

# 华阳河湖群表层沉积物磷形态及生物有效性

马金玉<sup>1</sup> 罗千里<sup>2</sup> 王文才<sup>2</sup> 范中亚<sup>2</sup> 李伟杰<sup>2</sup> 罗艳<sup>11</sup>

(1. 南昌航空大学环境与化学工程学院, 江西 南昌 330063;

2. 生态环境部华南环境科学研究所, 国家环境保护

水环境模拟与污染控制重点实验室, 广东 广州 510655)

**【摘要】:** 利用 SMT 法研究了华阳河湖群表层沉积物中磷的赋存形态, 并探讨了其影响因素及生物有效性。结果表明: 华阳河湖群表层沉积物总磷(TP)含量变化在 431~1099mg/kg 之间, TP 平均含量大小顺序为龙感湖>黄大湖>泊湖。无机磷(IP)约占 TP 的 36.3%~78.8%, 有机磷(OP)约占 TP 的 18.9%~40%, IP 是磷的主要赋存形态。IP 中各形态磷含量的高低顺序为: 铁铝结合态磷(Fe/Al-P)>钙结合态磷(Ca-P)>弱吸附态磷(Ex-P)。沉积物黏土组分与 TP、IP、Fe/Al-P 呈极显著正相关, 粒径组成比例和沉积物 TP 含量也存在线性关系。通过对比有无沉水植物点位, 发现沉水植物使沉积物除 Ex-P 外其它磷形态含量降低。与其它浅水湖泊相比, 华阳河湖群中潜在的生物有效磷(BAP)含量较高, 含量变化为 183.2~598mg/kg, 平均占沉积物 TP 的 47.4%, BAP 含量大小顺序为龙感湖>黄大湖>泊湖, 与 TP 含量水平一致, 沉积物 BAP 含量与水体溶解性正磷酸盐( $PO_4^{3-}$ -P)呈正相关关系。该研究基于华阳河湖群沉积物磷的赋存特征分析其生物有效性, 以期为解决华阳河湖群水体总磷浓度波动成因及影响提供参考。

**【关键词】:** 华阳河湖群 沉积物 磷形态 粒径 沉水植物 生物有效磷

**【中图分类号】:** X524 **【文献标识码】:** A **【文章编号】:** 1004-8227(2021)12-2962-10

湖泊沉积物是磷的重要蓄积库, 受到某些人为或自然因素干扰时, 沉积物不断在水体的“源”与“汇”角色中转换。影响湖泊沉积物-水界面磷的交换因素有很多, 这与沉积物的自身理化性质和环境因子息息相关。粒度作为沉积物的重要物理特征, 对沉积物吸附和释放磷的能力有重要影响<sup>[1]</sup>。环境因子 pH、DO 和氧化还原电位(ORP)等也能够影响水-沉积物界面的磷循环过程, 沉水植物在生长过程中可以通过光合作用等对周围环境因子产生影响, 改变水体的 pH、DO 和 ORP 等, 进而影响沉积物磷的内源释放<sup>[2]</sup>。磷的赋存形态是评价湖泊沉积物磷内源负荷的重要参数, 不同形态磷释放理化条件不同, 对湖泊富营养化贡献率也不同<sup>[3]</sup>。沉积物中的磷仅有一部分能够被生物利用, 这部分磷被称为生物有效磷, 它的含量大小能够在一定程度上反映水体营养状态和衡量初级生产力的大小<sup>[4]</sup>。基于此, 国内外学者对湖泊沉积物中的磷形态进行了大量的研究, 叶华香等<sup>[5]</sup>利用 SMT 法研究了南山湖沉积物中磷的赋存形态及时空分布特征; Tu 等<sup>[6]</sup>利用连续提取法研究了瑞士 Lugano 湖沉积物中的磷含量及其与湖泊富营养化的关系; Klamt 等<sup>[7]</sup>利用磷形态分级法研究了德国 Kleiner Gollinsee 湖由草型湖泊转为藻型湖泊对沉积物磷形态的影响。目前对于华阳河湖群的水体和沉积物中的磷也有部分研究, 曾凯等<sup>[8]</sup>研究了水位变化对华阳河湖群水体 TP 浓度的影响, 研究发现水体 TP 浓度总体表现出枯水期大于丰水期的特征; 洪源等<sup>[9]</sup>研究了龙感湖和黄大湖枯水期水体中的 TP 浓度, 研究发现枯水期水

**作者简介:** 马金玉(1995~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为湖泊营养盐转化。E-mail:1960995373@qq.com; 范中亚 E-mail:fanzhongya@scies.org

**基金项目:** 长江生态保护与修复安全驻点研究项目(2018CJA030301-014)

体 TP 浓度严重超标；杜宏伟等<sup>[10]</sup>研究了华阳河河湖群表层沉积物 TP 含量的空间分布，这些研究都集中在水和沉积物 TP 含量的变化情况，针对整个华阳河河湖群表层沉积物磷的不同形态和分布特征的研究还较少，并且对华阳河河湖群表层沉积物中磷的生物有效性缺乏认识。

