

文章编号:0559-9350(2020)05-0536-09

澜沧江流域枯水年发电效益与下游生态-出境水互馈博弈研究

蔡方园^{1,3}, 何艳虎², 陈晓宏¹

(1. 中山大学 水资源与环境研究中心, 广东 广州 510275;

2. 广东工业大学 环境生态工程研究院, 广东 广州 510006; 3. 中山大学 地理科学与规划学院, 广东 广州 510275)

摘要: 针对流域河道内水资源综合利用目标之间存在的互馈竞争关系, 本文以澜沧江干流景洪水电站为研究对象, 基于博弈理论构建了水电站发电效益与下游生态-出境水的完全信息静态博弈模型, 并耦合支付函数最大化方法, 探究在枯水典型年来水总量的约束下, 水电站发电效益与下游河道内生态需水-出境流量之间的竞争博弈关系。纳什均衡解表明, 在下游河道内生态需水流量选择最小值参与博弈时(天然径流量的21%), 景洪水电站发电效益(多年平均年发电量的80%)和澜沧江出境流量保证率(93.7%)在该典型年达到最高, 总效益最大。此外, 研究还发现景洪以下河道枯水期的日流量大于504 m³/s(出境流量下限值)、800 m³/s(航运需水下限值)的保证率由常规调度下的78.4%、40.3%提高到博弈均衡调度方案下的93.7%和48.8%。研究对于优化流域水库调蓄以协同发电和下游河道内用水综合效益具有借鉴作用。

关键词: 博弈; 纳什均衡; 发电效益; 生态需水; 出境流量; 澜沧江

中图分类号: TV213

文献标识码: A

doi: 10.13243/j.cnki.slxb.20190616

1 研究背景

水是人类赖以生存和发展的战略性资源, 而随着社会经济和人口的快速发展, 水资源开发利用和配置过程中潜在的矛盾也愈加显著^[1], 尤其是水电能源的开发^[2]。由于河流水电开发, 大坝拦蓄天然径流, 改变河流水文情势^[3], 这对于流域的生态环境以及下游人民社会福利等方面存在一定的负面影响。故河流水电开发中的水资源利用竞争博弈与优化配置问题不容忽视。

澜沧江-湄公河是一条国际河流, 涉及沿岸多个国家社会和人民的经济利益, 在澜沧江流域进行水电工程开发是极具战略挑战意义的, 很多学者都对此流域的水电开发、防洪、河道生态环境和航运等综合利用目标之间的竞争关系进行了研究。例如, 李栋楠等^[4]以澜沧江流域中下游三座梯级水库为例, 同时考虑发电目标和生态约束, 构建了梯级水库调度模型以定量分析发电和生态流量约束之间的均衡关系, 发现二者之间呈现出非线性的竞争关系; 魏国良等^[5]以漫湾水电站为研究对象, 建立了水电开发对河流生态系统服务功能影响的评价指标体系, 评估结果表明漫湾水电开发虽然获得了正面的发电经济效益, 但是生态环境方面牺牲的成本是生态效益的5.56倍, 经济效益的背后是极大的环境代价, 可见澜沧江水电开发和流域生态之间的矛盾颇为显著。

流域水资源优化配置的研究由来已久, 成果丰富^[6], 各种优化算法模型广泛应用, 例如多目标遗传算法^[7]、报童模型^[8]等。而近年来, 博弈相关理论与模型在解决水资源利用冲突和利益分配问题上

收稿日期: 2019-08-29; 网络首发时间: 2020-05-20

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1882.TV.20200519.1718.001.html>

基金项目: 国家自然科学基金项目(91547202, 51979043); 国家重大研发计划项目(2017YFC0405900); 广州市水务科技项目(穗污管办合字[2017]第28号)

作者简介: 蔡方园(1996-), 硕士生, 主要从事水资源方面的研究。E-mail: caify@mail2.sysu.edu.cn

通讯作者: 陈晓宏(1963-), 教授, 博士生导师, 主要从事水文水资源方面的研究。E-mail: eesexh@mail.sysu.edu.cn

的优异表现^[9]使学者们将目光聚焦于此。Zhenliang Liao等^[10]发现, 湄公河流域沿岸国家围绕该河流的水资源使用问题, 尤其是在上游修建梯级水库的行为上历来存在许多争执, 作者在文章中基于合作博弈理论设计了一款“湄公河”游戏对如何解决跨界河流上的水坝建设与流域收益分配问题进行了探究。Yang Yu等^[11]在澜沧江-湄公河流域对中国梯级水库系统运行和湄公河下游国家的水资源利用进行了合作博弈分析, 发现中国的梯级水库运作会影响湄公河下游流量的时空分布, 若中国参与合作联盟, 那么在流域系统层面上将会带来更多的收益。尹云松等^[12]熟练运用进化博弈理论, 使得有限理性的流域通过学习和协调, 能有效提高自身理性程度并调整对策, 最终实现具有一致性的水资源数量和质量分配上的纳什均衡。付湘等^[13]在研究中对多个水资源竞争用户进行了合作博弈和非合作博弈的效益差异探讨, 结果发现, 采取合作博弈能获得更高的总效益且实现帕累托最优, 而且合作博弈的效益分配机制还能驱使行动占先者加入合作联盟。Chih-Sheng Lee等^[14]基于水库流域管理出现的多项河道外供用水冲突, 建立了多目标博弈理论模型, 以期平衡流域经济发展和环境保护。何艳虎等^[15]为优化流域配水方案, 构建了引入奖励和惩罚因子的行业配水权重博弈模型, 并在东江流域取得了客观合理的结果。

