

文章编号:1672-3031(2017)01-0135-06

三峡水库支流库湾热收支——以朱衣河为例

赵晓杰¹, 程 瑶^{1,2}, 黄伟建³, 王雨春², 党承华¹

(1. 河北工程大学, 河北 邯郸 056038; 2. 中国水利水电科学研究院 水环境研究所, 北京 100038;

3. 河北工程大学, 河北 邯郸 056038)

摘要: 为更好认识水库库湾热收支过程, 本文利用实测水温、气象和美国国家海洋和大气管理局(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)短波辐射等资料, 分析了朱衣河库湾水温结构的时空变化、水面热通量和平流输运热量的年内变化, 结果表明: (1)朱衣河库湾年内表层水温为12.0~31.6℃, 底层为11.8~27.8℃; (2)受干-支流相互作用影响, 支流表层水温沿程存在水温差, 导致干-支流交汇处净热通量变化为-63.02~128.81 W/m², 支流中部为-62.01~116.14 W/m², 上游回水末端为-59.31~78.40 W/m²; (3)支流水体的平流输运热量与水位变化具有很好相关性; (4)影响支流水体热含量变化的主导因素是平流输运热量。

关键词: 三峡水库; 支流; 水温结构; 热通量; 平流输运热量

中图分类号: X7

文献标识码: A

doi: 10.13244/j.cnki.jiwhr.2017.01.009

1 研究背景

内陆水体与大气之间的热交换是地-气系统相互作用的重要组成部分, 水体热量收支与分配驱动着湖库生态系统所有生物物理(如水分循环), 和生物地球化学(如碳循环)过程, 进而影响局地天气、区域气候^[1]。三峡水库蓄水后, 由于改变了支流河道天然水流形态, 使得支流库湾热收支发生改变。热收支的改变是河流-水库体系水环境演化的关键过程, 因此研究三峡库区干-支流的交互作用, 分析支流库湾的热收支是评价水坝的水环境影响的基础。

水温变化实质是热量在湖库水体中的再分配过程^[2]。Liu等^[3]研究发现在六月上旬, 由于气温上升, 导致水温升高, 该期间洪水使得Lena河热通量上升了23%; Balistrieri等^[4]发现Dexter Pit湖在夏季出现非常显著的温跃层, 在秋季温跃层消失, 且出现逆温跃层现象, 主要由于太阳辐射的大小受季节变化的影响; 在Erie湖, 空气温度上升, 水温分层的时间增加, 变温层水温升高^[5]。已有的研究阐述了气温、太阳辐射、季节变化对湖库热收支或水温结构的影响, 但是针对水交换引起湖库热量变化尚不明晰。三峡支流库湾受密度流的作用, 与干流水体发生频繁的水交换^[6-7], 水温沿程变化显著^[8], 因此深入研究大型水库支流库湾热收支过程形成演化机理, 有助于评价三峡水库的水环境影响, 并且对认识水循环响应气候变化具有一定参考价值。

本文选取三峡库区内一条典型支流, 对其水体温度进行连续监测, 分析各监测点的热通量变化, 计算热输运, 以探究其热收支规律。

2 材料和方法

2.1 研究区及采样点 朱衣河是三峡库区奉节段长江北岸的一级支流, 库湾长约6 km, 水面最宽处

收稿日期: 2015-12-23

基金项目: “十二五”国家水体污染防治重大科技专项(2012ZX07104-001); 国家自然科学基金项目(51509066); 河北省重点基础研究项目(14964206D-3)资助

作者简介: 赵晓杰(1990-), 男, 河北邯郸人, 硕士, 主要从事水环境研究。E-mail: zhaoxj0929@163.com

通讯作者: 黄伟建(1964-), 男, 河北邯郸人, 博士, 教授, 主要从事水环境和计算机应用研究。

E-mail: huangweijian0808@163.com

0.6 km, 由西向东汇入长江, 属中亚热带湿润季风气候, 库湾整体流速较小, 只有厘米级且水华频发, 其水动力及水环境特征具有一定代表性^[9-12]。在朱衣河库湾布设3个监测点(图1), 从干、支流交汇处至上游依次记为ZY01(109°27'1.93"E, 31°0'42.29"N)、ZY02(109°25'30.56"E, 31°1'20.57"N)、ZY03(109°24'26.32"E, 31°1'8.75"N), 其距离干支流交汇处距离依次为0.3、2.7、5.7 km。

