

水肥耦合对荒漠区煤矸石山蜀葵和沙打旺水分利用效率的影响

胡杭丽¹,王进鑫^{1,2},马 戊³,万小楠¹,张龙廷¹,陈 印¹,项 通¹

(1.西北农林科技大学资源环境学院,陕西 杨凌 712100;2.西北植物营养与农业环境重点实验室,陕西 杨凌 712100;
3.西北农林科技大学水土保持研究所,陕西 杨凌 712100)

摘 要:为改善煤矸石山土壤水分和养分状况,提高景观生态型草本植物的水分利用效率,以蜀葵和沙打旺为试验材料,采用三因素五水平二次回归通用旋转组合设计,通过盆栽模拟试验研究了土壤相对含水量、施氮量、施磷量三者耦合对两种景观生态型草本植物叶片水分利用效率的影响,并通过模型寻优得出了最优水肥方案。研究表明:三因素对蜀葵叶片水分利用效率的影响顺序为土壤相对含水量>施氮量>施磷量,三因素对沙打旺叶片水分利用效率的影响顺序为土壤相对含水量>施磷量>施氮量;二因素耦合对蜀葵水分利用效率的影响不显著($P>0.05$),但对沙打旺水分利用效率有显著影响($P<0.05$),其顺序为水氮>水磷>氮磷;土壤水分条件是影响蜀葵和沙打旺叶片水分利用效率的首要因素,施氮对蜀葵更重要,施磷对沙打旺叶片水分利用效率的影响更大,蜀葵的水肥耦合优化方案为土壤相对含水量 37.6%~40.9%,施氮量(纯 N) 153.1~178.5 kg·hm⁻²,施磷量(P₂O₅) 89.4~120.4 kg·hm⁻²;沙打旺的水肥耦合优化方案为土壤相对含水量 69.0%~70.6%,施氮量(纯 N) 61.8~94.6 kg·hm⁻²,施磷量(P₂O₅) 109.9~170.1 kg·hm⁻²。

关键词:采煤迹地;蜀葵;沙打旺;水肥耦合;水分利用效率

中图分类号:S365 **文献标志码:**A

Effects of water and fertilizer coupling on water use efficiency of *Althaea rosea* (Linn.) Cavan and *Astragalus adsurgens* Pall.

HU Hangli¹, WANG Jinxin^{1,2}, MA Xu³, WAN Xiaonan¹,
ZHANG Longting¹, CHEN Yin¹, XIANG Tong¹

(1. College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;
2. Northwest Laboratory of Plant Nutrition and Agriculture Environment, Yangling, Shaanxi 712100, China;
3. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: The purpose of this study was to improve soil relative water content and nutrient condition of coal gangue dump and water use efficiency of landscape ecological herbaceous plants. *Althaea rosea* and *Astragalus adsurgens* were used as experimental materials. Quadratic regression general rotation combination design of three factors and five levels was used in the pot experiment. The coupling effects of soil relative water content, nitrogen application, and phosphorus application on water use efficiency of two landscape ecotype herbaceous plants were studied and the prioritization scheme was obtained through model optimization. The study indicated that the order of three factors on water use efficiency of *Althaea rosea* leaf was: soil relative water content > nitrogen application amount > phosphorus application amount. The order of three factors on water use efficiency of *Astragalus adsurgens* leaf was: soil relative water content > phosphorus application amount > nitrogen application amount. The coupling of two factors had no significant effect on water use efficiency of *Althaea rosea* ($P>0.05$). The coupling of two fac-

tors had a significant effect ($P<0.05$) on water use efficiency of *Astragalus adsurgens*, with the order: water nitrogen > water phosphorus > nitrogen phosphorus. Soil relative water content was the primary factor affecting water use efficiency of two plants. Nitrogen application amount was more important to water use efficiency of *Althaea rosea* while phosphorus application amount had a greater influence on water use efficiency of *Astragalus adsurgens*. The optimal water fertilizer coupling scheme of *Althaea rosea* was: soil relative water content 37.6%~40.9%, nitrogen application amount (pure nitrogen) 153.1~178.5 kg·hm⁻², and phosphorus application amount (P₂O₅) 89.4~120.4 kg·hm⁻². The optimal water fertilizer coupling scheme of *Astragalus adsurgens* was: soil relative water content 69.0%~70.6%, nitrogen application amount (pure nitrogen) 61.8~94.6 kg·hm⁻², and phosphorus application amount (P₂O₅) 109.9~170.1 kg·hm⁻².

Keywords: coal mining area; *Althaea rosea*; *Astragalus adsurgens*; water and fertilizer coupling; water use efficiency

煤炭是我国重要的一次性能源,煤炭开采在促进国民经济发展的同时,也给矿区周围生态环境和生态安全带来了威胁^[1]。特别是在煤炭开采过程中排放的煤矸石,是产量最高、占地最多的一种工业固体废弃物^[2],其堆积不仅会占用大量土地、损毁原地貌和植被^[3-4],若自燃还会产生有害气体,降水淋溶也会导致重金属污染,从而严重破坏矿区及周边生态环境^[5]。众多研究表明,植被恢复是改善采煤迹地生态环境、实现绿色发展的前提和重要手段^[6]。

西北干旱荒漠区是我国重要的煤炭基地之一,近年来随着能源需求的日益增长,大量的煤矸石山等采煤迹地亟待恢复植被。然而由于地处干旱荒漠区,水资源匮乏,年平均降水量低,通常只有 180~230 mm,难以满足植物正常生长对水分的需要,人工植被恢复初期必须进行灌溉补水,才能确保植被定居、生长。此外,西北干旱荒漠区采煤迹地多位于严重沙质荒漠化区^[7],植被恢复还面临着土壤养分贫瘠^[8],保水、保肥能力差等诸多问题。

