

姜燕,王乃昂,赵力强,等.巴丹吉林沙漠不同下垫面近地层气象要素垂直变化特征[J].中国沙漠,2026,46(3):109-119.

## 巴丹吉林沙漠不同下垫面近地层 气象要素垂直变化特征

姜燕<sup>1</sup>,王乃昂<sup>1</sup>,赵力强<sup>1</sup>,孟楠<sup>1,2</sup>,刘津桥<sup>1</sup>,叶豪<sup>1</sup>

(1.兰州大学 资源环境学院/沙漠与冰川科学观测研究站,甘肃 兰州 730000; 2.阜阳师范大学 地理系,安徽 阜阳 311400)

**摘要:** 利用3个观测站点2024—2025年近地大气边界层梯度探测资料,分析巴丹吉林沙漠腹地 and 东南缘四季典型晴天条件下近地层风温湿廓线特征。结果表明:(1)不同下垫面近地层风速白天高,夜间低,夜间大气层结稳定,风切变增大。沙山站风速廓线幂函数拟合相关性最高,湖边站与雅布赖山站则更符合指数函数关系。(2)近地层温度为湖边站>沙山站>雅布赖山站,温度廓线昼夜差异显著,夜间近地层大气呈现近似等温或逆温分布,且冬季逆温最强,湖边站和雅布赖山站逆温层高度大于沙山站。(3)近地层比湿为湖边站最大,沙山站最小,且夏季>秋季>春季>冬季。沙山站四季4 m以上出现逆湿,湖边站春、冬季夜间2 m以上及夏、秋季8 m以上出现逆湿,雅布赖山站逆湿常出现在4~8 m高度层,冬季全天均观测到逆湿。研究结果可为巴丹吉林沙漠世界遗产地的科学保护及区域数值模式的边界层参数化提供基础资料,加深对高大沙山形成机制的理解。

**关键词:** 巴丹吉林沙漠; 近地大气边界层; 气象要素; 廓线结构

文章编号: 1000-694X(2026)03-109-11

DOI: 10.7522/j.issn.1000-694X.2026.00010

中图分类号: P42

文献标志码: A

### 0 引言

揭示大气边界层特征及其形成机理是气象学研究的热点<sup>[1-3]</sup>。干旱区约占地球陆地面积的41%,是陆地生态系统的重要组成部分<sup>[4]</sup>。中国西北干旱区地处季风影响的边缘地带,气候干燥、生态环境极其脆弱,对全球变化的响应十分敏感<sup>[5-6]</sup>。沙漠作为典型干旱区下垫面,特殊的陆面过程属性及强太阳辐射导致显著的地面加热效应,极易形成超厚对流边界层<sup>[7-9]</sup>,成为典型地表环境下大气边界层过程研究的重要区域。

近年来,基于单点野外观测数据,针对塔克拉玛干沙漠<sup>[10]</sup>、腾格里沙漠<sup>[11-12]</sup>和古尔班通古特沙漠<sup>[13-14]</sup>等干旱区大气边界层气象要素廓线结构、辐射通量及能量交换特征的研究,加强了对干旱区陆面过程的认识。然而,沙漠是由多种类型下垫面共同组成的复杂地理单元,单一类型下垫面的观测结

果难以全面反映沙漠大气边界层的整体特征。

巴丹吉林沙漠作为典型复合下垫面区域,以高大沙山-湖泊群景观著称,拥有世界最高的沙丘<sup>[15-16]</sup>和110个常年积水湖泊<sup>[17-18]</sup>,其独特的地貌格局和气候环境使该区的近地大气边界层结构和陆面过程特征在干旱区研究中具有典型性和代表性<sup>[19-20]</sup>。目前,针对巴丹吉林沙漠大气边界层结构特征已开展了一些工作。Han等<sup>[21]</sup>通过位温与湍流参数识别典型晴天条件下对流边界层结构;赵采玲等<sup>[22]</sup>对夏季沙漠对流边界层高度发展的特征及其影响因素进行了研究;许兴斌等<sup>[23]</sup>利用高大沙山野外观测数据分析了近地层温湿廓线与能量交换特征,发现沙山能量交换以感热通量为主,并首次观测到逆湿现象。但受沙漠严酷自然条件和探测仪器设备限制,这些研究多为单一类型下垫面或短期观测。利用巴丹吉林沙漠多站点的连续观测数据能够更全面地反映沙漠不同下垫面间的差异,揭示沙漠大气边

收稿日期:2025-11-11; 改回日期:2026-01-13

资助项目:国家自然科学基金项目(42271131)

作者简介:姜燕(1999—),女,重庆云阳人,硕士研究生,主要从事沙漠陆面过程研究。E-mail: jyan2024@lzu.edu.cn

通信作者:王乃昂(E-mail: wangna@lzu.edu.cn)

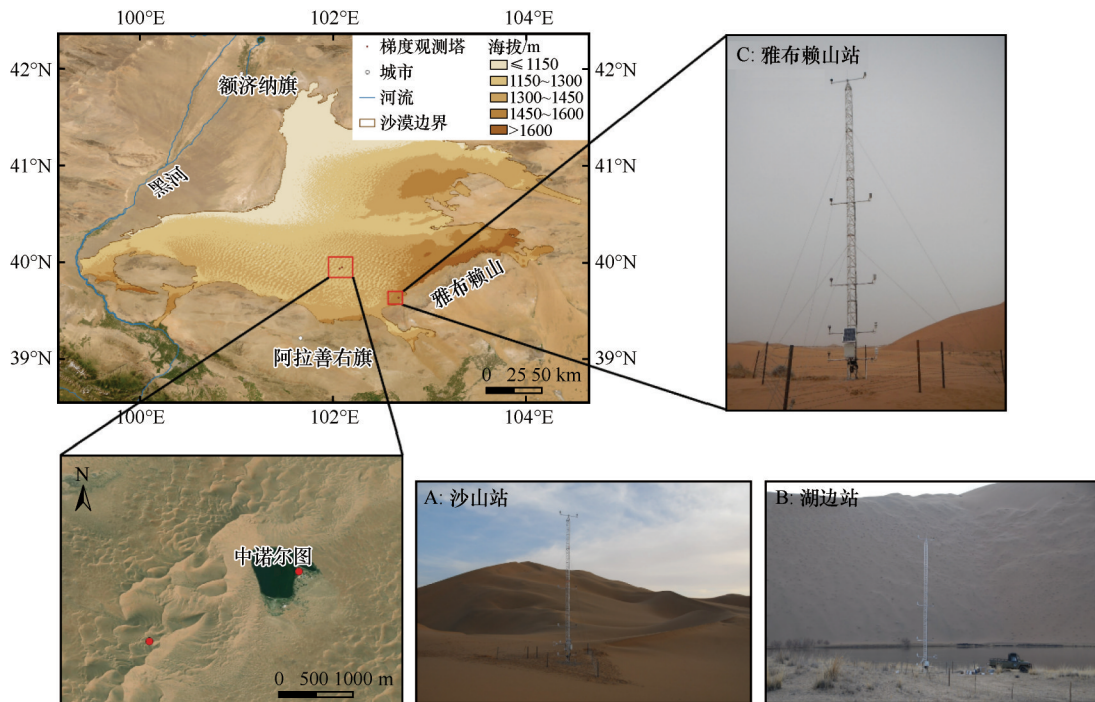
界层特征及其形成机理。

基于此,本文利用兰州大学沙漠与冰川科学观测研究站2024年3月至2025年2月连续一年的野外观测数据,对比分析巴丹吉林沙漠腹地高大沙山、湖泊以及东南缘低矮沙丘不同下垫面近地层风速、温湿度的变化特征,旨在为巴丹吉林沙漠世界遗产地的分区科学保护及区域数值模式的边界层参数化提供基础资料,加深对高大沙山形成机制的理解,为全球干旱区陆面过程的研究提供科学参考。

