

## 西南峡谷型水库的季节性分层与水质的突发性恶化\*

王雨春<sup>1</sup>, 朱俊<sup>2</sup>, 马梅<sup>3</sup>, 尹澄清<sup>3</sup>, 刘丛强<sup>2</sup>

(1: 中国水利水电科学研究院水环境研究所, 北京 100038)

(2: 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)

(3: 中国科学院生态环境研究中心环境水质学国家重点实验室, 北京 100085)

**摘要:** 选择西南云贵高原乌江流域的百花湖水库进行了气象、水温度和水化学(DO、Fe II 和 Mn II) 的连续监测(13个月)。结果表明, 由于气候等原因, 百花湖水库的水体在夏季形成分层, 但是没有典型分层湖泊的温跃层变化, 这种水体温度结构可以在4–10月保持稳定; 这种“不显著的”温度分层结构, 有效限制了上下水团的混合, 形成显著的水体溶解氧分层, 氧化/还原界面可达到水深8m左右。20世纪90年代初以来, 贵州多座水库频繁出现的季节性水质恶化现象, 与水库水体混合期(多为夏末初秋), 水体分层结构失稳有关。上下层水体的垂直交替, 使下层水体中的还原性物质带入上层湖水, 造成表层水体缺氧和表观浑浊, 鱼类窒息死亡。在百花湖水库的研究表明, 西南地区深水水库, 可以在夏季出现一定的水体温度分层结构, 并导致显著的水体水化学(如溶解氧)分层, 进而影响水库水环境质量。

**关键词:** 峡谷型水库; 水体分层; 水质恶化; 百花湖水库

## Thermal Stratification and Paroxysmal Deterioration of Water Quality in a Canyon-Reservoir, Southwestern China

WANG Yuchun<sup>1</sup>, ZHU Jun<sup>2</sup>, MA Mei<sup>3</sup>, YIN Chengqing<sup>3</sup> & LIU Congqiang<sup>2</sup>

(1: *Department of Water Environment, Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, P. R. China*)

(2: *State Key Laboratory of Environment Geochemistry, Institute of Geochemistry, CAS, Guiyang 550002, P. R. China*)

(3: *State Key Laboratory of Environmental Aquatic Chemistry, the Research Center for Eco-Environmental Sciences, CAS, Beijing 100085, P. R. China*)

**Abstract:** In order to elucidate factors controlled the water column stratification in canyon-reservoirs, and describe the relative response of water quality, we present a 13-month survey and study of meteorological, physical and hydro chemical patterns during 2001 in a canyon-reservoir, southwestern China, especially including a intensive frequency study during the period from August to November of this year in which an event of water quality abruptly degeneration occurred. The study showed that: an obscure thermal stratification has been formed on vertical profile of water column during summer (about from April to October) in Baihua Lake reservoir, however, it could cause the very strong hydro chemical stratification (i. e. dissolved oxygen stratification) in same period in water column of the reservoir. During summer of 2001, the oxide-reduce interface could move up to 8 meter-depth from bottom of Baihua Lake reservoir. The survey results also confirmed that gravitationally unstable of the thermal stratification caused by surface cooling of water when the air temperature decreased abruptly in early fall, led to a vertical convection between the upper layer water and deep layer water. The reductants (e. g.  $Mn^{2+}$ ,  $Fe^{2+}$  and  $H_2S$ ) formed in the anoxic hypolimnion accompanying with processes of organic matters degeneration would be brought to the epilimnion through the vertical eddy diffusion. These reductive matters would consume up the dissolved oxygen in the utter water rapidly as if such oxidization reactions were strong enough, and than a large number of aquatic organism dead due to oxygen deficient. This study showed that the seasonal thermal stratification, although not strong like typical alpine lakes, could play a key role in change of water quality in canyon-reservoirs.

**Keywords:** Canyon-reservoir; water column stratifications; water quality Baihua Res.

\* 国家自然科学基金项目(40103008)、中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2–105)和贵州省自然科学基金项目联合资助。2003–11–15 收稿; 2004–04–19 收修改稿。王雨春, 男, 1968年生, 高级工程师; E-mail: wangyc@iwhr.com.

