

# 3 云降水物理基础

## 3.1 背景知识

### 3.1.1 章节性质

性质	广义上：大气中的云的科学
范围	范围可包括从云的分类、形成、演变、云中辐射传输、云中光电现象等一直到云降水化学特性
内容	云、雾和降水物理学（简称云物理学）是以大气热力学和大气动力学为基础，研究大气中水分在各阶段所经历的物理过程，具体而言就是研究云、雾和降水的形成、发展、维持和消散规律的科学

### 3.1.2 研究对象

尺度	天气尺度	云雨单元的集体以及范围较大的天气系统
	中小尺度	有独立意义的中小规模的云雨单元及天气系统
	小尺度	结构尺度，云雨中的特征结构
	微尺度	云雨滴的形成、增长和消散规律
微尺度	对象	气体质粒与离子（1A-1nm）、核云雨质粒（1nm—1cm）、雹胚、雹块、微涡、乱流（1-10cm） 小涡、墙角风（0.1-1m） 热泡、尘卷、碎云、亮带厚（1-100m）
宏观尺度		
小尺度	对象	初生云、弧状云、龙卷漏斗、悬球云、云塔、降水幡等、雷达回波结构（弱回波区、回波墙、高悬回波等） （100m-5km）
中小尺度	对象	阵风锋、雷暴云和积云单体、龙卷气旋、中尺度高压及低压、雨团（2km-25km）
大中尺度	对象	云集体（飑线、云团、细胞状云）、雨带（25km-500km） 台风、气旋、锋面及辐合带云系、盾状云、螺旋云带、逗点云（>500km）
学科分类	按尺度可分为宏观云物理学和微观云物理学	
宏观云物理学	研究水平尺度 10m ~ 100km ~ 1000km，垂直厚度 10m ~ 10km 范围云形成、发展和消散的动力过程，主要是大气动力学问题	
微观云物理学	研究云体的组成元素—云粒子（云滴、冰晶）和降水粒子（雨、雪和冰雹等）所经历的凝结（华）、碰并和蒸发等过程，尺度仅 0.1μm ~ 1cm 水汽的相变热力学和气溶胶力学问题，所需的知识为热力学原理、扩散理论和物理化学等	
相互关系	① 云-降水-辐射气候效应 ② 相互依存、相互作用 ③ 通常的云物理学著作侧重于云的微物理学，并不是认为云的动力过程不重要，主要原因是对云的动力学的了解远不如对云的微物理学那样清楚	

### 3.1.3 目的与意义

水循环、天气、气候、人工影响天气、地气系统辐射能量收支、气溶胶云相互作用

### 3.1.4 方法体系

感性认识	观测和探测
理性认识（分析和综合）	理化实验、实验模拟、数值模拟
人为干扰（双重意义）	人工影响天气
观测和探测	对客观自然或人工影响后的云雾获得感性认识 例如：中小尺度观测网；云内外温、湿、压及气流分布探测，云体发展及夹卷情况探测、雷

达回波及卫星云图；云内微物理结构及有关参量和特征（如滴谱、含水量等）观测、降水观测等

**理化实验(隔离因子)** 从云雾过程的整体中隔离出一些因子，在实验室分析较为单一的物理关系

例如：水滴半径与下落末速度的关系、冻结核的有效阈温、不同半径水滴的重力碰并或电力碰并等

**实验模拟(综合因子)** 用实验方法模拟自然过程及机制

模拟的现象与自然过程在直观上有一定相似性，可用增减因子或改变参量的控制性实验方法研究云雾物理过程的因子、机制、子过程等

例如：在有垂直风洞的冷云室中，模拟冰雹在有过冷水滴的云中的增长，并分析影响其增长的因子；在水箱中加入由  $\text{BaCl}_2$  和  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  溶液混合而沉淀出  $\text{BaSO}_4$ ，用此沉淀物下沉情况模拟自然热云泡上升的情况；用薄层流体顶部冷却底部加热，模拟自然云泡对流过程及嵌入云和波状云的形状，研究相应的自然过程及云状的形成条件等

