

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第6期

Vol.33 No.6

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

我国湖泊富营养化效应区域差异性分析 曹金玲,许其功,席北斗,李小平,杨柳燕,江立文,魏自民,吴献花(1777)

基于“源”“汇”景观格局指数的海河流域总氮流失评价 孙然好,陈利顶,王伟,王赵明(1784)

云蒙湖流域土地利用变化对非点源氮污染负荷的影响 孟晓云,于兴修,泮雪芹(1789)

深圳市沿岸表层海水中全氟化合物的残留特征及其分布规律 陈清武,张鸿,柴之芳,沈金灿,杨波(1795)

典型电器工业区河涌沉积物中多环芳烃的分布、来源和潜在生态风险 邓代永,邱孟德,孙国萍,郭俊,张宏涛,张琴,许玫英(1801)

珠江下游河段沉积物中重金属含量及污染评价 谢文平,王少冰,朱新平,陈昆慈,潘德博,洪孝友,尹怡(1808)

扎龙湿地南山湖沉积岩芯重金属污染特征及来源判别 苏丹,臧淑英,叶华香,孙丽,贾晓丹,李苗(1816)

汕头湾沉积物磷的形态分布与季节变化特征研究 赵建刚,乔永民(1823)

氮磷比对东海浮游植物群落生长影响的微宇宙实验 黄伟,朱旭宇,曾江宁,寿鹿,陈全震,江志兵(1832)

春季福建北部海域浙闽沿岸流消亡期浮游桡足类种类组成及其分布 王彦国,林景宏,王春光,林茂(1839)

滩涂红树林种植-养殖耦合系统中多环芳烃含量水平分析 陈冠秋,李耀初,黄晋沐,南燕,林茂宏(1846)

四溴双酚 A 在 5 种巢湖鱼类体内的组织分布与生物浓缩因子研究 杨苏文,王圣瑞,闫振广,张普青(1852)

五氯酚对稀有鮑肌卵黄蛋白原及 p53 的诱导效应 熊力,马永鹏,张晓峥,金帮明,李伟,苏永良,毛思予,刘堰(1858)

全氟辛烷磺酸 (PFOS) 对斑马鱼卵黄蛋白原 mRNA 水平的影响 程艳,崔媛,党志超,谢文平,李海山,殷缓缓,陈会明(1865)

水溶性有机物电子转移能力与荧光峰强度的关系研究 陶亚,袁田,周顺桂,袁勇,庄莉,王辉亮(1871)

MIEX 中试实验对二级出水中有机物去除的 3DEEM 解析 杨建,高金华,常江(1878)

XDLVO 理论解析钙离子对腐殖酸反渗透膜污染的影响机制 姚淑娣,高欣玉,郭本华,包南,谢慧君,梁爽(1884)

栅藻 LX1 在水产养殖废水中的生长、脱氮除磷和油脂积累特性 马红芳,李鑫,胡洪管,于茵,巫寅虎(1891)

氯化铁用于反硝化同步化学生物絮凝工艺研究 王宏杰,董文艺,刘莉莎,韩贵超(1897)

合成氨废水短程反硝化特性研究 李妍,李泽兵,马家轩,王晓毅,赵白航,李军(1902)

基于新型反应器的好氧颗粒污泥的稳定性控制 李志华,杨帆,李胜,谢磊,王晓昌(1907)

采用非生长能量代谢参数表征颗粒污泥稳定性 李志华,吴军,李胜,谢磊,王晓昌(1913)

酸-碱预处理促进剩余污泥厌氧消化的研究 袁光环,周兴求,伍健东(1918)

小回流比条件下污泥浓度分区试验研究 史思,王素兰,李瑞,邢传宏(1923)

非离子表面活性剂对污泥调理脱水效果的影响 侯海攀,濮文虹,时亚飞,于文华,樊明明,刘欢,杨昌柱,李野,杨家宽(1930)

中国空气污染指数变化特征及影响因素分析 李小飞,张明军,王圣杰,赵爱芳,马潜(1936)

南京 3 类不同大气污染过程下气溶胶水溶性无机离子的特征研究 张秋晨,朱彬,苏继峰,王红磊(1944)

深圳市郊区大气中 PM_{2.5} 的特征分析 戴伟,高佳琪,曹罡,欧阳峰(1952)

餐饮业油烟的颗粒物分析 谭德生,邝元成,刘欣,戴飞鸿(1958)

Fe-MnO_x-CeO₂/ZrO₂ 低温催化还原 NO 性能研究 刘荣,杨志琴(1964)

自然型氨基酸及其钾盐的 CO₂ 吸收和再生特性 晏水平,陈竞翔,徐明亮,艾平,张衍林(1971)

耕作方式对紫色水稻土农田生态系统 CH₄ 和 N₂O 排放的影响 张军科,江长胜,郝庆菊,唐其文,程炳红,李辉,陈璐豪(1979)

垄作覆膜条件下田间氨挥发及影响因素 上官宇先,师日鹏,李娜,韩坤,李会科,王林权(1987)

添加不同 N 源条件下典型除草剂对土壤呼吸和 N₂O 排放的影响 孙青,史淳星,石坤,言儒斌,蒋静艳,吴以中(1994)

某石墨阳极法氯碱生产场地二噁英污染特征分析 余立凤,魏文侠,田亚静,吴广龙,李培中,赵丹(2000)

脱硫石膏对酸化森林土壤短期修复效果的研究 罗遥,康荣华,余德祥,谭炳全,段雷(2006)

岩溶山地土壤氧化铁形态及其与成土环境的关系 张治伟,朱章雄,傅瓦利,文志林(2013)

废弃尾矿库 15 种植物对重金属 Pb、Zn 的积累和养分吸收 施翔,陈益泰,王树凤,李江川(2021)

铬胁迫对 3 种草本植物生长及铬积累的影响 王爱云,黄姗姗,钟国锋,徐刚标,刘志祥,申响保(2028)

湘西花垣矿区主要植物种类及优势植物重金属蓄积特征 杨胜香,田启建,梁士楚,周耀渝,邹慧成(2038)

增施 CO₂ 对 C3 和 C4 植物根际氯氰菊酯残留浓度的影响 慕楠,刁晓君,王曙光,王鹏腾,李攀峰(2046)

生物强化去除吡啶的特性及微生物种群动态变化分析 乔琳,赵宏,王建龙(2052)

A/O MBR 处理生活污水效率与菌群多样性的关系 邝斌宇,史青, Montcho Leon Monthero,丁嫚,温东辉(2061)

石油污染土壤生物修复过程中氮循环功能基因的动态检测 吴彬彬,卢滇楠,刘铮(2068)

武汉市儿童多途径铅暴露风险评估 郝汉舟,陈同斌,吴基良,雷梅,田辉,祖文普,钟学斌(2075)

电子鼻预处理装置的开发及适用性研究 卜凡阳,文晓刚,万梅,刘锐,陈吕军,张永明(2083)

ToxTell 生物传感器在 Cu²⁺、Cd²⁺ 冲击活性污泥系统分析中的应用 王学江,王鑫,刘免,吴真,杨连珍,夏四清(2090)

环境样品免疫检测基质效应分析与控制 盛建武,何苗,施汉昌(2095)

热等离子体熔融固化模拟医疗废物的研究 张璐,严建华,杜长明,陆胜勇,李晓东(2104)

城市生活垃圾组分低温干燥特性及模型研究 吴亚娟,刘红梅,陆胜勇,严建华,李晓东(2110)

厌氧-准好氧联合型生物反应器填埋场产气规律的研究 韩智勇,刘丹,李启彬(2118)

处理垃圾渗滤液的 Fe/C 空气阴极 MFC 性能研究 唐玉兰,彭漫,于燕,何亚婷,傅金祥,赵玉华(2125)

基于冗余分析的典型喀斯特山区土壤-石漠化关系研究 龙健,廖洪凯,李娟,陈彩云(2131)

北京市能源消费与经济增长关系的协整检验分析 陈操操,张妍,刘春兰,王海华,李铮(2139)

《环境科学》征稿简则(1877) 《环境科学》征订启事(1890) 信息(1822,1857,1896,2138)

汕头湾沉积物磷的形态分布与季节变化特征研究

赵建刚, 乔永民*

(暨南大学生命科学与技术学院, 广州 510632)

