

三峡入库河流大宁河回水区沉积物和消落带土壤磷形态及其分布特征研究

徐德星¹, 秦延文^{2*}, 张雷², 郑丙辉², 海热提¹

(1. 北京化工大学环境工程系, 北京 100029; 2. 中国环境科学研究院河流与海岸带环境研究室, 北京 100012)

摘要:应用淡水沉积物中磷形态的标准测试程序(SMT)对三峡入库河流大宁河回水区表层沉积物、消落带土壤不同形态P进行了分级测定, 分析了各形态磷之间以及各形态磷与样品理化性质如有机质、主要氧化物组成之间的相关性。结果表明, 沉积物总磷含量在483.4~848.4 mg/kg之间, 平均为569.0 mg/kg, 与长江中下游浅水湖泊表层沉积物总磷含量相比, 大宁河回水区表层沉积物TP含量处于中下游水平, 而消落带土壤中总磷含量在488.9~1487.7 mg/kg之间, 平均含量为813.3 mg/kg, 远远高于沉积物样品总磷含量, 显示了人类活动对消落带土壤P含量的影响。各种形态P在河流沉积物与岸边消落带土壤中分布特点不同: ① 河流沉积物中IP/TP(平均值55.7%)略高于消落带土壤(平均值49.4%); ② 河流沉积物中IP以Ca-P为主(平均比例为83.5%), Fe/Al-P占IP比例仅为15%; 消落带土壤Ca-P占IP平均比例为73.9%, 而Fe/Al-P占IP比例上升至22%; ③ 河流沉积物中活性磷组分(OP+Fe/Al-P)平均含量为261.8 mg/kg, 在TP中所占比例平均值为49%, 而消落带土壤活性磷组分(OP+Fe/Al-P)平均含量为405.7 mg/kg, 在TP中所占比例平均达到54%。消落带土壤中活性磷组分在适宜的环境条件下会成为水体的二次污染源, 因此消落带土壤P对水体富营养化的潜在影响不容忽视。

关键词:三峡入库河流; 大宁河; 回水区; 沉积物; 消落带; 磷形态; 分布特征

中图分类号: X522 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2009)05-1337-08

Phosphorus Forms and Its Distribution Characteristics in Sediments and Soils of Water-Level-Fluctuating Zone of the Backwater Reach from Input River of Three Gorges Reservoir

XU De-xing¹, QIN Yan-wen², ZHANG Lei², ZHENG Bing-hui², HAI Re-ti¹

(1. Department of Environmental Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China; 2. River and Coastal Environment Research Center, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China)

Abstract: The contents of different phosphorus forms in surface sediments and the soils of water-level-fluctuating zone of the backwater reach from input river of Three Gorges Reservoir were measured, using the standard measurement and test (SMT) procedure of phosphorus forms in freshwater sediments. Correlation coefficients between phosphorus forms and sample geochemical characteristics, such as organic matter and major components were analyzed. The results indicated that the TP content in surface sediments varied from 483.4~848.4 mg/kg, and the average content was 569.0 mg/kg. The TP content in surface sediments placed in the mid-lower level, comparing with the TP content in surface sediment from the shallow lakes in the middle and lower reaches of Yangtze River. The TP content in soils of water-level-fluctuating zone varied from 488.9~1487.7 mg/kg, and the average content was 813.3 mg/kg. The average content of TP in soils of water-level-fluctuating zone whole exceeded the surface sediment, indicating of the influence of human's activity on phosphorus contents in soils of water-level-fluctuating zone. Distribution characteristics of phosphorus forms were different between the sediment and soils of water-level-fluctuating zone: ① The ratio of IP/TP in the surface sediments (average value 55.7%) was higher than that in soils of water-level-fluctuating zone (average value 49.4%); ② The domination phosphorus forms of IP in surface sediments was Ca-P (average ratio 83.5%), and the ratio of (Fe/Al-P) / IP was only 15%. The average ratio of Ca-P / IP in the soils of water-level-fluctuating zone was 73.9%, whereas the ratio of Fe/Al-P in IP raised to 22%; ③ The average content of active phosphorus (OP + Fe/Al-P) in surface sediment was 261.8 mg/kg, the average ratio of active phosphorus in TP was 49%, whereas the average content of active phosphorus (OP + Fe/Al-P) in soils of water-level-fluctuating zone was 405.7 mg/kg, the average ratio was 54%. The active phosphorus in soils of water-level-fluctuating zone would become potential pollution sources of water under correct environmental conditions; therefore, the potential impact of phosphorus on water eutrophication in soils of water-level-fluctuating zone couldn't be neglected.

Key words: input rivers of Three Gorges Reservoir; Daning River; backwater reach; sediment; water-level-fluctuating zone; phosphorus forms; distribution character

收稿日期: 2008-05-27; 修订日期: 2008-07-14

基金项目: 科技部国际(中德)合作项目(2007DFA90510)

作者简介: 徐德星(1982~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向水体富营养化和水处理, E-mail: xudexing2009@163.com

* 通讯联系人, E-mail: qinyw@craes.org.cn

三峡工程是开发和治理长江的关键性骨干工程,建成后防洪、发电、航运等综合效益巨大,但是工程的兴建和水库的形成,将部分改变长江水文情势,从而使长江流域生态与环境系统及结构发生变化,对长江流域的生态与环境产生深远的影响^[1].三峡水库蓄水后,库区水位提高、水流减缓、水体扩散能力减弱、库湾和支流污染物的滞留时间延长,水域环境发生了巨大的变化.受水库回水顶托,库湾和部分支流污染加重,局部水域已经出现富营养化现象^[2~4].

