

矿山废弃地人工草地调亏灌溉试验研究

荣浩^{1,2}, 阿比亚斯^{1,2}, 珊丹^{1,2}, 张铁钢^{1,2}, 葛楠^{1,2}

(1.中国水利水电科学研究院 内蒙古阴山北麓草原生态水文国家野外科学
观测研究站, 北京 100038; 2.水利部 牧区水利科学研究所, 内蒙古 呼和浩特 010020)

摘要: [目的] 以草原矿产资源开发形成的排土场为研究对象, 研究不同调亏灌溉处理排土场边坡人工栽培牧草生长状况、土壤含水率和坡面侵蚀的变化, 为完善草原矿区废弃地植被恢复灌溉技术提供科学依据。[方法] 设置 5 种调亏灌溉处理, 以充分灌溉为对照(CK), 通过对比试验分析不同调亏灌溉处理对边坡人工牧草群落总盖度、地上生物量、坡面径流及水分利用效率的影响, 采用秩和比法确定废弃地边坡人工草地最佳补水方案。[结果] 草原矿区废弃地边坡人工草地建设过程中, 随着亏水程度的加重, 植物生长发育受到限制, 当土壤含水率在土壤田间持水率的 45% 以下时, 植物地上生物量和群落盖度下降明显 ($p < 0.05$); 植物生长初期, 坡面产沙量和径流量随着灌水量的增加显著增加 ($p < 0.05$), 快速生长期和生长旺盛期各处理之间的产沙量、径流量变化不明显; 对比各灌溉处理水平, 轻度、中度调亏灌溉(土壤水分含量分别达到土壤田间持水率的 55%, 45% 时)水分利用效率较高。[结论] 人工草地建植效果、蓄水保土能力、灌溉水利用效率综合评价结果表明, 轻度调亏灌溉(土壤水分含量达到土壤田间持水率的 55%) 在人工草地建植效果与水分利用效率方面结合较好, 水土流失防控效果明显, 可作为草原区矿山废弃地建设人工草地主要节水灌溉模式优先选择。

关键词: 废弃地; 灌水量; 水分利用效率; 矿区

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2022)06-0054-07

中图分类号: S275.6

文献参数: 荣浩, 阿比亚斯, 珊丹, 等. 矿山废弃地人工草地调亏灌溉试验研究[J]. 水土保持通报, 2022, 42(6): 54-60. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.20220929.003; Rong Hao, Abiyasi, Shan Dan, et al. Regulated deficit irrigation of artificial grassland on abandoned land in a mining area [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(6): 54-60.

Regulated Deficit Irrigation of Artificial Grassland on Abandoned Land in a Mining Area

Rong Hao^{1,2}, Abiyasi^{1,2}, Shan Dan^{1,2}, Zhang Tiegang^{1,2}, Ge Nan^{1,2}

(1. *Yinshanbeilu Grassland Eco-hydrology National Observation and Research Station, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China*;

2. *Institute of Water Resources for Pastoral Area Ministry of Water Resources, Hohhot, Inner Mongolia 010020, China*)

Abstract: [Objective] The changes in plant growth, soil moisture content, and slope erosion on the slope of a dump field formed by the development of grassland mineral resources under different regulated deficit irrigation treatments were determined in order to provide a scientific basis for the implementation of restoration irrigation technology. [Methods] Five regulated deficit irrigation treatments were set up, and full irrigation was used as the control. The rank sum ratio method was used to determine the best water replenishment scheme for artificial grassland on abandoned land slopes. [Results] As water deficit increased, the growth and development of plants of an artificial grassland on abandoned slopes of a grassland mining area were restricted. The above-ground biomass and community coverage of plants decreased significantly ($p < 0.05$). In the early stage of plant growth, the sediment yield and runoff on the slope increased significantly with

收稿日期: 2022-07-29

修回日期: 2022-08-29

资助项目: 内蒙古自治区科技计划项目“草原绿色矿山建设与生态用水关键技术研究及示范”(2019GG023); 鄂尔多斯市科技合作重大专项“黄河流域绿色矿山建设生态修复关键技术研究及示范”(2021EEDSCXQDFZ2016)

第一作者: 荣浩(1969—), 男(汉族), 内蒙古自治区呼和浩特市人, 硕士, 正高级工程师, 主要从事草地水土保持与生态用水研究。Email: mk-srh@126.com.

increasing irrigation amount ($p < 0.05$). There were no obvious changes in sediment yield and flow rate between treatments. Compared with the regulated deficit irrigation treatments, the water use efficiency of mild and moderate regulated deficit irrigation (when the soil moisture content reached 55% and 45%, respectively, of the soil field water holding capacity) was relatively high. [Conclusion] A comprehensive evaluation of the effects of artificial grassland construction on water storage, soil conservation capacity, and irrigation water use efficiency showed that mild deficit-regulated irrigation (soil moisture content reached 55% of soil field water holding capacity) produced similar effects on water use efficiency and artificial grassland construction benefits. The combination was good, and the effect on soil erosion prevention and control was obvious. This level of regulated deficit irrigation could be used as the preferred choice for constructing artificial grasslands in the mine wasteland of the study area.

