

# 水肥条件对煤矸石土壤上两种牧草光合及生物量的影响

马 戌<sup>1</sup>, 王进鑫<sup>2</sup>, 张玉玉<sup>1</sup>, 胡杭丽<sup>2</sup>

(1.西北农林科技大学 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 2.西北农林科技大学 资源环境学院, 陕西 杨凌 712100)

**摘 要:**西北干旱荒漠区煤矸石排放数量巨大, 占用了大量土地且造成了多种污染, 为了解决植被恢复面临的水分短缺、蒸发力强和养分贫瘠等困难, 保证煤矸石土壤上典型牧草能够正常存活和生长良好, 试验采用二次通用旋转组合设计, 测定了不同水肥条件下草木樨和蒙古冰草的光合及生物量并建立了水肥耦合回归模型, 得到了煤矸石山植被恢复中 2 种牧草的最优水肥方案。结果表明: 土壤水分对 2 种牧草的光合及生物量最敏感; 磷肥对草木樨生长的贡献大于氮肥, 氮肥对蒙古冰草生长的贡献大于磷肥; 草木樨的光合及生物量均远大于蒙古冰草。西北煤矸石山植被恢复的草本植物首选草木樨, 其最优水肥方案为土壤相对含水量 68.44%~71.84%, 施氮量 82.09~102.92 kg/hm<sup>2</sup>, 施磷量 139.92~192.58 kg/hm<sup>2</sup>。其次是蒙古冰草, 其最优水肥方案为土壤相对含水量 65.33%~71.11%, 施氮量 138.40~172.62 kg/hm<sup>2</sup>, 施磷量 82.09~117.91 kg/hm<sup>2</sup>。试验结果为西北干旱荒漠区采煤迹地植被恢复提供了理论依据和实践指导。

**关键词:**煤矸石; 净光合速率; 生物量; 水肥耦合; 植被恢复; 模型寻优

中图分类号: S158.3

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2021)01-0179-09

## Effects of Water and Fertilizer Conditions on Photosynthesis and Biomass of Two Forage Grasses in Coal Gangue Soil

MA Xu<sup>1</sup>, WANG Jinxin<sup>2</sup>, ZHANG Yuyu<sup>1</sup>, HU Hangli<sup>2</sup>

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

**Abstract:** Coal mining activities produce a huge amount of coal gangue and other solid wastes, which are deposited in piles and replace a large area of arable land into bare land. Moreover, these mining activities are more severe in the arid desert area of northwest China where scarcity of water and nutrients plays a significant role in the vegetation restoration. A quadratic general rotary combination design was adopted to examine the influence of different doses of water and fertilizers on the photosynthesis and biomass of *Melilotus albus* Desr. and *Agropyron mongolicum* Keng grown in coal mine spoils. Moreover, to identify a suitable water and fertilizer doses for vegetation restoration in the coal gangue area of northwest China. The experimental results showed that soil water was most important factor for the net photosynthesis rate and biomass production of the two forage grasses, and also demonstrated that the influence of phosphorus fertilizer on growth of *Melilotus albus* Desr. was higher than that of nitrogen fertilizer, whereas the influence of nitrogen fertilizer on growth of *Agropyron mongolicum* Keng was higher than that of phosphorus fertilizer. The net photosynthesis rate and biomass production of *Melilotus albus* Desr. were greater higher than *Agropyron mongolicum* Keng, suggesting that planting *Melilotus albus* Desr. for revegetation purpose in the northwest coal gangue area with optimum water and fertilizer doses is the effective practice, which follows the pattern: soil relative water content 68.44%~71.84%, nitrogen application 82.09~102.92 kg/hm<sup>2</sup>, phosphorus application 139.92~192.58 kg/hm<sup>2</sup>. In addition, vegetation with *Agropyron mongolicum* Keng using soil relative water

收稿日期: 2019-12-31

修回日期: 2020-04-01

资助项目: 国家基础研发计划项目子课题“采煤迹地植被重建与保育技术研究”(2017YFC0504402-4)资助; 国家级大学生科技创新项目(201910712051)

第一作者: 马戌(1994—), 男, 甘肃平凉人, 硕士, 研究方向是林草生态工程。E-mail: maxu\_xnsbs@163.com

通信作者: 王进鑫(1962—), 男, 甘肃镇原人, 博士, 教授, 主要从事旱区人工林生态系统水分运移调控与生态恢复理论研究。E-mail: jwangl18@126.com

content of 65.33%~71.11%, nitrogen application of 138.40~172.62 kg/hm<sup>2</sup>, phosphorus application of 82.09~117.91 kg/hm<sup>2</sup> can also be considered as a second option.

**Keywords:** gangue field; net photosynthetic rate; biomass; water-fertilizer coupling; vegetation restoration; model optimization

煤矸石是煤炭开采和洗选过程中产生的一种排放量最大、占地最多、污染最严重的固体废弃物,其资源化利用率相对较低<sup>[1-2]</sup>。在我国,煤矸石山植被恢复总是在覆土后采用工程措施和林草措施相结合而进行的。尽管煤矸石山植被恢复已初见成效,但是煤矸石覆土土层很薄,土壤物理结构不良,保水持水能力很差,养分极端贫瘠,氮磷钾及有机质含量极低,植物生长发育所需的水分和养分严重匮乏<sup>[3-4]</sup>,致使林草成活率低、保存率低,植被恢复难度高,绿化工程投资大等问题还远远没有解决。目前,已有的研究多集中于水分、温度、盐害、养分等单一限制性因子<sup>[5-8]</sup>,而关于各因素交互效应对煤矸石山植被恢复影响的研究鲜有报道。对西北干旱荒漠区煤矸石山植被恢复而言,水分和养分是维持植物生长的关键因子,合理的水肥条件是植物长势良好的重要保证。研究表明水肥耦合有利于提高林草生产力和水肥利用效率,促进光合作用,增加生物量积累<sup>[9-10]</sup>。谷裕等<sup>[11]</sup>认为矿区植被恢复与土壤水分和养分之间存在复杂的交互效应,两者相互依存且制约,土壤养分特性相对于土壤水分对矿区植物生长的影响更大。但是也有研究认为土壤水分比土壤养分特性对矿区植物生长的影响更大<sup>[12-13]</sup>。因此,研究西北干旱荒漠区植物光合及生物量的水肥耦合规律,明确其最优水肥方案是煤矸石山植被恢复亟待解决的核心问题。

