

# 梯级水库生态调度多目标混合蛙跳差分算法研究

方国华<sup>1</sup>, 林泽昕<sup>1</sup>, 付晓敏<sup>2</sup>, 郭玉雪<sup>1</sup>, 闻昕<sup>1</sup>

(1. 河海大学 水利水电学院, 江苏 南京 210098; 2. 中国大唐集团科学技术研究院有限公司 西北分公司, 陕西 西安 710077)

**摘要:** 提出多目标混合蛙跳差分算法求解梯级水库多目标生态调度模型。该算法结合混沌理论生成初始解以提高初始解群体质量, 构建基于动态更新机制的外部归档集引导种群进化, 提高算法的收敛性与非劣解的多样性, 引入自适应差分算法加快子种群个体寻优, 提高算法收敛速度。对L河梯级水库多目标生态调度进行实例研究, 计算结果表明: 本文所提出的算法能够计算得到收敛性与分布性较好的调度方案集, 对比典型调度方案下泄径流与物种生态适宜径流, 表明生态调度能够较好满足物种的生态需水, 生态效益显著。

**关键词:** 生态调度; 多目标; 混合蛙跳算法; 混沌理论; 差分算法; 梯级水库

中图分类号: TV697.1<sup>+</sup>.2 文献标识码: A 文章编号: 1672-643X(2017)01-0069-05

## Ecological dispatch of cascade reservoir based on multi-objects shuffled frog leaping-difference algorithm

FANG Guohua<sup>1</sup>, LIN Zexin<sup>1</sup>, FU Xiaomin<sup>2</sup>, GUO Yuxue<sup>1</sup>, WEN Xin<sup>1</sup>

(1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. China Datang Corporation Science and Technology Research Institute Northwest Branch, Xi'an 710077, China)

**Abstract:** A multi-objectives shuffled frog leaping-difference algorithm was proposed to solve ecological dispatch model of cascade reservoirs, this algorithm was combined with chaos theory to generate the initial population in order to improve its group quality, the external archive based on dynamic updating mechanism was built to guide population evolution to increase the algorithm convergence and diversity of not-bad solutions, the adaptive differential algorithm was introduced to accelerate optimization of individual group to improve the algorithm convergence speed. Taking the L river cascade reservoirs' multi-objects ecological dispatch as a study case, the results showed that, the proposed algorithm could get a scheduling scheme set with good convergence and distribution. By comparing the discharge runoff of typical scheduling scheme and ecologically suitable runoff of specie, it showed that the ecological operation could meet the ecological demand of the species, and its ecological efficiency was significant.

**Key words:** ecological dispatch; multi-objective; shuffled frog leaping algorithm; chaos theory; difference algorithm; cascade reservoir

## 1 研究背景

梯级水库的运行在产生大量经济、社会效益的同时不可避免地威胁到当地河流生态系统的健康与稳定, 生态调度因兼顾生态与经济、社会等目标, 已成为修复与改善河流生态系统的有效方式。生态调度是一个非线性、高维、约束复杂的多目标优化问题, 近年来, 多种群体智能算法如蚁群算法、鱼群算法被运用于水库多目标调度模型求解中, 取得了较好的效果。

混合蛙跳算法<sup>[1]</sup> (Shuffled Frog Leaping Algorithm, SFLA) 属于典型的群体智能算法, 算法将寻优过程模拟为蛙群分散成多个子种群外出觅食, 周期性的重新聚集共享食物来源信息的过程。混合蛙跳算法中各子种群内部搜索与周期性全局信息交换使得算法具有较强的并行搜索和全局寻优能力, 有助于加快个体收敛。但混合蛙跳算法也存在着以下缺陷: 初始种群随机生成导致个体分布不均匀, 影响算法寻优性能、子种群线性迭代后期易陷入局部最优等。本文在混合蛙跳算法基础上, 引入基于混沌理

