

DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2014.0629

胡敏杰, 邹芳芳, 仝川, 等. 2014. 闽江河口短叶茳苳沼泽湿地沉积物磷的赋存形态和空间分布[J]. 环境科学学报, 34(11): 2815-2822

Hu M J, Zou F F, Tong C, et al. 2014. Fractions and spatial distribution of phosphorus in sediments of the *Cyperus malaccensis* marshes in the Min River estuary[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 34(11): 2815-2822

闽江河口短叶茳苳沼泽湿地沉积物磷的赋存形态和空间分布

胡敏杰¹, 邹芳芳², 仝川^{1,*}, 章文龙¹, 高灯州¹

1. 福建师范大学湿润亚热带生态-地理过程教育部重点实验室 亚热带湿地研究中心 地理科学学院, 福州 350007

2. 福建农林大学安溪茶学院, 福州 350002

收稿日期: 2014-01-13

修回日期: 2014-02-22

录用日期: 2014-02-22

摘要: 对闽江河口区不同盐度短叶茳苳沼泽湿地沉积物中磷的赋存形态和分布特征进行了研究, 探讨了河口沉积物中磷的来源及其影响因子。结果表明: ①闽江河口湿地沉积物全磷(TP)含量介于 607.91~807.60 mg·kg⁻¹, 平均值为 726.29 mg·kg⁻¹; 有机磷(OP)含量介于 120.44~166.63 mg·kg⁻¹, 平均值为 139.43 mg·kg⁻¹, 约占 TP 的 18.93%; 无机磷(IP)含量介于 479.65~647.56 mg·kg⁻¹, 平均值为 586.86 mg·kg⁻¹, 约占 TP 的 81.07%, IP 是磷的主要赋存形态。②IP 中, 赋存形态以闭蓄态磷(O-P)和铁结合态磷(Fe-P)为主, 分别占 IP 的 39.97% 和 32.92%; 其次是钙结合态磷(Ca-P)和铝结合态磷(Al-P), 分别占 IP 的 17.89%、9.22%。③在空间分布上, TP、OP、IP 含量在由海向陆方向整体呈先降低后递增趋势; IP 不同赋存形态在空间上也整体上呈现出以上趋势; 垂直方向上, 总体都表现为随土层深度波动降低, 这在一定程度上反映了近年来河口湿地环境污染的加剧。④磷的赋存形态和空间分布特征是电导率、pH、容重、含水率和粒度等多因子综合作用的结果。

关键词: 磷; 赋存形态; 空间分布; 沉积物; 短叶茳苳沼泽湿地; 闽江河口

文章编号: 0253-2468(2014)11-2815-08

中图分类号: X131

文献标识码: A

Fractions and spatial distribution of phosphorus in sediments of the *Cyperus malaccensis* marshes in the Min River estuary

HU Minjie¹, ZOU Fangfang², TONG Chuan^{1,*}, ZHANG Wenlong¹, GAO Dengzhou¹

1. Key Laboratory of Humid Sub-tropical Eco-geographical Process of the Ministry of Education, Research Centre of Wetlands in Subtropical Region, School of Geographical Sciences, Fujian Normal Universities, Fuzhou 350007

2. Anxi Tea College, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002

Received 13 January 2014;

received in revised form 22 February 2014;

accepted 22 February 2014

Abstract: Fractions and spatial distribution of phosphorus in the sediments of the *Cyperus malaccensis* marshes along the salinity gradient in the Min River estuary were determined, and the sources and main impact factors were discussed. Total Phosphorus (TP) contents in the sediments ranged from 607.91 to 807.60 mg·kg⁻¹, with an average of 726.29 mg·kg⁻¹. Organic Phosphorus (OP) contents ranged from 120.44 to 166.63 mg·kg⁻¹, with an average of 139.43 mg·kg⁻¹ and accounting for 18.93% of TP; Inorganic Phosphorus (IP) contents ranged from 479.65 to 647.56 mg·kg⁻¹, with an average of 586.86 mg·kg⁻¹ and accounting for 81.07% of TP. The occluded forms of P (O-P) and phosphate bound to iron oxides (Fe-P) were the major part of IP, accounting for 39.97% and 32.92% of IP, respectively. They were followed by Ca-bound P (Ca-P) and Al-bound P (Al-P), accounting for 17.89% and 9.22% of IP, respectively. Overall, the contents of TP, OP and IP as well as various forms of IP showed a decreasing then increasing trend from coastal areas to inland. The contents of various forms phosphorus in sediments had a fluctuating decreasing trend with sediments depth, indicating the increasing environmental pollution in recent years. Characteristics of fractions and spatial distribution of phosphorus are the combined effects of multiple factors, such as salinity, pH, bulk density, moisture and grain size.

Keywords: phosphorus; fractions; spatial distribution; sediment; *Cyperus malaccensis* marsh; Min River estuary

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.41071148); 福建师范大学亚热带河口生物地球化学创新团队项目

Supported by the National Natural Science Foundation of China (No.41071148) and the Innovation Team of Subtropical Estuarine Biogeochemistry of Fujian Normal University

作者简介: 胡敏杰 (1988—), 男, 博士研究生, E-mail: mjhu0014@163.com; * 通讯作者 (责任作者), E-mail: tongch@fjnu.edu.cn

Biography: HU Minjie (1988—), male, Ph.D. candidate, E-mail: mjhu0014@163.com; * **Corresponding author**, E-mail: tongch@fjnu.edu.cn

1 引言 (Introduction)

磷是限制植物生长和水质富营养化的主要元素,对生态系统的初级生产力和营养状况等都具有重要影响(向速林和周文斌,2010).沉积物作为磷的重要源和汇,是磷积累、输送和再生的重要场所,显著影响着磷的生物地球化学循环(McDowell *et al.*, 2002).沉积物中参与界面交换的磷及其释放量的大小,主要取决于沉积物中磷的赋存形态(Zhou *et al.*, 2005),不同形态的磷在其释放形态和生物有效性等方面存在较大差异.沉积物中磷的赋存形态及其相互转化是控制磷迁移、转化的主要因子(Van Der Zee *et al.*, 2007),尤其是在外源污染得到控制时,作为内源的沉积物磷释放就成为影响水体磷浓度的主要因子(Abram and Jarrell, 1995),使沉积物从磷的“汇”转为“源”.因此,研究沉积物中磷的赋存形态和空间分布对于分析磷的来源及评估区域的生态风险具有重要意义.

