

DOI: 10.5846/stxb201112051860

梁威, 邵学新, 吴明, 李文华, 叶小齐, 蒋科毅. 杭州湾滨海湿地不同植被类型沉积物磷形态变化特征. 生态学报, 2012, 32(16): 5025-5033.

Liang W, Shao X X, Wu M, Li W H, Ye X Q, Jiang K Y. Phosphorus fraction in the sediments from different vegetation type in hangzhou bay coastal wetlands. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(16): 5025-5033.

杭州湾滨海湿地不同植被类型沉积物磷形态变化特征

梁 威, 邵学新, 吴 明*, 李文华, 叶小齐, 蒋科毅

(国家林业局杭州湾湿地生态系统定位研究站, 中国林业科学研究院亚热带林业研究所, 富阳 311400)

摘要:研究了杭州湾滨海湿地不同植被类型下 0—5 cm 和 10—20 cm 沉积物总磷(TP)、无机磷(IP)、有机磷(OP)及其形态变化特征,揭示湿地植被演替对沉积物磷形态的影响。结果表明,沉积物 TP,互花米草(MC)显著高于其他植被类型。在 IP 中,可溶性松散态磷(Soluble and loosely bound P, SL-Pi)含量光滩(CK)最小,MC 最大;还原态可溶性磷(Reductant soluble P, RS-Pi)含量芦苇(LW)和 MC 显著高于 CK 和海三棱藨草(BC);钙磷(Ca-Pi)含量 CK 和 BC 显著大于 LW 和 MC。在 OP 中,活性有机磷(Labile Po, L-Po)含量最低、中等活性有机磷(Moderately labile Po, ML-Po)含量最高、非活性有机磷(Nonlabile Po, NL-Po)处于中间水平。IP 是磷素的主要形态、占 TP 的 74%—89%,而 Ca-Pi 又是 IP 的主要形态、于湿地沉积物淤积初期通过吸附沉淀作用存留。杭州湾湿地植被自然演替过程中不同植物生物量积累和营养物质循环过程的变化导致沉积物中磷形态的差异。植被演替初期,BC 显著改变 0—5 cm 沉积物磷形态,对 10—20 cm 沉积物无显著影响;植物演替后期的 LW 和 MC 促使 0—5 cm 沉积物有机磷快速积累,10—20 cm 沉积物有机磷小幅增加,同时促进 Ca-Pi 向可溶性、活性态磷转变。

关键词:杭州湾;植被类型;磷形态

Phosphorus fraction in the sediments from different vegetation type in hangzhou bay coastal wetlands

LIANG Wei, SHAO Xuexin, WU Ming*, LI Wenhua, YE Xiaoqi, JIANG Keyi

Wetland Ecosystem Research Station of Hangzhou Bay, State Forestry Administration; Research Institute of Subtropical Forestry, Chinese Academy of Forestry; Fuyang 311400, China

Abstract: The effects of saltmarsh vegetation on phosphorus fractions in the sediments were studied in this paper. Phosphorus fractions in the two layer (0—5cm, 10—20cm) sediments from four saltmarsh vegetation types (Bare flat, *Scirpus mariqueter*, *Phragmites australis*, *Spartina alterniflora*) were analyzed. The results indicated the impacts of vegetation succession on P fractions. The content of total phosphorus (TP) in the sediments from *S. alterniflora* (MC) habitats was higher than from the other vegetaion. The content of soluble and loosely bound P (SL-Pi) in was the lowest in bare flat(CK) and highest in sediments from MC haibitats. Similarly, the content of reductant soluble P (RS-Pi) in the sediments from *P. australis*(LW) and MC habitats were obviously higher than CK and *S. mariqueter*(BC). Adversely, the content of Ca-Pi in CK and BC habitatas sediments were significantly higher than LW and MC. The content of different organic P fractions was significantly different. In all vegetation types, the content of labile P (L-Po) was the lowest; the content of moderately labile P (ML-Po) was the highest; the content of nonlabile P (NL-Po) was at an intermediate level. Inorganic P covered up about 74%—89% of TP Ca-Pi, which was the main form of inorganic P, was retained by adsorbing and precipitating in the time of sediment deposition. The results suggested that biomass production and nutrient cycling

基金项目:国家自然科学基金项目(31000296);浙江省-中国林科院合作项目(2010SY02);国家“十一五”科技支撑专题(2006BAD03A1902)资助

收稿日期:2011-12-05; 修订日期:2012-06-19

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: hangzhoubay@126.com

processes with vegetation succession led to the difference of phosphorus forms. In early stage of succession, BC changed the P fractions of surface sediments significantly; but it imposed no obvious impact on subsurface sediments. In the later period, LW and MC promoted rapid accumulation of organic P in surface sediments but a litter less increase in subsurface sediments. At the same time, vegetation succession promoted Ca-Pi transforming to soluble and active P.

Key Words: Hangzhou Bay; vegetation type; phosphorus fraction

磷是植物生长及水体富营养化的限制营养元素。水体和土壤中磷素的含量通常决定了湿地生态系统的生产力和营养状况。湿地因为其对水体的净化能力及对磷素的储存功能,被称为“地球之肾”^[1]。湿地生态系统中 80%—90% 的磷贮存在土壤中,因为在土壤特殊的环境下营养元素有较长的周转时间^[2]。然而,湿地也可以向水体中释放磷、导致富营养化。因此,湿地是磷的主要源、汇和转换器之一,在水体富营养状况的控制以及磷循环过程中扮演着十分重要的角色。

