

刘辉志, 王雷, 杜群. 2018. 大气边界层物理研究进展(2012~2017 年)[J]. 大气科学, 42 (4): 823–832. Liu Huizhi, Wang Lei, Du Qun. 2018. An overview of recent studies on atmospheric boundary layer physics at LAPC (2012–2017) [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 42 (4): 823–832, doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.1802.17274.

大气边界层物理研究进展 (2012~2017 年)

刘辉志^{1,2} 王雷¹ 杜群¹

¹ 中国科学院大气物理研究所大气边界层物理和大气化学国家重点实验室, 北京 100029

² 中国科学院大学, 北京 100049

摘 要 本文总结了 2012~2017 年中国科学院大气物理研究所大气边界层物理和大气化学国家重点实验室大气边界层物理研究的最新进展, 主要包括不同下垫面(城市、青藏高原、草原、沙漠、湖泊、海洋等)大气边界层观测实验、大气湍流和阵风相干结构的理论研究以及大气数值模拟的参数化改进等, 同时对未来几年内大气边界层物理的发展方向做了展望。

关键词 大气边界层 大气湍流 陆气相互作用

文章编号 1006-9895(2018)04-0823-10

中图分类号 P404

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1802.17274

An Overview of Recent Studies on Atmospheric Boundary Layer Physics (2012–2017)

LIU Huizhi^{1,2}, WANG Lei¹, and DU Qun¹

¹ State Key Laboratory of Atmospheric Boundary Layer Physics and Atmospheric Chemistry (LAPC), Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Science, Beijing 100029

² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

Abstract This paper presents an overview of important developments in the atmospheric boundary layer physics from 2012 to 2017 at the State Key Laboratory of Atmospheric Boundary Layer Physics and Atmospheric Chemistry (LAPC), Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences. The developments include: improving the accuracy of measurements of UAT-2 ultrasonic anemometer, measurement studies of the atmospheric boundary layer over different land surfaces (Qinghai–Tibetan Plateau, grasslands, deserts, lakes, sea and etc.), theoretical studies on the atmospheric turbulence and the coherent structure in gusty disturbances, and improvements in the parameterization of atmospheric numerical simulations. Some future research prospects are also presented in this paper.

Keywords Atmospheric boundary layer, Atmospheric turbulence, Land–atmosphere interaction

1 引言

大气边界层是指以湍流运动为主、对地面强迫的响应时间在 1 小时以内的低层大气, 通常其高度

在夜间稳定条件下的几十米到日间强对流条件下的 2 km 之间。一方面, 大气边界层是人类活动所在地, 也是大气圈、生物圈、海洋圈、岩石圈、冰雪圈等多圈层相互作用和相互影响的桥梁。研究大

收稿日期 2017-11-13; **网络预出版日期** 2018-04-08

作者简介 刘辉志, 男, 1967 年出生, 博士, 研究员, 主要从事大气边界层和大气环境方面的研究。E-mail: huizhil@mail.iap.ac.cn

资助项目 国家自然科学基金项目 91537212、41675013、41661144018、41461144001, 公益性行业(气象)科研专项 GYHY201406001

Funded by National Natural Science Foundation of China (NSFC) (Grants 91537212, 41675013, 41661144018, 41461144001), Special Scientific Research Fund of Meteorological Public Welfare Profession of China (Grant GYHY201406001)

气边界层,有助于解决空气污染、水土流失、生态环境恶化等问题、实现可持续发展。另一方面,大气边界层是大气与地表进行物质和能量交换的发生地,地表下垫面变化和人类活动对气候的影响都是通过大气边界层内的物理和化学过程来实现的,大气湍流理论及陆面过程的参数化改进对准确预测全球气候变化意义重大。大气边界层的观测实验及数值模拟,一直以来都是大气科学的研究热点之一。

中国科学院大气物理研究所大气边界层物理和大气化学国家重点实验室(LAPC)建立于1991年,定位是大气边界层物理和化学过程的基础研究。胡非等(2003)、张美根等(2008)全面介绍了LAPC在2008年以前的工作,包括大气边界层综合观测系统的研制和观测实验、大气边界层和大气湍流机理研究、大气污染数值模式研究等方面的研究工作。刘辉志等(2013)着重介绍了2009至2012年大气边界层物理方面的研究成果,本文将简要介绍近几年来(2012~2017年)LAPC在大气边界层物理方面做出的最新研究进展。

2 大气边界层物理观测实验

近几年来,LAPC除了以北京325米气象塔为中心继续城市边界层综合观测以外,还在青藏高原、草原、湖泊、海洋、沙漠等多种下垫面开展了大量的大气边界层观测研究。

2.1 城市边界层观测实验

城市下垫面(尤其城市冠层)存在高度非均匀性,过去平坦均匀下垫面上得到的大气边界层理论在城市下垫面的适用性存在疑问。受观测平台的限制,城市边界层湍流特征的观测研究大多集中在粗糙子层和惯性层,对城市混合层的研究并不多见。Wang et al. (2014)基于2011年5~8月北京325米气象塔数据,分层分象限研究了北京城市下垫面夏季湍流动量和标量输送特征。刘阳等(2017)利用2008~2012年北京325米气象塔47、140和280 m三层湍流观测数据,分析了局地相似理论在北京城市下垫面的适用性,得到了湍流输送的垂直分布特征,这是目前城市下垫面研究湍流输送特征最长的连续观测资料之一。该研究发现三层高度分别代表城市粗糙子层、惯性层和混合层的湍流特征,可为城市大气边界层湍流传输参数化方案的改进(尤其是模式的垂直分层)提供科学依据。

在城市下垫面湍流通量观测研究方面,基于北京325米气象塔和香河102米气象塔观测数据,分析了城市下垫面和农田为主的郊区下垫面在辐射平衡和地表能量收支方面的差异(Wang et al., 2015)。LAPC于2012年3月在北京325米气象塔7层高度(8、16、47、80、140、220和280 m)安装了涡动相关观测系统,基于实测数据,分析了北京城区二氧化碳浓度在不同高度层次的日变化和月变化特征,初步给出不同季节和日变化时间段内二氧化碳的浓度垂直廓线(刘晓曼等, 2015),并对得到的CO₂通量梯度观测数据进行了质量控制和评价,该研究可为复杂城市下垫面通量研究提供参考(刘郁珏等, 2016)。

