

管博,于君宝,陆兆华,谢文军,陈小兵,王雪宏. 黄河三角洲重度退化滨海湿地盐地碱蓬的生态修复效果. 生态学报 2011 31(17):4835-4840.
Guan B, Yu J B, Lu Z H, Xie W J, Chen X B, Wang X H. The ecological effects of *Suaeda + salsa* on repairing heavily degraded coastal saline-alkaline wetlands in the Yellow River Delta. Acta Ecologica Sinica 2011 31(17):4835-4840.

黄河三角洲重度退化滨海湿地盐地碱蓬的 生态修复效果

管 博^{1,2}, 于君宝^{1,3,*}, 陆兆华^{1,3,*}, 谢文军³, 陈小兵¹, 王雪宏^{1,2}

(1. 中国科学院烟台海岸带研究所滨海湿地生态实验室 海岸带环境过程重点实验室,烟台 264000;

2. 中国科学院研究生院,北京 100049; 3. 滨州学院 山东省黄河三角洲生态环境重点实验室,滨州 256603)

摘要:采用翻地、施肥和芦苇碎屑培肥等土壤改良方法,利用盐地碱蓬在黄河三角洲重度退化区进行生态修复实验研究。结果表明:重度退化湿地土壤改良后,盐地碱蓬能够成功生长,3种改良方法均可有效的降低重度退化盐碱地的土壤含盐量,改良后的土壤Na⁺离子含量均显著低于对照组,土壤脲酶和磷酸酶活性与对照相比有了显著的提高,表明改良后土壤肥力得到了改善。3种改良方法比较,培肥处理组土壤Na⁺离子含量显著低于其他两种方法;盐地碱蓬生物量达到最高值,说明增加有机物的培肥方法可有效的改良重度退化盐碱湿地土壤,达到较为理想的生态修复预期效果。

关键词:黄河三角洲;退化湿地;盐地碱蓬;生态修复

The ecological effects of *Suaeda salsa* on repairing heavily degraded coastal saline-alkaline wetlands in the Yellow River Delta

GUAN Bo^{1,2}, YU Junbao^{1,3,*}, LU Zhaohua^{1,3,*}, XIE Wenjun³, CHEN Xiaobing¹, WANG Xuehong^{1,2}

1 Laboratory of Coastal Wetland Ecology, Key Laboratory of Coastal Environment Processes, Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, Yantai 264000, China

2 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3 Research Center for Eco-Environmental Sciences Yellow River Delta, Binzhou University, Binzhou 256603, China

Abstract: The Yellow River Delta is one of the most active regions of land-ocean interaction among the large river deltas in the world. However, the wetlands in Yellow River Delta have been suffering from soil salinity and increasing degradation, because of the coastal erosion and drying up of the Yellow River. Therefore, it's essential to develop efficient eco-remediation methods on heavily degraded coastal saline-alkaline wetlands to protect wetlands resources. To study the ecological effects of *Suaeda salsa* on repairing heavily degraded coastal saline-alkaline wetlands, ploughing (PG), fertilization (FG) and reed debris (RD) were used for soil eco-remediation. The saline-alkaline soil eco-remediation effects were investigated by periodic measurements of such variables as soil salt content, Na⁺, soil urease, phosphatase, soil nutrient components and biomass, density and yield of *Suaeda salsa* plant. The dynamic changes of different index and the differences of three eco-remediation methods were discussed. The results showed that the *Suaeda salsa* plant could grow well after the soil eco-remediation on heavily degraded coastal saline-alkaline wetlands. All three eco-remediation methods could decrease the soil salt content efficiently. The Na⁺ content in the eco-remediated soil was significantly lower than in control soil. Among three methods, the Na⁺ content in RD was significantly lower than in other two groups. The activity of soil

基金项目:中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-YW-223);国家自然科学基金项目(30770412,40873062);中国科学院百人计划项目;山东省科技攻关计划项目(2008GG20005006,2008GG3NS07005)

