

华北北部半干旱地区夏季大气边界层特征的实验研究

李倩惠¹ 张宏升^{1,†} 鞠婷婷¹ 肖凯涛²

1. 北京大学物理学院大气与海洋科学系, 气候与海-气实验室, 北京 100871; 2. 军事科学院防化研究院, 北京 100091; † 通信作者, E-mail: hsdq@pku.edu.cn

摘要 2016年7月3—16日在内蒙古自治区科尔沁地区大气科学与大气环境综合实验站开展科尔沁半干旱下垫面大气边界层野外综合观测试验, 利用GPS大气边界层精细探空资料, 分析华北北部半干旱地区晴天、阴天和雨天等不同天气条件下的大气边界层结构。采取不同的方法和判据对比确定大气边界层高度, 统计实验期间低空急流特征, 并对近地面湍流特征及地表能量收支状况进行初步的探讨。结果表明: 晴天, 白天的大气边界层平均高度约为1790 m, 夜间约为250 m; 阴天和雨天, 白天的大气边界层平均高度约为980 m, 夜间约为430 m。夜间, 近地面层湍流动能与边界层高度有较强的相关性。低空急流多发生在午夜, 平均高度约为390 m, 强度与高度正相关。

关键词 大气边界层高度; 低空急流; 地表能量收支; 半干旱地区

Experimental Research on the Characteristics of the Atmospheric Boundary Layer in the Semi-arid North China

LI Qianhui¹, ZHANG Hongsheng^{1,†}, JU Tingting¹, XIAO Kaitao²

1. Laboratory for Climate and Ocean-Atmosphere Studies, Department of Atmospheric and Oceanic Sciences, School of Physics, Peking University, Beijing 100871; 2. Research Institute of Chemical Defense, Academy of Military Sciences, Beijing 100091; † Corresponding author, E-mail: hsdq@pku.edu.cn

Abstract A comprehensive experiment on semi-arid underlying surface was carried out at the comprehensive experimental station of atmospheric science and atmospheric environment in Horqin, Inner Mongolia during July 3th to 16th in 2016. Using high-precision GPS sounding data of the atmospheric boundary layer (ABL), the structure of the ABL in the semi-arid North China under different weather conditions (sunny, cloudy and rainy) was analyzed. The atmospheric boundary layer height (ABLH) was determined by different methods and criteria. In addition, the characteristics of low-level jets (LLJs), surface turbulent flux and surface energy budget were discussed. The results indicate that the average height of the ABL is 1790 m during the day while it is 250 m at night when sunny. In the cloudy day, the average ABLH is 980 m in daytime and 430 m at night. The turbulent kinetic energy in the surface layer shows a strong correlation with ABLH at night. LLJs mostly occur at midnight, with an average altitude of approximately 390 m, and there is a positive correlation between the intensity and the altitude of LLJs.

Key words atmospheric boundary layer height; low-level jet; surface energy budget; semi-arid area

大气边界层不仅是地-气间物质、能量交换的桥梁, 也是多圈层相互作用的场所。正确理解大气边界层的结构及物理过程, 不仅有利于大气边界层

和陆面过程参数化方案的改进, 也对天气、气候和环境变化研究有重要意义^[1]。由于受地表强迫影响, 大气边界层结构有明显的日变化特征^[2]。作为边界

层的关键参数之一,大气边界层高度是反映湍流混合、垂直扩散和对流输送等过程的重要物理量^[3]。通常,白天对流边界层高度低于2000 m,夜间稳定边界层高度不超过500 m^[4]。

干旱半干旱区下垫面具有独特的水热特征,其边界层结构和陆面过程具有特殊性。20世纪80年代以来,国际上开展一系列对于干旱半干旱地区陆面过程和大气边界层的综合观测试验,包括SEBEX (Sahelian Energy Balance Experiment), HAPEX-Sahel和EFEDA (European Field Experiment in a Desertification-threatened Areas)等观测试验,探讨地表能量平衡的特点、植被退化对地-气交换的影响以及卫星遥感估测能量通量的可行性等问题^[5-7]。为了更好地了解干旱机理,在SALSA (Semi-Arid Land-Surface-Atmosphere)和SAHRA (Sustainability of Semi-Arid Hydrology and Riparian Areas)项目的研究中,综合分析了水文、生态与大气间的相互作用,为研究陆面过程与气候过程的耦合以及与地下水系统的耦合提供支持^[8-9]。在PILIPS (Project for the Intercomparison of Land-Surface Processes) San Pedro Sevilleta 试验中,对不同植被类型的半干旱区进行观测,试验资料用于陆面模式的评估,促进了大气环流模式中陆-气相互作用参数化方案的改进^[10]。我国相继开展“黑河地区地气相互作用观测试验研究(HEIFE)”、“西北干旱区陆-气相互作用观测试验研究(NWC-ALIEX)”以及“中国北方干旱灾害机制与预警试验(DroughtEX_China)”等观测试验,观察到绿洲“冷岛效应”、荒漠表面水汽“呼吸”效应等现象^[11-16],对于干旱区地-气间的水热交换和能量交换有了较多的了解,发展了干旱区陆面过程参数化。张强等^[17-18]发现我国西北干旱区具有以下主要特征:由于天空晴朗少云,地表接收的太阳总辐射量明显多于湿润地区;下垫面植被较少,具有较高的地表反照率;强烈的太阳辐射与裸露的地表状况导致白天地表辐射增温迅速,感热通量远高于湿润地区,在地表能量平衡中占主导地位;近地层较强的感热通量为边界层发展提供了充足的能量,残余层的累积效应提供了较好的热力环境,有利于深厚对流边界层的形成。