2.2 青藏高原边界层观测实验

青藏高原通过与大气间的能量和物质交换对亚洲地区的区域气候和全球大气环流产生重要影响(Wu et al., 2015)。喜马拉雅山脉位于青藏高原南缘,平均海拔高度超过6000米,是世界海拔最高的山脉,地形极为多变复杂,研究发现喜马拉雅山脉东部地区的热量通量高于青藏高原东部和西部地区,但低于青藏高原中部和喜马拉雅山脉中部地区。该地区的热量分配主要以潜热传输为主,平均波文比为0.36,与青藏高原其他地区显著不同(Zou et al., 2012)。南亚夏季风是亚洲最重要的气候系统之一。为明确南亚夏季风对青藏高原地表湍流通量交换的影响,LAPC在2013年5~7月开展了藏东南地气间交换过程观测实验(OSEP2013)(Zhou et al., 2015; Ma and Zhou, 2017)。该实验位于青藏高原东南部的雅鲁藏布江大峡谷,实验选择草地、农田和森林三种典型下垫面进行了地表湍流交换过程的同步观测,揭示了藏东南非均匀下垫面的平均湍流通量的变化特征以及南亚夏季风对这一交换过程的影响。观测表明,季风开始后,藏东南地区的大气对流和湿度增加了,南亚夏季风带来的水汽和对流云减少了太阳辐射,降低了空气和土壤温度,增加了空气湿度,潜热和感热通量同时减少。在季风期,地表有效能量主要分配为潜热通量(图1)(Zhou et al., 2015)。Ma and Zhou (2017)研究了雅鲁藏布江草地下垫面的地表特征参数,该地区的动力学粗糙度 Z_{0m} 和热传输阻尼系数 kB^{-1} 均高于青藏高原的中部和西部地区,平均值分别是 7.0 ± 1.4 cm, 5.7 ± 1.8 。动量传输系数 C_d 和热量传输系数 C_h 分别是 11.9×10^{-3} 和 3.8×10^{-3} 左右。Zhou et

al. (2012) 还利用地面观测和大尺度格点数据, 分析了南亚夏季风对喜马拉雅地区地面气象要素的影响。

2.3 草原边界层观测实验

不同气候带的草原生态系统响应不同气象因子(如气温、水分条件和云量等)的敏感度上存在显著差异(Seddon et al., 2016)。为了从实测角度证实这一差异, LAPC 在东北半干旱区退化草地(Du and Liu, 2013)、内蒙古半干旱草原(Wang et al., 2016a, 2017a; 王雷等, 2017)、湿润区高山草甸(Wang et al., 2016b, 2017b)及半干旱的高寒草地(Wang et al., 2018)等草原下垫面进行了多年的大气边界层观测实验。研究表明, 地气间碳水通量的

变化受到多因子的控制; 不同控制因子的重要程度会随着气候带和下垫面植被类型而发生改变。日尺度上, 光合有效辐射是生长季碳交换日变化尺度的主要控制因子, 但这种相关性会在干旱年份降低(Du and Liu, 2013)。半干旱草原的实际蒸散和 CO_2 吸收都会受到土壤水分胁迫的抑制(Du et al., 2012; Du and Liu, 2013; Wang et al., 2016a, 2017a); 而土壤水分条件在湿润区高山草甸的作用并不明显, 湿季的蒸发比值随土壤湿度的变化很小, 净辐射是丽江高山草甸实际蒸散的主要控制因子(Wang et al., 2016b)。植被生长状况是草原生态系统 NEE(净碳交换速率)季节变化的主要影响因子, 草地生态系统的碳通量变化与植被指数的季节变化特征密切

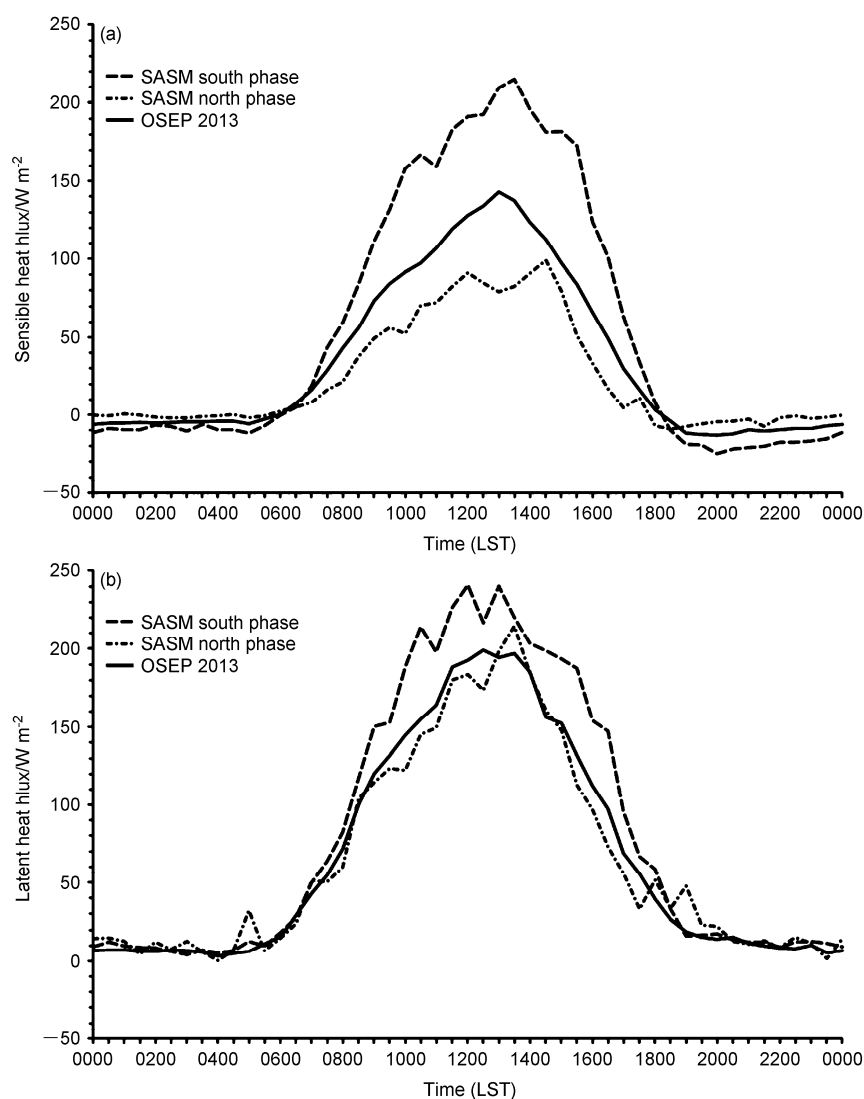


图1 (a) 感热通量和 (b) 潜热通量的平均日变化: OSEP2013 观测期间、南亚夏季风(SASM)南相阶段和北相阶段。引自 Zhou et al (2015)

Fig. 1 Diurnal variations of the (a) sensible and (b) latent heat fluxes, averaged during the campaign OSEP2013, the South Asian summer monsoon (SASM) south phase and north phase. From Zhou et al. (2015)

相关。年际尺度上,半干旱地区退化草地的净碳吸收与降水量及其季节分配关系密切,尤其是生长季早期的干旱对净碳吸收的年总量影响较大;降水事件($>1\text{ mm d}^{-1}$)出现的次数越多,生态系统的净碳吸收越多(Du and Liu, 2013)。另一方面,丽江高山草甸 CO_2 通量交换的年际变化主要受到年平均气温和气温的季节变化的控制,例如,春季和秋季较低的气温均会缩短生长季的长度及净碳吸收的年总量(Wang et al., 2017b)。

