



中国科学院大学  
University of Chinese Academy of Sciences

# 硕士学位论文

叶层化对的 Sarkisov 纲领

作者姓名: 王延泽

指导教师: 陈亦飞 副研究员

中国科学院数学与系统科学研究院

学位类别: 理学硕士

学科专业: 基础数学

培养单位: 中国科学院数学与系统科学研究院

2024 年 6 月



**Sarkisov program for foliated pairs**

**A thesis submitted to  
University of Chinese Academy of Sciences  
in partial fulfillment of the requirement  
for the degree of  
Master of Natural Science  
in Pure Mathematics**

**By**

**Yanze Wang**

**Supervisor: Professor Yifei Chen**

**Academy of Mathematics and Systems Science, Chinese Academy of  
Sciences**

**June, 2024**



## **中国科学院大学 学位论文原创性声明**

本人郑重声明：所呈交的学位论文是本人在导师的指导下独立进行研究工作所取得的成果。承诺除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体享有著作权的研究成果，未在以往任何学位申请中全部或部分提交。对本论文所涉及的研究工作做出贡献的其他个人或集体，均已在文中以明确方式标明或致谢。本人完全意识到本声明的法律结果由本人承担。

作者签名：

日 期：

## **中国科学院大学 学位论文授权使用声明**

本人完全了解并同意遵守中国科学院大学有关收集、保存和使用学位论文的规定，即中国科学院大学有权按照学术研究公开原则和保护知识产权的原则，保留并向国家指定或中国科学院指定机构送交学位论文的电子版和印刷版文件，且电子版与印刷版内容应完全相同，允许该论文被检索、查阅和借阅，公布本学位论文的全部或部分内容，可以采用扫描、影印、缩印等复制手段以及其他法律许可的方式保存、汇编本学位论文。

涉密及延迟公开的学位论文在解密或延迟期后适用本声明。

作者签名：

日 期：

导师签名：

日 期：



## 摘 要

双有理代数几何的目标之一是双有理等价分类代数簇，极小模型纲领用来在每一个固定的双有理等价类中找到一个良好的代表元。所有这些代表元可以分为两类，一种称为极小模型，另一种称为森纤维空间，两种代表元都不唯一。任何两个 MMP-相关的森纤维空间都被一个双有理映射连接，通过运行 Sarkisov 纲领，可以分解为有限多个基本的双有理映射。这样基本的映射有四种，称为 Sarkisov 连接。

本文的第一个目标是介绍三种 Sarkisov 纲领的方法。第二个目标是尝试对叶层化代数簇对建立 Sarkisov 纲领。通过将  $F$ -dlt 奇点的叶层化代数簇对约化成 klt 奇点的代数簇对，叶层化森纤维空间之间的双有理映射有较弱的分解。

**关键词：**极小模型纲领，Sarkisov 纲领，叶层化对





## Abstract

One of the goals of birational geometry is to classify varieties up to birational equivalence. The minimal model program is to find a good representative in every fixed birational equivalence class. All of these good representatives can be divided into two classes. One is called the minimal model, and the other is called Mori fiber space, both of which are not unique. Any two MMP-related Mori fibre spaces are connected by a birational map, which can be decomposed into finitely many elementary birational maps by running the Sarkisov program. There are four types of elementary birational maps, called Sarkisov links.

The first purpose of this paper is to introduce three methods of the Sarkisov program. The second goal is trying to establish the Sarkisov program for foliated pairs. By reducing  $F$ -dlt foliated pairs to klt pairs, there is a weak decomposition of birational maps between foliated Mori fibre spaces.

**Key Words:** Minimal Model Program, Sarkisov Program, Foliated pairs



## 目 录

第 1 章 绪论 .....	1
1.1 主要结果 .....	1
1.2 问题的历史 .....	3
1.3 本文结构 .....	4
第 2 章 预备知识 .....	5
2.1 代数簇对与奇点 .....	5
2.2 极小模型纲领 .....	6
2.3 模型及其有限性 .....	10
第 3 章 下降法 .....	13
3.1 定义与引理 .....	14
3.2 构造 Sarkisov 连接 .....	18
3.3 下降法的终结性 .....	21
第 4 章 双标量法 .....	25
4.1 定义和引理 .....	25
4.2 双标量法构造 Sarkisov 连接 .....	28
4.3 双标量 Sarkisov 纲领的终结性 .....	33
第 5 章 有限模型法 .....	37
5.1 定义和引理 .....	37
5.2 有限模型法构造 Sarkisov 连接 .....	40
5.3 构造 Sarkisov 分解 .....	41
第 6 章 三种方法的总结 .....	45
6.1 三种方法的比较 .....	45
6.2 例子 .....	46
6.2.1 下降法 .....	46
6.2.2 双标量法 .....	48
6.2.3 有限模型法 .....	49
第 7 章 叶层化 Sarkisov 纲领 .....	53
7.1 定义和引理 .....	53
7.2 三种方法的推广尝试 .....	56
7.3 弱化版结果 .....	58

参考文献 .....	61
致谢 .....	63
作者简历及攻读学位期间发表的学术论文与其他相关学术成果 ..	65

## 符号列表

### 符号解释

符号	解释
$\mathbb{R}$	实数
$\mathbb{Q}$	有理数
$\mathbb{R}_{\geq 0}$	非负实数
$(X/U, \mathcal{B})$	相对于 $U$ 的代数簇对
$(X/U, \mathcal{F}, \mathcal{B})$	相对于 $U$ 的叶层化代数簇对
$\mathrm{NS}(X)$	$X$ 的 Neron-Severi 群
$0 < \epsilon \ll 1$	充分小的正数 $\epsilon$
$a(E; X, b)$	除子 $E$ 关于代数簇对 $(X, \mathcal{B})$ 的差异数

### 缩写

MMP	Minimal model program
klt	Kawamata log terminal
lc	log canonical



## 第 1 章 绪论

### 1.1 主要结果

双有理代数几何的目标之一是按双有理等价类分类代数簇，并选取选择恰当的代表元。极小模型纲领 (Minimal model program) 是构造代表元的一种方法，并且猜想每一个代数簇都双有理等价于一个极小模型 (minimal model) 或一个森纤维空间 (Mori fibre space)，但这样的代表元有时并不唯一，于是自然的问题就是不同代表元之间的关系。对于极小模型的情形，我们有

**定理 1.1** (平转连接极小模型). 令  $(W, B_W)$  为一个终端奇点的  $\mathbb{Q}$ -分解代数簇对，且  $(X, B_X), (Y, B_Y)$  是它的两个极小模型。那么双有理映射  $X \dashrightarrow Y$  可以分解为一系列  $(K_X + B_X)$ -平转 (也称为复络, *flop*) 的复合。

本文主要关注森纤维空间之间的关系：

**定理 1.2** (Sarkisov 分解). 令  $f : (X, B) \rightarrow S$  和  $f' : (X', B') \rightarrow S'$  为两个 MMP-连接的 *klt* 奇点的  $\mathbb{Q}$ -分解森纤维空间，则有双有理映射  $\Phi$ ：

$$\begin{array}{ccc} (X, B) & \xrightarrow{\Phi} & (X', B') \\ f \downarrow & & \downarrow f' \\ S & & S' \end{array}$$

可以分解为 *Sarkisov* 连接映射的复合，即

$$\Phi = \Psi_n \circ \dots \circ \Psi_1$$

其中  $\Psi_i : X_i \dashrightarrow X_{i+1}$  是下列四种 *Sarkisov* 连接之一：

**第一型 *Sarkisov* 连接：**

$$\begin{array}{ccc} Z & \xrightarrow{\quad} & X_1 \\ p \downarrow & & \downarrow f_1 \\ X & & S_1 \\ f \downarrow & \nearrow t & \\ S & & \end{array}$$

第二型 *Sarkisov* 连接:

$$\begin{array}{ccc}
 Z & \cdots\cdots\rightarrow & Z' \\
 p \downarrow & & \downarrow q \\
 X & & X_1 \\
 f \downarrow & & \downarrow f_1 \\
 S & \xrightarrow{\sim} & S_1
 \end{array}$$

第三型 *Sarkisov* 连接:

$$\begin{array}{ccc}
 X & \cdots\cdots\rightarrow & Z \\
 f \downarrow & & \downarrow q \\
 S & & X_1 \\
 & \searrow s & \downarrow f_1 \\
 & & S_1
 \end{array}$$

第四型 *Sarkisov* 连接:

$$\begin{array}{ccc}
 X & \cdots\cdots\rightarrow & X_1 \\
 f \downarrow & & \downarrow f_1 \\
 S & & S_1 \\
 & \searrow s & \swarrow t \\
 & & T
 \end{array}$$

其中所有  $f : (X, B) \rightarrow S$  和  $f_1 : (X_1, B_1) \rightarrow S_1$  都是森纤维空间, 所有  $p, q$  都是除子压缩, 所有虚线的映射都是翻转 (*flip*)、平转 (*flop*) 或反向翻转 (*inverse flip*) 的复合。

这样的分解称为 *Sarkisov* 分解, 构造这样 *Sarkisov* 分解的方法称为 *Sarkisov* 纲领。

在叶层化代数簇对 (foliated pair) 上有较弱的结果:

**定理 1.3** (弱 *Sarkisov* 分解). 令  $(W, \mathcal{F}_W, B_W)$  是具有  $F$ -dlt 奇点的  $\mathbb{Q}$ -分解叶层化代数簇对, 且  $\rho : W \dashrightarrow X$  和  $\rho' : W \dashrightarrow X'$  是两个不同的  $(K_{F_W} + B_W)$ -MMP 的输出, 且  $X \rightarrow S$  和  $X' \rightarrow S'$  是两个森纤维空间。那么双有理映射  $\Phi : X \dashrightarrow X'$  存在分解:

$$X = X_0 \dashrightarrow X_1 \dashrightarrow \cdots \dashrightarrow X'$$

每一个代数簇  $X_i$  上有边界除子  $D_i$  和压缩态射  $f_i : X_i \rightarrow S_i$ , 使得  $(X_i, D_i) \rightarrow S_i$  是森纤维空间, 并且  $X_i \dashrightarrow X_{i+1}$  是 *Sarkisov* 连接。



## 1.2 问题的历史

Sarkisov 纲领起源于对直纹曲面的分类 [17, 18], Matsuki 和 Reid 指出了最初思路, 具有终端奇点的三维代数簇 (terminal threefolds) 上的 Sarkisov 纲领的完整证明由 Corti[7] 给出。

对于双有理同构的两个森纤维空间  $X \rightarrow S$  和  $X' \rightarrow S'$ , 选取  $X$  上一个定义双有理映射  $\Phi: X \dashrightarrow X'$  的线性系  $\mathcal{H}$  (或一个一般的除子  $H \in \mathcal{H}$ ), 那么第一个 Sarkisov 连接  $\psi_1: X \dashrightarrow X_1$  由运行一种特殊的极小模型纲领得到, 被称为双射线 MMP (2-ray game), 并且取决于  $\mathcal{H}$  ( $H$ ) 的选取。接着用  $\Phi_1 = \Phi \circ \psi_1^{-1}: X_1 \dashrightarrow X'$  替代  $\Phi: X \dashrightarrow X'$  并重复这一过程。通过定义 Sarkisov 次数, 并证明在归纳构造中 Sarkisov 次数下降来说明归纳终结。Bruno 和 Matsuki [5] 将这种方法推广到 klt 奇点的  $\mathbb{Q}$ -分解三维代数簇的情形, 并且对于任意维数的  $\mathbb{Q}$ -分解 klt 奇点代数簇对, 给出了 Sarkisov 纲领的大纲和所需要的结论。近年来在极小模型纲领中有一些重要进展, 例如标量极小模型纲领 (MMP with scaling) 的终结性 [4], 对数典范阈值 (log canonical threshold, lct) 的升链条件 (ascending chain condition, ACC)[11],  $\delta$ -lc Fano 代数簇对的有界性 [2, 3], 这些进展使得 Bruno 和 Matsuki 的大纲部分地可行, 剩下的主要问题与对数翻转的终结性和局部对数典范阈值 (local log canonical thresholds) 的 ACC (或者有限性) 有关。本文将这种方法称为下降法。

利用弱典范模型的有限性 [4] (finiteness of weak log canonical models), Hacon [12] 给出了另一种构造 Sarkisov 纲领的方法, 对所有维数都成立。这种方法也通过双射线 MMP 来构造 Sarkisov 连接, 但是固定了两个森纤维空间的公共对数解消  $(W, B_W)$  作为 Sarkisov 纲领的“屋顶”, 使得分解中的每一个森纤维空间都是  $W$  的某个弱对数典范模型。双标量法的 Sarkisov 纲领的终结性由弱对数典范模型的有限性推出, 这与标量翻转 (flips with scaling) 的终结性的证明类似。刘继豪 [15] 将这种方法推广到了一般化代数簇对 (generalized pairs) 的情况。本文将这种方法称为双标量法。

利用 Shokurov 的多面体方法 [19, 20], Hacon 和 McKernan [10] 给出了一种新方法, 不通过双射线 MMP 构造 Sarkisov 连接。令  $W$  为  $(X, B) \rightarrow S$  和  $(X', B') \rightarrow S'$  的公共对数解消, 则在  $W$  上有两个除子  $D$  和  $D'$ , 使得  $S$  和  $S'$  是  $W$  相对于  $D$  和  $D'$  的丰沛模型 (ample model)。进一步,  $W$  的除子的多面体的边界上有其

他除子  $D_i$ ，每个除子对应一个森纤维空间  $X_i \rightarrow S_i$  和  $W$  的丰沛模型  $S_i$ 。在多面体边界上有一条路径连接这些除子  $D_i$ ，并且将  $\Phi$  分解为对应的 Sarkisov 连接。Miyamoto [16] 将这种方法应用到了任意特征代数闭域上的 lc 对数曲面或  $\mathbb{Q}$ -分解对数曲面。本文将这种方法称为有限模型法。

### 1.3 本文结构

第一节给出主要的定理，并介绍 Sarkisov 纲领的发展历史。第二节给出基本概念的定义，MMP 相关的定理。

第三、四、五章分别介绍下降法、双标量法和有限模型法的具体内容，每一章都先介绍这种方法需要的定义和引理，接着说明构造每一个 Sarkisov 连接的方法，最后说明 Sarkisov 分解的构造。

在第六章，总结比较三种方法，并且每种方法给出一个具体例子。

第七章介绍了叶层化代数簇对 (foliated pairs)，并分析了三种方法在叶层化代数簇对的推广，最后给出弱化版结果。

## 第2章 预备知识

本章中的定义、记号和定理参考 [4, 13, 14]。

### 2.1 代数簇对与奇点

这一节定义基础概念和定理，参考 [4, 14]：

**定义 2.1.** 定义代数簇对和除子的记号。未加说明时，本文中的除子指  $\mathbb{R}$ -除子。

- 一个代数簇对  $(X, B)$  包括一个正规拟射影代数簇  $X$  和一个除子  $B = \sum_i b_i B_i$ ，其中  $B_i$  是素除子，且  $0 \leq b_i \leq 1$ ，并且满足  $K_X + B$  是  $\mathbb{R}$ -Cartier 除子， $B_i$  称为  $B$  的组成成分的素除子。

- 若双有理态射  $f : Y \rightarrow X$  满足  $Y$  是光滑代数簇，且  $\text{Exc } f \cup B_{\text{red}}$  是横截相交 (normal crossing) 的除子，那么称  $f$  为  $(X, B)$  的对数解消 (log resolution)。

- 正规代数簇  $X$  的余维数 1 的不可约子簇  $E \subset X$  称为  $X$  上的除子；如果  $f : Y \rightarrow X$  是双有理射影态射，那么  $Y$  上的除子  $E$  称为  $X$  之上的除子，或相对于  $X$  的除子。

代数簇对也简称对 (pair)。如果附加压缩态射  $\pi : X \rightarrow U$  的结构，则记为  $(X/U, B)$ ，当  $U$  清楚时或不是重要的性质时 (如定义奇点性质时与基底  $U$  无关) 常省略。

定义除子的差异数：

**定义 2.2.** 令  $(X, B)$  为代数簇对，且  $f : Y \rightarrow X$  是它的对数解消，则有分歧公式 (ramification formula)

$$K_Y + C = f^*(K_X + B)$$

那么除子  $E$  的差异数 (discrepancy)  $a(E; X, B)$  定义为

$$a(E; X, B) = -\text{mult}_E C$$

进一步，定义  $(X, B)$  的差异数：

$$\text{discrep}(X, B) := \inf \{a(E; X, B) : E \text{ 是 } X \text{ 之上的例外除子}\}$$

和整体差异数

$$\text{totdiscrep}(X, B) := \inf \{a(E; X, B) : E \text{ 是 } X \text{ 之上的除子}\}.$$

对于代数簇对之间的态射，可以定义无差除子：

**定义 2.3.** 令  $f : (Y, C) \rightarrow (X, B)$  为代数簇对之间的态射，在分歧公式中，

$$K_Y + C + \sum_i e_i E_i = f^*(K_X + B)$$

如果  $e_i = 0$ ，那么除子  $E_i$  称为  $f$ -无差的，或者  $f$ -相容的。如果

$$K_Y + C = f^*(K_X + B)$$

那么称  $f$  是无差的，或相容的 (crepant)。如果考虑不含边界的代数簇对，即  $B = C = 0$ ，那么分歧公式

$$K_Y + \sum_i e_i E_i = f^* K_X$$

中满足  $e_i = 0$  的除子称为无差除子。

通过差异数，定义代数簇对  $(X, B)$  的奇点性质：

**定义 2.4.** 对于代数簇对  $(X, B)$ ，定义奇点性质：

- (1) 如果  $\text{discrep}(X, B) > 0$ ，则称  $(X, B)$  具有终端奇点 (terminal)，也称  $K_X + B$  具有终端奇点；
- (2) 如果  $\text{discrep}(X, B) \geq 0$ ，则称  $(X, B)$  具有典范奇点 (canonical)，也称  $K_X + B$  具有典范奇点；
- (3) 如果  $\text{discrep}(X, B) > -1$ ，则称  $(X, B)$  具有 klt 奇点 (Kawamata log terminal)，也称  $K_X + B$  具有 klt 奇点；
- (4) 如果  $\text{discrep}(X, B) \geq -1$ ，则称  $(X, B)$  具有 lc 奇点 (log canonical)，也称  $K_X + B$  具有 lc 奇点；
- (5) 如果  $\text{discrep}(X, B) \geq -1 + \delta, \delta \in \mathbb{R}_{\geq 0}$ ，则称  $(X, B)$  具有  $\delta$ -lc 奇点，也称  $K_X + B$  具有  $\delta$ -lc 奇点；

## 2.2 极小模型纲领

**定理 2.1** (锥定理). 令  $(X, B)$  是具有 klt 奇点的  $\mathbb{Q}$ -分解代数簇对，且  $(K_X + B)$  不是数值有效的，那么有

(1)

$$\overline{\text{NE}}(X) = \overline{\text{NE}}(X)_{K_X+B \geq 0} + \sum_{\alpha \in \Lambda} R_\alpha$$

其中  $R_\alpha = \mathbb{R}_{\geq 0}[C_\alpha]$  是由有理曲线  $C_\alpha$  生成的  $(K_X + B)$ -负性的  $((K_X + B)\text{-negative})$  极端射线 (extremal ray), 且  $\Lambda$  是可列集;

(2) 对任何丰沛除子  $A$  和  $\epsilon > 0$ , 有

$$\overline{\text{NE}}(X) = \overline{\text{NE}}(X)_{K_X+B+\epsilon A \geq 0} + \sum_{\alpha \in \Lambda'} R_\alpha$$

其中  $\Lambda' \subset \Lambda$  是有限子集;

(3) 令  $F \subset \overline{\text{NE}}(X)$  是  $(K_X + B)$ -负性的极端面 (extremal face), 那么同构意义下存在唯一的压缩态射

$$f = \text{cont}_F : X \rightarrow Z$$

使得  $f_*\mathcal{O}_X = \mathcal{O}_Z$ , 并且曲线  $C \subset X$  被  $f$  压缩当且仅当  $[C] \in F$ 。

(4) 如果  $X$  上除子  $D$  相对于  $Z$  是数值平凡的, 即任意被  $f$  压缩的曲线  $C \subset X$ , 都有  $D \cdot C = 0$ , 那么存在  $Z$  上除子  $L_Z$  使得

$$f^*L_Z = D$$

在锥定理的 (4) 中, 当  $F = R$  是极端射线时, 有  $\rho(X) = \rho(Z) + 1$  ( $\rho(X)$  表示  $X$  的 Picard 数), 并且对应的压缩态射  $f$  有三种情况:

(1)  $\text{Exc } f = E$  是素除子, 此时称为除子压缩态射 (divisorial contraction morphism);

(2)  $\text{codim}(\text{Exc } f) \geq 2$ , 则称为小双有理态射 (small birational morphism);

(3)  $\dim Z < \dim X, \text{Exc } f = X$ , 此时称  $(X, B) \rightarrow Z$  为森纤维空间 (关于  $(K_X + B)$  的森纤维空间), 压缩态射  $f$  称为森纤维空间压缩态射。

**极小模型纲领 (MMP):** 对于  $(X, B) = (X_0, B_0)$ , 应用锥定理做关于极端射线的压缩态射  $f_1 : X \rightarrow Z$ 。

(1) 如果是除子压缩, 那么令  $X_1 = Z, B_1 = f_{1*}B$ 。在  $(X_1, B_1)$  上重复此过程;

(2) 如果是小双有理态射, 那么令  $f_1^+ : X_1 \rightarrow Z$  为  $f_1$  的翻转 (flip), 并记

$B_1$  为  $B$  在  $X_1$  上的严格双有理变换。在  $(X_1, B_1)$  上重复此过程；

$$\begin{array}{ccc} X & \xrightarrow{\quad\quad\quad} & X_1 \\ & \searrow f_1 & \swarrow f_1^+ \\ & Z & \end{array}$$

(3) 如果是森纤维空间压缩，那么 MMP 停止。

如果持续做前两种操作，并最终在  $(X_i, B_i)$  上  $K_{X_i} + B_i$  是数值有效除子，那么 MMP 在此终结，且  $(X_i, B_i)$  是极小模型；如果在森纤维空间  $(X_i, B_i) \rightarrow Z$  停止，那么 MMP 终结于这个森纤维空间。

