论文架构：

Part1:

介绍现有的星系形成理论（建立基础为CDM模型），有关研究的几个主流模型（HOD，SAM，N-body Semulation）。并说明三个重要的质量组成：星系质量（或重子物质质量）,包恒星质量和气体质量，第二个质量为暗物质晕质量。

Part2：

介绍什么是引力透镜效应，有什么研究意义（概述），重点介绍什么是弱引力透镜效应。并介绍弱引力透镜在暗物质晕的“测量”上的应用。（在方法上考虑的是一个星系处在的宇宙空间的二位密度分布函数（对星系的形态做球对称假设），该二维分布就是弱引力透镜效应观测的东西，有关观测量为，R为分析处理上的投影距离，并非星系真是距离，测量是因为改观测量和星系的暗晕质量（the mass of halo）有关，实际上和星系聚集程度（有关量为c，concentration）也有关联）。简要说明的测量问题（测量困难）。介绍NFW模型。

Part3：

介绍星系形成过程和什么是Queching效应。星系形成表现为恒星的形成活动，所以星系形成抑制也即是恒星形成活动停止。

介绍恒星形成的条件（足够多的冷气体分子云，金斯质量）。

说明为什么是queching效应（介绍说明光波传播能力随波长的变化曲线（可见光波段），由此进入星系的分类（blue galaxies and red galaxies））,介绍说明星系观测的星系类型分布概率图（双峰结构，说明星系从blue到red的演化时标很短，也就是发生的转型是快而短暂的，否则观测上应该存在更多的绿谷星系，但事实并不是如此）。介绍红星系指数（简单来看，反映了星系的红化程度）。

PS：统计上，关注星系的分类而不是分布。

Part4：回到课题主要问题：What drives Queching? Why is there Queching?

思考出发点：只考虑Queching是引力作用，结合part1~part3的说明，主要考虑暗物质晕质量和恒星质量的影响。（观测上：恒星质量越大，越接近于1）

若是考虑恒星质量的影响：恒星质量在星系和暗物质晕中，与气体质量联系在一起,那么对于queching, 和有什么关系？（此时可以肯定的是，queching效应与没有关系）。

若考虑为暗物质晕质量的影响，则考虑吸积作用（星系的并合过程，星系聚集（冲击波作用，气体被加热，冲散）——关键：对气体分布的影响，进而影响SF活动）。

分析问题所在：两种驱动因素从观测上存在判别困难：因为实际观测上，和总是息息相关，彼此联系。分析对于不考虑的原因（因为中性氢部分观测分析困难？）现有观测手段上：对于主要是光学波段的光谱分析，对于则是引力透镜效应。对于临近宇宙（考虑Z~0附近？？）主要考虑弱引力透镜。

Part5：How?

在观测上现在可以得到若引力透镜的观测量，通过，而和C是直接和直接相关的物理量（主要是）。

解决问题：假设和中的某一个是抑制作用的驱动原因，分析相应的弱引力透镜相应的观测量曲线。实际分析暗物质晕的平均质量和恒星质量的相关变化曲线，

即-关系图像。可以预见：该坐标系下会有两条曲线或者两个分布带，分别对应red和blue两种星系类型。

我们假设以作用为主（直接利用弱引力透镜效应），分析在这样的假设下，理论上的-关系，与实际观测对比。如两者在误差范围内能符合，则说明假设正确，queching的驱动原因是，相应的物理过程是这一假设下的有关物理过程。

如果观测与理论不符合，则反过来说明，的作用是更主要的，相应的物理过程为对应假设下的物理过程。

Part6：

给出结论，并分析过程可能存在的问题。

对中性氢的课题有关内容做简要说明，给出课题深化分析。

Part7:

参考文献，附录。

论文初稿

## 摘要：

关键词：弱引力透镜，半解析模型，暗晕，冷暗物质模型

第一节：课题背景

* 1. 概述

星系的形成和演化问题，在研究上并没有形成统一的认知或者广泛接受的基本理论。关于星系形成和演化过程中的各种物理过程和作用机制，现在的主要研究手段也主要建立在数值模拟的基础上（比较成熟的有N体数值模拟—偏重对宇宙大尺度结构的演化研究—和半解析模型（SAMs），近几年比较新的研究有对HOD模型改进的iHOD模型等）。在研究上，星系的形成和演化研究，是认识宇宙必不可少的一环。星系的研究包含了恒星形成和演化，恒星活动，气体物质活动，大质量甚至超大质量活动等重要的物理过程，在高红移的星系研究中还包括AGN的反馈过程。在技术上，观测手段日益成熟和多样化，对于星系的观测和分析发现，在星系颜色—星等分布图上，星系观测记录存在明显的双峰分布（相关工作：[1]. Star formation, quenching and chemical enrichment in local galaxies from integral field spectroscopy. Francesco M. C. Belfiore. A thesis submitted for the degree of Doctor of Philosophy June 2017.Chapter 1, figure 1.4 [2]. Mapping stellar content to dark matter halos. II.Halo mass is the main driver of galaxy quenching. Ying Zu, Rachel Mandelbaum. arXiv:1509.06758v1 [astro-ph.GA] 22 Sep 2015. Section 2:Figure 1 and Figure 2），即红序星系和蓝序星系—星系的光学双峰分布（[3].星系中的恒星形成活动的熄灭过程.李成.中国科学院.上海天文台.中国科学：物理学 力学 天文学）。前者相对应较早形成的星系，光谱上几乎全部分或全部分布在红光波段，星系内部冷气体含量稀少，恒星形成活动很低，星系特征以核球形式为主。而蓝序星系相对而言具有更多的冷气体分布，恒星的形成活动相对活跃，恒星形成率高，形态上大多表现为漩涡状，不规则形态（[3].星系中的恒星形成活动的熄灭过程.李成.中国科学院.上海天文台.中国科学：物理学 力学 天文学）。在光谱上分布主要集中在蓝紫光波段。而两者之间存在一个分布数目稀少的地带，天文学家称之为绿谷星系。绿谷星系的稀少，说明从红星系到蓝星系的演化过渡是快速过度的，这其中必然有某些物理机制，影响了星系的演化进程——星系中的恒星形成活动受到了抑制，进而影响了星系的演化。

* 1. 星系的形成和演化研究现状

最近几年对于星系宇宙学方面的研究，国内的代表性工作主要有中国科学：物理学-力学-天文学2017年刊录的系列工作。包括：星系形成演化模型中的冷气体成分（富坚），星系与子暗晕的统计联系（王岚），星系空间取向的理论和观测研究（康熙、王鹏、罗煜、夏千里、潘恒星），高红移Lyα发射线星系观测研究（郝彩娜，夏晓阳），星系并合与相互作用的数值模拟和观测统计（姜春艳），低红移河外星系中性氢原子气体观测（王菁）等。

目前对于星系的形成和演化研究，如前所述，主要通过数值模拟分析。（[4]. 宇宙恒星形成历史和星系形成演化半解析理论.赵东海.中国科学院上海天文台.）在理论方面，目前较为广泛接受的有N题模拟和SAMs模型。在SAMs模型下，对星系的形成演化过程，主要的描述参数有超新星反馈，金属丰度等。而暗晕的旋转，速度弥散等相对而言，在SAMs模型下对于SF（stellar formation）过程影响很小。在研究中，SAMs的模型理论可以和高红移和低红移的观测结果有较为理想的一致。

此外，SAMs可以很好的预言宇宙冷暗气体共动数密度，也可以给出与实际SFR观测数据相近的计算结果。现有的比较成熟的N体模拟有：EAGLE，Horizon-AGN等，相比之下，流体力学模拟也能给出更具体的物理信息和描述，而SAMs给出的是后验的，总体的分布情况。