收稿日期:2010-07-01; 修订日期:2010-08-30

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: Junbao.yu@gmail.com; lu-zhh@263.net

urease and phosphatase in eco-remediation groups were higher than control, which indicated that the soil fertility was significantly improved. Compared with three methods, the activity of soil urease and phosphatase in RD was the highest. The contents of total N in PG, FG and RD were increased 30.9%, 31.7% and 28.6% respectively, and the content of total organic C, available P and K did not rise significantly. Plant biomass is one of the most important indicator evaluating the plant growth condition. Compared with three methods, the density of *Suaeda salsa* plant was $FG < PG < RD$, and the biomass of *Suaeda salsa* plant was $PG < FG < RD$. The results together indicated that organic matter adding is an effective way for soil eco-remediation in heavily degraded coastal saline-alkaline wetlands.

Key Words: Yellow River Delta; degraded wetland; *Suaeda salsa* plant; eco-remediation

黄河三角洲位于渤海西岸,渤海湾和莱州湾湾口,是我国三大河口三角洲之一。黄河三角洲处于海陆交错地带,受黄河和渤海淡水咸水双重影响,又由于其特殊的地理位置和很短的成陆时间,其湿地生态系统具有明显的脆弱性。三角洲新生土地成土历程短、熟化程度低、土壤养分少,但土壤含盐量高、地表蒸发快、极易盐碱化^[1-2]。目前黄河三角洲盐碱退化荒地已经达到 16.7 万 hm^2 ^[3],重度退化的不毛之地随处可见,恢复黄河三角洲盐碱化湿地已成为保障区域生态安全,促进区域经济、生态协调发展的当务之急。到目前为止,多是利用海水及其他微咸水对滨海盐碱土进行改良研究^[4-6],而本区域主要采用引黄河水压盐的方法用于农田灌溉和恢复改良退化湿地,并取得了一定的成果^[7-8],但由于区域缺水及工程费用巨大而难以大范围实施。但很少有学者对不同的修复改良方法进行对比研究。本研究主要以盐地碱蓬为修复物种,采取了翻地、施肥和利用芦苇碎屑培肥的方法对重度退化盐碱湿地进行生态修复,并对几种不同方法进行对比研究,一方面可以比较不同改良方法的优缺点,另一方面为寻找适合黄河三角洲重度盐碱退化滨海湿地的生态修复提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验区位于黄河三角洲地区滨州市沾化县城北约 10km 处(37°46′37.6″N, 118°07′37.9″E)的重度退化滨海盐碱湿地。该区域属东亚温暖带潮湿大陆季风性气候,年平均降水量约 600mm,年蒸发量 1800—2000mm,年平均气温 12.5℃。该地区土壤类型主要为滨海潮土。由黄河泥沙沉积而成,近年来由于地下水过度开采,导致海水倒灌,加之年蒸发量远大于年降雨量,而形成寸草不生的重度盐碱地,土壤表面有盐析出,形成独特的白斑光板地。

1.2 试验方案

试验前于 4 月末对试验区土壤理化性质进行调查,取表层 0—20cm 土壤进行分析,见表 1。于 2009 年 5 月初先对试验区域土壤进行约 20cm 深度的翻耕整理,划成 2m × 3m 的小区,设 4 个处理:翻耕 (ploughing group, PG)、施肥 (fertilization group, FG)、芦苇碎屑培肥 (reed debris, RD) 和对照组 (control, C, 不进行任何处理)。翻耕处理即对土壤表层约 20cm 进行浅翻,使土壤表面疏松;施肥处理即在翻耕的基础上使用约 130kg N/ hm^2 的尿素;芦苇碎屑培肥处理即在翻耕的基础上混施 2kg/ m^2 芦苇碎屑。芦苇碎屑中氮、磷含量分别为 4.09g/kg 和 1.71g/kg,有机质含量为 533.0g/kg。每处理 3 次重复,共 12 个小区。2009 年 5 月末播种,每个小区撒播种子约 5000 粒,播种前对各小区灌水 20cm。

