闽江口湿地沉积物各形态磷分布特征及风险评价

赖月婷[1,2]，吴如林[1,2]，龚开晟[1,2]，谢蓉蓉[1,2]，李家兵[1,2,3]，陈文光[1,2]

(1. 福建师范大学环境科学与工程学院，福州 350007；
2. 福建师范大学福建省污染控制与资源循环利用重点实验室，福州 350007；
3. 美国路易斯安那州立大学农学院，巴吞鲁日 70803)

摘要：为探究湿地植被、理化性质等对沉积物磷的各赋存形态的影响，评价闽江口湿地污染程度和潜在环境风险。2017 年在闽江河口湿地由陆向海选取 4 个采样点，用 SMT 法提取各形态磷，测定分析了闽江口湿地沉积物各形态磷变化规律并进行风险评价。结果表明：沉积物中有机磷含量为 0.176～0.369 mg/g，约占总磷的 32.03%；而无机磷含量为 0.308～0.666 mg/g，占总磷 66.49%；总磷含量为 0.491～0.998 mg/g，其污染指数为 0.819～1.618，总体上为轻度污染。各形态磷在不同植被类型沉积物中含量分布不同，其中沉积物有机磷含量芦苇最高，扁穗莎草最低；无机磷中的钙磷含量则是互花米草最少，短叶茳芏和扁穗莎草明显高于其他植被类型；而铁铝磷含量是互花米草远高于其他植物；因总磷受无机磷影响较大，以致无机磷含量与总磷含量分布相似，均是扁穗莎草最高，芦苇最低。沉积物中钙磷与容重呈极显著负相关，与含水率呈极显著正相关，有机磷含量与有机质呈极显著正相关；总磷与含水率呈极显著正相关，与电导率呈显著负相关。以上现象可能由植被类型与生长阶段、理化性质、陆源物质、水文环境、凋落物、人类生产活动等多个因素的综合作用所导致。

关键词：闽江口；湿地；沉积物；各形态磷；风险评价

中图分类号：S45；S153　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1009-2242(2019)01-0171-07

DOI：10.13870/j.cnki.stbcxb.2019.01.028

Distribution Characteristics and Risk Assessment of Phosphorus Speciation in the Sediments of Min River Estuary Wetland

LAI Yueting[1,2], WU Ruling[1,2], GONG Kaisheng[1,2],
XIE Rongrong[1,2], LI Jiabing[1,2,3], CHEN Wenguang[1,2]

(1. *College of Environmental Science and Engineering, Fujian Normal University, Fuzhou* 350007;
2. *Key Laboratory of Pollution Control and Resource Recycling of Fujian Province, Fujian Normal University, Fuzhou* 350007; 3. *College of Agriculture, Louisiana State University, Baton Rouge* 70803)

Abstract: To evaluate the wetland pollution and potential environmental risks in Min River Estuary, the effects of wetland vegetations and physicochemical properties on the distribution of sediment phosphorus were explored. From land to sea in the research area, sediments of four sites with different wetland vegetation types (*Spartina alterniflora*, *Phragmites australis*, *Cyperus malaccensis* and *Cyperus compressus* respectively) were sampled in 2017, and then phosphorus speciations were analyzed using SMT method. In all four vegetation types wetlands, organic phosphorus (OP) accounted for averagely 32.03% of total phosphorus (TP), between 0.176 ～ 0.369 mg/g. Inorganic phosphorus (IP) accounted for averagely 66.49% of TP, between 0.308 ～ 0.666 mg/g. TP concentrations were from 0.491 ～ 0.998 mg/g, which were considered as moderate pollution level with the pollution index (moderate polluted 0.819 ～ 1.618). Results suggested that the distribution of phosphorus speciations varied from wetland vegetation types. The highest concentration of OP was found in the *Phragmites australis* wetland, and the lowest in *Cyperus compressus*. The Ca－P concentrations were obviously higher in *Cyperus malaccensis* and *Cyperus compressus* wetlands than in *Spartina alterniflora*. However, the Fe/Al－P concentrations were significantly higher in *Spartina alterni-*

收稿日期：2018-08-08
资助项目：国家自然科学基金项目(51541906)；福建省科技厅 JK 类项目(JK2017011)；福建师范大学“大学生创新创业训练计划”(创新训练类)省级项目(201810394065)
第一作者：赖月婷(1996—)，女，硕士研究生，主要从事湿地生态修复及污染物生物化学循环研究。E-mail：LaiYueting123@163.com
通信作者：李家兵(1974—)，男，副教授，硕士生导师，主要从事环境科学和生物地球化学循环研究。E-mail：lijiabing@fjnu.edu.cn

flora wetland compared to other wetlands. Since TP was strongly related to IP, the trends of TP and IP were similar: The highest concentration in *Cyperus compressus* wetland and the lowest in *Phragmites australis* wetland. Finally, the Ca—P concentrations showed the significantly negative correlation with bulk density, and the positive correlation with water contents. TP concentrations were significantly negatively correlated to conductivity, and positively correlated to water contents. All these phenomenon described could relate to the comprehensive effects of vegetation types and growth stages, physicochemical properties, terrestrial materials, hydrological environment, litters, and human production activities.