摘要: 分别于 2008 年 9 月(平水期)、11 月(枯水期)及 2009 年 6 月(丰水期)在汕头湾的 13 个站点采集表层沉积物样品, 测定了其中的总磷、无机磷、有机磷, 并采用 SMT 提取法提取并测定了各无机形态磷的含量, 分析了其空间分布与季节变化特征。汕头湾表层沉积物中总磷、无机磷及其各形态磷在季节变化上表现为枯水期 > 平水期 > 丰水期; 在空间上表现为由湾顶至湾外呈波状递减趋势, 其高值区出现于汕头湾上游的牛田洋。无机磷是汕头湾沉积物磷的主要存在形态(94.06%), 无机磷中钙结合态磷所占比重最大(70.21%), 其次为可交换态磷和铁结合态磷, 而以碎屑态磷最少(4.99%)。相关分析表明各种磷的来源相似, 且在时空分布上受地表径流季节变化影响。其中有机磷、铁结合态磷和可交换态磷为生物可利用性磷, 主要受控于其来源和水体氧化还原电位, 而钙结合态磷和碎屑态磷生物利用性差, 受区域内生物活动和地质特征影响显著。

关键词: 磷形态; 表层沉积物; 分布特征; 季节变化; 汕头湾

中图分类号: X131.2; X55 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)06-1823-09

Distribution Characteristics of Phosphorus Forms in Surface Sediments of the Shantou Bay in China

ZHAO Jian-gang, QIAO Yong-min

(College of Life Science and Technology, Jinan University, Guangzhou 510632, China)

Abstract: In order to know the horizontal distribution and seasonal variation characteristics of phosphorus species in surface sediment, the contents of different phosphorus species in the surface sediment sampling from Shantou Bay were determined by using the SMT sequential extraction method in September and November, 2008, and June, 2009. The contents of different phosphorus species basically showed an order of the low-water period, normal-water period and high-water period from high to low, and horizontal distributions of phosphorus species showed a decrease trend as waves from the inner bay to the outer bay with the maximum appeared in Niutianyang. The main form of total phosphorus in sediment was inorganic phosphorus, which accounted for 94.06%, and the content of Ca-P was the highest in all inorganic phosphorus of the surface sediment in Shantou Bay, comprising 70.21%, followed by Ads-P, Fe-P and De-P. The correlation analysis among different phosphorus forms suggested that they had similar sources and they were affected by surface runoff and seasonal variation. OP, Fe-P and Ads-P were bioavailable phosphorus, which were controlled by sources and water oxidation-reduction potential; while Ca-P and De-P were mainly influenced by biological processes and geological characteristics.

Key words: phosphorus speciation; surface sediment; distribution characteristics; seasonal variation; Shantou Bay

随着沿海经济的快速发展,近岸海域污染呈加重趋势,特别是富营养化问题尤为突出。磷是海洋中重要的生源要素,也是藻类生长的限制性因子^[1],其来源及浓度变化是影响近海环境富营养化问题的关键因素之一。沉积物作为海洋环境中磷的蓄积库,由各种途径进入其中的磷并不是简单地堆积或累积,而是经历了复杂的生物地球化学过程后以多种形态存在的,其含量处于动态变化过程当中,即在一定条件下,如氧化还原电位^[2]、温度^[3]、溶解氧量^[4]、生物作用^[5]等因子改变,以及水体扰动^[6]等因素的作用下,部分磷可以通过间隙水再返回上覆水。因此,沉积物在一定程度上又起到了磷的内源作用。有研究表明在外源性磷得到有效控制后,内源性磷的释放成为决定近岸海域富营养化程度的关键因素^[4]。磷能否在沉积物界面上与上覆水发生交换取决

于其形态,各种结合态的磷不仅具有相异的地球化学行为和生物有效性^[1],同时磷的形态也反映了早期成岩作用的动力学过程,并记录了磷的来源和人为因素影响等重要环境信息。因此,研究磷的存在形态可以更好地了解磷的释放过程和机制,有助于了解磷的动态循环及其在沉积物-水界面的迁移转化行为,对于深入认识人类活动对海洋环境的影响,以及海洋中磷的地化特性和环境作用具有重要意义^[7~10]。

收稿日期: 2011-09-21; 修订日期: 2011-12-09

基金项目: 国家自然科学基金委-广东省人民政府联合重点基金项目(U0633006); 国家自然科学基金项目(40873065); 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2009ZX07211-009)

作者简介: 赵建刚(1978~),男,博士研究生,主要研究方向为环境生态学, E-mail: zhjg@jnu.edu.cn

* 通讯联系人, E-mail: qym77@163.com

汕头湾位于广东省东部(116°30'~116°50'E, 23°20'~23°25'N),是由韩江和榕江向海淤积不平衡形成的一个狭长的半封闭型海湾,呈藕节状,由上游的牛田洋和下游的珠池肚(汕头港区)两个以狭窄水道相连的海湾构成,总面积约100 km².汕头湾具有典型的河口湾性质,湾顶有榕江和韩江支汊——梅溪直接汇入,东接新津河入海口,并以潮汐道与南海相连.汕头湾主要受潮流控制,径流相对较弱,湾内以上溯流为主;潮汐为不规则的半日潮,平均潮差和最大潮差分别为1.03 m和4.97 m,退潮流速大于涨潮流速^[11].

汕头湾是粤东地区最重要的海湾之一,随着人口的增加和经济的快速增长,汕头湾环境恶化、富营养化趋势加剧、赤潮频发,已成为制约当地经济可持续发展的重要环境因素.为此,本研究对汕头湾沉积物中磷含量、形态、分布特征及来源进行了分析,并对其污染状况进行了评价,以期深入了解磷的环境生物地球化学行为,改善汕头湾水域生态环境质量、遏制和预防赤潮的发生,以及为汕头湾的环境保护与治理提供科学依据.

1 材料与方 法

1.1 样品采集与预处理

根据汕头湾的地理特点和地表径流输入的周期性,在汕头湾海域共设置13个站点(图1),其中1~4号站点位于牛田洋,5~10号站点位于珠池肚,11~13号站点位于湾口航道.分别于2008年9月(平水期)、11月(枯水期)及2009年6月(丰水期)对汕头湾进行了3个航次的调查,以研究不同时期地表径流对汕头湾沉积物中磷含量及形态变化规律的影响.样品采集以彼德森采泥器抓取底泥,用塑料勺取其中中央0~5 cm未受干扰的表层沉积物装于聚乙烯塑料袋中,密封置于冰箱带回实验室进行分析.

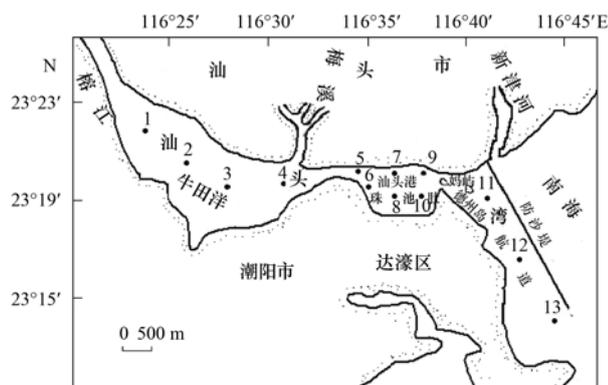


图1 调查站位示意

Fig. 1 Sampling stations in the Shantou Bay

沉积物样品经冷冻干燥后,用木棒分散、研磨、过筛(80目)后,置于密封袋中,在-20℃条件下保存至分析.野外现场用YSI-6600(YSI,美国)测定水温、pH、溶解氧、氧化还原电位和Chl-a等.

1.2 分析方法

1.2.1 细粒级组分分析

称取适量解冻后的样品在50℃条件下烘干后加入含量为20%的(NaPO₃)₆溶液,静置16 h以上,以去离子水冲洗使其通过孔径为63 μm的纱网,将滤过的样品于50℃条件下烘干后称其质量,即得出沉积物中的细粒级组分的含量^[12].

1.2.2 有机质含量的测定

称取适量风干后的泥样于550℃条件下灼烧5 h.灼烧前后的质量差即为泥样有机质质量,以泥样干重为基准计算有机质所占的质量分数^[13].

1.2.3 不同形态磷提取与测定

总磷(TP)、无机磷(IP)、有机磷(OP):用分析天平(Mettler Toledo AB204-N 瑞士)准确称取1.00 g沉积物样品2份,对其中1份在500℃条件下灰化2 h.然后以0.5 mol·L⁻¹ H₂SO₄分别对2份样品提取16 h,灰化样品中获得总磷(TP)含量,未灰化样品中获得无机磷(IP)含量,以总磷与无机磷的差值获得有机磷(OP)含量.

磷的形态:准确称取0.20 g沉积物样品,置于50 mL离心管中,以如下步骤提取各无机形态磷^[14-16].

