

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第11期

Vol.33 No.11

2012

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

京津冀与长三角区域大气 NO ₂ 污染特征	王英, 李令军, 刘阳 (3685)
2008~2011 年夏季京津冀区域背景大气污染变化分析	杨俊益, 辛金元, 吉东生, 朱彬 (3693)
沧州市大气污染特征观测研究	王永宏, 胡波, 王跃思, 刘伟, 张武 (3705)
华北工业城市降水中金属元素污染特征及来源	李月梅, 潘月鹏, 王跃思, 王英锋, 李杏茹 (3712)
广州市交通主干道空气中苯系物的测量	叶丛雷, 谢品华, 秦敏, 凌六一, 郑尼娜, 刘文彬, 黄祖照 (3718)
基于实时交通信息的道路机动车动态排放清单模拟研究	黄成, 刘娟, 陈长虹, 张健, 刘登国, 朱景瑜, 黄伟明, 巢渊 (3725)
柴油轿车燃用煤基 F-T 合成油的排放特性	胡志远, 程亮, 谭丕强, 楼狄明 (3733)
九龙江口滨海湿地生源要素空间分布特征	余小青, 杨军, 刘乐冕, 田原, 余正, 王昌付 (3739)
南四湖水体氮、磷营养盐时空分布特征及营养状态评价	舒凤月, 刘玉配, 赵颖, 吴艳鹏, 李爱华 (3748)
天目湖流域湿地对氮磷输出影响研究	李兆富, 刘红玉, 李恒鹏 (3753)
北京市新建城区不透水地表径流 N、P 输出形态特征研究	李立青, 吕书丛, 朱仁肖, 刘泽权, 单保庆 (3760)
云阳宗海库的分布与来源	张玉玺, 向小平, 张英, 陈玺, 刘景涛, 王金翠, 张媛静, 孙继朝 (3768)
南方某城市地表水体中粪源性污染指示微生物的分布特征研究	孙傅, 沙婧, 刘彦华 (3778)
三峡库区大宁河藻细胞昼夜垂直迁移研究	张永生, 郑丙辉, 姜霞, 郑浩, 钟娜, 陈春宵 (3787)
江淮农村生态型排水系统构建及截污作用研究	单保庆, 李楠, 唐文忠 (3797)
人工湿地植物床-沟壕系统水质净化效果	汪仲琼, 张荣斌, 陈庆华, 魏宏斌, 王为东 (3804)
潜流人工湿地演变对废水中有机物、氮及磷去除的影响	魏泽军, 谢建平, 黄玉明 (3812)
人工湿地处理含盐生活污水的特性研究	高峰, 杨朝晖, 李晨, 金卫红, 邓一兵 (3820)
催化湿式氧化法降解水中的 β -萘酚	刘杰, 于超英, 赵培庆, 陈革新 (3826)
ZVI/EDDS/Air 体系降解水中 2,4-二氯酚的研究	孙倩, 周海燕, 曹梦华, 吴琳娜, 王琳玲, 陈静, 陆晓华 (3833)
微波改性 MWNTs/TiO ₂ 复合材料对 1,2,3-三氯苯的光催化降解研究	施周, 张茜, 张伟, 徐舜开, 张骅 (3840)
腐殖酸对生物炭去除水中 Cr(VI) 的影响机制研究	丁文川, 田秀美, 王定勇, 曾晓岚, 徐茜, 陈健康, 艾小雨 (3847)
臭氧氧化-活性污泥法处理含 PVA 工业废水的试验研究	邢晓琼, 黄程兰, 刘敏, 陈滢 (3854)
复合底物对颗粒化 EBPR 系统除磷特性的影响及优化试验研究	徐少娟, 孙培德, 郑雄柳, 董毅 (3859)
进水比例对水解反应器出水水质的影响研究	梁康强, 熊娅, 戚茂荣, 林秀军, 朱民, 宋英豪 (3868)
厌氧-好氧联合型生物反应器埋地渗滤液水质水量变化规律的研究	韩智勇, 刘丹, 李启彬, 陈馨 (3873)
我国城市污水处理回用调查研究	郭宇杰, 王学超, 周振民 (3881)
快雌醇和壬基酚在土壤中的吸附-解吸特征	姜鲁, 王继华, 李建忠, 辛佳, 李森, 刘翔 (3885)
黄土丘陵区刺槐林深层土壤有机碳矿化特征初探	马昕昕, 许明祥, 杨凯 (3893)
半干旱黄土丘陵区土壤结皮的地表水文效应	卫伟, 温智, 陈利顶, 陈瑾, 吴东平 (3901)
广西大石围巨型漏斗土壤中多环芳烃与环境因素	孔祥胜, 祁士华, 蒋忠诚, 黄保健 (3905)
酸性条件下黄铁矿氧化机制的研究	王楠, 易筱筠, 党志, 刘云 (3916)
淋洗条件下砂土和粉土盐运移过程的监测研究	付腾飞, 贾永刚, 郭磊, 刘晓磊 (3922)
空气注射修复苯污染地下水模拟研究	樊艳玲, 姜林, 张丹, 钟茂生, 贾晓洋 (3927)
不同终点检测 5 种双酚 A 类化合物对 MCF-7 的细胞毒性	张帅帅, 刘堰, 刘树深, 朱祥伟 (3935)
上海世博园后滩湿地糙足类群落特征及其对环境因子的响应	陈立婧, 吴艳芳, 景钰湘, 王聪, 张饮江 (3941)
耐盐石油烃降解菌的筛选鉴定及其特性研究	吴涛, 谢文军, 依艳丽, 李小彬, 王君, 胡相明 (3949)
高效降酚菌株 <i>Ochrobactrum</i> sp. CH10 生长动力学和苯酚降解特性的研究	陈晓华, 魏刚, 刘思远, 孙江曼, 王芳芳, 李昊源, 刘宇军 (3956)
四溴双酚 A 好氧降解菌的筛选及其降解特性研究	钱艳园, 刘莉莉, 于晓娟, 丁丛, 王志平, 施玉衡, 李晨君 (3962)
长期施用有机和无机肥对黑土 <i>nirS</i> 型反硝化菌种群结构和丰度的影响	尹昌, 范分良, 李兆君, 宋阿琳, 朱平, 彭畅, 梁永超 (3967)
三氯乙烯在不同土壤中的吸附特性及其影响因素研究	何龙, 邱兆富, 吕树光, 逯志昌, 王治立, 隋倩, 林匡飞, 刘勇弟 (3976)
多菌灵在农田土壤中的降解及其影响因素研究	肖文丹, 杨肖娥, 李廷强 (3983)
硫化物对垃圾焚烧污泥焚烧飞灰高温过程中重金属挥发的影响	刘敬勇, 孙永裕 (3990)
关于医疗垃圾飞灰中二噁英在惰性气氛下的低温热脱附研究	纪莎莎, 李晓东, 徐旭, 陈彤 (3999)
第七届环境模拟与污染控制学术研讨会论文	
稻田气溶胶 NH ₃ 和气体 NO _x 排放在线测定研究	龚巍巍, 栾胜基 (4006)
一种可同时检测挥发性氯代烷烃和氯代烯烃的电子鼻的研制	文晓刚, 刘锐, 蔡强, 万梅, 汤灵容, 陈吕军 (4012)
基于被动采样技术的垃圾焚烧厂及周边大气中 PAHs 分布研究	孙少艾, 李洋, 周轶, 王海蛟, 孙英 (4018)
涪江流域农业非点源污染空间分布及污染源识别	丁晓雯, 沈珍瑶 (4025)
人工湿地不同区域基质磷含量的差异分析	曹雪莹, 种云霄, 余光伟, 仲海涛 (4033)
基于 RT-qPCR 选择性检测水中活性病原菌	林怡雯, 李丹, 吴舒旭, 何苗, 杨天 (4040)
消毒副产物生成的温度影响和动力学模型	张小璐, 杨宏伟, 王小仵, 付静, 解跃峰 (4046)
一种厌氧微观定量研究新方法	张仲良, 吴静, 蒋剑凯, 姜洁, 李怀志 (4052)
梧桐树叶作为反硝化碳源的研究	熊剑锋, 徐华, 阎宁, 张永明 (4057)
降解嗜盐菌 AD-3 的筛选、降解特性及加氧酶基因的研究	崔长征, 冯天才, 于亚琦, 董斐, 杨昕梅, 冯耀宇, 刘勇弟, 林汉平 (4062)
《环境科学》征订启事 (3711) 《环境科学》征稿简则 (3767) 信息 (3998, 4039, 4045, 4056) 专辑征稿通知 (4051)	

九龙江口滨海湿地生源要素空间分布特征

余小青¹, 杨军^{1*}, 刘乐冕^{1,2}, 田原^{1,3}, 余正^{1,2}, 王昌付¹

(1. 中国科学院城市环境研究所, 城市环境与健康重点实验室水生态健康组, 厦门 361021; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 香港科技大学工程学院土木与环境工程系, 香港)

