

# 南京近城市河流沉积物营养水平 与磷形态的空间分布

叶宏萌<sup>1,3</sup>, 袁旭音<sup>2,3</sup>, 徐荆棘<sup>2</sup>

(1. 河海大学文天学院, 安徽 马鞍山 243031; 2. 河海大学环境学院, 江苏 南京 210098;

3. 浅水湖泊综合治理与资源开发教育部重点实验室, 江苏 南京 210098)

**摘要:** 近城市河流位于城市与农村的过渡带, 其环境现状反映城市化过程对河流的影响。通过不同断面的样品研究了南京近城市河流——秦淮新河沉积物中主要营养元素与磷形态的空间分布, 分析其变化特征和污染成因。研究表明, 不同河段由于受人为活动和沉积环境的影响营养程度差异较大。河流表层沉积物的 TOC、TN 和 TP 范围分别为 3.07~34.97 g/kg、830~2 370 mg/kg 和 447~3 517 mg/kg, 磷的形态显示 Fe-P 或 Ca-P>Org-P>>Al-P>DP, 其中 Fe-P 和 Ca-P 二者之和占 TP 的 70% 以上, 两者均可指示营养化程度的轻重。通过西善桥段和入江口段柱状沉积物分析表明, 营养元素和磷形态垂向上均呈现明显的“沉降-降解-堆积”三段式变化, 西善桥段以 Fe-P 为优势形态, 占 TP 的 43.1%~50.5%, 入江口段以 Ca-P 为优势形态, 占 TP 的 46.3%~60.3%。通过不同河流磷含量的对比, 表明秦淮新河作为近城市河流, 营养水平介于一般的乡村河流与城市河流之间, 并且优势形态磷空间分布带有区域性, 表明长三角的城市化对近郊河流的影响是局部的。

**关键词:** 沉积物; 磷形态; 营养元素; 秦淮新河

**中图分类号:** X52 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-8227(2011)10-1262-06

当前我国河湖普遍面临着水质恶化的问题, 其中富营养化问题是水环境面临的最大挑战之一<sup>[1]</sup>。沉积物作为营养盐的源和汇对河流的营养水平影响大, 其中磷是最主要的限制性营养元素<sup>[2]</sup>, 而且不同磷形态具有不同的生物化学效应<sup>[3]</sup>, 因此研究沉积物磷的形态分布是了解河流营养状况的重要内容。目前水体沉积物磷的形态特征研究多见于湖泊、水库以及重点河流<sup>[4~9]</sup>, 而对河流尤其是城郊地带河流沉积物营养元素和磷形态的研究鲜见报道。

随着长江三角洲城市化的迅速发展, 人们的聚集地不断往乡村扩展, 污水的排放随之增多。近城市河流即处于城市与郊区的交接带河流, 由于流经城郊不同的功能区域, 沉积物中营养物质在空间上存在较大差异, 导致营养水平及磷形态分布的不同。因此研究近城市河流沉积物中营养元素和形态磷的空间分布及其成因, 可以为近城市河流的水质评价、发展趋势预测和污染防治提供可靠的理论依据并在一定程度上反映城市化对近城市河流的影响程度。

## 1 研究区概况与方法

### 1.1 研究区背景

秦淮河是南京市的重要河道, 全长 110 km, 干流长 36.6 km, 在江宁东山镇分为两支, 一支从东山镇往北由七桥瓮入南京城区, 另一支则为秦淮新河, 从东山镇的河定桥起经铁心桥、西善桥在雨花区的金胜圩入长江。本文研究的秦淮新河全长约 18 km, 位于江心洲夹江水源保护地上游不足 1.5 km 处。随着沿河两岸人类活动强度不断增大, 生活、农业以及工业的排污不断影响河流, 对饮用水源地安全形成较大隐患。本文选择了沿河 3 处不同功能区与入江口处沉积物进行营养物质空间分析(分析区域约 18 km)。研究区河定桥段周边是江宁经济开发区和农田, 有少量居民区; 铁心桥段植被茂密, 南部位于丘陵风景区; 西善桥段建有多座大型码头, 居民区集中, 工业、生活、农业污染源较杂; 入江口段附近主要是荒地, 河口与江水相汇合, 时常受江水的冲刷(图 1)。

收稿日期: 2011-02-21; 修回日期: 2011-04-15

基金项目: 中国地质调查局国土资源调查项目(GZTR20060201); 河海大学自然科学基金项目(2008432511)

