

盐地碱蓬覆被对滨海滩涂土壤理化性质的影响

陈立华^{1a}, 张欢^{1a}, 姚宇阗², 张弛^{1b}, 郑金海^{1b}, 张凤革^{3, ①}

(1. 河海大学; a. 农业科学与工程学院, b. 港口海岸与近海工程学院, 江苏 南京 210098;
2. 江苏省沿海开发集团有限公司, 江苏 南京 210013; 3. 南京农业大学草业学院, 江苏 南京 210095)

摘要: 以滨海滩涂盐地碱蓬 [*Suaeda salsa* (Linn.) Pall.] 的覆被度 (VC) 为标准划定低覆被区 ($30% < VC \leq 50%$)、中覆被区 ($50% < VC \leq 80%$) 和高覆被区 ($80% < VC \leq 100%$), 并以光滩区 ($0% \leq VC \leq 30%$) 为对照, 对各样地的盐地碱蓬生长指标和土壤理化指标进行测定, 并分析了盐地碱蓬生长状况与土壤因子的相关性。结果表明: 不同覆被区盐地碱蓬的总生物量、植株密度和株高均有显著 ($P < 0.05$) 差异, 但茎直径则无显著差异; 随覆被度增大, 盐地碱蓬的各项生长指标依次升高。各覆被区的土壤容重总体上显著低于光滩区, 土壤的最大持水量、总孔隙度、毛管孔隙度和通气孔隙度总体上显著高于光滩区, 其中, 高覆被区的土壤物理性质变幅最大。随土层加深, 各覆被区的土壤 pH 值总体呈升高趋势, 但土壤的含水量和水溶性盐含量总体呈降低趋势; 而各样地的各土壤养分含量总体呈不同的变化趋势。随覆被度增大, 土壤 pH 值呈降低趋势, 而土壤的含水量、水溶性盐和有机质含量总体呈升高趋势。与光滩区相比, 各覆被区 0~20 cm 土层的土壤 pH 值和土壤全氮含量升高、土壤水溶性盐含量降低, 各覆被区各土层的土壤有机质含量不同程度升高、土壤速效磷含量不同程度降低; 此外, 高覆被区各土层的土壤含水量及中覆被区各土层的土壤全氮含量均高于光滩区, 各覆被区 40~60 cm 土层的土壤速效钾含量均高于光滩区。冗余分析结果表明: 盐地碱蓬生长指标与土壤的容重和 pH 值呈极显著 ($P < 0.01$) 负相关, 与土壤的总孔隙度、含水量、有机质含量和全氮含量分别呈极显著或显著正相关。综合分析结果表明: 相较于光滩区, 盐地碱蓬覆被区的土壤结构明显改善, 土壤的持水能力以及有机质和全氮的含量均不同程度升高; 提示盐地碱蓬适度覆被有利于改善滨海滩涂土壤理化性质, 提高土壤肥力, 特别是对浅层土壤的理化性质有较大影响。

关键词: 滨海滩涂; 盐地碱蓬; 覆被度; 土壤理化指标; 冗余分析

中图分类号: Q949.745.1; Q945.1 文献标志码: A 文章编号: 1674-7895(2021)02-0019-09

DOI: 10.3969/j.issn.1674-7895.2021.02.03

Effects of *Suaeda salsa* covering on soil physicochemical properties in coastal beach CHEN

Lihua^{1a}, ZHANG Huan^{1a}, YAO Yutian², ZHANG Chi^{1b}, ZHENG Jinhai^{1b}, ZHANG Fengge^{3, ①}

(1. Hohai University; a. College of Agricultural Science and Engineering, b. College of Harbour, Coastal and Offshore Engineering, Nanjing 210098, China; 2. Jiangsu Coast Development Group Co., Ltd., Nanjing 210013, China; 3. College of Agro-grassland Science, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China), *J. Plant Resour. & Environ.*, 2021, 30(2): 19-27

Abstract: Using vegetation coverage (VC) of *Suaeda salsa* (Linn.) Pall. in coastal beach as a reference, the vegetation-covered areas were delimited into low vegetation-covered area ($30% < VC \leq 50%$), medium vegetation-covered area ($50% < VC \leq 80%$) and high vegetation-covered area ($80% < VC \leq 100%$), and taking the bare land area ($0% \leq VC \leq 30%$) as the control, the growth indexes of *S. salsa* and the physicochemical indexes of soil in each sampling plot were measured, and the correlations between growth status of *S. salsa* and soil factors were analyzed. The results show that the total biomass, plant density and height of *S. salsa* in different vegetation-covered areas are significantly ($P < 0.05$)

收稿日期: 2020-10-27

基金项目: 江苏省重点研发计划 (BE2018736); 南京市城乡建设委员会科技项目 (20198131216)

作者简介: 陈立华 (1982—), 男, 江苏南京人, 博士, 副教授, 主要从事海岸带生态建设和滩涂植被生态修复方面的工作。

①通信作者 E-mail: zhangfengge@njau.edu.cn

引用格式: 陈立华, 张欢, 姚宇阗, 等. 盐地碱蓬覆被对滨海滩涂土壤理化性质的影响[J]. 植物资源与环境学报, 2021, 30(2): 19-27.

different, but the stem diameter shows no significant difference; with the increase of vegetation coverage, each growth index of *S. salsa* increases successively. The soil bulk density in each vegetation-covered area is generally significantly lower than that in bare land area, while the maximum moisture capacity, total porosity, capillary porosity and aeration porosity of soil are generally significantly higher than those in the bare land area, in which, the soil physical properties in the high vegetation-covered area have the largest variation degrees. With the deepening of soil layer, the soil pH value in each vegetation-covered area shows a tendency to increase in general, but the water content and water soluble salt content in soil show a tendency to decrease in general; while each soil nutrient content in each sampling plot all shows different variation tendencies in general. With the increase of vegetation coverage, the soil pH value shows a tendency to decrease, while the water content, water soluble salt content and organic matter content in soil show a tendency to increase in general. Compared with the bare land area, the soil pH value and soil total nitrogen content of 0–20 cm soil layer increase, while the soil water soluble salt content decreases, soil organic matter content of each soil layer increases while soil available phosphorus content decreases to different degrees in each vegetation-covered area; in addition, the soil water content of each soil layer in the high vegetation-covered area and the soil total nitrogen content of each soil layer in the medium vegetation-covered area are all higher than those in the bare land area, the soil available potassium content of 40–60 cm soil layer in each vegetation-covered area is higher than that in the bare land area. The redundancy analysis result shows that the growth indexes of *S. salsa* show extremely significant ($P < 0.01$) negative correlations with the bulk density and pH value of soil, and show extremely significant or significant positive correlations with the total porosity, water content, organic matter content and total nitrogen content in soil. The comprehensive analysis result shows that compared with the bare land area, the soil structure of vegetation-covered areas of *S. salsa* is obviously improved, and the water holding capacity and contents of organic matter and total nitrogen of soil increase to different degrees; it is indicated that appropriate coverage of *S. salsa* is beneficial to improve the physicochemical properties and fertility of soil in coastal beach, especially has a great influence on the physicochemical properties of the shallow soil.

