水 利 学 报

2018年5月 SHUILI XUEBAO 第49卷 第5期

**文章编号**：0559-9350(2018)05-0628-11

# 面向发电、供水、生态要求的赣江流域水库群优化调度研究

陈悦云[1]，梅亚东[1]，蔡 昊[1]，许新发[2]

（1. 武汉大学 水资源与水电工程科学国家重点实验室，湖北 武汉 430072；2. 江西省水利科学研究院，江西 南昌 330029）

**摘要**：以赣江流域内已建成的大型控制性水库为研究对象，将赣江流域上游至下游用水区概化成7个主要用水区域，综合考虑各水库的运用目标、流域主要用水区域水量需求以及河道内生态流量的要求，以水库群总发电量最大、用水区域总缺水量最小和外洲控制站调度后流量与天然流量偏差最小为目标，建立面向发电、供水、生态要求的赣江流域水库群优化调度模型，采用多目标粒子群算法进行求解，得到不同来水频率下发电、供水和生态3个目标的非劣解集，并对3个目标之间的竞争关系进行了剖析。最后分析了各典型方案相应的水库水位过程和区域缺水情况。结果表明：各来水频率下，发电、供水、生态3个目标之间竞争程度有强有弱，其中发电目标与生态目标之间、供水目标与生态目标之间存在较强的竞争性，发电目标与供水目标之间则相对较弱。

**关键词**：发电；供水；生态；非劣解集；多目标粒子群算法

**中图分类号**：TV697 **文献标识码**：A **doi**：10.13243/j.cnki.slxb.20180130

## 1 研究背景

赣江是江西省境内最大河流，也是鄱阳湖水系第一大河，流域面积82 809 km$^2$，多年平均年径流量702.89亿m$^3$，流域水资源相对较丰富。但随着流域内经济社会快速发展，水资源开发利用程度不断提高，工农业供水与发电用水及河道内生态环境用水矛盾加剧，迫切需要水库发挥更大的水资源调控作用，通过优化水库群调度方式，实现发电、供水、生态等多个调度目标的均衡，使得流域水资源综合效益最佳。

近年来，国内外学者针对流域水库群发电、供水、生态等多目标优化调度开展了一系列研究，取得了有意义的成果。Yang等[1]通过RVA方法选择生态流量目标，建立了基于下游襄阳断面河道水流情势要求的丹江口生态调度模型，并比较了不同调度方式对水库环境效益与发电效益的影响程度。卢有麟等[2]以三峡梯级发电量最大和电站下游河道生态缺水量最小为目标，建立了多目标优化调度模型，研究发电和生态之间的竞争关系。王学斌等[3]考虑河流各生态功能用水和综合利用需求的水库调度方式，建立了黄河梯级水库多目标调度模型，分析生态、综合供水和发电效益之间的不对称竞争关系。粟晓玲等[4]综合考虑流域生态需水、用水净效益、水资源分配公平性等，建立了石羊河流域水资源配置多目标模型。Babel等[5]综合考虑农业、生活、工业和环境等用水部门，以不同部门需水的满足程度最大、各部门总经济效益最大为目标，建立了优化配置模型。张玲等[6]以供水净效益最大、供水系统总缺水量最小、重要污染物排放量最小为目标，建立了区域多目标水资源优化配置模型。以上研究中，文献[1-3]以水库为研究对象建立多目标模型，但是没有考虑到流域内取用水以及水资源分配情况对调度产生的影响；文献[4-6]虽然面向流域进行水资源优化配置研究，但是未能将

收稿日期：2018-02-04；网络出版日期：2018-05-28

网络出版地址：http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1882.TV.20180528.0947.001.html

基金项目：国家自然科学基金项目(51479140)；国家重点研发计划课题(2016YFC0401306)

作者简介：陈悦云(1995-)，女，安徽蚌埠人，硕士生，主要从事水库调度研究。E-mail：chenyueyun@whu.edu.cn

通讯作者：梅亚东(1963-)，男，湖北黄梅人，教授，博士生导师，主要从事水资源规划与管理研究。
E-mail：ydmei@whu.edu.cn

水库调度耦合到水资源优化配置模型中。由于在上下游水库之间存在河道外取用水，上游水库下泄流量在到达下游水库之前经过用水区域的用水、耗水、退水而发生变化，对下游的水资源分配产生影响。而目前研究较少考虑用水区水资源分配与水库调度的相互影响，弱化了水库群联合调度和区域水资源优化配置之间的有机联系。

在多目标问题求解方面，一些学者采用智能优化算法求解多目标调度模型，如遗传算法[7-8]、粒子群算法[9-10]和蚁群算法[11]等。另外一些学者则采用设置目标权重系数、分层序列法等方法对多目标模型进行求解。黄草等[12]以发电、河道外供水和河道内生态用水为目标建立了多目标优化调度模型，在模型求解时将3个目标按照重要程度设置了权重，把多目标问题转化成了单目标问题进行求解。王霞等[13]从水量总偏差和总发电量两方面设置目标函数，初步建立了基于河道生态需水量的水库生态调度模型，采用分层序列法将模型转化为单目标优化模型求解。郭旭宁等[14]采用模拟–优化相结合的方法，对水库调度规则进行模拟、对供水进行优化的求解方式来处理水库群联合调度中多目标问题的复杂性。此类转化虽然有效降低了模型的求解难度，但是未能在寻优过程中实现各目标之间的协同优化，其结果难以全面反映水库群优化调度过程中经济、社会和生态目标间的竞争制约关系。

赣江下游外洲水文站为赣江入鄱阳湖的出口控制站，其流量大小不仅与其上游水库的调度方式有关，还与流域内用水分配及消耗有关，选择其作为控制站能表达赣江水资源调配对下游尾闾地区生态和入鄱阳湖流量的影响。本文综合考虑赣江流域现有工程情况，选取流域内大型控制性水库为研究对象，并从上游到下游将用水区域进行概化。兼顾各水库的运用目标、区域用水以及河道内生态流量三方面要求，建立面向发电、供水和生态要求的赣江流域水库群优化调度模型，并采用多目标粒子群算法求解，研究不同来水频率下水库群发电、供水和生态3个目标之间的关系。