将实际蒸散分解为土壤蒸发和植被蒸腾被认为是理解气候敏感区生态系统如何响应全球气候变化的重要挑战之一(Huxman et al., 2005),这是因为,半干旱区草原生态系统的变化可能不会造成实际蒸散的显著变化,但会改变植被蒸腾(T)占实际蒸散(ET)的比例(T/ET)(Reynolds et al., 2000),进而影响土壤湿度和生态系统生产力。Wang et al. (2016a)基于涡动相关数据分解了内蒙古半干旱草原的实际蒸散,第一次得到了内蒙古半干旱草原T/ET年际变化的观测值(2005~2008年),解决了不同模式对T/ET的模拟值差异显著的问题。同时发现,日尺度上,土壤湿度控制土壤蒸发(E)和植被蒸腾方式的不同导致T/ET受到土壤湿度的显著影响(图2)。月尺度上,与实际蒸散不同,T/ET并没有受到干旱事件的影响,其季节变化主要与植被生长状况(叶面积指数)相关。

2.4 湖泊边界层观测实验

湖泊生态系统是气候变化的一个重要指示器(Adrian et al., 2009),在全球物质交换和能量循环过程中起着不可忽视的作用(Oswald and Rouse, 2004)。随着全球和区域气候模式中网格尺度的精细化,湖泊的重要性变得不可忽视(Dutra et al., 2010)。LAPC利用中日合作JICA项目建立的固定于湖面上的观测平台,在大理洱海开展了湖面—大气间相互作用的观测实验,这一研究可以为高原浅小湖泊模式的发展和改进提供基础数据。与实际观测得到的湖面反照率相比,CLM4湖泊模式在冬季低估(夏季高估)了湖面反照率。高原湖泊感热通量通常只有几十 W m^{-2} ,通常午后感热通量为负值;即湖面向大气输送热量。夏季湖泊大气界面感热通量最大值出现在清晨,与湖气温差的出现时间一致;在白天湖面的有效能量主要分配为潜热通量;湖气温差和水汽压差分别是感热通量和潜热通量日变化的主要控制因子(图3)(Liu et al., 2015)。利用人工神经

网络(ANN)填补了潜热通量的30分钟数据,模拟了洱海1980~2010的实际蒸散的年总量,发现年际尺度上洱海的实际蒸散与低云云量、年降水量和日照时数显著相关(Feng et al., 2016)。

基于水库和冰川下垫面的湍流观测数据,评估了Priestley-Taylor公式在水汽饱和下垫面的适用性。与水库下垫面相比,Priestley-Taylor公式在冰川下垫面模拟水汽通量交换时会造成极大的偏差,这说明该公式不适用于计算冰雪下垫面水的升华和凝华(Guo et al., 2015)。

2.5 海洋边界层观测实验

Cheng et al. (2014b)对海气耦合边界层特性和浪花—飞沫进入大气层的机理进行了研究,首次揭示了海上大风期间大气边界层底层的水平风速基本不随高度变化(图4),垂直风速为正。LSM(陆面过程模式)模拟的结果证明,阵风可将半径在 $10\sim 200\text{ }\mu\text{m}$ 的飞沫传入大气,纠正了以往海盐气溶胶通量计算中的错误,这一研究成果是对地球系统模式研制的重要贡献。

2.6 沙漠边界层观测实验

沙漠占全球陆地面积40%左右,对区域水分收支和气候变化有重要影响(Jacobs et al., 2000)。塔克拉玛干沙漠是全球面积最大沙漠之一,对地区和区域气候以及我国的季风环流都有重要影响(Zhang and Huang, 2004)。土壤表观热扩散率与土壤热量传输和土壤孔隙对流的瞬时变化有关,大多通过一维的热量传输方程计算得到(Zhang and Osterkamp, 1995)。基于塔克拉玛干沙漠2011年1~10月的观测资料,Gao et al. (2017)利用对流传输方程计算了该地区表观热扩散率的变化,结果表明该地区的表观热扩散率平均值为 $(2.5\pm 0.8)\times 10^{-7}\text{ m}^2\text{ s}^{-1}$,在干季较小,湿季较高,其对土壤含水量的变化极为敏感。

3 大气边界层理论研究

湍流和阵风扰动是叠加在平均风之上的两种脉动形式。LAPC在北京325米气象塔、妙峰山测风塔、灵山测风塔(程雪玲等, 2016)、甘肃沙漠(Cheng et al., 2014a)和南海(Cheng et al., 2015b)的观测数据均表明,在强风天气下,无论在近地层还是边界层上层,均存在具有相干结构的阵风,使其对湍流量及沙尘、污染物等气溶胶的输送与湍流输送相比具有同等重要的作用。进一步分析发

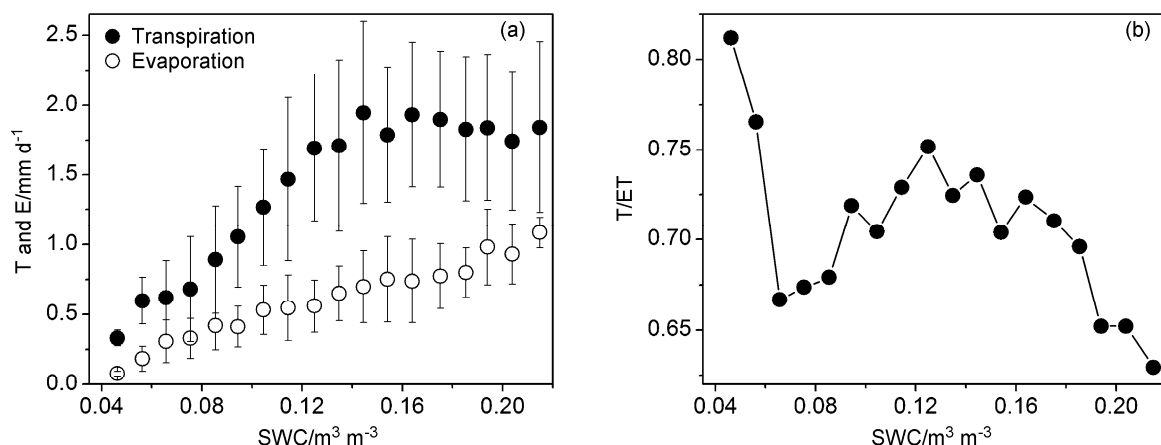


图 2 2005~2008 年内蒙古羊草禁牧草原 (UG79), 在日尺度上, (a) 植被蒸腾 (T) 和土壤蒸发 (E) 与土壤湿度 (SWC) 的关系, (b) T/ET 和 SWC 的关系。引自 Wang et al. (2016a)

Fig. 2 Relationship (a) between transpiration (T), evaporation (E) and soil water content (SWC), (b) between T/ET and SWC on the daily scale at the ungrazed site since 1979 (UG79) for the growing season from 2005 to 2008. From Wang et al. (2016a)

