DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2020.01.026
张天举，陈永金，刘加珍. 黄河口湿地不同植物群落土壤盐分与养分分布特征. 土壤，2020，52(1)：180–187

黄河口湿地不同植物群落土壤盐分与养分分布特征①

张天举，陈永金*，刘加珍

(聊城大学环境与规划学院，山东聊城 252059)

摘 要：为研究黄河口湿地不同植物群落下土壤盐分与养分含量的空间变化特征以及盐分与养分指标之间的关系，运用经典统计分析、Pearson 相关分析、单因素方差分析等方法，开展了植物样地调查和土壤剖面采样分析。结果表明：①研究区土壤全盐(TS)、K^+、Na^+、Ca^{2+}、Mg^{2+}、Cl^-、SO_4^{2-} 等盐分指标含量及有效磷(AP)、速效氮(AN)、全氮(TN)等养分含量在土壤表层(0～5 cm)最高，随着土壤深度的增加呈递减之势。②土壤属于重盐土类型(含盐量大于 4.0 g/kg)，Cl^-、Na^+ 含量远高于其他离子，是导致土壤盐渍化的主要成分。3 种植物群落土壤表层(0 ～ 5 cm)TS 含量分异特征表现为柽柳群落>碱蓬群落>芦苇群落。钠吸附比分析表明，3 种植物可能会在 10 ～ 20 cm 土层较早受到 Na^+ 的毒害。差异显著性检验结果表明，K^+、Na^+、HCO_3^- 含量在不同植物群落间差异性显著(P<0.05)；除全磷(TP)外，其余土壤养分含量在相同土层不同植物群落之间或在不同土层相同植物群落之间均有显著性差异(P<0.05)。③Pearson 相关分析表明，3 种植物群落的土壤盐分与养分指标之间相关性不显著，但 TS 与 Na^+(P<0.05)、Cl^- 含量(P<0.01) 均呈显著性相关。3 种植物群落土壤养分均处于亏缺状态，土壤相对贫瘠。土壤 N：P 均<14，植物受制于氮元素。控制或减少氯盐及钠盐的投入、增施有机肥和覆盖有机质含量高的物质是一条减轻黄河口湿地土壤盐渍化的合适途径。

关键词：黄河口湿地；植物群落；盐分；养分

中图分类号：S156.4+2 **文献标志码：**A

Spatial Distribution of Soil Salinity and Nutrients Ander Different Vegetation Communities in Yellow River Estuary Wetland

ZHANG Tianjü, CHEN Yongjin*, LIU Jiazhen

(*School of Environment and Planning*, *Liaocheng University*, *Liaocheng*, *Shandong* 252059, *China*)

Abstract: By using the classical statistical and correlation analysis and one way analysis of variance, an investigation of vegetation quadrats and soil samples was carried out to assess the spatial variation of soil salinity and nutrient contents and their relationship under different vegetation communities (*Tamarix chinensis*, *Suaeda salsa*, *Phragmites australis*) of the Yellow River Estuary. The results showed that: 1) The contents of salinity (TS, K^+, Na^+, Ca^{2+}, Mg^{2+}, Cl^-, SO_4^{2-}) and nutrients (available phosphorus, AP; available nitrogen, AN; total nitrogen, TN) in surface layers of soil profiles were obvious higher than those in other layers, and they declined with the increase of soil depth. 2) The studied soil belonged to heavy solonchak with the mean soil salinity more than 4.0 g/kg. Cl^- and Na^+ were the two most important ions contributing to soil salinization. There were great differences among different vegetation communities in total salinity in the surface layers (0–5 cm) with an order of *Tamarix chinensis* > *Suaeda salsa* > *Phragmites australis*. Sodium adsorption ratio indicated that the three vegetation could be poisoned by Na^+ in the layer of 10~20 cm. K^+, Na^+ and HCO_3^- were significantly different among different vegetation communities. Except for TP, the other soil nutrients were significantly different between different vegetation communities in the same soil layer or among the same vegetation communities in different soil layers. 3) correlation between salinity and nutrients were not significant in the three vegetation communities, however, total salt had significant correlation with Na^+ (P<0.05) and Cl^- (P<0.01). Soil nutrients were insufficient and the soil was infertile. The soil N:P under the three vegetation communities was less than 14, consequently, nitrogen was the limited nutrient factor to the growth of vegetation in study area. Therefore, controlling or reducing chloride and

①基金项目：国家科技支撑计划项目(2014BAC15B02)和国家自然科学基金项目(40901276；40871239)资助。

* 通讯作者(chenyongjin@lcu.edu.cn)

作者简介：张天举(1987—)，男，河南商丘人，硕士研究生，主要从事湿地生态修复研究。E-mail: 2382675001@qq.com

sodium, increasing organic manure and covering with organic matter are the optional ways to alleviate soil salinization in the Yellow River Estuary Wetland.

Key words: The Yellow River Estuary Wetland; Vegetation community; Salinity; Nutrients

土壤盐渍化是指土壤底层或地下水中的盐分随毛管水上升到地表，水分蒸发后，使盐分积累在表层土壤中的过程[1]。世界约有 1/3 的土壤发生盐渍化，而我国盐渍化土地面积达 2.5×10^6 hm^2，严重影响了土地资源尤其是耕地资源的有效供给，威胁着我国的粮食安全[2-3]。因此，盐渍化问题已成为世界性广泛关注的热点。在尺度研究方面，研究者们多以区域性研究为主[4-9]；在治理方法上，大多是集中在物理、化学和工程等方面。近年来生物改良方法因其可持续性强、生态环境效益好深受学界欢迎，如碱蓬、柽柳和芦苇等以其较强的耐盐能力常被用作改良盐渍化土壤的优先物种[10-18]。

