

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2023.04.009

邵天韵, 燕潇, 贾秉志, 等. 种植草本植物狗牙根改良滨海黏性盐碱地的研究. 土壤, 2023, 55(4): 764–770.

种植草本植物狗牙根改良滨海黏性盐碱地的研究^①

邵天韵¹, 燕潇¹, 贾秉志², 徐聆溪², 马占红², 任莹飞¹, 隆小华^{1*}

(1 南京农业大学资源与环境科学学院, 南京 210095; 2 江苏方洋集团有限公司, 江苏连云港 222065)

摘要: 针对江苏省连云港市徐圩新区盐碱地重度黏性的特点, 通过原位田间试验对比分析了种植 1 年狗牙根土壤与裸地对照土壤, 研究了种植草本植物狗牙根对重度黏性盐碱土的改良效果和机制。结果表明: 在重度黏性盐碱地种植狗牙根可以降低土壤盐分、土壤 pH 及 Ca^{2+} 、 K^+ 、 Mg^{2+} 、 Na^+ 、 Cl^- 含量, 增加土壤吸湿水、有机质与有效磷含量, 同时还可以增加土壤微生物群落多样性和丰富度。总之, 种植草本植物狗牙根对滨海重度黏性盐碱土壤的盐碱障碍消除和地力提升效果明显, 改良成效显著。

关键词: 盐碱地; 土壤改良; 狗牙根; 土壤微生物; 土壤酶

中图分类号: X53 文献标志码: A

Cultivation of Herbaceous Plants (*Cynodon dactylon*) is Helpful to Improve Soil Quality of Clayey Coastal Saline-Alkali Land

SHAO Tianyun¹, YAN Xiao¹, JIA Bingzhi², XU Lingxi², MA Zhanhong², REN Yingfei¹, LONG Xiaohua^{1*}

(1 College of Resources and Environmental Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China; 2 Jiangsu Fangyang Group Co., Ltd., Lianyungang, Jiangsu 222065, China)

Abstract: This study is to study the improvement effects of herbaceous plant (*Cynodon dactylon*) planting on the clayey coastal saline-alkali land. The coastal saline-alkali soil with and without *Cynodon dactylon* planting in Lianyungang City of Jiangsu Province was taken as the experimental object, soil samples of *Cynodon dactylon* planted for one year and the bare land (CK) were collected and determined. The results showed that *Cynodon dactylon* planting reduced soil salinity, pH value, and the concentrations of Ca^{2+} , K^+ , Mg^{2+} , Na^+ and Cl^- , increased soil moisture, the contents of organic matter, available phosphorus, and the diversity and richness of soil microbial community. In conclusion, the cultivation of *Cynodon dactylon* has the remarkable effects on the removal of saline-alkali barrier and the improvement of soil fertility in the clayey coastal saline-alkali land.

Key words: Saline alkali land; Soil improvement; *Cynodon dactylon*; Soil microorganism; Soil enzyme

盐碱地是指表层积聚了过量盐碱成分的土壤, 具有土壤盐分含量和 pH 高、透气性和透水性差、表层易板结、营养含量低等特点。在第二次国际可持续发展会议中, 土壤沙漠化、水土流失以及盐碱化被认为是未来全球农林业可持续发展所面临的三大问题^[1]。目前, 全球大约存在 $9.32 \times 10^8 \text{ hm}^2$ 盐碱地, 约占全球耕地面积的 10%, 而且至少以 $1.0 \times 10^6 \sim 1.5 \times 10^6 \text{ hm}^2/\text{a}$ 的速度持续增长。据我国第二次土壤普查数据, 我国盐碱地总面积约为 $3.67 \times 10^7 \text{ hm}^2$, 主要存在于我国西北、华北、东北以及滨海地带, 涉及 17 个省份, 其中我国西部六省(新疆、内蒙古、青海、甘肃、宁夏、陕西)占全国的 69.03%^[2]。大面积盐碱地因盐分过高而被摺

荒, 一方面是由于被盐碱地特殊的水文地质条件所限制, 另一方面, 次生盐渍化加重会引发土地生产力下降^[3]。盐渍土的改良和利用是我国生态环境治理的当务之急^[4], 同时也是缓解我国人地矛盾、促进区域可持续发展的的重要途径。

滨海盐渍土的突出障碍在于“高盐”, 因此其改良的关键重在“治盐”^[5]。高渗透压和离子毒性的胁迫效应是盐分对植物生长和繁殖生理盐害的主要表现^[6]。通常情况下, 植物的耐盐性是指通过生理或代谢过程来适应细胞内的高盐环境, 主要表现在耐渗透胁迫、营养元素平衡、代谢稳定和与盐结合等。大多耐盐植被容许盐分转运到根系, 并且以相应的形式吸

①基金项目: 徐圩新区土壤改良及绿化植物优选研究实施项目(001-QT900-ZX017)资助。

* 通讯作者(longxiaohua@njau.edu.cn)

