

复杂条件陆-气相互作用研究领域有关科学问题探讨^{*1}

张强^{1,2} 王蓉^{1,2,3} 岳平^{1,2} 赵映东⁴

ZHANG Qiang^{1,2} WANG Rong^{1,2,3} YUE Ping^{1,2} ZHAO Yingdong⁴

1. 中国气象局干旱气象研究所/甘肃省干旱气候变化与减灾重点实验室/中国气象局干旱气候变化与减灾重点开放实验室, 兰州, 730020
2. 甘肃省气象局, 兰州, 730020
3. 甘肃省人工影响天气办公室, 兰州, 730020
4. 甘肃省水文水资源勘测局, 兰州, 730000

1. *Key Laboratory of Arid Climatic Change and Disaster Reduction of Gansu Province, Key Open Laboratory of Arid Climatic Change and Disaster Reduction of CMA, Institute of Arid Meteorology, CMA, Lanzhou 730020, China*
2. *Gansu Meteorological Bureau, Lanzhou 730020, China*
3. *Gansu Weather Modification Office, Lanzhou 730020, China*
4. *Hydrologic and Water Resources Survey Department of Gansu Province, Lanzhou 730000, China*

2016-04-29 收稿, 2016-09-06 改回。

张强, 王蓉, 岳平, 赵映东. 2017. 复杂条件陆-气相互作用研究领域有关科学问题探讨. 气象学报, 75(1):39-56

Zhang Qiang, Wang Rong, Yue Ping, Zhao Yingdong. 2017. Several scientific issues about the land-atmosphere interaction under complicated conditions. *Acta Meteorologica Sinica*, 75(1):39-56

Abstract The real atmosphere is always under complicated conditions. Thereby problems caused by complicated conditions have imposed greatest scientific challenges in land-atmosphere interaction study. Application of research achievements in this field for solving various problems related to weather and climate are severely restricted. This paper presents an overview of recent developments in the study of complicated land-atmosphere interaction in China, and the complicated land-atmosphere interaction is discussed. Mechanisms for land-atmosphere interaction under complex conditions are explored from the perspective of both the land surface and the atmospheric boundary layer processes, which are two critical components of the land-atmosphere interaction. Key problems in land-atmosphere interaction studies under complicated conditions are addressed. Meanwhile, the basic method to investigate land-atmosphere interaction with a focus on complicated land surface processes and non-uniform atmospheric boundary layer has been outlined. Suggestions for further research activities of land-atmosphere interaction have been proposed.

Key words Complicated conditions, Land-atmosphere interaction, Atmospheric boundary layer, Land surface process, Key scientific issues

摘要 实际大气都是在复杂条件之下, 所以复杂条件带来的问题已成为陆-气相互作用研究领域面临的科学挑战, 严重制约了该领域研究成果在解决实际天气气候问题中的应用。在概要总结近年来中国复杂条件陆-气作用研究领域进展的基础上, 对复杂条件下陆-气相互作用有关的科学问题进行了探讨。从陆面过程和大气边界层这两个陆-气相互作用的关键环节分析了影响陆-气相互作用复杂条件的机制, 归纳了复杂条件下陆-气相互作用研究领域面临的关键科学问题。同时, 以复杂下垫面陆面过程和非均匀大气边界层问题为重点讨论了突破复杂条件陆-气相互作用关键科学问题的基本思路, 并对进一步开

* 资助课题: 国家自然科学基金重点项目(41630426)。

作者简介: 张强, 主要从事大气边界层、陆面过程、干旱气候与环境等领域的研究。E-mail: zhangqiang@cma.gov.cn; nigzhang@sina.com.cn

展复杂条件陆-气相互作用研究提出了初步的科学建议。

关键词 复杂条件,陆-气相互作用,大气边界层,陆面过程,关键科学问题

中图法分类号 P435

1 引言

陆-气相互作用主要通过陆面过程和大气边界层传输来实现。它不仅是地球陆面与大气物质和能量交换的主要途径,也是地球系统能量调整和转化的重要方式。全球气候演变及其空间格局的变化在很大程度上通过陆-气相互作用来实现(Seinfeld, et al, 2012; Dirmeyer, et al, 2014),重大天气过程的形成和发展也与陆-气相互作用密切相关。

以往对理想条件下陆-气相互作用的研究相对比较充分,而且也取得了许多重要认识(刘辉志等, 2013)。然而,在现实中,陆面和大气边界层均匀、定常的理想条件十分少见,大多数情况下都是非定常、非均匀及受地形和外强迫影响的复杂条件,不仅其陆-气相互作用过程已不完全符合理想条件下的规律,而且在陆-气相互作用研究的理论和方法上也遇到了新的挑战。这不仅制约了陆-气相互作用研究的深入开展,而且还使陆面过程和大气边界层等陆-气相互作用的核心环节的参数化面临极大的困难,严重影响了人们对气候变化机理的深入理解,限制了大气数值模式的深入发展(刘辉志等, 2013)。可以说,目前陆-气相互作用研究领域所面临的重要科学难题大多都是由复杂条件引起的。

虽然,在过去 20 年里已开展过一些复杂条件下陆-气相互作用的观测研究工作,从不同角度对复杂条件的陆-气相互作用问题有了一定认识(吕世华, 2004; 王介民等, 2007; Wen, et al, 2009; Wheeler, 2010; 张强等, 2012; 刘寿东等, 2014; Jiang, et al, 2015)。但总体而言,对复杂条件下陆-气相互作用的机理认识仍然十分有限,尤其对复杂下垫面陆面过程和非均匀大气边界层的理论研究还没有实质性的进展,其物理过程参数化问题依然困扰着目前大气数值模式的发展。因此,十分有必要对复杂条件引起的陆-气相互作用的关键科学问题开展深入研究。鉴于此,本文试图对复杂条件下陆-气相互作用有关科学问题深入思考的基础上,探讨影响陆-气相互作用复杂条件的机制,归纳复杂条件陆-气相互作用研究领域面临的关键科学问题,初步提出破解复

杂条件陆-气相互作用研究领域关键科学问题的基本思路,为今后继续深入开展复杂条件的陆-气相互作用研究提供参考。

2 中国复杂条件陆-气相互作用研究进展

陆-气相互作用的复杂条件是多方面的,既有下垫面起伏不平和非均匀造成的复杂性,也有大气特性三维非均匀分布造成的复杂性,甚至还有下垫面和大气特性非稳定变化引起的复杂性。20 世纪 80 年代以后,在全球范围内开展了一系列大型国际陆面观测试验研究和计划,堪萨斯州第一次 ISLSCP 外场试验(FIFE)(Sellers, et al, 1992)、“水文大气外场试验计划”(HAPEX)在法国西南部进行的 HAPEX-MOBILHY 试验(Andre, et al, 1989)、植被-大气-陆面的气候和水文相互作用的欧洲国际计划(ECHIVAL-EFEDA)(Bolle, et al, 1993)、北方森林生态-大气系统试验(BOREAS)(Sellers, et al, 1995)、“全球能量和水分循环试验”GEWEX 计划(包括陆地计划 GCIIP(Koch, et al, 1995)、亚洲季风试验 GAME(Yamazaki, et al, 2000)、亚马逊大尺度生物圈-大气相互作用试验 LBA 等)(Sellers, et al, 1993),对不同下垫面、不同时空尺度下的陆-气相互作用有了一定的认识。之后,中国也开展了大量陆-气相互作用观测试验及研究。目前,中国对复杂条件陆-气相互作用研究主要是围绕非均匀下垫面和复杂地形对陆面过程和大气边界层的影响开展的,所以这里主要依据下垫面的非均匀性和地形的复杂特征来梳理复杂条件陆-气相互作用研究进展。表 1 给出了中国复杂条件陆-气相互作用主要试验及研究。

2.1 绿洲或湖泊引起的干旱荒漠非均匀下垫面

在大尺度干旱荒漠背景下经常点缀着一些小尺度的绿洲或湖泊。干旱荒漠下垫面地表反照率高、蒸发量小、对太阳辐射响应迅速,而绿洲或湖泊下垫面的特性正好与之相反,这种下垫面特性的反差致使绿洲或湖泊大气边界层的动力、热力和水汽结构特征与其周围干旱荒漠背景明显不同,导致其陆-气动量、热量和水分交换过程比较独特,并与周围干旱

表1 中国复杂条件陆-气相互作用试验及研究

Table 1 Experiments and researches of complicated land-atmosphere interaction in China

观测试验	负责人	实施时间(年)
黑河地区地气相互作用观测试验(HEIFI)	胡隐樵,王介民	1988—1992
西北干旱区陆-气相互作用试验(NWC-ALIEX)	黄荣辉	2000—2005
绿洲系统非均匀下垫面能量水分交换和边界层过程观测与理论研究	吕世华	2007—2010
稀疏植被下垫面与大气相互作用研究	胡隐樵	1998—2004
黑河综合遥感联合试验(WATER)	李新	2007—2009
黑河生态水文遥感试验(HIWATER)	李新	2012—2015
内蒙古半干旱草原土壤植被大气相互作用(IMGRASS)	吕达仁	1997—2001
不同土地利用和覆盖条件下半干旱区大气和地表过程相互作用的观测试验研究	黄建平,刘辉志	2006—2010
国家全球变化重大研究计划“全球典型干旱地区气候变化及其影响”	黄建平	2012—2016
黄土高原陆面过程观测试验研究(LOPEX)	张强	2009—2012
白洋淀地区非均匀大气边界层的综合观测研究	胡非	2004—2007
大型潜水湖泊能量、水分和温室气体通量观测	李旭辉	2010—2013
城市边界层三维结构研究	蒋维楣	2004—2007
JICA项目“青藏高原及周边综合观测系统计划”	徐祥德	2005—2009
青藏高原环境观测研究平台	马耀明	2009—2014
国家全球变化重大研究计划“青藏高原气候系统变化及其对东亚地区的影响与机制研究”	马耀明	2011—2015
第三次青藏高原大气科学试验	赵平	2014—2017

荒漠下垫面大气边界层发生相互作用。这类非均匀下垫面在干旱荒漠区比较普遍和典型。

近年来,中国针对干旱荒漠非均匀下垫面开展了长期的观测试验研究(王介民,1999),分析了绿洲引起的干旱荒漠非均匀下垫面的陆-气交换特征,揭示了其大气边界层的非均匀机理,发展了其陆面过程和边界层参数化方案。其中,“黑河地区地-气相互作用观测试验研究(HEIFI)”(Hu, et al, 1992; 胡隐樵等, 1994; 王维真等, 2009)不仅发现了绿洲和湖泊的“冷岛效应”现象及其内边界层特征,还发展了绿洲引起的干旱荒漠非均匀下垫面的边界层参数化关系,揭示了绿洲与沙漠陆面过程的相互影响特征。随后,“西北干旱区陆-气相互作用试验研究(NWC-ALIEX)”(张强等, 2003b, 2005)对非均匀干旱荒漠区陆-气相互作用机理有了更深入的理解(张强等, 2008; 黄荣辉等, 2013),发现了临近绿洲的荒漠大气边界层逆湿和负水汽通量现象,揭示了绿洲引起的非均匀干旱荒漠下垫面的负梯度输送问题(赵建华等, 2011),给出了该类下垫面的部分陆面过程物理量的参数化(乔娟等, 2008)。此外,近年开展的“绿洲系统非均匀下垫面能量水分交换和边界层过程观测与理论研究”和“稀疏植被下垫面与大气相互作用研究”等工作(胡隐樵等, 2004; 黄荣辉, 2006)还揭示了绿洲引起的非均匀干旱荒漠下垫面的物质及能量交换机制,改进了该类非均匀下垫面的陆面过程参数化方案。另外,在黑河流域开展的“黑河综合遥感联合试验(WATER)”(Li, et al, 2009)和“黑河生态

