试验研究

干旱区铁路典型下垫面防沙植物生长动态与水分利用特征

彭晓川[1], 祁延录[1], 马新民[2]
(1.新疆铁道勘察设计院有限公司, 新疆 乌鲁木齐 830011;
2.中国铁路乌鲁木齐局集团有限公司, 新疆 乌鲁木齐 830011)

摘　要: [目的]揭示干旱区铁路沿线不同下垫面类型(沙漠与戈壁)对植被生长特征、水分动态过程及生态适应机制的影响,为铁路生态带植被配置与水资源管理提供科学依据。[方法]依托和若铁路沿线典型监测样地(DK48,DK258,DK553),开展2023年4—10月的连续监测,采集植被株高、地径、密度、活体所占比例、茎流速率及土壤水分等关键指标数据,采用回归分析与多元统计方法探讨植被形态与水分因子之间的定量关系。[结果]沙漠区(DK258)植被在株高(最高192.85 cm)、地径(36.36 mm)、活体比例(0.965)等方面显著高于戈壁区(DK48,DK553),表现出更强的水分获取能力和生态适应性。茎流监测显示,梭梭对春季降水响应迅速(4—6月高峰,速率达5.61×10^{-4} g/s),沙枣茎流在夏末显著上升。胡杨年需水量(17.5 kg)高于梭梭(0.24 kg)和沙枣(0.44 kg)。土壤水分分析表明,沙漠区虽渗透性强但保水性差,戈壁区蒸散强烈、入渗受限,均形成不利于植被恢复的水分环境。回归模型表明,梭梭株高随时间呈二次增长(R^2=0.97),冠幅呈指数扩展(R^2=0.82),水分因子[降水(P),土壤水分(M)]为主要驱动因素。[结论]不同下垫面显著影响植被形态结构与水分适应策略,沙漠区适宜发展根系发达型物种,戈壁区需结合节水措施提升保水效能。建议在生态修复工程中实施功能分区与分层配置策略,科学选择植物种类并优化灌溉制度,以构建高效、稳定、可持续的干旱铁路生态防护体系。

关键词: 防沙植物; 下垫面; 蒸渗量; 茎流; 植被形态
文献标识码: A　　**文章编号:** 1000-288X(2026)01-0001-11　　**中图分类号:** X169, S152.7

文献参数: 彭晓川, 祁延录, 马新民.干旱区铁路典型下垫面防沙植物生长动态与水分利用特征[J].水土保持通报,2026,46(1):1-11. Peng Xiaochuan, Qi Yanlu, Ma Xinmin. Growth dynamics and water use characteristics of sand-control plants on typical underlying surfaces along railways in arid regions [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation,2026,46(1):1-11.

DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2026.01.004　　**STR:32312.14.stbctb.2026.01.004**

Growth dynamics and water use characteristics of sand-control plants on typical underlying surfaces along railways in arid regions

Peng Xiaochuan[1], Qi Yanlu[1], Ma Xinmin[2]
(1.*Xinjiang Railway Survey and Design Institute Co. Ltd.*, *Urumqi*, *Xinjiang* 830011, *China*; 2.*China Railway Urumqi Bureau Group Co., Ltd.*, *Urumqi*, *Xinjiang* 830011, *China*)

Abstract: [Objective] The effects of different underlying surface types (desert and Gobi) along arid-region railway corridors on vegetation growth characteristics, water dynamics, and ecological adaptation mechanisms were analyzed, in order to provide a scientific basis for vegetation configuration and water resource management in railway ecological zones. [Methods] Based on continuous monitoring from April to October 2023 at three representative sites along the Hotan-Ruoqiang Railway (DK48, DK258, and DK553), key indicators such as plant height, basal diameter, density, live coverage ratio, stemflow rate, and soil moisture were collected.

收稿日期:2025-07-02　　**修回日期:**2025-09-17　　**采用日期:**2025-09-19
资助项目:中国铁路乌鲁木齐局集团有限公司科技研究开发计划项目"植物防沙体系配置防护效益评价与模式优化试验研究"(WLMQ-KGHZGS-HRTL-GGB-2020-0031)
第一作者:彭晓川(1977—),男(汉族),四川省古蔺县人,本科,高级工程师,主要从事铁路、公路路基勘察设计及岩土工程。Email:11200706@qq.com。
通信作者:祁延录(1976—),男(蒙古族),青海省海东市人,本科,正高级工程师,主要从事铁路、公路路基勘察设计及岩土工程。Email:82588674@qq.com。

Regression analysis and multivariate statistical methods were used to quantitatively explore the relationships between vegetation morphology and water-related factors. [Results] Vegetation in the desert area (DK258) exhibited significantly greater plant height (up to 192.85 cm), basal diameter (36.36 mm), and live coverage ratio (0.965) compared to the Gobi areas (DK48 and DK553), indicating stronger water acquisition capacity and ecological adaptability. Stemflow monitoring showed that *Haloxylon ammodendron* responded rapidly to spring precipitation (peaking from April to June at a rate of 5.61×10^{-4} g/s), while *Elaeagnus angustifolia* exhibited increased stemflow in late summer, and *Populus euphratica* had an annual water demand of 17.5 kg-substantially higher than *H. ammodendron* (0.24 kg) and *E. angustifolia* (0.44 kg). Soil moisture analysis revealed that while the desert area has high infiltration but low water retention, the Gobi area suffers from strong evapotranspiration and limited infiltration, both leading to unfavorable moisture conditions for vegetation recovery. Regression models showed that *H. ammodendron* height followed a quadratic growth pattern over time ($R^2=0.97$), and canopy width expanded exponentially ($R^2=0.82$), with precipitation (P) and soil moisture (M) as the primary driving factors. [Conclusion] Underlying surface types significantly influence vegetation morphology and water adaptation strategies. Desert zones are more suitable for deep-rooted species, while Gobi areas require water-saving interventions to improve soil moisture retention. It is recommended that the strategy of functional zoning and stratified vegetation configuration be implemented in ecological restoration projects, with scientifically selected species and optimized irrigation regimes, to build an efficient, stable, and sustainable ecological protection system along arid-region railways.

Keywords: sand-prevention plants; underlying surface; evapotranspiration volume; stemflow; vegetation morphology

风沙灾害是长期困扰沙区铁路安全运营的重要因素,严重威胁铁路设施和运输安全[1]。为解决这一问题,国内外研究人员围绕铁路风沙防治展开了广泛而深入的研究,通过现场观测、风洞试验、数值模拟和理论分析等手段,提出了一系列有效的风沙治理措施,显著降低了风沙对铁路设施的影响[2-5]。目前,沙区铁路风沙防治措施主要包括植物防沙[6]、化学防沙[7]、机械防沙[8]及多种措施组合运用[9](图1)。其中植物防沙(也称生物防沙)尤为突出,这类方法包括人工种植防护林带和天然植被恢复等手段。机械防沙和化学防沙虽能在短期内发挥作用,但使用寿命有限,且存在不利于环境保护的问题;相比之下,植物防沙具有持效期长、自我更新能力强、生态环境效益显著等优势,不仅可以有效固定流沙,还能改善区域微气候和土壤条件,防止水土流失,促进当地经济发展[10]。然而,植被在沙区的生长与存活高度依赖水分条件,而水分利用过程则受到地下水位、降水时空分布、土壤理化性质以及植被自身生理特征等多重因素的影响。如何在有限水资源条件下科学配置植被类型、优化灌溉制度,实现铁路沿线生态带的高效、稳定和可持续运行,是当前亟需解决的关键科学与工程问题。



a 植物防沙 b 化学防沙 c 机械防沙

图1 铁路沿线防沙措施

Fig.1 Sand prevention measures along railways

从水文学和生态学的角度看,植被生态需水量是进行生态用水管理与水资源优化配置的前提[11]。在干旱区,生态需水不仅要维持植被的正常生长和生态功能,还必须兼顾区域水资源的稀缺性与利用