了解半干旱区大气边界层结构、近地面湍流特征与地表能量收支状况,有利于加深对半干旱区大气边界层特征及地-气间水热交换和能量交换特殊性的认识,辅助模式验证,对理解干旱机理具有重

要意义。以往的半干旱区研究较多地关注草地和农田下垫面,缺乏对半干旱沙地下垫面的研究;多选择晴好天气,缺乏对阴雨天气大气边界层结构研究。同时,现有的气候模式对半干旱区的模拟效果也存在不足之处^[19]。

华北北部的科尔沁沙地位于内蒙古自治区东南部,是我国半干旱区面积最大的沙地。本文利用GPS大气边界层精细探空观测和近地面层大气湍流观测资料,分析2016年7月不同天气条件下科尔沁沙地下垫面大气边界层结构,采用不同的方法和判据,确定大气边界层高度,探究半干旱区沙地下垫面地-气相互作用特征。

1 数据与方法

1.1 资料获取

科尔沁大气科学与大气环境综合实验站(42°56'N, 120°42'E)位于内蒙古自治区通辽市奈曼旗境内,地处科尔沁沙地的东南部,海拔363 m。该地区为温带半干旱大陆性季风气候,年平均气温为6.8℃,年平均降水量为366 mm,蒸发量为1935 mm,是典型的半干旱地区^[20],由于过度放牧和乱砍乱伐,沙化现象严重。科尔沁地区下垫面略有起伏,地貌类型主要有流动和半流动沙丘、固定沙丘、平缓沙地等,生长沙蓬等低矮灌木丛^[21]。

我们在2016年7月3—16日期间开展GPS大气边界层探空探测,每天观测时间为02, 08, 14和20时,探测要素包括大气温度、相对湿度、风速和风向。数据处理与数据质量控制包括野点剔除和廓线平滑处理等,并剔除明显不合理的数据组。

内蒙古自治区科尔沁地区大气科学与大气环境综合实验站的探测平台为20 m高的气象观测塔,观测内容如下:4层温度和湿度(HMP45C, Campbell Sci. Inc.),观测高度分别为2, 4, 8和16 m;4层风速和风向(010C & 020C, Met One Co.),观测高度分别为2, 4, 16和20 m;净辐射(NR-Lite, Kipp&Zonen Co.),观测高度为2 m;8 m高度处安装有涡动相关系统(CAST3, Campbell Sci. Inc和LI7500, LiCor Co.),获取近地层风速、温度、水汽和CO₂浓度快速涨落资料;3层土壤温度观测(109, Campbell Co.),观测深度分别为5, 20和50 cm^[22]。实验观测自动连续,基本气象要素与土壤温度观测的时间分辨率为10 min,并进行30 min平均;大气湍流观测的采样频率为10 Hz,数据处理采用EddyPro软件^[23] (Advan-

ced 6.2.1, LI-COR Biosciences, Inc.), 湍流数据处理过程主要包括野点剔除^[24]、二次坐标变换^[25]和趋势项回归^[26]等。

1.2 计算地表土壤热通量和判定大气边界层高度

利用土壤热传导理论, 结合土壤温度, 计算土壤热通量。首先, 对实测土壤温度进行离散傅里叶变换, 利用各频率土壤温度位相与振幅, 推算地表温度各频率的位相与振幅, 合成地表温度^[27]; 然后, 根据地表与浅层土壤的温度梯度, 求出地表土壤热通量。