Keywords: Min River Estuary; wetland; sediment; phosphorus speciation; risk assessment

湿地是水陆交互作用形成的地貌单元,有气候调节、蓄洪节流、污染控制等方面的作用[1]。同时河口湿地也是河流的归宿地,接纳了大量生产及生活所排放的营养盐,使之成为营养盐等众多物质的重要蓄积库,从而影响着全球生源元素化学循环[2]。沉积物是河口湿地生态系统的重要组成部分,是营养元素的主要截留区和汇聚地,很大程度影响营养物质的吸收、储存和转化等过程,进而影响湿地生态系统的结构和功能。其中,表层沉积物是对环境变化的响应最敏感脆弱的部分,而且它承载着输入的磷营养盐等物质[3]。众所周知,磷是生物生长必需的养分元素,且会导致水体富营养化。湿地生态系统中大约有 80%～90%的磷储存于沉积物中[4],磷在沉积物中含量及分布可以反映河流污染程度和地球化学信息[5]。因此通过测定河口湿地沉积物中磷形态含量,分析其时空分布特征,对于研究沉积物中元素的行为特点、沉积物与水间的迁移特征和河口水体富营养化情况有很大意义。

目前,以闽江湿地沉积物磷为对象的研究已展开了一些工作,如短叶茳芏沉积物磷的赋存形态和分布[6]、芦苇/短叶茳芏土壤磷分级[7]等,然而闽江口湿地不同植物带下沉积物不同形态磷的空间分布特征及风险评价研究鲜有报道。不同潮间带的植物类型不同,对各形态磷的吸收程度有所不一,从而导致不同潮间带下的沉积物中各形态磷的富集程度不同,不同形态磷营养盐释放到上覆水体的程度也不同。沉积物作为抑制磷流入海洋的"过滤器",其对各形态磷的富集程度对减缓海洋富营养化有非常重要的作用。鉴于此,选取典型的闽江河口湿地作为研究区域来研究在潮间带下不同植物类型对磷的富集程度以及预估潜在富营养化风险,为相关管理部门对于闽江河口的富营养化预警及湿地生态系统的保护、修复和维护等方面提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

闽江发源于闽、赣交界,是我国东南沿海最大的河流,在闽江的两岸沿线形成了许多天然的湿地,它们在区域环境保护中发挥着多种重要的生态服务功能。本研究区是闽江河口湿地中面积最大的沙泥质天然湿地即鳝鱼滩湿地(图 1),地理坐标为东经 119°34′12″—119°41′40″,北纬 26°00′36″—26°03′42″,面积约为 3 120 hm^2[8],是闽江和支流带的泥沙在东海与闽江水流的作用下形成的,其土壤一般是滨海盐土和沙土。该区属于亚热带海洋性季风气候,年平均气温为 19.6 ℃,年均降水量为 1 346 mm[6]。其中芦苇、短叶江芏、扁穗莎草是优势物种,2002 年互花米草群落入侵,且飞速蔓延,如今在潮滩边缘已形成了大面积互花米草植物带,对湿地生物多样性及土壤产生了一定程度的影响[9]。

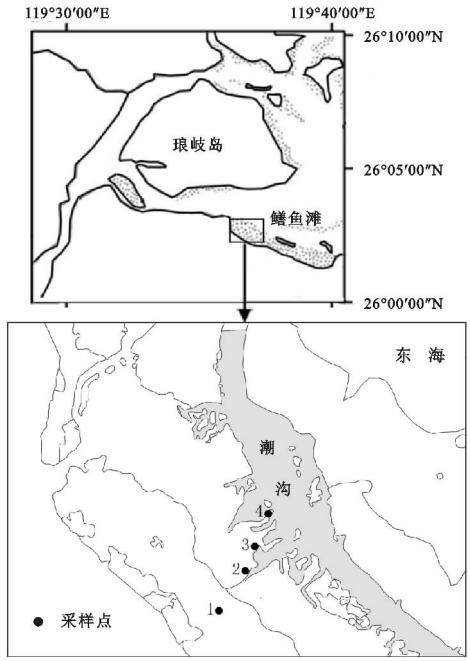

图 1 研究区域与采样点

1.2 样地布设和样品采集

本研究以闽江河口鳝鱼滩湿地沉积物为研究对象,在其西北部主潮沟附近布设一条样带(图 1),在样带上选取 4 种极具代表性的优势植被带作为样地,即由陆向海方向分别为芦苇沼泽、短叶茳芏沼泽、互花米草沼泽和扁穗莎草沼泽。

采样时间为 2017 年,采集沉积物用的是柱状土壤采样器,分别在不同植被类型样地中选取 4 个采样点,每个采样点采集深度为 60 cm,共 6 层,每层 10 cm。同时,采用便携式仪器原位测定沉积物的 pH 和 *EC*[2]。

1.3　样品处理与测定

将采回的样品放置通风处,在自然条件下风干后,进行碾碎、研磨,用手选法挑出植物树叶、根系、塑料等残渣,过 100 目筛子后,放入聚乙烯密封袋保存备用。分别采用 HACH-sensION$_3$ 和 ECTestr11$^+$ 原位测定土壤的 pH 和电导率(EC);用高温外热重铬酸钾容量法对土壤有机质含量进行测定;土壤粒度组成则采用激光粒度分析仪测定,并且按照国际制分类,沉积物容重用环刀法测定,含水率用烘干法测定[2]。本研究采用 SMT 分级法,该方法分级提取出的磷形态为铁铝磷、钙磷、无机磷、有机磷和总磷。虽然 SMT 法分级比较粗糙,但有较好的重现性,操作也相对简单,可以广泛应用于不同类型的沉积物,其具体提取方法为:

(1)铁铝结合态磷(Fe/Al－P):称取 0.20 g 的样品至离心管中,随后加入 20 mL 1 mol/L NaOH 溶液,将其放在恒温振荡器中振动 16 h,然后移至离心机中离心 10 min,再抽取 10 mL 上清液至离心管中,加入 4 mL 3.5 mol/L HCl 溶液,放入恒温振荡器中振动 16 h,再放离心机中离心 10 min 后取上清液于尿杯中,即为 Fe/Al－P 的待测样品。

(2)钙结合态磷(Ca－P):留上一步剩余残渣,加入 20 mL 1 mol/L HCl 溶液,放在恒温振荡器中振动 16 h,然后移至离心机中离心 10 min,取上清液至尿杯中,即获得 Ca－P 的待测样品。

