

种植不同宿根花卉对黄河三角洲盐渍土 盐分和养分的影响

李仕辉¹, 赵西梅¹, 王元波², 陈为峰³,
芦月¹, 夏江宝¹, 陈印平¹, 张子涵¹, 李怡然⁴

(1.山东航空学院 山东省黄河三角洲生态环境重点实验室, 山东 滨州 256603; 2.山东省国土空间生态修复中心, 山东 济南 250014; 3.山东农业大学 资源与环境学院, 山东 泰安 271018; 4.青岛大学 生命科学院, 山东 青岛 266003)

摘要: [目的] 探究种植不同宿根花卉对黄河三角洲土壤盐分和养分的影响, 为选择合适的宿根花卉进行盐渍土生态改良提供物种参考, 助力黄河国家战略和盐碱区域美丽乡村建设。[方法] 以种植马蔺(*Iris lactea*)、紫穗狼尾草(*Pennisetum alopecuroides* subsp. *purple*)、常夏石竹(*Dianthus plumarius*)、天人菊(*Gaillardia pulchella*)、大花萱草(*Heimerocallis hybrida*)和八宝景天(*Sedum spectabile*)的土壤为研究对象, 以未种植宿根花卉的裸地土壤为对照, 分析花卉种植对土壤含盐量、电导率、 Na^+ 、 Cl^- 、速效钾和有效磷含量的影响。[结果] ①种植宿根花卉对黄河三角洲盐渍土具有一定的生态调控效果。种植马蔺和紫穗狼尾草可显著降低0—10 cm土层的含盐量, 同时马蔺对10—20 cm土层的含盐量也有一定的降低效果, 电导率与含盐量趋势一致。②天人菊、常夏石竹可显著降低0—10 cm土层的 Na^+ 和 Cl^- 含量; 马蔺和天人菊对土壤中 Cl^- 去除效果较好。③不同宿根花卉对表土层速效钾含量影响不显著, 而种植不同宿根花卉可降低10—20 cm土层的有效磷含量, 紫穗狼尾草降低效果较小。[结论] 种植马蔺、紫穗狼尾草对盐渍土的改良效果较好, 在选择宿根花卉进行黄河三角洲地区盐渍土的生态改良时可优先考虑; 大花萱草居中; 常夏石竹、天人菊、八宝景天较差。

关键词: 黄河三角洲; 盐渍土; 宿根花卉; 土壤盐分; 土壤养分

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2024)06-0023-08

中图分类号: S682.1, S156.4⁺4

文献参数: 李仕辉, 赵西梅, 王元波, 等. 种植不同宿根花卉对黄河三角洲盐渍土盐分和养分的影响[J]. 水土保持通报, 2024, 44(6): 23-30. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2024.06.003; Li Shihui, Zhao Ximei, Wang Yuanbo, et al. Effects of different perennial flowers on salinity and nutrients in saline soil of Yellow River delta [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024, 44(6): 23-30.

Effects of Different Perennial Flowers on Salinity and Nutrients in Saline Soil of Yellow River Delta

Li Shihui¹, Zhao Ximei¹, Wang Yuanbo², Chen Weifeng³,
Lu Yue¹, Xia Jiangbao¹, Chen Yinping¹, Zhang Zihan¹, Li Yiran⁴

(1. Shandong Key Laboratory of Eco-environmental Science for the Yellow

River Delta, Shandong University of Aeronautics, Binzhou, Shandong 256603, China;

2. Shandong Provincial Territorial Spatial Ecological Restoration Center, Jinan, Shandong

250014, China; 3. College of Resource and Environment, Shandong Agricultural University, Taian,

Shandong 271018, China; 4. College of Life Sciences, Qingdao University, Qingdao, Shandong 266003, China)

Abstract: [Objective] The effects of planting different perennial flowers on soil salinity and nutrients in the Yellow River delta were explored, in order to provide species reference for selecting suitable perennial

收稿日期: 2024-05-20

修回日期: 2024-09-25

资助项目: 国家自然科学基金项目“黄河三角洲柽柳根系构型对水位—盐分变化的生态响应及调节机制”(32271963); 黄河三角洲土地利用安全野外科学观测研究站开放基金资助项目(YWZ202205); 滨州学院博士学位人员科研启动项目(2018Y18); 国家级大学生创新训练计划项目(202210449003); 山东省林草种质资源中心草本植物种质资源普查与收集(B包: 徒骇河—马颊河区域)(SDGP3700000000202302002674B-001)

第一作者: 李仕辉(2000—), 男(汉族), 山东省滨州市人, 硕士研究生, 研究方向为耐盐植物生态与盐碱地改良。Email: lishihui1024@163.com。

通信作者: 赵西梅(1980—), 女(汉族), 山东省临沂市人, 博士, 副教授, 主要从事耐盐植物生态与盐碱地生态修复等方面的研究。Email: zhaoximei@126.com。

flowers for ecological improvement of saline soil and assist the national strategy of the Yellow River and the construction of beautiful villages in saline-alkali areas. [Methods] The bare soil without planting perennial flowers was taken as the control, the soils planted with *Iris lactea*, *Pennisetum alopecuroides* subsp. *purple*, *Dianthus plumarius*, *Gaillardia pulchella*, *Hemerocallis hybrida*, and *Sedum spectabile* were examined to find the effects of perennial flowers planting on the soil salt content, electrical conductivity, Na^+ , Cl^- , available potassium, and available phosphorus content. [Results] ① The perennial flower planting showed ecological regulation effects on saline soil in the Yellow River Delta. Among them, *I. lactea* and *P. alopecuroides* significantly reduced the salt content in the 0—10 cm soil. At the same time, *I. lactea* also had a certain effect on reducing the salt content of 10—20 cm soil layer, and the trend of conductivity was consistent with the salt content. ② The contents of Na^+ and Cl^- in the 0—10 cm soils were significantly reduced by *G. pulchella* and *D. plumarius*, and the removal effect of soil Cl^- by *I. lactea* and *G. pulchella* was significant. ③ Perennial flowers had no significant effect on the content of available potassium in topsoil but reduced the content of available phosphorus in the 10—20 cm soils except *P. alopecuroides*. [Conclusion] The improvement effect of *I. lactea* and *P. alopecuroides* on saline soil was better, and they could be given priority when selecting perennial flowers for ecological improvement of saline soil in the Yellow River delta. *H. hybrida* had the medium effect, whereas *D. plumarius*, *G. pulchella* and *S. spectabile* had poor effects.