1.3 试验方法

1.3.1 样品采集

播种后,按月进行土壤样品和植物采集,每个小区按 S 形设置 5 个采样点,每个样点取表层 0—20cm 柱形土样,测定土壤含水量,自然风干后过 2mm 筛,备用。植物样品每个小区随机取约 20 株盐地碱蓬,用于地上生物量测量。10 月测量不同处理植株密度。

1.3.2 测定方法

土壤可溶性盐含量采用重量法;土壤有效 Na^+ 、 K^+ 采用原子吸收分光光度计 (AA-6800, 岛津, 日本) 测

定; 土壤有机碳、全氮采用元素分析仪(Elementar Vario Macro ,德国) 测定; 土壤有效磷采用 0.5mol/L 碳酸氢钠浸提 - 钼锑抗比色法测定; 土壤磷酸酶采用磷酸苯二钠比色法测定; 土壤脲酶采用苯酚钠比色法测定^[9]。

1.4 数据分析

采用 SPSS 统计软件利用单因素方差分析(ANOVA) 对实验数据差异性进行显著性分析, 所有数据均为 3 次重复的平均值, 并在 0.05 水平进行显著性分析。

2 结果分析与讨论

2.1 不同改良方法对土壤含盐量及 Na⁺ 离子含量的影响

图 1A 显示了土壤含盐量与降雨量随时间变化趋势, 土壤含盐量从 6 月到 10 月逐渐升高, 可能与后期降雨量逐渐减少有关。6 月, 不同处理组之间出现差异, 后期对照含盐量增加速度明显高于其他 3 个处理组, 主要是由于其他组进行翻耕后土壤孔隙度增大, 增加了土壤通气透水性^[10], 降雨使土壤盐分下降程度高所致。8 月、9 月对照组土壤含盐量显著高于其他 3 个处理组。可能是由于随着气温升高, 蒸发量增大, 土壤返盐速度增加, 而经过不同改良处理的土壤表面盐地碱蓬覆盖率高, 从而降低了土壤返盐速度。10 月末, 总含盐量均上升, 但仍明显低于本底水平, 这是因为改良样地盐地碱蓬覆盖率较高, 使地表 20cm 整体盐含量降低, 达到了明显的降盐效果(图 1A)。

表 1 试验区土壤基本性质

Table 1 Soil properties of the experimental region

| 指标 Index | 可溶性盐/% Soluble salt | 有机碳/(g/kg) Total organic C | 总氮/(g/kg) Total N | 有效磷/(mg/kg) Available P | 有效钾/(mg/kg) Available K |
|-------------|------------------------|-------------------------------|----------------------|----------------------------|----------------------------|
| 数值 Value | 2.50 | 18.57 | 0.663 | 8.092 | 353.7 |

由图 1B 可以看出 6 月到 7 月土壤可溶性 Na⁺ 含量均迅速下降, 之后升高, 对照组 Na⁺ 含量 7 月达到最低值, 而 7 月降雨量也达到最大值, 月降雨量为 116mm。说明 Na⁺ 含量随时间的波动趋势均与降雨量呈显著负相关 ($P < 0.05$), 经不同改良处理的土壤 Na⁺ 含量则是在 8 月达到最低值, 之后缓慢升高。10 月末对照组 Na⁺ 含量升高到年初水平, 而处理组均有一定程度的降低, 其中施肥组与翻地组分别降低到初期的 72% 和 77%, 芦苇碎屑处理组 Na⁺ 含量最低, 降低到初期的 56%, 说明改良处理能够显著降低土壤盐碱化程度。经芦苇碎屑培肥处理的土壤 Na⁺ 含量显著低于其他处理组的原因可能是由于施用芦苇碎屑改良方法能够增加盐地碱蓬的密度与产量, 从而对土壤返盐速度产生了不同的影响。

