

# 九龙江河流-库区系统沉积物磷特征及其生态学意义

鲁婷, 陈能汪\*, 陈朱虹, 王龙剑, 吴杰忠

(厦门大学环境与生态学院, 福建省海陆界面生态环境重点实验室, 厦门 361005)

**摘要:** 采用沉积物磷形态的标准测试方法 (SMT) 分析了九龙江北溪河流-库区系统 16 个站位的沉积物磷含量和形态组成, 探讨了该系统沉积物磷的空间分布、形态特征及其生态学意义。结果表明, 沉积物总磷 (TP) 的含量为  $387 \sim 2\,092 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 平均  $1\,032 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。以无机磷 (IP) 为主要赋存形态, IP 占 TP 的 48% ~ 98%, 而 IP 中以铁铝结合态磷 (Fe/Al-P) 为主, 占 IP 的 43% ~ 99%。TP 和 Fe/Al-P 含量呈现上游高、下游低的空间分布规律, 与表层水 DTP 含量和陆源污染负荷的分布一致。北溪沉积物 TP 含量的高低主要受 Fe/Al-P 控制。沉积物富磷、高 Fe/Al-P 比例 (释放潜力大) 以及“上游高下游低”的空间分布特征, 加上九龙江上游水体较低的氮磷比值属于藻类生长磷弱限制, 极可能是九龙江水华首先在上游暴发并向下游库区蔓延的主要原因。九龙江沉积物磷的这些特征在水华过程中具有重要的调控作用和生态学意义。

**关键词:** 河流-库区系统; 沉积物磷; SMT; 九龙江

中图分类号: X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)09-3430-07

## Characteristics of Sediment Phosphorus in the Jiulong River-Reservoir System and Its Ecological Significance

LU Ting, CHEN Neng-wang, CHEN Zhu-hong, WANG Long-jian, WU Jie-zhong

(Fujian Provincial Key Laboratory for Coastal Ecology and Environmental Studies, College of the Environment and Ecology, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

**Abstract:** Sediment phosphorus (P) content and component ratio from 16 sites along the North Jiulong River-reservoir system were analyzed using the Standard Measurement and Test (SMT) procedure. The spatial pattern and characteristics of sediment P and its ecological significance in the Jiulong River-reservoir system were examined in combination with water measurement and watershed information. Total P content in sediments ranged from 387 to 2 092  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  with an average of 1 032  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ . Inorganic phosphorus (IP) dominated P in sediment, accounting for 48% -98% of TP, and Fe/Al-bound phosphorus (Fe/Al-P) took 43% -99% of IP. The spatial pattern of sediment showed that TP and Fe/Al-P were higher in upstream and lower in downstream, corresponding to the spatial variation of surface water P and land-based loads from animal waste, human waste and fertilizer loss. Spatial variation of TP in sediment was controlled by Fe/Al-P along the North Jiulong River. The P-rich sediment with a great release potential due to the high ratio of Fe/Al-P, the typical spatial pattern, and the lower N/P ratio observed in upstream water (where phytoplankton growth tends to be weakly limited by phosphorus), are likely to explain the fact that algal blooms first appear in the upstream and then spread to downstream reservoirs along the North Jiulong River. Present findings concerning sediment P characteristics indicate an important regulating effect and the ecological significance on the process of algal blooms in the Jiulong River.

**Key words:** river-reservoir system; sediment phosphorus; SMT procedure; Jiulong River

在全球气候变暖与水体富营养化双重影响下, 水环境问题日益突出<sup>[1]</sup>。通常认为磷是淡水生态系统初级生产力的限制因子, 磷和氮的富集是导致水体富营养化和有害藻华的重要机制<sup>[2]</sup>。大量梯级电站开发导致河流湖库化, 进而改变了河流-库区系统的水文条件(如增加水力停留时间)和生物地球化学过程(如改变氮、磷、硅生源要素比例), 该类系统发生水体富营养化和水华的风险较大。除外源输入外, 库区沉积物作为内源是上覆水体中磷的重要来源<sup>[3-4]</sup>。在水华暴发过程中, 沉积物磷的释放及藻类利用往往是水华持续暴发的主要原因。目前, 淡水沉积物磷的研究主要集中在湖泊系统, 国内以长江中下游浅水湖泊特别是太湖<sup>[5-6]</sup>、鄱阳湖<sup>[7]</sup>、巢

湖<sup>[8]</sup>、武汉东湖<sup>[9]</sup>的相关研究比较多。国际上的研究集中在欧美地区, 如瑞典的 Erken 湖<sup>[10]</sup>、希腊北部的 Volvi 湖和 Koronia 湖<sup>[11]</sup>、美国缅因州 6 个湖泊<sup>[12]</sup>等。近年来, 我国大量的水华事件发生在经济发达的长江流域和东部沿海地区, 且呈现从湖泊向水库迅速扩展的趋势, 直接威胁饮用水源安全<sup>[13]</sup>。国内外在沉积物磷方面的研究主要集中在湖泊系统, 河流库区沉积物磷的研究还很少。

收稿日期: 2012-12-17; 修订日期: 2013-03-01

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项 (2012121053); 国家自然科学基金项目 (41076042)