在星系的形成活动研究上，富坚（[5]. 星系形成演化模型中的冷气体成分.富坚.中国科学院上海天文台.中国科学：物理学 力学 天文学.）的研究工作表明：在红移小于3的宇宙空间里，星系的恒星形成速率（即SFR）相对z~3以外的星系出现大幅度下降，但是在中性氢的红移演化分析上，在z~3的地方并没有出现明显的演化迹象，也就是说分子-原子气体的比例在随着红移逐渐减小，但是SFR却表现出明显的下降。这说明在星系的演化环节中，出现了抑制星系演化的物理过程。否则SFR的红移演化应与中性氢相一致。更进一步的分析讨论结果在李成的研究工作（[6].星系中的恒星形成活动的熄灭过程.李成.中国科学院.上海天文台.中国科学：物理学 力学 天文学）提到：宇宙的平均恒星形成速率，如果以红移作为演化方向，在z~2附近，平均SFR有一个峰值，但是在更高红移的宇宙空间，SFR的均值一直下降，这说明在更远或者更近的宇宙空间中，恒星的形成活动是被抑制的，并且该活动在上百亿年的星系活动中一直存在，在演化过程中，发生了某个抑制形成的物理作用。作者给出了包括halo quenching效应在内的三个主要物理机制。不足的是分析讨论时针对阶段性的星系观测特征，更多的是经验性的分析总结。目前缺乏数据和观测支持。相比之下，在Ying Zui和Rachel Mandelbaum的2015到2017的系列有关研究中（[7].[8].[9].分别对应I，II，III），针对HOD模型的改进并在quenching effec问题上的应用，作者给出了有力的数据分析基础，并指出了相应的模型下的弱引力透镜的可观测的量。。在李的工作中，还进一步分析了两种可能的恒星活动抑制过程。郭可欣在博士研究工作（[10].星系中恒星形成活动及演化的统计研究.郭可欣.中国科学院紫金山天文台 博士学位论文）中，以星系的观测特征和其相应的恒星演化速率相关关系为主，分析了星系中的恒星形成过程的物理作用，并指出：星系的演化过程在整体上是质量主导的（实际上星系的形成和演化，在CDM模型下，逐级成团理论指出引力是主导机制之一，在引力的作用下塌缩和聚集才有可能，而引力的作用以质量为主导），在中低红移星系中，星系中的恒星形成活动与星系的恒星质量相关联。在低红移宇宙，大质量星系的恒星形成活动还与星系的中心内在结构和星系的宿主暗晕相联系。在分析基础上作者进一步指出活动星系核的活动应与恒星形成活动联系可能性不大，认为这是两个独立的星系活动过程。在数据分析上，作者指出了大质量星系存在SFR的弥散，并且在大质量星系更加明显,但并未进一步阐明物理机制。

在近些年的研究中，除了直接的研究星系形成过程的物理过程，也有从统计性质出发的，对星系和暗晕性质分析的模型和研究。在该方面值得关注的工作有基于N体模拟的对星系和暗晕的统计性质的分析的工作（[11].王岚.星系与子暗晕的统计联系.王岚.中国科学：物理学 力学 天文学）。作者强调，在N体模拟过程中，更直接的影响星系演化的是次级晕。 有关研究最早的思想来自Holye在Aerodynamics(1949)的工作。Holye认为星系的角动量可能来自潮汐力力矩作用。在后来的研究工作中，White和Rees（Core condensation in heavy halos—A two-stage theory for galaxy formation and clustering.Mont Not R Astron Soc,1978,183:341-358）指出暗晕应该是在无耗散力作用的塌缩过程中形成，而过程的重子物质冷却形成星系；这部分工作包括了引力束缚（逐级成团）效应，气体冷却，反馈作用等。在观测上，对于该部分理论的检测依赖于星系的观测特征和弱引力透镜信号（这里指的是g-g lensing signal:galaxy-to-galaxy lensing）。统计上出发的对于星系的形成问题的分析的方法称为HOD模型（暗物质晕占态分布模型）。但是在这方面的研究主观性很强：分析依据或计算经验化，性质描述则主要依据占态分布函数和公式推理——缺少更基本的物理分析，引入假设比较多。针对HOD模型的优化有2015~2017Zu和Reachel的系列工作提出的iHOD模型（[7].[8].[9]），他们的工作最大的优势在于不需要引入先验假设或形式分布，并且考虑了星系计数的不完整性，因此iHOD模型可以包括更多的星系分析，并且可以得到更为理想的观测符合预测。

与星系形成研究紧密相连的另一个问题是中性氢的分布问题。这主要是因为星系的形成和演化，星系的许多物理性质或观测特征，都和恒星的形成演化活动联系在一起，而这整个过程和冷气体密切相关。（[12].低红移河外星系中性氢原子气体观测.王菁.中国科学：物理学 力学 天文学）冷气体从状态上分为原子气体HI和分子气体。而这两者关系着星系的演化和恒星的形成。在观测上我们通常追踪冷气的分布，进而预测恒星活动的发展。在中性氢的研究上，目前的主要困难在于观测（具体的问题分析参见参考文献[12].）。