大宁河是三峡水库的典型支流之一,发源于川、陕、鄂交界的大巴山南麓,地跨重庆市巫溪、巫山两县.流域面积4 402.2 km²,径流量 30.96 亿 m³,多年平均流量 98.4 m³/s^[5].三峡水库蓄水后,大宁河受到回水的影响^[6].145 m 水位河道回水至上游约 40 km,155 m 和 175 m 蓄水位时回水末端延伸至上游 50~60 km.随着蓄水位升高,河道拓宽,过水面积增大,断面流速迅速减小,汛期 145 m 水位时,断面流速在 0.06 m/s 以下,在开阔河段出现流速非常小的低流速区(约为 0.002 m/s),在冬季 175 m/s 高蓄水位下,整个回水段平均流速只有 0.004 m/s^[7].按照三峡水库支流回水区水体水力滞留时间和流速指标分类,大宁河回水区属湖泊型水体,易产生富营养化^[8].由于河流水体污染的原因,大宁河经常出现“水华”现象^[9].迄今,大宁河水体富营养化及水华现象的出现已经引起各方面的关注和重视,也对其进行了相关研究^[6,9~12].

磷是大多数淡水水体富营养化的主要限制性因子^[13].三峡水库蓄水后,磷成为其生态系统生产力的限制性因素^[14].沉积物是湖泊水库营养物质的重要蓄积库,营养物质在沉积物中不断积累,形成营养物质的内源负荷^[15].沉积物营养物质的内源释放能够维持上覆水体中的营养物质浓度,导致水华现象的持续发生^[16].沉积物与上覆水体之间不断进行磷的交换,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-沉积物界面上的磷的迁移与转化和成岩作用中的地球化学行为,对判断磷的来源及其输入量,以及如何控制水体富营养化有重要的现实意义.

本研究针对三峡入库河流大宁河回水区表层沉积物、消落带土壤磷形态进行分析,应用淡水沉积物中磷形态的标准测试程序(SMT)分析方法,以大宁河回水区表层沉积物、消落带土壤为对象,考察了样品的理化性质和磷形态,探讨了样品中磷形态的分

布特征以及它们之间的关系,以掌握三峡水库秋季蓄水运行(156m)条件下大宁河流域回水区沉积物分布特征,以期为分析水库运行对大宁河沉积物变化的影响、探讨水体中营养负荷的迁移变化规律提供基础数据.

1 材料与方法

1.1 采样点设置

样品于 2007 年 10 月采集.由大宁河回水末端至长江干流交汇处,共设置 6 个采样点,依次标记为 S1、S2、S3、S4、S5、S6,采样站位如图 1 所示.每个站位采集河流中泓线处沉积物样品,同时采集消落带土壤样品.

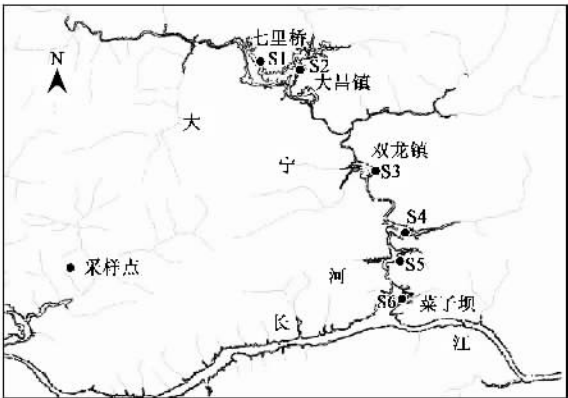


图 1 大宁河采样点站位示意
Fig.1 Sampling sites in the Daning River

1.2 样品的采集和处理

用蚌式采泥器采集表层(0~5 cm)沉积物样品,同时采集消落带表层土壤(0~2 cm)样品.样品采集后,放在铁盒中、密封好,于 4℃ 条件下保存.样品运回实验室后, - 20℃ 条件下冷冻,经 FD-1A-50 型冷冻干燥机冷冻干燥处理,用重物捣碎、过 100 目(0.149 mm)筛,保存于封口袋中,置于干燥器中备用.

1.3 分析方法

样品磷形态分析方法采用欧洲标准测试委员会框架下发展的 SMT 法^[17,18],该法将沉积物中的磷分为 TP、OP、IP、Fe/Al-P 和 Ca-P,具体步骤见图 2;有机质用重铬酸钾容量法^[19]测定;主要元素组成用电感耦合等离子体发射光谱仪测定^[20];颗粒组成用马尔文 2000 激光粒度分析仪测定(此分析项目由中国科学院生态环境研究中心协助完成);矿物组成采用 X 射线衍射法测定[此分析项目由中国地质大学(北京)地学中心协助完成],测试参照标准为 JY/T009-1996.