Keywords: Yellow River delta; saline soil; perennial flowers; soil salinity; soil nutrients

土壤盐渍化是土地退化的主要类型之一,也是世界性的资源和生态环境问题。世界上约 1/5 的土壤不同程度上受到盐分的影响,且呈不断恶化的趋势,预计至 2050 年,全球 50% 以上的耕地会发生盐渍化,严重威胁着土地利用率和作物产量^[1]。黄河三角洲是黄河百余年来冲积而成的新陆地,海—陆—河接壤形成了特殊的地理环境,具有多重生态界面,区域后备土地资源优势丰富,科学研究价值突出^[2-3]。然而,该区域地下水埋藏深度浅,土壤盐分易积累,潜矿化度高,蒸降比大,盐分很容易通过毛管作用向上迁移,引起次生盐渍化,大大降低了土壤生产力,严重制约了黄河三角洲农林业的可持续发展^[4-5]。在“黄河流域生态保护和高质量发展”上升为国家战略的背景下,加强盐碱地综合治理与利用等相关工程措施是黄河下游生态环境恢复和质量提升的主要目标^[6-7]。盐渍土的改良对黄河三角洲的生态恢复和经济发展具有重要意义。

黄河三角洲地下水矿化度较高,且潜水埋深较浅,蒸降比较大,土壤中盐分多呈明显的表聚现象,受海水入侵的影响,盐分主要组成以钠型盐氯化物为主。区域内土地资源优势突出,后备土地资源丰富。盐碱地绿色生态修复是一项复杂、艰巨的系统工程,采取适当调控措施,优化种植结构,进行盐碱地绿色生态改良,是提升地力、发挥土地资源效益的基础。随着科学技术的进步,盐碱地的技术改良已经取得了很多成果^[8-10],但受地域、资源、成本等的限制,以植物为主的盐碱地改良与利用具有简单、有效、可行性强、实现资源化等优点,可实现盐碱地的高效利用和

可持续发展。诸多研究表明,通过植物栽植生态改良措施可有效增加地表覆盖面积,减少地表水分蒸发,改善土壤结构^[11-13],影响土壤生物群落^[14],加速盐分淋洗、延缓或防止积盐返盐^[15],恢复和调节植物群落,有效改善盐渍化土壤生态环境^[16-17]。然而,由于不同的耐盐植物的生长特性不同,对盐渍土的适应和改良效果表现出很大的差异性^[18-21],有必要对耐盐植物进行筛选。本试验选取黄河三角洲地区园林绿化常用栽培宿根花卉马蔺(*Iris lactea*)、紫穗狼尾草(*Pennisetum alopecuroides* subsp. *purple*)、常夏石竹(*Dianthus plumarius*)、天人菊(*Gaillardia Pulchella*)、大花萱草(*Hemerocallis hybrida*)和八宝景天(*Sedum spectabile*),分析 6 种不同宿根花卉种植对黄河三角洲盐渍土盐分和养分的影响,明确盐分在土壤和植物器官中的分布特征,阐明盐分主要离子在土壤—宿根花卉中的迁移特征,探讨其改善盐渍化土壤的能力,为选择合适的宿根花卉进行盐渍土生态改良提供物种参考,助力黄河国家战略和盐碱区域美丽乡村建设。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于黄河三角洲东北部的东营渤海农场(37°47'34"N, 118°37'43"E),平均海拔 6 m。土壤类型主要为盐化潮土,土壤成土较晚,且黄河改道沉积物多次交叠,区域土壤底层具有砂黏交叠的特点。土壤盐分组成主要以氯化物为主, Na^+ , Cl^- 占离子总量的 70%~80%,土壤 pH 值为 7.79,含盐量平均

为 0.41%。属暖温带大陆性季风气候,年平均气温 12.1℃,无霜期 206 d,年均降雨量 551.6 mm,年均蒸发量在 1 700~1 900 mm 之间,地下水位浅,矿化度高,滩涂土壤为冲积性黄土母质,机械组成以粉砂和淤泥质粉砂为主,通气透水性差,研究区土壤达到中度盐渍化标准。

1.2 研究方法

2022 年 9 月种植马蔺、紫穗狼尾草、常夏石竹、天人菊、大花萱草和八宝景天,所有供试植物长势一致。每种植小区 4 m×4 m,行距 20 cm,株距 15 cm。试验采用完全随机设计,每种植物设 3 个重复共 18 个种植小区,各小区间隔 1 m,每个小区种植一种植物,随机抽签确定种植小区种类。以距离种植地 3 m 以外相同生境背景的盐渍土裸地为对照(CK)。试验地块为长期试验地块,初始土壤条件基本一致,所有小区及对照组均进行相同的栽培管理方式,各小区之间均不互相影响。种植初期为保证植物成活进行了相同的灌溉管理,种植完成后立即浇灌,之后第 3,7 d 浇灌一次,15 d 再浇灌一次,幼株成活后停止浇灌,

恢复自然生长状态。所有小区及对照组灌溉用水一致,均为淡水。具体试验布设见图 1。

2023 年 9 月对每个小区取 0—10,10—20 cm 土层的土壤,每个小区每个土层取 3 份土壤样品,小区内采用对角线五点取样,同一土层均匀混合备用。自然风干后磨碎,过 2 mm 筛后装袋,标记备用。参照中华人民共和国农业行业标准(NY/T 1121.16—2006)测定土壤水溶性盐总量(水土比 5:1);电导率仪测定土壤电导率;pH 计测定 pH 值;电感耦合等离子发射光谱仪(美国 PerkinElmer Optima 8000)测定土壤中 Na⁺ 含量;离子色谱仪(美国戴安 IC-2000)测定土壤中 Cl⁻ 含量;参照标准(NY/T 889—2004, NY/T 1121.7—2014)采用钼锑抗比色法测定土壤有效磷含量,乙酸铵浸提—火焰光度计法测定速效钾含量。植物样品于 105℃ 的烘箱内杀青,75℃ 烘干至恒重;将植物样品的地上部和地下部分开研磨,称取 0.200 g 磨好的植物样品于试管内,加 10 ml 去离子水摇匀,于 100℃ 水浴锅内,水浴加热 30 min,上清液备用,Na⁺ 和 Cl⁻ 的测定同土壤。