世界河流正受到筑坝拦截的广泛影响<sup>[1-4]</sup>. 在中国,长江、黄河等主要河流因为梯级水电站的修建而正以惊人的速度被拦截,仅长江流域内已建成 4.8 万座水库,其中大型水库 137 座<sup>[5]</sup>. 水坝对河流水量的拦截调蓄,极大地改变了河流原有的自然过程,包括水量、水动力、水化学、水生生物、物质地球化学循环等重要过程. 这种变化将对包括河口、直到近海的整个流域水文系统的生态环境产生深远影响,如,水库(生物)中生源物质的吸收、滞留,有可能干扰对近海生态系统具有重要意义的陆-海物质输送<sup>[6-10]</sup>. 流域中对河流广泛的筑坝拦截,使“河流水库化”成为陆地水文系统的重要特点. 通常,水库在流域中还具有灌溉、供水、水产养殖等重要的社会服务功能,我国近 80% 的城市供水是靠水库蓄水. 因此,水库内发生的许多重要过程对流域社会经济的可持续发展也具有重要意义.

河流筑坝拦截后,水动力强度降低,河流“急流生态环境”逐渐向湖泊的“静水环境”方向演化;水库水深的大幅增加,使水环境可能发生类似天然湖泊的“湖沼学反应”. 但是,水库在水文过程(人为调蓄)、水体直溜时间、来水方式(异重流影响)等方面与自然湖泊有较大差异,因此水库内的“湖沼学反应”可能又具有自身的特殊性;也由于人为扰动的差异,水库过程可能在很大范围内变化. 从目前情况看,尽管筑坝拦截的“河流水库化”对陆地水文系统的影响如此广泛,但是对水库“湖沼学过程”的研究在深度和广度上仍然十分不足,限制了我们对“水库-河流-流域”系统一些重要生态环境演化问题的深入理解.

对于有一定水深的湖泊,水体的季节性分层(thermal stratification)可能对湖泊内几乎所有水环境演化过程的起着控制或影响作用<sup>[11]</sup>. 由于水体的热能传输不均匀,冷、热水体密度的差异导致水体的物理分层,进而使不同水团化学性质的差异. 这种差异决定了湖泊内水化学(如氧化-还原)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. 中等深度(>10 m)的温带湖泊和阿尔卑斯型高山湖泊,形成显著的水体热分层<sup>[11]</sup>.

为了满足发电的需要,许多水库通常修建高坝以获得最大的发电势能. 我国西南地区(如,云贵川地区)修建了大量高坝大库容水库,长江三峡是最新的令人印象深刻的例子<sup>[5]</sup>. 出于发电的需要,这些水库通常修建高坝以获得最大发电势能,水库的大水深使水体分层具备必要条件. 我国西南地区气候温和,水温的年际变化不大,同时,水库的河流来水补给较大,水体交换速率快,这些因素成为干扰水体分层结构稳定的不利条件. 以往的研究,对深水峡谷型水库的分层及相应的水化学响应缺乏必要的认识.

本文以贵州乌江流域的百花湖水库为例,连续监测了水库水体的水温、溶解氧、pH 及其它相关水化学指标,根据实际监测数据(2001 年全年),查明了峡谷型水库水体分层结构(包括水温和水化学分层)发生、发展和消亡的年际演化过程. 特别是对由于分层结构失稳造成的突发性水环境性质变化事件进行了深入研究. 本次工作从 2001 年 8 月到 11 月,连续监测水情变化的全过程,以阐明峡谷型深水水库水环境性质变化与水体分层结构的关系.

## 1 材料与方 法

### 1.1 研究区概况

百花湖,云贵高原乌江支流猫跳河上的人工水库,为猫跳河六级开发中的第二级,1966 年 6 月建成蓄水,为大型水库. 百花湖流域面积 1895 km<sup>2</sup>,湖泊水面面积 14.5 km<sup>2</sup>,湖泊补给系数为 182.2,最大水深为 45 m,平均水深 21 m,湖水滞留时间为 0.102 a,湖泊长度 18 km,平均宽度为 0.8 km.

