



生态学杂志

Chinese Journal of Ecology

ISSN 1000-4890, CN 21-1148/Q

《生态学杂志》网络首发论文

题目: 微地形对滨海盐碱地土壤水盐分布和植物生物量的影响
作者: 贺文君, 韩广轩, 颜坤, 管博, 王光美, 路峰, 周英锋, 张乐乐, 周莉
DOI: 10.13292/j.1000-4890.202111.002
收稿日期: 2021-01-27
网络首发日期: 2021-08-25
引用格式: 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. <https://doi.org/10.13292/j.1000-4890.202111.002>



网络首发: 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认: 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

DOI: 10.13292/j.1000-4890.202111.002

微地形对滨海盐碱地土壤水盐分布和植物生物量的影响

贺文君^{1,2} 韩广轩^{1*} 颜坤¹ 管博¹ 王光美¹ 路峰³ 周英锋³ 张乐乐³ 周莉³

(¹中国科学院烟台海岸带研究所, 中国科学院海岸带环境过程与生态修复重点实验室, 山东烟台 264003; ²中国科学院大学, 北京 100049; ³山东黄河三角洲国家级自然保护区管理委员会, 山东东营 257500)

摘要 微地形营造可以通过改变滨海盐碱地水盐分布格局和植物生长, 实现滨海盐碱地的高效利用和可持续发展。本研究以滨海盐碱坡地为对象, 利用样线法对不同高程下土壤水盐和植被生长状况进行了调查, 并分析了植物生物量及根冠比的影响因素。结果表明: 高程显著改变了土壤水分含量、土壤电导率及 pH。随高程的增加, 各土层土壤水分含量和 pH 呈降低趋势, 而表层土壤电导率呈增加趋势。土壤盐分的剖面分布呈“表聚”现象, 土壤水分分布则呈现“底聚”现象。盐碱坡地以盐地碱蓬(*Suaeda salsa*)和芦苇(*Phragmites australis*)为优势种, 两者的单株地上生物量都与土壤电导率呈正相关, 与 pH 呈负相关。随着高程的增加, 植物地下生物量和根冠比呈降低趋势, 地上生物量呈增加趋势。土壤含水量和 pH 的协同影响可以解释根冠比 68% 的变化。基于微地形营造的滨海盐碱地生态修复和高效利用模式在突破盐碱地利用传统思维的基础上有助于实现滨海盐碱地的高效综合利用。

关键词 滨海盐碱地; 微地形; 高程; 土壤水盐; 生物量; 根冠比

Effects microtopography on soil water and salinity distribution and plant biomass in coastal saline-alkali land. HE Wen-jun^{1,2}, HAN Guang-xuan^{1*}, YAN Kun¹, GUAN Bo¹, WANG Guang-mei¹, LU Feng³, ZHOU Ying-feng³, ZHANG Le-le³, ZHOU Li³ (¹Key Laboratory of Coastal Environmental Processes and Ecological Remediation, Chinese Academy of Science Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, Yantai 264003, Shandong, China; ²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; ³Administration Committee of the Yellow River Delta National Nature Reserve, Dongying 257500, Shandong, China).

Abstract: Microtopography can utilize resources and promote the sustainable development of resources by changing the distribution pattern of water and salt and plant growth in coastal saline soils. Using sampling lines, we measured the soil water content, soil electric conductivity and plant biomass on the slope of coastal saline-alkali land. We analyzed the factors influencing plant biomass and root-shoot ratio. The results showed that the elevation significantly affected soil water content, soil electric conductivity and pH. Soil water content and pH tended to decrease with increasing elevation, while the soil electric conductivity of the topsoil tended to increase. The profile distribution of soil salinity showed a phenomenon of "surface accumulation", while the soil water showed a trend of "bottom layer". *Suaeda salsa* and *Phragmites australis* were the dominant species on the saline slopes. Aboveground biomass per plant of both had a positive correlation with soil electric conductivity and a negative correlation with pH. As the elevation increased, the belowground biomass and root/shoot ratio showed a downward trend, while aboveground biomass showed an upward trend. Soil water content and pH accounted for 68% of root-shoot ratio. Therefore, ecological restoration and high-efficiency utilization model in coastal saline-alkali land based on microtopography has broken through the traditional concept of saline-alkali land management and utilization, and realized the high-efficiency comprehensive utilization of coastal saline-alkali land.

Key words: coastal saline-alkaline land; microtopography; elevation; soil water and salinity; biomass; root-shoot ratio

山东省林业科技创新项目(2019LY006)和中国科学院重点部署项目(KFZD-SW-112)资助。

收稿日期: 2021-01-27

接受日期: 2021-07-05

*通讯作者 E-mail: gxhan@yic.ac.cn

滨海盐碱地是我国重要的后备土地资源, 具有较大的潜力和经济价值, 合理开发利用盐碱地, 提高其利用效率是缓解土地资源紧张、保障粮食安全的重要途径之一(吕晓等, 2012; Long *et al.*, 2016)。盐碱地的合理开发利用也是改善生态环境, 促进区域经济协调发展的有效措施。滨海盐碱地存在地下水位浅且矿化度高、土壤盐含量高、土质粘重肥力低和淡水资源匮乏等问题(白春礼, 2020; 欧阳竹等, 2020)。同时, 在盐碱地治理过程中依然存在局部区域盐渍化减缓和持久性的盐碱反复与加剧并存的状况(杨劲松等, 2016)。因此, 如何拓展盐碱地资源开发利用途径并形成高效生态的滨海盐碱地综合利用模式亟待研究。

我国滨海盐碱地开发利用经历了从单一治理改良模式到多方式结合的综合利用模式的转变与转化, 并在滨海盐碱区形成了如“上粮下渔”和“低挖造田”区域特色技术(张凌云, 2006; 李颖等, 2014)。滨海盐碱地改良模式通过“挖土成池, 筑土为台, 台田种植, 浅池养殖”方法, 利用种植和养殖相结合的土地利用方式来改善盐碱旱地的生态环境, 该方式注重台面与坑塘水域的利用, 而其坡面一直未得到较好利用。作为台面与水域的过渡区域, 微地形营造下的坡面连接了不同生态系统形成了不同的斑块镶嵌体。坡面生态系统的良性发展有利于各生境之间营养物质、生物和能量相互流动的同时, 也为物种的生存和繁殖提供了更加完整和丰富的生境条件(Liu *et al.*, 2020)。适宜生境面积的增加及空间格局的变化为生物提供了多种生态位, 从而有利于物种多样性的增加(Yang *et al.*, 2017; 韩广轩等, 2018)。

微地形营造的高程可在较小的区域范围内呈现不同的水盐分布格局。土壤水盐分布作为盐碱地治理的重要因素, 其改变可以直接作用于土壤理化性质而使土壤经历一系列的物理、化学及生物过程(韩玲等, 2018; 贺文君等, 2018)。地表径流、降雨入渗以及地下水的强烈蒸发作用改变了不同高程下土壤水分的再分配, 进而影响水分的空间变化(Legates *et al.*, 2011; Yang *et al.*, 2015), 土壤水分在土体中的滞留效应会改变土壤盐分的分布, 长时间尺度下土壤频繁的“脱盐”与“返盐”过程中也将进一步影响土壤质地及其结构稳定性(郑一鹏等, 2019; 罗延峰等, 2020)。土壤水分和盐分通过改变氮的矿化过程影响土壤养分可利用性(Qu *et al.*, 2021; 周慧等, 2020), 进而影响土壤微生物活性及其丰度(邹锋等, 2019)。因此, 微地形对土壤水盐分布的研究对盐碱地治理和高效利用具有重要意义。