Huang 等<sup>[14]</sup>认为西北干旱荒漠区煤矸石山植被恢复,应该以草本植物为主。基于西北地区土壤结构差、水分短缺、气候恶劣等立地条件与适生植物调查<sup>[15-18]</sup>,草木樨和蒙古冰草适应性和抗逆性强,耐寒、耐旱、耐贫瘠、耐盐碱,根系发达,生长迅速,生物量大,防风固沙能力强,是西北干旱荒漠区采煤迹地植被恢复的先锋牧草。因此,本文以草木樨和蒙古冰草为研究对象,探讨不同水肥条件对煤矸石土壤上 2 种典型草本植物光合及生物量的影响规律,从而确定西北煤矸石山植被恢复的最优水肥方案,必将为西北干旱荒漠区采煤迹地植被重建与保育提供重要的理论依据和技术支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

试验选取白花草木樨(*Melilotus albus* Desr.)和蒙古

冰草(*Agropyron mongolicum* Keng)作为供试材料,其种子均购于宁夏远声绿阳草业生态工程有限公司,采摘于宁夏当地。试验所需氮肥和磷肥分别为尿素(含氮 46%)和重过磷酸钙(含 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 46%),其中尿素溶于水后随水施入土壤,重过磷酸钙以穴施方式施入土壤。

### 1.2 供试土壤

试验供试土样由表层沙土和母质 3:1 混合而成,于 2019 年 3 月取自宁夏灵武羊场湾排矸场,过 0.5 cm 筛作为栽培基质。土壤理化性质为:土壤田间最大持水量 13.50%,容重 1.44 g/cm<sup>3</sup>,总孔隙度 31.36%,pH 8.54,土壤水溶性盐总量 0.77 g/kg,有机质 2.40 g/kg,碱解氮 9.14 mg/kg,有效磷 4.92 mg/kg,有效钾 58.89 mg/kg。土壤结构性较差,蓄水保墒能力差,氮、磷元素含量较低,钾元素含量较高,因此,试验仅对氮肥和磷肥进行研究。

### 1.3 试验设计与方法

盆栽试验采用 3 因素(土壤相对含水量、施氮量和施磷量)5 水平二次回归通用旋转组合设计,分别以草木樨和蒙古冰草的叶片净光合速率、水分利用效率和单株总生物量(干重)为目标函数构建二次回归模型。 $\gamma=1.682$ ,中心试验点  $m_0=6$ ,每种牧草设有 20 个处理,每个处理 10 个重复。根据供试土壤基础肥力状况,结合当地降雨量、水肥施用量以及草木樨和蒙古冰草生长发育的水肥特性,从而确定了 2 种牧草的三因素水平上下限,其编码值见表 1。设计土壤相对含水量、施氮量和施磷量 3 个因素依次为  $Z_1$ ,  $Z_2$ ,  $Z_3$ ,其中第  $j$  个因素的上、下水平分别为  $Z_{2j}$ ,  $Z_{1j}$ ,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  $\Delta_j$  如下:

$$Z_{0j} = \frac{Z_{1j} + Z_{2j}}{2} \Delta_j = \frac{Z_{2j} - Z_{1j}}{\gamma}$$

式中: $Z_1$  为土壤相对含水量; $Z_2$  为施氮量; $Z_3$  为施磷量; $Z_{2j}$ ,  $Z_{1j}$  分别为第  $j$  个因素的上、下水平; $Z_{0j}$  为各因素的零水平; $\Delta_j$  为各因素的变化间距; $\gamma=1.682$ 。

对各因素各水平进行编码,土壤相对含水量、施氮量和施磷量的编码值分别记为  $X_1$ ,  $X_2$  和  $X_3$ ,其编码值计算公式如下:

$$X_{ij} = \frac{Z_{1j} - Z_{0j}}{\Delta_j}$$

式中: $X_{ij}$  为各因素各水平的编码值; $X_1$  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; $\Delta_j$ 为各因素的变化间距。

表 1 试验因素水平及编码值

$X_{ij}$	$Z_1/\%$	草木樨		蒙古冰草	
		$Z_2/$	$Z_3/$	$Z_2/$	$Z_3/$
		( $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ )	( $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ )	( $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ )	( $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ )
+1.682	80.0	200.0	280.0	240.0	200.0
1	69.9	159.5	223.2	191.3	159.5
0	55.0	100.0	140.0	120.0	100.0
-1	40.1	40.5	56.8	48.7	40.5
-1.682	30.0	0.0	0.0	0.0	0.0
$\Delta_j$	14.9	59.5	83.2	71.3	59.5

注:记耕作层 0.20 m,则每  $\text{hm}^2$  土壤重  $2\times 10^6\text{kg}$ 。

试验地点位于西北农林科技大学南校区温室大棚,于 2019 年 3 月 15 日进行播种,充分灌水,待其幼苗长出 3 片真叶(即 4 月 20 日)时进行间苗,每盆保留 10 株长势相对一致的幼苗。试验从 6 月 1 日开始每天早上 8:00 通过称重法按照设计重量补水,使各处理盆栽土壤相对含水量维持在设定的水平范围(如  $80\%\pm 5\%$ )至试验结束,同时根据试验方案,将尿素总量的 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,重过磷酸钙总量的一半分别于 5 月 19 日和 6 月 10 采用穴施法施入土壤。

采用便携式光合仪(CIRAS-3)分别于 7 月 25 月、8 月 1 日对 2 种牧草进行两次光合测定,主要包括叶片的净光合速率( $P_n$ )、蒸腾速率( $Tr$ )和水分利用效率( $WUE$ )等指标。选定一个晴朗的上午,从 8:00—12:00 选择草木樨和蒙古冰草各处理完全伸展的成熟叶片进行光合测定,每种牧草每个处理重复 8 次,求平均值即为其光合参数。

试验结束后(8 月 21 日),挖出所有植株,清洗并用吸水纸吸干根系表面的水分,先在  $100\sim 105^\circ\text{C}$  杀青 10 min,然后把烘箱的温度降到  $70\sim 80^\circ\text{C}$  左右,烘至恒重,将干样放入干燥器中冷却至室温,取出称重,重复 10 次,求得平均值即为单株生物量( $B$ )。

1.4 数据处理

采用 Excel 2010 软件对试验数据进行统计与整理;采用 Design-Expert 8.0.6 软件建立 2 种牧草水肥耦合回归模型,用 ANOVA 程序做方差分析,t 检验法对模型回归系数进行显著性检验,响应面分析交互效应,采用 DPS 数据处理系统对 2 种牧草的水肥耦合回归模型进行约束条件下的模型寻优。