(1)可交换态磷(Ads-P)向离心管中加入1 mol·L⁻¹ MgCl₂溶液(pH为8.00)25 mL,在振荡器上连续振荡提取2 h,然后以4 000 r·min⁻¹离心20 min获得上清液,再依次用25 mL MgCl₂溶液和25 mL去离子水提取2 h,合并上清液待测,沉积物用于下一步提取.

(2)铁结合态磷(Fe-P)在上一步提取后的沉积物中加入25 mL柠檬酸钠-连二亚硫酸钠-碳酸氢钠混合液(pH为7.60),振荡提取6 h,离心获得上清液后,再依次用25 mL MgCl₂溶液和25 mL去离子水提取2 h,合并3次离心出的上清液待测,沉积物用于下一步提取.

(3)自生钙结合磷(Ca-P)在上一步提取后的沉积物中加入1 mol·L⁻¹的NaAC-HAC缓冲液(pH为4.00),振荡提取6 h,离心分离上清液,再以25 mL MgCl₂溶液和25 mL去离子水依次提取2 h,合并3次离心得到的上清液待测,沉积物用于下一步提取.

(4) 碎屑磷 (De-P) 在上一步提取后的沉积物中加 $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 HCl 溶液 30 mL, 振荡提取 16 h, 离心获得上清液待测。

上述提取液以德国 BRAN + LUEBBE 公司的 AA3 连续流动分析仪进行测定。

1.2.4 数据处理

以 SPSS 11.5 和 Origin 6.0 进行统计分析和图表制作。

2 结果与分析

2.1 沉积物总磷、有机磷和无机磷的含量与季节变化

汕头湾表层沉积物总磷含量的变化范围为 $502.78 \sim 172.14 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 平均含量为 $288.40 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 与国内大多数海域相比处于较低水平 (表 1), 在季节变化上表现为枯水期和平水期含量相当, 但均高于丰水期的特点; 有机磷的变化范围为 $5.21 \sim 39.13 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 平均值为 $17.13 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 约

为珠江口的 $1/10^{[17]}$, 含量处于较低水平, 在季节变化上枯水期略低于丰水期, 但二者均明显低于平水期; 无机磷是汕头湾沉积物磷的主要存在形态, 含量范围为 $162.05 \sim 463.65 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 平均值为 $271.28 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 与国内海域比较, 仅略高于南沙群岛海域^[18]。无机磷含量在季节变化上与总磷的基本一致, 也表现为枯水期与平水期含量相近, 且均高于丰水期的特点 (枯水期: 丰水期, $t = 2.605$, $P < 0.05$; 平水期: 丰水期, $t = 3.496$, $P < 0.05$); 无机磷各形态含量除可交换态磷在枯水期略低于平水期外, 其余各形态磷含量在不同时期的变化特征与总磷及无机磷的相似, 表现为枯水期略高于平水期, 无显著性差异, 但均高于丰水期。其中可交换态磷和铁结合态磷在枯水期与平水期的平均含量约是丰水期的 2 倍。与国内其它海域相比, 可交换态磷和自生钙结合磷含量均处于较高水平, 仅略低于桑沟湾^[7]和柘林湾^[19]等大规模养殖区。

表 1 汕头湾与国内其它河口和海湾沉积物中磷的含量比较/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$

Table 1 Comparisons concentrations of phosphorus in the sediment of some coast and Shantou Bay/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$

研究区域	TP	OP	IP	Ads-P	Fe-P	Ca-P	De-P	文献
汕头湾(平水期)	310.75	19.59	291.17	48.68	30.39	198.61	13.49	本研究
汕头湾(枯水期)	311.09	15.52	295.57	42.26	37.20	201.88	14.23	本研究
汕头湾(丰水期)	243.37	16.27	227.09	24.41	18.93	170.92	12.83	本研究
汕头湾(平均值)	288.40	17.13	271.28	38.45	28.84	190.47	13.53	本研究
大亚湾	341.87	51.05	290.81	19.71	27.35	92.93	127.70	[1]
桑沟湾	443.59	118.94	324.65	43.95	20.94	200.26	59.51	[7]
珠江口	501.31	167.54	333.77		79.7	30.46	222.64	[17]
南沙群岛	315.34	90.35	224.98					[18]
柘林湾	526	103.1		53.1	33.6	252.3	84	[19]
东海	595.19	148.17		6.19	42.19	10.17	351.18	[20]
乳山湾养殖区	1189.93	227.03			247.26			[21]
厦门西港	560	209	338		77	253		[22]

总磷及各形态磷的分布特点与季节变化见图 2。从中可知, 总磷含量的时空变化较大, 其最高值 ($502.78 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 出现在平水期位于汕头湾牛田洋中心的 3 号站位, 最低值 ($172.14 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 出现在同一时期汕头港区的 7 号站位, 后者约为前者的 $1/3$ 。平水期总磷在空间分布上表现为汕头湾表层沉积物中总磷含量由湾内到湾外呈波状递减趋势, 即湾内各站点高于湾外各站点、湾西部高于湾东部的特点。枯水期和丰水期总磷的空间分布与平水期基本一致。其中枯水期总磷的最高值也出现在牛田洋 (4 号站位, $411.36 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), 但最低值则移至湾外航道的 12 号站位 ($200.53 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)。从各站点总磷的含量变化来看, 枯水期各站点 (1、2 和 3 号站点除外) 均略高于平水期的, 且分布更趋均匀, 变异系

数为 20.75%。总磷分布趋均匀的特性在丰水期表现得更为明显, 3 号站位的最高值 ($344.11 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 约为 13 号站位最低值 ($176.35 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 的 2 倍, 变异系数仅为 18.98%。从各站点含量来看, 丰水期各站点总磷含量明显低于枯水期和平水期的 (7 和 8 号站位除外), 表明地表径流流量的变化对汕头湾沉积物磷含量及形态变化具有非常重要的影响。

无机磷是总磷的主要赋存形态, 平均含量约为总磷的 94.06%。总磷的时空分布基本上是无机磷分布特性的反映。在本研究中, 两者分布趋于一致, 包括其最高值和最低值出现的站位也相同。但从各站点无机磷占总磷的比例来看, 河口区明显高于其它站位, 如榕江口的 1 号站位、梅溪河口的 4 号站位

和新津河口的 13 号站位, 分别高达 95.32%、94.77% 和 95.19%, 表明河流输入是汕头湾无机磷的主要来源之一. 从时间跨度上看, 不同时期无机磷占总磷比率无显著差异, 但其含量则有显著变化, 表现为地表径流输入相对较弱的枯水期和平水期无机磷的含量是明显高于丰水期的. 从空间变化上看, 无机磷平水期的空间分布差异较大, 变异系数为 33.20%, 而枯水期和丰水期时的分布则相对均匀, 变异系数分别为 21.60% 和 18.99%, 在一定程度上反映了河口湾水文特性对外源物质迁移、扩散行为的影响.

有机磷在总磷中所占的比例较小, 在 2.44% ~ 11.17% 之间, 平均值为 5.94%. 有机磷占总磷的比重在不同时期存在明显差异, 表现为丰水期 > 平水期 > 枯水期, 与地表径流输入量成正比例关系, 反映了外源因素对沉积物中有机磷含量影响. 但从其含量的时间分布来看, 则表现为平水期 \approx 丰水期 > 枯水期, 这在一定程度又反映了内源有机磷的影响. 与无机磷相比, 有机磷含量分布的空间差异较大, 其最大值出现在平水期的 3 号站位 ($39.13 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), 最低值出现在丰水期的 4 号站位 ($5.21 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), 前者为后者的 7 倍以上, 且各时期有机磷含量的空间变异系数明显高于无机磷, 该特征不仅反映了有机磷输入量的变化, 也反映了有机磷对汕头湾环境变化更具敏感性. 但从空间分布上来看, 有机磷与总磷和无机磷的整体分布趋势相似.

2.2 无机形态磷的含量与季节变化

汕头湾表层沉积物中各形态磷的时空分布见图 2, 各形态磷占无机磷的质量分数见图 3. 从中可知, 无机磷中各形态磷的含量差异较大, 其中以自生钙结合磷所占的比例最大, 各形态磷含量顺序依次为: 钙结合态磷 > 可交换态磷 > 铁结合态磷 > 碎屑态磷.