90%以上的磷是以悬浮态形式由河流注入河口和滨海水域(Föllmi, 1996).滨海河口湿地处于海陆交汇地带,特殊的水动力作用以及咸淡水交汇使得环境因子频繁变化,导致河口沉积物具有磷“源”和“汇”的双重作用.河口湿地沉积物中磷的含量及赋存形态影响着湿地生态系统中物质与能量的界面交换过程和海陆相互作用(王国平,2004),是河口湿地生物地球化学循环研究的重要一环.目前,国外关于河口湿地沉积物磷赋存形态的相关研究较多,成果丰硕(Sundby *et al.*, 1992; Ruttenberg, 1992; Graca and Bolalek, 1998).国内关于沉积物磷形态研究主要集中于内陆湖泊和河流(朱广伟等,2004;张宪伟等,2009;袁和忠等,2010),对于滨海河口湿地沉积物磷的研究相对较少,主要集中在珠江口(扈传昱等,2001)、长江口(侯立军等,2006)和黄河口(罗先香等,2011)等区域.

闽江河口湿地是我国东南沿海区典型的河口湿地之一,为闽江入海携带物质堆积而成(全川等,2010),沉积物磷的含量与分布受上游径流和潮汐的双重影响,具有典型意义.但目前,对于闽江河口沼泽湿地沉积物磷形态和分布特征的研究尚未见报道,仅有关于闽江口鳝鱼滩湿地沉积物有机磷和无机磷含量及分布特征的研究(翟继红等,2010).考虑到目前对于入海河口区盐度梯度下潮汐沼泽湿地沉积物磷含量和赋存形态的研究报道较少,本研

究按盐度梯度选择闽江河口区中游段到入海口最典型的4个湿地(鳝鱼滩、蝙蝠洲、下洋洲和塔礁洲)上均有分布的短叶茳芏潮汐沼泽为研究区,探讨闽江河口区盐度梯度下短叶茳芏沼泽湿地沉积物磷的形态特征和分异规律,为认识闽江河口区潮汐沼泽湿地沉积物磷的含量、赋存形态和空间分布提供基础数据.

2 材料与方法 (Materials and methods)

2.1 研究区简况

闽江河口湿地地处东经 $119^{\circ}5'36'' \sim 119^{\circ}41'5''$, 北纬 $25^{\circ}50'43'' \sim 26^{\circ}9'42''$, 是我国闽江流域最大的天然湿地(刘剑秋等,2006),是典型的开放式感潮河口.该区属亚热带海洋性季风气候,温暖湿润,年均气温 19.6°C , 年均降水量 1346 mm , 潮汐属典型半日潮,土壤以红壤、砖红壤以及人工作用下形成的水稻土为主(郑彩红等,2006).芦苇(*Phragmites australis*)、短叶茳芏(*Cyperus malaccensis* Lam. var. *brevifolius* Bocklr)和蔗草(*Scirpus triqueter* L.)是该区的土著优势植物,其中短叶茳芏在研究区均有分布.河口区流经福州市区,沿陆-海方向,人类活动影响减弱,盐度逐渐增加.

2.2 沉积物取样

本研究以闽江河口短叶茳芏湿地沉积物为研究对象.为反映沉积物磷的空间分异特征,按照海陆位置和盐度梯度,依次选取分布于闽江河口区的鳝鱼滩湿地($26^{\circ}01'46.1''\text{N}$, $119^{\circ}37'34.6''\text{E}$)、蝙蝠洲湿地($26^{\circ}03'07.8''\text{N}$, $119^{\circ}33'26.5''\text{E}$)、下洋洲湿地($25^{\circ}58'32.2''\text{N}$, $119^{\circ}25'03.8''\text{E}$)、塔礁洲湿地($25^{\circ}57'22.4''\text{N}$, $119^{\circ}20'29.8''\text{E}$)上的短叶茳芏沼泽进行沉积物采样(图1).在以上短叶茳芏沼泽湿地内,基本

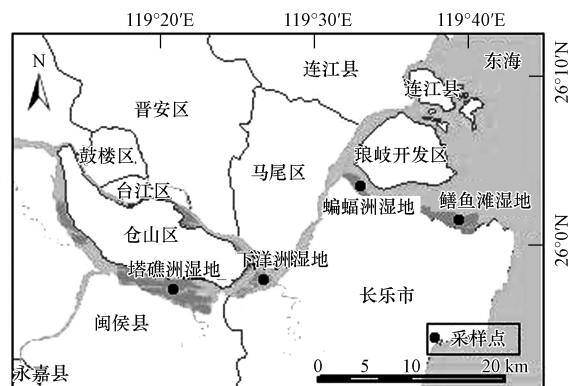


图1 采样点位示意图

Fig.1 Distribution of sampling sites in the Min River estuary

在与海岸线或河岸线平行的方向随机布设 3 个样点.为了反映沉积物磷形态的垂直分异规律和沉积层序,采用传统挖土壤剖面的方法取样,每个取样点取样深度为 50 cm,分别在 0~10 cm、10~20 cm、20~30 cm、30~40 cm 和 40~50 cm 土层取样,并将各层土样放入相应自封袋中保存.将所采沉积物样品带回实验室,经自然晾干,去除杂质,过 10 目和 100 目筛,装入自封袋,封口备用.

