

沙漠地区近地层能量交换特征研究初步评述

李振杰^{1,2}, 何清¹, 艾力·买买提明¹

(1. 中国气象局乌鲁木齐沙漠气象研究所, 新疆 乌鲁木齐 830002; 2. 新疆师范大学地理科学与旅游学院, 新疆 乌鲁木齐 830054)

摘要:总结了沙漠地区近地层能量交换特征研究的主要进展概况和热点问题。介绍了沙漠地区特有的结构复杂、水汽含量低、沙尘含量高等特征,并分析了其形成原因。对于沙漠近低层的辐射和能量收支特性、湍流通量特征等进行了总结。指出国内外在未来沙漠地区近地层湍流研究方面面临的一些主要科学问题,以及对未来沙漠地区近地层湍流能量特征研究的发展方向提出若干建议。

关键词:沙漠地区;近地层;能量交换

中图分类号: P423.5

文献标识码: A

沙漠地区是陆地表面重要的地貌单元之一,而我国干旱地区面积超过 100 万 km², 占国土面积的 11%, 荒漠是干旱区的主要景观^[1]。研究沙漠地区同大气间的能量交换机制对于探索大气边界层能量输送特征具有重要的实践意义。多年来各国学者对其进行了大量研究^[2-11]。大气边界层中离地面大约 100 m 左右最近地面的这一层称为近地面层,在近地面层中,大气受下垫面的影响最大,气象要素的日变化最大,湍流的变化也剧烈。注重近地面湍流的研究主要与这一层中大气与下垫面的相互作用非常强烈有关,而且描述湍流动量、热量和水汽的输送比较容易;近地层还可以看作大气最大的“风洞”,许多在实验室难以研究的流体力学问题可以在近地层中研究^[2]。已有的研究主要针对近地层地气间湍流能量交换,尤其是热量、水汽、动量等的输送,沙漠特有的近地层湍流能量交换特征,沙漠边界层逆湿现象^[2-4]以及特殊的深厚大气边界层^[5],辐射收支中的矿物气溶胶效应,沙尘天气下的湍流特征的研究等等^[6-7]。本文试图总结关于沙漠地区近地层大气湍流能量交换特征的研究成果,对近几十年来前人在沙漠大气边界层内尤其是近地层湍流能量交换特征方面的工作以及结论做简单的回顾与总结。

1 国内外研究进展

沙漠地区大气边界层研究开始于 20 世纪 70 年代^[8],自 20 世纪 80 年代始,科学家们^[9-13]日渐关注沙漠陆面过程的研究,开展了许多科学实验(如 Kansas, HAPEX, HEIFE, HUBEX, TIPEX, IMGRASS 等)。这些实验虽然取得了巨大成就,但对不同下垫面陆气之间物质与能量交换描述不精确,也制约了数值预报的准确性。

在我国,20 世纪 80 年代苏从先等首次发现了干旱区边界层绿洲“冷岛效应”结构特征^[15]。20 世纪 80 年代末至 90 年代初中日合作在甘肃黑河流域开展的“黑河地区地—气相互作用野外观测实验研究(HEIFE)”(简称“黑河实验”)^[16],是真正以研究干旱地区热量和辐射平衡过程为主的陆面过程试验,是国际上首次真正的干旱区陆面过程观测试验,并由此得出干旱荒漠地表典型晴天热量平衡和辐射平衡以感热为主。由于干旱地区缺少水分,其陆面过程的物理机制同湿润地区有质的差异。对河西走廊黑河流域中段的近地面层湍流通量和行星边界层结构、地面辐射能收支和辐射物理性质、行星边界层的数值试验等方面进行的综合研究(1987~1994),胡隐樵等和张强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

收稿日期:2009-05-12; 改回日期:2009-06-01

基金项目:国家自然科学基金项目(40775019); 国家科技支撑计划课题(2008BAC40B05-01); 新疆维吾尔自治区科技攻关项目(200833119); 中国气象局新技术推广项目(CMATG2007M27); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目(IDM2006002, IDM200807)共同资助