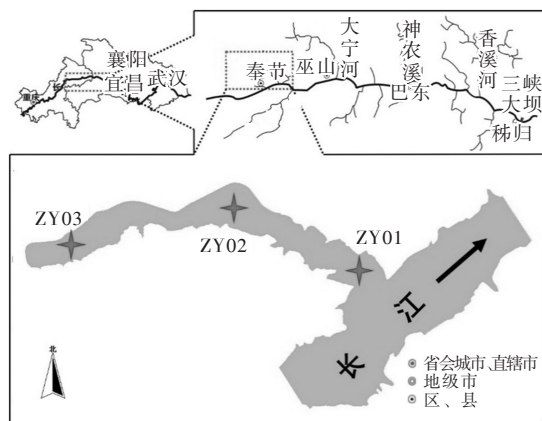


图1 监测点分布图

2.2 数据采集 自2013年1—12月, 每月22日进行定期观测, 使用多参数水质检测仪 YSI 6600V2测定水温、水深(由于在6—8月 ZY03点水深小于0.5 m, 故缺少其观测数据)。气温、相对湿度和风速使用 Kestrel 4500 风速气象仪(NK公司, 美国)进行观测。云层和太阳短波辐射资料均为月平均值, 采用 NOAA(National Oceanic and Atmospheric Administration)同化数据。

2.3 计算方法 水面净热通量计算公式:

$$H_n = H_c + H_e + H_s + H_L \quad (1)$$

式中: H_c 为显热通量(W/m^2); H_e 为潜热通量(W/m^2); H_s 为太阳短波辐射通量(W/m^2); H_L 为长波辐射通量(W/m^2)。

显热通量计算公式^[13]:

$$H_c = C_B \frac{P}{P_0} f(w)(T - T_a) \quad (2)$$

式中: H_c 为显热通量(W/m^2); C_B 为 Bowen 系数($=0.62 \text{ mb}/^\circ\text{C}$); P 为大气压(mb); P_0 为海平面的参考大气压($=1013 \text{ mb}$); T 为表层水温($^\circ\text{C}$); T_a 为大气温度($^\circ\text{C}$)。

潜热通量计算公式^[14]:

$$H_e = f(w)(e_a - e_s) \quad (3)$$

$$e_a = e_s \times \frac{R_h}{100} \quad (4)$$

$$e_s = 6.112e^{\frac{17.67T_a}{T_a + 243.5}} \quad (5)$$

$$f(w) = 6.9 + 0.345w^2 \quad (6)$$

式中: H_e 为潜热通量(W/m^2); $f(w)$ 为风速函数($\text{W}/(\text{m}^2\text{mb})$); w 为水面上方2 m处风速(m/s); e_a 为水面上方饱和水蒸气压(mb); e_s 为水面上方的实际水蒸气压(mb); R_h 为相对湿度(%); T_a 为大气温度($^\circ\text{C}$)。

长波辐射计算方法, 采用 Swinbank 公式^[15]:

$$H_L = \varepsilon \sigma \left\{ \left[9.37 \times 10^{-6} (T_a + 273.15)^6 \right] + \left[1 + 0.17C^2 - (T + 273.15)^4 \right] \right\} \quad (7)$$

式中: H_L 为长波辐射通量(W/m^2); ε 为水体反射系数($=0.97$); σ 为 Stephan-Boltzmann 常数($=5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2\text{K}^4)$); T 为表层水温($^\circ\text{C}$); T_a 为大气温度($^\circ\text{C}$); C 为云层(0为无云, 1为完全云层覆盖)。

