


资助项目：国家自然科学基金（41365002）

强降雨

熵原理和方法


林宗桂 林墨◎著

 气象出版社
China Meteorological Press

资助项目:国家自然科学基金(41365002)

强降雨熵原理和方法

林宗桂 林墨 著

 气象出版社
China Meteorological Press

内容简介

本书基于热力学熵原理,建立 MCS 概念模型,阐述了 MCS 发生发展“负熵源→负熵汇→负熵流”机制,创建了 MCS 理论新体系。应用信息熵原理,发展出基于信息量的强降雨预测新方法。用大样本实例验证了 MCS 理论和强降雨预测方法的正确性和适用性。通过模拟试验探究了负熵汇和负熵流本质特征。

本书可供天气预报气象工作者参考,也可供热力学、信息论、数学建模、计算机技术、复杂系统等方面的研究人员和高等院校师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

强降雨熵原理和方法 / 林宗桂, 林墨著. — 北京 : 气象出版社, 2018. 11

ISBN 978-7-5029-6652-2

I. ①强… II. ①林… ②林… III. ①降雨-熵-研究 IV. ①P426. 62

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 238208 号

出版发行: 气象出版社

地 址: 北京市海淀区中关村南大街 46 号

邮政编码: 100081

电 话: 010-68407112(总编室) 010-68408042(发行部)

网 址: <http://www.qxcbs.com>

E-mail: qxcbs@cma.gov.cn

责任编辑: 黄海燕

终 审: 吴晓鹏

责任校对: 王丽梅

责任技编: 赵相宁

封面设计: 博雅思企划

印 刷: 北京地大彩印有限公司

开 本: 787 mm×1092 mm 1/16

印 张: 20

字 数: 512 千字

版 次: 2018 年 11 月第 1 版

印 次: 2018 年 11 月第 1 次印刷

定 价: 120.00 元

本书如存在文字不清、漏印以及缺页、倒页、脱页等,请与本社发行部联系调换。

自序

本书的观点和思路,笔者历经数十年的酝酿和思索,至今才初步理出些头绪。

1982—1983年,我初到宜州市气象局工作期间,常被空虚和孤寂侵扰,为了排解,常常翻阅《广西降雨量资料集》,直觉发现强降雨的时空分布是介于有规律和无规律之间的,这些特征渐渐引起我的兴趣。其后,由于工作单位和工种的变动,这些兴趣和想法一度被搁置。大约20世纪末,在基层台站也可接收到卫星云图资料,卫星云图的应用又引起我的兴趣,但限于本人的专业背景和一些其他原因,这些兴趣只能在业余条件下做些自娱罢了。直到一个偶然机会,在大学同班同学的支持下,我获得一个有关卫星云图在强降雨预报中应用研究项目,渐渐地熟悉和领会一些应用知识和方法。由于种种原因,这方面的工作未能持续进行下去。非常幸运,21世纪初我结识了孙涵教授,在孙涵教授的赏识和关照下,我加入到他的研究团队。虽然孙涵教授团队的研究方向和本书的内容有所不同,但是孙涵教授却给我创造了一个得以继续开展研究的环境,这使后来我得以连续成功申请到两个国家自然科学基金(40965003, 41365002),在这个背景条件下我才得以完成本书的编写。

在撰写初期,我曾设想先从暴雨预报应用基点出发,通过一定程度的应用过程检验和修正后,再建立和推出相对成熟的理论体系。虽经数次努力,这设想也没能实现,其中原因说不清道不明。不得已,把初期以应用为主的《广西暴雨中尺度4D概念模型原理和应用》书稿,修改为现版的《强降雨熵原理和方法》,偏重从理论基础深度上进行了挖掘和探索,试图建立基于热力学熵和信息熵基本原理交叉而成的强降雨熵原理,依据此原理发展出成体系的强降雨短时预测方法,并用大量实例进行了验证。这样自然增加了本书的深度和广度,所耗费的时间也大为延长。

2016年9月,本人到了退休年龄,但此时所主持的国家自然科学基金项目尚未完成,多年的研究心得也未整理。退休后想要继续完成此任务,既无资源,更无时间,本应放下的事情,偏又放不下,只好在内心挣扎情况下艰难进行。本书大部分文字工作在我退休后才开始执笔行文,由于是在业余环境下撰写文稿,碎片式的时间和各种纷繁的干扰,增加了不少难度。读者不难发现,书中的各种模型主要以体现构思为主,严密性乏善可陈,还有许多基础性的科学和技术问题(如绪论末尾所提)有待进一步探究,遗憾的是笔者已无资源支持把研究工作继续向前推进。笔者撰写此书的目的:一是为完成国家自然科学基金项目任务,二是把多年的研究工作做一个归纳总结。至于读者的严肃或大度、见仁见智,笔者无不欢欣。成败得失,我心平常。

本人长期与林开平正研高工共事和合作,书中很多思路得到林开平的启发或修正,在实际工作中也得到很多帮助和支持;我也多年常与金龙教授交流讨论,得到许多有益的指导和帮助,在此表示衷心感谢!