水文遥感试验(HIWATER)”(Li, et al, 2013),不仅为流域生态-水文研究提供了更具有代表性的参数及驱动数据,并且为实现寒区和旱区非均匀下垫面地表蒸发模型提供基础数据,加深了对流域尺度和更大尺度上水循环和水资源转化规律的认识,对水资源的利用及可持续发展提供了重要技术支撑。海河流域地表通量与水文气象要素多尺度观测试验(Liu, et al, 2013),揭示了试验源区空间非均匀性是造成大孔径闪烁仪与涡动相关仪测量地表蒸发存在差异的主要原因。此外,发展和完善针对干旱区非均匀下垫面的干旱陆面过程模式及陆面过程参数化方案受到越来越多的关注。其中,李倩等(2008)发展了一个同时包含非均质土壤、干旱土壤和冻融土壤的土壤水热传输耦合模型,较好解决了非均匀土壤分布的陆面过程模式通用性问题;孟宪红等(2005)则利用金塔试验期间观测数据和卫星遥感资料相结合,对金塔绿洲及其周边干旱荒漠地区的地表参数非均匀分布特征进行了反演分析。

2.2 生态过渡带引起的半干旱区非均匀下垫面

中国的半干旱区主要分布在季风影响过渡区,该区域也是农业区向草地牧业区的生态过渡地带,其地表植被和土壤湿度分布空间变化很大,陆面特性的空间分布极不均匀,是半干旱区典型的非均匀下垫面。这种非均匀下垫面对气候变化比较敏感,非均匀性的动态变化也比较凸出,对陆面能量分配具有重要影响(符淙斌等, 2008; 黄建平, 2013)。

中国在20世纪末开始关注这类地区的陆-气相

互作用问题。其中,1997—2001年在内蒙古草原开展的“内蒙古半干旱草原土壤植被大气相互作用(IMGRASS)”观测试验研究(吕达仁等,2002),系统分析了农牧过渡带的退化草地陆-气水分和能量交换特征,揭示了该类非均匀下垫面气候与生态的互馈机制。之后,在吉林通榆县农牧过渡区开展的陆-气相互作用观测试验(Liu, et al, 2012; 冯健武等, 2012),不仅得到了植被非均匀下垫面近地面大气湍流特征和陆面过程特征的新认识,还探讨了半干旱区典型非均匀下垫面陆面过程参数化问题和人类有序活动对陆面过程的影响。同时,从2005年开始兰州大学榆中半干旱气候与环境观测站(SACOL)持续开展的陆-气相互作用观测试验研究(Huang, et al, 2008; 闭建荣等, 2008; 姚彤等, 2014)揭示了半干旱区非均匀下垫面陆-气相互作用的气候特征。最近,正在进行的“黄土高原陆面过程观测试验研究(LOPEX)”(Wen, et al, 2007; 张强等, 2009),针对黄土高原典型半干旱区气候和植被的空间差异,开展了符合半干旱区非均匀下垫面的陆-气相互作用技术要求的观测试验,揭示了半干旱区非均匀下垫面陆面过程物理量的空间非均匀分布特征及下垫面非均匀性引起的地表能量不闭合问题,并给出了该地区典型下垫面类型的陆面过程参数。另有模拟研究(佟华等, 2009)发现,在生态过渡带植被覆盖改变会造成反照率、粗糙度及土壤湿度等地表属性的显著变化,尤其植被气孔阻抗、根系深度、土壤湿度初值和反照率的时空变化对水分循环的影响较大。

2.3 湖泊引起的平原非均匀下垫面

在中国湿润的东部平原地区,虽然地表植被空间变化并不十分明显,但如洞庭湖和白洋淀等一些大型湖泊或水体分布会造成陆面温度、水分和粗糙度等下垫面特性的空间非均匀性,这是湿润平原环境中比较常见的非均匀下垫面类型。由于与陆地相比湖泊的反照率更低、热容量更大,因此会引起湖-陆风等边界层效应及非均匀表面通量输送问题。

针对大型湖泊引起的平原非均匀性,2004—2005年首次在华北地区最大的淡水湖——白洋淀地区进行了地-气相互作用综合观测试验(胡非等, 2006),该试验不仅对湖泊引起的非均匀下垫面的大气边界层结构特征、湍流输送特征等方面有了新认识,而且对该地区水、热分布不均引起的局地环流有

了初步理解。近年来在中国第三大浅水湖——太湖地区建立的涡流协方差观测网(Lee, et al, 2014),通过对该区湖-气通量(包括能量、动量、温室气体通量等)定量化观测及特征分析研究,为今后深入了解湖-气交换机制及湖泊对区域气候变化的影响提供参考,同时也为大型浅水湖泊辐射和能量平衡等问题的研究提供基础数据。有学者还对中国最大淡水湖——鄱阳湖地区非均匀下垫面的大气边界层温、湿度结构及能量传输过程进行了研究(杨罡等, 2011),发现白天下垫面非均匀加热引起上热下冷的大气边界层逆温结构。近年来,一些区域数值模式耦合了湖泊模块,为湖泊引起的平原非均匀下垫面陆-气相互作用研究提供了新的手段。其中,肖薇等(2012)用涡度相关系统的观测资料对太湖地区的大气水热交换系数进行了优化;任晓倩等(2014)利用湖-气热传输模型模拟了洱海地区非均匀下垫面的大气边界层特征;许鲁君等(2014, 2015)利用耦合了湖泊模型的WRF-CLM模式揭示了大理苍山-洱海地区的局地环流特征,发现非季风期湖泊对局地环流及大气边界层的影响较季风期更为显著。

2.4 土地利用和建筑物分布引起的城市复杂下垫面

城市化是当前全球的总体趋势,中国在城市化速度方面大幅度超过西方发达国家的历史进程。随着城市化趋势加剧,一些发达地区已经逐步形成了城市群,这在中国东部及沿海地区尤为明显(程兴宏等, 2007)。由于城市土地利用对地表覆盖性质的改变及高耸建筑物对边界层大气的扰动,城市的下垫面非均匀性及其大气边界层复杂性均显得更为突出,它们对城市下垫面陆-气交换及边界层风、温和湿结构的影响十分明显。这种由土地利用和建筑物分布引起的城市复杂下垫面在中国已经具有一定普遍性,其对较大尺度陆-气能量和物质交换的作用将会逐渐显现出来。

为此,在21世纪初,“城市边界层三维结构研究”、“城市冠层对物质输送扩散影响的模拟研究”、“城市冠层热动力效应多尺度双向耦合模拟研究”和“热力作用对城市冠层内流场及湍流扩散影响的数值模拟研究”等国家自然科学基金项目利用城市边界层观测、卫星遥感和数值模拟等多种方法,对城市群复杂下垫面大气边界层及陆面过程进行了比较广泛的研究(蒋维楣等, 2010; 周荣卫等, 2007),发现了城市群复杂下垫面的大气混合层抬升、上升速度增

强及热岛环流更加明显等特征;Miao等(2009)利用加入了单层城市冠层模型(UCM)的(WRF)模式模拟研究了北京城市大气边界层特征,揭示了城市群大气边界层的热岛结构及其影响范围;徐阳阳等(2009)通过对1993—2003年北京城市化发展对大气边界层结构的影响分析发现,北京城市化的发展使大气边界层风速出现了逐年减小的趋势,并且,城市冠层的改变,导致陆面过程特征参数发生明显改变,其中动力学地表粗糙度近年来也在不断增大;李晓莉等(2003)考虑了城市下垫面结构及人为活动等对边界层结构的影响,设计了一个适合中尺度模式特点的城市冠层参数化方案(UCP),对北京地区进行模拟试验发现,该方案显著提高了MM5模式对城市边界层热力和动力结构的模拟能力。孟春雷等(2013)则针对城市冠层模式(UCM)存在参数和物理过程过于复杂的问题,首次提出了整体城市陆面模式(BULSM)的概念,尝试根据城市的特点对CoLM重新进行了参数化,试验结果表明BULSM能够有效改进城市地区地表参数及通量的模拟。另外,对山谷城市复杂下垫面陆-气相互作用也有不少研究工作(张强,2001;张强等,2003a;李江林等,2009;马敏劲等,2012),这些工作通过对兰州山谷地形复杂城市下垫面大气边界层结构和输送特征分析,揭示了兰州山谷城市的静风特征和白天大气逆温结构及其对大气污染物输送的影响机理。同时,王腾蛟等(2013)利用耦合了单层城市冠层模块的中尺度数值模式WRF对兰州市热岛现象进行的高分辨率模拟试验表明,夜间热岛环流上升运动促进了谷风环流,而白天热岛环流则抑制了谷风环流的发展。

2.5 高原或大地形引起的山地复杂下垫面

大地形引起的复杂下垫面陆-气相互作用研究是当前国际热点科学问题之一。中国地形非常独特,从青藏高原到东南沿海,地势由西向东呈三级阶梯式分布,海拔高度变化较大。同时,内陆还有天山、秦岭、太行山、长白山等大型山脉。这种高原和多山的地理特征使中国山地复杂下垫面分布比较广泛,其陆-气相互作用的独特动力和热力强迫效应不仅对中国天气形成和演化具有深刻影响,而且还对区域气候格局和大气环流具有重要作用(马耀明等,2000;Xu, et al, 2008;周秀骥等,2009)。

为了更好地认识高原复杂下垫面大气边界层结

构及地-气物质、能量交换特征,近几十年来相继开展了一系列针对高原大地形复杂下垫面的综合观测试验。其中,2005—2009年开展的JICA(Japan International Cooperation Agency)项目(于淑秋等,2007),通过联合观测试验获得了青藏高原山地复杂下垫面比较完整的三维水汽场结构的动态演变特征,揭示了青藏高原的陆-气相互作用对东亚地区水汽输送的影响。同时,2006—2007年在珠穆朗玛峰北坡地区开展的综合强化观测试验中,发现了该地区局地环流系统明显有别于其他地区的观测结果(Zou, et al, 2009; Zhou, et al, 2011)。另外,近年来在青藏高原逐步建立起来的“青藏高原观测研究平台”(Ma, et al, 2008),对该地区复杂地表的多圈层相互作用规律的研究提供了一些较为有用的基础认识。“青藏高原气候系统变化及其对东亚区域的影响与机制研究”在青藏高原首次开展了“星-机-地”综合立体协同观测试验和大规模地-气相互作用综合观测试验(Yang, et al, 2014),不仅认识了青藏高原气候系统变化及其对东亚区域的影响机制,还对青藏高原复杂下垫面能量及水循环等数值模拟研究提供了参数化依据。目前正在实施的“第三次青藏高原大气科学试验”旨在阐明高原及周边地区能量、水分循环及其对区域和全球气候影响的机理,发展高原对中国灾害性天气气候影响的理论,探明青藏高原边界层-对流层-平流层物质交换及其影响,揭示青藏高原与全球变化的相互作用。此外,还有一些研究工作(李茂善等,2011;徐安伦等,2013;徐祥德等,2014)对青藏高原地区陆面过程和大气边界层特征的分析发现,青藏高原地区干季具有深厚混合层特征,青藏高原东南缘大气热源变化与下垫面水、热过程日变化密切相关,浮力项与湍能项对大气低层涡动特征和热力混合结构的形成有重要作用,初步探讨了青藏高原地区复杂下垫面陆-气相互作用机理。同时,陈渤黎等(2012)针对冻土造成青藏高原陆面过程的复杂性对青藏高原玛曲地区进行了模拟试验研究,认为CLM3.5模式对青藏高原陆面过程的复杂性具有较强的模拟能力。在大地形引起的复杂下垫面陆-气相互作用研究方面,在黄土高原地区也取得了重要进展,不仅给出了黄土高原沟壑地形的总体输送系数变化特征(张强等,1992),而且还揭示了黄土高原山谷地形的山顶加热效应及丘陵地形诱发的垂直平流输送特征(Yue, et al, 2015)。对