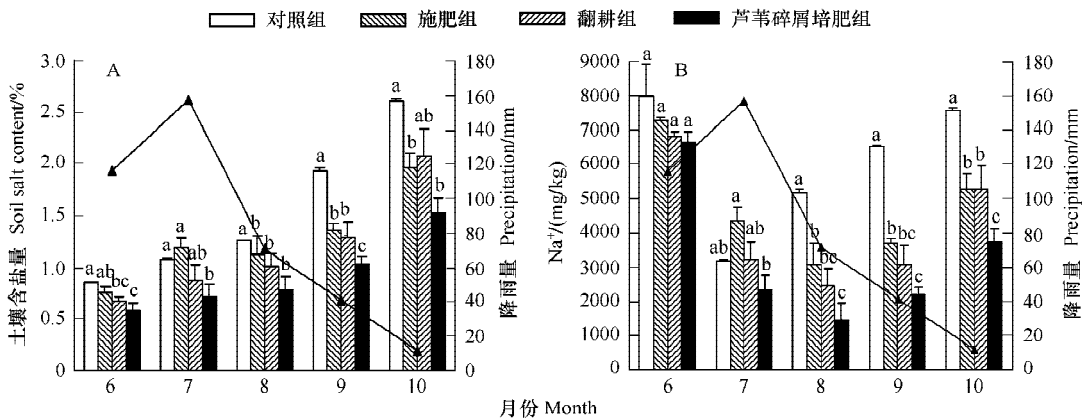


图 1 不同改良处理下土壤盐度随及降雨量动态变化(A) 与下土壤可溶 Na⁺ 离子含量随时间动态变化(B)

Fig. 1 The dynamic changes of precipitation, soil salt content with different eco-remediation methods at different times(A); The dynamic changes of soluble Na⁺ content with different eco-remediation methods at different times(B)

2.2 不同改良方法对土壤脲酶、磷酸酶活性的影响

土壤酶活性一直是评价土壤生产力和土壤质量的重要指标^[11]。土壤脲酶、磷酸酶与土壤有机质、全氮、全磷分别有着显著的相关关系^[12]。由图2可知,土壤脲酶活性随季节变化明显,6月到8月脲酶活性逐渐增高,8月以后又呈现降低趋势,而对照组脲酶活性则从7月开始下降。8月和10月经芦苇碎屑培肥处理组土壤脲酶活性明显高于其他组($P < 0.05$),而对照组脲酶活性最低。10月脲酶活性经与土壤Na离子相关性分析比较,呈极显著负相关($P < 0.01$)。这说明土壤含盐量降低是脲酶活性增加的重要因素之一。

磷酸酶活性从6月到8月逐渐升高,对照土壤磷酸酶活性在整个生长季表现出先缓慢升高后期降低的趋势;施肥、翻地处理磷酸酶活性变化趋势相似,8月到9月活性变化不大,9月后又出现上升趋势;芦苇碎屑培肥处理磷酸酶活性升高速度显著高于其他处理,并于10月达到最大($P < 0.05$)。以上结果表明经改良处理后,土壤酶活性增加,肥力提高,但不同改良处理后土壤酶活力有一定差异,说明土壤酶活力不仅与施肥有关,而且还与土壤孔隙度、土壤湿度、微生物活性等相关^[13],其中10月各处理组与土壤Na含量呈现显著性负相关($P < 0.05$),说明土壤含盐量降低也是增加土壤酶活力的重要指标之一。其中芦苇碎屑培肥处理表现出更强的酶活性,原因为有机物在土壤中腐烂,营养成分被土壤充分吸收,增加了土壤肥力。

