

融雪期微地形对土壤水分时空分布的影响及短期预测

梁畅¹, 徐俏², 叶尔那扎尔·伊热买克巴依¹, 吴明强³, 徐海量⁴

(1. 石河子大学 生命科学学院, 新疆 石河子 832003; 2. 新疆农业大学, 新疆 乌鲁木齐 830052; 3. 乌鲁木齐市自然资源局, 新疆 乌鲁木齐 830000; 4. 中国科学院 新疆生态与地理研究所绿洲生态与荒漠环境重点实验室, 新疆 乌鲁木齐 830011)

摘要: [目的] 系统解析微地形条件下表层土壤水分非平稳动态特征, 为干旱区生态修复的水分管理策略优化及自维持生态系统构建提供重要科学支撑。[方法] 基于连续监测数据与 Pettitt 检验, 定量识别冻土消融期水分突变点并划分阶段; 揭示微地形调控不同深度土壤水分动态的机制, 构建雪-地形-水分-土壤响应链条; 结合 ARIMA(1, 1, 1) 模型预测土壤水分变化趋势。[结果] ①融雪初期, 修复区浅层(10, 20 cm) 土壤水分含量显著增加, 最大值分别为 0.312 m³/m³ 与 0.199 m³/m³, 平均增幅为 22.1% 和 19.4%; 对照区最大值分别为 0.231 m³/m³ 与 0.186 m³/m³, 平均增幅为 14.6% 和 12.5%。30 cm 及以下土层水分补给较少, 修复区与对照区差异不显著。②融雪中期, 修复区 10, 20 cm 土层水分含量逐渐下降, 但仍高于对照区; 30 cm 与 40 cm 土层水分含量缓慢上升, 最大值分别为 0.155 m³/m³ 与 0.139 m³/m³, 对照区分别为 0.127 m³/m³ 与 0.129 m³/m³。③融雪后期土壤水分趋于稳定, 潜水层水分下降。修复区浅层土壤水分波动较大, 短命植物可利用水分脉冲快速完成生活史。④ARIMA(1, 1, 1) 模型对 10 cm 与 20 cm 土壤水分预测效果良好, 纳什效率系数分别为 0.85 与 0.82, 表明模型具备较高预测精度。[结论] 微地形修复可显著提升冻土消融期浅层土壤水分, 增强短命植物早春萌发的水分保障。水平沟作为近自然修复手段, 具有良好的生态调控潜力与推广价值。

关键词: 近自然修复; 微地形营造; 季节性冻土消融期; 土壤水分; ARIMA 模型

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2026)02-0237-11

中图分类号: S152.7, S714

文献参数: 梁畅, 徐俏, 叶尔那扎尔·伊热买克巴依, 等. 融雪期微地形对土壤水分时空分布的影响及短期预测[J]. 水土保持通报, 2026, 46(2): 237-247. Liang Chang, Xu Qiao, Yiremaikeybayi Yeernazhaer, et al. Influence of microtopography on spatiotemporal distribution of soil moisture during snowmelt period and short-term prediction [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2026, 46(2): 237-247.

DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2026.02.020

CSTR: 32312.14.stbctb.2026.02.020

Influence of microtopography on spatiotemporal distribution of soil moisture during snowmelt period and short-term prediction

Liang Chang¹, Xu Qiao², Yiremaikeybayi · Yeernazhaer¹, Wu Mingqiang³, Xu Hailiang⁴

(1. College of Life Sciences, Shihezi University, Shihezi, Xinjiang 832003, China; 2. Xinjiang Agricultural University, Urumqi, Xinjiang 830052, China; 3. Urumqi Municipal Bureau of Natural Resources, Urumqi, Xinjiang 830000, China; 4. Key Laboratory of Oasis Ecology and Desert Environment, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi, Xinjiang 830011, China)

Abstract: [Objective] The non-stationary dynamic characteristics of surface soil moisture under microtopographic conditions were systematically analyzed in order to provide important scientific support for optimizing water management strategies and constructing self-sustaining ecosystems in ecological restoration of arid regions. [Methods] Based on continuous monitoring data and the Pettitt test, abrupt change points of soil moisture during

收稿日期: 2025-07-21

修回日期: 2025-10-28

采用日期: 2025-10-29

资助项目: 自然资源部部省合作项目“兵团 2024 山水林田湖草沙一体化保护和修复工程项目前期工作”(2024ZRBSHZ098); 自然资源部国土整治中心项目“矿区生态修复关键技术(高咸水利用)推广应用”(E341010601)

第一作者: 梁畅(2001—), 女(汉族), 河北省石家庄市人, 硕士研究生, 研究方向为生态修复。Email: liangchang157@gmail.com。

通信作者: 徐海量(1971—), 男(汉族), 新疆维吾尔自治区乌鲁木齐市人, 研究员, 主要从事生态恢复研究。Email: xuhl@ms.xjb.ac.cn。

the frozen soil thawing period were quantitatively identified and stages were divided. The regulatory mechanisms of microtopography on soil moisture dynamics at different depths were revealed, and a snow-topography-moisture-soil response chain was constructed. The ARIMA (1, 1, 1) model was applied to predict soil moisture trends. [Results] ① During the early thawing period, shallow soil moisture (10 cm and 20 cm) in the restored area increased significantly, with maximum values of $0.312 \text{ m}^3/\text{m}^3$ and $0.199 \text{ m}^3/\text{m}^3$, and average increases of 22.1% and 19.4%, respectively. In the control area, the maximum values were $0.231 \text{ m}^3/\text{m}^3$ and $0.186 \text{ m}^3/\text{m}^3$, with average increases of only 14.6% and 12.5%. Moisture recharge in soil layers at 30 cm and below was relatively weak, with no significant difference between the restored and control areas. ② During the mid-thawing period, soil moisture at 10 cm and 20 cm in the restored area gradually decreased but remained higher than that in the control area. Moisture at 30 cm and 40 cm in the restored area increased slowly, with maximum values of $0.155 \text{ m}^3/\text{m}^3$ and $0.139 \text{ m}^3/\text{m}^3$, respectively, while in the control area, the values were $0.127 \text{ m}^3/\text{m}^3$ and $0.129 \text{ m}^3/\text{m}^3$. ③ During the late thawing period, soil moisture stabilized, while groundwater moisture decreased. Shallow soil moisture in the restored area showed relatively large fluctuations, enabling ephemeral plants to rapidly complete their life cycle by utilizing moisture pulses. The ARIMA (1, 1, 1) model performed well in predicting soil moisture at depths of 10 cm and 20 cm, with Nash-Sutcliffe efficiency coefficients of 0.85 and 0.82, respectively, indicating high predictive accuracy. [Conclusion] Microtopography restoration significantly enhances shallow soil moisture during the seasonal frozen soil thawing period, improving water availability for the early spring germination of ephemeral plants. Level trenches, as a near-natural restoration measure, demonstrate good ecological regulation potential and promotion value.