(1) 可交换态磷 (Ads-P)

汕头湾沉积物中可交换态磷的含量范围为 $1.47 \sim 131.95 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 平均值为 $38.45 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 占无机磷的质量分数为 0.91% ~ 33.56%, 平均为 14.17%. 其含量与国内其它海域相比处于较高水平, 略低于以海产养殖为主的柘林湾^[19]. 可交换态磷含量的最大值出现在平水期牛田洋水域的 2 号站位, 最低值则出现在枯水期湾口航道处的 13 号站位, 其总体分布特征与无机磷相似, 表现为河口高于外海、湾内高于湾外的分布趋势, 并在榕江河口附近各站点形成高值区. 可交换态磷的分布空间差异较

大, 其在 3 个时期的变异系数均在 70% 左右, 其中在汕头港区各站点的含量差别最为显著, 变化范围在 $8.06 \sim 82.71 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间, 可能与港口的船舶活动有关. 在时间分布上, 平水期和枯水期可交换态磷的含量相近, 平均值分别为 $48.68 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $42.26 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 约为丰水期含量 ($24.41 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 的 2 倍, 表明地表径流流量变化对沉积物中可交换态磷含量具有非常显著的影响.

(2) 铁结合态磷 (Fe-P)

汕头湾沉积物中铁结合态磷的含量范围为 $5.15 \sim 65.74 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 平均值为 $28.84 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 占无机磷含量的 3.18% ~ 24.52%, 平均为 10.63%. 其含量与国内其它海域相比, 处于较低水平, 略高于大亚湾^[1] 和桑沟湾^[7]. 其最高值和最低值分别出现在丰水期梅溪河口处的 4 号站位和枯水期的 13 号站位. 在空间分布上, 铁结合态磷仍表现为湾内高于湾外的趋势, 以丰水期的含量差异较大, 变异系数为 52.38%. 但从含量的时间分布来看, 则以丰水期的平均含量最低 ($18.93 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), 约为枯水期平均值 ($37.20 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 的 1/2.

(3) 钙结合态磷 (Ca-P)

钙结合态磷是汕头湾沉积物中无机磷的主要存在形态, 含量范围为 $70.10 \sim 359.02 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 平均值为 $190.47 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 占无机磷的 45.84% ~ 91.06%, 平均为 70.21%. 其含量与国内其它海域比较处于中等水平, 高于大亚湾^[1]、珠江口^[17] 和东海^[20] 等水域. 其最高值和最低值分别出现在平水期牛田洋的 3 号站位和汕头港区的 7 号站位, 在空间分布特征上与无机磷及总磷相似, 呈现出由湾内向湾外波状递减趋势, 并在牛田洋水域的 1 ~ 3 号站位形成高值区. 在时间分布方面, 枯水期和平水期钙结合态磷的平均含量相近, 分别为 $201.88 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $198.61 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 显著高于丰水期的 $170.92 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$.

(4) 碎屑磷 (De-P)

汕头湾表层沉积物碎屑磷的含量范围为 $7.87 \sim 20.27 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 平均值为 $13.53 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. 汕头湾沉积物中碎屑磷占无机磷比例较小, 在 2.53% ~ 8.44% 之间, 平均为 4.99%. 在空间分布上不同于上述 3 种形态, 分布相对均匀, 变异系数均在 14.52% 以下, 其最高值出现在丰水期牛田洋水域的 2 号站位, 最低值出现在枯水期的 13 号站点. 在时间分布上, 平水期、枯水期和丰水期的平均含量非常相近, 分别为 13.49 、 14.23 和 $12.83 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 均值

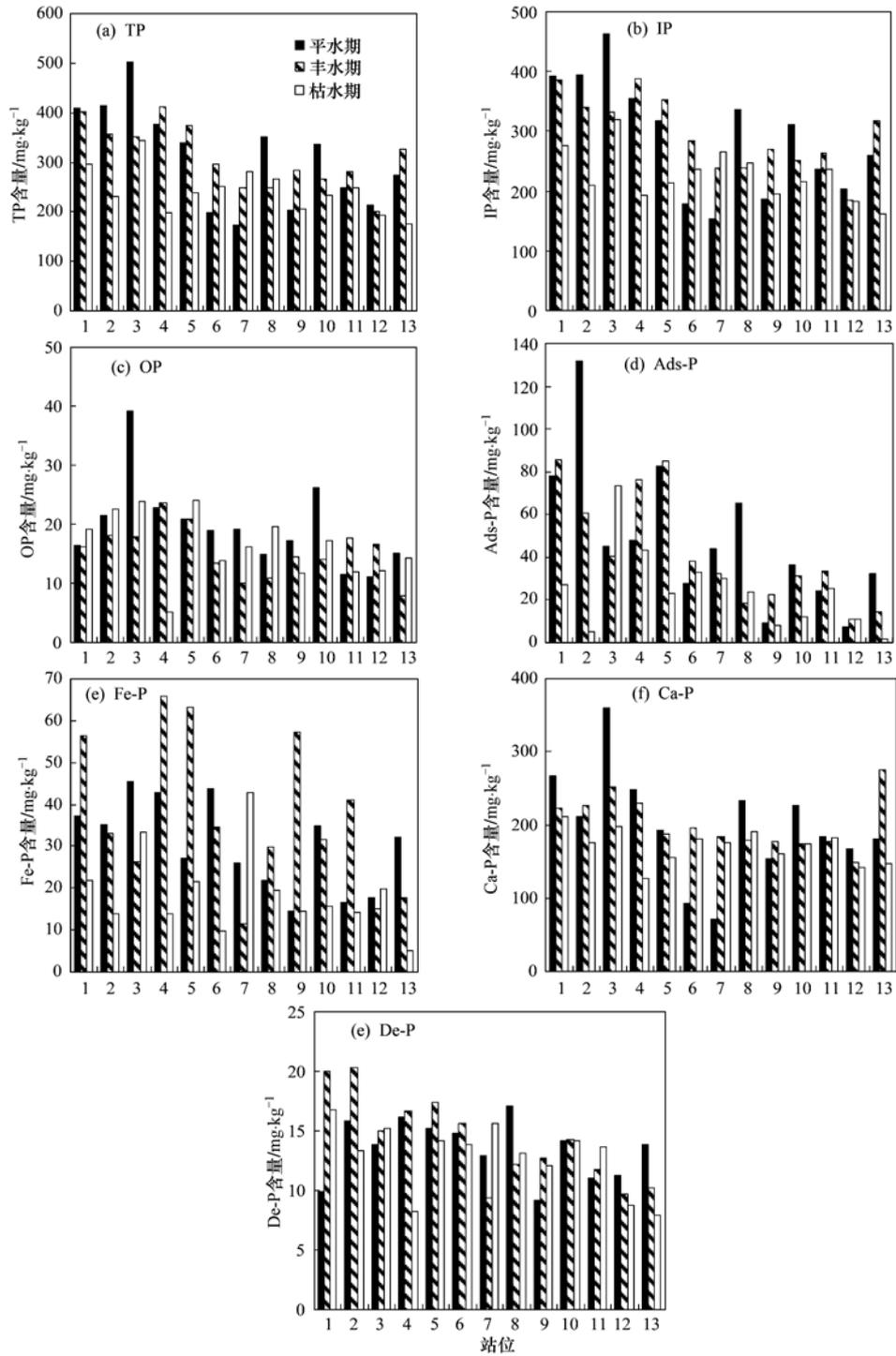


图2 汕头湾表层沉积物中不同磷形态含量的分布示意

Fig. 2 Distributions of different phosphorous forms of surface sediments in Shantou Bay

之间无显著差异,表明碎屑磷受海湾环境及地表径流影响较小,处于相对稳定状态.