作者简介: 叶宏萌(1984~), 女, 福建省建瓯人, 助教, 硕士, 主要研究方向为水资源保护和环境地球化学。E-mail: hongmengye@sina.com.cn

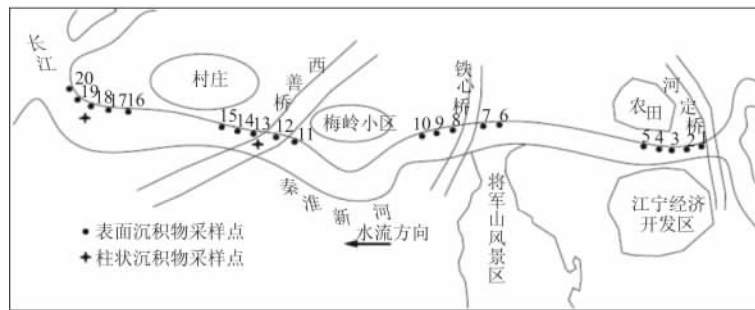


图 1 采样点分布

Fig. 1 Distribution of Sampling Sites

## 1.2 样品采集与分析测定

2008 年 3 月~5 月,在秦淮新河沿河定桥到入江口共采集了 20 个表层沉积物样品和 2 个柱状沉积岩芯(见图 1)。具体样品结合河道的地理位置以及相应不同的土地利用方式,划分为河定桥段(样点 1~5)、铁心桥段(样点 6~10)、西善桥段(样点 11~15)和入江口段(样点 16~20)四部分,以研究营养物的空间分布与特征。其中表层沉积物样品(距河岸约 2~3 m)采用“抓斗式”采样器采集,置于干净的聚乙烯塑料封口袋中,编号后避光密封保存;沉积岩芯(近岸边)采用柱状重力采样器采集,长度为 40 cm,现场以 2 cm 间隔进行分层,装入干净的聚乙烯塑料封口袋中,编号后避光密封保存。

所有样品立刻带回实验室,冷冻干燥后,用木棒

分散,去除杂质,采用玛瑙研钵磨至粉末状,过 100 目筛后,保存在纸袋中备用分析。分析项目为有机质(TOC)、总氮(TN)、总磷(TP)与磷的形态。其中 TOC、TN 和 TP 的测定方法与步骤参考《土壤农化分析》<sup>[10]</sup>;磷的形态则根据《湖泊富营养化调查规范》<sup>[11]</sup>分为 5 种,即水溶性磷(DP)、铝结合态磷(Al-P)、铁结合态磷(Fe-P)、钙结合态磷(Ca-P)和有机态磷(Org-P),分析过程中以标准样品控制,误差均在规定的范围内。

## 2 结果与讨论

### 2.1 表层沉积物中营养水平与磷的形态特征

各河段表层沉积物中营养元素和磷的形态数值统计见表 1。

表 1 表面沉积物的营养水平和磷形态含量

Tab. 1 Nutrient Levels and Contents of Phosphorus Species in Surface Sediments of Qinghuai New River

| 河段  | 项目    | TOC         | TN        | TP        | DP       | Al-P       | Fe-P          | Ca-P        | Org-P       |
|-----|-------|-------------|-----------|-----------|----------|------------|---------------|-------------|-------------|
|     |       | g/kg        |           |           | mg/kg    |            |               |             |             |
| 河定桥 | 范围    | 3.07~9.23   | 0.91~1.22 | 0.70~1.38 | 4.6~16.3 | 9.1~48.6   | 213.9~802.7   | 229.8~274.2 | 129.7~185.3 |
|     | 平均值   | 6.05        | 1.02      | 0.93      | 8.7      | 24.4       | 434.8         | 258.8       | 155.0       |
|     | CV(%) | 42.4        | 11.6      | 34.8      | 54.3     | 70.6       | 63.1          | 6.8         | 15.7        |
| 铁心桥 | 范围    | 3.93~21.70  | 0.83~2.01 | 0.45~1.09 | 4.2~7.9  | 4.9~33.7   | 79.0~499.6    | 264.8~297.8 | 56.6~203.8  |
|     | 平均值   | 10.57       | 1.29      | 0.63      | 5.7      | 12.1       | 197.0         | 276.4       | 112.9       |
|     | CV(%) | 63.9        | 35.8      | 42.2      | 28.9     | 101.1      | 88.4          | 4.7         | 49.4        |
| 西善桥 | 范围    | 14.13~34.97 | 1.24~2.37 | 1.08~3.52 | 8.9~23.5 | 12.5~131.3 | 435.0~2 182.7 | 390.2~532.6 | 177.0~473.8 |
|     | 平均值   | 22.32       | 1.66      | 2.24      | 14.1     | 60.9       | 1 299.9       | 440.4       | 304.0       |
|     | CV(%) | 38.4        | 30.7      | 48.2      | 45.1     | 79.7       | 61.2          | 14.4        | 40.9        |
| 入江口 | 范围    | 8.65~15.83  | 0.91~1.36 | 0.85~1.27 | 8.3~11.0 | 11.1~32.6  | 222.8~513.9   | 404.9~498.5 | 139.0~167.8 |
|     | 平均值   | 12.77       | 1.14      | 0.97      | 9.2      | 22.4       | 310.4         | 448.6       | 146.9       |
|     | CV(%) | 27.5        | 14.6      | 17.8      | 11.4     | 38.6       | 37.3          | 7.6         | 10.1        |

