

东江三大水库联合调度下惠州河段水温变化响应研究

胡培^{1,2}, 陈晓宏^{1,2}

(1.中山大学水资源与环境研究中心,广东 广州 510275;

2.华南地区水循环和水安全广东省普通高校重点实验室,广东 广州 510275)

摘要:以东江流域控制站点博罗站为代表,通过构建一维水流水温模型,计算分析了东江三大水库不同出库流量对下游惠州河段水温的影响,探讨了该地区基于水温的鱼类生态调度目标,提出了东江三大水库3月份的水库联合生态调度方案。研究表明,在东江三大水库出库流量比例不变的情况下,博罗站3月份水温随着流量的增大而增大,但变化并不明显;在博罗站流量不变的情况下,东江三大水库出库流量的变化对博罗站水温有较大的影响,其中以白盆珠水库的影响最为显著。结合前人的研究成果认为,在博罗站流量 $320\text{m}^3/\text{s}$ 的情况下,保持白盆珠水库3月份最小出库流量为 $30\text{m}^3/\text{s}$,有利于东江下游惠州河段的生态条件改善。

关键词:水温;水库联合调度;生态调度;东江下游

中图分类号:TV 697.12

文献标识码:A

文章编号:1000-0852(2013)01-0038-06

随着各流域大批水库电站的建成和投入使用,中国已形成了一批巨型水库群,其调度模式从单一水库的管理运营发展到多水库的联合调控^[1-2],长江、黄河、珠江等大流域水库群联调研究工作已逐渐开展^[3-4]。东江流域建有枫树坝、新丰江和白盆珠三大水库,将建设具有防洪、供水、发电功能的三大水库联合优化调度体系,水库联调是东江流域水库调度的发展重点之一。

我国水库的调度内容目前主要以兴利调度和防洪调度为主,在发挥水库社会经济功能方面起着巨大的作用^[5],但是,该调度方式很大程度上忽略了河流生态的需求,对河流生态系统造成了一定的胁迫效应^[6],容易造成河流生境破碎、生态系统失稳等生态环境问题^[7-8],因此,建立蕴含生态调度的水库运行管理新理念,对于缓解河流生态环境日趋恶化的局面是非常必要的。对水库生态调度的研究实践方面,国外研究时间早,研究水平较为成熟,Karr^[9]、Saito^[10]和 Ligon^[11]等人均有相应的研究成果,美国和澳大利亚等西方发达国家多以进入实践性研究阶段^[12-13];而国内的相关研究起步比较晚,目前仍停留在理论探讨以及初步的尝试阶

段^[14]。“十一五”以来,东江流域开展了东江水系生态系统健康监测、维持技术研究、应用示范等生态调度课题的研究,随着生态环境问题的日益凸显,在未来一定时期内,水库生态调度将逐渐受到重视^[15]。

水库生态调度主要针对生态流量、流速、水质、盐度、水温、泥沙等生境因子进行调节调度^[8]。水温是水生境的重要因子之一,水的物理、化学性质以及水生生物特别是鱼类对水温都比较敏感^[8,16],水温的变化,不仅影响鱼类的摄食、活动^[17-18],而且影响鱼类的产卵、发育^[19]。本文以河流水温作为生态调度目标,研究东江流域三大水库(枫树坝水库、新丰江水库、白盆珠水库)3月份的不同调度方案对控制站点博罗站水温的影响,结合该地区鱼类的特性及适宜温度,提出合适的生态调度方案,为东江流域水库调度提供依据。

1 研究区概况

1.1 东江流域

东江为珠江流域的三大水系之一,发源于寻邬县桎髻钵山,干流全长约562km,主要支流有新丰江、秋

收稿日期:2011-12-09

基金项目:国家自然科学基金重点项目(50839005);国家“十一五”水专项东江项目:东江水系生态系统健康监测、维持技术研究与应用示范(2008ZX07211-009);广东省科技厅项目(2010B050300010);广东省水利科技创新项目(2009-39)

作者简介:胡培(1987-),男,广东汕头人,硕士研究生,主要从事水文水资源方面研究。E-mail: 594897582@qq.com

通讯作者:陈晓宏(1963-),男,湖北公安人,教授、博导,从事水文水环境研究工作。E-mail: eesxh@mail.sysu.edu.cn

香江、西枝江和增江等。流域总面积 35 340km²。东江流域地理位置示意图如图 1 所示^[20]。

1.2 工程概况

东江流域中上游已建成的大型水库有三座,分别为位于支流新丰江的新丰江水库、位于贝岭水和寻邬水汇合口下游枫树坝水库和位于支流西枝江的白盆珠水库,三大水库总的兴利库容为 82.3×10⁸m³,控制面积 11 736km²。

