

DOI: 10.5846/stxb202104241079

肖婉秋, 买买提艾力·买买提依明, 刘永强, 王豫, 高佳程, 阿吉古丽·沙依提, 古丽妮萨罕·麦提库尔班. 中天山地区草地地表辐射收支演变规律. 生态学报, 2022, 42(11): 4550-4560.

Xiao W Q, Ali Mamtimin, Liu Y Q, Wang Y, Gao J C, Hajigul Sayit, Gurinisahan Meticulban. The rule of grassland surface radiation budget in the middle of Tianshan Mountains. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(11): 4550-4560.

中天山地区草地地表辐射收支演变规律

肖婉秋^{1,2,5}, 买买提艾力·买买提依明², 刘永强^{1,*}, 王 豫², 高佳程², 阿吉古丽·沙依提³, 古丽妮萨罕·麦提库尔班⁴

1 新疆大学资源与环境科学学院, 乌鲁木齐 830046

2 中国气象局乌鲁木齐沙漠气象研究所/新疆塔克拉玛干沙漠气象国家野外科学观测研究站/中国气象局塔克拉玛干沙漠气象野外科学试验基地/新疆沙漠气象与沙尘暴重点实验室, 乌鲁木齐 830002

3 新疆气象学会, 乌鲁木齐 830002

4 和田地区民丰县气象局, 和田 848500

5 新疆气象信息中心, 乌鲁木齐 830002

摘要: 地表辐射对研究地表能量平衡及气候形成机制具有重要意义。利用中天山乌拉斯台地区陆气相互作用观测站 2018 年 5 月至 2019 年 4 月地表辐射数据, 分析了中天山草地不同时间尺度和不同天气条件下的地表辐射与反照率变化特征。结果表明: (1) 地表辐射月平均日变化除大气长波辐射较弱外, 其余分量均呈单峰型, 极值大小及时间存在差异, 太阳总辐射与净辐射最大日峰值均出现在 6 月, 为 920.9 与 603.3 W/m², 大气与地表长波辐射分别出现在 7 月和 8 月, 为 327.5 W/m² 与 471.7 W/m², 而反射短波辐射则出现在 2 月, 为 520.6 W/m²。(2) 太阳总辐射、反射短波辐射、大气与地表长波辐射年曝辐量分别为 6860.62、2101.72、7171.25、10089.69 MJ/m²; 就季节变化而言, 反射短波辐射曝辐量在冬季明显高于其它季节, 其它分量则均表现为夏季 > 春季 > 秋季 > 冬季。(3) 不同月份地表反照率日变化均呈“U”型曲线, 年均值为 0.393, 最大与最小月均值分别出现在 12 月与 8 月, 为 0.760 与 0.217。这种变化体现在季节上则为冬季 > 秋季 > 春季 > 夏季。(4) 晴天地表辐射各分量日变化均较为光滑, 多云、降水天则不如晴天平滑。太阳总辐射和地表长波辐射对降水的响应均为减弱, 而大气长波辐射则为增强。反射短波辐射对降水的响应与地表反照率一致, 即在雨天和降雪后分别为减弱和增强。

关键词: 中天山草地; 地表辐射收支; 地表反照率

The rule of grassland surface radiation budget in the middle of Tianshan Mountains

XIAO Wanqiu^{1,2,5}, ALI Mamtimin², LIU Yongqiang^{1,*}, WANG Yu², GAO Jiacheng², HAJIGUL Sayit³, GURINISAHAN Meticulban⁴

1 College of Resource and Environmental Sciences, Xinjiang University, Urumqi 830046, China

2 Institute of Desert Meteorology, China Meteorological Administration/National Observation and Research Station of Desert Meteorology, Taklimakan Desert of Xinjiang/Taklimakan Desert Meteorology Field Experiment Station of China Meteorological Administration/Xinjiang Key Laboratory of Desert Meteorology and Sandstorm, Urumqi 830002, China

3 Xinjiang Meteorological Society, Urumqi 830002, China

4 Meteorological Bureau of Minfeng County, Hotan Region, Hetian 848500, China

5 Xinjiang Meteorological Information Center, Urumqi 830002, China

基金项目: 第二次青藏高原综合科学考察研究项目(2019QZKK010206); 国家自然科学基金项目(41875023, 41675011); 中央级公益科研院所基本科研业务费项目(IDM2021001)

收稿日期: 2021-04-24; **网络出版日期:** 2022-01-26

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: lyqxju@163.com

Abstract: Surface radiation budget is of great significance to the research for the surface energy balance and the mechanism of climate formation and change. The variation characteristics of surface radiation budget and surface albedo at different time scales and in different weather conditions for Ulatai grassland area in the middle of Tianshan Mountains were analyzed by using observation data in the middle of Tianshan Mountains Land-Atmosphere Interaction Observation Station from May 2018 to April 2019. The results demonstrated that: (1) the monthly mean diurnal variation curves of surface radiation components, except that the curve of downward long-wave radiation was weak, were all in unimodal type. The extreme values of surface radiation components appeared at different times and were unequal. The extreme value of the diurnal curves for both of the downward short-wave radiation and the surface net radiation appeared in June, which were 920.9 W/m^2 and 603.3 W/m^2 . The extreme values of the diurnal curves for both of downward and upward long-wave radiation appeared in July and August, which were 327.5 W/m^2 and 471.7 W/m^2 . But the extreme value of the diurnal curve for upward short-wave radiation appeared in February, which was 520.6 W/m^2 . (2) The annual total values of downward short-wave radiation, upward short-wave radiation, downward long-wave radiation and upward long-wave radiation were 6860.62 MJ/m^2 , 2101.72 MJ/m^2 , 7171.25 MJ/m^2 , and 10089.69 MJ/m^2 . In terms of seasonal variations for surface radiation components, the monthly total value of upward short-wave radiation was significantly higher in winter than in other seasons, while the monthly total values of other surface radiation components ranked as summer>spring>autumn>winter. (3) The monthly mean diurnal variations of surface albedo were all in U-shaped curves in different months. The average annual value of surface albedo was 0.393, and the extreme and minimum monthly mean values of surface albedo appeared in December and August, which were 0.760 and 0.217, respectively. In terms of seasonal variations for the surface albedo, the seasonal mean values of surface albedo ranked as winter>autumn>spring>summer. (4) The diurnal variation curves of surface radiation components were more smooth on clear day than cloudy and rainy days. The responses of downward short-wave radiation and upward long-wave radiation to precipitation were weakened, while downward long-wave radiation was enhanced. The response of upward short-wave radiation to precipitation was consistent with surface albedo, which was weakened and enhanced in rainy days and after snowfall, respectively.