2.3 各形态磷之间相关性分析

汕头湾沉积物各形态磷之间的相关分析见表2.可以看出,总磷与无机磷及无机磷各形态之间均存在极显著的正相关关系($P < 0.01$),其中总磷与

无机磷之间的相关性最高($r = 0.998, P < 0.01$),表明沉积物中总磷的含量与分布主要受无机磷的影响与控制,且无机磷中各形态对总磷均有显著的影响;与此相对应无机磷与各形态磷之间呈极显著的正相关关系($P < 0.01$),其中无机磷与可交换态磷的相关性最强($r = 0.831, P < 0.01$),其次为钙结合态磷

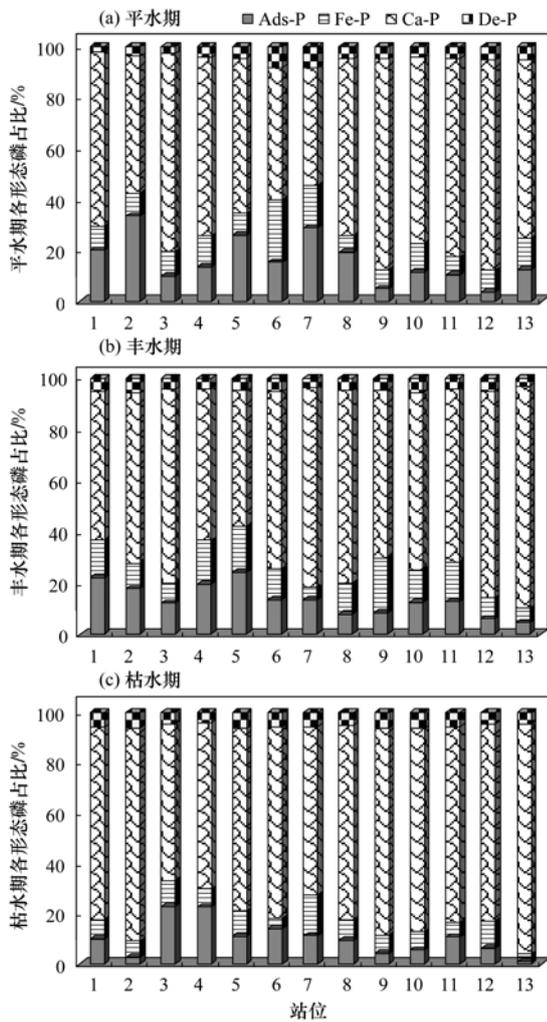


图3 汕头湾表层沉积物中各形态磷占无机磷的质量分数
Fig. 3 Mass fraction of various phosphorous forms on total inorganic phosphorous in Shantou Bay

表2 汕头湾表层沉积物中各形态磷相关系数矩阵¹⁾ (n=39)

Table 2 Correlation coefficients among different phosphorous forms of sediments in Shantou Bay (n=39)

	TP	IP	OP	Ads-P	Ca-P	Fe-P	De-P
TP	1.000	0.998 **	0.424 *	0.833 **	0.797 **	0.763 **	0.783 **
IP		1.000	0.359	0.831 **	0.808 **	0.757 **	0.763 **
OP			1.000	0.348	0.172	0.379	0.562 **
Ads-P				1.000	0.400 *	0.720 **	0.679 **
Ca-P					1.000	0.327	0.529 **
Fe-P						1.000	0.607 **
De-P							1.000

1) * 表示 $P < 0.05$; ** 表示 $P < 0.01$

富集,使沉积物中各形态磷含量明显增加,舒廷飞等^[26]研究表明,网箱养殖4~6 a后,沉积物总磷含量即为对照区的8倍之多,由此可见养殖污染对沉积物中的磷贡献显著.河流带来的面源污染与养殖污染相叠加,使牛田洋水域总磷及各形态磷含量明显高于汕头湾的其他水域.磷的这两种来源不仅对

($r=0.808, P < 0.01$),说明可交换态磷和钙结合态磷是决定无机磷含量与空间变化的主要因素.与无机磷相比,有机磷仅与碎屑态磷呈显著的正相关关系,表明两者具有相似的来源与地化行为.

3 讨论

3.1 磷的来源与分布特征

在空间分布上,汕头湾沉积物中不同形态磷的含量具有明显的地域特征,其高值区主要集中在牛田洋水域的1~4号站位,并表现出由湾顶至湾口、湾内至湾外波状递减趋势.此现象的出现与地表径流的输入和养殖污染密切相关,榕江和韩江支流梅溪河在牛田洋水域注入汕头湾,两河流域面积达76394 km²,平均年径流量 3.56×10^9 m³^[12],其中以榕江为主.同时,牛田洋水域还是汕头市主要的水产养殖基地,养殖面积达2467 hm²,其养殖废水直接排入牛田洋.1号和4号站位,分别位于榕江和梅溪河口附近,受陆源输入影响较大,在淡水交汇所产生的絮凝等作用的影响下,携带污染物的悬浮颗粒在此沉积,从而形成磷含量的高值区.许金树等^[23]和李亮歌等^[24]对台湾海峡沉积物磷的含量与分布研究也证实,磷的高值区主要集中在闽江入海口处,向外海递减,并认为这种现象的出现主要受河流携带污染物输入所致.黄自强等^[25]对长江口的研究也证实,地表径流是近海磷的主要来源,长江水中有机磷的含量为外海水的20倍,是长江口近海磷的主要来源.2号和3号站位比邻养殖池排污口,更多地受到养殖废水排入的影响,大量的残饵和养殖排泄物

牛田洋水域,而且对整个海湾也具有显著的影响,是汕头湾磷的主要来源,总磷及各形态磷之间均呈显著的正相关关系($P < 0.05$)即是这种来源相对一致性的内在反映.

位于牛田洋下游并与狭窄水道相连通的汕头港区,各形态磷含量相对较低,且空间分布差异较大.

其原因可能在于两个方面: 汕头湾水动力以潮汐作用为主, 淡水交汇主要发生在上游的牛田洋水域, 因此污染物也主要沉积于此, 通过狭窄水道进入汕头港区的相对较少. 同时, 随潮汐进入港区的相对洁净的海相沉积物也对污染物有一定稀释作用, 使得汕头港区的总磷及各形态磷的含量出现相对低值; 另一方面, 汕头港区为确保航行安全, 周期性地航道疏浚, 部分污染物被移至外海倾倒区, 也会使该水域沉积物中的污染物含量出现相对低值, 加之船舶航行时的机械扰动, 沉积物再悬浮作用明显, 部分磷溶出, 并随潮汐移出, 这不仅使港区总磷及各形态磷含量进一步降低, 而且其空间分布也呈现出差异明显的特征. 类似的现象也发生在湾口航道处, 且随着与污染源距离增加和海相影响加剧, 沉积物中磷的含量呈进一步下降趋势.

3.2 磷的形态特征与环境因子分析

汕头湾沉积物中磷的形态分布特征表现为 $\text{Ca-P} > \text{Ads-P} > \text{Fe-P} > \text{De-P}$. 在空间分布上各形态磷表现为由湾内向湾外呈波状递减趋势, 即沿着河口向入海的方向逐渐减少. 磷在空间上的这种变化规律, 除随着与输入源距离的增加, 其浓度呈逐渐减少因素之外, 更有其它因素与之相关.

可交换态磷 (Ads-P) 主要是指吸附在沉积物中黏土矿物颗粒、氧化物、氢氧化物等表面上的磷, 是沉积物中活性较强, 最易释放入上覆水, 且易被水生生物利用的部分. 沉积物中可交换态磷与上覆水中的可溶性磷在一定条件下处于动态平衡, 极易受环境因素变化的影响. 其中 pH、氧化还原电位、水动力条件、沉积物粒度和扰动等对可交换态磷的影响最为直接^[27]. 狭长的汕头湾在地表径流和海洋潮汐的共同作用下, 自湾顶至湾口形成了典型的海陆过渡性特征. 处于汕头湾上游的牛田洋, 水域相对开阔, 水流下泄通道又相对狭窄, 河流进入该水域后流速迅速降低, 沉积物形成了以粉砂和黏土组成为主 (74.30%)、有机物含量丰富 (9.01%)、pH 值相对较低 (6.50) 的特性, 极有利于可交换态磷的富集. 与牛田洋水域相比, 汕头港区则以潮汐作用为主, 但湾口拦潮坝的存在, 使港内水动力作用明显减弱, 其沉积物在组成上也以细粒级组分为主, 有机质含量较高^[12]. 该特征为沉积物吸附可交换态磷提供了极为有利的条件, 这可能是汕头湾总磷含量虽然低于国内其它海域, 但可交换态磷含量却相对较高的主要原因.

铁结合态磷 (Fe-P) 主要为沉积物中与铁氧化

物或氢氧化物结合的磷, 是沉积物中易变的部分, 而且一般认为其含量与区域内的污染程度呈正比^[28], 在本研究中该形态磷占总磷比例最低, 平均值为 7.59%, 说明该海域的污染相对较轻. 铁结合态磷受其来源、沉积特征及环境影响明显. 其中对氧化还原状态敏感的铁的存在形态与磷有着密切的关系, 在好氧条件下, 沉积物表面氧化层中的铁氧化物被视为上层水体中扩散的磷酸盐的“捕集器”^[27]. 因为在此状态下, Fe^{2+} 被氧化为 Fe^{3+} , 铁结合态磷由可溶态转化为不溶态, 表现为向沉积物富集, 而在还原条件下则趋向于释放入上覆水中. 本研究中, 河口、航道等处 (如 1、3、4、6、10 号站位) 水动力作用较强, 水体富氧充分, 溶解氧较高的区域, 均出现铁结合态磷的相对高值. 除了磷的来源因素外, 水体的富氧状态 ($\text{DO}: 7.42 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 和高 Eh 值可能是其主要原因之一. 戴纪翠等^[27] 对胶州湾的研究也证实了这一点, 铁结合态磷与水体溶解氧和 Eh 值呈显著的正相关关系. pH 值是影响铁结合态磷含量的另一重要因素, 当 pH 值增加时, 水合铁氧化物与磷的结合力减弱, 表现为磷由沉积物释放入上覆水. 由湾顶至湾口 pH 呈逐渐增加趋势, 变化范围为 6.80 ~ 7.50, 对沉积物在铁结合磷含量的影响相对弱于氧化还原条件, 具体影响程度如何, 还有待进一步研究.

