

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第10期

Vol.33 No.10

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

淀山湖百年营养演化历史及营养物基准的建立	李小平, 陈小华, 董旭辉, 董志, 孙敦平 (3301)
矿化度作为蒙新高原湖泊营养物基准影响指标的可行性	席北斗, 张亚丽, 许秋瑾 (3308)
小波分析在湖泊常见浮游藻类荧光识别测定中的应用	张翠, 苏荣国, 宋志杰, 张珊珊, 王修林 (3314)
湖面亮温对巢湖水华影响的遥感监测分析	张红, 黄勇, 李堃 (3323)
基于地下水暴露途径的健康风险评价及修复案例研究	姜林, 钟茂生, 贾晓洋, 夏天翔, 姚珏君, 樊艳玲, 张丽娜, 唐振强 (3329)
基于多生物标志物污染指数法的北部湾潮间带污染程度评价	杜秀萍, 孟范平, 王志峰, 李祥蕾, 杨菲菲, 程凤莲, 杨跃志, 李正炎 (3336)
东海无机氮排海通量年际变化估算	吴家林, 方倩, 石晓勇, 李克强, 张传松, 王修林 (3344)
海洋酸化对大型海藻生长以及磷酸盐、硝酸盐吸收利用的影响	于娟, 张瑜, 杨桂朋, 田延旺 (3352)
北黄海表层沉积物中颗粒态磷的形态分布	孟佳, 姚庆祯, 陈洪涛, 于志刚 (3361)
湖泊疏浚对沉积物再悬浮及磷迁移影响的模拟研究	余居华, 钟继承, 张银龙, 范成新, 何伟, 张雷, 唐阵武 (3368)
降雨条件下岩溶泉水中悬浮颗粒物的运移特征及来源分析	杨平恒, 刘子琦, 贺秋芳 (3376)
三峡水库试验性蓄水前后大宁河富营养化状态比较	张佳磊, 郑丙辉, 刘录三, 王丽婧, 吴光应 (3382)
三峡库区不同土地利用类型氮磷流失特征及其对环境因子的响应	曾立雄, 黄志霖, 肖文发, 田耀武 (3390)
山地城市地表径流源区水质特征监测研究	李立青, 单保庆, 赵建伟, 郭树刚, 高勇 (3397)
唐山开滦煤矿区土壤及地表水中 Se 元素赋存状态及其生态效应研究	张秀芝, 马忠社, 王荫楠, 王志军, 谢伟民 (3404)
西藏地表水中砷的分布	王明国, 李社红, 王慧, 肖唐付, 郑宝山 (3411)
锡林河流域地表水痕量元素的时空分布	薛丽洋, 吴锦奎, 张明泉, 丁永建, 叶柏生 (3417)
天津滨海地区表层沉积物中持久性有机污染物的含量特征与生态风险	卢晓霞, 张姝, 陈超琪, 侯珍, 杨君君 (3426)
松花江流域河流沉积物中多氯联苯的分布、来源及风险评价	聂海峰, 赵传冬, 刘应汉, 彭敏, 李括, 杨柯, 刘飞 (3434)
长江口近岸表层沉积物中基质结合态磷化氢的分布特征	李涛, 侯立军, 刘敏, 赵迪, 尹国宇, 郑艳玲, 赵慧 (3443)
烟台四十里湾柱状沉积物氮形态地球化学特征	杨玉玮, 高学鲁, 李培苗 (3449)
黄河口湿地土壤中正构烷烃分子指标及物源指示意义	姚鹏, 尹红珍, 姚庆祯, 陈洪涛, 刘月良 (3457)
含藻水中壬基酚的光降解转化研究	彭章娥, 冯劲梅, 何淑英, 吴峰 (3466)
硝酸铁-过硫酸盐改性 GAC 催化 H_2O_2 氧化橙黄 IV	张瑛洁, 徐淑芬, 廖霞, 曹天静, 杨榕, 李大鹏 (3473)
Pd/CMK-3 的合成、表征及对甲酸的电催化氧化性能研究	还中科, 宗恩敏, 魏丹, 万海勤, 郑寿荣, 许昭怡 (3479)
曝气稳定塘处理农村生活污水曝气控制条件研究	李怀正, 姚淑君, 徐祖信, 陈卫兵 (3484)
以亲水化改性聚氨酯为多孔载体的生物膜移动床反应器处理污水中试研究	王玉晓, 孔秀琴, 冯权, 卢海涛, 王德源, 唐黎明, 邢新会 (3489)
光催化降解渗滤液 DOM 不同组分的相对分子量变化特征	贾陈忠, 王焰新, 张彩香 (3495)
短程硝化-反硝化生物滤池脱氮机制研究	孙迎雪, 徐栋, 田媛, 李燕飞 (3501)
CANON 反应器运行稳定性及温度冲击的影响	付昆明, 张杰, 曹相生, 李冬, 孟雪征 (3507)
MUCT 工艺全程硝化和短程硝化模式下反硝化除磷研究	曾薇, 王向东, 张立东, 李博晓, 彭永臻 (3513)
活性污泥胞外聚合物 (EPS) 的分层组分及其理化性质的变化特征研究	袁冬琴, 王毅力 (3522)
有机负荷条件对间歇式气提内循环反应器中好氧颗粒污泥形成的影响	刘孟媛, 周丹丹, 高琳琳, 马德方, 张予萌, 李克宇 (3529)
厌氧污泥降解蔡动力学与生物多样性研究	曹新垲, 杨琦, 郝春博 (3535)
雌二醇在土壤/沉积物中的吸附特征及猪粪 DOM 对吸附的影响	张丰松, 李艳霞, 黄泽春, 杨明 (3542)
近海沉积物对粪固醇的等温吸附和热力学研究	张晓蕾, 薛文平, 徐恒振, 马新东 (3547)
甲苯在北京褐潮土中的运移分布及其 STOMP 模拟研究	韩春媚, 冉娟, 张慧, 李发生, 李雁, 谷庆宝 (3554)
聚丙烯酸钠为结合相的梯度扩散薄膜技术预测甘蔗田土壤中镉的生物有效性	王芳丽, 宋宁宁, 赵玉杰, 张长波, 沈跃, 刘仲齐 (3562)
土壤改良剂及其组合原位钝化果园土壤中的 Pb、Cd	汤民, 张进忠, 张丹, 陈舜, 张训, 刘万平, 余建 (3569)
基于不同通车时间的路旁土壤重金属健康风险:以连霍高速郑州—商丘段为例	谷蕾, 全致琦, 宋博, 马建华 (3577)
生活污水污泥制备的生物质炭对红壤酸度的改良效果及其环境风险	卢再亮, 李九玉, 姜军, 徐仁扣 (3585)
沉积物中多环芳烃对反硝化功能基因垂直分布的影响	吴艳阳, 黄珊, 叶嘉欣, 张恒军, 张仁铎 (3592)
阴离子黏土(层状双氢氧化物)对鲱鱼精 DNA 在重金属作用下的保护作用研究	唐旖旎, 吴平霄, 朱能武 (3598)
预处理后生物成因施氏矿物的矿物学特征及对 As(III) 吸附的影响	梁剑茹, 李浙英, 刘奋武, 周立祥 (3606)
铜绿假单胞菌 ZGKD2 的重金属耐性机制研究	张玉秀, 王姣, 柴团耀, 张倩, 刘金光, 李霞, 白志强, 苏增健 (3613)
1 株 1,2-二氯乙烷降解菌的分离及降解特性研究	王小春, 陈东之, 金小君, 陈建孟 (3620)
PCBs 降解菌的筛选及其降解特性研究	史舜燕, 冯流, 龚吉 (3627)
青草沙水库蓄水期间细菌群落结构变化的初步研究	彭青, 谢冰, 袁琦, 黄智婷, 崔璐璐, 王文婷 (3634)
华北平原玉米-小麦轮作农田 N_2O 交换通量的研究	裴淑玮, 张圆圆, 刘俊锋, 伦小秀, 牟玉静 (3641)
影响南京地区的两次典型空气污染过程分析	王飞, 朱彬, 康汉清, 高晋徽, 王瑛, 江琪 (3647)
济南市夏季环境空气 VOCs 污染特征研究	刘泽常, 张帆, 侯鲁健, 刘玉堂, 吕波 (3656)
活性炭分解臭氧机制研究	刘海龙, 张智辉, 张忠明, 焦媛媛, 王瑞军 (3662)
大气 O_3 浓度升高对 2 种基因型矮菜豆丛枝菌根 (AM) 结构及球囊霉素蛋白产生的影响	王鹏腾, 刁晓君, 王曙光 (3667)
铝胁迫下外源钙对外生菌根真菌抗氧化保护酶活性的影响	王明霞, 黄建国, 袁玲, 周志峰 (3675)
锌冶炼不同群落生境蟋蟀汞污染	郑冬梅, 李昕馨, 罗庆 (3680)
《环境科学》征订启事 (3313) 《环境科学》征稿简则 (3322) 信息 (3328, 3512, 3561, 3640)	