东江干流已建和在建 12 座梯级电站,分别为龙潭、稔坑、罗营口、苏雷坝、枕头寨、柳城、蓝口、木京、黄田、风光、沥口和剑潭等,梯级电站主要以发电为主,按照“来水多少放多少”的原则进行调度,不能进行拦蓄调节。各梯级位置示意图如图 1 所示。



图1 东江流域示意图
Fig.1 The Dongjiang river basin

1.3 控制站点

东江流域干流上主要有龙川、河源、岭下和博罗 4 个水文站(见图 1)。历年东江的水量调配均以近网河区的博罗站作为控制站,博罗水文站的径流情势代表了整个东江流域水量调控的效果^[21],其生态情况能够较好反应东江下游惠州河段的生态变化,因此,本文选取博罗站作为本次生态调度研究的控制站点。

1.4 鱼类状况

鱼类是东江流域水生态系统稳定的关键物种^[20],在东江下游惠州河段,关键鱼类包括鲤鱼、鲢鱼、草鱼、赤眼鲮、鲫鱼等^[20,22-23],根据相应的研究成果,可得该地

区关键鱼类的水温条件需求^[20],如表 1 所示。根据叶富良等对东江鱼类的研究结果,随着水温的升高,鲤鱼等关键鱼类在 3 月份开始产卵,其生殖季节主要在 3~7 月^[24],因此,本文选取 3 月份作为东江生态调度研究的时间点。

表1 东江下游惠州河段关键鱼类水温条件需求
Table1 Water temperature demand of key fish in the Huizhou reach of the Dongjiang River

鱼类名称	生存水温/°C	适宜水温/°C	孵化水温/°C
鲤鱼	2~32	25~32	18~20
鲢鱼	5~34	23~32	20~23
草鱼	0~38	15~27	18~22
赤眼鲮	6~31	18~25	19.9~24.3
鲫鱼	0~32	16~25	18~19

2 资料来源

本文采用资料为东江流域三大水库建成后(新丰江 1960 年,枫树坝 1973 年,白盆珠 1984 年)的 2000~2009 年的水文、水温和气象资料。

其中,利用新丰江、枫树坝和白盆珠三大水库的出库流量,大盛(东江北干流)、麻涌(麻涌河)、漳澎(淡水河)、泗盛围(东莞水道)等模型下边界站点的潮位过程,龙川、岭下、博罗等控制站点的径流系列,建立东江流域一维水流数学模型,模拟水库各种调度方案下流域的水流变化情况。

利用上边界三大水库坝下断面、下边界和干流控制站点的水温资料以及东江流域范围内的气温、日照、水汽压、风速、太阳辐射等气象资料,结合一维水流数学模型,建立东江流域一维水温模型,模拟水库各种调度方案下博罗站的水温变化情况。

3 模型构建

本文采用圣维南方程组为描述河道的水流运动的基本方程,对梯级电站采用水流过坝和水轮机组泄流的处理,再耦合一维水温迁移转化方程,构建东江流域一维水流水温模型。其中,模型上游边界取为东江三大水库白盆珠水库坝下(西枝江)、枫树坝水库坝下(东江干流)、新丰江水库坝下(新丰江),下游边界取为大盛(东江北干流)、麻涌(麻涌河)、漳澎(淡水河)、泗盛围(东莞水道),如图 2 所示,对相应河道进行概化,其余河道、区间来水、区间取水等作为旁侧入流处理,流场和温度场采用相同的模拟范围。模型计算时间步长为 10min,空间步长为 500~2 500m 不等。

