

李小院,张圣微,王帅,等.放牧对退化草地近地面辐射的影响[J].中国沙漠,2022,42(1):223-233.

放牧对退化草地近地面辐射的影响

李小院^a,张圣微^{abc},王 帅^a,李瑞燊^a,赵星宇^a,刘敏敏^a

(内蒙古农业大学 a.水利与土木建筑工程学院, b.内蒙古自治区农牧业大数据研究与应用重点实验室, c.内蒙古自治
区水资源保护与利用重点实验室, 内蒙古 呼和浩特 010018)

摘要: 随着环境变化,草原地表状态也会改变,尤其是近地面能量收支过程变化更明显。为深入理解半干旱草原地表辐射能量平衡过程对放牧的响应特征,利用内蒙古正镶白旗典型退化草原2020年生长季(6—10月)的辐射通量观测资料,对比分析了禁牧、放牧草地太阳总辐射、地表反射辐射、大气长波辐射、地表长波辐射、净辐射以及地表反照率的日变化和生长季变化规律的差异。结果表明:在生长季,太阳总辐射随着时间推进逐月递减;禁牧区的地表反射辐射总体小于放牧区;各月大气长波辐射日变化幅度很小,处于130—370 W·m⁻²;禁牧、放牧条件下地表长波辐射存在明显的季节变化规律,但是二者之间的差异甚微。内蒙古典型退化草原生长季近地面辐射通量有显著单峰型日变化特征。禁牧、放牧草地地表反照率都呈现“U”型日变化规律。生长季放牧草地的反照率明显高于禁牧草地。在禁牧区,辐射分量(地表反射辐射、大气长波辐射)和植被指数(归一化差异植被指数)对净辐射的影响是正向极显著的;而地表反照率和另一辐射分量(地表长波辐射)对净辐射有显著的负向作用。在放牧区,地表反射辐射和大气长波辐射对净辐射有极显著的正向作用;而地表反照率和地表长波辐射对净辐射的作用则是负向显著的。植被状况是影响内蒙古典型退化草原近地表辐射能量收支过程的首要因子。

关键词: 半干旱草原;辐射通量;日变化;生长季变化;分段结构方程模型

文章编号: 1000-694X(2022)01-223-11

DOI: 10.7522/j.issn.1000-694X.2021.00134

中图分类号: P422.4

文献标志码: A

0 引言

陆地下垫面状况对气候影响的研究早在20世纪70年代末就已经开始,许多学者利用不同的大气环流模式(AGCM)模拟了陆面过程在气候变化中的作用^[1],指出下垫面状况在很大程度上决定了陆表的能量和水分平衡,进而影响着局地、区域乃至全球大气环流和气候的基本特征。太阳辐射是地球能量的主要来源,是驱动地-气系统中各种物理和生命活动相互作用的原动力,也是影响其他分量变化的基本特征因子。因此,以地表辐射和热量平衡为主的能量交换过程便成为陆面过程的主要研究内容^[2-4]。地气间能量交换包括发生在土壤-植被-大气之间的辐射过程,所以在研究陆气相互作用中的水、能平衡之前^[5-6],对典型下垫面条件的地表辐射特征进行定位

观测和深入分析非常必要^[7-8]。

干旱、半干旱草原是全球陆地生态系统的重要类型,也是中国北方主要的地表类型^[9],由于特殊的地表植被、土壤和反照率,其地表辐射平衡过程不同于湿润区^[10-12]。放牧是草原土地利用方式中最为常见的一种,它通过减小草原地上生物量和叶面积指数,改变了植被覆盖状况,影响着地表温度、地表反射率和地表粗糙度等下垫面微气象特征^[13],继而作用于地气间的能量分配、植被蒸散和CO₂通量交换^[14-15]。因此,禁牧、放牧对区域尺度上的碳、水循环都有着重要的影响。在生态条件脆弱的半干旱区,过度放牧是草原土壤荒漠化的重要原因^[16]。而目前对于陆面过程的研究主要针对青藏高原特殊地形和西北干旱区^[17],对中国北方半干旱草原区研究较少,并且已有的研究大多仅基于短

收稿日期:2021-08-17; 改回日期:2021-09-28

资助项目:国家自然科学基金项目(52079063,51779116);内蒙古自治区自然科学基金项目(2019JQ06,2021MS03094);内蒙古自治区科技成果转化专项资金项目(2020CG0054);中央引导地方科技发展资金项目(2020ZY0008)

作者简介:李小院(1993—),男,内蒙古苏尼特右旗人,硕士研究生,主要从事水文过程与生态效应方面的研究。

E-mail: nndsjlyxzc@126.com

通信作者:张圣微(E-mail: zsw_imau@163.com)

时间的加密观测对草原生长期或典型天气条件下辐射特征的个例分析,利用长期的观测资料对半干旱草原下垫面辐射平衡特征的研究还稍显欠缺^[18-20]。

鉴于此,本文利用内蒙古正镶白旗典型退化草地2020年生长季辐射通量观测资料,分析典型半干旱草原下垫面辐射平衡四分量(太阳总辐射 R_{sd} ,地表反射辐射 R_{su} ,大气长波辐射 R_{ld} ,地表长波辐射 R_{lu})、净辐射(R_n)及地表反照率(Albedo)的日变化和季节变化规律,并将禁牧、放牧草地作对比分析,探讨地表辐射收支的动态变化规律及其影响因素,有助于加深对中国北方半干旱草原下垫面辐射平衡过程的认识,为准确评估草原生态系统与大气之间物质和能量交换提供科学依据,并以期改进北方

半干旱草原区陆面过程中的辐射参数化和卫星遥感参数化过程中所需参数提供科学依据。

1 数据与方法

1.1 研究区及设备布设

研究区位于锡林郭勒草原西南部的正镶白旗,是内蒙古典型的退化草原(图1)。研究区属中温带半干旱大陆性草原气候,降水少而集中。年降水量314 mm,年蒸发量2 126 mm,年均气温1.9℃。生长季有天然植被覆盖,植被以禾本科和菊科植物为主,代表性植物有羊草(*Leymus chinensis*)、冷蒿(*Artemisia frigida*)、克氏针茅(*Stipa krylovii*)、糙隐子草(*Cleistogenes squarrosa*)等。