热含量计算公式^[16]:

$$Q_c = C_w \int_{-z}^0 \rho T_z dz \quad (8)$$

式中： Q_c 为单位面积热含量(J/m^2)； C_w 为水体比热容($=4.2 \times 10^3 \text{J}/(\text{kg}^\circ\text{C})$)； ρ 为水深 z 处水体密度(kg/m^3)； T_z 为水深 z 处水温($^\circ\text{C}$)； z 为水深(m)。

平流输运热量计算公式：

$$Q_t = \Delta Q_c - Q_n \quad (9)$$

$$Q_n = \int_0^t H_n(t) dt \quad (10)$$

式中： Q_t 为平流热输运量(J/m^2)； ΔQ_c 为间隔月份热含量变化量(J/m^2)； Q_n 为水面净热交换量(J/m^2)； t 为监测间隔时间(s)； $H_n(t)$ 为水面净热通量(W/m^2)。

3 结果与分析

3.1 支流水温结构特征 如图2所示，平均水温在2月份最低，3个监测点均为 11.9°C 左右，表层水温为 12°C ，2月至8月为增温期，水温逐月升高，在8月份平均水温达到峰值，其中ZY01为 26.8°C ，ZY02为 27.8°C 左右，而ZY01表层水温为 27.2°C ，ZY02为 31.6°C ，主要因为干流水体向支流倒灌，对水体具有掺混作用，其强度从干支流交汇处向上游逐渐减弱，导致ZY01与ZY02有 1°C 左右的温度差；8月至次年1月为降温期，水温又逐月下降。其季节变化特点为：夏季最高，春秋次之，冬季最低。

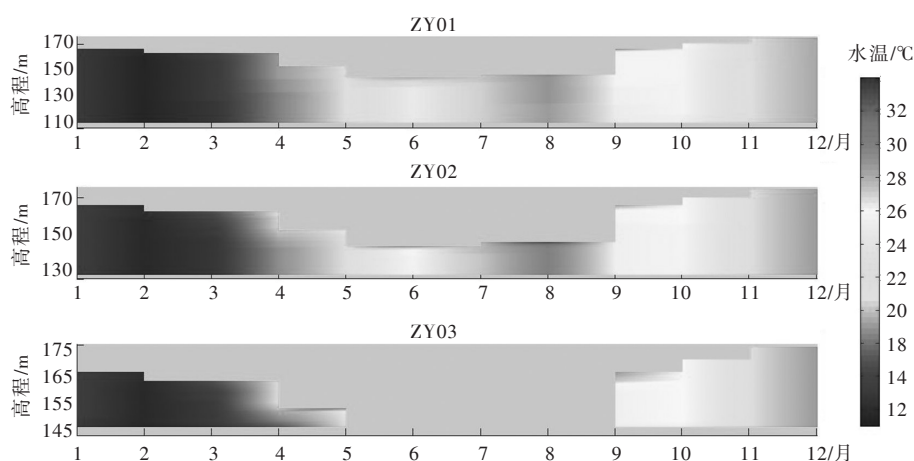


图2 各监测点年内水温

朱衣河的底层最低水温为 11.8°C ，最高为 27.8°C ，底层水温年变幅为 16°C ，这与三峡库区其他典型支流观测结果一致，如香溪河底层水温年变幅为 13°C ^[17-18]，大宁河底层水温年变幅为 9°C 左右^[19]，这由于水库调度水位有近30 m的落差，引起支流水体发生较大扰动，增强了深水水体流动性所导致的。

3.2 支流水面热通量 水面热通量主要包括太阳短波辐射通量、长波热辐射通量、显热通量及潜热通量。太阳短波辐射作为热量输入，长波热辐射及潜热通量作为平衡热量的输出部分，而显热通量的正负与气温有密切关系。朱衣河不同位置热通量逐月变化特征如图3所示：

