

# 水体热分层对万峰湖水环境的影响\*

邱华北<sup>1,2</sup> 商立海<sup>2\*\*</sup> 李秋华<sup>2,3</sup> 李广辉<sup>2</sup> 冯新斌<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 西南大学资源与环境学院, 重庆北碚 400715; <sup>2</sup> 中国科学院地球化学研究所环境地球化学国家重点实验室, 贵阳 550002;

<sup>3</sup> 贵州师范大学贵州省山地环境信息系统和生态环境保护重点实验室, 贵阳 550001)

**摘要** 2009年9月(秋季)和2010年1月(冬季)对南盘江流域峡谷型水库——万峰湖的水温和水化学(DO、pH、总磷)进行监测,结果表明:万峰湖水体在秋、冬季节均存在明显分层,秋季,水体分为3层,0~10 m为混匀层,10~50 m为斜温层,50 m以下为滞水层,这种温度分层阻止了水的对流混合,引起显著的水化学分层,形成底部厌氧层。冬季,水温下降,在水下50 m左右分层,表层随深度增加水温下降,下层为滞水层,水温较为均匀。相关性分析表明,万峰湖在2009年9月(秋季)和2010年1月(冬季)水温和DO、pH、总磷之间均为极显著相关,水化学分层与温度分层同步。

**关键词** 万峰湖; 水温分层; 水质; 空间分布

**中图分类号** X517 **文献标识码** A **文章编号** 1000-4890(2011)5-1039-06

**Impacts of seasonal thermal stratification on the water environment of Wanfeng Lake.** QIU Hua-bei<sup>1,2</sup>, SHANG Li-hai<sup>2\*\*</sup>, LI Qiu-hua<sup>2,3</sup>, LI Guang-hui<sup>2</sup>, FENG Xin-bin<sup>2</sup> (<sup>1</sup>College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715, China; <sup>2</sup>State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China; <sup>3</sup>Key Laboratory for Information System of Mountainous Area and Protection of Ecological Environment of Guizhou Province, Guiyang 550001, China). *Chinese Journal of Ecology*, 2011, **30**(5): 1039-1044.

**Abstract:** The water temperature and hydrochemical parameters during September 2009 and January 2010 of Wanfeng Lake in Guizhou Province were surveyed. A clear thermal stratification was found at the vertical profile of water column in autumn and winter. In autumn, a double thermocline appeared, which effectively limited the convective mixing of upper, intermediate and bottom of the layer water, caused water and water chemistry layered significantly. In winter, with the decreasing temperature of upper layer water, because the subsidence of the upper water due to the density changing, the water stratified structure changed, and convection exchange appeared between the upper and the bottom water, so the reducing matter released by anaerobic digestion was brought into the upper layer water. Seasonal thermal stratification played an important role in water quality and environmental change of Wanfeng Lake. Correlation analysis shows that, in Wanfeng Lake, the water temperature was significantly correlated with hydrochemical parameters (DO, pH, and total phosphorus) in September of 2009 and January of 2010, thus water chemistry layered with the temperature stratification synchronization.

**Key words:** Wanfeng Lake; thermal stratification; water quality; spatial distribution.

水库建成后会出现不同程度的水体热分层现象(吴莉莉等,2007;任华堂等,2007;易仲强等,2009;张士杰和彭文启,2009)。在热分层状态下,水体的

能量交换和物质迁移受到抑制,使得不同水层具有不同的水环境状态,引起水库水体的水质分层甚至生态分层,并对水库水的应用产生重要影响,其下泄水进一步影响下游河道水质和生态安全(Friedl *et al.*, 2004; Humborg *et al.*, 1997, 2000; 李冰冻等, 2009; 王煜和戴会超, 2009)。因而开展水电工程环境保护及其生态环境影响研究需要考虑水体热分层