上述过程称为  $(K_X + B)$ -MMP，其中出现的代数簇对  $(X_i, B_i)$  被称为 MMP 的结果，将 MMP 停止处的代数簇对称为 MMP 的输出 (极小模型或森纤维空间)。如果考虑相对代数簇对，即考虑基底  $U$  和压缩态射  $\pi : X \rightarrow U$ ，也有相应的相对于  $U$  的 MMP。对于极小模型纲领，有如下结果。

**定理 2.2** (标量 MMP (MMP with scaling) 的终结定理). [4, Corollary 1.4.2] 令  $\pi : X \rightarrow U$  为正规拟射影代数簇间的射影态射，且  $(X/U, B)$  是  $klt$  奇点的  $\mathbb{Q}$ -分解代数簇对，其中  $K_X + B$  是  $\mathbb{R}$ -Cartier 除子，且  $B$  是相对于  $U$  的大除子 (*big divisor*)。若  $C \geq 0$  为  $\mathbb{R}$ -除子，且  $K_X + B + C$  具有  $klt$  奇点且相对于  $U$  数值有效 (*nef*)，那么在  $U$  上运行  $C$ -标量的  $(K_X + B)$ -MMP，这个极小模型纲领将终结。

如果  $(K_X + B)$ -MMP 终结，那么其输出和  $(K_X + B)$  有下列关系：

**定理 2.3** (极小模型输出). [4, Corollary 1.3.3] 令  $\pi : X \rightarrow U$  为正规拟射影代数簇间的射影态射，且  $(X, B)$  是  $klt$  奇点的  $\mathbb{Q}$ -分解代数簇对，其中  $K_X + B$  是  $\mathbb{R}$ -Cartier 除子。若  $K_X + B$  不是相对于  $U$  伪有效的，那么可以运行某个  $U$  上的  $(K_X + B)$ -MMP，并且终结于森纤维空间  $g : Y \rightarrow Z$ 。

注意到如果  $\pi : X \rightarrow Y$  是双有理射影态射，那么  $X$  上所有除子都是相对于  $Y$  的大除子，于是有以下推论：

**推论 2.4.** [12, Corollary 13.7] 令  $(X, B)$  为  $klt$  奇点的代数簇对， $\mathfrak{E}$  是任意差异数满足  $a(E; X, B) \leq 0$  的例外除子  $E$  的集合，那么有双有理态射  $f : Z \rightarrow X$  和除子  $B_Z$  使得：

(1)  $(Z, B_Z)$  是  $klt$  代数簇对：

(2)  $E$  是  $f$ -例外除子当且仅当  $E \in \mathfrak{E}$ ;

(3) 若  $E \in \mathfrak{E}$  则  $\text{mult}_E B_Z = -a(E; X, B)$ , 且  $f_* B_Z = B$  和  $K_Z + B_Z = f^*(K_X + B)$ 。

特别的, 若设  $\mathfrak{E}$  为所有差异数满足  $a(E; X, B) \leq 0$  的例外除子  $E$  的集合, 那么  $Z$  被称为  $X$  的终端化 (terminalization); 若取  $\mathfrak{E}$  为仅包含一个差异数满足  $a(E; X, B) \leq 0$  的例外除子, 那么  $f: Z \rightarrow X$  被称为除子解压 (divisorial extraction)。

对相同的代数簇对  $(X, B)$  和对数典范除子  $K_X + B$ , 对应的  $(K_X + B)$ -MMP 可能有不同的输出, 它们之间有下列关系:

**定义 2.5.** [5, Definition 3.3] 如果多个代数簇对  $\{(X_i, B_i)\}$  是从对数光滑的代数簇对  $(W, B_W)$  的  $(K_W + B_W)$ -MMP 的不同结果, 则称它们为 MMP-相关的 (MMP-related)。

**引理 2.5.** [5, Proposition 3.4] 令  $\{(X_l, B_l)\}$  为有限多个互相双有理等价的 klt 奇点的  $\mathbb{Q}$ -分解代数簇对, 那么下列条件等价:

(1) 它们是 MMP-相关的;

(2) 存在一个对数光滑代数簇对  $(W, B_W)$  和一组射影双有理态射  $f_l: W \rightarrow X_l$  支配每个  $X_l$ , 满足  $f_{l*} B_W = B_l$  和分歧公式

$$K_W + B_W = f_l^*(K_{X_l} + B_l) + \sum_{\text{例外除子 } E_{li}} a_{li} E_{li}$$

其中对每个  $f_l$ -例外除子  $E_{li}$  满足  $a_{li} > 0$  的不等式条件;

(3) 对任意两个代数簇对  $(X, B = \sum_i b_i B_i), (X', B' = \sum_j b'_j B'_j)$ , 有  $a(B_i; X', B') \geq -b_i$  且严格不等式成立当且仅当  $B_i$  是  $X'$  之上的例外除子。同样的, 有  $a(B'_j; X, B) \geq -b'_j$  且严格不等式成立当且仅当  $B'_j$  是  $X$  之上的例外除子。

证明. 我们给出 (3)  $\implies$  (2) 的简略证明: 令  $W$  为支配每个代数簇对  $(X_l, B_l = \sum b_{li} B_{li})$  的对数光滑解消, 并有射影双有理态射  $f_l: W \rightarrow X_l$ , 它们例外除子的并  $f_{l*}^{-1} B_l \cup E_{li}$  是一个横截相交的除子。令  $B_W = \sum_t d_t D_t$ , 其中如果  $D_t$  是  $\cup_l f_{l*}^{-1} B_l$  中的某个素除子则  $d_t = b_{li}$ , 如果  $B_l$  是每个  $X_l$  上的例外除子, 则  $d_t = 1$ 。由条件 (3), 这是定义良好的。那么  $(W, B_W)$  上的分歧公式中的不等式条件也由 (3) 得到。  $\square$

### 2.3 模型及其有限性

**定义 2.6.** [10, §2] 对有理映射  $f : X \dashrightarrow Y$  若有  $f$  的解消  $p : W \rightarrow X$  和  $q : W \rightarrow Y$  满足  $p$  和  $q$  都是压缩态射且  $p$  是双有理态射, 则称  $f$  为有理压缩映射 (rational contraction)。若  $q$  也是双有理态射, 且每个  $p$ -例外除子都是  $q$ -例外除子, 则称  $f$  为双有理压缩映射 (birational contraction)。如果  $f^{-1}$  也是双有理压缩映射, 则称  $f$  为小双有理映射 (small birational map)。

**定义 2.7.** [4, Definition 3.6.1] 令  $f : X \dashrightarrow Y$  为正规拟射影代数簇间的双有理映射, 且  $p : W \rightarrow X$  和  $q : W \rightarrow Y$  是  $f$  的解消。若  $D$  是  $X$  上的  $\mathbb{R}$ -Cartier 除子, 满足  $D_Y = f_* D$  也是  $\mathbb{R}$ -Cartier 除子, 那么如果满足

- $f$  不解压任何除子 (即  $f$  是双有理压缩);
- $E = p^* D - q^* D_Y$  是  $Y$  上的有效除子 (对应的,  $\text{Supp } p_* E$  包含全部  $f$ -例外除子)。

则称  $f$  为  $D$ -非正性的 ( $D$ -non-positive), 对应的,  $D$ -负性的 ( $D$ -negative)。

回顾双有理代数几何中关于模型的定义 [4]:

**定义 2.8.** [4, Definition 3.6.5] 令  $\pi : (X, D) \rightarrow U$  为正规拟射影代数簇间的射影态射,  $K_X + D$  是  $X$  上的  $\mathbb{R}$ -Cartier 除子, 且  $f : X \dashrightarrow Y$  是  $U$  上的双有理映射。如果  $f$  是  $(K_X + D)$ -非正性的且  $K_Y + f_* D$  是  $U$  上半丰沛的 (semiample), 那么称  $Z$  是  $X$  关于  $D$  的在  $U$  上的 (或相对于  $U$  的) 半丰沛模型 (semiample model)。

令  $g : X \dashrightarrow Z$  为  $U$  上的有理映射,  $p : W \rightarrow X$  和  $q : W \rightarrow Z$  是对  $g$  的解消, 其中  $q$  是压缩态射。若  $Z$  上有  $U$  上的丰沛除子  $H$ , 且  $p^*(K_X + D) \sim_{\mathbb{R}, U} q^* H + E$ , 其中  $E$  满足对任意的  $B \in |p^*(K_X + D)/U|_{\mathbb{R}}$  都有  $B \geq E$ , 则称  $Z$  是  $X$  关于  $D$  的在  $U$  上的 (或相对于  $U$  的) 丰沛模型 (ample model)。

注. 在原文献和其他文献中的常见定义如下: 令  $\pi : X \rightarrow U$  为正规拟射影代数簇间的射影态射,  $D$  是  $X$  上的  $\mathbb{R}$ -Cartier 除子, 且  $f : X \dashrightarrow Y$  是  $U$  上的双有理映射。如果  $f$  是  $D$ -非正性的且  $f_* D$  相对于  $U$  是半丰沛的, 那么称  $Z$  是  $X$  为关于  $D$  的半丰沛模型。

但本文中只考虑  $D = K_X + B$  是对数典范除子的情況, 所以为记号简便做此修改。丰沛模型、弱对数典范模型等都做此修改。



**定义 2.9.** [4, Definition 3.6.7] 令  $\pi : (X, D) \rightarrow U$  为正规拟射影代数簇间的射影态射, 若  $K_X + D$  具有 lc 奇点且  $f : X \dashrightarrow Y$  是双有理压缩映射, 那么有如下定义:

- (1) 如果  $f$  是  $(K_X + D)$ -非正性的且  $K_Y + f_*D$  是  $U$  上数值有效的, 则称  $Y$  为关于  $D$  在  $U$  上的弱对数典范模型 (weak log canonical model);
- (2) 如果  $f$  是  $(K_X + D)$ -非正性的且  $K_Y + f_*D$  是  $U$  上丰沛的, 则称  $Y$  为关于  $D$  在  $U$  上的对数典范模型 (log canonical model);
- (3) 如果  $f$  是  $(K_X + D)$ -负性的且  $K_Y + f_*D$  是  $U$  上数值有效的和  $\mathbb{Q}$ -分解的, 并且具有 dlt 奇点, 则称  $Y$  为关于  $D$  在  $U$  上的对数终端模型 (log terminal model)。

**引理 2.6.** [4, Lemma 3.6.6] 令  $\pi : X \rightarrow U$  是正规拟射影代数簇间的射影态射, 且  $D$  是  $X$  上的  $\mathbb{R}$ -Cartier 除子。

- (1) 如果  $g_i : X \dashrightarrow X_i, i = 1, 2$  是关于  $D$  的  $U$  上的两个丰沛模型, 那么有同构态射  $h : X_1 \rightarrow X_2$  满足  $g_2 = h \circ g_1$ 。即丰沛模型在同构意义下唯一。
- (2) 如果  $f : X \dashrightarrow Y$  是  $U$  上关于  $D$  的半丰沛模型, 那么  $U$  上关于  $D$  的丰沛模型  $g : X \dashrightarrow Z$  存在, 并且  $g = h \circ f$ , 其中  $h : Y \rightarrow Z$  是压缩态射,  $Z$  上有对应丰沛除子  $H$  满足  $f_*D \sim_{\mathbb{R}, U} h^*H$ 。
- (3) 若  $f : X \dashrightarrow Y$  是  $U$  上双有理映射, 那么  $f$  是关于  $D$  在  $U$  上的丰沛模型当且仅当  $f$  是关于  $D$  在  $U$  上的半丰沛模型且  $f_*D$  在  $U$  上丰沛。

根据上述引理, 有对数典范模型的等价定义:

**定义 2.10.** 令  $\pi : (X, D) \rightarrow U$  是正规拟射影代数簇间的射影态射,  $K_X + D$  有 lc 奇点且  $f : X \dashrightarrow Y$  是不解压任何除子的双有理映射。如果  $Y$  是关于  $D$  在  $U$  上的丰沛模型, 那么称之为关于  $D$  的对数典范模型 (log canonical model)。

进一步, 对于边界是大除子的代数簇对, 还有

**引理 2.7.** [4, Lemma 3.9.3] 令  $\pi : (X, B) \rightarrow U$  是正规拟射影代数簇间的射影态射, 且  $(X, B)$  是具有 klt 奇点的代数簇对,  $B$  在  $U$  上是大除子。如果  $f : X \dashrightarrow Y$  是  $U$  上弱对数典范模型, 那么

- $f$  是  $U$  上半丰沛模型;
- $U$  上的丰沛模型  $g : X \dashrightarrow Z$  存在;

- 存在压缩态射  $h : Y \rightarrow Z$  和  $Z$  上在  $U$  上丰沛的  $\mathbb{R}$ -除子, 使得

$$K_Y + f_* B \sim_{\mathbb{R}, U} h^* H$$

下面给出除子的多面体相关的定义和定理:

**定义 2.11.** [4, Definition 1.1.4] 令  $\pi : X \rightarrow U$  为正规拟射影代数簇间的射影态射, 且  $V$  是  $\mathrm{WDiv}_{\mathbb{R}}(X)$  的定义在有理数上的有限维仿射子空间。取定一个除子  $A \geq 0$ , 定义:

$$\mathcal{L}_A(V) = \{D = A + B : B \in V, K_X + D \text{ 有 lc 奇点且 } B \geq 0\}$$

$$\mathcal{E}_{A, \pi}(V) = \{D \in \mathcal{L}_A(V) : K_X + D \text{ 是 } U \text{ 上的伪有效除子}\}$$

令  $f : X \dashrightarrow Y$  为  $U$  上的双有理压缩映射, 定义

$$\mathcal{W}_{A, \pi, f}(V) = \{D \in \mathcal{E}_A(V) : f \text{ 是 } X \text{ 关于 } D \text{ 在 } U \text{ 上的弱对数典范模型}\}$$

令  $g : X \dashrightarrow Z$  是  $U$  上的有理压缩映射, 定义

$$\mathcal{A}_{A, \pi, g}(V) = \{D \in \mathcal{E}_A(V) : g \text{ 是 } X \text{ 关于 } D \text{ 在 } U \text{ 上的丰沛模型}\}$$

进一步, 将  $\mathcal{A}_{A, \pi, g}(V)$  在  $\mathcal{L}_A(V)$  中的闭包记作  $\mathcal{C}_{A, \pi, g}(V)$ 。

如果基底  $U$  是清楚的, 或是一个点, 那么我们省略  $\pi$ , 简单记作  $\mathcal{E}_A(V)$  和  $\mathcal{A}_{A, f}$ 。

固定边界除子的范围, 则一些模型具有有限性。

**定理 2.8.** (弱对数典范模型有限性, [4, Theorem E])。令  $\pi : X \rightarrow U$  是正规拟射影代数簇间的射影态射, 且  $A$  是一个一般的在  $U$  上丰沛的  $\mathbb{R}$ -除子, 且

$$V \subset \mathrm{WDiv}_{\mathbb{R}}(X)$$

是定义在有理数上的有限维线性子空间, 假设存在具有 *klt* 奇点的代数簇对  $(X, \Delta_0)$ 。那么存在有限多个  $U$  上的双有理映射  $f_i : X \dashrightarrow X_i, 1 \leq i \leq l$ , 若某个  $D \in \mathcal{L}_A(V)$  有关于  $D$  的在  $U$  上的弱对数典范模型  $f : X \dashrightarrow Y$ , 那么对某个  $1 \leq i \leq l$  存在同构态射  $h_i : X_i \rightarrow Y$  使得  $f = h_i \circ f_i$ 。

### 第3章 下降法

在这一章中，代数簇对  $(X, B)$  的边界除子  $B$  是  $\mathbb{Q}$ -除子。

首先回顾 Corti [7] 给出的三维终端奇点的 Sarkisov 纲领。令  $f : X \rightarrow S$  和  $f' : X' \rightarrow S'$  是双有理等价的两个有终端奇点的三维森纤维空间。取  $S'$  上的丰沛除子  $A'$  (整系数 Weil 除子) 使得对某个  $\mu' > 0$  有  $X'$  上的一般的丰沛除子  $H'$  满足  $H' \sim -\mu' K_{X'} + f'^* A'$ ，并令  $H$  是  $H'$  在  $X$  上的严格双有理变换 (strict birational transform)。取一个公共解消  $p : W \rightarrow X$  和  $q : W \rightarrow X'$ 。

- (1) 令  $\mu = \max\{c \in \mathbb{R} : K_X + \frac{1}{c}H \text{ 在 } S \text{ 上数值有效}\}$ ;
- (2) 令  $\lambda = \min\{c \in \mathbb{R} : (X, \frac{1}{c}H) \text{ 有典范奇点}\}$ ;
- (3) 令  $p : (W, \frac{1}{\lambda}H_W) \rightarrow (X, \frac{1}{\lambda}H)$  的解消，且  $H_W$  是  $H'$  在  $W$  上的严格双有理变换，则  $e$  是  $p$ -无差的例外除子的个数。

如果  $\lambda \leq \mu$ ，在  $X$  运行相对于恰当基底的  $(K_X + \frac{1}{\mu}H)$ -MMP；如果  $\lambda > \mu$  则构造一个除子解压 (divisorial extraction)  $p : Z \rightarrow X$ ，并运行相对于  $S$  的  $(K_Z + \frac{1}{\lambda}H_Z)$ -MMP，这样得到第一个 Sarkisov 连接  $\psi_1 : X \dashrightarrow X_1$ 。这两种情况都是双射线 MMP。用  $X_1$  和  $\Phi_1 = \Phi \circ \psi_1^{-1} : X_1 \dashrightarrow X'$  替换  $X$  和  $\Phi$ ，并重复这个过程，这样递归地构造一系列 Sarkisov 连接。在这个过程中不变量  $(\mu, \lambda, e)$  将按字典序下降，最终得到  $\Psi_N : X_{N-1} \dashrightarrow X_N$ ，且  $X_N \cong X'$ 。这就是三维终端奇点代数簇的 Sarkisov 纲领。

对于 klt 奇点的  $\mathbb{Q}$ -分解代数簇对，考虑 MMP-相关的森纤维空间  $(X, B)$  和  $(X', B')$ 。自然的想法是按如下定义  $\mu, \lambda, e$ ：

- (1) 令  $\mu = \max\{c \in \mathbb{R} : K_X + B + \frac{1}{c}H \text{ 在 } S \text{ 上数值有效}\}$ ;
- (2) 令  $\lambda = \min\{c \in \mathbb{R} : (X, B + \frac{1}{c}H) \text{ 有典范奇点}\}$ ;
- (3) 令  $e$  为  $(X, B + \frac{1}{\lambda}H)$  的无差的例外除子的个数。

对  $\lambda$  的定义将导致一些困难。当  $\lambda > \mu$  时，为了构造 Sarkisov 连接需要构造除子解压  $p : Z \rightarrow X$ ，并在  $Z$  上运行  $(K_Z + B_Z + \frac{1}{\lambda}H_Z)$ -MMP。这个除子解压会解压出一个素除子  $E$ ，这个素除子  $E$  在  $Z$  的边界  $B_Z$  中的系数是 1。如果  $E$  是  $(X', B')$  的边界  $B'$  的一项，那么  $E$  在  $B'$  中的系数小于 1，这两者不匹配。另一方面，这是需要在具有 lc 奇点的代数簇对上运行 MMP，这比在具有 klt 奇点的

代数簇对上的 MMP 有技术上的困难。除此之外，由于具有 klt 奇点的 Fano 代数簇对的有界性失效，在证明 Sarkisov 纲领的终结性也有困难。

Bruno 和 Matsuki 给出了  $\lambda$  的另一种定义 (见定义 3.3)，且取决于特定的一个包含  $(X, B)$  和  $(X', B')$  的代数簇对的集合  $C_\theta$ ，这个集合满足：

- 对任意两个  $C_\theta$  中的代数簇对  $(X, B), (X', B')$ ，存在  $C_\theta$  中的代数簇对  $(W, B_W)$  和对数公共解消  $p : W \rightarrow (X, B)$  和  $q : W \rightarrow (X', B')$ ，使得  $(W, B_W)$  具有 klt 奇点且  $p_* B_W = B, q_* B_W = B'$ 。
- 在集合中的任意代数簇对  $(X, B)$  和  $(Z, B_Z)$  上可以运行  $(K_X + B + cH)$ -MMP 和  $(K_Z + B_Z + cH_Z)$ -MMP，并且所有结果都仍然在集合  $C_\theta$  中；
- 所有  $C_\theta$  中的代数簇对都具有  $\delta$ -lc 奇点，其中  $\delta$  是取决于  $C_\theta$  的正数。

### 3.1 定义与引理

令  $K = K(X)$  是双有理等价类的有理函数域 (注意到双有理等价的代数簇有相同的有理函数域)， $\Sigma = \{\nu\}$  是有理函数域的离散赋值的集合。

**定义 3.1.** [5, Definition 3.5] 取一个函数  $\theta : \Sigma \rightarrow [0, 1)_{\mathbb{Q}}$ ，那么可以定义关于  $\theta$  的集合  $C_\theta$ ，包含满足下列条件的具有 klt 奇点的  $\mathbb{Q}$ -分解代数簇对  $(X, B = \sum a_i B_i)$ ：

- (1)  $a_i = \theta(B_i)$ ；
- (2) 对所有  $X$  上的例外除子  $E$  有  $a(E; X, B) > -\theta(E)$ 。

注. 例如取  $\theta \equiv 0$  为常值函数，那么  $C_\theta$  是所有和  $X$  双有理等价的具有终端奇点的代数簇  $Y$  (不带有边界)。

根据这个集合可以定义  $\theta$ -差异数 ( $\theta$ -discrepancy)：

**定义 3.2** ( $\theta$ -差异数). 令  $C_\theta$  为上述代数簇对的集合，且  $(X, B)$  是有理函数域满足  $K(X) = K$  的代数簇对。令  $f : Y \rightarrow X$  是  $(X, B)$  的一个对数奇点解消，有分歧公式：

$$K_Y + B_Y + C = f^*(K_X + B)$$

其中  $B_Y = f_*^{-1} B + \sum_{E_i \text{ 例外除子}} \theta(E_i) E_i$ 。则  $X$  的例外除子  $E_i$  的  $\theta$ -差异数定义为

$$a_\theta(E_i; X, B) = -\text{mult}_{E_i} C.$$

或等价的, 可以定义为

$$a_\theta(E_i; X, B) = a(E_i; X, B) + \theta(E_i).$$

如果  $(X, B)$  上的所有例外除子  $E$  满足  $a_\theta(E; X, B) \geq 0$  (对应的,  $a_\theta(E; X, B) > 0$ ), 则称代数簇对  $(X, B)$  具有  $\theta$ -典范奇点 (对应的,  $\theta$ -终端奇点)。

