

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.

古尔班通古特沙漠地表辐射收支特征

高佳程^{1,2},王 豫²,阿吉古丽·沙依提³,买买提艾力·买买提依明²,
刘永强¹,赵雪赏^{1,2},杨兴华²,霍 文²,杨 帆²,周成龙²

(1.新疆大学 资源与环境科学学院,新疆 乌鲁木齐 830046; 2.中国气象局乌鲁木齐沙漠气象研究所 中国气象局
塔克拉玛干沙漠气象野外科学实验基地,新疆 乌鲁木齐 830002; 3.新疆气象学会,新疆 乌鲁木齐 830002)

摘要: 古尔班通古特沙漠是中国最大的固定、半固定沙漠。利用2017年该沙漠克拉美丽站辐射资料,分析了古尔班通古特沙漠不同时间尺度和不同天气条件下的地表辐射变化特征。结果表明:(1)不同月份沙漠辐射收支各分量月平均日变化均呈单峰型,但极值大小及出现时间存在差异。各分量曝辐量季节变化明显:太阳总辐射表现为生长期(4—9月)>积雪期(1—3月)>凋零期(10—12月),反射短波辐射表现为积雪期>生长期>凋零期,长波辐射和净辐射均表现为生长期>凋零期>积雪期。(2)地表反照率4—11月的日变化均呈“U”型曲线,年均值为0.367,积雪期、生长期、凋零期的平均值分别为0.7、0.246和0.27,其中1月1日至3月15日的日均值均高于0.7,这是该期间古尔班通古特沙漠存在稳定积雪所致。(3)晴天各分量日变化均为倒“U”型曲线,多云和雨天则不如晴天平滑,雪天短波辐射和净辐射日变化呈倒“V”型,长波辐射无明显日变化。降雨前后地表反照率日均值表现为雨前晴天>雨后晴天>雨天,降雪前后表现为雪后晴天>雪天>雪前晴天。(4)融雪前后各分量变化明显,积雪快速融化时地表反照率和反射短波辐射逐日减小,净辐射则反之,积雪完全融化前地表长波辐射一直较弱,积雪完全融化后逐渐增强。

关键词: 古尔班通古特沙漠; 地表辐射收支; 地表反照率

文章编号: 1000-694X(2021)01-047-12

DOI: 10.7522/j.issn.1000-694X.2020.00100

中图分类号: P422

文献标志码: A

0 引言

地表辐射收支是陆面过程研究的主要内容,也是地球表面转化太阳能量及实现热量循环的重要环节^[1]。地表辐射收支的变化反映了气候系统对太阳辐射强迫的响应^[2-3]。研究辐射收支不仅对认识当前气候状态具有重要意义,而且为未来气候变化的精准预测提供重要参考^[4-6]。20世纪80年代以后,国际上开展了一系列针对不同气候区的陆面过程野外观测试验^[7],这些试验均将地表辐射收支特征作为主要研究目标。国内相继开展的陆面过程试验亦有诸多进展,在西北干旱区^[8-10]、内蒙古草原^[11-13]、黄土高原^[14-16]及青藏高原^[17-19]等获得了重要成果。这些成果不仅揭示了不同下垫面陆-气能量、物质交换特征,而且为不同区域发展陆面过程

参数化和改进陆面过程模式提供了重要依据。

沙漠地区因极端干旱的气候和独特的下垫面条件使其地表辐射过程不同于其他湿润地区且对气候变化的响应极为敏感^[20],研究沙漠地表辐射收支对深入理解干旱区气候变化有重要意义。前人对中国塔克拉玛干沙漠^[21-25]、巴丹吉林沙漠^[26-30]、黑河流域沙漠^[31]及科尔沁沙地^[32-33]等地区的辐射收支进行了大量研究,丰富了学界对沙漠辐射收支特征的认识。针对固定、半固定性质的古尔班通古特沙漠,魏文寿等^[34]利用秋季5天的观测资料对沙漠东南缘不同下垫面辐射变化特征进行对比分析,得出流动沙丘反照率与长波辐射大于固定沙丘的结论;塔依尔等^[35]利用夏季2 d的观测资料对沙漠南缘地表能量特征进行分析,指出沙漠生境下净辐射主要

收稿日期:2020-06-17; 改回日期:2020-08-26

资助项目:国家自然科学基金项目(41875023); 中亚大气科学研究基金项目(CAAS201711, CAAS202009)

作者简介:高佳程(1994—),男,陕西武功人,硕士研究生,主要从事陆面过程研究。E-mail: 714939106@qq.com

通信作者:刘永强(E-mail: lyqxju@163.com)

用于感热通量的消散;刘冉等^[36]分析了沙漠南缘原始盐生荒漠区地表水热通量特征,并指出净辐射通量具有明显的季节变化。然而,有关古尔班通古特沙漠腹地较长时间尺度的地表辐射收支研究尚未见报道。作为中国面积最大的固定、半固定沙漠,古尔班通古特冬季稳定积雪^[37]、春季短命植物旺盛^[38]、夏季灌木群丰富^[39]等特性可能使其在陆-气能量、物质交换方面有着特殊性,也可能对区域乃至全球气候产生重要影响。基于此,本文利用古尔班通古特沙漠腹地长时间序列地表辐射观测数据,对该沙漠不同时间尺度和不同天气条件下的地表辐射变化特征进行分析,从而为了解该区域陆面过程演变特征提供科学事实。

1 研究区概况

古尔班通古特沙漠位于中国新疆准噶尔盆地中央,是中国第二大沙漠,面积约4.88万km²。沙漠景观主要包括各种形式的纵向沙丘、新月状沙丘和蜂窝状沙丘,其中纵向沙丘受西北风影响主要沿西北-东南方向移动。该沙漠为典型的中温带大陆性干旱气候,年均气温5—5.7℃,极端气温最高可达41.7℃,最低可至-31℃^[40],年降水量不超过150mm,集中在冬、春季节,且冬季地表通常覆盖15cm

左右厚的稳定积雪^[41],受此影响,春夏季短命植物生长旺盛。沙漠植被以梭梭柴(*Haloxylon ammdoen-dorn*)、白梭梭(*Haloxylon persicum*)为主,分布面积达1万km²以上。

2 数据与方法

观测数据来自中国气象局乌鲁木齐沙漠气象研究所于2012年建立的古尔班通古特沙漠克拉美丽陆-气相互作用观测试验站(简称克拉美丽站,45°14'N,87°35'E,海拔531m,图1)。克拉美丽站位于古尔班通古特沙漠腹地,行政地界属于阿勒泰地区福海县喀拉玛盖乡克拉美丽地区,该站装有涡动相关系统、梯度探测系统和辐射观测系统。本文数据主要来自辐射观测系统,所用仪器有净辐射传感器(荷兰Hukseflux公司,型号NR01,安装高度1.5m,采集器型号CR3000),土壤湿度传感器(美国Campbell Scientific公司,型号CS616,观测深度2、5、10、20、40cm,采集器型号CR3000),雪深传感器(美国Campbell Scientific公司,型号SR50A-L,安装高度1.5m,采集器型号CR1000);这些仪器的采集频率均为1Hz,并输出10s、1min、30min、1d数据,相关参数见表1。本文采用时间为地方时,比北京时间推后2h。