Key Words: grassland of middle Tianshan Mountains; surface radiation budget; surface albedo

陆面过程是陆-气间物质与能量交换的主要途径。地表辐射收支是陆面过程研究的重要内容^[1],也是水热交换中的一个重要参量,在半干旱气候变化中发挥主要作用,同时又是地球表面转化太阳能量及实现热量循环的重要环节^[2-4]。地表辐射作为气候变化的主要影响因子之一,其改变体现着区域乃至全球气候的变化状况^[5-7]。研究地表辐射收支过程,对客观量测气候状态及估计未来气候变化具有重要意义。20世纪80年代开始,不同生态系统辐射收支观测与研究逐渐成为学界广泛关注的热点问题^[8-13]。近年来,国内、外科学家在不同地区开展了大量陆面野外观测试验,并在地表辐射方面取得诸多进展^[14-20],国内辐射收支研究在青藏高原^[21-23]、内蒙古^[24-26]及西北干旱区^[27-29]等均获得了重要成果,为理解不同区域陆面过程提供了珍贵参考依据。

草地作为陆地生态系统最重要的组成部分之一,其地表辐射收支研究极为迫切^[30]。针对草地生态系统,王少影等^[19]利用中国气象科学院气候与环境综合观测研究站2010年观测数据,分析玛曲高寒草甸地表辐射特征,发现该地太阳总辐射转化为地表长波辐射的比值明显高于低海拔草地;顾润源等^[25]选取锡林浩特国家气候观测台2010年辐射观测资料,分析内蒙古半干旱草地下垫面辐射各分量变化特征,发现该地太阳总辐射季节变化表现为夏季>春季>秋季>冬季。此外,殷代英等^[27]根据2013年干旱环境背景下敦煌西湖湿地站辐射数据,分析该地区辐射季节变化特征,得出晴天变化曲线呈光滑单峰型,而雨天和沙尘天呈不规则多峰型变化的结论;次仁尼玛等^[21]利用一年辐射资料,对青藏高原羊八井地区地表辐射变化特征进行分析,指出该地存在总辐射瞬时值超出太阳常数的个例,且主要出现在夏季。然而,目前有关西北干旱区中天山草地生态系统辐射收支分析及其同期对比的研究较少。中天山地理位置特殊,植被类型复杂,考虑到中天山草地下垫面的特殊性,研究中天山草地辐射收支变化特征意义重大。因此,本文利用中天山乌拉斯台草地站2018年5—

2019年4月连续一年地表辐射观测资料,对该草地地表辐射收支与反照率在不同时间尺度和不同天气条件下的变化特征进行分析,以期了解中天山草地下垫面陆面过程演变规律提供参考。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

天山横亘于欧亚大陆腹地,横穿新疆维吾尔自治区全境,东西跨度超过 2500 km,南北平均距离约 250—350 km,有“中亚水塔”之称,中天山位于天山山脉核心部位,是世界上距离海洋最远的山系^[31]。研究区位于中天山乌拉斯台草地,属于典型温带大陆性气候,冬季寒冷且持续时间长,夏季温凉但时间短。受西风环流及北冰洋高纬气团和印度洋暖湿气流交汇作用的影响,该区域温度、湿度变化都较大。天山日照时间长,太阳总辐射量大,年日照时数达 2429 h,昼夜温差大,年平均气温 2.40 °C,年降水量 468.64 mm,年蒸发量 1193.60 mm。在此背景下,天山不同区域降水、温度与植被种类不尽相同,其中中天山最重要的植被覆盖类型当属草地,草地植被群落以羊茅、针茅、草甸早熟禾等为主^[32–33]。

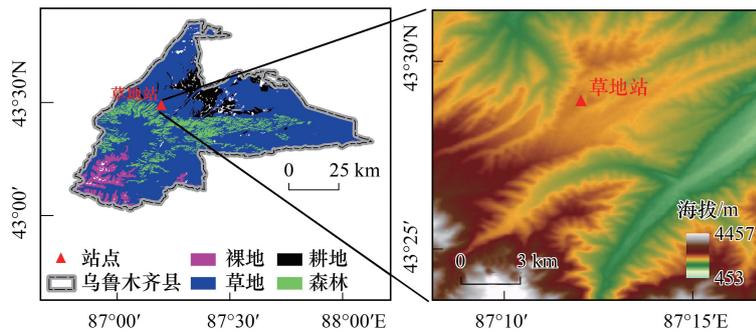


图1 中天山草地站周边下垫面类型及地形图

Fig.1 Types and topographic maps of underlying surface around the grassland station in the Middle Tianshan Mountains

1.2 数据处理

观测数据来自中国气象局乌鲁木齐沙漠气象研究所于 2016 年建设的乌鲁木齐白杨沟乌拉斯台地区中天山草地陆—气相互作用观测试验站(简称“草地站”,43°28′55.88″N,87°12′5.76″E,海拔 2036 m)。如图 1 所示,草地站位于中天山乌拉斯台草地,站内有辐射观测系统、梯度探测系统以及涡动相关系统。本文数据主要来自辐射观测系统,所用仪器包括净辐射传感器(荷兰 Hukseflux 公司,型号 NR01,安装高度 1.5 m,采集器型号 CR1000),土壤湿度传感器(美国 Campbell Scientific 公司,型号 CS616,观测深度 2、5、10、20、40 cm,采集器型号 CR3000);这些仪器的采集频率均为 1 Hz,并输出 10 s、1 min、30 min、1 d 数据,数据采集器所用时间均为地方时,与北京时相差 2 h。计算前剔除明显异常值、小于 20 W/m² 的太阳总辐射及对应的反射短波辐射。文中有关平均值的计算,短波辐射为白天平均,而长波辐射与净辐射则为全天平均。仪器相关参数见表 1。

选取 2018 年 5 月 1 日至 2019 年 4 月 30 日连续一年同步观测的辐射四分量数据进行分析。根据草地站实测数据,计算草地下垫面地表净辐射以及地表反照率,公式如下^[34]:

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

$$\alpha = SW \uparrow / SW \downarrow \quad (2)$$

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 $LW \uparrow$ 分别为太阳总辐射、反射短波辐射、大气和地表长波辐射, α 为地表反照率。辐射通量单位均为 W/m²。

晴空指数(k_t , clearness index)计算公式如下^[35]:

$$k_t = SW \downarrow / S_e \downarrow \quad (3)$$

表 1 仪器及参数

Table 1 The instruments and parameters

传感器 Sensors	观测项目 Observation items	测量范围 Observation range	测量精度 Measurement accuracy
NR01 净辐射传感器	短波辐射	285—3000 nm	<1.8%
NR01 net radiation sensor	长波辐射	4500—40000 nm	<7%
CS616 土壤湿度探测仪	土壤湿度	0%—水饱和	<0.1% VWC
CS616 soil moisture detector			
SR50A-L 雪深传感器	雪深	0.5—10 m	±1.0 cm 或±0.4%
SR50A-L snow depth sensor			

VWC: 表示土壤体积含水量 Volumetric water content

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

式中, S_e 为天文辐射, S_{sc} 为太阳常数 (1367 W/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_i 值接近于 0 表示天空云量增加, 太阳辐射弱; k_i 值接近于 1 则反之。本文利用晴空指数的大小来区分不同天空状况, 即 $k_i > 0.7$ 为晴天, $0.3 \leq k_i \leq 0.7$ 为多云, $k_i < 0.3$ 为阴天^[7]。