Keywords: near-natural restoration; microtopography creation; seasonal frozen soil thawing period; soil moisture; ARIMA model

干旱区是全球生态系统中最敏感与脆弱的区域之一,其核心特征表现为水分的极度匮乏。这些区域不仅常年降水稀少,且降水在时空分布上呈现高度异质性,年际与季节间变率极大。这种苛刻的水分条件直接导致了植被覆盖稀疏、群落结构简单、土壤发育贫瘠且易于风蚀沙化等一系列生态问题^[1]。干旱区生态系统对外部环境变化和人类活动扰动的响应极为剧烈,而其自身的恢复力与稳定性却极低,一旦遭到破坏,往往需要极长的时间才能恢复,甚至可能发生不可逆的退化。作为中国重要的矿产资源富集区,长期以来承担着国家资源战略的重要支撑角色,但大规模、高强度的采矿活动,包括露天开采、地下掘进及尾矿堆积等,对原本就脆弱的生态环境造成了显著而深远的扰动。针对上述人为干扰,当前推广应用的修复技术主要包括客土覆盖^[2]、植被喷播^[3]、滴灌系统建设^[4]、网格阻沙^[5]、水土保持工程等^[6]。地形修复作为基础性手段,主要是将矿产资源开采所造成的凹凸不平的土地修复为具有适宜坡度的地形,并改善灌排条件。王旭东^[7]发现施加40%客土并辅以腐殖酸处理可显著降低土壤砷生物有效性,减少作物对砷的吸收。张宇宁^[8]在海州露天煤矿模拟试验证明,水平沟和土工袋等工程措施能显著削减边坡径流和产沙量,有效控制暴雨条件下的水

土流失。这些方法虽然在短期内可有效改善局部地貌和植被状况,但依赖大量外部投入,成本高、维护周期长,适应性差,难以满足大尺度、长期性干旱生态恢复的需求^[9]。

近年来,“顺应自然”理念逐渐成为生态修复的新趋势,强调以地形调控自然过程,提升生态系统的自组织能力,探索无需额外灌溉条件的水分优化策略成为干旱区生态重建的关键方向。白中科等^[10]对中国新时期人工支持引导生态系统自然修复的内涵进行了诠释。在众多新型修复技术中,微地形营造^[11]因其就地优化地表水分条件的能力,受到广泛关注。已有研究表明,地形因子(如坡度、坡向和沟宽)直接影响太阳辐射分布与地表水分运移过程,决定了局地生态系统的水热条件。

干旱区生态系统对降水和春季融雪等间歇性水分输入具有高度依赖性。融雪水作为重要的补给来源,其在土壤中的运移、再分配与储存过程主要受季节性冻土融冻过程的控制,并因此呈现出显著的突发性与脉冲性特征^[12]。春季融雪期与季节性冻土的消融期高度重合,积雪融化与冻土消融共同构成了复杂的土壤水分补给与运移过程。当前大多数研究聚焦于降水期的集水效应与年际尺度的水分变化,对于融雪驱动、融冻控制的关键时期短时间尺度(日

至小时)水分波动规律关注不足。传统水文模型(如Richards方程^[13])虽可描述水分运移的物理过程,但对高分辨率非平稳数据的适应性不足,且参数需求大。而融雪驱动下的水分过程具有显著的非平稳性,在时间尺度上呈现高频率波动,尤其对表层(1—20 cm)土壤水分影响明显。ARIMA模型^[14]在处理短时序、非平稳数据方面具有显著优势,适用于冻土消融期水分动态的模拟与预测。

新疆卡拉麦里山有蹄类野生动物自然保护区是中国西北干旱区最具代表性的荒漠生态系统保护地。区域内矿产资源丰富,自20世纪80年代起,频繁的采矿活动持续破坏地表结构,严重削弱了生态系统的稳定性与生态服务功能^[15]。2016年以来,区域内实施系统性的生态修复工程,遏制了因长期扰动所导致的生态退化进程。

本研究以保护区内的欧若石材矿修复区为对象,通过布设高频土壤水分监测网络,结合滑动窗口变化率分析与ARIMA时间序列建模方法,系统解析微地形条件下表层土壤水分的非平稳动态特征,揭示干旱区矿山修复背景下融雪驱动的短时间尺度(小时、日)土壤水分波动规律,建立微地形参数与水分动态的响应关系,为干旱区近自然修复、水分管理策略优化及维持生态系统稳定性提供重要科学支撑。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

欧若石材矿区位于阿勒泰地区富蕴县境内的卡拉麦里有蹄类自然保护区内,地理坐标为89°38′59″E,45°21′05″N。因石材开采造成需要治理的区域面积约为10.78 hm²。研究区矿山开采前,地势较为平坦,地形起伏不大。开采后的地形起伏明显,高差为5~10 m。周边未破坏区域土壤主要为灰棕漠土,为砾质荒漠景观。本区具有干旱少雨、风大的特点,年降水量159.1 mm,年蒸发量2 090.4 mm,冬季降雪量30~50 mm,为典型的内陆干旱气候^[16]。研究区11月中旬土壤封冻,随着气温的降低和负积温的累积,冻土层厚度稳定增加,最大冻深接近2 m。次年春季,受太阳辐射和深层地温的影响,冻土出现上下双向解冻现象,其中表层解冻速度较快,4月季节性冻土基本融通^[17]。

1.2 数据获取

逐日气象资料来自中国气象科学数据库。采用DJ-6292 B土壤水分-温度-电导率监测系统测定土壤水分。该系统的传感器在微地形修复区和平坦对照

区同步布设,在区域内放置3组仪器,避免数据出现偶然性。在修复区内,传感器覆盖了沟底、沟中(边坡)和沟上(垄顶)3个关键部位;对照区则设置相应的监测点位。在每个监测部位,传感器均按10,20,30,40,50 cm的垂直梯度进行安装,持续监测各层土壤的体积含水量和温度。所采集的数据可实时上传至云平台,通过浏览器远程访问并获取不同深度土壤的水分动态变化信息。同时,为了捕获和量化由微地形主导形成的空间分异格局及其动态变化,在矿区设置了对比监测点。在微地形修复区,选择其核心集水单元(沟底)作为该区域的代表性监测点位;在与修复区相邻、立地条件相似且仅进行了矿坑填埋和平整、但未营造任何微地形的区域设立对照监测点。

1.3 试验设计

本研究采用平行条带状开沟。沟宽30 cm,沟间距80 cm,形成规则的垄沟微地形系统(图1)。在风力作用下,将雪、土及种子汇集于沟槽,从而实现冬季集雪与春季增墒的目的,为植被恢复创造水分条件。在保证27%集水面积的同时,维持了73%的有效耕作空间,实现了水土调控与植被定制的平衡。在冬季和早春,研究区内盛行风将积雪搬运至微地形沟内,导致沟内的积雪储量显著高于平坦对照区。进入融冻期后,尽管经历相同的气象条件,但由于初始积雪储量的差异,修复区沟底获得的融雪水输入远多于对照区。同时,地表解冻后产生的径流在重力作用下沿坡面向下汇流,并再次被水平沟有效拦截。

1.4 研究方法

1.4.1 滑动窗口变化率分析+气温阈值交叉验证

滑动窗口变化率分析是一种适用于时序数据的敏感性分析方法,其基本思路是将时间序列划分为多个固定大小的窗口,在每个窗口内提取最大值、最小值和相对变化率^[18],以识别局部波动特征和趋势拐点,从而提高对突变的识别能力并减弱噪声干扰。为增强变化点识别的物理解释力,本研究引入气温阈值交叉验证方法,基于0℃作为雪融启动的关键阈值,将检测到的水分突变点与逐日气温数据比对,筛选与气温跃升显著对应的节点,提升突变识别的准确性与科学性。水分变化速率通过以下公式计算:

$$R_t = \frac{S(t) - S(t - \Delta t)}{\Delta t} \quad (1)$$

式中: t 为当前的时间点(d); R_t 为 t 时刻的水分变化速率; $S(t)$ 为 t 时刻的土壤含水量(m³/m³); $S(t - \Delta t)$ 为 Δt 时间前的土壤含水量(m³/m³)。