黄河三角洲河口湿地受气候条件、土壤母质、海水以及沉积环境的影响，导致盐渍化土壤在区域内广泛分布，已严重影响到当地农业的可持续发展和生态系统的安全[19-20]。因此，研究该区域盐渍化土壤的主导因子，对于更好地预防和治理土壤盐渍化具有十分重要的意义。本研究在前人研究的基础上，选择黄河口湿地 3 种典型植物群落(碱蓬、柽柳、芦苇)，通过分析其土壤盐分与养分的组成、含量变化及二者的关系，探讨不同植物群落下土壤盐分、养分的空间分布特征，进而揭示盐渍化土壤的主导盐分因子，以为黄河口湿地盐渍化土壤的源头治理改良提供参考。

1　材料与方法

1.1　研究区概况

黄河口湿地因受黄河尾闾摆动和河水、海水的双重影响，使其具有独特的特征，主要分布在我国山东省东营市境内，地面平坦，海拔较低(10 m 以下)。处于温带季风性气候区，四季分明，光照充足，年平均气温 11.7 ~ 12.6 ℃，无霜期 211 d；年均降水量 530 ~ 630 mm，且 70% 分布在夏季，具有明显的季节性，从而导致地表径流和地下水补给量年内分配极不均匀；平均蒸散量为 750 ~ 2 400 mm。该区域由于受水分、含盐量、水埋深、矿化度、距海远近、地貌类型及人类活动的影响，植物群落组成比较简单，主要以柽柳、碱蓬和芦苇等为主。

1.2　样品采集

依据样点选择的代表性、典型性等原则，根据黄河口湿地的地形、地貌特征，选择地势相对平坦、植物长势良好、分布相对均匀且具有该区一般特征的区域布设 22 个样点(图 1，柽柳群落 8 个，碱蓬群落 7 个，芦苇群落 7 个)进行土壤样品采集，每个样点 3 次重复。采集 0 ~ 5、5 ~ 10、10 ~ 20、20 ~ 40、40 ~ 60、60 ~ 80 cm 土层的土壤样品，共计 396 个。将采集后的土壤样品带回实验室自然风干以备后用。

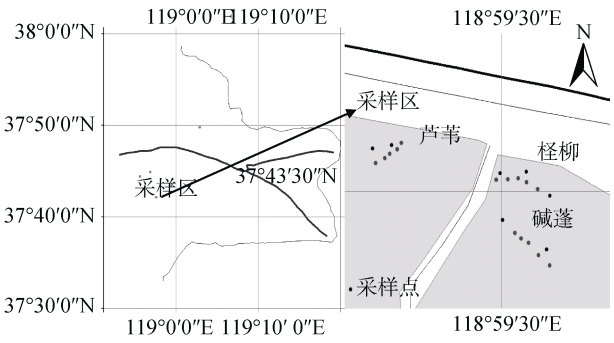


图 1　研究区示意图

Fig.1　Map　of　study　area

1.3　样品处理

除去土壤样品中的枯枝、残叶等杂质，研碎过 2 mm 筛，使用蒸馏水制备 1∶5 土水质量比溶液，静置过滤得到浸提液，测定离子组成。其中，K^+ 与 Na^+ 含量采用火焰分光光度法，Ca^{2+} 与 Mg^{2+} 含量采用 EDTA 容重法，Cl^- 含量采用硝酸银滴定法，HCO_3^- 含量采用双指示剂滴定法，SO_4^{2-} 含量采用 EDTA 容量法，全盐(TS)含量采用离子加和法。pH、电导率(EC)则分别采用 PHS-2C 型数字式酸度计、DDSJ-308A 电导率仪测定。土壤速效氮(AN)含量采用扩散吸收法，土壤有效磷(AP) 含量采用碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法，土壤全磷(TP) 含量采用高氯酸-硫酸消化法，土壤全氮(TN)采用凯氏定氮法[21]，土壤全钾(TK) 含量采用原子吸收分光光度计法，土壤速效钾(AK)采用乙酸铵浸提法[22]。

1.4　数据分析

采用 Excel 2003、SPSS 22.0 对数据进行处理，包括统计分析、相关分析、单因素方差分析等。利用 SPSS 22.0 统计软件对结果进行单因素方差分析，并利用 LSD 法检验单因素下各处理间差异的显著性(显著性水平设定为 a=0.05)，采用 Pearson 相关分析分析各盐分指标之间以及盐分、养分之间的相关性。

2 结果与分析

2.1 不同植物群落土壤盐分的分布特征及其相关关系

图 2 显示，除 HCO_3^- 外，K^+、Na^+、Ca^{2+}、Mg^{2+}、Cl^-、SO_4^{2-}、TS 等土壤盐分指标在碱蓬群落、柽柳群落表聚现象较明显，而各盐分指标在芦苇群落 0 ~ 80 cm 土层波动不大，这是因为芦苇群落地势较低，土壤长期处于湿润状态，使可溶性盐基离子在不同土层的分布相对均匀。在土壤表层(0 ~ 5 cm)，TS 含量柽柳群落>碱蓬群落>芦苇群落。在阳离子中，Na^+ 含量最高、K^+ 含量最低；在阴离子中，Cl^- 含量最高，SO_4^{2-} 次之，HCO_3^- 最少。差异显著性检验结果表明，在 0 ~ 80 cm 的土层，K^+ 含量，碱蓬群落显著高于芦苇群落(F=7.52，P<0.05)；Na^+ 含量，柽柳群落、碱蓬群落显著高于芦苇群落(F=9.19，P<0.05)；HCO_3^- 含量，碱蓬群落、芦苇群落显著高于柽柳群落(F=12.01，P<0.05)；其余离子及 TS 含量在 3 种植物群落中的差异性不显著(P>0.05)。Pearson 相关分析结果表明 (表 1)，在碱蓬群落中，TS 与 Cl^-、SO_4^{2-} 含量呈极显著性相关(P<0.01)，与 K^+、Na^+、Mg^{2+} 含量呈显著性相关 (P<0.05)；pH 与 Mg^{2+}、HCO_3^- 含量呈显著性相关(P<0.05)；EC 与 K^+、Mg^{2+} 含量呈显著性相关(P<0.05)，与 Cl^-、SO_4^{2-} 含量呈极显著性相关(P<0.01)。在柽柳群落中，除 HCO_3^- 外，TS 与 Ca^{2+}、Mg^{2+}、Cl^-、SO_4^{2-} 含量呈极显著性相关(P<0.01)，与 K^+、Na^+ 含量呈显著性相关(P<0.05)；pH 与所有离子均未呈显著性相关；EC 与离子的相关性和 TS 与离子的相关性一致。在芦苇群落中，TS 与 Cl^- 含量呈极显著性相关(P<0.01)，与 Na^+ 含量呈显著性相关(P<0.05)；pH 与 Mg^{2+} 含量呈显著性相关(P<0.05)；EC 与 Cl^- 含量呈极显著性相关(P<0.01)。

