

于君宝, 陈小兵, 孙志高, 等. 2010. 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, 30(4): 855 - 861

Yu J B, Chen X B, Sun Z G, *et al*. 2010. The spatial distribution characteristics of soil nutrients in new-born coastal wetland in the Yellow River delta [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 30(4): 855 - 861

黄河三角洲新生滨海湿地土壤营养元素空间分布特征

于君宝^{1, 2, *}, 陈小兵¹, 孙志高¹, 谢文军², 毛培利¹, 吴春发¹, 董洪芳¹, 牟晓杰¹, 栗云召¹, 管博¹, 单凯³

1. 中国科学院烟台海岸带滨海湿地生态实验室、海岸带环境过程重点实验室, 烟台 264003

2. 滨州学院山东省黄河三角洲生态环境重点实验室, 滨州 256600

3. 山东黄河三角洲国家级自然保护区管理局, 东营 257091

收稿日期: 2009-06-27 修回日期: 2009-08-08 录用日期: 2010-01-20

摘要: 根据植被分布状况, 在黄河三角洲国家级自然保护区核心区新生湿地内由黄河岸边至海滩方向布设两条平行样带, 研究土壤营养元素空间分布特征. 结果表明, 黄河三角洲新生滨海湿地表层土壤中 TN、NH₄⁺-N、NO₃⁻-N、TOC、TS 和 TP 平均含量分别为 419.37 mg·kg⁻¹、3.27 mg·kg⁻¹、0.87 mg·kg⁻¹、3.43 g·kg⁻¹、381.27 mg·kg⁻¹ 和 500.86 mg·kg⁻¹. 从黄河岸边至近海光滩区, 土壤中 TN、NO₃⁻-N、TOC 和 TS 含量逐渐升高. TOC、TN、NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 含量在剖面上均表现为由表向下逐渐降低的规律. 相关分析表明, 土壤中 TS、NO₃⁻-N、TN 含量与 TOC 含量之间存在着极显著的正相关, 土壤含盐量和 pH 是影响土壤中 TOC、TS、NO₃⁻-N、TN 含量和碳氮比大小的主要指标.

关键词: 营养元素; 空间分布; 滨海湿地; 黄河三角洲

文章编号: 0253-2468(2010)04-855-07 中图分类号: X144 文献标识码: A

The spatial distribution characteristics of soil nutrients in new-born coastal wetland in the Yellow River delta

YU Junbao^{1, 2, *}, CHEN Xiaobing¹, SUN Zhigao¹, XIE Wenjun², MAO Peili¹, WU Chunfa¹, DONG Hongfang¹, MU Xiaojie¹, LI Yunzhao¹, GUAN Bo¹, SHAN Kai³

1. Laboratory of Coastal Wetland Ecology, Key Laboratory for Coastal Environment Processes, Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, Yantai 264003

2. Shandong Key Laboratory of Eco-Environmental Science for Yellow River Delta, Binzhou University, Binzhou 256600

3. Administration of Shandong Yellow-River-Delta National Nature Reserve, Dongying 257091

Received 27 June 2009; received in revised form 8 August 2009; accepted 20 January 2010

Abstract: Based on the distribution of vegetation, two transects from the Yellow River bank to a salt beach were selected in new-born coastal wetland in the core area of the Yellow River Delta National Nature Reserve to study the spatial distribution characteristics of soil nutrients. The results show that the average contents of TN, NH₄⁺-N, NO₃⁻-N, TOC, TS and TP in top soil of new-born coastal wetland in Yellow River delta were 419.37 mg·kg⁻¹, 3.27 mg·kg⁻¹, 0.87 mg·kg⁻¹, 3.43 g·kg⁻¹, 381.27 mg·kg⁻¹ and 500.86 mg·kg⁻¹, respectively. From river bank to salt beach, the soil nutrient contents of TN, NO₃⁻-N, TOC and TS increased gradually, while the contents of TOC, TN, NH₄⁺-N and NO₃⁻-N decreased gradually with depth in the soil profiles. The results of correlation analysis show that there are highly significant relationships between TOC and TS, NO₃⁻-N as well as TN in soils. The soil salinity and pH are the determining factors for soil nutrient contents of TOC, TS, NO₃⁻-N, TN and C/N ratio.

Keywords: nutrient element; spatial distribution; coastal wetland; Yellow River delta

基金项目: 中国科学院知识创新工程重要方向项目 (No. KZCX2-YW-223); 中国科学院百人计划项目; 山东省科技攻关计划项目 (No. 2008GG20005006, 2008GG3NS07005); 国家自然科学基金项目 (No. 30770412)

Supported by the Knowledge Innovation Program of The Chinese Academy of Sciences (No. KZCX2-YW-223), the 100 Talents Program of the Chinese Academy of Sciences, the Science and Technology Development Program Project of Shandong Province (No. 2008GG20005006, 2008GG3NS07005) and the National Natural Science Foundation of China (No. 30770412)

作者简介: 于君宝 (1970—), 研究员 (博士), E-mail: Junbao_yu@gmail.com; * 通讯作者 (责任作者)

