

;

福建省山仔水库沉积物磷对水体磷浓度贡献的估算*

苏玉萍, 林佳, 何灵, 林婉珍, 王家乐

(福建师范大学环境科学与工程学院, 福州 350007)

摘要: 从沉积物磷的化学形态特征、沉积物—水界面的环境条件和水库的水文参数等角度探讨了山仔水库沉积物磷对上覆水体的磷浓度贡献, 并从沉积物间隙水与水体垂向溶解性磷的浓度梯度估算对水体磷浓度的贡献大小. 结果表明: 山仔水库沉积物具有大的释放磷的潜力, 沉积物间隙水和水体之间存在着明显的溶解性磷的浓度梯度, 沉积物的溶解性磷释放通量在 $0.0420\text{--}0.167\mu\text{g}/(\text{cm}^2\cdot\text{d})$ 之间, 沉积物磷对水体营养贡献大小在 $0.7\%\text{--}6\%$ 之间, 其中秋冬季节沉积物磷对水体的贡献大于春夏季节, 当外源减少时, 沉积物磷负荷在一定时间内将成为水库营养状态的重要贡献因子.

关键词: 深水水库; 沉积物; 磷; 贡献; 估算; 山仔水库

Calculation of the contribution of the sediment phosphorus to the phosphorus concentration of the water body of Shanzi deep reservoir in Fujian Province

SU Yuping, LIN Jia, HE Ling, LIN Wanzhen & WANG Jiale

(*Environmental Science and Engineering College of Fujian Normal University, Fuzhou 350007, P.R.China*)

Abstract: The contribution of the sediment phosphorus to the phosphorus concentration of the water body was studied through measuring the chemical forms of the sediment phosphorus and the environmental conditions at the sediment-water interface and the hydrological parameters of reservoir, and then we calculated the contribution from the concentration gradient of the total soluble phosphorus between the surface sediment and the water body. The result showed that the sediment of shanzi reservoir had a great release potential of the phosphorus and there was an apparent concentration gradient of the total soluble phosphorus between the surface sediment and the water body which releasing flux was from $0.0420\mu\text{g}/(\text{cm}^2\cdot\text{d})$ to $0.167\mu\text{g}/(\text{cm}^2\cdot\text{d})$. The contribution of sediment phosphorus to the phosphorus concentration of the water body was from 0.7% to 6% . The contribution in Autumn and in Winter were bigger than in Spring and in Summer. The sediment phosphorus load would be an important factor of the trophic status of the reservoir if the outside sources had been reduced.

Keywords: Deep reservoir; sediment; phosphorus; contribution; calculation; Shanzi reservoir

沉积物是水体营养盐的归宿, 同时也是水体的营养源之一. 沉积物磷对上覆水体中磷含量起缓冲作用, 随着水温、pH 值、氧化还原等环境条件的改变, 沉积物中的磷释放进入间隙水中, 进而通过扩散作用, 在上覆水体中重新参加循环^[1]. 在外源减少或得到控制的情况下, 沉积物磷负荷将在一定长的时间内阻止或延迟湖泊水质的治理效果. 沉积物磷对水体营养的贡献影响因素是非常复杂的, 目前国内外研究主要围绕沉积物磷的赋存形态, 沉积物—水界面磷的动态, 外源磷输入和内源磷输出平衡估算等不同的方面来分析沉积物磷对水体的贡献^[2-7]. 近年来福建省主要饮用水源水库山仔、东张、安砂、山美、东圳等均呈现不同程度富营养化趋势, 严重影响了水质, 并威胁到人们的饮水安全. 目前福建省尚未开展内源污染的系统化研究, 本文以山仔水库作为研究对象, 综合考虑了沉积物磷的化学形态和含量, 沉积物磷的释放条件, 水体的垂向溶解性磷浓度分布以及水库的水文参数特征, 探讨沉积物溶解性磷通过间隙水向水体扩散的过程, 估算出山仔水库沉积物磷对水体营养的贡献大小, 为正确评价该水体的营养状

* 福建省自然科学基金项目(2007J0235, WO750003)资助. 2008-02-19 收稿; 2008-05-28 收修改稿. 苏玉萍, 女, 1972 年生, 博士, 副教授; E-mail: ypsu@fjnu.edu.cn.

