

DOI: 10.20103/j.stxb.202410172533

闫凌骁, 杨红军, 郭瑾昊, 崔倩, 宋爱云, 孙景宽, 马金昭. 黄河三角洲柽柳防护林下伴生草本植物对盐渍土质量的影响. 生态学报, 2025, 45(12):

Yan L X, Yang H J, Guo J H, Cui Q, Song A Y, Sun J K, Ma J Z. Effects of accompanying herbaceous plants on the soil quality of coastal saline soil under *Tamarisk chinensis* shelter forest in the Yellow River Delta. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(12):

黄河三角洲柽柳防护林下伴生草本植物对盐渍土质量的影响

闫凌骁, 杨红军*, 郭瑾昊, 崔倩, 宋爱云, 孙景宽, 马金昭

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

摘要: 选取黄河三角洲滨海滩涂大致相同密度柽柳林下伴生草本植物群落土壤为对象, 测定分析了其 pH、电导率、盐分、养分含量、草本植物群落 α 、 β 多样性指数等指标, 采用模糊隶属函数法定量评价了不同草本植物群落对盐渍土的改良效果, 解析了不同因子在滨海盐渍土改良中的作用和贡献。结果表明: 黄河三角洲滨海柽柳防护林下引入不同草本植物群落对降低土壤盐分、缓解土壤碱化、提升土壤养分含量均有一定的帮助, 并且不同草本植物群落对盐渍土的改良效果存在明显差异 ($P < 0.05$)。以芦苇为优势种的草本植物群落在抑盐培肥、防止碱化等方面效果最佳。植物群落多样性指数分析表明物种丰富度、多样性指数对土壤改良效果有较大影响。土壤化学性质分析表明不同草本植物群落对盐渍土改良呈现出不同的生态功能: 在降低土壤盐分、提升有效氮方面, 以灰绿藜作为优势种的草本植物群落效果最好; 在提升土壤全磷养分方面, 芦苇群落效果最好; 在提升土壤全钾、有效磷、速效钾方面, 以盐地碱蓬为优势种的草本植物群落效果最好。在黄河三角洲海岸带柽柳防护林构建过程中, 以芦苇作为优势种的草本植物群落 (搭配碱蓬、灰绿藜、鹅绒藤、盐地碱蓬、狗尾草) 建议被优先选取。

关键词: 黄河三角洲; 耐阴草本植物; 柽柳防护林; 土壤质量; 植物群落多样性指数

Effects of accompanying herbaceous plants on the soil quality of coastal saline soil under *Tamarisk chinensis* shelter forest in the Yellow River Delta

YAN Lingxiao, YANG Hongjun*, GUO Jinhao, CUI Qian, SONG Aiyun, SUN Jingkuan, MA Jinzhao

Shandong University of Aeronautics, Shandong Provincial Key Laboratory of Eco-Environmental Science for the Yellow River Delta, Binzhou 256603, China

Abstract: The soil of herbaceous plant communities associated with *Tamarix chinensis* forests of similar density in the coastal tidal flat of the Yellow River Delta was selected as the study object. The study involved the measurement and analysis of various parameters, including pH, electric conductivity, salinity, nutrient content, as well as α - and β -diversity indices of herbaceous plant communities. To quantitatively assess the effectiveness of different herbaceous plant communities in saline soils, the fuzzy membership function method was utilized. This approach also facilitated the analysis of the roles and contributions of various factors in the improvement of coastal saline-alkali soils. The findings revealed that the establishment of diverse herbaceous plant communities beneath the coastal *T. chinensis* shelter forests in the Yellow River Delta significantly contributed to the reduction of soil salinity, mitigation of soil alkalization, and enhancement of soil nutrient content. Moreover, the analysis reveals that there are statistically significant differences in the improvement effects exerted by various herbaceous plant communities on saline soils, as indicated by a P-value of less than 0.05. These results underscore the importance of selecting appropriate herbaceous plant species for the effective rehabilitation of saline-alkali

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目 (21507006); 山东省自然科学基金项目 (ZR2020MD005); 山东省高等学校“青创人才引育计划”项目

收稿日期: 2024-10-17; **网络出版日期:** 2025-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: sdhkyanghongjun@126.com

soils in coastal regions. The herbaceous plant community dominated by *Phragmites australis* performs best in suppressing salt, fertilizing, and preventing alkalization. The examination of diversity indices within plant communities indicates that the richness of species and the diversity indices exert a more significant influence on the enhancement of soil quality. The investigation into the chemical properties of the soil further illustrates that various herbaceous plant communities possess distinct ecological roles in the amelioration of saline soils. Specifically, the community dominated by *Oxybasis glauca* shows the most favorable outcomes in terms of diminishing soil salinity and augmenting the levels of available nitrogen. When it comes to the enrichment of total phosphorus in the soil, the community of *P. australis* proves to be the most efficacious. Moreover, for the improvement of total potassium, available phosphorus, and available potassium in the soil, the community led by *Suaeda salsa* achieves the most superior results. In the context of establishing *T. chinensis* shelter forests along the coastal regions of the Yellow River Delta, it is advisable to prioritize the selection of the herbaceous plant community dominated by *P. australis*, which should be integrated with other species such as *Suaeda glauca*, *O. glauca*, *Cynanchum chinense*, *S. salsa*, and *Setaria viridis* to optimize the ecological benefits and soil improvement outcomes.

Key Words: Yellow River Delta; shade-tolerant herbaceous plants; *T. chinensis* shelter forest; soil quality; plant community diversity index

中国有着接近 2×10^4 km 海岸线,而沿海防护林不仅具有防风固沙、保持水土、涵养水源、防灾减灾、维护沿海地带生态平衡的功能,并具有抵御海啸和风暴潮危害、护卫滨海国土、美化人居环境的作用,对于维护沿海地区生态、人民生命财产和工农业生产安全具有重要意义^[1-3]。十三五期间,我国把生态修复和海岸防护作为主要任务,全面推进实施了“南红北柳”湿地修复工程,逐渐形成了“南红北柳”沿海防护林分布模式。红树林可以提供稳定沉积物、减少海浪冲击、减轻沿海洪水等海岸保护生态系统服务^[4]。在我国南方珠江三角洲地区,红树林是抵御洪水和海水侵蚀的重要防线,它常与堤坝等传统的防洪结构结合在一起抵挡海水漫溢和海浪直接冲击^[5-7]。而在我国北方沿海防护林构建时使用柽柳-禾草复合模式对改善生态环境、促进退化生境恢复上有着显著优势^[8]。对于黄河三角洲地区来说,虽然黄河入海时带来了大量泥沙形成了新的土地,但是由于地下水位浅、盐分含量高、受海水入侵等因素的影响导致沿海潮间带土壤盐渍化严重。在此分布最广的植物是盐生植物,其中盐生草本植物又以盐地碱蓬和芦苇的地带性分布比较典型^[9-11]。而柽柳作为黄河三角洲地区盐碱类湿地的建群种,对于改善区域生态状况,维护海岸带生态系统稳定有重要作用。同时柽柳会吸收土壤盐分调节自身渗透压,从而适应高盐的生长环境,并且柽柳会在冠层下富集土壤有机碳和氮,形成“肥岛”效应^[12-14]。但是如果气候比较干旱,降雨稀少,柽柳可能会导致土壤表层的水分流失与盐分富集^[15-18]。在柽柳林下引入耐阴草本植物,可以提高植被的地表覆盖率,减少水分的蒸发,减缓盐类在土壤表面的富集。因此可以促进柽柳的生长,形成更高的林分冠层密度。与裸土相比,更高的植被冠层密度下土壤养分含量会有所提高^[10]。而不同的植物种类有不同的功能性状,植物功能的多样性代表了群落和生态系统内生物的功能性状的值和变化范围,也突出了不同植物群落内物种功能性状的差异^[19]。植物群落的功能组成对生态系统特性的影响,也随着群落生物量的增加而增加^[20]。因此在柽柳林营建中引入耐阴草本植物群落在保持土壤水分、降低土壤表面盐分富集、提升土壤养分含量、增加群落生物量等诸多方面有重要意义。

人工栽植的柽柳林在半干旱地区具有显著的土壤改良作用,能有效改善高盐碱土壤环境。它不仅显著提升了土壤中的有机质、全氮、有效磷等养分水平,增加了土壤微生物的生物量,还改变了微生物群落的构成。此外,柽柳林的存在促进了土壤大团聚体的形成和孔隙度的提升,进而影响了土壤水分含量和电导率在时间和空间上的变异特性^[15-16, 21-22]。但是目前关于沿海柽柳防护林营建的研究主要集中在柽柳林本身及柽柳林对土壤的影响,而关于在柽柳林中引入耐阴草本植物群落对土壤理化性质及土壤质量的影响方面研究仍较为缺乏。柽柳林营建过程中草本植物的科学配置问题尚未得到充分重视,导致柽柳林建设过程中草本植物群落的生态作用未能得到充分发挥。基于此,本研究在黄河三角洲滨州港地区收集了 13 个采样点的数据,调查

