

# 黄河三角洲湿地不同植被群落下土壤养分含量特征

丁秋祎, 白军红, 高海峰, 肖 蓉, 崔保山

(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)

**摘 要:**以黄河三角洲潮上带湿地为对象,通过采样、分析,研究了4种典型的植被群落下水盐梯度和土壤养分含量的变化特征。结果显示,沿植物群落演替方向,土壤水分含量无显著差异,土壤盐分呈逐渐降低的趋势,在一定程度上反映了植物群落的不同演替阶段。在这种水盐梯度下,植被群落的变化能够影响土壤养分含量,沿着植被演替方向,全碳与有机质含量随着演替方向呈先逐渐降低后增加的趋势,土壤碳氮比(C/N)在植被演替中期相对较高;全氮含量沿着演替方向呈现增加趋势,硝态氮与铵态氮先增加后降低;全磷与有效磷随演替变化系数较小,演替中期各理化性质变异系数相对较大。各群落土壤C/N值均小于25。相关分析表明,全氮、有机质与有效磷两两显著相关( $p<0.01$ ),有效磷还与含水率显著相关( $p<0.05$ ),硝态氮、铵态氮和全磷未显示出与其他理化性质的相关关系。含水率与pH值显著相关( $p<0.05$ ),且二者均与土壤盐分显著负相关( $p<0.01$ )。

**关键词:**植被群落;湿地土壤;养分含量;黄河三角洲

中图分类号:S153.6 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2009)10-2092-06

## Soil Nutrient Contents in Yellow River Delta Wetlands with Different Plant Communities

DING Qiu-yi, BAI Jun-hong, GAO Hai-feng, XIAO Rong, CUI Bao-shan

(State Key Lab of Water Environment Simulation, School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

**Abstract:** Soil nutrient contents were measured in 31 study plots of the supratidal zone wetland of Yellow River Delta (YRD) in order to reveal their changes in marsh soils with different plant communities. By the methods of spatial distribution as a substitute for time succession, different plant communities were chosen to substitute different periods of plant community succession. Results showed that there were obvious relationships among four plant communities and soil salt contents (SC) but there were no significant differences among water contents (WC), which also showed different succession periods of plant community to some certain. Along the positive succession direction of plant community, both the contents of soil organic matter (SOM) and their variation coefficients showed the trend of “decreasing before increasing” along the water-salt gradients. The ratios of C/N were relatively higher in the middle of the successions than at the beginning or later stage. Total nitrogen (TN) contents showed an increase while  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  and  $\text{NO}_3^--\text{N}$  showed the trends of “decreasing after increasing”. Total phosphorus (TP) contents had no significant variations with the succession. No significant differences were observed in total phosphorus (TP) and available phosphorus (AP) contents of wetland soils under four plant communities. The middle of the succession had the higher variation coefficients. In wetland soils under four plant communities, the ratios of C/N were all lower than 25. Correlation analysis showed that there were significantly positive correlations between TN, SOM and AP ( $P<0.01$ ). TP was significantly positively correlated with WC ( $P<0.05$ ). No significant correlations were found between  $\text{NH}_4^+-\text{N}$ ,  $\text{NO}_3^--\text{N}$  and TP with other soil properties. WC were significantly positively correlated with pH ( $P<0.05$ ) and both of them were negatively correlated with SC ( $P<0.01$ ).

**Keywords:** plant communities; wetland soil; nutrient contents; Yellow River Delta

河口滨海湿地是海陆相互作用的重要场所,连接海陆两个生态系统,是地球上重要的湿地类型之一。河口滨海湿地也是演替发生比较活跃的区域,滨海湿地在淤涨的条件下有向内陆演替的趋势,来自陆源、

海源的物质在河口地区沉降、堆积,使得河口沉积物成为陆源和海源的巨大汇<sup>[1]</sup>。

湿地土壤养分含量变化受湿地生态系统的水文过程<sup>[2]</sup>、植被类型<sup>[3]</sup>、土壤理化性质<sup>[4]</sup>等多种因素的影响。土壤、植被、水文、气候等因素在不同时空尺度上相互作用,共同影响着湿地生态系统类型的特征和湿地植被群落的形成过程;同样,湿地植被群落的变化也显著影响着湿地生态系统的各种生态过程<sup>[5]</sup>。湿地土壤的理化性状不仅能反映湿地土壤结构状况和蓄

收稿日期:2009-04-10

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973)项目(2006CB403301);国家自然科学基金项目(40701003,50879005)