效率，因此确定不同类型植被的耗水规律，对于制定科学的灌溉计划和物种配置方案至关重要[12]。国内外研究普遍认为，植被耗水过程是一个涵盖植物蒸腾、冠层截留、土壤蒸发、渗漏与径流等多个环节的综合过程[13-15]。不同下垫面条件会显著影响土壤水分补给与消耗的动态平衡。例如沙漠区由于土壤质地以流沙为主，渗透性强、入渗速度快，但保水能力较差；而戈壁区则表层砾石覆盖比例高，虽在一定程度上减少直接蒸发，但降水入渗受限且地下水埋深较大，从而限制了根系可利用水的获取[16]。

自 21 世纪以来，干旱区植物生态用水量的估算方法不断发展，从早期的水量平衡法、定额法，到基于遥感和蒸散模型的区域估算方法[11]，再到利用稳定同位素技术精确解析植物水源依赖性[17]，研究精度与应用范围显著提升。Song Chunwei 等[11]基于蒸散模型分析了新疆不同生态系统的需水格局，提出在生态修复项目中应针对性地制定水量分配方案；Wu Yu 等[17]利用同位素揭示了梭梭在不同季节对浅层降水与深层地下水的依赖比例变化，为理解耐旱植物的水分适应策略提供了关键证据。此外，Wang Xudong 等[18]基于 BP 神经网络与灰色预测模型，预测了新疆干旱区未来农业与生态用水变化趋势，强调在气候变化背景下应优先保障生态需水，以提升植被恢复的长期可持续性。在国内，围绕干旱区铁路沿线生态需水问题的研究起步较晚，现有成果多集中于防沙体系结构优化、植被类型选择以及灌溉水量定额等方面。例如，贾保全等[19]通过实测与模型模拟相结合的方法，确定了不同植被类型的生态用水定额，并指出低地草甸等湿生植被的生态需水量显著高于旱生植被；王西琴等[20]对环境需水的最小阈值进行了界定，提出河道最小环境需水量的概念，为干旱区生态用水量化提供了参考；王芳等[21]分析了西北干旱区土地利用变化与径流形成的关系，提出了基于水文过程的生态需水计算方法。从生理生态学角度，干旱区典型防沙植物如梭梭、沙枣和胡杨在水分获取策略上表现出显著差异。Zhao Li 等[22]的研究表明不同龄梭梭林在生长季与休眠期的水盐运移规律存在显著差别，这与根系分布深度、土壤含水层特征密切相关。胡杨作为深根性树种，在地下水位下降时仍可依赖深层水源维持生理活动，但其年需水量远高于梭梭与沙枣，因此在水资源紧缺区域的适应性较差；而梭梭与沙枣由于具备较高的水分利用效率，更适合在降水不稳定，地下水位较深的地段应用。

综上所述，尽管国内外已有大量关于干旱沙区植物耗水与土壤水分迁移的研究成果，但针对不同下垫面条件下相同时期植物群耗水的定位监测仍较为缺乏，而这直接影响沙生植物的存活与生长状况。针对这一研究空白，本研究依托和若铁路沿线典型样地（DK48，DK258，DK553），在 2023 年 4—10 月期间开展连续监测，采集植被株高、地径、密度、活体比例、茎流速率、土壤水分等关键指标数据，并结合气象与土壤环境数据，构建多元回归模型，解析植被形态与水分因子的定量关系。在此基础上，比较不同下垫面条件下典型防沙植物的生长动态与水分利用特征，揭示其生态适应机制，并提出针对性植被配置与水资源管理优化策略，以期为干旱区铁路生态防护体系的构建与维护提供科学依据。

1　野外监测方法及数据采集

1.1　野外监测方法

选择和若铁路沿线 DK258 沙漠段以及 DK48，DK553 戈壁段作为野外试验区。试验区域具体位置如图 2 所示。其中，DK258 试验点位于典型的沙漠地段，经纬度分别为（38°25′N，87°30′E），此地年均降水量仅为 27.6 mm，而年均蒸发量却高达 2 500 mm，降水与蒸发之间的巨大差异导致水分极度缺乏，地貌以流动沙丘为主，沙丘形态多变，存在高度较大的沙丘群，植被覆盖率低。DK48 和 DK553 试验点位于典型的戈壁地段，经纬度分别为（38°24′N，87°20′E）和（37°35′N，82°15′E），此地砾石覆盖广泛，土壤粗粒化程度高，年均降水量约 45 mm，年均蒸发量高达 3 648 mm。沿线植物分别于 2020 年秋季和 2021 年春季完成栽植，并在部分区域实施补植，以保证群落结构的完整性与防护效果。各类植物的栽植间距统一为 1 m，采用品字形排列，以增强植被带的空间覆盖度和防风固沙能力。监测工作于 2023 年 4—9 月开展。该期间为覆盖植被生长的主要时段。植被形态指标（株高、地径、密度、活体比例）按月测定；茎流速率在整个生长季持续记录，采样间隔为 30 min；土壤水分在 0—100 cm 范围内分层监测，数据的采集频率为 1 次/min；气象要素（降水量、气温、空气湿度、风速）由自动气象站实时监测，并以 10 min 为间隔自动记录。

每个试验区的监测区域采用随机布点法设置。共划定 5 个 10×10 m 的采样区，作为独立观测单元。采样区植被形态特征采用钢卷尺（精度 0.1 cm）测量株高，数显游标卡尺（精度 0.01 mm）测量地径，并采用样方计数植株计算密度与活体比例。茎流速率使用 SFM1 型热扩散式茎流计，传感器热针间距 5 mm，热脉冲周期 30 min。土壤水分采用 Decagon Devices

公司 5 TE 型土壤水分与温度传感器配合 Em50 数据采集器，自动记录体积含水量（VWC）。气象要素由 HOBO RX3 000 自动气象站采集，包括翻斗式雨量计、空气温湿度传感器和风速传感器。

数据处理包括剔除异常值与缺测值，并采用线性插值法补齐短时缺失数据。植被耗水量通过茎流速率积分计算单株日耗水量，并结合样地株数折算至群落水平；土壤水分动态采用日均值平滑处理，分析降水响应时间及滞后效应；统计分析基于气候要素（降水 P、温度 T）、土壤性质（湿度 M，pH 值）及时间（t），利用多元逐步回归构建株高（H）和冠幅（D）预测模型，计算决定系数（R^2）及显著性水平（p 值）。全部分析在 SPSS 26.0 和 OriginPro 2022 中完成，以确保结果的科学性与可重复性。