Biography: YU Junbao (1970—), professor (Ph. D.), E-mail: Junbao_yu@gmail.com; * Corresponding author

1 引言 (Introduction)

湿地是一种特殊自然综合体,是地球上重要的生存环境和生态系统之一.因其独特的水文、土壤、植被与生物特征,使其在调节气候、涵养水源、净化环境等方面具有巨大的环境功能,拥有极高的生态价值.据估算,全球湿地生态价值约为全球自然生态系统生态价值总和的 45% (Costanza *et al.*, 1997).湿地具有碳源与碳汇的双重属性,全球天然湿地每年释放的甲烷约占全球甲烷总释放量的 22%,同时湿地是全球生物生产量最高的生态系统之一,在全球生态系统中湿地土壤的碳储量仅少于海洋和热带雨林而位居第三位 (IPCC, 2007; Sabine *et al.*, 2004).湿地系统处于常年积水或者季节性积水状态,水分波动频繁,从而对氮、磷、硫等生源元素的存储、释放及形态转化均有其独特的调节作用 (毛志刚等, 2009; 高建华等, 2004; 熊汉锋, 王运华, 2005).因此,湿地生态系统营养元素的生物地球化学循环研究已经成为目前湿地生态学研究的热点.

黄河三角洲湿地是我国最年轻的滨海湿地生态系统,是东北亚内陆和环西太平洋鸟类迁徙的重要中转站和越冬栖息地,具有海陆过渡性、原生性和脆弱性的特点.黄河在历史上历经多次改道,自 1955 年至今已改道 11 次,从而使黄河三角洲滨海湿地大体上分为北部黄河故道退化区和东部新生湿地地区,现在新生湿地面积仍以每年 $20 \sim 23 \text{ km}^2$ 速度增长 (张建锋等, 2006),因此快速演化性和高速沉积性是黄河三角洲新生滨海湿地的独特特征.在这种条件下,系统内营养元素生物地球化学循环过程必然有其特殊规律和驱动机制.近些年来,国内外学者在黄河三角洲景观格局 (汪小钦等, 2006; 张建锋等, 2006; 张晓龙等, 2007)、生物多样性保护 (王玉珍, 2007; 李政海等, 2006)、群落演替 (侯本栋等 2007; 叶庆华等, 2004) 及湿地演化 (尹延鸿等, 2004; 汪小钦等, 2002; 张绪良等, 2009) 等方面开展了一系列的研究,但对黄河三角洲滨海湿地生态系统生源元素生物地球化学行为研究极少,仅见 2 篇报道 (吕艳华等, 2008; 孙宁波等, 2007),而滨海湿地营养元素状况会显著影响植物的演替方向、近海环境及水生生物的生长及外部形态等 (Choi *et al.*, 2001; Gascon *et al.*, 2006; Tanner *et al.*, 2000),对系统的演化和功能的发挥具有决定性作

用.为此,本研究选择黄河三角洲新生海滨湿地作为研究区域,通过野外调查和采样测定,研究新生海滨湿地不同植被群落下土壤碳、氮、硫、磷的生物地球化学特征及其影响因素,为进一步深入探讨滨海湿地元素生物地球化学循环过程及生态修复研究提供科学依据.

2 材料与方法 (Materials and methods)

2.1 研究区域概况

研究区域位于黄河三角洲国家级自然保护区 ($37^{\circ}40' \text{N} \sim 38^{\circ}10' \text{N}$, $118^{\circ}41' \text{E} \sim 119^{\circ}16' \text{E}$) 内,黄河入海口处.保护区总面积 $15.3 \times 10^4 \text{ km}^2$,属温带大陆性季风气候,四季分明,年平均气温 12.1°C ,多年平均降水量约 551.6 mm .区内植被以水生植被和盐生植被为主 (85% 以上),植物群落组成简单,建群种少 (贺强等, 2007),芦苇 (*Phragmites communis Trin.*)、柽柳 (*Tamarix chinensis Lour.*) 及翅碱蓬 (*Suaeda heteropter Kitag.*) 分布较广,植被的分布主要受土壤盐碱化程度影响.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.

2.2 研究方法

2008 年 8 月,在黄河三角洲国家级自然保护区核心区新生湿地内由黄河岸边至海方向布设两条平行样带,每条样带根据植被类型设置 10 个点位 (图 1),依次为 A 河滩 (无植被)、B 三棱蔗草