作者简介:丁秋祎(1983—),女,安徽淮北人,在读硕士,主要从事湿地生态过程与效应研究。E-mail: specialbox@163.com

通讯作者:白军红 E-mail: junhongbai@163.com

水能力,而且会影响湿地植被生长,关系到沿河区域湿地环境的形成与植被演替<sup>[6]</sup>。

作为自然的时空连续体,空间的变异性是土壤的一种自然属性,土壤理化性质、土壤内水分运动的某些经验参数以及土壤中有关状态变量的数值,在同一时刻不同空间位置呈现出不相等的性质<sup>[7]</sup>。目前国内外对湿地生态系统中土壤营养元素分布规律已经有一些研究,但多数集中在单一湿地类型中营养元素在土壤中的空间分布特征,从布设采样点的方法上看多局限于点位,营养元素的研究多关注于单一植物群落的几个样地或者单一植物群落的土壤空间分布特征,而对于自然状态下不同混生植被群落下湿地土壤营养元素含量变化特征研究尚少。本研究则是基于区域内植被样方调查的结果,在大尺度上综合考虑湿地内各个样方内植被特征和水盐信息,将黄河三角洲滨海湿地科学归类为不同的植被群落,初步探讨了不同植被群落下表层土壤养分的含量特征变化,突破了以往研究中对于群落划分的主观性和局限性,植物群落归类更贴近自然保护区的实际情况,可为湿地生态系统的恢复、保护和管理提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

黄河三角洲国家级自然保护区是我国暖温带最

完整、最广阔、最年轻的湿地生态系统,位于山东省东营市黄河入海口处,渤海湾南岸和莱州湾西岸(N37°35'~38°12',E118°33'~119°20'),总面积 $15.3 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,属于温带大陆性季风气候,年平均气温 $12.3^\circ\text{C}$ ;年平均降水量 $555.9 \text{ mm}$ ,多集中在7—8月份;年蒸发量 $1962.1 \text{ mm}$ ,是降水量的3.6倍。区域内地势平坦,自然坡降 $1/8000 \sim 1/12000$ ,生态格局时空变化迥异,湿地类型多样,湖泊、河口、潮沟等常年淹水湿地占总湿地面积的63.06%,芦苇湿地、潮上带盐碱湿地、灌丛湿地、草甸等季节性淹水湿地占总湿地面积的36.94%。

黄河三角洲土壤形成时间相对较短,机械组成以粉沙为主,沙黏层次变化复杂。土壤质地以轻壤土和中壤土为主,土壤类型以潮土和盐土为主。研究区淡水缺乏,地下水位较浅,水质矿化度较高,土壤向积盐方向发展,湿地植被群落演替频繁,且逆向演替明显<sup>[8]</sup>。该区植被以草甸为主,林木稀少,主要植被有草本植物盐地碱蓬(*Suaeda salsa*)、灌木柽柳(*Tamrnx chinesei*)、芦苇(*Phragmites australi*)、白茅(*Imperata cylindrica*)等(图1)。

### 1.2 样品采集和分析

2007年8月,根据侯本栋等<sup>[10]</sup>对黄河三角洲地区植物群落种类的研究结果,综合考虑湿地景观的整体特征,研究区选择依据典型性和代表性的原则,在黄