\* 国家自然科学基金项目(40873085和40973083)和贵州省自然科学基金项目(黔科合J字[2007]2168号)资助。

\*\* 通讯作者 E-mail: shanglihai@vip.skleg.cn

收稿日期: 2010-11-05 接受日期: 2011-03-02

的影响。

近年来,随着我国西部水电资源的开发,地处河流上游的高坝峡谷水库数量急剧增加,其水环境必将影响下游河流水质和生态环境,而国内关于水体热分层与水库水环境相关性的研究还比较薄弱(苏玉萍等,2007)。因此,开展西南高坝峡谷水库水体热分层对水环境影响研究具有重要意义。本文利用对万峰湖水库2009年9月和2010年1月的野外实测数据,分析了秋、冬季节万峰湖水库水温、DO、pH、总磷的空间分布规律,阐明了万峰湖水体的分层特征,并初步探讨了水体热分层对万峰湖水环境的影响,为我国西南地区水电工程的环境保护及其对生态环境的影响研究提供科学参考。

## 1 研究地区和研究方法

### 1.1 研究区概况

万峰湖位于贵州省黔西南州兴义市和安龙县境内,地处我国西南部喀斯特地貌区,黔、滇、桂三省区交界处,由国家重点工程天生桥一级电站大坝将南盘江拦蓄而成,是红水河水电站梯级开发的龙头水库,同时承担着西江流域沿江城市生活和工农业用水的供水。万峰湖湖面面积176 km<sup>2</sup>,主航道长约128 km,最宽处20 km,总库容为102.6亿 m<sup>3</sup>(邹竹波等,2005)最大水深达104 m;兼有发电、防洪、旅游、养殖、航运、饮用水源及工农业用水等多种功能。

### 1.2 研究方法

由于万峰湖库区狭长,整个湖区两岸密集分布养鱼网箱,且峡谷水库上、中游存在明显的底层温差异重流现象(易仲强等,2009),故而采样点选择在受河流入库水影响较小的万峰湖坝艾至大坝段主航道水域设置,下游至上游依次为S1(大坝)、S2(野鸭滩)、S3(革步)、S4(坝艾)在各采样点采集不同深度的分层水样(图1)。

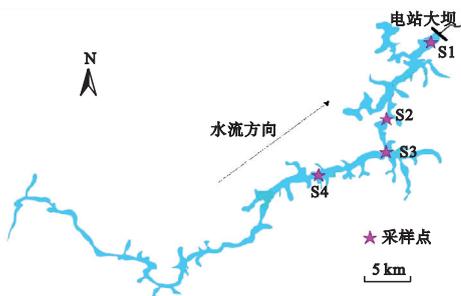


图1 万峰湖采样点分布示意图

Fig. 1 Sampling location of Wanfeng Lake

2009年9月、2010年1月进行水样采集,在4个垂直剖面采用YSI-6600V2水质多参数测定仪现场测定垂直水温、溶解氧(DO)和pH值。其中,在2009年9月采样使用YSI-6600V2(中水)水质多参数测定仪(极限工作深度为60 m);2010年1月使用YSI-6600V2(深水)水质多参数测定仪(极限工作深度为200 m)。由于仪器性能所限,2009年9月未能采集到深度60 m以下水体的垂直水温、溶解氧(DO)和pH值数据。

用5 L水样采样器采集分层水样,带回实验室使用钼锑抗分光光度法测定总磷(GB 11893-89;国家环境保护总局,2002)。

对水温分层类型的判别采用指标法, $a = \text{入库总流量} / \text{总库容}$ ;当 $a < 10$ 时,为稳定分层型;当 $a > 20$ 时,为完全混合型(叶守泽等,1998;王煜和戴会超,2009)。

### 1.3 数据处理

以Microsoft Excel 2003进行数据处理及绘图,采用SPSS 13.0软件进行Pearson相关分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 万峰湖水体水温变化

从图2可以看出,9月和1月万峰湖均具有明显分层,9月分层尤为显著。9月万峰湖为高温期,垂向上出现了双温跃层分布,0~10 m为表层,10~50 m为中层斜温层,50 m以下为底部低温层。表层与底层之间温差10℃左右。1月水体分为3层,表层为0~30 m、30~60 m为温跃层和60 m以下为底层,表层和底层之间温差为2℃~3℃。万峰湖秋季和冬季水体分层结构,抑制了上、下层水体物质的对流交换。