从表中可见,不同河段沉积物中营养物和磷形态含量不同,反映了输入的磷污染水平或形态组成的不同。其中位于上游的河定桥段和铁心桥段的营养水平相对低,西善桥段营养水平最高,入江口段的营养水平居中,这与该河段水质相关的模糊评价结

果一致<sup>[12]</sup>。尤其突出的是西善桥段的 TP 含量高达 2.24 g/kg,是南京土壤背景值(0.61 g/kg)的 3 倍多<sup>[13]</sup>。据已有研究表明营养元素比值的不同可以反映营养来源的特点,其中 TOC/TN 在某种程度上可反映有机质来源与生物种类的差别<sup>[14]</sup>,一般

高等植物为 14~23,水生生物为 2.8~3.4,浮游动物与浮游植物为 6~13,藻类为 5~14<sup>[15]</sup>;而 TN/TP 的变化是浮游植物生长以及生源要素在水体中的分布与循环的反映<sup>[16,17]</sup>,大多数研究表明水体营养水平会随 TN/TP 的降低而提高<sup>[17,18]</sup>。图 2 显示秦淮新河沉积物中 TOC/TN 比值平均值为 10,空间分布不均一,比值为 3~15,变幅较大。不过数据多集中在 5~14,反映了该河流有机物来源以藻类和浮游动植物为主;从不同河段看,河定桥和铁心桥段的比值多在 5~8,而西善桥段和入江口的比值多在 10~14,所以西善桥段有机质来源更加丰富,入江口由于位于西善桥下游,受到了上游物质的影响。TN/TP 比值平均值为 1.4,空间分布也不均匀,变幅为 0.53~2.40 较大。尤其是西善桥河段平均比值最低为 0.83,显示了较高的营养水平。

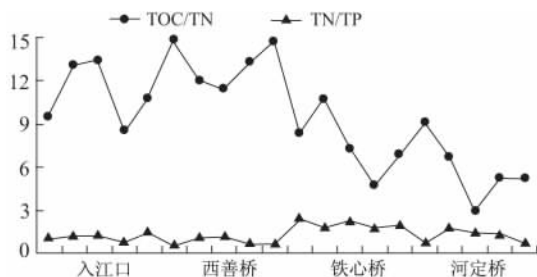


图 2 营养元素比值

Fig. 2 TOC/TN and TN/TP of Sediments

表中还可以比较出沉积物磷的形态含量排序为 Fe-P 或 Ca-P > Org-P >> Al-P > DP, 其中 Fe-P 和 Ca-P 明显占优势, DP、Al-P 和 Fe-P 的变异系数较大, Ca-P 的变异系数最小。该现象与磷组分的来源有关, 因为我国城市河流污染主要以点源污染为主, 包括生活污染源和工业污染源<sup>[19,20]</sup>。磷组分中 DP、Al-P 和 Fe-P 作为生物易利用磷是受人类活动影响最大的活性磷<sup>[21,22]</sup>, 通常 DP 来源以农业面源为主, Al-P 和 Fe-P 来源以生活污水和工业废水为主, 而 Ca-P 来源主要是碎屑岩或自生组分<sup>[23]</sup>, 为沉积物中较惰性的磷组分, 受人类活动影响较小。通