(3)无机磷(IP):称取 0.20 g 的样品于离心管中,加入 20 mL 1 mol/L HCl 溶液,放在恒温振荡器中振动 16 h,然后移至离心机中离心 10 min,取上清液至尿杯中,即获得 IP 的待测样品。

(4)有机磷(OP):取上一步中的剩余残渣于坩埚中,放入 450 ℃的马弗炉中灰化 3 h;冷却后,将坩埚的土样倒入离心管中,加入 20 mL 1 mol/L HCl 溶液,放在恒温振荡器中振动 16 h,然后移至离心机中离心 10 min,取上清液至尿杯中,即为 OP 的待测样品。

(5)总磷(TP):称取 0.20 g 的样品于坩埚中,放入 450 ℃的马弗炉中灰化 3 h;将坩埚的土样倒入离心管中,加入 20 mL 3.5 mol/L HCl 溶液,放在恒温振荡器中振动 16 h,然后移至离心机中离心 10 min,取上清液至尿杯中,即获得 TP 的待测样品[10]。

将所有的待测样品放置冰箱 4 ℃保存,各形态磷最终提取液采用针头式连续流动分析仪(Skalar San＋,荷兰)测定。

1.4　数据处理与分析

试验数据均采用 Excel 2003 软件进行相应地初步处理,各结合态磷的含量折线图运用 Origin 8.0 软件制作,使用 SPSS 17.0 软件的双变量相关性分析法进行统计分析。

2　结果与分析

2.1　闽江口湿地沉积物理化性质空间分布特征

闽江口湿地沉积物 4 个采样点的 pH、含水率、电导率和有机质空间分布特征见图 2。沉积物的 pH 为 5.84～6.94,说明研究区域呈弱酸性。垂直上,2 号样点各层 pH 波动最大,最大值出现在 20－30 cm 土层中,其余样点 pH 均随着土层深度的增加呈现先降后升的趋势。水平上,除了 20－30 cm 土层外,其余各层 pH 均沿陆向海也呈现先减后增的趋势,20－30 cm 土层沿陆向海呈上下波动之势且变化幅度最大。土壤含水率为 0.378%～0.558%,垂直上,2 号样点含水率随深度的增加而逐渐降低,其余样点均呈上下波折之势,其中 3 号样点各层含水率波动幅度最大。水平上,表层含水率沿陆向海呈先升后降的趋势,变化平缓,其余土层中含水率均由陆向海呈上下波折之势且变化幅度较大。电导率为 0.67～4.90 mS/cm,垂直上,2 号样点的电导率随土层深度的增加而逐渐增加,其余样点电导率变化均为不规则波动,各点变化趋势各不相同,其中 3 号样点除 30－40 cm 土层外电导率随着深度的增加而增加,在水平上除了 20－30 cm 土层和底层呈上下波动外,其余均呈先降后升之势,各层电导率变化幅度均较大。最后,沉积物的有机质含量在 1.92%～4.42%范围内变化,垂直上,0－40 cm 土层中沉积物各样点有机质的含量均呈上下波动的趋势且各层含量变化起伏大致相同,深度 40 cm 以下各样点变化不尽相同;水平方向上,表层有机质含量由陆向海呈现逐渐降低的趋势,其余土层则呈现先下降后上升之势,40－50 cm 土层在 2 号样点降至最低点后又平缓上升,其余土层则在 3 号样点降至最低后有所上升。

2.2　闽江口湿地沉积物中各结合态磷的含量及变化特征

2.2.1　沉积物中有机磷(OP)的含量及变化特征

沉积物中 OP 含量为 0.176～0.369 mg/g,平均值为 0.237 mg/g,约占总磷的 32.16%。由图 3 可知,总体而言,各样点总含量水平分布趋势为 1 号样点＞3 号样点＞2 号样点＞4 号样点,除了 3 号样点外 OP 含量由陆向海呈逐渐降低趋势,其中 1 号样点总含量最多,3 号样点次之;在垂直分布上各层总含量除了 20－30 cm 土层外,随着土层深度的增加含量依次减少,表层总含量最高,深度为 20－30 cm 土层总含量次之。具体而言,水平上,0－40 cm 土层均由陆向海呈先降后升再降的波折之势,但变化幅度不尽相同,30－40 cm 土层变化较其他 3 层平缓。40－50 cm 土层和底层变化趋势则是先增后减;垂直上,1 号样点沉积物中含量在 0－30 cm 土层范围内随着土层深度的增加而

上升，而在 30 cm 土层以下含量迅速降低且变化幅度大，2 号样点和 3 号样点则随着土层深度的增加而波动下降，除了 1 号样点 20－30 cm 土层含量最高外，其余 3 点均为表层最高。