2 结果与分析

2.1 水肥耦合回归模型的建立及检验

将不同水肥条件下草木樨和蒙古冰草的叶片净光合速率、水分利用效率和生物量列于表 2 中,采用

Design-Expert 软件对表 2 试验结果进行多元线性回归分析,分别建立其关于 3 个因素的二次回归模型(1),(2),(3),(4),(5)和(6):

$$Pn_1=12.06+2.81X_1+0.30X_2+0.85X_3-0.72X_1^2-0.91X_2^2-0.45X_3^2-0.65X_1X_2-0.23X_1X_3-0.32X_2X_3$$
(1)

$$WUE_1=1.34+0.02X_1+0.01X_2+0.04X_3-0.10X_1^2-0.08X_2^2-0.06X_3^2-0.08X_1X_2-0.03X_1X_3-0.01X_2X_3$$
(2)

$$B_1=2.65+0.96X_1-0.03X_2+0.17X_3+0.20X_1^2-0.01X_2^2+0.004X_3^2+0.15X_1X_2-0.32X_1X_3+0.10X_2X_3$$
(3)

$$Pn_2=6.08+0.91X_1+0.70X_2+0.12X_3+0.07X_1^2+0.13X_2^2+0.23X_3^2+0.13X_1X_2+0.06X_1X_3-0.47X_2X_3$$
(4)

$$WUE_2=0.85+0.09X_1+0.07X_2-0.001X_3-0.06X_1^2-0.002X_2^2-0.02X_3^2+0.04X_1X_2-0.02X_1X_3-0.02X_2X_3$$
(5)

$$B_2=0.39+0.09X_1+0.07X_2+0.02X_3+0.001X_1^2-0.03X_2^2+0.01X_3^2-0.02X_1X_2-0.01X_1X_3-0.01X_2X_3$$
(6)

式中: $Pn_1$ 和  $Pn_2$ 分别表示草木樨和蒙古冰草的叶片净光合速率[ $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ ]; $WUE_1$ 和  $WUE_2$ 分别表示其叶片水分利用效率( $\mu\text{mol}/\text{mmol}$ ); $B_1$ 和  $B_2$ 分别表示其单株生物量( $\text{g}/\text{株}$ ); $X_1$ 为土壤相对含水量编码值; $X_2$ 为施氮量编码值; $X_3$ 为施磷量编码值。

水肥耦合回归模型经显著性检验, $F_1<F_{0.05}(5,5)=5.05$ ,失拟不显著,即试验中除设置因素外,其他自然因素对试验结果未产生显著性影响,表明回归方程在试验区域拟合很好。 $F_2>F_{0.05}(9,10)=3.02$ ,表明草木樨和蒙古冰草的水肥耦合回归模型均达到了显著水平( $p<0.05$ )。说明建立的二次回归模型都具有代表性,对西北煤矸石山草木樨和蒙古冰草叶片净光合速率、水分利用效率和生物量进行预测,具有较高的可靠性。

表 2 试验方案设计与结果统计表

处理号	各处理变量编码值			Pn/( $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )		WUE/( $\mu\text{mol} \cdot \text{mmol}^{-1}$ )		生物量/(g/株)	
	$X_1$	$X_2$	$X_3$	草木樨	蒙古冰草	草木樨	蒙古冰草	草木樨	蒙古冰草
1	1	1	1	11.58±3.89	7.63±0.59	0.99±0.23	0.90±0.33	3.64±0.75	0.43±0.30
2	1	1	−1	11.78±1.80	8.90±0.36	1.05±0.32	0.98±0.22	3.77±0.59	0.54±0.55
3	1	−1	1	14.23±2.14	6.88±1.73	1.19±0.33	0.73±0.16	3.50±0.59	0.49±0.57
4	1	−1	−1	12.03±2.90	5.95±1.81	1.17±0.32	0.74±0.08	4.04±0.83	0.39±0.38
5	−1	1	1	8.93±2.42	6.10±1.05	1.29±0.45	0.73±0.39	2.29±0.45	0.41±0.34
6	−1	1	−1	7.08±2.87	7.28±1.66	1.17±0.53	0.74±0.41	1.13±0.63	0.33±0.24
7	−1	−1	1	7.85±2.85	5.55±1.79	1.14±0.51	0.71±0.25	2.74±0.30	0.25±0.20
8	−1	−1	−1	5.88±1.84	5.20±1.42	1.03±0.54	0.65±0.46	1.98±0.32	0.27±0.24
9	−1.682	0	0	4.60±1.36	3.88±1.18	0.88±0.38	0.44±0.39	1.28±0.26	0.17±0.16
10	1.682	0	0	15.58±0.99	8.15±0.85	1.21±0.30	0.87±0.28	5.05±1.30	0.57±0.38
11	0	−1.682	0	8.15±3.04	5.25±1.05	1.06±0.38	0.70±0.35	2.25±0.49	0.10±0.10
12	0	1.682	0	10.98±1.27	7.13±1.23	1.13±0.28	0.96±0.39	2.87±0.46	0.49±0.37
13	0	0	−1.682	9.13±1.28	6.63±1.32	1.05±0.30	0.78±0.25	2.27±0.45	0.35±0.43
14	0	0	1.682	12.60±1.37	6.35±0.60	1.24±0.30	0.80±0.25	2.94±0.66	0.46±0.50
15	0	0	0	11.75±0.90	6.48±1.48	1.28±0.28	0.82±0.46	2.44±0.38	0.44±0.52
16	0	0	0	12.90±1.85	6.13±1.03	1.41±0.40	0.79±0.32	2.39±0.34	0.39±0.36
17	0	0	0	11.60±1.10	5.65±0.82	1.32±0.20	0.90±0.34	2.45±0.55	0.41±0.32
18	0	0	0	12.55±2.42	5.90±0.88	1.40±0.37	0.82±0.36	2.73±0.40	0.31±0.36
19	0	0	0	12.00±1.38	6.55±0.29	1.41±0.39	0.83±0.36	2.91±0.48	0.39±0.36
20	0	0	0	11.53±3.03	5.88±1.44	1.25±0.36	0.93±0.36	3.00±0.47	0.39±0.28

2.2 主因子效应分析

通过对草木樨和蒙古冰草叶片净光合速率、水分利用效率和生物量水肥耦合回归模型的偏回归系数进行标准化,比较其绝对值大小可直接判断各因素对目标函数的影响程度。

从上述回归方程可知,草木樨和蒙古冰草水肥耦合回归模型的一次项系数为正值,说明在试验设计范围内,土壤水分、氮肥和磷肥各因子均对 2 种牧草叶片净光合速率、水分利用效率和生物量具有明显地促进作用。三因素对草木樨光合及生物量的影响程度从大到小为土壤相对含水量>施磷量>施氮量,蒙古冰草为土壤相对含水量>施氮量>施磷量。由此可知,在试验区,草木樨和蒙古冰草光合及生物量对土壤水分的响应最为敏感,磷肥对草木樨生长发育的贡献大于氮肥,氮肥对于蒙古冰草的贡献大于磷肥,这可能是因为豆科牧草本身具有一定固氮能力,施用少量氮肥就可以满足草木樨等豆科牧草的生长发育<sup>[19]</sup>,禾本科牧草因其本身没有固氮能力,要想改变其生长特性和提高其生物量就必须增施适量氮肥,磷肥可以促进禾本科植物的固氮作用<sup>[20]</sup>。