沉积物中的磷以不同的物理化学形式结合,呈现出不同的地球化学特征,在磷循环中所起的作用也不同^[3]。磷形态的定量研究是探讨湿地沉积物中磷的生物地球化学功能的重要前提。依据不同形态磷含量变化也可以有效预测水体发生富营养化的风险^[4]。沉积物不同形态磷之间相互转化直接影响着磷的迁移,但是传统沉积物磷的测试方法不能定量分析无机和有机磷的变化^[5]。Zhang-Kovar^[6]总结有关磷分级的研究工作,详细阐述土壤无机磷和有机磷的浸提方法。沉积物磷分级按照不同结合态磷稳定性差别,将其中的磷分为不同形态。这些磷形态具有不同的物理化学特征或包含于不同的物质中或活性大小不同,可以定量研究沉积物中不同形态磷之间的转化。现阶段有关沉积物磷形态研究,大多只是针对无机磷^[7-9]或者有机磷^[10-12]分别开展,同时分析无机磷和有机磷形态特征的研究比较少见^[13-15]。同时,关于磷形态研究多集中于内陆淡水湖泊和河流,对于滨海河口湿地研究较少。

滨海湿地是我国湿地的重要类型之一。以杭州湾为界,杭州湾滨海湿地分成杭州湾以北和杭州湾以南两个部分。杭州湾南岸湿地属于淤涨型滩涂,每年新增大量湿地面积,同时由于经济发展需要,又被不断地围垦利用。受自然因素和人为因素的双重影响,生态系统的不稳定性和脆弱性表现极为突出,是典型的生态环境脆弱区域。外来种互花米草(*Spartina alterniflora*)的入侵和人为围垦活动已成为影响该地区湿地土壤磷素随植被自然演替分布的主要原因。

湿地植物可以改变磷的地球化学形态并进而影响营养磷元素的地球化学循环。因此本文详细分析了杭州湾滨海湿地沉积物无机磷、有机磷及总磷含量变化特征,研究湿地磷的赋存形态、环境地球化学行为,尤其是植被演替对沉积物磷形态的影响。为杭州湾滨海湿地的保护及利用提供理论依据,对湿地管理有重要意义。

1 材料与方法

1.1 实验区概况

杭州湾位于浙江省东部,西接钱塘江、东至东海、呈喇叭口形状,属河口海湾。属于北亚热带海洋性季风气候,年均气温 16 ℃,年均降水量 1273 mm,日照 2038 h,无霜期 244 d。研究区位于杭州湾湿地中心内。杭州湾湿地中心位于宁波市杭州湾新区西北部,杭州湾跨海大桥西侧,主要由围垦湿地、离岸沙洲和自然潮滩组成,总面积 43.5 km²。研究区潮汐类型属于不规则半日潮,每日受到潮水冲刷两次。具体位置详见图 1。随高程的增加和滩涂形成时间的逐渐加长,潮滩湿地伴有典型的自然生物群落演替序列,依次为光滩、海三棱藨草(*Scirpus mariqueter*)和芦苇(*Phragmites australis*)生长区^[16]。此外,由于外来种互花米草的入侵,在海三棱藨草和芦苇生长区之间出现了互花米草镶嵌群落。

1.2 样品采集及处理

2011 年 4 月下旬,根据资料收集和现场勘察,在离岸沙洲北侧选取植被面积较大、植物长势较为一致的

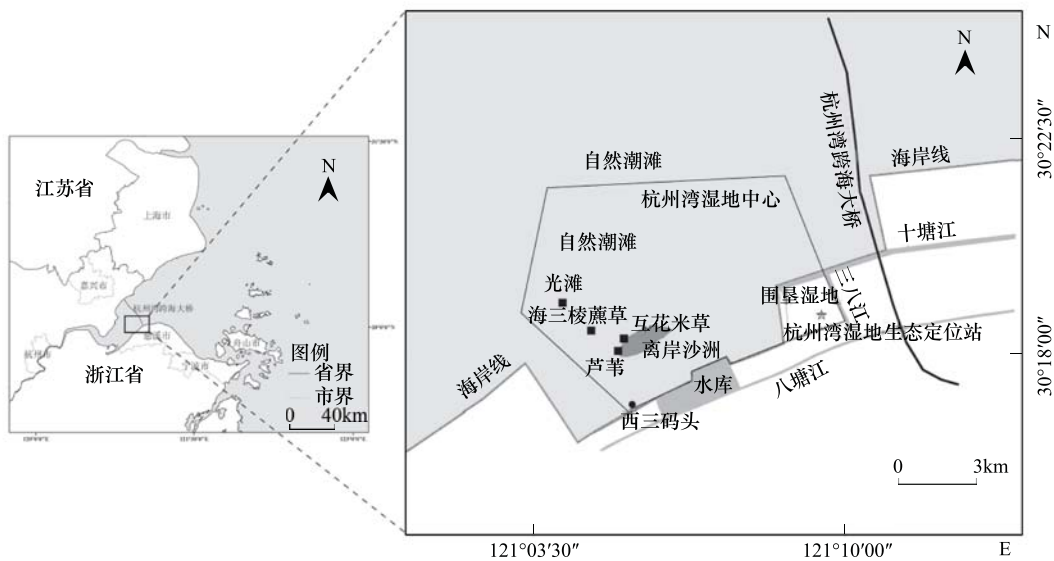


图1 研究区域地理位置

Fig.1 Location of the research area

区域, 布设4处样地, 分别代表光滩(CK)、海三棱藨草(BC)、芦苇(LW)和互花米草(MC)不同植被类型的湿地。每块样地随机布设3个样方(5 m×5 m), 且样方间隔不小于10 m, 每个样方S型取5个沉积物样品混合为一个样。采用Eijkelpamp土壤取样器取柱状沉积物样品, 取得的沉积物柱状样直径为6 cm。将柱状沉积物样品按照0—5 cm、10—20 cm分层采集。沉积物样品采集后放入聚乙烯袋中, 密封以防止样品污染。样品经冷冻干燥仪(LGJ-10C, 北京四环科学仪器厂)冻干、研磨、过筛(2 mm)后, 密封冷藏保存。

1.3 样品分析

1.3.1 沉积物理化性质

沉积物pH值和电导率分别使用pH计、电导率仪在水土比5:1条件下测定。有机质含量通过550℃样品灼烧5h的烧失量(Loss on ignition, LOI)测定^[17]。沉积物粒径测定采用英国Malvern公司的Mastersizer 2000激光粒度分析仪, 粒径测量范围为0.02—2000 μm。粒径分类采用国际制土壤粒径分级标准, 粘粒(0—0.002 mm)、粉粒(0.002—0.02 mm)和砂粒(0.02—2 mm)。测定沉积物基本理化性质见表1。