Key words: coastal beach; *Suaeda salsa* (Linn.) Pall.; vegetation coverage; soil physicochemical index; redundancy analysis

滨海滩涂作为陆地和海洋生态系统间的过渡带,具有碳汇、防潮护岸和提供生物栖息地等功能^[1-2]。近年来,受沿海围垦、生物入侵、污染物排放和滩涂开发等方面的影响,滨海滩涂环境承载能力明显下降^[3]。滩涂植被具有抗风消浪、保持水土、维护生物多样性和维持滩涂生态系统等功能^[4],滩涂植被的恢复与建设对滨海滩涂生态系统的保护十分重要。

土壤理化特性是影响植物生长发育及其分布格局的重要因子之一^[5-6],尽管滨海湿地植被具有一定的特殊性,但其与土壤因子仍具有同样的关系。Angiolini等^[7]的研究结果表明:田间持水量、土壤pH值和土壤有机质含量等指标与地中海海岸带植被分布格局密切相关;郝翠等^[8]认为,土壤含水量和含盐量是形成滨海新区湿地植物分布格局的重要因子;高鑫等^[9]的研究结果表明:黄河三角洲滩涂的碱蓬、芦苇 [*Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud.] 和怪柳 (*Tamarix chinensis* Lour.) 等植物群落的土壤有机质含量和分布存在差异。从上述研究结果可见:滨海

湿地植物分布和生长与土壤理化性质间相互影响,且这种影响效应因植物种类不同而异。但目前相关研究涉及的土壤理化性质指标不全面,导致人们对滨海湿地植物生长与土壤因子间的互作关系缺乏深入了解。

传统的围垦开发对滨海滩涂的生态环境、生态功能和生物多样性有一定的负面影响^[10],导致滩涂植被多样性减少,因而,在滨海滩涂植被建设过程中,需要发展能够耐受高盐度和潮水淹没的植被^[11-12]。盐地碱蓬 [*Suaeda salsa* (Linn.) Pall.] 隶属于藜科 (Chenopodiaceae) 碱蓬属 (*Suaeda* Forssk. ex J. F. Gmel.), 为一年生草本植物,能够耐受含盐量高达 $10 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的盐土,是滨海滩涂高盐土壤生长的“先锋植物”^[13]。为探讨盐地碱蓬覆被对滨海滩涂土壤理化特性的影响,揭示盐地碱蓬对滩涂高盐土壤的适应性,作者在对盐地碱蓬生长状况调查的基础上,对不同覆被区的土壤理化指标进行分析和比较,明确盐地碱蓬覆被度与滩涂土壤理化性质的相关性,以期为滨

海滩涂植被建设和土壤改良提供基础研究数据。

1 研究区自然概况和研究方法

1.1 研究区自然概况

研究区位于江苏省东台市条子泥垦区的黄海堤内滩涂,地理坐标为东经 120°57'53"、北纬 32°50'52",海拔 0 m。属于亚热带和暖温带过渡区,季风显著;年均温 14.6 °C,年均日照时数 2 130 h;降水集中在 6 月至 9 月,年均降水量 1 050 mm,年均蒸发量 882.8 mm;年均风速 3.3 m·s⁻¹,平均空气相对湿度 80%。

研究区自然植被种类较为单一,以盐地碱蓬为主,分布少量的柹柳和芦苇等耐盐植物,多为单优势种群落。研究区土壤为粉砂质潮盐土,土壤板结,透气性差,水分和养分易流失,盐分离子以 Na⁺、K⁺ 和 Cl⁻ 为主,地下水位约 0.5~1.0 m。研究区内光滩区土壤理化性质如下:土壤容重 1.62 g·cm⁻³,总孔隙度 38.10%,田间持水量 18.19%,pH 8.72;水溶性盐、有机质和全氮的平均含量分别为 14.68、2.32 和 0.69 g·kg⁻¹,速效钾和速效磷的平均含量分别为 373.94 和 14.69 mg·kg⁻¹。

1.2 研究方法

1.2.1 样地设置 2019 年 8 月,在研究区内划定未经人工开发利用、地形平坦、除盐地碱蓬外无其他植物生长的区域为样地,并根据文献[14],以盐地碱蓬的覆被度(VC,即植被的垂直投影面积占样地面积的百分比)为标准划定光滩区(0%≤VC≤30%)和盐地碱蓬覆被区(30%<VC≤100%)。盐地碱蓬覆被区又分为低覆被区(30%<VC≤50%)、中覆被区(50%<VC≤80%)和高覆被区(80%<VC≤100%)3 个等级样地;研究区的光滩区无植物生长,为对照样地。

在上述各样地内分别划定 3 个面积 10 m×10 m 的大样方,记为 3 次重复;在每个大样方内按对角线等距设置 3 个面积 1.0 m×1.0 m 的小样方,共计 36 个小样方,进行植物和土壤样品的采集和分析。

1.2.2 植物生长指标测定 除光滩区外,记录每个小样方内盐地碱蓬的植株数量,并根据公式“植株密度=植株数量/样方面积”计算植株密度。在每个样方内随机选择盐地碱蓬 15 株,用钢卷尺(精度 0.1 cm)测量株高(地面到叶片自然伸长时最高处的距离),用电子游标卡尺(精度 0.01 cm)测量茎直径(茎基部的直径)。挖取每个小样方内全部完整植株,用

刷子除去表面泥土,用电子秤(精度 0.01 kg)称量鲜质量,之后将完整植株带回实验室,用蒸馏水洗净,置于烘箱中于 85 °C 烘干至恒质量,根据公式“总生物量=干质量/样方面积”计算不同覆被区盐地碱蓬的总生物量。各指标均重复测定 3 次,结果取平均值。

1.2.3 土壤理化指标测定 用不锈钢土钻在各样方中采集 0~20、20~40 和 40~60 cm 深度的土样,用环刀(100 cm³)采集植株根际土层(0~20 cm 深度)的原状土样,用于土壤理化指标分析。

