

双台子河口湿地不同植物群落土壤营养元素及含盐量研究

宋晓林^{1,2}, 吕宪国^{1*}, 张仲胜^{1,2}, 陈志科³, 刘正茂³

(1. 中国科学院东北地理与农业生态研究所湿地生态与环境重点实验室, 长春 130012; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049; 3. 黑龙江农垦勘测设计研究院, 哈尔滨 150090)

摘要: 采用时空互代法, 选择辽宁双台子河口湿地中芦苇 (*Phragmites australis* (Clav.) Trin.)、香蒲 (*Typha orientalis* Presl.)、碱茅 (*Puccinellia distans* Parl) 和碱蓬 (*Suaeda salsa*) 4 种群落, 研究了不同植物群落土壤中营养元素和含盐量分布特征, 探讨了河口湿地植被演替过程中营养元素的变化规律. 结果表明, 不同植物群落土壤中全钾、全磷、含盐量存在显著性差异, 而速效磷、全氮、速效氮、速效钾、全硫、全铁和有机质含量不存在显著性差异. 相关性分析表明, 有机质含量与全氮、速效磷、速效钾显著或极显著相关, 植物残体分解可能是土壤中氮及有效养分的主要来源; 土壤含盐量与全磷、全铁含量呈显著正相关关系. 双台子河口湿地土壤中碳氮比 ($R_{C/N}$) 变化范围为 12.21 ~ 26.33, 平均为 18.21, 表明双台子河口湿地土壤中的有机质主要为“陆源”而非“海源”, 河口湿地植物群落对河口区土壤中有有机质具有重要贡献. 4 种植物群落土壤碳氮比不存在显著性差异 ($F = 1.890$, $p = 0.151$). 土壤碳氮比与土壤含盐量显著相关 ($r = 0.3463$, $p = 0.0358$), 随着土壤含盐量的增加, 土壤中的碳氮比升高.

关键词: 河口湿地; 植物群落; 营养元素; 含盐量; 碳氮比

中图分类号: X173; X131.3 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2011)09-2632-07

Study on Nutrient and Salinity in Soil Covered with Different Vegetations in Shuangtaizi Estuarine Wetlands

SONG Xiao-lin^{1,2}, LÜ Xian-guo¹, ZHANG Zhong-sheng^{1,2}, CHEN Zhi-ke³, LIU Zheng-mao³

(1. Key Laboratory of Wetland Ecology and Environment, Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130012, China; 2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Heilongjiang Agricultural Reclamation Survey, Design and Research Institute, Harbin 150090, China)

Abstract: Nutrient elements and salinity in soil covered by different vegetations including *Phragmites australis* (Clav.) Trin., *Typha orientalis* Presl., *Puccinellia distans* Parl, and *Suaeda salsa* in Shuangtaizi estuarine wetlands were investigated to study their distribution characteristics and to reveal the nutrient element variation during the vegetation succession processes. Results indicated that total potassium, total phosphorus and salinity were different significantly in soil between different plant communities while available phosphorus, total nitrogen, available nitrogen, available potassium, total sulfur, iron and soil organic carbon were different insignificantly. Correlation analysis suggested that soil organic carbon were related significantly to total nitrogen, available phosphorus, available potassium, which implied that decomposition of plant litter might be the mail source of soil nitrogen and available nutrient. Salinity was significantly related to total phosphorus and iron in soil. In Shuangtaizi estuarine wetland soil, ratios of carbon to nitrogen ($R_{C/N}$) was in the range of 12.21-26.33 and the average value was 18.21, which was higher than 12.0. It indicated that soil organic carbon in Shuangtaizi estuarine mainly came from land but not ocean and plants contributed the most of soil organic matters. There was no significant difference in $R_{C/N}$ between soil from the four plant communities ($F = 1.890$, $p = 0.151$). $R_{C/N}$ was related significantly to sol salinity ($r = 0.3463$, $p = 0.0358$) and was increasing with soil salinity.

Key words: estuarine wetlands; vegetation communities; soil nutrient; salinity; carbon and nitrogen ratio

河口湿地 (estuarine wetlands) 位于河流生态系统和海洋生态系统之间, 是海陆相互作用的重要场所^[1,2]. 由于陆源和海源物质在河口湿地处不断交汇、堆积, 导致河口湿地成为物质循环的源、汇和转换器, 具有独特的水文、土壤、植被及元素生物地球化学循环过程^[3~5].