湍流特征研究发现,在复杂河谷地区垂直方向的湍流以小尺度涡旋运动为主,能较快地调整适应地形变化,而水平方向对地形起伏敏感(Yue, et al, 2015);另外,受复杂地形影响,夜间稳定边界层中产生的低空急流向下传递,使得经典相似性理论难以描述复杂地形湍流运动的特征(Liang, et al, 2014)。针对高原及大地形开展的陆-气相互作用研究,发现存在一些不能被稳定度参数描述的过程影响着复杂地形湍流运动的客观现象(Moraes, et al, 2005; 梁捷宁等, 2014),深化了对该类复杂下垫面陆-气相互作用特征的认识。

事实上,即使对于同一类型的下垫面,其陆面特性在时间尺度上也具有一定的差异。例如,对于最典型的草原地区,植被及作物含水量具有明显的日变化趋势(马耀明等, 2001),从而使得草原下垫面陆-气水热交换也会产生相应的变化;另外,随着季节的变化,植被自然生长高度的不同会导致该类下垫面空气动力学粗糙度存在显著的季节差异(Zhang, et al, 2016),这种差异对草原下垫面陆-气相互作用过程也会产生一定的影响。此外,即使在平坦均匀的沙漠地带,由于日变化造成的热力非均匀现象也会造成陆面特征参数的非均匀性(魏文寿等, 2008)。

2.6 复杂下垫面陆面过程模式及其模拟研究

陆-气相互作用的下垫面复杂性需要相应的陆面过程模式刻画和描述,而且能够科学描述复杂下垫面影响的大气数值模式对认识复杂条件陆-气相互作用问题也具有重要帮助,所以近年来复杂下垫面陆面过程模式及其模拟分析是大气数值模拟研究的重要方向之一。经过几十年的努力,陆面过程模式已从第一代仅考虑物理过程的水箱模式,发展到考虑植被的作用和影响的第二代陆面模式及包含生物化学过程的第三代陆面模式(乔娟等, 2008),目前正从均匀平坦下垫面陆面过程模式向复杂下垫面陆面过程模式努力。

近十几年来,随着许多野外观测试验的开展,对许多典型下垫面陆面过程描述及陆面过程参数化方案的研究取得了新的进展,同时也推进了对干旱、半干旱、湖泊、城市及高原等区域复杂下垫面陆面过程模式及其模拟水平的提高。其中,杨扬等(2015)在CLM4.0模式的基础上发展了一个适用于干旱荒漠草原过渡带的土壤孔隙度参数化方案,并通过改进

土壤热导率和导水率参数,提高了对该类复杂下垫面土壤温度及土壤含水量的模拟性能。刘野等(2015)在对中国半干旱区陆-气相互作用长期观测试验的基础上,用多种方法估算了不同典型下垫面地表空气动力学粗糙度(z_{0h})和热传输附加阻尼(κB^{-1})值,并将其引入陆面过程模式,明显改进了半干旱区非均匀下垫面地表感热通量的模拟能力。杨启东等(2014)对陆面过程模式SHAW的热力粗糙度进行了改进,并引入了干表层蒸发方案,改进后的模式提高了对非均匀下垫面湍流通量模拟能力,尤其明显改善了对深层土壤温度的模拟精度。Yang等(2008)通过对干旱、半干旱、半湿润等不同复杂下垫面热量及动量传输特征的模拟分析,评估了不同热传输附加阻尼(κB^{-1})参数化方案的模拟效果,给出了目前陆面模式传输附加阻尼(κB^{-1})参数化方案的最佳选择。Chen等(2010)对比了6种不同的热力粗糙度长度(z_{0h})参数化方案与改进后的参数化方案(考虑了热力粗糙度长度的日变化特征)对干旱及半干旱地区地表温度和地表感热通量的模拟效果,结果表明:未改进的参数化方案对白天地表温度估计过高,而对地表感热通量估计过低,改进后的参数化方案对地表温度和地表感热通量均有较好的模拟效果。对于湖泊下垫面,古红萍等(2014)通过在WRF3.2模式中耦合一维热扩散湖气模式,建立了湖气耦合模式,对太湖引起的非均匀下垫面水温的模拟能力有了较明显的改进。另外,鉴于目前城市冠层模式及城市水文模式对局地尺度物理过程描述的复杂性及当前气候模式的分辨率较低等问题,孟春雷等(2013)在CoLM模式基础上构建了一个整体城市陆面模式,该模式既能模拟城市复杂下垫面的地表能量平衡,又能够较好模拟城市水分平衡。在高原复杂下垫面陆面过程模式研究方面,夏坤等(2011)根据热力学平衡方程得到了土壤发生冻融的临界温度,对陆面过程模式的冻土的融化条件进行了调整,调整后的陆面过程模式能够较好反映高原非均匀下垫面冻土融化过程及其伴随的冻结过程。熊建胜等(2014)利用玛曲高寒草原的观测试验资料,对草原湖泊非均匀下垫面CLM4.0模式的参数化方案进行了评估分析,并发现理查德方程和径流计算的修改对土壤含水量模拟影响较大,对高原非均匀下垫面陆面模式的改进具有科学参考意义。

3 陆-气相互作用的复杂条件影响机制

造成陆-气相互作用复杂条件的因素比较多,弄清这些因素的影响机制对研究复杂条件陆-气相互作用十分重要。陆-气相互作用的复杂条件大体可以归纳为如下几个方面。

3.1 陆面特性非均匀对陆-气相互作用由下向上的影响

陆面特性的非均匀能够由下向上对陆-气相互作用产生影响,从而引起陆面过程、边界层及其以上大气的连锁反应和多时空尺度运动。这种非均匀性是由下垫面粗糙度、热力和水分属性分布不均匀造成的。其中,粗糙度特性包括植被或地面附着物的类型、覆盖度、高度及其他地表几何特性;热力和水分特性包括地表类型和土壤湿度、土壤类别、土壤颜色及积雪面积、积雪厚度和积雪洁净度等因素。这类下垫面非均匀特性既有自然因子驱动的,也有土地利用等人类活动产生的。

3.2 天气状态的复杂性对陆-气相互作用由上向下的影响

天气状态的复杂性能够由上向下对陆-气相互作用产生影响,会引起大气多尺度输送及陆面过程的联动响应。这种复杂性一般包括大气特性和要素分布的非均匀性及大气特性和要素变化的非稳定性。它们主要表现在两个方面:(1)云、水汽和大气成分及风、温、湿属性分布不均匀和快速变化造成的复杂性;(2)天气系统分布即高、低压系统和锋面等形成和演化过程造成的复杂性。天气状态复杂性与陆-气相互作用的关系和陆面特性非均匀性与陆-气相互作用的关系有所不同,这种复杂性不仅是陆-气相互作用的影响因素,而且还是陆-气相互作用本身的参与因素,它们之间的作用关系要比陆面特性非均匀性与陆-气相互作用之间的更显著。

3.3 多重复杂条件的耦合影响

现实中,陆-气相互作用的复杂条件大都不是单一要素、单一因子或单一尺度,一般是多要素、多因子和多尺度的叠加作用,甚至还有要素之间、因子之间和尺度之间的相互耦合作用。复杂条件的多要素和多因子作用实际上前面已经提到。而就复杂条件的多时空尺度而言,空间尺度一般包括区域、流域、生态系统、农田、植株等不同尺度分布的非均匀性,

时间尺度一般包括日、季节、年际、年代际及以上尺度变化的非均匀性。要在陆-气相互作用中反映这种多重复杂条件的耦合影响就需要构建包含有多时空尺度、并且具有物理意义的陆面过程或边界层参数化关系。

3.4 新因素驱动的复杂条件影响

近年来,随着城市化加快和空气污染越来越严重,陆-气相互作用的复杂条件出现了新的变化,一些新的驱动因子显得重要起来。其中,污染物排放造成的大气污染和“雾、霾”分布已经成为大气成分(主要是大气边界层)三维非均匀分布及非稳定变化的重要因素。而且,它还会通过污染物和“雾、霾”的辐射效应和吸湿作用造成大气热力和水分特性的三维非均匀分布及非稳定变化。由于污染物引起的大气化学应对大气边界层能量平衡及空气湍流动力学的作用(Lee, et al, 2015),以及近年来人类活动加剧引起的温室气体排放增加等一系列变化,都对陆面过程和大气边界层过程造成显著的影响(Raupach, et al, 2008, 2011)。同时,城市化不仅造成陆面特性的非均匀性更加复杂,而且建筑物增高产生的扰动还使大气边界层动力非均匀性更加凸出。这种复杂条件还具有快变性和无序性特点,对其进行数理描述的难度更大。

通过上面对影响陆-气相互作用复杂条件的因素进行分析,给出了陆-气相互作用复杂条件影响机制的简单示意(图1)。从图1可以看出,陆-气相互作用复杂条件有来自下垫面的因素,也有来自上面大气的因素;有自然因素,也有人类活动因素;有直接因素,也有间接因素。而且,陆-气相互作用各类复杂条件之间会相互影响,复杂条件对陆面过程与大气边界层的影响还会相互传递。

4 复杂条件陆-气相互作用研究领域面临的关键科学问题

虽然近年来在复杂条件陆-气相互作用研究领域开展了不少工作,但主要是针对陆面特性非均匀影响方面的工作,而且就这方面的工作也很少有实质性的进展。更何况,影响陆-气相互作用的复杂条件众多,而且还存在不同类型复杂条件的耦合影响。因此,复杂条件陆-气相互作用研究领域目前面临不少技术瓶颈,许多关键科学问题有待进一步突破。

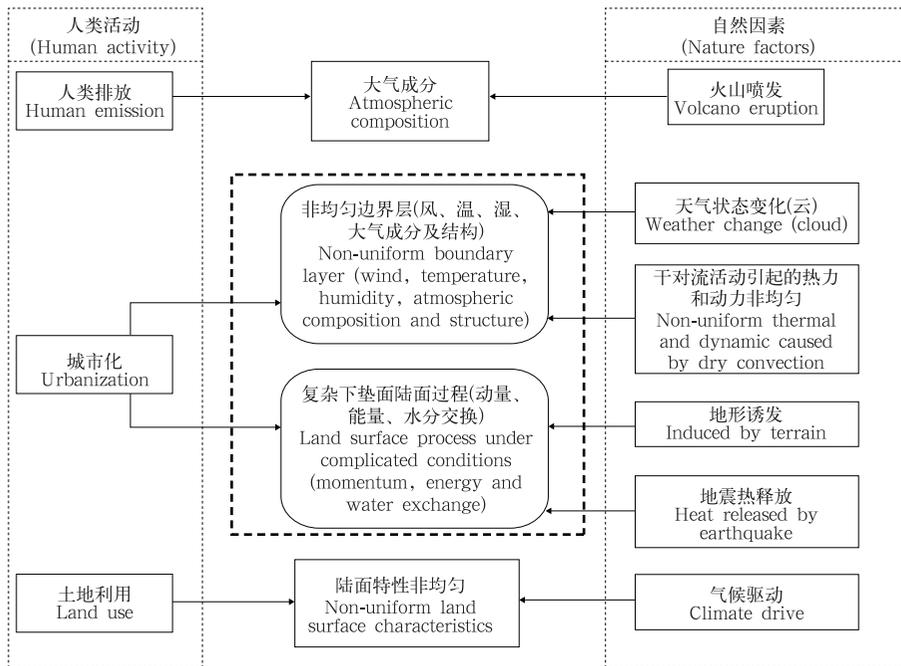


图1 陆-气相互作用复杂条件影响机制的简单示意

Fig. 1 Diagram of mechanisms for the land-atmosphere interaction under complicated conditions