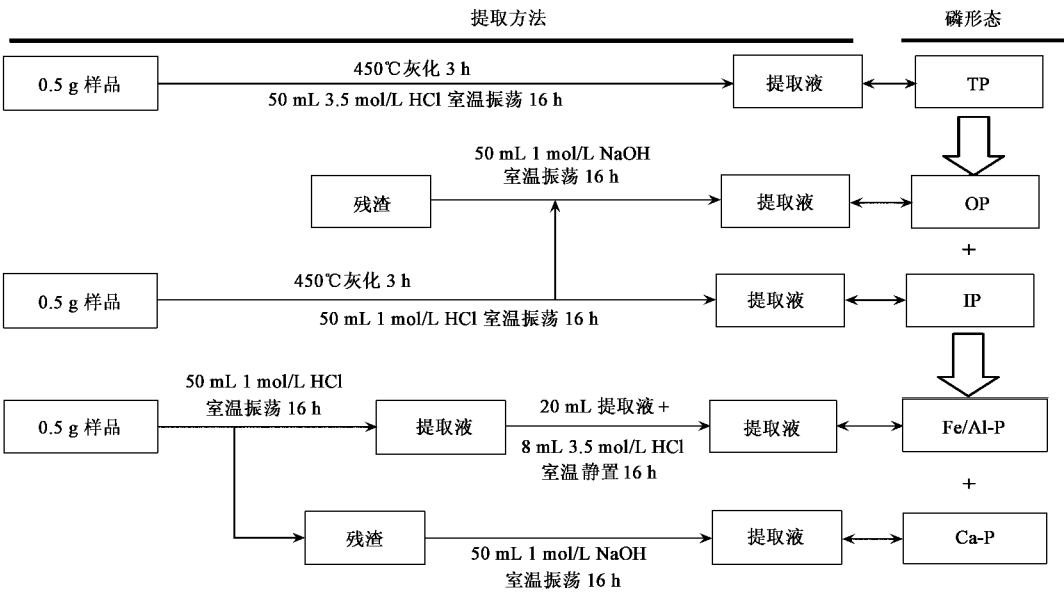


图 2 淡水沉积物磷形态分离 SMT 法

Fig.2 SMT protocol for phosphorus forms sequential extraction in freshwater sediment

2 结果与讨论

2.1 样品的理化性质

2.1.1 有机质与粒度

沉积物样品中,有机质含量在 23.0 ~ 34.0 g/kg 之间,最大值出现在 S6 点处,最小值出现在 S2 点处,变化范围不大.S6 处于河口处,受库区回水影响较大,这可能是导致此点沉积物样品中有机质含量较高的主要原因.

消落带样品中有机质含量在 22.0 ~ 77.0 g/kg 之间,比沉积物高出很多,最大值出现在 S5 点处,最小值出现在 S1 点处,最大值与最小值相差 3.5 倍,变化范围较大.大宁河流域以农业为第一产业,耕种过程中农药及化肥的施用以及生活污水的排放等可能是造成消落带土壤有机质含量较高的主要原因.大宁河流域多暴雨,水土流失严重,消落带土壤中较高的有机质含量对水体富营养化有潜在的威胁.

沉积物样品粒径组成中粉砂平均含量高达 77.0%,粘土平均含量为 13.0%,极细砂的平均含量为 8.2%;消落带样品粒径组成中粉砂平均含量为 67.7%,极细砂的平均含量为 14.5%,粘土的平均含量为 7.4%.对比各组分的含量可以看出,沉积物样品的粒度比消落带样品细.整体上讲,样品中颗粒组成主要以粉砂粒级、粘粒粒级和极细砂粒级为主,这一分析结果与长江中下游湖泊沉积物颗粒组成基本一致^[21].

2.1.2 物相分析

沉积物、消落带样品的氧化物组成都以 SiO₂、CaO、Al₂O₃ 为主,其中 SiO₂ 最高.二者的差别在于,沉积物样品中的 CaO 含量比消落带样品高,而 Al₂O₃ 含量比消落带样品低.本研究中的沉积物样品主要氧化物组成与长江中下游浅水湖泊沉积物样品中主要元素组成稍有差别^[22].

大宁河回水段沉积物样品矿物组成以方解石、绿泥石、伊利石、石英为主,其次为白云石和长石,赤铁矿和含铁矿物没有检测到;消落带样品矿物组成中,石英含量最高,其次为绿泥石、伊利石、长石、方解石,赤铁矿和含铁矿物含量极低,多数站位未检出.样品中矿物组成以含 Si 和 Ca 的石英、绿泥石、伊利石、长石、方解石为主,含铁矿物含量极低.大宁河回水段沉积物及消落带样品矿物组成与长江中下游湖泊沉积物样品的矿物组成^[21]差异明显,这主要是因为长江流域位于我国亚热带地区,土壤矿物组成与演变深受亚热带生物气候条件的影响有关^[23].

2.2 磷的赋存形态

分析研究结果,沉积物样品中,总磷含量在 483.4 ~ 848.4 mg/kg 之间,最大值出现在 S6 点处,最小值出现在 S1 点处,最大值与最小值相差近 2 倍,平均为 569.0 mg/kg.S6 点位于巫山县城附近,处于大宁河与长江干流的交汇处,人口密度大,生活污水排放量较大,该区域较严重的污染程度及受库区回水影响较大可能是导致此点位总磷含量较高的主要

原因.

