

滨海湿地原生灌草群落土壤养分与盐分关系

陈永金, 靖淑慧, 杜婷婷, 刘加珍, 徐梦辰, 刘亚琦

(聊城大学 环境与规划学院, 山东 聊城 252059)

摘要: 通过灌草群落划分、土壤采样以及室内测定、数理统计等方法, 分析了黄河三角洲原生湿地灌草群落土壤的养分、盐分分布特征及相互关系, 发现原生灌草群落土壤可溶性盐的垂直分布变异性较大, 其中, 碱蓬群落与柽柳群落土壤可溶性盐分布具有较强的表聚性, 而土壤有机质含量表现为芦苇群落> 柽柳群落> 碱蓬群落, 且灌草群落中土壤 C/N 值都大于 5, 表明其有机质腐殖化程度较高。另一方面, 土壤全氮与有机质存在明显的线性正相关; 而土壤全盐与有机质、全氮之间存在明显的倒数关系, 表明全盐对二者的制约作用, 其中 15~20 g/kg 的土壤盐分范围对应的是土壤全氮、有机质由迅速减少向缓慢减少的变化趋势。研究结果可以为盐碱土改良提供重要参考。

关键词: 黄河三角洲; 灌草群落; 土壤盐分; 土壤养分; 分布特征

中图分类号: S153 文献标志码: A 文章编号: 1672-1683(2015)05-0895-06

Relationship between soil nutrient and salinity of native shrub herb communities in the coastal wetland

CHEN Yong jin, JING Shu hui, DU Ting ting, LIU Jia zhen, XU Meng chen, LIU Ya qi

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

Abstract: The distribution characteristics of soil nutrient and soil salinity of native shrub herb communities in the Yellow River Delta wetland and their relationship were investigated using the methods of shrub herb association classification, soil sampling, laboratory analysis, and mathematical statistics. The results showed (1) the vertical variation of soil soluble salt differs significantly, and the distribution of soil salinity of the Suaeda glauca association and Tamarix chinensis association shows the trend of surficial accumulation; (2) the order with high to low of soil organic matter content is Phragmites communis association, Tamarix chinensis association, and Suaeda glauca association; (3) the C/N rate of the shrub herb communities is higher than 5, which suggests high humification degree of soil organic matter; (4) soil total nitrogen has a positive correlation with organic matter, while soil total salinity has an inverse correlation with organic matter and total nitrogen, which indicates the restriction of total salinity on organic matter and total nitrogen; and (5) the soil salinity range from 15 to 20 g/kg corresponds to the transition for the rapid to slow reduction of soil total nitrogen and organic matter. The results can provide reference for the improvement of saline soil.

Key words: Yellow River Delta; shrub herb communities; soil salinity; soil nutrient; distribution characteristics

黄河三角洲是我国暖温带最广阔、最完整、最年轻的湿地生态系统, 因此其不仅关系山东省的区域协调发展, 而且也是国家区域协调发展战略的重要组成部分。不过, 生态环境的脆弱, 尤其是土壤盐渍化严重是该地区面临的主要环境问题。

土壤盐分含量常常影响植物对养分的吸收, 表现出不同地貌单元植被分布特征不同。近几年来, 国内外学者对黄河三角洲盐渍土水盐运移^[1-3]、土壤元素分布及影响因素^[4-5]、植物对盐渍土的生理生态适应^[6-8]、以及环境演变与评价^[9-11]等方面开展了一系列的研究。本文旨在分析原生灌

草群落土壤养分与盐分空间分异的的基础上, 揭示灌草群落中盐分、养分相互作用的机理, 以期对盐碱土的土壤改良及开发利用提供参考依据, 为促进黄河三角洲资源开发与可持续发展的结合提供理论依据。

1 研究方法

本研究区在黄河三角洲入海口大汶流管理站南部(见图1)。按照灌草群落自然植被的不同, 将研究区样地划分为3种植被群落, 分别为碱蓬群落、柽柳群落、芦苇群落。

收稿日期: 2014-08-27 修回日期: 2015-08-11 网络出版时间: 2015-09-24

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20150924.2032.011.html>

基金项目: 国家自然科学基金(40901276); 山东省优秀中青年科学家科研奖励基金(2011BSB01256); 聊城大学创新项目(SF2013142)

