

DOI: 10.19741/j.issn.1673-4831.2022.0468

张英蕾, 吴炎慧, 刘红玉, 等. 基于土壤水分和盐分含量变化的滨海湿地盐地碱蓬生态退化诊断[J]. 生态与农村环境学报, 2023, 39(8): 1067-1076.

ZHANG Ying-lei, WU Yan-hui, LIU Hong-yu, et al. Study on Ecological Degradation Diagnosis of *Suaeda salsa* in Coastal Wetland Based on Changes of Soil Moisture and Salinity Content[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2023, 39(8): 1067-1076.

基于土壤水分和盐分含量变化的滨海湿地 盐地碱蓬生态退化诊断

张英蕾, 吴炎慧, 刘红玉^①, 李玉凤, 邱春琦, 周诗薇, 黄琬淳, 周 永 (南京师范大学海洋科学与工程学院, 江苏 南京 210023)

摘要: 水分和盐分是滨海湿地土壤环境因子的综合表征, 是控制盐地碱蓬生长的关键因子。选取江苏盐城滨海湿地的盐地碱蓬(*Suaeda salsa*)为研究对象, 结合野外调查和室内实验的方法, 测算分析不同生长环境条件下盐地碱蓬种群和个体形态与土壤水分和盐分含量之间的关系, 诊断其生态退化程度。结果表明: 土壤水分和盐分与盐地碱蓬的生长状态关系密切, 是决定种群密度、盖度及个体高度、根长、一级分枝数、单株盖度的关键因子。正常状态盐地碱蓬区的土壤含水量 w 稳定在 18.61%~32.18% 之间, 电导率稳定在 2.53~20.33 $\text{mS} \cdot \text{cm}^{-1}$ 之间, 成熟期种群平均密度为 44 株 $\cdot \text{m}^{-2}$, 植株株高与根长分别为 14~23 和 12~20 cm, 分枝多且单株盖度高, 生态指数区间为 [0.8, 1.0]; 轻度退化和中-重度退化状态盐地碱蓬区的土壤含水量为 8.03%~35.45%, 电导率为 0.69~34.25 $\text{mS} \cdot \text{cm}^{-1}$, 波动幅度大且稳定性差, 成熟期种群平均密度可高达 1 516 株 $\cdot \text{m}^{-2}$, 植株株高与根长分别为 17~56 和 5~19 cm, 分枝少且单株盖度低, 生态指数区间分别为 [0.6, 0.8] 和 [0, 0.6]。研究结果可为滨海湿地盐地碱蓬的生态退化诊断与恢复效果评估提供科学依据。

关键词: 滨海湿地; 盐地碱蓬; 土壤水盐; 生态退化; 熵权-灰色关联分析

中图分类号: Q948.11; S151.9 文献标志码: A 文章编号: 1673-4831(2023)08-1067-10

Study on Ecological Degradation Diagnosis of *Suaeda salsa* in Coastal Wetland Based on Changes of Soil Moisture and Salinity Content. ZHANG Ying-lei, WU Yan-hui, LIU Hong-yu^①, LI Yu-feng, QIU Chun-qi, ZHOU Shi-wei, HUANG Wan-chun, ZHOU Yong (College of Marine Science and Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China)

Abstract: Moisture and salinity are the basic characteristics of soil in coastal wetlands, and are the key factors affecting the growth of *Suaeda salsa*. The study selected Yancheng Coastal Wetland of Jiangsu Province as research area. The diagnosis of *Suaeda salsa* degradation state was determined by analyzing the relationship between soil moisture, salinity and *Suaeda salsa*. The results show that: (1) Soil moisture and salinity were closely related to the growth of *Suaeda salsa*, and were the key factors determining plant individual morphology. (2) Soil moisture and salinity of *Suaeda salsa* was between 18.61%~32.18% and 2.53~20.33 $\text{mS} \cdot \text{cm}^{-1}$, respectively, in the normal state. During the maturity period, the average plant density was 44 plants $\cdot \text{m}^{-2}$, and plant height and root length were between 14~23 and 12~20 cm, respectively, with many branches and high single plant coverage. The ecological index range was between 0.8 and 1. The soil moisture of *Suaeda salsa* was between 8.03% and 35.45% and the soil salinity was between 0.69 and 34.25 $\text{mS} \cdot \text{cm}^{-1}$, in slightly degraded and moderately to severely degraded states, showing a large fluctuation and low stability. During the maturity period, the average plant density can reach to 1 516 plants $\cdot \text{m}^{-2}$, and the plant height and root length were between 17~56 cm and 5~19 cm, respectively, with few branches and low single plant coverage, and the ecological index ranges were [0.6, 0.8] and [0, 0.6], respectively. The results of the study could provide scientific basis for ecological degradation diagnosis and restoration effect evaluation of coastal *Suaeda salsa*.

收稿日期: 2022-05-13

基金项目: 国家自然科学基金(31971547); 江苏省重点研发计划专项(BE2018681)

① 通信作者 E-mail: liuhongyu@njnu.cn

Key words: coastal wetlands; *Suaeda salsa*; soil moisture and salinity; ecological degradation; entropy weight-grey relation analysis

盐地碱蓬(*Suaeda salsa*)属藜科碱蓬属植物,为一年生草本,主要分布于滨海、湖边及荒漠等各种盐碱环境中。较强的耐盐碱能力使盐地碱蓬成为滨海湿地的先锋植物,并作为黑嘴鸥、丹顶鹤等鸟类栖息、觅食的场所,是生态修复和评判湿地恢复的重要物种^[1-2]。受互花米草(*Spartina alterniflora*)入侵、滩涂围垦等影响^[3],盐地碱蓬的适宜生境发生了改变,退化十分严重。前人已围绕盐地碱蓬及其生境做了大量的研究工作。宋洪海等^[4]研究发现,土壤条件中水分不足导致土壤盐分含量过高是造成盐地碱蓬死亡的主要原因。管博等^[5]和李珊等^[6]研究发现,水盐的交互作用对盐地碱蓬的株高、根长以及分枝数产生显著影响。相关研究结果表明,水分和盐分是滨海湿地环境因子的综合体现^[7],是直接影响盐地碱蓬生长状态与生态退化的关键因素。但目前相关研究以室内栽培控制变量的实验方法为主,不能很好地反映野外复杂水盐环境条件下的盐地碱蓬生态退化问题。如何利用水分和盐分这 2 个关键影响因子及野外实地调查数据,以盐地碱蓬的生长状态为依据直观判断其生态退化程度,是盐地碱蓬生态恢复与重建研究亟待解决的科学问题。

该研究以江苏盐城滨海湿地的盐地碱蓬为研究对象,选取了趋于原生环境、受人为干扰而处于退化状态以及人工恢复效果较差的盐地碱蓬区,基于野外调查和室内实验数据,以原生环境中的盐地碱蓬作为参照,对比分析土壤水分和盐分对盐地碱蓬生长的影响,阐明盐地碱蓬种群及植株形态变化与生态退化的关系,合理划分退化等级。这有助于野外条件下直观诊断不同环境中盐地碱蓬的生态退化程度和修复状况,为保护和恢复盐地碱蓬提供科学参考。