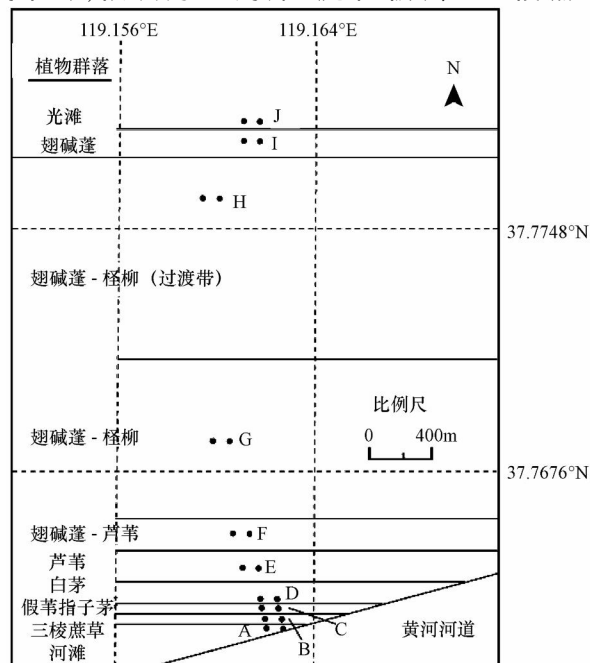


图 1 采样点布设图

Fig 1 The sketch of study sampling sites

(*Sparganium stoloniferum* Buch.-Han.)、朝天委陵菜(*Potentilla supina* Linn)区、C假苇拂子茅(*Calamagrostis pseudophragmites*)区、D白茅(*Imperata cylindrica* (Linn.) Beauv)区、E芦苇区、F翅碱蓬芦苇区、G翅碱蓬柽柳区、H翅碱蓬柽柳(过渡带)区、I翅碱蓬区、J光滩区(无植被)。由于该区受人类干扰少,因此样带内的植被为原生序列。

在每个采样点的土壤剖面分层采集土壤样品,0~10cm深度范围每层间隔2cm,10cm以下每层间隔10cm。其中A点因受水分限制仅采至20cm深度,其余样点采集深度至60~80cm。样品风干后研磨,过100目筛孔筛,用于项目测定。总有机碳(TOC)、总硫(TS)用元素分析仪(VariMAX CNS)测定,总氮(TN)、氨氮($\text{NH}_4^+\text{-N}$)、硝态氮($\text{NO}_3^-\text{-N}$)和总磷(TP)采用连续流动分析仪(Skalar Scan⁺⁺)测定,土壤容重、pH值、含盐量等理化指标用常规方法测定。

2.3 数据处理与图形绘制

根据野外实测数据与实验室的分析结果,数据

差异显著性检验采用单因素差分析,相关性分析采用person相关系数评价。图形绘制采用origin7.0和Adobe Illustrator CS3等绘图软件完成。

3 结果 (Results)

3.1 营养元素的剖面分布特征

黄河三角洲新生滨海湿地各研究样点土壤中营养元素具有相似的剖面变化趋势详见图2。由图2可见,TOC、TN、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量均表现为由表层向下逐渐降低的规律,峰值出现在表层0~10cm范围内(图2a、d、e、f),而TP、TS含量的峰值分别出现在土壤剖面的中下层(图2b、c)。在表层0~10cm范围内, TN 、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量随着剖面深度增加降低幅度较大。单因素方差分析(One-way-ANOVA)结果表明:TOC、TN、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量剖面差异极显著($p < 0.01$),而TP、TS含量剖面差异不显著(p 值分别为0.426和0.218),表明这两种元素剖面分异不明显。