作者简介: 陈永金(1968-), 男, 山东兰陵人, 副教授, 主要从事生态水文学方面的研究。E-mail: chen Yongjin@lcu.edu.cn

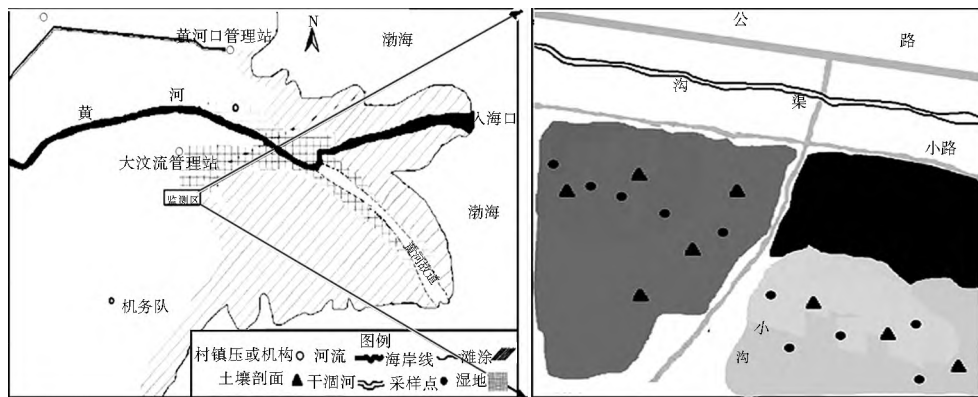


图 1 原生灌草群落土壤表层采样点与土壤剖面分布示意图

Fig. 1 Distribution map of soil profile and surface soil sampling points in the native shrub herb communities

本次研究在碱蓬群丛的采样点有 8 个, 土壤剖面 3 个; 柽柳群丛的采样点 11 个, 土壤剖面 6 个; 芦苇群丛有采样点 8 个, 土壤剖面 2 个。2012 年 10 月, 对每个采样点土壤剖面进行分层采样, 即 0~5 cm、5~10 cm、10~20 cm、20~40 cm、40~60 cm、60~80 cm, 直至地下水位, 并记录了样点周围的植被类型、采样深度以及明显的地貌特征。

样品采回后自然风干, 采用常规的样品处理方法得到土壤浸出液, 分析项目包括: pH 值、全盐、 CO_3^{2-} 、 HCO_3^{2-} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 K^+ 、 Na^+ 、速效磷、全磷、有机质等指标。其中, HCO_3^- 、 CO_3^{2-} 采用双指示剂滴定法, Cl^- 采用硝酸银滴定法, SO_4^{2-} 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 采用 EDTA 容量法, K^+ 、 Na^+ 采用火焰光度法, 土壤中速效磷采用 0.5 mol 碳酸氢钠提取 钼锑抗比色法, 全磷采用高氯酸 硫酸消化法, 土壤有机质采用重铬酸钾加热法; 而 pH 值、电导率则分别采用 PHS 2C 型数字式酸度计、DDSJ 308A 电导率仪测定。

根据野外实测数据与实验室的分析结果, 采用 SPSS17.0 与 Sigmaplot10.0 软件对数据进行统计和相关分析。

2 结果与分析

2.1 灌草群落土壤盐分、养分的分布特征

2.1.1 土壤全盐分布特征

研究区不同群丛下土壤可溶性盐变化范围为 4.51~42.99 g/kg, 属于重盐土类型(含盐量大于 4.0g/kg); 土壤 pH 值在 7.4 至 9.38 之间, 平均值为 8.23, 呈偏碱性; 电导率均值为 4.48 ms/cm(表 1)。全盐、pH 值和电导率三项指标的统计方差分别为 7.76、0.52 和 2.57, 变异系数分别为 0.61、0.06 和 0.57。由以上诸项指标可以看出, 盐分(包括电导率)在不同灌丛间的变化较大, 而酸碱度则相对差异较小。

表 1 灌草群落中可溶性盐的统计

Tab. 1 Statistics of soil soluble salinity in the shrub herb communities

项目	全盐/(g·kg ⁻¹)	pH 值	电导率/(ms·cm ⁻¹)
极小值	4.51	7.40	1.93
极大值	42.99	9.38	11.60
平均值	12.76	8.23	4.48

各层土壤可溶性盐平均值变化范围为 9.08~21.44 g/kg(图 2)。柽柳群丛和碱蓬群丛的 0~10 cm 土壤可溶性

盐明显高于其他各层, 即可溶性盐分布具有较强的表聚性; 而芦苇群丛从 0~10 cm 土壤可溶性盐含量较低, 20~40 cm 处含盐量最高, 40~60 cm 深处全盐含量又开始下降, 原因是其较深的地下水位与较大的植被覆盖度明显地抑制了土壤蒸发, 减少了可溶性盐从土壤深层向地表的积聚。有研究表明, 离海洋越远的地方, 潮沟的影响力越小, 可溶性盐分含量也越低, 反之越大^[12]。土壤可溶性盐含量的高低是植被空间分布的主要限制因素, 群落优势种由盐生植物柽柳最终过度为适盐植物芦苇。

