赵庆庆, 白军红, 高永超, 等. 黄河三角洲湿地土壤盐离子沿水盐梯度的变化特征[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(3): 641-649. ZHAO Qing-qing, BAI Jun-hong, GAO Yong-chao, et al. Variations in soil salt ions along a water and salinity gradient in the Yellow River Delta, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(3): 641-649.

黄河三角洲湿地土壤盐离子沿水盐梯度的变化特征

赵庆庆1,2, 白军红2*, 高永超1, 王磊磊1, 郑立稳1, 王加宁1, 张树岩3

(1.齐鲁工业大学(山东省科学院),山东省科学院生态研究所,山东省应用微生物重点实验室,济南 250103;2.北京师范大学环境 学院,水环境模拟国家重点实验室,北京100875;3.黄河三角洲国家级自然保护区黄河口管理站,山东 东营 257500)

摘 要:为了分析黄河三角洲滨海湿地土壤电导率及盐离子组成沿水盐梯度的分布规律,沿自黄河向海的方向选择了假尾拂子 茅湿地、香蒲湿地、芦苇湿地、柽柳和盐地碱蓬混生湿地和盐地碱蓬湿地作为研究样地,于2014年在各类型湿地内采集0~50 cm的 土壤,并测定土壤电导率和6种盐离子。结果表明,盐地碱蓬湿地0~50 cm土壤的电导率、钠离子、钾离子和氯离子显著高于其他 湿地(P<0.05),镁离子、钙离子和硫酸根离子的最高值则出现在柽柳和盐地碱蓬混生湿地。在剖面方向上,电导率和6种盐离子 表现出不同的变化趋势。线性相关分析表明,土壤电导率和6种盐离子呈显著正相关关系(P<0.05)。土壤电导率和盐离子在 2014年均表现出强变异特征。研究表明,沿自河向海的水盐梯度,湿地土壤电导率、钠离子、钾离子、镁离子、钙离子、氯离子和硫 酸根离子总体呈现逐渐上升的趋势,土壤电导率的变化主要受钠离子和氯离子含量变化的影响。

关键词:土壤盐分;盐离子;水盐梯度;黄河三角洲;滨海湿地

中图分类号:S156.4 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2019)03-0641-09 doi:10.11654/jaes.2018-1530

Variations in soil salt ions along a water and salinity gradient in the Yellow River Delta, China

ZHAO Qing-qing^{1,2}, BAI Jun-hong^{2*}, GAO Yong-chao¹, WANG Lei-lei¹, ZHENG Li-wen¹, WANG Jia-ning¹, ZHANG Shu-yan³

(1.Ecology Institute, Qilu University of Technology (Shandong Academy of Sciences), Shandong Provincial Key Laboratory of Applied Microbiology, Ji' nan 250103, China; 2.State Key Laboratory of Water Environment Simulation, School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 3.Management Station of the Yellow River Mouth, National Nature Reserve of the Yellow River Delta, Dongying 257500, China)

Abstract: Soil samples were collected to a depth of 50 cm in the Yellow River Delta Nature Reserve, including *Calamagrostis pseudophragmites* wetlands (S1), *Typha orientalis* wetlands (S2), *Phragmites australis* wetlands (S3), *Tamarix chinensis* and *Suaeda salsa* wetlands (S4) and *Suaeda salsa* wetlands (S5), along a gradient of water and salinity in four seasons of 2014. Soil electrical conductivity (EC) and the concentrations of six salt ions (Na⁺, K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, Cl⁻ and SO²⁻₄) were analyzed to investigate the effects of water and salinity gradient on soil salinity. The results showed that soil EC, Na⁺, K⁺, and Cl⁻ in *Suaeda salsa* wetlands were significantly higher than those in the other wetlands (*P*<0.05), while the highest value of Mg²⁺, Ca²⁺, and SO²⁻₄ occurred in *Tamarix chinensis* and *Suaeda salsa* wetland soils. Along the 0~ 50 cm soil profile, soil EC and salt ions showed different trends. Soil EC was linearly and significantly positively correlated with six salt ions (*P*<0.05). Furthermore, strong variability was observed in soil EC and salt ions in five wetlands. Our results indicated that soil EC and six salt ions increased along the water and salinity gradient from the Yellow River to the sea, and soil EC was mainly affected by the changes of Na⁺ and Cl⁻.