作者简介: 鲁婷 (1987-) 女, 硕士研究生, 主要研究方向为河流-库区磷循环过程, E-mail: luting1\_1987@163.com

\* 通讯联系人, E-mail: nwchen@xmu.edu.cn

九龙江是福建省第二大江,近 30 年来,流域内化肥施用量和畜禽养殖量增加了 3~7 倍<sup>[14]</sup>。梯级水电站大量修建,坡地开发和城市化进程加快<sup>[15]</sup>,受这些因素的综合影响,流域营养盐污染负荷持续增加,河流湖库化与富营养化问题日益加剧。2009 年 1 月底,九龙江北溪上游发生了大规模的拟多甲藻水华,并向下游库区蔓延式暴发直至漳州、厦门的饮用水源地——江东库区<sup>[16]</sup>。为深入研究九龙江水华过程及其调控机制,在了解浮游植物群落分布特征<sup>[17]</sup>的基础上,本实验以九龙江北溪河流-库区系统为整体研究对象,调查分析沉积物磷的不同形态含量,结合水化学参数和沉积物理化性质及流域污染信息,全面分析该系统沉积物磷的基本特征,并探讨磷在藻类水华过程中的调控作用和生态学意义。

### 1 材料与方法

#### 1.1 研究区域概况

九龙江地处亚热带季风区,年均降水量 1 400~1 800 mm,4~9 月的降雨量占全年的 75%。流域内有北溪、西溪和南溪 3 条主要干流,其中北溪是九龙江水系中最长、最重要的溪流,源于龙岩梅花山一带,全长 274 km,多年平均流量 281.4 m<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup>,汇水面积 9 640 km<sup>2</sup>,河道平均坡降 2.4‰,由西北向东南流经农业集约化水平较高的龙岩山区(生猪养殖为主)和漳州平原(蔬菜水果种植为主),在厦门入海。九龙江全流域电站大坝超过 120 座,其中仅北溪干流上就建有 11 级梯级水电站,河流湖库化现象严重,九龙江已演变为典型的河流-库区群系统。

#### 1.2 样品采集与现场观测

沿北溪干流设置 16 个采样点(涵盖库区与河流),于 2012 年 1 月采集沉积物和表层水样品(最下游的 N16 于 3 周前采集)。利用抓斗采泥器采集表层沉积物,利用 2.5 L 有机玻璃采水器采集表层水,利用 WTW 多参数水质仪现场测定 pH、DO、水温、电导率等。部分样点没能采到沉积物,采到的有 12 个沉积物样品(编号为 N1、N2、N3、N6、N7、N8、N9、N10、N11、N12、N13、N16)。

#### 1.3 样品处理与实验分析

水样带回实验室后立即经 0.45 μm 的醋酸纤维膜过滤,用紫外可见分光光度法分析溶解态总氮(DTN)和总磷(DTP)。沉积物样品经过高速(8 000 r·min<sup>-1</sup>,15 min)离心,经 FD-1 冷冻机中真空冷冻干燥,研磨过 100 目筛,4℃ 冰箱保存至分析完毕。实验所用玻璃及聚乙烯器皿均用稀盐酸浸泡 24 h 以上后,用超纯水清洗 3 遍,实验用水为超纯水。

沉积物磷的形态分析采用欧洲标准测试委员会框架下发展的 SMT 法<sup>[18]</sup>。该法将沉积物磷分为 5 种形态,即 NaOH-P(Fe/Al 结合态磷)、HCl-P(Ca 结合态磷)、IP(无机磷)、OP(有机磷)和 TP(总磷),提取步骤见图 1。提取后 5 000 r·min<sup>-1</sup>离心 20 min,提取上清液,用钼锑抗分光光度法测定磷含量,残渣进入下一步提取,每个样品做 3 个平行样。各形态磷含量的测定结果以沉积物干重为基准表示(mg·kg<sup>-1</sup>)。

