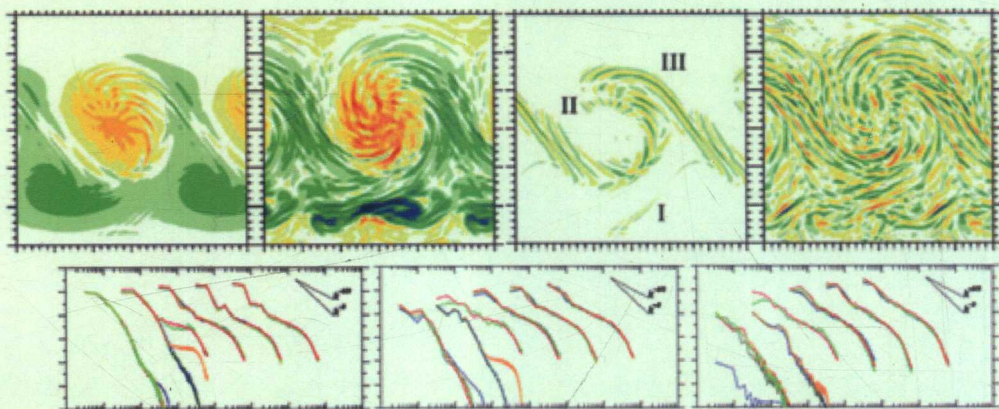


湿大气中尺度能量谱 理论和应用

张立凤 彭 军◎著



湿大气中尺度能量谱理论和应用

张立凤 彭 军 著

 气象出版社
China Meteorological Press

内容简介

本书介绍了非静力湿大气中尺度能量谱理论及应用的研究成果:首先给出了改进的非静力湿大气运动控制方程组及其扰动形式;然后基于这些方程组开展了湿位涡、湿有效能量以及中尺度能量谱的研究,定义了湿物质重力势能,揭示了湿大气有效能量的转化关系;最后设计了理想的梅雨锋和湿斜压波系统,从动力学上揭示了两类系统的中尺度能量谱特征和形成机理。

本书可供大气科学学者和相关专业的师生参考,也可作为研究生教材。

图书在版编目(CIP)数据

湿大气中尺度能量谱理论和应用/张立凤,彭军著. --

北京:气象出版社, 2017. 6

ISBN 978-7-5029-6570-9

I. ①湿… II. ①张… ②彭… III. ①大气能量学-研究

IV. ①P401

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 128616 号

Shidaqi Zhongchidu Nengliangpu Lilun he Yingyong

湿大气中尺度能量谱理论和应用

张立凤 彭 军 著

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:李太宇

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:北京建宏印刷有限公司

开 本:787 mm×1092 mm 1/16

印 张:8

字 数:204 千字

版 次:2017 年 6 月第 1 版

印 次:2017 年 6 月第 1 次印刷

定 价:50.00 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

序

强烈的乃至造成灾害的天气过程大都与中尺度天气系统(mesoscale weather system)相关。因此,要认识、分析和预报它们,就必须建立较严谨的相应的基本方程组和作相应的理论研究。这有别于大尺度天气系统(synoptic[meteorological]system,按英文的字源直译是“可图示的天气[气象]系统”),以及其相应的基本方程组和动力学研究。对于大尺度天气系统的方程和动力学过程的研究,今日大体上已较成熟和定型了,尽管其中包含有专门适用的近似和不少未解决的问题。但对于中尺度天气系统的研究,在 20 世纪后半叶仅仅只是开始,21 世纪才处于蓬勃发展起来的阶段,现已有许多发出亮丽闪光的研究成果,但尚难说已经是成熟或定型了的,还需要继续做更多更系统更深入的研究。本书的作者张立凤教授的研究结果就属于这些继续深入研究的亮丽者之一。

我国大部分地区位于中低纬度带和季风区,气象灾害频发。还在 20 世纪 50 年代,谢义炳、顾震潮、陶诗言等气象学者即发现,不能生硬套用挪威学派和芝加哥学派发展起来的对中高纬度带适用的大尺度天气系统的分析方法和理论。谢义炳教授明确指出,对于中尺度天气系统,甚至中低纬度带的一些大尺度天气系统,非地转风明显,水汽及其相变过程极其重要,必须在分析、预报和建立理论时予以仔细考虑。他用湿空气的相当位温 θ_{se} 代替干空气的位温 θ 来清楚地分析出东亚(尤其夏季)锋区结构及其演变,又于 20 世纪 70 年代初期提出湿有效位能和湿不稳定。它比干空气运动不稳定的临界水平尺度要小许多,理论与实际相符合,尽管他仍用了准地转模式(这对于平直基流是适用的)。这些尤如“报春燕子”,尽管当时尚有人对之有所诟病,但谢先生的发现和基本结论至今已成为我国和世界的共识了。此后,先在国内,继而国外,相关的分析方法和各种理论研究就积极开展起来了。例如,对暴雨落区的预报,尤其是其临近预报,用什么气象要素合成的诊断量可作为征兆? 就是一个重要的研究课题。

如同 20 世纪中期一样,那时对中高纬度带和大尺度系统发展的理论研究,得出锋区(即斜压性强的地带)、正涡度(或位涡度)及其平流很有指示性。在锋区扰动的有效位能可转换成水平运动的动能,扰动发展;而涡度及其平流决定系统发

展的强度和向何处移动。这在电子计算机不够快和数值天气预报未广泛业务应用之前是十分有用的。对于中尺度问题,几经研究,找出湿位涡(wet potential vorticity)对于暴雨落区很有显示度。