### 1.2 采样与分析方法

本次研究中,在百花湖中部开阔深水湖区设固定监测点(水深 26 m),从 2000 年 12 月到 2002 年 1 月进行逐月监测. 其中对水体“水质突变”期间(2001 年 8 月 30 日-11 月 3 日)监测频度为每天一次. 水样在垂直剖面上按 2 米间隔用 Niskin 5 L 水样采样器采集,现场测定水样水温、DO、pH 和电导指标(Hanna,意大利). 在现场用 0.45 μm 醋酸纤维滤膜(Millipore)过滤水样,一部分过滤水样立刻用比色法测定 Fe(II);一部分过滤水样(100 ml)现场酸化,密封低温保存,带回实验室供分析溶解铁、锰和阳离子(原子吸收 PE51002,美国);另一部分过滤水样(100 ml)直接密封低温保存,尽快带回实验室测阴离子(离子色谱法 HP1100). 监测期间的气象数据通过小型气象仪自动观测(每 5 min 记录一次).

## 2 结果

### 2.1 温度的年际变化和水体热分层结构

水温实测结果表明:百花湖水库表层水体水温变化与气温变化趋势一致,水温的年内变化幅度约为 10–25 °C,显然是由于该地区气候温和,全年气温变化幅度较小的缘故.在垂直剖面上(图 1),百花湖水库水温变化具有季节性差异.从 4 月份开始直到 10 月末,随气温升高,上下层水体温度出现差异,该期间水温剖面维持上高下低的基本结构,表层和最下层水体温度的最大温差出现在 7 月,约为 6–7 °C,显然上下层水温差不是很大,没有出现阿尔卑斯型高山湖泊典型的温跃层分布特征.到 10 月以后,随气温的不断降低,表层水不断被冷却,较重冷水沉入下层水体,水温度逐渐混合均匀.从入秋后直到第二年 4 月,水体温度剖面基本混合均匀.

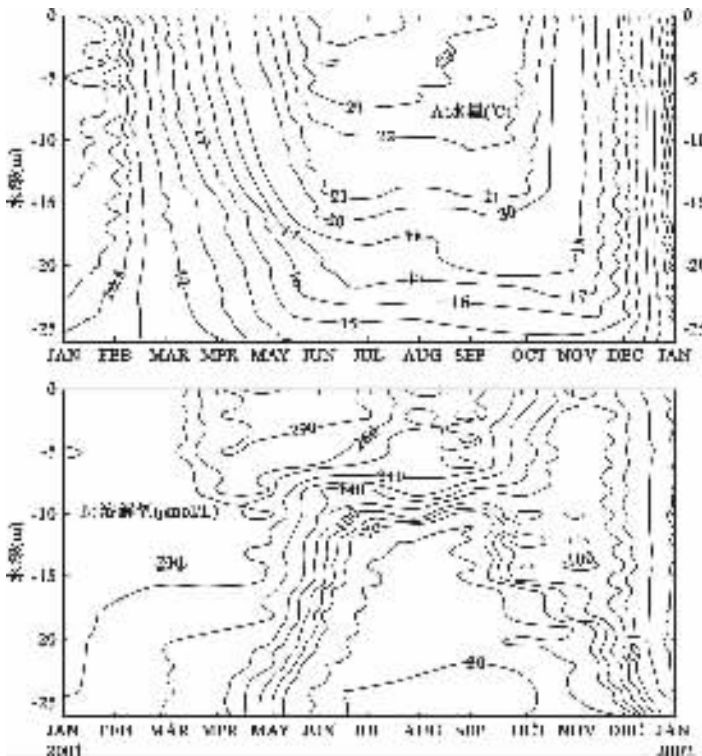


图 1 百花湖水库水温(A)和溶解氧(B)剖面的年际变化(2001)

Fig. 1 Vertical variations of water temperature(A), dissolved oxygen(B) in Baihuahu Reservoir, 2001

由图显而易见,百花湖水库水体在垂直剖面上,尽管没有显著的温跃层分布,但是在 4–10 月期间可以维持相对稳定的“上高下低”水温分层结构.在此水温分层期间可能限制上下层水团的交换.