4.1 典型过渡区陆-气相互作用问题

由于受地理或气候因素影响,地球表面分布着各种不同类型的过渡区。其中,比较典型的有生态过渡带、气候过渡带、季风过渡区及海-陆过渡带等具有一定代表性的4类过渡区,它们的空间尺度一般都在区域尺度上。而且,有时还会出现两类甚至以上类型过渡区重叠的情况,比如生态过渡区与气候过渡区的重叠。这些过渡区是全球下垫面最敏感和大气环流最活跃的区域,其陆-气相互作用受复杂条件的影响也最凸出,引起的陆-气相互作用问题的复杂性在全球和中国都具有一定的广泛性。尤其对于季风过渡区,其空间的进退及年循环、年际波动和年代际变化与陆面特性和大气辐射特征的时空变异密切相关,对陆-气相互作用的影响非常显著(李育等,2015)。对于典型过渡区复杂条件而言,不仅陆面过程和大气边界层物理量的时空变化明显,而且气团的特异结构也比较显著。可以推测,在该类复杂条件下,一方面可能会由于大气边界层厚度和地表感热通量的剧烈空间变化,诱发中小尺度天气扰动和非典型环流(Segal, et al, 1992)即局地环流,从而对大气过程形成产生影响。另一方面可能会由于异性气团之间的相互作用激发中小尺度运动。但这些推测是否会发生,如果发生又将如何在陆面过程

和大气边界层参数化中描述这种复杂条件的影响以及气候变化对这些过渡区空间格局的动态影响对陆-气相互作用复杂条件会有怎样的作用等一些关键问题有待进一步的研究来破解。

4.2 大尺度地形陡降区陆-气相互作用问题

在全球陆地上,山地分布广泛,海拔高度相差很大。尤其,中国地势总体呈显著的西高东低分布,由青藏高原、黄土高原和东部平原构成明显的三级阶梯地形(图2)。在这三大台阶过渡处及三大台阶内部都有一些尺度较大的地形陡变区,它们代表了独特的高山复杂下垫面类型,它们是地球上对陆-气相互作用影响最重要的复杂条件之一。这种复杂条件的动力和热力作用一方面会产生较强的中尺度环流(图2),影响水汽输送和天气过程形成;另一方面会引起大气边界层内部的非均匀动力扰动,对天气系统发展产生不可忽视的作用。因此,青藏高原和黄土高原过渡区雷暴多发与该区地形起伏较大、下垫面分布不均匀密切相关(李江林等,2015)。不过,这种大尺度地形陡降区的下垫面复杂性产生的陆面过程和大气边界层效应、中尺度环流和大气扰动特征及其对天气系统的影响机理方面的探讨尚不够深入,需要系统的观测试验和科学的数值模拟试验进行深入分析研究。

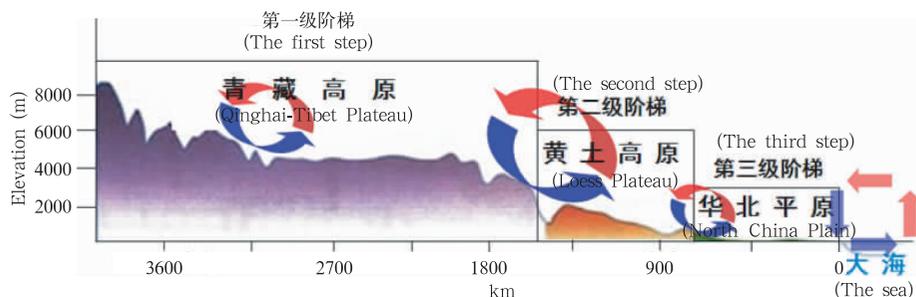


图2 中国地形三级阶梯产生的中尺度大气环流示意

Fig. 2 Schematics of the mesoscale atmospheric circulations caused by three-step staircase-like topography over China

4.3 数值模式非均匀网格的陆面过程和边界层参数化问题

对陆面物理量的参数化估算是目前获得网格尺度陆面过程和边界层参数化的主要途径。但对非均匀或复杂下垫面而言,这种参数化途径遇到了明显的技术挑战。就目前技术现状而言,建立非均匀网格的陆面过程物理量参数化估算方法的思路之一就是在对不同尺度陆面过程物理量进行观测试验的基础上,构建依赖下垫面非均匀性的升尺度参数关系。目前,对100 m尺度会选择涡动相关仪(EC)观测方法,对1000 m尺度会选择大孔径闪烁仪(LAS)观测方法,对10 km尺度会选择遥感反演方法。虽然近红外和微波LAS可同步测量感热与潜热通量,但不同尺度观测方法之间如何恰当地耦合仍然有一些困难(Xu, et al, 2013),且遥感反演方法也存在一定的技术局限。另外,能否通过高分辨率卫星遥感观测或其他技术手段及时获得不同尺度非均匀性特征也有待验证。这些问题都限制了数值模式非均匀网格陆面过程和边界层参数化的解决。

4.4 “马赛克”方法的局限性问题

不少学者也在试图用“马赛克”方法(Koster, et al, 1992)解决网格尺度非均匀参数化问题。不过,地球陆地的下垫面类型众多,而且每种类型还可以对其无限细分,因此该方法最大的缺点是增加了计算量,且不能从网格整体上解析地描述陆-气的交换过程(陈斌等, 2008)。目前,对数值模式非均匀网格内出现的各类下垫面的陆面过程的认识还不完善,对一些下垫面类型的陆面过程参数并不了解,因此在用“马赛克”方法时缺乏足够下垫面类型的陆面过程参数来填充“马赛克”方块。同时,还存在由于下

垫面的演变造成的斑块分布不稳定性问题及不同斑块间相互作用问题等,“马赛克”方法的斑块具有稳定性及斑块之间具有相互独立性前提只是一种理想的假定。因此,如何利用“马赛克”方法描述下垫面非均匀网格的参数化问题至今仍困扰着人们。

4.5 非均匀大气边界层的参数化问题

与目前研究得相对比较成熟的均匀大气边界层相比,自然界中普遍存在的非均匀大气边界层的流场结构和能量传输过程更为复杂。非均匀大气边界层参数化不仅存在湍流闭合问题、负梯度输送问题、相干结构问题(Krusche, et al, 2004)和内边界层问题等,而且还有局地环流或局地垂直运动的动力贡献和能量平流输送问题。到目前为止,在大多数大气数值模式中,对网格尺度陆面非均匀问题已经有所考虑,但对网格尺度大气边界层非均匀问题考虑得很少。这主要是由于对非均匀大气边界层的观测试验要比非均匀陆面过程的困难得多,对其观测试验的认识也很有限。因此,目前非均匀大气边界层参数化问题仍面临较大挑战。

4.6 复杂条件下经典大气湍流理论的适用性问题

对于均匀下垫面大气边界层而言,以近地层莫宁-奥布霍夫相似性理论和惯性区科尔莫戈罗夫湍流理论等为代表的经典理论和方法已相对发展得比较成熟。然而,对于复杂条件而言,莫宁-奥布霍夫相似性理论是否依然适用实际的近地层通量廓线关系,实际的湍流运动是否依然还满足科尔莫戈罗夫理论等都有很大的疑问。如果一些经典理论已经不完全适用复杂条件,又该如何对其进行非均匀性修正? 或者是否只有新的理论和方法才能解决? 同时,在复杂条件下,间歇性湍流既可能由平均气流随

机变化引起,也可能由时间尺度大于湍流的亚中尺度运动造成,如何对其进行有效地区分和数理描述?这些都是复杂条件下大气湍流研究需要解决的重要问题。

4.7 复杂条件大气边界层与自由大气相互作用问题

边界层顶是大气边界层与自由大气的交界面,在这个交界面上大气边界层与自由大气通过夹卷过程和抽吸作用等相互作用,并直接影响大气边界层发展和天气过程形成。但目前对均匀下垫面等理想条件的大气边界层与自由大气的相互作用特征都尚未完全研究清楚,对复杂条件而言大气边界层与自由大气的动力夹卷和抽吸等过程会更加特殊,更何况复杂条件可能还会衍生出边界层与自由大气之间新的作用因子,其大气边界层顶的动量、能量和物质输送特征及其相互联动响应机制还远远不够清楚,并缺乏其相互作用对局地环流及区域大气运动作用的深入探讨。因此,复杂条件大气边界层与自由大气相互作用问题至今仍然是一个很大的难题。

4.8 沙尘天气引起的复杂条件大气边界层问题

沙尘暴是中国北方主要的灾害性天气之一,大气边界层过程作为起沙的重要机制是沙尘暴形成的关键因素。然而,不仅沙尘分布本身会造成大气边界层三维不均匀结构,而且看似平坦的沙漠地表也存在许多复杂下垫面问题。比如,起伏的沙浪分布及沙尘粒径和沙土水分不均匀分布等都会引起复杂下垫面问题。目前,对于如何考虑大气沙尘不均匀分布对大气边界层的影响、下垫面沙浪对粗糙度长度的影响及沙尘粒径和沙土水分不均匀分布对起沙临界摩擦速度的影响等问题仍然没有很好的解决方法。同时,大气边界层对流对大气沙尘的非均匀抬升和传输、大气边界层沙尘的非均匀辐射强迫和动力强迫、二相流特征及拟序结构(Mwendera, et al, 1994),以及沙尘暴过程对大气边界层结构产生的影响等(李岩瑛等,2011;杨兴华等,2011)也是沙尘天气引起的复杂条件大气边界层的凸出问题。

5 解决关键科学问题的初步思路

目前,国际上对复杂条件陆-气相互作用研究领域的探索方兴未艾,虽然从不同角度对复杂条件陆-气相互作用有了一定认识,但总体上缺乏突破性进展,复杂条件陆-气相互作用研究领域正处在重要历史关口。因此,针对如何解决复杂条件陆-气相互作用

研究领域的一些关键科学问题进行一些深入思考十分必要。

5.1 凸出科学试验方案对复杂条件的针对性

科学试验是推动陆-气相互作用研究领域发展的主要手段,以往陆-气相互作用的重大研究进展都无不与一些大型科学试验计划的实施有关。然而,可能正是由于以往大部分陆-气相互作用科研试验有意选择在理想条件下进行,缺乏对复杂条件的针对性,在一定程度上影响了复杂条件陆-气相互作用研究领域的进展。当前,可以利用观测技术发展带来的机遇,突破以往科学试验方案的局限性,根据复杂条件的具体特点设计具有针对性的科学试验方案,对观测站点进行合理布局,从而获得能够捕捉到复杂条件影响信息的观测数据。例如,针对中国季风影响过渡区的复杂性,就应该沿季风进退方向和边缘带走向设计“十”字形布局的观测试验方案;而针对无规律性的非均匀植被分布,则需要设计多层嵌套式矩阵试验方案;而针对中国城市高层建筑往往分散在整个城市区域的特点,在城市大气边界层特性观测试验中,则可以采用先进的闪烁仪和无人机同时观测的试验方案(Lee, et al, 2015)。

5.2 简化复杂下垫面参数化问题的复杂性

为了便于问题的解决,通常可以将复杂下垫面参数化问题进行合理简化。实际上,有不少下垫面的非均匀性具有一定的分布规律,还有一部分下垫面的非均匀性虽然没有比较明显的分布规律但其分布特征受具有一定规律的因素所控制,这将为复杂下垫面参数化问题进行简化提供了理论基础。因此,可以先选择具有一定的分布规律或受一定规律因素控制的非均匀下垫面的陆-气相互作用来研究,这样比较容易找到非均匀性的参数化关系。比如,自然植被分布的非均匀性一般受气候因素控制,沙浪起伏分布的非均匀性可能受大气动力场和沙粒特性分布规律决定,此类下垫面非均匀性的陆面过程参数化问题可能会比较容易解决。