1 研究区域与方法

1.1 研究区选择

盐城滨海湿地位于江苏海岸带中部,是我国沿海保存最完整、面积最大的淤泥质滩涂湿地^[8],主要植被类型为互花米草、盐地碱蓬、芦苇(*Phragmites australis*)等。研究于 2020 年 12 月对盐城滨海湿地的盐地碱蓬进行了初步采样调查,进而确定了 5 块代表性典型样区(图 1)。样区 1 为东台条子泥南部潮间带原生盐地碱蓬区,此区位于潮间带前缘,受人

为干扰较小,趋于自然状态,作为参照区;样区 2 为条子泥南部方塘河口互花米草入侵盐地碱蓬区,此区受互花米草入侵影响严重;样区 3 为弶港梁垛河口堤内残存盐地碱蓬区,此区受海堤阻隔影响,海陆水文连通性差;样区 4 为盐城保护区试验区的种植盐地碱蓬恢复区,此区位于水塘和道路之间,是人工播种盐地碱蓬区;样区 5 为南缓冲区潮间带的退渔还湿盐地碱蓬恢复区,为人工撒种恢复的盐地碱蓬区。

1.2 数据来源与方法

1.2.1 盐地碱蓬种群调查

根据各样区大小设置不同长度的样线,每条样线等间距设置多个 0.5 m×0.5 m 的样方(表 1),确保所设样方的数量能反映每个区域不同环境下盐地碱蓬的生长状况。各区样方设置如下:样区 1 自陆向海至无植被生长的光滩,样区 2 自陆至潮沟区域,样区 3 和 4 自陆至水域边缘,样区 5 自陆至养殖塘前缘。对每个样点利用手持 GPS 进行定位,分别于 2021 年萌发期(4 月)、生长期(6 月)和成熟期(10 月)调查样方内盐地碱蓬种群的密度、盖度,测量植株株高、根长和一级分枝数,并计算单株盖度(盐地碱蓬总盖度/数量),以便更好地反映盐地碱蓬的生长状态。

1.2.2 土壤水分和盐分测定

每个样方用铁铲采集样方内 0~15 cm 深度土壤,装入自封袋密封带回实验室,除去根系、枝叶后,用烘干法测定土壤含水量^[9]。对于 2020 年 12 月初步采样带回的土壤,以水土质量比 5:1 通过离心法制备水浸提液,测定盐分含量。相关性分析表明,实验所测土壤盐分含量与野外所测土壤电导率呈显著正相关($r=0.885, P<0.01$),在后期采样中直接利用土壤原位电导率仪(美国 Spectrum EC450)测定 0~15 cm 深度土壤电导率,以土壤电导率来反映土壤盐分含量^[10-12]。

1.2.3 盐地碱蓬生态退化诊断方法

综合灰色关联分析法和熵权法计算盐地碱蓬生态指数(图 2),从而对其生态退化状况进行诊断。灰色关联分析实质上是对样区盐地碱蓬状态离理想状态的远近程度做出比较客观的判断^[13-14],避免人为判断的主观性。根据生态退化诊断参照区的选取方法^[15],确定受干扰程度小、环境稳定、趋于自然状态的样区 1 作为盐地碱蓬未退化状态的参照区,其他样区为比较区。