### 1 数据与方法

巴丹吉林沙漠(39°04'15"—42°12'23"N, 99°23'18"—104°34'02"E)位于阿拉善高原西南缘,东起宗乃山与雅布赖山,西至古日乃湖,南抵合黎山及北大山,北达拐子湖与古居延泽。地势整体东南高、西北低。沙漠总面积约5.2万km<sup>2</sup>,是中国第二大沙漠<sup>[24]</sup>。为了加强对沙漠陆-气相互作用的研究,兰州大学沙漠与冰川科学观测研究站在巴丹吉林沙漠腹地及东南缘布设了3座梯度观测塔(图1)。中诺尔图沙山梯度塔(简称沙山站)位于沙漠腹地中诺尔图湖(0.48 km<sup>2</sup>)西南部的高大沙山上,沙丘高度大于350 m,缓坡坡度为15.8°~25.0°,陡坡坡度大于31.5°<sup>[25]</sup>,

下垫面为裸沙;中诺尔图湖边梯度塔(简称湖边站)位于沙漠腹地中诺尔图湖东南缘,紧邻湖泊东侧的湖滨带,夏季植被生长茂密,分布有成片的沙生芦苇,周围有高约1~2 m的稀疏人工梭梭林,代表典型的湖泊下垫面;雅布赖山梯度塔(简称雅布赖山站)位于沙漠东南缘,沙丘整体规模较小,沙丘高度小于200 m,缓坡坡度为10.0°~15.2°,陡坡坡度25.0°~30.0°<sup>[25]</sup>,下垫面为裸沙。梯度观测塔仪器及型号见表1。原始数据由数据采集器输出为30 min平均值,并经过严格质量控制,包括:①三站点传感器的同步校准;②逻辑极值检查(风速0~40 m·s<sup>-1</sup>、风向0°~360°、气温春季-25~40 °C、夏季0~50 °C、秋季-30~40 °C、冬季-35~20 °C,相对湿度0~100%,气压600~1 000 hPa);③时间一致性检验,通过判断气象要素在合理时间尺度内的可变幅度识别异常跳变值(风向因不具连续性,不进行该项检验)。由于湖边站8 m高度处风速风向数据缺失,数据处理时予以剔除。经严格的质量控制,沙山站所有气象要素有效观测率为100%;湖边站除风速风向有效观测率为97.77%外,其余气象要素有效观测率为100%;雅布赖山站除水汽压有效观测率为99.48%外,其余气象要素有效观测率为100%。整体数据完好率较高,保证研究结论的可靠性。



注:基于内蒙古自治区地理信息公共服务平台审图号蒙S(2023)039号标准地图制作,底图边界无修改

图1 研究区及梯度观测塔位置

Fig.1 Location of study area and gradient observation towers

表1 野外观测仪器及型号

Table 1 Instruments and specifications for field observations

仪器名称	型号	观测高度/m	采样周期	精度	生产厂家
数据采集器	CR3000	1	最大 100 Hz	—	美国 CSI
二维风传感器	WindSonic4	1,2,4,8,16	10 s	风速:±2%(12 m·s <sup>-1</sup> );风向:±3%	英国 Gill
三维超声风传感器	CSAT3	2	10 Hz	$U_x$ 和 $U_y$ :±1 mm·s <sup>-1</sup> ; $U_z$ :±0.5 mm·s <sup>-1</sup>	美国 CSI
空气温湿度传感器	HMP155A	1,2,4,8,16	10 s	气温:±0.1 °C;相对湿度:±2%	芬兰 Vaisala
四分量净辐射传感器	CNR4	1.5	10 s	±1%	荷兰 Kipp & Zonen

季节划分依据气象学中北半球通用标准,即春季(3—5月)、夏季(6—8月)、秋季(9—11月)和冬季(12月至次年2月)。典型晴天样本的筛选基于沙山站的辐射数据,当晴空指数大于0.7时定义为晴天,同时结合中诺尔图气象站观测资料对湖边站进行同步验证,剔除湖岸局地小气候干扰的样本,确保3站点晴天判据一致。晴空指数( $k_t$ )计算过程如下<sup>[26]</sup>:

$$k_t = DR/Se \downarrow \quad (1)$$

$$Se \downarrow = Sc [1 + 0.033 \cos(360t_d/365)] \sin \beta \quad (2)$$

$$\sin \beta = \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos t \quad (3)$$

$$\delta = 0.409 \sin(0.0172t_d - 1.39) \quad (4)$$

式中: $DR$ 为向下短波辐射( $W \cdot m^{-2}$ ); $Se \downarrow$ 为天文辐射( $W \cdot m^{-2}$ ); $Sc$ 为太阳常数( $1370 W \cdot m^{-2}$ ); $t_d$ 为对应日序数; $\beta$ 为太阳高度角( $^\circ$ ); $\delta$ 为太阳赤纬( $^\circ$ ); $\varphi$ 为地理纬度( $^\circ$ )。

比湿( $q$ ,  $g \cdot kg^{-1}$ )计算公式如下<sup>[27]</sup>:

$$q = 622e/(p - 0.378e) \quad (5)$$

式中: $e$ 为实际水汽压(hPa); $p$ 为大气压(hPa)。

为统一时间标准,本文分析均采用北京时间。沙山站地方时比北京时间晚1小时11分钟43秒,湖边站晚1小时11分钟37秒,雅布赖山站晚1小时9分钟17秒。

## 2 结果与分析

### 2.1 地面气象要素特征

不同下垫面风速日变化趋势一致,白天大、夜间小。白天受太阳辐射加热影响,地表温度升高,湍流活动增强,夜间地表辐射冷却导致湍流受到抑制。平均风速为沙山站( $3.05 m \cdot s^{-1}$ )>雅布赖山站( $2.64 m \cdot s^{-1}$ )>湖边站( $1.22 m \cdot s^{-1}$ ,图2A)。沙山站地形开阔,空气流动顺畅,平均风速最高,日变化为 $2.80 \sim 3.53 m \cdot s^{-1}$ ,以南风为主,表现出较高的基准风

速和较小的日较差。雅布赖山站风速日变化幅度较大,日变化为 $1.77 \sim 3.65 m \cdot s^{-1}$ ,白天以西南偏南风为主,夜间则转为东南偏南风。巴丹吉林沙漠腹地沙山与湖泊交错的地貌格局形成了局部封闭的小气候环境,导致湖边站的平均风速明显低于沙山站及雅布赖山站,日变化为 $0.88 \sim 1.75 m \cdot s^{-1}$ ,受湖泊独特的水域调节及湖-山格局下的局地环流影响,该地风向昼夜变化较明显,白天以南风为主,夜间转为东南风(图2B)。