作者简介:李振杰(1982-),男,硕士研究生,主要从事沙漠气候及沙漠气候资源研究. E-mail: lizhenjie101@163.com

界层的特征,同时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研究^[17]。王俊勤、胡隐樵、陈家宜等于1991年8、10月在HEIFE实验区的3种下垫面(农田绿洲、戈壁和沙漠)上进行了边界层探测,分析结果表明,绿洲“冷岛效应”明显^[18]。刘树华利用二维大气边界层模式研究了平坦、均匀戈壁下垫面对流大气的位温和比湿廓线及其时间变化的垂直结构^[19]。朱平、蒋瑞宾利用黑河实验所取得的资料,对比分析了绿洲、沙漠及戈壁边界层中风、温、湿分布规律^[20]。张强、赵鸣等对黑河计划IOP期间在戈壁站观测的湍流脉动资料及有关梯度资料进行了分析,得到了湍流脉动强度、湍流感热、潜热通量和温、湿梯度等的若干特征^[21]。马志福、谭芳、候勤东对塔克拉玛干沙漠地区冬、夏季平均温度、相对湿度、气压分布规律进行了系统研究,建立了冬季平均温度预测方程^[22]。阎宇平、王介民等采用区域大气模拟系统(RAMS)模拟了黑河实验区沙漠戈壁上空“逆湿”,并研究了“逆湿”发生时沙漠戈壁大气边界层结构^[23]。李江风等对沙漠气候及其数值模拟等方面进行了综合性研究^[24]。奥银焕、吕世华、陈玉春^[25]张强等^[26]利用“我国西北干旱区陆—气相互作用试验”2000年5~6月在甘肃敦煌进行的野外观测资料,对西北干旱区临近绿洲的荒漠戈壁大气湿度特征和在绿洲影响下大气的逆湿和负水汽通量与风向和大气稳定度的关系进行了分析研究。刘树华等建立了一个研究荒漠下垫面陆面物理过程与大气边界层相互作用的模式,并模拟了荒漠下垫面的土壤环境物理、地面热量通量、蒸发、蒸散及大气边界层结构特征,还对主要的环境物理参数进行了敏感性实验^[27]。梅凡民利用风温廓线法在毛乌素沙漠的一块平坦沙地上进行了观测试验,并分别计算了中性、稳定、不稳定大气层结的空气动力学粗糙度^[28]。何清等研究了沙漠绿洲交界处肖塘地区的空气动力学粗糙度,得出粗糙度随下垫面性质变化明显,与稳定度呈正相关,与风速呈负相关,摩擦速度随粗糙度增大而减小^[29]。

2 沙漠地区大气边界层特征

2.1 边界层特征

沙漠边界层与湿润地区相比,其边界层厚度、干燥和沙尘含量等都是非常独特的。首先沙漠地区少云,地表干燥,以致地表往往能达到很高的温度,输送到大气中的感热通量很大,使得混合层加深,由此

沙漠边界层通常比较厚,而且一般是白天比较深厚,夜间较低,这是由地表热力和近地层大气运动所形成的独特的大气热力边界层结构决定的^[30-32]。绿洲的“冷岛效应”和临近绿洲沙漠或隔壁的逆湿现象是绿洲与沙漠环境相互作用的结果^[17-18]。沙漠地区近地层比湿是夜间大于白天,阴天大于晴天;普遍存在逆湿现象,强逆湿则主要出现在夜间尤其是凌晨,白天虽然也出现逆湿,但强度普遍较弱^[2]。在塔克拉玛干沙漠腹地,晴天夜间比湿较大,白天较小,沙尘日夜间比湿变化平缓,在沙尘暴发生时,比湿急剧增大,并有弱的逆湿现象存在^[3,33]。

