

牧草种植对黄河三角洲盐碱土壤改良效果的 动态监测及综合评价

窦晓慧¹, 李红丽¹, 盖文杰², 许婷婷³, 吴其聪¹, 安淳淳¹, 潘嘉琛¹, 董智¹

(1.山东农业大学林学院,泰山森林生态系统定位研究站,山东 泰安 271018;

2.东营市河口区林业发展服务中心,山东 东营 257299;3.肥城市行政审批服务局,山东 肥城 271600)

摘要:为揭示牧草种植改良盐碱地的效果,更好地开发利用后备土地资源。以黄河三角洲滨海盐碱地为研究对象,采用小区试验、野外取样、室内测试相结合的方法,研究了高丹草、甜高粱和墨西哥玉米3种一年生牧草在1个生长期对黄河三角洲盐碱地土壤物理、化学和酶活性改良效果的动态变化,并依据土壤质量指数综合评价了改良效果。结果表明:(1)土壤含水量、pH和电导率随生长时间增加呈下降趋势,高丹草和墨西哥玉米在生长旺盛期对土壤pH的降低效果最明显,甜高粱在收获期降低pH的效果最好。3种牧草土壤电导率较CK均显著降低,对20—40 cm土层的降低效果优于0—20 cm土层,其中墨西哥玉米效果最好。(2)种植不同牧草对土壤养分含量有明显改善,其中土壤有机质、速效氮、速效磷含量有显著提升,但对土壤速效钾含量影响不大。(3)3种牧草在不同生长期对土壤酶活性的影响不同,在生长旺盛期土壤酶活性最强,均显著增强土壤过氧化氢酶、蔗糖酶和脲酶的活性,其中甜高粱对过氧化氢酶和蔗糖酶活性影响最大。(4)不同牧草对盐碱土壤改良指标的贡献值存在差异,综合土壤理化性质、养分含量和土壤酶活性作为土壤评价指标,种植不同牧草后土壤质量从高到低依次为甜高粱>高丹草>墨西哥玉米>CK。研究结果可为黄河三角洲地区盐碱地的植物修复技术和筛选及引进国内外具有高效生态经济效益的耐盐植物提供理论依据和重要参考。

关键词:牧草;盐碱地;生物改良;土壤质量评价;黄河三角洲

中图分类号:S156.4⁺2

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2022)06-0394-08

DOI:10.13870/j.cnki.stbcbx.2022.06.048

Dynamic Monitoring and Comprehensive Evaluation of the Effect of Pasture Cultivation on Saline Soil Improvement in the Yellow River Delta

DOU Xiaohui¹, LI Hongli¹, GAI Wenjie², XU Tingting³,

WU Qicong¹, AN Chunhun¹, PAN Jiachen¹, DONG Zhi¹

(1.Forestry College of Shandong Agricultural University, Taishan Forest Ecosystem Positioning Research

Station, Tai'an, Shandong 271018; 2.Dongying Hekou District Forestry Development Service Center, Dongying,

Shandong 257299; 3.Feicheng Administrative Examination and Approval Service Bureau, Feicheng, Shandong 271600)

Abstract: In order to reveal the effect of forage grass planting on improving saline alkali land and better develop and utilize the reserve land resources, the coastal saline alkali land in the Yellow River Delta was taken as the research object, using the methods of plot experiments, field sampling and indoor tests, we investigated the dynamic changes of physical, chemical and enzymatic activities of saline soils planted three annual forage grasses (*Sorghum bicolor* × *sudanense*, *Sorghum bicolor* 'Dochna', *Purus frumentum*) during a growing period, and comprehensively evaluated the improvement effects based on the soil quality index. The results showed that: (1) Soil water content, pH and conductivity showed a decreasing trend with the increasing of growth time, and the most significant reduction in soil pH was observed for *Sorghum bicolor* × *sudanense* and *P. frumentum* during the vigorous growth period, and the best reduction in pH was observed at the harvest stage of *Sorghum bicolor* 'Dochna'. The soil conductivities of all three forage grasses

收稿日期:2022-04-05

资助项目:山东省农业科技资金(林业科技创新)项目(2019LY005-03)

第一作者:窦晓慧(1997—),女,在读硕士研究生,主要从事土壤侵蚀及荒漠化治理研究。E-mail:17854337082@163.com

通信作者:李红丽(1972—),女,博士,教授,主要从事荒漠化防治与生态修复研究。E-mail:hlh@sdau.edu.cn

were significantly lower than that of CK, and the reduction effect on 20—40 cm soil layer was better than that on 0—20 cm soil layer, among which *P. frumentum* was the best. (2) Planting of different forage grasses significantly improved soil nutrient content, and the content of soil organic matter, avail nitrogen and avail phosphorus increased significantly, but had little effect on soil avail potassium content. (3) The three forage grasses had different effects on soil enzyme activities at different growth periods. During the vigorous growth period, the soil enzyme activity was the strongest, and activities of soil catalase, sucrase and urease significantly enhanced. *Sorghum bicolor* ‘Dochna’ had the greatest effect on activities of catalase and sucrase. (4) There were differences in the contribution of different forage grasses to the improvement index of saline alkali soil. Taking soil physical and chemical properties, nutrient content and soil enzyme activity as soil evaluation indexes, the soil quality after planting different forage grasses from high to low was *Sorghum bicolor* ‘Dochna’ > *Sorghum bicolor* × *sudanense* > *P. frumentum* > CK. The research could provide theoretical basis and important reference for the phytoremediation technology of saline alkali land in the Yellow River Delta and the screening and introduction of salt-tolerant plants with high ecological and economic benefits at home and abroad.