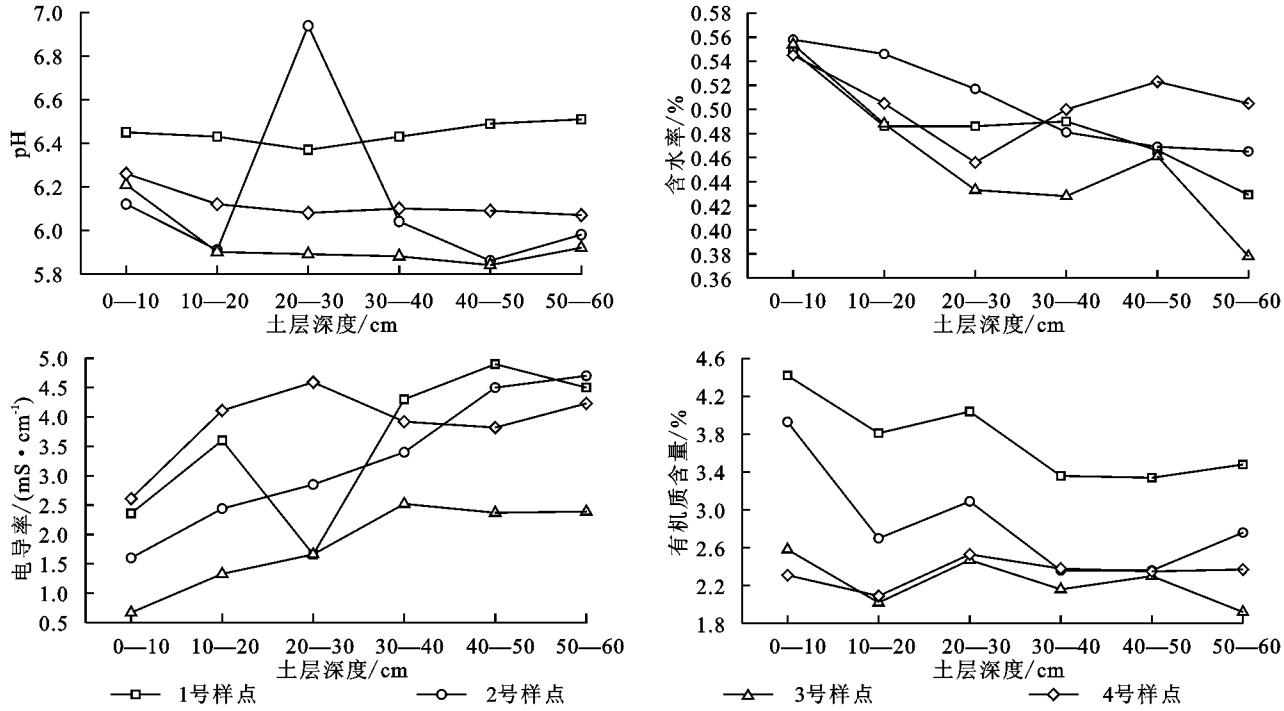

图 2 沉积物理化性质的变化

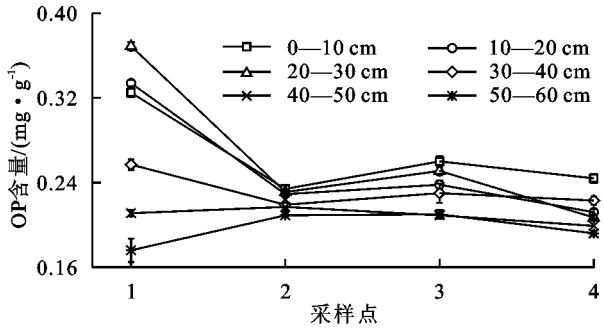

图 3 沉积物中 OP 含量及分布

2.2.2 沉积物中无机磷(IP)的含量及变化特征

(1)沉积物中钙结合态磷(Ca－P)的含量及变化特征。IP 主要包括 Fe/Al－P 和 Ca－P 2 种赋存形态，Ca－P 主要是指与 Ca 结合的磷，其含量为 0.059～0.268 mg/g，平均含量为 0.198 mg/g，约占无机磷的 40.57%，是无机磷的重要组成部分。由图 4 可知，总体上，各样点 Ca－P 总含量水平分布趋势为 4 号样点＞2 号样点＞1 号样点＞3 号样点，由陆向海呈现波折之势，2 号样点和 4 号样点总含量均明显高于其余样点，3 号样点总含量最少；在垂直分布上各层总含量随着深度增加而降低直至底层含量略微升高，其中在亚表层至 20－30 cm 土层中变化幅度很大，之后趋于平缓，表层和亚表层总含量明显高于其余土层。具体而言，水平上，沉积物中 Ca－P 各层含量均沿陆向海呈上下波动的趋势，但波动的程度和规律不同，其中表层和亚表层沿陆向海呈先降后升又降之势，波动较平缓，而其余 4 层变动趋势相反且变化幅度和速率度都很大；垂直上，1 号样点和 3 号样点含量变化的大体趋势均随着深度的增加而逐渐降低且变化渐缓，但不同的是 3 号样点在 10－30 cm 土层中含量迅速下降且幅度最大，之后趋于平缓且在底层有略微的上升；30 cm 以上各层含量相差甚小，30 cm 以上各层含量相近，但 30 cm 前后含量差距大。

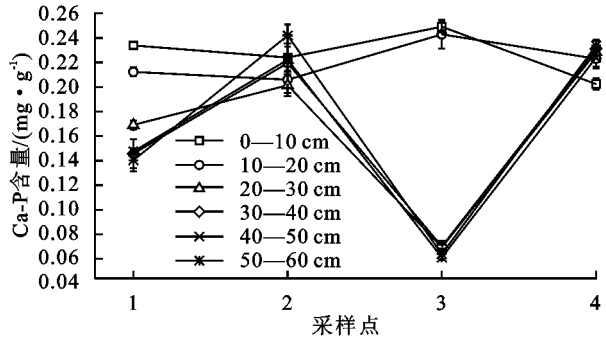

图 4 沉积物中 Ca－P 含量及分布

(2)沉积物中铁铝结合态磷(Fe/Al－P)的含量及变化特征。Fe/Al－P 含量为 0.206～0.518 mg/g，平均含量为 0.349 mg/g，约占无机磷的 71.52%，是无机磷的主要赋存形态。由图 5 可知，总体上，各样点 Fe/Al－P 总含量水平分布趋势为 3 号样点＞4 号样点＞2 号样点＞1 号样点，除了 3 号样点外沿陆向海方向呈现上升的趋势，其中 3 号样点含量最高，1 号样点含量最低；各层总含量在垂直上随着土层深度的增加呈现先降后升又降的趋势，各层总含量差距不大，其中 30－40 cm 土层总含量最高，底层总含量最低。具体而言，水平上，沉积物表层中含量沿陆向海逐