从湍流运动的角度, 大气边界层高度是湍流能量或湍流应力接近消失的高度。由于湍流运动的廓线观测难度较大, 实际应用中常常通过热力、动力和物质的垂直分布特征来反映湍流运动, 判定大气边界层高度。通常, 从热力角度, 将位温梯度明显不连续, 存在较强逆温的高度作为边界层高度; 从动力角度, 将风速逼近地转风的高度, 或风速最大值的高度作为边界层高度, 夜间稳定边界层阻碍动量下传, 边界层顶有风速极大值, 因此风速极值法在夜间更适用; 从物质角度, 将湿度梯度明显不连续的高度作为大气边界层高度^[28]。

1.3 天气背景

2016年7月3—10日, 奈曼地区基本上处于晴空少云的天气条件, 其中4—6日受较稳定的高压控制, 7—10日气压逐渐降低, 有天气系统更替。7月11—16日, 实验站历经两次天气过程, 11日多云转小雨, 12日为小雨天气, 13—14日较为晴朗, 将12日作为雨天天气的代表; 15—16日天空云量增多, 云层较厚, 作为阴天天气的代表。在夏季, 类似的天气一般有相似的环流背景, 实验期间的边界层特征应可以代表科尔沁地区夏季类似天气条件下的天气边界层特征。

2 不同天气条件下大气边界层结构特征

2.1 不同天气条件下大气边界层热力结构

图1给出科尔沁地区2016年7月大气边界层热力结构。

白天, 晴天时, 地表对大气的辐射加热较强, 热力湍流旺盛, 对流边界层高度约为1750 m, 层顶呈典型的逆温结构, 其中1200 m高度附近的位温突变可能是观测期间该高度附近存在薄云所致; 阴天时, 白天地表升温较小, 加热大气的作用减弱, 不

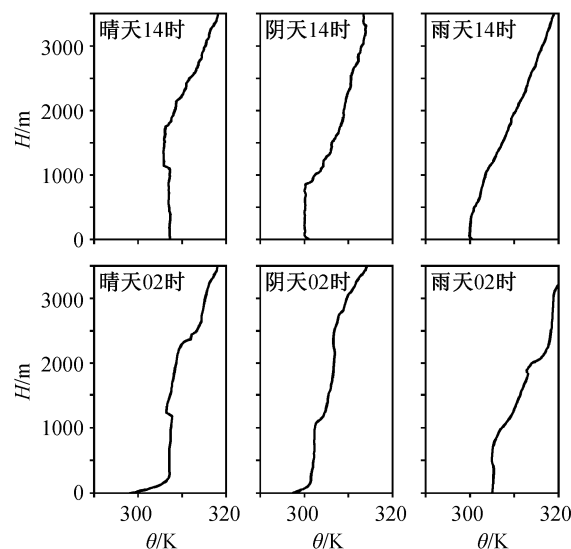


图1 科尔沁地区半干旱区2016年7月大气边界层位温廓线
Fig. 1 Potential temperature profiles of the atmospheric boundary layer in the semi-arid region of Horqin in July 2016

稳定边界层高度较低, 约为850 m, 但仍有较清晰的不稳定边界层顶; 雨天时, 地表能量存在亏损, 没有明显的混合层特征。

夜间, 晴天时, 下垫面呈现较强的辐射冷却, 逆温强度达75 K/km, 稳定边界层高度约为270 m; 阴天时, 较强的大气逆辐射对地表产生保温作用, 逆温层强度较弱, 高度仅有170 m; 雨天时, 风剪切是边界层形成的主要机制, 热力作用几乎可以忽略不计。

干旱地区强热力作用有利于形成深厚大气边界层, 白天的边界层高度可达4 km以上, 夜间可达1 km, 残余层的累积效应对对流边界层发展有利的热力和能量来源^[17,29]。虽然图1显示晴天夜间有清晰的残余层结构和逆温顶盖, 但白天并未形成深厚对流边界层, 其原因可能是科尔沁沙地属半干旱区, 土壤含水量比干旱区高, 土壤热容量更大, 白天地表升温比干旱区慢, 地表对大气的热力强迫弱于干旱区, 不足以形成深厚对流边界层。同样, 夜间的半干旱区地表辐射冷却程度也较弱, 稳定边界层高度也低于干旱区。

2.2 不同天气条件下大气边界层水汽结构

图2给出科尔沁地区2016年7月的大气边界层水汽结构。

白天, 晴朗条件下水汽混合层的高度约为1760 m, 比湿约为7 g/kg, 卷夹层内水汽迅速减少至2 g/kg; 阴天时水汽混合层较低, 高度约为900 m; 雨