Keywords: forage grass; saline alkali land; biological improvement; soil quality evaluation; Yellow River Delta

受气候干旱、海水倒灌浸渍、地下水顶托和排水不畅等诸多因素的影响而引起区域土壤的盐渍化,黄河三角洲成为高盐度、低土地利用的盐碱土壤的主要分布区^[1],盐渍化土地面积约占整个区域的 50%以上。土壤盐渍化不仅引起土壤板结、透水透气性变差,还降低土壤中微生物和酶的活性与碳氮元素矿质化程度,导致土壤日益贫瘠^[2],造成作物的减产或绝收,影响植物的生长与生存,更影响到盐碱地这一后备土地资源耕地化的进程。黄河三角洲自然资源禀赋良好,大面积的盐碱地可作为后备土地资源进行合理开发,但其土壤盐碱含量高、质量差、生产力低下,开发利用难度大。目前实施的工程措施、化学改良措施都存在成本高、改良效果不持久、局限性大等不足,而生物措施具有改善土壤理化性状、抑制土壤返盐、提高土壤微生物群落数量和活性,提升土地生产力等特性,并可通过收获地上部分而获得经济效益^[3],是盐碱地绿色开发与利用的持久有效的措施之一。中共中央、国务院《关于做好 2022 年全面推进乡村振兴重点工作的意见》^[4]指出,“支持将符合条件的盐碱地等后备资源适度有序开发为耕地……,分类改造盐碱地,推动由主要治理盐碱地适应作物向更多选育耐盐碱植物适应盐碱地转变。”因此,筛选生长迅速、土壤改良效果良好而又具有可利用价值或产业延伸价值的耐盐碱植物成为快速推进黄河三角洲盐碱地改良及其耕地化的有效途径,科学改良与开发利用盐渍化土地对该区农林业的高质量与土地资源耕地化发展极其重要。

牧草具有生长快、再生能力强且生物量大、植物地下根茎和根系较发达、易于种植、地上部刈割方便等优点,有利于快速改良土壤。有研究^[5]表明,在盐

碱地种植牧草可改土肥田、促进草田轮作与农业可持续发展,可为畜牧业提供优良饲草资源。禾本科牧草作为盐碱地利用的先锋植物。为此,本文选取高丹草(*Sorghum bicolor* × *sudanense*)、甜高粱(*Sorghum bicolor* ‘Dochna’)和墨西哥玉米草(*Purus frumentum*)3 种一年生耐重度盐碱牧草(4~6 g/kg),研究土壤理化性质、养分特征和酶活性等在 1 个生长季内的动态变化,以及在牧草的干预下土壤理化性质与酶活性的相互关系,并根据土壤质量综合指数评价不同牧草的土壤改良效果,以期为黄河三角洲地区盐碱地的植物修复技术和筛选并引进国内外具有高效生态经济效益的耐盐植物提供理论依据和重要参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验样地位于山东省东营市河口区山东省林业科学研究院试验基地(37°54′47″N,118°35′02″E)。属于暖温带半湿润大陆性季风气候区,年平均气温 12.3℃,年平均风速为 3.1 m/s,年均降水量 692 mm,主要集中在夏季,蒸发量较大,年均蒸发量 1 500 mm。试验地为黄河三角洲滨海盐碱地,土壤类型为盐化潮土,地下水位 1.5 m,土壤含盐量为(3.78±0.25)g/kg,为滨海中度盐渍土。

1.2 研究方法

1.2.1 样地设置与样品采集 2021 年 4 月 16 日在试验地布设牧草种植试验,选取 1 年生禾本科耐盐牧草品种,分别是 G1(高丹草)、G2(甜高粱)、G3(墨西哥玉米草)和 CK(盐碱荒地)4 个处理,每个处理 3 组重复,共有 12 个样地,每块小样地的面积为 10 m²

(2 m×5 m),样地与样地之间间隔 1 m。试验开始前(4 月)、牧草生长旺盛期(7 月)和收获期(10 月)在各处理小区采用五点采样法采集 0—20,20—40 cm 土层的土样,生长旺盛期和收获期土样采集时采用抖根法采集牧草根际土壤,所有土壤样品送回实验室,进行自然干燥、研磨和筛分,在 1 个月内进行土壤理化性质及酶活性(干土法)的测定^[6]。

1.2.2 测定方法 土壤容重的测定采用环刀浸水法;土壤含水量采用烘干称重法测定;土壤有机质含量的测定采用重铬酸钾氧化外加加热法;土壤 pH 采用酸度计法(土:水为 1:2.5);土壤电导率采用电导法;速效氮含量采用碱解扩散法测定;速效磷含量采用碳酸氢钠浸提—分光光度计法;土壤速效钾含量采用乙酸铵浸提—火焰光度计法;过氧化氢酶采用高锰酸钾(0.1 mol/L KMnO₄)滴定法,酶活性以每 24 h 内 5 g 土消耗高锰酸钾的毫升数表示;脲酶活性采用苯酚钠—次氯酸钠比色法,酶活性以每 24 h 后 5 g 土中 NH₃—N 的毫克数表示;蔗糖酶采用 3,5—二硝基水杨酸比色法测定,酶活性以 24 h 后 5 g 土壤中生成的葡萄糖 mg 数表示。

1.3 数据处理

采用 SPSS 24.0 软件,运用单因素方差分析法(ANOVA)对土壤各指标进行差异性比较;采用 Origin 2019 软件进行绘图;运用 Pearson 相关分析研究土壤酶活性与土壤理化性质之间的关系;利用隶属函数计算各指标的隶属度值,结合因子分析对各指标数据值进行标准化处理,通过标准化后的数值进行主成分分析,计算土壤质量综合指数 SQI,最后以供试的 3 种牧草对滨海盐碱地土壤质量的改良进行综合评价,该值越大,表明土壤综合质量越高,改良效果越好。