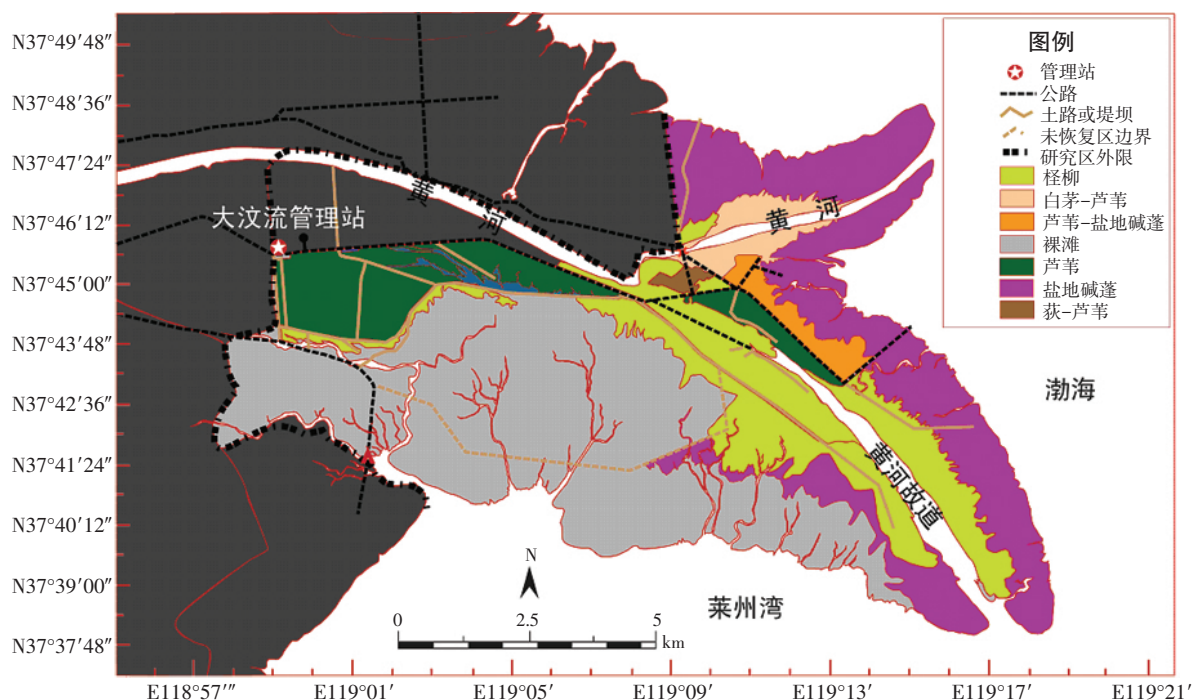


图1 研究区植被群落分布图

Figure 1 The distribution of vegetation community in YRD

河现行河道保护区内北部和东部无人干扰或人为干扰较小的区域,共布设 31 个 50 m×50 m 研究小区,每个研究小区内随机取 5 个 1 m×1 m 植物样方,统计样方内各植物种的密度。综合 3 层数据将研究区样地划分为 4 种基本植被群落:盐地碱蓬群落、怪柳-盐地碱蓬+芦苇群落、芦苇-盐地碱蓬群落、芦苇群落。选择代表 4 种植物群落的 31 块样地进行样品采集和分析,各植被群落的水盐信息见表 1。

表 1 黄河三角洲湿地不同植被群落样地的植被群落特征和水盐特征

Table 1 Characteristics of vegetation and groundwater-level in Yellow River Delta wetland with different plant communities

| 植被群落 | 群落描述         | WC/%            | SC/g·kg <sup>-1</sup> |
|------|--------------|-----------------|-----------------------|
| 群落 1 | 盐地碱蓬群落       | 0.288 5±0.055 5 | 0.806 7±0.798 4       |
| 群落 2 | 盐地碱蓬-怪柳+芦苇群落 | 0.251 0±0.046 9 | 2.425 0±1.262 9       |
| 群落 3 | 芦苇-盐地碱蓬群落    | 0.290 5±0.063 8 | 0.983 8±0.433 0       |
| 群落 4 | 芦苇+白茅群落      | 0.299 4±0.061 9 | 0.500 3±0.230 5       |

在每一样地内同时随机采集 3~5 个土壤表层(0~20 cm)样品进行混合、装袋并标记为代表该样地的单一土壤样本,共计采集 60 个土壤样品。将采集的土样带回实验室,风干后捡去石块、植物残根等杂物,研磨后过 0.75 mm 分样筛,采用四分法先取每份土样总量的一半,装袋备测土壤的 pH 值和土壤盐度(SC),另外一份继续研磨,过 0.18 mm 筛后,装袋待测土壤全磷(TP)、全氮(TN)以及土壤有机质(SOM)等。

土壤 pH 值采用 pH 计测定(土:水=1:5);土壤盐度(SC)采用便携式盐度测定仪测定(土:水=1:5),并转换单位为 g·kg<sup>-1</sup>;土壤含水率(WC)和容重(dv)采用烘干法测定;土壤全氮(TN)采用元素分析仪(CHNOS Elemental Analyzer, Vario EL, German)测定;土壤全磷(TP)使用 ICP-AES 电感耦合等离子体光谱仪进行测定(标准物质为 GBW07401,回收率 108%);土壤有机碳(TOC)与有机质(SOM)采用稀释热法测定;硝态氮(NO<sub>3</sub>-N)采用离子色谱(戴安公司 DX-300 型离子色谱仪)测定;铵态氮(NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N)采用 2 mol·L<sup>-1</sup> KCl 浸提-蒸馏法测定;由于土壤 pH 值呈碱性,有效磷(AP)采用 0.05 mol·L<sup>-1</sup> NaHCO<sub>3</sub> 浸提-钼锑抗比色法测定<sup>[9]</sup>。运用 Origin 6.0 和 SPSS 12.0 对数据进行统计分析。