况, 改善和恢复该水库的水质, 实现水资源的可持续利用提供科学的参考.

1 研究区域概况

山仔水库位于福建省敖江流域中游, 中心地理位置(26°17'51"N, 119°21'35"E(图 1)), 1994年开始蓄水, 1997年被定为福州市第二饮用水源. 年平均气温 14.7–19.4℃, 年降水量在 1000–1800mm 之间, 山仔水库呈长条不规则状分布, 平均水深 30 多米, 调节库容 $1.06 \times 10^8 \text{m}^3$. 由于水库上游石材工业污水、养猪厂污水以及农业污水的排入水库, 水库已呈明显富营养化现象. 山仔水库的富营养化问题引起了省政府的高度重视, 2000 年颁布了《敖江流域水源保护管理办法》, 通过搬迁各类污染源, 加强了流域的治理和综合管理, 但每年春末到秋初蓝藻的持续爆发, 说明水质并没有得到根本性改善, 由于点源污染输入量得到一定的控制, 面源污染的输入长期存在, 而内源污染贡献不容忽视.

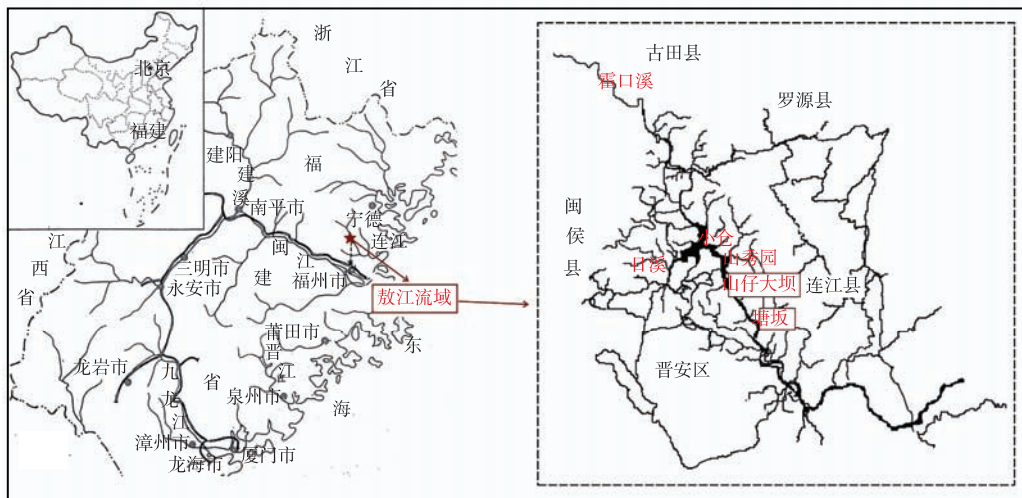


图 1 山仔大坝地理位置

Fig.1 Location site of the reach of Shanzi Dam

2 实验方法

2.1 样品的采集

2.1.1 表层沉积物的采集 根据山仔水库库区的形态学特征, 2005 年 4 月, 采用柱状采泥器, 在进口日溪断面(26°20.8'N, 119°16.4'E)、进口七里断面(26°23.7'N, 119°17.4'E)、库心断面(26°22.6'N, 119°18.9'E)、出口大坝断面(26°20.4'N, 119°19.8'E)4 个具有代表性的断面进行采样. 日溪和七里断面, 水面宽小于 50m, 在河流中心断面位置采集 10 个表层样品; 库心和出口的水面宽大于 100m, 用 GPS500 型导航仪, 网格法均匀设置采集 10 个表层样品. 每个断面采集的 10 个沉积物样品, 分别按表层 0–5cm 风干后混合, 按四分法分析磷的形态, 分别测 3 个平行样, 取平均值.