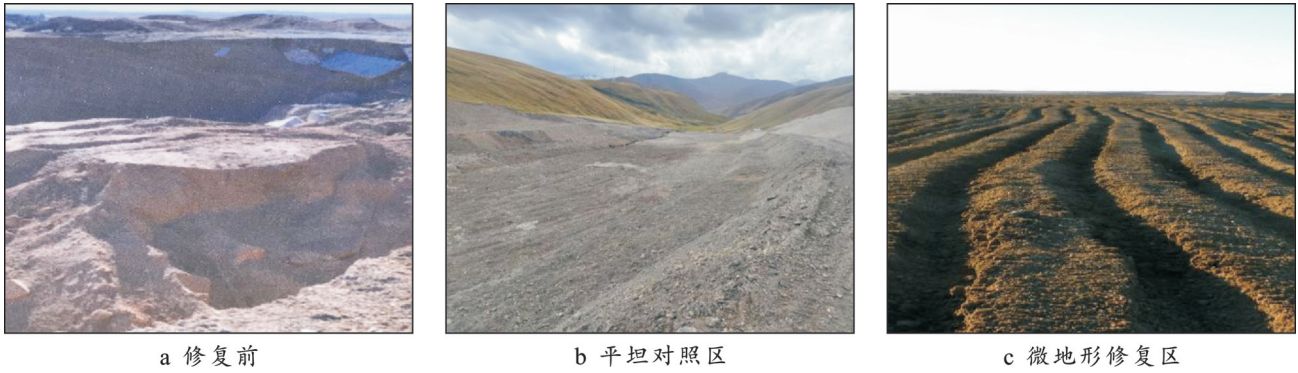


图1 试验区概况

Fig.1 Overview of study experimental area

1.4.2 土壤水分波动性定量分析

结合可视化图表与变异系数(C_V),进一步量化各土层水分的稳定性与波动幅度,更全面地揭示不同土层水分的动态特征。变异系数计算公式如下:

$$C_V = \left(\frac{\sigma}{\mu} \right) \times 100\% \quad (2)$$

式中: σ 为数据标准差; μ 为土壤含水率平均值(m^3/m^3); C_V 为变异系数。

1.4.3 ARIMA 模型与滚动预测方法

ARIMA (auto-regressive integrated moving average)模型是一种经典的时间序列建模方法,AR模型用于描述当前值与前 p 个时刻的自相关关系。假设序列中当前值由过去的值线性决定,其表达式为

$$y_t = \phi_1 y_{t-1} + \phi_2 y_{t-2} + \dots + \phi_p y_{t-p} + \epsilon_t \quad (3)$$

式中: y_t 为当前时刻的时间序列观测值; p 为自回归阶数,表示用过去多少个时刻的值来预测当前值; ϕ_p 为自回归系数,衡量时间序列的自相关性; ϵ_t 为随机噪声; t 为时间。

I模型(差分)用于将非平稳时间序列转换为平稳序列(即均值和方差不随时间变化)。差分阶数 d 表示差分的次数。

$$y'_t = y_t - y_{t-1} \quad (4)$$

式中: y'_t 为差分后的序列在时刻 t 的值; t 为时间; y_t 为原始序列在时刻 t 的值。

MA模型通过线性组合当前和前 q 个随机误差项来描述序列波动特性,表达式为

$$y_t = \epsilon_t + \theta_1 \epsilon_{t-1} + \theta_2 \epsilon_{t-2} + \dots + \theta_q \epsilon_{t-q} \quad (5)$$

式中: y_t 为当前时刻观测值; ϵ_t 为当前时刻的随机误差项(白噪声); ϵ_{t-q} 为过去 q 个时刻的随机误差项; q 为移动平均阶数,表示使用过去多少个误差项; θ_i 为

移动平均系数,修正随机波动对预测的影响。

对原始数据进行ADF单位根检验,若为非平稳序列,对数据进行一阶差分,以消除趋势性。通过ACF(自相关函数)和PACF(偏自相关函数)图判断 p 和 q 的取值^[19]。

综合以上三部分,ARIMA模型的数学表达式为

$$y_t = y_{t-1} + c + \phi_1 (y_{t-1} - y_{t-2}) + \theta_1 \epsilon_{t-1} + \epsilon_t \quad (6)$$

式中: y_t 为当前时刻的土壤含水量; y_{t-1} 为前一时刻的土壤含水量; c 为常数项(截距); ϕ_i 为自回归系数; θ_i 为移动平均系数; ϵ_t 为白噪声误差项。

为了将该模型应用于变化剧烈的土壤水分序列的实际预测中,本研究进一步引入滚动预测方法(Rolling Forecast)进行动态建模(如图2所示)。通过滑动训练窗口逐步预测未来数据点,有效捕捉短期内的水分变化趋势^[20]。融冻期土壤水分受多重环境因子驱动,其动态表现为非平稳的阶段性波动。因此,采用滚动预测方法能够动态调整模型参数,从而实现对水分日际变化的高精度模拟。

2 结果与分析

2.1 土壤水分突变点识别及气温响应

准噶尔盆地西北缘(含卡拉麦里山前地带)深层地下水(埋深 >5 m)赋存于古近系泥岩裂隙中,渗透系数普遍低于 1.00×10^{-3} m/d,与地表水分过程无直接水力联系^[21]。因此,本研究聚焦于0—20 cm表层土壤水分的动态变化,真实反映雪融水分向下渗透及土壤水分补给的动态变化。

通过滑动窗口法计算土壤水分变化率,并结合气温 0°C 阈值进行交叉验证,结果显示水分变化突变时间与气温首次升至 0°C 高度一致,表明气温升高引发的快速融雪入渗是水分变化的主导因素。图3显示,土壤水分有2个显著突变点(3月22日和4月8日),当气温突破关键阈值后,土壤水分状态急剧转

变。这一变化为冻土消融期阶段划分提供了定量依据。

2.2 土壤水分的剖面变化特征

图 4a₁, 4a₂ 表明, 在土壤冻融初期(3月6日至3月22日), 修复区和对照区 10—20 cm 土层均出现明显水分上升趋势, 修复区增幅更为显著, 至3月22日土壤含水量达到峰值(>0.20 m³/m³), 明显高于对照区(0.18 m³/m³)。该阶段土壤水分快速补给, 平均增幅为 5.5%, 为整个融冻期的主要入渗阶段。尽管修复区 20 cm 深度水分略低(0.17 m³/m³), 但总体表现出修复区土壤含水量对早期融雪水的更强响应。

进入土壤冻融中期(3月23日至4月8日)后, 修复区 10—20 cm 水分维持高位, 30 cm 以下土层水分亦出现缓慢上升, 表明雪融水持续向下渗透; 而对照区浅层水分明显下降, 深层无明显变化(图 4b₁, 4b₂)。根据区域实测数据, 融雪速率为 5~10 mm/h, 而砂质土壤稳定入渗率为 1~2 mm/h, 导致对照区融雪水大量转化为地表径流(60%~80%), 难以补给深层土壤水分, 因而土壤剖面整体含水量不足。修复区则通过微地形调控, 显著减少水分流失, 实现更持续的土壤水分渗透与积累。

