

论文

# 三峡水库香溪河库湾水动力特性分析

纪道斌<sup>①②</sup>, 刘德富<sup>①\*</sup>, 杨正健<sup>①</sup>, 肖尚斌<sup>①③</sup>

① 三峡大学土木水电学院, 宜昌 443002;

② 武汉大学水利水电学院, 武汉 430072;

③ 中国科学院地球环境研究所, 西安 710075

\* 联系人, E-mail: [Df Liu@ctgu.edu.cn](mailto:Df Liu@ctgu.edu.cn)

收稿日期: 2009-04-01; 接受日期: 2009-11-06

国家“十一五”科技支撑计划(编号: 2008BAB29B09)、国家水体污染控制与治理科技重大专项子课题(编号: 2008ZX07104-004)和国家自然科学基金(批准号: 50679038)资助项目

**摘要** 为研究解决三峡水库支流库湾水环境问题, 必须探明三峡水库支流库湾的水动力过程. 基于 2008 年的野外观测数据, 对香溪河库湾水流速度、水温、浊度、水位、流量等因子进行分析. 结果表明香溪河库湾水动力特性难以简单概化为一维特征, 而在深度上具有分层异向流动特征. 支流上游来水主要以顺坡底部异重流形式流出库湾; 干支流水体密度差的变化及水位变动带来干支流水体处于频繁的交换状态, 水库干流水体主要以倒灌异重流形式进入库湾. 香溪河库湾异重流主要由水体之间的温差和浊度差引起, 其中温差是主要原因. 倒灌异重流潜入点深度主要决定于干支流水体密度差; 潜入点异重流厚度主要受水库干支流水体密度差及水位高低影响; 潜入库湾的距离主要受支流上游来流量、水位高低及水位日变幅影响.

**关键词**

三峡水库  
香溪河库湾  
水动力  
异重流  
水温差

三峡水库 2003 年 6 月开始蓄水后, 库区回水区水体由天然河道改变为人工水库. 库区主要支流 40 条<sup>[1]</sup>, 部分支流库湾蓄水后每年均发生不同程度的富营养化现象<sup>[2-4]</sup>, 成为三峡水库水环境重点关注的问题. 针对三峡水库支流库湾的水体富营养化以及水华问题已有大量的研究<sup>[5-10]</sup>, 越来越多的学者开始认识到水流变缓是三峡水库支流库湾发生富营养化的主要诱因<sup>[11-13]</sup>. 一方面水库蓄水使支流库湾流速变缓有利水华发生; 另一方面水库的水位调节以及水库干支流水体物理化学性质存在差异, 水库干、支流水体处于频繁的交换状态, 这种交换又会反过来进一步改变库湾水体的物理、化学特性, 从而不断影响着支流库湾水华的发生. 因此, 研究清楚三峡水库蓄

水后支流库湾水动力特性及其受水库干流影响的特点, 是研究库湾水环境状况和解决其水体富营养化问题的基础. 目前不少学者将库湾水动力问题概化为一维模型, 在此基础上建立支流库湾水动力条件影响水华的关系模型或富营养化模型<sup>[12,14,15]</sup>. 然而库湾水面几乎水平, 重力作用下的水体流动微弱, 采用传统的水动力学数学模型进行库湾水动力学条件的模拟计算与实际相差甚远, 因此有必要通过现场监测来探明三峡水库支流库湾水动力特性.

本文以 2008 年的野外观测数据为依据, 分析了三峡水库蓄水后香溪河库湾的水动力特性及其产生的原因. 该研究为进一步解决支流库湾水环境问题提供了水动力学基础.

## 1 材料与方方法

香溪河系长江三峡水库湖北库区内第一大支流, 发源于湖北省西北部神农架林区, 流经兴山县、秭归县, 于香溪镇注入长江(图 1)。香溪河干流长 94 km, 流域范围 110°25'~111°06'E, 30°57'~31°34'N, 流域面积 3099 km<sup>2</sup>。水库蓄水 135 m 后, 香溪河距离河口约 24 km 范围形成回水区, 蓄水 156 m 后对应约 30 km, 2008 年 9 月底开始蓄至 172.5 m 后对应约 40 km, 回水区的水体转变为类似湖泊水体(缓流水体)。

### 1.1 采样点设置

从香溪河库湾的河口至高阳镇设置 11 个采样断面, 采样点编号依次为 XX00, XX01, XX02, ..., XX10, 另外在水库干流香溪河库湾河口的上游设置一个采样点, 记为 CJ。样点分布见图 1。

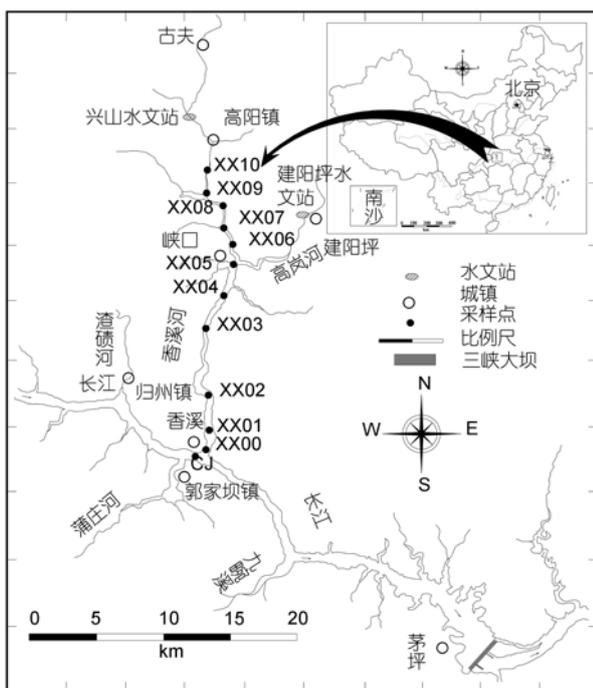


图 1 香溪河库湾采样点分布图

### 1.2 监测指标及方法

2008 年监测时段从 1~12 月, 监测频率为每周一次, 其中夏季蓝藻水华期间监测频率为每周两次, 秋季汛末蓄水初期水库干流含沙量较大时为每天一次, 蓄水中后期为每周两次。监测指标包括各点水位、流