消落带样品中,总磷含量在 488.9 ~ 1487.7 mg/kg之间,最大值出现在 S4 点处,最小值出现在 S2 点处,最大值与最小值相差约 3 倍,变化范围比沉积物大,平均为 813.3 mg/kg. S2 点位于大昌新城附近,大昌新城以旅游为主,农业耕地面积很有限,含磷农药和化肥施用量很小,此点消落带样品中磷的来源比较单一,主要来源于生活污水的排放,因此 S2 点消落带样品总磷含量相对较低. S4 点靠近农业耕种区,此点总磷含量受人为因素和自然因素的影响较大,农业耕种过程中化肥及农药的大量施用,经暴雨的冲刷作用大量富含磷的泥砂被冲落到消落带中,这可能是 S4 点总磷含量较高的主要原因.

沉积物样品中总磷含量与长江中下游浅水湖泊表层沉积物总磷含量^[24~26](见图 3)相比处于中等偏下水平,检测结果与长江口沉积物总磷含量^[27]变化范围相接近. 由沉积物和消落带样品中总磷分布情况(见图 4)可以看出消落带样品总磷含量明显高于沉积物样品,这可能与沉积物中磷的释放有一定的关系,具体原因有待进一步研究. 沉积物样品中总磷的分布情况在一定程度上反映了库区蓄水后对大宁河回水段水环境的影响状况. 沉积物和消落带样品中各形态磷的分布情况见图 5.

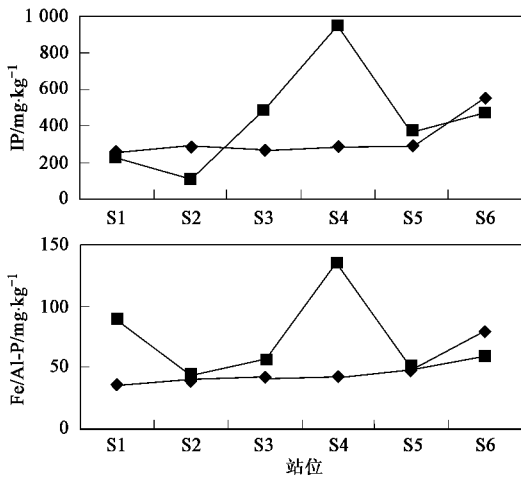


图 5 沉积物和消落带样品中各形态磷的分布

Fig.5 Distribution of phosphorus forms in sediments and water-level-fluctuating zone samples

2.2.2.1 有机磷(OP)

OP 是部分活性的磷形态. Rydin^[28]通过对瑞典 Erken 湖沉积物磷形态的研究发现,大约 50% 的 OP 可以被降解成为生物可利用的磷形态.

沉积物样品中,OP 含量在 198.6 ~ 230.0 mg/kg 之间,最大值出现在 S6 点处,最小值出现在 S2 点

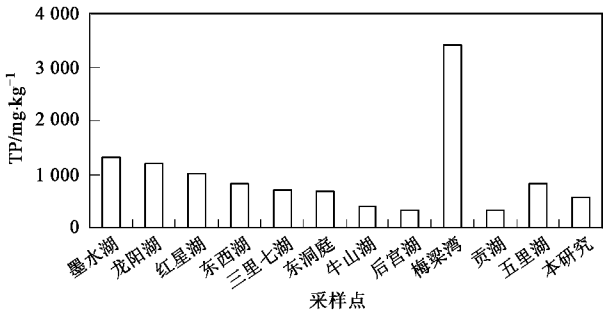


图 3 长江中下游浅水湖泊表层沉积物 TP 含量

Fig.3 Total phosphorus in the surface sediments from the shallow lakes in the middle and lower reaches of Yangtze River

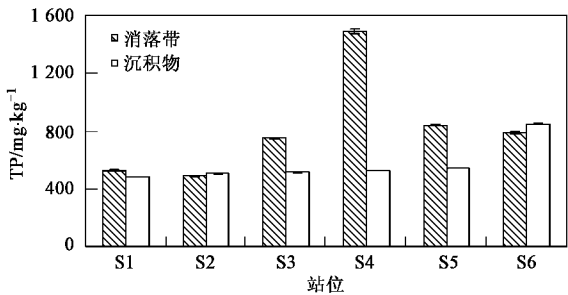
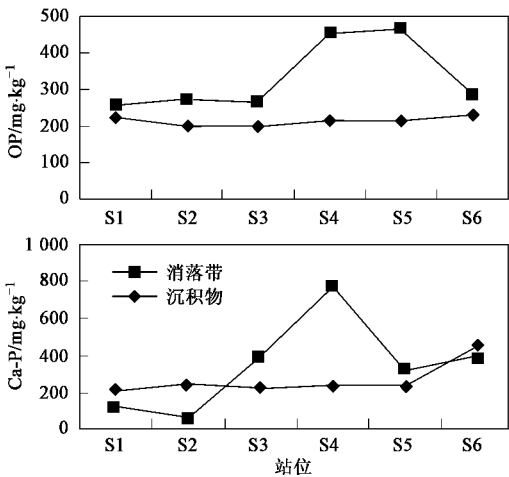