Keywords: soil salinity; salt ions; water and salinity gradient; the Yellow River Delta; coastal wetlands

收稿日期:2018-12-06 录用日期:2019-02-03

作者简介:赵庆庆(1990-),女,山东济宁人,助理研究员,研究方向为湿地生态过程。E-mail:hpzhaoqing@163.com

^{*}通信作者:白军红 E-mail:junhongbai@163.com

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金项目(41807396);国家重点研发计划项目(2017YFC0505906);山东省应用微生物重点实验室开放基金项目(SKLAM201802);北京师范大学学科交叉建设项目

Project supported: The Young Scientists Fund of National Natural Science Foundation of China (41807396); The National Key R&D Program of China (2017YFC0505906); The Special Fund of Shandong Provincial Key Laboratory of Applied Microbiology (SKLAM201802); The Interdiscipline Research Funds of Beijing Normal University

土壤中较高的盐离子的毒性作用会抑制土壤生物活性和植物正常生长,降低植物生产力,影响土壤中有机质输入,也会对土壤碳排放过程造成影响^[1-2]。 逐渐上升的可溶性盐离子含量,特别是氯离子和硫酸根离子还会改变生源要素(碳、氮、磷、硫等)的生物地球化学循环过程^[3]。当硫酸根含量增加时,硫酸根还原过程将取代产甲烷过程而成为有机碳厌氧矿化的主要过程,该过程导致二氧化碳排放升高和甲烷排放降低^[4]。同时,土壤中钠离子、钾离子、钙离子和镁离子的含量,也是反映土壤质量的重要指标^[5],其含量变化可以影响植物生长,又可以作为养分为微生物提供营养基质^[6]。因此,土壤盐分含量和组成是影响湿地生物地球化学过程的重要因素。

在潮汐、地下水和黄河水侧渗的综合作用下,黄 河三角洲湿地呈现出明显的水盐梯度特征。水盐条 件决定了黄河三角洲湿地植被的总体分布格局、植物 多样性和湿地土壤的积盐方式,因此不同植物群落下 土壤盐分空间格局存在差异^[7-8]。相比于无植被覆盖 的滩涂盐渍土,植被覆盖的土壤表现出控盐和脱盐现 象^[9]。此外,气候变化也被认为是土壤盐分动态变化 的影响因素^[10]。黄河三角洲湿地由于自身成陆时间 晚、地理位置独特、地下水埋深浅且矿化度高,在海水 不断入侵的影响下,导致土壤盐渍化严重^[11]。湿地盐 渍化导致湿地退化,改变湿地生态系统过程和景观动 态,影响湿地生态服务功能^[3]。因此,研究黄河三角 洲湿地土壤盐分及盐离子组成沿水盐梯度的变化特 农业环境科学学报 第38卷第3期

征对于了解湿地盐渍化程度以及指导滨海湿地植被 修复具有重要的理论意义。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

黄河三角洲自然保护区(117°31′~119°18′E,36° 55′~38°16′N)位于山东省东营市境内,毗邻渤海,是 重要的湿地类型自然保护区,于2013年被列入国际 重要湿地名录。该保护区总面积为15.3万hm²,由核 心区(59 419 hm²)、缓冲区(11 233 hm²)和实验区(82 348 hm²)构成^[12]。整个保护区包括北部的一千二自 然保护区(1976年改道后黄河故道入海区域)和南部 的黄河口自然保护区(现行黄河入海区域)^[13]。保护 区内气候南北差异不明显,属于暖温带半湿润季风气 候,年均温度12.1℃,年均降水量551.6 mm,年蒸发 量高达1962 mm,干旱指数高达3.56^[14]。

本研究以黄河口保护区内黄河北岸自然湿地为研究样区,沿自黄河向海的方向,选择假尾拂子茅湿地(S1)、香蒲湿地(S2)、芦苇湿地(S3)、柽柳和碱蓬混生湿地(S4)和盐地碱蓬湿地(S5)5类湿地为研究样地,每种样地设置3个重复(图1)。S1和S2湿地紧邻黄河北岸,主要受黄河水影响;S3湿地主要受调水调沙带来的淡水和地下海水影响;S4和S5湿地受潮汐作用明显,其中S4湿地仅受到大潮的影响,S5湿地的潮汐频率高于S4湿地。采样期间,S4和S5湿地未发生涨潮和退潮现象。