将博弈相关理论运用于分析跨境国际河流的河道内用水, 有助于深入认识水电开发效益与河道生态需水、出境流量等的互馈竞争关系, 寻求更为合理的解决方案。以澜沧江干流为例, 水电站发电效益由水库发电流量和水头决定, 水库发电下泄水量会导致水库蓄水量减少, 水头降低, 影响后续发电效益; 而水库下泄水量与下游河道的生态需水流量存在重叠关系, 水库下泄水量越多, 能使得下游河道的生态需水和出境水满足度越高。若水库为满足下游河道内生态需水和出境流量的要求无约束泄流, 必然导致枯水年水库蓄水减少、水头降低、发电效益受损, 此时水电站发电效益最大化和下游的生态需水、出境流量满足程度最高之间就存在竞争博弈关系。因此, 本文欲以澜沧江干流景洪水电站为研究对象, 引入博弈理论, 构建水电站发电效益与下游河道内生态需水-出境水的完全信息静态博弈模型, 并耦合支付函数最大化计算方法, 在来水量一定的总约束下, 分析水电站发电效益(由发电流量和发电水头反映)与下游河道内生态需水-出境水之间的竞争博弈关系, 并依据纳什均衡准则计算获得综合效益最大化下的流域水库调蓄与下游河道用水协同调控方案。

2 研究区域概况

澜沧江-湄公河是一条国际河流, 在中国境内河段称为澜沧江, 出境后河段称为湄公河。澜沧江全长 2160 km, 平均比降 2.12‰, 流域面积 17.4 万 km²。根据 2003 年全国水力资源复查成果, 澜沧江流域水力资源技术可开发装机容量 34 840 MW, 年发电量 1690.33 亿 kW·h, 水力资源极其丰富, 是我国重点开发的十三大水电基地之一。景洪水电站是澜沧江干流最后一个具有径流调节能力的梯级电站, 坝址距离澜沧江出国境口仅 108.9 km, 河流出境流量近似等于水库下泄流量。因此, 景洪水电站的水资源合理调配对维护中国和湄公河下游国家的共同利益至关重要。

景洪水电站水库死水位 591 m, 正常蓄水位 602 m, 校核洪水位 609.4 m, 相应的死库容为 5.62 亿 m³, 正常蓄水位以下的库容为 8.71 亿 m³, 总库容 11.39 亿 m³, 为不完全季调节水库。坝址处多年平均径流量 1830 m³/s^[16]。电站下游河道枯水期水面水位约 538 m, 汛期水位抬高, 两年一遇的设计洪水位为 544.9 m。本文中坝址下游河道的水位流量关系曲线借鉴李廷华^[17]根据允景洪水文站历史洪水数据资料推求的结果, 即水位 $H(m)$ —流量 $Q(m^3/s)$:

$$H = 0.0014Q + 535.2 \quad (1)$$

由式(1)可以计算出景洪水电站坝址处两年一遇洪峰流量约为 7000 m³/s。

景洪水电站总装机容量为 1750 MW, 发电额定水头为 60 m, 最大发电流量为 3328 m³/s, 单库多年平均年发电量为 78.58 亿 kW·h。

景洪水电站装机容量大, 河道落差大, 水能资源丰富, 发电效益高; 电站建成后, 景洪市政府规定, 该市的城市用水将直接从电站库区取水, 取水流量为 1.73 m³/s; 由于澜沧江在流经景洪电站后,

下游沿江地势豁然开阔,大部分土地利用类型属于耕地,目前防洪标准较低,而且景洪电站调节库容较小,若单独运行只能保证自身枢纽的防洪要求,无力也无需承担下游地区的防洪任务^[18],所以,当汛期景洪水电站来水流量达到两年一遇的洪水时(洪峰流量约为7000 m³/s),为了减少弃水、增加蓄水以最大化发电效益,水库最高蓄水位调整为校核洪水位,并规定在洪峰出现后的7天内调整水库水位回落到正常蓄水位,保障坝体自身安全;此外,澜沧江沿岸生物物种丰富而且比较脆弱,同时河流的生态健康也影响着下游国家的综合利益,故景洪水电站在发挥综合效益时,须保证河道内生态需水得到满足,出境水量不低于504 m³/s^[19],使河流能够健康可持续地给沿岸国家与人民带来利益。综上所述,景洪电站的开发任务确定为以发电为主,同时需满足河道内生态需水和出境流量的要求。