摘要: 为了揭示亚热带典型滨海湿地生源要素的空间分布特征及影响因素, 选取九龙江口滨海湿地为研究对象, 于2009年夏采集表层沉积物及柱状样, 利用元素分析仪和流动注射分析仪对主要生源要素碳、氮、磷、硫(C、N、P、S)进行分析。结果表明, 九龙江口滨海湿地生源要素含量较高, 总碳、总氮、总磷、总硫(TC、TN、TP、TS)的均值分别为 (12.64 ± 2.66) 、 (1.57 ± 0.29) 、 (0.48 ± 0.06) 、 (2.61 ± 1.37) $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 空间分布差异性显著。红树林植被区表层沉积物的TC、TN、TP含量高于米草植被及光滩, 高潮位TC、TN、TP含量>中潮位>低潮位, TS在米草植被及中潮位含量较高。柱状样的TC、TN具有相似的垂直变化趋势, 均表现为由表层向下逐渐降低, 且不同植被间的柱状样TC、TN含量在同一深度上都表现为: 红树区>米草区>光滩区; 柱状样TP平均值是光滩最低, TS平均值是光滩最高。冗余分析表明, 植被类型、pH及潮位是影响表层沉积物生源要素(C、N、P、S)分布最显著的环境因子, 解释量分别为24.0%、19.0%和11.6%。

关键词: 沉积物; 碳、氮、磷、硫; 滨海湿地; 红树; 米草; 光滩

中图分类号: X142 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)11-3739-09

Spatial Variations of Biogenic Elements in Coastal Wetland Sediments of the Jiulong River Estuary

YU Xiao-qing¹, YANG Jun¹, LIU Le-mian^{1,2}, TIAN Yuan^{1,3}, YU Zheng^{1,2}, WANG Chang-fu¹

(1. Aquatic Ecohealth Group, Key Laboratory of Urban Environment and Health, Institute of Urban Environment, Chinese Academy of Sciences, Xiamen 361021, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Department of Civil and Environmental Engineering, School of Engineering, The Hong Kong University of Science and Technology, Hong Kong, China)

Abstract: To reveal the spatial distribution of biogenic elements and their influencing factors in the typical subtropical coastal wetland, both surface and core sediment samples were collected from the Jiulong River Estuary, southeast China in summer 2009. The biogenic elements including carbon, nitrogen, phosphorus, sulfur (C, N, P, S) were determined by Element Analyzer and Flow Injection Analyzer. The concentrations of TC, TN, TP, and TS were (12.64 ± 2.66) $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, (1.57 ± 0.29) $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, (0.48 ± 0.06) $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, and (2.61 ± 1.37) $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, respectively. Further, these biogenic elements showed a distinct spatial pattern which closely related with the vegetation type and tide level. Values of TC, TN, TP in the surface sediment of mangrove vegetation zones were higher than those in the cord-grass and mudflat zones, while TC, TN, TP concentrations in the high tide level regions were higher than those in the middle and low tide level regions. The TS concentration was the highest in cord-grass vegetation and middle tidal level zones. The TC and TN values in sedimentary core decreased gradually with depth, and they were the highest in the mangrove sites, followed by cord-grass and mudflat sites at the same depth. In mudflat sedimentary core, the average content of TP was the lowest, whereas TS was the highest. Redundancy analysis revealed that vegetation type, pH and tide level were the main factors influencing the distribution of biogenic elements in surface sediments of the Jiulong River Estuary, by explaining 24.0%, 19.0% and 11.6% of total variation in the four biogenic elements (C, N, P and S), respectively.

Key words: sediment; C, N, P, S; coastal wetland; mangrove; cord-grass; mudflat

滨海湿地作为海洋和陆地过渡区域, 缓冲两者相互作用和影响, 是多种运动形态及物质的交汇场所, 其生态系统服务功能以多种形式表现, 尤其作为氮、磷(N、P)的汇, 过滤作用可减少径流中的N、P入海^[1], 同时还是重要的碳汇之一^[2]。由于受海陆作用的交互影响, 滨海湿地各种物理、化学、生物因素变化强烈, 是一个典型的环境脆弱带和敏感区, 易受各种自然和人为活动的干扰和破坏。近年来, 随着滨海地区人口不断增长和经济的快速发展, 大

量的污染物输入到河口地区, 对河口及其滨岸环境质量造成不同程度的威胁, 对初级生产力、生物多

收稿日期: 2012-01-18; 修订日期: 2012-05-09

基金项目: 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-YW-Q02-04); 科技部国际科技合作项目(2011DFB91710); 厦门市科技计划杰出青年项目(3502Z20116006); 中国科学院优秀博士学位论文、院长奖获得者科研启动专项资金项目; 教育部留学回国人员科研启动基金项目

作者简介: 余小青(1984~), 女, 硕士, 研究实习员, 主要研究方向为生物地球化学循环, E-mail: xqyu@iue.ac.cn

* 通讯联系人, E-mail: jyang@iue.ac.cn

样性以及生态系统功能等产生深刻的负面效应^[3]. 当前,滨海湿地碳、氮、磷、硫(C、N、P、S)的生物地球化学循环是全球变化研究焦点之一,也是海岸带陆海相互作用研究(LOICZ)项目的核心^[4]. 长期以来滨海湿地沉积物有机质的来源、储存、循环等过程是众多学者研究讨论的重点^[5~13].

九龙江口滨海湿地作为福建省东南沿海地区重要的潮汐湿地,是九龙江入海携带的物质流、能量流的途经之地,属于典型的红树林湿地保护区. 红树林是热带、亚热带海岸潮间带的木本植物群落,与其它森林类型相比,红树林具有食物网结构复杂、物种多样性高、生产力高的特点,具有独特的生态功能和重要的社会、经济价值^[14]. 九龙江口红树林的主要种类是秋茄(*Kandelia candel*),从世界范围看,秋茄红树纯林生长得最好的只有我国福建的九龙江河口和台湾的淡水河口,因此九龙江河口秋茄红树基因库具有独特性和稀有性^[15]. 然而,由于近年来快速的城市化与工业化,沿岸工业废水、生活污水过量排放,高密度养殖,特别是互花米草(*Spartina alterniflora*)的入侵,导致红树林面积逐年减少,湿地生态服务功能严重受损^[16,17]. 近年来,国内学者对九龙江沉积物的常量、微量元素组成^[18]、重金属分布特征^[19]、氮、磷形态分布特征^[20~22]等进行了研究,但对九龙江口不同湿地类型沉积物C、N、P、S的生物地球化学过程这一问题尚鲜见报道.

本研究以厦门九龙江河口的滨海湿地为对象,通过对不同植被、不同潮位站点的生源要素C、N、P、S含量和分布的分析,揭示城市滨海湿地生源要素的空间分布特征,以期为滨海湿地保护与恢复提供基础数据.

1 材料与方法

1.1 样品采集

本研究区域位于福建九龙江口红树林保护区内,主要红树种类是秋茄,近年来互花米草大面积入侵. 九龙江河口处于亚热带海洋性季风气候区,年

平均温度为21℃,年平均降水量为1 100 mm. 九龙江河口潮汐活动强烈,平均潮差达2 m. 本研究采样时间为2009年5月31日~6月1日,根据植被类型和潮位的差别,表层沉积物样共设置15个站位,每个站位采集5个表层沉积物样品,分别为边长1 m的正方形4个角,再加上中心点. 采样站位如图1所示,植被、潮位信息见表1,其中A2站位虽为光滩,但距米草植物较近. 另外,选取3个不同植被类型的中潮位(光滩A2、米草B2、红树D2),利用柱状采样器各采集长度为50 cm的柱状样,用自封袋封好置于车载冰箱内运回实验室,以2 cm间隔分样.