为了建设绿色矿山,尽快恢复西北干旱荒漠区煤矸石山植被,我们以西北地区多年生景观生态型草本植物蜀葵(*Althaea rosea*)和沙打旺(*Astragalus adsurgens*)为研究对象。前者花色鲜艳美观,根系发达,适应性强,繁殖系数高,耐寒、耐旱,特别是耐盐碱,在含盐 0.6%、pH8.9 的土壤中仍能正常生长;后者抗逆性强,耐旱、耐寒、抗风蚀和耐沙埋^[9]。以叶片水分利用效率作为综合评价干旱荒漠区植物生长适宜程度的生理生态指标^[10-11],对两种典型草本植物的水肥耦合效应进行模拟研究,试图阐明采煤迹地蜀葵和沙打旺叶片水分利用效率对水肥耦合的响应规律,并通过模型寻优得出最优水肥搭配,旨在以最少的水分、养分投入,产出较多的干物质^[12],即提高草本植物的水分利用效率,以达到生态效益最大化和植被恢复的目的,为西北干旱荒漠

区煤矸石山植被恢复提供技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验土壤来自宁夏灵武市羊场湾煤矿排矸场取土场,由表层沙土和母质 3:1 混合而成,将土壤过 0.5 cm 筛作为盆栽基质。经测定土壤的容重为 1.44 g·cm⁻³,田间持水量 13.5%,土壤 pH 值 8.54,含盐量 0.77 g·kg⁻¹,有机质 2.4 g·kg⁻¹,碱解氮 9.14 mg·kg⁻¹,有效磷 4.92 mg·kg⁻¹,速效钾 58.89 mg·kg⁻¹,氮磷含量低于宁夏灵武天然草地^[13]。与全国土壤养分含量分级标准^[14]比较,除速效钾处于中等水平外,有效磷处于低水平,有机质、碱解氮尚不到极低水平的一半,养分极度缺乏。

供试草本植物蜀葵(*Althaea rosea* (Linn.) Cavan)和沙打旺(*Astragalus adsurgens* Pall.)种子,从宁夏远声绿阳草业生态工程有限公司购买,种子产自宁夏本地。氮肥和磷肥分别为尿素(含 N 46%)和重过磷酸钙(含 P₂O₅ 46%)。

1.2 试验设计

盆栽试验采用三因素五水平二次回归通用旋转组合设计。根据试验土壤肥力状况,灵武排矸场土壤速效钾含量属中等水平,基本能满足蜀葵和沙打旺的正常生长要求,因此试验设计时不考虑钾肥。沙打旺属豆科植物,具根瘤菌,可将空气中的氮素转化利用,但对磷肥的需求相对较高^[15]。因此,蜀葵和沙打旺的设计施氮、磷量略有不同。通过查找资料和开展预试验,土壤相对含水量下限确定为 30%,以保证植物的正常存活。设计土壤相对含水量(Z_1)、施氮量(Z_2)和施磷量(Z_3)3 因素,各因素试验水平见表 1。施氮量、磷量分别为纯 N 和 P₂O₅用量,实际化肥施用量需根据质量百分比进行换算。其中第 j 因素的上、下水平分别为 Z_{j+} 、 Z_{j-} ,根

据二次回归通用旋转组合设计确定各因素的零水平 Z_{0j} 和变化间距 Δ_j :

$$Z_{0j} = 0.5(Z_{1j} + Z_{2j}) \tag{1}$$

$$\Delta_j = (Z_{2j} - Z_{0j})/\gamma \tag{2}$$

土壤相对含水量 (Z_1)、施氮量 (Z_2)、施磷量 (Z_3) 三因素的编码值分别记为 X_1 、 X_2 、 X_3 , 根据(3) 式进行计算。

$$X_{ij} = (Z_{ij} - Z_{0j})/\Delta_j \tag{3}$$

试验于 2019 年 3—8 月在陕西省杨凌示范区西北农林科技大学南校区的干旱实验大棚内进行。盆栽试验于 2019 年 3 月中旬开始播种, 植物长出 3 片真叶(4 月 20 日)时间苗, 每盆保留 10 株长势一致的幼苗。从 6 月 1 日开始, 每天 8:00 通过称重法控制盆栽土壤相对含水量。N 素总量的 30%、40%、30% 分别于 5 月 19 日、6 月 10 日、6 月 24 日采用水溶法施入土壤, P 素总量的 50%、50% 分别于 5 月 19 日、6 月 10 采用穴施法施入土壤。

1.3 测定指标与方法

采用便携式光合仪(CIRAS-3)分别于 7 月 10 日和 8 月 1 日 8:00—12:00, 选择每个处理向阳、

健康且完全伸展的成熟叶片, 每间隔 1 h 测定 1 次, 每个处理测定 8 次, 测定指标为叶片净光合速率 (P_n)、蒸腾速率(T_r)。瞬时水分利用效率(WUE) 为净光合速率和蒸腾速率的比值, 8 组分别计算后再求平均值^[16], 得到两种植物不同处理的 WUE 。将植株挖出并清洗, 杀青并烘干至重量维持不变, 样品冷却至室温后称重, 重复 8 次求平均值作为单株生物量。

1.4 数据处理

采用 Excel 2010 软件对试验数据进行整理, 测定数据取算术平均值; 采用 DPS 软件建立水肥耦合回归模型, 进行单因素效应分析、交互效应分析和模型寻优; 采用 Design-Expert 8.0.6 软件绘制耦合效应图。