3 研究方法

3.1 博弈论与完全信息静态博弈 博弈论是关于策略相互作用的理论,构成一个博弈的基本要素至少包含以下4个:博弈参与对象、博弈规则、博弈策略和博弈的支付。其中,博弈规则包括行为、时间和信息3个关键内容。

在博弈中,如果参与对象采取行动的次序无先后之分,且对其他参与对象的特征、类型以及可以选择的战略和在此战略下所能得到的支付等信息掌握得充分,我们将这类博弈称为完全信息静态博弈^[20]。

本文欲在来水总量确定的情况下,探究水电站发电效益与下游河道内生态需水-出境流量之间的博弈竞争关系该如何协调,以期达到综合效益最大化的纳什均衡状态。在博弈过程中,假定水库发电效益与河道内生态需水-出境需水这三者采取策略的次序无先后之分,且相互之间的行为特点和阈值区间是已知信息,可选策略以及在此策略下能得到的支付或效益亦为已知信息,那么就构成了一个完全信息静态博弈问题。

3.2 完全信息静态博弈模型 在明确一个博弈的基本构成要素之后,根据这些要素,运用博弈论规范的数学语言及概念构建博弈模型。有多个对象参与的博弈模型 W 的一般表达式如下:

$$W = (X, S_x, S^*, U) \quad (2)$$

式中: X 为博弈参与对象 x 的集合, $x \in X$; S_x 为每个博弈参与对象 x 的策略集合; S^* 为博弈均衡策略; U 为博弈参与对象的支付函数集合。

3.3 纳什均衡 纳什均衡(Nash Equilibrium)的概念,最早是由Nash(1950, 1951)提出的,其数学定义是:

在由 X 个参与对象组成的博弈中,策略组合 $s = (s_1, s_2, s_3, \dots, s_x)$ 构成一个纳什均衡,当且仅当:对于每一个博弈参与对象 $x, x = 1, 2, 3, \dots, X$,其策略 s_x 是对策略组合 s 中的其他所有博弈参与对象策略 s_{-x} 的最优回应,即对任意 $s'_x \in S_x, U(s_x, s_{-x}) \geq U(s'_x, s_{-x})$ ^[21]。

通俗来讲,一个纳什均衡就是所有博弈参与对象的一个策略组合。这个策略组合的每个策略都与其他策略构成相互最优反应,一旦实现相互最优,所有博弈参与对象都将不会单方面改变策略,因此会形成均衡状态。纳什均衡的实现要求所有博弈参与对象的均衡策略是共同认识,也就是完全信息博弈的概念。本文根据研究对象的特点和研究目的,通过构建完全信息静态博弈模型,以期达到纳什均衡。

4 景洪水电站发电效益与下游生态需水—出境流量互馈博弈分析

4.1 完全信息静态博弈模型构建 景洪水电站在来水量一定的约束下,水库发电效益与下游河道内生态需水—出境流量的完全信息静态博弈模型记为 $W = (X, S_x, S^*, U)$,具体构建如下:

(1)参与对象集合。参与对象集合记为 $X = \{\text{水电站发电效益, 下游河道内生态需水流量, 出境流量}\}$ 。

(2)各参与对象的策略集合。 S_x 为各参与对象的策略集合(即水电站发电效益与下游河道内用水的协同调度方案)。其中, 参与对象1—水电站发电效益的策略集合: $S_1 = \{Q_i\}$, (发电效益由发电流量与水头反映, 水头可通过水库蓄泄过程中的水量平衡关系和水位-库容曲线用发电流量表示, 因此发电效益策略简化为发电流量 Q_i 表示); 参与对象2—下游河道内生态需水流量的策略集合: $S_2 = \{EFR_i\}$; 参与对象3—出境流量的策略集合: $S_3 = \{Q_{出境i}\}$; $i=1, 2, \dots, T$, i 为参与对象的行动时段, T 为行动时段总数。各参与对象所有策略选择所形成的集合成为博弈的策略集合, 记为 $S_x = \{S_1, S_2, S_3\}$ 。

(3)支付函数。水电站发电效益与下游河道内生态需水流量、出境流量这三个博弈参与对象在各种行为策略组合下的支付函数记为 U , 在每一种策略组合 m 下, 支付函数 U_m 为:

$$U_m = U_{m1} + U_{m2} + U_{m3} \quad (3)$$

$$U_{m1} = E_m / 78.58 \quad (4)$$

$$U_{m2} = \sum de_m / T \quad (5)$$

$$U_{m3} = \sum dc_m / T \quad (6)$$

其中: 式(3) U_m 为所有博弈参与对象的总支付函数, 表示策略组合 m 下的总效益;

式(4)定义 U_{m1} 为策略组合 m 下博弈参与对象1--发电效益的支付函数, 等于年内实际发电量 E_m 与景洪电站多年平均年发电量 78.58(单位: 亿 kW·h)的比值, 即发电效益指数;

式(5)定义 U_{m2} 为策略组合 m 下博弈参与对象2--河道内生态需水流量的支付函数, 等于水库下泄流量满足生态需水流量的时段数(记为 $\sum de_m$) 占总计算时段数(T)的比例, 即生态效益指数。