(1)长波辐射是水体热通量的支出项之一，均为负值表示水体向大气散发热量。其绝对值的最大值出现在12月，绝对值的最小值出现在8月，表示12月支出的热通量最大，8月支出热通量最小，8月至12月散发热量逐月增多，1月至8月是递减阶段，这主要因为2月至8月水气温差小，随雨季的到来，云量逐渐增多，使得长波辐射逐渐减小。8月至12月水、气温差增大，云量逐渐减少，长波辐射逐渐增大。

(2)短波辐射作为水面热通量的主要收入项在6月份达到峰值，7、8月份降水较6月份有所增多，致使水面短波辐射通量减少，在11月达到最小值，11月至次年6月短波辐射逐渐增大。

(3)显热交换是水和大气两相间的温度差引起的热传输。2月至8月期间，气温随季节变化逐月

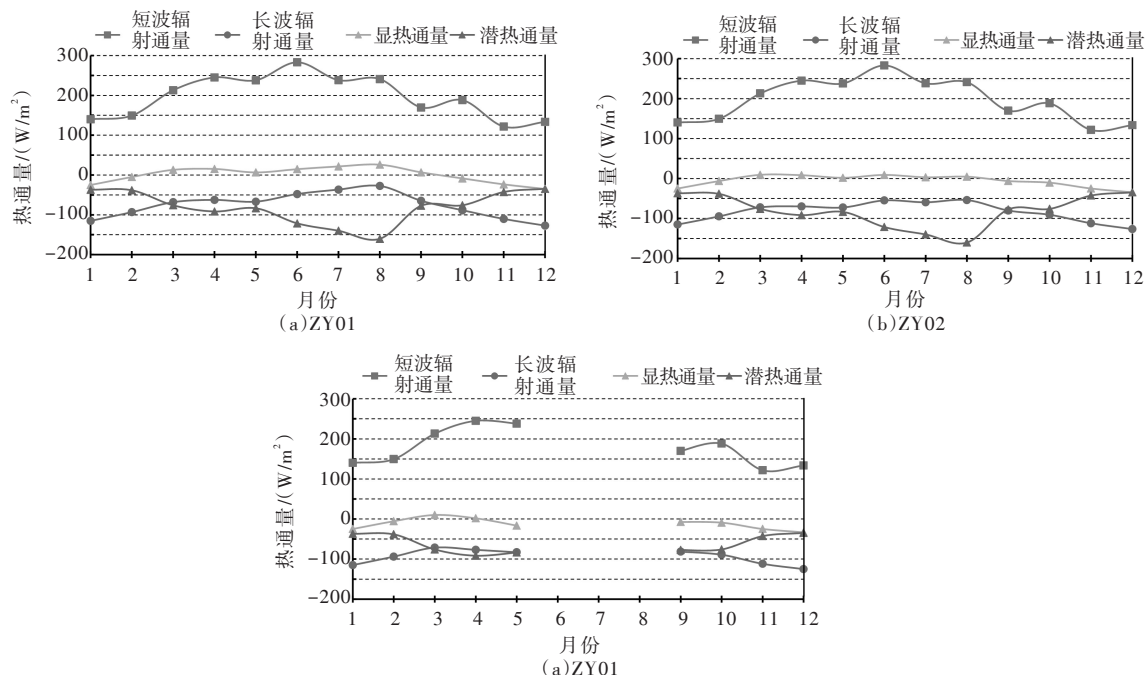


图3 各监测点年内热通量(吸热为正,放热为负)

升高(图4),水温的变化相对于气温,存在一定的滞后性^[20],表层水温从3月份开始升高。由于气温高于水温,显热通量在3月至8月均为正值,显热通量为正值,水体在吸收热量;9月至次年1月,气温逐月降低且低于表层水温,显热通量为负值。

