

# 黄河三角洲不同类型湿地土壤盐分的剖面分异特征

王大伟<sup>1</sup>, 白军红<sup>1</sup>, 赵庆庆<sup>2</sup>, 卢琼琼<sup>1</sup>, 张树岩<sup>3</sup>

(1. 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; 2. 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; 3. 黄河三角洲国家级自然保护区黄河口管理站, 东营 257500)

**摘要:** 为探究高强度人为干扰是否改变滨海湿地土壤盐分的剖面特征, 采集黄河三角洲典型自然湿地和人为干扰湿地不同植物群落下的土壤剖面样品, 进行实验室测定。运用单因素方差分析、非参数检验、聚类分析等方法, 对土壤剖面含盐量及理化性状进行统计分析。结果显示: 由陆向海湿地土壤从轻度盐渍化向盐土过渡, 盐分剖面特征受人活动影响显著, 同时人为影响因植被类型而异。总体而言, 人为干扰湿地土壤盐渍化程度高于自然湿地。土壤盐分剖面类型可划分为表聚型、震荡型和均匀型三种, 空间上由海向陆土壤盐分剖面类型由表聚型、震荡型向均匀型转变。人为干扰湿地中的柽柳(*Tamarix chinensis*)群落和裸地土壤盐分表聚特征明显, 属于表聚型剖面, 表聚系数为63%, 均匀型剖面占比最高, 达到2/3。当地人为了筑坝修路等建设活动, 通过直接阻断或改变地形等方式削弱了湿地潮汐的水文连通过程, 进而改变土壤含水率、容重等生境要素, 可能成为影响盐分剖面特征的重要因素。通过闸阀调控、生态补水工程水文连通恢复措施, 改善湿地土壤盐碱化问题, 有助于推动黄河三角洲滨海湿地的可持续发展与管理。

**关键词:** 土壤含盐量; 土壤剖面; 聚类分析; 植物群落; 黄河三角洲

在高强度人类活动和气候变化的双重胁迫下, 滨海湿地破碎化严重, 湿地水文连通受阻, 土壤次生盐渍化、生物多样性降低等生态环境问题突出<sup>[1-2]</sup>。湿地土壤盐渍化程度, 直接影响到湿地生源要素转化、植物群落演替以及微生物多样性变化等重要生态过程, 从而驱动海岸带景观格局的演变<sup>[3-5]</sup>。因此, 识别湿地土壤盐渍化特征及人类活动的影响, 对区域生态环境的可持续发展至关重要。

黄河三角洲是中国最典型的新生湿地生态系统, 是国家发展重要的后备土地资源区, 也是维持区域生态环境平衡的重要珍稀湿地<sup>[6,7]</sup>。该区域海拔低, 地下水埋藏浅、矿化度高, 土壤发育特征以盐化沼泽土和潮滩盐土为主, 土壤盐渍化形势严峻<sup>[8,9]</sup>。滨海湿地土壤盐渍化的形成过程复杂, 从区域气候和地形条件、水文地质状况、植被覆盖及人为垦殖等因素出发, 探讨湿地土壤盐分的时空分异特征及成因, 成为以往学者研究的重点<sup>[9-12]</sup>。当下探究水文连通对湿地关键生态过程的驱动作用, 尤其是水文连通与生物地球化学连通的耦合机制及基于水文连通调控的湿地修复和保育技术成为湿地研究的热点与难点<sup>[13,14]</sup>。而从水文连通角度, 解析人为筑堤、修路等高强度活动通过改变水文连通条

收稿日期: 2018-11-21; 修订日期: 2019-09-07

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0505906); 北京师范大学学科交叉建设项目(11500-312231104); 中央高校基本科研业务费专项资金; 北京师范大学博一学科交叉基金项目(BNUXKJC1923)

作者简介: 王大伟(1994-), 男, 山东德州人, 博士研究生, 研究方向为湿地生态水文过程。

E-mail: david\_9412@163.com

通讯作者: 白军红(1976-), 男, 河北无极人, 博士, 教授, 研究方向为湿地生态修复。E-mail: junhongbai@163.com

件, 影响土壤盐分剖面特征的研究, 成为滨海湿地保护和修复过程中亟待解决的问题。

为探究高强度人为干扰活动是否改变滨海湿地土壤盐分的剖面特征及影响地表聚盐过程, 选取黄河三角洲典型自然湿地和堤坝围隔湿地为研究对象, 对比分析人为干扰活动对湿地土壤盐分剖面分异特征的影响, 以为科学认识和管理滨海湿地土壤盐渍化问题提供理论支撑。

### 1 研究方法与数据来源

#### 1.1 研究区概况

研究区选择在黄河入海口北岸湿地 (119°10'0.79"~119°9'57.71"E, 37°45'49.34"~37°46'6.14"N) 和东营港区南部堤坝围隔湿地 (118°54'40.85"~118°55'1.27"E, 38°3'19.79"~38°3'22.93"N) (图1)。其中黄河入海口北岸湿地位于黄河三角洲国家级自然保护区内, 是黄河向北改道入海形成的新生湿地, 受黄河径流和渤海潮汐活动交互作用的影响, 无筑坝、修路等人为建设活动的干扰, 属典型的新生自然湿地。水盐条件由河向海呈梯度变化, 致使该区植物多样性丰富, 既包括淡水沼泽植物, 如香蒲 (*Typha orientalis Presl*)、假苇拂子茅 (*Calamagrostis pseudophragmites*)、芦苇 (*Phragmites communis*) 等, 也包括柽柳 (*Tamarix chinensis Lour*)、盐地碱蓬 (*Suaeda salsa*) 等典型盐生植物。而堤坝围隔湿地位于黄河三角洲东北部东营港区域, 历史上防潮堤、公路、港口建设等人为开发活动强度较大, 致使滩涂面积萎缩, 斑块破碎化加剧, 潮流过程被阻断, 滨海湿地退化严重<sup>[15]</sup>, 属典型的人为干扰湿地。该区域植物多样性较低, 植物群落主要包括盐地碱蓬、柽柳、芦苇等。

#### 1.2 样品采集与处理

于2014年8月采集自然湿地 (黄河入海口北岸湿地) 和人为干扰湿地 (东营港区南部湿地) 各植物群落下的土壤剖面样品 (图1)。在黄河北岸的自然湿地, 沿海陆梯度设