本书作者张立凤教授,在本书中首先详细研究了适合于湿大气中尺度运动的一些近似等专门问题,例如,引入局地气候标准大气代替等温大气作为参考态,引入修改的湿位温,使用湿假不可压缩方程近似等,随后详尽列出湿大气中尺度运动的完整动力学和热力学方程组及其扰动形式,并作了详尽的解说。就笔者所见所知,本书所列,是最为完整、严谨和形式紧凑的。只是作者并不列出相关的初始条件和边界条件,此乃因作者只拟作深入的动力分析和机理研究,无意于引导读者去改进和重新研制中尺度数值天气预报模式以取代现有的各种模式。

由这些基本方程可推出湿大气内部运动的许多合成变量(泛函),便于作多种诊断分析和机理研究,作者也一一作了推导、分析和给出实际应用的个案。这是本书的核心和最精彩的部分。除了前面已提到的湿位涡之外,作者专注于各种能量及其收支、相互转换和转移,还有按运动的空间尺度的能谱分布,及其串级和转换与转移。理论部分就是本书的第4、5章,实际应用分析案例就是第6至第9章。请读者注意,尽管本书作者的推导详细、层次分明,但要读懂第4、5两章,得有耐心、全神贯注并且一气呵成。这是因为湿空气过程本身太复杂了,而且许多都是尚在探索中的新事物,非但要求作者有融会贯通各方面的本领,还需有读者的悟性,像在今日面对大数据而寻找因果关系一样。简言之,作者提出和叙述的(局地)有效能量的定义是很有用的,能谱分析也是很有用的分析工具。在中尺度天气系统发展过程中,湿空气运动能量的形式,其来源及转换和能谱转移是十分重要的。在湿空气中,有不同于干斜压大气大尺度运动的能量形式,例如,因多相水物质的加入而有的湿有效位能(书中称为APE),因垂直速度的重要作用导致湿空气可压缩性作用产生的有效弹性势能(书中称为AEE),甚至还有夹在空气当中的各相水物质的势能(本书称作MGE)。湿空气中的能量中可以使用于相互转换的部分的总和即称为有效能量(available energy)。

本书作者特别注意了能谱的转换及串级和转移问题,这既关系到同在一定谱区内的中尺度运动的发展演变,也关系到不同谱区间的能量交换和转移问题,即不同尺度系统的相互作用,例如大尺度运动与中尺度运动相互作用。笔者以为,中尺度系统自身除经历发生发展到衰消的生命过程,也必有与大尺度系统及比其尺度小的运动(如杂乱的“对流”和不规则的“湍流”)的相互作用。大抵中尺度系统在发生和发展初期,大尺度运动的结构提供了初始扰动发展(不稳定)背景,而

位于其处的小尺度运动(杂乱的对流等)于是自组织起来,从大小两头将能量转移到中尺度运动中来,形成明显的中尺度系统。而在中尺度系统发展阶段,主要是自身的各种能量的相互转换而发展,尤其是水汽潜热释放而使动能大增。等到发展到鼎盛和进入衰减阶段,其结构在垂直方向相当大范围内就趋于一致,即趋于一定程度的正压大气运动,于是能量必然同时向大尺度和小尺度转移,前者为大尺度吸收,尤其是加强急流;后者为通过小尺度运动而耗散。故在不同阶段,能谱及其转移是不同的。对不同阶段分别进行研究,可能会更好理解其生命史。本书作者也试图这样做,一些结果很有启发性。至于国外的一些做法,例如就全程套用三维均匀湍流能量串级形式和理论也许是不妥的,其结论还须商榷。

也许笔者是本书的第一批读者之一,研读得不仔细,谨把阅读的体会写出来供后来的读者参考和批评指正。应本书作者盛情之邀,也只好把这些体会权作为本书的一篇序文。

曾庆存

(曾庆存)

2017年5月

前 言

中尺度天气系统的发展是造成暴雨灾害的关键因子,对其准确预报的前提是了解系统发展演变的动力学机理。由于中尺度系统具有非地转平衡、非静力平衡、湿物理过程复杂、多尺度系统相互作用等重要特点,使得中尺度动力学的研究难度很大。

从能量学的角度看,中尺度系统的发展必然伴随着中尺度动能的增加。而分析动能的来源可知,中尺度动能增加的途径大致有两种:一种是在中尺度波段上有其他形式的能量向动能的直接转换;另一种是大尺度或小尺度的动能向中尺度动能的串级输送。能量谱能够给出不同尺度(或波段)上能量的分布,谱空间的能量收支方程能够给出不同尺度上的能量收支和转换。所以,通过诊断能量谱收支方程,可得到中尺度能量的演变和来源,即通过分析中尺度能量谱形成的机理,可为揭示中尺度系统发生发展的机理提供新视角。

大量观测事实表明,在对流层高层和平流层低层中,大气水平动能谱在不同的波长范围表现为不同的斜率 k_h 。在天气尺度上,动能谱近似满足 k_h^{-3} ;而在中尺度上,动能随波数的变化则比较平缓,动能谱近似满足 $k_h^{-5/3}$ 。为解释观测动能谱形成的动力学机理,已有大量的研究工作。但从前人的工作结果可知, $k_h^{-5/3}$ 大气中尺度能量谱形成的动力学机理至今仍然是一个具有争议的科学问题,而且越来越多的研究已经表明,大气中基于惯性湍流假定的纯串级理论并不能全面地解释实际中尺度能量谱的特征。过去研究能量谱的理论框架还不能妥善地描述实际大气的情况,这种理论框架的局限性也严重限制了研究结果的全面性。