计算了不同草本植物群落的 α 、 β 多样性指数以及群落附近柽柳相关数据;测定并分析了柽柳林下不同草本植物群落土壤的 pH、电导率(EC);土壤盐分阳离子 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 含量;土壤盐分阴离子 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 CO_3^{2-} 、 HCO_3^- 含量;土壤有效氮(AN)、有效磷(AP)、速效钾(AK)含量;土壤全磷(TP)、全钾含量(TK),探讨了柽柳林下伴生的不同耐阴草本植物群落对土壤理化性质及盐渍土质量的影响,初步明确了黄河三角洲滨海柽柳防护林营建过程中耐阴草本植物群落的配置模式,对我国北方地区柽柳防护林体系建设具有一定的指导意义。

1 研究区概况

研究地点位于山东省鲁北地区的滨州无棣县渤海沿岸(38°09′50″—38°10′50″N, 118°02′60″—118°04′20″E),研究区域的总面积约为 2.3 km²,是黄河三角洲的一部分。该研究区域为北温带东亚季风区域大陆性气候,全年四季分明,夏季高温多雨,冬季寒冷干燥。年平均气温为 12.5 °C,年平均无霜期为 203 d,全年平均日照时数为 2850 h,全年平均降水量为 543.2 mm,全年平均蒸发量为 1805 mm,降水集中在 6—9 月,占全年降水量的 75%以上。本研究地区具有土壤矿化度高、地下水位浅、地势比较平坦、海拔高度低的特点。光滩湿地的土壤属于冲击黄土母质,不易透水透气^[11, 23]。在滩涂上主要分布有新生柽柳林(*T. chinensis*),林下生长的耐阴草本植物主要有:灰绿藜(*O. glauca*)、碱蓬(*S. glauca*)、盐地碱蓬(*S. salsa*)、芦苇(*P. australis*)、鹅绒藤(*C. chinense*)等,其余还有少量二色补血草(*Limonium bicolor*)、牛筋草(*Eleusine indica*)。

2 材料与方法

2.1 样地设置与样品采集

黄河三角洲地区的草本植物一般于每年的 4—10 月为一个生长周期,本实验于 2021 年 8 月份植物长势旺盛的时候进行采集。采样地区和采样点位如图 1 所示。在进行样品采集过程中,沿着平行于海岸线的方向设置 3 个采样断面,一共设置 13 个采样点,其中 D1 为裸地,作为对照组 CK。在灌木生长旺盛的地方设置 3 个 1 m×1 m 的草本样方,并且以 3 个草本样方为中心,设置 1 个 10 m×10 m 的灌木样方将 3 个草本样方包裹在内。统计灌木样方中柽柳总株数、总盖度、株高、基径等指标,计算样方内柽柳的郁闭度、密度。统计每个草

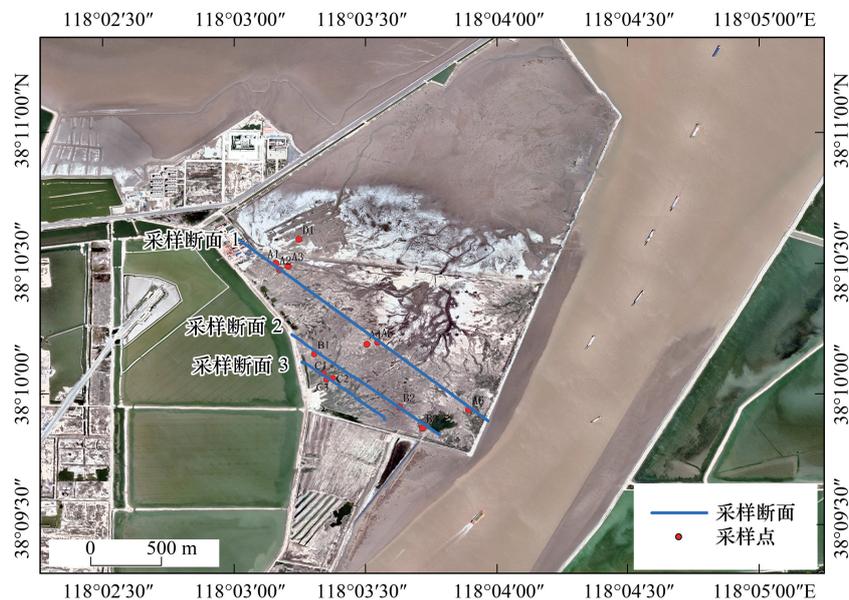


图 1 采样点位分布图

Fig.1 Sampling point distribution map

A1: 1 号采样点; A2: 2 号采样点; A3: 3 号采样点; A4: 4 号采样点; A5: 5 号采样点; A6: 6 号采样点; B1: 7 号采样点; B2: 8 号采样点; B3: 9 号采样点; C1: 10 号采样点; C2: 11 号采样点; C3: 12 号采样点; D1: 13 号采样点

本样方中每种草本植物的株数、盖度,计算整个样点内每种植物平均盖度、各类草本植物总株数。之后将样方内所有草本植物连根系完整取出,清理干净后分类上秤称重,统计样方内每种植物的总生物量。

在每个采样点灌木样方中 3 个草本样方附近按照东、南、西、北四个不同的方位选取 4 个采样点位,分别取 0—5 cm, 5—20 cm, 20—40 cm 三个土层的土壤样品,每个土层采集 3 次。然后将每个采样点 4 个不同方位同土层的土壤样品进行混合后当作一个采样点中该土层的土壤样品,装入塑料自封袋内带回实验室进行处理。(其中每个采样点每个土层会有 3 包土壤样品,多出的土壤样品备用)

2.2 样品处理及指标测定

将土壤样品自然风干,除去其中的植物残留部分(如植物的根、茎、叶等)以及石子沙砾等,测定土样中的盐碱、养分相关指标。采用电位法测定土壤 pH(土水比 1:5 浸提);采用电导率仪测定土壤电导率(土水比 1:2.5 浸提);采用碱解扩散法测定土壤有效氮含量;采用钼锑抗比色法测定土壤样品有效磷含量;采用 NH_4Ac 浸提+火焰光度法测定土壤速效钾含量^[23];采用电感耦合等离子发射光谱仪(安捷伦 Optima8000, 美国)测定土壤盐分阳离子 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 含量;采用离子色谱仪(Dionex IC 2000, 美国)测定土壤盐分阴离子 Cl^- 、 SO_4^{2-} 含量;采用硫酸标准溶液测定土壤盐分阴离子 CO_3^{2-} 、 HCO_3^- 含量^[24];采用硫酸-高氯酸盐-煮沸-钼锑抗比色法测定土壤全磷含量;采用火焰光度计法测定土壤全钾含量^[25]。

2.3 数据处理与分析

2.3.1 重要值及植物群落多样性计算方法

参照许喆等^[26]对草地植物群落多样性的计算方法,计算采样点草本植物群落物种重要值(P_i)、 α 多样性指数,即多样性指数 Shannon-Wiener(H)、均匀度指数 Pielou index(J)、丰富度指数 Patrick index(R)、优势度指数 Simpson index(DS)。参照史恭发等^[27]对大兴安岭林下植物多样性的计算方法,计算采样点草本植物群落物种的 β 多样性指数,即群落相似度指数 C_s 。所有计算公式如下:

(1) 重要值(P_i)

$$P_i = (\text{相对多度} + \text{相对频度} + \text{相对盖度} + \text{相对生物量}) / 4$$

(2) 丰富度指数 Patrick index(R), 数值越高说明物种丰富度越高。

$$R = \frac{S-1}{\ln N}$$

(3) 多样性指数 Shannon-Wiener(H), 数值越高说明物种多样性越好。

$$H = - \sum_{i=1}^S P_i \ln P_i$$

(4) 优势度指数 Simpson index(DS), 数值越高说明优势种的生态功能越突出。数值范围在 0—1 之间。

$$DS = 1 - \sum_{i=1}^S P_i^2$$

(5) 均匀度指数 Pielou index(J), 数值越高说明物种在样方中分布越均匀。数值范围在 0—1 之间。

$$J = \frac{H}{\ln S}$$

式中, S 为样方中的物种数, N 为群落中全部物种的个体数。

(6) 群落相似度指数 C_s , 数值在 0—0.2 表示两群落物种几乎没有相似之处, 0.2—0.4 表示非常低的相似, 0.4—0.6 为低度相似, 0.6—0.8 为中度相似, 0.8—1 之间为高度相似。 c 是两个群落共有的物种数, a 和 b 分别为两个群落各自物种数。

$$C_s = \frac{2c}{a+b}$$

2.3.2 模糊隶属函数值计算方法

使用模糊隶属函数法计算不同草本植物群落的综合评价^[28]。如果指标与土壤改良效果之间呈现正

相关关系,使用以下公式:

$$X_u = \frac{X_i - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}}$$

反之,若呈现出负相关关系,则使用如下公式:

$$X_u = 1 - \frac{X_i - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}}$$

式中, X_u 表示隶属函数值, X_{\min} 和 X_{\max} 分别表示指标在不同草本植物群落中的最小值、最大值, X_i 为指标在不同草本植物群落中的平均值。