Keywords: abandoned land; irrigation amount; water use efficiency; mining area

干旱、半干旱草原区是中国北方重要的生态安全屏障,也是中国煤炭资源主要分布和产出的重点区域之一^[1],在气候变化背景下,加之放牧等人类活动的干扰使该地区植被退化严重,生态系统较为脆弱^[2-3]。随着草原区矿产资源开采规模和强度不断加大,资源开采形成的松散堆积型废弃地面积也不断增加,矿产资源开发与草原环境保护之间的矛盾日益尖锐。矿山废弃地因其独特的形成方式,土壤结构组成有别于普通土壤,具有结构松散、土体无层次、有效水分含量偏低、抗侵蚀能力差等特点^[4],特别是废弃地边坡,不同于一般意义上的坡耕地和原始地貌,其坡面的可蚀性是自然坡面的10~100倍^[5],侵蚀速率是撂荒地的43.60~180.13倍^[6]。针对矿山开采废弃地生态退化问题诸多学者开展了大量的研究,研发的生态修复技术在实践中也得到应用,研究成果主要集中在矿山开采对矿区生态环境的影响机制、矿区废弃地的物理性修复、植物修复和抗侵蚀复垦技术等方面^[7-11]。在矿山废弃地边坡生态恢复理论与技术方面,有关植物深层、浅层根系的护坡作用机制、根系在边坡中的受力关系等已有大量理论研究,但生态修复实践中相关技术应用相对较少^[12-14];目前较成熟、可应用的矿山生态护坡技术主要有喷混植生技术、客土喷播技术、草帘、生物毯等苫盖技术、生态袋、生态棒坡面防护技术等^[15-17],受气候、地质、土壤等自然条件以及投资成本等因素的影响,目前矿山废弃地护坡技术的推广与应用与生态建设需求之间的贴合度还需深入探讨。干旱半干旱地区年均降水量偏低、天然降雨有效性较差,土壤水分是该地区土地复垦和生态恢复的最大限制因子之一^[18],而另一方面,草原大型煤矿开采利用过程中,

可用于矿区生态修复的水资源十分有限,矿山废弃地植被恢复与重建中缺乏水分的有效供给,导致废弃地特别是其边坡人工植被建植极为困难^[19]。科学的坡面节水灌溉方式是解决矿区废弃地边坡土壤水分匮乏的一种有效途径^[20],而相比于平地灌溉,坡面灌溉易导致水分不能均匀分布,过大的灌水量还会造成坡面水土流失以及水资源的浪费^[21-22]。本研究针对草原矿区废弃地边坡人工草地建植困难,水土流失严重的生态恢复问题,基于水量平衡方程,通过混播豆科、禾本科草本植物的灌溉对比试验,分析不同补水处理下的人工牧草生长状况、坡面产流产沙量及水分利用效率,探讨最佳补水方案,为草原区绿色矿山建设中的水资源可持续利用与完善生态恢复技术提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于内蒙古锡林浩特市胜利东二号露天煤矿南排土场,排土场为煤矸石等废弃物排放后覆土形成的人工重塑堆垫地貌,平台、边坡阶梯式相间分布,边坡长度15~18 m,坡度约33°,坡面覆土深度30~50 cm。研究区土壤为栗钙土,土壤粒径以>0.05 mm的细沙为主,土壤质量较差,养分含量偏低^[23],0—20 cm土层原状土壤理化性质详见表1。试验区属于中温带干旱半干旱气候,多年平均降水量为294.9 mm,降水量主要集中在6—9月(表2),多年平均气温1.7 °C,多年平均蒸发量2 350.2 mm。研究区原地表植被为典型草原植被,以克氏针茅(*Stipa krylovii*)、羊草(*Leymus chinensis*)为主要建群种,植被盖度35%~50%。

表1 研究区土壤基本理化性质

测定指标	土壤容重/(g·cm ⁻³)	全氮/(g·kg ⁻¹)	全磷/(g·kg ⁻¹)	全钾/(g·kg ⁻¹)	有机质/(g·kg ⁻¹)	pH值
数值	1.36	0.18	0.29	40.43	6.30	8.96

表 2 研究区 2021 年降水量统计

月份	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	合计
降水量	5.0	10.2	9.1	11.8	17.0	49.2	129.0	35.7	58.0	4.8	10.9	4.1	344.8

mm

1.2 试验设计

1.2.1 材料 根据研究区自然气候条件结合当地植被建设经验,选择两种多年生草本植物作为栽培试验材料,即紫花苜蓿(豆科苜蓿属 *Medicago sativa*)与扁穗冰草(禾本科冰草属 *Agropyron cristatum*)。

1.2.2 设计 2020年6月播种,紫花苜蓿、扁穗冰草混播比例1:1,混播播种量均为 1 g/m^2 ,采取撒播的播种方式,播种深度2 cm。灌溉试验在混播牧草生长的第2年(2021年)进行,豆科、禾本科牧草第2年4月中旬返青到种子成熟分为返青、现蕾(抽穗)、开花、成熟、枯黄5个时期。根据紫花苜蓿与扁穗冰草不同生育期的需水特性,灌溉时期选择混播牧草生长的3个关键阶段^[24-25],即生长初期(返青期,4月20日至5月10日)、快速生长期(现蕾(抽穗)期,5月25日至6月15日)、生长旺盛期(开花期,7月10日至31日)。