针对这些问题,本书以湿大气中尺度能量谱理论为切入点,以解释中尺度 $k_h^{-5/3}$ 谱斜率形成机理为牵引,在非静力可压缩湿大气的理论框架下,定义了局地湿有效位能、有效弹性势能和湿物质重力势能,改进了湿大气运动方程组和各种能量收支方程,给出了非静力湿大气中能量的转换关系,推导得到了能量谱收支方程,以中纬度的典型天气系统——斜压波系统和对我国夏季洪涝有重大影响的梅雨锋系统为例,研究了中尺度能量谱的分布特征及形成机理。

本书共分 10 章。第 1 章论述了研究的意义及相关问题的研究现状。第 2 章

推导了改进的非静力湿大气运动控制方程组、控制方程组的扰动形式以及湿假不可压缩控制方程组。第3章基于改进的非静力湿大气运动控制方程,定义了改进的湿位涡并在暴雨个例中进行了应用和比较。第4章基于非静力湿大气运动控制方程组的扰动形式,发展了非静力湿大气局地有效能量理论。第5章基于湿假不可压缩控制方程组,推导了非静力湿大气能量谱收支方程。第6章和第7章研究了梅雨锋系统的中尺度动能谱和湿有效位能谱的分布及形成机理。第8章和第9章研究了湿斜压波系统在平流层低层和对流层高层的中尺度能量谱的分布及形成机理。第10章给出了全文的总结。

本书的研究工作得到了国家自然科学基金项目“梅雨期暴雨系统的中尺度动能谱及可预报性研究”(41375063)的资助,为此特向国家自然科学基金委员会地学部表示感谢。本书的出版还得到国防科技大学气象海洋学院领导和气象出版社的重视和支持,在此也向他们表示感谢。最后还要感谢多年来支持我们工作的曾庆存院士,引领我进入中尺度领域并一直进行合作研究的张铭教授,以及其他鼓励和支持过我的同事、朋友们。

张立凤

2017年5月12日

目 录

序

前言

第 1 章 绪论	(1)
1.1 研究背景与选题意义	(1)
1.2 湿大气相关理论研究进展	(2)
1.3 中尺度能量谱研究进展	(6)
1.4 存在问题	(9)
第 2 章 非静力可压缩湿大气运动控制方程	(11)
2.1 修改位温的引入	(11)
2.2 改进的湿大气控制方程组	(12)
2.3 控制方程组的扰动形式	(13)
2.4 湿假不可压缩控制方程组	(14)
2.5 小结	(15)
第 3 章 基于改进的湿大气控制方程的湿位涡理论	(16)
3.1 引言	(16)
3.2 改进的湿位涡及其倾向方程	(17)
3.3 改进湿位涡的性质	(19)
3.4 改进湿位涡的应用	(19)
3.5 小结	(24)
第 4 章 非静力湿大气局地有效能量理论	(25)
4.1 引言	(25)
4.2 有效能量定义和能量收支方程	(25)
4.3 参考态的指定	(28)
4.4 在理想斜压大气中的应用	(31)
4.5 小结	(33)
第 5 章 非静力湿大气能量谱收支方程	(35)
5.1 引言	(35)
5.2 湿假不可压缩系统的能量分析	(36)
5.3 谱的计算方法	(37)
5.4 能量谱定义及能量谱收支方程	(38)
5.5 非线性项的进一步分解	(41)
5.6 一维总水平波数谱和相应的谱收支方程	(42)

5.7 小结	(43)
第 6 章 梅雨锋系统的中尺度动能谱	(45)
6.1 引言	(45)
6.2 模式与试验设计	(45)
6.3 模拟的梅雨锋系统特征	(49)
6.4 梅雨锋系统中尺度动能谱特征	(52)
6.5 梅雨锋系统中尺度动能收支谱分析	(57)
6.6 小结	(59)
第 7 章 梅雨锋系统的湿有效位能谱	(62)
7.1 引言	(62)
7.2 理想梅雨锋系统特征进一步分析	(62)
7.3 梅雨锋系统的中尺度湿有效位能谱	(64)
7.4 梅雨锋系统湿有效位能的谱收支及转换谱	(67)
7.5 小结	(70)
第 8 章 平流层低层湿斜压波系统的中尺度能量谱	(72)
8.1 引言	(72)
8.2 研究方法	(72)
8.3 理想斜压波的模拟	(74)
8.4 平流层低层的能量谱	(80)
8.5 平流层低层的能量谱收支	(84)
8.6 湿过程作用和能量串级机制	(89)
8.7 小结	(90)
第 9 章 对流层高层湿斜压波系统的中尺度能量谱	(93)
9.1 引言	(93)
9.2 能量谱收支方程	(94)
9.3 斜压波模拟的回顾	(94)
9.4 能量串级、能量转换和能量垂直输送	(95)
9.5 非绝热作用	(99)
9.6 绝热非保守项和三维散度项	(102)
9.7 净直接强迫与能量串级的比较	(103)
9.8 小结	(105)
第 10 章 全书总结	(106)
10.1 非静力湿大气基础理论研究	(106)
10.2 理想梅雨锋系统中尺度能量谱动力学机理研究	(107)
10.3 理想斜压波系统中尺度能量谱动力学机理研究	(108)
参考文献	(110)

