

不同宿根花卉栽植对黄河三角洲表层土壤盐分和养分的影响

李仕辉¹, 芦月¹, 赵西梅^{1*}, 王元波², 陈为峰³, 夏江宝¹, 陈印平¹, 张子涵¹

(1 山东航空学院山东省黄河三角洲生态环境重点实验室, 滨州 256603;

2 山东省国土空间生态修复中心, 济南 250014; 3 山东农业大学资源与环境学院, 泰安 271018)

摘要: [目的]为探究栽植不同宿根花卉对黄河三角洲表层土壤盐分和养分的影响, [方法]以栽植马蔺 (*Iris lactea*)、紫穗狼尾草 (*Pennisetum alopecuroides* 'Purple')、常夏石竹 (*Dianthus plumarius*)、天人菊 (*Gaillardia Pulchella*)、大花萱草 (*Emerocallis hybrida*) 和八宝景天 (*Sedum spectabile*) 的土壤为研究对象, 以未栽植宿根花卉的裸地为对照, 分析土壤含盐量、电导率、Na⁺、Cl⁻、速效钾和有效磷含量。[结果]①栽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。栽植马蔺和紫穗狼尾草可显著降低 0-10 cm 土层的含盐量和电导率, 同时马蔺对 10-20 cm 土层的含盐量和电导率也有一定的降低效果。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, 而栽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]栽植马蔺、紫穗狼尾草对盐渍土的改良效果较好, 常夏石竹、天人菊、八宝景天较差, 该研究结果可为黄河三角洲地区选择合适的宿根花卉进行盐渍土生态改良提供一定的参考依据。

关键词: 黄河三角洲; 盐渍土; 宿根花卉; 土壤盐分; 土壤养分

文献标志码: A

中图分类号: S682.1

Effects of different perennial flowers planting on shallow soil salinity and nutrients in the Yellow River Delta

LI Shihui¹, Lu Yue¹, ZHAO Ximei^{1*}, WANG Yuanbo², CHEN Weifeng³, XIA Jiangbao¹,
CHEN Yinping¹, ZHANG Zi-han¹

(1 Shandong Key Laboratory of Eco-Environmental Science for the Yellow River Delta, Shandong University of Aeronautics, Binzhou 256600, China; 2 Shandong Provincial Territorial Spatial Ecological Restoration Center, Ji'nan 250014, China; 3 College of Resource and Environment, Shandong Agricultural University, Taian 271018, China)

Abstract: [Objective] In order to explore the effects of planting different perennial flowers on salt and nutrients in saline soil of the Yellow River Delta. [Methods] In this study, the soils planted with *Iris lactea*, *Pennisetum alopecuroides* 'Purple', *Dianthus plumarius*, *Gaillardia pulchella*, *Hemerocallis hybrida* and *Sedum spectabile* were used as the research objects, and the bare land without perennial flowers was used as the control. The soil salt content, electrical conductivity, Na⁺, Cl⁻, available potassium, and available phosphorus content were analyzed. [Result] ①The results showed that planting perennial flowers had a certain ecological regulation effect on saline soil in the Yellow River Delta. Among them, planting *I. lactea* and *P. alopecuroides* can significantly reduce the salt content and electrical conductivity of 0-10 cm soil layer, and *I. lactea* also has a certain reduction effect on 10-20 cm soil layer. ②The contents of Na⁺ and Cl⁻ in 0-10 cm were significantly reduced by *G. pulchella* and *D. plumarius*, and the removal effect of Cl⁻ in soil by *Iris lactea* and *G. pulchella* was better. ③Different perennial flowers had no significant effect on the content of available potassium in topsoil, while planting different perennial flowers could reduce the content of available phosphorus in 10-20 cm soil layer, and the effect of *P. alopecuroides* was less. [Conclusion] The improvement effect of saline soil by *I. lactea* and *P. alopecuroides* were better than the perennial flowers, such as *D. plumarius*, *G. Pulchella* and *S. spectabile*. The results of this study can provide some reference for selecting suitable perennial flowers for ecological improvement of saline soil in the Yellow River Delta.