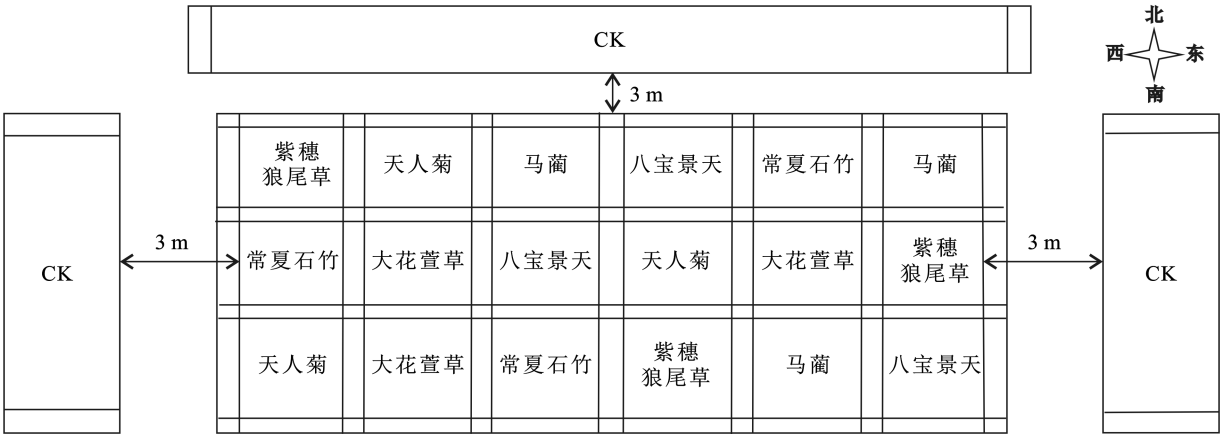


图 1 种植试验布设示意图
Fig.1 Layout diagram of planting experiment

1.3 数据处理

采用 Microsoft Office Excel 2021 数据处理、作图,SPSS 27.0 统计分析软件对各项指标进行单因素方差分析(one-way ANOVA),Duncan 法进行差异显著性检验($p<0.05$)。

2 结果与分析

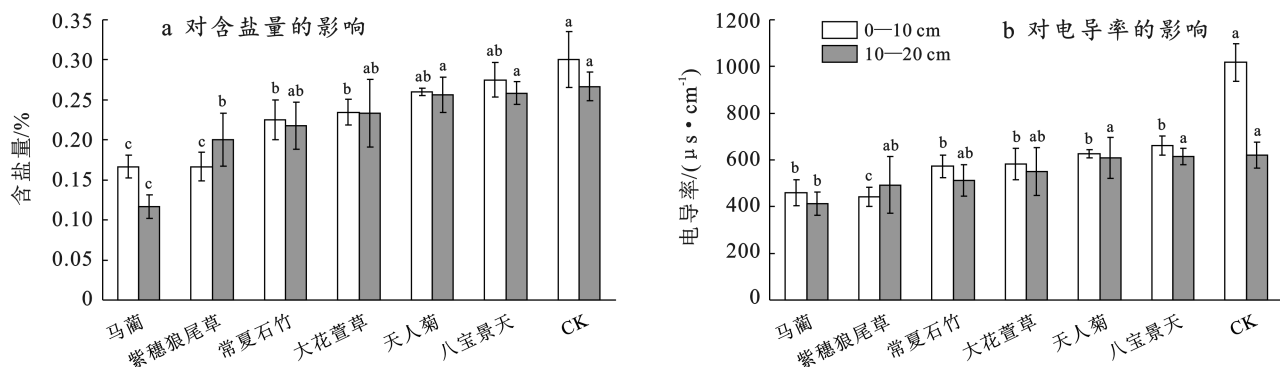
2.1 种植不同宿根花卉对土壤含盐量及土壤电导率的影响

研究表明,种植不同的宿根花卉均能降低各土层的土壤含盐量和电导率,且电导率与土壤含盐量变化规律相似。由图 2 可知,随着土层深度的增加,不同

宿根花卉土壤含盐量和电导率基本呈现降低的趋势。这是由于盐随水动,盐分在土壤毛管作用下随水分上升到土壤表面,水去盐留,盐分在土壤逐渐积聚在土壤表层,无浇灌或久未降雨时,会导致表层土壤的盐分要高于深层土壤。对 0—10 cm 土层,种植马蔺和紫穗狼尾草后土壤的含盐量和电导率降低最显著,含盐量均为 0.16%,比 CK 降低了 44.4%;电导率分别比 CK 降低了 575.67 和 558.67 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 。种植常夏石竹和大花萱草效果次之,含盐量分别为 0.22% 和 0.23%;分别比 CK 降低了 25.0% 和 21.8%,这可能与不同宿根花卉的地上覆盖率有关。试验中马蔺和紫穗狼尾草的地上生物量远高于其他宿根花卉,宿根

花卉的地上覆盖率越高,其根系越发达,扩大了土壤的接触面,植株对土壤中水分等物质的吸收能力就越强;同时,在无充足灌溉的情况下,增加地上覆盖度可减少土壤蒸发,有效减缓表土层土壤盐分的积累。由图 2 可知,种植天人菊和八宝景天较种植其他几种宿根花卉相比,0—10 cm 土层土壤含盐量较高,但均低于 CK。种植这两种植物土壤电导率差异不显著 ($p>0.05$),但与对照差异显著。对 10—20 cm 土层,种

植马蔺后土壤含盐量、电导率均最低,分别为 0.12%, 413.33 $\mu\text{S}/\text{cm}$;其次为紫穗狼尾草,常夏石竹和大花萱草,其含盐量分别为 0.20%, 0.22% 和 0.23%, 土壤电导率分别为 502.33, 512.67 和 529.33 $\mu\text{S}/\text{cm}$;种植天人菊和八宝景天对 10—20 cm 的土层土壤含盐量和电导率的降低效果不显著 ($p>0.05$),研究发现天人菊和八宝景天根系较短,八宝景天根系量较少,且须根主要分布在 0—10 cm 土层。



注:不同字母表示相同土层同一指标间有显著性差异($p<0.05$)。下同。

图 2 种植不同宿根花卉对土壤含盐量及土壤电导率的影响

Fig.2 Effects of planting different perennial flowers on soil salinity and soil electrical conductivity