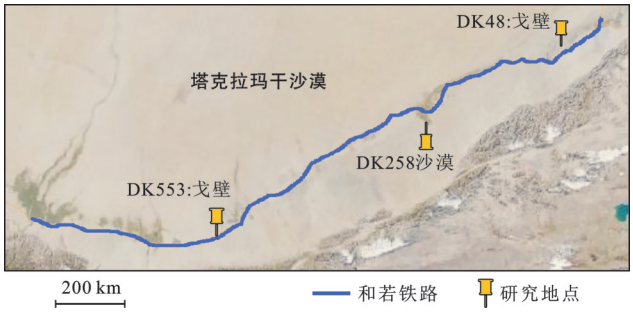


图 2 研究区卫星影像

Fig.2 Satellite image of research area

1.2 野外监测原理

本文利用植物水分平衡原理（如图 3 所示）对和若铁路沿线植物的生长状况与外部环境条件进行监测与分析，以期为植物生长提供科学的灌溉指导，实现植被的健康稳定发育。植物的生长和存活直接取决于土壤水分是否能够充分满足茎流所需。因此，准确评估和控制土壤含水量是植物灌溉管理中的重要环节。根据水分平衡原理，植物根系区域土壤含水量的变化受到降雨补给、人工灌溉、蒸发损失和土壤下渗的共同作用。

1.3 数据处理原理

植物树干液流密度与上下探针的温度差 ΔT 具有良好的相关性，通过测量上下探针的温度差 ΔT，将温度差 ΔT 代入经验公式，即可计算出树干液流密度 J_S，计算公式为

$$J_S = 119 \times 10^{-6} \times \left(\frac{\Delta T_m - \Delta T}{\Delta T} \right) \tag{1}$$

式中：J_S 为树干液流密度〔g/(m²·s)〕；ΔT_m 为昼夜最大温差；ΔT 为瞬时温差。

树干液流量的计算公式为

$$F = J_S \cdot A \tag{2}$$

式中：F 为树干液流量（g/s）；A 为树干边材的面积。

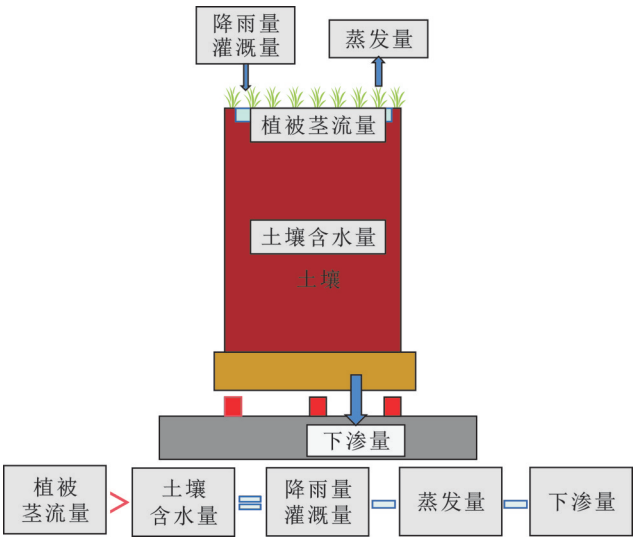


图 3 植物生长水分平衡监测原理示意图

Fig.3 Schematic diagram of water balance monitoring principle during plant growth

利用茎流量监测仪监测整个植物生长过程，采样间隔为 1 min，监测时长为 7 个月。蒸渗仪用于监测株间或群落内的蒸发量，其原理是以水量平衡原理为基础。对于单个被分离的土柱，水量平衡方程为

$$P + I + G = \mathrm{ET} + R_i + R_S + D \pm \Delta S \tag{3}$$

式中：P 为降水量；I 为灌溉水量；G 为地下水流通量；ET 为蒸发量；R_i 为土体壤中流；R_S 为地表径流；D 为深层渗漏量；ΔS 为土柱中土壤水分的前后变化量。由于和若铁路沿线属于极度干旱区，土体壤中流 R_i 与地表径流 R_S 均可视为零。以上平衡原理可简化为

$$P + I + G = \mathrm{ET} + D \pm \Delta S \tag{4}$$

蒸发量和下渗量监测采用称重式蒸渗仪，由于该仪器采用刚体结构，地下水流通量 G 可视为零。以上平衡原理可简化为

$$P + I = \mathrm{ET} + D \pm \Delta S \tag{5}$$

为系统评估植物防沙示范区的植被生长状况及其防沙固沙效果，本文采用全过程动态监测方法，对植物群落的生态适应性与功能表现进行持续跟踪记录。监测工作围绕苗木定植初期与生长期两个关键阶段开展，旨在揭示不同阶段植物的生长响应特征及其生态作用。①苗木种植初期。在植被建设的初始阶段，监测重点为苗木的初始成活率与枝条萌发率，同时评估补植前后植株保存率的变化。该阶段的动态观测有助于全面了解植物在引种与定植过程中的适应能力，及时掌握苗木健康状况，为后续植被

稳定生长和群落结构建立提供基础保障。②苗木生长期。进入生长阶段后,监测重心转向植物地上部生物量的动态变化。具体包括株高、冠幅、地径、新枝长度等关键生长参数的定期测量,以明确植物的生长趋势和群落扩展能力。通过该阶段的连续监测,不仅可量化植被生长势,也为综合评估其防风固沙能力与生态服务功能提供依据。

具体的监测方法则采用定点监测和非定点随机抽样调查相结合的方式:①定点监测。定点监测选择在新疆和若—若羌铁路沿线具有代表性的固定监测点,长期定位观察植物个体或群落的生长变化规律,对植被的株高变化、冠幅扩展趋势、新枝生长速率、地径增长等生长参数进行精确的逐月或逐季监测,以获取连续、稳定的植物生长动态数据。②非定点监测(随机抽样调查)。为确保监测数据的全面性和代表性,本研究在和若铁路沿线选择DK48(戈壁区1),DK258(沙漠区),DK553(戈壁区2)这3种典型下垫面区域,每个样方区采用标准样方调查方法,详细记录各区域内植物的株高、冠幅等多项生态指标。每个样方区植物成活率不同,所收集的数据量也不一致,因而,在数据处理中统一求解平均值。

2　监测结果与分析

2.1　不同下垫面植被生长状况

为全面评估沙漠与戈壁区典型下垫面植被的生长差异及其演化过程,本文选取和若铁路沿线的3个典型监测点DK48(戈壁区1),DK258(沙漠区)与DK553(戈壁区2),对不同植被类型进行2023年4—10月的连续动态监测。各点设置5个样方,定期记录株高、地径、活体比例、年增长量及植被密度等指标,结果详见表1—3。所测数据均为样方内各项指标平均值。

表1　戈壁样区1(DK48)植被基本特征

Table 1　Basic vegetation characteristics of Gobi sample area 1 (DK48)

样方编号	主要植被类型	平均株高/cm	当年平均生长量/cm	平均地径/mm	平均活体比例/%	年平均生长量/(cm·cm^{-1})	植被密度/%
1	梭梭、红柳	105.00	21.80	17.37	74	17.68	12.37
2	梭梭、红柳	106.00	15.65	15.87	74	10.95	13.31
3	梭梭、沙拐枣	120.86	15.65	21.96	73	10.95	10.43
4	梭梭	112.23	23.14	18.06	74	19.19	8.93
5	沙枣、梭梭、沙拐枣和沙柳	91.89	26.08	15.69	61	19.24	13.92