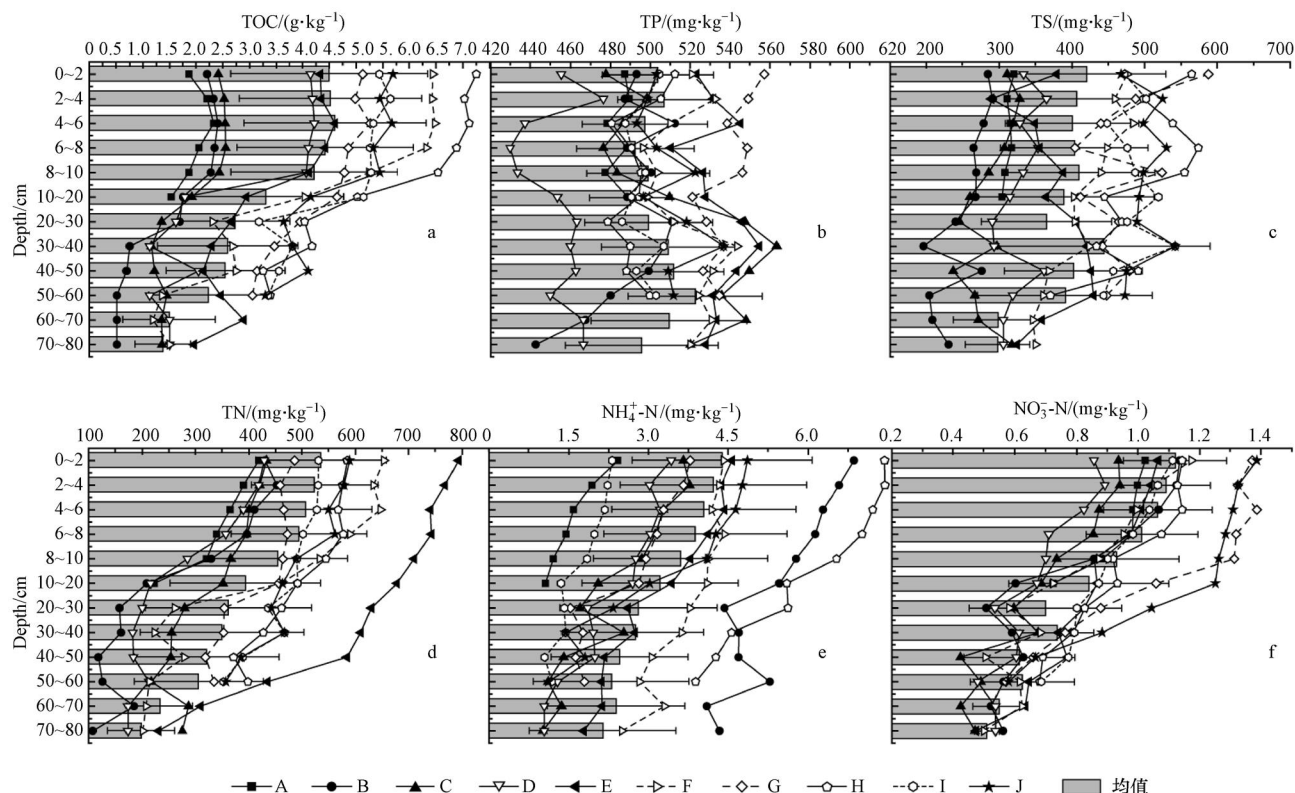


图2 滨海湿地土壤中营养元素垂直分布

Fig. 2 The vertical distribution of soil nutrient elements in the coastal wetland

植物的分解输入是陆地生态系统土壤营养元素碳、氮的主要来源,植物生物量监测表明,黄河三

角洲滨海湿地植物生物量以地上生物量为主(约占总生物量的 65%~93%),植物地上部枯萎后主要归还到土壤表层,而研究的植物群落除芦苇外,本区优势植物碱蓬、柽柳及研究区的假苇拂子茅、白茅等地下根系不发达,主要分布在土壤 0~30cm 深度,随着土壤深度的增加而根系明显减少.因此植物分解作用所归还到土壤中的 TOC、TN、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 主要集中在土壤表层,且随着土壤深度的增加其浓度逐渐降低.这种变化趋势与国、内外滨海湿地碳、氮研究所得到的结果相类似(Forja *et al.*, 2003; 毛志刚等, 2009).

黄河三角洲滨海湿地土壤中硫、磷的剖面变化不显著,这主要与湿地氮、磷的化学性质相对稳定及其在湿地系统中的生物地球分异有关.黄河三角洲滨海湿地系统中硫和磷的主要来源是陆源的磷和硫随黄河水流输入系统,伴随着泥沙的沉积而保留在淤积土层中,自 2002 年小浪底工程实现调水调沙以后,每年黄河三角洲新生湿地均有稳定的泥沙沉积,由于不同时段保存在沉积物中磷、硫含量有一定的差异,加之磷、硫的化学性质较为稳定,区域植物根系不发达,植物分异作用相对较弱,因此磷、硫在土壤剖面上的变化规律不明显,差异不显著.

3.2 表层土壤营养元素水平分异规律

由于植物的吸收累积和分解释放作用,生态系统养分的分布与植被状况关系密切(毛志刚等, 2009).黄河三角洲滨海湿地土壤(0~30cm)营养元素水平分布见图 3.分析结果表明,从黄河岸边至盐滩区(由 A 点至 J 点),表层土壤中 TN、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、TOC 和 TS 含量变化呈逐渐升高趋势,TP 变化不大,而 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 呈现出波动变化趋势.0~30cm 土壤中营养元素平均含量分别为:TN $419.37 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (中值 $439.81 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ $3.27 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (中值 $2.99 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ $0.87 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (中值 $0.87 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)、TOC $3.43 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ (中值 $3.77 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$)、TS $381.27 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (中值 $397.25 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)、TP $500.86 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (中值 $502.43 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$).单因素方差分析表明,除 TP 外,不同植被类型土壤营养元素含量差异显著.值得注意的是,尽管靠海光滩区因含盐量过高(2.6%以上)和受潮汐冲刷而无植被生长,但土壤中的各营养元素平均含量却高于样带中大部分点位(图 3).