作者简介: 邵天韵(1994—), 女, 江苏南京人, 博士, 主要研究方向为盐碱地生态改良与修复。E-mail: t2022065@njau.edu.cn

收盐分,对盐分具有一定的耐受能力而不受其害,从而维持健康的生长发育活动。这些植物能够在盐渍土壤中生长,并不能阻止盐分进入体内,也不能将盐分排出体外,而是依赖自身的生理途径或形态特征来避免盐害,以维持其正常的生理活动。这些耐盐植物抗盐性高,在修复盐渍化土壤方面具有良好的应用前景。有学者比较了众多植物的抗盐性,认为狗牙根属植物是一类抗盐性高的植物^[7]。

狗牙根(*Cynodon dactylon* (L.) Pers.)又称拌根草、铁线草等,为禾本科狗牙根属的低矮草本植物。狗牙根属植物是适于世界各温暖潮湿和温暖半干旱地区的长寿命多年生草本植物,我国也有着非常丰富的狗牙根资源。狗牙根适应的土壤范围广,是暖季型草坪草中主要建坪草种之一。因其根系发达、匍匐茎蔓延性强,容易形成致密的草皮,保水效果极好,是重要的水土保持物种^[8],被广泛用于运动场草坪建植和园林绿化。此外,狗牙根还极耐热、耐践踏和抗旱,耐盐性也较好^[9-10]。Shi等^[11]从生理和代谢水平研究狗牙根对碱胁迫的响应,发现狗牙根在轻度碱胁迫下可能通过减缓代谢来维持其基本生长,而在中度和重度碱胁迫下则是表现为其碳水化合物积累量的显著增加,说明狗牙根对不同土壤pH的碱胁迫采取了不同的应对策略。同时也有很多研究表明,狗牙根在盐碱地建植或咸水(包括再生水)灌溉中具有很高的应用潜力^[9,12]。

目前,狗牙根耐盐性的研究多集中在狗牙根育成品种或品系内及与其他草种间差异比较^[12-13]、不同来源狗牙根耐盐种质的筛选与鉴定^[10,14]等,少有对狗牙根的生态修复功能方面的研究,对盐碱地的修复改良效果更是鲜见报道。基于此,本研究以江苏省连云港市徐圩新区滨海重度黏性盐碱地为试验对象,分析了种植狗牙根对重度黏性盐碱土改良的效果和机制。

1 材料与方 法

1.1 试验区域与供试材料

研究区位于江苏省连云港市连云区(34°75'N, 119°37'E)。连云区地处江苏省东北部,东临黄海,南接灌云,西连海州,北靠赣榆,是连云港市的主城区之一,为连云港对外开放的最东段,新亚欧大陆桥东端起点,因境内有连云港港口而得名连云。该区地处暖温带的南缘,属向亚热带过渡的季风海洋性气候地带,四季分明,气候宜人。年平均气温为14℃,1月份气温最低,均温1.1℃;8月份气温最高,均温26.8℃;

全年有223 d以上日均温不低于10℃。水资源总量一千余万立方米,年均降水量900 mm。试验区土壤质地较为黏重(属于黏壤土),在试验前土壤基本理化性质为:土壤容重(1.58±0.22) g/cm³,土壤含盐量(9.31±0.75) g/kg,土壤pH 8.78±0.28,土壤有机质含量(4.40±0.49)g/kg。供试草本植物种子为江苏常见的包衣脱壳狗牙根种子。

1.2 研究方法

试验共设置两个处理:①裸地对照处理(没有植被生长的空白裸地),试验区面积为20 m×20 m,记为PCK;②狗牙根种植处理,试验区面积为20 m×100 m,记为HP。狗牙根的播种时间为2021年4月16日,播种量为10 g/m²。两个处理除种植狗牙根种植与否外,其他条件保持完全一致,即试验开始前5 d统一进行翻耕处理(翻耕深度为20 cm)和底肥施用(复合肥15-15-15,施用量为30 kg/667 m²),而后无其他人为干预活动。

于2022年4月20日,在试验区采集种植了狗牙根的土壤样品和裸地对照土样,采样深度为0~10 cm。将采集到的土壤样品按照NY/T 1121.1—2006《土壤检测 第1部分:土壤样品的采集、处理和贮存》^[15]的要求进行处理,用于后续土壤理化指标的测定。每个样点同步采集约10.0 g的新鲜土样用锡纸包好,标记好后投入液氮罐中转运至实验室,而后保存于-80℃冰箱中,用于后续的土壤DNA提取和分析^[16]。

按照NY/T 1121—2006系列标准测定土壤pH(电导法)^[17]、有机质(重铬酸钾法)^[18]、有效磷(酶标仪法)^[19]、土壤含盐量(电位法)^[20]、最大吸湿水量(烘干法)^[21]、全氮(自动定氮仪法)^[22];按照NY/T 889—2004^[23]标准测定土壤速效钾(火焰光度计法);按照HJ 632—2011^[24]标准测定土壤全磷(NaOH碱熔-钼锑抗分光光度法);采用电感耦合等离子体原子发射光谱仪法测定土壤K、Ca、Na、Mg元素的含量;采用土壤酶活试剂盒测定土壤过氧化氢酶、碱性磷酸酶和脲酶活性。土壤微生物的检测由诺禾致源(Novogene)公司完成。