式(6)定义 U_{m3} 为策略组合 m 下博弈参与对象3--出境需水流量的支付函数, 等于水库下泄流量满足出境需水流量的时段数(记为 $\sum dc_m$) 占总计算时段数(T)的比例, 即出境效益指数。

耦合支付函数最大化方法进行博弈计算, 鉴于发电效益这一博弈要素易于量化表述, 因此将发电效益最大化作为主要目标, 下游河道内生态需水和出境需水以约束条件的形式参与博弈。

$$\max(E) = \max\left(\sum_{i=1}^T 9.81 \times Q_i \times \Delta H_i \times \eta \times \Delta t_i\right) \quad (7)$$

约束条件如下:

电站出力约束

$$N_i = 9.81 \times Q_i \times \Delta H_i \times \eta \quad (8)$$

$$0 \leq Q_i \leq 3328 \quad (9)$$

$$\Delta H_i = (H_i + H_{i+1}) / 2 - H_{\text{下}} \quad (10)$$

式中: N_i 为 i 时段电站实际出力, kW; Q_i 为 i 时段发电流量, 3328 m³/s 为景洪电站正常运行下的最大允许发电流量^[22]; ΔH_i 为 i 时段发电净水头, m; η 为发电效率, 一般取 0.7 ~ 0.9, 这里取 0.9; H_i 、 H_{i+1} 分别为 i 、 $i+1$ 时段的水库水位, m; $H_{\text{下}}$ 指水库下游河道内水位, m; 根据李廷华^[17]关于景洪水电站下游河道内水位-流量关系的相关研究, 分 2 种情况(a)当 $Q_{\text{下泄}i} \leq 2000$ m³/s 时, 该计算时段 i 处于枯水期, 取下游河道内水位 $H_{\text{下}}$ 为定值 538 m; (b)当 $Q_{\text{下泄}i} > 2000$ m³/s 时, 下游河道内水位按式(1)计算, 为 $H_{\text{下}} = 0.0014 * Q_{\text{下泄}i} + 535.2$ 。

水量平衡关系及库容约束:

$$V_{i+1} = V_i + (F_i - Q_{\text{供}i} - Q_i - Q_{\text{弃}i}) \times \Delta t_i \quad (11)$$

$$5.62E + 8 \leq V_i \leq 1.139E + 9 \quad (12)$$

$$Q_{\text{下泄}i} = (Q_i + Q_{\text{弃}i}) \quad (13)$$

式中： V_i 指 i 时段水库库容， m^3 ，允许库容范围在死库容 5.62 亿 m^3 和总库容 11.39 亿 m^3 之间； F_i 为 i 时段水库来水流量， m^3/s ； $Q_{供i}$ 是指 i 时段城市供水取水流量 1.73 m^3/s ，假定保证率为 100%； Q_i 为 i 时段发电流量， m^3/s ； $Q_{弃i}$ 为 i 时段不经过发电机组直接下泄流量， m^3/s ；水库总下泄流量 $Q_{下泄i}$ 为水库 i 时刻的发电用流量和水库 i 时刻弃水流量之和， m^3/s ； $\Delta t_i = 24 \times 3600$ ，用以将发电出力计算时段单位从日换算成秒。

水库水位约束：

$$H_i = 554.7 \times V_i^{0.0384} \quad (14)$$

$$591 \leq H_i \leq 609 \quad (15)$$

式中： H_i 为 i 时段水库水位。式(14)是景洪电站水库的水位-库容曲线，水库水位变化范围在 591 m (死水位)与 609 m (校核洪水位)之间。

河道内生态需水及出境流量约束：

$$\begin{cases} EFR_i = 0.21 \times F_i, & \text{最小生态需水流量} \\ EFR_i = 0.37 \times F_i, & \text{适宜生态需水流量} \\ EFR_i = 0.66 \times F_i, & \text{理想生态需水流量} \end{cases} \quad (16)$$

$$\min(Q_{出境i}) = 504 \quad (17)$$

式中： EFR_i 为 i 时段下游河道内生态需水流量； $Q_{出境i}$ 为河流出境流量， m^3/s 。水库下泄流量需受到下游河道内生态需水流量和出境流量下限值的约束，与发电出力(由发电水头和发电流量决定)之间形成互馈竞争关系。根据胡波等人^[23]提出的生态需水系数-水文参数耦合模型，推求得到澜沧江河道的最小、适宜以及理想的生态需水量分别占实测来水径流量的 21%、37%和 66%。

4.2 计算结果 依据位于景洪水电站上游最邻近的夏旧水文站 1961—2000 年的实测日流量数据和流域区间雨量站的实测降雨量数据，通过泰森多边形法由区间点雨量资料推求流域面雨量数据^[24]，进而通过面雨量数据和流域径流系数^[25]，推求得到景洪水电站坝址处断面流量数据。因为澜沧江干流河道落差大，宽窄纵深，水库为河道型水库，将坝址处河道断面流量作为水库天然来水入库流量，对问题的研究影响程度有限，所以在此使用坝址处断面径流量近似作为景洪水库入库流量。

