

文章编号:1006 - 7639(2003) - 03 - 0074 - 05

大气边界层气象学研究综述

张 强

(中国气象局 兰州干旱气象研究所, 甘肃 兰州 730020)

摘 要:文中回顾了大气边界层气象学的发展历史,总结了目前大气边界层气象学的主要进展,并指出国内外在未来大气边界层气象学研究方面面临的一些主要科学问题,以及对未来大气边界层气象学的发展方向提出若干建议,同时还指出了大气边界层气象学在思想上和方法上应该注意的一些相关问题。

关键词:大气边界气象学;研究进展;主要问题;发展方向

中图分类号:P404

文献标识码:A

引 言

什么是边界层?广义讲:在流体介质中,受边界相对运动以及热量和物质交换影响最明显的那一层流体。具体到大气边界层,是指受地球表面摩擦以及热过程和蒸发显著影响的大气层。大气边界层厚度,一般白天约为 1.0km,夜间大约在 0.2km 左右,地表提供的物质和能量主要消耗和扩散在大气边界层内。大气边界层是地球-大气之间物质和能量交换的桥梁。全球变化的区域响应以及地表变化和人类活动对气候的影响均是通过大气边界层过程来实现的。

1 大气边界层气象学发展历史

大气边界层气象学是大气科学中一门重要的基础理论学科,大气边界层气象学的发展,不仅受到观测系统和探测技术的制约,也受到数学、物理学等基础支撑学科发展水平的影响,并随着它们的发展而发展。大气边界层气象学是以湍流理论为基础的,研究大气和它下垫面(陆面和洋面)相互作用以及地球-大气之间物质和能量交换的一门新型气象学科分支。

什么是湍流?英文湍流为“turbulence”,日文为“乱流”,湍流简单定义:流体微团进行的有别于一般宏观运动的不规则的随机运动,从宏观上看,它没

有稳定的运动方向,但它能够象分子运动一样通过其随机运动过程有规律地传递物质和能量。从 1915 年由 Taylor^[1]提出大气中的湍流现象到 1959 年 Priestley^[2]提出自由对流大气湍流理论,可以说,到 20 世纪 50 年代以前经典的湍流理论基本上已经形成。以后,湍流理论基本上再没有出现大的突破。

1905 年 Ekman^[3]从地球流体力学角度提出了著称于世的 Ekman 螺线,在此基础上形成了行星边界层的概念,他的基本观点仍沿用至今。1961 年,Blackadar^[4]引入混合长假定,用数值模式成功地得到了中性时大气边界层具体的风矢端的螺旋图象。行星边界层的提出使人们认识到了大气边界层在大气中的特殊性和一些奇妙的规律。

从 20 世纪 50 年代开始,由于农业、航空、大气污染和军事科学的需要,掀起了大气边界层研究的高潮。1954 年,Monin 和 Obukhov^[5]提出了具有划时代意义的 Monin-Obukhov 相似性理论,建立了近地层湍流统计量和平均量之间的联系。1982 年,Dyer^[6]等利用 1976 年澳大利亚国际湍流对比实验 ITCE 对其进行完善,使得该理论有了极大的应用价值。1971 年 Wyngaard^[7]提出了局地自由对流近似,补充了近地面层相似理论在局地自由对流时的空白。

从 20 世纪 70 年代开始,随着大气探测技术和研究方法的发展,特别是雷达技术,飞机机载观测,

收稿日期:2003 - 07 - 23;改回日期:2003 - 09 - 10

作者简介:张强(1965 -),男,甘肃靖远人,研究员,主要从事大气边界层、陆面过程、绿洲气象学、中尺度数值模拟和城市大气环境等领域的研究。

系留气球和小球探空观测以及卫星遥感和数值模拟等手段的出现,大气边界层的研究开始从近地层向整个边界层发展。简洁地概括,对大气边界层物理结构研究贡献最突出的是两大野外实验和一个数值实验,即澳大利亚实验的 Wanggara 和美国的 Minnesota 实验以及 Deardorff 的大涡模拟实验。