表2　沙漠样区(DK258)植被基本特征

Table 2　Basic vegetation characteristics of desert sample area (DK258)

样方编号	主要植被类型	平均株高/cm	当年平均生长量/cm	平均地径/mm	平均活体比例/%	年平均生长量/(cm·cm^{-1})	植被密度/%
1	梭梭	192.85	21.92	33.54	72	18.14	52.50
2	梭梭、沙枣	179.28	27.57	34.15	72	19.21	50.46
3	梭梭、旱柳	137.10	18.00	24.89	75	13.42	26.40
4	沙枣、旱柳、梭梭和柽柳	160.00	25.30	36.36	97	19.90	22.79
5	梭梭、沙枣和旱柳	82.27	13.63	7.16	79	9.68	5.78

表3　戈壁样区2(DK553)植被基本特征

Table 3　Basic vegetation characteristics of Gobi sample area 2 (DK553)

样方编号	主要植被类型	平均株高/cm	当年平均生长量/cm	平均地径/mm	平均活体比例/%	年平均生长量/(cm·cm^{-1})	植被密度/%
1	梭梭、胡杨和沙拐枣	147.50	26.00	32.77	66	19.15	23.39
2	胡杨、梭梭和沙枣	155.90	19.29	26.50	77	14.88	30.50
3	梭梭、红柳和灌木丛	90.60	14.55	2.70	78	10.40	28.42
4	梭梭	139.04	20.85	24.48	76	14.76	33.36
5	梭梭和沙拐枣	170.94	25.30	32.94	77	18.40	21.52

通过对和若铁路沿线DK48(戈壁区1),DK258(沙漠区)和DK553(戈壁区2)植被生长特征的对比发现,三区域植被在株高、地径、活体比例及密度等方面存在显著差异。其中,沙漠区(DK258)植被平均株高(最高192.85 cm)明显高于戈壁区DK48(最高120.86 cm)和DK553(最高170.94 cm),且该区域植物的平均地径最高达到36.36 mm,远大于戈壁区DK48和DK553的最大值(分别为21.96 mm和32.94 mm)。此外,DK258的植被活体比例(最高0.965)和植被密度(5.78%～52.5%)亦显著高于戈壁区(DK48密度8.93%～3.92%,DK553密度21.52%～33.36%),表明沙漠区植物的根系发育更充分,生态适应性更强。造成上述差异的主要原因在于不同区域的土壤性质、水分供应条件及植被种类特征。具体而言,沙漠区虽降雨量较低(年均仅27.6 mm),但地下水位相对较高(60～100 m),且土壤以流沙为主,利于根系发达的植被(如梭梭、旱柳、柽柳)吸取深层水分,从而表现出较高的生长潜力;戈壁区虽降水略多(年均约45 mm),但土壤砾质化程度严重,孔隙大,持水能力弱,限制了植物根系发育和整体生长表现,导致其植株高度较矮,地径较小,植被密度和活体比例均相对较低。上述形态指标的显著差异不仅反映了植物对不同地表资源环境的响应能力,也暗示着其在水分获取与利用机制方面存在本质区别。为进一步揭示不同下垫面植被对水分条件的适应模式,本文结合茎流监测与时序分析,系统评估其在生长季内的动态水分需求特征。

2.2 不同下垫面植物水分生理分析

基于上述生长动态差异的分析,进一步从水分生理过程探讨典型植物在沙漠与戈壁下垫面条件下的水分利用特征。图4为沙漠与戈壁区域不同类型植被在生长季内(4—9月)各月份茎流速率的日变化趋势。

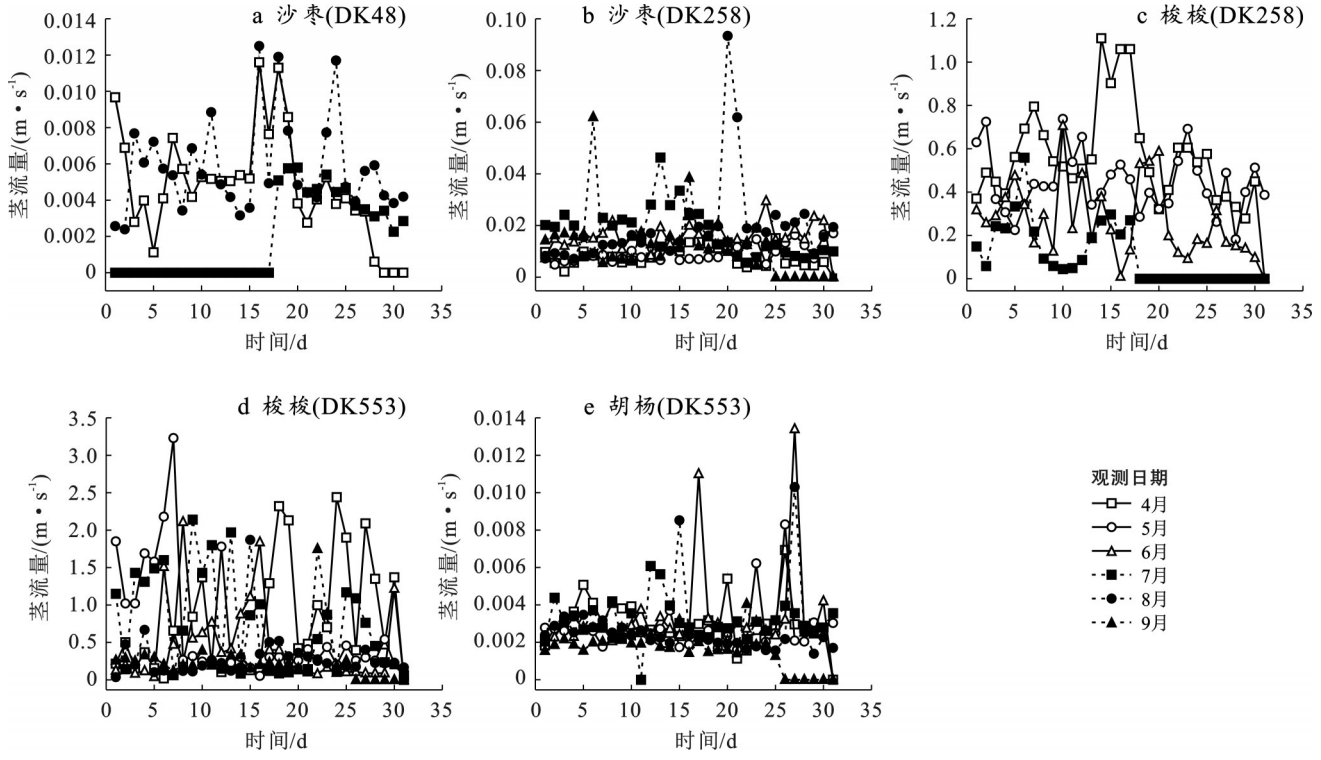


图4 生长季各月份典型植物茎流量时序

Fig.4 Time sequence of stemflow of typical plants in each month of the growing season