量、速度、水深、水温、pH 值、浊度、含沙量、水体密度、电导率、总氮、总磷、硅酸盐、叶绿素 a 浓度、透明度等指标。其中, 水位及库湾上游来流量由中国长江三峡工程开发总公司提供; 水流流速利用挪威产声学多普勒三维点式流速仪 6 MHz“Vector”测量, 内部采样频率最大为 250 Hz, 最大输出频率为 64 Hz, 测量精度为测量值的(0.5±0.1)% cm/s<sup>[16,17]</sup>; 水温、水深、浊度、pH 值、电导率利用美国产 Hydrolab DS5 多参数水质监测仪测定, 水温、水深精度分别为 ±0.10°C, ±0.1 m, 浊度精度在 ±5%(测试范围为 0~3000 NTU); 透明度用塞氏盘法现场直接测量。在各采样点取水样加入相应的固定剂固定后带回实验室参考《水和废水分析方法》(第四版)和《湖泊生态调查观测与分析》测定总氮、总磷、硅酸盐、叶绿素 a 浓度<sup>[18,19]</sup>; 同时非汛期取干、支流各采样点表层水 10 L 带回实验室静置 48 h, 采用称重法测量水体中的含沙量<sup>[20]</sup>, 在汛期水库浊度较大时在各采样点沿深度分层取水样 10 L 用同样的方法测得水体分层含沙量。并用多参数水质监测仪在相同的采样点测定其浊度对测得的含沙量与浊度进行回归, 得到拟合曲线:

$$C = 0.00092Turb^{1.00427}, \quad (1)$$

其相关系数为 0.99608, 相关性显著, 所以公式(1)可用于由浊度近似计算水库干、支流表层以下的含沙量; 水体密度由水温对应水体密度加上水体中的含沙量而得。水温对应的水体密度根据《1990 年国际温标纯水密度表》提供的数据拟合合成以下公式计算而得

$$\begin{aligned} \rho = & 1 \times 10^{-11} \times T^6 + 5 \times 10^{-9} \times T^5 - 1 \times 10^{-6} \times T^4 \\ & + 1 \times 10^{-4} \times T^3 - 9.1 \times 10^{-3} \times T^2 \\ & + 6.79 \times 10^{-2} \times T + 999.84, \quad (R^2 = 1.001). \end{aligned} \quad (2)$$

由于实测水库水体含沙量较小, 最大值仅为 0.8 kg/m<sup>3</sup>, 因此本文忽略了水体中泥沙对水体体积的影响。限于篇幅本文仅对 2008 年野外观测的水位、流量、浊度、水温、水体密度、水流流速时空分布进行分析, 以揭示三峡水库蓄水后库湾水动力条件变化的规律。

## 2 结果与分析

### 2.1 香溪河库湾水位及上游来流量

香溪河库湾水位采用三峡水库坝前水位, 香溪河库湾上游来水主要有上游东北方向流出的古夫河

和西北方向流出的南阳河在昭君故里汇合, 以及位于香溪河库湾中游峡口镇汇入的次级支流高岚河, 上游来流量由位于昭君故里的兴山水文站控制, 高岚河流量由位于高岚河上的建阳坪水文站控制(图 1). 库水位在 170 m 以下兴山水文站始终在回水区以上自然河道中, 2008 年 11 月初库水位上升至 170 m 以后, 该站位于回水区, 不能直接测得上游来水量, 因此图 2(b)中 2008 年 11 月 2 日至年底兴山水文站流量数据缺失.

2008 年香溪河库湾水位从年初的 155.34 m 不断降低, 至 6 月 10 日降至 144.75 m, 其中 4 月 26 日~6 月 10 日水位下降较为集中, 平均日降幅达到 0.2 m, 最大日降幅为 0.8 m(5 月 26 日); 6 月 9 日~9 月 27 日为汛期, 水库维持汛限水位 145 m 运行, 期间水位依然保持着一定程度的波动. 其中最大日降幅和日升幅分别为 0.34 m(6 月 22 日)和 0.6 m(7 月 4 日); 9 月 28 日开始至 11 月 5 日分两次分期蓄至 172.5 m, 第一阶段为 9 月 28 日~10 月 6 日, 第二阶段为 10 月 17 日~11 月 4 日, 其中水位日最大上升幅度达到 2.38 m(9 月 30 日). 按照三峡工程规划, 水库水位蓄至 175 m 后水库将由初期运行期转入正常运行阶段, 每年 10 月份开始蓄水. 2008 年水位经历了 156 m 高位运行→泄水期→145 m 汛限低位运行→蓄水期→172.5 m 高位运行的完整的水位调度过程, 且 172.5 m 也已接近正常蓄水位, 所以本研究的监测结果具有一般代表性(图 2(a)).

2008 年兴山水文站和建阳坪水文站平均来流量

分别为 40.37 和 13.56  $\text{m}^3/\text{s}$ , 来流量范围分别为 3.22~586  $\text{m}^3/\text{s}$  和 4.27~142  $\text{m}^3/\text{s}$ (图 2(b)). 香溪河来流量年际变化较小, 年内变化较大, 汛期来流量明显增大, 其中 7~9 月兴山站和建阳坪站的平均流量分别为 72.15 和 13.91  $\text{m}^3/\text{s}$ . 同时 2008 年兴山站监测到的平均来流量稍大于多年平均值, 而最大来流量小于多年最大值(742  $\text{m}^3/\text{s}$ ); 而建阳坪站的平均来流量与多年水平持平, 但最大值则明显小于多年最大来流量(图 2(b)).

## 2.2 香溪河库湾水动力过程及特征

总体上, 库湾的整体流速较小, 平均流速只有厘米级. 香溪河属南北走向, 从北流向南, 水流方向与库湾支流深泓线方向大致相当, 侧向流速较小, 因此在分析库湾水流特性时采用各采样点测得的北向分流速矢量( $v$ ).

如图 3 所示为 2008 年香溪河库湾纵剖面流速动态分布图, 由图可见无论是在水库供水、水位降落期还是在水库蓄水、水位上升期, 库湾水流均非是一个方向流动而是分层异向流动. 在水库供水、水位降落期及汛期, 库湾上游来水主要以底部潜流流向河口, 自 5 月开始该底部潜流流速呈增大趋势, 其中 6 月 22 日监测到上游最大流速值达到 0.46  $\text{m/s}$ (图 3(h)), 这与当时汛期上游来流量突增有关(图 2); 在上游来水主要以底部潜流流向河口的同时, 从 2 月中旬开始在香溪河河口底部出现向库湾内流动的“楔”形水体, 即形成底部倒灌现象, 但倒灌范围仅限于距河口 5