此外,同时测定了沉积物相关理化参数,其中 pH 和 Eh 的测定参照文献[20],沉积物烧失量(LOI)的

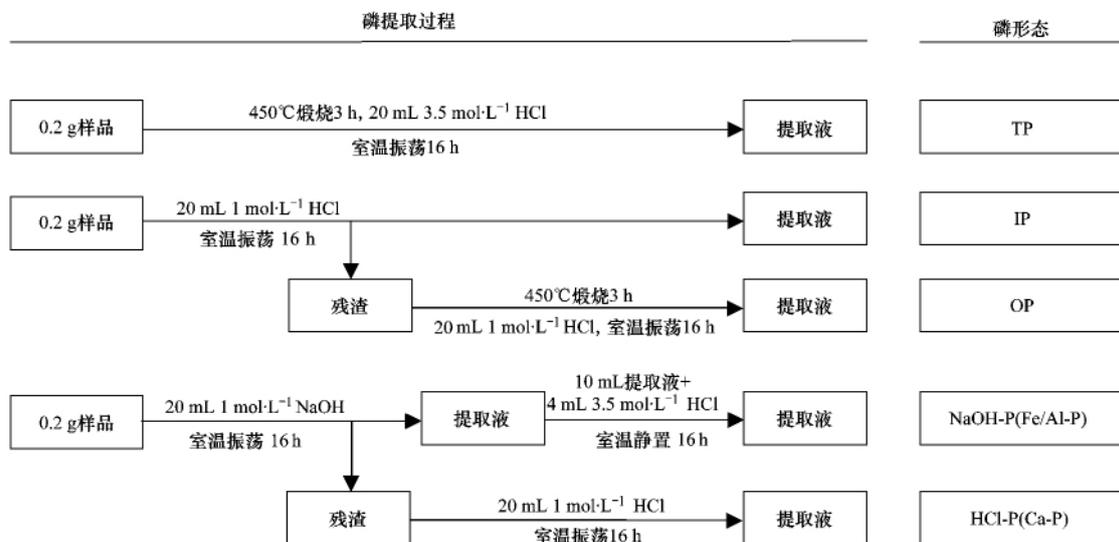


图 1 沉积物磷形态分离 SMT 法<sup>[19]</sup>

Fig. 1 SMT procedure for sequential extraction of sediment phosphorus

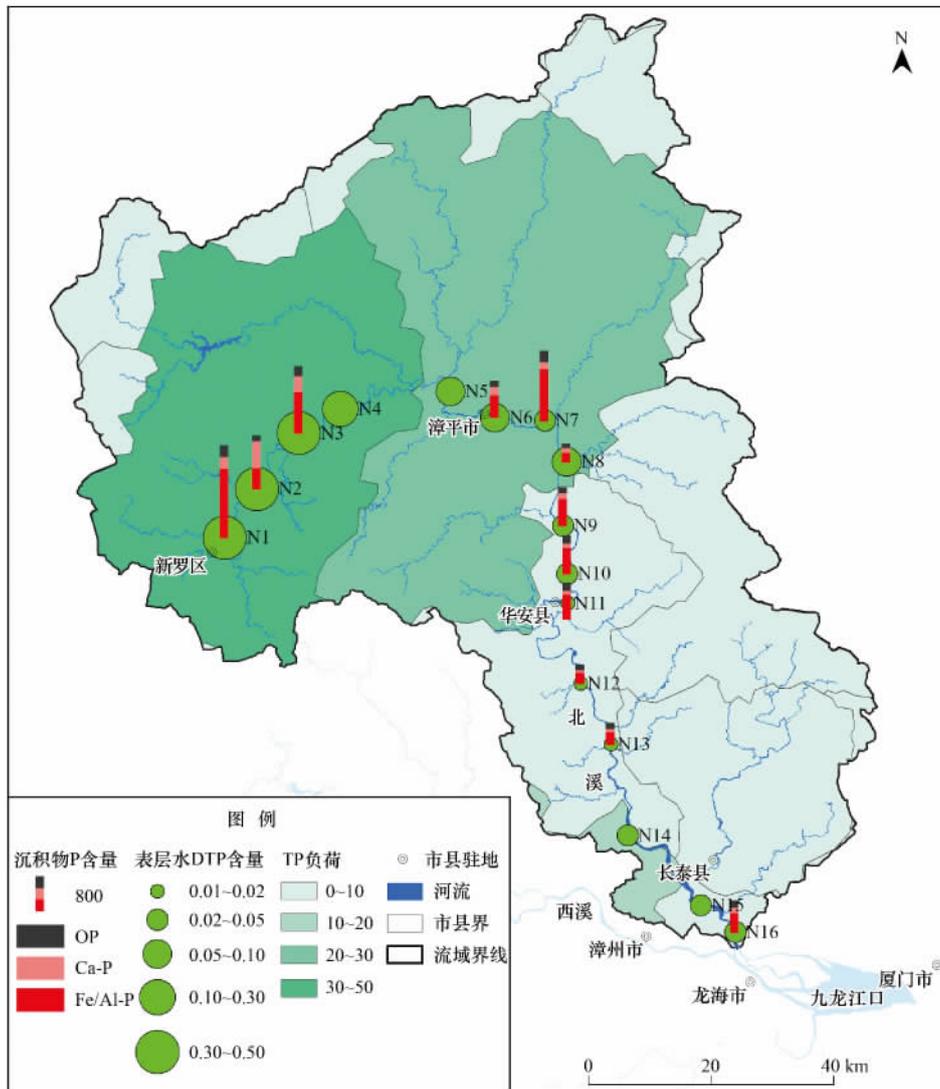
测定采用灼烧法<sup>[21]</sup> ,用于近似反映有机质含量. 沉积物 TOC 和 TN 的测定利用 Perkin Elmer 公司产的 PE2400 SERIESII型元素分析仪进行分析.