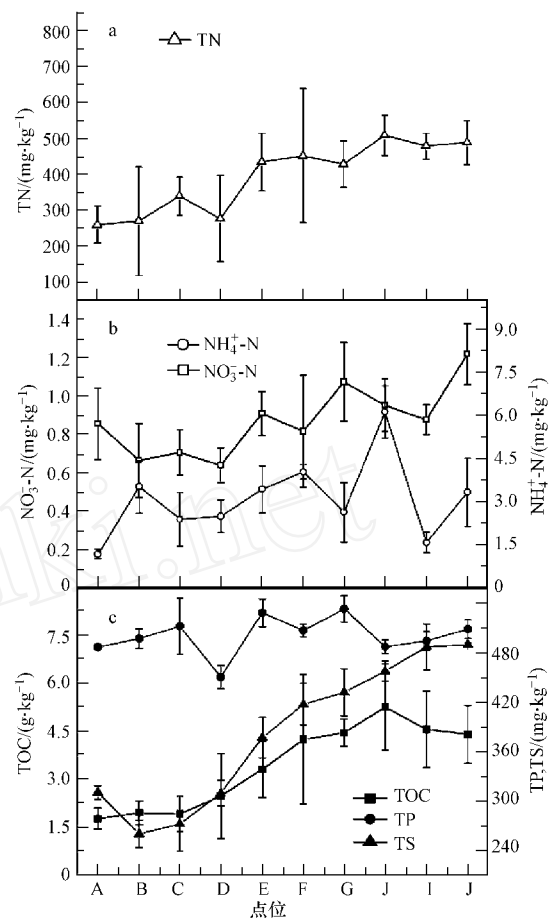


图 3 滨海湿地表层土壤(0~30cm)营养元素水平分布

Fig. 3 The horizontal distribution of nutrients in topsoil (0~30 cm) of the coastal wetland

黄河三角洲新生滨海湿地土壤养分的水平分布规律与滨海湿地植物群落、土壤盐分状况、营养元素的化学性质及潮汐等关系密切.不同湿地植物对养分的吸收与归还能力是决定养分水平分布的关键因素(Forja *et al.*, 2003; Sollie and Verhoeven, 2008; 毛志刚等, 2009),而黄河三角洲不同植物群落的带状分布是植物适应不同盐分阈值的具体体现(贺强等, 2007).从黄河岸边至近海光滩区,土壤含盐量逐渐升高,植物群落表现出从三棱蔗草 芦苇 碱蓬的变化,在植物吸收与残体分解归还作用下,表层土壤中 TN、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、TOC 和 TS 含量逐渐升高,而 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 出现波动变化.磷由于其化学性质较为稳定,各植物群落表层土壤中 TP 含量差异不大.此外,大部分植被覆盖区点位土壤营养元素含量低于光滩,说明该区域土壤营养元素的来源除湿地植物外,还受外源输入的影响,如由于低潮滩受潮汐作用影响,海水中的藻类、动植物残体会滞留在土

壤表层,从而使土壤具有一定数量的营养元素.总的来说,同其他生态系统相比,滨海湿地中营养元素含量处于较低的水平(表1).

表1 不同湿地土壤中营养元素含量

Table 1 The nutrient element content in soils of different wetlands

湿地类型	TOC / (g·kg ⁻¹)	TN / (mg·kg ⁻¹)	NH ₄ ⁺ -N / (mg·kg ⁻¹)	NO ₃ ⁻ -N / (mg·kg ⁻¹)	TP / (mg·kg ⁻¹)	TS / (mg·kg ⁻¹)	文献来源
沼泽湿地 (三江平原)	60.57 ~ 80.76	17030 ~ 19780	31.40 ~ 82.02	2.94 ~ 3.39	1987.43 ~ 2064.79	1219.8 ~ 520.8	(Yu <i>et al.</i> , 2007; 石福臣等, 2007; 李新华等, 2007)
高原湿地 (云南纳帕海)	110.67	2710	223.7	138.3			(田昆等, 2004)
内陆盐沼 (向海)	11.5 ~40.2	1400	15.41	2.62		700	(王国平等, 2003; 白军红等, 2004)
滨海湿地 (黄河三角洲)	1.7 ~5.3	258 ~698	1.2 ~6.1	0.6 ~1.2	450 ~534	259 ~490	本研究
盐城滨海湿地	1.7 ~7.9	170 ~360					(毛志刚等, 2009)
Coastal muds of Brazil	5.6						(Zhu <i>et al.</i> , 2002)
Peatland in Scotland						2400	(Chapman, 2001)
Swamp in the southeastern United States	180.1	10800	1.2		688		(Signal <i>et al.</i> , 2006)
Freshwater wetland in Keoladeo National Park, India	63	7000					(Prusty <i>et al.</i> , 2009)

黄河三角洲新生滨海湿地土壤中营养元素含量偏低的原因主要包括几个方面,一是成土时间短,样带布设区为1996年黄河人为改道后所形成的新生湿地,其形成时间最长不超过13年,因此土壤熟化程度低,营养元素含量较低;其次是新生滨海湿地土壤盐化严重,最高含盐量接近3%左右,耐盐植物长势较差,生物量低,同沼泽湿地相比,黄河三角洲滨海湿地生物量仅为沼泽湿地的1/10至1/3,因此植物归还量小,土壤中营养元素来源少;第三是滨海湿地植物分解速度快,约是沼泽湿地的3~7倍,使植物归还的营养元素迅速释放到土壤,而低熟化的土壤保持养分能力较差,黄河的调水调沙致使大范围的滨海湿地定期过水,植物释放的养分及植物残体会随水入海,从而降低了土壤中的养分含量.