2 结果与分析

2.1 蜀葵和沙打旺水肥耦合回归模型建立及检验

根据表 2, 以水分利用效率(WUE) 为因变量, X_1 、 X_2 、 X_3 为自变量, 对两种草本植物蜀葵和沙打旺进行多元线性回归分析。

表 1 蜀葵和沙打旺三因素五水平编码值

Table 1 Three-factor and five-level coding values of <i>Althaea rosea</i> and <i>Astragalus adsurgens</i>					
X_{ij}	$Z_1/\%$	蜀葵 <i>Althaea rosea</i>		沙打旺 <i>Astragalus adsurgens</i>	
		$Z_2/(\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2})$	$Z_3/(\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2})$	$Z_2/(\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2})$	$Z_3/(\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2})$
上星号臂+ γ (+1.682)	80.0	240.0	200.0	200.0	280.0
Upper asterisk arm+ γ (+1.682)					
上水平 (+1) Upper level (+1)					
零水平 (0) Zero level (0)	69.9	191.3	159.5	159.5	223.2
下水平 (-1) Lower level (-1)	55.0	120.0	100.0	100.0	140.0
下星号臂- γ (-1.682)	40.1	48.7	40.5	40.5	56.8
Lower asterisk arm- γ (-1.682)	30.0	0	0	0	0
变化区间 Δ_j Change interval Δ_j	14.9	71.3	59.5	59.5	83.2

注: 记耕作层 0.2 m, 则每公顷土壤重 $2 \times 10^5 \text{ kg}$ 。
Note: If the cultivated layer is 0.2 m, the soil weight per hectare is $2 \times 10^5 \text{ kg}$.

$$WUE_1 = 1.126 - 0.229X_1 + 0.163X_2 - 0.017X_3 + 0.071X_1^2 - 0.084X_2^2 + 0.008X_3^2 - 0.106X_1X_2 - 0.044X_1X_3 - 0.066X_2X_3 \tag{4}$$

$$WUE_2 = 1.156 + 0.118X_1 + 0.013X_2 - 0.030X_3 - 0.009X_1^2 + 0.016X_2^2 + 0.025X_3^2 - 0.111X_1X_2 - 0.044X_1X_3 - 0.009X_2X_3 \tag{5}$$

式中, WUE_1 为蜀葵的水分利用效率, WUE_2 为沙打旺的水分利用效率, X_1 为土壤相对含水量的编码值, X_2 为施氮量的编码值, X_3 为施磷量的编码值。

(4) 式回归显著性检验结果: $F_1 = 4.536 < F_{0.05}(5, 5) = 5.05$, 失拟不显著。 $F_2 = 7.89 > F_{0.05}(9, 10) = 3.02$, 回归关系极显著 ($P < 0.01$)。说明建立的回归模型具有代表性, 可作为蜀葵的 WUE 预测模

型。(5) 式回归显著性检验结果: $F_1 = 1.294 < F_{0.05}(5, 5) = 5.05$, 失拟不显著。 $F_2 = 3.26 > F_{0.05}(9, 10) = 3.02$, 回归关系显著 ($P < 0.05$)。说明建立的回归模型具有代表性, 可作为沙打旺的 WUE 预测模型。

在 $\alpha = 0.10$ 显著水平下, 剔除不显著项后, 得到简化后的回归方程:

$$WUE_1 = 1.126 - 0.229X_1 + 0.163X_2 + 0.071X_1^2 - 0.084X_2^2 - 0.106X_1X_2 \tag{6}$$

$$WUE_2 = 1.156 + 0.118X_1 - 0.111X_1X_2 \tag{7}$$

2.2 蜀葵和沙打旺水肥耦合回归模型主效应分析

回归模型的偏回归系数已标准化, 可以直接从一次项系数绝对值判断各因素对目标函数的影响

大小。三因素对蜀葵的 WUE 的影响顺序为 $X_1>X_2>X_3$, 即土壤相对含水量>施氮量>施磷量, 说明土壤相对含水量对蜀葵 WUE 影响最大, 施氮量次之, 施磷量影响程度最小。其中 X_2 为正效应, 即施氮量增加促进了蜀葵 WUE 提高; X_1 和 X_3 为负效应, 即土壤相对含水量和施磷量增加阻碍了蜀葵 WUE 提高。三因素对沙打旺的 WUE 的影响顺序为 $X_1>X_3>X_2$, 即土壤相对含水量>施磷量>施氮量, 说明土壤相对含水量对沙打旺 WUE 影响最大, 施磷量次之, 施氮量影响程度最小。其中 X_1 和 X_2 为正效应, 即土壤相对含水量和施氮量增加促进了沙打旺 WUE 提高; X_3 为负效应, 即施磷量增加降低了沙打旺 WUE 。

2.3 蜀葵和沙打旺水肥耦合回归模型单因素效应分析

单因素效应分析是将分析因素以外的因素固定为 0 水平, 仅考虑单一因素对目标函数的影响。根据单因素偏回归方程, 作单因素效应函数图(图 1)。蜀葵的偏回归子模型中, 土壤相对含水量和施氮量的二次项系数为正值, 抛物线开口向上; 施氮量的二次项系数为负值, 开口向下。沙打旺的偏回归子模型中, 土壤相对含水量的二次项系数为负值,