2 结果与分析

2.1 地表辐射收支变化特征

2.1.1 地表辐射月平均日变化

中天山草地地表太阳总辐射月平均日变化均呈单峰型, 同时受气候条件影响, 日变化幅度季节波动较为明显(图 2)。太阳总辐射具体表现为 5—9 月保持在较高水平, 10—12 月逐渐减小, 次年 1—3 月继续增大, 而 4 月又略有减小。各月日峰值集中在 12:00—13:00, 最大和最小日峰值分别出现在 6 月和 12 月, 分别为 920.9 与 511.8 W/m^2 , 月均值为 $300.7—503.5 \text{ W/m}^2$; 此外, 3 月和 4 月太阳总辐射日峰值相差较大, 分别为 919.9 与 792.5 W/m^2 , 这是 3 月晴天较多, 而 4 月多云、降水天气频繁所致。不同月份反射短波辐射月平均日变化亦呈

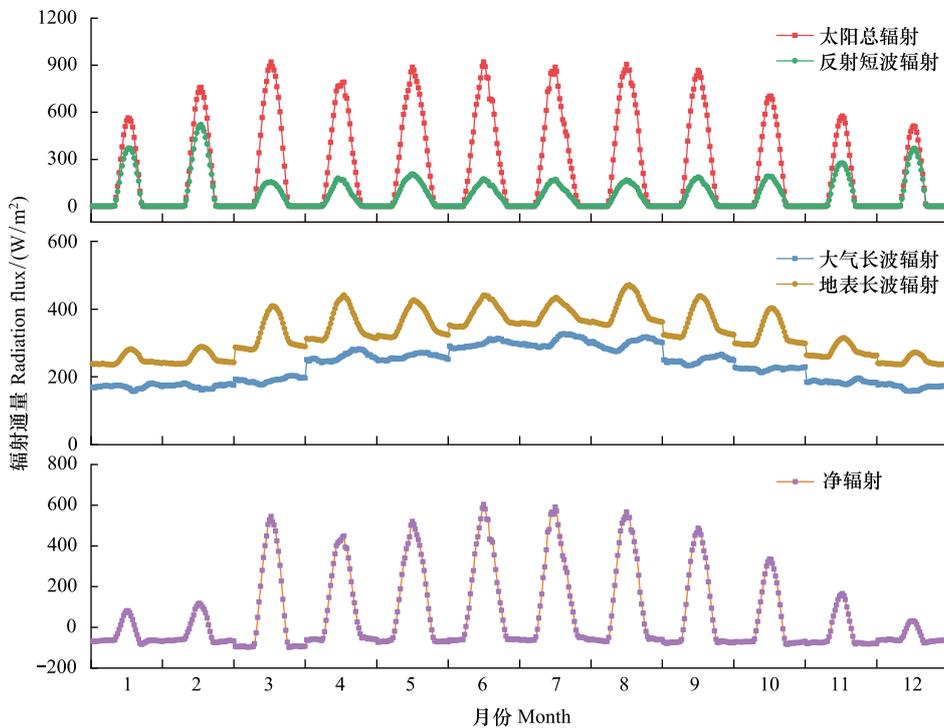


图 2 地表辐射收支的月平均日变化

Fig.2 The monthly mean diurnal variation of surface radiation budget

单峰型,但极值出现时间不同于太阳总辐射,集中在 11:00—13:00,最大和最小日峰值分别出现在 2 月和 3 月,为 520.6 W/m^2 与 156.2 W/m^2 ,月均值为 $92.0\text{—}291.7 \text{ W/m}^2$ 。

大气长波辐射月平均日变化较为平缓,具体表现为 4—8 月保持在较高水平,9—12 月逐渐减小,次年 1—3 月又逐渐增大。大气长波辐射日峰值出现的时间比短波辐射跨度更大,最大和最小日峰值分别出现在 7 月和 12 月,为 327.5 与 179.6 W/m^2 ,月均值为 $169.5\text{—}305.3 \text{ W/m}^2$;地表长波辐射月平均日变化趋势与短波辐射较一致,全年变化与大气长波辐射趋势基本一致,但日峰值却有极大不同,具体表现为:5—6 月呈上升趋势,6—8 月呈先下降后上升趋势,9—12 月下降更快,次年 1—4 月又呈上升趋势;地表长波辐射日峰值集中在 12:30—13:00,最大与最小日峰值分别出现在 8 月和 12 月,为 471.7 与 272.4 W/m^2 ,月均值为 $246.0\text{—}397.1 \text{ W/m}^2$ 。

净辐射夜间变化较小,但白天与太阳总辐射的变化基本一致。草地净辐射具体表现为:5—8 月保持在较高水平,9—12 月减小,次年 1—4 月又持续增大。其日峰值集中在 12:00—13:00,最大和最小日峰值分别出现在 6 月和 12 月,为 603.3 与 31.2 W/m^2 ,月均值为 $-46.9\text{—}149.7 \text{ W/m}^2$ 。

2.1.2 地表辐射月曝辐量

图 3 为辐射月曝辐量变化,太阳总辐射年曝辐量为 6860.62 MJ/m^2 ,平均月曝辐量为 571.72 MJ/m^2 。全年最大和最小月曝辐量分别出现在 5 月和 12 月,分别为 781.20 MJ/m^2 与 294.14 MJ/m^2 。太阳总辐射曝辐量季节变化明显,为夏季>春季>秋季>冬季。

反射短波辐射年曝辐量为 2101.72 MJ/m^2 ,平均月曝辐量为 175.14 MJ/m^2 。全年最大和最小月曝辐量分别出现在 2 月和 9 月,分别为 311.09 MJ/m^2 和 126.81 MJ/m^2 。冬季曝辐量平均值为 252.27 MJ/m^2 ,明显高于其它季节。

大气与地表长波辐射年曝辐量分别为 7171.25 MJ/m^2 与 10089.69 MJ/m^2 ,平均月曝辐量分别为 597.60 MJ/m^2 与 840.81 MJ/m^2 ,全年最大曝辐量均出现在 7 月,分别为 817.66 MJ/m^2 与 1031.64 MJ/m^2 ,全年最小曝辐量均出现 2 月,分别为 406.82 MJ/m^2 与 600.13 MJ/m^2 。大气与地表长波辐射季节变化与太阳总辐射一致,均为夏季>春季>秋季>冬季。