土壤中元素的含量及分布特征在不同时空尺度上受到多方面因素的影响, 如成土母质、气候条

件、水文地貌及生物因素^[6,7]. 在相同的母质、气候及相似的地貌条件下, 地表覆被状况及植物类型对土壤中元素的分布特征起支配作用^[8~10]. 如土壤中

收稿日期: 2010-09-25; 修订日期: 2011-04-08
基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2008ZX07208-009)
作者简介: 宋晓林 (1982 ~), 女, 博士研究生, 主要研究方向为湿地水文过程, E-mail: songxiaolin02@126.com
* 通讯联系人, E-mail: luxg@neigae.ac.cn

Ca 含量受植被影响最大,而 Fe、K 在土壤中的分布受植被类型影响最小^[11]. 河口湿地中,植被的演替会导致土壤中营养元素分布特征变化,如黄河三角洲中沿着植被演替方向,土壤总氮含量呈现增加的趋势,而全磷与有效磷则变化不大^[12].

目前国内外对湿地生态系统中土壤元素的含量及分布规律已经有一些研究,但是主要集中在单一湿地植被类型中营养元素的空间分布特征方面,探讨元素在湿地土壤-植物系统中的生物地球化学循环过程,而且研究较多的主要为沼泽湿地^[13-15]. 此外,也有部分学者从土壤发育的角度,综合水文地貌学与元素地球化学的理论与方法,研究沼泽形成或者不同脱沼泽阶段土壤的潜育化、潜育化及白浆化过程,关注土壤剖面中铁锰元素的淋溶、运移及再沉淀规律^[16]. 相比较而言,关于河口湿地中植物群落演替过程中土壤元素的含量及变化特征研究并不多. 河口区土壤中水盐梯度是决定植物群落分布的主要环境因子^[17],然而在由半盐生植被转变为盐生植被过程中,土壤中营养元素如何变化鲜有报道. 本研究采用时空互代法,通过选择河口湿地 4 种不同植物群落,分析了半盐生植物群落演变为盐生植物群落过程中土壤营养元素含量的变化,以期为正确认识河口湿地植被演替过程中元素的运移规律提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

双台子河口湿地位于辽宁省盘锦市境内,辽河三角洲的最南端、双台子河入海口处,主要范围在双台子河口国家级自然保护区内. 区域内植物主要有碱茅、湿地碱蓬、芦苇、香蒲、三棱草 (*Carex phacota* Spr.) 等. 属暖温带季风气候,年平均气温 9.2°C ^[18]. 年平均降水 $611.6 \sim 640.1 \text{ mm}$,主要集中在夏季,占全年降水量的 63%^[19]. 海拔高度 3.5 m ,土壤为滨海氯化物盐渍土^[20].

1.2 样品采集

2008 年 10 月,按照典型性和代表性的原则,在双台子河口湿地选择人类活动干扰较少的地区,设置 37 个 $6 \text{ m} \times 6 \text{ m}$ 的单优植物群落样地,包括碱茅群落样地 8 个、碱蓬群落样地 16 个、芦苇群落样地 8 个、香蒲群落样地 5 个(图 1). 在每一样地内同时随机采集 3~4 个表层 ($0 \sim 25 \text{ cm}$) 土壤样品进行混合,采用聚乙烯塑料袋密封标号后带回实验室,室温下自然风干,拣去石块、植物残根等杂物,

碾磨过 80 目尼龙筛,密封保存于封口袋中待测.

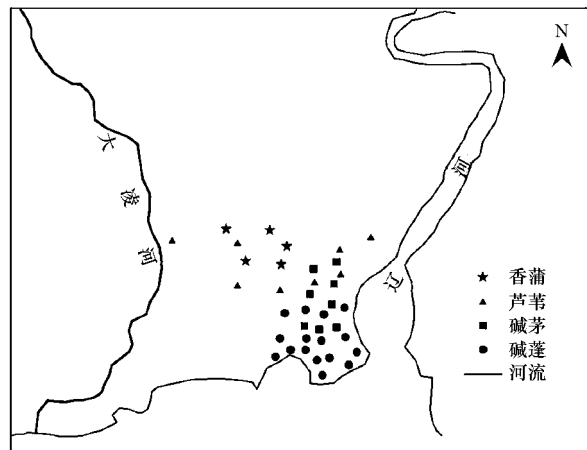


图 1 采样点示意

Fig. 1 Sample sites

1.3 元素分析

土壤全氮测定采用凯氏定氮法. 土壤样品用 $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-HClO}_4$ 消解后,使用分光光度计测定全磷含量,原子吸收光谱仪测定全钾;速效氮采用 KCl 溶液提取,连续流动分析仪测定;速效磷采用 $0.5 \text{ mol/L NaHCO}_3$ 提取,钼锑抗比色法测定;速效钾采用 $1.0 \text{ mol/L NH}_4\text{Ac}$ 溶液提取,使用火焰光度法测定. 土壤有机质采用重铬酸钾氧化-滴定法测定,总硫采用硫酸钡比浊法测定;全铁采用原子吸收分光光度法测定;含盐量采用电导率仪测定(土:水 = 1:5). 所有测试工作由中国科学院东北地理与农业生态研究所分析测试部完成.