2.2 不同宿根花卉对土壤盐分离子的影响

由图 3a, 3b 可知,种植不同宿根花卉可影响土壤剖面盐分 Na^+ 和 Cl^- 含量,且不同宿根花卉对不同土层盐分离子的影响程度不同。由图 3a 可知,种植不同宿根花卉可显著影响不同土壤剖面的土壤盐分 Na^+ 含量 ($p<0.05$),主要表现为显著降低 0—10 cm 土层土壤中 Na^+ 含量,这与土壤含盐量规律相似。种植天人菊后土壤中 Na^+ 含量为 141.52 $\mu\text{g}/\text{g}$,比 CK 降低了 40.1%,降低效果最显著 ($p<0.05$);其次为常夏石竹(246.91 $\mu\text{g}/\text{g}$)和大花萱草(269.38 $\mu\text{g}/\text{g}$);种植马蔺与紫穗狼尾草差异不显著 ($p>0.05$),其 Na^+ 含量分别为 314.43 和 327.99 $\mu\text{g}/\text{g}$;种植八宝景天对 0—10 cm 土层 Na^+ 的降低效果最差,为 357.9 $\mu\text{g}/\text{g}$,显著低于 CK,这可能是由于种植不同宿根花卉后增加了土壤的覆盖面积,减少了 Na^+ 向表层迁移。种植宿根花卉后土壤中 Na^+ 含量依次为:马蔺(377.39 $\mu\text{g}/\text{g}$)>八宝景天(371.20 $\mu\text{g}/\text{g}$)>紫穗狼尾草(352.50 $\mu\text{g}/\text{g}$)>大花萱草(333.10 $\mu\text{g}/\text{g}$)>常夏石竹(324.09 $\mu\text{g}/\text{g}$)>天人菊(320.90 $\mu\text{g}/\text{g}$)。由图 3b 可知,不同宿根花卉对土壤中 Cl^- 含量影响不同。对 0—10 cm 土层,种植不同宿根花卉后土壤中 Cl^- 含量均低于 CK。其中种植天人菊(196.68 $\mu\text{g}/\text{g}$)、常夏石竹(203.90 $\mu\text{g}/\text{g}$)和马蔺(211.83 $\mu\text{g}/\text{g}$)对土壤中 Cl^- 含量降低效果显著 ($p<0.05$),其次为大花萱草(320.04 $\mu\text{g}/\text{g}$)和紫穗狼

尾草(369.57 $\mu\text{g}/\text{g}$);种植八宝景天也可显著降低土壤表层 Cl^- 含量 ($p<0.05$),但效果不如其他宿根花卉。这可能因为八宝景天相对于其他宿根花卉,对土壤 Cl^- 的吸收较弱,这与 Na^+ 规律是一致的。对于 10—20 cm 土层,种植不同宿根花卉后土壤中 Cl^- 含量均高于 CK,依次为:八宝景天(512.06 $\mu\text{g}/\text{g}$)>紫穗狼尾草(405.93 $\mu\text{g}/\text{g}$)>大花萱草(363.16 $\mu\text{g}/\text{g}$)>常夏石竹(347.13 $\mu\text{g}/\text{g}$)>天人菊(320.04 $\mu\text{g}/\text{g}$)>马蔺(277.18 $\mu\text{g}/\text{g}$)。

2.3 种植不同宿根花卉对土壤养分的影响

由图 4 可知种植不同宿根花卉对土壤中速效钾含量的影响不显著 ($p>0.05$),但对土壤中有效磷含量影响差异较大 ($p<0.05$)。由图 4a 可知,种植不同宿根花卉对土壤中速效钾含量的影响不显著 ($p>0.05$)。对 0—10 cm 土层,速效钾含量呈现为:对照(337.27 $\mu\text{g}/\text{g}$)>八宝景天(334.93 $\mu\text{g}/\text{g}$)>天人菊(331.19 $\mu\text{g}/\text{g}$)>常夏石竹(330.15 $\mu\text{g}/\text{g}$)>马蔺(324.67 $\mu\text{g}/\text{g}$)>紫穗狼尾(310.29 $\mu\text{g}/\text{g}$)>大花萱草(302.89 $\mu\text{g}/\text{g}$)。对 10—20 cm 土层,种植紫穗狼尾草(246.86 $\mu\text{g}/\text{g}$)土壤速效钾含量显著高于 CK ($p<0.05$)。种植马蔺、常夏石竹、大花萱草、天人菊、八宝景天速效钾含量与 CK 相比无显著差异 ($p>0.05$)。由图 4b 可知,种植不同宿根花卉后对土壤中有效磷含量影响差异较大 ($p<0.05$)。对于 0—10 cm 土层,种植不同宿根花卉后土壤中的有效

磷含量大多高于 CK ($p < 0.05$)。其中种植常夏石竹后土壤有效磷含量最高,为 $0.52 \mu\text{g/g}$,比 CK 增加了 $0.18 \mu\text{g/g}$;种植大花萱草、紫穗狼尾草、马蔺和八宝景天差异不显著 ($p > 0.05$);种植天人菊后土壤有效磷含量增加不显著,为 $0.36 \mu\text{g/g}$ 。对 10—20 cm 土

层,种植不同的宿根花卉后土壤有效磷含量均显著低于 CK ($p < 0.05$),种植不同宿根花卉后土壤有效磷含量呈现:紫穗狼尾草 ($0.30 \mu\text{g/g}$) > 常夏石竹 ($0.24 \mu\text{g/g}$) > 马蔺 ($0.20 \mu\text{g/g}$) > 大花萱草 ($0.16 \mu\text{g/g}$) = 八宝景天 ($0.16 \mu\text{g/g}$) > 天人菊 ($0.14 \mu\text{g/g}$)。

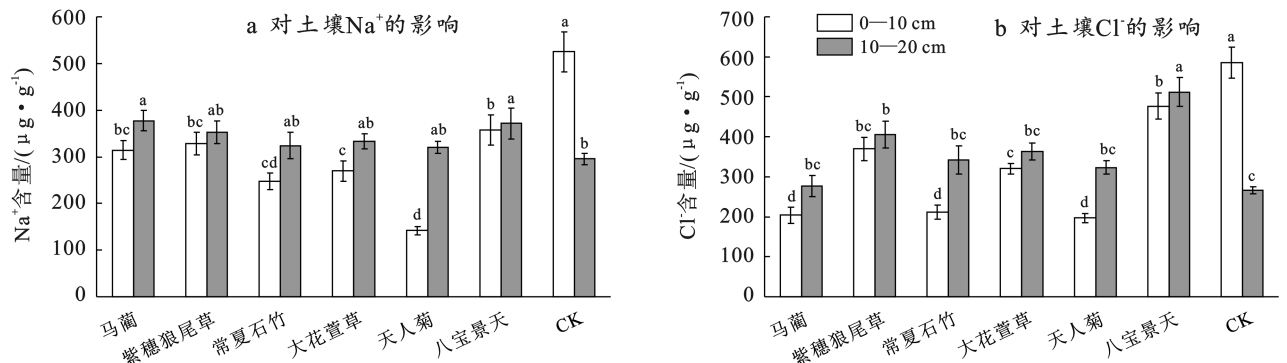


图 3 种植不同宿根花卉对土壤 Na^+ 和 Cl^- 含量的影响

Fig.3 Effects of planting different perennial flowers on soil Na^+ and Cl^- contents

