

DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2022.0137

ZHANG Mengxiao, WANG Yu, Ali Mamtimin, et al. Response of atmospheric boundary layer height to snow cover in winter in Gurbantunggut Desert and its surrounding areas[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2022, 44(5):1558–1569. [张梦肖, 王豫, 买买提艾力·买买提依明, 等. 古尔班通古特沙漠及周边区域冬季大气边界层高度对地表积雪的响应[J]. 冰川冻土, 2022, 44(5):1558–1569.]

古尔班通古特沙漠及周边区域冬季大气边界层高度对地表积雪的响应

张梦肖^{1,2,3,4,5}, 王 豫^{3,4,5}, 买买提艾力·买买提依明^{3,4,5}, 刘永强^{1,2},
高佳程^{3,4,5}, 肖婉秋^{1,2,3,4,5}, 温 聪^{3,4,5}, 宋美琪^{3,4,5},
艾力亚尔·艾海提^{3,4,5}, 王卫平^{1,2}, 孟湘尧^{1,2}

(1. 新疆大学 地理与遥感科学学院, 新疆 乌鲁木齐 830017; 2. 新疆大学 新疆绿洲生态自治区重点实验室, 新疆 乌鲁木齐 830017;
3. 中国气象局 乌鲁木齐沙漠气象研究所, 新疆 乌鲁木齐 830002; 4. 新疆塔克拉玛干沙漠气象国家野外科学观测研究站/
新疆沙漠气象与沙尘暴重点实验室, 新疆 乌鲁木齐 830002; 5. 中国气象局 塔克拉玛干沙漠气象野外科学试验基地/
中国气象局树木年轮理化重点实验, 新疆 乌鲁木齐 830002)

摘 要: 古尔班通古特沙漠是中国唯一冬季存在长期积雪的沙漠, 在此特殊地理环境下, 沙漠及周边区域冬季雪深和边界层高度的时空变化特征和相互关系尚未明确。本文利用1980—2019年SMMR (Scanning Multichannel Microwave Radiometer)、SSM/I (Special Sensor Microwave/Imager)、SSMIS (Special Sensor Microwave Imager/Sounder) 被动微波遥感雪深数据、古尔班通古特沙漠腹地雪深观测数据和ERA5再分析资料(the Fifth Generation ECMWF Reanalysis)边界层高度数据, 分析了沙漠及周边区域冬季雪深和边界层高度的时空变化特征与相互关系。结果表明: 古尔班通古特沙漠及周边区域冬季雪深年均值为8.45 cm, 整体呈现东北部和南部积雪较深, 其他区域积雪较浅并呈现出由沙漠中心区域向四周逐渐减少的特点, 雪深在古尔班通古特沙漠及其东北、南边的邻近区域呈升高趋势, 剩余地区呈下降趋势。古尔班通古特沙漠及周边区域冬季边界层高度年均值为105.54 m, 呈现东南部和西北部高, 中心沙漠区域、东北部、西南部较低的特点, 边界层高度在沙漠及周边区域升高而其他区域降低。古尔班通古特沙漠的冬季雪深和大气边界层高度时空变化整体呈负相关, 其中93.17%以上的沙漠区域呈负相关, 平均相关系数为-0.32, 最大相关系数绝对值为-0.58, 空间相关系数为-0.42 ($P < 0.05$)。

关键词: 古尔班通古特沙漠; 雪深; 大气边界层高度; 时空分布

中图分类号: P426.63⁵ **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0240(2022)05-1558-12

0 引言

大气边界层是对流层的最低层, 其变化直接影响地表和自由大气之间水汽、热量、动量以及污染物等交换过程^[1-4], 对天气和气候有重要影响^[5]。边界层高度是大气边界层的一个重要物理参数^[6-8], 在描述低层大气特征, 评估各种大气过程、天气以及空气质量预报中, 扮演重要角色^[9-10], 并随时间

和空间不断变化^[11-12]。众多学者^[13-15]研究发现, 1958—2013年我国西北地区的边界层高度呈下降趋势, 冬季以增加趋势为主。

积雪深度的变化对全球能量平衡以及水文循环具有显著影响^[16], 是积雪气候效应、水资源管理、水文预报及监测、陆面过程、评估雪灾发生和等级划分的重要参数^[17]。积雪深度变化存在明显的区

收稿日期: 2021-12-28; 修订日期: 2022-04-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(41875023); 中央级公益科研院所基本科研业务费项目(IDM2021005; IDM2021001); 国家重点研发计划(2019YFC1510505)资助

作者简介: 张梦肖, 硕士研究生, 主要从事陆面过程参数化及模拟, 融雪洪水预警决策支持研究. E-mail: 1271535867@qq.com

通信作者: 刘永强, 教授, 主要从事陆面过程参数化及模拟, 融雪洪水预警决策支持研究. E-mail: lyqxju@163.com

域性差异,1980—2005年,纬度大于 40°N 的地区冬季最大积雪深度和平均积雪深度增加,而纬度小于 40°N 的地区积雪深度则呈现下降的趋势^[18]。多位学者^[19–22]发现,1957—2014年中国西北部地区积雪深度呈显著上升趋势,而Huang等^[23]发现,2000—2014年中国西北部地区积雪深度呈下降趋势,但在新疆北部区域积雪深度呈上升趋势。

古尔班通古特沙漠是我国第一大固定/半固定沙漠,其大气边界层受地形和地表差异的影响,近地大气边界层的气象要素和下垫面类型呈现明显的季节性变化,进而影响边界层高度^[24–26]。以往针对其大气边界层的研究多基于单点数据分析,对边界层高度的影响研究则多集中在太阳辐射、风速、湿度、地形因素上^[27–28]。古尔班通古特沙漠是中国少有的冬季具有稳定积雪覆盖的沙漠,稳定积雪深度约为15 cm左右^[29]。针对该沙漠积雪的研究多集中在雪深对季节性冻土^[30–31]、沙尘天气^[32]、植被生长^[33–35]的影响及雪深的特征和影响因素上^[36–38],影响因素的研究多集中于气温、降水、高程、坡度和坡向等气候因子和地形因子^[39–42],特别是李杨等^[32]研究发现,由于积雪反射率极高,使沙漠地表辐射冷却强烈,形成冷源性下垫面和近地层逆温层结,增加了大气稳定度。除此之外,鲜少有人讨论古尔班通古特沙漠及周边区域冬季边界层高度对积雪的响应。积雪下垫面影响沙漠的动力和热力,其作用又通过边界层高度传递到自由大气,边界层演变方面在此区域有着特殊的规律,并对区域气候产生着重要的影响。因此,研究古尔班通古特沙漠及周边区域边界层高度对积雪深度的响应尤为重要。

目前大气边界层的研究资料主要来自探空、星载遥感以及再分析数据等^[43],古尔班通古特沙漠腹地人迹罕至,获取长时间序列的边界层高度探空资料非常困难^[44],前期研究大多基于少数站点数据或短期探空资料数据的分析,对沙漠大气边界层长期变化特征的研究甚少,遥感各类资料丰富,在边界层领域具有广阔的应用前景,但星载遥感探测资料对于边界层研究来说其垂直分辨率仍不够高^[45],再分析数据的不断更新,从时空上弥补了观测数据的不足,对进一步开展这一区域边界层高度的研究,提供了更好的基础^[46]。ERA5(the Fifth Generation ECMWF Reanalysis)是欧洲中期天气预报中心ECWMF(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts)的再分析产品,具有长时间序列、高时空分辨率的优点^[47],研究显示,

ERA5资料在新疆有较好的适用性^[48],另外,评估5种再分析资料在东疆地区的适用性发现,ERA5的适用性最高^[49]。因此,ERA5再分析数据更适用于开展古尔班通古特沙漠大气边界层高度变化研究。

古尔班通古特沙漠气象站点少,获取大区域长时间序列的雪深资料非常困难,遥感是估算大尺度积雪时空变化的唯一有效的方法^[50]。被动微波遥感可以透过云层,全天候地提供地表雪深信息并且具有高时间分辨率^[51],利用来自美国国家雪冰数据中心(NSIDC)处理的SMMR(1979—1987年),SSM/I(1987—2007年)和SSMIS(2008—2019)逐日被动微波亮温数据(EASE-Grid)反演得到的长时间序列积雪数据集,精度较好^[52],目前已有研究者使用该数据集在不同区域进行了大尺度长时间序列的气候分析^[53]、水文模拟^[54–55]、雪灾风险区划^[56]、积雪时空变化及影响因素^[57]等研究并取得了相对满意的结果。

本文利用2014—2019年SMMR、SSM/I、SSMIS雪深数据、欧洲中心ERA5再分析资料边界层高度数据和古尔班通古特沙漠陆气相互作用观测站点实测雪深数据,分析古尔班通古特沙漠及周边区域冬季积雪深度和边界层高度的时空分布特征以及边界层高度对积雪深度变化的响应,为理解该沙漠积雪对区域大气边界层影响提供参考。