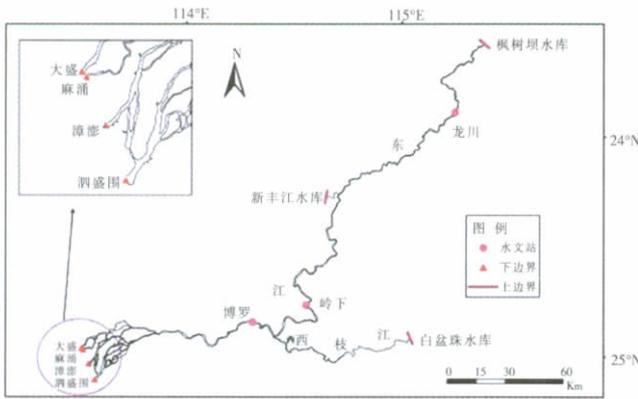


图2 东江水流水温模型河道概化示意图

Fig.2 The Dongjiang river in the flow and water temperature model

3.1 水流控制方程

一维潮流数学模型采用圣维南方程组

$$\text{连续方程: } \frac{\partial z}{\partial t} + \frac{1}{B} \frac{\partial Q}{\partial x} = \frac{q}{B} \quad (1)$$

动量方程:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + (gA - \frac{BQ^2}{A^2}) \frac{\partial z}{\partial t} + \frac{2Q}{A} \frac{\partial Q}{\partial x} = \frac{Q^2}{A^2} \frac{\partial A}{\partial x} \Big|_z - \frac{gQ|Q|}{Ac^2R} \quad (2)$$

式中: z 为断面水位; Q 为流量; A 为河道过水面积; g 为重力加速度; B 为过水宽度; q 为旁侧入流流量; R 为水力半径; c 为谢才系数; x, t 是位置和时间坐标。

采用四点加权 Preissmann 隐式差分格式离散式(1)和式(2),用追赶法求解。

3.2 节点连接方程

$$\text{流量衔接条件: } \sum Q_i = \frac{\partial \Omega}{\partial t} \quad (3)$$

$$\text{动力衔接条件: } Z_1 + \frac{u_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{u_2^2}{2g} \quad (4)$$

$$\text{汉点连接条件: } Z_1 = Z_2 = \dots = \bar{Z} \quad (5)$$

式中: i 为节点中各节点断面的编号; Ω 为节点的蓄水量; Z 为节点断面的水位。

由式(3)、式(4)和式(5)以及河网边界条件,可以得到节点方程组,采用迭代法求解。

3.3 梯级电站过流处理

东江干流梯级电站建设后,河道水力特性发生突变,对梯级电站水坝堰、闸过流进行如下处理:

关闸时,由水轮机组发电下泄流量:

$$Q = \frac{N}{9.81\eta(Z_i - Z_{i+1} - \alpha Q^m - kQ^2)} \quad (6)$$

开闸时,由梯级水库闸门下泄流量:

$$Q = \sigma_s \mu e b \sqrt{2g(Z_i - Z_{i+1})} \quad (7)$$

式中: N 为水轮机组出力; η 为水轮机组效率系数; α 、 m 、 k 为系数,由梯级电站尾水处水深流量关系曲线的特征决定; e 为闸门开度; b 为闸孔宽度; μ 为出流流量系数; Z_i 、 Z_{i+1} 分别为闸门前后水位; σ_s 为淹没系数,对自由出流, $\sigma_s = 1$ 。

3.4 水温迁移转化方程

一维水温迁移转化的基本方程为:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} = E \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + S_T \quad (8)$$

式中: t 为时间; x 为距离; T 为 t 时 x 处的水温; u 为河段流速; E 为热量在水中的扩散、离散系数; S_T 为微元河段关于水温的源漏项。

一般情况下,热量在河流中的纵向扩散、离散作用远小于移流作用,因此,忽略式(8)右端第一项,利用特征线法进行求解,结合 3.1 和 3.2 计算所得的河流水流结果,以及气象条件、初始条件、边界条件,即可模拟河流水温的时空变化。

3.5 模型验证

3.5.1 水流模型验证

本论文主要针对东江惠州河段进行分析,因此,模型以边界的径流潮位资料输入,对惠州河段博罗站进行率定验证,利用博罗站 2009 年 1 月 1 日~12 月 31 日的流量数据进行模型率定,利用 2010 年 1 月 1 日~12 月 31 日的流量数据对模型进行验证。图 3 分别为博罗站逐日、各月代表日(与水温模型验证时间对应)和 3 月份(本次模拟的月份)的流量验证结果。验证结果显示,博罗的逐日、逐月和 3 月份流量过程线拟合度 R^2 分别是 0.913、0.878 和 0.985,模拟结果较好。