2.3 测定方法

沉积物中磷形态的提取以化学提取法为主,是利用对沉积物中各种形态的磷酸盐具有不同浸提能力的化学浸提剂,将磷酸盐逐级分离.本研究采用中国土壤学会组编的《土壤农业化学分析方法》(鲁如坤,2000)中规定的分级提取方法,测定了沉积物中的全磷(TP)和无机磷(IP)的分级.沉积物 TP 含量经硫酸-高氯酸消解后使用流动连续分析仪测定(Skalar San⁺⁺,荷兰);IP 中磷的赋存形态主要分为铝结合态磷(Al-P)、铁结合态磷(Fe-P)、闭蓄态磷(O-P)和钙结合态磷(Ca-P),按照分级提取方法依次提取,浸提液使用流动连续分析仪测定;有机磷(OP)含量为 TP 与 IP 的差值.

沉积物有机质使用重铬酸钾氧化-还原滴定法测定,全氮(TN)使用碳氮元素分析仪测定(vario MAX,德国),电导率和 pH 值采用电位法测定(DDS-307 型电导仪和奥立龙 868 型酸度计),容重

用环刀法进行测定,含水率用烘干法测定,粒度组成采用 Master Sizer-2000 型激光粒度分析仪测定.

2.4 数据处理

数据处理及相关性分析,采用 Excel 2003 与 SPSS17.0 软件中的双因素方差分析和 Pearson 相关分析等工具.

3 结果与分析(Results and analysis)

3.1 沉积物理化性质分析

盐度梯度下,闽江河口短叶茳苳湿地沉积物电导率、pH、含水率、容重、粒度、有机质变化趋势如表 1 所示.电导率和 pH 在不同湿地均表现出显著正相关关系($p < 0.01$),具有随盐度降低而减少的趋势;垂直层面上大致呈现出随深度递增的趋势.含水率和容重的相关性分析表现为显著负相关关系($p < 0.01$),在水平和垂直方向,两者均呈现完全相反的变化趋势.电导率、pH 与含水率、容重均不相关($p > 0.05$),粒度主要由粉粒、砂粒和粘粒组成,以粉粒为主,粉粒、粘粒含量分布趋势为鳝鱼滩 > 蝙蝠洲 > 下洋洲 > 塔礁洲,砂粒则相反;电导率、pH 与粘粒、粉粒呈极显著正相关关系($p < 0.01$),与砂粒呈极显著负相关关系($p < 0.01$).沉积物有机质含量在 10~30 cm 土层差异较大,有机质在不同湿地的相关性不显著($p > 0.05$).

表 1 采样点沉积物理化性质

Table 1 Physical and chemical properties of the sediments from sampling sites

湿地	土层深度/ cm	电导率/ ($\text{mS} \cdot \text{cm}^{-1}$)	pH	含水率	容重/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	粘粒	粉粒	砂粒	有机质
鳝鱼滩湿地	0~10	1.17	6.65	99.05%	0.64	12.66%	62.48%	24.87%	7.08%
	10~20	1.19	6.32	91.56%	0.75	13.18%	64.1%	22.72%	6.37%
	20~30	1.46	6.28	91.26%	0.75	10.64%	59.46%	29.9%	5.77%
	30~40	1.62	6.18	88.8%	0.79	11.78%	60.35%	27.87%	5.47%
	40~50	2.01	6.44	89.97%	0.79	11.6%	60.97%	27.43%	5.6%
蝙蝠洲湿地	0~10	0.71	4.93	87.57%	0.78	11.45%	57.68%	30.87%	7.3%
	10~20	0.53	5.19	66.03%	0.96	12.14%	54.39%	33.47%	3.86%
	20~30	0.71	5.65	84.59%	0.82	11.69%	52.56%	35.75%	4.03%
	30~40	1.18	5.66	79.25%	0.87	11.63%	54.16%	34.21%	4.71%
	40~50	1.28	5.67	90.78%	0.8	12.43%	52.73%	34.84%	5.26%
下洋洲湿地	0~10	0.36	4.93	89.9%	0.78	9.99%	53.51%	36.5	6.2%
	10~20	0.37	4.6	88.91%	0.8	10.89%	53.3%	35.81%	6.21%
	20~30	0.35	4.53	86.29%	0.81	10.85%	54.56%	34.59%	6.6%
	30~40	0.34	4.73	75.43%	0.89	11.21%	52.53%	36.26%	6.37%
	40~50	0.33	5.01	74.65%	0.91	11.9%	52.2%	35.9%	5.33%

续表1

湿地	土层深度/ cm	电导率/ ($\text{mS}\cdot\text{cm}^{-1}$)	pH	含水率	容重/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	粘粒	粉粒	砂粒	有机质
塔礁洲湿地	0~10	0.33	5.01	112.05%	0.66	11.23%	51.59%	37.18%	7.74%
	10~20	0.24	4.62	91.35%	0.72	9.7%	52.2%	38.09%	6.19%
	20~30	0.27	4.52	88.35%	0.78	8.97%	46.52%	44.5%	5.64%
	30~40	0.31	4.72	78.32%	0.85	11%	50.01%	38.99%	5.75%
	40~50	0.33	4.87	81.55%	0.82	10.32%	50.01%	39.67%	6.89%

3.2 沉积物 TP 含量与分布特征

闽江河口不同盐度湿地沉积物中 TP 含量在 $607.91 \sim 807.60 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间, 平均值为 $726.29 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 含量高于黄河口湿地(陈为峰等, 2008)和辽河口湿地(罗先香等, 2010), 具有潜在富营养化风险. 不同采样点沉积物中 TP 含量分布呈现出随盐度梯度先减少后递增的趋势, 具有明显的空间差异性. TP 与 TN、有机质含量间存在极显著正相关关系 ($p < 0.01$), 说明它们之间具有同源性. TP 的空间分

布趋势为: 鱻鱼滩 > 塔礁洲 > 下洋洲 > 蝙蝠洲, 说明水动力作用(潮汐、径流等)和陆源污染物输入(动植物残体、农药化肥和生产生活垃圾等)是 TP 的重要来源. 在垂直层面上, 闽江口鱻鱼滩、蝙蝠洲、下洋洲、塔礁洲湿地沉积物(0~50 cm) TP 含量在 10~30 cm 出现较大差异. 各湿地沉积物中 TP 含量具有相似的垂直变化规律(图 2), 最大值分别出现在沉积物表层(0~10 cm)和亚表层(10~20 cm), 这在一定程度上说明近年来河口区受磷污染加剧.

