

砒砂岩改良风沙土对2种引进植物生长和氮磷营养的影响

范陈斌¹, 武苗苗², 苏睿², 张泽坤², 何红花¹

(1. 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; 2. 西北农林科技大学资源环境学院, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 通过室内盆栽模拟试验, 设计风沙土、砒砂岩、黄绵土、覆土砒砂岩、覆沙砒砂岩和砒砂岩改良风沙土6个土壤处理, 种植鲁冰花和墨西哥玉米草2种引进植物, 研究2种植物在砒砂岩改良风沙土和晋陕蒙接壤区原有土壤类型中的生长和氮磷营养差异, 为该区域植被恢复提供理论依据。结果表明: (1) 植物在砒砂岩改良风沙土中根系生长好, 总体生物量大, 鲁冰花地上生物量相较于黄绵土增幅达到242%, 地下生物量相较于风沙土增幅达到186%, 根长和根体积相较于风沙土增幅达到388%和290%; (2) 2种引进植物根系在不同的土壤环境中表现出不同的适应特征, 鲁冰花比根长在砒砂岩改良风沙土中最大, 风沙土中最小, 墨西哥玉米草比根长在黄绵土中最大, 砒砂岩改良风沙土中最小; 鲁冰花和墨西哥玉米草根系中直径 $d \leq 0.45$ mm的细根体积占总根体积的百分比在砒砂岩改良风沙土中均较小, 分别为9.99%和13.94%; (3) 所有处理中植物的氮和磷含量均低于植物在正常生长条件下的氮和磷含量, 植物生长受到氮和磷养分限制, 并且植物氮磷比小于14, 植物生长受氮素限制更严重。与几种原有土壤类型相比, 砒砂岩改良风沙土土壤理化性质更好, 土壤生产力高, 更适宜植物生长, 可以应用于晋陕蒙接壤区的植被恢复, 但在种植过程中应考虑适当施用氮肥和磷肥, 以加快植被恢复进程。

关键词: 砒砂岩改良风沙土; 生物量; 根系形态特征; 植被恢复

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2019)03-0228-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2019.03.034

Effects of Pisha Sandstone-Amended Aeolian Sandy Soil on Growth, Nitrogen and Phosphorus Nutrition of Two Introduced Plants

FAN Chenbin¹, WU Miaomiao², SU Rui², ZHANG Zekun², HE Honghua¹

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

2. College of Nature Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100)

Abstract: Through indoor pot experiment, two introduced species, i. e. *Lupinus micranthus* and *Purus frumentum* were cultured in Pisha sandstone-amended aeolian sandy soil, aeolian sandy soil, Pisha sandstone, loessial soil, Pisha sandstone covered by aeolian sandy soil and Pisha sandstone covered by loessial soil. The objective of this study was to investigate the differences in growth, nitrogen and phosphorus nutrition of two introduced species planted in Pisha sandstone-amended aeolian sandy soil and primary soil types in the contiguous areas of Shanxi, Shaanxi and Inner Mongolia, and provide references for the vegetation restoration of this area. The results showed that: (1) Pisha sandstone-amended aeolian sandy soil was better for the growth of plant root system, the total biomass was large, the above-ground biomass of *L. micranthus* in the Pisha sandstone-amended aeolian sandy soil was 242% higher than that in loessial soil, and the underground biomass was 186% higher than that in the aeolian sandy soil, the root length and volume were 388% and 290% higher than those in the aeolian sandy soil, respectively; (2) The root system of the two introduced plants showed different adaptive characteristics in different soil treatments, specific root length of *L. micranthus* was the largest in the Pisha sandstone-amended aeolian sandy soil and the least in the aeolian sandy

收稿日期: 2019-01-04

资助项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0504504)

第一作者: 范陈斌(1994-), 男, 贵州遵义人, 硕士研究生, 主要从事区域林草生态恢复研究。E-mail: fanchenbin@nwsuaf.edu.cn

通信作者: 何红花(1983-), 女, 河北唐山人, 博士, 副研究员, 硕士生导师, 主要从事植被恢复重建技术研究。E-mail: honghuahe@ms.iswc.ac.cn

soil, while that of *P. frumentum* was the largest in the loessial soil and the least in the Pisha sandstone-amended aeolian sandy soil. The volume fraction of roots less than or equal to 0.45 mm diameter was only 9.99% for *L. micranthus* and 13.94% for *P. frumentum* in the Pisha sandstone-amended aeolian sandy soil, which were smaller than those in other soils; (3) The nitrogen and phosphorus concentrations of plants in all treatments were lower than those under normal growth conditions, indicating that plant growth was restricted by nitrogen and phosphorus. The nitrogen-phosphorus ratios in all plants were less than 14, suggesting that plant growth was more severely limited by nitrogen than by phosphorus. Compared with several original soil types, the Pisha sandstone-amended aeolian sandy soil had better physiochemical properties and a higher productivity, and more suitable for plant growth, it could be applied to vegetation restoration in the contiguous areas of Shanxi, Shaanxi and Inner Mongolia in northwestern China. However, appropriate application of nitrogen and phosphate fertilizers should be considered to accelerate the process of vegetation restoration.

