DOI:10.15928/j.1674-3075.201906080149

6种典型滨海湿地植物对土壤盐分的影响

郭 嘉[1,2],李敬玉[3],徐化凌[4],许 洁[5],张明乾[6],于一雷[1,2],
徐卫刚[1,2],马牧源[1,2],赵娜娜[1,2],李肖夏[1,2],朱耀军[1,2]

(1.中国林业科学研究院湿地研究所,北京 100091;
2.湿地生态功能与恢复北京市重点实验室,北京 100091;
3.北京农学院都市农业研究所,北京 102206;
4.东营市农业科学研究院,山东 东营 257091;
5.山东科达基建有限公司,山东 东营 257000;
6.福建中烟工业有限责任公司技术中心,福建 厦门 361021)

摘要:探究典型滨海湿地植物对盐碱土的改良作用,可为未来盐碱地改良和治理提供理论参考与决策依据。在黄河三角洲湿地,选择盐角草(*Salicornia europaea*)、盐地碱蓬(*Suaeda salsa*)、二色补血草(*Limonium bicolor*)、中亚滨藜(*Atriplex centralasiatica*)、獐毛(*Aeluropus sinensis*)、星星草(*Puccinella tenuiflora*)共6种典型植物,采用野外原位种植方式;在试验中心的田间选择5 m×10 m区域,布置18个相同的试验小区(1 m×1 m),每种植物均撒播3个小区,分别在植物生长苗期(6月初)、初期(7月中旬)、中期(8月中旬)、后期(9月中下旬)采集各小区内土样,测定土壤盐分变化。结果显示,与生长初期相比,6种植物生长后期使土壤全盐、可溶性K^+、Na^+、Ca^{2+}、SO_4^{2-}、Cl^-平均显著降低了22.02%、22.03%、23.59%、19.65%、17.37%、19.05%,pH和Mg^{2+}在中亚滨藜、獐毛、星星草群落显著降低了3.99%、4.58%、4.63%和11.81%、14.54%、17.57%,中亚滨藜、獐毛、星星草对土壤盐分的降低作用较好。不同植物生长期的对比发现,盐角草群落在植物生长早期对土壤盐分的降低效果最好,但中后期以中亚滨藜、獐毛、星星草的降盐作用更为显著。

关键词:湿地植物;黄河三角洲;土壤pH;降盐作用

中图分类号:Q948.11 **文献标志码**:A **文章编号**:1674-3075(2021)03-0038-09

黄河三角洲湿地位于山东省东北部的渤海之滨,是世界上暖温带保存最广阔、最完善、最年轻的湿地生态系统(Yu et al, 2014)。然而,由于成陆前受海水长期浸渍、成陆时间短、地下水位和矿化度较高、年蒸发量远远大于降雨量等原因,黄河三角洲湿地又形成大面积盐碱地。一方面,盐碱地上分布着种类众多的盐生植物,其生长特性、生理机能、耐盐碱机理和程度等不同(Flowers & Colmer, 2008; Zhang & Shi, 2013; Shabala et al, 2014),从而对盐碱土改良效果也不尽相同,因而提供了重要的研究材料;另一方面,盐碱地的形成和扩大使得该地区植被受到严重盐碱胁迫(Yang et al, 2017)。因此,深入研究滨海湿地植物对土壤盐分的吸附作用,可为湿地盐碱化修复提供理论基础和技术支撑。滨海湿地植物在盐土上自然完成其生活史,与盐土协同进化,形成了一系列适应盐生环境的生理机制。根据其对盐分的摄取、贮存、分泌等特点,可分为真盐生植物(包括叶肉质化和茎肉质化两类)、泌盐盐生植物和假盐生植物三大类(Breckle, 1995)。由于真盐生植物和泌盐盐生植物在生长过程中可有效摄取土壤盐分,降低土壤含盐量,具有较显著改良盐碱土的能力,因而被广泛用于土壤盐分改良(Lv et al, 2012)。

盐角草(*Salicornia europaea*)和盐地碱蓬(*Suaeda salsa*)为典型真盐生植物(分别为叶肉质化和茎肉质化),是目前发现最抗盐的盐生植物之一,常作为盐碱地修复的先锋植物,其主要通过摄取土壤盐分,在体内富集达到降低土壤盐分的目的(Zhao et al, 2002;2003; 王锋等, 2017)。已有研究表明,盐角草可以明显降低次生盐渍化棉田的土壤盐分(梁飞等, 2011);盐地碱蓬也可显著降低盐分含量,达到改良盐碱地的效果(林学政等, 2006; 张立宾等, 2007);盐地碱蓬种植后,其根际土壤全

收稿日期:2019-06-10 **修回日期**:2021-02-01

基金项目:中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金(CAFYBB2014MA015)。

作者简介:郭嘉,1980年生,男,博士,副研究员,主要从事湿地生态学研究。E-mail: guojia@caf.ac.cn

盐含量可减少 31.22%(赵春桃和弋良朋,2012);左明等(2014)对 5 种耐盐景观植物研究后发现,盐地碱蓬对土壤的脱盐效果最好,可达 6.32%。二色补血草(*Limonium bicolor*)、中亚滨藜(*Atriplex centralasiatica*)、獐毛(*Aeluropus sinensis*)、星星草(*Puccinella tenuiflora*)均属于泌盐盐生植物,通过吸收土壤盐分,然后分泌到体外以降低土壤盐分含量。刘玉新等(2006)研究表明,滨海盐渍土种植中亚滨藜 2 年后,土壤发生了显著的脱盐过程,脱盐率达 18.5%;周波和许志丹(2005)发现星星草对盐碱土壤具有一定的改良效果;李春艳(1995)也认为星星草可显著降低土壤盐分,且脱盐作用有一定的稳定性和持续性。虽然这些植物均已应用于盐碱土改良,但大多数研究仅关注单个植物对盐碱土的改良作用,多种植物对盐碱土改良的同步比较研究仍鲜有报道。