2.2 不同植物群落钠吸附比特征

钠吸附比(SAR)是指土壤溶液中 Na^+ 和 Ca^{2+}、Mg^{2+} 的相对含量，通常用于判断植物生长状况和土壤是否会发生碱化[23]。碱蓬群落、柽柳群落和芦苇群落的钠吸附比随着土壤深度的增加呈先升后降之势，最大值均出现在 10 ~ 20 cm 土层(表 2)，分别为 6.13、4.52、2.73，这可能是由于上层的 Na^+ 淋溶至下层而使下层的 Na^+ 含量增加、下层的 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 含量因植物根系选择性吸收而降低或者是由土壤酸

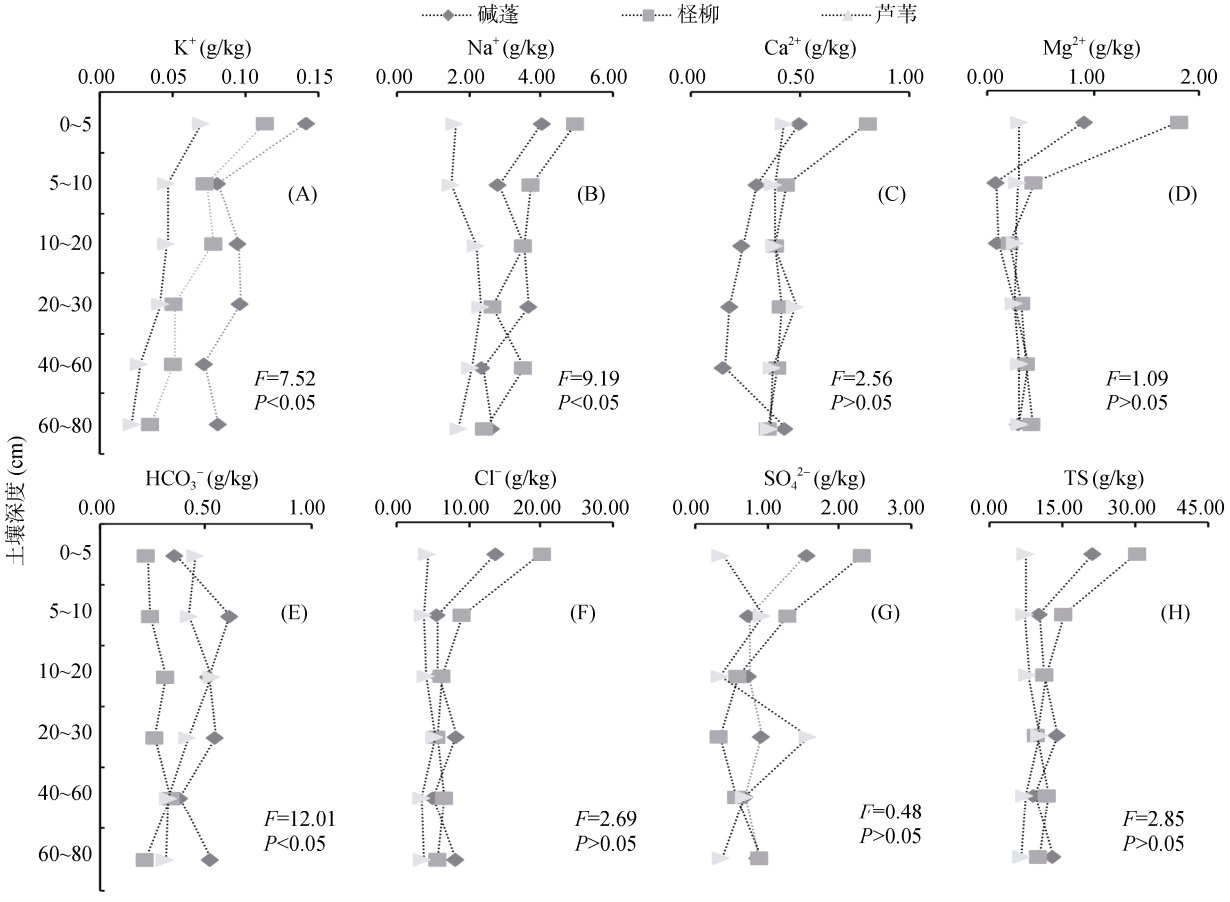


图 2 3 种植物群落中土壤盐分指标分布特征

Fig. 2 Profile distribution of soil salinity under three vegetation communities

表 1　3 种植物群落盐分指标与离子之间的相关性

Table 1　Correlation between soil salinity and ions under three vegetation communities