北黄海表层沉积物中颗粒态磷的形态分布

孟佳, 姚庆祯*, 陈洪涛, 于志刚

(中国海洋大学化学化工学院, 海洋化学理论与工程技术教育部重点实验室, 青岛 266100)

摘要: 于 2007 年 10 月乘东方红 2 号科考船在北黄海采集表层沉积物, 应用改进的 SEDEX 法对表层沉积物中的可交换态磷、有机磷、铁结合态磷、自生磷灰石磷、碎屑磷和难分解有机磷等 6 种颗粒态磷的含量进行了测定, 并分析了其分布状况及其影响因素。结果表明, 碎屑磷和自生磷灰石磷是总颗粒态磷的主要组分, 含量的变化范围分别为 $25.7 \sim 122.5 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ 和 $5.7 \sim 176.2 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$, 分别占总颗粒态磷的质量分数为 17.0% ~ 56.9% 和 10.2% ~ 49.8%。弱吸附态磷、可提取态有机磷、铁结合态磷、难分解有机磷含量的变化范围分别为 $5.5 \sim 43.9$ 、 $4.1 \sim 41.4$ 、 $2.3 \sim 26.7$ 、 $6.0 \sim 33.6 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ 。碎屑磷和自生磷灰石磷含量之和占据了总颗粒态磷的大部分, 表明总磷以自然来源磷为主; 铁结合态磷含量较低, 表明北黄海受人为输入引起的污染程度较轻; 可提取态有机磷与难分解有机磷之和占总颗粒态磷的质量分数很低, 表明颗粒态磷中有机态含量较低, 主要以无机态的形式为主; 生物可利用磷即弱吸附态磷、可提取态有机磷、铁结合态磷之和, 占总颗粒态磷的质量分数为 6.7% ~ 33.2%, 表明调查区表层沉积物中磷的生物可利用性较低。

关键词: 北黄海; 颗粒态磷; 沉积物; 形态; 分布

中图分类号: X145 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3301(2012)10-3361-07

Forms and Distributions of Particulate Phosphorus in the Surface Sediments of North Yellow Sea

MENG Jia, YAO Qing-zhen, CHEN Hong-tao, YU Zhi-gang

(Key Laboratory of Marine Chemistry Theory and Technology, Ministry of Education, College of Chemistry and Chemical Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

Abstract: Surface sediments were collected from the North Yellow Sea in October 2007. The sediments were analyzed with modified SEDEX to obtain six forms of phosphorus. The results indicate that among the total phosphorus the detrital phosphorus and authigenic phosphorus are the main forms and the content varies from 25.7 to $122.5 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ and from 5.7 to $176.2 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$, respectively, which taking up 17.0% - 56.9% and 10.2% - 49.8% of the total phosphorus. The content of exchangeable phosphorus, extractable organic phosphorus, iron-bound phosphorus and refractory phosphorus ranges from 5.5 to 43.9 , from 4.1 to 41.4 , from 2.3 to 26.7 , from 6.0 to $33.6 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$, respectively. Detrital and authigenic phosphorus are the major forms of the total phosphorus, indicating that the natural input is the major source of particle phosphorus in the study area. The content of iron-bound phosphorus is low, indicating that human input is minor in the area; mass fraction of the extractable organic phosphorus and refractory organic phosphorus is low, indicating that there is a low organic content while the main form of the total phosphorus is inorganic in the surface sediments of this area. Bioavailable phosphorus as exchangeable phosphorus, extractable organic phosphorus and iron-bound phosphorus account for 6.7% - 33.2% of the total particle phosphorus, indicating that bioavailability of phosphorus in the surface sediments is low.

Key words: North of Yellow Sea; particulate P; sediment; form; distribution

磷是生物圈赖以存在的基本元素之一,也是引起江河、湖泊和近岸海域水体富营养化的重要因素。近海沉积物是海洋中磷的重要源和汇。颗粒态磷是河流系统和河口地区磷的主要存在形态。通常将海洋沉积物中的颗粒态磷分为 6 种形态(可交换态磷、有机磷、铁结合态磷、自生磷灰石磷、碎屑磷和难分解有机磷),不同形态磷的生物地球化学活性存在较大差异,在海洋中扮演着不同的角色。沉积物中磷的赋存形态分析可以为研究者提供沉积物中磷的存在状态及其活性方面的信息。海洋沉积物可以通过上覆水体或通过再悬浮过程进入水体中^[1],直接影响水体初级生产力的大小,通过测定

沉积物中磷的不同化学形态及其含量,对研究水体中磷的形态、水-沉积物界面上磷的迁移与转化和成岩作用中的地球化学行为及磷的循环过程,对研究该元素的生物可利用性,甚至于对研究碳、硫、氧、氮等元素的循环都有重要意义^[2]。

沉积物中磷的赋存形态受其来源影响较大,总磷、有机磷和铁结合态磷的含量主要受控于物质来

收稿日期: 2011-12-02; 修订日期: 2012-03-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(40976044); 山东省自然科学基金项目(ZR2010DM003)

作者简介: 孟佳(1987~),女,硕士研究生,主要研究方向为海洋生物地球化学, E-mail: mengjiadeyouxiang@163.com

* 通讯联系人, E-mail: qzhyao@ouc.edu.cn

源;吸附态磷与铁结合态磷和有机磷同属于沉积物中生物可利用磷范畴,其在沉积物中的循环主要与铁氧化物有关,钙结合态磷主要来源于海洋浮游生物^[3]. 粒径也是影响沉积物中磷的含量及赋存形态的重要因素. 通常细颗粒物具有大的比表面积^[4],铁锰氧化物等具有较强吸附能力的物质富集于细颗粒中^[5],这使得磷等生源要素更多地存在于细颗粒物中. Rao 等^[6]对长江沉积物的研究表明,铁结合态磷含量同 < 20 μm 粒级沉积物含量密切相关. Andrieux 等^[7]在塞纳湾、卢瓦尔河口和吉伦河口对沉积物的粒度分布和各形态磷含量进行了分析,发现铁/铝结合态磷和可交换态磷同 < 63 μm 沉积物含量显著正相关. Martha 等^[8]对比了不同季节密西西比河口淡水端沉积物的粒径和沉积物中各形态磷的含量,发现沉积、再悬浮过程中的“水力分选”控制了沉积物的粒径分布,从而影响了沉积物中磷的含量和赋存形态. 目前有关北黄海表层沉积物中颗粒态磷形态分布还尚未有报道. 本研究通过对北黄海表层沉积物中磷赋存形态的分析,着重探讨了北黄海沉积物中磷的形态分布及其影响因素.