1.3.星系演化研究的几个相关模型

1.3.1. N体模拟与SAMs：

N体模拟或者说N-body simulation指的是对N体问题的数值求解或模拟。在天文研究上，N体问题主要涉及分析天体在引力作用下动力学问题。起初的N提问题目的在于分析行星相互作用后的运行问题，而随着天文学的发展，关于星系（或星系团）的问题研究逐渐变成了很重要的一类N体问题。但是直接的问题求解很困难，困难的原因之一在于：物理上，涉及到三体问题，求解就已经比较复杂；其二是在今天的宇宙学研究上，我们对于星系，大尺度结构等的问题分析，动力学基础是流体力学，而流体力学的基本动力学方程至今仍是数学界一大难题。版随着计算机技术的发展，天文学研究者们尝试从数值计算上，来分析宇宙学研究中的各类非线性演化问题（其中包括星系的演化问题）。

N体模拟的特点：N体模拟中的粒子具有实际的物理意义对应，包括了重子物质和暗物质的作用和演化，所以N体模拟过程中粒子的状态特征和物理过程联系在一起。但是N体模拟过程往往涉及大量的粒子演化分析，需要大量的计算时间和资源。现在比较成熟的流体力学模拟有illustric, EAGLE, Horizon-AGN。（[5]. 星系形成演化模型中的冷气体成分.富坚.中国科学院上海天文台.中国科学：物理学 力学 天文学.）

在后面的研究中，人们更多采用SAMs（半解析模型）。SAMs建立在在流体力学模拟的基础上，主要分析种重子物质的有关物理过程。SAMs同时考虑了更多更为细致的中间物理过程，比如气体的吸积和反馈，气体粒子的转化（分子—原子转化），金属丰度等等。SAMs虽然实现起来更加容易，但是对物理过程的描述都是唯象的，模拟的物理过程与成分无关，同一个模拟对于不同的粒子假设是一样的。SAMs中成分后物理过程分开，相关计算是后处理，因此在物理图景的描绘和说明上不如流体力学模拟（[5]. 星系形成演化模型中的冷气体成分.富坚.中国科学院上海天文台.中国科学：物理学 力学 天文学.）。最早的气体相关的N体模拟来自Cook等人在2010年发表的工作。

1.3.2. HOD模型和iHOD模型：

HOD模型指的是暗晕占态分布模型（Halo Occupation Distribution model）,HOD一开始只是在分析星系并和过程中涉及到的一个参数，HOD提出主要是为了描述恒星成分和暗物质晕的统计联系。现代指这样的星系描述模型：主要分析恒星-暗晕质量关系（SHMR）。HOD模型三个主要分析性质为：星系质量和宿主暗晕的概率分布关系，暗晕中的星系物质空间分布与暗晕的关系，星系的速度分布（速度弥散）和暗晕的质量关系。HOD模型认为星系都处在不可观测的暗物质晕中，而星系和宿主暗晕的演化彼此作用，密切相关，最大优势是可以很好的解释星系成团效应和星系见的引力透镜现象。对给定的宇宙学模型，HOD可以给出相应的恒星和暗物质晕的关系描述（Yang et.al 2003），因此，HOD模型也是宇宙学模型一个有效的约束条件。iHOD模型是Zu等人2015年到2017年系列工作中对HOD模型引申和修正提出的模型，作为比较，HOD也说为：cHOD—completeness -HOD,iHOD 表示 incompleteness-HOD。两者的区别在于对样本数据的采样方式不同，iHOD模型下，原有的暗晕计数期望函数延伸为连续性函数，加入了次晕丰度匹配的方法。相比于HOD模型，iHOD考虑了采样数据的不完整性，同时不需要引入先验假设或条，iHOD成功的解释了SDSS的观测数据，解释了横行质量-星系暗晕质量之间的对数坐标下的内在离散和大质量段的斜率退化。iHOD在分析SHMR和g-g lensing等信息上，能够预测更大的星系样本([5].)。从iHOD模型出发，Zu等人还分析了星系形成过程中的淬冷效应和其物理机制（[6].）以及星系演化和其所在环境的相互作用（[7].）。