1 研究区概况

研究区(图1)位于天山以北的古尔班通古特沙漠及周边地区,地理范围为 $42^{\circ}10'\sim 49^{\circ}13'\text{N}$, $81^{\circ}18'\sim 91^{\circ}53'\text{E}$,面积 $3.10\times 10^5\text{ km}^2$,海拔180~5252 m,整个地区被阿尔泰山山脉和天山山脉包围,内有盆地、河流、湖泊、戈壁、沙漠和草原绿洲,地貌轮廓非常明显^[58]。古尔班通古特沙漠是中国第二大沙漠,地处新疆北部,位于准噶尔盆地中央,西接伊犁河谷,南邻天山山脉,北靠阿尔泰山^[59],地理范围为 $44^{\circ}15'\sim 46^{\circ}50'\text{N}$, $84^{\circ}50'\sim 91^{\circ}20'\text{E}$,面积 $4.88\times 10^4\text{ km}^2$,海拔300~600 m^[60]。该沙漠以典型的大陆性温带荒漠气候为主,风向以东北风和西风为主,夏季干热少雨,冬季严寒多雪,是我国唯一冬季存在长期积雪的沙漠^[61–62]。

2 数据资料与分析方法

2.1 数据来源与处理

2.1.1 雪深数据

雪深实测数据,来源于古尔班通古特沙漠陆—

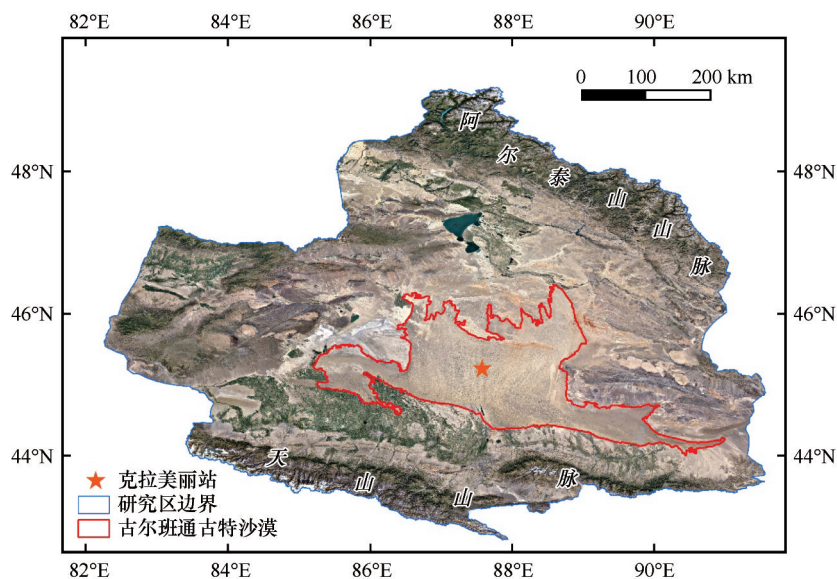


图1 研究区位置示意图

Fig. 1 Location of the study area

气相互作用观测试验站(简称克拉美丽站, $45^{\circ}14' N$, $87^{\circ}35' E$, 海拔 531 m, 图 1)。该观测试验站是中国气象局乌鲁木齐沙漠气象研究所于 2012 年在古尔班通古特沙漠腹地克拉美丽地区所建。观测系统主要包括涡动相关系统、梯度探测系统和辐射观测系统^[63]。本研究数据来自梯度观测系统中雪深实测数据(美国 Campbell Scientific 公司, 型号 SR50A-L, 安装高度 1.5 m, 采集器型号 CR1000), 采集频率为 1 Hz, 并输出 10 s、1 min、30 min、1 d 数据。数据时间段为 2013—2018 年。

雪深产品数据中国雪深长时间序列数据集, 来源于国家青藏高原科学数据中心(<http://data.tpcd.ac.cn/>)。该数据集是车涛等^[64]、Dai 等^[65-66]利用 SMMR、SSM/I、SSMIS 被动微波遥感数据, 在 Chang 算法基础上, 针对中国地区修正的算法, 反演得到雪深数据。数据采用 EASE-Grid 和地理坐标投影 2 种投影方式, 时间分辨率为 1 d, 空间分辨率为 25 km, 积雪深度单位为 cm。本研究选取数据集时间范围为 1980—2020 年, 每年选取冬季 12 月至次年 2 月的雪深数据代表本年冬季积雪雪深。

2.1.2 边界层高度数据

边界层高度数据, 来源于哥白尼气候数据库(<https://cds.climate.copernicus.eu/>), 采用分辨率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 的 ERA5 再分析资料。数据采用常规经纬度网格投影方式, 时间分辨率为 1 h, 空间分辨率为 0.25° , 数据单位为 m。本研究选取数据的时间范围为 1980—2020 年, 每年选取冬季 12 月至次年 2

月的边界层高度数据代表本年冬季边界层高度。

2.2 研究方法

2.2.1 趋势分析法

为研究古尔班通古特沙漠及周边区域雪深和边界层高度变化趋势, 采用基于像元的一元线性回归分析法计算其变化特征, 单个像元多年线性回归方程的趋势线斜率 *slope* 即为年际变化速率^[67-68]。以时间为自变量, 雪深、边界层高度为因变量。如果 *slope* 是正值, 表示积雪深度或边界层高度呈增加趋势, 如果 *slope* 是负值, 则说明积雪深度或边界层高度呈下降趋势。

2.2.2 Pearson 相关性分析

皮尔森相关系数 (Pearson correlation coefficient, *R*) 可以直观反映两个变量线性相关的密切程度^[69]。*R* 为正数, 表示二者正相关; 反之, 则表明二者负相关, 且 *R* 的绝对值越大表明二者相关性越强。

2.3 雪深产品数据和再分析资料的适用性评估

为了评估中国 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 长时间序列雪深数据集在古尔班通古特沙漠及周边区域的适用性, 利用克拉美丽站 2013—2018 年每年 12 月至次年 2 月的实测雪深数据对遥感雪深产品进行检验, 以此评估该产品数据在沙漠区域的适用性。当两种数据相关系数达到 0.9 以上时, 认为基于遥感的积雪数据产品可用于区域积雪时空变化特征研究。由图 2 可知, 克拉美丽站实测雪深数据和青藏高原科学数据中心的积雪产品相关性相当高, 呈现显著的正相关, 相关系数达 0.93, 并通过 $P < 0.05$ 置信验证, 由

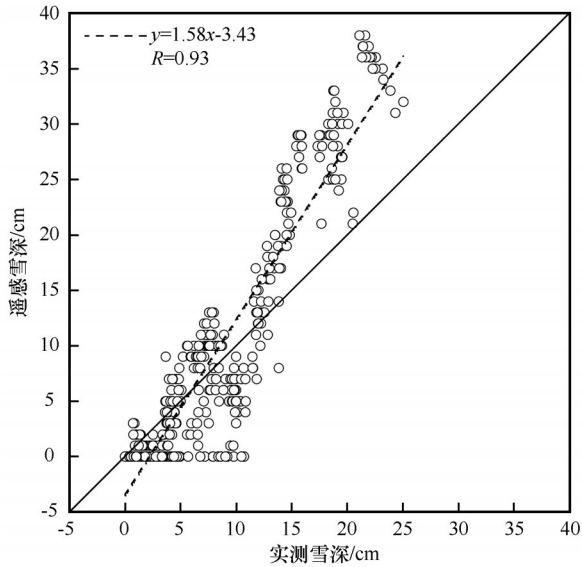


图2 雪深产品在研究区的适用性评估

Fig. 2 Applicability evaluation of snow depth products in the study area

此断定该数据产品可用于古尔班通古特沙漠地区尺度的积雪时空分布规律以及大气边界层高度相关性研究。图2中显示被动微波遥感雪深较实测雪深偏大,原因可能与沙漠中站点稀少有关,仅克拉美丽一个站点,未选用多个站点进行适用性评估,实测数据代表性有误差;其次,因为被动微波遥感数据的空间分辨率较低,把一定区域内积雪粒径和密度看作是相同的值,造成被动微波遥感反演的雪深存在误差^[70];雪中的含水量太大、水体的影响、积雪粒径的变化或积雪表面融化等引起的散射特性

改变也会造成 SMMR、SSM/I、SSM/I/S 被动微波遥感数据反演的雪深与地面实测的存在误差;Chang 的微波估计方法存在薄雪时估计过高的问题^[71];理论上讲,植被也会影响雪层的微波辐射特征^[50],克拉美丽站存在稀疏植被,影响遥感数据的准确性。

由王豫等^[72]研究结果可以看出,ERA5 再分析资料与该沙漠腹地实测探空资料有很好的一致性,两者相关系数达 0.98,认为 ERA5 再分析资料的边界层高度产品可用于该区域大气边界层时空演变规律研究。