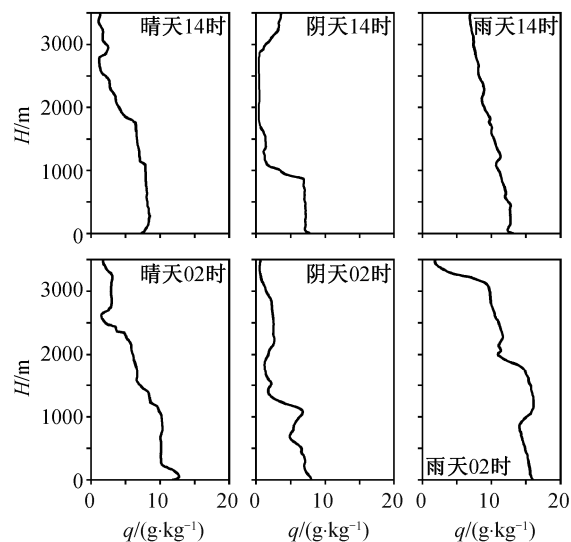


图 2 科尔沁地区半干旱区 2016 年 7 月大气边界层比湿廓线
Fig. 2 Specific humidity profiles of the atmospheric boundary layer in the semi-arid region of Horqin in July 2016

天时, 大气中的水汽含量大幅度地增加, 近地面比湿超过 13 g/kg, 水汽混合层不清晰。

夜间, 晴天时稳定边界层抑制湍流输送, 水汽在近地面聚集, 形成高湿层, 比湿超过 10 g/kg, 残余层保持白天水汽混合层的结构; 阴天时, 接地逆温较弱, 近地面没有清晰的高湿层; 雨天时, 水汽整体上随高度递减, 近地面比湿超过 15 g/kg。

夏季晴天的水汽分布明显受热力作用影响, 水汽混合层与热力混合层及稳定边界层结构相互呼应。夏季阴雨天的热力作用减弱, 白天水汽混合层特征弱, 夜间的水汽层和残余层分界模糊。此外, 与西北干旱区水汽较少(白天近地面比湿多低于 4 g/kg, 夜间多低于 8 g/kg^[17])相比, 科尔沁半干旱区湿度明显偏高(白天近地面比湿多大于 5 g/kg, 夜间多大于 10 g/kg)。

2.3 不同天气条件下大气边界层动力结构

图 3 给出科尔沁地区 2016 年 7 月大气边界层风速结构。

白天, 晴天时对流边界层动量混合均匀, 高度约为 2115 m, 整层风速约为 2.5 m/s; 阴雨天, 由于天气系统过境, 风速增大, 阴天时, 900 m 以下动量混合均匀, 风速约为 5 m/s; 雨天时, 风力进一步增强, 在机械湍流的作用下, 1700 m 以下风速较均匀, 约为 6 m/s。

夜间, 晴天时, 由于稳定边界层阻碍高空动量下传, 逆温层顶有风速极大值, 约为 6 m/s; 阴天时,

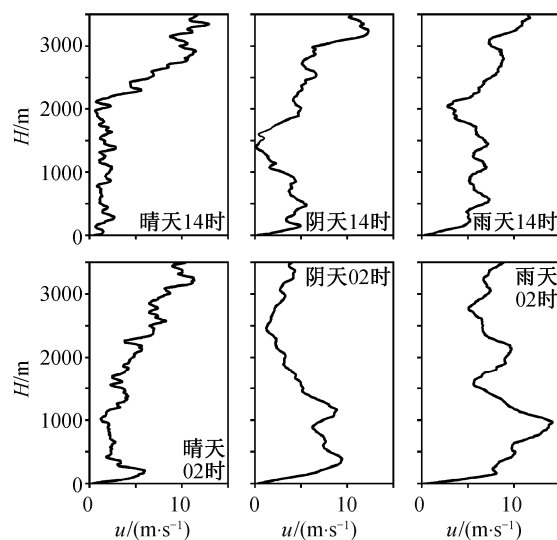


图 3 科尔沁地区半干旱区 2016 年 7 月大气边界层风速廓线
Fig. 3 Wind speed profiles of the atmospheric boundary layer in the semi-arid region of Horqin in July 2016

存在风速多极值现象, 最大风速接近 10 m/s; 雨天时, 夜间有低空急流出现, 急流轴高度约为 950 m, 与逆温层高度相对应。风速的垂直分布与热力结构、水汽结构相对应, 也印证了大气边界层高度判断的可信度。

本文采用与 Bonner^[30]类似的方法, 利用最大风速与风速差定义低空急流: 高度低于 1500 m, 最大风速 ≥ 5 m/s, 且风速极大值与相邻风速极小值的差值超过 3 m/s。科尔沁半干旱区风速廓线通常有明显的急流型结构, 试验期间共出现 17 组低空急流(表 1)。

