

引水条件下水库生态调度方法研究

王海霞,张弛,周惠成,张小丽

(大连理工大学 水利工程学院, 辽宁 大连 116024)

摘要: 针对以生态流量大小为调度目标的生态调度方法与供水目标矛盾突出的问题,提出了包括流量大小、频率、延时等多种属性信息的生态整体目标,并设计了生态流量约束法以及生态供水限制线法两种生态调度方法。结果表明:生态流量约束法主要是对生态流量大小进行调节,无法对水库缺水时期的生态供水进行灵活调整,其与供水目标的竞争关系明显;而生态供水限制线法,能够针对包括流量大小、频率、延时等多种信息的生态目标整体,通过调整流量大小及流量过程等形式,对生态目标进行控制,其调度效果要明显优越于生态流量约束法。因此,碧流河水库实施大伙房输水应入连工程后,应采取生态供水限制线的生态调度方法。

关键词: 水库生态调度; IHA 指标; 生态限制线; 高斯隶属度函数; 引水条件; 水库

中图分类号:TV697.11

文献标识码:A

文章编号:1672-643X(2016)01-0001-06

Research on ecological operation method under water diversion condition

WANG Haixia, ZHANG Chi, ZHOU Huicheng, ZHANG Xiaoli

(School of Hydraulic Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: Aimed at the contradiction between the ecological operation method which uses flow magnitude as the operation object and the water supply objective, this paper proposed an integrative ecological goals including flow magnitude, frequency, duration and other attribute information. It also designed two ecological operation methods named flow-restraint method and the limited water supply method. Results showed that flow-restraint method mainly controls flow magnitude, and can't flexibly adjust ecological water supply at dry periods of reservoir, so it has obvious competition with water supply objective. While the limited water supply method can focus on the whole ecological objective by controlling flow magnitude and process to adjust ecological objective, and it has more advantages compared with flow-restraint method. Therefore, after the project of emergent transmission of water from Dahuofang reservoir, Biliuhe reservoir should implement the limited water supply ecological operation method.

Key words: ecological operation of reservoir; IHA index; ecological limited water supply line; Gauss membership function; water diversion condition; reservoir

1 研究背景

随着水资源供需矛盾的不断加剧以及人们对本地水资源开发利用程度的不断提高,跨流域引水成为解决缺水地区水资源紧缺的重要手段^[1]。同时,水库运行给下游河道生态系统带来的影响日益严重,河道内流量减少、河口滩涂生态退化、生物多样性锐减等问题突出,生态环境越来越受到人们的重视。因此,引水工程实施后,有必要研究制定合理的

生态调度方法,使引水在对受水区的工业与生活、农业供水状况进行改善的同时,能够对受水区水库下游河道的生态环境系统进行有效修复。

国外很早就进行了生态调度相关方面的研究,并且取得了丰硕的研究成果。为了保护 and 恢复鱼类溯流产卵的需求,美国海洋渔业局将大古力水坝(GCD)的主要调度目标由发电与防洪调整为生态保护^[2];田纳西河流域管理局通过对20多个水库的优化调度调整,提出提高下游最小流量、对涡轮机通

风等措施,改善下游河道生态系统的健康状况^[3];在非洲南部的津巴布韦,研究人员运用 Desktop 模型,对 Odzi 河的 Osborne 水库进行河流生态环境需水量研究,为考虑生态环境问题的水库调度提供指导^[4];James 等^[5]提出了考虑管理优先级及人类活动与生态需求平衡的生态系统管理方法,确定了普吉湾的生态管理指标体系;Jackie 等^[6]针对奥卡万戈河未来发展中的生态保护问题,提出了不同经济发展水平下的生态完整性规划,为边界河的可持续发展提供规划等。