## 2 问题概化

根据赣江流域水资源开发利用现状，选取4座已建大型水库——上犹江水库、万安水库、峡江水库和江口水库，将从上游到下游水库间的用水区域概化成7个用水区，并选取外洲站作为赣江进入鄱阳湖的流量控制断面。赣江流域水系概化图如图1所示。4座水库均为不完全年调节水库。以年为调度期，月为调度时段，在来水、需水过程已知的条件下，以调度期内水库群总发电量最大、用水区总缺水量最小以及外洲站调度后流量与天然流量偏差最小为目标，统一考虑发电、供水、生态要求，建立赣江流域水库群多目标优化调度模型。

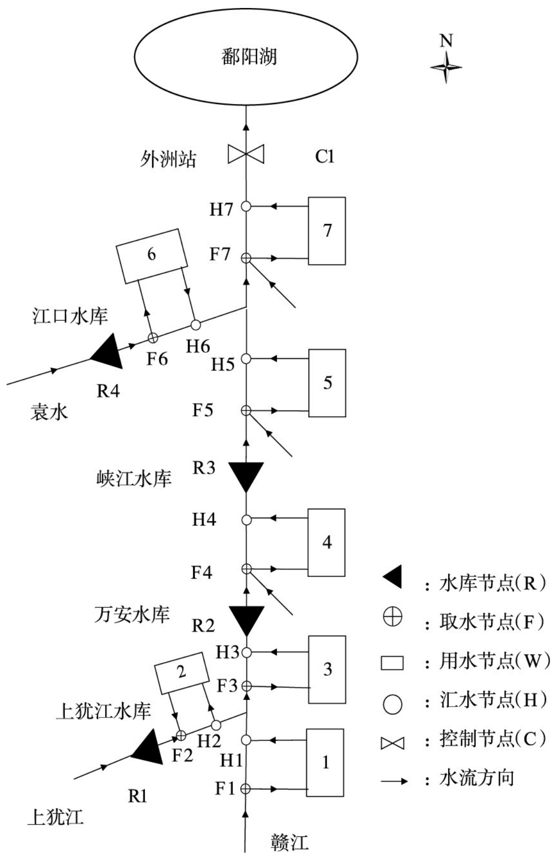


图1　赣江流域水资源系统概化

## 3 模型建立

### 3.1 目标函数

(1)发电目标。调度期内四库总发电量最大。

$$f_1 = \max \sum_{t=1}^{T}\sum_{i=1}^{n}\left\{K_i Q_{\mathrm{fd},\ i}(t) H_i(t)\Delta t\right\} \tag{1}$$

式中：$K_i$为$i$水电站的出力系数，$i$=1，2，…，$n$；$n$为电站总数，$n$=4；$t$=1，2，…，$T$；$T$为调度期

总计算时段数，$T=12$；$Q_{fd,\ i}(t)$为$i$水库$t$时段的发电流量；$H_i(t)$为$i$水库$t$时段的发电水头；$\Delta t$为计算时段长。

(2)供水目标。调度期内用水区域总缺水量最小。

$$f_2=\min\sum_{t=1}^{T}\sum_{j=1}^{m}\left(W_{\mathrm{xu},j}(t)-W_{\mathrm{qu},j}(t)\right) \tag{2}$$

式中：$W_{\mathrm{xu},j}(t)$、$W_{\mathrm{qu},j}(t)$分别为$j$用水区$t$时段的需水量和取水量，$j=1$，2，…，$m$；$m$为概化的用水区总数，$m=7$。

(3)生态目标。外洲站调度后流量与天然流量偏差最小。

Poff等[15]认为，在天然水文情势下，河流的生物多样性和生态系统完整性最好。对已经受到水库调度影响的河流来说，模仿河道天然流量过程，能在一定程度上减缓水库调度对下游河道生态环境的不利影响，改善河道生态环境的质量。目前衡量水库调度前后水文过程改变程度的表达形式有很多[16-18]，本文采用Ladson等[19]提出的修正全年流量偏差函数(AAPFD)。该指标在识别流量变化对河流生态环境的影响时更为敏感，更能反映河流的生态环境状况，其值越小表示水库调度后流量变化对河流生态系统的影响越小，河流生态环境越好[20]。表达式如下：

$$f_3=\min\left\{\sum_{t=1}^{T}\left(\frac{Q(t)-Q_N(t)}{\bar{Q}_N}\right)^2\right\}^{0.5} \tag{3}$$

式中：$Q(t)$为调度后$t$时刻外洲站流量；$Q_N(t)$为$t$时刻外洲站天然流量；$\bar{Q}_N$为调度期天然流量的平均值。

**3.2 约束条件**

(1)水库节点。①水量平衡方程

$$V_i(t+1)=V_i(t)+\left(Q_{\mathrm{rk},i}(t)-Q_{\mathrm{ck},i}(t)\right)\tau_t \tag{4}$$

式中：$V_i(t)$、$V_i(t+1)$分别为$i$水库$t$时段初、末蓄水量；$Q_{\mathrm{rk},i}(t)$为$i$水库$t$时段平均入库流量；$Q_{\mathrm{ck},i}(t)$为$i$水库$t$时段平均出库流量，为发电流量与弃水流量之和；$\tau_t$为时间单位转换系数。

②水位限制

$$Z_i^{\min}(t+1)\leqslant Z_i(t+1)\leqslant Z_i^{\max}(t+1) \tag{5}$$

式中：$Z_i^{\min}(t+1)$、$Z_i^{\max}(t+1)$分别为$i$水库$t$时段末水位允许的最小和最大值，$Z_i^{\min}(t+1)$为$i$水库死水位，$Z_i^{\max}(t+1)$为$i$水库汛限水位，其他时期为正常蓄水位。

③出库流量限制

$$Q_{\mathrm{ck},i}^{\min}(t)\leqslant Q_{\mathrm{ck},i}(t)\leqslant Q_{\mathrm{ck},i}^{\max}(t) \tag{6}$$

式中：$Q_{\mathrm{ck},i}^{\max}(t)$、$Q_{\mathrm{ck},i}^{\min}(t)$分别为$i$水库$t$时段下泄流量允许的最大和最小值。

④ 电站出力限制

$$N_i^{\min}(t)\leqslant N_i(t)\leqslant N_i^{\max}(t) \tag{7}$$

式中：$N_i^{\max}(t)$、$N_i^{\min}(t)$分别为$i$电站$t$时段平均出力允许的最大和最小值；$N_i(t)$为$i$电站$t$时段出力。