相似性理论是大气边界层气象学中最主要的分析和研究手段之一,在建立了比较成熟的用于描述大气近地面层的 Monin—Obukhov 相似性理论以后,人们开始寻求类似的全边界层的相似性理论。国际上,除 Neuwstadt^[8]、Shao^[9]等做了大量工作外,我国胡隐樵等^[10]以野外实验验证了局地相似性理论,并建立了各种局地相似性理论之间的关系。张强等^[11]还对局地相似性理论在非均匀下垫面近地面层的适应性做了一些研究。

自 1895 年雷诺平均方程建立以来,该方程组的湍流闭合问题是至今未解决的一个跨两个世纪的科学难题。人们发展湍流闭合理论,以达到能够数值求解大气运动方程,实现对大气的数值模拟。闭合理论有一阶局地闭合理论即 K 闭合。1990 年 HoIt-sIag^[12]在 1972 年理论框架的基础上,用大涡模拟资料对 K 理论做了负梯度输送的重大修正。为更精确地求解大气运动方程,也为了满足中小尺度模式,特别是大气边界层模式刻画边界层湍流通量和其它高阶矩量的目的,高阶湍流闭合技术也开始被模式要求。

由于大气边界层研究是以野外探测实验为基础的,实验性很强的科学,我国以往由于经济落后,无法得到第一手的实验资料,研究相对落后,与国外相比,总体上差距在 20a 左右,但我国学者在大气边界层的研究中也有其特殊贡献:1940 年周培源先生^[13]提出的湍流应力方程模式理论,被认为是湍流模式理论开始的标志,这一工作奠定了他在国际湍流研究领域的崇高地位。苏从先等^[14]在上世纪 50 年代给出的近地面层通量廓线与当时国外同类研究同步,被国外学者称为“苏氏定律”,在上世纪 80 年代苏从先等^[15]首次发现了干旱区边界层的“冷岛效应”结构。上世纪 70 年代周秀骥^[16]提出的湍流分子动力学理论也很有独特的见解。1981 年周明煜^[17]提出的大气边界层湍流场团块结构是对湍流结构的新认识。上世纪 80~90 年代赵鸣^[18]对边界层顶抽吸作用的研究是对 Charney—Eiassen 公式的很好发展。在 20 世纪 90 年代的“黑河实验”中,

胡隐樵等和张强^[19]首次发现了邻近绿洲的荒漠大气逆湿,并总结提出了绿洲与荒漠相互作用下热力内边界层的特征等等。

国内外有关大气边界层和大气湍流的专著已有数十本,其中,起里程碑作用的几本专著对大气边界层的发展做出了特殊贡献。1953 年 Sutton^[20]著的《微气象学》、1973 年 Haugen^[21]著的《微气象学》、1984 年 Panofsky 等^[22]著的《大气湍流》、1988 年 Stull^[23]著的《边界层气象学导论》和 1992 年 Garratt^[24]著的《大气边界层》等。国内直到 20 世纪 90 年代才出现大气边界层专著,较有代表性的是 1990 年赵鸣等^[25]编著的《边界层气象学教程》。

综上所述,到上世纪 70 年代,对均匀下垫面大气边界层物理结构,基本有了比较全面的认识,大气边界层基础理论基本上已经形成。从 20 世纪 80 年代到目前的 20 多年间,除了数值模拟水平和观测技术等实验手段有较大提高外,大气边界层领域的工作,几乎主要集中在解决大气数值模式中边界层和地表通量参数化问题上,而在理论研究方面则显得过于平静。因此,最近 20 多年实际上是大气边界层研究领域发展相对比较缓慢的时期。

2 大气边界层气象学研究面临的主要问题

2.1 非均匀和复杂下垫面边界层

非均匀下垫面和复杂下垫面不仅会造成大气边界层结构和运动状态在时间和空间上的重大差异,而且给大气模式的边界层参数化造成极大困难,自然界中的非均匀或复杂下垫面可归纳为 3 大类。