注.  $\theta$ -典范代数簇对并不总在集合  $C_\theta$  中。

对 MMP-相关的森纤维空间内, 可以构造运行 Sarkisov 纲领所需要的集合  $C_\theta$ :

**命题 3.1.** [5, Lemma 3.6] 令  $f : (X, B) \rightarrow S$  和  $f' : (X', B') \rightarrow S'$  是两个 MMP-相关的具有 klt 奇点的  $\mathbb{Q}$ -分解森纤维空间, 有双有理映射  $\Phi$ :

$$\begin{array}{ccc} (X, B) & \xrightarrow{\Phi} & (X', B') \\ f \downarrow & & \downarrow f' \\ S & & S' \end{array}$$

假设  $B = \sum_i b_i B_i + \sum_j d_j D_j$  和  $B' = \sum_j d'_j D_j + \sum_k b'_k B'_k$ , 其中  $B_i$  是在  $X$  上但不在  $X'$  上的除子,  $B'_k$  是在  $X'$  上但不在  $X$  上的除子, 而  $D_j$  是在  $X$  和  $X'$  上的除子。由引理 2.5, 有  $d_j = d'_j$ 。取一个有理数  $\epsilon$  满足

$$-\text{totdiscrep}(X, B), -\text{totdiscrep}(X', B') < \epsilon < 1$$

并按如下定义函数  $\theta : \{v\} \rightarrow [0, 1)_{\mathbb{Q}}$ :

- 对于边界  $B, B'$  的除子, 有  $\theta(B_i) = b_i, \theta(D_j) = d_j, \theta(B'_k) = b'_k$ ;
- 如果  $E$  是  $X$  和  $X'$  上的例外除子, 则  $\theta(E) = \epsilon$ ;
- 如果  $D$  是  $X$  和  $X'$  上的除子, 但不是  $B$  或  $B'$  的部分, 则  $\theta(D) = 0$ 。

那么定义 3.1 构造的集合  $C_\theta$  满足:

- (1)  $(X, B)$  和  $(X', B')$  在集合  $C_\theta$  中;
- (2) 对  $C_\theta$  中任意有限多个具有 klt 奇点的代数簇对  $\{(X_l, B_l)\}$ , 有  $(Z, B_Z) \in C_\theta$  和射影双有理态射  $Z \rightarrow X_l$  使得  $X_l$  是相对于  $X_l$  的  $(K_Z + B_Z)$ -MMP 的输出, 因此也是相对于  $\text{Spec } \mathbb{C}$  的  $(K_Z + B_Z)$ -MMP 结果;
- (3) 任何从  $C_\theta$  中一个元素出发的  $(K + B)$ -MMP, 其结果依然落入  $C_\theta$ 。对任何  $c \in \mathbb{Q}_{>0}$  和无基点 (base point free) 的整系数除子  $H$  给出的  $(K + B + cH)$ -MMP 也成立。

注. 令  $\delta = 1 - \epsilon$ , 那么所有  $C_\theta$  中的代数簇对都是具有  $\delta$ -lc。

使用命题 3.1 中的假设和记号, 可以定义 Sarkisov 次数 (Sarkisov degree)。取  $S'$  上的极丰沛的除子  $A'$  和足够大和足够可除的整数  $\mu' > 1$  使得

$$\mathcal{H}' = | -\mu'(K_{X'} + B') + f'^* A' |$$

是  $X'$  在  $\text{Spec } \mathbb{C}$  上的极丰沛的完全线性系。令  $(W, B_W)$  是  $X$  和  $X'$  在  $C_\theta$  中的公共对数解消, 有射影态射  $\sigma : W \rightarrow X$  和  $\sigma' : W \rightarrow X'$  满足  $\sigma_* B_W = B, \sigma'_* B_W = B'$ 。令  $\mathcal{H}_W := \sigma'^* \mathcal{H}'$ , 那么  $\mathcal{H} := \Phi_*^{-1} \mathcal{H}' = \sigma_* \mathcal{H}_W$ 。进一步, 如果  $\mathcal{H}$  不是无基点的, 那么

$$\sigma^* \mathcal{H} = \mathcal{H}_W + F$$

其中  $F = \sum f_l F_l \geq 0$  是固定部分 (fixed part)。线性系  $\mathcal{H}'$  中的一个一般除子  $H'$  使得  $H_W := \sigma'^* H' = \sigma'^{-1} H' \in \mathcal{H}_W$ , 并记  $H := \Phi_*^{-1} H' = \sigma_* H_W$ 。那么  $H$  是  $f$ -丰沛的, 且  $\sigma^* H = H_W + F$ 。通过取进一步的解消, 不妨设  $H_W$  与  $\sigma$  和  $\sigma'$  的例外除子各部分光滑且互相横截相交 (即  $(W, H_W + \text{Exc } \sigma + \text{Exc } \sigma')$  是对数光滑的)。

接下来定义在  $C_\theta$  中关于  $H'$  (或  $\mathcal{H}'$ ) 的 Sarkisov 次数:

**定义 3.3.** [5, Definition 3.8]  $C_\theta$  中关于  $H'$  (或  $\mathcal{H}'$ ) 的 Sarkisov 次数是一个按字典序排序的三元组  $(\mu, \lambda, e)$ , 其中:

- **数值有效阈值  $\mu$ :** 令  $C \subset X$  是被  $f$  压缩的曲线, 那么

$$\mu := -\frac{H.C}{(K_X + B).C}$$

即  $K_X + B + \frac{1}{\mu} H \equiv_S 0$ ;

- **$\theta$ -典范阈值  $\frac{1}{\lambda}$ :** 若  $\mathcal{H}$  无基点则定义  $\lambda = 0$ ; 否则定义

$$\frac{1}{\lambda} := \max\{t : a_\theta(E; X, B + tH) \geq 0, \forall X \text{ 上例外除子 } E\}$$

- **$(K_X + B_X + \frac{1}{\mu} H)$  的  $\theta$ -无差除子个数:**  $e = 0$  若  $\mathcal{H}$  无基点 (此时  $\lambda = 0$ ) 则定义  $e = 0$ ; 否则定义

$$e = \#\{E; E \text{ 是 } \sigma\text{-例外除子, 且 } a_\theta(E; X, B + \frac{1}{\lambda} H) = 0\}$$

注. 对于 Sarkisov 次数, 有下列性质:

(1) Sarkisov 次数取决于  $A', H'$  和  $\theta$  的选取。

(2) 取公共对数解消  $(W, B_W) \in C_\theta$ , 其中  $B_W = \sum \theta(E)E$ , 并且有射影双有理态射  $\sigma : W \rightarrow X, \sigma' : W \rightarrow X'$ 。由于  $\sigma^*H = H_W + \sum f_l F_l$ , 所以有分歧公式:

$$K_W + B_W + tH_W = \sigma^*(K_X + B + tH) + \sum (a_l - tf_l)E_l$$

其中  $\sum a_l E_l$  是有效除子且支撑在  $\text{Exc } \sigma$  上。那么  $\lambda := \max\{\frac{f_l}{a_l}\}$ 。如果  $H$  是无基点的, 那么  $\sum f_l F_l = 0$  且  $\lambda = 0$ 。

(3)  $e$  是公式

$$K_W + B_W + \frac{1}{\lambda}H_W = \sigma^*(K_X + B + \frac{1}{\lambda}H) + \sum (a_l - \frac{1}{\lambda}f_l)E_l.$$

中系数  $\sum (a_l - \frac{1}{\lambda}f_l)E_l$  为 0 的部分的个数。这样的素除子  $E_1, \dots, E_e$  称作  $\theta$ -无差的。

需要构造在集合  $C_\theta$  中的解压态射:

**引理 3.2.** 使用定义 3.3 中的记号, 并假设  $\lambda \neq 0$ , 那么存在压缩态射  $f : Z \rightarrow X$  满足:

- $(Z, B_Z) \in C_\theta$  且  $(Z, B_Z + \frac{1}{\lambda}H_Z)$  具有  $\theta$ -终端奇点的  $\mathbb{Q}$ -分解代数簇对;
- $\rho(Z) = \rho(X) + 1$ ;
- $(K_X + B + \frac{1}{\lambda}H)$  是  $f$ -无差的, 即

$$K_Z + B_Z + \frac{1}{\lambda}H_Z = f^*(K_X + B + \frac{1}{\lambda}H)$$

证明. 按照 [5, Proposition 1.6] 的思路来证明。取定义 3.3 中的  $(W, B_W) \in C_\theta$  和公共对数解消  $\sigma : W \rightarrow X, \sigma' : W \rightarrow X'$ 。将  $(K_X + B + \frac{1}{\lambda}H)$  的  $\theta$ -无差除子重新编号  $E_1, \dots, E_e$ , 那么有

$$K_W + B_W + \frac{1}{\lambda}H_W = \sigma^*(K_X + B + \frac{1}{\lambda}H) + \sum_{l=1}^e 0 \cdot E_l + \sum_{l>e} (a_l - \frac{1}{\lambda}f_l)E_l.$$

在  $W$  上运行相对于  $X$  的对某丰沛除子标量的  $(K_W + B_W + \frac{1}{\lambda}H_W)$ -MMP, 将终结于  $(W, B_W + \frac{1}{\lambda}H_W)$  相对于  $X$  极小模型  $p : (Y, B_Y + \frac{1}{\lambda}H_Y) \rightarrow X$ , 且  $p$  的例外除子恰好是  $\cup_{i=1}^e E_i$ , 并且  $p$  是无差的:

$$K_Y + B_Y + \frac{1}{\lambda}H_Y = p^*(K_X + B + \frac{1}{\lambda}H)$$



接下来运行相对于  $X$  的对某丰沛除子标量的  $(K_Y + B_Y)$ -MMP，将终结于  $(Y, B_Y)$  相对于  $X$  的极小模型，这个极小模型就是  $(X, B)$ 。令  $f : Z \rightarrow X$  是 MMP 中的最后一个除子压缩，那么  $f$  就是满足条件的除子解压态射。□

### 3.2 构造 Sarkisov 连接

这一节主要按照 [5, §1] 的内容。

**终结判定：** 如果  $\lambda \leq \mu$  且  $K_X + B + \frac{1}{\mu}H$  是数值有效的，那么两个森纤维空间是同构的 (见定理3.5)，Sarkisov 纲领在此结束。

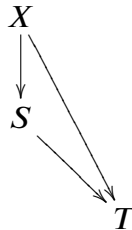
**构造连接：** 如果上述条件不成立，则进行 Sarkisov 纲领的归纳构造。

**引理 3.3.** (1) 如果  $\lambda \leq \mu$  且  $K_X + B + \frac{1}{\mu}H$  不是数值有效的，那么存在压缩态射  $X \rightarrow T$  和第三型或第四型 Sarkisov 连接  $\psi_1 : X \dashrightarrow X_1$ ；

(2) 如果  $\lambda > \mu$  那么存在除子压缩 (除子解压)  $p : Z \rightarrow X$  和第一型或第二型 Sarkisov 连接  $\psi_1 : X \dashrightarrow X_1$ 。

证明. 分两种情况考虑：

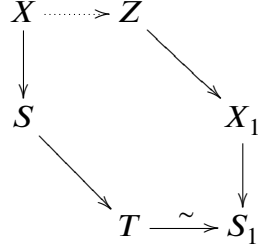
(1) 假设  $\lambda \leq \mu$  和  $K_X + B + \frac{1}{\mu}H$  不是数值有效的。记  $f$  是  $(K_X + B)$ -负性的极端射线  $R = \overline{\text{NE}}(X/S)$  的压缩态射，那么由  $\mu$  的定义有  $(K_X + B + \frac{1}{\mu}H).R = 0$ 。存在极端射线  $P \subset \overline{\text{NE}}(X)$  使得  $(K_X + B + \frac{1}{\mu}H).P < 0$  且  $F := P + R$  是极端面 (细节见 [7, 5.4.2])。取  $0 < \delta \ll 1$  使得  $(K_X + B + (\frac{1}{\mu} - \delta)H).P < 0$ ，由于  $H$  是  $f$ -丰沛的，有  $(K_X + B + (\frac{1}{\mu} - \delta)H).R < 0$ 。因此  $F$  是  $(K_X + B + (\frac{1}{\mu} - \delta)H)$ -负性的极端面。由于  $(X, B + (\frac{1}{\mu} - \delta)H)$  有 klt 奇点，由压缩定理，存在关于  $F$  的压缩态射  $g : X \rightarrow T$  穿过  $f : X \rightarrow S$ 。



由于  $(X, B + \frac{1}{\mu}H)$  具有 klt 奇点，且  $\rho(X/T) = 2$ ，可以运行相对于  $T$  的关于某丰沛除子标量的  $(K_X + B + \frac{1}{\mu}H)$ -MMP。由于  $B + \frac{1}{\mu}H$  是相对于  $T$  的大除子，这个 MMP 终结。有下列情况：

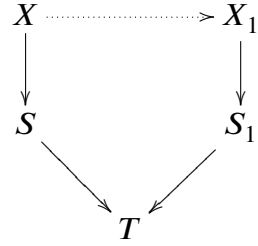


(1).1 在有限多步翻转复合  $X \dashrightarrow Z$  后, 第一个非翻转的压缩态射是一个除子压缩  $p: Z \rightarrow X_1$ , 之后是一个森纤维空间的压缩态射  $f_1: (X_1, B_1 + \frac{1}{\mu}H_1) \rightarrow S_1$ 。这个压缩态射  $f_1$  也是关于  $(X_1, B_1)$  的森纤维空间。



这是第三型的 Sarkisov 连接。

(1).2 在有限多步翻转复合  $X \dashrightarrow X_1$  后, 第一个非翻转的压缩态射是森纤维空间的压缩态射  $f_1: (X_1, B_1 + \frac{1}{\mu}H_1) \rightarrow S_1$ 。这个压缩态射  $f_1$  也是关于  $(X_1, B_1)$  的森纤维空间。

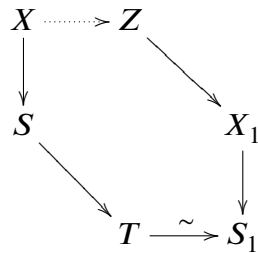


这是第四型的 Sarkisov 连接。

(1).3 在有限多步翻转复合  $X \dashrightarrow Z$  后, 第一个非翻转的压缩态射是一个除子压缩  $p: Z \rightarrow X_1$ , 且

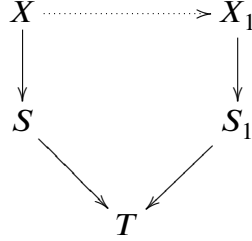
$$K_Z + B_Z + \frac{1}{\mu}H_Z = p^*(K_{X_1} + B_1 + \frac{1}{\mu}H_1) + eE$$

其中  $e > 0$ ,  $E = \text{Exc } p$  且  $f_1: (X_1, B_1 + \frac{1}{\mu}H_1) \rightarrow T$  是关于  $(X, B + \frac{1}{\mu}H)$  在  $T$  上的极小模型。事实上  $\overline{\text{NE}}(X_1/T)$  唯一的极端射线是  $(K_{X_1} + B_1 + \frac{1}{\mu}H_1)$ -平凡的, 所以是  $(K_{X_1} + B_1)$ -负性的。所以  $f_1: (X_1, B_1) \rightarrow T$  是森纤维空间。



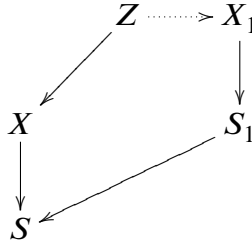
取  $S_1 = T$ , 这是第三型 Sarkisov 连接。

(1).4 在有限多步翻转复合  $X \dashrightarrow Z$  后,  $(K_X + B + \frac{1}{\mu}H)$ -MMP 终结于  $T$  上的极小模型  $(X_1, B_1 + \frac{1}{\mu}H_1)$ 。那么存在  $\overline{NE}(X_1/T)$  的极端射线  $R$ , 并且是  $(K_{X_1} + B_1 + \frac{1}{\mu}H_1)$ -平凡的和  $(K_{X_1} + B_1)$ -负性的。令  $f_1 : X_1 \rightarrow S_1$  为关于  $R$  的压缩态射, 这是第四型的 Sarkisov 连接。



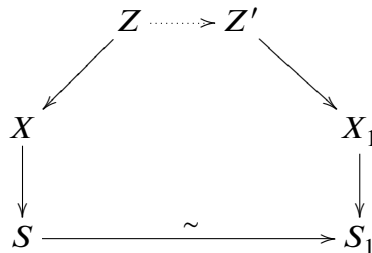
(2) 假设  $\lambda > \mu$ 。取引理3.2构造的除子解压  $p : (Z, B_Z + \frac{1}{\lambda}H_Z) \rightarrow (X, B + \frac{1}{\lambda}H)$ , 即  $(Z, B_Z)$  具有  $\theta$ -终端奇点且  $p^*(K_X + B + \frac{1}{\lambda}H) = K_Z + B_Z + \frac{1}{\lambda}H_Z$ , 其中  $B_Z = \sum \theta(E_\nu)E_\nu$ ,  $Z$  上的除子  $E_\nu$  对应赋值  $\nu$ 。运行相对于  $S$  的对某丰沛除子标量的  $(K_Z + B_Z + \frac{1}{\lambda}H_Z)$ -MMP, 由于  $Z$  被  $(K_Z + B_Z + \frac{1}{\lambda}H_Z)$ -负性的曲线覆盖,  $(K_Z + B_Z + \frac{1}{\lambda}H_Z)$  不是相对伪有效的。因此由定理2.3, 这个 MMP 终结于森纤维空间。有下列两种情况:

(2).1 在有限多步翻转复合  $Z \dashrightarrow X_1$  后, 第一个非翻转的压缩态射是森纤维空间  $f_1 : (X_1, B_1 + \frac{1}{\lambda}H_1) \rightarrow S_1$  由于  $(K_{X_1} + B_1 + \frac{1}{\lambda}H_1)$  是在  $S_1$  上反丰沛 (anti-ample) 的除子, 且  $H_1$  是  $f_1$ -丰沛的所以  $(K_{X_1} + B_1)$  在  $S_1$  上反丰沛。



因此  $f_1 : (X_1, B_1) \rightarrow S_1$  是森纤维空间, 这是第一型的 Sarkisov 连接。

(2).2 在有限多步翻转复合  $X \dashrightarrow X'$  后, 第一个非翻转的压缩态射是一个除子压缩  $q : Z' \rightarrow X_1$ , 接着是森纤维空间压缩态射  $f_1 : (X_1, B_1 + \frac{1}{\lambda}H_1) \rightarrow S$ 。



令  $S_1 = S$ , 那么压缩态射  $f_1$  同时也是关于  $(X_1, B_1)$  的森纤维空间。这是第二型的 Sarkisov 连接。

□

用  $(X_1, B_1)$  和  $\Phi_1 = \Phi \circ \psi_1^{-1}$  替换  $(X, B)$  和  $\Phi$ , 并重复上述引理内容。

**断言 3.4.** Sarkisov 次数在此过程中按字典序下降:

- 对于 (I):
  - (I).1 和 (I).2 的情况下, 由于  $K_{X_1} + B_1 + \frac{1}{\mu}H_1$  在  $S_1$  上反丰沛, 所以有  $\mu_1 < \mu$ 。
  - (I).3 和 (I).4 的情况下, 由于  $(K_{X_1} + B_1 + \frac{1}{\mu}H_1)$  在射线  $R = \overline{NE}(X_1/S_1)$ , 所以有  $\mu_1 = \mu$ 。注意到  $(X_1, B_1 + \frac{1}{\mu}H_1)$  任然具有  $\theta$ -典范奇点, 所以  $\lambda_1 \leq \mu = \mu_1$ , 所以下一个 Sarkisov 连接依然是情况 (I)。对于 (I).3 的情况, 还有  $\rho(X_1) = \rho(X) - 1$ 。
- 对 (2).1, 有  $\mu_1 \leq \mu$  和  $\lambda_1 \leq \lambda$ 。且如果  $\lambda_1 = \lambda$ , 那么  $e_1 < e$ 。

### 3.3 下降法的终结性

首先说明在终结判定满足时, 得到的森纤维空间和  $X' \rightarrow S'$  同构:

**定理 3.5** (Noether-Fano-Iskovskikh 判定法). 按照定义 3.3 中的记号, 有

- (1)  $\mu \geq \mu'$ ;
- (2) 如果  $\mu \geq \lambda$  且  $(K_X + B + \frac{1}{\mu}H)$  是数值有效的, 那么  $\Phi$  是森纤维空间的同构, 即有交换图表:

$$\begin{array}{ccc} X & \xrightarrow[\Phi]{\sim} & X' \\ f \downarrow & & \downarrow f' \\ S & \xrightarrow{\sim} & S' \end{array}$$

证明. 按照 Hacon [12, Claim 13.20], Liu [15, Theorem 5.1] 和 Corti [7, Theorem 4.2] 的思路给出证明:

- (1) 只需证明  $(K_X + B + \frac{1}{\mu'}H)$  是  $f$ -数值有效的。取公共解消  $\sigma: W \rightarrow X$  和  $\sigma': W \rightarrow X'$ , 有分歧公式

$$\begin{aligned} K_W + B_W + \frac{1}{\mu'}H_W &= \sigma'^*(K_{X'} + B' + \frac{1}{\mu'}H') + \sum e'_j E_j + \sum g'_k G'_k \\ &= \sigma^*(K_X + B + \frac{1}{\mu'}H) + \sum g_i G_i + \sum e_j E_j \end{aligned}$$