采用环刀法^{[15]13-14}测定土壤容重、最大持水量和孔隙度(包括总孔隙度、毛管孔隙度和通气孔隙度),采用电位法^{[15]266-271}测定土壤 pH 值,采用烘干法^{[16]22-24}测定土壤含水量,采用电导法^{[16]183-187}测定水溶性盐含量,采用重铬酸钾氧化法^{[16]30-34}测定有机质含量,采用凯氏定氮法^{[16]44-49}测定全氮含量,采用 0.5 mol·L⁻¹ NaHCO₃ 法^{[16]81-83}测定速效磷含量,采用乙酸铵浸提-火焰光度法^{[16]106-108}测定速效钾含量。各指标均重复测定 3 次,结果取平均值。

1.3 数据处理和分析

使用 SPSS 18.0 统计软件对数据进行单因素方差分析,使用 Duncan's 测验进行显著性分析,使用 EXCEL 2019 软件制表,使用 CanoDraw for Windows 软件绘图;采用冗余分析(RDA)方法分析盐地碱蓬生长状况与土壤因子的相关性。

2 结果和分析

2.1 不同覆被区盐地碱蓬生长状况比较

滨海滩涂不同覆被区盐地碱蓬生长状况的比较结果见表 1。结果显示:高覆被区盐地碱蓬的生长状况最佳。在高覆被区,盐地碱蓬的总生物量分别为中覆被区和低覆被区的 2.49 和 5.12 倍,植株密度分别为中覆被区和低覆被区的 1.21 和 1.54 倍,株高分别为中覆被区和低覆被区的 1.26 和 1.70 倍,茎直径分别为中覆被区和低覆被区的 1.11 和 1.18 倍;随覆被度的增大,盐地碱蓬的各项生长指标依次升高。总体上看,不同覆被区盐地碱蓬的总生物量、植株密度和株高均有显著($P<0.05$)差异,但茎直径则无显著差异。

2.2 盐地碱蓬覆被区土壤理化性质的变化

2.2.1 土壤物理性质的变化 滨海滩涂盐地碱蓬覆被区土壤物理指标的比较结果见表 2。由表 2 可见:

高覆被区和中覆被区的土壤容重较光滩区(对照)分别降低了 17.79% 和 9.20%, 且差异均达显著 ($P < 0.05$) 水平, 而低覆被区的土壤容重与光滩区无显著差异。高覆被区、中覆被区和低覆被区的土壤最大持水量较光滩区分别升高了 121.82%、54.04% 和 55.00%, 总孔隙度较光滩区分别升高了 87.68%、48.17% 和 40.69%, 毛管孔隙度较光滩区分别升高了 82.63%、39.97% 和 51.99%, 且差异均达显著水平。

高覆被区和中覆被区的土壤通气孔隙度较光滩区分别升高了 106.67% 和 78.76%, 且差异均达显著水平; 而低覆被区的土壤通气孔隙度与光滩区无显著差异。

总体上看, 各盐地碱蓬覆被区的土壤容重显著低于光滩区, 土壤的最大持水量、总孔隙度、毛管孔隙度和通气孔隙度则显著高于光滩区, 其中, 高覆被区的土壤物理性质变化最明显, 土壤结构相对较好, 通气和持水能力更佳。

表 1 滨海滩涂不同覆被区盐地碱蓬生长状况的比较 ($\bar{X} \pm SD$)¹⁾

Table 1 Comparison on growth status of *Suaeda salsa* (Linn.) Pall. in different vegetation-covered areas in coastal beach ($\bar{X} \pm SD$)¹⁾

样地 Sampling plot	覆被度 Vegetation coverage (VC)	总生物量/(kg·m ⁻²) Total biomass	植株密度/m ⁻² Plant density	株高/cm Height	茎直径/cm Stem diameter
高覆被区 High vegetation-covered area	80% < VC ≤ 100%	0.87 ± 0.24a	322.2 ± 29.0a	42.48 ± 4.08a	0.20 ± 0.02a
中覆被区 Medium vegetation-covered area	50% < VC ≤ 80%	0.35 ± 0.04b	265.6 ± 16.5b	33.67 ± 0.95b	0.18 ± 0.02a
低覆被区 Low vegetation-covered area	30% < VC ≤ 50%	0.17 ± 0.03c	208.8 ± 14.5c	24.97 ± 1.28c	0.17 ± 0.02a

¹⁾ 同列中不同的小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$) Different lowercases in the same column indicate the significant ($P < 0.05$) difference.

表 2 滨海滩涂盐地碱蓬覆被区的土壤物理指标比较 ($\bar{X} \pm SD$)¹⁾

Table 2 Comparison on soil physical indexes in vegetation-covered areas of *Suaeda salsa* (Linn.) Pall. in coastal beach ($\bar{X} \pm SD$)¹⁾

样地 Sampling plot	覆被度 Vegetation coverage (VC)	容重/(g·cm ⁻³) Bulk density	最大持水量/% Maximum moisture capacity	总孔隙度/% Total porosity	毛管孔隙度/% Capillary porosity	通气孔隙度/% Aeration porosity
高覆被区 High vegetation-covered area	80% < VC ≤ 100%	1.34 ± 0.02c	32.63 ± 1.87a	56.96 ± 3.46a	43.63 ± 3.08a	13.33 ± 2.01a
中覆被区 Medium vegetation-covered area	50% < VC ≤ 80%	1.48 ± 0.04b	22.66 ± 1.89b	44.97 ± 3.17b	33.44 ± 2.10b	11.53 ± 1.86a
低覆被区 Low vegetation-covered area	30% < VC ≤ 50%	1.59 ± 0.03a	22.80 ± 2.08b	42.70 ± 2.16b	36.31 ± 3.20ab	6.39 ± 1.22b
光滩区 Bare land area (CK)	0% ≤ VC ≤ 30%	1.63 ± 0.04a	14.71 ± 4.07c	30.35 ± 4.59c	23.89 ± 6.11c	6.45 ± 1.53b

¹⁾ 同列中不同的小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$) Different lowercases in the same column indicate the significant ($P < 0.05$) difference.