2.1.2 垂直方向水样与沉积物间隙水的采集 2004 年 10 月, 2005 年 1 月、4 月和 7 月, 分别在山仔水库的河流区进口日溪和七里、缓冲区库心、湖泊区出口大坝, 用奥地利进口不锈钢柱状采泥器分别采集 30cm 左右柱状沉积物, 各三根, 按 2cm 分割, 装入密实塑料袋, 放入保温箱保存, 带回实验室低温高速离心提取间隙水, 取 3 根柱状沉积物间隙水平均值, 同时采集采样点表层混合水(水面下 0.5m 和透明度盘所测深度的 2 倍)、中位水(水深一半处)、上覆水(离沉积物 0.2m 左右), 用于分析总溶解性磷(TDP), 分别测 3 个平行样, 取平均值.

2.2 分析方法

2.2.1 沉积物孔隙度 孔隙度=沉积物容重/沉积物比重^[8].

沉积物的容重: 湿沉积物的质量与体积比(g/cm^3), 3个平行样, 取平均值;

沉积物比重: 风干土样均匀混合, 过 20 目筛, 用比重瓶法测定, (g/cm^3), 3个平行样, 取平均值.

2.2.2 水体总溶解性磷 水样经 $0.45\mu\text{m}$ 膜过滤, 过硫酸钾氧化后, 钼锑抗比色法测定总溶解性磷^[8], 每个样品做 3 个平行样, 取平均值.

2.2.3 沉积物磷形态 沉积物磷形态的分级采用 SMT 法^[9], 钼锑抗比色法测定磷含量. 每个样品做 3 个平行样, 取平均值.

称取 0.200g 样品加 20ml 1mol/L NaOH 振荡 16h 后离心, 取 10ml 上清液加入 4ml 3.5mol/L HCl 静置 16 后离心, 钼锑抗比色法测定磷含量, 得到铁/铝/锰结合态磷(NaOH-P); 1mol/L NaOH 提取后的残渣用饱和 NaCl 溶液清洗后, 加入 20ml 1mol/L HCl 振荡 16h 后提取钙结合态磷(Ca-P); 称取 0.200g 样品加 20ml 1mol/L HCl 振荡 16h 后提取无机磷(IP); 残渣用去离子水洗涤两次, 冷冻干燥, 超声浴 30s, 于 450°C 马弗炉中灰化 3h, 加 20ml 1mol/L HCl 振荡 16h 后提取有机磷(OP); 称取 0.200g 样品, 于 450°C 马弗炉中灰化 3h, 加 20ml 3.5mol/L HCl 振荡 16h 后提取总磷(TP).

3 结果与讨论

3.1 山仔水库沉积物表层磷形态分布

SMT 法提取结果表明, 山仔水库 4 个点位表层沉积物总磷含量在 600.0 ± 20.2 至 $1000.0 \pm 24.6\text{mg}/\text{kg}$ 之间(图 2), 从进口日溪, 进口七里→库心→大坝, 总磷的含量逐渐增加, 表明营养物随水流逐渐积累. 山仔水库 4 个点位表层沉积物均以无机磷为主, 平均含量占总磷含量的 60%–73%, 有机磷含量占总磷含量 27%–40%, 无机磷中铝/铁结合态磷占绝对优势, 占总磷含量的 44%–57%, 钙磷占总磷含量的 13%–26%, 活性较大的铝/铁结合形态磷和有机磷占总磷含量的 73%–85%, 表明山仔水库表层沉积物具有较大的释放磷的潜能.