钙结合态磷 (Ca-P) 在沉积物中分布最为广泛, 本研究中其所占总磷的质量分数最高, 平均为 66.04%. 沉积物中钙结合态磷通常可分为两大部分, 自生钙磷和碎屑态磷^[14], 本研究的钙磷即为自生钙磷, 主要来源于生物代谢、生物碎屑矿化和早期成岩作用形成的氟磷灰石. 由于氟磷灰石只形成于 2 cm 以下的沉积物, 所以浮游生物及生物碎屑是汕头湾表层自生钙磷的主要来源. 在本研究中, 牛田洋水域钙结合态磷含量出现高值, 并向湾外呈递减趋势, 其主要原因在于榕江、梅溪等河流在牛田洋水域入海, 大量营养盐的输入, 为该水域藻类繁殖创造极佳的条件, 加之含有大量的浮游生物和污染物养殖废水的排入, 使牛田洋水域初级生产力出现高值, 本次研究中该水域叶绿素平均含量达 $2.45 \mu\text{g} \cdot \text{dm}^{-3}$, 明显高于汕头湾的其它海区. 郑丽波等^[20] 研究表明, 沉积物自生钙磷含量与上覆水初级生产力具有很好的耦合性, 区域内的生物活动是决定沉积物中自生钙磷含量与分布的主要因素之一.

碎屑态磷 (De-P) 主要来自于流域内风化侵蚀产生的磷灰石矿物晶屑, 该部分磷活性较差, 很难被

生物再利用,其含量与分布主要反映了汕头湾及其地表径流的地质特点. 汕头湾碎屑态磷仅占总磷的 4.70%,与大亚湾^[1]、珠江口^[17]、东海^[20]等海区沉积物碎屑态磷占主要成分不同,其主要原因可能与粤东地区以火成岩而非石灰岩为主的地质特点有关,水体中溶解性钙相对较少,占碎屑态磷主要成分的磷酸钙生成与沉淀量偏低所致,同时汕头湾碎屑态磷在平面与季节上无明显变化,也反映该部分磷的来源与稳定性特征.

3.3 季节变化与磷的含量与分布特征

根据汕头湾主要环境影响因素——地表径流输入量的变化,对汕头湾进行了 3 个不同季节的调查,结果表明:汕头湾沉积物总磷及各形态磷的含量均表现为枯水期 > 平水期 > 丰水期 (Ads-P 为平水期 > 枯水期 > 丰水期),有机磷则表现为平水期 > 丰水期 > 枯水期,这种现象的产生主要受水量及其所引起的水动力、溶解氧、氧化还原电位、pH 值和生物作用等多种因素共同作用的结果. 其中生物作用可能是主导因子,汕头湾浅水区均为泥滩,是底栖贝类的主要养殖区,在平水期和丰水期贝类生长代谢旺盛,由贝类排泄物及贝类残体分解所形成的有机磷富集于沉积物中,而在枯水期养殖贝类被拖网捞起,不仅有有机磷的生物来源锐减,同时捕捞作业对表层沉积物扰动加速了有机质的降解,而且表层与亚表层沉积物的混合也使得表层沉积物中有机磷的含量进一步降低,这可能是平水期和丰水期有机磷含量高于枯水期的主要原因之一.

由平水期进入枯水期,汕头湾及入海河流域降雨减少,进入旱季. 但处于热带亚热带区域的粤东平原,工农业活动并未因此减弱,即排污量并没有显著减少,但水量的锐减使稀释作用降低,地表径流中营养盐的浓度显著升高,且此时汕头湾主要受潮汐作用的控制,淡水冲刷能力减弱,污染物主要在湾内富集,这可能是平水期和枯水期总磷及各形态磷含量明显较高的主要原因,其中与沉积物处于弱结合状态的可交换磷在平水期和枯水期的含量约是丰水期的 2 倍,就是这一现象的典型反映,也是汕头湾沉积物磷的主要地化特征之一. 相对于平水期和枯水期,丰水期雨量充沛,地表径流量大,水动力作用较强,淡水经湾口汇入南海,污染物也随之被带出海湾,使得汕头湾丰水期沉积物表现出磷含量偏低,分布相对均匀的特征.

钙结合态磷作为无机磷的主要存在形式,其含量和分布受水期的影响尤为显著. 枯水期水量的减

少和水温的降低,使得藻类特别是底栖藻类大量死亡,并在微生物的作用下降解释放出磷酸盐,使沉积物中生物骨骼类含磷矿物含量明显增加. 这可能是汕头湾枯水期钙结合态磷高显著高于丰水期的主要原因.

不同水期引起的环境因素的变化对铁结合态磷的影响也非常显著,其在丰水期的含量显著低于平水期和枯水期,约为后者的 1/2. 出现这种现象的原因,可能在于丰水期大量的有机物随地表径流进入汕头湾,并富集于沉积物中. 此时,较高的水温和微生物活性使有机质迅速降解,消耗了大量的溶解氧,底层水处于缺氧或厌氧状态, Fe^{3+} 被还原成 Fe^{2+} ,磷由不溶态转化为可溶态,并随水流移出海湾,从而造成铁结合态磷低于其它水期.

3.4 各形态磷的生物地球化学意义

确定磷的生物有效性及其含量范围,从而评价其对环境的影响是研究沉积物中磷形态的主要目的,钙结合态磷和碎屑态磷活性很低,基本上不会再进入上覆水,极难被生物利用^[29,30]. 因此汕头湾表层沉积物中能被生物利用的磷主要包括可交换态磷、铁结合态磷和有机磷,约占 TP 含量的 29.27%. 其中可交换态磷的生物有效性最强,极易通过沉积物-水界面进入上覆水,是影响水体水质和生物可利用性的主要部分. 汕头湾可交换态磷含量较高是其主要特征之一,海湾及入湾河流域的点、面源排放是主要因素,因此改善汕头湾水质,避免富营养化现象的发生,控制磷的外源输入是主要措施之一;铁结合态磷是潜在生物可利用磷,主要受水体氧化还原状态的影响,当沉积环境由氧化态转化为还原态时, Fe^{3+} 被还原成 Fe^{2+} ,从而释放出磷;而有机磷则需经矿化后才能为生物所利用. 有机磷的矿化受多种因素的影响,李学刚等^[31]研究认为,酸性条件和有机碳含量增加,均有利于有机磷的矿化,进而促进磷的释放. 汕头湾集港口、养殖区、河口和城市污水排放地于一体,水体理化因子受人为影响显著、变化明显. 有机磷虽然在沉积物中的含量相对无机磷明显偏低,但其地化行为在养殖、排污、扰动和季节变化等多种因子的作用下变化显著且活跃,由此引起的磷在沉积物-水界面的释放通量的变化,将在一定程度上影响到海湾水质、富营养化状态及藻类的生长. 总之,沉积物中直接或潜在的生物可利用性磷是影响海湾环境的主要因子之一,海湾复杂多变的理化特征与人为影响因素协同作用,通过控制磷在沉积物-水间的界面行为影响水体环境和浮游生物的

生理生态特性.

4 结论

(1) 汕头湾表层沉积物中无机磷为主要组成部分, 平均达 94.06%, 有机磷含量较低. 在无机磷中钙结合态磷含量最高, 碎屑态磷含量最低.

(2) 汕头湾表层沉积物的磷含量从空间分布上表现为湾内高于湾外、湾西部高于湾东部; 时间分布上表现为丰水期低于枯水期和平水期. 来源与地表径流是控制磷含量与时空分布差异的主要因素.

(3) 相关性分析表明, 总磷、有机磷、无机磷及其各形态磷均呈显著的正相关关系, 表明它们具有相似的来源.

(4) 可交换态磷、铁结合态磷和有机磷是汕头湾表层沉积物中潜在的生物有效性磷, 平均约占总磷的 29.27%.