Keywords: Pisha sandstone-amended aeolian sandy soil; biomass; root morphology; vegetation restoration

晋陕蒙接壤区地处黄土高原丘陵沟壑区,区域内资源丰富,其中煤炭资源占全国总储量的62.7%^[1]。由于煤炭开发活动,区域内土壤结构被破坏,土壤流失和退化严重^[2-3]。该区域的环境治理和植被恢复已经成为国家治理的重点和科学界研究的热点问题。区域内主要土壤类型有风沙土、黄绵土和作为下伏地层广泛存在的砒砂岩。砒砂岩的上覆情况包括裸露砒砂岩、盖土砒砂岩和盖沙砒砂岩,垂直剖面为层状结构土壤。风沙土土体松散、胶体含量低、通透性强、养分贫瘠。黄绵土结构致密、胶体含量高、黏性强、通透性差。砒砂岩成岩程度低、沙粒间胶结程度差、结构强度低、极其贫瘠。该区域3种土壤均不利于植物生存和生长,植被恢复十分困难。已有学者^[4-9]基于砒砂岩较强持水保水和风沙土容易漏水漏肥的互补性质,将这2种土复配成一种改良土。这种改良土壤较风沙土具有更好的土壤质地^[7]和保水保肥能力^[10-12],更适合植物生长。已有研究^[8]发现,在这种改良土中小麦光合能力增强,干物质积累增加,产量提高。有研究^[9]表明,在砒砂岩:风沙土为1:2的

改良土中种植玉米,玉米产量显著提高。前人的研究主要关注改良土中作物生长和产量情况,而晋陕蒙接壤区的植被恢复是目前更为重要的问题。本研究选用鲁冰花和墨西哥玉米草2种引进植物,以晋陕蒙接壤区原有土壤类型和砒砂岩改良风沙土为基质,通过盆栽试验模拟2种植物生长,通过测定不同土壤类型中植物生物量、根系形态指标以及氮磷养分含量,研究砒砂岩改良风沙土对2种植物生长和氮磷营养的影响,为晋陕蒙接壤区的植被恢复提供参考和依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

本试验使用风沙土、砒砂岩和黄绵土作为供试土壤。风沙土采自内蒙古准格尔旗大路镇(111°22'6.4" E, 40°02'45.7" N),砒砂岩采自内蒙古准格尔旗暖水乡砒砂岩区(110°34'34.3" E, 39°44'23.6" N),黄绵土采自陕西省延安市安塞区(109°18'08.9" E, 36°43'52.4" N)。风沙土、砒砂岩和黄绵土样品风干后过2 mm筛备用。供试土壤基本理化性质见表1。供试植物为鲁冰花(*Lupinus micranthus*)和墨西哥玉米草(*Purus frumentum*)。

表1 土壤基本理化性质

土壤类型	土壤容重/ (g·cm ⁻³)	土壤机械组成/%			田间持水量/%	pH	有机碳/ (mg·g ⁻¹)	全氮/ (μg·g ⁻¹)	铵态氮/ (μg·g ⁻¹)	硝态氮/ (μg·g ⁻¹)	速效磷/ (μg·g ⁻¹)	全磷/ (μg·g ⁻¹)
		砂粒	粉粒	黏粒								
风沙土	1.60	90.5	5.8	3.7	17.8	8.5	1.23	127.08	7.45	2.13	0.45	267
砒砂岩	1.55	60.7	26.8	12.5	29.6	9.1	3.41	162.42	5.26	4.86	0.65	509
黄绵土	1.38	67.4	21.9	10.8	33.1	8.7	1.65	265.26	0.46	2.44	1.35	493

1.2 试验设计和方法

本试验共设计6个土壤类型处理,分别为:风沙土(S)、砒砂岩(P)、黄绵土(L)、覆土砒砂岩(L1P1)、覆沙砒砂岩(S1P1)、砒砂岩改良风沙土(S3P1)(风沙土和砒砂岩质量比为3:1,下文中简称为改良土)。供试植物为鲁冰花和墨西哥玉米草。采用盆栽模拟试验,2种植物每个处理分别重复3次。试验于2018年6月7日开始,在直径为15 cm,高度为20 cm的PVC管里放上1个塑

料袋,S、P和L处理分别将过筛的4 kg风沙土、砒砂岩和黄绵土直接装入,L1P1和S1P1处理先在底部装入2 kg砒砂岩,然后分别装入2 kg黄绵土和风沙土,S3P1处理将3 kg风沙土和1 kg砒砂岩均匀混合后装入。所有处理称重加水至10%土壤含水量(质量含水量),次日每盆播种鲁冰花和墨西哥玉米草种子20粒。于2018年6月17日间苗,鲁冰花每盆留6株,墨西哥玉米草每盆留4株。生长期间土壤含水量(质量含水量)控制在10%左

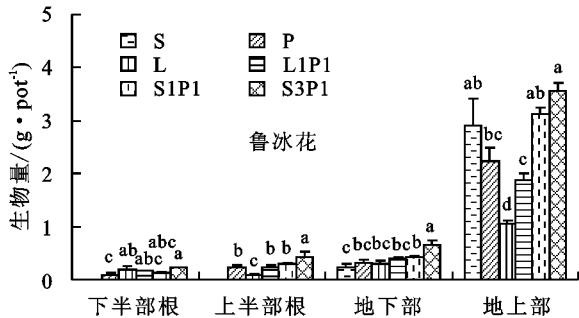
右,每隔 2 天称重浇水。植物于 2018 年 9 月 26 日收获,整个试验过程中不施任何肥料。

1.3 测定项目与方法

植株地上部刈割后清理干净装入牛皮纸袋,105 °C 杀青 1 h,75 °C 烘干至恒重。地上部刈割后,将土体从 PVC 管中完整取出,覆土砒砂岩和覆沙砒砂岩处理从土壤分层界面用刀切开,其余处理从完整土体 1/2 高度切开(风沙土中鲁冰花根系较少,土壤松散,未能分层),分别取出上层和下层土壤中的根系,冲洗后用根系扫描仪扫描,扫描的根系图片使用 WinRHIZO 根系分析系统分析。根据分析结果,得到根长和根体积,并计算比根长(单位质量的根长)和不同直径根体积占总根体积的百分比。将扫描后的根装入牛皮纸袋,105 °C 杀青 1 h,于 75 °C 烘干至恒重。烘干磨碎后的植物样品用硫酸-高氯酸消煮法消煮(沉淀,取上清液),植物磷含量用钼锑抗比色法^[13]测定,植物氮含量使用凯氏定氮仪^[13]测定。