1.2.3 方法 灌溉水平设6个处理,即微度、轻度、中度、重度、强度5个灌水下限,以充分灌溉为对照(CK),每个处理3次重复,共18个试验小区,各处理灌水下限^[26-27](土壤的体积含水率占田间持水量的百分比,计划湿润层为30 cm,当计划湿润层含水量达到下限时开始灌水,水分上限为75%的田间持水量)详见表3。试验小区布设于排土场边坡,每个小区宽5 m,长15 m,小区之间间隔0.5 m作为隔离缓冲带,铺设防渗膜防止水分相互渗透。灌水采用智能灌溉系统控制的地面滴灌方式,每个小区的灌水量采用水表独立控制。当土壤含水率达到处理范围时进行灌水,灌水量的计算公式为:

$$M=1\ 000\ H\rho(\theta_{\text{上}}-\theta_{\text{下}})/\eta \quad (1)$$

式中: M 为灌水量(mm); H 为计划湿润土层深度(m); ρ 为土壤湿润比,即被湿润的土壤体积占湿润层总土壤体积的百分比,通常以地面下20—30 cm处湿润面积占总灌溉面积的百分比来表示,取0.6; $\theta_{\text{上}}$ 为设计土壤含水率上限%,取75%田间持水率,占土壤体积百分比; $\theta_{\text{下}}$ 为灌溉前实测的土壤含水率下限%,占土壤体积百分比; η 为灌水利用系数^[28]。

1.3 试验方法

1.3.1 人工草地植物群落总盖度 于2021年7月底采用样方法在每个试验小区随机选取3个 $1\text{ m}\times 1\text{ m}$ 的草本样方,用数码相机拍摄样方,计算每个样方内的植物群落总盖度。

表 3 废弃地人工草地调亏灌溉试验灌水下限

水分处理	占田间持水率的比例/%			说明
	生长初期	快速生长期	生长旺盛期	
CK	75	75	75	对照,充分灌溉
RDI ₁	65	65	65	处理1,微度调亏灌溉
RDI ₂	55	55	55	处理2,轻度调亏灌溉
RDI ₃	45	45	45	处理3,中度调亏灌溉
RDI ₄	35	35	35	处理4,重度调亏灌溉
RDI ₅	25	25	25	处理5,强度调亏灌溉

1.3.2 人工草地地上生物量 采用刈割法测定,2021年7月底,在每个试验小区随机选取3个 $1\text{ m}\times 1\text{ m}$ 样方,齐地刈割,不区分植物种除去枯枝叶,烘干后称干重。

1.3.3 土壤含水率 利用无线多层土壤墒情传感器(EWS-SMT-6,北京天正高科智能科技有限公司)实时监测每个试验小区土壤含水率变化(可通过终端远程查看),利用传感器分别测定0—10,10—20,20—30 cm土层土壤水分,监测时间设置为每1 d记录1次,并采用烘干法进行校正。

1.3.4 坡面产流产沙测定 分别在每个试验小区边坡底部布设1个径流小区($5\text{ m}\times 3\text{ m}$),四周以铝塑板进行围挡,径流小区底部设计集流桶,观测灌溉后的径流量和产沙量。①径流量观测。灌溉结束后立即进行径流量观测,测定集流桶中的径流体积即径流量。②产沙量观测。径流测定后,将桶内水分充分搅浑,用铝盒取水样,每次取60 ml,3次重复,现场测定浑水重量,记录浑水体积,静置24 h,过滤掉清水,置于 $105\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下烘箱12 h,测定干土重量^[29]。

1.3.5 耗水量计算 混播牧草的耗水量采用水量平衡方程计算^[28],计算公式为:

$$ET=W_0-W_t+W_T+P_0+K+M \quad (2)$$

$$W_T=667(H_2-H_1)(\theta_{\text{上}}-\theta_{\text{下}}) \quad (3)$$

式中:ET为某时段的耗水量(mm); W_0 , W_t 为某时段的土壤计划层内的储水量(mm); W_T 表示由于计划湿润层变化而增加的水量(mm); P_0 为有效降雨量(mm); K 为地下水补给量(mm),本试验无地下水影响,故 $K=0$; M 为某时段的灌水量(mm); H_1 , H_2 为计划湿润层深度(m)。

1.3.6 水分利用效率 试验期内水分利用效率计算公式为:

水分利用效率(WUE)=植被地上生物量(Y)/耗水量(ET)。

1.4 数据分析

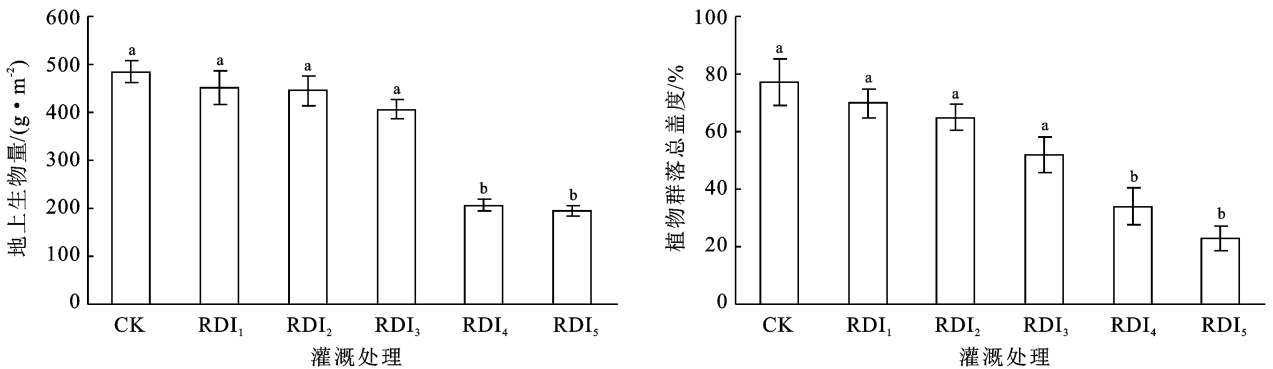
利用 SPSS Statistics 20.0 软件进行数据统计分析,采用单因素方差分析 LSD 法比较不同调亏灌溉处理下的差异 ($p=0.05$),采用秩和比法 (Rank-sum ratio, RSR)^[30] 对不同调亏灌溉处理矿区废弃地植被恢复的适宜性进行评价。