第1章 绪论

1.1 研究背景与选题意义

中尺度天气系统是造成气象灾害的主要天气系统。认识和了解中尺度天气系统发展演变的动力学机理是准确预报中尺度天气的前提,也是预防和降低气象灾害的科学保证(高守亭等,2013)。中尺度天气系统的典型特征为:非地转平衡、非静力平衡、复杂的湿物理过程,也正是这些特点使得中尺度动力学研究更为复杂(王文等,2003;高守亭,2007)。一直以来,中尺度动力学研究受到三方面的挑战:一是由于高时空分辨率的观测资料缺乏,使得对中尺度系统结构和演变规律的认识受到限制;二是中尺度天气是不同尺度运动系统共同作用造成的,不同尺度天气系统相互作用的物理机制还有待进一步研究;三是中尺度系统的演变和发展过程中伴随着复杂的湿物理过程,而对这些湿物理过程的认识,尤其是湿物理过程对中尺度系统反馈作用的认识还不是很深刻,如何合理地考虑水汽等湿物质作用仍然是理论研究和模式发展面临的重大难题。

近十多年来,大气科学基础理论的研究进展,高速度和大容量存储计算机及其高效并行计算方法的快速发展,加速了高分辨率非静力数值模式的发展,例如 MM5(Dudhia,1993)、WRF(Skamarock et al.,2008)、COSMO-DE(Steppeler et al.,2003)、AROME(Seity et al.,2010)等。这些高分辨率非静力数值模式的构造是基于精确的大气原始方程组,并考虑了完整的大气物理过程(例如水汽相变、辐射、边界层混合、耗散等),同时可以显式地预报大气中的各种湿物质(包括水汽、云水、雨水等)。数值模式的发展不仅提高了数值预报水平,同时模式输出的高分辨率结果也在一定程度上缓解了缺乏高时空分辨率观测资料的限制,为中尺度天气系统的动力学机理研究提供了一条可行的途径(Zhang et al. 2002, 2003, 2006; Tan et al., 2004; Bei 和 Zhang,2007; 赵玉春等 2011)。Zhang 等(2002)基于 MM5 模式成功模拟了发生于美国东海岸的一次暴雪过程,其控制试验较好地再现了快速气旋发展和伴随的降水特征,并在此基础上研究了其可预报性问题;Bei 和 Zhang (2007)利用 MM5 模式较好地模拟了一次梅雨期大暴雨过程,并研究了其中尺度系统可预报性;Plougonven 和 Snyder (2007)基于中尺度 WRF 模式模拟了不同类型的斜压波系统,研究了急流和锋面激发的重力惯性波结构;赵玉春等(2011)基于 WRF 模式研究了典型梅雨锋系统的多尺度结构特征;Schemm 等(2013)基于 COSMO-DE 模式模拟了湿斜压波系统,研究了暖湿输送带的形成。尽管当前的数值模式已经可以在一定程度上模拟出许多实际天气系统的中尺度特征,但是这些天气系统发展的中尺度动力学机理还不是十分清楚。这些中尺度天气系统虽然在性质、结果和发展机理方面有差异,但本质上都发生在非静力的湿大气中,属于湿大气动力学研究的范畴。因此,要想进

一步弄清楚这些系统的发生、发展机理,首先要深入研究中尺度非静力湿大气理论。

相对非静力湿大气,人们对于干静力平衡大气的理论研究要深入得多。适用于干静力平衡大气的理论有很多,其中具有代表意义的有位涡理论、有效能量学理论等。位涡是大气中的重要热力学和动力学综合参数;在绝热、无摩擦的干大气中位涡具有保守性和可反演性,正是由于位涡具有这些性质,使得这个物理量被广泛地用于大尺度大气运动的诊断分析。能量转换和守恒定律是自然科学中物质运动遵循的普遍规律。本质上,天气系统的演变过程可看成是大气能量传播、累积和释放的过程,大气中不同形式能量的转换和不同尺度能量的串级直接关系到中尺度系统的发展以及中尺度天气的强度。因此,从能量学角度研究大气运动规律是大气科学研究的一种有效方法。但是,已有的这些理论显然都不能直接应用于非静力湿大气,因为实际大气中,天气系统的演变都伴随着水汽的相变及潜热的释放等物理过程,这些湿物理过程会破坏位涡的守恒性质,同时潜热加热对系统的能量循环也有重要的贡献。

除了具有非静力、湿的特点以外,大气运动还有一个重要的特点,即多尺度特征。从波动的角度,张铭等(2008a, 2008b, 2010, 2013)通过频谱分析,对不同尺度的大气波动做了系列的研究工作,揭示了不同尺度波动的性质及其不稳定条件,并将理论成果应用于暴雨、热带气旋和亚洲季风的研究中。从能量的角度看,中尺度系统的发展必然伴随着中尺度动能的增加,而动能的来源有两种可能的方式:一种是其他形式的中尺度能量向中尺度动能的直接转换;另一种是大尺度或小尺度动能向中尺度动能的串级输送。但是,以往的能量学理论多从整体上研究系统的能量转换规律,并不能揭示不同尺度的能量转换规律、不同尺度间能量的串级规律以及不同高层能量的垂直输送规律。这些问题实质上属于大气能量谱分析(spectral analysis)的研究内容,同时也构成本研究的重点。大气能量作为描述大气状态的物理量,对其进行谱分析在天气过程发展机理和预报研究中都有重要的作用。理论上,谱分析可以为研究大气能量循环提供更多的物理视角(Fjørtoft, 1953),是认识大气运动规律的有效方法。但是过去的能量谱理论基本上都是基于静力平衡大气发展的(Koshyk 和 Hamilton, 2001; Waite 和 Snyder, 2009),而且对湿物理过程的考虑还很不全面(Hamilton et al., 2008; Waite 和 Snyder, 2013; Augier 和 Lindborg, 2013),因此,湿物理过程以及非静力作用对中尺度系统能量串级和能量转换的影响还不是十分清楚,迫切需要开展非静力湿大气能量谱理论研究。