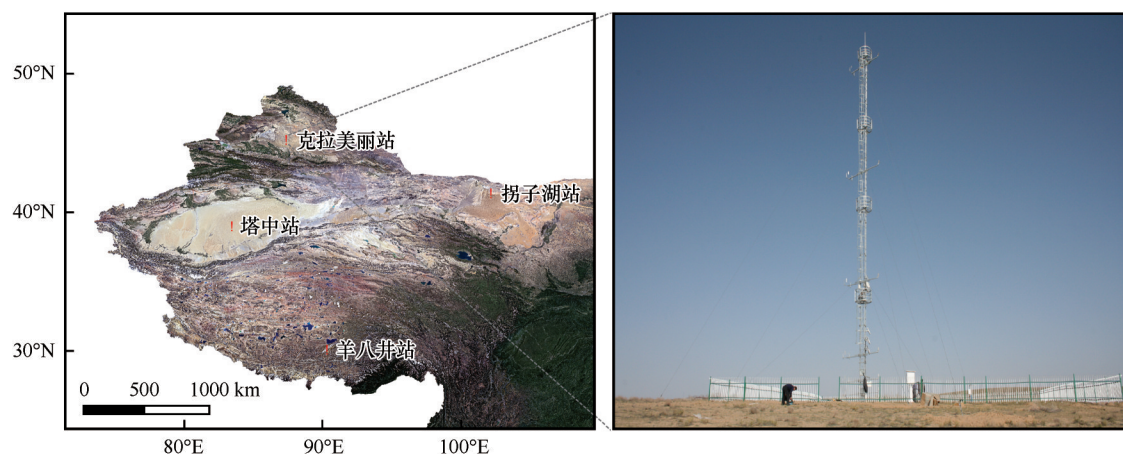


图1 克拉美丽站地理位置示意图及观测场照片

Fig.1 Location and general view of Kelameili observation station

选取2017年全年连续同步观测的辐射四分量、土壤温湿度及雪深半小时数据进行分析,其中,针对太阳总辐射和大气长波辐射,利用MODIS日反照率产品数据(来自<https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/>)和反射短波辐射数据重新计算了因积雪覆盖仪器表面而造成的不合理数据,并剔除太阳总

辐射小于 $20\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 的短波辐射数据,而后计算地表净辐射和地表反照率^[42]:

$$R_{\text{net}} = SW_{\text{net}} + LW_{\text{net}} = SW_{\downarrow} - SW_{\uparrow} + LW_{\downarrow} - LW_{\uparrow} \quad (1)$$

$$\alpha = SW_{\uparrow} / SW_{\downarrow} \quad (2)$$

式中: R_{net} 为净辐射; SW_{net} 为地表净吸收的太阳辐射; LW_{net} 为地面有效辐射; SW_{\downarrow} 、 SW_{\uparrow} 、 LW_{\downarrow} 和 LW_{\uparrow}

表 1 仪器及参数
Table 1 The instruments and parameters

仪器	观测项目	测量范围	测量精度
NR01 净辐射传感器	短波辐射	285—3000 nm	<1.8%
	长波辐射	4500—40000 nm	<7%
CS616 土壤湿度探测仪	土壤湿度	—	<0.1%(土壤体积含水量)
SR50A-L 雪深传感器	雪深	0.5—10 m	±1.0 cm 或 ±0.4%

分别为太阳总辐射、反射短波辐射、大气长波辐射和地表长波辐射; α 为地表反照率。辐射通量的单位均为 $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ 。

晴空指数(k_t)计算公式如下^[43]:

$$k_t = SW \downarrow / S_c \downarrow \tag{3}$$

$$S_c \downarrow = S_{sc} [1 + 0.033 \cos(360 t_d / 365)] \sin \beta \tag{4}$$

式中: S_{sc} 为太阳常数($1\,370\,\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$); t_d 为日序数; β 为太阳高度角。该指数反映了云量变化对太阳辐射的影响。 k_t 值接近于 0 表示天空云量增加,太阳辐射弱; k_t 值接近于 1 表示天空晴朗无云,太阳辐射强。利用晴空指数的大小来区分不同天空状况,即 $k_t \geq 0.72$ 为晴天, $0.72 > k_t \geq 0.3$ 为多云, $k_t < 0.3$ 为阴天。

3 结果与分析

3.1 地表辐射收支变化特征

3.1.1 地表辐射月平均日变化

不同月份的太阳总辐射月平均日变化均呈单峰型,但极值及其出现时间不同(图 2)。太阳总辐射整体表现为 1—3 月逐渐增大,4 月略有减小,5—

8 月保持较高水平,8—12 月逐渐减小。全年极大瞬时值出现在 6 月 19 日,为 $1\,057\,\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$,月均值为 $189\text{—}504.8\,\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$,日峰值集中在 12:00—13:00,最大日峰值出现在 5 月,为 $905.7\,\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$,比巴丹吉林沙漠拐子湖(5 月, $858.8\,\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$)和塔克拉玛干沙漠塔中(7 月, $822.4\,\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$)高,最小日峰值出现在 12 月,为 $316.6\,\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$,比拐子湖(12 月, $386.5\,\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$)和塔中(12 月, $449.2\,\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$)低^[44]。古尔班通古特沙漠太阳总辐射特征与其他沙漠明显不一致,主要与不同沙漠的地理位置及气候条件有关。古尔班通古特为固定、半固定沙漠,春夏季由于生长旺盛的植被对土壤表层起到固沙作用,不易形成沙尘天气,而巴丹吉林和塔克拉玛干沙漠地表均无植被覆盖,春夏季沙尘天气较多,其中塔克拉玛干沙漠作为流动沙漠,沙尘尤为频繁,导致太阳总辐射被沙尘削弱,因此,古尔班通古特沙漠尽管纬度较高,但春夏季较少的沙尘天气使其太阳总辐射在该期间较同期其他沙漠偏高;另一方面,古尔班通古特沙漠由于纬度较高,海拔较低,且位于中国天气系统上游,冬季天气过程出现较为频繁,阴天、多

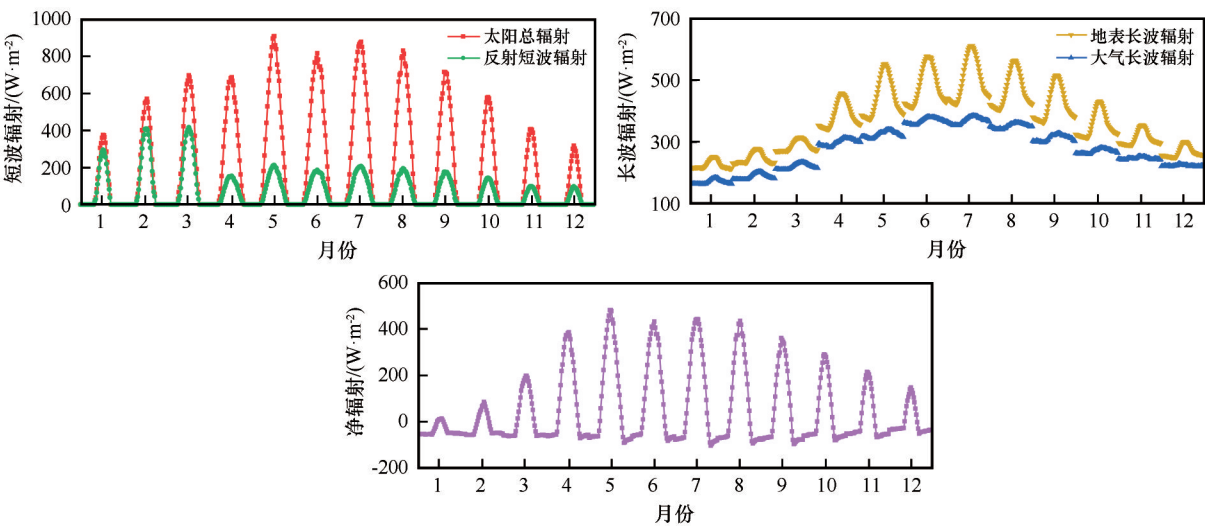


图 2 地表辐射收支的月平均日变化
Fig.2 The monthly mean diurnal variation of surface radiation budget