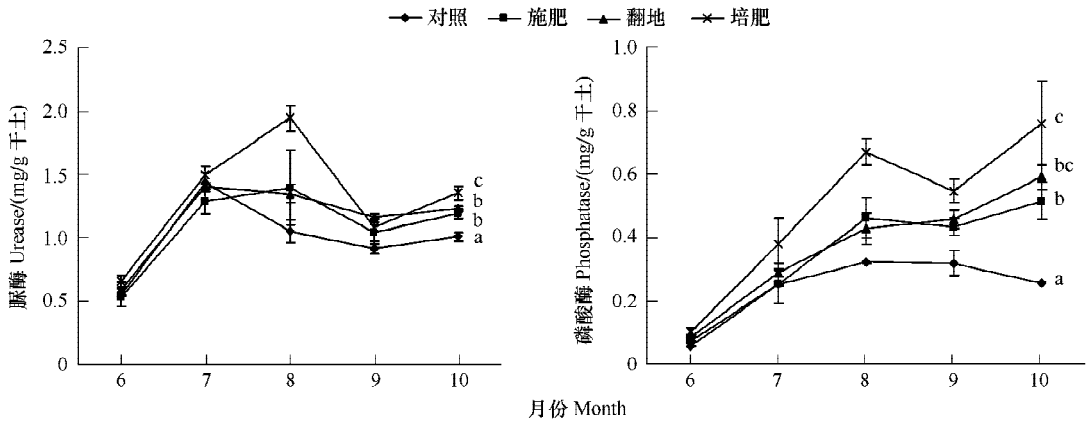


图2 不同改良处理下脲酶与磷酸酶随时间的动态变化

Fig. 2 The dynamic changes of urease and phosphatase in different treatments

2.3 不同改良方法对土壤养分的影响

表2显示了土壤有机碳、全氮、有效磷以及有效钾随时间的变化情况,由表可知,有机碳含量随时间变化不大,对照10月与6月相比略有升高,施肥、翻地和芦苇碎屑处理分别增加7.2%、8.7%和11.9%,但不同处理间差异也不显著。全氮含量变化趋势与有机碳相似,对照组土壤氮含量稳定,处理组增加量分别为30.9%、31.7%和28.6%,不同处理之间差异不显著。从土壤有效磷来看,其含量随季节呈现波动变化趋势,其中8月达到最大值,整个监测时期,对照组有效磷均高于其他处理组,但3个处理组之间差异不显著。有效钾含量与降雨量呈现负相关,即6、7月份有效钾含量随降雨量增加而显著下降,7月以后有效钾含量呈现波动上升趋势。与对照相比,不同处理下有效钾含量略有增加,但整体差异不显著,说明不同处理并没有使土壤有效钾含量显著增加,原因可能为本地区有效钾含量整体偏高,而不同处理并没有提供大量外源钾元素^[14]。以上结果综合表明不同处理对土壤营养元素变化影响不显著。

2.4 不同改良方法对盐地碱蓬生长的影响

由表3可知,盐地碱蓬生长周期较长,10月末盐地碱蓬高度达到最大值。不同处理下盐地碱蓬高度差异不显著,但生物量差异显著($P < 0.05$)。盐地碱蓬地上生物量在整个生长季呈现波动变化趋势,7月末达到最大值,此时盐地碱蓬生长达到成熟期,而8月到9月盐地碱蓬进入繁殖期,更多的营养用于种子生长,植株生物量略有下降。9月到10月繁殖期后期,种子成熟,植株继续积累地上生物量。不同改良处理相比,施肥组生物量的增加速度显著高于其他两组,幼苗期以后植物主要靠吸收外界营养维持生长,氮肥能够直接被植

物吸收,进行代谢活动和生物量积累,10月施肥组生物量达到翻地组的2倍。

表2 不同改良处理下土壤有机碳、全氮、有效磷以及有效钾随时间的动态变化

Table 2 The dynamic changes of total organic carbon, total nitrogen, available phosphorus and available potassium in different treatment