2 结果与分析

2.1 人工草地地上生物量与群落总盖度的变化

不同灌溉处理人工草地地上生物量的变化可知 (图 1),地上生物量由大到小的顺序依次为:CK > RDI₁ > RDI₂ > RDI₃ > RDI₄ > RDI₅,经方差显著性分析,CK, RDI₁, RDI₂, RDI₃ 与 RDI₄, RDI₅ 之间存在显著性差异 ($p<0.05$)。随着亏水程度的增加,植被

地上生物量呈下降趋势,且当土壤水分低于 45% 田间持水率时,地上生物量下降明显,说明此时土壤有效水含量减少,植物开始出现干旱胁迫,为了吸收土壤水分并提高植物抗旱能力,分配给植物根系光合产物的比例增加,导致地上部分分配比例减少。不同调亏灌溉处理试验小区植物群落总盖度变化结果表明 (图 1),随着亏水程度的加重,人工草地植物群落总盖度逐渐下降, RDI₃, RDI₄, RDI₅ 分别比 CK 减少了 4.0%, 24.7%, 32.8%, 方差分析结果显示, CK, RDI₁, RDI₂, RDI₃ 与 RDI₄, RDI₅ 之间的植物群落总盖度变化差异达到显著水平 ($p<0.05$),这与不同灌溉处理植被地上生物量的变化结果一致,说明中度以上水分亏缺已经影响到混播牧草对水分的吸收利用,进而影响植物正常生长。



注:不同小写字母表示不同处理之间差异显著 ($p<0.05$)。下同。

图 1 不同灌溉处理人工草地地上生物量和植物群落总盖度变化

2.2 不同调亏灌溉处理坡面径流泥沙变化

表 4 为植物生长季内不同调亏灌溉处理下的坡面径流泥沙的变化情况。

由表 4 可以看出,试验期间内,不同灌溉处理下各试验小区的产沙量在 0.35~1.14 kg 之间,平均值 0.65 kg;径流量在 5.27~15.23 L 之间,平均值 9.47 L,总体上,灌溉处理下的产沙量变化差异大于径流量变化。植物生长初期,群落盖度较低,地表裸露较多,土壤入渗率降低,灌溉水量过大对地表冲刷强烈,易产生坡面径流;产沙和径流量的变化规律一致,均是随

着灌水量的增加,坡面产沙量也随之增加,植物生长初期,边坡充分灌溉 (CK) 产生的泥沙和径流明显高于调亏灌溉处理 ($p<0.05$);快速生长期、生长旺盛期由于地表植物明显增加,灌水量对坡面径流的影响不明显,各灌溉处理之间的产沙量、产流量变化基本接近。生长季内,各处理产沙量、径流量由大到小顺序均为:CK > RDI₁ > RDI₂ > RDI₃ > RDI₅ > RDI₄,植物生长的不同阶段灌溉方式进入土壤中的水分出现差异,说明群落盖度和地上生物量的增加能有效抑制坡面径流。

表 4 植物生长季坡面产流产沙变化

处理	生长初期		快速生长期		生长旺盛期	
	产沙量/kg	径流量/L	产沙量/kg	径流量/L	产沙量/kg	径流量/L
CK	1.14±0.09 ^a	15.23±1.05 ^a	0.78±0.11 ^a	11.69±0.65 ^a	0.39±0.06 ^a	6.08±0.16 ^a
RDI ₁	1.05±0.08 ^{ab}	13.64±0.96 ^{ab}	0.77±0.09 ^a	11.05±0.27 ^a	0.42±0.09 ^a	6.26±0.20 ^a
RDI ₂	0.89±0.15 ^b	13.04±0.78 ^{ab}	0.69±1.01 ^a	10.07±0.19 ^a	0.41±0.03 ^a	6.12±0.12 ^a
RDI ₃	0.74±0.13 ^b	11.08±0.85 ^b	0.72±0.06 ^a	10.84±0.36 ^a	0.36±0.02 ^a	5.56±0.36 ^a
RDI ₄	0.68±0.06 ^b	9.95±0.56 ^b	0.68±0.08 ^a	9.78±0.22 ^a	0.35±0.06 ^a	5.27±0.54 ^a
RDI ₅	0.65±0.05 ^b	9.21±0.62 ^b	0.69±0.06 ^a	10.15±0.41 ^a	0.37±0.05 ^a	5.44±0.23 ^a

注:不同小写字母表示灌溉处理间差异显著 ($p<0.05$)。

2.3 不同调亏灌溉处理的水分利用效率

不同调亏灌溉处理下人工草地土壤水分变化如图 2 所示。由图 2 可知,混播牧草生长季的不同时期 0—30 cm 土壤含水率基本呈现出一致的变化规律,即随着降雨量和灌溉水量的增加而增大。紫花苜蓿、扁穗冰草种植第二年植物根系主要分布在对 0—30 cm 土层,表现出植物对 0—30 cm 土层中的土壤水分利用更加高效,0—30 cm 土层中的土壤含水率变化明显。随着植物生长发育过程的延续,需水量逐步

增加,快速生长期需水量较大,土壤水分出现明显的波动性降低;植物开花期天然降雨明显增多,并且草本植物进入生殖生长阶段,植物对灌水的需求开始下降。试验期间,各调亏灌溉处理的土壤含水率变化范围在 $6.6 \sim 22.5 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 之间,土壤含水率的变化幅度较大,其中, RDI_3 , RDI_4 和 RDI_5 在 0—30 cm 土层土壤含水率的变化差异达到显著水平 ($p < 0.05$), RDI_3 , RDI_4 , RDI_5 灌溉处理的平均土壤含水率比充分灌水处理(CK)分别降低了 23.1%, 32.3% 和 41.2%。