云天气较多,导致冬季太阳总辐射较其他沙漠偏低。

反射短波辐射月平均日变化亦呈单峰型,但极值在年内的差异不同于太阳总辐射,即1—3月保持较高水平,4月大幅减小,4—7月上下波动,7—12月逐渐减小。月均值为 $58.7\text{--}234.8\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$,日峰值集中在12:00—13:00,日峰值的最大出现在3月,值为 $416\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$,比拐子湖(5月, $249.72\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$)和塔中(4月, $199.22\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$)高^[44]。造成这种差异的原因是古尔班通古特沙漠3月不仅天气状况优于巴丹吉林沙漠和塔克拉玛干沙漠,太阳总辐射相对较高,而且地表由于大部分时间(3月1—26日)为积雪覆盖,反照率亦高于这两个沙漠,进而导致3月太阳总辐射和地表反照率相对较高的古尔班通古特沙漠有较高的反射短波辐射。

长波辐射月平均日变化均呈单峰型,相对太阳总辐射滞后约0.5—2 h,日峰值集中在14:00—15:30,但大气长波辐射全年的日变化相对其他分量均较弱。长波辐射整体表现为1—5月逐渐增大,6—8月保持较高水平,9—12月逐渐减小。地表和大气长波辐射的月均值分别为 $226.4\text{--}501.2\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 和 $170.6\text{--}369.2\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$,最大和最小月均值分别出现在7月和1月。此外,1月1日至3月26日地表始终

覆有积雪,而积雪对地表的保温作用使得地表温度始终较低且变化较小,进而造成1—3月长波辐射不仅全天较小,而且日变化幅度较弱。

地表净辐射夜间变化较小,白天则与太阳总辐射的变化较为一致,峰值集中在12:00—14:00。净辐射整体表现为1—5月逐渐增大,5—8月保持较高水平,8—12月逐渐减小。各月日均值为 $-37.6\text{--}111.8\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$,最大和最小日峰值分别出现在5月和1月,依次为 $480.5\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 和 $8\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 。

3.1.2 地表辐射收支年变化

太阳总辐射年曝辐量为 $6\,191.19\text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$,平均月曝辐量为 $515.93\text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ (图3)。积雪期(1—3月)、生长期(4—9月)及凋零期(10—12月)的平均月曝辐量分别为 364.29 、 710.13 、 $279.17\text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ 。全年月曝辐量最大值出现在7月,为 $842.5\text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$,略高于拐子湖(5月, $792.74\text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$)和塔中(7月, $721.11\text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$),但低于青藏高原羊八井地区(6月, $1\,025.14\text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$);月曝辐量最小值出现在12月,为 $176.4\text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$,低于拐子湖(12月, $241\text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$)、塔中(12月, $297.3\text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$)和羊八井地区(12月, $551.75\text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$),比羊八井地区低 $375.35\text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ ^[17,23,44]。造成这种差异的原因是羊八井地区纬度低,海拔高,空气稀薄,该地接收的太阳总辐射全年均较高。

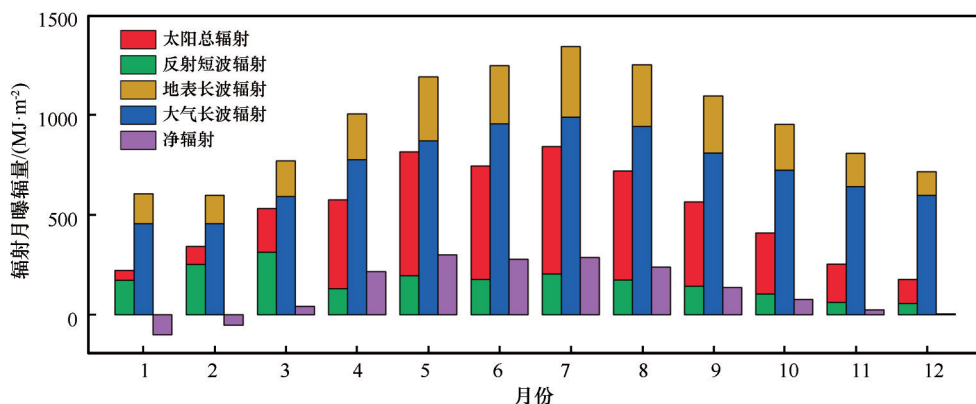


图3 地表辐射收支的月曝辐量变化

Fig.3 The variation of monthly total surface radiation budget

反射短波辐射年曝辐量为 $1\,974.94\text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$,平均月曝辐量为 $164.58\text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ 。积雪期、生长期及凋零期平均月曝辐量分别为 245.46 、 169.4 、 $73.02\text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ 。全年月曝辐量最大值出现在3月,为 $312.6\text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$,比塔中(5月, $183.5\text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$)、拐子湖(5月 $236.09\text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$)及羊八井地区(6月, $199.58\text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$)^[17,23,44]都高。最小月曝辐量出现在12月,为 $54.86\text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$,比拐子湖(11月, $85.11\text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$)、塔中(12月, $78.2\text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$)

及羊八井地区(12月, $127.98\text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$)^[17,23,44]都低。古尔班通古特沙漠3月由于积雪覆盖地表而导致的较高地表反照率是该地3月反射短波辐射曝辐量比其他地区都高的主要原因。

地表和大气长波辐射的平均月曝辐量分别为 $965.04\text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ 和 $733.84\text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$,二者在不同时期的平均月曝辐量均表现为生长期>凋零期>积雪期,地表长波辐射分别为 $1\,188.66$ 、 825.68 、 $657.16\text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$,

大气长波辐射分别为890.29、653.85、500.93 $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ 。二者月曝辐量最大值均出现在7月,分别为988.89 $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ 和1 342.43 $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}$,最小值则分别出现在2月和1月,依次为597.67 $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ 和455.35 $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ 。此外,1—2月由于地表一直为积雪覆盖,近地层温度变化较小,导致该期间长波辐射月曝辐量差异不大。