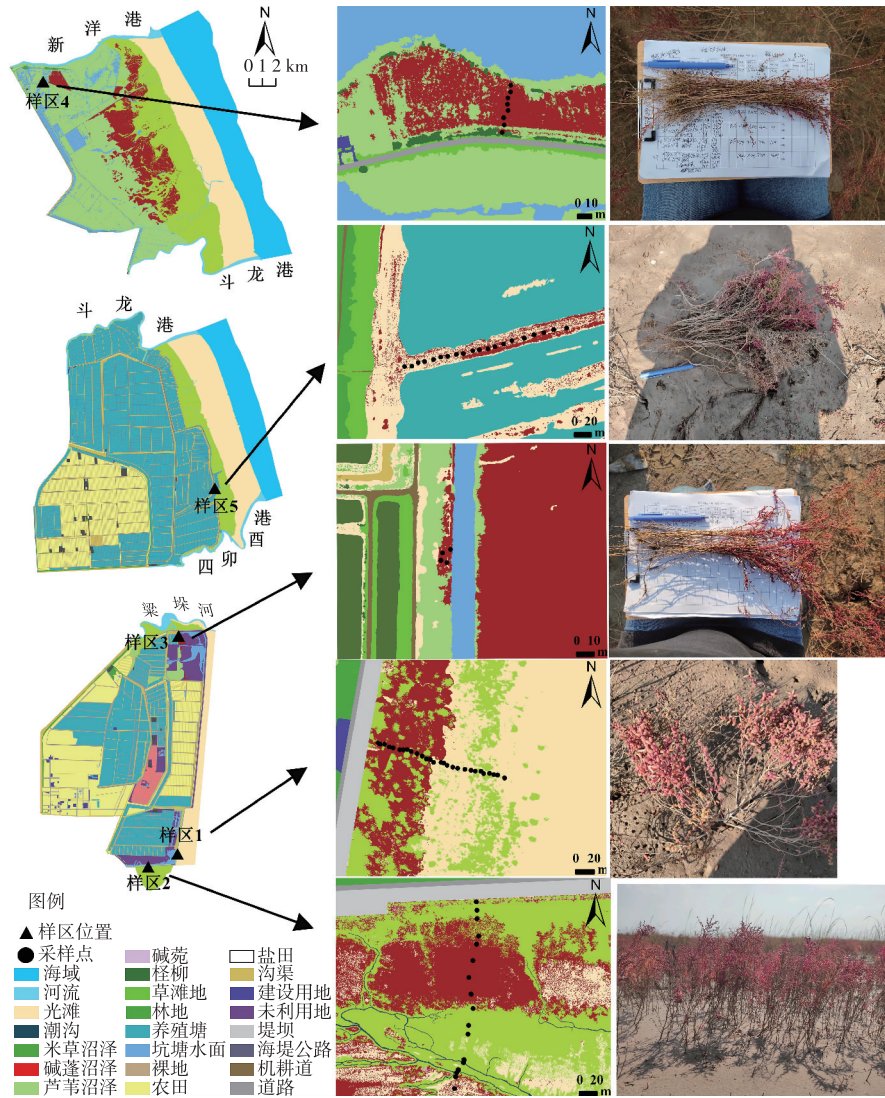


图 1 采样区、样点位置和野外实拍图

Fig. 1 Sample area, sample point location and *Suaeda salsa* field photos

表 1 样方设置

Table 1 Design of sampling plots

样区编号	样区名称	经纬度	时间	样方数量	样方号
样区 1	条子泥南潮间带原生碱蓬区	32°43'10"~32°43'16" N, 120°55'27"~120°55'28" E	2021 年 4 月	26	1-1~1-26
			2021 年 6 月	26	1-1~1-26
			2021 年 10 月	28	1-1~1-28
样区 2	条子泥南方塘河口互花米草入侵碱蓬区	32°43'16"~32°43'08" N, 120°55'28"~120°55'40" E	2021 年 4 月	18	2-1~2-18
			2021 年 6 月	20	2-1~2-20
			2021 年 10 月	20	2-1~2-18
样区 3	弥港梁垛河口堤内残存碱蓬区	32°52'20"~32°52'41" N, 120°56'42"~120°56'52" E	2021 年 4 月	8	3-1~3-8
			2021 年 6 月	3	3-1~3-3
			2021 年 10 月	4	3-1~3-4
样区 4	盐城保护区试验种植碱蓬恢复区	33°36'22"~33°36'23" N, 120°31'11"~120°31'11" E	2021 年 4 月	8	4-1~4-8
			2021 年 6 月	8	4-1~4-8
			2021 年 10 月	8	4-1~4-8
样区 5	南缓冲区潮间带退渔还湿碱蓬恢复区	33°23'03"~33°23'05" N, 120°42'57"~120°43'05" E	2021 年 10 月	20	5-1~5-20

用下式计算比较区 $\{x_i\}$ 与参照区 $\{x_0\}$ 的第 k 评价指标的关联系数 $\xi_i(k)$:

$$\xi_i(k) = \frac{\min_{(i)} \min_{(k)} |x_0(k) - x_i(k)| + \rho \times \max_{(i)} \max_{(k)} |x_0(k) - x_i(k)|}{|x_0(k) - x_i(k)| + \rho \times \max_{(i)} \max_{(k)} |x_0(k) - x_i(k)|} \quad (1)$$

式(1)中, $x_0(k)$ 为样区 1 盐地碱蓬生态退化评价指标所构成的数列,称为参照数列,其中“0”表示参照区, k 表示该样区生态退化评价的第 k 个指标; $x_i(k)$ 为第 i 个比较样区各评价指标构成的数列,称

为比较数列,由该比较数列和参照数列组成对比数列矩阵; ρ 为分辨系数,取值范围为 0~1,通常选择 0.5。

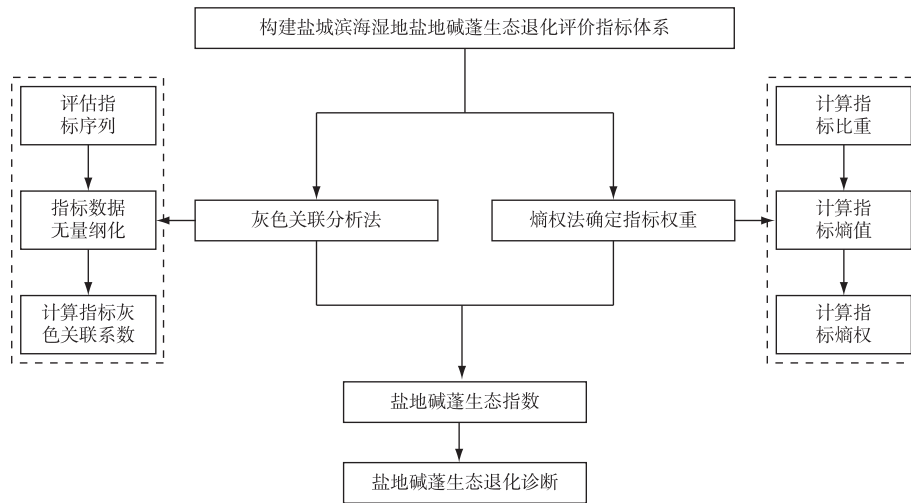


图 2 基于熵权-灰色关联分析法的盐地碱蓬生态退化诊断技术路线

Fig. 2 Technical route for diagnosing the ecological degradation of *Suaeda salsa* based on entropy weight grey correlation analysis

熵权法是判断指标离散程度的数学方法^[16],优点是直接采用决策矩阵信息客观测算各项指标的权重。首先对原始数据进行归一化处理,使其无量纲化,计算第 i 样区第 j 项指标值的特征比重或贡献度(p_{ij}):

$$p_{ij} = \frac{x_{ij}'}{\sum_{i=1}^n x_{ij}'} \quad (2)$$

接着,计算第 j 项指标的熵值(E_j):

$$E_j = -\frac{1}{\ln n} \sum_{i=1}^n (p_{ij} \times \ln p_{ij}), \quad 0 \leq E_j \leq 1 \quad (3)$$

然后,确定评价指标的权重 (W_j):

$$W_j = \frac{1 - E_j}{\sum_{j=1}^m (1 - E_j)}, \quad j = 1, 2, 3, \dots, m \quad (4)$$

最终,根据 $\xi_i(k)$ 和 W_j 求出不同比较样区的盐地碱蓬生态指数(R_i):

$$R_i = \sum_{j=1}^n W_j \xi_i(k) \quad (5)$$

式(5)中,比较样区指数值越大,表示与参照样区盐

地碱蓬的生长状态更接近。

1.3 数据处理与分析

用 Excel 软件初步统计、处理野外调查数据和实验数据,用 Origin 软件绘制点线图和柱状图。利用 Canoco 5 软件进行土壤水分、盐分含量与盐地碱蓬种群及个体形态的冗余分析(RDA),所生成的 RDA 排序图中,箭头长短表示盐地碱蓬与土壤水盐的关系,箭头越长表示相关性越大,反之则越小;夹角大小则表示两者之间的相关性,夹角小于 90°表示呈正相关,夹角大于 90°表示呈负相关,夹角接近 90°表示几乎不相关^[17]。

2 结果与分析

2.1 盐地碱蓬样区土壤水分和盐分变化及特征

各样区盐地碱蓬土壤的水盐及其稳定性存在显著差异(图 3)。样区 1 作为参照区,其水盐环境比较稳定,3 个时期土壤含水量 w 稳定在 18.61%~32.18%之间,电导率在 2.53~20.33 $\text{mS} \cdot \text{cm}^{-1}$ 之间,两者的平均值分别为 9.16% 和 10.67 $\text{mS} \cdot \text{cm}^{-1}$,最大值分别为生长期的 9.90% 和成熟期的 11.96 $\text{mS} \cdot \text{cm}^{-1}$;其中电导率在 4 月萌发期从陆向

海呈增大趋势,增量为 $10.37 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$,其余 2 个时期略有波动,含水量则表现出萌发期最低、成熟期最高的特征。样区 2 的土壤水盐含量在萌发期最低、成熟期最高,含水量和电导率分别在 $18.21\% \sim 35.45\%$ 和 $2.12 \sim 34.10 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$ 之间变化,平均值分别为 11.36% 和 $16.51 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$,波动幅度随时间的推移呈增大趋势,最大值分别为成熟期的 14.97% 和 $28.71 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$,与样区 1 相比,样区 2 的水盐含量波动范围更大,整体稳定性较差。样区 3 的土壤含水量和电导率在生长期最低,整个采样期两者分别在 $21.76\% \sim 33.47\%$ 和 $0.69 \sim 26.03 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$ 之间变化,平均值分别为 6.16% 和 $13.27 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$,最大值均出现在萌发期,分别为 11.71% 和 $25.34 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$,与样区 1 相比,土壤水盐变化

