ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

# 自念式式员 Acta Ecologica Sinica



第33卷 第11期 Vol.33 No.11 2013

中国生态学学会 主办 中国科学院生态环境研究中心 *科 译 出 版 社* 出版



## 生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

## 第 33 卷 第 11 期 2013 年 6 月 (半月刊)

目 次

#### 前沿理论与学科综述

新一代 Landsat 系列卫星: Landsat 8 遥感影像新增特征及其生态环境意义 徐涵秋,唐 菲(3249)
两种自然保护区设计方法——数学建模和计算机模拟
家域研究进展
浅水湖泊生态系统稳态转换的阈值判定方法 李玉照,刘 永,赵 磊,等(3280)
辐射传输模型多尺度反演植被理化参数研究进展 肖艳芳,周德民,赵文吉(3291)
微囊藻毒素对陆生植物的污染途径及累积研究进展 靳红梅,常志州 (3298)
个体与基础生态
年龄、性别及季节因素对千岛湖岛屿社鼠最大活动距离的影响 叶 彬,沈良良,鲍毅新,等(3311)
寄主大小及寄生顺序对蝇蛹佣小蜂寄生策略的影响 詹月平,周 敏,贺 张,等 (3318)
两种苹果砧木根系水力结构及其 PV 曲线水分参数对干旱胁迫的响应
三种根系分泌脂肪酸对花生生长和土壤酶活性的影响
种群、群落和生态系统
象山港春季网采浮游植物的分布特征及其影响因素 江志兵,朱旭宇,高 瑜,等(3340)
洞头海域网采浮游植物的月际变化 (3351) 朱旭宇,黄 伟,曾江宁,等 (3351)
狗牙根与牛鞭草在三峡库区消落带水淹结束后的抗氧化酶活力 李兆佳,熊高明,邓龙强,等(3362)
三亚岩相潮间带底栖海藻群落结构及其季节变化
长期围封对不同放牧强度下草地植物和 AM 真菌群落恢复的影响 周文萍,向 丹,胡亚军,等 (3383)
北京松山自然保护区森林群落物种多样性及其神经网络预测 苏日古嘎,张金屯,王永霞 (3394)
藏北高寒草地生态补偿机制与方案
辽东山区次生林生态系统不同林型树干茎流的理化性质 徐天乐,朱教君,于立忠,等 (3415)
施氮对亚热带樟树林土壤呼吸的影响 郑 威,闫文德,王光军,等(3425)
人工高效经营雷竹林 CO2 通量估算及季节变化特征 陈云飞,江 洪,周国模,等 (3434)
新疆典型荒漠区单食性天花吉丁虫磷元素含量对环境的响应 王 晶,吕昭智,宋 菁 (3445)
双斑长跗萤叶甲越冬卵在玉米田的空间分布型 张 聪,葛 星,赵 磊,等(3452)
舟山群岛四个养殖獐种群遗传多样性和遗传结构 林杰君,鲍毅新,刘 军,等 (3460)
景观、区域和全球生态
乡镇尺度金塔绿洲时空格局变化
合并与不合并:两个相似性聚类分析方法比较

#### 资源与产业生态

#### 研究简报

青藏高原高寒草原区工程迹地面积对其恢复植物群落特征的影响 ……… 毛 亮,周 杰,郭正刚(3547) 黄土山地苹果树树体不同方位液流速率分析……… 孟秦倩,王 健,张青峰,等(3555) 期刊基本参数:CN 11-2031/Q\*1981\*m\*16\*314\*zh\*P\*¥90.00\*1510\*33\*2013-06

#### \*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*

**封面图说:**清晨的天山马鹿群——家域是动物行为学和保护生物学的重要概念之一,它在动物对资源环境的适应与选择,种群 密度及社会关系等生态学过程研究中有着重要的作用。马鹿属于北方森林草原型动物,在选择生境的各种要素中, 隐蔽条件、水源和食物的丰富度是最重要的指标。野生天山马鹿是中国的特产亚种,主要分布在北天山深山海拔 1500—3800m 地带的森林草原中,在高山至谷地之间不同高度的坡面上,马鹿按季节、昼夜变化的不同进行采食。

彩图及图说提供:陈建伟教授 北京林业大学 E-mail: cites. chenjw@163. com

#### DOI: 10.5846/stxb201203100324

张小勇,杨茜,孙耀,黄建生.黄东海陆架区沉积物中磷的形态分布及生物可利用性.生态学报,2013,33(11):3509-3519. Zhang X Y, Yang Q, Sun Y, Huang J S. The distribution of phosphorus forms and bioavailability in sediments from Huang Dong Hai continental shelf. Acta Ecologica Sinica,2013,33(11):3509-3519.

# 黄东海陆架区沉积物中磷的形态分布及 生物可利用性

### 张小勇<sup>1,2</sup>,杨 茜<sup>1</sup>,孙 耀<sup>1,\*</sup>,黄建生<sup>1</sup>

(1. 中国水产科学研究院黄海水产研究所,青岛 266071;2. 中国海洋大学海洋污染生态化学实验室,青岛 266003)

**摘要:**采用1992 年 Ruttenberg 连续提取法(SEDEX)将黄东海陆架区沉积物中的磷分为交换态磷(Ex-P),Fe 结合态磷(Fe-P), 自生磷(Au-P),碎屑磷(De-P),有机磷(Or-P),分析了各形态磷的平面和垂直分布特征;利用沉积物年代序列测定的结果,探 讨了柱状沉积物中不同形态磷的含量变化,并进一步分析了该区域磷形态的生物可利用性。结果表明,黄东海陆架区表层沉积 物各形态磷平均含量为:Au-P(140.72 μg/g)>De-P(59.23 μg/g)>Or-P(32.69 μg/g)>Fe-P(29.91 μg/g)>Ex-P(5.92 μg/g);各 形态磷在沉积时间序列上分布不同,反映了不同时期人类活动和气候环境等因子对磷埋藏量影响的不同,其中 Au-P 在长江口 H1-18 站位含量比南黄海中部 3 个站位要低得多;调查区表层潜在生物有效磷为 13.55% 左右,仅仅占沉积磷中的一小部分。 关键词:黄东海陆架区;沉积物;磷形态;年代序列;生物可利用性