3 结果与讨论

3.1 冬季雪深时空变化特征

对 1980—2019 年冬季雪深进行算数平均,得到年平均值,分析 40 年研究区冬季积雪深度整体变化趋势。从图 3 和图 4 可以看出,研究区冬季雪深随时间变化幅度较大,多年冬季平均雪深约为 8.45 cm,最大与最小平均雪深分别出现在 2016 年和 2007 年,分别为 12.84 cm 和 5.02 cm。研究区内部的古尔班通古特沙漠地区,冬季雪深变化幅度也较大,多年冬季平均雪深约为 7.68 cm,最大与最小平均雪深分别出现在 1993 年和 2014 年,分别为 16.84 cm 和 2.51 cm。总体上,研究区冬季雪深呈现不显著的微弱增加趋势,以 $0.02 \text{ cm} \cdot \text{a}^{-1}$ ($R^2=0.012$, $P=0.507$) 的速率增加,沙漠地区冬季雪深同样呈不显著的增加趋势,以 $0.09 \text{ cm} \cdot \text{a}^{-1}$ ($R^2=0.068$, $P=0.104$) 的速率增加。

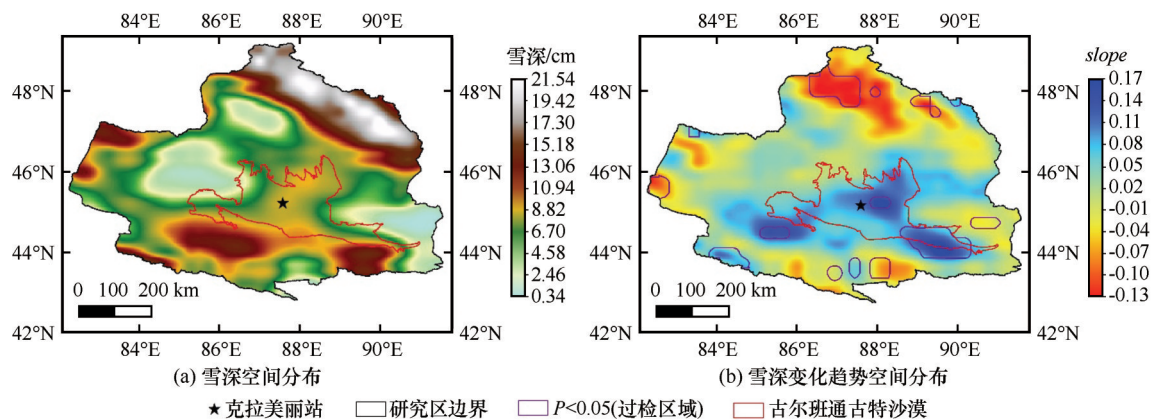


图3 1980—2019年冬季平均雪深的空间分布特征及变化趋势空间分布
Fig. 3 Spatial distribution (a) and trend (b) of average snow depth in winter during 1980 to 2019

根据图3(a)可知,研究区冬季雪深空间分布具有明显的地区差异,研究区东北部和南部积雪较深,其他区域积雪较浅并呈现出由沙漠中心区域向四周逐渐减少的特点。沙漠地区的冬季雪深空间

分布表现为沙漠中心及南北部的竖直区域积雪较深而东西部沙漠边缘地区积雪较浅。从研究区雪深空间分布可以看出,研究区 29.74% 的区域雪深小于 6 cm;研究区 51.63% 的区域雪深在 6~12 cm,

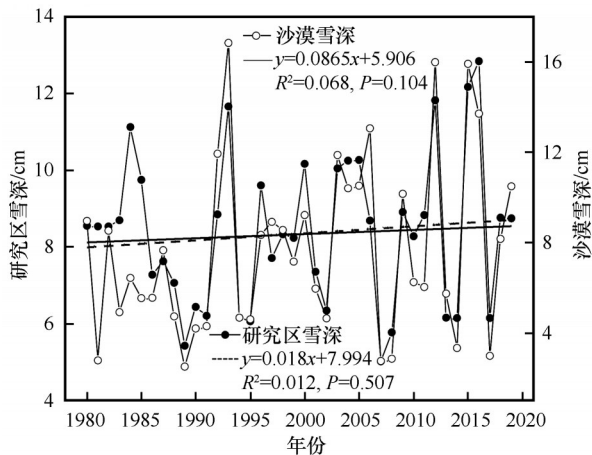


图4 1980—2019年冬季平均雪深的变化趋势

Fig. 4 Variation and trend of average winter snow depth during 1980 to 2019

主要分布于古尔班通古特沙漠、天山北坡和塔城地区西部;研究区18.90%的区域雪深大于12 cm,主要分布在古尔班通古特沙漠南缘、阿尔泰山山脉及研究区西部地区。在古尔班通古特沙漠地区,79.21%的区域雪深在6~12 cm,20.79%的区域雪深小于6 cm,零星分布在沙漠东西缘。雪深空间分布特征与地形地貌、温度变化和降水来源有很大关联,水分主要来源于北冰洋,造成北部地区降水偏多而南部地区降水偏少,同时东北部雪深高值区位于高海拔的阿尔泰山山脉地区,海拔高积雪不易融化,每年积雪期积累导致雪深较高;南部雪深高值区分布于植被农田多的区域,雪深大的现象可能与当地近年来植被覆盖度的增加减缓了积雪融化有关。

根据研究区冬季年均雪深变化趋势空间分布[图3(b)]可知,研究区64.77%的区域雪深呈现增加趋势,主要分布在研究区中心偏南方向的古尔班通古特沙漠及其东北部、南部的临近区域;而研究区35.23%的区域雪深呈现下降趋势,分布于研究区北部的阿尔泰山山脉、南部的天山山脉和西部区域。在古尔班通古特沙漠地区,99.86%的区域雪深呈现增加趋势,分布于沙漠大部分区域;仅0.14%的区域雪深呈现下降趋势,零星分布于沙漠的西北部。研究区10.12%的区域积雪深度呈显著性变化,主要分布于研究区北部的阿尔泰山山脉、南部天山山脉边缘地区、古尔班通古特沙漠东南区域及沙漠西南方向临近区域。

3.2 冬季边界层高度时空变化特征

对1980—2019年冬季边界层高度进行算数平均,得到年平均值,分析40年研究区冬季边界层高度整体变化趋势。从图5和图6可以看出,整个研究区冬季边界层高度随时间变化幅度较大,多年冬季平均边界层高度约为105.54 m,最大与最小平均高度分别出现在2014年和1986年,分别为126.38 m和82.44 m。沙漠地区冬季边界层高度变化幅度也较大,多年冬季平均高度约为102.88 m,最大与最小平均高度分别出现在1994年和1986年,分别为120.68 m和72.56 m。总体上,研究区冬季边界层高度呈极显著增长趋势,以 $0.44 \text{ m} \cdot \text{a}^{-1}$ ($R^2=0.232$, $P<0.01$)的速率升高,沙漠地区冬季边界层高度呈不显著的微弱增长趋势,以 $0.06 \text{ m} \cdot \text{a}^{-1}$ ($R^2=0.005$, $P=0.667$)的速率升高。

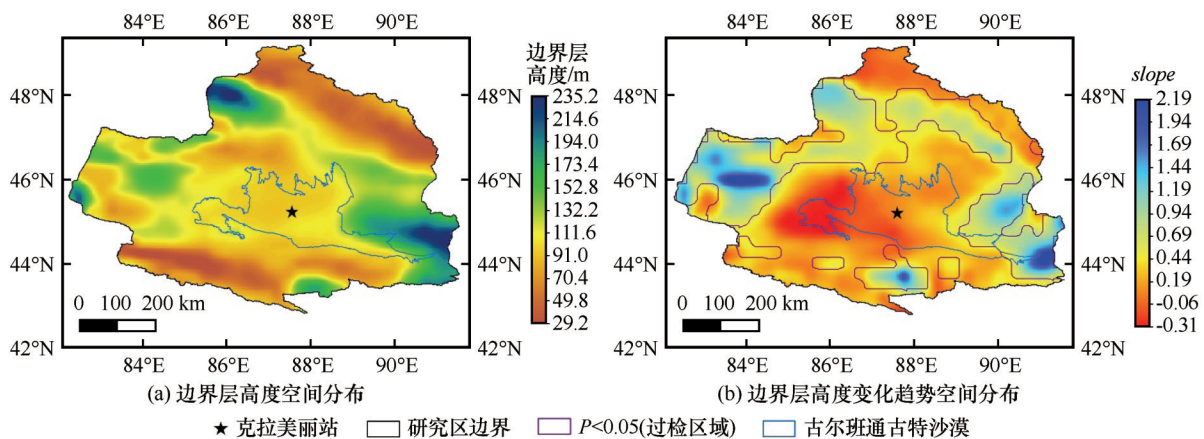


图5 1980—2019年冬季边界层高度的空间分布特征及变化趋势空间分布

Fig. 5 Spatial distribution (a) and trend (b) of boundary layer height in winter during 1980 to 2019