2.1.2 土壤养分分布特征

(1) 有机质分布特征。

黄河三角洲湿地土壤有机质变化范围较大, 为 2.08~19.29 g/kg(表 2), 大部分土壤属于中等以下水平(<20 g/kg)^[13]; 土壤有机质、总氮、有效氮和速效磷差异很大; 有效氮和速效磷的变异系数较高, 分别为 0.65 和 0.66; C/N 与全磷的变异系数最小, 分别为 0.42 和 0.09, 有机质和全氮变异系数分别为 0.48 和 0.53, 处中间位置。土壤养分统计标准差与变异系数比较接近: 全氮、有效氮、全磷、速效磷、有机质以及 C/N 的标准差分别为 0.40、33.76、0.55、1.20、7.30、21.16。

表 2 灌草群落土壤养分的统计特征

Tab. 2 Statistics of soil nutrient in the shrub herb communities

项目类别	全氮 / (g·kg ⁻¹)	有效氮 / (mg·kg ⁻¹)	全磷 / (g·kg ⁻¹)	速效磷 / (mg·kg ⁻¹)	有机质 / (g·kg ⁻¹)	C/N
极小值	0.05	8.23	0.46	0.15	2.08	7.33
极大值	1.11	120.75	0.65	2.98	19.29	50.22
平均值	0.40	33.76	0.55	1.20	7.30	21.16

研究区不同群丛土壤剖面有机质质量分数变化范围为 2.68~10.94 g/kg。不过, 芦苇群丛 0~5 cm 层土壤有机质明显高于其他各层, 其剖面有机质垂直方向上变异较强; 不同群丛在表层土表现为芦苇群丛>柽柳群丛>碱蓬群丛(图 3), 其中芦苇群丛的土壤表层(0~5 cm)有机质质为 19.28 g/kg, 这是由于芦苇群丛的枯枝落叶较多加之芦苇的根系不是很深, 使得有机碳得以在表土层中积累; 碱蓬群丛 0~40 cm 土层有机质随深度的增加呈先下降后上升; 在 60 cm 以下土层中所有群丛的土壤有机质均表现为下降趋势。

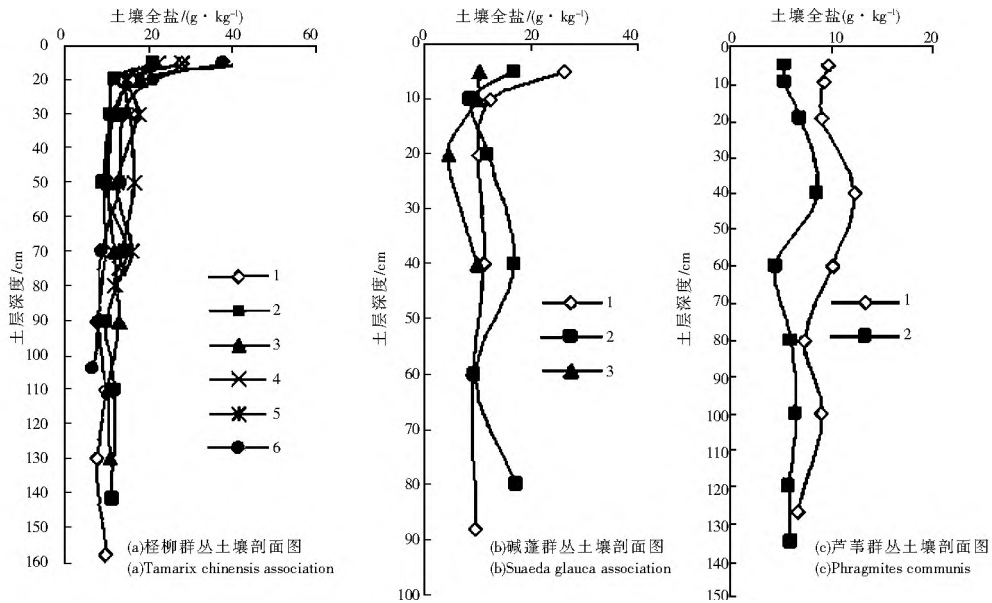


图 2 黄河三角洲湿地三种群丛土壤剖面全盐分布特征

Fig. 2 Distribution characteristics of total salinity of soil profiles in three plant associations