| 指标 Index | 月份 Month | 处理方式 Methods of treatment | | | |
|-----------------|-------------|---------------------------|---------------------------|-----------------------|-------------------|
| | | 对照 Control | 施肥 Fertilization group | 翻地 Ploughing group | 培肥 Reed debris |
| 有机碳/(g/kg) | 6 | 18.58 ± 0.03 | 20.63 ± 0.91 | 19.15 ± 0.15 | 19.94 ± 0.27 |
| Total Organic C | 7 | 18.23 ± 0.81 | 19.78 ± 1.31 | 18.93 ± 1.39 | 20.33 ± 1.15 |
| | 8 | 18.90 ± 0.33 | 22.34 ± 0.65 | 20.96 ± 0.38 | 23.12 ± 0.38 |
| | 9 | 18.58 ± 0.54 | 22.10 ± 1.14 | 21.42 ± 0.59 | 22.47 ± 1.08 |
| | 10 | 18.66 ± 0.36 | 22.11 ± 0.56 | 20.81 ± 0.73 | 22.32 ± 0.32 |
| 全氮/(g/kg) | 6 | 0.66 ± 0.03 | 0.68 ± 0.06 | 0.63 ± 0.02 | 0.70 ± 0.08 |
| Total N | 7 | 0.60 ± 0.03 | 0.66 ± 0.11 | 0.67 ± 0.07 | 0.76 ± 0.01 |
| | 8 | 0.52 ± 0.02 | 0.84 ± 0.12 | 0.77 ± 0.02 | 0.90 ± 0.03 |
| | 9 | 0.68 ± 0.04 | 0.80 ± 0.08 | 0.75 ± 0.03 | 0.86 ± 0.08 |
| | 10 | 0.64 ± 0.05 | 0.89 ± 0.04 | 0.83 ± 0.02 | 0.90 ± 0.08 |
| 有效磷/(mg/kg) | 6 | 9.02 ± 0.85 | 8.80 ± 0.19 | 8.02 ± 1.22 | 8.22 ± 0.39 |
| Available P | 7 | 11.72 ± 0.31 | 6.30 ± 0.12 | 7.82 ± 0.59 | 6.40 ± 0.42 |
| | 8 | 12.16 ± 0.46 | 11.07 ± 0.13 | 10.91 ± 0.37 | 10.80 ± 0.44 |
| | 9 | 8.79 ± 0.33 | 8.79 ± 0.52 | 8.26 ± 0.75 | 7.15 ± 0.04 |
| | 10 | 11.57 ± 0.57 | 10.88 ± 1.13 | 10.51 ± 0.76 | 10.77 ± 0.66 |
| 有效钾/(mg/kg) | 6 | 347.69 ± 27.23 | 398.04 ± 25.99 | 329.55 ± 16.47 | 373.01 ± 2.09 |
| Available K | 7 | 251.68 ± 1.14 | 304.91 ± 40.95 | 253.70 ± 16.08 | 307.64 ± 15.07 |
| | 8 | 260.24 ± 1.95 | 333.70 ± 5.46 | 278.71 ± 30.78 | 345.68 ± 19.51 |
| | 9 | 265.18 ± 5.11 | 355.84 ± 11.90 | 289.54 ± 36.43 | 338.43 ± 47.59 |
| | 10 | 242.86 ± 1.78 | 354.77 ± 13.69 | 293.17 ± 34.23 | 358.35 ± 7.94 |

不同处理下盐地碱蓬密度大小为施肥组 < 翻地组 < 芦苇碎屑组,单株生物量大小则为翻地组 < 芦苇碎屑组 < 施肥组,其中施肥组密度最小,但单株生物量最高,可能是因为施肥为盐地碱蓬生长提供生长所需要的氮素营养,使地上单株生物量增加,而地上生物量增高则盐地碱蓬植株对于资源(如光照)的竞争的增加,一些生长较弱小的植株就会因长期竞争不到有效资源而死亡,从而密度降低^[15]。芦苇碎屑组植株密度略高于翻地组,但两组差异不显著。生物量是评价植物生长状态的最重要因素之一^[2],从表3可知,单位面积生物量大小为翻地组 < 施肥组 < 芦苇碎屑组,其中芦苇碎屑组和翻地组生物量差异显著($P < 0.05$)。