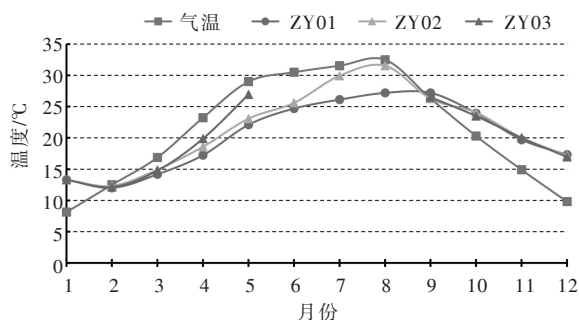


图4 气温与各监测点表层水温(0.5m)年内变化

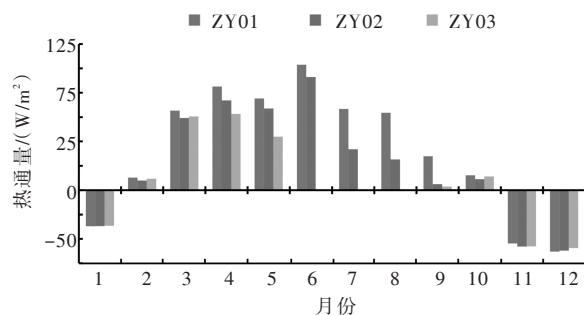


图5 各监测点年内水面净热通量

(4)潜热通量是由于水体蒸发造成的热量支出。风速、饱和水蒸气压和实际水蒸气压是影响潜热通量的3个因素,由于朱衣河长度较短,以上3个因素没有差异,因此朱衣河3个监测点月内潜热通量相同。潜热通量年内总和为 -978.2 W/m^2 ,其中夏季(6月至8月)潜热通量累计为 -421.5 W/m^2 ,占全年潜热通量的43.1%。潜热通量绝对值的最大值出现在8月,表示8月由于蒸发造成的水体热损失最多;其绝对值的最小值出现在12月,表示由于蒸发造成的水体热损失最小。

(5)水面净热通量为(1)–(4)项的和,其年内变化特征如图5所示。净热通量在2–6月逐渐增大至最大值,而7–10月则逐渐下为最小值,11–次年1月净热通量均为负值。1–2月期间,净热通量由负值变化为正值,10–11月由正值转变为负值,这主要受短波辐射和长波辐射的共同影响。2月份相较于1月份短波辐射通量增加 10 W/m^2 ,长波辐射通量降低 20 W/m^2 ;11月份相较于10月份短波辐射通量降低 67 W/m^2 ,长波辐射通量增加 20 W/m^2 。比较各监测点每月净热通量,发现ZY01在各月份净热通量中都比较大,ZY02居中,而ZY03较小。全年净热通量的累计值,ZY01为 482.43 W/m^2 ,ZY02为 310.84 W/m^2 ,由于缺少3个月的水温数据ZY03只有 73.05 W/m^2 。4–9月间水面热辐射通量月内空间变化显著,其他月份水面热辐射通量月内空间变化不明显,这主要是由于4–9月间支流水温呈现明显的空间分布状态,进而使得水面热通量也存在空间差异。

3.3 支流水体平流输运热量 水体作为热量的载体^[21], 其流入或流出对输运热量具有重要作用。根据式(9)计算各监测点平流输运热量(表1), 在1—3月, 由于水位的下降9.48 m, 支流水深减少, 平流输运的热量主要为输出状态; 3—4月, 水位略有升高, 干流水体向支流倒灌, 平流输运的热量表现为收入; 4—6月, 由于水库处于汛前消落期, 水位落差较大, 支流水体大量流入干流, 带走大量热量; 6—8月, 水位先升后降, 平流输运的热量由正值变为负值; 8—11月, 水位逐月升高, 输运热量主要表现为收入状态, 其中10—11月, 水位升高, 输运热量为负值, 主要因为干流水温比支流水温低所导致的; 11—12月, 水位下降, 支流水量减少, 输运热量为输出状态。根据平流输运热量与水位变化(图6), 计算其相关系数ZY01、ZY02和ZY03分别为0.77、0.92和0.88, 因此水位变化对平流输运热量具有显著作用。在1—12月期间, ZY01和ZY03分别有10个月和5个月输运热量超过热含量变化量的50%, 其中ZY03仅有7个月有相应数据, 而ZY02输运热量与热含量变化量最小比值为61%, 因此, 平流输运热量是影响热含量变化的主导因素。