## 2 结果与讨论

### 2.1 不同湿地植被群落的水盐梯度特征分析

种群格局是种群的重要结构特征之一,能够反映

环境对群落中物种的生存和生长的影响以及群落演替动态。滨海湿地植物群落演替与环境因子,尤其是水盐梯度的变化密切相关<sup>[10]</sup>。生态系统的空间演替可以看作是时间演替的缩影,根据侯本栋等<sup>[8]</sup>对黄河三角洲地区植物群落演替方向的研究结果判断,本研究中的 4 种植被群落在一定程度上反映了研究区盐生植被向淡水植被进行正向演替过程中的 4 个时段:盐地碱蓬群落(第一时段)-怪柳-盐地碱蓬+芦苇群落(第二时段)-芦苇-盐地碱蓬群落(第三时段)-芦苇群落(第四时段)。

按 Cambardella 等<sup>[11]</sup>对变异系数的分级标准:C.V.<0.1 属于弱变异性;C.V.=0.1~1 属于中等变异性;C.V.>1 属于强变异性。通过计算,4 种群落土壤含水率与盐分含量变异系数均位于 0.1~1 之间,属于中等变异水平,且盐分变异系数高于含水率变异系数。通过单因素方差分析可知,不同样地之间土壤含水率没有显著性差异( $F=1.281$ ,  $Sig=0.301$ ),而盐分含量( $F=8.472$ ,  $Sig=0.000<0.001$ )存在显著性差异。由表 1 可见,除了盐地碱蓬外,沿植物演替的方向,土壤盐分含量呈减少趋势。王海洋等<sup>[12]</sup>研究认为盐沼植被的生长使得泥沙大量淤积,高程被不断抬高,相应地改变了湿地受潮水淹没时间和淹没范围,导致盐度条件发生变化,进而促进淡水植物的生长,促使演替向淡水植被方向进行。所有群落中,盐地碱蓬群落多生活在地表积水 0.5~8 cm 的淹水环境,其他群落土壤不淹水或季节性淹水。盐地碱蓬群落是黄河三角洲地区的建群种,多生活在受潮汐影响较频繁的地区,该样地盐分含量低于演替中期可能是因为表层土受潮汐影响,盐分发生淋失,同时地表覆水也减少了因蒸发而带来的表层水分损失、下层盐分向上迁移所导致的地表聚盐现象。

### 2.2 不同植被群落下湿地土壤养分含量特征

表 2 表明,沿着植物群落演替的方向,有机质含量有随着演替方向先逐渐降低后增加的趋势,表层土有机质含量在演替末期达到最高值,演替中期变异系数相对较大。土壤中有机质含量变化是由有机物质输入和输出量的相对大小决定的<sup>[13]</sup>,输入量主要依赖于有机残体归还量以及有机残体的腐殖化系数,而输出量则主要包括受各种生物和非生物条件(氧化还原电位、土壤含水量等)控制下的分解和侵蚀损失<sup>[14]</sup>。随着演替的进行,植物群落所在生境的水盐条件不断优化,有机碳的矿化量增加,植被物种组成和生物量都有不同程度的增加,植物对有机质的需求增加。张智才等<sup>[15]</sup>研究发现群落地下生物量、单位面积物种数与

表 2 黄河三角洲湿地不同植被群落下土壤理化性质

Table 2 Changes of soil nutrient contents in Yellow River Delta wetland with different plant communities

| 植被群落 |      | pH    | TN/g·kg <sup>-1</sup> | TP/g·kg <sup>-1</sup> | SOM/g·kg <sup>-1</sup> | NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N/mg·kg <sup>-1</sup> | NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N/mg·kg <sup>-1</sup> | AP/mg·kg <sup>-1</sup> |
|------|------|-------|-----------------------|-----------------------|------------------------|-----------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|------------------------|
| 群落 1 | 平均值  | 8.617 | 0.270                 | 691.877               | 6.634                  | 4.732                                               | 1.422                                               | 5.779                  |
|      | 标准差  | 0.357 | 0.071                 | 52.112                | 1.480                  | 2.286                                               | 0.214                                               | 3.140                  |
|      | 变异系数 | 0.414 | 0.263                 | 0.753                 | 0.223 0                | 0.483 2                                             | 0.151                                               | 0.543                  |
| 群落 2 | 平均值  | 8.047 | 0.218                 | 651.311               | 6.318                  | 5.483                                               | 2.125                                               | 4.923                  |
|      | 标准差  | 0.259 | 0.135                 | 64.693                | 2.906                  | 1.765                                               | 2.165                                               | 3.238                  |
|      | 变异系数 | 0.322 | 0.622                 | 0.993                 | 0.460                  | 0.322                                               | 1.019                                               | 0.658                  |
| 群落 3 | 平均值  | 8.722 | 0.235                 | 637.348               | 6.264                  | 5.931                                               | 2.009                                               | 7.948                  |
|      | 标准差  | 0.180 | 0.094                 | 77.080                | 1.504                  | 2.714                                               | 0.693                                               | 1.903                  |
|      | 变异系数 | 0.206 | 0.399                 | 0.121                 | 0.240                  | 0.458                                               | 0.345                                               | 0.239                  |
| 群落 4 | 平均值  | 8.372 | 0.253                 | 676.864               | 6.933                  | 5.071                                               | 1.541                                               | 7.164 3                |
|      | 标准差  | 0.139 | 0.085                 | 54.751                | 1.367                  | 1.374                                               | 0.198                                               | 1.835                  |
|      | 变异系数 | 0.166 | 0.034                 | 0.809                 | 0.197                  | 0.271                                               | 0.129                                               | 0.256                  |