3.3 营养元素含量与土壤含盐量、pH、碳氮比、土壤容重的关系

土壤保持养分的能力主要取决于土壤的理化性状,如在有机质含量较丰富的土壤中,其土壤微团聚结构好,保持养分能力强,而盐渍化较严重的

土壤,由于其土壤颗粒过细,盐分含量过高,土壤结构较差,保水保肥能力较弱.黄河三角洲新生滨海湿地土壤营养元素含量与土壤理化参数的相关关系见表2.相关分析表明,研究区域土壤中TS、NO₃⁻ -N、TN含量与TOC含量之间存在着显著的正相关,说明土壤保持营养元素的能力受制于土壤TOC总量. TOC含量与含盐量、pH和碳氮比显著正相关,而与土壤容重显著负相关. TP仅与TS密切相关,这与二者之间的化学性质有关. NH₄⁺ -N与其他的土壤理化指标相关性不显著,这主要是由于滨海湿地土壤中NH₄⁺ -N含量较低,而其化学性质较活跃,含量变化差异较大的缘故.土壤含盐量和pH是影响土壤中TOC、TS、NO₃⁻ -N、TN含量和碳氮比大小的主要指标.其中土壤含盐量与土壤中TOC、TS、NO₃⁻ -N、TN含量成正相关,这不仅反映出光滩湿地存在着营养物质的外源输入外,还反映出含盐量高的区域植物营养物质归还速度较快,因为在高盐分区主要植物以碱蓬为主,碱蓬的肉质化叶片同芦苇、白茅的纤维化叶片相比更容易分解并向土壤释放养分.

表 2 土壤中营养元素含量与土壤相关参数的相关系数

Table 2 The correlation coefficients of nutrient content and related parameters in soils

参数	TOC	TP	TS	NO ₃ ⁻ -N	NH ₄ ⁺ -N	TN	容重	含盐量	pH	碳氮比
TOC	1	0.10	0.72**	0.72**	0.21	0.76**	-0.41**	0.70**	-0.52**	0.67**
TP	0.10	1	0.38**	0.07	-0.17	0.19	0.01	0.18	-0.07	0.04
TS	0.72**	0.38**	1	0.55**	-0.07	0.54**	-0.27*	0.72**	-0.52**	0.57**
NO ₃ ⁻ -N	0.72**	0.07	0.55**	1	0.22	0.58**	-0.14	0.48**	-0.39**	0.39**
NH ₄ ⁺ -N	0.21	-0.17	-0.07	0.22	1	0.17	-0.05	0.16	-0.21	0.03
TN	0.76**	0.19	0.54**	0.56**	0.17	1	-0.38**	0.41**	-0.42**	0.10
容重	-0.41**	0.01	-0.27*	-0.14	-0.05	-0.38**	1	-0.17	0.30*	-0.27*
含盐量	0.70**	0.18	0.72**	0.48**	0.16	0.41**	-0.17	1	-0.55**	0.61**
pH	-0.52**	-0.70	-0.52**	-0.39**	-0.21	-0.42**	0.30*	-0.55**	1	-0.39**
碳氮比	0.67**	0.04	0.57**	0.39**	0.03	0.10	-0.27*	0.61**	-0.39**	1

注: ** 0.01水平显著相关, * 0.05水平显著相关, n=132

4 结论 (Conclusions)

1)黄河三角洲新生滨海湿地土壤中营养元素含量处于较低水平, 0~30cm 土壤中 TN、NH₄⁺-N、NO₃⁻-N、TOC、TS 和 TP 平均含量分别为 419.37 mg·kg⁻¹、3.27 mg·kg⁻¹、0.87 mg·kg⁻¹、3.43 g·kg⁻¹、381.27 mg·kg⁻¹ 和 500.86 mg·kg⁻¹。

2)表层土壤中 TN、NO₃⁻-N、TOC 和 TS 含量从黄河岸边至近海光滩区逐渐升高;而 TOC、TN、NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 含量在剖面上均表现为由表向下逐渐降低的规律, 峰值出现在最表层。

3)土壤中 TS、NO₃⁻-N、TN 含量与 TOC 含量之间存在着显著的正相关关系, 土壤含盐量和 pH 是影响土壤中 TOC、TS、NO₃⁻-N、TN 含量和碳氮比大小的主要指标。

致谢:感谢山东黄河三角洲国家级自然保护区管理局刘月良总工对该研究野外工作的支持,感谢吴惠丰研究员(博士)帮助修改论文英文摘要,同时感谢两位匿名审稿人对文章所提出的中肯修改意见和建议。

责任作者简介:于君宝(1970—),男,博士,研究员,中国科学院烟台海岸带研究所滨海湿地生态实验室主任,山东省黄河三角洲生态环境重点实验室学术委员会委员,2008年“百人计划”入选者,主要研究方向为湿地生物地球化学与生态修复,在国内外学术刊物上发表学术论文 70 余篇,申请发明专利 4 项。

参考文献 (References):

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

Bai J H, Ouyang H, Deng W, *et al* 2004. Spatial distribution pattern of nitrogen in marsh soils in Xianghai wetlands [J]. Geographical Research, 23 (5): 614—622 (in Chinese)