Key words: Yellow River Delta; Saline soil; Perennial flowers; Soil salinity; Soil nutrients

土壤盐渍化是世界性的土地资源与生态环境领域内亟待解决的重要问题之一,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^[2-4]。然而,该区域地下水埋藏深度浅,土壤盐分易积累,潜水矿化度高,蒸降比大,盐分很容易通过毛管作用力向上迁移,形成次生盐渍化,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^[2,4-6]。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^[7-8]。盐渍土的改良无论是对于黄河三角洲的生态恢复还是经济发展都具有重要意义。

黄河三角洲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造,是提升地力,发挥土地资源的基础。随着科学技术的进步,盐碱地在技术改良方面已经取得了很多成果^[11-15],但受地域、资源、成本等的限制,利用植物实现寓利用与改良的调控,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。研究表明,盐生植物绿色调控盐渍化土壤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^[15-18],影响土壤生物群落^[12-13, 19],加速盐分淋洗、延缓或防止积盐返盐^[15-16, 18, 20],有效改善盐渍化土壤生态环境,具有恢复和调节植物群落的功能^[21-22]。由于不同的宿根花卉其生长发育特性不同,对盐渍土的适应和改良效果表现出很大的差异性^[23-25]。因此,本研究通过栽植马蔺、紫穗狼尾草、常夏石竹、天人菊、大花萱草和八宝景天 6 种宿根花卉,研究不同宿根花卉对黄河三角洲盐渍土土壤的盐分和养分的影响,探讨其适应和改善盐渍土壤生态环境的能力,对黄河三角洲地区盐渍土的绿色生态改良,黄河下游生态保护与高质量发展,助力乡村振兴和美丽乡村建设具有重要意义。

1 材料与方法

1.1 材料及研究区概况

研究区位于黄河三角洲的东北部,山东省东营渤海农场(37°47'34"N, 118°37'43"E),海拔 6 m。属暖温带大陆性季风气候,年平均气温 12.1℃,无霜期 206 天,年均降雨量 551.6 mm、年均蒸发量 1700~1900 mm,相对湿度 68%左右,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。于 2022 年 9 月栽植马蔺、紫穗狼尾草、常夏石竹、天人菊、大花萱草和八宝景天各 3 行,每行 24 株,行距 20 cm,株距 15 cm,每 3 行为 1 个小区,各小区大小为 4 m×4 m,各小区间隔 1 m。以距离栽植地 3 m 以外的相同生境背景的盐渍土裸地为对照(CK)。

1.2 研究方法

于 2023 年 9 月对每个小区取 0~10 cm, 10~20 cm 土层的土壤,每个小区每个土层取 3 份土壤样品作为重复,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 40 目筛网后装袋,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);用电导率仪测定土壤电导率;pH 计测定 pH;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;参照国家标准(NYT889-2004、NYT1121.7-2014)用钼锑抗比色法测定土壤有效磷含量,用乙酸铵浸提-火焰光度计法测定速效钾含量。

1.3 数据处理

使用 Microsoft Office Excel 2021 数据处理、作图,采用 SPSS 27.0 统计分析软件对不同林分各项指标进行单因素方差分析(one-wayANOVA),邓肯(Duncan)法进行差异显著性检验($P<0.05$)。

2 结果与分析

2.1 不同宿根花卉对土壤含盐量及电导率的影响

研究表明,栽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,且电导率变化规律与土壤含盐量变化规律相似。由图 1 可知,随着土壤深度的增加,不同宿根花卉土壤含盐量和电导率基本呈现降低的趋势。这可能是由于盐分随着水分的蒸发逐渐积聚在土壤表层,导致表层土壤的盐分要高于深层土壤。对 0~10 cm 土层,栽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%,比对照降低了 44.4%;电导率分别比对照降低了 575.67 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 和 558.67 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 。栽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%;分别比对照降低了 25.0%和 21.8%,这可能与不同宿根花卉的地上覆盖率有关。宿根花卉的地上覆盖率越高,其根系越发达,对土壤中养分离子的吸收能力就越强。马蔺和紫穗狼尾草的地上生物量远高于其他宿根花卉,这与研究结论一致。