土壤有机质、全氮、全磷含量均呈显著正相关关系,演替中期植被群落更替频繁,不同植被群落下植被生态学特征(高度、密度等)不均可能是造成有机质变异程度相对较大的原因。

氮素含量直接影响着植物的生产力、植被类型,同时植被覆盖度、植物残体输入量以及植被类型也影响着氮素的动态。土壤中全氮含量与变异程度远远低于内陆盐沼湿地土壤氮素含量<sup>[16]</sup>,这说明研究区土壤氮素供给相当缺乏;全氮含量除在群落 1 较高外,沿着演替方向呈现增加趋势;硝态氮含量低于铵态氮,两者含量均显示出在演替中期的含量较大,在演替初始和末期相对较小。硝态氮变异系数>1 属于强变异水平。自然土壤中的氮素主要来源于生物残体和生物固氮,少量来源于大气降水。土壤氮的输出主要是土壤中有机的分解,分解后大部分被植物吸收利用,部分有机氮经过矿化(氨化)、硝化、反硝化作用以及氨挥发等生物过程而重返回大气中<sup>[17]</sup>。由于随着植物群落演替的进行,植物生物量和地表凋落物增加,土壤中微生物也随之增加,因此随着演替的进行,土壤中全氮含量也有所增加;且随着植被物种的增多,水盐环境得到一定的改善,根系环境中微生物含量也随之增加<sup>[17]</sup>,更多的有机氮矿化以满足植物的生长需求。

全磷含量沿着演替方向先逐渐降低,在演替末期又有所增加;变异系数较小。有效磷含量则呈现沿着演替群落先增加后减少的趋势。黄河口湿地土壤中全磷含量与长江口湿地土壤总磷的含量相差不大<sup>[18]</sup>;土壤全磷含量沿植被演替方向的变化规律不明显,且变异程度相对较低(表 2)。其原因在于土壤中磷的含量主要和成土母质有关,其含量受土壤类型和气候条件

的影响,受演替中植被群落结构变化影响较弱,植被的生长对其起消耗作用,因而其分布与有机质和总氮的分布相反。杨桂山等<sup>[19]</sup>研究江苏滨海滩涂湿地时也发现磷素随植被类型的丰富而有降低的趋势。

### 2.3 不同植被群落下湿地土壤碳氮比

土壤碳氮比可以表征土壤微生物在分解有机质过程中的碳氮转化关系。耕作土壤中,土壤微生物获得平衡营养的碳氮比约为 25:1,如果土壤碳氮比低于 25:1,则表明土壤有机质的腐殖化程度高,利于微生物的分解,有机氮更容易矿化;反之则发生微生物对营养物质的固定。微生物对枯落物营养元素调控的结果致使分解过程中残体的化学性质发生变化<sup>[20]</sup>。由表 3 可见,研究区 4 种植被群落下土壤碳氮比相对较低,变化范围为 14.8~19.5,略高于长江口盐沼湿地表层土的碳氮比(6~11)<sup>[18]</sup>,与欧洲和北美滨海湿地表层土壤的碳氮比(7~19)相似<sup>[21]</sup>,这表明该区土壤有机质的腐殖化程度较高。4 种植被群落下土壤碳氮比的大小次序为群落 2>群落 4>群落 3>群落 1,表明在植被演替中期有机质腐殖程度小于演替末期,演替初期有机质腐殖程度最大。土壤碳氮比还常用于辨别有机质是来自陆源还是海源;海中水草由于含有丰富蛋白质,其碳氮比通常为 4~10;而陆地植物由于富含纤维素而比值较高,往往高于 20<sup>[22]</sup>。由此可判断黄河三角洲湿地有机质来源主要以海源为主,从上游冲刷而来的沙土对有机质含量贡献相对不大。