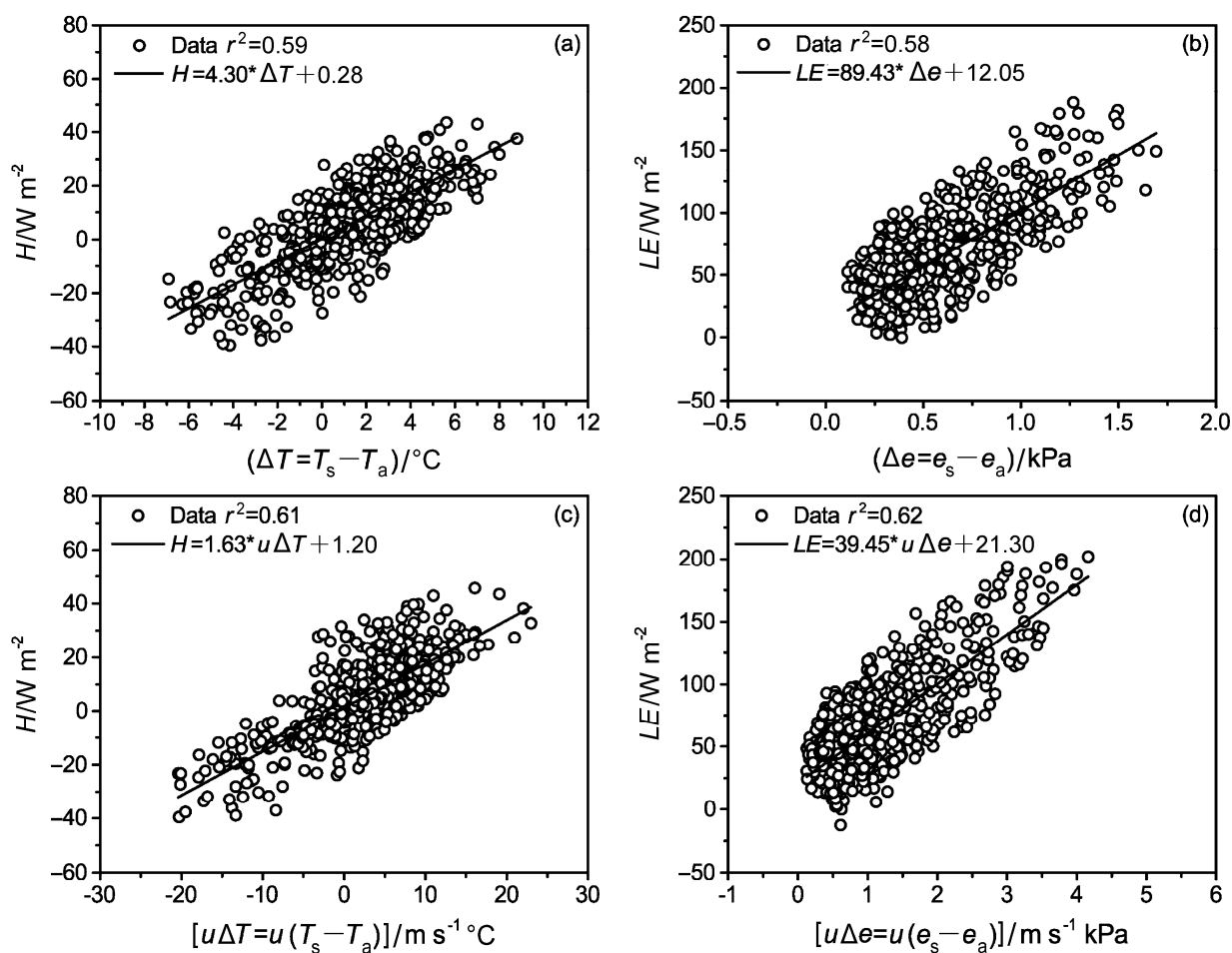


图 3 (a、c) 洱海湖面感热通量 (H) 与湖气温差 (ΔT) (包括风速 u) 的关系; (b、d) 潜热通量 (LE) 与水汽压差 (包括风速 u) (Δe) 的关系。引自 Liu et al. (2015)

Fig. 3 Relationships between fluxes and lake-air temperature, vapor pressure deficit and wind speed. From Liu et al. (2015)

现, 非强风条件下, 城市边界层的阵风也会具有相干结构, 其对动量通量的贡献占到了约 80% (Li et al., 2016)。一般来说, 阵风的相干结构多出现在近中性的大风条件下, 热力作用会降低阵风的相干性。因此, 与城市相比, 沙漠的热力作用很强, 在大气非中性条件下很难形成阵风的相干结构 (李奇龙等, 2016)。

为完整描述大气边界层湍流风速脉动的统计特征, 需基于概率分布模型建立相应的随机过程模型, 目前研究较多的一种随机过程模型是截断列维飞行。通过分析实测的湍流超声风速数据发现, 在时间尺度较大时, 截断列维飞行所对应的截断稳定分布不能很好的与数据拟合。进一步的研究表明, 不能拟合的原因是因为大气湍流风速脉动时间序列普遍存在统计关联特征, 而截断列维飞行是独立随机过程, 该研究可为进一步改进截断列维飞行模型提供参考 (Liu and Hu, 2013)。

在大气边界层结构方面, 进行了大气边界层高度和中尺度热泡的时空相干结构等方面的研究。Dai et al. (2014) 利用飞机探测决定的大气边界层高度的“真实值”, 在多种下垫面和天气条件下验证了基于风廓线确定大气边界层高度的多种方法, 发现温度梯度法是最准确的方法, 而理查逊数法与其他方法相比偏差明显更大。同时, LAPC 还基于北京 325 米气象塔多层观测和多普勒雷达数据, 结合多种方法计算得到并分析了北京城市下垫面大气边界层高度的日变化 (图 5)。发现晴天大气边界层高度最大, 与自然下垫面相比, 城市冠层热存储及人为热造成夜间大气边界层近中性且高度更大 (Huang et al., 2017)。另一方面, 热泡在大气边界层能量、动量和水汽的输送, 以及边界层与自由大气能量和物质交换等方面, 起着重要的作用。通过分析沿京津冀地区布点的七台相控阵风廓线雷达两个月的协同观测资料, 发现最含能的热泡结构具有极为相似的特征, 存在一种简便的参数化方案, 能有效刻画热不稳定层结中的热泡结构 (Liu et al., 2012)。

4 大气边界层数值模拟

全球主要的区域气候模式 RCMs、全球气候模式 GCM、陆面模式 CLM4 以及中尺度天气预报模式 WRF 中均已引入湖泊参数化方案 (Subin et al., 2012)。在数值天气预报和气候模型中加入湖泊参

数化方案会明显提高模式的模拟性能。许鲁君等 (2014)、许鲁君和刘辉志 (2015) 采用耦合湖泊模型的 WRF_CLM 模式模拟了大理苍山洱海地区的局地环流特征和山谷盆地中洱海的湖泊效应, 发现非季风期湖泊对局地环流及大气边界层影响显著, 季风期, 受降水天气影响, 局地环流发展不充分。白天湖面辐散以及夜间湖泊南部的气旋式环流弱, 湖泊作用没有非季风期明显。另外, 还利用在洱海获得的观测资料研究了 WRF3.7.1 模式在洱海的适用性, 通过对比模拟进一步研究了影响湖泊物理过程及湖气相互作用的主要因子, 发现地形订正方法的引入减小了风速的模拟误差, 可以提高感热和潜热通量的模拟效果 (Xu et al., 2016)。