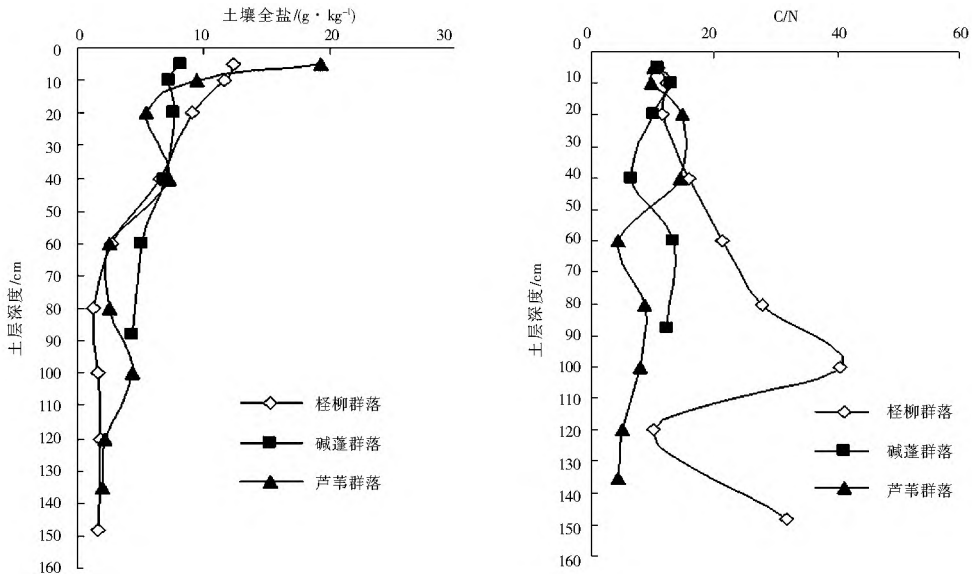


图 3 黄河三角洲湿地灌草群落 C/N 与有机质分布特征

Fig. 3 Distribution characteristic of organic matter and C/N ratio in the shrub herb communities

另外,研究区各群落的土壤 C/N 值都大于 5,表明这些土壤有机质腐殖化程度高。

(2) 氮分布特征。

不同群丛下层土壤全氮含量为 0.37~1.11 g/kg,其中,芦苇群丛与柽柳群丛的生物量和地表凋落物相对较多,利于氮素的累积。在垂直剖面上(图 4),碱蓬群丛与芦苇群丛表现为先下降后上升再下降的趋势,碱蓬群丛土壤全氮最高点都出现在 20~40 cm 深的土层中。研究区土壤中氮主要来源于动植物残体、生物固氮,少量来源于降水,氮的输出主要包括土壤有机质的分解、植物对有效氮的吸收、反硝化作用及通过径流随水流失等过程。由图 3 可知,有效氮在芦苇群丛表土中含量最高,而碱蓬群丛表层土壤中最低。在垂直方向上有效氮与全氮的质量分数表现出极相似的消长趋势(图 4)。

(3) 磷分布特征。

土壤中磷素主要来源于成土母质和动植物残体归还,其含量受土壤类型和气候条件的影响,磷通常以正磷酸盐的形态存在于土壤中。研究区土壤中全磷平均含量在 0.51~0.59 g/kg 之间,变异性不大(图 5),与凌敏等的研究结论一致^[4]。究其原因,是由于磷化学性质相对稳定,且不溶于水,很少受水分运动的影响,因此在土壤中变异较小。

土壤中速效磷含量在不同群丛之间差异明显,碱蓬群丛最高,柽柳群丛次之,芦苇群丛最低。由于植物只能吸收到达根系表面的土壤磷素^[5],碱蓬群落物种少,根系不发达,对磷素利用率低,芦苇群落物种多样性高,植物根系密布,对磷素利用率高,柽柳则处在中间位置。土壤速效磷含量受植物(微生物)、气候、土壤磷素组成及理化性质等因素影响^[6-7],为满足生长过程中对磷的需求,根际微生物会分泌有机酸、磷酸酶及质子等物质,提高土壤速效磷含量^[18-19]。