范围大,土壤盐分的稳定性较差。样区 4 土壤含水量和电导率的波动区间分别为 $8.03\% \sim 23.84\%$ 和 $2.09 \sim 10.15 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$,平均值分别为 6.74% 和 $5.53 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$,最大值分别为生长期的 6.72% 和萌发期的 $8.07 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$;其中,土壤盐分变化较小,土壤水分表现出 6 月最低、10 月最高的特征,与样区 1 相比,该区土壤表现出低盐低水且稳定的状态。样区 5 成熟期的土壤含水量和电导率分别在 $21.09\% \sim 29.84\%$ 和 $9.38 \sim 34.25 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$ 之间变化,平均值分别为 8.75% 和 $24.88 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$;与同期样区 1 相比,样区 5 的水分和盐分波动幅度较大,与同属盐地碱蓬恢复区的样区 4 相比,其土壤表现出高盐高水的特征。

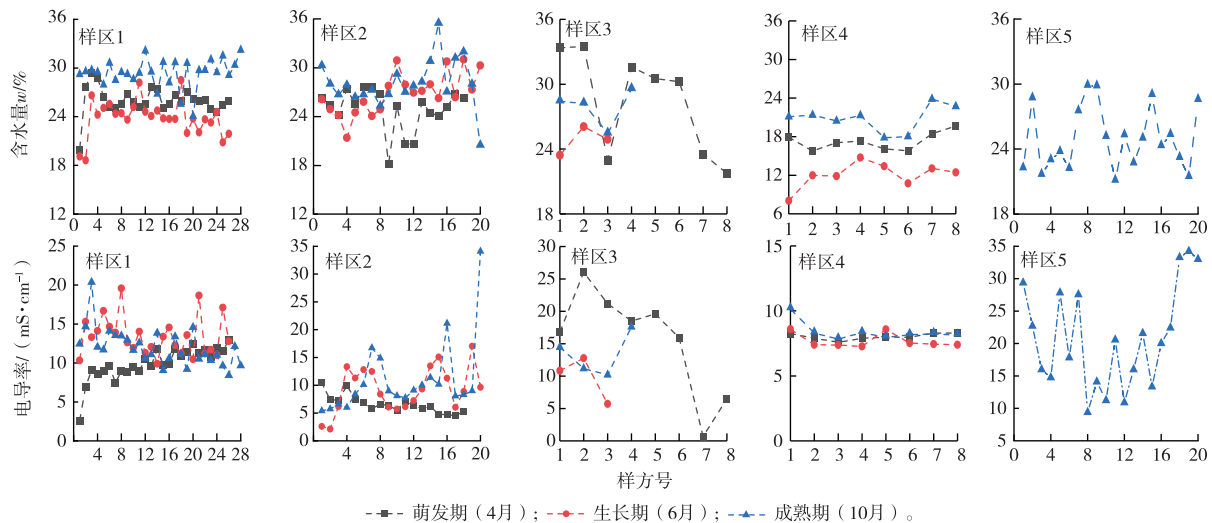


图3 各样区土壤水分和盐分的变化

Fig. 3 Changes of soil moisture and salinity in sample areas

2.2 盐地碱蓬种群和个体形态变化特征

各样区不同环境下盐地碱蓬在萌发期和生长期处于不断生长变化中,到 10 月成熟期时,植株生长趋缓,其状态至枯落前基本不会发生较大改变(图 4)。样区 1 作为参照区,从萌发期至成熟期各指标值稳定增大,其盖度、单株盖度以及株高的增幅较为明显,分别增长 36.95 百分点、 7.06 百分点和 11.25 cm ;成熟期时,盐地碱蓬的种群密度达 $44 \text{ 株} \cdot \text{m}^{-2}$,盖度约为 44% ,植株株高 20.25 cm ,根长 15.83 cm ,一级分枝数和单株盖度分别为 9 个和 8.19% 。样区 2 盐地碱蓬各指标值呈波动变化,除株高外的其余指标均在 6 月达最大值,10 月则有所降低,与样区 1 相比,株高变化幅度最大,变化量达 29.86 cm ;成熟期时,除株高外的指标值均小于样区

1,最终表现出低密度且植株细高的形态。样区 3 从萌发期至成熟期,盐地碱蓬的种群密度降低,每平方米约减少 508 株,盖度、单株盖度和株高则呈显著增长趋势,增量分别为 18.82 百分点、 0.38 百分点和 27.48 cm ,相比样区 1,该区株高变化最大,根长变化最小,成熟期的盐地碱蓬表现出高密度、高植株、短根系、无分枝的特征。样区 4 从萌发期至成熟期,盐地碱蓬的种群密度减幅最大,每平方米约减少 1408 株,盖度、单株盖度、株高和根长的变化趋势与样区 3 相近,但整体增幅更大,分别增长 31.98 百分点、 0.14 百分点、 30.46 cm 和 1.48 cm ;至成熟期,该区盐地碱蓬的特征与样区 3 相近,且更细高。与样区 1 相比,样区 5 成熟期的盐地碱蓬单株盖度、分枝数、根长较小;而与同属恢复区的样区 4 相比,

则表现出低密度、高盖度、长根系的特征。

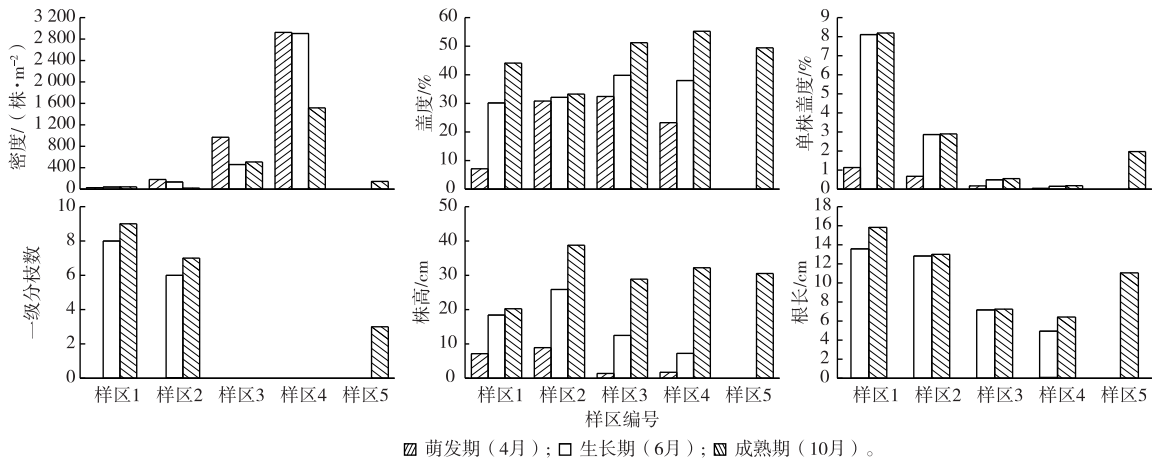


图 4 各样区盐地碱蓬种群和个体形态变化特征

Fig. 4 Morphological changes and characteristics of populations and individuals of *Suaeda salsa* in sample areas