根据图5(a)可知,研究区边界层高度空间分布具有明显的地区差异,研究区的东南部和西北部高

度较大,中心沙漠区域、东北部、西南部高度较浅。沙漠地区冬季边界层高度空间分布呈现出西部较

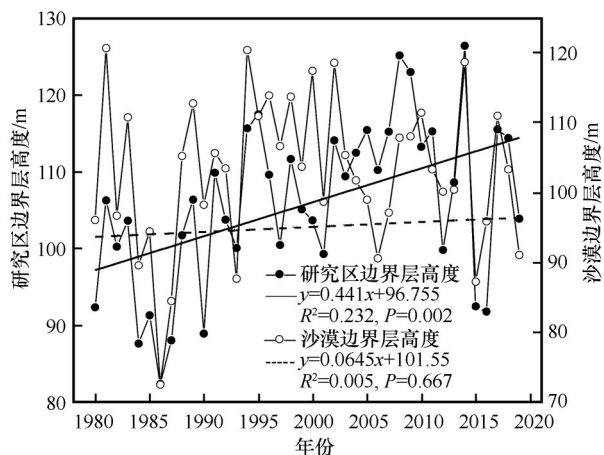


图6 1980—2019年冬季边界层高度的变化趋势

Fig. 6 Variation and trend of winter boundary layer height during 1980 to 2019

低、东部沙漠边缘地区较高的特点。从边界层高度空间分布可以看出,研究区47.32%的区域边界层高度小于100 m;研究区40.97%的区域高度在100~150 m,研究区11.71%的区域高度大于150 m。而在沙漠地区,40.56%的区域边界层高度小于100 m,57.09%的区域高度在100~150 m,仅2.35%的区域高度大于150 m,零星分布在沙漠东缘。边界层高度空间分布特征与温度、风速和湿度关联密切,边界层高度较高值分布在研究区的西北、东南部地区,极有可能是因为当地常年风速较大,湍流活动剧烈,使得边界层高度较高,沙漠地区南缘区域同样是这个原因,风速大、积雪少、边界层高度高,图5(a)底部中间的绿色区域为乌鲁木齐市南部,其边界层高度较高可能是因为热岛效应^[73]。

根据研究区冬季年均边界层高度变化趋势空间分布[图5(b)]可知,研究区86.80%的区域边界层高度呈现增长趋势,分布于古尔班通古特沙漠及周边区域;而研究区13.20%的区域边界层高度呈现下降趋势,主要分布在研究区北部的阿尔泰山山脉、南部地区和古尔班通古特沙漠的西部区域。在沙漠地区,63.95%的区域边界层高度呈现增长趋势,分布于沙漠东部;而36.05%的区域边界层高度呈现下降趋势,主要分布于沙漠的西部和南部区域。研究区31.64%的区域边界层高度呈显著性变化,主要分布于研究区北部阿尔泰山山脉、南部天山山脉和东部区域;不显著变化的区域主要分布在沙漠中心区域及其西部和东南部。

3.3 冬季雪深和边界层高度的相关性

在栅格尺度上计算1980—2019年古尔班通古特沙漠地区多年冬季平均雪深和边界层高度的相关系数,分析比较其相关性及其空间分布规律(图7)。沙漠93.17%的区域冬季雪深与边界层高度呈负相关,仅6.83%的区域呈正相关,平均相关系数为-0.32,最高达-0.58,即积雪深度增加,边界层高度会降低,冬季边界层高度受雪深变化的影响显著。从相关系数的空间分布可以看出,沙漠地区61.76%的区域相关系数在-0.6~-0.3,主要分布于沙漠的北部和西部区域;沙漠地区31.41%的区域相关系数在-0.3~0,分布于沙漠的南部和东南部区域;沙漠区域仅6.83%的区域相关系数在0~0.11,分布于沙漠东南角。沙漠地区67.96%的区域冬季雪深和边界层高度的相关性通过0.05置信验证,主要分布在克拉美丽站东侧及古尔班通古特沙漠东南部。

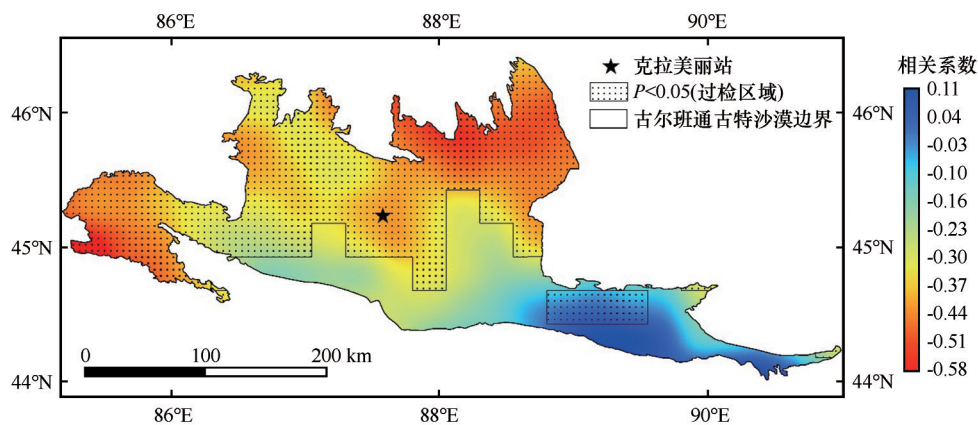


图7 1980—2019年冬季年均雪深和边界层高度的相关性

Fig. 7 Correlation between average winter snow depth and boundary layer height during 1980 to 2019

从图8可以看出,1980—2019年每年沙漠区域平均的冬季雪深和边界层高度相关系数为

-0.42 ($P < 0.05$),呈现明显的负相关变化趋势。冬季大气层结较为稳定,大气边界层高度较低,积

雪下垫面通过影响空气温度来影响高空自由大气变化,从而引起大气边界层高度的变化。从图3(a)和图5(a)可以看出,当积雪深度在0.3~21.5 cm时,研究区的冬季大气边界层高度保持在29~235 m,雪深高值区亦是边界层高度低值区。图8显示,1980—2019年随着雪深增加时,边界层高度呈现降低趋势,雪深降低时边界层高度呈现增长趋势。

为进一步探讨雪深与边界层高度的关系,根据图8中1980—2019年冬季雪深变化趋势选取近40年中具有代表性的大雪年2012年和小雪年2017年,来讨论古尔班通古特沙漠冬季逐日雪深和边界层高度的变化趋势(图9),当年冬季时间为每年12月至次年2月。结果表明边界层高度对雪深的响应具有滞后性,且沙漠冬季日尺度积雪深度和边界层高度呈明显负相关性,在2013年1月20—31日、2018年1月1—23日和1月27—31

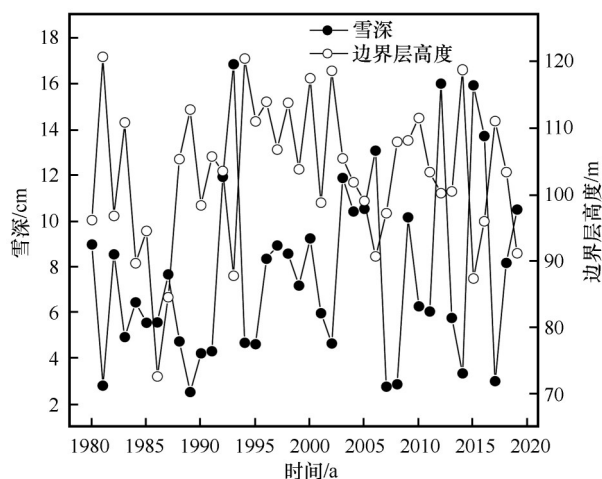


图8 古尔班通古特沙漠冬季雪深与边界层高度年际变化趋势

Fig. 8 Interannual variation and trend of winter snow depth and boundary layer height over the Gurbantunggut Desert

日,当雪深呈增加趋势时,边界层高度呈下降趋势,反之亦然。

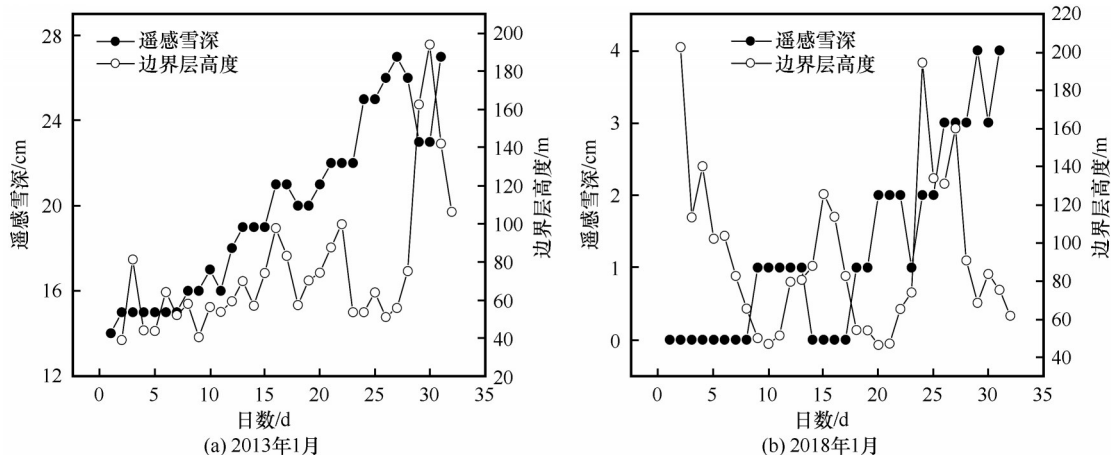


图9 古尔班通古特沙漠冬季雪深与边界层高度逐日变化趋势

Fig. 9 Daily variation and trend of winter snow depth and boundary layer height over the Gurbantunggut Desert