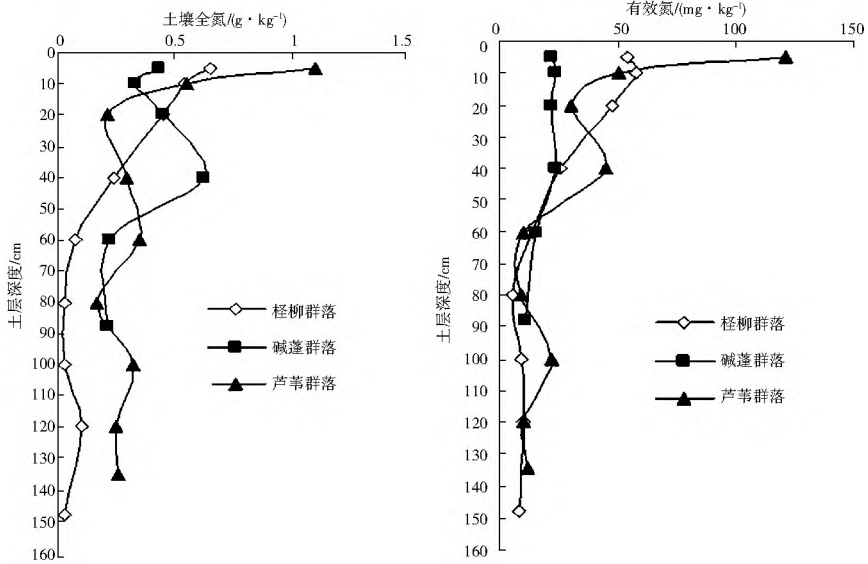


图 4 黄河三角洲湿地不同群丛土壤氮素的垂直分布

Fig. 4 Vertical distribution of soil nitrogen in different plant association

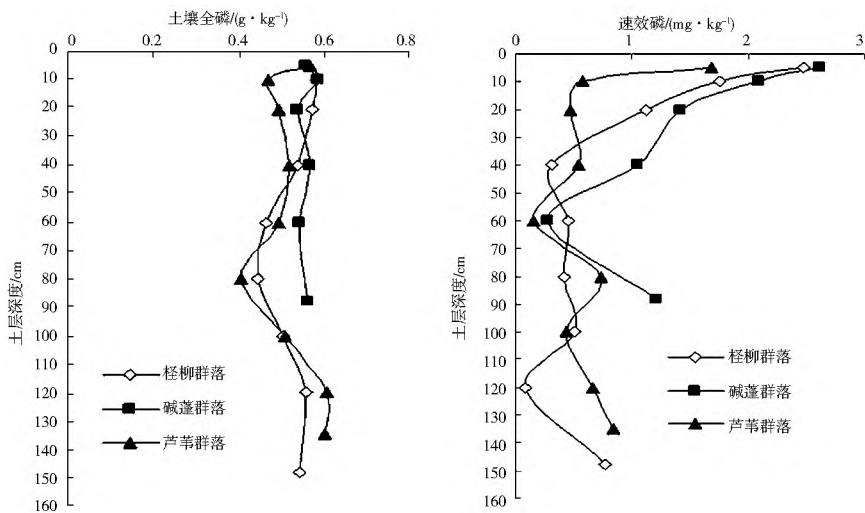


图 5 黄河三角洲不同群丛磷元素垂直分布

Fig. 5 Vertical distribution of soil phosphorus in different plant associations

总的来看, 芦苇群丛土壤中营养元素含量最高, 主要原因是该群丛植物再生产能力强且生物量大, 表层积累大量枯枝落叶, 腐殖化作用明显^[20-21], 营养元素易于积累。而磷的化学性质较为稳定, 各植物群丛表层土壤中全磷含量差异不大。

2.2 土壤可溶性盐与土壤养分的关系

黄河三角洲湿地受南海共同作用的影响, 土壤盐分含量高, 平均值在 5.15~15.89 g/kg, 属于重盐土类型(含盐量大于 4.0 g/kg); 有机质含量平均值在 4.84~7.31 g/kg 之间, 按照全国第二次土壤普查的养分分级标准, 均属极低等水平 (< 20 g/kg); 有效氮的含量平均值在 17.76~42.58 mg/kg, 均属极低等水平 (< 45 mg/kg); 速效磷的含量平均值在 0.57~1.52 mg/kg, 均属极低等水平 (< 15 mg/kg), 因此研究区土壤属于贫瘠的盐渍化土。

表 3 是研究区土壤可溶性盐分与养分的相关性分析, 由表 3 可以看出, 全氮和 K⁺、速效磷和全盐、Na⁺、Cl⁻, 速效钾和 Na⁺, 在 0.05 水平上显著相关; 速效磷和 K⁺ 在 0.01 水平上显著相关。

从图 6 可以看出, 土壤全氮与有机质随盐分含量的增大而逐渐降低, 这充分说明黄河三角洲灌草群落中土壤盐分是影响养分的重要原因之一。回归分析表明表层土壤 (0~5 cm) 全氮、有机质与全盐含量的关系都符合倒数函数关系 (图 6), 土壤有机质含量较高地段的盐分含量较低。