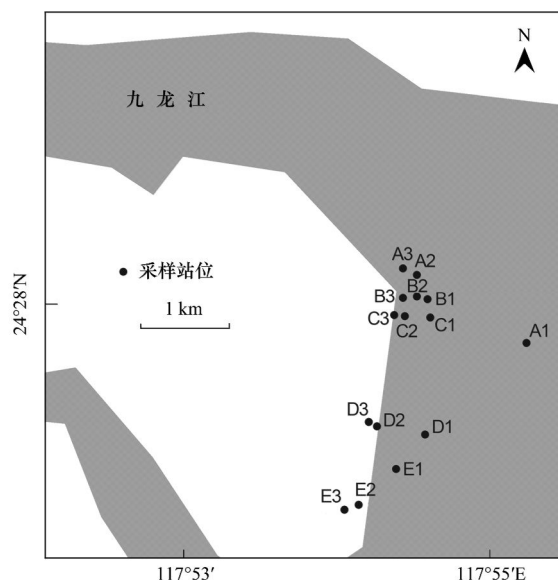


图1 九龙江口滨海湿地采样站位

Fig. 1 Map of coastal wetland in the Jiulong River Estuary showing the location of sampling stations

1.2 样品分析

将沉积物样品于-40℃冷冻干燥后,取部分样品研磨过100目筛进行元素分析,另一部分测定沉积物性质. 总碳(TC)、总氮(TN)、总硫(TS)使用德国Elementar Vario MAX CNS Analyzer测定,总磷(TP)经硫酸-高氯酸消解稀释后使用美国LACHAT QC8500流动注射分析仪测定. 粒度(D50)用英国马尔文2000型激光粒度仪分析,电导率按水土比

表1 九龙江口滨海湿地采样点植被潮位信息

Table 1 Characteristics of vegetation and tidal level in the sampling sites from coastal wetland of the Jiulong River Estuary

站位	植被	潮位	站位	植被	潮位	站位	植被	潮位
A1	光滩	低	A2	光滩	中	A3	光滩	高
B1	米草	低	B2	米草	中	B3	米草	高
C1	红树林/米草交互	低	C2	红树林/米草交互	中	C3	红树林/米草交互	高
D1	米草	低	D2	红树林	中	D3	红树林	高
E1	红树林	低	E2	米草	中	E3	米草	高

4:1浸提后使用 Extech EC410 电导仪测定, pH 值按水土比 2.5:1 浸提后使用 Starter 2C 实验室 pH 计测定, 本研究中的 C/N 及 N/P 均为物质的量之比 (mol/mol)。

通过预实验, 应用岛津 TOC-SSM 5000A 分析仪测定样品的无机碳 (IC) 含量时, 发现绝大多样品 IC 含量低于检测限 ($0.1 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$), 故直接对样品 TC 进行分析, 可认为 TC 约等于 TOC。

1.3 数据分析

应用 Statistica 6.0 和 Canoco 4.5 统计分析软件对所获得数据进行统计分析。包括沉积物生源要素的差异性检验及方差分析, 约束排序方法分析生源要素与环境因子之间的关系。植被及潮位用梯度矩阵进行表达, 不同植被用 1、0 矩阵分别表示有无相关植被。例如: 光滩 (0, 0), 红树 (0, 1), 米草 (1, 0), 红树米草交互 (1, 1); 不同潮位用 1, 2, 3 分别表示低潮位、中潮位、高潮位。

应用约束排序法分析主要生源要素 C、N、P、S 分布与环境因子之间的关系。在分析之前, 除 pH 之外的检测指标都经过 $\lg(X+1)$ 转换。首先, C、N、P、S 含量矩阵的除趋势对应分析, 结果显示最大的梯度长度 <3 , 表明模型符合线性分布, 因此适合采用冗余分析 (redundancy analysis, RDA)。采用前向选择 (forward selection) 选出方差贡献率最大的环境因子, 蒙特卡罗置换检验 (Monte Carlo permutation test) 结果是否可靠^[23]。

2 结果与分析

2.1 表层沉积物生源要素水平分布

九龙江口滨海湿地表层沉积物中的 TC 含量介于 $8.59 \sim 22.21 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 平均值为 $(12.64 \pm 2.66) \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ($M \pm SD$), 站位间差异显著 ($P < 0.01$), 最高值出现在红树高潮位 D3, 最低值出现在光滩低潮位 A1 [图 2(a)]; TN 的含量介于 $1.17 \sim 2.34 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 平均值为 $(1.57 \pm 0.29) \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 站位间差异显著 ($P < 0.01$), 最高值出现在互花米草高潮位 E3, 最低值位于光滩中潮位 A2 [图 2(b)]; TP 的含量介于 $0.32 \sim 0.59 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 平均值是 $(0.48 \pm 0.06) \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 站位间差异显著 ($P < 0.01$), 最高值位于红树林米草交互的高潮位 C3, 最低值位于光滩中潮位 A2 [图 2(c)]; TS 含量介于 $0.85 \sim 8.48 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 平均值是 $(2.61 \pm 1.37) \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 站位间差异显著 ($P < 0.01$), 最高值位于互花米草高潮位 E3, 低值位于红树林高潮位 D3 [图 2(d)]。C/N 介于 $7.71 \sim 11.46$,

平均值为 9.36 ± 0.66 , 各站位之间差异不显著 ($P = 0.20$), 最高值出现在 D3 红树高潮, 最低为 A1 光滩低潮 [图 2(e)]; N/P 介于 $5.37 \sim 9.38$, 平均值为 7.02 ± 0.95 , 站位间差异显著 ($P < 0.01$), 最高位于 E3 米草高潮, 最低位于 E3 米草中潮 [图 2(f)]。

2.2 生源要素垂直分布

柱状样的 TC、TN 具有相似的垂直变化趋势, 均表现为由表层向下逐渐降低, 且不同植被间的柱状样 TC、TN 含量在同一深度上都表现为红树 > 米草 > 光滩 [图 3(a)、3(b)]。TP、TS 的最大值出现在柱状样的中下层 [图 3(c)、3(d)], 红树和米草区同一深度的 TP 值都较接近, 特别在中层 20 ~ 36 cm 其变化趋势一致, 光滩 TP 含量除 16 ~ 18 cm 深度值较高外, 其余深度上都小于红树和米草植被区; TS 含量为光滩 > 红树 > 米草, 米草植被下的 TS 含量垂直变化不大, 红树植被下 0 ~ 26 cm 段 TS 含量约为 28 ~ 50 cm 段 TS 含量的一半; 光滩下 TS 含量整体波动较大, 最大值出现在 36 ~ 38 cm 处。C/N 在同一深度上 (除 24 ~ 26 cm 外) 都表现为光滩 > 红树 > 米草, 24 ~ 26 cm 处光滩 > 米草 > 红树, 红树和米草植被下的 C/N 在 16 ~ 30 cm 段波动稍大, 光滩植被下 C/N 值 26 cm 以下高于 26 cm 以上的值 [图 3(e)]。N/P 的值在红树及米草植被下较接近且上下变化不大, 光滩的值波动范围较大, 表层值异常高, 16 ~ 18 cm 处异常低, 分布无明显规律 [图 3(f)]。

2.3 表层沉积物各生源要素及环境参数间的关系

相关分析结果显示 (表 2): TC、TN、TP 之间呈极显著正相关 ($P < 0.01$); C/N 与 TC 极显著正相关 ($P < 0.01$), 与 TN 相关性不显著; 粒度与 TC、TN、TP 存在显著负相关 ($P < 0.01$), 但与 TS 相关性不显著; 电导率与各元素之间均不相关; pH 与 TS 呈极显著正相关 ($P < 0.01$), 与 TP 呈极显著负相关 ($P < 0.01$)。

2.4 不同植被及潮位下生源要素的分布

表层沉积物 TC、TN、TP 在不同植被间分布趋势一致, 表现为: 红树湿地 > 红树与米草交互湿地 $\approx$ 米草湿地 > 光滩; TS 表现为米草 > 光滩 $\approx$ 交互 $\approx$ 红树 [图 4(a) ~ 4(d)]。C/N 分布差异显著, 红树湿地高于其他植被; N/P 在红树植被下较高, 但各植被间无显著差异 [图 4(e)、4(f)]。

表层沉积物 TC、TN、TP 在不同潮位间分布趋势一致表现为: 高潮位 > 中潮位 > 低潮位; TS 表现为: 中潮位 > 高潮位 $\approx$ 低潮位 [图 5(a) ~ 5(d)]。各潮位间 C/N 分布无显著差异, N/P 表现为高潮位 $\approx$