3.3 沉积物 IP 含量及形态分布特征

IP 主要指吸附在沉积物上的溶解态磷酸盐与金属离子结合后以不同形态存在的磷(潘成荣等, 2007), 是比较活跃的磷形态. 研究区 IP 含量介于 $479.65 \sim 647.56 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 平均值为 $586.86 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 占 TP 含量的 81.07%, 是影响 TP 趋势的主要因素, 盐度梯度上含量变化趋势与 TP 相似. IP 主要包括 Al-P、Fe-P、O-P 和 Ca-P 4 种赋存形态(表 2), 各赋存形态按平均含量从大到小依次为: O-P > Fe-P > Ca-P > Al-P(图 3). 对不同形态磷之间的相关性分析表明, 在整个闽江河口区, IP 与 TP 呈极显著正相关关系 ($p < 0.01$), Fe-P、Al-P、O-P 与 IP、TP 均表现为极显著正相关关系 ($p < 0.01$).

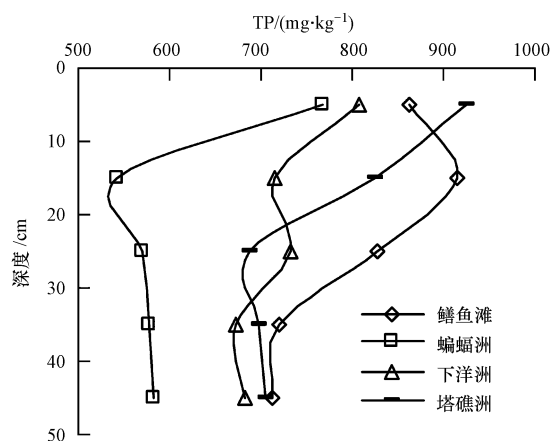


图 2 沉积物 TP 含量垂直分布

Fig.2 Vertical distribution of TP in sediments

表 2 沉积物各形态磷的含量分布

湿地	Al-P	Fe-P	O-P	Ca-P	IP	TP
鱻鱼滩湿地	59.23 ± 2.45	184.46 ± 10.45	263.87 ± 11.83	133.42 ± 2.86	640.97 ± 21.69	807.60 ± 39.92
蝙蝠洲湿地	37.48 ± 1.98	141.32 ± 14.21	199.07 ± 3.86	101.79 ± 2.98	479.65 ± 19.47	607.91 ± 40.48
下洋洲湿地	52.70 ± 5.78	216.33 ± 13.30	218.20 ± 2.58	92.03 ± 1.88	579.26 ± 22.80	721.64 ± 23.95
塔礁洲湿地	69.21 ± 2.44	237.04 ± 13.07	254.20 ± 9.83	87.11 ± 2.64	647.56 ± 20.94	768.00 ± 46.67
平均	54.66 ± 6.66	194.79 ± 20.85	233.84 ± 15.19	103.59 ± 10.40	586.86 ± 38.91	726.29 ± 43.19

O-P 是为氧化铁胶膜所包被的还原溶解性磷酸铁和铝, 其形成与沉积物风化强度显著相关(吴峰炜等, 2009), 这种形态的磷难以释放出来被生物利用. 闽江河口短叶茳芏湿地沉积物中 O-P 含量介于

$199.07 \sim 263.87 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 平均含量为 $233.84 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 约占 IP 的 39.97%, 是 IP 的主要赋存形态, 说明该区域沉积物中氧化物含量较高. 空间分布上与 TP 相似, 高值出现在鱻鱼滩湿地和塔礁洲湿地,

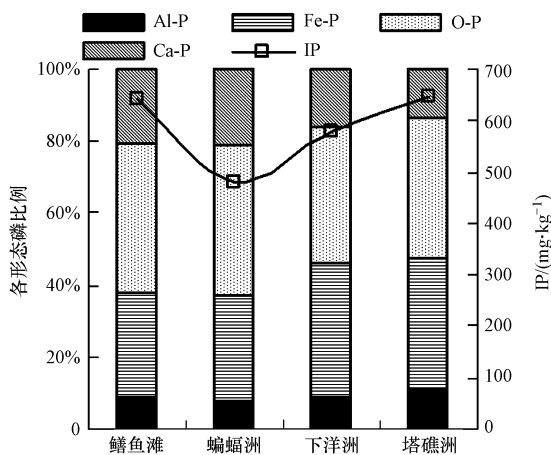


图3 沉积物中 IP 的化学形态特征

Fig.3 Chemical fractions of IP in sediments

这可能是径流和潮汐携带的有机物(如动植物残体与粪便等)中的磷回归沉积物后被铁氧化物胶膜包裹形成的稳定态磷(张晶,2012)。

Ca-P 是生物不可利用的磷,不易被释放,主要来源于碎屑岩和自生源(Ruban *et al.*, 2001).数据分析表明,闽江口短叶茳苳湿地沉积物中 Ca-P 含量介于 87.11 ~ 133.42 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,平均值为 103.59 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,约占 IP 的 17.89%.水平分布表现为由海向陆逐渐减少,与电导率、pH 和粘粒递减方向一致,这是因为钙在间歇水中的化学活性随盐度的增加而