植物群落	指标	K^+	Na^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	HCO_3^-	Cl^-	SO_4^{2-}
碱蓬	TS	0.837*	0.779*	0.642	0.790*	–0.088	0.995**	0.958**
	pH	0.061	0.112	–0.320	–0.771*	0.831*	–0.398	–0.494
	EC	0.784*	0.641	0.740	0.846*	–0.187	0.958**	0.949**
柽柳	TS	0.874*	0.908*	0.981**	0.971**	–0.431	0.999**	0.953**
	pH	–0.007	–0.275	–0.490	–0.573	0.387	–0.488	–0.481
	EC	0.885*	0.915*	0.977**	0.962**	–0.435	0.997**	0.955**
芦苇	TS	0.061	0.794*	0.481	0.304	–0.225	0.954**	0.747
	pH	–0.371	0.663	–0.441	0.814*	–0.715	0.505	–0.125
	EC	0.183	0.685	0.443	0.459	–0.295	0.994**	0.610

注：**表示在 $P<0.01$ 水平相关性显著；*表示在 $P<0.05$ 水平相关性显著，下同。

表 2　3 种植物群落不同土层钠吸附比变化特征

Table 2　Characteristics of sodium adsorption ratios in different soil layers under three vegetation communities

植物群落	0 ~ 5 cm	5 ~ 10 cm	10 ~ 20 cm	20 ~ 40 cm	40 ~ 60 cm	60 ~ 80 cm
碱蓬	3.40	4.52	6.13	5.52	3.27	3.09
柽柳	3.07	3.98	4.52	3.11	4.01	2.77
芦苇	1.89	1.86	2.73	2.72	2.49	2.11

碱平衡被打破导致的。当 pH 升高时，HCO_3^- 会转化成 CO_3^{2-}，而使 Ca^{2+}、Mg^{2+} 以沉淀的方式降低。

2.3　不同植物群落土壤养分的丰缺性及其分布特征

按照全国第二次土壤普查分级标准(表 3)[24]判断，碱蓬群落的 AK 变幅为 129.75 ~ 372.25 mg/kg，属于中等至丰富状态；AP 的变幅为 0.50 ~ 2.58 mg/kg，属于极缺状态；AN 的变幅为 10.68 ~ 28.88 mg/kg，属于极缺状态；TN 的变幅为 0.24 ~ 0.55 g/kg，属于缺到极缺状态。柽柳群落的 AK 属于较缺至丰富状态，AP 属于极缺状态，AN 属于缺至极缺状态，TN 属于极缺状态。芦苇群落的 AK 属于缺至丰富状态，AP 属于极缺状态，AN 属于较缺至极缺状态，TN 属于较缺至极缺状态。

表 3　全国第二次土壤普查养分分级标准

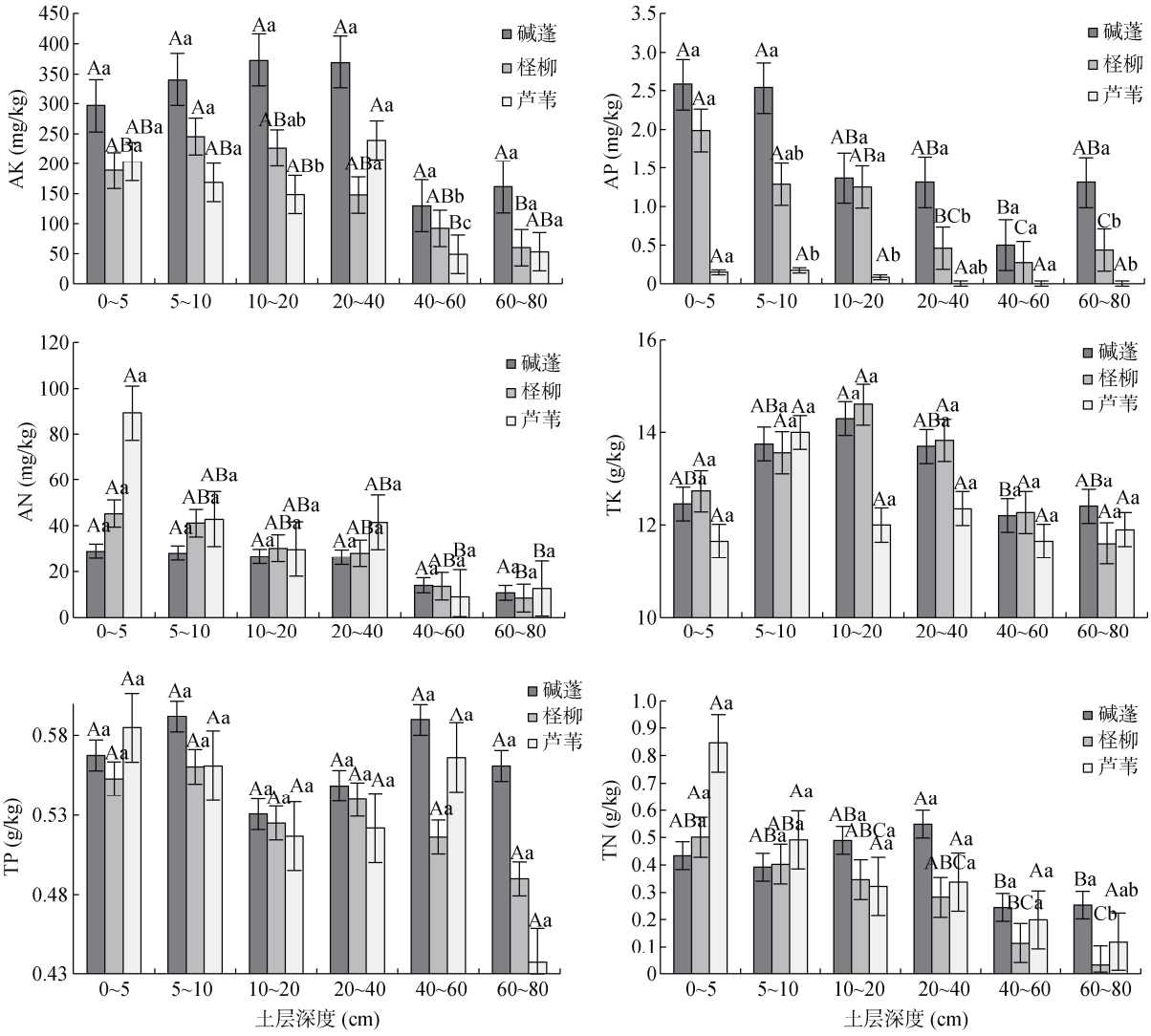
Table 3　Classification standard of soil nutrients in 2nd national soil survey