参考文献:

- [1] 何桐, 谢健, 余汉生, 等. 大亚湾表层沉积物中磷的形态分布特征 [J]. 中山大学学报 (自然科学版), 2010, **49**(6): 126-131.
- [2] Hupfer M, Lewandowski J. Oxygen controls the phosphorus release from lake sediments—a long-lasting paradigm in limnology [J]. *International Review of Hydrobiology*, 2008, **93**(4-5): 415-432.
- [3] Jensen H S, Andersen F Ø. Importance of temperature, nitrate, and pH for phosphate release from aerobic sediments of four shallow, eutrophic lakes [J]. *Limnology and Oceanography*, 1992, **37**(3): 577-589.
- [4] 郭海涛, 张进忠, 魏世强, 等. 长寿湖沉积物中磷形态的季节变化特征 [J]. 环境科学, 2011, **32**(7): 1994-1999.
- [5] Beklioglu M, Carvalho L, Moss B. Rapid recovery of a shallow hypertrophic lake following sewage effluent diversion: lack of chemical resilience [J]. *Hydrobiologia*, 1999, **412**: 5-15.
- [6] 李大鹏, 黄勇, 李伟光. 河道底泥再悬浮状态对磷平衡浓度的影响 [J]. 中国环境科学, 2008, **28**(5): 94-98.
- [7] 蒋增杰, 方建光, 张继红, 等. 桑沟湾沉积物中磷的赋存形态及生物有效性 [J]. 环境科学, 2007, **28**(12): 2783-2788.
- [8] Zhou Q X, Gibson C E, Zhu Y M. Evaluation of phosphorus bioavailability in sediments of three contrasting lakes in China and the UK [J]. *Chemosphere*, 2001, **42**(2): 221-225.
- [9] Rydin E. Potentially mobile phosphorus in lake Erken sediment [J]. *Water Research*, 2000, **34**(7): 2037-2042.
- [10] 郑丽波, 周怀阳, 叶瑛. 东海特定海区柱状沉积物中磷的存在形态及其环境指示意义 [J]. 上海环境科学, 2003, **22**(6): 414-429.
- [11] 田向平, 李春初. 汕头湾悬移质石英含量与含沙量的关系及显损含沙量年出现率推算 [J]. 泥沙研究, 2004, (4): 51-55.
- [12] 乔永民, 黄长江. 汕头湾表层沉积物重金属元素含量和分布特征研究 [J]. 海洋学报, 2009, **31**(1): 106-116.
- [13] Watts C J. Seasonal phosphorus release from exposed, re-inundated littoral sediments of two Australian reservoirs [J]. *Hydrobiologia*, 2000, **431**(1): 27-39.
- [14] Ruttenberg K C. Development of a sequential extraction method for different forms of phosphorus in marine sediments [J]. *Limnology & Oceanography*, 1992, **37**(7): 1460-1482.
- [15] 李悦, 乌大年, 薛永先. 沉积物中不同形态磷提取方法的改进及其环境地球化学意义 [J]. 海洋环境科学, 1998, **17**(1): 15-20.
- [16] 刘素美, 张经. 沉积物中磷的化学提取分析方法 [J]. 海洋科学, 2001, **25**(1): 22-25.
- [17] 扈传显, 潘建明, 刘小涯. 珠江口沉积物中磷的赋存形态 [J]. 海洋环境科学, 2001, **20**(4): 21-25.
- [18] 王汉奎, 黄良民, 陈国华. 南沙群岛海域表层沉积物中磷的形态分布特征 [J]. 热带海洋学报, 2005, **24**(3): 31-37.
- [19] 李金, 董巧香, 杜虹, 等. 柘林湾表层沉积物中氮和磷的时空分布 [J]. 热带海洋学报, 2004, **23**(4): 63-71.
- [20] 郑丽波, 叶瑛, 周怀阳, 等. 东海特定海区表层沉积物中磷的形态、分布及其环境意义 [J]. 海洋与湖沼, 2003, **34**(3): 274-282.
- [21] 王迪迪, 孙耀, 石晓勇, 等. 乳山湾东流区沉积物中不同形态磷的分布特征 [J]. 生态学报, 2008, **28**(5): 2417-2421.
- [22] 陈淑美, 傅天保, 林建云. 厦门西港表层沉积物磷的形态与分布 [J]. 台湾海峡, 1991, **10**(3): 235-239.
- [23] 许金树, 李亮歌. 台湾海峡中、北部沉积物中磷的存在形态 [J]. 海洋与湖沼, 1990, **21**(1): 62-69.
- [24] 李亮歌, 许金树. 台湾海峡中、北部沉积物中有机碳、全氮及全磷的含量分布特征 [J]. 热带海洋学报, 1990, **9**(1): 32-39.
- [25] 黄自强, 暨卫东. 长江口水中总磷、有机磷、磷酸盐的变化特征及相互关系 [J]. 海洋学报, 1994, **16**(1): 51-60.
- [26] 舒廷飞, 温琰茂, 贾后磊, 等. 哑铃湾网箱养殖对水环境的影响 [J]. 环境科学, 2004, **25**(5): 97-101.
- [27] 戴纪翠, 宋金明, 李学刚, 等. 胶州湾沉积物中的磷及其环境指示意义 [J]. 环境科学, 2006, **27**(10): 1954-1963.
- [28] 岳维忠, 黄小平. 珠江口柱状沉积物中磷的分布特征及其环境意义 [J]. 热带海洋学报, 2005, **24**(1): 21-27.
- [29] Jiang Z J, Fang J G, Zhang J H, *et al.* Forms and bioavailability of phosphorus in surface sediments from Sungo Bay [J]. *Chinese Journal of Environmental Science*, 2007, **28**(12): 2783-2788.
- [30] 侯立军, 陆健健, 刘敏, 等. 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, 2006, **26**(3): 488-494.
- [31] 李学刚, 宋金明, 李宁, 等. 胶州湾沉积物中氮与磷的来源及其生物地球化学特征 [J]. 海洋与湖沼, 2005, **36**(6): 562-571.