我国生态调度的起步较晚,目前大部分是针对生态需水量的计算方法研究。王加全等^[7]利用改进的 7Q10 法、Tennant 法、最小月平均流量法等确定了燕山水库的生态需水量,并计算了不同生态流量对水库供水、发电、灌溉等目标的影响程度,确定了考虑生态需求的水库最优调度方案;雍婷等^[8]在确定丹江口水库的生态库容时,使用 Tennant 法计算了不同生态有利程度下的河道基本生态需水过程;许新宜等^[9]利用 Tennant 法、最小月径流法和逐月最小径流法,计算了南盘江柴石滩水库上游流域的生态需水量,并以环境效益与经济效益之和作为调度目标,计算不同来水条件下水库的调度结果;杨娜等^[10]利用 Tennant 法和湿周法,综合得出丹江口下游河道的旬生态需水量,并建立了兼顾兴利目标和天然水流模式目标的多目标水库优化调度模型,分析天然水流模式目标对兴利目标的影响情况;朱金峰等^[11]采用 Tennant 法对沙河水系不同断面的最小和适宜生态流量进行了计算,并分析了生态流量满足程度对水库群经济目标的影响,等等。

本文选择各月平均流量、10 d 最大流量、高流量延时、低流量延时以及流量平均增加率等 5 个指标,作为碧流河水库引水后的生态目标。设计了生态流量约束法与生态供水限制线法两种生态调度方法,计算其在不同用水户供水量分配情景下的调度结果。生态供水限制线法能够充分利用生态流量的其它方面属性,使相同工业与生活、农业供水量情景下的生态目标整体优越于生态流量约束法,可以作为碧流河水库引水条件下的生态调度方法。

2 方 法

2.1 生态目标计算方法

水文变化指标法(IHA)^[12]由于能够全面地对河流生态系统的整体状况进行描述,因此成为一种评价工具被人们广泛地应用于对河流的研究与管理中去。

Brian 等^[13]在水文变化指标法(IHA)的基础上,提出了利用 RVA^[14]法对河道水文情势变化情况进行评价的新方法。但是,RVA 法计算的只是各个指标落在目标范围内的频率,对于落在目标范围之外的指标,其值是位于目标范围的上限之上、还是下限之下,被完全忽略,导致其对流量序列评价不准确^[15]。

所以,在进行水文指标变化程度计算时,不仅应考虑指标落在目标范围内的频率,还应考虑各个指标值对于最佳值(天然状态)的隶属程度。指标越接近天然流量状态,表明河流生态系统的健康状况越好,反之越差。因此,本文采用高斯隶属度函数来计算水文指标相对于天然状态的隶属度程度,使调度后的河流生态环境尽可能地接近天然状况^[16]。其计算公式为:

$$\mu(x_i) = e^{-\frac{(x_i - m_i)^2}{2\sigma_i^2}} \quad (1)$$

式中: $\mu(x_i)$ 为第*i*个水文指标的隶属度函数值; x_i 为受人类活动影响后(调度后)第*i*个水文指标值; m_i 为受人类活动影响前(水库建设前)第*i*个水文指标的均值; σ_i^2 为受人类活动影响前(水库建设前)第*i*个水文指标的方差。

受人类活动影响后(本文中指水库的调度实施后),某个水文指标的现值越接近于天然状态,其隶属度函数值越接近于 1,表明河流生态系统的状况越好;反之,水文指标的隶属度函数值越接近于 0,表明河流生态系统的状况越差。

对于由 *n* 个水文指标组成的生态环境系统,其生态目标函数可以表示为:

$$\max P_{eco} = \max \sum_{i=1}^n \omega_i \mu_i \quad (2)$$

式中: P_{eco} 为生态整体目标函数值; ω_i 为第*i*个水文指标的权重系数; μ_i 为第*i*个水文指标的隶属度函数值。

2.2 生态调度方法设计

2.2.1 生态流量约束法 生态流量约束法,是根据给定的生态流量过程,在调度中以约束条件的形式进行满足。该方法将生态需水作为必须满足的条件,在调度中给予 100% 的优先满足。

本文考虑到要使生态流量值具有一定的变化范围,以便研究不同流量级别对于生态目标的响应程度,故设计生态流量以 0.3 亿 m^3 (最小生态流量值)为基础,并以 0.2 亿 m^3 为步长不断增加,直到工业与生活的供水量达到其下限值时,生态环境供水量达到其上限值。将不同的生态环境供水量情况,按照多年平均径流在各旬内的比例进行分配,在调度