依据各指标与土壤质量变异的正负相关性来确定隶属度函数类型,并采用隶属度函数分别计算各指标的隶属度值^[6]。

$$\text{升型分布函数公式: } F(x_i) = \frac{(x_{ij} - x_{i\min})}{(x_{i\max} - x_{i\min})}$$

$$\text{降型分布函数公式: } F(x_i) = \frac{(x_{i\max} - x_{ij})}{(x_{i\max} - x_{i\min})}$$

式中: x_{ij} 为种植某一种牧草品种后土壤的某一指标的测定值; $x_{i\max}$ 为第 i 个指标的最大值; $x_{i\min}$ 为第 i 个指标的最小值。

不同牧草种植下土壤质量指标权重及质量指数的计算公式为:

$$W_i = C_i / \sum_{i=1}^n C_i$$

$$\text{SQI} = \sum_{j=1}^m K_j [\sum_{i=1}^n W_i \times f(x_i)]$$

式中: W_i 表示在某一主成分中第 i 个土壤质量评价

指标的权重; C_i 表示在某一主成分中第 i 个土壤质量评价指标因子载荷量的绝对值; n 表示评价不同牧草土壤质量指标的数目; m 为主成分的数目; K_j 为第 j 个主成分的方差贡献率; $f(x_i)$ 表示第 i 项土壤质量评价指标的隶属度值; W_i 表示在某一主成分中第 i 项土壤质量评价指标的权重。

2 结果与分析

2.1 不同牧草对黄河三角洲盐碱土壤理化性质的影响

由图 1 可知,与 CK 相比,3 种牧草对不同土层土壤理化性质有不同程度的影响,且在整个生长期各土壤理化性质的动态变化也存在差异。不同牧草在 0—20 cm 土层,土壤含水量、pH 和电导率均随生长期呈逐渐减少趋势,在 20—40 cm 土层,土壤含水量和 pH 随生长期呈先增后减的趋势,土壤电导率呈减少趋势。在生长旺盛期内,不同牧草处理下 0—20 cm 土壤含水量较 CK 相比均显著减少($p < 0.05$),分别降低 15.8%,7.7% 和 15.9%;但 20—40 cm 土层 G1 较 CK 显著增加($p < 0.05$),G2、G3 较 CK 显著降低,而在收获期内差异不显著($p > 0.05$)。3 种牧草在不同时期对土壤 pH 的降低效果不同,G1 和 G3 在生长旺盛期对土壤 pH 的降低效果最明显,G2 在收获期降低 pH 的效果最好。不同牧草在同一生长期对土壤电导率的影响存在差异。在生长旺盛期,不同牧草与 CK 相比土壤电导率差异不大。在收获期,0—20 cm 土层下 3 种牧草较 CK 的土壤电导率均显著降低($p < 0.05$),分别降低 6.8%,7.1%,4.5%,但不同牧草之间差异不大;20—40 cm 土层 3 种牧草较 CK 均显著降低($p < 0.05$),分别降低 20.6%,11.1%,22.4%,其中 G3 效果最明显。