其中  $\{G_i\}, \{E_j\}$  是  $\sigma$ -例外除子,  $\{E_j\}, \{G'_k\}$  是  $\sigma'$ -例外除子。即  $G_i$  是只在  $\sigma$  上例外的除子,  $G'_k$  是只在  $\sigma'$  上例外除子,  $E_j$  是在二者上都例外的除子。由于  $H_W = \sigma'^* H'$ , 所以  $g'_k > 0$  或者没有这样的  $G'_k$  (这是由  $B_W$  的构造得到的)。取被  $f$  压缩的一般曲线  $C \subset X$ , 且它在  $W$  的双有理原像  $\tilde{C}$  和  $G_i, E_j$  无交, 并且不包含在  $G'_k$  中。那么有

$$\begin{aligned} C \cdot \left( K_X + B + \frac{1}{\mu'} H \right) &= \tilde{C} \cdot \left( \sigma^* \left( K_X + B + \frac{1}{\mu'} H \right) + \sum g_i G_i + \sum e_j E_j \right) \\ &= \tilde{C} \cdot \left( \sigma'^* \left( K_{X'} + B' + \frac{1}{\mu'} H' \right) + \sum e'_j E_j + \sum g'_k G'_k \right) \\ &= \tilde{C} \cdot \sigma'^* f'^* A' + \tilde{C} \cdot \left( \sum g'_k G'_k \right) \geq 0. \end{aligned}$$

由此推出  $(K_X + B + \frac{1}{\mu'} H)$  是  $f$ -数值有效的, 且  $\mu \geq \mu'$ ;

(2) 首先证明  $\mu = \mu'$ 。只需证  $\mu' \geq \mu$ , 同上, 只需证  $(K_{X'} + B' + \frac{1}{\mu} H')$  是  $f'$ -数值有效的。同上取被  $f'$  压缩的  $X'$  上的一般曲线  $C' \subset X'$ , 并且在  $W$  上的双有理原像  $\tilde{C}'$  和  $G'_k, E_j$  无交, 并且不包含在  $G_i$ 。那么同上可得到  $C' \cdot (K_{X'} + B' + \frac{1}{\mu} H') \geq 0$ , 即  $(K_{X'} + B' + \frac{1}{\mu} H')$  是  $f'$ -数值有效的。而  $(K_{X'} + B' + \frac{1}{\mu'} H') \equiv_{f', \mathbb{Q}} 0$ , 所以  $\frac{1}{\mu} \geq \frac{1}{\mu'}$ , 这就推出  $\mu' \geq \mu$ 。

接下来证明它们同构。取  $X$  上极丰沛除子  $D$ , 且  $D'$  是在  $X'$  上的严格双有理变换。那么  $D'$  是  $f'$ -丰沛的, 所以存在  $0 < d \ll 1$  使得:

- $K_X + B + \frac{1}{\mu} H + dD$  是丰沛除子;
- $K_{X'} + B' + \frac{1}{\mu} H' + dD'$  是丰沛除子;
- $(W, B_W + \frac{1}{\mu} H_W + dD_W)$  具有 klt 奇点 (因为  $\mu \geq \lambda$ , 所以可以做到)。

因此  $X$  和  $X'$  都是  $(W, B_W + \frac{1}{\mu} H_W + dD_W)$  的对数典范模型, 由对数典范模型的唯一性,  $X \cong X'$ 。更进一步,  $f$  和  $f'$  压缩相同的曲线数值等价类, 所以两个森纤维空间同构。

□

Bruno 和 Matsuki[5] 给出的下降法的 Sarkisov 纲领的终结性需要下列条件:

(1) 数值有效阈值  $\mu$  的离散性 (或者降链条件, descending chain condition, DCC)。由于本章的代数簇对  $(X, B)$  的边界除子是  $\mathbb{Q}$ -除子, 由  $\delta$ -lc Fano 代数簇对的有界性和相关定理 ([3, Theorem 1.1]), 任意维数下此条件都成立 (离散的正有理数集满足 DCC)。

(2) 翻转的终结性 (这对高维情况还没有完全证明);

(3) lct 的 ACC (ascending chain condition of log canonical thresholds);

(4) 对具有终端奇点的代数簇的 Sarkisov 纲领需要局部 lct 的有限性; 对具有 klt 奇点的代数簇对的 Sarkisov 纲领需要局部  $\theta$ -ct ( $\theta$ -canonical thresholds) 的有限性。这些在四维及以上的情况还不清楚。

**用反证法部分证明终结性:** 简要的说明思路: 如果上一节中构造的 Sarkisov 连接构成无限长的序列, 即有无限多个  $X_i$  和构造的映射:

$$X = X_0 \dashrightarrow X_1 \dashrightarrow \cdots \dashrightarrow X_i \dashrightarrow \cdots \dashrightarrow X'$$

(1) 由  $\mu_i$  的离散性 (DCC), 在有限步后  $\mu_i$  是常值, 不再下降。不妨设  $\mu = \mu_0 = \mu_i$  对所有  $i$  成立。

(2) 如果序列中有一个第三型或第四型的 Sarkisov 连接  $\psi_i$ , 那么后续每一个 Sarkisov 连接  $\psi_j, j > i$  都是第三型或第四型 (见断言 3.4)。由于第三型 Sarkisov 连接的 Picard 数严格下降, 所以只有有限多个。于是在  $j \gg 0$  时  $\psi_j$  全部为第四型 Sarkisov 连接, 同时也是无限多个翻转的复合。对于三维代数簇对和四维伪有效的代数簇对, 这样的翻转只有有限多步, 这是一个矛盾。在高维其他情况还不清楚。

(3) 假设所有 Sarkisov 连接都是第一型或者第二型的。lct 的 ACC 对所有维数都成立 [11], 所以存在正数  $\alpha$  使得对  $i \gg 0$  有  $(X_i, B_i + \alpha H_i)$  具有 klt 奇点, 并且每个 Sarkisov 连接  $\psi_i, i \gg 0$  都同时是相对于  $S_i$  的  $(K_{Z_i} + B_{Z_i} + \alpha H_{Z_i})$ -MMP 结果。在具有终端奇点的三维代数簇的情况, 这和  $\theta$ -典范阈值的有限性矛盾 (具体见 [5, Claim 2.2])。



## 第4章 双标量法

本章介绍 [12, §13] 和 [15] 中的双标量法 (double scaling) 构造的 Sarkisov 分解。下降法用  $X'$  上的除子  $H'$  来作为标量，双标量法在  $X$  和  $X'$  上分别构造除子  $G$  和  $H'$ ，作为双标量。令  $W$  为 MMP-相关的森纤维空间  $f : (X, B) \rightarrow S$  和  $f' : (X', B') \rightarrow S'$  的公共解消，取在  $S$  上的丰沛除子  $A$  使得

$$G \sim_{\mathbb{R}} -(K_X + B) + f^* A$$

是一般的丰沛除子。类似的，取  $S'$  上丰沛除子  $A'$ ，使得

$$H' \sim_{\mathbb{R}} -(K_{X'} + B') + f'^* A'$$

是一般的丰沛除子。那么  $(X, B + G)$  和  $(X', B' + H')$  是  $W$  (关于  $B_W + G_W$  和  $B_W + H_W$ ) 的两个弱对数典范模型。双标量 Sarkisov 纲领将构造  $W$  的有限多个弱对数典范模型  $(X_i, B_i + g_i G_i + h_i H_i)$ ，它们是分别关于  $(W, B_W + g_i G_W + h_i H_W)$  的模型，其中  $0 \leq g_i, h_i \leq 1$ 。这些模型间的双有理映射  $\psi_i : X_i \dashrightarrow X_{i+1}$  是通过双射线 MMP 构造 Sarkisov 连接映射。

和下降法相比，这种方法在一个更小的集合内运行 MMP 和 Sarkisov 纲领。所有的  $X_i$  都对应一个  $(K_W + D_i)$ -非正性的双有理压缩映射  $W \dashrightarrow X_i$ ，其中  $D_i$  是  $\mathrm{WDiv}_{\mathbb{R}}(W)$  的一个有界子集  $\mathcal{E}_A(V)$ 。对于这个子集有弱对数典范模型的有限性性质，由此可以得到双标量法的 Sarkisov 纲领的终结性。

### 4.1 定义和引理

令  $(W, B_W)$  是 klt 奇点的  $\mathbb{Q}$ -分解代数簇对，并且  $f : (X, B) \rightarrow S$  和  $f' : (X', B') \rightarrow S'$  是两个不同的  $(K_W + B_W)$ -MMP 的输出，且都是森纤维空间。接下来给出一些所需的记号和引理。

**定义 4.1.** 令  $f : W \dashrightarrow X$  是正规拟射影代数簇间的双有理映射，如果

- $f$  不解压除子；
- 对所有在  $W$  之上的除子  $E$  都有  $a(E; X, B_X) \geq a(E; W, B_W)$ ,

那么记  $(W, B_W) \geq (X, B_X)$ 。

对于具有终端奇点的代数簇对，有下面的引理：

**引理 4.1.** [12, Lemma 13.8] 令  $f : W \dashrightarrow X$  是双有理映射且  $(W, B_W)$  具有终端奇点。如果

- $f$  不解压除子；
- $K_X + B$  是数值有效除子，其中  $B = f_* B_W$ ；
- 对所有  $W$  上的除子  $E \subset W$  都有  $a(E; X, B) \geq a(E; W, B_W)$ 。

那么有

- $(W, B_W) \geq (X, B_X)$ ；
- $(X, B_X)$  具有 *klt* 奇点；
- 如果  $Z \rightarrow X$  是关于  $E$  的除子解压，其中  $a(E; X, B_X) \leq 0$ ，那么  $E$  是  $W$  上的除子；
- 如果  $Z \rightarrow X$  是  $(X, B_X)$  的终端化，那么  $W \dashrightarrow Z$  不解压除子。

相反的，从非正性映射出发，可以构造这样的具有终端奇点的更高模型：

**引理 4.2.** [15, Lemma 3.5] 令  $\sigma : (W, B_W) \dashrightarrow (X, B)$  是  $(K_W + B_W)$ -非正性双有理映射，使得  $\sigma_*(K_W + B_W) = K_X + B$  且  $(W, B_W)$  是 *klt* 奇点的  $\mathbb{Q}$ -分解代数簇对，那么存在一个映射解消  $\pi : \tilde{W} \rightarrow W$  和  $\tilde{\sigma} : \tilde{W} \rightarrow X$  使得

- $(\tilde{W}, B_{\tilde{W}})$  是终端奇点的  $\mathbb{Q}$ -分解代数簇对，且  $\tilde{\sigma}_* B_{\tilde{W}} = B$ ；
- $\tilde{\sigma}$  是  $(K_{\tilde{W}} + B_{\tilde{W}})$ -非正性的且  $(\tilde{W}, B_{\tilde{W}}) \geq (X, B)$ ；

$$\begin{array}{ccc}
 & \tilde{W} & \\
 \pi \swarrow & & \searrow \tilde{\sigma} \\
 (W, B_W) & \xrightarrow{\sigma} & (X, B)
 \end{array}$$

通过应用引理 4.2，可以调整双标量法 Sarkisov 纲领的初始设定：

**断言 4.3.** 用  $(W, B_W)$  的奇点解消代替它，使得  $(W, B_W)$  具有终端奇点，且  $\sigma : W \rightarrow X$  和  $\sigma' : W \rightarrow X'$  是  $(K_W + B_W)$ -非正性态射，并且  $(W, B_W) \geq (X, B), (X', B')$ 。

取  $S$  和  $S'$  上的极丰沛除子  $A$  和  $A'$  使得

$$G \sim_{\mathbb{R}} -(K_X + B) + f^* A$$



和

$$H \sim_{\mathbb{Q}} -(K_{X'} + B') + f'^* A'$$

是丰沛除子。进一步, 可以假设  $G$  和  $H$  满足  $G_W := \sigma^* G = \sigma_*^{-1} G$  和  $H_W := \sigma'^* H = \sigma'^{-1} H$ 。因此

$$\sigma_*(K_W + B_W + G_W) = K_X + B + G$$

是数值有效的, 引理 4.1 的结论满足。如果必要的话取进一步解消, 可以假设  $(W, B_W + gG_W + hH_W)$  对数光滑, 并且对所有  $0 \leq g, h \leq 2$  都具有终端奇点。

在这个设定下, 有双标量的 Sarkisov 纲领:

**定理 4.4** (双标量 Sarkisov 纲领). [12, Claim 13.12] 沿用上述记号, 有有限多个 Sarkisov 连接的序列

$$\begin{array}{ccccccc} X = X_0 & \cdots & X_1 & \cdots & X_2 & \cdots & X_N = X' \\ f=f_0 \downarrow & & f_1 \downarrow & & f_2 \downarrow & & f_N \downarrow \\ S = S_0 & & S_1 & & S_2 & & S_N = S' \end{array}$$

和

$$1 = g_0 \geq g_1 \geq \cdots \geq g_N = 0$$

$$0 = h_0 \leq h_1 \leq \cdots \leq h_N = 1$$

满足

(1) 对每个  $i$ , 双有理压缩映射  $\sigma_i : W \dashrightarrow X_i$  都是  $(K_W + B_W + g_i G_W + h_i H_W)$ -非正性的, 并且  $(K_{X_i} + B_i + g_i G_i + h_i H_i) = \sigma_{i*}(K_W + B_W + g_i G_W + h_i H_W)$  是数值有效的, 且相对于  $S_i$  数值平凡;

(2)  $(W, B_W + g_i G_W + h_i H_W) \geq (X_i, B_i + g_i G_i + h_i H_i)$ ;

(3) 每一个 Sarkisov 连接  $X_i \dashrightarrow X_{i+1}$  都是一组  $(K_{X_i} + B_i + g_i G_i + h_i H_i)$ -平凡的映射的复合;

(4) 最后一个森纤维空间  $X_N \rightarrow S_N$  同构于  $X' \rightarrow S'$ 。

这里平凡映射指

**定义 4.2.** [12, §13.2] 令  $f : X \dashrightarrow Y$  是相对于  $S$  正规拟射影代数簇间的有理映射, 并且  $D$  是  $X$  上  $\mathbb{R}$ -Cartier  $\mathbb{R}$ -除子, 且  $f_* D = D_Y$ 。如果  $D$  是  $S$  上某个  $\mathbb{R}$ -Cartier 除子的拉回, 那么称  $f$  为  $D$ -平凡 ( $D$ -trivial)。

## 4.2 双标量法构造 Sarkisov 连接

这一节将归纳地构造 Sarkisov 连接。对于森纤维空间  $X = X_0 \rightarrow S = S_0$ , 将  $(X_0, B_0 + 1 \cdot G_0 + 0 \cdot H_0)$  看作  $(W, B_W + 1 \cdot G_W + 0 \cdot H_W)$  的弱对数典范模型, 并把  $(X', B' + 0 \cdot G' + 1 \cdot H')$  看作  $(W, B_W + 0 \cdot G_W + 1 \cdot H_W)$  的弱对数典范模型。归纳地构造  $f_i : X_i \rightarrow S_i$ , 使得  $(X_i, B_i + g_i \cdot G_i + h_i \cdot H_i)$  是  $(W, B_W + g_i \cdot G_W + h_i \cdot H_W)$  的弱对数典范模型。在这个过程中,  $g_i$  逐渐减少为  $g_N = 0$ , 而  $h_i$  逐渐增加为  $h_N = 1$ , 并且  $X_N \rightarrow S_N$  与  $X' \rightarrow S'$  同构。

假设已经构造定理4.4中的映射  $\sigma_i : W \dashrightarrow X_i$ , 即

- $f_i : (X_i, B_i) \rightarrow S_i$  是森纤维空间, 且  $\sigma_{i*} B_W = B_i$ ;
- $\sigma_i : W \dashrightarrow X_i$  是  $(K_W + B_W + g_i G_W + h_i H_W)$ -非正性的, 且

$$(K_{X_i} + B_i + g_i G_i + h_i H_i) = \sigma_{i*}(K_W + B_W + g_i G_W + h_i H_W)$$

是数值有效的, 并且相对于  $S_i$  数值平凡;

- $(W, B_W + g_i G_W + h_i H_W) \geq (X_i, B_i + g_i G_i + h_i H_i)$ ;
- $0 \leq g_i, h_i \leq 1$ 。

那么构造下一个满足定理4.4的 Sarkisov 连接  $X_i \dashrightarrow X_{i+1}$ 。类比下降法的 Sarkisov 次数, 引入下列记号:

**定义 4.3.** 令  $C_i$  是被  $f_i$  压缩的 (也称为  $f$ -垂直的,  $f$ -vertical)  $X_i$  上的曲线, 那么定义

- $r_i := \frac{H_i \cdot C_i}{G_i \cdot C_i}$ ;
- 令  $\Gamma$  是满足下列条件的  $t \in [0, \frac{g_i}{r_i}]$  的集合
  - $(W, B_W + g_i G_W + h_i H_W + t(H_W - r_i G_W)) \geq (X_i, B_i + g_i G_i + h_i H_i + t(H_i - r_i G_i))$ ;
  - $K_{X_i} + B_i + g_i G_i + h_i H_i + t(H_i - r_i G_i)$  数值有效.

令  $s_i = \max \Gamma$ ;

- 记  $D_{W,i} = B_W + g_i G_W + h_i H_W$  和  $D_i = B_i + g_i G_i + h_i H_i$ , 并记

$$D_{W,i}(t) = B_W + g_i G_W + h_i H_W + t(H_W - r_i G_W)$$

和

$$D_i(t) = B_i + g_i G_i + h_i H_i + t(H_i - r_i G_i)$$

令  $g_{i+1} = g_i - r_i s_i$  和  $h_{i+1} = h_i + s_i$ 。注意到  $D_{W,i+1} = D_{W,i}(s_i)$ 。

注. 由定义容易得到:

- (1)  $r_i > 0$ ;
- (2)  $\Gamma = \{0\}$  或  $\Gamma$  是闭区间
- (3)  $g_{i+1} = g_i \Leftrightarrow h_{i+1} = h_i \Leftrightarrow s_i = 0$ ;

**终结判定:** 如果  $s_i = \frac{g_i}{r_i}$ , 此时  $g_{i+1} = 0$ . 令  $N = i + 1$ , 并令  $f_N : X_N = X_i \rightarrow S_N = S_i$ , 那么  $h_N = 1$  且  $X_N \rightarrow S_N$  与  $f' : X' \rightarrow S'$  同构 (见命题 4.8), 这样双标量 Sarkisov 纲领停止. 此时事实上  $X_i \cong X_N, S_i \cong S_N$ , 但是对二者的边界不同, 而  $X_N$  的边界  $B_N$  与  $(X', B')$  的边界  $B'$  相同.

**构造 Sarkisov 连接:**

**命题 4.5** (构造 Sarkisov 连接). 如果  $s_i < \frac{g_i}{r_i}$ , 那么可以构造 Sarkisov 连接  $X_i \dashrightarrow X_{i+1}$ .

证明. 分两种情况构造:

- (1) 若  $s_i$  不是集合  $\Gamma$  的第一个条件

$$(W, B_W + g_i G_W + h_i H_W + t(H_W - r_i G_W)) \geq (X_i, B_i + g_i G_i + h_i H_i + t(H_i - r_i G_i))$$

的阈值, 也就是说存在  $0 < \epsilon \ll 1$ , 使得  $W$  上任意除子  $E$ , 都有

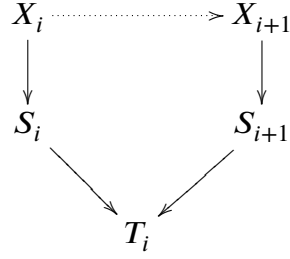
$$a(E; X_i, D_i(s_i + \epsilon)) \geq a(E; W, D_{W,i}(s_i + \epsilon))$$

并且  $K_{X_i} + D_i(s_i + \epsilon)$  不是数值有效. 那么对某个  $0 < \delta \ll \epsilon$ , 存在一个 2 维的  $(K_{X_i} + D_i(s_i + \epsilon) - \delta G_i)$ -负性极端面  $F$ , 由  $R = \mathbb{R}_{\geq 0}[C_i]$  和另一个极端射线  $P$  张成 (spanned by  $R$  and  $P$ ). 于是存在关于  $F$  的压缩态射  $X_i \rightarrow T_i$  穿过  $f_i$ .