表 2 试验设计方案与结果

Table 2 Experiment design and results				水分利用效率 WUE		生物量 Biomass	
编号 Number	X_1	X_2	X_3	蜀葵 <i>Rosea</i>	沙打旺 <i>Adsurgens</i>	蜀葵 <i>Rosea</i>	沙打旺 <i>Adsurgens</i>
1	1	1	1	0.85	1.13	5.55	2.96
2	1	1	-1	0.93	1.39	5.08	2.85
3	1	-1	1	0.76	1.39	3.72	3.07
4	1	-1	-1	0.88	1.56	2.81	4.19
5	-1	1	1	1.59	1.17	2.00	2.60
6	-1	1	-1	1.80	1.20	2.31	2.92
7	-1	-1	1	1.38	0.93	2.55	1.07
8	-1	-1	-1	1.02	0.98	1.69	2.62
9	-1.682	0	0	1.51	0.96	1.92	2.12
10	1.682	0	0	1.06	1.21	6.67	4.92
11	0	-1.682	0	0.52	1.11	1.30	2.37
12	0	1.682	0	1.17	1.20	3.21	3.01
13	0	0	-1.682	1.16	1.15	3.06	3.55
14	0	0	1.682	1.05	1.21	4.17	3.84
15	0	0	0	1.27	1.30	4.25	3.65
16	0	0	0	1.07	1.00	3.81	3.70
17	0	0	0	1.16	1.11	4.19	2.92
18	0	0	0	1.15	1.17	4.34	3.87
19	0	0	0	1.03	1.20	4.21	4.19
20	0	0	0	1.09	1.17	4.02	2.96

注: X_1, X_2, X_3 分别为土壤相对含水量、施氮量、施磷量编码值。
Note: X_1, X_2, X_3 are the coding values of soil relative water content, nitrogen application amount, and phosphorus application amount.

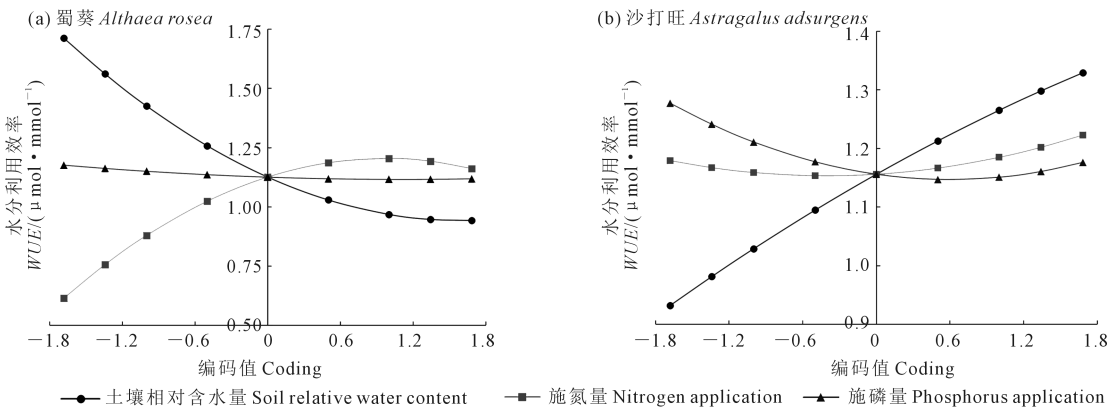


图 1 水分利用效率单因素效应分析

Fig.1 Single factor effects of water use efficiency

抛物线开口向下; 施氮量和施磷量的二次项系数为正值, 开口向上。
由图 1a 可知: 蜀葵的 WUE 随土壤相对含水量的增加而减小^[17-18], 说明灌水量增多不能提高蜀葵的 WUE 。土壤相对含水量编码值为 -1.682 时, 最大 WUE 为 $1.713 \mu\text{mol} \cdot \text{mmol}^{-1}$ 。施氮量编码值由 -1.682 增加到 0.967 水平时, WUE 从 $0.614 \mu\text{mol} \cdot \text{mmol}^{-1}$ 增至 $1.205 \mu\text{mol} \cdot \text{mmol}^{-1}$, 之后 WUE 随施氮量增加逐渐下降至 $1.161 \mu\text{mol} \cdot \text{mmol}^{-1}$, 说明合适的施氮量能促进蜀葵 WUE 的提升, 过多或过少都不利于增加蜀葵的 WUE 。施磷量对蜀葵的水分利

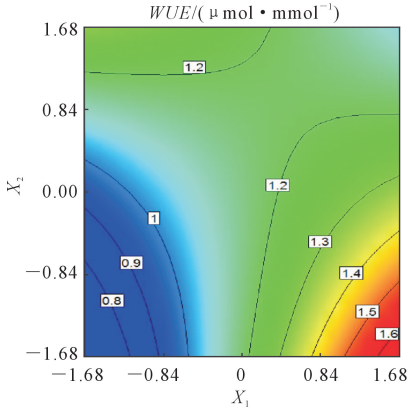
用效率几乎无影响。
由图 1b 可知: 沙打旺的 WUE 随土壤相对含水量的增加而增大, 从 $0.932 \mu\text{mol} \cdot \text{mmol}^{-1}$ 增加到 $1.328 \mu\text{mol} \cdot \text{mmol}^{-1}$ 。沙打旺 WUE 在土壤相对含水量取最大值时出现最大值, 可能土壤相对含水量设计上限偏低。施氮量编码值由 -1.682 增至 -0.424 时, 沙打旺的 WUE 稍有下降, 最小值为 $1.164 \mu\text{mol} \cdot \text{mmol}^{-1}$, 之后 WUE 缓慢增加到 $1.222 \mu\text{mol} \cdot \text{mmol}^{-1}$ 。施磷量水平由 -1.682 增至 0.611 时, 沙打旺的 WUE 呈下降趋势, 最小值为 $1.147 \mu\text{mol} \cdot \text{mmol}^{-1}$, 之后沙打旺 WUE 不断增大至 $1.175 \mu\text{mol} \cdot \text{mmol}^{-1}$ 。

2.4 蜀葵和沙打旺水肥耦合回归模型交互作用分析

三因素交互作用分析,是将某一因素固定为 0 水平,分析另外二因素耦合对因变量的影响。蜀葵交互作用的显著性检验结果为: X_1X_2 (土壤相对含水量 $\times$ 施氮量) $>X_2X_3$ (施氮量 $\times$ 施磷量) $>X_1X_3$ (土壤相对含水量 $\times$ 施磷量),但交互效应均不显著($P>0.05$)。