中给予 100% 满足,计算不同级别的生态流量对于工业与生活目标以及生态目标的影响情况。

2.2.2 生态供水限制线法 为了使缺水时期生态环境用水不对水库其它用水户的供水产生较大的压力,满足工业与生活、农业供水的保证率需求,本文对生态环境设计了限制供水的策略,与生态流量约束法的调度结果进行对比,以确定效果较优的生态调度方式。该方法是在水库初始调度图中,增加生态环境供水限制线,通过优化生态环境供水限制线在调度图中的位置,确定水库在不同蓄水情况下的生态环境供水策略,获得对各个供水目标最优的供水规则。

绘制生态调度线时,首先要确定其在调度图中的位置,即确定生态与其它用水户的供水优先级问题。根据碧流河水库的供水任务及实际调度情景,水库应在满足原来工业与生活、农业供水的基础上,再对生态环境实行供水。因此,生态供水调度线应该位于供水调度图的最上方。

另外,像工业与生活、农业用水一样,生态用水需求也具有一定的弹性,在可接受范围内的缺水对河流生态环境系统不会造成特别严重的破坏。并且,为了防止水库在连续缺水年内对生态环境实施正常供水而对工业与生活、农业供水造成巨大的压力,使其供水发生深度破坏而对区域经济造成灾难性的影响,本文对生态环境也实行限制供水的策略。根据生态环境用水可以承受的弹性范围,将生态环境供水限制系数设置为 0.5,即在水库当前水位或未来来水不足的情况下,对生态环境按照其设计值的 50% 需水量进行限制供水。这样,在增加了生态环境用水户后,水库新的供水调度见图 1。

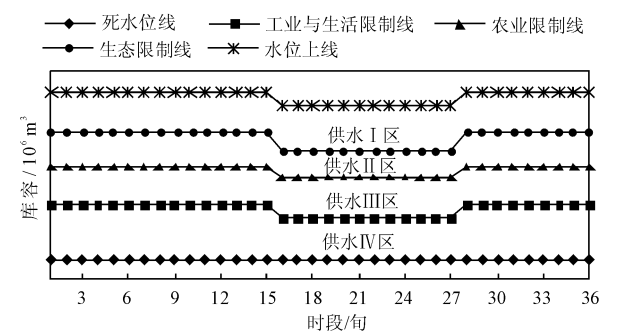


图 1 加入生态供水线后的碧流河水库供水调度图

图 1 中,横坐标为调度时段,1 ~ 36 表示 1 年中的 36 旬;纵坐标表示相应调度线在不同时段对应的库容情况。由于加入生态调度线后,各调度线在调度图中的具体位置需要被重新优化确定,因此,各调

度线在相应时段对应的库容值并不确定。工业与生活、农业、生态 3 个用水户的供水调度线与正常蓄水位线(汛期为汛限水位线)以及死水位线一起,将调度图分为四部分供水区域,各区域的供水规则规定如表 1 所示。

3 研究区概况及调度情景设计

3.1 研究区概况

本文以辽宁省大连市的碧流河水库为研究对象,以大伙房水库输水应急入连工程为研究背景,研究引水工程实施后,对于水库下游河道生态环境目标最优的生态调度方法。碧流河水库主要有工业与生活、农业两个用水户,引水前其供水量分别为 2.5 亿 m³ 与 0.2442 亿 m³,设计供水保证率为 95% 与 75%。

表 1 图 1 中不同区域的供水规则

调度区	工业与生活供水决策	农业供水	生态供水
I 区	D ₁	D ₂	D ₃
II 区	D ₁	D ₂	α ₃ × D ₃
III 区	D ₁	α ₂ × D ₂	α ₃ × D ₃
IV 区	α ₁ × D ₁	α ₂ × D ₂	α ₃ × D ₃
限制供水系数	α ₁ = 0.9	α ₂ = 0.7	α ₃ = 0.5