由图 1-A、B 可知,栽植天人菊和八宝景天较栽植其他几种宿根花卉相比,0~10 cm 土层土壤含盐量较高,但也均低于对照。栽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,栽植马蔺后土壤的含盐量、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 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 、512.67 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 和 529.33 $\mu\text{S}/\text{cm}$;栽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 ($p>0.05$),研究发现这两种植物根系较短且主要分布在 0~10 cm 土层。

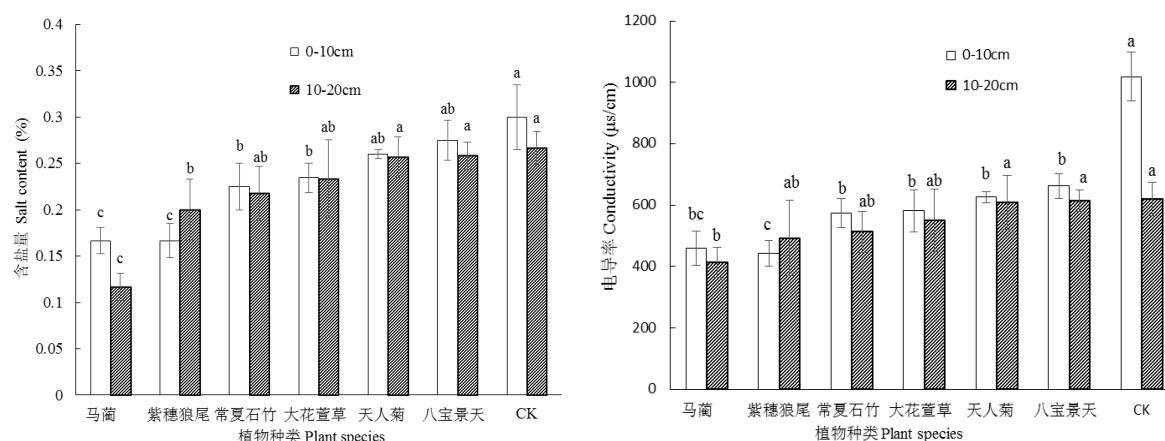


图 1 不同宿根花卉对土壤含盐量和电导率的影响

Fig.1 The effect of different perennial flowers on soil salinity and electrical conductivity (EC)

注:多重比较为同土层间差异性比较,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。

2.2 不同宿根花卉对土壤盐分离子的影响

由图 2-A、B 可知,栽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 2-A 可知,栽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 ($p<0.05$),主要表现在显著降低 0~10 cm 土层土壤中 Na^+ 含量,这与土壤含盐量规律相似。栽植天人菊后土壤中 Na^+ 含量为 14 1.52 $\mu\text{g}/\text{g}$,比对照降低了 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 (269.3 $\mu\text{g}/\text{g}$);栽植马蔺与紫穗狼尾草对照差异不显著 ($p>0.05$),其 Na^+ 含量分别为 314.43 $\mu\text{g}/\text{g}$ 和 327.99 $\mu\text{g}/\text{g}$;栽植八宝景天对 0~10 cm 土层 Na^+ 的降低效果最差,但也显著低于对照,为 357.9 $\mu\text{g}/\text{g}$,这可能是由于栽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。栽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 (33 3.10 $\mu\text{g}/\text{g}$) > 常夏石竹 (324.09 $\mu\text{g}/\text{g}$) > 天人菊 (320.90 $\mu\text{g}/\text{g}$)。