沙打旺叶片水分利用效率的三因素交互作用显著性检验结果为: X_1X_2 (土壤相对含水量 $\times$ 施氮量) $>X_1X_3$ (土壤相对含水量 $\times$ 施磷量) $>X_2X_3$ (施氮量 $\times$ 施磷量)。其中只有 X_1X_2 对沙打旺的水分利用效率有显著影响($P=0.0145<0.05$), X_1X_3 和 X_2X_3 没有通过显著性检验。因此这里仅分析 X_1X_2 (土壤相对含水量 $\times$ 施氮量)对沙打旺叶片水分利用效率的交互作用。

沙打旺土壤相对含水量和施氮量二因素耦合



注: X_1 是土壤相对含水量的编码值, X_2 是施氮量的编码值。

Note: X_1 is the coding value of soil relative water content, and X_2 is the coding value of nitrogen application amount.

图 2 土壤相对含水量与施氮量对沙打旺水分利用效率的耦合效应

Fig.2 Coupling effect of soil relative water content and nitrogen application amount on water use efficiency of *Astragalus adsurgens*

2.5 蜀葵和沙打旺水肥耦合回归模型寻优

水分利用效率用于综合评价植物生长适宜程度,生物量是评价植物干物质产出的重要指标,综合二者分析得出两种植物的水肥优化方案,既保证了植物的存活,也有利于植物的旺盛生长。采用 DPS 数据处理系统进行模型寻优,三因素五水平共组成了 3^5 种(125 种)方案。根据 DPS 数据处理软件给出的 95%上下限置信区间,由公式 $Z_{ij}=X_{ij}\Delta_j+Z_0$ 换算得到优化方案(土壤相对含水量、施氮量、施磷量)的上下限,实际化肥施用量需根据化肥质量百分数进行换算。

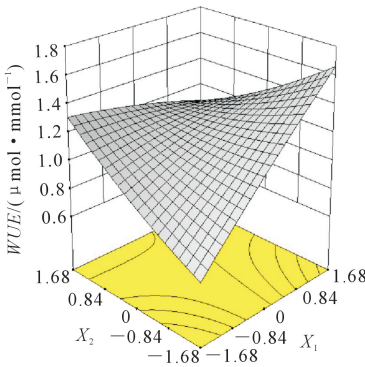
蜀葵 $WUE>1.12\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{mmol}^{-1}$ 的组合有 50 个,蜀葵生物量 $>3.54\text{ g}\cdot\text{株}^{-1}$ 的方案有 43 个。蜀葵的三

交互方程为:

$$WUE_2=1.156+0.118X_1+0.013X_2-0.009X_1^2+0.016X_2^2-0.111X_1X_2 \tag{8}$$

由图 2 可得, X_1 的编码值临界点为 0, X_2 的编码值临界点为 0.84。当土壤相对含水量、施氮量小于临界点,随着二因素的增加, WUE 增加,产生耦合协同效应;大于临界点时, WUE 随二因素的增加而降低,产生负效应,说明过量水肥不利于提高沙打旺 WUE ^[19]。

$X_1<0,X_2>0.84$ 时,固定土壤相对含水量, WUE 随施氮量增加而增加,说明此时施氮量对 WUE 影响更大。 $X_1>0,X_2<0.84$ 时,固定施氮量,沙打旺 WUE 随土壤相对含水量增加而增加,这与单因素效应分析结果一致,说明此时土壤相对含水量是 WUE 主要影响因素。当 X_1 编码值为 1.682, X_2 编码值为 -1.682 时,最大 WUE 为 $1.415\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{mmol}^{-1}$ 。



因素优化方案见表 3 和表 4,可见水、氮、磷的施用范围有重叠部分。三因素一致范围内,可认为是水肥用量较低时水分利用效率较高,且干物质产出较多的蜀葵优化方案:土壤相对含水量37.6%~40.9%,施氮量 $153.1\sim178.5\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,施磷量 $89.4\sim120.4\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。

沙打旺 $WUE>1.18\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{mmol}^{-1}$ 的组合有 40 个,沙打旺生物量 $>3.17\text{ g}\cdot\text{株}^{-1}$ 的方案有 45 个。沙打旺的三因素优化方案见表 5 和表 6,可见水、氮、磷的施用范围有重叠部分。三因素一致范围内,可认为是水肥用量较低时水分利用效率较高,且干物质产出较多的沙打旺优化方案:土壤相对含水量 $69.0\%\sim70.6\%$,施氮量 $61.8\sim94.6\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,施磷量 $109.9\sim170.1\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。

表 3 蜀葵水分利用效率>1.12 μmol · mmol⁻¹的优化方案

Table 3 Prioritization scheme of <i>Althaea rosea</i> with water use efficiency >1.12 μmol · mmol ⁻¹			
水平 Level	X ₁	X ₂	X ₃
-1.682	20	0	10
-1	15	5	10
0	15	15	10
1	0	15	10
1.682	0	15	10
合计次数 Total times	50	50	50
加权均数 Weighted average	-0.973	0.705	0
标准误 Standard error	0.099	0.123	0.175
95%置信区间	-1.166~	0.464~	-0.343~
95% Confidence interval	-0.780	0.945	0.343
优化方案 Optimization plan	37.6~43.4	153.1~187.4	79.6~120.4