从图4可以看出,各监测样点不同植物的茎流变化受区域地表特征、气候条件及植被类型影响显著,表现出明显的时空差异性。在DK48监测点,沙枣的茎流在4月和8月较为活跃,7月则明显减弱,其平均茎流速率为7.84×10^{-6} g/s(图4a)。这表明该区域沙枣的生长高峰主要出现在春初和夏末,而7月由于高温强蒸发作用,植株水势降低,导致茎流速率下降。相比之下,DK258区域沙枣在7—9月表现出更高的茎流水平,尤其是8月中旬存在突出的峰值,平均茎流速率可达1.41×10^{-5} g/s(图4b),反映出该区域在夏末降水可能集中,水分利用效率提升。在DK258监测点,梭梭的茎流则在5—6月显著升高(图4c),平均茎流速率为4.00×10^{-4} g/s。其早期生长活跃与春季降水有关,显示出对早春水分变化的快速响应能力。在DK553监测点,梭梭在4月和5月茎流最为显著,茎流速率高达5.61×10^{-4} g/s(图4d),后期(6—9月)则

逐渐降低,可能与该区域夏季降雨减少和表层水分迅速蒸发有关。胡杨在该区域的茎流相对较小,但在5,6及8月仍有较明显的波峰,平均值为2.90×10^{-6} g/s(图4e),表明其对季节性降雨的响应相对滞后,推测其主要依赖深层水源或地下水补给。

图5为2023年4—9月和若铁路DK48监测点土壤日蒸发量与有效降雨量的变化过程。从图5可以看出,土壤蒸发量自4月初的高值呈波动下降趋势,6月后趋于稳定,维持在0.1～0.2 mm/d。与之相比,有效降雨量整体偏低,波动性大,7—9月多次接近或降至零,反映出降水对土壤水分补给能力极为有限,甚至存在水分净失现象。上述特征主要受极端干旱气候与土壤类型共同驱动。DK48区域年均降雨仅约45 mm,蒸发远超降水,导致水分严重亏缺,且区域土壤以粗粒砾石为主,结构疏松、保水性差,降水难以在根系层形成有效储水。此外,降雨事件频率低、强度小,加之高温、低湿、大风等气象因子强化蒸散,使土壤短暂湿润后迅速失水,难以转化为植物可利用水分,最终造成植被长期处于干旱胁迫下,严重限制生态恢复与系统稳定性。

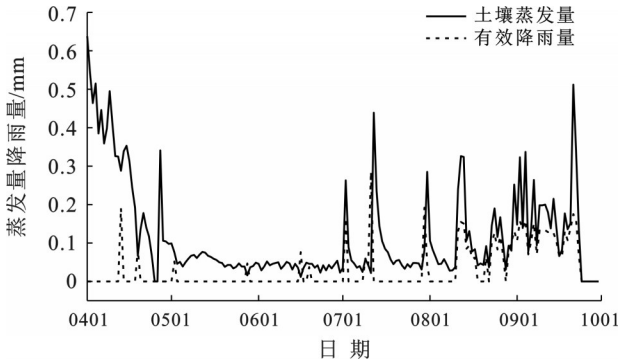


图5　戈壁样区DK48监测点土壤蒸渗仪监测数据

Fig.5　Monitoring data of soil evapotranspiration meter at DK48 monitoring point in Gobi sample area

图6为2023年4—9月和若铁路沿线DK258(沙漠地带)监测点的土壤日蒸发量与有效降雨量变化。图6中黑色曲线为土壤蒸发量,红色曲线为有效降雨量。从图6可知,DK258蒸发量在4月初高达0.6 mm/d,随后迅速下降并在6月中下旬后趋于稳定,维持在0.05～0.15 mm/d,且存在多次短时波动性蒸发峰值。这种波动说明在极端干旱环境下,即便气候条件变化微弱,也会导致土壤水分剧烈响应。相较而言,有效降雨量整体偏低,呈零星脉冲式分布,仅在5—8月期间出现少量输入,日值普遍低于0.1 mm/d,多数时段为零,无法有效补给土壤水分。原因是DK258区域属典型干热沙漠气候,年降雨稀少、时空分布极不均衡,且常伴随高温、低湿、大风等强化蒸散因子,促使土壤水分快速丧失。另一方面,沙漠土壤以细砂为主、结构松散、孔隙大,雨水难以在表层蓄存,极易下渗或蒸发,加之植被覆盖稀疏,缺乏生物调节机制,使降水难以转化为生态有效水。综合来看,DK258沙漠区呈现出典型的“高蒸散—低降雨—快流失”生态水文机制,导致根系层土壤长期处于水分赤字状态,植被生存受限。

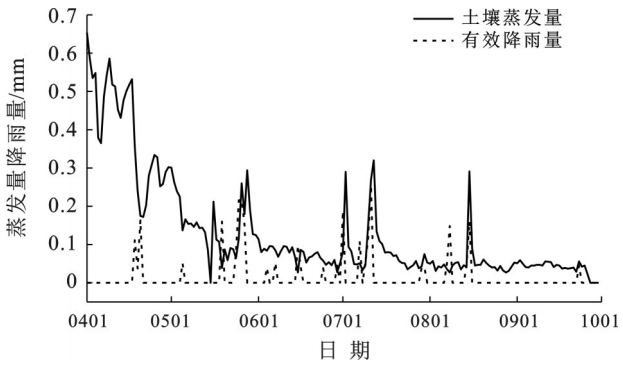


图6　沙漠样区DK258监测点土壤蒸渗仪监测数据

Fig.6　Monitoring data of soil evapotranspiration meter at DK258 monitoring point in desert sample area

图7为DK553监测点土壤蒸发量与有效降雨量的日变化特征。从图7可以看出,蒸发量在4月初达最大值(约0.6 mm/d),随后迅速下降,并在5月至9月间维持在0.05～0.15 mm/d,表现为低值波动状态。尽管整体蒸发水平较DK48和DK258略低,但仍呈现出多次短时升高,表明蒸发过程易受高温、风速等气象因子扰动。有效降雨量则呈典型脉冲式变化,仅在个别时段(4月下旬至8月)出现间歇性输入,持续性和强度均不足,无法有效补给土壤水分。造成上述特征的原因主要是该区年降水稀少,气候干旱、高辐射、高风速等因素显著增强蒸散作用,且土壤类型以粗砾质为主,保水性能极差,地表植被稀疏,缺乏蒸腾调节。综合来看,DK553地区呈现出“强蒸散—弱补给—低蓄水”的典型机制,土壤表层长期处于水分亏缺状态。该机制限制了植被水分获取与生态系统恢复,提示戈壁地区生态治理需从提升降雨利用率与土壤保水能力入手,优化基质结构或引入小尺度水分调控技术,以改善系统水分平衡。

2.3　植物生长要素相关分析

在综合考虑前期形态动态监测与茎流水分过程分析的基础上,本研究进一步引入气象与土壤要素,对植被生长的主控因子进行定量识别。利用调查和监测数据,在考虑气候要素、土壤性质和时间因素变化对植被外部形态量(株高H和冠幅D)的影响后,利用多元统计分析法建立株高(H)和冠幅(D)随降水(P)、温度(T)、土壤相对湿度(M)、时间(t)的关系。