在近地层通量模拟方面。夜间稳定条件下, 现有通量参数化方案 (包括数值迭代和非迭代方案) 不易给出较准确的湍流参数及通量估算结果 (Wang et al., 2013)。Li et al. (2014) 改进了之前发展的非迭代参数化方案, 使之适用于稳定条件, 显著地提高了计算精度 (图 6), 同时节省计算时间。Du et al. (2017) 比较了 SiB3 与 SiBcrop 模式的模拟效果, 耦合了新的农田物候模块的 SiBcrop 模式可以改进对农田生态系统总初级生产力 (GPP) 日总量的模拟, 但对实际蒸散的模拟改进不大。Wang et al. (2012) 发现与单个正弦波相比, 多个正弦波的叠加可更加真实地描述土壤温度上边界条件, 由此给出描述土壤上边界条件的热传导—对流土壤温度预报方程的解析解。结合观测数据进行验证, 证实该土壤温度预报模型的模拟结果更接近观测事实。WRF 模式对美国大草原南部地区短期的极端气候事件 (干旱或过湿) 的模拟结果显示, 与积云参数化相比, 陆面过程模式对大气—陆地间的水收支乃至区域气候起到更为重要的作用, 其中陆面过程模式主要影响降水量, 而积云参数化主要带来降水时间变化的模拟偏差 (Pei et al., 2014)。

风能是一种重要的气候资源, 随着我国风电规模的迅速增大, 对风能资源评估系统和风功率预测系统的精度要求越来越高。LAPC 将中尺度气象模式 (WRF) 与计算流体力学模式 Fluent 耦合, 进行复杂地形精细化的风场模拟, 给出水平分辨率 50 m × 50 m、距地面 150 m 高度范围内垂直分辨率 10 m 的精细风场结构和风能评估 (程雪玲等, 2015)。分析了 WRF 输出的风速、温度、摩擦速度等气象因子与实测风场数据的相关性, 从而建立了多元线

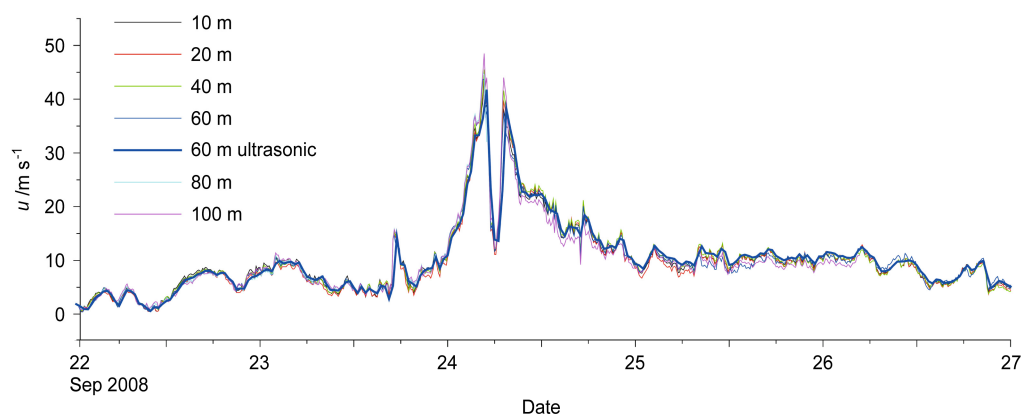


图 4 2008 年 9 月 22~26 日 Zhizi 观测塔 6 层风杯和 1 层超声风速计观测到的 10 分钟水平风速。引自 Cheng et al. (2014b)

Fig. 4 Time series of 10-min averaged horizontal velocity measured at 6 levels by cup anemometers and 1 level by ultrasonic anemometer deployed in the Zhizi tower during 22–26 September 2008. From Cheng et al. (2014b)

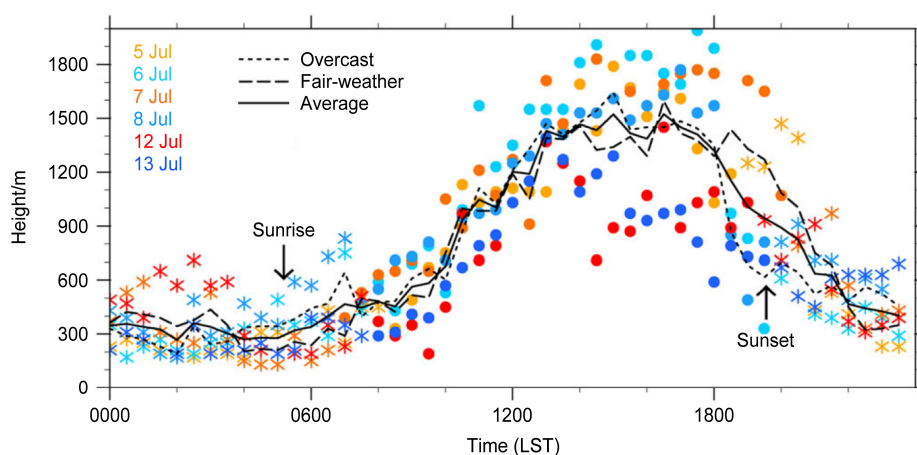


图 5 大气边界层高度的日变化, 包括观测期间逐天 (点值) 以及观测期间晴天 (长虚线) 和阴天 (短虚线) 的平均值曲线。其中对流边界层由临界值法计算得到, 夜间边界层由分离法计算得到。引自 Huang et al. (2017)

Fig. 5 Time series of PBL depth based on the threshold method for the convective boundary layer (CBL) and the fractional method for the nocturnal boundary layer (NBL). The solid, long dashed, and short dashed lines represent the average diurnal cycles for all periods, fair-weather days and overcast days, respectively. From Huang et al. (2017)

性模式输出统计 (MOS) 模型 (肖擎曜等, 2017)。还进一步利用 30 m 分辨率地表覆盖产品 GlobeLand30 制作高精度地表粗糙度资料, 应用于精细化风能资源评估, 该研究成果可基本满足风电场预测长期发电量水平的业务需求 (张双益和胡非, 2017)。

5 第二代超声风速温度仪 (UAT-2) 观测误差的修正

为提高 LAPC 研发的第二代超声风速温度仪的测量准确性, Cheng et al. (2015a) 提出了修正 UAT-2 观测误差的方法。观测误差的修正主要有两个方面, 第一通过风洞实验和数值模拟, 得到三维校正

矩阵修正仪器的阻挡效应 (blocking effect) 造成的风场变化; 第二是在外场实验中, 利用倾角仪确定迎角 (angle of attack), 再利用坐标旋转修正仪器的垂直偏移, 这种方法可以大幅改善垂直风速的测量效果 (图 7), 使该仪器观测精度达到了国外先进仪器的水平。

6 结论和展望

本文从观测实验、理论研究、数值模拟等方面简要介绍了中国科学院大气物理研究所大气边界层物理和大气化学国家重点实验室近几年的研究进展。由于水平限制, 可能有不少不妥之处和不全面的地方。作者认为未来几年大气边界层物理的研