3.5.2 水温模型验证

模型以边界的水流水温资料输入,通过东江下游惠州河段的控制站点博罗站进行水温模型的率定验证,根据实际的资料情况,选取与水流模型相对应的各月时间点的水温数据对模型进行验证,见图 4。验证结果显示,博罗的水温过程线拟合度 R^2 为 0.909,模拟结果较好。

4 计算结果及分析

河道流量的变化,影响水体在河道传播的时间,继而改变水体与大气热传递的时间,使河流水温发生变化;同时,流量变化导致河流水深改变,影响上下层水温的混合速率,对河流水温也会造成一定的影响。另一

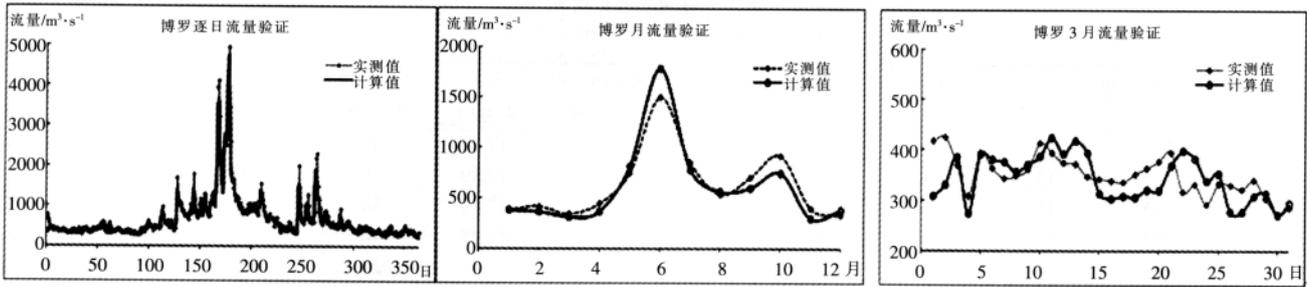


图3 水流模型验证结果
Fig.3 Verification of flow

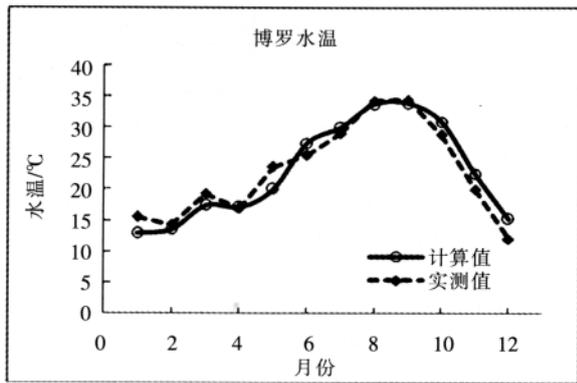


图4 水温模型验证结果
Fig.4 Verification of water temperature

方面,东江流域由三大水库进行联合调度,而各水库纬度差别较大,其坝下水温并不相同,若水库改变下泄流量,会导致河流汇合处混合水温的变化,继而影响下游的河流水温。

为研究以上两种情况对水温的影响,通过本论文建立的水流水温模型,计算3月份不同联调方案下,博罗控制断面的水温变化情况。

4.1 不同流量对水温的影响

以2010年东江流域枯水期水库调度方案为基准,枫树坝、新丰江、白盆珠出库流量占三大水库总出库流

量比例分别为29%、59%、12%,在保持比例不变的情况下,统一调整三大水库的出库流量(情景一),计算不同流量下博罗断面的水温,结果如表2所示。可以发现,东江流域3月份,在气象条件和三大水库出库流量比例不变的情况下,博罗断面水温随着河道流量的增大而增大,但是其变化幅度相对较小。

4.2 不同联调方案对水温的影响

根据东江流域三大水库2000~2009年的月平均流量,枫树坝水库3月份平均流量为20~140m³/s,新丰江3月份平均流量为120~240m³/s,白盆珠3月份平均流量为15~55m³/s。根据东江流域水资源分配方案研究成果,为保证下游生活、生产、航运等的需求,必须保证博罗断面流量不小于320m³/s。因此,以博罗断面320m³/s为控制目标,以三大水库3月份平均出库流量为变化范围,制定不同的水库调度方案(情景二),计算模拟该情景下博罗断面的水温。结果如表3所示。