1.2 湿大气相关理论研究进展

大气运动基本方程组是一切大气科学研究的出发点,也是各种大气动力学理论的基础,例如前面提到的位涡理论和有效能量学理论。不同于干大气动力学,研究湿大气动力学首先要确定如何正确地描述水汽以及凝结物的作用。由于位温的保守性,干大气动力学控制方程中常采用其作为热力学状态变量。为了确定湿空气的热力学属性,科学家推荐了各种不同的位温参数来描述湿空气。例如, Ninomiya (1984)建议在研究梅雨锋系统时采用相当位温(θ_e); Tripoli 和 Cotton (1981)使用一个所谓的“冰-液态水位温(ice-liquid water potential temperature)”来描述深对流云系统中的热动力过程。显然,干位温只适合于干大气,而相当位温只适用于饱和湿大气,考虑到实际大气往往是处于含有水汽的非均匀饱和状态, Gao 等(2004)发展了广义位温概念(θ_g)。这些不同形式的湿位温定义在一定程度上体现了水汽对湿空气热力学

属性的作用,相应的研究也增强了人们对水汽作用的重视(Cho 和 Cao,1998; Zhang et al., 2002)。但是这些湿位温存在一个共同的缺陷,即虽然它们都是从热力学角度在一定的假设下得到的,但是它们不满足最基本的湿空气状态方程。因此,这些湿位温形式无法作为基本状态变量来描述湿空气基本控制方程组。无疑,如何确定合适的湿大气状态变量,仍然是制约湿大气动力学理论发展的基础问题,这自然也在一定程度上限制了湿位涡理论和湿有效能量理论的发展。

1.2.1 湿位涡理论

Etrel (1942) 首次给出了斜压干大气中位涡的一般形式:

$$P_d = \alpha_d \zeta_a \cdot \nabla_3 \theta \quad (1.1)$$

其中, α_d 和 θ 是干空气的比容和位温, $\zeta_a = 2\boldsymbol{\Omega} + \nabla_3 \times \mathbf{v}$ 是三维绝对涡度矢量, $\mathbf{v}$ 是三维速度矢量, $\boldsymbol{\Omega}$ 是地球自转角速度矢量, $\nabla_3 = (\nabla, \partial_z)$ 为三维梯度算子。在绝热、无摩擦的大气中干位涡具有保守性和可反演性。正是由于位涡具有这些性质,使得这个物理量被广泛地用于大尺度大气运动的诊断分析。然而实际大气中,天气系统的演变都伴随着水汽的相变及潜热的释放等物理过程,这些湿物理过程会破坏位涡的守恒性质。因此,基于位涡研究湿大气中天气系统演变的前提是:合理地将 Etrel 干位涡的概念拓展到湿大气中。

Bennetts 和 Hoskins (1979) 首次利用相当位温 θ_e 替换 θ 定义了相当位温湿位涡(简称相当位涡)

$$P_e = \alpha \zeta_a \cdot \nabla_3 \theta_e \quad (1.2)$$

其相应的变化方程为

$$dP_e/dt = \alpha(\nabla_3 p \times \nabla_3 \alpha) \cdot \nabla_3 \theta_e + \alpha \zeta_a \cdot \nabla_3 \dot{\theta}_e + \alpha(\nabla_3 \times \mathbf{F}) \cdot \nabla_3 \theta_e \quad (1.3)$$

其中, $\mathbf{F}$ 为摩擦强迫矢量, p 和 α 分别是湿空气的气压和比容, $\dot{\theta}_e \equiv d\theta_e/dt$ 代表总的非绝热加热。相当位涡的概念已广泛用于研究斜压系统中的条件对称不稳定——锋面雨带形成的一种可能机制(Emanuel, 1979, 1983, 1988)。Cao 和 Cho(1995)通过数值试验进一步诊断了温带气旋中湿位涡的产生,指出在三维湿绝热无摩擦流中,当斜压矢量与水汽梯度的夹角小于(大于) 90° 时负(正)的湿位涡产生。湿位涡方程在 Cao 和 Cho (1995)的研究中得到进一步发展:

$$dP_e/dt = A_e(\nabla_3 \theta \times \nabla_3 p) \cdot \nabla_3 q + \alpha \zeta_a \cdot \nabla_3 \dot{\theta}_e + \alpha(\nabla_3 \times \mathbf{F}) \cdot \nabla_3 \theta_e \quad (1.4)$$

其中, q 是比湿, A_e 是位温、气压和比湿的函数,其形式相当复杂。

值得注意的是,使用相当位温等价于假定了大气状态是完全饱和的,而实际上,在中尺度对流系统中,大气既非绝对干的,也非绝对饱和的,而是处于典型的非均匀饱和状态。为了解决这一矛盾,Gao 等(2004)通过引入凝结概率函数 $(\frac{q}{q_s})^k$, 定义了广义位温

$$\theta_g = \theta \exp \left[\frac{Lq_s}{c_p T} \left(\frac{q}{q_s} \right)^k \right] \quad (1.5)$$