不同下垫面温度日变化趋势一致,白天高、夜间低,比湿变化与此相反,白天低、夜间高(图2C、D)。07:00—07:30温度开始上升,至16:30—17:00温度达最大值,之后温度逐渐下降。沙山站最高、最低温度出现时间晚于其他两个站点。平均温度为湖边站( $11.79 \text{ }^\circ\text{C}$ )>沙山站( $11.50 \text{ }^\circ\text{C}$ )>雅布赖山站( $9.86 \text{ }^\circ\text{C}$ ),比湿为湖边站( $4.40 g \cdot kg^{-1}$ )>雅布赖山站( $4.37 g \cdot kg^{-1}$ )>沙山站( $4.10 g \cdot kg^{-1}$ )。沙山站日平均温度、比湿的变化分别为 $8.19 \sim 15.02 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $3.81 \sim 4.39 g \cdot kg^{-1}$ ,湖边站分别为 $6.06 \sim 17.70 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $4.07 \sim 4.76 g \cdot kg^{-1}$ ,雅布赖山站分别为 $5.21 \sim 14.54 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $4.01 \sim 4.67 g \cdot kg^{-1}$ 。湖泊区域温湿日变化较沙山和沙漠边缘更为剧烈,这是沙漠腹地湖泊区暖岛效应导致的结果<sup>[28-29]</sup>,湖泊的存在为沙漠腹地提供了局部水汽源,有利于维持局地生态环境。

### 2.2 近地层风速廓线特征

不同下垫面四季典型晴天近地层风速随高度升高而增大(图3)。近地层风速廓线可以分为夜间稳定型和白天不稳定型<sup>[30-31]</sup>,白天太阳辐射加热地表,大气层结不稳定逐渐增强,上下层风速差较小,风切变减小,夜间近地层常形成逆温,大气层结稳定,上下层风速差较大,风切变增大。湖边站由于湖滨生长稀疏植被,对气流产生阻滞作用,使得1~2 m

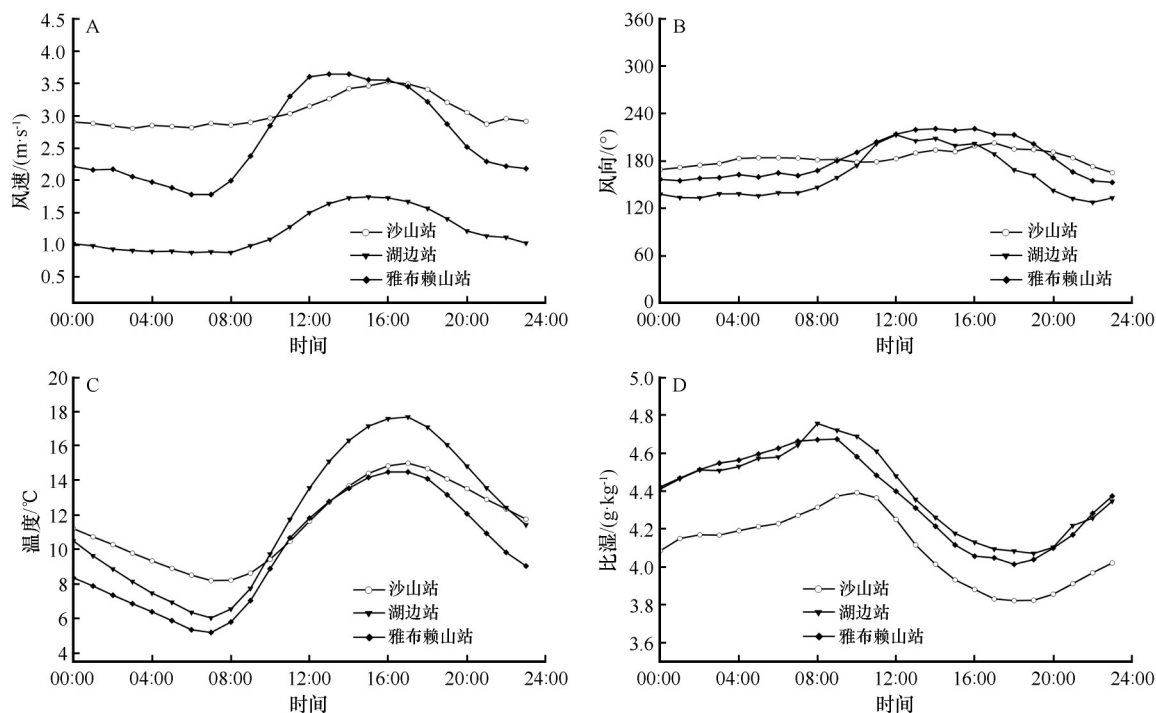


图2 不同下垫面2 m高度处气象要素日变化

Fig.2 Diurnal variation of meteorological variables at 2 m height over different underlying surfaces

高度内形成较大的风切变。沙山站无植被覆盖,摩擦阻力小,近地层1~2 m内风切变最小,而在8~16 m高度层,风切变较大。雅布赖山站则在4 m高度处存在明显拐点,拐点以下风切变较大,拐点以上递增趋缓,风切变减小。

风速大小均呈显著季节差异。沙山站春季风速最大、冬季最小,夏秋季次之,湖边站与雅布赖山站夏、秋季风速大,春、冬季相对较小。冬季风速均表现为全年最低,分别为 $3.40 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (沙山站)、 $1.04 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (湖边站)和 $2.36 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (雅布赖山站),此时日照时间短,大气层结稳定,动量垂直交换受限,风速随高度增加的幅度较小,3站点风速廓线趋于一致。

边界层理论认为,中性近地层风速廓线为著名的对数律,而在非中性层结时,指数律和幂律能更好地描述风速廓线<sup>[32]</sup>。对巴丹吉林沙漠不同下垫面近地层各垂直梯度平均风速的多函数拟合分析发现,沙山站幂函数拟合相关系数( $R^2=0.9758$ )最高,风速随高度表现为平缓增加趋势。湖边站与雅布赖山站则以指数函数拟合效果最佳,风速随高度增加而增大,风速梯度随高度增加而减小(图4)。

风速廓线差异与下垫面属性及局地层结密切相关<sup>[33-34]</sup>。沙山裸沙下垫面陆-气能量交换以感热通量为主导,白天感热通量为正,其峰值可达

$353.09 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ <sup>[23]</sup>,强烈的湍流混合主导近地层动量传输,使风速随高度呈幂律增长。相比之下,湖边站和雅布赖山站常受逆温影响,稳定层抑制湍流混合,动量向上输送效率降低,风速随高度的增加呈现出指数趋缓特征。在塔克拉玛干沙漠<sup>[31]</sup>和东疆黑戈壁<sup>[35]</sup>地区也观测到风速廓线指数特征,这与湖边站和雅布赖山站表现一致,而区别于沙山站,进一步表明巴丹吉林沙漠高大沙山形成的独特性。

### 2.3 近地层温度廓线特征

不同下垫面四季典型晴天近地层温度表现为夏季>秋季>春季>冬季。四季温度廓线昼夜差异明显,白天温度随高度升高而递减,夜间则随高度升高而递增,出现明显的逆温现象(图5)。据温度廓线日变化特征,可将其划分为早晨过渡型、日间辐射型、傍晚过渡型及夜间辐射型4种类型,这与其他干旱区的研究一致<sup>[11-13,36-37]</sup>。春、秋、冬季早晨过渡型出现在08:00—10:00,日间辐射型在10:00—18:00出现,傍晚过渡型在18:00—20:00出现,夜间辐射型在20:00至次日08:00出现。夏季由于日出时间提前且太阳辐射增强,地表增温迅速,早晨过渡型(06:00—08:00)出现时间略早于其他季节。3站点温度廓线日变化特征总体较为一致,而湖边站冬季傍晚过渡型(16:00—18:00)出现时间提前,主要归因于