根据模拟计算的结果,可以发现,在保证博罗站最低流量的情况下,东江三大水库出库流量的变化会对博罗断面的水温造成不同程度的影响,其中,白盆珠水库的影响最为敏感,在其水量调度范围内,可造成博罗断面水温大约1°C的变化范围。这主要是由于东江干流为南北走向,水温较低,而白盆珠水库和西枝江纬度较低,距离博罗站位置较近,且为东西走向,其汇入东江干流的水体水温较高,因此,在下游博罗断面流量不变的情况下,增大西枝江汇入东江干流流量的比例,能够一定程度上提高博罗断面水体水温。

结合1.4所描述的东江下游惠州河段的鱼类状况,该地区3月份几种关键鱼类开始产卵,由表1以及近年来博罗站3月份的水温资料可得,当最低水温大于18°C时,比较有利于鱼类的生存发展和鱼卵的孵化。因此,为保障东江下游惠州河段3月份的水温生态调度目标(水温大于18°C),根据表3的模拟结果,

表2 情景一模拟结果

Table2 The simulated results of Scene 1

水库联调方案(出库流量/m³·s⁻¹)			博罗流量 /m³·s⁻¹	博罗水温 /°C
枫树坝	新丰江	白盆珠		
40	80	16	286	17.71
45	90	18	303	17.74
50	100	20	320	17.77
55	110	22	337	17.79
60	120	24	354	17.82
65	130	26	371	17.85
70	140	28	388	17.89
75	150	30	405	17.92
80	160	32	422	17.94
85	170	34	439	17.96

表3 情景二模拟结果
Table3 The simulated results of Scene 2

水库出库流量/ $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$			博罗	水库出库流量/水库出库流量/ $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$			博罗	水库出库流量/水库出库流量/ $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$			博罗
枫树坝	新丰江	白盆珠	水温/ $^{\circ}\text{C}$	枫树坝	新丰江	白盆珠	水温/ $^{\circ}\text{C}$	枫树坝	新丰江	白盆珠	水温/ $^{\circ}\text{C}$
20	135	15	17.64	20	125	25	17.88	40	95	35	18.13
30	125	15	17.64	30	115	25	17.89	20	110	40	18.25
40	115	15	17.64	40	105	25	17.89	30	100	40	18.25
50	105	15	17.65	50	95	25	17.89	40	90	40	18.26
60	95	15	17.65	20	120	30	18.01	20	105	45	18.37
20	130	20	17.75	30	110	30	18.01	30	95	45	18.38
30	120	20	17.76	40	100	30	18.01	20	100	50	18.50
40	110	20	17.77	50	90	30	18.01	30	90	50	18.50
50	100	20	17.77	20	115	35	18.13	20	95	55	18.62
60	90	20	17.76	30	105	35	18.13	25	90	55	18.62

在保证博罗站流量 $320\text{m}^3/\text{s}$ 的情况下, 设置枫树坝和新丰江出库流量和为 $140\text{m}^3/\text{s}$, 白盆珠水库出库流量为 $30\text{m}^3/\text{s}$ 是比较合适的, 在此基础上, 可以适当提高白盆珠水库出库流量比例。

5 结论

(1) 本文将水库联合调度和生态调度进行结合, 探索以水温为目标的水库联合生态调度方案, 为东江水库的联合多目标调度提供依据。

(2) 在三大水库出库流量比例不变的情况下, 博罗站3月份水温随着流量的增大而增大。根据模拟结果, 博罗流量从 $286\text{m}^3/\text{s}$ 增大到 $439\text{m}^3/\text{s}$, 水温只增大 0.25°C , 变化幅度比较小。

(3) 在博罗站3月份流量控制在 $320\text{m}^3/\text{s}$ 的情况下, 各水库出库流量所占比例的变化对博罗站水温的影响程度并不相同。白盆珠水库出库流量变化对博罗站水温变化比较敏感, 其出库流量从 $15\text{m}^3/\text{s}$ 增大到 $55\text{m}^3/\text{s}$, 博罗水温增大了约 1°C 。

(4) 根据前人的研究成果^[20,22-24], 3月份东江下游惠州河段的最低水温大于 18°C 时, 比较有利于以鱼类为代表的河流生态发展, 因此, 保持枫树坝和新丰江出库流量和为 $140\text{m}^3/\text{s}$, 白盆珠水库出库流量为 $30\text{m}^3/\text{s}$, 或适当提高白盆珠水库出库流量比例, 可以改善东江下游惠州河段的生境质量。