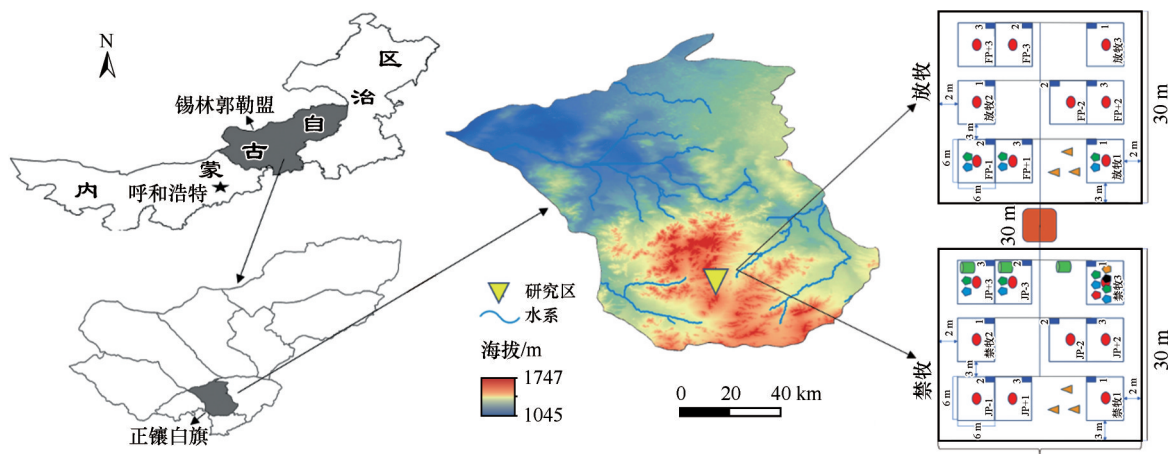


图1 研究区位置及试验设备布设

Fig.1 Location of study area and layout of test equipment

试验区内分别设置了禁牧区和自由放牧区,每个区内设置3个处理和3个平行,共18个分区。在每个分区中心位置布设5、15、30、60、100 cm 5层土壤水分、温度和电导率传感器(CS650, Campbell, 美国)。在禁牧和放牧区中部安设1套自动气象站进行空气温湿度(HMP155A, Campbell, 美国)观测。2020年6月16日辐射计安装并成功运行,本文选择6—10月的辐射通量观测资料($W \cdot m^{-2}$)进行分析。6月草地植被进入返青期,7—8月进入生长旺盛期,9—10月草地植被进入枯黄期。近地层定位辐射观测系统的辐射仪器(Apogee, 美国)包括:在禁牧和放牧区分别安装了3套SL-610向上长波和SP-610向上短波辐射计,同时在禁牧区的对照3样地里安装1套SL-510向下长波和SP-510向下短波辐射计,用来测量不同处理下向上、向下长波、短波辐射。通

过CR1000X(Campbell, 美国)数据采集器对气温、湿度、降水、辐射、土壤水分、土壤温度、土壤电导率等进行每15 s一次自动观测,处理输出每1 min、5 min、10 min、15 min、0.5 h、1 h、1 d的气象、辐射和土壤数据。

1.2 气候与土壤特征

研究区的气候特征因其独特的地理位置和环境而异。图2描述了禁牧区和放牧区研究时期内(6—10月)逐日的降水量(P)、气温(T_a)、地表温度(T_s)和5 cm土层的土壤含水量(WVC)。由于研究区地处中纬度内陆地区,距海洋遥远,且海拔较高,气候变差大,是典型的干旱半干旱大陆性气候。该地区雨热同期,降水多在7、8、9月;秋季气温剧降,霜临较早。

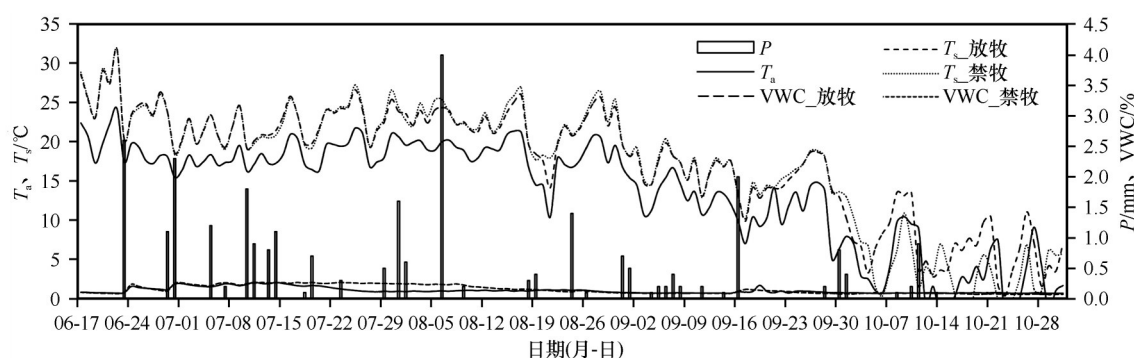


图2 禁牧、放牧草地6—10月气象因子和土壤水分特征

Fig.2 Meteorological factors and soil moisture change from June to October in the prohibited grazing and grazing areas

1.3 植被特征

研究地点的植被数据通过 GEE (Google Earth Engine) 提取某一区域长时间序列归一化差异植被指数 (NDVI) 像元值来表征。本文通过 GEE 线上 Colab 版本读取 MODIS 数据集的 NDVI 数据, 并输入相应研究区的地理坐标和研究日期完成对所需植被数据的提取。所提取的 NDVI 数据只是每月有卫星过境时覆盖区域特定时间的数据, 在此基础上, 还需对研究期间缺失数据进行填充。本文通过基于 R 语言 mice 包提供的回归插补法^[21-22], 合理地估算缺失值的分布, 对缺失变量和完全数据变量拟合多元回归模型来预测缺失值, 再进行填充, 确保填充的数据是合理的。

对于现有基础上的 NDVI 数据集, 用 mice 包进行数据填补。操作步骤按: 观察缺失值, 多重填补, 分析结果优化模型, 获得最终结果。首先用 md.pattern() 函数来判断行的缺失值, 并利用 VIM 包进行数据可视化。使用 mice() 函数进行数据填充, 填补用的方法为 pmm 预测均值匹配 (predictive mean matching) 法。多重填补法的填补矩阵数, 默认为 5 次。获得填充结果。

对 5 组插补数据集进行多元线性回归分析, 进行 T 检验和 F 检验, 判断模型整体拟合的有效性。然后对插补的结果, 再进行 R^2 检验。最后, 根据检验统计量, 我们选择以第 3 次 pmm 的结果作为填充, 获得填充后的完整数据集 (图 3)。

1.4 分段 Piecewise 结构方程模型

分段 Piecewise SEM (又称为验证性路径分析)^[23]通过引入一个灵活的数学框架来扩展传统的 SEM, 该框架可以包含各种各样的模型结构、分布和假设。在分段 SEM 中, 每一组关系都是独立 (或

局部) 估计的, 它使用 X^2 检验比较观察到的和预测的协方差矩阵, 使用“定向分离检验” (Tests of directed separation) 获得分段结构方程模型的全局拟合优度 (Global goodness-of-fit)^[24]。