### 2.4 湿地土壤养分与其他理化性质之间的相关性

相关分析结果表明(表 4),有机质、全氮、有效磷含量呈两两显著相关( $p<0.01$ ),硝态氮、铵态氮、全磷与其他理化性质的相关关系均不显著。这表明氮磷有

表 3 不同植被群落下湿地土壤的碳氮比

Table 3 C/N ratios in marsh soils from the Yellow River

Delta wetlands with different plant communities

| 项目  | 群落 1   | 群落 2   | 群落 3   | 群落 4   |
|-----|--------|--------|--------|--------|
| C/N | 14.818 | 19.492 | 16.551 | 16.920 |

相当一大部分以有机质结合态存在。白军红等<sup>[16]</sup>研究也证实湿地土壤氮素主要以有机氮的形式存在于有机质中,土壤全氮含量常常与有机质消涨趋势相一致。已有研究表明土壤对磷的储存能力与有机质含量有关,一般有机质含量愈高,对磷的吸附能力愈强<sup>[23]</sup>。磷通常以正磷酸盐的形式存在于土壤中,相当一部分以有机质结合态存在。碱性土中无机磷以 Ca-P 为主要存在形式,而 Ca-P 在不同土壤粒径颗粒中的分布是均匀的<sup>[24]</sup>,由于研究区的土壤呈弱碱性,土壤总磷含量变化与土壤质地关联性不大。

有效磷还与含水率显著相关( $p<0.05$ )。李颖等<sup>[25]</sup>研究表明,土壤水分过高或过低均不利于土壤微生物、植物和动物的生长和繁衍,进而影响土壤酶活性,从而间接影响到土壤养分含量的变化。Zhang 等<sup>[26]</sup>研究表明土壤有机碳和全氮与土壤粘粒和粉粒比例呈显著正相关,因为细颗粒沉积物具有较大的表面积或体积比,通常表现出对有机质的富集;土壤中粘粒、粉粒比例愈高,土壤有机碳和全氮在土壤中稳定性就愈强<sup>[27]</sup>。容重与盐分显著相关( $p<0.05$ ),但容重与土壤中各营养元素均未出现显著相关关系。含水率与 pH 值显著相关( $p<0.05$ ),且二者均与土壤盐分显著负相关( $p<0.01$ ),说明土壤含水率越大,越能削弱研究区因蒸发量较大而带来的土壤盐渍化问题,研究区土壤盐渍化程度越严重,土壤碱性越大。

### 3 结论

(1)不同的植被群落,土壤水盐条件变异系数均属于中等变异水平,盐分变异程度高于水分;沿着植被群落的演替方向,土壤水分含量没有显著性差异,盐分含量呈减少趋势。

(2)植被群落的变化能够影响土壤养分含量,沿着植被演替方向,全碳与有机质含量随着演替方向呈先逐渐降低后增加的趋势;全氮含量沿着演替方向呈现增加趋势;硝态氮与铵态氮先增加后降低;全磷与有效磷随演替变化系数较小,演替中期各理化性质变异系数相对较大。植被演替中期 C/N 高于演替初期与末期。

(3)全氮、有机质、有效磷两两显著相关( $p<0.01$ );硝态氮、铵态氮和全磷未显示出与其他理化性质的相关关系,有效磷还与含水率显著相关( $p<0.05$ )。含水率与 pH 值显著相关( $p<0.05$ ),且二者均与土壤盐分显著负相关( $p<0.01$ ),说明土壤含水率越大,越能削弱研究区因为蒸发量较大带来的土壤盐渍化问题,研究区土壤盐渍化程度越严重,土壤碱性越大。

#### 参考文献:

- [1] Thornton S F, McManus J. Application of organic carbon and nitrogen stable isotope and C/N ratios as source indicators of organic matter provenance in estuarine systems: Evidence from the Tay Estuary, Scotland Estuarine[J]. *Coastal and Shelf Science*, 1994, 38(3): 219-233.
- [2] Tanner C C, D'Eugenio J, McBride G B, et al. Effect of water level fluctuation on nitrogen removal from constructed wetland mesocosms[J]. *Ecological Engineering*, 1999, 12(1): 67-92.
- [3] Baer S G, Church J M, Williard K W J, et al. Changes in intrasystem N cycling from  $N_2$ -fixing shrub encroachment in grassland: multiple posi-