本研究在中国林业科学研究院黄河三角洲综合试验中心,选择 6 种典型滨海湿地植物(盐角草、盐地碱蓬、二色补血草、中亚滨藜、獐毛和星星草)进行野外原位种植,通过采集不同生长期各植物群落土壤样品,分析土壤盐分变化,探明植物生长对土壤盐分的吸收作用,同步研究其对盐碱土的改良作用,旨在为盐碱土的进一步精确改良提供理论基础和科学依据。

1　材料与方法

1.1　研究区概况

中国林业科学研究院黄河三角洲综合实验中心(筹备)位于山东省东营市垦利县,紧邻黄河三角洲国家级自然保护区(37°59′～38°5′N,118°36′～118°57′E)。该试验中心所属区域气候为暖温带、半湿润、大陆性季风气候。年均日照时数 2 590～2 830 h,年均气温 11.7～12.8℃,年无霜期 206 d,≥10℃的年积温约 4 300℃,年均降水量 530～630 mm,70%降水分布在夏季,年均蒸发量 1 900～2 400 mm(韩广轩等,2011)。

试验中心周边为自然草甸植被,主要以盐生草甸为主。试验中心的田间试验始于 2013 年,试验开始前对试验地土壤进行了采样,分析基础理化指标,结果见表 1。

表 1　试验地土壤基础理化指标

Tab.1　Physical and chemical properties of soil in the experimental plots

指标	pH	全盐/ g·kg^{-1}	有机质/ g·kg^{-1}	全氮/ g·kg^{-1}	全磷/ g·kg^{-1}	全钾/ g·kg^{-1}	速效氮/ mg·kg^{-1}	速效磷/ mg·kg^{-1}	速效钾/ mg·kg^{-1}
测定值	7.54	2.74	19.68	1.26	0.48	18.49	96.46	6.89	109.34

1.2　试验设计

在试验中心的田间选择 5 m×10 m 区域,布置 18 个相同的试验小区(1 m×1 m),按照每行 3 个、每列 6 个布置到该区域内,每个小区间隔 50 cm,各小区均采用高 50 cm 挡板与周边环境分隔开。在春季,分别将盐角草、盐地碱蓬、二色补血草、中亚滨藜、獐毛和星星草种子按照相同播种量随机播撒于 18 个试验小区中,每种植物均撒播 3 个小区。植物出芽后进行间苗,尽量确保各小区植物株行距和密度一致。其余田间措施完全为自然状况,灌溉依靠自然降雨,试验期间气象状况见表 2。

表 2　试验期间气象状况

Tab.2　Meteorological conditions during the experiment

月份	平均气温/ ℃	降水量/ mm	相对湿度/ %	日照时间/ h
6	25.3	129.8	60	248.0
7	27.8	137.2	75	220.6
8	26.9	184.8	76	203.9
9	22.9	18.4	68	220.5

1.3　样品采集与处理

分别在植物生长苗期(6 月初)、初期(7 月中旬)、中期(8 月中旬)、后期(9 月中下旬)对各小区内土样进行采集。在各小区内分别随机布置 3 个采样点(3 次重复),用直径 2 cm 土钻采集 0～30 cm 土样,每个小区内 3 个样点取样后立即混合成为 1 个样品,代表该小区土样,最终每种植物群落取 3 份土样,共计 18 份。

1.4　样品分析与测定

土样采集后带回实验室,在阴凉通风处风干,磨样,过筛,然后进行理化分析。方法如下:土壤 pH 采用电极法(pH 计)测定;土壤全盐采用质量法测定;土壤可溶性 K^+、Na^+、Ca^{2+}、Mg^{2+} 浓度采用原子吸收分光光度法;土壤可溶性 SO_4^{2-} 采用 $BaSO_4$ 比浊法测定;土壤可溶性 Cl^- 采用硝酸银滴定法。

1.5　数据处理

利用 Excel 2013 软件对数据进行均值和方差分析并绘图。利用 SPSS 20.0 软件对数据进行单因素方差(ANOVA)分析比较。

2　结果与分析

2.1　pH值

图1显示了不同植物群落土壤的pH特征，苗期各植物群落土壤pH值基本相同。随植物生长，各群落土壤pH均呈下降趋势，从方差分析结果可以看出，二色补血草、中亚滨藜、獐毛、星星草群落土壤pH均显著降低(表3)。与苗期相比，pH值在二色补血草、中亚滨藜、獐毛、星星草群落显著降低了2.72%、3.99%、4.58%、4.63%，相同生育期各植物群落间土壤pH值未现显著差异，但獐毛和星星草群落土壤的pH降低较大。

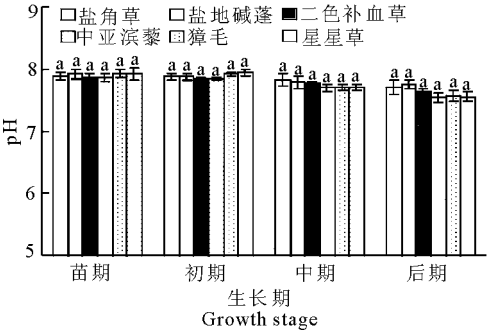


图1　不同植物群落的土壤pH值变化

Fig.1　pH variation of soils with different plants

2.2　全盐

土壤全盐随植物生长也呈现出逐渐降低的趋势(图2)。植物生长初期，盐角草和盐地碱蓬群落土壤全盐含量降幅较大；生长后期，盐角草、盐地碱蓬、二色补血草、中亚滨藜、獐毛、星星草群落土壤全盐均显著降低，分别比苗期降低了13.99%、16.78%、21.52%、26.15%、27.17%、26.50%，总的平均降低效应达22.02%(表4)。生长后期，獐毛群落土壤全盐含量最低，比盐角草群落降低14%($P<0.05$)。