论初始解生成、动态更新外部档案集与自适应差分局部搜索3大改进策略,提出多目标混合蛙跳差分算法,改善算法寻优性能,并运用于L河流域梯级水库多目标生态调度模型求解。

## 2 梯级水库多目标生态调度模型建立

生态需水保障是水库调度中生态目标的直接表现,水库调度中经济、社会等目标主要包括发电量、出力、防洪等。结合本文实例资料情况,以梯级水库下游典型物种生态缺水量和梯级发电量作为水库多目标生态调度的目标集,构建梯级水库多目标生态调度模型。

目标函数见式(1)、(2):

(1) 梯级发电量最大

$$E_1 = \max \sum_{i=1}^M \sum_{t=1}^T (A_i \cdot Q_{i,t} \cdot H_{i,t} \cdot L_t) \quad (1)$$

(2) 生态缺水量最小

$$E_2 = \min \sum_{i=1}^M \sum_{t=1}^T (|\min(0, (Q_{i,t} + S_{i,t} - Q_{d_{\min}}))|) \Delta t \quad (2)$$

式中:  $E_1$ 、 $E_2$  分别为梯级电站发电量和生态缺水量,  $\text{MW} \cdot \text{h}$ ,  $\text{m}^3$ ;  $M$  为梯级水库数;  $T$  为调度总时段,  $\text{h}$ ;  $A_i$ 、 $Q_{i,t}$ 、 $H_{i,t}$ 、 $S_{i,t}$  分别为第  $i$  个电站的出力系数、 $t$  时段发电流量,  $\text{m}^3/\text{s}$ 、 $t$  时段平均发电净水头,  $\text{m}$ 、弃水流量,  $\text{m}^3/\text{s}$ ;  $L_t$  为第  $t$  时段小时数;  $Q_{d_{\min}}$  为某时段为满足生态要求的电站最小下泄生态流量,  $\text{m}^3/\text{s}$ ;  $\Delta t$  为每个计算时段长度,  $\text{s}$ 。

约束条件见参考文献[2],文中不再赘述。

## 3 多目标混合蛙跳差分算法设计

多目标优化问题求解关键在于利用较少资源得到逼近问题目标域真实最优非劣解前沿的均匀解集。混合蛙跳算法主要包括初始解生成、子种群划分与迭代等过程,其基本理论见有关参考文献[3],在此不再赘述。本文在混合蛙跳算法基础上针对其存在后期易陷于局部最优的缺陷,引入基于混沌理论生成初始解,丰富解个体的多样性,提升初始种群质量;建立具有动态更新机制的外部档案集,保存迭代更新过程中得到的最优解,引导算法寻优过程,增强非劣解的多样性与收敛性;将自适应差分算法用于子种群个体局部搜索中,加快寻优过程。

### 3.1 基于混沌理论初始解生成

混沌具有随机性、遍历性等运动特性<sup>[4-6]</sup>,看似杂乱无序,却蕴含着有序。利用混沌运动的独特特

性产生大量初始解,提升初始解种群质量,有助于加快算法收敛与跳出局部最优缺陷。本文运用 Logistics 映射产生大量的初始解,如式(3):

$$z_{i+1} = \mu z_i (1 - z_i) \quad (3)$$

$$i = 0, 1, 2, \dots, \mu \in (2, 4]$$

式中:  $\mu$  为控制参量,当  $\mu = 4$  时,Logistics 映射处于完全混沌状态。

基于混沌理论生成初始种群基本步骤如下:

Step1: 确定初始种群规模  $G$ ;

Step2: 随机产生一个 0 到 1 之间的向量  $z_0 = \{z_{01}, z_{02}, \dots, z_{0D}\}$ , 且  $z_{0j} \neq \{0.25, 0.5, 0.75\}$ ,  $j \in D$ , 其中  $D$  为优化问题的维数;

Step3: 利用式(1)产生  $2 \times G$  个向量,分别为  $\{z_1, z_2, \dots, z_{2G}\}$ , 将  $z_i$  的每个分量载波到优化变量的取值区间  $[z_{\min,j}, z_{\max,j}]$ ;