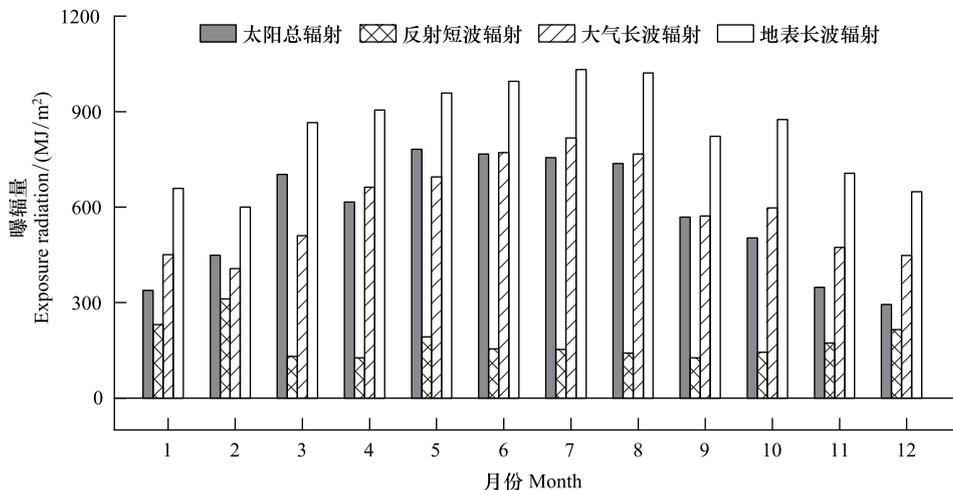


图 3 地表辐射收支的月曝辐量变化

Fig.3 The monthly total variation of surface radiation budget

2.1.3 地表辐射日均值变化

图 4 为中天山草地生态系统 2018 至 2019 连续一年各辐射分量日均值变化,太阳总辐射最大和最小日均值分别出现在 5 月 25 日和 10 月 4 日,为 776.2 W/m^2 与 75.5 W/m^2 。太阳总辐射具有明显的季节变化特征,春、夏季较大,秋季较小,冬季降低至全年最小。从振幅上看,亦为春、夏季较大而冬季最小。

反射短波辐射最大与最小日均值分别出现在 5 月 8 日和 5 月 14 日,为 452.7 W/m^2 与 12.9 W/m^2 。反射

短波辐射最大值比太阳总辐射出现的时间早约半月,主要是因为中天山积雪时间长,植物复苏时间略晚,地表发白发黄颜色偏浅,所以反照率较高,反射短波辐射较大。至夏季,植被生长迅速,NDVI 升高,且伴有少量降雨,夏季反射短波整体上比春季小。此外,夏季与另外三季不同,振幅最小且没有出现日均值突然增大的情况。冬季日均值明显高于其它季节。

大气长波辐射日均值整体水平低于地表长波辐射,但两者日均变化曲线基本类似,且最大与最小日均值出现时间也类似。大气与地表长波辐射最大日均值分别出现在 7 月 4 日和 8 月 7 日,为 348.3 W/m^2 与 422.2 W/m^2 ,最小日均值都出现在 1 月 30 日,为 98.6 W/m^2 与 214.7 W/m^2 。

净辐射日均值变化趋势与太阳短波辐射的变化较为一致,春、夏季最大,秋季次之,冬季最小,夏季振幅大而冬季振幅小,一年中日平均净辐射变化在 $-54.9—452.0 \text{ W/m}^2$,最大和最小值分别出现在 6 月 20 日与 12 月 22 日。

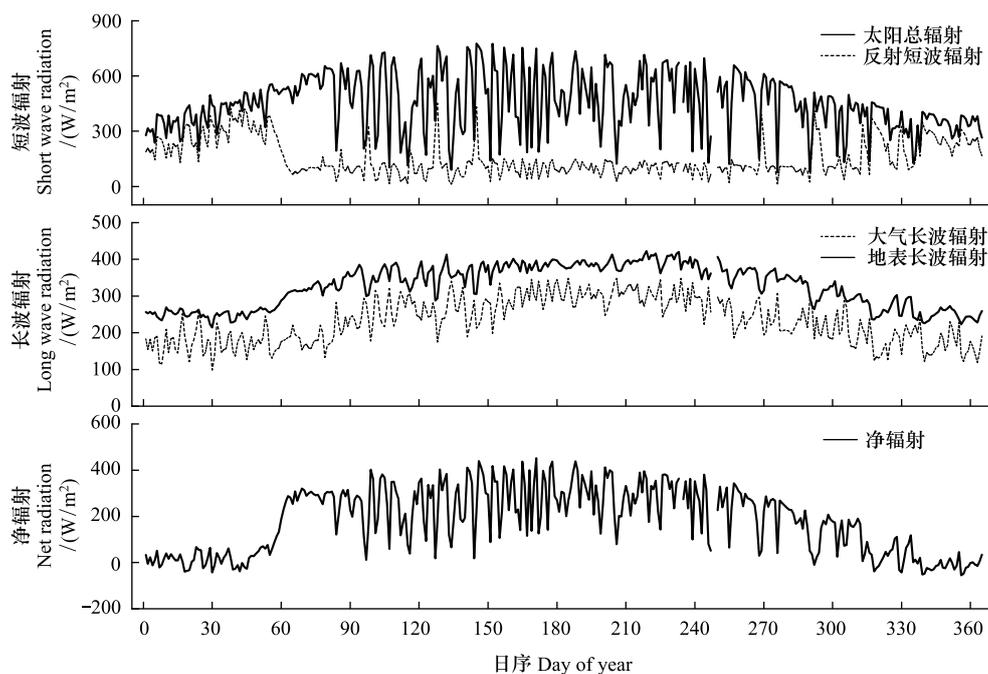


图 4 2018—2019 年辐射分量日均值变化

Fig.4 The variation of daily mean of radiation components from 2018 to 2019

2.2 地表反照率变化特征

地表反照率表征地表对太阳总辐射的反射能力,是影响地表能量收支和决定陆面过程的重要因子之一,地表反照率通过分配大气和地表间的辐射能量,影响生态系统的物理、生理、生物化学过程,从而直接或间接影响全球及区域气候^[36]。图 5 为 2018 年 5 月—2019 年 4 月地表反照率月平均日变化。可以看出,草地站全年 12 个月份均呈早晚高、中午低的“U”型曲线,季节变化表现为冬季>秋季>春季>夏季。就全年而言,地表反照率具体表现为:1—2 月保持较高水平,3 月骤减,3—9 月保持在较低水平且浮动较小,10 月开始地表反照率略有回升,11—12 月持续上升并在较高水平。最大与最小月均值分别出现在 12 月和 8 月,分别为 0.760 与 0.217,年均值为 0.393。

2.3 降水条件对地表辐射与地表反照率的影响

2.3.1 降雨与雨夹雪过程

为分析西北干旱区中天山乌拉斯台草地生态系统不同降水条件下辐射收支变化特征,选取 2018 年 6 月 20—23 日与 2019 年 4 月 10—13 日两个不同时段,分别代表降雨与雨夹雪过程的天气状况。根据观测点降水资料,2018 年 6 月 21、22 日为降雨日,2019 年 4 月 11 日为雨夹雪、4 月 12 日为降雨日,具体可参见表 2。