图 4 沉积物和消落带样品中总磷的分布

Fig.4 Distribution of TP in sediments and water-level-fluctuating zone samples



处,最大值与最小值相差甚微,平均为 213.6 mg/kg. 消落带样品中,OP 含量在 258.1 ~ 465.0 mg/kg,最大值出现在 S4 点处,最小值出现在 S1 点处,最大值与最小值相差约 2 倍,平均为 333.7 mg/kg. 沉积物样品各站 OP 含量差异不大;而消落带样品各站 OP 含量差异明显,并且各站位的 OP 含量均高于沉

积物样品,有的站位 OP 含量比沉积物样品高出 1 倍之多.造成 2 种样品 OP 含量有较大差异的原因可能主要有两方面:一方面可能是消落带样品的 OP 含量受人为因素的影响导致;另一方面可能是沉积物样品中 OP 部分释放到了水体中,具体原因有待深入研究.沉积物、消落带样品中,OP 占总磷的比重范围分别在 27.1% ~ 46.4% 和 30.7% ~ 56.5% 之间,平均为 38.7% 和 43.7%,所占比重较大.样品中 OP 含量较高,这种潜在的巨大的磷负荷与大宁河“水华”现象的暴发有密切的关系;同时也表明流域内农业径流输入磷含量相对较高^[18],这与该地区以农业为第一产业的特点相吻合.

2.2.2 无机磷(IP)

IP 主要是沉积过程中吸附在沉积物上的溶解态磷酸盐及与水体中部分金属离子结合后以不同形态存在的 $P^{[29]}$. 沉积物样品中,IP 含量在 268.3 ~ 547.3 mg/kg,最大值出现在 S6 点处,最小值出现在 S1 点处,最大值与最小值相差约 2 倍,平均为 322.1 mg/kg.在消落带样品中,IP 含量在 109.8 ~ 954.6 mg/kg,最大值出现在 S4 点处,最小值出现在 S2 点处,最大值与最小值相差约 8 倍,平均为 434.7 mg/kg.沉积物、消落带样品中 IP 含量变化趋势与 TP 基本一致.消落带样品中 IP 最大值与最小值相差较大,变化幅度较大.这可能与消落带土壤容易受人为因素影响有关.沉积物样品中,IP 占 TP 的比重范围在 51.5% ~ 64.5%,平均为 55.7%.消落带样品中,无机磷占总磷的比重范围在 41.4% ~ 64.8%,平均为 49.4%.表明样品中的磷以 IP 为主.

应用 SMT 法测得的无机磷(IP)包括铁铝结合态磷(Fe/Al-P)和钙结合态磷(Ca-P)两部分,下面就样品中的 Fe/Al-P 和 Ca-P 的分布情况分别加以讨论.

(1)铁铝结合态磷(Fe/Al-P) 在所测沉积物样品中,Fe/Al-P 含量在 36.3 ~ 78.9 mg/kg,最大值出现在 S6 点处,最小值出现在 S1 点处,最大值与最小值相差约 2 倍,平均为 48.2 mg/kg.在消落带样品中,Fe/Al-P 含量在 42.7 ~ 134.5 mg/kg,最大值出现在 S4 点处,最小值出现在 S2 点处,最大值与最小值相差约 3 倍,平均为 72.0 mg/kg.沉积物样品中,Fe/Al-P 占无机磷的比例平均为 15%,在消落带样品中则上升至 22%;并且消落带样品各站位的 Fe/Al-P 值均大于沉积物样品,可能是因为沉积物中的部分 Fe/Al-P 通过水-沉积物界面的迁移转化作用释放到了水体中.Fe/Al-P 作为磷形态中的活性部分,是可以被生物利用的磷^[18],对水体富营养化有一定的潜

在影响.消落带土壤中较高的 Fe/Al-P 含量对水体富营养化的影响不容忽视,有待进行深入研究.

水体沉积物中 Fe/Al-P 的含量与沉积物粒度密切相关,沉积物中粘土含量越高,颗粒越细,吸附能力越强,Fe/Al-P 的含量就越高^[30].大宁河回水段沉积物样品中,粘粒平均含量仅为 13.0%,所占比重较小,这可能是导致沉积物中 Fe/Al-P 含量低的原因.Fe/Al-P 是一种污染指示物^[30],S6 处沉积物样品 Fe/Al-P 含量呈现出明显的增加趋势,S6 点位于巫山县城附近,人口密度大,生活污水排放量较大,该区域较严重的污染程度及受库区回水影响较大可能是导致此点位 Fe/Al-P 含量较高的主要原因.

(2)钙结合态磷(Ca-P) 钙结合态磷主要来源于碎屑岩或本地自生^[18].Ca-P 是沉积物中较惰性的磷组分,由于磷酸钙的溶度积 K_{sp} 为 1.6×10^{-44} ,很难被溶解,对间隙水和上覆水的磷含量的影响较小^[15].