2.3.3 数据处理及分析

使用 Excel 2016 (Microsoft Corp., Redmond, WA, USA) 对土壤盐碱、养分指标进行统计分析, 计算平均值和标准差 (SD); 统计植物群落 α 、 β 多样性指数; 进行模糊隶属函数值计算。使用 SPSS 27.0 (SPSS Inc., Chicago, IL, USA) 选择单因素方差分析、邓肯多重范围检验, 分析指标之间的差异性。使用 Origin 2022 对不同草本植物群落土壤指标进行主成分分析, 提取其主要成分。

3 结果与分析

3.1 不同草本植物群落柽柳参数分析

由表 1 可以看出, 芦苇群落的柽柳密度最高, 而盐地碱蓬群落的柽柳密度最低, 各种群落的柽柳密度没有显著性差异 ($P > 0.05$)。在柽柳株高方面, 可以得知芦苇群落柽柳株高最高, 为 172.36 cm。而盐地碱蓬群落柽柳的株高比芦苇群落低 63.21 cm, 为 109.15 cm, 是几类不同群落中柽柳株高的最低值。其中碱蓬群落、盐地碱蓬群落和其余两个群落相比, 其柽柳株高差异性较为显著 ($P < 0.05$)。在柽柳基径方面, 四种不同草本植物群落并没有显著性差异 ($P > 0.05$), 但盐地碱蓬群落的柽柳拥有相对最粗基径, 为 9.51 cm, 而芦苇群落和盐地碱蓬群落相比降低了 3.75 cm, 是几类不同草本植物群落柽柳基径的最低值。在郁闭度方面, 四种草本植物群落并没有显著性差异 ($P > 0.05$), 又知盐地碱蓬群落、灰绿藜群落的柽柳郁闭度相差无几, 在 85% 左右。同时碱蓬群落、芦苇群落的柽柳郁闭度也近乎相同, 在 72% 左右。可以认为选定研究区域柽柳林密度等大致相同, 本研究区域面积较小, 土壤均为后期黄河冲击形成, 土壤形成时造成的异质性很低, 研究区内气候、温度等外在环境均一致, 后期区域内土壤盐分、养分等理化性质土壤质量的差异主要由草本植物及其生物群落导致。

表 1 不同草本植物群落的柽柳基本参数

Table 1 Basic parameters of *T. chinensis* in different herbaceous communities

参数类型 Parameter type	碱蓬群落 (SGC)	盐地碱蓬群落 (SSC)	芦苇群落 (PAC)	灰绿藜群落 (OGC)
密度 Density/(株/hm ²)	8300±1114a	8317±104a	11267±2759a	9467±153a
株高 Plant height/cm	109±13b	143±23ab	172±31a	166±12a
基径 Footpath/mm	61.0±2.00a	95.1±45.4a	57.6±24.0a	71.6±7.40a
郁闭度 Constriction/%	72±13a	87±6a	72±10a	85±5a

同行不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$); SGC: 碱蓬群落 *Suaeda glauca* community; SSC: 盐地碱蓬群落 *Suaeda salsa* community; PAC: 芦苇群落 *Phragmites australis* community; OGC: 灰绿藜群落 *Oxybasis glauca* community

3.2 林下植物物种组成及其多样性指数分析

研究区域为典型的滨海盐碱地植物群落, 在设置的样地中一共调查到了 8 个草本植物种类, 分属 5 个不同的科。由表 2 可知, 12 个样地中的草本植物可分为由 4 种植物作为优势种的草本植物群落, 即碱蓬群落 (记为 SGC) 其中包括 A1、A2、A3 样地共 3 个; 盐地碱蓬群落 (记为 SSC) 其中包括了 A4、A5、B1 号样地共 3 个; 芦苇群落 (记为 PAC) 其中包括 A6、B2、B3 号样地共 3 个; 灰绿藜群落 (记为 OGC) 其中包括 C1、C2、C3 号样地共 3 个。在本次调查研究中 4 种植物群落 (SGC、SSC、PAC、OGC) 的植物组成数量分别为 5、5、6、5 种草本植物。

表 2 不同草本植物在各个样地中的重要值

Table 2 Importance values of different herbaceous plants in each sample plot

植物种类 Plant species	科 Family	样地编号 Sample plot number											
		A1	A2	A3	A4	A5	A6	B1	B2	B3	C1	C2	C3
碱蓬 <i>S. glauca</i>	藜科	0.45	0.65	0.46	0.07	0.20	0.10	0.10	0.05	0.04	0.04	0.04	0.04
灰绿藜 <i>O. glauca</i>	苋科	0.24	0.05	0.18	0.05	0.06	0.22	0.05	0.12	0.11	0.54	0.40	0.39
二色补血草 <i>L. bicolor</i>	白花丹科	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
鹅绒藤 <i>C. chinense</i>	萝藦科	0.11	0.17	0.14	0.22	0.14	0.15	0.13	0.28	0.25	0.25	0.22	0.21
芦苇 <i>P. australis</i>	禾本科	0.12	0.08	0.16	0.25	0.19	0.38	0.19	0.33	0.40	0.09	0.24	0.25
盐地碱蓬 <i>S. salsa</i>	藜科	0.02	0.02	0.02	0.38	0.37	0.12	0.50	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
狗尾草 <i>S. viridis</i>	禾本科	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.03	0.02	0.20	0.17	0.05	0.02	0.02
牛筋草 <i>E. indica</i>	禾本科	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.06	0.07

A1:1号采样点;A2:2号采样点;A3:3号采样点;A4:4号采样点;A5:5号采样点;A6:6号采样点;B1:7号采样点;B2:8号采样点;B3:9号采样点;C1:10号采样点;C2:11号采样点;C3:12号采样点

由表 3 可知,通过对不同草本植物群落 α 多样性指数进行比较,物种丰富度指数 (R) 的变化趋势为 $SGC \leq OGC < SSC < PAC$,芦苇群落和其他草本植物群落差异显著 ($P < 0.05$),其植物个体数量最多。多样性指数 (H) 的变化趋势为 $OGC \leq SGC \leq PAC \leq SSC$,四种群落显著性差异并不明显 ($P > 0.05$),但盐地碱蓬群落物种多样性最好。各群落的优势度指数 (DS) 排序为 $SGC \leq OGC \leq SSC \leq PAC$,四种群落优势度指数之间差异并不显著 ($P > 0.05$),但芦苇在其群落中的优势度最为明显,相比之下碱蓬在其群落中的优势度最弱。最后,不同草本植物群落的均匀度指数 (J) 排序为 $PAC < OGC \leq SSC \leq SGC$ 。其中碱蓬群落和盐地碱蓬群落数值最相似,说明其个体数量或者生物量分布最为均匀,即该种类的群落更加稳定和平衡。芦苇群落的均匀度指数最低,其和碱蓬群落、盐地碱蓬群落具有显著性差异 ($P < 0.05$)。

表 3 不同草本植物群落的 α 多样性指数Table 3 α diversity indices of different herbaceous plant communities

指数类型 Index type	碱蓬群落 (SGC)	盐地碱蓬群落 (SSC)	芦苇群落 (PAC)	灰绿藜群落 (OGC)
丰富度指数 Patrick index (R)	0.47±0.18b	0.53±0.07b	0.80±0.13a	0.48±0.02b
多样性指数 Shannon-Wiener (H)	1.25±0.19a	1.40±0.08a	1.28±0.17a	1.21±0.08a
优势度指数 Simpson index (DS)	0.65±0.10a	0.73±0.04a	0.75±0.01a	0.70±0.06a
均匀度指数 Pielou index (J)	0.92±0.06a	0.92±0.04a	0.80±0.05b	0.87±0.05ab

同行不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$)

由表 4 观察不同草本植物群落之间的 β 多样性指数 C_s 可知,盐地碱蓬群落与碱蓬群落呈现高度相似水平,碱蓬群落与芦苇群落呈现出中等相似水平,碱蓬群落与灰绿藜群落呈现出低度相似水平。盐地碱蓬群落和芦苇群落呈现出最高的相似水平 (0.91),盐地碱蓬群落和灰绿藜群落呈现出低度相似水平。同时芦苇群落与灰绿藜群落呈现出最低的相似水平 (0.55)。可见芦苇群落与盐地碱蓬群落的物种组成极其相似。

表 4 不同草本植物群落的 β 多样性指数Table 4 β diversity index of different herbaceous plant communities