### 2.2 溶解氧(DO)的剖面分布

水体溶解氧浓度的变化与水温变化相似,具有明显的季节性变化(图 1).在夏季水体温度分层期间(4–10 月),水体垂直剖面上,表现出上、下层溶解氧浓度明显差异的分层现象,其变化幅度十分显著,上层水体中溶解氧较高,甚至过饱和(浮游植物光合作用贡献),而一定水深(约 8–10 m)则存在水体溶解氧急剧降低的“跃变层”,在此深度以下水体中溶解氧浓度降到极低水平(小于 5 µmol/L).水体水化学性质的分层结构,将一直维持到秋季(10 月),入秋上下水体混合后,水库水体垂直剖面上溶解氧含量逐渐混合均匀.

### 3 讨论

水温和溶解氧实测结果(图1)清楚表明,百花湖水库水温垂直剖面年际变化显然可以在4-10月形成较弱的温度分层,其垂直剖面绝对温差较小显然与该地区温和的气候条件有关.水体溶解氧浓度剖面具有同样的季节性变化趋势.值得注意的是,在水体温度弱分层的情况下,水体溶解氧的垂直剖面变化十分显著,在一定深度(约8m)形成溶解氧急剧跌落的跃变界面,形成上层水体的溶解氧过饱和和“跃变界面”以下的接近绝对缺氧的体系(水团).

水体中溶解氧主要来源主要有二:第一、表层水与气体水-气交换后通过分子扩散和水体交换在水体中扩散.水体中溶解氧的含量与温度、海拔高度等控制氧在水中的溶解程度的因素有关,也与水体混合的水动力条件有关.通常认为溶解氧在水体中的分子扩散速率较低,水体交换是湖泊中溶解氧传输的主要方式.正常情况下,水体中溶解氧浓度不会超过当时条件下的氧溶解度.第二、水生植物,包括藻类等浮游植物和沉水植物光合作用是湖泊系统水体溶解氧的重要来源<sup>[9]</sup>.水生植物光合作用的释氧过程,可能使局部水团溶解氧超过氧在水中的溶解度,达到过饱和.湖泊水体中的耗氧,主要是水生生物呼吸作用和细菌对有机质矿化降解过程引起.对营养程度高的水体,有机质降解是导致水体溶解氧跌落的主要过程.

湖泊中,上层的气体交换和浮游植物的光合作用为上层水体提供了溶解氧,而底层接近沉积物表面有机质的矿化降解消耗大量水体中溶解氧.如果上下层水体能够充分交换,水体“耗氧机制”可以得到“复氧机制”的补偿.反之,如果水体交换受限制,下层水体耗氧远超过复氧,水团可能逐渐发展为绝对缺氧.许多湖泊、海湾等水域的水体溶解氧季节性跌落(缺氧)正是后一过程的作用结果.

百花湖水库水体温度和溶解氧的剖面变化也显示了同样的过程.百花湖水库水体温度“弱”分层结构的形成和稳定,限制了上下水体的垂直交换,其强度足以阻断下层水体的耗氧补偿.每年4月后,水温分层结构逐渐形成,上下层水体交换减弱.随气温升高,浮游植物光合作用加强,植物光合作用产生的 $O_2$ 释放到水体,使上层水体溶解氧浓度升高,甚至过饱和.而在水库下层水体,则可能发生与此相反的过程,河流从流域输入的有机物质和水库表层水体(透光层水体)浮游植物死亡后的遗体沉入湖底,在下层水体和沉积物中细菌矿化降解有机质消耗水体中溶解氧,水体中溶解氧浓度下降.对于百花湖水库而言,浮游植物初级生产力提供的有机质是沉积有机质的主要部分,因此,从大约4月开始,春季大量出现的浮游植物(藻类)开始死亡进入下层水体,下层水体的耗氧代谢开始加强,加之水体垂直交换受水温分层的限制,下层水体逐渐发展为厌氧体系.