其中, c_p 是干空气定压比容, L 是水汽凝结潜热率, q_s 是饱和比湿; k 是气压、温度、比湿和凝结核密度的函数。一般地, k 取大于 1 的常数;王兴荣等(1999)推荐取 $k = 9$ 。利用 θ_g 取代位温 θ , 就得到了广义湿位涡(GMPV)

$$P_g = \alpha \zeta_a \cdot \nabla_3 \theta_g \quad (1.6)$$

在饱和或接近饱和的条件下,基于凝结函数定义的广义湿位涡是有效的,但是在没有凝结

或相对湿度较低的情况下其应用是受限的(Gao et al., 2004)。湿度梯度大的区域虽然容易形成降水,但大的湿度梯度并不是降水发生的充分条件。也就是说,降水中心与湿度梯度大值中心并不完全重合。广义湿位涡可能过分地强调了接近饱和和区域湿度梯度的作用。

由于相当位温是饱和湿大气的基本量,并不能严格反映真实大气的非均匀饱和属性,所以为了使位涡倾向方程真实反映湿位涡产生机制,特别是反映湿度梯度和非绝热作用对湿位涡的贡献,基于相当位温定义的湿位涡形式变得越来越复杂,而且在推导倾向方程时,不可避免地引入了一些近似或半经验半理论参数。另外, Schubert 等(2001)曾指出基于相当位温定义的湿位涡不满足可反演原则。

基于 Ooyama (1990, 2001)提出的湿非静力模式, Schubert 等(2001)定义了一种形式的虚位温

$$\theta_v = \frac{p}{\rho R_d} \left(\frac{p_0}{p} \right)^{R_d/c_{pd}} \quad (1.7)$$

其中, $\rho = \rho_d + \rho_v + \rho_c + \rho_r$ 为全密度, ρ_v 、 ρ_c 、 ρ_r 分别对应水汽密度、云水密度和雨水密度;并证明了在湿位涡方程中使用虚位温 (θ_v) 可以消除力管项,即

$$\nabla_3 \theta_v \cdot (\nabla_3 \rho \times \nabla_3 p) = 0 \quad (1.8)$$

用 θ_v 定义的新湿位涡即为虚位温位涡(简称虚位涡),其表达式为:

$$P_\rho = \rho^{-1} \zeta_a \cdot \nabla_3 \theta_v \quad (1.9)$$

同时相应的湿位涡方程为:

$$dP_\rho/dt = \rho^{-1} [(\nabla_3 \times \mathbf{F}) \cdot \nabla_3 \theta_v + \zeta_a \cdot \nabla_3 \dot{\theta}_v + P_\rho \nabla_3 \cdot (\rho \mathbf{U})] \quad (1.10)$$

其中, $\mathbf{U}$ 为雨水物质相对于湿空气的速度矢量,且 $\dot{\theta}_v = d\theta_v/dt$ 。

随后, Bannon(2002)基于多成分流和多相态流的理论深入研究了湿对流模式的理论基础,并得出根据湿空气密度 (ρ_m) 和虚位温 (θ_v) 可以将 Ertel 干位涡扩展到湿大气,其将湿位涡进一步定义为:

$$P_v = \rho_m^{-1} \zeta_a \cdot \nabla_3 \theta_v \quad (1.11)$$

其中, $\rho_m = \rho_d + \rho_v$ 为湿空气密度, $\theta_v = \frac{p}{\rho_m R_d} \left(\frac{p_0}{p} \right)^{R_d/c_{pd}} \approx (1 + 0.61q_v)\theta$ 为虚位温。

其相应的湿位涡方程为:

$$dP_v/dt = \rho_m^{-1} \{ \zeta_a \cdot \nabla_3 \dot{\theta}_v + \nabla_3 \theta_v \cdot [\nabla_3 \times (\dot{\mathbf{u}}_m \rho_d / \rho_m)] - \rho_m^{-1} \zeta_a \cdot \nabla_3 \dot{\theta}_v \rho_v \} \quad (1.12)$$

式中, $\dot{\theta}_v \equiv d\theta_v/dt$, $\dot{\mathbf{u}}_m$ 代表湿空气净的微物理通量强迫, $\dot{\rho}_v = d\rho_m/dt + \rho_m \cdot \nabla \mathbf{u}$ 代表水汽的源/汇项。注意,式中忽略了摩擦的作用。

显然,式(1.10)和(1.12)是有着明显区别的。Bannon(2002)指出,这种区别的本质在于 Schubert 等(2001)忽略了水汽凝结物与湿空气的速度差异。事实上, Schubert 等(2001)与 Bannon(2002)分析问题的角度是不一样的,前者以湿大气整体作为研究对象,而后者则把湿大气分为湿空气和凝结物两部分。

以虚位温定义的湿位涡虽然理论严谨,且保持了可反演性,但却不能显式地体现湿度梯度对位涡的作用,而且虚位涡倾向方程中还含有额外的水汽源汇项,这使得其应用受到限制。

1.2.2 湿有效能量理论

天气系统的发展演变伴随着大气能量的传播、累积和释放。早在 20 世纪 50、60 年代,谢

义炳(1956)、陶诗言(1963)等气象学家就从大气能量时空分布、收支转换的角度开展了研究工作(雷雨顺,1978;Yu,1999;张苏平等,2006)。他们发现,利用能量方法研究暴雨等中尺度灾害性天气过程可揭示出许多重要的现象。