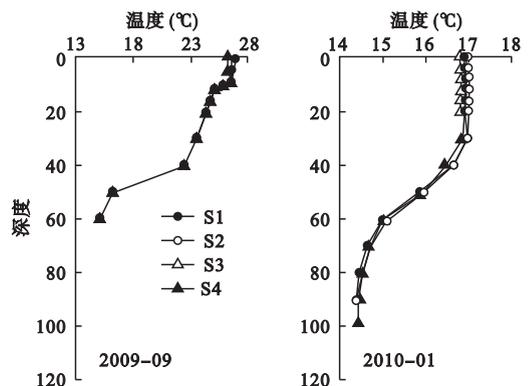


图2 万峰湖水温分布

Fig. 2 Spatial distribution of temperature of Wanfeng Lake

## 2.2 万峰湖水体 DO 空间分布

由图3和图2可知,万峰湖在9月、1月DO的垂向分层与9月、1月温度分层对应,且分层结构相同。9月各采样点在0~10m的表层DO饱和度差异较大,最高可达93.7%(坝艾),最低25.8%(大坝);10~50m的斜温层,DO饱和度稳定在60%左右(大坝点在40m处偏低,为49.8%);在50m以下的底层水体DO饱和度降到7%以下。1月各采样点在30m以上为表层,DO饱和度66.4%~86.3%,30~60m为跃变层,60m以下为底层,DO浓度降至5%以下。如图3所示,9月万峰湖各采样点表层水体DO饱和度差异缩小。除S4样点DO饱和度9月比1月高外,其他3个采样点表层水体饱和度均为1月>9月。

## 2.3 万峰湖水体 pH 值空间分布

由图4可以看出,9月垂直方向各采样点水体pH值与9月温度、DO的垂直分层趋势一致,各采样点均在10~12m、40~50m出现跃变层。就整个剖面来看,各采样点从表层到底层pH值呈现出逐渐降低的趋势。1月万峰湖30m以上pH值均匀分布,30m以下至界面呈递减趋势,无明显分层。

## 2.4 万峰湖水体总磷的空间分布

由图5可以看出,万峰湖秋、冬季节总磷的垂直分布规律相近,均以40m为分界点,40m以上为上层,40m以下为底层;上层水体总磷均匀分布,且秋季浓度为0.017~0.03 mg·L<sup>-1</sup>,冬季为0.029~0.037 mg·L<sup>-1</sup>。底层水体总磷分布为斜坡分布,最高浓度在水-沉积物界面附近。其界面浓度秋季为0.54~0.91 mg·L<sup>-1</sup>,冬季为0.98~1.16 mg·L<sup>-1</sup>。