1.3 数据处理

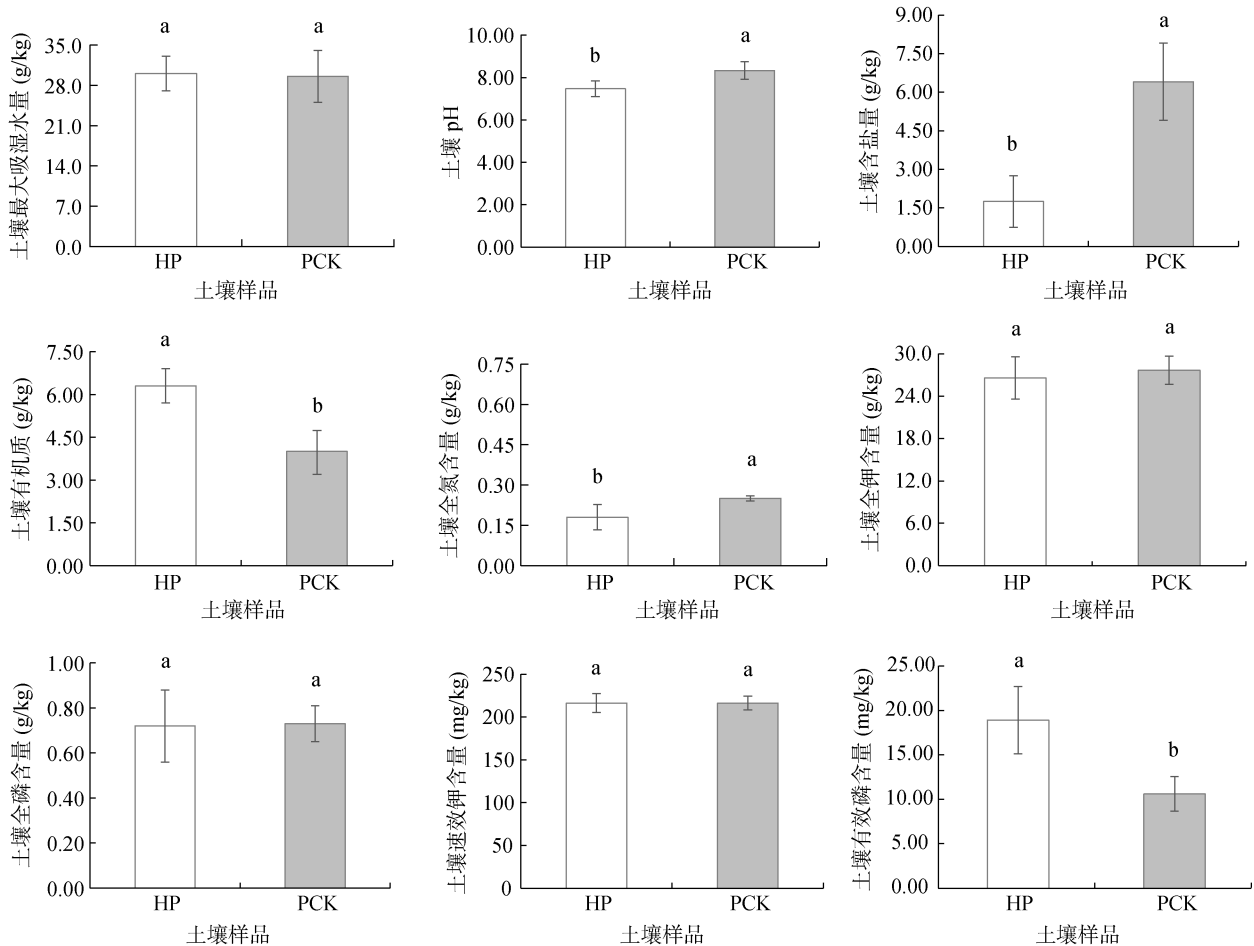
本试验数据使用Excel 2007和SPSS 26进行统计分析。文中所有数据的平均值取自3次重复,并计算标准误差,即用平均值±标准误差(Mean±SE)表示;采用单因素方差分析(ANOVA)法进行处理间差异性比较,显著水平为P<0.05。

2 结果与分析

2.1 种植狗牙根对重度黏性盐碱地土壤基本理化性质的影响

如图 1 所示,裸地土壤最大吸湿水量为 29.6 g/kg,种植 1 年狗牙根后的土壤最大吸湿水量为 30.1 g/kg,增加了 1.80%,有一定的上升趋势。这可能是由于种植狗牙根之后虽然一定程度上降低了土壤的容重,但更是显著提升了土壤中有机质的含量,因此导致了土

