

DOI: 10.20103/j.stxb.202412093028

乔成龙, 杜灵通, 陈娜, 王玉霞, 蔡露露, 施光耀, 薛斌. 荒漠草原区人工灌丛生态系统辐射收支及其生物物理响应机制. 生态学报, 2025, 45 (15): - .

Qiao C L, Du L T, Chen N, Wang Y X, Cai L L, Shi G Y, Xue B. Radiation budget and its biophysical response mechanisms of planted shrub ecosystem in desert steppe. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45 (15): - .

荒漠草原区人工灌丛生态系统辐射收支及其生物物理响应机制

乔成龙^{1,2,3}, 杜灵通^{2,3,4,*}, 陈娜⁵, 王玉霞^{1,2,3}, 蔡露露^{1,2,3}, 施光耀^{2,3,4}, 薛斌^{2,3,4}

1 宁夏大学林业与草业学院, 银川 750021

2 宁夏大学西北土地退化与生态恢复省部共建国家重点实验室培育基地, 银川 750021

3 宁夏大学西北退化生态系统恢复与重建教育部重点实验室, 银川 750021

4 宁夏大学生态环境学院, 银川 750021

5 哈巴湖国家级自然保护区管理局, 吴忠 751500

摘要:为揭示生态修复工程引起的陆地生态系统地气间能量交互作用的生物物理响应机制, 本文基于 2019–2021 年宁夏盐池荒漠草原区人工灌丛生态系统的辐射观测数据, 分析了该生态系统的辐射收支特征; 并利用随机森林模型和集合经验模态分解法, 研究了反照率对生物物理因子的响应机制。结果表明: (1) 不同季节, 人工灌丛生态系统日内变化趋势大体相似; 但变化幅度、峰值时间和日均值具有显著的季节差异。 (2) 下行短波辐射和长波辐射均表现出明显的季节性单峰变化, 净辐射和净短波辐射也遵循相似的季节变化模式; 下行短波辐射驱动了净辐射的季节性变化, 生长季反照率的变化趋势整体呈现出凹谷特征。 (3) 土壤水分、饱和水汽压差和叶面积指数是影响反照率的主要生物物理因子, 反照率与生物物理因子间存在非线性的响应关系。 (4) 降水事件及其耦合的土壤水分变化驱动了反照率的短期随机波动, 调控短波辐射的短期收支过程; 而人工灌丛植被的年内季节性生长决定了反照率的长期趋势。该研究补充了荒漠草原区人工灌丛生态系统的辐射收支过程认识, 揭示了驱动反照率变化的关键生物物理因素, 为荒漠生态系统管理提供了科学依据。

关键词: 辐射收支; 反照率; 生物物理因子; 人工灌丛

Radiation budget and its biophysical response mechanisms of planted shrub ecosystem in desert steppe

QIAO Chenglong^{1,2,3}, DU Lingtong^{2,3,4,*}, CHEN Na⁵, WANG Yuxia^{1,2,3}, CAI Lulu^{1,2,3}, SHI Guangyao^{2,3,4}, XUE Bin^{2,3,4}

1 School of Forestry and Prataculture, Ningxia University, Yinchuan 750021, China

2 Breeding Base for State Key Laboratory of Land Degradation and Ecological Restoration in Northwest China, Ningxia University, Yinchuan 750021, China

3 Key Laboratory for Restoration and Reconstruction of Degraded Ecosystem in Northwest China of Ministry of Education, Ningxia University, Yinchuan 750021, China

4 School of Ecology and Environment, Ningxia University, Yinchuan 750021, China

5 Administration of Haba Lake National Nature Reserve, Wuzhong 751500, China

Abstract: To reveal the biophysical response mechanism of the energy interaction between the land surface and the atmosphere in terrestrial ecosystems under the influence of ecological restoration projects, this study analyzed the radiation budget characteristics of a planted shrub ecosystem using the radiation observation data collected in the Yanchi desert steppe

基金项目: 国家自然科学基金 (42467016) 和宁夏重点研发计划 (2024BEG02009)

收稿日期: 2024-12-09; **网络出版日期:** 2025-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: dult80@qq.com

region of Ningxia from 2019 to 2021. The response of surface albedo to biophysical factors was further examined using a random forest model and ensemble empirical mode decomposition method. The results showed that: (1) The diurnal variation patterns of the planted shrub ecosystem were generally similar across seasons; however, significant seasonal differences were observed in the change amplitude, peak time, and daily average value. (2) Downwelling shortwave radiation and longwave radiation both showed obvious seasonal single-peak change, and net radiation and net shortwave radiation also followed similar seasonal patterns. Downwelling shortwave radiation drove seasonal variation in net radiation. The albedo trend during the growing season exhibited a concave valley shape overall. (3) Soil water content, vapor pressure deficit and leaf area index were the primary biophysical factors that affect albedo. The relationship between albedo and these biophysical factors was nonlinear. (4) Precipitation events, coupled with soil moisture, drive short-term fluctuations in albedo, while intra-annual seasonal growth of planted shrub vegetation determined long-term albedo trends. This study enhanced the understanding of radiation processes in planted shrub ecosystem of desert steppe area, identified the key factors driving albedo changes, and provided a scientific basis for desert ecosystem management.

Key Words: radiation budget; surface albedo; biophysical factors; planted shrub

冠层界面的辐射收支平衡决定着生态系统关键过程的可利用能量大小,也直接影响着地气交互作用过程的强弱^[1-2]。大气成分(气溶胶、二氧化碳浓度等)、云、下垫面等多种因素共同影响着地表辐射收支^[3-5]。作为量化地表反射下行短波辐射的指标,反照率(Albedo, α)在冠层界面的辐射收支过程中发挥着重要作用。反照率受土壤属性^[6]、植被类型与结构^[7]、城市建设^[8]和气候变化^[9]等的影响,这些因素会引起辐射强迫^[10]和地表温度变化^[11-12],进而引起一系列地气能量交互效应的反馈。因此,深入探究地表辐射过程、反照率变化及其驱动因素,对于理解气候变化趋势^[13]、预测生态系统功能演替以及制定精准的生态恢复措施^[14]具有重要意义。

目前,地表辐射收支的研究主要集中于量化辐射收支过程、探讨驱动机制及其生态效应,已有学者利用野外定位观测数据,量化了不同时间尺度下的草地^[15]、农田^[16]和湿地^[17]等生态系统的辐射收支特征,并比较不同天气条件下(如晴天、阴天和雨天)的差异。在区域尺度上,辐射收支过程的研究主要依赖于遥感技术,重点围绕辐射分量及其特征的遥感反演算法^[18]与真实性验证^[19-20]开展。其中,反照率决定短波辐射支出强弱,研究反照率变化特征及其影响机制对理解生态系统的地气作用过程至关重要,现有研究的侧重点也各异。在站点尺度上,多聚焦于反照率对土壤水分^[6,21]、相对湿度^[22]和太阳高度角等生物物理因子的响应;在区域尺度上,多侧重于反照率时空变化特征、驱动因素^[23]及其引起的地温变化等^[12,24]。然而,现有辐射收支研究主要基于典型生态系统类型区的长期定位观测,缺乏一些特殊植被结构背景下的辐射收支特征认识,如荒漠草原区大范围的生态修复工程建植的非地带性人工灌丛植被是否改变了地表辐射能量的收支过程;此外,当前缺乏多种生物物理因子交互影响辐射收支的机制研究,阻碍了人们理解变化环境下地气能量交互作用及生态学过程。