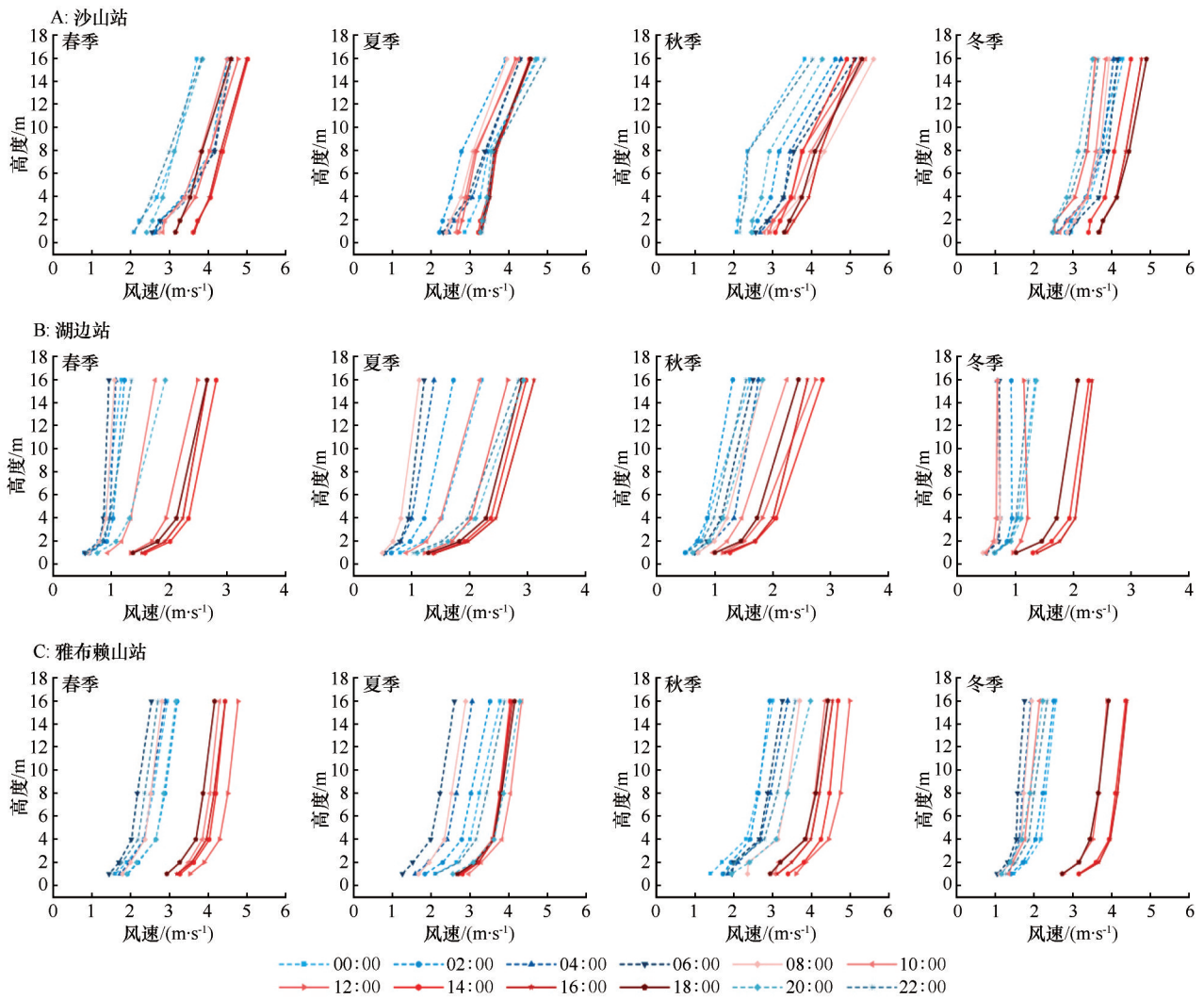


图3 沙山站(A)、湖边站(B)和雅布赖山站(C)四季典型晴天风速廓线

Fig.3 Seasonal wind speed profiles on typical clear days at the Sand Dune Station (A), the Lakeside Station (B), and the Yabulai Mountain Station (C)

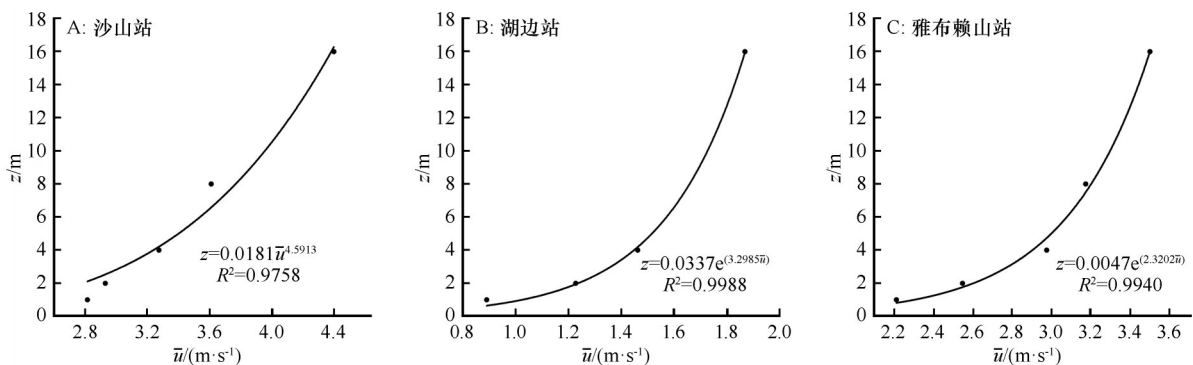


图4 沙山站(A)、湖边站(B)和雅布赖山站(C)典型晴天平均风速以及函数拟合

Fig.4 Typical clear-day mean wind speeds and their functional fits at the Sand Dune Station (A), the Lakeside Station (B), and the Yabulai Mountain Station (C)

冬季湖泊结冰,辐射冷却效应增强并与封闭地形中冷空气的积聚作用叠加,共同促使地表冷却过程提前发生。

逆温出现频率有明显的时次和季节变化(表2),冬季逆温最为显著,这与青藏高原<sup>[38-39]</sup>观测较为一致,冬季近地层地表辐射冷却强烈,大气层结稳