如上所述,表层和水-沉积物界面的总磷质量浓度均为冬季略高于秋季。如图2和图3所示,秋季

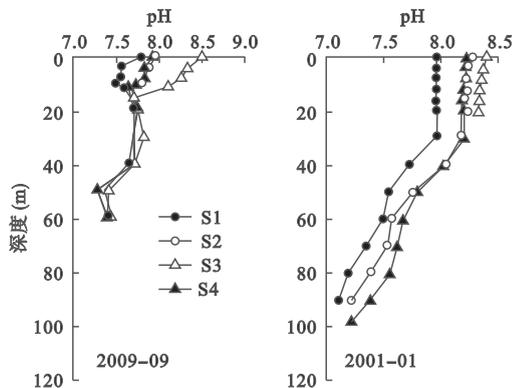


图4 万峰湖 pH 值空间分布  
Fig. 4 Spatial distribution of pH of Wanfeng Lake

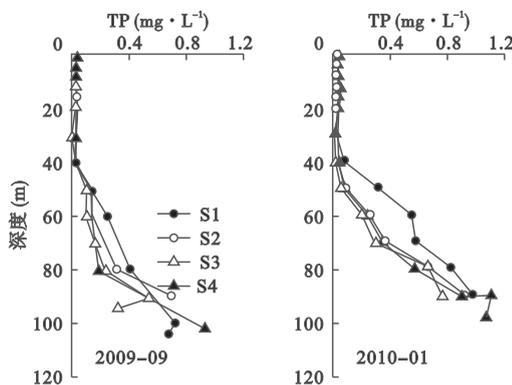


图5 万峰湖总磷空间分布  
Fig. 5 Spatial distribution of total phosphorus of Wanfeng Lake

40m深度既是水温分布的第二温跃层的上界面,也是好氧层和厌氧层跃变的上界面;冬季40m深度位于水温和DO的跃变层。

## 3 讨论

### 3.1 水体热分层对 DO 空间分布的影响

水库蓄水后,水深增加,水动力条件减弱(Topping *et al.*, 2000),水体滞留时间延长(Covich, 1993),水团混合方式出现显著变化(Zhang *et al.*, 1990)。由于水体热能传输不均匀引起冷、热水体密度的差异导致水体的物理分层,引起不同水团化学性质的差异,这种差异决定了水库内的水化学变化、物质地球化学循环、水生生物作用的时空分布等重要湖沼学过程(Dynesius & Nilsson, 1994; Chacon & Rosas-Monge, 1998; 刘建康, 2000; 王雨春等, 2006; Kelly, 2001; 刘丛强等, 2009),有可能导致库区内的水质分层和生态分层。

对水温分层类型的判别一般采用指标法(叶守泽等, 1998; 王煜和戴会超, 2009)。万峰湖年入库总

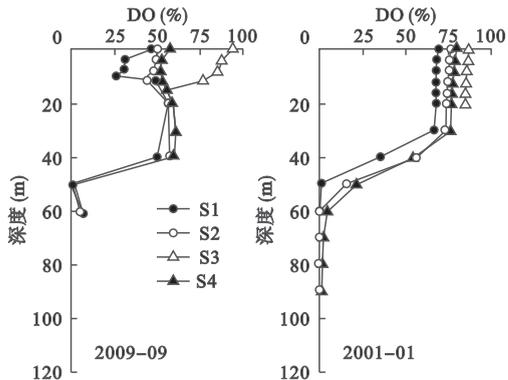


图3 万峰湖 DO 空间分布  
Fig. 3 Spatial distribution of dissolved oxygen of Wanfeng Lake

流量 193 亿  $m^3$ , 总库容 102.6 亿  $m^3$  (刘泽钧和包亚军, 2004), 计算可得:  $a = 193/102.6 = 1.88$ ,  $a < 10$ 。由此可见, 万峰湖水库垂直水温分布属于稳定分层型, 测定结果与之相符。相关性分析(表 1 和表 2)表明, 万峰湖 9 月(秋季)和 1 月(冬季)温度和 DO、pH、总磷之间均为极显著相关( $P < 0.01$ ), 由于温度分层导致的水体热分层结构明显限制了各水层间的物质交换, 引起了明显的水环境响应。

水体的 DO 含量, 与氧气在大气中的分压、水温、水体中的溶解性物质等有关, 也与水体的水动力条件有关。水体 DO 含量主要受控于以表层水体与大气之间的氧交换和浮游生物光合作用的氧释放为主要过程的复氧机制 (Puklakov, 1995; Tufford & McKellar, 1999); 以水生呼吸作用和有机质的降解为主要过程的水体耗氧机制 (林永泰等, 1995; 江林源等, 2008) 的双重作用。表层水体通过水、气交换和浮游植物的光合作用, 为表层水体补充 DO, 而由于水体热分层阻断了表、底层水体的对流, 使得底层水体的溶氧消耗无法得到有效补偿 (Vassilis & Sultana, 2003), 而有机质在水-沉积物界面的降解进一步加重了底部水体氧消耗 (林永泰等, 1995; 陈小江等, 2006), 致使水库下层水体耗氧速率远远超过复氧速率, 甚至发展为厌氧状态 (Puklakov, 1995; Tufford & McKellar, 1999)。