图1 研究区域示意图 Figure 1 The location map of sampling sites

1.2 样品采集与分析

分别于2014年1月(冬季)、4月(春季)、8月(夏季) 和10月(秋季)在研究区每条样带上的不同湿地样 区内挖掘50 cm深的土壤剖面,以10 cm为间隔将土 壤剖面划分为5层(0~10、10~20、20~30、30~40 cm和 40~50 cm),分层采集土壤样品,每种湿地类型设置3 个重复。所有土壤样品带回实验室,剔除肉眼可见的 植物残体、石块后,自然风干2~3周,其中一部分样 品用研钵研磨过20目筛后用于测定土壤电导率,另 一部分研磨过100目筛后用于测定土壤盐离子。

土壤电导率(EC):在土水1:5(质量:体积)的上 清液中使用电导率仪测定;土壤盐离子:按土水1:5 (质量:体积)水浸提,使用离子色谱[戴安DX 600测 定钠离子(Na⁺)、钾离子(K⁺)、镁离子(Mg²⁺)和钙离子 (Ca²⁺),戴安ICS 2000测定氯离子(Cl⁻)和硫酸根离子 (SO²⁺),美国]测定。

1.3 统计分析

利用单因素方差分析对不同样地0~50 cm 土壤 的电导率、钠离子、钾离子、镁离子、钙离子、氯离子和 硫酸根离子进行显著性差异分析,当P<0.05 时,认为 具有显著性差异。在单因素方差分析中,当方差齐性 时,采用LSD检验;当方差非齐性时,采用Tamhane检 验。统计分析均采用SPSS 19.0软件完成。箱式分布 图使用 OriginPro 2016 软件绘制,剖面分布图使用 Surfer软件进行绘制(反向插值法)。

2 结果与讨论

2.1 湿地土壤电导率沿水盐梯度的分布特征

土壤溶液的电导率是指示土壤中盐分含量或盐

分积累总体状况的一个指标,可以用来指示土壤盐度 的变化[15-16]。5类湿地0~50 cm 土壤电导率的变化如 图2所示。由图2可知,S1和S2湿地的土壤电导率之 间无显著性差异(P>0.05),但显著低于S3、S4和S5湿 地(P<0.05)。S3湿地的土壤电导率显著低于S4和S5 湿地(P<0.05), S5湿地0~50 cm 土壤电导率的平均值 最高。就季节变化而言,S1湿地土壤电导率在4个季 节之间无显著性差异(P>0.05)。S2湿地土壤电导率 在春季和夏季具有较高值,其次为冬季,秋季土壤电 导率显著低于其他3个季节(P<0.05)。S3湿地土壤 电导率在冬季具有最高值(P<0.05),春季土壤电导率 平均值高于夏季和秋季,但3个季节间无显著性差异 (P>0.05)。但对于S4和S5湿地而言,冬季和夏季土 壤电导率显著高于春季和秋季(P<0.05)。王艳等[10] 针对自然状态下 0~60 cm 深度滨海盐渍土的研究发 现,受降雨和气温影响,季节变化对土壤盐分的影响 表现为春季积盐、夏季脱盐、秋季缓慢积盐和冬季稳 定。付颖凹对天津滨海刺槐林盐碱土壤的研究也发 现,表层土壤含盐量在春季具有最高值,春季较高的 蒸发量被认为是造成这一现象的原因。然而,植被覆 盖可以改变气候因子对土壤盐分动态的影响。本 研究中,S1和S2湿地主要受淡水影响,S3湿地受地下 海水影响,盐分均低于盐渍土壤,未呈现出与盐渍土 一致的季节变化规律。由于黄河三角洲夏季潮汐频 率高,冬季多发大潮,因此S4和S5湿地在植被、潮汐 输入及海水入侵的综合影响下,土壤盐分在冬夏季节 具有较高值。在2014年采样时间内,5类湿地中 (S1~S5) 0~50 cm 土壤电导率平均值的变化范围分别 为0.24~0.28、0.27~0.42、1.55~2.40、2.87~5.43 mS·cm⁻¹