1.4 数据统计分析

利用 Excel 2010 进行数据整理和作图,SPSS 18.0 进行单因素方差(ANOVA)统计分析,LSD 法多重比较,差异显著性定义为 $P < 0.05$,除了不同直



注:不同小写字母表示不同土壤类型中植物生物量在 0.05 水平上差异显著。

图 1 不同土壤类型中植物生物量

2.2 根系形态特性

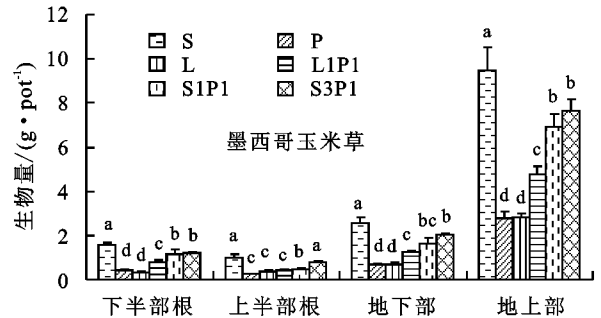
由图 2 可知,2 种植物根长和根体积在不同土壤处理中差异显著。鲁冰花总根根长、上半部和下半部根长在改良土中最大,显著高于其他土壤处理($P < 0.05$),分别高约 90%~388%,73%~757%,64%~197%;鲁冰花总根体积、上半部和下半部根体积在改良土中最大,显著高于其他土壤处理($P < 0.05$),分别高约 198%~290%,217%~875%,119%~280%。墨西哥玉米草根长和根体积在风沙土中最大,且与其他土壤类型差异显著($P < 0.05$)。在改良土中墨西哥玉米草总根根长和下半部根长显著大于砒砂岩和黄绵土处理($P < 0.05$),总根根长高约 91%和 74%,下半部根长高约 97%和 115%。在改良土中墨西哥玉米草总根体积和下半部根体积显著大于砒砂岩、黄绵土和覆土砒砂岩处理($P < 0.05$),总根体积高约 46%~136%,下半

部根体积占总根体积的百分比为 3 个重复的平均值外,其余数据均为 3 个重复的平均值±标准误差。

2 结果与分析

2.1 植株生物量

由图 1 可知,鲁冰花在改良土中相较于其他几种土壤类型具有更大的生物量。鲁冰花地上生物量在改良土中显著大于砒砂岩、覆土砒砂岩和黄绵土处理($P < 0.05$),分别高约 60%,91%,242%;地下和上半部根系生物量在改良土中均显著高于其他处理($P < 0.05$),分别高约 58%~186%和 51%~366%;在改良土中的下半部根系生物量显著高于砒砂岩处理($P < 0.05$),高约 154%,和其他土壤处理无显著差异。墨西哥玉米草地上、地下以及上半部和下半部根系生物量均在风沙土中最大,且显著高于其他土壤类型($P < 0.05$)。改良土中墨西哥玉米草地上、地下以及下半部根系生物量仅次于风沙土处理,比砒砂岩处理分别高约 176%,198%,200%,比覆土砒砂岩处理分别高约 60%,64%,50%,比黄绵土处理分别高约 171%,190%,279%($P < 0.05$);墨西哥玉米草上半部根系生物量在改良土中显著高于砒砂岩、黄绵土、覆土砒砂岩和覆沙砒砂岩处理($P < 0.05$),高约 63%~195%。