根据上述分析可知,百花湖这样的深水峡谷型水库,由于年际气温变化较小,水体的温度分层变化不是十分显著,没有典型的“温跃层”,但是水体垂直剖面上水温度“上高下低”的分层结构可以维持在整个夏季.正是由于存在这种“不显著的”温度分层结构的存在,有效限制了水库上、下水团的混合,阻断了下层水体溶解氧补充恢复的途径.在有足够有机质输入情况下(如高富营养化表层水体产生的大量藻类等初级生产力),沉积物表面和下层水体中有机质的矿化降解消耗水体中溶解氧,可以在水体垂直剖面上形成显著的溶解氧(水化学)分层.因此,百花湖水库中不显著的温度分层的季节性变化,可能形成显著的、类似典型阿尔卑斯分层湖泊的水体溶解氧分层,即,形成显著的水化学分层.

显然,百花湖水库中的水化学分层,导致上层好氧水体和下层厌氧水体中所发生的物理化学反应、生物作用、元素迁移等截然不同.在缺氧的下层水体中,氧化还原敏感元素(如铁、锰和其它重金属元素)被还原将具有更强的迁移活性,同时可以大量形成 $H_2S$ 等厌氧代谢产物.从图1可以看出,百花湖水库夏季湖底厌氧代谢过程十分强烈,有氧/无氧界面(或氧化/还原界面)从沉积物表层一直升高到8m水深.由于表层光合作用等复氧作用,使水体有氧、无氧体系相对稳定在此范围.水体中水化学的季节性分层,直接影响水库的水环境性质的变化.百花湖等水库近年出现的季节性水质恶化事件,可能是水体温度(水化学)季节性分层的结果.

自20世纪90年代初以来,乌江流域的百花湖、红枫湖、乌江渡水库等水库,相继发生季节性的水质恶化事件,尤其是百花湖最为严重.在初秋,水库经常出现水质突发性变坏,多表现为水体在短时期内(一昼夜)变得发黑、浑浊,水体溶解氧急剧降低,鱼虾大量死亡,网箱养殖遭到重大损失,随后水质自行缓解.由于湖

水一夜间变黑, 俗称为“黑潮”. 对于“黑潮”事件人们存在不同看法, 多数倾向于系流域内工厂有毒物质排放所致. 然而对百花湖水库周边工厂的监测, 并没有工厂突发性量排污的证据.