净辐射年曝辐量为1 441.84 $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}$,平均月曝辐量为120.15 $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ 。积雪期、生长期及凋零期的平均月曝辐量分别为-37.39、262.96、59.8 $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ 。需要指出,积雪期地表主要为积雪覆盖,地表以损失能量为主,造成该期间平均月曝辐量为负值。最大月曝辐量出现在5月,为299.31 $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}$,与塔中(6月,326.7 $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}$)和拐子湖(7月,292.09 $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}$)相差较小,比羊八井地区(6月,578.34 $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}$)低约50%。最小月曝辐量出现在1月,为-100.33 $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}$,而拐子湖(6.75 $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}$)、塔中(73.2 $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}$)和羊八井地区(216.95 $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}$)最小月曝辐量均出现在12月且为正值^[17,23,44]。

3.2 地表反照率变化特征

地表反照率表征地球表面对太阳辐射的反射能力,决定了太阳辐射能量在地表和大气间的分配,其变化会影响地气系统的能量收支平衡,进而引起区域乃至全球气候变化^[45]。从图4可以看出,古尔班通古特沙漠腹地地表反照率的日变化在4—11月均表现为早晚高、中午低的“U”型曲线,而在其他月份因地表长期积雪或偶有积雪表现为不规则曲线。地表反照率表现为1—4月逐渐减小,4—11月略有波动,12月略有回升,月均值最大和最小分别出现在1月和4月,分别为0.766和0.233,年均值0.367。结合地表辐射收支分析发现古尔班通古特沙漠积雪期虽太阳总辐射较小,但平均地表反照率

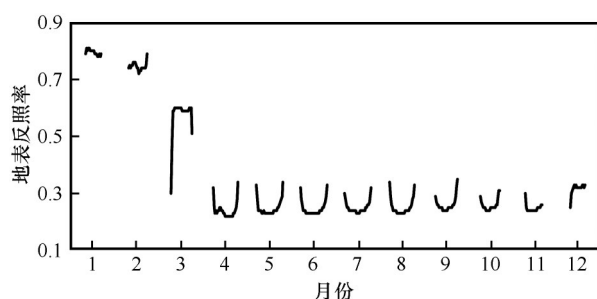


图4 地表反照率月平均日变化

Fig.4 The monthly mean diurnal variation of land surface albedo

高达0.7,积雪融化前(2017年1月1日至3月15日)地表反照率日均值一直处于0.7以上,导致积雪期反射短波辐射处于全年最高水平;生长期虽太阳总辐射较大,但平均地表反照率仅0.249,导致生长期反射短波辐射不如积雪期;凋零期不仅太阳总辐射较小,而且平均地表反照率亦略高于生长期,为0.275,导致凋零期反射短波辐射处于全年最低水平。与其他沙漠相比,地表反照率年均值古尔班通古特沙漠>巴丹吉林沙漠>黑河流域沙漠>塔克拉玛干沙漠塔中>塔克拉玛干沙漠北缘肖塘(表2)。其中积雪期古尔班通古特沙漠地表反照率较同期其他沙漠高逾一倍,但生长期和凋零期比其他沙漠相近时期均较低。造成这种差异的主要原因是古尔班通古特沙漠积雪融化前(2017年3月15日积雪开始融化)地表始终覆盖稳定积雪,地表反照率日均值一直处于0.7以上,而其他沙漠地区相应时期降雪较少且融化较快,进而导致同时期古尔班通古特沙漠地表反照率相对较高,这是古尔班通古特沙漠独特的下垫面情况造成的;另一方面,古尔班通古特沙漠春季短命植物旺盛、夏季灌木群丰富以及降雨的季节分配较为均匀等特点,使其在生长期和凋零期的地表反照率相对较低。

3.3 不同天气条件下地表辐射与反照率的变化

选取2017年2月18—21日、2017年4月11—14日、2017年8月10—13日、2017年10月2—5日4个时段,分别代表冬、春、夏、秋季的典型天气(晴天、多云、雨天、雪天,表3)。根据观测点降水资料,具体降水日为2月19日(4.2 mm)、4月14日(2.3 mm)、8月12日(8.8 mm)、10月4、5日(0.8 mm、0.1 mm),其中2月19日为雪天。

地表辐射各分量在不同天气条件下具有明显的日变化特征,同时日变化幅度表现出季节波动性(图5)。晴天时,太阳总辐射只受太阳高度角影响,表现为日出后由零开始逐渐增大,于正午达日峰值后逐渐减小,并于日落减小至零的倒“U”型曲线;多云时,受云的干扰,尽管日变化规律尚且可寻,但不如晴天平滑,且较晴天有所减小;雨天时,日变化已无明显规律,且较晴天大幅减小;雪天时,日变化呈倒“V”型,且较晴天有所减小。晴天日峰值具有明显的季节变化,夏季>春季>秋季>冬季,分别为929.1、886.1、740.6、705.6 $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ 。不同天气条件下反射短波辐射具有与太阳总辐射基本一致的

表 2 不同沙漠地区月平均地表反照率

Table 2 Monthly mean surface albedo in different deserts

月份	古尔班通古特沙漠腹地 克拉美丽(2017年)	塔克拉玛干沙漠北缘 肖塘(2009年) ^[25]	塔克拉玛干沙漠 塔中(2013年) ^[21]	巴丹吉林沙漠拐子湖 (2013年) ^[44]	黑河流域沙漠 (1991年) ^[31]
1	0.766	0.31	0.32	—	0.34
2	0.746	0.28	0.30	0.35	0.31
3	0.574	0.27	0.30	0.32	0.29
4	0.233	0.27	0.28	0.32	0.27
5	0.249	0.26	0.26	0.3	0.27
6	0.247	0.25	0.26	0.27	0.26
7	0.251	0.26	0.25	0.27	0.26
8	0.251	0.26	0.26	0.29	0.26
9	0.261	0.26	0.27	0.31	0.28
10	0.259	0.27	0.29	0.32	0.30
11	0.248	0.27	0.31	0.35	0.33
12	0.317	0.29	0.32	0.37	0.37
平均值	0.367	0.27	0.28	0.32	0.30

表 3 四季代表性天气状况

Table 3 Weather conditions at different times of the year

季节	日期	晴空指数	天气状况	季节	日期	晴空指数	天气状况
冬季	02-18	0.70	多云	夏季	08-10	0.76	晴天
	02-19	0.45	降雪		08-11	0.64	多云
	02-20	0.74	晴天		08-12	0.13	降雨
	02-21	0.87	晴天		08-13	0.69	多云
春季	04-11	0.77	晴天	秋季	10-02	0.78	晴天
	04-12	0.65	多云		10-03	0.60	多云
	04-13	0.68	多云		10-04	0.58	降雨
	04-14	0.18	降雨		10-05	0.23	降雨

日变化特征。但晴天日峰值的季节变化则不同于太阳总辐射,具体表现为冬季>夏季>春季>秋季,分别为 522.7、228.7、201.9、182.1 W·m⁻²,冬季日峰值高出其他季节一倍多。

地表长波辐射晴天时的日变化表现为夜间逐渐减小,日出时达最小值,日出后随地表增温而增大,于午后达日峰值后,随地表降温而减小的单峰型曲线。在地表温度较低的冬季及其他季节的雨天,地表长波辐射日变化较弱,并且在量值上较低,冬季日曝辐量表现为晴天<多云<雪天,分别为 20.85、22.8、24.39 MJ·m⁻²,其他季节则表现为晴天>