2.3 单因子效应分析

2.3.1 净光合速率回归模型单因子效应分析 采用降维法得到土壤水分、施氮量和施磷量对 2 种牧草叶片净光合速率的偏回归子模型,可知草木樨的二次项系数均为负值,蒙古冰草均为正值,据其描绘出相应

变化曲线(图 1)。其中草木樨叶片净光合速率随着水肥用量的增加呈现开口向下的抛物线变化(图 1A),说明其随着水肥用量的增加先显著升高后降低,最大值在水肥设计范围之内,符合报酬递减率。而蒙古冰草叶片净光合速率随着水氮用量的增加呈现开口向上的抛物线变化(图 1B),其在水肥用量最大时达到最大值,水肥设计上限过小。由图 1 可以明显看出,在相对处理条件下,草木樨叶片净光合速率远高于蒙古冰草。

2.3.2 水分利用效率回归模型单因子效应分析 根据土壤水分、施氮量和施磷量对 2 种牧草叶片水分利用效率的偏回归子模型,草木樨和蒙古冰草的二次项系数均为负值,描绘出其叶片水分利用效率随着水肥用量的增加均呈现开口向下的抛物线变化曲线(图 2)。说明草木樨和蒙古冰草叶片水分利用效率均随着水肥用量的增加先升高后显著降低,即在适量的水肥用量时其达到最大值,此后随着水肥用量的继续增加逐渐降低。这可能是因为随着肥料的增加草木樨净光合速先增大后减小,蒸腾速率变化不大,而且蒙古冰草蒸腾速率的增加幅度大于净光合速率,致使其水分利用效率也呈现先升高后降低的趋势。

从图 2 可以看出;在试验设计范围内,土壤水分由 −1.682 增加至 0.10 时,草木樨水分利用效率由 1.03  $\mu\text{mol}/\text{mmol}$  升高至最大值为 1.34  $\mu\text{mol}/\text{mmol}$ ,此后逐渐降低至 1.11  $\mu\text{mol}/\text{mmol}$ 。氮肥为 0.06 时,



水分利用效率升高至最大值为  $1.34 \mu\text{mol}/\text{mmol}$ , 磷肥为  $0.33$  时, 水分利用效率升高至最大值为  $1.35 \mu\text{mol}/\text{mmol}$ , 此后逐渐降低(图 2A)。土壤水分由  $-1.682$  增加至  $0.75$  时, 蒙古冰草水分利用效率由  $0.53 \mu\text{mol}/\text{mmol}$  升高至最大值为  $0.88 \mu\text{mol}/\text{mmol}$ , 此后逐渐降低至  $0.83 \mu\text{mol}/\text{mmol}$ 。氮肥从  $-1.682$

增加到  $1.682$  时, 蒙古冰草水分利用效率从  $0.73 \mu\text{mol}/\text{mmol}$  不断升高至最大值为  $0.96 \mu\text{mol}/\text{mmol}$ , 磷肥为  $-0.03$  时, 水分利用效率升高至最大值为  $0.85 \mu\text{mol}/\text{mmol}$ , 此后逐渐降低至  $0.79 \mu\text{mol}/\text{mmol}$ (图 2B)。在相同处理条件下, 草木樨叶片水分利用效率明显大于蒙古冰草。

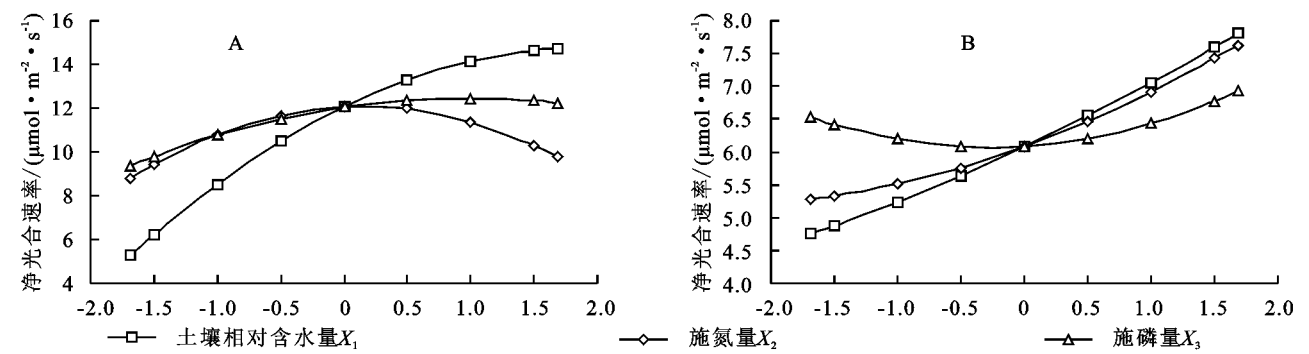


图 1 土壤水分、氮肥和磷肥单因素对 2 种牧草净光合速率的单因子效应

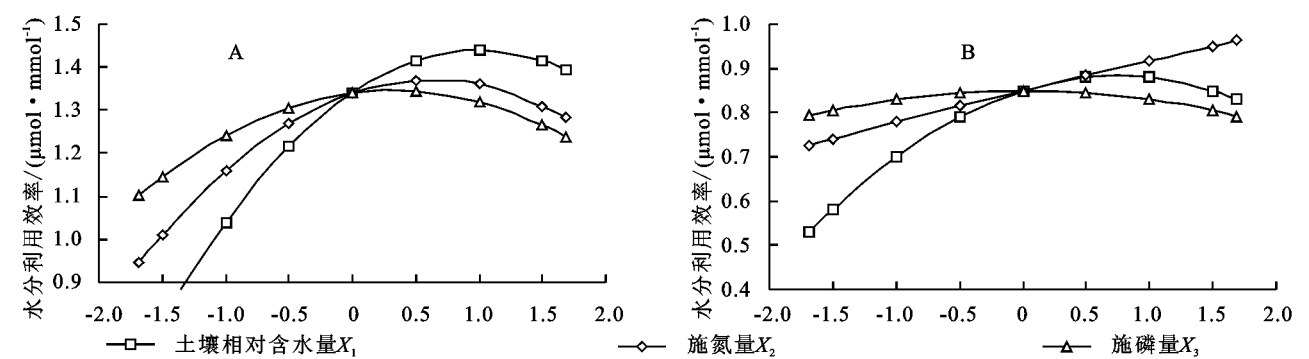


图 2 土壤水分、氮肥和磷肥单因素对 2 种牧草水分利用效率的单因子效应

2.3.3 生物量回归模型单因子效应分析 根据土壤水分、施氮量和施磷量对 2 种牧草单株生物量的偏回归子模型, 草木樨和蒙古冰草的水分与磷肥的二次项系数均为正值, 氮肥二次项系数为负值, 描绘出相应的变化曲线(图 3)。