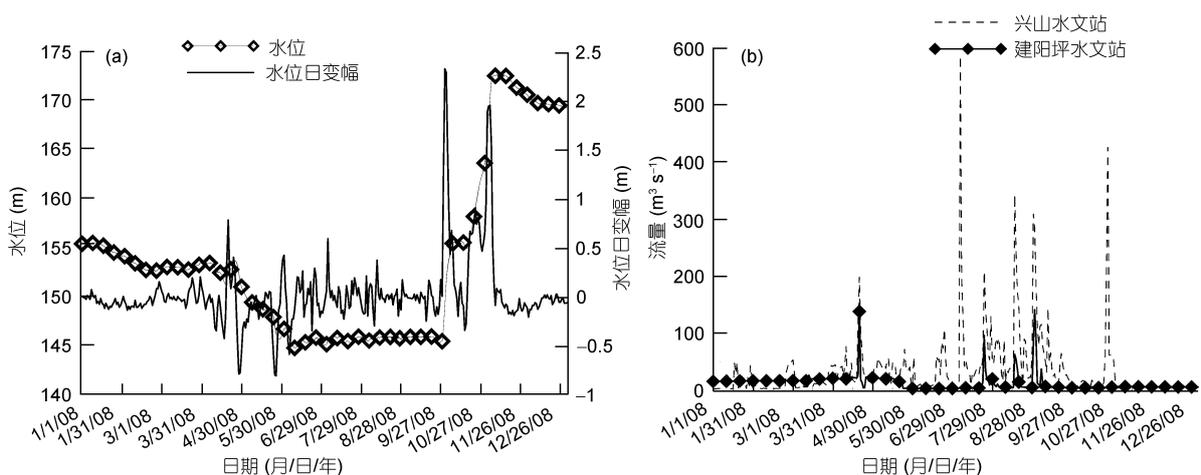


图 2 2008 年香溪河库湾水位及上游来流量变化过程

(a) 水位及水位日变幅; (b) 上游来流量

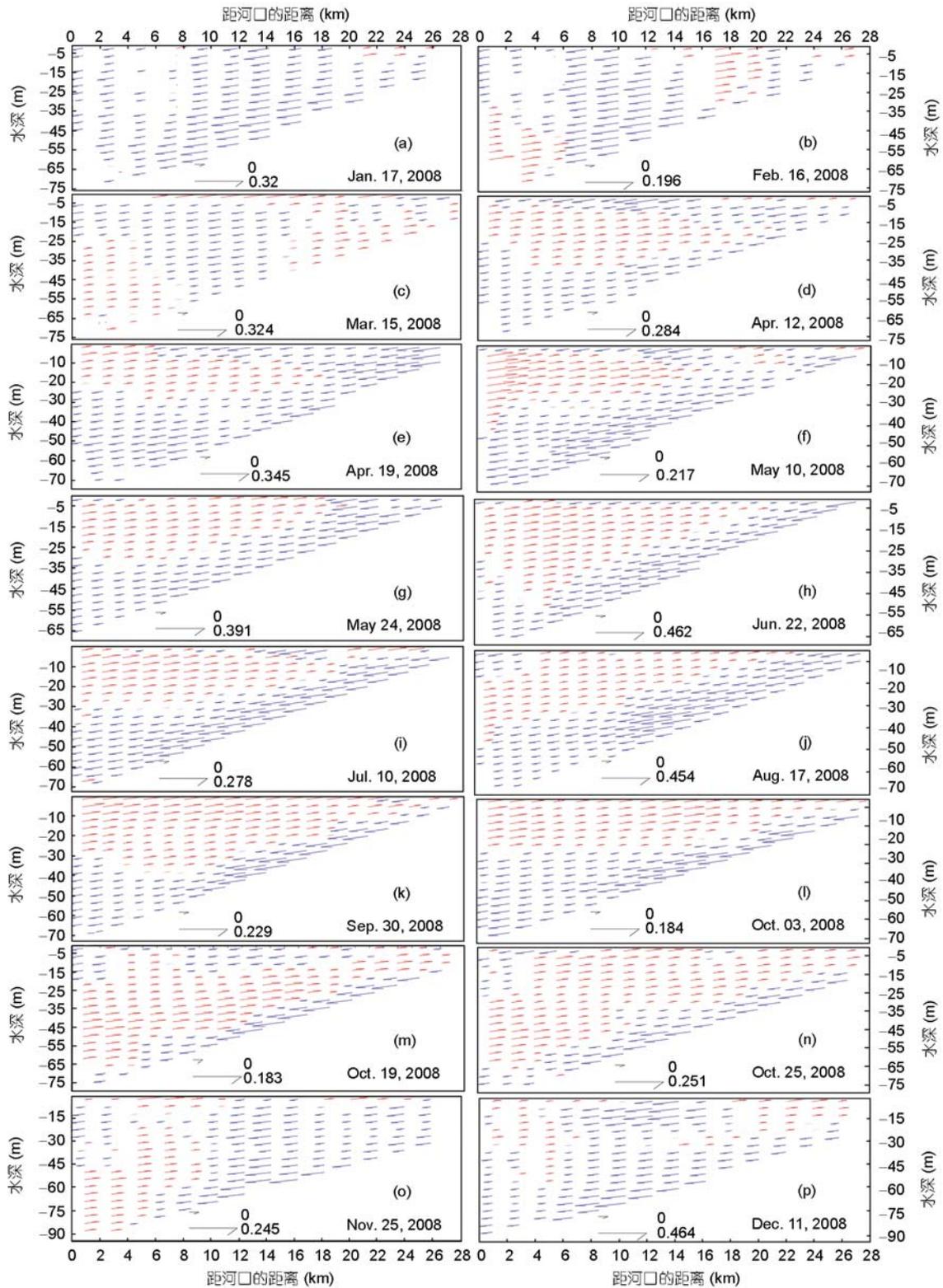


图3 2008年香溪河库湾纵剖面流速动态分布图( $m s^{-1}$ )

红色矢量表示由河口流向支流, 蓝色矢量表示由支流流向河口, 矢量长度表示流速大小

km 以内, 平均流速为 0.04 m/s(图 3(b)), 到 3 月倒灌范围逐渐扩大, 达到距河口约 7 km(图 3(c)); 在此之后, 在香溪河库湾持续存在分层异向流动现象, 4 月至 9 月, 水库干流水体均从河口中部水深 5~40 m 范围潜入库湾, 平均潜入流速为 0.05 m/s, 最大流速出现在 5 月 10 日, 水深 5 m 处流速达到 0.16 m/s(图 3(f)), 倒灌潜入的范围明显比 2 月和 3 月要大, 绝大多数时间均能影响到库湾中上游. 在 9 月底至 10 月 6 日水库蓄水第一阶段, 干流水体主要从库湾表层倒灌进库湾, 平均流速为 0.06 m/s(图 3(k)和(l)), 倒灌水体迅速影响到整个库湾, 而随后的第二阶段蓄水过程, 水库干流水体则从中层倒灌进库湾(图 3(m)和(n)), 但在水位快速上升、水流倒灌的同时底部仍存在流向河口的潜流. 蓄水完成后的 11 月及 12 月干流仍有水流从底部或中层潜入库湾(图 3(o)和(p)), 但潜入范围较小, 在距离河口 10 km 以内.

由此, 香溪河库湾水动力难以简单概化为一维特征, 而是在深度上长期具有复杂的分层异向流动特征. 一年中库湾底部始终存在流向河口的潜流, 大多时候河口处会发生水库干流水体倒灌进入库湾的现象, 倒灌潜入点深度以及潜入库湾的距离随不同季节水体物理性质、库湾上游来流量、水库水位及水位日变幅等的不同而有所不同.

### 3 香溪河库湾分层异向流水动力特征形成的原因分析

上述库湾分层异向流动现象不能简单地用重力作用下的水体流动现象来解释, 应该存在更为复杂的原因. 我们知道, 两种密度相差不大、可以相混的流体相互接触, 因为密度的差异将发生相对运动, 这种运动形式称为异重流<sup>[21,22]</sup>. 其中, 重液体在轻液体的下部运动, 叫做下层或底部异重流; 轻液体在重液体的上部运动, 叫做上层异重流; 如果在上下两层不同密度的中间运动, 则叫做中层异重流<sup>[23]</sup>. 按照河床底坡(相对于异重流运动而言)的不同, 可将其分为顺坡、平坡和反坡异重流<sup>[22,24]</sup>. 仔细分析干流水体密度差及其变化过程发现, 干流水体倒灌进入库湾的规律与倒灌异重流规律一致; 分析库湾上游来水与库湾回水水体密度差及其变化过程, 可以用顺坡底部异重流较好地解释库湾流向河口的底部潜流现象.