宁夏盐池县位于中国北方农牧交错带,县内广布的荒漠草原生态系统在上世纪发生严重退化,之后又开展了一系列人工植被重建工程,尤其是在退化草原上种植以中间锦鸡儿(*Caragana liouana*)为主的灌木,形成了 $8.92 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 的人工灌丛景观,约占县域总面积的 13.18%^[25]。大规模的灌丛种植不仅改变了区域植被结构,而且改变了地带性荒漠草原区的生物物理环境,这为研究变化环境下生态系统结构与功能、地气交互作用提供了典型对象。为此,前人利用涡度相关技术、生态过程模型和遥感法等手段,探讨了人工灌丛对地气间碳水循环的影响^[26-28],模拟了灌丛建植前后地表能量过程的差异^[29],但依然缺乏人工灌丛生态系统辐射收支响应生物物理因子的机制研究。因此,本研究旨在使用定位观测数据量化荒漠草原区人工灌丛生态系统的辐射收支特征,使用随机森林模型评估不同生物物理因子对反照率的影响,并揭示变化环境下反照率响应各因子的生物物理机制。

1 研究区概况、数据与方法

1.1 研究区概况

盐池县(37°04'—38°10'N, 106°30'—107°47'E)位于宁夏回族自治区东部,与陕西省、甘肃省和内蒙古自治区接壤,面积为 6769 km²,是宁夏最大的县。盐池县位于农牧交错带上,地理和气候都具有较强的过渡性特点,地形南高北低,从南部黄土丘陵区向北部鄂尔多斯台地过渡,平均海拔为 1623 m;是典型的中温带大陆性季风气候,四季鲜明,干旱少雨,1960—2020 年的年平均气温与平均降水量分别为 8.41 °C 和 288.3 mm^[28],且南北差异较大,即气候从南部半干旱区向北部干旱区过渡;中北部的地带性土壤以风沙土和灰钙土为主,南部以黄绵土为主。为防沙治沙和改善区域生态环境,盐池县在退化严重的草原大面积种植灌木^[25],在地带性荒漠草原区形成了较为典型的人工灌丛生态系统(图 1),植被类型以中间锦鸡儿(*Caragana liouana*)为主,灌丛行带间伴生有短花针茅(*Stipa breviflora*)、猪毛蒿(*Artemisia scoparia*)、老瓜头(*Cynanchum komarovii*)和苦豆子(*Sophora alopecuroides*)等草本植物。

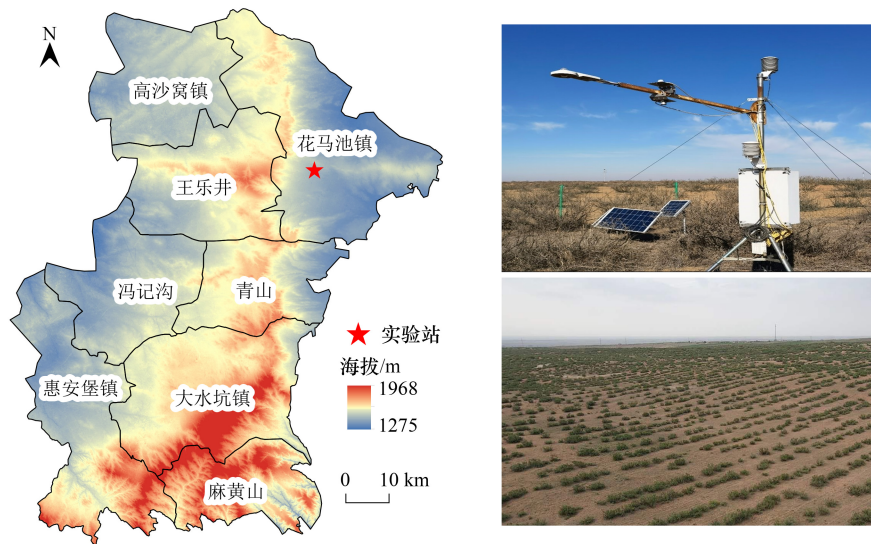


图 1 研究区概况图及人工灌丛生态系统景观

Fig.1 Location map of study area and landscape of planted shrub ecosystem

1.2 数据与方法

1.2.1 野外台站观测数据

观测数据来自宁夏大学荒漠草原生态系统定位观测研究站(107°19'48"E, 37°49'48"N, 1353 m),站内监测指标包括了碳水通量、地表辐射和相关的环境与气象因子等。定位站安装 CNR-4 辐射四分量传感器(Kipp&zonen, 荷兰)获取人工灌丛生态系统上行短波辐射(Upwelling shortwave radiation, USR)、下行短波辐射(Downwelling shortwave radiation, DSR)、上行长波辐射(Upwelling longwave radiation, ULR)和下行长波辐射(Downwelling longwave radiation, DLR),辐射四分量传感器架设高度为 2.5 m,观测半径为 25 m;使用 HMP45C 温湿度传感器(Vaisala, 芬兰)观测空气温度和湿度,架设高度为 2 m;使用土壤水分传感器 SM150(Delta-T, 英国)和土壤温度传感器 107-L(Campbell, 美国)观测土壤水分和土壤温度,埋深为 10 cm,利用 CR1000 数据采集器按 5 分钟频率进行采样并存储。

1.2.2 辐射收支数据处理与计算

使用荒漠草原区人工灌丛生态系统定位观测研究站 2019—2021 年辐射四分量观测数据用于本研究(2019 年 12 月—2020 年 1 月数据缺失),由于辐射传感器自发热现象对长波辐射测量精度有影响,故使用仪

器自身温度对所测长波辐射进行了偏差校正,原始辐射数据剔除异常值和小于 20 W/m^2 的下行短波辐射及其对应的上行短波辐射,日尺度短波辐射为白天平均,日尺度长波辐射为全天平均^[15]。基于观测的日尺度辐射数据计算地表净辐射(Net Radiation, R_n)、净短波辐射(Net shortwave Radiation, R_s)、净长波辐射(Net longwave Radiation, R_l)和反照率(Albedo, α),来研究人工灌丛生态系统的辐射收支特征; R_n 为地表上行总辐射与下行总辐射之差,表示地表所获取的净辐射能量,不仅能反映地表能量平衡状态,而且作为有效能影响着地气间潜热通量与显热通量^[30],各指标计算公式如下:

$$R_n = R_s + R_l \quad (1)$$

$$R_s = \text{DSR} - \text{USR} \quad (2)$$

$$R_l = \text{DLR} - \text{ULR} \quad (3)$$

$$\alpha = \text{USR} / \text{DSR} \quad (4)$$

式中, R_s 为净短波辐射, R_l 为净长波辐射,DSR 为下行短波辐射,USR 为上行短波辐射,DLR 为下行长波辐射,ULR 为上行长波辐射,单位均为 W/m^2 。