⑤水库边界条件

$$Z_i(1)=Z_i(T+1)=Z_i \tag{8}$$

式中：$Z_i(1)$、$Z_i(T+1)$分别为$i$水库调度期初、末水库水位；$Z_i$为$i$水库死水位。

(2)取水节点

$$R_j(t)=Q_{\mathrm{sy},i}(t)+Q_{\mathrm{qj},j}(t)-W_{\mathrm{qu},j}(t) \tag{9}$$

$$R_j(t)\geqslant Q_{\min,j}(t) \tag{10}$$

$$0\leqslant W_{\mathrm{qu},j}(t)\leqslant\min\left\{W_{\mathrm{xu},j}(t),\ W_{\mathrm{kq},j}(t),\ W_{\mathrm{gn},j}(t)\right\} \tag{11}$$

式中：$R_j(t)$为$j$用水区$t$时段取水后河道内流量；$Q_{sy,i}(t)$、$Q_{qj,j}(t)$分别为$j$用水区$t$时段上游来水量、区间入流量；$Q_{\min,j}(t)$为$j$用水区所在河段$t$时刻最小河道内流量；$W_{kq,j}(t)$为$j$用水区$t$时段可取水量；$W_{gn,j}(t)$为$j$用水区$t$时段供水能力。

(3)综合用水节点

$$W_{qu,j}(t)=W_{L,j}(t)+W_{I,j}(t)+W_{A,j}(t) \tag{12}$$

$$W_{que,j}(t)=W_{xu,j}(t)-W_{qu,j}(t) \tag{13}$$

$$0\leqslant W_{L,j}(t)\leqslant W_{Lxu,j}(t) \tag{14}$$

$$0\leqslant W_{I,j}(t)\leqslant W_{Ixu,j}(t) \tag{15}$$

$$0\leqslant W_{A,j}(t)\leqslant W_{Axu,j}(t) \tag{16}$$

式中：$W_{L,j}(t)$、$W_{I,j}(t)$、$W_{A,j}(t)$分别为$j$用水区$t$时段生活、工业和农业供水量，采用优先次序法分配到各用水部门，优先次序级为：生活用水>工业用水>农业用水；$W_{Lxu,j}(t)$、$W_{Ixu,j}(t)$、$W_{Axu,j}(t)$分别为$j$用水区$t$时段生活、工业和农业需水量；$W_{que,j}(t)$为$j$用水区$t$时段缺水量。

(4)退水量计算

$$W_{tui,j}(t)=aW_{L,j}(t)+bW_{I,j}(t)+cW_{A,j}(t) \tag{17}$$

式中：$W_{tui,j}(t)$为$j$用水区$t$时段退水量；$a$、$b$、$c$为生活、农业和工业退水系数。

(5)汇水节点

$$Q_{h,j+1}(t)=R_j(t)+W_{tui,j}(t) \tag{18}$$

式中：$Q_{h,j+1}(t)$为$j+1$个汇水节点$t$时刻流量，若汇水节点下游为水库节点，则水库入流为汇水节点流量。

(6)非负约束。各种变量均为非负值。

## 4 求解方法

本文建立的模型涵盖了水库优化调度和流域不同用水区间水量优化分配，是一个多目标优化调度问题，通常水库调度求解所用的动态规划方法不再适用。近年来，智能优化算法逐渐被用来解决水库群多目标调度问题中存在的高维、非线性等问题，粒子群算法因为具有快速收敛和参数设置简单等特点，被广泛用来解决多目标优化问题[21]。粒子群优化算法搜索速度快，所需调整参数较少，计算复杂度比遗传算法低[22]；相对于蚁群算法，粒子群算法则具有可以通过当前搜索到的最优点进行信息共享，能够直接利用全局信息[23]，所以本文采用多目标粒子群算法进行模型求解。其与单目标问题的区别在于，多目标优化问题的解不是唯一的，而是根据Pareto支配关系得到的一个最优解集合。算法基本介绍见参考文献[9]。本文与之不同的是：

(1)惯性权重值$w$采用Shi等[24]提出的线性递减权值策略。在迭代初期，$w$较大，使得粒子有较大速度进行探索，以在全局范围内获得较好解；随着迭代次数的增加，$w$取值线性减小，使得迭代后期粒子在极值点附近通过较小的速度步长进行精密地探索，进而使算法更有可能收敛到种群的全局最优位置。

(2)外部档案中粒子的适应度值采用小生境共享机制计算。其基本思想[25]是：将小生境中的粒子视为个体共享资源，其适应度值取为个体共享度的倒数。小生境中个体越多时，个体的相似度就越高，相应的适应度就越小，从而降低种群中相似个体的适应度值，在迭代过程中减少相似个体被选择的概率，维持了种群的多样性，同时避免了局部收敛和早熟现象。

**4.1 算法编码方式** 为有效处理水量平衡、调度初、末水位限制等复杂约束，根据所求问题特点，以各水库各时段末水位序列和各用水区间各时段取水量为决策变量进行编码，即决策变量为

$\{Z_{1,1}$，…，$Z_{1,12}$，$Z_{2,1}$，…，$Z_{2,12}$，$Z_{3,1}$，…，$Z_{3,12}$，$Z_{4,1}$，…，$Z_{4,12}$，$W_{1,1}$，…，$W_{1,12}$，$W_{2,1}$，…，$W_{2,12}$，…,$Z_{7,1}$，…，$Z_{7,12}\}$，共132个变量。其中，$Z_{i,t}$为$i$水库$t$时段末水位；$W_{i,t}$为$i$用水区$t$时段取水量。

**4.2 算法步骤** (1)步骤1。初始化粒子种群$M$，随机生成粒子初始位置$X_0$和初始速度$V_0$，设置外部档案空间规模$N_{space}$，同时初始化其为空；(2)步骤2。计算当代每个粒子的目标函数，判断出非支配解并保存于外部档案中；(3)步骤3。根据小生境共享机制计算外部档案中粒子的适应度值，采用与适应度值成比例的轮盘赌方法[26]从其中选取全局最优位置$gbest$；(4)步骤4。根据粒子群算法的进化方程更新粒子的位置$X$和速度$V$，根据Pareto支配关系选取个体历史最优位置$pbest$；(5)步骤5。用当代粒子群中产生的非支配解更新外部档案，若外部档案中个体数目超过指定的空间规模$N_{space}$，采用轮盘赌方法对外部档案规模进行维护，得到当代Pareto最优解集；(6)步骤6。若达到结束条件，则停止迭代，将外部档案中的Pareto最优解集进行输出；否则转入步骤2。