“醉卧沙场君莫笑,古来征战几人回。”

林宗桂

2018年5月

前 言

强降雨是指暴雨及以上量级降雨的统称。强降雨是我国气象灾害中最严重、最常发生的灾害之一,每年都因强降雨洪涝造成严重的生命财产和经济损失。多年来,气象学者不懈地对强降雨产生机理进行深入研究,目前已认识到天气尺度系统如锋面、气旋、高空槽等并不是直接造成强降雨的天气系统,中尺度天气系统才是造成强降雨的直接系统。但强降雨问题是一个复杂问题,一方面是由于观测资料的限制,另一方面是由于涉及多尺度的相互作用,描述强降雨过程的动力系统还有不少问题没有完全解决,对产生强降雨的中尺度系统各种重要物理过程缺乏完整的认识,不了解什么过程是预报模式中最基本、最关键的,如何在预报模式中有效地表示它们。这些因素严重制约了强降雨的预报能力,是目前强降雨预报准确率不高的主要原因。近年来,随着气象业务现代化建设快速发展,卫星云图、中尺度自动气象站、多普勒雷达等多种非常规观测资料的大量增加,为解决强降雨预报中信息不足的难题提供了资料条件。

与动力系统把强降雨预报作为初值问题求解不同,本书把产生强降雨的中尺度对流系统(Mesoscale Convective Systems,简称 MCS)发生发展作为一个热力学系统演变过程考虑,试图以新视界探索强降雨的产生机理,在此基础上构建 MCS 概念模型;在信息论原理基础上,把强降雨预测作为信息量的获取和利用问题,从而发展出相应的强降雨预测方法;基于这两个原理和方法,发展出强降雨熵原理和方法。目前已初步构建了 MCS 概念模型,发展出成体系的强降雨准客观定量的短时临近预测方法,并用大量的实例进行了检验,用模拟试验方法进行了抽象研究。实例检验和模拟试验证实,强降雨的熵原理是自洽的,预测方法实用性较强。这些研究成果大部归总于本书中,全书总分六章。

绪论主要讨论依据热力学熵和信息熵原理分析对流性强降雨问题的思路,发展强降雨预测方法的原则和方向,简述本书的研究进展和有待继续推进研究的问题。

第 1 章在热力学熵原理基础上讨论 MCS 发生发展过程和机理,构建了 MCS 发生发展概念模型,以及对流单体环境条件模型、对流触发模型、对流单体结构和发展模型、对流传播发展模型等系列辅助性模型。在这些模型基础上,提出了 MCS 发生发展的“负熵源→负熵汇→负熵流”机制原理,发展出成体系的模型原理。

第 2~3 章主要依据信息论基本原理方法,讨论气象信息模型的建立,提出了“相对基准信息量”和“预测信息量”概念,定义了“预测可靠性”和“协调因子系数”,设计了基于卫星、自动站和雷达等非常规资料的 MCS 信息提取模型,实现强降雨预测信息提取的算法设计。

第 4 章从总体上对 73 个低槽影响过程,进行中尺度变压场、雷达回波和降雨分布的对应分析。归纳出 MCS 的强雷达回波大都分布在中尺度负变压区内,中尺度负变压区的形成或加强一般超前于 MCS 的发生,中尺度负变压区对强雷达回波出现范围有很好的指示意义。

第 5 章采用模板化分析方法,对 12 个典型降雨过程进行规范化分析,发现并归纳出 MCS

发生发展过程中几个规律性和独特性问题:用实例验证了中尺度变压场概念模型,以及 MCS 概念模型“负熵源→负熵汇→负熵流”机制的合理性和普适性;通过规范化和流程化的分析方法,准客观定量地提取降雨落区、落时和强度的预测信息量,并估算了降雨预测的可靠性,证实了气象信息概念模型的合理性和有效性;验证了马尔可夫环模型的实用性和通用性。这些实例分析提供了应用示范案例。