群落名称 Community name	碱蓬群落 (SGC)	盐地碱蓬群落 (SSC)	芦苇群落 (PAC)	灰绿藜群落 (OGC)
碱蓬群落 (SGC)	1			
盐地碱蓬群落 (SSC)	0.8	1		
芦苇群落 (PAC)	0.73	0.91	1	
灰绿藜群落 (OGC)	0.6	0.6	0.55	1

3.3 土壤化学性质分析

3.3.1 土壤酸碱度和电导率分析

表 5 展示出了各类草本植物群落与对照组裸地 (CK, D1) 土壤理化性质对比。如图 2 所示,在 0—5 cm

土层中,芦苇群落与灰绿藜群落之间有显著性差异($P<0.05$),pH 值的变化范围为 8.84—9.15;在 5—20 cm 土层中碱蓬群落与盐地碱蓬群落、灰绿藜群落有显著性差异($P<0.05$),pH 值的变化范围为 9.14—9.86;在 20—40 cm 土层中各种草本植物群落无显著性差异($P>0.05$),pH 值的变化范围为 9.02—9.52。总体来说,有 pH 值 $SSC \leq OGC \leq PAC \leq SGC \leq CK$,且其变化趋势为 0—5 cm \leq 20—40 cm \leq 5—20 cm。

表 5 各类草本植物群落与裸地(CK,D1)土壤理化性质对比

Table 5 Comparison of soil physicochemical properties between various herbaceous communities and bare land (CK,D1)

指标类型 Index type	碱蓬群落 (SGC)	盐地碱蓬群落 (SSC)	芦苇群落 (PAC)	灰绿藜群落 (OGC)	裸地 (CK,D1)
pH	9.38±0.40a	9.13±0.25a	9.30±0.45a	9.27±0.22a	9.44±0.47a
电导率 Electrical conductivity/($\mu\text{s}/\text{cm}$)	656.31±652.00ab	1422.01±1171.07a	668.38±738.99ab	95.16±13.72b	193.50±8.24ab
水溶性盐离子累计含量 Cumulative content of water-soluble salt ions/(mg/kg)	2314.42±2076.71bc	4854.19±2214.10b	2445.21±1459.12bc	492.14±53.83c	11811.91±362.59a
有效氮、有效磷、速效钾累计含量 Cumulative content of available nitrogen, available phosphorus, available potassium/(mg/kg)	198.00±29.26b	238.92±25.81a	173.00±9.18bc	141.11±23.79c	141.30±6.10c
总磷、总钾累计含量 Cumulative content of total phosphorus, total potassium/(mg/kg)	17822.33±301.28b	18893.22±126.26a	16520.18±298.42d	17532.67±277.48b	17034.25±305.70c

同行不同字母表示差异显著($P<0.05$)

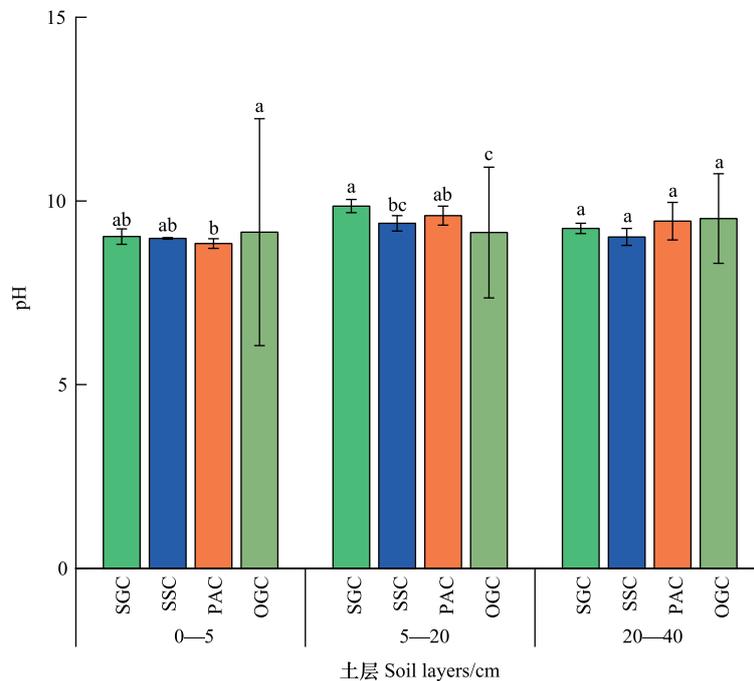


图 2 不同草本植物群落不同土层土壤 pH 值

Fig.2 Soil pH in different soil layers of different herbaceous plant communities

小写字母表示同土层不同群落数据之间的显著性差异($P < 0.05$),所有图皆同;SGC:碱蓬群落;SSC:盐地碱蓬群落;PAC:芦苇群落;OGC:灰绿藜群落

又如图 3 所示,在 0—5 cm 土层中,盐地碱蓬群落、芦苇群落与盐地碱蓬群落、灰绿藜群落的 EC 值有显著性差异($P<0.05$),其中盐地碱蓬群落有最高值 669.92 $\mu\text{s}/\text{cm}$,灰绿藜群落有最低值 103.52 $\mu\text{s}/\text{cm}$;在 5—

20 cm 土层中,盐地碱蓬群落其他三种草本植物群落具有显著性差异($P<0.05$),EC 值的变化范围为 77.42—954.75 $\mu\text{s}/\text{cm}$;在 20—40 cm 土层中盐地碱蓬群落与灰绿藜群落有显著性差异($P<0.05$),EC 值的变化范围为 104.55—2641.35 $\mu\text{s}/\text{cm}$ 。总体来说 EC 值的变化趋势为 0—5 cm<5—20 cm<20—40 cm,各种草本植物群落在降低土壤盐分方面有一定的效果,对上层土壤的改良效果要优于下层土壤。而不同草本植物群落对土壤理化性质的影响呈现出较大差异。

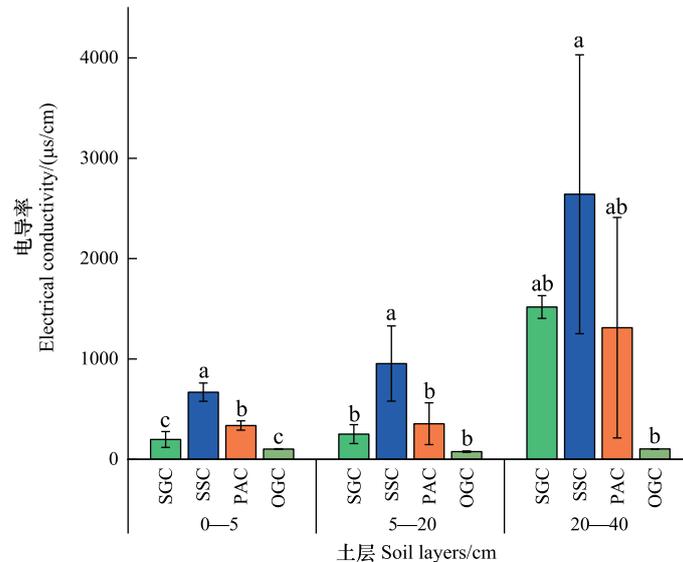


图 3 不同草本植物群落不同土层土壤电导率值

Fig.3 Soil electric conductivity in different soil layers of different herbaceous plant communities

3.3.2 土壤盐分含量分析

结合表 5 与图 4 可知,土壤水溶性盐离子含量在不同的草本植物群落与裸地之间存在着显著性差异($P<0.05$)。将不同草本植物群落、CK 土壤中的水溶性盐离子累计含量作比较,则有 $\text{OGC}<\text{SGC}\leq\text{PAC}<\text{SSC}<\text{CK}$ 。可见不同草本植物群落对于降低土壤水溶性盐离子含量均有一定的帮助。在不同草本植物群落中, K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} 含量随着土层深度增加而呈现先降后增的趋势, Na^+ 、 Cl^- 含量随着土层深度增加而呈现出增加趋势,而 HCO_3^- 含量随着土层深度增加而呈现降低趋势。其中 Ca^{2+} 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 含量表现出不同程度的表聚性;而 K^+ 、 Na^+ 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 含量表现出不同程度的底聚性; CO_3^{2-} 含量则在 0—5 cm 土层比较多。