渐降低且趋势渐缓,变化幅度最小,其余土层中,除了亚表层外各土层变化趋势一致即为先上升至 3 号样点后骤降且变化幅度很大;垂直上,1 号样点含量随着土层深度的增加而逐渐降低,趋势明显,2 号样点在亚表层处有所上升,之后呈现随着深度的增加而逐渐下降的趋势,3 号样点在亚表层处有些许下降,其后含量随着深度的增加而增加且在 10－30 cm 土层间增加幅度最大,之后变化渐缓,4 号样点除了 30－40 cm 土层外含量几乎无太大变化,在 30－40 cm 深度含量突升至最高值后又下降,各层之间含量相差最小。

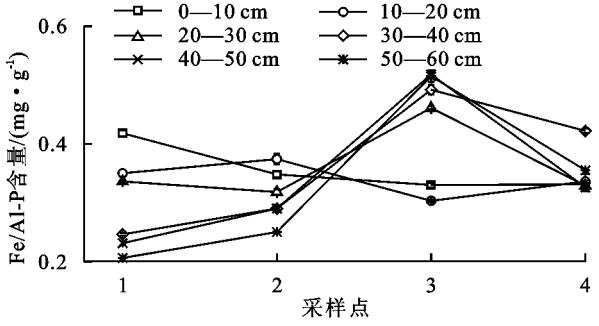

图 5　沉积物中 Fe/Al－P 含量及分布

(3)沉积物中无机磷(IP)的含量及变化特征。闽江河口沉积物 IP 含量由陆向海不同植物带沉积物中 IP 含量及分布见图 6。沉积物中 IP 含量变化范围在 0.308～0.638 mg/g,平均值为 0.488 mg/g,约占总磷的 66.21%,是总磷的主要组成部分。其在空间分布上存在一定的变化特征:总体上,各采样点沉积物中的 IP 总含量在水平上的趋势为 4 号样点＞3 号样点＞2 号样点＞1 号样点,沿陆向海含量逐渐增加,其中 4 号样点增量和总含量均最大,1 号样点含量最小;垂直方向上,各层总含量除了 30－40 cm 土层外随着深度的增加而逐渐降低,20－30 cm 土层降低幅度最大,而后趋势逐渐平缓,表层和亚表层总含量明显高于其余土层。具体而言,水平上,表层含量沿陆向海逐渐降低到 3 号样点后上升,1 号样点的表层含量最高,其余土层 IP 含量均由陆向海依次上升且趋势显著,变化幅度均较大;垂直上,1 号样点和 2 号样点沉积物中的含量均随着土层深度的增加而降低;3 号样点含量随着土层深度的增加而先降后升,上升趋势渐缓,各层含量相差最小,4 号样点 IP 含量除了 30－40 cm土层外呈现平缓上升的趋势,30－40 cm 土层中含量均比其余土层大。

2.2.3　*沉积物中总磷(TP)的含量及变化特征*　闽江河口湿地沉积物 TP 含量为 0.491～0.909 mg/g,平均值为 0.737 mg/g,由陆向海不同植物带沉积物中 TP 含量及垂直分布见图 7。在水平分布上各样点总含量的变化趋势在水平方向上与 IP 相似;但垂直方向上沉积物中各层 TP 含量与 IP 略有不同,即各层总含量随着土层深度的增加而减少,趋势渐缓。其中深度为 30 cm 以上土层含量沿陆向海逐渐降低,30 cm 以下土层含量沿陆向海逐渐升高。

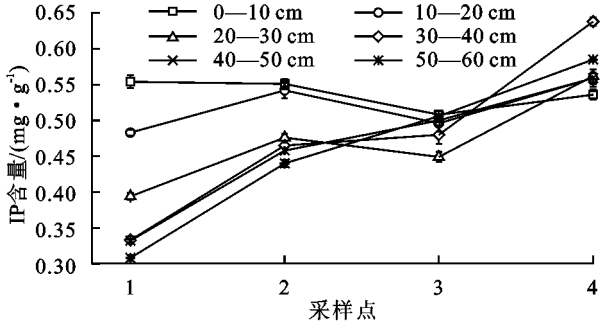

图 6　沉积物中 IP 含量及分布

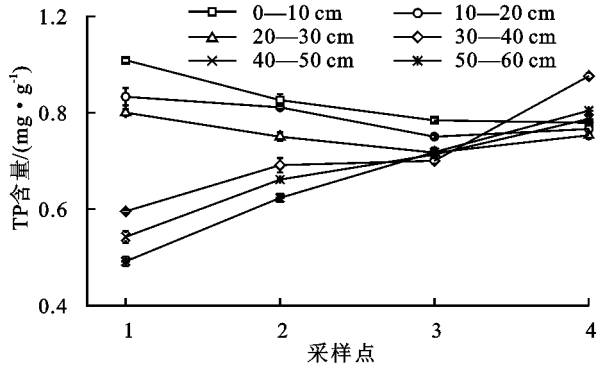

图 7　沉积物 TP 含量及分布

2.3　闽江口湿地沉积物中总磷风险评价

本研究采用单项因子标准指数法对沉积物中的总磷进行评价(表 1),标准值取 0.6 g/kg,计算公式[11]为:

$$P_i=\frac{C_i}{S_i}$$

式中:P_i 为沉积物中评价因子 i 的污染标准指数,P_i 大于 1 表明含量超过评价标准值;C_i 为评价因子 i 的实测值(g/kg);S_i 为评价因子 i 的评价标准限值(g/kg)。

表 1　污染指数评价标准

污染指数	$P_i\leqslant 1$	$1<P_i\leqslant 2$	$2<P_i\leqslant 3$	$P_i>3$
污染等级	清洁	轻度污染	中度污染	重度污染