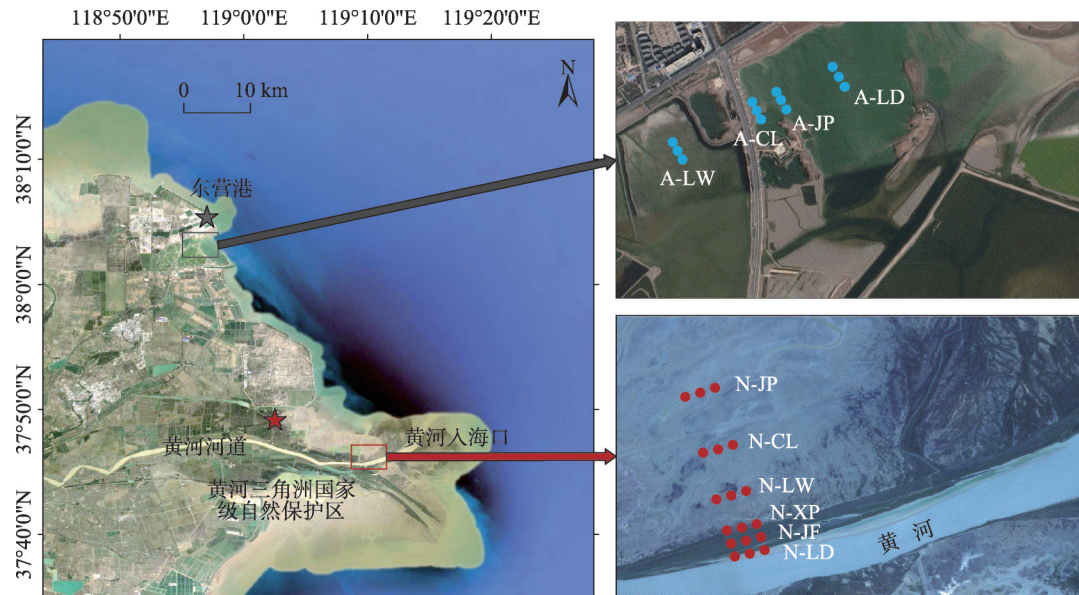


图1 研究区地理位置及采样点分布示意图

Fig. 1 Geographical location and sampling points of the study area

置三条间隔 100 m 的平行样线, 由黄河向海依次采集河滩裸地 (N-LD)、假苇拂子茅 (N-JF)、香蒲 (N-XP)、芦苇 (N-LW)、柽柳 (N-CL)、盐地碱蓬 (N-JP) 群落的土壤剖面样品。在东营港区南部的人为干扰湿地, 垂直岸线由海向陆采集滩涂裸地 (A-LD)、盐地碱蓬 (A-JP)、柽柳 (A-CL)、芦苇 (A-LW) 群落土壤剖面样品, 同样设置三条间隔 100 m 的平行样线。在各植物群落下的土壤按照五点采样法, 采集 50 cm 深度的土壤剖面, 以 10 cm 为间隔分为五层, 即 0~10 cm、10~20 cm、20~30 cm、30~40 cm、40~50 cm, 将每层土壤样品充分混合并分装, 共采集土壤混合样品 150 个, 带回实验室用于指标测定分析。测定前, 剔除土壤样品的残存的植物残体、石块等, 室温下自然风干 2~3 周, 之后研磨, 过 100 目筛, 保存于自封袋中, 用于测定土壤理化指标。

### 1.3 指标测定

土壤含水率和容重通过环刀法取样, 在 105 °C 的烘箱中烘 24 小时至恒重; 土壤电导率 (EC) 和 pH 值, 按土水比 (1 : 5) 浸提, 分别用 pH 计和电导率仪测定; 土壤含盐量可根据黄河三角洲前人研究建立的含盐量 (g/kg) 与电导率 (dS/m) 的经验关系进行换算<sup>[16]</sup>:

$$\text{Salinity} = 2.18 \times \text{EC} + 0.727, R^2 = 0.9387 \quad (1)$$

土壤盐离子 ( $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ ), 按土水比 (1 : 5) 浸提, 用离子色谱法测定; 土壤钠吸附比 (SAR) 的估算依据测定土壤的  $\text{Na}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$  和  $\text{Mg}^{2+}$ , 并按照式 (2) 计算<sup>[17]</sup>:

$$\text{SAR}(\text{mmol}^{-1})^{0.5} = \text{Na}^+ / [(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})/2]^{0.5} \quad (2)$$

### 1.4 数据分析

通过 Pearson 相关分析探讨土壤理化性质间的相关性。为判别不同分组间的差异显著性, 首先通过 Shapiro-Wilk 法进行正态性检验, 当分组满足正态性时, 进行 *T* 检验和单因素方差分析; 当不满足正态性时, 使用非参数 Mann Whitney U 检验区分。通过聚类分析方法, 对土壤样品剖面特征进行归类分析。以上分析均在 SPSS 20.0 软件中进行, 使用 Excel 2016 软件进行数据整理, 使用 Origin 9.0 软件进行图形绘制。