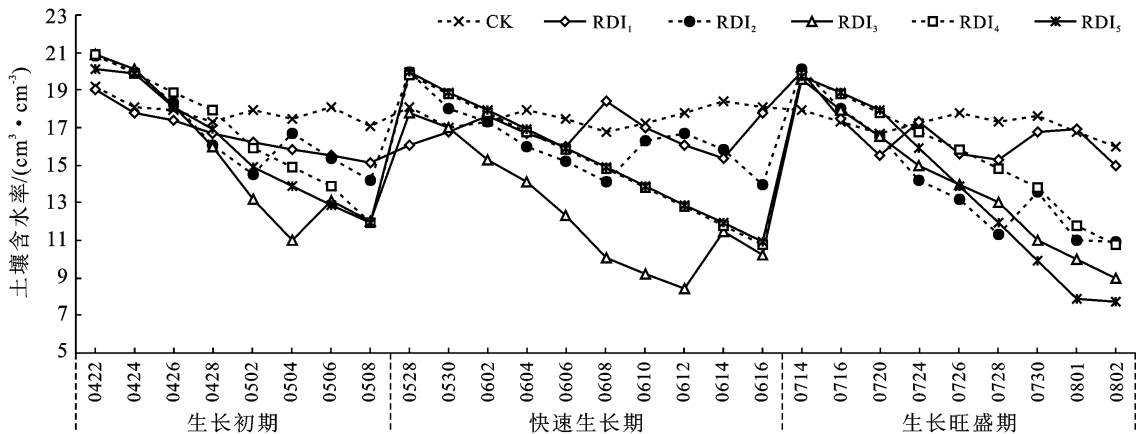


图 2 不同灌溉处理人工草地土壤含水率变化

2021 年植物生长初期和快速生长期天然降水偏低,4 月和 5 月降水量分别为 11.8 mm 和 17.0 mm,在干旱缺水的环境下,灌溉水量是影响植被耗水的主要因素,分析不同调亏灌溉处理下植物耗水量结果表明(图 3),植物耗水量随着灌水量的增加而增加,充分灌溉(CK)的耗水量显著高于调亏灌溉处理 ($p < 0.05$),调亏灌溉处理之间, RDI_1 与 RDI_3 , RDI_4 , RDI_5 之间变化差异达到显著水平 ($p < 0.05$)。

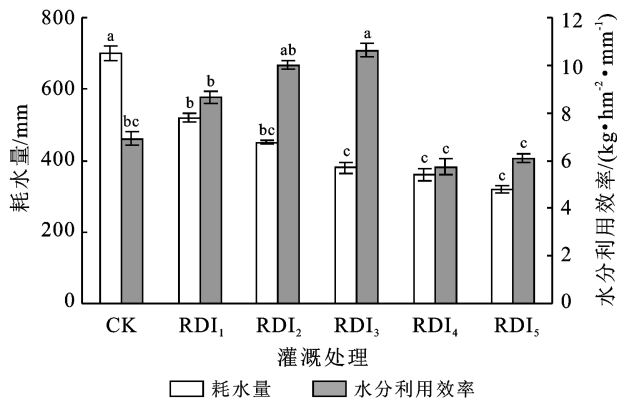


图 3 不同灌溉处理下人工草地耗水量和水分利用效率变化

灌溉量对植物的耗水量及水分利用效率的影响明显,随着灌溉量增加,耗水量逐渐增加,而水分利用效率逐渐减小。 RDI_4 、 RDI_5 调亏处理的水分利用效

率较低,显著低于其他处理 ($p < 0.05$)。 RDI_2 和 RDI_3 2 个调亏处理的水分利用效率显著高于其他灌溉处理 ($p < 0.05$),且均达到 $10 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{mm})$ 以上,表明这两种灌溉方式对水分的利用效率较高。

2.4 基于 RSR 人工草地调亏灌溉评价

通过对比分析,各灌溉处理在植被生长情况、坡面产流产沙和水分利用效率等方面存在差异性,采用秩和比法(RSR)对各灌溉处理进行综合评价,可以反映出调亏灌溉是否适宜在水资源匮乏的草原矿区植被恢复与重建中推广应用。

(1) 评价指标选择。选择 4 个指标进行综合评价,反映植被恢复效果的指标,人工草地植物群落总盖度;反映蓄水保土能力的指标,产沙量和径流量;反映灌溉水利用效率的指标,水分利用效率。

(2) 指标值计算。依据 RSR 计算公式:

$$\text{RSR}_i = \sum_{j=1}^m \frac{R_{ij}}{i \cdot m \cdot n} \quad (4)$$

式中: m 为评价指标数(4 个指标,分别为植物群落总盖度、产沙量、径流量和水分利用效率); n 为评价对象、即分组数(6 个试验处理,分组数为 6); R_{ij} 为每个指标各评价对象的秩,高优指标从小到大编秩,低优指标从大到小编秩,指标数据相近或相同编平均秩。

(3) 综合评价。根据秩和比法的评价原理, RSR 值越大, 说明被评价模式的综合效益越高; RSR 值越小, 说明被评价模式的综合效益越低^[31]。RSR 值计算结果(表 5)显示, 各种调亏灌溉模式中, 综合效益排序为: $RDI_2 > RDI_3 > RDI_4 > RDI_1 > CK > RDI_5$ 。