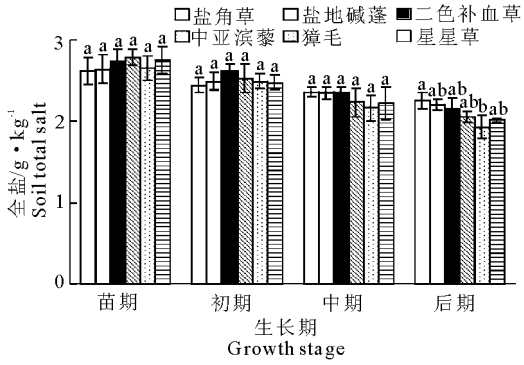


图2　不同植物群落的土壤全盐变化

Fig.2　Total salt variation of soils with different plants

表3　各植物群落不同生长期的土壤pH方差分析

Tab.3　Variance analysis of soil pH for different plant communities during different growth stages

生长期	盐角草	盐地碱蓬	二色补血草	中亚滨藜	獐毛	星星草
苗期	7.89±0.06^{a}	7.92±0.07^{a}	7.86±0.07^{a}	7.86±0.07^{a}	7.93±0.07^{a}	7.92±0.10^{ab}
初期	7.87±0.05^{a}	7.87±0.06^{a}	7.83±0.03^{a}	7.83±0.02^{a}	7.92±0.04^{a}	7.94±0.05^{a}
中期	7.82±0.10^{a}	7.79±0.10^{a}	7.76±0.04^{ab}	7.70±0.06^{b}	7.70±0.05^{b}	7.71±0.04^{bc}
后期	7.71±0.12^{a}	7.75±0.07^{a}	7.64±0.05^{b}	7.54±0.07^{c}	7.56±0.09^{b}	7.55±0.07^{c}

注：不同字母表示在$P<0.05$水平显著相关。

Note: Different letters indicate significant difference ($P<0.05$).

表4　各植物群落不同生长期的土壤全盐方差分析

Tab.4　Variance analysis of total soil salt for different plant communities during different growth stages

生长期	盐角草	盐地碱蓬	二色补血草	中亚滨藜	獐毛	星星草
苗期	2.62±0.17^{a}	2.64±0.17^{a}	2.74±0.14^{a}	2.78±0.10^{a}	2.65±0.15^{a}	2.75±0.16^{a}
初期	2.44±0.10^{ab}	2.49±0.10^{ab}	2.63±0.08^{ab}	2.52±0.17^{ab}	2.49±0.09^{ab}	2.47±0.09^{ab}
中期	2.36±0.06^{ab}	2.35±0.07^{ab}	2.35±0.07^{bc}	2.23±0.18^{bc}	2.17±0.16^{bc}	2.23±0.20^{bc}
后期	2.25±0.09^{b}	2.20±0.07^{b}	2.15±0.14^{c}	2.05±0.06^{c}	1.93±0.14^{c}	2.02±0.03^{c}

注：不同字母表示在$P<0.05$水平显著相关。

Note: Different letters indicate significant difference $P<0.05$.

2.3　钾(K^+)

图3显示了土壤钾(K^+)含量随植物生长的变化规律。K^+含量呈现出逐渐降低的趋势，到植物生长后期，除二色补血草群落外，其他植物群落的土壤K^+含量均显著降低，总的平均降低效应达22.03%(表5)。獐毛和星星草群落的土壤K^+含量中期显著低于盐角草和碱蓬群落($P<0.05$)，后期显著低于盐角草群落($P<0.05$)。

2.4　钠(Na^+)

土壤钠(Na^+)含量随植物生长而呈降低趋势(图4)。植物生长初期，盐角草和盐地碱蓬群落土壤Na^+含量降低幅度较大；生长后期，各植物群落

土壤 Na^+ 含量比初期分别降低 25.94%、25.70%、23.18%、20.67%、21.68%、24.35%，平均值为 23.59%，均达显著水平(表 6)。从不同生长期看，各植物群落间并未出现显著差异。

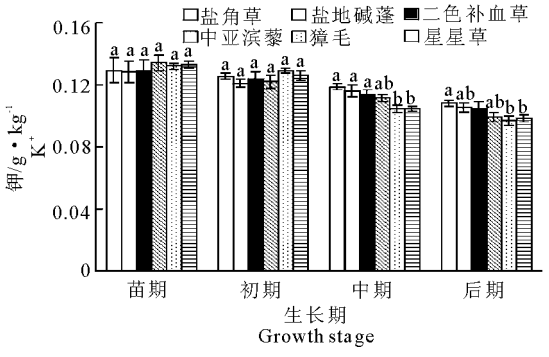


图 3　不同植物群落的土壤钾含量变化

Fig.3　Variation of soil K^+ for different plant communities during different growth stages

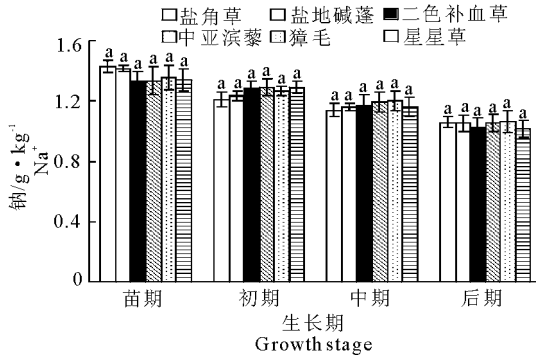


图 4　不同植物群落的土壤钠含量变化

Fig.4　Variation of soil Na^+ for different plant communities during different growth stages

表 5　各植物群落不同生长期的土壤钾含量方差分析

Tab.5　Variance analysis of soil K^+ for different plant communities during different growth stages

生长期	盐角草	盐地碱蓬	二色补血草	中亚滨藜	獐毛	星星草
苗期	0.13±0.01^a	0.13±0.01^a	0.13±0.01^a	0.13±0.01^a	0.13±0.00^a	0.13±0.00^a
初期	0.13±0.00^a	0.12±0.00^a	0.12±0.01^a	0.12±0.00^b	0.13±0.00^a	0.13±0.00^a
中期	0.12±0.00^{ab}	0.12±0.00^{ab}	0.11±0.00^a	0.11±0.00^{bc}	0.10±0.00^b	0.10±0.00^b
后期	0.11±0.00^b	0.11±0.00^b	0.10±0.00^a	0.10±0.00^c	0.10±0.00^b	0.10±0.00^b

注：不同字母表示在 $P<0.05$ 水平显著相关。

Note: Different letters indicate significant difference $P<0.05$.