由图 2-B 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,栽植不同宿根花卉后土壤中 Cl^- 含量均低于对照。其中栽植天人菊 (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 ($p<0.05$),其次为大花萱草和紫穗狼尾草,栽植后土壤中 Cl^- 含量为 3 20.04 $\mu\text{g}/\text{g}$ 和 369.57 $\mu\text{g}/\text{g}$;栽植八宝景天也可降低土壤表层 Cl^- 含量 ($p<0.05$),但效果不如其他宿根花

卉显著。这说明相对于其他宿根花卉，八宝景天对土壤 Cl^- 的吸收较弱，这与 Na^+ 规律是一致的。对 10~20 cm 土层，栽植不同宿根花卉后土壤中 Cl^- 含量均高于对照，依次为八宝景天 ($512.06 \mu\text{g/g}$) > 紫穗狼尾草 ($405.93 \mu\text{g/g}$) > 大花萱草 ($363.16 \mu\text{g/g}$) > 常夏石竹 ($347.13 \mu\text{g/g}$) > 天人菊 ($320.04 \mu\text{g/g}$) > 马蔺 ($277.18 \mu\text{g/g}$)。

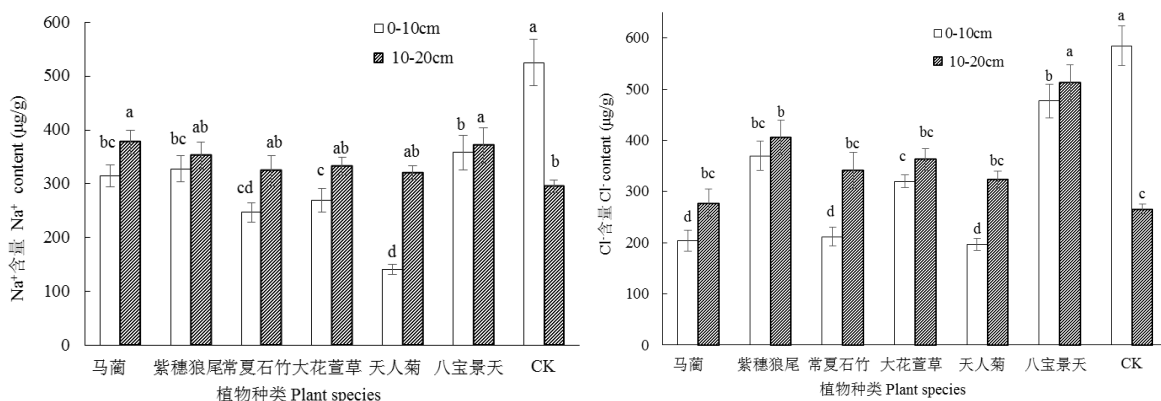


图 2 不同宿根花卉对土壤盐分 Na^+ 和 Cl^- 含量的影响

Fig.2 The effect of different perennial flowers on the content of soil Na^+ and Cl^-

2.3 不同宿根花卉对土壤养分的影响

由图 3-A、B 可知栽植不同宿根花卉对土壤中速效钾含量的影响不显著 ($p>0.05$)，但是对土壤中有效磷含量影响差异较大 ($p<0.05$)。

由图 3-A 可知，栽植不同宿根花卉对土壤中速效钾含量的影响不显著 ($p>0.05$)。栽植不同宿根花卉后土壤 0~10 cm 土层中速效钾含量依次为对照 ($337.27 \mu\text{g/g}$) > 八宝景天 ($334.93 \mu\text{g/g}$) > 天人菊 ($331.19 \mu\text{g/g}$) > 常夏石竹 ($330.15 \mu\text{g/g}$) > 马蔺 ($324.67 \mu\text{g/g}$) > 紫穗狼尾草 ($310.29 \mu\text{g/g}$) > 大花萱草 ($302.89 \mu\text{g/g}$)。对 10~20 cm 土层，栽植马蔺 ($229.48 \mu\text{g/g}$) 和紫穗狼尾草 ($246.86 \mu\text{g/g}$) 后土壤中的速效钾含量略有增加，但差异不显著。栽植常夏石竹、大花萱草、天人菊、八宝景天后 10~20 cm 土层速效钾含量与对照差异不显著 ($p>0.05$)。