从时间上看, 低空急流在夜间和清晨均有发生, 02 时的发生频率最高, 急流轴高度多在 200~500 m 之间, 平均高度约为 390 m, 最大高度接近 1000 m。从急流强度上看, 平均风速约为 10 m/s, 最大风速可达 15 m/s; 08 时的急流风速小于夜间, 这与日出后逆温层逐渐崩溃, 湍流混合增强, 风切变减小, 急流强度减弱有关。此外, 急流轴高度与风速极大值、湍流动能和逆温层高度均呈现正相关关系, 原因在于风速极大值越大, 边界层内风切变越大, 机械湍流更强, 湍流动能也随之增大, 并且湍流输送更强, 湍流输送的增强又会促进逆温层的发展。

3 大气边界层高度

3.1 大气边界层高度的判定

图 4 给出分别采用热力作用、动力作用和物质

表 1 科尔沁地区 2016 年 7 月低空急流情况
Table 1 Low-level jets in Horqin in July 2016

日期	时刻	最大风速/(m·s ⁻¹)	急流轴高度/m	日期	时刻	最大风速/(m·s ⁻¹)	急流轴高度/m
05	08	5.3	388.2	09	02	10.6	335.7
	02	6.0	204.6		08	5.7	369.3
06	08	5.0	287.3	10	02	9.2	293.8
	20	6.2	198.7		20	13.9	442.3
07	02	9.6	366.8	11	02	14.9	474.4
	20	14.6	391.2		08	11.9	590.9
08	02	12.4	380.5	12	02	14.2	963.6
	08	10.3	493.3	14	02	12.7	284.5
	20	13.2	347.0				

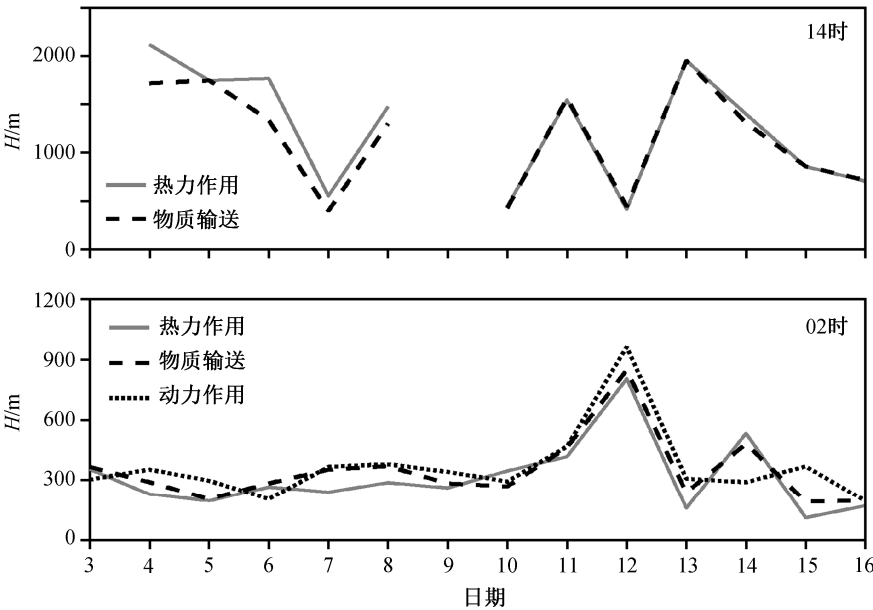


图 4 采用热力作用、动力作用和物质输送方法确定的大气边界层高度时间序列
Fig. 4 Time series of the ABLH determined by thermodynamic, dynamic and material transportation methods

输送规律判定的大气边界层高度随时间的变化。白天，对流边界层高度平均约 1200 m，晴天条件下平均 1790 m，最高可达 2120 m；阴雨天不稳定边界层高度平均约 980 m。

湍流运动是地-气交换的主要方式，对比晴天与阴天的近地面湍流特征，有助于理解晴天与阴天边界层高度的差异。图 5 给出 2016 年 7 月科尔沁半干旱区湍流通量的日变化。晴天，感热量、潜热量和动量通量在 08 时前后迅速增大；阴天，白天湍流通量增加缓慢，数值远小于晴天。

图 6 给出科尔沁半干旱区 2016 年 7 月 02 时近地面湍流动能的变化。与图 4 对比，可见 02 时边界层高度与湍流动能密切相关，稳定边界层主要由机械湍流主导。利用风速廓线给定的边界层高度与湍