3.4 讨论

古尔班通古特沙漠冬季积雪深度呈现微弱的增加趋势,这与诸多研究结果比较相似。Che等^[19]利用被动微波遥感数据发现,从1978—2006年中国积雪深度呈现微弱的上升趋势;Zhang等^[20]发现1980—2014年,西北地区雪深变化呈增加趋势,积雪深度变化在2000年以后更为显著;马丽娟等^[21]发现1957—2009年,中国年均雪深呈波动增加趋势,新疆西北部呈显著上升趋势;Huang等^[23]发现从2000—2014年,新疆北部天山和阿尔泰山地区积雪深度呈增加趋势;刘畅宇^[74]研究发现,北疆积雪区积雪深度呈上升趋势,年均积雪深度为8.6 cm,积

雪深度变量平均增加 $0.2 \text{ cm} \cdot (10\text{a})^{-1}$,与本文结果高度一致。

在边界层高度方面,研究区与沙漠多年冬季平均边界层高度都是呈现增长趋势,这个结果与Zhang等^[13]给出的1958—2001年冬季边界层高度总体是增加趋势,年际波段呈现出先增加后降低的趋势一致;万云霞等^[75]研究发现,1979—2009年新疆西北部分地区边界层高度增高而东部地区降低,暂未发现相同研究区范围边界层高度变化趋势不同的研究结论,李岩瑛等^[15]发现2006—2012年中国西北干旱区边界层高度变化呈减小趋势,由于研究时间段和空间区域不同,造成了研究结果不一致。

1980—2019 年冬季古尔班通古特沙漠平均雪深和边界层高度的相关性空间分布,呈不显著负相关的东南部区域及其邻近区域常年风速较大,湍流活动剧烈,使得边界层高度较高,造成此区域边界层高度与雪深不显著负相关,也可能是因为其中几年冬季沙漠东南部区域受风速影响较小,边界层高度较低,其雪深也低于正常水平,从而导致 1980—2019 年沙漠东南部及邻近区域相关性降低。

积雪下垫面作为冬季特殊的下垫面类型,通过地表能量重新分配影响大气边界层高度的发展,积雪通过影响气温间接影响大气边界层高度的变化,李杨等^[32]研究也指出,由于积雪的高反射率,使沙漠地表辐射冷却强烈,形成冷源性下垫面和近地层逆温层结,导致大气稳定度增强,边界层高度降低;李媛^[76]研究表明,边界层高度具有明确的季节性,春夏季较高,秋冬季较低,边界层高度变低与秋冬季节地面温度较低有关。古尔班通古特沙漠也属于同一类型。

4 结论

本文利用 SMMR、SSM/I、SSMIS 被动微波遥感雪深数据、实测雪深数据和 ERA5 再分析资料边界层高度数据,分析古尔班通古特沙漠及周边区域 1980—2019 年冬季雪深和边界层高度的时空分布及演变规律,并结合冬季雪深、边界层高度数据探讨沙漠冬季边界层高度对雪深变化的响应关系,得出以下结论:

(1)研究区 1980—2019 年冬季雪深年际变化整体呈现不显著上升趋势,多年冬季平均雪深约为 8.45 cm,以 $0.02 \text{ cm} \cdot \text{a}^{-1}$ ($R^2=0.012$, $P=0.507$) 的速率缓慢增加,古尔班通古特沙漠地区冬季雪深同样呈现不显著增加趋势,多年冬季平均雪深约为 7.68 cm,以 $0.09 \text{ cm} \cdot \text{a}^{-1}$ ($R^2=0.068$, $P=0.104$) 的速率增加。沙漠地区的冬季雪深空间分布沙漠中心及南北部的竖直区域积雪较深、东西部沙漠边缘地区积雪较浅;而沙漠地区冬季雪深的变化趋势则是在沙漠大部分区域呈增加趋势,在沙漠西北部零星区域呈减少趋势。

(2)研究区 1980—2019 年冬季边界层高度年际变化整体呈现极显著上升趋势,多年冬季平均边界层高度约为 105.54 m,以 $0.44 \text{ m} \cdot \text{a}^{-1}$ ($R^2=0.232$, $P<0.01$) 的速率升高,古尔班通古特沙漠地区冬季边界层高度同样呈现不显著增长趋势,多年冬季平

均边界层高度约为 102.88 m,以 $0.06 \text{ m} \cdot \text{a}^{-1}$ ($R^2=0.005$, $P=0.667$) 的速率升高。沙漠地区冬季边界层高度空间分布呈现出西部较低、东部沙漠边缘地区较高的特点;而沙漠地区冬季边界层高度的变化趋势表现为沙漠东部区域呈增长趋势,在沙漠西部、西北部和南部区域呈下降趋势。

(3)古尔班通古特沙漠地区 1980—2019 年冬季雪深和边界层高度在时空上整体呈现出负相关性。沙漠 93.17% 的区域多年冬季雪深和边界层高度呈负相关变化,相关系数绝对值最高可达 0.58,平均值为 -0.32,1980—2019 年沙漠冬季多年平均雪深与边界层高度的相关系数为 -0.42 ($P<0.05$)。当积雪深度为 0.3~21.5 cm 时,研究区的冬季大气边界层高度保持在 29~235 m,雪深高值区亦是边界层高度低值区,1980—2019 年随着雪深增加时,边界层高度呈现降低趋势,呈明显负相关性。

参考文献(References):

- [1] Zhao Jianhua, Zhang Qiang, Wang Sheng, et al. Studies on frequency density of inversion intensity and height of atmospheric boundary layer in arid region of northwest China[J]. Plateau Meteorology, 2013, 32(2): 2377-2386. [赵建华, 张强, 王胜, 等. 西北干旱区夏季大气边界层逆温强度和密度的频率密度研究[J]. 高原气象, 2013, 32(2): 2377-2386.]
- [2] Zhao Yanru, Zhang Kequan, Mao Wenqian, et al. Boundary layer height's variation characteristics research of arid and semi-arid areas over East Asia and North Africa in recent 100 years[J]. Plateau Meteorology, 2017, 36(5): 1304-1314. [赵艳茹, 张珂铨, 毛文茜, 等. 100 年来东亚和北非干旱半干旱区边界层高度的变化特征研究[J]. 高原气象, 2017, 36(5): 1304-1314.]
- [3] Schmid P, Niyogi D. A method for estimating planetary boundary layer heights and its application over the ARM Southern Great Plains site[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2012, 29(3): 316-322.
- [4] Feng Xueliang, Wu Bingfang, Yan Nana. A method for deriving the boundary layer mixing height from MODIS atmospheric profile data[J]. Atmosphere, 2015, 6(9): 1346-1361.
- [5] Liu Huizhi, Feng Jianwu, Wang Lei, et al. Overview of recent studies on atmospheric boundary layer physics at LAPC[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2013, 37(2): 467-476. [刘辉志, 冯健武, 王雷, 等. 大气边界层物理研究进展[J]. 大气科学, 2013, 37(2): 467-476.]
- [6] Zhang Qiang. Study on depth of atmospheric thermal boundary layer in extreme arid desert regions[J]. Journal of Desert Research, 2007, 27(4): 614-620. [张强. 极端干旱荒漠地区大气热力边界层厚度研究[J]. 中国沙漠, 2007, 27(4): 614-620.]
- [7] Zhang Qiang, Zhang Jie, Qiao Juan, et al. Relationship of atmospheric boundary layer depth with thermodynamic processes at the land surface in arid regions of China[J]. Science China Earth Sciences, 2011, 54(10): 1586-1594.
- [8] Zhao Cailing, Lü Shihua, Li Zhaoguo, et al. Numerical simulation of influence of land surface thermal condition on Badain