## 5 计算结果及分析

### 5.1 数据与参数选取

(1)数据来源。将外洲站年径流量系列排频，分别选取1969年、1964年和1986年作为50 %、75 %和95 %来水频率的典型年，其它各站用同期数据按同倍比放大作为来流过程。由于干流上万安水库(1990年建成)、峡江水库(2013年建成)投入运行时间较晚，支流上的上犹江水库、江口水库对年径流总量影响较小，所以用1990年之前实测流量代替天然流量。

根据《赣江流域水量分配方案研究报告》中50 %、75 %和95 %来水频率下的人口、用水定额、灌溉面积和灌溉定额等数据，计算出生活、工业和农业等部门相应的需水量，然后按照用水区域供水范围进行整理，得到规划水平年2030年各来水频率的需水过程。

(2)各水库最小下泄流量计算。采用Tennant法[27]计算各库最小下泄流量，选取标准为“一般”，即4—9月取对应月份多年平均流量的30 %，10月—次年3月取对应月份多年平均流量的10 %。

(3)算法参数选取。经多次试算，算法参数设置如下：

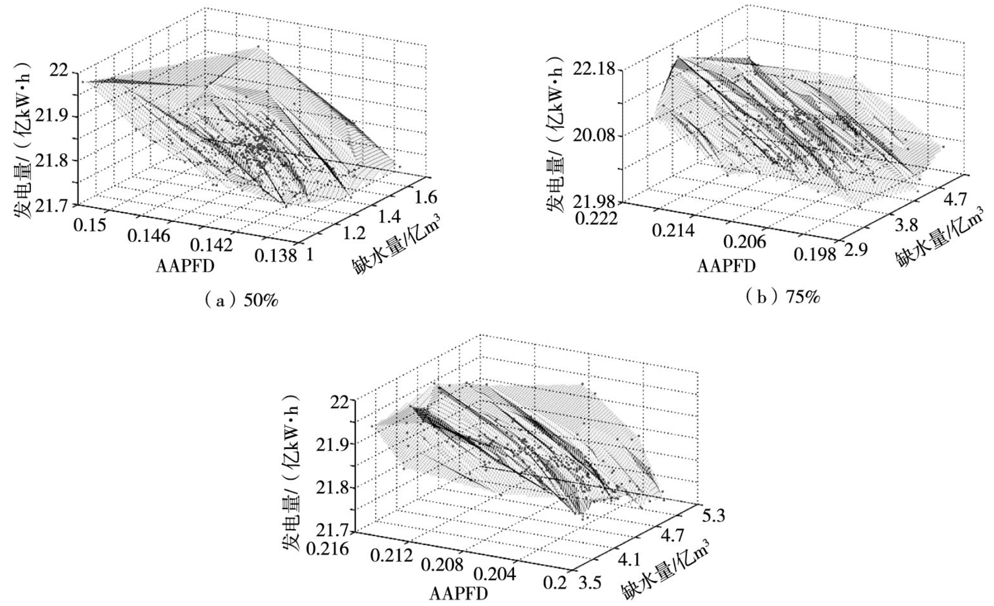
粒子种群$M$=1000；外部档案空间规模$N_{space}$=500；加速常量$c_1$=$c_2$=1.9；惯性权重采用线性递减方法计算，$\omega_{max}$=0.93、$\omega_{min}$=0.7；粒子速度$v_{max}$=0.5、$v_{min}$=−0.5；迭代次数$N$=1000。

**5.2 供水、发电、生态目标间关系分析** 根据来水、需水等数据，采用多目标粒子群算法对多目标模型进行求解，得到规划水平年50 %、75 %和95 %来水频率下水库群总发电量、用水区域总缺水量、外洲站全年流量偏差AAPFD值3个目标的非劣解集，见图2。

从图2非劣解点据分布空间看，在不同来水频率下，3个目标之间均在三维空间中呈现出不光滑的倾斜曲面，其非劣解集分布的空间范围与来水频率有密切关系。总体来说，在来水较丰时，用水区域总缺水量较小，与天然流量的偏差较小，发电量较大。但是由于采用出口断面外洲站的流量来选择典型年，50 %频率典型年来水下游偏丰，所以相比75 %、95 %频率来水，其发电量并没有大幅度增大，但是缺水量和生态流量偏差有明显的改善。3种来水频率下，若要增大3个目标中一个目标的效益，则需要以牺牲其余两者中至少一个目标为代价，体现出发电、供水、生态三者之间的竞争博弈关系。

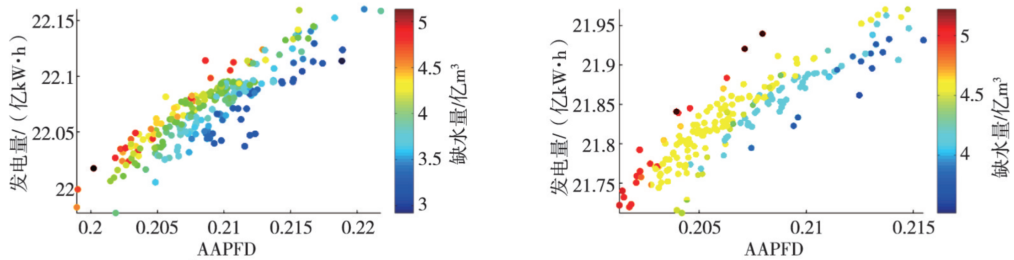
为了进一步分析3个目标之间的关系，对三维坐标下的点据进行二维投影，获得各频率下目标投影图如图3—图5所示。限于篇幅，仅列出75 %、95 %的结果。

图3表示的是在不同来水频率下，缺水量分别取不同值时，发电量和AAPFD值之间的关系。从图3可以看出，当缺水量固定时，随着发电量的增大，AAPFD值也增大，即生态效益随着发电效益的增大而减小。当缺水量增加时，发电量与AAPFD两个目标之间的关系点据略微左移，即供水效益减小时，表现出AAPFD值减小(生态效益增大)，发电效益增加的趋势。图4为不同来水频率下，发电量不同取值时，AAPFD值和缺水量之间的关系。从图4可以看出缺水量增大即供水效益减小时，