2.2.2 土壤 pH 值的变化 滨海滩涂盐地碱蓬覆被区不同土层土壤 pH 值、含水量和水溶性盐含量的比较结果见表 3。由表 3 可见: 在盐地碱蓬覆被区, 0~20 cm 土层的土壤 pH 值均较低, 而 40~60 cm 土层的土壤 pH 值均较高; 其中, 中覆被区和低覆被区各土层间的土壤 pH 值无显著差异, 而高覆被区 0~20 cm 土层的土壤 pH 值显著低于 40~60 cm 土层。在光滩区, 0~20 cm 土层的土壤 pH 值显著低于其他土层, 但 20~40 cm 土层的土壤 pH 值与 40~60 cm 土层无显著差异。

高覆被区 0~20 cm 土层的土壤 pH 值较光滩区无显著变化, 而中覆被区和低覆被区 0~20 cm 土层的土壤 pH 值较光滩区分别升高了 3.46% 和 4.04%, 且差异均达显著水平; 高覆被区、中覆被区和低覆被区 20~40 cm 土层的土壤 pH 值较光滩区分别降低了 4.96%、2.37% 和 1.72%, 且差异均达显著水平; 高覆被区、中覆被区和低覆被区 40~60 cm 土层的土壤

pH 值较光滩区分别降低了 4.10%、1.84% 和 1.30%, 且差异均达显著水平。

总体上看, 各样地的土壤 pH 值随土层加深呈升高的趋势, 而随盐地碱蓬覆被度增大呈降低的趋势, 表明高覆被区土壤降碱效果更为明显。

2.2.3 土壤含水量的变化 由表 3 可见: 不同样地土壤含水量总体表现出随土层加深而降低的趋势, 其中, 中覆被区和低覆被区各土层间的土壤含水量无显著差异, 高覆被区仅 0~20 cm 土层的土壤含水量与 40~60 cm 土层间有显著差异, 而光滩区 0~20 cm 土层的土壤含水量显著高于其他土层。

从高覆被区、中覆被区到低覆被区, 各土层土壤含水量依次递减, 各覆被区间 0~20 和 20~40 cm 土层的土壤含水量差异显著。其中, 高覆被区 0~20 和 20~40 cm 土层的土壤含水量较光滩区分别增加了 10.53% 和 13.97%, 而低覆被区 0~20 和 20~40 cm 土层的土壤含水量较光滩区分别减少了 16.32% 和

表3 滨海滩涂盐地碱蓬覆被区不同土层土壤的pH值、含水量和水溶性盐含量比较($\bar{X}\pm SD$)

Table 3 Comparison on pH value, water content and soluble salt content in soil of different soil layers in vegetation-covered areas of *Suaeda salsa* (Linn.) Pall. in coastal beach ($\bar{X}\pm SD$)

样地 ¹⁾ Sampling plot ¹⁾	不同土层的土壤pH值 ²⁾ Soil pH value of different soil layers ²⁾		
	0~20 cm	20~40 cm	40~60 cm
HVC	8.72±0.03Bb	8.82±0.07ABc	8.88±0.04Ac
MVC	8.97±0.06Aa	9.06±0.07Ab	9.09±0.04Ab
LVC	9.02±0.07Aa	9.12±0.06Ab	9.14±0.04Ab
CK	8.67±0.01Bb	9.28±0.03Aa	9.26±0.01Aa

样地 ¹⁾ Sampling plot ¹⁾	不同土层的土壤含水量/% ²⁾ Soil water content of different soil layers ²⁾		
	0~20 cm	20~40 cm	40~60 cm
HVC	30.34±0.97Aa	29.20±0.82ABa	27.56±1.34Ba
MVC	26.26±0.78Ab	25.69±1.10Ab	25.69±1.05Aa
LVC	22.97±0.17Ac	22.67±1.09Ac	25.34±1.55Aa
CK	27.45±0.70Ab	25.62±0.43Bb	25.14±1.12Ba

样地 ¹⁾ Sampling plot ¹⁾	不同土层的土壤水溶性盐含量/(g·kg ⁻¹) ²⁾ Soil soluble salt content of different soil layers ²⁾		
	0~20 cm	20~40 cm	40~60 cm
HVC	11.60±0.68Aab	5.84±1.37Ba	2.97±1.42Ba
MVC	9.55±0.77Ab	4.27±1.42Ba	2.64±0.48Ba
LVC	10.93±1.39Aab	3.26±0.76Ba	1.71±0.05Ba
CK	13.48±1.50Aa	4.43±0.48Ba	2.34±0.11Ba

¹⁾ HVC: 高覆被区 High vegetation-covered area (80% < VC ≤ 100%); MVC: 中覆被区 Medium vegetation-covered area (50% < VC ≤ 80%); LVC: 低覆被区 Low vegetation-covered area (30% < VC ≤ 50%); CK: 光滩区 Bare land area (0% ≤ VC ≤ 30%). VC: 覆被度 Vegetation coverage.

²⁾ 同行中不同的大写字母表示同一指标在不同土层间差异显著 ($P < 0.05$) Different uppercases in the same row indicate the significant ($P < 0.05$) difference in the same index among different soil layers; 同列中不同的小写字母表示同一指标在不同样地间差异显著 ($P < 0.05$) Different lowercases in the same column indicate the significant ($P < 0.05$) difference in the same index among different sampling plots.

11.51%,且差异均达显著水平;而中覆被区0~20和20~40 cm土层的土壤水分含量与光滩区无显著差异,各覆被区40~60 cm土层的土壤含水量与光滩区也无显著差异。

总体上看,滨海滩涂盐地碱蓬覆被区土壤含水量随土层加深呈降低的趋势,其中,高覆被区土壤水分含量相对较高。

2.2.4 土壤水溶性盐含量的变化 由表3可见:不同样地土壤水溶性盐含量表现出随土层加深而降低的趋势,其中,各样地0~20 cm土层的土壤水溶性盐含量均显著高于20~40和40~60 cm土层。此外,光滩区0~20 cm土层的土壤水溶性盐含量高达13.48 g·kg⁻¹,在所有样地和所有土层中均最高。

各覆被区不同土层的土壤水溶性盐含量总体无显著差异;其中,从高覆被区、中覆被区到低覆被区,20~40和40~60 cm土层的土壤水溶性盐含量依次递减,而0~20 cm土层的土壤水溶性盐含量则表现出高覆被区和低覆被区较高、中覆被区较低的现象。各覆被区0~20 cm土层的土壤水溶性盐含量较光滩区均不同程度降低,其中,仅中覆被区0~20 cm土层的土壤水溶性盐含量与光滩区有显著差异,降低了29.15%;而各覆被区20~40和40~60 cm土层的土壤水溶性盐含量与光滩区无显著差异。

总体上看,滨海滩涂盐地碱蓬覆被区土壤水溶性盐含量随土层加深呈降低的趋势,其中,低覆被区各土层的土壤水溶性盐含量均低于光滩区,中覆被区0~20 cm土层的土壤水溶性盐含量显著低于光滩区,而高覆被区20~40和40~60 cm土层的土壤水溶性盐含量均高于光滩区,表明适度降低覆被度对土壤的脱盐效果相对较好。

