

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2024.05.003

张旭东, 杨光, 赵允格, 等. 黄土高原水蚀风蚀交错区生物结皮对灌草生态系统水分耗散的影响[J]. 水土保持学报, 2024, 38(5).

ZHANG Xudong, YANG Guang, ZHAO Yunge, et al. Effects of biocrusts on water evapotranspiration of shrub-grass ecosystem in water-wind erosion crisscross region of loess plateau[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(5).

黄土高原水蚀风蚀交错区生物结皮对灌草生态系统水分耗散的影响

张旭东^{1,2}, 杨光³, 赵允格², 澹台彧^{1,2}, 刘宁², 鱼舜尧²

(1.西北农林科技大学资源环境学院, 陕西 杨凌 712100; 2.西北农林科技大学水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100; 3.吴起县气象局, 陕西 延安 717600)

摘要: [目的] 为研究生物结皮对灌草生态系统水分耗散的影响。[方法] 采用原状土柱试验, 以裸土为对照, 设置灌草(单株灌木—20%盖度草本)、灌草—30%生物结皮和灌草—50%生物结皮 3 个处理, 研究生物结皮对灌草生态系统水分耗散的影响。[结果] 模拟 30 mm 降水 12 h 后, 灌草—生物结皮处理 0—20 cm 土层水分含量较裸土处理平均提高 15.4%, 较灌草处理平均提高 12.8%。与裸土相比, 灌草及灌草与 2 个盖度生物结皮处理显著增加土壤水分耗散, 其中灌草处理较裸土增加 120.3%, 灌草—生物结皮较裸土平均增加 116.5%。生物结皮降低灌草生态系统的水分耗散。与灌草处理相比, 灌草—生物结皮水分耗散平均降低 1.7%, 降低程度与生物结皮盖度、时段及土层深度有关。其中, 灌草—50%生物结皮的水分耗散量较灌草—30%生物结皮处理降低 13.4%。生物结皮对灌草生态系统水分耗散的降低作用在雨后 1~4 天表现明显。生物结皮对灌草生态系统水分耗散的降低主要取决于 20—45 cm 土层耗散的降低。与灌草处理相比, 灌草—生物结皮的 0—20 cm 土层水分蒸散损耗平均提高 14.4%, 而 20 cm 以下土层水分耗散平均降低 15.5%。[结论] 30 mm 降雨量条件下生物结皮降低灌草生态系统的水分耗散, 有利于缓解风蚀水蚀交错区灌草植被的水分亏缺。研究揭示了生物结皮对灌草生态系统水分耗散影响, 为旱区生态恢复提供了理论依据。

关键词: 生物结皮; 灌草生态系统; 水分分布; 蒸散发; 土壤水分

中图分类号: 152.7 **文献标识码:** A

Effects of Biocrusts on Water Evapotranspiration of Shrub-Grass Ecosystem in Water-Wind Erosion Crisscross Region of Loess Plateau

ZHANG Xudong^{1,2}, YANG Guang³, ZHAO Yunge², TAN Taiyu^{1,2}, LIU Ning², YU Shunya²

(1. College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

3. Wuyi Meteorological Bureau, Yan'an, Shaanxi 717600, China)

Abstract: [Objective] To determine the effect of biological soil crusts (biocrusts) on water evapotranspiration of the shrub-grass ecosystem. [Methods] The effect of biocrusts on water evapotranspiration of the shrub-grass ecosystem in water-wind erosion crisscross region of Loess Plateau was investigated by using original soil columns of field condition. In the study, the bare soil column was used as control, and three treatments were set up. The three treatments were shrub-grass (single plant shrub-20% grass), shrub-grass—30% biocrusts and shrub-grass—50% biocrusts. [Results] The results showed that after 12 hours of simulated 30 mm precipitation infiltration, water content of 0—20 cm soil layer in the shrub-grass-biotic crust treatment was 15.4% higher than that in the bare soil treatment and 12.8% higher than that in the shrub-grass treatment. Compared with bare soil, soil water evapotranspiration of shrub-grass and shrub-grass with two

收稿日期: 2024-02-25 修回日期: 2024-03-29 录用日期: 2024-04-15

资助项目: 国家重点研发计划项目(2022YFF1300802); 国家自然科学基金项目(41830758, 42377357)

第一作者: 张旭东(1998—), 男, 在读硕士研究生, 主要从事生物结皮水文过程研究。E-mail: zhangxudong2021@yeah.net

通信作者: 赵允格(1971—), 女, 研究员, 博士生导师, 主要从事生物土壤结皮生态功能、退化修复研究。E-mail: zyunge@ms.iswc.ac.cn

<http://stbxb.alljournal.com.cn>

level of biocrusts' coverage significantly increased. Among them, soil water evapotranspiration of shrub-grass treatment increased by 120.3% compared to bare soil, while shrub-grass-biocrusts increased by 116.5% on average. Biocrusts reduced soil water evapotranspiration of the shrub-grass ecosystem. Compared with the shrub-grass treatment, soil water evapotranspiration of the shrub-grass-biocrusts decreased by 1.7% on average. The degree of reduction of evapotranspiration was related to the coverage of biocrusts, period and soil depth. Among them, the water evapotranspiration of shrub-grass-50% biocrusts was 13.4% lower than that of shrub-grass-30% biocrusts. The reduction of water evapotranspiration of shrub-grass ecosystem caused by biocrusts was obvious during the first 1~4 days after rain. The reduction of water evapotranspiration of shrub-grass ecosystem caused by biocrusts mainly related to the evapotranspiration of 20—45 cm soil layer. Compared with the shrub-grass treatment, the water evapotranspiration loss of the 0—20 cm soil layer of the shrub-grass-biocrust treatment increased by 14.4% on average, while the water dissipation below 20 cm decreased by 15.5% on average. [Conclusion] Under the condition of 30 mm rainfall, biocrusts reduced the water evapotranspiration of shrub-grass ecosystem, which may beneficial the water deficit of shrub-grass vegetation in the wind-water erosion crisscross area. The study provides a reference for revealing the effect of biocrusts on water evapotranspiration in shrub-grass ecosystems.