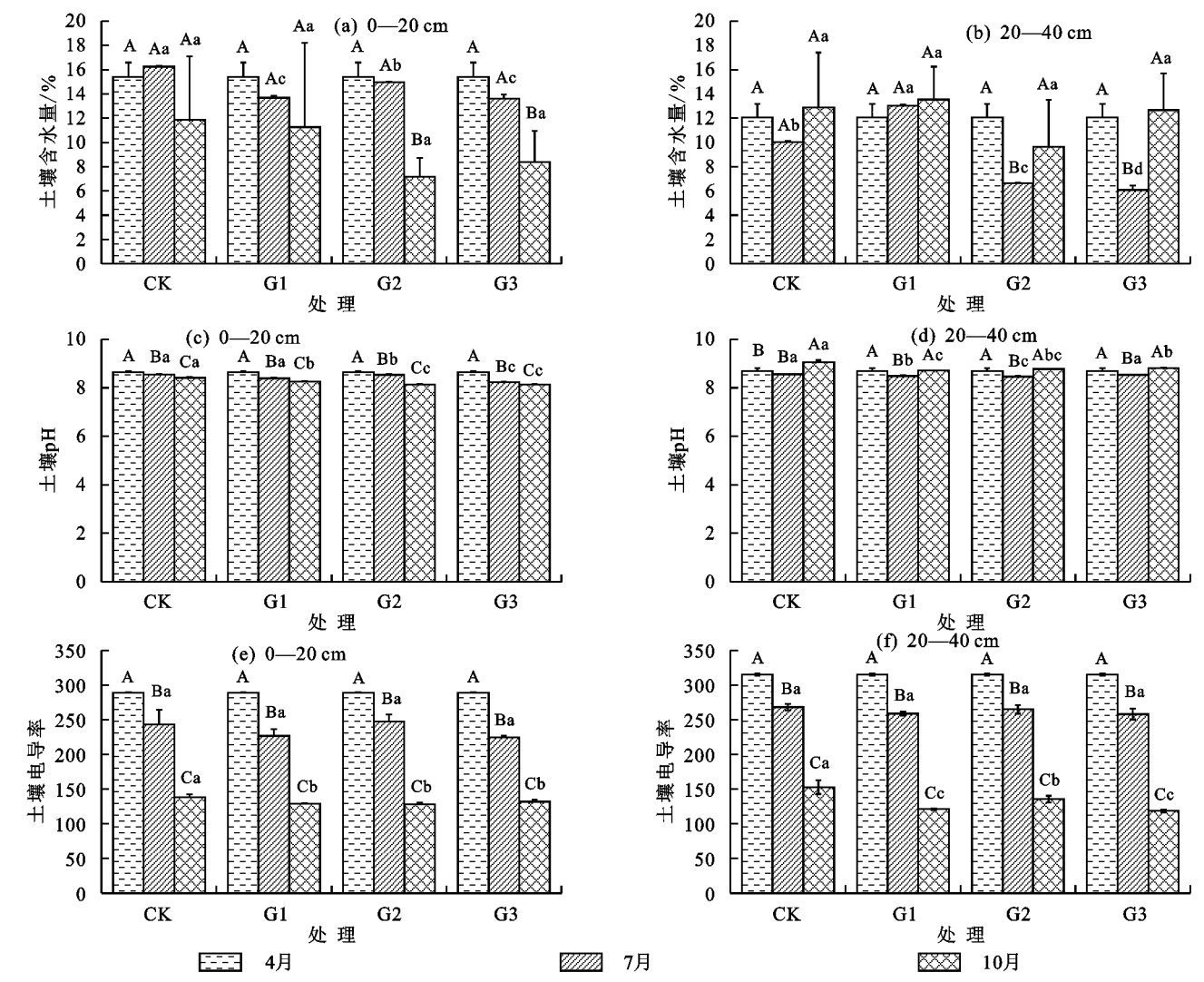
2.2 不同牧草对黄河三角洲盐碱土壤养分特性的影响

从图 2 可以看出,0—20 cm 土层土壤养分含量均优于 20—40 cm 土层。不同牧草在 1 个生长周期内土壤有机质含量的变化趋势不同,随着生长期 G2、G3 呈先降低后增加的趋势,但 G1 呈相反趋势。在生长旺盛期,0—20 cm 土层中,与 CK 相比,G1 的土壤有机质含量显著增加($p < 0.05$),而 G2 却显著减少($p < 0.05$);20—40 cm 土层中,G1 的有机质含量较 CK 显著增加($p < 0.05$),G3 较 CK 显著减少($p < 0.05$)。在收获期,0—20 cm 土层中 3 种牧草较 CK 均显著增加($p < 0.05$),表现为 G2>G3>G1。

在生长周期内不同牧草土壤速效氮含量变化趋势不同,0—20 cm 土层中 G1、G2 呈先减少后增加的趋势,G3 逐渐减少,但在 20—40 cm 土层中 G1 逐渐减少,G2、G3 先减少后增加。在生长旺盛期,G2 处

理下0—20 cm 土壤速效氮含量显著低于其他处理。在收获期,0—20 cm 3 种牧草处理下土壤速效氮含

量显著高于 CK,表现为 $G1>G2>G3$,但在 20—40 cm 土层表现出相反的趋势,为 $G3>G2>CK>G1$ 。



注:图中不同大写字母表示不同生长时期间差异显著($p<0.05$);不同小写字母表示不同牧草间差异显著($p<0.05$)。下同。

图1 不同牧草处理对土壤理化性质的影响

不同牧草处理下收获期土壤速效磷含量显著高于生长旺盛期($p<0.05$)。在生长旺盛期,0—20 cm 土层土壤速效磷含量 G1 和 G3 较 CK 相比显著增加($p<0.05$),20—40 cm 土层 3 种牧草均显著高于 CK ($p<0.05$),表现为 $G2>G1>G3$ 。在收获期,0—20 cm 土层中 G2 显著高于其他处理($p<0.05$),20—40 cm 土层中 G2、G3 均显著高于其他处理($p<0.05$)。

不同牧草在生长期,土壤速效钾含量呈先降低后增加的趋势,在收获期速效钾含量显著高于其他时期($p<0.05$)。在生长旺盛期,0—20 cm 土层土壤速效钾含量表现为 $G1>G3>CK>G2$,20—40 cm 土层为 $G2>G1>G3>CK$ 。在收获期,0—20 cm 土层所有处理间无显著差异($p>0.05$),20—40 cm 表现为三种牧草均显著高于 CK($p<0.05$)。

2.3 不同牧草对黄河三角洲盐碱土壤酶活性的影响

土壤酶活性是维持土壤肥力的一个潜在性指标。

由图 3 可知,在 1 个生长周期内,4 种牧草均在生长旺盛期土壤酶活性达到最高。在 1 个生长周期内,3 种牧草的土壤过氧化氢酶活性均呈先增加后降低的趋势,在生长旺盛期达到最高。在生长旺盛期,0—20 cm 土层中 4 种处理无显著差异,20—40 cm 土层中 G1、G2 与 CK 相比显著降低($p<0.05$)。在收获期,0—20 cm 土壤过氧化氢酶活性表现为 $G2>G3>G1>CK$,20—40 cm 表现为 $G2>G1>G3>CK$ 。

土壤蔗糖酶活性变化趋势不同,在 0—20 cm 土层中,G1 和 G2 随生长时间的增加呈先增后减的趋势,而 G3 呈现先减后增的趋势;在 20—40 cm 土层中均呈逐渐增加的趋势。在生长旺盛期,不同牧草对土壤酶活性的影响不同,0—20 cm 土层中 G1 和 G2 较 CK 相比显著增加($p<0.05$),且表现为 $G2>G1$,但 G3 较 CK 相比显著降低($p<0.05$);20—40 cm 土层中不同处理之间差异不大。在收获期,0—20 cm

土层中 3 种牧草蔗糖酶活性较 CK 相比均显著增加 ($p<0.05$), 表现为 $G2>G1>G3>CK$; 20—40 cm 土层中 $G2$ 较 CK 显著增加 ($p<0.05$)。