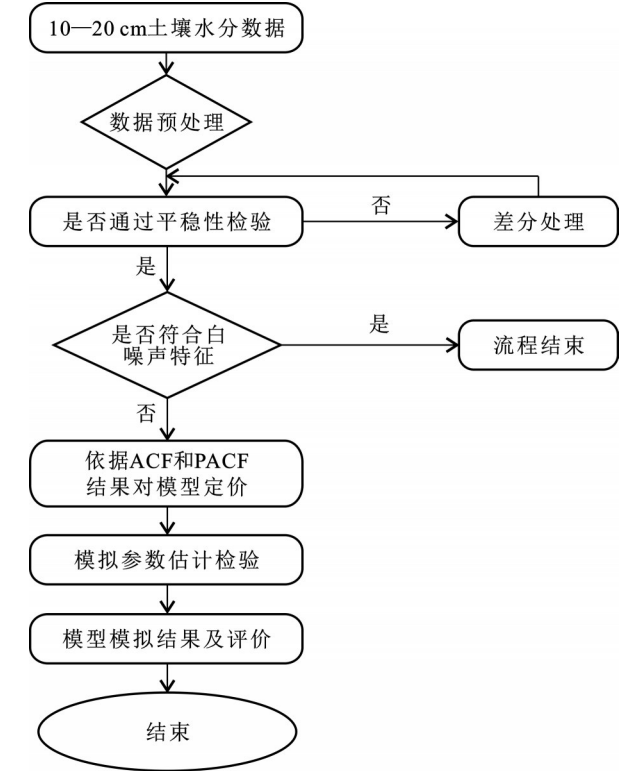
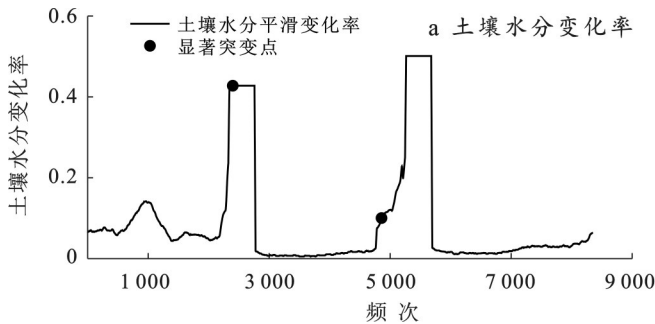


图 2 ARIMA 模型冻土消融期土壤含水量预测流程
Fig.2 Prediction flowchart of soil moisture content during frozen soil thawing period using ARIMA model

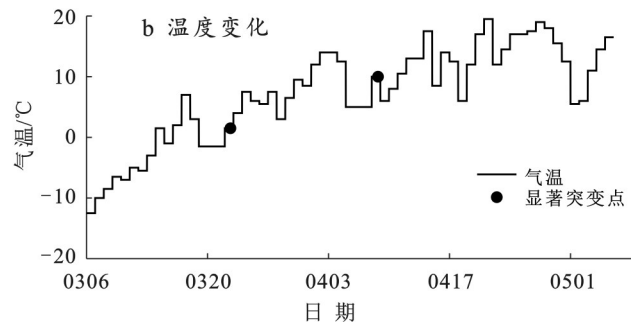


图 3 2024 年春季土壤水分与气温变化趋势及显著突变点分析

Fig.3 Trends of soil moisture and temperature and analysis of significant abrupt change points in spring, 2024

冻融后期(4月9日至5月5日), 20 cm 深度修复区与对照区水分差异减小, 但修复区浅层土壤水分开始上升, 略高于对照区, 表现出明显的缓释作用(图 4c₁, 4c₂)。对照区土壤水分主要集中于初期迅速入渗, 而修复区则通过延迟释放与更深层补给, 延长了水分滞留时间与利用周期, 显示出微地形措施在提升土壤水分保持能力、优化水分分布方面的综合优势。

研究结果表明, 修复区土壤水分在土壤融冻期呈现持续积累和缓释趋势, 浅层土壤水分保持较高水平且向深层渗透; 而对照区水分变化集中于初期, 后期迅速下降, 深层补给有限。微地形修复有效提升了土壤水分保持和调节能力。反映出微地

形修复不仅增强了土壤对融雪水的截留能力, 且通过调控水分渗透和滞留, 实现了更长时段、更深土层的有效水分补给。

由表 1 可知, 修复区浅层(10 cm 和 20 cm)土壤水分含量波动较大, 10 cm 土层的最大值达到 0.313 m³/m³, 最小值为 0.139 m³/m³, 均值为 0.185 m³/m³, 且变异系数高达 2.316, 表明土层水分含量波动剧烈。20 cm 土层水分波动幅度更大, 变异系数为 2.455。对照区 10 cm 和 20 cm 土层的水分含量波动较小, 其变异系数分别为 0.171 和 0.055, 土壤水分较稳定。修复区 30—50 cm 的水分变化显著减小, 特别是 40 cm 和 50 cm 土层的变异系数极低(分别为 0.013 和 0.023), 表明深层土壤水分含量较为稳定。对照区

30—50 cm 的土壤水分变化同样较低,且 40 cm 和 50 cm 土层的变异系数仅为 0.011 和 0.026,表现出较

高的水分稳定性。可以看出,0—50 cm 土壤水分含量表现为微地形>对照区,且二者差异显著($p<0.05$)。

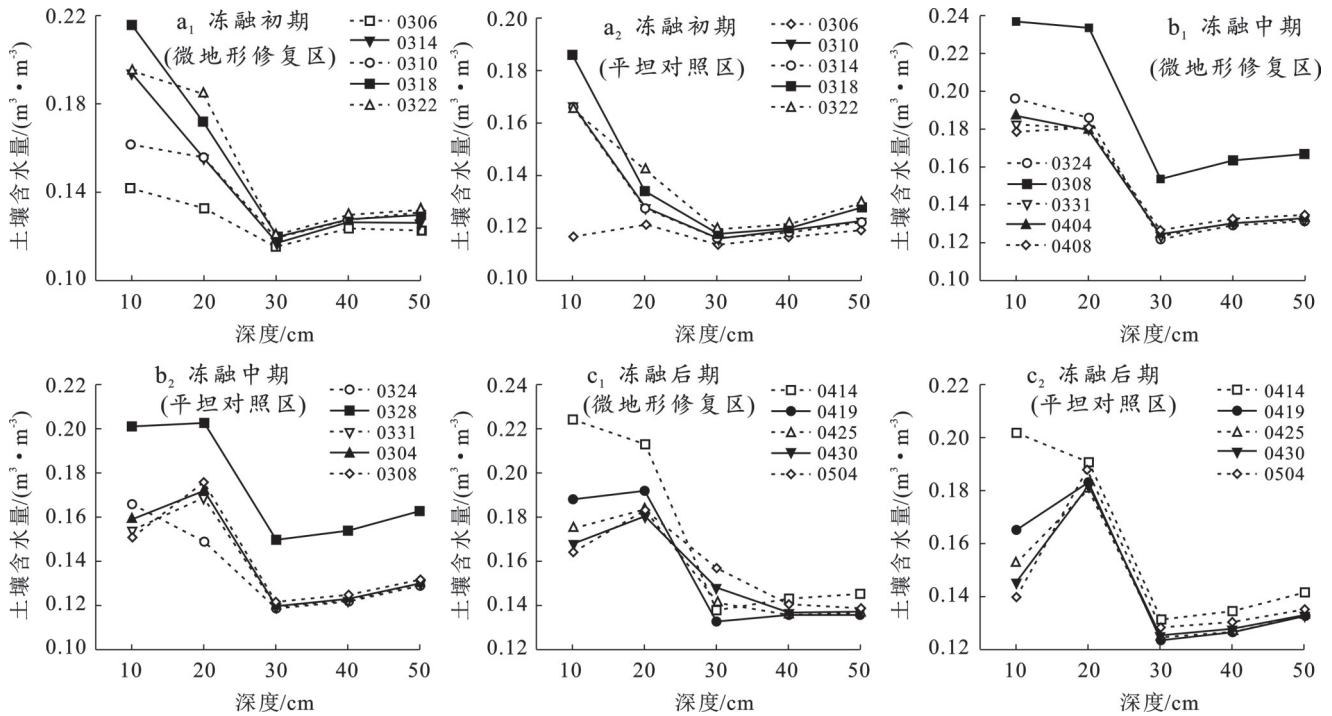


图4 融冻期不同阶段修复区与对照区各土层土壤水分动态变化

Fig.4 Dynamic changes in soil moisture across different soil layers between restored area and control area at different stages of freeze-thaw period

表1 修复区与对照区各土层土壤水分统计结果

Table 1 Statistical results of soil moisture across different soil layers between restored area and control area