## The distribution of phosphorus forms and bioavailability in sediments from Huang Dong Hai continental shelf

ZHANG Xiaoyong<sup>1,2</sup>, YANG Qian<sup>1</sup>, SUN Yao<sup>1,\*</sup>, HUANG Jiansheng<sup>1</sup>

1 Yellow Sea Fisheries Research Institute of Chinese Academy of Fishery Science, Qingdao 266071, China

2 Laboratory of Marine Pollution Ecological Chemistry, Ocean University of China, Qingdao 266003, China

**Abstract**: Phosphorus is the most important limiting factor in nutrient cycling. It is also the key element controlling primary production in aquatic environments. Sediments act as both a sink and a source of phosphorus because of continuous transport of phosphorus species across the sediment-water interface. Phosphorus is intimately involved in both the terrestrial and marine biogeochemical cycles. However, not all fractions of phosphorus in sediments are released to the overlying water. Therefore the effects of phosphorus in sediments in promoting aquatic environment eutrophication can be more efficiently evaluated by studying phosphorus fractions, rather than total phosphorus (TP). In this study, the forms and bioavailability of phosphorus in the sediment were analyzed by means of SEDEX (Ruttenberg KC) to determine the geochemical characteristics of phosphorus in the Huang Dong Hai continental shelf. According to this method, there are five types of phosphorus : iron-phosphorus (Fe-P), organic-phosphorus (Or-P), detritus-phosphorus (De-P), exchangeable-phosphorus (Ex-P), and autologous-phosphorus (Au-P). They differ from each other in occurrence, origin and geochemical features. The horizontal and vertical distribution of six forms is presented. The profiles of age deposition were also investigated to reveal changes in the contents of the different phosphorus forms over about two hundred years. The rank order of the contents of phosphorus fractions in the surface sediment was Au-P (140.72  $\mu g/g$ ) > De-P (59.23  $\mu g/g$ ) > Or-P (32.69  $\mu g/g$ ) > Fe-P (29.91  $\mu g/g$ ) > Ex-P (5.92  $\mu g/g$ ). The contents of Au-P and Or-P decreased from offshore

收稿日期:2012-03-10; 修订日期:2013-02-21

基金项目:国家重点基础研究发展计划项目(2006CB400007);中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金(20603022013003)

<sup>\*</sup> 通讯作者 Corresponding author. E-mail: sunyao@ysfri. ac. cn

to the open sea, and values for De-P were uniformly distributed over the whole sea area. High contents of TP and Ex-P were present in the Yangtze estuary area. TP, Fe-P, Or-P, De-P, Au-P and Ex-P contents in the sediments were in the range 310. 23-941. 78µg/g, 5. 46-58. 11µg/g, 4. 87-80. 57µg/g, 12. 68-282. 15µg/g, 31. 86-271. 38µg/g, and 1.32-20.95 µg/g, respectively. The vertical distribution of the different fractions of phosphorus at four sampling stations varied. The distribution of different phosphorus fractions in different sediments reflected changes in the early diagenesis of phosphorus. The concentration of Au-P in H1-18 was much lower than at the other three stations. In the study area, the relative contributions of Fe-P, Ex-P, and Or-P were 5.96%, 1.18%, and 6.51% of TP, respectively. Fe-P is considered to be the most labile fraction of phosphorus fraction in the sediments. It will change when the oxidation-reduction environment changes in the surface sediments. Fe-P can be used to determine the source of phosphorus and indicate the extent of environmental pollution. Or-P can be released during the decomposition of organic matter in the early diagenetic process, and even convert to other forms of phosphorus. When organic matter degrades, the phosphorus is released into the overlying water. Consequently, the degradation of Or-P is an important process in its influencing of the contents of phosphorus fractions in sediments. Ex-P is influenced by particle size of the sediments and released into the overlying water mainly through ion exchange. Hence it is important to understand under what conditions phosphorus can be changed from one fraction into another and phosphorus in sediments can be released into the overlying water. Fe-P, Ex-P, and Or-P are biologically available fractions of phosphorus in our study area. The results showed that potentially biological available phosphorus accounted for 13.55% of the total phosphorus.

Key Words: Huang Dong Hai continental shelf; sediment; phosphorus forms; chronosequence; bioavailability

生源物质的循环一直是全球生物地球化学过程研究的重要内容,磷是维持海洋生物生命活动的重要元素 之一,其含量和分布直接影响着海区初级生产力及浮游植物的总量。近海沉积物是海洋水体中磷的重要源 和汇,沉积物中生物可获得磷影响水体的营养状态和初级生产力,与沉积物-水界面磷的交换息息相关。通过 研究沉积物中磷的形态分布,有助于理解沉积物中磷的循环过程及再生机制,评价沉积物中磷的生物可利用 性,进一步理解调查区域沉积物中磷地球化学行为特征及海区环境变化。郑爱榕,沈海维等[1]以沉积物为唯 一磷源,估算了藻类对沉积物中磷的利用量,探讨了沉积物磷的生物可利用性。Nelson<sup>[2]</sup>根据沉积物中铁结 合磷含量与盐度的相关性推断古海水盐度。许金树,李亮哥<sup>[3]</sup>指出钙结合态磷(Ca-P)在柱状沉积物中的含 量与水温、酸碱度等微环境因素密切相关,钙结合态磷(Al-P)可作为沉积物质量的重要指标。Zhu 等<sup>[4]</sup>认为 表层沉积物中的交换磷可作为湖泊污染的一个有效指标。戴纪翠等[5]在研究胶州湾柱状沉积物中不同粒级 中磷的赋存形态时,得出潜在的生物可利用磷的含量随着粒度的变细,其所占的比例也逐渐增加。 Sondergarrd<sup>[6]</sup>指出 pH 值的增加会加大氢氧根和磷酸根离子的竞争,因此削弱 Fe<sup>3+</sup>与磷酸盐的结合程度,从而 导致沉积物中磷酸盐进入水体中。Frankowski 等<sup>[7]</sup>在对波罗的海南部底部柱状沉积物的磷研究表明沉积物 中磷的含量受沉积类型,有机质含量,沉积物的化学组成,底部溶氧量等相关因素一系列因素的影响。 Hisashi<sup>[8]</sup>指出表层沉积物中 Fe-P 的含量可以指示磷的来源和环境污染程度。然而目前对湖泊沉积物中磷形 态开展的研究比较多,对近海,河口沉积物研究的较少,对整个黄东海沉积物中不同形态磷的研究尤其是沉积 物的年代测定鲜有报道。因此,对黄东海沉积物中的磷开展系统深入的研究,是阐明黄东海磷生物地球化学 循环过程所必需的。鉴于此本文在对黄东海陆架区进行大面积调查的基础上,以 2006 年春夏季航次采集的 沉积物样品为研究对象,采用 1992 年 Ruttenberg<sup>[9]</sup> 连续提取法(SEDEX)将沉积物中的磷分为交换态磷 exchangeable-phosphorus(Ex-P),铁结合态磷 iron-phosphorus(Fe-P),自生磷 autologous-phosphorus(Au-P),碎 屑磷 detritus-phosphorus(De-P),有机磷 organic-phosphorus(Or-P),系统地研究了各形态磷的分布特征及生物 可利用性。