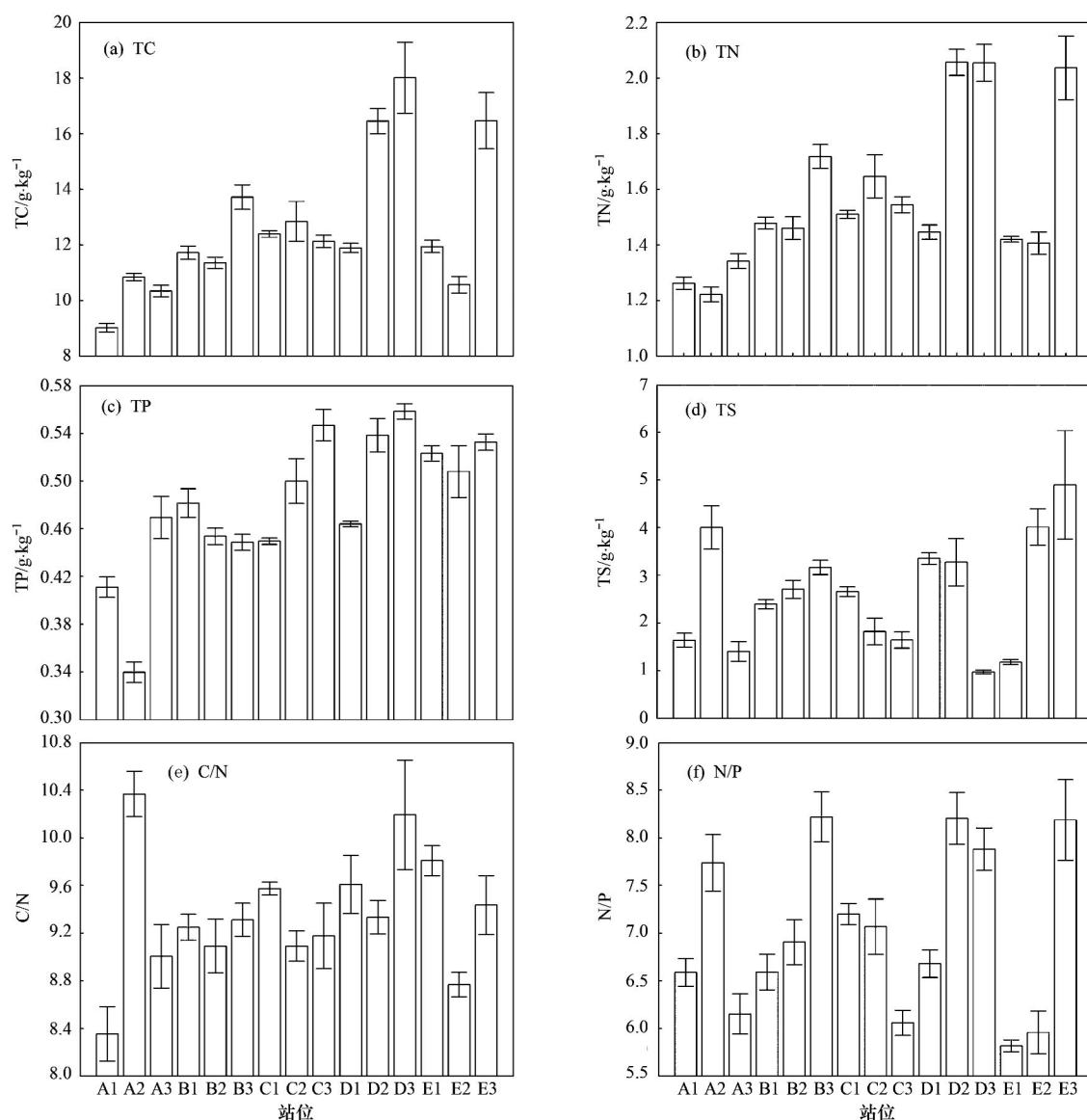


图2 九龙江口滨海湿地表层沉积物 TC、TN、TP、TS、C/N、N/P 的空间分布

Fig. 2 Spatial variation of TC, TN, TP, TS contents and C/N, N/P ratios in coastal wetland surface sediments of the Jiulong River Estuary

中潮位 > 低潮位 [图 5(e)、5(f)]。

方差分析结果表明,不同植被间 TC、TN、TP、TS、C/N 差异极显著 ($P < 0.01$), N/P 差异显著 ($P = 0.03$); 不同潮位间 TC、TN、TP、TS、N/P 差异极显著 ($P < 0.01$), C/N 分布差异不显著 ($P = 0.52$); 不同植被和潮位间 TC、TN、TP、TS、C/N、N/P 差异均极显著 ($P < 0.01$), 见表 3。

2.5 生源要素分布与环境因子之间的关系

RDA 的第一、二轴共同解释 41.8% 的 TC、TN、TP、TS 分布差异 [图 6]。RDA 第一轴的特征值为 33.7%, 表明环境因子沿第一轴的变化对 TC、TN、TP、TS 的分布影响最大。第一轴与红树、潮位呈极显著负相关 ($P < 0.01$), 与粒径、pH 呈极显著正相关

($P < 0.01$), 将不同植被的低、中、高潮位从右至左区分开。第二轴与米草、潮位及 pH 呈极显著负相关 ($P < 0.01$), 与粒径呈极显著正相关 ($P < 0.01$), 与电导率呈显著正相关 ($P < 0.05$), 沿第二轴可将不同植被区分开, 从上到下为红树、光滩、交互、米草。在所有分析的环境因子中, 红树、米草、潮位和 pH 与 4 类生源要素的分布均呈显著的相关关系 ($P < 0.01$)。偏冗余分析表明植被类型对生源要素分布影响最大, 为 24.0%, pH 为 19.0%, 潮位为 11.6%。

3 讨论

3.1 表层沉积物生源要素分布特点

与其他地区湿地表层沉积物相比 (表 4), 九龙

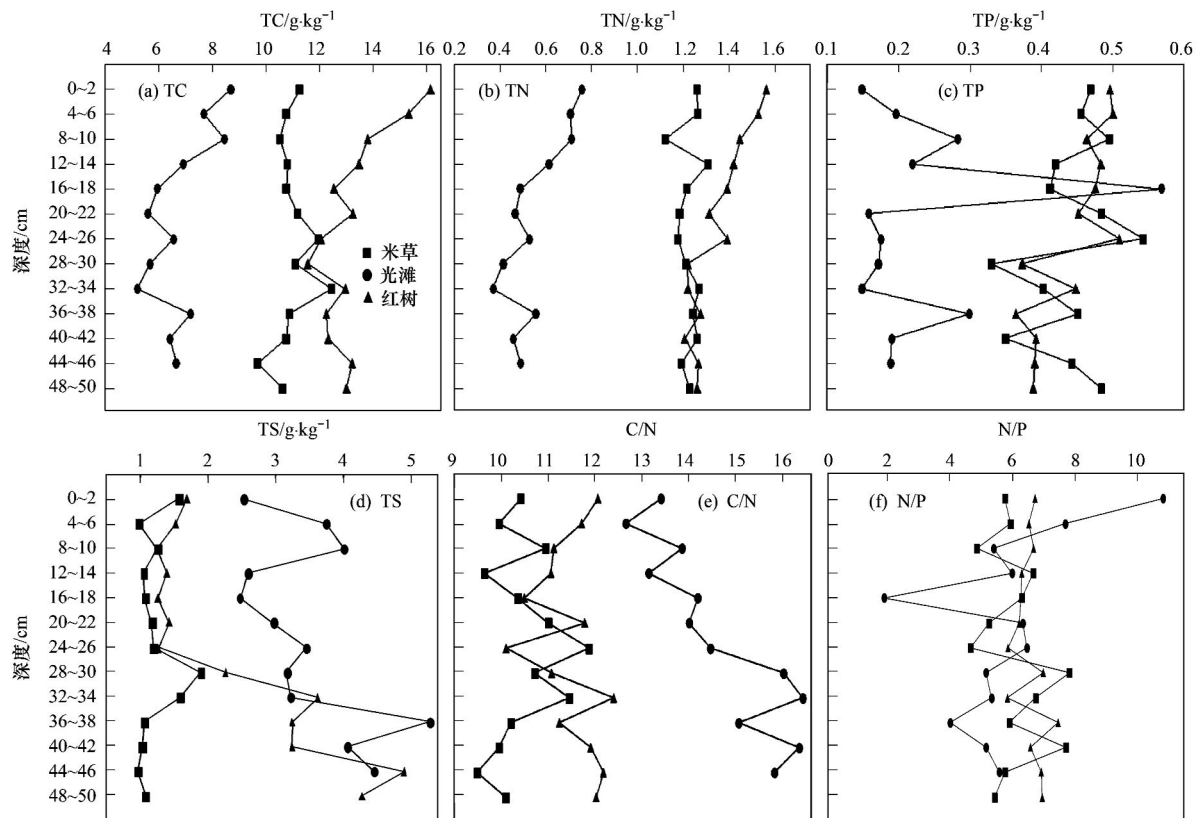


图3 九龙江口滨海湿地柱状沉积物 TC、TN、TP、TS、C/N、N/P 的垂直分布

Fig. 3 Vertical distribution of TC, TN, TP, TS contents and C/N, N/P ratios in coastal wetland core sediments of the Jiulong River Estuary

表2 九龙江口滨海湿地表层沉积物生源要素及沉积环境因子之间的相关性¹⁾

Table 2 Correlation between biogenic elements and environmental parameters in coastal wetland surface sediments of the Jiulong River Estuary