图6、图7为降雨与雨夹雪前后地表辐射收支与地表反照率日变化特征。2018年6月20—23日为一个典型降雨过程,这几日太阳总辐射日均值为187.9—748.9 W/m²,雨后空气中杂质更少,太阳辐射相对较强,降雨出现时间分别为6月21日8:00与22日15:40,此过程太阳总辐射急剧下降。2019年4月10—13日,此过程天气条件相对复杂,4月10日为晴天,11与12日为雨夹雪,13日逐渐变晴,这几日太阳总辐射日均值为185.8—654.4W/m²,晴天时太阳总辐射为较光滑的倒“U”型,而降雨与雨夹雪导致太阳总辐射变化呈多峰型,对太阳总辐射均有削弱作用。

两种天气条件下,反射短波辐射日变化与太阳总辐射较一致,但晴天时反射短波辐射整体远低于太阳总辐射,特殊天气反射短波值相比于晴天更低,降雨过程反射短波辐射日均值为39.7—147.9 W/m²,6月21与22日降雨,地面颜色变深,地表反照率与反射短波辐射对降雨的响应为减弱,22日雨后地表反照率有所增强;雨夹雪过程反射短波辐射日均值为29.2—108.5 W/m²,2019年4月11日18:30阵雨,地面颜色由浅变深,地表反照率减弱,反射短波辐射减小,前半段与降雨过程较为类似,而随后的降雪导致地表反照率骤增。

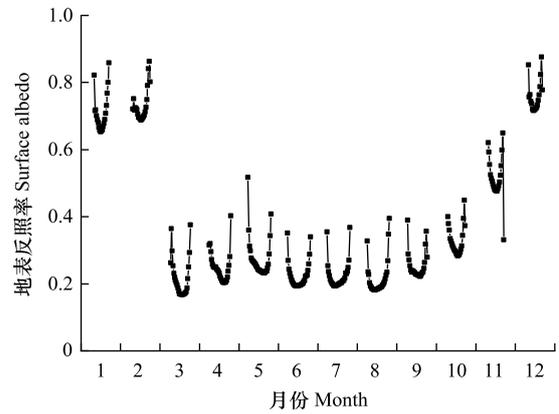


图5 地表反照率月平均日变化特征

Fig.5 The monthly mean diurnal variation of land surface albedo

表2 不同降水前后天气状况

Table 2 Weather conditions before and after different precipitation

降水过程 Precipitation process	时间 Time	晴空指数 Clear sky index	天气状况 Weather conditions	降水过程 Precipitation process	时间 Time	晴空指数 Clear sky index	天气状况 Weather conditions
降雨过程 Rainfall process	2018-06-20	0.87	晴天	雨夹雪过程 Sleet process	2019-04-10	0.91	晴天
	2018-06-21	0.21	降雨		2019-04-11	0.22	雨夹雪
	2018-06-22	0.40	降雨		2019-04-12	0.38	降雨
	2018-06-23	0.82	晴天		2019-04-13	0.86	晴天

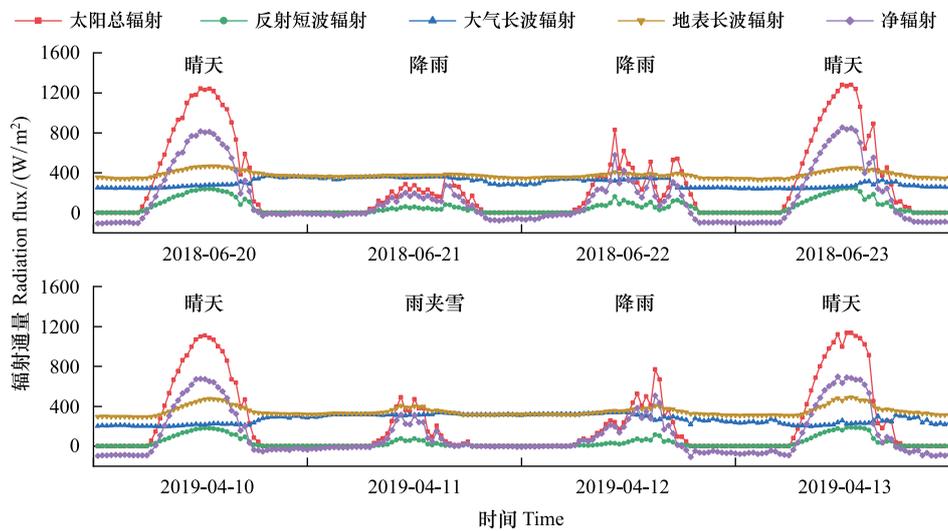


图6 降水前后地表辐射收支日变化

Fig.6 Diurnal variation of surface radiation budget before and after precipitation

大气与地表长波辐射变化不似短波辐射明显,二者在降雨过程日均值分别为263.2—340.4 W/m²与

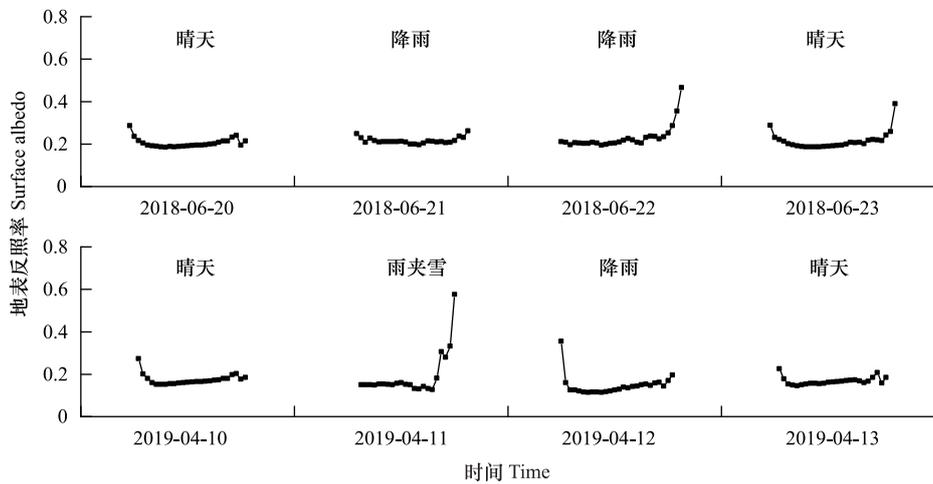


图7 降水前后地表反照率日变化

Fig. Diurnal variation of surface albedo budget before and after precipitation process

368.4—396.6 W/m², 雨夹雪过程大气与地表长波辐射日均值分别为 230.0—315.4 W/m² 与 338.6—362.1 W/m², 降雨与雨夹雪均对大气长波辐射起到增强作用, 而对地表长波辐射起到削弱作用。两种天气状况下净辐射的日变化与对应太阳总辐射变化都较为类似, 降雨过程与雨夹雪过程日均值为分别 51.8—230.2 W/m² 与 48.6—158.9 W/m², 其值较为接近, 可以说, 此次雨夹雪过程雨量偏多而未形成积雪或积雪量很少。