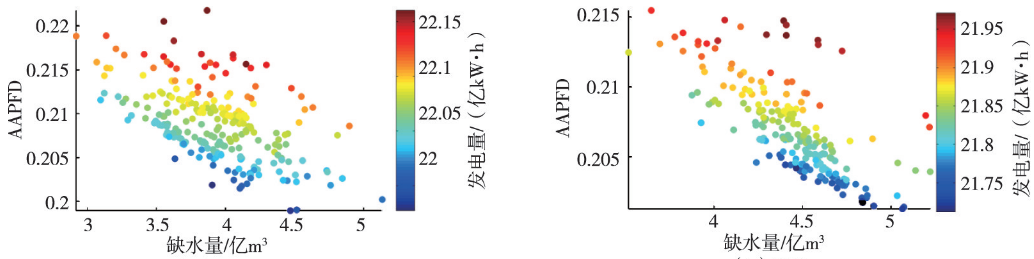

（a）50%　（b）75%　（c）95%

图2　不同频率来水非劣解集计算结果




（a）75%　（b）95%

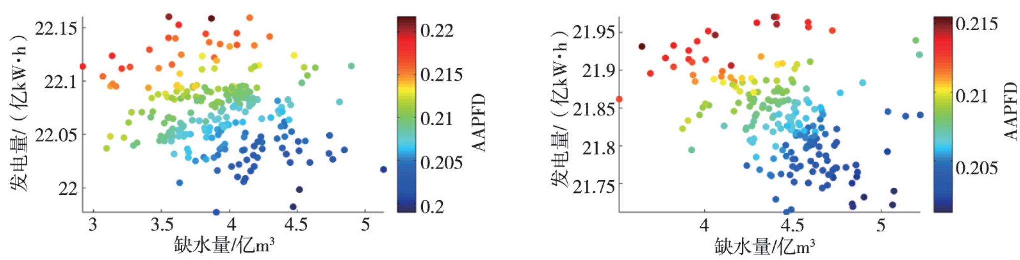
图3　发电目标和生态目标之间关系




（a）75%　（b）95%

图4　供水目标和生态目标之间关系

AAPFD值增大(生态效益减小)的变化趋势。图5呈现的是不同来水频率下，在不同AAPFD值时，发电量和缺水量之间的关系。由图5可知，当AAPFD值固定时，发电效益随着供水效益的减小有增大的趋势。但是两个目标之间的变化关系，相对于图3中的发电效益和生态效益关系以及图4中的生态




（a）75%　（b）95%

图5　发电目标和供水目标之间关系

效益和供水效益的关系较弱。

由以上3个图可以得出：在面向发电、供水、生态要求的赣江流域水库群优化调度中，3个目标之间存在着竞争制约关系，其中，发电和生态、供水和生态之间的制约关系较强，发电和供水之间的竞争关系相比之下较弱。这是由于水库以及用水区域取用水后使得天然来流的过程发生改变，导致出口断面处的流量相对于天然流量过程改变明显，所以发电与生态、供水与生态之间的竞争关系较强。而水库发电用水下泄后还可以被用水区域利用，故发电和供水两个目标之间的竞争性相对较弱。

**5.3 典型非劣方案调度过程分析** 为进一步分析水库调度过程特征，各频率下均选择总发电量最大方案、总缺水量最小方案以及AAPFD值最小方案进行比较，方案选取情况如表1所示。由于75 %、95 %来水频率下缺水情况较为严重，重点分析这两个频率。图6—图7给出了对应方案各水库水位过程。

表1 各频率选取方案目标值

| 方案 | 50% | | | 75% | | | 95% | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 总发电量/(亿kW·h) | 总缺水量/亿m³ | AAPFD | 总发电量/(亿kW·h) | 总缺水量/亿m³ | AAPFD | 总发电量/(亿kW·h) | 总缺水量/亿m³ | AAPFD |
| 总发电量最大方案 | 21.981 | 1.075 | 0.151 | 22.160 | 3.554 | 0.221 | 21.971 | 4.393 | 0.215 |
| 总缺水量最小方案 | 21.973 | 1.031 | 0.152 | 22.114 | 2.920 | 0.219 | 21.862 | 3.517 | 0.212 |
| AAPFD值最小方案 | 21.728 | 1.649 | 0.139 | 21.982 | 4.469 | 0.199 | 21.722 | 5.064 | 0.201 |

对75 %来水频率下各水库水位分析，如图6所示。首先，75%来水频率下各水库水位过程差别很大。上犹江水库、江口水库水位整体上是先上升后下降，而万安水库、峡江水库则是先保持死水位不变，之后水位才开始上升，这是由于上犹江、江口水库调节能力较强。其次，各库各方案水位的增长和消落趋势基本同步，但是水位有所差别。比如万安水库三个方案下3月末—6月末水位相同，7月份开始各方案水位出现差异；江口水库在3月末—5月末，总发电量最大方案水位最低，AAPFD值最小方案水位最高，但是在7月份期间总发电量最大方案水位逐渐高于总缺水量最小方案，7月末—12月末总发电量最大方案水位较其他两个方案最高。

95 %来水频率下水位过程也有类似规律。上犹江水库和江口水库水位比万安水库和峡江水库上升快，尤其是峡江水库在3月末—6月末一直保持在死水位，这与水库自身的调节能力有关。其次，各库不同方案下水位过程有所差别，整体上看总发电量最大方案水位最高，AAPFD值最小方案水位最低。

总的来说，95 %来水频率下水库总发电量相较75 %减小，上犹江水库和江口水库的水位过程在两个频率下较为相似，但是万安水库和峡江水库受制于调节能力，水库表现出多次运用。总之，各水库水位过程的变化体现出了水库蓄丰补枯的作用。