过图 3 不同河段磷形态占总磷的组成比例可见, 秦淮新河沉积物磷形态中 Fe-P 和 Ca-P 明显占优势, 二者之和占 TP 的 70% 以上。同时从河定桥段到入江口的 Fe-P 占总磷的份额依次表现出“高一低一高一低”的特点; Ca-P 则表现出“低一高一低一高”的特点, 显示了 Fe-P 和 Ca-P 份额的相互消长关系, 同时可以作为河流沉积物营养水平的指标。这与前人关于 Fe-P 含量随 TP 含量的上升而显著增加的研究结果吻合<sup>[14,24]</sup>。

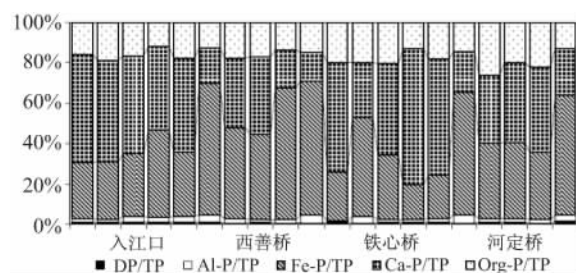


图 3 磷的形态占总磷百分比

Fig. 3 Percentages of Form Phosphorus to Total Phosphorus

由于 Al-P 和 Fe-P 往往是活性磷, 可以反映出区域磷输入<sup>[25]</sup>; 而 Ca-P 大多源于自然碎屑物质, 在河道沉积物中相对稳定<sup>[23]</sup>, 因而沉积物中磷形态比值特征可以显示区域营养物质来源。从图 4 可以看出, 秦淮新河沉积物中 Al-P/Ca-P 和 Fe-P/Ca-P 两比值趋势一致, 且在不同河段比值大小有差异。具体而言, Al-P/Ca-P 的平均值西善桥段(比值为 0.13) > 河定桥段(0.09) > 入江口段(0.05) > 铁心桥段(0.04); Fe-P/Ca-P 的平均值西善桥段(比值为 2.84) > 河定桥段(1.67) > 铁心桥段(0.72) > 入江口段(0.68)。这与各河段的人类活动背景与物质输入有关。其中西善桥段人口密集、河定桥位于江宁经济开发区, 这两处有明显的生活和农田污水排放, 铝、铁磷的比例较高而且不均匀; 铁心桥段位于风景区, 污水的排放少, 磷的变化相对均匀; 入江口段虽然位于西善桥的下游, 由于江水的稀释作用, 引起部分铁磷和铝磷的溶解, 降低了沉积物铝磷和铁磷的浓度。