华阳河河湖群是长江中下游重要的浅水湖泊，近年来，围湖造田、围网养殖、生活与农业污染使得华阳河河湖群富营养化趋势加重，目前已处于从草型湖泊向藻型湖泊过渡的稳态转化临界点，其中龙感湖已经接近中度富营养化<sup>[11]</sup>，而磷是造成湖泊富营养化趋势的主要因素之一。有研究表明<sup>[9,12]</sup>，华阳河河湖群水体总磷季节性波动幅度较大，在枯水期总磷浓度超出 III 类标准，部分区域甚至超出了 IV 类标准，枯水期沉积物内源磷动态释放量占全年释放量的比例约 80%左右，是造成湖泊水体总磷浓度季节性差异的主要原因。作为“源”，沉积物中不同形态的磷可以通过扩散、再悬浮、生物扰动等方式进入上覆水体，而不同形态磷因释放机制不同，稳定性及生物有效性也相差甚远。基于此，本文对华阳河河湖群表层沉积物中磷的形态、分布特征进行系统分析，并探究形成其空间差异的影响因素和生物有效性，以期为进一步研究华阳河河湖群磷营养盐迁移转化和后续实施环境保护措施提供参考和依据。

# 1 材料和方法

## 1.1 研究区域概况

华阳河河湖群位于安徽省与湖北省交界处，主要包括龙感湖、大官湖、黄湖、泊湖，其中大官湖和黄湖合称黄大湖。华阳河流域面积为 5511.4km<sup>2</sup>，其中龙感湖、黄大湖、泊湖的湖泊面积分别为 420、299、180km<sup>2</sup>。华阳河河湖群主要依靠地表径流和降水补给，龙感湖北部纳新县河和二郎河来水，泊湖北部纳凉亭河来水，经湖泊调蓄后，经华阳闸和阳湾闸分别注入长江。华阳河河湖群属于北亚热带湿润气候，年均温度为 16.6℃，年降水量 1140mm。华阳河河湖群具有涵养水源、净化水质、调蓄洪水、调节气候和维护生物多样性等重要生态功能。

## 1.2 采样点布设与样品采集

本课题组于 2019 年 12 月采集了华阳河河湖群及其入湖口共 15 个点位的表层沉积物(图 1)，为研究龙感湖入湖口沉积物磷含量的沿程变化情况，在龙感湖设置 5 个点位，其中 L1 靠近二郎河入湖口；为研究黄大湖湖岸边至湖心处沉积物的磷含量沿程变化情况，在黄大湖设置 4 个点位，其中 H1 靠近水陆交错带；为研究沉水植物对沉积物磷含量的影响，在泊湖设置 6 个点位，其中 P4 靠近凉亭河入湖口，且 P4 处有大量沉水植物菹草生长。采样点经纬度采用 GPS 确定，所有点位使用抓斗式采泥器采集表层沉积物样品，使用有机玻璃采水器采集上覆水，每个点位沉积物样品混匀后装袋，一部分样品在现场测量理化指标，一部分样品经风干、磨细后过 100 目尼龙筛，装入塑料袋中密封，待测；上覆水装入乙烯瓶中带回实验室测定。

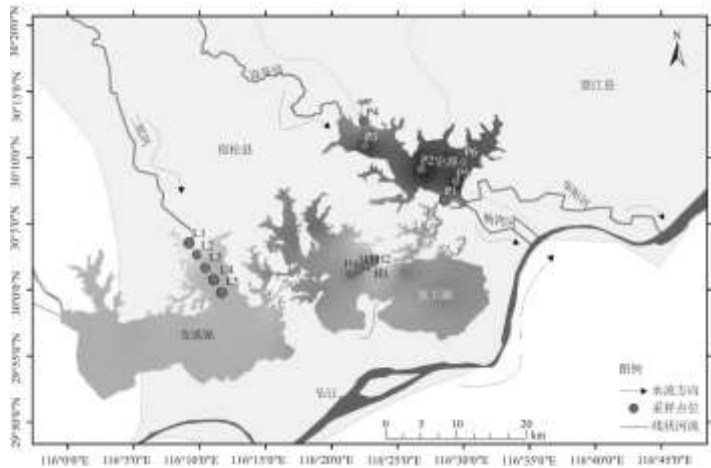


图 1 华阳河湖群采样点分布图

### 1.3 测量指标与方法

现场利用便携式多参数水质仪 (YSI ProQuatro) 测量上覆水 pH 和 ORP; 利用浊度计测量上覆水浊度; 利用便携式 pH 计测量沉积物 pH; 上覆水经过硫酸钾消解后, 利用钼酸铵分光光度法 (GB11893-89) 测定 TP 浓度; 上覆水经 0.45 μm 滤膜过滤后, 利用钼酸铵分光光度法测定 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P 浓度; 利用电极法测量沉积物 pH; 沉积物 OM 以烧失量表示, 称取混匀后的沉积物, 于 105℃ 条件下烘干至恒重, 再将烘干后的样品放入马弗炉中, 于 550℃ 条件下煅烧 5h, 煅烧前后的质量差即为烧失率<sup>[13]</sup>; 沉积物粒径利用激光粒度仪 (Mastersizer2000) 测试; 沉积物中磷形态的分析采用欧洲标准测试委员会框架下发展的 SMT (The Standards, Measurements and Testing Programme) 分离方法<sup>[14]</sup>, 分级提取的磷形态包括总磷 (TP)、无机磷 (IP)、弱吸附态磷 (Ex-P)、铁铝结合态磷 (Fe/Al-P)、钙磷 (Ca-P)、有机磷 (OP)。

### 1.4 分析方法

#### 1.4.1 粒径分级

沉积物按粒径大小可分为黏土 (<4 μm)、粉砂 (4~63 μm)、砂 (>63 μm) 等组分 (GB/T12763.8-2007)。为分析粒径与不同形态磷的关系, 本研究将沉积物粒径共分为 5 个组分, 分别为黏土 (<4 μm)、细粉砂 (4~10 μm)、中粉砂 (10~50 μm)、粗粉砂 (50~63 μm)、砂 (>63 μm)。