地形因子和土壤水盐分布等因素为植物生长发育提供了差异化的生存条件(白雪等, 2020), 同时也是决定植物群落组成的重要驱动因素, 对植物的各种功能性状具有较强的过滤作用(Fu *et al.*, 2020)。地形因素可以改变环境因子与植物生物量及其分配之间的关系(Qiu *et al.*, 2019)。在水盐分布格局的改变下植物可以通过调整自身形态结构(宋香静等, 2017; 田晓燕等, 2019), 以及改变地上、地下生物量及其分配来增强其生存能力以期更好地获得各种资源(Wang *et al.*, 2019; 白雪等, 2020)。另外, 植物生物量分配的变化很大程度上影响盐碱地源汇功能的转变, 进而影响生态系统生产力的发展及其稳定(Hayes *et al.*, 2017)。因此, 科学合理地进行微地形营造对退化盐碱地植被恢复、生物量的积累及生态系统的正向演替具有重要意义(卫伟等, 2013)。此外, 过往对微地形的研究主要集中在草原、草甸、森林等陆地生态系统(汝海丽等, 2016; Yu *et al.*, 2018; Falco *et al.*, 2019; 吴昊等, 2020), 而对滨海盐碱地的研究相对较少。因此, 本研究基于盐碱地微地形营造构建技术, 探讨微地形对修复盐碱地坡面土壤水盐和植物生物量的影响, 以期对退化滨海盐碱地生态修复及高效利用提供数据支撑和参考案例。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于中国科学院黄河三角洲滨海湿地生态试验站(37°45'50"N, 118°59'24"E)。该区域属于暖温带大陆性季风气候, 光照充足, 四季分明, 夏季多雨。常年盛行东南风和东北风。2019年5—10月整个生长季内, 研究区空气温度日均值为22.3℃, 日均空气温度变幅为9.1~31.3℃(图1)。光合有效辐射日均值为349.07 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, 日均光合有效辐射变化范围为20.68~538.09 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 。区域内地下水位浅, 矿化度高。2019年降水总量为503.5 mm, 8月4日—8月10日期间降水总量达318.60 mm(图1)。降水分配不均匀, 年蒸发量1962 mm(Cui *et al.*, 2009), 4—6月多为干旱期, 受强蒸发作用影响, 浅层地下水可向地表运输造成盐分表聚, 易形成干旱盐碱环境; 70%的降水量主要集中在7—9月, 强降雨后易形成地面淹水, 发生淹水涝渍。生境岛顶10和20 cm土壤体积含水量日均值变化范围分别为35.6%~58.6%和45.5%~59.9%。研究区域土壤类型以滨海盐碱土为主, 土壤质地主要为砂质黏壤土, 盐度高, 通透性差。生境岛坡面以自然恢复为主, 自然植被以芦苇(*Phragmites*

australis)和盐地碱蓬(*Suaeda salsa*)为优势种, 伴生有蘆草(*Scirpus triqueter*)。

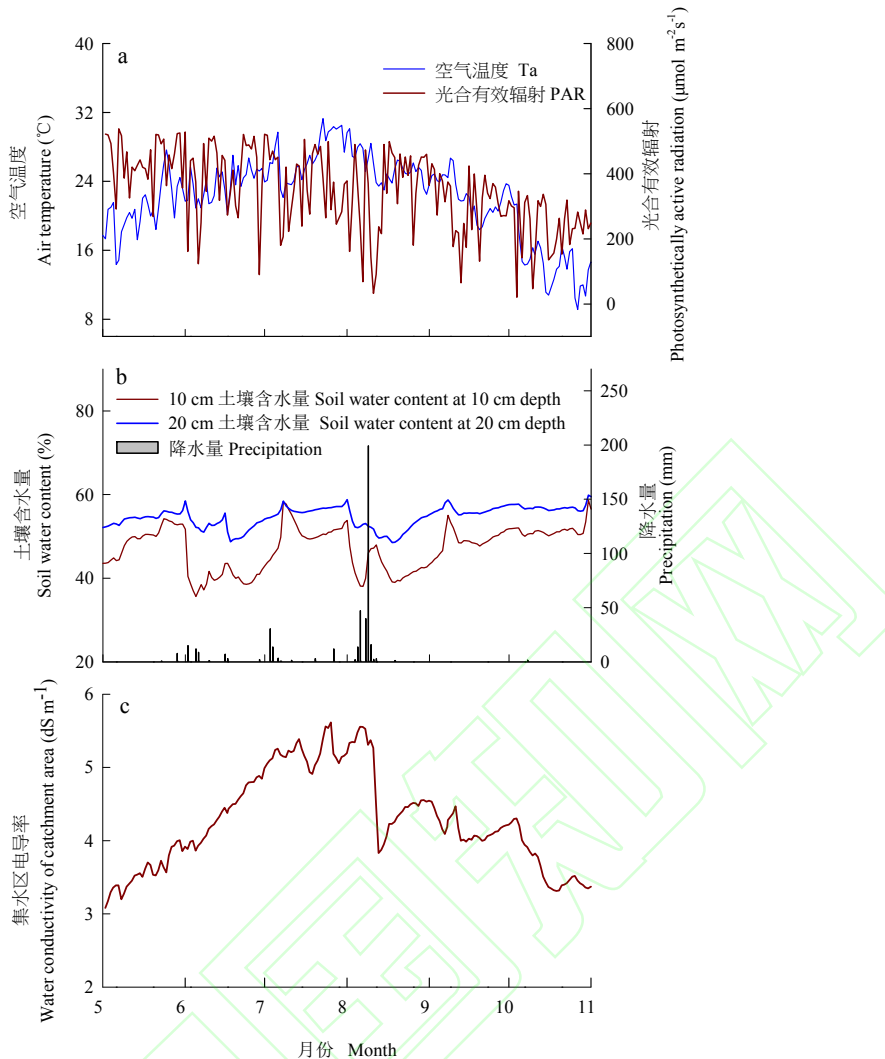


图1 2019 年生长季黄河三角洲生境岛环境因子动态变化

Fig.1 Variations of environmental factor in habitat islands of the Yellow River Delta during the growing season of 2019

1.2 生境岛构建方案

生境岛示范区位于中国科学院黄河三角洲滨海湿地生态试验站北侧(37°46'06"N, 118°58'09"E), 总面积约 10.0 hm²。生境岛的坡面为不同缓坡, 每个生境岛与地平面夹角为 5°~9°, 坡面高程不同将导致土壤含水量和盐分变化的差异, 并在坡面形成了不同的湿生和盐生生境。微地形周边以 30°斜坡方式挖至 1.5 m(即在微地形周边 2.7 m 处为 1.5 m 的等深线), 其余水域垂直下挖至 2.9 m。挖出的土壤用于构建整个生境岛, 生境岛高度为 1.5 m。水域、坡面和岛顶的面积比例为 3:2:1。每个生境岛之间 2.0~3.0 m 的深沟作为集水区。集水区通过水泵与周边排水渠相连, 汇集周边土壤淋盐后的微咸水及蓄集夏季雨水, 并形成不同水深的水生生境。周边排水渠水源主要为种植区灌溉压盐后的微咸水, 通过水泵注入集水区作为湖水水源, 并进行二次利用。集水区区内为微咸水, 水质电导率日均值为 4.1 dS·m⁻¹, 日均值变化范围为 2.9~5.6 dS·m⁻¹(图 1c)。生境岛岛顶为平面, 相当于降低地下水位, 能够抑制土壤返盐, 促进土壤自然脱盐, 防御季节性的涝害, 并形成不同的旱生生境。微地形营造后, 生境岛顶面面积为 21000 m², 坡面面积为 43000 m², 可利用土地总面积为 54000 m², 水域总面积为 55000 m²。

1.3 气象数据和集水区数据监测

空气温度、降水量及光合有效辐射利用微气象观测系统获取, 该系统利用空气温度传感器(HMP50, Vaisala, Helsinki, Finland), 雨量筒(52203, RM Young Inc., Traverse City, MI, USA),

光合有效辐射传感器(Li-190SL, Li-Cor, USA), 土壤湿度传感器(EnviroSMARTSDI-12, Sentek Pty Ltd., USA), 并通过数据采集器(CR1000, Campbell Scientific Inc., USA)在线采集, 按 30 min 计算平均值进行存储。集水区电导率利用温盐深仪(Ruskin)进行监测, 仪器每 2h 记录一次数据。

1.4 样品采集和指标测定

2019 年 10 月底采用样线法和调查法对生境岛进行植被及土壤调查。调查共布设 6 条样线, 每条样线选取 4 个高程(1.5、1.0、0.5、0 m)进行土壤样品及植物样品采集, 本研究中不同高程为相对高度, 0 m 高程处于坡面与集水区的交界处, 并未被水面淹没。植被调查在不同高程处随机选取 0.5 m×0.5 m 样方, 调查样方内不同植株的种类、株数, 调查结束后用剪刀将样方内的全部植物齐地面剪下并对不用植物进行分类称重, 70 °C 烘干至恒重后测定不同植物地上部重量。用内径 10 cm 的根钻每 10 cm 一层, 取土至 40 cm 处, 然后根洗净后 70 °C 烘干至恒重测定根干量。利用土钻收集土层深度分别为 0~10、10~20、20~30、30~40 cm 的土壤, 其中一部分土样利用烘干法测定土壤含水量, 另一部分土样风干后过 2 mm 筛, 5:1 水土比, 分别利用电导率仪(雷磁, DDBJ-350F)和 pH 计(Mettler Toledo, LE438 IP67)进行土壤电导率和土壤 pH 测定。

本研究中以单位面积干物质重量作为地上和地下生物量。地上总生物量为样方调查内所有植物地上生物量加和, 地下总生物量为调查的所有植物根系重量加和。地上总生物量($\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$)=样方内所有植物地上生物量之和/ (0.5×0.5) , 地下总生物量($\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$)=样方内所有植物地下生物量之和/ $[\pi\times(0.1/2)^2]$, 根冠比=地下总生物量($\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$)/地上总生物量($\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$)。累积盖度为样方调查内所包含物种盖度的加和。植物单株地上生物量=该物种地上干物质量/株数。