结合调查数据，利用回归分析，得到梭梭林株高与生长时间的变化关系（如图8所示），株高（H）随时间（t）的演化规律拟合曲线的表达式为

$$H = 33.825 + 2.45t + 4.59t^2 \quad (6)$$

其中拟合决定系数R^2的值为0.97。该表达式揭示了株高生长速度随时间的线性递增趋势，即梭梭在种植后不仅持续生长，其单位时间内的生长速率也在不断加快，增长速率约维持在2.5～5 cm/a，说明此阶段主要为定植缓苗与根系适应期。进入第3年后，生长速率显著上升，至第7年达到约67 cm/a，表明梭梭逐渐进入快速生长期，具备良好的生物量积累能力。这种“加速生长型”模式反映出梭梭在干旱区具有较强的生态适应性和固沙潜力，尤其在早期完成根系扎深与稳定后，能够高效利用有限的降水资源实现持续快速生长。从植被建设角度看，该特性适宜于中长期生态修复工程中作为骨干树种使用，同时也提示在不同生长阶段应相应调整管理策略，如初期重点保障成活率和水源供应，后期则应加强生长监测与抚育管理，以充分发挥其防风固沙和生境改善功能[14,18]。

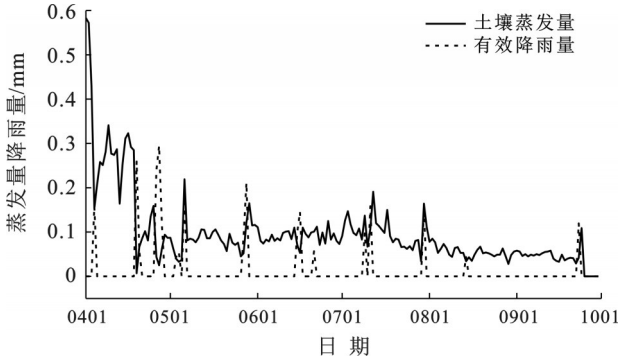


图7 戈壁样区DK553监测点土壤蒸渗仪监测数据

Fig. 7 Monitoring data of soil evapotranspiration meter at DK553 monitoring point in Gobi sample area

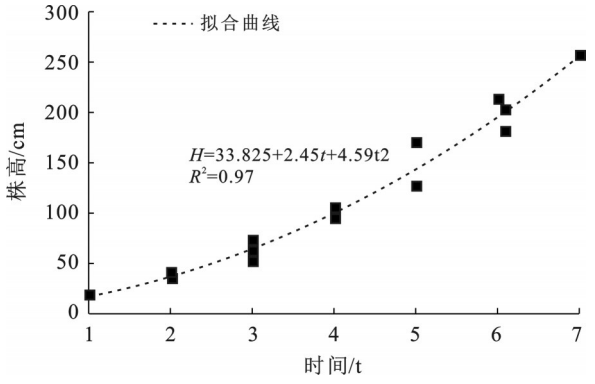


图8 梭梭株高（H）与时间（t）关系

Fig.8 Relationship between height（H） and time（t） of *H. ammodendron*

结合调查数据，利用回归分析，建立冠幅（D）随时间（t）的演化规律，如图9所示，拟合曲线的表达式为

$$D = 76.96 + 6.30e^{0.49t} \quad (7)$$

其中拟合决定系数R^2的值为0.82。从图像趋势和模型结构可以看出，梭梭冠幅在前期（第1—3 a）增长相对缓慢，但随着时间推移，增长速率加快，呈现典型的指数增长趋势。初期缓慢增长可能受限于根系扩展范围、竞争压力与水分供应，而进入中后期后，随着地上部与根系系统的协同发育，冠幅扩展能力迅速增强，表现出较强的水平扩张能力。相比株高增长呈二次多项式趋势，冠幅更符合水平蔓延性植物结构的自然生长特征，强调其在后期快速覆盖地表、增强防风固沙能力方面的生态功能。

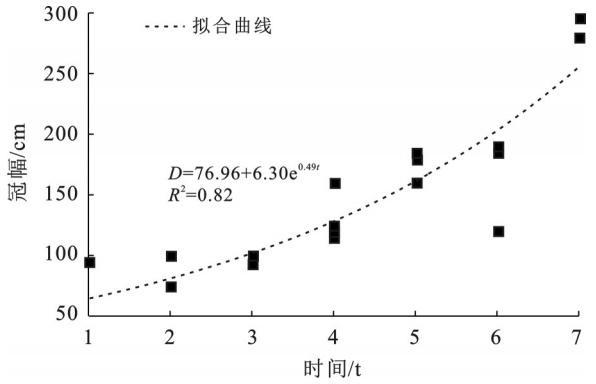


图9 梭梭冠幅（D）与时间（t）的关系

Fig.9 Relationship between crown diameter（D） and time（t） of *H. ammodendron*

同样，利用多元回归分析方法得到降水（P）、土壤相对湿度（M）、土壤pH值、温度（T）对株高（H）、冠幅（D）影响的函数表达式。根据相关性分析得出降水（P）、土壤相对湿度（M）、土壤pH值、温度（T）、时间（t）具备独立性的条件，将模型假定为如下的函数表达形式，求解出未知参数，得出株高H与冠幅D与各参数的关系为

$$H = (0.56P - 0.95T + 0.82M - 2.81\mathrm{pH}) \times (2.62\mathrm{t} + 4.75t^2) \quad (8)$$

$$D = (0.41P - 0.85T + 1.15M - 1.13\mathrm{pH})e^{0.56t} \quad (9)$$

该半经验理论模型深刻反映降水（P）、土壤相对湿度（M）、土壤pH值（pH）、温度（T）、生长时间（t）对植被外部形态量（株高H和冠幅D）的影响，有助于对当地防风固沙林的生长做定量监测，同时也有助于对退化的防风固沙植被修复和重新栽植提供理论依据。

3 讨 论

3.1 不同下垫面下植被生态特征与水分适应策略

根据现场监测结果可知，沙漠与戈壁区下垫面

条件差异显著影响植物的生长形态与生态适应策略。沙漠区土壤松散,结构通透,虽年降水极少,但地下水位相对较浅,使得植物根系可深扎获取深层水分[19]。该区域植被如梭梭、沙枣等普遍表现为株高大,地径大,活体比例高,体现出以扩展根系提升抗逆性的生态对策。相较之下,戈壁区土壤以砾石和结皮为主,根系扩展受限,植物整体形态低矮、覆盖度小,呈现出“矮化-节水”型保守生长策略以适应表层水分匮乏的生境[23-25]。