增大(宋祖光等,2007),海盐中的硫酸盐促进了沉积物中硫化物的产生,硫化物与钙结合,降低了其隔离磷的能力(Hartzell and Jordan, 2012);pH 值增加也会使 Ca-P 发生沉淀(金相灿等,2008);粒度越小吸附磷的能力越强.相关分析也显示,Ca-P 与电导率、pH 值、粘粒、粉粒呈显著正相关关系($p < 0.01$),与砂粒呈显著负相关关系($p < 0.01$).鱗鱼滩湿地 Ca-P 含量为最高值,这是由于位于河口区,受潮汐周期性影响,盐度高,这与海相沉积物中钙磷含量较高也是吻合的.垂直分布上,总体呈随深度增加而波动减少(图 4),其中鱗鱼滩湿地垂直波动最为明显,这可能与处于咸淡水交汇地带,沉积环境复杂,酸碱度变化剧烈有关.Al-P 和 Fe-P 是溶解态磷酸盐与 Al、Fe 等金属离子结合而成,其含量受沉积环境的影响(徐康等,2011).研究区 Al-P 和 Fe-P 含量平均值分别为 54.66 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 194.79 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,分布占 IP 的 9.22%、32.92%.Fe-P 与有机质含量呈显著正相关关系($p < 0.05$),说明 Fe-P 含量可能与有机质的累积和氧化降解有关(叶华香等,2012);Fe-P 又与电导率呈显著负相关关系($p < 0.05$),这可能是由于盐度增加所带来的硫化物增加,促进了 Fe^{3+} 向 Fe^{2+} 的还原(Jordan *et al.*, 2008).Al-P 与容重含量呈极显著负相关关系($p < 0.01$).二者水平分布趋势与 TP 相似,高值均出现在塔礁

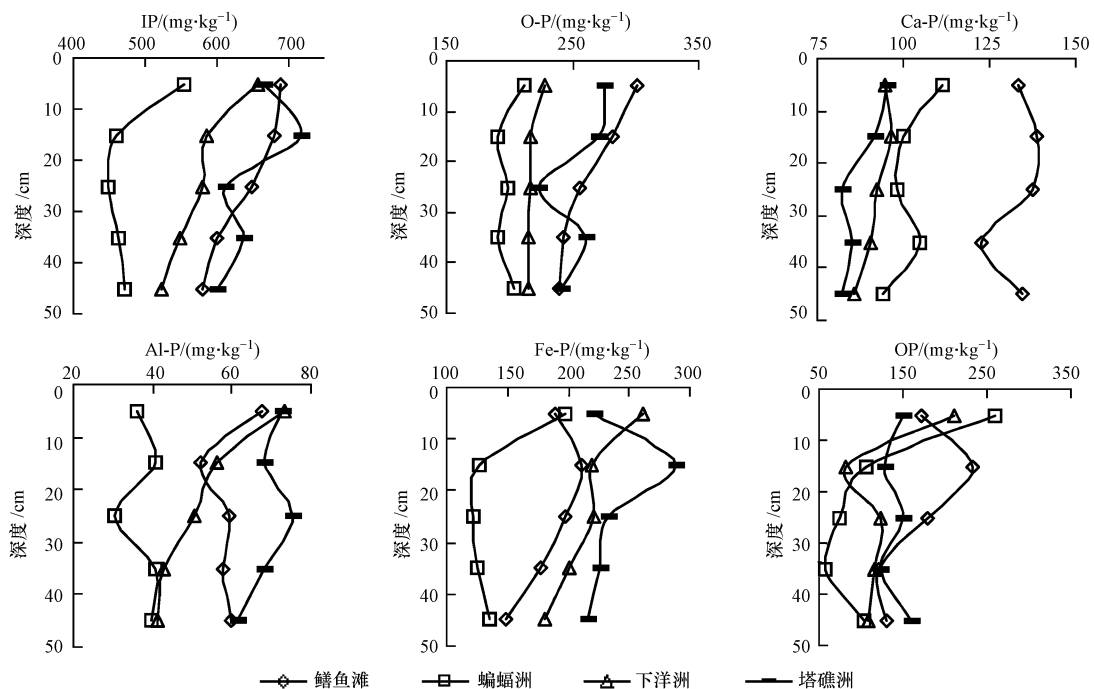


图4 沉积物中 OP 和 IP 中各化学形态垂直分布特征

Fig.4 Vertical distribution of OP and IP in sediments

洲湿地和鳊鱼滩湿地.垂直分布上,总体呈随深度增加而波动降低的趋势,但在 30 cm 以下下降趋势减缓,基本呈现表层富集的特征(图 4).此外,Ca-P 在中性至强酸性沉积物的风化过程中会转化为低溶性的 Al-P 和 Fe-P,这也与研究区 Ca-P 与 Al-P、Fe-P 含量变化趋势相反是吻合的.

3.4 沉积物 OP 含量与分布特征

河口湿地沉积物中的 OP 主要来自海源、陆源和自身源的混合输入(Fang, 2000),难以释放被生物利用.盐度梯度下,闽江口短叶茳苳沼泽湿地沉积物中 OP 含量介于 120.44~166.63 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,平均含量为 139.43 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,约占 TP 的 18.93%,远低于 IP. OP 含量与粘粒、粉粒呈显著正相关关系($p<0.05$),与有机质之间存在显著的正相关关系($p<0.01$),表

明粒度和有机质可能是影响沉积物 OP 累积与赋存的主要因素之一.由于 OP 只有在有机质矿化时才会被释放,所以河口湿地沉积物中的 OP 含量相对 IP 较低.OP 含量水平与垂直分布趋势与 TP、IP 相似,最高值出现在鳊鱼滩湿地,这可能是由于样品采自潮间带,上游径流和潮汐携带的有机物质在此截留,沉积物矿物成分高,而较小的沉积物粒度对有机物吸附强,使有机磷含量较高;垂直方向波动较大(图 5),这也反映了河口区水文条件的复杂性.