CONTENTS

Regional Heterogeneity of Lake Eutrophication Effects in China	CAO Jin-ling, XU Qi-gong, XI Bei-dou, <i>et al.</i> (1777)
Correlating Landscape Pattern with Total Nitrogen Concentration Using a Location-weighted Sink-source Landscape Index in the Haihe River Basin, China	SUN Ran-hao, CHEN Li-ding, WANG Wei, <i>et al.</i> (1784)
Impact of the Land-use Change on the Non-point Source Nitrogen Load in Yunmeng Lake Watershed	MENG Xiao-yun, YU Xing-xiu, PAN Xue-qin (1789)
Residue Characteristics and Distributions of Perfluorinated Compounds in Surface Seawater Along Shenzhen Coastline	CHEN Qing-wu, ZHANG Hong, CHAI Zhi-fang, <i>et al.</i> (1795)
Distribution and Potential Ecological Risk of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Sediments from Typical Electronics Industrial Zone	DENG Dai-yong, QIU Meng-de, SUN Guo-ping, <i>et al.</i> (1801)
Residues and Potential Ecological Risk Assessment of Metal in Sediments from Lower Reaches and Estuary of Pearl River	XIE Wen-ping, WANG Shao-bing, ZHU Xin-ping, <i>et al.</i> (1808)
Character and Sources Identification of Heavy Metals Contamination in Sediment from the Core Sediment in Nanshan Lake, the Zhalong Wetland	SU Dan, ZANG Shu-ying, YE Hua-xiang, <i>et al.</i> (1816)
Distribution Characteristics of Phosphorus Forms in Surface Sediments of the Shantou Bay in China	ZHAO Jian-gang, QIAO Yong-min (1823)
Microcosm Experiments on the Influence of Different N/P Ratios on Phytoplankton Community Growth in the East China Sea	HUANG Wei, ZHU Xu-yu, ZENG Jiang-ning, <i>et al.</i> (1832)
Species Composition and Distribution Characteristics of Pelagic Copepods in the Northern Sea of Fujian During Withdraw of Zhe-Min Coastal Current	WANG Yan-guo, LIN Jing-hong, WANG Chun-guang, <i>et al.</i> (1839)
PAHs Concentrations in Aquatic Products and Food Safety Evaluation in the Coupled Mangrove Planting-Aquaculture Ecological System	CHEN Guan-qiu, LI Yao-chu, HUANG Jin-mu, <i>et al.</i> (1846)
Tissue Distribution and Bioconcentration Factors of Tetrabromobisphenol A in Five Fishes in Lake Chaohu	YANG Su-wen, WANG Sheng-rui, YAN Zhen-guang, <i>et al.</i> (1852)
Induction Effects of Pentachlorophenol on Vitellogenin and p53 in Chinese Rare Minnow (<i>Gobiocypris rarus</i>)	XIONG Li, MA Yong-peng, ZHANG Xiao-zheng, <i>et al.</i> (1858)
Effects of Perfluorooctane Sulfonate (PFOS) Exposure on Vitellogenin mRNA Level in Zebrafish (<i>Brachydanio rerio</i>)	CHENG Yan, CUI Yuan, DANG Zhi-chao, <i>et al.</i> (1865)
Relationship Between Electron Transfer Capacity and Fluorescence Characteristics of Dissolved Organic Matter	TAO Ya, YUAN Tian, ZHOU Shun-gui, <i>et al.</i> (1871)
Characterization of the Change in DOM During Municipal Secondary Effluent Treatment with Magnetic Ion Exchange Resin by 3DEEM	YANG Jian, GAO Jin-hua, CHANG Jiang (1878)
Reverse Osmosis Membrane Fouling by Humic Acid Using XDLVO Approach; Effect of Calcium Ions	YAO Shu-di, GAO Xin-yu, GUO Ben-hua, <i>et al.</i> (1884)
Growth, Removal of Nitrogen and Phosphorus, and Lipid Accumulation Property of <i>Scenedesmus</i> sp. LX1 in Aquaculture Wastewater	MA Hong-fang, LI Xin, HU Hong-ying, <i>et al.</i> (1891)
Iron Chloride for Simultaneous Denitrification and Chemical-Biological Flocculation Process	WANG Hong-jie, DONG Wen-yi, LIU Li-sha, <i>et al.</i> (1897)
Characteristic Research of Shortcut Denitrification in Synthetic Ammonia Industrial Wastewater Treatment Process	LI Yan, LI Ze-bing, MA Jia-xuan, <i>et al.</i> (1902)
Stability Control of Aerobic Granules Using an Innovative Reactor	LI Zhi-hua, YANG Fan, LI Sheng, <i>et al.</i> (1907)
Description of the Stability of Granules Using Nongrowth-related Parameters	LI Zhi-hua, WU Jun, LI Sheng, <i>et al.</i> (1913)
Enhancement of Anaerobic Digestion of Excess Sludge by Acid-Alkali Pretreatment	YUAN Guang-huan, ZHOU Xing-qiu, WU Jian-dong (1918)
Pilot Validation of Sludge Concentration Partition at Small Reflux Ratio Condition	SHI Si, WANG Su-lan, LI Rui, <i>et al.</i> (1923)
Influence of Non-ionic Surfactants on Sludge Dewaterability	HOU Hai-pan, PU Wen-hong, SHI Ya-fei, <i>et al.</i> (1930)
Variation Characteristics and Influencing Factors of Air Pollution Index in China	LI Xiao-fei, ZHANG Ming-jun, WANG Sheng-jie, <i>et al.</i> (1936)
Characteristics of Aerosol Water-Soluble Inorganic Ions in Three Types Air-Pollution Incidents of Nanjing City	ZHANG Qiu-chen, ZHU Bin, SU Ji-feng, <i>et al.</i> (1944)
Characterization of Atmospheric PM _{2.5} in the Suburb of Shenzhen	DAI Wei, GAO Jia-qi, CAO Gang, <i>et al.</i> (1952)
Analysis on Oil Fume Particles in Catering Industry Cooking Emission	TAN De-sheng, KUANG Yuan-cheng, LIU Xin, <i>et al.</i> (1958)
Low-Temperature Catalytic Reduction of NO over Fe-MnO _x -CeO ₂ /ZrO ₂ Catalyst	LIU Rong, YANG Zhi-qin (1964)
CO ₂ Absorption and Regeneration Performance of a Natural Amino Acid and Its Potassium Salt	YAN Shui-ping, CHEN Jing-ao, XU Ming-liang, <i>et al.</i> (1971)
Effects of Tillage-Cropping Systems on Methane and Nitrous Oxide Emissions from Agro-Ecosystems in a Purple Paddy Soil	ZHANG Jun-ke, JIANG Chang-sheng, HAO Qing-ju, <i>et al.</i> (1979)
Factors Influencing Ammonia Volatilization in a Winter Wheat Field with Plastic Film Mulched Ridges and Unmulched Furrows	SHANGGUAN Yu-xian, SHI Ri-peng, LI Na, <i>et al.</i> (1987)
Effects of Typical Herbicides on Soil Respiration and N ₂ O Emissions from Soil Added with Different Nitrogen Fertilizers	SUN Qing, SHI Chun-xing, SHI Kun, <i>et al.</i> (1994)
Analysis of Characteristics of Dioxin Contamination in the Chlor-alkali Site that Uses Graphite Anode for Production	YU Li-feng, WEI Wen-xia, TIAN Ya-jing, <i>et al.</i> (2000)
Effect of Flue Gas Desulfurization Gypsum Application on Remediation of Acidified Forest Soil	LUO Yao, KANG Rong-hua, YU De-xiang, <i>et al.</i> (2006)
Morphology of Soil Iron Oxides and Its Correlation with Soil-Forming Process and Forming Conditions in a Karst Mountain	ZHANG Zhi-wei, ZHU Zhang-xiong, FU Wa-li, <i>et al.</i> (2013)
Pb, Zn Accumulation and Nutrient Uptake of 15 Plant Species Grown in Abandoned Mine Tailings	SHI Xiang, CHEN Yi-tai, WANG Shu-feng, <i>et al.</i> (2021)
Effect of Cr(VI) Stress on Growth of Three Herbaceous Plants and Their Cr Uptake	WANG Ai-yun, HUANG Shan-shan, ZHONG Guo-feng, <i>et al.</i> (2028)
Bioaccumulation of Heavy Metals by the Dominant Plants Growing in Huayuan Manganese and Lead/Zinc Mineland, Xiangxi	YANG Sheng-xiang, TIAN Qi-jian, LIANG Shi-chu, <i>et al.</i> (2038)
Effect of CO ₂ Fertilization on Residual Concentration of Cypermethrin in Rhizosphere of C3 and C4 Plant	MU Nan, DIAO Xiao-jun, WANG Shu-guang, <i>et al.</i> (2046)
Bioaugmented Removal of Pyridine and the Microbial Community Dynamic Analysis	QIAO Lin, ZHAO Hong, WANG Jian-long (2052)
Relationship Between Sewage Treatment Efficiency and Bacterial Community Diversity in an A/O MBR	KUANG Bin-yu, SHI Qing, Montcho Leon Monthero, <i>et al.</i> (2061)
Dynamic Changes in Functional Genes for Nitrogen Cycle During Bioremediation of Petroleum-Contaminated Soil	WU Bin-bin, LU Dian-nan, LIU Zheng (2068)
Risk Assessment of Lead Exposure from Different Intake Pathways for Children in Wuhan City	HAO Han-zhou, CHEN Tong-bin, WU Ji-liang, <i>et al.</i> (2075)
Implementation of a Pretreatment Device for an Electronic Nose	BU Fan-yang, WEN Xiao-gang, WAN Mei, <i>et al.</i> (2083)
Copper and Cadmium Toxicities to Activated Sludge Investigated with ToxTell Biosensor	WANG Xue-jiang, WANG Xin, LIU Mian, <i>et al.</i> (2090)
Matrix Effect and Control of Immunoassay for Environmental Samples	SHENG Jian-wu, HE Miao, SHI Han-chang (2095)
Study on Vitrification of Simulated Medical Wastes by Thermal Plasma	ZHANG Lu, YAN Jian-hua, DU Chang-ming, <i>et al.</i> (2104)
Study on the Low Temperature Drying of Components of Municipal Solid Waste and Its Model Analysis	WU Ya-juan, LIU Hong-mei, LU Sheng-yong, <i>et al.</i> (2110)
Aerogenesis Evolution of the Anaerobic-semiaerobic Bioreactor Landfill	HAN Zhi-yong, LIU Dan, LI Qi-bin (2118)
Performance of Microbial Fuel Cells with Fe/C Catalyst Carbon Felt Air-Cathode for Treating Landfill Leachate	TANG Yu-lan, PENG Man, YU Yan, <i>et al.</i> (2125)
Relationships Between Soil and Rocky Desertification in Typical Karst Mountain Area Based on Redundancy Analysis	LONG Jian, LIAO Hong-kai, LI Juan, <i>et al.</i> (2131)
Energy Consumption and GDP Growth in Beijing: Cointegration and Causality Analysis	CHEN Cao-cao, ZHANG Yan, LIU Chun-lan, <i>et al.</i> (2139)

《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6月15日 33卷 第6期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 33 No. 6 Jun. 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. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel: 010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. 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