沉积物样品中,Ca-P 占 IP 比重在 80.6% ~ 85.6% 之间,平均为 83.5%;消落带样品中,Ca-P 占 IP 比重 54.1% ~ 84.9% 之间,平均为 73.9%,远远高于太湖入湖河流宜溧河及西苕溪的研究结果^[26].沉积物样品矿物组成中 CaO 的平均含量高于消落带样品中沉积物样品 CaO 的平均含量,但是沉积物样品中 Ca-P 平均含量及变化范围比消落带样品小,这可能与沉积物中 Ca-P 含量受水动力状况、水温、酸碱度等沉积环境因素的影响有关^[30].样品中,Ca-P 所占比重较大,说明样品中 Ca-P 既是无机磷的优势组分,同时也是总磷的优势组分.样品中较高的 Ca-P 含量可能与流域范围内的土壤及矿物中较高的 Ca 含量有关.

沉积物、消落带样品中各形态磷的平均含量及其占 TP 的平均比例见图 6.实验结果还表明,沉积物中磷形态趋于较稳定的存在方式,Ca-P 和 OP 在沉积物中的比例较高,Fe/Al-P 的相对含量较低,这与前人对河流沉积物磷形态的研究结果一致^[28].

样品中,Ca-P 在 TP 中占有优势,这可能与流域内的土壤及矿物组成情况有关;OP 占 TP 的比重较 Ca-P 低,比 Fe/Al-P 高出很多;OP 和 Fe/Al-P 作为磷形态中的活性部分,两者在消落带样品中占 TP 的平均含量均高于沉积物样品,沉积物样品中 OP 和 Fe/Al-P 之和占 TP 的平均比例为 49%,在消落带样品中上升至 54%,表明了人类活动对消落带土壤 P 含量的影响;消落带中各形态磷含量基本高于沉积物,究其原因可能是沉积物中部分磷在水-沉积物界

面发生迁移转化释放到水体中,另一方面也可能是消落带各形态磷含量受农业面源污染及生活污水、工业废水排放的影响致使其含量相对较高.造成样品各形态磷含量差异的原因有待深入研究.大宁河

流域多暴雨、流域内坡耕地比重大,在发生暴雨时,大量的泥沙携带的污染物进入大宁河^[5],消落带土壤中较高的活性磷含量对流域内水体富营养化的潜在影响不容忽视.

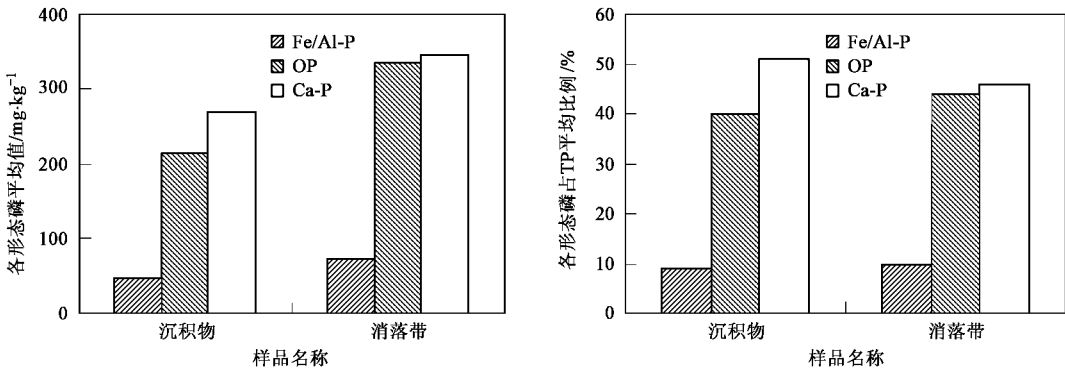


图 6 沉积物、消落带样品中各形态磷的平均含量及其占总磷的平均比例

Fig.6 Average content and ratio of phosphorus forms in sediment and water-level-fluctuating zone samples

2.3 相关性分析

沉积物中磷的输入包括径流输送、污水排放、生物来源等,输入的磷经过复杂的生物地球化学过程后沉淀,其含量受沉积物性质、水动力条件、生化作用等因素的影响^[31].分析沉积物中各形态磷之间的关系以及它们与沉积物的某些理化性质之间的相关关系,有利于认识磷形态的分布特征.本研究分析了样品中各形态磷含量之间的相关性以及样品中有机质含量和主要氧化物组成与各形态磷含量之间的相关性,以期更深入地了解研究区域内磷形态的分布特征.

表 1 给出了沉积物样品中各形态磷含量之间的相关性分析结果,沉积物样品中 TP 含量与 Fe/Al-P、Ca-P极显著相关,说明沉积物中 TP 含量的增加主要来自 Fe/Al-P 和Ca-P.在各形态磷中,OP 与 Fe/Al-P、Ca-P相关性较弱,该结果表明样品中 OP 与Fe/Al-P、Ca-P来源存在差异;Fe/Al-P 与 Ca-P显著相关,说明二者的来源可能相同.