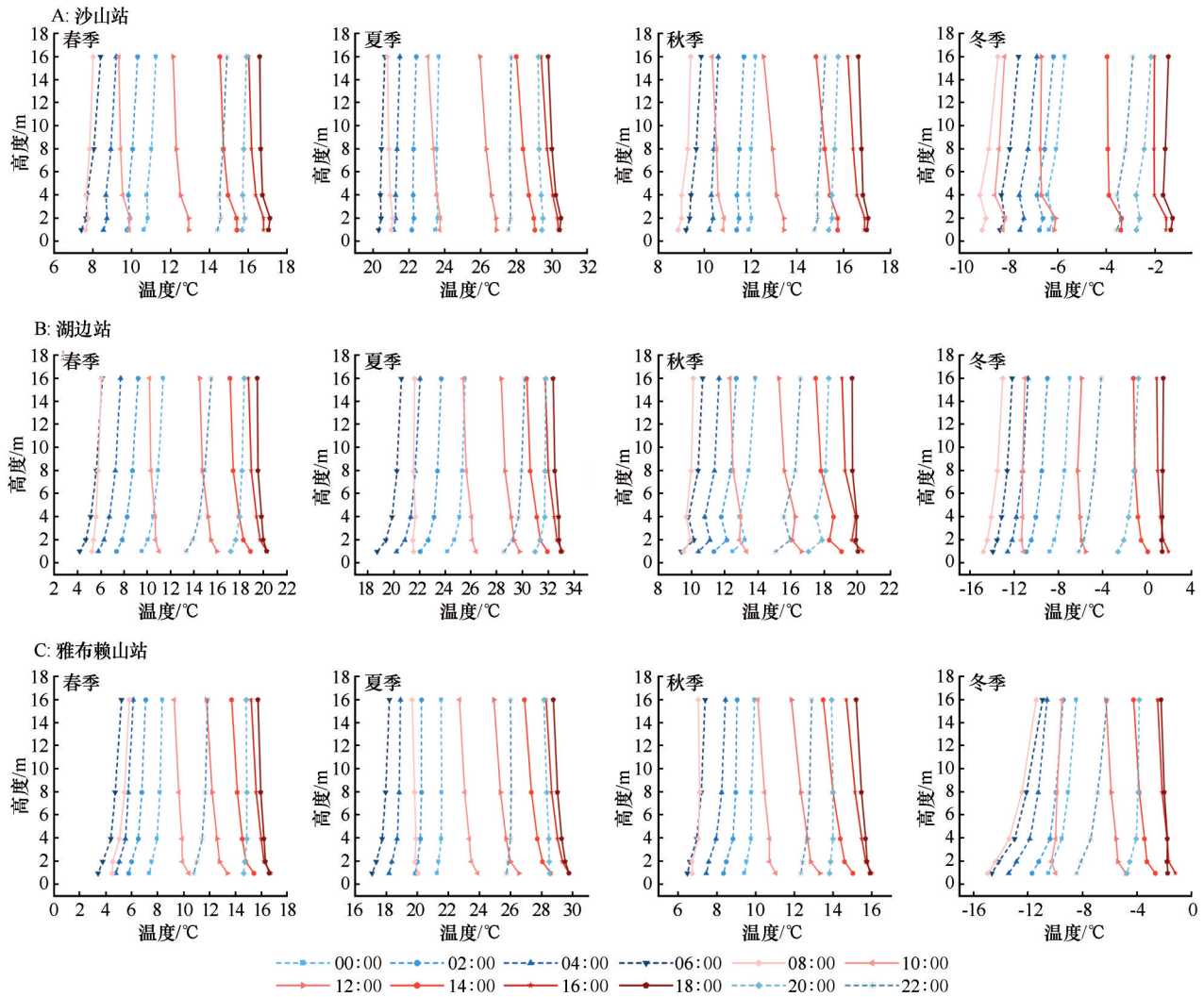


图5 沙山站(A)、湖边站(B)和雅布赖山站(C)四季典型晴天温度廓线

Fig.5 Seasonal temperature profiles on typical clear days at the Sand Dune Station (A), the Lakeside Station (B), and the Yabulai Mountain Station (C)

定,从而导致逆温出现频率高、强度大且持续时间长。

不同下垫面逆温结构差异明显。沙山站在2~4 m高度存在一个超绝热层,温度随高度升高迅速降低,在这一高度层上下出现近似等温或逆温现象,4 m高度处存在明显拐点,拐点以下由于地表辐射冷却主导,温度垂直梯度大于拐点以上。湖边站与雅布赖山站1~16 m高度均形成逆温层,最大逆温层厚度及强度高于沙山站,表明两站点大气层结较沙山站更为稳定。总体看来,湖边站全年逆温出现频率最高(冬季逆温频率高达72.9%),主要受地形、水体及周边环境共同作用影响,该站夜间四周沙山辐射冷却的空气下沉汇聚,当高空出现暖平流时,更易形成稳定逆温结构。

从持续时间与强度对比来看,巴丹吉林沙漠的

逆温特性介于塔克拉玛干沙漠<sup>[40]</sup>与青藏高原西部<sup>[41]</sup>之间。沙山站逆温一般于18:00形成,持续至次日10:00,持续时间与塔克拉玛干沙漠(17:00至次日09:00)相近,但明显长于青藏高原地区(21:00—21:30至次日08:30—09:00)。逆温强度方面,沙山站弱于塔克拉玛干沙漠(超强逆温可达 $0.42\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{m}^{-1}$ ),强于青藏高原(最大逆温为 $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{m}^{-1}$ )。这些差异主要受区域地形、地理位置及下垫面热力属性影响。

## 2.4 近地层湿度廓线特征

不同下垫面四季典型晴天近地层比湿整体随高度上升而减小,冬季出现显著的昼夜差异(图6)。总体看来,3站点全年比湿的季节变化特征为夏季>秋季>春季>冬季,四季均观测到不同程度的逆湿现象,逆湿强度和垂直分布有着明显差异。

表2 不同下垫面四季典型晴天逆温数据统计

Table 2 Statistics of seasonal temperature inversions on typical clear days over different underlying surfaces

季节	站点	逆温频率 /%	最大逆温层 厚度/m	平均逆温强度 /( $^{\circ}\text{C}\cdot\text{m}^{-1}$ )	最大逆温强度/( $^{\circ}\text{C}\cdot\text{m}^{-1}$ ) (出现高度;时间)	逆温出现主要时段
春季	沙山站	50.0	12	0.08	0.24(1~2 m;06:00)	18:00至次日10:00
	湖边站	58.3	15	0.20	0.58(1~2 m;22:00)	20:00至次日08:00
	雅布赖山站	54.2	15	0.14	0.36(1~2 m;06:00)	20:00至次日08:00
夏季	沙山站	35.4	12	0.06	0.13(1~2 m;04:00)	18:00至次日10:00
	湖边站	54.2	15	0.21	0.67(1~2 m;06:00)	20:00至次日08:00
	雅布赖山站	37.5	15	0.09	0.25(1~2 m;06:00)	22:00至次日08:00
秋季	沙山站	54.2	12	0.06	0.16(1~2 m;04:00)	全天
	湖边站	54.2	12	0.25	0.90(1~2 m;22:00)	全天
	雅布赖山站	50.0	15	0.08	0.19(2~4 m;04:00)	22:00至次日06:00
冬季	沙山站	66.7	12	0.08	0.18(1~2 m;06:00)	全天
	湖边站	72.9	15	0.17	0.50(1~2 m;20:00)	18:00至次日12:00
	雅布赖山站	66.7	15	0.25	0.59(2~4 m;06:00)	20:00至次日10:00

沙山站四季比湿廓线均呈现多层结构,在4 m高度处出现一个极小值,4 m高度以下比湿随高度升高而减小,4 m高度以上比湿随高度升高而增大。全天在4 m以上高度层均出现较轻微的逆湿现象,4~8 m逆湿最为明显,各时次差异较小,四季全天逆湿梯度分别为0.02、0.04、0.04、0.01  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$ 。