从图 3 还可看出, 不同处理下土壤脲酶活性均随生长时间呈先增后减的趋势。在生长旺盛期, 不

同牧草对土壤酶活性的影响不同, 0—20 cm 土层中表现为 $G3>CK>G1>G2$, 20—40 cm 土层中表现为 $G2>G1>CK>G3$ 。在收获期, 3 种牧草对土壤酶活性均显著高于 CK ($p<0.05$), 表现为 $G3>G1>G2$ 。

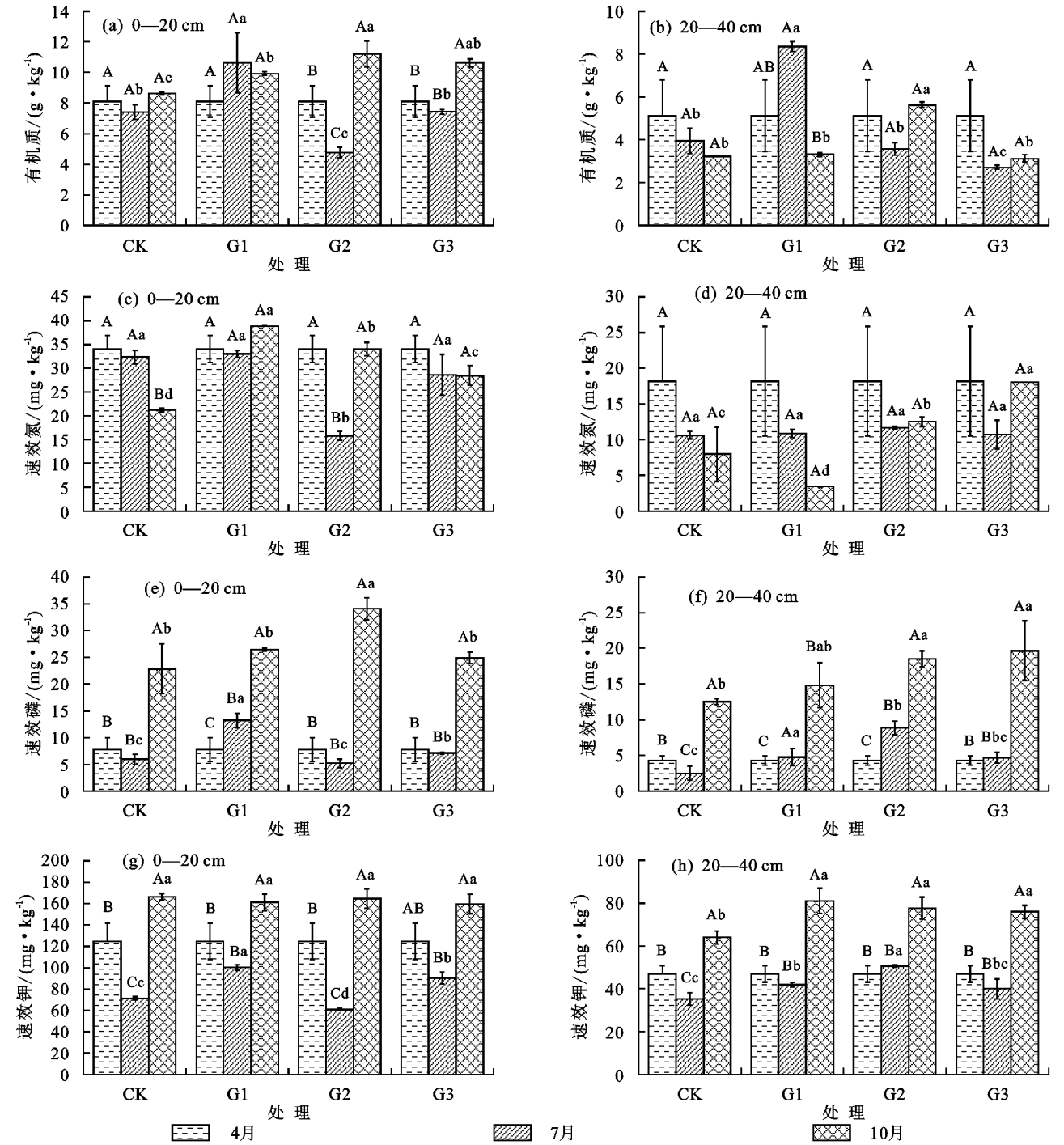


图 2 不同牧草处理对土壤养分特征的影响

2.4 土壤质量评价

选取收获期土壤指标进行土壤质量评价, 其中土壤含水量、有机质、速效氮、速效磷、速效钾、过氧化氢酶、蔗糖酶、脲酶采用升型分布函数; 土壤 pH、电导率和容重采用降型分布函数。对各个土壤指标的统计值采用隶属函数公式进行计算, 隶属度值越大, 表

明土壤质量越好。

利用 SPSS 因子分析对土壤质量指标进行主成分分析, 从中提取各主成分及其方差贡献率、累计方差贡献率以及不同牧草种植下土壤质量评价指标在各主成分中的载荷值。2 个主成分的累计方差贡献率达到 79.654%, 说明 2 个主成分基本涵盖了 11 个

指标所反映的主要内容,可以用来表征土壤质量的差异性。

对不同牧草种植下土壤质量评价指标的因子负荷量分别计算,获得各指标在不同主成分中的权

重(表 1)。从各主成分中的载荷值得出,2 个主成分可以解释>90%的指标为 pH、电导率、有机质、速效氮、速效磷、速效钾、过氧化氢酶和蔗糖酶;>80%的指标为脲酶;>60%的指标为含水量。