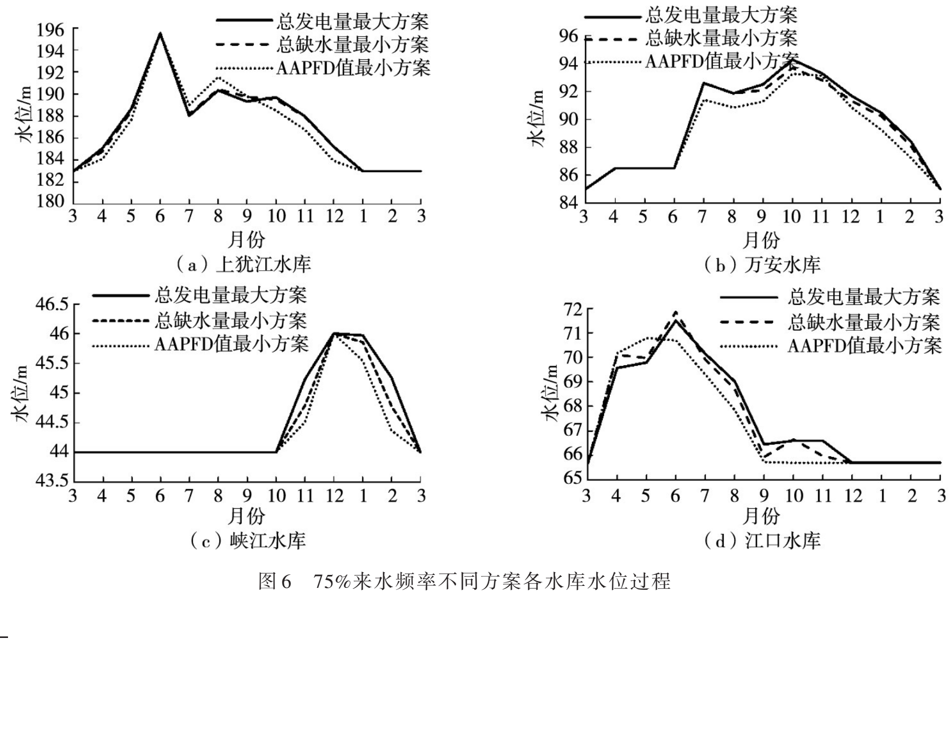



图6 75%来水频率不同方案各水库水位过程

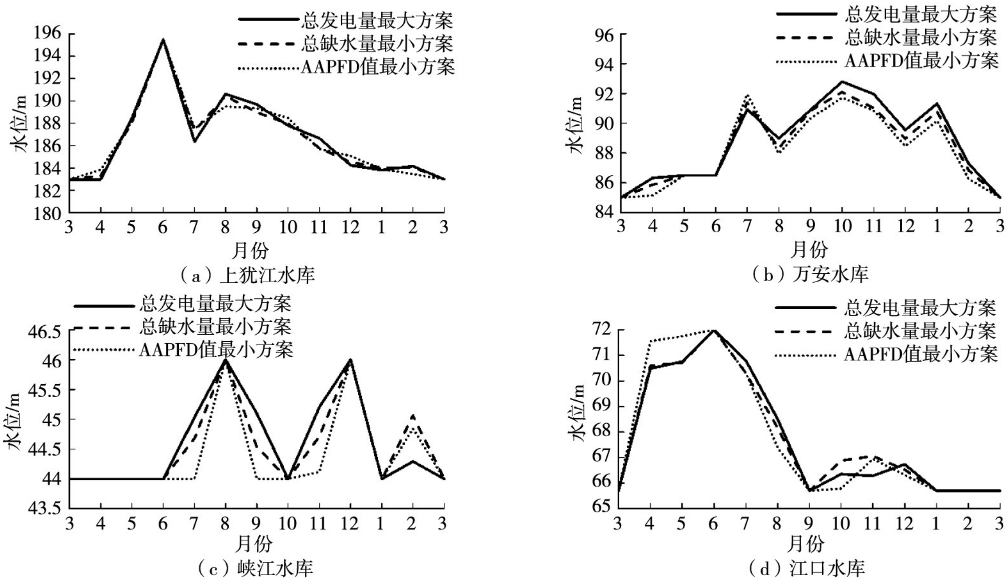


图7　95%来水频率不同方案各水库水位过程

**5.4　用水区域缺水分析**　对75 %、95 %来水频率下总缺水量最小方案对应的各用水区缺水量进行统计，计算得到缺水率如图8所示。

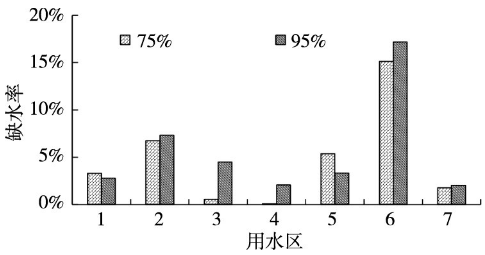


图8　75%和95%来水频率下各用水区缺水率对比

由结果知，75 %来水频率下，水平年总缺水量最小方案的总缺水量为2.92亿 m³，总缺水率6.15 %，最小缺水率为0.09 %，最大缺水率为15.13%；95%来水频率下，总缺水量为5.52亿 m³，缺水率6.93 %。两种频率下主要缺水出现在支流袁河江口水库以下用水区6，其次是上犹江水库以下用水区2，主要是由于这两种频率下支流来水偏小。尽管95 %来水频率下总缺水率相较75 %增幅不大，但是由图8可以看出，各用水区的缺水率有变化，95 %来水频率下缺水范围更广。