多云>雨天。造成冬季不同天气条件下地表长波辐射差异较小及与其他季节相反的原因是冬季地表积雪,气温直减率较低,多云和雪天时,云的逆辐射作用使得地表温度损失较晴天少,尤其雪天新雪的保温作用使得夜间地表温度基本没有损失,从而导致晴天地表长波辐射日曝辐量较多云和雪天少。不同季节不同天气条件下大气长波辐射的日变化均较弱,但其对天气条件的响应不同于短波辐射,具体表现为晴天<多云<雨天和雪天,说明大气对地面的保温作用。不同天气条件下净辐射白天的日变化与太阳总辐射较为一致,夜间则表现为晴天<

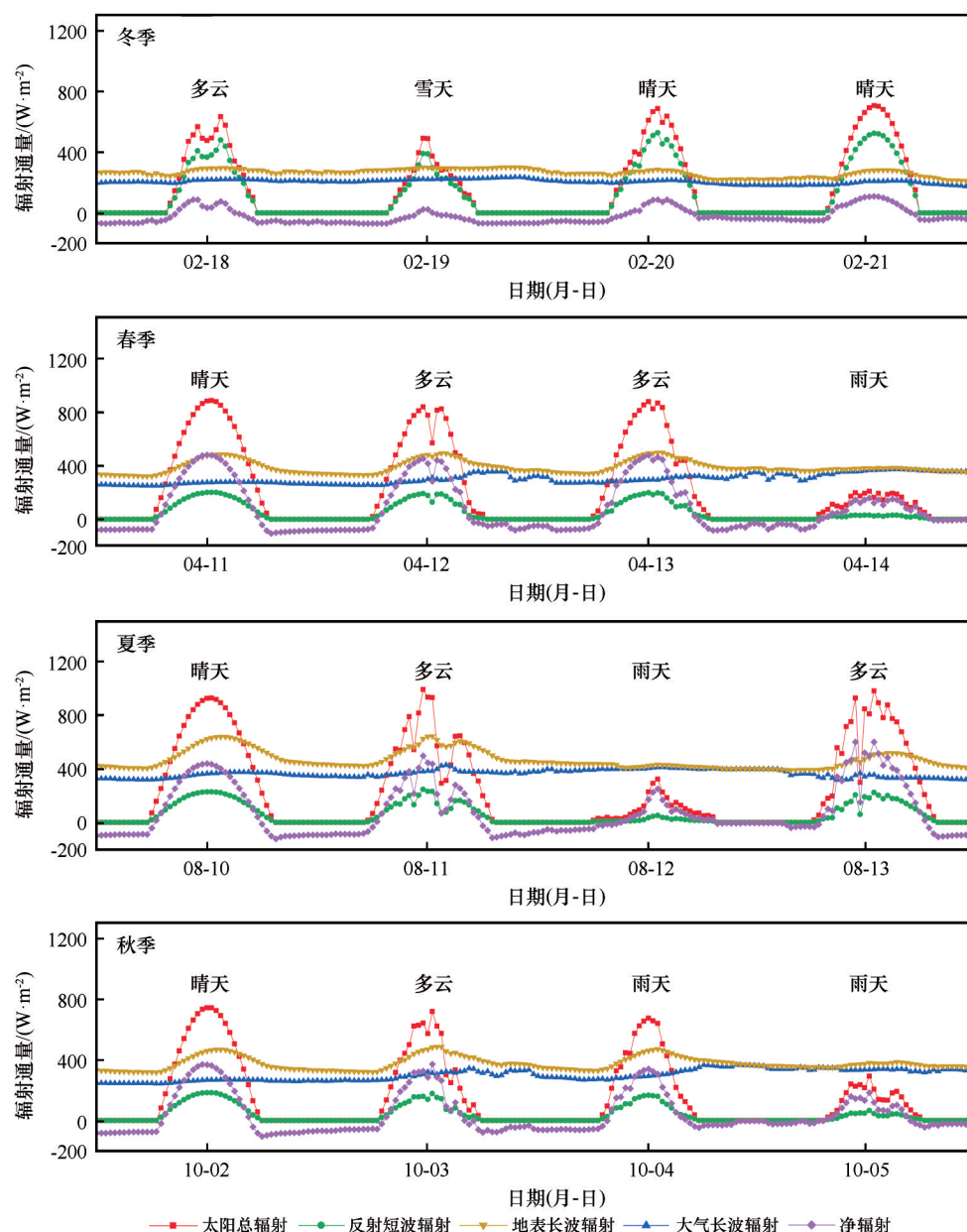


图 5 不同季节典型天气下地表辐射收支的日变化

Fig.5 The diurnal variation of surface radiation budget in typical weather in different seasons

多云<雨天和雪天。这是因为夜间净辐射均为负值,代表地表损失能量,而云的逆辐射作用导致天气越晴朗,地表损失的能量就越多,净辐射就越小。

8月12日有降雨(降雨量为8.8 mm),除8月9、15日晴天外,其他白天均为多云天气。从图6A、B可知,夏季晴天地表反照率日变化为早晚高、中午低的“U”型曲线;多云天气因云量较大,日变化有一定波动;雨天地表反照率日变化波动更大,且整体低于雨前,这是因为降雨发生时表层土壤湿度逐渐增大,使得地表反照率减小。雨后第二天地表反照率日变化先低后高(8月13日),主要是因为日出后

随着太阳辐射增强地表温度上升,地表水分蒸发增大,从而导致表层土壤湿度逐渐减小,进而使地表反照率升高,恢复到晴天状态。总体而言,降雨前后地表反照率日均值为雨前晴天(0.26)>雨后晴天(0.25)>雨后多云(0.23)>雨天(0.22),需要指出,雨后晴天(8月15日)地表反照率略低于雨前晴天,说明观测点土壤有一定的蓄水能力。

12月27日有降雪,降雪量为3.6 mm。从图6C可知,降雪前(12月26日)地表反照率日变化表现为上午高、下午低,且08:00—14:00有明显的减小趋势,这是因为夜晚产生的露水的散射作用,使上午