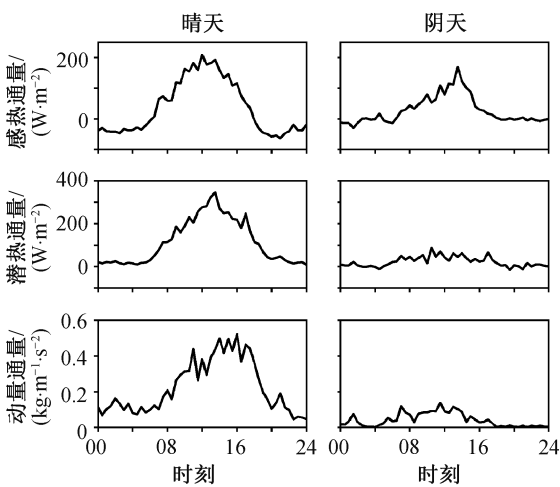


图 5 科尔沁地区 2016 年 7 月湍流通量日变化
Fig. 5 Diurnal variation of the turbulent flux in Horqin in July 2016

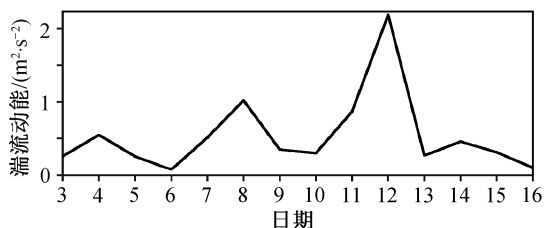


图 6 科尔沁地区 2016 年 7 月 02 时近地面湍流动能变化
Fig. 6 Turbulent kinetic energy in the surface layer at 2:00 in Horqin in July 2016

流动能的相关性最高, 与水汽的相关性次之, 与位温的相关性最小, 相关系数分别为 0.96, 0.77 和 0.69。

白天, 利用热力作用和水汽输送确定的大气边界层高度较为接近, 其原因是由于 14 时对流边界层发展充分, 热量和水汽在边界层内混合充分, 而边界层顶有较强的逆温结构, 导致边界层与自由大气间的热量和水汽特征存在较大差异。

夜间, 利用热力、水汽和动力作用给出的大气边界层高度变化趋势一致, 利用热力和水汽给出的大气边界层高度数值更接近, 利用动力给出的大气边界层高度数值偏大。

图 7 对比不同判别方法给出的大气边界层高度。总体上, 利用热力作用、动力作用和水汽输送判定的大气边界层高度一致性较高, 拟合线斜率均约为 1。利用水汽输送方法判别的大气边界层高度低于利用热力作用判别的高度, 利用动力作用判别的大气边界层高度数值较为离散。

3.2 地表能量收支对边界层高度的影响

图 8 给出 2016 年 7 月科尔沁半干旱区地表能量收支状况。实验观测期间, 科尔沁半干旱区未发现深厚大气边界层, 可能的原因是半干旱区土壤含水量比干旱区高, 地表反照率偏小^[31], 白天净辐射比干旱区(如敦煌荒漠夏季白天的净辐射量约为 500

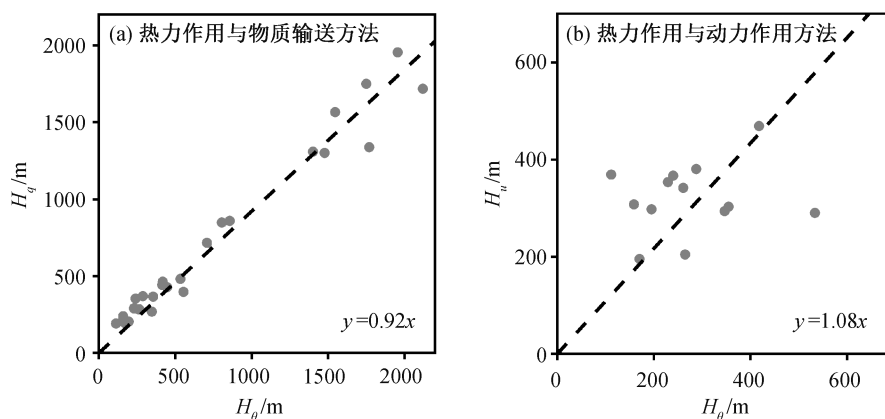


图 7 热力作用、动力作用 and 物质输送方法判别的大气边界层高度对比
Fig. 7 Comparison of the ABLH determined by thermodynamic, dynamic and material transportation methods