表1 不同植被类型下沉积物粒径、有机质、电导率和pH值变化

Table 1 Sediment physical and chemical properties for different soil of vegetation types

样点 Samples	土层深 Layer of sample/cm	pH	电导率/(ms/cm) Conductivity	有机质/% Organic matter	粘粒/% Clay	粉粒/% Silt	砂粒/% Sand
光滩	0—5	8.73±0.02 b	4.98±0.38 a	4.99±0.08 b	4.60	35.04	60.36
Bare flat	10—20	9.27±0.09 a	1.41±0.17 c	4.48±0.61 c	3.42	27.78	68.80
海三棱藨草	0—5	8.93±0.09 a	3.26±0.08 b	8.38±0.24 a	10.14	66.63	23.23
<i>Scirpus mariqueter</i>	10—20	9.06±0.07 bc	1.71±0.16 bc	6.34±0.10 b	5.95	49.77	44.28
芦苇	0—5	9.07±0.17 a	2.65±0.38 c	8.33±0.10 a	8.42	61.87	29.71
<i>Phragmites australis</i>	10—20	8.97±0.07 c	2.16±0.24 a	7.43±0.14 a	8.02	57.21	34.77
互花米草	0—5	8.94±0.11 a	2.38±0.08 c	8.60±0.09 a	9.31	68.88	21.81
<i>Spartina alterniflora</i>	10—20	9.15±0.10 ab	1.85±0.10 ab	7.75±0.11 a	8.45	62.76	28.79

1.3.2 不同形态磷分级提取

Zhang和Kovar等^[6]总结土壤磷分级方法, 无机磷和有机磷分别采用连续提取法进行测定。无机磷按照Kuo等^[18]建立的针对石灰性土壤的提取方法进行分级: 可溶性松散态磷(Soluble and loosely bound P, SL-Pi)

由 0.1 mol/L NaOH+1 mol/L NaCl 溶液提取;还原态可溶性磷(Reductant soluble P, RS-Pi)由 CDB (Sodium citrate-sodium dithionite-sodium bicarbonate) 溶液提取;Ca-Pi 由 0.5 mol/L HCl 溶液提取。有机磷按照 Ivannoff 等^[19]的方法进行分级提取;活性有机磷(Labile Po, L-Po)由 pH=8.5 0.5mol/L NaHCO₃溶液提取,主要为吸附于土壤的松散态磷;中等活性有机磷(Moderately labile Po, ML-Po)由 1.0 mol/L HCl 提取,同时包括 0.5 mol/L NaOH 提取出来的富里酸结合态有机磷;非活性有机磷(Nonlabile Po, NL-Po)则包括 0.5 mol/L NaOH 提取出的腐植酸结合态有机磷,以及沉积物灼烧后 1.0 mol/L H₂SO₄提取出来的残渣态有机磷。提取液中溶解磷酸根使用磷钼蓝比色法测定。总磷(TP)为各形态磷相加之和。

1.4 数据处理

数据处理及统计分析在 Microsoft Excel 2010、Sigmaplot 12.0 和 Spss 19.0 软件上进行。所有数据使用单因素方差分析,LSD 法显著性检验($P<0.05$)。

2 结果与分析

2.1 无机磷含量

沉积物 0—5 cm、10—20 cm 无机磷含量如图 2 所示。几种植被类型 0—5 cm 和 10—20 cm 沉积物中 SL-Pi 含量都较低,0—5 cm 沉积物含量约为 6.91—59.55 mg/kg,10—20 cm 沉积物中含量约为 7.04—61.59 mg/kg。RS-Pi 含量处于 3 种形态磷中间水平,0—5 cm 沉积物含量约为 46.21—275.24 mg/kg、平均值(146.40 ± 20.23) mg/kg,10—20 cm 沉积物含量约为 46.81—244.86 mg/kg、平均值(138.38 ± 19.21) mg/kg,变动幅度较大。Ca-Pi 含量最高,0—5 cm 沉积物含量约为 169.87—435.00 mg/kg、平均值(307.90 ± 24.13) mg/kg,10—20 cm 沉积物中含量约为 189.24—427.07 mg/kg,平均值(310.81 ± 23.36) mg/kg。不同植被类型 0—5 cm 沉积物中 3 种形态无机磷含量呈现出较明显的趋势。SL-Pi 含量 CK 最小、MC 最大,差异显著,BC 和 LW 同等水平、无显著性差异,BC、LW 和 MC 约是 CK 的 2—3 倍大小,体现有植物的湿地生态系统受到植物的影响沉积物中可溶性、有效磷含量水平较高。RS-Pi 含量除 LW 较高、平均值(221.98 ± 38.91) mg/kg,其他几种类型含量差别不大、无显著性差异。不同类型下 Ca-Pi 含量水平普遍较高,其中尤以 CK 和 BC 含量最高,LW 和 MC 含量相当。10—20 cm 3 种形态无机磷沉积物表现出的趋势与 0—5 cm 沉积物基本相同。CK 和 BC 三种形态无机磷含量呈现明显的梯度 Ca-Pi>RS-Pi>SL-Pi,含量差别明显;LW 和 MC 沉积物中 Ca-Pi 和 RS-Pi 含量差别不大,呈现 Ca-Pi \approx RS-Pi>SL-Pi。