2.2 近地层特征

沙漠表层热量交换(也称沙漠表层热通量)是沙漠地表面热量平衡中的主要影响因素^[34]。表征近地面层湍流发展强弱程度的物理量之一就是湍流交换系数,湍流交换系数随高度的增加而增大^[35]。干旱地区戈壁下垫面卡曼常数为: 0.39 ± 0.01 ^[36],就沙漠地区的动量和感热总体输送系数而言,在沙漠裸露地表上,其粗糙度随风速变化不明显,因此可视为常数,中性总体输送系数不随风速变化^[37]。干旱地区不同类型地表近地层湍流输送的风速随地表粗糙度增大而变大,湍流输送变强,且湍流输送强度与地面粗糙元密度有关^[38]。沙漠湍流交换系数随高度的升高而增大^[35]。沙漠春季近地面层风速梯度依次增大,湍流动量、热量交换系数依次减小^[39]。干旱地区可能是一个水汽输送和热能的“汇”。沙漠地区蒸发量很小,地表热量平衡中以感热为主,潜热可以忽略不计,而且干旱地区能量和物质湍流输送的参数化必须考虑层结影响,否则将造成严重误差^[23,40-41]。

沙漠地区的湍流能量交换具有明显的日变化特征。如塔克拉玛干沙漠腹地湍流能量平衡特征是:湍流各分量基本上以当地时间12:00时为中心,呈对称分布。净辐射、土壤热通量、感热通量具有非常明显的日变化特征^[42],且能量输送具有不同模式和日变化进程,沙漠大气边界层中热量、水汽和动量的湍流混合对温度、水汽和风速的垂直廓线影响很大。

2.3 大气和地表能量收支

沙漠特有的地表物理属性,使得地表温度能达到很高,因而大气能接收到强度更大的红外辐射;而少云和低水汽含量导致大气对红外辐射吸收较低;较高的地表温度导致通过对流引起的大气感热较大;地表少水导致通过蒸发产生的地面热支出较少。

大气中的低水汽含量和少云,导致大气中凝结潜热较低;大气中的低水汽含量导致大气对地表和空间的红外辐射较弱;沙质地表所具有的较高反照率导致地表的太阳辐射的反射率较大;云量少导致大气反射较少;稀疏植被导致通过蒸腾作用的支出热量较少,并且无植被区反照率较高;潜在的大气粉尘浓度较高在很大程度上改变了能量收支各过程。而绿洲附近沙漠地表能量收支有其特殊性,即绿洲效应。荒漠吹来的干空气使得绿洲地表蒸发率很大,热量损失迅速,形成绿洲“冷岛”;绿洲周围近地表水汽通量向下^[17-20,26]。

不同沙质条件下的沙层热量昼夜变化分明,反馈效应不同。如有短波辐射时,沙漠吸热以感热交换为主,夜间沙漠释放热量以潜热交换为主。所以在沙漠地区,当沙层温度明显上升时,在该区低空形成浅薄的热低压,促使沙漠对大气的反馈作用形成了昼夜分明的感热和潜热交换机制,使干旱沙漠的气候效应更为显著。撒哈拉沙漠具有较低的反照率。流动沙丘下垫面湍流输送的无量纲速度分量方差及无量纲温度、湿度脉动方差在不稳定层结下,均满足莫宁—奥布霍夫相似理论,但存在近地面层能量不平衡现象^[43]。

沙漠辐射收支还受到矿物气溶胶、沙尘的影响。由于沙漠地表缺少植被,贴地层风速很大,干燥的贴地层缺水使土壤粒子不容易附着,沙尘很容易被扬起进入大气,造成沙漠边界层沙尘含量高^[30]。大气矿物气溶胶、沙尘使地面射出红外辐射的吸收和再发射增加,从而导致地面的冷却增强^[8,44-47],即沙尘对太阳辐射起到增强加热的作用,对红外辐射起到增强冷却的作用。例如,塔克拉玛干沙漠腹地的沙尘使总辐射降低较为显著。动量、热量交换系数均呈现出沙尘暴天气条件下最大,扬沙次之,浮尘最小的特点;在近地层,湍流感热交换为主导^[48-49]。