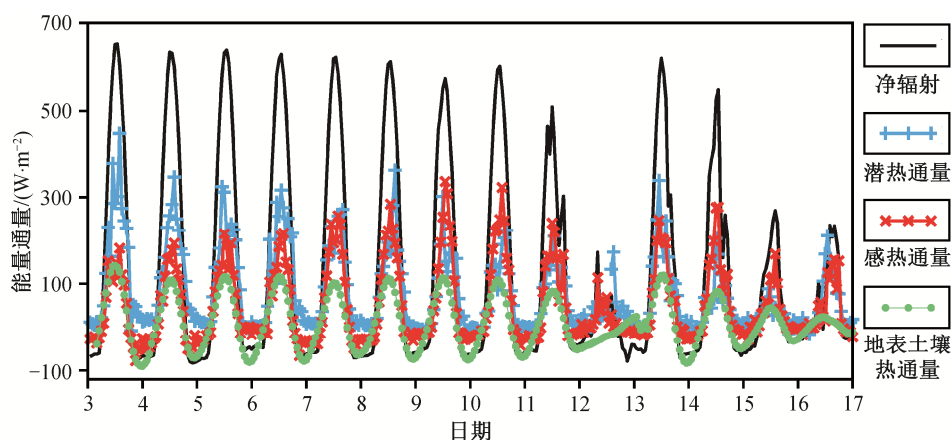


图 8 科尔沁地区 2016 年 7 月地表能量收支时间序列
Fig. 8 Time series of surface energy budget in Horqin in July 2016

W/m^2)^[17]强,晴天时可达 640 W/m^2 。由于半干旱区水汽含量较高,水分蒸发更充足,潜热通量往往大于感热通量,晴天感热通量约为 242 W/m^2 ,潜热通量约为 359 W/m^2 。干旱区感热通量占主导地位,如敦煌地区感热通量可达 450 W/m^2 ,约 90% 的净辐射转化为感热通量^[17],而科尔沁半干旱区仅有 38% 的净辐射转化为感热通量,导致地表接收的能量更多地用于水分蒸发,促进对流发展的能量不足,从而未能形成深厚大气边界层。

4 结论与讨论

本文利用 GPS 大气边界层精细探空资料,分析华北北部半干旱地区 2016 年 7 月 3—16 日晴天、阴天和雨天等不同天气条件下的大气边界层结构,采取不同的方法和判据确定大气边界层高度,初步讨论实验期间的低空急流特征、近地面湍流特征和地表能量收支状况,得到如下结论。

1) 晴天,白天大气边界层平均高度约为 1790 m,夜间约为 250 m;阴雨天,白天大气边界层平均高度约为 980 m,夜间约为 430 m。利用热力作用、动力作用和水汽输送判定的大气边界层高度一致性较好。

2) 科尔沁半干旱区的夏季午夜时段常出现低空急流现象,急流轴高度范围在 200~500 m 之间,平均高度约为 390 m。清晨的急流强度低于午夜,与逆温层崩溃和湍流混合增强有关。低空急流高度与最大风速、湍流动能、逆温层高度正相关。

3) 大气边界层高度与陆面过程密切相关。晴天,近地层地-气间湍流交换更强,边界层发展充分,边界层高度更高。夜间大气边界层高度与近地面湍流动能的相关性较强。晴天,科尔沁半干旱区的净辐射、感热通量和潜热通量分别为 640 , 240 和 360 W/m^2 。与西北干旱区不同,由于科尔沁半干旱区土壤含水量更高,地表辐射能量更多地用于水分蒸发,净辐射更强,潜热通量大于感热通量,导致地表热力强迫较弱,对流发展的能量不及干旱区,实验观测期间没有发现类似西北干旱区的深厚大气边界层现象。

参考文献

- [1] 刘辉志,王雷,杜群. 大气边界层物理研究进展 (2012~2017 年). 大气科学, 2018, 42(4): 823-832
- [2] Stull R B. An introduction to boundary layer me-