#### 1 实验部分

#### 1.1 调查方法与站位设置

本次调查的站位分布于南黄海中部海域和长江口 38°N 及闽浙沿岸(图1),于 2006 年春夏季进行了调查。使 用箱式采样器采集沉积物样品。将沉积物样品以2 cm 间隔分层切割后,于-20 ℃冷冻保存,以0—2cm分层样 36° 作为表层沉积物样。取分层样品在 60 ℃下恒温烘干至 恒重,用电动研钵仪研磨,过 60 目筛,待测定。

#### 1.2 磷的形态测定

总磷(TP)的测定方法参照<sup>[10]</sup>:称取烘干磨好的沉 积物样品 0.05 g 左右,加入 50 mL 水后再加 3 mL K<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>8</sub>溶液,盖好盖子。在压热器中压热 30 min,冷 却,离心,取上层清液。加入 1.5 mL 抗坏血酸溶液混合 半分钟后加入 1.5 mL 混合试剂。混匀,以空白试剂作 参比,用 5 cm 比色皿在 820 nm 波长下测定吸光度。沉 积物中不同形态磷含量测定方法参照 Ruttenberg<sup>[9]</sup>化 学连续提取法。

#### 1.3 沉积年代序列测定

样品采用<sup>210</sup>Pb 测年。选取南黄海中部 10594, 10694,12694 等3个站位和长江口 H1-18 等4 个站位 的柱状样,每个柱样分别取 10 个样品进行测定。以取 样时间 2006 年作为测年零点,利用沉积速率得到柱状 样年龄。

#### 2 结果与讨论

#### 2.1 年代测定结果

由图 2 可知,南黄海 10594,10694 和 12694 站位<sup>210</sup> Pb 放射性活度均呈现了"两段分布模式"。<sup>210</sup> Pb 的放射性活度随岩芯深度明显衰减,衰减到一定深度其放射性活度基本达到恒定值(<sup>210</sup> Pb 的分布呈垂直线),上部斜线段为<sup>210</sup> Pb 的衰变段,下部垂直线为与<sup>210</sup> Pb 母体<sup>226</sup> Ra 的平衡段或本底段。反映采样海区沉积环境较稳定。不同的是,3 个岩芯中<sup>210</sup> Pb "斜线"的斜率及"垂线"开始的深度有所不同。这种分布与李凤业等<sup>[11]</sup>,赵一阳等<sup>[12]</sup>对黄渤海和南黄海的沉积速率研究结果一致。经过计算得到 10594,10694 和 12694 站位的沉积速率分别为 0.350,0.143,0.153 cm/a,根据各站位柱样长度和<sup>210</sup> Pb 的衰变深度,对 3 站位定年,底部年龄分别约为 150,200,230 a。而长江口 H1-18 站<sup>210</sup> Pb 的分布模式属于典型的"三段模式"。在 0—7cm 段,<sup>210</sup> Pb 随深度衰减没有规律,可作为混合段。岩心 7—23 cm 段,<sup>210</sup> Pb 随深度呈指数衰减,并呈现出较有规律的分布特征,该层是<sup>210</sup> Pb 的衰变段。岩心 23—30 cm 段,<sup>210</sup> Pb 的放射性活度基本上恒定,即为<sup>210</sup> Pb 的衰变平衡段。经计算该站位沉积速率为 0.225 cm/a,柱样长度大约 30 cm,因此该站位柱状样约有 130a 的沉积历史。 2.2 沉积物中各磷形态的平面分布特征

从图 3 可以看出,各形态磷分布差异明显,首先是平均含量差异较大,表层沉积物中自生磷(Au-P)含量 最大,平均值为140.72 μg/g,最大值出现在南黄海中部12694站,交换磷(Ex-P)平均含量最小为5.92 μg/g, 最小值出现在闽浙沿岸 h1—24站;其次是各形态磷存在明显的平面分布类型差异,总体上看 Au-P 和 Or-P 呈 现由近岸向远海逐渐减小的特点,这与陆源输入对沉积物中 Or-P 的含量影响较大有关<sup>[13]</sup>。Fe-P 在 28.13° N,122.97°E 有高值,原因可能是长江冲淡水降低了盐度,导致该区 Fe-P 含量较高<sup>[14]</sup>。De-P 在整个调查海区





图 2 10594,12694,10694 和 H1-18<sup>210</sup> Pb 垂直分布





图 3 黄东海陆架区各磷形态的平面分布(等值线单位 μg/g)



分布较均匀。TP 的高值区出现在长江口海域附近,这可能与长江径流输入带来大量陆源有机质碎屑及营养 盐在此沉降有关<sup>[14]</sup>, Ex-P 分布较复杂, 未呈现明显的规律性。