1.2.3 叶面积指数及处理

叶面积指数(Leaf area index, LAI)使用中分辨率成像光谱仪(MODIS)的 MCD15A3H 产品(<https://modis.ornl.gov/>),时间分辨率为 4 d,空间分辨率为 500 m。根据野外台站的经纬度坐标,提取台站所在区域遥感像元的 LAI 值,使用 Gaussian 滤波算法,对 LAI 数据进行平滑处理,最后使用线性插补的方法,获取日尺度 LAI 数据。

1.2.4 统计分析方法

随机森林模型(Random forest model, RF)是由 Breiman 提出的一种基于决策树的集成机器学习算法,不仅适用于处理分类和回归问题,还可深入探究影响因素的重要性程度^[31],具有高效处理高维数据和较强的鲁棒性与抗过拟合能力^[32]。其通过重采样技术从原始数据集中抽取多个子样本,针对每个子样本建立决策树,对所有决策树的预测结果进行集成,并采用多数投票法来确定最终预测结果^[33]。本研究将生长季反照率 α 作为响应变量,以空气温度 T_a 、土壤温度 T_s 、土壤水分 SWC、饱和水汽压差 VPD、叶面积指数 LAI 和下行短波辐射 DSR 作为解释变量构建随机森林模型;首先,通过替换取样法将原始数据划分为 6 个子样本集,随机选取一个子样本集作为独立样本用于评估模型,其余 5 个子样本集用于构建模型;其次,将每个样本集以 7:3 划分为训练样本和验证样本,使用 R 语言中的 RandomForest 包进行模型构建与训练,并利用验证样本评估模型性能,以调整和优化模型参数;最后,使用独立样本对最终模型进行评估,以确保模型的模拟精度和泛化能力。利用重要性得分评估解释变量对响应变量的贡献程度,利用偏依赖图评估单一解释变量对响应变量的平均影响^[32]。

集合经验模态分解法(Ensemble empirical mode decomposition, EEMD)是一种自适应时序数据分析方法,用于解决时序数据的模态混叠问题。该方法通过向目标时序数据中添加白噪声,构建待分解信号,再利用经验模态分解法(Empirical mode decomposition, EMD)将信号分解为不同时间尺度的固有模态分量(Intrinsic mode function, IMF)和一个残差(Residual, RES)^[34]。本研究采用 EEMD 对研究期内生长季反照率进行分解,提取第一固有模态分量(IMF1)和残差(RES)。其中,IMF1 反映反照率的高频波动,而 RES 则揭示了反照率的低频趋势。在分解过程中,扰动白噪声与原始信号的信噪比设置为 0.2,集合平均次数设置为 100 次,以确保分解结果的稳定性和准确性。

2 结果与分析

2.1 人工灌丛生态系统辐射通量特征

2.1.1 辐射日内变化

荒漠草原区人工灌丛生态系统在不同季节的日内辐射变化如图 2 所示,下行短波辐射呈现出明显的“单

峰型”日变化,其峰值出现在正午时分。下行短波辐射的峰值在夏季最高,达到 743.94 W/m^2 ,而在冬季最低,为 532.76 W/m^2 ,春秋两季的峰值则分别为 735.3 和 579.98 W/m^2 。受下垫面反照率动态变化的影响,上行短波辐射在春夏秋冬四季的峰值分别为 123.68 、 111.54 、 100.88 和 122.45 W/m^2 ,其中春季最大,秋季最小。上、下行短波辐射日内变化周期同步,即下行短波辐射的日内变化决定了上行短波辐射的日内形态,但上行短波辐射的强弱还受制于反照率大小。不同季节,地表短波辐射日内发生交换的起止时刻不同,起始时刻春夏两季从 05:50 开始,冬季则延迟至 07:45 开始;但结束时刻却在冬季最早,结束时刻为 18:25,而夏季能持续至 21:10;这些特征决定于地球公转导致的太阳升落时间。相较于短波辐射,上行长波辐射日内变化相对平缓,上、下行长波辐射最大出现在夏季,分别为 451.24 和 351.65 W/m^2 ;最小出现在冬季,分别为 294.43 和 209.22 W/m^2 。受固体地表热辐射属性和温度等因素影响,上行长波辐射在春夏秋冬四季间出现峰值的时刻有所不同,分别为 14:00、14:00、13:30 和 13:55。总之,荒漠草原区人工灌丛生态系统在不同季节的日内辐射动态规律大致相同,但各季节在辐射的变化幅度、峰值出现时间以及日均值方面均表现出明显的季节性差异。

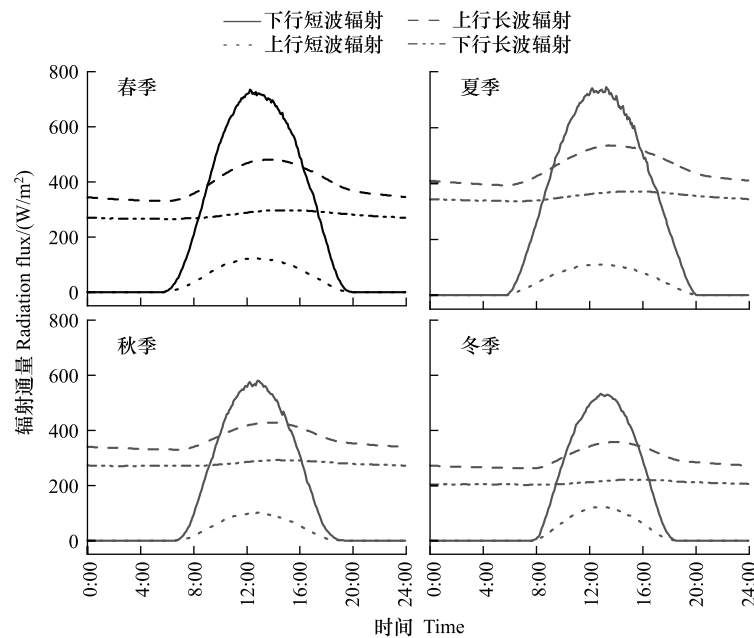


图 2 不同季节人工灌丛生态系统各辐射分量日内变化特征

Fig.2 Diurnal variation characteristics of radiation components in the planted shrub ecosystem at different seasons

2.1.2 辐射年际变化

从荒漠草原区人工灌丛生态系统 2019—2021 年期间的各辐射分量变化来看(图 3),上、下行短波辐射和上、下行长波辐射的日均值分别为 71.4 W/m^2 ($CV = 8.02\%$)、 404.7 W/m^2 ($CV = 0.47\%$)、 380.0 W/m^2 ($CV = 0.34\%$) 和 283.9 W/m^2 ($CV = 0.94\%$),其中下行短波辐射最强,上行短波辐射最弱,且上行短波辐射变异最大。下行短波辐射和上下行长波辐射均具有明显的季节性变化特征。受到太阳高度角影响,下行短波辐射年内呈单峰形态,5 月份达到全年最高 (490.09 W/m^2),12 月份达到全年最低 (306.12 W/m^2);受日内云量等因素影响,单日下行短波辐射会出现毛刺状的低值。上行短波辐射变化幅度相对较小,日间波动不大,但由于降雪高反射所致,冬季上行短波辐射会出现短时异常升高。上行与下行长波辐射表现出相似的年际变化周期,在 7 月份达到峰值,分别为 465.31 W/m^2 和 358.73 W/m^2 ;在 12 月份降至全年最低,分别为 277.93 W/m^2 和 198.04 W/m^2 ,且长波辐射上行方向始终大于下行方向,即地表辐射能量交换在长波波段以向天空热辐射消耗支出为主。