## 2 结果

### 2.1 沉积物磷含量的空间分布特征

九龙江北溪沉积物总磷( Fe/Al-P + Ca-P + OP) 与表层水 DTP 及流域污染负荷的空间分布见图 2. 沉积物 TP 含量在 387 ~ 2 092 mg·kg<sup>-1</sup> 之间( 相差 5 倍以上) ,平均1 032 mg·kg<sup>-1</sup> ,总体上 TP 含量呈现上游高、下游低的空间分布特征. 表层水的 DTN 含量( 图 2 未显示) 在 2. 13 ~ 10. 13 mg·L<sup>-1</sup> 之间 ,DTP 含量在 0. 02 ~ 0. 49 mg·L<sup>-1</sup> 之间 ,两者在空间上也

呈现上游高、下游低的分布格局. 上游 N1 ~ N3 段流域污染负荷最高 ,表层水 DTN 和 DTP 含量也最高 ( DTN > 8. 00 mg·L<sup>-1</sup> ,DTP > 0. 30 mg·L<sup>-1</sup> ) ,河流进入漳平市( N6) 至华安县( N11) ,流域污染负荷较小 ,受支流稀释和河流的净化作用 ,DTN 含量降至 3. 00 ~ 4. 00 mg·L<sup>-1</sup> 之间; 水中以颗粒态为主的磷素在迁移过程中容易在梯级电站库区沉积 ,与上游站位相比 ,下游 N6 ~ N11 段表层水 DTP 含量( 0. 02 ~ 0. 04 mg·L<sup>-1</sup> ) 明显下降. 北溪下游进入人口密集、污染较重的长泰县和漳州市郊后 ,水中 DTN 和 DTP 含量又有所抬升. 图 2 表明 ,沉积物磷与表层水 DTP 含量和流域 TP 污染负荷在空间分布上是基本一致的.



单位分别是: 沉积物 P( mg·kg<sup>-1</sup> )、表层水 DTP( mg·L<sup>-1</sup> ) 和 TP 负荷 [kg·( hm<sup>2</sup>·a )<sup>-1</sup> ]; 流域磷污染负荷引自文献[22]

图 2 九龙江北溪沉积物磷、表层水 DTP 和流域磷污染负荷( 畜禽养殖污染 + 生活污染 + 化肥流失) 的空间变化

Fig. 2 Spatial variation of phosphorus concentration in sediment , DTP of surface water and county-level phosphorus load ( sum of animal wastes , human wastes and fertilizer runoff) along the North Jiulong River

## 2.2 沉积物磷的赋存形态特征

九龙江北溪沉积物中各形态磷含量及其组成比例汇总于表 1. 所有站位 IP 含量为 276 ~ 1 577  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 占 TP 的 48% ~ 98% (75% 的样品 IP 占 60% 以上), 而 OP 仅占 TP 的 12% ~ 27%, 表明北溪沉积物中 IP 是最主要的赋存形态. IP 包括 Fe/Al-P 和 Ca-P, 其中 Fe/Al-P 占 IP 的 43% ~ 99%, 而 Ca-P 除上游的 N2 站位外, 仅

占 IP 的 14% ~ 37%, 可见北溪沉积物中 IP 以 Fe/Al-P 为主. IP 和 Fe/Al-P 含量均呈现上游高、下游低的空间分布, Ca-P 含量沿程逐渐下降, 至江东库区有所回升, OP 的空间变化不明显. 利用  $3.5 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$  HCl 直接提取出北溪沉积物中 90%  $[\text{TP}/(\text{Fe/Al-P} + \text{Ca-P} + \text{OP})]$  以上的磷, 说明 SMT 分离提取法中浓 HCl-P 含量可以基本代表 TP 含量.

表 1 九龙江北溪沉积物各形态磷含量及其组成比例

Table 1 Sediment phosphorus contents and component ratios in the North Jiulong River

站位编号	站位名称	站点类型	TP			Fe/Al-P		Ca-P		IP		OP	
			$\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	$\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	占 TP/%	$\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	占 TP/%	$\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	占 TP/%	$\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	占 TP/%	$\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	占 TP/%
N1	闽西宾馆	库区	2 091.8	1 591.0	76.1	268.6	12.8	1 577.1	75.4	276.4	13.2		
N2	平林	河流	1 154.9	483.7	41.9	622.1	53.9	1 134.6	98.2	140.6	12.2		
N3	雁石桥	河流	1 673.9	957.3	57.2	373.1	22.3	1 315.4	78.6	229.1	13.7		
N6	漳平市区	河流	752.5	522.4	69.4	193.0	25.6	688.7	91.5	150.2	20.0		
N7	华寮	库区	1 486.5	1 194.1	80.3	173.2	11.7	1 207.7	81.2	253.2	17.0		
N8	大杞	河流	387.4	216.2	55.8	114.3	29.5	313.1	80.8	106.2	27.4		
N9	西陂电站	库区	735.9	635.3	86.3	117.6	16.0	699.6	95.1	138.2	18.8		
N10	绵良电站	库区	1 089.4	612.8	56.3	95.4	8.8	632.7	58.1	199.2	18.3		
N11	华安县	库区	1 020.6	578.6	56.7	92.8	9.1	607.8	59.6	187.9	18.4		
N12	天宫电站	库区	578.6	250.7	43.3	70.2	12.1	275.9	47.7	134.7	23.3		
N13	利水电站	库区	580.4	291.5	50.2	78.1	13.4	315.2	54.3	139.1	24.0		
N16	江东库区	库区	832.6	453.3	53.9	117.3	14.3	505.3	60.8	177.7	21.4		
范围			387.4 ~ 2 091.8	216.2 ~ 1 591.0	41.9 ~ 86.3	70.2 ~ 622.1	8.8 ~ 53.9	275.9 ~ 1 577.1	47.7 ~ 98.2	106.2 ~ 276.4	12.2 ~ 27.4		
平均值			1 032.0	648.9	60.7	193.0	19.1	772.8	73.4	177.7	19.0		
标准差			503.6	409.2	14.2	161.9	12.8	432.7	17.0	52.9	4.6		