表 6　各植物群落不同生长期的土壤钠含量方差分析

Tab.6　Variance analysis of soil Na^+ for different plant communities during different growth stages

生长期	盐角草	盐地碱蓬	二色补血草	中亚滨藜	獐毛	星星草
苗期	1.43±0.09^a	1.42±0.03^a	1.33±0.06^a	1.33±0.09^a	1.36±0.08^a	1.34±0.07^a
初期	1.21±0.08^b	1.24±0.05^b	1.28±0.07^a	1.29±0.06^a	1.27±0.06^a	1.29±0.05^a
中期	1.14±0.08^{bc}	1.16±0.04^{bc}	1.17±0.08^{ab}	1.19±0.10^{ab}	1.20±0.08^{ab}	1.16±0.07^{ab}
后期	1.06±0.06^c	1.05±0.05^c	1.03±0.05^b	1.06±0.10^b	1.06±0.08^b	1.01±0.07^b

注：不同字母表示在 $P<0.05$ 水平显著相关。

Note: Different letters indicate significant difference $P<0.05$.

2.5　钙(Ca^{2+})

随植物生长，各植物群落土壤钙(Ca^{2+})含量逐月降低(图 5)。与苗期相比(表 7)，后期盐角草、碱蓬、二色补血草、中亚滨藜、獐毛、星星草群落土壤 Ca^{2+} 含量分别降低了 18.59%、16.17%、21.01%、20.42%、21.75%、19.94%，平均降低了 19.65%，均达显著水平($P<0.05$)。各生育时期，不同植物群落土壤 Ca^{2+} 含量无显著差异。

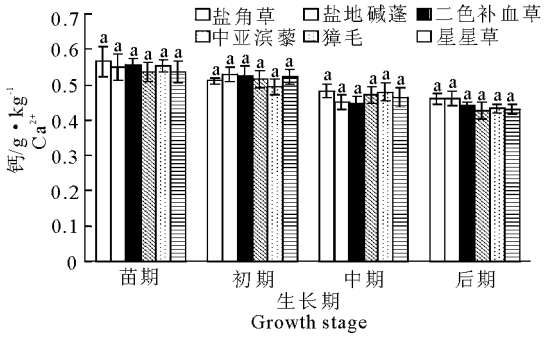


图 5　不同植物群落的土壤钙含量变化

Fig.5　Variation of soil Ca^{2+} for different plant communities during different growth stages

2.6　镁(Mg^{2+})

各植物群落土壤镁(Mg^{2+})含量随植物生长也呈降低趋势(图 6)。至植物生长后期，中亚滨藜、獐毛、星星草群落较苗期显著降低了 11.81%、14.54%、17.57%(表 8)。对于植物不同生育时期，后期獐毛群落土壤 Mg^{2+} 含量比碱蓬群落显著降低 8.2%($P<0.05$)，星星草群落比盐角草、碱蓬、二色补血草群落显著降低了 9.5%、11.69%、10.55%($P<0.05$)。

表7　各植物群落不同生长期的土壤钙含量方差分析

Tab.7　Variance analysis of soil Ca^{2+} for different plant communities during different growth stages

生长期	盐角草	盐地碱蓬	二色补血草	中亚滨藜	獐毛	星星草
苗期	0.57±0.04^{a}	0.55±0.04^{a}	0.56±0.02^{a}	0.54±0.03^{a}	0.55±0.02^{a}	0.54±0.03^{a}
初期	0.51±0.01^{ab}	0.53±0.02^{ab}	0.52±0.03^{a}	0.52±0.02^{a}	0.49±0.02^{ab}	0.52±0.02^{a}
中期	0.46±0.02^{b}	0.45±0.02^{b}	0.45±0.02^{b}	0.47±0.02^{ab}	0.48±0.03^{b}	0.46±0.03^{ab}
后期	0.46±0.02^{b}	0.46±0.02^{b}	0.44±0.01^{b}	0.43±0.02^{b}	0.43±0.01^{b}	0.43±0.01^{b}

注：不同字母表示在 $P<0.05$ 水平显著相关。

Note: Different letters indicate significant difference $P<0.05$.

2.7　硫酸盐(SO_4^{2-})

土壤可溶性硫酸盐(SO_4^{2-})含量随植物生长逐渐降低(图7)。初期，盐角草群落($P<0.05$)和盐地碱蓬群落土壤 SO_4^{2-} 含量降低幅度较大；后期，各植物群落土壤 SO_4^{2-} 含量均较苗期显著降低(表9)，分别降低了 18.73%、15.89%、15.41%、22.50%、13.52%、18.14%，平均为 17.37%($P<0.05$)。不同生长期植物群落之间并无显著差异。

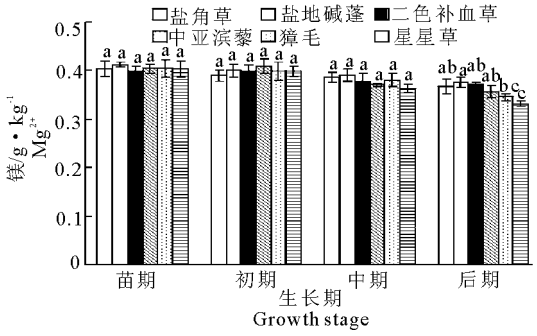


图6　不同植物群落的土壤镁含量变化

Fig.6　Variation of soil Mg^{2+} for different plant communities during different growth stages