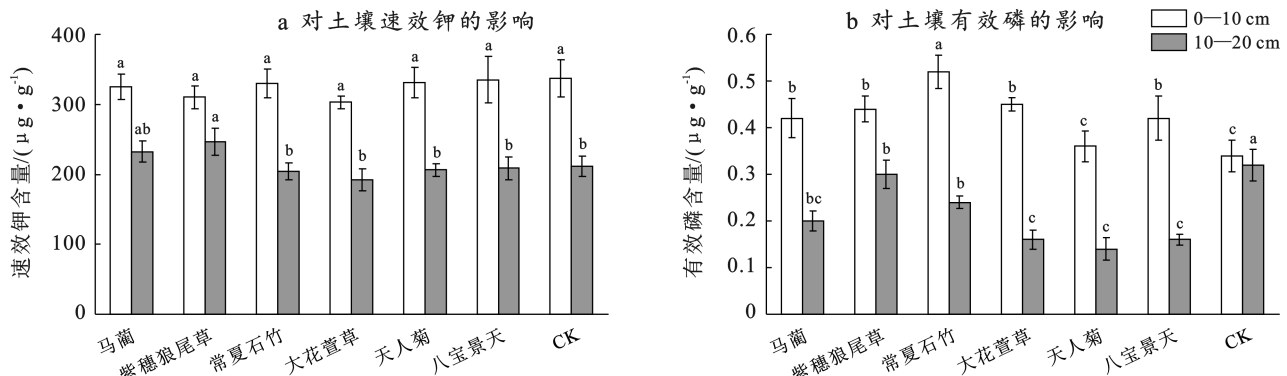


图 4 种植不同宿根花卉对土壤速效钾和有效磷含量的影响

Fig.4 Effects of planting different perennial flowers on soil available potassium and available phosphorus content

2.4 不同宿根花卉 Na^+ , Cl^- 含量

由图 5 可知,不同宿根花卉地上地下部分 Na^+ 和 Cl^- 含量存在显著差异 ($p < 0.05$),且离子类型不同,地上地下部分含量也不同。由图 5a 可知, Na^+ 基本表现为植物地下部分高于地上部分,这表明植物通过根系的活动将土壤中的 Na^+ 主要吸收在根部,再通过转运作用将 Na^+ 贮存在地上部分。其中天人菊地下部分 Na^+ 含量显著高于其他宿根花卉 ($p < 0.05$),不同宿根花卉地下部分 Na^+ 含量依次为:天人菊 (10.41 mg/g) > 马蔺 (5.57 mg/g) > 常夏石竹 (5.41 mg/g) > 紫穗狼尾草 (2.21 mg/g) > 大花萱草 (1.83 mg/g) > 八宝景天 (1.18 mg/g)。这与本研究图 2a 中天人菊和常夏石竹等对土壤中 Na^+ 降低效果较好,八宝景天效果较差的结果是一致的。由图 5b 可知, Cl^- 整体表现为植物地上部分高于地下部分,这可能与植物的耐盐和吸收特性相关。天人菊地上部分 Cl^- 含量显著高于其他宿根花卉 ($p < 0.05$),不同植物地上部分 Cl^- 含量呈

现:天人菊 (6.93 mg/g) > 大花萱草 (5.52 mg/g) > 八宝景天 (5.295 mg/g) > 马蔺 (5.00 mg/g) > 常夏石竹 (3.81 mg/g) > 紫穗狼尾草 (2.64 mg/g)。这与本研究不同宿根花卉对土壤 Cl^- 降低效果的结论一致,也是植物—土壤系统盐分离子运移规律的反馈。

3 讨论

3.1 不同宿根花卉对土壤含盐量、电导率的影响

土壤含盐量作为盐渍土的重要特征指标,是盐碱土改良的重要依据^[16]。结果表明,种植不同宿根花卉后均可降低土壤含盐量,这是由于植物根系对土壤中的盐分离子具有一定的吸收作用,且种植不同宿根花卉均可增加地表植被覆盖率,有效减缓地表蒸发,减少地表积盐^[10,13,15]。相比其他宿根花卉,马蔺根系粗壮,地下生物量较大,须根稠密发达,具有较强的固土能力^[21];紫穗狼尾草根系分蘖和生长速度快,根系生物量大,吸收能力强^[18],所以种植马蔺和紫穗狼尾草后

对表土层土壤含盐量的降低效果最显著($p < 0.05$)。研究发现,种植不同宿根花卉后土壤电导率的变化趋势与土壤含盐量基本一致,受盐分离子导电的影响,当盐离子浓度增加时土壤电导率增加,在一定浓度范围内,土壤含盐量与电导率呈正相关。种植不同宿根花卉能够有效地降低黄河三角洲盐渍土的电导率,且以种植马蔺和紫穗狼尾草效果最为显著($p < 0.05$),

这可能与种植宿根花卉的地上地下生物量有关。在生长指标监测过程中发现,马蔺和紫穗狼尾草的根系较为发达,地上生物量大、地下根系越发达、植物适应性越强,对土壤相关离子吸收能力越强,土壤盐量的降低效果就越显著,在一定程度上该宿根花卉对盐碱土的改良效果就越好,这与杨策等^[11]、尹德洁等^[13]的结论一致。

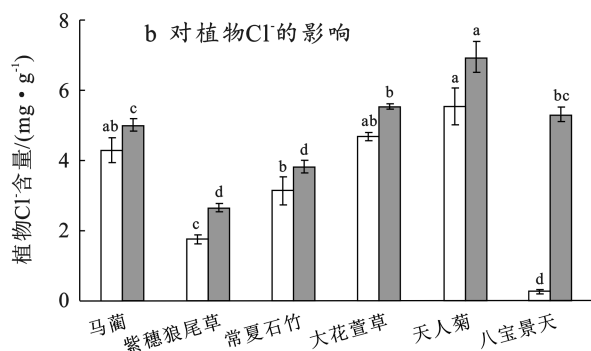
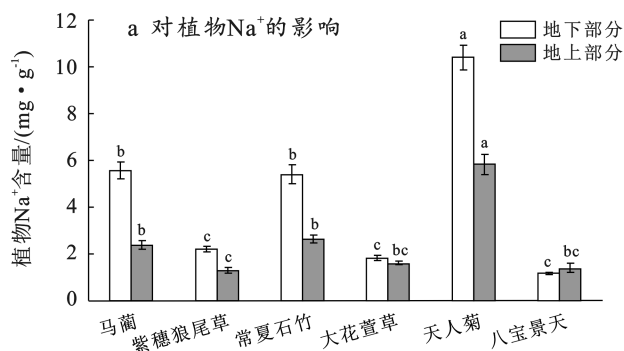