不同小写字母表示不同样点之间的差异显著(P<0.05);不同大写字母表示同一样点不同季节之间的差异显著(P<0.05)。下同 Different lowercase letters represent significant differences between sampling sites(P<0.05);Different capital letters represent significant differences between seasons at the same sampling site(P<0.05). The same below

图2 湿地土壤(0~50 cm)电导率沿水盐梯度的变化特征

Figure 2 Changes in soil EC in top 50 cm wetland soils along water and salinity gradient

644

农业环境科学学报 第38卷第3期

和 3.71~6.17 mS·cm⁻¹。

2.2 湿地土壤盐离子沿水盐梯度的变化特征

图 3 显示了 2014年土壤(0~50 cm)中4种阳离子 (钠、钾、钙、镁离子)含量沿水盐梯度的变化。由图 3 可知,4种阳离子中,钠离子含量最高,钾离子含量最 低。沿自河向海的水盐梯度,钠离子和钾离子分布趋势一致,最高值均出现在受潮汐影响的S5湿地,最低值出现在S1或S2湿地。S4湿地土壤的钙离子显著高于其他湿地(P<0.05),具有最高值。S1和S2湿地土壤中4种阳离子含量均显著低于其他3个湿地(P<



图3 湿地土壤(0~50 cm)钠、钾、钙、镁离子沿水盐梯度的箱式分布图



2019年3月 赵庆庆,等:黄河三角洲湿地土壤盐离子沿水盐梯度的变化特征

0.05),且S3湿地土壤中的4种阳离子含量显著低于 S4和S5湿地(P<0.05)(钙离子除外)。S4湿地土壤镁 离子平均值高于S5湿地土壤,但二者之间在夏秋季 节无显著性差异(P>0.05)。

5类湿地土壤(0~50 cm)中氯离子和硫酸根离子 含量沿水盐梯度的变化如图4所示。5类湿地0~50 cm土壤氯离子含量的平均值均高于硫酸根离子,两 种阴离子平均值的最高值均出现在S5湿地(秋季硫 酸根离子的最高值出现在S4)。S1和S2湿地土壤中 的两种阴离子含量均显著低于其他3类湿地(P< 0.05),且S3湿地土壤中的两种阴离子显著低于S4和 S5湿地(P<0.05)。尽管S1和S2湿地土壤的盐离子之 间无显著性差异(P>0.05),但离黄河更近的S1湿地 土壤中盐离子平均值总体低于S2湿地。综上可知,6 种盐离子沿自河向海的水盐梯度呈现逐渐上升的趋 势,最高值出现在受潮汐影响的柽柳和盐地碱蓬混生 湿地或盐地碱蓬湿地。

2.3 湿地土壤(0~50 cm)电导率和盐离子沿水盐梯度 的空间分布特征

湿地土壤(0~50 cm)电导率和盐离子沿水盐梯度 的空间分布见图 5。在 0~50 cm 深度范围内,水平方 向上,每层土壤的电导率和盐离子均沿自河向海的水 盐梯度呈上升趋势。受黄河淡水影响的低盐度湿地 (S1和S2)土壤电导率和盐离子无明显剖面变化趋势。受淡水和地下海水影响的芦苇湿地(S3)电导率和盐离子则呈现出随深度增加而上升的趋势,最高值出现在40~50 cm土壤,表明海水入侵造成芦苇湿地土壤盐分含量升高。由于同时受到潮汐和地下海水的影响,S4和S5湿地土壤的电导率和盐离子剖面分布趋势基本一致,总体呈现随深度增加而下降的趋势,最高值多出现在0~10 cm土壤。

土壤电导率的大小主要取决于溶解性盐离子(钠 离子、钙离子、铵根离子、氯离子和硫酸根离子等)的 浓度^[18]。翁永玲等^[19]研究发现,黄河三角洲湿地土壤 含盐量较高,盐分主要成分为氯离子和钠离子,其次 是硫酸根离子。通过对本研究中6种盐离子的剖析 发现,土壤的盐基离子分布趋势与电导率一致,沿自 河向海的水盐梯度总体呈现逐渐上升的趋势。线性 拟合分析表明(表1),土壤电导率与6种盐离子之间 均为显著正相关关系(P<0.01),电导率与钠离子、氯 离子的线性相关关系最强,表明钠离子和氯离子对电 导率的影响最大。