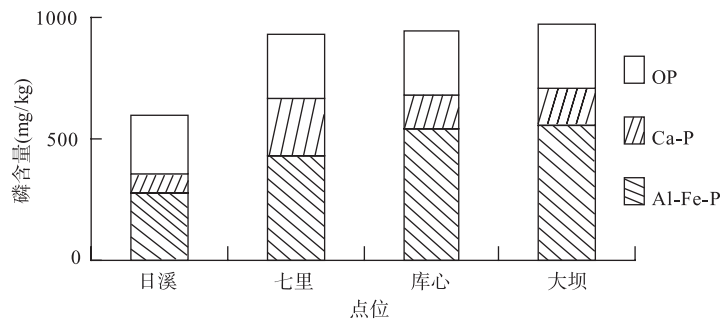


图 2 沉积物表层磷形态分布

Fig.2 Distribution of the forms of phosphorus in the surface sediment

3.2 沉积物磷相关性分析

沉积物磷对上覆水体的贡献除了与沉积物磷形态有关, 还与沉积环境如沉积物-水界面的磷浓度梯度、氧化-还原电位、pH 值、水温、水深、沉积物地球化学性质等有关^[7].

用 SPSS 统计软件对 2005 年 4 月沉积物表层各种磷形态、间隙水 TDP、上覆水 TDP 进行 Pearson 相关性分析, 结果如表 1 所示. 由表 1 可知: 沉积物表层的总磷与铝/铁磷相关系数达到 0.948, 显著相关 ($P < 0.01$), 反映了沉积物表层铝/铁磷占总磷大多数的事实; 铝/铁磷与钙磷相关系数为 0.602, 显著相关 ($P < 0.01$), 说明铝/铁磷与钙磷之间可能存在着同源的关系^[10]. 间隙水 TDP 与沉积物表层的铝/铁磷、有机磷相关系数分别为: 0.492, 0.519, 显著相关 ($P < 0.01$), 说明间隙水的总溶解性磷主要来自沉积物铝/铁磷的释放和有机磷的分解. 随着沉积物-水界面水温的升高, 微生物代谢作用增强, 有机磷被分解成可溶性的磷酸盐, 释放到间隙水中, 随着沉积物-水界面的厌氧环境的逐渐形成, 沉积物中铝/铁磷的释放作用会加强. 沉积物间隙水的 TDP 与上覆水的 TDP 相关系数为 0.664, 显著相关 ($P < 0.01$), 反映了沉积物间隙水的 TDP 扩散对

上覆水的贡献, 间隙水的溶解性磷扩散是沉积物影响上覆水体, 进而影响库区整个水体溶解性磷的主要途径.

表1 沉积物表层各种磷形态、间隙水TDP、上覆水TDP Pearson相关性分析*

Tab.1 Pearson pertinence analysis of the forms of phosphorus in the surface sediment and the total dissolved phosphorus in the core water and total dissolved phosphorus in the overlay water

	间隙水 TDP	铝/铁磷	钙磷	有机磷	总磷	上覆水 TDP
间隙水 TDP	1.000					
铝/铁磷	0.492	1.000				
钙磷	-0.255	0.602	1.000			
有机磷	0.519	0.367	0.317	1.000		
总磷	0.312	0.948	0.805	0.489	1.000	
上覆水 TDP	0.664	0.074	-0.426	0.341	-0.045	1.000

* n=8, 数据显著性水平 P<0.01.

3.3 沉积物磷对水体营养贡献的分析

2004-2005 年不同季节山仔水库各采样点平均水深(表 2)表明, 山仔库区春末夏季处于丰水季节. 图 3 是 2004-2005 年山仔水库各个采样点表层水、上覆水、中位水和间隙水中的总溶解性磷含量的垂直分布, 结果是 3 个平行样取平均值, 相对偏差小于 5%. 四个季节各个采样点的间隙水总溶解性磷的含量远大于水体中总溶解性磷含量, 表明沉积物-水界面上存在明显的总溶解性磷浓度的梯度(图 3).