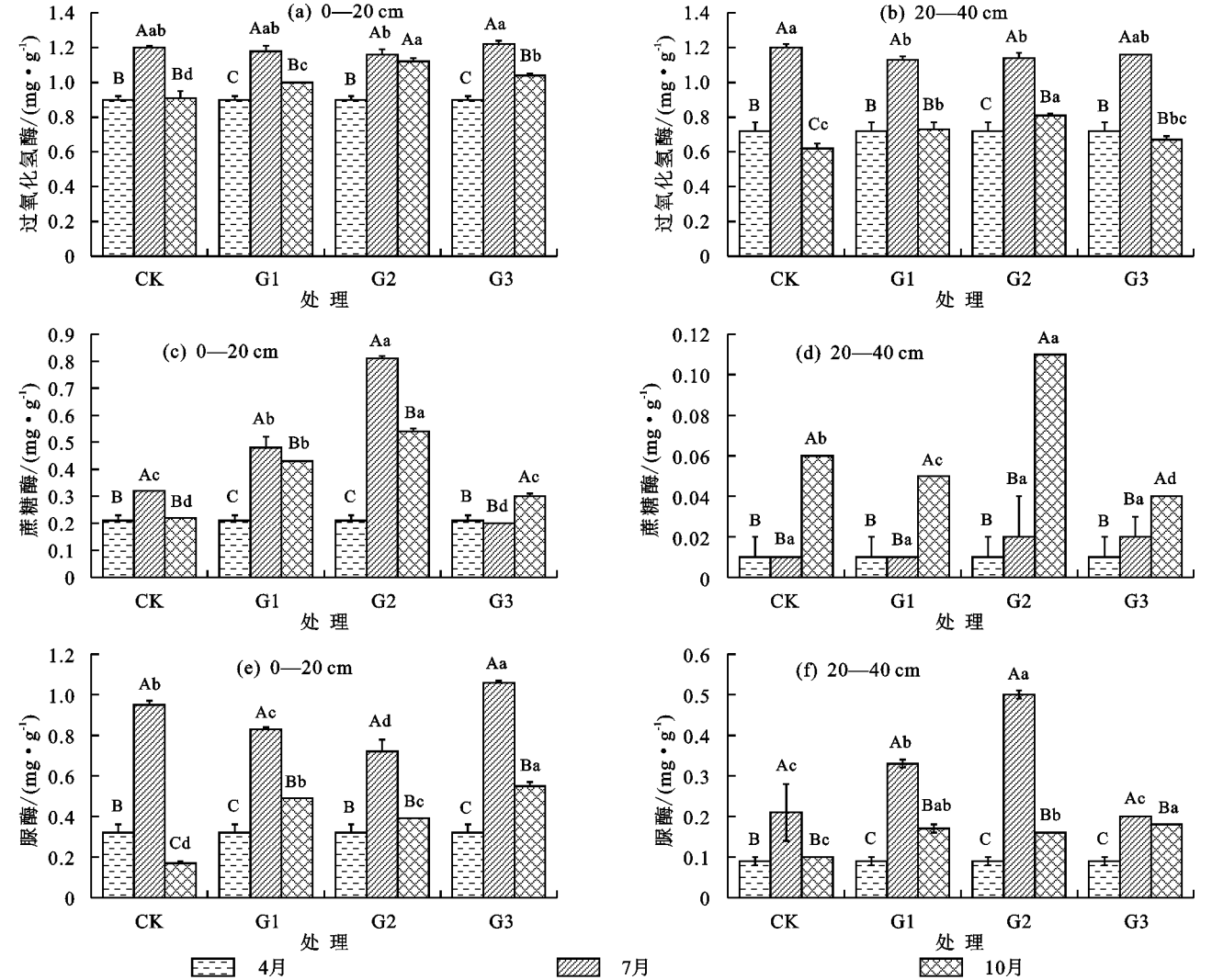


图3 不同牧草处理对滨海盐碱土壤酶活性的影响

土壤质量 指标	第1主成分		第2主成分	
	负荷量	权重	负荷量	权重
含水量	-0.688	0.078	-0.377	0.170
容重	-0.405	0.046	0.089	0.040
pH	-0.963	0.110	0.161	0.073
电导率	-0.223	0.025	0.939	0.424
有机质	0.975	0.111	0.077	0.035
速效氮	0.919	0.105	-0.009	0.004
速效磷	0.903	0.103	-0.048	0.022
速效钾	0.931	0.106	-0.150	0.068
过氧化氢酶	0.970	0.110	0.017	0.008
蔗糖酶	0.932	0.106	0.168	0.076
脲酶	0.858	0.098	0.099	0.045
方差贡献率/%	69.420		10.234	
累计方差贡献率/%	69.420		79.654	

根据土壤质量综合指数计算公式,结合隶属度和权重,计算的土壤质量综合指数(SQI)见表 2。与 CK 相比,种植牧草对盐碱土壤质量有良好的改良效应,3 种禾本科牧草的改良效果具体表现为甜高粱>高丹草>墨西哥玉米草,SQI 分别提高 55.7%,42.5%,41.9%。

表2 不同牧草的土壤质量综合指数

主成分	不同牧草			
	CK	G1	G2	G3
第1主成分	0.3440	0.4961	0.5621	0.4971
第2主成分	0.4563	0.6105	0.5306	0.5868
土壤质量综合指数	0.2855	0.4069	0.4445	0.4051