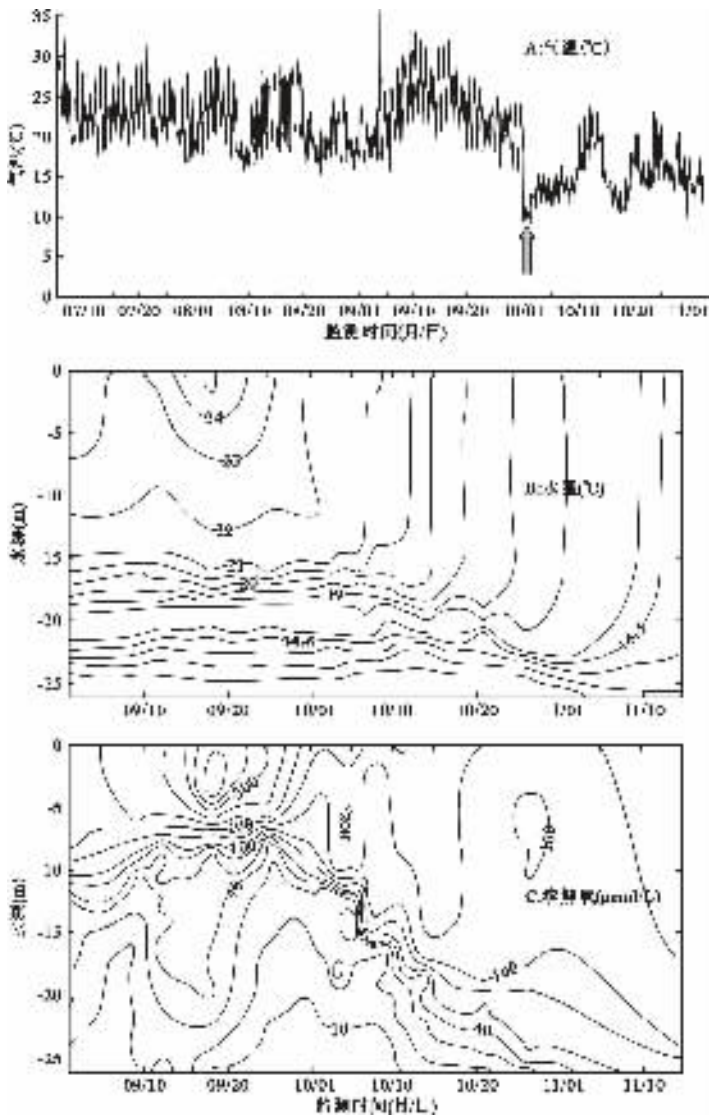


图2 2001年8月30日到11月1日期间百花湖区的气温(a)、水温(b)和DO(c)变化

Fig.2 Variations of air temperature(a), water temperature(b) and DO(c) during 30, Aug. to 1, Nov., 2001

贵州高原在秋季常常出现突然降温的天气过程, 冷空气过境可能使气温一昼夜下降 15 - 20°C, 水库出现水体“黑潮”事件总是出现在降温的当天或稍后, 因此有理由相信, 气温的突然下降与水质突发性变化有关系. 对2001年夏秋季的对湖泊水体和气温变化的连续观察, 提供了两者相互作用的证据.

2001年夏末秋初, 除8月几次小幅度的降温外, 10月以前气温在 20 - 30°C, 9月中旬到下旬, 气温超过 30°C, 但是到10月3日晚, 突然的(图中箭头所示)使气温一夜降至 10°C左右(图2A箭头所示), 随之出现水体变黑、溶解氧降低、鱼虾死亡事件. 以后一段时间内, 随气温的变化, 水质条件(溶解氧升降和水质表

观)时好时坏. 同期对百花湖水体温度和溶解氧剖面(图 2B,C)的每天连续观察结果表明,表层水温及水体温度分布结构的变化明显伴随气温变化. 随着气温的下降,表层被冷却的水体下沉,水温等值线逐渐下沉,原有的温度分层结构被破坏. 特别是 10 月 1 日夜的降温事件,气温的骤降,大量被冷却表层水体下沉,短时间内上、下层水体迅速垂直交替,向上迁移的下层厌氧产物(如  $H_2S$ )使水体表现变差、变臭,这些还原物质被氧化的过程消耗了上层水体的溶解氧,其沉淀出的氧化产物使水体更为浑浊. 而此时,气温降低使浮游植物光合作用减弱,水体富氧机制降低,实测表明,短时间内使表层水中溶解氧最低跌落到  $100 \mu\text{mol/L}$  左右(已低于鱼类室息的 DO 浓度下限). 随后数日,由于大气氧逐渐溶入、河流补给以及还原物质耗净等因素,水体溶解氧逐渐升高,水质逐渐恢复.