根据实际代表年法，对坝址处 40 年的径流量序列进行水文频率计算，根据计算结果选取 1994.6—1995.5(枯水年，95%)作为枯水典型年，基于该典型年的实际来水情况，在日尺度上对景洪水库进行发电效益与下游河道内生态需水流量-出境流量的完全信息静态博弈模型计算，得到各策略组合的支付函数值计算结果如下表 1~3：

表 1 景洪水电站枯水典型年发电效益与河道内生态需水-出境流量博弈计算结果

| 策略组合 m | 支付函数值 $U_m = U_{m1} + U_{m2} + U_{m3}$ | 参与者 1: 发电效益 | | 参与者 2: 生态需水 | | 参与者 3: 出境需水 | |
|----------|---|-----------------------------|---------------------|--------------|--------------------|---------------|---------------------|
| | | 年总发电量/ (亿 $kW \cdot h$) | 发电效益 指数 U_{m1} | 生态需水 流量约束 | 生态效益指数 U_{m2} | 出境需水流量 满足度 | 出境效益 指数 U_{m3} |
| 1 | 2.737 | 62.97 | 0.800 | 最小 | 1 | 93.7% | 0.937 |
| 2 | 2.725 | 62.80 | 0.799 | 适宜 | 1 | 92.6% | 0.926 |
| 3 | 2.662 | 61.70 | 0.785 | 理想 | 1 | 87.7% | 0.877 |

表 2 景洪水电站枯水典型年汛期发电效益与河道内生态需水-出境流量博弈计算结果

| 策略组合 | 汛期总发电量/(亿 $kW \cdot h$) | 河道内生态需水流量约束值 | 出境需水流量满足度 | 出境需水流量不满足天数 |
|------|--------------------------|--------------|-----------|-------------|
| 1(1) | 42.34 | 最小 | 100% | 0 |
| 2(1) | 42.34 | 适宜 | 100% | 0 |
| 3(1) | 42.29 | 理想 | 100% | 0 |

综上所述，根据纳什均衡准则，对本文计算结果中的景洪水电站发电效益与下游河道内生态需水-出境水博弈策略组合进行检验，得到纳什均衡解如下式(18)~(24)：

表3 景洪水电站枯水典型年非汛期发电效益与河道内生态需水—出境流量博弈计算结果

| 策略组合 | 非汛期总发电量/(亿 kW·h) | 河道内生态需水流量约束值 | 出境需水流量满足度 | 出境需水流量不满足天数 |
|------|------------------|--------------|-----------|-------------|
| 1(2) | 20.63 | 最小 | 93.70% | 23 |
| 2(2) | 20.47 | 适宜 | 92.60% | 27 |
| 3(2) | 19.41 | 理想 | 87.67% | 45 |

$$S^* = (s_1^*, s_2^*, s_3^*) = (\{Q_i^*\}, \{EFR_i^*\}, \{Q_{出境i}^*\}) \quad (18)$$

在汛期(6—10月):

$$Q_i^* = \begin{cases} EFR_i^*, & \text{当 } 5.62 \leq V_i < 8.71 \\ F_i, & \text{当 } V_i \geq 8.71 \text{ 且 } F_i < 3328 \\ 3328, & \text{当 } V_i \geq 8.71 \text{ 且 } F_i \geq 3328 \end{cases} \quad (19)$$

$$EFR_i^* = 0.21 * F_i \quad (20)$$

$$Q_{出境i}^* = 504 \quad (21)$$

在非汛期(11月—翌年5月):

$$Q_i^* = \begin{cases} 0, & \text{当 } 5.62 < V_i < 8.71 \text{ 且 } F_i < \max\{EFR_i^*, Q_{出境i}^*\} \\ \max\{EFR_i^*, Q_{出境i}^*\}, & \text{当 } 5.62 < V_i \leq 8.71 \text{ 且 } F_i \geq \max\{EFR_i^*, Q_{出境i}^*\} \\ F_i, & \text{当 } V_i \geq 8.71 \text{ 且 } F_i < 3328 \\ 3328, & \text{当 } V_i \geq 8.71 \text{ 且 } F_i \geq 3328 \end{cases} \quad (22)$$

$$EFR_i^* = 0.21 * F_i \quad (23)$$

$$Q_{出境i}^* = 504 \quad (24)$$

式中: $\{Q_i^*\}$ 为景洪水电站发电效益的纳什均衡解策略集, m^3/s ; $\{EFR_i^*\}$ 为下游河道内生态需水流量约束值的纳什均衡解策略集, m^3/s ; $\{Q_{出境i}^*\}$ 为出境需水流量约束值的纳什均衡策略集, m^3/s ; V_i 为博弈行动时段初的水库库容, 亿 m^3 ; F_i 为入库流量, m^3/s 。