1.3.3. 几个重要的质量参数：

在本文的分析工作里面，针对星系的quenching效应主要考虑引力作用，因此在分析过程中主要涉及三个质量参数：暗晕质量，恒星的质量，气体质量，通常后两者可一起考虑为重子物质质量。在星系形成的淬冷效应分析中，我们考虑暗晕质量做主导或者恒星质量做主导，在两种情况下分别考虑不同的衍生物理作用。比如考虑暗晕质量对星系演化起主导作用，在分析中我们考虑的物理作用过程以星系间的相互作用，如星系的并合，那么过程可能会出现大规模气体加热，冲击波则会将气体打散，这些作用会影响气体含量，准确来说影响气体的冷却，进而影响恒星的形成活动，影响星系的形成，演化。在我们的分析中，假设暗晕的密度分布符合NFW模型描述。在具体的描述上，我们可以进一步把气体分为分子气体和原子气体。其中分子气体和恒星的形成活动密切相关。因此，对于星系形成活动抑制的物理机制，在一定程度上，可以借助对气体冷却和分子形成过程的影响。在高温、强辐射的星系环境，比如发生星爆，AGN活动反馈的地方，环境温度高，气体容易被加热和“吹”散（物质被抛洒出去），同时在高温，强辐射的环境下，气体难以冷却，形成分子，因而具有这样的星系环境的星系是存在恒星形成困难的，星系的行成活动受到抑制，演化上向着红序星系方向演化。在研究上，我们也借助分子-原子气体比例，红序星系占比系数，SFR等参数来描述一个星系或星系群体的宏红化程度，而这些关系一定程度上可以以暗晕的函数或者恒星，或者气体的质量的函数。因此，从引力作用，星系描述的角度，暗晕质量，恒星质量以及气体质量都是重要的物理参数和描述指标。

1.4.可观测量分析与讨论：

一般对于星系的观测量依据不同的科学需要而不同，常见的有广度函数，金属丰度（一定程度上也可以反映出星系的演化程度）等。在这里我们主要关注和分析以下几个观测量。

1.4.1. 星系的色序分布图：

在星系的观测上，光学的颜色-星等分布（Optical color-magnitude）通常作为星系观测上的一个科学判据并以此进行星系类型划分——红序和蓝序星系划分。例如，利用SDSS巡天的数据，我们可以做出红移z<0.1的星系的颜色星等分布（color-magnitude distribution）,把星系的颜色-星等占态分布画在对数坐标架下，我们会发现星系的分布存在明显的双峰性：有两个明显的集中区域，表示在颜色星等直方图上会存在两个峰值明显的占态——称为星系色序分布的双峰性—两个集中的部分通常我们称为红星系和蓝星系，在一些研究中我们也把两个占态之间的星系称为绿谷星系（2003年，[13]. QUANTIFYING THE BIMODAL COLOR-MAGNITUDE DISTRIBUTION OF GALAXIES. Ivan K. Baldry, Karl Glazebrook, Jon Brinkmann, Zeljko I vezic, Robert H. Lupton, Robert C. Nichol4, Alexander S. Szalay. Ivan K. Baldry, Karl Glazebrook, Jon Brinkmann, Zeljko Ivezic, Robert H. Lupton, Robert C. Nichol, AlexanderS. Szalay. [13]. Star formation, quenching and chemical enrichment in local galaxies from integral field spectroscopy. Francesco M. C. Belfiore. A thesis submitted for the degree of Doctor of Philosophy June 2017.）。星系的颜色星等分布星系的颜色星等分布，是一个类似恒星赫罗图的科学工具，不同的是，对于星系的问题目前尚未研究清楚。星系的颜色占态存在集中分布，而且所谓的绿谷星系分布的很少。这说明星系红序和蓝序之间的演化是迅速的，因为观测统计上绿谷星系的数目是稀少的，也就是存在过渡状态的星系在观测统计上是很少的。在红序和蓝序之间的转化是迅速的，或者说有某种物理机制抑制了蓝序星系的活动（恒星形成活动）。在星系形成研究上我们称之为星系形成的淬冷效应——即恒星形成活动被突然抑制。

1.4.2. 引力透镜：

根据爱因斯坦的广义相对论，光线在通过引力场时会发生偏着。在宇宙中，大质量的前景天体在自身周围的宇宙空间产生的引力场，会使得来自后方的观测方向上的背景星系的光线发生偏折，这种现象天文学家称之为引力透镜效应。