3 讨论

3.1 牧草种植对土壤理化性质的影响

土壤与植物之间存在复杂的交互效应,土壤理化性质的变化直接影响植物的生长和土地的生产力。

对盐碱土壤改良的关键是压盐抑碱,增加土壤微生物和酶活性,提高土壤养分的固存。在盐碱地上种植耐盐植物,能使土壤理化指标得到明显改善,有利于土壤良性发展,但不同植被类型对盐碱土壤质量的影响存在较大差异^[8]。有机酸积累是植物对多种逆境胁迫的响应,有机酸代谢与植物抗盐碱密切相关,植物根系可以分泌有机酸降低土壤 pH。本研究发现,种植牧草可显著改善土壤 pH,3 种牧草 0—20 cm 土层土壤 pH 的降低效果均优于 20—40 cm,20—40 cm 土层 pH 只有在植物生长旺盛期有显著降低,高丹草和墨西哥玉米草在生长旺盛期对土壤 pH 的降低效果最明显,甜高粱在收获期降低 pH 的效果最好。植物措施具有较强的降盐抑碱效果,主要是因为牧草积累土层中的盐分,同时增加地表覆盖度,植物蒸腾代替了部分土壤蒸发,抑制盐分的表聚性^[9]。本研究中种植牧草后土壤电导率和含水量随生长时间增加呈下降趋势,3 种牧草 0—20 cm 土层土壤电导率较 CK 相比显著降低,其中甜高粱效果最好;20—40 cm 土层,其中墨西哥玉米效果最明显。这与迟春明等^[10]认为的种植耐盐植物对表层土壤具有明显的脱盐效果一致。但植物各生育期表层土壤盐分离子均以 K^+ 、 Ca^{2+} 、 SO_4^{2-} 和 NO_3^- 为主,生长旺盛期 Na^+ 和 Mg^{2+} 含量也较高,说明这几种离子容易在土壤表层积累^[11]。因此认为,耐盐植物可以起到降低土壤电导率的作用,但由于盐离子容易在土壤表层积累,降低表层土壤植物改良的效果。土壤含水量与电导率在不同处理之间没有表现出一致的规律性,主要是由于土壤盐分随土壤水分上升的同时还受许多其他因素的影响,如地下潜水水位、降雨、地表蒸发量、植物根系吸水以及不同植被覆盖等。从种植效果来看,高丹草、甜高粱和墨西哥玉米的干重分别为 102.22,583.96,99.15 g/株,均获得较高的生物产量,表现出较强的耐盐碱能力和对盐渍化的适应性,且墨西哥玉米生物产量最低,耐盐性最差,以往的研究^[12]认为,在滨海重度盐碱土中高丹草和甜高粱的耐盐性较强,墨西哥玉米的耐盐性最差;高丹草和甜高粱对台州滨海重度盐渍土有一定的改良效果;高丹草在成苗期和成熟期积累盐分来适应滨海盐碱地^[13];在沿海滩涂地区,高丹草和甜高粱产量较高,墨西哥玉米产量最低耐盐性相对较差^[14],与本研究的结果基本一致。

3.2 牧草种植对土壤养分的影响

耐盐植物种植可显著提高土壤养分含量^[15],有关土壤钾含量状况研究结果并不一致。本研究中,种植不同牧草对土壤养分含量有明显改善,0—20 cm

土层养分含量均显著高于 20—40 cm,其中土壤有机质、速效氮、速效磷含量有显著提升,但不同牧草处理对土壤速效钾的提高效果不显著。不同牧草对土壤有机质含量的增加在不同时期的表现效果不同,高丹草在生长旺盛期对土壤有机质含量增加最为明显,3 种牧草在收获期对土壤有机质含量均有显著增加。高丹草、甜高粱和墨西哥玉米草在收获期土壤速效氮含量较 CK 有不同程度的增加,分别增加 83.7%,60.8%和 34.5%;速效磷含量分别增加 15.6%,49.0%和 8.9%;速效钾含量变化不大,这与乔艳辉等^[5]得出的种植 NyPa 牧草未能提升土壤钾含量的研究结果一致。但也有研究^[16]表明,种植耐盐牧草后,土壤钾含量有显著提高。

3.3 牧草对土壤酶活性的影响

土壤酶作为生物催化剂,是土壤有机体的代谢驱动力,在土壤生态系统的物质循环和能量流动方面扮演着重要角色。土壤过氧化氢酶是一种氧化还原酶,对土壤中物质和能量转化起着关键作用,其活性大小可以表征土壤腐殖化强度和有机质积累强度,在一定程度上可以表征土壤肥力。土壤蔗糖酶参与土壤碳循环,其活性可以反映土壤有机碳积累、分解和转化的规律,常用来表征土壤的熟化程度。土壤脲酶在氮化合物的分解和转化循环过程中起着重要作用。不同植物对土壤酶活性的影响效果不同^[17]。自然植被和羊草可以提高土壤过氧化氢酶活性,而燕麦和苜蓿却降低了过氧化氢酶活性^[18]。星星草能提高土壤蔗糖酶、脲酶、纤维素酶、碱性磷酸酶活性^[19]。张旭龙等^[17]研究发现,“新葵 6 号”对提高蔗糖酶活性的效果最为显著,而“新葵 4 号”则对提高脲酶和磷酸酶活性的效果最为显著。以往的研究^[20]还发现,在不同的植物群落下土壤酶活性的变化趋势不同,同时还发现土壤酶活性季节变化趋势也不同^[21]。本研究中,种植高丹草、甜高粱和墨西哥玉米草后,土壤过氧化氢酶、蔗糖酶和脲酶活性均得到提升,对 0—20 cm 土层土壤的改良效果大于 20—40 cm 土层,并且在不同生长期酶活性不同,在生长旺盛期酶活性达到最高。总体来说,甜高粱和高丹草对土壤过氧化氢酶活性和蔗糖酶活性影响最显著。土壤酶活性和土壤盐分随生长季节变化,在温度较高的季节土壤酶活性也较高^[18],与本试验结果一致。