春、夏季,雅布赖山站比湿廓线呈现出与沙山站相似的多层结构,全天逆湿梯度分别约为0.01、0.02  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$ 。相比之下,湖边站由于邻近水体,蒸发源充足,比湿廓线结构更为均匀,在02:00—08:00也观测到微弱逆湿,春季2 m以上出现逆湿,各层全天逆湿梯度约为0.01  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$ ,夏季8 m以上出现逆湿,逆湿梯度约为0.004  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$ 。

秋季,湖边站8 m以上在10:00—18:00存在微弱逆湿,逆湿梯度为0.002  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$ ,而在雅布赖山站夜间(02:00—08:00)2 m高度处出现极大值,2 m高度以下比湿随高度升高而增大,1~2 m高度层存在明显逆湿,逆湿梯度约为0.06  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$ 。

冬季,湖边站与雅布赖山站比湿廓线出现明显的昼夜差异,湖边站夜间(00:00—08:00)2 m以上出现逆湿,逆湿时间持续较短。雅布赖山站夜间在2 m以上,白天4 m以上出现逆湿。同其他季节相比,湖边、雅布赖山站冬季逆湿均较弱,各层逆湿梯度分别约为0.01、0.004  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$ 。

逆湿是干旱半干旱区近地层特有的现象<sup>[42]</sup>,不同地区逆湿出现时间、拐点与高度存在差异。塔克

拉玛干沙漠北缘哈德地区春季逆湿拐点出现在1 m,冬季则在2 m<sup>[40]</sup>,南缘秋季在10 m以上、冬季在2 m以上出现逆湿<sup>[43]</sup>。鼎新戈壁各季节4 m以下均出现逆湿现象<sup>[44]</sup>。本研究同样发现巴丹吉林沙漠不同下垫面逆湿频率、高度、强度和出现时间存在明显差异(表3),其形成过程受下垫面热力性质、地形、湍流混合强弱及局地环流共同影响。沙山站四季均在4 m以上持续出现逆湿,这与高大沙山独特的温度层结及局地水汽循环相关。沙山站在2~4 m这一高度层内湍流混合作用强,可将地表水汽快速输送至上层,使4 m以下比湿显著降低,在4 m以上湍流逐渐减弱,加之夜间裸沙地表辐射冷却迅速形成稳定层结,使得上层水汽扩散受限。此外,因站点邻近湖泊,白天湖风带来的湿润平流可在上层累积<sup>[45]</sup>,使得逆湿在全天均较易维持。

湖边站逆湿的形成受湖-陆热力差异及局地湖陆风环流影响。湖泊蒸发作用强烈且比热容大<sup>[46]</sup>,白天湖区气流辐散下沉,夜间辐合上升,形成次级环流<sup>[47]</sup>。夜间湖面蒸发产生的湿空气被抬升至离地面一定高度后水平输送至湖岸,由于湖滨稀疏植被具有一定阻力,近地层(1~2 m)湍流混合受到抑制,限制水汽向下扩散,因此在春、冬季夜间2 m以上易形成逆湿。夏、秋季由于湖泊蒸发旺盛,湿空气可随弱上升气流扩散至更高高度,使逆湿抬升至8 m以上,但强度相对较弱。

雅布赖山站逆湿与沙山站的强湍流调控、湖边

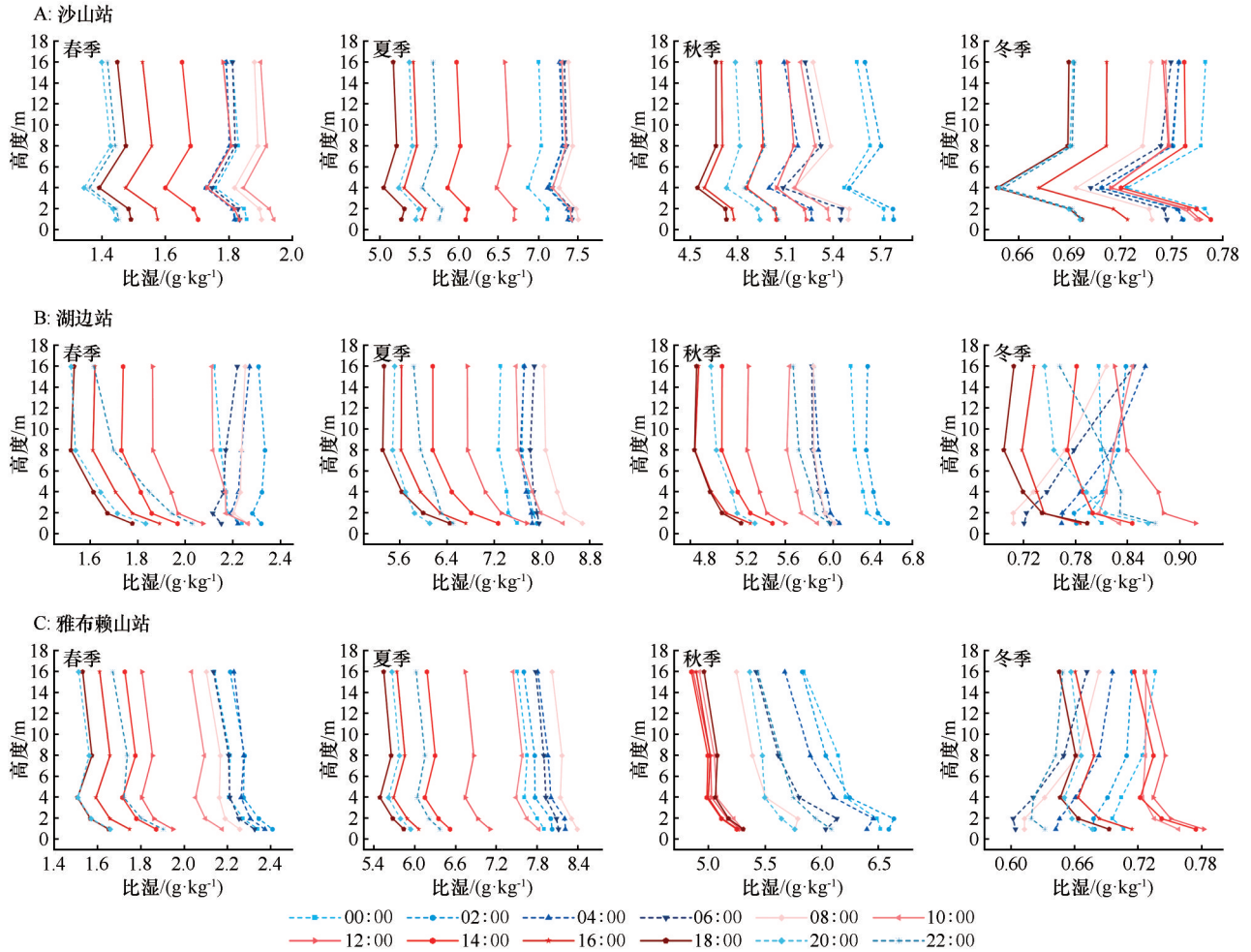


图6 沙山站(A)、湖边站(B)和雅布赖山站(C)四季典型晴天比湿廓线

Fig.6 Seasonal specific humidity profiles on typical clear days at the Sand Dune Station (A), the Lakeside Station (B), and the Yabulai Mountain Station (C)