(5) 本文以流域控制站点博罗站为研究目标, 研究重点位于东江下游惠州河段, 未来的研究可以结合东江流域上的其他控制站点, 探索整个东江流域的生态调度方案。

参考文献:

[1] 郭生练, 陈炯宏, 刘攀, 等. 水库群联合优化调度研究进展与展望[J]. 水科学进展, 2010, 21 (4): 496-503. (GUO Shenglian, CHEN

Jionghong, LIU Pan, et al. State-of-the-art review of joint operation for multi-reservoir systems [J]. Advances in Water Science, 2010, 21(4): 496-503. (in Chinese))

[2] 刘冀, 王丽学. 水库群防洪联合调度研究现状与展望[J]. 水电能源科学, 2004, 22 (2): 30-32. (LIU Ji, WANG Lixue. Status quo and prospect of flood control operation of multi-reservoir [J]. Water Resources and Power, 2004, 22(2): 30-32. (in Chinese))

[3] 陈进, 黄薇. 长江水库群联合调度可能性分析[J]. 长江科学院学报, 2008, 25(2): 1-5. (CHEN Jin, HUANG Wei. Possibility analysis of united regulation of reservoir groups in Changjiang river basin [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2008, 25(2): 1-5. (in Chinese))

[4] 李国英. 基于水库群联合调度和人工扰动的黄河调水调沙[J]. 水利学报, 2006, 37 (12): 1439-1446. (LI Guoying. Regulation of water and sediment for the Yellow river based on joint operation of reservoirs and artificial intervention [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006, 37(12): 1439-1446. (in Chinese))

[5] 徐杨, 常福宣, 陈进, 等. 水库生态调度研究综述[J]. 长江科学院院报, 2008, 25(6): 33-37. (XU Yang, CHANG Fuxuan, CHEN Jin, et al. Review of research on ecological operation of reservoir [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2008, 25(6): 33-37 (in Chinese))

[6] 董哲仁, 孙东亚, 赵进勇. 水库多目标生态调度 [J]. 水利水电技术, 2007, 38 (1): 28-32. (DONG Zheren, SUN Dongya, ZHAO Jinyong. Multi-objective ecological operation of reservoirs [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2007, 38(1): 28-32. (in Chinese))

[7] 黄云燕. 水库生态调度方法研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2008. (HUANG Yunyan. Studies on Ecological Operation of Reservoirs Methods [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2008. (in Chinese))

[8] 王波. 梯级水库对河流生境因子的累积影响研究[D]. 武汉: 长江科学院, 2008. (WANG Bo. Cumulative Impact Study of Cascade Reservoir on River Ecological Factors [D]. Wuhan: Changjiang River Scientific Research Institute, 2008. (in Chinese))

[9] Karr J R. Assessment of biotic integrity using fish communities [J]. Fisheries, 1981, 6: 21-27.