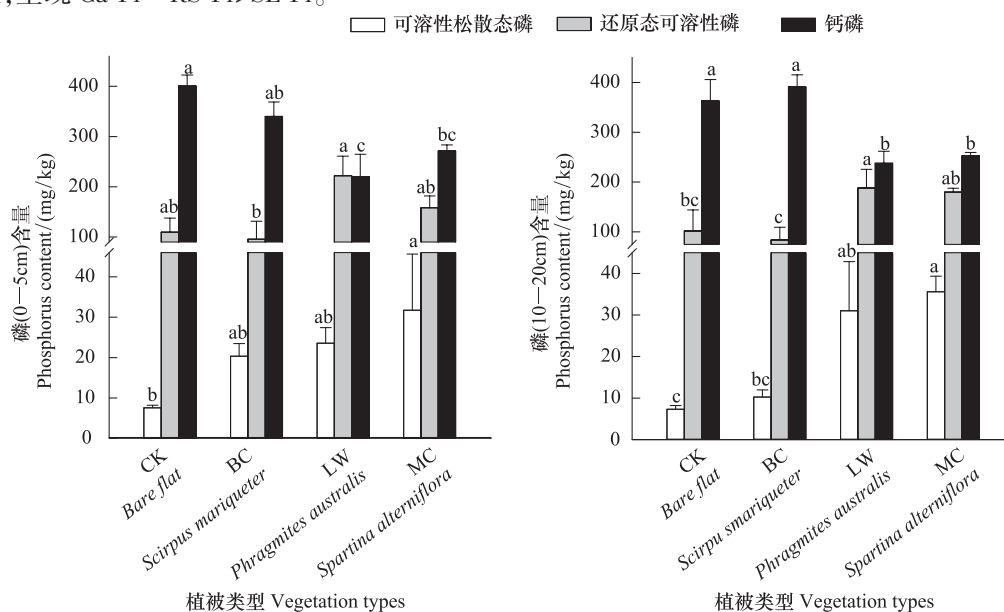


图 2 不同植被类型沉积物无机磷含量

Fig. 2 Content of inorganic P under different vegetation type

2.2 有机磷含量

有机磷含量如图3所示。0—5 cm、10—20 cm 沉积物 L-Po 含量分别为 1.83—12.71 mg/kg、平均值(5.96 ± 0.85) mg/kg, 0.39—16.76 mg/kg、平均值(4.19 ± 1.35) mg/kg; ML-Po 含量分别为 51.37—108.98 mg/kg、平均值(82.91 ± 5.94) mg/kg, 31.21—77.41 mg/kg、平均值(53.97 ± 4.06) mg/kg; NL-Po 含量分别为 9.16—97.26 mg/kg、平均值(38.96 ± 7.03) mg/kg, 5.74—35.51 mg/kg、平均值(17.94 ± 3.22) mg/kg。所有植被类型无论 0—5 cm 还是 10—20 cm 沉积物均为 ML-Po > NL-Po > L-Po。而且 L-Po 含量显著低于其他有机磷含量,几个样点整体平均值 ML-Po 约是其 12—15 倍, NL-Po 约是其 4—7 倍。0—5 cm 沉积物 L-Po 含量, CK 显著小于另外 3 种植被类型; 10—20 cm 沉积物 CK 含量仍是最小, BC 和 MC 植被类型 L-Po 含量相近, LW 平均值为 (10.59 ± 3.27) mg/kg、显著高于另外 3 种植被类型。0—5 cm 和 10—20 cm 沉积物 ML-Po 含量表现出共同的趋势为: 4 种植类型含量差异性不显著, LW 和 MC 略大于 CK 和 BC 植被类型。0—5 cm 和 10—20 cm 沉积物四种植被类型 NL-Po 含量无显著性差异, CK 和 LW 含量接近, BC 与 MC 含量略高。