1.4 数据处理

采用 Arcgis 9.2 软件绘制采样点图. 数据处理采用 SPSS 13.0 软件中 Q-Q 图分析数据是否符合正态分布,采用多重方差比较分析 (Duncan's) 数据间的差异,相关分析采用 Pearson 相关系数,差异显著水平为 $p < 0.05$.

2 结果与分析

2.1 土壤有机质含量和盐分含量

数据分析表明,所测得的 10 种指标数据均不符合正态分布,因此将数据通过自然对数转换后进行统计分析. 结果表明 4 种植物群落土壤有机质不存在显著性差异 ($F = 1.148, p = 0.344$),土壤含盐量存在极显著差异 ($F = 9.400, p < 0.001$),碱茅和碱蓬群落土壤中含盐量显著高于芦苇和香蒲群落(图 2). 碱茅与碱蓬是典型的盐生植物,主要生长

在河流入海口处，涨潮时潮水可以直接进入碱茅与碱蓬群落中，潮水带来的大量盐分在土壤中累积造成土壤中盐分含量很高。芦苇与香蒲为淡水生或半

盐生植物，在土壤盐分含量过高时就会死亡。碱茅与碱蓬群落土壤中含盐量约为芦苇或香蒲群落土壤中含盐量的 2~3 倍。

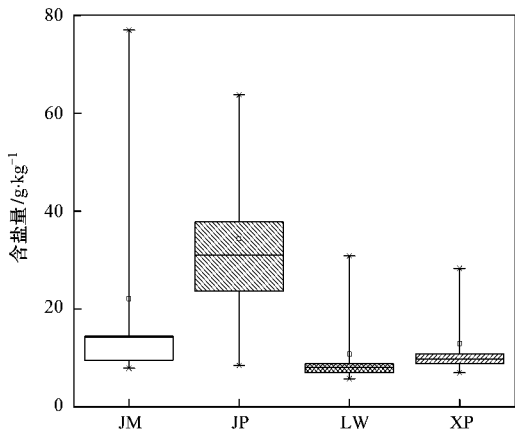
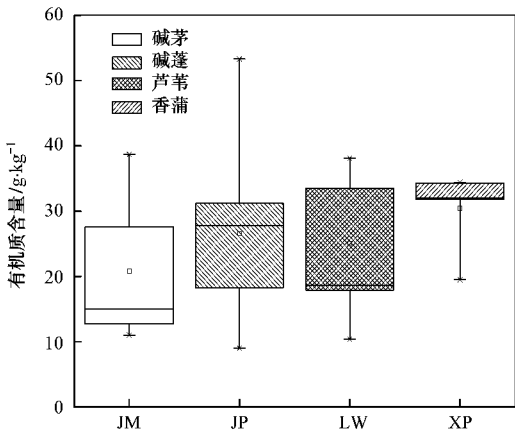


图 2 不同植物群落土壤有机质含量与含盐量
Fig. 2 Organic matter and salt contents in soil with different plant cover

2.2 土壤氮磷钾含量

从图 3 中可以看出，土壤中全氮含量为香蒲 > 碱蓬 > 芦苇 > 碱茅，4 种植物群落土壤中全氮含量不存在显著性差异 ($F = 1.419, p = 0.255$)。当土壤成土母质、气候条件、水文地貌特征相同或相似的情况下，土壤中氮素含量受到植被覆盖、植物残体输入量以及植被类型的影响^[21]，土壤中大部分是有机态氮（约占全氮的 85%~95%），这些有机态氮只有通过氮素的矿化作用转变为非有机态氮才能被植物所吸收利用^[22,23]。4 种植物群落土壤中有效态氮含量大小为芦苇 > 香蒲 > 碱茅 > 碱蓬，说明芦苇群落土壤中有机态氮的矿化速率较高。

全磷在 4 种植物群落土壤均差异显著 ($F = 5.848, p = 0.003$)。碱蓬群落土壤中全磷含量最高，平均为 $(624.56 \pm 94.66) \text{ mg/kg}$ 。土壤中磷的自然输入主要有岩石矿物风化、大气沉降以及地表径流 3 种，在较长的时间尺度上，母岩的类型、组成等地球化学因素对磷的生物循环起控制作用^[11]，碱蓬群落土壤中高的全磷含量可能与海水不断冲刷碱蓬群落土壤，海水中的磷酸盐等盐分被截留在土壤中并不断累积有关。

4 种植物群落土壤中全钾含量存在显著性差异 ($F = 3.420, p = 0.028$)，其中芦苇群落土壤中全钾含量明显高于其它 3 种植物群落。4 种植物群落土壤中速效钾含量差异不大，速效钾主要是指土壤胶体表面负电荷所吸附的钾，能够用醋酸铵、氯化镁、氯化钠或者氯化钙之类的盐溶液提取。土壤中