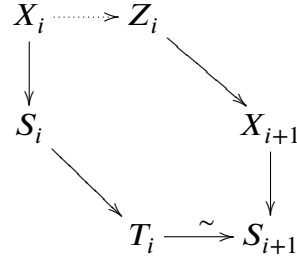
$$\begin{array}{ccc} X_i & & \\ \downarrow & \searrow & \\ S_i & & \\ & \searrow & \\ & & T_i \end{array}$$

接着运行相对于  $T_i$  的关于某丰沛除子标量的  $(K_{X_i} + D_i(s_i + \epsilon))$ -MMP, 在有限多个翻转后, 会接着一个关于  $(K_{X_i} + D_i(s_i + \epsilon))$  的森纤维空间压缩态射, 或一个除子压缩态射, 或已经成为极小模型。

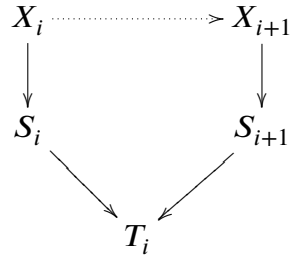
(1).1 若记  $X_i \dashrightarrow X_{i+1}$  是翻转的复合, 并且接着森纤维空间压缩  $X_{i+1} \rightarrow S_{i+1}$ , 那么这是第四型的 Sarkisov 连接;



(1).2 若记  $X_i \dashrightarrow Z_i$  是翻转的复合, 并接着一个除子压缩态射  $Z_i \rightarrow X_{i+1}$ , 那么令  $S_{i+1} = T_i$ , 则  $X_{i+1} \rightarrow S_{i+1}$  是一个森纤维空间。这是第三型的 Sarkisov 连接。



(1).3 若记  $X_i \dashrightarrow X_{i+1}$  是翻转的复合, 且  $X_{i+1} \rightarrow T_i$  是关于  $(X_i, D_i(s_i + \epsilon))$  相对于  $T_i$  的极小模型。令  $C'$  是  $C_i$  在  $X_{i+1}$  上的双有理变换, 则有  $(K_{X_{i+1}} + D_{i+1}(\epsilon)).C' = 0$  和  $(K_{X_{i+1}} + B_{i+1}).C' < 0$ , 因此有压缩态射  $X_{i+1} \rightarrow S_{i+1}$  相对于  $T_i$ 。这个态射是森纤维空间, 并且这是第四型 Sarkisov 连接。



注意到  $(K_{X_i} + D_i(s_i))$  及其严格双有理变换都是相对于  $S_i$  上数值平凡的, 由锥定理 2.1, 此时的  $X_i \dashrightarrow X_{i+1}$  是一系列  $(K_{X_i} + D_i(s_i))$ -平凡映射的复合。

(2) 如果  $s_i$  集合  $\Gamma$  的第一个条件 4.3 的阈值, 也就是说存在  $0 < \epsilon \ll 1$  和  $W$  上的  $\sigma_i$ -例外除子  $E_i$  使得

$$a(E_i; X_i, D_i(s_i + \epsilon)) < a(E_i; W, D_{W,i}(s_i + \epsilon))$$

此时有

$$a(E_i; X_i, D_i(s_i)) = a(E_i; W, D_{W,i}(s_i)) = -\text{mult}_{E_i}(D_{W,i}(s_i)) \leq 0$$

令  $p_i : Z_i \rightarrow X_i$  是推论 2.4 中除子  $E_i$  的除子解压, 并且记

$$K_{Z_i} + D_{Z_i}(s_i) = K_{Z_i} + B_{Z_i} + g_{i+1}G_{Z_i} + h_{i+1}H_{Z_i} = p_i^* \left( K_{X_i} + D_i(s_i) \right)$$

取充分小的  $\delta$  使得  $0 < \delta \ll \epsilon \ll 1$  且

$$K_{Z_i} + \Delta_i = p_i^*(K_{X_i} + D_i(s_i + \epsilon) - \delta G_i)$$

具有 klt 奇点。接下来运行相对于  $S_i$  的  $(K_{Z_i} + \Delta_i)$ -MMP。由于  $Z_i$  被  $(K_{Z_i} + \Delta_i)$ -负性的曲线覆盖, 所以  $(K_{Z_i} + \Delta_i)$  相对于  $S_i$  不是伪有效的, 这个 MMP 终结于森纤维空间。同时, 对一任意  $0 < \delta' \leq \delta$ , 这也是  $p_i^*(K_{X_i} + D_i(s_i + \epsilon) - \delta' G_i)$ -MMP。在有限多步翻转之后, 要么终结于  $(K_{Z_i} + \Delta_i)$  的森纤维空间, 要么接着一个  $(K_{Z_i} + \Delta_i)$  的除子压缩态射。

(2).1 若记  $Z_i \dashrightarrow X_{i+1}$  是有限步翻转的复合, 并终结于森纤维空间

$$X_{i+1} \rightarrow S_{i+1}$$

那么是第一型的 Sarkisov 连接。

$$\begin{array}{ccc} & Z_i & \dashrightarrow X_{i+1} \\ & \swarrow & \downarrow \\ X_i & & S_{i+1} \\ \downarrow & \swarrow & \\ S_i & & \end{array}$$

在这种情况下有  $\rho(X_{i+1}) = \rho(X_i) + 1$ 。

(2).2 若记  $Z_i \dashrightarrow Z'_i$  是有限步翻转的复合, 并且接着相对于  $S_i$  的除子压缩

$$q_i : Z'_i \rightarrow X_{i+1}$$

那么  $X_{i+1} \rightarrow S_{i+1} := S_i$  是森纤维空间, 这是第二型 Sarkisov 连接。

$$\begin{array}{ccccc} & & Z_i & \dashrightarrow & Z'_i \\ & \swarrow & & & \searrow \\ X_i & & & & X_{i+1} \\ \downarrow & & & & \downarrow \\ S_i & \xrightarrow{\sim} & & & S_{i+1} \end{array}$$

注意到  $(K_{X_i} + D_i(s_i))$  及其严格双有理变换都是相对于  $T_i$  上数值平凡的, 由锥定理 2.1, 此时的  $X_i \dashrightarrow X_{i+1}$  是一系列  $(K_{X_i} + D_i(s_i))$ -平凡映射的复合。

□

类似于下降法中的 Sarkisov 次数, 定义 4.3 中的不变量也有规律:

**断言 4.6.** 由 [12, Lemma 13.14-17] 和 [15, Lemma 4.2] 可以得到:

(1)  $r_i \leq r_{i+1}$ 。在 (1).1 的情况, 还有  $r_i < r_{i+1}$ 。

(2) 在情况 (1) 中由于  $X_i \dashrightarrow X_{i+1}$  是相对于  $T_i$  的  $(K_{X_i} + D_i(s_i))$ -平凡映射, 所以对任意的  $W$  之上的除子  $E$ , 都有

$$a(E; X_i, D_i(s_i)) = a(E; X_{i+1}, D_{i+1})$$

和不等式

$$a(E; X_{i+1}, D_{i+1}) \geq a(E; W, D_{W,i+1})$$

(3) 在情况 (2) 中由于  $X_i \dashrightarrow X_{i+1}$  是相对于  $S_i$  的  $(K_{X_i} + D_i(s_i))$ -平凡映射, 所以同样对任意的  $W$  之上的除子  $E$ , 都有

$$a(E; X_i, D_i(s_i)) = a(E; X_{i+1}, D_{i+1})$$

和不等式

$$a(E; X_{i+1}, D_{i+1}) \geq a(E; W, D_{W,i+1})$$

(4) 在情况 (1) 中, 任意  $W$  之上的除子  $E$  和  $0 < \epsilon \ll 1$ , 都有

$$a(E; X_i, D_i(s_i + \epsilon)) \leq a(E; X_{i+1}, D_{i+1}(\epsilon))$$

并且因为  $X_i \not\cong X_{i+1}$ , 所以有  $W$  之上的除子  $F$  使得

$$a(F; X_i, D_i(s_i + \epsilon)) < a(F; X_{i+1}, D_{i+1}(\epsilon))$$

(5) 在情况 (2) 中, 任何  $W$  之上的除子  $E$ , 对所有  $0 < \epsilon \ll 1$  都有

$$a(E; X_i, D_i(s_i + \epsilon) - \delta G_i) \leq a(E; X_{i+1}, D_{i+1}(\epsilon) - \delta G_{i+1})$$

并且因为  $X_i \not\cong X_{i+1}$ , 所以有  $W$  之上的除子  $F$  使得

$$a(F; X_i, D_i(s_i + \epsilon) - \delta G_i) < a(F; X_{i+1}, D_{i+1}(\epsilon) - \delta G_{i+1})$$

(6)  $h_i \leq 1$ , 且  $h_i = 1$  当且仅当  $g_i = 0$ ;

### 4.3 双标量 Sarkisov 纲领的终结性

**引理 4.7.** [12, Lemma 13.18-19] (或者 [15, Lemma 4.9]) 假设按上节所述构造了 Sarkisov 连接的序列:

$$\begin{array}{ccccccc} X = X_0 & \cdots & X_1 & \cdots & X_2 & \cdots & X_i & \cdots \\ f_0 \downarrow & & f_1 \downarrow & & f_2 \downarrow & & f_i \downarrow & \\ S = S_0 & & S_1 & & S_2 & & S_i & \end{array}$$

那么

- (1) 在同构意义下, 只有有限多种森纤维空间  $f_i : X_i \rightarrow S_i$ ;
- (2) 对  $(G_W, H_W)$  双标量的 Sarkisov 纲领终结, 即存在整数  $N > 0$  使得  $g_N = 0$ 。

**证明.** (1) 第一条本质上来自弱对数典范模型的有限性 (定理 2.8)。如下构造  $\text{WDiv}_{\mathbb{R}}(W)$  的子空间  $V$ :

(1.1) 假设对某个  $k$  有  $h_k > 0$ 。由于  $H_W$  是数值有效且是大除子, 那么存在丰沛除子  $A_W$  和有效除子  $C_W$  使得  $H_W \sim_{\mathbb{R}} A_W + C_W$ 。此时取  $V$  为  $B_W, G_W, H_W, C_W$  的组成成分的素除子张成的仿射空间。此时对于  $i > k$ , 定义  $\Delta_i$  为

$$B_W + g_i G_W + h_i H_W \sim_{\mathbb{R}} h_k A_W + B_W + g_i G_W + (h_i - h_k) H_W + h_k C_W =: \Delta_i \in \mathcal{L}_{h_k A_W}(V)$$

(1.2) 假设对所有  $k$  都有  $h_k = 0$ , 那么  $h_i \equiv 0$  且  $g_i \equiv 1$ 。由于  $G_W$  是数值有效且是大除子, 那么存在丰沛除子  $A_W$  和有效除子  $C_W$  使得  $G_W \sim_{\mathbb{R}} A_W + C_W$ 。此时取  $V$  为  $B_W, C_W$  的组成成分的素除子张成的仿射空间。此时定义  $\Delta_i$  为

$$B_W + G_W \sim_{\mathbb{R}} A_W + B_W + C_W =: \Delta_i \in \mathcal{L}_{A_W}(V)$$

那么每一个  $X_i$  都是  $(W, \Delta_i)$  的弱对数典范模型。由弱对数典范模型的有限性, 在同构意义下, 存在有限多个  $\sigma_i : W \dashrightarrow X_i$ 。

这样只证明了  $X_i$  的有限性, 此时需要森纤维空间  $X_i \rightarrow S_i$  的有限性。接下来证明在构造的 Sarkisov 连接的序列中, 出现的  $X_i$  的森纤维空间在同构意义下只有有限多个。不妨设存在无穷子列  $\{i_k\}_{k=0}^{\infty}$  使得  $X_{i_k} \cong X_{i_0}$ 。为简化记号, 不妨设  $X_{i_0} = X_0 = X$  (注意, 做此替换后  $X_0$  可能并不是 Sarkisov 纲领的初始起点, 但为符号简便, 仍将其记为  $X$ )。记  $f_{i_k}$  是关于极端射线  $R_k \subset \overline{\text{NE}}(X_{i_k}) = \overline{\text{NE}}(X)$  的

森纤维空间压缩态射。那么有  $(K_X + B) \cdot R_{i_k} < 0$  且  $(K_X + B + g_{i_k}G + h_{i_k}H) \cdot R_k = 0$ , 并且  $H$  和  $G$  相对于  $S_{i_k}$  是丰沛的。分三种情况证明:

(1.1) 如果对某  $k$  有  $h_{i_k} = 1$ , 那么 Sarkisov 纲领终结, 原序列是有限序列, 断言显然成立。

(1.2) 假设  $h_{i_k} = 0$  对所有  $i_k$  成立, 那么  $g_{i_k} = 1$ 。因为  $G_{i_k}$  是大除子, 所以存在丰沛除子  $A$  和有效除子  $E$  使得  $G = A + E$ 。取充分小的  $\epsilon$  使得  $(X, D)$  具有 klt 奇点, 其中  $D = B + (1 - \epsilon)G + \frac{\epsilon}{2}E$ , 那么  $(K_X + D) \cdot R_k < 0$  且  $(K_X + D + \frac{\epsilon}{2}A) \cdot R_k < 0$  对所有  $k$  成立。由锥定理 2.1, 有

$$\overline{NE}(X) = \overline{NE}(X)_{K_X + D + \frac{\epsilon}{2}A_k \geq 0} + \sum_{\alpha \in \Lambda \text{ 有限集}} R_\alpha.$$

由于森纤维空间  $X = X_{i_k} \rightarrow S_{i_k}$  是关于极端射线  $R_\alpha$  的压缩态射, 这样的射线有限, 所以弱对数典范模型  $X = X_{i_0}$  在构造的 Sarkisov 连接的序列中出现的森纤维空间在同构意义下有限;

(1.3) 假设对某个  $k > 0$  有  $h_{i_k} > 0$ , 那么通过截短子列, 不妨设  $0 < h_{i_0} = h_0 < 1$  (注意, 做此替换后  $X_0$  并不是 Sarkisov 纲领的初始起点, 并且  $g_0 \neq 1$ , 但为符号简便, 仍将其记为  $X$ )。因为  $H$  是大除子, 所以存在丰沛除子  $A$  和有效除子  $E$  使得  $H = A + E$ 。取充分小的  $\epsilon$  使得  $(X, D)$  具有 klt 奇点, 其中  $D = B + (1 - \epsilon)H + \epsilon E$ 。那么  $(K_X + D) \cdot R_k < 0$  且  $(K_X + D + \epsilon A) \cdot R_k < 0$  对所有  $k$  成立。同样由锥定理 2.1, 有

$$\overline{NE}(X) = \overline{NE}(X)_{K_X + D + \epsilon A} \geq 0 + \sum_{\alpha \in \Lambda \text{ 有限集}} R_\alpha$$

同上, 由于森纤维空间  $X = X_{i_k} \rightarrow S_{i_k}$  是关于极端射线  $R_\alpha$  的压缩态射, 这样的射线有限, 所以弱对数典范模型  $X = X_{i_0}$  在构造的 Sarkisov 连接的序列中出现的森纤维空间在同构意义下有限;

(2) 若上述构造的 Sarkisov 连接的序列是无限的, 那么由 (1), 不妨设存在无穷子列  $\{i_k\}_{k=0}^\infty$  使得森纤维空间  $X_{i_k} \rightarrow S_{i_k}$  同构于  $X_{i_0} \rightarrow S_{i_0}$ 。为简化记号, 不妨设  $X_{i_0} = X_0 = X$  (同样的, 做此替换后  $X_0$  可能并不是 Sarkisov 纲领的初始起点, 并且可能有  $g_0 \neq 1, h_0 \neq 0$ , 但为符号简便, 仍将其记为  $X$ )。此时曲线  $C_{i_k} \subset X$  是相同的曲线, 由  $g_{i_k}$  和  $h_{i_k}$  的构造可以得到  $g_0 = g_{i_k}$  和  $h_0 = h_{i_k}$ 。由于序列  $h_i$  和  $g_i$  是单调的, 所以  $h_i = h_0$  和  $g_i = g_0$  是常值, 并且  $r_i = r_0, s_i = 0$  都是常值。



若序列中存在命题4.5中 (1) 构造的第三或第四型 Sarkisov 连接, 不妨设为  $X \dashrightarrow X_1$ , 那么由断言4.6的 (4), 下一个 Sarkisov 连接也是按 (1) 的构造, 继而之后所有连接都是如此。再考虑 Picard 数, 由于  $X \cong X_{i_1}$ , 显然之后都是第四型 Sarkisov 连接。由断言4.6的 (4), 对任意  $W$  上的除子  $E$ , 存在不等式

$$a(E; X, D(s_0 + \epsilon)) \leq a(E; X_1, D_1(\epsilon))$$

但是同样由断言4.6的 (4), 还存在  $W$  之上的除子  $F$ , 使得

$$a(F; X, D(s_0 + \epsilon)) < a(F; X_1, D_1(\epsilon))$$

于是对  $X = X_{i_0} \cong X_{i_1}$  有

$$a(F; X, D(\epsilon)) < a(F; X_{i_1}, D_{i_1}(\epsilon))$$

矛盾。

假设 Sarkisov 连接的序列全是由命题4.5中 (2) 构造的第一第二型 Sarkisov 连接。同样由 Picard 数可以得到, 所有 Sarkisov 连接都是第二型。类似的, 由断言4.6的 (5) 可以推出矛盾。

综上, 命题4.5构造的 Sarkisov 序列是有限的。

□

最后还要证明双标量 Sarkisov 纲领终结的森纤维空间  $X_N \rightarrow S_N$  与  $(X', B') \rightarrow S'$  同构。这一部分与下降法 Sarkisov 纲领的判别法定理3.5类似。

**命题 4.8.** (1)  $h_N = 1$ 。

(2)  $X_N \rightarrow S_N$  同构于  $X' \rightarrow S'$ 。

证明. 事实上此处  $X'$  上的除子  $h'H' = 1 \cdot H'$  代替了定理3.5中  $X'$  上的  $\mathbb{Q}$ -除子  $\frac{1}{\mu'}H'$ , 而  $h_N H_N$  对应定理3.5中的  $\frac{1}{\mu}H$ 。用同样的方法可以证明  $h_N = h' = 1$ 。

(2) 也可以用同样的方法证明: 取  $X_N$  上极丰沛除子  $L$ , 且  $L'$  是在  $X'$  上的严格双有理变换。那么  $L'$  是  $f'$ -丰沛的, 所以存在  $0 < d \ll 1$  使得:

- $K_{X_N} + B_N + H_N + dL$  是丰沛除子;
- $K_{X'} + B' + H' + dL'$  是丰沛除子;
- $(W, B_W + H_W + dD_W)$  具有 klt 奇点 (由双标量 Sarkisov 纲领的初始设定断言4.3可以得到)。

因此  $X_N$  和  $X'$  都是  $(W, B_W + H_W + dD_W)$  的对数典范模型, 由对数典范模型的唯一性,  $X_N \cong X'$ 。更进一步,  $f_N$  和  $f'$  压缩相同的曲线数值等价类, 所以两个森纤维空间同构。  $\square$

综上所述, 由引理4.4和命题4.8, 可以得到定理1.2。

## 第5章 有限模型法

这一章主要参考 [10]。通过有限模型来构造 Sarkisov 分解和前两种方法不同，这种方法并不通过运用双射线 MMP 来构造 Sarkisov 连接。下面简要介绍这种方法的思路：

令  $W$  为两个 MMP-相关的森纤维空间  $X \rightarrow S$  和  $Y \rightarrow T$  公共奇点解消。取  $\mathrm{WDiv}_{\mathbb{R}}(W)$  的有限维仿射子空间  $V$  和丰沛  $\mathbb{Q}$ -除子  $A$ ，那么  $\{\mathcal{A}_i = \mathcal{A}_{A, f_i}\}$  是  $\mathcal{E}_A(V)$  的一个划分，且每个子集  $\mathcal{A}_i$  对应  $W$  的一个丰沛模型，相邻的子集对应的丰沛模型之间有压缩态射 (见定理5.2)。由引理5.7，可以取到一个特殊的子空间  $V$ ，使得

(1)  $V$  是 2 维的有理仿射空间 (可以定义在有理数上)；

(2)  $S, T$  是  $W$  关于  $D_S, D_T \in \mathcal{L}_A(V)$  的丰沛模型；

(3)  $D_S$  和  $D_T$  是  $\mathcal{L}_A(V)$  边界  $\partial\mathcal{L}_A(V)$  上的两个点，并且将边界分为两个部分。在其中一个部分上，有有限多个线段连接  $D_S$  和  $D_T$ ，并且  $D_i$  是线段的端点，此时每个端点  $D_i$  对应一个 Sarkisov 连接。见 6.2.3 节的示意图，其中  $D_S = D_0, D_T = D_1$ 。

那么双有理映射  $X \dashrightarrow Y$  是 (3) 中 Sarkisov 连接的复合。这就是有限模型法构造的 Sarkisov 分解。

注. 有限模型法的 Sarkisov 纲领严格来说并不是一个纲领 (program)，和前两种方法不同，不是归纳地构造分解中的森纤维空间  $X_i \rightarrow S_i$ ，而是先找出  $W$  关于  $D \in \mathcal{L}_A(V)$  的丰沛模型，然后选择其中的一些作为分解中的森纤维空间。

### 5.1 定义和引理

首先给出  $\mathcal{E}_A(V)$  关于丰沛模型的划分定理：

**定理 5.1.** [4, Corollary 1.1.5] 令  $\pi : X \rightarrow U$  是正规拟射影代数簇间的射影态射，并且  $V \subset \mathrm{WDiv}_{\mathbb{R}}(X)$  是有限维有理子空间，假设存在一个除子  $\Delta_0 \in V$  使得  $(X, \Delta_0)$  具有 *klt* 奇点。令  $A$  是相对于  $U$  的一般的丰沛  $\mathbb{Q}$ -除子，并且它和任何  $V$  中的除子都没有共同的素除子作为组成成分。那么

(1) 存在有限多个相对于  $U$  的双有理映射  $f_i : X \dashrightarrow X_i$  使得:

$$\mathcal{E}_{A,\pi}(V) = \bigcup_i \mathcal{W}_i$$

其中  $\mathcal{W}_i = \mathcal{W}_{A,f_i}(V)$  是定义在有理数上的多面体 (*rational polytope*)。且如果  $f : X \dashrightarrow Y$  是关于对某个  $D \in \mathcal{E}_{A,\pi}(V)$  相对于  $U$  的对数终端模型, 那么对某个  $i$ , 有  $f = f_i$ 。即  $X$  关于  $\mathcal{E}_{A,\pi}(V)$  的对数终端模型一定是  $f_i$  中的一个。

(2) 存在有限多个相对于  $U$  的有理映射  $g_j : X \dashrightarrow Z_j$  使得:

$$\mathcal{E}_{A,\pi}(V) = \coprod_j \mathcal{A}_j$$

其中  $\{\mathcal{A}_j = \mathcal{A}_{A,\pi,g_j}\}$  是  $\mathcal{E}_A(V)$  的划分。令  $C_j$  是  $\mathcal{A}_j$  在  $\mathcal{L}_{A,\pi}(V)$  中的闭包;

(3) 对每个  $f_i$  都存在某个  $g_j$  和态射  $h_{ij} : Y_i \rightarrow Z_j$  使得  $\mathcal{W}_i \subset C_j$ 。

如果模型对应的多面体相邻, 那么模型之间有态射:

**定理 5.2.** [10, Theorem 3.3] 令  $W$  是光滑射影代数簇, 并且  $V$  是  $\mathrm{WDiv}_{\mathbb{R}}(W)$  的有限维有理子空间。取定一个有效丰沛  $\mathbb{Q}$ -除子  $A$ , 假设  $\mathcal{L}_A(V)$  中有元素  $D_0$  使得  $K_W + D_0$  具有 *klt* 奇点并且是大除子。那么存在有限多个有理压缩映射  $f_i : W \dashrightarrow X_i$  使得

(1)  $\{\mathcal{A}_i = \mathcal{A}_{A,f_i}\}$  是  $\mathcal{E}_A(V)$  的划分。 $\mathcal{A}_i$  是有限多个有理多面体的内点的并。令  $C_i$  是  $\mathcal{A}_i$  在  $\mathcal{L}_A(V)$  中的闭包。如果  $f_i$  双有理映射, 那么  $C_i$  是有理多面体;

(2) 如果  $i, j$  两个指标满足  $\mathcal{A}_j \cap C_i \neq \emptyset$ , 那么存在一个压缩态射  $f_{ij} : X_i \rightarrow X_j$  使得  $f_j = f_{ij} \circ f_i$ ;