不同植物在水分获取与利用方面也展现出多样化的响应机制。浅根型先锋植物如梭梭,茎流高峰集中于春季,表现为“高流量-短周期”型吸水模式,年需水量最低,仅 0.24 kg,适用于生态修复初期快速绿化。沙枣则在不同区域呈现出不同的高值期,年需水量适中(0.44 kg),具备“低耗水-强适应”的特征,适合长期维稳使用。胡杨年需水量高达 17.5 kg,其茎流响应滞后,依赖深层水源,适宜构建深根层结构稳定的生态骨架。在植被配置中应根据物种功能特征与水分策略差异,实行分层配置、功能互补的多样化种植模式,以增强生态系统在干旱区的生存能力与恢复效能[26-27]。进一步分析显示,植被的生长过程不仅受限于水分获取能力,也受到气候、土壤及时间因素的共同调控。以梭梭为例,其株高与时间呈显著的二次函数增长关系(R^2=0.97),前 3 a 每年增长 2.5～5 cm,进入第 4 a 后增长速率迅速提升,第 7 a 可达 67 cm/a,反映出“加速生长型”生态策略。这一阶段正值根系深入,地上部快速扩展时期,说明梭梭具备较强的水分适应能力与固沙潜力[28]。冠幅方面,其与时间呈指数增长趋势(R^2=0.82),前期增长缓慢,后期扩展迅猛,展现出典型的水平扩张能力。上述规律不仅揭示了梭梭在干旱区的生态建群优势,也为不同生长期的养护策略提供了量化依据:初期应注重水源保障与成活率,中后期则需关注扩展潜力与防护功能的发挥。

3.2　地表属性对土壤水分过程的调控作用

地表类型对区域水分动态具有显著调节效应,是影响干旱区生态系统结构与功能稳定的关键因素[29]。通过对比和若铁路沿线 3 个典型监测点的土壤蒸发与降雨响应特征发现,DK258(沙漠区)虽降水极少,但细砂质土壤具一定保水能力,蒸发下降快、波动小,水分过程相对稳定。然而该区降雨极少,有效补水功能极为有限,土壤水分难以维持在生态有效范围,形成“极低补给-快速亏水”的极端水文模式[29]。戈壁区 DK48 与 DK553 因土壤砾质、结皮覆盖严重,保水性差,蒸发量高、波动显著,表现为“高蒸散-弱补水”的机制。其中 DK553 因地表扰动小,水文过程略显稳定,具备一定生态恢复潜力。此外,植物与土壤水分之间存在显著的反馈耦合机制。植物根系结构决定了对水分的捕获能力,而土壤水分状况则制约着植物生长趋势与群落演替方向。本研究利用多元回归模型,构建了株高(H)和冠幅(D)与降水(P)、温度(T)、土壤相对湿度(M)、土壤 pH 值和时间(t)之间的函数关系,揭示了气候与土壤因子对植物形态发育的显著影响。其中,降水和土壤湿度对梭梭形态指标的提升最为关键,pH 值与温度亦起到调节作用,且时间作为累积变量主导整体生长趋势[28-30]。这一模型为评估不同下垫面下植物响应机制提供了定量化依据,进一步强调了在戈壁与沙漠等极端生态系统中土壤改良和水分调控的重要性。

3.3　区域节水灌溉模式优化与管理建议

在水资源极度有限的干旱区,实现灌溉水的高效利用是保障铁路沿线人工植被持续生长的基础。结合茎流监测结果与当地灌溉制度进行分析,本文估算了三地段典型植物的单株年需水量,若羌地区为 1.09 m^3,且末为 0.85～0.86 m^3,和田地区则略低为 0.82～0.83 m^3。需水差异与各地土壤特性、气候条件、盐碱程度及植被结构密切相关。这一估算结果为区域水资源管理、工程节水设计和灌溉制度优化提供了量化依据。

在此基础上,建议全面推广“精准智慧灌溉系统”。该系统集成土壤水分传感器、气象数据采集设备和水肥一体化滴灌网络,通过动态调节实现水分的时空精准投放,显著提升水资源利用效率。在灌溉模式优化中,应充分结合本研究建立的梭梭株高与冠幅增长模型,将植物不同生长期的需水节律与灌溉策略相匹配。例如在第 1—3 a 缓慢生长期,应重点保障成活率与供水连续性;而在第 3—7 a 快速扩展期,则需调整灌溉频率与施肥比例,以促进地上与地下部分协同生长。结合环境监测与生长模型预测,可实现“定期—定量—定种”的调控方式,为铁路沿线干旱区生态系统恢复提供技术支撑和实践路径。

为了维持植被的持续生长与生态功能,需实施科学的日常养护和精准的智慧灌溉管理。结合“精准智慧灌溉”系统的应用,可有效提升水资源利用效率,减少人工干预,增强生态系统稳定性。通过水肥一体化设备、土壤水分和气象监测装置,实现灌溉自动调控,具有高效、节水、智能等优势。该系统中包括主管、支管及滴头组成的滴灌网络,可根据实时数据动态调整灌水量和施肥量,从而保障植物在不同生长期的需水需求。

4 结 论

（1）不同下垫面对植被生长形态具有显著影响。沙漠区（DK258）植被株高、地径、密度和活体比例均明显高于戈壁区（DK48，DK553），其中株高最高达192.85 cm，地径36.36 mm，活体比例0.965，反映出其根系发育良好、生物量积累能力强。该差异主要受土壤质地、地下水位和植物类型等因素驱动，沙漠区流沙土壤渗透性强，有利于深层吸水，而戈壁区砾质结构持水性差，限制了植被的垂直发育与生长潜力。

（2）典型植物在水分响应机制上表现出明显的物种与区域差异。梭梭春季（4—6月）茎流活跃，平均速率达5.61×10^{-4} g/s，属“高流量-短周期”型吸水模式；沙枣在夏末（7—9月）茎流升高，表现出较强的环境适应性；胡杨全年茎流整体偏低但存在滞后峰值，显示其依赖深层水源维持生理活动。需水量估算显示，胡杨年需水17.5 kg，显著高于梭梭（0.24 kg）和沙枣（0.44 kg），说明不同物种的生态位、水分获取方式和适宜区域应在工程配置中科学区分。

（3）多元回归分析显示，梭梭株高随时间呈二次增长趋势（$R^2=0.97$），冠幅呈指数扩展（$R^2=0.82$），说明其在扎根稳定后具备快速扩展与地表覆盖能力。水分因子（P，M）对形态生长具有最显著的正向驱动作用，时间控制生长节律，温度和pH值则提供调节支持。综合形态特征与水分策略，建议生态修复中根据植物功能实施分区、分层配置，构建结构稳定、功能互补的植被群落体系，以提升干旱区铁路生态带的恢复效能与系统稳定性。

参考文献（References）

[1] Dimson M, Gillespie T W. Trends in active restoration of tropical dry forest: Methods, metrics, and outcomes [J]. Forest Ecology and Management, 2020, 467: 118150.

[2] 辛林桂，程建军，张志平，等.铁路侧向导沙沙障流场演化规律研究[J].铁道科学与工程学报，2018，15(3)：621-628.
Xin Lingui, Cheng Jianjun, Zhang Zhiping, et al. Study on the characteristics of the flow field evolution of the lateral guide rail [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2018,15(3):621-628.

[3] 孙婧，李家园，王海龙，等.红一线新建地方铁路联合沙障结构参数优化研究[J].铁道科学与工程学报，2023，20(1)：145-155.
Sun Jing, Li Jiayuan, Wang Hailong, et al. Structural parameter optimization of combined sand barrier of new local railway for Hongyi line [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2023,20(1):145-155.

[4] Zhao Meng, A G, Zhang Jien, et al. Ecological restoration impact on total terrestrial water storage [J]. Nature Sustainability, 2021,4(1):56-62.

[5] Rey F, Bifulco C, Bischetti G B, et al. Soil and water bioengineering: Practice and research needs for reconciling natural hazard control and ecological restoration [J]. Science of the Total Environment, 2019,648:1210-1218.