图5 种植不同宿根花卉对植株地上、地下部分 Na⁺ 和 Cl⁻ 含量的影响

Fig.5 Effects of planting different perennial flowers on contents of Na⁺ and Cl⁻ in aboveground and underground parts of plants

3.2 不同宿根花卉与土壤盐分离子的关系

黄河三角洲距海较近,地下水位浅,易受地下水咸水的影响,地下水可以通过土壤毛管作用力上升到土壤表面,发生次生盐渍化,Na⁺和Cl⁻是该区域盐渍化土壤中的主要盐分离子^[6,15]。种植宿根花卉后增加了土壤的覆盖率,减少了水分蒸发,盐随水动,有效减少了盐分和盐分离子向表层土壤的迁移^[22]。此外,基于盐分平衡理论,本研究发现盐分及主要盐分离子在土壤—植物系统中进行迁移,部分盐分离子被植物根茎叶吸收,种植宿根花卉均可显著降低土壤0—10 cm土层中Na⁺和Cl⁻含量,但由于根系以及地上生物量的差异,不同宿根花卉对盐分离子的吸收存在差异^[21,23-24]。马蔺、常夏石竹和天人菊0—10 cm根系生物量大且分布较集中,对Na⁺和Cl⁻具有较强的吸收能力,可有效降低土壤中Cl⁻含量;而八宝景天根系较浅,须根较少,吸收Cl⁻的能力较弱,本研究中宿根花卉地上地下Na⁺和Cl⁻分布特征的结论中也印证了这一观点。种植不同宿根花卉后促进了水盐运移,但受植物选择性吸收的影响,宿根花卉选择性少吸收或不吸收Na⁺和Cl⁻以提高对盐分胁迫的抗性;另外,植物长期的系统发育中逐渐形成了对逆境的适应或抵抗逆境的本领,逆境下植物调节体内调节酶活性和渗透调节物质,增加其含量以减少Na⁺和Cl⁻对植物的毒害作用,降低胁迫对植物正常的生长发育、代谢的影响^[25]。另外,种植植物后根系吸收促进了植物—土壤系统的水盐运移过程,盐随水动,受

植物的耐盐程度和选择吸收的影响,可能导致地上地下部分盐分离子不同,植物可少吸收对其生长发育不利的Na⁺和Cl⁻以提高对盐分胁迫的抗性^[26]。

3.3 不同宿根花卉对土壤养分的影响

钾、磷元素是植物生长发育过程中的必需元素,参与植物生长发育并影响植物抗性^[27-28]。对0—10 cm土层,植物选择性多吸收K⁺,以降低Na⁺/K⁺,减少Na⁺对植物的毒害^[10,19],因此,土壤中速效钾含量均低于对照。大花萱草对土壤中速效钾的吸收高于其他植物,可能因为大花萱草地上部分占比较大,生殖生长期较早,开花结实需钾量明显增加的原因^[29]。除马蔺和紫穗狼尾草,其他几种宿根花卉对10—20 cm土层中速效钾的含量变化差异不显著($p > 0.05$),这可能与马蔺和紫穗狼尾草根系较为发达且分布范围广,高盐胁迫下根系分泌的有机酸和酶来溶解土壤中的固态钾化合物,使其转化为可溶性的速效钾离子参与植物生理生态过程,以减轻Na⁺积累毒害有关^[30]。种植不同宿根花卉后0—10 cm土层有效磷含量均显著高于对照,可能是表层枯落物增加了土层中有机质和微生物活动,其释放的有机酸与土壤颗粒中难溶性磷酸盐发生解吸反应,使得磷离子从土壤颗粒表面解脱出来,导致0—10 cm土壤中磷含量升高^[31],下一步的工作重点应围绕表层微生物活动展开。而种植宿根花卉后10—20 cm土层中有效磷含量显著低于对照($p < 0.05$)。这可能是由于黄河三角洲土壤盐碱性,pH值大于7。碱性条件下多数磷为非有效性,因

此土壤有效磷含量较低(约在 18.6~33.4 mg/kg 之间,仅占总磷的 3.2%~5.9%^[32]),且随土层深度的增加缺磷更为明显^[33]。而植物的形态建成需要吸收土壤有效磷,更加剧了磷的短缺^[34]。因此 10—20 cm 土壤中的有效磷含量显著低于对照。

4 结 论

(1) 种植不同宿根花卉后均可有效降低土壤含盐量、电导率和 0—10 cm 土层中 Na⁺ 和 Cl⁻ 含量。种植马蔺、紫穗狼尾草、常夏石竹和大花萱草降低 0—10 cm 土层土壤含盐量和电导率效果最好,种植马蔺对 10—20 cm 土层的土壤含盐量和电导率降低效果最好,但受植物根系吸收的影响,种植宿根花卉后植物会选择性减少吸收根系分布层内的 Na⁺ 和 Cl⁻ 以减少盐分离子的毒害。

(2) 种植不同宿根花卉对不同土壤养分的影响不同。种植不同宿根花卉对 0—10 cm 土层的速效钾含量影响不显著,而土壤有效磷增加。种植不同宿根花卉后 0—10 cm 土层有效磷含量均高于对照,而根系集中分布层吸收有效磷参与植物器官形态建成,导致有效磷含量减少。

(3) 种植马蔺、紫穗狼尾草对盐渍土的改良效果较好,种植常夏石竹、天人菊、八宝景天较差,大花萱草的改良效果居中,在选择合适的宿根花卉进行黄河三角洲地区盐渍土的生态改良时应优先选择适应性强的马蔺和紫穗狼尾草,其次选择大花萱草,尽量避免八宝景天单一种植模式。

参考文献 (References)

[1] Davies J. The business case for soil [J]. *Nature*, 2017, 543(7645):309-311.

[2] 姚荣江,杨劲松.黄河三角洲地区土壤盐渍化特征及其剖面类型分析[J].干旱区资源与环境,2007,21(11):106-112.

Yao Rongjiang, Yang Jinsong. Analysis on salinity characteristics and profile types of saline soils in the Yellow River delta [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2007,21(11):106-112.

[3] Fan X, Pedroli B, Liu G, et al. Soil salinity development in the Yellow River delta in relation to groundwater dynamics [J]. *Land Degradation & Development*, 2012, 23(2):175-189.