一般地,陆地上以自然植被下垫面为主,可以根据自然植被下垫面的非均匀规律,简化其陆面过程参数化问题的复杂性,构建具有一定物理机制的非均匀参数化关系。比如,可以把陆面过程参数化中自然植被非均匀因素分为控制因素和影响因素,对任意陆面过程物理量 H 可以表示为

$$H = H_0 f_1(h, d, l, \dots) f_2(e_1, e_2, e_3, \dots) \quad (1)$$

式中, H_0 是均匀下垫面陆面过程物理量参数化关系, 已经有比较经典的公式来表示; $f_1(h, d, l, \dots)$ 是非均匀性控制函数, 受植被高度(h)、植被密度(d)和植被柔软性(l)等植被特征因子控制, 它们基本与气候条件有关; $f_2(e_1, e_2, e_3, \dots)$ 是非均匀性影响函数, 受近地层大气动力因子(e_1)、热力因子(e_2)和气压因子(e_3)等环境因素影响, 它会放大或缩小非均匀性的表现力, 放大或缩小非均匀性的作用。这个关系式基本上表示了非均匀自然植被下垫面陆面过程参数化的思路。

5.3 建立多尺度陆面过程参数化关系

由于陆面特性复杂性受不同时空尺度的因素影响, 所以构建多尺度陆面过程参数化关系对于复杂下垫面陆-气相互作用过程十分必要, 它可以在一定程度上描述陆面过程参数的非均匀性影响。比如, 对动力学粗糙度长度而言, 它同时受近地层大气动

力学特征、大气热力学特征、植被自然生长规律、降水年际波动的生态效应和植被分布类型等多个因子影响(Krusche, et al, 2004)。如图3所示, 这些因子代表了日、年、年际、年代际等不同时间尺度影响。因此, 可以构建一个包含多尺度气候动力因子的动力学粗糙度长度(Zhang, et al, 2016)的参数化关系

$$z_0 = F(v, c, s, a_d, a_T) \quad (2)$$

式中, $z_0 = F(v, c, s, a_d, a_T)$ 是动力学粗糙度长度参数化关系函数, v, c, s, a_d, a_T 分别代表植被类型(气候态)因子、气候年际波动因子、植被季节生长因子、大气动力因子和大气热力因子等。另外, 对于整个非均匀下垫面上的动力学粗糙度长度, 可以先考虑每个单独的板块上的(根据粗糙元的特征参数如植被的高度、植被覆盖度及叶面积指数等因素确定)粗糙度长度, 然后再运用足迹权重法来计算整个区域的值(Lu, et al, 2009)。

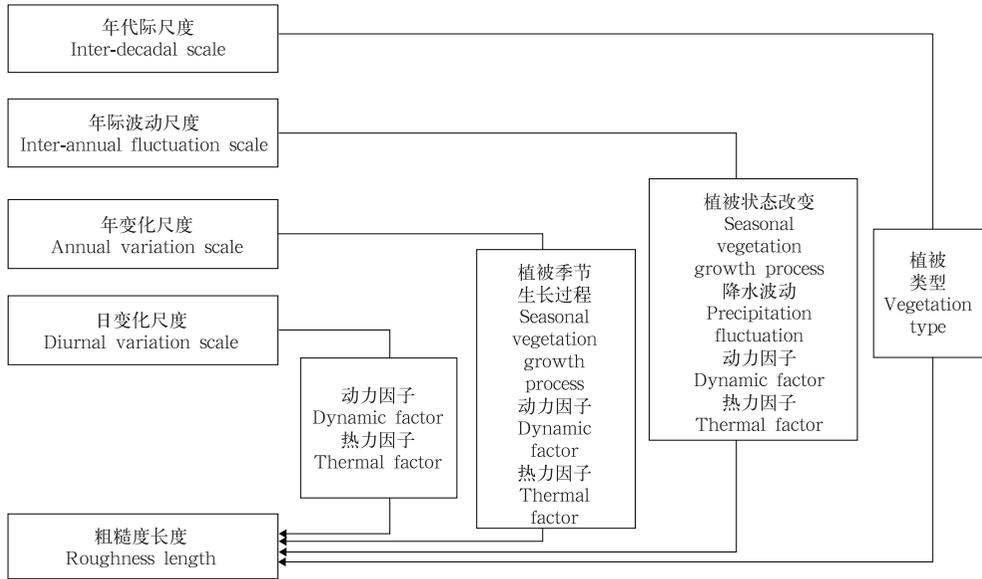


图3 动力学粗糙度长度多尺度影响因子示意

Fig. 3 Schematics of the multi-scale factors influencing the dynamic roughness length

5.4 结合多观测手段对非均匀下垫面陆面过程参数的升尺度方案

建立非均匀下垫面陆面过程参数的升尺度关系即陆面过程参数的尺度耦合问题是当前非均匀网格尺度上陆面过程参数化的重要方向。要实现这个目标, 需要充分利用目前发展的多种观测手段结合实现陆面过程参数的升尺度转化, 即用综合观测试验 EC 的单点通量观测(10^{-1} km 空间尺度)、LAS 的区域平均通量观测(10^0 km 空间尺度)和卫星遥感

通量反演(10^1 km 空间尺度)等数据建立不同尺度之间的通量耦合关系。这其中, 必须使区域平均尺度与卫星遥感像元尺度(10^0 km)相匹配, 卫星遥感反演尺度与区域模式网格尺度(10^1 km)相匹配, 这样不同尺度通量才能耦合起来, 才能实现不同尺度陆面过程参数的转化。一方面可采取将多个升频方法结合引起辅助变量的方法, 弥补单点蒸散发测量和遥感估算之间的差距(Liu, et al, 2016); 另一方面, 对一些变量可以考虑建立无量纲特征长度, 建立

次网格参数化模型,从而在一定程度上解决不同尺度上的陆面过程非均匀性问题(Avissar, et al, 1989, Avissar, 1995)。此外,针对非均匀下垫面陆面过程参数的尺度转换问题,也可以尝试利用近年来发展起来的足迹模型(能够精确描述仪器观测通量的代表范围大小以及源区范围内各个单元的相对贡献)来分析地表通量的尺度关系(卢俐等, 2010)。

5.5 通过完善“马赛克”方法发展高分辨区域数值模式

“马赛克”方法可用于改进次网格非均匀通量的估算,是目前解决非均匀下垫面陆面过程参数化问题最常用的方法,但使用这种方法需要各种下垫面类型的陆面过程参数来填充。这可以通过加快对一些陆面参数尚不清楚的下垫面类型的陆面过程观测试验进行研究,来完善对各类下垫面陆面过程参数的认识,并以此发展高分辨率区域数值模式。并且,可以利用高分辨率数值模式,设计各种不同的敏感性试验方案,研究各类下垫面非均匀性的影响特征和作用机制,这对揭示不同空间尺度非均匀耦合问题及不同非均匀因子相互作用问题具有很大帮助。

5.6 利用大气非线性理论来解决非均匀性问题

非均匀大气的湍流交换不但存在垂直速度交叉耦合效应,还存在 Soret 和 Dufour 效应(Mwendera, et al, 1994),它们都是典型的非线性现象(胡隐樵等, 2012)。因此,针对陆面或大气的非均匀性,可以尝试利用非线性理论来描述其特征,包括动力过程对物质和能量输送的交叉耦合效应及位温梯度对潜热的耦合效应和水汽梯度对感热的耦合效应等都可以用非线性方程进行描述。此外,还可以尝试将希尔伯特-黄变换技术应用于复杂条件大气湍流研究(张宏昇, 2014),它能够在一定程度上解决非平稳、非定常的复杂条件大气湍流运动问题。

6 结 语

20 世纪上半叶,经过对各种大气边界层相似性方法的争论和探索,终于确立了均匀下垫面莫宁-奥布霍夫相似性理论等经典的理论方法。但由于当时中国正处于战乱之中,基本上缺席了这一进程。在 20 世纪 70—90 年代,陆面过程和大气边界层科学试验研究及其参数化研究得到了快速发展,中国科学家在后期广泛参与其中,但由于受观测试验设备和科研经费限制,比较缺乏创先性和突破性的贡献。

目前,正是国际上复杂条件陆-气相互作用研究的关键时期,在确立复杂条件陆面过程和大气边界层理论与方法的进程中面临许多艰巨的科学挑战,中国科学家可以利用区位优势 and 凸出本土特色,寻求对该领域重要科学问题的突破。

同时,中国综合气象观测体系发展很快,气象探空观测正在突破以往低精度、低分辨率、单设备(L 波段雷达)、部分要素(风、温、湿)的观测局面,已经逐步具有高精度、高分辨率、多设备(L 波段雷达、激光雷达、云雷达和风廓线雷达等)、多要素的观测能力,已基本能够满足大气边界层观测的技术要求。并且,正在建立的土壤水分和植被生态特征观测网,已初步具备部分陆面过程观测能力。中国综合气象观测体系的这种发展趋势,可以提供空间分布比较密细的、长期稳定的、对陆-气相互作用具有一定针对性的科学观测数据,这对复杂条件陆-气相互作用研究会有极大的帮助。另外,观测试验技术的迅猛发展是推动陆-气相互作用研究从理想条件向复杂条件发展的主要动力。实践证明,协同观测是集约化利用分散观测试验资源的有效手段,可以实现国内现有观测试验力量的效益倍增,从而为复杂条件陆-气相互作用研究提供充分的试验数据保障。虽然以往进行的协同观测计划已经发挥了成功的示范作用,但由于广度和深度不足,且没有稳定和持续地实施下去,在一定程度上影响了其作用的发挥。因此,十分有必要进一步提升协同观测计划的层次,彻底实现中国陆-气相互作用的观测试验技术标准化、数据质量控制规范化和资料应用共享化,充分整合现有观测试验资源,为推动复杂条件陆-气相互作用关键科学问题突破创造坚实的观测试验基础。

此外,陆面过程模式的完善和发展既是研究复杂下垫面陆-气相互作用的挑战又是其实现突破的机遇。因此,应该以科学的理论推断为基础,通过开展充分针对复杂下垫面特点的陆-气相互作用观测试验研究,系统发展复杂下垫面陆面过程参数化方案。这不仅可以提高对复杂地区陆面过程的模拟能力,而且还为研究复杂下垫面陆-气相互作用机理问题提供了重要的手段。

陆-气相互作用研究是基础性研究,该研究要想从幕后走向前台,就必须与现实技术问题密切结合,切实解决百姓关注的现实问题。因此,陆-气相互作用研究领域的科技成果必须充分应用到天气预报和

气候预测中,必须为大气数值模式发展提供核心技术支撑,必须在解决“雾、霾”等社会热点问题上发展关键作用,必须在解释气候变化重大论点上扮演重要角色等。只有这样陆-气相互作用研究才能有强劲的生命力,才能从幕后走向前台。不过,要做到这一点就首先需要破解复杂条件带来的一系列科学难题。

事实上,人类生产、生活主要在大气边界层中进行,而且日常目睹的许多天气现象也大都发生在边界层之内。比如,无论是如今广受诟病的“雾、霾”,还是人们浪漫记忆中的彩虹,都是典型的边界层现象。努力提高公众对大气边界层的认知,让大众知道大气边界层科学距离我们每个人都最近,无论愿意或不愿意,人们都只能与她朝夕相处!必须认真研究她,揭开她层层神秘的面纱!