2.1.1 下垫面性质非均匀分布

由于植被分布不均匀或土壤性质变化造成的不均匀性,最突出的有海陆分布、干旱荒漠区中绿洲和湖泊分布。这种非均匀性不仅存在各子系统之间的相互作用,内边界层特征也是很显著的,对后者我们正在做一些工作。

2.1.2 地形起伏和山脉的作用

复杂地形对边界层结构也有突出影响,它使确定数值模式网格点上的有效粗糙度问题变得极为困难。

2.1.3 城市大气边界层

城市面积不断扩大,使得城市边界层影响日益重要,并且随着城市向高空发展,城市边界层更加复

杂,城市冠层的输送,建筑物阻力和尾流湍流,多重反射,粗糙度的确定以及日益普及的空调和汽车的热源效应的影响等,都是当今的难点问题。

2.2 特殊地区边界层特征

由于缺乏有效的的基本观测资料,一些极端气候区的边界层研究和认识都还很不足,其中两大区域值得我们注意。

2.2.1 干旱荒漠区的大气边界层特征

干旱区范围广,与全球大多数区域对比强烈,通过边界层对大气加热作用,对气候和大气环流影响较大。绿洲等引起的非均匀使干旱区边界层结构也比较复杂,我们已经初步发现干旱区的边界层厚度非常特殊。

2.2.2 青藏高原寒区边界层特征

它是全球最大的地形,对大气环流影响极大,但研究很不充分。

2.3 沙尘暴等特殊天气边界层特征

由于沙尘暴等特殊天气事件出现概率比较少,在边界层观测中很少捕捉到这些过程,并且对它们的观测还存在一些技术上的困难。然而,沙尘暴天气的风沙大气边界层的观测是有重要意义的,其特殊性主要表现在对大气边界层两个特殊的强迫上:

强的干对流活动引起的宏观垂直运动对边界层结构的强迫作用和对输送过程的贡献。大气边界层内超常沙尘分布对辐射过程的强迫作用。

2.4 边界层与云和降水的作用

边界层与云和降水的相互作用表现在多方面,上世纪90年代起这方面的研究开始增加,但很多问题仍不清楚,主要有以下几个方面。积云和对流降水等中尺度过程产生的中尺度通量如何在边界层进行参数化?水汽在边界层相变时引起的潜热释放的热量强迫作用。水汽在边界层的辐射强迫效应。强的湿对流过程对边界层的动力强迫作用。

2.5 湍流如何在模式中更合理的参数化

湍流闭合仍未彻底解决,所以才出现五花八门的闭合技术。有没有彻底闭合方法?非线性热力学会不会是条途径,还需要进一步去研究。

2.6 大气湍流问题

大气湍流研究面临的问题,主要有以下3个方面:(1)到目前为止,我们对大气湍流认识到什么程度?事实上给湍流一个严格的定义都很困难。对大气湍流从最基础理论另辟蹊径去研究仍然十分必

要。(2)湍流机制和湍流本质研究如何突破,非线性动力学真的能解决湍流的问题吗?这其中的疑点仍然很多。(3)间歇性湍流等一些特殊湍流问题并没有取得最终的结论,如何去进一步深入,至今仍困扰着我们。

2.7 地—气之间界面的物质和能量交换问题

随着地球系统科学的提出,大气与陆地和海洋等其它系统的相互作用越加引起人们的重视。全球变化通过大气与地球表面相互作用来响应和实现,气候异常也往往潜伏着地—气能量交换的异常表现。为了能较好地表达地气交换过程,将边界层研究的最新理论进展及时用于建立大气和海洋以及大气和陆地的耦合过程是十分必要的。由于界面物理过程的复杂性,尤其因陆面涉及生态、水文、地质和人类活动等多种过程因素,建立完善的大气与陆地或大气与海洋耦合过程比较困难。因此,陆—气界面的交换甚至已发展成为一个相当热门的研究领域即陆面过程。但目前陆面过程模式变得越来越复杂,引进的不确定参数也不断增加。我们会不会仍在层层参数的迷宫中打转?陆面过程可否有简洁明了的公式可以表达?