2.4 湍流通量特征

沙漠空气动力学粗糙度影响着近地面热量、水汽和动量的湍流通量^[28-29,50]。地表越粗糙,风速越大,湍流输送越强,且湍流输送强度与地面粗糙元密度有关^[51]。感热、潜热通量的大小受诸如下垫面、天气、季节等因素的影响,因此不同下垫面的感热和潜热通量有很大的差异,受不同天气过程影响时的感热、潜热通量也有很大的差异。沙漠地表潜热通量的分布存在较大的季节和区域性差异^[52]。温带沙漠下垫面不同沙尘天气状况下的各通量,春季无

降水的晴空天气状况下,白天以热力湍流为主,在近地层以湍流感热交换为主。在扬沙和沙尘暴天气过程中,动量通量有明显的增加,感热通量有不同程度的降低^[53]。浮尘天气条件下,近地层湍流输送较晴空天气条件下弱;扬沙天气条件下,近地层湍流感热交换和湍流动量交换都很重要,并且湍流动量通量的峰值较晴空峰值大将近一个量级;沙尘暴天气条件下,湍流动量通量和感热通量都是最重要的湍流交换,湍流交换强于扬沙天气,强的感热对沙漠地区局地性沙尘暴的产生和加强起着重要作用。

沙漠大部分净辐射用于感热通量的散失,另一部分用于向地下传输,少部分则用于潜热输送:炎热干燥的夏季,感热交换是沙漠下垫面能量交换的主要形式,也是影响沙漠气候变化的主要热力因素,部分热量通过分子热交换的形式将热量传递到沙漠深层,很少一部分热量则用于潜热交换^[54],即沙漠地区地面得到的热量主要是通过感热通量的方式消耗^[55]。沙漠大部分净辐射能以感热和潜热的形式提供大气,约35%的净辐射能以地热流量的形式进入土壤^[56]。流动沙漠层和固定沙漠层的热量传输差异主要是由地表状况、沙层性质和气温等因素决定的,不同类型沙漠区地气之间的热量传输过程,白天以感热、夜间以潜热的形式向大气传输,形成了沙漠地区对辐射热量特有的响应与反馈交换传输过程^[48-49]。

沙漠地区的感热通量要大于有植被地区的感热通量,潜热通量则相反,有植被地区的远大于沙漠地区。沙漠沙尘天气白天近地层热力湍流作用强于动力湍流,湍流交换以感热交换为主;沙尘天气过程中,近地面层湍流动力作用明显增加,湍流动量和感热交换都对湍流输送有主要贡献,感热通量数值有不同程度的降低。较强沙尘暴天气过程中动力湍流强于热力湍流。随着沙尘天气经历起沙、平衡、沉降的演变过程,沙尘通量数值呈现由正值为主,过渡到向上和向下数值相当、向下数值比例增加。非沙尘天气、扬沙天气和沙尘暴天气过程的沙尘通量值分别有不同的范围。其非沙尘天气也存在一定量的沙尘输送,但数值较小,沙尘通量与摩擦速度的3次方成正比^[57]。水汽通量和动量通量具有明显的日变化规律^[49]。

3 存在的突出问题

边界层研究的任何一次重大进展几乎都与思想

方法的创新或观测技术的重大突破有关。比如,正因为先产生了一套全新的相似性思想,才得以有大气近地面层的 Monin - Obukhov 相似性理论的建立和与实践的结合;有了探空观测技术的突破和新观测手段的出现才得以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的理论形成^[58]。虽然近几十年干旱荒漠区湍流研究得到了飞速发展,但由于问题的复杂性和认识的局限,该领域的研究仍存在着大量有待深入研究的问题:

(1) 目前的研究区域主要集中在内陆几个主要的沙漠,由于沙漠特有的极端干旱等恶劣自然条件的限制,因此虽然观测实验已开展了很多,但仍缺乏可信度较高、持续时间较长、观测要素较全面的研究资料;

(2) 湍流交换要受到沙漠地表因子的影响,所以不仅要考虑有没有植被覆盖,还要考虑地形起伏对能量交换的影响,考虑沙粒粒径的影响^[59],在研究中要综合考虑多方面因素。如何处理下垫面的非均匀性,是干旱荒漠区湍流能量研究中迫切需要解决的问题;

(3) 虽然在沙漠中沙尘暴等特殊天气事件出现概率比较多,但对它们的观测还存在一些技术上的困难,在边界层观测中很少捕捉到这些过程;

(4) 对于沙漠近地层湍流能量交换特征的研究中还存在一些问题,主要体现于数据的搜集和处理。如:所有的涡动相关系统都会减弱有效的高频和低频湍流信号;观测精度受到感应头尺寸、间距、内在响应时间以及与去倾、平滑有关的信号处理过程的制约^[60];

(5) 在数据计算过程中也存在理论上、技术上的差距。哪一种参数化方案更适合沙漠地区的应用,需要进一步的验证^[42]。已有的计算湍流热输送的方法有波文比—能量平衡法(BREB)、涡动相关法(EC)^[61]、空气动力学方法、通量廓线法^[60]、足迹分析法、组合法和变分法等。在已有的研究中,通常通过参数化方案计算地气间通量的输送和交换,例如整体输送系数法、组合法等^[36]。组合法计算湍流量,其优点在于不需预先知道普适函数,且精度较高^[62-63]。应用涡动相关仪数据时,有必要做一些校正,并对数据进行质量评价^[64]。要进一步研究沙漠湍流能量输送的物理机制,必须在多维空间上进行;

(6) 在近地面层能量存在不平衡现象,近地面

层能量收支不平衡原因有待进一步研究,可能与观测仪器误差及大气中有组织上升与下沉运动的存在有关^[32]。

4 展望

沙漠地区的湍流通量研究在我国已经取得很多成果,在研究方法上已经突破传统,研究手段上也有了很大改进,利用最先进的仪器进行观测和数据处理。研究所涉及的范围也越来越广,从辐射收支到通量特征,从晴天到沙尘天气,从地表物理属性到空气动力特征,各方面的研究都已有了很大的进步。近地层能量交换深刻影响着大气的能量平衡,对陆面过程的数值模式模拟成为干旱荒漠区湍流研究的重点。

沙漠地区湍流能量交换特征和理论上的突破与实验是密不可分的。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^[57]。在未来几年里,沙漠地区近地层湍流能量特征研究应主要集中在以下几个方面:①利用沙漠地区遥感探测、飞行观测、气象塔观测和湍流脉动测量等多种手段,发展新的资料获取方法,为沙漠湍流研究提供更准确、完善的数据;②完善和发展复杂沙漠下垫面的边界层理论,尤其是特殊天气条件下的边界层理论;③加强湍流通量测量、资料整理并实现资料共享;④自然流沙近地层通量观测与参数计算比较;⑤沙尘蠕移、跃移、漂移过程观测,起沙通量;⑥激光雷达监测,沙尘垂直通量廓线;⑦风廓线与温度水汽微波辐射计,探测边界层结构;⑧陆面过程模拟与卫星遥感资料参数化。

参考文献:

- [1] 赵松乔. 中国干旱地区自然地理[M]. 北京: 科学出版社, 1985.
- [2] 刘式达, 梁福明, 刘式适, 等. 大气湍流[M]. 北京: 北京大学出版社, 2008. 166 - 184.
- [2] 谷良雷, 胡泽勇, 吕世华, 等. 敦煌和酒泉夏季晴天和阴天边界层气象要素特征分析[J]. 干旱区地理, 2007, 30(6): 871 - 878.
- [3] 李祥余, 何清, 艾力·买买提明, 等. 塔中春季晴天近地层温度、湿度和风速廓线特征[J]. 干旱区地理, 2008, 31(3): 389 - 396.
- [4] 李祥余, 何清, 艾力·买买提明, 等. 塔中春季阴天近地层风速、温度和湿度廓线特征分析[J]. 干旱气象, 2007, 25(2): 22 - 29.
- [5] 张强, 王胜. 西北干旱区夏季大气边界层结构及其陆面过程特征[J]. 气象学报, 2008, 66(4): 599 - 608.
- [6] ZHANG Hongsheng, ZHU Hao, PENG Yan, et al. Experiment on Dust Flux During Duststorm Periods over Desert Area [J]. ACTA

- METEOROLOGICA SINICA, 2008, 22 (2):239-247.
- [7] 孙继明,肖稳安,牛生杰,等. 沙漠地区沙尘天气近地层湍流输送特征分析[J]. 南京气象学院学报,2002,25(4):489-495.
- [8] Charney J G. Dynamics of deserts and droughts in the Sahel[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1975, 101:193-202.
- [9] Henderson-Sellers A. Albedo change - - surface surveillance from satellites[J]. Climate Change, 1980, 2:275-281.
- [10] Qornitz V. A survey of anthropogenic vegetation changes in west Africa during the last century - climatic implications[J]. Climate Change, 1985, 7:285-325.
- [11] Cunnington W M, Rowntree P R. Simulation of the Saharan atmosphere - dependence on moisture and albedo[J]. Quart J Roy Meteor Soc, 1986, 112:971-999.
- [12] Lare A R, Nicholson S E. A climatological description of the surface energy balance in the central sahel; Part I: Shortwave radiation[J]. J Appl Meteor, 1990, 29:123-137.
- [13] Williams K J, Balling J R C. Interaction of desertification and climate[J]. Geneva: WMO and Nairobi: UNEP, 1994. 230.
- [14] Thomas T Warner. Desert Meteorology[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2004. 291-301.
- [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] “黑河试验”核心小组. 黑河地区地气相互作用观测试验研究(HEIFE)[J]. 地球科学进展, 1991, 6(4):34-38.
- [17] 胡隐樵, 高由禧. 黑河实验(HEIFE) - 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.
- [18] 张强, 胡隐樵. 绿洲地理特征及其气候效应[J]. 地球科学进展, 2002, 17(4):477-486.
- [19] 王俊勤, 胡隐樵, 陈家宜, 等. HEIFE 区边界层某些结构特征[J]. 高原气象, 1994, 13(3):299-306.
- [20] 朱平, 蒋瑞宾. 绿洲、沙漠及戈壁边界层特征对比分析[J]. 气象, 1996, 22(3):48-50.
- [21] 张强, 赵鸣, 刘志权, 等. 河西戈壁地区不同天气背景下微气象状况的初步分析[J]. 南京大学学报, 1997, 33(1):112-121.
- [22] 马志福, 谭芳, 候勤东. 塔克拉玛干沙漠地区温压湿分布规律研究[J]. 中国沙漠, 2000, 20(3):289-292.
- [23] 阎宇平, 王介民, 玛·曼乃提, 等. 黑河实验区沙漠戈壁上空“逆湿”的数值模拟[J]. 气象科学, 2001, 21(1):36-43.
- [24] 李江风, 何清, 胡烈群, 等. 塔克拉玛干沙漠和周边山区天气气候[M]. 北京: 科学出版社, 2003. 281-584.
- [25] 奥银焕, 吕世华, 陈玉春. 河西地区不同下垫面边界层特征分析[J]. 高原气象, 2004, 23(2):215-219.