(3) 进一步假设  $V$  张成  $W$  的 *Neron-Severi* 群, 即

$$V \rightarrow \mathrm{NS}(W)$$

是满射。如果某个  $C_i$  的一个连通分支  $C$  与  $\mathcal{L}_A(V)$  的内点有交, 那么下列等价:

(3).1  $C$  张成  $V$ ;

(3).2 对除子  $D \in \mathcal{A}_i \cap C$ , 那么  $f_i$  是关于  $D$  的对数终端模型;

(3).3  $f_i$  是双有理映射, 且  $X_i$  是  $\mathbb{Q}$ -分解的。

(4) 假设  $V$  张成  $W$  的 *Neron-Severi* 群。取两个指标  $i, j$ , 使得  $C_i$  张成  $V$  并且  $D$  是  $\mathcal{A}_j \cap C_i$  的一般点, 并且也是  $\mathcal{L}_A(V)$  的内点, 那么  $C_i$  在  $D$  的一个邻域局部同构于  $\overline{\mathrm{NE}}(X_i/X_j)^* \times \mathbb{R}^k$ , 其中  $k \geq 0$ 。并且  $\rho(X_i/X_j) = \dim C_i - \dim C_j \cap C_i$ 。

对于上述定理后两条的子空间  $V$ ，需要张成  $\text{NS}(W)$ ，所以有  $\dim V \geq \rho(W)$ 。但是通过下列引理，可以取其 2 维子空间，仍然满足结论；

**引理 5.3.** [10, Corollary 3.4] 假设  $V$  张成  $W$  的 Neron-Severi 群。令  $G(r, V)$  为  $V$  的  $r$  维实子空间的 Grassmannian 空间，那么存在一个 Zariski 稠密的开子集  $U \subset G(r, V)$ ，使得任何定义在有理数上的子空间  $[V'] \in U$ ，都满足定理 5.2 的 (1)-(4)。

证明. 令  $U \subset G(r, V)$  是不包含任何多面体  $C_i \subset \mathcal{L}_A(V)$  的面 (face) 的  $r$ -维子空间  $V' \subset V$  的集合。特别的， $\mathcal{L}_A(V')$  的内部包含在  $\mathcal{L}_A(V)$  的内部。显然任何定义在有理数上的子空间  $[V'] \in U$  都满足定理 5.2 的 (1)-(4)。□

注. 应用上述引理，本章从此开始，总假设  $V$  是满足定理 5.2(1)-(4) 的定义在有理数上的 2-维空间。此时如果多面体  $C$  是 2 维的，那么就张成 Neron-Severi 群，进而定理 5.2(3).1 的条件就满足。

下面的引理用定理 5.2(2) 的态射构造对应的除子压缩、小压缩或森纤维空间压缩。

**引理 5.4.** [10, Lemma 3.5] 令  $f : W \dashrightarrow X$  和  $g : W \dashrightarrow Y$  是两个有理压缩使得  $C_{A,f}$  是 2 维空间 (张成 2 维线性空间) 且  $\mathcal{O} = C_{A,f} \cap C_{A,g}$  是 1 维空间。假设  $\rho(X) \geq \rho(Y)$  且  $\mathcal{O}$  不包含在  $\mathcal{L}_A(V)$ 。令  $D$  是  $\mathcal{O}$  的内点且  $B = f_* D$ 。那么存在一个有理压缩态射  $\pi : X \dashrightarrow Y$  且  $g = \pi \circ f$  满足下列情况之一：

- (1)  $\rho(X) = \rho(Y) + 1$  且  $\pi$  是  $(K_X + B)$ -平凡映射。此时下列情况之一成立：
  - (1).1  $\pi$  是双有理态射，并且  $\mathcal{O}$  不包含在  $\mathcal{E}_A(V)$  的边界里。此时有两种情况：
    - (1).1.1  $\pi$  是除子压缩，并且  $\mathcal{O} \neq C_{A,g}$ ；
    - (1).1.2  $\pi$  是小压缩，并且  $\mathcal{O} = C_{A,g}$ 。
  - (1).2  $\pi$  是森纤维空间压缩，并且  $\mathcal{O} = C_{A,g}$  包含在  $\mathcal{E}_A(V)$  的边界里。
- (2)  $\rho(X) = \rho(Y)$ 。此时  $\pi$  是  $(K_X + B)$ -平转，并且  $\mathcal{O} \neq C_{A,g}$  不包含在  $\mathcal{E}_A(V)$  的边界里。

$$\begin{array}{ccc}
 X & \xrightarrow{\pi} & Y \\
 \searrow p & & \swarrow q \\
 & S &
 \end{array}$$

注. 引理5.4.(1) 中, 态射  $\pi$  由定理5.2.(2) 给出. 引理5.4.(1).1 对应定理5.2.(3) 成立的情况, 而引理5.4.(1).2 则对应定理5.2.(3) 不成立的情况。

引理5.4.(2) 中两个态射  $p, q$  由定理5.2.(2) 给出, 并且都是引理5.4.(1).1.2 的小双有理态射。这两个小双有理态射构成了一个平转。

最后给出引理来保证后续构造的 Sarkisov 连接中的每一个代数簇, 都是  $(W, B_W)$ -MMP 的结果。

**引理 5.5.** [10, Lemma 3.6] 令  $f : W \dashrightarrow X$  是  $\mathbb{Q}$ -分解代数簇的双有理压缩映射, 假设  $(W, D)$  和  $(W, D + A)$  都具有 *klt* 奇点。如果  $f$  是关于  $(W, D + A)$  的丰沛模型, 且  $A$  是丰沛的, 那么  $f$  是  $(K_W + D)$ -MMP 的过程。

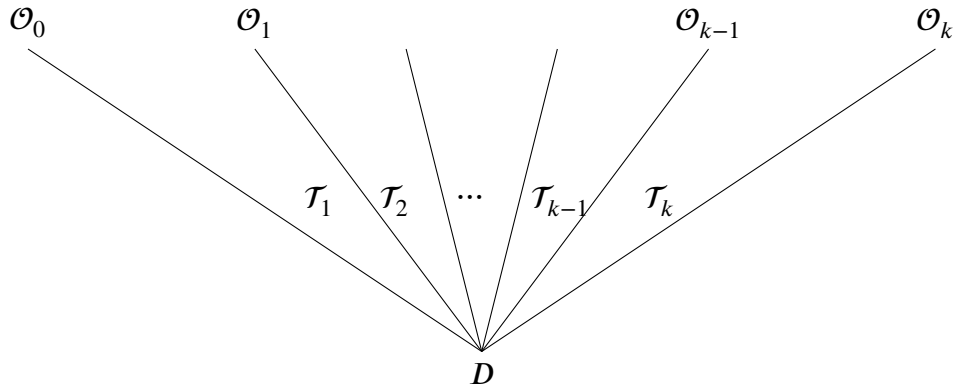
## 5.2 有限模型法构造 Sarkisov 连接

这一节构造 Sarkisov 连接。对于某些端点  $D \in \mathcal{E}_A(V)$ , 如果  $D = A + B$  在  $\mathcal{E}_A(V)$  的边界上, 并且在  $\mathcal{L}_A(V)$  的内部, 那么可以构造对应的 Sarkisov 连接

$$\begin{array}{ccccccc}
 & & Z = Z^0 & \xrightarrow{\text{关于 } K+D \text{ 的平转}} & Z^1 & \cdots & Z^k = Z_1 \\
 & \swarrow p & & & \swarrow & & \searrow q \\
 X & & & & Y^1 & & X_1
 \end{array}$$

其中  $p, q$  可能是同构, 且  $X, X_1, Z, Z_1, Z^i, Y^i$  都是  $W$  关于  $D$  的某种模型。

令  $\tau_1, \dots, \tau_k$  是包含  $D$  的多面体  $C_i$  中 2 维的那些。通过重新排序, 可以假设  $\mathcal{O}_0$  是  $\tau_1$  和  $\mathcal{E}_A(V)$  的边界的交 (即  $\tau_1 \cap \partial \mathcal{E}_A(V) = \mathcal{O}_0$ ), 类似的  $\mathcal{O}_k$  是  $\tau_k$  和  $\mathcal{E}_A(V)$  的边界的交 (即  $\tau_k \cap \partial \mathcal{E}_A(V) = \mathcal{O}_k$ ), 并且  $\mathcal{O}_i = \tau_i \cap \tau_{i+1}$  是 1 维的。如下图所示:



令  $f_i : W \dashrightarrow X_i$  是  $\tau_i$  对应的双有理映射, 且  $g_i : W \dashrightarrow S_i$  是  $\mathcal{O}_i$  对应的有理映射。

记

$$f = f_1 : W \dashrightarrow X, g = f_k : W \dashrightarrow Y$$

以及

$$\phi : X \rightarrow S = S_0, \psi : Y \rightarrow T = S_k$$

和  $X' = X_2, Y' = X_{k-1}$ 。令  $W \dashrightarrow R$  为关于  $D$  的丰沛模型。延续这些记号，构造 Sarkisov 连接：

**定理 5.6.** [10, Theorem 3.7] 取边界  $B_W$  使得  $(W, B_W)$  是对数光滑的对数终端奇点的代数簇对，且  $D - B_W$  是丰沛除子。那么  $\phi$  和  $\psi$  是森纤维空间，并且是  $(K_W + B_W)$ -MMP 的输出。假设  $D$  包含在 2 个以上的多面体中，那么  $\phi$  和  $\psi$  由 Sarkisov 连接相连，并且每个  $f_i : W \dashrightarrow X_i$  是  $(K_W + B_W)$ -MMP 的过程。

证明. 假设  $k \geq 3$ ，那么有

$$\begin{array}{ccc} X' & \dashrightarrow & Y' \\ p \downarrow & & \downarrow q \\ X & & Y \\ \phi \downarrow & & \downarrow \psi \\ S & & T \\ s \swarrow & & \searrow t \\ & R & \end{array}$$

注意到  $\rho(X_i/R) \leq 2$  且  $\rho(X/S) = \rho(Y/T) = 1$ ，那么下列两种情况之一成立：

- (1)  $s$  是一致态射 (identity) 而  $p$  是除子压缩 (除子解压)；
- (2)  $s$  是压缩态射而  $p$  是平转。

同样的情况对  $q$  和  $t$  成立。而映射  $X' \dashrightarrow Y'$  是  $(K + D)$ -平转。这样给出了四种 Sarkisov 连接。  $\square$

### 5.3 构造 Sarkisov 分解

首先需要如下特别的解消  $W$  和仿射子空间  $V \subset \text{WDiv}(W)$ ：

**引理 5.7.** [10, Lemma 4.1] 令  $\phi : (X, B_X) \rightarrow S$  和  $\psi : (Y, B_Y) \rightarrow T$  是两个具有  $klt$  奇点的 MMP-相关森纤维空间。那么存在光滑射影代数簇  $W$  和两个双有理态射  $f : W \rightarrow X$  和  $g : W \rightarrow Y$ ，并且有边界除子  $(B_W)$  是  $(W, B_W)$  具有  $klt$  奇点。同时还存在  $W$  上的丰沛  $\mathbb{Q}$ -除子  $A$  和 2 维有理仿射子空间  $V \subset \text{WDiv}_{\mathbb{R}}(W)$  使得：

- (1) 如果  $D \in \mathcal{L}_A(V)$ , 那么  $D - B_W$  是丰沛除子;
- (2)  $\mathcal{A}_{A, \phi \circ f}$  且  $\mathcal{A}_{A, \psi \circ g}$  不包含在  $\mathcal{L}_A(V)$  的边界里;
- (3)  $V$  满足定理 5.2.(1-4);
- (4)  $C_{A, f}$  和  $C_{A, g}$  是 2 维的;
- (5)  $C_{A, \phi \circ f}$  和  $C_{A, \psi \circ g}$  是 1 维的。

证明. 由 MMP-相关的假设, 存在 klt 奇点的  $\mathbb{Q}$ -分解代数簇对  $(W, B_W)$  使得  $f : W \dashrightarrow X$  和  $g : W \dashrightarrow Y$  是  $(K_W + B_W)$ -MMP 的输出。令  $p' : W' \rightarrow W$  是  $f$  和  $g$  的解消, 记

$$K_{W'} + B_{W'} = p'^*(K_W + B_W) + E'$$

其中  $p'_* B_{W'} = B_W$ , 且  $E' \geq 0$  和  $B_{W'} \geq 0$  没有公共组成成分,  $E'$  是例外除子。取除子  $-F$  满足:

- 相对于  $W$  丰沛的;
- $\text{Supp } F = \text{Exc } p'$ ;
- $K_{W'} + B_{W'} + F$  具有 klt 奇点。

由于  $p'$  是  $(K_{W'} + B_{W'} + F)$ -负性的,  $(K_W + B_W)$  具有 klt 奇点,  $W$  是  $\mathbb{Q}$ -分解的, 所以相对于  $W$  的  $(K_{W'} + B_{W'} + F)$ -MMP 终结于  $(W, B_W)$ 。用  $(W', B_{W'} + F)$  替换  $(W, B_W)$ , 可以假设  $(W, B_W)$  是对数光滑并且  $f, g$  是双有理态射。

取  $W$  上一般的丰沛  $\mathbb{Q}$ -除子  $A, H_1, H_2, \dots, H_k$  on  $W$  使得  $H_1, \dots, H_k$  生成  $W$  的 Neron-Severi 群。记  $H = A + H_1 + \dots + H_k$ 。取  $S$  和  $T$  上充分丰沛的除子  $A_S$  和  $A_T$  使得

$$-(K_X + B_X) + \phi^* A_S$$

和

$$-(K_Y + B_Y) + \psi^* A_T$$

都是丰沛除子。取有理数  $0 < \delta < 1$  使得

$$-(K_X + B_X + \delta f_* H) + \phi^* A_S$$

和

$$-(K_Y + B_Y + \delta g_* H) + \psi^* A_T$$



都是丰沛除子, 并且  $f$  和  $g$  都是  $(K_W + B_W + \delta H)$ -负性的。通过用  $\delta H$  替换  $H$  可以假设  $\delta = 1$ 。接着取  $\mathbb{Q}$ -除子  $B_0 \leq B_W$  使得  $A + (B_0 - B_W), -(K_X + f_* B_0 + f_* H) + \phi^* A_S$  和  $-(K_Y + g_* B_0 + g_* H) + \psi^* A_T$  都是丰沛除子, 并且  $f$  和  $g$  都是  $(K_W + B_0 + \delta H)$ -负性的。

取一般的丰沛  $\mathbb{Q}$ -除子  $F_1 \geq 0$  和  $G_1 \geq 0$  使得

$$F_1 \sim_{\mathbb{Q}} -(K_X + f_* B_0 + f_* H) + \phi^* A_S$$

且

$$G_1 \sim_{\mathbb{Q}} -(K_Y + g_* B_0 + g_* H) + \psi^* A_T$$

并且

$$K_W + B_0 + H + F + G$$

具有 klt 奇点, 其中  $F = f^* F_1, G = g^* G_1$ 。考虑由  $H_1, \dots, H_k, F, G$  张成的线性子空间, 再被  $B_0$  平移, 得到  $\text{WDiv}_{\mathbb{R}}(W)$  的仿射子空间  $V_0$  (即  $V_0 = B_0 + \langle H_1, \dots, H_k, F, G \rangle$ )。假设  $D = A + B \in \mathcal{L}_A(V_0)$ , 那么

$$D - B_W = (A + B_0 - B_W) + (B - B_0)$$

是丰沛除子 (由于  $B - B_0$  是数值有效的, 由  $V_0$  的定义可以得到)。注意到

$$B_0 + F + H \in \mathcal{A}_{A, \phi \circ f}(V_0), B_0 + G + H \in \mathcal{A}_{A, \psi \circ g}(V_0)$$

且  $f$  和  $g$  分别是关于  $K_W + B_0 + F + H$  和  $K_W + B_0 + G + H$  的弱对数典范模型。因此由定理5.2 推出  $V_0$  满足定理5.2.(1)-(4)。

由于  $H_1, \dots, H_k$  生成  $W$  的 Neron-Severi 群, 可以找到常数  $h_1, \dots, h_k$  使得  $G \equiv \sum_{i=1}^k h_i H_i$ 。那么存在  $0 < \delta \ll 1$  使得

$$B_0 + F + \delta G + H - \delta \left( \sum_{i=1}^k h_i H_i \right) \in \mathcal{L}_A(V_0)$$

且

$$B_0 + F + \delta G + H - \delta \left( \sum_{i=1}^k h_i H_i \right) \equiv B_0 + F + H$$

因此,  $\mathcal{A}_{A, \phi \circ f}$  不含在  $\text{of } \mathcal{L}_A(V_0)$  的边界中。类似的,  $\mathcal{A}_{A, \psi \circ g}$  不包含在  $\mathcal{L}_A(V_0)$  的边界中。特别的, 由于  $\rho(X/S) = \rho(Y/T) = 1$ , 所以  $\mathcal{A}_{A, \phi \circ f}$  和  $\mathcal{A}_{A, \psi \circ g}$  张成  $V_0$  中的仿射平面。

考虑  $F + H - A$  和  $G + H - A$  张成的空间, 再被  $B_0$  平移, 得到仿射空间  $V_1$ 。由引理5.3, 将  $V_1$  扰动得到定义在有理数上的仿射空间  $V$ , 这个空间即满足此引理。□

最后证明 Sarkisov 分解的存在性:

证明. 令  $(W, B_W), A$  和  $V$  满足引理5.7。取  $\mathcal{L}_A(V)$  中的内点  $D_0 \in \mathcal{A}_{A, \phi \circ f}$  和  $D_1 \in C_{A, g}$ 。由于  $V$  是 2 维的, 去掉  $D_0$  和  $D_1$  将把  $\mathcal{E}_A(V)$  的边界分成两个部分。其中一部分对应的除子都不是大除子, 并且包含在  $\mathcal{L}_A(V)$  的内部。考虑这一部分从  $D_0$  到  $D_1$  的路径, 存在有限多个点  $D_i, 2 \leq i \leq N$  包含在两个以上的多面体  $C_{A, f_k}(V)$  中。由引理 5.6, 每一个点  $D_i$  给出一个 Sarkisov 连接。那么双有理映射  $X \dashrightarrow Y$  分解成这些连接的复合。□

## 第6章 三种方法的总结

### 6.1 三种方法的比较

先比较前两种方法的异同点。相同点是：

(1) 前两种方法都归纳地构造 Sarkisov 连接  $X_i \dashrightarrow X_{i+1}$ ，并且每个连接都是用双射线 MMP 来构造，这样的归纳过程是两个纲领 (program)。这两个纲领的终结判定本质上是一样的 (Noether-Fano-Iskovskikh 判别法，定理3.5和4.8)，即  $(X_N, B_N + H_N)$  和  $(X', B' + H')$  是相同的弱对数典范模型，而  $S, S_N$  是相同的丰沛模型 (在下降法中应该是  $(X', B' + \frac{1}{\mu'} H')$ )。

(2) 在构造每个 Sarkisov 连接时，都分为两种情况，对应 Noether-Fano-Iskovskikh 判别法的两个条件。当  $K_{X_i} + B_i + g_i G_i + h_i H_i + D_i(s_i + \epsilon)$  或  $K_{X_i} + \frac{1}{\mu_i} H_i$  不是数值有效时，即不是极小模型时，自然地直接在  $X$  上运行某种 MMP；另外一种情况则关于  $X_i$  和  $X'$  的奇点性质 (关于特定的边界除子和对数典范除子)，都需要先改善  $X_i$  的奇点性质，使其向  $X'$  接近，具体来说就是构造特定的除子解压。不同点是：

(1) 下降法只将  $X'$  看作某个弱对数典范模型，然后将  $X$  用 MMP 改造成对应的模型。下降法用 Sarkisov 次数来描述两者之间的距离。双标量法则将  $X$  和  $X'$  都看作  $W$  的模型 (通过构造  $G$  和  $H'$ )，用  $(G_W, H_W)$  和它们的系数  $g_i, h_i$  来描述两个模型间的距离。

(2) 第一种方法在相对较大的范围内改进  $X$ ，具体来说，终端奇点的三维代数簇的集合，或者高维情况下构造集合  $C_\theta$ ，下降法的终结性依赖于这个集合中的某些 DCC 或有限性。双标量法则固定一个屋顶，即公共对数解消  $W$ ，这个纲领的终结性依赖于  $W$  的模型的有限性。因此，下降法需要更多的限制条件，例如边界除子是  $\mathbb{Q}$ -除子等，才能保证纲领终结；而双标量法则更广泛地可行和成立。

第三种方法和第一种方法有本质的不同，有限模型法并不是一个纲领，即并不是归纳地构造 Sarkisov 连接。相反，这种方法首先找出公共解消  $W$  上的丰沛模型，然后找到一条路线，将它们连起来。此时代数簇之间的态射，并不是根据 MMP 将一个代数簇改进成另一个代数簇的态射，而是表示不同代数簇作为不同

模型的关系。下降法构造 Sarkisov 连接是通过双射线 MMP，其中出现的每一个代数簇，在有限模型法中被视为一组特殊的互相相邻的模型。

## 6.2 例子

这一节给出一些具体的 MMP-相关的森纤维空间的 Sarkisov 分解的例子。

### 6.2.1 下降法

记  $X = \mathbb{P}^2$  为射影平面，坐标记为  $[x_0 : x_1 : x_2]$ ，记  $X' = \mathbb{P}^2$  为另一个射影平面，坐标为  $[y_0 : y_1 : y_2]$ 。记  $B = \{x_0 = 0\}$  和  $B' = \{y_0 = 0\}$ 。取双有理映射  $\Phi : X \dashrightarrow X'$ ，按如下定义：

$$\Phi : [x_0 : x_1 : x_2] \dashrightarrow [x_0^2 : x_0x_1 : x_1^2 + x_0x_2]$$

那么存在一个公共解消  $\sigma : W \rightarrow X$  和  $\sigma' : W \rightarrow X'$ ，两个态射都是三个对点的胀开的复合。三个胀开如下所示：

(1)  $\pi_1 : W_1 \rightarrow X$  是对点  $P_0 \in B$  的胀开，点  $P_0$  是双有理映射  $\Phi$  不定义的点。用相同的符号  $B$  表示它在  $W_1$  上的严格双有理变换。将  $\pi_1$  的例外除子记为  $E_1$ 。此时  $\Phi$  提升到双有理映射  $W_1 \dashrightarrow X'$ ，但仍然不是态射。