分级标准	全氮(g/kg)	速效氮(mg/kg)	速效磷(mg/kg)	速效钾(mg/kg)
丰富	>2.0	>150	>40	>200
较丰富	1.5 ~ 2.0	120 ~ 150	20 ~ 40	150 ~ 200
中等	1.0 ~ 1.5	90 ~ 120	10 ~ 20	100 ~ 150
较缺	0.75 ~1.0	60 ~ 90	5 ~ 10	50 ~ 100
缺	0.5 ~ 0.75	30 ~ 60	3 ~ 5	30 ~ 50
极缺	<0.5	<30	<3	<30

从图 3 可知，相对于 AP、AN，AK 含量较高，多分布于 0 ~ 40 cm 土层，尤其是 AK。AK、AP 以碱蓬群落含量最高，柽柳群落次之，芦苇群落最少，这是因为芦苇群落的地势较低，土壤含水量较高，会溶解大量钾和磷，而被芦苇吸收；AN 则以芦苇群落含量最高，柽柳群落次之，碱蓬群落最少。随着土壤深度的增加，碱蓬、柽柳群落的 AK 含量先升后降，芦苇群落则是先降后升再降，这可能是受土壤母质的影响，因为其变化趋势和 TK 基本一致，尤其是在碱蓬群落和柽柳群落中，而在芦苇群落 5 ~ 10 cm 土层 AK 被根部大量吸收；AP 含量在 3 种植物群落中整体呈降低之势，且在芦苇群落 20 cm 以下土层未检测出；AN 含量在芦苇、柽柳群落中整体呈下降之势，在碱蓬群落 20 cm 以上的土层几乎无变化。TK、TP 含量在 3 种植物群落中的变化趋势大体相反，TK 先升后降，TP 先降后升。芦苇、柽柳群落的 TN 含量逐渐降低，而碱蓬群落则先升后降。

差异显著性检验结果表明，对于 AK 含量，碱蓬群落显著高于芦苇群落(10 ~ 20 cm，$P<0.05$)、在 40 ~ 60 cm 土层 3 群落中差异性均显著($P<0.05$)，在其余相同土层 3 群落中的差异性均不显著($P>0.05$)；碱蓬群落在各土层之间差异性不显著($P>0.05$)，柽柳群落在 5 ~ 10 cm 和 60 ~ 80 cm 土层间、芦苇群落在 20 ~ 40 cm 和 40 ~ 60 cm 土层间差异性均显著($P<0.05$)。对于 AP 含量，在 5 ~ 10 cm 土层的碱蓬群落和芦苇群落间，10 ~ 20 cm 土层的碱蓬群落、柽柳群落和芦苇群落间，20 ~ 40 cm 土层的碱蓬群落和柽柳群落间，60 ~ 80 cm 土层的碱蓬群落和柽柳群落、芦苇群

落间差异性均显著(P<0.05)；碱蓬群落在 0 ~ 10 cm 和 40 ~ 60 cm 土层间、柽柳群落在 0 ~ 10 cm 和 40 ~ 80 cm 土层间差异性均显著(P<0.05)，芦苇群落在各土层间差异性均不显著(P>0.05)。对于 AN 含量，相同土层不同植物群落间差异性均不显著(P>0.05)；碱蓬群落在各土层间差异性不显著(P>0.05)，柽柳群落在 0 ~ 5 cm 和 60 ~ 80 cm 土层间、芦苇群落在 0 ~ 5 cm 和 40 ~ 80 cm 土层间差异性均显著(P<0.05)。对于 TK 含量，相同土层不同植物群落间差异性均不显著(P>0.05)；碱蓬群落在 10 ~ 20 cm 和 40 ~ 60 cm 土层间差异性显著(P<0.05)，柽柳群落、芦苇群落在各土层间的差异性均不显著(P>0.05)。对于 TP 含量，相同土层不同植物群落间差异性均不显著(P>0.05)；相同植物群落不同土层间差异性均不显著(P>0.05)。对于 TN 含量，除 60 ~ 80 cm 土层碱蓬群落和柽柳群落差异性显著外(P<0.05)，其余相同土层 3 群落间的差异性均不显著(P>0.05)；碱蓬群落在 20 ~ 40 cm 和 40 ~ 80 cm 土层间、柽柳群落在 0 ~ 5 cm 和 60 ~ 80 cm 土层间差异性均显著(P<0.05)，芦苇群落在各土层间差异性均不显著(P>0.05)。



(图中不同小写、大写字母分别表示同一土层不同植物群落间，同一植物群落不同土层间差异显著(P<0.05))

图 3 养分在 3 种植物群落土壤中的分布特征

Fig.3 Distribution of soil nutrients under three vegetation communities

2.4 不同植物群落土壤全磷含量及其氮磷比

碱蓬群落 TP 含量变幅为 0.53 ~ 0.59 g/kg，均值为 0.56 g/kg；柽柳群落 TP 含量变幅为 0.49 ~ 0.56 g/kg，均值为 0.53 g/kg；芦苇群落 TP 含量变幅为 0.44 ~ 0.58 g/kg，均值为 0.53 g/kg。3 种植物群落 TP 含量均值除碱蓬群落外，其余两群落 TP 含量均值稍低于我国 TP 含量均值(0.56 g/kg)[25]。碱蓬群落土壤 N：P 变幅为 0.41 ~ 1.00；柽柳群落土壤 N：P 变幅为