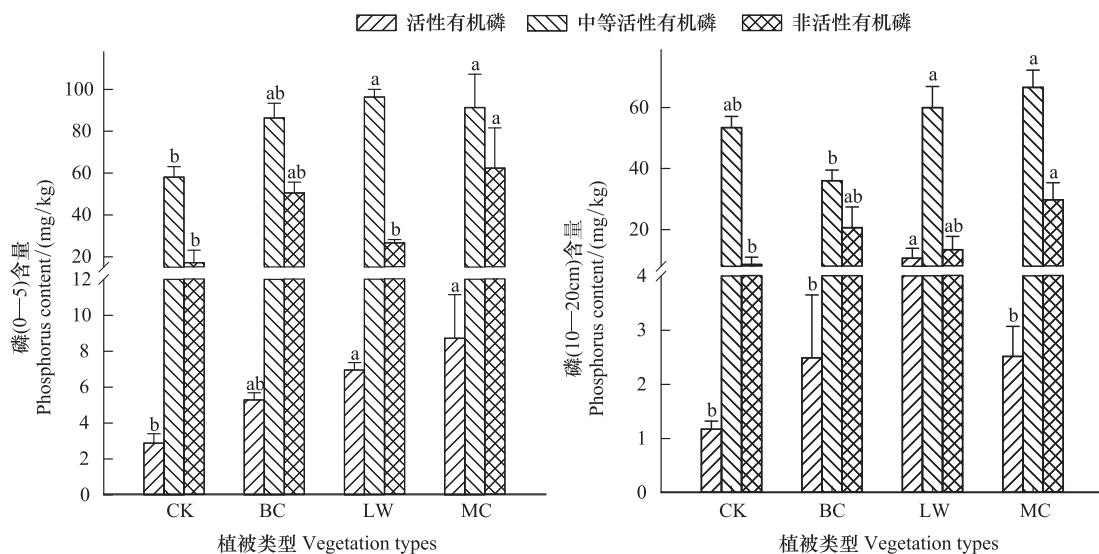


图3 不同植被类型下沉积物有机磷含量

Fig. 3 Content of organic P under different vegetation types

2.3 沉积物 TP 及组成

沉积物 TP 含量及各形态 P 所占百分比如图 4 所示。MC 0—5 cm 和 10—20 cm 沉积物 TP 含量分别为 (623.09 ± 6.86) mg/kg、(571.72 ± 3.34) mg/kg, 显著高于其他植被类型。CK、BC 和 LW 的 TP 含量无显著差异, 此 3 种植类型 0—5 cm 沉积物含量变化范围 595—598 mg/kg; 10—20 cm 沉积物含量范围 535—545 mg/kg, BC 和 LW 比 CK 略高约 10 mg/kg。CK、BC、LW 和 MC 4 种植被类型 0—5 cm 沉积物有机磷占 TP 百分比分别为 13.06%、23.67%、21.75%、26.00%; 10—20 cm 沉积物有机磷占 TP 百分比分别为 11.76%、10.76%、15.39%、17.25%。0—5 cm 沉积物 CK 有机磷比例显著低于其他植被约 10%; 10—20 cm 沉积物 LW 和 MC 有机磷比例显著高于 CK 和 BC。另外, 值得注意的是 BC 和 MC 两种类型沉积物。BC 0—5 cm 沉积物有机磷比例偏高、比例大小与 LW 和 MC 相当, 10—20 cm 沉积物有机磷比例偏低、比例大小与 CK 相当。无机磷形态, 0—5 cm 和 10—20 cm 沉积物均表现出的明显趋势: LW 和 MC 相比于 CK 和 BC, Ca-Pi 比例明显减小、SL-Pi 和 RS-Pi 比例增加。无机磷是杭州湾湿地沉积物磷素的主要形态, Ca-Pi 是无机磷的主要形态。

3 讨论

杭州湾潮滩湿地伴有典型的自然生物群落演替序列, 依次为光滩、海三棱藨草和芦苇生长区^[16]。此外, 由于外来种互花米草的入侵, 在海三棱藨草和芦苇生长区之间出现了互花米草镶嵌群落。互花米草植被生长带靠近芦苇, 有些地方甚至出现芦苇、互花米草交互群落。采用 6 种形态磷含量和 TP 对植被类型进行聚类分

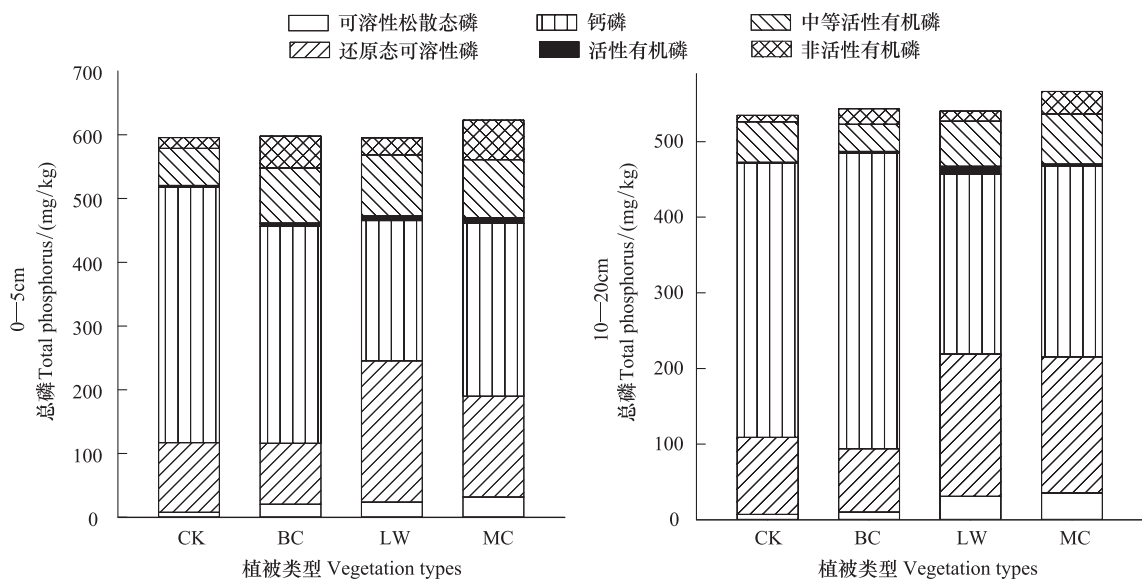


图4 不同植被类型下沉积物磷(P)组成

Fig. 4 Structure of sediment P under different vegetation types

析,设置参数为:系统聚类法、组间连接法、欧氏距离、原始变量 Z Scores 法标准化。聚类分析结果特征明显:0—5 cm 和 10—20 cm 沉积物都可以划分为两类:(1)CK 和 BC;(2)LW 和 MC。说明杭州湾湿地植被演替过程促进沉积物不同形态磷含量变化,形成两个特征类群,分别代表植被演替初期和后期。

与宋祖光等^[20]研究结果相似,杭州湾湿地沉积物中钙磷是无机磷的主要存在形态、与海洋沉积物以钙磷为主是一致的。由于钙磷的百分含量在一定程度上可以反映陆海相互作用的强弱,因此说明杭州湾滨海沉积物中磷的环境化学行为受海洋作用较大。杭州湾湿地形成初期,TP 主要来自海洋沉积物、磷素积累主要通过吸附沉淀等作用完成。研究区湿地处于不断演替变化之中、演替经历时间较短,TP 主要来自演替初期的自然积累,所以 CK、BC 和 LW 的 TP 含量相近。但是植物根际对沉积物的影响可能会先从磷的形态方面表现出来。MC 因其作为入侵种性质的特异性,以及外界环境的影响,导致 TP 偏高。杨永兴等^[21]研究发现海三棱藨草与芦苇作为原生植被其土壤具有原生土壤特征,外来物种互花米草入侵在一定程度上改变了原生海三棱藨草和芦苇湿地土壤全量与速效养分特征与分布规律。MC 具有较大的生物量及枯落物和磷的归还量。MC 样地靠近离岸沙洲围塘养殖区,受到人为干扰和养殖污染的影响。这可能是互花米草 TP 含量显著高于其他植被类型的主要原因。