选择 1958 – 2011 年共 54 年的水库入库径流资料作为基础数据进行研究,计算时段为旬。其中,引水工程的设计供水能力为 3.0 亿 m³/a,工程管线规模为 90 万 t/d,管道输水损失为 4%。考虑到水库的来水及用水量特点,设计 7 月中、下旬及 8 月上、中旬 4 个时段外,其它时段均按照输水管道的最大引水能力引水。

3.2 调度情景设计

根据水文变化指标(IHA)对生态系统各个方面的响应关系及碧流河水库的河道生态环境特点,选择各月平均流量、10 d 最大流量、高流量延时、低流量延时以及流量平均增加率等 5 个指标作为本文的生态调度目标,以检验不同生态调度方法对调度目标的有效性,确定适合本文的生态调度方法。

另外,为了将生态流量约束法与设置生态调度线法两种不同生态调度方案的效果进行对比,本文在按最大引水能力引水后,对不同用水户实施不同的供水分配方案。受长距离高额引水成本的限制,引水工程实施后,设定水库对工业与生活增加的供水量不少于 1 亿 m³,即引水后,水库对工业与生活的供水量不少于 3.5 亿 m³,而对农业供水量设置

0.2442、0.4、0.6、0.8、1 亿 m^3 等几种情况,分析在不同的农业供水情景下,工业与生活供水量以 0.2 亿 m^3 的步长逐渐增加时,富余引水量在工业与生活、生态环境供水之间再分配的效率问题。对于两种不同的生态调度方法,其目标函数及约束条件等调度情形设置如下。

3.2.1 生态流量约束法 即在调度过程中,按照设计的时段生态需水量,以水库泄流的方式进行 100% 满足。优化变量为工业与生活、农业供水调度线上的水位参数。调度目标及约束条件如下所示。

(1) 目标函数。以缺水指数作为衡量工业与生活、农业两个用水户供水效率的目标函数,其表达式为:

$$\min SI = \min \frac{100}{NT} \sum_{i=1}^{NT} \left(\frac{D_{i,j} - W_{i,j}}{D_{i,j}} \right)^k \quad (3)$$

式中: N 为时间系列样本年数; T 为年内划分的调度时段数; $D_{i,j}$ 为第 i 个时段内第 j 个用水户的总需水量, 10^6 m^3 ; $W_{i,j}$ 为第 i 个时段内第 j 个用水户的实际供水量, 10^6 m^3 ; k 是用来反映缺水社会经济影响的指数,这里 k 取 2。

对于生态目标,以生态整体满足度作为目标函数,其表达式为:

$$\max P_{eco} = \max \{ \omega_1 \mu_1 + \omega_2 \mu_2 + \omega_3 \mu_3 + \omega_4 \mu_4 + \omega_5 \mu_5 \} \quad (4)$$

式中: P_{eco} 为生态目标值; $\omega_i (i = 1 \sim 5)$ 为各水文指标的权重系数,文中 $\omega_i = 1/5$; $\mu_j (j = 1 \sim 5)$ 为各水文指标的隶属度函数值。

(2) 约束条件

水量平衡约束:

$$S_{t+1} = S_t + I_t - D_t - E_t - SU_t \quad (5)$$

水位约束:

$$\text{汛期: } Z_{dead} \leq Z_t \leq Z_{limit} \quad (6)$$

$$\text{非汛期: } Z_{dead} \leq Z_t \leq Z_{normal} \quad (7)$$

保证率约束:

工业供水保证率:

$$P_{ind} = \frac{m}{NT + 1} \times 100\% \geq 95\% \quad (8)$$

农业供水保证率:

$$P_{agr} = \frac{n}{N + 1} \times 100\% \geq 75\% \quad (9)$$

供水调度线不交叉约束:

$$Z_t^1 \geq Z_t^2 \geq \dots \geq Z_t^{num} \quad (10)$$

供水限制约束:工业与生活供水允许破坏深度为 10%,农业供水允许破坏深度为 30%。

其中: S_t, S_{t+1} 分别为 t 时段初、末的水库库容,

10^6 m^3 ; I_t 为 t 时段入库流量, 10^6 m^3 ; D_t 为 t 时段水库对各用水户的总供水量, 10^6 m^3 ; E_t, SU_t 为 t 时段水库的蒸发渗漏损失量及弃水量, 10^6 m^3 ; Z_t 为 t 时段水库的水位, m ; Z_{dead} 为水库的死水位, m ; Z_{limit} 、 Z_{normal} 为水库的汛限水位、正常高水位, m ; P_{ind} 、 P_{agr} 为工业与生活、农业供水保证率; N 为时间系列样本年数; T 为年内划分的时段数; m, n 为工业与生活、农业供水不发生破坏的时段数; Z_t^k 为第 k 限制顺序的用水户在 t 阶段的供水限制水位, m , $k = 1, \dots, num, num$ 为用水户个数。

3.2.2 设置生态调度线法 设置生态调度线法增加了生态环境供水调度线,因此,其优化变量除了工业与生活、农业供水调度线上的时段水位参数外 ($36 + 16 = 52$),还包括生态环境供水调度线上的时段水位参数。因此,其优化变量总个数为 $52 + 36 = 88$ 个。该种情景下,水库对各用水户的供水顺序分别为工业与生活、农业、生态环境。当水库当前水量或未来来水不足时,水库对生态环境按照预先确定供水量的 50% 实行限制供水。除此之外,水库的调度目标及各项约束条件,与生态流量约束法设置相同。

4 结果及讨论

利用带精英策略的非支配排序遗传算法 - NSGA - II,对最大引水能力条件下两种生态调度方法对于不同工业与生活、农业、生态供水组合方案下的调度情况进行求解。由于对于工业与生活、农业供水,其供水保证率分别为 95% 与 75%,在调度中被要求强制满足,因此在确定最优生态调度方案时,只从每种情景的可行解中挑选出对生态环境目标最优的解,作为各种情景调度结果的对比情况,如图 2 所示。其中,算法基本参数设置如下:种群规模为 100,交叉概率 P_c 为 0.1,变异概率 P_m 为 $1/m$ (m 为优化变量的个数),最大进化迭代次数为 30 万代。

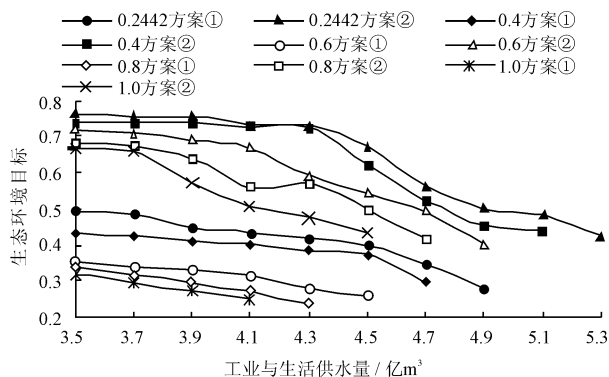


图2 两种生态调度方法不同情景下的调度结果对比

图 2 中,横坐标表示工业与生活供水量,横坐标表示生态环境目标值。根据公式(1)与(4),生态环境目标是 5 个生态指标总体隶属度值的均值,为 0~1 之间的数值,无单位。

从图 2 可以看出,无论是对于方案①还是方案②,在同样的农业供水量条件下,随着工业与生活供水量的逐渐增加,生态环境目标值逐渐减小,并且随着工业与生活供水量的增加,生态环境目标的下降速率逐渐增大。这是因为工业与生活、生态环境供水量之间存在明显的竞争关系。当工业与生活供水量较少时,则可用于生态环境的供水量较多,生态目标值较大;随着工业与生活供水量的逐渐增加,可用于生态环境的供水量逐渐减少,使生态目标逐渐下降。并且当工业与生活供水量较少时,可用于生态环境的供水量较多,因工业与生活供水量增加而导致的生态环境减少量并不会对其目标造成非常大的影响,而当生态环境可供水量降低到一定程度时,其单位供水量的减少不仅会对生态流量的量值造成很大的影响,同时影响到生态流量的过程,从而使生态目标整体下降较大。