速效钾含量较低，约占土壤全钾量的 0.1%~2%^[24,25]。速效钾受植物根系影响较大。植物在生长过程中，根系分泌的低分子量有机酸，如柠檬酸、草酸、酒石酸、苹果酸等，均可以有效加快土壤中矿物钾的释放^[26,27]，这可能是造成这 4 种植物群落中速效钾含量差异不大的主要原因。

2.3 土壤铁和硫含量

铁是构成土壤氧化还原体系最基本的变价元素之一，在土壤中的含量仅次于氧、硅、铝，对土壤的物理化学性质产生深刻影响。土壤中的铁主要赋存于硅酸盐、铝硅酸盐、碳酸盐、硫酸盐、氧化物和硫化物之中，水文情势的变化对土壤中铁影响较大，而植被对铁影响较小^[28]。如图 4 所示，不同植物群落下土壤中总铁含量不存在显著差异 ($F = 0.774, p = 0.517$)。不同植物群落土壤中总硫含量差异不大 ($F = 1.851, p = 0.157$)。土壤中硫元素环境行为较为复杂，容易受到干湿沉降的影响^[29]。

2.4 土壤元素含量相关性分析

从表 1 可以看出，有机质含量与全氮、速效磷、速效钾显著或极显著相关，这表明它们有相似的来源。植物残体分解释放出来的氮、磷、钾可能是本地区土壤中有效养分的主要来源。土壤中全铁含量与全氮、速效氮、有机质、速效磷、速效钾含量均呈显著正相关关系。含盐量与全磷、全硫含量显著正相关，与速效钾显著负相关，这表明导致土壤中盐分含量升高的盐基阴离子可能主要是 SO_4^{2-} 与 PO_4^{3-} ，这也与碱蓬群落土壤中相对较高的全硫含量