表 1 沉积物磷形态相关系数矩阵¹⁾

Table 1 Correlation coefficients among phosphorus forms in sediment samples

	TP	IP	OP	Fe/Al-P	Ca-P
TP	1				
IP	0.995**	1			
OP	0.596	0.565	1		
Fe/Al-P	0.993**	0.986**	0.580	1	
Ca-P	0.990**	0.999**	0.556	0.975**	1

1) * 表示在 0.05 水平上显著相关, ** 表示在 0.01 水平上显著相关, n = 6, 下同

消落带样品中的磷含量易受人为因素等外界条件影响.表 2 给出了消落带样品中各形态磷含量之间的相关性分析结果,消落带样品中 TP 含量与Ca-P极显著相关,与 OP、Fe/Al-P 相关性较弱,这可能与流域内土壤和矿物组成以富含钙的矿物为主有关.在各形态磷中,OP 与 Fe/Al-P、Ca-P相关性较弱,Fe/Al-P与Ca-P的相关性一般,说明消落带样品中磷形态的分布情况较复杂.

表 2 消落带磷形态相关系数矩阵

Table 2 Correlation coefficients between phosphorus forms in water-level-fluctuating zone samples

	TP	IP	OP	Fe/Al-P	Ca-P
TP	1				
IP	0.971**	1			
OP	0.746	0.592	1		
Fe/Al-P	0.746	0.742	0.384	1	
Ca-P	0.965**	0.995**	0.607	0.675	1

对沉积物中磷形态与其沉积物的理化性质(有机质、主要氧化物组成)之间的关系可以用来推断沉积物中磷的特性^[32].本研究分析了沉积物样品中各形态磷含量与有机质含量、主要氧化物之间的相关性,分析结果见表 3.

沉积物样品中,有机质的含量与 TP、Fe/Al-P、Ca-P含量相关性较弱,与 OP 的相关性较好,达到了极显著水平,说明有机质的输入对沉积物中磷形态的分布有一定的影响.

在主要氧化物组成中,主要是 TFe_2O_3 (总的铁氧化物含量)、 Al_2O_3 、CaO 与各形态磷有较密切关

系. TFe_2O_3 、 Al_2O_3 、 CaO 与 TP 、 Fe/Al-P 、 Ca-P 均呈现极显著正相关关系,与 OP 的相关性较弱,这一结果表明了沉积物中各形态磷来源的差异.

表 3 沉积物样品中各形态磷与有机质、 TFe_2O_3 、 Al_2O_3 、 CaO 之间的相关性

Table 3 Correlation coefficients between phosphorus forms and OM, TFe_2O_3 , Al_2O_3 , CaO in sediment samples

	TP	Fe/Al-P	Ca-P	OP
OM	0.749	0.704	0.720	0.921**
TFe_2O_3	0.975**	0.993**	0.954**	0.528
Al_2O_3	0.963**	0.985**	0.927**	0.515
CaO	0.941**	0.966**	0.894*	0.674

消落带样品中各形态磷含量与有机质、 TFe_2O_3 、 Al_2O_3 、 CaO 之间的相关性很小或没有(见表 4),这可能与消落带样品磷含量受诸多环境及人为因素的影响有关,具体原因有待深入研究.

表 4 消落带样品中各形态磷与有机质、 TFe_2O_3 、 Al_2O_3 、 CaO 之间的相关性

Table 4 Correlation coefficients between phosphorus forms and OM, TFe_2O_3 , Al_2O_3 , CaO in water-level-fluctuating zone samples

	TP	Fe/Al-P	Ca-P	OP
OM	0.440	0.158	0.352	0.732
TFe_2O_3	0.026	0.328	0.063	0.639
Al_2O_3	0.157	0.256	0.085	0.697
CaO	0.245	0.200	0.170	0.758

3 结论

(1)沉积物样品中总磷含量在 483.4 ~ 848.4 mg/kg 之间,与长江中下游浅水湖泊表层沉积物总磷含量相比处于中等偏下水平,检测结果与长江口沉积物总磷含量变化范围相接近;消落带样品中总磷含量在 488.9 ~ 1487.7 mg/kg ,消落带样品中的总磷含量明显高于沉积物样品中的总磷含量,这可能与沉积物中磷的释放有一定的关系.沉积物、消落带样品中的磷以无机磷为主,有机磷为辅.

(2)消落带样品各站位的 OP 含量均高于沉积物样品,这可能与沉积物中磷的释放及消落带土壤受人为因素的影响有一定的关系.沉积物、消落带样品中, OP 占总磷的比重范围分别在 27.1% ~ 46.4% 和 30.7% ~ 56.5%之间,平均为 38.7%和 43.7%,所占比重较大.样品中 OP 含量较高,这种潜在的巨大的磷负荷与大宁河“水华”现象的暴发有密切的关系;同时也表明流域内农业径流输入磷含量相对较高,这与该地区以农业为第一产业的特点相吻合.

(3)样品中的 IP 是 TP 的优势组分,其中 Ca-P 又

是无机磷的优势组分, Fe/Al-P 在无机磷中所占比例相对较小.消落带样品中各站位的 Fe/Al-P 含量均高于沉积物样品,消落带样品中较高的 Fe/Al-P 含量对水体富营养化有潜在的不容忽视的影响.