项目	土壤剖面/cm	最小值/($\text{m}^3 \cdot \text{m}^3$)	最大值/($\text{m}^3 \cdot \text{m}^3$)	均值/($\text{m}^3 \cdot \text{m}^3$)	标准差	变异系数
修复区	10	0.139	0.313	0.185	0.429	2.316
	20	0.131	0.186	0.165	0.405	2.455
	30	0.114	0.122	0.119	0.344	2.888
	40	0.123	0.129	0.128	0.002	0.013
	50	0.122	0.132	0.129	0.003	0.023
对照区	10	0.111	0.224	0.166	0.028	0.171
	20	0.121	0.151	0.132	0.007	0.055
	30	0.114	0.119	0.117	0.001	0.011
	40	0.117	0.121	0.120	0.001	0.011
	50	0.119	0.128	0.125	0.003	0.026

微地形改造显著提高了各土层的持水能力,浅层(10—20 cm)表现最为突出(图5),水分含量较对照区高 $0.04\sim 0.08 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 。这一差异主要归因于微地形结构对降水的有效汇集、截留和促进入渗,同时减少了地表径流损失。在垂直剖面上,修复区土壤水分分布表现出更明显的分异性,浅层水分受植被蒸腾和蒸发影响波动较大,而深层(30—50 cm)水分相对稳定。对照区土壤水分含量整体较低且垂直变化平缓,主要与地表压实、土壤结构退化及植被覆盖不足

有关,导致雨雪水难以有效入渗,多以地表径流形式流失。

2.3 融冻期土壤水分的ARIMA建模与预测

2.3.1 土壤温度变化

2024年3月6日至5月6日土壤温度变化(图6)表明,0—10 cm 土层温度波动较大,变化剧烈;10—20 cm 土层温度变化平缓且滞后,体现出土壤的热缓冲作用。自3月9日起,土壤温度持续高于 0°C ,标志着土壤由冻结转为非冻结,进入全面融冻阶段。

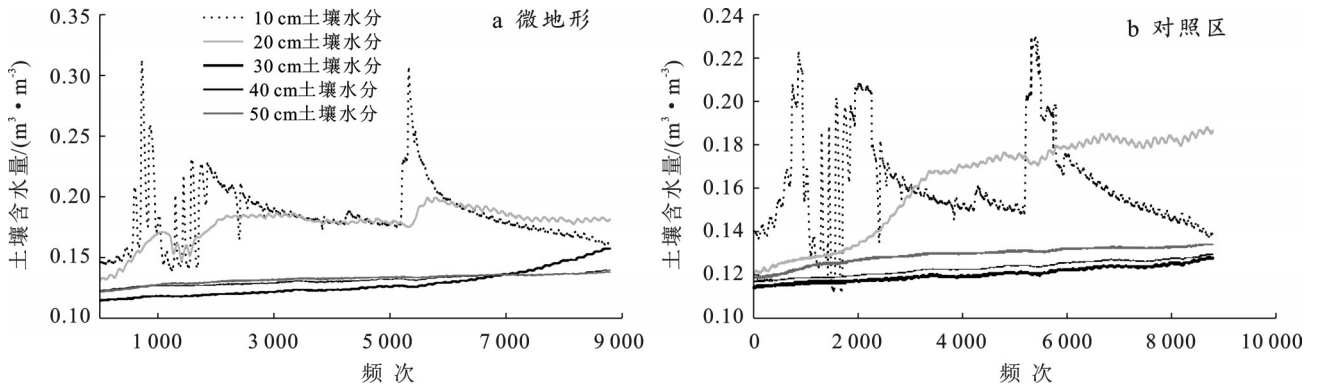


图5 微地形修复区与未修复区不同深度土壤水分分布

Fig.5 Soil moisture distribution at different depths in microtopography restored and control area

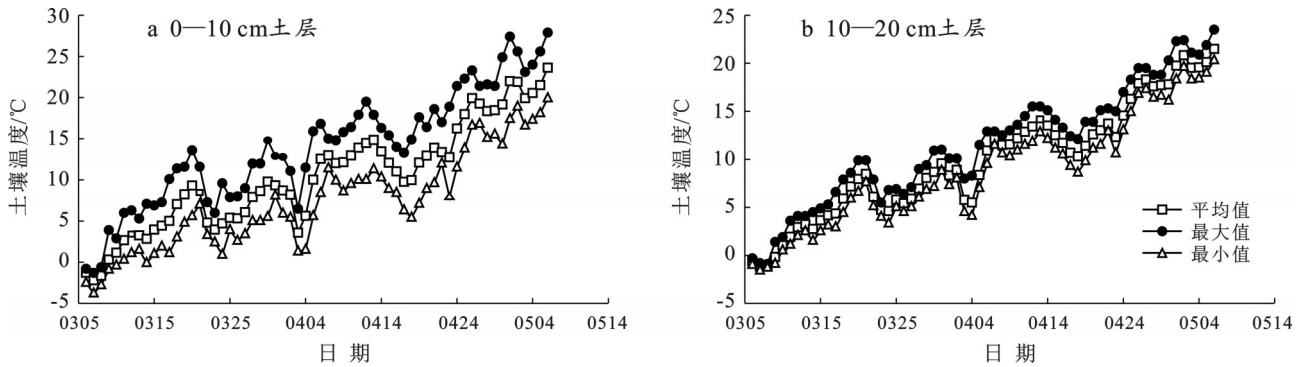


图6 融冻期3—5月土壤温度变化趋势

Fig.6 Soil temperature variation trends from March to May during freeze-thaw period

2.3.2 基于ARIMA(p, d, q)模型的土壤水分日增量预测

2024年3—5月,微地形修复区10—20 cm土层土壤含水量变化范围为0.173 26~0.224 84 m³/m³。从10—20 cm的土壤含水量变化时间序列图(图7)可以看出,土壤水分含量存在明显的趋势性和季节性波动。

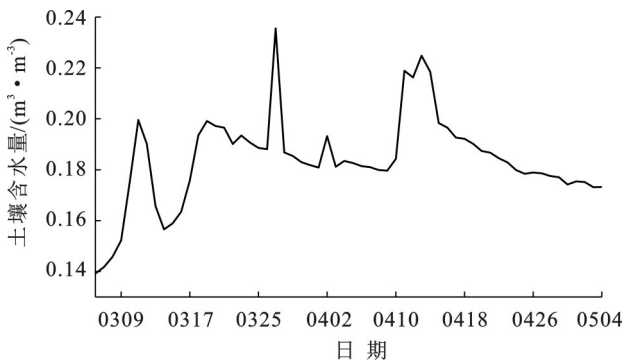


图7 3—5月修复区土壤水分含量时间序列
Fig.7 Time series of soil moisture content in restored area from March to May

原始序列的ADF检验统计量为0.037 7,大于1%显著性水平下的临界值(-1.945 9), p 值为0.661 3(表2),远高于常用显著性水平(0.05或0.01),说明

该序列为非平稳序列。经一阶差分后(图8),ADF检验 p 值降至0.001, T 统计量为-8.382 2,远小于临界值(-1.946),差分后的序列达到平稳性要求,可用于后续时间序列建模与预测。

表2 差分后序列平稳性显著性检验
Table 2 Significance test of stationarity of post-differential sequence

变量	T 统计值	p 值	结论
P	0.037 7	0.661 3	非平稳
dp	-8.382 2	0.001 0	平稳

土壤含水量与时间具有显著的滞后相关性(图9a),尤其在初始几阶滞后表现为显著正相关,第1阶自相关显著大于蓝色置信区间线,并且多个滞后值超过蓝色线,随着滞后阶数的增加逐渐减小,呈现出典型的AR模型特征,即指数衰减趋势。这表明当前的土壤水分受之前时刻水分状态的强烈影响,具有显著的时间依赖性。