## 2 结果分析

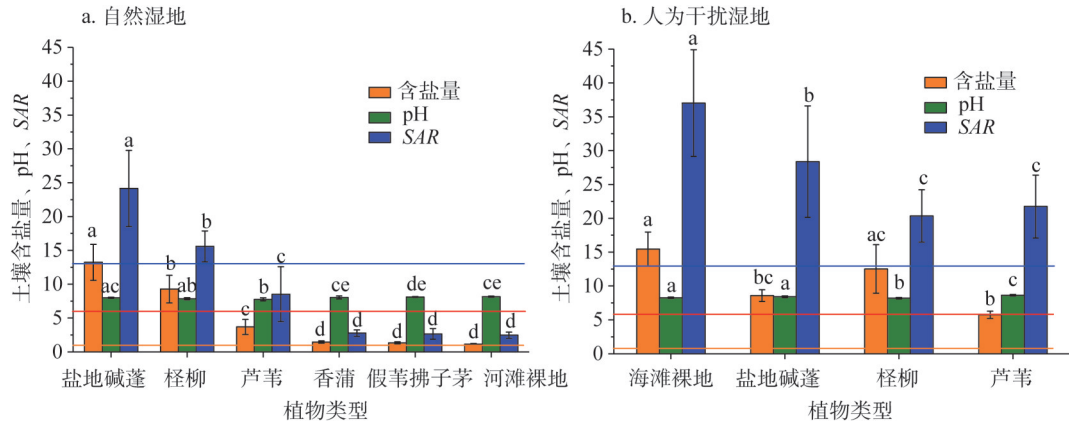
### 2.1 自然湿地与人为干扰湿地不同植物群落下土壤的盐渍化特征

#### 2.1.1 不同植物群落下湿地土壤的盐渍化水平

黄河三角洲自然湿地和人为干扰湿地土壤含盐量及 SAR 沿植被带梯度的分布格局具有明显差异 (图 2), 其中自然湿地土壤含盐量沿自海向陆方向呈递减规律, 且低于人为干扰湿地, 反映了土壤含盐量与植被分布格局在空间上的一致性; 而人为干扰湿地的柽柳群落下土壤含盐量偏高, 改变了土壤含盐量沿海陆梯度的分布格局。总体上, 土壤 SAR 值由海向陆逐渐下降, 人为干扰湿地的柽柳和芦苇群落下土壤 SAR 显著高于自然湿地土壤, 表明其土壤碱化程度更严重。此外, 该区域湿地土壤 pH 总体上高于 8, 土壤呈弱碱性。

不同植物群落下土壤含盐量、pH 及 SAR 的差异性显著 (图 2)。在自然湿地中, 盐地碱蓬和柽柳群落下土壤含盐量较高, 分别为 13.2 g/kg 和 9.29 g/kg, 属于盐土<sup>[18]</sup>。香蒲、假苇拂子茅和河滩裸地的土壤含盐量在 1.11~1.63 g/kg 范围内, 显著低于其他三类植物群落下的土壤 ( $P < 0.05$ ), 属于轻度盐渍化。在人为干扰湿地中, 除芦苇群落 (5.73 g/kg) 外, 其余植物群落下土壤含盐量均超过盐土临界限值, 并且滩涂裸地和柽柳群落土壤含





注: 英文字母表示差异显著性, 橙线、红线、蓝线分别表示非盐渍化、盐土等级含盐量临界值 1 g/kg、6 g/kg, 碱土等级临界值  $SAR=13$ 。

图2 自然湿地和人为干扰湿地不同植物群落下土壤含盐量、pH及SAR

Fig. 2 Soil salinity, pH and SAR of different plant communities in natural and anthropogenic disturbance wetlands

盐量显著高于芦苇群落下土壤 ( $P<0.05$ ), 与盐地碱蓬群落相比, 柽柳群落下土壤含盐量较高, 但由于采样变异性较大, 未达到显著性差异水平 ( $P>0.05$ )。此外, 在人为干扰的滩涂裸地、盐地碱蓬和柽柳群落下土壤SAR超过13, 且土壤含盐量高于盐土等级临界值, 属于盐碱土, 而芦苇湿地土壤含盐量偏低, 则属于碱土<sup>[19]</sup>。

### 2.1.2 不同植物群落下的湿地土壤盐分类型

土壤盐分类型主要取决于土壤中溶解性盐基离子种类与含量。在研究的 $Na^+$ 、 $K^+$ 、 $Ca^{2+}$ 、 $Mg^{2+}$ 、 $Cl^-$ 、 $SO_4^{2-}$ 六种盐离子中, 土壤阳离子以钠离子含量最高, 而阴离子则以氯离子含量最高, 呈现出典型的滨海地带性特征; 在不同植物群落下, 人为干扰湿地土壤的盐离子浓度均明显高于自然湿地土壤, 与土壤含盐量分布特征一致。

基于前人对土壤盐分类型的划分<sup>[20-22]</sup>, 按照盐离子厘摩尔比划分了不同植物群落下土壤盐分的组成类型。自然湿地土壤盐分类型包括氯化钠盐和硫酸镁—氯化钠盐两种 (表1), 其中盐地碱蓬、柽柳和芦苇湿地土壤为氯化钠盐型, 表现为典型的潮间带海水扰动作用; 而香蒲、假苇拂子茅和河滩裸地土壤则为硫酸镁—氯化钠盐型, 表现为河流淡水侧渗的影响, 存在咸淡水交互作用。在人为干扰湿地中, 各植物群落下的土壤均为氯化钠盐型 (表2), 是海洋潮汐作用影响的结果<sup>[10]</sup>。

表1 自然湿地不同植物群落的土壤盐分类型

Table 1 Soil salt components of different plant communities in natural wetlands

| 植被类型  | 盐离子厘摩尔比          |                                |                   | 盐分类型     |
|-------|------------------|--------------------------------|-------------------|----------|
|       | $Cl^-/SO_4^{2-}$ | $(Na^++K^+)/(Ca^{2+}+Mg^{2+})$ | $Mg^{2+}/Ca^{2+}$ |          |
| 盐地碱蓬  | 13.13            | 10.04                          | 0.68              | 氯化钠盐     |
| 柽柳    | 15.50            | 6.08                           | 0.82              | 氯化钠盐     |
| 芦苇    | 8.84             | 4.52                           | 1.23              | 氯化钠盐     |
| 假苇拂子茅 | 1.21             | 1.78                           | 1.40              | 硫酸镁—氯化钠盐 |
| 香蒲    | 1.64             | 1.74                           | 1.36              | 硫酸镁—氯化钠盐 |
| 河滩裸地  | 2.14             | 1.82                           | 1.44              | 硫酸镁—氯化钠盐 |

表2 人为干扰湿地不同植物群落的土壤盐分类型

Table 2 Soil salt components of different plant communities in anthropogenic disturbance wetlands

| 植被类型 | 盐离子厘摩尔比  |  |                                    | 盐分类型 |
|------|--|--|------------------------------------|------|
|      | Cl <sup>-</sup> /SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> | (Na <sup>+</sup> +K <sup>+</sup> )/(Ca <sup>2+</sup> +Mg <sup>2+</sup> ) | Mg <sup>2+</sup> /Ca <sup>2+</sup> |      |
| 滩涂裸地 | 31.99  | 17.63  | 2.90                               | 氯化钠盐 |
| 盐地碱蓬 | 20.15  | 16.45  | 1.93                               | 氯化钠盐 |
| 柽柳   | 78.42  | 10.54  | 3.10                               | 氯化钠盐 |
| 芦苇   | 15.72  | 14.57  | 1.40                               | 氯化钠盐 |