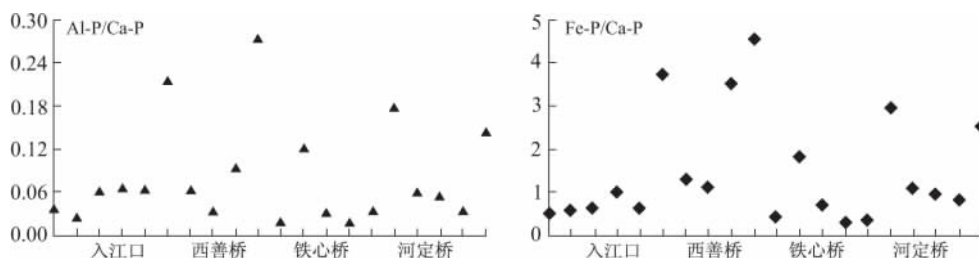


图 4 Al-P/Ca-P 和 Fe-P/Ca-P 比值

Fig. 4 Al-P/Ca-P and Fe-P/Ca-P

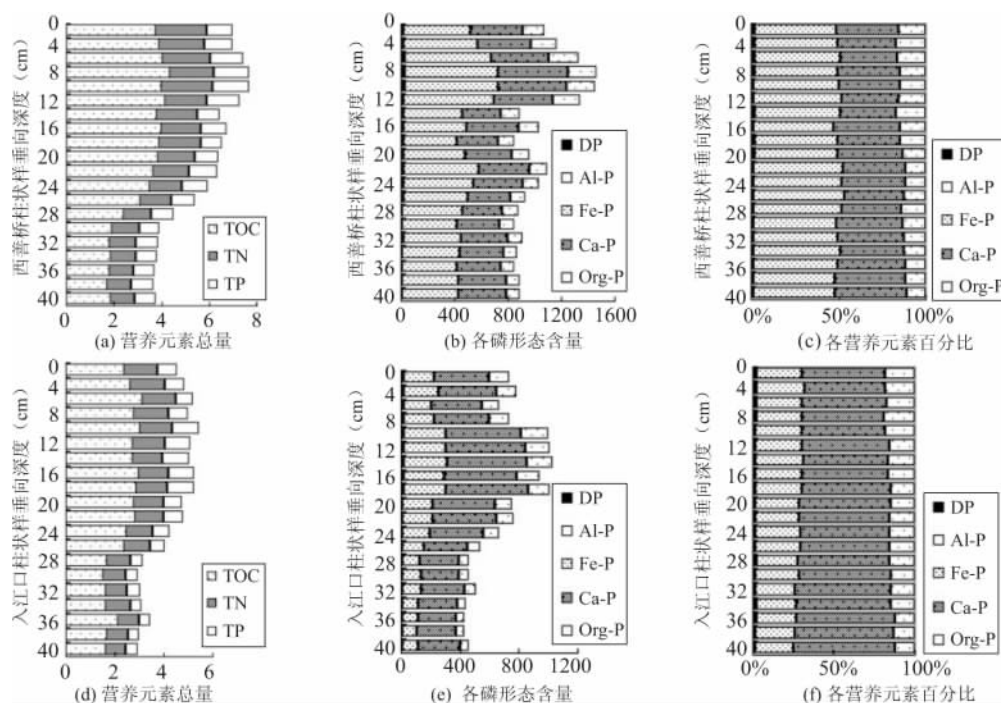
## 2.2 垂向沉积物中磷的形态特征

由前文可知,西善桥段是秦淮新河污染较重的河段,代表了受城市化影响显著的地段,而入江口段受长江水冲刷和稀释,是受城市化影响较弱的河段。通过这两个河段的柱状沉积物样品分析,可以对比不同程度城市化影响下河流沉积物的反应。

从图 5(a、b 与 d、e)可以看出,两河段的垂向沉积物营养元素变化存有相似趋势,表明河流的自然物质在元素变化方面仍占主导地位。首先,两河段营养元素含量自上而下均为明显的“沉降-降解-堆积”三段式变化<sup>[26]</sup>。在表层(0~4 cm)沉积物中营养含量较高,在亚表层(5~12 cm)营养达到最高值,在中层(13~28 cm)表现出降解的过程,在下层(29~40 cm)营养含量最低。即第一阶段表层—亚表层表现了沉降的积累效应,第二阶段亚表层—中层出现了降解的过程,第三阶段中层—下层达到了堆积稳定的状态。以 TOC 为例,在早期成岩作用阶段,有机质发生明显的生物氧化作用,经降解作用残留的部分相对稳定地积蓄在沉积物中<sup>[26]</sup>,沉积物柱状样表层

所处环境氧化性高于中下层段,随着有机碳的“沉降-降解-堆积”过程而出现表层高并逐渐变小后趋于稳定的变化<sup>[27]</sup>,这在西善桥段岩芯比较明显。图 5(c、f)表示了两河段不同形态磷的垂向变化,其组成变化类似表层沉积物,即  $\text{Fe-P}$  或  $\text{Ca-P} > \text{Org-P} > \text{Al-P} > \text{DP}$ 。但是  $\text{Ca-P}$  占 TP 的份额从表层至下层总体上升,说明了随着 TP 含量的降低,以自生来源为主的  $\text{Ca-P}$  更加占优势;而其他形态的磷随着深度增加,份额总体在下降,尤其是  $\text{Fe-P}$ ,这与多数研究的结论一致。 $\text{Ca-P}$  是生物难利用的磷形式,不易被释放进入上覆水体<sup>[28]</sup>,而铁铝结合态磷是生物易利用的形式,并且容易向上覆水体释放相符<sup>[29]</sup>。

两河段垂向沉积物的营养成分变化也存在差异之处。首先,西善桥的垂向沉积物营养水平和形态磷的含量整体上明显高于入江口段,潜在释放的风险大。其次,西善桥段以  $\text{Fe-P}$  为优势形态,占 TP 的 43.1%~50.5%;而入江口段以  $\text{Ca-P}$  为优势形态,占 TP 的 46.3%~60.3%,表明前者人为的物质输入较多,而后者自然物质沉积较多。