4 结论

(1)种植牧草后对土壤理化性质产生较大影响。土壤含水量、pH 和电导率随生长时间增加呈下降趋势,种植牧草对 0—20 cm 土壤 pH 的改良优于 20—

40 cm,高丹草和墨西哥玉米草在生长旺盛期对土壤 pH 的改良最明显,甜高粱在收获期效果最好。3 种牧草土壤电导率较 CK 均显著降低,对 20—40 cm 土层的降低效果优于 0—20 cm 土层,其中墨西哥玉米效果最好。

(2)种植不同牧草对土壤养分含量有明显改善,0—20 cm 土层效果优于 20—40 cm 土层,其中土壤有机质、速效氮、速效磷含量有显著提升,但对土壤速效钾含量影响并不大。其中,甜高粱对土壤有机质和速效磷含量的增加较其他牧草效果最好,而高丹草增加土壤速效氮和速效钾的效果最好。

(3)4 种牧草在不同生长期内对土壤酶活性的影响不同,在生长旺盛期土壤酶活性最强,植物对上层土壤酶活性的影响大于下层土壤,3 种牧草较 CK 均显著增强了土壤过氧化氢酶、蔗糖酶和脲酶的活性,其中甜高粱对过氧化氢酶和蔗糖酶活性影响最大。

总体上,3 种禾本科牧草对滨海盐碱土壤均有明显的改良效果,且不同品种对盐碱土壤的改良效果有明显差异,具体表现为甜高粱>高丹草>墨西哥玉米草>荒草地。

参考文献:

[1] 吕真真,杨劲松,刘广明,等.黄河三角洲土壤盐渍化与地下水特征关系研究[J].土壤学报,2017,54(6):1377-1385.

[2] 杨劲松,姚荣江,王相平,等.中国盐渍土研究:历程、现状与展望[J].土壤学报,2022,59(1):10-27.

[3] 孙佳,夏江宝,苏丽,等.黄河三角洲盐碱地不同植被模式的土壤改良效应[J].应用生态学报,2020,31(4):1323-1332.

[4] 中共中央国务院.中共中央、国务院关于做好 2022 年全面推进乡村振兴重点工作的意见[EB/OL].(2022-02-22)[2022-04-01].中共中央国务院,2022.

[5] 乔艳辉,王月海.NyPa 牧草对滨海盐碱地土壤改良效应研究[J].中国农学通报,2021,37(24):67-72.

[6] 田平雅,沈聪,赵辉,等.银北盐碱区植物根际土壤酶活性及微生物群落特征[J].土壤学报,2020,57(1):217-226.

[7] 胡琴,陈为峰,宋希亮,等.开垦年限对黄河三角洲盐碱地土壤质量的影响[J].土壤学报,2020,57(4):824-833.

[8] Xie X F, Pu L J, Wang Q Q, et al. Response of soil physicochemical properties and enzyme activities to

long-term reclamation of coastal saline soil, Eastern China[J].Science of the Total Environment,2017,607/608:1419-1427.

[9] Zhao Y G, Li Y Y, Wang J, et al. Buried straw layer plus plastic mulching reduces soil salinity and increases sunflower yield in saline soils[J].Soil and Tillage Research,2016,155:363-370.

[10] 迟春明,王志春.苏打盐渍土草原植被群落分布与土壤理化性质相互关系[J].生态学杂志,2013,32(9):2245-2249.

[11] Peng J L, Lei W J, Huang J C, et al. Effects of straw covering and different types of potassium fertilizer on salinity accumulation in surface layer of tobacco-planted paddy soil[J].Agricultural Science and Technology,2013,14(6):905-910.

[12] 张文洁.沿海滩涂地区不同栽培措施对牧草耐盐性的影响[D].南京:南京农业大学,2011.

[13] 刘雅辉,王秀萍,刘广明,等.滨海盐土区 4 种典型耐盐植物盐分离子的积累特征[J].土壤,2017,49(4):782-788.

[14] 张文洁,丁成龙,沈益新,等.沿海滩涂地区不同栽培措施对禾本科牧草产量及品质的影响[J].草地学报,2012,20(2):318-323.

[15] Yang H J, Xia J B, Cui Q, et al. Effects of different *Tamarix chinensis*-grass patterns on the soil quality of coastal saline soil in the Yellow River Delta, China[J]. Science of the Total Environment,2021,772:e145501.

[16] 潘洁,王立艳,肖辉,等.滨海盐碱地不同耐盐草本植物土壤养分动态变化[J].中国农学通报,2015,31(18):168-172.

[17] 张旭龙,马森,吴振振,等.不同油葵品种对盐碱地根际土壤酶活性及微生物群落功能多样性的影响[J].生态学报,2017,37(5):1659-1666.

[18] 罗慧,冯程程,岳中辉,等.植被修复对重度盐碱地土壤酶活性和酶反应热力学特征的影响[J].应用生态学报,2020,31(12):4243-4250.

[19] 崔新,崔国文,李洪影,等.覆盖秸秆和补播牧草对松嫩平原退化盐碱草地土壤酶活性的影响[J].中国草地学报,2014,36(5):95-100.

[20] 南丽丽,郭全恩,向华,等.甘肃省盐碱草地主要植物群落土壤酶活性研究[J].水土保持学报,2015,29(4):311-315.

[21] 苏鑫,卢嫚,冯程程,等.松嫩草地土壤酶活性对土壤盐分季节动态的响应[J].中国草地学报,2020,42(1):127-134.