0.06 ~ 0.91；芦苇群落土壤 N∶P 变幅为 0.27 ~ 1.45。随着土壤深度的增加，柽柳群落和芦苇群落土壤 N∶P 逐渐降低，碱蓬群落土壤 N∶P 则先升后降，最大值出现在 20 ~ 40 cm 土壤深度。在 0 ~ 10 cm 土层，土壤 N∶P 芦苇群落>柽柳群落>碱蓬群落；在 10 ~ 80 cm 土层，土壤 N∶P 则表现为碱蓬群落>芦苇群落>柽柳群落，这一特征在 20 cm 以下土层较为明显(图 4)。

2.5　土壤盐分与养分的相关性分析

由表 4 可知，碱蓬群落中的 TN 与 Na^+ 含量呈显著性相关(P<0.05)，其余盐分指标和养分指标间无显著相关性。柽柳群落中的 AP 与 TS、Na^+、Cl^-、SO_4^{2-} 含量呈显著性相关(P<0.05)，与 K^+ 含量呈极显著性相关(P<0.01)；AN 与 K^+ 含量呈显著性相关(P<0.05)；TN 与 K^+ 含量呈显著性相关(P<0.05)，其余盐分、养分指标间相关性不明显。芦苇群落中的 AK 与 Ca^{2+}、Cl^- 含量呈显著性相关(P<0.05)；AN 与 K^+ 含量呈极显著性相关(P<0.01)；TN 与 K^+ 含量呈极显著性相关(P<0.01)，其余盐分、养分指标间没有明显相关性。

表 4　3 种植物群落土壤中盐分与养分间的相关性

Table 4　Correlation between soil salinity, ions with nutrients under three vegetation communities

盐分指标	植物群落	养分指标					
		AK	AP	AN	TK	TP	TN
TS	碱蓬	0.192	0.563	0.377	–0.288	–0.178	0.319
	柽柳	0.340	0.838*	0.698	–0.112	0.550	0.703
	芦苇	0.727	–0.228	0.194	0.037	0.100	0.055
K^+	碱蓬	0.385	0.611	0.590	–0.077	–0.270	0.484
	柽柳	0.685	0.954**	0.866*	0.340	0.699	0.904*
	芦苇	0.752	0.675	0.961**	0.063	0.645	0.965**
Na^+	碱蓬	0.721	0.500	0.767	0.349	–0.581	0.834*
	柽柳	0.538	0.848*	0.747	0.115	0.643	0.771
	芦苇	0.135	–0.496	–0.356	–0.379	–0.152	–0.447
Ca^{2+}	碱蓬	–0.083	0.664	0.053	–0.376	0.043	–0.149
	柽柳	0.189	0.759	0.588	–0.163	0.414	0.613
	芦苇	0.846*	0.189	0.548	–0.059	0.270	0.408
Mg^{2+}	碱蓬	–0.213	0.308	0.102	–0.647	0.146	–0.052
	柽柳	0.146	0.731	0.568	–0.252	0.412	0.575
	芦苇	–0.642	0.570	–0.003	–0.269	0.063	0.106
HCO_3^-	碱蓬	0.472	0.188	0.175	0.692	–0.142	0.278
	柽柳	–0.006	–0.368	–0.292	0.315	–0.157	–0.214
	芦苇	0.660	0.042	0.534	0.148	0.336	0.528
Cl^-	碱蓬	0.105	0.536	0.294	–0.370	–0.125	0.236
	柽柳	0.323	0.831*	0.693	–0.120	0.545	0.698
	芦苇	0.841*	–0.006	0.443	–0.051	0.094	0.280
SO_4^{2-}	碱蓬	0.134	0.581	0.377	–0.353	–0.063	0.248
	柽柳	0.308	0.828*	0.640	–0.235	0.471	0.616
	芦苇	0.523	–0.345	–0.020	0.425	0.137	–0.096

3　讨论

碱蓬、柽柳、芦苇 3 种植物群落土壤 TS 含量的平均值均大于 4.0 g/kg，属于重盐土类型[26]。土壤 TS 含量柽柳群落>碱蓬群落(0 ~ 10 cm)(图 2H)，这是因为本研究区柽柳植被覆盖度相对较低，稀疏的植物分布增加了地表裸露的面积，强烈的蒸发作用导致灌丛间出现大量的“盐斑”，加之柽柳蒸腾作用导致大量失水，致使土壤盐分含量增加并向表层积聚而形成“盐岛”效应。另外，黄河三角洲盛行海陆风，不同程度的风贯穿柽柳灌丛，水分流失加快，也会促进灌丛间“盐岛”的形成。郗金标等[27]、尹传华等[28]报道柽柳的盐岛效应能增加土壤的含盐量。而碱蓬群落地势稍低，水分相对充裕，致使盐分表聚相对

较弱，有学者指出碱蓬自身能够有效地降低土壤的含盐量[29-30]。

研究区 Na^+、Cl^- 含量较其他离子含量高(图 2)，尤其是 Cl^-，这可能是因为 Cl^- 很少被土壤吸附，也不易于从土壤解离，又不易形成难溶性的氯化物。而对于 Na^+，这是因为本区域距海较近，海水长期侧侵增加了土壤中 Na^+ 的含量，这与已有的研究海水能增大土壤的 Na^+ 含量[23]的结果相似。也可能是植物具有吸钾“拒钠”的功能，姚世响等[31]指出植物在 NaCl 低浓度胁迫时可以选择吸收 K^+，而避免在植物体内积累 Na^+；张继伟等[32]则指出油蒿具有“吸钾拒钠”的特征。相关分析表明，在 3 群落中 TS 均与 Cl^-、Na^+ 含量关系密切(表 1)，这说明氯盐、钠盐是土壤盐渍化的主要有效成分。因此，控制或减少氯盐、钠盐投入是一条减轻黄河口湿地土壤盐渍化的合适途径。除个别盐分、养分指标之间呈显著性相关外，大多数盐分、养分指标之间相关性不显著(P>0.05)(表 4)。