#### 1.4.2 归一化处理

按式 (1) 将数据归一化处理, 将量纲数据转变为无量纲数据:

$$f(x) = \frac{x_i - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (1)$$

式中:  $x_i$  为变量;  $x_{\min}$  为因子变量最小值;  $x_{\max}$  为因子变量最大值。本研究在探讨粒径组分和沉积物磷含量关系时, 先将数据归一化处理, 再做多元线性回归分析。

#### 1.4.3 生物有效磷 (BAP) 含量分析

沉积物中 Ex-P 是最具生物有效性的磷, 可通过离子交换很容易释放到上覆水体, 进而被浮游生物利用。Fe/Al-P 中的 Fe-P 易受沉积环境影响, 是潜在的生物有效磷<sup>[15]</sup>。当沉积物中 IP 被藻类等浮游生物过量消耗时, OP 可矿化成为生物有效磷, 因此也是潜在的生物有效磷<sup>[16]</sup>。有研究指出可提取的 OP 部分约有 60% 是可以活动的<sup>[17]</sup>。因此本研究中生物有效磷 (BAP) 采用公式 (2) 计算<sup>[18]</sup>:

$$BAP = Ex-P + Fe/Al-P + 0.6 \times OP \quad (2)$$

### 1.5 数据分析

采用 Origin8.0 进行绘图, 使用 SPSS22.0 进行相关性分析、多元线性回归分析和显著性检验, 空间分布图采用 ArcGIS10.1 软件绘制。

## 2 结果与分析

### 2.1 表层沉积物和上覆水理化性质

华阳河湖群上覆水的 pH 变化在 6.99~7.81 之间, 整体呈弱碱性。上覆水 TP 浓度变化在 0.03~0.24mg/L 之间, 龙感湖、黄大湖、泊湖上覆水 TP 平均浓度分别为 0.19、0.12、0.06mg/L, 大小顺序为龙感湖>黄大湖>泊湖。上覆水 ORP 大小变化在 57.6~117.3mV 之间(以铂电极参比), 整体处于氧化环境。沉积物有机质(OM)含量变化在 3.8%~10.2%之间, 在 OM 含量高的点位沉积物中均发现混有植物残体。沉积物 pH 变化在 5.6~6.69 之间, 整体偏酸性。

### 2.2 沉积物粒径组成

粉砂(4~63 μm)是华阳河湖群表层沉积物的主要存在形式, 平均占 75.26%(图 2)。黏土、细粉砂、中粉砂、粗粉砂、砂在龙感湖沉积物组成中平均分别占 13.28%、29.18%、37.48%、8.59%、11.47%, 在黄大湖沉积物组成中平均分别占 11.74%、27.7%、44.33%、1.7%、14.54%, 在泊湖沉积物组成中平均分别占 10.6%、41.38%、33.35%、7.72%、6.95%。

### 2.3 沉积物磷含量空间分布

华阳河湖群表层沉积物 TP 含量变化在 431~1099mg/kg 之间(表 2)。其中, 龙感湖沉积物 TP 含量变化在 645~1099mg/kg 之间, 平均含量为 837mg/kg, 从湖口至湖心沿程呈现先升高后降低的趋势, 在 L2 处 TP 含量最高, 随后降低。黄大湖沉积物 TP 含量变化在 478~1029mg/kg 之间, 平均含量为 652mg/kg, 从岸边至湖心处 TP 含量逐渐降低。泊湖沉积物 TP 含量变化在 431~544mg/kg 之间, 平均含量为 483mg/kg, 在入湖口 P4 点位 TP 含量低于泊湖其它点位。TP 平均含量大小顺序为: 龙感湖>黄大湖>泊湖。这主要是由于龙感湖受入湖河流二郎河影响, 水体 TP 严重超标<sup>[8]</sup>, 水体中的磷进入龙感湖后进而沉降到沉积物中; 黄大湖一方面承接上游龙感湖来水, 另一方面受养殖业影响较大<sup>[9]</sup>, 在华阳河湖群网箱被全部拆除前, 黄大湖围网养鱼面积甚至超过湖泊面积的 50%, 因此养殖饵料蓄积在沉积物中的磷不可忽视; 泊湖入湖口处 P4 沉积物 TP 甚至小于泊湖其它点位, 说明泊湖受入湖河流凉亭河影响较小, 且泊湖受农业面源和养殖业影响较小, 故泊湖沉积物 TP 含量最小。

表 1 上覆水及表层沉积物理化性质

采样点	水深(m)	上覆水 pH	上覆水 TP(mg/L)	浊度(NTU)	上覆水 ORP(mV)	沉积物 OM(%)	沉积物 pH
L1	0.65	6.99	0.24	16.75	117.32	3.81	6.28
L2	1.20	7.50	0.19	9.86	101.72	10.24	6.09
L3	1.65	7.55	0.17	5.27	97.83	8.19	6.04
L4	1.55	7.56	0.17	4.50	97.48	7.38	6.21
L5	1.55	7.62	0.16	3.44	93.08	7.92	6.34
H1	0.60	7.44	0.07	3.36	92.04	8.13	5.89
H2	1.60	7.66	0.10	14.14	79.85	9.13	6.21

H3	1.90	7.75	0.14	17.06	75.24	7.69	5.89
H4	2.15	7.81	0.16	26.20	66.76	6.31	6.03
P1	1.80	7.68	0.10	11.25	87.17	5.00	6.45
P2	3.00	7.63	0.05	4.58	97.75	5.23	6.22
P3	2.75	7.59	0.05	3.66	95.63	5.67	5.79
P4	1.70	7.47	0.03	3.33	57.61	7.48	5.60
P5	3.00	7.71	0.05	3.86	82.40	6.29	6.69
P6	2.60	7.62	0.05	4.02	96.22	6.18	6.45