壤最大吸湿水量的增加。种植 1 年狗牙根后的土壤有机质含量较裸地土壤显著增加($P<0.05$)。裸地土壤的有机质含量为 4.02 g/kg,种植狗牙根后土壤有机质上升为 6.33 g/kg,增加了 57.5%。此外,裸地土壤 pH 为 8.33(偏碱性),种植 1 年狗牙根后的土壤 pH 为 7.47(偏中性),降低了 10.3%,呈明显的下降趋势,表明种植狗牙根对土壤的碱性环境有所改善。种植 1 年狗牙根后的土壤盐分较裸地土壤盐分显著降低($P<0.05$),由 6.41 g/kg 降低至 1.75 g/kg,降低了约 72.6%。



(PCK: 裸地对照土壤; HP: 狗牙根种植土壤; 图中不同小写字母表示不同土样间差异显著($P<0.05$); 下同)

图 1 种植狗牙根土壤与裸地对照土壤理化性质的比较

Fig. 1 Comparison of soil properties with and without *Cynodon dactylon* planting

种植了 1 年狗牙根后的土壤全氮含量较裸地土壤显著下降($P<0.05$)由 0.25 g/kg 下降为 0.18 g/kg,减少了 28%;与此同时,裸地土壤全钾、全磷和速效钾含量分别为 27.7 g/kg、0.73 g/kg 和 216.2 mg/kg,种植 1 年狗牙根后土壤中 3 个指标的含量分别减少了 3.97%、1.37% 和 0,但差异不显著($P>0.05$),这可能表明狗牙根的生长发育会消耗较多的氮元素,但对土壤中磷和钾元素的影响不大。裸地对照土样有效磷含量为 10.6 mg/kg,种植 1 年狗牙根后的土壤有效磷含

量上升为 18.8 mg/kg,增加了 77.4%,有明显的上升趋势($P<0.05$),表明种植狗牙根对土壤有效磷含量具有一定的增加效果(图 1)。

2.2 种植狗牙根对重度黏性盐碱地土壤盐分离子和酶活性的影响

如图 2 所示,种植一年狗牙根后的土壤与裸地土壤中的 Cl^- 含量差异显著($P<0.05$),裸地土壤 Cl^- 含量为 0.78 g/kg,种植 1 年狗牙根后降低为 0.12 g/kg,减少了 84.6%。裸地土壤 Ca^{2+} 、 K^+ 、 Mg^{2+} 、 Na^+ 含量分

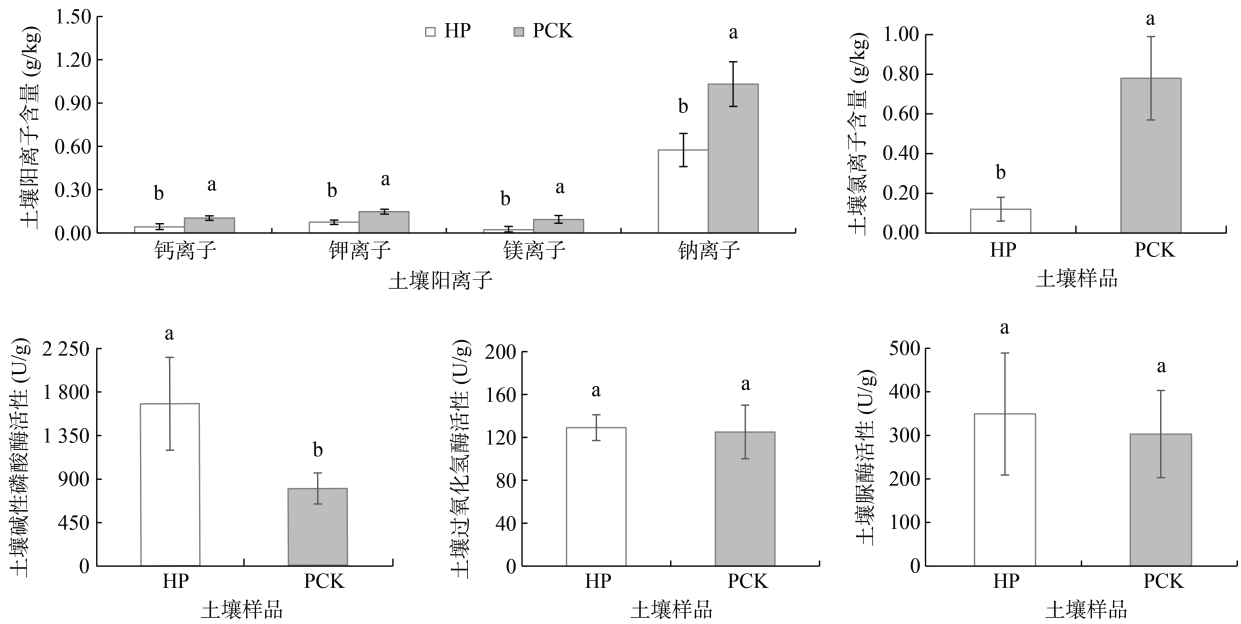


图 2 种植狗牙根土壤与裸地对照土壤离子浓度及土壤酶活比较

Fig. 2 Comparison of soil ion concentrations and enzyme activities with and without *Cynodon dactylon* planting