3.3.3 土壤养分含量分析

结合表 5 与图 5、图 6,可知不同草本植物群落对提升土壤养分含量有一定的帮助,并且不同草本植物群落之间存在着较大差异($P<0.05$)。全磷(TP)含量排序为 $\text{SSC}\leq\text{CK}\leq\text{SGC}\leq\text{OGC}\leq\text{PAC}$;全钾(TK)含量排序为 $\text{PAC}\leq\text{CK}<\text{OGC}\leq\text{SGC}<\text{SSC}$;有效氮(AN)含量排序为 $\text{CK}<\text{SGC}\leq\text{SSC}\leq\text{PAC}\leq\text{OGC}$;有效磷(AP)含量排序为 $\text{CK}<\text{OGC}<\text{PAC}\leq\text{SGC}<\text{SSC}$;速效钾(AK)含量排序为 $\text{OGC}<\text{CK}<\text{PAC}\leq\text{SGC}\leq\text{SSC}$ 。具体来说,碱蓬群落的 TP、TK、AN、AP、AK 分别是裸地的 1.004、1.048、1.664、1.502、1.364 倍;盐地碱蓬群落的 TK、AN、AP、AK 分别是裸地的 1.113、1.859、2.081、1.658 倍;芦苇群落的 TP、AN、AP、AK 分别是裸地的 1.092、2.1、1.49、1.102 倍;灰绿藜群落的 TP、TK、AN、AP 分别为裸地的 1.045、1.029、2.221、1.259 倍。可见相较于全量养分,草本植物群落对速效养分的提升效果更优。

如图 5 所示,关于不同草本植物群落下土壤速效养分含量,不同土层之间有较大差别。在 0—5 cm 土层,不同草本植物群落有效磷(AP)、速效钾(AK)含量差异显著($P<0.05$);在 5—20 cm 土层,不同草本植物群落速效钾(AK)含量差异显著($P<0.05$);在 20—40 cm 土层,不同草本植物群落有效磷(AP)、速效钾(AK)含量差异显著($P<0.05$)。如图 6 所示,关于不同草本植物群落下土壤全量养分含量,不同土层之间也有较大差

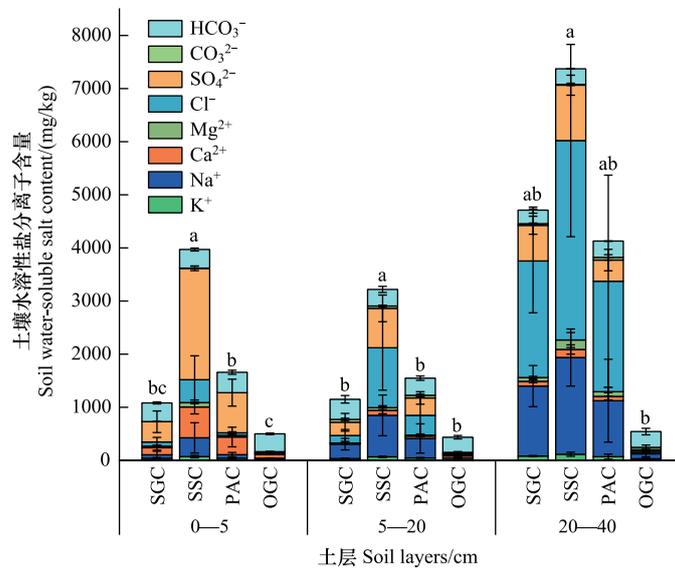


图 4 不同草本植物群落不同土层土壤水溶性盐分离子含量

Fig.4 Soil water-soluble salt ions content in different soil layers of different herbaceous plant communities

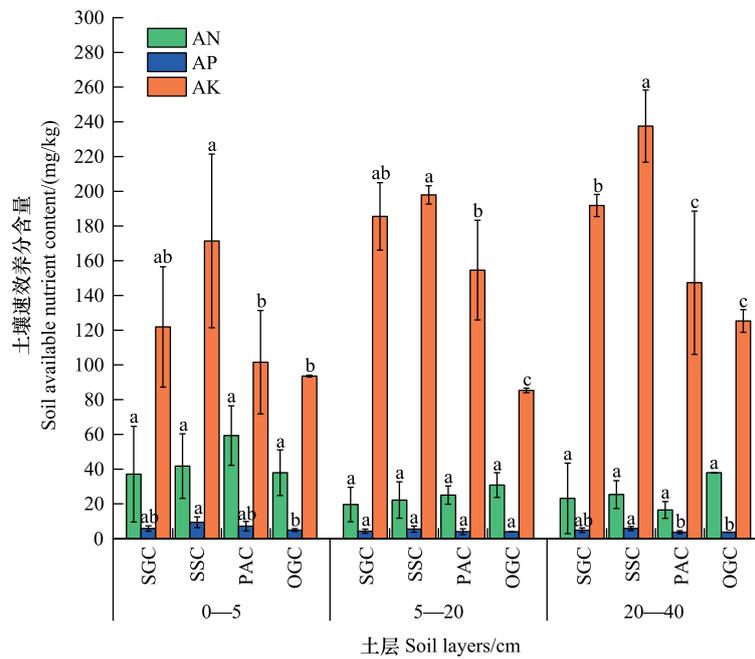


图 5 不同草本植物群落不同土层土壤速效养分含量

Fig.5 Soil available nutrient content in different soil layers of different herbaceous plant communities

AN:有效氮;AP:有效磷;AK:速效钾

别。在 0—5 cm 土层,不同草本植物群落之间全钾(TK)含量差异显著($P<0.05$);在 5—20 cm 土层,灰绿藜群落的全磷(TP)含量与其他群落有显著差异($P<0.05$),全钾(TK)含量四种不同的草本植物群落之间均有较大差异($P<0.05$),其中盐地碱蓬群落与芦苇群落之间的差异最为明显;在 20—40 cm 土层,芦苇群落全钾(TK)含量与其他三个草本植物群落差异显著($P<0.05$)。四种不同群落的全磷(TP)含量有显著差异($P<0.05$)。

3.4 不同草本植物群落指标主成分分析

不同草本植物群落特征、柽柳密度(TD)等均会影响土壤基本理化性质以及土壤养分含量,并且各个环境因子之间也会相互影响。因此有必要将众多环境因子中提取出主要影响因子,即对滨州港柽柳林下耐阴草本

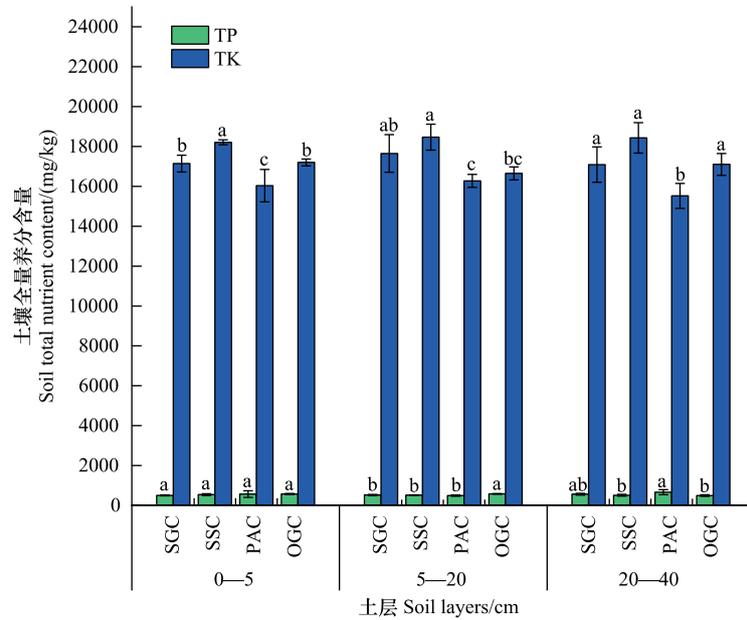


图 6 不同草本植物群落不同土层土壤全量养分含量

Fig.6 Soil total nutrient content in different soil layers of different herbaceous plant communities

TP:总磷;TK:总钾

植物群落的环境因子进行主成分分析。其主成分载荷见表 6。本着 PC 特征值大于 1 的原则,一共选择 3 个主成分,其累计贡献率可达 81.606%,可以较好的代表 20 个指标的信息。其中 PC1 的贡献率为 37.857%,因子载荷较大 (Loading value>0.27) 的是水溶性 K⁺、水溶性 Mg²⁺、植物群落丰富度指数 R; PC2 的贡献率为 26.85%,因子载荷较大 (Loading value>0.27) 的为水溶性 Na⁺、水溶性 Cl⁻; PC3 的贡献率为 16.899%,因子载荷较大 (Loading value>0.27) 的为水溶性 Ca²⁺、水溶性 SO₄²⁻、植物群落多样性指数 H、均匀度指数 J。

表 6 不同草本植物群落的主成分因子载荷

Table 6 Factor loadings of principal component within different herbaceous plant communities

因子 Factor	主成分 Principal component			因子 Factor	主成分 Principal component		
	1	2	3		1	2	3
K ⁺	0.315	0.203	0.036	AK	0.175	0.261	0.237
Na ⁺	0.231	0.308	-0.115	EC	0.270	0.259	-0.135
Ca ²⁺	0.239	-0.019	0.329	pH	-0.280	0.122	-0.132
Mg ²⁺	0.322	0.150	-0.090	R	0.270	-0.203	-0.164
Cl ⁻	0.244	0.277	-0.178	H	0.187	-0.138	0.317
SO ₄ ²⁻	0.220	0.091	0.386	DS	0.224	-0.099	0.044
CO ₃ ²⁻	-0.242	0.136	-0.028	J	-0.157	0.208	0.276
HCO ₃ ⁻	0.117	-0.281	0.145	TD	0.091	-0.350	-0.181
TP	0.243	-0.132	-0.321	特征值 Eigenvalue	7.571	5.37	3.38
TK	-0.188	0.094	0.413	贡献率 Contribution rate/%	37.857	26.85	16.899
AN	0.032	-0.418	0.063	累计贡献率	37.857	64.708	81.606
AP	0.194	-0.268	0.241	Cumulative contribution rate/%			