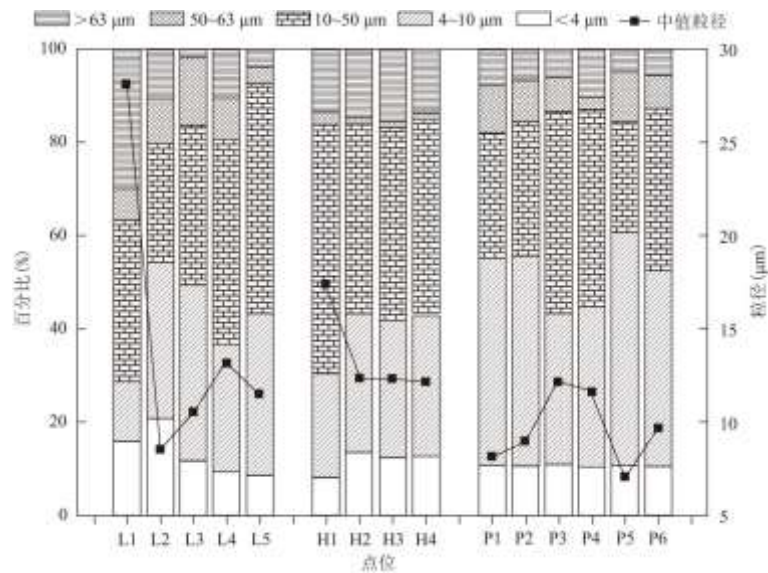


图2 表层沉积物中值粒径及粒径组成

龙感湖、黄大湖、泊湖沉积物 IP 含量变化分别在 366~761、277~384、195~359mg/kg 之间(表 2)。3 个湖区 IP 占 TP 含量的质量分数分别为 55.9%~78.8%、36.3%~70.8%、46.9~66%，平均占比分别为 63.42%、55.3%、56.67%，说明华阳河湖群表层沉积物磷含量以 IP 为主。

龙感湖、黄大湖、泊湖沉积物 Ex-P 含量变化分别在 12~16、2~18、6~21mg/kg 之间(图 3)。3 个湖区 Ex-P 占 TP 含量的质量分数分别为 1.2%~2%、0.4%~3.3%、1.3%~4.9%(表 2)。各点位的 Ex-P 含量均很低，在所有磷形式中占比最低，且每个点位含量相差不大，没有明显的变化趋势。

龙感湖、黄大湖、泊湖沉积物 Ca-P 含量变化分别在 139~183、100~229、47~220mg/kg 之间(图 3)。3 个湖区 Ca-P 占 TP 含量的质量分数分别为 14.2%~21.6%、9.7%~42.3%、11.6%~40.4%(表 2)。

龙感湖、黄大湖、泊湖沉积物 Fe/Al-P 含量变化分别在 183~405、87~208、97~149mg/kg 之间(图 3)。3 个湖区 Fe/Al-P

占 TP 含量的质量分数分别为 28.3%~41.2%、17%~24.1%、17.8%~31.4%(表 2)。除 H3、H4、P5、P6 外,其他点位 Fe/Al-P>Ca-P>Ex-P,说明 Fe/Al-P 是 IP 的主要成分,同时也是影响 TP 变化的主要因素。

龙感湖、黄大湖、泊湖沉积物 OP 含量变化分别在 167~300、144~387、143~190mg/kg 之间(图 3)。3 个湖区 OP 占 TP 含量的质量分数分别为 18.9%~39.1%、26.6%~37.6%、29.2%~40%(表 2),平均占比分别为 30.68%、33.4%、33.4%。

表 2 表层沉积物不同形态磷占 TP 的质量分数

点位	含量(mg/kg)		百分比				
	TP	IP	IP	Ex-P	Fe/Al-P	Ca-P	OP
L1	882	695	79%	1.7%	41%	21%	19%
L2	1099	761	69%	1.2%	37%	14%	27%
L3	874	494	57%	1.8%	30%	17%	32%
L4	683	382	56%	1.8%	28%	20%	36%
L5	645	366	57%	2.0%	28. %	22%	39%
H1	1029	374	36%	1.3%	20%	10%	38%
H2	557	313	56%	1.6%	24%	23%	36%
H3	478	277	58%	0.4%	18%	34%	33%
H4	542	384	71%	3.3%	17%	42%	27%
P1	437	271	62%	1.6%	27%	26%	34%
P2	477	263	55%	1.7%	25%	24%	36%
P3	475	223	47%	1.3%	31%	12%	40%
P4	431	195	45%	4.9%	23%	11%	33%
P5	532	345	65%	3.6%	25%	31%	29%
P6	544	359	66%	3.3%	18%	40%	29%

#### 2.4 沉积物的 BAP 的含量分布

华阳河湖群沉积物 BAP 含量在 183~598mg/kg 之间,总体占 TP 的 36.3%~56.7%之间,平均占比 47.4%(图 4)。L2 处 BAP 含量最高,这可能是由于 L2 处黏土含量较高,有利于对 BAP 的吸附。P4 处 BAP 含量最低,这可能与该点有沉水植物有关,使得沉积物中 BAP 被植物大量吸收蓄积。龙感湖、黄大湖、泊湖 BAP 平均含量分别为 445、274、229mg/kg, BAP 平均含量大小顺序为龙感湖>黄大湖>泊湖, BAP 含量的空间分布与沉积物 TP 含量的空间分布一致,即污染越重、TP 含量越高的区域,其 BAP 含量也越高。这主要是由于 Fe/Al-P 和 OP 是华阳河湖群 TP 的主要组分,同时也是 BAP 的主要组分,而且这两种形态的磷在一定条件下