Step4: 计算上述  $2 \times G$  个向量的目标函数值,并进行非支配排序,从中选择  $G$  个较优的向量构成初始种群,参与算法寻优过程。

### 3.2 动态更新外部归档集

具有动态更新机制的外部归档集的基本思想是:设定  $EA$  规模为  $N_{EA}$ ,在算法迭代初期,当  $EA$  中个体数量少于  $N_{EA}$  时,采用模拟二进制交叉增加个体数量,当非支配排序等级为 1 的个体数量大于  $N_{EA}$  时,动态计算个体拥挤距离,逐次删除拥挤距离小的个体,直至满足限定要求,否则全部进入  $EA$ ;当  $EA$  中个体数量大于  $N_{EA}$  时,动态删除拥挤距离最小的个体。算法迭代过程中,将产生的新非支配解与  $EA$  中个体进行支配比较,剔除劣解。当  $EA$  超限时,依据动态拥挤距离计算方法删除拥挤距离小的个体,在种群全局迭代过程中产生的构成新的  $EA$ 。具有动态更新机制的外部归档集的实现需解决两个问题:

(1) 模拟二进制交叉。将二进制串的单点交叉工作原理作用于以实数表示的染色体串,两个父代个体经过基因交叉得到两个子代个体,见式(4):

$$x_{1,k} = \frac{1}{2} [(1 - \beta_k) p_{1,k} + (1 + \beta_k) p_{2,k}] \quad (4)$$

$$x_{2,k} = \frac{1}{2} [(1 + \beta_k) p_{1,k} + (1 - \beta_k) p_{2,k}]$$

式中:  $x_{i,k}$  为第  $i$  个子代个体的第  $k$  个元素;  $p_{i,k}$  为第  $i$  个父代个体的第  $k$  个元素,  $\beta_k \geq 0$ , 计算方法见式(5):

$$\beta(u) = \begin{cases} (2u)^{\frac{1}{1+\eta_c}}, & u \leq 0.5 \\ \left[ \frac{1}{2(1-u)} \right]^{\frac{1}{1+\eta_c}}, & \text{else} \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $u$  为  $(0,1)$  之间的随机数;  $\eta_c$  为交叉分布指数,可为任意非负数。

(2) 动态拥挤距离计算。通过剔除部分拥挤距离小的个体维护外部种群的分布均匀性<sup>[7]</sup>,以两个目标函数为例,拥挤距离计算见式(6):

$$P[i]_{dis} = (P[i + 1].f_1 - P[i - 1].f_1) + (P[i + 1].f_2 - P[i - 1].f_2) \quad (6)$$

式中:  $P[i]_{dis}$  为第  $i$  个个体的拥挤距离;  $P[i].f_{1,2}$  为第  $i$  个个体在子目标函数  $f_1$  和  $f_2$  上的函数值。

### 3.3 自适应差分算法子种群更新

差分算法 (Difference Algorithm, DE) 具有原理简单、受控参数少的优点,包括变异、交叉、选择 3 种操作。

(1) 变异操作。常见的变异方式为  $DE/rand/1$ , 为充分发挥全局最优解的基点引导作用,增大优秀个体的产生机率,提出  $DE/rand - best/1$  变异方式,见式(7):

$$v_i(t) = x_{i_1}(t) + F \times (x_{best}(t) - x_{i_2}(t)) \quad (7)$$

式中:  $x_{i_1}(t), x_{i_2}(t)$  为在子种群中随机选择的 2 个个体,  $i_1 \neq i_2$ ;  $x_{best}(t)$  为当前全局最优个体;  $F$  为差分矢量缩放因子。

参数  $F$  的大小关系到差分矢量对变异个体的影响强弱,动态变化的  $F$  有利于算法在初期保持种群多样性,跳出局部最优,在后期围绕最优解的精细化搜索,加快全局收敛。其计算公式见式(8):

$$F_i = F_{max} - \frac{i \times (F_{max} - F_{min})}{GEN} \quad (8)$$

式中:  $F_i \in [F_{min}, F_{max}]$ ;  $GEN$  为混合蛙跳算法全局迭代次数,  $i = 1, 2, \dots, GEN$ 。