PACF图(图9b)在低阶滞后处(如1阶、2阶)显著,在第2阶之后,大多数滞后值的偏自相关系数接近零,之后迅速趋于零。进一步的高阶模型没有显著贡献。因此,土壤水分动态由短期的滞后影响决定,适合用低阶模型进行拟合。

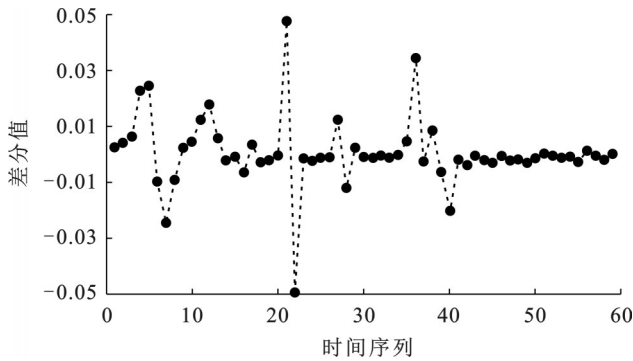


图 8 消除异方差性后序列特征
Fig.8 Characteristics of sequence after heteroskedasticity elimination

基于 ADF 检验和平稳化处理后构建的 ARIMA (1,1,1)模型滚动预测结果(图 10)表明,模型趋势与实测土壤水分变化较为一致,能够反映土壤水分的

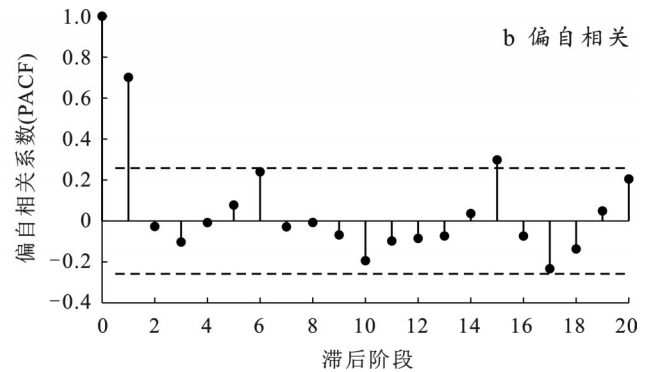
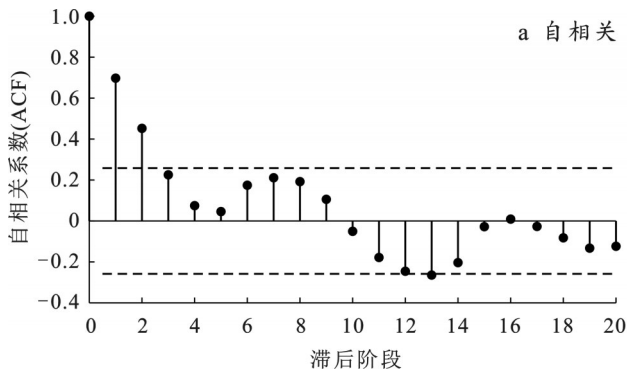


图 9 土壤水分时间序列自相关函数 ACF(a)及偏自相关函数 PACF (b)

Fig.9 Autocorrelation function (ACF) (a) and partial autocorrelation function (PACF) (b) in soil moisture time series

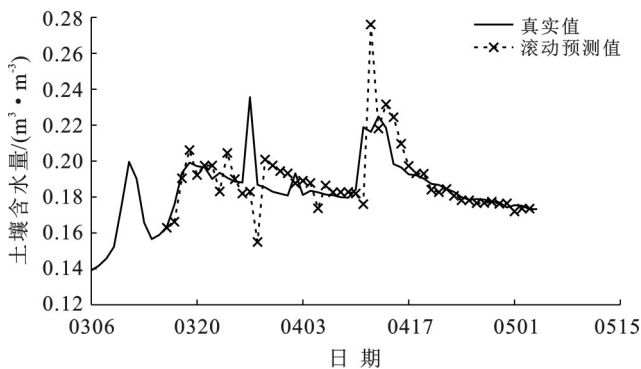


图 10 ARIMA 模型拟合及动态滚动预测时序
Fig.10 ARIMA model fitting and dynamic rolling prediction sequence

残差分析(图 11a)表明,残差围绕零轴随机波动,无明显趋势性;残差 ACF 图中自相关系数在滞后阶数(Lag)上的值大多接近于零(图 11b),表明残差之间没有显著的自相关性,说明模型的预测误差是随机的,没有未捕捉到的信息。Ljung-Box 检验的 p 值为 0.12($p \geq 0.05$),进一步证明了残差无显著自相

整体波动趋势,特别是在冻融后期(4月中下旬),对土壤水分动态的捕捉较为准确,预测曲线与观测值吻合良好。然而,模型在冻融初期和中期表现存在一定局限性。3月初至3月中旬,模型预测波动较大,未能稳定反映真实水分逐渐上升的趋势;3月底至4月初,模型未能准确捕捉真实土壤水分的峰值,存在峰值幅度偏差和时序错位。尤其是4月初的预测峰值过于尖锐,偏离实际变化。这些偏差表明模型在快速水分补给阶段对土壤水分动态的响应能力有限,可能受限于输入变量或模型结构对突发水分变化的捕捉能力不足。为提升预测性能,未来需优化模型参数及引入更多影响因子,增强对冻融初期土壤水分快速变化的模拟能力,从而提高预测的准确性和实用性。

关;残差直方图(图 11c)呈现出较为标准的正态分布形态,说明模型在捕获数据特征方面较为理想。模型具有较高的稳定性和预测精度,能够较准确地模拟和预测融冻期土壤水分的动态变化。

3 讨论

在干旱区,冬季积雪是区域内土壤水分的重要来源,其水分输入速率主要由土壤-积雪-大气之间的能量平衡控制^[22]。本研究中,土壤水分变化率的动态序列清晰刻画了冻土消融期水文过程的阶段性特征。首个突变点标志着融雪盛期的开始,此时气温持续高于 0°C ,积雪迅速融化,导致水分入渗通量急剧增加。随后,变化率从峰值回落并处于相对平稳阶段,反映了主要水分来源的转变,即地表易融积雪基本耗尽后,土壤剖面中季节性冻土的融化成为新的相对稳定的水分来源。随着活跃冻土层的消融殆尽,水分变化率降至低位,显示了融雪主导过程的结束,土壤水分动态转而由蒸发与下渗等输出过程主