表2 2004-2005年不同季节山仔水库各采样点平均水深

Tab.2 Average depth of the water in four seasons in the shanzi reservoir from 2004 to 2005

年-月	日溪(m)	七里(m)	库心(m)	大坝(m)
2004-10	20.1	21.2	33.4	42.6
2005-01	13.8	17.4	29.9	40.6
2005-04	21.2	23.3	36.2	47.1
2005-07	24.6	27.2	40.4	50.6

由于山仔水库属于深水库, 扰动作用相对较少, 可以认为分子扩散是沉积物溶解组分通过间隙水向上覆水体迁移的最主要方式. 已有研究表明, 间隙水的分子扩散过程满足斐克第一定律^[11]:

$$J_s = -\phi D_s \frac{\partial C}{\partial x} \tag{1}$$

式中: J_s 为沉积物溶质的扩散通量($\text{mg}/(\text{cm}^2 \cdot \text{a})$); ϕ 为沉积物孔隙度; $\frac{\partial C}{\partial x}$ 为间隙水中溶质的浓度梯度(mg/cm^4); D_s 为沉积物中溶质的分子扩散系数(cm^2/s).

因为 D_s 是关于沉积物弯曲度的函数, 在实际工作中测定弯曲度是比较困难的, 所以通常是根据稀溶液中溶质的扩散系数 D_o 来导出 D_s . Krom 等在实验的基础上, 得出 D_o 与 D_s 之间的经验公式, 同时可以校正温度(上覆水温度)和孔隙度的差异造成的误差

$$D_o(\text{HPO}_4^{2-}) = 7.34 + 0.16(T - 25) \tag{2}$$

$$D_s(\text{HPO}_4^{2-}) = D_o(\text{HPO}_4^{2-}) \phi \tag{3}$$

研究表明: 在孔隙度小于 0.75 的条件下(3)式成立, 在孔隙度大于 0.75 的条件下用 ϕ^2 代替 ϕ , 因为山仔水库沉积物的孔隙度都小于 0.75(如表 2 所示), 所以式(3)对于本研究对象成立.

假定: 1) 分子扩散是沉积物间隙水扩散迁移的唯一的途径; 2) 水体充分混合, 可以估算出沉积物磷

的扩散对水质的影响程度^[11-12].

$$\eta = C_d / C \quad (4)$$

式中, C_d 为沉积物间隙水扩散迁移出的总溶解性磷酸盐浓度(mg/L); C 为水体中总溶解性磷酸盐浓度(mg/L).

$$C_d = J_s \cdot T_w / H \quad (5)$$

式中, J_s 为扩散通量(mg/(cm²·a)); T_w 为水体停留时间(a); H 为水深(m).