## 2.3 沉积物相关理化特征

九龙江北溪沉积物的相关理化参数汇总于表 2. 沉积物 pH 范围为 6.46 ~ 7.37, 氧化还原电位 Eh 为 213.9 ~ 258.9 mV. 沉积物烧失量 LOI 最大值出现在下游的 N13(利水电站), 最小值出现在上游的 N2(平林). LOI 可近似表征有机质的含量, 数据显

示北溪沉积物的有机质含量有一定差异(5.5% ~ 14.2%). 沉积物 TN 和 TOC 的空间差异显著, TN 含量在  $0.7 \sim 3.5 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$  之间, TOC 含量在  $6.6 \sim 23.4 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$  之间, 沉积物 TN 和 TOC 呈现上游向下游递减的梯度变化规律.

表 2 九龙江北溪沉积物理化性质

Table 2 Physicochemical parameters of sediment in the North Jiulong River

站位编号	pH	Eh/mV	LOI(dw) /%	TOC $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	TN $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$
N1	7.03	233.8	9.58	23.4	3.8
N2	7.37	213.9	5.54	22.3	3.1
N3	7.00	235.7	13.53	22.8	3.5
N6	7.11	229.4	7.07	21.6	2.5
N7	6.66	255.8	11.64	22.1	2.9
N8	7.14	227.1	9.02	19.3	1.7
N9	6.76	250.1	9.25	18.3	1.7
N10	6.64	256.7	12.74	21.4	2.0
N11	6.89	242.1	8.45	21.8	2.2
N12	6.84	245.2	8.05	7.5	0.8
N13	6.79	248.2	14.19	8.5	0.9
N16	6.46	258.9	9.38	6.6	0.7

## 3 讨论

### 3.1 沉积物磷空间分布的控制因素

九龙江北溪沉积物 P 含量呈现上游高、下游低的分布特征(图 2). 由生活污染、畜禽养殖和农田化肥流失引起的 TP 污染负荷存在明显的区域差异, 直接影响表层水 DTP 含量的沿程分布<sup>[22]</sup>. 上游龙岩市(新罗区)的污染负荷全流域最高, 漳平市和漳州市郊次之. 近 10 年来, 新罗区畜禽养殖业发展迅猛, 成为最大的污染来源, N1 ~ N3 河段很高的沉积物 P 含量显然与新罗区生猪养殖排放大量粪污有关. 流经漳平市的 N7, 受到农田化肥流失和小企业污水排放, 以及河道形态的综合影响, 该站位沉积物 TP 含量高达  $1 487 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ . 华安县污染负荷最

低 相应河段沉积物 P 含量也较低. 可见, 沉积物 P 含量的空间分布主要受控于流域污染源的分布.

Fe/Al-P 是指被 Fe、Al 或 Mn 的氧化物及其水合物所包裹的磷, 属生物可利用磷, 主要来源于污水和废水排放<sup>[23]</sup>. 北溪沉积物的 Fe/Al-P 含量高达 216 ~ 1 591  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 其空间分布与 TP 基本一致, 最高值出现在龙岩市区站位(N1), 反映了龙岩市区的磷污染相当严重(图 2), Fe/Al-P 含量低值(N8 最低)出现在下游受人类活动干扰较小, 且河道坡降和水流速都比较大的河段. 北溪沉积物 TP 含量高低主要受 Fe/Al-P 控制, Fe/Al-P 占 TP 的 42% ~ 86%, 主要与北溪龙岩地区大量的铁锰矿开发有关. 2012 年 11 月课题组在 N9 所在的西陂库区 11 个表层水样品测得 Fe 含量为 0.01 ~ 0.10  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , Mn 含量为 0.19 ~ 0.23  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  (数据由王德利副教授提供), 其中锰大大超过地表水水质标准限值(Fe 为 0.3  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , Mn 为 0.1  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ).

Ca-P 也称为磷灰石磷, 主要来源于碎屑岩或本地自生的磷灰石磷, 以及难溶性的磷酸钙矿物<sup>[23]</sup>, 通常被认为是生物难利用的磷. 九龙江北溪沉积物的 Ca-P 含量除 N2 站位较高外, 其它站位在 70 ~ 373  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  之间, 略高于福建省山仔水库(23 ~ 139  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )<sup>[24]</sup>, 这可能与不同地质条件下的风化有关. N2 站位的 Ca-P 占 TP 的 54%, 可能与该河段频繁挖沙(据现场调查)有关.

在各形态磷中, OP 被认为是可部分为生物利用的磷, 主要来自农业面源<sup>[23]</sup>. 北溪沉积物 OP 含量为 106 ~ 276  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 空间差异较 Fe/Al-P 小, 表明北溪沉积物 OP 含量相对稳定.