条件独立性检验的 P 值在单个 Fisher's C 统计量中使用下式^[25]:

$$C = -2 \sum_{i=1}^k \ln(p_i) \quad (1)$$

这一统计量是自由度为 $2k$ 的 X^2 分布, k 是基础集中的独立声明数。

C 统计数据可用于计算 SEM 的 AIC 分数, 以便在模型选择框架中进行嵌套比较^[26]:

$$AIC = C + 2K \quad (2)$$

式中: K 是自由度的可能性。

另一种变体 AIC_c , 可以根据样本大小进行选择:

$$AIC_c = C + 2K \frac{n}{(n - K - 1)} \quad (3)$$

本文采用基于 R 语言实现的 Piecewise SEM^[24], 来研究辐射通量 (R_n 、 R_{lu} 、 R_{ld} 、 R_{su} 、 R_{sd} 、Albedo) 与气候因子 (P 、 T_a 、 RH 、 VPD)、土壤因子 (T_s 、 VWC) 以及植被因子 (NDVI) 之间的相互关系。

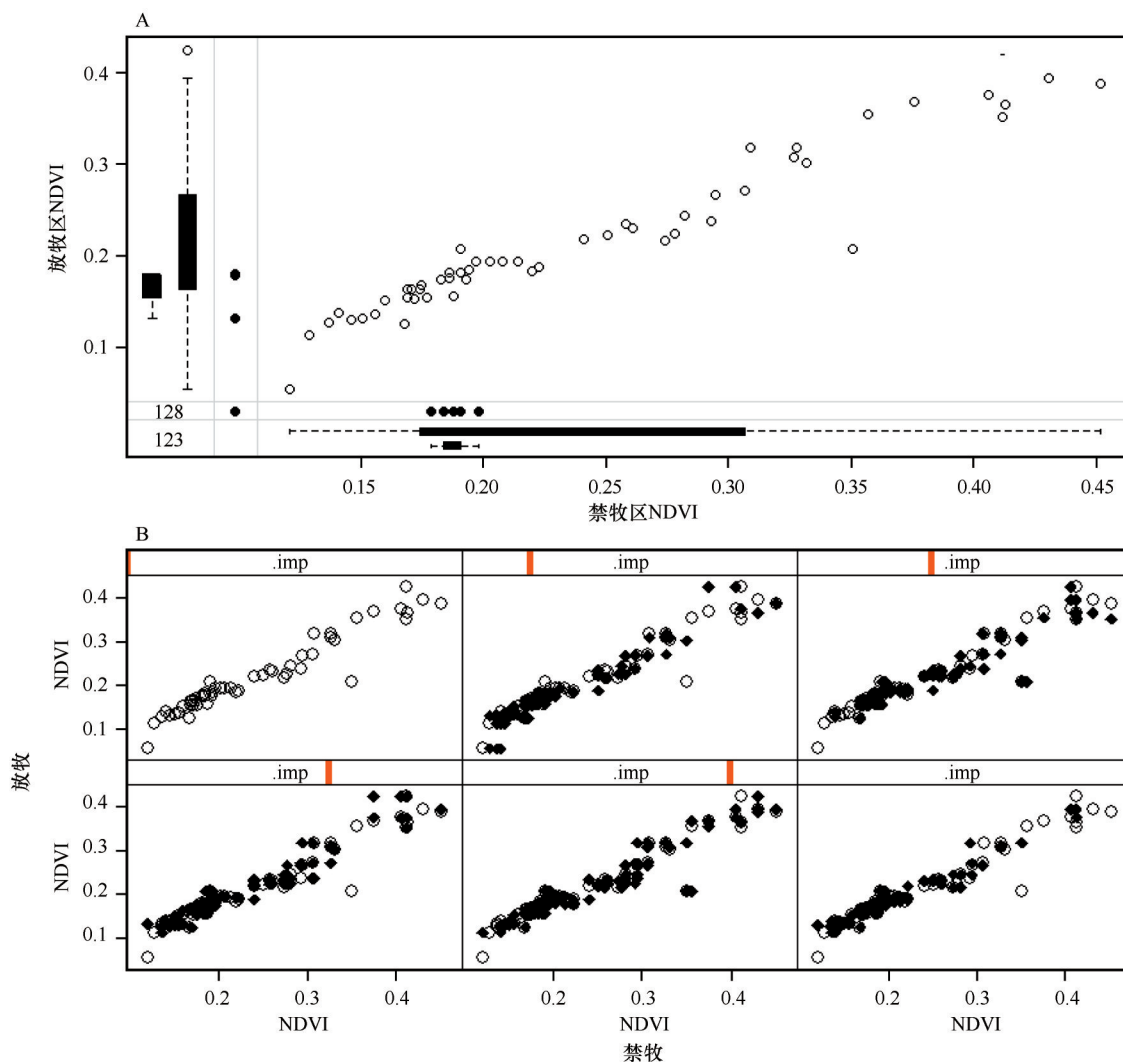
2 结果与分析

2.1 地表辐射收支的变化特征

2.1.1 禁牧和放牧草地辐射通量对比

内蒙古典型退化草原生长季地表辐射通量有显著单峰型日变化特征 (图 4A)。

太阳总辐射 (R_{sd}) 的变化特征主要受当地太阳高度角、大气透明度和云量等因素的影响^[27]。研究区 6—10 月 R_{sd} 日平均最大值依次为 779.63 (13:00)、745.77 (13:00)、726.03 (12:00)、645.65 (12:00)、635.53



A 图中:○.数据散点图,◆.禁牧列和放牧列的缺失值位置。B 图中每一个面板为一个列的原始数据和5次填充的数据,
○.原始数据取值,◆.填充的数据取值。x轴为禁牧NDVI,y轴为放牧NDVI

图3 禁牧、放牧区NDVI缺失值分布散点图(A)和NDVI数据填充(B)

Fig.3 Scatter plot (A) of NDVI missing value distribution and NDVI data filling condition (B) in prohibited grazing and grazing areas

(12:00) $W \cdot m^{-2}$ 。 R_{sd} 随着时间推进逐月递减,6—8月是一年光热条件最佳时段。

由图4A可以看出,禁牧区和放牧区各月地表反射辐射(R_{su})均呈现出典型的日变化规律。晚上由于没有 R_{sd} 致使 R_{su} 很低,甚至为0,日出以后, R_{su} 开始慢慢提升,其日变化规律与 R_{sd} 相同,达到日最大值的时间也基本与 R_{sd} 一致。禁牧区6—10月日平均最大值依次为 123.46 (13:00)、110.42 (14:00)、112.80 (12:00)、98.45 (12:00)、105.30 (12:00) $W \cdot m^{-2}$ (图4B);而放牧区日平均最大值分别为 127.73 (13:00)、113.54 (14:00)、126.41 (12:00)、113.11 (12:00)、121.02 (13:00) $W \cdot m^{-2}$ (图4B)。