2.8 局地实验结果的代表性

由于财力和人力有限,只能在个别具有代表性的地方进行大气边界层和陆面过程试验,然而,这些局地试验成果能否用于数值模式的网格尺度?到底是卫星遥感资料还是细网格数值模拟能帮助我们解决这一问题?都等待我们去研究、去回答。

3 结 语

3.1 取得重大研究进展的基础

大气边界层气象学取得重大研究进展的基础有以下两个因素:(1)思想方法的创新,如先有一套全新的相似性思想产生,才得以有大气近地层的Monin—Obukhov相似性理论的建立与实践的结合。(2)观测技术的重大突破,如有了探空观测技术的突破和新观测手段的出现,才有对全边界层结构的完整认识,并且极大地推动对流边界层和稳定边界层理论形成。有了雷达探测手段才能对云边界层有一定的认识。有了计算机技术的巨大进步才使大涡模拟方法得以实现。

3.2 面向应用是科学研究最强劲的生命力

大气边界层气象学的发展只有贴近实践应用才

能有更强劲的生命力。比如:大气边界层研究成果的最先用户是军事,航空事业发展也是以边界层动力学研究为基础的,大气环境污染的核心理论就是边界层物理,火箭、导弹和卫星发射离不开适宜的大气边界层条件,生态环境建设要遵循边界层的输送规律,边界层气象学在这些领域有着非常的应用前景,大气边界层研究的每一步发展几乎都与这些应用领域的需要和推动分不开。

3.3 目前的障碍就是未来的突破点

目前,大气边界层研究面临的主要问题可归结为两大方面:包括非均匀下垫面在内的复杂下垫面大气边界层结构和理论的研究,边界层理论的研究从均匀下垫面走向复杂下垫面,就如同当年大气湍流理论从实验室走进实际大气一样,这是任何理论研究渐进发展的必然。大气湍流的闭合问题是上两个世纪留下的遗憾,由于湍流闭合问题的困扰使大气动力学理论的坚实性受到了影响。对湍流闭合问题的解决会使大气控制方程的求解达到精确和完善。

3.4 边界层研究领域在不断拓展

随着数值模式的不断成熟,大气边界层与地表之间物质和能量输送的刻画即陆面过程参数化越来越成为制约模式发展的重要方面,所以,陆面过程参数化在边界层研究中异军突起,渐渐自成体系。在发展气候系统模式时,各子模式在界面上的连接和耦合会牵扯到一系列的大气边界层问题。用卫星遥感资料反演陆面过程,将是推广和应用卫星探测手段的重要方面之一,这也是目前能够较好取得陆面特征空间分布的唯一方法。

3.5 充分重视边界层气象学的试验性

大气边界层气象学是一门试验性很强的科学,它在理论上的突破是以试验和实验为基础,并与实验和试验不可分的。鉴于以往国内大多数相关野外试验并未取得突破性的成果,在今后的边界层试验中,要充分重视观测项目设置的科学性和资料的可靠性以及观测技术的先进性。

3.6 边界层气象学离我们并不遥远

由于边界层气象学属于最基础的学科,而且其物理过程比较复杂而抽象,所以许多人甚至气象工作者,对大气边界层知之甚少。但实际上,大气边界层非常贴近我们日常工作和生活,气象学,甚至地球科学的大多数问题都与边界层密切相关。许多日常现象就是边界层运动,如烟羽的多种形态,雾的形成

和消散,漂亮而不规则的云浪,甚至沙尘暴和暴雨等等都是大气边界层运动的产物。

参考文献:

- [1] Taylor C. Eddy motion in the atmosphere[J]. Phil Trans, 1915.
- [2] Priestley C H B. Turbulent Transfer in the Lower Atmosphere [M]. Chicago: University of Chicago Press, 1959.
- [3] Ekman V W. On the influence of the Earth's rotation on ocean current[J]. Arkiv Mat Astron Fysik, 1905, 2(11): 1 - 53.
- [4] Blackadar A K. The vertical distribution of wind and turbulent exchange in a neutral atmosphere [J]. J Geophys Res, 1962, 67: 3 095 - 3 102.
- [5] Moynin A S, Obukhov A M. Basic laws of turbulent mixing in the atmosphere near the ground[J]. Tr Akad Nauk SSSR Geofiz inst, 1954, 24(151): 163 - 187.
- [6] Dyer A J, Bradley E F. An alternative analysis of flux - gradient relationships at the 1976 ITCE[J]. Bound Layer Meteor, 1982, 22: 3 - 19.
- [7] Wyngaard J C, Cote O R, Jzumi Y. Local free convection, similarity, and the budgets of shear stress and heat flux[J]. J Atmos Sci, 1971, 28: 11171 - 11182.
- [8] Nieuwstadt F T M. The turbulent structure of the stable nocturnal boundary layer[J]. J Atmos Sci, 1984, 41: 2202 - 2216.
- [9] Shao Y, Hacher J M. Local similarity relationships in a horizontal homogeneous boundary layer[J]. Bound Layer Meteor, 1990, 52: 17 - 40.
- [10] 胡隐樵, 张强. 论大气边界层的局地相似性[J]. 大气科学, 1993, 17(1): 10 - 20.
- [11] 张强, 胡隐樵. 局地相似性在近地面层大气中的一个应用[J]. 气象学报, 1994, 52(2): 212 - 222.
- [12] Holtslag A A, Boville B S. Local versus nonlocal boundary layer diffusion in a global climate model (CCM3) [J]. J Climate, 1993, 11: 2097 - 2116.
- [13] 周培源. 关于 Reynolds 求似应力方法的推广和湍流的性质 [J]. 中国物理学报, 1940, (4): 1 - 33.
- [14] 苏从先. 关于层结大气中近地层湍流交换的基本规律[J]. 气象学报, 1959, 30(1): 114 - 118.
- [15] 苏从先, 胡隐樵. 绿洲和湖泊的冷岛效应[J]. 科学通报, 1987, 10: 756 - 758.
- [16] 周秀骥. 湍流分子动力学理论[J]. 大气科学, 1977, (4) 300 - 305.
- [17] 周明煜. 大气边界中湍流场的团块结构[J]. 中国科学, 1981, (5): 614 - 622.
- [18] 赵鸣. 自由对流与稳定层结边界层风廓线的解析表达和边界层顶的抽吸速度[J]. 大气科学, 1992, 16(1): 18 - 28.
- [19] 胡隐樵, 高由禧. 黑河实验 (HEIFE) 一对干旱地区陆面过程的一些新认识[J]. 气象学报, 1994, 52(3): 285 - 296.
- [20] Sutton O G. Micrometeorology [M]. New York: Mc Grow - Hill, 1953.
- [21] Haugen D A. Workshop on Micrometeorology [C]. Boston: American Meteorological Society, 1973.

- [22] Panofsky H A ,Dutton A. Atmospheric Turbulence [M]. New York :Wiley ,1984.
- [23] Stull R B. Introduction to Boundary Layer Meteorology [M]. Kluwer Academic Publish ,1998.
- [24] Garratt J R. The Atmospheric Boundary Layer [M]. Cambridge : Cambridge University Press ,1992.
- [25] 赵鸣,苗曼倩,王彦昌. 边界层气象学教程 [M]. 北京 :气象出版社 ,1991.

Review of Atmospheric Boundary Layer Meteorology

ZHANG Qiang

(Institute of Arid Meteorology ,CMA ,Lanzhou 730020 ,China)

Abstract :After reviewing the history of development and summarizing the current scientific advances of the study on atmospheric boundary layer meteorology , the key scientific problems faced in the future about this field were pointed out . it also gave several suggestions for future development direction . At the same time , the ideas and methods of the study were demonstrated as well .

Key words :Atmospheric boundary layer meteorology ; advances of study ; key scientific problems ; development direction.

www.cnki.net