2.3.2 降雪过程

图8、图9为降雪过程辐射收支日变化与地表反照率日均值变化。2018年10月15—27日为一个降雪过程, 太阳总辐射表现为晴天>多云>降雪, 日均值为 78.6—510.7 W/m², 晴天后的17与18日为连续两天的降雪, 雪深由1cm升至7cm, 太阳总辐射骤减。17日降雪太阳总辐射最小, 19日为降雪后的晴天, 大气透明度高, 太阳总辐射达到此过程的最高, 积雪融化较快, 至22日雪完全融化。新雪导致地表反照率上升, 18日达最高(0.873), 反射短波辐射亦呈上升趋势, 其日变化与太阳总辐射较为一致, 日均值为 23.0—413.1 W/m²。变晴后地表反照率与反射短波辐射又逐渐降低至较低水平。

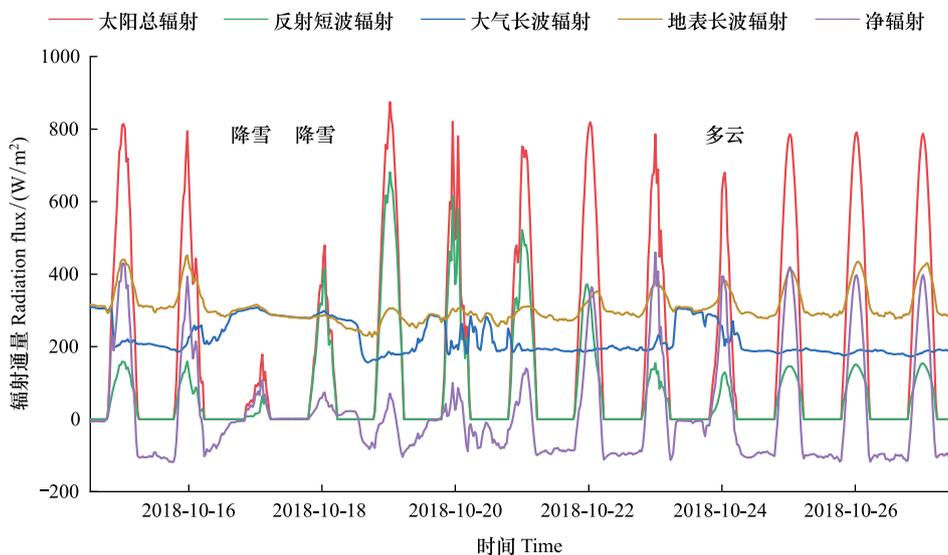


图8 降雪过程地表辐射收支日变化

Fig.8 Daily variation of surface radiation budget during snowmelt

大气与地表长波辐射在该过程的日均值分别为 183.3—290.7 W/m^2 与 264.2—341.4 W/m^2 , 融雪过程吸热影响空气温度, 所以大气长波辐射日变化较为明显, 而晴天大气透明度好, 大气长波辐射变化平缓且处于较低水平。有积雪时, 到达地表的太阳能量主要用于积雪融化与水分蒸发, 地表温度低且变化较小, 导致 10 月 17—22 日地表长波辐射较低, 而积雪完全融化后, 地表温度与近地层温度升高, 使地表长波辐射变化增强。

净辐射受辐射四分量、地表反照率、云量、下垫面状况等因素的共同作用, 其日变化与太阳总辐射较一致且变化相对较明显, 日均值为 $-37.6—74.3 W/m^2$, 降雪导致净辐射骤减, 融雪净辐射逐渐回升, 此过程日变化较强。

3 讨论

中天山草地与其它地区均存在太阳总辐射超出太阳常数的现象^[11,26,37-38]。中天山草地站与青藏高原 BJ 站、NPAM 站、藏东南站的太阳总辐射季节变化相同^[39]。与其它地区相比, 中天山草地太阳总辐射最大日峰值(6 月, 920.9 W/m^2) 比锡林郭勒草地生长期(7 月, 783.4 W/m^2) 和锡林浩特草地(6 月, 850.1 W/m^2) 高^[25-26], 这主要与各个草地的地理位置及气候条件有关。此外太阳总辐射还受纬度、海拔、日照时间、大气环流和地形因素影响。新疆太阳辐射强度强, 主要由于气候干燥, 大气透明度好。中天山草地站反射短波辐射最大值为 520.6 W/m^2 , 出现在 2 月, 它略高于内蒙古锡林浩特草地(3 月, 508.1 W/m^2), 更高于锡林郭勒草地生长季(6 月, 151.6 W/m^2)^[25-26]。研究区 2 月地表尚有积雪, 导致该区域的反射短波辐射比其它两个区域高。

中天山草地站太阳总辐射最大月曝辐量(5 月, 781.20 MJ/m^2) 略低于内蒙古锡林浩特(6 月, 795.73 MJ/m^2), 更低于青藏高原羊八井地区(6 月, 1025.14 MJ/m^2); 最小月曝辐量(12 月, 294.14 MJ/m^2) 高于内蒙古锡林浩特(12 月, 237.79 MJ/m^2), 而低于青藏高原羊八井地区(12 月, 533.88 MJ/m^2)^[21,25]。究其原因, 因内蒙古天空水汽和云量等含量较中天山更低, 该地太阳总辐射衰减相对较弱, 又因青藏高原羊八井海拔高于中天山, 该地全年接收到的太阳辐射较后者更多。中天山草地反射短波辐射最大月曝辐量(2 月, 311.09 MJ/m^2) 高于内蒙古锡林浩特草地(3 月, 227.78 MJ/m^2), 亦高于青藏高原羊八井地区(6 月, 199.58 MJ/m^2); 最小月曝辐量(9 月, 126.81 MJ/m^2) 高于内蒙古锡林浩特地区(10 月, 86.86 MJ/m^2), 但略低于青藏高原羊八井地区(12 月, 127.97 MJ/m^2)^[21,25]。其原因在于, 相比于内蒙古, 中天山草地地区积雪较多且时间长, 地表反照率较高, 从而使得中天山草地地区反射短波曝辐量偏高。

据表 3, 中天山与内蒙古锡林浩特 1 月地表反照率比青藏高原与甘肃陇中黄土高原高 3 倍左右, 其原因在于, 前两个地区 1 月有积雪, 导致反照率增大。与其它草地相比, 地表反照率年均值表现为新疆中天山草地 > 内蒙古锡林浩特 > 吉林省通榆退化草地 > 青藏高原林芝地区 > 甘肃陇中黄土高原半干旱草地。中天山草地年均值是甘肃陇中黄土高原半干旱草地的 2 倍多, 主要是由于中天山积雪时间跨度大, 融雪速度慢, 而陇中雨季降雨时间较多, 土壤湿度大, 植被生长快。