TP:总磷 Total phosphorus;TK:总钾 Total potassium;AN:有效氮 Available nitrogen;AP:有效磷 Available phosphorus;AK 速效钾 Available potassium;EC:电导率 Electrical conductivity;TD:柽柳密度 *T. chinensis* density

3.5 不同草本植物群落高因子载荷指标聚类分析

基于 PCA 结果 (表 6), 选取 10 个高因子载荷指标 (Loading value>0.27) 进行聚类分析。具体为水溶性

K^+ 、水溶性 Na^+ 、水溶性 Ca^{2+} 、水溶性 Mg^{2+} 、水溶性 Cl^- 、水溶性 SO_4^{2-} 、全钾、植物群落丰富度指数 R 、多样性指数 H 、均匀度指数 J 。表 7 显示了不同高因子载荷的隶属函数值,结果表明不同草本植物群落对土壤的改良效果综合排序为 $SSC < SGC < OGC < PAC$ 。可见芦苇群落对土壤的改良效果最好,其它三种植物群落对土壤的改良效果比较接近。

表 7 不同草本植物群落的高因子载荷隶属函数值

Table 7 The subordinate function value of high factor loadings within different herbaceous plant communities

因子 Factor	影响效果 Effectiveness	群落名称 Community name			
		碱蓬群落(SGC)	盐地碱蓬群落(SSC)	芦苇群落(PAC)	灰绿藜群落(OGC)
K^+	—	0.59	0.69	0.69	0.66
Na^+	—	0.70	0.60	0.74	0.75
Ca^{2+}	—	0.54	0.64	0.72	0.47
Mg^{2+}	—	0.66	0.70	0.76	0.63
Cl^-	—	0.76	0.69	0.80	0.52
SO_4^{2-}	—	0.57	0.55	0.63	0.56
TK	+	0.38	0.51	0.54	0.50
R	+	0.52	0.50	0.63	0.56
H	+	0.63	0.52	0.37	0.67
J	+	0.58	0.52	0.63	0.67
综合得分 Composite score		5.94	5.93	6.51	5.97

“+”表示积极影响效果,“—”表示消极影响效果

4 讨论

4.1 不同草本植物群落对土壤的养分提升效果

陆地植物群落在全球碳、氧、水、氮的生物化学循环中起着关键作用,它可以提供诸如固碳、水分运输等生态系统服务^[29—30]。植物多样性是生态系统生物多样性的基础,其在维持生态系统多功能性,提升生态系统生产力,使生态系统稳定等方面扮演着不可或缺的角色^[31—33]。群落中植物多样性提高有助于恢复土壤碳储量并提升土壤肥力,具有高植物群落多样性的地块中积累的氮、钾、钙、镁养分含量要显著高于生长有单一植物种类的地块^[34—35]。在黄河三角洲地区,芦苇和柽柳对于提高土壤养分含量和促进微生物多样性起到了关键作用。这些植物的根际环境具有显著的养分聚集效应。同时,芦苇群落展现出丰富的植物种类和庞大的个体数量^[36—38]。在本研究中芦苇群落的 α 多样性指数表明了该类群落的植物种类丰富、数量最多,它对土壤养分的提升效果也较好,这与其他研究中的结论相吻合。

土壤盐分含量高、营养元素缺乏是全球沿海地区土地的普遍现象和主要关注点,植物在沿海地区的生长状况直接影响土地的养分含量^[39—41]。有相关研究已指出草本植物群落显著改善了滨海盐渍土的理化性质,提高了土壤有机质、速效养分含量,并且不同种类的混生林对土壤养分的提升效果存在着明显差异^[8, 23]。具体来说,植物功能群组成和植物群落的物种多样性均会显著影响土壤的 C、N、P。不同草本植物群落的养分含量不同,对土壤养分的贡献主要集中在表层,所以草本植物群落的组成对土壤 C、N、P 的影响在 0—20cm 土层大于 20—60cm 土层^[42—45]。在本研究出现了类似的结果,多种草本植物群落下土壤的养分含量相较于裸地 CK 均有较大的提升,且 0—20cm 土层的提升效果更加明显,但是不尽相同。对于本研究中的结果,其原因可能也在于:不同生长期的植物根系分泌物,虽然对土壤微生物功能性的影响比较相似,但是其对于微生物群落结构以及植物可利用土壤养分的影响明显不同^[46]。植物凋落物的分解及其对土壤养分的影响是生态系统物质循环的重要组成部分,凋落物可以提高土壤肥力,不同的凋落物对土壤养分的贡献各不相同^[47—48]。混生林植物枯萎死亡之后形成腐殖质,并且柽柳在一定盐度下会形成显著的“肥岛效应”,对例如速效氮、速效钾、总有机碳等土壤养分的富集能力更强^[49—50]。又有研究表明不同盐分、淹水环境条件下,植物凋落物的分解速

率不同,例如黄河三角洲地区盐地碱蓬凋落物在高盐分状态下分解速率比芦苇凋落物快^[51]。因此由于草本植物群落的物种多样性、根系分泌物差异、凋落物的种类及其分解速度以及环境因素的共同作用,不同草本植物群落对土壤养分的提升作用存在差异。

4.2 不同草本植物群落对土壤的降盐缓碱效果

土壤中有八大水溶性盐分离子 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 CO_3^{2-} 、 HCO_3^- , 它们占土壤盐分的 95% 以上, 测定分析土壤中这些离子的含量可以判断出其盐渍化情况, 并可以根据不同的盐渍化类型, 从而使用不同的改良措施^[52]。黄河三角洲地区的平均土壤含盐量在 0.6%, 土壤电导率约为 2.58 ms/cm^[53]。对于该地区邻近渤海南岸的研究区域来说, 海水侵蚀是造成土壤盐渍化以及次生盐渍化的主要因素。其降水以及河流水表现出相对稳定的水化学特性, 但是湿地水体中主要离子特征表现出明显的季节以及位置差异, 其中大部分湿地水体属于 Na-Cl 型, 少部分属于 Ca-Na- HCO_3^- 混合型^[54]。而 Na^+ 和 Cl^- 都是单价电荷离子, 很容易随着灌溉或者海水侵蚀等方式在土壤中不断下渗累积^[55]。本研究测定的盐分离子中 Na^+ 、 Cl^- 含量最高, 并且随着土层深度增加而增加, 这也印证了上述结论。由于 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} 的离子电荷和离子浓度等离子特性, 土壤胶体对它们的吸收能力较强^[23]。所以说本研究中这三种水溶性盐分离子含量, 呈现出随土层深度增加而先减后增的现象。有学者模拟了黄河三角洲地区的土壤和地下水环境, 并在土壤中种植了柽柳, 其研究表明 HCO_3^- 含量在不同地下水位下, 随土壤深度增加而增加^[24]。但本研究得出与其相反的结论, 其原因可能是因为本研究中土壤受到草本植物群落和不同密度柽柳的共同作用, 并且地下水位多变。

黄河三角洲地区土壤盐分较高的地区适合盐地碱蓬与柽柳混合植物群落生长, 而盐分较低的区域则以芦苇和其他耐盐植物共存为主^[38]。在本研究中发现草本植物群落对土壤有着不同程度的降盐缓碱效果, 主要原因是草本植物群落有较高的地表覆盖率, 并且柽柳提供了较高的林分冠层密度 (71%—86%), 在土壤水分上行过程中减少了蒸发, 一定程度上减缓了盐分在土壤表层聚集^[8]。土壤与植物群落的影响作用是相互的, 草本植物群落不同会影响土壤的理化性质, 反之土壤的理化性质也会影响草本植物群落的组成。有研究表明黄河三角洲地区土壤盐分含量与距海距离极显著负相关 ($P < 0.01$)^[13], 所以对于黄河三角洲地区沿海防护林构建时, 对于距离海岸线较近, 土壤盐度较高的地区柽柳林下适合种植碱蓬、盐地碱蓬, 可以降低土壤盐分并提升各种养分的含量, 缓解碱化。反之, 离海岸线较远, 土壤盐度稍低的地区柽柳林下适合种植芦苇, 可以降低土壤盐分并显著增加 TP、AN、AP、AK 含量。不同的草本植物群落均可以达到一定的土壤改良效果。