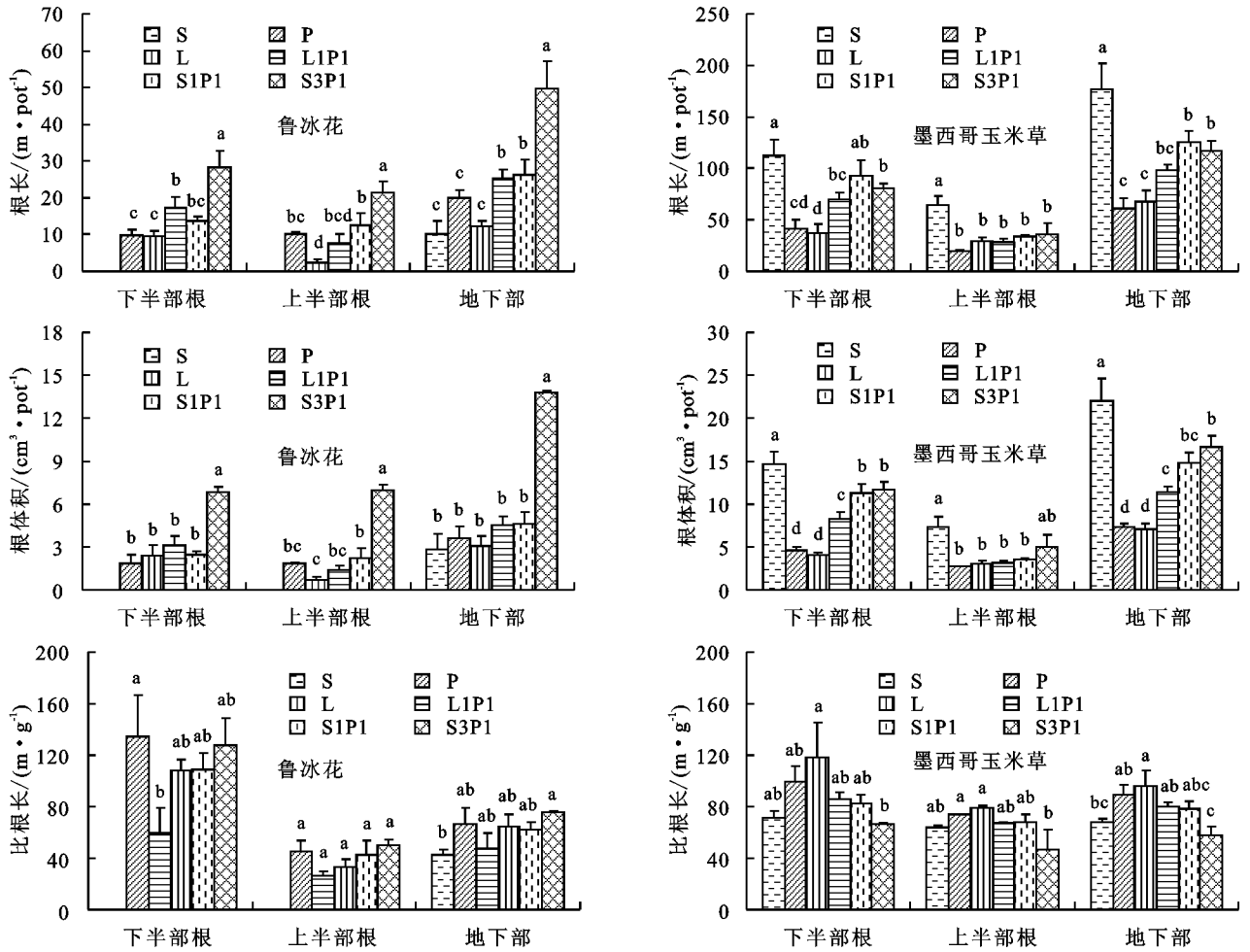
部根体积高约 40%~185%。

由图 2 可知,鲁冰花比根长表现出“下大上小”规律,上半部比根长在 26.2~45.3 m/g,下半部比根长在 59.6~134.2 m/g。鲁冰花总根比根长在改良土中最大,显著高于风沙土处理($P < 0.05$);上半部比根长在改良土中最大,但不同土壤类型间无显著差异;下半部比根长在黄绵土中显著低于其他处理($P < 0.05$),其余处理间无显著差异。墨西哥玉米草总根比根长、下半部比根长在改良土中均显著低于黄绵土处理,上半部比根长在改良土中显著低于砒砂岩和黄绵土处理($P < 0.05$)。

由表 2 和表 3 可知,鲁冰花和墨西哥玉米草根系中不同直径根体积占总根体积的百分比在不同土壤处理中表现出差异,其中直径 $d \leq 0.45$ mm 的细根体积占总根体积的百分比在改良土中均较小,分别为 9.99%和

13.94%。鲁冰花总根系中直径 $d \leq 0.45$ mm 的细根体积占总根体积的百分比从大到小为砒砂岩 > 覆土砒砂岩 > 覆沙砒砂岩 > 黄绵土 > 改良土 > 风沙土,在上半部根系中直径 $d \leq 0.45$ mm 的细根体积占总根体积的百分比从大到小为砒砂岩 > 覆沙砒砂岩 > 覆土砒砂岩 > 黄

绵土 > 改良土,在下半部根系中直径 $d \leq 0.45$ mm 的细根体积占总根体积的百分比从大到小为砒砂岩 > 覆土砒砂岩 > 覆沙砒砂岩 > 改良土 > 黄绵土。墨西哥玉米草总根系和上、下半部根系中直径 $d \leq 0.45$ mm 的细根体积占总根体积的百分比均在改良土中最小。



注:不同小写字母表示不同土壤类型中植物根长、根体积和比根长在 0.05 水平上差异显著。

图 2 不同土壤类型中植物根长、根体积和比根长

表 2 鲁冰花不同直径根体积占总根体积的百分比

单位: %

根系位置	处理	0.05 < d ≤ 0.10 mm	0.15 < d ≤ 0.20 mm	0.20 < d ≤ 0.25 mm	0.25 < d ≤ 0.30 mm	0.30 < d ≤ 0.35 mm	0.35 < d ≤ 0.40 mm	0.40 < d ≤ 0.45 mm	d > 0.45 mm
下半部根	S								
	P	0.22	2.50	0.01	5.03	2.49	5.65	3.81	80.28
	L	0.13	1.10	0	2.68	1.61	4.57	3.36	86.56
	L1P1	0.19	2.50	0.01	5.94	2.81	6.26	3.92	78.36
	S1P1	0.20	2.41	0.01	5.63	2.94	6.88	4.52	77.41
	S3P1	0.11	1.24	0.01	3.38	1.84	4.42	2.78	86.22
上半部根	S								
	P	0.22	2.14	0.01	4.46	2.28	5.22	3.35	82.33
	L	0.11	0.75	0.01	1.90	1.17	3.02	2.42	90.62
	L1P1	0.21	2.27	0.01	3.93	1.89	3.54	1.93	86.23
	S1P1	0.29	2.31	0.01	3.92	1.77	3.76	2.54	85.40
	S3P1	0.11	0.71	0	1.56	0.87	2.30	1.52	92.93
总根	S	0.12	1.11	0.01	1.99	0.93	2.07	1.43	92.35
	P	0.22	2.31	0.01	4.73	2.38	5.42	3.56	81.38
	L	0.12	1.01	0.01	2.49	1.50	4.19	3.13	87.56
	L1P1	0.20	2.41	0.01	5.15	2.45	5.18	3.14	81.46
	S1P1	0.25	2.35	0.01	4.69	2.30	5.17	3.44	81.79
	S3P1	0.11	0.94	0.01	2.35	1.29	3.22	2.07	90.01