- Jaran Desert atmospheric boundary layer height in summer[J]. Plateau Meteorology, 2014, 33(6): 1526-1533. [赵采玲, 吕世华, 李照国, 等. 夏季巴丹吉林沙漠陆面热状况对边界层高度影响的模拟实验[J]. 高原气象, 2014, 33(6): 1526-1533.]
- [9] Saeed U, Rocadenbosch F, Crewell S. Synergetic use of LiDAR and microwave radiometer observations for boundary-layer height detection [C]//2015 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Milan, Italy. Piscataway, NJ: IEEE, 2015: 3945-3948.
- [10] Shrestha S, Shrestha S, Maharjan S, et al. Boundary layer characteristics over the central area of the Kathmandu valley as revealed by sodar observation[J]. Journal of Institute of Science and Technology, 2015, 20(1): 28-35.
- [11] Zhang Qiang, Zhao Yingdong, Wang Sheng, et al. A study on atmospheric thermal boundary layer structure in extremely arid desert and Gobi region on the clear day in summer[J]. Advances in Earth Science, 2007, 22(11): 1150-1159. [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.]
- [12] Zhang Qiang, Wang Sheng. A study on atmospheric boundary layer structure on a clear day in the arid region in northwest China[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2008, 66(4): 599-608. [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.]
- [13] Zhang Jie, Zhang Qiang, Tang Congguo. Temporal variety of boundary layer height over deep arid region and the relations with energy balance[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(8): 2545-2555. [张杰, 张强, 唐从国. 极端干旱区大气边界层厚度时间演变及其与地表能量平衡的关系[J]. 生态学报, 2013, 33(8): 2545-2555.]
- [14] Guo Jianping, Miao Yucong, Zhang Yong, et al. The climatology of planetary boundary layer height in China derived from radiosonde and reanalysis data[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2016, 16(20): 13309-13319.
- [15] Li Yanying, Zhang Qiang, Zhang Aiping, et al. Analysis on atmosphere boundary layer variation characteristics and their impact factors in arid region and semi-arid region over northwest China[J]. Plateau Meteorology, 2016, 35(2): 385-396. [李岩瑛, 张强, 张爱萍, 等. 干旱半干旱区边界层变化特征及其影响因子分析[J]. 高原气象, 2016, 35(2): 385-396.]
- [16] Wang Hongwei, Huang Chunlin, Hao Xiaohua, et al. Analyses of the spatiotemporal variations of snow cover in North Xinjiang[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2014, 36(3): 508-516. [王宏伟, 黄春林, 郝晓华, 等. 北疆地区积雪时空变化的影响因素分析[J]. 冰川冻土, 2014, 36(3): 508-516.]
- [17] Liu Yang, Li Lanhai, Chen Xi, et al. Spatial distribution of snow depth based on geographically weighted regression kriging in the Bayanbulak Basin of the Tianshan Mountains, China[J]. Journal of Mountain Science, 2018, 15(1): 33-45.
- [18] Peng Shushi, Piao Shilong, Ciais P, et al. Change in winter snow depth and its impacts on vegetation in China[J]. Global Change Biology, 2010, 16(11): 3004-3013.
- [19] Che Tao, Li Xin. Spatial distribution and temporal variation of snow water resources in China during 1993—2002[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2005, 27(1): 64-67. [车涛, 李新. 1993—2002年中国积雪水资源时空分布与变化特征[J]. 冰川冻土, 2005, 27(1): 64-67.]
- [20] Zhang Xin, Wang Kaicun, Boehrer B. Variability in observed snow depth over China from 1960 to 2014[J]. International Journal of Climatology, 2021, 41(1): 374-392.
- [21] Ma Lijuan, Qin Dahe. Spatial-temporal characteristics of observed key parameters for snow cover in China during 1957—2009[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2012, 34(1): 1-11. [马丽娟, 秦大河. 1957—2009年中国台站观测的关键积雪参数时空变化特征[J]. 冰川冻土, 2012, 34(1): 1-11.]
- [22] Zhao Qiudong, Zhao Chuancheng, Qin Yan, et al. The change features and future trend of snowfall and extreme snowfall in the arid areas of Northwest China[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2020, 42(1): 81-90. [赵求东, 赵传成, 秦艳, 等. 中国西北干旱区降雪和极端降雪变化特征及未来趋势[J]. 冰川冻土, 2020, 42(1): 81-90.]
- [23] Huang Xiaodong, Deng Jie, Ma Xiaofang, et al. Spatiotemporal dynamics of snow cover based on multi-source remote sensing data in China[J]. The Cryosphere, 2016, 10(5): 2453-2463.
- [24] Ma Shuhong, Ge Feng, Chen Xiaoguang, et al. The spatial-temporal distribution of maximum instantaneous wind speed and the control of active dunes in Gurbantunggut Desert[J]. Resources Science, 2007, 29(4): 46-53. [马淑红, 戈峰, 陈晓光, 等. 古尔班通古特沙漠瞬间最大风速的时空分布特征[J]. 资源科学, 2007, 29(4): 46-53.]
- [25] Huo Wen, Gu Junming, Yang Xinghua, et al. Analysis on boundary layer meteorological elements profile in the Gurbantunggut Desert[J]. Desert and Oasis Meteorology, 2015, 9(1): 17-23. [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.]
- [26] Mamtimin A, Wang Yu, Sayit H, et al. Characteristics of turbulence over the semi-fixed desert area north of Xinjiang, China[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2021, 46(12): 2365-2378.
- [27] Li Yarong, Li Jiming, Zhao Yuxin, et al. Long-term variation of boundary layer height and possible contribution factors: a global analysis[J]. Science of the Total Environment, 2021, 796: 148950.
- [28] Mamtimin A, Wang Yu, Sayit H, et al. Seasonal variations of the near-surface atmospheric boundary layer structure in China's Gurbantunggüt Desert[J]. Advances in Meteorology, 2020, 2020: 6137237.
- [29] Duan Cheng, Wu Ling, Wang Shaoming, et al. Analysis of spatio-temporal patterns of ephemeral plants in the Gurbantunggüt Desert over the last 30 years[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(8): 2642-2652. [段呈, 吴玲, 王绍明, 等. 近30年古尔班通古特沙漠短命植物的时空格局[J]. 生态学报, 2017, 37(8): 2642-2652.]
- [30] Wang Xueqin, Zhang Yuanming, Jiang Jin, et al. Variation pattern of soil water content in longitudinal dune in the southern part of Gurbantunggüt Desert: how SnowMelt and frozen soil change affect the soil moisture[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2006, 28(2): 262-268. [王雪芹, 张元明, 蒋进, 等. 古尔班通古特沙漠南部沙垄水分动态——兼论积雪融化和冻土变化对沙丘水分分异作用[J]. 冰川冻土, 2006, 28(2): 262-268.]
- [31] Zhou Baojia. Experimental study on snow evaporation and condensation in Gurbantunggut Desert of China[D]. Shihezi: Shihezi University, 2009. [周宝佳. 古尔班通古特沙漠地区雪面蒸发—凝结试验研究[D]. 石河子: 石河子大学, 2009.]
- [32] LI Yang, Ali Mamtimin, Liu Yan, et al. Characteristics of snow cover and sand-dust events and their correlation in Gur-