1.5 数据分析

用单因素方差(one-way ANOVA)分析对比土壤水分、土壤电导率以及 pH 在不同高程下及土层下的差异, 并用该方法对地上生物量、地下生物量及根冠比进行差异分析。利用双因素方差(two-way ANOVA)分析高程和土层对土壤水分、土壤电导率及 pH 的交互影响。利用线性模型对土壤含水量、土壤电导率和 pH 与单株盐地碱蓬和单株芦苇地上生物量进行拟合。利用 Pearson 相关分析高程、土壤含水量、土壤电导率、pH 与根冠比之间的相关性。利用多元回归分析方法分析高程、土壤含水量、土壤电导率、pH 对根冠比的协同影响。显著性水平为 $\alpha=0.05$ 。运用统计分析软件 SPSS 17.0 进行数据统计分析, 运用 Sigmaplot 12.5 进行数据制图, 文中数据为 6 个重复, 数据为平均值 \pm 标准误。

2 结果与分析

2.1 不同高程对土壤水盐分布的影响

高程显著影响了生境岛坡面土壤水分、电导率和 pH 的变化(图 2, 图 3 和表 1)。随着高程的增加, 土壤含水量呈降低趋势, 并在 0 m 高程处达到最大值(图 2a-d)。各深度下, 0 m 高程处土壤含水量显著高于其他高程处。随土层深度的增加, 土壤含水量呈增加趋势。此外, 不同高程下生境岛土壤水分分布不均匀总体差异较大, 并呈“底聚”现象(图 2a)。0~30 cm 土层深度下, 0 m 高程处的土壤电导率显著低于其他高程处, 但各高程处土壤电导率在 40 cm 土层处没有显著差异(图 2e-h)。土壤电导率变化剧烈且呈“表聚”现象, 而 0.5~1 m 高程处表层(0~10 cm)土壤电导率最高, 其变化范围为 2.40~10.76 $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$ (图 3b)。10 和 20 cm 土层 pH 在 0 m 高程处达到最大并显著高于其他各高程处, 但其他各高程处 pH 没有显著差异(图 2i, j)。生境岛土壤整体偏碱性, pH 分布范围为 7.48~9.18, pH 随着高程的不断降低呈增大趋势(图 3)。

由双因素方差分析可知, 高程和土壤深度对土壤含水量和 pH 没有显著交互作用($P>0.05$), 但对土壤电导率有显著交互影响($P=0.024$)(表 1)。高程对土壤含水量、土壤电导率和 pH 都有显著影响($P<0.05$), 同时土层对土壤含水量、土壤电导率和 pH 也有显著影响($P<0.05$)。

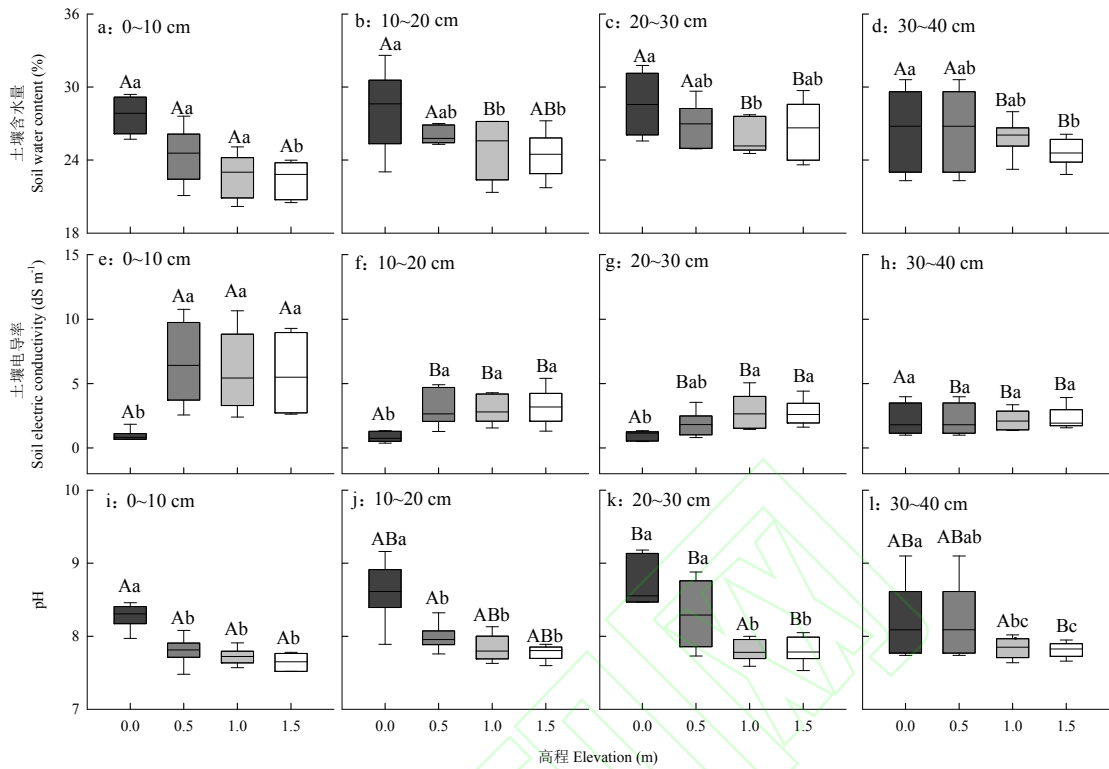


图2 高程对土壤含水量(a-d)、土壤电导率(e-h)和pH(i-l)的影响

Fig.2 Effects of elevations on soil water content (a-d), soil electric conductivity (e-h) and pH (i-l)

注: 不同小写字母表示相同土层不同高程处存在差异($P<0.05$); 不同大写字母表示同一高程处不同土层之间的差异($P<0.05$)。

Note: The different lowercase letters indicate the significant differences elevations of the same soil layers ($P<0.05$), whereas the different uppercase letters represent the significant differences across soil layers at same elevations ($P<0.05$).

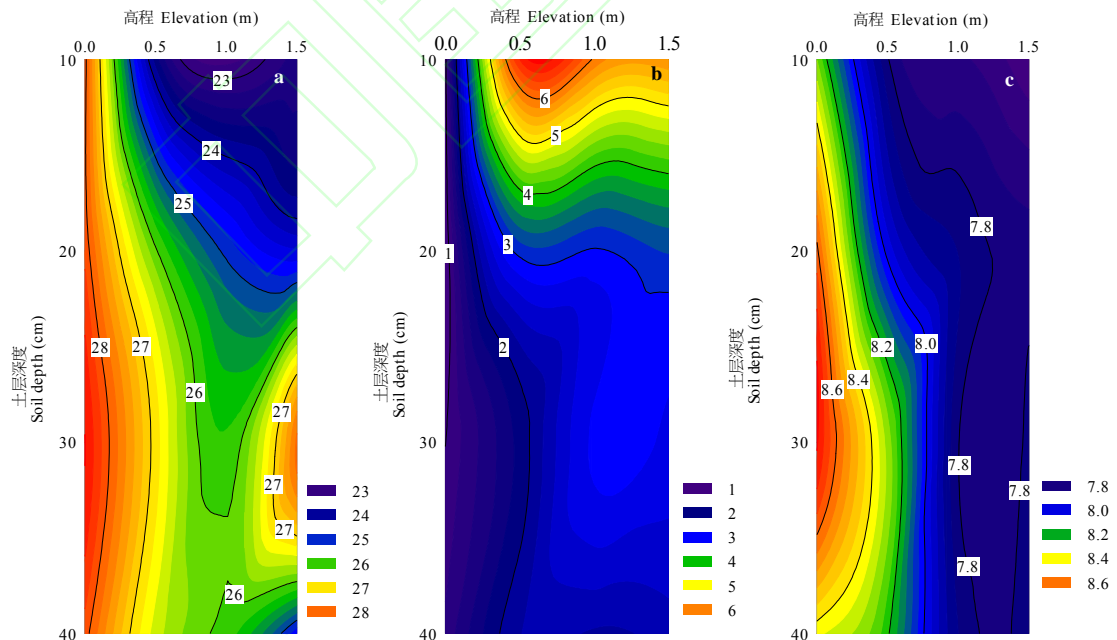


图3 不同高程下土壤含水量(a)、土壤电导率(b)和pH(c)空间分布

Fig.3 Spatial distribution of soil water content (a), soil electric conductivity (b) and pH (c) under different elevations

表 1 高程与土层对土壤含水量、电导率及 pH 影响的双因素分析

Table 1 Two-way ANOVA for testing the effects of elevation and soil layers on soil water content, soil electric conductivity and pH

参数 Parameter	高程 Elevation		土层 Soil layers		高程×土层 Elevation×Soil layers	
	<i>F</i>	<i>P</i>	<i>F</i>	<i>P</i>	<i>F</i>	<i>P</i>
	土壤含水量 Soil water content	6.22**	0.001**	3.60**	0.017**	0.55 ^{ns}
土壤电导率 Soil electric conductivity	14.10**	0.000**	16.41**	0.000**	2.29*	0.024*
pH	38.79**	0.000**	5.20**	0.002**	1.16 ^{ns}	0.332 ^{ns}

*, $P < 0.05$; **, $P < 0.01$; ns, $P > 0.05$.