	TC	TN	TP	TS	C/N	N/P	粒度	pH	电导率
TC	1.000	0.895 **	0.547 **	0.049	0.410 **	0.577 **	-0.483 **	-0.158	0.162
TN	0.895 **	1.000	0.579 **	0.035	0.030	0.596 **	-0.554 **	-0.197	0.090
TP	0.547 **	0.579 **	1.000	-0.225 *	0.057	-0.158	-0.404 **	-0.451 **	0.110
TS	0.049	0.035	-0.225 *	1.000	0.046	0.356 **	0.156	0.650 **	-0.146
C/N	0.410 **	0.030	0.057	0.046	1.000	0.179	-0.007	-0.015	0.068
N/P	0.577 **	0.596 **	-0.158	0.356 **	0.179	1.000	-0.227 *	0.196	-0.088
粒度	-0.483 **	-0.554 **	-0.404 **	0.156	-0.007	-0.227 *	1.000	0.346 **	-0.048
pH	-0.158	-0.197	-0.451 **	0.650 **	-0.015	0.196	0.346 **	1.000	0.011
电导率	0.162	0.090	0.110	-0.146	0.068	-0.088	-0.048	0.011	1.000

1) ** 表示 $P < 0.01$; * 表示 $P < 0.05$; Spearman 等级相关(双尾检验); $n = 75$ 表3 方差分析植被、潮位对九龙江口滨海湿地表层沉积物生源要素分布的影响¹⁾

Table 3 Factorial designs derived from vegetation and tidal level to biogenic elements in coastal wetland surface sediments of the Jiulong River Estuary, by ANOVA

因子	TC		TN		TP		TS		C/N		N/P	
	F	P	F	P	F	P	F	P	F	P	F	P
植被	45.972	0.00 **	53.011	0.00 **	44.052	0.00 **	12.931	0.00 **	4.679	0.005 **	3.197	0.03 *
潮位	25.461	0.00 **	32.005	0.00 **	19.380	0.00 **	9.541	0.00 **	0.655	0.52	12.987	0.00 **
植被×潮位	11.416	0.00 **	15.365	0.00 **	5.970	0.00 **	6.357	0.00 **	10.135	0.00 **	22.085	0.00 **

1) ** 表示 $P < 0.01$; * 表示 $P < 0.05$

江口湿地表层沉积物 TC 含量与福建泉州海岸湿地及福建漳江口红树林湿地相近,高于长江盐沼与黄

河三角洲滨海湿地,低于香港维多利亚湾潮滩湿地及美国马萨诸塞州潮滩湿地;本研究中 TN 含量与

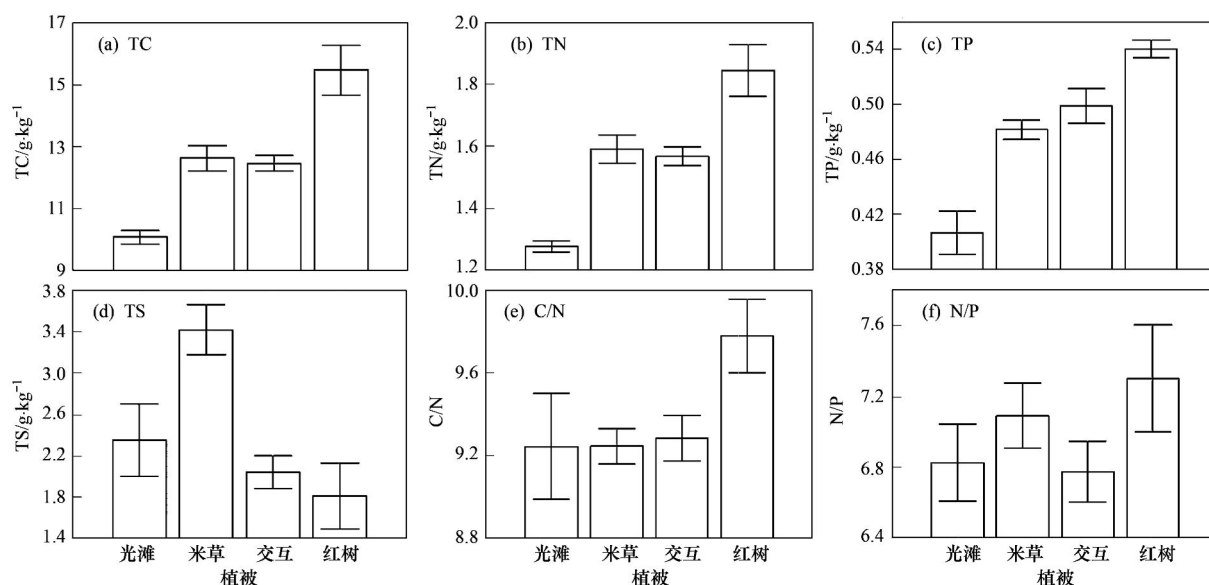


图4 九龙江口滨海湿地不同植被类型表层沉积物 TC、TN、TP、TS 含量及 C/N、N/P 的比较

Fig. 4 Comparison of TC, TN, TP, TS contents and C/N, N/P ratios of surface sediments under different vegetations in coastal wetland of the Jiulong River Estuary

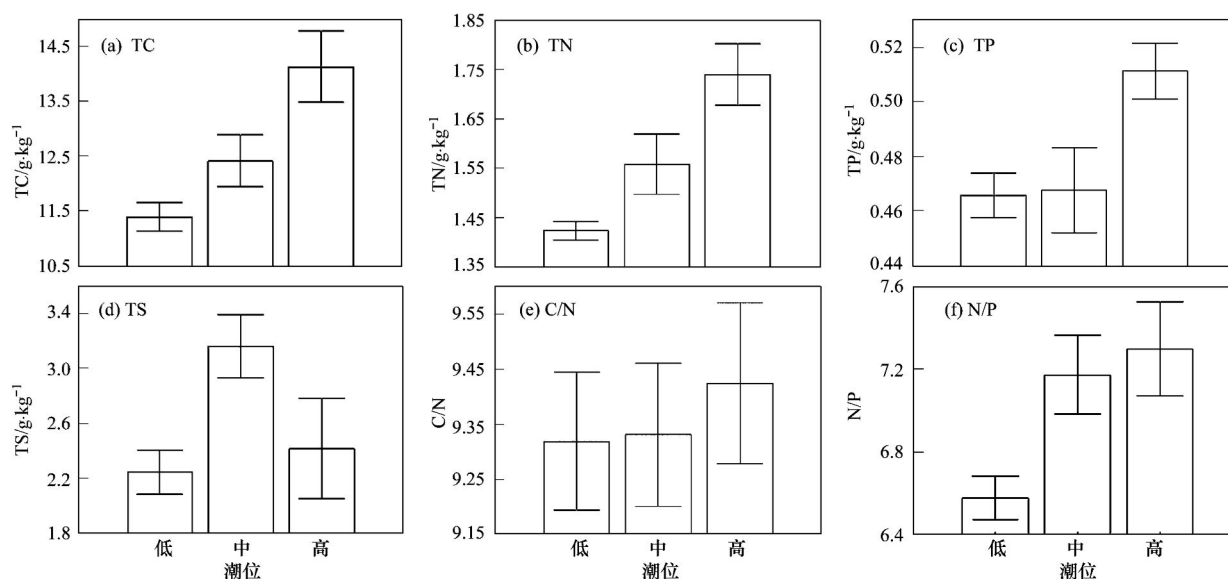


图5 九龙江口滨海湿地不同潮位表层沉积物 TC、TN、TP、TS 含量及 C/N、N/P 的比较

Fig. 5 Comparison of TC, TN, TP, TS contents and C/N, N/P ratios of surface sediments from different tidal levels in coastal wetland of the Jiulong River Estuary

苏北潮滩湿地、福建泉州湾海岸湿地及福建漳江口红树林湿地接近,高于香港维多利亚湾潮滩湿地、长江口盐沼及黄河三角洲滨海湿地,但低于美国马萨诸塞州潮滩湿地;本研究中 TP 含量与福建漳江口红树林湿地、香港维多利亚湾潮滩湿地及黄河三角洲滨海湿地都较为接近,低于苏北潮滩湿地;TS 含量较长江口盐沼及黄河三角洲滨海湿地高,与林慧娜等^[25]测定的福建云霄红树林湿地相近。

红树林具有“高生产力、高归还率和高分解率”

的三高特性^[14]。本研究区位于典型红树林保护区,一方面红树林及米草植被区域对有机物质的富集能力远远大于光滩湿地^[26,27],另一方面滨海湿地植物分解速度较快,植物归还的营养元素可以快速释放回沉积物中^[12],因此推测九龙江口表层沉积物有机质含量远高于其他湿地。但是,除地质原因外,与人口密集、污染较为严重的香港维多利亚湾潮滩和美国马萨诸塞州潮滩湿地相比,九龙江口滨海湿地远离大型城市群,受到的城市人类活动所造成的污染