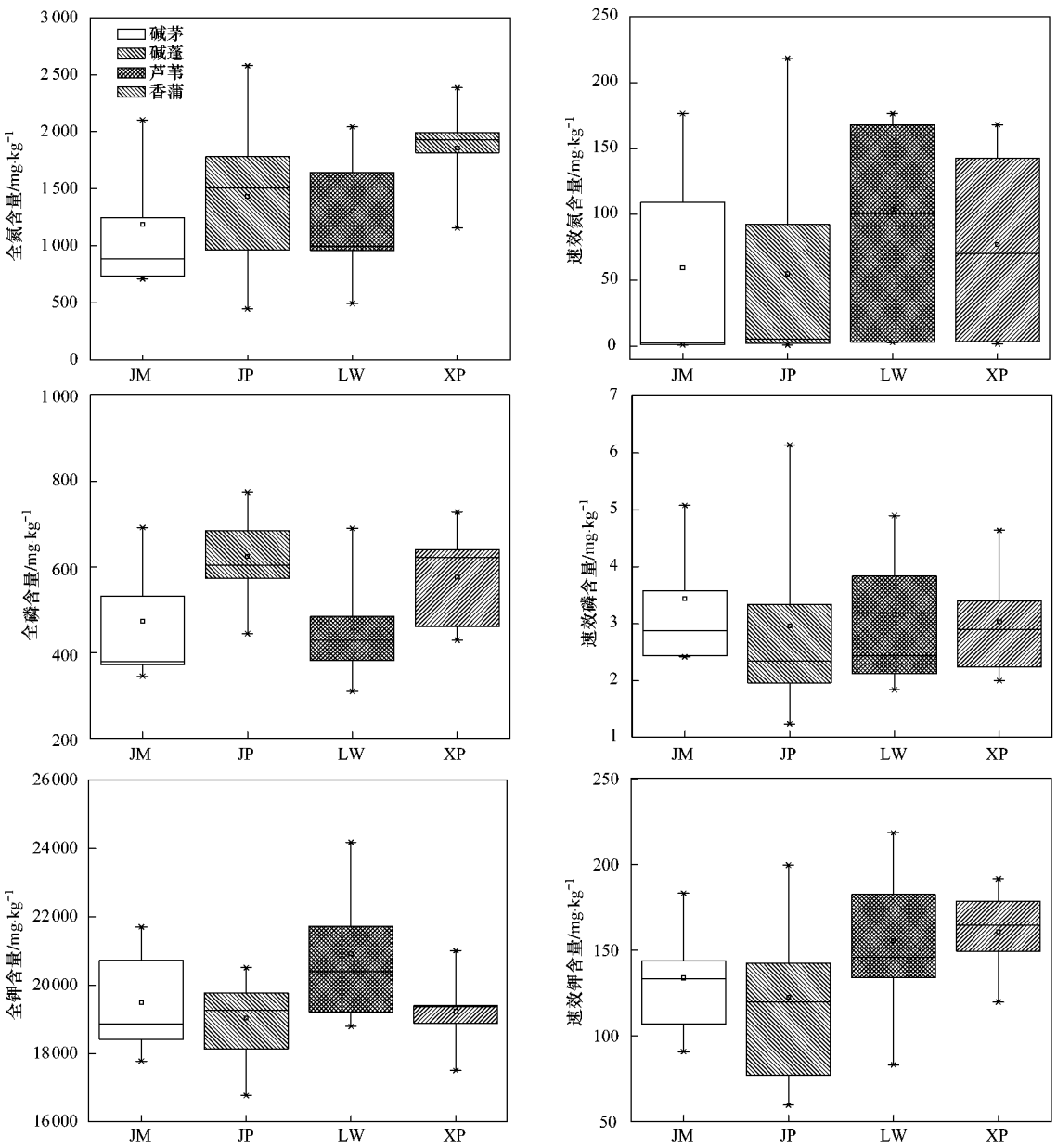


图 3 不同植物群落土壤中营养元素含量

Fig. 3 Nutrient elements contents in soil with different plant cover

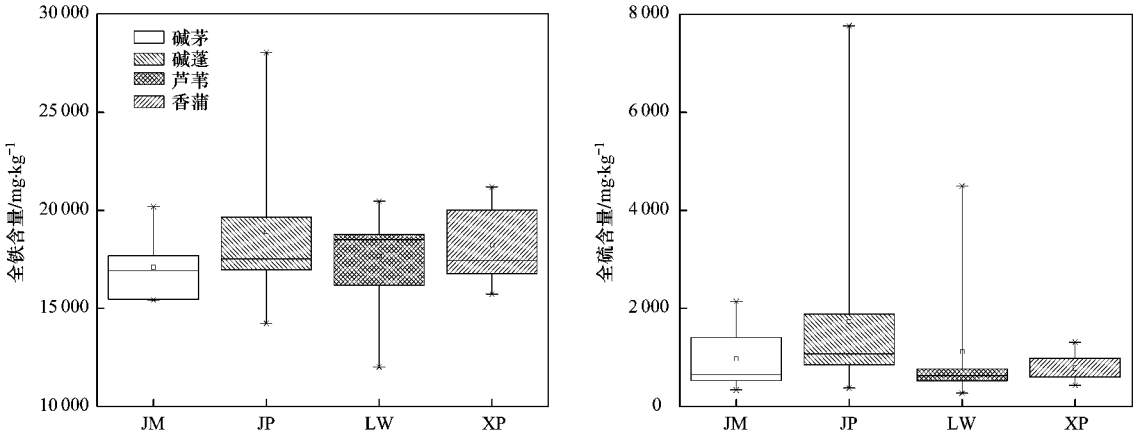


图 4 不同植物群落土壤中全铁和全硫含量

Fig. 4 Total iron and sulfate contents in soil with different plant cover

表 1 土壤元素相关性分析¹⁾

Table 1 Correlation analysis of elements in soil

	全氮	速效氮	有机质	速效磷	速效钾	全磷	全硫	全钾	全铁	含盐量
全氮	1.0									
速效氮	0.146	1.0								
有机质	0.55**	0.248	1.0							
速效磷	0.419**	0.425**	0.431*	1.0						
速效钾	0.665**	0.283	0.604**	0.46**	1.0					
全磷	0.366*	-0.207	0.322	0.024	0.024	1.0				
全硫	-0.260	-0.174	-0.219	-0.152	-0.354*	0.498**	1.0			
全钾	-0.190	0.360*	-0.154	0.62	0.190	-0.124	0.082	1.0		
全铁	0.471**	0.368**	0.509**	0.473**	0.550**	0.162	-0.191	0.016	1.0	
含盐量	0.015	-0.028	0.080	-0.045	-0.325*	0.486**	0.615**	-0.295	0.196	1.0

1) *表示 $p < 0.05$; **表示 $p < 0.01$

与全磷含量相一致。

3 讨论

由于植物对营养元素的吸收、积累、分解和释放作用，生态系统中养分的分布与植物状况关系密

切^[30]。不同湿地植物对养分的吸收与归还能力是决定土壤养分水平及分布的关键因素^[31,32]。双台子河口湿地不同植被的分布状况是植物适应不同盐分阈值的体现^[17]。总体上同其他湿地生态系统相比，双台子河口湿地中营养元素含量处于较低的水平(表 2)。

表 2 不同湿地土壤中营养元素含量

Table 2 Nutrient elements contents in different wetland soil

湿地类型	全氮 /mg·kg ⁻¹	全磷 /mg·kg ⁻¹	全钾 /mg·kg ⁻¹	有机质 /%	全硫 /mg·kg ⁻¹	全铁 /mg·kg ⁻¹	文献
沼泽湿地(三江平原)	17 030 ~ 19 780	1 987 ~ 2 064			520 ~ 1 219		[33 ~ 35]
高原湿地(云南纳帕海)	1 640 ~ 2 830			3.14			[36,37]
内陆盐沼(向海)	1 400					700	[38,39]
滨海湿地(双台子河口)	1 411	549	19 572	2.6	1 309	18 168	本研究
滨海湿地(黄河三角洲)	258 ~ 698	450 ~ 534				259 ~ 490	[40]
Swamp in the southeastern United States	10 800	688		11.9			[41]
Freshwaterwetland in Keoladeo National Park, India	7 000						[42]