Keywords: biocrusts; shrub-grass ecosystem; water distribution; evapotranspiration; soil moisture

Received: 2024-02-25

Revised: 2024-03-29

Accepted: 2024-04-15

黄土高原大部分位于干旱半干旱地区,水资源匮乏,土壤水分是限制植物生长和生态恢复的关键因素。蒸散发是土壤水分损失的主要途径之一,主要受气象条件、土壤水分^[1]、植被等因素的综合影响^[2]。通常,生态系统的蒸散发随植被盖度的增加而增加^[3]。近年来,黄土高原地区由于退耕还林(草)工程的实施,植被明显恢复,据报道^[4],该区植被盖度已从退耕初期 2000 年的 27.4% 增加至 2019 年的 57.5%,成为该区土壤水分损失重要影响因素。准确评估植被恢复对黄土高原恢复生态系统的蒸散发的影响,对于区域土壤水文模拟、水资源承载力评估、植被建设与管理等均具有重要意义。

当前生态系统蒸散发的研究主要基于气象学(边界层湍流交换理论)、水文学(水量平衡理论)及水文学(空气动力与地表能量平衡理论)等方法,典型方法包括波文比法和涡动相关法^[5-6]。已有研究^[7-8]多基于上述方法在流域尺度上进行蒸散发的评估,认为目前黄土高原的人工植被土壤含水量已经接近该区土壤水分承载力的阈值。例如,SHAO 等^[9]发现,黄土高原退耕还林(草)工程实施后的 15 年间(2001—2015 年),蒸散发年均增加 4.39 mm,认为植被恢复是该区土壤水分损失的关键影响因素。然而,已有研究主要集中于植被盖度变化、降雨、温度等要素对生态系统蒸散发的影响,对于不同类型的地表覆盖对蒸散发的贡献尚不明确,妨碍了对现有植被的管理与植被恢复的科学搭配。

生物土壤结皮(biological soil crusts,简称生物结皮)是由生长于地表及表层土壤中的隐花植物,包括藻类、地衣类、苔藓类等光自养生物和土壤中的真菌、细菌、古细菌等以不同的占比与土壤矿质颗粒紧密结合而形成的复杂结构体^[10],在全球干旱半干旱地区广泛分布,平均盖度可达 40%,常分布于维管植物间隙^[11],是土壤与大气间的界面层,影响着土壤—大气间物质与能量交换,显著影响土壤水分入渗、分布、蒸发及径流等水文过程^[12]。研究^[13-14]表明,生物结皮影响土壤水分渗透性,导致土壤水分分布趋于浅层化,影响土壤水分蒸发等^[15-18]。例如,孙福海等^[14]研究表明,黄土高原的藓结皮降低了土壤渗透性,同时显著提高表层土壤的持水与供水能力。另一方面,生物结皮与高等维管束植被之间形成复杂的互馈关系^[19-23],通过影响土壤水分的剖面分布,影响灌木和草本植物的根系对土壤水分的吸收利用及蒸腾速率^[24]。但目前鲜有研究探索灌草生态系统中生物结皮对蒸散发的影响,特别是黄土高原退耕还林(草)区,生物结皮的盖度常高达 60%~70%,与灌草等维管束植物呈镶嵌式分布^[25],可能是生态系统蒸散发的重要影响因素。

为此,本文以生物结皮广泛分布的黄土高原水蚀风蚀交错区灌草生态系统为对象,采用原状土柱试验,以裸土为对照,研究不同盖度生物结皮对灌草生态系统蒸散发的影响,探讨不同盖度生物结皮对灌草生态系统蒸散发的影响及作用途径,以期完善生物结

皮对土壤水分平衡影响的研究,为当前生物结皮影响土壤水分蒸散发的争议提供科学解释。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究于2023年5—7月在位于陕西省榆林市神木市六道沟神木土壤侵蚀与环境试验站(110°21′—110°23′E, 38°46′—38°51′N)完成。六道沟小流域位于陕西省神木市以西14 km处,海拔1 094.0~1 273.9 m,夏天温暖湿润,年平均气温8.4℃,月平均温度最高达23.7℃(7月)。该流域气候变化剧烈,旱洪及沙尘暴灾害频繁,是典型的水蚀风蚀交错带和生态环境脆弱区^[26]。流域面积为6.9 km²,主沟道总长4.21 km,自南而北流入窟野河一级支流三道沟。年平均降水量为437.4 mm,主要集中在6—9月,占到全年降水量的77.4%左右。土壤类型主要有黄绵土、沙黄土和在沙地上发育起来的风沙土。该区自然植被大部分已遭破坏,人工恢复的植被占到较高比例。柠条(*Caragana korshinskii*)、沙蒿(*Artemisia desertorum*)是该流域分布范围较广的典型灌木(半灌木)物种,优势草本物种有长芒草(*Stipa bungeana*)、铁杆蒿(*Artemisia gmelinii*)和人工种植的紫花苜蓿(*Medicago sativa*)等。其中分布广泛的长芒草和柠条在该流域生态环境中有着比较重要的地位。近年来,随着退耕还林(草)工程的实施,生物结皮在该区大面积发育,平均盖度可达47.3%,以藻结皮和藓结皮为主^[27]。

1.2 试验设计

为明确生物结皮对灌草生态系统蒸散发的影响,试验以裸土为对照,设置灌草、灌草—30%生物结皮、灌草—50%生物结皮3个处理。其中,灌草处理中,草本盖度设置为20%,灌木为单株(表1),每个处理3个重复。灌木和草本选取研究区广泛分布的柠条和长芒草。生物结皮为藻藓混合结皮(藻藓盖度比为1:1),供试土壤类型为黄绵土,0—45 cm土层土壤平均容重为1.39 g/cm³。