Chapman S J. 2001. Sulphur forms in open and afforested areas of two Scottish peatlands [J]. Water Air and Soil Pollution, 128 (1-2):

23—39

Choi Y, Wang Y, Hsieh Y P, *et al* 2001. Vegetation succession and carbon sequestration in a coastal wetland in northwest Florida: Evidence from carbon isotopes [J]. Global Biogeochemical Cycles, 15 (2): 311—319

Costanza R, d Arge R, de Groot R, *et al* 1997. The value of the world's ecosystem services and natural capital [J]. Nature, 387 (6630): 253—260

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

高建华, 欧维新, 杨桂山. 2004. 潮滩湿地 N、P 生物地球化学过程研究 [J]. 湿地科学, 2 (3): 220—227

Gao J H, Ou W X, Yang G S. 2004. Overview on geochemical process of nitrogen and phosphorus in tidal flat wetland [J]. Wetland Science, 2 (3): 220—227 (in Chinese)

Gascon S, Boix D, Sala J, *et al* 2006. Organic carbon and nutrient (P, N) concentrations of water and sediment in several aquatic environment types of a Mediterranean coastal wetland (Emporda Wetlands, NE Iberian Peninsula) [J]. Annales De Limnologie-International Journal of Limnology, 42 (4): 221—231

贺强, 崔保山, 赵欣胜, 等. 2007. 水盐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, 5 (3): 208—214

He Q, Cui B S, Zhao X S, *et al* 2007. Vegetation distribution patterns to the gradients of water depth and soil salinity in wetlands of Yellow River delta, china [J]. Wetland Science, 5 (3): 208—214 (in Chinese)

侯本栋, 马风云, 邢尚军, 等. 2007. 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, 24 (3): 313—318

Hou B D, Ma F Y, Xing S J, *et al* 2007. Soil and vegetation characteristics of wetland communities at different successive stages in the Huanghe River Delta [J]. Journal of Zhejiang Forestry College, 24 (3): 313—318 (in Chinese)

IPCC. 2007. Contribution of working Group II to the fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change: Impacts, Adaptation and Vulnerability [R]. Cambridge and New York: Cambridge University Press 213—249

李新华, 刘景双, 孙志高, 等. 2007. 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, 27 (6): 2119—2207

Li X H, Liu J S, Sun Z G, *et al* 2007. The Biogeochemical cycle of sulfur in Calamagrostis angustifolia wetland ecosystem in the Sanjiang Plain [J]. Acta Ecologica Sinica, 27 (6): 2119—2207 (in Chinese)