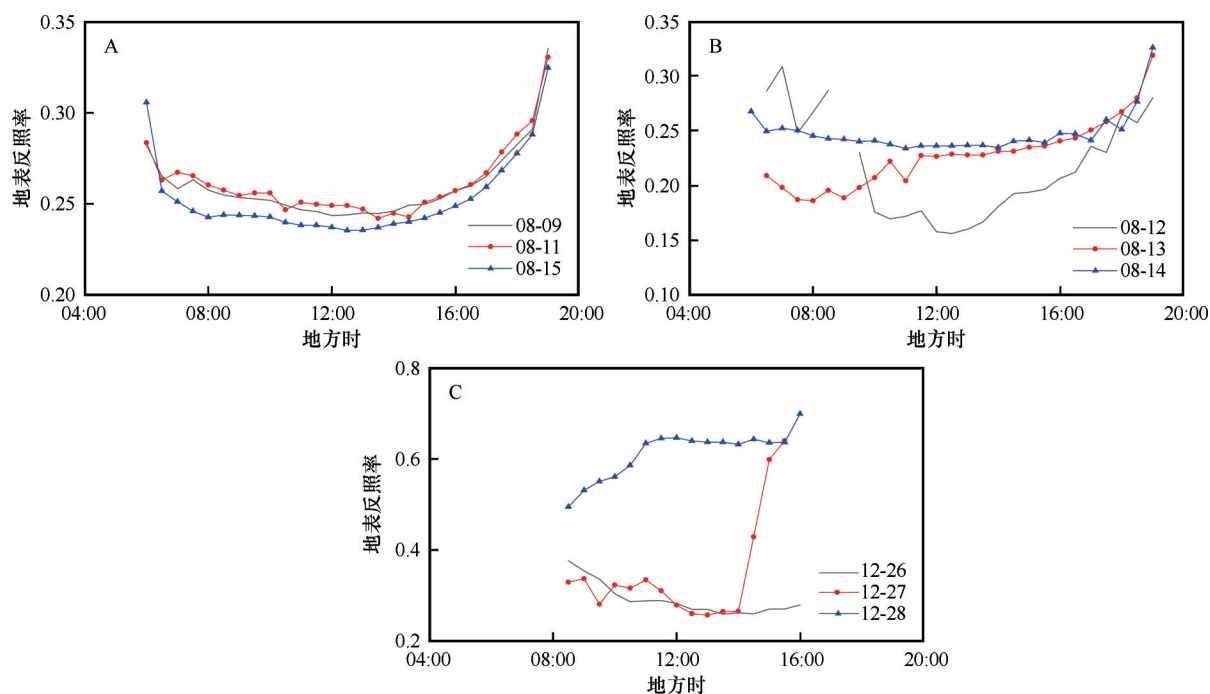


图6 降雨(8月9—15日)和降雪(12月26—28日)前后地表反照率的日变化

Fig.6 The diurnal variation of surface albedo around rainfall and snowfall periods

的地表反照率增加,从而导致了上午的地表反照率大于下午的不对称现象。降雪日(12月27日)08:00—14:00地表反照率变化与前一天基本一致,14:00以后,下垫面逐渐由裸土转为积雪,地表反照率大幅增加,至日落时高达0.62。降雪过后(12月28日),地表反照率整体大于降雪前,日变化表现上午低、下午高。总体而言,地表反照率表现为雪后晴天>雪天>雪前晴天,三者日均值分别为0.61、0.35、0.29。

3.4 融雪前后地表辐射与反照率的变化

太阳总辐射作为积雪融化的主要能量来源,其日变化主要与每日的天气状况有关。3月15—20日,因多云天气较多,太阳总辐射日变化相对较弱,日均值为 $270.3\text{--}483.6\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ (图7),进而导致该期间积雪融化较慢,雪深由17.3 cm降至13.7 cm,仅降低3.6 cm(图8);3月21日夜间降雪,该日雪深日均值升至13.9 cm,随后迎来连续4日的晴天,太阳总

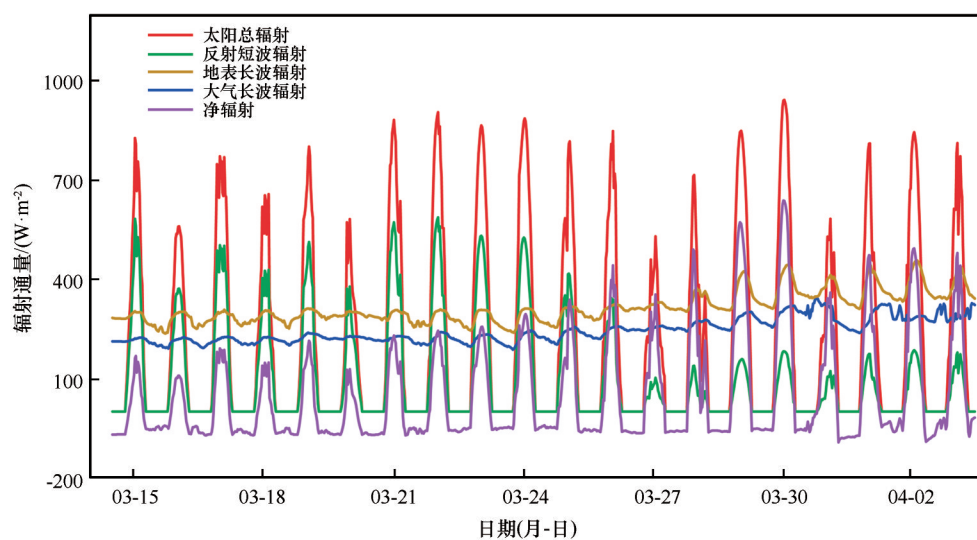


图7 融雪前后地表辐射收支的日变化

Fig.7 The diurnal variation of surface radiation budget around snowmelt period

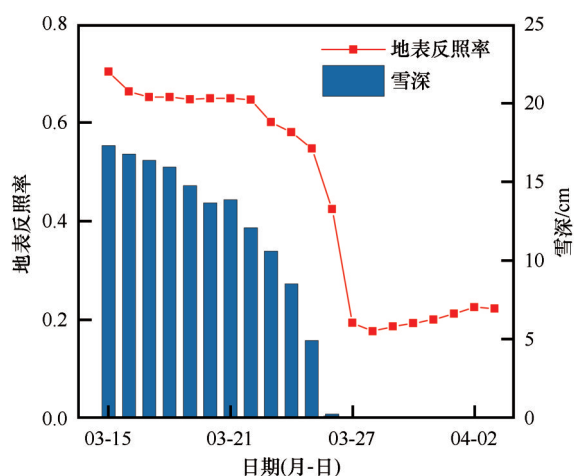


图8 融雪前后地表反照率与雪深的日均值变化

Fig.8 The variations of daily mean surface albedo and snow depth around snowmelt period

辐射日变化相对较强,日均值为 $439.7\text{--}555\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$,进而导致积雪快速融化,至3月26日雪深已不到1 cm;3月27日至4月3日,太阳总辐射因天气多变,日变化亦较为复杂,日均值 $284.9\text{--}583.9\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$;另一方面,由于积雪已完全融化,再加上雪融水下渗,湿润的土壤裸露出地表,并随着雪融水的下渗和蒸发,表层土壤逐渐变干。

反射短波辐射的日变化与太阳总辐射较为一致,3月15—22日,雪深整体处于12 cm以上,地表反照率日均值整体较高且变化较小($0.65\text{--}0.7$),反射短波辐射日均值亦相对较高($229.6\text{--}348.8\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$);3月22日以后,随着积雪进一步融化,地表反照率逐日下降,日均值于3月27日积雪完全融化时降至 0.19 ,相应的反射短波辐射日均值于3月27日降至 $55.1\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 。3月28日一场降雨(降水量为 0.4 mm)之后,随着雪融水下渗以及表层土壤水分蒸发,地表反照率逐日上升,但整体较低,日均值处于 $0.18\text{--}0.22$,相应的反射短波辐射日均值亦较低,整体处于 $62.5\text{--}112.8\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 。

地表和大气长波辐射的日变化在3月15—27日相对较弱,二者该期间日均值分别为 $272.3\text{--}290.2\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 和 $210.1\text{--}222.4\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$;3月27日至4月3日日变化表现为逐日增强,二者日均值分别为 $318.1\text{--}381.3\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 和 $251.8\text{--}300.7\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 。造成这种差异的原因是地表存在积雪时,到达地表的太阳能量主要用于积雪融化和水分蒸发,地表温度始终较低且变化较小,从而导致3月27日以前地表和