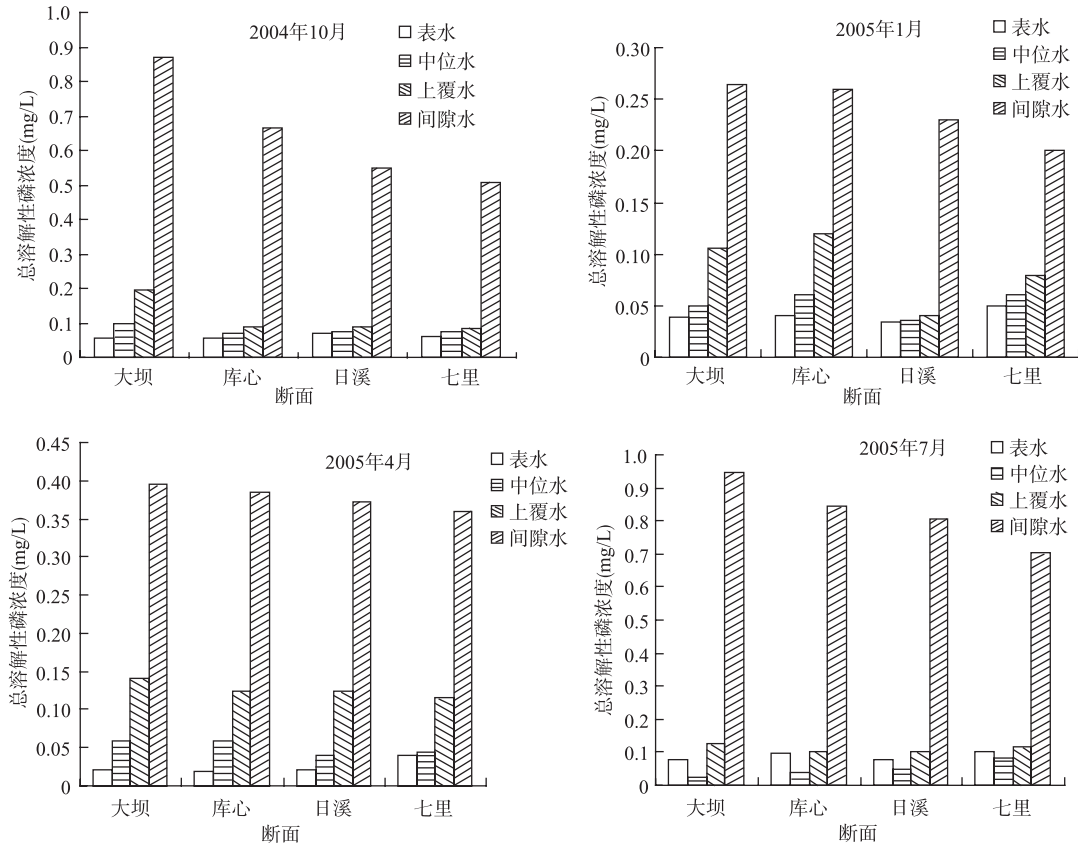


图 3 2004–2005 年不同季节各采样断面的总溶解性磷浓度

Fig.3 Concentrations of the total dissolved phosphorus at each section in four seasons

由表 3 中可知, 4 个季节不同点位上总溶解性磷扩散通量均表现为湖泊区(大坝: 0.0476–0.1670 $\mu\text{g}/(\text{cm}^2\cdot\text{d})$)>缓冲区(库心: 0.0470–0.1504 $\mu\text{g}/(\text{cm}^2\cdot\text{d})$)>河流区(七里: 0.0438–0.1484 $\mu\text{g}/(\text{cm}^2\cdot\text{d})$)>河流区(日溪: 0.0420–0.1468 $\mu\text{g}/(\text{cm}^2\cdot\text{d})$), 这与沉积物中活性磷(铝铁磷, 有机磷)含量的空间分布规律一致湖泊区(大坝)>缓冲区(库心)>河流区(七里, 日溪), 在同一季节沉积物—水界面环境条件相差不大的情况下, 湖泊区(大坝)沉积物具有更高的磷释放能力. 从季节上看, 夏季沉积物磷扩散通量(0.1528 $\mu\text{g}/(\text{cm}^2\cdot\text{d})$)明显高于其他季节, 秋天(0.1032 $\mu\text{g}/(\text{cm}^2\cdot\text{d})$)次之, 而冬天的扩散通量(0.0452 $\mu\text{g}/(\text{cm}^2\cdot\text{d})$)最少. 夏季沉积物—水界面微生物代谢旺盛, 分解有机物消耗了大量的溶解氧, 由于阳光无法到达深水底层, 无法进行光合作用, 造成水体底层接近厌氧, 加上夏季水温高, 磷释放的正交实验已经表明, 厌氧和高温条件有利于磷的释放, 所以夏季的磷扩散通量最高; 冬天随着水温分层的消失, 下层水向上翻转, 整个水体充分混合, 使得沉积物—水界面溶解氧相对较高, 加上冬天水温低, 不利于磷的释放, 所以冬天的磷扩散通量最低.