RDI_2 (轻度调亏灌溉)在水分利用效率与人工草地建植效果方面结合较好, 且水土流失防控成效明显。因此, 在水资源短缺的矿区植被恢复过程中, 轻度调亏可作为矿山废弃地人工草地建植的主要节水灌溉模式优先选择应用。

表 5 不同灌溉处理 RSR 评价指标秩次(R)

处理	植物群落总盖度		产沙量		径流量		水分利用效率		RSR
	数值/ %	R 值	数值/ kg	R 值	数值/ L	R 值	数值/ ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$)	R 值	
CK	88	6.0	2.31	2.5	33.00	2.5	6.48	1.5	0.521
RDI_1	82	5.5	2.24	2.5	30.95	2.5	7.26	3.0	0.563
RDI_2	78	5.0	1.99	3.0	29.23	3.0	10.01	5.5	0.688
RDI_3	52	3.0	1.82	3.0	27.48	4.0	10.53	6.0	0.667
RDI_4	40	2.5	1.71	4.0	25.01	4.0	7.7	3.5	0.583
RDI_5	31	1.5	1.71	4.0	24.80	4.0	6.5	1.0	0.438

3 讨论

矿山废弃地具有土体结构不稳定、土壤微生物活性差, 土壤养分匮乏、易发生水土流失等特点, 自然降水量较低、降水季节差异较大、无霜期较短、生态环境相对脆弱的中国北方草原区, 矿山废弃地植被恢复与重建更是一个复杂且综合的系统工程^[32-34]。研究表明, 土壤水分是影响干旱半干旱地区矿山植被恢复与重建的主要限制因素, 较低的土壤分会抑制植物种子萌发、根部吸收水分, 影响植物正常生长发育^[35-36]。矿山废弃地人工草地建设过程中, 采取灌溉措施可以在天然降雨不足情况下提供植物生长发育所必需的水分, 有利于植物正常生长和增强其竞争力, 特别是对于废弃地边坡, 由于坡面土层或基质较薄, 蓄水有限, 在自然降雨量较低的情况下, 适宜灌溉技术是保证废弃地边坡植被恢复与重建所需水分的重要手段^[37]。调亏灌溉追求在水分限制条件下最大的水分生产^[38], 从干旱半干旱区矿山废弃地人工草地的生长状况来看, 不同的调亏灌溉处理, 使草本植物生育期的土壤水分处于不同程度的亏缺状态, 人工草地植物群落总盖度和地上生物量出现不同程度的降低, 但经差异显著性分析, 充分灌溉与微度、轻度、中度调亏灌溉处理的植物群落总盖度和地上生物量之间的变化差异未达到显著水平, 说明草原区矿山废弃地人工草地建植过程中, 通过调亏灌溉可以在不明显降低生态恢复效果的情况下, 通过提高水分利用效率, 利用有限水资源增加废弃地植被恢复与重建的范围和规模, 平衡水分投入和生态效益之间输出。

在不同调控灌溉处理下, 紫花苜蓿、扁穗冰草混播牧草试验小区的土壤含水量表现出随着灌水量的增加而增大, 而栽植植物种类对土壤水分含量的影响

不明显。万文亮等^[39]研究也表明, 土壤含水率随着调控灌水量的增加表现出显著增加, 土壤含水量受灌水影响较大, 受植物品种影响较少^[40]。本研究中, 水分梯度在 45%~65% 之间的混播人工草地植物生长状况明显好于水分梯度在 25%~35% 的处理水平, 党志强等^[41]在河西走廊紫花苜蓿耗水量与耗水规律的研究中发现, 紫花苜蓿在 70% 田间持水量处理的水分利用最为经济, 相比于单播, 混播牧草的根系分布空间更大, 对水分利用效率更高, 因此, 混播草地水分利用效率较单播能提高 21.26%~32.5%^[42], 康文彦等^[27]研究证明, 苜蓿和无芒雀麦混播草地在拔节期和抽穗期进行水分调亏能够减少草地的无效蒸发, 提高牧草品质和水分利用效率, 因此, 干旱半干旱草原矿区废弃地人工草地建设更适合选择牧草混播的方式。本研究通过对不同灌水处理方式植被生长状况、坡面产流产沙和水分利用效率进行综合评价分析, 结果表明, 灌水量控制下限越高, 植被盖度越大, 但从植被恢复效果、蓄水保土能力、灌溉水利用率等方面综合评价, 土壤水分含量达到土壤田间持水率的 55% 以上的灌水方式并不能产生最大的综合效益。在水资源相对匮乏的干旱、半干旱草原矿区废弃地边坡植被恢复与重建过程中, 既要节约水资源, 又要保证植被修复效益, 在保证坡面植被所需土壤水分适时供给的同时, 以获得较优的边坡植被恢复成效。

4 结论

(1) 干旱、半干旱草原矿区废弃地边坡植被恢复过程中, 当土壤水分含量低于 45% 田间持水率时, 植物群落总盖度和地上生物量下降明显, 植物生长发育明显受到干旱胁迫。

(2) 微度、轻度、中度调亏灌溉与充分灌溉处理

植物群落总盖度和地上生物量无显著性差异,轻度和中度调亏灌溉可以提高混播牧草的水分利用效率。

(3) 采用秩和比法对废弃地植被恢复调亏灌溉模式进行综合效益评价,在水资源短缺的矿区植被恢复中,轻度调亏可作为草原矿山废弃地植被恢复的主要节水灌溉方式,即利用 55% 的灌水控制下限进行灌溉较适宜废弃地的植被恢复。

[参 考 文 献]