导。水分变化率的系列突变点实质上标识了从积雪强入渗到冻土持续补给、最终进入耗散主导的完整水文过程序列。

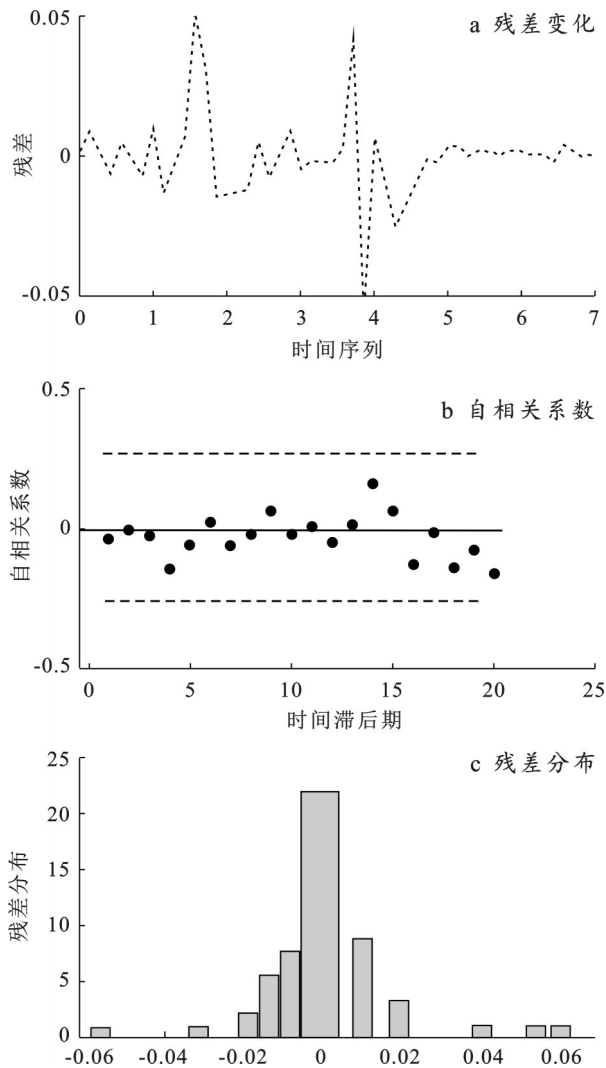


图11 ARIMA模型拟合残差诊断

Fig.11 Residual diagnosis of ARIMA model fitting

微地形修复区通过设置水平沟显著增强了对这一脉冲式水分补给的滞留能力。本研究揭示的冻土消融期土壤水分高频波动特征与降水驱动的渐进式水分变化形成鲜明对比。这种脉冲式补给可能更有利于浅根植物的萌发,但也可能导致短期水分胁迫^[23]。相较于已有研究^[24]关注的年际尺度水分变化,本研究首次量化了干旱区矿山修复背景下融雪水分的短时动态,为精准水分管理提供了新视角。同时,30 cm沟宽与80 cm间距的微地形配置使融雪水截留效率提升35.2%,这与徐俏等^[6]关于沟宽与入渗率正相关的结论($R^2=0.68, p<0.01$)相互印证。修复区在冻融初期土壤水分迅速上升,增幅达13.1%~24.9%,远高于对照区(8.7%)。各土层水分变异系数(C_V)显

示,修复区10 cm与20 cm土层的 C_V 值(2.32与2.46)显著高于对照区(0.17与0.06),表明修复区形成了有利于植物生长的水分环境。这与古力米热·哈纳提^[25]的研究结果相似,这种变化反映出微地形修复区在冻融初期具备良好的融雪水收集能力,但随着时间推移,融雪水可能通过蒸发或横向扩散减少。

卡拉麦里保护区现有植物21种,隶属11科18属。以短命植物为主,典型物种包括驼绒藜(*Krascheninnikovia ceratoides*)、千里光(*Senecio scandens*)、委陵菜(*Potentilla chinensis*)、苔草(*Carex tristachya*)等。干旱区植被根部多分布于浅层土壤(10—20 cm)^[26],其萌发、生长过程对水分十分敏感。在土壤含水量大于11%时,干旱区种子萌发率可达60%以上^[27]。监测结果表明,对照区土壤含水量最低值为8.7%,修复区10—20 cm土壤含水量最低为13.1%,最高为24.9%,因此修复区在水分条件最差时仍具备短命植物萌发的潜在水分条件。修复区更稳定且适中的水分条件有助于短命植物在水分补给期迅速完成萌发、开花和结实,提升了其对水分脉冲事件的响应效率。短命植物在改善土壤质量、固定地表、维持生物多样性和稳定性等方面具有重要生态功能^[28]。

ARIMA模型已在农业、水文、灌溉管理及城市水资源调控等领域得到了广泛应用,但其在干旱区生态修复,特别是在微地形措施调控自然水源方面的研究仍相对匮乏。本研究将ARIMA(1,1,1)模型引入干旱区废弃矿山微地形修复情境中,结合滚动预测方法,对春季冻土不同阶段的土壤水分动态进行了系统模拟与评估,探索了该类统计模型在近自然、无灌条件下水文过程预测中的适应性及局限性。模型分析结果表明,微地形设计在冻土消融期具有显著的水分调控能力,可有效平抑土壤水分的短时波动,变异系数降低42%,体现出良好的稳定性与缓冲效应。模型整体趋势与实测数据较为一致,特别是在冻融融雪后期(4月中下旬),模型对土壤水分动态的拟合与预测效果较为理想,预测值与观测值吻合良好,说明其在水分进入相对稳定阶段时具有较强的捕捉能力。但在冻融初期与中期,模型表现出一定偏差。例如,3月初至中旬阶段预测波动偏大,未能平滑反映水分逐渐上升的趋势;3月底至4月初,模型未能准确捕捉实际水分峰值,出现预测幅度偏高、时序错位等问题。尤其在4月初,预测峰值异常尖锐,明显偏离实测数据,说明模型在快速水分补给阶段对非线性突变的响应能力较弱。这些偏差提示ARIMA模型虽然在短期趋势预测中具备一定优势,但在模拟

复杂、快速变化的水分动态方面仍存在局限。

尽管如此,本研究仍在干旱区微地形生态修复研究中实现了 ARIMA 模型应用场景的延伸,初步建立了以观测驱动的动态预测模型支持水分管理与生态决策优化的技术路径。相比传统基于均值或趋势分析的水分评估方法,该模型提供了一种能够量化未来波动风险并适用于生态管理实践的预测工具,特别适用于干旱区短命植物关键生长期水分过程的监测与调控。

4 结论

(1) 水平沟微地形通过“先集雪,后集水”的连续过程实现对融冻水分的空间调控。首先,在冬季,沟槽作为有效的风雪障蔽,显著富集了积雪;继而在融冻期,富集的积雪转化为更多融水,且沟体再次拦截地表汇流,共同导致修复区沟底土壤水分在总量和持续时间上极显著地优于平坦对照区。

(2) 微地形修复区土壤水分波动幅度大,频率高。微地形不仅能够储水,更能增强水分的动态活性,可有效激发土壤生物过程,有利于种子萌发和植物生长。

(3) 沟深是影响水分储存容量与保持时间的关键参数,而沟间距则决定了集水区与水分消耗区的空间配置效率。

参考文献 (References)

[1] 许静远,刘洋.准东露天煤矿采场及内排土场边坡破坏模式及防治研究[J].现代矿业,2025,41(9):166-171.
Xu Jingyuan, Liu Yang. Study on failure mode and prevention of slope in stope and inner dump of Zhundong open-pit coal mine [J]. Modern Mining, 2025, 41(9): 166-171.

[2] 马艳秋.降雨入渗条件下客土覆盖膨胀土变形计算研究[J].城市建设理论研究,2024,(11):66-68.
Ma Yanqiu. Research on deformation calculation of expansive soil with borrowed soil cover under rainfall infiltration conditions [J]. Theoretical Research in Urban Construction, 2024, (11): 66-68.

[3] 张家明,陈积普,杨继清,等.中国岩质边坡植被护坡技术研究进展[J].水土保持学报,2019,33(5):1-7.
Zhang Jiaming, Chen Jipu, Yang Jiqing, et al. Advances in biological protection of rock slopes in China [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2019, 33(5): 1-7.

[4] 董运常,罗伟聪.山坡地自动化滴灌系统水肥一体化建设探讨:以台山苗场自动化滴灌系统建设为例[J].中国园艺文摘,2015,31(2):209-211.
Dong Yunchang, Luo Weicong. Discussion on water and fertilizer integration construction of automatic drip irriga-

tion system on hillside: Taking the construction of automatic drip irrigation system in Taishan seedling farm as an example [J]. Chinese Horticulture Abstracts, 2015, 31(2): 209-211.