- bantunggut Desert[J]. Journal of Desert Research, 2010, 30(4): 961-967. [李杨, 艾力·买买提明, 刘艳, 等. 古尔班通古特沙漠积雪覆盖、沙尘天气特征及其相互关系[J]. 中国沙漠, 2010, 30(4): 961-967.]
- [33] Ban Weiqiang, Yan Cheng, Yin Linke, et al. Effects of site condition and snow depth on haloxylon ammodendron afforestation in Gurbantunggut Desert[J]. Journal of Desert Research, 2012, 32(2): 395-398. [班卫强, 严成, 尹林克, 等. 立地条件和积雪厚度对古尔班通古特沙漠梭梭造林的影响[J]. 中国沙漠, 2012, 32(2): 395-398.]
- [34] Fan Lianlian, Ma Jian, Wu Linfeng, et al. Response of the herbaceous layer to snow variability at the south margin of the Gurbantunggut Desert of China[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2012, 36(2): 126-135. [范连连, 马健, 吴林峰, 等. 古尔班通古特沙漠南缘草本层对积雪变化的响应[J]. 植物生态学报, 2012, 36(2): 126-135.]
- [35] Li Gonglin, Zhang Dinghai, Zhang Zhishan, et al. Population dynamics of main sand-fixing shrubs in the Gurbantunggut Desert[J]. Journal of Desert Research, 2021, 41(2): 129-137. [李功麟, 张定海, 张志山, 等. 古尔班通古特沙漠沙丘主要灌木的种群数量动态[J]. 中国沙漠, 2021, 41(2): 129-137.]
- [36] Zhou Hongfei, Li Yan, Tang Ying, et al. The characteristics of the snow-cover and snowmelt water storage in Gurbantunggut Desert[J]. Arid Zone Research, 2009, 26(3): 312-317. [周宏飞, 李彦, 汤英, 等. 古尔班通古特沙漠的积雪及雪融水储存特征[J]. 干旱区研究, 2009, 26(3): 312-317.]
- [37] Tang Ying. Experimenting and modelling on the snowmelt hydrological process in Gurbantonggute Desert of Xinjiang, China[D]. Shihezi: Shihezi University, 2008. [汤英. 古尔班通古特沙漠融雪水文过程试验与模拟[D]. 石河子: 石河子大学, 2008.]
- [38] Chen Wenqian, Ding Jianli, Zhang Zhe, et al. Black carbon in seasonal snow across northern of Xinjiang[J]. China Environmental Science, 2019, 39(1): 83-91. [陈文倩, 丁建丽, 张喆, 等. 新疆干旱区季节性积雪中黑碳气溶胶研究[J]. 中国环境科学, 2019, 39(1): 83-91.]
- [39] Liao Xiaohe, He Qing, Jin Lili, et al. Change of surface albedo, soil temperature and moisture under snow cover in the hinterland of Taklimakan Desert in winter[J]. Journal of Desert Research, 2018, 38(2): 393-400. [廖小荷, 何清, 金莉莉, 等. 塔克拉玛干沙漠腹地冬季积雪下垫面地表反照率及土壤温湿度变化特征[J]. 中国沙漠, 2018, 38(2): 393-400.]
- [40] Wu Nan, Zhang Ke, Guan Xiaoxiang, et al. Spatiotemporal variations of snow cover and its influencing factors in upper-middle reaches of the Yalong River from 1979 to 2018[J]. Water Resources Protection, 2022, 38(5): 151-158. [吴南, 张珂, 管晓祥, 等. 1979—2018年雅砻江中上游积雪时空变化及影响因素分析[J]. 水资源保护, 2022, 38(5): 151-158.]
- [41] Xia Yulian, Wang Minzhong, Zhao Zhong, et al. Response of snow cover to climate in the southern margin of Gurbantunggut Desert: a case study of Caijia Lake area[C]//Proceedings of the 34th Annual Meeting of The Chinese Meteorological Society (S4). Chinese Meteorological Society, 2017: 195-200. [夏玉莲, 王敏仲, 赵忠, 等. 古尔班通古特沙漠南缘积雪对气候的响应——蔡家湖区域[C]//第34届中国气象学会年会(S4)重大气象干旱成因、物理机制、监测预测与影响论文集. 中国气象学会, 2017: 195-200.]
- [42] Tan Ziyuan. Numerical simulation of boundary layer height and its effect on dust weather in arid and semi-arid regions of north-west China[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2019. [谭子渊. 中国西北干旱半干旱区边界层高度特征及其对沙尘天气影响的数值模拟研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2019.]
- [43] Fu Wei, Li Maoshan, Yin Shucheng, et al. Study on the atmospheric boundary layer structure of the Qinghai-Xizang Plateau under the south branch of the westerly wind and the plateau monsoon circulation field[J]. Plateau Meteorology, 2022, 41(1): 190-203. [伏薇, 李茂善, 阴蜀城, 等. 西南风支与高原季风环流场下青藏高原大气边界层结构研究[J]. 高原气象, 2022, 41(1): 190-203.]
- [44] Wang Yu, Ajiguli Sayiti, Ali Mamtimin, et al. Simulation evaluation of parameterization scheme for atmospheric boundary layer in Gurbantunggut Desert[J]. Desert and Oasis Meteorology, 2020, 14(4): 78-87. [王豫, 阿吉古丽·沙依提, 买买提艾力·买买提依明, 等. 古尔班通古特沙漠大气边界层参数化方案的模拟评估[J]. 沙漠与绿洲气象, 2020, 14(4): 78-87.]
- [45] Zhou Wen, Yang Shengpeng, Jiang Xi, et al. Estimating planetary boundary layer height over the Tibetan Plateau using COSMIC radio occultation data[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2018, 76(1): 117-133. [周文, 杨胜朋, 蒋熹, 等. 利用COSMIC掩星资料研究青藏高原地区大气边界层高度[J]. 气象学报, 2018, 76(1): 117-133.]
- [46] Guo Yanling, Mao Wenqian, Wang Hongyu, et al. Climate change characteristics of the boundary layer height with dryness and wetness and their relationship in extreme arid areas[J]. Climatic and Environmental Research, 2021, 26(5): 532-540. [郭燕玲, 毛文茜, 王泓宇, 等. 极端干旱区边界层高度与干湿的气候变化特征及相互关系分析[J]. 气候与环境研究, 2021, 26(5): 532-540.]
- [47] Liu Hongbo, Dong Li, Yan Ruojing, et al. Evaluation of near-surface wind speed climatology and long-term trend over China's mainland region based on ERA5 reanalysis[J]. Climatic and Environmental Research, 2021, 26(3): 299-311. [刘鸿波, 董理, 严若婧, 等. ERA5再分析资料对中国大陆区域近地层风速气候特征及变化趋势再现能力的评估[J]. 气候与环境研究, 2021, 26(3): 299-311.]
- [48] Shi Wanrong. Multi-source precipitation product assessment and diurnal variation characteristics of extreme precipitation in Central Asia[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology, 2021. [史婉蓉. 中亚地区多源降水产品评估及极端降水日变化特征研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2021.]
- [49] Wang Yu, Zhao Xueshang, Mamtimin A, et al. Evaluation of reanalysis datasets for solar radiation with in situ observations at a location over the Gobi region of Xinjiang, China[J]. Remote Sensing, 2021, 13(21): 4191.
- [50] Che Tao, Li Xin, Gao Feng. Estimation of snow water equivalent in the Tibetan Plateau using passive microwave remote sensing data (SSM/I)[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2004, 26(3): 363-368. [车涛, 李新, 高峰. 青藏高原积雪深度和雪水当量的被动微波遥感反演[J]. 冰川冻土, 2004, 26(3): 363-368.]
- [51] Che Tao, Li Xin. The development and prospect of estimating snow water equivalent using passive microwave remote sensing data[J]. Advance in Earth Sciences, 2004, 19(2): 204-210. [车涛, 李新. 被动微波遥感估算雪水当量研究进展与展望[J]. 地球科学进展, 2004, 19(2): 204-210.]
- [52] Che Tao, Li Xin, Jin Rui, et al. Snow depth derived from passive microwave remote-sensing data in China[J]. Annals of Glaciology, 2008, 49: 145-154.
- [53] Bai Shuying, Shi Jianqiao, Shen Weishou, et al. Spatial-tem-