不同植物生物量生产和营养物质循环过程的变化导致了不同植被类型间沉积物磷形态的差异^[22]。杭州湾湿地演替初期,CK 沉积物磷形态中,SL-Pi 和 L-Po 活性磷含量较低、与其它植被类型具有显著差别,Ca-Pi 性质稳定磷含量较大。另外,CK 作为原始淤积形态,沉积物又受到潮汐冲刷和降水等自然条件的影响,可溶性磷逐渐流失。BC 10—20 cm 沉积物磷形态组成与 CK 相似,0—5 cm 沉积物磷形态显著改变。植被演替初期 BC 促进 0—5 cm 沉积物 Ca-Pi 向 SL-Pi 转变,同时促进有机磷积累;但是对 10—20 cm 沉积物无显著影响。海三棱藨草是潮间带的先锋植物,在恶劣条件下生存并建群,地下部分具有很强的吸收营养物质的能力^[23]。另外,它可以改变潮滩生境中的沉积环境,促使泥沙淤积,使沉积物性质如粒径、盐度、有机质含量等发生变化^[24]。

植被演替后期 LW 和 MC 对无机磷形态也有显著的作用。相对于植被演替初期,Ca-Pi 含量大幅下降、SL-Pi 和 RS-Pi 显著增高。RS-Pi 通常认为以铁(Fe)、锰(Mn)等元素的氢氧化物结合态存在。当沉积物氧含量较低、处于还原状态,这种金属氢氧化物结合态磷有可能释放出来^[25]。芦苇和互花米草对有机磷积累和促进稳定态无机磷向可利用磷转变起到提高土壤肥力的作用。通常高土壤肥力与植被对 P 的高利用率以及对

环境的高适应性等因素密切相关^[22]。芦苇根表覆盖有铁氧化物胶膜,根表铁膜能够富集根际的养分、在介质养分缺乏时被活化吸收^[26]。古小治等^[27]研究南四湖湿地沉积物指出芦苇能明显改善湿地沉积物的物理化学特性,能有效控制沉积物中磷酸根的再次释放,RS-Pi 和 Ca-Pi 在一定条件下可转化为 SL-Pi,进而成为孔隙水中磷酸盐的来源。互花米草具有较强竞争力和对逆境的高抗性^[28]。植被演替后期 LW 和 MC 10—20 cm 沉积物有机磷小幅增加,0—5 cm 沉积物有机磷显著积累。3 种形态的有机磷,BC、LW 和 MC 均大于 CK,说明植被演替促进有机磷积累是通过不同形态有机磷同时增长实现的,不是特定某种形态有机磷的增长。另有研究指出慈溪地区大规模进行滩涂围垦建设导致沉积物环境发生变化,有机磷占 TP 含量比例显著偏高^[20]。本文研究区虽处于围垦区外围的自然潮滩,但仍受到围垦对整个大区域环境的影响;另外,离岸沙洲近些年围塘养殖情况日益严重,对周围沉积物环境也产生一定程度的影响。因此,围垦也是导致 BC、LW 和 MC 有机磷增长的重要原因。有机磷来源复杂,陆源物质、潮滩带植被凋落物、海洋浮游生物等对有机磷均有一定的贡献。

随着土壤有机质的积累,有机磷也随之形成^[29]。由表 1,BC、LW 和 MC 0—5 cm 和 10—20 cm 沉积物有机质含量均显著高于 CK,植被生长增加了沉积物有机质积累。相关研究指出,杭州湾自然潮滩植被对沉积物 0—5 cm 有机碳有显著影响,不同植被类型沉积物的固碳能力随植物群落演替而逐步增强,表现为芦苇>互花米草>海三棱藨草>光滩^[30]。由图 5,0—5 cm 和 10—20 cm 沉积物有机质和有机磷含量呈现显著正相关关系($P<0.05$),表明沉积物有机质可以作为有机磷含量水平的指标之一。诸多研究^[9, 13, 31]发现土壤有机质含量与有机磷存在显著正相关关系,认为有机质是有机磷的载体。杭州湾湿地受到潮汐冲刷作用强烈,光滩更容易受到侵蚀,磷素可随着沉积物颗粒流失。海三棱藨草、芦苇、互花米草植被的生长,一方面减少了水流冲击作用,另一方面植被凋落物和根系作用促进有机质和有机磷的积累。高海鹰等^[12]发现在外源输入较为严重的地区,有机质与沉积物有机磷形态没有明显的相关性。外源输入严重的地区,有机质的累积速率远超过其矿化水平,使吸附的有机磷被迅速埋藏。这在一定程度上说明,杭州湾湿地沉积物有机质和有机磷主要来源于植被凋落物,受到外源污染的影响不大。

4 结论

杭州湾湿地 TP 主要来自海洋沉积物,在淤积初期通过吸附、沉淀等作用积累。由于演替时间较短,CK、BC 和 LW 主要受到河口环境的影响,TP 含量变化不大。而入侵物种 MC 在一定程度上改变了原生海三棱藨草和芦苇湿地土壤全量与速效养分特征与分布规律,同时,由于靠近离岸沙洲围塘养殖区、受到人为干扰和养殖污染的影响,导致 TP 含量显著高于其他植被类型。

杭州湾湿地不同植被类型沉积物无机磷含量差异显著。0—5 cm 和 10—20 cm 沉积物表现出类似规律。SL-Pi 含量 CK 最小、MC 最大;RS-Pi 含量 LW 和 MC 显著高于 CK 和 BC;Ca-Pi 含量 CK 和 BC 显著大于 LW 和 MC。植被生长能够有效促进沉积物无机磷中的稳定态磷向可溶性、活性态磷转变。

植被演替显著改变沉积物磷形态特征。BC、LW 和 MC 各形态有机磷均大于 CK,说明植被生长显著促进沉积物有机磷积累。0—5 cm 沉积物有机磷含量整体高于 10—20 cm,表明植被枯落物对 0—5 cm 沉积物有机磷含量影响较大。植被演替初期,BC 显著影响 0—5 cm 沉积物磷形态、对 10—20 cm 沉积物作用较小;演替后期,LW 和 MC 10—20 cm 沉积物有机磷小幅增加,0—5 cm 沉积物有机磷显著积累。