[6] Xu Bin, Zhang Jie, Huang Ning, et al. Characteristics of turbulent aeolian sand movement over straw checkerboard barriers and formation mechanisms of their internal erosion form [J]. Journal of Geophysical Research (Atmospheres), 2018,123(13):6907-6919.

[7] Sarafrazi V, Talaee M R. Simulation of wall barrier properties along a railway track during a sandstorm [J]. Aeolian Research, 2020,46:100626.

[8] Cheng Jianjun, Xue Chunxiao. The sand-damage-prevention engineering system for the railway in the desert region of the Qinghai-Tibet plateau [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2014, 125:30-37.

[9] Xin Guowei, Zhang Jie, Fan Liqiang, et al. Numerical simulations and wind tunnel experiments to optimize the parameters of the second sand fence and prevent sand accumulation on the subgrade of a desert railway [J]. Sustainability, 2023,15(17):12761.

[10] 辛国伟，程建军，杨印海.铁路沿线挂板式沙障开孔特征与风沙流场的影响研究[J].铁道学报，2016，38(10)：99-107.
Xin Guowei, Cheng Jianjun, Yang Yinhai. Study on effect of characteristics of hanging-type concrete sand barrier opening and wind-sand field along railway [J]. Journal of the China Railway Society, 2016, 38(10): 99-107.

[11] Song Chunwei, Du Huishi. Spatial and temporal variations in the ecological vulnerability of northern China [J]. Journal of Sensors, 2022,2022(1):723830.

[12] 周智彬，徐新文，雷加强，等.咸水灌溉下塔里木沙漠公路防护林水分平衡研究[J].干旱区地理，2010，33(6)：904-908.
Zhou Zhibin, Xu Xinwen, Lei Jiaqiang, et al. Water balance and movement of Tarim Desert highway shelterbelt irrigated by saline water [J]. Arid Land Geography, 2010,33(6):904-908.

[13] Hu Haiying, Zhu Lin, Li Huixia, et al. Seasonal changes in the water-use strategies of three herbaceous species in a native desert steppe of Ningxia, China [J]. Journal of Arid Land, 2021,13(2):109-122.

[14] Hamitouche M, Fosser G, Anav A, et al. Impact of runoff schemes on global flow discharge: A comprehen-

sive analysis using the Noah-MP and CaMa-Flood models [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2025,29(5):1221-1240.

[15] Yi Jun, Li Huijie, Zhao Ying, et al. Assessing soil water balance to optimize irrigation schedules of flood-irrigated maize fields with different cultivation histories in the arid region [J]. Agricultural Water Management, 2022,265:107543.

[16] Shen Changsheng, Wang Guohua, Gou Qianqian. Dynamics of soil water, temperature, and salt and their coupled effects in *Haloxylon ammodendron* forests of different ages in an arid desert oasis ecotone [J]. Journal of Hydrology:Regional Studies, 2024,55:101965.

[17] Wu Yu, Zhou Hai, Zheng Xinjun, et al. Seasonal changes in the water use strategies of three co-occurring desert shrubs [J]. Hydrological Processes, 2014, 28(26):6265-6275.

[18] Wang Xudong, Xu Haojie, Pan Yanxia, et al. Forecasting ecological water demand of an arid oasis under a drying climate scenario based on deep learning methods [J]. Ecological Informatics, 2024,82:102721.

[19] 贾宝全,许英勤.干旱区生态用水的概念和分类:以新疆为例[J].干旱区地理,1998,21(2):8-12.
Jia Baoquan, Xu Yingqin. The conception of the eco-environmental water demand and its classification in arid land: Taking Xinjiang as an example [J]. Arid Land Geography, 1998,21(2):8-12.

[20] 王西琴,刘昌明,杨志峰.河道最小环境需水量确定方法及其应用研究:Ⅰ.理论[J].环境科学学报,2001,21(5):544-547.
Wang Xiqin, Liu Changming, Yang Zhifeng. Method of resolving lowest environmental water demands in river course: Ⅰ. Theory [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2001,21(5):544-547.

[21] 王芳,梁瑞驹,杨小柳,等.中国西北地区生态需水研究:Ⅰ.干旱半干旱地区生态需水理论分析[J].自然资源学报,2002,17(1):1-8.
Wang Fang, Liang Ruiju, Yang Xiaoliu, et al. A study of ecological water requirements in northwest China: Ⅰ. Theoretical analysis [J]. Journal of Natural Resources, 2002,17(1):1-8.

[22] Zhao Li, Li Wanjing, Yang Guang, et al. Moisture, temperature, and salinity of a typical desert plant (*Haloxylon ammodendron*) in an arid oasis of northwest China [J]. Sustainability, 2021,13(4):1908.

[23] 安桂香,曾凡江,孙旭伟,等.塔克拉玛干沙漠南缘不同植被区土壤水分状况研究[J].水土保持通报,2011,31(1):63-67.
An Guixiang, Zeng Fanjiang, Sun Xuwei, et al. Soil water conditions under various vegetations in southern fringe of Takelamakan Desert [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2011,31(1):63-67.

[24] 彭丽萍.基于氧稳定同位素的典型荒漠植物水分来源研究[D].新疆 乌鲁木齐:新疆大学,2019.
Peng Liping. Study on water sources of typical desert plants based on oxygen stable isotopes [D]. Urumqi, Xinjiang: Xinjiang University, 2019.

[25] 强玉泉,徐先英,张锦春,等.民勤青土湖梭梭茎干液流特征及其对环境因子的响应[J].干旱区研究,2022,39(4):1143-1154.
Qiang Yuquan, Xu Xianying, Zhang Jinchun, et al. Characteristics of stem sap flow of *Haloxylon ammodendron* and its response to environmental factors in Qingtu Lake, Minqin [J]. Arid Zone Research, 2022,39(4):1143-1154.

[26] 龙爱华,魏潇娜,张继,等.近16年来新疆内陆河区生态耗水及其变化分析[J].水利水电技术,2019,50(12):170-177.
Long Aihua, Wei Xiaona, Zhang Ji, et al. Analysis of ecological water consumption and its variation in inland river regions in Xinjiang in recent 16 years [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2019,50(12):170-177.

[27] 王辉.柴达木盆地生态用水研究[D].北京:北京林业大学,2017.
Wang Hui. Study on ecological water use in Qaidam Basin [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2017.

[28] 万艳芳.祁连山青海云杉林蒸腾特征及影响因素分析[D].甘肃 兰州:甘肃农业大学,2017.
Wan Yanfang. Characteristics of transpiration of *Picea crassifolia* forest and relevant factors analysis in the Qilian Mountains [D]. Lanzhou, Gansu: Gansu Agricultural University, 2017.

[29] Ehleringer J R, Phillips S L, Schwinning W, et al. Seasonal shifts in water source depth for desert woody plants: Evidence from isotopic measurements [J]. Journal of Hydrology, 2022,615:128-140.

[30] Xue Bing, Jiang Yan, Wang Qijie, et al. Seasonal transpiration dynamics and water use strategy of a farmland shelterbelt in Gurbantunggut Desert oasis, northwestern China [J]. Agricultural Water Management, 2024,295:108777.