可以通过间隙水释放到上覆水体中，从而影响水体的富营养化状态。所以就华阳河湖群而言，表层沉积物的 TP 含量可在一定程度上指示沉积物内源释放的风险。

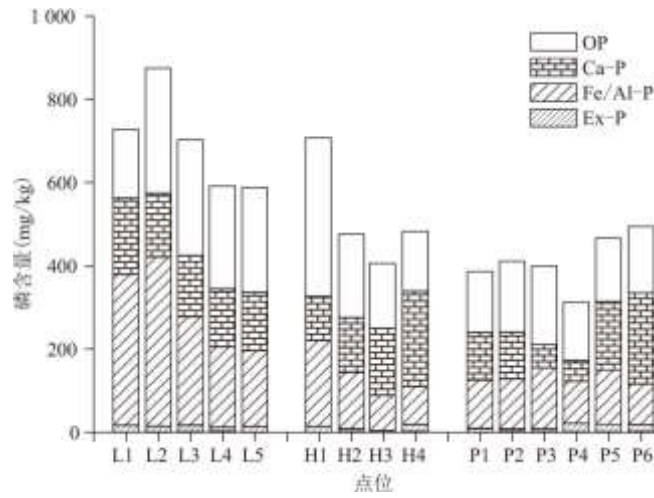


图3 表层沉积物不同磷形态含量分布

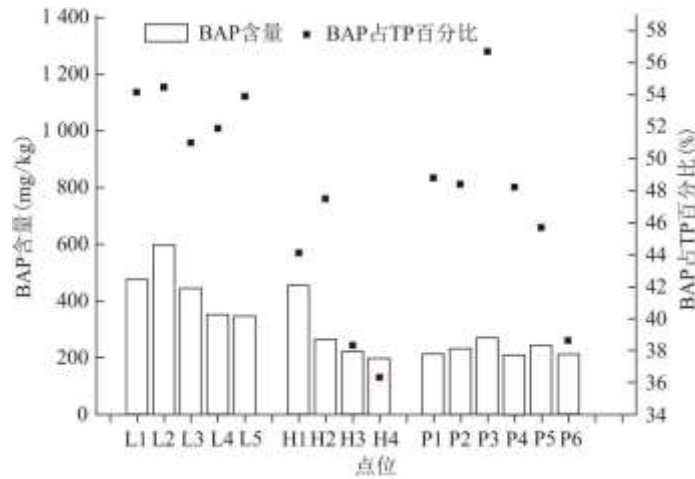


图4 表层沉积物 BAP 含量及 BAP 占 TP 百分比

### 3 讨论

#### 3.1 沉积物磷形态与粒径的关系

不同粒径的泥沙颗粒具有不同的比表面积，一般地，细颗粒沉积物相较于粗颗粒沉积物具有更大比表面积，表面具有更多的吸附点位，更易与营养盐发生吸附作用<sup>[19]</sup>。相关性分析结果显示，龙感湖和泊湖的 TP、IP、Fe/Al-P 与黏土含量呈极显著正相关(表 3)，说明龙感湖和泊湖沉积物磷含量受到沉积物的粒径组成的影响，这与水动力条件、陆源输入、生物扰动等因素有关。

表 3 龙感湖、泊湖沉积物磷形态与上覆水及沉积物理化性质相关性分析

	<4 μ m	4~10 μ m	10~50 μ m	50~63 μ m	>63 μ m	中值粒径	OM	上覆水 ORP
TP	0.80**	-0.49	-0.18	0.31	0.35	0.33	0.50	0.60
IP	0.86**	-0.51	-0.30	0.25	0.53	0.44	0.30	0.67*
Ex-P	0.03	-0.01	-0.01	-0.19	0.08	0.07	0.27	-0.39
Fe/Al-P	0.86**	-0.52	-0.17	0.21	0.54	0.49	0.33	0.63*
Ca-P	0.26	-0.05	-0.34	0.27	0.20	0.18	-0.02	0.58
OP	0.40	-0.22	0.16	0.33	-0.20	-0.10	0.77**	0.38

注：\*\*表示在 0.01 级别(双尾)相关性显著相关；\*表示在 0.05 级别(双尾)相关性显著相关。

不同组分粒径对磷的吸附能力存在差异，因此沉积物磷含量的变化受到不同组分粒径共同的影响。为了更进一步探究不同粒径组分含量与沉积物 TP 含量的关系，假设黏土、细粉砂、中粉砂、粗粉砂、砂的质量分数分别为  $x_1$ 、 $x_2$ 、 $x_3$ 、 $x_4$ 、 $x_5$ ，则沉积物 TP 和沉积物不同粒径组分含量之间的关系可以通过线性函数关系式表达为： $TP=1.079x_1+0.567x_3+0.581x_4+0.079x_5-0.511$  ( $R^2=0.837$ ,  $P<0.05$ )。

从偏回归系数来看，黏土的偏回归系数最大，说明 TP 含量受黏土组分的影响最大，这主要是由于 TP 主要以 IP 形式存在，IP 中 Fe/Al-P 占主导，Fe/Al-P 主要吸附在颗粒较小的黏土表面。

入湖河流河口沉积环境复杂，造成河口附近的沉积物磷形态以及含量存在差异。从粒径组成来看，在入湖口 L1、P4 河口处砂含量相对较多，中值粒径较大。入湖口处水动力较强，不利于细颗粒的沉积，造成沉积物粒径偏大，这在太湖、巢湖入湖河流河口也有相似现象<sup>[20, 21]</sup>。