### 3.1 干流水体密度变化过程及特征

图 4 给出了 2008 年水库干流(CJ)以及库湾表层水体密度变化图. 图 5 为三峡水库干流(CJ)及库湾各采样点(XX00~XX10)水体密度沿深度分布图. 可以看出, 水库干流及库湾表层水体密度 2 月最大, 其中水库干流密度为 999.65 kg/m<sup>3</sup>; 库湾水体密度从下游向上游逐渐增大, 下游最小为 999.62 g/cm<sup>3</sup>, 上游最大值为 999.70 kg/m<sup>3</sup>. 随着水温的上升, 表层密度逐渐减小, 3~7 月干流表层水体平均密度分别为 999.57, 999.17, 998.21, 997.35 和 997.28 kg/m<sup>3</sup>, 主汛期 8 月后干流水体密度略有增大, 8, 9 及 12 月干流表层水体平均密度分别为 997.32, 997.70 和 998.81 kg/m<sup>3</sup>. 库湾除上游略有不同外, 水体密度与水库干流的变化趋势基本一致, 以库湾中游 XX05 为例, 2 月为 999.65 kg/m<sup>3</sup> 最大, 随后逐渐减小, 5 月为 997.78 kg/m<sup>3</sup>, 7 月最小为 996.34 kg/m<sup>3</sup>, 8 月开始逐渐增大, 12 月 11 日为 998.83 kg/m<sup>3</sup>. 库湾上游(XX10)水体密度在汛期波动较大, 且高于库湾中下游以及水库干流表层水体密度(图 4 和 5).

沿深度方向, 水库干流水体的密度梯度较小, 库湾水体密度沿深度梯度较大(图 5). 以 2008 年 7 月 10 日为例(图 5(c)), 水库干流采样点 CJ 的表层水体密度为 997.29 kg/m<sup>3</sup>、底部为 997.39 kg/m<sup>3</sup>, 相差 0.09‰, 库湾中游 XX05 表层水体密度为 996.23 kg/m<sup>3</sup>、底部为 997.97 kg/m<sup>3</sup>, 相差 1.73‰. 另外, 在 2008 年大多数时间里, 水库干流水体密度介于库湾靠近河口段表层水体密度与底部水体密度之间(图 5(b), (c), (e)), 而在局部时段也会出现大于库湾靠近河口段水体密度(图 5(a))或小于整个库湾水体密度, 如第一阶段蓄水(图 5(d)).

### 3.2 干流水体密度差及其引起的倒灌异重流现象

图 6(a)所示为水库干支流表层水体密度差及水

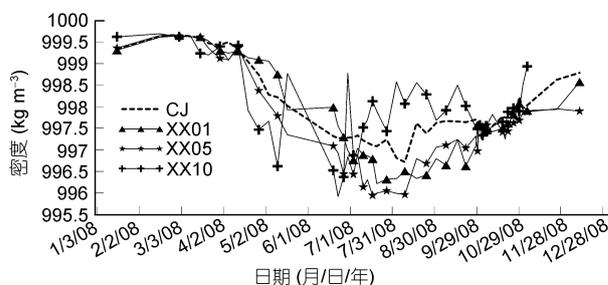


图 4 水库干流及香溪河库湾表层水体密度变化图

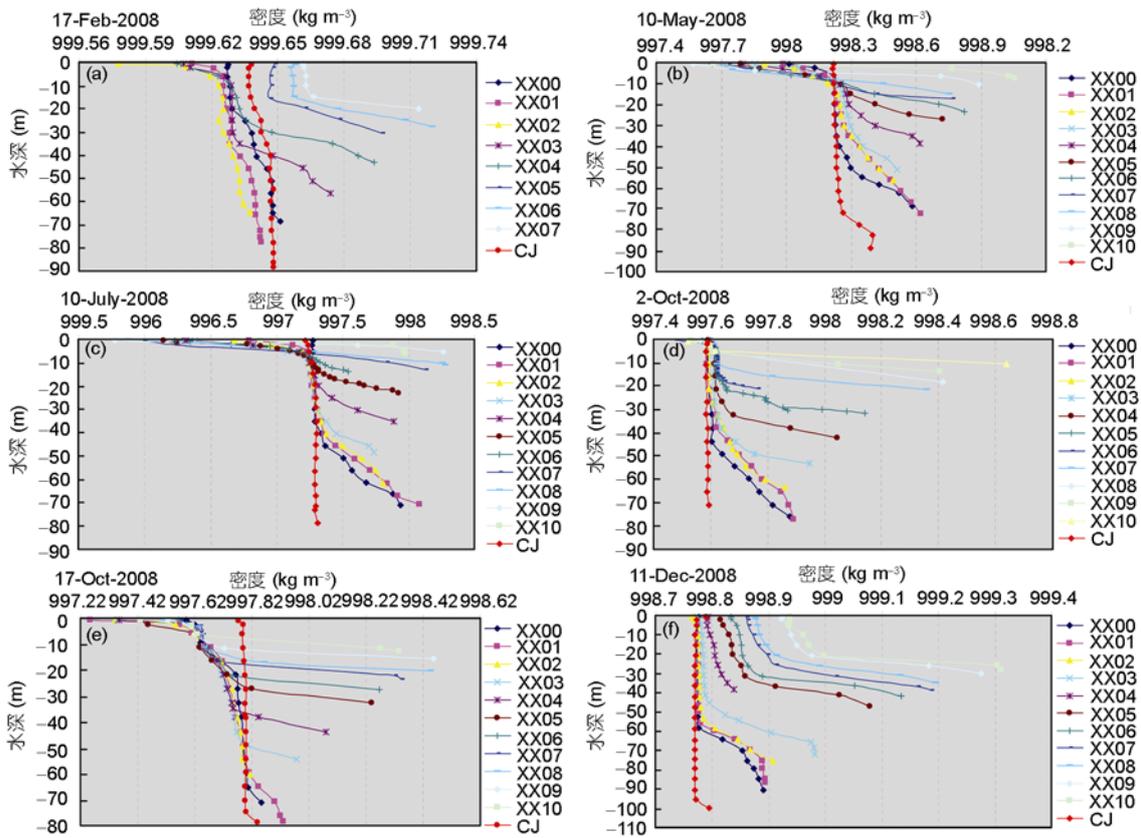


图5 香溪河库湾及水库干流各采样点水体密度沿深度分布图

库干流水体最大密度与库湾底部水体密度差的年度变化过程. 由图可见, 水库干流表层水体密度一年中绝大多数时间均大于库湾(XX01)表层水体密度, 汛期7~9月尤为显著, 差值范围为  $0.002\sim 1.013\text{ kg/m}^3$  (9月7日); 而4月19日, 27日, 蓄水期间10月1日至6日, 干流表层水体密度小于库湾, 差值范围为  $0.006\sim 0.057\text{ kg/m}^3$ . 然而, 水库干流沿深度水体密度最大值绝大多数时间均小于库湾底部水体密度, 差值范围为  $0.013\sim 0.946\text{ kg/m}^3$ ; 2, 3, 11月例外, 水库干流水体密度大于库湾底部, 差值范围为  $0.0001\sim 0.01\text{ kg/m}^3$ . 由此可见, 2, 3, 11月底水库干流水体密度大于库湾水体密度, 因此水库干流以底部异重流形式倒灌进入库湾; 4月19日、27日, 蓄水期间10月1日至10月6日, 水库干流水体密度小于库湾表、底层水体的密度, 因此水库干流以表层异重流的形式倒灌进入库湾; 其他时段干流水体密度大于库湾表层水体密度、小于库湾底部水体密度, 因此干流水体主要以中层倒灌异重流形式进入库湾.