## 2.2 自然湿地与人为干扰湿地不同植物群落下土壤含盐量的剖面分布

自然湿地和人为干扰湿地土壤含盐量的差异性在盐地碱蓬、芦苇和裸地中达到显著性水平 (图3,  $P < 0.05$ )。与自然湿地相比,人为干扰湿地中盐地碱蓬群落下土壤0~20 cm土层含盐量较低 ( $P < 0.05$ ),但在其他土层不存在显著差异 ( $P > 0.05$ )。人为干扰湿地芦苇群落下土壤各土层含盐量均高于自然湿地,且在10~40 cm土层上具有显著性差异 ( $P < 0.05$ )。人为干扰湿地柽柳群落下表层(0~10 cm)土壤含盐量高于自然湿地,但由于采样变异性较大,两者之间的差异性并不显著 ( $P > 0.05$ )。此外,滨海滩涂裸地土壤含盐量显著高于河滩裸地 ( $P < 0.05$ )。

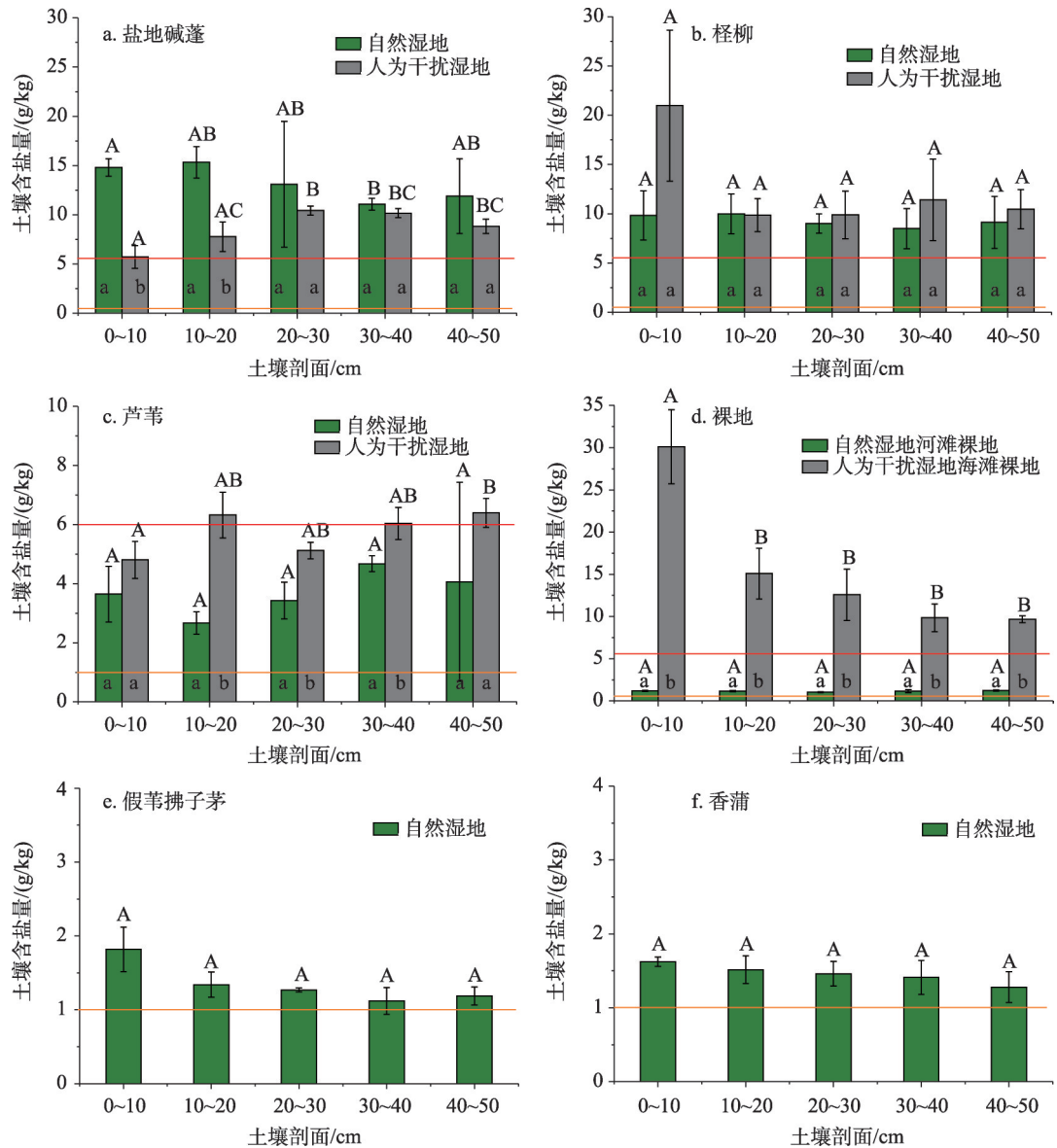
自然湿地和人为干扰湿地土壤含盐量的剖面变异性因植被类型而异(图3)。与自然湿地相比,人为干扰湿地中土壤含盐量的剖面变异性更强,其中滩涂裸地和柽柳湿地表层土壤含盐量明显高于10 cm以下土层,剖面变异系数分别为55%、38%,属于中等程度变异<sup>[23]</sup>。滩涂裸地不同土层的土壤含盐量之间具有显著性差异 ( $P < 0.05$ )。而盐地碱蓬群落下表层土壤含盐量为5.72 g/kg,显著低于20 cm以下土层 ( $P < 0.05$ ),剖面变异系数为22%。而芦苇湿地土壤盐含量最低,且剖面变异性较小,仅在0~10 cm层和40~50 cm层表现出显著性差异 ( $P < 0.05$ ),变异系数为13%。

在自然湿地中,各植物群落下土壤剖面含盐量的剖面变异性都较低(变异系数 $\leq 20\%$ ),并无明显的表聚特征。只有盐地碱蓬群落下不同土层之间的土壤含盐量差异显著,其中表层土壤含盐量显著高于30~40 cm土层 ( $P < 0.05$ )。盐地碱蓬湿地土壤含盐量的剖面分布由表层向下层呈“降S型”递减趋势,而芦苇湿地则正好相反,呈“升S型”递增分布。柽柳、香蒲和河滩裸地土壤剖面含盐量低,且剖面分布均匀,变异系数分别为6.7%、6.0%和8.7%,属于弱变异性。