- [1] 孟峰,张周爱,陈树召.宝日希勒矿区煤炭资源开发的生态环境影响评价[J].中国煤炭,2021,47(9):16-25.
- [2] 张扬建,朱军涛,沈若楠,等.放牧对草地生态系统影响的研究进展[J].植物生态学报,2020,44(5):553-564.
- [3] Zhou Wei, Yang Han, Huang Lu, et al. Grassland degradation remote sensing monitoring and driving factors quantitative assessment in China from 1982 to 2010 [J]. Ecological Indicators, 2017,83:303-313.
- [4] 吕刚,刘雅卓,李叶鑫,等.露天煤矿排土场边坡表层土壤水分物理性质空间变异特征[J].土壤通报,2018,49(1):69-77.
- [5] Riley S J. Aspects of the differences in the erodibility of the waste rock dump and natural surfaces, Ranger Uranium mine, Northern Territory, Australia [J]. Applied Geography, 1995,15(4):309-323.
- [6] 郭明明,王文龙,李建明,等.神府矿区弃土弃渣体侵蚀特征及预测[J].土壤学报,2015,52(5):1044-1057.
- [7] 张兆彤,王金满,张佳瑞.矿区复垦土壤与植被交互影响的研究进展[J].土壤,2018,50(2):239-247.
- [8] 项元和,于晓杰,魏勇明.露天矿排土场生态修复与植被重建技术[J].中国水土保持科学,2013,11(增刊):48-54.
- [9] Hou Xiaoyun, Liu Shiliang, Zhao Shuang, et al. Interaction mechanism between floristic quality and environmental factors during ecological restoration in a mine area based on structural equation modeling [J]. Ecological Engineering, 2018,124:23-30.
- [10] 珊丹,邢恩德,荣浩,等.草原矿区排土场不同植被配置类型生态恢复[J].生态学杂志,2019,38(2):336-342.
- [11] Geoffrey L H, James D B. Biochar soil amendments in prairie restorations do not interfere with benefits from inoculation with native *Arbuscular mycorrhizal* fungi [J]. Restoration Ecology, 2020,28(4):785-795.
- [12] 戚国庆,胡利文.植被护坡机制及应用研究[J].岩石力学与工程学报,2006,25(11):2220-2225.
- [13] 言志信,闫昌明,王后裕.植被护坡的根和土力学作用[J].中国科学:技术科学,2011,41(4):436-440.
- [14] 宗全利,冯博,蔡杭兵,等.塔里木河流域河岸植被根系护坡的力学机制[J].岩石力学与工程学报,2018,37(5):1290-1300.
- [15] 李荣海,张玉辉,朱万刚,等.喷混植生技术在冶金矿山岩石边坡加固绿化中的应用[J].现代矿业,2012(11):17-20.
- [16] 珊丹,荣浩,刘艳萍,等.干旱荒漠区排矸场不同覆盖类型对土壤水分蒸发的影响[J].水土保持通报,2020,40(5):15-20.
- [17] 蒋文翠,杨继清,彭尔瑞,等.矿山生态修复研究进展[J].矿业研究与开发,2022,42(4):127-132.
- [18] 陶涛,马东豪,吴思聪,等.外源凹凸棒土添加对半干旱矿区复垦土壤水分涵养功能的影响[J].应用生态学报,2022,33(4):901-908.
- [19] 杨勤学,赵冰清,郭东罡.中国北方露天煤矿区植被恢复研究进展[J].生态学杂志,2015,34(4):1152-1157.
- [20] 何京丽,邢恩德,珊丹,等.退化草地恢复水土保持关键技术[M].北京:水利水电出版社,2016.
- [21] 王英宇.公路石质边坡喷播绿化植被的降雨、灌溉水分分配特征[J].水土保持学报,2018,32(4):128-138.
- [22] 李艳茹.不同灌溉方式下矿区排土场边坡植被恢复的灌溉制度与水分运移模拟研究[D].内蒙古呼和浩特:内蒙古农业大学,2016.
- [23] 珊丹,荣浩,刘艳萍,等.草原露天矿排土场微生物菌肥施用效果研究[J].中国农业科技导报,2018,20(6):129-135.
- [24] 王志强,朝伦巴根,高瑞忠,等.多年生人工牧草高效用水灌溉制度的研究[J].农业工程学报,2006,22(12):49-55.
- [25] 乔子楣,刘敏国,杨惠敏.高寒地区灌溉对建植当年紫花苜蓿产量、水分和光能利用效率的影响[J].中国草地学报,2020,42(3):86-93.
- [26] 汪精海,李广,银敏华,等.调亏灌溉对高寒荒漠区人工混播草地土壤环境与牧草生长的影响[J].草业学报,2022,31(1):95-106.
- [27] 康文彦,齐广平,康燕霞,等.不同灌水模式对禾豆混播人工草地产量与品质的影响[J].水利规划与设计,2020(4):103-110.
- [28] 吴晓茜,夏桂敏,李永发,等.调亏灌溉对黑花生生长、光合特性及水分利用效率的影响[J].沈阳农业大学学报,2018,49(1):57-64.
- [29] 冯强,赵文武,张骁,等.黄土丘陵沟壑区草地径流和泥沙拦截效率及其影响因素[J/OL]. 应用与环境生物学报, <https://doi.org/10.19675/j.cnki.1006-687x.2022.02027>.
- [30] 荣浩,珊丹,刘艳萍,等.草原工程侵蚀区植被恢复模式的水土保持效应[J].水土保持研究,2017,24(3):24-28.
- [31] 潘峰,付强.模糊综合评价在水环境质量综合评价中的应用研究[J].环境工程,2002,20(2):58-60.
- [32] 韩煜,赵伟,张淇翔,等.不同植被恢复模式下矿山废弃地的恢复效果研究[J].水土保持研究,2018,25(1):120-125.