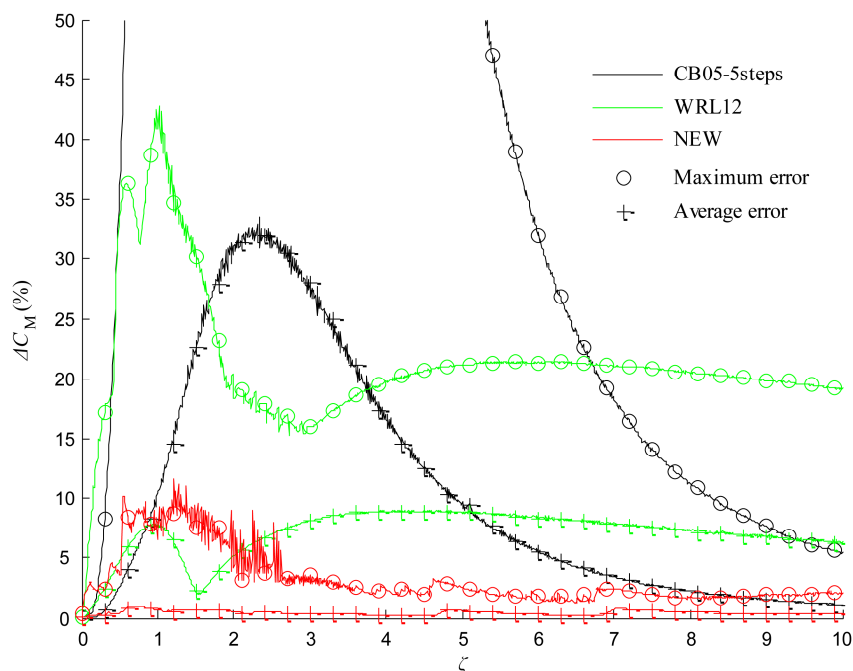


图6 参数化方案CB05、WRL12和新参数化方案模拟热量输送系数(C_h)的相对误差的最大值和平均值,没有显示超过50%的相对误差。引自Li et al. (2014)
Fig. 6 Maximum and average relative errors of the bulk heat transfer coefficient (C_h) for the CB05 scheme with five-step iteration (black lines), the WRL12 scheme (green lines) and the new scheme (red lines). Errors larger than 50% are not shown. From Li et al. (2014)

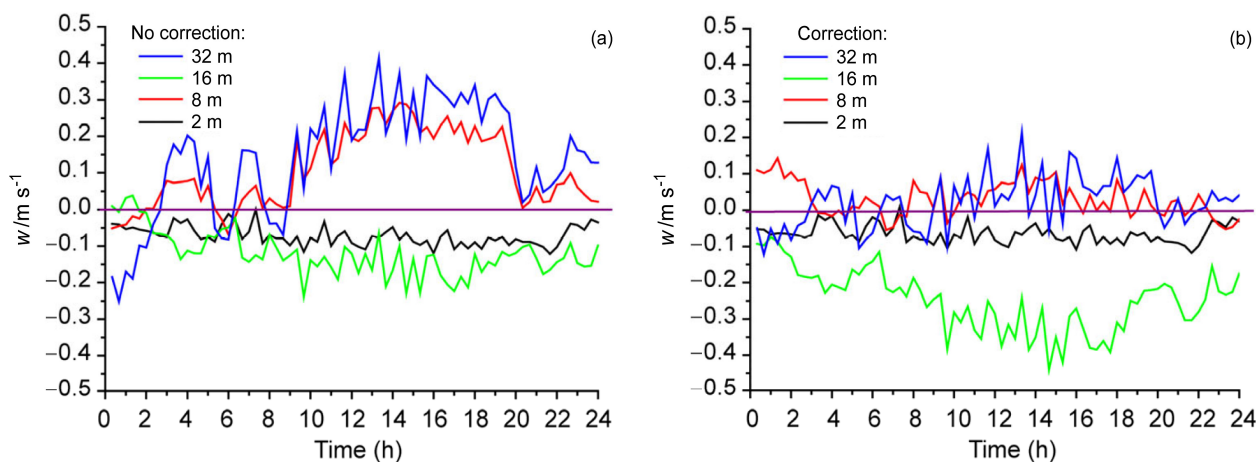


图7 (a)未修正和(b)经过倾角仪修正的四层(2 m、8 m、16 m和32 m)垂直风速的对比。引自Cheng et al. (2015a)。

Fig. 7 Comparison of vertical velocities (a) uncorrected and (b) corrected by inclinometer at four levels (2 m, 8 m, 16 m and 32 m). From Cheng et al. (2015a)

究热点将是阵风相干结构的数学表达、非均匀下垫面大气边界层结构特征和湍流理论、数值模式中大气边界层参数化方案的改进、风能资源的精细化预报等方面。另外,大气边界层定位观测实验的尺度通常在数百米到几公里之间,需要将站点观测尺度,得到空间尺度为几十公里的陆面过程关键参数,才能应用于遥感资料和气候模式的验证和改进。野外观测实验和气候模式模拟的空间尺度匹配,是目前大气边界层研究的热点和难点。

参考文献 (References)

- Adrian R, O'Reilly C M, Zagarese H, et al. 2009. Lakes as sentinels of climate change [J]. *Limnol. Oceanogr.*, 54 (6): 2283–2297, doi:10.4319/lo.2009.54.6_part_2.2283.
- Cheng X L, Hu F, Zeng Q C. 2014a. Stochastic method to determine the scale and anomalous diffusion of gusts in a windy atmospheric boundary layer [J]. *Chin. Sci. Bull.*, 59 (34): 4890–4898, doi:10.1007/s11434-014-0550-9.
- Cheng X L, Wu L, Song L L, et al. 2014b. Marine-atmospheric boundary layer characteristics over the South China Sea during the passage of strong typhoon Hagupit [J]. *J. Meteor. Res.*, 28 (3): 420–429,