### 3.3 库湾上游来水与库湾回水水体密度差及其引起的顺坡底部异重流现象

XX10点已经接近库湾回水末端, 水深较浅, 因此选用库湾最上游采样点XX10底部水体密度作为上游来水的密度, 并用其与库湾上、中、下各代表点(XX09, XX05, XX01)的平均水体密度比较, 来分析库湾上游来水与库湾回水之间的水体密差异. 由图6(b)可见, 1和2月上游来水水体密度稍大于库湾回水水体密度, 3月与4月基本持平, 而5月至12月, 上游来水水体密度则明显大于库湾回水水体密度. 因此库湾上游来水全年主要以顺坡底部异重流的形式流向河口, 尤其以5月之后更为明显.

### 3.4 引起水体密度差异的原因分析

形成异重流的根本原因是密度差异, 而引起水体密度差异的原因主要有温差及泥沙含量的差异.

#### 3.4.1 库湾上游来水与库湾回水间的密度差异

依然选用库湾最上游采样点XX10底部水温与

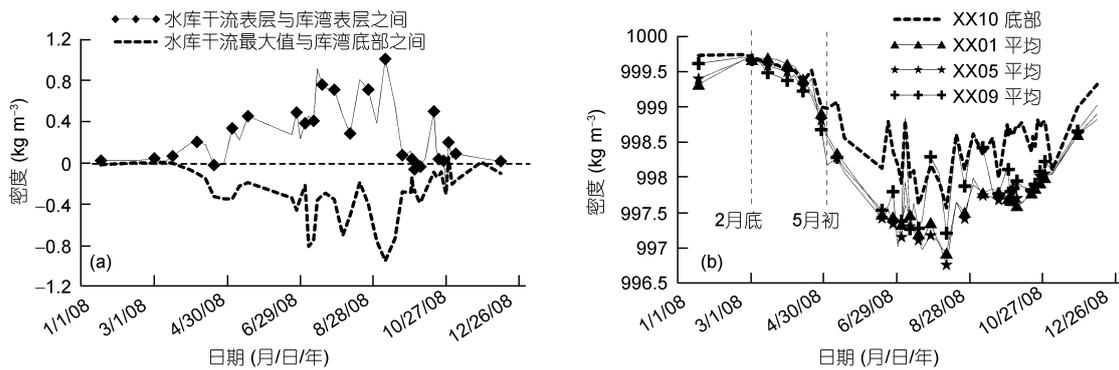


图6 上游来水、水库干流与库湾水体密度比较图

(a) 水库干流与库湾(XX01)水体密度差; (b) 上游来水与库湾回水水体密度比较

库湾上、中、下各代表点(XX09, XX05, XX01)的平均水温比较, 来分析上游来水与库湾回水之间的密度差的成因(图 7(a)). 3月到5月初, 库湾上游来水水温与库湾回水平均水温差别不大, 如3月15日, XX10底部水温为 11.14 °C, XX09, XX05 及 XX01 平均水温分别为 12.13, 11.20 及 10.04 °C, XX10 底部水温介于 XX09 与 XX01 之间, 相差均不超过 2 °C. 在 2008 年其他时间, 上游来水温度虽有波动, 但始终低于库湾各点平均水温, 以 6 月 22 日为例, XX10 底部水温为 16.98 °C, XX09, XX05 及 XX01 平均水温分别为 22.71, 23.02, 23.59 °C, 比 XX10 底部水温分别高出 5.73, 6.04, 6.61 °C. 因此期间上游来水密度大于库湾回水密度, 汛期库湾上游来水含沙量明显大于库湾回水(图 7(b)), 进一步增大了上游来水密度, 从而全年上游来水密度大于库湾回水密度, 5 月份之后更为明显.

### 3.4.2 水库干流与香溪河库湾水体之间的密度差异

图 7(c)显示, 1 和 2 月及蓄水期以后 11 和 12 月干流水温与库湾水温基本没有差别, 干流及库湾表底温差也很小, 同时两水体浊度差也较小, 导致水库干流与库湾的密度差很小(图 6(a)). 3 月, 水库干流表层和底部水温分别低于库湾表层及底部水温, 4~9 月, 水温逐步升高, 干流表层及底部水温介于库湾表、底水温之间, 如 8 月 17 日, 干流表、底水温分别为 24.44 和 24.41 °C, 库湾 XX01 表、底水温分别为 25.87 和 21.00 °C. 9 月底开始蓄水, 干流水温开始高于库湾水温, 如 10 月 2 日, 干流表层和底部水温分别是 23.05 和 23.08 °C, 库湾 XX01 表、底水温分别为 23.00 和 21.62 °C, 该趋势在 4 月中下旬也出现过, 如 4 月 19 日, 干流表层和底部水温分别是 15.33 和 15.23 °C, 库

湾 XX01 表、底水温分别为 15.23 和 12.94 °C. 第一阶段蓄水后至 10 月底干流水温趋势和 4~9 月趋势一致, 干流水温介于库湾表底水温之间.

期间汛期 7~9 月干流浊度增大, 与库湾之间泥沙含量差同时增大, 如 8 月 17 日两水体表层浊度最大差值达到 523.70 NTU(图 7(d)). 5~9 月, 干流表层水体密度均大于库湾表层水体密度, 但越到底部则相反(图 6(a)). 遴选 5 月 10 日及 8 月 17 日分析三峡水库干流与库湾温差、含沙量差影响两水体总密度差效果(图 8), 5 月水库干流及库湾间浊度几乎没有差异, 此时两水体间密度差主要由两水体的温差引起(图 8(a)); 8 月水库干流浊度沿深度均显著大于库湾, 温度对应密度呈现干流表层 0~20 m 大于库湾, 20 m 以下小于库湾, 然而两水体间总密度差沿深度变化趋势与温差沿深度变化趋势相似, 因受泥沙含量差影响, 水体水库干流水体总密度大于库湾水体密度的范围扩大到水面以下 35 m, 表面密度差增大, 底部密度差减小(图 8(b)). 由此可见, 影响干支流密度差的因素主要是水体温差.

## 4 香溪河库湾倒灌异重流运动规律分析

对顺坡底部异重流规律研究的较多, 但对倒灌异重流规律研究的较少, 下面对香溪河库湾倒灌异重流运动规律进行一些分析.