在不考虑水温分层, 水体处于充分混合, 且沉积物通过间隙水向上覆水体的释放只考虑分子扩散的

前提下, 得出的间隙水总溶解性磷扩散对水体的影响参数 η , 从点位上看: 日溪(1.48%–5.96%)>七里(0.92%–4.04%)>库心(0.76%–4.02%)>大坝(0.74%–2.56%), 与磷扩散通量规律刚好相反, 这是因为影响参数 η 不仅与磷扩散通量有关, 还与水体寄宿时间, 水深, 水体总溶解性磷酸盐浓度有关, 由于水深: 大坝>库心>七里>日溪, 所以虽然大坝磷扩散通量最高, 由于大坝处水最深, 降低了大坝处磷释放对水体的贡献程度. 一般认为夏天的磷扩散通量大, 从间隙水扩散到水体的总溶解性磷含量高, 对水体的贡献也相应的比较大, 值得注意的是, 山仔水库季节上的贡献程度与磷扩散通量也几乎相反, 秋(4.15%)冬(4.02%)的贡献大于春(2.21%)夏(0.97%). 事实上间隙水总溶解性磷的扩散与水温分层有很大的关系, 夏天沉积物磷扩散通量大, 由于山仔水库每年3–11月形成水温稳定分层^[13], 从间隙水扩散的溶解性磷酸盐都滞留在温跃层以下, 因而对整个库区水体的影响程度降低了; 而冬天由于水体的均匀混合, 从间隙水扩散的溶解性磷酸盐通过水体的混合对整个水体产生较大的影响, 但是冬天的磷释放能力小, 结果秋天沉积物间隙水总溶解性磷扩散对水体的贡献在四个季节里最大, 从表 3 中可知, 不同季节和不同点位的沉积物磷对水体营养贡献大小在 0.7%–6%之间.

表 3 沉积物磷扩散对水体的贡献*

Tab.3 Calculation of the contribution of the sediment phosphorus to the water body

日期 (年-月)	断面	孔隙度 (%)	孔隙水磷浓度 梯度 ($\mu\text{g}/\text{cm}^4$)	J_s ($\mu\text{g}/(\text{cm}^2\cdot\text{d})$)	H (m)	C ($\mu\text{g}/\text{ml}$)	η (%)
2004-10	日溪	56.34	0.5500	0.0934	11.6	0.0694	5.96
	七里	57.43	0.5456	0.0958	20.0	0.0609	4.04
	库心	52.38	0.6650	0.0970	22.0	0.0564	4.02
	大坝	52.30	0.8694	0.1264	45.1	0.0566	2.56
2005-01	日溪	62.08	0.2302	0.0420	10.8	0.0505	5.70
	七里	62.11	0.2410	0.0438	16.8	0.0460	4.20
	库心	61.77	0.2602	0.0470	20.0	0.0451	3.86
	大坝	61.74	0.2634	0.0476	39.3	0.0390	2.30
2005-04	日溪	53.38	0.3642	0.0536	15.3	0.0315	3.46
	七里	55.39	0.3408	0.0544	22.4	0.0352	2.14
	库心	52.75	0.3804	0.0548	31.1	0.0280	1.96
	大坝	52.75	0.3912	0.0558	45.1	0.0300	1.28
2005-07	日溪	53.62	0.8052	0.1468	22.1	0.0790	1.48
	七里	54.79	0.7796	0.1484	28.4	0.1000	0.92
	库心	53.21	0.8454	0.1504	35.0	0.0990	0.76
	大坝	53.02	0.9454	0.1670	50.7	0.0790	0.74

* 停留时间=库容/平均流量, 山仔水库正常蓄水库容量 $1.67 \times 10^8 \text{m}^3$, 多年平均流量 $58.9 \text{m}^3/\text{s}$, 季节平均流量是通过季节径流量与年径流量之间的关系推算出来, 未考虑蒸发量对停留时间的影响, 本估算中默认库区不同点位水体的停留时间接近相同.

在实际的沉积物体系中, 扩散通量还受到吸附作用, 离子交换作用等影响, 实际扩散要比理论上的慢, 这里计算出的扩散通量也只是反映了沉积物与水体之间磷交换的趋势, 间隙水扩散对水体的贡献程度也只考虑到扩散通量、水深、水体磷浓度和季节上的水体寄宿时间的影响, 没有考虑到水温分层、点位上的水体寄宿时间差异等因素. 实际上湖泊区的水体寄宿时间更长, 河流区的水体寄宿时间短, 在冬天水体均匀混合的条件下, 大坝间隙水扩散对水体的贡献程度可能更大; 在夏春秋三个季节, 因为水温分层, 间隙水扩散的磷滞留在温跃层以下, 对整个水体的影响程度小, 而在秋末水温分层消失时, 上翻的水团会将下层水中较高浓度的溶解性磷带到表层, 引起表层水质恶化; 春初在水体水温分层形成之前,