本文采用的总磷评价标准(0.6 g/kg),与加拿大安大略省环境和能源部发布的指南[12]中沉积物中能引起最低级别生态风险效应的总磷浓度相一致。经数据统计分析表明,研究区域各层总磷的污染标准指数为 0.819～1.514,对照表 1 发现,除了 1 号样点 40 cm 土层以下污染等级为清洁外,其余均为轻度污染;各层总磷的平均污染指数为 1.099～1.374,可见闽江口沉积物总磷的污染程度总体上呈轻度污染。另外,通过对各样点各层污染指数的分析发现,总体而言,随着土层深度的增加总磷污染标准指数逐渐降低,这说明表层较其余土层严重,随土层深度的增加,污染程度逐渐降低。此外,沿陆向海方向上,总磷的

污染标准指数逐渐升高，其中 1 号样点污染标准指数最低，5 号样点最高，此外，本研究采样时间在植物生长期，植物生长旺盛，对营养物质需求量大，植物根系也发达，磷作为植物营养物质不断由根输送到地上部分，因此地下磷含量较低，换言之，尽管本研究表明闽江河口沉积物处于轻度污染，但实际污染程度较此研究更高。

2.4 闽江口湿地沉积物各形态磷与理化性质的相关性分析

沉积物中各形态磷与 pH、含水率、电导率等的相关性见表 2。闽江口湿地沉积物总磷及各磷形态的分布在不同程度上受沉积物的 pH、含水率、电导率、有机质等的综合影响。沉积物中钙磷与容重呈极显著负相关($P<0.01$)，与含水率呈极显著正相关($P<0.01$)，与砂砾呈显著负相关($P<0.05$)；铁铝磷与 pH、电导率、粉粒均呈显著负相关($P<0.05$)；无机磷与含水率呈显著正相关($P<0.05$)；有机磷含量与有机质呈极显著正相关($P<0.01$)，与电导率呈极显著负相关关系($P<0.01$)；总磷与含水率呈极显著正相关($P<0.01$)，与电导率呈显著负相关($P<0.05$)。

表 2 沉积物中各形态磷与理化性质的相关性分析

指标	容重	pH	含水率	电导率	有机质	黏粒	粉粒	砂砾
钙磷	−0.578**	0.170	0.696**	0.150	0.140	0.346	0.397	−0.416*
铁铝磷	0.372	−0.451*	−0.224	−0.492*	−0.283	−0.134	−0.428*	0.375
无机磷	0.007	−0.358	0.417*	−0.199	−0.345	0.070	−0.062	0.026
有机磷	−0.374	0.316	0.268	−0.443*	0.627**	0.230	0.016	−0.083
总磷	−0.183	−0.082	0.572**	−0.464*	0.086	0.164	−0.060	−0.004

注：* 表示该点通过了 $P<0.05$ 的相关性检测；* * 表示该点通过了 $P<0.01$ 的相关性检测。

3 讨 论

本研究表明，不同植物带下沉积物各形态磷含量具有一定特征，可以推测不同植物的营养物质循环过程和生物量生产过程的不同对潮间带不同植物下沉积物各形态磷之间的差异有一定影响。植物生长过程中，需要利用根系从沉积物中吸收磷为植物所用，而植物衰败后，凋落物和根回到沉积物中影响磷的含量。有研究[4]表明，植物根际对磷素有富集的作用，沉积物可能会先通过磷的赋存形态来表现自身受到植物根际的影响。植物根际会分泌磷酸酶、有机酸等多种分泌物，这些分泌物会对磷素的利用产生一定影响，譬如磷酸酶可以使 OP 矿化为植物易利用的 IP，有机酸会活化难溶磷使 Ca−P 和 Fe/Al−P 一定程度富集在根际[13]。

此外，由图 3 和图 6 对比，可以推测出根系在吸收许多的 IP，同时又富集了大量的 OP，供其高效转化为 IP。有研究[13]表明，芦苇是多年生植物，衰落的老根因长期处于缺氧环境以活性磷的状态回到土壤中，导致 OP 的增加。本研究中，Ca−P 与其他形态磷含量对比，Ca−P 含量总体上最低，很大可能是因根际等的综合作用下被植物吸收利用。芦苇中 Ca−P 含量可能是由于受到了芦苇生长较大的影响，本试验采样时间在 7 月，植物生长旺盛，可能被植物根系或微生物分泌物分解转化为植物可利用的磷，这与野鸭湖湿地有关研究[14]结果正好吻合。另外，梁威等[4]研究还指出，互花米草和芦苇植物带沉积物的 Ca−P 含量大幅度降低，而以 Fe、Mn 等元素的氢氧化物结合态存在的还原态可溶性磷的含量增高，本研究亦得到相似结果。而在沉积物是在还原状态，加上环境中氧较低，铁、锰等元素的氢氧化物结合态磷有可能得以释放。除此之外，很大程度上是由于属于入侵物种的互花米草自身具有的独特性质，在一定程度会改变原有土壤的性质特征，影响了各形态磷含量。互花米草的入侵后，原生植被土壤全量、速效养分特征和分布规律发生了一定的改变。已有研究[15]表明，互花米草的入侵会使土壤中 TP 的含量显著增加。况且互花米草的生产力较高，生物量和枯落物较大，则磷的吸收量和归还量较大，影响着沉积物中的磷含量[16]，由此推测，Ca−P 含量低很大程度是由于互花米草的植物根系吸收所致。本研究在 7 月采样，植物体对养分需求很大，根系大量 Ca−P 吸收为植物所用，这与苗萍[17]关于胶州湾的研究结论吻合。正因如此，大量的磷被互花米草吸收，对沉积物中磷的增加可以起到了缓冲的作用，有学者[15]指出，互花米草的入侵使得沉积物磷的释放能力下降，削弱了潜在磷的释放风险，降低了水体富营养化风险。