对75 %和95 %来水频率下，各用水区的用水过程进行比较分析，如图9—图10所示。

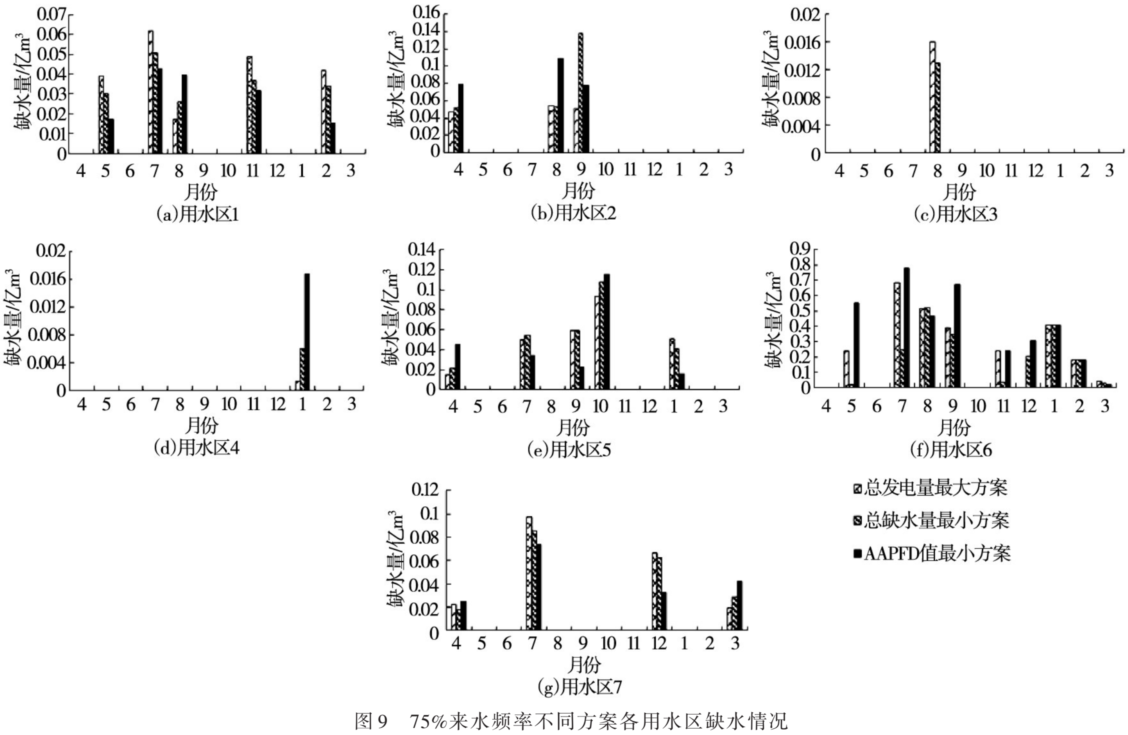


图9　75%来水频率不同方案各用水区缺水情况

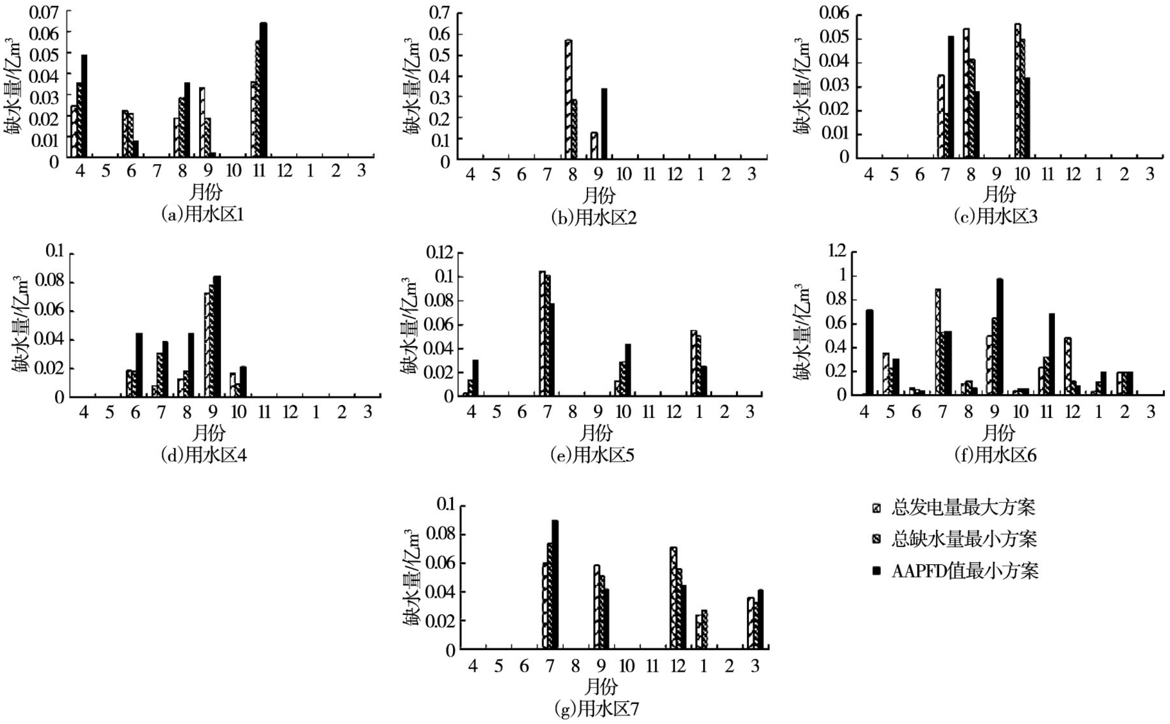



图10　95%来水频率不同方案各用水区缺水情况

由图9可以看出，在75 %来水频率下，用水区域3在8月份和用水区域4在1月份出现了轻微缺水现象，用水区域1、2、5和7在不同月份出现了缺水情况，缺水量在0.01亿 ~ 0.15亿 m³之间，而江口水库以下用水区域6缺水较为严重，仅4、6和10月不缺水，5、7、9月缺水量较高，缺水量在0.5亿 m³以上，这是由于外洲控制站75 %来水频率下对应的江口水库上游来水较枯，满足不了下游区域的水量需求。

由图10可以看出，95 %来水频率下，总缺水量比50 %和75 %频率多0.6亿 m³。用水区域1、3、4、5和7在不同月份出现了缺水情况，缺水量基本在0.1亿 m³以下。用水区域2在8月和9月两个月出现了较为严重的缺水，缺水量在0.5亿 m³左右。而用水区域6则是出现了严重缺水，全年共11个月出现了不同程度的缺水，其中4、7、9、11及12月部分方案的缺水量在0.5亿 m³以上。

将多目标优化调度非劣解集中缺水量最小方案与《鄱阳湖流域水量分配与水权制度建设研究》[28]水量分配模拟模型计算结果进行比较。整体来看，规划水平年2030年两个模型计算结果主要缺水区域基本相同，缺水量计算结果为：50 %、75 %、95 %来水频率下，优化调度缺水量分别为1.05亿、2.92亿和3.52亿 m³，模拟模型计算分别为1.21亿、2.49亿和4.22亿 m³，优化调度的缺水量与模拟模型的缺水量基本一致。但相比水量分配模拟模型，本文同时给出了3个目标间的非劣关系。

## 6　结论

(1)为实现赣江流域水资源综合效益最优化，以水库群总发电量最大、用水区域总缺水量最小以及外洲站调度后流量与天然流量偏差最小为目标，建立了面向发电、供水和生态要求的赣江流域水库群优化调度模型。该模型能够较全面刻画水资源调配过程中发电、供水和生态3个目标之间的相关关系。(2)采用多目标粒子群算法求解，得到不同来水频率下发电、供水和生态3个目标的非劣调度解集。结果表明：各来水频率下，发电、供水、生态3个目标之间均存在着竞争制约关系，其中发电目标与生态目标之间、供水目标与生态目标之间的竞争性较强，发电目标与供水目标之间竞争性相对较弱。(3)规划水平年2030年50 %来水频率赣江流域缺水较为轻微，总缺水量1.03亿 m³，总缺水率2.53 %。75 %、95 %来水频率缺水率分别为6.15 %、6.92 %，整体来说缺水不算严重，但是各分

区缺水情况差异明显，袁河江口水库以下用水区6缺水率最大，在15 %以上，其次为上犹江水库下游用水区2，缺水率大于5 %。

## 参　考　文　献：


[ 1 ] YANG N, MEI Y, ZHOU C . An optimal reservoir operation model based on ecological requirement and its effect on electricity generation[J] . Water Resources Management, 2012, 26(14): 4019-4028 .