站的湖陆风主导不同。该站夜间冷空气易在丘间积聚,削弱近地面湍流混合作用,使水汽扩散受到抑制而在特定高度层(4~8 m)堆积。冬季整体气温低,大气稳定度高,近地面冷空气积聚效应最显著,全天均能观测到逆湿,白天4~8m、夜间2m以上高度出现逆湿。秋季逆湿出现频率最低,夜间1~2 m、白天4~8 m高度观测到逆湿。

### 3 结论

巴丹吉林沙漠不同下垫面近地层风速日变化一致,白天高,夜间低。夜间因逆温形成,大气层结稳定,风切变增大。沙山站因地形开阔且动力扰动强烈,平均风速最高( $3.05 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ),风速随高度变化最符合幂函数关系( $R^2=0.9758$ ),而受植被阻滞和地形影响的湖边站与雅布赖山站,则更符合风速梯度随高度递减的指数函数关系。

近地层温度湖边站>沙山站>雅布赖山站,昼夜差异显著。夜间普遍出现逆温,冬季逆温最强、频率最高。沙山站2~4 m高度存在超绝热层,夜间4 m以上常呈近似等温或逆温分布,湖边站和雅布赖山站夜间1~16 m高度形成逆温层,大气层结更为稳定。

近地层比湿湖边站>雅布赖山站>沙山站,季节变化为夏季>秋季>春季>冬季。本研究在巴丹吉林沙漠多站点均观测到逆湿现象,其垂直分布与强度因下垫面不同存在差异,沙山站四季逆湿出现在4 m以上;湖边站逆湿高度随季节变化(春、冬季在2 m以上,夏、秋季在8 m以上);雅布赖山站逆湿常见于4~8 m高度层,冬季全天可见。

相较于塔克拉玛干沙漠,巴丹吉林沙漠近地大气边界层的观测研究较少,多为单点或短期观测。本研究利用多站点数据资料开展对比分析,但观测高度仅覆盖1~16 m,且缺少地表辐射资料 and 三维超

表3 不同下垫面四季典型晴天逆湿数据统计

Table 3 Statistics of seasonal specific humidity inversions on typical clear days over different underlying surfaces

季节	站点	逆湿频率 /%	最大逆湿层 厚度/m	逆湿拐点 高度/m	平均逆湿强度 /(g·kg <sup>-1</sup> ·m <sup>-1</sup> )	逆湿出现主要时段
春季	沙山站	25.0	4	4	0.020	全天
	湖边站	29.2	14	2	0.007	02:00—08:00
	雅布赖山站	22.9	4	4	0.008	全天
夏季	沙山站	43.8	4	4	0.030	全天
	湖边站	16.7	8	8	0.004	00:00—06:00;14:00—20:00
	雅布赖山站	18.8	4	4	0.030	08:00至次日00:00
秋季	沙山站	33.3	4	4	0.030	全天
	湖边站	12.5	8	8	0.002	10:00—18:00
	雅布赖山站	14.6	4	2	0.030	02:00—08:00;14:00—18:00
冬季	沙山站	43.8	12	4	0.006	全天
	湖边站	45.8	15	2	0.006	00:00—10:00;14:00—18:00
	雅布赖山站	56.3	14	2	0.004	全天

声风等湍流通量数据。未来可通过增加观测高度并结合数值模拟,进一步揭示不同下垫面边界层结构及地-气相互作用规律。

#### 参考文献:

- [1] 张建涛,王敏仲,何清,等.塔克拉玛干沙漠腹地夏季夜间低空急流变化特征[J].中国沙漠,2020,40(5):89-100.
- [2] 车军辉,赵平,史茜,等.大气边界层研究进展[J].地球物理学报,2021,64(3):735-751.
- [3] 朱从祯,罗继成,王敏仲,等.塔克拉玛干沙漠腹地夏季夜间稳定边界层特征及其对沙尘气溶胶浓度的影响[J].中国沙漠,2024,44(5):1-12.
- [4] 陈亚宁,李玉朋,李稚,等.全球气候变化对干旱区影响分析[J].地球科学进展,2022,37(2):111-119.
- [5] 张强,黄荣辉,王胜,等.西北干旱区陆面过程观测野外试验(NWC-ALIEX)及其研究进展[J].地球科学进展,2005,20(4):427-441.
- [6] Huang J P, Yu H P, Dai A G, et al. Drylands face potential threat under 2 °C global warming target[J]. Nature Climate Change, 2017,7(6):417-422.
- [7] 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.
- [8] Marsham J H, Parker D J, Grams C M, et al. Observations of mesoscale and boundary-layer circulations affecting dust uplift and transport in the Saharan boundary layer[J]. Atmospheric Chemistry and Physics Discussions, 2008,8(3):8817-8846.
- [9] Cuesta J, Edouard D, Mimouni M, et al. Multiplatform observations of the seasonal evolution of the Saharan atmospheric boundary layer in Tamanrasset, Algeria, in the framework of the African Monsoon Multidisciplinary Analysis field campaign conducted in 2006[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2008,113(D23):D00C07.
- [10] Yang G C, Shu W, Wang M Z, et al. Analysis of height of the stable boundary layer in summer and its influencing factors in the Taklamakan Desert hinterland[J]. Remote Sensing, 2024,16(8):1417.
- [11] 陈阳,吕萍,曹敏,夏子书,等.腾格里沙漠湖泊群小气候特征及其对气候变化的响应[J].中国沙漠,2024,44(2):231-238.
- [12] 吕萍,董治宝,张正偲,等.腾格里沙漠近地面层风、气温、湿度特征[J].中国沙漠,2009,29(5):977-981.
- [13] 霍文,顾军明,杨兴华,等.古尔班通古特沙漠边界层气象要素廓线观测分析[J].沙漠与绿洲气象,2015,9(1):17-23.
- [14] Mamtimin A, Wang Y, Sayit H, et al. Seasonal variations of the near-surface atmospheric boundary layer structure in China's Gurbantünggüt Desert[J]. Advances in Meteorology, 2020(1):6137237.
- [15] Dong Z B, Wang T, Wang X M. Geomorphology of the megadunes in the Badain Jaran Desert[J]. Geomorphology, 2004,60(1/2):191-203.
- [16] Niu Z M, Wang N A, Meng N, et al. Contribution of lake-dune patterning to the dune height of mega-dunes in the Badain Jaran Sand Sea, Northern China[J]. Remote Sensing, 2021,13(23):4915.
- [17] 张振瑜,王乃昂,马宁,等.近40 a巴丹吉林沙漠腹地湖泊面积变化及其影响因素[J].中国沙漠,2012,32(6):1743-1750.
- [18] 王乃昂,宁凯,李卓仑,等.巴丹吉林沙漠全新世的高湖面与泛湖期[J].中国科学:地球科学,2016,46(8):1106-1115.
- [19] 李建刚,奥银焕,李照国,等.巴丹吉林沙漠夏季大气边界层结构[J].中国沙漠,2014,34(2):488-497.
- [20] 郑新倩,杨帆,李超凡,等.巴丹吉林沙漠北缘拐子湖流沙下垫面近地层湍流强度和陆面过程特征[J].中国沙漠,2019,39