注:为使图形简洁,图 a、d 中 TOC 浓度单位为 10g/kg, TN、TP 单位为 g/kg;图 b、e 中各形态磷单位为 mg/kg

图 5 西善桥和入江口柱状样中磷形态组成

Fig. 5 Composition of Phosphorus Species in the Core Sediments of Xishan Bridge Part and Merging Estuary

## 2.3 秦淮新河与其他河流沉积物中磷含量的对比

秦淮新河作为南京近城市河流,其表层沉积物的 TP 含量为 447~3 517 mg/kg,平均值为 1 193 mg/kg,远远超过了长江口(493~816 mg/kg<sup>[4]</sup>)、

黄河干流(594~957 mg/kg<sup>[30]</sup>)、珠江口(平均值为 456 mg/kg<sup>[31]</sup>)、大辽河河口区(394~712 mg/kg<sup>[21]</sup>)等较大的自然水系,也超过了总磷相对较高的钱塘江富阳—杭州河段(595~1 463 mg/kg,平均

为  $940 \text{ mg/kg}^{[32]}$ ) 以及北京市西北郊区的官厅水库的入库河流——永定河 ( $580 \sim 1\,276 \text{ mg/kg}^{[33]}$ ); 但又尚未达到流经城市的内秦淮河 ( $1\,345 \sim 4\,902 \text{ mg/kg}^{[34]}$ ) 和南通城市中心的濠河 (平均值为  $3\,020 \text{ mg/kg}^{[35]}$ ) 的总磷水平。可见, 秦淮新河的总磷含量介于一般的自然河流与城市河流之间。比较上述水体磷的形态含量可以发现, 所述水体都以无机磷占主要成分, 其中较大自然水系或河口区总磷含量低, 且无机磷主要以钙磷为主<sup>[4,21,30,31]</sup>; 而钱塘江富阳-杭州段在污染轻微段以钙磷为主, 严重段以铝-铁磷为主<sup>[32]</sup>; 永定河则以钙磷为主 (占总磷 50% 以上)<sup>[33]</sup>。典型城市河流缺少相关形态磷数据, 但以同城市的湖泊 (莫愁湖与玄武湖) 参照可以看出形态磷中有机磷成分明显升高, 但仍以无机磷为主, 铁磷所占份额较高<sup>[36,37]</sup>。可见对于大部分河流钙磷与铝-铁磷可以指示污染程度, 钙磷表征污染轻微, 铝-铁磷表征污染较严重。那么秦淮新河在不同河段表现出的钙磷与铁磷沿程的相互消长关系从一定程度反映了秦淮新河磷的不均匀分布, 说明了其污染带有区域性。一定程度上显示了长三角的城市化对近郊河流的不同影响。

### 3 结论

(1) 秦淮新河由于受区域污染源和沉积环境的影响, 各河段营养程度差异较大。其中位于上游的河定桥段和铁心桥段的营养水平较低, 西善桥段营养水平最高, 入江口段的营养水平居中。

(2) 秦淮新河沉积物中 TOC/TN 比值表明该河流有机物来源以藻类和浮游动植物为主; TN/TP 比值普遍较低与较高的总磷含量和营养水平有关。

(3) 西善桥和入江口段的柱状沉积物的不同营养元素在垂向变化 (自上而下) 都有“沉降-降解-堆积”三段式特征, 不同的磷形态中 Ca-P 所占总磷份额垂向向下总体升高, 其他形态磷份额总体下降; 西善桥段垂向的磷形态以 Fe-P 为主, 入江口段则以 Ca-P 为主, 表现出人为输入与自然沉积的不同。

(4) 通过不同河流沉积物磷含量的对比说明了秦淮新河作为近城市河流总磷含量介于一般的自然河流与城市河流之间, 不同磷的分布差异性显示了长三角的城市化对近郊河流的不同影响。

### 参考文献:

[1] SHARPLEY A N, TUNNEY H. Phosphorus research strate-

gies to meet agricultural and environmental challenges of the 21st century[J]. *Environ Qual*, 2000, 29: 76~81.

[2] ALEXANDER R B, SMITH R A. Trends in the nutrient enrichment of US rivers during the late 20th century and their relation to changes in probable stream trophic conditions[J]. *Limnology and Oceanography*, 2006, 51(1): 639~654.