表 4 湿地间表层沉积物生源要素对比¹⁾/g·kg⁻¹

湿地类型	TOC(或 TC)	TN	TP	TS
福建漳江口红树林湿地 ^[13]	9.10 ~ 28.60	0.61 ~ 2.20	0.43 ~ 1.24	—
福建泉州湾海岸湿地 ^[11]	9.39 ~ 20.57	1.63 ~ 2.60	—	—
香港维多利亚潮滩 ^[5]	19.20 ~ 23.30	0.95 ~ 1.08	0.47 ~ 0.50	—
美国马萨诸塞州潮滩 ^[6]	20.10 ~ 49.40	2.00 ~ 4.20	—	—
长江口盐沼 ^[8]	1.0 ~ 7.0	0.14 ~ 0.78	0.5 ~ 0.7	0.1 ~ 0.6
苏北潮滩 ^[10]	1.66 ~ 20.00	0.19 ~ 1.86	0.63 ~ 1.02	—
黄河三角洲滨海湿地 ^[12]	1.70 ~ 5.30	0.26 ~ 0.70	0.45 ~ 0.53	0.26 ~ 0.49
吉林向海沼泽湿地 ^[24]	—	—	—	0.37 ~ 3.03
福建云霄红树林湿地 ^[25]	—	—	—	0.5 ~ 3.7
本研究区湿地	8.59 ~ 22.21	1.17 ~ 2.34	0.32 ~ 0.59	0.85 ~ 8.48

1) “—”表示文献中没有相关数据

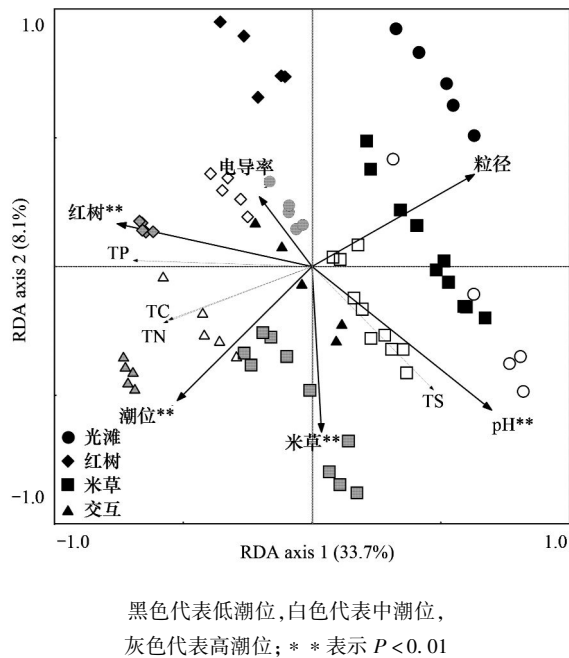


图 6 九龙江口滨海湿地表层沉积物 TC、TN、TP、TS 与环境因子 RDA 排序图

Fig. 6 RDA ordination showing the TC, TN, TP and TS in surface sediments in relation to the statistically significant environmental factors in coastal wetland of the Jiulong River Estuary

相对较小,TC 含量显著低于以上两个湿地. 光滩中潮位 A2 点距离米草植被区较近,不足 5 m,推测此站位高含量的 TS 与互花米草密切相关.

3.2 表层沉积物有机质来源

滨海湿地有机质的来源主要有两种:一种是湿地生物的生产输入^[6,28],一种是外界补给,如地表径流和潮汐等携带进来的颗粒态和溶解态有机质^[29~32]. 研究区域的 TC、TN 之间存在显著正相关(表 2),提示这些有机物可能有共同的来源. C/N 常被用来指示有机质的潜在物源,如浮游植物的 C/N 为 6~9^[33],浮游细菌 C/N 为 2.6~4.3^[34],陆

源有机质的 C/N 通常大于 12^[35]. 本研究区域 C/N 较低,变化范围为 7.71~11.46,平均值为 9.36 ± 0.66 ,表明该区域表层沉积物有机质为混合来源. 但由于未测定九龙江河口的悬浮颗粒物以及湿地植物的 C、N 组成,故尚不能计算各来源的贡献比例. 本研究中,不同植被间 C/N 差异显著,红树植被下的值高于其他植被,而不同潮位间分布差异不显著[图 4(e)、图 5(e)],推测该区域有机质来源可能受陆源影响较大.

九龙江口湿地 C/N 与 TC 显著相关,与 TN 不相关. 这种差异的原因主要是,沉积物中富含 N 的有机物质比富含 C 的有机质更易被微生物降解^[36],因此单独用 C/N 表征来源存在一定的局限性^[37].

3.3 表层沉积物有机质分布的影响因子

研究表明,湿地有机质的时空分布规律不仅与湿地植物群落、潮汐相关,还与沉积物性质、外源输入及营养元素的化学性质等关系密切^[12,13,38]. 本研究结果显示,植被类型、潮位及沉积物粒径是影响该区域表层沉积物碳氮分布最显著的环境因子. 九龙江口湿地表层沉积物 TC、TN 在不同植被间分布趋势一致,表现为:红树 > 米草 ≈ 交互 > 光滩,不同潮位间分布趋势一致表现为:高潮位 > 中潮位 > 低潮位[图 4、图 5]. 张祥霖等^[13]对漳江口红树林湿地和潘齐坤等^[21]对九龙江口红树林湿地氮的研究结果均与本研究结果相一致. 红树林的生产力高,同时归还作用非常显著,因此与其他植被相比红树林下的沉积物有机碳含量较高^[14,21,27].

九龙江口湿地表层沉积物碳、氮的浓度从高潮位到低潮位呈现逐渐降低趋势,而且与沉积物粒径显著负相关. 高潮位沉积物颗粒较细,而碳、氮元素容易富集在细颗粒沉积物表面^[8,39],不难解释高潮位沉积物中的有机质含量较高. 值得注意的是,

中、高潮位植被覆盖量大,凋落物提供的有机质多,加之受潮汐冲刷影响较小,有机质流失较少^[40];同时,高潮位离陆地更近,易受陆源污染^[21]。

4 结论

(1)九龙江口滨海湿地生源要素具有明显的空间分布格局。表层沉积物 TC、TN、TP、TS 平均含量分别为 (12.64 ± 2.66) 、 (1.57 ± 0.29) 、 (0.48 ± 0.06) 和 $(2.61 \pm 1.37) \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,红树林植被区表层沉积物的碳、氮、磷含量高于米草植被及光滩,高潮位碳、氮、磷含量高于中潮位和低潮位。柱状样的 TC、TN 具有相似的垂直变化趋势,均表现为由表层向下逐渐降低,且在同一深度上都表现为红树 > 米草 > 光滩;柱状样 TP 平均含量光滩最低,TS 平均含量是光滩最高。

(2)生源要素空间分布差异性显著,与植被类型和潮汐密切相关。表层沉积物 TC、TN、TP 之间为极显著正相关($P < 0.01$),提示这些生源要素可能有共同的来源。植被类型、潮位及 pH 是影响表层沉积物生源要素(C、N、P、S)分布最显著的环境因子。

致谢:野外采样工作得到了中国科学院知识创新工程重要方向项目(城市滨海湿地生源要素循环的界面过程及温室气体排放的微生物生态学机制)全体参与人员的帮助,谨致谢忱!

参考文献:

- [1] Valiela I, Teal J M. The nitrogen budget of a salt marsh ecosystem[J]. *Nature*, 1979, **280**(5724): 652-656.
- [2] Chmura G L, Anisfeld S C, Cahoon D R, *et al.* Global carbon sequestration in tidal, saline wetland soils [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2003, **17**(4): 1111-1133.
- [3] Vitousek P M, Mooney H A, Lubchenco H A, *et al.* Human domination of earth's ecosystems [J]. *Science*, 1997, **277**(5325): 494-499.
- [4] Smith S V. Carbon-nitrogen-phosphorus fluxes in the coastal zone: the global approach[J]. *LOICZ Newsletter*, 2002, **49**: 7-11.
- [5] Lau S S S, Chu L M. Contaminant release from sediments in a coastal wetland[J]. *Water Research*, 1999, **33**(4): 909-918.
- [6] Wang X C, Chen R F, Berry A. Sources and preservation of organic matter in Plum Island salt marsh sediments (MA, USA): long-chain *n*-alkanes and stable carbon isotope compositions[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2003, **58**(4): 917-928.
- [7] Valery L, Bouchard V, Lefevre J C. Impact of the invasive native species *Elymus athericus* on carbon pools in a salt marsh [J]. *Wetlands*, 2004, **24**(2): 268-276.
- [8] Zhou J L, Wu Y, Kang Q S, *et al.* Spatial variations of carbon, nitrogen, phosphorous and sulfur in the salt marsh sediments of the Yangtze Estuary in China[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2007, **71**(1-2): 47-59.
- [9] 高建华, 杨桂山, 欧维新. 苏北潮滩湿地不同生态带有机质来源辨析与定量估算[J]. *环境科学*, 2005, **26**(6): 51-56.
- [10] 高建华, 杨桂山, 欧维新. 互花米草引种对苏北潮滩湿地 TOC、TN 和 TP 分布的影响[J]. *地理研究*, 2007, **26**(4): 799-808.
- [11] 王爱军, 陈坚, 李东义, 等. 泉州湾海岸湿地沉积物 C、N 的空间变化[J]. *环境科学*, 2007, **28**(10): 2361-2368.
- [12] 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.
- [13] 张祥霖, 石盛莉, 潘根兴, 等. 互花米草入侵下福建漳江口红树林湿地土壤生态化学变化[J]. *地球科学进展*, 2008, **23**(9): 974-981.
- [14] 林鹏. 中国红树林生态系统[M]. 北京: 科学出版社, 1997. 11-33.
- [15] 杨忠兰. 福建九龙江河口湿地现状评价及保护对策[J]. *中南林业调查规划*, 2004, **23**(3): 40-43.
- [16] 陈国强, 刘影, 陈鹏. 海湾型城市湿地的动态变化及其退化因素分析[J]. *江西师范大学学报(自然科学版)*, 2007, **31**(3): 327-330.
- [17] 国家环境保护部. 2007 年中国近岸海域环境质量公报[R]. 北京, 2008. 36.
- [18] 林炳煌, 雷怀彦, 官宝聪, 等. 九龙江河口表层沉积物元素特征及地球化学意义[J]. *厦门大学学报(自然科学版)*, 2009, **48**(3): 450-455.
- [19] 柳浩然, 雷怀彦, 王蒙光, 等. 九龙江河口湾表层沉积物中重金属分布及其潜在生态风险[J]. *厦门大学学报(自然科学版)*, 2009, **48**(3): 456-460.
- [20] 潘齐坤, 罗专溪, 颜昌宙, 等. 城市滨海湿地表层沉积物磷形态与相关关系分析[J]. *生态环境学报*, 2010, **19**(9): 2117-2122.
- [21] 潘齐坤, 罗专溪, 邱昭政, 等. 九龙江口湿地表层沉积物氮的形态分布特征[J]. *环境科学研究*, 2011, **24**(6): 673-678.
- [22] 王振红, 王婷. 九龙江口南港段潮滩区土壤/沉积物的磷素形态特征[J]. *漳州师范学院学报(自然科学版)*, 2009, **22**(3): 111-115.
- [23] Ter Braak C J F, Šmilauer P. CANOCO reference manual and canodraw for windows user's guide-software for canonical community ordination (Version 4.5) [M]. New York, USA: Microcomputer Power, Ithaca, 2002.
- [24] 王国平, 刘景双, 张玉霞. 向海湿地全硫与有效硫垂直分布[J]. *水土保持通报*, 2003, **23**(2): 5-8.
- [25] 林慧娜, 傅娇艳, 吴浩, 等. 中国主要红树林湿地沉积物中硫的分布特征及影响因素[J]. *海洋科学*, 2009, **33**(12): 79-82.
- [26] 高建华, 杨桂山, 欧维新. 苏北潮滩湿地植被对沉积物 N、P 含量的影响[J]. *地理科学*, 2006, **26**(2): 224-230.
- [27] 龚子同, 张效朴. 中国的红树林与酸性硫酸盐土[J]. *土壤*

- 学报, 1994, **31**(1): 86-93.
- [28] Meziane T, Bodineau L, Retiere C, *et al.* The use of lipid markers to define sources of organic matter in sediment and food web of the intertidal salt-marsh-flat ecosystem of Mont-Saint-Michel Bay, France[J]. *Journal of Sea Research*, 1997, **38**(1-2): 47-58.
- [29] Chalmers A G, Wiegert R G, Wolf P L. Carbon balance in a salt marsh: interactions of diffusive export, tidal deposition and rainfall-caused erosion [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 1985, **21**(6): 757-771.
- [30] Roman C T, Daiber F C. Organic carbon flux through a Delaware Bay salt marsh: tidal exchange, particle size distribution, and storms[J]. *Marine Ecology Progress Series*, 1989, **54**(1-2): 149-156.
- [31] Hemminga M A, Cattrijsse A, Wielemaker A. Bedload and nearbed detritus transport in a tidal saltmarsh creek [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 1996, **42**(1): 55-62.
- [32] 周俊丽. 长江口湿地生态系统有机质的生物地球化学过程研究——以崇明东滩为例[D]. 上海: 华东师范大学, 2005. 125-126.
- [33] Holligan P M, Harris R P, Newell R C, *et al.* Vertical distribution and partitioning of organic carbon in mixed, frontal and stratified waters of the English Channel[J]. *Marine Ecology Progress Series*, 1984, **14**(2-3): 111-127.
- [34] Lee S, Fuhrman J A. Relationships between biovolume and biomass of naturally derived marine bacterioplankton [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1987, **53**(6): 1298-1303.
- [35] Hedges J I, Man D C. The characterization of plant tissues by their lignin oxidation products[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1979, **43**(11): 1803-1807.
- [36] Cowie G L, Hedges J I. Biochemical indicators of diagenetic alteration in natural organic matter mixtures[J]. *Nature*, 1994, **369**(6478): 304-307.
- [37] Meyers P A. Preservation of elemental and isotopic source identification of sedimentary organic matter [J]. *Chemical Geology*, 1994, **114**(3-4): 289-302.
- [38] 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**(1-4): 107-121.
- [39] Ashagrie Y, Zech W, Guggenberger G. Transformation of a *Podocarpus falcatus* dominated natural forest into a monoculture *Eucalyptus globulus* plantation at Munesa, Ethiopia; soil organic C, N and S dynamics in primary particle and aggregate-size fractions[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2005, **106**(1): 89-98.
- [40] 郑国侠, 宋金明, 孙云明, 等. 南海深海盆表层沉积物氮的地球化学特征与生态学功能[J]. *海洋学报*, 2006, **28**(6): 44-52.