2.3 盐地碱蓬种群和个体形态与土壤水分和盐分的关系

对土壤水盐数据和盐地碱蓬各指标值进行冗余分析(RDA),结果如图 5 所示。比较发现,研究区土壤水分和盐分与盐地碱蓬的生长状态相关性极强。其中,萌发期土壤水盐与盐地碱蓬种群密度和盖度呈负相关,与单株盖度呈正相关,株高与土壤含水量呈正相关,与盐分的相关性较小;生长期土壤水盐与种群密度和盖度呈负相关,与其余个体形态指标呈正相关;成熟期时,土壤水盐与盐地碱蓬种群密度和盖度依旧存在负相关关系,与根长、

单株盖度呈正相关,株高与盐度呈正相关,与含水量的相关性较小,一级分枝数则相反。分析显示,土壤水盐对盐地碱蓬的种群和个体形态具有极大的影响,萌发期间过高的土壤水盐会对盐地碱蓬的萌发定植起抑制作用,并且在低盐胁迫环境中,土壤含水量在一定范围内的升高会促进盐地碱蓬幼苗株高增长,进而促使单株盖度增大;生长期和成熟期的土壤水盐会促进盐地碱蓬形态改变,在一定范围内形态指标会随两者的增加而增大,但两者过高会导致盐地碱蓬植株死亡,降低种群密度和盖度。

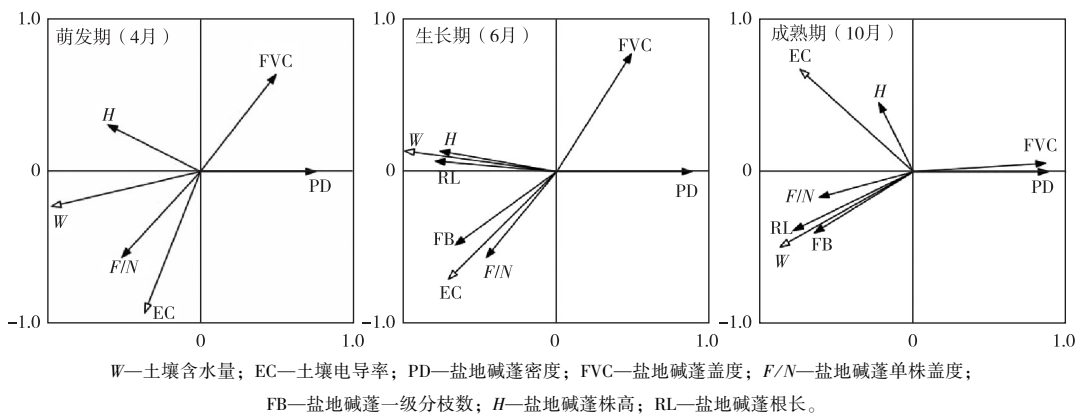


图 5 盐地碱蓬种群和个体形态与土壤水盐的 RDA 排序图

Fig. 5 RDA ordination diagrams of soil moisture and salinity and the *Suaeda salsa*

2.4 基于熵权-灰色关联分析法的盐地碱蓬生态退化诊断

前述分析表明,土壤水盐与盐地碱蓬的生长状态关系密切,即盐地碱蓬的种群状态和个体形态是

土壤水盐环境影响下的外在表现。因此,可以通过盐地碱蓬的外在生长状态直观诊断其生态退化程度。结合野外实地调查和相关分析,萌发期与生长期的盐地碱蓬还处于生长阶段,其种群和个体形态

变化速度快,不能作为盐地碱蓬的最终状态进行生态退化诊断,10 月盐地碱蓬转入以生殖生长为主的成熟期,其形态至枯落前基本不会发生较大改变;

因此选取该时期各样区盐地碱蓬种群及个体形态指标均值构建生态退化评价指标体系(表 2),并计算生态指数。

表 2 成熟期各样区盐地碱蓬生态退化评价指标均值

Table 2 Mean value of ecological degradation indicators of *Suaeda salsa* at maturity

样区编号	密度/(株·m ⁻²)	盖度/%	株高/cm	根长/cm	单株盖度/%	一级分枝数
样区 1(CK)	44	44.09	20.25	15.83	8.19	9
样区 2	20	33.26	38.78	13.00	2.90	7
样区 3	508	51.22	28.88	7.25	0.55	0
样区 4	1 516	55.23	32.21	6.10	0.18	0
样区 5	144	49.42	30.53	11.06	1.97	3

根据灰色关联法和熵权法得到各样区盐地碱蓬生态退化评价指标的灰色关联系数和权重,结果

见表 3。

表 3 各样区盐地碱蓬生态退化评价指标的灰色关联系数及权重

Table 3 Grey correlation coefficient and weight of *Suaeda salsa* ecological degradation indicators

样区编号	灰色关联系数					
	密度	盖度	株高	根长	单株盖度	一级分枝数
样区 1(CK)	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
样区 2	0.968	0.877	0.728	0.758	0.861	0.462
样区 3	0.613	0.915	0.852	0.410	0.672	0.373
样区 4	0.333	0.873	0.806	0.410	0.643	0.362
样区 5	0.880	0.935	0.829	0.511	0.786	0.422
权重	0.274	0.086	0.090	0.208	0.136	0.206

各样区的盐地碱蓬生态指数由大到小依次为样区 1(1.000)、样区 2(0.776)、样区 5(0.696)、样区 3(0.577)、样区 4(0.487),可见不同样区的盐地碱蓬具有较大差异。由此可以判定样区 2、样区 5 与参照状态样区 1 的盐地碱蓬生长状态更为接近,样区 4 与样区 1 差距最大。

(0.8,1.0],轻度退化状态[0.6,0.8],中-重度退化状态[0,0.6)。据此将 5 个样区的盐地碱蓬划分为 3 个等级,样区 1 为参照状态,样区 2、样区 5 为轻度退化状态,样区 3、样区 4 为中-重度退化状态。

不同退化程度的盐地碱蓬所对应的土壤水分和盐分与植株数据见表 4。

盐地碱蓬生态退化等级划分如下:参照状态

表 4 成熟期盐地碱蓬的土壤水盐与植株状态

Table 4 Soil moisture and salinity and plant status of *Suaeda salsa* in sample areas at maturity period