本研究的 SAR 最大均值为 6.13，低于陈效民等[23]的 7.85，高于贡璐等[33]的 6.03，这可能是由于具体的地理位置、局域小气候、微地形、地貌、水文等条件导致。该区 3 种植物长势良好没有受到 Na^+ 毒害的迹象，若发生毒害可能出现在 10 ~ 20 cm 土层(表 2)。有研究指出碱蓬能够将根部吸收的大量 Na^+ 运输至地上部并区域化进液泡以减轻 Na^+ 毒害[34]，以稀释的方式使吸收到体内的盐分不致于发生毒害[35]，以此来适应盐生环境。因此，种植碱蓬提高植被覆盖度也是一种减轻黄河口湿地土壤盐渍化的合适途径。根据 Richards 提出的 SAR 分级标准[36]，本研究 SAR 值远小于 10，说明该研究区土壤尚未形成碱化土类型，仍以重盐土类型为主。

盛行的海陆风使植物能够较多地截留其所携带的有机物质，而使土壤表层有机质增加，凋落物的分解同样促使养分含量在表层增加。因此，该区出现了土壤养分表聚的现象。这与刘景双等[37]研究三江平原地区的结果相似。总体来讲，除 AK 外，其余土壤养分(AP、AN、TN)均处于缺或极缺状态(表 3)，这说明该区土壤养分相对贫瘠、土壤质量较差。因此，应注意增施有机肥、覆盖有机质含量高的物质。差异显著性检验结果表明，TP 含量在相同土层不同植物群落之间以及在不同土层相同植物群落之间差异性均不显著(P>0.05)，这是因为 TP 主要受土壤风化作用的影响，由于土壤风化过程缓慢，且不同土层中土壤风化程度差异不大，因而随土壤深度的增加 TP 变化差异性不显著(图 3)，这和刘学东等[38]研究结果一致。

土壤 N∶P 是指示植物生长过程中土壤养分供应情况的指标，当土壤 N∶P<14 时，表现为氮素供应不足，影响植被生长[39]。本研究中土壤 N∶P 最大值为 1.45，远低于 14，更低于郭子武等[40](19.37)、胡启武等[41](20.63)、郑艳明等[42](21.30)的研究，这说明该研究区此 3 种植物生长所需的氮元素供应不足，生长受制于氮元素，同时也说明本研究区土壤氮元素相对于其他地区极其匮乏。因此，在该区域改良盐渍化土壤时，应适当增加含氮有机物质。

4 结论

1)研究区土壤属于重盐土类型(含量大于 4.0 g/kg)，在土壤表层(0 ~ 5 cm)TS 含量为柽柳群落>碱蓬群落>芦苇群落。

2)相关分析表明，Cl^-、Na^+ 是构成研究区盐渍化土壤的主要成分。控制或减少氯盐、钠盐投入是一条减轻黄河口湿地土壤盐渍化的合适途径。大多数盐分与养分指标之间呈不显著相关(P>0.05)。

3)研究区土壤养分处于亏缺状态，相对贫瘠，应适当增施有机肥、覆盖有机质含量高的物质。差异显著性检验结果表明，除 TP 外，其余土壤养分在相同土层不同植物群落之间或在不同土层相同植物群落之间均有一定的差异显著性(P<0.05)。

4)随着碱蓬群落向柽柳群落再到芦苇群落的演替，钠吸附比 SAR 依次降低，且可能会在 10 ~ 20 cm 的根层形成毒理层而使植物受到伤害。3 种植物群落土壤 N∶P 均<14，植物生长受制于氮元素，在该区域改良盐渍化土壤时，应适当增加含氮有机物质。

参考文献：

[1] 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[J]. 土壤学报, 2017, 54 (6): 1377–1385.

[2] 郭洋, 陈波浪, 盛建东, 等. 几种一年生盐生植物的吸盐能力[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(1): 269–276.

[3] 阿斯古丽·木萨, 阿不都拉·阿不力孜, 瓦哈甫·哈力克, 等. 新疆克里雅绿洲土壤盐分、pH 和盐基离子空间异质性分析[J]. 土壤, 2017, 49(5): 1007–1014.

[4] Vanita P, Pankaj K P. Spatial and temporal variability of soil moisture[J]. International Journal of Geosciences, 2010, 1(2): 87–98.

[5] 王盼盼, 李艳红, 张小萌. 艾比湖湿地植物群落变化对盐分环境梯度的响应[J]. 生态环境学报, 2015, 24(1): 29–33.