大气长波辐射较低;而地表积雪完全融化后,到达地表的太阳能量大部分被地表吸收,使得近地层温度及其日较差逐渐增大,进而导致该期间地表和大气长波辐射的日变化较强。

净辐射的日变化与太阳总辐射较为一致,但收入量在积雪快速融化时表现为逐日上升。3月15—20日净辐射的日变化相对较弱,日均值为 $-25.2\text{--}11.5\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$,这是因为该期间太阳总辐射较弱,反射短波辐射较强;3月21—26日由于反射短波辐射逐日减弱,导致净辐射日变化表现为逐日增强,日均值由 $19.7\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 增至 $58.4\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$;3月27日至4月3日由于反射短波辐射相对较弱,净辐射收入量主要由太阳总辐射控制,日均值为 $43.8\text{--}158.2\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 。

4 结论

古尔班通古特沙漠腹地辐射收支各分量月平均的日变化均为早晚低、正午高的单峰型曲线,但极值大小及其出现时间存在差异。太阳总辐射和净辐射日峰值的最大均出现在5月($905.7, 480.5\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$),反射短波辐射则出现在3月($416\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$),地表和大气长波辐射峰值均出现在7月($611.5, 385.3\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$)。太阳总辐射和反射短波辐射各月日峰值主要在 $12:00\text{--}13:00$,长波辐射峰值在 $14:00\text{--}15:30$,净辐射峰值在 $12:00\text{--}14:00$ 。

古尔班通古特沙漠腹地辐射收支各分量的平均月曝辐量季节变化明显,太阳总辐射表现为生长期>积雪期>凋零期,反射短波辐射表现为积雪期>生长期>凋零期,长波辐射和净辐射表现为生长期>凋零期>积雪期。太阳总辐射、地表和大气长波辐射的月曝辐量最大值均出现在7月,分别为 $842.5, 1\,342.43, 988.89\text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$;反射短波辐射和净辐射则分别出现在3月和5月,依次为 $312.6\text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ 和 $299.31\text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ 。

古尔班通古特沙漠腹地反照率4—11月的日变化为“U”型曲线。全年最大和最小月均值分别出现在1月和4月,依次为 0.766 和 0.233 ,年均值为 0.367 。地表反照率季节变化表现为积雪期 $0.7>$ 生长期 $0.27>$ 凋零期 0.246 。古尔班通古特沙漠积雪融化前(2017年3月15日积雪开始融化)地表始终覆盖稳定积雪,地表反照率日均值一直处于 0.7 以

上,而其他沙漠地区相应时期降雪较少且融化较快,造成同时期古尔班通古特沙漠地表反照率相对较高。

古尔班通古特沙漠腹地晴天辐射收支各分量的日变化为光滑的倒“U”型曲线,多云、雨天及雪天则不如晴天平滑,其中雪天短波辐射和净辐射日变化曲线呈倒“V”型。太阳总辐射、反射短波辐射及净辐射对云和降水较为敏感且在不同季节均表现为减弱,而长波辐射受云和降水的影响较小,其中大气长波辐射在不同季节均表现为增强,地表长波辐射在冬季表现为增强,在其他季节表现为减弱。地表反照率在降雨前后表现为雨前晴天>雨后晴天>雨天,降雪前后则表现为雪后晴天>雪天>雪前晴天。

积雪快速融化对地表反照率、反射短波辐射及净辐射影响较大,对长波辐射影响较小。地表反照率日均值由 0.65 降至 0.19,反射短波辐射则由 $229.6 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 降至 $55.1 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$,而净辐射则由 $19.7 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 增至 $58.4 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。积雪快速融化对长波辐射影响相对滞后,长波辐射日变化在积雪完全融化后随近地表升温逐日增强。

参考文献:

- [1] 张强,王胜.干旱荒漠区土壤水热特征和地表辐射收支年变化规律研究[J].自然科学进展,2007(2):211-216.
- [2] 张强,孙昭莹,王胜.黄土高原定西地区陆面物理量变化规律研究[J].地球物理学报,2011,54(7):1727-1737.
- [3] 岳平,张强,赵文,等.云和降水扰动对黄土高原半干旱草地辐射收支及能量分配的影响[J].物理学报,2013,62(20):1-14.
- [4] Zhang X, Gu S, Zhao X Q, et al. Radiation partitioning and its relation to environmental factors above a meadow ecosystem on the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2010, 115(D10): 985-993.
- [5] Shi Q, Liang S. Characterizing the surface radiation budget over the Tibetan Plateau with ground-measured, reanalysis, and remote sensing data sets: 2. Spatiotemporal analysis[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2013, 118(17): 9642-9657.
- [6] Wang S Y, Zhang Y, Lyu S H, et al. Radiation balance and the response of albedo to environmental factors above two alpine ecosystems in the eastern Tibetan Plateau[J]. Sciences in Cold and Arid Regions, 2017, 9(2): 142-150.
- [7] 张强,王蓉,岳平,等.复杂条件陆-气相互作用研究领域有关科学问题探讨[J].气象学报,2017,75(1):39-56.
- [8] 殷代英,屈建军,余晔,等.敦煌湖泊湿地生态系统地表辐射收支特征[J].中国沙漠,2018,38(1):172-181.
- [9] Yang F, Huang J P, Zhou C L, et al. Taklimakan desert carbon-sink decreases under climate change[J]. Science Bulletin, 2020, 65(6): 431-433.
- [10] 王超,韦志刚,高晓清,等.夏季敦煌稀疏植被下垫面物质和能量交换的观测研究[J].高原气象,2012,31(3):622-628.
- [11] 杨帆,邵全琴,李愈哲,等.北方典型农牧交错带草地开垦对地表辐射收支与水热平衡的影响[J].生态学报,2016,36(17):5440-5451.
- [12] 顾润源,武荣盛,吴菊秀,等.内蒙古半干旱草原下垫面地表辐射特征[J].干旱区地理,2013,36(5):854-864.
- [13] 岳平,张强,邓振镛,等.草原生长期地表辐射和能量通量月平均日变化特征[J].冰川冻土,2010,32(5):941-947.
- [14] 陈星,余晔,陈晋北,等.黄土高原半干旱区雨养农田地表辐射和能量通量的季节变化[J].高原气象,2016,35(2):351-362.
- [15] 王兴,张强,王胜.中国黄土高原半湿润地区陆面温、湿特性及辐射收支特征研究[J].高原气象,2013,32(5):1272-1279.
- [16] 孙昭莹,张强.黄土高原半干旱区陆面温度和能量的气候特征分析[J].中国沙漠,2011,31(5):1302-1308.
- [17] 次仁尼玛,单增罗布,宣越健,等.青藏高原羊八井地区地表辐射的季节变化特征[J].高原气象,2013,32(5):1253-1260.
- [18] 谷星月,马耀明,马伟强,等.青藏高原地表辐射通量的气候特征分析[J].高原气象,2018,37(6):1458-1469.
- [19] 李宏毅,肖子牛,朱玉祥.藏东南地区草地下垫面湍流通量和辐射收支各分量的变化特征[J].高原气象,2018,37(4):923-935.
- [20] Yang T, Wang X Y, Zhao C Y, et al. Changes of climate extremes in a typical arid zone: Observations and multimodel ensemble projections[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2011, 116(D19): 106-124.
- [21] 杨帆,王顺胜,何清,等.塔克拉玛干沙漠腹地地表辐射与能量平衡[J].中国沙漠,2016,36(5):1408-1418.
- [22] 赵佳伟,何清,金莉莉,等.塔克拉玛干沙漠腹地秋季陆面过程特征[J].中国沙漠,2019,39(4):159-167.
- [23] 金莉莉,何清,买买提艾力·买买提依明,等.塔克拉玛干沙漠腹地辐射收支和反照率变化特征[J].中国沙漠,2014,34(1):215-224.
- [24] 李帅,胡列群,何清,等.塔克拉玛干沙漠腹地地表辐射收支特征研究[J].中国沙漠,2012,32(4):1035-1044.
- [25] 王延慧,史玉光,买买提艾力·买买提依明,等.塔克拉玛干沙漠北缘辐射分量特征[J].中国沙漠,2013,33(6):1824-1831.
- [26] 马宁,王乃昂,黄银洲,等.巴丹吉林沙漠腹地夏季不同天气条件下陆-湖面辐射收支与能量分配特征对比[J].自然资源学报,2015,30(5):796-809.
- [27] 马迪,吕世华,奥银焕,等.巴丹吉林沙漠不同下垫面辐射特