别为 0.103、0.147、0.094、1.031 g/kg，种植狗牙根 1 年后分别显著下降为 0.043、0.075、0.022、0.574 g/kg($P<0.05$)，分别降低了 58.3%、49.0%、76.6%、44.3%。可见，种植狗牙根对降低盐碱地土壤盐基离子含量效果显著。

裸地土壤中碱性磷酸酶活性均值为 794 U/g，种植了 1 年狗牙根后显著增加为 1 677 U/g($P<0.05$)，是裸地土壤的 2.11 倍，表明种植狗牙根对土壤中碱性

磷酸酶活性有显著的增强效果。裸地土壤中过氧化氢酶、脲酶活性均值为 125、303 U/g，种植 1 年狗牙根后为 129、349 U/g，分别增加了 3.20%、15.2%，但影响不显著($P>0.05$)(图 2)。

2.3 土壤理化性质与土壤酶活性的相关性

土壤各理化指标的 Pearson 相关性如表 1 所示。由表 1 可知，土壤含盐量分别与土壤 pH、Ca²⁺、K⁺、Mg²⁺、Na⁺、Cl⁻含量呈显著($P<0.05$)或极显著($P<0.01$)

表 1 土壤理化性质与土壤酶的 Pearson 相关性

Table 1 Pearson correlation of soil physiochemical properties and enzyme activities

	最大吸湿水量	含盐量	pH	有机质	全氮	全钾	全磷	有效磷	速效钾	Ca ²⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	Cl ⁻
含盐量	0.396													
pH	0.477	0.975**												
有机质	0.132	-0.762	-0.751											
全氮	0.140	0.738	0.600	-0.525										
全钾	0.215	0.289	0.374	-0.263	0.307									
全磷	0.380	0.308	0.475	-0.325	0.003	0.871*								
有效磷	0.288	-0.452	-0.496	0.893*	-0.241	-0.427	-0.517							
速效钾	0.773	0.270	0.264	0.408	0.290	0.169	0.074	0.642						
Ca ²⁺	0.594	0.906*	0.888*	-0.518	0.796	0.520	0.436	-0.249	0.550					
K ⁺	0.426	0.985**	0.973**	-0.699	0.727	0.395	0.388	-0.405	0.359	0.937**				
Mg ²⁺	0.533	0.964**	0.934**	-0.651	0.811	0.383	0.347	-0.352	0.410	0.937**	0.958**			
Na ⁺	0.322	0.988**	0.963**	-0.753	0.719	0.316	0.314	-0.447	0.267	0.886*	0.991**	0.929**		
Cl ⁻	0.432	0.987**	0.967**	-0.773	0.692	0.202	0.274	-0.461	0.225	0.867*	0.950**	0.952**	0.954**	
碱性磷酸酶	0.101	-0.612	-0.686	0.907*	-0.241	-0.477	-0.627	0.949**	0.446	-0.409	-0.592	-0.491	-0.626	-0.608
过氧化氢酶	-0.932**	-0.594	-0.676	0.206	-0.300	-0.349	-0.528	0.063	-0.566	-0.728	-0.596	-0.713	-0.504	-0.641
脲酶	0.620	0.077	0.136	0.457	0.094	0.521	0.406	0.492	0.863*	0.424	0.223	0.214	0.115	-0.011

注：*、**分别表示在 $P<0.05$ 、 $P<0.01$ 水平(双尾)显著相关；下同。

正相关关系; 土壤 pH 与 Ca^{2+} 、 K^+ 、 Mg^{2+} 、 Na^+ 、 Cl^- 含量互为显著正相关关系($P < 0.05$); 土壤有机质与土壤有效磷、全钾与全磷含量均呈显著正相关关系($P < 0.05$)。

2.4 种植狗牙根对重度黏性盐碱地土壤微生物多样性的影响

从表 2 可以看出, 通过 16S rDNA 检测, 种植狗牙根的土壤可直观观测到的物种数目显著高于裸地土壤($P < 0.05$)。两土壤间 Shannon 指数和 Simpson 指数(微生物多样性)无显著性差异($P > 0.05$), 但 Chao1 指数种植狗牙根土壤显著高于裸地土壤($P < 0.05$)。说明种植狗牙根后, 土壤环境中的物种丰富度显著升高。

表 2 不同土壤样品中 16S rDNA 的 Shannon 指数、Simpson 指数和 Chao1 指数

Table 2 Shannon, Simpson and Chao 1 indexes of 16S rDNA in soils with and without *Cynodon dactylon* planting

Alpha 多样性指数	HP	PCK
Observed_species	1974 a	1769 b
Shannon	8.759 a	8.124 a
Simpson	0.993 a	0.984 a
Chao1	2684 a	2043 b

注: PCK: 裸地土壤; HP: 狗牙根种植土壤。表中同行不同小写字母表示不同土壤间差异显著($P < 0.05$)。

2.5 土壤理化性质与土壤微生物多样性的相关性

如表 3 所示, 土壤细菌酸杆菌门(Acidobacteria)相对丰度与土壤 Cl^- 、 Na^+ 、全氮和盐分含量均呈现显著的负相关关系, 而放线菌门(Actinobacteria)相对丰度与