致谢:本文是在2014年南京“第十一届大气边界层战略研讨会”上所做“复杂条件下陆-气相互作用研究有关科学问题探讨”报告的基础形成的。在会议讨论期间,赵鸣教授、黄建平教授、邹捍研究员、石广玉院士、刘树华教授、周明煜研究员、胡隐樵研究员、王介民研究员、胡非研究员、高志球教授、蒋维楣教授、何清研究员、贾立研究员、张宇研究员、王成刚博士等对报告内容提供了宝贵的意见和建议,在此一并致谢。

参考文献

闭建荣,黄建平,刘玉芝等. 2008. 黄土高原半干旱区地表辐射特征. 兰州大学学报(自然科学版), 44(3): 33-38. Bi J R, Huang J P, Liu Y Z, et al. 2008. Characteristics of surface radiation over semi-arid region of the Loess Plateau. J Lanzhou Univ (Nat Sci), 44(3): 33-38 (in Chinese)

陈斌,丁裕国,刘晶森等. 2008. 非均匀地表陆面过程参数化研究. 高原气象, 27(5): 1172-1180. Chen B, Ding Y G, Liu J M, et al. 2008. Review on research of parameterization of heterogeneous land surface process. Plateau Meteor, 27(5): 1172-1180 (in Chinese)

陈渤黎,吕世华,罗斯琼. 2012. CLM3.5 模式对青藏高原玛曲站陆面过程的数值模拟研究. 高原气象, 31(6): 1511-1522. Chen B L, Lü S H, Luo S Q. 2012. Simulation analysis on land surface process at Maqu station in the Qinghai-Xizang Plateau using community land model. Plateau Meteor, 31(6): 1511-1522 (in Chinese)

程兴宏,徐祥德,张胜军等. 2007. 北京地区热岛非均匀分布特征的卫星遥感-地面观测综合变分分析. 气候与环境研究, 12(5): 683-692. Cheng X H, Xu X D, Zhang S J, et al. 2007. Integrated analysis on unsymmetrical space distribution characteristics of urban heat island based on variational processing method

in Beijing. Climatic Environ Res, 12(5): 683-692 (in Chinese)

冯健武,刘辉志,王雷等. 2012. 半干旱区不同下垫面地表粗糙度和湍流通量整体输送系数变化特征. 中国科学:地球科学, 42(1): 24-33. Feng J W, Liu H Z, Wang L, et al. 2012. Seasonal and inter-annual variation of surface roughness length and bulk transfer coefficients in a semiarid area. Sci China Earth Sci, 55(2): 254-261

符淙斌,马柱国. 2008. 全球变化与区域干旱化. 大气科学, 32(4): 752-760. Fu C B, Ma Z G. 2008. Global change and regional aridification. Chinese J Atmos Sci, 32(4): 752-760 (in Chinese)

古红萍,沈学顺,金继明等. 2014. WRF_Lake 湖气模式对我国太湖的湖温模拟应用评估. 气象, 40(2): 166-173. Gu H P, Shen X S, Jin J M, et al. 2014. Evaluation on simulation of coupled WRF lake model to lake surface temperature in Taihu lake. Meteor Mon, 40(2): 166-173 (in Chinese)

胡非,洪钟祥,陈家宜等. 2006. 白洋淀地区非均匀大气边界层的综合观测研究:实验介绍及近地层微气象特征分析. 大气科学, 30(5): 883-893. Hu F, Hong Z X, Chen J Y, et al. 2006. The field experiment of atmospheric boundary layer over heterogeneous surface in Baiyangdian area: Introduction and preliminary data analysis. Chinese J Atmos Sci, 30(5): 883-893 (in Chinese)

胡隐樵,高由禧. 1994. 黑河实验(HEIFE)——对干旱地区陆面过程的一些新认识. 气象学报, 52(3): 285-296. Hu Y Q, Gao Y X. 1994. Some new understandings of processes at the land surface in arid area from the HEIFE. Acta Meteor Sinica, 52(3): 285-296 (in Chinese)

胡隐樵,孙菽芬,郑元润等. 2004. 稀疏植被下垫面与大气相互作用研究进展. 高原气象, 23(3): 281-296. Hu Y Q, Sun S F, Zheng Y R, et al. 2004. Review of study on interaction between underlying surface with sparse vegetation and atmosphere. Plateau Meteor, 23(3): 281-296 (in Chinese)

胡隐樵,陈晋北,吕世华. 2012. 从湍流经典理论到大气湍流非平衡态热力学理论. 高原气象, 31(1): 1-27. Hu Y Q, Chen J B, Lü S H. 2012. From the classic theory of turbulence to the Non-equilibrium thermodynamic theory of atmospheric turbulence. Plateau Meteor, 31(1): 1-27 (in Chinese)

黄建平,季明霞,刘玉芝等. 2013. 干旱半干旱区气候变化研究综述. 气候变化研究进展, 9(1): 9-14. Hunag J P, Ji M X, Liu Y Z, et al. 2013. An overview of arid and semi-arid climate change. Progressus Inquisitiones de Mutatione Climatis, 9(1): 9-14 (in Chinese)

黄荣辉. 2006. 我国重大气候灾害的形成机理和预测理论研究. 地球科学进展, 21(6): 564-575. Huang R H. 2006. Progresses in research on the formation mechanism and prediction theory of severe climatic disasters in China. Adv Earth Sci, 21(6): 564-575 (in Chinese)

黄荣辉,周德刚,陈文等. 2013. 关于中国西北干旱区陆-气相互作用及其对气候影响研究的最近进展. 大气科学, 37(2): 189-

210. Huang R H, Zhou D G, Chen W, et al. 2013. Recent progress in studies of air-land interaction over the arid area of Northwest China and its impact on climate. *Chinese J Atmos Sci*, 37(2): 189-210 (in Chinese)
- 蒋维楣, 苗世光, 张宁等. 2010. 城市气象环境与边界层数值模拟研究. *地球科学进展*, 25(5): 463-473. Jiang W M, Miao S G, Zhang N, et al. 2010. Numerical simulation on urban meteorology and urban boundary layer. *Adv Earth Sci*, 25(5): 463-473 (in Chinese)
- 李江林, 陈玉春, 吕世华等. 2009. 利用 RAMS 模式对山谷城市冬季局地风场的数值模拟. *高原气象*, 28(6): 1250-1259. Li J L, Chen Y C, Lü S H, et al. 2009. Numerical simulation of local circulation in valley city in winter using RAMS model. *Plateau Meteor*, 28(6): 1250-1259 (in Chinese)
- 李江林, 余晔, 刘川. 2015. 青藏高原与黄土高原过渡区雷暴活动特征及东亚夏季风的影响. *高原气象*, 34(6): 1575-1583. Li J L, Yu Y, Liu C. 2015. Variation of thunderstorm activities and its connection to east Asian summer monsoon in transition region between Qinghai-Xizang Plateau and Loess Plateau. *Plateau Meteor*, 34(6): 1575-1583 (in Chinese)
- 李茂善, 马耀明, 马伟强等. 2011. 藏北高原地区干、雨季大气边界层结构的不同特征. *冰川冻土*, 33(1): 72-79. Li M S, Ma Y M, Ma W Q, et al. 2011. Structural difference of atmospheric boundary layer between dry and rainy seasons over the central Tibetan plateau. *J Glaciol Geocryol*, 33(1): 72-79 (in Chinese)
- 李晓莉, 何金海, 毕宝贵等. 2003. MM5 模式中城市冠层参数化方案的设计及其数值试验. *气象学报*, 61(5): 526-539. Li X L, He J H, Bi B G, et al. 2003. The design of urban canopy parameterization of MM5 and its numerical simulations. *Acta Meteorologica Sinica*, 61(5): 526-539 (in Chinese)
- 李育, 朱秋睿. 2015. 三大自然区过渡地带近 50 年来气候类型变化及其对气候变化的响应. *地球科学进展*, 30(7): 791-801. Li Y, Zhu G R. 2015. Changes of climate zones in the transition area of three natural zones during the past 50 years and their responses to climate change. *Adv Earth Sci*, 30(7): 791-801 (in Chinese)
- 李岩瑛, 张强, 薛新玲等. 2011. 民勤大气边界层特征与沙尘天气的气候学关系研究. *中国沙漠*, 31(3): 757-764. Li Y Y, Zhang Q, Xue X L, et al. 2011. Relationship between atmosphere boundary layer characteristics and sand-dust weather climatology in Minqin. *J Desert Res*, 31(3): 757-764 (in Chinese)
- 李倩, 孙蓓芬. 2007. 通用的土壤水热传输耦合模型的发展和改进研究. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 37(11): 1522-1535. Li Q, Sun S F. 2008. Development of the universal and simplified soil model coupling heat and water transport. *Sci China Ser D Earth Sci*, 51(1): 88-102
- 梁捷宁, 张镭, 田鹏飞等. 2014. 黄土高原复杂地形上边界层低空急流对近地层湍流的影响. *地球物理学报*, 57(5): 1387-1398. Liang J N, Zhang L, Tian P F, et al. 2014. Impact of low-level jets on turbulent in nocturnal boundary layer over complex terrain of the Loess Plateau. *Chinese J Geophys*, 57(5): 1387-1398 (in Chinese)
- 刘辉志, 冯健武, 王雷等. 2013. 大气边界层物理研究进展. *大气科学*, 37(2): 467-476. Liu H Z, Feng J W, Wang L, et al. 2013. Overview of recent studies on atmospheric boundary layer physics at LAPC. *Chinese J Atmos Sci*, 37(2): 467-476 (in Chinese)
- 刘寿东, 姜润, 王成刚等. 2014. 南京夏季城市热岛时空分布特征的观测分析. *大气科学学报*, 37(1): 19-27. Liu S D, Jiang R, Wang C G, et al. 2014. Observation analysis on spatial and temporal distribution characteristics of summer urban heat island in Nanjing. *Trans Atmos Sci*, 37(1): 19-27 (in Chinese)
- 刘野, 郭维栋, 宋耀明. 2015. 半干旱区关键地表参数的估算及其对地气通量模拟的改进. *中国科学: 地球科学*, 45(10): 1524-1536. Liu Y, Guo W D, Song Y M. 2015. Estimation of key surface parameters in semi-arid region and their impacts on improvement of surface fluxes simulation. *Sci China Earth Sci*, 59(2): 307-319
- 卢俐, 刘绍民, 徐自为等. 2010. 大孔径闪烁仪和涡动相关仪观测显热通量之间的尺度关系. *地球科学进展*, 25(11): 1273-1282. Lu L, Liu S M, Xu Z W, et al. 2010. The scale relationship of sensible heat flux measured by large aperture scintillometer and eddy covariance system. *Adv Earth Sci*, 25(11): 1273-1282 (in Chinese)
- 吕达仁, 陈佐忠, 陈家宜等. 2002. 内蒙古半干旱草原土壤植被大气相互作用(IMGRASS)综合研究. *地学前缘*, 9(2): 295-306. Lü D R, Chen Z Z, Chen J Y, et al. 2002. Composite study on inner Mongolia semi-arid grassland soil-vegetation-atmosphere interaction (IMGRASS). *Earth Sci Front*, 9(2): 295-306 (in Chinese)
- 吕世华. 2004. 盆地绿洲边界层特征的数值模拟. *高原气象*, 23(2): 171-176. Lü S H. 2004. Numerical simulation of boundary layer character in oasis basin. *Plateau Meteor*, 23(2): 171-176 (in Chinese)
- 马敏劲, 郭世奇, 王式功. 2012. 近 11 年兰州空气污染特征及其边界层结构影响的分析. *兰州大学学报(自然科学版)*, 48(6): 69-73. Ma M J, Guo S Q, Wang S G. 2012. Analysis of the characteristics of air pollution and its boundary layer structural effect in recent 11 years over Lanzhou. *J Lanzhou Univ (Nat Sci)*, 48(6): 69-73 (in Chinese)
- 马耀明, 塚本修, 吴晓鸣等. 2000. 藏北高原草甸下垫面近地层能量输送及微气象特征. *大气科学*, 24(5): 715-722. Ma Y M, Tsukamoto O, Wu X M, et al. 2000. Characteristics of energy transfer and micrometeorology in the surface layer of the atmosphere above grassy marshland of the Tibetan Plateau area. *Chinese J Atmos Sci*, 24(5): 715-722 (in Chinese)
- 马耀明, 塚本修, 王介民等. 2001. 青藏高原草甸下垫面上的动力学和热力学参数分析. *自然科学进展*, 11(8): 824-828. Ma Y M, Tsukamoto O T, Wang J M, et al. 2001. Analysis of aero-