各形态磷的主要地球化学特征如下:Fe-P 的平均值为 29.91 μg/g,含量在 5.46—58.11 μg/g 之间,平均含量闽浙沿岸>长江口>南黄海中部,占 TP 的 5.96%;Ex-P 的平均值为 5.92 μg/g,含量在 1.32—20.95 μg/g 之间,平均含量长江口>闽浙沿岸>南黄海中部,占 TP 的 1.17%;Au-P 的平均值为 140.72 μg/g,含量在 31.86—271.38 μg/g 之间,平均含量长江口>闽浙沿岸>黄海中部,占 TP 的 28.01%;De-P 的平均值为 59.23 μg/g,含量在 12.68—282.15 μg/g 之间,平均含量为长江口>闽浙沿岸>南黄海中部,占 TP 的 11.79%;Or-P 的平均值为 32.69 μg/g,含量在 4.87—80.57 μg/g 之间,平均含量闽浙沿岸>南黄海中部>长江口,占 TP 的 6.51%;TP 平均值为 502.25 μg/g,含量在 310.23—941.78 μg/g 之间,平均含量长江口>闽浙沿岸>南黄海中部>长江口>闽浙沿岸>南黄海中部。

各形态磷呈现明显的地域差异,这与沉积物来源、沉积环境、矿物组成、气候条件以及人为因素有关。输入的磷经过复杂的生物地球化学过程后沉淀进入沉积物中,其含量受沉积物性质、水动力条件、生化作用等因素的影响<sup>[15]</sup>。

2.3 沉积物中各形态磷的垂直分布特征

研究沉积物中各形态磷的含量随深度变化的规律,可反映环境变化对磷累积过程的影响,揭示沉积物中 有机质的早期成岩作用对其循环的贡献<sup>[14]</sup>。南黄海中部和长江口4个站位沉积物中各形态磷的垂直分布不 同(图4),其主要的地球化学特征如下所述。

#### 2.3.1 Ex-P

4 个站位沉积物中 Ex-P 含量差异较大,在各站位的平均含量(μg/g)为:10694 (47.22)>10594(28.08)> 12694(16.27)>H1-18(6.02)。南黄海中部 10594、10694 和 12694 柱状样中的 Ex-P 的含量呈自上而下逐渐 降低的趋势,原因可能是表层沉积物有机磷的强烈矿化降解,向孔隙水中提供了较多的溶解磷酸盐,使相对较 多的磷酸根被沉积物颗粒吸附,随着沉积深度的加深,有机质降解作用减弱,孔隙水中磷酸盐减少,从而导致 被吸附的 Ex-P 含量减少<sup>[16]</sup>。长江口 H1-18 处 Ex-P 的含量上下波动较大,整体上呈现表层比底层低的特点, Ex-P 的平均含量远低于黄海中部 3 个站位,这可能与各站位所处海区的环境不同有关。南黄海中部属现代 沉积环境,水动力条件条件相对平静,造成细土在此集中,细颗粒沉积物中吸附较高含量的 Ex-P,而长江口海 区水动力活跃,沉积物颗粒较粗。Ex-P 受沉积粒度影响较大,沉积物颗粒较粗,吸附 Ex-P 的含量较低。另外 Ex-P 较活跃,最易释放进入上覆水体并很容易被水生生物吸收利用。上覆水体的可溶性磷酸盐和沉积物中 的 Ex-P 处于动态平衡,当环境条件(如氧化还原电位、温度、pH 值、水动力条件等)变化或受到扰动(包括人 为扰动和生物扰动)时,沉积物中的 Ex-P 很容易进入上覆水体中。由于长江口处于海陆过渡带,具有环境脆 弱性,环境因子较易发生改变,从而诱发沉积物中 Ex-P 的释放<sup>[17]</sup>。

#### 2.3.2 Fe-P

Fe-P 在 4 个柱样表层至 20 cm 处的平均含量高于沉积柱底部的含量。这在一定程度上反映了沉积物在 埋藏过程中早期成岩作用对铁磷结合态的改造,在较深部位的沉积层,有机质降解消耗溶解氧,使环境变得相 对还原,导致铁磷矿物还原溶解,释放出的磷酸盐通过孔隙水向上迁移,在氧化还原电位较高的表层沉积物中 形成矿物而沉淀,表层沉积物对磷酸根迁移的"屏蔽效应",造成铁林矿物在沉积物表层富集<sup>[18]</sup>。Jensen 等; schuffert<sup>[19-20]</sup>也指出在柱状沉积物中 Fe-P 含量在表层有高值,随深度增加含量减少的变化趋势普遍存在。 Fe-P 在 10594,12694 和 H1-18 柱样中上下含量变化不大,但在 10694 变化幅度较大。4 个站位中 Fe-P 的平 均含量(μg/g)为:12694(7.00) > 10694 (6.09) >H1-18(2.47)>10594(1.91)。

#### 2.3.3 Au-P

Au-P 在 10594 站位中含量自上而下变化较稳定,在 10694,12694 和在 H1-18 站位随深度增加其含量逐渐增加,原因可能是 Au-P 来自沉积物早期成岩过程中内生过程形成或生物成因的钙结合态磷,表层生物呼

吸作用产生的 CO<sub>2</sub> 对 Au-P 有较强的溶出作用<sup>[21-22]</sup>。微生物大多生存在表层,次表层以下,沉积作用和微生物数量随深度增加而减少,Au-P 得以较好保存。各站位中 Au-P 的平均含量(μg/g)为:10694 (315.52)> 12694(314.08)>10594 (210.93)> H1-18(40.61)。

2.3.4 De -P

De-P 主要是来源于流域内风化侵蚀产物中磷灰石矿物晶屑等<sup>[23]</sup>,可以反映流域内侵蚀速率的大小及侵 蚀程度的强弱,不受海洋自生的生源颗粒的影响,是沉积物中较惰性的磷组分,通常被认为是生物难利用性 磷。De-P 在 10594 和 10694 柱样表层至 20 cm 处较稳定,在 12694 柱样表层至 20 cm 处变化比较复杂,20 cm 以下至取样底层含量较稳定。H1-18 中 De-P 自上而下含量逐渐降低,原因可能是随深度增加 De-P 的矿化作 用加强其含量逐渐降低。从图中可以看出,沉积物中 De-P 和 Au-P 随深度的变化趋势是相反的,沉积物中 De-P 的含量与沉积环境及间隙水中磷酸根(PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>)含量有关。4 个站位 De-P 的平均含量(μg/g)为:10694 (111.90)>12694 (77.25)>10594(68.47) >H1-18(47.76)。