土壤碳氮比($R_{C/N}$)可以表征土壤有机质在分解过程中的碳氮转化关系，并可用来表征河口区土壤中有有机物为“陆源”还是“海源”^[43]。微生物在土壤有机质分解过程中起主导作用，当 $R_{C/N}$ 为 25:1 时，土壤微生物介导的氮矿化和固定达到平衡，如果 $R_{C/N}$ 低于 25:1，则表明土壤有机质的腐殖化程度高，微生物对有机质分解作用强烈，有机氮更容易矿化；反之则发生微生物对营养物质的固定^[3]。由表 3 可以发现，4 种植物群落 $R_{C/N}$ 均处于较低的水平，变化范围为 12.21 ~ 26.33，平均为 18.21 相比碱茅、碱蓬和芦苇群落，香蒲群落 1 a 大部分时间处于淹水状态，植物残体的分解作用比其他 3 种植物群落要弱。辽河口湿地不同植物群落 $R_{C/N}$ 高于长江口盐沼湿地上层土的碳氮比(6 ~ 11)和东海沉积物中的碳氮比(春季 7.63，秋季 15.23)^[44]，也高于欧洲和北美滨海湿地

表层土壤的碳氮比(7 ~ 19)^[45]。河口区不同植物群落由半盐生转变为盐生群落的过程中，土壤 $R_{C/N}$ 不断升高，这可能是由于土壤中盐分的增加及水位的增加^[46]，抑制了土壤微生物的活动，导致有机质分解速度变慢，发生累积。

Milliman 等^[43]认为，当土壤碳氮比 > 12 时，有机质主要为陆源有机物，当碳氮比 < 8 时则主要为海源有机物。双台河口区土壤中碳氮比均大于 12，表明有机质主要为陆源，这与 Milliman 等对冬季长江口有机物来源的研究结果相一致，说明河口湿地植物群落由半盐生演变为盐生之后，土壤中有机质依然主要源于陆生植物。

河口三角洲湿地生态系统形成和发育的关键制约因素除了与一般内陆湿地生态系统共有的水分因子之外，另一个关键制约因素就是由距海远近、海

表 3 不同植物群落下土壤碳氮比¹⁾

Table 3 Ratios of carbon to nitrogen in soil under different plant cover

项目	碱茅	碱蓬	芦苇	香蒲
碳氮比	12. 21 ~ 22. 16 (17. 40)	14. 25 ~ 26. 33 (19. 59)	18. 02 ~ 21. 07 (19. 21)	14. 41 ~ 17. 75 (16. 51)

1) 括号内数字为平均值

拔高低以及微地貌等所决定的土壤盐分因子。土壤盐分是影响河口三角洲盐沼湿地中植被地带性分布的关键因子之一^[16]。本研究,土壤含盐量与土壤碳氮比显著正相关($r=0.3463$, $p=0.0358$)。随着土壤含盐量的增加,土壤碳氮比也逐步升高(图 5),这可能是由于土壤含盐量的升高,植物群落的组成由芦苇等半盐生植物转变为碱茅、碱蓬等盐生植物。碱蓬的肉质化叶片同芦苇的纤维化叶片相比更容易分解并向土壤中释放养分。

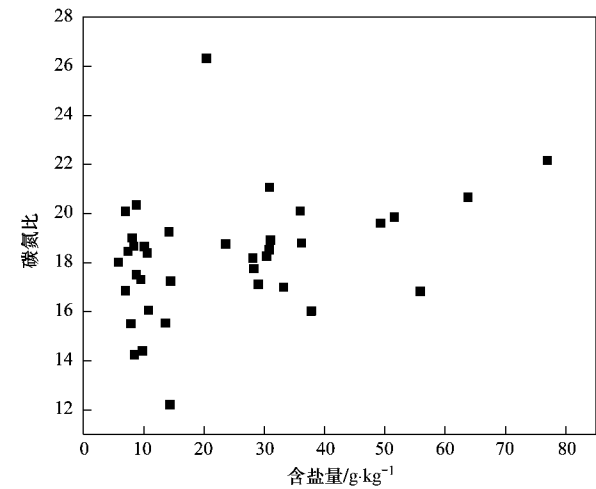


图 5 土壤含盐量与土壤碳氮比的关系

Fig. 5 Relationships between ratios of carbon to nitrogen and soil salt contents

4 结论

(1)双台子河口湿地芦苇、香蒲、碱茅及碱蓬 4 种植物群落土壤中全钾、全磷和含盐量存在显著性差异,全氮、速效氮、速效磷、速效钾、有机质、全铁和全硫含量差异不大。相关性分析表明,有机质含量与全氮、全磷、速效磷、速效钾呈显著或极显著相关,植物残体分解释放的养分可能是土壤中速效磷、钾的主要来源。