土壤的盐基离子主要来源于成土母质^[6]。由于 成土母质的元素组成和土壤形成过程中钙离子和镁 离子的优先固持作用,土壤盐基离子的含量一般呈现 钙离子>镁离子>钾离子>钠离子的规律^[6,20]。本研究



Figure 4 The box plots of Cl⁻ and SO²⁻₄ along water and salinity gradient



图5 土壤电导率和盐离子沿水盐梯度的空间分布图

Figure 5 Spatial distributions of soil EC and salt ions along water and salinity gradient

中,5种湿地土壤中4种阳离子的含量均呈现钠离子>钙离子>镁离子>钾离子的趋势,与张天举等[21]的研究结论一致,这可能主要受成土母质的影响所致。此外,土壤中有机质含量和土壤颗粒组成会影响土壤盐基离子的吸附,植被对盐基离子的吸收也会影响土壤盐离子的分布格局[22]。

受潮汐和海水入侵输入大量盐离子的影响,土壤 盐度和盐离子含量沿自黄河向海的方向逐渐上升。 刘玉斌等^[23]结合遥感影像反演证实河水、地下水和海 水之间的相互作用决定了黄河三角洲湿地盐分的空 间分异规律。水盐条件决定了植被的分布格局,因此 沿自河向海的水盐梯度上分布着适应不同水盐条件 的湿地植被^[3]。不同湿地植被类型对于盐分胁迫具 有不同的适应机制。柽柳具有泌盐功能,可以在其周 围形成盐岛效应;而盐地碱蓬具有吸收盐分的功 能^[22]。因此,张天举等^[21]认为,柽柳表层湿地的全盐 量、钠离子、钙离子、镁离子和氯离子均较高于盐地碱 蓬湿地是植被对盐分的适应机制不同及柽柳湿地蒸 发高于盐地碱蓬湿地造成的。然而,考虑到海水入侵 和潮汐可以输入大量盐离子,选取的研究样点的水文 条件,特别是潮汐淹水频率不同也是造成结果不同的 重要原因。此外,安乐生等^[24]研究也发现,水文地质 条件和地貌条件是控制氯离子迁移富集的重要因素。 2.4 湿地土壤(0~50 cm)电导率和盐离子的变异特征

标准偏差是反映数据离散程度的指标,数值越小,表明数据偏离平均值的程度越小。而标准偏差与平均值的比值被定义为变异系数,由于变异系数可以消除量纲差异的影响,因此可以更好地反映空间上的差异^[25]。根据变异系数的大小可以将其划分为3类:弱变异(<0.1)、中等变异(0.1~0.2)和强变异(>0.3)^[26]。表2展示了5类湿地0~50 cm土壤的电导率和盐离子在2014年的平均值、标准偏差和变异系数。由表

农I工場电守举与0种益离于的线性拟合大系	表1	¹ 与6种盐离子的线性拟合关系
----------------------	----	----------------------------

拟合方程	拟合系数R ²	自由度 F	显著性系数P
Fitting equation	Coefficients	Degree of freedom	Coefficients of significance
EC=1.56×10 ⁻³ Na ⁺ -0.066	0.75	885.86	< 0.01
EC=0.05K ⁺ +0.50	0.48	275.54	< 0.01
EC=0.01Mg ²⁺ +0.008	0.31	134.99	< 0.01
EC=0.007Ca ²⁺ +0.44	0.10	32.19	< 0.01
EC=8.18×10 ⁻⁴ Cl ⁻ +0.21	0.79	1 121.11	< 0.01
EC=0.004SO ² ₄ -0.17	0.42	215.29	< 0.01