由图4B看出,研究区各月大气长波辐射(R_{ld})日

变化幅度很小,处于 130—370 $W \cdot m^{-2}$,基本上没有极大值出现。在地表性质大致相似的情况下,地表温度(T_s)的大小决定了地表长波辐射(R_{lu})的多少^[28]。禁放牧条件下, R_{lu} 存在明显的日变化和季节变化特征,但是二者之间的差异甚微。 R_{lu} 变化较为平缓,日较差不大。6—10月,随着 T_a 和 T_s 的逐渐减小, R_{lu} 也逐月降低,在10月出现了最低值。 R_{lu} 的变化与 T_s 的变化情况相一致。

2.1.2 地表净辐射

地表净辐射(R_n)的大小以及变化特征是由短波辐射平衡和长波辐射平衡两部分决定的,因此影响 R_n 的因子主要有太阳高度及日照长短、大气透明度、天气条件和下垫面状况等^[29]。 R_n 有昼夜变化(图

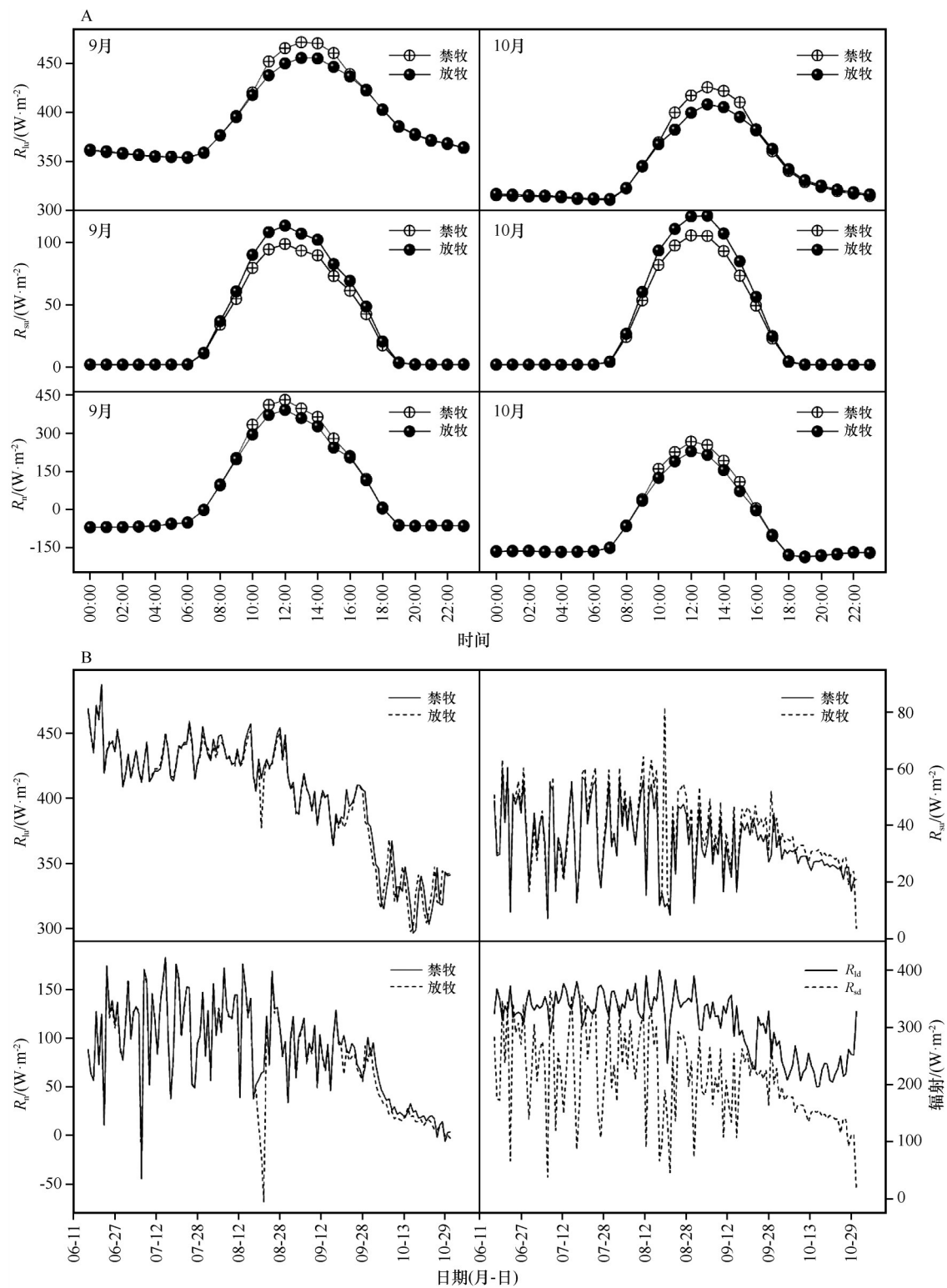


图4 禁牧、放牧草地辐射通量9—10月平均日变化(A)和逐日变化(B)
Fig.4 The average diurnal variation (A) and day-to-day variation (B) of radiation
fluxes from September to October in prohibited grazing and grazing areas

4A)和明显的季节变化(图4B)。

从昼夜变化来看, R_{a} 呈现单峰变化趋势。日出之前净辐射通量是负值,日出之后,随着太阳高度角的

增大, R_{so} 在逐渐升高,从而 R_{a} 也在逐渐上升,直到正午(12:00—13:00)达到一日中的最大值;而后持续下降,直到日落后 R_{a} 又变成负值。从整体变化来看,禁牧草

地和放牧草地的 R_n 无显著差异,变化规律一致。

2.1.3 地表反照率

利用观测的 R_{su} 与 R_{sd} 的比值得到禁牧、放牧草地的地表反照率(Albedo)。为了减小辐射较小时的测量误差,本文选取 $R_{sd} > 50 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 的辐射数据资料进行反照率的计算^[30]。

对于禁牧、放牧草地 Albedo 的日变化,都呈现“U”型变化规律(图 5A),二者无明显差别。在日出前和日落后,地表反照率出现峰值,在此期间变

化比较平缓。对于研究期的时间变异性(6—10月),禁牧、放牧草地变化规律一致。6—10月是草原的生长季,地面植被覆盖较好,地表反照率处于全年较低值且变化不大(图 5B)。由此可见,植被对于地表反照率的影响作用存在较为明显的差异。