3.5 沉积物各形态磷与环境因子间的关系

将沉积物 TP、OP、IP、O-P、Fe-P、Ca-P、Al-P 含量数据分别与沉积物电导率、pH、容重、含水率、粒度、有机质、TN 值进行线性相关分析,结果见表 3.

表 3 沉积物各形态磷含量与理化性质的相关关系($n=60$)

Table 3 Correlation between contents of fractions of phosphorus and physicochemical properties in sediments

指标	电导率	pH	容重	含水率	粘粒	粉粒	砂粒	有机质	TN
TP	0.012	0.165	-0.796**	0.735**	-0.063	0.406	-0.339	0.713**	0.684**
IP	-0.079	0.040	-0.731**	0.601**	-0.305	0.230	-0.141	0.496*	0.475*
OP	0.150	0.289	-0.543**	0.620**	0.347*	0.502*	-0.502*	0.737**	0.716**
Fe-P	-0.540*	-0.506*	-0.431	0.337	-0.340	-0.228	0.321	0.532*	0.520*
Ca-P	0.833**	0.885**	-0.403	0.330	0.521**	0.950**	-0.923**	-0.328	0.022
Al-P	-0.148	-0.099	-0.585**	0.527**	-0.540	-0.112	0.201	0.143	0.286
O-P	0.130	0.336	-0.768**	0.636**	0.050	0.393	-0.350	0.058	0.342

注: ** $p<0.01$; * $p<0.05$.

由表 3 可知,沉积物电导率、pH、容重、含水率、粒度、有机质、TN 等均在不同程度上影响着河口湿地磷形态的分布.综合来看,闽江口短叶茳苳沼泽湿地沉积物中 TP、IP、OP、Al-P、O-P 含量均与容重呈显著负相关关系($p<0.01$),与含水率呈显著正相关关系($p<0.05$);TP、OP 含量与有机质、TN 均表现为显著正相关关系($p<0.01$),与电导率、pH 相关性不显著,OP 含量还与粘粒、粉粒呈显著正相关关系($p<0.05$);Fe-P 与电导率、pH 值呈显著负相关关系($p<0.05$),与有机质、TN 呈显著正相关关系($p<0.05$);Ca-P 与电导率、pH、粘粒、粉粒均显著正相关关系($p<0.01$),与砂粒呈显著负相关关系($p<0.01$).从沉积物垂直剖面变化的影响因子分析,不同湿地沉积物各种磷形态含量与各因子间相关性差异较大.综合而言,表现为受电导率、pH 值、粒度、有机质等多因子的调节.

4 讨论(Discussion)

盐度梯度下,闽江河口短叶茳苳沼泽湿地沉积

物磷的赋存形态和空间分布特征是多因子综合作用的结果,具有重要的环境学意义.

4.1 水动力作用对沉积物磷形态分布的影响

强烈的水动力作用及咸淡水交汇使得环境因子频繁变化,增加了沉积物中磷作为内源向上覆水体释放的可能性.①潮汐顶托作用(王纯等,2011),使上游径流流速减缓,陆源污染物在此沉淀、累积,同时潮汐携带的动植物残体、固体垃圾等没有及时退去,也增加了各形态磷的含量;②周期性涨潮使得河口区盐度增加,硫酸盐类物质含量也随之增加,而硫酸盐类物质会促进磷的溶解与沉淀,进而对沉积物中各形态磷的含量产生影响(Hartzell *et al.*, 2010);盐度也通过影响磷的沉积速率而影响磷的形态(Jordan *et al.*, 2008);此外,在盐度对磷的影响中,离子强度也扮演重要角色,由于离子间的竞争,盐度的增加可能减少对 PO_4^{3-} 的吸附(Beltman *et al.*, 2000);Paludan 和 Morris(1999)也认为,河口沼泽沉积物磷形态沿盐度梯度的变化是离子强度和铁、钙等有效性发生变化的结果.③在咸淡水交汇

地带,酸碱度变化剧烈,而海洋沉积物在 pH 值接近 7 时,就有利于磷灰石的形成(刘敏等,2001);同时, pH 值随盐度梯度的增加而增加,促进了咸水中 SO_4^{2-} 的还原,改变了磷酸根离子的电荷,从而降低对 PO_4^{3-} 的吸附(Sundareshwar and Morris, 1999; Coelho *et al.*, 2004). 鱔鱼滩湿地位于出海口海滨段,咸水影响最明显,水文特征及物化环境变化导致地表被潮水淹没的时间长,潮水水位高,植被初级生产力也相对较高(贾瑞霞等,2008),加上潮汐携带的有机物质及其顶托作用,使得磷素在沉积物表层滞留、分解并输入沉积物中,使该区出现高值。

4.2 沉积物机械组成对磷形态分布的影响

从本研究相关分析结果可以看出,沉积物机械组成主要从容重和粒径两个方面影响磷形态分布:①各形态磷含量总体表现为与容重呈负相关关系,这主要是由于容重越小,沉积物越疏松,通透性越好,持水能力也就越强,使得沉积物水分、空气、热量等理化性质得到改善(罗先香等,2011),磷等营养元素含量也就越高;②与沉积物粒度呈负相关关系,粒度越小磷含量就越高,这是因为粒度小的颗粒物表面积大,表面附着营养盐的能力就越强,从而使磷的含量随细颗粒含量的增加而增大(李敏等,2004),沉积物粒度是控制研究区表层沉积物各形态磷含量分布的重要因素。