样区	含水量/%		土壤电导率/(mS·cm ⁻¹)		密度/(株·m ⁻²)		盖度/%		株高/cm		根长/cm		单株盖度/%		一级分枝数	
	范围	均值	范围	均值	范围	均值	范围	均值	范围	均值	范围	均值	范围	均值	范围	均值
样区 1	24~32	29.4	8~20	12.0	8~208	44	29.3~57.8	44.1	14~23	20.3	12~20	15.8	0.7~27.8	8.2	5~19	9
样区 2	20~35	28.1	5~34	11.0	16~80	20	21.0~42.1	33.3	17~56	38.8	8~19	13.0	0.5~8.6	2.9	3~15	7
样区 5	21~30	25.0	9~35	20.8	32~400	144	36.7~66.7	49.4	21~39	30.5	7~16	11.1	0.5~4.9	2.0	2~4	3
样区 3	25~30	27.9	10~18	13.4	172~832	508	44.1~59.0	51.2	18~37	28.9	6~8	7.3	≤1		—	—
样区 4	17~24	20.8	2~10	5.8	472~2 224	1 516	39.0~60.4	55.2	28~42	32.2	5~7	6.1	≤1		—	—

“—”表示无分枝数。

作为参照状态的样区 1 土壤含水量和电导率波动区间的极差值分别为 9%和 13 mS·cm⁻¹,水盐含量较稳定;盐地碱蓬密度和盖度均值相近,植株形态总体差异度小,株高和根长的极差值分别为 9 和

8 cm,分枝数多且单株盖度高。轻度退化状态的土壤含水量均值小于参照状态,电导率的极差值大于 26 mS·cm⁻¹,为参照状态波动区间极差值的 2 倍;盐地碱蓬密度和盖度差异较大,植株形态差异显

著,其中样区 2 株高和根长的极差值最大,分别为 40 和 11 cm,平均株高约为参照状态的 2 倍,但根系较短,单株盖度低且一级分枝数少。中-重度退化状态的土壤含水量和电导率值普遍较低,且极差值小;盐地碱蓬种群表现出高密度、低盖度的特征,植株高、根系短,株高和根长的最大极差值分别为 19 和 2 cm,没有一级分枝,单株盖度最低。与参照状态相比,退化的盐地碱蓬土壤水盐异常且稳定性差,株高与其余个体形态指标成反比,通常表现为高植株、短根系、单株盖度低、一级分枝数少或不分枝的形态,特别是在碱蓬密度大的情况下该特征更为明显,如中-重度退化的样区 3 和样区 4。最终成熟期盐地碱蓬表现出的形态为参照状态呈“矮胖树形”,退化状态呈“高瘦形”。

3 讨论

3.1 盐地碱蓬区土壤水分和盐分变化的原因

人类活动使滨海湿地的外围环境不断改变,导致土壤水分和盐分发生变化^[18-19],进而直接影响盐地碱蓬生长,造成生态退化。轻度退化状态的样区 2、5 通过潮沟与外围海域相连。其中,样区 2 沿潮沟成片分布的互花米草形成生物堤,阻断了潮汐水的周期性滋养,使得盐地碱蓬土壤水盐格局发生改变,同时由于盐地碱蓬群落的盖度低于互花米草群落,土壤蒸发返盐强度大,致使盐地碱蓬区土壤往往出现高盐低水的现象;样区 5 由于恢复盐地碱蓬区两侧的地势低矮,导致沿潮沟流进的海水易发生囤积现象,使该区长时间维持较高的土壤盐分。

中-重度退化状态的样区 3 土壤水分和盐分主要源于受闸坝控制的外围水环境,很大程度上受闸坝放水周期的影响,同时较大面积的盐地碱蓬受外围水域的作用程度不一致,使得土壤水盐的差异性显著;与其他样区相比,保护区管理恢复的样区 4 地距海较远(约 8 km),难以接受潮汐水流的影响,并且该区从陆向临近水域的地形坡度大(4.14%),该区土壤水分快速下渗流失的同时又得不到及时补充,导致土壤水分和盐分偏少。因此,导致退化盐地碱蓬区土壤水分和盐分存在差异的原因各不相同,但可以通过互花米草区刈割^[20]、建立良好的排水灌溉系统等水盐调控方式恢复退化区的土壤水盐环境,以更好地恢复盐地碱蓬。

3.2 土壤水分和盐分对盐地碱蓬生长的影响

分析土壤水分和盐分与盐地碱蓬的生长关系发现,水分和盐分的变化对盐地碱蓬的生长产生一定影响,并且水盐环境的不稳定性和不适宜性会造

成早期已萌发生长的植株死亡,这与孙旭等^[21]通过室内栽培实验得到的研究结果相一致。结合熵权-灰色关联分析诊断得到的盐地碱蓬退化结果可以看出,在土壤电导率高、含水量少或 2 个指标值都较低的区域,盐地碱蓬密度大,植株高,根长短,单株盖度低。王摆等^[22]的研究表明,野外条件下盐地碱蓬的生长具有适宜的水盐生态阈值区间。在一定含量的水盐条件下,盐地碱蓬的分支数、根长以及开花数目增多^[23-25]。但当土壤水分或盐分超出盐地碱蓬生态阈值的上下限时^[26-27],植株生长受限。夏宁等^[28]研究发现,当土壤含盐量达 $11 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,盐地碱蓬的植株颜色、茎粗、叶片肉质化程度发生改变,达 $19.5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时出现枯萎死亡现象。李悦等^[29]研究发现,较低的土壤水分会使植物出现生理干旱从而限制其生长。土壤含水量过高时,植物的叶片又会出现萎蔫、老化、茎基变粗等现象^[30]。以上研究均表明,一定含量的土壤水分和盐分对盐地碱蓬的生长具有促进作用,而过高或过低的水分和盐分会改变盐地碱蓬的生长形态,并最终导致植株处于退化状态。

3.3 其他因素对盐地碱蓬生长的影响

野外条件下盐地碱蓬的生长受多重环境因素的共同影响,为了评价土壤水分和盐分及其交互作用对盐地碱蓬种群及个体形态的影响,运用方差分解(VPA)进行解析。分析结果显示,在盐地碱蓬的生长过程中,土壤水分和盐分及其交互作用对其的贡献度分别为 25.4%、18.1%和 16.8%,未解释部分占 39.7%,表明野外环境中除水盐这 2 种主要影响因素外,盐地碱蓬的生长还受到其他因素的影响。已有室内研究表明,光照、温度、碱胁迫和重金属含量等因素对藜科碱蓬属的植被生长有一定影响^[31],而野外环境中这些因素对盐地碱蓬生长的具体影响还需要进一步开展研究。

4 结论

对盐城滨海湿地的 5 块代表性盐地碱蓬样区进行了土壤水分和盐分以及植株生长状态的调查与分析,在此基础上诊断了盐地碱蓬的生态退化程度和修复状况,得出以下结论:

(1) 土壤水盐与盐地碱蓬的生长状态关系紧密,是导致研究区盐地碱蓬种群和个体形态差异以及生态退化的主要因素。研究区土壤水盐含量与种群密度、盖度呈负相关,与株高、根长、一级分枝数、单株盖度呈正相关。