## 2.3 不同植物群落下土壤含盐量的剖面类型分析

以欧式距离作为判别标准,运用聚类分析的方法,进一步分析滨海湿地不同植物群落下土壤含盐量的剖面分布特征,并将采集的土壤剖面划分为三类:表聚型剖面、震荡型剖面和均匀型剖面<sup>[24]</sup>(图4)。采用表聚系数,即剖面0~20 cm层土壤平均含盐量与20 cm以下各土层平均含盐量之和的比值<sup>[24]</sup>,表征土壤盐分在地表的积累水平。

表聚型剖面表现为表层土壤含盐量显著高于下层 ( $P < 0.01$ ),土壤含盐量沿剖面土层呈下降趋势(图4a),包括人为干扰湿地中的裸地和柽柳湿地,含盐量位于7.42~32.8 g/kg,平均含盐量达到14.7 g/kg,是盐土临界值的两倍之多。盐分表聚系数达到63%,高于震荡型和均匀型(表3),同时表聚特征增大了剖面变异性,变异系数为52%,属于中等程度变异,表明该类型土壤盐化程度高,可能存在表层积盐过程;且主要分布在人为干扰湿地中,未见于自然湿地。



注: 小写字母表示同一土层下自然与人为干扰湿地间的差异显著性, 大写字母表示同一类湿地下不同土层间的差异显著性; 橙线和红线分别表示非盐渍化和盐土等级临界值含盐量 1 g/kg、6 g/kg。

图3 自然湿地和人为干扰湿地不同植被群落下土壤含盐量的剖面分布

Fig. 3 Profile distribution of soil salinity of different plant communities in natural and anthropogenic disturbance wetlands

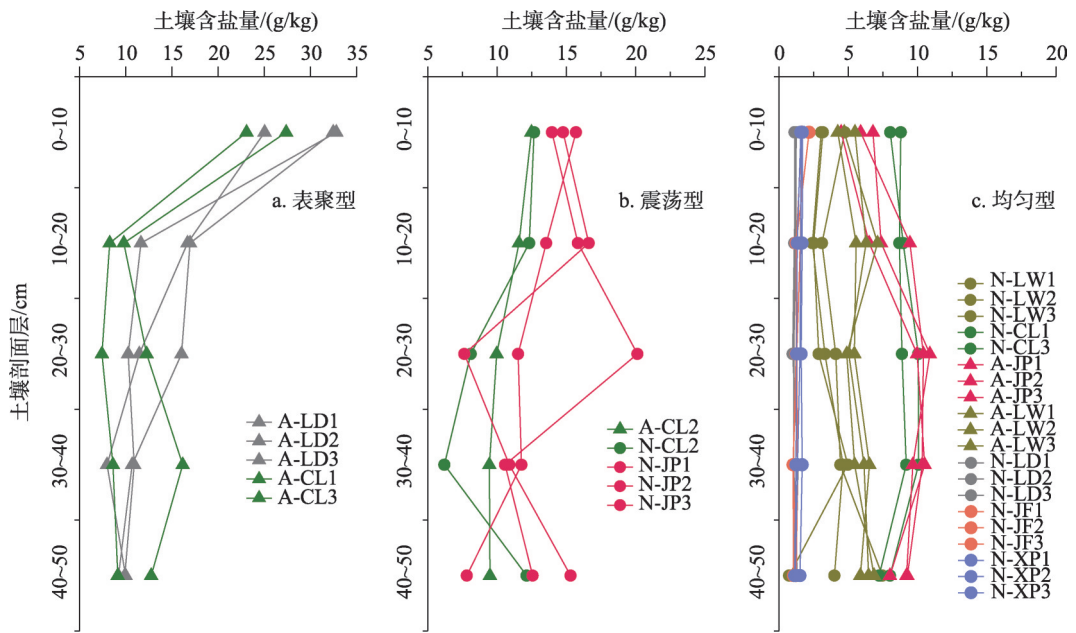
震荡型剖面表现为土壤含盐量随土壤深度增加呈波动变化, 不存在一致的剖面分布特征 (图 4b)。主要分布在自然湿地的盐地碱蓬和柽柳群落, 土壤含盐量在 6.20~20.1 g/kg 之间, 平均含盐量为 12.1 g/kg, 盐化程度较重。盐分表聚系数为 43%, 介于表聚型和均匀型之间, 变异系数为 27% (表 3), 属于中等程度变异。

均匀型剖面表现为土壤含盐量沿不同深度土层呈较为均一的特征 (图 4c), 占土壤剖面总数的 2/3, 以自然湿地盐生植被向淡水植被过渡为主。该类型剖面主要分布于采样带的远海端, 大部分位于淡水湿地, 受黄河周期性水文特征的影响。均匀型剖面的土壤含

表3 不同剖面类型土壤含盐量统计特征

Table 3 Statistical characteristics of soil salinity of different types of profiles

| 剖面类型 | 最大值/(g/kg) | 最小值/(g/kg) | 平均值/(g/kg) | 标准差/(g/kg) | 变异系数/% | 表聚系数/% |
|------|------------|------------|------------|------------|--------|--------|
| 表聚型  | 32.8       | 7.42       | 14.7       | 7.59       | 52     | 63     |
| 震荡型  | 20.1       | 6.20       | 12.1       | 3.21       | 27     | 43     |
| 均匀型  | 10.9       | 0.73       | 4.18       | 3.20       | 77     | 29     |



注：N为自然湿地，用圆点表示；A为人为干扰湿地，用三角表示；LD、JP、CL、LW、JF、XP分别代表裸地、盐地碱蓬、柽柳、芦苇、假苇拂子茅、香蒲等六种植被类型，用不同颜色表示。