水分和施磷量的增加显著升高, 随着施氮量的不断增加先升高后降低。从图 3 可以明显看出, 土壤水分对 2 种牧草的生物量具有显著的促进作用, 肥料对草木樨增产不明显(图 3A), 氮肥对蒙古冰草的增产作用大于磷肥(图 3B)。在相同处理条件下, 草木樨生物量明显远大于蒙古冰草。

结果表明草木樨和蒙古冰草生物量均随着土壤

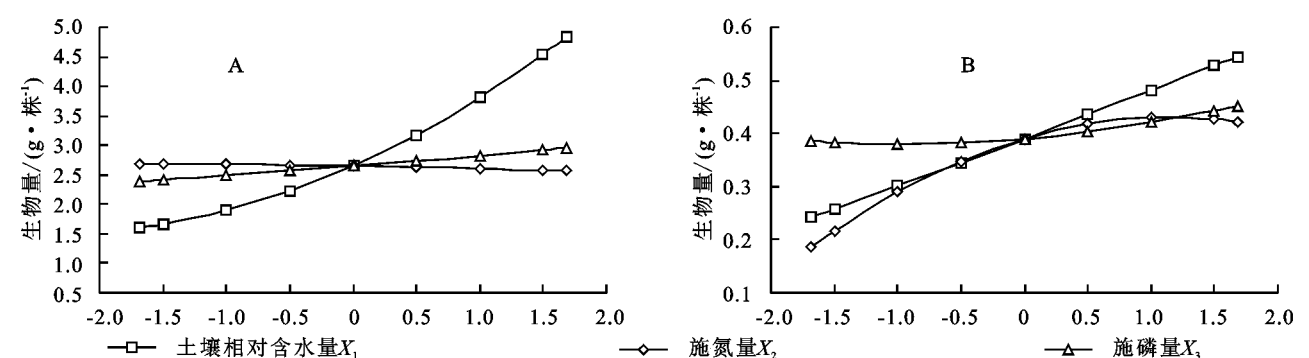


图 3 土壤水分、氮肥和磷肥单因素对 2 种牧草生物量的单因子效应

## 2.4 因子间交互效应分析

2.4.1 净光合速率回归模型交互效应分析 通过分析和比较 2 种牧草叶片净光合速率交互效应子模型的交互项显著性, 草木樨交互项  $X_1 X_2$ ,  $X_2 X_3$  和  $X_1 X_3$  的系数均为负值, 说明水、氮和磷在一定范围

内具有明显的相互替代作用, 交互效应从大到小为水氮 > 氮磷 > 水磷, 它们的交互效应均未达到显著水平。蒙古冰草叶片净光合速率回归模型交互项  $X_1 X_2$  和  $X_1 X_3$  的系数均为正值,  $X_2 X_3$  的系数为负值, 说明水氮和水磷的交互作用对蒙古冰草水分利用

效率具有较大的促进作用,水分是肥料发挥作用的重要前提,磷肥会消减氮肥的肥效作用,交互效应从大到小为氮磷>水氮>水磷,只有氮磷对蒙古冰草叶片净光合速率的交互效应达到了显著水平( $p<0.05$ )。这里仅分析氮磷对蒙古冰草净光合速率的交互效应,见图 4,其交互方程为: $P_2=6.08+0.70X_2+0.12X_3+0.13X_2^2+0.23X_3^2-0.47X_2X_3$ 。

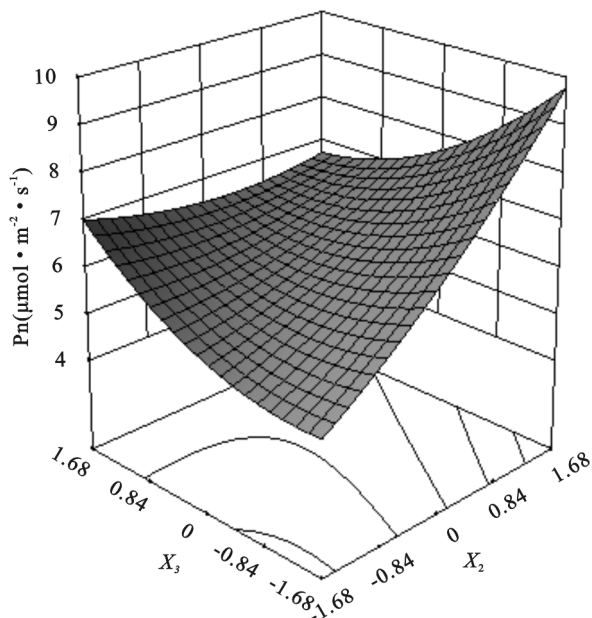


图 4 蒙古冰草净光合速率氮磷交互效应

由上述方程和图 4 可以看出:当  $X_2$  和  $X_3$  均为  $-1.682$  时蒙古冰草叶片净光合速率最小,即不施氮肥和磷肥时,净光合速率最小为  $4.39 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。蒙古冰草叶片净光合速率随着施氮量和施磷量的增加而缓慢增大。当  $X_2=1.682$  且  $X_3=-1.682$  时净光合速率最大,即施氮量为  $240.0 \text{ kg}/\text{hm}^2$  且不施磷量时,净光合速率达到最大值为  $9.40 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。氮磷耦合作用对蒙古冰草的净光合速率表现为负效应,说明随着氮或磷的增加,蒙古冰草净光合速率会随着另一因素的增加而降低,其中,氮肥对蒙古冰草净光合速率的增幅远大于磷肥,磷肥会消减氮肥的肥效作用。