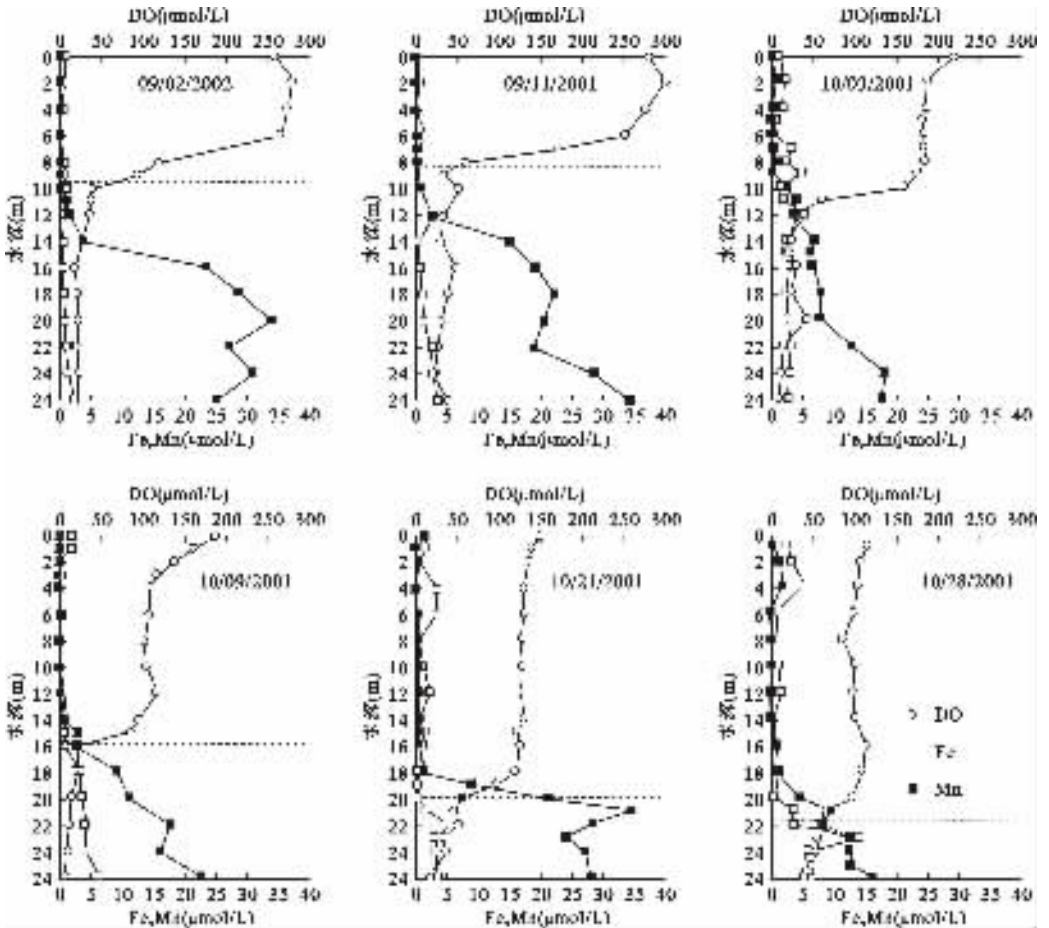


图 3 百花湖水库分层水体中 Fe(II)、Mn(II)和 DO 的剖面变化

Fig. 3 Vertical changes of Fe(II), Mn(II) and DO in water column during stratification, Baihuahu Reservoir

水库分层水体“翻转”混合过程导致的水环境性质的变化,也体现在水体中氧化还原敏感元素(Fe 和 Mn)分布变化上(图 3). 一般来说,由于溶液中电子活性高低的限制,特定的水环境条件下只存在某种稳定的氧化还原状态. 湖泊(水库)分层水体中,有氧/缺氧的过渡区(氧化-还原边界层)附近,发生剧烈的氧化还原反应和元素迁移<sup>[12]</sup>. 水体分层结构稳定阶段(10 月 3 日以前),百花湖水库的氧化-还原边界层(图中虚线)基本维持在水深 8-10 m 左右;气温下降后水体交换开始,氧化还原边界层逐渐向下迁移. 水体 DO、

Mn(II)和Fe(II)分布变化表征了分层水体的混合过程. 水体混合过程中,垂直交替上迁的还原物质(如, Mn(II)、Fe(II)和硫化物等)在上层水体被氧化,该过程使上层水体的溶解氧 DO 降到  $100 \mu\text{mol/L}$ ,局部湖区甚至降小于  $50 \mu\text{mol/L}$ ,氧化过程的颗粒态产物,使水体表现显得浑浊、混黑. 百花湖水水库水体中锰的地球化学行为显然要比铁活跃,  $\text{Mn}^{(IV)}\text{O}_2$  的氧化作用可能控制水体中 Fe(II),也存在 Fe(II)形成硫化物矿物的过程(图3)<sup>[13]</sup>.