(2) 利用盐地碱蓬生态指数可以直接诊断盐地

碱蓬的生态退化程度。适宜环境参照状态下的盐地碱蓬生态指数值介于(0.8, 1.0]之间, 所对应的土壤含水量和电导率分别在 18.61% ~ 32.18% 和 2.53 ~ 20.33 $\text{mS} \cdot \text{cm}^{-1}$ 之间, 成熟期种群平均密度为 44 株 $\cdot \text{m}^{-2}$, 植株株高和根长均值分别为 20.25 和 15.83 cm, 分枝数多且单株盖度均值达 8.19%, 呈“矮胖树形”。轻度退化和中-重度退化状态的盐地碱蓬生态指数值分别在 [0.6, 0.8] 和 [0, 0.6) 之间, 所对应的土壤含水量和电导率介于 8.03% ~ 35.45% 和 0.69 ~ 34.25 $\text{mS} \cdot \text{cm}^{-1}$ 之间, 成熟期种群密度高, 平均株高大于 28 cm, 根长短于 13 cm, 分枝数少或不分枝, 单株盖度均值低于 3%, 呈“高瘦形”。

(3) 盐地碱蓬具有较强的抗逆能力, 但长时间处于逆境中的植株会发生退化甚至死亡。通常近海、水文连通性强、受人为干扰程度小的区域土壤环境更稳定, 水盐含量更均衡, 更适宜盐地碱蓬生长。

参考文献:

- [1] 李景霞, 付碧宏. 江苏盐城滨海湿地系统格局变化及其对丹顶鹤生境的影响[J]. 遥感学报, 2021, 25(12): 2507-2519. [LI Jing-xia, FU Bi-hong. Pattern Change of the Coastal Wetland System and Its Dynamic Impact on the Habitat of Red-crowned Cranes in Yancheng, Jiangsu Province [J]. National Remote Sensing Bulletin, 2021, 25(12): 2507-2519.]
- [2] 孙立汉, 杜静, 高士平, 等. 滦河口湿地黑嘴鸥原繁殖地恢复研究[J]. 地理与地理信息科学, 2005, 21(3): 84-87. [SUN Lihan, DU Jing, GAO Shi-ping, et al. Study on the Restoration of the *Larus saundersi's* Original Breeding Site in Luanhekou Wetland [J]. Geography and Geo-Information Science, 2005, 21(3): 84-87.]
- [3] 栾兆擎, 闫丹丹, 薛媛媛, 等. 滨海湿地互花米草入侵的生态水文学机制研究进展[J]. 农业资源与环境学报, 2020, 37(4): 469-476. [LUAN Zhao-qing, YAN Dan-dan, XUE Yuan-yuan, et al. Research Progress on the Ecohydrological Mechanisms of *Spartina alterniflora* Invasion in Coastal Wetlands [J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2020, 37(4): 469-476.]
- [4] 宋洪海, 梁漱玉. 土壤条件对翅碱蓬生长发育的影响[J]. 现代农业科技, 2010(3): 290-291, 296. [SONG Hong-hai, LIANG Shu-yu. Effects of Soil Conditions on the Growth and Development of *Suaeda heteroptera* [J]. Modern Agricultural Sciences and Technology, 2010(3): 290-291, 296.]
- [5] 管博, 于君宝, 陆兆华, 等. 黄河三角洲滨海湿地水盐胁迫对盐地碱蓬幼苗生长和抗氧化酶活性的影响[J]. 环境科学, 2011, 32(8): 2422-2429. [GUAN Bo, YU Jun-bao, LU Zhao-hua, et al. Effects of Water-Salt Stresses on Seedling Growth and Activities of Antioxidative Enzyme of *Suaeda salsa* in Coastal Wetlands of the Yellow River Delta [J]. Environmental Science, 2011, 32(8): 2422-2429.]
- [6] 李珊, 卢霞, 郑薇, 等. 盐地碱蓬生长生理指标和冠层光谱对水盐胁迫的响应[J]. 海洋湖沼通报, 2022, 44(3): 31-40. [LI Shan, LU Xia, ZHENG Wei, et al. Responses of Growth and Physiological Indicators and Canopy Spectra of *Suaeda salsa* to Water-salt Stresses [J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2022, 44(3): 31-40.]
- [7] 田晓燕, 高楠, 陆冠茹, 等. 黄河三角洲两种水盐生境下芦苇植被根系特征差异研究[J]. 生态科学, 2021, 40(2): 1-8. [TIAN Xiao-yan, GAO Nan, LU Guan-ru, et al. Study on the Differences of Root Spatial Distribution Characteristics of *Phragmites australis* in Two Different Water-salt Habitats in the Yellow River Delta [J]. Ecological Science, 2021, 40(2): 1-8.]
- [8] 刘红玉, 周奕, 郭紫茹, 等. 盐沼湿地大规模恢复的概念生态模型: 以盐城为例[J]. 生态学杂志, 2021, 40(1): 278-291. [LIU Hong-yu, ZHOU Yi, GUO Zi-ru, et al. A Conceptual Ecological Model for Large-scale Salt Marsh Restoration: A Case Study of Yancheng [J]. Chinese Journal of Ecology, 2021, 40(1): 278-291.]
- [9] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000: 289-292. [LU Ru-kun. Methods of Soil Agrochemical Analysis [M]. Beijing: China Agriculture Sciencetech Press, 2000: 289-292.]
- [10] 戚志伟. 崇明东滩滨海围垦湿地芦苇光合和生长对土壤水盐因子的响应[D]. 上海: 华东师范大学, 2017. [QI Zhi-wei. Effects of Soil Water-salt Indicators on the Photosynthesis and Growth of *Phragmites australis* in the Coastal Reclaimed Wetland at Dongtan of Chongming Island, China [D]. Shanghai: East China Normal University, 2017.]
- [11] 吴迪, 张卓栋, 陈思宇, 等. 基于 EC-Probe 仪器的土壤盐分原位测定及其在河北坝上地区的应用研究[J]. 中国农学通报, 2015, 31(16): 201-206. [WU Di, ZHANG Zhuo-dong, CHEN Si-yu, et al. Using the EC-Probe Instrument for *In-situ* Soil Salinity Measurement and Its Application in Bashang Region of Hebei Province [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2015, 31(16): 201-206.]
- [12] 邢佳. 污泥基生物炭的制备优化及其对重金属污染土壤的修复[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021. [XING Jia. Research on Preparation and Optimization of Sludge-based Biochar and Its Remediation of Heavy Metal Contaminated Soil [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2021.]
- [13] 唐柄哲, 何丙辉, 闫建梅. 川中丘陵区土地利用方式对土壤理化性质影响的灰色关联分析[J]. 应用生态学报, 2016, 27(5): 1445-1452. [TANG Bing-zhe, HE Bing-hui, YAN Jian-mei. Gray Correlation Analysis of the Impact of Land Use Type on Soil Physical and Chemical Properties in the Hilly Area of Central Sichuan, China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, 27(5): 1445-1452.]
- [14] LIU F X, ZHU P Y, LIANG H Q, et al. Evaluation Model of Water Resources Comprehensive Index Based on Grey Correlation Analysis and GM (1,1) Prediction [J]. International Core Journal of Engineering, 2022, 8(5): 364-381.
- [15] 庞博, 崔保山, 蔡燕子, 等. 我国滨海湿地生态修复参照区选取