表 4 蜀葵生物量>3.54 g · 株⁻¹的优化方案

Table 4 Prioritization scheme of *Althaea rosea* with biomass >3.54 g · plant⁻¹

水平 Level	X ₁	X ₂	X ₃
-1.682	0	0	6
-1	0	6	8
0	7	14	10
1	18	13	10
1.682	18	10	9
合计次数 Total times	43	43	43
加权均数 Weighted average	1.123	0.554	0.164
标准误 Standard error	-1.123	0.136	0.179
95%置信区间	-1.297~	0.288~	-0.178~
95% Confidence interval	-0.948	0.820	0.515
优化方案 Optimization plan	35.7~40.9	140.5~178.5	89.4~130.6

表 5 沙打旺水分利用效率>1.18 μmol · mmol⁻¹的优化方案

Table 5 Prioritization scheme of *Astragalus adsurgens* with water use efficiency >1.18 μmol · mmol⁻¹

水平 Level	X ₁	X ₂	X ₃
-1.682	5	10	8
-1	5	10	8
0	0	10	8
1	15	0	8
1.682	15	10	8
合计次数 Total times	40	40	40
加权均数 Weighted average	0.67	-0.25	0
标准误 Standard error	0.191	0.2	0.196
95%置信区间	0.295~	-0.642~	-0.384~
95% Confidence interval	1.046	0.142	0.384
优化方案 Optimization plan	59.4~70.6	61.8~108.4	108.1~171.9

表 6 沙打旺生物量>3.17 g · 株⁻¹的优化方案

Table 6 Prioritization scheme of <i>Astragalus adsurgens</i> with biomass >3.17 g · plant ⁻¹			
水平 Level	X ₁	X ₂	X ₃
-1.682	0	10	9
-1	0	10	9
0	5	15	9
1	20	10	9
1.682	20	0	9
合计次数 Total times	45	45	45
加权均数 Weighted average	1.19	-0.37	0
标准误 Standard error	0.079	0.144	0.184
95%置信区间	0.937~	-0.656~	-0.362~
95% Confidence interval	1.347	-0.091	0.362
优化方案 Optimization plan	69.0~75.1	61.0~94.6	109.9~170.1

量、施肥量对两种植物叶片 WUE 的影响程度是不同的,土壤相对含水量对两种草本植物 WUE 的影响重要性大于施肥量,这与张新燕等^[20]、于文颖等^[21]得出的试验结果一致。

灌水量影响气孔开合程度,进而影响光合过程和蒸腾过程^[22-23],因此植物的 WUE 出现变化。蜀葵的 WUE 随土壤相对含水量的增加逐渐减小,可能是因为土壤水分出现亏缺时,气孔开度较低,由于光合作用对气孔开度的依赖性小于蒸腾作用^[24],所以土壤相对含水量较低时叶片 WUE 较高^[25-26],这与种培芳等^[27]研究干旱胁迫对甘肃 5 种经济林木 WUE 影响时得到的结论一致。沙打旺 WUE 随土壤相对含水量的增加而逐渐升高,可能是因为气孔导度随土壤相对含水量的增加而逐渐下降^[28],WUE 随气孔导度下降而增加;也可能是因为土壤相对含水量增加,能被植物利用的水分增加,蒸腾强度增大^[29],植物 WUE 降低。邢英英等^[30]研究得出,灌水影响了土壤中的水分和养分环境,一定范围内根系生长和土壤水分表现出正相关关系,这与本文得出的结论一致。随着土壤相对含水量的增加,沙打旺的 WUE 可能出现最大值后下降,即 WUE 随土壤相对含水量增大先增大后减小,是否存在最大值尚需要进一步开展研究。施肥对植物 WUE 产生影响,可能是因为肥料促进了植物根系的发育,影响了根系的吸水能力,也可能是因为对郁闭度和土壤水分蒸发量产生了影响,还可能是影响了叶片水势和土壤水势^[31]。

水肥是影响植物 WUE 的重要因素,“以肥调水”^[32-33]、“以水促肥”对于提高草本植物 WUE 有十分重要的作用。水肥耦合效应对植物可产生 3 种效应,即协同效应、叠加效应和拮抗效应。相比于只进行水分管理或养分管理,水肥耦合效应对 WUE

3 讨 论

水、氮、磷 3 因素对蜀葵 WUE 的影响顺序为土壤相对含水量>施氮量>施磷量,对沙打旺 WUE 的影响顺序为土壤相对含水量>施磷量>施氮量。灌水

的促进效果更好,本文得到的试验结果证明了这一点,马戌等^[34]也得出了类似的结论。分析沙打旺二因素交互效应时得出的耦合影响顺序,与 Wang 等^[35]研究水、氮、磷两两因素耦合对茶树干物质的影响顺序一致。当水分亏缺时,可以通过增施氮肥提高 WUE;氮肥不足时,可以通过增加灌水提高 WUE,这充分验证了水肥作用的互补性,土壤水分(施氮量)的降低可用增施氮肥(提高土壤相对含水量)进行补偿^[36]。根据水肥耦合协同互补效应,施用氮肥和磷肥一定程度上弥补了蜀葵对水分的需要,即施用一定量的氮磷肥后可减少灌水;且进行试验设计时已考虑土壤相对含水量下限可以保证植物的正常存活,蜀葵是耐旱植物,综合两方面考虑蜀葵的优化方案是可行的。孙善文等^[37]研究得出,干旱环境中植物水分利用效率提高可能是因为叶片表面绒毛增加了边界阻力和减少了水分蒸腾,同时提高了对土壤水的利用程度,充分解释了蜀葵的耐旱性。

植物水分利用效率(WUE)的测定,因研究尺度不同而异^[38],可以分为叶片水平、个体水平和群体水平。植物个体 WUE 可用叶片瞬时 WUE 进行估算,两者在生理生态学意义上是一致的。叶片水平上的水分利用效率可以揭示植物内在的耗水机制,为植被合理灌水与施肥提供依据,对于干旱区植被恢复与保育有着十分重要的作用。本研究分析了水肥耦合对两种植物叶片瞬时 WUE 的影响,接下来将继续探究水肥耦合对植物个体和群体水平上 WUE 的影响。在盆栽试验结论的指导下,在西北煤矸石矿区进行重复试验,进一步完善水肥耦合优化方案,指导生产实践活动。