1 站位布设、样品采集及研究方法

北黄海是一个半封闭的海盆,位于山东半岛和朝鲜西海岸之间. 西北部通过渤海海峡与渤海相连,南部与南黄海互通. 北黄海的等深线基本上与岸线平行,整体水深比较浅,平均水深为 46 m,同时北黄海中部还存在着一个西北-东南走向的深槽,其东南端最深处接近 90 m. 北黄海是现代黄河沉积物

向外海扩散的通道,也是黄海暖流进入渤海的通道,物质来源多样,流系比较复杂^[9].

于 2007 年 10 月在北黄海 121° ~ 125°E, 37° ~ 40°N 范围内布设 22 个站位(图 1),用箱式采样器采集沉积物样品,用不锈钢铲取 1 ~ 2 cm 表层沉积物,样品放入洁净的聚乙烯密封袋冷冻保存.

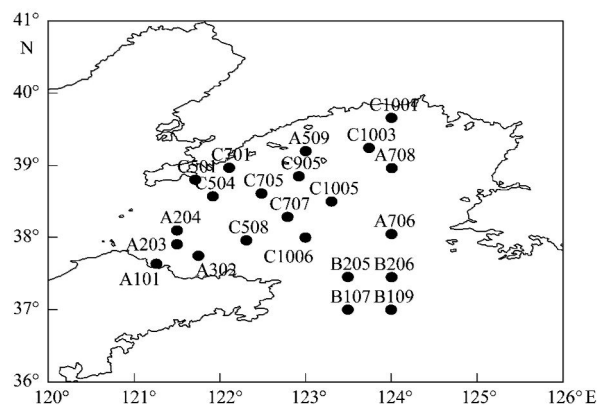


图 1 北黄海 2007 年 10 月表层沉积物采样站位示意

Fig. 1 Distribution of the sampling stations in North Yellow Sea

表层沉积物样品经冷冻干燥后,研磨,过 100 目筛,干燥器中保存,用于磷赋存形态分析.

采用改进了的 SEDEX 法^[10,11]将颗粒态磷的 6 种形态分步进行提取,此方法依次采用 MgCl_2 溶液、SDS(十二烷基硫酸钠)溶液、CDB(柠檬酸钠-连二亚硫酸钠-碳酸氢钠)溶液、醋酸缓冲溶液、盐酸溶液和灼烧 + 盐酸溶液将颗粒态磷划分为可交换态磷、有机磷、铁结合态磷、自生磷灰石磷、碎屑磷和难分解有机磷 6 种形态,颗粒态总磷为各形态磷相加(表 1).

表 1 改进后的 SEDEX 提取方法

Table 1 Improved SEDEX extract method

步骤	提取试剂及条件	颗粒态磷的形态
1	1 mol·L ⁻¹ MgCl_2 , 2 h, pH 8, 25℃	弱吸附态磷
2	1% SDS, HCO_3^- 缓冲液, pH 8.6, 2 h(×6)	可提取态有机磷
3	1 mol·L ⁻¹ HAc 缓冲溶液, pH 7.6, 8 h, 25℃	铁结合态磷
4	1 mol·L ⁻¹ NaAc-HAc 缓冲液, pH 4, 6 h, 25℃	自生磷灰石、生物磷灰石及碳酸钙结合磷(以下简称自生磷灰石磷)
5	1 mol·L ⁻¹ HCl, 16 h, 25℃	火成及变质碎屑磷(以下简称碎屑磷)
6	500℃ 灼烧, 2 h, 1 mol·L ⁻¹ HCl, 16 h, 25℃	难分解有机磷

MgCl_2 提取液中的磷酸盐采用磷钼蓝法进行测定^[11];醋酸缓冲溶液提取液以及 HCl 提取液分别以 1 mol·L⁻¹ HCl 溶液和 1 mol·L⁻¹ NaOH 溶液调节 pH 值为 1 左右,然后采用磷钼蓝法对其中的磷酸盐进行测定^[5,7]. SDS 提取液中磷酸盐的测定采用如下方法:蒸干 100 mL 提取液,600℃ 下灼烧 4 h,6 mol·L⁻¹ HCl 溶液提取 16 ~ 24 h,过滤提取液,以

NaOH 溶液中和一定体积提取液,然后采用磷钼蓝法进行测定^[11,12]. CDB 提取液中的磷酸盐采用改进后的异丁醇萃取法进行测定^[13].

目前没有沉积物中各赋存形态磷含量的标准样品,本研究选用中国近海沉积物标样(GB W 07314),用改进后的 SEDEX 法对其中的颗粒态总磷进行测定,以检验实验分析过程的可靠性. 标样

给定的总磷的值为 $(20.9 \pm 1.97) \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$, 采用改进后的 SEDEX 法测得总磷的平均值为 $20.8 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$, 在给定的范围内.

2 结果与讨论

北黄海表层沉积物中各形态磷含量列于表 2.

表 2 北黄海 2007 年 10 月表层沉积物中各形态磷的含量¹⁾/ $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$

Table 2 Content of different phosphorus forms in sediments at surface in North Yellow Sea in Oct, 2007/ $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$

站位	弱吸附态磷	可提取态有机磷	铁结合态磷	自生磷灰石磷	碎屑磷	难分解有机磷	总磷
A101	7.7	9.2	19.1	24.2	98.0	18.0	176.2
A203	15.1	16.9	4.1	45.7	98.0	15.4	195.2
A302	11.0	15.1	13.3	95.3	122.5	22.7	279.9
A204	17.3	12.9	—	31.0	98.8	14.5	174.9
A509	7.6	14.0	8.0	41.3	50.4	10.2	131.4
A706	5.5	5.2	—	5.7	25.7	19.0	61.1
A708	6.6	4.1	2.5	6.8	36.9	9.2	66.0
B107	11.8	17.1	15.6	107.6	89.3	16.4	257.7
B109	13.0	12.5	7.1	88.3	57.8	15.2	193.7
B205	22.9	27.9	26.7	176.2	96.2	27.0	376.9
C501	25.3	23.8	24.0	142.0	51.0	33.6	299.6
B206	38.5	9.6	16.4	78.8	42.9	7.8	193.9
C504	13.7	9.5	5.5	52.7	79.5	9.1	169.9
C508	21.0	31.6	12.9	162.9	71.8	26.6	326.8
C701	18.9	41.4	7.4	61.2	65.6	30.3	224.7
C705	27.6	29.9	8.3	81.8	71.8	28.6	247.9
C707	43.9	31.4	6.1	70.6	94.5	31.7	278.1
C905	9.0	9.2	—	28.8	73.3	13.5	133.8
C1001	6.9	9.9	3.7	18.9	45.6	31.7	116.8
C1003	8.8	4.8	—	14.9	28.6	9.5	66.6
C1005	14.2	11.6	—	33.0	67.3	6.0	132.1
C1006	21.2	14.5	2.3	25.0	106.8	17.8	187.7
平均值	16.7	16.5	10.8	63.3	71.5	18.8	195.0

1) “—”表示未检出

2.1 弱吸附态磷

Logan^[14]将弱吸附态磷定义为被吸附的易水解的或易溶解的磷,可由水、稀电解质溶液、离子交换树脂或同位素³²P 置换测得的磷. 弱吸附态磷 (Ex-P)是所有形态磷中与颗粒物结合能力最弱的磷,表层沉积物中的 Ex-P 很容易通过解吸作用释放到上覆水体中被生物所利用. 在水体与沉积物界面的相互作用下,表层弱吸附态磷含量较大,随着沉积物深度的增加,磷在沉积物和上覆水体之间的迁移转化作用逐渐减弱,因此沉积物深度越深,弱吸附态磷的含量一般越低^[15].