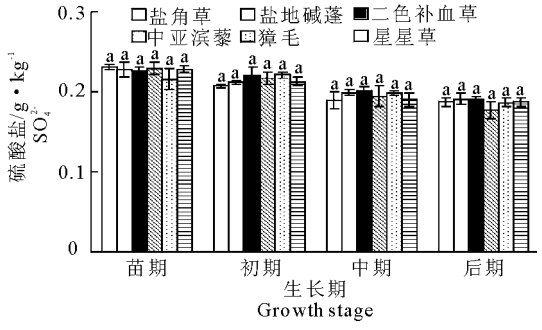


图7　不同植物群落的土壤可溶性硫酸盐含量变化

Fig.7　Variation of soil SO_4^{2-} for different plant communities during different growth stages

表8　各植物群落不同生长期的土壤镁含量方差分析

Tab.8　Variance analysis of soil Mg^{2+} for different plant communities during different growth stages

生长期	盐角草	盐地碱蓬	二色补血草	中亚滨藜	獐毛	星星草
苗期	0.40±0.02^{a}	0.41±0.01^{a}	0.40±0.01^{a}	0.40±0.01^{ab}	0.40±0.02^{a}	0.40±0.02^{a}
初期	0.39±0.01^{a}	0.40±0.01^{a}	0.40±0.01^{a}	0.41±0.01^{a}	0.40±0.02^{a}	0.40±0.01^{a}
中期	0.39±0.01^{a}	0.39±0.01^{a}	0.38±0.02^{a}	0.37±0.00^{bc}	0.38±0.01^{ab}	0.36±0.01^{b}
后期	0.37±0.01^{a}	0.38±0.01^{a}	0.37±0.00^{a}	0.36±0.01^{c}	0.35±0.01^{b}	0.33±0.00^{b}

注：不同字母表示在 $P<0.05$ 水平显著相关。

Note: Different letters indicate significant difference at the level of $P<0.05$.

表9　各植物群落不同生长期的土壤可溶性硫酸盐含量方差分析

Tab.9　Variance analysis of soil SO_4^{2-} for different plant communities during different growth stages

生长期	盐角草	盐地碱蓬	二色补血草	中亚滨藜	獐毛	星星草
苗期	0.23±0.00^{a}	0.23±0.01^{a}	0.23±0.00^{a}	0.23±0.01^{a}	0.22±0.01^{a}	0.23±0.01^{a}
初期	0.21±0.00^{b}	0.21±0.00^{ab}	0.22±0.01^{ab}	0.22±0.01^{ab}	0.22±0.00^{a}	0.21±0.01^{a}
中期	0.19±0.01^{b}	0.20±0.00^{b}	0.20±0.01^{bc}	0.19±0.01^{bc}	0.20±0.00^{ab}	0.19±0.01^{b}
后期	0.19±0.01^{b}	0.19±0.01^{b}	0.19±0.00^{c}	0.18±0.01^{c}	0.19±0.01^{b}	0.19±0.01^{b}

注：不同字母表示在 $P<0.05$ 水平显著相关。

Note: Different letters indicate significant difference $P<0.05$.

2.8　氯(Cl^-)

土壤可溶性氯(Cl^-)含量随植物生长的变化如图8所示。植物生长初期，盐角草群落和盐地碱蓬群落土壤 Cl^- 含量降低幅度较大(表10)；后期，盐角草、盐地碱蓬、二色补血草、中亚滨藜、獐毛、星星草群落土壤 Cl^- 含量分别降低了 19.13%、20.83%、17.92%、17.42%、22.13%、16.85%，平均降低了 19.05%，方差分析表明，均达显著水平($P<0.05$)；同样，相同生长期，各植物群落间的土壤氯离子含量也无显著差异。

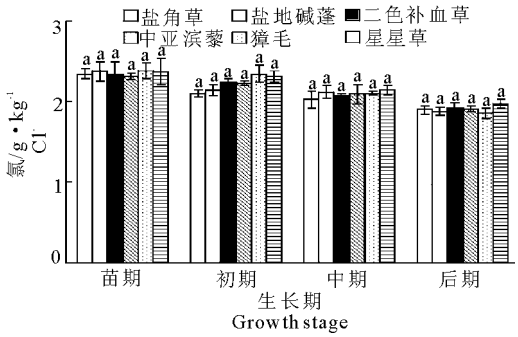


图 8　不同植物群落的土壤可溶性氯含量变化

Fig.8　Variation of soil Cl^- for different plant communities during different growth stages

3　讨论

3.1　滨海盐生植物对土壤盐分的作用机制

本研究结果表明,6 种滨海湿地盐生植物均使得土壤 pH、全盐含量、可溶性 K^+、Na^+、Ca^{2+}、Mg^{2+}、SO_4^{2-}、Cl^-含量降低,可见这 6 种植物均可有效降低土壤盐分,改良黄河三角洲湿地的盐碱状况。盐生植物对滨海盐地改良主要通过以下 3 种途径。

3.1.1　增加了地表盖度,抑制了土壤水分蒸发　盐生植物生长可显著增加地表覆盖度,从而调节小气候,减少地表水分蒸发,抑制深层土壤盐分上升。盐碱土形成的原因之一是蒸发量大于降水量,从而导致深层土壤盐分随水分蒸发向表层的聚集,提升了土壤盐分含量。然而,种植盐生植物后,植物的旺盛生长增加了地表植被盖度,显著减少了土壤水分蒸发,以植物蒸腾取代土壤水分蒸发,有效减缓了盐分随水向表层的聚集和运移,避免蒸发造成的地表积盐,从而降低土壤盐分含量。在减少土壤下层盐分向表层聚集的同时,表层原有盐分也经过雨水淋溶和植物吸收而逐渐减少,从而进一步减少了土壤盐分。有研究发现,中亚滨藜植株生长对地表盖度的增加,抑制了因土壤水分蒸发引起的地表积盐,加之对盐分的吸收,最终导致了土壤盐分的降低(刘玉新等,2006;王玉珍等,2006);本研究中,随着植物生长,地表覆盖度增加,同样有效改善了土壤盐分状况。