(2) 交叉、选择操作。交叉操作通过将目标个体与变异个体按照一定概率交换向量元素的方式产生试验个体,以增加种群个体的多样性,本文采用二项式交叉方法实现交叉操作。交叉概率  $CR$  的取值大小对差分算法的影响与参数  $F$  类似,算法搜索初期较大的取值能够拓展算法搜索空间,较小的取值能够在后期保证具有良好向量因子的个体免遭过多的破坏,加快算法收敛。其计算公式见式(9):

$$CR_i = CR_{min} + \frac{i \cdot (CR_{max} - CR_{min})}{GEN} \quad (9)$$

选择操作是基于适者生存的贪婪选择机制,通过选择变异交叉产生的新个体与子种群最差个体中的较优个体,实现算法的迭代更新。本文采用文献[8]中的选择机制,不再赘述。

算法整体流程见图 1。

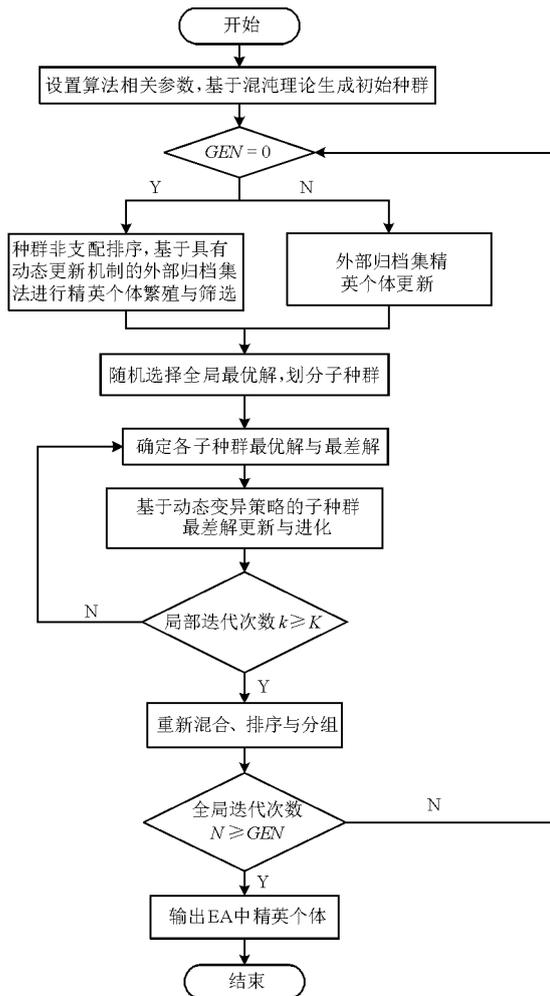


图 1 多目标混合蛙跳差分算法基本流程

### 3.4 数值计算分析

选择 ZDT<sup>[9]</sup> 系列测试函数对本文所提算法的收敛性指标  $\gamma$  与多样性指标  $\Delta$  进行计算,与 NSGA - II、SPEA - II 和 MOPSO 计算结果<sup>[10-11]</sup> 对比分析,每个测试函数独立运行 20 次,MSFL - DEA 参数设置为:种群规模  $G = 100$ ,全局迭代次数  $GEN = 500$ ,子种群数  $N = 10$ ,每个子种群个体数  $M = 10$ ,子种群迭代次数  $K = 12$ ,外部归档集规模  $N_{EA} = 50$ ,差分矢量缩放因子  $F \in [0.8, 0.9]$ ,杂交概率  $CR \in [0.9, 0.98]$ 。限于篇幅,仅给出 ZDT3 测试结果,见表 1。

表 1 算法收敛度与多样性对比结果

算法	$\gamma$		$\Delta$	
	$M$	$VAR$	$M$	$VAR$
NSGA - II	0.11450	0.00794	0.73854	0.01971
SPEA - II	0.00789	0.00011	1.22731	0.02925
MOPSO	0.00418	0.00000	0.83195	0.00892
MSFL - DEA	0.00234	0.00000	0.24843	0.00000