2.3.5 Or-P

Or-P 在南黄海中部 3 个柱样中均呈现自上而下减小的趋势,在整个 H1-18 柱样中含量较稳定。各站位 Or-P 的平均含量(μg/g)为:10694(88.80)>12694(40.44)>10594(39.41)>H1-18 (9.99)。Or-P 可分为难 降解性和可降解性有机磷<sup>[18]</sup>。难降解性有机磷主要来源陆源物质的排放,其含量在柱状沉积物中基本保持 不变;可降解性有机磷由死亡的海洋浮游生物组成,在早期成岩过程中随有机质的分解而释放,甚至向其它结 合态磷转化<sup>[24]</sup>。其含量随深度增加而迅速降低。这与本次调查的 4 个站位中 Or-P 的含量变化一致。在沉积 物表层氧化还原界面上浮游生物的遗体被微生物分解转化成 Or-P,使表层 Or-P 含量较高,并且迅速降低;在 深层,可能是由于沉积作用和微生物活动减少,使 Or-P 含量相对稳定<sup>[25]</sup>。除此之外, Or-P 在沉积物中的含 量还受多种因素综合控制,陆源输入的影响也是主要原因之一。

#### 2.3.6 TP

TP 在不同站位沉积物中的含量差别不大,4 个站位中的平均含量(μg/g)为:10694 (550.82)>H1-18 (500.64)>12694(445.25)>10594(440.53)。反映了不同的沉积物来源对沉积物中元素含量的影响。TP 在 4 个柱样中的含量从表层到取样的底层变化不大。表明沉积物对磷的保存效率较高,即颗粒物物中的磷沉降 到沉积物-海水界面后,大部分在一定时间内不能再参与循环,成为相对稳定的惰性态。

对4个站位各形态磷的垂直分布分析可以看出不同站位沉积物中各形态磷在垂向分布上不同,反映了不同沉积环境早期成岩作用过程的复杂性,及不同形态磷形成机理的不同。对其研究能给出柱状沉积物早期成岩作的重要信息。柱状沉积物中不同形态磷的分布主要受到沉积物的氧化还原环境、有机质的含量、水动力条件及生物扰动的影响。另外,沉积物粒度与磷形态的关系沉积物的粒度结构从很大程度上影响着沉积物中各种化学元素的含量与分布,从而进一步影响着沉积物的区域地球化学特征和生态环境。对东黄海陆架区柱状沉积物中磷的不同形态的分析得出,长江口附近 Ex-P 的含量较南黄海中部要低得多,原因可能是南黄海中部属现代沉积环境,水动力条件条件相对平静,造成细土在此集中,细颗粒沉积物中吸附较高含量的 Ex-P,而长江口海区水动力活跃,沉积物颗粒较粗。Ex-P 受沉积粒度影响较大,沉积物颗粒较粗,吸附 Ex-P 的含量较低。另外受长江每年输入大量泥沙的稀释作用影响,H1-18 站位沉积物中 Or-P 和 De-P 的平均含量明显低于南黄海中部3 个站位。

#### 2.4 沉积剖面中可转化态磷的年际分布特征

根据 Pb<sup>210</sup> 的测定结果,各形态磷与沉积年代的对应关系如图 5 所示。具体到各站位而言:10594 站位位 于高营养盐的南黄海沿岸流海域。20 世纪之前,TP, De-P 和 Ex-P 3 种形态含量变化较稳定,此时期正处于 中国第一次工业革命之前,该海域受人类活动影响较小。20 世纪之后 Or-P 和 Ex-P 呈波动增长的趋势, Fe-P 含量明显高于 20 世纪之前,原因可能是此站位受陆源影响较大,进入 20 世纪以来人类活动加剧向海洋输入 了更多的污染物,而 Fe-P 在沉积物中的含量可以作为指示海洋环境污染状况<sup>[8]</sup>;10694 站位位于南黄海北



图 4 站位 10594,10694,12694 和 H1-18 柱状样各磷形态的的垂直分布 Fig. 4 The verticall distribution of phophorus froms in 10594,12694,10694 and H1-18 cores

部。TP和 Or-P在整个沉积时间序列上变化趋势相似。Ex-P在1950年之前含量波动不大,1950年之后含量





急剧上升。De-P, Au-P和Fe-P在整个时间序列上含量变化没有明显的规律性;12694站位位于南黄海东北部。Or-P和De-P, TP和Au-P变化趋势较为相似。Ex-P在1950之后含量急剧上升。从图中可以看出,该站位各形态磷大多在20世纪60—70年代出现了整个沉积柱的最大值;H1-18站位位于长江口附近,该地区沉

积物属于黏土质粉沙,沉积物粒度较大,同时陆源的稀释作用使 TP 和 Or-P 自 20 世纪以来含量逐渐减少。各 形态磷在 1940 年以前含量波动较大。

由图 5 可看出,自 1960 年以来,Or-P 和 TP 在南黄海中部 10594 和 10694 站中含量呈波动增加的特点, 这与我国工业发展进程不无关系,60 年代以前我国还未进入工业化时期,人类活动的影响还较小,赤潮的危 害不显著,而在 60 年代至 80 年代中期我国正处于全面工业建设时期,人类活动大大增加了陆源物质和营养 元素向海洋的输入。Au-P 在 4 个柱样中自 20 世纪 70 年代以来,含量呈下降趋势,这可能与 1975 年曾出现 过一次大规模的厄尔尼诺现象<sup>[26]</sup>造成海洋的初级生产力提高,海域的富营养化致使海洋生物生长迅速,生物 呼吸作用产生的 CO<sub>2</sub> 对 Au-P 有较强的溶出作用有关<sup>[21]</sup>。另外,Au-P 在 H1-18 含量比其余 3 个站位要低得 多,这可能与调查区生物主要为硅质生物,钙质生物相对较少有关<sup>[27]</sup>。受长江每年输入大量泥沙的稀释作用 影响,H1-18 站 TP,Or-P 和 Ex-P 含量近年来逐渐减少。10594 中的 TP 和 De-P,10694 和 H1-18 中的 TP 和 Or-P,12694 和中的 De-P 和 Or-P 在沉积时间序列上变化趋势相似。这在一定程度上反映了磷形态在埋藏过 程受多种因素共同影响。各形态磷含量分布的控制因素和环境意义还有待进一步研究。