表2 土壤电导率和盐离子的统计分析

Table 2 The statistical analysis of soil EC and salt ions

样点	统计项	电导率 EC/	钠离子 Na ⁺ /	钾离子K⁺/	镁离子 Mg ²⁺ /	钙离子Ca2+/	氯离子 Cl-/	硫酸根离子 SO ²⁻ /
Sites	Indicators	$mS \cdot cm^{-1}$	mg∙kg ⁻¹	$mg \cdot kg^{-1}$	mg•kg ⁻¹	$mg \cdot kg^{-1}$	$mg \cdot kg^{-1}$	$mg \cdot kg^{-1}$
S1	平均值	0.25	271.42	10.27	97.70	183.14	157.21	245.91
	标准差	0.11	70.65	4.76	49.22	63.39	59.86	112.95
	变异系数	0.44	0.26	0.46	0.50	0.35	0.38	0.46
S2	平均值	0.29	302.12	10.66	104.25	198.88	190.26	363.65
	标准差	0.13	83.23	7.20	52.26	65.06	60.84	131.48
	变异系数	0.44	0.28	0.68	0.50	0.33	0.32	0.36
S3	平均值	1.80	1 194.55	25.20	162.42	271.13	1 979.45	540.40
	标准差	0.68	385.54	10.80	64.68	83.66	690.17	185.53
	变异系数	0.38	0.32	0.43	0.40	0.31	0.35	0.34
S4	平均值	3.53	2 234.12	39.28	288.89	364.38	4 355.80	786.93
	标准差	1.62	672.50	13.77	106.51	115.28	1 604.61	336.02
	变异系数	0.46	0.30	0.35	0.37	0.32	0.37	0.43
S5	平均值	4.82	3 098.60	79.32	251.08	263.34	5 310.92	971.82
	标准差	1.77	1 030.66	34.27	76.59	60.37	2 187.83	366.64
	变异系数	0.37	0.33	0.43	0.31	0.23	0.41	0.38

2可知,沿自河向海的水盐梯度,5类湿地(S1~S5)土 壤(0~50 cm)电导率的平均值分别为0.25、0.29、1.80、 3.53 mS·cm⁻¹和4.82 mS·cm⁻¹, 钠离子的平均值分 别为271.42、302.12、1194.55、2234.12 mg·kg⁻¹和 3 098.60 mg·kg⁻¹, 钾离子的平均值分别为 10.27、 10.66、25.20、39.28 mg·kg⁻¹和79.32 mg·kg⁻¹, 镁离子的 平均值分别为97.70、104.25、162.42、288.89 mg·kg⁻¹ 和 251.08 mg·kg⁻¹, 钙离子的平均值分别为 183.14、 198.88、271.13、364.38 mg·kg⁻¹和263.34 mg·kg⁻¹, 氯离 子的平均值分别为157.21、190.26、1979.45、4355.80 mg·kg⁻¹和5 310.92 mg·kg⁻¹,硫酸根离子的平均值分 别为245.91、363.65、540.40、786.93 mg·kg⁻¹和971.82 mg·kg⁻¹。5类湿地土壤电导率和盐离子的变异系数 大都高于0.3,属于强变异性,这可能是由电导率和盐 离子的季节变化和土壤深度变化导致的。有研究认 为,当土壤电导率高于4 mS·cm⁻¹时,该土壤被认定为 盐土;而且土壤中钠离子含量较高时,土壤为碱性土 的可能性较大[27]。由此可推断,盐地碱蓬湿地土壤为 盐土。

3 结论

(1)沿自黄河向海的水盐梯度,湿地土壤电导率和盐离子含量逐渐升高,植被分布呈带状格局逐渐 变化。

(2)沿剖面方向,低盐度湿地未表现出明显的分 布趋势,受地下水影响的芦苇湿地土壤盐分则呈现随 深度增加而上升的趋势。

(3)受潮汐影响的盐地碱蓬湿地土壤电导率平均 值均高于4mS·cm⁻¹,属于盐土,土壤电导率和钠离 子、钾离子、氯离子、硫酸根离子含量的平均值均高于 其他湿地土壤。镁离子和钙离子含量平均值的最高 值均出现在柽柳和盐地碱蓬混生湿地。

(4)沿自黄河向海的水盐梯度,5种湿地0~50 cm 土壤的电导率和6种盐离子在2014年均呈现强变异 性特征。

参考文献:

- Dang D M, Macdonald B, Warneke S, et al. Available carbon and nitrate increase greenhouse gas emissions from soils affected by salinity [J]. Soil Research, 2017, 55(1):47–57.
- [2] Nouri H, Chavoshi Borujeni S, Nirola R, et al. Application of green remediation on soil salinity treatment: A review on halophytoremediation [J]. Process Safety and Environmental Protection, 2017, 107:94–107.
- [3] Herbert E R, Boon P, Burgin A J, et al. A global perspective on wet-

农业环境科学学报 第38卷第3期

land salinization: Ecological consequences of a growing threat to freshwater wetlands[J]. *Ecosphere*, 2015, 6(10):1-43.