第 6 章使用自主对流发展模式和对流单体发展传播模式进行模拟试验。试验结果表明:自主对流发展模拟表现出了负熵汇的本质特征;组成 MCS 的对流单体的发展密度和强度,实质上反映了负熵流的密度和强度,模拟试验结果表现了负熵流本质特征;如果要使直径 10 km 暖湿气柱,在抬升触发对流后形成自主对流可能性达 80%以上,暖湿空气堆积厚度要达 2600 m 以上。

本书的策划由林宗桂和林墨共同完成,书中大部分文字工作由林宗桂完成,林墨完成了全部的软件程序算法设计、数学建模、模拟试验、数据处理和实例验证,设计和初绘了逾 1000 幅插图,并负责出版事务工作。

本书在编写过程中得到了很多同事、朋友的支持和帮助,在此谨向他们表示感谢。同时,感谢气象出版社的大力支持,感谢黄海燕等编辑一直以来的关心和辛勤付出。

作者

2018 年 5 月

目 录

自序	
前言	
绪论	(1)
第 1 章 强降雨热力学熵模型和原理	(5)
1.1 强降雨熵变过程特征	(5)
1.2 MCS 熵变模型原理	(8)
1.3 负熵源	(11)
1.4 负熵汇	(16)
1.5 MCS 热力学熵模型	(22)
第 2 章 强降雨信息模型和信息量	(32)
2.1 气象信息模型	(32)
2.2 气象观测数据信源特点	(33)
2.3 强降雨事件信息量	(38)
2.4 强降雨预测与信息量	(45)
第 3 章 强降雨信息提取算法原理和设计	(52)
3.1 中尺度变压场分离算法原理	(52)
3.2 强降雨预测信息的提取算法原理	(56)
3.3 算法设计	(73)
第 4 章 降雨实例和大尺度天气系统配置特点	(83)
4.1 降雨实例	(83)
4.2 大尺度天气系统基本配置和演变特征	(102)
第 5 章 典型强降雨过程分析	(107)
5.1 TTNSNS-2aNS-20150610-0611	(108)
5.2 TTVSNS-2aNS-20160909-0910	(122)
5.3 TTNSNS-3aNS-20160614-0615	(136)
5.4 TTNSNS-3aMS-20160615-0616	(149)
5.5 TTNSNS-3aMS-20150515-0516	(162)
5.6 TTVSVS-4NWS-20150722-0723	(174)
5.7 TTNSNS-4SES-20150723-0724	(188)

5.8	TTNSNS-3aMS-20140818-0819	(201)
5.9	TTNSNS-3aMM-20160603-0604	(215)
5.10	TTNSNS-3aMW-20150715-0716	(228)
5.11	TTNSVS-4NES-20160409-0410	(241)
5.12	TTNSVS-4NEM-20150501-0502	(254)
5.13	降雨过程中蕴含的规律性和独特性.....	(266)
第6章	模拟试验	(269)
6.1	降雨过程相似和差别	(269)
6.2	自主对流概率模拟试验	(271)
参考文献	(278)
附录A	一个长生命期中尺度对流系统维持机制的研究	(281)
附录B	一个高空槽前中尺度对流系统发生发展过程和机制研究	(293)
附录C	一股高原南下弱冷空气触发准静止锋对流过程分析	(305)

绪论

普遍的事实是,在许多地方对流性强降雨都是小概率事件。小概率事件是一个弱因果律问题,动力学方法处理存在着难以克服的困难。热力学熵和信息熵都是基于概率而定义的,热力学定律的普适性和可靠性,信息论原理和方法应用的广泛性,自然提示我们,对于对流性强降雨小概率事件,应用基于概率定义的热力学熵和信息熵原理来分析处理是再自然不过了。本书就是从这个基点出发,用唯象观点对强降雨过程进行探索研究,旨在发展出一些实用的预测方法。