### 3.2 九龙江沉积物磷赋存形态与理化性质的关系

相关性分析表明, 沉积物各形态磷含量与相关理化性质有关系(表 3). 沉积物 TP 与各形态磷以及 TN、TOC 都有显著的相关性, 其中与 Fe/Al-P、OP 极显著相关( $P < 0.01$ ), 与 Ca-P 的相关性较差( $P > 0.05$ ), 表明九龙江北溪沉积物 TP 含量的高低(空间差异)主要受 Fe/Al-P 控制, 其次是 OP, 这与 Ruban 等<sup>[25]</sup>在法国 Bort-Les-Orgues 水库的研究结果一致. 也有研究表明, Ca-P 可能因为环境条件的变化, 如 pH 骤降时可溶解出来并被生物所利用, 从而影响沉积物 TP 含量<sup>[26]</sup>. 表 3 显示沉积物 Ca-P 与 pH 显著相关( $R^2 = 0.679$ ,  $P < 0.05$ ), 说明沉积物理化性质会影响磷的转化与赋存形态. 沉积物 TP 与沉积物 TN 极显著相关( $R^2 = 0.837$ ,  $P < 0.01$ ), 表明沉积物磷和氮来自相似的人为污染源. 沉积物 TP 与表层水 DTP 极显著相关( $P < 0.01$ ), 进一步说明沉积物磷主要受流域污染输入的影响. Ca-P 与 Fe/Al-P 的相关性很小, 表明两者有不同的来源和空间分布特征. 此外, 沉积物 Fe/Al-P 与表层水 DTP 相关性较差, 原因是影响水体磷形态的因素和过程很多(吸附解吸、溶解沉积、藻类利用等).

表 3 九龙江北溪沉积物磷和理化参数的决定系数<sup>1)</sup>

Table 3 Correlation coefficients between sediment phosphorus and physicochemical parameters in the North Jiulong River

	Fe/Al-P	Ca-P	IP	OP	pH	Eh	LOI	TOC	TN	DTN	DTP
TP	0.936**	0.480	0.944**	0.924**	0.092	-0.078	0.203	0.580*	0.837**	0.778**	0.716**
Fe/Al-P	1	0.268	0.895**	0.926**	-0.021	0.050	0.214	0.567	0.775**	0.588*	0.561
Ca-P		1	0.663*	0.154	0.679*	-0.709*	-0.322	0.473	0.676*	0.799**	0.843**
IP			1	0.790**	0.285	-0.273	0.041	0.679*	0.920**	0.810**	0.799**
OP				1	-0.230	0.248	0.374	0.441	0.653*	0.496	0.412

1) \*\* 表示极显著相关( $P < 0.01$ ), \* 表示显著相关( $P < 0.05$ ); 样本数  $n = 12$

### 3.3 九龙江沉积物磷的生态学意义

九龙江北溪沉积物磷含量(TP 为 387 ~ 2 092  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )处于较高水平, 显著高于其他河流、湖库, 如黄河为 594 ~ 957  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ <sup>[27]</sup>, 太湖为 295 ~ 913  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ <sup>[28]</sup>, 福建山仔水库为 400 ~ 700  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ <sup>[24]</sup>. 北溪沉积物主要以高活性的 Fe/Al-P 为主(占 TP 的 42% ~ 86%), OP 占 TP 的 12% ~ 27%. 由于 Fe/Al-P 和 OP 具有较高的释放和生物利用潜力<sup>[10 25]</sup>. 这意味着北溪沉积物磷一旦释放出来, 会显著提高水中生物可利用磷含量. 2009 年 1

月和 2011 年 8 月北溪的两次水华事件, 均呈现从上游库区(漳平段)向下游蔓延式暴发的规律. 与九龙江北溪下游相比, 上游库区(N1 ~ N6 站位)表层水的 DTN/DTP 质量比值较低(平均 27), 符合 Smith 1983 年提出的“氮磷比值低于 29 易发生蓝藻水华”法则<sup>[29]</sup>. 根据 Redfield 比值理论, 上游水体处于磷弱限制系统. 在此提出可能的水华发生机制: 在合适的气象水文条件下, 不易受磷限制的上游库区先暴发水华, 优势藻大量繁殖, 电站库区开闸放水后, 高密度的水华藻进入下游库区, 引发新一轮的藻类

暴发. 在这个过程中, 水华藻大量繁殖消耗水体营养盐, 同时改变了库区底层水的 pH 和 DO, 从而促进沉积物中磷的释放. 有研究表明, 水华藻较高的光合作用速率促进水柱 pH 升高, 高 pH 水渗透进入沉积物从而影响沉积物磷循环过程<sup>[30]</sup>. 当 pH 超过临界值(9.0~9.2)时, 沉积物中与 Fe 结合的无机磷可释放进入上覆水<sup>[31]</sup>. 水华藻死亡沉底腐烂分解时大量耗氧形成的还原条件, 导致沉积物 Fe/Al-P 中的 Fe<sup>3+</sup> 被还原成 Fe<sup>2+</sup>, 与 Fe<sup>2+</sup> 结合的磷由于溶解度增加释放到上覆水<sup>[12, 32]</sup>. 受沉积物磷的不同释放机制影响, 水体磷含量可以得到补充. 据 2009 年 1~2 月水华期间监测数据分析, 北溪江东库区叶绿素含量与 TN/TP 比值有很好的负相关性 ( $R^2 = 0.748$ ,  $P < 0.01$ ), 说明氮磷比值在水华过程中有重要的调控作用. 漳平市以下的 N6 站位至 N16 站位之间共有 8 级梯级电站, 这些库区沉积物的 Fe/Al-P 的含量相对较高(平均  $528 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ), 具有相当大的释放潜能. 河流磷的输送和库区沉积物磷的再循环, 使下游库区水华持续暴发成为可能(如 2009 年江东库区水华持续 3 周). 显然, 九龙江河流-库区系统沉积物磷含量、形态特征以及特有的空间分布规律, 对九龙江水华过程具有重要的调控作用和生态学意义.