总体而言,生长季放牧草地的地表反照率明显高于禁牧草地,放牧区由于自由放牧降低了植被覆盖率,使得地表反照率增大。

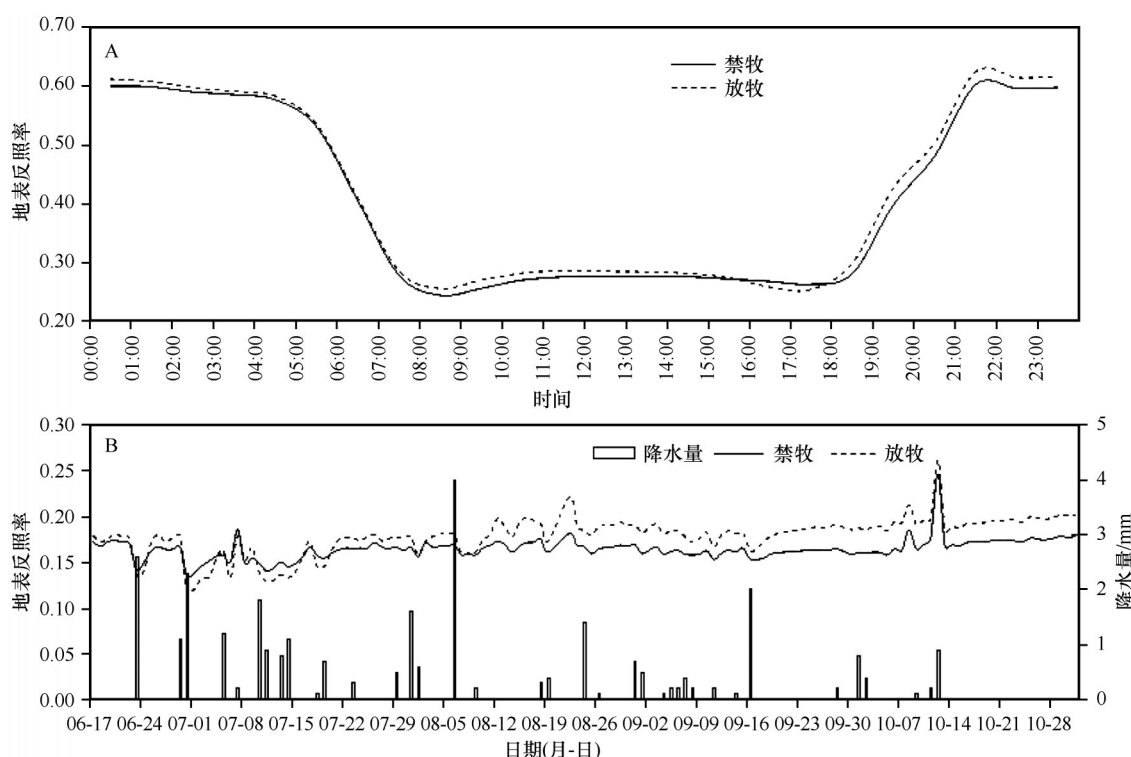


图5 生长季禁牧、放牧草地地表反照率平均日变化(A)和逐日变化(B)

Fig.5 The average diurnal variation (A) and the day-to-day variation (B) of albedo of prohibited grazing and grazing areas in growing season

2.2 禁牧和放牧条件下辐射通量对气候、土壤和植被的响应

2.2.1 禁牧和放牧条件下的植被差异及其对地表反照率的影响

由于围封,6、7、8、9、10月禁牧区的植被覆盖度比自由放牧区分别增加了17.0%、25.0%、5.7%、11.3%、5.7%(图6A)。对于禁牧、放牧和增雨、减雨的双因素对照处理,在雨热同期的生长季,降水的改变对于植被的影响显然要大于禁牧、放牧的管理措施^[31-32],这一结论为今后的草地管理措施可提供依据。

禁牧、放牧两种处理下的地表反照率变化相对

平稳,而植被覆盖度有明显的先上升后下降的单峰变化趋势(图6A)。禁牧、放牧下总体变化趋势相一致。

研究期间,禁牧、放牧处理下的NDVI逐日变化特征以及变化率分布见图6B。在研究期间,禁牧、放牧草地NDVI整体上经历先上升后下降的变化趋势,于7月20日达到峰值。

2.2.2 禁牧和放牧条件下辐射通量对气候、土壤和植被因子的响应

由图7可知,禁牧区 $RH(\beta = -0.92, P < 0.001)$ 、 $VPD(\beta = -0.84, P < 0.001)$ 、 $R_{sd}(\beta = -0.24, P < 0.01)$ 、 $VWC(\beta = -0.32, P < 0.01)$ 和 $T_s(\beta = -0.40, P < 0.05)$ 对

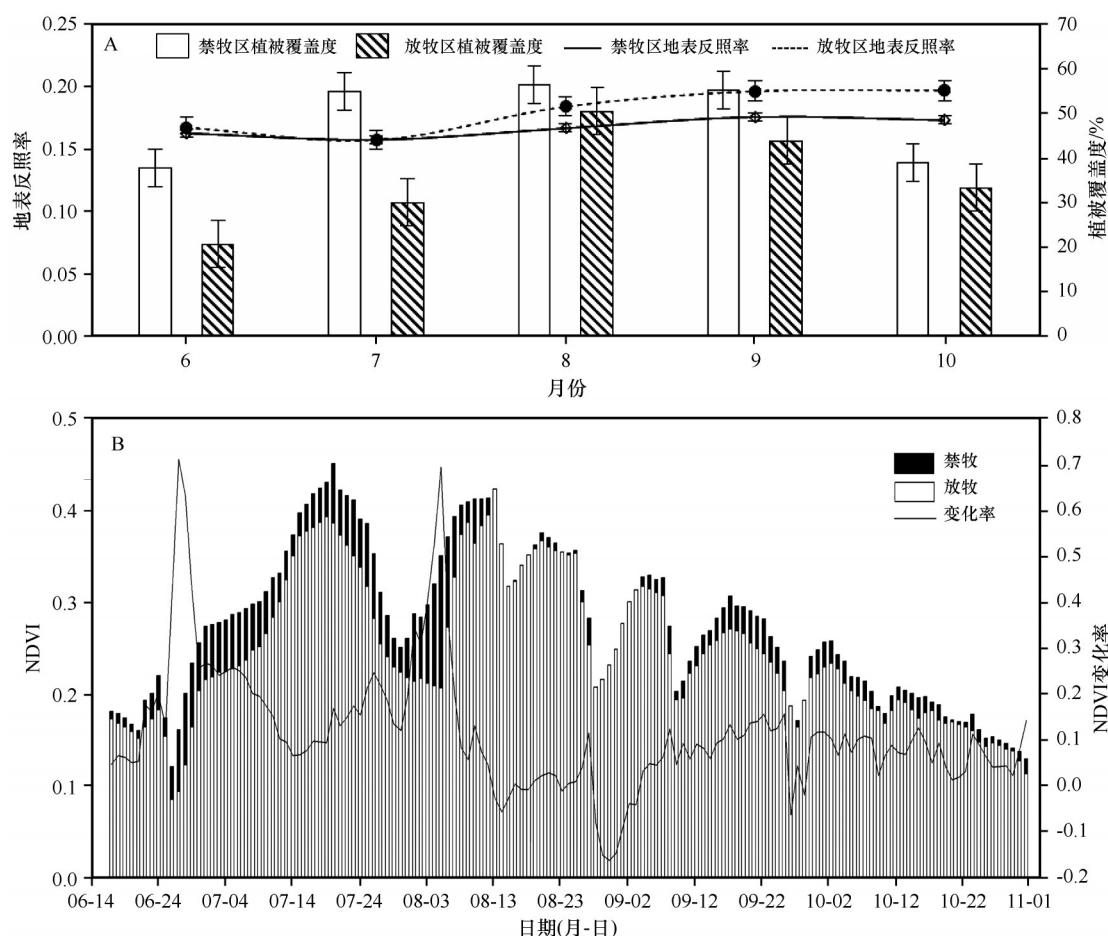


图6 生长季禁牧、放牧草地地表反照率(Albedo)和植被覆盖度的逐月变化(A)和归一化差异植被指数(NDVI)逐日变化(B)