**2.4.2 水分利用效率回归模型交互效应分析** 通过分析和比较 2 种牧草叶片水分利用效率交互效应子模型的交互项显著性,草木樨交互项系数交互效应从大到小为水氮>水磷>氮磷,只有水氮交互效应达到了显著水平( $p<0.05$ )。蒙古冰草叶片净光合速率回归模型交互项  $X_1X_2$  的系数为正值,  $X_1X_3$  和  $X_2X_3$  的系数均为负值,交互效应从大到小为水氮>水磷=氮磷,它们的交互效应均未达到显著水平。因此,这里仅分析水氮对草木樨叶片水分利用效率的交互效应,见图 5,其交互方程为: $W_1=1.34+0.02X_1+$

$$0.01X_2-0.10X_1^2-0.08X_2^2-0.08X_1X_2。$$

由上述方程和图 5 可以看出;当  $X_1$  和  $X_2$  均为  $-1.682$  时草木樨叶片水分利用效率最小,即土壤相对含水量为  $30.0\%$  且不施氮肥时,水分利用效率最小为  $0.57 \mu\text{mol}/\text{mmol}$ 。草木樨叶片水分利用效率随着水氮的增加先升高后降低。当草木樨水分利用效率最大时,  $X_1=0.14$  和  $X_2=-0.03$  是临界效应分界点,即土壤相对含水量为  $57.09\%$  且施氮量为  $98.22 \text{ kg}/\text{hm}^2$  时,叶片水分利用效率达到最大值为  $1.34 \mu\text{mol}/\text{mmol}$ ,此后逐渐降低。说明在临界效应分界点之前水氮与草木樨水分利用效率呈正相关,即适量的土壤水分和氮肥可以相互促进,不断提高草木樨水分利用效率,反之呈负相关。

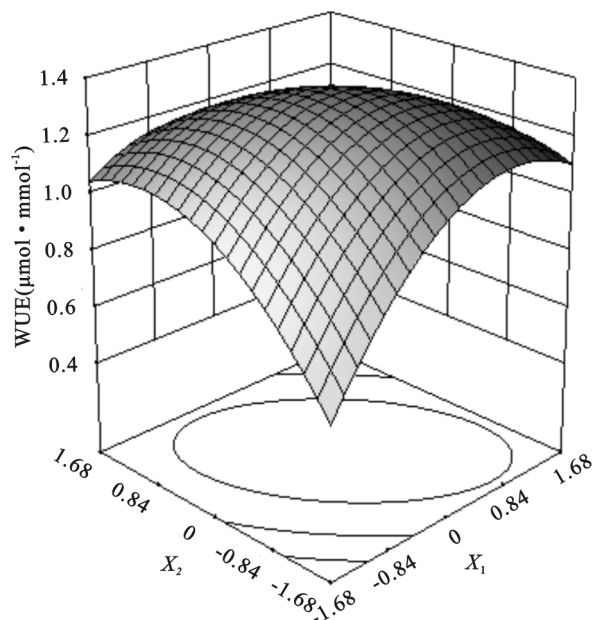


图 5 草木樨水分利用效率水氮交互效应

**2.4.3 生物量回归模型交互效应分析** 通过分析和比较 2 种牧草生物量交互效应子模型的交互项显著性,草木樨交互项系数  $X_1X_3$  为负值,  $X_1X_2$  和  $X_2X_3$  均为正值,说明水和磷在一定范围内具有明显的相互削减作用,交互效应从大到小为水磷>水氮>氮磷,只有水磷交互效应对草木樨生物量的交互效应达到了显著水平( $p<0.05$ )。蒙古冰草叶片净光合速率回归模型交互项  $X_1X_2$ ,  $X_1X_3$  和  $X_2X_3$  的系数均为负值,交互效应从大到小为水氮>氮磷>水磷,它们的交互效应均未达到显著水平。因此,这里仅分析水磷对草木樨生物量的交互效应,见图 6,其交互方程为: $B_1=2.65+$

$0.96X_1+0.17X_3+0.20X_1^2+0.005X_3^2-0.32X_1X_3$ 。

由上述方程和图 6 可以看出:当  $X_1$  和  $X_3$  均为  $-1.682$  时草木樨生物量最小,即土壤相对含水量为  $30.0\%$  和不施磷肥时,生物量最小为  $0.42 \text{ g}/\text{株}$ 。当  $X_1=1.682$  和  $X_3=-1.682$ ,即土壤相对含水量为

80%和不施磷肥时,生物量达到最大值为 5.46 g/株。说明草木樨生物量随着水磷施用量的增加不断升高,水磷交互作用对草木樨具有显著的增长作用,但是在高水分条件下,草木樨对磷肥的需求量较低。

2.5 模型寻优

2.5.1 草木樨的最优水肥方案 在试验结果分析及模型拟合的基础上,采用 Design-Expert 软件对草木樨光合及生物量的回归模型在约束条件下进行模型寻优,其约束条件为水肥使用量最小的基础上使其光合及生物量达到最大,由此得到当  $X_1=0.12, X_2=-0.14, X_3=-1.16$  时,草木樨净光合速率最大为  $12.61 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ,水分利用效率最大为  $1.21 \mu\text{mol}/\text{mmol}$ ,生物量最大为 3.23 g/株。根据试验所得的水肥耦合回归模型,每个因素取 5 个水平:1.682,1,0,-1 和 -1.682,以所有处理的试验结果平均值作为系统优化栽培方案的指标临界值,采用 DPS 数据处理系统对  $5^3=125$  个方案进行寻优。在 125 个方案中,净光合速率大于  $10.64 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$

的组合有 50 个,生物量高于 2.78 g/株的方案共有 65 个,其水、氮和磷最优组合方案见表 3 和表 4。

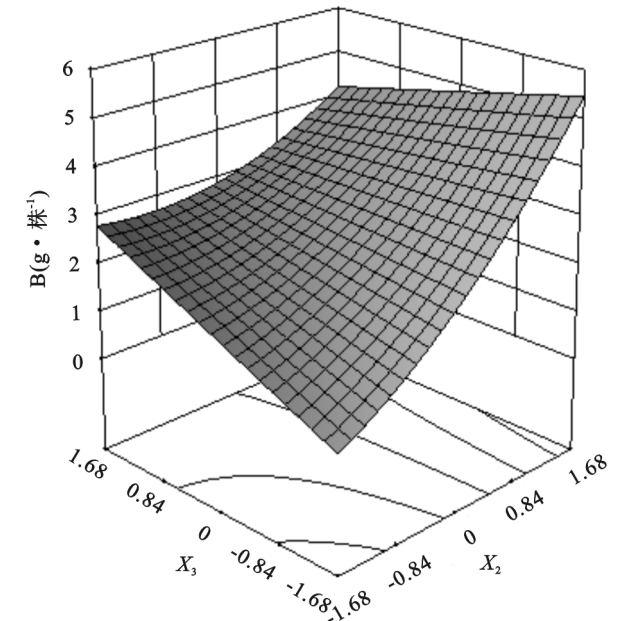


图 6 草木樨生物量水磷交互效应

表 3 草木樨净光合速率大于 10.64 μmol/(m²·s) 的寻优方案及频率

水平	X <sub>1</sub>		X <sub>2</sub>		X <sub>3</sub>	
	次数	频率	次数	频率	次数	频率
-1.682	0	0	9	0.180	5	0.100
-1	0	0	13	0.260	9	0.180
0	10	0.200	14	0.280	11	0.220
1	20	0.400	11	0.220	13	0.260
1.682	20	0.400	3	0.060	12	0.240
合计次数	50	1	50	1	50	1
加权均数	1.073		-0.242		0.315	
标准误	0.087		0.148		0.161	
95%置信区间	0.902~1.244		-0.533~0.049		-0.001~0.632	
最优方案	68.44~73.54		68.29~102.92		139.92~192.58	