[ 2 ] 卢有麟，周建中，王浩，等 . 三峡梯级枢纽多目标生态优化调度模型及其求解方法[J] . 水科学进展，2011，22(6)：780-788 .

[ 3 ] 王学斌，畅建霞，孟雪姣，等 . 基于改进NSGA-Ⅱ的黄河下游水库多目标调度研究[J] . 水利学报，2017，48(2)：135-145 .

[ 4 ] 粟晓玲，康绍忠 . 石羊河流域多目标水资源配置模型及其应用[J] . 农业工程学报，2009，25(11)：128-132 .

[ 5 ] BABEL M S, GUPTA A D, NAYAK D K . A model for optimal allocation of water to competing demands[J] . Water Resources Management, 2005, 19(6): 693-712 .

[ 6 ] 张玲，徐宗学，张志果 . 基于粒子群算法的水资源优化配置[J] . 水文，2009，29 (3)：41-45 .

[ 7 ] 陈南祥，李跃鹏，徐晨光 . 基于多目标遗传算法的水资源优化配置[J] . 水利学报，2006，37(3)：308-313 .

[ 8 ] HAKIMI-ASIABAR M, GHODSYPOUR S H, KERACHIAN R . Deriving operating policies for multi-objective reservoir systems: Application of self-learning genetic algorithm[J] . Applied Soft Computing, 2010, 10(4): 1151-1163 .

[ 9 ] BALTAR A M, FONTANE D G . Use of multi-objective particle swarm optimization in water resources management[J] . Journal of Water Resources Planning and Management, 2008, 134 (3): 257-265 .

[ 10 ] 李艳丽 . 基于多目标优化的粒子群算法研究及其应用[D] . 成都：西南交通大学，2014 .

[ 11 ] KUMAR D N, REDDY M J . Ant colony optimization for multi-purpose reservoir operation[J] . Water Resources Management, 2006, 20(6): 879-898 .

[ 12 ] 黄草，王忠静，李书飞，等 . 长江上游水库群多目标与优化调度模型及应用研究Ⅰ：模型原理及求解[J] . 水利学报，2014，45(9)：1009-1018 .

[ 13 ] 王霞，郑雄伟，陈志刚. 基于河流生态需水的水库生态调度模型及应用[J] . 水电能源科学，2012，30(6)，59-61.

[ 14 ] 郭旭宁，胡铁松，黄兵，等 . 基于模拟-优化模式的供水水库群联合调度规则研究[J] . 水利学报，2011，42(6)：757-766 .

[ 15 ] POFF N L, ALLAN J D, BAIN M B . The natural flow regime: A paradigm for river conservation and restoration[J] . BioScience, 1997, 47(11): 769-784 .

[ 16 ] HOMA E S, VOGEL R M, SMITH M P, et al . An Optimization Approach for Balancing Human and Ecological Flow Needs[C]//Proceedings of the EWRI 2005 World Water and Environmental Resources Congress, 2005 .

[ 17 ] SHIAU J, WU F . Optimizing environmental flows for multiple reaches affected by a multipurpose reservoir system in Taiwan: Restoring natural flow regimes at multiple temporal scales[J] . Water Resources Research, 2013, 49(1): 565-584 .

[ 18 ] YIN X A, YANG Z F, PETTS G E . A new method to assess the flow regime alterations in riverine ecosystems[J] . River Research and Applications, 2015, 31: 497-504 .

[ 19 ] LADSON A R, WHITE L J . An Index of Stream Condition: Reference Manual[M] . Waterways Unit, Department of Natural Resources and Environment, 1999 .

[ 20 ] 杨志峰，陈贺 . 一种动态生态环境需水计算方法及其应用[J] . 生态学报，2006，26(9)：2989-2995 .

[ 21 ] COELLO C A C, PULIDO G T, LECHUGA M S . Handling multiple objectives with particle swarm optimization[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2004, 8(3): 256-279 .

[ 22 ] 沈艳，郭兵，古天祥 . 粒子群优化算法及其与遗传算法的比较[J] . 电子科技大学学报，2005，34(5)：696-699 .

[ 23 ] 纪震，廖惠连 . 粒子群算法及应用[M] . 北京：科学出版社，2009 .

[ 24 ] SHI Y, EBERHART R C . Empirical Study of Particle Swarm Optimization[C]//Evolutionary Computation, Proceedings of the 1999 Congress on IEEE, 1999 .
[ 25 ] LIU D S, TAN K C, GOH C K, et al . On Solving Multi-objective Bin Packing Problems Using Particle Swarm Optimization[C]//Proceedings of IEEE Congress on Evolutionary Computation, 2006 .
[ 26 ] 王芳，邱玉辉 . 一种引入轮盘赌选择算子的混合粒子群算法[J] . 西南师范大学学报(自然科学版)，2006，31(3)：93-96 .
[ 27 ] 郭丹利，夏自强，林虹，等 . 生态径流评价中Tennant法应用[J] . 生态学报，2009，29(4)：1787-1792 .
[ 28 ] 杨永生，许新发，李荣昉 . 鄱阳湖流域水量分配与水权制度建设研究[M] . 北京：中国水利水电出版社，2011 .

## Multi-objective optimal operation of key reservoirs in Ganjiang River oriented to power generation, water supply and ecology

CHEN Yueyun[1], MEI Yadong[1], CAI Hao[1], XU Xinfa[2]

(1. *Wuhan University, State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan* 430072, *China*;
2. *Jiangxi Provincial Institute of Water Sciences, Nanchang* 330029, *China*)

**Abstract:** Taking key reservoirs in the Ganjiang River basin as the research object, seven main water use regions were generalized in the basin to develop a multi-objective optimal operation model oriented to the demands of power generation, water supply and ecology. The operation model was designed to maximize power generation of the reservoir group, minimize total water deficit of the water region while minimizing flow alteration of Waizhou Station, taking account of different objectives of reservoirs, the water demand of main regions and the requirements of the ecological instream flow. The multi-objective particle swam optimization method was adopted in solving this model to obtain the non-dominated solution set of the three objectives under different inflow frequencies, and the competition relationships among them were investigated. Then the corresponding water level process and water shortage situation of typical schemes were analyzed. The results indicate that the degrees of competition relationships among the three objectives are different. The competition between power generation and ecology, and that between water supply and ecology are fiercer, and the one between water generation and water supply is weaker.

**Keywords:** power generation; water supply; ecology; non-dominated solution set; multi-objective particle swarm optimization

（责任编辑：王成丽）