

饮马河流域生态调度研究

刘 海¹, 齐文彪¹, 于德万¹, 谢新民²

(1.吉林省水利水电勘测设计研究院,吉林 长春 130021;2.中国水利水电科学研究院,北京 100038)

摘 要:以吉林省饮马河流域为研究对象,开展生态调度研究,构建了该流域的生态调度模型,并开发了基于两时段法的计算软件系统,给出了在维持饮马河流域现有水库及其配套灌区工程实际供水条件下的河道生态调度结果及水库的生态调度线,对流域生态调度成本进行了详细分析。研究结果可以为饮马河流域内水利工程的科学管理和合理调度提供科技支撑。

关键词:饮马河;生态调度;需水预测;水库生态调度线

中图分类号:X826

文献标识码:A

文章编号:1000-0852(2013)06-0035-07

引言

水库在发挥防洪、城乡供水、灌溉与发电等重要功能的同时,人为改变了河流原有的自然演进和变化过程,引起了一系列的河流生态环境问题,致使河流健康受到损害和威胁。要实现“河流健康、人水和谐、工程生态调度、可持续发展”的目标,要求人们重新认识和正确处理水库与河流的关系。对水库等水利工程与河流生态系统之间的相互关系重新定位,迫切需要建立水库运行管理的新模式和生态调度的新方式^[1-3]。本文以吉林省饮马河流域作为研究对象进行生态调度研究,研究结果可以为解决该区域水生态恶化等严峻的生态环境问题提供较好的科学依据。

1 研究流域概况

饮马河地处吉林省中部,是松花江一级支流,河长 386.80km,流域面积 $1.74 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。伊通河是饮马河左岸最大支流,河长 342.50km,流域面积 $0.93 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。

饮马河流域处于东北黑土带核心区,是吉林省水稻、玉米等粮食作物的主产区,是东北老工业基地和国家主要的商品粮基地。2006年,饮马河流域人口总数为 772.57 万人,地区生产总值(GDP)为 1 498.81 亿元,占全省总 GDP 的 35.2%。近年来,高强度的人类活动导致饮马河流域水资源过度开发利用,地区之间和

行业之间争水、工业用水无偿挤占农业用水、生产用水大量挤占生态环境用水等现象日趋严峻,导致流域内水资源供需矛盾、水污染状况十分突出。因此恢复饮马河流域河道内与河道外的生态环境用水额度,改变和调整流域内大中型水库现行的调度方式,全面实施生态用水调度,对维持河流生态系统健康,改善水环境与水景观具有重要的意义。

2 研究思路

饮马河流域生态调度研究的总体思路为:(1)通过实地调研和资料收集整理,全面分析和了解饮马河流域的“水资源-人类社会-生态环境”三者的现状,分析流域的不同生态功能,预测河道外国民经济与生态环境需求,确定河道内生态环境需水量;(2)利用系统分析方法,对饮马河流域“天然-人工侧支”二元水循环系统进行抽象和概化,建立系统水量平衡关系、边界条件以及相应生态调度准则,构建生态调度数学模型,并利用现代计算机技术与数据库技术集成开发生态调度计算软件系统;(3)根据流域历史长系列径流资料,利用已建成的生态调度模型与计算软件系统对不同情景下生态调度方案进行逐时段调节计算,给出饮马河流域生态调度推荐方案及实施生态调度后对国民经济用水的影响,并初步提出骨干枢纽工程——石头口门水库与新立城水库的生态调度线。

3 “三生”需水预测

3.1 河道外需水预测

饮马河河道外生态需水预测主要包括生活、工业、建筑业及三产、农业与城镇生态需水量预测五项内容。生活需水量预测,分城镇居民生活需水量和农村居民生活需水量两类,采用定额指标法预测;工业需水预测根据饮马河流域经济发展和工业结构调整与节水措施的实施,将未来工业需水定额按强化节水和适度节水、一般节水三种情景考虑;建筑业需水量采用万元增加值取水量法预测,确定出强化节水与适度节水、一般节水三种情景的建筑业用水定额;农业需水量包括农业灌溉需水量和林牧渔畜需水量,采用定额指标法,确定各水平年不同需水方案农业需水量;河道外生态环境需水按城镇生态环境需水、湖泊沼泽湿地生态补水、林草植被建设需水和地下水回灌补水分别计算。

3.2 河道内需水预测

河道内生态需水预测主要包括生态基流、外景观水面蒸发消耗与水生生物需水量预测三个方面内容^[4-5]。生态基流是指维持饮马河河流基本生态功能的最小需水量,本研究采用10年最小月平均流量法、Q90法确定。河流水面蒸发是河流水量消耗的重要方式之一,需要一定的水量来维持河流水面的蒸发量。本研究根据不同水平年的伊通河长春段水景观水面规划指标,利用长春水文站降水、蒸发系列资料确定不同水平年河道内水景观水面蒸发消耗水量。河道内水生生物需水量指维持河道内水生生物群落的稳定性和保护生物多样性所需要的水量。在有资料的地区水生生物需水量可按式计算:

$$W_c = \sum_{i=1}^{12} \max(W_{cij}) \quad (1)$$

式中: W_c 为水生生物年需水量, m^3 ; W_{cij} 为第*i*月第*j*种生物需水量, W_{cij} 根据具体生物物种生活(生长)习性确定。在资料缺乏地区,采用Tennant法计算。