表 3 墨西哥玉米草不同直径根体积分占总根体积分的百分比

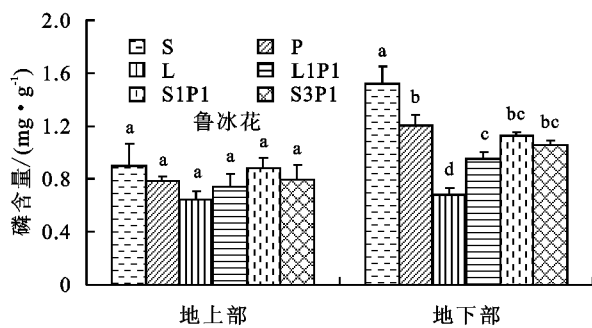
单位: %

根系位置	处理	0.05<d≤0.10 mm	0.15<d≤0.20 mm	0.20<d≤0.25 mm	0.25<d≤0.30 mm	0.30<d≤0.35 mm	0.35<d≤0.40 mm	0.40<d≤0.45 mm	d>0.45 mm
下半部根	S	0.68	4.17	0.01	4.31	1.81	4.15	3.02	81.84
	P	0.97	5.09	0.02	5.97	2.67	6.21	4.17	74.90
	L	1.01	5.94	0.02	5.84	2.22	5.14	3.73	76.10
	L1P1	0.89	4.66	0.02	5.17	2.18	5.29	3.94	77.86
	S1P1	0.85	3.81	0.02	4.16	1.67	3.99	2.94	82.55
	S3P1	0.65	2.93	0.01	3.02	1.25	3.10	2.32	86.73
上半部根	S	0.83	5.11	0.02	5.10	1.86	4.07	2.89	80.13
	P	0.65	3.88	0.01	4.63	1.76	4.41	3.42	81.24
	L	0.95	7.68	0.02	8.55	2.80	5.90	4.66	69.45
	L1P1	0.99	5.89	0.02	6.02	2.07	4.92	3.95	76.13
	S1P1	1.10	5.49	0.02	5.60	2.17	4.76	3.26	77.58
	S3P1	0.64	3.58	0.01	4.12	1.58	3.32	2.37	84.37
总根	S	0.73	4.49	0.01	4.58	1.83	4.12	2.97	81.27
	P	0.84	4.62	0.02	5.45	2.32	5.52	3.88	77.35
	L	0.98	6.63	0.02	6.92	2.45	5.44	4.10	73.46
	L1P1	0.92	4.98	0.02	5.39	2.15	5.19	3.95	77.40
	S1P1	0.91	4.18	0.02	4.48	1.78	4.16	3.01	81.46
	S3P1	0.65	3.11	0.01	3.33	1.34	3.16	2.33	86.06

2.3 植物养分特征

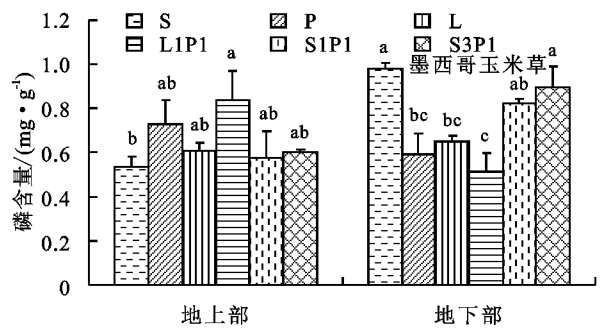
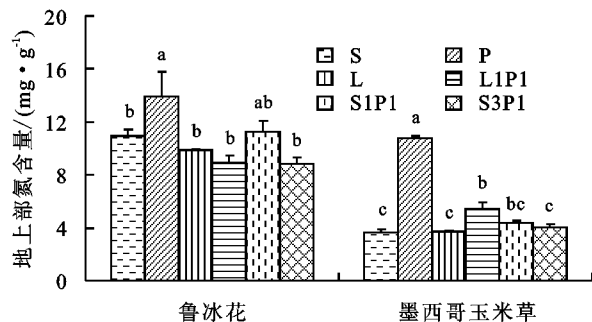
由图 3、图 4 可知,鲁冰花和墨西哥玉米草在所有土壤类型中磷和氮含量均较低,但鲁冰花的氮磷含量均高于墨西哥玉米草。不同土壤处理中鲁冰花地上部和地下部磷含量分别在 0.64~0.90, 0.58~1.52 mg/g,地上部氮含量在 8.5~13.9 mg/g。墨西哥玉

米草在不同土壤处理中地上部和地下部磷含量分别在 0.53~0.84, 0.51~0.98 mg/g,地上部氮含量在 3.6~10.8 mg/g。鲁冰花地上部氮磷比在黄绵土中最高,为 14.6,且显著高于其他处理($P<0.05$),其他处理中在 7.2~11.5。墨西哥玉米草地上部氮磷比在砒砂岩处理最大,达到 18.5,其他处理中在 3.7~10.8。



注:不同小写字母表示不同土壤类型中植物磷含量在 0.05 水平上差异显著。

图 3 不同土壤类型中植物磷含量



注:不同小写字母表示不同土壤类型中植物地上部氮含量和氮磷比在 0.05 水平上差异显著。

图 4 不同土壤类型中植物地上部氮含量和氮磷比

3 讨论

由于风沙土和砒砂岩资源的便利性,利用砒砂岩改良风沙土进行植被恢复已经成为当前的研究热点。

前人^[4,14]研究表明,在风沙土中加入砒砂岩后,土壤毛细管孔隙增加,土壤含水量提高,同时饱和导水率降低^[10],水分蒸发减少^[12],保水能力增强。张露等^[7]将

砒砂岩和风沙土按比例复配后的土壤质地由砂土变为壤砂土、砂壤和粉壤土。砒砂岩和风沙土复配后的土壤容重、比重、通气性、透水性、养分状况等土壤理化性质得到明显改善。植物生物量的积累是对土壤理化性质的反映,是土壤生产力的重要体现。本研究中,鲁冰花在改良土中的地上和地下生物量最大,地上生物量相较于黄绵土增幅达到242%,地下生物量相较于风沙土增幅达到186%,验证了改良土相较于几种晋陕蒙接壤区原有土壤类型具有更好的理化性质。由于生物学特性差异,植物种间对于土壤理化性质的响应表现出差异。本研究中,墨西哥玉米草地上和地下生物量从大到小为风沙土>改良土>覆沙砒砂岩>覆土砒砂岩>黄绵土>砒砂岩,说明墨西哥玉米草更适合在风沙土中种植。综合6种土壤处理中植物的生长情况,可以发现改良土中2种植物的生物量均较大,说明改良土生产力较高,可以应用于晋陕蒙接壤区的植被恢复。