[3] SONG J M, LUO Y X, LÜX X, et al. Forms of phosphorus and silicon in the natural grain size surface sediments of the southern Bohai Sea, China[J]. *Oceanol Limnol*, 2003, 21(3): 286~292.

[4] 李 敏, 韦鹤平, 王光谦, 等. 长江口、杭州湾水域沉积物中磷的化学形态分布特征[J]. *海洋学报*, 2004, 26(2): 125~130.

[5] 王圣瑞, 金相灿, 赵海超, 等. 长江中下游浅水湖泊沉积物对磷的吸附特征[J]. *环境科学*, 2005, 26(3): 38~43.

[6] 金相灿, 庞 燕, 王圣瑞, 等. 长江中下游浅水湖沉积物磷形态及其分布特征研究[J]. *农业环境科学学报*, 2008, 27(1): 279~285.

[7] 李北罡, 郭博书. 黄河中游表层沉积物中无机磷的化学形态研究[J]. *农业环境科学学报*, 2006, 25(6): 1 607~1 610.

[8] 张宏伟, 潘 纲, 王晓丽, 等. 内蒙古段黄河沉积物对磷的吸附特征研究[J]. *环境科学*, 2009, 30(1): 172~177.

[9] 马 钦, 李北罡, 焦小宝. 黄河表层沉积物中磷的分布特征及磷的生物可利用性[J]. *农业环境科学学报*, 2009, 28(11): 2 379~2 384.

[10] 南京农业大学. 土壤农化分析[M]. 第 2 版. 北京: 农业出版社, 1988: 82~83.

[11] 金相灿, 屠清瑛. 湖泊富营养化调查规范[M]. 第 2 版. 北京: 中国环境科学出版社, 1990: 211~230.

[12] 刘 晨, 鲍治宇. 秦淮新河 (雨花段) 水质的模糊数学评价[J]. *苏州科技学院学报 (工程技术版)*, 2005, 18(3): 57~60.

[13] 吴新民, 金 洋, 翁志华. 南京及周边地区土壤地球化学特征及基础地质应用探讨[J]. *江苏地质*, 2007, 31(3): 180~186.

[14] 余 辉, 张文斌, 卢少勇, 等. 洪泽湖表层底质营养盐的形态分布特征与评价[J]. *环境科学*, 2010, 31(4): 961~968.

[15] 蔡金傍, 李文奇, 刘 娜, 等. 洋河水库底泥污染特性研究[J]. *农业环境科学学报*, 2007, 26(3): 892~893.

[16] SMITH V H. Low nitrogen to phosphorus ratios favor dominance by blue-green algae in lake phytoplankton[J]. *Science*, 1983, 211: 669~671.

[17] QUIRÓS R. The relationship between nitrate and ammonia concentrations in the pelagic zone of lakes[J]. *Limnetica*, 2003, 22(1-2): 37~50.

[18] DOWNING J A, MCCAULEY E. The nitrogen:Phosphorus relationship in Lakes[J]. *Limnol & Oceanogr*, 1992, 37(5): 936~945.

[19] 白丽艳. 大凌河朝阳市区段污染源调查分析与对策[J]. *辽宁城乡环境科技*, 1998, 18(4): 36~38.

[20] 张 莺. 湖北省河流中氨氮的污染状况与特征[J]. *环境科学与技术*, 2004, 24(增刊): 30~31.

[21] 王世亮, 王志刚, 王 萍, 等. 大辽河水系沉积物剖面磷的形态和分布特征[J]. *环境科学*, 2009, 30(12): 3 494~3 501.