另外，理化性质对各形态磷的含量也有显著影响。由表 2 可推测，OP 会伴随有机质的积累而形成。诸多相关研究[15]亦发现相同结论，且把有机质当成是 OP 的载体。容重越小，越容易贮存 Ca−P，有学者发现，容重越小，土壤的质地就越疏松，越有助于养分的贮存。pH 对磷的含量也会产生一定影响，pH 的高低对植物的生长影响较大，pH 越高，越不利于植物对磷的吸收。由图 6 和图 7 可知，IP 和 TP 含量分布总体上可能与距海洋的距离和植物的生长情况有关。芦苇距离海洋最远，含量最低，离海洋越近含量越高，推测采样时间在夏季，炎热高温，降水量

少,而闽江河口湿地受到潮汐冲刷作用强,海水淹没时间对植物的水分、光合作用等产生很大影响,影响植物的生长状况不同,导致对磷的吸收不同,最终使沉积物中磷含量不同。

除此之外,闽江口湿地沉积物中土壤各层微生物也可能间接影响了各形态磷含量的分布。一方面植物根系周围的微生物能促进土壤中有机质等地分解和营养成分地转化,在植物的生长中发挥着重要的作用。有研究[18]表明,沉积物中的芽孢杆菌、肠杆菌等解磷功能菌属分泌的有机酸可以与沉积物中铁铝磷酸盐形成配合物,把植物难吸收的 OP 转化为易吸收的 IP。另一方面植物的生产过程中会产生分泌物等,影响根际微生物群落。季节及植物根际环境对芦苇植物带细菌群落多样性影响较大,7 月芦苇生长状况良好,根系分泌物旺盛,促进微生物生长繁殖,加速了磷的转化。

此外,土壤中各层磷含量的变化还可能受到土壤的过滤、吸附、富集等物理作用影响,有研究[3]表明,磷在土壤中主要在表层,而且 TP 是土壤对成土母质和营养物质吸附、沉淀等作用而成的,加上淋溶对磷的影响小,且粒径与吸附能力成反比,可能共同导致了各形态磷垂直上磷含量的分布。

经总磷风险评价可知,可能由于土壤对磷的过滤、吸附等作用,植物根系磷养分的吸收等对沉积物总磷污染程度的降低起着一定的作用。经总磷风险评价可知,离海最远的植物带—芦苇植物带的总磷污染程度最低,距离海最近的植物带—扁穗莎草植物带的污染程度最高,但均处于轻度污染。此现象一方面可能受海洋影响,另一方面植物在对磷的吸收程度及所在沉积物的蓄磷能力也产生了一定的作用。

各形态磷的来源复杂,影响因素也十分复杂,大致概括还可能与陆源物质、水文环境、凋落物、海洋浮游生物和植被周边动物等因素有关。另有研究[19]指出,闽江河口湿地附近有许多围垦养殖塘导致沉积物中磷的污染程度加剧,进而增加了其潜在释放风险。本研究区域虽地处围垦养殖区外围的天然湿地,但仍然会受到围垦养殖塘的影响,况且闽江口湿地是闽江下流,在一定程度上会受到沿岸居民干扰、污水排放的影响,因此这可能是导致各形态磷含量分布的原因。

4　结 论

(1)研究区域沉积物 TP 含量的均值为 0.737 mg/g,IP 含量约占 TP 的 66.21%,是 TP 的主要组成部分,其中 Ca—P 和 Fe/Al—P 又分别占 IP 的 40.57%和 71.52%,OP 含量约占 TP 的 32.16%,该湿地沉积物中 TP 含量相对较高,污染指数为 0.819～1.514,总体上为轻度污染。

(2)在空间分布上,水平上,除了互花米草植物带,OP 含量沿陆向海总体上呈降低的趋势,而 Ca—P、Fe/Al—P、IP、TP 均沿陆向海含量而增加。其中,OP 含量可能是由于海水浸没时间长短和海水稀释导致含量降低,而互花米草是入侵物种,具有其特殊的性质和生活习性,导致含量偏高,说明互花米草对 OP 有一定的富集作用,削弱了其释放风险,降低富营养化风险;IP 含量和 TP 含量在沉积物沿陆向海含量依次增加。垂直上,OP 含量除 20—30 cm 土层外随土层深度的增加而降低;Ca—P 随土层深度的增加而降低至底层后略微升高;OP 除 30—40 cm 土层外逐渐降低;TP 随着土层深度的增加而降低,且趋势渐缓。

(3)沉积物 OP 含量,芦苇最高,扁穗莎草最低;在 IP 中,Ca—P 含量互花米草最少,短叶茳芏和扁穗莎草显著高于其他植被类型;Fe/Al—P 含量互花米草明显高于其余植被类型;IP 含量与 TP 含量均是扁穗莎草最高,芦苇最低。通过相关性分析,沉积物中 Ca—P 与容重呈极显著负相关,Fe/Al—P 与 pH、粉粒均呈显著负相关,TP 和 Ca—P 均与含水率呈极显著正相关,IP 与含水率呈显著正相关,Fe/Al—P、OP 和 TP 与电导率呈显著负相关,OP 含量与有机质呈极显著正相关,Ca—P 与砂砾呈显著负相关。

参考文献:

[1] 苏海涛,郭沛涌. 湿地沉积物磷释放风险研究[J]. 能源与环境,2017(2):64-67.

[2] 何涛,孙志高,李家兵,等. 闽江河口互花米草与短叶茳芏湿地土壤无机硫形态分布特征及其影响因素[J]. 环境科学学报,2017,37(12):4747-4756.

[3] 胡敏杰. 闽江河口淡水、半咸水沼泽土壤碳氮磷分布及计量学特征[J]. 中国环境科学,2016,36(3):917-926.

[4] 梁威,邵学新,吴明,等. 杭州湾滨海湿地不同植被类型沉积物磷形态变化特征[J]. 生态学报,2012,32(16):5025-5033.

[5] 余成. 坦噶尼喀湖东北部入湖河流表层沉积物中磷的形态和分布特征[J]. 湖泊科学,2017,29(2):334-342.