土壤全氮含量呈现显著的正相关关系, 变形菌门(Proteobacteria)相对丰度与土壤有机质含量呈现显著的正相关关系。芽单胞菌门(Gemmatimonadetes)相对丰度与疣微菌门(Verrucomicrobia)相对丰度呈现显著的正相关关系。土壤 Na^+ 、 Cl^- 含量与土壤盐分含量间呈现极显著的正相关关系, 因此, 各门类细菌与这 3 个土壤性状之间呈现相似的相关关系。5 个环境因子中, 有机质与各门类细菌表现的相关关系和土壤 Na^+ 、 Cl^- 、盐分以及全氮表现的相关关系相反。厚壁菌门(Firmicutes)与放线菌门表现负相关关系, 而与其他门类细菌均表现正相关关系。而绿弯菌门(Chloroflexi)与变形菌门(Proteobacteria)、放线菌门(Actinobacteria)表现正相关关系, 与其余门类细菌均表现负相关关系。放线菌门(Actinobacteria)与泉古菌门(Crenarchaeota)、绿弯菌门(Chloroflexi)呈现正相关关系, 与其余门类细菌均表现负相关关系(表 3)。

3 讨论

3.1 种植狗牙根对土壤理化性质的影响

土壤中的可溶性盐基离子是阻碍植物生长发育的重要因素。本试验中, 种植狗牙根使土壤由原原本的重度盐渍土(6.41 g/kg)降低至轻度盐渍土(1.75 g/kg), 含盐量降低了约 72.6%(图 1), 此外, 还显著降低了试验区土壤 pH 与 Ca^{2+} 、 Na^+ 和 Cl^- 等盐基离子含量(图 2), 表明种植狗牙根对降低土壤含盐量有显著的效果, 改善了试验区的土壤环境。土壤有机质含量是反映土壤

表 3 土壤基本理化性质与相对丰度前 10 位菌门的 Pearson 相关性

Table 3 Pearson correlations between soil physiochemical properties and relative abundances of top 10 phyla

	Cl^-	全氮	有机质	Na^+	盐分	变形菌门	拟杆菌门	放线菌门	厚壁菌门	绿弯菌门	酸杆菌门	疣微菌门	粘菌门	芽单胞菌门
全氮	0.692													
有机质	-0.773	-0.525												
Na^+	0.954**	0.719	-0.753											
含盐量	0.987**	0.738	-0.762	0.988**										
变形菌门	-0.533	-0.301	0.904*	-0.528	-0.532									
拟杆菌门	0.317	-0.386	-0.354	0.124	0.193	-0.322								
放线菌门	0.68	0.918**	-0.759	0.732	0.729	-0.595	-0.278							
厚壁菌门	-0.578	-0.802	0.596	-0.476	-0.543	0.335	0.036	-0.803						
绿弯菌门	0.108	0.380	0.227	0.123	0.158	0.104	-0.468	0.138	0.056					
酸杆菌门	-0.913*	-0.893*	0.626	-0.889*	-0.920**	0.312	0.006	-0.801	0.758	-0.193				
疣微菌门	-0.171	-0.465	-0.176	-0.372	-0.283	-0.413	0.645	-0.291	0.066	-0.199	0.417			
粘菌门	-0.615	-0.519	0.282	-0.450	-0.564	0.242	-0.184	-0.333	0.405	-0.669	0.577	-0.172		
芽单胞菌门	-0.512	-0.542	0.108	-0.670	-0.598	-0.191	0.334	-0.394	0.164	-0.128	0.646	0.917*	0.018	
泉古菌门	0.365	-0.032	-0.491	0.548	0.437	-0.491	0.184	0.189	0.269	-0.300	-0.136	-0.226	0.313	-0.417

肥力的一个重要指标。在本次试验中, 裸地对照土壤的有机质含量为 4.02 g/kg, 种植狗牙根后土壤有机质上升为 6.33 g/kg, 增加了 57.5%(图 1), 表明种植狗牙根显著地提高了土壤的有机质含量。但土壤的全氮、全磷和全钾含量有所下降(图 2)。这些结果表明, 可能由于试验地的有机质基础较低, 狗牙根的种植为土壤增加了一定的有机质含量, 但同时狗牙根的生长增加了对土壤中养分的消耗, 导致土壤中养分含量降低^[25]。