由表1可知:MSFL-DEA算法收敛度与多样性指标计算结果均小于其余三种算法,且方差为零,表明多种改进策略的引进增强了种群的多样性,避免了陷入局部最优,显著改善了算法的寻优性能,具有较好的收敛性和鲁棒性。

## 4 实例研究

L河干流规划11级梯级开发方案,属于典型的龙头带径流开发模型,本文以11个梯级水库中调节性能较强的L1、L9梯级水库为例,对其进行中长期生态调度研究。L1、L9分别具有年、季调节性能,L1装机容量 $27 \times 10^4$  kW,保证出力 $8.05 \times 10^4$  kW,正常蓄水位675 m,死水位640 m;L9装机容量 $28.8 \times 10^4$  kW,保证出力 $7.86 \times 10^4$  kW,正常蓄水位217 m,死水位199 m。

### 4.1 生态适宜需水计算

L河干流现有典型鱼类物种A和B,其栖息地分别位于L1、L9坝址下游,由于人类活动加剧,已

威胁到其种群多样性。本文以鱼类A与B为生态保护目标,参考Tennant法“很好状态值”生态流量推荐值,同时参考文献[12]中利用物理栖息地法计算所得A和B生态适宜径流,取两者最大值,计算结果见表2。

### 4.2 调度结果及对比分析

选择20%、50%、80%3种典型频率来水作为输入,运用多目标混合蛙跳差分算法求解所建调度模型,算法编码与约束处理参考文献[13-14]中处理方式。根据调度规则,L1、L9梯级水库汛期采用固定排沙水位运行,L1在5-7月维持水位至665 m运行,L9在5-7、8-10月分别维持在221 m、213 m运行。结合测试函数参数选择经验以及多次测试,确定算法参数为:群体数 $G = 50$ ,子种群个数 $N = 5$ ,子种群个体数 $M = 10$ ,子种群迭代次数 $K = 15$ ,外部档案集规模 $N_{EA} = 30$ ,全局迭代次数 $GEN = 300$ ,差分矢量缩放因子 $F \in [0.6, 0.8]$ ,变异概率 $CR \in [0.3, 0.45]$ 。典型调度方案集见表3。

表2 鱼类物种A、B生态适宜径流过程

鱼类物种	月份											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
A	43.0	43.0	43.0	64.6	64.6	69.4	124.8	184.4	139.7	85.9	85.9	43.0
B	84.1	84.1	84.1	141.7	141.7	150.5	251.5	352.0	289.5	289.5	96.6	84.1

表3 各水文年典型生态调度方案集

方案	丰水年		平水年		枯水年	
	梯级发电量/ $10^8$ (kW·h)	生态缺水量/ $10^8$ m <sup>3</sup>	梯级发电量/ $10^8$ (kW·h)	生态缺水量/ $10^8$ m <sup>3</sup>	梯级发电量/ $10^8$ (kW·h)	生态缺水量/ $10^8$ m <sup>3</sup>
1	29.8517	2.61	26.7205	3.03	23.8648	3.20
5	29.8525	2.62	26.7212	3.04	23.8652	3.25
10	29.8533	2.64	26.7219	3.05	23.8657	3.31
15	29.8544	2.66	26.7230	3.07	23.8664	3.40
20	29.8553	2.68	26.7239	3.09	23.8667	3.44
25	29.8562	2.70	26.7248	3.10	23.8671	3.49
30	29.8571	2.71	26.7257	3.13	23.8671	3.55

由表3可见,对比3种不同频率来水调度方案集,随着生态缺水量的增加,梯级发电量也逐渐增加,表明梯级发电量与生态缺水量之间存在明显的正比关系。丰水年来水量较大,梯级发电量相比平水年、枯水年较大,且生态缺水量较小,两者之间对立性较弱,表明当来水量较大时,梯级电站有更大的空间协调发电与生态之间的关系。