4 结 论

1) 土壤水分条件是影响蜀葵和沙打旺叶片水分利用效率的首要因素;施氮、施磷对叶片水分利用效率的影响程度因植物种类不同而异。

2) 三因素对蜀葵叶片水分利用效率的影响顺序:土壤相对含水量>施氮量>施磷量,因素间交互作用不显著。蜀葵的水肥耦合优化方案为土壤相对含水量 37.6%~40.9%,施氮量 153.1~178.5 kg·hm⁻²,施磷量 89.4~120.4 kg·hm⁻²。

3) 三因素对沙打旺叶片水分利用效率的影响顺序:土壤相对含水量>施磷量>施氮量;二因素耦合对沙打旺水分利用效率的影响显著,顺序为水氮>水磷>氮磷。沙打旺的水肥耦合优化方案为土壤相对含水量 69.0%~70.6%,施氮量 61.8~94.6 kg·

hm⁻²,施磷量 109.9~170.1 kg·hm⁻²。

参 考 文 献:

- [1] 吴淑莹,周伟,袁涛,等. 宁东煤矿基地采煤沉陷区植被动态变化研究[J]. 西北林学院学报, 2020, 35(1): 218-225.
WU S Y, ZHOU W, YUAN T, et al. Vegetation dynamics in mining subsidence area of Ningdong coal mine base[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2020, 35(1): 218-225.
- [2] 郝志远,李素清. 阳泉矿区煤矸石山复垦地不同植被下草本植物群落生态关系[J]. 应用与环境生物学报, 2018, 24(5): 1158-1164.
HAO Z Y, LI S Q. Ecological relationships in herbaceous plant communities under different plantations on reclaimed coal gob piles in the Yangquan mining area, China[J]. Chinese Journal of Applied & Environmental Biology, 2018, 24(5): 1158-1164.
- [3] 杨宇平,许丽,丰菲,等. 基于植被重建的宁东矿区煤矸石山立地类型及其特征[J]. 水土保持通报, 2020, 40(3): 202-207.
YANG Y P, XU L, FENG F, et al. Site types and characteristics of coal gangue hill based on vegetation reconstruction in Ningdong mining area[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2020, 40(3): 202-207.
- [4] 郝婧,郭东罡,上官铁梁,等. 煤矸石场植被恢复初期生态绩效评价[J]. 生态学报, 2016, 36(7): 1946-1958.
HAO J, GUO D G, SHANGGUAN T L, et al. Ecological performance assessment on early plant reclamation in coal gangue yard[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(7): 1946-1958.
- [5] LI K J, GU Y S, LI M Z, et al. Spatial analysis, source identification and risk assessment of heavy metals in a coal mining area in Henan, Central China[J]. International Biodeterioration & Biodegradation, 2018, 128: 148-154.
- [6] 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.
YANG Q X, ZHAO B Q, GUO D G. A review on vegetation restoration of opencast coal mine areas in northern China[J]. Chinese Journal of Ecology, 2015, 34(4): 1152-1157.
- [7] 梁会,田美荣,钱金平,等. 基于风蚀模型的宁夏土壤风蚀特征及影响因素[J]. 水土保持研究, 2019, 26(1): 34-40.
LIANG H, TIAN M R, QIAN J P, et al. Soil wind erosion characteristics and influence factors in Ningxia based on wind erosion model[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2019, 26(1): 34-40.
- [8] ZAHRA N, FAROOQ M, SIDDIQUE K H M. Strategies for improving water use efficiency in dryland agroecosystems[J]. Frontiers of Agricultural Science and Engineering, 2021, 8(4): 599-602.
- [9] 俞斌华,王文建,殷建鹏,等. 杀菌剂对沙打旺种子萌发和幼苗生长的短期影响[J]. 草业科学, 2017, 34(1): 59-66.
YU B H, WANG W J, YIN J P, et al. Short-term effect of fungicide on seed germination and seedling growth of standing milk vetch (*As-tragalus adsurgens*) [J]. Pratacultural Science, 2017, 34(1): 59-66.
- [10] SU B Q, SHANGGUAN Z P. Response of water use efficiency and plant-soil C : N : P stoichiometry to stand quality in Robinia pseud-oacacia on the Loess Plateau of China [J]. Catena, 2021, 206: 105571.
- [11] YANG S S, ZHANG J H, HAN J Q, et al. Evaluating global ecosystem water use efficiency response to drought based on multi-model a-