(2)  $\pi_2 : W_2 \rightarrow W_1$  是对点  $P_1 = E_1 \cap B$  的胀开，点  $P_1$  是双有理映射  $W_1 \dashrightarrow X'$  的不定义点。将  $\pi_2$  的例外除子记为  $E_2$ ，仍然用同样的符号  $B$  和  $E_1$  表示它们在  $W_2$  上的严格双有理变换。此时  $\Phi$  提升到双有理映射  $W_2 \dashrightarrow X'$ ，但仍然不是态射。

(3)  $\pi_3 : W = W_3 \rightarrow W_2$  是对点  $P_2 \in E_2 \setminus (B \cup E_1)$  的胀开。将  $\pi_3$  的例外除子记为  $E_3$ ，仍然用同样的符号  $B, E_1, E_2$  表示它们在  $W_3$  上的严格双有理变换。此时  $\Phi$  提升到双有理映射  $W_3 \rightarrow X'$  是一个态射。

那么  $\sigma = \pi_3 \circ \pi_2 \circ \pi_1$  和  $W = W_3$  是  $\Phi$  的公共解消。对称的， $\sigma' : W \rightarrow X'$  是三个压缩曲线的态射的复合  $W = W_3' \xrightarrow{\pi_3'} W_2' \xrightarrow{\pi_2'} W_1' \xrightarrow{\pi_1'} X'$ 。双有理态射  $\pi_3', \pi_2', \pi_1'$  依次压缩曲线  $B, E_2, E_1$ 。

注. 显然双有理映射  $\Phi$  有逆映射

$$\Phi^{-1} : [y_0 : y_1 : y_2] \dashrightarrow [y_0^2 : y_0y_1 : y_1^2 - y_0y_2]$$

与  $\Phi$  只差一个符号。于是  $\sigma'$  是解消  $\Phi^{-1}$  的三个胀开的复合，例外曲线依次是  $E_1, E_2, B$ 。可以看到， $B' \subset X'$  是例外除子  $E_3 \subset W$  在  $X'$  上的严格双有理变换。

在  $W$  上, 如果用相同的符号  $B'$  记它在  $W$  上的严格双有理变换, 那么除子  $E_3$  和  $B$  是地位相等的。

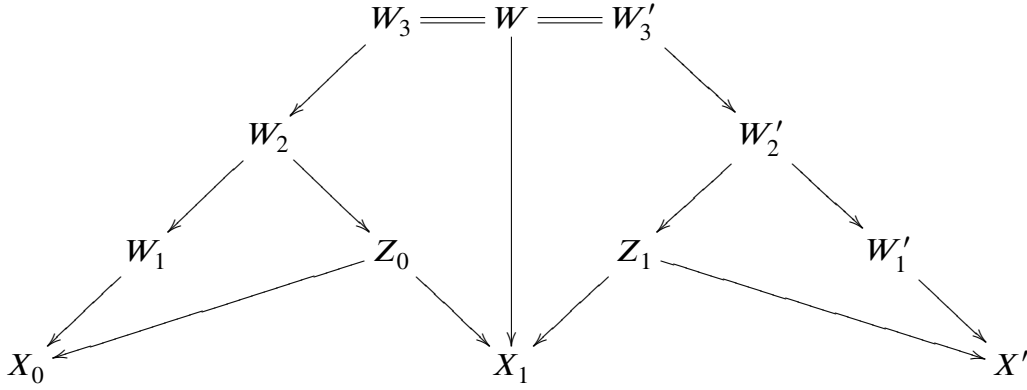
下面给出一些代数簇的符号:

- 令  $W_2 \rightarrow Z_0$  是  $W_2$  压缩曲线  $E_1$  的态射, 且  $Z_0 \rightarrow X_1$  是压缩曲线  $B$  的除子压缩, 那么  $Z_0 \rightarrow X_0$  是  $X$  上解压  $E_2$  的除子解压;

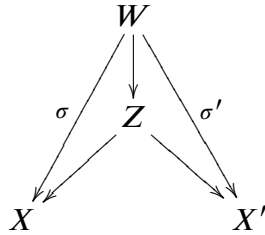
- 令  $W'_2 \rightarrow Z_1$  是  $W'_2$  上压缩  $E_1$  的态射, 那么  $Z_1 \rightarrow X_1$  是  $X_1$  上解压除子  $E_3$  的除子解压, 并且  $Z_1 \rightarrow X'$  是压缩  $E_2$  的除子压缩;

- 令  $W \rightarrow Z$  是  $W$  上压缩  $E_1$  和  $E_2$  的两个压缩曲线态射的复合, 那么  $Z \rightarrow X$  是解压  $E_3$  的除子解压, 而  $Z \rightarrow X'$  是解压  $B$  的除子解压

对应的映射的交换图表:



和



考虑代数簇对  $(X, bB)$  和  $(X', b'B')$ , 因为是对数光滑的, 所以显然是具有 klt 奇点的。取函数  $\theta$  使得:

- $\theta(B) = b$  且  $\theta(B') = b'$ ;
- $\theta(E_1) = \theta(E_2) = \epsilon$ , 其中  $b, b' < \epsilon < 1$ .

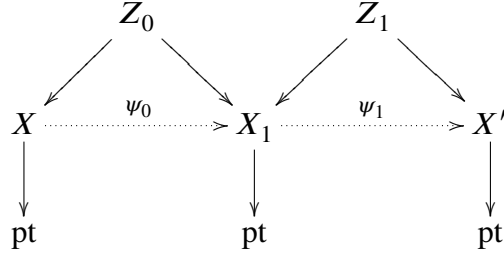
那么有分歧公式:

$$\begin{aligned}
 & K_W + B_W \\
 = & \sigma^*(K_X + bB) + (3 - 2b + b')E_3 + (1 - b + \epsilon)E_1 + (2 - 2b + \epsilon)E_2 \\
 = & \sigma'^*(K_{X'} + b'B') + (3 - 2b' + b)B + (1 - b' + \epsilon)E_1 + (2 - 2b' + \epsilon)E_2
 \end{aligned}$$

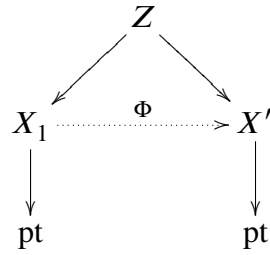
取  $H' = |\mathcal{O}_{X'}(1)|$  为  $X'$  上极丰沛的完全线性系, 那么  $H \in |\mathcal{O}_X(2)|$ 。

不同的  $\theta$  和  $\epsilon$  的选取给出不同的分解:

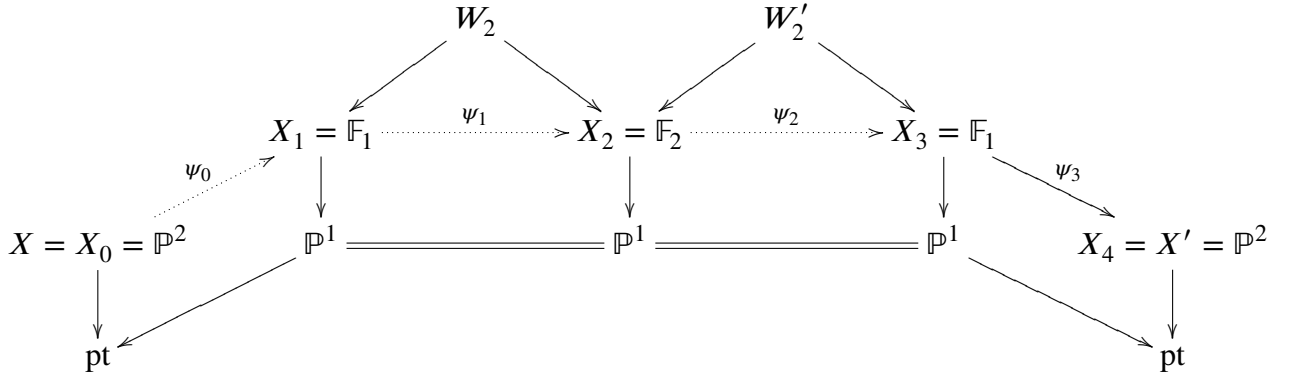
(1) 如果  $2b + 2b' \geq 3\epsilon > 0$ , 那么  $\Phi$  是两个第二型 Sarkisov 连接  $\psi_0, \psi_1$  的复合:



(2) 如果  $2b + 2b' < 3\epsilon$ , 那么  $\Phi$  是一个第二型 Sarkisov 连接的复合:



(3) 如果  $\epsilon = b = b' = 0$ , 那么  $\Phi$  是四个 Sarkisov 连接  $\psi_i$  的复合:



## 6.2.2 双标量法

沿用6.2.1节的记号, 令  $B_W = \frac{1}{2}(B + E_1 + E_3)$  并考虑代数簇对  $(X, \frac{1}{2}B)$  和  $(X', \frac{1}{2}B')$ 。那么有  $G = G_0 \sim_{\mathbb{Q}} \frac{5}{2}B$  和  $H' \sim_{\mathbb{Q}} \frac{5}{2}B'$ 。对  $G$  和  $H'$  运行双标量 Sarkisov 纲领:

(1) 第一个连接:  $r_0 = 2$  且  $s_0 = \frac{1}{5}$ 。于是  $X_1$  是  $W$  关于  $(W, B_W + \frac{3}{5}G_W + \frac{1}{5}H_W)$  的弱对数典范模型;

(2) 第二个连接:  $r_1 = 1$  且  $s_1 = \frac{2}{5}$ 。于是  $X_2 = X'$  是  $W$  关于  $(W, B_W + \frac{1}{5}G_W + \frac{3}{5}H_W)$  的弱对数典范模型。

注. 严格按照命题4.5和引理4.7来说,  $N = 3$ , 且还有一个恒同的连接  $X_2 = X_3$ , 不过这里我们省去它。

注. 这给出了上一小节6.2.1 中情况 (1) 相同的分解。

### 6.2.3 有限模型法

令  $P, Q$  是射影平面  $\mathbb{P}^2$  上两个不同的点, 且  $L$  是经过  $P$  和  $Q$  的射影直线。令  $p : X \rightarrow \mathbb{P}^2$  是在  $P$  处的胀开, 并且记  $E_1$  是例外除子。令  $q : Y \rightarrow \mathbb{P}^2$  是在  $Q$  处的胀开, 并且记  $E_2$  是例外除子。令  $W \rightarrow \mathbb{P}^2$  是在  $P$  和  $Q$  两点的胀开。那么有压缩态射  $f : W \rightarrow X$  和  $g : W \rightarrow Y$ 。用相同的记号  $L, E_1$  和  $E_2$  表示它们在  $W$  上的严格双有理变换。那么  $W$  上有

$$K_W \sim -3L - 2E_1 - 2E_2$$

和相交数关系:

	$L$	$E_1$	$E_2$
$L$	-1	1	1
$E_1$	1	-1	0
$E_2$	1	0	-1

令  $h : W \rightarrow Z$  是压缩曲线  $L$  的压缩态射, 那么  $Z \cong \mathbb{P}^1 \times \mathbb{P}^1 = \mathbb{F}_0$ 。注意到  $X \cong \mathbb{F}_1$ , 那么  $\phi : X \rightarrow S \cong \mathbb{P}^1$  是森纤维空间。类似的, 还有一个森纤维空间  $\psi : Y \rightarrow T \cong \mathbb{P}^1$ 。用交换图表表示是:

$$\begin{array}{ccccc}
 S \cong \mathbb{P}^1 & \xleftarrow{\phi} & X \cong \mathbb{F}_1 & \xrightarrow{p} & \mathbb{P}^2 \\
 & & \uparrow f & & \uparrow q \\
 & & W & \xrightarrow{g} & Y \cong \mathbb{F}_1 \\
 & \swarrow h & & & \downarrow \psi \\
 Z \cong \mathbb{F}_0 & \xrightarrow{\quad} & & & T \cong \mathbb{P}^1
 \end{array}$$

由  $p$  和  $q$  诱导双有理映射  $\Phi : X \dashrightarrow Y$ , 如果取  $W$  上边界除子  $B_W = \frac{1}{4}L$ , 那么  $f$  和  $g$  是  $(K_W + B_W)$ -MMP 输出的两个森纤维空间, 即它们是 MMP-相关的森纤维空间。

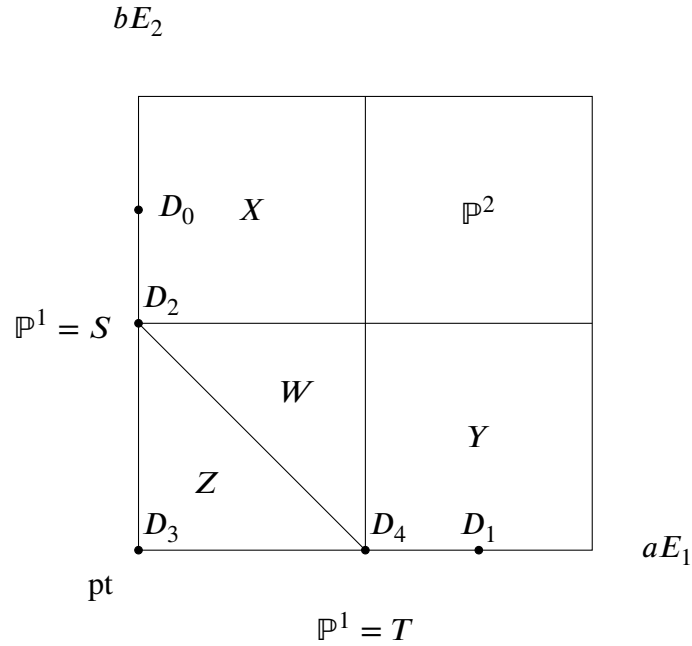
取  $A \sim_{\mathbb{Q}} -K_W + \frac{1}{4}L$ 。将  $E_1$  和  $E_2$  张成的线性空间用  $\frac{1}{4}L$  平移, 得到仿射子空间, 记为  $V$ , 那么有  $\mathcal{L}_A(V) = \mathcal{E}_A(V)$ 。对

$$D = A + \frac{1}{4}L + aE_1 + bE_2, 0 \leq a, b \leq 1$$

有  $D \in \mathcal{E}_A(V)$ , 且  $K_W + D \sim_{\mathbb{Q}} \frac{1}{2}L + aE_1 + bE_2$  成立。取下列除子:

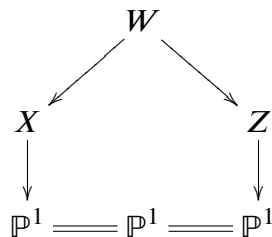
$$\begin{aligned} D_0 &= A + \frac{1}{4}L + 0 \cdot E_1 + \frac{3}{4} \cdot E_2 \\ D_1 &= A + \frac{1}{4}L + \frac{3}{4} \cdot E_1 + 0 \cdot E_2 \\ D_2 &= A + \frac{1}{4}L + 0 \cdot E_1 + \frac{1}{2} \cdot E_2 \\ D_3 &= A + \frac{1}{4}L + 0 \cdot E_1 + 0 \cdot E_2 \\ D_4 &= A + \frac{1}{4}L + \frac{1}{2} \cdot E_1 + 0 \cdot E_2 \end{aligned}$$

于是  $\mathcal{E}_A(V)$  有下图所示的划分:



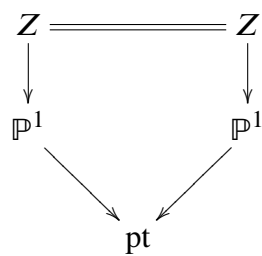
其中  $W, X, Y, Z, \mathbb{P}^2$  是  $W$  关于某些边界除子  $D$  (对应图中符号所在多面体) 的弱对数典范模型, 同时也是某些除子的丰沛模型和对数典范模型; 另外  $S, T, pt$  是  $W$  关于某些边界除子的丰沛模型 (但不是对数典范模型)。  $D_0$  对应弱对数典范模型  $X$  和丰沛模型  $S$ , 并且压缩态射  $\phi: X \rightarrow S$  (定理5.2.(2) 给出) 是森纤维空间压缩态射; 类似的  $D_1$  对应森纤维空间  $\psi: Y \rightarrow T$ 。点  $D_2, D_3, D_4$  对应三个 Sarkisov 连接 (按定理4.5);

- $D_2$  对应

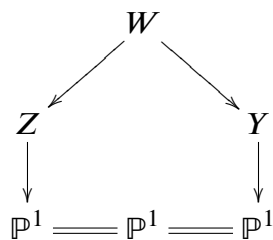




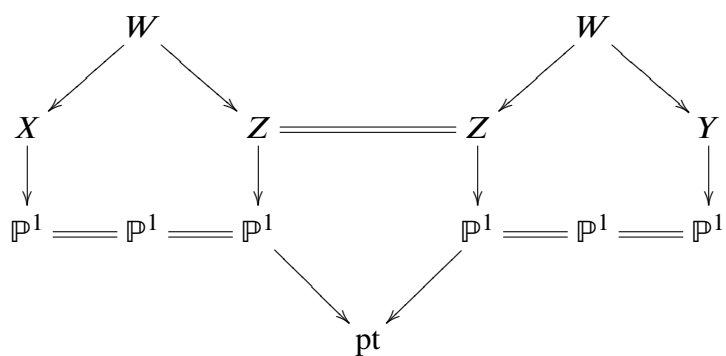
•  $D_3$  对应



•  $D_4$  对应



于是, 有  $\Phi : X \dashrightarrow Y$  的分解:



注. 此例中对  $V$  和  $A$  的选取并不是严格按照引理5.7构造的, 但是相对简单一些, 并且可以看出模型在 Sarkisov 分解中的位置。



## 第7章 叶层化 Sarkisov 纲领

传统双有理代数几何用典范除子  $K_X$  描述代数簇  $X$  的性质。如果用子层  $\mathcal{F} \subset \mathcal{T}_X$  代替切丛，进而用叶层化典范除子 (foliated canonical divisor)  $K_{\mathcal{F}}$  代替典范除子  $K_X$ ，就对应叶层化双有理代数几何。此时有对应的叶层化极小模型纲领，在高维情况下尤其对代数可积的叶层化代数簇对有一系列结果。本章尝试分析这种情况下的 Sarkisov 纲领。

### 7.1 定义和引理

首先给出叶层化代数簇对的基本知识。

**定义 7.1** (叶状结构). [8, Definition 2.3-6]

(1) 令  $X$  为正规代数簇。 $X$  上的一个叶状结构 (foliation) 是一个凝聚层  $\mathcal{F} \subset \mathcal{T}_X$ ，满足

(1.1)  $\mathcal{T}_X/\mathcal{F}$  是无扭的 (torsion free);

(1.2)  $\mathcal{F}$  在李括号下封闭。

如果  $\mathcal{F} = 0$ ，称之为由点定义的叶状结构 (此时此叶状结构的叶子 (leaves) 是单点)。

(2) 对  $X$  上素除子  $D$ ，若  $D$  不是  $\mathcal{F}$ -不变的，则定义  $\epsilon_{\mathcal{F}}(D) = 1$ ；反之，如果  $D$  是  $\mathcal{F}$ -不变的，则定义  $\epsilon_{\mathcal{F}}(D) = 0$ 。

(3) 如果除子  $K_{\mathcal{F}}$  满足  $\det \mathcal{F} = \mathcal{O}_X(-K_{\mathcal{F}})$ ，则称  $K_{\mathcal{F}}$  为  $\mathcal{F}$  的典范除子。

(4) 令  $f : Y \dashrightarrow X$  为支配有理映射，将  $X$  上的叶状结构  $\mathcal{F}$  在  $f$  的拉回记作  $f^{-1}(\mathcal{F})$  (叶状结构的拉回的定义参考 [1, 3.1] 或 [9, 3.2])，并且称其为  $\mathcal{F}$  诱导的  $Y$  上的叶状结构。令  $g : X \dashrightarrow X'$  为双有理映射，则将  $(g^{-1})^{-1}(\mathcal{F})$  记为  $g_*\mathcal{F}$ ，并称为  $\mathcal{F}$  的推出。

(5) 如果存在支配有理映射  $h : X \dashrightarrow Z$  和  $Z$  上的由点定义的叶状结构  $\mathcal{F}_Z = 0$ ，使得  $\mathcal{F} = h^{-1}(\mathcal{F}_Z)$ ，则称  $\mathcal{F}$  为代数可积 (algebraically integrable) 的叶状结构，并且称  $\mathcal{F}$  由  $h$  诱导。

用  $K_{\mathcal{F}}$  代替  $K_X$ ，可以定义相应的概念

**定义 7.2.** 使用 [6, 3.4.5, 6.2.1]、[1, 3.2] 的定义：

(1) 叶层化代数簇对  $(X/U, \mathcal{F}, B)$  包括一个正规射影代数簇  $X$ ，叶状结构  $\mathcal{F}$  和边界除子  $B$ ，一个压缩态射  $\pi : X \rightarrow U$ ，使得叶层化对数典范除子

$$K_{\mathcal{F}} + B$$

是  $\mathbb{R}$ -Cartier 除子。叶层化代数簇对也简称叶层化对 (foliated pair)。如果  $\mathcal{F}$  是代数可积的，则称为代数可积叶层化代数簇对。当基底  $U = pt$ ，或清楚时，常舍去  $U$ ，简记为  $(X, \mathcal{F}, B)$ 。

(2) 如果  $f : Y \rightarrow X$  是双有理态射，且  $\mathcal{F}_Y$  是  $\mathcal{F}$  诱导的  $Y$  上的叶状结构，且  $E \subset Y$  是  $Y$  上的除子，那么分歧公式

$$K_{\mathcal{F}_Y} + C = f^*(K_{\mathcal{F}} + B)$$

定义了例外除子  $E$  的叶层化差异数

$$a(E; X, \mathcal{F}, B) = -\text{mult}_E C$$

(3) 用叶层化差异数可以定义奇点性质：

(3.1) 如果对所有除子  $E$ ，有  $a(E; X, \mathcal{F}, B) > -\epsilon(E)$ ，则称  $(X, \mathcal{F}, B)$  具有 klt 奇点；

(3.2) 如果对所有除子  $E$ ，有  $a(E; X, \mathcal{F}, B) \geq -\epsilon(E)$ ，则称  $(X, B)$  具有 lc 奇点；