2.2.5 土壤养分含量的变化 滨海滩涂盐地碱蓬覆被区不同土层土壤养分含量的比较结果见表4。由表4可见:不同样地土壤有机质含量表现出不同的变化趋势,但各覆被区不同土层间的土壤有机质含量均无显著差异。从光滩区、低覆被区、中覆被区到高覆被区,不同土层的土壤有机质含量依次递增,其中,低覆被区各土层的土壤有机质含量显著低于高覆被区,而光滩区各土层的土壤有机质含量均显著低于各覆被区。

不同样地各土层的土壤全氮含量表现出不同的变化趋势,但40~60 cm土层的土壤全氮含量总体最高;其中,中覆被区和光滩区的土壤全氮含量表现出随土层加深而升高的趋势,而高覆被区和低覆被区的土壤全氮含量则随土层加深表现出“高一低—高”的变化趋势。高覆被区、中覆被区和低覆被区0~20 cm土层的土壤全氮含量较光滩区分别升高了217.65%、86.27%和125.49%,且差异均达显著水平;高覆被区和低覆被区20~40 cm土层的土壤全氮含量较光滩区分别降低了58.74%和48.95%,且差异均达显著水平,而中覆被区20~40 cm土层的土壤全氮含量则高于光滩区,但二者无显著差异;各覆被区间40~60 cm土层的土壤全氮含量与光滩区均无显著差异。

各覆被区的土壤速效磷含量均表现出随土层加深而升高的趋势,其中,仅高覆被区0~20 cm土层的土壤速效磷含量显著低于其他土层;而光滩区的土壤

速效磷含量则随土层加深表现出“高一低一高”的变化趋势,其中,0~20 cm 土层的土壤速效磷含量显著高于其他土层。光滩区各土层的土壤速效磷含量均不同程度高于各覆被区,仅光滩区 0~20 cm 土层的土壤速效磷含量与各覆被区差异显著;各样地间 20~40 和 40~60 cm 土层的土壤速效磷含量均无显著差异。

不同样地土壤速效钾含量随土层加深表现出不同的趋势,光滩区土壤速效钾含量随土层加深呈降低的趋势,中覆被区和低覆被区土壤速效钾含量随土层加深波动变化,而高覆被区土壤速效钾含量随土层加深呈升高的趋势;其中,光滩区、中覆被区和低覆被区不同土层间的土壤速效钾含量均无显著差异,而高覆

被区仅 0~20 cm 土层的土壤速效钾含量显著低于其他土层。各样地间 0~20 cm 土层的土壤速效钾均无显著差异,但 20~40 和 40~60 cm 土层的土壤速效钾含量均以高覆被区最高,较光滩区分别升高了 18.58% 和 20.92%,且差异均达显著水平;而中覆被区和低覆被区 20~40 和 40~60 cm 土层的土壤速效钾含量与光滩区无显著差异。

总体上看,盐地碱蓬覆被区土壤有机质含量显著高于光滩区,各覆被区 0~20 cm 土层的土壤全氮含量显著升高、土壤速效磷含量显著降低,且高覆被区 20~40 和 40~60 cm 土层的土壤速效钾含量也显著升高,表明高覆被区土壤养分水平总体上高于中覆被区和低覆被区。

表 4 滨海滩涂盐地碱蓬覆被区不同土层的土壤养分含量比较 ($\bar{X}\pm SD$)

Table 4 Comparison on soil nutrient content of different soil layers in vegetation-covered areas of *Suaeda salsa* (Linn.) Pall. in coastal beach ($\bar{X}\pm SD$)

样地 ¹⁾ Sampling plot ¹⁾	不同土层的土壤有机质含量/(g·kg ⁻¹) ²⁾ Soil organic matter content of different soil layers ²⁾			不同土层的土壤全氮含量/(g·kg ⁻¹) ²⁾ Soil total nitrogen content of different soil layers ²⁾		
	0~20 cm	20~40 cm	40~60 cm	0~20 cm	20~40 cm	40~60 cm
HVC	5.27±0.29Aa	6.00±0.51Aa	5.90±0.45Aa	1.62±0.12Aa	0.59±0.13Bb	1.58±0.44Aa
MVC	4.70±0.16Aab	5.33±0.38Aab	5.17±0.52Aab	0.95±0.13Bb	1.71±0.42ABa	2.37±0.35Aa
LVC	4.43±0.33Ab	4.70±0.14Ab	4.73±0.19Ab	1.15±0.23Bb	0.73±0.21Bb	1.91±0.13Aa
CK	2.93±0.18Bc	3.69±0.10Ac	3.89±0.04Ac	0.51±0.18Bc	1.43±0.30ABa	2.32±0.33Aa

样地 ¹⁾ Sampling plot ¹⁾	不同土层的土壤速效磷含量/(mg·kg ⁻¹) ²⁾ Soil available phosphorus content of different soil layers ²⁾			不同土层的土壤速效钾含量/(mg·kg ⁻¹) ²⁾ Soil available potassium content of different soil layers ²⁾		
	0~20 cm	20~40 cm	40~60 cm	0~20 cm	20~40 cm	40~60 cm
HVC	4.85±0.59Bb	6.70±0.29Aa	7.24±0.57Aa	331.72±21.66Ba	405.24±25.01Aa	411.92±20.05Aa
MVC	4.94±0.29Ab	6.19±0.95Aa	6.62±0.34Aa	358.45±17.04Aa	331.77±14.25Ab	361.78±24.58Aab
LVC	4.85±0.89Ab	5.61±0.82Aa	6.09±0.85Aa	335.06±26.31Aa	345.09±12.50Ab	342.75±21.66Ab
CK	12.12±0.57Aa	6.95±0.85Ba	7.53±1.17Ba	351.77±8.19Aa	341.75±16.37Ab	340.65±8.09Ab

¹⁾ HVC: 高覆被区 High vegetation-covered area (80%<VC≤100%); MVC: 中覆被区 Medium vegetation-covered area (50%<VC≤80%); LVC: 低覆被区 Low vegetation-covered area (30%<VC≤50%); CK: 光滩区 Bare land area (0%≤VC≤30%). VC: 覆被度 Vegetation coverage.