2.5 沉积物中磷形态的生物可利用性

沉积物中不同形态的磷具有不同的生物地球化学行为和生物可利用性,在适当的条件下沉积物中的磷通 过间隙水向上覆水体释放,对上覆水体的富营养化水平有重要的影响<sup>[28]</sup>。Sonzogni等<sup>[29]</sup>等认为生物有效性 磷即很容易以溶解态磷酸盐释放,并被藻类生长所吸收利用那部分磷。Fe-P 是沉积物中最易变的部分,会随 氧化还原环境的变化而改变,它与水体中 Fe<sup>2+</sup>(Fe<sup>3+</sup>)的含量紧密相关,受到水体中可溶性铁浓度的控制<sup>[30]</sup>。 在还原环境中,Fe<sup>3+</sup>还原为 Fe<sup>2+</sup>,沉积物中 Fe-P 溶解释放磷。由于浮游植物和有机质的矿化分解易使该区处 于缺氧环境,导致 Fe<sup>3+</sup>还原为 Fe<sup>2+</sup>引起磷向水体释放; Or-P 在早期成岩过程中可随着有机质的分解而释放, 有机质降解时 Or-P 被释放到间隙水中, Or-P 的降解是影响沉积物中磷组分含量的一个重要过程<sup>[31]</sup>另外沉积 物中的一些细菌在有氧条件下可以吸收过量的磷,以有机聚磷酸盐的形态储存起来,在厌氧条件下,细菌可以 利用这些 Or-P 为能量进行新陈代谢,这些 Or-P 便以无机磷的形态再次被释放出来<sup>[14]</sup>,沉积物中 Or-P 的含 量直接影响到可供初级生产力利用的溶解性磷的水平<sup>[32]</sup>;Ex-P 主要源于水生颗粒,即沉降颗粒的吸附或生 物碎屑的再生,受沉积粒度影响较大。当上覆水体中磷酸盐含量较低时,通过离子交换释放到上覆水体中,被 浮游植物吸收<sup>[33]</sup>。因此, Fe-P、Ex-P和 Or-P被视为沉积物中生物有效性磷, 它们通过沉积物-水界面之间的 交换,影响上覆水体的富营养化水平,从而影响浮游植物总量。而自身磷、碎屑磷、难溶有机磷则很难进入水 体,参与生物循环被生物所利用。从表1可以看出,沉积物中的潜在生物可利用磷均与水体中的叶绿素 a 呈 较好的正相关性,且这种相关性在与 Ex-P 较其它形态磷表现得更为明显,说明沉积物中的 Ex-P 更易释放进 人上覆水体,成为浮游植物进行光合作用的营养成分。由2.2可知,本次调查区表层沉积物中 Fe-P, Ex-P 和 Or-P 分别占 TP 为 5.96%, 1.18%, 6.51%, 即潜在生物有效磷为 13.55% 左右, 仅仅占沉积磷中的一小部 分。在黄东海陆架区海域,表层沉积物在水动力、风浪、生物扰动以及人为因素等作用下极易发生再悬浮,这 些潜在生物有效性磷通过沉积物-水界面、悬浮物-水界面的物质交换过程会发生再生活化,从而在不同程度 上会促进藻类生长,影响水体的富营养化状态和初级生产力。

Tuble 1 Correlationship between the biouvanuable phosphorus and chlorophyn a in overlying water (10 50, 1 (0.05)			
潜在生物有效磷 — Bioavailable phosphorus /(µg/g)	叶绿素 a Chlorophyll a /(mg/m³)		
	线性回归方程	$R^2$	
	Linear regression equation		
Fe-P	y = 0.0930x + 1.8748	0.3582	
Ex-P	y = 0.7315x + 1.4325	0.5530	
Or-P	y = 0.0958x + 1.8588	0.4330	

表1 黄东海陆架区表层沉积物潜在生物有效磷与水体叶绿素 a 的相关关系(*n*=30, *P*<0.05) Table 1 Correlationship between the bioavailable phosphorus and Chlorophyll a in overlying water(*n*=30, *P*<0.05)

#### 3 结论

(1)采用 Ruttenberg 连续提取法(SEDEX)测得黄东海陆架区表层沉积物磷平均含量为:Au-P(140.72 μg/g)>De -P(59.23 μg/g)>Or-P(32.69 μg/g)>Fe-P(29.91 μg/g)>Ex-P(5.92 μg/g)。Au-P 和 Or-P 呈现 由近岸向远海逐渐减小的特点,De-P 在整个调查海区分布较均匀,TP 和 Ex-P 的高值区均出现在长江口海域 附近。

(2) 柱状沉积物中各形态磷垂直分布不同,柱状沉积物中各形态磷垂直分布不同。不同站位沉积物中各 形态磷在垂向分布上的不同反映了不同沉积环境早期成岩作用过程的复杂性,及不同形态磷形成机理的 不同。

(3)受不同时期人类活动,气候环境等因子的影响,不同形态磷在不同沉积物中的沉积时间序列上分布 呈现不同的特征。10594中的 TP 和 De-P,10694和 H1-18中的 TP 和 Or-P,12694和中的 De-P 和 Or-P 在沉 积时间序列上变化趋势相似。Au-P 在 H1-18含量比其余 3个站位要低得多,可能与调查区生物主要为硅质 生物,钙质生物相对较少有关。

(4) 黄东海陆架区表层沉积物 Fe-P、Ex-P 和 Or-P 分别占 TP 为 5.96%, 1.18%, 6.51%, 即潜在生物有效磷为 13.55% 左右, 仅仅占沉积磷中的一小部分, 这些潜在生物有效性磷通过沉积物-水界面、悬浮物-水界面的物质交换过程会发生再生活化, 从而在不同程度上会促进藻类生长, 影响水体的富营养化状态和初级生产力。