试验原状土柱准备:原状土柱取样前于PVC管(外径40 cm,高度45 cm)对称侧边上开孔,位置分别为距PVC管上沿10, 20, 30, 40 cm,后用泡沫封盖,胶带密封。利用便携式水分速测仪在预留孔进行原状土柱水分剖面分布观测。

原状土柱取样于2023年5月初进行。在六道沟小流域选取地势较平坦的黄土区柠条林,选取大小均一且有生物结皮(藻藓混合)覆盖的柠条(单株),采集其原状土柱于PVC(土柱高40 cm)管中。同时在采

样点附近挖取大小均一的长芒草移栽于原状土柱内,采集藻藓混合的生物结皮,对不符合生物结皮盖度的处理进行补充,最后称重得到原状土柱初始重量。原状土柱采集的同时,采集各土柱采样点临近处0—5, 8—13, 18—23, 28—33, 38—43 cm土层环刀样,2个重复,测定原状土柱初始含水量。原状土柱采集完成后,统一摆放于陕西神木侵蚀与环境国家野外科学观测研究站附近地势开阔的平地。在土柱土面与管壁接触处涂抹凡士林,以减少边壁效应带来的试验误差,然后进行遮阴和浇水养护。试验前通过称重计算各原状土柱含水量,根据各土柱中土壤实际含水量,通过浇水将土壤含水量统一调整至0.193 cm³/cm³,即相当于30 mm降水后的0—45 cm土层的土壤平均含水量,浇水时一次性灌入管内,使其自然入渗。试验过程中为避免自然降雨的影响,降雨时用移动遮雨棚进行遮盖。

表1 试验前草本盖度、灌木分枝数、平均基径及平均高度

Table 1 Coverage of grass, branch number, average basal diameter and average height of shrubs before experiment

处理	草本盖度/%	灌木分枝数	灌木基径/mm	灌木平均高度/cm
裸土	—	—	—	—
灌草	20.07±1.19a	5.66±1.33ab	6.20±1.21a	38.70±1.50a
灌草—30%BSC	21.20±0.38a	8.00±0.58a	4.80±0.29a	37.50±4.57a
灌草—50%BSC	21.27±1.23a	4.67±0.33b	6.54±0.48a	39.93±8.16a

注:表中数据为平均值±标准差;同列不同字母表示不同处理间差异显著($p < 0.1$)。下同。

1.3 研究指标与测定方法

1.3.1 土壤含水量与日蒸散量测定 于2023年6月30日至7月19日通过称重(电子秤量程150 kg,精确到0.001 kg)进行土壤水分与蒸散量测定,土壤含水量与日蒸散量均根据每日称重进行计算。

$$WC = (m_t - m_0 + m_w) / V \times 100\% \quad (1)$$

$$ET = (m_{t-1} - m_t) / (\rho_w \times S) \times 10 \quad (2)$$

式中:WC为土壤体积含水量(%); m_t 为第 t 天原状土柱重量(g); m_0 为初始重量(g); m_w 原状土柱初始含水量质量(g); V 为原状土柱内土体体积(cm³); ET 为日蒸散量(mm); m_{t-1} 为前一天原状土柱重量(g); ρ_w 为水的密度(g/cm³); S 为原状土柱内土体面积(cm²)。

1.3.2 土壤水分剖面分布测定 于2023年6月30日和7月19日每天利用便携式水分速测仪(ML3, Delta-T Devices)在预留孔位进行测定原状土柱剖面水分。

1.3.3 植物地上生物量测定 试验完成结束时量取

灌木基径和高度(表 2),后剪取草本及灌木地上部并在 85 °C 下杀青,65 °C 烘干至恒重。

表 2 试验后草本盖度、草本生物量、灌木生物量、灌木分枝数、平均基径及平均高度

Table 2 Coverage and biomass of grass, biomass, branch number, average basal diameter and average height of shrub after experiment

处理	草本盖度/%	草本生物量/ (g · m ⁻²)	灌木生物量/ (g · m ⁻²)	灌木分枝数	灌木 基径/mm	灌木平均 高度/cm
裸土	—	—	—	—	—	—
灌草	20.47±1.21a	94.21±5.63a	231.23±24.46a	5.66±1.33ab	6.21±1.21a	39.46±1.61a
灌草-30%生物结皮	21.90±0.38a	103.74±1.39a	267.98±33.55a	8.00±0.58a	4.82±0.28a	38.03±4.60a
灌草-50%生物结皮	21.87±1.26a	127.88±26.88a	286.38±9.34a	4.67±0.33b	6.55±0.49a	41.70±7.42a

1.3.4 单位生物量蒸散速率 为对比高含水量条件与低含水量条件及蒸散发过程中生物结皮盖度对灌草生态系统蒸散发速率的影响,分别计算试验 1~4, 16~20, 1~20 天各生物结皮盖度下单位生物量灌草蒸散发速率。计算公式为:

$$V = ET_{GB}/d(m_G + m_B) \quad (3)$$

式中:ET_{GB}为灌草及灌草-生物结皮处理蒸散发量(mm);m_G为草本地地上部干重(g);m_B为灌木地上部干重(g);V为灌草生态系统中单位生物量灌草蒸散发速率[mm/(g · d)];d为蒸散发天数(天)。