4 结论

(1) 中天山草地生态系统地表辐射收支各分量除大气长波辐射日变化较弱外, 其余分量均表现为早晚低、正午高的单峰曲线, 而极值及其出现时间有所差异。太阳总辐射与净辐射最大日峰值均出现在 6 月

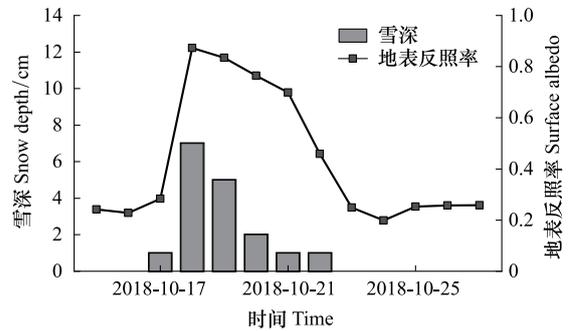


图9 降雪过程地表反照率与雪深日均值变化

Fig.9 Changes of the surface albedo and the daily mean value of snow depth during the snow melting process

(920.9、603.3 W/m²),均集中在 12:00—13:00,反射短波与地表长波辐射分别出现在 2 月(520.6 W/m²)和 8 月(471.7 W/m²),分别集中在 11:00—13:00 与 12:30—13:00,而大气长波辐射出现时间跨度较大。

表 3 不同草地月平均地表反照率

Table 3 Monthly average surface albedo in different region

月份 Month	中天山草地 (2018—2019) Grassland of middle Tianshan Mountains (2018—2019)	内蒙古锡林浩特 草地(2010 年) ^[25] Xilinhot grassland in Inner Mongolia (2010)	青藏高原林芝地区 (2009—2010) ^[40] Nyingchi region of Qinghai Tibet Plateau (2009—2010)	甘肃陇中黄土高 原半干旱草地 (2010 年) ^[41] Semi-arid grassland of the Loess Plateau in Longzhong, Gansu (2010)	吉林省通榆退化 草地(1991 年) ^[42] Degraded grassland in Tongyu, Jilin Province (1991)
1	0.712	0.70	0.23	0.207	0.30
2	0.732	0.55	0.22	0.226	0.29
3	0.218	0.46	0.21	0.230	0.26
4	0.248	0.29	0.20	0.201	0.26
5	0.275	0.22	0.19	0.192	0.25
6	0.224	0.19	0.18	0.183	0.23
7	0.224	0.19	0.19	0.171	0.20
8	0.217	0.20	0.19	0.175	0.19
9	0.254	0.22	0.20	0.162	0.19
10	0.329	0.24	0.21	0.173	0.21
11	0.517	0.39	0.23	0.188	0.22
12	0.760	0.53	0.24	0.222	0.42
平均 Average	0.393	0.35	0.21	0.194	0.25

(2) 太阳总辐射、反射短波辐射、大气与地表长波辐射年曝辐量分别为 6860.62、2101.72、7171.25、10089.69 MJ/m²。太阳总辐射与反射短波辐射最大月曝辐量分别出现在 5 月(781.20 MJ/m²)和 2 月(311.09 MJ/m²),大气与地表长波辐射最大月曝辐量均出现在 7 月,分别为 817.66 MJ/m²与 1031.64 MJ/m²。除反射短波辐射曝辐量冬季明显高于其它季节外,其它分量均为夏季>春季>秋季>冬季。

(3) 太阳总辐射、反射短波辐射、大气长波辐射、地表长波辐射与净辐射最大日均值分别出现在 5 月 25 日、5 月 8 日、8 月 22 日、7 月 4 日和 8 月 7 日,分别为 776.2、452.7、348.3、422.2、452.0 W/m²,太阳总辐射与净辐射日均值均表现为夏季最大,春、秋季次之,冬季最小的季节特征。

(4) 中天山草地地表反照率月平均日变化均表现为先减小后增加的“U”型曲线,季节变化表现为冬季>秋季>春季>夏季,最大与最小月均值分别出现在 12 月与 8 月,其值分别为 0.760 与 0.217,年均值为 0.393。

(5) 中天山草地晴天各分量日变化均较光滑,其它天气不如晴天平滑。降雨对大气长波辐射有增强作用,对其它分量与地表反照率均有削弱作用,而降雪对太阳总辐射与地表长波辐射有削弱作用,对大气长波辐射有增强作用,地表反射短波辐射与地表反照率在降雪后的响应均为增强。

参考文献 (References):

- [1] Hatzianastassiou N, Matsoukas C, Fotiadis A, Pavlakakis K G, Drakakis E, Hatzidimitriou D, Vardavas I. Global distribution of Earth's surface shortwave radiation budget. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2005, 5(10):2847-2867.
- [2] 朱德琴, 陈文, 刘辉志, 黄荣辉. 我国西北典型干旱区和高原地区地表辐射能量收支特征比较. *气候与环境研究*, 2006, 11(6): 683-690.
- [3] 管晓丹, 石瑞, 孔祥宁, 刘婧晨, 甘泽文, 马洁茹, 罗雯, 曹陈宇. 全球变化背景下半干旱区陆气机制研究综述. *地球科学进展*, 2018, 33(10): 995-1004.
- [4] 黄建平, 李明霞, 刘玉芝, 张镭, 龚道溢. 干旱半干旱区气候变化研究综述. *气候变化研究进展*, 2013, 9(1): 9-14.
- [5] Mamtimin A, Wang Y, Sayit H, Yang X H, Yang F, Huo W, Zhou C L. Seasonal Variations of the Near-Surface Atmospheric Boundary Layer Structure in China's Gurbantünggüt Desert. *Advances in Meteorology*, 2020, 2020:6137237.