(1)热力学视角下的强降雨问题

热力学发展史上,1854年,克劳修斯(Clausius)在热力学第二定律基础上,提出了熵的概念,把热力学第二定律用一个态函数表示。1877年,玻耳兹曼(L. Boltzmann)建立了熵与热力学概率关系式,把宏观的热力学熵与微观的热力学概率联系起来,解释了熵的微观意义。经典热力学研究的是平衡态,处理的是孤立系统和自发过程。在热力学研究从平衡态向非平衡态研究发展过程中,普律高津(Ilya Prigogine)创立了耗散结构理论。耗散结构理论指出:一个远离平衡态的非线性的开放系统通过不断地与外界交换物质和能量,在系统内部某个参量的变化达到一定的阈值时,通过涨落,系统可能发生突变即非平衡相变,由原来的混沌无序状态转变为一种在时间上、空间上或功能上的有序状态。这种在远离平衡态的非线性区形成的新的稳定的宏观有序结构,由于需要不断与外界交换物质或能量才能维持,因此称之为“耗散结构”(dissipative structure)。

产生强降雨的对流系统是暖湿空气被抬升触发后,靠水汽潜热释放产生阿基米德浮力而形成自主对流。对流系统具有高度组织性,结构特征明显,不满足静力平衡条件,需要系统外水汽的不断流入,水汽凝结释放潜热向高层低温区流动,液态水脱离系统降落到地面,依靠系统内外物质和能量的交换才能维持和发展,这些都是耗散结构的明显特征,是远离平稳区的系统。远离平衡区热力学理论研究证明,在远离平衡区中,系统的演化并不遵循某种变分原理,因而不能像平衡态或接近平衡态那样,用某种势函数来确定变化趋势的终态。在平衡态附近,抑或近平衡区的定态附近,系统对于微小涨落是稳定的,热力学势的存在显然是一种保证,使得微小涨落不至于破坏稳定性。然而系统一旦进入远离平衡区,少量的涨落就足以使它进入完全不同的新状态。即引起系统突变,从而导致按照熵产生极小原理所确定的热力学关系变得不稳定,表现出复杂的时空行为,引起宏观结构的形成和宏观有序的增加。远离平衡的开放系统离开了普适和重复,走向特殊和唯一。这解释了每一个强降雨对流系统的独特性,同时也意味着应用热力学研究方法分析和处理对流系统的发展生消问题的独特优势。

热力学定律在气象中的应用形成了大气热力学。传统大气热力学中,热力学第一定律应用远较第二定律应用广泛和深入,热力学第二定律多用于分析水汽相变,熵的概念一般仅在考

虑大气运动绝热过程中使用。富有科学革命意义的是热力学第二定律,它是热力学的精髓,是热力学定律中内涵最深刻、思想影响最广泛的定律,目前在气象学中仅得到表层应用,热力学熵原理在对流性强降雨系统的机理分析中,其优势远未发挥,留存有巨大的待探索空间。

热力学所采用的基本研究方法,是从大量现象中总结出规律,再将得来的普遍规律结合不同的特殊条件,推论出适应这些条件的特殊规律,这种方法尤其适合研究对流性强降雨过程这类小概率事件。因此,本书针对中尺度对流系统(MCS)强降雨机理等问题,应用热力学熵原理,探索强降雨发生过程的热力学机理,试图以新视界审视仍存在的 MCS 暴雨科学问题。

(2) 基于信息论的强降雨预测方法

信息论起源于通信工程。1948年,美国应用数学家香农(Shannon)发表了《通信的数学理论》著名论文,他从研究通信系统传输的实质出发,对信息做了科学定义,并进行了定性和定量描述,从而创立了信息论。根据香农的信息定义,信息是事物运动状态或存在方式的不确定性的描述。以通信过程为例,通信过程是一种消除不确定性过程。不确定性的消失,就获得了信息。原先的不确定性消除得越多,获得的信息就越多。如果原先的不确定性全部消除了,就获得了全部信息;若消除了部分不确定性,就获得了部分信息;若原先的不确定性没有任何消除,就没有获得任何信息。

强降雨预测的目的也就是为了消除强降雨是否发生的不确定性。当预测可靠性越高,则可获得更多的信息。反之,预测可靠性低,获得的信息就少。由此可见,强降雨预测可归结为信息的获取、加工和应用的过程。通过气象观测,从大气运动过程中测量当前状态的各种参数,所得的观测数据是信息源的组成部分。对气象观测数据进行分析处理,提取与强降雨发生有关的各种前期信息,然后输入到预测模式中,模式输出得到强降雨发生可能性的信息。这与香农的通信信息模型具有类似性,可以把气象观测得到的数据类似为信源,气象观测数据的分析处理类似为信道,分析处理过程中的误差和遗漏相当于信息传输过程中的干扰,预测模式类似于信宿,这样就可以把信息论原理和方法引申应用到强降雨预测中了。