表 10　各植物群落不同生长期的土壤可溶性氯含量方差分析

Tab.10　Variance analysis of soil Cl^- for different plant communities during different growth stages

生长期	盐角草	盐地碱蓬	二色补血草	中亚滨藜	獐毛	星星草
苗期	2.34 ± 0.09^{a}	2.37 ± 0.12^{a}	2.33 ± 0.17^{a}	2.31 ± 0.05^{a}	2.38 ± 0.10^{a}	2.37 ± 0.16^{a}
初期	2.10 ± 0.11^{b}	2.14 ± 0.07^{ab}	2.23 ± 0.10^{a}	2.22 ± 0.13^{a}	2.34 ± 0.15^{ab}	2.32 ± 0.07^{a}
中期	2.02 ± 0.04^{b}	2.11 ± 0.14^{ab}	2.07 ± 0.09^{ab}	2.10 ± 0.09^{ab}	2.10 ± 0.08^{bc}	2.14 ± 0.04^{ab}
后期	1.90 ± 0.05^{b}	1.88 ± 0.14^{b}	1.91 ± 0.11^{b}	1.91 ± 0.08^{b}	1.85 ± 0.15^{c}	1.87 ± 0.04^{b}

注:不同字母表示在 $P<0.05$ 水平显著相关。

Note: Different letters indicate significant difference $P<0.05$.

3.1.2　改变了土壤结构,提升了相关酶活性　盐生植物根系可有效向土壤中输出根系分泌物,增强土壤微生物活性,促进土壤有机质形成,根系残体还可直接参与土壤有机质的形成,从而改变土壤毛管孔隙和团粒结构,阻止了土壤底层盐分向上迁移。同期的研究结果表明,这 6 种盐生植物生长后期显著提升了土壤碳氮代谢的相关酶活性,使脲酶、蔗糖酶、磷酸酶、纤维素酶、蛋白酶活性分别提高了 16.0%、32.9%、18.0%、31.1%、46.5%(郭嘉等,2020)。

3.1.3　通过生物移盐作用,降低了土壤盐分　随植物生长,不断吸收土壤盐分,积累到体内或分泌到体表,从而降低土壤盐分(Baldwin et al, 2006;Wang et al, 2009)。盐角草和盐地碱蓬为真盐生植物,二色补血草、中亚滨藜、獐毛、星星草均属于泌盐盐生植物,均可从土壤中吸收大量盐分,积累到体内或分泌到体表,从而实现盐分的转移,最终有效降低土壤盐分,改良土壤。本研究表明,随植物生长,土壤全盐含量逐渐降低(图 2)。李从娟等(2015)报道,种植盐地碱蓬后,土壤 pH 有所降低;董积忠等(2014)对盐角草和盐地碱蓬的同步对比研究表明,两种植物均显著降低土壤含盐量;二者的研究结果均表明,盐地碱蓬的生长可以优先降低土壤含盐量。对于泌盐盐生植物,本次同一区域的研究结果表明,种植中亚滨藜 4 年后,土壤含盐量比种植前下降了 72.1%(刘玉新等,2006);种植星星草 2 年后,土壤含盐量下降了 22.9%(张立宾等,2006)。在土壤各盐分离子方面,雍艳华等(2016)研究表明,盐角草对土壤中 K^+、Na^+、Ca^{2+}、Mg^{2+}、SO_4^{2-}、Cl^-具有显著的吸收能力;赵振勇等(2013)研究得出盐地碱蓬对土壤 Na^+、Cl^-、SO_4^{2-} 具有较强的摄取能力,尤其对 Cl^-表现出更强的选择吸收倾向;潘书轩等(2014)认为在盐渍土上种植盐地碱蓬后,Na^+和 Cl^-质量分数明显降低;范亚文等(2001)研究表明,种植星星草后,盐碱土壤中的全钠、全镁和全钙含量均有不同程度的

降低。由于滨海盐地底层盐分来源充足，植物生物量有限，可带走的盐分也有限。因此，3种途径中，起主要作用的为前两种，即植物生长可显著阻止盐分向地表迁移。

3.2 不同类型植物的土壤移盐效果存在差异

3.2.1 初期植物的降盐作用主要依靠根系吸收　本研究显示，总的来看，植物生长初期，真盐生植物（盐角草和盐地碱蓬）群落的土壤全盐及各离子含量降低幅度较大。植物生长中期，泌盐盐生植物（二色补血草、中亚滨藜、獐毛、星星草）群落的土壤全盐及各离子含量降低幅度较大，这可能主要是由于植物生长初期，各种植物地上部对土壤覆盖度较小，土壤盐分的降低主要靠植物的吸收作用，真盐生植物对盐分的吸收强于泌盐盐生植物。赵可夫等（2002）研究表明，在去除土壤 Na^+ 含量方面，盐地碱蓬高于中亚滨藜。植物生长后期，二色补血草、中亚滨藜、獐毛、星星草对地表的覆盖度远远高于盐角草和盐地碱蓬，此时，阻止地表水分蒸发成为土壤盐分降低的主要途径。王玉珍等（2006）研究认为中亚滨藜成熟株侧枝众多，最多可达22个，冠幅可达2 m左右，几乎能把土壤完全覆盖住；周波和许志丹（2005）研究发现星星草分蘖能力强，年均分蘖枝25个左右，多者可达33～44个，几乎完全覆盖地表土壤。