[4] 杨劲松,姚荣江.我国盐碱地的治理与农业高效利用[J].中国科学院院刊,2015,30(增刊 1):162-170.

Yang Jingsong, Yao Rongjiang. Management and efficient agricultural utilization of salt-affected soil in China [J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2015, 30

(Suppl.1):162-170.

[5] Yu Junbao, Li Yunzhao, Han Guangxuan, et al. The spatial distribution characteristics of soil salinity in coastal zone of the Yellow River delta [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2014,72(2):589-599.

[6] 欧阳竹,王竑晟,来剑斌,等.黄河三角洲农业高质量发展新模式[J].中国科学院院刊,2020,35(2):145-153.

Ouyang Zhu, Wang Hongsheng, Lai Jianbin, et al. New approach of high-quality agricultural development in the Yellow River delta [J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2020,35(2):145-153.

[7] 刘小京,郭凯,封晓辉,等.农业高效利用盐碱地资源探讨[J].中国生态农业学报(中文),2023,31(3):345-353.

Liu Xiaojing, Guo Kai, Feng Xiaohui, et al. Discussion on the agricultural efficient utilization of saline-alkali land resources [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2023,31(3):345-353.

[8] 王倩姿,王玉,孙志梅,等.腐植酸类物质的施用对盐碱地的改良效果[J].应用生态学报,2019,30(4):1227-1234.

Wang Qianzi, Wang Yu, Sun Zhimei, et al. Amelioration effect of humic acid on saline-alkali soil [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019,30(4):1227-1234.

[9] 姜展博,宁松瑞,王全九.脱硫石膏改良盐碱土壤综合评价研究[J].土壤学报,2024,61(3):699-713.

Jiang Zhanbo, Ning Songrui, Wang Quanjiu. A comprehensive evaluation of the effect of desulfurized gypsum for improving saline-alkali soil [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2024,61(3):699-713.

[10] Xia Jiangbao, Ren Jiayun, Zhang Shuyong, et al. Forest and grass composite patterns improve the soil quality in the coastal saline-alkali land of the Yellow River delta, China [J]. *Geoderma*, 2019,349:25-35.

[11] 杨策,陈环宇,李劲松,等.盐地碱蓬生长对滨海重盐碱地的改土效应[J].中国生态农业学报(中英文),2019,27(10):1578-1586.

Yang Ce, Chen Huanyu, Li Jinsong, et al. Soil improving effect of Suaeda salsa on heavy coastal saline-alkaline land [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2019,27(10):1578-1586.

[12] Ijaz B, Sudiro C, Jabir R, et al. Adaptive behaviour of roots under salt stress correlates with morpho-physiological changes and salinity tolerance in rice [J]. *International Journal of Agriculture and Biology*, 2019,21(3):667-674.

[13] 尹德洁,张洁,荆瑞,等.山东滨海盐渍区植物群落与土壤化学因子的关系[J].应用生态学报,2018,29(11):3521-3529.

Yin Dejie, Zhang Jie, Jing Rui, et al. Relationships between plant community and soil chemical factors in coastal saline area of Shandong, China [J]. *Chinese*

- Journal of Applied Ecology, 2018, 29(11): 3521-3529.
- [14] Schmidt R, Mitchell J, Scow K. Cover cropping and no-till increase diversity and symbiotroph: Saprotroph ratios of soil fungal communities [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2019, 129: 99-109.
- [15] 王瑞燕, 孔沈彬, 许璐, 等. 黄河三角洲不同地表覆被类型和微地貌的土壤盐分空间分布[J]. 农业工程学报, 2020, 36(19): 132-141.
- Wang Ruiyan, Kong Shenbin, Xu Lu, et al. Spatial distribution of soil salinity under different surface land cover types and micro-topography in the Yellow River delta [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(19): 132-141.
- [16] 马龙, 李亚玲, 刘诗琪, 等. 高原湿地公路工程边坡不同恢复措施下土壤理化性质及酶活性[J]. 水土保持通报, 2024, 44(4): 157-167.
- Ma Long, Li Yaling, Liu Shiqi, et al. Effects of different restoration measures on soil physicochemical properties and enzyme activity of slopes in plateau wetland after highway engineering disturbance [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024, 44(4): 157-167.
- [17] Muchate N S, Nikalje G C, Rajurkar N S, et al. Physiological responses of the halophyte *Sesuvium portulacastrum* to salt stress and their relevance for saline soil bio-reclamation [J]. Flora, 2016, 224: 96-105.
- [18] Liang Wenji, Ma Xiaoli, Wan Peng, et al. Plant salt-tolerance mechanism: A review [J]. Biochemical and Biophysical Research Communications, 2018, 495(1): 286-291.
- [19] 许盼云, 吴玉霞, 何天明. 植物对盐碱胁迫的适应机理研究进展[J]. 中国野生植物资源, 2020, 39(10): 41-49.
- Xu Panyun, Wu Yuxia, He Tianming. Research progress on adaptation mechanism of plants to saline-alkali stress [J]. Chinese Wild Plant Resources, 2020, 39(10): 41-49.
- [20] Adolf V I, Jacobsen S E, Shabala S. Salt tolerance mechanisms in quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd) [J]. Environmental and Experimental Botany, 2013, 92: 43-54.
- [21] 刘雪, 陈涛, 蒋亚蓉, 等. 6 种宿根花卉在土壤干旱胁迫下的生理变化与抗旱性关系[J]. 西北农业学报, 2017, 26(1): 70-78.
- Liu Xue, Chen Tao, Jiang Yarong, et al. Relationship between physiological change and drought tolerance in six perennial flowers under drought stress [J]. Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica, 2017, 26(1): 70-78.
- [22] 马玉蕾, 王德, 刘俊民, 等. 黄河三角洲典型植被与地下水埋深和土壤盐分的关系[J]. 应用生态学报, 2013, 24(9): 2423-2430.
- Ma Yulei, Wang De, Liu Junmin, et al. Relationships between typical vegetations, soil salinity, and groundwater depth in the Yellow River delta of China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2013, 24(9): 2423-2430.
- [23] 岳小红, 曹靖, 耿杰, 等. 盐分胁迫对啤酒大麦幼苗生长、离子平衡和根际 pH 变化的影响[J]. 生态学报, 2018, 38(20): 7373-7380.
- Yue Xiaohong, Cao Jing, Geng Jie, et al. Effects of different types of salt stress on growth, ion balance and rhizosphere pH changes in beer barley seedlings [J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(20): 7373-7380.
- [24] 孙娟娟, 于林清, 赵金梅, 等. 盐分不均匀分布对紫花苜蓿生长和离子特征的影响[J]. 中国农业科学, 2017, 50(22): 4299-4306.
- Sun Juanjuan, Yu Linqing, Zhao Jinmei, et al. Effects of heterogeneous root zone salinity on plant growth and ion characteristic in alfalfa [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2017, 50(22): 4299-4306.
- [25] 张衡锋, 杨绮, 韦庆翠, 等. 盐胁迫对 10 个品种紫薇的影响及其耐盐性综合评价[J]. 东北林业大学学报, 2023, 51(9): 34-40.
- Zhang Hengfeng, Yang Qi, Wei Qingcui, et al. Effects of salt stress and salt tolerance on ten *Lagerstroemia indica* varieties [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2023, 51(9): 34-40.
- [26] 吴鹏, 吕剑, 郁继华, 等. 褪黑素对盐碱复合胁迫下黄瓜幼苗光合特性和渗透调节物质含量的影响[J]. 应用生态学报, 2022, 33(7): 1901-1910.
- Wu Peng, Lyu Jian, Yu Jihua, et al. Effects of melatonin on photosynthetic properties and osmoregulatory substance contents of cucumber seedlings under salt-alkali stress [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2022, 33(7): 1901-1910.
- [27] 陈文瑞, 蒋朝, 周齐新, 等. 不同盐分条件下硅对两个高羊茅品种生物量分配和营养元素氮、磷、钾吸收利用的影响[J]. 草业学报, 2022, 31(5): 51-60.
- Chen Wenrui, Jiang Zhao, Zhou Qixin, et al. Effects of silicon on biomass allocation and uptake and utilization of nitrogen, phosphorus, and potassium in two tall fescue (*Festuca arundinacea*) cultivars under different salinity conditions [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2022, 31(5): 51-60.
- [28] Qu Fanzhu, Shao Hongbo, Meng Ling, et al. Forms and vertical distributions of soil phosphorus in newly formed coastal wetlands in the Yellow River delta estuary [J]. Land Degradation & Development, 2018, 29(11): 4219-4226.