- teorology. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1988: 9-19
- [3] Liu S Y, Liang X Z. Observed diurnal cycle climatology of planetary boundary layer height. Journal of Climate, 2010, 23(21): 5790-5809
- [4] Garratt J R. Review: the atmospheric boundary layer. Earth Science Reviews, 1994, 37(1/2): 89-134
- [5] Wallace J S, Wright I R, Stewart J B, et al. The Sahelian Energy Balance Experiment (SEBEX): ground based measurement and their potential for spatial extrapolation using satellite data. Advances in Space Research, 1991, 11(3): 131-141
- [6] Goutorbe J P, Lebel T, Tinga A, et al. HAPEX-Sahel: a large-scale study of land-atmosphere interactions in the semi-arid tropics. Annales Geophysicae, 1994, 12(1): 53-64
- [7] Grunwald J, Kalthoff N, Corsmeier U, et al. Comparison of areally averaged turbulent fluxes over non-homogeneous terrain: Results from the EFEDA-field experiment. Boundary-Layer Meteorology, 1996, 77(2): 105-134
- [8] Goodrich D C, Chehbouni A, Goff B, et al. Preface paper to the Semi-Arid Land-Surface-Atmosphere (SALSA) Program special issue. Agricultural and Forest Meteorology, 2000, 105(1/2/3): 3-20
- [9] Sorooshian S, Bales R, Gupta H, et al. A brief history and mission of SAHRA: a national science foundation science and technology center on "Sustainability of semi-arid hydrology and riparian areas". Hydrological Processes, 2002, 16(16): 3293-3295
- [10] Hogue T S, Bastidas L, Gupta H, et al. Evaluation and transferability of the Noah Land Surface Model in semiarid environments. Journal of Hydrometeorology, 2005, 6(1): 68-84
- [11] 胡隐樵,高由禧. 黑河实验(HEIFE)——对于干旱地区陆面过程的一些新认识. 气象学报, 1994, 52(3): 285-296
- [12] 张强,黄荣辉,王胜,等. 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, 2005, 20(4): 427-441
- [13] Li Y H, Yuan X, Zhang H S, et al. Mechanisms and early warning of drought disasters: an experimental drought meteorology research over China (DroughtEX_China). Bulletin of the American Meteorological Society, 2019, 100(4): 673-687
- [14] Zhang Q, Huang R H. Parameters of land surface processes for Gobi in north-west China. Boundary-

- Layer Meteorology, 2004, 110(3): 471–478
- [15] 苏从先, 胡隐樵, 张永丰, 等. 河西地区绿洲的小气候特征和“冷岛效应”. 大气科学, 1987, 11(4): 390–396
- [16] 张强, 卫国安. 邻近绿洲的荒漠表层土壤逆湿和对水分“呼吸”过程的分析. 中国沙漠, 2003, 23(4): 379–384
- [17] 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. 气象学报, 2008, 66(4): 599–608
- [18] 张强, 黄荣辉, 王胜. 浅论西北干旱区陆面过程和大气边界层对区域天气气候的特殊作用. 干旱气象, 2011, 29(2): 133–136
- [19] Fu C B, Wang S Y, Xiong Z, et al. Regional climate model intercomparison project for Asia. Bulletin of the American Meteorological Society, 2005, 86(2): 257–266
- [20] Wang X Y, Zhao X Y, Li Y L, et al. Responses of soil respiration to simulated precipitation and nitrogen, phosphorus additions in Horqin Sandy Land of north-eastern China. Fresenius Environmental Bulletin, 2013, 22(5): 1463–1471
- [21] 左小安, 赵哈林, 赵学勇, 等. 科尔沁沙地不同恢复年限退化植被的物种多样性. 草业学报, 2009, 18(4): 9–16
- [22] Ju T T, Li X L, Zhang H S, et al. Effects of soil moisture on dust emission from 2011 to 2015 observed over the Horqin Sandy Land area, China. Aeolian Research, 2018, 32: 14–23
- [23] LI-COR Biosciences. Eddy covariance processing software (version 6.2.1) [CP/OL]. (2017) [2018–02–10]. <https://www.licor.com/EddyPro>
- [24] Vickers D, Mahrt L. Quality control and flux sampling problems for tower and aircraft data. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 1997, 14(3): 512–526
- [25] Wilczak J M, Oncley S P, Stage S A. Sonic anemometer tilt correction algorithms. Boundary-Layer Meteorology, 2001, 99(1): 127–150
- [26] Gash J H C, Culf A D. Applying a linear detrend to eddy correlation data in real time. Boundary-Layer Meteorology, 1996, 79(3): 301–306
- [27] 张鹏, 张宏升, 杜金林, 等. 科尔沁沙地地区地表温度的确定和分析. 北京大学学报(自然科学版), 2011, 47(4): 655–663
- [28] 赵鸣, 苗曼倩, 王彦昌. 边界层气象学教程. 北京: 气象出版社, 1991: 217–228
- [29] Marsham J H, Parker D J, Grams C M, et al. Observations of mesoscale and boundary-layer scale circulations, affecting dust transport and uplift over the Sahara. Atmospheric Chemistry and Physics, 2008, 8(23): 6979–6993
- [30] Bonner W D. Climatology of the low level jet. Monthly Weather Review, 1968, 96(12): 833–850
- [31] Liu H Z, Wang B M, Fu C B. Relationships between surface albedo, soil thermal parameters and soil moisture in the semi-arid area of Tongyu, Northeastern China. Advances in Atmospheric Sciences, 2008, 25(5): 757–764