磷的沉积物-水界面循环过程受 pH、DO、氧化还原电位、温度、河道形态、水文条件(水流、混合和水力停留时间等)和生物作用的综合影响<sup>[33]</sup>. 目前对库区沉积物-水界面过程的研究不多, 尤其是微生物如何介入沉积物磷的吸附-释放过程, 如在还原条件或缺氧条件下沉积物细菌能快速吸收和释放磷<sup>[34]</sup>. 总体上, 沉积物磷向上覆水释放的作用机制十分复杂<sup>[35]</sup>. 九龙江北溪库区沉积物-水界面磷的释放过程及其与水华过程之间的动态作用关系尚待深入研究.

#### 4 结论

(1) 采用 SMT 法对九龙江北溪河流-库区系统的沉积物磷的含量、赋存形态及其空间分布进行了分析. 沉积物 TP 含量在  $387 \sim 2092 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  之间, 平均  $1032 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ . 以 IP 为主要赋存形态(IP 占 TP 的 48%~98%), 其中又以 Fe/Al-P 为主(占 IP 的 43%~99%). 总体上沉积物 TP 和 Fe/Al-P 含量均呈现上游高、下游低的空间分布规律, 与表层水 DTP 含量和污染负荷的分布一致, 沉积物磷主要受流域污染输入影响.

(2) 九龙江北溪沉积物 TP 含量高低主要受 Fe/Al-P 控制. 高 Fe/Al-P 含量和比例主要与上游龙岩地区畜禽养殖磷污染排放和大量的铁锰矿场开发有关. 沉积物富磷和高 Fe/Al-P 比例以及“上游高下游低”的空间分布特征, 加上北溪上游水体较低的氮磷比值(藻类生长不易受磷限制), 极可能是九龙江水华首先在上游暴发并向下游库区蔓延的主要原因. 九龙江北溪沉积物磷具有较高的释放潜力, 河流营养盐输送和库区沉积物磷的再循环使水华持续暴发成为可能. 九龙江沉积物磷的这些特征在水华过程中具有重要的调控作用和生态学意义.

#### 参考文献:

- [1] Moss B, Kosten S, Meerhoff M, *et al.* Allied attack: climate change and eutrophication [J]. *Inland Waters (Journal of the International Society of Limnology)*, 2011, 1(2): 101-105.
- [2] Conley D J, Paerl H W, Howarth R W, *et al.* Controlling eutrophication: nitrogen and phosphorus [J]. *Science*, 2009, 323(5917): 1014-1015.
- [3] Søndergaard M, Jensen J P, Jeppesen E. Internal phosphorus loading in shallow Danish lakes [J]. *Hydrobiologia*, 1999, 408-409: 145-152.
- [4] Komatsu E, Fukushima T, Shiraishi H. Modeling of P-dynamics and algal growth in a stratified reservoir-mechanisms of P-cycle in water and interaction between overlying water and sediment [J]. *Ecological Modelling*, 2006, 197(3-4): 331-349.
- [5] 秦伯强, 朱广伟, 张路, 等. 大型浅水湖泊沉积物内源营养盐释放模式及其估算方法——以太湖为例 [J]. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2005, 35(S2): 33-44.
- [6] 李江, 金相灿, 姜霞, 等. 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.
- [7] Lin X S, Zhou W B. Phosphorus forms and distribution in the sediments of Poyang Lake, China [J]. *International Journal of Sediment Research*, 2011, 26(2): 230-238.
- [8] 王绪伟, 王心源, 封毅, 等. 巢湖沉积物总磷含量及无机磷形态的研究 [J]. *水土保持学报*, 2007, 21(4): 56-59.
- [9] 孟春红, 赵冰. 东湖沉积物中氮磷形态分布的研究 [J]. *环境科学*, 2008, 29(7): 1831-1837.
- [10] Rydin E. Potentially mobile phosphorus in Lake Erken sediment [J]. *Water Research*, 2000, 34(7): 2037-2042.
- [11] Kaiserli A, Voutsas D, Samara C. Phosphorus fractionation in lake sediments-Lakes Volvi and Koronia, N. Greece [J]. *Chemosphere*, 2002, 46(8): 1147-1155.
- [12] Lake B A, Coolidge K M, Norton S A, *et al.* Factors contributing to the internal loading of phosphorus from anoxic sediments in six Maine, USA, lakes [J]. *Science of the Total Environment*, 2007, 373(2-3): 534-541.
- [13] 陈能汪, 章颖瑶, 李延凤. 我国淡水藻华长期变动特征综合分析 [J]. *生态环境学报*, 2010, 19(8): 1994-1998.