**致谢:**王迪迪负责样品采集和数据录入,黄海水产研究所环境室同学在论文写作、数据处理过程中提供帮助, 特此致谢。

#### References:

- Zheng A R, Shen H W, Li W Q. Study of chemical forms of phosphorus and their bioavailability in the sediments. Acta Oceanologica Sinica, 2004, 26(4): 49-57.
- [2] Nelson B W. Sedimentary phosphate method for estimating paleosalinities. Science, 1967, 158(3803): 917-920.
- [3] Xu J S, Li L G. Existing forms of phosphorus in sediment from middle and northern Taiwan Strait. Oceanologia Et Limnologia Sinica, 2004,21(4): 49-57.
- [4] Zhu G W, Qin B Q, Zhang L, Luo L C. Geochemical forms of phosphorus in sediments of three large, shallow lakes of China. Pedosphere, 2006, 16(6): 726-734.
- [5] Dai J C, Song J M, Li X G, Yuan H M, Zheng G X, Li N. Sediment record of phosphorus and the primary study of its bioavailability in Jiaozhou Bay sediments. Environmental Science, 2007,28(5): 929-936.
- [6] Søndergaard M. Seasonal variations in the loosely sorbed phosphorus fraction of the sediment of a shallow and hypereutrophic lake. Environmental Geology, 1988, 11(1): 115-121.
- Frankowski L, Bolalek J, Szostek A. Phosphorus in bottom sediments of Pomeranian Bay (Southern Baltic-Poland). Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2002, 54(6): 1027-1038.
- [8] Hisashi J. Fractionation of phosphorus and releasable traction in sediment mud of Osaka Bay. Bulletin of the Japanese Society of Scientific Fisheries, 1983, 49(3): 447 -454.
- [9] Ruttenberg K C. Development of a sequential extraction method for different forms of phosphorus in marine-sediments. Limnology Oceanography, 1992, 37(7): 1460-1482.
- [10] Hu C Y, Wang Z F, Lu H Y. A method of determination of total phosphate in these awater and marine sediment. Marine Environmental Science, 1999,18(3): 48-52.
- [11] Li F Y, Gao S, Jia J J, Zhao Y Y. Contemporary deposition rates of fine-grained sediment in the Bo hai and Yellow Seas. Oceanologia Et Limnologia Sinica. 2002,33 (4):364-369.
- [12] Zhao Y Y, Li F Y, DeMaster D J, Nittrouer C A, Milliman J D. Preliminary studies on sedimentation rate and sediment flux of the south Huanghai Sea. Oceanologia Et Limnologia Sinica. 1991,22(1):38-42.
- [13] Liu M, Xu S Y, Hou L J, Ou D N. Phosphorous species in sediments and their distribution in the Yangtze estuary and coastal areas. Marine Science Bulletin, 2001,20(5): 10-17.
- [14] Zhu Y Y. Preliminary study on distribution characteristics and biogeochemistry of varlous phosphorus forms in the sediments of the East China Sea and the Yellow Sea [D]. Qingdao: Ocean university of China,2009.
- [15] Hou L J, Liu M, Xu S Y, Jiang L M. Species of phosphorus in core sediments from the Changjiang Estuary and its environmental significance. Marine Environmental Science, 2001,20(2); 7-12.
- [16] Krom M D, Berner R A. Adsorption of phosphate in anoxic marine sediments. Limnology and Oceanography, 1980, 25(5): 797-806.

- [17] Yuan D L, Hu G R, Yu R L. Distribution of phosphorus form s in sediments of Luoyang Estuary, Quanzhou Bay. Chinese Journal of Ecology, 2010, 29(1): 84-90.
- [18] Wang Y C, Ma M, Wan G J, Liu C Q, Yin C Q. The Phosphorus forms and depositional history in sediments of Lake Hongfeng, Guizhou Province. Journal of Lake Science, 2004,16(1): 21-27.
- [19] Jensen H S, Mortensen P B, Andersen F Ø, Rasmussen E, Jensen A. Phosphorus cycling in a coastal marine sediment, Aarhus Bay, Denmark. Limnology and Oceanography, 1995.40(5): 908-917.
- [20] Schuffert J D, Jahnke R A, Kastner M, Leather J, Sturz A, Wing M R. Rates of formation of modern phosphorite off western Mexico. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1994, 58(22): 5001-5010.
- [21] Hu X F, Gao X J, Chen Z L. Preliminary stud y on nitrogen and phosphorus release from the creek sediments, outskirts of Shanghai. Shanghai Environmental Science, 2001, 20(2):66-70.
- [22] House W A, Denison F H. Factors influencing the measurement of equilibrium phosphate concentrations in river sediments. Water Research, 2000, 34(4): 1187-1200.
- [23] Zheng L B, Ye Y, Zhou H Y. Phosphorus forms in sediments of the East China Sea and its environmental significance. Journal of Geographical Sciences, 2004, 14(S1): 113-120.
- [24] Sundby B, Gobeil C, Silverberg N, Mucci A. The phosphorus cycle in coastal marine sediments. Limnology and Oceanography, 1992,37(6): 1129-1145.
- [25] Yue W Z, Huang X P. Distribution characteristics of nitrogen and its source in core sediments from Pearl River Estuary. Environmental Science, 2005,26(2)195-199.
- [26] He F X. Relationship between Elnino phenomenon and the catch of navodon septentrional is gunther in the Huanghai sea, the East China sea and the Tsushima sea area. Transaction of oceanology and limnology, 1998(1): 13-22.
- [27] Zheng L B, Ye Y, Zhou H Y, Wang H Z. Distribution of different forms of Phosphorus in seabed sediments from East China sea and its environmental significance. Oceanologia Et Limnologia Sinica, 2003,34(3): 274-282.
- [28] Hou L J, Lu J J, Liu M, Xu S Y. Species and bioavailability of phosphorus in surface sediments from the shoals in the Yangtze Estuary Acta Scientiae Circumstantiae, 2006, 26(3): 488-494.
- [29] Sonzogni W C, Armstrong S C, De Logan T J. Bioavailability of phosphorus inputs to lakes. Journal of Environmental Quality, 1982, 11(4): 555-563.
- [30] Wen H X. Phosphorus combined condition of river sediments and its environmental geochemistry significance. Chinese Science Bulletin, 1993,38 (13): 1219-1222.
- [31] Andrieux F, Aminot A. A two-year survey of phosphorus speciation in the sediments of the Bay of Seine (France). Continental Shelf Research, 1997, 17(10): 1229-1245.
- [32] Edlund G, Carman R. Distribution and diagenesis of organic and inorganic phosphorus in sediments of the Baltic proper. Chemosphere, 2001, 45 (6/7): 1053-1061.
- [33] Wu P. Recent Sedimentary Records of Primary Production and Nutrients in the Typical Areas of the East China Sea and the Yellow Sea [D]. Qingdao: Ocean university of China, 2007.