- 征和地表能量收支分析[J].高原气象,2012,31(3):615-621.
- [28] 李建刚,奥银焕,吕世华,等.巴丹吉林沙漠与小尺度湖泊夏季地表特征对比分析[J].高原气象,2014,33(3):647-657.
- [29] 杨帆,买买提艾力·买买提依明,何清,等.巴丹吉林沙漠拐子湖地表辐射与能量平衡特征[J].中国沙漠,2015,35(6):1636-1643.
- [30] 李建刚,奥银焕,李照国.夏季不同天气条件下沙漠辐射和能量平衡的对比分析[J].地理科学进展,2012,31(11):1443-1451.
- [31] 季国良,邹基玲.干旱地区绿洲和沙漠辐射收支的季节变化[J].高原气象,1994,12(3):100-106.
- [32] 王凯,张宏升,刘辉志,等.科尔沁沙地流动沙丘与玉米地辐射特性比较分析[J].应用气象学报,2005,3(2):174-180.
- [33] 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,200,1(3):389-398.
- [34] 魏文寿,董光荣.古尔班通古特沙漠的辐射热量交换分析[J].中国沙漠,1997,17(4):3-9.
- [35] 塔依尔,吕新,杨利勇.石河子垦区沙漠和绿洲下垫面生态条件下能量交换特征[J].中国沙漠,2007,3(3):478-482.
- [36] 刘冉,王勤学,唐立松,等.盐生荒漠地表水热与二氧化碳通量的季节变化及驱动因素[J].生态学报,2009,29(1):67-75.
- [37] 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,2002,11(11):1923-1932.
- [38] 王雪芹,蒋进,王远超,等.古尔班通古特沙漠南部短命植物生长对水热条件变化的响应[J].科学通报,2006,51(增刊1):88-93.
- [39] 石亚飞,张志山,黄磊,等.古尔班通古特沙漠半固定沙丘植物群落物种组成和种群结构[J].应用生态学报,2016,27(4):1024-1030.
- [40] Ali M, Wang Y, Hajigul S, et al. Seasonal variations of the near-surface atmospheric boundary layer structure in China's Gurbantünggüt Desert [J]. *Advances in Meteorology*, 2020 (4): 1-13.
- [41] 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.
- [42] Norman G L, Wang H L, Richard P A, et al. New generation of climate models track recent unprecedented changes in earth's radiation budget observed by CERES [J]. *Geophysical Research Letters*, 2020, 47(5): 1134-1150.
- [43] 买买提艾力·买买提依明,金莉莉,李振杰,等.2007—2011年塔克拉玛干沙漠腹地太阳辐射观测研究[J].气候变化研究进展,2014,10(2):87-94.
- [44] 杨阳,杨帆,买买提艾力·买买提依明,等.塔克拉玛干沙漠塔中与巴丹吉林沙漠拐子湖地表辐射特征对比[J].中国沙漠,2018,38(5):1068-1077.
- [45] 肖登攀,陶福祿,Moïwo J P. 全球变化下地表反照率研究进展[J].地球科学进展,2011,26(11):1217-1224.

Characteristics of surface radiation budget in Gurbantunggut Desert

Gao Jiacheng^{1,2}, Wang Yu², Sayit Hajigul³, Mamtimin Ali², Liu Yongqiang¹, Zhao Xueshang^{1,2},
Yang Xinghua², Huo Wen², Yang Fan², Zhou Chenglong²

(1. College of Recourse and Environment Sciences, Xinjiang University, Urumqi 830046, China; 2. Desert Meteorology
Field Experiment Station of CMA, Institute of Desert Meteorology, China Meteorological Administration, Urumqi
830002, China; 3. Xinjiang Meteorological Society, Urumqi 830002, China)

Abstract: As the largest fixed and semifixed desert in China, the Gurbantunggut Desert presents the obvious variety on local surface radiation budget and energy balance. In order to clarify the law of evolution of the surface radiation budget over the desert, the variation characteristics of the desert surface radiation under different time scales and different weather conditions were analyzed by using the radiation data of the Kelameili observation station in the hinterland of Gurbantunggut Desert in 2017. The results showed that: (1) The monthly mean diurnal variation curves of surface radiation components were all in unimodal type, but extreme values of which appeared at different times and were unequal. The monthly total variation of surface radiation components were obvious: mean monthly total of the downward long-wave radiation were ranked as growth phase (April–September) > snow cover phase (January–March) > withering phase (October–December), and which of upward short-wave radiation ranked as snow cover phase > growth phase > withering phase, while which of long-wave radiation and net radiation were all ranked as growth phase > withering phase > snow cover phase. (2) The monthly mean diurnal variation of surface albedo were all in U-shaped curves from April to November. The annual mean value was 0.367. The average values of snow cover phase, growth phase, and withering phase were 0.7, 0.246, and 0.27, respectively. The daily mean values was greater than 0.7 from January 1 to March 15 because Gurbantunggut Desert has been covered within the snow covered continuously during this period. (3) On clear day, The diurnal variation of surface radiation components was smooth inverted U-shaped curves, while which on cloudy and rainy day became irregular. On snow day, the diurnal variation of short-wave radiation and net radiation were inverted V-shaped curve, while which of long-wave radiation was inconspicuous. During the rainfall and snowfall periods, the daily mean values of surface albedo were ranked as the day before rainfall > the day after rainfall > rainy day and as the day after snowfall > snow day > the day before snowfall, respectively. (4) During the snow-melt period, the variation of radiation components was obvious: the daily mean value of surface albedo and upward short-wave radiation decreased day by day when snow cover melted rapidly, while which of net radiation increased. Before snow cover had melted completely, the diurnal variation of long-wave radiation was inconspicuous, but which after snow cover melted completely increased.

Key words: Gurbantunggut Desert; surface radiation budget; surface albedo