²⁾ 同行中不同的大写字母表示同一指标在不同土层间差异显著 ($P<0.05$) Different uppercases in the same row indicate the significant ($P<0.05$) difference in the same index among different soil layers; 同列中不同的小写字母表示同一指标在不同样地间差异显著 ($P<0.05$) Different lowercases in the same column indicate the significant ($P<0.05$) difference in the same index among different sampling plots.

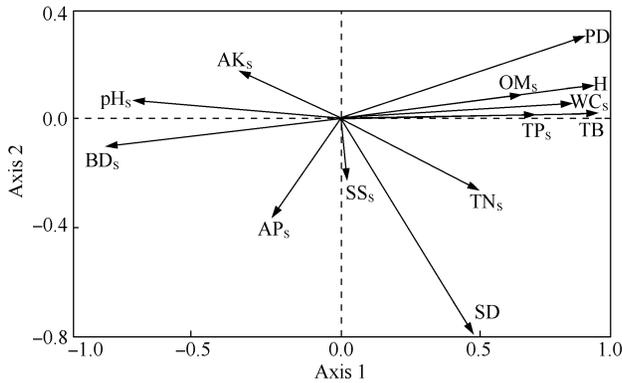
2.3 盐地碱蓬生长状况与土壤理化指标的关系

滨海滩涂盐地碱蓬覆被区的盐地碱蓬生长指标与土壤理化指标的 RDA 排序图见图 1。RDA 第 1 排序轴解释了植被与土壤关系的 77.7%, 第 2 排序轴解释了植被与土壤关系的 20.9%, 二者共同解释了植被与土壤关系的 98.6%。

由图 1 可见,盐地碱蓬的总生物量、植株密度和株高与土壤的容重、pH 值、速效磷含量和速效钾含量呈负相关,与土壤的总孔隙度、含水量、有机质含量和全氮含量呈正相关,与土壤水溶性盐含量的相关性较

弱;盐地碱蓬茎直径与土壤的容重、pH 值和速效钾含量呈负相关,与其他土壤因子均呈正相关,但相关性均较弱。

相关性分析结果表明:RDA 第 1 排序轴与土壤的容重和 pH 值呈极显著 ($P<0.01$) 负相关,与总孔隙度和含水量呈极显著正相关,与有机质含量和全氮含量呈显著 ($P<0.05$) 正相关;RDA 第 2 排序轴与土壤因子无显著相关性。总体上看,滨海滩涂盐地碱蓬的生长指标与土壤的容重、pH 值、总孔隙度、含水量、有机质含量和全氮含量显著相关。



BD_s: 土壤容重 Soil bulk density; TP_s: 土壤总孔隙度 Soil total porosity; pH_s: 土壤 pH 值 Soil pH value; WC_s: 土壤含水量 Soil water content; SS_s: 土壤水溶性盐含量 Soil water soluble salt content; OM_s: 土壤有机质含量 Soil organic matter content; TN_s: 土壤全氮含量 Soil total nitrogen content; AP_s: 土壤速效磷含量 Soil available phosphorus content; AK_s: 土壤速效钾含量 Soil available potassium content; TB: 总生物量 Soil total biomass; PD: 植株密度 Plant density; H: 株高 Height; SD: 茎直径 Stem diameter.

图1 滨海滩涂盐地碱蓬覆被区的盐地碱蓬生长指标与土壤理化指标的 RDA 排序图

Fig. 1 RDA ordination diagram of growth indexes of *Suaeda salsa* (Linn.) Pall. with physicochemical indexes of soil in vegetation-covered areas of *S. salsa* in coastal beach

3 讨论和结论

植物生长对土壤理化性质影响显著,同时土壤理化性质的改变对植物生长有反馈作用^[11-12]。盐地碱蓬根系主要分布在 0~20 cm 土层,对根际土壤物理性质影响较大,对深层土壤的物理性质影响较小。本文中,盐地碱蓬覆被可降低其根际土壤容重,提高土壤的最大持水量、总孔隙度、毛管孔隙度和通气孔隙度。土壤容重反映了土壤结构和持水能力^[17],土壤孔隙反映了土壤疏松程度^[18],因此,盐地碱蓬的生长可以优化土壤结构,提高土壤持水能力,促进土质疏松透气,总体上显著改善了其根际土壤的物理性质。

土壤 pH 值变化与植物种类和凋落物的酸碱度有关^[19]。在高盐土壤中,植物从土壤中吸收 Na⁺、K⁺、Ca²⁺ 和 Cl⁻ 等无机离子,以提高细胞内渗透势、促进水分吸收,从而保证正常的生理代谢,同时分泌或释放出 H⁺ 和有机酸等^[19],使土壤 pH 值改变,这也是盐地碱蓬覆被区土壤 pH 值变化的原因之一。与光滩区相比,盐地碱蓬覆被区表层(0~20 cm 土层)土壤的 pH 值偏高,可能与盐地碱蓬的同化枝盐腺与空气中 CO₂ 结合形成 HCO₃⁻ 有关^[20-21]。盐地碱蓬覆被区 20~60 cm 土层的土壤 pH 值显著 ($P < 0.05$) 低于

光滩区,可能是由于土壤微生物和植物根系呼吸产生的 CO₂ 溶解于土壤水中形成碳酸,加之凋落物分解产生有机酸^[22-23],中和了土壤的碱性,使土壤 pH 值降低。高覆被区植物根系的呼吸作用较强,因此,其土壤降碱效果略强于中覆被区和低覆被区。

尚辉等^[24]认为,滩涂土壤盐分的聚集效应主要受降水和地表蒸发影响。在本研究区内,光滩区土壤板结,降水入渗难,土壤水分蒸发量远大于降水量,导致地表持续积盐,表层土壤水溶性盐含量高;而在盐地碱蓬的高覆被区和中覆被区,浅层(0~40 cm 土层)土壤含水量增加,可能与盐地碱蓬的覆被增加了地表覆被度、抑制土壤返盐、改善土壤结构,提高了土壤持水能力有关;低覆被区浅层土壤含水量显著低于光滩区,可能与低覆被区覆被度低、土壤结构无明显改善、土壤持水能力较差,而盐地碱蓬的生长和代谢加剧了土壤水分的散失有关。

盐地碱蓬是吸盐植物^[25],可从土壤中吸收盐分并积累在体内,从而转移土壤盐分,促进土壤脱盐。但在本研究中,高覆被区的表层土壤水溶性盐含量与光滩区无显著差异,而中覆被区表层土壤水溶性盐含量则显著低于光滩区,这可能是由于高覆被区的盐地碱蓬密度大,枝叶凋落物积累量大,凋落物中的大量盐分返回土壤^[26],增加了表层土壤水溶性盐含量。这一现象也提示在高盐环境中高密度定植耐盐植物短期内脱盐效果不显著。