(2)4 种植物群落土壤碳氮比均大于 12 且存在显著性差异,说明双台子河口湿地土壤中有机质主要为“陆源”,同其他地区相比,双台子河口湿地土壤中碳氮比处于较高水平。碳氮比与土壤含盐量显著相关,随着含盐量的增加,土壤碳氮比升高。

参考文献:

[1] Sutula M, Day J W, Cable J, *et al.* Hydrological and nutrient budgets of freshwater and estuarine wetlands of Taylor Slough in Southern Everglades, Florida(U. S. A.) [J]. *Biogeochemistry*, 2001, **56**: 287-310.

[2] Rogers K, Wilton K M, Saintilan N. Vegetation change and surface elevation dynamics in estuarine wetlands of southeast Australia[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2006, **66**: 559-569.

[3] 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 [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 1994, **38**: 219-233.

[4] Li R, Shu K, Luo Y, *et al.* Assessment of heavy metal pollution estuarine surface sediments of Tangxi river in Chaohu lake basin [J]. *Chinese Geographical Science*, 2010, **20**(1): 9-17.

[5] 宋晓林, 吕宪国. 中国退化河口湿地生态恢复研究进展[J]. *湿地科学*, 2009, **7**(4): 379-384.

[6] 朱鹤健, 何宜庚. 土壤地理学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1992. 78-87.

[7] Song B, Yin X Q, Zhang Y, *et al.* Dynamics and relationships of Ca, Mg, Fe in litter, soil fauna and soil in *Pinus koraiensis*-broadleaf mixed forest[J]. *Chinese Geographical Science*, 2008, **18**(3): 284-290.

[8] 杨小波, 张桃林, 吴庆书. 海南琼北地区不同植被类型物种多样性与土壤肥力的关系[J]. *生态学报*, 2002, **22**(2): 190-196.

[9] 李朝生, 杨晓辉, 于春堂, 等. 鄂尔多斯高原北部不同植被类型下土壤性状的分异[J]. *水土保持学报*, 2006, **20**(5): 48-51.

[10] 张楠阳, 张景群, 杨玉霞, 等. 黄土高原不同人工生态林对土壤主要营养元素的影响[J]. *东北林业大学学报*, 2009, **37**(11): 74-76.

[11] 唐将, 李勇, 邓富银, 等. 三峡库区土壤营养元素分布特征研究[J]. *土壤学报*, 2005, **42**(3): 473-478.

[12] 丁秋祎, 白军红, 高海峰, 等. 黄河三角洲湿地不同植被群落下土壤养分含量特征[J]. *农业环境科学学报*, 2009, **28**(10): 2092-2097.

[13] 高俊琴, 吕宪国. 毛果苔草湿地开垦后土壤中主要营养元素垂直分异[J]. *水土保持通报*, 2002, **22**(3): 32-34.

[14] 刘吉平, 杨青, 吕宪国. 三江平原典型环型湿地土壤营养元素的空间分异规律[J]. *水土保持学报*, 2005, **19**(2): 76-79.

[15] 黄文娟, 刘菊秀, 唐旭利, 等. 鼎湖山 5 种森林土壤的无机氮和有效磷含量[J]. *应用与环境生物学报*, 2009, **15**(4):

441-447.

[16] 董元华,徐琪. 不同脱沼泽阶段土壤中铁锰的比较研究[J]. 土壤学报, 1991, **28**(4): 382-389.

[17] 贺强,崔保山,赵欣胜,等. 盐梯梯度下黄河三角洲湿地植被空间分异规律的定量分析[J]. 湿地科学, 2007, **5**(3): 208-214.

[18] 杨帆,赵冬至,索安宁. 双台子河口湿地景观时空变化研究[J]. 遥感技术与应用, 2008, **23**(1): 51-56.

[19] 朱浩峥,侯万发,李忠波,等. 双台子河口“红海滩”退化初探[J]. 土壤通报, 2006, **37**(6): 1191-1194.

[20] 杨慧玲,尹怀宁,徐惠民,等. 双台子河口滨海湿地生态系统服务功能与价值评估[J]. 国土与自然资源研究, 2009, (1): 68-70.

[21] 朱清海,毛艳,朱浩峥,等. 辽宁省盘锦地区滨海盐渍土在发展生态农业条件下土壤肥力的变化[J]. 生态学杂志, 1996, **15**(5): 36-40.