2.2 不同高程对植物物种分布的影响

生境岛坡面主要以盐地碱蓬和芦苇为优势种(图 4a), 盐地碱蓬的相对丰度随高程增大呈现先增加后减小的趋势。此外, 0 m 高程处存在蔗草湿生植物。高程显著改变了植被的累积盖度(图 4b)。累积盖度随高程不断增大并在 1.5 m 高程处达到最大值。0.5 m 高程处累积盖度最低, 但与 0 m 高程处没有显著性差异(图 4b)。

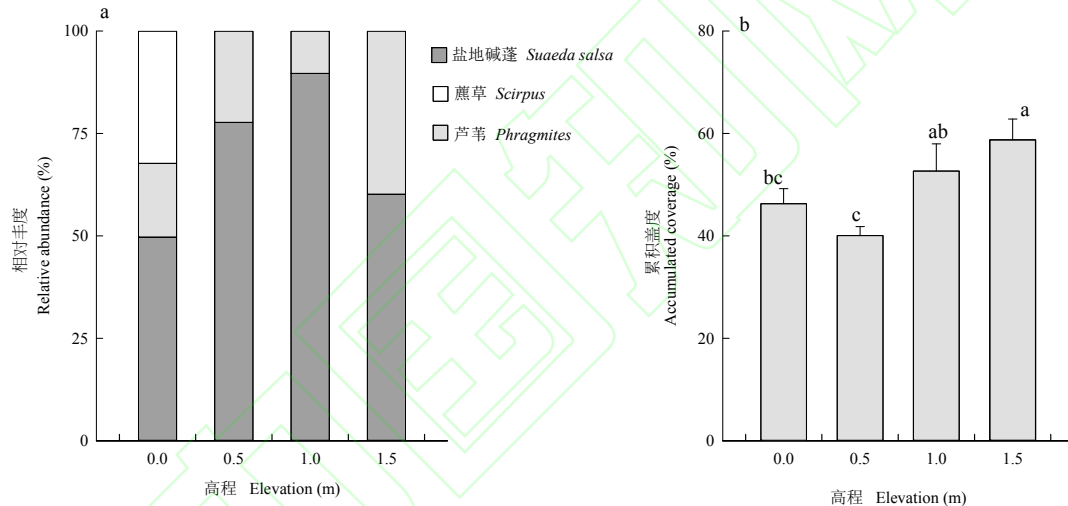


图 4 不同高程对植物相对丰度和累积盖度的变化的影响

Fig.4 Effects of different elevations on changes in relative abundance and cumulative coverage of plants

注: 不同小写字母表示不同高程处存在差异($P < 0.05$), 下同。

Note: Different lowercase letters indicate the significant differences at different elevations ($P < 0.05$). The same below.

2.3 不同高程下土壤水盐对植物单株地上生物量的影响

高程显著改变了盐地碱蓬和芦苇的单株地上生物量(图 5)。盐地碱蓬单株地上生物量随高程具有增加趋势, 并在 1.5 高程处达到最大值。1.5 m 高程处盐地碱蓬单株地上生物量比 1.0、0.5 和 0 m 高程处分别增加了 57.2%、53.3%和 85.5%, 而 1.0、0.5 和 0 m 高程处盐地碱蓬单株地上生物量没有显著差异(图 5a)。芦苇单株地上生物量在 0.5 m 处具有最大生物量, 比 1.0 和 0 m 高程增加了 89.7%和 84.2%(图 5b)。此外, 盐地碱蓬和芦苇单株地上生物量都与土壤电导率呈显著的正相关($P < 0.05$), 与 pH 呈显著负相关($P < 0.05$), 但与土壤水分没有显著相关性(图 6)。

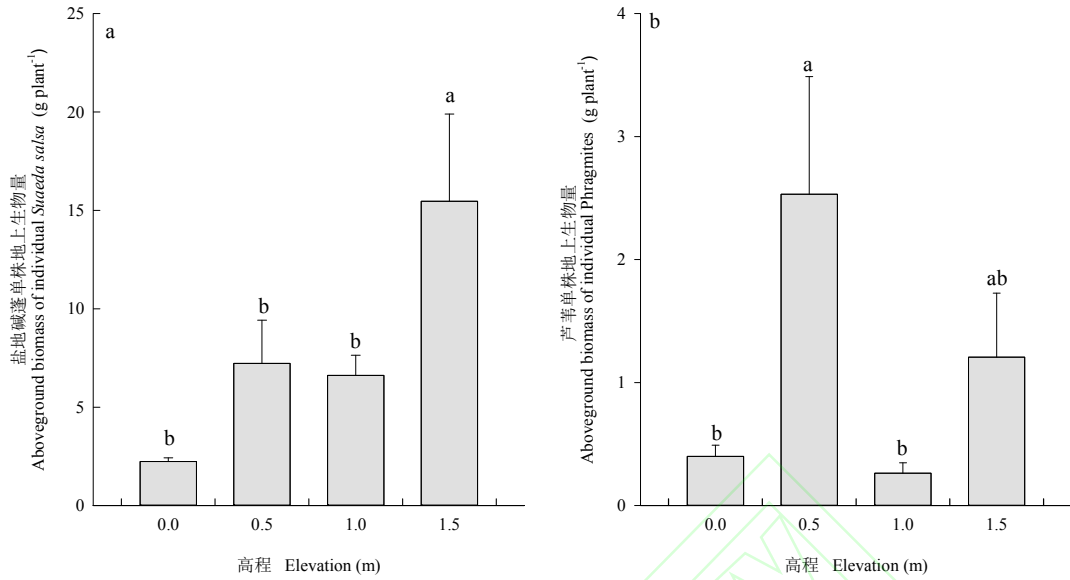


图5 高程对盐地碱蓬和芦苇单株地上生物量的影响
Fig.5 Effects of elevation on aboveground biomass of individual *Suaeda salsa* and *Phragmites australis*

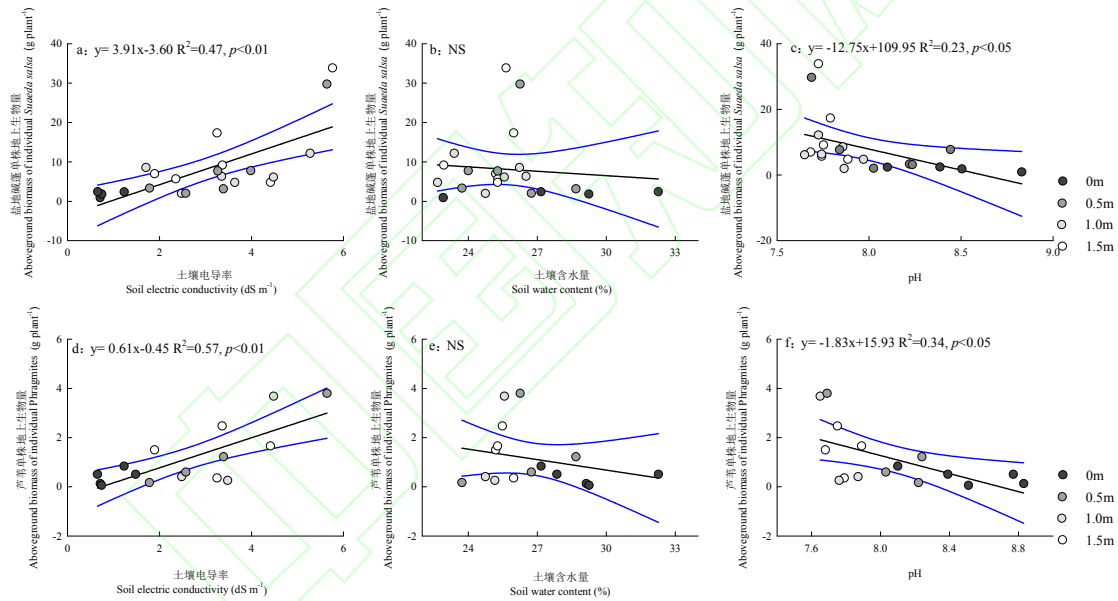


图6 土壤电导率、土壤含水量和 pH 与盐地碱蓬单株地上生物量和芦苇单株地上生物量之间的线性回归关系

Fig.6 Linear regression relationship between soil conductivity, soil moisture content and pH and aboveground biomass of individual *Suaeda salsa* and *Phragmites australis*

注: NS 表示无显著($P>0.05$)的线性关系。

Note: NS indicates non-significant ($P>0.05$) linear relationship.