根系是植物吸收水分和养分的主要器官,其大小以及在土壤中的分布影响着植株整体生长和干物质积累。土壤理化性质的差异导致机械阻力、颗粒组成和总孔隙度不同,这些因素影响土壤水、热、气和营养的移动和含量,进而影响植物根系形态特征^[15-16]。本研究中,鲁冰花总根长和上下土层根长、总根体积和上下土层根体积均在改良土中最大,且显著高于其他几种土壤类型,说明改良土中植物具有更大的根系组织吸收土壤中水分和养分供给植物生长,进一步表明改良土相较于其他几种土壤类型具有更适宜植物根系生长的环境条件,可以促进植物生长。在试验土壤类型中,墨西哥玉米草的根长和根体积与生物量表现相似,均在风沙土中最大,其次为改良土,可能是因为墨西哥玉米草相较于鲁冰花具有更大的根系,而风沙土土粒空隙较大且较疏松,机械阻力较小^[17],有利于墨西哥玉米草的根系生长以及水分和养分吸收。基于此特性,在晋陕蒙接壤区的风沙土分布区可以种植墨西哥玉米草,利用其发达的根系固结风沙土、拦蓄水分、改善土壤的理化性质。

植物在适应环境的过程中,根系会通过形态特征的调整以响应土壤水分和养分资源的变化,从而获取水分和养分用于生长。比根长是根长与生物量的比值,是体现根系功能的核心指标之一,综合反映了根系吸收资源的能力。比根长越大,说明用于构建和维持单位长度根系所需的碳水化合物越少,植物将更多的能量用于吸收作用,因此水分和养分获取的优势越大。植物比根长受环境条件的影响,但对环境因子的响应不具有一致性。有研究^[18]发现,4种风毛菊属植物在土壤条件恶劣的情况下会通过增加比根长来更

有效地吸收土壤资源,但也有研究^[19]表明,植物比根长在养分丰富的环境下明显大于贫瘠土壤。比根长可以反映植物在不同生境中的适应特征,研究比根长可以了解植物的生物量分配策略。本文中对鲁冰花和墨西哥玉米草比根长的研究发现,在不同土壤处理中,鲁冰花总比根长从大到小为改良土>砒砂岩>覆土砒砂岩>覆沙砒砂岩>黄绵土>风沙土,说明在改良土中鲁冰花单位生物量构建的根长大,因此比根长大,在风沙土中用以构建其根系的碳投入较多,但是其比根长却小。鲁冰花在改良土中用以构建根长的生物量投入效率最高。由于鲁冰花的根系为直根系,其下半部土层中侧根和细根的比例高于上半部土层,因此上、下半部比根长表现出“下大上小”的趋势。而墨西哥玉米草为须根系植物,其总比根长从大到小为黄绵土>砒砂岩>覆土砒砂岩>覆沙砒砂岩>风沙土>改良土,说明墨西哥玉米草在改良土中用以构建根长的生物量投入效率最低。2种植物在不同土壤中比根长的变化表明2种植物对其生存环境的变化具有较高的适应性,种间又因为生物学特性的差异表现出不同的适应特征。

植物根系为了获得生长所需要的水分和养分,其不同直径根系的分布特征均有明显的变化。植物根系中直径较小的细根是最活跃、最敏感的部分,有着巨大的吸收表面积,是植物水分和养分吸收的主要器官。植物根系中细根的生物量分配不仅受自身遗传特性的影响,还与土壤水分、养分、容重和温度等土壤环境条件密切相关,同时细根在根系中的比例大小还可以反映一定的环境条件信息。有研究^[20]结果显示,在干旱和贫瘠的环境下,植物细根数量增加,在整体根系中占比变大。本研究结果表明,2种植物在不同的土壤环境中细根体积占总根体积的百分比表现出差异,说明植物在不同环境中表现出不同的细根分配策略。除了风沙土中鲁冰花根系生长遭到严重胁迫而导致根系生长较差以外,生长在改良土中的植物根系中直径 $d \leq 0.45$ mm细根体积占总根体积的百分比在几种土壤类型最小,说明改良土中植物只需较小比例细根所获得的资源就能满足植物生长,这可能是因为改良土相较其他几种土壤处理具有较好的保水性,土壤实际含水量高,因此植物只需投入较小比例的碳水化合物用以生产细根吸收水分,而将更多的碳储存到较粗的根中维持根系结构稳定。

氮磷是植物生长必需的营养元素,其在植物体内含量高低决定植物的生长速率^[21]。本研究中,鲁冰花和墨西哥玉米草植物地上部氮磷含量均低于植物正常生长条件下的氮磷含量(氮15 mg/g、磷2 mg/g)^[22],表明2种植物生长受到氮和磷养分胁迫。这

主要是因为试验所用土壤中养分含量较低(表 1),且较差的土壤质地限制了植物根系生长,影响了植物对土壤养分的吸收。鲁冰花氮含量比墨西哥玉米草高,主要是因为豆科植物可以通过根瘤固氮,与禾本科植物相比受到土壤中氮素可用性的限制较小。有研究^[23]表明,豆科植物可以在干旱地区作为先锋植物,为整个生态系统提供有效氮,提高土壤肥力。植物体内的氮磷比化学计量特征可以作为分析土壤养分供应状况的指标,用来预测氮和磷养分供应状况^[24]。Koerselman 等^[25]研究表明,当植物氮磷比小于 14 时,植物受到氮养分限制,而氮磷比大于 16 时,植物受磷养分限制,氮磷比在 14~16 时,受到 2 种养分共同限制或养分充足不受限制。本研究中,除了黄绵土中鲁冰花和砒砂岩中墨西哥玉米草氮磷比大于 14 外,其他处理中氮磷比均小于 14,表明 2 种植物在该地区生长主要受到氮素限制。因此,在该地区引种植物时,可以适当施用氮肥和磷肥促进植物生长,从而加快植被恢复进程。