2.1.3 辐射收支年际变化

荒漠草原区人工灌丛生态系统的辐射收支季节变化如图 4 所示,净辐射与净短波辐射呈现出明显的季节

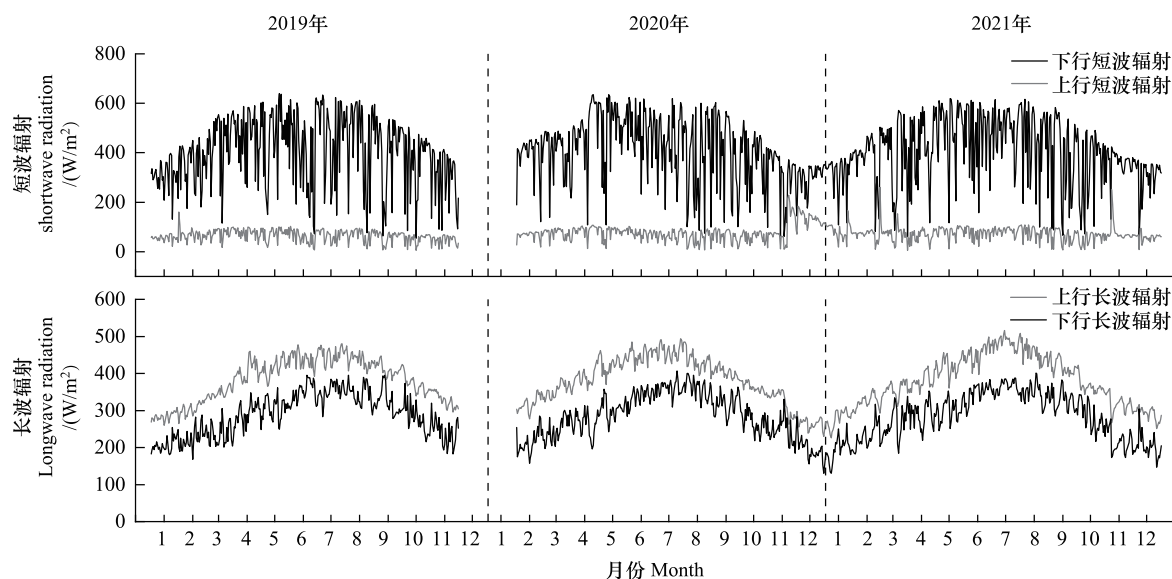


图3 2019—2021年人工灌丛生态系统各辐射分量的变化特征

Fig.3 Variation characteristics of radiation components in the planted shrub ecosystem from 2019 to 2021

性单峰形态,且二者在长周期趋势与短期波动特征上表现一致,但净长波辐射的季节性周期不甚明显;净辐射与净短波辐射在年内呈季节性的单峰形态。从辐射收支净值来看,净短波辐射均为正值,表明人工灌丛生态系统在短波波段以吸收能量为主;净长波辐射为负值,表明人工灌丛生态系统在长波波段以释放能量为主;净辐射也为正值,即该生态系统以净吸收辐射能量为主。从辐射收支成分来看,净辐射波动主要受净短波辐射的控制,下行短波辐射决定净短波辐射收入大小,下行短波辐射的季节性周期变化决定了人工灌丛生态系统在不同季节获取的可用能量多寡。

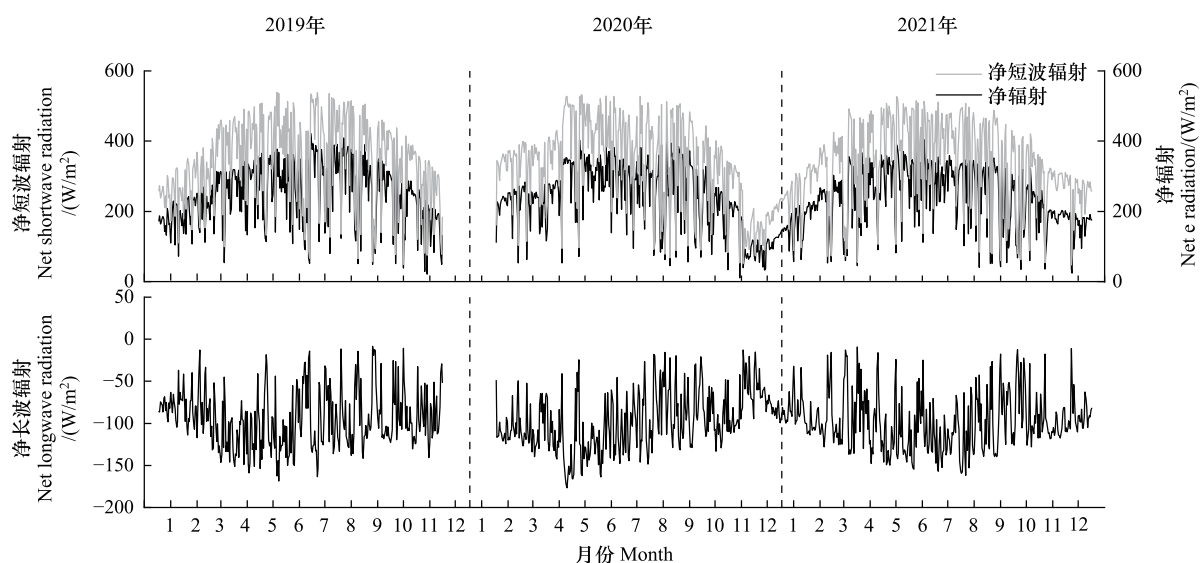


图4 2019—2021年人工灌丛生态系统辐射收支变化特征

Fig.4 Variation characteristics of radiation budget in the planted shrub ecosystem from 2019 to 2021

2019—2021年人工灌丛生长季(4月份至10月份)的反照率如图5所示。平均反照率为0.154,其中最大值为0.198,最小值为0.088。除2021年外,人工灌丛生态系统的反照率基本上表现出以整个生长季为周期的

凹谷特征,但短期内存在突然降低的毛刺峰。反照率随生长季的凹谷特征与人工灌丛植被的生长节律一致,植被生长最为茂盛、叶面积最大的季节,其反照率达到了最低;反照率短期的异常降低,与地表水分供应状况(降水及土壤水分)的突变一致。但 2021 年生长季中期的严重干旱^[26]显著改变了人工灌丛生态系统的反照率特征,导致生长季中期的反照率异常升高。