**数值模拟** 根据控制自然云雾降水发展过程的基本规律所遵循的**数学物理方程组**（包括宏观的流体动力学、热力学方程组和云雾微观过程方程组），按实测的初始及边界条件，进行数值求解可摆脱实验室的约束和局限，可考虑较多因子；可以很复杂，但自然界的复杂性不能完全用方程表达出来

**人工影响云雾降水** 用人为方法干扰云雾降水过程，观测干扰后果，以了解云雾降水发展规律。

干扰的原理、催化剂性质和剂量、干扰部位及被干扰对象的特点等，都直接或间接影响云雾降水过程的后续发展；自然云雾降水过程十分复杂，影响因子的主次常有变化；干扰后果是自然发展与人为干扰的综合叠加造成，区分十分困难

### 3.1.5 发展简史

500B.C.	第一次希腊降水观测
400B.C.	印度宏观降水观测
200B.C.	巴勒斯坦降水观测记录
100B.C.	罗马人和希腊人将箭射入雷雨云中，企图防止冰雹闪电
1325	大炮最早在 1325 年用于军事作战。向积雨云发射大炮弹，其弹片可以炸毁雷雨，将这种方法认为是他及其朋友的贡献
1784	<b>赫顿/哈顿</b> ：发表雨暴（Rainstorms）的形成理论，认为两团不同温度的空气混合时，空气中的一部分水汽变成雨水降落，因此暖风（气流）和冷风（气流）的交会是雨暴的成因。
1802	法国的 Jean Baptiste Lamarck (1744 - 1829) 首先将云分为 5→12 种类型
1803	英国的药剂师 Luke Howard：对云的改造和人工影响，把云按形态分为四类
1896	巴黎出版第 1 部国际云图，现用瑞士 1956 年版
1843	John Dalton：混合气体（大气）的总压等于组成它的各个气体的分压之和；测量饱和水汽压；
1868	法国 Peslin 首先说明降雨是上升气流的绝热膨胀引起的

## 3.2 暖云形成与微物理过程

章节概述 全过程概述：核化→凝结→碰并

### 3.2.1 云滴形成

小节概述 过饱和→均质核化（开尔文公式）→异质核化（大气气溶胶，溶质效应，科勒曲线，云凝结核）

过饱和 过程 气块上升→膨胀、绝热冷却→LCL→过饱和

过饱和度 相对于纯水平面  $S(\%) = (RH - 100) = (e/e_s - 1) * 100$  自然云中一般小于 1%

相对于平冰面  $S_i(\%) = (RH_i - 100) = (e/e_{si} - 1) * 100$  深对流云可观测高达 100%

鬃积雨云 15km 以上云顶观测到 300% 平冰面过饱和度（由于水面饱和 > 冰面，水面未饱和，冰面已饱和）

#### 3.2.1.1 均质核化与开尔文公式

均质核化 定义 在无外来粒子帮助的情况下，依靠过饱和水汽凝结而形成纯水滴的过程

① 水汽相态的一些水分子由于随机碰撞聚集到一起，形成足够大而且能够稳定存在的小水滴胚胎（初始滴）

概述 初始滴大小和稳定性与过饱和度密切相关，稳定存在是动态平衡的过程。

理论基础

1. 一个系统总是趋向于以能量减少的方式达到平衡
2. 系统设定：假设一个体积为  $V$ ，表面积为  $A$  的小滴在一定温度  $T$  和气压  $p$  下的过饱和水汽中形成
3. 如果  $\mu_l$  和  $\mu_v$  分别表示每个分子在液相和气相的吉布斯自由能， $n$  为单位体积液体中的水分子数，那么系统由于凝结导致的吉布斯自由能减小为： $nV(\mu_v - \mu_l)$ （由气态→液态的差值）
4. 建立单位面积液滴表面所需要作的功为： $A\sigma$ ，其中  $\sigma$  为水的表面能（构建单位面积汽-液界面所需要作的功，克服表面张力做功）
5. 由于液滴形成导致的系统能量净增加值为： $\Delta E = A\sigma - nV(\mu_v - \mu_l)$
6. 可以证明  $\mu_v - \mu_l = kT \ln \frac{e}{e_s}$  吉布斯自由能与水汽压差值有关