龙感湖从入湖口到湖心 TP 含量呈现先升高后降低的趋势，与粒径组成及外源输入颗粒物沉积规律有关。L1 处水动力较强，进入湖区后，L2 处湖泊水动力减弱，细颗粒逐渐沉降，中值粒径最小，更有利于沉积物对磷的吸附。Fe/Al-P 与 TP 空间分布趋势一致，一方面是由于 Fe/Al-P 受细颗粒组分影响较大；另一方面 Fe/Al-P 的含量变化会随氧化还原环境而变化，当上覆水 ORP 降低时， $Fe^{3+}$  被还原同时溶出，其携带的磷会被活化进入水体<sup>[22]</sup>。相关性分析结果也显示，龙感湖 Fe/Al-P 含量与上覆水 ORP 显著正相关(表 3)，所以上覆水 ORP 沿程降低，有利于 Fe/Al-P 的释放。L1 处 Ca-P 含量高于龙感湖其它点位，也与 L1 处粒径较大有关。Ca-P 按其来源可分为自生钙磷和原生碎屑磷，其中碎屑磷主要来源于流域内风化侵蚀产物中磷灰石矿物晶屑等，且碎屑磷主要存在于粗颗粒物中，含量随粒径增大而增大<sup>[23, 24]</sup>。L1 处含砂量较大，导致 Ca-P 含量较高。OP 主要包含农业面源污染和水生动植物残体中含有的磷。相关性分析结果显示，龙感湖 OP 与 OM 呈极显著正相关(表 3)，说明 OM 是 OP 的重要载体<sup>[25]</sup>。而沉积物粒径较大不利于沉积物对 OM 的吸附，所以这也间接导致了 L1 处 OP 含量低于龙感湖其它点位。龙感湖各点位 Ex-P 含量相差不大，说明水动力导致的粒径组分差异对龙感湖表层沉积物中 Ex-P 影响不大。

泊湖入湖口处 P4 比泊湖其它点位砂含量较多(图 2)，一方面受到河流携带泥沙沉积作用影响，另一方面 P4 处距离岸边较近，冲刷作用使此处湖岸崩塌较严重。P4 处 TP、Fe/Al-P 含量低于泊湖其它点位，这与此处粒径稍大有关系。OP 含量低则可能是沉水植物和粒径共同影响的结果。但 P4 处 Ca-P 含量较低，并没有随着粒径增大而增加，也可能与此处有沉水植物有关。

### 3.2 沉积物磷形态与沉水植物的关系

在泊湖分别采取了 P4 点沉水植物根部附近的沉积物与其它无沉水植物点位的表层沉积物，将沉水植物区磷含量与无沉水植物区的磷平均含量进行比较。沉水植物区沉积物 TP 含量为 431mg/kg, 无沉水植物区沉积物 TP 含量为 493mg/kg, 沉水植物区沉积物 TP 含量降低了 12.6%。沉水植物区 Ex-P、Fe/Al-P、Ca-P、OP 分别占 TP 的 4.9%、23.4%、10.9%和 33.2%, Fe/Al-P、Ca-P、OP 含量分别比无沉水植物区降低了 12.6%、18%、64.6%、12.8%, Ex-P 含量比无沉水植物区上升了 44.8% (图 5)。总体来看, 除 Ex-P 外, 沉水植物使沉积物各种磷形态含量降低。沉水植物能够促进 Ex-P 的释放并且吸收利用 Ex-P<sup>[26]</sup>, Ex-P 含量升高可能是 Ex-P 被植物利用后其他形态磷向 Ex-P 转化的结果。菹草在生长过程中, 根系分泌有机酸类物质会导致根际 pH 值降低 (表 1), 在 pH 值较低的情况下, 有机酸能作为螯合剂, 与 Fe、Al、Ca 等阳离子螯合<sup>[27]</sup>, 从而导致 Fe/Al-P 的释放, 造成 Fe/Al-P 含量降低。OP 作为潜在的 BAP, 在厌氧条件下可被有效地矿化成 IP 从而被生物利用, 其矿化程度和速率与氧化还原条件极为相关<sup>[28,29]</sup>, P4 点上覆水 ORP 较低 (表 1) 为 OP 的矿化提供了有利条件, 造成 OP 含量下降。Ca-P 自身相对较为稳定, 一般不易释放, 但是当环境中 pH 值较低的时候也会释放<sup>[30]</sup>, P4 处沉积物 pH 较低 (表 1) 是导致 Ca-P 含量下降的主要原因。

### 3.3 沉积物 BAP 与水体磷负荷的关系

华阳河湖群表层沉积物 BAP 与上覆水 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P 相关性分析结果显示, BAP 与上覆水 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P 呈正相关的关系 (图 6)。在 BAP 含量低值区, 离散点较多, 其可能的原因为较低的 BAP 含量在转化为 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P 时转化效率差异性较大<sup>[31]</sup>。同时上覆水中的 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P 含量不仅与沉积物的 BAP 含量有关, 还受水体 pH、ORP、风浪扰动等环境因子的影响。如黄大湖的 H2、H3、H4 和泊湖的 P3、P5、P6 的 BAP 含量均较低, 无显著差异 (P>0.05), 但是上覆水 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P 浓度却存在显著差异 (P<0.01)。这可能与两个湖泊的水深有关, H2、H3、H4 的水深均小于 P3、P5、P6 (表 1), 水深较浅时, 沉积物更容易受到风浪扰动引起再悬浮, 使沉积物中的 BAP 更容易转化为 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P 进入上覆水体中, 这一点从黄大湖水体的浊度大于泊湖水体的浊度也能反映出来。而在 BAP 含量高值区, 上覆水中的 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P 含量也较大, BAP 与 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P 线性关系更好, 说明龙感湖相较于黄大湖和泊湖沉积物内源释放风险更大。