[22] 胡玉福,邓良基,张世熔,等. 川中丘陵地区典型小流域土壤氮素空间变异特征及影响因素研究[J]. 水土保持学报, 2008, **22**(3): 70-75, 81.

[23] 刘琪璟,徐倩倩,张国春,等. 长白山北坡土壤氮矿化时空分异特征[J]. 生态学报, 2009, **29**(10): 5656-5664.

[24] 刘会玲,陈亚恒,段毅力,等. 土壤钾素研究进展[J]. 河北农业大学学报, 2002, **25**(增刊): 66-68.

[25] 李小坤,鲁剑巍,吴礼树. 土壤钾素固定和释放机制研究进展[J]. 湖北农业科学, 2008, **47**(4): 473-477.

[26] 王东升,王君. 低分子量有机酸作用下土壤矿物钾释放机制[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2009, **28**: 259-261.

[27] 从日环,李小坤,鲁剑巍,等. 低分子量有机酸对红壤和黄褐土钾素转化的影响[J]. 土壤学报, 2009, **46**(3): 532-536.

[28] 邹元春,吕宪国,姜明. 不同水文情势下环形湿地土壤铁的时空分布特征[J]. 环境科学, 2009, **30**(7): 2059-2064.

[29] 郝庆菊,王起超,王跃思,等. 开垦利用对三江平原湿地土壤硫含量的影响[J]. 环境科学学报, 2003, **23**(5): 614-618.

[30] 毛志刚,王国祥,刘金娥,等. 盐城海滨湿地盐沼植被对土壤碳氮分布特征的影响[J]. 应用生态学报, 2009, **20**(2): 293-297.

[31] Forja J M, Ortega T, Ponce R, *et al.* Tidal transport of inorganic carbon and nutrients in a coastal salt marsh (Bay of Cadiz, SW Spain) [J]. Ciencias Marinas, 2003, **29**(4): 469-481.

[32] Sollie S, Verhoeven J T A. Nutrient cycling and retention along a littoral gradient in a Dutch shallow lake in relation to water level regime[J]. Water Air and Soil Pollution, 2008, **193** (124): 107-121.

[33] Yu J B, Sun W D, Liu J S, *et al.* Enhanced net formations of nitrous oxide and methane underneath the frozen soil in Sanjiang wetland, northeastern China [J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2007, **112** (D7), doi: 10. 1029/2006JD008025.

[34] 石福臣,李瑞利,王绍强,等. 三江平原典型湿地土壤剖面有机碳及全氮分布与积累特征[J]. 应用生态学报, 2007, **18**(7):1425-1431.

[35] 李新华,刘景双,孙志高,等. 三江平原小叶章湿地生态系统硫的生物地球化学循环[J]. 生态学报, 2007, **27**(6): 2199-2207.

[36] 肖德荣,田昆,张利权. 滇西北高原纳帕海湿地植物多样性与土壤肥力的关系[J]. 生态学报, 2008, **28**(7): 3116-3124.

[37] 田昆,常凤来,陆梅,等. 人为活动对云南纳帕海湿地土壤碳氮变化的影响[J]. 土壤学报, 2004, **41**(5): 681-686.

[38] 王国平,刘景双,张玉霞. 向海湿地全硫与有效硫垂向分布[J]. 水土保持通报, 2003, **23**(2): 5-8.

[39] 白军红,欧阳华,邓伟,等. 向海沼泽湿地土壤氮素的空间分布格局[J]. 地理研究, 2004, **23**(5): 614-622.

[40] 于君宝,陈小兵,孙志高,等. 黄河三角洲新生滨海湿地土壤营养元素空间分布特征[J]. 环境科学学报, 2010, **30**(4): 855-861.

[41] Sigal G C, Kang W J, Coleman S W. Soil profile distribution of phosphorus and other nutrients following wetland conversion to beef cattle pasture[J]. Journal of Environmental Quality, 2006, **35**(6): 2374-2382.

[42] Prusty B A K, Chandra R, Azeez P A. Distribution of carbon, nitrogen, phosphorus, and sulfur in the soil in a multiple habitat system in India[J]. Australian Journal of Soil Research, 2009, **47**(2):177-189.

[43] Milliman J D, Xie Q C, Yang Z S. Transfer of particulate organic carbon and nitrogen from the Yangtze River to the Ocean [J]. American Journal of Science, 1984, **284**: 824-834.

[44] 刘文臣,王荣,李超伦. 东海颗粒有机物中的碳氮比[J]. 海洋与湖沼, 1998, **29**(5): 467-470.

[45] 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**:119-130.

[46] Guo X L, Lu X G, Tian K. Nitrogen cycling in plant-soil systems in three freshwater wetland types along a water level gradient in the Sanjiang Plain, Northeast China [J]. Fresenius Environmental Bulletin, 2010, **19**(4): 688-695.