进一步,选择丰水年L1梯级3种典型调度方案(方案1、15、30),列出各时段末水位,见图2。

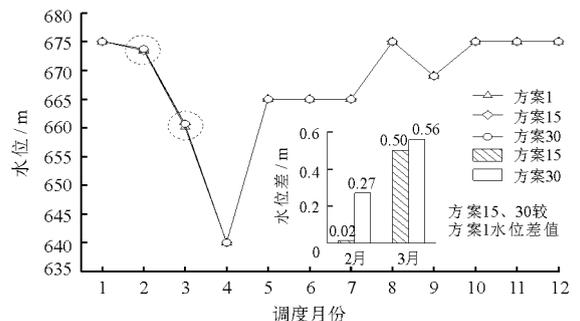


图2 L1梯级丰水年典型调度方案水位过程线

通过对比图 2 中不同调度方案水位值可见,3 种典型调度方案水位差别主要体现在枯水期,集中在 2、3 月,这些差别产生的主要原因是各典型方案对调度目标的侧重点不一样。方案 1 的调度模式明显侧重于生态效益,其在枯水期适当加大了下泄流量以满足下游河道典型物种的生态需水,但这一措施不可避免地影响了枯水期的出力,从而对全年的发电造成了影响;方案 30 则侧重于经济效益,其通过减少枯水期下泄流量,获得较高的库水位,提升全年发电量,但其忽视了下游鱼类等物种的生态需水,违背了生态保护的初衷;方案 15 是方案 1 和方案 30 的折中。

限于篇幅限制,以 L1 梯级为例,分析枯水年调度方案 15 下泄径流满足鱼类 A 生态需水情况,见图 3。

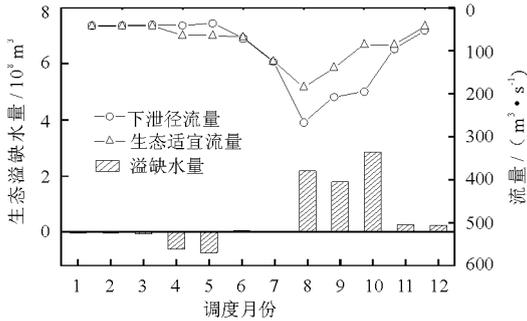


图 3 枯水年鱼类 A 生态需水满足情况

鱼类 A 每年 12 月产卵,1 月份进入繁殖盛期,卵具有黏性,附着在水生植物上。由图 3 可见,A 产卵期出现生态缺水情况,但下泄径流与生态适宜径流之间相差不大,较好地满足了其产卵流量要求,丰水期出现生态溢水情况,较大的下泄径流扩大了 A 的栖息地范围,有利于其种群生存繁衍。

由表 2 计算鱼类 A 生态适宜需水量为  $26.55 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,根据丰、平、枯各典型年计算,生态缺水量分别为  $0.98 \times 10^8$ 、 $1.33 \times 10^8$ 、 $1.49 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,相应生态需水满足程度分别为 96.31%、94.99%、94.38%,满足程度较高,表明生态调度发挥了较好的生态保护作用。以丰水年为例,其生态调度方案集空间分布情况见图 4。

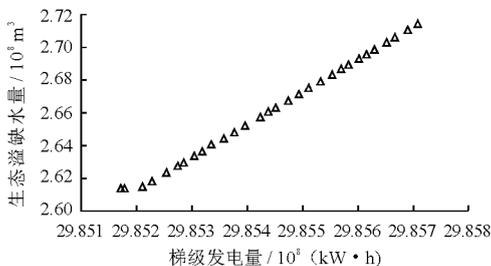


图 4 丰水年调度方案集

由图 4 可见,由 MSFL - DEA 获得非劣解集空间分布广泛且较均匀,收敛精度较高,可见 MSFL - DEA 在求解梯级水库生态调度问题时具有较好的收敛性和多样性。