- [26] 张强, 卫国安, 黄荣辉. 绿洲对其临近荒漠大气水分循环的影响 - 敦煌试验数据分析[J]. 自然科学进展, 2002, 12(2):170-175.
- [27] 刘树华, 张景光, 刘昌明, 等. 荒漠下垫面陆面过程和大气边界层相互作用敏感性实验[J]. 中国沙漠, 2002, 22(6):636-644.
- [28] 梅凡民, Rajot J, Alfaro S, 等. 平坦沙地的空气动力学粗糙度变化及其物理意义[J]. 自然科学进展, 2006, 16(3):325-330.
- [29] 何清, 缪启龙, 张瑞军, 等. 塔克拉玛干沙漠肖塘地区空气动力学粗糙度分析[J]. 中国沙漠, 2008, 28(6):1011-1016.
- [30] 魏文寿等译. 沙漠气象学[M]. 北京: 气象出版社, 2008. 215-233.
- [31] 张强, 王胜. 西北干旱区夏季大气边界层结构及其陆面过程特征[J]. 气象学报, 2008, 66(4):599-608.
- [32] 张强, 赵映东, 王胜, 等. 极端干旱荒漠区典型晴天大气热力边界层结构分析[J]. 地球科学进展, 2007, 22(11):1150-1159.
- [33] 王敏仲, 魏文寿, 何清, 等. 南疆沙漠腹地夏季晴天与沙尘日小气候观测对比分析[J]. 气象, 2008, 34(11):7-14.
- [34] Fujio, Kimura, Yugo, Shimzy. Estimation of sensible and latent heat fluxes from soil surface temperature using a line air-land heat transfer model[J]. Reprinted from Journal of Applied Meteorology, 1994, 33(4):36-40.
- [35] Stull R B. An Introduction to Boundary Layer Meteorology[M]. Boston: Kluwer Academic Publishers, 1988. 11.
- [36] Eageleson P S. Land surface processes in atmospheric general circulation models[M]. Cambridge, 1981. 67-111.
- [37] Zhang H S, Chen J Y, Zhang A C, et al. An experiment and the results on flux-gradient relationships in the atmospheric surface over Gobi desert surface[A]. Proceedings of International Symposium on HEIFE[C], Kyoto, Japan, 1993. 349-362.
- [38] 吕萍, 董治宝, 李芳. 三种不同床面近地层湍流输送特征[J]. 干旱区研究, 2006, 23(1):98-103.
- [39] 程穆宁, 牛生杰. 沙漠地区春季近地层气象要素分布规律的观测研究[J]. 中国沙漠, 2008, 28(5):955-961.
- [40] 左洪超, 胡隐樵. 黑河试验区沙漠和戈壁的总体输送系数[J]. 高原气象, 1992, 11(4):371-380.
- [41] 胡隐樵, 高由禧, 王介民, 等. 黑河实验(HEIFE)的一些研究成果[J]. 高原气象, 1994, 13(3):225-236.
- [42] 艾力·买买提明, 何清, 高志球, 等. 塔克拉玛干沙漠近地层湍流热通量计算方法比较研究[J]. 中国沙漠, 2008, 28(5):948-954.
- [43] 刘辉志, 洪钟祥, 张宏升, 等. 内蒙古奈曼流动沙丘下垫面湍流输送特征初步研究[J]. 大气科学, 2003, 27(3):389-398.
- [44] Chou M d, Guodang J, Liu K N, et al. Calculation of surface radiation in arid region - A case study[J]. J Appl Meteor, 1992(31):1084-1095.
- [45] Ackerman S A, Cox S K. The Saudi Arabian heat low: Aerosol distribution and thermodynamic structure[J]. J Geophys Res, 1982(87):8991-9002.
- [46] Tegen I, Lacis A A, Fang I. The influence on climate forcing of mineral aerosol from disturbed soils[J]. Nature, 1996(380):419-422.
- [47] Oke T R. Boundary Layer Climates Methuen[M]. London. 1987.
- [48] 何清, 缪启龙, 李帅, 等. 塔克拉玛干沙漠腹地总辐射变化特征及影响因子分析[J]. 中国沙漠, 2008, 28(5):896-902.
- [49] 缪启龙, 李兰兰, 何清, 等. 南疆沙漠腹地大气边界层湍流量特征的观测研究[J]. 气象与减灾研究, 2008, 31(3):15-21.
- [50] 张瑞军, 何清, 孔丹, 等. 塔克拉玛干沙漠北缘沙尘暴源区地表沉积物粒度特征[J]. 干旱区研究, 2008, 25(6):887-893.
- [51] 吕萍, 董治宝, 李芳, 等. 三种不同床面近地层湍流输送特征