表 1 2009 年 9 月(秋季)温度、DO、pH、总磷 Pearson 相关系数

Table 1 Matrix of Pearson correlation coefficients for temperature, DO, pH, and TP in September 2009

	温度	DO	pH	TP
温度	1	0.787 **	0.709 **	-0.756 **
DO		1	0.914 **	-0.676 **
pH			1	-0.507 **
TP				1

\*\* ,  $P < 0.01$ ;  $n = 37$ 。

表 2 2010 年 1 月(冬季)温度、DO、pH、总磷 Pearson 相关系数

Table 2 Matrix of Pearson's correlation coefficients for temperature, DO, pH, and TP in January 2010

	温度	DO	pH	TP
温度	1	0.942 ** ( $n = 46$ )	0.926 ** ( $n = 76$ )	-0.872 ** ( $n = 76$ )
DO		1	0.952 ** ( $n = 46$ )	-0.810 ** ( $n = 46$ )
pH			1	-0.850 ** ( $n = 76$ )
TP				1

\*\* ,  $P < 0.01$ 。

水体 DO 主要来源于表层水体与大气的交换和浮游生物的光合作用, 依据 Fick 扩散定律, 水体中的 DO 的垂向分布应该是由表层向底层曾现出逐步降低的趋势, 然而, 由于万峰湖秋、冬季节的热分层结构阻止了上、下层水体的对流交换, 以致底层水体在秋、冬季节均得不到有效更新, 加上万峰湖网箱养殖产生的养殖排泄物和大量未食饵料在库底的矿化降解, 以致万峰湖底部在秋、冬季均为厌氧。由图 3 可以看出, 受秋季水库水温和入流的影响, 水中 DO 10 ~ 50 m 有稳定分层, 这主要是因为秋季水库入流水温较水库表层水温低, 而密度较表层水体高, 这种密度差异使入流在 10 ~ 50 m 深处潜流进入水库, 由于入流河水的 DO 相对较高, 导致该水层的 DO 升高 (彭文启等, 2009; 黄廷林等, 2010); 而冬季入流水温与水库表层水体差异很小, 入流水与水库表层水混合, 因而对冬季 DO 的垂向分层未产生明显影响。由于万峰湖网箱养殖密度过大, 加上春夏季浮游植物死亡后的耗氧分解。表层水体耗氧速率超过其复氧速率。致使秋、冬季万峰湖表层水体的 DO 饱和度, 从上游至下游, 呈现出逐渐降低的趋势 (图 3)。相关性表明, 万峰湖 9 月(表 1)和 1 月(表 2)水体 DO 与水体温度均为极显著正相关, DO 分层与水体分层同步。综上所述, DO 的分层结构是由温度的热分层结构所引起。

### 3.2 水体热分层对 pH 空间分布的影响

通常情况下, 喀斯特地区湖泊水库中水体 pH 值主要受  $CO_2$  含量和  $HCO_3^-$  浓度的控制, 而水体中  $CO_2$  含量受多种因素影响, 如水温、溶解离子、微生物等 (吴丰昌, 1996; 刘建康, 2000)。表层水体光照充足, 浮游生物量高, 受人为活动影响显著, 影响  $CO_2$  浓度的因子较多。在水库底部, 死亡下沉的生物有机残体和网箱养殖残留物大量沉积, 其厌氧矿化降解作用产生大量的  $CO_2$  和有机酸, 并从水-沉积物界面向上覆水体扩散。所以越接近底部, 水体 pH 值也越低。吴丰昌等 (1996) 对沉积物-水界面的  $HCO_3^-$  的扩散通量计算发现, 沉积物为  $HCO_3^-$  的源, 并通过沉积物和水的作用影响上覆水体的酸碱平衡。