盐地碱蓬的生长改善了区域小环境,影响其凋落物的转化,促进有机质累积,并间接影响氮、磷、钾元素的循环。土壤有机质含量是土壤重要的养分指标之一^[27],其含量高低取决于生物量产生与分解的平衡状态,以及土壤储存有机质的能力^[28]。本研究中,盐地碱蓬的覆被显著增加了土壤有机质含量,但盐地碱蓬植株矮小,根系短而细,土壤有机质的来源以根系新陈代谢和枯枝落叶形成的腐殖质为主,因而表层土壤有机质含量最高。但各覆被区不同土层间的土壤有机质含量无显著差异,可能原因是研究区分布在海堤边缘且地势较低,受海水倒灌和潮汐涨落的影响,有机质随潮水淋溶至土壤深处,表层部分有机质随退潮流失,加之深层土壤中还可能含有泥沙淤积携带的陆源生物和海洋生物等生物源有机质,导致覆被区表层土壤与深层土壤有机质含量差异不大。

植物需从土壤中不断吸收氮、磷、钾等元素维持自身生长发育^[29]。土壤氮元素的输入途径主要有植

物残体的归还、生物固氮和少量大气氮沉降^[11,30]。氮元素先在土壤表层聚集^[31],后随水分向下层缓慢扩散,而植物根系也会吸收深层土壤中氮元素并向根际土层转运,用于其生长发育,这也是盐地碱蓬覆被区表层土壤全氮含量显著高于光滩区的原因。高覆被区和低覆被区 20~40 cm 土层的土壤全氮含量低于光滩区,且各覆被区 40~60 cm 土层的土壤全氮含量与光滩区无显著差异,可能与土壤中氮元素的迁移速率和盐地碱蓬的生长年限等因子有关。中覆被区和低覆被区 20~60 cm 土层的土壤速效钾含量与光滩区无显著差异,而高覆被区 20~60 cm 土层的土壤速效钾含量显著高于光滩区,可能与高覆被区的土壤通透性大幅增强,土壤微生物活动加剧,促进了钾盐分解和溶出有关。盐地碱蓬在生长发育过程中需要从土壤中吸收大量磷素,导致表层土壤速效磷含量迅速降低,而盐地碱蓬覆被区 20~60 cm 土层的土壤速效磷含量与光滩区无显著差异,可能是因为土壤磷元素的固定和吸收多在植物根系密度较大、水分含量较高的浅层土壤进行^[32],且磷元素在土壤中沿剖面向下淋溶的可能性不大且淋溶量少^[33],故盐地碱蓬覆被区较深的土壤中速效磷水平无明显变化。

冗余分析结果表明:盐地碱蓬的生长指标与土壤的容重、pH 值、总孔隙度、含水量、有机质含量和全氮含量显著相关,其中,盐地碱蓬的生长指标与土壤容重呈极显著($P<0.01$)负相关,与总孔隙度呈极显著正相关,表明盐地碱蓬的覆被使滨海滩涂高盐土壤的容重降低、孔隙度增加,优化了土壤结构,同时,优化的土壤使植物根系伸展阻力减小^[34],有利于盐地碱蓬生长。土壤 pH 值对土壤微生物活动、土壤养分的有效性和形态、植物根系酶活性等都有显著影响^[35],盐地碱蓬的生长指标与土壤 pH 值呈极显著负相关,可能与强碱环境可抑制植物对养分的吸收^[36],进而抑制盐地碱蓬生长发育有关。盐地碱蓬生长指标与土壤含水量呈极显著正相关,表明土壤水分是维持植物生长和种群稳定的重要水源和主要驱动力^[37-38]。

植物对限制性环境因子的适应,很大程度上影响着植物的生理生态特性,从而影响植物生物量的积累^[39]。滨海滩涂区域的土壤有机质和全氮匮乏,为植物分布和生长的限制性环境因子,而在盐地碱蓬覆被区,生物量增大,凋落物分解增加^[40],促进了土壤中有有机质和氮素的积累,从而为盐地碱蓬生长发育提供养分。因此,盐地碱蓬生长指标与土壤的有机质含

量和全氮含量呈显著正相关。

综上所述,相较于光滩区,滨海滩涂有盐地碱蓬覆被的区域土壤结构明显改善,土壤的持水能力以及有机质和全氮含量均不同程度升高,各覆被区土壤理化性质总体上变化显著;盐地碱蓬生长指标与土壤的容重和 pH 值呈极显著负相关,与总孔隙度、含水量、有机质含量和全氮含量呈极显著或显著正相关。盐地碱蓬的生长对滨海滩涂土壤理化性质有改良作用,其中,高覆被区土壤理化性质的改善程度最明显。通过植被建设进行滨海滩涂生态保护或土壤改良是一个长期的过程,未来需长期跟踪盐地碱蓬生长发育过程中滨海滩涂土壤结构和肥力等理化性质的变化,从而为滨海滩涂植被建设提供理论支撑。

参考文献:

- [1] MOXHAM C, KENNY S A, BEESLEY L S, et al. Large-scale environmental flow results in mixed outcomes with short-term benefits for a semi-arid floodplain plant community[J]. *Freshwater Biology*, 2019, 64: 24-36.
- [2] XIE L, WANG B, XIN M, et al. Impacts of coppicing on *Tamarix chinensis* growth and carbon stocks in coastal wetlands in northern China[J]. *Ecological Engineering*, 2020, 147: 105760.
- [3] LIU R, PU L, ZHU M, et al. Coastal resource-environmental carrying capacity assessment: a comprehensive and trade-off analysis of the case study in Jiangsu coastal zone, eastern China[J]. *Ocean and Coastal Management*, 2020, 186: 105092.
- [4] CHEN L, REN C, ZHANG B, et al. Spatiotemporal dynamics of coastal wetlands and reclamation in the Yangtze Estuary during past 50 years (1960s-2015)[J]. *Chinese Geographical Science*, 2018, 28(3): 386-399.
- [5] GUO Y, HOU L, ZHANG Z, et al. Soil microbial diversity during 30 years of grassland restoration on the Loess Plateau, China: tight linkages with plant diversity [J]. *Land Degradation and Development*, 2019, 30: 1172-1182.
- [6] WANG C, FU B, ZHANG L, et al. Soil moisture-plant interactions: an ecohydrological review [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2019, 19: 1-9.
- [7] ANGIOLINI C, LANDI M, PIERONI G, et al. Soil chemical features as key predictors of plant community occurrence in a Mediterranean coastal ecosystem[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2013, 119: 91-100.
- [8] 郝 翠, 梁耀元, 孟伟庆, 等. 天津滨海新区自然湿地植物分布与土壤理化性质的关系[J]. *湿地科学*, 2009, 7(3): 266-272.
- [9] 高 鑫, 靖淑慧, 朱源山. 滨海湿地不同群落下土壤有机质的差异研究[J]. *科技经济导刊*, 2017(1): 96-97, 95.
- [10] LIU C, ZHANG Z, ZHANG X, et al. Coastal development history and tidal flat ecosystem conservation along the coast of Jiangsu