1.4 数据处理

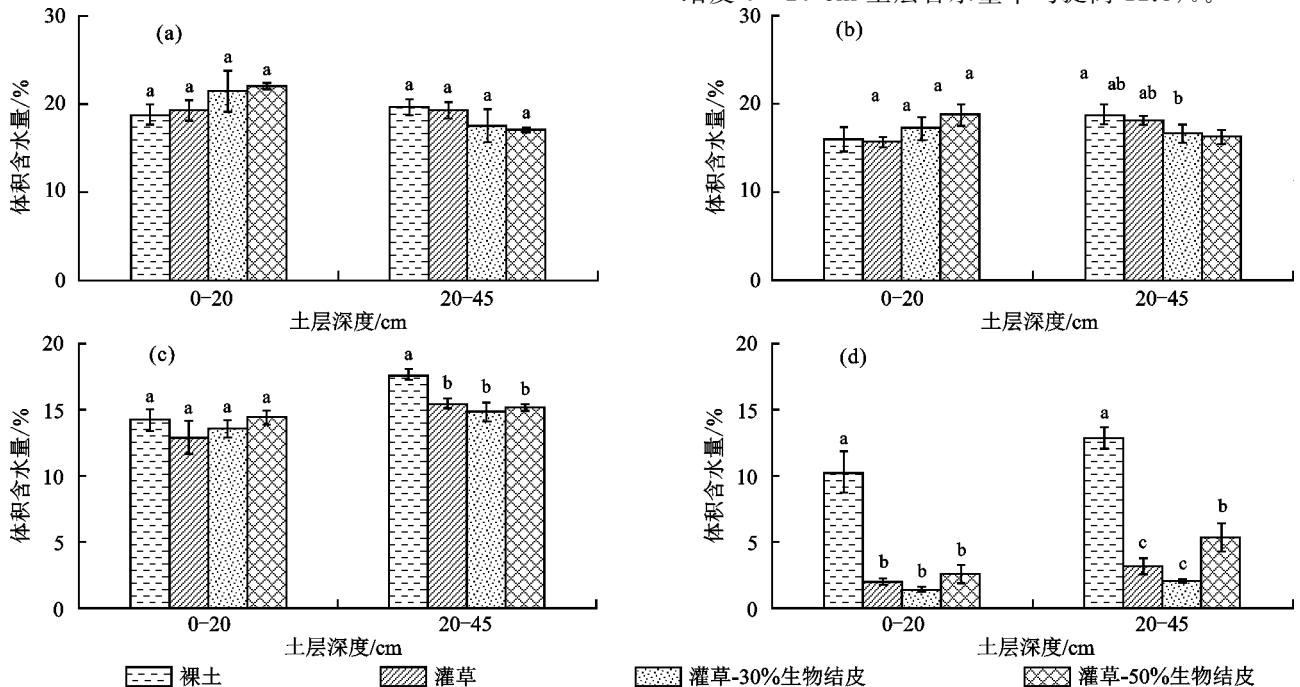
采用 SPSS 25.0 软件对灌木、草本生物量、蒸散量、蒸散速率及土壤含水量等数据进行正态分布检

验,采用单因素方差分析(one-way ANOVA)和 LSD 法对灌木、草本生物量、蒸散量、蒸散速率及土壤含水量进行多重比较(α=0.1)。使用 Origin 2021 软件绘制图形。数据结果表示为平均值±标准误。

2 结果与分析

2.1 生物结皮对灌草生态系统土壤水分剖面分布的影响

4 个处理的土壤水分剖面分布动态见图 1。在试验开始 0.5 天后(图 1a),与裸土相比,灌草、灌草-30%生物结皮、灌草-50%生物结皮处理 0—20 cm 土层含水量分别提高 2.4%,13.9%,17.0%。20—45 cm 土层含水量则分别降低 1.8%,10.7%,13.1%,不同处理间无显著差异。与灌草处理相比,灌草-生物结皮 0—20 cm 土层含水量平均提高 12.8%。



注:图(a)、(b)、(c)和(d)分别为浇水后 0.5、1、4、20 天;图柱上方不同小写字母表示同一土层深度不同处理间差异显著($p < 0.1$)。

图 1 试验期间各处理不同时期的土层含水量

Fig. 1 Soil water content of each treatment in different periods during the experiment

试验 1 天后(图 1b),4 个处理的含水量均有下降。其中,灌草处理的 0—20 cm 土层含水量低于裸土处理,灌草-50%生物结皮处理的 20—45 cm 土层含水量显著低于裸土处理。试验 4 天后(图 1c),仅

灌草-50%生物结皮处理的 0—20 cm 土层含水量高于裸土处理,而灌草、灌草-生物结皮处理的 20—45 cm 土层含水量均显著低于裸土处理。

试验 20 天后(图 1d),灌草和灌草-生物结皮处理

的土层含水量均显著低于裸土处理。与灌草处理的 0—20 cm 土层相比,灌草—30%生物结皮处理土壤含水量降低 29.6%,灌草—50%生物结皮处理则提高 27.9%,处理间无显著差异。与灌草处理 20—45 cm 土层含水量相比,灌草—30%生物结皮处理降低 35.1%,灌草—50%生物结皮处理则显著提高 68.2%。

综上,生物结皮在水分入渗时提高 0—20 cm 土层含水量,并随生物结皮盖度的提高有增加趋势。在蒸散过程灌草—50%生物结皮对 20—45 cm 土层含水量具有较好保持作用,并在蒸散 20 天后与灌草处理差异显著。

2.2 生物结皮对灌草生态系统蒸散过程的影响

从图 2 可以看出,4 个处理的累积蒸散过程变化均由快速增长后趋于平缓。在蒸散 20 天后,与裸土处理相比,灌草、灌草—30%生物结皮、灌草—50%生物结皮处理的累积蒸散量分别显著提高 120.3%, 132.0%, 101.0%。与灌草处理相比,灌草—生物结皮处理的累积蒸散量降低 1.7%。灌草—50%生物结皮的累积蒸散量较灌草—30%生物结皮处理显著降低 13.4%。可见,在灌草生态系统中,生物结皮引起的蒸散发变化受到生物结皮盖度的显著影响,并在 50%生物结皮盖度条件下可以有效降低灌草生态系统的蒸散发。