表1 各监测点平流输运热量年内变化 (单位: 10^8 J/m^2)

监测点	1—2月	2—3月	3—4月	4—5月	5—6月	6—7月	7—8月	8—9月	9—10月	10—11月	11—12月
ZY01	-6.52	0.63	5.14	-2.1	-9.95	8.44	-2.83	11.4	3.46	-4.13	-5.83
ZY02	-5.3	-0.81	3.48	-5.48	-7.8	4.41	-2.49	14.02	4.11	-1.38	-4.27
ZY03	-4.23	-1.43	1.04	-7.17	-	-	-	-	4.76	0.12	-2.75

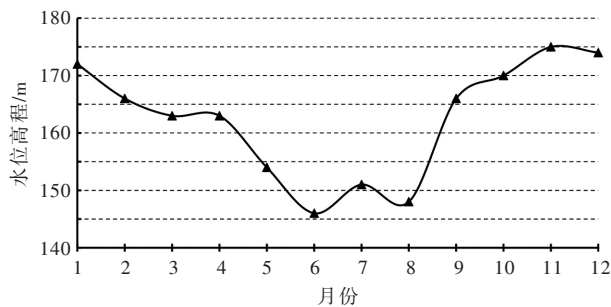


图6 研究区2013年水位变化

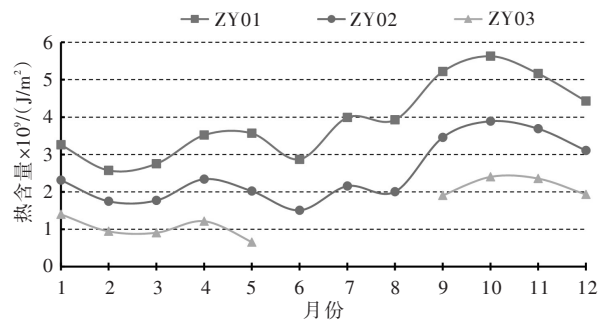


图7 各监测点年内热含量

3.4 支流水体热含量 水体的水温、密度和深度共同决定了水体的热含量。朱衣河水体热含量如图7所示。热含量变化主要由水面净热交换量和平流输运热量所影响^[16](与河底热交换暂不考虑)。在1—2月期间, 3个监测点输运热量均表现为输出状态, 且该时期水面净热量同样为热量输出, 因此2月热含量比1月有所降低; 在3月期间, ZY01输运热量由输出转变为热输入, ZY02和ZY03依然为热输出, 此阶段水面净热量均为热收入, 由于3个监测点输运热量不同, ZY01和ZY02热含量略微升高, 而ZY03热含量略微下降; 4月和7月期间, 所有监测点的输运热量和水面净热量均表现为热收入, 因此该时期热含量均升高; 4—6月由于热量输出分别为 $5.48 \times 10^8 \text{ J/m}^2$ 和 $7.8 \times 10^8 \text{ J/m}^2$, 而水面净热量收入为 $2.28 \times 10^8 \text{ J/m}^2$ 和 $2.68 \times 10^8 \text{ J/m}^2$, 该时期, 热量输出是热量收入的2~3倍, 所以热含量显著降低; 8月期间, 热量输出占主导位置, 因此热含量相对7月份有所降低; 在9月份, 由于ZY01和ZY02热量输入分别为 $11.4 \times 10^8 \text{ J/m}^2$ 和 $14.02 \times 10^8 \text{ J/m}^2$, 使得热含量有较大的增幅; 10月, 3个监测点的热输入量为 $4 \times 10^8 \text{ J/m}^2$ 左右, 而水面净热量为 $0.4 \times 10^8 \text{ J/m}^2$ 左右, 因此热含量有小幅增加; 11月和12月, 热含量受到热量运输和水面净热量输出热量的影响, 使其逐月降低。