CONTENTS

Characteristics of Atmospheric NO ₂ in the Beijing-Tianjin-Hebei Region and the Yangtze River Delta Analyzed by Satellite and Ground Observations	··· WANG Ying, LI Ling-jun, LIU Yang (3685)
Variation Analysis of Background Atmospheric Pollutants in North China During the Summer of 2008 to 2011	····· YANG Jun-yi, XIN Jin-yuan, JI Dong-sheng, <i>et al.</i> (3693)
Characteristics of Atmospheric Pollutants in Cangzhou	····· WANG Yong-hong, HU Bo, WANG Yue-si, <i>et al.</i> (3705)
Chemical Characteristics and Sources of Trace Metals in Precipitation Collected from a Typical Industrial City in Northern China	····· LI Yue-mei, PAN Yue-peng, WANG Yue-si, <i>et al.</i> (3712)
BTX Monitoring Nearby Main Road Traffic in Guangzhou	····· YE Cong-lei, XIE Pin-hua, QIN Min, <i>et al.</i> (3718)
Dynamic Road Vehicle Emission Inventory Simulation Study Based on Real Time Traffic Information	····· HUANG Cheng, LIU Juan, CHEN Chang-hong, <i>et al.</i> (3725)
Emission Characteristics of a Diesel Car Fueled with Coal Based Fischer-Tropsch (F-T) Diesel and Fossil Diesel Blends	····· HU Zhi-yuan, CHENG Liang, TAN Pi-qiang, <i>et al.</i> (3733)
Spatial Variations of Biogenic Elements in Coastal Wetland Sediments of the Jiulong River Estuary	····· YU Xiao-qing, YANG Jun, LIU Le-mian, <i>et al.</i> (3739)
Spatio-Temporal Distribution of TN and TP in Water and Evaluation of Eutrophic State of Lake Nansi	····· SHU Feng-yue, LIU Yu-pei, ZHAO Ying, <i>et al.</i> (3748)
Impact on Nitrogen and Phosphorous Export of Wetlands in Tianmu Lake Watershed	····· LI Zhao-fu, LIU Hong-yu, LI Heng-peng (3753)
Nitrogen and Phosphorus Composition in Urban Runoff from the New Development Area in Beijing	····· LI Li-qing, LÜ Shu-cong, ZHU Ren-xiao, <i>et al.</i> (3760)
Distribution and Sources of Arsenic in Yangzonghai Lake, China	····· ZHANG Yu-xi, XIANG Xiao-ping, ZHANG Ying, <i>et al.</i> (3768)
Occurrence of Fecal Indicator Bacteria in Urban Surface Water: A Case Study in Southern China	····· SUN Fu, SHA Jing, LIU Yan-hua (3778)
Vertical Migration of Algal Cells in the Daning River Bay of the Three Gorges Reservoir	····· ZHANG Yong-sheng, ZHENG Bing-hui, JIANG Xia, <i>et al.</i> (3787)
Construct of Yangtze-Huai River Rural Areas Ecological Drainage System and Its Retention Effect on Pollutants	····· SHAN Bao-qing, LI Nan, TANG Wen-zhong (3797)
Water Treatment Efficiency of Constructed Wetland Plant-Bed/Ditch Systems	····· WANG Zhong-qiong, ZHANG Rong-bin, CHEN Qing-hua, <i>et al.</i> (3804)
Effect of the Subsurface Constructed Wetland Evolution into Free Surface Flow Constructed Wetland on the Removal of Organic Matter, Nitrogen, and Phosphorus in Wastewater	····· WEI Ze-jun, XIE Jian-ping, HUANG Yu-ming (3812)
Treatment Characteristics of Saline Domestic Wastewater by Constructed Wetland	····· GAO Feng, YANG Zhao-hui, LI Chen, <i>et al.</i> (3820)
Degradation of β -Naphthol by Catalytic Wet Air Oxidation	····· LIU Jie, YU Chao-ying, ZHAO Pei-qing, <i>et al.</i> (3826)
Degradation of 2,4-Dichlorophenol in Aqueous Solution by ZVI/EDDS/Air System	····· SUN Qian, ZHOU Hai-yan, CAO Meng-hua, <i>et al.</i> (3833)
Study on Photocatalytic Degradation of 1,2,3-Trichlorobenzene Using the Microwaved MWNTs/TiO ₂ Composite	····· SHI Zhou, ZHANG Qian, ZHANG Wei, <i>et al.</i> (3840)
Mechanism of Cr(VI) Removal from Aqueous Solution Using Biochar Promoted by Humic Acid	····· DING Wen-chuan, TIAN Xiu-mei, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (3847)
Research on the Treatment of Wastewater Containing PVA by Ozonation-Activated Sludge Process	····· XING Xiao-qiong, HUANG Cheng-lan, LIU Min, <i>et al.</i> (3854)
Effects of Composite Substrates on the Phosphorus Removal in Granule-based EBPR System and Its Optimization Experiment	····· XU Shao-juan, SUN Pei-de, ZHENG Xiong-liu, <i>et al.</i> (3859)
Research of Input Water Ratio's Impact on the Quality of Effluent Water from Hydrolysis Reactor	····· LIANG Kang-qiang, XIONG Ya, QI Mao-rong, <i>et al.</i> (3868)
Evolution of Leachate Quantity and Quality in the Anaerobic-semiaerobic Bioreactor Landfill	····· HAN Zhi-yong, LIU Dan, LI Qi-bin, <i>et al.</i> (3873)
National Survey of Urban Sewage Reuse in China	····· GUO Yu-jie, WANG Xue-chao, ZHOU Zhen-min (3881)
Sorption and Desorption of 17 α -Ethinyl Estradiol and 4- <i>n</i> -Nonylphenol in Soil	····· JIANG Lu, WANG Ji-hua, LI Jian-zhong, <i>et al.</i> (3885)
Soil Organic Carbon Mineralization of Black Locust Forest in the Deep Soil Layer of the Hilly Region of the Loess Plateau, China	····· MA Xin-xin, XU Ming-xiang, YANG Kai (3893)
Effects of Soil Crusts on Surface Hydrology in the Semiarid Loess Hilly Area	····· WEI Wei, WEN Zhi, CHEN Li-ding, <i>et al.</i> (3901)
Environmental Factors on Distribution of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Soils from Dashiwei Karst Giant Doline (Tiankeng) in Guangxi, China	····· KONG Xiang-sheng, QI Shi-hua, JIANG Zhong-cheng, <i>et al.</i> (3905)
Investigation on Mechanism of Pyrite Oxidation in Acidic Solutions	····· WANG Nan, YI Xiao-yun, DANG Zhi, <i>et al.</i> (3916)
Monitoring of Water and Salt Transport in Silt and Sandy Soil During the Leaching Process	····· FU Teng-fei, JIA Yong-gang, GUO Lei, <i>et al.</i> (3922)
Simulation on Remediation of Benzene Contaminated Groundwater by Air Sparging	····· FAN Yan-ling, JIANG Lin, ZHANG Dan, <i>et al.</i> (3927)
Detecting the Cytotoxicities of Five Bisphenol A Analogues to the MCF-7 Human Breast Carcinoma Cell Line Through Different Endpoints	····· ZHANG Shuai-shuai, LIU Yan, LIU Shu-shen, <i>et al.</i> (3935)
Response of Copepod Community Characteristics to Environmental Factors in the Backshore Wetland of Expo Garden, Shanghai	····· CHEN Li-jing, WU Yan-fang, JING Yu-xiang, <i>et al.</i> (3941)
Isolation, Identification and Characterization of Halotolerant Petroleum-degrading Bacteria	····· WU Tao, XIE Wen-jun, YI Yan-li, <i>et al.</i> (3949)
Growth Kinetics and Phenol Degradation of Highly Efficient Phenol-degrading <i>Ochrobactrum</i> sp. CH10	····· CHEN Xiao-hua, WEI Gang, LIU Si-yuan, <i>et al.</i> (3956)
Isolation of Aerobic Degrading Strains for TBBPA and the Properties of Biodegradation	····· QIAN Yan-yuan, LIU Li-li, YU Xiao-juan, <i>et al.</i> (3962)
Influences of Long-term Application of Organic and Inorganic Fertilizers on the Composition and Abundance of <i>nirS</i> -type Denitrifiers in Black Soil	····· YIN Chang, FAN Fen-liang, LI Zhao-jun, <i>et al.</i> (3967)
Characteristics and Influencing Factors of Trichloroethylene Adsorption in Different Soil Types	····· HE Long, QIU Zhao-fu, LÜ Shu-guang, <i>et al.</i> (3976)
Degradation of Carbenazim in Paddy Soil and the Influencing Factors	····· XIAO Wen-dan, YANG Xiao-e, LI Ting-qiang (3983)
Effects of Sulphur Compounds on the Volatile Characteristics of Heavy Metals in Fly Ash from the MSW and Sewage Sludge Co-combustion Plant During the Disposal Process with Higher Temperature	····· LIU Jing-yong, SUN Shui-yu (3990)
Low-temperature Thermal Treatment of Dioxin in Medical Waste Fly Ash Under Inert Atmosphere	····· JI Sha-sha, LI Xiao-dong, XU Xu, <i>et al.</i> (3999)
Hourly Measurement on Aerosol NH ₃ and Gas NO _x Emission in the Rice Field	····· GONG Wei-wei, LUAN Sheng-ji (4006)
Implementation of an Electronic Nose for Rapid Detection of Volatile Chloralkane and Chloroalkene	····· WEN Xiao-gang, LIU Rui, CAI Qiang, <i>et al.</i> (4012)
Pilot Study on PAHs of the Atmosphere Around the Refuse Incineration Plant Based on the Technology of Passive Sampling	····· SUN Shao-ai, LI Yang, ZHOU Yi, <i>et al.</i> (4018)
Spatial Distribution and Pollution Source Identification of Agricultural Non-Point Source Pollution in Fujian Watershed	····· DING Xiao-wen, SHEN Zhen-yao (4025)
Difference of P Content in Different Area Substrate of Constructed Wetland	····· CAO Xue-ying, CHONG Yun-xiao, YU Guang-wei, <i>et al.</i> (4033)
Selective Detection of Viable Pathogenic Bacteria in Water Using Reverse Transcription Quantitative PCR	····· LIN Yi-wen, LI Dan, WU Shu-xu, <i>et al.</i> (4040)
Formation of Disinfection By-products; Temperature Effect and Kinetic Modeling	····· ZHANG Xiao-lu, YANG Hong-wei, WANG Xiao-mao, <i>et al.</i> (4046)
A Novel Quantitative Approach to Study Dynamic Anaerobic Process at Micro Scale	····· ZHANG Zhong-liang, WU Jing, JIANG Jian-kai, <i>et al.</i> (4052)
Leaves of <i>Platanus orientalis</i> as the Carbon Source for Denitrification	····· XIONG Jian-feng, XU Hua, YAN Ning, <i>et al.</i> (4057)
Isolation, Characterization of an Anthracene Degrading Bacterium <i>Martellella</i> sp. AD-3 and Cloning of Dioxygenase Gene	····· CUI Chang-zheng, FENG Tian-cai, YU Ya-qi, <i>et al.</i> (4062)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 汤鸿霄 陈吉宁 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2012年11月15日 33卷 第11期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 33 No. 11 Nov. 15, 2012

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市 2871 信箱(海淀区双清路 18 号, 邮政编码: 100085) 电话: 010-62941102, 010-62849343 传真: 010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel: 010-62941102, 010-62849343; Fax: 010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街 16 号 邮政编码: 100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话: 010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencecp. com	Distributed	by	Science Press Tel: 010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencecp. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京 399 信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国 内 定 价: 70.00 元

国外发行代号: M 205

国 内 外 公 开 发 行