当全盐含量在 0~12 g/kg 范围时, 随着土壤盐分的增加有机质含量迅速减少; 当盐分含量达到 20 g/kg 以上时, 有机质含量随盐分增加而缓慢减少。所以可以认为, 15~20 g/kg 的全盐含量范围是土壤全氮与有机质由迅速减少向缓慢减少的过渡值。

图 6 还显示, 土壤全磷与盐分之间的回归关系不明显, 但土壤全氮与有机质之间具有明显的线性关系。

3 结论

(1) 黄河三角洲湿地不同群丛下土壤可溶性盐变化范围为 4.51~42.99 g/kg, 属于重盐土类型; 土壤可溶性盐的垂直变化差异性较大, 其中, 碱蓬群丛与柽柳群丛土壤可溶性盐分布具有较强的表聚性。

表 3 土壤可溶性盐与土壤养分的相关性

Tab.3 The correlation between soil soluble salinity and soil nutrient

	Na ⁺	Cl ⁻	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	SO ₄ ²⁻	TN	EN	TP	AP	TK	AK	OM
T S	0.679*	0.991*	0.452*	0.630*	0.932*	0.676*	0.023	0.006	0.003	0.433*	0.043	0.123	0.206
Na ⁺	1	0.615*	0.774**	0.031	0.465**	0.397*	0.048	-0.025	0.094	0.433*	0.221	0.461*	0.06
Cl ⁻		1	0.411*	0.648**	0.942**	0.605**	0.032	0.004	-0.015	0.433*	0.017	0.081	0.214
K ⁺			1	-0.207	0.248	0.176	0.382*	0.19	0.249	0.660**	0.088	0.613**	0.252
Ca ²⁺				1	0.716**	0.518**	-0.19	0.023	-0.092	0.042	0.073	-0.36	0.147
Mg ²⁺					1	0.618**	0.005	0.043	-0.028	0.267	-0.066	-0.156	0.204
SO ₄ ²⁻						1	-0.021	0.066	-0.001	0.203	0.104	0.123	0.163
TN							1	0.832**	0.091	0.391*	0.056	0.451*	0.866**
EN								1	0.036	0.25	0.095	0.208	0.924**
TP									1	0.408*	-0.225	0.117	0.042
AP										1	-0.008	0.540**	0.372*
TK											1	0.212	0.152
AK												1	0.312

注: ** 表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关, * 表示在 0.05 水平(双侧)上显著相关。

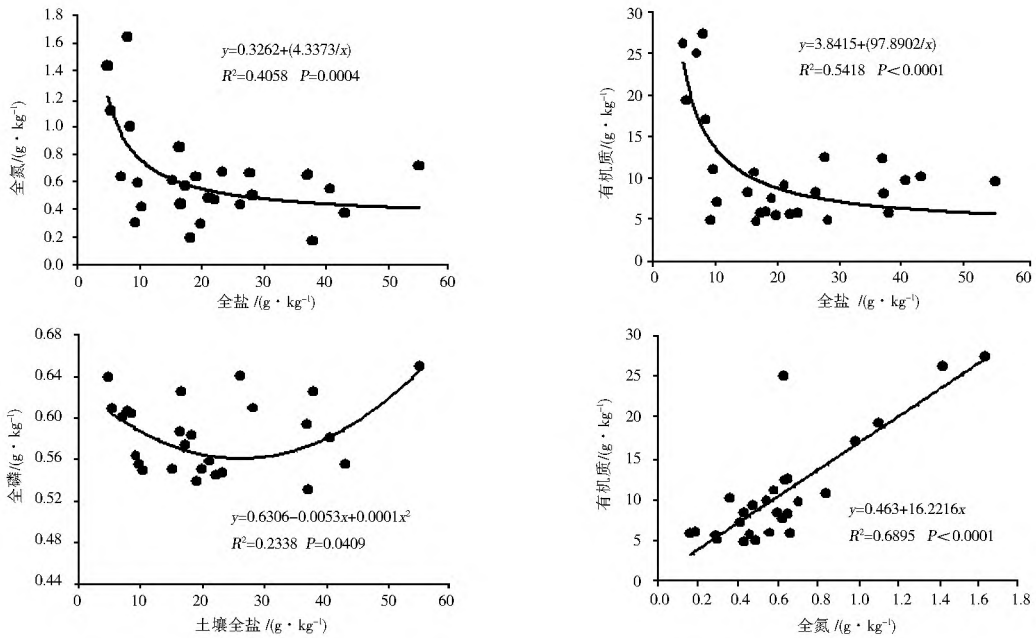


图 6 灌草群落土壤盐分与养分之间的回归关系

Fig.6 Regression analysis of soil salinity and soil nutrient in the

(2) 不同植物群丛下土壤有机质含量差异显著, 其中芦苇群丛下有机质含量最高, 怪柳群丛次之, 碱蓬群丛最低; 各灌草群落中土壤 C/N 值都大于 5, 表明这些土壤有机质腐殖化程度高。