- [10] Saito L, Johnson B M, Bartholow J, et al. Assessing ecosystem effects of reservoir operations using food web-energy transfer and water quality models[J]. *Ecosystems*, 2001, 4: 105-125.
- [11] Ligon F E, Dietrich W E, Trush W J. Downstream ecological effects of dams[J]. *Bioscience*, 1995, 45: 183-192.
- [12] Riechter B D, Mathews R, Harrison D L. Eco logically sustainable water management: managing river flows for ecological integrity [J]. *Ecological Applications*, 2003, 13: 206-224.
- [13] Jager H I and Smith B T. Sustainable reservoir operation: can we generate hydropower and preserve ecosystem value[J]. *River Research and Applications*, 2008, 24: 340-352.
- [14] 王远坤,夏自强,王桂华. 水库调度的新阶段——生态调度[J]. *水文*, 2008, 28 (1):7-9. (WANG Yuankun, XIA Ziqiang, WANG Guihua. A new phase of reservoir regulation: ecological operation [J]. *Journal of China Hydrology*, 2008, 28(1): 7-9.(in Chinese))
- [15] 袁超,陈永柏. 三峡水库生态调度的适应性管理研究[J]. *长江流域资源与环境*, 2011, 20(3):269-275. (YUAN Chao, CHEN Yongbo. Research of adaptive management for ecological operation of the Three-gorges dam [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2011, 20(3): 269-275.(in Chinese))
- [16] 陈秀铜. 改进低温下泄水不利影响的水库生态调度方法及影响研究[D]. 武汉:武汉大学, 2010. (CHEN Xiutong. Study on Method and Influence of Reservoir Ecological Operation Improved the Adverse Effects of Low Temperature Discharge Water [D]. Wuhan: Wuhan University, 2010.(in Chinese))
- [17] Elliott J M. The effects of temperature and ration size on the growth and energetics of salmonids in captivity[J]. *Comp Biochem Physiol*, 1982, 73B: 81- 91.
- [18] Hawkins A D, Soofiani N M, Smith G W. Growth and feeding of juvenile cod, *Gadus morhua* L[J]. *J Cons Perm Int Explor M er*, 1985, 42: 11-32.
- [19] 叶星,潘德博,许淑英,等. 水温和盐度对广东鲂胚胎发育的影响 [J]. *水产学报*, 1998, 22 (4):322-327. (YE Xing, PAN Debo, XU Shuying, et al. Effects of temperature and salinity on embryonic development of *Megalobrama hoffmanni* [J]. *Journal of Fisheries of China*, 1998, 22(4): 322-327.(in Chinese))
- [20] 许景峰. 河库化对河流生境的影响研究——以东江干流为例[D]. 广州: 中山大学, 2011. (XU Jingfeng. Research on the Impact of Cascade Reservoirs Development on River Habitat in Dongjiang Main Stream [D]. Guangzhou: Sun Yat-sen University, 2011.(in Chinese))
- [21] 朱淑兰,陈晓宏,何玲. 东江流域三大水库枯季径流调节效果评价 [J]. *广东水利水电*, 2009:9-11. (ZHU Shulan, CHEN Xiaohong, He Ling. Evaluation about flow adjustment functions of the three large reservoirs of Dongjiang river basin in dry season [J]. *Guangdong Water Resources and Hydropower*, 2009:9-11.(in Chinese))
- [22] 刘毅,林小涛,孙军,等. 东江下游惠州河段鱼类群落组成变化特征 [J]. *动物学杂志*, 2011, 46 (2):1-11. (LIU Yi, LIN Xiaotao, SUN Jun, et al. Fish community changes in Huizhou segment of Dongjiang river [J]. *Chinese Journal of Zoology*, 2011, 46 (2) :1-11.(in Chinese))
- [23] 叶富良,杨萍,宋蓓玲. 东江鱼类区系研究[J]. *湛江水产学院学报*, 1991, 11 (2):1-7. (YE Fuliang, YANG Ping, SONG Peilin. The fish fauna of the Dongjiang river [J]. *Journal of Zhanjiang Ocean University*, 1991, 11(2) :1-7.(in Chinese))
- [24] 叶富良, 陈军. 东江鲤鱼种群动态及其最大持续渔获量的研究[J]. *水生生物学报*, 1986, 10 (2):109-120. (YE Fuliang; CHEN Jun. Study on the population dynamics of carp (*Cyprinus carpio* L.) in the Dongjiang river with reference to the problem of its maximum sustained yield [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 1986, 10(2):109-120.(in Chinese))

Research on Joint Ecological Operation of Reservoirs Based on Water Temperature: A Case Study in Huizhou Reach of Dongjiang River

HU Pei^{1,2}, CHEN Xiaohong^{1,2}

(1.Center for Water Resources and Environment, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China; 2. Key Laboratory of Water Cycle and Water Security in Southern China of Guangdong High Education Institute, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China)

Abstract: With the Boluo Station of the Dongjiang River Basin as a case study, the influence of water temperature in the Huizhou Reach under different flow releasing conditions of the three large reservoirs was analyzed, the ecological operation goals based on water temperature were discussed, and the joint ecological operation scheme of the three large reservoirs in March was proposed, by using 1D flow and water temperature model. The results show that under the same proportion of outflow among three large reservoirs, the water temperature increases at the Boluo Station in March when the flow increases, but changes little; Under the same flow at Boluo station, the different outflow of three large reservoirs, especially Baipenzhu, have great effects on the water temperature in the Huizhou Reach. Combined with former research results, in condition of keeping the flow the of Boluo Station at 320m³/s, we recommend the least outflow of the Baipenzhu Reservoir at 30m³/s in March, which is good for the ecology in the Huizhou Reach of the Dongjiang River.

Key words: water temperature; joint operation of reservoirs; ecological operation; downstream of the Dongjiang River