3.2.2 盐角草的盐分吸收作用强于盐地碱蓬　本研究结果显示，真盐生植物中，盐角草对土壤盐分的改良作用强于盐地碱蓬，这可能是由于两者对土壤的覆盖类似，因覆盖导致的盐度降低也类似，因此主要取决于对土壤盐分的吸收，而盐角草对土壤盐分的吸收作用强于盐地碱蓬，表现出盐角草的改良作用强于盐地碱蓬。有研究显示，盐角草对土壤盐分、Na^+、Cl^-的吸收能力强于盐地碱蓬，且其体内的盐分含量在生长中期达到峰值（郭洋等，2015）。本次研究表明，盐角草和盐地碱蓬对盐离子的降低作用显示出一定差异性，对土壤 Na^+、Cl^-的降低作用明显高于 Ca^{2+}、Mg^{2+}、K^+，这可能是由于其对盐离子的吸收差异所致；与张莹莹等（2012）的研究结果一致。

3.2.3 植物的移盐效果与其生长特征和形态有关　本研究结果还显示，泌盐盐生植物中，獐毛和星星草对土壤盐分的降低作用高于二色补血草和中亚滨藜，这可能主要与獐毛和星星草的生长特征及形态有关，两者分蘖能力均较强（周波和许志丹，2005），从而可以迅速对地表形成很高的覆盖度，阻止了地表水分蒸发，降低了土壤盐度。有研究表明，由于盐地碱蓬生物量和冠幅均较盐角草更大，产生的遮荫效应更明显，从而表现出盐地碱蓬在抑制盐分表聚上优于盐角草（祁通等，2011；董积忠等，2014）。更为重要的是，相比于其他植物，两者生长均贴紧地面，更能有效地进一步阻止地表水分蒸发，从而取得更加显著的降盐效果。成熟期生物量表现为：星星草＜獐毛＜盐角草＜二色补血草＜盐地碱蓬＜中亚滨藜，可见从生物移盐效果来看，獐毛和星星草最小，这也从另一方面进一步说明，植物对土壤盐分的降低主要取决于其生长特征和形态；此外，根据先前的研究观察，獐毛和星星草根系更为密集，从而有利于提高微生物活性，促进土壤有机质和团聚体的形成，改变土壤孔隙状态和团粒结构，有效阻止盐分的向上迁移，达到降低土壤盐分的效果。

4 结论

（1）盐角草、盐地碱蓬、二色补血草、中亚滨藜、獐毛和星星草6种盐生植物均可有效改良滨海湿地土壤盐度状况，中亚滨藜、獐毛和星星草对土壤盐分的降低作用高于其他植物。

（2）6种植物表现出不同的改良效果，盐角草和盐地碱蓬初期表现出较好的降盐作用，中亚滨藜、獐毛和星星草后期的降盐效果更为显著。

参考文献

董积忠，尹传华，王海孝，等，2014. 两种盐生植物生物移盐能力及土壤改良效果比较[J]. 新疆农业科学，51(4)：124－128.

范亚文，孙国荣，阎秀峰，等，2001. 种植星星草对盐碱草地土壤养分状况的改良作用[J]. 植物研究，21(4)：600－604.

郭嘉，陈纪香，于一雷，等，2020. 黄河三角洲湿地典型盐生植物群落土壤酶活性研究[J]. 湿地科学与管理，16(1)：55－59.

郭洋，陈波浪，盛建东，等，2015. 几种一年生盐生植物的吸盐能力[J]. 植物营养与肥料学报，21(1)：269－276.

韩广轩，栗云召，于君宝，等，2011. 黄河改道以来黄河三角洲演变过程及其驱动机制[J]. 应用生态学报，22(2)：467－472.

李春艳，1995. 种植星星草改良盐碱土效果分析[J]. 哈尔滨师范大学自然科学学报，11(4)：100－104.

李从娟，孙永强，范敬龙，等，2015. 盐地碱蓬在高盐碱土环境中的生态学意义[J]. 干旱区研究，32(6)：1160－1166.

梁飞，田长彦，尹传华，等，2011. 盐角草改良新疆盐渍化棉田效果初报[J]. 棉花学报，38(10)：30－32.

林学政，陈靠山，何培青，等，2006. 种植盐地碱蓬改良滨海盐渍土对土壤微生物区系的影响[J]. 生态学报，26(3)：801－807.

刘玉新，张立宾，崔宏伟，2006. 中亚滨藜的耐盐性及其对滨海盐渍土的改良效果研究[J]. 山东农业大学学报(自然科学版),37(2)：167－171.

潘书轩，孙良斌，张少民，等，2014. 盐地碱蓬在北疆的生育规律及其对盐渍土改良效果[J]. 西北农业学报，23(12)：201－206.

祁通，孙九胜，刘易，等，2011. 滴灌条件下不同盐生植物对盐渍化土壤的脱盐效果研究[J]. 新疆农业科学，48(12)：2309－2314.

王玉珍，刘永信，魏春兰，等，2006. 6 种盐生植物对盐碱地土壤改良情况的研究[J]. 安徽农业科学，34(5)：951－952，957.

王锋，黄俊华，杨文英，等，2017. 艾丁湖盐角草种群动态生命表及其对温度变化的响应[J]. 草业科学，34(5)：1064－1071.

雍艳华，张霞，王绍明，等，2016. 新疆典型盐生植物营养器官盐分积累与生态化学计量特征[J]. 植物生态学报，40(12)：1267－1275.

张立宾，刘玉新，张明兴，2006. 星星草的耐盐能力及其对滨海盐渍土的改良效果研究[J]. 山东农业科学,(4):40－42.

张立宾，徐化凌，赵庚星，2007. 碱蓬的耐盐能力及其对滨海盐渍土的改良效果[J]. 土壤，39(2)：310－313.

张莹莹，佘慧，刘维仲，2012. 对运城盐湖地区盐角草和盐地碱蓬耐盐性的分析[J]. 山西师范大学学报(自然科学版),26(4)：66－70.

赵可夫，范海，江行玉，等,2002. 盐生植物在盐渍土壤改良中的作用[J]. 应用与环境生物学报，8(1):1－5.