图4 自然湿地和人为干扰湿地不同植物群落下土壤含盐量的剖面类型

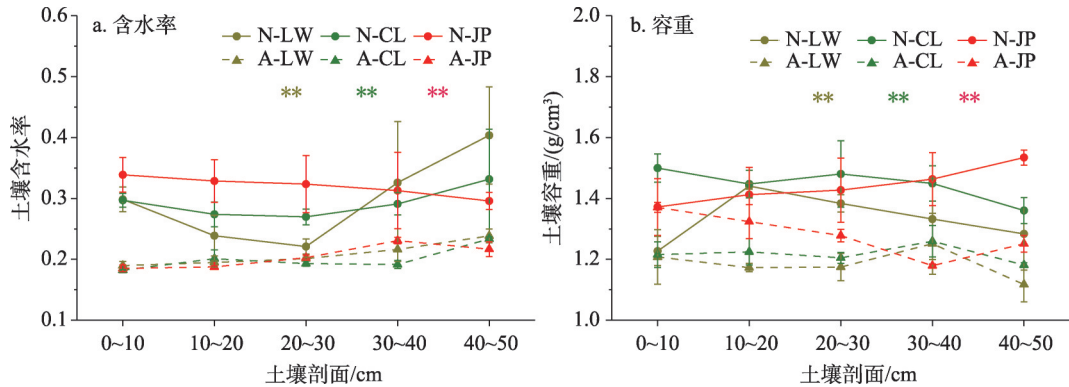
Fig. 4 Profile type of soil salinity of different plant communities in natural and anthropogenic disturbance wetlands

盐量显著低于表聚型和震荡型剖面，平均值仅为4.18 g/kg，未达到盐土限值。土壤盐分的表聚系数最小（29%），但变异系数较大（77%）（表3），这主要是因为该类型剖面所涉及的植被类型多，生态幅宽，土壤含盐量跨度大，导致整个类型变异性程度高。

#### 2.4 土壤含盐量与土壤含水率、容重的关系

土壤水分和质地条件是影响湿地土壤盐渍化特征的重要因素<sup>[10]</sup>，图5展示了自然湿地和人为干扰湿地不同植物群落下湿地土壤含水率和容重的剖面分布特征。在三种植物群落下，人为干扰湿地土壤剖面含水率均显著低于自然湿地 ( $P < 0.01$ )，并且其剖面变异性更小，属于弱变异性。与自然湿地相比，人为干扰湿地土壤容重也偏低 ( $P < 0.01$ )，两者剖面变异性相当，均属于弱变异性。

自然湿地和人为干扰湿地土壤含盐量与理化性状的相关分析结果见表4、表5。在自然湿地中，土壤含盐量与土壤pH呈极显著负相关 ( $P < 0.01$ )，与SAR呈极显著正相关 ( $P < 0.01$ )，而与土壤含水率、容重的相关关系并未达到显著性水平 ( $P > 0.05$ )；但土壤含水率与土壤容重之间存在极显著负相关关系 ( $P < 0.01$ )。在人为干扰湿地中，土壤含盐量与土壤含水率、pH呈极显著负相关 ( $P < 0.01$ )，而与土壤容重、钠吸附比呈极显著正相



注: \*\*表示同一植物群落下, 自然湿地(N, 圆点实线表示)与人为干扰湿地(A, 三角虚线表示)间土壤指标在0.01水平上存在显著差异; LW、CL、JP分别表示芦苇、柽柳、盐地碱蓬, 用不同颜色表示。

图5 自然湿地和人为干扰湿地不同植物群落土壤含水率和容重的剖面特征

Fig. 5 Profile distribution of soil water content and bulk density of different plant communities in natural and anthropogenic disturbance wetlands

关 ( $P < 0.01$ ), 而且各指标间又有显著相关关系 ( $P < 0.05$ ), 表明土壤理化性质能够影响土壤盐渍化水平。

### 3 结论与讨论

黄河三角洲滨海湿地土壤盐渍化水平沿陆海梯度从轻度盐渍化向盐土过渡, 与植物群落分布具有空间格局上的一致性, 体现了盐分梯度下湿地植物生态位分化的现象<sup>[25]</sup>。本研究发现, 土壤盐分的剖面分异特征受人为活动影响显著, 且盐分割面分异特征因植物群落而异。

(1) 总体而言, 人为干扰湿地土壤盐渍化程度高于自然湿地, 并在芦苇和柽柳群落土壤中达到显著性水平 ( $P < 0.05$ )。与自然湿地相比, 人为干扰湿地土壤含盐量的剖面变异性更强,

其中柽柳群落和滩涂裸地土壤含盐量的表聚特征明显。从土壤盐分类型来看, 人为干扰湿地植物群落主要受海洋潮汐过程影响, 属于氯化钠盐类型<sup>[10]</sup>; 而自然湿地在潮汐和径流的双向驱动作用下, 土壤盐分包括氯化钠盐和硫酸镁—氯化钠盐两种类型<sup>[10]</sup>, 其中盐地碱蓬、柽柳和芦苇群落土壤盐分属于氯化钠盐类型, 而河滩附近的裸地、假苇拂子茅和香蒲群落土壤盐分属于硫酸镁—氯化钠盐类型。

(2) 黄河三角洲湿地不同植物群落下土壤盐分的剖面分异特征不同, 采用聚类分析

表4 自然湿地土壤理化指标间的相关关系

Table 4 Pearson correlation coefficient between selected soil properties in natural wetlands

|     | 含盐量      | 含水率      | 容重      | pH      | SAR |
|-----|----------|----------|---------|---------|-----|
| 含盐量 | 1        |          |         |         |     |
| 含水率 | 0.043    | 1        |         |         |     |
| 容重  | 0.054    | -0.625** | 1       |         |     |
| pH  | -0.281** | -0.103   | 0.491** | 1       |     |
| SAR | 0.924**  | 0.047    | 0.036   | -0.267* | 1   |

注: \*\*, \*分别表示在0.01、0.05水平上显著相关, 下同。

表5 人为干扰湿地土壤理化指标间的相关关系

Table 5 Pearson correlation coefficient between selected soil properties in anthropogenic disturbance wetlands

|     | 含盐量      | 含水率      | 容重       | pH       | SAR |
|-----|----------|----------|----------|----------|-----|
| 含盐量 | 1        |          |          |          |     |
| 含水率 | -0.444** | 1        |          |          |     |
| 容重  | 0.342**  | -0.738** | 1        |          |     |
| pH  | -0.709** | 0.286**  | -0.292** | 1        |     |
| SAR | 0.473**  | -0.347** | 0.491**  | -0.258** | 1   |