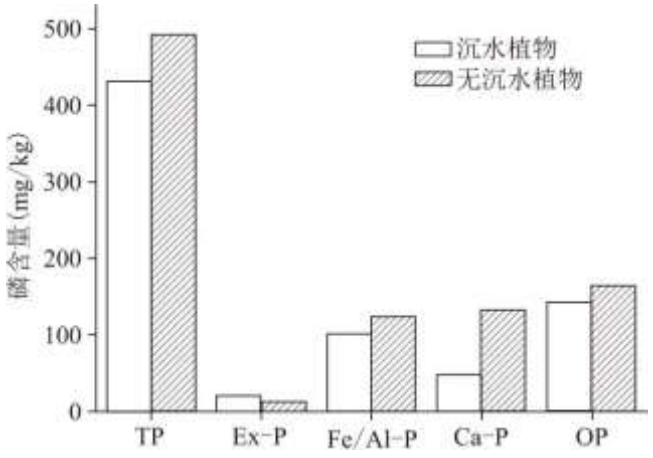


图 5 有无沉水植物点位的表层沉积物磷形态含量

华阳河湖群表层沉积物 BAP 占 TP 含量的 47.4%, 相较于长江口 13.02%, 南四湖 36.61%, 太湖 30.5%, 巢湖 43.07% 处于较高水平<sup>[18,32,33,34]</sup>。此外, 本研究得到的 3 个湖泊间的 BAP 含量大小顺序与此前华阳河湖群浮游生物量的研究结果一致<sup>[35]</sup>, 均为龙感湖>黄大湖>泊湖。沉积物中的 BAP 的含量越高, 向上覆水体释放的潜在风险越大, BAP 进入水体后将作为浮游植物进行光合作用的营养成分, 进而影响水体的初级生产力。浮游植物特别是藻类的增多是湖泊富营养化的一种趋势, 因此, 若要控制华阳河湖群从草型湖泊向藻型湖泊的转变, 要对沉积物中的 BAP 的影响因素及释放方式进一步深入研究。

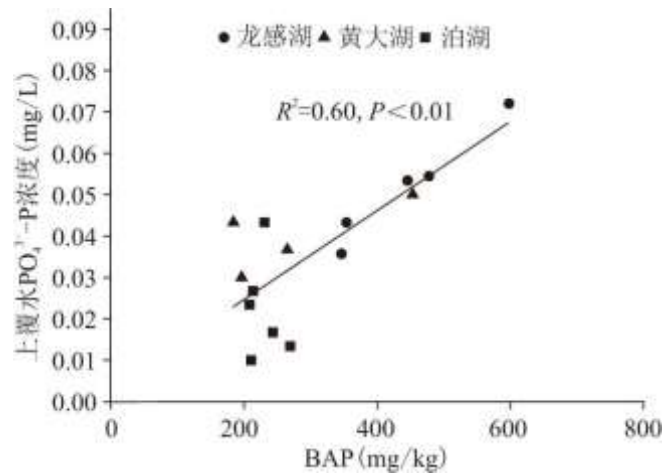


图 6 表层沉积物 BAP 含量与上覆水 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P 浓度的关系

## 4 结论

(1) 华阳河湖群表层沉积物 TP 含量与上覆水体 TP 浓度水平保持一致，其中 IP 为主要形态，IP 中各形态磷的含量大小顺序为 Fe/Al-P>Ca-P>Ex-P。

(2) 龙感湖和泊湖沉积物 TP、IP、Fe/Al-P 与黏土呈极显著正相关，TP 含量与粒径组分存在线性相关关系。在龙感湖和泊湖入湖口由于较多的外源输入和较强的水动力，沉积物磷形态受粒径组分影响更大。

(3) 泊湖沉水植物区的沉积物 TP 含量低于泊湖其他点位均值，除 Ex-P 外，沉水植物使沉积物其它磷形态含量降低，通过对比发现沉水植物可通过改变 pH 和 ORP 影响沉积物磷形态含量。

(4) 华阳河湖群表层沉积物 BAP 占 TP 含量的 47.4%，高于长江中下游其他浅水湖泊含量。在 TP 含量越高的区域，其 BAP 含量也越高，结合 BAP 含量与上覆水 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P 浓度之间的线性关系，可得出龙感湖相较于黄大湖和泊湖沉积物内源释放风险更大。

### 参考文献:

[1] MENG J, YAO Q Z, YU Z G. Particulate phosphorus speciation and phosphate adsorption characteristics associated with sediment grain size[J]. Ecological Engineering, 2014, 70(1):140-145.

[2] 王立志, 王国祥, 俞振飞, 等. 沉水植物生长期对沉积物和上覆水之间磷迁移的影响[J]. 环境科学, 2012, 33(2):385-392.

[3] XIE F Z, LI L, SONG K, et al. Giesy. Characterization of phosphorus forms in a Eutrophic Lake, China[J]. Science of the Total Environment, 2019, 659(1):1437-1447.

[4] 张小勇, 杨茜, 孙耀, 等. 黄东海陆架区沉积物中磷的形态分布及生物可利用性[J]. 生态学报, 2013, 33(11):3509-3519.

[5] 叶华香, 臧淑英, 尉文佳, 等. 南山湖沉积物磷形态时空分布特征[J]. 环境工程, 2019, 37(5):105-110, 116.