- [6] Zhang X C, Gu S, Zhao X Q, Cui X Y, Zhao L, Xu S X, Du M Y, Jiang S, Gao Y B, Ma C, Tang Y H. Radiation partitioning and its relation to environmental factors above a meadow ecosystem on the Qinghai-Tibetan Plateau. *Journal of Geophysical Research. Atmospheres*, 2010, 115 (D10): D10106.
- [7] Wang Y, Sayit H, Mamtimin A, Zhu J, Zhou C L, Huo W, Yang F, Yang X H, Gao J C, Zhao X S. Evaluation of five planetary boundary layer schemes in WRF over China's largest semi-fixed desert. *Atmospheric Research*, 2021, 256: 105-567.
- [8] 李英年, 赵亮, 周华坤, 徐世晓, 张法伟. 高寒湿地太阳辐射和地表反射率变化的统计学特征. *冰川冻土*, 2007, 29(1): 137-143.
- [9] 刘晶森, 马金玉, 李世奎, 梁宏, 任三学. 华北平原北部太阳辐射及地表辐射平衡特征——基于河北固城站的试验观测研究. *太阳能学报*, 2009, 30(5): 577-585.
- [10] 蒋友严, 任贾文, 秦翔, 谢爱红, 王叶堂. 珠穆朗玛峰北坡海拔 6523m 辐射平衡观测结果分析. *冰川冻土*, 2007, 29(4): 589-594.
- [11] 钱泽雨, 胡泽勇, 杜萍, 马耀明, 石川裕彦. 藏北高原典型草甸下垫面与 HEIFE 沙漠区辐射平衡气候学特征对比分析. *太阳能学报*, 2003, 24(4): 453-460.
- [12] 季国良, 邹基玲. 干旱地区绿洲和沙漠辐射收支的季节变化. *高原气象*, 1994, 13(3): 323-329.
- [13] 吕达仁, 陈佐忠, 陈家宜, 王庚辰, 季劲钧, 陈洪滨, 刘钟龄. 内蒙古半干旱草原土壤-植被-大气相互作用综合研究. *气象学报*, 2005, 63(5): 571-593.
- [14] 张翔, 刘晓琴, 张立锋, 牛犇, 赵亮, 古松. 青藏高原三江源区人工草地能量平衡的变化特征. *生态学报*, 2017, 37(15): 4973-4983.
- [15] Moore C J. A comparative study of radiation balance above forest and grassland. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1976, 102(434): 889-899.
- [16] Matzinger N, Andretta M, Van Gorsel E, Vogt R, Ohmura A, Rotach M W. Surface radiation budget in an Alpine valley. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2003, 129(588): 877-895.
- [17] 刘帅, 李胜功, 于贵瑞, 孙晓敏, 张雷明, 杉田伦明, 李英年, 张宪洲, 王艳芬. 不同降水梯度下草地生态系统地表能量交换. *生态学报*, 2010, 30(3): 557-567.
- [18] 周秉荣, 李凤霞, 肖宏斌, 周万福, 颜亮东, 李甫, 李晓东. 2009/2010 年黄河源区高寒草甸下垫面能量平衡特征分析. *冰川冻土*, 2013, 35(3): 601-608.
- [19] 王少影, 张宇, 吕世华, 尚伦宇, 张少波. 玛曲高寒草甸地表辐射与能量收支的季节变化. *高原气象*, 2012, 31(3): 605-614.
- [20] 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平衡各分量的变化特征. *高原气象*, 2018, 37(4): 923-935.
- [21] 次仁尼玛, 单增罗布, 宣越健, 陈天禄. 青藏高原羊八井地区地表辐射的季节变化特征. *高原气象*, 2013, 32(5): 1253-1260.
- [22] Chou Y L, Sheng Y, Zhu Y P. Study on the relationship between the shallow ground temperature of embankment and solar radiation in permafrost regions on Qinghai - Tibet Plateau. *Cold Regions Science and Technology*, 2012, 78: 122-130.
- [23] Hong J, Kim J. Simulation of surface radiation balance on the Tibetan Plateau. *Geophysical Research Letters*, 2008, 35(8): L08814.
- [24] Yu L, Zhang M, Wang L C, Qin W M, Lu Y B, Li J L. Clear-sky solar radiation changes over arid and semi-arid areas in China and their determining factors during 2001 - 2015. *Atmospheric Environment*, 2020, 223: 117198.
- [25] 顾润源, 武荣盛, 吴菊秀, 孙小龙, 马耀明, 杨铁刚. 内蒙古半干旱草原下垫面地表辐射特征. *干旱区地理*, 2013, 36(5): 854-864.
- [26] 岳平, 张强, 邓振镛, 杨金虎, 孙旭映. 草原生长期地表辐射和能量通量月平均日变化特征. *冰川冻土*, 2010, 32(5): 941-947.
- [27] 殷代英, 屈建军, 余晔, 赵素平, 李芳, 肖建华. 敦煌湖泊湿地生态系统地表辐射平衡特征. *中国沙漠*, 2018, 38(1): 172-181.
- [28] 杨帆, 邵全琴, 李愈哲, 樊江文, 包玉海. 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. *生态学报*, 2016, 36(17): 5440-5451.
- [29] 王超, 韦志刚, 高晓清, 李振朝, 侯旭宏, 刘慧, 魏红. 夏季敦煌稀疏植被下垫面物质和能量交换的观测研究. *高原气象*, 2012, 31(3): 622-628.
- [30] 马虹, 陈亚宁, 李卫红. 陆地生态系统 CO₂ 与水热通量的研究进展. *新疆环境保护*, 2012, 34(2): 1-8.
- [31] 陈亚宁, 李稚, 方功焕, 邓海军. 气候变化对中亚天山山区水资源影响研究. *地理学报*, 2017, 72(1): 18-26.
- [32] 郑奕, 杨莲梅, 刘艳. 新疆天山山区禾本科牧草物候区域差异及其驱动力分析. *生态学报*, 2020, 40(4): 1281-1294.
- [33] 王桂钢, 周可法, 孙莉, 李雪梅, 秦艳芳. 天山山区草地变化与气候要素的时滞效应分析. *干旱区地理*, 2011, 34(2): 317-324.
- [34] Loeb N G, Wang H L, Allan R P, Andrews T, Armour K, Cole J N S, Dufresne J L, Forster P, Gettelman A, Guo H, Mauritsen T, Ming Y, Paynter D, Proistosescu C, Stuecker M F, Willén U, Wyser K. New generation of climate models track recent unprecedented changes in earth's radiation budget observed by CERES. *Geophysical Research Letters*, 2020, 47(5): e2019GL086705.
- [35] 买买提艾力·买买提依明, 金莉莉, 李振杰, 缪启龙, 何清. 2007—2011 年塔克拉玛干沙漠腹地太阳辐射观测研究. *气候变化研究进展*, 2014, 10(2): 87-94.
- [36] 肖登攀, 陶福禄, Moiwu J P. 全球变化下地表反照率研究进展. *地球科学进展*, 2011, 26(11): 1217-1224.
- [37] 卞林根, 陆龙骅, 逯昌贵, 陈彦杰, 高志球, 刘辉志, 张宏升, 陈家宜. 1998 年夏季青藏高原辐射平衡分量特征. *大气科学*, 2001, 25(5): 577-588.
- [38] 陆龙骅, 周国贤, 张正秋. 1992 年夏季珠穆朗玛峰地区的太阳直接辐射和总辐射. *太阳能学报*, 1995, 16(3): 229-233.
- [39] 武荣盛, 马耀明. 青藏高原不同地区辐射特征对比分析. *高原气象*, 2010, 29(2): 251-259.
- [40] 岳平, 李耀辉, 张良, 杨金虎, 王若安, 殷晓荣. 青藏高原林芝与四川盆地温江地区晴天辐射和能量平衡特征. *冰川冻土*, 2012, 34(6): 1328-1335.
- [41] 李德帅, 王金艳, 王式功, 李振朝, 尚可政, 史晋森. 陇中黄土高原半干旱草地地表反照率的变化特征. *高原气象*, 2014, 33(1): 89-96.
- [42] 刘辉志, 涂钢, 董文杰. 半干旱区不同下垫面地表反照率变化特征. *科学通报*, 2008, 53(10): 1220-1227.