- Province, China[J]. *Journal of Coastal Conservation*, 2019, 23: 857-867.
- [11] CHEN B, SUN Z. Effects of nitrogen enrichment on variations of sulfur in plant-soil system of *Suaeda salsa* in coastal marsh of the Yellow River estuary, China[J]. *Ecological Indicators*, 2020, 109: 105797.
- [12] LI J, HUSSAIN T, FENG X, et al. Comparative study on the resistance of *Suaeda glauca* and *Suaeda salsa* to drought, salt, and alkali stresses[J]. *Ecological Engineering*, 2019, 140: 105593.
- [13] ZHANG X, LI M, YANG H, et al. Physiological responses of *Suaeda glauca* and *Arabidopsis thaliana* in phytoremediation of heavy metals[J]. *Journal of Environmental Management*, 2018, 223: 132-139.
- [14] 谭清梅,刘红玉,张华兵,等.基于遥感的江苏省滨海湿地景观植被覆盖度分级研究[J].*遥感技术与应用*, 2013, 28(5): 934-940.
- [15] 鲁如坤.土壤农业化学分析方法[M].北京:中国农业出版社,2000.
- [16] 鲍士旦.土壤农化分析[M].3版.北京:中国农业出版社,2000.
- [17] 罗先香,敦萌,闫琴.黄河口湿地土壤磷素动态分布特征及影响因素[J].*水土保持学报*, 2011, 25(5): 154-160.
- [18] 董聿森,夏江宝,陆兆华,等.莱州湾南岸高、中和低密度柽柳林地土壤理化特征[J].*湿地科学*, 2019, 17(4): 470-477.
- [19] 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.
- [20] 董正武,赵英,雷加强,等.塔克拉玛干沙漠不同区域柽柳沙包土壤盐分分布特征及其影响因素[J].*植物生态学报*, 2018, 42(8): 873-884.
- [21] 尹传华,董积忠,石秋梅,等.不同生境下盐生灌木盐岛效应的变化及生态学意义[J].*土壤学报*, 2012, 49(2): 289-295.
- [22] DING L J, SU J Q, LI H, et al. Bacterial succession along a long-term chronosequence of paddy soil in the Yangtze River Delta, China[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2017, 104: 59-67.
- [23] HAICHAIR F E Z, SANTAELLA C, HEULIN T, et al. Root exudates mediated interactions belowground[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2014, 77: 69-80.
- [24] 尚辉,颜安,韩瑞,等.微生物改良基质对新围垦海涂盐土改良的初步研究[J].*农业工程学报*, 2020, 36(8): 120-126.
- [25] FOUNTOLAKIS M S, SABATHIANAKIS G, KRITSOTAKIS I, et al. Halophytes as vertical-flow constructed wetland vegetation for domestic wastewater treatment[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 583: 432-439.
- [26] YANG B, WANG R, XIAO H, et al. Spatio-temporal variations of soil water content and salinity around individual *Tamarix ramosissima* in a semi-arid saline region of the upper Yellow River, Northwest China[J]. *Journal of Arid Land*, 2018, 10(1): 101-114.
- [27] 王立艳,潘洁,杨勇,等.滨海盐碱地种植耐盐草本植物的肥土效果[J].*草业科学*, 2014, 31(10): 1833-1839.
- [28] 王洁,贾文雄,赵珍,等.祁连山北坡草甸草原地上生物量与土壤理化性质的关系[J].*水土保持研究*, 2017, 24(1): 36-42, 48.
- [29] 郭嘉,徐化凌,张明乾,等.6种典型盐生植物生长对盐土养分的作用研究[J].*林业资源管理*, 2019(3): 107-112.
- [30] MA Y, YANG Y, LIU R, et al. Adaptation of euhalophyte *Suaeda salsa* to nitrogen starvation under salinity[J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2020, 146: 287-293.
- [31] XU Y, WANG X, BAI J, et al. Estimating the spatial distribution of soil total nitrogen and available potassium in coastal wetland soils in the Yellow River Delta by incorporating multi-source data[J]. *Ecological Indicators*, 2020, 111: 106002.
- [32] HERRERA L F R, SHANE M W, LÓPEZ-BUCIO J. Nutritional regulation of root development[J]. *Wiley Interdisciplinary Reviews-Developmental Biology*, 2015, 4: 431-443.
- [33] 王军静,白军红,赵庆庆,等.哈拉海湿地芦苇沼泽土壤碳、氮和磷含量的剖面特征[J].*湿地科学*, 2014, 12(6): 690-696.
- [34] 刘晚荷,李良贤,谢海容,等.土壤容重对野生香根草幼苗根系形态及其生物量的影响[J].*草业学报*, 2015, 24(4): 214-220.
- [35] 白娜,王立,孔东升.黑河自然保护区沼泽湿地土壤化学性质的空间分布特征研究[J].*草业学报*, 2017, 26(5): 15-28.
- [36] 丁珊珊,于晓菲,王国平,等.水盐条件变化对盐沼湿地植物生理生态特性及土壤环境的影响[J].*土壤与作物*, 2019, 8(2): 166-177.
- [37] WU G L, ZHANG Z N, WANG D, et al. Interactions of soil water content heterogeneity and species diversity patterns in semi-arid steppes on the Loess Plateau of China[J]. *Journal of Hydrology*, 2014, 519: 1362-1367.
- [38] YANG L, WEI W, CHEN L, et al. Response of temporal variation of soil moisture to vegetation restoration in semi-arid Loess Plateau, China[J]. *Catena*, 2014, 115(1): 123-133.
- [39] 张彩琴,张军,李茜若.草地植被生物量动态研究视角与研究方法评述[J].*生态学杂志*, 2015, 34(4): 1143-1151.
- [40] 李强,周道玮,陈笑莹.地上枯落物的累积、分解及其在陆地生态系统中的作用[J].*生态学报*, 2014, 34(14): 3807-3819.

(责任编辑:郭严冬)