- [J].水土保持研究,2019,26(6):165-170.
- Pu Jialin, Liu Liang. Hydrology functions and decomposition characteristics of litter in subtropical forest [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2019,26(6):165-170.
- [31] 周丽丽,蔡丽平,马祥庆,等.不同发育阶段杉木人工林凋落物的生态水文功能[J].水土保持学报,2012,26(5):249-253.
- Zhou Lili, Cai Liping, Ma Xiangqing, et al. Eco-hydrological function in different developing stages of Chinese fir [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2012,26(5):249-253.
- [32] 张明明,高瑞馨.针叶植物叶片比较解剖及生态解剖研究综述[J].森林工程,2012,28(2):9-13.
- Zhang Mingming, Gao Ruixin. Research review on comparative anatomy and ecological anatomy of conifers blade [J]. Forest Engineering, 2012,28(2):9-13.
- [33] 于强,闫淑君,陈莹,等.9种园林树种凋落叶的持水性能[J].中国城市林业,2021,19(6):21-27.
- Yu Qiang, Yan Shujun, Chen Ying, et al. Water holding capacity of leaf litters in nine greening tree species [J]. Journal of Chinese Urban Forestry, 2021,19(6):21-27.
- [34] 刘效东,乔玉娜,周国逸,等.鼎湖山3种不同演替阶段森林凋落物的持水特性[J].林业科学,2013,49(9):8-15.
- Liu Xiaodong, Qiao Yuna, Zhou Guoyi, et al. Water-holding characteristics of litters in three forests at different successional stages in Dinghushan [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2013,49(9):8-15.
- [35] 刘少冲,段文标,赵雨森.莲花湖库区几种主要林型枯落物层的持水性能[J].中国水土保持科学,2005,3(2):81-86.
- Liu Shaochong, Duan Wenbiao, Zhao Yusen. Water-holding capacity of litter layer for various major forest types in Lianhua Lake reservoir area [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2005,3(2):81-86.
- ~~~~~
- (上接第 30 页)
- [29] 闫晓宇,郭文君,秦都林,等.滨海盐碱地棉花秸秆还田和深松对棉花干物质积累、养分吸收及产量的影响[J].作物学报,2022,48(5):1235-1247.
- Yan Xiaoyu, Guo Wenjun, Qin Dulin, et al. Effects of cotton stubble return and subsoiling on dry matter accumulation, nutrient uptake, and yield of cotton in coastal saline-alkali soil [J]. Acta Agronomica Sinica, 2022,48(5):1235-1247.
- [30] 慈华聪,田晓明,张楚涵,等.不同盐分处理对狼尾草和大油芒发芽与幼苗生长的影响[J].生态学杂志,2013,32(5):1168-1174.
- Ci Huacong, Tian Xiaoming, Zhang Chuhan, et al. Effects of salt stress on the seed germination and seedling growth of *Pennisetum alopecuroides* and *Spodiopogon sibiricus* [J]. Chinese Journal of Ecology, 2013,32(5):1168-1174.
- [31] 咸敬甜,陈小兵,王上,等.盐渍土磷有效性研究进展与展望[J].土壤,2023,55(3):474-486.
- Xian Jingtian, Chen Xiaobing, Wang Shang, et al. Phosphorus availability in saline soil: A review [J]. Soils, 2023,55(3):474-486.
- [32] 孙军娜,徐刚,邵宏波.黄河三角洲新生湿地磷分布特征及吸附解吸规律[J].地球化学,2014,43(4):346-351.
- Sun Junna, Xu Gang, Shao Hongbo. Fractionation and adsorption-desorption characteristics of phosphorus in newly formed wetland soils of Yellow River delta, China [J]. Geochimica, 2014,43(4):346-351.
- [33] 刘盛林,丁效东,郑东峰,等.黄河三角洲盐渍化荒地种植植物对土壤改良、磷形态转化及有效性的影响[J].水土保持学报,2021,35(1):278-284.
- Liu Shenglin, Ding Xiaodong, Zheng Dongfeng, et al. Effect of different plants plantation on amelioration of uncultivated saline wasteland, soils phosphorus fraction and availability in the Yellow River delta [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021,35(1):278-284.
- [34] 夏静,南丽丽,陈洁,等.低磷胁迫下不同根型苜蓿形态及生理响应[J].中国草地学报,2023,45(10):58-67.
- Xia Jing, Nan Lili, Chen Jie, et al. Morphological and physiological responses of different root types of alfalfa under low phosphorus stress [J]. Chinese Journal of Grassland, 2023,45(10):58-67.