- 李政海,王海梅,刘书润,等. 2006. 黄河三角洲生物多样性分析 [J]. 生态环境, 15(3): 577—582
- Li Z H, Wang H M, Liu S R, *et al*. 2006. Analysis about the biodiversity of Yellow River Delta [J]. Ecology and Environment, 15(3): 577—582 (in Chinese)
- 吕艳华,白洁,姜艳,等. 2008. 黄河三角洲湿地硝化作用强度及影响因素研究 [J]. 海洋湖沼通报, (2): 61—66
- Lü Y H, Bai J, Jiang Y, *et al*. 2008. Studies of nitrifying activity and impact factors of wetland in Yellow River delta [J]. Transactions of Oceanology and Limnology, (2): 61—66 (in Chinese)
- 毛志刚,王国祥,刘金娥,等. 2009. 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, 20(2): 293—297
- Mao Z G, Wang G X, Liu J E, *et al*. 2009. Influence of salt marsh vegetation on spatial distribution of soil carbon and nitrogen in Yancheng coastal wetland [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 20(2): 293—297 (in Chinese)
- Prusty B A K, Chandra R, Azeem P A. 2009. Distribution of carbon, nitrogen, phosphorus, and sulfur in the soil in a multiple habitat system in India [J]. Australian Journal of Soil Research, 47(2): 177—189
- Sabine C L, Heimann M, Araxo P, *et al*. 2004. Current status and past trends of the global carbon cycle [A] // C B Field and M R Raupach. Global Carbon Cycle: Integrating Humans, Climate, and the Natural World [C]. Washington, District of Columbia: Island Press 17—44
- 石福臣,李瑞利,王绍强,等. 2007. 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, 18(7): 1425—1431
- Shi F C, Li R L, Wang S Q, *et al*. 2007. Profile distribution and accumulation characteristics of organic carbon and total nitrogen in typical marshes in Sanjiang Plain [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 18(7): 1425—1431 (in Chinese)
- Signal G C, Kang W J, Coleman S W. 2006. Soil profile distribution of phosphorus and other nutrients following wetland conversion to beef cattle pasture [J]. Journal of Environmental Quality, 35(6): 2374—2382
- Sollie S, Verhoeven J T A. 2008. 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, 193(1-4): 107—121
- 孙宁波,王宇庭,孙春光,等. 2007. 黄河三角洲水底底泥中氮、磷特征及其与水体磷富营养化关系 [J]. 青岛农业大学学报(自然科学版), 24(4): 274—278
- Sun N B, Wang Y T, Sun C G, *et al*. 2007. Nitrogen and phosphorus characteristics in the reservoir sediments of Yellow River delta and their relationship to the phosphorus eutrophication of the water [J]. Journal of Qingdao Agricultural University (Natural Science), 24(4): 274—278 (in Chinese)
- Tanner D K, Brazner J C, Brady V J. 2000. Factors influencing carbon, nitrogen, and phosphorus content of fish from a Lake Superior coastal wetland [J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 57(6): 1243—1251
- 田昆,常凤来,陆梅,等. 2004. 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, 41(5): 681—686
- Tian K, Chang F L, Lu M, *et al*. 2004. Impacts of human disturbances on organic carbon and nitrogen in Napahai wetlands Northwest Yunnan [J]. Acta Pedologica Sinica, 41(5): 681—686 (in Chinese)
- 王国平,刘景双,张玉霞. 2003. 向海湿地全硫与有效硫垂向分布 [J]. 水土保持通报, 23(2): 5—8
- Wang G P, Liu J S, Zhang Y X. 2003. Vertical distribution of total sulfur and available sulfur in Xianghai wetland [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 23(2): 5—8 (in Chinese)
- 汪小钦,王钦敏,刘高焕,等. 2002. 黄河三角洲油田集中区土地利用演化的遥感分析 [J]. 地球信息科学, (4): 75—79
- Wang X Q, Wang Q M, Liu G H, *et al*. 2002. Remote sensing analysis of land use change in oil fields of the Yellow River delta [J]. Geoinformation Science, (4): 75—79 (in Chinese)
- 汪小钦,王钦敏,刘高焕,等. 2006. 黄河三角洲土地利用覆盖格局与演化分析 [J]. 水土保持学报, 20(5): 158—161
- Wang X Q, Wang Q M, Liu G H, *et al*. 2006. Analysis of land use and land cover change in Yellow River delta [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 20(5): 158—161 (in Chinese)
- 王玉珍. 2007. 黄河三角洲湿地资源及生物多样性研究 [J]. 安徽农业科学, 35(6): 1745—1746; 1787
- Wang Y Z. 2007. Study on the wetland resource and biodiversity in the Yellow River delta [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 35(6): 1745—1746; 1787 (in Chinese)
- 熊汉锋,王运华. 2005. 湿地碳氮磷的生物地球化学循环研究进展 [J]. 土壤通报, 36(2): 240—243
- Xiong H F, Wang Y H. 2005. Advances in researches on biogeochemical circulation of C, N and P in wetlands [J]. Chinese Journal of Soil Science, 36(2): 240—243 (in Chinese)
- 叶庆华,田国良,刘高焕,等. 2004. 黄河三角洲新生湿地土地覆被演替图谱 [J]. 地理研究, 23(2): 2570—264
- Ye Q H, Tian G L, Liu G H, *et al*. 2004. Tupu analysis on the land cover evolving patterns in the new-born wetland of the Yellow River delta [J]. Geographical Research, 23(2): 2570—264 (in Chinese)
- 尹延鸿,周永青,丁东. 2004. 现代黄河三角洲海岸演化研究 [J]. 海洋通报, 23(2): 32—40
- Yin Y H, Zhou Y Q, Ding D. 2004. Evolution of modern Yellow River delta coast [J]. Marine Science Bulletin, 23(2): 32—40 (in Chinese)
- Yu J B, Sun W D, Liu J S, *et al*. 2007. Enhanced net formations of nitrous oxide and methane underneath the frozen soil in Sanjiang wetland, northeast China [J]. Journal of Geophysical Research-Atmospheres, 112(D7): doi: 10.1029/2006JD008025
- 张建锋,邢尚军,孙启祥,等. 2006. 黄河三角洲植被资源及其特征分析 [J]. 水土保持研究, 13(1): 100—102
- Zhang J F, Xing S J, Sun Q X, *et al*. 2008. Study on flora resources and its features in Yellow River delta region [J]. Research of Soil and Water Conservation, 13(1): 100—102 (in Chinese)
- 张晓龙,李培英,刘月良,等. 2007. 黄河三角洲湿地研究进展 [J]. 海洋科学, 31(7): 81—87
- Zhang X L, Li P Y, Liu Y L, *et al*. 2007. Studies on the wetland of the Yellow River Delta: a review [J]. Marine Sciences, 31(7): 81—87 (in Chinese)
- 张绪良,叶思源,印萍,等. 2009. 黄河三角洲自然湿地植被的特征及演化 [J]. 生态环境学报, 18(1): 292—298
- Zhang X L, Ye S Y, Yin P, *et al*. 2009. Characters and successions of natural wetland vegetation in Yellow River delta [J]. Ecology and Environmental Sciences, 18(1): 292—298 (in Chinese)
- Zhu Z B, Aller R C, Mak J. 2002. Stable carbon isotope cycling in mobile coastal muds of Amapa, Brazil [J]. Continental Shelf Research, 22(15): 2065—2079