(4) 代数可积的叶层化对  $(X, \mathcal{F}, B)$  如果满足：

(4.1)  $X$  最多有商奇点 (quotient singularities)；

(4.2) 存在压缩态射  $f : X \rightarrow Z$ ，使得  $\mathcal{F}$  是由  $f$  诱导的叶状结构；

(4.3) 存在一个约化除子  $\Sigma$  使得  $\text{Supp } B \subset \text{Supp } \Sigma$ ，且  $(X, \Sigma)$  是环形的 (toroidal)，特别的， $X$  是 klt 奇点的  $\mathbb{Q}$ -分解代数簇；

(4.4) 存在约化除子  $\Sigma_Z$  使得  $(Z, \Sigma_Z)$  是对数光滑的，并且

$$(X, \Sigma) \rightarrow (Z, \Sigma_Z)$$

是等维数环形态射 (equidimensional toroidal morphism)；

则称为叶层化对数光滑代数簇对。

(5) 对代数可积叶层化代数簇对  $(X, \mathcal{F}, B)$ , 如果有双有理态射  $f : Y \rightarrow X$ , 使得

$$(Y, \mathcal{F}_Y = f^{-1}\mathcal{F}, B_Y = f_*^{-1}B + \text{Exc } f)$$

是叶层化对数光滑代数簇对, 那么称  $f$  为叶层化对数解消 (foliated log resolution)。

(6) 对具有 lc 奇点的代数可积叶层化代数簇对  $(X, \mathcal{F}, B)$ , 如果有叶层化对数解消  $f : Y \rightarrow X$ , 使得任意  $X$  上例外除子  $E \subset Y$ , 都有

$$a(E; X, \mathcal{F}, B) > -\epsilon_{\mathcal{F}}(E)$$

那么称其具有  $F$ -dlt 奇点。

在叶层化代数簇对中, 还有一种特殊的奇点性质, 首先由 Ambro, Cascini, Shokurov, Spicer 在 [1] 中提出:

**定义 7.3** (ACSS 奇点). [8, Definition 4.1-3] 设  $(X/U, B)$  为具有 lc 奇点的代数簇对, 且  $f : X \rightarrow Z$  是压缩态射。

(1) 记  $B^v$  和  $B^h$  分别为  $B$  在  $Z$  上垂直和水平的部分, 即  $B^v$  的组成成分素除子  $D$  满足  $f(D) \subsetneq Z$ , 而  $B^h$  的组成成分素除子  $D$  满足  $f(D) = Z$ 。如果满足下列性质:

(1.1) 存在  $Z$  上的约化除子  $\Sigma_Z$ , 使得  $(Z, \Sigma_Z)$  是对数光滑代数簇对, 且  $f(B^v = \Sigma_Z)$ ;

(1.2) 对任意闭点  $z \in Z$  和约化除子  $\Sigma \geq \Sigma_Z$ , 如果  $(Z, \Sigma)$  在  $z \in Z$  附近是对数光滑的, 那么  $(X, B + f^*(\Sigma - \Sigma_Z))$  在  $z \in Z$  附近具有 lc 奇点。

那么称  $(X/U, B)/Z$  具有性质  $*$ 。

(2) 对于代数可积的叶层化代数簇对  $(X/U, \mathcal{F}, B) = (X, \mathcal{F}, B)$ , 如果存在压缩态射  $f : X \rightarrow Z$  和约化除子  $G$ , 满足下列条件

(2.1)  $(X/U, B + G)/Z$  满足性质  $*$ ;

(2.2)  $\mathcal{F}$  由  $f$  诱导;

(2.3)  $G$  是  $\mathcal{F}$ -不变除子 (在这种情况下, 等价于  $G$  在  $Z$  上垂直)

那么称  $(X/U, \mathcal{F}, B; G)/Z$  具有性质  $*$ 。

(3) 如果满足性质  $*$  的  $(X/U, \mathcal{F}, B; G)/Z$  还满足:

(3.1)  $(X/U, \mathcal{F}, B)$  具有 lc 奇点;

(3).2  $f$  是等维数压缩态射

则称  $(X/U, \mathcal{F}, B; G)/Z$  满足弱 ACSS 条件, 或者具有弱 ACSS 奇点。

(4) 如果具有若 ACSS 奇点的  $(X/U, \mathcal{F}, B; G)/Z$  还满足:

(4).1 如果除子  $\Sigma \subset Z$  满足  $\Sigma \geq f(G)$  且  $(Z, \Sigma)$  是对数光滑代数簇对, 那么

$$(X/U, \mathcal{F}, B + G + f^*(\Sigma - f(G)))$$

(4).2 如果  $W$  是 lc 中心, 且  $\eta_W$  是其一般点 (generic point), 那么  $(X, B + G)$  在  $\eta_W$  附近是环形的, 且  $W$  是  $(X/U, \mathcal{F}, [B])$  的 lc 中心。

那么称具有 ACSS 性质, 或具有 ACSS 奇点。

ACSS 奇点在叶层化 MMP 下保持:

**命题 7.1.** [8, Lemma 4.8] 设  $(X/U, \mathcal{F}, B; G)/Z$  具有 ACSS 奇点, 并且是  $\mathbb{Q}$ -分解的。那么

(1) 任何  $(K_{\mathcal{F}} + B)$ -负性的相对于  $U$  的极端射线都是  $(K_X + B + G)$ -负性的相对于  $Z$  的极端射线, 因此每一步相对于  $U$  的  $(K_{\mathcal{F}} + B)$ -MMP 都是相对于  $Z$  的  $(K_X + B + G)$ -MMP;

(2) 如果  $\phi : (X, \mathcal{F}, B; G) \dashrightarrow (X', \mathcal{F}', B'; \phi_* G)$  是一步  $(K_{\mathcal{F}} + B)$ -MMP, 那么  $(X', \mathcal{F}', B'; \phi_* G)$  也是具有 ACSS 奇点的  $\mathbb{Q}$ -分解代数可积叶层化代数簇对。

$F$ -dlt 奇点的叶层化代数簇对具有 ACSS 性质:

**定理 7.2.** [6, Theorem 17.0.1] 如果  $\mathbb{Q}$ -分解代数可积叶层化代数簇对  $(X, \mathcal{F}, B)$  具有  $F$ -dlt 奇点, 那么具有 ACSS 奇点。

## 7.2 三种方法的推广尝试

首先, 由下列定理, 在特定奇点设定下, 可以运行某些叶层化 MMP:

**定理 7.3** (叶层化 MMP). [6, Theorem 2.1.1] 设  $(X/U, \mathcal{F}, B)$  是  $F$ -dlt 奇点的  $\mathbb{Q}$ -分解代数可积叶层化代数簇对, 那么对应的锥定理、翻转的存在性等定理成立, 即可以运行相对于  $U$  的  $(K_{\mathcal{F}} + B)$ -MMP。

但是只对部分情况下有终结性:

**定理 7.4** (叶层化 MMP 终结性). [6, Theorem 2.1.2] 设  $(X/U, \mathcal{F}, B)$  是  $F$ -dlt 奇点的  $\mathbb{Q}$ -分解代数可积叶层化代数簇对, 并且满足  $B \geq A \geq 0$ , 其中  $A$  是丰沛的  $\mathbb{R}$ -除子。假设  $H$  是丰沛的  $\mathbb{R}$ -除子, 那么可以运行关于  $H$  标量的  $(K_{\mathcal{F}} + B)$ -MMP, 并且终结。特别的,

- (1) 如果  $K_{\mathcal{F}} + B$  不是相对于  $U$  伪有效的, 那么终结于叶层化森纤维空间;
- (2) 如果  $K_{\mathcal{F}} + B$  是相对于  $U$  伪有效的, 那么终结于好极小模型 (good minimal model, 定义见 [6, Definition 9.1.1])。

假设  $(W/U, \mathcal{F}_W, B_W)$  是代数可积的叶层化代数簇对, 并且具有  $F$ -dlt 奇点。运行相对于  $U$  的  $(K_{\mathcal{F}_W} + B_W)$ -MMP, 并且假设有两个不同的叶层化森纤维空间  $(X, \mathcal{F}, B) \rightarrow S$  和  $(X', \mathcal{F}', B') \rightarrow S'$  作为叶层化 MMP 的不同输出。此时有双有理映射  $\Phi: X \dashrightarrow X'$ , 目标是构造这个映射的 Sarkisov 分解, 并且其中每一个  $X_i$ , 都有一个叶层化森纤维空间  $(X_i, \mathcal{F}_i, B_i) \rightarrow S_i$ 。接下来分析三种方法在叶层化代数簇对上能否推广。

**下降法:** 对于具有  $F$ -dlt 奇点的代数可积叶层化代数簇对, 有下列结果;

**引理 7.5.** [6, Lemma 6.2.4] 令  $X$  是正规拟射影代数簇,  $f: X \dashrightarrow Z$  是支配的有理映射, 且  $\mathcal{F}$  是由  $f$  诱导的代数可积的叶状结构,  $B$  是有效  $\mathbb{R}$ -除子。那么叶层化代数簇对  $(X, \mathcal{F}, B)$  的叶层化对数解消存在。

**定理 7.6** (压缩超例外除子). [6, Theorem 9.4.1] 令  $(X/U, \mathcal{F}, B)$  是 ACSS 奇点的  $\mathbb{Q}$ -分解叶层化代数簇对, 且

$$K_{\mathcal{F}} + B \sim_{\mathbb{R}, U} E$$

其中  $E$  是相对于  $U$  的超例外除子 (super exceptional divisor), 并且是有效  $\mathbb{R}$ -除子。那么关于某丰沛除子  $A$  标量的相对于  $U$  的任何  $(K_{\mathcal{F}} + B)$ -MMP 终结于  $(X', \mathcal{F}', B')$ , 是相对于  $U$  的好极小模型, 并且  $X \dashrightarrow X'$  的例外除子恰好是  $E$ 。

注意到当  $X \rightarrow U$  是双有理射影态射时, 所有例外除子都是超例外除子。因此用上述定理可以构造叶层化代数簇对的除子解压。同时由于某些丰沛除子标量的 MMP 终结, 用下降法的思路可以构造类似的 Sarkisov 连接。

但是, 由于 Fano 型叶层化代数簇对的有界性暂时未知, 所以这种方法的终结性仍未明确。

**双标量法和有限模型法：**对于双标量法，需要构造公共解消  $W$  和边界除子  $B_W, G_W, H_W$ ，使得  $(W, B_W + 2G_W + 2H_W)$  具有终端型奇点，并且需要定义一个序关系 (定义4.1)。这对于叶层化代数簇的情况是困难的。

另外，这两种方法都依赖于模型的有限性，虽然有叶层化代数簇对的对应模型的定义，但其有限性暂时未知。因此这两种方法暂时难以推广。

### 7.3 弱化版结果

但是，通过将叶层化代数簇对约化为普通的代数簇对，可以得到较弱的结果。

**定理 7.7.** [1, Proposition 3.6] 或 [6, Proposition 7.3.6] 令  $(X/U, F, B; G)/Z$  是具有 ACSS 奇点的  $\mathbb{Q}$ -分解叶层化代数簇对，那么

(1) 相对于  $Z$  有线性等价：

$$K_X + B + G \sim_{\mathbb{R}, Z} K_{\mathcal{F}} + B$$

(2)  $(X, 0)$  具有  $klt$  奇点， $(X, B + G)$  具有  $lc$  奇点。

用上述结果，可以将叶层化代数簇对  $(W, F_W, B_W)$  转化为普通的森纤维空间，进而将  $X \rightarrow S$  和  $X' \rightarrow S'$  视作普通的森纤维空间。为了应用 Sarkisov 分解，还需要将  $lc$  奇点的代数簇对约化为  $klt$  奇点：

**引理 7.8.** 令  $(X, B + A)$  是具有  $lc$  奇点的  $\mathbb{Q}$ -分解代数簇对，其中  $A$  是丰沛除子，并且  $(X, 0)$  具有  $klt$  奇点。那么存在边界除子  $D$ ，使得

$$K_X + B + A \sim_{\mathbb{R}} K_X + D$$

并且  $(X, D)$  具有  $klt$  奇点。

证明. 令  $f : Y \rightarrow X$  为对数解消，考虑分歧公式

$$K_Y + E_K = f^* K_X$$

和

$$K_Y + f_*^{-1} B + E_B + E_K + f^* A = f^*(K_X + B + A)$$



由  $(X, 0)$  具有 klt 奇点知  $E_K < 1$ ; 由  $(X, B + A)$  具有 lc 奇点知  $E_B \leq 1$ 。由于丰沛是开性质, 所以存在充分小  $0 < \epsilon \ll 1$ , 使得  $A + \epsilon B$  是丰沛除子, 并且  $f^*(A + \epsilon B)$  是数值有效的大除子, 因此存在  $Y$  上的丰沛除子  $A_Y$  和充分小有效除子  $E_Y$ , 使得

$$f^*(A + \epsilon B) \sim_{\mathbb{R}} A_Y + E_Y$$

且

$$(Y, D_Y = (1 - \epsilon)(f_*^{-1}B + E_B) + E_K + A_Y + E_Y)$$

具有 klt 奇点。那么

$$K_Y + f_*^{-1}B + E_B + E_K + f^*A \sim_{\mathbb{R}} K_Y + D_Y$$

令  $D := f_*D_Y$ , 则

$$K_X + B + A \sim_{\mathbb{R}} K_X + D$$

且  $(X, D)$  具有 klt 奇点。 □

对两个  $(K_{F_W} + B_W)$ -MMP 进行微扰, 可以在边界除子  $B_W$  中添加丰沛成分。具体来说, 令  $\rho : W \dashrightarrow X$  和  $\rho' : W \dashrightarrow X'$  为两个不同的  $(K_{F_W} + B)$ -MMP 的过程, 因为在有限步内结束, 所以都之经过有限次关于某个极端射线  $R$  的压缩态射或翻转, 即每一步中都有

$$(K_{F_i} + B_i).R < 0$$

令  $A_W$  是  $W$  上任意丰沛除子, 且  $0 < \epsilon \ll 1$  充分小, 使得

$$(K_{F_i} + B_i + \epsilon A_i).R < 0$$

恒成立, 并且  $(W, F_W, B_W + \epsilon A_W)$  具有  $F$ -dlt 奇点, 那么  $\rho, \rho'$  也是  $(K_{F_W} + B + \epsilon A)$ -MMP。用  $\epsilon A$  替换  $A$ , 可以假设  $(W, F_W, B_W + A_W)$  是具有  $F$ -dlt 奇点的  $\mathbb{Q}$ -分解的代数可积的叶层化代数簇。用上述结果可以证明定理 1.3

证明. 由于  $(W, F_W, B_W)$  具有  $F$ -dlt 奇点, 所以存在除子  $G_W$  和压缩态射  $W \rightarrow Z$ , 使得  $(W, F_W, B_W; G)/Z$  具有 ACSS 奇点, 并且有

$$K_F + B_W \sim_Z K_X + B + G$$

取  $W$  上的丰沛除子  $A_W$ , 满足

- (1)  $(W, B_W + G_W + A_W)$  具有 lc 奇点;
- (2)  $A_W$  不包含  $(X, B + G)$  的 lc 中心;
- (3)  $\rho, \rho'$  也是  $(K_{F_W} + B_W + A_W)$ -MMP 的输出;

由定理7.1,  $(K_{F_W} + B_W + A_W)$ -MMP 的输出  $X, X'$  也是相对于  $Z$  的  $(K_W + B_W + G_W + A_W)$ -MMP 的输出。由引理7.8, 存在除子

$$D_W \sim B_W + G_W + A_W$$

使得  $(W, D_W)$  是 klt 奇点的  $\mathbb{Q}$ -分解代数簇对, 且  $(X, D) \rightarrow S$  和  $(X', D') \rightarrow S'$  是它相对于  $Z$  的两个森纤维空间。由定理1.2, 双有理映射  $\Phi: X \rightarrow X'$  有 Sarkisov 分解:

$$X = X_0 \dashrightarrow X_1 \dashrightarrow \cdots \dashrightarrow X_N = X'$$

□

注. 这个分解中的 Sarkisov 连接  $X_i \dashrightarrow X_{i+1}$  是根据上述构造的边界除子  $D_W$  得到的。即存在除子  $D_i$  和  $D'_i$ , 使得交换图表

$$\begin{array}{ccc}
 Z_i & \xrightarrow{\tau} & Z'_i \\
 p \downarrow & & \downarrow q \\
 X_i & & X_{i+1} \\
 \phi \downarrow & & \downarrow \psi \\
 S_i & & S_{i+1} \\
 s \swarrow & & \nwarrow t \\
 & T &
 \end{array}$$

中,  $p, q, \tau$  都是关于某个边界除子  $D'_i$  的翻转或平转或无差除子解压, 而  $(X_i, D_i) \rightarrow S_i$  是普通代数簇对的森纤维空间, 不是叶层化森纤维空间。这与所期望的叶层化 Sarkisov 分解并不一致, 因此将定理1.3称为弱化的结果。

## 参考文献

- [1] F. Ambro, P. Cascini, V. Shokurov, and C. Spicer. Positivity of the Moduli Part. Mar. 2022. doi: 10.48550/arXiv.2111.00423. URL <http://arxiv.org/abs/2111.00423>. arXiv:2111.00423 [math].
- [2] C. Birkar. Anti-pluricanonical systems on Fano varieties. *Annals of Mathematics*, 190(2):345 – 463, 2019. doi: 10.4007/annals.2019.190.2.1. URL <https://doi.org/10.4007/annals.2019.190.2.1>.
- [3] C. Birkar. Singularities of linear systems and boundedness of Fano varieties. *Annals of Mathematics*, 193(2):347 – 405, 2021. doi: 10.4007/annals.2021.193.2.1. URL <https://doi.org/10.4007/annals.2021.193.2.1>.
- [4] C. Birkar, P. Cascini, C. D. Hacon, and J. McKernan. Existence of minimal models for varieties of log general type. *Journal of the American Mathematical Society*, 23(2):405–468, Nov. 2009. ISSN 0894-0347. doi: 10.1090/S0894-0347-09-00649-3. URL <http://www.ams.org/journal-getitem?pii=S0894-0347-09-00649-3>.
- [5] A. Bruno and K. Matsuki. Log Sarkisov program. *Internat. J. Math.*, 8(4):451–494, 1997. ISSN 0129-167X. doi: 10.1142/S0129167X97000238. URL <https://doi.org/10.1142/S0129167X97000238>.
- [6] G. Chen, J. Han, J. Liu, and L. Xie. Minimal model program for algebraically integrable foliations and generalized pairs. Sept. 2023. doi: 10.48550/arXiv.2309.15823. URL <http://arxiv.org/abs/2309.15823>. arXiv:2309.15823 [math].
- [7] A. Corti. Factoring birational maps of threefolds after Sarkisov. *Journal of Algebraic Geometry*, 1995(4):223–254, 1995.
- [8] O. Das, J. Liu, and R. Mascharak. ACC for lc thresholds for algebraically integrable foliations. July 2023. doi: 10.48550/arXiv.2307.07157. URL <http://arxiv.org/abs/2307.07157>. arXiv:2307.07157 [math].
- [9] S. Druel. Codimension 1 foliations with numerically trivial canonical class on singular spaces. *Duke Mathematical Journal*, 170(1), Jan. 2021. ISSN 0012-7094. doi: 10.1215/00127094-2020-0041.
- [10] C. Hacon and J. McKernan. The Sarkisov program. *Journal of Algebraic Geometry*, 22(2): 389–405, Dec. 2012. ISSN 1056-3911, 1534-7486. doi: 10.1090/S1056-3911-2012-00599-2.
- [11] C. Hacon, J. McKernan, and C. Xu. ACC for log canonical thresholds. *Annals of Mathematics*, 180(2):523–571, Sept. 2014. ISSN 0003-486X. doi: 10.4007/annals.2014.180.2.3. URL <https://annals.math.princeton.edu/2014/180-2/p03>.

- [12] C. D. Hacon. The Minimal model program for Varieties of log general type. 48(2):49, June 2012. ISSN 2543-991X, 2080-5519. URL <https://www.math.utah.edu/~hacon/MMP.pdf>.
- [13] Y. Kawamata, K. Matsuda, and K. Matsuki. Introduction to the Minimal Model Problem. pages 283–360. doi: 10.2969/aspm/01010283. URL <https://projecteuclid.org/euclid.aspm/1525310275>.
- [14] J. Kollár and S. Mori. *Birational Geometry of Algebraic Varieties*. Number 134 in Cambridge tracts in mathematics. Cambridge University Press, Cambridge ; New York, 1998. ISBN 978-0-521-63277-5.
- [15] J. Liu. Sarkisov program for generalized pairs. *Osaka J. Math.*, 58(4):899–920, 2021. ISSN 0030-6126.
- [16] K. Miyamoto. The Sarkisov program on log surfaces. *arXiv: Algebraic Geometry*, 2019: 114–114, 2019.
- [17] V. G. Sarkisov. Birational automorphisms of conic bundles. *Mathematics of the USSR-Izvestiya*, 17(1):177–202, Feb. 1981. ISSN 0025-5726. doi: 10.1070/IM1981v017n01ABEH001326.
- [18] V. G. Sarkisov. On conic bundle structures. *Izv. Akad. Nauk SSSR Ser. Mat.*, 46(2):371–408, 432, 1982. ISSN 0373-2436.
- [19] V. V. Shokurov. 3-fold log flips. *Izvestiya: Mathematics*, 40:95–202, 1993. URL <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:120741953>.
- [20] V. V. Shokurov and S. R. Choi. Geography of log models: theory and applications. *Central European Journal of Mathematics*, 9:489–534, 2009. URL <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:18815424>.

## 致 谢

感谢导师对我的指导和耐心，容忍我的懒惰。

感谢同学的帮助。

2024 年 4 月



## 作者简历及攻读学位期间发表的学术论文与其他相关学术成果

### 作者简历：

2016 年 09 月——2020 年 06 月，在北京航空航天大学数学系获得学士学位。

2020 年 09 月——2024 年 06 月，在中国科学院数学与系统科学研究院攻读硕士学位。

### 已发表（或正式接受）的学术论文：

- (1) A note on the Sarkisov Program, London Mathematical Society Lecture Note Series, 待发表

### 参加的研究项目及获奖情况：

无。