## 4 结论

百花湖水水库全年水温、水化学(溶解氧、铁、锰等)和气象的连续监测结果表明,在气候温和地区的峡谷型水库中可能在夏季出现水温的分层结构,尽管水体热分层不十分显著,没有明显的温度跃变层,但是已有效限制上下水体的垂直交换. 在水体温度“弱”分层条件下,水体水化学性质(如溶解氧)则可能出现十分显著的上、下差异,百花湖水水库在夏季逐渐形成显著的水化学分层,在水深 8 m 左右出现显著的溶解氧浓度跌落跃变层.

水体上述分层现象的发生、变化,直接控制水库的水环境性质. 百花湖水水库近年来经常发生的季节性水质恶化事件,是由于秋季突然降温导致的水体分层结构失稳,上下水团的垂直交替过程中,耗氧和复氧机制不平衡的结果. 水体铁、锰等地球化学数据提供了进一步证据.

百花湖的水质恶化事件,也与水库富营养化过程的演化相关<sup>[14]</sup>. 随水库运行时间增加,水体营养程度提高,大量浮游植物进入水库下层,水库水体化学分层的对水环境的影响变得更为重要.

通过在百花湖水水库的研究,可以认为,在气候温和的西南地区具有较大水深的水库,尽管河流补给可能较大,仍可以在夏季出现一定的水体温度分层结构,并导致显著的水体水化学(如溶解氧)分层,进而影响水库水环境条件. 鉴于我国西南地区近年来修建了大量高坝大库容水库(如三峡水库),上述认识显然对未来水库水环境研究和管理具有重要意义.

## 5 参考文献

- [1] Meybeck M, Helmer P. The quality of rivers from pristine stage to global pollution. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 1989, **75**:283–309.
- [2] Vörösmarty C J. The storage and aging of continental runoff in large reservoir systems of the world. *Ambio*, 1997, **26**:210–219.
- [3] Kelly V J. Influence of reservoir on solute transport: a regional-scale approach. *Hydrological Processes*. 2001, **15**:1227–1249.
- [4] Humborg C, Danielsson S A, Sjöberg B, Green M. Nutrient land-sea fluxes in oligotrophic and pristine estuaries of the Gulf of Bothnia, Baltic Sea. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2003, **56**:781–793.
- [5] 长江水利委员会编. 长江流域防洪图集. 北京:科学出版社, 2001
- [6] 沈志良. 三峡工程对长江口海区营养盐分布变化影响的研究. *海洋与湖沼*, 1991, **22**(6):540–546.
- [7] Dynesius M & Nilsson C. Fragmentation and Flow Regulation of River Systems in the Northern Third of the World. *Science*, 1994, **266**: 753–762.
- [8] Zhang J, Zhang Z F, Liu S M, et al. Human impacts on the large world rivers: would the Changjiang (Yangtze River) be an illustration? *Global Biogeochemical Cycle*, 1999, **13**(4): 1099–1105.
- [9] Humborg C, Ittekkot V, Cociasu A, et al. Effect of Danube River dam on Black Sea biogeochemistry and ecosystem structure. *Nature*, 1997, **386**:385–388.
- [10] Humborg C, Conley D J, Rahm L, et al. Silicon retention in river basins: far-reaching effects on biogeochemistry and aquatic food webs in coastal marine environments. *Ambio*, 2000, **29**(1): 45–50.
- [11] Wetzel R G. *Limnology: lakes and river ecosystems*. Third Edition. San Diego: Academic Press, 2001.
- [12] Stumm W, Morgan J J. *Aquatic Chemistry*. New York: Wiley, 1970.
- [13] 王雨春. 贵州红枫湖、百花湖沉积物-水界面营养元素的生物地球化学作用[学位论文],中国科学院地球化学研究所博士论文,2001.
- [14] 张 维. 红枫湖、百花湖环境特征及富营养化. 贵阳:贵州科技出版社,1999.