表 4 草木樨生物量大于 2.78 g/株的寻优方案及频率

水平	X <sub>1</sub>		X <sub>2</sub>		X <sub>3</sub>	
	次数	频率	次数	频率	次数	频率
-1.682	5	0.077	13	0.200	10	0.154
-1	0	0	13	0.200	10	0.154
0	10	0.154	13	0.200	10	0.154
1	25	0.385	13	0.200	15	0.231
1.682	25	0.385	13	0.200	20	0.308
合计次数	65	1	65	1	65	1
加权均数	0.902		0		0.336	
标准误	0.116		0.153		0.156	
95%置信区间	0.675~1.130		-0.301~0.301		0.030~0.641	
最优方案	65.06~71.84		82.09~117.91		142.50~193.33	

综合表 3 和表 4 中净光合速率和生物量的最优方案,两者的水肥施用量范围基本一致,为增加试验结果的准确性与可靠性,可将其相交部分视为在水肥用量较低的基础上要使得草木樨生长发育良好的最优水肥方案:土壤相对含水量 68.44%~71.84%,施氮量 82.09~

102.92 kg/hm<sup>2</sup>,施磷量 139.92~192.58 kg/hm<sup>2</sup>。  
2.5.2 蒙古冰草的最优水肥方案 采用 Design-Expert 软件对草木樨光合及生物量的回归模型在约束条件下进行模型寻优,当  $X_1=0.16, X_2=-1.56, X_3=-1.68$  时,蒙古冰草净光合速率最大为 8.67

$\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ,水分利用效率为最大  $0.98 \mu\text{mol}/\text{mmol}$ ,生物量最大为  $0.34 \text{ g}/\text{株}$ 。每个因素取 5 个水平:1.682,1,0,−1 和 −1.682,组成 125 个方案,其

中,净光合速率大于  $6.37 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 的组合有 53 个,生物量高于  $0.38 \text{ g}/\text{株}$ 的方案共有 65 个,其水、氮和磷最优组合方案见表 5 和表 6。

表 5 蒙古冰草净光合速率大于  $6.37 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 的寻优方案及频率

水平	$X_1$		$X_2$		$X_3$	
	次数	频率	次数	频率	次数	频率
−1.682	2	0.038	5	0.094	11	0.208
−1	3	0.057	6	0.113	11	0.208
0	7	0.132	10	0.189	10	0.189
1	19	0.359	14	0.264	11	0.208
1.682	22	0.415	18	0.340	10	0.189
合计次数	53	1	53	1	53	0.9999
加权均数	0.937		0.563		−0.032	
标准误	0.124		0.156		0.17	
95%置信区间	0.693~1.180		0.258~0.869		−0.365~0.302	
最优方案	65.33~72.58		138.40~181.96		78.28~117.97	

表 6 蒙古冰草生物量大于  $0.38 \text{ g}/\text{株}$ 的寻优方案及频率

水平	$X_1$		$X_2$		$X_3$	
	次数	频率	次数	频率	次数	频率
−1.682	0	0	5	0.077	13	0.200
−1	5	0.077	10	0.154	13	0.200
0	15	0.231	15	0.231	13	0.200
1	20	0.308	15	0.231	13	0.200
1.682	25	0.385	20	0.308	13	0.200
合计次数	65	1	65	1	65	1
加权均数	0.878		0.465		0	
标准误	0.104		0.139		0.153	
95%置信区间	0.674~1.081		0.193~0.738		−0.301~0.301	
最优方案	65.04~71.11		133.76~172.62		82.09~117.91	

综合表 5 和表 6 中净光合速率和生物量的最优方案,两者的水肥施用量范围基本一致,为增加试验结果的准确性与可靠性,可将其相交部分视为在水肥用量较低的基础上要使得蒙古冰草生长发育良好的最优水肥方案:土壤相对含水量  $65.33\% \sim 71.11\%$ ,施氮量  $138.40 \sim 172.62 \text{ kg}/\text{hm}^2$ ,施磷量  $82.09 \sim 117.91 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 。

3 讨论

在西北干旱荒漠区,水分是植被恢复的限制性因子,土壤水分对林草的生长发育影响深远<sup>[21]</sup>,当土壤相对含水量较低时,植物的生长生理指标都会受到不良的影响<sup>[22]</sup>。草木樨和蒙古冰草的气体交换参数多在土壤相对含水量为 80%时较高,这与马宇飞<sup>[23]</sup>研究中草木樨光合作用最适宜点在相对田间持水量 78.4%的结果相近。磷肥对草木樨生长发育的贡献大于氮肥,氮肥对于蒙古冰草的贡献大于磷肥,这与前人的研究结果基本一致<sup>[24-25]</sup>。在相同处理条件下,草木樨的光合及生物量都显著高于蒙古冰草,姜慧敏<sup>[26]</sup>通过比较豆科牧草与禾本科牧草的生理生态指标,也认为豆科牧草的光合参数均大于禾本科牧草。

因此,西北干旱荒漠区采煤迹地植被恢复应该首选草木樨,其次是蒙古冰草。

水肥耦合效应对植物可产生 3 种不同的结果或现象,即协同效应、叠加效应和拮抗效应,从试验结果可以看出,不同水肥条件下草木樨的净光合速率等光合参数明显高于只灌水或只施氮量或只施磷肥。Bronson 等<sup>[27]</sup>也发现水肥耦合能较好地促进植物生长,提高水分和养分的利用效率,其效果比只进行水分管理和养分管理更好。尹光华等<sup>[28]</sup>认为水肥耦合是通过扩大叶面积、提高叶片蒸腾速率、增加叶绿素含量、增大叶片气孔导度、降低胞内二氧化碳浓度来促进叶片光合作用的。杜灵通等<sup>[29]</sup>通过近 17 a 来宁东煤炭基地植被生态系统特征调查,表明植被生态系统蒸散增长率比生产力增长速率更快,这是导致区域水分利用效率下降的根本原因。在干旱胁迫条件下,适量施磷有利于促进植物根系发达,增强其抗旱性,在少磷或缺磷的条件下,草木樨蒸腾速率变化不大,净光合速率明显下降从而导致其生物量降低。蒙古冰草水分利用效率与土壤相对含水量或施氮量均呈正相关关系,施磷量对其水分利用效率的影响较小,