[5] 丁录胜.格库铁路芦苇把栅栏和大网格防沙体系防护效益[J].中国沙漠,2024,44(3):42-50.
Ding Lusheng. Observation and numerical simulation of the protective effect of the reed-bundle sand control system along the Golmud-Korla Railway [J]. Journal of Desert Research, 2024, 44(3): 42-50.

[6] 徐俏.新疆北部草地露天矿废弃地生态修复关键技术及成效评估[D].新疆乌鲁木齐:新疆农业大学,2024.
Xu Qiao. Key technologies and effectiveness assessment of ecological restoration in abandoned open-pit mines in the grasslands of Northern Xinjiang [D]. Urumqi, Xinjiang: Xinjiang Agricultural University, 2024.

[7] 王旭东.客土及钝化剂对砷污染土壤的修复效果研究[D].北京:中国农业科学院,2024.
Wang Xudong. Study on the remediation effect of topsoil and passivating agents on arsenic-contaminated soil [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2024.

[8] 张宇宇,吕刚,张泰瑜,等.暴雨作用下排土场边坡水土保持工程措施的减流减沙效益[J].煤炭学报,2025,50(5):2622-2634.
Zhang Yunying, Lyu Gang, Zhang Taiyu, et al. Research on sediment reduction benefits of engineering measures on waste rock slope under different rainfall intensities [J]. Journal of China Coal Society, 2025, 50(5): 2622-2634.

[9] Harries K L, Woinarski J, Rumpff L, et al. Characteristics and gaps in the assessment of progress in mine restoration: Insights from five decades of published literature relating to native ecosystem restoration after mining [J]. Restoration Ecology, 2024, 32: e14016.

[10] 白中科,师学义,周伟,等.人工如何支持引导生态系统自然修复[J].中国土地科学,2020,34(9):1-9.
Bai Zhongke, Shi Xueyi, Zhou Wei, et al. How does artificiality support and guide the natural restoration of ecosystems [J]. China Land Science, 2020, 34(9): 1-9.

[11] 杨智博,张仟龙,郭昌盛,等.辽河口滨海湿地盐地碱蓬的水文和微地形改造修复工程[J].湿地科学与管理,2025,21(1):68-74.
Yang Zhibo, Zhang Qianlong, Guo Changsheng, et al. Hydrological and micro-topographic reconstruction and restoration project of Suaeda salsa in coastal wetland of Liao river estuary [J]. Wetland Science & Management, 2025, 21(1): 68-74.

[12] Yang Wenbin, Tang Jinnian, Liang Hairong, et al. Deep soil water infiltration and its dynamic variation in the shifting sandy land of typical deserts in China [J]. Science China Earth Sciences, 2014, 57(8): 1816-1824.

- [13] Kheimi M, Zounemat-Kermani M. Conventional and advanced AI-based models in soil moisture prediction [J]. *Physics and Chemistry of the Earth (Parts A/B/C)*, 2025, 139:103944.
- [14] Benvenuto D, Giovanetti M, Vassallo L, et al. Application of the ARIMA model on the COVID-2019 epidemic dataset [J]. *Data in brief*, 2020, 29: 105340.
- [15] 陈晨, 邵长亮, 葛炎, 等. 卡拉麦里山有蹄类野生动物自然保护区蒙古野驴生境格局动态及其成因分析 [J]. *生态学报*, 2021, 41(5):2056-2066.
Chen Chen, Shao Changliang, Ge Yan, et al. Habitat pattern dynamics and cause analysis of *Equus hemionus* in Kalamaili Mountain Ungulate Nature Reserve, Xinjiang [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(5):2056-2066.
- [16] 徐海量, 苑埏焯, 徐俏. 干旱区生态修复的实践: 以古尔班通古特沙漠为例 [J]. *科学*, 2020, 72(6):14-18.
Xu Hailiang, Yuan Kaiye, Xu Qiao. Ecological remediation of arid area: The case of Gurbantunggut Desert, Xinjiang [J]. *Science*, 2020, 72(6):14-18.
- [17] 郝建盛, 张飞云, 黄法融, 等. 新疆伊犁地区季节冻土沿海拔的分布规律及其影响因素 [J]. *冰川冻土*, 2020, 42(4):1179-1185.
Hao Jiansheng, Zhang Feiyun, Huang Farong, et al. Altitudinal distribution pattern of seasonally frozen ground and its influencing factors in the Ili basin, Xinjiang [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2020, 42(4):1179-1185.
- [18] 陈照盟, 刘玥. 时间序列中早期预警信号的阈值探索: 基于变点自回归模型 [C] // 第二十五届全国心理学学术会议摘要集. 成都, 2023: 155-157.
Chen Zhaomeng, Liu Yue. Threshold exploration of early warning signals in time series: A change-point autoregressive model approach [C] // Abstracts of the 25th National Academic Conference. Chengdu, 2023: 155-157.
- [19] 李永娣. 基于 ARIMA、平减指数法和主成分回归模型的 GDP 总量及增速预测: 以河南省为例 [J]. *河南科技*, 2021, 40(13):149-155.
Li Yongdi. Analysis of GDP and growth forecast based on ARIMA model, deflator index method and principal component regression model: Take Henan Province as an example [J]. *Henan Science and Technology*, 2021, 40(13):149-155.
- [20] 王英伟, 马树才. 基于 ARIMA 和 LSTM 混合模型的时间序列预测 [J]. *计算机应用与软件*, 2021, 38(2): 291-298.
Wang Yingwei, Ma Shucui. Time series forecasting based on ARIMADLSTM hybrid model [J]. *Computer Applications and Software*, 2021, 38(2):291-298.
- [21] 董新光, 邓铭江. 新疆地下水资源 [M]. 新疆乌鲁木齐: 新疆科学技术出版社, 2005.
Dong Xinguang, Deng Mingjiang. *Groundwater Resources in Xinjiang* [M]. Urumqi, Xinjiang: Xinjiang Science and Technology Press, 2005.
- [22] Bruland G L, Richardson C J. Hydrologic, edaphic, and vegetative responses to microtopographic reestablishment in a restored wetland [J]. *Restoration Ecology*, 2005, 13(3):515-523.
- [23] 胡新, 陈勇强. 降水驱动下表层土壤水分变化规律 [J]. *安徽农业科学*, 2019, 47(21):58-60.
Hu Xin, Chen Yongqiang. Variation of surface soil moisture driven by precipitation [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2019, 47(21):58-60.
- [24] Niu Jiqiang, Liu Zijian, Chen Feiyan, et al. Variations of soil moisture and its influencing factors in arid and semi-arid areas, China [J]. *Journal of Arid Land*, 2025, 17(5):624-643.
- [25] 古力米热·哈那提, 姜波, 苏里坦, 等. 基于气温变化的简易融雪模型研究 [J]. *干旱区地理*, 2023, 46(2):169-177.
Gulimire Hanati, Jiang Bo, Su Litan, et al. Simple snowmelt model based on temperature change [J]. *Arid Land Geography*, 2023, 46(2):169-177.
- [26] 王涛涛. 新疆北部荒漠一年生短命植物根系构型研究 [D]. 新疆乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2023.
Wang Taotao. Study on root system architecture of annual short-lived plants in the northern desert of Xinjiang [D]. Urumqi, Xinjiang: Xinjiang Agricultural University, 2023.
- [27] 曾晓玲. 古尔班通古特沙漠种子秋萌特征及萌发趋势的研究 [D]. 新疆石河子: 石河子大学, 2011.
Zeng Xiaoling. Characters and trend of seeds germinate in autumn in gurbantonggut desert, China [D]. Shihezi, Xinjiang: Shihezi University, 2011.
- [28] Peng Mengwen, He Hao, Wang Zhongke, et al. Responses and comprehensive evaluation of growth characteristics of ephemeral plants in the desert-oasis ecotone to soil types [J]. *Journal of Environmental Management*, 2022, 316:115288.