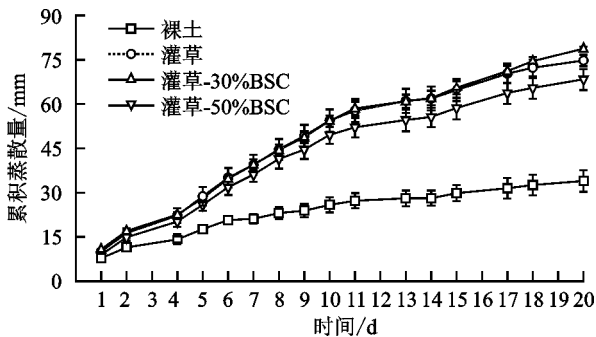
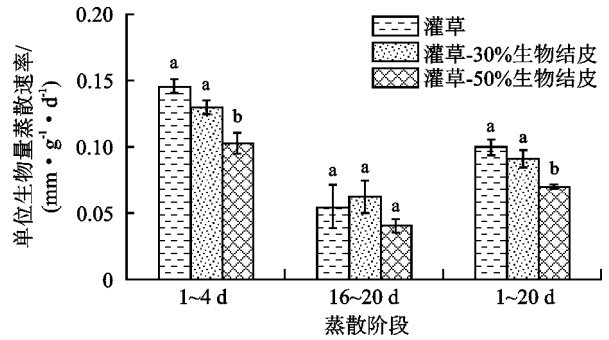


图 2 不同处理的累积蒸散量动态

Fig. 2 Accumulated evapotranspiration dynamics of different treatments

2.3 生物结皮对灌草生态系统蒸散速率的影响

为了进一步解析生物结皮对灌草生态系统蒸散速率的影响,用单位生物量蒸散速率做对比,以消除处理间灌木和草本生物量不同带来的影响(图 3)。在蒸散较快的 1~4 天,与灌草处理相比,灌草—30%生物结皮处理的单位生物量蒸散速率降低 11.0%,灌草—50%生物结皮处理的单位生物量蒸散速率显著降低 29.6%。与灌草—30%生物结皮处理相比,灌草—50%生物结皮处理的单位生物量蒸散速率显著降低 20.9%。



注:图柱上方不同小写字母表示同一蒸散阶段不同处理间差异显著($p < 0.1$)。

图 3 各处理在不同蒸散阶段的单位生物量蒸散速率

Fig. 3 Evapotranspiration rate per unit biomass of each treatment at different evapotranspiration stages

在蒸散较慢的 16~20 天,与灌草处理相比,灌草—30%生物结皮处理的单位生物量蒸散速率提高 13.7%,灌草—50%生物结皮处理的单位生物量蒸散速率降低 26.6%,处理间无显著差异。

在蒸散 1~20 天,与灌草处理相比,灌草—30%生物结皮处理的单位生物量蒸散速率降低 8.6%,灌草—50%生物结皮处理的单位生物量蒸散速率显著降低 29.3%。与灌草—30%生物结皮处理相比,灌草—50%生物结皮处理的单位生物量蒸散速率显著降低 23.2%。

可见生物结皮可以有效降低灌草生态系统的蒸散速率。降低作用随生物结皮盖度提高而加强,随蒸散速率的降低而下降。

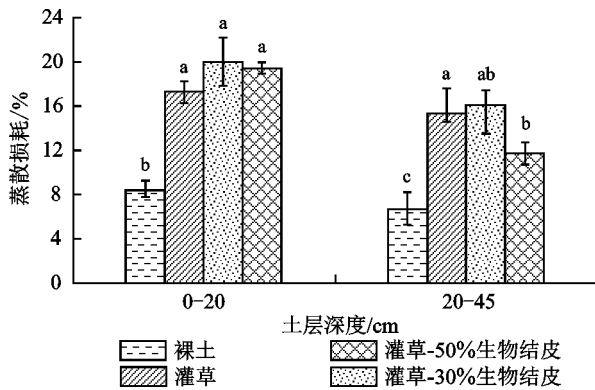
2.4 生物结皮对灌草生态系统不同土层水分蒸散损耗的影响

不同深度土壤水分的耗散受土壤水分及其剖面分布、地表覆盖类型、植被根系分布等的影响。由图 4 可知,在 0—20 cm 土层,灌草和灌草—生物结皮处理的水分蒸散损耗均显著高于裸土处理。与灌草处理相比,灌草—生物结皮处理的 0—20 cm 土层水分蒸散损耗平均提高 14.4%,处理间无显著差异。

在 20—45 cm 土层,灌草和灌草—生物结皮处理的水分蒸散损耗均显著高于裸土处理。与灌草处理相比,灌草—生物结皮处理的 20—45 cm 土层水分蒸散损耗平均降低 15.5%,其中灌草—50%生物结皮与灌草处理显著差异。与灌草—30%生物结皮处理相比,灌草—50%生物结皮处理的 20—45 cm 土层水分蒸散损耗显著降低 24.2%。

综上,与灌草处理相比,生物结皮提高灌草生态系统 0—20 cm 土层水分蒸散损耗,降低灌草生态系统 20—45 cm 土层水分蒸散损耗,下层的降低作用大于上层的提高作用,且降低程度随生物结皮盖度提高