赵春桃,弋良朋，2012. 天津滨海主要盐生植物根际土壤特征研究[J]. 天津农业科学，18(4)：53－57.

赵振勇，张科，王雷，等，2013. 盐生植物对重盐渍土脱盐效果[J]. 中国沙漠，33(5)：1420－1425.

周波，许志丹，2005. 星星草对盐碱草地的适应性及改良作用的研究现状[J]. 吉林师范大学学报(自然科学版),(4):30－31.

左明，蒋万钊，刘志国，等，2014. 黄河三角洲盐渍土中耐盐植物生长及脱盐效果研究[J]. 山东林业科技，(1)：18－20.

Baldwin D S，Rees G N，Mitchell A M，2006. The short-term effects of salinization on anaerobic nutrient cycling and microbial community structure in sediment from freshwater wetland[J]. Wetlands，26：455－464.

Breckle S W，1995. Biology of salt tolerant plants[M]. Michigan USA：Book Crafters：199－213.

Flowers T J，Colmer T D，2008. Salinity tolerance in halophytes[J]. New Phytologist，179(4)：945－963.

Lv S L，Nie L L，Fan P X，et al，2012. Sodium plays a more important role than potassium and chloride in growth of Salicornia europaea[J]. Acta Physiologiae Plantarum，34(2)：503－513.

Shabala S，Bose J，Hedrich R，2014. Salt bladders：Do they matter[J]. Trends in Plant Science，19：687－691.

Wang C M，Zhang J L，Liu X S，2009. Puccinellia tenuiflora maintains a low Na^+ level under salinity by limiting unidirectional Na^+ influx resulting in a high selectivity for K^+ over Na^+[J]. Plant Cell & Environment，32：486－496.

Yang W，Li X X，Sun T，et al，2017. Habitat heterogeneity affects the efficacy of ecological restoration by freshwater releases in a recovering freshwater coastal wetland in China′s Yellow River Delta[J]. Ecological Engineering，104：1－8.

Yu J，Li Y，HAN G，et al，2014. The spatial distribution characteristic of soil salinity in coastal zone of the Yellow River Delta[J]. Environmental Earth Sciences，72(2)：589－596.

Zhang J L，Shi H Z，2013. Physiological and molecular mechanisms of plant salt tolerance[J]. Photosynthesis Research，115：1－22.

Zhao K F，Fan H，Jiang X Y，et al，2002. Critical day-length and photoinductive cycles for the induction off lowering in halophyte Suaeda salsa[J]. Plant Sciences，162(1)：27－31.

Zhao K F，Fan H，Zhou S，et al，2003. Study on the salt and drought tolerance of Suaeda salsa and Kalanchoe daigremontiana under isoosmotic salt and water stress[J]. Plant Sciences，165(4)：837－844.

（责任编辑　万月华）

Effects of Six Typical Coastal Wetland Plants on Soil Salinity

GUO Jia[1,2], LI Jing-yu[3], XU Hua-ling[4], XU jie[5], ZHANG Ming-qian[6], YU Yi-lei[1,2], XU Wei-gang[1,2], MA Mu-yuan[1,2], ZHAO Na-na[1,2], LI Xiao-xia[1,2], ZHU Yao-jun[1,2]

(1. Institute of Wetland Research, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, P.R.China;
2. Beijing Key Laboratory of Wetland Services and Restoration, Beijing 100091, P.R.China;
3. Institute of Urban Agriculture, Beijing Agricultural University, Beijing 102206, P.R.China;
4. Dongying academy of agricultural sciences, Dongying 257091, P.R.China;
5. Shandong Keda Infrastructure Co., Ltd., Dongying 257000, P.R.China;
6. Technology Center of China Tobacco Fujian Industrial Co., Ltd., Xiamen 361021, P.R.China)

Abstract: Coastal wetland plants complete their life cycle in saline soil and have evolved mechanisms that adapt the plants to a saline environment. The ability of coastal wetland plants to reduce soil salinity and alkalinity was explored to provide a theoretical reference and basis for decision-making in future efforts to improve and manage these soils. The Yellow River Delta wetland was selected as a case study and in-situ experiments using six typical coastal wetland plants (*Salicornia europaea*, *Suaeda salsa*, *Limonium bicolor*, *Atriplex centralasiatica*, *Aeluropus sinensis*, *Puccinella tenuiflora*) were carried out to investigate the effect of plant growth on soil salinity and alkalinity. At our experimental center, 18 experimental plots (1 m×1 m) were arranged within a rectangular area (5 m×10 m). Each plant was sown in three randomly selected plots and soil samples from each plot were collected at the seedling stage (early June), early stage (mid-July), middle stage (mid-August) and late stage (mid to late September) of plant growth. Soil physicochemical properties were analyzed and included pH, total salt and dissolved K^+, Na^+, Ca^{2+}, Mg^{2+}, SO_4^{2-} and Cl^-. Compared with the early growth stage, the total salt and dissolved K^+, Na^+, Ca^{2+}, SO_4^{2-} and Cl^- content of soil samples decreased significantly after the plants had reached their late growth stage. The respective decreases, averaged across the six plants, were 22.02%, 22.03%, 23.59%, 19.65%, 17.37% and 19.05%. In soil planted with *A. centralasiatica*, *A. sinensis* and *P. tenuiflora*, the pH and Mg^{2+} were also significantly reduced, with respective pH reductions of 3.99%, 4.58% and 4.63% and Mg^{2+} reductions of 11.81%, 14.54% and 17.57%. The experimental soils were most improved by *A. centralasiatica*, *A. sinensis* and *P. tenuiflora*. The beneficial effects of the different plants varied with growth stage: *S. europaea* best reduced soil salinity in the early growth stage, but salinity reduction with *A. centralasiatica*, *A. sinensis* and *P. tenuiflora* was more pronounced during the middle and late stages.

Key words: wetland plant; Yellow River Delta; soil pH; desalination