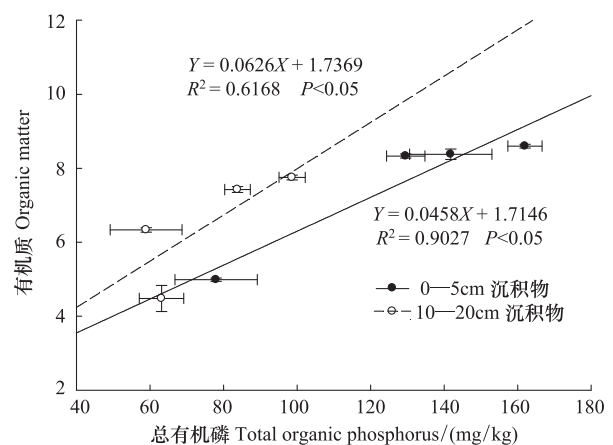


图 5 不同植被类型沉积物总有机磷(TPo)与有机质的相关关系
Fig. 5 Correlation between TPo and organic matter under different vegetation types

References:

- [1] Wu M, Shao X X, Hu F, Jiang K Y. Effects of reclamation on soil nutrients distribution of coastal wetland in south Hangzhou bay. *Soils*, 2008, 40 (5): 760-764.
- [2] Jimenez-carceles F, Alvarezrojel J. Phosphorus fractionation and distribution in salt marsh soils affected by mine wastes and eutrophicated water: a case study in SE Spain. *Geoderma*, 2008, 144(1/2): 299-309.
- [3] Pan Q K, Luo Z X, Yan C Z, Zhang D D. Phosphorus fractions and theirs correlation analysis in surface sediment of urban coastal wetland. *Ecology and Environmental Sciences*, 2010, 19(9): 2117-2122.
- [4] Tian J R, Zhou P J. Phosphorus fractions of floodplain sediments and phosphorus exchange on the sediment-water interface in the lower reaches of the Han River in China. *Ecological Engineering*, 2007, 30(3): 264-270.
- [5] Beck M A, Sanchez P A. Soil phosphorus movement and budget after 13 years of fertilized cultivation in the Amazon basin. *Plant and Soil*, 1996, 184(1): 23-31.
- [6] Kovar J L, Pierzynski G M. *Methods of Phosphorus Analysis for Soils, Sediments, Residuals, and Waters*. 2nd ed. Blacksburg: Virginia Tech University, 2009.
- [7] House W A, Denison F H, Armitage P D. Comparison of the uptake of inorganic phosphorus to a suspended and stream bed-sediment. *Water Research*, 1995, 29(3): 767-779.
- [8] Schroeder P D, Kovar J L. Comparison of organic and inorganic phosphorus fractions in an established buffer and adjacent production field. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2006, 37(9/10): 1219-1232.
- [9] Zhang J, Li M, Liu S, Liu Y J, Zhang L Q, Cao Q, Sun D Z. Seasonal variations and bioavailability of inorganic phosphorus in soils of Yeyahu Wetland in Beijing, China. *International Journal of Sediment Research*, 2011, 26(2): 181-192.
- [10] Pant H, Reddy K R. Hydrologic influence on stability of organic phosphorus in wetland detritus. *Journal of Environment Quality*, 2001, 30(2): 668-668.
- [11] Turner B L, Cade-Menun B J, Condron LM, Newman S. Extraction of soil organic phosphorus. *Talanta*, 2005, 66(2): 294-306.
- [12] Gao H Y, Liu T, Din S M, Bai X L, Li B. Characteristics of organic phosphorus fractions in sediments of Lake Dianchi. *Ecology and Environment*, 2008, 17(6): 2137-2140.
- [13] Qin S J, Liu J S, Wang G P, Zhou W M. Phosphorus fractions under different land uses in Sanjiang Plain. *Environmental Science*, 2007, 28 (12): 2777-2782.
- [14] Darilek J L, Huang B, Li D C, Wang Z G, Zhao Y C, Sun W X, Shi X Z. Effect of land use conversion from rice paddies to vegetable fields on soil phosphorus fractions. *Pedosphere*, 2010, 20(2): 137-145.
- [15] Sharpley A N, Smith S J. Fractionation of inorganic and organic phosphorus in virgin and cultivated soils. *Soil Science Society of America Journal*, 1985, 49(1): 127-130.
- [16] Wu T G, Wu M, Xiao J H. Dynamics of community succession and species diversity of vegetations in beach wetlands of Hangzhou Bay. *Chinese Journal of Ecology*, 2008, 27(8): 1284-1289.
- [17] Qian B, Liu L, Xiao X. Comparative tests on different methods for content of soil organic matter. *Journal of Hohai University: Natural Sciences*, 2011, 39(1): 34-38.
- [18] Sparks D L. *Methods of Soil Analysis. Part 3. Chemical Methods*. Madison Wis: American Society of Agronomy, 1996.
- [19] Ivanoff D B, Reddy K R, Robinson S. Chemical fractionation of organic phosphorus in selected histosols. *Soil Science*, 1998, 163(1): 36-45.
- [20] Song Z G, Gao X J, Zhang C. Distribution, existed forms and ecological significance of phosphorus in tide-beach surface sediments of the Hangzhou Bay. *Chinese Journal of Ecology*, 2007, 26(6): 853-858.
- [21] Yang Y X, Liu C E, Yang Y. Characteristics of N, P and K cycling in scirpus mariqueter wetland ecosystem at Jiuduansha shoal of Yangtze River estuary. *Chinese Journal of Ecology*, 2009, 28(10): 1977-1985.
- [22] Zhao Q, Zeng D H, Fan Z P, Yu Z Y, Hu Y L, Zhang J W. Seasonal variations in phosphorus fractions in semiarid sandy soils under different vegetation types. *Forest Ecology and Management*, 2009, 258(7): 1376-1382.
- [23] Yan Q, He W S, Lu J J. Temporal and spatial changes of plant biomass and its N content during vegetation succession at Chongming dongtan wetland. *Chinese Journal of Ecology*, 2006, 25(9): 1019-1023.
- [24] Yang X Z, Lu J J, Liu H. Influence of characteristics of scirpus mariqueter community on the benthic macro-invertebrate in a salt marsh of the Changjiang Estuary. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22(3): 326-333.
- [25] Ribeiro D, Martins G, Nogueira R, Cruz J V, Brito A G. Phosphorus fractionation in volcanic lake sediments (Azores-Portugal). *Chemosphere*,

2008, 70(7): 1256-1263.