相关性分析表明, 在秋(表 1)、冬(表 2)季万峰湖 pH 值与温度、DO 为极显著正相关, 与总磷呈极显著负相关。万峰湖水库表层水体由于水体对流的影响, pH 值均匀分布; 在底层, 由于水-沉积物界面有机质的降解产生大量的  $CO_2$  和有机酸, 并从水-沉

积物界面向上覆水体扩散(Fick 扩散定律),在水库底层形成浓度梯度。从而使底层水体表现为,越接近水-沉积物界面 pH 越低。在秋季和冬季受人为活动影响较为明显的万峰湖表层水体,各采样点之间自上游至下游 pH 值表现为降低的趋势,且各采样点冬季 pH 值高于秋季。pH 的沿程变化与 DO 的一致,与温度的相反。这可能是由于表层水体耗氧物质的氧化分解产生的  $\text{CO}_2$  溶于水体所致。2009 年 9 月中部斜温层的 pH 分布与对应季节 DO 的分布相同,也是由异重流引起,但其具体机制尚不清楚,还有待进一步的研究。

### 3.3 水体热分层对总磷空间分布的影响

水库水体磷含量主要受入库河流磷输入和沉积物内源释放的影响。沉积物是水库及其流域中营养盐的重要归宿和蓄积库,并在一定的环境条件下向上覆水体释放。这种潜在释放能力的大小主要取决于湖泊沉积物及其上覆水体的物理化学和生物特性的改变,其中最主要的是水中 DO、pH、氧化还原电位、温度、生物以及水体扰动等(姜敬龙和吴云海,2008;吴宗义,2009)。研究表明,较高的温度和厌氧环境均有利于沉积物磷的释放(范成新,1995;陈文花等,2006;曹海燕和冯启言,2006;李家兵等,2007)。蔡景波等(2007)实验得出,厌氧状态下上覆水的磷浓度是好氧状态下的 15 倍。pH 对沉积物的磷释放也有重要影响,pH 在中性左右释磷量最小,升高或者降低 pH 值均有利于磷的释放。

受水体热分层的影响,万峰湖水体底层秋冬、季节均为厌氧状态,铁锰氧化物被还原,溶解度增大,被铁锰氧化物吸附、沉淀的磷被释放出来(Seiki *et al.*, 1989;王雨春和万国江,2000)。同时,厌氧条件下  $\text{S}^{2-}$  与  $\text{Fe}^{2+}$  相结合,且厌氧微生物需磷少,进一步减弱了磷的沉积作用。相关分析表明,2009 年 9 月(表 1)和 2010 年 1 月(表 2)万峰湖水体总磷和温度、DO、pH 均为极显著负相关( $P < 0.01$ )。与 DO 和 pH 相似,总磷也受水温分层的制约。受水体热分层和有机物在库底矿化分解作用的双重影响,在万峰湖底层水体形成厌氧环境,加剧了沉积物磷向上覆水体的释放。秋季水体双温跃层结构也在一定程度上限制了总磷由底层向表层水体迁移。冬季表层水体变厚,中部斜温层消失,表、底层之间得以直接通过温跃层进行物质交换。同时,冬季表层浮游植物数量减少,耗磷减少,致使磷浓度略有增加。

综上所述,万峰湖水库水温分层引起的水化学

分层,导致上层好氧水体和底层厌氧水体所发生的物理化学反应、生物作用、元素迁移等截然不同。在好氧的表层水体,受人为影响显著,秋、冬季各采样点之间均表现出明显差异;在缺氧的底层水体中,铁、锰等重金属被还原,磷酸盐等营养盐被释放,水-沉积物界面有机质的降解生成大量  $\text{CO}_2$  和有机酸等厌氧代谢产物,使底层水 pH 值较表层水体低(苏玉萍等,2007)。加上万峰湖网箱养鱼产生的大量养殖排泄物和饵料进入水库底层,水库水体化学分层对水环境的影响变得更为重要。