因而在种植蒙古冰草的水肥管理过程中施氮量应多于施磷量,草木樨则相反,这与试验相符合。

## 4 结论

(1) 试验建立了2种牧草光合及生物量的水肥耦合回归模型,均达到了显著水平且具有很强的代表性,适应于预测西北干旱荒漠区煤矸石山土壤上不同水肥条件下草木樨和蒙古冰草的光合速率、水分利用效率和生物量。

(2) 土壤水分对2种牧草的光合及生物量最敏感;磷肥对草木樨生长发育的贡献大于氮肥,氮肥对蒙古冰草的贡献大于磷肥;三因素交互作用对2种牧草水分利用效率的影响程度从大到小均是水氮>水磷>氮磷;对于生物量的三因素交互作用大小而言,草木樨为水磷>水氮>氮磷,蒙古冰草为水氮>氮磷>水磷。

(3) 草木樨的光合及生物量均远大于蒙古冰草,西北煤矸石山植被恢复的草本植物首选草木樨,其最优水肥方案为:土壤相对含水量 68.44%~71.84%,施氮量 82.09~102.92 kg/hm<sup>2</sup>,施磷量 139.92~192.58 kg/hm<sup>2</sup>。其次是蒙古冰草,其最优水肥方案为:土壤相对含水量 65.33%~71.11%,施氮量 138.40~172.62 kg/hm<sup>2</sup>,施磷量 82.09~117.91 kg/hm<sup>2</sup>。

### 参考文献:

- [1] 贺露红.煤矸石废弃地生态修复技术及环境效应研究[D].北京:北京林业大学,2008.
- [2] 许超,康鑫.煤矸石危害及其综合利用[J].环境科技,2010,23(S1):102-104.
- [3] 吴琼.煤矸石对周边土壤环境的影响研究[D].西安:西安科技大学,2010.
- [4] Sun Y Z, Fan J S, Qin P, et al. Pollution extents of organic substances from a coal gangue dump of Jiulong Coal mine, China [J]. Environmental Geochemistry and Health, 2009,31(1):81-89.
- [5] 王洪丹,王金满,曹银贵,等.黄土区露天煤矿排土场土壤与地形因子对植被恢复的影响[J].生态学报,2016,36(16):5098-5108.
- [6] 王改玲,白中科.安太堡露天煤矿排土场植被恢复的主要限制因子及对策[J].水土保持研究,2002,9(1):38-40.
- [7] 刘艳萍,梁占岐,何京丽,等.矿区排土场植被恢复节水灌溉措施研究[J].草原与草坪,2018,38(5):18-23.
- [8] 潘德成,邓春晖,吴祥云,等.矿山复垦区土壤水分时空分布对植被恢复的影响[J].干旱区资源与环境,2014,28(3):96-100.
- [9] 曹生奎,冯起,司建华,等.植物叶片水分利用效率研究综述[J].生态学报,2009,29(7):444-454.
- [10] 温超,单玉梅,贾伟星,等.水肥耦合对科尔沁羊草割草场植物群落多样性和生产力的影响[J].中国农学通报,2017,33(26):100-106.
- [11] 谷裕,王金满,王洪丹,等.黄土区露天煤矿排土场植被恢复的水肥响应[J].生态学杂志,2016,35(12):3233-3241.
- [12] 王伟,张洪江,张成梁,等.煤矸石山植被恢复影响因子初探:以山西省阳泉市 280 煤矸石山为例[J].水土保持通报,2008,28(2):147-152.
- [13] 魏忠义,王秋兵.大型煤矸石山植被重建的土壤限制性因子分析[J].水土保持研究,2009,16(1):179-182.
- [14] Huang L, Zhang P, Hu Y G, et al. Soil water deficit and vegetation restoration in the refuse dumps of the Heidaigou open-pit coal mine, Inner Mongolia, China[J]. Sciences in Cold and Arid Regions, 2018,8(1):22-35.
- [15] Leistner T, Peuker U A, Rudolph M. How gangue particle size can affect the recovery of ultrafine and fine particles during froth flotation[J]. minerals Engineering, 2017,109:1-9.
- [16] 张婷,王曰鑫.煤矸石山生态恢复研究进展[J].水土保持研究,2007,14(5):380-382.
- [17] 赵廷宁,张玉秀,曹兵,等.西北干旱荒漠区煤炭基地生态安全保障技术[J].水土保持学报,2018,32(1):1-5.
- [18] 王仰麟,常青,谢苗苗,等.矿区生态风险评估与防范研究[M].北京:科学出版社,2016.
- [19] 李丽,李宁,盛建东,等.施氮量和种植密度对紫花苜蓿生长及种子产量的影响[J].草地学报,2012,20(1):54-57.
- [20] 苏富源,郝明德,郭慧慧,等.施用氮肥对人工羊草草地产量及养分吸收的影响[J].草地学报,2015,23(4):233-236.
- [21] Otto R, Krüsi B O, Burga C A, et al. Old-field succession along a precipitation gradient in the semi-arid coastal region of Tenerife[J]. Journal of Arid Environments, 2006,65(1):156-178.
- [22] 徐苏男.水分胁迫及复水对结缕草生长生理和光合荧光特性的影响[D].沈阳:辽宁大学,2012.
- [23] 马宇飞.土壤水分胁迫下4种豆科牧草的水分生理与光合特性[D].山东泰安:山东农业大学,2009.
- [24] 张金凤,徐雨晴.水氮添加对内蒙古多伦县退耕还草地生物量、生产力及其分配[J].中国生态农业学报,2016,24(2):192-200.
- [25] 韩建国,李鸿祥,马春晖,等.施肥对草木樨生产性能的影响[J].草业学报,2000,9(1):16-27.
- [26] 姜慧敏.豆科牧草与禾本科牧草的根系特征与生理生态指标的比较研究[D].呼和浩特:内蒙古大学,2013.
- [27] Bronson K F, Booker J D, Bordovsky J P, et al. Site-specific irrigation and nitrogen management for cotton production in the southern high plains[J]. Agronomy Journal, 2006,98(1):212-219.
- [28] 尹光华,刘作新,陈温福,等.水肥耦合条件下春小麦叶片的光合作用[J].兰州大学学报:自然科学版,2006,42(1):40-43.
- [29] 杜灵通,徐友宁,宫菲,等.宁东煤炭基地植被生态特征及矿业开发对其的影响[J].地质通报,2018,37(12):95-103.