- doi:10.1007/s13351-014-3279-0.
- 程雪玲, 胡非, 曾庆存. 2015. 复杂地形风场的精细数值模拟 [J]. 气候与环境研究, 20 (1): 1–10. Cheng X L, Hu F, Zeng Q C. 2015. Refined numerical simulation of complex terrain flow field [J]. Climatic Environ. Res. (in Chinese), 20 (1): 1–10, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2014.13225.
- 程雪玲, 房小怡, 卢俐, 等. 2016. 强风天气下边界层结构特征 [J]. 气候与环境研究, 21 (1): 99–106. Cheng X L, Fang X Y, Lu L, et al. 2016. The characteristics of boundary layer structure under strong wind weather [J]. Climatic Environ. Res. (in Chinese), 21(1): 99–106, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2015.15000.
- Cheng X L, Peng Z, Hu F, et al. 2015a. Measurement errors and correction of the UAT-2 ultrasonic anemometer [J]. Sci. China Technol. Sci., 58 (4): 677–686, doi:10.1007/s11431-014-5728-5.
- Cheng X L, Huang J, Wu L, et al. 2015b. Structures and characteristics of the windy atmospheric boundary layer in the South China Sea region during cold surges [J]. Adv. Atmos. Sci., 32 (6): 772–782, doi:10.1007/s00376-014-4228-7.
- Dai C, Wang Q, Kalogiros J A, et al. 2014. Determining boundary-layer height from aircraft measurements [J]. Bound.-Layer Meteor., 152 (3): 277–302, doi:10.1007/s10546-014-9929-z.
- Du Q, Liu H Z. 2013. Seven years of carbon dioxide exchange over a degraded grassland and a cropland with maize ecosystems in a semiarid area of China [J]. Agr. Ecosyst. Environ., 173: 1–12, doi:10.1016/j.agee.2013.04.009.
- Du Q, Liu H Z, Xu L J. 2017. Evaluating of simulated carbon flux phenology over a cropland ecosystem in a semiarid area of China with SiBcrop [J]. Int. J. Biometeorol., 61 (2): 247–258, doi:10.1007/s00484-016-1207-y.
- Du Q, Liu H Z, Feng J W, et al. 2012. Carbon dioxide exchange processes over the grassland ecosystems in semiarid areas of China [J]. Sci. China Earth Sci., 55 (4): 644–655, doi:10.1007/s11430-011-4283-1.
- Dutra E, Stepanenko V M, Balsamo G, et al. 2010. An offline study of the impact of lakes on the performance of the ECMWF surface scheme [J]. Boreal Environ. Res., 15 (2): 100–112.
- Feng J W, Liu H Z, Sun J H, et al. 2016. The surface energy budget and interannual variation of the annual total evaporation over a highland lake in Southwest China [J]. Theor. Appl. Climatol., 126 (1–2): 303–312, doi:10.1007/s00704-015-1585-9.
- Gao Z Q, Tong B, Horton R, et al. 2017. Determination of desert soil apparent thermal diffusivity using a conduction-convection algorithm [J]. J. Geophys. Res., 122 (18): 9569–9578, doi:10.1002/2017JD027290.
- Guo X F, Liu H P, Yang K. 2015. On the application of the Priestley–Taylor relation on sub-daily time scales [J]. Bound.-Layer Meteor., 156 (3): 489–499, doi:10.1007/s10546-015-0031-y.
- 胡非, 洪钟祥, 雷孝恩. 2003. 大气边界层和大气环境研究进展 [J]. 大气科学, 27 (4): 712–728. Hu Fei, Hong Zhongxiang, Lei Xiao'en. 2003. Recent progress of atmospheric boundary layer physics and atmospheric environment research in IAP [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 27 (4): 712–728, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2003.04.18.
- Huang M, Gao Z Q, Miao S G, et al. 2017. Estimate of boundary-layer depth over Beijing, China, using Doppler lidar data during SURF-2015 [J]. Bound.-Layer Meteor., 162 (3): 503–522, doi:10.1007/s10546-016-0205-2.
- Huxman T E, Wilcox B P, Breshears D D, et al. 2005. Ecohydrological implications of woody plant encroachment [J]. Ecology, 86 (2): 308–319, doi:10.1890/03-0583.
- Jacobs A F G, Heusinkveld B G, Berkowicz S M. 2000. Force-restore technique for ground surface temperature and moisture content in a dry desert system [J]. Water Resour. Res., 36 (5): 1261–1268, doi:10.1029/2000WR900016.
- 李奇龙, 程雪玲, 曾庆存. 2016. 大气边界层阵风相干结构的产生条件 [J]. 气候与环境研究, 21 (6): 725–736. Li Q L, Cheng X L, Zeng Q C. 2016. Conditions for the formation of the coherent structure in gusty disturbances in the atmospheric boundary layer [J]. Climatic Environ. Res. (in Chinese), 21 (6): 725–736, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2016.16063.
- Li Q L, Cheng X L, Zeng Q C. 2016. Gustiness and coherent structure under weak wind period in atmospheric boundary layer [J]. Atmos. Oceanic Sci. Lett., 9 (1): 52–59, doi:10.1080/16742834.2015.1086176.
- Li Y, Gao Z, Li D, et al. 2014. An improved non-iterative surface layer flux scheme for atmospheric stable stratification condition [J]. Geosci. Model Dev., 7 (2): 515–529, doi:10.5194/gmd-7-515-2014.
- Liu L, Hu F. 2013. Cascade-like and scaling behavior of wind velocity increments in the atmospheric surface layer [J]. Physica A, 392 (23): 5808–5816, doi:10.1016/j.physa.2013.07.054.
- Liu L, Hu F, Liu X M. 2012. Proper orthogonal decomposition of mesoscale vertical velocity in the convective boundary Layer [J]. Bound.-Layer Meteor., 144 (3): 401–417, doi:10.1007/s10546-012-9731-8.
- 刘晓曼, 程雪玲, 胡非. 2015. 北京城区二氧化碳浓度和通量的梯度变化特征——I 浓度与虚温 [J]. 地球物理学报, 58 (5): 1502–1512.
- Liu X M, Cheng X L, Hu F. 2015. Gradient characteristics of CO₂ concentration and flux in Beijing urban area. Part I: Concentration and virtual temperature [J]. Chinese J. Geophys. (in Chinese), 58 (5): 1502–1512, doi:10.6038/cjg20150504.
- 刘阳, 刘辉志, 王雷. 2017. 北京城市下垫面大气边界层湍流输送垂直分布特征 [J]. 中国科学: 地球科学, 47 (10): 1243–1256. Liu Y, Liu Z H, Wang L. 2017. The vertical distribution characteristics of integral turbulence statistics in the atmospheric boundary layer over an urban area in Beijing [J]. Sci. China Earth Sci., 60 (8): 1533–1545, doi:10.1007/s11430-016-9050-5.
- 刘辉志, 冯健武, 王雷, 等. 2013. 大气边界层物理研究进展 [J]. 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 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 37 (2): 467–476, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.12315.
- 刘郁珏, 胡非, 程雪玲, 等. 2016. 北京 325 米气象塔上 CO₂ 梯度观测数据质量控制与评价 [J]. 大气科学, 40 (2): 390–400. Liu Y J, Hu F, Cheng X L, et al. 2016. Data processing and quality assessment of the eddy covariance system of the 325-m meteorology tower in Beijing [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 40 (2): 390–400, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1504.14325.
- Liu H Z, Feng J W, Sun J H, et al. 2015. Eddy covariance measurements of water vapor and CO₂ fluxes above the Erhai Lake [J]. Sci. China Earth Sci., 58 (3): 317–328, doi:10.1007/s11430-014-4828-1.
- Ma S P, Zhou L B. 2017. Characteristics of land–air exchange parameters