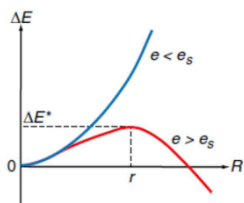
则由于半径为  $R$  的小滴形成引起的系统能量净增加为：

$$\Delta E = 4\pi R^2 \sigma \text{ 构建一个气液界面所需要的能量} - \frac{4}{3}\pi R^3 nkT \ln \frac{e}{e_s} \text{ 由于凝结导致的系统吉布斯自由能减少}$$

$\sigma$  水的表面能（克服表面张力做功）  $n$  单位体积液体中的水分子数  $k$  波尔茨曼常数

开尔文理论

1. 若不饱和，则不稳定，无法生存。
2. 曲线最高点对应的  $r$  为初始滴半径。对于不同过饱和度， $r$  不同。



② 开尔文公式 在何情况下形成水滴大小

初始滴平衡半径  $r = \frac{2\sigma}{nkT \ln(e/e_s)}$   $\sigma$  水的表面能  $n$  水分子数  $k$  波尔茨曼常数

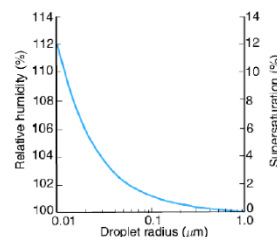
推导

由开尔文理论对  $\Delta E$  求导可得

开尔文曲线

曲率效应：对较低的过饱和度，需要的平衡状态的  $r$  值更大。

然而，实际大气中过饱和度相当小，初始滴粒径  $> 0.1\mu m$ ，难度极大  
在自然界中，依靠纯水汽形成初始滴是不现实的，必须依靠异质核化



③ 平衡是不稳定的，当其半径大于（小于） $r$  时，小滴将会增长（蒸发）

④ 自然云中的云滴不会由纯水汽的均质核化形成

例题 1. 证明上方左图中临界能障  $\Delta E^*$  的高度可写为  $\Delta E^* = \frac{16\pi\sigma^3}{3(nkT \ln \frac{e}{e_s})^2}$ （对每个  $r$  对应  $\Delta E^*$ ）

当  $R=r$  时， $\Delta E = \Delta E^*$ ，从而  $\Delta E^* = 4\pi R^2 \sigma - \frac{4}{3}\pi R^3 nkT \ln \frac{e}{e_s}$  和  $r = \frac{2\sigma}{nkT \ln(e/e_s)}$

$$\text{则 } \Delta E^* = 4\pi R^2 \sigma - \frac{4}{3}\pi r^2 (2\sigma) \Rightarrow \Delta E^* = \frac{4}{3}\pi r^2 \sigma = \frac{16\pi\sigma^3}{3(nkT \ln \frac{e}{e_s})^2}$$

2. 如果由于在纯水中加入十二烷基硫酸钠使表面张力 $\sigma$ 减少了10%,确定 $\Delta E^*$ 、 $r$ 改变了几成(忽略 $n$ 、 $e$ 变化)

将上式对 $\sigma$ 求导, 则 $\frac{d(\Delta E^*)}{d\sigma} = \frac{16\pi\sigma^2}{(nkT \ln \frac{e}{e_s})^2}$  如果小水滴的表面张力减少10%, 亦即 $\frac{d\sigma}{\sigma}$ 减少10%, 则 $\frac{d(\Delta E^*)}{d\Delta E^*} = -0.3$

则临界能障减少30%。从开尔文公式可得,  $\frac{dr}{r} = \frac{d\sigma}{\sigma}$ 。因此, 如果 $\sigma$ 减少10%, 那么 $r$ 也将减少10%。

人工影响天气播撒吸水性更强的盐粉更有利于形成降水的原因。

3. 添加十二烷基硫酸钠对小水滴的均质核化有哪些影响?