- [4] Chambers L G, Reddy K R, Osborne T Z. Short-term response of carbon cycling to salinity pulses in a freshwater wetland[J]. Soil Science Society of America Journal, 2011, 75(5):2000–2007.
- [5] Campo J, Maass J M, Jaramillo V J, et al. Calcium, potassium, and magnesium cycling in a Mexican tropical dry forest ecosystem[J]. *Biogeochemistry*, 2000, 49(1):21–36.
- [6] 姜 林, 耿增超, 李珊珊, 等. 祁连山西水林区土壤阳离子交换量及 盐基离子的剖面分布[J]. 生态学报, 2012, 32(11):3368-3377.
 JIANG Lin, GENG Zeng-chao, LI Shan-shan, et al. Soil cation exchange capacity and exchangeable base cation content in the profiles of four typical soils in the Xi-Shui Forest Zone of the Qilian Mountains [J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(11):3368-3377.
- [7] Horton D J, Theis K R, Uzarski D G, et al. Microbial community structure and microbial networks correspond to nutrient gradients within coastal wetlands of the Great Lakes[J]. *BioRxiv*, 2018. doi: https://doi. org/10.1101/217919.
- [8] 陈永金, 刘加珍, 刘亚琦, 等. 黄河河口湿地潮汐作用下土壤盐分异 质响应研究[J]. 聊城大学学报(自然科学版), 2014, 27(4):72-77.
 CHEN Yong-jin, LIU Jia-zhen, LIU Ya-qi, et al. Research on heterogeneous response of soil salinity to tidal action in the estuary of Yellow River[J]. Journal of Liaocheng University (Nat Sci), 2014, 27(4):72-77.
- [9] 张 蛟, 崔士友, 冯芝祥, 等. 气候因子和地表覆盖对沿海滩涂土壤 盐分动态的影响[J]. 中国生态农业学报, 2018, 26(2):294-302.
 ZHANG Jiao, CUI Shi-you, FENG Zhi-xiang, et al. Climate factors and mulching affect soil salinity dynamics in coastal areas[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2018, 26(2):294-302.
- [10] 王 艳, 廉晓娟, 张余良, 等. 天津滨海盐渍土水盐运动规律研究
 [J]. 天津农业科学, 2012, 18(2):95-97, 101.
 WANG Yan, LIAN Xiao-juan, ZHANG Yu-liang, et al. Study on water-salt movement of coastal saline soil in Tianjin[J]. *Tianjin Agricultural Sciences*, 2012, 18(2):95-97, 101.
- [11] 崔保山,谢 湉,王 青,等. 大规模围填海对滨海湿地的影响与 对策[J]. 中国科学院院刊, 2017, 32(4):418-425. CUI Bao-shan, XIE Tian, WANG Qing, et al. Impact of large-scale Reclamation on coastal wetlands and implications for ecological restoration, compensation, and sustainable exploitation framework[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2017, 32(4):418-425.
- [12] 刘 莉,韩 美,刘玉斌,等.黄河三角洲自然保护区湿地植被生物量空间分布及其影响因素[J].生态学报,2017,37(13):4346-4355.

LIU Li, HAN Mei, LIU Yu-bin, et al. Spatial distribution of wetland vegetation biomass and its influencing factors in the Yellow Rvier Delta Nature Reserve[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37 (13) : 4346–4355.

[13] 李晓晓,杨 薇,孙 涛,等.黄河故道尾闾湿地大型底栖动物群 落对生态补水的响应研究[J].北京师范大学学报(自然科学版), 2018,54(1):64-72.

LI Xiao-xiao, YANG Wei, SUN Tao, et al. Ecological responses of

2019年3月

macrobenthic community to freshwater replenishment in the tail wetland of old Yellow River[J]. *Journal of Beijing Normal University* (*Natural Sciences*), 2018, 54(1):64–72.