有增加趋势,因此,综合表现生物结皮降低灌草生态系统水分蒸散损耗。



注:图柱上方不同小写字母表示同一土层深度不同处理间差异显著($p < 0.1$)。

图 4 不同处理的各土层水分蒸散损耗

Fig. 4 Evapotranspiration loss of each soil layer under different treatments

3 讨论

3.1 生物结皮对土壤水分分布的影响

生物结皮作为黄土高原地区退耕地重要的地表覆盖,对土壤水循环过程具有十分重要的作用^[11],但目前有关生物结皮对生态系统水分蒸散发的影响仍不清楚。本研究结果表明,生物结皮在水分入渗过程中提高 0—20 cm 土层土壤水分,在蒸散过程中则对下层水分有较好的保持作用。上层的高含水量条件可能会促进蒸发,同时影响植被的水分利用。试验开始时,0—20 cm 土壤含水量大小分别为灌草—50%生物结皮>灌草—30%生物结皮>灌草>裸土,表明生物结皮影响土壤水分的分布,提高浅层土壤含水量,这主要是因为生物结皮通过分泌胞外多糖等化学物质,堵塞土壤孔隙^[14,28],同时通过增加地表粗糙度的方式更多地捕获降尘,增加土壤表层细颗粒含量,降低土壤非毛管孔隙度,导致土壤渗透性的下降^[14],在浅层保持更多水分,这与前人^[29-31]的研究结果一致。有研究^[18,20]表明,藓结皮覆盖表层土壤后的饱和含水率较无结皮高 10.4%,藓结皮的发育可以有效改善土壤的理化性质,提高土壤水分常数,使土壤表层具有更好的持水和供水能力。本试验结束时灌草—50%生物结皮处理的 20—45 cm 土层的含水量较灌草提高 68.2%,灌草—生物结皮较灌草提高 16.5%,与 ELDRIDGE 等^[32]的研究结果一致,表明生物结皮有利与灌草生态系统的下层土壤水分的保持。

3.2 生物结皮对灌草生态系统蒸散发的影响

蒸散发是影响土壤水分收支平衡的重要因素。生物结皮通过对土壤表层的质地、孔隙度、有机质等的改变,进而影响土壤水分运动^[15]。在本研究中,4

个处理 1~20 天日蒸散发速率范围在 1.70~3.94 mm/d,与马启民等^[33]在鄂尔多斯沙地人工柠条林的生长季日蒸散发速率(0.10~4.00 mm/d)研究结果一致。生物结皮对灌草生态系统不同土层水分蒸散损失的表现不同,在 0—20 cm 土层表现为促进,20—45 cm 土层表现为抑制。这可能是由于浇水后生物结皮保持更多的水分在 0—20 cm 土层,表层土壤较高的含水量使土壤表面具有较大的水汽压梯度差^[17],从而具有更高的蒸发潜力,提高 0—20 cm 的蒸散量;而蒸散过程中土壤表层含水量的下降,使土壤水分扩散主要以水汽运动和土壤颗粒吸湿的方式为主^[34],土表覆盖的生物结皮具有较高的粉粒和黏粒含量^[15],进而增加土壤对水分的保持作用,抑制土壤水分的扩散作用^[32],从而降低土壤水分的蒸散发损失。

通过比较各处理蒸散发量,表明不同盖度的生物结皮对灌草生态系统的蒸散发表现出不同的作用。在通过对比单位生物量灌草的蒸散发速率,平衡生物量带来的影响后,30%生物结皮和 50%生物结皮均降低灌草生态系统的单位生物量蒸散发速率。对比不同土层的土壤含水量损失可见,生物结皮主要是通过减少下层土壤水分的损失降低蒸散发量与蒸散发速率。有部分学者^[35-36]研究结果认为生物结皮促进蒸发,这可能是由于蒸发土柱高度过低(≤ 30 cm)导致,这与本研究 0—20 cm 土层的蒸散发一致。此外,不同的土壤质地、生物结皮类型、试验方法、维管束植被等也会导致不同的试验结果。在本研究中,生物结皮降低灌草生态系统的蒸散发。其主要原因可能为:(1)不同于生物结皮单独覆盖,灌草植被促进土壤水分入渗^[37],削弱生物结皮的土壤水分浅层化,进而减小土壤表面的水汽压梯度差,降低蒸发潜力。(2)由于灌草生长的耗水,使浅层土壤水分减小,生物结皮层更有效的抑制土壤水分的扩散^[14],从而降低土壤水分的蒸发。(3)灌草覆盖为生物结皮提供遮挡,减少生物结皮由于失水失活后颜色加深而对辐射的吸收,进而减缓土壤温度的上升^[38],土壤水分的蒸散损失也随之减小。(4)由于生物结皮对蒸散发的控制,灌草生态系统在蒸散发过程中有更高的含水量和更高的土壤热容量,显热通量增大,潜热通量减小,土壤蒸发力受限^[38]。在毛乌素沙地的研究^[31]结果表明,生物结皮通过抑制蒸发减缓油蒿的水分胁迫,在其单独覆盖时,在干旱和湿润年份分别表现出土壤水分亏缺和水分盈余^[15]。因此,生物结皮对蒸散发的影响也受到灌草植被和土壤含水量(降雨量)的重要影响,这解释了影响生物结皮调节蒸散发的两大因素。以上分析表明,生物结皮虽然可能增加上层土壤水分含

量,一定程度上增加灌草生态系统上层土壤的蒸散发,但其对下层土壤水分的保持作用强于对上层土壤水分的消耗作用,从而降低总体蒸散发。本研究结果首次证实生物结皮可通过影响灌草生态系统水分蒸散发进而影响区域土壤水分平衡,对正确评价退耕还林(草)生态工程的土壤水分效应具有重要意义。

然而,本研究区小降雨量事件多发,本研究重点关注 30 mm 中等降雨条件下生物结皮对灌草生态系统的蒸散发的影响,但不同降雨量导致土壤水分剖面分布的不同,可能导致生物结皮对灌草生态系统的蒸散发影响出现差异。因此,考虑以上情况,不同降雨量条件下生物结皮对土壤水分蒸散发的影响仍是有待明确的问题。

4 结论

(1)生物结皮使灌草生态系统在水分入渗时截留更多水分在 0—20 cm 土层,截留作用随生物结皮盖度增加呈增加趋势。

(2)生物结皮降低灌草生态系统蒸散量与蒸散速率,对蒸散速率的降低作用随生物结皮盖度提高而加强,随蒸散速率的下降而降低。

(3)生物结皮主要通过降低 20—45 cm 土层的水分蒸散损耗来降低灌草生态系统的蒸散损耗。与灌草处理相比,灌草—生物结皮处理的蒸散损耗降低 1.7%,灌草—生物结皮处理在 20—45 cm 土层的蒸散损耗降低 15.5%。