的方法, 可以将土壤盐分的剖面特征划分为: 表聚型、震荡型和均匀型三种。其中表聚型剖面较少, 主要包括人为干扰湿地中的柽柳群落和滩涂裸地, 盐分表聚系数为 63%; 而均匀型剖面占比最高, 达到土壤剖面总数的 2/3, 包括由盐生植被向淡水植被的过渡阶段。由海洋向内陆, 土壤盐分的剖面特征由表聚型、震荡型向均匀型转变<sup>[26]</sup>。表聚型剖面主要存在于人为干扰湿地中, 而该区域的人为筑堤修坝活动阻挡了部分潮汐通道, 使得局地水文连通性减弱。此外, 道路建设也会改变局地地形, 切断道路内侧芦苇湿地与外侧海洋潮汐过程的水文联系, 导致湿地水盐交换过程受阻, 土壤易发生表层聚盐现象<sup>[13,14]</sup>。

(3) 人为干扰湿地土壤含水率、容重与土壤含盐量存在显著相关关系 ( $P < 0.01$ ), 土壤水分及质地特征会影响土壤的水盐运移过程, 从而影响土壤盐渍化程度<sup>[9,10]</sup>。与自然湿地相比, 人为干扰湿地的柽柳和芦苇群落下土壤的含水率偏低, 而含盐量偏高, 这可能受人为筑坝修路导致水文连通受阻及强烈的蒸发作用影响<sup>[13,27]</sup>。此外, 人为干扰湿地土壤的容重也显著偏低, 这可能是由于人为建设对地形的改变影响了湿地的水沙输移模式<sup>[14]</sup>。综合来看, 可以通过调控闸阀开闭、实施生态补水工程等措施, 恢复区域湿地的水文连通性<sup>[28,29]</sup>, 从而改善黄河三角洲湿地土壤盐碱化问题。

### 参考文献(References):

- [1] CUI B S, HE Q, GU B H, et al. China's coastal wetlands: Understanding environmental changes and human impacts for management and conservation. *Wetlands*, 2016, 36(1): 1-9.
- [2] WANG D W, BAI J H, WANG W, et al. Comprehensive assessment of soil quality for different wetlands in a Chinese delta. *Land Degradation & Development*, 2018, 29(10): 3783-3794.
- [3] ZHAO Q Q, BAI J H, ZHANG G L, et al. Effects of water and salinity regulation measures on soil carbon sequestration in coastal wetlands of the Yellow River Delta. *Geoderma*, 2018, 319: 219-229.
- [4] 章光新. 水文情势与盐分变化对湿地植被的影响研究综述. *生态学报*, 2012, 32(13): 4254-4260. [ZHANG G X. The effects of changes in hydrological regimes and salinity on wetland vegetation: A review. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(13): 4254-4260.]
- [5] SINGH K. Microbial and enzyme activities of saline and sodic soils. *Land Degradation & Development*, 2016, 27(3): 706-718.
- [6] 崔保山, 刘兴土. 黄河三角洲湿地生态特征变化及可持续性管理对策. *地理科学*, 2001, 14(3): 250-256. [CUI B S, LIU X T. Ecological character changes and sustainability management of wetlands in the Yellow River Delta. *Scientia Geographica Sinica*, 2001, 14(3): 250-256.]
- [7] 张同瑞, 赵庚星, 高明秀, 等. 基于近地多光谱和OLI影像的黄河三角洲冬小麦种植区盐分估算及遥感反演: 以山东省垦利县和无棣县为例. *自然资源学报*, 2016, 31(6): 1051-1060. [ZHANG T R, ZHAO G X, GAO M X, et al. Soil salinity estimation and remote sensing inversion based on near-ground multispectral and TM imagery in winter wheat growing area in the Yellow River Delta: Case study in Kenli county and Wudi county, Shandong province. *Journal of Natural Resources*, 2016, 31(6): 1051-1060.]
- [8] 付腾飞, 张颖, 高金尉, 等. 黄河三角洲土壤盐分时空变异特征研究. *中国海洋大学学报: 自然科学版*, 2017, 47(10): 50-60. [FU T F, ZHANG Y, GAO J W, et al. Study on spatial-temporal variability of saline soil salinity in the Yellow River Delta. *Periodical of Ocean University of China: Natural Science*, 2017, 47(10): 50-60.]
- [9] 吕真真, 杨劲松, 刘广明, 等. 黄河三角洲土壤盐渍化与地下水特征关系研究. *土壤学报*, 2017, 54(6): 1377-1385. [LYU Z Z, YANG J S, LIU G M, et al. Relationship between soil salinization and groundwater characteristics in the Yellow River Delta. *Acta Pedologica Sinica*, 2017, 54(6): 1377-1385.]
- [10] 姚荣江, 杨劲松, 姜龙. 黄河下游三角洲盐渍区表层土壤积盐影响因子及其强度分析. *土壤通报*, 2008, 39(5): 1115-1119. [YAO R J, YANG J S, JIANG L. Analysis on factors of salt accumulation and intensity in topsoil in the saline region of lower Yellow River Delta. *Chinese Journal of Soil Science*, 2008, 39(5): 1115-1119.]