沉积物-水界面环境条件的变化, 间隙水向上覆水层扩散的溶解性磷会随水团上翻, 也会出现短时间的表层水质恶化. 目前山仔水库作为内源的沉积物释磷作用还未对水质产生较大影响, 当水库的外部污染源得到控制以后, 沉积物间隙水和上覆水体的营养浓度差异将驱动沉积物内源营养负荷的释放.

4 结论

山仔水库表层沉积物总磷含量在 600.0–1000.0mg/kg 之间, 活性较大的铝/铁结合态磷和有机磷占总磷含量的 73%–85%, 表明山仔水库表层沉积物具有较大的释磷潜能; 四个季节沉积物间隙水溶解性磷与上覆水溶解性磷之间高的相关性表明了沉积物间隙水溶解性磷向上覆水体的扩散; 四个季节总溶解性磷扩散通量估算表明, 沉积物磷对水体营养贡献大小在 0.7%–6%之间, 其中秋冬季节沉积物磷对水体的贡献大于春夏季节, 当外源减少时, 沉积物磷负荷在一定时间内将成为水库营养状态的重要贡献因子.

5 参考文献

- [1] LI Qingman, Zhang Wen, Wang Xingxiang *et al.* Phosphorus in Interstitial Water Induced by Redox Potential in Sediment of Dianchi Lake, China. *Pedosphere*, 2007, **17**(6): 739-746.
- [2] Peng Jianfeng, Wang Baozhen, Song Yonghui *et al.* Adsorption and release of phosphorus in the surface sediment of a wastewater stabilization pond. *Ecological Engineering*, 2007, **31**(2): 92-97.
- [3] Fang Tienhsi, Chen Juilin, Huh Chih-An. Sedimentary phosphorus species and sedimentation flux in the East China Sea. *Continental Shelf Research*, 2007, **27**(10-11): 1465-1476.
- [4] Monbet GJ, Brunskill I, Zagorskis *et al.* Phosphorus speciation in the sediment and mass balance for the central region of the Great Barrier Reef continental shelf (Australia). *Geochimica et Cosmochimica Acta June*, 2007, **71**(11): 2762-2779.
- [5] 朱广伟, 秦伯强, 高 光. 太湖现代沉积物中磷的沉积通量及空间差异性. *海洋与湖沼*, 2007, **38**(4): 329-335.
- [6] 金相灿, 卢少勇, 王开明等. 巢湖城区洗耳池沉积物磷及其生物有效磷的分布研究. *农业环境科学学报*, 2007, **26**(3): 847-851.
- [7] 高 丽, 杨 浩, 周健民等. 滇池沉积物磷内负荷及其对水体贡献的研究. *环境科学学报*, 2004, **24**(5): 776-781.
- [8] 《全国主要湖泊、水库富营养化调查研究》课题组. 湖泊富营养化调查规范(第 2 版). 北京: 中国环境科学出版社, 1990: 213-215.
- [9] Ruban VJF, Lopez-Sanchez, 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. *Fresenius J Anal Chem*, 2001, **370**: 224-228.
- [10] 王雨春. 贵州红枫湖、百花湖沉积物-水界面营养元素(磷、氮、碳)的生物地球化学作用[学位论文]. 贵州: 中国科学院地球化学研究所, 1999: 51-97.
- [11] 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. *岩矿测试*, 2004, **23**(4): 246-250.
- [12] 万国江. 环境质量的地球化学原理. 北京: 中国环境科学出版社, 1988: 87.
- [13] 苏玉萍, 郑达贤, 林婉珍. 福建省山仔水库水体季节性分层特征研究. *福建师范大学学报(自然科学版)*, 2007, **22**(3): 1-4.