### 4.1 香溪河库湾倒灌异重流潜入条件分析

众多学者利用潜入点处的弗劳德数讨论异重流形成条件<sup>[25,26]</sup>. 其中最为著名的是 1957 年范家骅等的水槽试验, 得到异重流潜入条件关系式<sup>[27]</sup>:

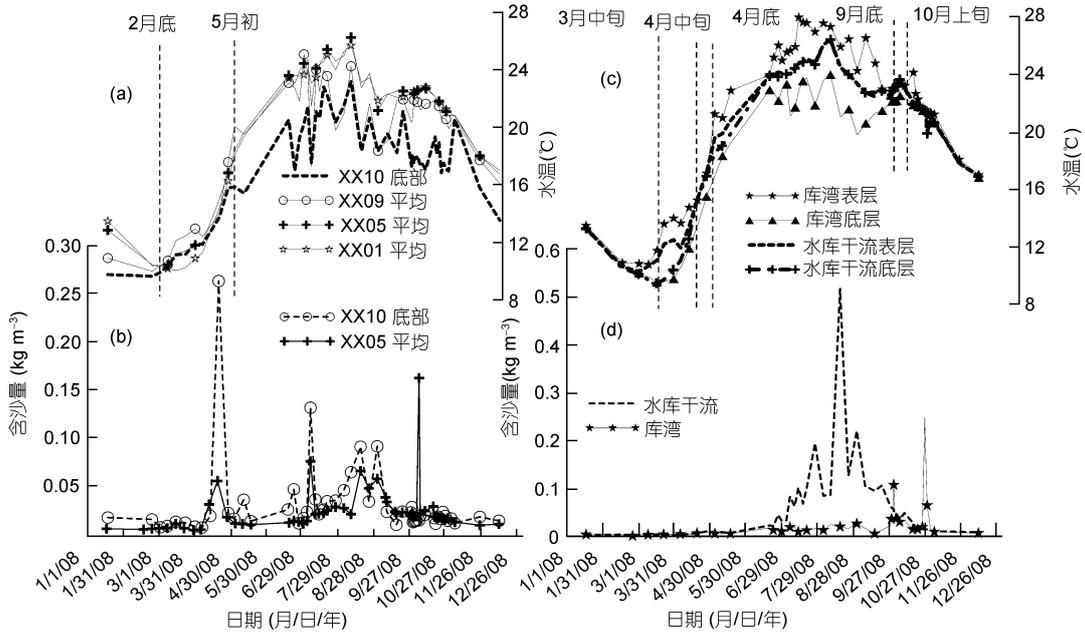


图7 三峡水库干流、库湾、库湾上游来水水温及浊度对比图

(a) 库湾上游来水与库湾水温对比; (b) 库湾上游来水与库湾(XX05)浊度对比; (c) 水库干流水温与库湾(XX01)水温对比; (d) 三峡水库干流及库湾表层水体浊度对比

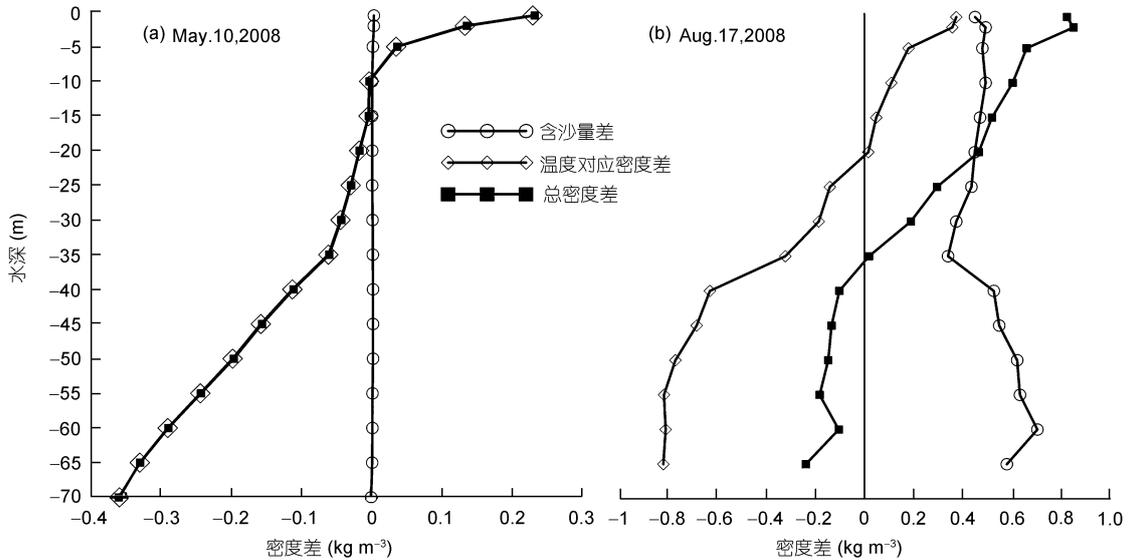


图8 三峡水库干流与库湾温差、含沙量差影响两水体密度差效果比较

$$Fr^2 = \frac{v_0^2}{\eta_g g h_0} = 0.6 \quad \text{或} \quad Fr = \frac{v_0}{\eta_g g h_0} = 0.78, \quad (3)$$

式中,  $\eta_g$  为重力修正系数,  $\eta_g = \frac{\Delta\gamma}{\gamma_m}$ ,  $h_0$  为潜入点异重流厚度;  $v_0$  为潜入点平均流速;  $\gamma$ ,  $\gamma_m$  分别为清

水、浑水容重;  $\Delta\gamma$  为浑水与清水容重差,  $\Delta\gamma = \gamma_m - \gamma$ ;  $g$  为重力加速度. 从式中可以看出, 异重流潜入条件主要与该处水深、流速和容重等因素有关. 本研究采用 2008 年香溪河口倒灌异重流的实测资料, 借用公式(3), 对潜入点处的  $Fr$  数进行了计算, 结果

如表 1. 其中,  $g=9.8092597 \text{ m/s}^2$ ,  $h_0$  取 XX01 点倒灌异重流厚度, 其他符号意义同公式(3).

由表 1 可见,  $Fr^2$  范围为 0.003~0.511, 分布较为分散, 与公式(3)不尽相同. Savage 和 Brimberg<sup>[28]</sup>分析水槽实验资料认为  $Fr^2$  并非定值, 其范围为 0.09~0.64; Ford 和 Jonson<sup>[29]</sup>通过野外观测发现潜入点附近的佛汝德数  $Fr^2$  的范围大致在 0.01~0.49; Akiyama<sup>[30]</sup>经过理论分析得到缓坡和陡坡异重流潜入点水深  $h_0$  不同的公式, 与实测资料比较后认为  $Fr^2$  在 0.01~0.303 之间.

钱宁等人<sup>[21]</sup>也发现年平均含沙量仅  $1 \text{ kg/m}^3$  左右的长江, 也有可能形成异重流, 并造成青山运河和葛洲坝枢纽航道的淤积. 秦文凯等人<sup>[24]</sup>也认为如果水库干流水体较浑, 而某些支流水体较清或汛期水库的含沙量突然增大, 都有可能产生异重流入侵支沟, 引起支沟的淤积, 在湖泊出口, 如果江水的含沙量较大, 湖泊出流不大且含沙量较小, 也有可能产生异重流入侵湖泊出口段<sup>[24]</sup>. Roget 和 Colomer<sup>[31]</sup>、韩其为<sup>[32]</sup>则从理论上对倒灌异重流形成、倒灌流动、异重流衰

减、含沙量变化及淤积状况等进行了研究. 根据美国谢弗湖的实测资料, 当河水和湖水的密度相差 0.8‰, 就有可能形成异重流<sup>[21]</sup>. 而本研究中 2, 11 和 12 月水库干流与库湾密度仅相差 0.02‰~0.05‰(表 1)时就发生了较弱的底部倒灌异重流.