由图 3-B 可知，栽植不同宿根花卉后对土壤中有效磷含量影响差异较大 ($p<0.05$)。在 0~10 cm 土层栽植不同宿根花卉后土壤中的有效磷含量均高于对照。其中栽植常夏石竹后土壤中有有效磷含量最高，为 $0.52 \mu\text{g/g}$ ，比对照增加了 $0.18 \mu\text{g/g}$ ；栽植大花萱草、紫穗狼尾草、马蔺和八宝景天差异不显著 ($p>0.05$)；栽植天人菊后土壤中有有效磷含量增加的不明显，为 $0.36 \mu\text{g/g}$ 。栽植不同的宿根花卉后 10~20 cm 土层土壤有效磷含量均低于对照，栽植植物后土壤有效磷含量分别为紫穗狼尾草 ($0.3 \mu\text{g/g}$) > 常夏石竹 ($0.24 \mu\text{g/g}$) > 马蔺 ($0.2 \mu\text{g/g}$) > 大花萱草 ($0.16 \mu\text{g/g}$) = 八宝景天 ($0.16 \mu\text{g/g}$) > 天人菊 ($0.14 \mu\text{g/g}$)。

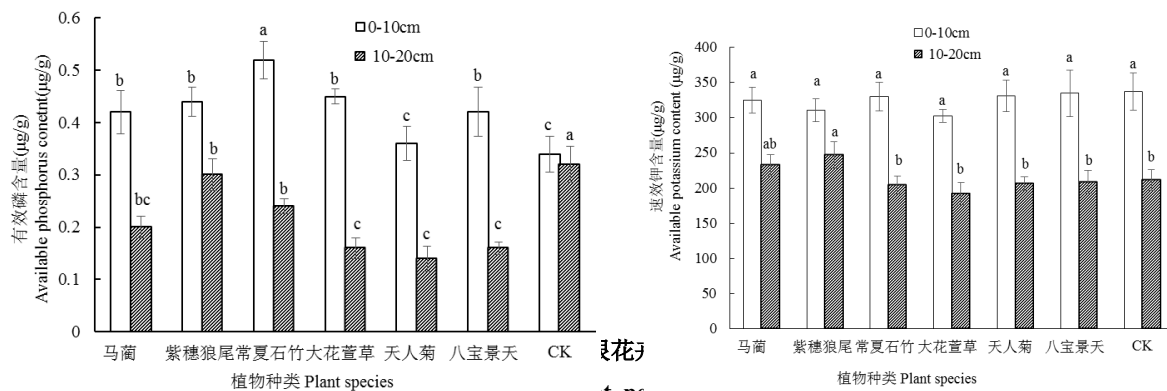


图 3 不同宿根花卉对土壤养分的影响
The effect of different perennial flowers on soil nutrients

3 讨论

3.1 不同宿根花卉对土壤含盐量、电导率的影响

土壤含盐量作为盐碱土壤的重要特征指标,是盐碱土改良的重要依据^[9,21]。结果表明,栽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,且栽植不同宿根花卉后地表植被覆盖率增加,有效减缓了地表蒸发,减少了蒸发造成的地表积盐^[15, 17-18, 20]。相比其他几种宿根花卉,马蔺根系粗壮,须根稠密发达^[26],紫穗狼尾草根分蘖和生长速度快,吸收能力强^[23]。且这两种植物的植被覆盖率较大,所以栽植马蔺和紫穗狼尾草后对土壤含盐量的降低效果最显著($p<0.05$)。研究发现,栽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,这是因为盐分中的离子有助于导电,当盐离子浓度增加时土壤电导率会增加,因此,土壤的电导率和水溶性盐存在一定的系数相关性^[14]。研究发现栽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,且以栽植马蔺和紫穗狼尾草效果最为显著($p<0.05$),这可能与植物的地上地下生物量有关。地上生物量越大,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,在一定程度上该植物对盐碱土的改良效果就越好,这与尹德洁和杨策等人^[18-19]结论一致。