- Microbial Ecology, 2004, 48(3):424-430.
- [38] 吴秀芝,刘秉儒,阎欣,等.荒漠草地土壤微生物生物量和微生物熵对沙漠化的响应[J].应用生态学报, 2019, 30(8):2691-2698.
- [39] 胡宗达,刘世荣,刘兴良,等.川西亚高山天然次生林不同演替阶段土壤—微生物生物量及其化学计量特征[J].生态学报, 2021, 41(12):4900-4912.
- [40] Brookes P C, Powlson D S, Jenkinson D S. Phosphorus in the soil microbial biomass [J]. Soil Biology and Biochemistry, 1984, 16(2):169-175.
- [41] 邹锋,武鑫鹏,张万港,等.鄱阳湖典型湿地土壤微生物活性对季节性水位变化的响应[J].生态学报, 2018, 38(11):3838-3847.
- [42] 胡洋,丛孟菲,陈末,等.氮添加对巴音布鲁克高寒湿地土壤微生物量和酶活性的影响[J].生态学报, 2022, 42(13):5328-5339.
- [43] 万忠梅,宋长春,郭跃东,等.毛苔草湿地土壤酶活性及活性有机碳组分对水分梯度的响应[J].生态学报, 2008, 28(12):5980-5986.
- [44] Xiao Ye, Huang Zhigang, Lu Xianguo. Changes of soil labile organic carbon fractions and their relation to soil microbial characteristics in four typical wetlands of Sanjiang Plain, Northeast China [J]. Ecological Engineering, 2015, 82:381-389.
- [45] Dodor D E, Tabatabai M A. Effect of cropping systems on phosphatases in soils [J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2003, 166:7-13.
- [46] Wang Xiaochang, Lu Qin. Effect of waterlogged and aerobic incubation on enzyme activities in paddy soil [J]. Pedosphere, 2006, 16(4):532-539.
- [47] A'Bear A D, Jones T H, Kandeler E, et al. Interactive effects of temperature and soil moisture on fungal-mediated wood decomposition and extracellular enzyme activity [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2014, 70:151-158.
- [48] 鄢紫薇,高璟赟,张秀玲,等.不同水分处理对华中地区稻田土壤酶活性的影响[J].农业环境科学学报, 2022, 41(1):91-98.
- [49] Erica D O S, Erika V D M, Gustavo P D, et al. Seasonal effect of land use type on soil absolute and specific enzyme activities in a Brazilian semi-arid region [J]. Catena, 2019, 172:397-407.
- [50] Groffman P M, McDowell W H, Myer J C, et al. Soil microbial biomass and activity in tropical riparian forests [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2001, 33(10):1339-1348.
- [51] Lee R Y, Porubsky W P, Feller I C, et al. Porewater biogeochemistry and soil metabolism in dwarf red mangrove habitats (Twin Cays, Belize) [J]. Biogeochemistry, 2008, 87(2):181-198.
- [52] Almahsheer H, Duarte C M, Irigoien X. Nutrient limitation in central Red Sea mangroves [J]. Frontiers in Marine Science, 2016, 3:271-285.
- [53] Gao Jintao, Wang Enxi, Ren Weiling, et al. Effects of simulated climate change on soil microbial biomass and enzyme activities in young Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata*) in subtropical China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(4):272-278.

(上接第60页)

- [33] 卫智军,李青丰,贾鲜艳,等.矿业废弃地的植被恢复与重建[J].水土保持学报, 2003, 17(4):172-175.
- [34] Ahirwal, Jitendra, Maiti, et al. Assessment of soil properties of different land uses generated due to surface coal mining activities in tropical Sal(*Shorea robusta*) forest, India [J]. Catena: An Interdisciplinary Journal of Soil Science Hydrology-Geomorphology Focusing on Geoecology and Landscape Evolution, 2016, 140:155-163.
- [35] 姚敏娟,张树礼,李青丰,等.黑岱沟露天矿排土场不同植被配置土壤水分研究:土壤水分垂直动态研究[J].环境与发展, 2011, 23(1):29-32.
- [36] 张燕乐,甄庆,张兴昌,等.露天煤矿排土场不同植被土壤水分特征及其时间稳定性[J].水土保持学报, 2020, 34(3):212-218.
- [37] 刘艳萍,梁占岐,荣浩,等.基于植被恢复边坡稳定性的适宜节水灌溉技术研究[J].草原与草坪, 2019, 39(6):94-99.
- [38] Geerts S, Raes D. Deficit irrigation as an on-farm strategy to maximize crop water productivity in dry areas [J]. Agricultural Water Management, 2009, 96(9):1275-1284.
- [39] 万文亮,郭鹏飞,胡语妍,等.调亏灌溉对新疆滴灌春小麦土壤水分、硝态氮分布及产量的影响[J].水土保持学报, 2018, 32(6):166-174.
- [40] 孟维伟,张微,张永丽,等.灌水对不同小麦品种耗水特性和土壤硝态氮运移的影响[J].麦类作物学报, 2011, 31(6):1123-1129.
- [41] 党志强,赵桂琴,龙瑞军.河西地区紫花苜蓿的耗水量与耗水规律初探[J].干旱地区农业研究, 2004, 22(3):67-71.
- [42] Ali S, Xu Y Y, Ma X C, et al. Deficit irrigation strategies to improve winter wheat productivity and regulating root growth under different planting patterns [J]. Agricultural Water Management, 2019, 219(6):1-11.