应用信息熵原理,开发强降雨预测中的信息提取和信息应用技术,发展出基于信息量的对流性强降雨预测新方法,这是本书主要探索目的之一。

(3) 热力学熵与信息熵的关联性

既然热力学熵和信息熵都是基于概率定义的,两者之间必然具有某种关系。一个物理系统的热力学熵是它无组织程度的度量,是系统无序状态的描述,是状态无序性的表现。在孤立系统的演化中,系统的总熵永远不会减少,这就是热力学熵的不减原理。信息熵也是紊乱程度的一种度量,在信息论中信息熵只会减少,不可能增加,这就是信息熵不增原理。信息熵的数学表达式和热力学熵表达式是一致的,两个熵可作为同一事物看待。信息熵是消除不定度所需信息的度量,而热力学熵是系统混乱程度的度量。要使混乱的系统有序化就需要有信息,而信息的丢失就表示系统混乱程度的增加。信息熵和热力学熵互为负值。一个系统有序程度增高,则热力学熵就减小,所需获取的信息越多;反之,一个系统无序程度增加,则热力学熵增大,所丢失的信息越多。所以信息熵是负熵,可见信息熵和热力学熵的数学表达式中只差一个负号,其他都是一致的。这表明,信息熵与热力学熵公式所代表的方向相反,它表示获取信息后,消除或部分消除了不确定性,信息熵只会减少。自然,产生强降雨的 MCS 是远离平衡态的热力学系统,可用热力学原理分析强降雨产生的机理和条件,而强降雨预测可用信息论方法进行。这样,对流性强降雨机理和预测归结为热力学熵和信息熵的交叉学科问题,可以充分利用

热力学和信息论研究成果推进强降雨预测难题的解决。

(4) 建模过程的基本考虑

在对流性强降雨系统的机理分析和强降雨预测方法中,本书广泛采用了模型的描述方法。这是因为模型能把一个复杂系统的几个主要因素一致地凸显出来,有利于寻找模型的某些不变和普遍的属性。模型的一个好处就是它们允许使用精确的数学方法。但在对流性强降雨机理和预测方法研究中,笔者知道,经验科学并不是纯数学,如果把它与纯数学混为一谈,那它很容易失去活力,容易演化为一种数学游戏。笔者接受这样的观点:模型只是问题在一定条件下的近似描述,是主观和客观的结合,它不是先验的、唯一的,结论也只是相对的。在数学建模过程中,应当允许使用“不严格”的数学。在无法进行严格的数学推理时,必须代之以对问题本身的分析、归纳、类比、猜测、尝试、事后检验等等。应当强调对问题数学本质的“理解”,以此取代形式严密,但掩盖了思想本质的证明(雷功炎,1999)。本书中的各种模型是基于以上原则而建立的。

(5) 弱因果律下的规律性特征

所谓弱因果律下的规律性特征是:大致相同的原因会引起大致相同的结果。这是贯穿全书内容架构的一根主线。

第1章是贯穿这根主线的第一个结点。虽然产生强降雨的MCS形态结构和强度等千差万别,但高熵态的水汽要相变为低熵态的液态水必需吸收负熵,MCS从发生前的无序形态发展到成熟期具有很强组织性的有序状态,以及产生强降雨等都需要吸收相当数量的负熵。这些负熵MCS内部不可能产生,只能从MCS外更大尺度的低熵值环境场汇聚而来。因此,第1章中所构建MCS发生发展概念模型,以及构建对流单体环境条件模型、对流触发模型、对流单体结构和发展模型、对流传播发展模型等系列辅助性模型,到形成用于解释MCS发生发展的“负熵源→负熵汇→负熵流”机制原理,抽象地归纳了“负熵”这一“因”,然后才形成MCS有序结构特征,以及产生强降雨的“果”。但这因、果是受概率条件约束的,是“弱”的因果关系,所以热力学熵原理解释更具合理性,后文的许多实例分析也证实了强降雨热力学熵模型的正确性,由此奠定了强降雨的熵原理基础。