#### 4.2 香溪河库湾倒灌异重流潜入时厚度及潜入距离分析

表 2 所示为香溪河库湾倒灌异重流潜入时潜入水层的厚度及潜入距离与水体密度差等进行的相关性分析的结果. 二种相关性分析均表明潜入点异重流厚度与水库干支流表层水体密度差大小呈显著负相关, 密度差越大, 潜入点异重流厚度越小(图 9); 与水库水位高低呈显著正相关, 汛期水库低水位运行时, 潜入点的厚度较小, 而在 2 和 3 月及蓄水后的 11 月和 12 月, 水库又恢复高水位运行时, 其厚度又有增大的趋势(图 9).

潜入距离受上游来流量、水位高低及水位日变幅影响. 当汛期香溪河库湾上游来流量增大时, 倒灌异

表 1 2008 年香溪河库湾倒灌异重流潜入条件

日期	潜入点异重流厚度 $h_0(\text{m})$	流速 $v_0(\text{m/s})$	重力修正系数 $\eta_g$	$Fr^2$	日期	潜入点异重流厚度 $h_0(\text{m})$	流速 $v_0(\text{m/s})$	重力修正系数 $\eta_g$	$Fr^2$
1~17					8~17	14.668	0.043	0.000814	0.016
2~16	35.019	0.054	0.000027	0.317	8~31	17.402	0.092	0.000389	0.129
3~16	53.300	0.015	0.000070	0.006	9~15	28.286	0.020	0.000562	0.003
3~30	25.653	0.033	0.000190	0.023	9~30	25.349	0.070	0.000066	0.301
4~12	10.102	0.046	0.000182	0.118	10~2	30.793	0.070	0.000033	0.489
4~27	24.636	0.070	0.000089	0.230	10~5	26.069	0.062	0.000102	0.149
5~10	20.370	0.071	0.000227	0.113	10~19	35.775	0.041	0.000136	0.035
5~17	20.318	0.036	0.000459	0.014	10~23	35.535	0.059	0.000020	0.511
6~22	25.308	0.045	0.000280	0.029	10~29	56.212	0.038	0.000204	0.013
6~29	29.582	0.029	0.000241	0.012	11~1	32.322	0.057	0.000049	0.210
7~17	20.411	0.050	0.000766	0.016	11~25	44.565	0.047	0.000048	0.105
7~27	19.843	0.027	0.000716	0.005	12~11	24.477	0.025	0.000020	0.126

表 2 潜入点倒灌异重流厚度及潜入距离与相应因素相关关系分析表

		密度差	上游来流量	水位	水位日变幅
线性相关 Pearson	潜入点异重流厚度	-0.308 <sup>a)</sup>	-0.214	0.481 <sup>a)</sup>	0.086
	Sig.	0.033	0.144	0.001	0.559
	潜入距离	0.058	0.004	-0.288 <sup>a)</sup>	0.419 <sup>a)</sup>
	Sig.	0.695	0.981	0.047	0.003
秩相关 Spearman's rho	潜入点异重流厚度	-0.307 <sup>a)</sup>	-0.266	0.528 <sup>a)</sup>	0.141
	Sig.	0.034	0.067	0.000	0.340
	潜入距离	-0.209	-0.361 <sup>a)</sup>	0.098	0.482 <sup>a)</sup>
	Sig.	0.153	0.012	0.506	0.001

a) 表示差异性检验系数 Sig.< $\alpha=0.05$ , 即相关分析具有统计学意义

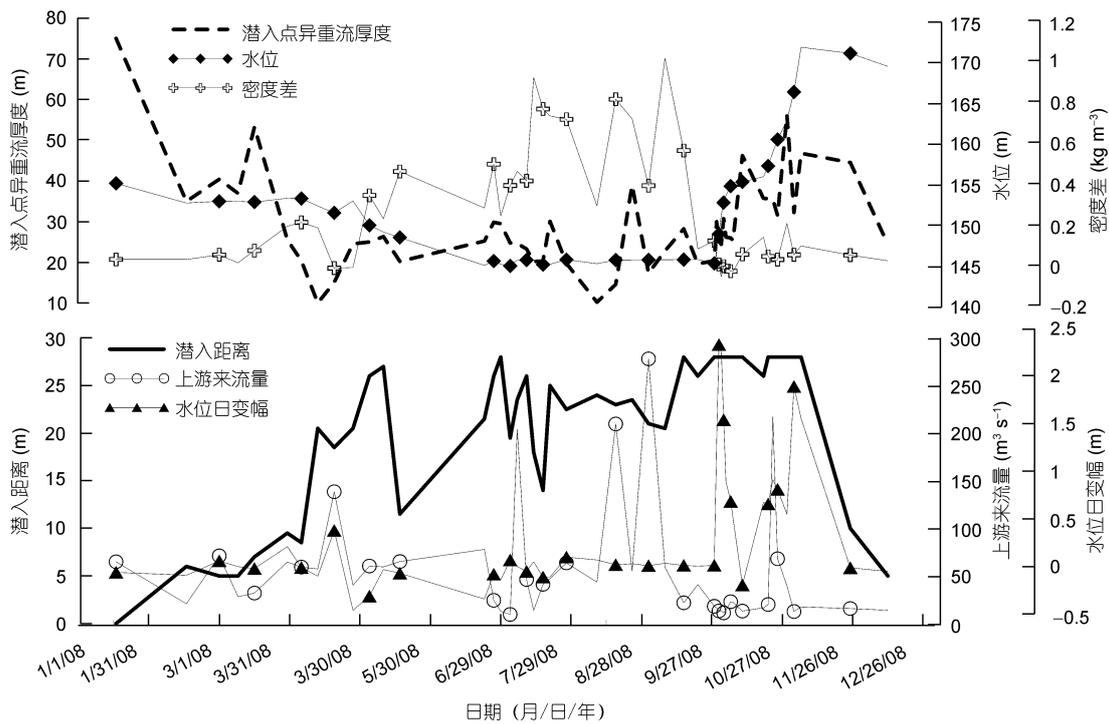


图9 潜入点倒灌异重流厚度及潜入距离与相关因素的关系图

重流潜入距离略有减小, 如7月6日, 8月17日, 8月31日(图9); 日上升幅度增大时, 倒灌异重流潜入距离显著增大, 这在汛末蓄水期间体现的尤为明显(图9), 这为探讨通过三峡水库日调节影响支流库湾水动力从而控制水华提供依据。

## 5 结论

(1) 三峡水库蓄水后, 三峡水库支流库湾水动力特性受上游来水以及水库干流影响显著, 在深度方向具有典型的分层异向流特征, 不能简单的根据其“河道型”形态特点概化为一维特性。

(2) 香溪河库湾上游来水主要以顺坡底部异重流形式流出库湾, 特别是5至10月。产生的原因主要

是由上游来水与库湾回水之间的温差及含沙量差引起的密度差造成。

(3) 水库水位变动以及干支流水体密度差的变化带来干支流水体处于频繁的交换状态, 干流水体主要以倒灌异重流的形式进入香溪河库湾。异重流主要由水库干流与支流库湾水体温差和浊度差引起的密度差引起, 其中温度差占主要地位。异重流倒灌时潜入点深度主要决定于干支流水体密度差的变化过程, 随季节有所不同, 2和3月在底部, 4~9月主要为中层, 汛后第一阶段蓄水主要为表层, 第二阶段蓄水为中层, 11和12月分别为底部和中层。潜入点异重流厚度主要受水库干支流水体密度差及水位高低影响; 异重流潜入库湾的距离主要受支流上游来流量、水库水位高低及水位日变幅影响。

致谢 马骏、易仲强、杨霞、曹巧丽等同志参加野外监测工作, 审稿人给予了宝贵的建议, 在此一并感谢!