北黄海表层沉积物中弱吸附态磷含量的变化范围 $5.5 \sim 43.9 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$, 平均含量为 $(16.7 \pm 0.27) \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$; 最低值出现在 A706 站位, 最高值出现在 C707 站位. 弱吸附态磷占总磷的比例范围为 3.9% ~ 19.8%, 平均为 8.5%. 弱吸附态磷含量的平面分

布差异较大(图 2), 整体表现为调查海区西北部及南部浓度较高, 东北部浓度较低; 以 C707 为中心的附近站位的含量较高. 与同期所得到的北黄海底层水体溶解氧平面分布(图 3)相对比可以发现: 弱吸附态磷高值区恰为溶解氧的低浓度区, 而调查海域东北部及山东半岛北部溶解氧高浓度区恰为弱吸附态磷含量低值区. 弱吸附态磷的分布与底层溶解氧浓度呈反相关. 此外, 弱吸附态磷的分布受沉积物粒径影响, 一般粒径较小的粉沙含有较多的弱吸附态磷. 根据王伟等^[17]对于同一海域表层沉积物类型的研究可知, 调查海域东北部为粒径较大的沙质, 总体上呈现出从东向西表层沉积物粒径逐步减小的趋势, 这与本研究观测到的调查海域东北部弱吸附态磷含量较低、西北部和南部表层沉积物中弱吸附态磷含量较高是一致的.

2.2 可提取态有机磷

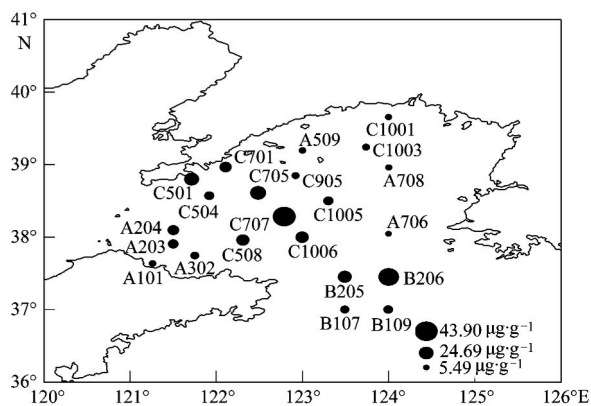


图2 北黄海2007年10月表层沉积物弱吸附态磷分布示意

Fig. 2 Horizontal distribution of exchangeable P in sediments at surface in North Yellow Sea in Oct, 2007

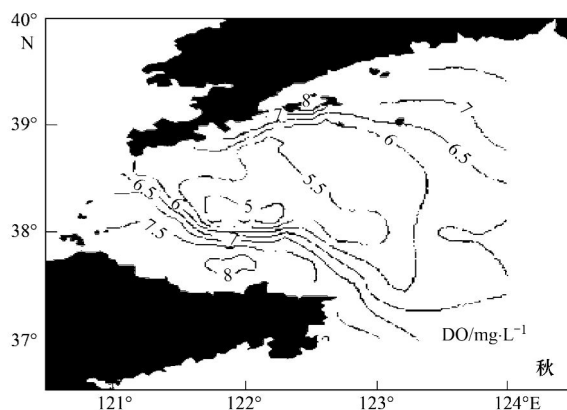


图3 北黄海2007年10月底层水体溶解氧分布示意^[16]

Fig. 3 Horizontal distribution of dissolving O₂ in bottom water of North Yellow Sea in Oct, 2007

SDS 提取的有机磷为可提取态有机磷, 主要来源于生物残骸、腐殖质等, 为生物可利用磷. 调查海域沉积物中可提取态有机磷含量的变化范围为 4.1 ~ 41.4 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, 平均含量为 (16.5 ± 0.27) $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, 占总磷含量的 4.9% ~ 18.4%, 平均为 8.4%, 与弱吸附态磷的含量相当. 其含量的平面分布(图4)整体表现为中部浓度较高, 两边浓度较低; C705 附近几个站位的含量相对较高; 最高值出现在 C701 站位, 最低值出现在 A708 站位. 总体表现为中部含量高, 由中部向两侧逐渐降低, 与同期所得到的北黄海底层水体溶解氧平面分布(图3)刚好相反. 有机磷的分布主要受生产力水平高低的影响, 此外, 还与溶解氧浓度有关, 在较低的溶解氧浓度下, 有机磷不易被氧化分解, 有利于有机磷的富集. 而 C701 站位出现高值与其处于近岸有较高的生产力水平及溶解氧浓度低, 不利于降解等因素有关.

2.3 铁结合态磷

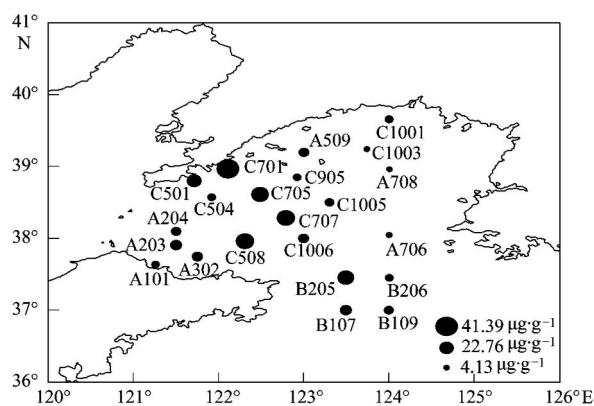


图4 北黄海2007年10月表层沉积物可提取有机态磷分布示意

Fig. 4 Horizontal distribution of organic P in sediments at surface in North Yellow Sea in Oct, 2007

铁结合态磷被认为是沉积物中最易被解吸的部分之一, 它代表了沉积物中铁氧化物所结合的磷酸盐, 其含量随氧化还原电位(Eh)的改变而改变. 当 Eh 降低时, Fe(III) 被还原, 导致被铁氧化物吸附或与其结合的磷活化, 进而释放到水体中; 当 Eh 升高时, Fe(II) 被氧化为 Fe(III) 并沉淀, 溶解态的磷被铁锰氧化物吸附转化为颗粒态^[18]. 铁结合态磷在适当的氧化还原条件下可被生物所利用. 铁结合态磷在沉积物-水界面的迁移转化使水体中的磷在短时间尺度上形成快速循环, 进而成为重要的动态营养源, 这种潜在的内源性磷负荷与水体富营养化程度有重要关系. 铁结合态磷与环境的污染程度及人类活动密切相关, 可以反映区域受磷污染的状况^[19].

调查海域沉积物中铁结合态磷含量的变化范围为 2.3 ~ 26.7 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, 平均含量 (10.8 ± 0.23) $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, 在各形态磷中最低, 占总磷的质量分数为 1.2% ~ 10.8%, 平均为 4.8%. 其中最高值在 B205 站位, 最低在 C1006 站位. 从平面分布来看(图5), 较高含量出现在调查海域南部和西北部的站位, 其余站位含量较低. 由于铁结合态磷的来源主要是市政污水、工业废水以及农业源流失的磷^[20], 沿岸几个站位的含量较高, 可能与环境的污染及人类活动有关. 铁结合态磷的整体分布受底层溶解氧的浓度的影响, 其分布总体表现为中部含量高, 由中部向两侧逐渐降低, 与溶解氧的中部含量较低, 由中部向两侧逐渐升高的分布正好吻合^[15]. 缺氧水体 Fe(III) 容易被还原, 铁结合态磷也随之被释放到水体中. 反之, 溶解氧浓度大, 有利于铁结合态磷的形成. 溶解氧浓度越高, 沉积物粒径越小的区域, 铁结合态磷的含量越大.