Fig.6 Month-to-month variation (A) of albedo and vegetation coverage and day-to-day variation (B) of NDVI of prohibited grazing and grazing areas in growing season

Albedo 的影响均是负向显著的。 $R_{su}(\beta=0.88, P<0.001)$ 、 $R_{ld}(\beta=0.46, P<0.001)$ 和 $NDVI(\beta=0.16, P<0.001)$ 对 R_n 的影响是正向极显著的;而 $Albedo(\beta=-0.22, P<0.001)$ 和 $R_{lu}(\beta=-0.29, P<0.01)$ 对 R_n 有显著的负向作用。 $VWC(\beta=0.46, P<0.001)$ 、 $RH(\beta=0.44, P<0.001)$ 、 $R_{sd}(\beta=0.20, P<0.01)$ 和 $Albedo(\beta=0.18, P<0.05)$ 均对 $NDVI$ 有显著的促进作用。

放牧区 $R_{su}(\beta=0.70, P<0.001)$ 对 $Albedo$ 的影响是正向显著的;而 $R_{sd}(\beta=-0.76, P<0.001)$ 、 $VWC(\beta=-0.40, P<0.001)$ 、 $RH(\beta=-0.29, P<0.001)$ 均对 $Albedo$ 的影响是负向显著的。 $R_{su}(\beta=0.82, P<0.001)$ 和 $R_{ld}(\beta=0.46, P<0.001)$ 对 R_n 有极显著的正向作用;而 $Albedo(\beta=-0.36, P<0.001)$ 和 $R_{lu}(\beta=-0.22, P<0.05)$ 对 R_n 的作用则是负向显著的。 $R_{ld}(\beta=0.60, P<0.01)$ 、 $R_{su}(\beta=0.42, P<0.001)$ 、 $RH(\beta=0.45, P<0.001)$ 、 $VWC(\beta=0.35, P<0.001)$ 和

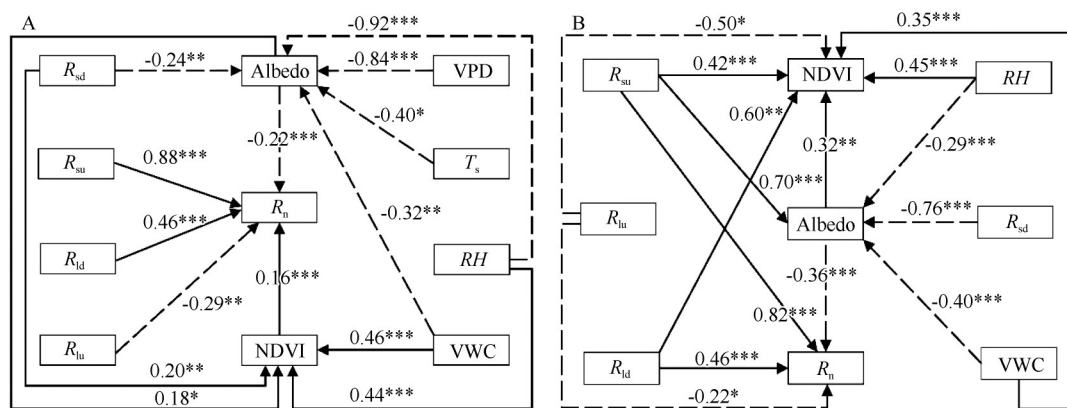
$Albedo(\beta=0.32, P<0.01)$ 均对 $NDVI$ 有重要的促进作用;而 $R_{lu}(\beta=-0.50, P<0.05)$ 对 $NDVI$ 却有着显著的抑制作用。

禁牧区 $Albedo$ 和 $NDVI$ 既作为内生变量受到辐射、气象和土壤因子的直接影响,又作为外生变量对 R_n 产生直接影响,同时 $Albedo$ 对 $NDVI$ 也产生直接的正向作用;放牧区 $Albedo$ 作为中间变量,既受到外生变量的直接影响,又对 $NDVI$ (正向)和 R_n (负向)产生直接作用。

3 讨论

3.1 生长季禁牧和放牧草地植被状态的差异性及其影响因素

6月草地植被刚进入返青期,此时研究区内植被覆盖低, $NDVI$ 处在研究期间的最低水平。随后因为雨热条件的齐备,植被迅速生长, $NDVI$ 快速



单箭头线称为直接路径,表示因果关系,方向由原因指向结果。实线表示正相关,虚线表示负相关,数字为路径系数 β 。

*号表示显著性水平 P 值(***,0.001;** ,0.01;* ,0.05)

图7 禁牧(A)、放牧(B)草地辐射通量与气候、土壤、植被因子的路径图

Fig.7 Path plot of radiation fluxes and climate, soil and vegetation factors in prohibited grazing (A) and grazing (B) areas.

In the figure, the line with single arrow is called direct path, which indicates causality, and the direction is from cause to result. solid lines indicates positive correlation, dotted lines indicates negative correlation, and the number is the path coefficient β . The sign * indicates the significance level P value (***, 0.001; **, 0.01; *, 0.05)

上升并达到峰值^[33]。这段时间内禁牧、放牧区的NDVI在6月26日出现最大差异,差异率达到0.71(图6B)。这说明在牧草萌芽期,禁牧、放牧区植被差异最为明显。此后,NDVI值处于逐渐下降趋势,直到生长季结束,其值相较于返青期略有降低。这一时期内,禁牧、放牧区的NDVI在8月5日出现第二次较大的差异,变化率达到仅次于第一次的0.69(图6B)。而此时的放牧区NDVI值也处于相对较低的水平。这说明植被生长状况良好,自由放牧导致放牧区的植被破坏较为严重,覆盖度较低,进而二者差异显著^[34-35]。在8月28日至9月3日时间段,禁牧、放牧区NDVI出现一次时间短、差异小的负向变化,30日变化率达到负向最大(-0.16)。

3.2 生长季禁牧和放牧草地近地面辐射能量的差异及其影响因素

禁牧区的 R_{su} 总体小于放牧区(图4A),这是因为放牧区由于自由放牧使得区内植被被破坏,覆盖度降低,地表相较于禁牧区更加裸露,从而对到达地面的太阳辐射反射更多^[36]。从研究期间来看,6—9月是草原生长季,降水较多,空气中水汽含量和云量较高^[28,37],因此 R_{ld} 在生长季节中保持较高的值。10月大气长波辐射突然降低,原因是10月的平均气温在整个生长季最低,从而导致 R_{ld} 也最低。