表 4 湿地土壤理化性质间的相关关系矩阵

Table 4 Correlation matrix between soil nutrient contents and environmental factors

|             | TN    | TP    | SOM     | $NO_3^-$ -N | $NH_4^+$ -N | AP      | WC     | dv     | pH     | SC       |
|-------------|-------|-------|---------|-------------|-------------|---------|--------|--------|--------|----------|
| TN          | 1.000 | 0.235 | 0.913** | -0.280      | 0.213       | 0.502** | 0.432* | -0.176 | 0.190  | -0.154   |
| TP          |       | 1.000 | 0.164   | -0.099      | -0.146      | 0.079   | 0.188  | -0.063 | 0.300  | -0.324   |
| SOM         |       |       | 1.000   | -0.180      | 0.287       | 0.582** | 0.300  | -0.015 | 0.083  | 0.017    |
| $NO_3^-$ -N |       |       |         | 1.000       | -0.232      | -0.085  | -0.093 | 0.054  | -0.006 | 0.303    |
| $NH_4^+$ -N |       |       |         |             | 1.000       | 0.244   | 0.081  | 0.300  | 0.013  | 0.111    |
| AP          |       |       |         |             |             | 1.000   | 0.429* | -0.106 | 0.280  | -0.147   |
| WC          |       |       |         |             |             |         | 1.000  | -0.174 | 0.401* | -0.477** |
| dv          |       |       |         |             |             |         |        | 1.000  | -0.028 | 0.420*   |
| pH          |       |       |         |             |             |         |        |        | 1.000  | -0.597** |
| SC          |       |       |         |             |             |         |        |        |        | 1.000    |