第2~3章是贯穿这根主线的另一结点。这两章主要依据弱因果律关系,认为强降雨预测具有不确定性,是一个概率事件,与通信工程信息模型具有类似性。通信工程信道容量和编码定理基本点是在给定条件下,寻求某种最大可能性;同样,强降雨预测对信息处理的基本要求,也是在某种条件下,寻求某种最大可能性。因此,借用通信系统模型基本原理建立气象信息模型。通信工程中的信息熵通常比较抽象,不考虑具体对象性质特征等。与通信工程系统不同,气象信息处理有其特殊性,对强降雨预测而言,存在几个特征:海量的信息源,不一定有足够的信息量;来自多元多尺度信息源的信息具有很强互补性,信息的合理利用至关重要;要求信息气象学意义具体和明确,有利提高信息应用的可靠性。

在气象信息模型基础上所提出的“相对基准信息量”和“预测信息量”概念,以及“预测可靠性”和“协调因子系数”定义,所构造的马尔可夫环模型等,这些数学模型都具有明确的气象学意义,又体现了在概率条件约束下的独特性,具有弱因果律特征。

第4章用2010—2016年共73个系列化的降雨过程实例,从总体上进行中尺度变压场、雷达回波和降雨分布的对应分析。虽然这些中尺度负变压区形态各异,对流雷达回波强弱和分布无一相同,但强雷达回波大部分出现在中尺度负变压区内,中尺度负变压区的形成或加强一

般超前于 MCS 的发生,超前时间短的为 2~5 小时,长的达 8~12 小时。这些现象表现出明显的弱因果律的规律性特征。这是贯穿主线的另一个结点。

第 5 章采用模板分析方法,对 12 个降雨分布类型和降雨强度都具有典型性降雨过程的实例进行规范化分析,发现这些降雨过程都可以分析出规律性特征:适用于 MCS 概念模型“负熵源→负熵汇→负熵流”机制的解释;适用于相对基准信息量、预测信息量和预测可靠性等基于信息量预测模型;对 MCS 发展阶段和发展趋势是否适用于马尔可夫环模型进行分析判断。这些概念模型和预测模型都是基于概率而建立起来的,具有弱因果律规律性特征。这也是贯穿主线的一个结点。

第 6 章使用自主对流发展模式和对流单体发展传播模式进行模拟试验。试验结果表明:自主对流发展模拟试验表现出了负熵汇的本质特征;可以从概率事件试验出发,经过与实际的对流雨团对应分析后,得到可以反映负熵流密度和强度的结果,显示出线对流单体传播模拟试验结果具有负熵流本质特征。这构成贯穿主线的末个结点。

总的来说,本书的基本内容可以归纳出如下几点弱因果律的规律性特征。

① 基于热力学熵原理,建立起自洽的“负熵源→负熵汇→负熵流”机制原理,适用于解释大、中尺度天气系统的相互关系,以及 MCS 发生发展的环境条件关系。

② 在气象信息模型基础上,发展出相对基准信息量、预测信息量、预测可靠性、协调因子系数等概念和定义,构建了基于信息量的对流性强降雨预测方法,明晰了对流性强降雨预测的关键所在,指出了解决问题的途径,对提高预测可靠性具有指向作用。

③ 通过大样本实例规范化、程序化的“负熵源→负熵汇→负熵流”机制分析,进行了基于信息量的强降雨预测试验,验证了热力学熵模型和信息熵模型的合理性,证实广泛适用于对流性强降雨预测。

④ 模拟试验表明,抽象的试验结果也可以反映实际对流性降雨过程本质属性特征。

(6)有待继续推进研究的科学问题

本书的理论基础还比较薄弱,应用研究也仅是初步的,还有许多基础性的科学和技术问题有待深入研究。为了夯实基础和拓展应用范围,需要进一步探究如下以下几个方面的问题。

① 暖湿气层厚度对自主对流概率影响机制。

② 中尺度负变压区近平衡态的昂萨格倒易定理判别或解释。

③ 暖湿空气微团热力运动独立性假设,以及对流单体极大上升速度廓线的正态分布函数曲线特征的证明或解释。

④ 由对流单体的极大速度廓线正态分布函数曲线特征,推论一般非线性系统的基本特征:“一个自持的正反馈系统的正半程,必有某种属性服从于一定的概率分布。”对流单体作为正反馈系统的模拟研究结果,探及复杂系统的基本属性层面,这是一个复杂系统深层次问题,值得继续深入研究。