## 5 结 论

本文基于混合蛙跳算法框架,引入基于混沌理论初始解生成、动态更新外部档案集与自适应差分局部搜索 3 大改进策略,提出多目标混合蛙跳差分算法,通过与 NSGA - II、SPEA - II、MOPSO 等算法对比分析,表明该算法具有较好的收敛性与多样性。将其用于所构建包含生态、经济目标的梯级水库多目标调度模型求解中,取得了具有良好收敛性与分布性的调度方案集,与下游物种生态适宜径流相比较,典型调度方案能够较好满足物种生态需水,生态效益显著。

文中所提混合蛙跳差分算法仍然有一定的优化空间,下一步研究中可重点放在优化代码编写,改进局部搜索策略上,以期提高算法寻优效率。此外,文中生态目标求解主要在于满足鱼类生态适宜需水量的程度,下一步可在水量、流速等方面进一步细化生态目标,以得到更贴近实际的调度方案。

## 参考文献:

- [1] Eusuff M M, Lansey K E. Optimization of water distribution network design using the Shuffled Frog Leaping Algorithm [J]. Journal of Water Resources Planning and Management - Asce, 2003, 129 (3): 210 - 225.
- [2] 明波,黄强,王义民,等. 基于改进布谷鸟算法的梯级水库优化调度研究[J]. 水利学报. 2015, 46(3): 341 - 349.
- [3] Wang Hongbo, Zhang Kepeng, Tu Xuyan. A mnemonic shuffled frog leaping algorithm with cooperation and mutation [J]. Applied Intelligence, 2015, 43 (1): 32 - 48.
- [4] Ott E, Grebogi C, Yorke J A. Controlling chaos [J]. Physical review letters, 1990, 64 (11): 1196 - 1199.
- [5] Prigogine I. Order out of chaos: Man's new dialogue with nature [M]. London: Heinemann, 1984.
- [6] Alligood K T, Sauer T D, Yorke J A. Chaos: An introduction to dynamical systems [M]. New York-Berlin-Heidelberg: Springer - Verlag, 1997.
- [7] 魏武,郭燕. 基于拥挤距离的动态粒子群多目标优化算法 [J]. 计算机工程与设计, 2011, 32(4): 1422 - 1425 + 1452.
- [8] 吴亮红. 多目标动态差分进化算法及其应用研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2011.

秋季,5-10月汛期径流量约占全年的89.61%,径流在夏季递增,其余季节递减。

## 5 结论

本文分析都柳江上游流域气候变化以及径流响应,通过建立三水源新安江月模型,采用1968-2004年历史降雨、蒸发、径流资料对模型参数进行率定,经过验证得到可以准确模拟都柳江上游流域月径流过程的新安江月模型。使用降尺度处理后的GCM输出数据驱动模型,生成2020-2099年不同情景下的流域径流,并对流域未来气候变化以及径流过程进行分析。主要结论:

(1)2020-2099年都柳江上游流域的年平均降雨量预计总体上呈现波动稳定趋势。RCP2.6情景下的年平均降雨量呈略微减小趋势,减小幅度较小,RCP4.5和RCP8.5情景下呈略微增长趋势,增长幅度较小。未来年平均降雨的波动较大,极端降水出现较为频繁,降雨量丰沛与稀少的时间段交替频繁,且交替的时间段短。2020-2099年都柳江上游流域的年平均气温在三种情景下均呈现增长趋势。三种气候变化情景下RCP2.6、RCP4.5、RCP8.5的倾向率分别为 $0.05^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 、 $0.23^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 、 $0.50^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 。气温升温明显,最大增幅达到 $4.20^{\circ}\text{C}$ 。2020-2099年都柳江上游流域的年平均蒸发在三种情景下均呈现波动增长趋势,平均倾向率 $7.01\text{mm}/10\text{a}$ ,最大增幅达到 $111.77\text{mm}$ 。

(2)2020-2099年都柳江上游流域径流流量总体上呈现波动减小趋势。年际径流总体呈现波动减小趋势,局部时间段呈现增加趋势,流量丰沛和偏枯的年份交替频繁,变幅大,径流流量相对于基准期基本上处于负距平,总体上流量比历史平均水准要少。径流受季风气候影响,年内分布十分不均,主要集中在夏季和秋季,5-10月汛期径流量约占全年的89.61%,径流在夏季递增,其余季节递减。