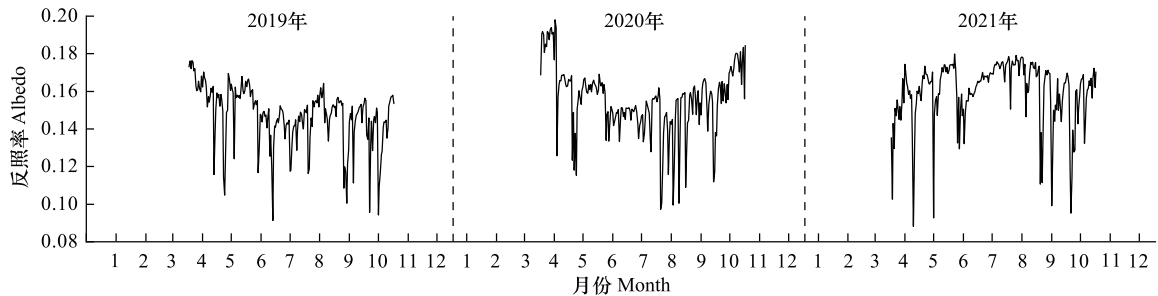


图 5 2019—2021 年人工灌丛生态系统生长季反照率变化

Fig.5 Albedo variations in the planted shrub ecosystem during the growing season from 2019 to 2021

2.2 人工灌丛生态系统辐射收支的生物物理响应

2.2.1 反照率随机森林模型构建与优化

为评估不同生物物理因子对人工灌丛生态系统反照率的影响,本研究以反照率作为响应变量,以多个生物物理因子作为解释变量,构建随机森林模型。为提高随机森林模型的整体精度,需要通过逐步筛选的方法对模型参数进行优化。如图 6 所示,在分裂数为 3 时,模型误差降至最低;当分类树数量达到 100 后,模型误差基本趋于稳定。基于如上分析,最终确定模型中使用的分裂数为 3,分类树数量为 100。利用独立样本数据对模型的观测值和预测值进行拟合检验,绝大多数点聚集在拟合线上,表现出较高的预测精度。线性拟合的决定系数 R^2 为 0.91,表明所建立的随机森林模型模拟结果能够较好的解释数据的变异性;均方根误差 RMSE 仅为 0.005,表明所构建的随机森林模型具有较高的模拟精度。

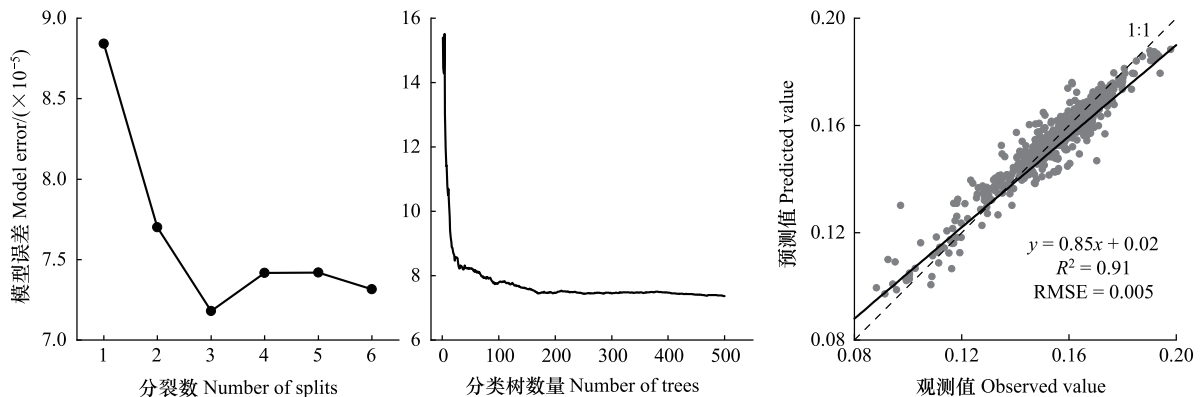


图 6 随机森林模型参数影响分析及精度验证

Fig.6 Impact of parameters on model simulation and its accuracy evaluation

2.2.2 影响反照率的重要生物物理因子甄别

基于重要性得分和节点纯度两项指标评估不同生物物理因子对反照率的影响程度(图 7)。土壤水分含量和饱和水汽压差均表现出较高的重要性得分和节点纯度,表明二者是影响反照率的主要土壤物理和大气物理因子。叶面积指数表现出高重要性得分与低节点纯度的特点,表明叶面积指数对反照率的影响并非直接影响,而是通过调节其他生物物理因子与反照率之间相互作用而间接发挥作用。下行短波辐射表现出低重要性

得分与高节点纯度的特点,即下行短波辐射在整体上对反照率的影响相对较小,但在特定条件下可能对反照率产生显著影响。相比之下,空气温度和土壤温度对反照率的影响有限。

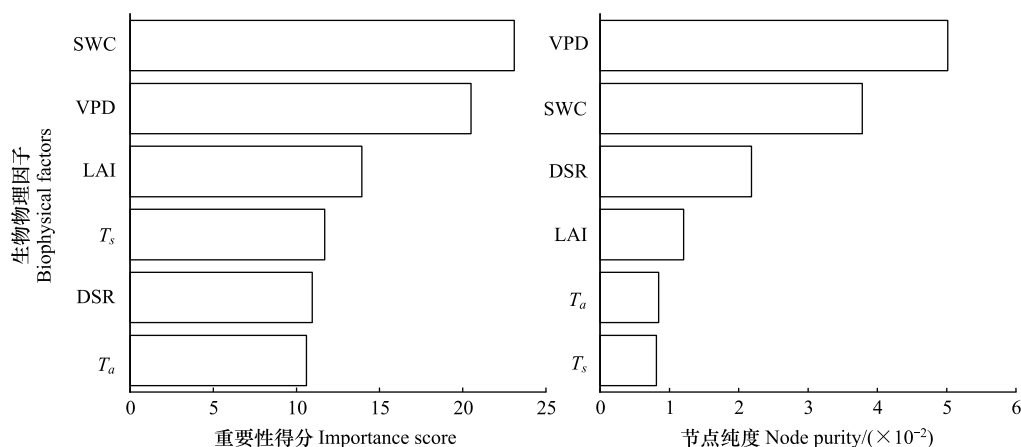


图7 生物物理因子重要性排序

Fig.7 Importance ranking of biophysical factors

2.2.3 反照率响应生物物理因子的依赖分析

反照率与各生物物理因子之间的偏依赖关系如图8所示,众多生物物理因子与反照率之间存在明显的非线性关系,且反照率对不同生物物理因子的响应程度和响应特点有所不同。从反照率对6种不同生物物理因子的响应范围来看,反照率响应土壤水分含量和饱和水汽压差的影响最大,而对土壤温度的响应最小。反照率随着土壤水分含量的增加而表现出“梯形”下降特点,土壤水分含量在 $0.02-0.04 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 和 $0.08-0.1 \text{ m}^3/$