2.4 不同高程对植物总生物量和根冠比的影响

高程显著改变了植物的总生物量和根冠比(图 7)。地上总生物量在 1.5 m 处有最大值并显著高于其他高程,而其他高程处地上总生物量没有显著差异(图 7a)。地下总生物量和根冠比在 0 m 高程处达到最大值并显著高于其他高程处,而其他高程处无显著差异(图 7)。

Pearson 相关分析表明,根冠比与土壤含水量和 pH 呈极显著的正相关关系($P<0.01$),与高程和土壤电导率和高程呈显著的负相关关系($P<0.05$)(表 2)。高程与土壤含水量和 pH 呈显著负相关($P<0.05$),但与土壤电导率呈极显著正相关($P<0.01$)。土壤电导率与土壤含水量和 pH 呈显著负相关($P<0.01$)。多元回归分析表明,土壤含水量和 pH 分别可解释根冠比 10%和 58%的变化,两者可共同解释根冠比 68%的变化(表 3)。此时,高程以及土壤电导率的影响

在逐步回归中被剔除。

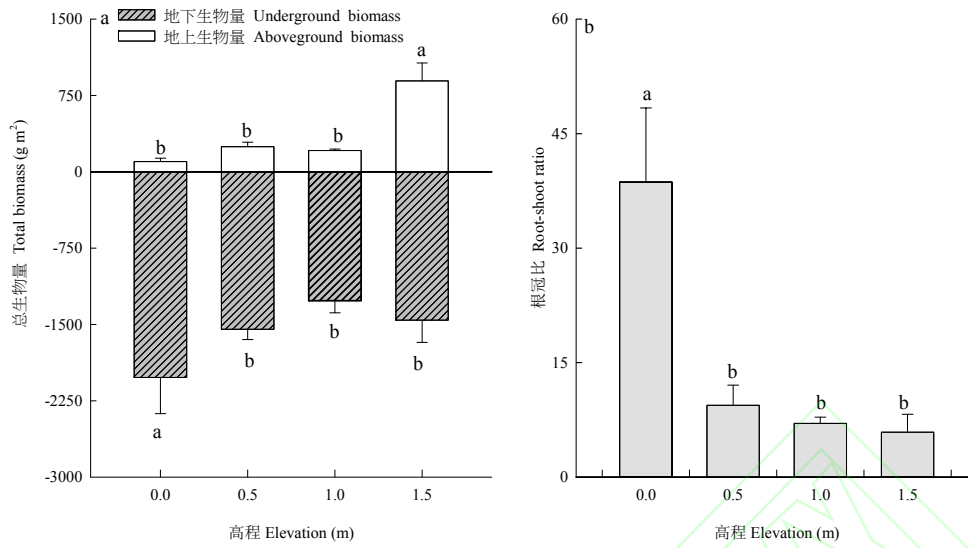


图7 不同高程对植物总生物量和根冠比的影响
Fig.7 Effects of elevation on total biomass and root-shoot ratio

表2 根冠比与高程、土壤含水量土壤电导率和 pH 的相关性分析

Table 2 The correlation analysis between root-shoot ratio with elevation, soil water content, soil electric conductivity and pH

参数 Parameter	高程 Elevation	土壤含水量 Soil water Content	土壤电导率 Soil electric conductivity	pH	根冠比 Root-shoot ratio
高程 Elevation	1				
土壤含水量 Soil water Content	-0.506*	1			
土壤电导率 Soil electric conductivity	0.556**	-0.412*	1		
pH	-0.795**	0.323	-0.634**	1	
根冠比 Root-shoot ratio	-0.694**	0.564**	-0.509*	0.773**	1

*, $P < 0.05$; **, $P < 0.01$.

表3 根冠比与土壤含水量和 pH 的多元回归分析

Table 3 Multiple linear regression of root-shoot ratio with soil water content and pH

参数 Parameter	系数	P	偏 R^2 Partial R^2
常数 Constant	-306.273	<0.001	
土壤含水量 SWC	2.55	0.01	0.10
pH	31.87	<0.001	0.58

注: 方程: 根冠比= $a+b \times \text{SWC}+c \times \text{pH}$ ($R^2=0.68$)。

Note: Equation: Root-shoot ratio= $a+b \times \text{SWC}+c \times \text{pH}$ ($R^2=0.68$).

3 讨论

3.1 坡面高程变化对土壤理化性质的影响

本研究中, 高程显著改变了生境岛土壤水分条件(表 1, 表 2)。此外, 微地形营造下的坡面土壤水分空间分布不均匀, 其分布呈“底聚”现象(图 2, 图 3), 而 0 m 高程作为集水区与坡面的过渡区, 其含水量显著高于其他高程处土壤含水量(图 2)。地形因素在一定条件上对土壤水分具有重要影响(Yang *et al.*, 2015), 地形变化改变了地表起伏状况以及坡面漫流的

连通性, 改变水流在坡面的入渗能力及滞留时间, 从而影响整个土壤坡面含水量的变化(李艳梅等, 2005; 卫伟等, 2013; 司梦可等, 2019)。蒸发、根系吸水等因素的存在也会影响土壤水分在不同深度的再分配, 将进一步影响不同高程与土壤水分含量的关系(Chen *et al.*, 2020)。本研究中, 盐地碱蓬根系主要分布在浅层土壤(弋良朋等, 2011), 加之表层土壤水分蒸发快, 致使表层土壤含水量较低, 而研究区内地下水位浅使得深层土壤含水量较高且差异较小。

高程与土壤电导率呈显著正相关和 pH 呈显著的负相关, 且土壤电导率与 pH 呈显著的负相关(表 2)。此外, 生境岛坡面表层土壤电导率变化剧烈(图 3), 电导率随土层增加不断降低(图 2)。由于滨海湿地地下水位浅, 蒸发剧烈使得盐分在土壤剖面上变化较为剧烈(Chu *et al.*, 2018; Luna *et al.*, 2019), 致使表层土壤盐分含量较高。本研究中, 表层土壤电导率随高程降低呈减小趋势, 并在 0 m 高程处达到最小值(图 2)。微地形可以通过影响地表水文连通性, 使土壤盐分在较小的区域范围内具有较大的空间分布差异, 从而影响土壤盐分含量的变化(杨帆等, 2013)。土壤电导率是土壤盐分含量的表征, 土壤盐分含量是各种溶解性盐离子浓度的综合反映(王明等, 2014)。水分对 0 m 高程处土壤的冲刷与浸淹降低了其盐分含量(韩玲等, 2018), 同时土壤频繁的干湿交替循环模式造成了土壤中 CaCO_3 等固态物质的溶解及其它盐离子对 H^+ 的置换并最终引起 0 m 高程处 pH 的升高(王明等, 2014; 韩玲等, 2018)。土壤中盐基离子的洗脱和置换也使得土壤电导率和 pH 呈显著的负相关。

3.2 坡面高程变化对植物生物量及其分配的影响

本研究中, 土壤电导率促进了盐地碱蓬和芦苇单株地上生物量的生长, 并与根冠比呈显著的负相关(图 6, 表 2)。过往的研究表明, 盐地碱蓬和芦苇具有较强的耐盐性, 其耐盐范围分别为 2.5%~3.6%和 3.0%~4.0%(尚克春等, 2014)。盐分在一定程度上可以促进盐地碱蓬的生长(黄玮等, 2008; Jia *et al.*, 2018)。这是由于盐地碱蓬作为盐生植物可以吸收部分 Na^+ 作为渗透调节物质贮存于液泡中以应对盐胁迫所带来的风险(Zhao *et al.*, 2003; Qiu *et al.*, 2007), 盐分在促进盐地碱蓬个体生长的茂密的同时也促进了单株地上生物量的增大(图 4, 图 5)。此外, 盐分对芦苇也有一定的促进作用: 一方面, 芦苇可以通过增强对水分的吸收, 增强细胞膜的稳定功能来提高其耐盐性(许振伟等, 2018); 另一方面, 芦苇可以通过提高其抗氧化酶活性, 编码其抗盐基因来降低盐分对自身的毒害作用(Zhang *et al.*, 2020), 来促进其生物量的累积。另外, 本研究中 pH 与盐地碱蓬和芦苇的单株地上生物量呈显著负相关(图 6)。过高的 pH 可能通过影响土壤磷的可利用性而间接影响植物的光合作用, 从而引起植物地上生物量的改变(唐琨等, 2013)。