6月由于草原植被刚进入返青期,禁牧区地表

植被覆盖度略高于放牧区,从而导致Albedo略低于放牧区。10月牧草已经枯黄,但由于依然存在降水,土壤表层湿度较高,导致10月的Albedo仍然处于较低水平^[38]。6—7月研究区内植物矮小,放牧区植被被牛羊啃食和践踏,地表与冬季裸露的土地无明显差异,植被盖度很低^[39];而禁牧区由于围封作用,植被得以恢复,植被盖度较高,因此,这一时期内的禁牧、放牧草地植被覆盖度相差较大^[40]。但此时的植物均低矮,因此Albedo相差无几。8—9月植被进入生长旺盛期,植被高而密且恢复较快,因此放牧区的植被盖度略低于禁牧区。10月植被进入枯黄期,盖度较8、9月相比显著降低。而8—10月期间,由于研究区植被以牧草为主,牛羊的啃食与破坏作用尤为明显,这一时期内的Albedo差异非常明显。

禁牧、放牧区的 R_n 均在7月达到整个生长季最大值(图4B),说明7月地表获得的净能量最多^[41];在10月 R_n 达到最小值,主要是由于植被裸露或地表积雪使得反照率最高^[42],反射辐射明显升高,而地表吸收辐射却降低,造成 R_n 整个生长季节最小。

4 结论

内蒙古典型退化草原生长季地表辐射通量有显著单峰型日变化特征。研究区太阳总辐射随着时间(6—10月)推进逐月递减,6—8月是一年中光热条件最佳时段。禁牧区的地表反射辐射总体小

于放牧区。研究区各月大气长波辐射日变化幅度很小,基本上没有极大值出现。地表长波辐射存在明显的日变化和季节变化特征,但是二者之间的差异甚微。

生长季放牧草地的地表反照率明显高于禁牧草地,放牧区植被覆盖率低,使得反照率增大。禁牧草地和放牧草地的净辐射无显著差异,变化规律一致。对于研究期间的植被而言,禁牧和放牧草地NDVI整体上经历先上升后下降的变化趋势,于7月20日达到峰值。期间出现两次较明显的差异时期(6月26日和8月5日)。

在禁牧区,气象因子(相对湿度和饱和水汽压差)、太阳总辐射与土壤条件(5 cm 土层土壤含水量和土壤温度)均对地表反照率有重要的抑制作用。辐射分量(地表反射辐射、大气长波辐射)和植被指数(NDVI)对净辐射的影响是正向极显著的;而另外的两个辐射分量(地表反照率和地表长波辐射)对净辐射有显著的负向作用。土壤因子(5 cm 土层土壤含水量)、气象因子(相对湿度)、辐射(太阳总辐射和地表反照率)均对NDVI有显著的促进作用。地表反照率(负向显著)和NDVI(正向显著)既作为内生变量受到辐射、气象和土壤因子的直接影响,又作为外生变量对净辐射产生直接影响,同时地表反照率对NDVI也产生直接显著的正向作用。

在放牧区,地表反射辐射对地表反照率的影响是正向显著的;而太阳总辐射、5 cm 土层土壤含水量、相对湿度均对地表反照率的影响是负向显著的。地表反射辐射和大气长波辐射对净辐射有极显著的正向作用;而地表反照率和地表长波辐射对净辐射的作用则是负向显著的。大气长波辐射、地表反射辐射、相对湿度、5 cm 土层土壤含水量和地表反照率均对NDVI有重要的促进作用;而地表长波辐射对NDVI却有着显著的抑制作用。地表反照率作为中间变量,既受到外生变量的直接影响,又对NDVI(正向显著)和净辐射(负向显著)产生直接作用。

参考文献:

- [1] 王介民. 陆面过程实验和地气相互作用研究:从 HEIFE 到 IMG-GRASS 和 GAME-Tibet/TIPEX[J]. 高原气象, 1999, 18(3): 280-294.
- [2] 范丽军, 韦志刚, 董文杰, 等. 西北干旱区地表辐射特性的初步研究[J]. 高原气象, 2002, 21(3): 309-314.
- [3] 季国良, 马晓燕, 邹基玲, 等. 黑河地区绿洲和沙漠地面辐射收支的若干特征[J]. 干旱气象, 2003, 21(3): 29-33.
- [4] 张强, 曹晓彦. 敦煌地区荒漠戈壁地表热量和辐射平衡特征的研究[J]. 大气科学, 2003, 27(2): 245-254.
- [5] Liang S L, Wang K C, Zhang X T, et al. Review on estimation of land surface radiation and energy budgets from ground measurement, remote sensing and model simulations[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2010, 3(3): 225-240.
- [6] 孙岚, 吴国雄, 孙菽芬. 陆面过程对气候影响的数值模拟: SSiB 与 IAP/LASG L9R15 AGCM 耦合及其模式性能[J]. 气象学报, 2000, 58(2): 179-193.
- [7] 刘少锋, 林朝晖. 通用陆面模式 CLM 在东亚不同典型下垫面的验证试验[J]. 气候与环境研究, 2005(3): 406-421.
- [8] 钱泽雨, 胡泽勇, 杜萍, 等. 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[J]. 太阳能学报, 2003, 24(4): 453-460.
- [9] 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): 84-94.
- [10] 王慧, 胡泽勇, 李栋梁, 等. 黑河地区鼎新戈壁与绿洲和沙漠下垫面地表辐射平衡气候学特征的对比分析[J]. 冰川冻土, 2009, 31(3): 464-473.
- [11] 岳平, 王若安, 张强, 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): 563-576.
- [12] 史激光. 典型草原区生长季能量平衡闭合分析[J]. 中国农学通报, 2010, 26(16): 332-336.
- [13] Li S G, Harazono Y, Oikawa T, et al. Grassland desertification by grazing and the resulting micrometeorological changes in Inner Mongolia[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2000, 102(2/3): 125-137.
- [14] Bremer D J, Auen L M, Ham J M, et al. Evapotranspiration in a prairie ecosystem: effects of grazing by cattle[J]. Agronomy Journal, 2001, 93(2): 338-348.
- [15] Rogiers N, Eugster W, Furger M, et al. Effect of land management on ecosystem carbon fluxes at a subalpine grassland site in the Swiss Alps[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2005, 80(2): 187-203.
- [16] Li S G, Eugster W, Asanuma J, et al. Energy partitioning and its biophysical controls above a grazing steppe in central Mongolia[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2006, 137(1/2): 89-106.
- [17] 武荣盛, 马耀明. 青藏高原不同地区辐射特征对比分析[J]. 高原气象, 2010, 29(2): 251-259.
- [18] 岳平, 牛生杰, 张强, 等. 春季晴天与阴天草原辐射和能量平衡特征的一次对比观测[J]. 中国沙漠, 2010, 30(6): 1464-1468.
- [19] 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.
- [20] 张强, 王胜. 干旱荒漠区土壤水热特征和地表辐射平衡年变化规律研究[J]. 自然科学进展, 2007(2): 73-78.
- [21] 李璐. 基于 R 语言的缺失值填补方法[J]. 统计与决策, 2012(17): 72-74.