## 参考文献

- 1 张晟, 李崇明, 付永川, 等. 三峡水库成库后支流库湾营养状态及营养盐输出. 环境科学, 2008, 29(1): 7—12
- 2 李永建, 李斗果, 王德蕊. 三峡工程II期蓄水对支流富营养化的影响. 西南农业大学学报:自然科学版, 2005, 27(4): 474—478

- 3 张晟, 刘景红, 黎莉莉, 等. 三峡水库成库初期营养盐与浮游植物分布特征. 环境科学, 2006, 27(6): 1056—1061
- 4 郭劲松, 陈杰, 李哲, 等. 156 m 蓄水后三峡水库小江回水区春季浮游植物调查及多样性评价. 环境科学, 2008, 29(10): 2710—2715
- 5 Duan S, Xu F, Wang L J. Long-term changes in nutrient concentrations of the Changjiang River and principal tributaries. Biogeochem, 2007, 85(2): 215—234[DOI]
- 6 Liu S M, Zhang J, Chen H T, et al. Nutrients in the Changjiang and its tributaries. Biogeochem, 2003, 62(1): 1—18
- 7 Ye L, Han X Q, Xu Y Y, et al. Spatial analysis for spring bloom and nutrient limitation in Xiangxi bay of three Gorges Reservoir. Env Monit Assess, 2007, 127(1): 135—145[DOI]
- 8 韩新芹, 叶麟, 徐耀阳. 香溪河库湾春季叶绿素 a 浓度动态及其影响因子分析. 水生生物学报, 2006, 30(1): 89—94
- 9 胡建林, 刘国祥, 蔡庆华, 等. 三峡库区重庆段主要支流浮游植物调查. 水生生物学报, 2006, 30(1): 116—119
- 10 周广杰, 祝琪军, 胡征宇, 等. 三峡库区四条支流藻类多样性评价及“水华”防治. 中国环境科学, 2006, 26(3): 337—341
- 11 李崇明, 黄真理, 张晟, 等. 三峡水库藻类“水华”预测. 长江流域资源与环境, 2007, 16(1): 1—6
- 12 李锦秀, 禹雪中, 幸治国. 三峡库区支流富营养化模型开发研究. 水科学进展, 2005, 16(6): 777—778
- 13 曾辉, 宋立荣, 于志刚, 等. 三峡水库“水华”成因初探. 长江流域资源与环境, 2007, 16(3): 336—339
- 14 黄程, 钟成华, 邓春光, 等. 三峡水库蓄水初期大宁河回水区流速与藻类生长关系的初步研究. 农业环境科学学报, 2006, 25(2): 453—457
- 15 王玲玲, 戴会超, 蔡庆华. 香溪河生态调度方案的数值模拟. 华中科技大学学报(自然科学版), 2009, 37(4): 111—114
- 16 Soulsby R L. Selecting record length and digitization rate for near-bed turbulence measurements. J Phys Oceanography, 1980, 10(2): 208—219[DOI]
- 17 Voulgaris G, Trowbridge J H. Evaluation of the Acoustic Doppler Velocimeter (ADV) for Turbulence Measurements. J Atmos Oceanic Technol, 1998, 15(1): 272—289[DOI]
- 18 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法. 第四版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002
- 19 黄祥飞, 陈伟明, 蔡启铭. 湖泊生态调查观测与分析. 北京: 中国标准出版社, 2000
- 20 中华人民共和国建设部. GB50159—92 河流悬移质泥沙测验规范. 北京: 中国计划出版社, 2007
- 21 钱宁, 万兆惠. 泥沙运动力学. 北京: 科学出版社, 2003
- 22 王光谦, 方红卫. 异重流运动基本方程. 科学通报, 1996, 41(18): 1715—1720
- 23 钱宁, 范家骅. 异重流. 北京: 水利水电出版社, 1958
- 24 秦文凯, 韩其为. 反坡异重流的研究. 水动力学研究与进展: A 辑, 1996, 10(6): 637—647
- 25 徐建华, 李晓宇, 李树森. 小浪底库区异重流潜入点判别条件的讨论. 泥沙研究, 2007(6): 71—74
- 26 姚鹏, 王兴奎. 异重流潜入规律研究. 水利学报, 1996(8): 77—83
- 27 范家骅. 异重流运动的实验研究. 水利学报, 1959(5): 30—48
- 28 Savage S B, Brimberg J. Analysis of plunging phenomena in water resources. J Hvdraul Res, 1975, 13(2): 187—204
- 29 Ford D E, Johnson M C, Monismith S G. Density inflows to DeGray lake, Arkansas. In: Second international symposium on stratified flows, IAHR. Trondheim, Norway, 1980
- 30 Akiyama J, Stefan H G. Plunging flow into a reservoir: Theory. J Hydraulic Eng, 1984, 110(4): 484—499[DOI]
- 31 Roget E, Colomer J. Flow characteristics of a gravity current induced by differential cooling in a small lake. Aquat Sci-Res Across Bound, 1996, 58(4): 367—377
- 32 韩其为. 水库淤积. 北京: 科学出版社, 2003

## Hydrodynamic characteristics of Xiangxi Bay in Three Gorges Reservoir

JI DaoBin<sup>1,2</sup>, LIU DeFu<sup>1\*</sup>, YANG ZhengJian<sup>1</sup>, XIAO ShangBin<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup> College of Civil & Hydroelectric Engineering of China Three Gorges University, Yichang 443002, China;

<sup>2</sup> School of Water Resources & Hydropower Engineering of Wuhan University, Wuhan 430072, China;

<sup>3</sup> Institute of Earth Environment, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710075, China

Based on continuous monitoring in 2008, this paper analyzed the hydrodynamic processes of the Xiangxi Bay (XXB), a tributary of TGR. It showed that the hydrodynamics of the XXB could be generalized as a density-stratified flow, and could not be simply simulated by one-dimension model. The upstream water mainly flowed out of the bay in a process of downslope-bottom density current, meanwhile, the TGR mainstream water entered into the XXB in a reverse density current. The density current of the XXB was mainly caused by the water temperature difference and turbidity difference between the TGR mainstream and the bay, and the former played a dominant role. The intruding depth of the reverse density current depended on the density difference; density current thickness at the plunging point mainly rested on the density difference and the water level; and the distance of the density current entering into the bay lay on the runoff from the upstream, water level and daily water level fluctuation.

**Three Gorges Reservoir, Xiangxi Bay, hydrodynamics, density current, water temperature difference**