- [11] 范晓梅, 刘高焕, 唐志鹏, 等. 黄河三角洲土壤盐渍化影响因素分析. 水土保持学报, 2010, 24(1): 139-144. [FAN X M, LIU G H, TANG Z P, et al. Analysis on main contributors influencing soil salinization of the Yellow River Delta. Journal of Soil and Water Conservation, 2010, 24(1): 139-144.]
- [12] 张濛, 濮励杰, 王小涵, 等. 不同干扰强度对滩涂围垦区土壤颗粒组成的时空分异特征的影响. 自然资源学报, 2016, 31(5): 845-854. [ZHANG M, PU L J, WANG X H, et al. Effects of disturbance intensity on spatial-temporal differentiation of soil particle size in reclamation area of tidal flat. Journal of Natural Resources, 2016, 31(5): 845-854.]
- [13] 崔保山, 蔡燕子, 谢滢, 等. 湿地水文连通的生态效应研究进展及发展趋势. 北京师范大学学报: 自然科学版, 2016, 52(6): 738-746. [CUI B S, CAI Y Z, XIE T, et al. Ecological effects of wetland hydrological connectivity: Problems and prospects. Journal of Beijing Normal University: Natural Science, 2016, 52(6): 738-746.]
- [14] 张仲胜, 于小娟, 宋晓林. 水文连通对湿地生态系统关键过程及功能影响研究进展. 湿地科学, 2019, 17(1): 1-8. [ZHANG Z S, YU X J, SONG X L. Impacts of hydrological connectivity on key ecological processes and functions in wetlands: A general review. Wetland Science, 2019, 17(1): 1-8.]
- [15] 靳宇弯, 杨薇, 孙涛, 等. 围填海活动对黄河三角洲滨海湿地生态系统的影响评估. 湿地科学, 2015, 13(6): 682-689. [JIN Y W, YANG W, SUN T, et al. Assessment of ecological impact of seashore reclamation activities on coastal wetland ecosystems in the Yellow River Delta. Wetland Science, 2015, 13(6): 682-689.]
- [16] WANG Z, ZHAO G, GAO M, et al. Spatial variability of soil salinity in coastal saline soil at different scales in the Yellow River Delta, China. Environmental Monitoring and Assessment, 2017, 189(2): 80-92.
- [17] RIETZ D N, HAYNES R J. Effects of irrigation-induced salinity and sodicity on soil microbial activity. Soil Biology and Biochemistry, 2003, 35(6): 845-854.
- [18] 鲍士旦. 土壤农化分析(第三版). 北京: 中国农业出版社, 2000: 178-200. [BAO S D. Soil and Agricultural Chemistry Analysis: The Third Edition. Beijing: China Agriculture Press, 2000: 178-200.]
- [19] United States Salinity Laboratory Staff. Diagnosis and Improvement of Saline and Alkali Soils. Washington D C: US Government Printing Office, 1954: 60-160.
- [20] 黎力群. 盐渍土基础知识. 北京: 科学出版社, 1986: 54-62. [LI L Q. Basic Knowledge on Saline Soil. Beijing: Science Press, 1986: 54-62.]
- [21] 朱祖祥. 土壤学(下册). 北京: 农业出版社, 1983: 347-359. [ZHU Z X. Pedology (Volume ii). Beijing: Agricultural Press, 1983: 347-359.]
- [22] 王遵亲, 祝寿泉, 俞仁培, 等. 中国盐渍土. 北京: 科学出版社, 1993: 36-346. [WANG Z Q, ZHU S Q, YU R P, et al. Saline Soil in China. Beijing: Science Press, 1993: 36-346.]
- [23] 王小艳, 冯跃华, 李云, 等. 黔中喀斯特山区村域稻田土壤理化特性的空间变异特征及空间自相关性. 生态学报, 2015, 35(9): 2926-2936. [WANG X Y, FENG Y H, LI Y, et al. Spatial variability of soil physiochemical properties and their autocorrelations at village-region in karst mountainous area, Guizhou province. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(9): 2926-2936.]
- [24] 李宝富, 熊黑钢, 张建兵, 等. 不同耕种时间下土壤剖面盐分动态变化规律及其影响因素研究. 土壤学报, 2010, 47(3): 429-438. [LI B F, XIONG H G, ZHANG J B, et al. Dynamic of soil salt in soil profiles different in cultivation age and its affecting factors. Acta Pedologica Sinica, 2010, 47(3): 429-438.]
- [25] 贺强, 崔保山, 赵欣胜, 等. 水盐梯度下黄河三角洲湿地植物种的生态位. 应用生态学报, 2008, 19(5): 969-975. [HE Q, CUI B S, ZHAO X S, et al. Niches of plant species in wetlands of the Yellow River Delta under gradients of water table depth and soil salinity. Chinese Journal of Applied Ecology, 2008, 19(5): 969-975.]
- [26] 邹晓霞, 王维华, 王建林, 等. 垦殖与自然条件下黄河三角洲土壤盐分的时空演化特征研究. 水土保持学报, 2017, 31(2): 309-316. [ZOU X X, WANG W H, WANG J L, et al. Time-spatial revolution characteristics of soil salinity in the Yellow River Delta under different land cultivation and natural conditions. Journal of Soil and Water Conservation, 2017, 31(2): 309-316.]
- [27] XIN P, ZHOU T Z, LU C H, et al. Combined effects of tides, evaporation and rainfall on the soil conditions in an intertidal creek-marsh system. Advances in Water Resources, 2017, 103: 1-15.
- [28] CUI B S, YANG Q C, YANG Z F, et al. Evaluating the ecological performance of wetland restoration in the Yellow River Delta, China. Ecological Engineering, 2009, 35(7): 1090-1103.
- [29] 韩玲, 白军红, 叶晓飞, 等. 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,

2018, 54(1): 42-47. [HAN L, BAI J H, YE X F, et al. 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*, 2018, 54(1): 42-47.]

## Profile differentiation of soil salinity for natural and anthropogenic disturbance wetlands in the Yellow River Delta

WANG Da-wei<sup>1</sup>, BAI Jun-hong<sup>1</sup>, ZHAO Qing-qing<sup>2</sup>, LU Qiong-qiong<sup>1</sup>, ZHANG Shu-yan<sup>3</sup>

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

**Abstract:** The objective of the research was to investigate whether high-intensity anthropogenic disturbance changed the profile characteristics of soil salinity in coastal wetlands. Soil samples of different vegetation zones were collected in natural wetland (NW) and anthropogenic disturbance wetland (AW) in the Yellow River Delta, and tested in the laboratory. One-way ANOVA, nonparametric test and cluster analysis were applied for statistical analysis. The results showed that soil salinity ranged from mild salinization to saline soil along the land-sea gradient. Profile characteristics of soil salinity was significantly influenced by human disturbance, varying with plant communities. In general, compared to NW, soil salinization was much heavier in AW. Soil samples were clustered into three profile types: surface accumulation profile (SAP), oscillation profile (OP), even distribution profile (EDP). The profile types ranged from SAP and OP to EDP in spatial pattern from sea to land. The A-CL and bare tidal flat soil samples showed surface accumulative feature with coefficient of surface accumulation of 63%, belonging to SAP. And almost two-thirds of soil samples belonged to EDP. The dam and tarmac construction weakened the tidal connectivity and destroyed wetland habitats (e.g., soil water content, bulk density, etc.) by direct blocking or terrain changes, which could be the main attribution to soil salinization and salt surface accumulation. Thus hydrological connectivity restoration measures, such as sluice regulation and ecological water compensation projects, could be used to improve soil salinization and promote sustainable development of coastal wetlands in the Yellow River Delta.

**Keywords:** soil salinity; soil profile; cluster analysis; plant communities; Yellow River Delta