并不是所有的位(势)能(重力势能+内能)都能转换为动能。位能中能够有效转换为动能那一少的、活跃的部分称为有效位能(APE)。基于 Margules(1910)的工作,Lorenz(1955)首先发展了有效位能理论,其初衷是研究满足静力平衡的全球干大气的能量循环问题。他还进一步推导了有效位能的近似表达式,即有效位能正比于位温扰动的水平方差。从那以后,Lorenz(洛伦兹)有效位能的概念就成了研究大气能量循环的一个主要架构,在此基础上,中外学者做了大量的工作(Boer,1989;Siegmund,1994;罗连升和杨修群,2003;Steinheimer et al.,2008;Boer和Lambert,2008;Marques和Castanheira,2012;Zuo et al.,2012)。但是,由于Lorenz有效位能具有全球属性,其在有限区域能量学研究中的应用受到一定的限制。为了研究局地能量循环和转换,Holliday和McIntyre(1981)引入了有效位能密度的概念来刻画不可压缩层结流体中的局地有效能量。几乎同时,Andrews(1981)进一步发展了可压缩非静力流体中的局地有效位能密度的理论,并得到另一种形式的有效能量,即有效弹性能。但是,Andrews的结果受限于可逆绝热过程。近年来,中国学者针对局地环流能量转化问题也开展了一系列工作。李建平和高丽(2006)提出了扰动位能概念,并利用NCEP(美国国家环境预报中心)再分析资料诊断了扰动位能一阶矩项与大气动能的联系,指出两者成负相关。汪雷等(2012)进一步推导了大气分层扰动位能控制方程,并将其运用于中国南海季风活动的能量收支分析。扰动位能拓展了Lorenz有效位能理论在局地能量收支中的运用,适合于局地气候学研究。然而其推导过程仍然基于静力平衡关系,而且没有考虑水汽的作用,因此,不适用于非静力湿大气中的中尺度系统研究,特别是对流性天气系统的能量分析。

为了研究湿大气中动能的产生问题,Lorenz(1978)做了最初的尝试,提出了湿有效能量(moist available energy)的概念,并基于图解技术评估了其演变。然而Mchall(1989)认为实际大气中图形方法的应用是极度繁琐的,并且他指出在Lorenz(1978)的研究中所采用的物理机制可能不太符合降水系统的观测事实。随后,Mchall(1990)用相当位温(θ_e)取代了Lorenz有效位能公式中的位温(θ),定义了一个广义有效位能。但是,使用相当位温相当于假定湿空气中的水汽全部凝结并释放潜热,这显然偏离了实际情况,且会在一定程度上夸大相变潜热的作用。最近几年(Pauluis和Held,2002a,2002b;Googy,2003)通过分析湿大气的熵收支,湿过程的作用得到了进一步的探索。这些结果指出利用干大气的理论框架研究湿大气的能量循环是不合理的,因为湿大气中伴随着水汽的输送和水物质的循环(例如,相变、降水)。为了进一步发展湿大气有效能量理论,针对可压缩的、多成分流体,Bannon(2005)发展了一个新的关于局地有效能量的推导。在他的研究中,其发展的局地有效能量概念历史上称之为“Exergy”(Marquet,1991;Kucharski,1997)。其研究结果表明总的有效能量随着水汽含量的增大而增大;并且,在他的这项研究中,有效能量被分为三个部分:有效位能、有效弹性能和有效化学能。在此基础上,他又开展了一系列关于大气有效能量的深入研究工作(Bannon,2012,2013),但是,在他的这些研究中,定义有效能量所采用的参考态都要求是等温且满足静力平衡。因此,Bannon的局地有效能量理论的应用是存在局限性的,因为事实上由于其分子热转移(molecular heat transfer)很小,地球大气可以长时间维持稳定的温度层结(Kucharski,2001),并且当大气处于这样的参考态时,没有能量能够有效地转换为动能(Van Mieghem,

1956)。Pauluis(2007)推广了 Lorenz 干有效位能理论框架,并显式地推导出湿大气中有效位能的源和汇的分析表达式。遗憾的是,他未能像 Lorenz 有效位能定义一样,明确地给出具有平方和正定性质的湿有效位能的解析表达式。而且,正如作者自己指出的,他的研究结果仍然局限于静力平衡大气。因此,Pauluis(2007)的湿有效位能理论并不能直接地用于强对流发生的大气中。

以上这些回顾说明了进一步发展适用于一般湿大气的有效能量理论的必要性。值得注意的是,前面所提到的有效能量理论都是建立在物理空间上的,并不能直接揭示不同尺度之间能量串级的规律,也就是不能从能量演变的角度揭示大气运动的多尺度相互作用机理。为了更好地揭示不同尺度系统的能量循环规律,尤其是中尺度系统的能量来源,必须进一步在波数谱空间下研究湿有效能量理论,建立谱空间下的能量收支方程,进而研究不同尺度系统能量的分布以及形成这种分布的动力学机理,这就涉及本研究的重点内容,即中尺度能量谱动力学机理研究。

1.3 中尺度能量谱研究进展

1.3.1 观测事实

能量谱(energy spectra),即能量在不同尺度(或波数)上的分布。大量观测事实(Nastrom 和 Gage,1985; Lindborg,1999; Cho 和 Lindborg,2001)表明在对流层高层和平流层低层中,大气水平动能谱在中尺度范围(20~2000 km)上表现为具有不同斜率的两个区域(图 1.1)。