在枯水典型年来水总量的约束下, 景洪水电站发电效益与下游河道内生态需水—出境流量博弈模型纳什均衡解(策略组合1)对应的博弈过程如图1所示。

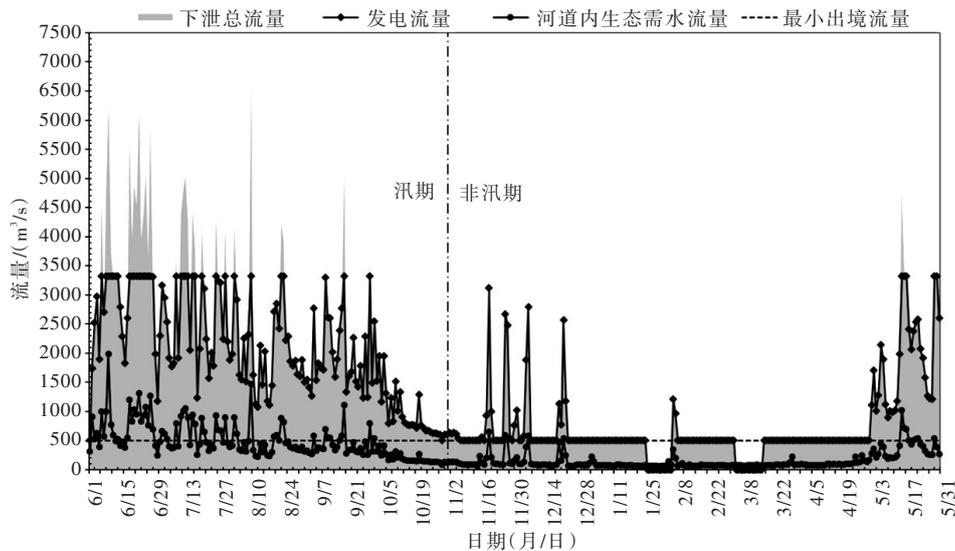


图1 枯水典型年景水电站发电效益与下游河道内生态需水—出境流量纳什均衡策略博弈过程(策略组合1)

4.3 分析讨论 依据上表1~3的计算结果, 结合纳什均衡定义, 对各参与者的策略组合进行分析可得:

在枯水典型年，水电站发电效益(由发电水头和发电流量决定)与下游河道内生态需水-出境水的博弈竞争关系显著(表1)，尤其是在来水量大幅度减少的非汛期(表3)。

(1)在来水量充足的汛期(表2)，水电站发电效益与下游河道内生态需水、出境需水的满足程度都比较高，竞争关系不显著。且汛期由于来水量陡涨，景洪水库调节库容有限，不经过水轮机直接下泄的弃水流量在不同的生态需水流量约束值情况下差异不大(图2)。

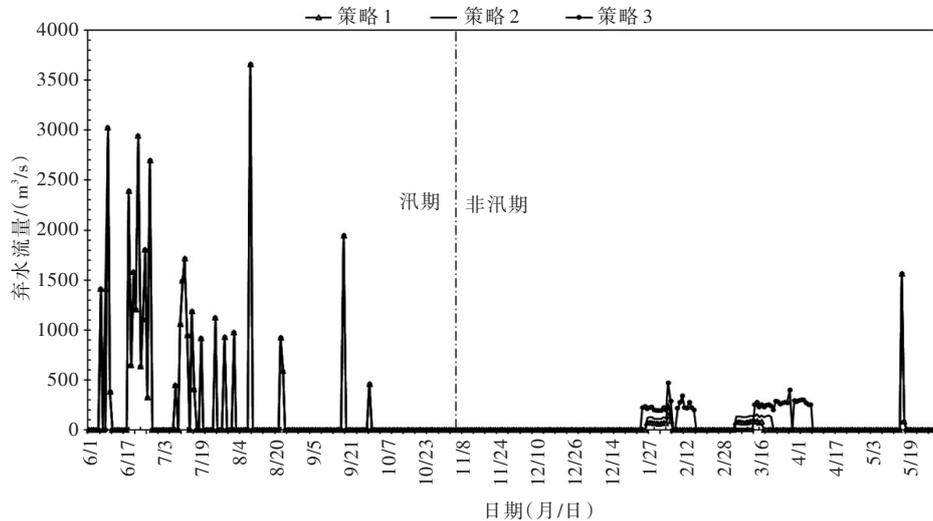


图2 枯水典型年景洪电站在3种不同博弈策略下的弃水过程

(2)但是在来水量大幅减少的非汛期(表3)情况则大有不同。水库下泄水量伴随枯水年的入库水量减少必然导致水库蓄水量减少、水头降低，进而影响发电效益，尤其是在非汛期(即枯水期)，既要考虑水库蓄水以抬高水位，保证后续发电效益，又要尽可能地保障下游河道的生态需水流量和出境流量需求，强调重视河流生态健康与国际河流出境水需求，此时水库发电效益和下游的生态需水-出境流量需求之间的互馈竞争激烈程度显现，并且从图2博弈的弃水过程可以看出，非汛期在策略3，即河道内生态需水约束值取理想值的情境下，未经水轮机直接下泄以满足下游河道内生态需水和出境需水流量的弃水量最大；其次是策略2；而在策略1，即河道内生态需水约束值取最小值的情境下弃水量最小，使水库得以蓄水，在非汛期后期的发电水头和发电流量能够得到更大程度的保障，获得更高的发电效益。