4.3 微地形对滨海盐碱土水盐分布和植物生长的影响

微地形是影响盐渍化土壤性质和植物分布的重要因素, 可以改变滨海盐碱地水盐分布格局和植物生长状况。地形的微起伏便会显著影响土壤的水分含量、电导率和 pH 值。随着高程的增加, 各土层的土壤水分含量和 pH 值会逐渐降低, 但是表层土壤的电导率却呈现上升趋势。盐分和水分会在土壤不同层面累积, 盐分在土壤表层积聚, 形成“表聚”现象, 而水分则在土壤底层积聚, 表现为“底聚”现象。这些微地形引起的土壤水分和理化性质的变化, 不仅塑造了不同的土壤环境, 而且间接调控了植物的生长和多样性, 从而在坡地不同高程位置形成了生态差异^[56—57]。有关于黄河三角洲地区微地形改造的相关实验结果表明, 不同的微地形确实会显著影响该地区土壤理化性质与植被生长状况, 其中月牙形、三角形土垄在植被恢复和土壤改良效应上表现最好^[58—60]。除去微地形因素之外, 地下水位高低、土壤微生物活性以及人为活动都会导致本研究实验结果出现一定偏差, 因此研究结果具有一定局限性。

5 结论

黄河三角洲滨州港沿海柽柳防护林下引入不同草本植物群落对降低新生柽柳林下土壤盐分, 缓解土壤碱化, 提升土壤养分含量均有一定的帮助, 并且不同草本植物群落对盐渍土的改良效果具有明显差异。聚类分析结果表明, 以芦苇为优势种的草本植物群落在降低土壤盐分、增加土壤养分含量、防止碱化、植物群落 α 多样性指数等诸多方面表现最好, 其余三种草本植物群落差别不大。从植物群落 α 多样性指数角度分析, 芦苇

群落的丰富度指数最高,并与其他群落有显著差异($P<0.05$),且其多样性指数较高,说明其群落内植物种类较丰富且数量最多。可见草本植物群落中植物种类越丰富、数量越多,对土壤的改良效果越好,柽柳影响因素次之。结合土壤化学性质数据进行分析,在降低土壤盐分方面,以灰绿藜作为优势种的植物群落效果最好。对于提升土壤养分方面,芦苇群落对土壤中全磷含量的提升效果最好;盐地碱蓬群落对土壤中全钾、有效磷、速效钾含量的提升效果最好;灰绿藜群落对提升土壤中有效氮的效果最佳。综合诸多方面来看,在黄河三角洲沿海柽柳防护林构建过程中,建议林下优先种植以芦苇作为优势种的草本植物群落(搭配碱蓬、灰绿藜、鹅绒藤、盐地碱蓬、狗尾草)。

参考文献(References):

- [1] Bao B H, Chang M Y, Jin S H, Li X Q, Xie H T. Periodic flooding decoupled the relations of soil C, N, P, and K ecological stoichiometry in a coastal shelterbelt forest of Eastern China. *Forests*, 2023, 14(11): 2270.
- [2] Cai X L, Henderson M, Wang L G, Su Y H, Liu B H. Shelterbelt structure and crop protection from increased typhoon activity in NorthEast China. *Agriculture*, 2021, 11(10): 995.
- [3] Shan Q H, Zhang J F, Sun S Y, Chen G C, Zhang H D, Shen L M. Construction of coastline shelterbelts and assessment of their environmental effects in Yuyao, China. *Land Degradation & Development*, 2018, 29(8): 2428-2437.
- [4] Montgomery J M, Bryan K R, Coco G. The role of mangroves in coastal flood protection: The importance of channelization. *Continental Shelf Research*, 2022, 243: 104762.
- [5] De Dominicis M, Wolf J, van Hespren R, Zheng P, Hu Z. Mangrove forests can be an effective coastal defence in the Pearl River Delta, China. *Communications Earth & Environment*, 2023, 4: 13.
- [6] Wang R J, Zhang J F, Zhang D S, Wang S F, Dong L S, Qin G H, Shou S T, Zhang H P. Problem-based techniques and practices of coastal ecological engineering construction in China. *Environment, Development and Sustainability*, 2025: 1-21.
- [7] Zhang L X, Shi L, Yang F. Assessing ecosystem service dynamics in China's coastal shelterbelt: Implications for ecosystem restoration. *Environmental Impact Assessment Review*, 2024, 106: 107515.
- [8] Xia J B, Ren J Y, Zhang S Y, Wang Y H, Fang Y. Forest and grass composite patterns improve the soil quality in the coastal saline-alkali land of the Yellow River Delta, China. *Geoderma*, 2019, 349: 25-35.
- [9] Liu L L, Wang B S. Protection of halophytes and their uses for cultivation of saline-alkali soil in China. *Biology*, 2021, 10(5): 353.
- [10] Wu Y N, Dai L Y, Wang Y, Xie L M, Zhao S Q, Liu Y, Zhang M X, Zhang Z M. Coexistence mechanisms of *Tamarix chinensis* and *Suaeda salsa* in the Yellow River Delta, China. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2020, 27(21): 26172-26181.
- [11] Chen P, Xia J B, Ma H S, Gao F L, Dong M M, Xing X S, Li C R. Analysis of spatial distribution pattern and its influencing factors of the *Tamarix chinensis* population on the beach of the muddy coastal zone of Bohai Bay. *Ecological Indicators*, 2022, 140: 109016.
- [12] 陈萍,夏江宝,王善龙,李栋,高芳磊,赵万里,马金昭.黄河三角洲滨海滩涂不同密度柽柳林的土壤盐碱与养分特征. *生态学报*, 2022, 42(24): 10180-10190.
- [13] 夏江宝,赵西梅,刘俊华,赵自国,刘庆,陈印平.黄河三角洲莱州湾湿地柽柳种群分布特征及其影响因素. *生态学报*, 2016, 36(15): 4801-4808.
- [14] Tao B X, Chen Q H, Wang J D, Zhang B H, Yuan H Y, Chen Y J. "Fertile island" of *Tamarix Chinensis* accelerated the carbon decomposition in the coastal wetlands of the Yellow River Delta, China. *Catena*, 2022, 211: 106034.
- [15] Li J S, Yang C, Hussain T, Feng X H, Liu X J, Guo K. Long-term effect of *tamarisk* plantation on soil physical properties and soil salt distribution in coastal saline land. *Agronomy*, 2022
- [16] Cao Q Q, Yang B M, Li J R, Wang R S, Liu T, Xiao H J. Characteristics of soil water and salt associated with *Tamarix ramosissima* communities during normal and dry periods in a semi-arid saline environment. *Catena*, 2020, 193: 104661.
- [17] Araya T, Mlahlwa A V, Elbasit M A A, Newete S W. The impact of *Tamarix* invasion on the soil physicochemical properties. *Scientific Reports*, 2022, 12(1): 5750.
- [18] Newete S W, Abd Elbasit M A, Araya T. Soil salinity and moisture content under non-native *Tamarix* species. *International Journal of Phytoremediation*, 2020, 22(9): 931-938.
- [19] Wang Y, Zhang L M, Chen J, Feng L, Li F B, Yu L F. Functional diversity of plant communities in relationship to leaf and soil stoichiometry in Karst areas of southwest China. *Forests*, 2022, 13(6): 864.
- [20] Balazs K R, Munson S, Butterfield B J. Functional composition of plant communities mediates biomass effects on ecosystem service recovery across