表3 不同改良处理对植物高度、地上单株生物量、密度以及单位面积生物量的影响

Table 3 The effect of different eco-remediation methods on plant height, aboveground biomass, density and yield

| 项目 Item | 月份 Month | 施肥 Fertilization group | 翻地 Ploughing group | 培肥 Reed debris |
|-----------------------------------|-------------|---------------------------|-----------------------|-------------------|
| 高度/cm | 6 | 11.86 ± 0.42 a | 11.90 ± 1.55 a | 14.66 ± 0.98 a |
| Plant height | 7 | 35.33 ± 3.29 a | 33.54 ± 1.74 a | 39.11 ± 1.42 a |
| | 9 | 47.03 ± 3.03 a | 51.06 ± 4.15 a | 56.11 ± 4.78 a |
| | 10 | 59.35 ± 3.18 a | 59.67 ± 3.23 a | 62.87 ± 4.98 a |
| 地上单株生物量/(g/株) | 6 | 0.47 ± 0.08 a | 0.42 ± 0.03 a | 0.51 ± 0.04 a |
| Aboveground biomass | 7 | 2.32 ± 0.30 b | 1.22 ± 0.07 a | 2.10 ± 0.30 b |
| | 9 | 1.47 ± 0.38 a | 0.84 ± 0.01 a | 1.25 ± 0.17 a |
| | 10 | 2.29 ± 0.35 b | 1.09 ± 0.05 a | 1.45 ± 0.04 a |
| 密度 Density/(株/m ²) | 10 | 292 ± 74 a | 365 ± 41 ab | 531 ± 115 b |
| 单位面积生物量 Yield/(g/m ²) | 10 | 639.99 ± 77.60 ab | 396.29 ± 12.13 a | 771.12 ± 142.44 b |

8月植物样品缺失,但不影响本实验结果;不同字母表示同一月份不同处理差异显著($P < 0.05$)

3 结论

(1) 盐地碱蓬作为吸盐型盐生植物,采用翻地、施肥和施用芦苇碎屑的土壤改良方法能够有效的使盐地

碱蓬在高盐度的环境中更好的生长,并达到了一定程度的压盐效果,土壤中的 Na 离子也有显著的降低。

(2) 经过改良处理的土壤脲酶和磷酸酶活性与对照相比有了显著的提高,表明土壤肥力得到了改善,3种改良方法相比较,芦苇碎屑组对土壤肥力的改良效果最为显著。

(3) 采用翻地、施肥和施用芦苇碎屑改良处理的土壤全氮含量分别增加了 30.9%、31.7% 和 28.6%,有机碳、有效磷和有效钾均呈现波动性变化,但与对照相比差异不显著。

(4) 盐地碱蓬生物量随植物的不同生长期出现波动变化趋势。不同改良处理相比较,10月施肥处理下单株盐地碱蓬地上生物量显著高于其他两个处理,但对于密度而言,施肥处理组显著低于芦苇碎屑处理组。

(5) 生物量是评价植物生长状态的最重要因素之一,3种改良处理方法相比较,芦苇碎屑处理组盐地碱蓬生物量达到最高,在黄河三角洲重度退化盐碱化湿地基质改良与植被恢复中,施用芦苇碎屑效果显著。

致谢:山东省黄河三角洲生态环境研究中心各位老师,在实验过程中提供帮助,Houston 大学高永军教授对本文写作给予帮助,特此致谢。

References:

- [1] Zhang X L. The Environmental Change and Degradation of Modern Yellow River Delta Coastal Wetland. Qingdao: University of Chinese Oceanology, 2005.
- [2] Cui B S, Yang Q C, Yang Z F, Zhang K J. Evaluating the ecological performance of wetland restoration in the Yellow River Delta, China. *Ecological Engineering*, 2009, 35(7): 1090-1103.
- [3] Li J L, Lu Z H, Tian J Y, Wang L, Li P H, Xiao Z F. Bio-remediation of coastal saline-alkali marshy soil by irrigation with pulp and paper waste water. *Journal of China University of Mining and Technology*, 2008, 37(2): 281-286.
- [4] Miyamoto S, Arturo C. Soil salinity of urban turf areas irrigated with saline water. *Landscape and Urban Planning*, 2006, 77(1/2): 28-38.
- [5] Lymbery A J, Doupe B G, Bennett T, Starcevic M R. Efficacy of a subsurface-flow wetland using the estuarine sedge *Juncus kraussii* to treat effluent from inland saline aquaculture. *Aquacultural Engineering*, 2006, 34(1): 1-7.
- [6] Chen X M, Bai B, Huang D A. Effects of seawater irrigation on soil salinization-alkalization and saturation conductivity in Yellow River Delta. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2006, 22(2): 50-54.
- [7] Xu H L, Chen J X, Gao C Q, Yu D H, Chang S L. The Tamarix forest building technology in Yellow River Delta. *Chinese Soil and Water Conservation*, 2008, (9): 43-45.
- [8] Wu K. Water regime change characteristics and sustainable development of irrigation areas diverted water from lower reach of the Huanghe River. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2003, (1): 45-47.
- [9] Bao S D. Soil Agrochemical Analysis. 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2005: 91-94, 103-104, 154-167.
- [10] Tang H Y, Yang X S, Shen J L, Zhang C W, Bai X, Guo R P, Li H L, Wu X. Effect of different improved measures on vegetation and soil fertility of saline-alkali grassland. *Prataculture and Animal Husbandry*, 2007, (10): 1-3.
- [11] Dick R P, Breakwell D, Turco R. Soil enzyme activities and biodiversity measurements as integrating biological indicators // Doran J W, Jones A J, eds. *Handbook of Methods for Assessment of Soil Quality*. Wisconsin: Soil Science Society of America Special Publication, 1996: 247-272.
- [12] Acosta-Martínez V, Cruz L, Sotomayor-Ramírez R, Pérez-Alegría L. Enzyme activities as affected by soil properties and land use in a tropical watershed. *Applied Soil Ecology*, 2007, 35(1): 35-45.
- [13] Yang L J, Li T L, Li F S, Lemcoff J H, Cohen S. Fertilization regulates soil enzymatic activity and fertility dynamics in a cucumber field. *Scientia Horticulturae*, 2008, 116(1): 21-26.
- [14] Ma X, Xia M J, Lu Z H, Pei D Y, Liu Z M, Miao Y. The influence of irrigation with paper mill effluent on soil chemical properties of the heavily degraded coastal saline-alkaline wetlands in the Yellow River Delta. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(11): 3001-3009.
- [15] Steen H, Scrosati R. Intraspecific competition in *Fucus serratus* and *F. evanescens* (Phaeophyceae: Fucales) germlings: effects of settlement density, nutrient concentration and temperature. *Marine Biology*, 2004, 144: 61-70.

参考文献:

- [1] 张晓龙. 现代黄河三角洲滨海湿地环境演变及退化研究. 青岛: 中国海洋大学, 2005.
- [3] 李甲亮, 陆兆华, 田家怡, 王琳, 李鹏辉, 肖忠峰. 造纸废水灌溉对滨海盐碱化湿地的生态修复. *中国矿业大学学报*, 2008, 37(2): 281-286.
- [6] 陈效民, 白冰, 黄德安. 黄河三角洲海水灌溉对土壤盐碱化和导水率的影响. *农业工程学报*, 2006, 22(2): 50-54.
- [7] 徐化凌, 陈纪香, 高翠琴, 于德花, 常尚连. 黄河三角洲泥质海岸柽柳冲浪林带建设技术. *中国水土保持*, 2008, (9): 43-45.
- [8] 吴凯. 黄河下游水情变化特征与引黄灌溉的可持续发展. *灌溉排水学报*, 2003, (1): 45-47.
- [9] 鲍士旦. 土壤农化分析(第三版). 北京: 中国农业出版社, 2005: 91-94, 103-104, 154-167.
- [10] 唐鸿宇, 杨晓松, 沈景林, 张成武, 白雪, 郭瑞萍, 李海龙, 武霞. 不同改良措施对盐碱化草地植被和土壤肥力的影响. *草业与畜牧*, 2007, (10): 1-3.
- [14] 马欣, 夏孟婧, 陆兆华, 裴定宇, 刘志梅, 苗颖. 造纸废水灌溉黄河三角洲重度退化滨海盐碱湿地对土壤化学性质的影响. *生态学报* 2010, 30(11): 3001-3009.