## 4 结论

由于水体热分层限制了各层水体的对流交换,DO 和 pH 值均呈现与温度相同的分层结构,9 月,在 8~12 m 和 40~50 m 出现温度跃变,阻止了上下水体的对流交换。使水体的上、中、下层水化学性质出现明显差异。1 月,在 30~60 m 出现跃变。虽然万峰湖在冬季也呈现明显分层,然而冬季万峰湖水体热分层处于失稳状态,存在明显的对流现象,由于水体对流扰动,表层水体增厚至 30 m,斜温层消失,上层水体和底层水体得以直接进行物质交换。万峰湖 9 月(秋季)和 1 月(冬季)温度和 DO、pH、总磷均为极显著相关,由于温度分层导致的水体热分层结构明显限制了各水层间的物质交换,引起了明显的水环境响应。由此可见,万峰湖水库的水温分层直接导致了库区内的水化学分层,并进而影响水库的生态分层。这说明季节性的水体热分层对万峰湖水库水质和水环境变化起重要作用。

## 参考文献

- 蔡景波,丁学锋,彭红云. 2007. 环境因子对沉水植物对底泥磷释放的影响研究. 水土保持学报, **21**(2): 151-154.
- 曹海燕,冯启言. 2006. 环境因子对南四湖底泥磷释放的影响实验研究. 水科学与工程, (6): 36-38.
- 陈文花,张江山,曾雨,等. 2006. 福州山仔水库底泥磷释放规律的研究. 云南环境科学, **25**(2): 35-37.
- 陈小江,沈子伟,胡家文,等. 2006. 网箱养殖与水环境相互作用关系的研究进展. 河北渔业, (11): 6-8.
- 范成新. 1995. 湖湖沉积物理化特征及磷释放模拟. 湖泊科学, **7**(4): 341-349.
- 国家环境保护总局. 2002. 水和废水监测分析方法(4版). 北京:中国环境科学出版社.
- 黄廷林,章武首,柴蓓蓓. 2010. 大水深水库内源污染特征及控制技术. 环境污染与防治, **32**(3): 1-4.
- 江林源,邓潜,黄光华,等. 2008. 网箱养鱼与水库水质