随着高程的增加植物地下总生物量和根冠比呈降低趋势, 地上总生物量呈现增加趋势(图 7), 土壤含水量和 pH 的协同影响可以解释根冠比 68%的变化(表 3)。植物可以通过协调分配资源来优化生存策略以应对外界因素和环境胁迫的影响(Wang *et al.*, 2019; 白雪等, 2020)。本研究中, 随高程的降低植物的分配模式由主要分配给地上部分转化为主要分配给根系。靠近水面 0 m 高程处的植物具有更大的根冠比, 尽管 0 m 高程处土壤水分含量较高, 但 0 m 处的蘆草和芦苇更多受集水区水位波动的影响, 植物对水分亏缺更为敏感, 为增强植物对短期水位波动的适应, 干物质将更多资源分配于根系中, 促进根系的生长, 以期捕获更多水分以维持其生长(王秋林等, 2012; 刘亚男等, 2020)。另外, 过高的 pH 抑制了地上生物量的累积反过来增大了植物的根冠比, 也使得 pH 对根冠比具有显著的促进作用。

3.3 基于微地形营造的滨海盐碱地生态修复和高效利用模式

土壤水盐是影响盐碱地治理的重要因素(Cui *et al.*, 2018), 挖沟筑台有效增加了台面表层返盐临界深度与地下水位的相对距离(王建波等, 2019), 以减轻在蒸发作用的驱动下大量地下水携带盐分向土壤表层富集的土壤返盐作用(贺文君等, 2018)。灌水淋碱及自然降雨对坡面耕层土壤进行淋洗, 土壤盐分随水进入池塘及排碱沟等集水区, 实现洗盐淋碱, 从而减轻了坡面土壤盐碱化程度(图 8)。微地形构造地差异性水盐分布格局为植物生长提供了条件。土壤水盐分布不仅可以直接影响植物群落组成和分布(Iturrate-Garcia *et al.*, 2016; 郗亚栋等, 2019), 还可以通过改变土壤其他理化环境引起植物种类和功能的变化(郑雨婷等, 2018)。研究表明, 适宜的高水低盐的生态环境有利于物种多样性的增加(郗亚栋等, 2019), 而本研究中一定程度的高盐土壤环境也促进了个体植株的生长。此外, 微地形为植物种子分布以及幼苗定植提供了有利条件(Qiu *et al.*, 2019; 邱冬冬等, 2020), 促进了植物生长。植被的增加又反作用于土壤, 在增加土壤酶活性的同时降低了土壤盐碱化程度, 有利于土壤质量和功能的稳定(刘奕嫩等, 2018; 罗慧等, 2020)。

基于微地形营造的滨海盐碱地生态修复和高效利用模式在传统“上粮下渔”以及“台田模式”的基础上加大了对土壤坡面的利用。坡面、平地镶嵌的生态系统和水生生态系统通过食物链来完成物质运移和生物迁徙，加强了不同生境之间的连通性(韩广轩等, 2018)，物质养分在食物链之间的循环利用也将进一步增大对盐碱地土壤的改良几率(徐新洲等, 2013)，而食物网系统的构建促进了水生植物生长，提高了水污染代谢的速度，同时也促进了集水区水质的净化(梁利群等, 2013)，从而形成良性反馈促进生态系统稳定性(图 8)。该模式通过建立盐碱地异质性生境优化组合模式来促进植被生长以打造景观层次的多样性。该模式在突破盐碱地利用传统思维的同时有助于实现滨海盐碱地的高效综合利用。此外，该模式促进了植被的恢复和生长对退化滨海盐碱地的生态保护和修复也具有一定的指导意义。

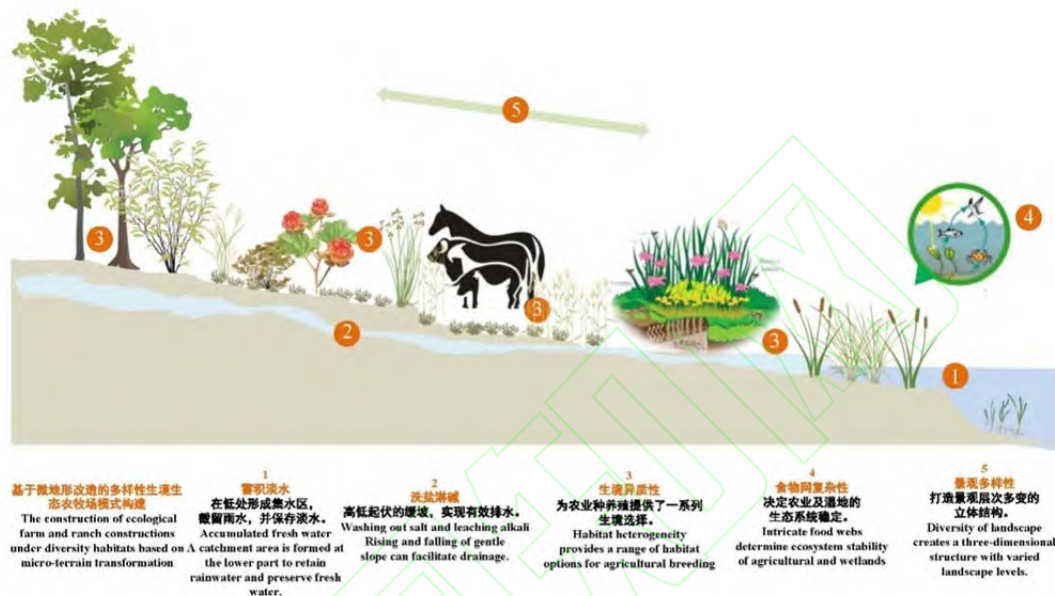


图 8 基于微地形营造的盐碱地生态修复和高效利用模式概念图

Fig.8 A conceptual diagram illustrating the ecological restoration and efficient utilization model in coastal saline-alkaline land based on microtopography construction

4 结论

微地形造成了土壤水盐分布、pH、植物生物量及其分配比例的变化。高程显著改变了土壤水盐分布格局。高程与土壤含水量和 pH 呈显著负相关，但与土壤电导率呈显著正相关；pH 和电导率呈显著的负相关。高程和土层对土壤电导率具有显著的交互作用。盐地碱蓬和芦苇作为生境岛坡地的优势种，两者的单株地上生物量都与土壤电导率呈正相关，与 pH 呈负相关。土壤含水量和 pH 的协同影响可以解释根冠比 68% 的变化。随高程的增加，植物的根冠比逐渐减小，植物通过增加地下生物量，减小地上生物量来应对微地形引起的土壤水盐格局的变化。

参考文献

- 白雪, 赵成章, 康满萍. 2020. 疏勒河中游河岸林地下水埋深对胡杨幼苗生物量分配与生长的影响. 生态学杂志, **39**(11): 3605-3612. [Bai X, Zhao CZ, Kang MP. 2020. Effects of groundwater depth on biomass allocation and growth of *Populus euphratica* seedlings in desert riparian forest in the middle reaches of Shule River. *Chinese Journal of Ecology*, **39**(11): 3605-3612.]
- 白春礼. 2020. 科技创新引领黄河三角洲农业高质量发展. 中国科学院院刊, **35**(2): 138-144. [Bai CL. 2020. Scientific and technological innovation leads high-quality development of agriculture in the Yellow River Delta. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, **35**(2): 138-144.]
- 韩玲, 白军红, 叶晓飞, 等. 2018. 淡水恢复对黄河口盐沼湿地土壤水盐信息的影响. 北京师范大学学报(自然科学版), **54**(1): 42-47. [Han L, Bai JH, Ye XF, et al. 2018. Effects of freshwater restoration on dynamics of water and salt information in salt marsh soils of the Yellow River Estuary, China. *Journal of Beijing Normal University (Natural Science)*, **54**(1): 42-47.]