当遥远的天体发出的光，传播到地球时，过程中会经过其他的前景天体，此时远处天体的光线会在前景天体附近的宇宙空间发生偏折。引力透镜是广义相对论的理论预测之一。在引力透镜里面，如果作用效果强到在前景星系周围形成明显的爱因斯坦环、弧形或者多个图像，称为强引力透镜。如果背景天体失真很小，此时称为若引力透镜，实际上弱引力现象在宇宙中分布更加普遍。对于弱引力透镜效应只能通过统计分析来进行测量（通常是真只有百分之几），测量的是垂直于透镜中心方向上的背景天体的优选拉伸。在天文研究上，弱引力透镜在重建质量分布上十分有用（强引力透镜实际上效果明显，但是通常前景天体质量很大，质量集中度过高，精度不够，不少研究工作有进行强弱引力透镜效应重建质量场的比较，弱引力透镜的分析结果能够更好的符合观测特征）。但是因为距离遥远，加上星系基本观测表现为椭圆形，而作用效应很小，因此弱引力透镜通常要求大量的观测样本。也正是因为对质量分布的重塑，弱引力的统计分析可以用于对宇宙学模型的检测，更好的理解和修正CDM模型，同时这也可以为暗物质，暗能量问题进一步提供线索和约束。介于两者之间的叫微引力透镜，微引力透镜在形状上不能看到形变，但是通过背景天体的光量的时间变化来被观测到。

在弱引力透镜的测量上，先后在1995，1997，1998，由Kaiser,Squires and Broadhurst;Luppino and Kaiser;Hoekstra et.al 等人分别提出来利用反转点扩散函数（PSF）采样和切片的方法，恢复了一个收到系统PSF函数污染的剪切计算器的数据系统。目前这一方法是在弱引力透镜切片测量中广泛使用的方法。

弱引力透镜对于质量的重塑优势在于，弱引力透镜的分析和测量都是建立在内在统计的基础上，不需要引入物质组成和状态的假设，是直接的质量分布的观测手段。

弱引力透镜的测量涉及到两个物理量：敛散度和切形变（convergence and shear）。敛散度是描述背景天体被放大程度的物理量，切形变是描述背景天体在观测方向上，沿着前景星系的切方向的形变程度的物理量。在测量上，到源和透镜体的角距离对于透镜的可观测量的测量具有非常重要的意义。

在本文的描述中主要涉及的是g-g weak lensing，星系之间的弱引力透镜是一类特殊的弱引力透镜，观测上背景星系由于前景星系的存在而发生形变和扭曲，g-g weak lensing 可以用来辅助构建前景星系附近的宇宙空间的物质分布，在暗物质考虑的情况下，该质量分布不一定描述重子物质分布。G-g weak lensing可以用于3D质量密度分布分析，测量星系的质光比，分析星系的质量演化关系等。本文主要从NFW模型出发，从星系质量逆向的构建引力透近信号，和观测对比，从而分析星系形成过程中的恒星形成活动的quenching效应（在g-g weak lensing的分析中，为了反映空间的物质分布特征，我们把三维的物质分布，沿着观测方向，把背景星系的质量分布积分成透镜元处的面密度分布）。

后续理论部分有关符号和公式记录：

：联合概率密度分布函数：

，

其中，。

。

：条件概率密度分布函数，分别表示在给定恒星质量情况下星系的宿主暗晕取某个质量的概率密度大小、给定暗晕质量的情况下，星系的恒星质量为某个质量的概率密度大小。

：暗晕的质量函数，表示的是质量的数密度分布。。类似的可以定义恒星质量函数：

。

：表示联合概率密度分布的边界概率分布，分别把Mh和M\*的分布函数归一化得到。

：文中讨论用到的SHMR关系的反函数。

其中，，，，是常数，，为常数。

，。

，，。

：表示星系的红化系数，反应为红星系的比例系数。类似的可以定义，并且

。

：总的暗晕内部星系的恒星质量和暗晕质量的关系函数：



对应的，可以定义红星系和蓝星系的恒星质量和暗晕质量函数关系：，。此时相应的，对应的概率定义为：，。

：对星系的序列划分依据。表示星系的两个波段的观测的差值。颜色对应的就是平时所说的颜色。常见的划分还有。（参考文献：[06].Figure1,2 et.al.）