## 参考文献:

- [1] 沈永平,王国亚. IPCC第一工作组第五次评估报告对全球气候变化认知的最新科学要点[J]. 冰川冻土,2013,35(5):1068-1076.
- [2] 李峰平,章光新,董李勤. 气候变化对水循环与水资源的影响研究综述[J]. 地理科学,2013,33(4):457-464.
- [3] 曹丽娟,董文杰,张勇,等. 未来气候变化对黄河流域水文过程的影响[J]. 气候与环境研究,2013,18(6):746-756.
- [4] 沈元芳, Baer F. 全球气候模式(GCM)对辐射强迫的响应[J]. 应用气象学报,1997,8(S1):78-86.
- [5] 徐宗学,程磊. 分布式水文模型研究与应用进展[J]. 水利学报,2010,41(9):1009-1017.
- [6] 雷晓辉,蒋钟钟,王浩,等. 分布式水文模型 EasyDHM(II):应用实例[J]. 水利学报,2010,41(8):893-899+907.
- [7] 刘金涛,宋慧卿,张行南,等. 新安江模型理论研究的进展与探讨[J]. 水文,2014,34(1):1-6.
- [8] 方国华,戚核帅,闻昕,等. 气候变化条件下21世纪中国九大流域极端月降水量时空演变分析[J]. 自然灾害学报,2016,25(2):15-25.
- [9] 郭素荣. 1960-2010年青海省气候变化的时空特征分析[D]. 兰州:西北师范大学,2012.
- [10] 郑艳妮,闻昕,方国华,等. 新安江流域气候变化及径流响应研究[J]. 水资源与水工程学报,2015,26(1):106-110.
- [11] 侯钦磊,白红英,任园园,等. 50年来渭河干流径流变化及其驱动力分析[J]. 资源科学,2011,33(8):1505-1512.
- [12] 秦年秀,姜彤,许崇育. 长江流域径流趋势变化及突变分析[J]. 长江流域资源与环境,2005,14(5):589-594.
- [13] 杭月荷. CMIP5多模式对中国极端降水的模拟评估及未来情景预估[D]. 南京:南京信息工程大学,2013.
- [14] 陈炯烽,张万昌. 基于遗传算法的新安江模型日模拟参数优选研究[J]. 水文,2006,26(4):32-38.
- [15] 吕志朋. 基于遗传算法优化参数的新安江三水源模型研究[J]. 广东水利水电,2012(5):9-13.
- [16] 王绍武,罗勇,赵宗慈,等. 新一代温室气体排放情景[J]. 气候变化研究进展,2012,8(4):305-307.

(上接第73页)

- [9] Zitzler E, Deb K, Thiele L. Comparison of multiobjective evolutionary algorithms: Empirical results [J]. Evolutionary computation, 2000, 8(2):173-195.
- [10] Chen Minyou, Zhang Congyu, Luo Ciyong. Adaptive evolutionary multi-objective particle swarm optimization algorithm [J]. Control and Decision, 2009, 24(12):1845-1851.
- [11] Tripathi P K, Bandyopadhyay S, Pal S K. Adaptive multi-objective particle swarm optimization algorithm [C]// Proceedings of IEEE Congress Evolutionary Computation, Singapore: Singapore F, 2007.
- [12] Chen Junxia, Qiao Ruizhi, Li Wenhua, et al. Research on the ecological water demand based on physical habitat simulation model [J]. Advanced Materials Research, 2014, 1022(1022):376-379.
- [13] 周建中,李英海,肖舸,等. 基于混合粒子群算法的梯级水电站多目标优化调度[J]. 水利学报,2010,41(10):1212-1219.
- [14] 王学敏,周建中,欧阳硕,等. 三峡梯级生态友好型多目标发电优化调度模型及其求解算法[J]. 水利学报,2013,44(2):154-163.