4 结论

(1)与几种晋陕蒙接壤区原有土壤类型相比,改良土中 2 种引进植物根系生长较好,生物量积累较大,说明改良土土壤生产力较高,可以应用于该地区植被恢复。墨西哥玉米草更适宜在风沙土中种植。

(2)2 种植物根系在不同土壤环境中表现不同的适应策略,种间又因为生物学特性的差异表现出不同适应特征。鲁冰花比根长在不同土壤处理中从大到小为改良土>砒砂岩>覆土砒砂岩>覆沙砒砂岩>黄绵土>风沙土,墨西哥玉米草比根长从大到小为黄绵土>砒砂岩>覆土砒砂岩>覆沙砒砂岩>风沙土>改良土。植物不同直径根体积占总根体积的百分比在不同土壤类型中具有差异,鲁冰花和墨西哥玉米草根系中直径 $d \leq 0.45$ mm 的细根体积占总根体积的百分比在改良土中均较小,分别为 9.99% 和 13.94%。

(3)本研究中,鲁冰花地上部氮和磷含量分别在 8.5~13.9,0.64~0.90 mg/g,墨西哥玉米草地上部氮和磷含量分别在 3.6~10.8,0.53~0.84 mg/g,均低于植物正常生长条件下的氮和磷含量,植物生长受到氮和磷养分胁迫,在引种植物时可以适当施用氮肥和磷肥,加快植被恢复进程。

(4)基于 2 种植物的生物学特性,在晋陕蒙接壤区可以将鲁冰花和墨西哥玉米草搭配种植,利用墨西哥玉米草的强大根系固土,拦蓄水分,利用鲁冰花固氮,提高土壤肥力,从而改善土壤理化性质,增加地表植被覆盖,减少水土流失。

参考文献:

[1] 车秀珍,尚金城,陈冲. 晋陕蒙接壤地区能源基地战略环境

影响评价研究[J]. 资源开发与市场,2002,18(5):24-27.

- [2] 王占礼. 中国水土流失的基本概况及其综合治理[J]. 灾害学,2000,15(3):18-25.
- [3] 白中科,段永红,杨红云,等. 采煤沉陷对土壤侵蚀与土地利用的影响预测[J]. 农业工程学报,2006,22(6):67-70.
- [4] 王欢元,韩霖昌,罗林涛,等. 砒砂岩与沙复配成土过程中沙的调控作用[J]. 土壤通报,2014,45(2):286-290.
- [5] 张露,韩霖昌,马增辉,等. 砒砂岩与沙复配“土壤”的质地性状[J]. 西北农业学报,2014,23(4):166-172.
- [6] 韩霖昌,付佩,王欢元,等. 砒砂岩与沙复配成土技术在毛乌素沙地土地整治工程中的推广应用[J]. 科学技术与工程,2013,13(25):7287-7293.
- [7] 张露,韩霖昌,王欢元,等. 砒砂岩与风沙土复配后的粒度组成变化[J]. 中国水土保持科学,2015,13(2):44-49.
- [8] 李娟,韩霖昌,李晓明. 砒砂岩与沙复配成土对小麦光合生理和产量的影响[J]. 麦类作物学报,2014,34(2):203-209.
- [9] 罗林涛,程杰,王欢元,等. 玉米种植模式下砒砂岩与沙复配土氮素淋失特征[J]. 水土保持学报,2013,27(4):58-61.
- [10] Han J C, Xie J C, Zhang Y. Potential role of feldspathic sandstone as a natural water retaining agent in Mu Us Sandy Land, Northwest China [J]. Chinese Geographical Science, 2012, 22(5): 550-555.
- [11] 张露,韩霖昌,罗林涛,等. 砒砂岩与风沙土复配土壤的持水特性研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版),2014,42(2):207-214.
- [12] 张磊,齐瑞鹏,张应龙,等. 砒砂岩风化物对土壤水分特征曲线及蒸发的影响[J]. 土壤学报,2015,52(1):77-86.
- [13] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京:中国农业出版社,2007.
- [14] 付佩,王欢元,罗林涛,等. 砒砂岩与沙复配成土造田技术研究[J]. 水土保持通报,2013,33(6):242-246.
- [15] 康绍忠,张建华,梁建生. 土壤水分与温度共同作用对植物根系水分传导的效应[J]. 植物生态学报,1999,23(3):211-219.
- [16] 路海东,薛吉全,马国胜,等. 陕西榆林春玉米高产田土壤理化性状及根系分布[J]. 应用生态学报,2010,21(4):895-900.
- [17] 宋桂龙,韩烈保,张训忠,等. 土壤机械阻力对草地早熟禾根系生长的影响[J]. 北京林业大学学报,2009,31(1):60-65.
- [18] 武高林,陈敏,杜国祯. 营养和光照对不同生态幅风毛菊属植物幼苗形态可塑性的影响[J]. 应用生态学报,2008,19(8):1708-1713.
- [19] 陈海波,卫星,王婧,等. 水曲柳苗木根系形态和解剖结构对不同氮浓度的反应[J]. 林业科学,2010,46(2):61-66.
- [20] 王晓冬,叶生欣,沈海龙,等. 不同土壤水分条件对真桦幼苗形态特征、生物量及光合生理特征的影响[J]. 东北林业大学学报,2008,36(5):22-24.