3.2 不同宿根花卉对土壤盐分离子的影响

黄河三角洲地区距海较近,地下水位浅,盐渍土受海水入侵的影响较大。因此,Na⁺和Cl⁻是盐渍化土壤中的主要盐分离子^[4, 7, 20]。栽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,因此,有效减少盐分和盐分离子向表层土壤迁移^[28-29],本研究发现栽植不同宿根花卉均可显著降低土壤0~10 cm土层中Na⁺和Cl⁻含量。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^[24-25]。马蔺、常夏石竹和天人菊对Na⁺和Cl⁻具有较强的吸收能力,根系生物量大、且分布较集中,可有效降低土壤中Cl⁻含量;而八宝景天根系较浅,须根较少,对Cl⁻的吸收能力较弱,栽植后对Cl⁻降低效果较差。栽植植物后根系吸收促进了水盐运移,盐分随水运移到该土层,受植物选择性吸收的影响,可减少吸收对其生长发育不利的Na⁺和Cl⁻;也可能是受植物体内调节酶活性和渗透调节物质的影响,逆境下增加其含量以减少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^[30-31]。

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,参与植物生长发育过程,影响植物的抗性^[32-33]。0~10 cm土层,K⁺参与植物生理生化过程,植物选择性多吸收K⁺,降低Na⁺/K⁺,减少Na⁺对植物的毒害^[10,15],导致土壤中的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,因为大花萱草地上部分比重大,且其较早进入生殖生长期,而生殖生长阶段植物需钾量明显增加^[34]。除马蔺和紫穗狼尾草,其他几种宿根花卉对10~20 cm土层土壤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其根系较为发达且分布范围广有关,高盐胁迫下根系分泌的有机酸、酶和其他物质来溶解土壤中的固体态钾化合物,使其转化为可溶性的速效钾离子参与植物生理生态过程,减轻Na⁺积累有关^[35-36]。栽植不同宿根花卉后0~10 cm土层有效磷含量均显著高于对照,可能是由于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^[37],下一步的工作重点应围绕表层微生物活动展开。而栽植宿根花卉后10~20 cm土层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,多数磷为非有效性,随土壤深度的增加缺磷更为明显^[37-38],植物的形态建成需要吸收土壤有效磷加剧了磷的短缺^[39],导致10~20 cm土壤中的有效磷含量显著低于对照。

4 结论

(1)栽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。栽植马蔺、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,栽植马蔺对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,栽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)栽植不同宿根花卉对不同土壤养分的影响不同。栽植不同宿根花卉对0~10 cm土层的速效钾含量影响不显著,而土壤有效磷增加。栽植不同宿根花卉后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) 综上所述,栽植马蔺、紫穗狼尾草对盐渍土的改良效果较好,栽植常夏石竹、天人菊、八宝景天较差,该研究结果可为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、滨海城市的绿化及助力黄河国家战略、黄河三角洲的可持续发展提供重要依据。

参考文献:

- Davies, J. The business case for soil[J]. *Nature*, 2017, 543, 309-311.
- 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.
- 关元秀, 刘高焕, 刘庆生, 等. 黄河三角洲盐碱地遥感调查研究[J]. *遥感学报*, 2001, 5(1): 46-52.
- Fan X, Pedrolí B, Liu G, et al. Soil salinity development in the Yellow River Delta in relation to groundwater dynamics [J]. *Land Degradation and Development*. 2012, 23: 175-189.
- 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(Z1): 162-170.
- Yu J B, Li Y Z, Han G X, et al. The spatial distribution characteristics of soil salinity in coastal zone of the Yellow River Delta[J]. *Environmental Earth Sciences*. 2014, 72: 589-599.
- 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):154-153.
- 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*, 2023, 31(3): 345-353.
- 张红军, 王强, 许艳, 等. 黄河三角洲盐渍化土壤改良脱盐规律及效果评价[J]. *环境工程*, 2023, 41 (S2): 683-686.
- 秦文芳, 宋慧平, 范远, 程芳琴. 活性焦对晋北盐碱地土壤性质和两种植物生长的影响[J]. *应用生态学报*, 2021, 32(5): 179-1806.
- 王倩姿, 王玉, 孙志梅, 刘佳, 牛劲斌, 薛澄, 马文奇. 腐植酸类物质的施用对盐碱地的改良效果[J]. *生态学杂志*, 2019, 30 (4): 1227-1234.
- 奥伦. 盐碱地不同修复方式土壤微生物群落分布特征及氮循环的驱动机制响应研究[D]. 东北林业大学, 2022.
- 刘月, 杨树青, 张万锋, 娄帅. 磷石膏和碱蓬对盐渍化土壤水盐及细菌群落结构的影响[J]. *环境科学*, 2023, 44(4): 2325-2337.
- 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/OL]. *土壤学报*, 2023, <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1119.p.20231023.1618.004.html>.
- Xia J B, Ren J Y, Zhang S Y, 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, 08(2): 349-350.
- 杨策, 陈环宇, 李劲松, 田宇, 封晓辉, 刘小京, 郭凯. 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*, 2019, 27(10): 1578-1586.
- 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.
- 尹德洁, 张洁, 荆瑞, 董丽. 山东滨海盐渍区植物群落与土壤化学因子的关系[J]. *生态学杂志*, 2018, 29(11): 3521-3529.
- Schmidt R, Mitchell J, Scow K. Cover cropping and no-till increase diversity and symbiotroph: saprotroph ratios of soil fungal communities. *Soil Biology & Biochemistry*, 2019, 129: 99-109.
- 王瑞燕, 孔沈彬, 许璐, 李玉环, 程韦翰, 赵恩来. 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.
- 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/OL]. *水土保持通报*, 1-11[2024-05-20]. <https://doi.org/10.13961/j.cnki.stbctb.20240510.001>.
- 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.
- Liang W J, Ma X L, Wan P, et al. Plant salt-tolerance mechanism: A review[J]. *Biochemical and Biophysical Research Communications*. 2018, 495(1):286-291.
- 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.
- Adolf V I, Jacobsen S E, Shabala, S. Salt tolerance mechanisms in quinoa (*Chenopodium quinoa Willd*) [J]. *Environmental & Experimental Botany*, 2013, 92: 43-54.
- 刘雪, 陈涛, 蒋亚蓉, 仇云云, 张艳, 袁涛, 王亚楠. 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.

马玉蕾, 王德, 刘俊民, 温小虎, 高猛, 邵宏波. 黄河三角洲典型植被与地下水埋深和土壤盐分的关系[J]. 生态学杂志, 2013, 24(9): 2423-2430.

岳小红, 曹靖, 耿杰, 李瑾, 张宗菊, 张琳捷. 盐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.

张衡锋, 杨绮, 韦庆翠, 张焕朝. 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.

吴鹏, 吕剑, 郁继华, 刘娜, 李金武, 金莉, 金宁, 王舒亚. 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.

陈文瑞, 蒋朝, 周齐新, 王云琴, 李春鸣, 郭鹏辉, 刘慧霞. 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.

Qu F Z, Shao H B, Meng L, 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): 12-13.

闫晓宇, 郭文君, 秦都林, 王双磊, 聂军军, 赵娜, 祁杰, 宋宪亮, 毛丽丽, 孙学振. 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.

袁泽斌. 马蔺对混合盐胁迫的响应及盐碱土改良效果的研究[D]. 苏州大学, 2020.

慈华聪, 田晓明, 张楚涵, 王鹏山, 王振宇, 张清. 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.

咸敬甜, 陈小兵, 王上, 张晓龙, 徐刚. 盐渍土磷有效性研究进展与展望[J]. 土壤, 2023, 55(3): 474-486.

刘盛林, 丁效东, 郑东峰, 石宁, 刘国利, 孙泽强. 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, 293.

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.