- over grassland in Southeast Tibet [J]. *J. Hydrometeor.*, 18 (8): 2249–2264, doi:10.1175/JHM-D-16-0084.1.
- Oswald C J, Rouse W R. 2004. Thermal characteristics and energy balance of various-size Canadian Shield lakes in the Mackenzie River basin [J]. *J. Hydrometeor.*, 5 (1): 129–144, doi:10.1175/1525-7541(2004)005<0129: TCAEBO>2.0.CO;2.
- Pei L S, Moore N, Zhong S Y, et al. 2014. WRF model sensitivity to land surface model and cumulus parameterization under short-term climate extremes over the southern Great Plains of the United States [J]. *J. Climate*, 27 (20): 7703–7724, doi:10.1175/JCLI-D-14-00015.1.
- Reynolds J F, Kemp P R, Tenhunen J D. 2000. Effects of long-term rainfall variability on evapotranspiration and soil water distribution in the Chihuahuan desert: A modeling analysis [J]. *Plant Ecol.*, 150 (1–2): 145–159, doi:10.1023/A:1026530522612.
- Seddon A W R, Macias-Fauria M, Long P R. 2016. Sensitivity of global terrestrial ecosystems to climate variability [J]. *Nature*, 531 (7593): 229–232, doi:10.1038/nature16986.
- Subin Z M, Riley W J, Mironov D. 2012. An improved lake model for climate simulations: Model structure, evaluation, and sensitivity analyses in CESM1 [J]. *J. Adv. Model. Earth Syst.*, 4 (1): M02001, doi:10.1029/2011MS000072.
- 王雷, 刘辉志, Bernhofer C. 2017. 土壤水分条件对内蒙古典型草原水汽和二氧化碳通量的影响研究 [J]. *大气科学*, 41 (1): 167–177.
- Wang L, Liu H Z, Bernhofer C. 2017. A study of the impact of soil water conditions on water and carbon dioxide fluxes over typical grasslands in Inner Mongolia of China [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 41 (1): 167–177, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1602.15313.
- Wang L, Liu H Z, Bernhofer C. 2016a. Grazing intensity effects on the partitioning of evapotranspiration in the semiarid typical steppe ecosystems in Inner Mongolia [J]. *Int. J. Climatol.*, 36 (12): 4130–4140, doi:10.1002/joc.4622.
- Wang L, Liu H Z, Bernhofer C. 2017a. Response of carbon dioxide exchange to grazing intensity over typical steppes in a semi-arid area of Inner Mongolia [J]. *Theor. Appl. Climatol.*, 128 (3–4): 719–730, doi:10.1007/s00704-016-1736-7.
- Wang L, Liu H Z, Sun J H, et al. 2016b. Water and carbon dioxide fluxes over an alpine meadow in Southwest China and the impact of a spring drought event [J]. *Int. J. Biometeorol.*, 60 (2): 195–205, doi:10.1007/s00484-015-1016-8.
- Wang L, Liu H Z, Sun J H, et al. 2017b. Biophysical effects on the interannual variation in carbon dioxide exchange of an alpine meadow on the Tibetan Plateau [J]. *Atmos. Chem. Phys.*, 17 (8): 5119–5129, doi:10.5194/acp-17-5119-2017.
- Wang L, Liu H Z, Shao Y P, et al. 2018. Water and CO₂ fluxes over semiarid alpine steppe and humid alpine meadow ecosystems on the Tibetan Plateau [J]. *Theor. Appl. Climatol.*, 131 (1–2): 547–556, doi:10.1007/s00704-016-1997-1.
- Wang L L, Gao Z Q, Horton R, et al. 2012. An analytical solution to the one-dimensional heat conduction-convection equation in soil [J]. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 76 (6): 1978–1986, doi:10.2136/sssaj2012.0023N.
- Wang L L, Gao Z Q, Pan Z T, et al. 2013. Evaluation of turbulent surface flux parameterizations over tall grass in a Beijing suburb [J]. *J. Hydrometeor.*, 14 (5): 1620–1635, doi:10.1175/JHM-D-12-0103.1.
- Wang L L, Li D, Gao Z Q, et al. 2014. Turbulent transport of momentum and scalars above an urban canopy [J]. *Bound.-Layer Meteor.*, 150 (3): 485–511, doi:10.1007/s10546-013-9877-z.
- Wang L L, Gao Z Q, Miao S G, et al. 2015. Contrasting characteristics of the surface energy balance between the urban and rural areas of Beijing [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 32 (4): 505–514, doi:10.1007/s00376-014-3222-4.
- Wu G X, Duan A M, Liu Y M, et al. 2015. Tibetan Plateau climate dynamics: Recent research progress and outlook [J]. *Natl. Sci. Rev.*, 2 (1): 100–116, doi:10.1093/nsr/nwu045.
- 肖攀曜, 胡非, 范绍佳. 2017. 风能数值预报的模式输出统计 (MOS) 研究 [J]. *资源科学*, 39 (1): 116–124.
- Xiao Q Y, Hu F, Fan S J. 2017. Model output statistics and wind power numerical prediction [J]. *Res. Sci.*, 39 (1): 116–124, doi:10.18402/resci.2017.01.12.
- 许鲁君, 刘辉志. 2015. 云贵高原洱海湖泊效应的数值模拟 [J]. *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 [J]. *Acta Meteor. Sinica*, 73 (4): 789–802, doi:10.11676/qxxb2015.047.
- 许鲁君, 刘辉志, 曹杰. 2014. 大理苍山—洱海局地环流的数值模拟 [J]. *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 [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 38 (6): 1198–1210, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1401.13293.
- Xu L J, Liu H Z, Du Q, et al. 2016. Evaluation of the WRF-lake model over a highland freshwater lake in southwest China [J]. *J. Geophys. Res.*, 121 (23): 13989–14005, doi:10.1002/2016JD025396.
- Zhang Q, Huang R H. 2004. Parameters of land-surface processes for Gobi in North–West China [J]. *Bound.-Layer Meteor.*, 110 (3): 471–478, doi:10.1023/B:BOUN.0000007224.08804.b8.
- Zhang T, Osterkamp T E. 1995. Considerations in determining thermal diffusivity from temperature time series using finite difference methods [J]. *Cold Reg. Sci. Technol.*, 23 (4): 333–341, doi:10.1016/0165-232X(94)00021-O.
- 张双益, 胡非. 2017. GlobeLand30 地表覆盖产品应用于精细化风能资源评估 [J]. *资源科学*, 39 (1): 125–135.
- Zhang S Y, Hu F. 2017. Application of GlobeLand30 land cover product in refined wind energy resource assessment [J]. *Res. Sci.*, 39 (1): 125–135, doi:10.18402/resci.2017.01.13.
- 张美根, 胡非, 邹捍, 等. 2008. 大气边界层物理与大气环境过程研究进展 [J]. *大气科学*, 32 (4): 923–934.
- Zhang M G, Hu F, Zou H, et al. 2008. An overview of recent studies on atmospheric boundary layer physics and atmospheric environment in LAPC [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 32 (4): 923–934, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2008.04.18.
- Zhou L B, Zou H, Ma S P, et al. 2012. Observed impact of the South Asian summer monsoon on the local meteorology in the Himalayas [J]. *Acta Meteor. Sinica*, 26 (2): 205–215, doi:10.1007/s13351-012-0206-0.
- Zhou L B, Zou H, Ma S P, et al. 2015. The observed impacts of South Asian summer monsoon on the local atmosphere and the near-surface turbulent heat exchange over the Southeast Tibet [J]. *J. Geophys. Res.*, 120 (22): 11509–11518, doi:10.1002/2014JD022928.
- Zou H, Li P, Ma S P, et al. 2012. The local atmosphere and the turbulent heat transfer in the eastern Himalayas [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 29 (3): 435–440, doi:10.1007/s00376-011-0233-2.