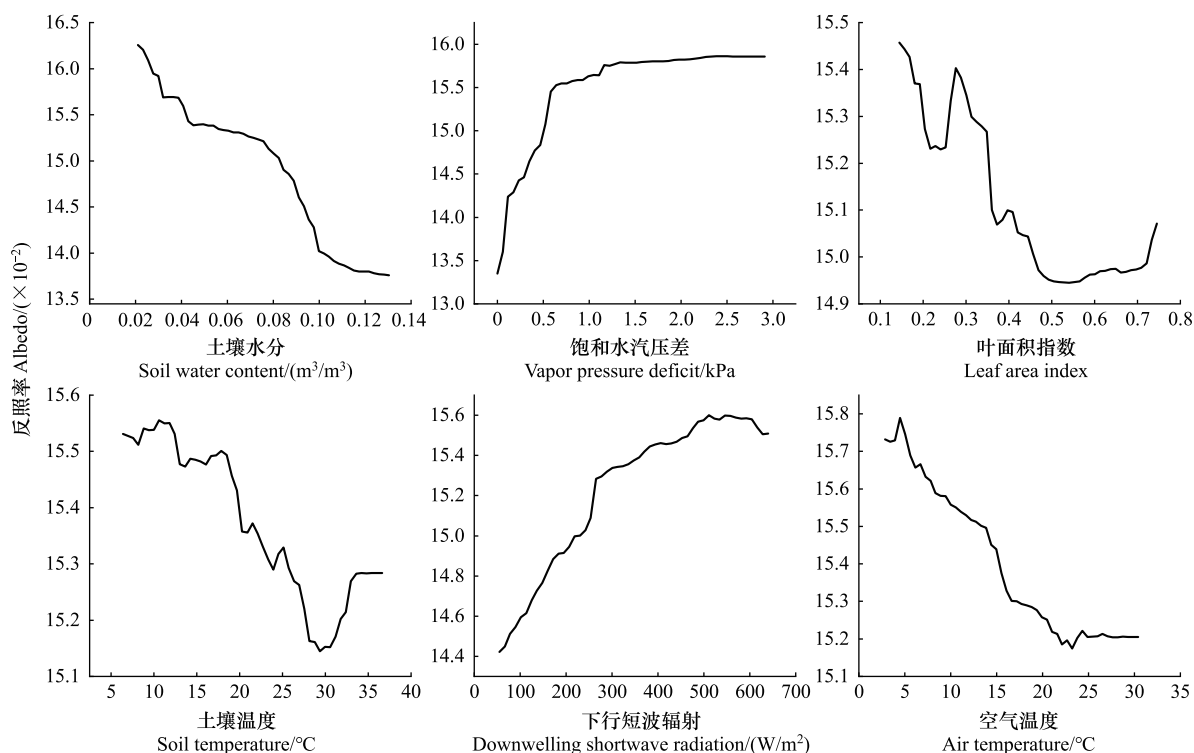


图8 反照率与生物物理因子之间的偏依赖图

Fig.8 Partial dependence plot between albedo and biophysical factors

m^3 的两个区间是反照率响应最敏感的区域。当饱和水汽压差小于 0.7 kPa, 反照率表现出正相关响应; 当饱和水汽压差超过 0.7 kPa 并出现大气干旱胁迫后, 反照率则对饱和水汽压差逐渐失去响应。当叶面积指数处于 0.3—0.5 的区间时, 反照率会显著随叶面积增加而下降; 但当叶面积指数超过 0.5 后, 反照率则失去对叶面积变化的响应。空气温度在 5—24 °C 间和土壤温度在 10—30 °C 间, 反照率均表现出与它们有负响应关系, 但其响应程度相对较小。反照率会随着短波能量供应增强而升高, 但下行短波辐射超过 280 W/m^2 以后, 反照率对短波能量供应的依赖性逐渐降低。

2.2.4 辐射收支的生物物理响应分析

从图 5 的反照率变化特征可以看出, 人工灌丛生态系统反照率年内变化既有高频的短期波动, 又有低频的长期趋势。因此, 利用集合经验模态分解, 将反照率分解出表征高频波动的第一固有模态分量 (IMF1) 和表征长期趋势的残差 (RES), 以此来分析驱动辐射收支的生物物理机制 (图 9)。结果表明, 第一固有模态分量与降水和土壤水分的变化具有明显的同步特征, 表明降水事件导致的土壤水分变化是反照率短期波动的主要驱动因素。而残差与叶面积指数表现出较为一致的反向作用, 说明人工灌丛植被年内季节性生长主导了反照率的年内长期趋势。值得一提的是 2021 年生长季中期的持续干旱引发土壤水分长期亏缺^[26], 并通过生物物理因素的综合作用反馈于能量收支, 对反照率产生抑制性影响, 最终致使 2021 年的反照率长期趋势与叶面积指数失去反向关联。综上可知, 降水事件及其耦联的土壤水分变化驱动了反照率的短期波动, 而人工灌丛植被的年内季节性生长决定了反照率的长期趋势。

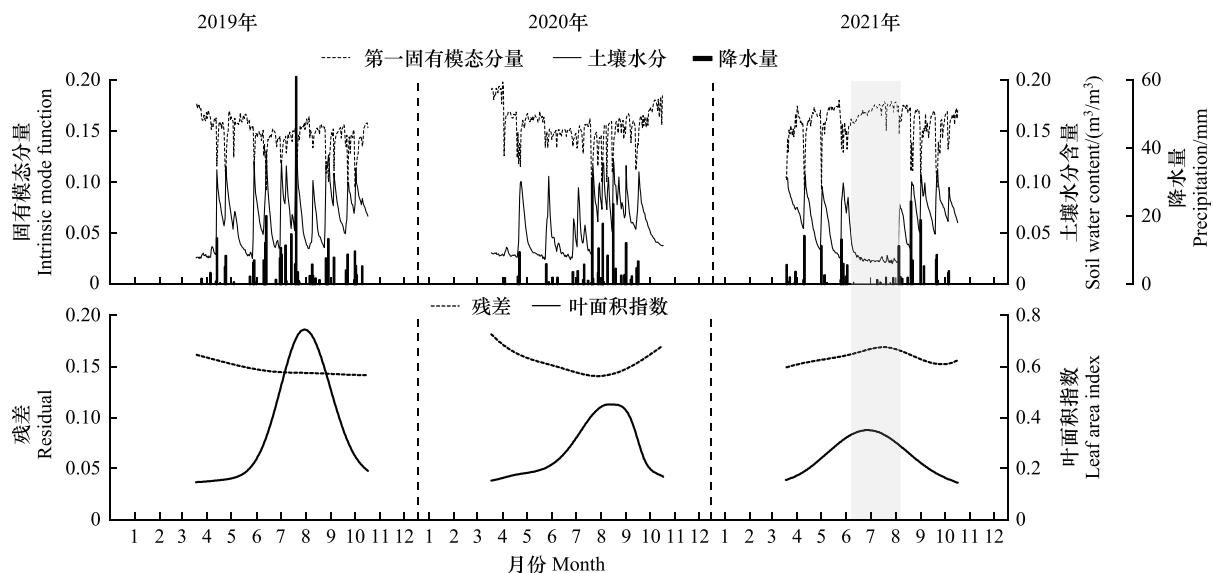


图 9 生长季反照率短期与长期变化特征分解及生物物理驱动机制

Fig.9 Decomposition of short-term and long-term variation of albedo during the growing season and their driving mechanisms