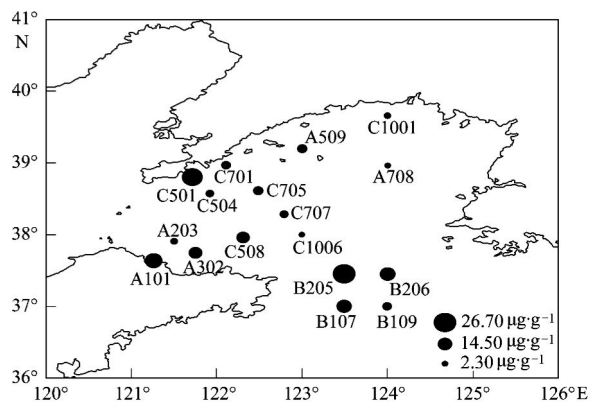


图5 北黄海 2007 年 10 月表层沉积物铁结合态磷分布示意

Fig. 5 Horizontal distribution of iron-bound P in sediments at surface in North Yellow Sea in Oct, 2007

2.4 自生磷灰石磷

在沉积物中与钙结合的磷呈现出不同的类型和来源。Ruttenberg^[22]首次将沉积物中的钙结合态磷分为自生磷灰石磷和碎屑磷灰石磷。自生磷灰石磷是早期成岩过程中形成的生物成因的钙结合态磷(包括生物骨骼碎屑,如鱼骨、藻类、贝壳等)以及碳酸钙结合的自生和生物磷灰石,一般不受沉积物本身的特性和陆源排放的影响,主要受生物活动的影响。自生磷灰石磷在水体中不易转化为可被生物体利用的可溶性磷酸盐^[21],是水体及沉积物中磷酸盐的“汇”^[22,23]。

调查区沉积物中自生磷灰石磷的含量范围为 $5.7 \sim 176.2 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, 含量范围变化较大。其中最高值出现在 B205 站位, 最低值出现在 A706 站位。平均含量为 $(63.3 \pm 1.3) \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, 占总磷的 10.2% ~ 49.8%, 平均为 31.2%。从平面分布来看(图 6), 较高含量集中在调查海域西南部的 C501、C508、B205 等站位, 其它站位含量均不太高。北黄海表层叶绿素分布呈现出由近岸到海域中央浓度逐渐降低, 同时西部较封闭海域浓度大于东部开阔海域的分布趋势^[24], 这与本研所得到的自生磷灰石磷含量分布趋势较为一致, 表明海洋表层沉积物的自生磷灰石磷主要来源于海洋浮游生物。

该调查区自生磷灰石磷占总颗粒态磷的质量分数很高, 且变化范围较大, 采用相同方法, 东海特定海区得到的结果显示, 自生磷灰石磷含量较低, 且变化不大^[3]。这主要是由于东海特定海区有长江河口带来的大量颗粒物输入, 这对河口生物性颗粒物有稀释作用, 而相比而言, 北黄海该调查区没有较高含量颗粒物的输入。

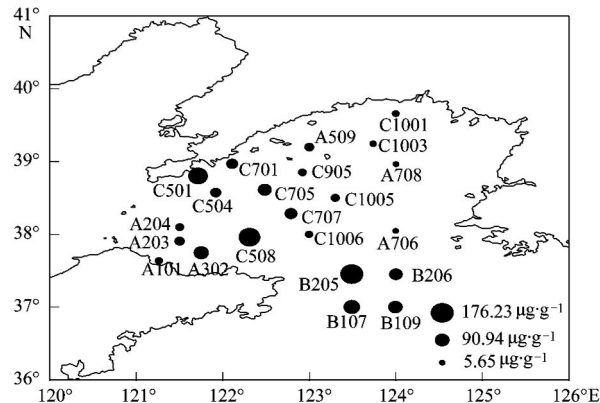


图6 北黄海 2007 年 10 月表层沉积物自生磷灰石磷分布示意

Fig. 6 Horizontal distribution of authigenic P in sediments at surface in North Yellow Sea in Oct, 2007

2.5 碎屑磷

碎屑磷灰石磷是以火成岩和变质岩为来源的碎屑磷, 主要来源于陆源输入。调查区沉积物中碎屑磷的含量范围为 $25.7 \sim 122.5 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, 平均含量是 $(71.5 \pm 0.72) \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, 占总磷的 17.0% ~ 56.9%, 平均为 37.0%, 在各形态磷中平均含量最高。其中最高值出现在 A302 站位, 最低值出现在 A706 站位。从平面分布来看(图 7), 较高值分布在调查海域西南部、山东半岛沿岸, 调查海域东北部含量很低。相对于其他形态的磷, 碎屑磷含量较高, 这在渤海及东海特定海区也得到了相同的结论^[2,3]。

自生磷灰石磷与碎屑磷含量之和占据了总提取磷的大部分, 说明本调查区的自然来源磷含量多, 总磷以自然来源磷为主。

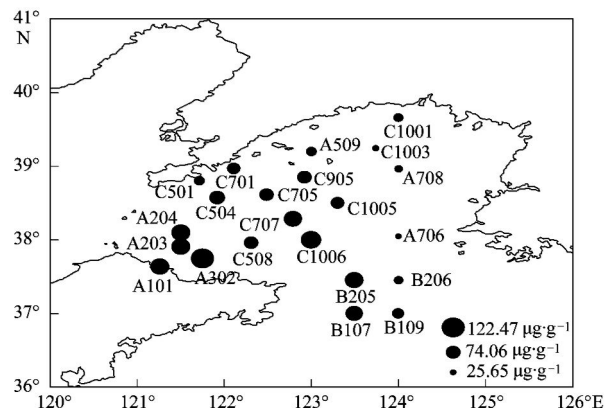


图7 北黄海 2007 年 10 月表层沉积物碎屑磷分布示意

Fig. 7 Horizontal distribution of detrital P in sediments at surface in North Yellow Sea in Oct, 2007

2.6 难分解有机磷

难分解有机磷主要是由黏土矿物中的磷及 SDS 无法提取的有机磷组成, 是总磷中除去各反应活性磷

后剩余的部分,该部分很难提取,且为生物不可用磷。

调查区沉积物中难分解有机磷的含量在 $6.0 \sim 33.6 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, 平均含量为 $(18.8 \pm 0.24) \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, 占总磷的 $4.0\% \sim 27.1\%$, 平均为 10.1% 。其中最高值出现在 C501 站位, 最低值出现在 C1005 站位。从平面分布来看(图 8), 大体呈现西边高、东边低的分布格局, 但辽东半岛沿岸的 C1001 含量很高。C001 站位各形态磷的含量均高于周围其他站位, 可能受鸭绿江输入的影响。

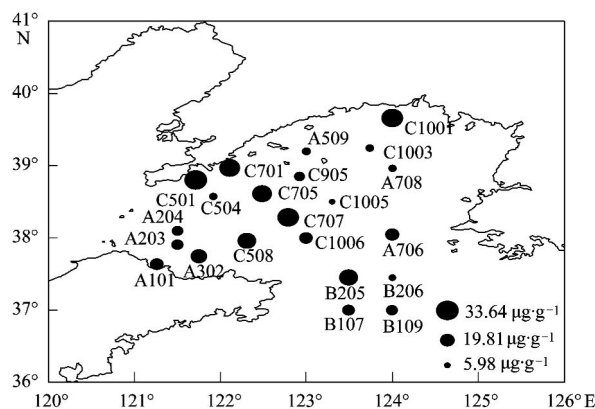


图 8 北黄海 2007 年 10 月表层沉积物难分解有机磷分布示意

Fig. 8 Horizontal distribution of refractory P in sediments at surface in North Yellow Sea in Oct, 2007