4 结论

本文在对三峡水库支流库湾水温观测的基础上, 进行了热收支计算, 研究了干支流相互作用下支流水体的热力学状况: (1)由于年内各月支流库湾水温结构呈现空间变化, 因此造成水面净热通量呈现从干支流交汇处至上游沿程变小的空间分布规律。(2)通过对平流输运热量的计算, 1—6月, 水

库水位呈下降趋势,平流输运的热量以输出为主,而7月到11月,水位呈上升趋势,平流输运热量以输入为主,结果发现,平流输运热量的收支与水位升降有较好的相关性。(3)通过分析水面净热量和平流输运热量两个因素对热含量变化的影响,研究发现,平流输运热量是造成热含量变化的主导因素。(4)三峡库区的水位变化会影响支流水体热收支,从而改变支流水温结构,造成干、支流水体在密度差的作用下,支流水体天然的水循环和物质循环模式发生改变,最终导致支流库湾水质和生态环境发生改变。因此三峡库区支流库湾水生态的保护与修复,在注重区域环境保护的同时,还需要重视三峡水位调蓄对支流库湾的影响,以便达到治理和改善水质的目的。

参 考 文 献:

- [1] 王伟.太湖能量收支及其对气候变化的响应[D].南京:南京信息工程大学,2014.
- [2] 李嘉,梁瑞峰,邓云,等.水库水温分层的流场分析[J].天津大学学报:自然科学与工程技术版,2014,47(5):395-400.
- [3] LIU Baozhong, YANG Daqing, YE Baisheng, et al. Long-term open-water season stream temperature variations and changes over Lena River Basin in Siberia[J]. Global and Planetary Change, 2005, 48(1/3): 96-111.
- [4] BALISTRERI L S, TEMPEL R N, STILLINGS L L, et al. Modeling spatial and temporal variations in temperature and salinity during stratification and overturn in Dexter Pit Lake, Tuscarora, Nevada, USA[J]. Applied Geochemistry, 2006, 21(7): 1184-1203.
- [5] LIU Wentao, BOCANIOV S A, LAMB K G, et al. Three dimensional modeling of the effects of changes in meteorological forcing on the thermal structure of Lake Erie[J]. Journal of Great Lakes Research, 2014, 40(4): 827-840.
- [6] 纪道斌,刘德富,杨正健,等.三峡水库香溪河库湾水动力特性分析[J].中国科学:物理学 力学 天文学,2010,40(1):101-112.
- [7] 罗光富.支流河口水动力作用对三峡库区干支流营养盐交换的影响[D].上海:华东师范大学,2014.
- [8] 杨正健,刘德富,马骏,等.三峡水库香溪河库湾特殊水温分层对水华的影响[J].武汉大学学报:工学版,2012,45(1):1-9,15.
- [9] 李双.三峡水库库中地区典型干、支流水体 $p(\text{CO}_2)$ 的时空分布及影响因素研究[D].上海:上海大学,2014.
- [10] 郭劲松,贺阳,付川,等.三峡库区腹心地带消落区土壤氮磷含量调查[J].长江流域资源与环境,2010,19(3):311-317.
- [11] 吴娅,王雨春,胡明明,等.三峡库区典型支流浮游细菌的生态分布及其影响因素[J].生态学杂志,2015,34(4):1060-1065.
- [12] 周子然,邓兵,王雨春,等.三峡库区干流水体交换特征初步研究——以朱衣河为例[J].人民长江,2015,46(22):1-6.
- [13] BOWEN I S. The ratio of heat losses by conduction and by evaporation from any water surface[J]. Physical review, 1926, 27: 779-787.
- [14] BOLTON D. The Computation of Equivalent Potential Temperature[J]. Monthly Weather Review, 1980, 108(7): 1046-1053.
- [15] SWINBANK W C. Long-wave radiation from clear skies[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1963, 89: 339-348.
- [16] 史得道,孙即霖.中国东部近海热含量季节变化及影响因素分析[J].中国海洋大学学报:自然科学版,2009,39:274-280.
- [17] 余真真,王玲玲,戴会超,等.三峡水库香溪河库湾水温分布特性研究[J].长江流域资源与环境,2011,20(1):84-89.
- [18] 谢涛.三峡水库调度对香溪河库湾水温特性的影响研究[D].宜昌:三峡大学,2014.
- [19] 张佳磊.三峡库区大宁河富营养化和水华研究[D].上海:华东师范大学,2011.
- [20] 姚维科,崔保山,董世魁,等.水电工程干扰下澜沧江典型段的水温时空特征[J].环境科学学报,2006,26(6):1031-1037.
- [21] 商少凌,张彩云,洪华生.气候-海洋变动的生态响应研究进展[J].海洋学研究,2005,23(3):14-22.