- 
- [6]TU L Y,KLAUS A J,TOBIAS S,et al.Phosphorus fractions in sediments and their relevance for historical lake eutrophication in the Ponte Tresa basin (Lake Lugano,Switzerland) since 1959[J].Science of The Total Environment,2019,685:806-817.
- [7]KLAMT A M,HILT S,MOROS M,et al.The effect of a shift from macrophyte to phytoplankton dominance on phosphorus forms and burial in the sediments of a shallow hard-water lake[J].Biogeochemistry,2019,143,371-385.
- [8]曾凯,王家生,章运超,等.华阳河湖群水位变化对水质的影响分析[J].长江科学院院报,2020,8(1):49-53.
- [9]洪源,罗勇,王钟.安徽省宿松县龙感湖和黄大湖枯水期水质现状分析[J].安徽农业科学,2018,46(35):75-79.
- [10]杜宏伟,张恒军,范中亚,等.华阳河湖群底泥沉积物特性研究[J].环境科学与技术,2015,38(4):128-132.
- [11]安徽省生态环境厅.安徽省生态环境状况公报:2018[R].合肥:安徽省生态环境厅,2019.
- [12]范中亚,王文才,蒋锦刚,等.华阳河湖群沉积物内源磷释放风险及控制策略[J].环境科学研究,2020,33(5):1170-1178.
- [13]闫兴成,王明玥,许晓光,等.富营养化湖泊沉积物有机质矿化过程中碳、氮、磷的迁移特征[J].湖泊科学,2018,30(2):306-313.
- [14]RUBAN V,PARDO P,RAURET G,et al.Development of a harmonised phosphorus extraction procedure and certification of a sediment reference material[J].Journal of Environmental Monitoring,2001,3(1):121-125.
- [15]侯立军,陆健健,刘敏,等.长江口沙洲表层沉积物磷的赋存形态及生物有效性[J].环境科学学报,2006,26(3):488-494.
- [16]熊强,焦立新,王圣瑞,等.滇池沉积物有机磷垂直分布特征及其生物有效性[J].环境科学,2014,35(11):4118-4126.
- [17]EMIL R.Potentially mobile phosphorus in Lake Erken sediment[J].Water Research,2000,34(7):2037-2042.
- [18]安文超,张书武,和慧,等.南四湖及主要入湖河流河口区表层沉积物磷的形态与分布特征研究[J].环境科学学报,2012,32(4):895-901.
- [19]刘敏,许世远,侯立军,等.长江口滨岸潮滩沉积物中磷的存在形态和分布特征[J].海洋通报,2001,20(5):10-17.
- [20]李强,霍守亮,王晓伟,等.巢湖及其入湖河流表层沉积物营养盐和粒度的分布及其关系研究[J].环境工程技术学报,2013,3(2):147-155.
- [21]章婷曦,文莹亭,董丹萍,等.太湖西北部表层沉积物粒度特征与沉积环境[J].湖泊科学,2018,30(3):836-846.
- [22]扈传昱,潘建明,刘小涯.珠江口沉积物中磷的赋存形态[J].海洋环境科学,2001,20(4):21-25.
- [23]ZHENG L B,YE Y,ZHOU H Y.Phosphorus forms in sediments of the East China Sea and its environmental significance[J].Journal of Geographical Sciences,2004,14(1):113-120.

- 
- [24]YAO Q Z,DU J T,CHEN H T,et al.Particle-size distribution and phosphorus forms as a function of hydrological forcing in the Yellow River[J].Environ Sci Pollut Res,2016,23(1),3385-3398.
- [25]韩年,袁旭音,周慧华,等.洪泽湖入湖河流沉积物有机磷分布特征及外源输入对其形态转化的影响[J].湖泊科学,2020,32(3):665-675.
- [26]赵海超,赵海香,王圣瑞,等.沉水植物对沉积物及土壤垂向各形态无机磷的影响[J].生态环境,2008(1):74-80.
- [27]LI Y F,LUO A C,WEI X H,et al.Changes in phosphorus fractions,PH, and phosphatase activity in rhizosphere of two rice genotypes[J].Pedosphere,2008(6):785-794.
- [28]TURNER B L,CADE-MENUM B J,CONDRON L M,et al.Extraction of soil organic phosphorus[J].Talanta,2005,66(2):294-306.
- [29]BAI J H,YU L,YE X F,et al.Organic phosphorus mineralization characteristics in sediments from the coastal salt marshes of a Chinese delta under simulated tidal cycles[J].Journal of Soils and Sediments,2020,20(1):513-523.
- [30]WU Y H,WEN Y J,ZHOU J X,et al.Phosphorus release from lake sediments:Effects of pH,temperature and dissolved oxygen[J].KSCE Journal of Civil Engineering,2014,18(1):323-329.
- [31]张路,范成新,朱广伟,等.长江中下游湖泊沉积物生物可利用磷分布特征[J].湖泊科学,2006(1):36-42.
- [32]胡晓婷,程吕,林贤彪,等.长江口及其邻近海域沉积物磷的赋存形态和空间分布[J].环境科学学报,2016,36(5):1782-1791.
- [33]王琦,姜霞,金相灿,等.太湖不同营养水平湖区沉积物磷形态与生物可利用磷的分布及相互关系[J].湖泊科学,2006(2):120-126.
- [34]徐康,刘付程,安宗胜,等.巢湖表层沉积物中磷赋存形态的时空变化[J].环境科学,2011,32(11):3255-3263.
- [35]吴奇丽,张坤,陈欢,等.华阳河湖群叶绿素 a 浓度的季节动态和空间分布[J].水生态学杂志,2019,40(2):66-72.