- [26] Yao Ha X, Ye Z Z. Iron plaques on wetland plant root surface: a review. *Chinese Journal of Ecology*, 2009, 28(11): 2374-2380.
- [27] Gu X Z, Zhang L, Bo X, Fan C X. Characteristics of sediments and pore water in lake Nansi Wetland. *Environmental Science*, 2010, 31(4): 939-945.
- [28] Deng Z F, An S Q, Zhi Y B, Zhou C F, Chen L, Zhao L, Zhao C J, Fang S B, Li H L. Preliminary studies on invasive model and outbreak mechanism of exotic species, *Spartina alterniflora* Loisel. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(8): 2678-2686.
- [29] Zhao S H, Yu W T, Zhang L, Shen S M, Ma Q. Research advance in soil organic phosphorus. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(11): 2189-2194.
- [30] Shao X X, Yang W Y, Wu M, Jiang K Y. Soil organic carbon content and its distribution pattern in Hangzhou Bay coastal wetlands. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 22(3): 658-664.
- [31] Dunne E, Smith J, Perkins D, Clark M W, Jawitz J W, Reddy K R. Phosphorus storages in historically isolated wetland ecosystems and surrounding pasture uplands. *Ecological Engineering*, 2007, 31(1): 16-28.

参考文献:

- [1] 吴明, 邵学新, 胡锋, 蒋科毅. 围垦对杭州湾南岸滨海湿地土壤养分分布的影响. *土壤*, 2008, 40(5): 760-764.
- [3] 潘齐坤, 罗专溪, 颜昌宙, 张丹丹. 城市滨海湿地表层沉积物磷形态与相关关系分析. *生态环境学报*, 2010, 19(9): 2117-2122.
- [12] 高海鹰, 刘韬, 丁士明, 白秀玲, 李宝. 滇池沉积物有机磷形态分级特征. *生态环境*, 2008, 17(6): 2137-2140.
- [13] 秦胜金, 刘景双, 王国平, 周旺明. 三江平原不同土地利用方式下土壤磷形态的变化. *环境科学*, 2007, 28(12): 2777-2782.
- [16] 吴统贵, 吴明, 萧江华. 杭州湾滩涂湿地植被群落演替与物种多样性动态. *生态学杂志*, 2008, 27(8): 1284-1289.
- [17] 钱宝, 刘凌, 肖潇. 土壤有机质测定方法对比分析. *河海大学学报: 自然科学版*, 2011, 39(1): 34-38.
- [20] 宋祖光, 高效江, 张弛. 杭州湾潮滩表层沉积物中磷的分布、赋存形态及生态意义. *生态学杂志*, 2007, 26(6): 853-858.
- [21] 杨永兴, 刘长娥, 杨杨. 长江河口九段沙海三棱藨草湿地生态系统 N, P, K 的循环特征. *生态学杂志*, 2009, 28(10): 1977-1985.
- [23] 闫芊, 何文珊, 陆健健. 崇明东滩湿地植被演替过程中生物量与氮含量的时空变化. *生态学杂志*, 2006, 25(9): 1019-1023.
- [24] 袁兴中, 陆健健, 刘红. 河口盐沼植物对大型底栖动物群落的影响. *生态学报*, 2002, 22(3): 326-333.
- [26] 姚海兴, 叶志鸿. 湿地植物根表铁膜研究进展. *生态学杂志*, 2009, 28(11): 2374-2380.
- [27] 古小治, 张雷, 柏祥, 范成新. 南四湖湿地沉积物及孔隙水基本特性研究. *环境科学*, 2010, 31(4): 939-945.
- [28] 邓自发, 安树青, 智颖飙, 周长芳, 陈琳, 赵聪蛟, 方淑波, 李红丽. 外来种互花米草入侵模式与爆发机制. *生态学报*, 2006, 26(8): 2678-2686.
- [29] 赵少华, 宇万太, 张璐. 土壤有机磷研究进展. *应用生态学报*, 2004, 15(11): 2189-2194.
- [30] 邵学新, 杨文英, 吴明, 蒋科毅. 杭州湾滨海湿地土壤有机碳含量及其分布格局. *应用生态学报*, 2011, 22(3): 658-664.

《生态学报》2012 年征订启事

《生态学报》是中国生态学学会主办的自然科学高级学术期刊,创刊于 1981 年。主要报道生态学研究原始创新性科研成果,特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评介和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,280 页,国内定价 70 元/册,全年定价 1680 元。

国内邮发代号:82-7 国外邮发代号:M670 标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路 18 号 电 话:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@rcees.ac.cn 网 址: www.ecologica.cn

编辑部主任 孔红梅 执行编辑 刘天星 段 靖

生 态 学 报
(SHENGTAI XUEBAO)
(半月刊 1981 年 3 月创刊)
第 32 卷 第 16 期 (2012 年 8 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA
(Semimonthly, Started in 1981)
Vol. 32 No. 16 (August, 2012)

编 辑	《生态学报》编辑部 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085 电话:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn	Edited by	Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA Add: 18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China Tel: (010)62941099 www.ecologica.cn Shengtaixuebao@rcees.ac.cn
主 编	冯宗炜	Editor-in-chief	FENG Zong-Wei
主 管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
主 办	中国生态学学会 中国科学院生态环境研究中心 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add: 18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出 版	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:1000717	Published by	Science Press Add: 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
发 行	科 学 出 版 社 地址:东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717 电话:(010)64034563 E-mail: journal@cspg.net	Distributed by	Science Press Add: 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel: (010)64034563 E-mail: journal@cspg.net
订 购	全国各地邮局	Domestic	All Local Post Offices in China
国外发行	中国国际图书贸易总公司 地址:北京 399 信箱 邮政编码:100044	Foreign	China International Book Trading Corporation Add: P. O. Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 许可证	京海工商广字第 8013 号		



ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 70.00 元