- poral variation of snow depth in Tibet and its response to climatic change in the past 30 years[J]. *Remote Sensing for Land & Resources*, 2014, 26(1): 144-151. [白淑英, 史建桥, 沈渭寿, 等. 近30年西藏雪深时空变化及其对气候变化的响应[J]. *国土资源遥感*, 2014, 26(1): 144-151.]
- [54] He Keqi, Gao Chao, Xie Jingkai, et al. Multi-objective optimization of hydrological model based on runoff and snow data[J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2019, 38(3): 65-74. [何柯琪, 高超, 谢京凯, 等. 基于径流和积雪资料的水文模型多目标率定[J]. *水力发电学报*, 2019, 38(3): 65-74.]
- [55] Lu Guihua, Yang Ye, Wu Zhiyong, et al. Temporal and spatial variations of snow depth in regions of the upper reaches of Yangtze River under future climate change scenarios: a study based on CMIP5 multi-model ensemble projections[J]. *Advances in Water Science*, 2014, 25(4): 484-493. [陆桂华, 杨烨, 吴志勇, 等. 未来气候情景下长江上游区域积雪时空变化分析——基于CMIP5多模式集合数据[J]. *水科学进展*, 2014, 25(4): 484-493.]
- [56] Li Hongmei, Li Lin, Gao Ge, et al. Snow disaster in Qinghai plateau: risk division and countermeasure[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2013, 35(3): 656-661. [李红梅, 李林, 高歌, 等. 青海高原雪灾风险区划及对策建议[J]. *冰川冻土*, 2013, 35(3): 656-661.]
- [57] Tan Qiuyang, Cheng Lei, Xu Zongxue, et al. Spatiotemporal distribution of snow cover depth and its driving factors in the Yarlung Zangbo River Basin, 1979—2017[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2021, 43(4): 1049-1059. [谭秋阳, 程磊, 徐宗学, 等. 1979—2017年雅鲁藏布江流域雪深时空分布特征及其影响因素分析[J]. *冰川冻土*, 2021, 43(4): 1049-1059.]
- [58] Liu Yan, Ruan Huihua, Zhang Yunhui, et al. Spatio-temporal characteristics of the snow cover ecclution in the northern region of Xinjiang over the period of 1961—2008[J]. *Resources Science*, 2012, 34(4): 629-635. [刘艳, 阮惠华, 张云惠, 等. 1961年至2008年新疆北疆地区积雪的时空演变特征[J]. *资源科学*, 2012, 34(4): 629-635.]
- [59] Tao Ye, Wu Ganlin, Liu Yaobin, et al. Soil stoichiometry and their influencing factors in typical shrub communities in the Gurbantunggut Desert, China[J]. *Journal of Desert Research*, 2017, 37(2): 305-314. [陶冶, 吴甘霖, 刘耀斌, 等. 古尔班通古特沙漠典型灌木群落土壤化学计量特征及其影响因素[J]. *中国沙漠*, 2017, 37(2): 305-314.]
- [60] Hu Yongfeng, Wang Xueqin, Guo Hongxu, et al. Wind fluctuation over semi-fixed longitudinal dune in Gurbantunggut Desert[J]. *Journal of Desert Research*, 2011, 31(2): 393-399. [胡永锋, 王雪芹, 郭洪旭, 等. 古尔班通古特沙漠半固定沙垄表面风的脉动特征[J]. *中国沙漠*, 2011, 31(2): 393-399.]
- [61] Zhang Liyun, Chen Changdu. On the general characteristics of plant diversity of Gurbantunggut sandy desert[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22(11): 1923-1932. [张立运, 陈昌笃. 论古尔班通古特沙漠植物多样性的一般特点[J]. *生态学报*, 2002, 22(11): 1923-1932.]
- [62] Zhao Hongmei, Cheng Junhui, Zhang Wentai, et al. Litters decomposition characteristics of five species in the Gurbantunggut Desert[J]. *Journal of Desert Research*, 2020, 40(2): 165-176. [赵红梅, 程军回, 张文太, 等. 古尔班通古特沙漠5种植物凋落物分解特征[J]. *中国沙漠*, 2020, 40(2): 165-176.]
- [63] Gao Jiacheng, Wang Yu, Sayit Hajigul, et al. Characteristics of surface radiation budget in Gurbantunggut Desert[J]. *Journal of Desert Research*, 2021, 41(1): 47-58. [高佳程, 王豫, 阿吉古丽·沙依提, 等. 古尔班通古特沙漠地表辐射收支特征[J]. *中国沙漠*, 2021, 41(1): 47-58.]
- [64] Che Tao, Dai Liyun. China snow depth time series dataset (1979—2020)[DS/OL]. National Data Center for Tibetan Plateau Science, 2015. DOI: 10.11888/Geogra. tpdc. 270194. CSTR: 18406. 11. Geogra. tpdc. 270194. [车涛, 戴礼云. 中国雪深长时间序列数据集(1979—2020)[DS/OL]. 国家青藏高原科学数据中心, 2015. DOI: 10.11888/Geogra. tpdc. 270194. CSTR: 18406. 11. Geogra. tpdc. 270194.]
- [65] Dai Liyun, Che Tao, Ding Yongjian. Inter-calibrating SMMR, SSM/I and SSM/I/S data to improve the consistency of snow-depth products in China[J]. *Remote Sensing*, 2015, 7(6): 7212-7230.
- [66] Dai Liyun, Che Tao, Ding Yongjian, et al. Evaluation of snow cover and snow depth on the Qinghai-Tibetan Plateau derived from passive microwave remote sensing[J]. *The Cryosphere*, 2017, 11(4): 1933-1948.
- [67] Ren Xuan, Zheng Jianghua, Mu Chen, et al. Correlation analysis of the apatial-temporal variation of grassland net primary productivity and climate factors in Xinjiang in the past 15 years[J]. *Ecological Science*, 2017, 36(3): 43-51. [任璇, 郑江华, 穆晨, 等. 新疆近15年草地NPP动态变化与气象因子的相关性研究[J]. *生态科学*, 2017, 36(3): 43-51.]
- [68] Wang Junqi, Wang Guangjun, Liang Sihai, et al. Extraction and spatio-temporal analysis of vegetation coverage from 1996 to 2015 in the source region of the Yellow River[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2021, 43(2): 662-674. [王俊奇, 王广军, 梁四海, 等. 1996—2015年黄河源区植被覆盖度提取和时空变化分析[J]. *冰川冻土*, 2021, 43(2): 662-674.]
- [69] Yang Xuewen, Wang Ninglian, Chen Anan, et al. The relationship between area variation of the Aral Sea in the arid Central Asia and human activities and climate change[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2020, 42(2): 681-692. [杨雪雯, 王宁练, 陈安安, 等. 中亚干旱区咸海面积变化与人类活动及气候变化的关联研究[J]. *冰川冻土*, 2020, 42(2): 681-692.]
- [70] Yan Hao, Zhang Jiahua. Retrieval of snow depth in China by using SSM/I data[J]. *Journal of Mountain Science*, 2008, 26(1): 59-64. [延昊, 张佳华. 基于SSM/I被动微波数据的中国积雪深度遥感研究[J]. *山地学报*, 2008, 26(1): 59-64.]
- [71] Bai Yunjie, Lu Ling, Li Xin, et al. Sensitivity analysis on snow parameters impacting passive microwave brightness temperature of snow: an study based on MEMLS[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2009, 24(5): 622-630. [白云洁, 卢玲, 李新, 等. 积雪微波辐射亮温对积雪参数的敏感性分析——以多层积雪微波辐射模型为例[J]. *遥感技术与应用*, 2009, 24(5): 622-630.]
- [72] Wang Yu, Sayit H, Mantimin A, et al. Evaluation of five planetary boundary layer schemes in WRF over China's largest semi-fixed desert[J]. *Atmospheric Research*, 2021, 256: 105567.
- [73] Liu Zengqiang, Zheng Yuping, Li Jinglin, et al. Temperature inversion characteristics of low-air atmosphere of Urumqi City[J]. *Arid Land Geography*, 2007, 30(3): 351-356. [刘增强, 郑玉萍, 李景林, 等. 乌鲁木齐市低空大气逆温特征分析[J]. *干旱区地理*, 2007, 30(3): 351-356.]
- [74] Liu Changyu. Spatiotemporal heterogeneity of snow cover and causes in China[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2021. [刘畅宇. 中国地区积雪时空异质性及成因分析[D]. 兰州: 兰州

- 大学, 2021.]
- [75] Wan Yunxia, Zhang Yu, Zhang Jinwen, et al. Influence of sensible heat on planetary boundary layer height in east Asia [J]. *Plateau Meteorology*, 2017, 36(1): 173-182. [万云霞, 张宇, 张瑾文, 等. 感热变化对东亚地区大气边界层高度的影响[J]. *高原气象*, 2017, 36(1): 173-182.]
- [76] Li Yuan. Long-term trend of planetary boundary layer height derived from multiple dataset in China and its underlying mechanism [D]. Beijing: Chinese Academy of Meteorological Sciences, 2020. [李媛. 基于多种资料的中国大气边界层高度时空分布特征及其机理研究[D]. 北京: 中国气象科学研究院, 2020.]

Response of atmospheric boundary layer height to snow cover in winter in Gurbantunggut Desert and its surrounding areas

ZHANG Mengxiao^{1,2,3,4,5}, WANG Yu^{3,4,5}, Ali Mamtimin^{3,4,5}, LIU Yongqiang^{1,2},
GAO Jiacheng^{3,4,5}, XIAO Wanqiu^{1,2,3,4,5}, WEN Cong^{3,4,5}, SONG Meiqi^{3,4,5},
Ailiyaer Aihaiti^{3,4,5}, WANG Weiping^{1,2}, MENG Xiangyao^{1,2}

(1. College of Geography and Remote sensing Sciences, Xinjiang University, Urumqi 830017, China; 2. Xinjiang Key Laboratory of Oasis Ecology, Xinjiang University, Urumqi 830017, China; 3. Institute of Desert Meteorology, China Meteorological Administration, Urumqi 830002, China; 4. National Observation and Research Station of Desert Meteorology, Taklimakan Desert of Xinjiang/Xinjiang Key Laboratory of Desert Meteorology and Sandstorm, Urumqi 830002, China; 5. Taklimakan Desert Meteorological Field Experiment Base/Key Laboratory of Tree-ring Physical and Chemical Research, China Meteorological Administration, Urumqi 830002, China)

Abstract: The Gurbantunggut Desert is the only desert in China with long-term snow cover in winter. In such a special geographical environment, the temporal and spatial variation of winter snow depth and boundary layer height over the desert and its surrounding areas are not clear. To explore its temporal and spatial variations and relationships, this paper compiled 2014—2019 SMMR (Scanning Multichannel Microwave Radiometer), SSM/I (Special Sensor Microwave/Imager), SSMI/S (Special Sensor Microwave Imager/Sounder) passive microwave snow depth data, snow depth observations in the hinterland of the Gurbantunggut Desert, and boundary layer height data from the Fifth Generation ECMWF Reanalysis, for the analysis of the temporal and spatial variation of winter snow depth and boundary layer height in desert and its surrounding areas, using trend analysis method and Pearson correlation analyses are analyzed. It provides a reference for understanding the impact of Gurbantunggut Desert snow on regional atmospheric boundary layer. The results show that the annual average winter snow depth in the Gurbantunggut Desert and its surrounding areas is 8.45 cm, showing a deep snow cover in the northeast and south as a whole, and a shallow snow cover in other areas. The snow cover gradually decreases from the center of the desert to the surrounding areas. The snow depth in the Gurbantunggut Desert and its northeast and south adjacent areas shows a rising trend, while the remaining areas show a downward trend. The average annual height of the boundary layer in the Gurbantunggut Desert and its surrounding areas in winter is 105.54 m, which is high in the southeast and northwest, and shallow in the central, northeast and southwest desert area. The height of the boundary layer in the desert and its surrounding areas increases while that in other areas decreases. The winter snow depth in Gurbantunggut Desert is negatively correlated with the spatial and temporal changes of the atmospheric boundary layer height, of which 93.17% of the desert areas are negatively correlated, with an average correlation coefficient of -0.32 , the highest of -0.58 , and a spatial correlation coefficient of -0.42 ($P < 0.05$).

Key words: Gurbantunggut Desert; snow depth; atmospheric boundary layer height; time and space distribution

(责任编辑: 钟歆玥)