(下转第147页)

- [9] SL191-2008 水工混凝土结构设计规范[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2008.
- [10] CECS 203-2006, 自密实混凝土应用技术规程[S]. 北京: 中国计划出版社, 2006.
- [11] 蒋利学, 张誉. 混凝土碳化深度的计算与试验研究[J]. 混凝土, 1996(4): 12-17.

Comparative experimental investigation on the properties of large rock-filled concrete test blocks

QIN Genquan^{1, 2}, LIANG Bijue^{1, 2}, JIANG Shuihua³

(1. Jiangxi Provincial Water Conservancy Planning Design and Research Institute, Nanchang 330029, China;

2. Jiangxi Provincial Water Conservancy Engineering Structure Technology Research Center, Nanchang 330029, China;

3. School of Civil Engineering and Architecture, Nanchang University, Nanchang 330031, China)

Abstract: Rock-filled concrete is a new technology for mass concrete that is developed on the basis of the self-compacting concrete. However, there exist certain uncertainties in the stone sources of rock-fill concrete. Pouring test in the engineering field to investigate the properties of large rock-filled concrete is an important prerequisite for the successful application of this technology. This paper aims to perform a comparative experimental investigation on the properties of large rock-filled concrete test blocks, which are poured by using excavated rocks and local collected pebbles at Wuxikou hydro-junction project site as rock-fills, respectively. The properties of large rock-filled concrete test blocks are studied and compared systematically through the concrete indexes, including compressive strength, permeability coefficient, elastic modulus and carbonization depth of the test block. The superiority and feasibility of taking excavated rocks as the stone sources of rock-fills are verified.

Keywords: Rock-filled concrete; Wuxikou hydro-junction project; large test block; Concrete indexes; Internal temperature rise

(责任编辑: 王冰伟)

(上接第 140 页)

Heat budget of tributary bay in Three Gorges Reservoir: a case study of Zhuyi River

ZHAO Xiaojie¹, CHENG Yao^{1, 2}, HUANG Weijian³, WANG Yuchun², DANG Chenghua¹

(1. Hebei University of Engineering, Handan 056038, China;

2. Department of Water Environment, IWH, Beijing 100038, China; 3. Hebei University of Engineering, Handan 056038, China)

Abstract: In order to better understand the heat budget of tributary bay in reservoir, spatial-temporal distribution of water temperature structure, water surface heat fluxes and heat transports by advection are analyzed in this paper, based on the measured water temperature, meteorological data, and shortwave radiation data which are downloaded from National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). Results show that (1) water surface temperature of Zhuyi Bay ranges from 12.0 °C to 31.6 °C, and bottom temperature ranges from 11.8 °C to 27.8 °C. (2) Influenced by the interaction between the main stream and the tributary, there is temperature difference in water surface along the tributary bay, and the net heat flux at the confluence of the main stream and tributary ranges from -63.02 W/m² to 128.81 W/m², in the middle reaches of tributary it ranges from -62.01 W/m² to 116.14 W/m², and in the upstream of tributary bay it ranges from -59.31 W/m² to 78.04 W/m². (3) The heat transports by advection correlate with the fluctuation of water level. (4) The heat transports by advection is the main factor of the changes of water heat content in the tributary.

Keywords: Three Gorges Reservoir; tributary; water temperature structure; net heat flux; heat transports by advection

(责任编辑: 杨虹)