- [14] Chen N W , Peng B R , Hong H S , *et al.* Nutrient enrichment and N: P ratio decline in a coastal bay-river system in southeast China: The need for a dual nutrient ( N and P ) management strategy [J]. *Ocean & Coastal Management* , 2012. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2012.07.013>.
- [15] Huang J L , Li Q S , Pontius Jr R G , *et al.* Detecting the dynamic linkage between landscape characteristics and water quality in a subtropical coastal watershed , southeast China [ J ]. *Environmental Management* , 2013 , **51**( 1 ) : 32-44.
- [16] Li Y , Cao W Z , Su C X , *et al.* Nutrient sources and composition of recent algal blooms and eutrophication in the northern Jiulong River , Southeast China [J]. *Marine Pollution Bulletin* , 2011 , **63** ( 5-12 ) : 249-254.
- [17] 田永强,俞超超,王磊,等. 福建九龙江北溪浮游植物群落分布特征及其影响因子[J]. *应用生态学报*, 2012, **23**( 9 ) : 2559-2565.
- [18] 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 of Environmental Monitoring* , 1999 , **1**( 1 ) : 51-56.
- [19] Pardo P , Rauret G , López-Sánchez J F. Shortened screening method for phosphorus fractionation in sediments: A complementary approach to the standards , measurements and testing harmonised protocol [J]. *Analytica Chimica Acta* , 2004 , **508**( 2 ) : 201-206.
- [20] 金相灿,屠清瑛. 湖泊富营养化调查规范 [M]. ( 第二版 ). 北京: 中国环境科学出版社, 1990. 144-148.
- [21] Heiri O , Lotter A F , Lemcke G. Loss on ignition as a method for estimating organic and carbonate content in sediments: reproducibility and comparability of results [ J ]. *Journal of Paleolimnology* , 2001 , **25**( 1 ) : 101-110.
- [22] 陈能汪,王龙剑,林晖,等. 九龙江流域经济发展与河流水质时空关联分析[J]. *生态与农村环境学报*, 2012, **28**( 1 ) : 19-25.
- [23] Ruban V , López-Sánchez 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' Journal of Analytical Chemistry* , 2001 , **370**( 2-3 ) : 224-228.
- [24] 苏玉萍,郑达贤,庄一廷,等. 南方内陆富营养化湖泊沉积物磷形态特征研究[J]. *农业环境科学学报*, 2005 , **24**( 2 ) : 362-365.
- [25] Ruban V , Brigault S , Demare D , *et al.* An investigation of the origin and mobility of phosphorus in freshwater sediments from Bort-Les-Orgues Reservoir , France [J]. *Journal of Environmental Monitoring* , 1999 , **1**( 4 ) : 403-407.
- [26] Aigars J. Seasonal variations in phosphorus species in the surface sediments of the Gulf of Riga , Baltic Sea [J]. *Chemosphere* , 2001 , **45**( 6-7 ) : 827-834.
- [27] 张宏伟,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.
- [28] 袁和忠,沈吉,刘恩峰,等. 太湖水体及表层沉积物磷空间分布特征及差异性分析[J]. *环境科学*, 2010 , **31**( 4 ) : 954-960.
- [29] Smith V H. Low nitrogen to phosphorus ratios favor dominance by blue-green algae in lake phytoplankton [J]. *Science* , 1983 , **221** ( 4611 ) : 669-671.
- [30] Bailey E , Owens M , Boynton W , *et al.* Sediment phosphorus flux: pH interaction in the tidal freshwater Potomac River estuary [R]. USA: Interstate Commission on the Potomac River Basin , UMCES report TS-505-08-CBL , 2006 , 1-91.
- [31] Eckert W , Nishri A , Parparova R. Factors regulating the flux of phosphate at the sediment-water interface of a subtropical calcareous lake: A simulation study with intact sediment cores [J]. *Water , Air , and Soil Pollution* , 1997 , **99**( 1-4 ) : 401-409.
- [32] Amirbahman A , Pearce A R , Bouchard R J , *et al.* Relationship between hypolimnetic phosphorus and iron release from eleven lakes in Maine , USA [J]. *Biogeochemistry* , 2003 , **65**( 3 ) : 369-386.
- [33] Tournoud M , Perrin J L , Gimber F , *et al.* Spatial evolution of nitrogen and phosphorus loads along a small Mediterranean river: implication of bed sediments [J]. *Hydrological Processes* , 2005 , **19**( 18 ) : 3581-3592.
- [34] Gächter R , Meyer J S. The role of microorganisms in mobilization and fixation of phosphorus in sediments [ J ]. *Hydrobiologia* , 1993 , **253**( 1-3 ) : 103-121.
- [35] Koski-Vähälä J , Hartikainen H , Tallberg P. Phosphorus mobilization from various sediment pools in response to increased pH and silicate concentration [ J ]. *Journal of Environmental Quality* , 2001 , **30**( 2 ) : 546-552.