[6] 胡敏杰,邹芳芳,仝川,等. 闽江河口短叶茳芏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,2014,34(11):2815-2822.

[7] 章文龙,曾从盛,仝川,等. 闽江河口芦苇和短叶茳芏沼泽土壤磷分级特征比较[J]. 湿地科学,2014,12(6):683-689.

[8] 李家兵,陈庆燎,张丽烟,等. 闽江河口互花米草入侵过程对短叶茳芏湿地土壤氮矿化的影响[J]. 水土保持学报,2016,30(4):242-248.

[9] 金宝石,高灯州,杨平,等. 闽江河口区互花米草入侵不同年限下湿地土壤有机碳变化[J]. 自然资源学报,2016,31(4):608-619.

(下转第 185 页)

acquisition, plant nutrition in a world of declining renewable resources [J]. Plant Physiology, 2001, 127 (2): 390-397.

[6] Wardle D. Aboveground and belowground consequences of long-term forest retrogression in the timeframe of millennia and beyond [C] // Wirth C, Gleixner G, Heimann M (eds). Old-growth forests: Function, fate and value. Ecological Studies 207, Springer Verlag Berlin Heidelberg, 2009:193-209.

[7] Huang W J, Liu J X, Wang Y P, et al. Increasing phosphorus limitation along three successional forests in southern China [J]. Plant and Soil, 2013, 364(1/2): 181-191.

[8] Zhang H Z, Shi L L, Wen D Z, et al. Soil potential labile but not occluded phosphorus forms increase with forest succession [J]. Biology and Fertility of Soils, 2016, 52(1): 41-51.

[9] Feng C, Ma Y, Fu S, et al. Soil carbon and nutrient dynamics is following cessation of anthropoggenic disturbances in degraded subtropical forests [J]. Land Degradation & Development, 2017, 28: 2457-2467.

[10] Zhang Y, Zhou Z C, Yang Q. Genetic variations in root morphology and phosphorus efficiency of *Pinus massoniana* under heterogeneous and homogeneous low phosphorus conditions [J]. Plant and Soil, 2013, 364 (1/2): 93-104.

[11] Tiessen H, Stewart J W B, Moir J Q. Changes in organic and inorganic phosphorus composition of two grassland soils and their particle size fractions during 60 ~ 90 years of cultivation [J]. European Journal of Soil Science, 2010, 34(4): 815-823.

[12] 辜翔,张仕吉,刘兆丹,等.中亚热带植被恢复对土壤有机碳含量、碳密度的影响[J].植物生态学报,2018,42(5):595-608.

[13] 王娜,朱小叶,方晰,等.中亚热带退化林地土壤有机碳及不同粒径土壤颗粒有机碳的变化[J].水土保持学报,2018,32(3):218-225,234.

[14] Shenoy V V, Kalagudi G M. Enhancing plant phosphorus use efficiency for sustainable cropping [J]. Biotechnology Advances, 2005, 23(7/8): 501-503.

[15] Bowman R A, Cole C V. An exploratory method for fractionation of organic phosphorus from grassland soils [J]. Soil Science, 1978, 125(2): 49-54, 95-101.

[16] Lajtha K, Sehlesinger W H. The biogeochemistry of phosphorus cycling and phosphorus availability along a desert soil chronosequence [J]. Ecology, 1988, 69 (1): 24-39.

[17] 秦胜金,刘景双,王国平,等.三江平原不同土地利用方式下土壤磷形态的变化[J].环境科学,2007,28(12):2777-2782.

[18] Joergensen K G. Microbial biomass phosphorus in soils of beech (*Fagus sylvtica* L.) forests [J]. Biology and Fertility of Soils, 1995, 19(2/3): 215-219.

[19] Cross A F, Schlesinger W H. A literature-review and evaluation of the Hedley fractionation-Applications to the biogeochemical cycles of soil-phosphorous in natural ecosystems [J]. Geoderma, 1995, 64(3/4): 197-214.

[20] Frizano J, Johnson A H, Vann D R, et al. Soil phosphorus fractionation during forest development on landslide scars in the Luquillo Mountains, Puerto Rico [J]. Biotropica, 2002, 34(1): 17-26.

(上接第 177 页)

[10] 俞振飞,王国祥,钱君龙,等.SMT 法测定沉积物标准样品有机磷形态分析方法探究[J].中国环境监测,2013,29(3):117-122.

[11] 马太玲,张江山.环境影响评价[M].武汉:华中科技大学出版社,2009:98.

[12] Mirja L. Sedimentation of trace metals in the Gulf of Bothnia [J]. Chemosphere, 1995, 31(8): 3839-3856.

[13] 刘晶晶.湿地挺水植物根系土壤中的磷形态变化与分析[J].中国环境科学,2013,33(11):2040-2046.

[14] 滕泽栋,李敏,朱静,等.野鸭湖湿地芦苇根际微生物多样性与磷素形态关系[J].环境科学,2017,38(11):4589-4597.

[15] 安婉丽.互花米草入侵对闽江口湿地土壤磷形态及释放风险的影响[J].水土保持学报,2016,30(6):214-219.

[16] Xiao R, Bai J H, Gao H F, et al. Spatial distribution of phosphorus in marsh soils of a typical land/inland water ecotone along a hydrological gradient [J]. Catena, 2012, 98: 96-103.

[17] 苗萍.胶州湾互花米草湿地氮、磷元素的垂直分布及季节变化[J].应用生态学报,2017,28(5):1533-1540.

[18] 章振亚,丁陈利,肖明.崇明东滩湿地不同潮汐带入侵植物互花米草根际细菌的多样性[J].生态学报,2012,32(21):6636-6646.

[19] 高灯州.围垦养殖对沉积物磷赋存形态的影响及其潜在释放风险评估[D].福州:福建师范大学,2016.