3 结论

(1)施用溶磷解钾微生物菌剂可以使马铃薯增产5.58%~24.54%。且“冀张薯12”马铃薯对施加菌剂响应最大,增产最高。菌剂的施用可以显著提高马铃薯品质,Vc含量提高133.50%~320.21%;可溶性蛋白质含量提高29.40%~45.50%;可溶性糖含量提高6.40%~7.30%;且“紫色马铃薯”3个品质指标都显著增加,对菌剂的响应能力最大。

(2)施用溶磷解钾微生物菌剂可以提高土壤速效磷钾含量,“大西洋”整个生育期土壤速效磷钾分别增长44.04%,40.40%;“紫色马铃薯”分别增加23.58%,32.21%;“冀张薯12”分别增加34.85%,28.13%。施用溶磷解钾微生物菌剂可分别提高土壤酸性和碱性磷酸酶活性36.53%~38.51%,23.70%~40.89%,且“冀张薯12”生长的土壤磷酸酶活性对施加菌剂响应能力最强。

(3)张北坝上地区以提高产量为主推荐种植“冀张薯12”,以营养含量为主则推荐种植“紫色马铃薯”,且二者施用溶磷解钾菌剂均可提高产量和提升品质。

参考文献:

- [1] 郭新送,丁方军,陈士更,等.不同用量包膜氯化钾对马铃薯产量、品质及土壤钾供应的影响[J].水土保持学报,2017,31(6):296-301.
- [2] 何文寿,马琨,代晓华,等.宁夏马铃薯氮、磷、钾养分的吸收累积特征[J].植物营养与肥料学报,2014,20(6):1477-1487.
- [3] 段玉,张君,李焕春,等.马铃薯氮磷钾养分吸收规律及施肥肥效的研究[J].土壤,2014,46(2):212-217.
- [4] 郑春雅,许中旗,马长明,等.冀西北坝上地区退化防护林的土壤性质[J].水土保持学报,2016,30(1):203-207.
- [5] 吴海燕,金荣德,范作伟,等.解磷巨大芽孢杆菌(*Bacillus megaterium*)的溶磷机理探讨[J].吉林农业大学学报,2014,36(2):171-175.
- [6] 范丙全.我国生物肥料研究与应用进展[J].植物营养与肥料学报,2017,23(6):1602-1613.
- [7] 李甘雨,林海,董颖博,等.胶质芽孢杆菌释放矿物元素效果及机理研究进展[J].金属矿山,2017(1):113-118.

(上接第234页)

- [21] Elser J J, Fagan W F, Denno R F, et al. Nutritional constraints in terrestrial and freshwater food webs [J]. Nature, 2000, 408(6812): 578-580.
- [22] Marschner P. Marschner's mineral nutrition of higher plants [M]. London, UK: Academic Press, 2012: 672.
- [23] Glasener K M, Waggener M G, Mackown C T, et al. Contributions of shoot and root nitrogen-15 labeled legume nitrogen sources to a sequence of three cereal

- [8] 尚海丽,毕银丽,彭苏萍,等.解钾细菌与黏土矿物协同促进玉米生长提高土壤养分有效性[J].农业工程学报,2016,32(12):129-135.
- [9] 梅新兰,闪安琪,蒋益,等.适应玉米的溶磷细菌筛选及其对玉米生长的影响[J].土壤学报,2016,53(2):502-509.
- [10] 廖佳丽,徐福利,赵世伟.宁南山区施肥对马铃薯生长发育、产量及品质的影响[J].中国土壤与肥料,2009(4):48-52.
- [11] 孔令郁,彭启双,熊艳,等.平衡施肥对马铃薯产量及品质的影响[J].土壤肥料,2004(3):17-19.
- [12] 吕慧峰,王小晶,陈怡,等.氮磷钾分期施用对马铃薯产量和品质的影响[J].中国农学通报,2010,26(24):197-200.
- [13] 张西露,刘明月,伍壮生,等.马铃薯对氮、磷、钾的吸收及分配规律研究进展[J].中国马铃薯,2010,24(4):237-241.
- [14] 关松荫.土壤酶及其研究法[M].北京:农业出版社,1986:309-313.
- [15] 刘露,李丽,闫洪雪,等.巨大芽孢杆菌的应用研究进展[J].北方农业学报,2016,44(4):117-120.
- [16] 刘五星,徐旭士,杨启银,等.胶质芽孢杆菌对土壤矿物的分解作用及机理研究[J].土壤,2004,36(5):547-550.
- [17] 钱建民,王晓岑,段雪娇,等.微生物肥对马铃薯产量及品质的影响[J].作物杂志,2015(1):99-102.
- [18] 钟传青,黄为一.磷细菌 P17 对不同来源磷矿粉的溶磷作用及机制[J].土壤学报,2004,41(6):931-937.
- [19] 盛下放,冯阳.不同条件下硅酸盐细菌对含钾矿物分解作用的研究[J].土壤,2005,37(5):110-112.
- [20] 盛下放,黄为一,殷永娟.硅酸盐菌剂的应用效果及其解钾作用的初步研究[J].南京农业大学学报,2000,23(1):43-46.
- [21] 李新新,高新新,陈星,等.一株高效解钾菌的筛选、鉴定及发酵条件的优化[J].土壤学报,2014,51(2):381-388.
- [22] 邱晓丽.不同生物有机肥对土壤生物活性以及对马铃薯的生物效应的影响[D].兰州:甘肃农业大学,2018.
- [23] 陈倩,刘善江,白杨,等.山西矿区复垦土壤中解磷细菌的筛选及鉴定[J].植物营养与肥料学报,2014,20(6):1505-1516.
- [24] 卫星,徐鲁荣,张丹,等.一株耐硝酸盐的巨大芽孢杆菌溶磷特性研究[J].环境科学学报,2015,35(7):2052-2058.

crops [J]. Soil Science Society of America Journal, 2002, 66(2): 523-530.

- [24] 王维奇,徐玲琳,曾从盛,等.河口湿地植物活体一枯落物一土壤的碳氮磷生态化学计量特征[J].生态学报,2011,31(23):7119-7124.
- [25] Koerselman W, Meuleman A. The vegetation N:P ratio: A new tool to detect the nature of nutrient limitation [J]. Journal of Applied Ecology, 1996, 33(6): 1441-1450.