#### 参考文献:

- [1] 郑爱榕,沈海维,李文权. 沉积物中磷的存在形态及其生物可利用性研究. 海洋学报, 2004, 26(4): 49-57.
- [3] 许金树,李亮歌.台湾海峡中、北部沉积物中磷的存在形态.海洋与湖沼, 1990, 21(1): 62-69.
- [5] 戴纪翠,宋金明,李学刚,袁华茂,郑国侠,李宁. 胶州湾不同形态磷的沉积记录及生物可利用性研究. 环境科学, 2007,28(5): 929-936.
- [10] 扈传昱, 王正方, 吕海燕. 海水和海洋沉积物中总磷的测定. 海洋环境科学, 1999, 18(3): 48-52.
- [11] 李凤业,高抒,贾建军,赵一阳.黄、渤海泥质沉积区现代沉积速率.海洋与湖沼,2002,33(4):364-369.
- [12] 赵一阳,李凤业, DeMaster D J, Nittrouer C A, Milliman J D. 南黄海沉积速率和沉积通量的初步研究.海洋与湖沼,1991,22(1):38-42.
- [13] 刘敏,许世远,侯立军,欧冬妮.长江口滨岸潮滩沉积物中磷的存在形态和分布特征.海洋通报,2001,20(5):10-17.
- [14] 朱媛媛. 东、黄海沉积物中各形态磷的分布特征及其生物地球化学初步研究 [D]. 青岛;中国海洋大学, 2009.
- [15] 侯立军,刘敏,许世远,蒋黎敏. 长江口岸带柱状沉积物中磷的存在形态及其环境意义. 海洋环境科学, 2001, 20(2): 7-12.
- [17] 袁栋林,胡恭任,于瑞莲.泉州湾洛阳江河口沉积物中磷的形态分布.生态学杂志,2010,29(1):84-90.
- [18] 王雨春,马梅,万国江,刘丛强,尹澄清.贵州红枫湖沉积物磷赋存形态及沉积历史.湖泊科学,2004,16(1):21-27.
- [21] 胡雪峰,高效江,陈振楼.上海市郊河流底泥氮磷释放规律的初步研究.上海环境科学,2001,20(2):66-70.
- [25] 岳维忠,黄小平.珠江口柱状沉积物中氮的形态分布特征及来源探讨.环境科学,2005,26(2):195-199.
- [26] 何发祥. 厄尔尼诺现象与黄、东海,对马海域马面鲀渔获量关系——长江口及其邻近海区 ENSO 渔场学问题之三. 海洋湖沼通报, 1998, (1): 13-22.
- [27] 郑丽波, 叶瑛,周怀阳,王怀照. 东海特定海区表层沉积物中磷的形态、分布及其环境意义. 海洋与湖沼, 2003, 34(3): 274-282.
- [28] 侯立军,陆健健,刘敏,许世远.长江口沙洲表层沉积物磷的赋存形态及生物有效性.环境科学学报,2006,26(3):488-494.
- [30] 翁焕新. 河流沉积物中磷的结合状态及其环境地球化学意义. 科学通报, 1993, 38(13): 1219-1222.
- [33] 吴鹏. 东、黄海典型海域初级生产力和氮、磷营养要素的近代沉积记录 [D]. 青岛: 中国海洋大学, 2007.

## 《生态学报》2013年征订启事

《生态学报》是由中国科学技术协会主管,中国生态学学会、中国科学院生态环境研究中心主办的生态学高级专业学术期刊,创刊于1981年,报道生态学领域前沿理论和原始创新性研究成果。坚持"百花齐放,百家争鸣"的方针,依靠和团结广大生态学科研工作者,探索自然奥秘,为生态学基础理论研究搭建交流平台,促进生态学研究深入发展,为我国培养和造就生态学科研人才和知识创新服务、为国民经济建设和发展服务。

《生态学报》主要报道生态学及各分支学科的重要基础理论和应用研究的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;新书评价和 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,300页,国内定价90元/册,全年定价2160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

本期责任副主编 朱永官

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33卷 第11期 (2013年6月) ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 33 No. 11 (June, 2013) 编 《生态学报》编辑部 Edited Editorial board of 辑 by 地址:北京海淀区双清路18号 ACTA ECOLOGICA SINICA 邮政编码:100085 Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China 电话:(010)62941099 Tel:(010)62941099 www. ecologica. cn www. ecologica. cn shengtaixuebao@ rcees. ac. cn shengtaixuebao@ rcees. ac. cn 主 编 王如松 Editor-in-chief WANG Rusong 主 管 中国科学技术协会 Supervised by China Association for Science and Technology 主 ホ 中国生态学学会 Sponsored by Ecological Society of China 中国科学院生态环境研究中心 Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS 地址:北京海淀区双清路18号 邮政编码:100085 Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China Published by Science Press 出 版件 ÷ źł. 地址:北京东黄城根北街16号 Add:16 Donghuangchenggen North Street, 邮政编码:100717 Beijing 100717, China EП 北京北林印刷厂 刷 Printed Beijing Bei Lin Printing House, bv 发 行斜 ÷ Beijing 100083, China źł. K. 1000-0933 地址:东黄城根北街16号 Distributed by Science Press 邮政编码:100717 Add:16 Donghuangchenggen North 电话:(010)64034563 Street, Beijing 100717, China E-mail:journal@cspg.net Tel: (010)64034563 购 全国各地邮局 ìΤ E-mail: journal@ cspg. net 国外发行 中国国际图书贸易总公司 Domestic All Local Post Offices in China 地址:北京 399 信箱 SSN China International Book Trading Foreign 邮政编码:100044 广告经营 Corporation 京海工商广字第8013号 许可证 Add P. O. Box 399 Beijing 100044, China 6

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 90.00 元