[6] 王卓然, 赵庚星, 高明秀, 等. 黄河三角洲垦利县夏季土壤水盐空间变异及土壤盐分微域特征[J]. 生态学报, 2016, 36(4): 1040–1049.
[7] 王朋飞, 杨思存, 陈英, 等. 基于典范对应分析的河西绿洲灌区土壤盐渍化特征[J]. 甘肃农业大学学报, 2016, 51(4): 92–100.
[8] 刘迁迁, 苏里坦, 刘广明, 等. 新疆伊犁察南灌区土壤盐分特征[J]. 土壤, 2017, 49(5): 1001–1006.
[9] 胡国庆, 刘肖, 何红波, 等. 黄河三角洲不同盐渍化土壤中氨基糖的积累特征[J]. 土壤学报, 2018, 55(2): 390–398.
[10] 张立华, 陈小兵. 盐碱地柽柳“盐岛”和“肥岛”效应及其碳氮磷生态化学计量学特征[J]. 应用生态学报, 2015, 26(3): 653–658.
[11] 郭建荣, 郑聪聪, 李艳迪, 等. NaCl处理对真盐生植物盐地碱蓬根系特征及活力的影响[J]. 植物生理学报, 2017, 53(1): 63–70.
[12] 弋良朋, 王祖伟. 滨海盐渍土壤中不同类型盐生植物富集镉的效应[J]. 生态学报, 2017, 37(14): 1–7.
[13] 李从娟, 孙永强, 范敬龙, 等. 盐地碱蓬在高盐碱土环境中的生态学意义[J]. 干旱区研究, 2015, 32(6): 1160–1166.
[14] 潘洁, 王立艳, 肖辉, 等. 滨海盐碱地不同耐盐草本植物土壤养分动态变化[J]. 中国农学通报, 2015, 31(18): 168–172.
[15] Lesica P, Deluca T H. Is tamarisk allelopathic? Plant soil[J]. Plant and Soil, 2004, 267(1): 357–365.
[16] Ladenburger C G, Hild A L, Kazmer D J, et al. Soil salinity patterns in Tamarix invasions in the Bighorn Basin, Wyoming, USA [J]. Journal of Arid Environments, 2006, 65(1): 111–128.
[17] 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.
[18] 陈友媛, 孙萍, 陈广琳, 等. 滨海区芦苇和香蒲耐盐碱性及除氮磷效果对比研究[J]. 环境科学, 2015, 36(4): 1489–1496.
[19] 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[J]. 水土保持学报, 2010, 24(1): 139–144.
[20] 刘雅辉, 王秀萍, 刘广明, 等. 滨海盐土区 4 种典型耐盐植物盐分离子的积累特征[J]. 土壤, 2017, 49(4): 782–788.
[21] 杜改俊, 李艳红, 张小萌, 等. 艾比湖湿地典型植物群落土壤养分和盐分的空间异质性[J]. 生态环境学报, 2015, 24(8): 1302–1309.
[22] 弋良朋, 马健, 李彦. 荒漠盐生植物根际土壤盐分和养分特征[J]. 生态学报, 2007, 27(9): 3565–3571.
[23] 陈效民, 白冰, 蔡成君, 等. 黄河三角洲海水灌溉对土壤性质的影响研究[J]. 水土保持学报, 2004, 18(1): 19–21.
[24] 杨皓, 胡继伟, 黄先飞, 等. 喀斯特地区金刺梨种植基地土壤肥力研究[J]. 水土保持研究, 2015, 22(3): 50–55.
[25] Han W X, Fang J Y, Guo D L, et al. Leaf nitrogen and phosphorus stoichiometry across 753 terrestrial plant species in China[J]. New Phytologist, 2005, 168: 377–385.
[26] 陈永金, 靖淑慧, 杜婷婷, 等. 滨海湿地原生灌草群落土壤养分与盐分关系[J]. 南水北调与水利科技, 2015, 13(5): 895–900.
[27] 郗金标, 张福锁, 陈阳, 等. 盐生植物根冠区土壤盐分变化的初步研究[J]. 应用生态学报, 2004, 15(1): 53–58.
[28] 尹传华, 董积忠, 石秋梅, 等. 不同生境下盐生灌木盐岛效应的变化及生态学意义[J]. 土壤学报, 2012, 49(2): 289–295.
[29] 张立宾, 徐化凌, 赵庚星. 碱蓬的耐盐能力及其对滨海盐渍土的改良效果[J]. 土壤, 2007, 39(2): 310–313.
[30] 赵振勇, 张科, 王雷, 等. 盐生植物对重盐渍土脱盐效果[J]. 中国沙漠, 2013, 33(5): 1420–1425.
[31] 姚世响, 陈莎莎, 徐栋生, 等. 不同盐胁迫对新疆耐盐植物藜叶片钾、钠元素含量及相关基因表达的影响[J]. 光谱学与光谱分析, 2010, 30(8): 2281–2284.
[32] 张继伟, 赵昕, 陈国雄, 等. 盐胁迫下荒漠植物柠条和油蒿的离子吸收及分配特征[J]. 干旱区资源与环境, 2016, 30(3): 68–73.
[33] 贡璐, 朱美玲, 塔西甫拉提·特依拜, 等. 塔里木盆地南缘旱生芦苇生态特征与水盐因子关系[J]. 生态学报, 2014, 34(10): 2509–2518.
[34] Wang S M, Zhang S M, Zhang J L, et al. Low-affinity Na^+ up take in the halophyte Suaeda maritima[J]. Plant Physiology, 2007,145(2): 559–571.
[35] Flowers T J, Colmer T D. Salinity tolerance in halophytes[J]. New Phytologist, 2008, 179(4): 945–963.
[36] 宋新山, 邓伟, 章光新, 等. 钠吸附比及其在水体碱化特征评价中的应用[J]. 水利学报, 2000, 50(7): 70–76.
[37] 刘景双, 杨继松, 于君宝, 等. 三江平原沼泽湿地土壤有机碳的垂直分布特征研究[J]. 水土保持学报, 2003, 17(3): 5–8.
[38] 刘学东, 陈林, 杨新国, 等. 白刺沙堆周围土壤理化性状的空间分布特征[J]. 北方园艺, 2016(10): 158–163
[39] 叶春, 蒲玉琳, 张世熔, 等. 湿地退化条件下土壤碳氮磷储量与生态化学计量变化特征[J]. 水土保持学报, 2016, 30(6): 181–187.
[40] 郭子武, 陈双林, 杨清平, 等. 密度对四季竹叶 C、N、P 化学计量和养分重吸收特征的影响[J]. 应用生态学报, 2013, 24(4): 893–899.
[41] 胡启武, 聂兰琴, 郑艳明, 等. 沙化程度和林龄对湿地松叶片及林下土 C、N、P 化学计量特征影响[J]. 生态学报, 2014, 34(9): 2246–2255.
[42] 郑艳明, 尧波, 吴琴, 等. 鄱阳湖湿地两种优势植物叶片 C、N、P 动态特征[J]. 生态学报, 2013, 33(20): 6488–6496.