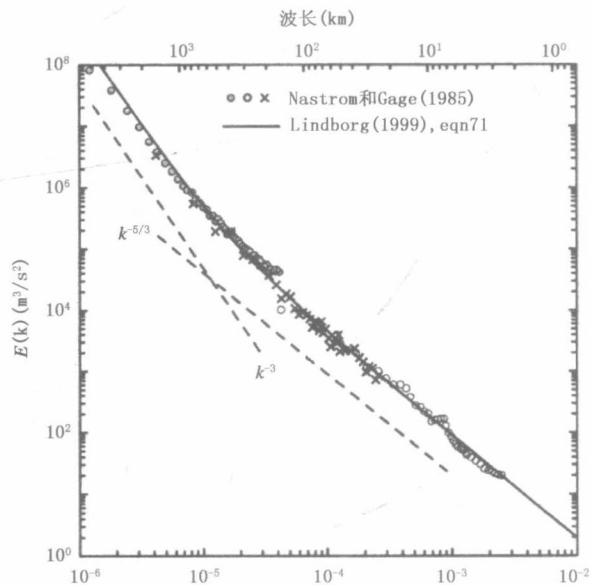


图 1.1 Nastrom 和 Gage (1985)基于 GASP 飞机观测资料分析得到的大气水平动能谱(符号),简称 Nastrom 和 Gage 谱,与 Lindborg(1999)基于 MOZAIC 飞机观测资料拟合得到大气参考谱线(实线),简称 Lindborg(1999)参考谱线。引自 Skamarock (2004)

在中尺度范围低端,即对应波长近似小于 500 km 的波数范围上,动能随波数的变化比较平缓,其动能谱斜率近似为 $-5/3$,即 $E_k \propto k_h^{-5/3}$;而在尺度近似大于 500 km 的波数范围上,其动能谱斜率则近似为 -3 ,即 $E_k \propto k_h^{-3}$ (这里 k_h 是总水平波数)。观测的动能谱 k_h^{-3} 分布符合地转湍流理论(Charney, 1971; Boer 和 Shepherd, 1983),而关于大气中尺度动能谱 $k_h^{-5/3}$ 特征的流体力学机制解释至今仍然是一个具有重大争议的科学问题(Lindborg, 2005, 2007; Tulloch 和 Smith, 2009)。除了大气动能谱以外,大气有效位能谱也表现出了相似的谱转折特征。

1.3.2 湍流理论解释

对于中尺度 $-5/3$ 谱分布,过去的研究倾向于用基于惯性湍流假设的串级理论来解释,并提出了两种完全不同的观点:一种是基于二维湍流理论(Kraichnan, 1967)或准二维(层结)湍流(Gage, 1979; Lilly, 1983)的升尺度能量串级(inverse energy cascade),即在中尺度范围上能量由较小尺度向较大尺度转移;另一种是基于三维湍流理论(Kolmogorov, 1941)的降尺度能量串级(direct energy cascade)。由于形成升尺度能量通量的小尺度能量源很难被识别,所以大量的研究多针对降尺度机制,且研究结果表明,非线性相互作用的惯性重力波(Dewan, 1979; VanZandt, 1982; Smith et al., 1987)、准地转动力学(Tung 和 Orlando, 2003; Gkioulekas 和 Tung, 2005a, 2005b)、表面准地转动力学(Tulloch 和 Smith, 2009)、具有强的层结的各向异性湍流(Lindborg, 2006)等都有可能是产生降尺度能量串级的物理机制。但是,尽管如此,还是没有足够的理由说明在中尺度范围上只有降尺度能量串级过程存在,升尺度能量串级仍然可能是中尺度能量谱形成的一种机制,特别是对于暴雨等强对流系统,由于小尺度的反馈作用,升尺度能量串级更是不能忽视的。Lilly(1983)指出衰退的对流云体和雷暴云砧泻流可以提供这些小尺度能量源。Gkioulekas 等(2007)指出在统计平衡条件下,强迫耗散二维(2D)湍流中,能量的升尺度输送占主导。

本质上,关于能量串级输送的观点都暗含了中尺度谱段是理想的湍流惯性运动,中尺度上没有显著的能量源或汇(Waite 和 Snyder, 2013),也就是说动能以保守的方式依次地向越来越小或者越来越大的尺度转移。但是,中尺度系统中许多物理过程都具有增加或减少中尺度动能的潜力,这些物理过程包括潜热的释放、重力惯性波的垂直传播、边界层拖曳、辐射冷却等。这些物理过程不仅可以直接给中尺度系统注入能量,而且如果这些过程足够强,它们甚至可能影响能量串级的方向。因此,基于湍流理论的研究结果显然不能很好地解释实际大气中尺度能量谱的特征,特别是对于具有各向异性的锋面系统。

1.3.3 数值模拟研究

早期的数值模拟研究在一定程度上受到了湍流串级理论的影响,研究的重点也集中于揭示中尺度范围上能量串级的方向。在 20 世纪 90 年代以前,大部分数值模拟研究的目的是调查层结湍流中升尺度能量串级的可能性:Herring 和 Métais (1989)设计了具有稳定强迫的层结湍流数值模式,不过他们并没有成功地模拟出升尺度能量串级过程。Métais 等(1996)和 Bartello (1995)的研究表明,在具有足够强的旋转和层结的湍流数值试验中可以模拟出明确的升尺度能量串级过程和中尺度的 $-5/3$ 谱斜率特征。Lindborg 和 Cho (2001)基于观测数据利用三阶结构函数(third-order structure function)分析指出,在平流层低层水平尺度[10, 100 km]上降尺度能量串级占主导。此后,一些数值模拟研究关注的焦点开始转向层结湍流