3.2 种植狗牙根对土壤酶活性的影响

土壤酶是土壤组分中较为活跃的成分之一。在根际环境中, 植物根系活动为土壤微生物提供了丰富的物质与能量来源, 对其生长、代谢和分布状况产生重要影响, 进而调控土壤酶的释放^[26]。相关研究表明, 土壤有机质含量增加, 会使得土壤蔗糖酶和脲酶活性水平增强, 但会造成过氧化氢酶活性下降^[27]。本试验中, 种植狗牙根土壤碱性磷酸酶活性、过氧化氢酶活性和脲酶活性较裸地对照土壤均有所提高, 提升幅度分别为 1.11 倍($P<0.05$)、3.40% 和 15.2%(图 2)。土壤磷酸酶是一类催化土壤有机磷化合物矿化成无机磷的酶, 而土壤脲酶能酶促土壤中尿素水解成氨, 二者与土壤有效磷、有机质等肥力指标密切相关。通过相关性分析发现, 土壤碱性磷酸酶的活性不仅与土壤有机质含量显著正相关($P<0.05$), 与土壤有效磷含量也存在极显著正相关关系($P<0.01$), 而脲酶活性除了与 Cl^- 含量呈负相关关系, 与其余的土壤理化性质均呈现正相关关系(表 1)。可见, 种植狗牙根能够通过提高土壤酶活性的方式达到活化土壤中养分的目的, 进而提高土壤中养分的有效性, 提升土壤肥力。

3.3 种植狗牙根对土壤微生物的影响

土壤微生物是生态系统中重要的组成部分, 土壤微生物多样性及其变化影响着土壤肥力的高低及其变化^[28]。Zhang 等^[29]研究表明, 土壤性质对细菌群落结构有着重要的影响, 环境特性的差异直接影响了土壤中细菌的生物活性与组成, 本试验结果与之相一致。本试验种植狗牙根的土样中所观测到的物种数目和物种丰富度皆显著高于裸地对照土样($P<0.05$)(表 2), 说明种植狗牙根显著提升了土壤中物种丰富度。李丽娟^[30]对三峡消落带不同植被土壤进行微生物检测, 其对于种植狗牙根土样中真核微生物门类检测结果与本次种植狗牙根土样中所检测出的门类顺序大致相同。Jousset 等^[31]研究发现, 变形菌门中包含和植物共生(根瘤菌属)以及具有一定降解有机物能力的多种好氧或者兼性细菌; LeFevre 等^[32]的研究表明, 变形菌门在抑制病原微生物和还原难降解有机物中发挥重要作用。

本研究中, 变形菌门相对丰度与有机质含量呈现显著正相关关系(表 3), 这与前人的研究结果相一致。且本试验中, 丰度较高的细菌门类中, 浮霉菌门和泉古菌门与氨氧化有着密切的关系, 芽孢杆菌门对土壤污染物(例如农药、烃等)和植物凋落物等成分的降解过程发挥重要的作用, 绿弯菌门具有还原亚硝酸盐的生态功能^[33-35]。说明种植狗牙根使土壤的理化性质发生改变, 盐分降低, 养分含量增加, 同时使土壤中的各微生物种群与土壤环境之间相互循环促进, 以达到改良盐碱地的效果。

4 结论

1) 种植 1 年狗牙根后, 滨海重度黏性盐碱地土壤盐度和 pH 分别显著降低($P<0.05$)了 72.6%和 10.3%, 至 1.75 g/kg 和 pH 7.47。

2) 种植 1 年狗牙根后, 土壤有机质含量由 4.02 g/kg 显著提升至 6.33 g/kg($P<0.05$); 土壤有效磷含量增加了 77.4%($P<0.05$); 土壤全氮显著降低了 28%($P<0.05$); 土壤速效钾、全钾和全磷没有显著变化。

3) 种植 1 年狗牙根后, 土壤中碱性磷酸酶活性增加了 1.11 倍($P<0.05$), 而过氧化氢酶活性与脲酶活性分别增加了 3.4% 和 15.2%($P>0.05$)。

4) 种植 1 年狗牙根后, 土壤中物种丰富度显著提升, 且土壤中有有机质、全氮、 Na^+ 和 Cl^- 含量均对土壤微生物群落结构有显著影响。

参考文献:

- [1] 张建锋, 张旭东, 周金星, 等. 世界盐碱地资源及其改良利用的基本措施[J]. 水土保持研究, 2005, 12(6): 28-30, 107.
- [2] 樊自立, 马英杰, 马映军. 中国西部地区的盐渍土及其改良利用[J]. 干旱区研究, 2001, 18(3): 1-6.
- [3] 杨劲松, 姚荣江, 王相平, 等. 防止土壤盐渍化, 提高土壤生产力[J]. 科学, 2021, 73(6): 30-34, 2, 4.
- [4] 杨蕾, 石凤翎. 海乳草耐盐性研究进展[J]. 中国草地学报, 2019, 41(2): 89-94.
- [5] 刘淙琮, 孙宏勇, 郭凯, 等. 不同矿化度咸水在滨海典型植被盐碱地中的入渗特性研究[J]. 土壤, 2022, 54(1): 177-183.
- [6] Shao T Y, Long X H, Liu Y Q, et al. Effect of industrial crop Jerusalem artichoke on the micro-ecological rhizosphere environment in saline soil[J]. Applied Soil Ecology, 2021, 166: 104080.
- [7] 陈静波, 宗俊勤, 张莉, 等. 狗牙根在江苏滨海盐碱地的适应性评价[J]. 江苏农业科学, 2016, 44(11): 244-247.
- [8] 陈华峰. 狗牙根在库尔勒地区园林的发展应用前景[J]. 中国农业信息, 2016(14): 40.
- [9] 产祝龙, 施海涛, 王艳平. 狗牙根抗非生物胁迫的研究进展[J]. 草业科学, 2013, 30(8): 1182-1187.