- dynamic and thermodynamic parameters on the grassy marshland surface of Tibetan Plateau. *Prog Nat Sci*, 11(8): 824-828 (in Chinese)
- 孟春雷, 戴永久. 2013. 城市陆面模式设计及检验. *大气科学*, 37(6): 1297-1308. Meng C L, Dai Y J. 2013. Development and verification of a bulk urbanized land surface model. *Chinese J Atmos Sci*, 37(6): 1297-1308 (in Chinese)
- 孟宪红, 吕世华, 陈世强等. 2005. 金塔绿洲地表特征参数遥感反演研究. *高原气象*, 24(4): 509-515. Meng X H, Lü S H, Chen S Q, et al. 2005. Retrieval of ground surface parameter over Jinta oasis using the satellite data. *Plateau Meteor*, 24(4): 509-515 (in Chinese)
- 乔娟, 张强, 张杰. 2008. 非均匀下垫面陆面过程参数化问题研究进展. *干旱气象*, 26(1): 73-77, 88. Qiao J, Zhang Q, Zhang J. 2008. Preliminary summary on parameterization of heterogeneous land surface process and remote sensing technology research. *J Arid Meteor*, 26(1): 73-77, 88 (in Chinese)
- 任晓倩, 李倩, 陈文等. 2014. 一个新的湖-气热传输模型及其模拟能力评估. *大气科学*, 38(5): 993-1004. Ren X Q, Li Q, Chen W, et al. 2014. A new lake model for air-lake heat exchange process and evaluation of its simulation ability. *Chinese J Atmos Sci*, 38(5): 993-1004 (in Chinese)
- 王介民. 1999. 陆面过程实验和地气相互作用研究: 从 HEIFE 到 IMGRASS 和 GAME-Tibet/TIPEX. *高原气象*, 18(3): 280-294. Wang J M. 1999. Land surface process experiments and interaction study in China from HEIFE to IMGRASS and GAME-TIBET/TIPEX. *Plateau Meteor*, 18(3): 280-294 (in Chinese)
- 王介民, 王维真, 奥银焕等. 2007. 复杂条件下湍流通量的观测与分析. *地球科学进展*, 22(8): 791-797. Wang J M, Wang W Z, Ao Y H, et al. 2007. Turbulence flux measurements under complicated conditions. *Adv Earth Sci*, 22(8): 791-797 (in Chinese)
- 王腾蛟, 张镭, 张博凯等. 2013. 城市下垫面对河谷城市兰州冬季热岛效应及边界层结构的影响. *气象学报*, 71(6): 1115-1129. Wang T J, Zhang L, Zhang B K, et al. 2013. The impacts of urban underlying surface on the winter urban heat island effect and the boundary layer structure over the valley city Lanzhou. *Acta Meteor Sinica*, 71(6): 1115-1129 (in Chinese)
- 王维真, 徐自为, 刘绍民等. 2009. 黑河流域不同下垫面水热通量特征分析. *地球科学进展*, 24(7): 714-723. Wang W Z, Xu Z W, Liu S M, et al. 2009. The characteristics of heat and water vapor fluxes over different surfaces in the Heihe River Basin. *Adv Earth Sci*, 24(7): 714-723 (in Chinese)
- 佟华, 刘辉志, 赵琳娜. 2009. 半干旱区陆面模式参数对水分循环的敏感性研究. *气候与环境研究*, 14(6): 621-630. Tong H, Liu H Z, Zhao L N. 2009. Sensitivity research of parameters to water cycle in land surface model in semi-arid area. *Climatic Environ Res*, 14(6): 621-630 (in Chinese)
- 魏文寿, 王敏仲, 何清等. 2008. 塔克拉玛干沙漠腹地近地边界层温湿廓线与热量平衡分析. *科学通报*, 53(S2): 18-24. Wei W S, Wang M Z, He Q, et al. 2008. Analyses of temperature and humidity profiles and heat balance of the surface boundary-layer in the hinterland of the Taklimakan Desert. *Chinese Sci Bull*, 53(S2): 22-30
- 夏坤, 罗勇, 李伟平. 2011. 青藏高原东北部土壤冻融过程的数值模拟. *科学通报*, 56(22): 1828-1838. Xia K, Luo Y, Li W P. 2011. Simulation of freezing and melting of soil on the northeast Tibetan Plateau. *Chinese Sci Bull*, 56(20): 2145-2155
- 肖薇, 刘寿东, 李旭辉等. 2012. 大型浅水湖泊与大气之间的动量和热交换系数: 以太湖为例. *湖泊科学*, 24(6): 932-942. Xiao W, Liu S D, Li X H, et al. 2012. Transfer coefficients of momentum, heat and water vapour in the atmospheric surface layer of a large shallow freshwater lake: A case study of Lake Taihu. *J Lake Sci*, 24(6): 932-942 (in Chinese)
- 熊建胜, 张宇, 王少影等. 2014. CLM4.0 土壤水分传输方案改进在青藏高原陆面过程模拟中的效应. *高原气象*, 33(2): 323-336. Xiong J S, Zhang Y, Wang S Y, et al. 2014. Influence of soil moisture transmission scheme improvement in CLM4.0 on simulation of land surface process in Qinghai-Xizang plateau. *Plateau Meteor*, 33(2): 323-336 (in Chinese)
- 徐安伦, 李建, 刘辉志等. 2013. 大理国家气候观象台地面辐射观测数据的质量控制研究. *高原气象*, 32(5): 1432-1441. Xu A L, Li J, Liu H Z, et al. 2013. Quality control of surface radiation data measured in Dali national climate observatory. *Plateau Meteor*, 32(5): 1432-1441 (in Chinese)
- 许鲁君, 刘辉志, 曹杰. 2014. 大理苍山-洱海局地环流的数值模拟. *大气科学*, 38(6): 1198-1210. Xu L J, Liu H Z, Cao J. 2014. Numerical simulation of local circulation over the Cangshan Mountain-Erhai Lake area in Dali, Southwest China. *Chinese J Atmos Sci*, 38(6): 1198-1210 (in Chinese)
- 许鲁君, 刘辉志. 2015. 云贵高原洱海湖泊效应的数值模拟. *气象学报*, 73(4): 789-802. Xu L J, Liu H Z. 2015. Numerical simulation of the lake effect of Erhai in the Yunnan-Guizhou Plateau area. *Acta Meteor Sinica*, 73(4): 789-802 (in Chinese)
- 徐祥德, 王寅钧, 赵天良等. 2014. 高原东南缘大气近地层湍能特征与边界层动力、热力结构相关特征. *气象*, 40(10): 1165-1173. Xu X D, Wang Y J, Zhao T L, et al. 2014. Relationship between turbulent energy in the near-surface layer and atmospheric boundary layer thermodynamic structure over the southeastern side of Tibetan plateau. *Meteor Mon*, 40(10): 1165-1173 (in Chinese)
- 徐阳阳, 刘树华, 胡非等. 2009. 北京城市化发展对大气边界层特性的影响. *大气科学*, 33(4): 859-867. Xu Y Y, Liu S H, Hu F, et al. 2009. Influence of Beijing urbanization on the characteristics of atmospheric boundary layer. *Chinese J Atmos Sci*, 33(4): 859-867 (in Chinese)
- 杨罡, 刘树华, 朱蓉等. 2011. 鄱阳湖地区大气边界层特征的数值模拟. *地球物理学报*, 54(4): 896-908. Yang G, Liu S H, Zhu R, et al. 2011. Numerical simulation of features of boundary-

- layer over Poyang Lake area. Chinese J Geophys, 54(4): 896-908 (in Chinese)
- 杨启东, 王丽娟. 2014. SHAW 模式的改进及其在黄土高原半干旱区的模拟研究. 干旱气象, 32(4): 527-536, 552. Yang Q D, Wang L J. 2014. Improvement of the land surface model SHAW and simulation analysis in the Loess Plateau. J Arid Meteor, 32(4): 527-536, 552 (in Chinese)
- 杨兴华, 何清, 阿吉古丽·沙依提等. 2011. 塔克拉玛干沙漠腹地沙尘暴过程的大气边界层特征分析. 沙漠与绿洲气象, 5(6): 11-15. Yang X H, He Q, Shayiti A, et al. 2011. Character analysis of boundary layer during a sandstorm in hinterland of the Taklimakan desert. Desert Oasis Meteor, 5(6): 11-15 (in Chinese)
- 杨扬, 左洪超, 杨启东等. 2015. CLM4.0 模式对干旱区荒漠草原过渡带快速变化陆地过程的数值模拟研究. 高原气象, 34(4): 923-934. Yang Y, Zuo H C, Yang Q D, et al. 2015. Numerical simulation of transient land surface process over desert-steppe transitional zone in arid areas using community land model. Plateau Meteor, 34(4): 923-934 (in Chinese)
- 姚彤, 张强, 尹晗. 2014. 半干旱区榆中地表粗糙度年变化及影响机理. 应用气象学报, 25(4): 454-462. Yao T, Zhang Q, Yin H. 2014. The annual variation and its influencing mechanism of surface roughness length of Yuzhong in semi-arid areas. J Appl Meteor Sci, 25(4): 454-462 (in Chinese)
- 于淑秋, 王继志, 丁国安. 2007. 中日 JICA 计划项目: 我国高原及周边新一代气象灾害综合监测网系统建设取得进展. 气象学报, 65(6): 1011-1012. Yu S Q, Wang J Z, Ding G A. 2007. China-Japan JICA Program: Progress made on building a new generation of integrated monitoring website of meteorological disaster for Tibet and surrounding region in China. Acta Meteor Sinica, 65(6): 1011-1012 (in Chinese)
- 张宏昇. 2014. 大气湍流基础. 北京: 北京大学出版社, 189pp. Zhang H S. 2014. Atmospheric Turbulence Foundation. Beijing: Peking University Press, 189pp (in Chinese)
- 张强, 胡隐樵. 1992. 兰州山地湍流输送和湍流强度的研究. 高原气象, 11(2): 126-132. Zhang Q, Hu Y Q. 1992. A research about turbulent transport and intensity over complex terrain of Lanzhou. Plateau Meteor, 11(2): 126-132 (in Chinese)
- 张强. 2001. 地形和逆温层对兰州市污染物输送的影响. 中国环境科学, 21(3): 230-234. Zhang Q. 2001. The influence of terrain and inversion layer on pollutant transfer over Lanzhou City. China Environ Sci, 21(3): 230-234 (in Chinese)
- 张强, 吕世华, 张广庶. 2003a. 山谷城市大气边界层结构及输送能力. 高原气象, 22(4): 346-353. Zhang Q, Lü S H, Zhang G S. 2003. The structure of atmospheric boundary layer over valley city and its transfer ability. Plateau Meteor, 22(4): 346-353 (in Chinese)
- 张强, 卫国安, 黄荣辉. 2003b. 西北干旱区敦煌戈壁局地地面过程野外试验研究 // 吴国雄, 孙菽芬, 陈文. 青藏高原与西北干旱区对气候灾害的影响. 北京: 气象出版社, 157-177. Zhang Q, Wei G A, Huang R H. 2003. The field experiment on local surface process of Dunhuang in arid region // Wu G X, Sun S D, Chen W, et al. Influence of the Tibetan Plateau and the Acid Region in West China to Climatic Disaster. Beijing: China Meteor Press, 157-177 (in Chinese)
- 张强, 黄荣辉, 王胜等. 2005. 西北干旱区陆-气相互作用试验(NWC-ALIEX)及其研究进展. 地球科学进展, 20(4): 427-441. Zhang Q, Huang R H, Wang S, et al. 2005. NWC-ALIEX and its research advances. Adv Earth Sci, 20(4): 427-441 (in Chinese)
- 张强, 王胜. 2008. 西北干旱区夏季大气边界层结构及其陆地过程特征. 气象学报, 66(4): 599-608. Zhang Q, Wang S. 2008. A study on atmospheric boundary layer structure on a clear day in the arid region in northwest China. Acta Meteor Sinica, 66(4): 599-608 (in Chinese)
- 张强, 胡向军, 王胜等. 2009. 黄土高原陆地过程试验研究(LOPEX)有关科学问题. 地球科学进展, 24(4): 363-371. Zhang Q, Hu X J, Wang S, et al. 2009. Some technological and scientific issues about the experimental study of land surface processes in Chinese Loess Plateau (LOPEX). Adv Earth Sci, 24(4): 363-371 (in Chinese)
- 张强, 曾剑, 张立阳. 2012. 夏季季风盛行期中国北方典型区域陆面水、热过程特征研究. 中国科学: 地球科学, 42(9): 1385-1393. Zhang Q, Zeng J, Zhang L Y. 2012. Characteristics of land surface thermal-hydrologic processes for different regions over North China during prevailing summer monsoon period. Sci China Earth Sci, 55(11): 1872-1880
- 赵建华, 张强, 王胜. 2011. 西北干旱区对流边界层发展的热力机制模拟研究. 气象学报, 69(6): 1029-1037. Zhao J H, Zhang Q, Wang S. 2011. A simulative study of the thermal mechanism for development of the convective boundary layer in the arid zone of northwest China. Acta Meteor Sinica, 69(6): 1029-1037 (in Chinese)
- 周荣卫, 蒋维楣, 刘罡等. 2007. 精细的城市边界层模拟中热力粗糙度引入的初步研究. 大气科学, 31(4): 611-620. Zhou R W, Jiang W M, Liu G, et al. 2007. A study of introducing temperature roughness length into a fine urban boundary layer model. Chinese J Atmos Sci, 31(4): 611-620 (in Chinese)
- 周秀骥, 赵平, 陈军明等. 2009. 青藏高原热力作用对北半球气候影响的研究. 中国科学 D 辑: 地球科学, 39(11): 1473-1486. Zhou X J, Zhao P, Chen J M, et al. 2009. Impacts of thermodynamic processes over the Tibetan Plateau on the Northern Hemispheric climate. Sci China Ser D Earth Sci, 52(11): 1679-1693
- Andre J C, Goutorbe J P, Schmugge T, et al. 1989. HAPEX-MOBILHY: Results from a large-scale field experiment // Rango A. Remote Sensing and Large-Scale Global Processes. Wallingford, UK: International Association of Hydrological Sciences, 13-20
- Avissar R, Pielke R A. 1989. A parameterization of heterogeneous