阴影部分表示 2021 年 6—8 月份人工灌丛生态系统所经历的干旱期

3 讨论

3.1 人工灌丛生态系统反照率变化的驱动机制

因受多种生物物理因子的交互影响, 不同类型生态系统反照率变化的驱动机制存在显著差异^[23]。在物理调控机制方面, 干旱区生态系统的反照率短期波动与地表水分状况关系密切, 如降水事件发生后, 中天山地区草地生态系统的反照率在短时间内会发生骤减^[15]; 本研究也发现荒漠草原区人工灌丛生态系统的反照率突降与降水事件节律一致 (图 9); 由此可见, 干旱区降水事件及其耦联的土壤水分升高驱动了反照率的急速降低和短期波动^[35—36], 进而调控地气短波辐射收支的短期变化, 其机制在于降水改变了表层土壤水分含量,

影响了土壤对短波辐射的吸收和反射属性。

在生物调控机制方面,地处暖温带大陆性气候区的落叶灌丛的冠层结构在年内呈显著的周期变化:LAI在生长初期迅速增加,生长中期保持高位,到生长季后期开始下降^[37];已有研究证实灌丛生态系统的冠层绿度对反照率会产生影响^[21],且冠层结构中的 LAI 在驱动生态系统地气能量交互中有着极为重要的作用^[29];由此可知,人工灌丛生态系统的植被冠层季相变化决定了反照率长周期趋势和地气短波能量收支的年内特征。尽管地表水分状况和冠层结构季相变化分别控制着反照率的短期波动和长期趋势,但两种驱动又有关联,灌丛的季节性生长依赖于土壤水分的可利用性^[38],因此,长期持续干旱亦会减弱生物因素对反照率长周期的驱动,这是今后人工灌丛生态系统辐射收支如何响应极端气候事件研究的方向。

3.2 人工灌丛建植对荒漠草原辐射能量收支及相关生态过程的影响

荒漠草原区建植人工灌丛会改变生态系统的结构和功能^[27],已有研究表明,盐池荒漠草原建植人工灌丛后,LAI 的年最大值由 0.20 增加到 0.67,植被年内与年际的生长特征也发生相应的改变^[37]。人工灌丛建植过程中,植被覆盖度增加,裸地面积减少,浅根系的草本植物转变为深根系的灌丛。草本植物主要使用浅层土壤水分,其对降水响应更为敏感;而灌丛则主要利用深层土壤水分,其对降水脉冲的响应较弱。人工灌丛建植不仅改变了地表植被冠层结构,也引起了地表土壤水文过程响应的变化,包括土壤水分供给和消耗过程的改变,继而影响到地表辐射能量的收支过程。综上所述,人工灌丛建植使得降水事件及其耦联土壤水分对反照率的影响有所减弱,植被在地表辐射收支过程中的长期调控作用进一步凸显。

LAI 增大引起的植被变绿会导致反照率的下降^[39],进而造成更多的能量进入人工灌丛生态系统。已有研究发现,荒漠草原区人工灌丛建植使得净辐射、潜热通量和显热通量分别增加了 5%、7% 和 14%^[29]。能量循环过程的改变驱动了地表水循环过程。为维持正常的生理活动和防止自身温度过高,人工灌丛植被会通过根系大量吸收深层土壤水分,深层土壤水分的消耗会造成区域性土壤干层现象出现^[40]。因此,干旱半干旱区生态恢复治理中需要综合考虑生态系统水能平衡关系,合理调节植被结构和水分利用,才能维持生态系统功能的稳定性,确保生态治理工程的长期效益。

4 结论

基于宁夏盐池县荒漠草原区人工灌丛生态系统的辐射与生物物理观测数据,通过计算反照率、净长波辐射、净短波辐射等指标,使用随机森林模型和集合经验模态分解等方法,研究了荒漠草原区人工灌丛生态系统辐射收支及其生物物理响应机制。主要结论如下:人工灌丛生态系统的辐射日内变化和季节变化均与太阳短波辐射有关,形成净辐射能量供给的周期性变化特点;生物物理因子与反照率之间存在非线性关系,其中土壤水分、饱和水汽压差和叶面积指数是影响反照率的主要生物物理因子,决定着短波能量的收支比例;降水事件及其耦联的土壤水分变化驱动了反照率的短期随机波动和短波能量收支,而植被冠层结构的季相变化决定了反照率的长周期趋势,辐射收支的生物物理调控机制与人工灌丛生态系统的结构和功能特性密切相关。该研究结果可为干旱半干旱区人工生态系统管理和区域资源优化利用提供科学依据。

参考文献 (References):

- [1] Wild M, Folini D, Schär C, Loeb N, Dutton E G, König-Langlo G. The global energy balance from a surface perspective. *Climate Dynamics*, 2013, 40(11-12): 3107-3134.
- [2] Bonan G B. Forests and climate change: forcings, feedbacks, and the climate benefits of forests. *Science*, 2008, 320(5882): 1444-1449.
- [3] 陈安南, 赵传峰. 气溶胶直接辐射强迫研究进展. *科学通报*, 2024, 69(1): 30-44.
- [4] He H Z, Kramer R J, Soden B J, Jeevanjee N. State dependence of CO₂ forcing and its implications for climate sensitivity. *Science*, 2023, 382(6674): 1051-1056.
- [5] 张华, 王菲, 汪方, 李剑东, 陈晓龙, 王在志, 李建, 周喜讯, 王秋艳, 王海波, 游婷, 谢冰, 陈琪, 端义宏. 全球气候变化中的云辐射反馈作用研究进展. *中国科学:地球科学*, 2022, 52(3): 400-417.
- [6] 张亚峰, 王新平, 潘颜霞, 王正宁, 虎瑞. 荒漠地区地表反照率与土壤湿度相关性研究. *中国沙漠*, 2011, 31(5): 1141-1148.
- [7] Duveiller G, Hooker J, Cescatti A. The mark of vegetation change on Earth's surface energy balance. *Nature Communications*, 2018, 9(1): 679.