- [J]. 干旱区研究, 2008, 23(1): 98 - 103.
- [52] 王敏仲, 魏文寿, 杨莲梅, 等. 塔克拉玛干沙漠地表潜热时空特征分析[J]. 中国沙漠, 2008, 28(5): 940 - 947.
- [53] 刘辉志, 洪钟祥, 张宏升, 等. 内蒙古奈曼流动沙丘下垫面湍流输送特征初步研究[J]. 大气科学, 2003, 27(3): 389 - 398.
- [54] 塔依尔, 吕新, 杨利勇. 石河子垦区沙漠和绿洲下垫面生态[J]. 中国沙漠, 2007, 27(3): 478 - 482.
- [55] 张强, 曹晓彦. 敦煌地区荒漠戈壁地表热量和辐射平衡特征的研究[J]. 大气科学, 2003, 27(2): 245 - 254.
- [56] 张宏升, 朱好, 彭艳, 等. 沙尘天气过程沙地下垫面沙尘通量的获取与分析研究[J]. 气象学报, 2007, 65(5): 744 - 752.
- [57] 牛国跃, 孙菽芬, 洪钟祥. 沙漠土壤和大气边界层中水热交换和传输的数值模拟研究[J]. 气象学报, 1997, 55(4): 398 - 407.
- [58] 张强. 大气边界层气象学研究综述[J]. 干旱气象, 2003, 21(3): 74 - 78.
- [59] 张瑞军, 何清, 孔丹, 等. 塔克拉玛干沙漠北缘沙尘暴源区地表沉积物粒度特征[J]. 干旱区研究, 2008, 25(6): 887 - 893.
- [60] Panofsky H A, Dutton J A. Atmospheric Turbulence, Models and method for Engineering [M]. New York: John Wiley and Sons, 1984. 397.
- [61] Kaimal J C, Finnigan J J. Atmospheric Boundary Layer and Flows [M]. Oxford University Press, 1994. 289.
- [62] 胡隐樵, 奇跃进. 组合法确定近地面层湍流通量和通用函数[J]. 气象学报, 1991, 49(1): 46 - 53.
- [63] 胡隐樵, 奇跃进, 杨选利. 河西戈壁小气候和热量平衡特征的初步分析[J]. 高原气象, 1990, 9(2): 113 - 119.
- [64] 徐自为, 刘绍民, 宫丽娟, 等. 涡动相关仪观测数据的处理与质量评价研究[J]. 地球科学进展, 2008, 23(4): 357 - 370.

Preliminary Summary of Studies on Characteristics of Atmospheric Turbulent Energy Exchange Near Surface Layer of Arid Desert Area

LI Zhenjie^{1,2}, HE Qing¹, Ali Mamtimin¹

(1. Institute of Desert Meteorology, CMA, Urumqi 830002, China;
2. College of Geographical Science and Tourism, Xinjiang Normal University, Urumqi 830054, China)

Abstract: The researches on characteristics of atmospheric turbulent energy exchange near the surface layer of arid desert area were summarized in this paper, and the characteristics of the complex structure of atmospheric boundary layer, low water vapor content and high sand content in desert region were introduced also. The characteristics of radiation, energy budget and the turbulent flux near surface layer were summarized. It was pointed out some of the key scientific questions both at home and abroad we will face up in the future, and some advices about the study direction in atmospheric turbulent energy exchange near the surface layer of arid desert area in the future were proposed also.

Key words: arid desert area; turbulent energy exchange; surface layer