- [22] Buuren S V, Groothuis-Oudshoorn K. Mice: Multivariate imputation by chained equations in R[J]. *Journal of Statistical Software*, 2011, 45(3): 1–67.
- [23] Shipley B. *Cause and Correlation in Biology: A User's Guide to Path Analysis, Structural Equations and Causal Inference* [M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2000.
- [24] Lefcheck J S. PiecewiseSEM: Piecewise structural equation modeling in R for ecology, evolution, and systematics[J]. *Methods in Ecology and Evolution*, 2016, 7(5): 573–579.
- [25] Shipley B. Confirmatory path analysis in a generalized multilevel context[J]. *Ecology*, 2009, 90(2): 363–368.
- [26] Shipley B. The AIC model selection method applied to path analytic models compared using a d-separation test[J]. *Ecology*, 2013, 94(3): 560–564.
- [27] 钱正安, 焦彦军. 青藏高原气象学的研究进展和问题[J]. *地球科学进展*, 1997, 12(3): 207–216.
- [28] 季国良, 江灏, 吕兰芝. 青藏高原的长波辐射特征[J]. *高原气象*, 1995(4): 68–75.
- [29] 翁笃鸣. 青藏高原地表净辐射若干重要特征研究[J]. *大气科学学报*, 1991(2): 151–159.
- [30] 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[J]. *科学通报*, 2008, 53(10): 1220–1227.
- [31] 曹永香, 毛东雷, 蔡富艳, 等. 新疆策勒绿洲化进程中典型下垫面的小气候空间差异[J]. *中国沙漠*, 2020, 40(6): 180–189.
- [32] Daniel B, Francois G, Pierre L. 数量生态学: R语言的应用[M]. 赖江山, 译. 北京: 高等教育出版社, 2014.
- [33] 张军, 葛剑平, 国庆喜. 中国东北地区主要植被类型NDVI变化与气候因子的关系[J]. *生态学报*, 2001(4): 522–527.
- [34] 李永宏, 汪诗平. 放牧对草原植物的影响[J]. *中国草地*, 1999(3): 11–19.
- [35] 王德利, 吕新龙. 不同放牧密度对草原植被特征的影响分析[J]. *草业学报*, 1996(3): 28–33.
- [36] 吴锦奎, 王杰, 丁永建, 等. 干旱区农田、草地和荒漠下垫面辐射收支平衡的对比分析[J]. *高原气象*, 2010, 29(3): 645–654.
- [37] 翁笃鸣, 陈媛. 中国大气逆辐射的气候计算及其分布特征[J]. *南京气象学院学报*, 1992, 15(1): 1–9.
- [38] Lan X, Li Y, Shao R, et al. Vegetation controls on surface energy partitioning and water budget over China[J]. *Journal of Hydrology*, 2020, 600(6273): 125646.
- [39] 何念鹏, 田静, 薛亚芳, 等. 长期围封和自由放牧对高寒草甸土壤微生物群落结构及碳源代谢多样性的影响[J]. *中国应用生态学报*, 2018, 29(8): 2705–2712.
- [40] 颜亮, 周广胜, 张峰, 等. 内蒙古荒漠草原植被盖度的空间异质性动态分析[J]. *生态学报*, 2012(13): 45–52.
- [41] 朱宾宾, 孙双红, 李艳红, 等. 呼伦贝尔沙地紫外辐射和太阳总辐射特征[J]. *中国沙漠*, 2021, 41(1): 111–118.
- [42] 刘春芳, 魏伟, 俞啸, 等. 1995–2018年石羊河流域下游荒漠化动态变化[J]. *应用生态学报*, 2021, 32(6): 2098–2106.

Effects of grazing on near surface radiation in degraded steppe in Inner Mongolia, China

Li Xiaoyuan^a, Zhang Shengwei^{abc}, Wang Shuai^a, Li Ruishen^a, Zhao Xingyu^a, Liu Minmin^a

(a. College of Water Conservancy and Civil Engineering / b. Inner Mongolia Autonomous Region Key Laboratory of Big Data Research and Application of Agriculture and Animal Husbandry / c. Key Laboratory of Water Resources Protection and Utilization of Inner Mongolia Autonomous Region, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China)

Abstract: With the change of environment, the surface states of grassland has also changed, especially the near surface energy budget process changed more obvious. In order to comprehend the response of surface radiation energy balance processes to prohibited grazing and grazing in semi-arid grasslands, this paper analyzes the radiation flux observation data of typical degraded grasslands in Zhengxiangbai Banner of Inner Mongolia during the growing season (June–October) in 2020. The differences of diurnal and seasonal variation of total solar radiation, surface upward shortwave radiation, downward longwave radiation, surface upward longwave radiation, net radiation and albedo and their responses to meteorological factors, soil moisture, and vegetation conditions were studied in comparison between the prohibited grazing and grazing steppes. The indicated that the total solar radiation decreases month by month as time advances during the growing season. The surface upward shortwave radiation in the prohibited grazing area is generally smaller than that in the grazing area. The daily variation of the downward longwave radiation in each month is small, ranging from 130 to 370 W·m⁻². There is an obvious seasonal variation pattern of the surface upward longwave radiation under the prohibited grazing and grazing condition, but the little difference between them. The near surface radiation fluxes in the typical degraded grassland in Inner Mongolia has a significant unimodal diurnal variation during the growing season. The albedo of the both pastures showed a "U" shaped daily variation pattern. The Albedo of grazing pasture in the growing season was significantly higher than one of prohibited grazing pasture. The Piecewise Structural Equation Modeling analysis revealed that the radiation components (surface upward shortwave radiation, downward longwave radiation) and the vegetation index (normalized difference vegetation index) had a positive and highly significant effect on the net radiation; while Albedo and another radiation component (surface upward longwave radiation) had a significant negative effect on the net radiation in the prohibited grazing area. In the grazing area, the surface upward shortwave radiation and the downward longwave radiation had a highly significant positive effect on the net radiation; while Albedo and the surface upward longwave radiation had a negatively significant effect on the net radiation. Therefore, in the study, the vegetation status was the strongest factor affecting the near surface radiative energy balance process in typical degraded grasslands in Inner Mongolia under different grazing prohibition conditions.

Key words: semi-arid steppe; radiation flux; diurnal variation; growing season variation; Piecewise Structural Equation Model