⑤ 4D 维度标准气压场分离算法设计和实现。

⑥ 中尺度变压场边缘弱化效应消除,以及多个中尺度变压场拼图协调方法。

第1章 强降雨热力学熵模型和原理

绪论中已指出,对流性强降雨是小概率事件,应用热力学熵原理分析和处理对流系统的发展生消问题具有独特优势。更进一步地,强降雨的产生,从热力学观点看,就是高熵状态的水汽吸收负熵后相变为低熵状态的液态水,其本质是大气的一个热运动过程。热力学第二定律指出,一个封闭的系统内部是不能自行产生负熵的,要使系统内高熵状态的水汽吸收到负熵,系统必须是一个开放的,并有使系统外的负熵向系统内输送,满足系统内水汽大量吸收负熵相变为低熵液态水的环境。在系统内水汽相变和熵变过程中,系统内外环境会伴随出现各种热力学过程特征。本章就是在这个思路下,主要应用热力学熵原理,建立强降雨热力学熵模型,从宏观和中尺度解释、推论对流性强降雨天气系统的形成发展过程及基本特征,为后续的强降雨信息熵方法提供基础。

1.1 强降雨熵变过程特征

对流性强降雨主要是 MCS 产生的,以下分析 MCS 产生强降雨的熵变过程特征。

1.1.1 水汽凝结熵变特征

水汽为高熵值状态,水为低熵值状态。水汽凝结为水是从高熵值状态变化到低熵值状态,也就是说,水汽凝结为水必须吸收负熵。由实验数据得知,水汽凝结潜热比水的冻结潜热大得多, 0°C 时单位质量水汽凝结与水的冻结需要吸收的负熵比值为

$$k = \frac{S_{wv}}{S_{w}} = \frac{L_{wv}}{L_{w}} = \frac{2500.6}{333.6} \approx 7.5 \quad (1-1)$$

式中, S_{wv} 为单位质量的水相变为水汽时所需吸收的熵值,其值为 $2500.6(\text{J} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$; S_w 为单位质量的冰相变为水时所需吸收的熵值,其值为 $333.6(\text{J} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$; L_{wv} 为水的汽化潜热,其值为 $2500.6(\text{J} \cdot \text{g}^{-1})$; L_w 为冰融解潜热,其值为 $333.6(\text{J} \cdot \text{g}^{-1})$ 。式(1-1)表明,水汽凝结熵变值为冰融解熵变值的 7.5 倍,因此在强降雨过程中,水汽凝结熵变影响最为重要。

水汽凝结潜热与温度变化的线性关系为

$$L_{wv} = 2500.6 - 2.37t \quad (1-2)$$

式中, t 为温度($^{\circ}\text{C}$)。式(1-2)表明,随着温度升高,水汽凝结潜热呈线性减少,因而水汽相变的熵变绝对值也随着减小。单位质量水汽凝结熵变值计算式为

$$\Delta S = -\frac{Q}{T} = -\frac{L_{wv}}{T} \quad (1-3)$$

式中, Q 为热量(J); T 为绝对温度(K)。利用式(1-2)和(1-3)可以计算出不同温度条件下单位

质量水汽凝结熵变值(表 1-1)。从表中水汽凝结熵变值随温度变化的数据可以解释,暖云中除水汽含量丰富外,水汽凝结所需吸收的负熵绝对值也比冷云小,所以,暖云更容易产生强降雨。

表 1-1 不同温度条件下单位质量水汽凝结熵变值列表

$T(^{\circ}\text{C})$	$T(\text{K})$	$L_{wv}(\text{J} \cdot \text{g}^{-1})$	$\Delta S(\text{J} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$
-10	263	2524.30	-9.598
-5	268	2512.45	-9.375
0	273	2498.23	-9.151
5	278	2488.75	-8.952
10	283	2476.90	-8.752
15	288	2465.05	-8.559
20	293	2453.20	-8.373
25	298	2441.35	-8.192
30	303	2429.50	-8.018

1.1.2 强降雨量级与熵变率

强降雨主要是指暴雨及以上量级降雨,按中国气象局标准分级如表 1-2 所示。

表 1-2 强降雨级别列表

单位:mm

	1 小时	3 小时	6 小时	12 小时	24 小时
特大暴雨	>50	>80	>100	>140	>250
大暴雨	30~50	40~80	60~100	70~140	100~250
暴雨	16~29	20~39	20~59	30~69	50~99