- 的相互关系研究. 现代农业科技, (20): 222-226.
- 姜敬龙, 吴云海. 2008. 底泥磷释放的影响因素. 环境科学与管理, **33**(6): 43-46.
- 李冰冻, 李 嘉, 李克锋, 等. 2009. 二滩水库坝前及下泄水体水温分布现场观测与分析. 水利水电科技进展, **29**(4): 21-23.
- 李家兵, 马雪艳, 孔健健. 2007. 福州第二饮用水水源地——山仔水库底泥中磷释放研究. 海峡科学, (6): 52-55.
- 林永泰, 张 庆, 杨汉运, 等. 1995. 黑龙滩水库网箱养鱼对水环境的影响. 水利渔业, (6): 8-15.
- 刘丛强, 汪福顺, 王雨春, 等. 2009. 河流筑坝拦截的水环境响应——来自地球化学的视角. 长江流域资源与环境, **18**(4): 384-396.
- 刘建康. 2000. 高级水生生物学. 北京: 科学出版社.
- 刘泽钧, 包亚军. 2004. 天生桥一级水电站的运行与管理. 大坝与安全, (3): 12-16.
- 彭文启, 曾玉红, 槐文信. 2009. 水库密度流研究进展综述. 节水灌溉, (7): 18-20.
- 任华堂, 陈永灿, 刘昭伟. 2007. 大型水库水温分层数值模拟. 水动力学研究与进展, **22**(6): 667-675.
- 苏玉萍, 郑达贤, 林婉珍, 等. 2007. 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), **23**(3): 1-4.
- 王雨春, 万国江. 2000. 湖泊现代化沉积物中磷的地球化学作用及环境效应. 重庆环境科学, **22**(4): 39-41.
- 王雨春, 朱 俊, 马 梅, 等. 2006. 西南峡谷型水库的季节性分层与水质的突发性恶化. 湖泊科学, **17**(1): 54-60.
- 王 煜, 戴会超. 2009. 大型水库水温分层影响及防治措施. 三峡大学学报(自然科学版), **31**(6): 11-14.
- 吴丰昌, 万国江, 蔡玉蓉. 1996. 沉积物-水界面的生物地球化学作用. 地球化学进展, **11**(2): 191-197.
- 吴莉莉, 王惠民, 吴时强. 2007. 水库的水温分层及其改善措施. 水电站设计, **23**(3): 97-100.
- 吴宗义. 2009. 湖泊内源磷释放及形态转化的影响理化因素. 化学工程与装备, (4): 134-135.
- 叶守泽, 夏 军, 邦生练, 等. 1998. 水库水环境模拟预测与评价. 北京: 中国水利水电出版社.
- 易仲强, 刘德富, 杨正健, 等. 2009. 三峡水库香溪河库湾水温结构及其对春季水华的影响. 水生态学杂志, **2**(5): 6-11.
- 张士杰, 彭文启. 2009. 二滩水库水温结构及其影响因素研究. 水利学报, **40**(10): 1254-1258.
- 邹竹波, 查 林, 张国义, 等. 2005. 万峰湖水质污染与生态环境状况的调查. 黔西南民族师范高等专科学校学报, (3): 78-80.
- Chacon TC, Rosas-Monge. 1998. Water quality characteristics of a high altitude oligotrophic Mexican lake. *Aquatic Eco-system Health and Management*, **1**: 237-243.
- Covich AP. 1993. Water and ecosystems// Gleick PH, ed. Water in Crisis. New York: Oxford University Press: 40-55.
- Dynesius M, Nilsson C. 1994. Fragmentation and flow regulation of river systems in the northern Third of the world. *Science*, **266**: 753-762.
- Friedl G, Teodoru C, Wehrli B. 2004. Is the Iron Gate I reservoir on the Danue River a sink for dissolved silica. *Biogeochemistry*, **68**: 21-32.
- Humborg C, Conley DJ, Rahm L, et al. 2000. Silicon retention in river basins: Far-reaching effects on biogeochemistry and aquatic food webs in coastal marine environments. *Ambio*, **29**: 45-50.
- Humborg C, Ittekkot V, Cociasu A, et al. 1997. Effect of Danue River dam on Black Sea biogeochemistry and ecosystem structure. *Nature*, **386**: 385-388.
- Kelly VJ. 2001. Influence of reservoir solute transport: A regional-scale approach. *Hydrological Processes*, **15**: 1227-1249.
- Puklakov V. 1995. A mathematical model of the heat and mass transfer processes in a stratified reservoirs. *Internationale Revue der gesamten Hydrobiologie und Hydrographie*, **80**: 49-59.
- Seiki T, Hirofumi I, Etsuji D. 1989. Benthic nutrient remineralization and oxygen consumption in the coastal area of Hiroshima Bay. *Water Research*, **23**: 219-228.
- Topping DJ, Rubin DM, Vierra Jr LE. 2000. Colorado River sediment transport: Natural sediment supply limitation and the influence of Glen Canyon Dam. *Water Resources Research*, **36**: 515-542.
- Tufford DL, McKellar HN. 1999. Spatial and temporal hydrodynamic and water quality modeling analysis of a large reservoir on the South Carolina (USA) coastal plain. *Ecological Modelling*, **114**: 137-173.
- Vassilis ZA, Soultana KG. 2003. Simulation of water temperature and dissolved oxygen distribution in Lake Vegoritis, Greece. *Ecological Modelling*, **160**: 39-53.
- Zhang J, Huang WW, Liu MG, et al. 1990. Drainage basin weathering and major element transport of two large Chinese rivers (Huanghe and Changjiang). *Journal of Geophysical Research*, **95**: 13277-13288.

作者简介 邱华北,男,1984年生,硕士研究生。主要从事环境过程与计算机模拟研究。E-mail: huabei772004@yahoo.com.cn

责任编辑 魏中青