(3) 研究区不同灌丛下土壤盐分与养分之间有一定相关性: 灌草群落表土层的土壤全盐与有机质、全氮之间存在倒数关系, 土壤有机质含量较高地段的盐分含量较低; 15~20 g/kg 的土壤盐分范围是土壤全氮与有机质由迅速减少向缓慢减少的过渡范围。

参考文献(References):

[1] 董海凤, 杜振宇, 马丙尧, 等. 黄河三角洲人工林地土壤的水盐动态变化[J]. 水土保持学报, 2013, 27(5): 48-53. (DONG Hai feng, DU Zherr yu, MA Bing rao, et al. Dynamic changes of wafer and salt in soils of different plantations in the Yellow River Delta[J]. Journal of soil and warer conservation, 2013, 27(5):

48-53. (in Chinese))

[2] 付腾飞, 贾永刚, 刘晓磊, 等. 黄河三角洲滨海盐渍土水盐运移监测研究[J]. 土壤通报, 2012, 43(6): 1342-1347. (FU Teng fei, JIA Yong gang, LIU Xiaolei, et al. Experimental research to monitor The Yellow River delta saline soil water and salt transport[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2012, 43(6): 1342-1347. (in Chinese))

[3] 张蕾娜, 冯永军, 张红等. 滨海盐渍土水盐运移影响因素研究, 山东农业大学学报[J], 2001, 32(1): 55-58. (ZHANG Lei na, FENG Yong jun, ZHANG Hong, et al. Study on the influential factors on degree to water and salt movement of seashore saling soil[J]. Journal of Shandong Agricultural University (Natural Science) 2001, 32(1): 55-58. (in Chinese))

[4] 于家宝, 董洪芳, 王慧彬, 等. 黄河三角洲新生湿地土壤金属元素空间分布特征[J]. 湿地科学, 2011, 9(4): 297-304. (YU Jiaobao, DONG Hongfang, WANG Huibin, et al. Spatial distribution characteristics of metals in new-born coastal wetlands in