- an experimental dryland restoration network. *Functional Ecology*, 2021
- [21] Yan X Y, Zhang L L, Xu Q, Qi L Y, Yang J Y, Dong X D, Jiang M G, Hu M J, Zheng J Q, Yu Y Y, Miao Y, Han S J, Wang D. Effects of variation in *Tamarix chinensis* plantations on soil microbial community composition in the middle Yellow River floodplain. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2023, 20(6): 5015.
- [22] Mao P L, Lin Q Z, Pang Y X, Wang K X, Ni R Q, Han X, Cao B H. Eco-physiological response mechanism of *Tamarix chinensis* to soil water changes in coastal wetlands of the Yellow River Delta. *Frontiers in Marine Science*, 2023, 10: 1231928.
- [23] Yang H J, Xia J B, Cui Q, Liu J T, Wei S C, Feng L, Dong K K. Effects of different *Tamarix chinensis*-grass patterns on the soil quality of coastal saline soil in the Yellow River Delta, China. *Science of the Total Environment*, 2021, 772: 145501.
- [24] Zhao X M, Xia J B, Chen W F, Chen Y P, Fang Y, Qu F Z. Transport characteristics of salt ions in soil columns planted with *Tamarix chinensis* under different groundwater levels. *PLoS One*, 2019, 14(4): e0215138.
- [25] Yu Q J, Suo L Z, Qi J, Wang Y, Hu Q L, Shan Y, Zhao Y. Soil habitat condition shapes *Tamarix chinensis* community diversity in the coastal saline-alkali soils. *Frontiers in Plant Science*, 2023, 14: 1156297.
- [26] 许喆, 米文宝, 米楠, 樊新刚. 工业运输活动对周边荒漠草原植物多样性与土壤性状的影响. *生态学报*, 2023, 43(12): 5060-5071.
- [27] 史恭发, 徐诺, 牛钊倩, 孙炜伦. 内蒙古大兴安岭东部林下植物生物多样性海拔差异. *生态学报*, 2024, 44(7): 3004-3015.
- [28] 孙佳, 夏江宝, 苏丽, 赵西梅, 陈印平, 岳喜元, 李传荣. 黄河三角洲盐碱地不同植被模式的土壤改良效应. *应用生态学报*, 2020, 31(4): 1323-1332.
- [29] Franklin J, Serra-Diaz J M, Syphard A D, Regan H M. Global change and terrestrial plant community dynamics. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2016, 113(14): 3725-3734.
- [30] Migliavacca M, Musavi T, Mahecha M D, Nelson J A, Knauer J, Baldocchi D D, Perez-Priego O, Christiansen R, Peters J, Anderson K. The three major axes of terrestrial ecosystem function. *Nature*, 2021, 598(7881): 468-472.
- [31] Luo Y, Gong Y. α diversity of desert shrub communities and its relationship with climatic factors in Xinjiang. *Forests*, 2023
- [32] Hong P B, Schmid B, De Laender F, Eisenhauer N, Zhang X W, Chen H Z, Craven D, De Boeck H J, Hautier Y, Petchey O L. Biodiversity promotes ecosystem functioning despite environmental change. *Ecology letters*, 2022, 25(2): 555-569.
- [33] Wang C, Hou Y H, Hu Y X, Zheng R L, Li X N. Plant diversity increases above-and below-ground biomass by regulating multidimensional functional trait characteristics. *Annals of Botany*, 2023, 131(6): 1001-1010.
- [34] Furey G N, Tilman D. Plant biodiversity and the regeneration of soil fertility. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2021, 118(49): e2111321118.
- [35] Chen X L, Chen H Y, Chen C, Ma Z, Searle E B, Yu Z P, Huang Z Q. Effects of plant diversity on soil carbon in diverse ecosystems: A global meta-analysis. *Biological Reviews*, 2020, 95(1): 167-183.
- [36] Li J Y, Chen Q F, Li Q, Zhao C S, Feng Y. Influence of plants and environmental variables on the diversity of soil microbial communities in the Yellow River Delta Wetland, China. *Chemosphere*, 2021, 274: 129967.
- [37] Zhao Y H, Li T, Shao P S, Sun J K, Xu W J, Zhang Z H. Variation in bacterial community structure in rhizosphere and bulk soils of different halophytes in the Yellow River Delta. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 2022, 9: 816918.
- [38] Xu Z, Li R Q, Dou W J, Wen H, Yu S L, Wang P, Ning L H, Duan J Q, Wang J C. Plant diversity response to environmental factors in Yellow River Delta, China. *Land*, 2024, 13(3): 264.
- [39] Liu S L, Hou X Y, Yang M, Cheng F Y, Coxico A, Wu X, Zhang Y Q. Factors driving the relationships between vegetation and soil properties in the Yellow River Delta, China. *Catena*, 2018, 165: 279-285.
- [40] Zhang T, Wang T, Liu K, Wang L X, Wang K, Zhou Y. Effects of different amendments for the reclamation of coastal saline soil on soil nutrient dynamics and electrical conductivity responses. *Agricultural Water Management*, 2015, 159: 115-122.
- [41] Zhang W W, Wang C, Xue R, Wang L J. Effects of salinity on the soil microbial community and soil fertility. *Journal of Integrative Agriculture*, 2019, 18(6): 1360-1368.
- [42] Zhang W, Ren C J, Deng J, Zhao F Z, Yang G H, Han X H, Tong X G, Feng Y Z. Plant functional composition and species diversity affect soil C, N, and P during secondary succession of abandoned farmland on the Loess Plateau. *Ecological Engineering*, 2018, 122: 91-99.
- [43] Wang L L, Zhang G H, Zhu P Z, Xing S K, Wang C S. Soil C, N and P contents and their stoichiometry as affected by typical plant communities on steep gully slopes of the Loess Plateau, China. *Catena*, 2022, 208: 105740.
- [44] Xiong J L, Dong L W, Lu J L, Hu W G, Gong H Y, Xie S B, Zhao D M, Zhang Y H, Wang X T, Deng Y. Variation in plant carbon, nitrogen and phosphorus contents across the drylands of China. *Functional Ecology*, 2022, 36(1): 174-186.
- [45] Zhang D Y, Peng Y F, Li F, Yang G B, Wang J, Yu J C, Zhou G Y, Yang Y H. Changes in above-/below-ground biodiversity and plant functional composition mediate soil respiration response to nitrogen input. *Functional Ecology*, 2021, 35(5): 1171-1182.

- [46] Zhao M L, Zhao J, Yuan J, Hale L, Wen T, Huang Q W, Vivanco J M, Zhou J Z, Kowalchuk G A, Shen Q R. Root exudates drive soil-microbe-nutrient feedbacks in response to plant growth. *Plant, Cell & Environment*, 2021, 44(2): 613-628.
- [47] Zhang W P, Fornara D, Yang H, Yu R P, Callaway R M, Li L. Plant litter strengthens positive biodiversity - ecosystem functioning relationships over time. *Trends in Ecology & Evolution*, 2023, 38(5): 473-484.
- [48] Liu S Q, Yang R, Peng X D, Hou C L, Ma J B, Guo J R. Contributions of plant litter decomposition to soil nutrients in ecological tea gardens. *Agriculture*, 2022, 12(7): 957.
- [49] JING P, WANG S, CHEN Y, LU W, MA C. Adaptation of salt-tolerant forage grasses to saline soil and their ability to improve saline soil utilization in southern Xinjiang region. *Acta Prataculturae Sinica*, 2017, 26(10): 56-63.
- [50] Sun J, Xia J B, Zhao X M, Gao F L, Zhao W L, Xing X S, Dong M M, Chu J M. Enrichment of soil nutrients and salt ions with different salinities under *Tamarix chinensis* shrubs in the Yellow River Delta. *Catena*, 2023, 232: 107433.
- [51] Zhai J X, Anderson J T, Yan G X, Cong L, Wu Y N, Dai L Y, Liu J K, Zhang Z M. Decomposition and nutrient dynamics responses of plant litter to interactive effects of flooding and salinity in Yellow River Delta wetland in northeastern China. *Ecological Indicators*, 2021, 120: 106943.
- [52] Li X Q, Xia J B, Zhao X M, Chen Y P. Effects of planting *Tamarix chinensis* on shallow soil water and salt content under different groundwater depths in the Yellow River Delta. *Geoderma*, 2019, 335: 104-111.
- [53] Zhou D Y, Ni Y H, Yu X N, Lin K X, Du N, Liu L L, Guo X, Guo W H. Trait-based adaptability of *Phragmites australis* to the effects of soil water and salinity in the Yellow River Delta. *Ecology and Evolution*, 2021, 11(16): 11352-11361.
- [54] Xia C C, Liu G D, Xia H Y, Jiang F T, Meng Y C. Influence of saline intrusion on the wetland ecosystem revealed by isotopic and hydrochemical indicators in the Yellow River Delta, China. *Ecological Indicators*, 2021, 133: 108422.
- [55] Xing X G, Kang D G, Ma X Y. Differences in loam water retention and shrinkage behavior: Effects of various types and concentrations of salt ions. *Soil and Tillage Research*, 2017, 167: 61-72.
- [56] 刘建波, 杨帆, 王志春, 聂朝阳, 张璐, 安丰华, 郭亮亮. 苏打盐渍土区土壤理化性质及植物生物量与微地形空间异质性关系. *土壤与作物*, 2021, 10(2): 163-176.
- [57] 贺文君, 韩广轩, 颜坤, 管博, 王光美, 路峰, 周英锋, 张乐乐, 周莉. 微地形对滨海盐碱地土壤水盐分布和植物生物量的影响. *生态学杂志*, 2021, 40(11): 3585-3597.
- [58] Zhang K, Xia J B, Su L, Gao F L, Cui Q, Xing X S, Dong M M, Li C R. Effects of microtopographic patterns on plant growth and soil improvement in coastal wetlands of the Yellow River Delta. *Frontiers in Plant Science*, 2023, 14: 1162013.
- [59] Qi J, Sun K X, Pan Y H, Hu Q L, Zhao Y. Effect of ridging shapes on the water - salt spatial distribution of coastal saline soil. *Water*, 2023, 15(16): 2999.
- [60] 苏丽, 葛磊, 夏江宝, 孙佳, 赵西梅. 黄河三角洲滨海滩涂不同微地形改造的盐地碱蓬恢复效应评价. *农业工程学报*, 2021, 37(10): 82-90.