参考文献:

- [1] JUNG M, REICHSTEIN M, CIAIS P, et al. Recent decline in the global land evapotranspiration trend due to limited moisture supply[J]. *Nature*, 2010, 467(7318): 951-954.
- [2] SCHLESINGER W H, JASECHKO S. Transpiration in the global water cycle[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2014, 189: 115-117.
- [3] CHEN Y P, WANG K B, LIN Y S, et al. Balancing green and grain trade[J]. *Nature Geoscience*, 2015, 8: 739-741.
- [4] SONG Y, WANG Y Q, JIN L, et al. Quantitative contribution of the Grain for Green project to vegetation greening and its spatiotemporal variation across the Chinese Loess Plateau[J]. *Land Degradation and Development*, 2022, 33(11): 1878-1891.
- [5] WANG K C, DICKINSON R E. A review of global terrestrial evapotranspiration: Observation, modeling, climatology, and climatic variability[J]. *Reviews of Geophysics*, 2012, 50(2): eRG2005.
- [6] LIU Y B, QIU G Y, ZHANG H S, et al. Shifting from homogeneous to heterogeneous surfaces in estimating terrestrial evapotranspiration: Review and perspectives [J]. *Science China Earth Sciences*, 2022, 65(2): 197-214.
- [7] 邓景成,高鹏,穆兴民,等.黄土高原退耕还林工程对生态环境的影响及对策建议[J]. *水土保持研究*, 2017, 24(5): 63-68.
- [7] DENG J C, GAO P, MU X M, et al. Impacts and advice of the grain for green project to ecological environment on the Loess Plateau[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2017, 24(5): 63-68.
- [8] FENG X M, FU B J, PIAO S L, et al. Revegetation in China's Loess Plateau is approaching sustainable water resource limits [J]. *Nature Climate Change*, 2016, 6: 1019-1022.
- [9] SHAO R, ZHANG B Q, SU T X, et al. Estimating the increase in regional evaporative water consumption as a result of vegetation restoration over the Loess Plateau, China [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2019, 124(22): 11783-11802.
- [10] WEBER B, BELNAP J, BÜDEL B, et al. What is a biocrust: A refined, contemporary definition for a broadening research community [J]. *Biological Reviews*, 2022, 97(5): 1768-1785.
- [11] 赵允格,许明祥,王全九,等.黄土丘陵区退耕地生物结皮对土壤理化性状的影响[J]. *自然资源学报*, 2006, 21(3): 441-448.
- [11] ZHAO Y G, XU M X, WANG Q J, et al. Impact of biological soil crust on soil physical and chemical properties of rehabilitated grassland in hilly Loess Plateau, China [J]. *Journal of Natural Resources*, 2006, 21(3): 441-448.
- [12] BELNAP J, WILCOX B P, VAN SCOYOC M W, et al. Successional stage of biological soil crusts: An accurate indicator of ecohydrological condition [J]. *Ecohydrology*, 2013, 6(3): 474-482.
- [13] XIAO B, SUN F H, HU K L, et al. Biocrusts reduce surface soil infiltrability and impede soil water infiltration under tension and ponding conditions in dryland ecosystem [J]. *Journal of Hydrology*, 2019, 568: 792-802.
- [14] 孙福海,肖波,李胜龙,等.黄土高原藓类生物结皮对表层土壤水分运动参数的影响[J]. *农业工程学报*, 2021, 37(14): 79-88.
- [14] SUN F H, XIAO B, LI S L, et al. Effects of moss-dominated biocrusts on surface soil-water movement parameters in the Chinese Loess Plateau [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2021, 37(14): 79-88.
- [15] 岳艳鹏,成龙,孙迎涛,等.毛乌素沙地生物结皮覆盖区土壤水分收支变化特征[J]. *应用生态学报*, 2022, 33(7): 1861-1870.
- [15] YUE Y P, CHENG L, SUN Y T, et al. Changes of