- [10] 刘亚宁. 狗牙根 CdSAP1 基因的克隆及耐盐功能解析[D]. 南京: 南京农业大学, 2016.
- [11] Shi H T, Ye T T, Song B, et al. Comparative physiological and metabolomic responses of four *Brachypodium distachyon* varieties contrasting in drought stress resistance[J]. *Acta Physiologiae Plantarum*, 2015, 37(6): 122.
- [12] 陈静波, 刘建秀. 狗牙根抗盐性评价及抗盐机理研究进展[J]. *草业学报*, 2012, 21(5): 302–310.
- [13] Marcum K B, Pessaraki M. Salinity tolerance and salt gland excretion efficiency of bermudagrass turf cultivars[J]. *Crop Science*, 2006, 46(6): 2571–2574.
- [14] Schwartz B, Zhang J, Fox J, et al. Turf performance of shaded ‘TifGrand’ and ‘TifSport’ hybrid bermudagrass as affected by mowing height and trinexapac-ethyl[J]. *HortTechnology*, 2020, 30(3): 391–397.
- [15] 中华人民共和国农业部. 土壤检测 第 1 部分: 土壤样品的采集、处理和贮存: NY/T 1121.1—2006[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.
- [16] 李磊, 柳佳莹, 徐艳萍, 等. 滨海沙地不同竹林土壤理化性质与综合评价[J]. *热带作物学报*, 2023, 44(1): 215–223.
- [17] 中华人民共和国农业部. 土壤检测 第 2 部分: 土壤 pH 的测定: NY/T 1121.2—2006[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.
- [18] 中华人民共和国农业部. 土壤检测 第 6 部分: 土壤有机质的测定: NY/T 1121.6—2006[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.
- [19] 中华人民共和国农业部. 土壤检测 第 7 部分: 土壤有效磷的测定: NY/T 1121.7—2006[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.
- [20] 中华人民共和国农业部. 土壤检测 第 16 部分: 土壤水溶性盐总量的测定: NY/T 1121.16—2006[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.
- [21] 中华人民共和国农业部. 土壤检测 第 21 部分: 土壤最大吸湿量的测定: NY/T 1121.21—2006[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.
- [22] 中华人民共和国农业部. 土壤检测 第 24 部分: 土壤全氮的测定 自动定氮仪法: NY/T 1121.24—2006[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.
- [23] 中华人民共和国农业部. 土壤速效钾和缓效钾含量的测定: NY/T 889-2004[S]. 北京: 中国农业出版社, 2005.
- [24] 中华人民共和国环境保护部. 土壤 总磷的测定 碱熔-钼锑抗分光光度法: HJ 632—2011[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2012.
- [25] 张婧, 陈庆锋, 刘伟, 等. 秸秆还田对盐碱地土壤及作物生长的影响研究进展[J]. *江苏农业科学*, 2022, 50(11): 13–22.
- [26] 何瑞成, 吴景贵. 有机物料对原生盐碱地土壤生物学性质的影响[J]. *土壤学报*, 2018, 55(3): 774–782.
- [27] 刘传和, 贺涵, 何秀古, 等. 菠萝不同连作年限对土壤理化性状和微生物群落丰度的影响[J]. *土壤*, 2021, 53(6): 1244–1249.
- [28] 司绍诚, 吴宇澄, 李远, 等. 耕地和草地土壤健康研究进展与展望[J]. *土壤学报*, 2022, 59(3): 625–642.
- [29] Zhang C, Nie S, Liang J, et al. Effects of heavy metals and soil physicochemical properties on wetland soil microbial biomass and bacterial community structure[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 557/558: 785–790.
- [30] 李丽娟. 三峡消落带四种适生植物根部土壤养分、酶活和细菌群落多样性特征[D]. 重庆: 西南大学, 2020.
- [31] Jousset A, Rochat L, Lanoue A, et al. Plants respond to pathogen infection by enhancing the antifungal gene expression of root-associated bacteria[J]. *Molecular Plant-Microbe Interactions*, 2011, 24(3): 352–358.
- [32] LeFevre G H, Hozalski R M, Novak P J. Root exudate enhanced contaminant desorption: An abiotic contribution to the rhizosphere effect[J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, 47(20): 11545–11553.
- [33] Jiang N, Li Y, Zheng C G, et al. Characteristic microbial communities in the continuous permafrost beside the bitumen in Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2015, 74(2): 1343–1352.
- [34] 黄海洪, 陈倩, 类延菊, 等. 低营养水体中芽孢杆菌降解有机氮的研究[J]. *环境科学学报*, 2019, 39(2): 325–335.
- [35] 严淑娴, 刘茗, 刘彩霞, 等. 毛竹纯林土壤微生物多样性高于杉木纯林[J]. *土壤学报*, 2022, 59(6): 1704–1717.