- the Yellow River Delta[J]. *Wetland Science*, 2011, 9(4): 297-304. (in Chinese)
- [5] 王丰川, 刘加珍, 陈永金. 黄河三角洲湿地土壤呼吸及其环境因子分析[J]. *人民黄河*, 2013, 35(1): 81-84. (WANG Fengchuan, LIU Jiachen, CHEN Yongjin, et al. Yellow River Delta wetland soil respiration and the environmental factor analysis[J]. *Yellow River*, 2013, 35(1): 81-84. (in Chinese))
- [6] 张华兵, 刘红玉, 玉凤, 等. 自然条件下盐城滨海湿地土壤水分盐度空间分异及其与植被关系研究[J]. *环境科学*, 2013, 34(2): 540-546. (ZHANG Huabing, LIU Hongyu, LI Yufeng, et al. Spatial variation of soil moisture / salinity and the relationship with vegetation under natural conditions in Yancheng Coastal Wetland[J]. *Environmental Science*, 2013, 34(2): 540-546. (in Chinese))
- [7] 管博, 于君宝, 陆兆华, 等. 黄河三角洲滨海湿地水盐胁迫对盐地碱蓬幼苗生长和抗氧化酶活性的影响[J]. *环境科学*, 2011, 32(8): 2422-2429. (GUAN Bo, YU Junbao, LU Zhaohua, et al. Effects of water-salt stresses on seedling growth and activities of antioxidative enzyme of Suaeda salsa in coastal wetlands of the Yellow River Delta[J]. *Environmental Science*, 2011, 32(8): 2422-2429. (in Chinese))
- [8] 安乐生, 赵全升, 叶思源, 等. 黄河三角洲地下水关键水盐因子及其植被效应[J]. *水科学进展*, 2011, 22(5): 689-695. (AN Lesheng, ZHAO Quansheng, YE Siyuan, et al. Water salt interactions factors and vegetation effects in the groundwater ecosystem in Yellow River Delta[J]. *Advances in Water Science*, 2011, 22(5): 689-695. (in Chinese))
- [9] 陈爽, 杨国范. 改进的 AHP 在黄河三角洲湿地生态环境质量评价中的应用[J]. *南水北调与水利科技*, 2011, 9(1): 99-101. (CHEN Shuang, YANG Guofan. Ecological quality appraisal of Yellow River Delta wetland using the improved AHP method[J]. *South to North Water Diversion and Water Science & Technology*, 2011, 9(1): 99-101. (in Chinese))
- [10] 杨劲松, 姚荣江. 黄河三角洲地区土壤水盐空间变异特征研究[J]. *地理科学*, 2007, 27(3): 21-30. (YANG Jingsong, YAO Rongjiang. Spatial variability of soil water and salt characteristics in the Yellow River Delta[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2007, 27(3): 21-30. (in Chinese))
- [11] 杨明, 张治昊, 杨晓阳. 黄河口新口门水下三角洲演变特征[J]. *南水北调与水利科技*, 2011, 9(3): 43-48. (YANG Ming, ZHANG Zhihao, YANG Xiaoyang. Evolution characteristics of underwater delta near the new mouth of the Yellow River Estuary[J]. *South to North Water Diversion and Water Science & Technology*, 2011, 9(3): 43-48. (in Chinese))
- [12] 陈海霞, 付为国, 王守才, 等. 镇江市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 Haixia, FU Weiguo, WANG Shoucai, 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. (in Chinese))
- [13] 叶志刚, 葛建军, 周俊, 等. 安徽省亳州市耕地土壤养分状况调查[J]. *农技服务*, 2007, 24(3): 38-39. (YE Zhigang, GE Jianjun, ZHOU Jun, et al. Investigation on condition of soil nutrient of cultivated land in Bozhou city, Anhui Province[J]. *Agricultural Technology Service*, 2007, 24(3): 38-39. (in Chinese))
- [14] 凌敏, 刘汝海, 王艳, 等. 黄河三角洲柽柳林场湿地土壤养分的空间异质性及其与植物群落分布的耦合关系[J]. *湿地科学*, 2010, 8(1): 92-97. (LING Min, LIU Rurhai, WANG Yan, et al. Spatial heterogeneity of soil nutrients and the relationship between soil nutrients and plant community in tamarix chinensis forest farm wetland of Yellow River Delta Wetland[J]. *Wetland science*, 2010, 8(1): 92-97. (in Chinese))
- [15] 马祥庆, 梁霞. 植物高效利用磷机制的研究进展[J]. *应用生态学报*, 2004, 15(4): 7135-7166. (MA Qingxiang, LIANG Xia. Research advances in mechanism of high phosphorus use efficiency of plants[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(4): 7135-7166. (in Chinese))
- [16] Rydin E, Malmaeus J, Karlsson O, et al. 2011. Phosphorus release from coastal Baltic Sea sediments as estimated from sediment profiles[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 92: 111-117.
- [17] Xiao R, Bai JH, Gao HF, et al. Spatial distribution of phosphorus of a typical land/inland water ecotone along a hydrological gradient[J]. *Catena*, 2012, 98: 96-103.
- [18] 罗先香, 敦萌, 闫琴. 黄河口湿地土壤磷素动态分布特征及影响因素[J]. *水土保持学报*, 2011, 25(5): 154-160. (LUO Xiexiang, DUN Min, YAN Qin. Dynamic distribution and influence factors of soil phosphorus in Yellow River Estuary Wetland[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2011, 25(5): 154-160. (in Chinese))
- [19] 黄敏, 吴金水, 黄巧云, 等. 土壤磷素微生物作用的研究进展[J]. *生态环境*, 2003, 12(3): 366-370. (HUANG Min, WU Jinshui, HUANG Qiaoyun, et al. Process in research on microbiological action of soil phosphorus[J]. *Ecology and Environment*, 2003, 12(3): 366-370. (in Chinese))
- [20] 樊后保, 袁颖红, 王强, 等. 氮沉降对杉木人工林土壤有机碳和全氮的影响[J]. *福建林学院学报*, 2007, 27(1): 1-6. (FAN Houbao, YUAN Yinghong, WANG Qian, et al. Effects of nitrogen deposition on soil organic carbon and total nitrogen beneath Chinese fir plantations[J]. *Journal of Fujian College of Forestry* 2007, 27(1): 1-6. (in Chinese))
- [21] 王岩, 陈永金, 刘加珍, 黄河三角洲湿地植被空间分布对土壤环境的响应[J]. *东北林业大学学报*, 2013, 41(9): 59-62. (WANG Yan, CHEN Yongjin, LIU Jiachen. Relationship between spatial distribution of wetland vegetation and soil environmental factors in the Yellow River Delta[J]. *Journal of northeast forestry university*, 2013, 41(9): 59-62. (in Chinese))