2.7 总磷

沉积物中总磷 (TP) 含量范围在 $61.1 \sim 376.9 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, 平均含量在 $(195.0 \pm 2.3) \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, 最小值和最大值分别出现在站位 A706 和 B205。总磷的分布(图 9)呈现西南部高、东北部低的趋势。总磷的分布受沉积物粒径影响, 一般粒径较小的粉沙含有高含量的总磷。根据王伟等^[17]对于同一海域表层沉积物类型的研究可知, 北黄海东北部为粒径较大的沙质, 总体上呈现出从东向西表层沉积物粒径逐步减小的趋势^[17], 这与本研究观测到的调查海域东北部总磷含量较低、中部及偏西位置表层沉积物中总磷含量较高是一致的。

2.8 生物可利用磷

研究沉积物中磷形态的一个非常重要的目的就是估算生物可利用磷, 它直接影响水体的初级生产力, 与沉积物-水界面磷的交换息息相关^[25]。生物可利用磷在表层沉积物中的含量对上覆水体中磷的含量和水体中藻类及挺水植物等的生长有重要影响, 其在表层沉积物中富集, 会导致磷的释放潜力明显增大, 当沉积物受到扰动引发再悬浮或理化环境发生变化时, 会将这部分磷释放到水体中。不同研究

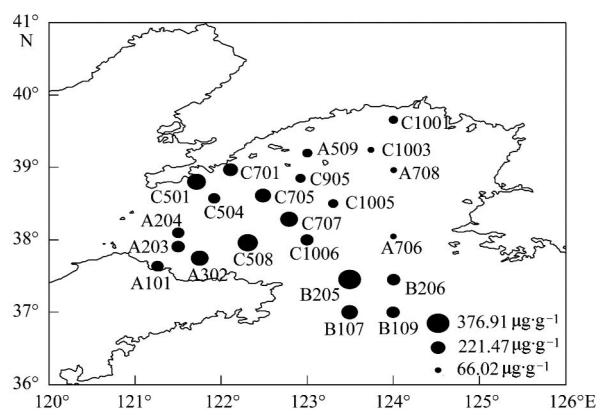


图 9 北黄海 2007 年 10 月表层沉积物总磷分布示意

Fig. 9 Horizontal distribution of total P in sediments at surface in North Yellow Sea in Oct, 2007

者对生物可利用磷形态的确定方法不同, 不同研究方法所得的结果也不尽相同。一般认为, 弱吸附态磷易进入水体被生物所利用; 可还原铁结合态磷和可提取态有机磷是潜在的活性磷, 在一定条件下也能进入水体被生物利用; 而自生磷灰石磷、碎屑磷、非活性有机磷很难被生物利用, 部分有机磷可以通过矿化成岩过程而逐渐转化为生物可利用磷^[26]。本研究采用改进了的 SEDEX 提取法将沉积物中磷的赋存形态分为 6 种, 将其中的弱吸附态磷、有机磷、铁结合态磷确定为潜在的生物可利用磷, 它们代表了潜在的可由沉积物向水体中释放的磷酸盐的上限。

根据以上方法计算了调查海域的生物可利用磷, 其范围在 $5.5 \sim 81.4 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, 占总磷的 $6.7\% \sim 33.2\%$, 平均为 19.0% 。最大值和最小值分别在 C707 站位和 A706 站位。平面分布结果显示(图 10), 东北部区域及山东半岛沿岸含量较低, 其余站位相对较高, 其分布特征与弱吸附态磷较为相似。

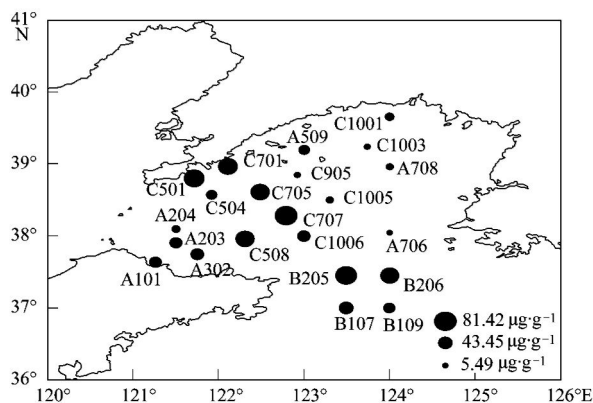


图 10 北黄海 2007 年 10 月表层沉积物生物可利用磷分布示意

Fig. 10 Horizontal distribution of Bioavailable P in sediments at surface in North Yellow Sea in Oct, 2007

但这种估算给出了沉积物向水体释放磷酸盐的上限, 实际中沉积物向水体释放的磷酸盐可能要小得多. 温婷婷等^[16]得到的相同航次底层水体中磷酸盐的平面分布图显示, 调查海域中部磷酸盐含量较高而向两侧呈现出降低的趋势, 这与图 10 所表现出的中部含量高, 向两侧降低的分布趋势较为一致.

3 结论

(1) 弱吸附态磷、可提取态有机磷、铁结合态磷含量与沉积物粒径密切相关, 表现为沉积物粒径越小, 含量越高; 而自生磷灰石磷、碎屑磷以及难分解有机磷与沉积物粒径之间的关系表现不明显, 受其他因素影响较大.

(2) 碎屑磷和自生磷石灰磷含量之和占据了总提取态磷的大部分, 表明本调查区的自然来源磷含量多, 总磷以自然来源磷为主.

(3) 铁结合态磷在沿岸几个站位的含量较高, 可能与环境的污染及人类活动有关. 溶解氧浓度越高, 沉积物粒径越小, 铁结合态磷的含量越大.

(4) 可提取态有机磷与难分解有机磷之和占总提取磷的质量分数很低, 北黄海的表层沉积物中有有机态磷含量较低, 主要以无机态的形式为主, 说明北黄海受农业面源污染少.

(5) 生物可利用磷即弱吸附态磷、可提取态有机磷、铁结合态磷之和, 占总磷的 6.7% ~ 33.2%, 表明北黄海表层沉积物中磷的生物可利用性较低.

参考文献:

- [1] Simon N S. Nitrogen cycling between sediment and the shallow-water column in the transition zone of the Potomac River and Estuary. II. The role of wind-driven resuspension and adsorbed ammonium[J]. *Estuarine, Coastal Shelf Science*, 1989, **28**(5): 531-547.
- [2] Liu S M, Z Jing, Li D J. Phosphorus cycling in sediments of the BoHai and Yellow Seas[J]. *Estuarine, Coastal Shelf Science*, 2004, **59**(2): 209-218.
- [3] 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.
- [4] Stone M, Mudroch A. The effect of particle size, chemistry and mineralogy of river sediments on phosphate adsorption[J]. *Environmental Technology Letters*, 1989, **10**(5): 501-510.
- [5] Pacini N, Gächter R. Speciation of riverine particulate phosphorus during rain events[J]. *Biogeochemistry*, 1999, **47**(1): 87-109.
- [6] Rao J L, Berner R A. Time variations of phosphorus and sources of sediments beneath the Changjiang (Yangtze River) [J]. *Marine Geology*, 1997, **139**(1-4): 95-108.
- [7] Andrieux F, Aminot A. A two-year survey of phosphorus speciation in the sediments of the Bay of Seine (France) [J]. *Continental Shelf Research*, 1997, **17**(10): 1229-1245.
- [8] Martha S, Bianchi T S, McKee B A. Effect of seasonal sediment storage in the lower Mississippi River on the flux of reactive particulate phosphorus to the Gulf of Mexico[J]. *Limnology and Oceanography*, 2004, **49**(6): 2223-2235.
- [9] Yang S Y, Jung H S, Lim D I, *et al.* A review on the provenance discrimination of sediments in the Yellow Sea[J]. *Earth-Science Reviews*, 2003, **63**(1-2): 93-120.
- [10] 刘鹏霞. 三峡水库蓄水至 135 米后库区和长江干流各形态磷的分布特征研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2007. 12-22.
- [11] 何会军. 河流与河口颗粒物中磷的生物地球化学特征研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2009. 35-44.
- [12] Vink S, Chambers R M, Smith S V. Distribution of phosphorus in sediments from Tomales Bay, California[J]. *Marine Geology*, 1997, **139**(1-4): 157-179.
- [13] Anschutz P, Zhong S J, Sundby B. Burial efficiency of phosphorus and the geochemistry of iron in continental margin sediments[J]. *Limnology and Oceanography*, 1998, **43**(1): 53-64.
- [14] Logan T J. Mechanisms for release of sediment-bound phosphate to water and the effects of agricultural land management on fluvial transport of particulate and dissolved phosphate [J]. *Hydrobiologia*, 1982, **91-92**(1): 519-530.
- [15] 张志斌, 张学扬, 张波, 等. 南四湖微山湖区沉积物磷形态分布特征[J]. *环境科学*, 2009, **30**(5): 1346-1350.
- [16] 温婷婷, 张传松, 王丽莎, 等. 春、秋季北黄海生源要素的平面分布特征[J]. *中国海洋大学学报 (自然科学版)*, 2009, **39**(4): 789-798.
- [17] 王伟, 李安春, 徐方建, 等. 北黄海表层沉积物粒度分布特征及其沉积环境分析[J]. *海洋与湖沼*, 2009, **40**(5): 525-530.
- [18] 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.
- [19] Ruban V, López-Sánchez J F, Pardo P, *et al.* Selection and evaluation of sequential extraction procedures for the determination of phosphorus forms in lake sediment[J]. *Journal Environmental Monitoring*, 1999, **1**(1): 51-56.
- [20] 李广源. 洞庭湖水环境质量评价及水环境容量分析[D]. 南京: 河海大学, 2005. 58.
- [21] Williams J D H, Shear H, Thomas R L. Availability to *Scenedesmus quadricauda* of different forms of phosphorus in sedimentary materials from the Great Lakes[J]. *Limnology and Oceanography*, 1980, **25**(1): 1-11.
- [22] Ruttenberg K C. Development of a sequential extraction method for different forms of phosphorus in marine sediment [J]. *Limnology and Oceanography*, 1992, **37**(7): 1460-1482.
- [23] Ruttenberg K C. Diagenesis and burial of phosphorus in marine sediment; implications for the marine phosphorus budget[M]. New Haven: Yale University, 1990. 10-20.
- [24] 高爽. 北黄海叶绿素和初级生产力的时空变化特征及其影响因素[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2009. 30-51.
- [25] 赵颖, 王国秀, 章北平. 典型城内过富营养化湖泊沉积物和间隙水中各形态磷的相关性研究[J]. *长江流域资源与环境*, 2006, **15**(4): 490-494.
- [26] 杨逸萍, 胡明辉, 陈海龙, 等. 九龙江口生物可利用磷的行为与入海通量[J]. *台湾海峡*, 1998, **17**(3): 269-273.