(4)沉积物样品各形态磷之间的相关性显著;理化性质中,主要氧化物 TFe_2O_3 、 Al_2O_3 、 CaO 与各形态磷呈现极显著正相关关系;有机质含量与各形态磷之间相关性较弱,与 OP 显著相关,说明有机质的输入对沉积物中磷形态的分布有一定的影响.消落带样品中各形态磷含量与有机质、主要氧化物之间的相关性很小或没有,可能与消落带样品磷含量受诸多因素的影响有关.

参考文献:

[1] 长江水利委员会.三峡工程生态环境影响研究[M].武汉:湖北科学技术出版社,1997.1-7.

[2] 蔡庆华,胡征宇.三峡水库富营养化问题与对策研究[J].水生生物学报,2006,30(1):7-11.

[3] 郑丙辉,曹承进,秦延文,等.三峡主要入库河流氮营养盐特征及其来源分析[J].环境科学,2008,29(1):1-6.

[4] 曹承进,秦延文,郑丙辉,等.三峡主要入库河流磷营养盐特征及其来源分析[J].环境科学,2008,29(2):310-315.

[5] 许其功.三峡库区典型流域农业非点源污染研究[D].北京:北京师范大学,2007.1-5.

[6] 蒙万轮,钟成华,邓春光,等.库区蓄水后大宁河神女溪富营养化调查与评价[J].云南环境科学,2005,24(增刊):136-139.

[7] 邓春光.三峡库区富营养化研究[M].北京:中国环境科学出版社,2007.83-88.

[8] 郑丙辉.三峡水库水环境综合管理技术研究报告[R].北京:中国环境科学研究院,2006.63-87.

[9] 刘瑞民,沈珍瑶.大宁河流域生态环境综合评价及其演变[J].北京师范大学学报(自然科学版),2006,42(2):200-203.

[10] 蒙万轮,钟成华,邓春光,等.三峡库区蓄水后支流回水段富营养化研究[J].广州环境科学,2005,20(2):38-41.

[11] 钟成华,辛治国,赵文谦,等.三峡水库蓄水后大宁河水体富营养化调查与评价[J].灌溉排水学报,2004,23(3):20-23.

[12] 周广杰,况琪军,胡征宇.大宁河春季浮游藻类“水华”及其营养限制[J].长江流域资源与环境,2007,16(5):628-633.

[13] Schindler D W. The evolution of phosphorus limitation in lakes[J]. Sci, 1997, 195: 260-262.

[14] 张远,郑丙辉,刘鸿亮,等.三峡水库蓄水后氮、磷营养盐的特征分析[J].水资源保护,2005,21(6):23-26.

[15] 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.

[16] Pomeioy L R, Smith E E, Crant C M. The exchange of Phosphorus between estuarine water and sediments [J]. Limnol Oceanogr, 1965, 10(2): 167-172.

[17] Ruban V, Brigault S, Demare D, et al. An investigation of the origin and mobility of phosphorus in freshwater sediments from bortlesorgues reservoir, France [J]. Journal of Environmental Monitoring, 1999, 1(4): 403-407.

- [18] 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.
- [19] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. (第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002. 462-464.
- [20] SY/T5163-1995, 沉积物粘土矿物相对含量 X 射线衍射分析方法[S].
- [21] 孟凡德, 姜霞, 金相灿. 长江中下游湖泊沉积物理化性质研究[J]. *环境科学研究*, 2004, **17**(增刊): 24-29.
- [22] 金相灿, 庞燕, 王圣瑞, 等. 长江中下游浅水湖泊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.
- [23] 马毅杰. 长江中下游土壤矿物组成与其土壤肥力[J]. *长江流域资源与环境*, 1994, **3**(1): 1-8.
- [24] 张敏. 长江中下游浅水湖泊富营养化机制与重金属污染研究[D]. 北京: 中国环境科学研究院, 2005. 129-157.
- [25] 金相灿, 王圣瑞, 庞燕. 太湖沉积物磷形态及 pH 值对磷释放的影响[J]. *中国环境科学*, 2004, **24**(6): 707-711.
- [26] 张路, 范成新, 池俏俏, 等. 太湖及其主要入湖河流沉积磷形态分布研究[J]. *地球化学*, 2004, **33**(4): 423-432.
- [27] 高效江, 陈振楼, 许世远. 长江口滨岸潮滩沉积物中磷的环境地球化学特征[J]. *环境科学学报*, 2003, **23**(6): 711-715.
- [28] Rydin E. Potentially mobile phosphorus in Lake Erken sediment[J]. *Wat Res*, 2000, **34**(7): 2037-2042.
- [29] 潘成龙, 王家权, 郑志侠, 等. 巢湖沉积物中氮与磷赋存形态研究[J]. *生态与农村环境学报*, 2007, **23**(1): 43-47.
- [30] 刘敏, 陆敏, 许世远, 等. 长江河口及其上海岸带水体沉积物中磷的存在形态[J]. *地学前缘*, 2008, **7**: 94-98.
- [31] 侯立军, 刘敏, 许世远, 等. 长江口岸带柱状沉积物中磷的存在形态及其环境意义[J]. *海洋环境科学*, 2001, **20**(2): 7 -12.
- [32] Andrieux-Loyer F, Aminot A. Phosphorus forms related to sediment grain size and geochemical characteristics in French coastal areas, Estuarine[J]. *Coastal and Shelf Science*, 2001, **52**: 617-629.