- soil water budget in the area covered by biological soil crusts in Mu Us sandy land, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2022, 33(7): 1861-1870.
- [16] 石薇, 王新平, 张亚峰. 腾格里沙漠人工固沙植被区浅层土壤水分对降水和生物结皮的响应[J]. 中国沙漠, 2018, 38(3): 600-609.
- SHI W, WANG X P, ZHANG Y F. Response of soil moisture in shallow depth to stochastic rainfall and biological crust in revegetated sand dunes in the tengger desert, China[J]. Journal of Desert Research, 2018, 38(3): 600-609.
- [17] 周丽芳, 阿拉木萨. 生物结皮发育对地表蒸发过程影响机理研究[J]. 干旱区资源与环境, 2011, 25(4): 193-200.
- ZHOU L F, A L. Influence mechanism of development of biological soil crust on evaporation process[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2011, 25(4): 193-200.
- [18] LI S L, BOWKER M, XIAO B. Biocrust impacts on dryland soil water balance: A path towards the whole picture[J]. Global change biology, 2022, 28(21): 6462-6481.
- [19] GYPSER S, VESTE M, FISCHER T, et al. Infiltration and water retention of biological soil crusts on reclaimed soils of former open-cast lignite mining sites in Brandenburg, north-east Germany[J]. Journal of Hydrology and Hydromechanics, 2016, 64(1): 1-11.
- [20] SUN J Y, LI X R. Role of shrubs in the community assembly of biocrusts: The biotic and abiotic influences along a biocrust succession gradient[J]. Plant and Soil, 2021, 460(1): 163-176.
- [21] ZHANG S J, ZHANG Q, LI Y G, et al. Shrubs have a greater influence on the nonstructural carbohydrates of desert mosses along precipitation decreased[J]. Environmental and Experimental Botany, 2023, 216: e105530.
- [22] YADAV P, SINGH R P, HASHEM A, et al. Enhancing biocrust development and plant growth through inoculation of desiccation-tolerant cyanobacteria in different textured soils[J]. Microorganisms, 2023, 11(10): e2507.
- [23] 李新荣, 谭会娟, 回嵘, 等. 中国荒漠与沙地生物土壤结皮研究[J]. 科学通报, 2018, 63(23): 2320-2334.
- LI X R, TAN H J, HUI R, et al. Researches in biological soil crust of China: A review[J]. Chinese Science Bulletin, 2018, 63(23): 2320-2334.
- [24] CHEN N, WANG X P, ZHANG Y F, et al. Ecohydrological effects of biological soil crust on the vegetation dynamics of restoration in a dryland ecosystem[J]. Journal of Hydrology, 2018, 563: 1068-1077.
- [25] 王一贺, 赵允格, 李林, 等. 黄土高原不同降雨量带退耕地植被-生物结皮的分布格局[J]. 生态学报, 2016, 36(2): 377-386.
- WANG Y H, ZHAO Y G, LI L, et al. Distribution patterns and spatial variability of vegetation and biocrusts in revegetated lands in different rainfall zones of the Loess Plateau Region, China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(2): 377-386.
- [26] 查轩, 唐克丽. 水蚀风蚀交错带小流域生态环境综合治理模式研究[J]. 自然资源学报, 2000, 15(1): 97-100.
- ZHA X, TANG K L. Study on comprehensive control model of small watershed eco environment in water and wind crisscrossed erosion zone[J]. Journal of Natural Resources, 2000, 15(1): 97-100.
- [27] 赵允格, 吉静怡, 张万涛, 等. 黄土高原生物土壤结皮分布时空分异特征[J/OL]. 应用生态学报, 1-13[2024-03-28]. <https://doi.org/10.13287/j.1001-9332.202403.011>.
- ZHAO Y G, JI J Y, ZHANG W T, et al. Characteristics of spatial and temporal variability in the distribution of biological soil crusts on the Loess Plateau, China[J/OL]. Chinese Journal of Applied Ecology, 1-13[2024-03-28]. <https://doi.org/10.13287/j.1001-9332.202403.011>.
- [28] FISCHER T, VESTE M, WIEHE W, et al. Water repellency and pore clogging at early successional stages of microbiotic crusts on Inland Dunes, Brandenburg, NE Germany[J]. Catena, 2010, 80(1): 47-52.
- [29] SHI W, WANG X P, ZHANG Y F, et al. The effect of biological soil crusts on soil moisture dynamics under different rainfall conditions in the Tengger Desert, China[J]. Hydrological Processes, 2018, 32(10): 1363-1374.
- [30] KIDRON J G, BÜDEL B. Contrasting hydrological response of coastal and desert biocrusts[J]. Hydrological Processes, 2014, 28(2): 361-371.
- [31] 关红杰. 毛乌素沙地生物土壤结皮对油蒿水分吸收的影响模拟[J]. 生态学报, 2023, 43(14): 5875-5889.
- GUAN H J. Biocrust effects on root water uptake of shrubs in the MU Us Desert[J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(14): 5875-5889.
- [32] ELDRIDGE D J, REED S C, TRAVERS S K, et al. The pervasive and multifaceted influence of biocrusts on water in the world's drylands[J]. Global Change Biology, 2020, 26(10): 6003-6014.
- [33] 马启民, 李永山, 王海兵, 等. 鄂尔多斯沙地人工柠条林能量平衡与蒸散研究[J]. 高原气象, 2022, 41(6): 1511-1521.
- MA Q M, LI Y S, WANG H B, et al. Study on energy balance and evapotranspiration of an artificial *Caragana korshinskii* shrub land in Ordos Plateau[J]. Plateau Meteorology, 2022, 41(6): 1511-1521.
- [34] 邓建才, 卢信, 陈效民, 等. 封丘地区土壤水分扩散率的研究[J]. 土壤通报, 2005, 36(3): 317-320.

- DENG J C, LU X, CHEN X M, et al. Soil moisture diffusivity in fengqu region[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2005, 36(3): 317-320.
- [35] 刘立超, 李守中, 宋耀选, 等. 沙坡头人工植被区微生物结皮对地表蒸发影响的试验研究[J]. 中国沙漠, 2005, 25(2): 191-195.
- LIU L C, LI S Z, SONG Y X, et al. Effect of microbiotic crust on evaporation process in vegetated area in Shapotou Region[J]. Journal of Desert Research, 2005, 25(2): 191-195.
- [36] 张志山, 何明珠, 谭会娟, 等. 沙漠人工植被区生物结皮类土壤的蒸发特性: 以沙坡头沙漠研究试验站为例[J]. 土壤学报, 2007, 44(3): 404-410.
- ZHANG Z S, HE M Z, TAN H J, et al. Evaporation from soils covered with biological crusts in revegetated desert: A case study in Shapotou Desert research and experiment station[J]. Acta Pedologica Sinica, 2007, 44(3): 404-410.
- [37] 淡晨希, 张琼, 刘畅, 等. 生物结皮与草本植物共生坡面的产流-入渗过程特征[J]. 应用生态学报, 2022, 33(7): 1853-1860.
- DAN C X, ZHANG Q, LIU C, et al. Characteristics of runoff and infiltration processes on slope with intergrown biocrusts and herbs[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2022, 33(7): 1853-1860.
- [38] 祝晨佳, 高吉喜. 土壤蒸发影响因素及抑制途径研究综述[J/OL]. 环境保护科学, 1-11[2024-03-27]. doi.org/10.16803/j.cnki.issn.1004-6216.202305026.
- ZHU C J, GAO J X. A review of the factors affecting soil evaporation and its inhibition methods[J/OL]. Environmental Protection Science, 1-11[2024-03-27]. doi.org/10.16803/j.cnki.issn.1004-6216.202305026.