注:\* 显著性水平  $p<0.05$ ; \*\* 显著性水平  $p<0.01$ ; 样本数  $n=31$ 。

- tive feedbacks[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2006, 115 (1-4): 174-182.
- [4] Lost S, Landgraf D, Makeschin F. Chemical soil properties of reclaimed marsh soil from Zhejiang Province P. R. China[J]. *Geoderma*, 2007, 142 (3-4): 245-250.
- [5] 杨志峰, 崔保山, 黄国和, 等. 黄淮海地区湿地水生态过程、水环境效应及生态安全调控[J]. *地球科学进展*, 2006, 21(11): 1119-1127. YANG Zhi-feng, CUI Bao-shan, HUANG Guo-he, et al. Hydro-ecological processes, water-environmental effects and integrated control of ecological security for wetlands in Huang-Huai-Hai region of China[J]. *Advances in Earth Science*, 2006, 21(11): 1119-1127.
- [6] 闫培峰, 周华荣, 刘宏霞. 白杨河——艾里克湖湿地土壤理化性质的空间分布特征[J]. *干旱区研究*, 2008, 25(3): 406-412. YAN Pei-feng, ZHOU Hua-rong, LIU Hong-xia. Spatial distribution of soil physiochemical properties in wetlands in the basin of Baiyang River and Arik Lake[J]. *Arid Zone Research*, 2008, 25(3): 406-412.
- [7] Bai Jun-hong, Deng Wei, Zhu Yan-ming, et al. Spatial variability of nitrogen in soils from land/inland water ecotones[J]. *Communication in Soil Science and Plant Analysis*, 2004, 35: 735-749.
- [8] 侯本栋, 马风云, 邢尚军, 等. 黄河三角洲不同演替阶段湿地群落的土壤和植被特征[J]. *浙江林学院学报*, 2007, 24(3): 313-318. HOU Ben-dong, MA Feng-yun, XING Shang-jun, et al. Soil and vegetation characteristics of wetland communities at different successive stages in the Huanghe River Delta[J]. *Journal of Zhejiang Forestry College*, 2007, 24(3): 313-318.
- [9] 中国土壤学会土壤化学分析专业委员会. 土壤常规分析方法[M]. 第2版. 北京: 科学出版社, 1965: 20-40. Agro-Chemistry Professional Committee in Soil Science Society of China, Edit. General analytical method of soil and agro-chemistry[M]. 2nd edition, Beijing: Science Press, 1965: 20-40.
- [10] 陆健健. 河口生态学[M]. 北京: 海洋出版社, 2003: 44-45. LU Jian-jian, Estuarine ecology[M]. Beijing: China Ocean Press, 2003: 44-45.
- [11] Cambardella C A, Moorman T B, Novak J M. Field-scale variability of soil properties in Central Iowa soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1994, 58: 1501-1511.
- [12] 王海洋, 陈家宽, 周进. 水位梯度对湿地植物生长、繁殖和生物量分配的影响[J]. *植物生态学报*, 1999, 23(3): 269-274. WANG Hai-yang, CHEN Jia-kuan, ZHOU Jin. Influence of water level gradient on plant growth reproduction and biomass allocation of wetland plant species[J]. *Acta Phytocologica Sinica*, 1999, 23(3): 269-274.
- [13] 陈海霞, 付为国, 王守才, 等. 镇江内江湿地植物群落演替过程中土壤养分动态研究[J]. *生态环境*, 2007, 16(5): 1475-1480. CHEN Hai-xia, FU Wei-guo, WANG Shou-cai, et al. Dynamics of soil nutrients in plant community succession process in inner-river wetland in Zhenjiang[J]. *Ecology and Environment*, 2007, 16(5): 1475-1480.
- [14] 李忠佩, 程励励, 林心雄. 退化红壤的有机质状况及施肥影响的研究[J]. *土壤*, 1994, 26(2): 70-76. LI Zhong-pei, CHENG Li-li, LIN Xin-xiong. The fertilization effect and organic matter status of degraded red soil[J]. *Soil*, 1994, 26(2): 70-76.
- [15] 张智才, 闫玉春, 邵振艳. 草原植被-土壤的关系及对干扰响应差异研究[J]. *干旱区资源与环境*, 2009, 23(5): 121-127. ZHANG Zhi-cai, YAN Yu-chun, SHAO Zhen-yan. Study on the correlation between steppe vegetation and soil as well as the difference in response to disturbance[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2009, 23(5): 121-127.
- [16] 白军红, 邓伟, 王庆改, 等. 内陆盐沼湿地土壤碳氮磷剖面分布的季节动态特征[J]. *湖泊科学*, 2007, 19(5): 599-603. BAI Jun-hong, DENG Wei, WANG Qing-gai, et al. Seasonal dynamics of carbon, nitrogen and phosphorus in soil profiles from an inland salt marsh[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2007, 19(5): 599-603.
- [17] Bellehumeur G, Legendre P. Multiscale source of variation in ecological variable: modeling spatial dispersion, elaborating sampling designs[J]. *Landscape Ecology*, 1998, 13: 14-25.
- [18] 王爱萍. 长江口滨海湿地磷的迁移转化及净化功能的研究[D]. 上海: 同济大学, 2005: 1-11. WANG Ai-ping. The phosphorus transfer and refining of the Yangtze Coastal Wetland[D]. Shanghai: Tongji University, 2005: 1-11.
- [19] 杨桂山, 施雅风, 张琛. 江苏滨海潮滩湿地对潮位变化的生态响应[J]. *地理学报*, 2002, 57(3): 325-332. YANG Gui-shan, SHI Ya-feng, ZHANG Chen. The ecological response of typical mud flat to sea level change in Jiangsu Coastal Plain[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2002, 57(3): 325-332.
- [20] 吕国红, 周莉, 赵先丽, 等. 芦苇湿地土壤有机碳和全氮含量的垂直分布特征[J]. *应用生态学报*, 2006, 17(3): 384-389. LV Guo-hong, ZHOU Li, ZHAO Xian-li, et al. Vertical distribution of soil organic carbon and total nitrogen in reed wetlands[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2006, 17(3): 384-389.
- [21] Marchand C, Lallier-Vergès E, Baltzer F. The composition of sedimentary organic matter in relation to the dynamic features of a mangrove-fringed coast in French Guiana [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2003, 56(1): 119-130.
- [22] Reddy K R, Diaz O A. Phosphorus dynamics in selected wetlands and streams of the lake Okeechobee Basin[J]. *Ecological Engineering*, 1995, 5(2-3): 183-207.
- [23] Venterink H O, Davidsson T E, Kiehl K, et al. Impact of drying and rewetting on N, P and K dynamics in a wetland soil[J]. *Plant and Soil*, 2002, 24(3): 119-130.
- [24] 全为民, 韩金娣, 平先隐, 等. 长江口湿地沉积物中的氮、磷与重金属[J]. *海洋科学*, 2008, 32(6): 98-102. QUAN Wei-min, HAN Jin-di, PING Xian-yin, et al. Distribution and accumulation of nutrients and heavy metals in the sediment of Changjiang estuary wetlands[J]. *Marine Sciences*, 2008, 32(6): 98-102.
- [25] 李颖, 钟章成. 不同土壤南天竹系统的土壤酶活性分异[J]. *武汉植物学研究*, 2006, 24(2): 144-148. LI Ying, ZHONG Zhang-cheng. Differentiation of soil enzyme activities in different soil-heavenly bamboo systems[J]. *Journal of Wuhan Botanical Research*, 2006, 24(2): 144-148.
- [26] Zhang W, Yua L, Hutchinson S M, et al. China's Yangtze Estuary: I. Geomorphic influence on heavy metal accumulation in intertidal sediments[J]. *Geomorphology*, 2001, 41(2-3): 195-205.
- [27] 吴庆标, 王效科, 张德平, 等. 呼伦贝尔草原土壤粘粉粒组分对有机碳和全氮含量的影响[J]. *生态环境*, 2004, 13(4): 630-632. WU Qing-biao, WANG Xiao-ke, ZHANG De-ping, et al. Effects of clay-silt fractions of soil on SOC and TN in Hulunbeir grassland[J]. *Ecology and Environment*, 2004, 13(4): 630-632.