对于每种农业供水量情景,当生态环境供水量达到其设计最小值 0.3 亿 m³ 时,其可以实现的最大工业与生活供水量,方案②都优于方案①。这是因为生态调度线法,即对生态环境实施限制供水的策略,通过对水库缺水时段的生态环境供水限制措施,很大程度上缓解了水库缺水时期的供水压力,从而提高了水库长系列的整体供水能力,使在相同的农业供水情景下,水库可以实现的最大工业与生活供水量增加。

另外对于任何农业供水量情景,相同工业与生活供水量条件下的生态环境目标值,方案②也都优于方案①。这是因为限制供水策略使水库在某些缺水时段对生态环境供水量减少的同时,使水库有更

多的水量提升非供水紧张期、但对生态目标整体提升有利的时段供水量,使生态环境的年内供水过程向着更有利于目标函数的方向优化,从而使生态环境目标的整体值提升。

从图 2 还可以看出,随着农业供水量的增加,生态环境目标逐渐减小。说明虽然农业用水与生态环境用水存在共用部分,但是他们之间的竞争关系较协同关系更加明显。农业供水量的增加,会使有农业供水时段的生态环境供水量增加。但是这种量值的增加对于生态目标并不具有针对性,与其导致的可根据目标进行量值与过程同时调控的生态环境可供水量减少部分相比,其减少的效果更为明显,从而使生态环境目标值整体降低。

当工业与生活供水量为 4.3 亿 m³、农业供水量为 0.4 亿 m³ 时,其可以达到的生态环境目标值是最优的。因为在该种情景下,工业与生活供水量与之前的状况相比,有所增加却对生态环境目标降低不大,如果继续增加工业与生活供水量,则会使生态环境目标有较大幅度的降低;而在相同的工业与生活供水量情况下,该情景的农业供水量与 0.2442 亿 m³ 的情景相比有所增加,而生态环境目标却基本保持不变,但如果继续增加农业供水量,则会使生态环境目标有较大幅度的降低,因此,无论是考虑特定农业供水量情景下,工业与生活供水量与生态环境目标之间的竞争关系,还是考虑一定工业与生活供水量情况下,农业供水量情景与生态环境目标之间的竞争关系,该种供水组合对各个用水户的调度结果都是最优的。因此,本文确定在跨流域引水条件下,通过设置生态环境供水限制线对水库下游河道的生态环境实施调控时,水库的工业与生活、农业、生态环境供水量分别设定为 4.3 亿、0.4 亿以及 1.6 亿 m³。该种情景下,水库的各项调度指标与引水前对比结果如表 2 所示。

表 2 最大引水能力条件下两种不同调度情景的结果对比

调度情景	多年平均	工业与生活用水			农业与生活用水			生态环境	年均蒸发、	年均弃水量/亿 m ³
	引水量/	年均供水	供水保	年均缺水	年均供水	供水保	年均缺水	用水量/	渗漏损失	
	亿 m ³	量/亿 m ³	证率/%	量/亿 m ³	量/亿 m ³	证率/%	量/亿 m ³	亿 m ³	量/亿 m ³	
引水前	0	2.47	97.58	0.04	0.24	78.18	0	0	0.46	1.95
引水后	2.88	4.29	98.46	0.01	0.24	78.18	0.17	1.53	0.47	1.55
变 化	+2.88	+1.83	0.88	-0.03	0	0	0.15	1.53	0.01	-0.41

5 结 论

本文对大伙房水库输水应急入连工程实施后,

碧流河水库考虑生态目标的调度问题进行了研究。设置了生态流量约束法与生态供水限制线两种不同的生态调度方案,对引水工程实施后不同用水户供

水量分配情景下的调度结果进行了比较。本文研究主要得到以下结论:

(1)生态流量约束法由于限定了各个时段的生态供水过程,因此对于具有流量大小、延时、变化率等多个指标的综合生态目标,其不同径流量级别的变化对生态目标的改善并不显著。当可供水量有限时,可以通过调节生态流量其它方面的属性(流量延时、变化率等),达到改善生态整体目标的效果。

(2)设置生态供水限制线的生态调度方法,通过限制水库枯水时段对生态环境的供水量,使水库的整体供水能力提升。另外,通过提高丰水时段对生态目标有利的时段供水量,以及调整对生态目标有利的时段流量过程,使生态目标整体提高。

(3)通过不同供水量分配情景下,生态流量约束法与生态供水限制线法的调度结果对比,得到引水工程实施后,碧流河水库考虑生态目标时,其工业与生活、农业、生态环境供水量分别为4.3亿、0.4亿、1.6亿 m^3 时,水库对于经济目标与生态目标的整体调度效益是最优的。

参考文献:

- [1] Zhang Chi, Wang Guoli, Peng Yong, et al. A negotiation based multi-objective, multi-party decision-making model for inter-basin water transfer scheme optimization[J]. Water Resources Management, 2012, 26(14): 4029 – 4038.
- [2] Junk W J. Amazonian flood plains: Their ecology, present and potential use[J]. Revue Dhydrobiologie Tropicale, 1982, 15: 81 – 98.
- [3] Whipple W, Duflois D, Grigg N, et al. A proposed approach to coordination of water resource development and environmental regulations[J]. Journal of the American Water Resources Association, 2007, 17(2): 713 – 716.
- [4] Hughes D A, Hannart P. A desktop model used to provide an initial estimate of the ecological instream flow requirements of rivers in South Africa[J]. Journal of Hydrology, 2003, 270(3 – 4): 167 – 181.
- [5] James C A, Kershner J, Samhouri J, et al. A methodology for evaluating and ranking water quantity indicators in support of ecosystem based management[J]. Environmental Management, 2012, 49(3): 703 – 719.
- [6] King J, Beuster H, Brown C, et al. Pro – active management: the role of environmental flows in transboundary cooperative planning for the Okavango River system[J]. Hydrological Sciences Journal, 2014, 59(3 – 4): 786 – 800.
- [7] 王加全, 马细霞, 李 艳. 基于水文指标变化范围法的水库生态调度方案评价[J]. 水力发电学报, 2013, 32(1): 107 – 112.
- [8] 雍 婷, 许银山, 梅亚东. 基于生态流量要求的调度图优化及生态库容研究[J]. 水力发电学报, 2013(01): 89 – 95.
- [9] 许新宜, 宾零陵, 潘成忠, 等. 考虑环境效益的南盘江上游水库调度研究[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2013, 49(2): 180 – 186.
- [10] 杨 娜, 梅亚东, 于乐江. 考虑天然水流模式的多目标水库优化调度模型及应用[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2013, 41(1): 85 – 89.
- [11] 朱金峰, 王忠静. 考虑生态用水的水库群优化调度研究[J]. 水力发电学报, 2012, 31(5): 71 – 76 + 89.
- [12] Richter B D, Baumgartner J V, Powell J, et al. A method for assessing hydrologic alteration within ecosystems[J]. Conservation Biology, 1996, 10(4): 1163 – 1174.
- [13] Brian R, Jeffrey B, Robert W, et al. How much water does a river need? [J]. Freshwater Biology, 1997, 37(1): 231 – 249.
- [14] Poff L R, Allan J D, Bain M B. The natural flow regime: A paradigm for river conservation and restoration[J]. Bioscience, 1997, 47(11): 768 – 784.
- [15] Shiau J, Wu F. A Histogram Matching Approach for assessment of flow regime alteration: application to environmental flow optimization[J]. River Research and Applications, 2008, 24(7): 914 – 928.
- [16] Suen J P, Eheart J W. Reservoir management to balance ecosystem and human needs: Incorporating the paradigm of the ecological flow regime[J]. Water Resources Research, 2006, 42(3): 178 – 196.