- land surfaces for atmospheric numerical models and its impact on regional meteorology. *Mon Wea Rev*, 117(10): 2113-2136
- Avissar R. 1995. Recent advances in the representation of land-atmosphere interactions in general circulation models. *Rev Geophys*, 33(S2): 1005-1010
- Bolle H J, Andre J C, Arrue J L, et al. 1993. EFEDA: European field experiment in a desertification-threatened area. *Ann Geophys*, 11(2-3): 173-189
- Chen Y Y, Yang K, Zhou D G, et al. 2010. Improving the Noah land surface model in arid regions with an appropriate parameterization of the thermal roughness length. *J Hydrometeorol*, 11(4): 995-1006
- Dirmeyer P A, Wang Z Y, Mbul M J, et al. 2014. Intensified land surface control on boundary layer growth in a changing climate. *Geophys Res Lett*, 41(4): 1290-1294
- Hu Y Q, Yang X L, Zhang Q, et al. 1992. The characters of energy budget on the Gobi and desert surface in Hexi region. *Acta Meteor Sinica*, 6(1): 82-91
- Huang J P, Zhang W, Zuo J Q, et al. 2008. An overview of the semi-arid climate and environment research observatory over the Loess Plateau. *Adv Atmos Sci*, 25(6): 906-921
- Jiang Q O, Ma E J, Zhan J Y, et al. 2015. Seasonal and interannual variation in energy balance in the semiarid grassland area of China. *Adv Meteor*, 2015: 120620
- Koch G W, Scholes R J, Steffen W L, et al. 1995. The IGBP terrestrial transects: Science plan. IGBP Report No. 39. Stockholm, Sweden; IGBP
- Koster R D, Suarez M J. 1992. A comparative analysis of two land surface heterogeneity representations. *J Climate*, 5(12): 1379-1390
- Krusche N, De Oliveira A P. 2004. Characterization of coherent structures in the atmospheric surface layer. *Bound Layer Meteorol*, 110(2): 191-211
- Lee X, Liu S D, Xiao W, et al. 2014. The Taihu eddy flux network: An observational program on energy, water, and greenhouse gas fluxes of a large freshwater lake. *Bull Amer Meteor Soc*, 95(10): 1583-1594
- Lee X, Gao Z Q, Zhang C L, et al. 2015. Priorities for boundary layer meteorology research in China. *Bull Amer Meteor Soc*, 96(9): ES149-ES151
- Li X, Li X W, Li Z Y, et al. 2009. Watershed allied telemetry experimental research. *J Geophys Res Atmos*, 114(D22), doi: 10.1029/2008JD011590
- Li X, Cheng G D, Liu S M, et al. 2013. Heihe watershed allied telemetry experimental research (HiWATER): Scientific objectives and experimental design. *Bull Amer Meteor Soc*, 94(8): 1145-1160
- Liang J N, Zhang L, Wang Y, et al. 2014. Turbulence regimes and the validity of similarity theory in the stable boundary layer over complex terrain of the Loess Plateau, China. *J Geophys Res Atmos*, 119(10): 6009-6021
- Liu H Z, Feng J W. 2012. Seasonal and interannual variations of evapotranspiration and energy exchange over different land surfaces in a semiarid area of China. *J Appl Meteor Climatol*, 51(10): 1875-1888
- Liu S M, Xu Z W, Zhu Z L, et al. 2013. Measurements of evapotranspiration from eddy-covariance systems and large aperture scintillometers in the Hai River Basin, China. *J Hydrol*, 487: 24-38
- Liu S M, Xu Z W, Song L S, et al. 2016. Upscaling evapotranspiration measurements from multi-site to the satellite pixel scale over heterogeneous land surfaces. *Agri Forest Meteorol*, 230-231: 97-113, doi: 10.1016/j.agrformet.2016.04.008
- Lu L, Liu S M, Xu Z W, et al. 2009. The characteristics and parameterization of aerodynamic roughness length over heterogeneous surfaces. *Adv Atmos Sci*, 26(1): 180-190
- Ma Y M, Kang S C, Zhu L P, et al. 2008. Roof of the world: Tibetan observation and research platform: Atmosphere-land Interaction over a heterogeneous landscape. *Bull Amer Meteor Soc*, 89(10): 1487-1492
- Miao S G, Chen F, LeMone M A, et al. 2009. An observational and modeling study of characteristics of urban heat island and boundary layer structures in Beijing. *J Appl Meteor Climatol*, 48(3): 484-501
- Moraes O L L, Acevedo O C, Degrazia G A, et al. 2005. Surface layer turbulence parameters over a complex terrain. *Atmos Environ*, 39(17): 3103-3112
- Mwendera E J, Feyen J. 1994. Effects of tillage and rainfall on soil surface roughness and properties. *Soil Technol*, 7(1): 93-103
- Raupach M R, Canadell J G, Quéré C L. 2008. Anthropogenic and biophysical contributions to increasing atmospheric CO₂ growth rate and airborne fraction. *Biogeosciences*, 5(6): 1601-1613
- Raupach M R, Canadell J G, Ciais P, et al. 2011. The relationship between peak warming and cumulative CO₂ emissions, and its use to quantify vulnerabilities in the carbon-climate-human system. *Tellus B*, 63(2): 145-164
- Segal M, Arritt R W. 1992. Nonclassical mesoscale circulations caused by surface sensible heat-flux gradients. *Bull Amer Meteor Soc*, 73(10): 1593-1604
- Seinfeld J H, Pandis S N. 2012. *Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change*. New York: John Wiley & Sons
- Sellers P J, Hall F G, Ranson K J, et al. 1995. The boreal ecosystem-atmosphere study (BOREAS): An overview and early results from the 1994 field year. *Bull Amer Meteor Soc*, 76(9): 1549-1577
- Sellers P J, Hall F G, Asrar G, et al. 1992. An overview of the first international satellite land surface climatology project (ISLSCP) field experiment (FIFE). *J Geophys Res Atmos*, 97(D17): 18345-18371

- Sellers P J, Nobre C A, Fitzjarrald D J, et al. 1993. LAMBADA-BATERISTA: A Preliminary Science Plan for a Large Scale Biosphere-Atmosphere Field Experiment in the Amazon Basin. Washington, DC: ISLSCP, IGPO, 49pp
- Wen J, Wei Z G, Lü S H, et al. 2007. Autumn daily characteristics of land surface heat and water exchange over the Loess Plateau mesa in China. *Adv Atmos Sci*, 24(2): 301-310
- Wen J, Wang L, Wei Z G. 2009. An overview of the Loess Plateau mesa region land surface process field Experiment series (LOPEXs). *Hydrol Earth Syst Sci*, 13(6): 945-951
- Wheater H S. 2010. Hydrological Processes, Groundwater Recharge and Surface-Water /Groundwater Interactions in Arid and Semi-Arid Areas. *Groundwater Modeling in Arid and Semi-Arid Areas*. Cambridge: Cambridge University Press, 5-37
- Xu X D, Zhang R H, Shi X H, et al. 2008. A new integrated observational system over the Tibetan Plateau. *Bull Amer Meteor Soc*, 89(10): 1492-1496
- Xu Z W, Liu S M, Li X, et al. 2013. Intercomparison of surface energy flux measurement systems used during the HiWATER-MUSOEXE. *J Geophys Res Atmos*, 118(23): 13140-13157
- Yamazaki N, Kalahari H, Yatagai A, et al. 2000. Current status of GAME reanalysis project and some preliminary results// International GAME/HUBEX, Workshop. Sapporo, 12-14
- Yang K, Koike T, Ishikawa H, et al. 2008. Turbulent flux transfer over bare-soil surfaces: Characteristics and parameterization. *J Appl Meteor Climatol*, 47(1): 276-290
- Yang K, Wu H, Qin J, et al. 2014. Recent climate changes over the Tibetan Plateau and their impacts on energy and water cycle: A review. *Glob Planet Change*, 112: 79-91
- Yue P, Zhang Q, Wang R Y, et al. 2015. Turbulence intensity and turbulent kinetic energy parameters over a heterogeneous terrain of Loess Plateau. *Adv Atmos Sci*, 32(9): 1291-1302
- Zhang Q, Yao T, Yue P. 2016. Development and test of a multifactorial parameterization scheme of land surface aerodynamic roughness length for flat land surfaces with short vegetation. *Sci China Earth Sci*, 59(2): 281-295
- Zhou L B, Zou H, Ma S P, et al. 2011. Vertical air mass exchange driven by the local circulation on the northern slope of Mount Everest. *Adv Atmos Sci*, 28(1): 217-222
- Zou H, Ma S P, Zhou L B, et al. 2009. Measured turbulent heat transfer on the northern slope of Mt. Everest and its relation to the south Asian summer monsoon. *Geophys Res Lett*, 36(9), doi: 10.1029/2008GL036984