[22] 刘晓端, 徐 清, 刘 浏, 等. 密云水库沉积物-水界面磷的地

- 球化学作用[J]. 岩矿测试, 2004, 23(4): 246~250.
- [23] RUBAN V. Harmonized protocol and certified reference material for the determination of extractable contents of phosphorus in freshwater sediments—A synthesis of recent works[J]. Fresenius J Anal Chem, 2001, 370: 224~228.
- [24] 万国江, 白占国, 王浩然, 等. 洱海近代沉积物中碳·氮·硫·磷的地球化学记录[J]. 地球化学, 2000, 29(2): 189~197.
- [25] RUBAN V, LOPEZ-SANCHEZ J F, PARDO P, et al. Harmonized protocol and certified reference material for the determination of extractable contents of phosphorus in freshwater sediments—A synthesis of recent works[J]. Fresenius J Anal Chem, 2001, 370: 224~228.
- [26] 金相灿, 孟凡德, 姜霞, 等. 太湖东北部沉积物理化特征及磷赋存形态研究[J]. 长江流域资源与环境, 2006, 15(3): 388~396.
- [27] 吴峰伟, 汪福顺, 吴明红, 等. 滇池、红枫湖沉积物中总磷、分态磷及生物硅形态与分布特征[J]. 生态学杂志, 2009, 28(1): 88~94.
- [28] 韩璐, 黄岁樑, 王乙震. 海河干流柱芯不同粒径沉积物中有机和磷形态分布研究[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(5): 955~962.
- [29] 李江, 金相灿, 姜霞. 太湖不同营养水平湖区沉积物理化性质和磷的垂向变化[J]. 环境科学研究, 2007, 20(4): 64~69.
- [30] 张宪伟, 潘纲, 陈灏, 等. 黄河沉积物磷形态沿程分布特征[J]. 环境科学学报, 2009, 29(1): 191~198.
- [31] 岳维忠, 黄小平, 孙翠慈. 珠江口表层沉积物中氮、磷的形态分布特征及污染评价[J]. 海洋与湖沼, 2007, 38(2): 111~117.
- [32] 沈小东, 申开丽, 杨强, 等. 钱塘江(富阳)杭州段沉积物磷的赋存形态分析[J]. 环境污染与防治, 2007, 29(9): 678~681.
- [33] 陈红军, 黄怀曾, 冯流, 等. 永定河沉积物中磷的存在形态及其指示意义[J]. 岩矿测试, 2005, 24(3): 176~180.
- [34] 罗玉兰, 徐颖, 曹忠. 秦淮河底泥及间隙水氮磷垂直分布及相关性分析[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(4): 1245~1249.
- [35] 蒋庆丰, 周琳, 赵玲, 等. 南通市区河道磷污染分布特征[J]. 南通大学学报(自然科学版), 2009, 8(3): 42~54.
- [36] 李璜, 徐颖, 朱明珠, 等. 城市浅水湖泊沉积物磷形态分布及其与间隙水磷的关系[J]. 环境保护科学, 2009, 35(5): 8~10, 51.
- [37] 丰茂武, 吴云海, 龚春生. 玄武湖沉积物中磷的形态分布特征[J]. 环境监测管理与技术, 2007, 19(2): 19~22.

## DISTRIBUTION OF PHOSPHORUS SPECIATION AND TROPHIC LEVEL OF SEDIMENT FROM THE PERI-URBAN RIVER, NANJING

YE Hong-meng<sup>1,3</sup>, YUAN Xu-yin<sup>2,3</sup>, XU Jing-ji<sup>2</sup>

(1. Wen Tian College, Hohai University, Maanshan 243031, China; 2. College of the Environmental, Hohai University, Nanjing 210098, China;

3. Key Laboratory of Integrated Regulation and Resource Development on Shallow Lakes, Ministry of Education, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** The environmental circumstances of peri-urban river in the transition zone between urban and country can reflect the effect of urbanization on rivers. This study revealed space characteristics of nutrients and geochemical forms of phosphorus in the sediment from the peri-urban river—New Qinhuai River in Nanjing. The statistics data showed discrepant trophic levels in different sections of the river due to various sewage discharge and sedimentary process. TOC, TN and TP ranged from 3.07 to 34.97 g/kg, 830 to 2370 mg/kg and 447 to 3517 mg/kg respectively. The content sequence of phosphorus fractions was Fe-P or Ca-P > Org-P >> Al-P > DP, in which Fe-P and Ca-P accounted more than 70% of TP, and both showed signals of nutritional status. The characteristics of nutrients and phosphorus fractions in Xishan-qiaoqiao core and the estuarine core followed a mode marked three-stage of "settlement-degradation-stacked" changes in contents. Fe-P was the dominant form and accounting for 43.1%~50.5% of TP in the Xishanqiao core. Ca-P was the dominant form and accounting for 46.3%~60.3% of TP in the estuarine core. The trophic level of New Qinhuai River is between rural river and urban river. The dominant phosphorus fractions are distributed in variant sites. In a way, the urbanization in the Yangtze River Delta does't affect overall environment of the peri-urban river.

**Key words:** sediment; phosphorus form; nutrients; New Qinhuai River