CONTENTS

Nutrient Dynamics over the Past 100 Years and Its Restoration Baseline in Dianshan Lake	LI Xiao-ping, CHEN Xiao-hua, DONG Xu-hui, <i>et al.</i> (3301)
Possibility of Total Dissolved Solid as one of Nutrient Baselines in Inner Mongolia-Xinjiang Plateau	XI Bei-dou, ZHANG Ya-li, XU Qiu-jin (3308)
Fluorescence Discrimination Technique for Phytoplankton Based on the Wavelet Analysis	ZHANG Cui, SU Rong-guo, SONG Zhi-jie, <i>et al.</i> (3314)
Analysis of Algae Bloom and Lake Surface Bright Temperature in Chaohu Lake Based on Remote Sensing Data	ZHANG Hong, HUANG Yong, LI Kun (3323)
Case Study on Groundwater Health Risk Assessment and Remediation Strategy Based on Exposure Pathway	JIANG Lin, ZHONG Mao-sheng, JIA Xiao-yang, <i>et al.</i> (3329)
Pollution Assessment in the Intertidal Zone of Beibu Gulf Using Multi-biomarker Pollution Index	DU Xiu-ping, MENG Fan-ping, WANG Zhi-feng, <i>et al.</i> (3336)
Estimation of the Flux of Inorganic Nitrogen Flowing into the East China Sea	WU Jia-lin, FANG Qian, SHI Xiao-yong, <i>et al.</i> (3344)
Effects of Ocean Acidification on Growth, Phosphate and Nitrate Uptake of Macroalgae	YU Juan, ZHANG Yu, YANG Gui-peng, <i>et al.</i> (3352)
Forms and Distributions of Particulate Phosphorus in the Surface Sediments of North Yellow Sea	MENG Jia, YAO Qing-zhen, CHEN Hong-tao, <i>et al.</i> (3361)
Influence of Dredging on Sediment Resuspension and Phosphorus Transfer in Lake; A Simulation Study	YU Ju-hua, ZHONG Ji-cheng, ZHANG Yin-long, <i>et al.</i> (3368)
Transportation and Sources of the Suspended Particle in a Karst Spring During a Storm Event	YANG Ping-heng, LIU Zi-qi, HE Qiu-fang (3376)
Comparison of Trophic Status Analysis of the Daning River Within the Three Gorges Reservoir Before and After Experimental Impoundment	ZHANG Jia-lei, ZHENG Bing-hui, LIU Lu-san, <i>et al.</i> (3382)
Nitrogen and Phosphorus Loss in Different Land Use Types and Its Response to Environmental Factors in the Three Gorges Reservoir Area	ZENG Li-xiong, HUANG Zhi-lin, XIAO Wen-fa, <i>et al.</i> (3390)
Research on Stormwater Runoff Quality of Mountain City by Source Area Monitoring	LI Li-qing, SHAN Bao-qing, ZHAO Jian-wei, <i>et al.</i> (3397)
Occurrence Form and Ecological Effect of Selenium in Soil and Surface Water of Kailuan Coalfield of Tangshan	ZHANG Xiu-zhi, MA Zhong-she, WANG Yin-nan, <i>et al.</i> (3404)
Distribution of Arsenic in Surface Water in Tibet	WANG Ming-guo, LI She-hong, WANG Hui, <i>et al.</i> (3411)
Spatial and Temporal Distribution of Trace Elements in Surface Water in the Xilin River Basin	XUE Li-yang, WU Jin-kui, ZHANG Ming-quan, <i>et al.</i> (3417)
Concentration Characteristics and Ecological Risk of Persistent Organic Pollutants in the Surface Sediments of Tianjin Coastal Area	LU Xiao-xia, ZHANG Shu, CHEN Chao-qi, <i>et al.</i> (3426)
Distribution, Sources and Ecological Risk Assessment of Polychlorinated Biphenyl in Sediments from Songhua River Basin	NIE Hai-feng, ZHAO Chuan-dong, LIU Ying-han, <i>et al.</i> (3434)
Distributions of Matrix-Bound Phosphine in Surface Sediments of the Yangtze Estuary	LI Tao, HOU Li-jun, LIU Min, <i>et al.</i> (3443)
Geochemical Characteristics of Nitrogen in Core Sediments from Sishili Bay, China	YANG Yu-wei, GAO Xue-lu, LI Pei-miao (3449)
Composition of <i>n</i> -Alkanes in Soils of the Yellow River Estuary Wetlands and Their Potential as Organic Matter Source Indicators	YAO Peng, YIN Hong-zhen, YAO Qing-zhen, <i>et al.</i> (3457)
Study on the Degradation and Transformation of Nonylphenol in Water Containing Algae	PENG Zhang-e, FENG Jin-mei, HE Shu-ying, <i>et al.</i> (3466)
Degradation of Orange IV Dye Solution Catalyzed by Fe(NO ₃) ₃ ·(NH ₄) ₂ S ₂ O ₈ Modified GAC in the Presence of H ₂ O ₂	ZHANG Ying-jie, XU Shu-fen, LIAO Xia, <i>et al.</i> (3473)
Synthesis, Characterization and Electrocatalytic Performance of Pd/CMK-3 for Formic Acid Oxidation	HUAN Zhong-ke, ZONG En-min, WEI Dan, <i>et al.</i> (3479)
Research of Controlling Condition for Aeration Stabilization Pond Dealing with Sanitary Waste of Countryside	LI Huai-zheng, YAO Shu-jun, XU Zu-xin, <i>et al.</i> (3484)
Pilot-Scale Study on Treatment of Municipal Sewage by Moving-Bed Biofilm Reactor with the Hydrophobically Modified Polyurethane Cubes as Biofilm Carriers	WANG Yu-xiao, KONG Xiu-qin, FENG Quan, <i>et al.</i> (3489)
Variation Characteristics of Relative Molecular Mass of Different Fractions of Dissolved Organic Matter from Landfill Leachate During Photocatalytic Degradation	JIA Chen-zhong, WANG Yan-xin, ZHANG Cai-xiang (3495)
Mechanism of Nitrogen Removal by Partial Nitrification-Denitrification Biological Filter	SUN Ying-xue, XU Dong, TIAN Yuan, <i>et al.</i> (3501)
Performance Stability of CANON Reactor and Temperature Impact	FU Kun-ming, ZHANG Jie, CAO Xiang-sheng, <i>et al.</i> (3507)
Denitrifying Phosphorus Removal in a Modified University of Cape Town (MUCT) Process Treating Domestic Wastewater Under Nitrification and Nitritation	ZENG Wei, WANG Xiang-dong, ZHANG Li-dong, <i>et al.</i> (3513)
Study on the Stratification Components of Extracellular Polymeric Substances (EPS) in Activated Sludge and Their Variation Characteristics in Physicochemical Properties	YUAN Dong-qin, WANG Yi-li (3522)
Influence of Organic Loading Rate on the Start-up of a Sequencing Airlift Aerobic Granular Reactor	LIU Meng-yuan, ZHOU Dan-dan, GAO Lin-lin, <i>et al.</i> (3529)
Degradation Kinetics of Naphthalene by Anaerobic Sludge and Analysis of the Bacterial Biodiversity	CAO Xin-kai, YANG Qi, HAO Chun-bo (3535)
Sorption of 17 β -estradiol to Soils and Sediment and Influence of Pig Manure DOM	ZHANG Feng-song, LI Yan-xia, HUANG Ze-chun, <i>et al.</i> (3542)
Sorption Isotherms and Sorption Thermodynamics of Faecal Sterols on Offshore Sediment	ZHANG Xiao-lei, XUE Wen-ping, XU Heng-zhen, <i>et al.</i> (3547)
Research on the Characteristic of Toluene Migration and Distribution in Fluvio-Aquic Soil and Its Simulation Using STOMP Model	HAN Chun-mei, RAN Juan, ZHANG Hui, <i>et al.</i> (3554)
Predicting the Cadmium Bioavailability in the Soil of Sugarcane Field Based on the Diffusive Gradients in Thin Films with Binding Phase of Sodium Polyacrylate	WANG Fang-li, SONG Ning-ning, ZHAO Yu-jie, <i>et al.</i> (3562)
<i>In Situ</i> Immobilization of Pb and Cd in Orchard Soil Using Soil Ameliorants	TANG Min, ZHANG Jin-zhong, ZHANG Dan, <i>et al.</i> (3569)
Health Assessment of Heavy Metals in Roadside Soils at Different Operation Time; A Case Study of Zhengzhou-Shangqiu Section Along the Lianyungang-Horgas Highway	GU Lei, TONG Zhi-qi, SONG Bo, <i>et al.</i> (3577)
Amelioration Effects of Wastewater Sludge Biochars on Red Soil Acidity and Their Environmental Risk	LU Zai-liang, LI Jiu-yu, JIANG Jun, <i>et al.</i> (3585)
Effect of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons on the Vertical Distribution of Denitrifying Genes in River Sediments	WU Yan-yang, WU Qun-he, HUANG Shan, <i>et al.</i> (3592)
Role of Layered Double Hydroxide (LDH) in the Protection of Herring Testis DNA from Heavy Metals	TANG Yi-ni, WU Ping-xiao, ZHU Neng-wu (3598)
Mineralogical Characteristics of Biogenic Schwertmannite Amended with Different Pretreatment Methods and the Effects on As(Ⅲ) Absorption	LIANG Jian-ru, LI Zhe-ying, LIU Fen-wu, <i>et al.</i> (3606)
Mechanism of Heavy-Metal Tolerance in <i>Pseudomonas aeruginosa</i> ZGKD2	ZHANG Yu-xin, WANG Jiao, CHAI Tuan-yao, <i>et al.</i> (3613)
Isolation, Degradation Characteristics of a 1,2-Dichloroethane-Degrading Strain	WANG Xiao-chun, CHEN Dong-zhi, JIN Xiao-jun, <i>et al.</i> (3620)
Isolation and Degradation Characteristics of PCB-degrading Strain	SHI Shun-yan, FENG Liu, GONG Ji (3627)
Preliminary Study on the Changes of Bacterial Community Structure in Qingcaosha Reservoir During Water Storage Period	PENG Qing, XIE Bing, YUAN Qi, <i>et al.</i> (3634)
N ₂ O Exchange Fluxes from Wheat-Maize Crop Rotation System in the North China Plain	PEI Shu-wei, ZHANG Yuan-yuan, LIU Jun-feng, <i>et al.</i> (3641)
Analysis of the Impact of Two Typical Air Pollution Events on the Air Quality of Nanjing	WANG Fei, ZHU Bin, KANG Han-qing, <i>et al.</i> (3647)
Pollution Characteristics of VOCs in Ambient Air of Ji'nan City in Summer	LIU Ze-chang, ZHANG Fan, HOU Lu-jian, <i>et al.</i> (3656)
Effects and Mechanism of Catalytic Decomposition of Ozone by Activated Carbon	LIU Hai-long, ZHANG Zhi-ye, ZHANG Zhong-ming, <i>et al.</i> (3662)
Effect of Elevated O ₃ on the Arbuscular Mycorrhizal (AM) Structure and Glomalin Production in Two Genotypes of Snap Bean	WANG Peng-teng, DIAO Xiao-jun, WANG Shu-guang (3667)
Effect of Exogenous Calcium on the Activities of Antioxidative Protective Enzymes in Ectomycorrhizal Fungi Under Aluminum Stress	WANG Ming-xia, HUANG Jian-guo, YUAN Ling, <i>et al.</i> (3675)
Mercury Pollution in Cricket in Different Biotopes Suffering from Pollution by Zinc Smelting	ZHENG Dong-mei, LI Xin-xin, LUO Qing (3680)

《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10月15日 33卷 第10期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 33 No. 10 Oct. 15, 2012

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

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 70.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行