- nalys[J]. Science of the Total Environment, 2021, 778: 146356.
- [12] QI D L, HU T T, SONG X. Effects of nitrogen application rates and irrigation regimes on grain yield and water use efficiency of maize under alternate partial root-zone irrigation[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2020, 19(11): 2792-2806.
- [13] 季波,何建龙,吴旭东,等.宁夏典型天然草地土壤有机碳及其活性组分变化特征[J].草业学报,2021,30(1): 24-35.
- Ji B, HE J L, WU X D, et al. Characteristics of soil organic carbon and active organic carbon in typical natural grassland in Ningxia[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2021, 30(1): 24-35.
- [14] 陈怀满.环境土壤学[M].北京:科学出版社,2010:113-123.
- CHEN H M. Environmental soil science[M]. Beijing: Science press, 2010:113-123.
- [15] 羿明璇,陈震,储志英,等.磷水因子及其互作效应影响紫云英生长发育研究进展[J].中国草地学报,2020,42(3): 167-174.
- YI M X, CHEN Z, CHU Z Y, et al. Research advances in the effects of water,phosphorus and their interaction on the growth and development of Chinese milk vetch (*Astragalus sinicus* L.)[J]. Chinese Journal of Grassland, 2020, 42(3): 167-174.
- [16] 陈丹丹,欧光龙,陈金龙,等.不同天气条件对云南 4 个主要造林树种幼林光合特性的影响[J].西南林业大学学报,2016,36(5): 32-38.
- CHEN D D, OU G L, CHEN J L, et al. Effects of different weather conditions on Photosynthetic characteristics of juvenile plantations of four afforestation tree species in Yunnan Province[J]. Journal of Southwest Forestry University, 2016, 36(5): 32-38.
- [17] ZHAO J X, FENG H Z, XU T R, et al. Physiological and environmental control on ecosystem water use efficiency in response to drought across the northern hemisphere[J]. Science of the Total Environment, 2021, 758: 143599.
- [18] ZHANG J X, WANG Q Q, XIA G M, et al. Continuous regulated deficit irrigation enhances peanut water use efficiency and drought resistance[J]. Agricultural Water Management, 2021, 255: 106997.
- [19] ZHOU X, WANG R S, GAO F, et al. Apple and maize physiological characteristics and water-use efficiency in an alley cropping system under water and fertilizer coupling in Loess Plateau, China[J]. Agricultural Water Management, 2019, 221: 1-12.
- [20] 张新燕,王浩翔,牛文全.水氮供应对温室滴灌番茄水氮分布及利用效率的影响[J].农业工程学报,2020,36(9): 106-115.
- ZHANG X Y, WANG H X, NIU W Q. Effects of water and N-fertilizer supplies on the distribution and use efficiency of water and nitrogen of drip-irrigated tomato in greenhouse[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(9): 106-115.
- [21] 于文颖,纪瑞鹏,冯锐,等.不同生育期玉米叶片光合特性及水分利用效率对水分胁迫的响应[J].生态学报,2015,35(9): 2902-2909.
- YU W Y, JI R P, FENG R, et al. Response of water stress on photosynthetic characteristics and water use efficiency of maize leaves in different growth stage[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(9): 2902-2909.
- [22] 韩阳瑞,单炜,许大为,等.沙地柠条光合特性与水分利用效率对干旱胁迫的响应[J].西南林业大学学报(自然科学),2021,41(3): 37-44.
- HAN Y R, SHAN W, XU D W, et al. Response of photosynthetic characteristics and water use efficiency to drought stress of *Caragana korshinskii* in desert[J]. Journal of Southwest Forestry University (Natural Sciences), 2021, 41(3): 37-44.
- [23] 王海梅,贾成朕,李慧融,等.水分胁迫对典型草原植物群体光合作用的影响[J].干旱地区农业研究,2020,38(1): 237-242.
- WANG H M, JIA C Z, LI H R, et al. Effects of water stress on community photosynthesis of plants and its relationship of typical grassland in northern China[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2020, 38(1): 237-242.
- [24] 姜寒冰,张玉翠,任晓东,等.作物水分利用效率研究方法 & 尺度传递研究进展[J].中国生态农业学报,2019,27(1): 50-59.
- JIANG H B, ZHANG Y C, REN X D, et al. A review of progress in research and scaling-up methods of crop water use efficiency[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2019, 27(1): 50-59.
- [25] NAZEMI RAFI Z, KAZEMI F, TEHRANIFAR A. Effects of various irrigation regimes on water use efficiency and visual quality of some ornamental herbaceous plants in the field[J]. Agricultural Water Management, 2019, 212: 78-87.
- [26] 张燕,张富仓,强生才,等.水肥供应对温室滴灌施肥番茄生长及水氮利用的影响[J].干旱地区农业研究,2017,35(4): 103-109.
- ZHANG Y, ZHANG F C, QIANG S C, et al. Effects of irrigation and fertilization on growth, water and nitrogen use of tomato in greenhouse under fertigation[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2017, 35(4): 103-109.
- [27] 种培芳,单立山,苏世平,等.干旱胁迫对甘肃地区 5 种经济林苗木水分利用效率的影响[J].干旱地区农业研究,2018,36(2): 137-143.
- CHONG P F, SHAN L S, SU S P, et al. Effects of drought stress on water use efficiency of five economic forest species in Gansu Province[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2018, 36(2): 137-143.
- [28] 于明含.典型固沙植物冠层温度和气孔导度特征及其对土壤水分的响应[D].北京:北京林业大学,2016.
- YU M H. Canopy temperature and stomatal conductance characteristics of typical sand-fixation plants and their responses to soil moisture[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2016.
- [29] MACHAKAIRE A T B, STEYN J M, FRANKE A C. Assessing evapotranspiration and crop coefficients of potato in a semi-arid climate using eddy covariance techniques[J]. Agricultural Water Management, 2021, 255: 107029.
- [30] 邢英英,张富仓,张燕,等.滴灌施肥水肥耦合对温室番茄产量、品质和水氮利用的影响[J].中国农业科学,2015,48(4): 713-726.
- XING Y Y, ZHANG F C, ZHANG Y, et al. Effect of irrigation and fertilizer coupling on greenhouse tomato yield, quality, water and nitrogen utilization under fertigation[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2015, 48(4): 713-726.
- [31] 王鹏勃,李建明,丁娟娟,等.水肥耦合对温室袋培番茄品质、产量及水分利用效率的影响[J].中国农业科学,2015,48(2): 314-323.
- WANG P B, LI J M, DING J J, et al. Effect of water and fertilizer coupling on quality, yield and water use efficiency of tomato cultivated by organic substrate in bag[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2015, 48(2): 314-323.