- 韩广轩, 牛振国, 栾兆擎, 等. 2018. 河口三角洲湿地健康生态圈构建:理论与方法. 应用生态学报, **29**(8): 2787-2796. [Han GX, Niu ZG, Luan ZQ, *et al.* 2018. Construction of healthy wetland ecosphere in estuarine delta: theory and method. *Chinese Journal of Applied Ecology*, **29**(8): 2787-2796.]
- 贺文君, 韩广轩, 许延宁, 等. 2018. 潮汐作用下干湿交替对黄河三角洲盐沼湿地净生态系统 CO₂ 交换的影响. 应用生态学报, **29**(1): 269-277. [He WJ, Han GX, Xu YN, *et al.* 2018. Effects of drying and wetting cycles induced by tides on net ecosystem exchange of CO₂ over a salt marsh in the Yellow River Delta, China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, **29**(1): 269-277.]
- 黄 玮, 李志刚, 乔海龙, 等. 2008. 旱盐互作对盐地碱蓬生长及其渗透调节物质的影响. 中国生态农业学报, **16**(1): 173-178. [Huang W, Li ZG, Qiao HL, *et al.* 2008. Interactive effect of sodium chloride and drought on growth and osmotica of *Suaeda salsa*. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, **16**(1): 173-178.]
- 李 颖, 陶 军, 钞锦龙, 等. 2014. 滨海盐碱地“台田-浅池”改良措施的研究进展. 干旱地区农业研究, **32**(5): 154-160. [Li Y, Tao J, Chao HL, *et al.* 2014. Research progress of improving measures of “raised field-shallow pool” for coastal saline-alkaline land. *Agricultural Research in the Arid Areas*, **32**(5): 154-160.]
- 李艳梅, 王克勤, 刘芝芹, 等. 2005. 云南干热河谷微地形改造对土壤水分动态的影响. 浙江林学院学报, **22**(3): 259-265. [Li YM, Wang KQ, Liu ZQ, *et al.* 2005. Effect of reconstructed micro-slope on soil moisture dynamics in Yunnan dry-hot river valley. *Journal of Zhejiang Forestry College*, **22**(3): 259-265.]
- 梁利群, 任 波, 常玉梅, 等. 2013. 中国内陆咸(盐碱)水资源及渔业综合开发利用. 中国渔业经济, **31**(4): 138-145. [Liang LQ, Ren B, Chang YM, *et al.* 2013. Inland brackish (alkaline-saline) water resources and fisheries utilization in China. *Chinese Fisheries Economics*, **31**(4): 138-145.]
- 刘亚男, 来兴发, 杨 倩, 等. 2020. 控水对饲草作物间作群体产量、根冠比及水分利用效率的影响. 应用生态学报, **31**(1): 113-121. [Liu YN, Lai XF, Yang Q, *et al.* 2020. Effects of water supply on biomass yield, root/shoot ratio and water use efficiency of forage crops in intercropping systems. *Chinese Journal of Applied Ecology*, **31**(1): 113-121.]
- 刘奕嫩, 于 洋, 方 军. 2018. 盐碱胁迫及植物耐盐碱分子机制研究. 土壤与作物, **7**(2): 201-211. [Liu YM, Yu Y, Fang J. 2018. Saline-alkali stress and molecular mechanism of saline-alkali tolerance in plants. *Soils and Crops*, **7**(2): 201-211]
- 罗 慧, 冯程程, 岳中辉, 等. 2020. 植被修复对重度盐碱地土壤酶活性和酶反应热力学特征的影响. 应用生态学报, **31**(12): 4243-4250. [Luo H, Feng CC, Yue ZH, *et al.* 2020. Effects of phytoremediation on soil enzyme activity and thermodynamic characteristics of enzymatic reaction in severe saline-alkali land Chinese. *Journal of Applied Ecology*, **31**(12): 4243-4250.]
- 罗延峰, 刘晓丽, 宋希亮, 等. 2020. 黄河三角洲农田排水沟边坡土壤水盐和养分分布特征. 山西农业大学学报(自然科学版), **40**(5): 31-40. [Luo YF, Liu XL, Song XL, *et al.* 2020. Spatial and temporal distribution characteristics of soil water salts and nutrients in agro-ditches slope of the Yellow River Delta. *Journal of Shanxi Agricultural University (Natural Science Edition)*, **40**(5): 31-40.]
- 吕 晓, 徐 慧, 李 丽. 2012. 盐碱地农业可持续利用及其评价. 土壤, **44**(2): 203-207. [Lü X, Xu H, Li L. 2012. Agricultural sustainable utilization and evaluation of saline-alkali land. *Soils*, **44**(2): 203-207.]
- 欧阳竹, 王竑晟, 来剑斌, 等. 2020. 黄河三角洲农业高质量发展新模式. 中国科学院院刊, **35**(2): 145-153. [Ouyang Z, Wang HS, Lai JB, *et al.* 2020. New approach of high-quality agricultural development in the Yellow River Delta. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, **35**(2): 145-153.]
- 郅亚栋, 滕德雄, 吕光辉. 2019. 干旱荒漠区植物生态位对水盐的响应. 生态学报, **39**(8): 2899-2910. [Qie YD, Teng DX, Lü GX. 2019. Response of plant niche to soil moisture and salinity in an arid desert area of XinJiang, China. *Acta Ecologica Sinica*, **39**(8): 2899-2910.]
- 邱冬冬, 张树岩, 马 旭, 等. 2020. 滨海盐沼盐地碱蓬根部凹坑微地形结构的形成机理研究. 环境生态学, **2**(1): 17-25. [Qiu DD, Zhang SY, Ma X, *et al.* 2020. Formation mechanism of concave microtopography at

- the root of *Suaeda salsa* in the coastal salt marsh. *Environmental Ecology*, **2**(1): 17-25.]
- 汝海丽, 张海东, 焦 峰, 等. 2016. 黄土丘陵区微地形对草地植物群落结构组成和功能特征的影响. 应用生态学报, **27**(1): 25-32. [Ru HL, Zhang HD, Jiao F, *et al.* 2016. Impact of micro-landform on grassland plant community structure and function in the hilly Loess Plateau region, China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, **27**(1): 25-32.]
- 尚克春, 刘宪斌, 陈晓英. 2014. 高盐废水人工湿地处理中耐盐植物的筛选. 农业资源与环境学报, **31**(1): 74-78. [Shang KC, Liu XB, Chen XY. 2014. Screening of the salt tolerant plants for high salinity wastewater treatment by the artificial wetland. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, **31**(1): 74-78.]
- 司梦可, 曹建生, 阳 辉. 2019. 微地形变化对地表水文过程影响的研究进展. 中国生态农业学报(中英文), **27**(10): 1587-1595. [Si MK, Cao JS, Yang H. 2019. Advances in research on the effects of micro-topography changes on surface hydrological processes. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, **27**(10): 1587-1595.]
- 宋香静, 李胜男, 韦 玮, 等. 2017. 黄河三角洲柽柳根系分布特征及其影响因素. 湿地科学, **15**(5): 716-722. [Song XJ, Li SN, Wei W, *et al.* Distribution characteristics of root system of *Tamarix chinensis* in Yellow River Delta and its influence factors. *Wetland Science*, **15**(5): 716-722.]
- 唐 琨, 朱伟文, 周文新, 等. 2013. 土壤 pH 对植物生长发育影响的研究进展. 作物研究, **27**(2): 207-212. [Tang K, Zhu WW, Zhou WX, *et al.* 2013. Research progress oneffects of soil pH on plant growth and development. *Crop Research*, **27**(2): 207-212.]
- 田晓燕, 陈 敏, 路 峰, 等. 2019. 黄河三角洲芦苇生长与根系分布特征对不同时期水盐胁迫的响应. 生态学杂志, **38**(2): 404-411. [Tian XY, Chen M, Lu F, *et al.* 2019. Response of growth and root biomass of *Phragmites australis* to water level and salt stress at different growth stages in the Yellow River Delta. *Chinese Journal of Ecology*, **38**(2): 404-411.]
- 王 明, 张晴雯, 杨正礼, 等. 2014. 宁夏引黄灌区干湿交替过程中土壤 pH 的动态变化及影响因素. 核农学报, **28**(4): 720-726. [Wang M, Zhang QW, Yang ZL, *et al.* 2014. Soil pH changes in the paddy field during the drying and rewetting cycles in the Ningxia irrigation area of the Yellow River Basin. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, **28**(4): 720-726.]
- 王建波, 张振东, 邵东宏, 等. 2019. 低洼盐碱地渔农综合利用模式简析. 渔业信息与战略, **34**(3): 188-193. [Wang JB, Zhang ZD, Shao DH, *et al.* 2019. On the integrated model for fisheries and agriculture in low-lying saline-alkaline land. *Fishery Information and Strategy*, **34**(3): 188-193.]
- 王秋林, 陈静蕊, 刘 晖, 等. 2012. 两种挺水植物对水位变化的生长响应. 水生生物学报, **36**(3): 583-587. [Wang QL, ChenJR, Liu H, *et al.* 2012. The growth responses of two emergent plants to the water depth. *Acta Hydrobiologica Sinica*, **36**(3): 583-587.]
- 卫 伟, 余 韵, 贾福岩, 等. 2013. 微地形改造的生态环境效应研究进展. 生态学报, **33**(20): 6462-6469. [Wei W, Yu Y, Jia FY, *et al.* 2013. Research progress in the ecological effects of micro-landform modification. *Acta Ecologica Sinica*, **33**(20): 6462-6469.]
- 吴 昊, 肖楠楠, 林婷婷. 2020. 秦岭松栎林功能多样性与物种多样性和环境异质性的耦合关系. 生态环境学报, **29**(6): 1090-1100. [Wu H, Xiao NN, Lin TT. 2020. Relationships between functional diversity and species diversity of pine-oak mixed forest in Qinling Mountains and their environmental explanations. *Ecology and Environmental Sciences*, **29**(6): 1090-1100.]
- 徐新洲, 薛建辉, 吕志刚, 等. 2013. 太湖贡湖湾湖滨湿地生态功能区与植被修复研究. 南京林业大学学报(自然科学版), **37**(3): 35-40. [Xu XZ, Xue JH, Lü ZG, *et al.* 2013. A research of ecological function area and vegetation restoration at Taihu Gonghu bay wetland. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition)*, **37**(3): 35-40.]
- 许振伟, 宋慧佳, 李明燕, 等. 2019. 不同生态型芦苇种群对盐胁迫的生长和光合特性. 生态学报, **39**(2): 542-549. [Xu ZW, Song HJ, Li MY, *et al.* 2019. Different adaptations of physiological ecology between