(3)由上表1中依据纳什均衡准则得到的完全信息静态博弈模型支付函数计算结果U可知，景洪水电站枯水典型年发电效益与下游河道内生态需水、出境流量完全信息静态博弈的纳什均衡解为策略组合1，即在满足下游生态需水流量最小值(即天然径流量的21%)的情况下得到景洪水电站发电效益与下游河道内生态需水-出境水博弈的水库优化调配方案，水电站枯水年发电效益达到多年平均发电量的80%，枯水期出境流量不低于504 m³/s的保证率从常规调度的78.4%(基于下游允景洪水文站2006—2008年的实测数据)提升到93.7%。在此博弈模型计算得到的水库优化调配方案下，景洪水电站枯水典型年发电效益与下游河道内生态需水、出境流量三者的支付函数值最大，总效益值亦为最大。

(4)然而在纳什均衡解中，依旧存在非汛期极枯水时水库安全运行时下泄流量无法满足河流出境流量需求的情况，其中一个关键原因是澜沧江径流主要由雨水补给，降水季节分配不均直接导致澜沧江径流量存在明显的汛期和枯期且径流量差异极大，年最大和最小日均径流量差距可高达10倍^[25]，也说明了在澜沧江干流单一水库的调节能力是不够的，梯级水电站的建设将大大提高澜沧江流域水能资源与水量资源的开发利用效率。

5 结论

针对水电开发下河流水资源多目标利用的冲突问题，引入博弈模型，创新性地构建水电站发电

效益与下游河道内生态需水—出境流量的完全信息静态博弈模型,以澜沧江干流下游景洪电站为实例,依据纳什均衡准则并耦合支付函数最大化方法进行计算。结果表明:景洪水电站发电效益与下游河道内生态需水—出境需水之间的博弈竞争关系在入库流量大幅减少的非汛期(即枯水期)表现尤为显著,而在水量丰富的汛期表现则稍弱;在枯水典型年来水情况下,当澜沧江下游河道生态需水流量取最小流量约束,即天然径流量的21%时,景洪水电站全年的发电效益(多年平均年发电量的80%)和澜沧江出境流量保证率(93.7%)在该典型年达到最高,综合效益最大化且水库弃水量最小。此外,将本文博弈模型计算结果与传统的调度运行结果进行比较,发现景洪以下河道枯水期的日流量大于 $504\text{ m}^3/\text{s}$ (出境流量下限值)、 $800\text{ m}^3/\text{s}$ (航运需水下限值)的保证率分别由常规调度下的78.4%、40.3%(基于下游允景洪水文站2006—2008年的实测数据)提高到博弈均衡调度方案下的93.7%和48.8%,说明博弈模型调度方案相较于传统常规调度是存在一定优越性的。

传统水库优化调度有一套成熟的多目标优化方法,但多目标优化方法并未考虑竞争因素之间的博弈关系及其纳什均衡准则,各竞争因素之间的协同性未得到充分体现。本文则充分考虑流域各用水主体间存在的竞争博弈关系,明确针对澜沧江流域在我国境内最下游的景洪水电站为节点,提出发电效益最大化目标与下游河道内生态需水和出境水需求满足程度最高之间的竞争博弈关系,通过定义它们在完全信息静态博弈下的支付函数表达的总效益,给出总效益最大化的发电出力、生态水量和出境水量的保证率,一定程度上克服了传统水库优化调度下各用水竞争要素之间缺乏协同性的缺陷,对于优化流域水库调蓄以协同发电和下游河道内用水综合效益具有借鉴作用。另外,本研究中澜沧江这类来水量较大且存在明显雨季和旱季的河流,提出了单库在调节水力发电效益与下游河道内用水竞争博弈方面能力较弱的问题,在后续研究中可考虑基于本研究结果,进一步深入分析澜沧江梯级水电站的建设在跨境河流水力发电效益与下游河道内多方用水中的竞争博弈关系,探讨更为合理的水库群优化调度方案。

参 考 文 献:

- [1] 王浩,刘家宏.国家水资源与经济社会系统协同配置探讨[J].中国水利,2016(17):7-9.
- [2] ZARFL C, LUMSDON A E, BERLEKAMP J, et al. A global boom in hydropower dam construction[J]. Aquatic Sciences, 2015, 77(1): 161-170.
- [3] 纪道斌,龙良红,徐慧,等.梯级水库建设对水环境的累积影响研究进展[J].水利水电科技进展,2017, 37(3): 7-14.
- [4] 李栋楠,赵建世.梯级水库调度的发电-生态效益均衡分析[J].水力发电学报,2016, 35(2): 37-44.
- [5] 魏国良,崔保山,董世魁,等.水电开发对河流生态系统服务功能的影响——以澜沧江漫湾水电工程为例[J].环境科学学报,2008(2): 235-242.
- [6] 王浩,游进军.中国水资源配置30年[J].水利学报,2016, 47(3): 265-271, 282.
- [7] FENG Z K, NIU W J, CHENG C T. Optimization of hydropower reservoirs operation balancing generation benefit and ecological requirement with parallel multi-objective genetic algorithm[J]. Energy, 2018, 153: 706-718.
- [8] 何艳虎,陈晓宏,林凯荣,等.东江流域水资源优化配置报童模式研究[J].水力发电学报,2015, 34(6): 57-64.
- [9] MADANI K. Game theory and water resources[J]. Journal of Hydrology, 2010, 381(3/4): 225-238.
- [10] LIAO Z L, HANNAM P M. The Mekong Game: Achieving an All-win Situation[J]. Water Resources Management, 2013, 27(7): 2611-2622.
- [11] YU Y, ZHAO J S, LI D N, et al. Effects of hydrologic conditions and reservoir operation on transboundary cooperation in the Lancang-Mekong river basin[J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 2019, 145(6): 04019020.
- [12] 尹云松,糜仲春,张道武.流域水资源分配纳什均衡实现过程的进化博弈分析[J].运筹与管理,2005(1): 57-61.
- [13] 付湘,陆帆,胡铁松.利益相关者的水资源配置博弈[J].水利学报,2016, 47(1): 38-43.

- [14] LEE C S . Multi-objective game-theory models for conflict analysis in reservoir watershed management[J] . *Chemosphere*, 2012, 87(6): 608-613 .
- [15] 何艳虎,陈晓宏,林凯荣,等 . 用水总量控制下行业配水权重不完全信息动态博弈[J] . *中国人口·资源与环境*, 2017, 27(11): 209-214 .
- [16] 穆秀英,吴新 . 澜沧江流域水电开发及其特点[J] . *电网与清洁能源*, 2010, 26(5): 72-78 .
- [17] 李廷华 . 景洪水电站历史洪水分析[J] . *云南水力发电*, 2001(1): 25-27 .
- [18] 郑江涛 . 浅谈景水电站的开发任务[J] . *云南水力发电*, 2001(1): 19-22 .
- [19] 郭有安,周毅 . 澜沧江中下游梯级电站发电与生态需水耦合优化研究[J] . *水力发电*, 2017, 43(7): 92-95 .
- [20] 张维迎 . 博弈论与信息经济学[M] . 上海:上海人民出版社,2004 .
- [21] 谢识予 . 纳什均衡论[M] . 上海:上海财经大学出版社,1999: 24-52 .
- [22] 杨璐 . 景水电站装机容量选择综合分析[D] . 昆明:昆明理工大学,2008 .
- [23] 胡波,郑艳霞,翟红娟,等 . 生态需求流量与河道内生态需水量计算研究——以澜沧江、红河为例[J] . *长江科学院院报*, 2015, 32(3): 99-106 .
- [24] 张涛,王祥,杨欣玥,等 . 面雨量计算方法对水文模拟的影响[J] . *人民长江*, 2017, 48(19): 42-47 .
- [25] 何大明 . 澜沧江——湄公河水文特征分析[J] . *云南地理环境研究*, 1995(1): 58-74 .

Game study of Lancang River Basin's power generation benefit and downstream ecological water-outbound water in the dry years

CAI Fangyuan^{1, 3}, HE Yanhu², CHEN Xiaohong¹

(1. Center for Water Resources and Environment, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China;

2. Institute of environmental and Ecological Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China;

3. School of Geography and Planning, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China)

Abstract: Aiming at the mutual-feed competition between the comprehensive utilization of water resources in river basins, the Jinghong hydropower station on the main stream of the Lancang River is taken as the research object in this paper, and based on the game theory, a complete information static game model is developed between the hydropower generation efficiency and the downstream ecological-outbound water. The model, coupled with a payment function maximization method, is used to explore the competitive game relationship between the benefits of power generation of hydropower station and ecological water demand-outflow in the downstream river under the constraints of the total amount of water in a typical dry year. The game equilibrium solution shows that when the minimum ecological water flow in the downstream channel is selected to participate in the game (21% of natural runoff), the power generation benefit of Jinghong Hydropower Station (80% of the mean annual energy production) and the outflow guarantee rate of Lancang River (93.7%) reached the highest in this dry year, and the total benefit was the largest. In addition, the study also found that, the guarantee rates of the daily flow rate of the river below Jinghong greater than 504 m³/s (lower limit of outbound flow) and 800 m³/s (submarine limit required for shipping) are 78.4% and 40.3% under conventional dispatch during the dry season. While they increased to 93.7% and 48.8% under the game equilibrium scheduling scheme. The research has a reference for optimizing the regulation and storage of watershed reservoirs for coordinated power generation and comprehensive benefits of water use in downstream rivers.

Keywords: game; Nash equilibrium; power generation benefits; ecological water demand; outbound flow; Lancang River

(责任编辑:杨虹)