4.3 人类活动对沉积物磷形态分布的影响

磷的形态研究反映的不仅是早期成岩作用的动力学过程,而且也反映了物源输入和人为影响等重要信息(吴峰炜等,2009).整个闽江河口区流经福州市区并经长乐市和连江县注入海洋,处于由城市向郊区过渡的区域,受人类活动影响差异显著.随着经济的发展,研究区围塘养殖、围垦造田、生产生活排污等使大量的磷素不断注入滨岸湿地.其中,塔礁洲湿地处于福州市城郊结合区,受人类活动影响明显,生产生活污水和垃圾等都随江汇集于此,同时此处也是水禽养殖和水产养殖的集中地,动物排泄物和养殖饲料都在此累积,沉积物稳定性较弱,这都对各形态磷的输入、积累、转化产生影响.TP 含量的空间分布在向海方向,大致表现为塔礁洲>下洋洲>蝙蝠洲,这与人类活动影响由陆向海减弱的趋势是一致的.而鱔鱼滩湿地磷含量的异常高值主要是受海洋的影响。

4.4 湿地沉积物磷的生态风险评价

河口湿地沉积物中磷的形态与分布对于河口

及滨岸地区的污染状况具有重要的指示意义.根据加拿大安大略省制定的环境质量评价标准,即能引起最低级别生态风险效应(此时沉积物已受污染,但多数生物尚可承受)的 TP 含量为 $600 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (Leivuori and Niemistö, 1995).本研究中闽江河口各研究湿地沉积物 TP 含量介于 $607.91 \sim 807.60 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间,平均值为 $726.29 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,说明 TP 含量已超正常范围,受磷污染较明显,具有潜在生态危险性.其中,沉积物表层(0~10 cm)和亚表层(10~20 cm)受磷污染较为突出,这在一定程度上也反映了近年来河口区受磷污染加剧。

综上所述,本研究探讨了盐度梯度下闽河口短叶茳苳沼泽湿地沉积物中磷的形态与分布特征及其环境学意义,结果显示这种形态及分布特征是多因子作用的结果,除上述分析因子外,可能还与河口湿地的发育及历史过程等有关,有待今后进一步深入研究。

5 结论(Conclusions)

1) 闽江河口短叶茳苳沼泽湿地沉积物 TP 含量平均值为 $726.29 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, IP 含量平均值为 $586.86 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,约占 TP 的 81.07%,IP 是磷的主要赋存形态.IP 中,又以 O-P 和 Fe-P 为主,分别占 IP 的 39.97%和 32.92%,湿地沉积物磷水平较高,有产生河口区富营养污染危害。

2) 在盐度梯度下,闽河口短叶茳苳沼泽湿地沉积物中不同形态磷含量在空间分布上具有一定的差异性,除 Ca-P 外均表现为由海向陆先降低后递增的趋势,垂直方向呈波动下降趋势,表现出表层富集的特征。

3) 随着短叶茳苳沼泽湿地由淡水向半咸水的演替,各沉积物理化因子变化多样,沉积物 pH、粘粒、粉粒等呈增加趋势,而沉积物砂粒却在减小.短叶茳苳沼泽湿地沉积物磷的形态及分布特征受多个因子的影响.研究区位于城市下游、濒临海洋,受人为干扰和潮汐作用的综合影响明显,湿地沉积物磷含量已超正常标准。

责任作者简介:全川(1964—),男,教授,博士生导师,主要从事湿地生物地球化学循环研究.E-mail: tongch@fjnu.edu.cn.

参考文献(References):