- [8] Ouyang Z T, Sciusco P, Jiao T, Feron S, Lei C, Li F, John R, Fan P L, Li X, Williams C A, Chen G Z, Wang C H, Chen J Q. Albedo changes caused by future urbanization contribute to global warming. *Nature Communications*, 2022, 13(1): 3800.
- [9] Guan Y L, Lu H W, Yin C, Xue Y X, Jiang Y L, Kang Y, He L, Heiskanen J. Vegetation response to climate zone dynamics and its impacts on surface soil water content and albedo in China. *Science of The Total Environment*, 2020, 747: 141537.
- [10] 翟俊, 刘荣高, 刘纪远, 赵国松. 1990—2010 年中国土地覆被变化引起反照率改变的辐射强迫. *地理学报*, 2013, 68(7): 875-885.
- [11] Wang K, Zhao D S, Zhu Y, Gao X, Deng S Q, Chen Z W, Wang S S, Cui Y P. Albedo-dominated biogeophysical warming effects induced by vegetation restoration on the Loess Plateau, China. *Ecological Indicators*, 2023, 154: 110690.
- [12] Schlaerth H L, Silva S J, Li Y, Li D. Albedo as a competing warming effect of urban greening. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2023, 128(24): e2023JD038764.
- [13] Stephens G L, O'Brien D, Webster P J, Pilewski P, Kato S, Li J L. The albedo of earth. *Reviews of Geophysics*, 2015, 53(1): 141-163.
- [14] Hasler N, Williams C A, Denney V C, Ellis P W, Shrestha S, Terasaki Hart D E, Wolff N H, Yeo S, Crowther T W, Werden L K, Cook-Patton S C. Accounting for albedo change to identify climate-positive tree cover restoration. *Nature Communications*, 2024, 15(1): 2275.
- [15] 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.
- [16] 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. *高原气象*, 2013, 32(5): 1272-1279.
- [17] 张乐乐, 高黎明, 陈克龙. 青海湖流域瓦颜山湿地辐射平衡和地表反照率变化特征. *冰川冻土*, 2018, 40(6): 1216-1222.
- [18] Huang G H, Wang W Z, Zhang X T, Liang S L, Liu S M, Zhao T B, Feng J M, Ma Z G. Preliminary validation of GLASS-DSSR products using surface measurements collected in arid and semi-arid regions of China. *International Journal of Digital Earth*, 2013, 6 (sup1): 50-68.
- [19] Bender F A M., Rodhe H, Charlson R J, Ekman A M. L., Loeb N. 22 views of the global albedo—comparison between 20 GCMs and two satellites. *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*, 2006, 58(3): 320-330.
- [20] 陈爱军, 吴倩倩, 卞林根, 刘玉洁. 青藏高原 MODIS 地表反照率与地面观测结果的比较. *科技通报*, 2016, 32(11): 47-50, 55.
- [21] Sanchez-Mejia Z M, Papuga S A, Swetish J B, van Leeuwen W J D, Szutu D, Hartfield K. Quantifying the influence of deep soil moisture on ecosystem albedo: The role of vegetation. *Water Resources Research*, 2014, 50(5): 4038-4053.
- [22] 马安静, 张明礼, 周志雄, 王永斌, 王成福. 近地表水汽密度对多年冻土区地表辐射的影响研究—以北麓河地区为例. *气候变化研究进展*, 2024, 20(3): 304-315.
- [23] 陆云波, 王伦澈, 牛自耕, 王绍强, 王力哲. 2000—2017 年中国区域地表反照率变化及其影响因子. *地理研究*, 2022, 41(2): 562-579.
- [24] 朱躲萍, 叶辉, 王军邦, 赵烜岚, 左婵, 芦光新, 张法伟, 李英年. 青海三江源区高寒植被地表反照率变化及其辐射温度效应. *生态学报*, 2022, 42(14): 5630-5641.
- [25] 郑琪琪, 杜灵通, 宫菲, 丹杨, 王乐. 基于 GF-1 遥感影像的宁夏盐池柠条人工林景观特征研究. *西南林业大学学报: 自然科学*, 2019, 39(1): 152-159.
- [26] Ma L L, Qiao C L, Du L T, Tang E T, Wu H Y, Shi G Y, Xue B, Wang Y X, Lucas-Borja M E. Drought in the middle growing season inhibited carbon uptake more critical in an anthropogenic shrub ecosystem of Northwest China. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2024, 353: 110060.
- [27] Du L T, Zeng Y J, Ma L L, Qiao C L, Wu H Y, Su Z B, Bao G. Effects of anthropogenic revegetation on the water and carbon cycles of a desert steppe ecosystem. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2021, 300: 108339.
- [28] 乔成龙, 杜灵通, 潘海珠, 马龙龙, 田静, 袁洪艺, 吴宏玥. 基于 SEBAL 模型评估干旱半干旱区人工灌丛植被对地表蒸散的影响. *农业工程学报*, 2021, 37(10): 110-117.
- [29] Tang E T, Zeng Y J, Wang Y F, Song Z B, Yu D Y, Wu H Y, Qiao C L, Van der Tol C, Du L T, Su Z B. Understanding the effect of revegetated shrubs on energy, water and carbon fluxes in a desert steppe ecosystem using STEMMUS-SCOPE model. *Biogeosciences*, 2024, 21(4): 893-909.
- [30] Mira M, Olioso A, Gallego-Elvira B, Courault D, Garrigues S, Marloie O, Hagolle O, Guillevic P, Boulet G. Uncertainty assessment of surface net radiation derived from Landsat images. *Remote Sensing of Environment*, 2016, 175: 251-270.
- [31] 赵艳艳, 张晓平, 陈明星, 高珊珊, 李润奎. 中国城市空气质量的区域差异及归因分析. *地理学报*, 2021, 76(11): 2814-2829.
- [32] 张雷, 王琳琳, 张旭东, 刘世荣, 孙鹏森, 王同立. 随机森林算法基本思想及其在生态学中的应用—以云南松分布模拟为例. *生态学报*, 2014, 34(3): 650-659.
- [33] 施光耀, 周宇, 桑玉强, 张劲松, 孟平, 蔡露露, 裴松义, 王尧. 基于随机森林方法分析环境因子对空气负离子的影响. *中国农业气象*, 2021, 42(5): 390-401.
- [34] Wu Z H, Huang N E. Ensemble empirical mode decomposition: a noise-assisted data analysis method. *Advances in Adaptive Data Analysis*, 2009, 1(1): 1-41.
- [35] Post D F, Fimbres A, Matthias A D, Sano E E, Accioly L, Batchily A K, Ferreira L G. Predicting soil albedo from soil color and spectral reflectance data. *Soil Science Society of America Journal*, 2000, 64(3): 1027-1034.
- [36] Matthias A D, Fimbres A, Sano E E, Post D F, Accioly L, Batchily A K, Ferreira L G. Surface Roughness Effects on Soil Albedo. *Soil Science Society of America Journal*. 2000, 64(3): 1035-1041.
- [37] 丹杨, 杜灵通, 王乐, 马龙龙, 乔成龙, 吴宏玥, 孟晨. 荒漠草原人工灌丛化对蒸散发及其组分的影响—以盐池县为例. *生态学报*, 2020, 40(16): 5638-5648.
- [38] Mu Y M, Yuan Y, Jia X, Zha T S, Qin S G, Ye Z Q, Liu P, Yang R Z, Tian Y. Hydrological losses and soil moisture carryover affected the relationship between evapotranspiration and rainfall in a temperate semiarid shrubland. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2022, 315: 108831.
- [39] Feng H H, Ye S C, Zou B. Contribution of vegetation change to the surface radiation budget: A satellite perspective. *Global and Planetary Change*, 2020, 192: 103225.
- [40] Ge F C, Xu M X, Li B B, Gong C, Zhang J L. Afforestation reduced the deep profile soil water sustainability on the semiarid Loess Plateau. *Forest Ecology and Management*, 2023, 544: 121240