- 方法研究[J].环境生态学,2020,2(1):1-9,25.[PANG Bo, CUI Bao-shan, CAI Yan-zi, *et al.* Studies on Selection Method of Reference Condition for Ecological Restoration of Coastal Wetlands in China[J]. Environmental Ecology, 2020, 2(1): 1-9, 25.]
- [16] 高翔,黄娉婷,王可.宁夏沙坡头干旱沙漠自然保护区生态系统稳定性评估[J].生态学报,2019,39(17):6381-6392.[GAO Xiang, HUANG Ping-ting, WANG Ke. Assessment of the Ecosystem Stability of Shapotou Arid Desert Nature Reserve in Ningxia, China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(17): 6381-6392.]
- [17] MORRIS C. Multivariate Analysis of Ecological Data Using Canoco 5, 2nd Edition [J]. African Journal of Range & Forage Science, 2015, 32(4): 289-290.
- [18] 郭紫茹,王刚,吴玉琴,等.人类活动对盐城海岸线与滨海湿地的影响研究[J].生态与农村环境学报,2021,37(3):295-304.[GUO Zi-ru, WANG Gang, WU Yu-qin, *et al.* Impact of Human Activities on Yancheng Coastline and Coastal Wetlands[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2021, 37(3): 295-304.]
- [19] 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.[DING Shan-shan, YU Xiao-fei, WANG Guo-ping, *et al.* The Effects of Hydrology and Salinity on Plant Eco-physiology and Soil Environment in Saline Wetlands: A Review [J]. Soils and Crops, 2019, 8(2): 166-177.]
- [20] 李飞飞,高珂晓,朱金方,等.综合物理防控技术对盐城大丰港互花米草的控制效果[J].生态学报,2021,41(24):9637-9644.[LI Fei-fei, GAO Ke-xiao, ZHU Jin-fang, *et al.* Effect of Comprehensive Physical Control Technologies on *Spartina alterniflora* in Dafeng Port, Yancheng [J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(24): 9637-9644.]
- [21] 孙旭.水盐调控下翅碱蓬生长特征研究[D].沈阳:沈阳农业大学,2018.[SUN Xu. Study on Growth Characteristics of *S. salsa* under Water and Salinity Regulation [D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2018.]
- [22] 王摆,韩家波,周遵春,等.大凌河口湿地水盐梯度下翅碱蓬的生态阈值[J].生态学杂志,2014,33(1):71-75.[WANG Bai, HAN Jia-bo, ZHOU Zun-chun, *et al.* Ecological Thresholds of *Suaeda heteroptera* under Gradients of Soil Salinity and Moisture in Daling River Estuarine Wetland [J]. Chinese Journal of Ecology, 2014, 33(1): 71-75.]
- [23] 贾林,刘璐瑶,王鹏山,等.盐地碱蓬的耐盐机理及改良土壤机理研究进展[J].中国农学通报,2021,37(3):73-80.[JIA Lin, LIU Lu-yao, WANG Peng-shan, *et al.* Salt-tolerance and Soil Improvement Mechanism of *Suaeda salsa*: Research Progress [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2021, 37(3): 73-80.]
- [24] 赵肖依,魏海峰,黄欣,等.不同水位条件对翅碱蓬发芽与生长的影响[J].环境生态学,2019,1(6):18-22.[ZHAO Xiao-yi, WEI Hai-feng, HUANG Xin, *et al.* Effects of Different Water Level Conditions on Germination and Growth of *Suaeda salsa* [J]. Environmental Ecology, 2019, 1(6): 18-22.]
- [25] 刘雪华.盐分和水文干扰对盐地碱蓬个体及种群的影响[D].济南:山东师范大学,2016.[LIU Xue-hua. Effects of Salinity and Hydrological Interference on Individuals and Populations of *Suaeda salsa* [D]. Ji'nan: Shandong Normal University, 2016.]
- [26] 周珺,魏虹,吕茜,等.土壤水分对湿地松幼苗光合特征的影响[J].生态学杂志,2012,31(1):30-37.[ZHOU Jun, WEI Hong, LÜ Qian, *et al.* Effects of Soil Water Regime on Leaf Photosynthetic Characteristics of Slash Pine (*Pinus elliottii* engelm.) Seedlings [J]. Chinese Journal of Ecology, 2012, 31(1): 30-37.]
- [27] 麻莹,张洪嘉,库都斯·阿布都沙拉木,等.盐碱胁迫对盐地碱蓬生长、有机酸等溶质积累及其生理功能的影响[J].草地学报,2021,29(9):1934-1940.[MA Ying, ZHANG Hong-jia, KUDUSI · Abudushalamu, *et al.* Effects of Salt and Alkali Stresses on the Growth, Accumulation of Organic Acids and Other Solutes and Their Physiological Functions of *Suaeda salsa* [J]. Acta Agrestia Sinica, 2021, 29(9): 1934-1940.]
- [28] 夏宁,孟茹,魏海峰,等.土壤盐分对翅碱蓬生长的影响[J].环境生态学,2020,2(1):52-56.[XIA Ning, MENG Ru, WEI Hai-feng, *et al.* Effect of Soil Salinity on the Growth of *Suaeda salsa* [J]. Environmental Ecology, 2020, 2(1): 52-56.]
- [29] 李悦,陈忠林,王杰,等.盐胁迫对翅碱蓬生长和渗透调节物质浓度的影响[J].生态学杂志,2011,30(1):72-76.[LI Yue, CHEN Zhong-lin, WANG Jie, *et al.* Effects of Salt Stress on *Suaeda heteroptera kitagawa* Growth and Osmosis-regulating Substance Concentration [J]. Chinese Journal of Ecology, 2011, 30(1): 72-76.]
- [30] 史功伟.盐及淹水对不同表型盐地碱蓬抗盐性的影响[D].济南:山东师范大学,2009.[SHI Gong-wei. Effects of Salinity and Waterlogging on Salt-tolerance of *Suaeda salsa* L. from an Intertidal Zone and Saline Inland Soil [D]. Ji'nan: Shandong Normal University, 2009.]
- [31] 彭钊植,雷春英,吉小敏.藜科碱蓬属植物研究进展[J].江西农业学报,2021,33(2):42-46.[PENG Mu-zhi, LEI Chun-ying, JI Xiao-min. Research Advances in *Suaeda* Plants [J]. Acta Agriculturae Jiangxi, 2021, 33(2): 42-46.]

作者简介:张英蕾(1998—),女,山东日照人,主要研究方向为滨海湿地生态退化。E-mail: 2766976302@qq.com

(责任编辑:许素)