- estuarine and landlocked reeds in different salinities. *Acta Ecologica Sinica*, **39**(2): 542-549.]
- 杨帆, 王志春, 王云贺, 等. 2013. 松嫩平原微地形下土壤水盐与植物群落分布的关系. *生态学报*, **33**(19): 6202-6208. [Yang F, Wang ZC, Wang YH, *et al.* 2013. The correlation between soil water salinity and plant community distribution under micro-topography in Songnen Plain. *Acta Ecologica Sinica*, **33**(19): 6202-6208.]
- 杨劲松, 姚荣江, 王相平, 等. 2016. 河套平原盐碱地生态治理和生态产业发展模式. *生态学报*, **36**(22): 7059-7063. [Yang JS, Yao RJ, Wang XP, *et al.* 2016. Research on ecological management and ecological industry development model of saline-alkali land in the Hetao Plain, China. *Acta Ecologica Sinica*, **36**(22): 7059-7063.]
- 弋良朋, 王祖伟. 2011. 盐胁迫下3种滨海盐生植物的根系生长和分布. *生态学报*, **31**(5): 1195-1202. [Yi LW, Wang ZW. 2011. Root system characters in growth and distribution among three littoral halophytes. *Acta Ecologica Sinica*, **31**(5): 1195-1202.]
- 张凌云. 2006. 黄河三角洲地区滨海盐渍土农业生态的利用模式. *土壤肥料*, (1): 38-43. [Zhang LY, 2006. Study the using agricultural ecology model of the coastal saline soil on the Yellow River Delta. *Soil and Fertilizer*, (1): 38-43.]
- 郑丽婷, 苏田, 刘翔宇, 等. 2018. 庙岛群岛典型植物群落物种、功能、结构多样性及其对环境因子的响应. *应用生态学报*, **29**(2): 343-351. [Zheng LT, Su T, Liu XY, *et al.* 2018. Species, functional, structural diversity of typical plant communities and their responses to environmental factors in Miao Archipelago, China, *Chinese Journal of Applied Ecology*, **29**(2): 343-351.]
- 郑一鹏, 余冬立, 王洪德, 2019. 钠盐含量变化对海涂粉砂土工程边坡土力学性质的影响. *水土保持学报*, **33**(2): 93-97. [Zheng YP, She DL, Wang HD. 2019. Effects of sodium salt content on soil mechanical properties of silty sandon engineering soil slope in coastal reclamation area. *Journal of Soil and Water Conservation*, **33**(2): 93-97.]
- 周慧, 史海滨, 郭珈玮, 等. 2020. 盐分与有机无机肥配施对土壤氮素矿化的影响. *农业机械学报*, **51**(5): 295-304. [Zhou H, Shi HB, Guo JW, *et al.* 2020. Effect of salt and organic-inorganic fertilizer application on soil nitrogen mineralization. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, **51**(5): 295-304.]
- 邹锋, 李金前, 韩丽丽, 等. 2019. 鄱阳湖湿地土壤微生物活性对年际水文变化的响应. *湖泊科学*, **31**(2): 551-559. [Zou F, Li JQ, Han LL, *et al.* 2019. Response of soil microbial functional traits to annually hydrological changes in Lake Poyang wetland. *Journal of Lake Sciences*, **31**(2): 551-559.]
- Chen D, Wei W, Chen LD. 2020. How can terracing impact on soil moisture variation in China? A meta-analysis. *Agricultural Water Management*, **27**: 105849.
- Chu XJ, Han GX, Xing QH, *et al.* 2018. Dual effect of precipitation redistribution on net ecosystem CO₂ exchange of a coastal wetland in the Yellow River Delta. *Agricultural and Forest Meteorology*, **249**: 286-296.
- Cui BS, Yang QC, Yang ZF, *et al.* 2009. valuating the ecological performance of wetland restoration in the Yellow River Delta, China. *Ecological Engineering*, **35**: 1090-1103.
- Cui LL, Li GS, Ouyang NL, *et al.* 2018. Analyzing coastal wetland degradation and its key restoration technologies in the coastal area of Jiangsu, China. *Wetlands*, **38**: 525-537.
- Falco N, Wainwright H, Dafflon B, *et al.* 2019. Investigating microtopographic and soil controls on a mountainous meadow plant community using high-resolution remote sensing and surface Geophysical Data. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, **124**: 1618-1636.
- Fu H, Yuan GX, Ge DB, *et al.* 2020. Cascading effects of elevation, soil moisture and soil nutrients on plant traits and ecosystem multi-functioning in Poyang Lake wetland, China. *Aquatic Sciences*, **82**: 34.
- Hayes MA, Jesse A, Tabet B, *et al.* 2017. The contrasting effects of nutrient enrichment on growth, biomass allocation and decomposition of plant tissue in coastal wetlands. *Plant and Soil*, **416**: 193-204.

- Iturrate-Garcia M, O'Brien MJ, Khitun O, *et al.* 2016. Interactive effects between plant functional types and soil factors on tundra species diversity and community composition. *Ecology and Evolution*, **6**: 8126-8137.
- Jia J, Huang C, Bai JH, *et al.* 2018. Effects of drought and salt stresses on growth characteristics of euhalophyte *Suaeda salsa* in coastal wetlands. *Physics and Chemistry of the Earth Parts A/B/C*, **103**: 68-74.
- Legates DR, Mahmood R, Levia DF, *et al.* 2011. Soil moisture: A central and unifying theme in physical geography. *Progress in Physical Geography*, **35**: 65-86.
- Liu JK, Engel BA, Zhang GF, *et al.* 2020. Hydrological connectivity: One of the driving factors of plant communities in the Yellow River Delta. *Ecological Indicators*, **112**: 106150.
- Long X, Liu L, Shao T, *et al.* 2016. Developing and sustainably utilize the coastal mudflat areas in China. *Science of the Total Environment*, **569-570**: 1077-1086.
- Luna E, Jouany C, Castanedac C. 2019. Soil composition and plant nutrients at the interface between crops and saline wetlands in arid environments in NE Spain. *Catena*, **173**: 384-393.
- Qiu DD, Yan JG, Ma X, *et al.* 2019. Microtopographical modification by a herbivore facilitates the growth of a coastal saltmarsh plant. *Marine Pollution Bulletin*, **140**: 431-442.
- Qiu NW, Chen M, Guo JR, *et al.* 2007. Coordinate up-regulation of V-H⁺-ATPase and vacuolar Na⁺/H⁺ antiporter as a response to NaCl treatment in a C-3 halophyte *Suaeda salsa*. *Plant Science*, **172**: 1218-1225.
- Qu WD, Han GX, Wang J, *et al.* 2021. Short-term effects of soil moisture on soil organic carbon decomposition in a coastal wetland of the Yellow River Delta. *Hydrobiologia*, **848**: 3259-3271.
- Wang JF, Shi YJ, Ao YN, *et al.* 2019. Summer drought decreases *Leymus chinensis* productivity through constraining the bud, tiller and shoot production. *Journal of Agronomy and Crop Science*, **205**: 554-561.
- Yang L, Chen LD, Wei W. 2015. Effects of vegetation restoration on the spatial distribution of soil moisture at the hillslope scale in semi-arid regions. *Catena*, **124**: 138-146.
- Yang W, Li XX, 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. *Ecological Engineering*, **104**: 1-12.
- Yu B, Liu G, Liu Q, *et al.* 2018. Effects of micro-topography and vegetation type on soil moisture in a large gully on the Loess Plateau of China. *Hydrology Research*, **49**: 1255-1270.
- Zhang LW, Chen L, Lu F, *et al.* 2020. Differentially expressed genes related to oxidoreductase activity and glutathione metabolism underlying the adaptation of *Phragmites australis* from the salt marsh in the Yellow River Delta, China. *PeerJ*, **8**: e10024.
- Zhao KF, Fan H, Zhou S, *et al.* 2003. Study on the salt and drought tolerance of *Suaeda salsa* and *Kalanchoe clavigramontiana* under iso-osmotic salt and water stress. *Plant Science*, **165**: 837-844.

作者简介 贺文君, 女, 1992 年生, 博士研究生, 研究方向为滨海盐碱地保护和利用。E-mail: wjhe@yic.ac.cn

责任编辑 魏中青