Abram M M, Jarrell W M. 1995. Soil phosphorus as a potential nonpoint

- source for elevated stream phosphorus levels [J]. *Journal of Environmental Quality*, 24(1): 132-138
- Beltman B, Rouwenhorst T G, Van Kerkhoven M B, *et al.* 2000. Internal eutrophication in peat soils through competition between chloride and sulphate with phosphate for binding sites [J]. *Biogeochemistry*, 50(2): 183-194
- 陈为峰, 史衍玺, 田素锋, 等. 2008. 黄河口新生湿地土壤氮磷分布特征研究[J]. *水土保持学报*, 22(1): 69-73
- Coelho J P, Flindtb M R, Jensenb H S, *et al.* 2004. Phosphorus speciation and availability in intertidal sediments of a temperate estuary: relation to eutrophication and annual P-fluxes [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 61(4): 583-590
- 翟继红, 曾从盛, 仝川, 等. 2010. 闽江河口湿地沉积物有机磷和无机磷含量及垂直分布特征[J]. *亚热带资源与环境学报*, 5(1): 9-14
- Fang T H. 2000. Partitioning and behavior of different forms of phosphorus in the Tanshui estuary and one of its tributaries, Northern Taiwan [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 50(5): 689-701
- Föllmi K B. 1996. The phosphorus cycle, phosphogenesis and marine phosphate-rich deposits [J]. *Earth-Science Reviews*, 40(1/2): 55-124
- Graca B, Bolałek J. 1998. Forms of phosphorus in sediments from the Gulf of Gdańsk [J]. *Applied Geochemistry*, 13(3): 319-327
- Hartzell J L, Jordan T E, Cornwell J C. 2010. Phosphorus burial in sediments along the salinity gradient of the Patuxent River, a subestuary of the Chesapeake Bay (USA) [J]. *Estuaries and Coasts*, 33(1): 92-106
- Hartzell J L, Jordan T E. 2012. Shifts in the relative availability of phosphorus and nitrogen along estuarine salinity gradients [J]. *Biogeochemistry*, 107(1/3): 489-500
- 侯立军, 陆健健, 刘敏, 等. 2006. 长江口沙洲表层沉积物磷的赋存形态及生物有效性[J]. *环境科学学报*, 26(3): 488-494
- 扈传昱, 潘建明, 刘小涯. 2001. 珠江口沉积物中磷的赋存形态[J]. *海洋环境科学*, 20(4): 21-25
- 贾瑞霞, 仝川, 王维奇, 等. 2008. 闽江河口盐沼湿地沉积物有机碳含量及储量特征[J]. *湿地科学*, 6(4): 492-498
- 金相旭, 庞燕, 王圣瑞, 等. 2008. 长江中下游浅水湖泊沉积物磷形态及其分布特征研究[J]. *农业环境科学学报*, 27(1): 279-285
- Jordan T E, Cornwell J C, Boynton W R, *et al.* 2008. Changes in phosphorus biogeochemistry along an estuarine salinity gradient: The iron conveyor belt [J]. *Limnology and Oceanography*, 53(1): 172-184
- Leivuori M, Niemistö L. 1995. Sedimentation of trace metals in the Gulf of Bothnia [J]. *Chemosphere*, 31(8): 3839-3856
- 李敏, 韦鹤平, 王光谦, 等. 2004. 长江口、杭州湾水域沉积物对磷吸附行为的研究[J]. *海洋学报*, 26(1): 125-131
- 刘剑秋, 曾从盛, 陈宁. 2006. 闽江河口湿地研究[M]. 北京: 科学出版社
- 刘敏, 许世远, 侯立军, 等. 2001. 长江口滨岸潮滩沉积物中磷的存在形态和分布特征[J]. *海洋通报*, 20(5): 10-17
- 鲁如坤. 2000. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社
- 罗先香, 张珊珊, 敦萌. 2010. 辽河口湿地碳、氮、磷空间分布及季节动态特征[J]. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 40(12): 97-103
- 罗先香, 敦萌, 闫琴. 2011. 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*, 25(5): 154-160
- McDowell R, Sharpley A, Withers P. 2002. Indicator to predict the movement of phosphorus from soil to subsurface flow [J]. *Environmental Science & Technology*, 36(7): 1505-1509
- Paludan C, Morris J T. 1999. Distribution and speciation of phosphorus along a salinity gradient in intertidal marsh sediments [J]. *Biogeochemistry*, 45(2): 197-221
- 潘成荣, 汪家权, 郑志侠, 等. 2007. 巢湖沉积物中氮与磷赋存形态研究[J]. *生态与农村环境学报*, 23(1): 43-47
- Ruban V, López-Sánchez J F, Pardo P, *et al.* 2001. Harmonized protocol and certified reference material for the determination of extractable contents of phosphorus in freshwater sediments — A synthesis of recent works [J]. *Fresenius' Journal of Analytical Chemistry*, 370(2/3): 224-228
- Ruttenberg K C. 1992. Development of a sequential extraction method for different forms of phosphorus in marine sediments [J]. *Limnology and Oceanography*, 37(7): 1460-1482
- 宋祖光, 高效江, 张弛. 2007. 杭州湾潮滩表层沉积物中磷的分布、赋存形态及生态意义[J]. *生态学杂志*, 26(6): 853-858
- Sundareshwar P V, Morris J T. 1999. Phosphorus sorption characteristics of intertidal marsh sediments along an estuarine salinity gradient [J]. *Limnology and Oceanography*, 44(7): 1693-1701
- Sundby B, Gobeil C, Silverberg N, *et al.* 1992. The phosphorus cycle in coastal marine sediments [J]. *Limnology and Oceanography*, 37(6): 1129-1145
- 仝川, 贾瑞霞, 王维奇, 等. 2010. 闽江河口潮汐盐沼湿地土壤碳氮磷的空间变化[J]. *地理研究*, 29(7): 1203-1213
- Van Der Zee C, Roevros N, Chou L. 2007. Phosphorus speciation, transformation and retention in the Scheldt estuary (Belgium/The Netherlands) from the freshwater tidal limits to the North Sea [J]. *Marine Chemistry*, 106(1/2): 76-91
- 王纯, 王维奇, 曾从盛, 等. 2011. 闽江河口区盐-淡水梯度下湿地土壤氮形态及储量特征[J]. *水土保持学报*, 25(5): 147-153
- 王国平. 2004. 湿地磷的生物地球化学特性[J]. *水土保持学报*, 18(4): 193-198
- 吴峰炜, 汪福顺, 吴明红, 等. 2009. 滇池、红枫湖沉积物中总磷、分态磷及生物硅形态与分布特征[J]. *生态学杂志*, 28(1): 88-94
- 向速林, 周文斌. 2010. 鄱阳湖沉积物中磷的赋存形态及分布特征[J]. *湖泊科学*, 22(5): 649-654
- 徐康, 刘付程, 安宗胜, 等. 2011. 巢湖表层沉积物中磷赋存形态的时空变化[J]. *环境科学*, 32(11): 3255-3263
- 叶华香, 臧淑英, 贾晓丹, 等. 2012. 扎龙湿地表层沉积物磷的赋存形态及空间分布特征[J]. *地理与地理信息科学*, 28(2): 108-112
- 袁和忠, 沈吉, 刘恩峰. 2010. 太湖不同湖区沉积物磷形态变化分析[J]. *中国环境科学*, 30(11): 1522-1528
- 张晶. 2012. 北京野鸭湖湿地土壤中磷的形态分布和转化行为研究[D]. 北京: 北京林业大学. 40-41
- 张宪伟, 潘纲, 陈灏, 等. 2009. 黄河沉积物磷形态沿程分布特征[J]. *环境科学学报*, 29(1): 191-198
- 郑彩红, 曾从盛, 陈志强, 等. 2006. 闽江河口区湿地景观格局演变研究[J]. *湿地科学*, 4(1): 29-35
- Zhou A M, Tang H X, Wang D S. 2005. Phosphorus adsorption on natural sediments: modeling and effects of pH and sediment composition [J]. *Water Research*, 39(7): 1245-1254
- 朱广伟, 秦伯强, 高光, 等. 2004. 长江中下游浅水湖泊沉积物中磷的形态及其与水相磷的关系[J]. *环境科学学报*, 24(3): 381-388