引自:2016,气象知识,科普活动增刊。

设单位质量水汽熵值为 S_v ,单位质量水熵值为 S_w ,因 $S_v > S_w$,令

$$\Delta S_{wv} = |S_w - S_v|$$

式中, ΔS_{wv} 为单位质量水汽与水的熵差绝对值($\text{J} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)。为讨论方便,假设降雨自离开云底直到降落地面都没有蒸发损失,地面测得降雨量与云底相同。取华南夏季常见凝结高度约 920 hPa,温度 T 约 297 K,水汽潜热 $J=2443.72 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1}$,降雨强度取表 1-2 各量级中值,计算式为

$$S=Q/T=MJ/T=M(2443.72/297)$$

式中, M 为水汽质量(g)。按上式计算,结果列于表 1-3 中。

表 1-3 降雨强度量级熵变率列表

降雨强度量级	22mm/1h	30mm/3h	40mm/6h	50mm/12h	75mm/24h
项目					
$M(\text{g})$	2.2000	3.0000	4.0000	5.0000	7.5000
$S(\text{J} \cdot \text{K}^{-1})$	16.77	22.87	30.49	38.11	57.93
$S/h(\text{J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{h}^{-1})$	16.77	7.62	5.08	3.18	2.41

降雨强度量级熵变率级差大致可分为三级:1 h 达暴雨量级的降雨熵变率极大,必定是对流性强降雨;3~6 h 达暴雨量级的基本是以单位时间强度量为特征,熵变率较大,一般是对流性强降雨;12~24 h 达暴雨量级的熵变率明显偏小,既可能是以单位时间强度量为特征的较高强度对流性降雨,也可能是以时段累积量为特征的低强度连续性降雨(图 1-1)。由此可见,熵变率的大小隐含着降雨性质的不同。

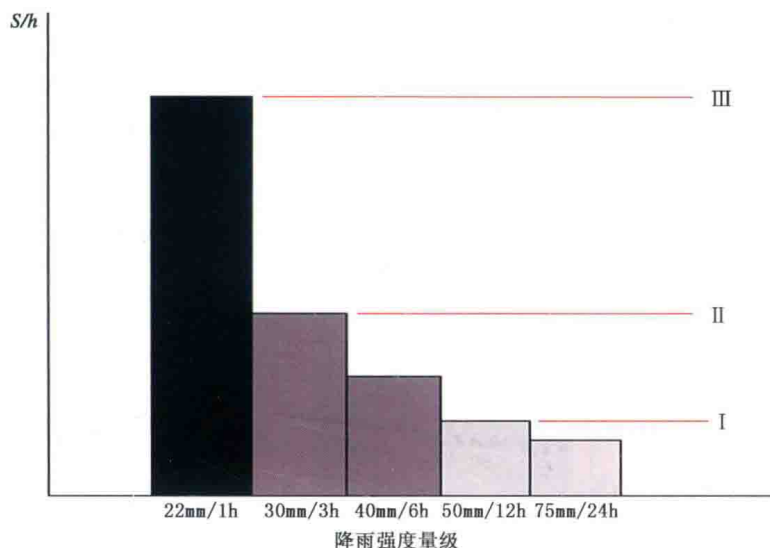


图 1-1 降雨强度量级熵变率分布图

1.1.3 MCS 底部垂直速度

水汽垂直通量反映了水汽垂直输送进入 MCS 的强度,与 MCS 的发展关系密切。水汽垂直通量的计算式为

$$m_v = \rho \omega W \quad (1-4)$$

式中, m_v 为水汽垂直通量($\text{g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$); ρ 为湿空气密度($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$); ω 为混合比($\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$); W 为垂直速度($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)。

依据华南夏季常见对流天气探空观测结果,设云底高度为 1000 m,从 MCS 底部进入的饱和水汽准同步凝结降落,取 W 为 MCS 底部垂直速度,湿空气密度 $\rho = 0.001176 \text{ g} \cdot \text{cm}^3$,饱和比湿 $\omega \approx q_s = 0.0188 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$,把式(1-4)改写为

$$W = \frac{m_v}{\rho q_s} = \frac{m_v}{2.21088 \times 10^{-5}}$$

依据表 1-2 降雨强度量级,利用上式计算得到空气垂直速度(表 1-4)。从表中 W 的范围可以看出,1~3 h 降雨量达暴雨以上强度的 MCS 是不满足准静力平衡条件的。

表 1-4 降雨量级对应空气垂直速度列表

降雨量级	22mm/1h	30mm/3h	40mm/6h	50mm/12h	75mm/24h
$m_v(\text{g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$	6.1111×10^{-3}	2.7778×10^{-3}	1.8519×10^{-3}	1.1574×10^{-3}	8.6806×10^{-4}
$W(\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$	277	126	84	52	39