- (4):103-112.
- [21] Han B, Lü S H, Ao Y H. Development of the convective boundary layer capping with a thick neutral layer in Badanjilin: observations and simulations[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2012, 29(1): 177-192.
- [22] 赵采玲, 吕世华, 韩博, 等. 夏季巴丹吉林沙漠残余层与深厚对流边界层的关系研究[J]. *高原气象*, 2016, 35(4): 1004-1014.
- [23] 许兴斌, 王乃昂, 梁晓燕, 等. 巴丹吉林沙漠高大沙山近地层温湿廓线与能量交换特征[J]. *中国沙漠*, 2018, 38(6): 1303-1312.
- [24] 朱金峰, 王乃昂, 陈红宝, 等. 基于遥感的巴丹吉林沙漠范围与面积分析[J]. *地理科学进展*, 2010, 29(9): 1087-1094.
- [25] 牛震敏. 高大沙山的形成机制与演化模拟[D]. 兰州: 兰州大学, 2022.
- [26] 李万彪. 大气物理-热力学与辐射基础[M]. 北京: 北京大学出版社, 2010: 174-187.
- [27] 银燕, 刁一伟, 刘超, 等. 大气物理学[M]. 北京: 气象出版社, 2018: 11-15.
- [28] 张洵赫, 王乃昂, 赵力强, 等. 基于MODIS数据的巴丹吉林沙漠冬季暖岛空间分布特征及其研究[J]. *兰州大学学报(自然科学版)*, 2015, 51(2): 180-185.
- [29] 梁晓燕. 巴丹吉林沙漠湖泊区暖岛效应研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2020.
- [30] 缪启龙, 王晶, 何清, 等. 南疆沙漠腹地大气边界层气象要素廓线分析[J]. *气象与减灾研究*, 2009, 32(2): 6-10.
- [31] 李汉林, 何清, 金莉莉. 塔克拉玛干沙漠腹地和北缘典型天气近地层风速廓线特征[J]. *干旱气象*, 2020, 38(6): 965-978.
- [32] 赵鸣, 苗曼倩, 王彦昌. 边界层气象学教程[M]. 北京: 气象出版社, 1991: 19-58.
- [33] 毛东雷, 雷加强, 曾凡江, 等. 策勒不同下垫面风速廓线时空差异研究[J]. *干旱区资源与环境*, 2014, 28(11): 171-177.
- [34] 雷杨娜, 孙娴, 张侠, 等. 陕北黄土高原复杂地形风速廓线特性[J]. *可再生能源*, 2015, 33(9): 1345-1350.
- [35] 阿吉古丽·沙依提, 王远弘, 王豫, 等. 东疆黑戈壁近地大气边界层气象要素季节变化规律[J]. *沙漠与绿洲气象*, 2020, 14(3): 131-136.
- [36] 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.
- [37] 魏文寿, 王敏仲, 何清, 等. 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[J]. *科学通报*, 2008, 53(增刊II): 18-24.
- [38] 蒋兴文, 李跃清, 王鑫, 等. 青藏高原东部及下游地区冬季边界层的观测分析[J]. *高原气象*, 2009, 28(4): 754-762.
- [39] 刘金青, 聂永喜, 周措毛. 黄河源地区近地面逆温层特征及形成原因分析[J]. *高原山地气象研究*, 2020, 40(2): 78-82.
- [40] 顾军明, 霍文, 艾力·买买提明, 等. 塔克拉玛干沙漠北缘近地层气象要素变化特征[J]. *干旱气象*, 2014, 32(2): 239-247.
- [41] 李家伦, 洪钟祥, 孙菽芬. 青藏高原西部改则地区大气边界层特征[J]. *大气科学*, 2000, 24(3): 301-312.
- [42] 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.
- [43] 付光祥, 何清, 王勇辉, 等. 塔克拉玛干沙漠南缘近地层风温湿廓线与能量交换特征[J]. *干旱区地理*, 2024, 47(1): 68-80.
- [44] 王慧, 胡泽勇, 马伟强, 等. 鼎新戈壁下垫面近地层小气候及地表能量平衡特征季节变化分析[J]. *大气科学*, 2008, 32(6): 1458-1470.
- [45] Lü P, Dong Z B, Shao T J, et al. Terrain-driven circulation around megadune-lake system in China's Badain Jaran Sand Sea [J]. *Geomorphology*, 2025, 473: 109633.
- [46] 胡文峰, 王乃昂, 赵力强, 等. 巴丹吉林沙漠典型湖泊湖气界面水-热交换特征[J]. *地理科学进展*, 2015, 34(8): 1061-1071.
- [47] 奥银焕, 吕世华, 韩博, 等. 巴丹吉林沙漠夏季近地层微气象特征分析[J]. *高原气象*, 2013, 32(6): 1682-1691.

## Vertical variations of near-surface meteorological elements over different underlying surfaces in the Badain Jaran Desert

Jiang Yan<sup>1</sup>, Wang Naiang<sup>1</sup>, Zhao Liqiang<sup>1</sup>, Meng Nan<sup>1,2</sup>, Liu Jinqiao<sup>1</sup>, Ye Hao<sup>1</sup>

(1. College of Earth and Environmental Sciences / Desert and Glacier Science Observation and Research Station, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China; 2. Department of Geography, Fuyang Normal University, Fuyang 311400, Anhui, China)

**Abstract:** Using near-surface atmospheric boundary layer gradient observations from three stations during 2024–2025, this study systematically investigates the seasonal characteristics of near-surface wind speed, air temperature, and specific humidity profiles under typical clear-sky conditions in the desert interior and along the southeastern margin of the Badain Jaran Desert. The principal findings are summarized as follows. (1) Across different underlying surfaces, near-surface wind speeds are consistently higher during the daytime and lower at night, with the nocturnal boundary layer characterized by stable stratification and intensified wind shear. Among the three sites, the wind speed profile at the Sand Dune Station exhibits the strongest agreement with a power-law formulation, whereas those at the Lakeside Station and the Yabulai Mountain Station are more accurately described by exponential functions. (2) Near-surface air temperature decreases in the order of Lakeside Station, Sand Dune Station, and Yabulai Mountain Station. Temperature profiles display pronounced diurnal variability, with the nocturnal near-surface atmosphere tending toward near-isothermal conditions or developing temperature inversions. The most intense inversions occur in winter, and the inversion layer heights at the Lakeside and Yabulai Mountain Stations are greater than those at the Sand Dune Station. (3) Near-surface specific humidity is highest at the Lakeside Station and lowest at the Sand Dune Station, with a clear seasonal ranking of summer greater than autumn greater than spring greater than winter. At the Sand Dune Station, humidity inversion occurs above 4 m throughout all seasons. At the Lakeside Station, humidity inversion is observed above 2 m during nighttime in spring and winter and above 8 m in summer and autumn. At the Yabulai Mountain Station, humidity inversion frequently appears within the 4–8 m layer, and it is observed throughout the entire day in winter. The research results provide fundamental data to support leading scientific conservation efforts for the Badain Jaran Desert World Heritage Site and to improve boundary layer parameterizations in regional numerical models, thereby deepening the understanding of the formation mechanisms of mega-dunes.

**Key words:** Badain Jaran Desert; near-surface atmospheric boundary layer; meteorological elements; profile structure