$r$ 为由水分子随机碰撞形成的小胚滴要继续保持自发凝结增长所必须达到的临界半径。因此, 对某一给定的环境空气过饱和度, 如果 $r$ 减少了(由于加入十二烷基硫酸钠), 小水滴的均质核化将变得更容易。

大气中加入某些颗粒物更有利于云滴形成。

### 3.2.1.2 大气气溶胶

**定义** 悬浮于大气中的固体和或液体粒子和大气组成的胶体体系(不包括云粒子)。

目前一般所指的是气溶胶中的颗粒物。其下落末速度可忽略不计

**形貌** 形态复杂, 多为不规则颗粒状

**构成** 碳黑(链状)、硫酸铵、尘埃、硫酸、海洋性有机物、海盐、晶体状生物有机物、生物质烟尘(山火)、花粉

**粒径** 由于形貌复杂, 有多种描述和替代方法

**空气动力学等效直径**: 与所研究的粒子具有相同降落末速率、密度为 $1g/cm^3$ 球体的直径( $D_p$ )

**体积等效直径/几何直径**: 所研究不规则形状的粒子与直径为 $D_p$ 的球形粒子具有相同的体积 【环境领域】

**光学等效直径**: 所研究不规则形状的粒子与直径为 $D_p$ 的球形粒子具有相同的光散射能力 【大气辐射】

气溶胶颗粒一般直径不到发丝的1/20, PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>10</sub>

**生源** **一次气溶胶**: 海洋二甲基硫醚排放二氧化硫 DMS、海水飞沫(海盐)、山火、火山爆发、人类活动等

**二次气溶胶**: 在空气中转化为气溶胶、**气粒转化**等

**汇** **干沉降**: 粒子被地面各类物体吸附等

**湿沉降**: 核化凝结、布朗扩散捕获粒子、泳移现象(phoresis)、重力碰并等

**一次粒子** 天然污染源和人为污染源直接排放的颗粒物

如: 道路、建筑和农业产生的扬尘(粗粒子为主) 柴油发动机机动车、锅炉、废物焚烧、露天烧烤、火烧秸秆和居民烧柴等产生的碳黑粒子等

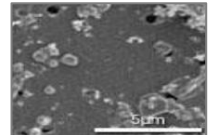
**二次粒子** 大气中某些污染气体(如二氧化硫 $SO_2$ , 氮氧化物 $NO_x$ , 碳氢化合物 VOCs 等)之间, 或这些气体与大气中的常规组分(如氧气)之间通过化学/光化学反应形成的颗粒物

如: 光化学烟雾→硫酸盐、硝酸盐、铵盐、有机碳等

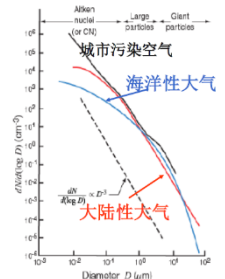
**成核机制** 高能电离辐射+紫外辐射→离子诱导均相核化→碰并增长+离子粘连→有机物凝结增长

**总浓度情况** 海洋 $\sim 10^3 cm^{-3}$  陆地农村 $\sim 10^4 cm^{-3}$  污染城市 $\geq 10^5 cm^{-3}$

**尺度分布**  $10^{-4} \sim 10^1 \mu m$



气溶胶电镜图



### 3.2.1.3 异质核化与科勒曲线

**异质核化**

**定义** 在**外来粒子**的帮助下水汽核化形成水滴的过程(主要为气溶胶)

**描述** 1. 大气气溶胶中的一些**粒子**能够成为使水汽在其上**凝结的核**, 这些粒子称之为**云凝结核 (CCN)**, 包括**可湿性和可溶性(硫酸钠等)气溶胶**

2. 云滴能够在比均质核化所要求的过饱和度**低得多**的条件下在这些气溶胶粒子上形成和增长

3. 某些大气气溶胶是水溶性的, 因而当有水汽在其表面凝结时, 它们就开始溶解

4. 溶液滴表面上的平衡饱和水汽压小于与其同样大小纯水滴表面的值, 即所谓的**溶质效应**

5. 某些不可溶的气溶胶可以作为有效的**冰核 (IN)**, 参与大气冰粒子的形成

**溶质效应**

**原理** 溶液滴表面上的饱和水汽压(它与水滴表面的水分子浓度成正比), 小于纯水滴表面上的值, 因为溶液滴表面的某些位置被盐分子(或离子, 如果盐粒子电离的话)占掉了