- [14] Gao H F, Bai J H, Xiao R, et al. Soil net nitrogen mineralization in salt marshes with different flooding periods in the Yellow River Delta, China[J]. CLEAN-Soil, Air, Water, 2012, 40(10):1111-1117.
- [15] Jiang Y, Hao W, Zhang Y, et al. Geostatistical analyses of soil electrical conductivity in a vegetable greenhouse field with different data sets[J]. *Environmental Research Journal*, 2008, 2(3):125-130.
- [16] Yu Y, Wang H, Liu J, et al. Shifts in microbial community function and structure along the successional gradient of coastal wetlands in Yellow River Estuary[J]. European Journal of Soil Biology, 2011, 49 (2):12-21.
- [17] 付 颖.天津滨海盐碱土水盐动态及有机改良剂的改良效果研究[D].北京:北京林业大学, 2015.

FU Ying. Dynamics of water and salt in the Tianjin Binhai Saline soil and the effectiveness of organic modifier[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2015.

- [18] Marandi A, Polikarpus M, Jõeleht A. A new approach for describing the relationship between electrical conductivity and major anion concentration in natural waters[J]. *Applied Geochemistry*, 2013, 38: 103– 109.
- [19] 翁永玲,宫 鹏,黄河三角洲盐渍土盐分特征研究[J].南京大学学报:自然科学版,2006,42(6):602-610.
 WENG Yong-ling, GONG Peng. Soil salinity measurements on the Yellow River Delta[J]. Journal of Nanjing University (Natural Sciences), 2006,42(6):602-610.
- [20] 张玉革,梁文举,姜 勇.不同利用方式下潮棕壤交换性钙镁的剖面分布[J].应用生态学报,2008,19(4):813-818.

ZHANG Yu-ge, LIANG Wen-ju, JIANG Yong. Profile distribution of exchangeable calcium and magnesium in an aquatic brown soil as affected by land use type[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(4):813-818. [21] 张天举, 陈永金. 滨海湿地土壤表层盐分在不同群落的变异分析[J]. 科技资讯, 2017, 15(5):117-120.

ZHANG Tian-ju, CHEN Yong-jin. Analysis of soil salt in surface soils of different vegetation types in coastal wetlands[J]. *Science & Technology Information*, 2017, 15(5):117-120.

- [22] 张立华,陈沛海,李 健,等.黄河三角洲柽柳植株周围土壤盐分离子的分布[J]. 生态学报, 2016, 36(18):5741-5749.
 ZHANG Li-hua, CHEN Pei-hai, LI Jian, et al. Distribution of soil salt ions around *Tamarix chinensis* individuals in the Yellow River Delta[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(18):5741-5749.
- [23] 刘玉斌,韩 美,刘延荣,等.黄河三角洲土壤盐分养分空间分异 规律研究[J].人民黄河,2018,40(2):76-80.

LIU Yu-bin, HAN Mei, LIU Yan-rong, et al. Spatial distribution of soil salinity and nutrients in the Yellow River Delta[J]. *Yellow River*, 2018, 40(2):76-80.

[24] 安乐生, 周葆华, 赵全升, 等. 黄河三角洲土壤氯离子空间变异特征及其控制因素[J]. 地理科学, 2015, 35(3):358-364.

AN Le-sheng, ZHOU Bao-hua, ZHAO Quan-sheng, et al. Spatial variability of soil chloride content and its driving factors in the Huang-he River Delta[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2015, 35(3): 358-364.

[25] 于 洋. 城市中街尘金属的分布与污染源分析[D]. 北京:北京师范大学, 2017.

YU Yang. Distribution and source analysis of metals in urban street dust[D]. Beijing: Beijing Normal University, 2017.

[26] 李章平. 重庆市主城区街道灰尘的污染与风险特征研究[D]. 重 庆:西南大学, 2012.

LI Zhang-ping. Analysis of pollution and risk of street dust in core district of Chongqing[D]. Chongqing:Southwest University, 2012.

[27] Rath K M, Rousk J. Salt effects on the soil microbial decomposer community and their role in organic carbon cycling: A review[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2015, 81:108–123.