4 生态调度模型

解决饮马河流域生态调度问题,需要构建一个基于“天然-人工”二元水循环模式的多水源、多工程、多用户、多目标的复杂水资源调度系统。本研究建立的生态调度模型以尽可能恢复河流的连续性、满足河流下游的生态环境用水、模拟河流自然的水文周期、恢复生

境的空间异质性、改善生物的栖息地水环境质量为目标,以流域内两座主要水库(石头口门水库、新立城水库)作为调度对象,尽可能的完成生态需水调度、生态水文情势调度、泥沙调度、水质调度、生态因子调度及综合调度的任务。

4.1 生态调度系统概化

生态调度系统内的各类物理元素(计算单元、水利工程、河道、渠道交汇点)之间通过线段(河、渠道)的相互联结形成生态调度系统网络。解决生态调度问题需要对一个复杂的水资源生态系统进行一定程度的概化处理,使其能够简化的反映系统的供需平衡关系和一般性问题^[6-8]。生态调度系统的概化包括:确定系统计算分区(单元)、选择重要水利工程、划分可利用水源、设置控制性节点或断面、区分用水户分类、河流渠道系统、河网概化等。

生态系统网络图是指导水资源生态调度模型编制,确定各水源、用水户、水利工程相互关系,以及建立系统供、用、耗、排关系的基本依据。本文根据“天然-人工”二元水循环模式和各元素在生态调度系统中的物理特征,将其概化成三类图形要素:节点、连线及平面。按照系统网络图的基本概念,将生态调度系统中各节点间通过若干条各类有向线段进行连接,形成饮马河流域水资源生态调度系统网络图如图1所示。

4.2 生态调度模型构建

4.2.1 模型的输入与输出

饮马河流域生态调度模型的输入主要包括计算单元、分区及流域,水利工程及其参数、控制节点,河流、渠道的上下游节点及其参数,地下水参数,水利工程、控制节点及计算单元上的长系列月、旬径流过程,各计算单元中各用户的长系列需水月过程等。模型的输出主要包括各计算单元、行政分区及流域分区的长系列及多年平均供需水平衡结果,各水利工程的长系列调度结果,渠道的长系列过水量结果,河道重要控制断面的下泄量结果,各个流域分区的长系列变时段供用耗排平衡结果,各流域分区的长系列地下水平衡结果等。

4.2.2 目标函数

生态调度要满足区域社会、经济及环境的要求,既要追求社会、经济效益,同时又要考虑生态环境保护。生态调度的目标函数是在满足系统的水量平衡要求、运行要求及其它要求基础上,使系统的效益(或水量损失,或按优先级)达到最佳。模型中主要考虑以下准则:效益最大原则、供水水源优先序、水库生态调度规则

算单元外调水供水平衡方程、计算单元污水处理回用平衡方程、计算单元地下水供水平衡方程、河流渠道过流约束条件、计算单元河网调蓄约束条件、计算单元退水平衡方程、农业均匀破坏约束条件、湖泊、湿地约束条件、生态水库水量平衡方程。流域分区的水量平衡方程及约束条件包括:流域水量平衡方程与流域分区地下水平衡方程。

4.3 模型求解

本研究采用世界银行和美国 GAMS 公司研制的 Windows GAMS 2.50 软件工具,构建流域生态调度模型并开发基于两时段法的计算软件系统,搭建集数据库、模型库与人机交互界面等于一体的计算平台。

模型的时间要素主要涉及模型计算时段的划分、模拟计算总的时间段以及计算中各时段之间的关系等。本研究选取旬作为生态调度模型的计算时段,对于饮马河流域这样比较小的流域来说,其水量传输大都可以在一个计算时段内完成,可不必考虑水量传播时间的影响。模型采用 1956~2000 年系列资料,计算年系列共计 45a,每年共划分 20 个计算时段,即 8 个月时段(1~4 月、9~12 月)和 12 个旬时段(5~8 月),按照时间发展的先后顺序逐年、变时间尺度调节计算。

模型的时间关系描述采用两时段序贯决策优化计算方法(两时段法),在两时段情形下,第一时段称为当前时段,第二时段为当前时段的下一时段,第二时段以后的全部时段统称为余留期。两时段法旨在解决水库调度计算中余留期的后效性问题。当水库当前时段调度时,适当考虑下一时段乃至后续时段的调度,使得水库调度在系统的整个运行时段内更趋于合理化。如当出现连续枯水时段时,要调整水库在两时段内向各用水户的供水策略,尽量使当前时段与下一时段各用户的供水量破坏深度大致相当,避免出现当前时段供水偏多而使得下一时段的各用户破坏深度过大以至无法忍受等情况。两时段法基本原理,见图 2。

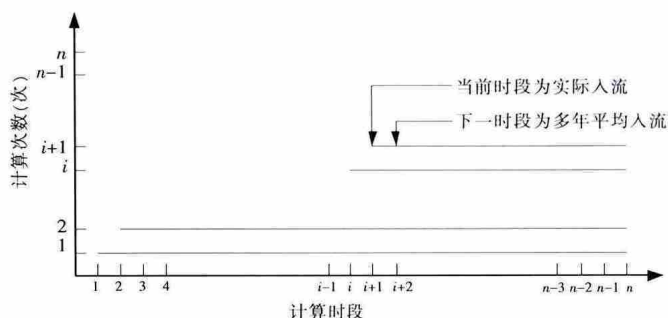


图 2 两时段法计算原理示意图

Fig.2 The calculation principle of the two-period method

5 生态调度结果与分析

为了满足模型计算的需要,首先将流域面上的地表水资源量转化为流域内各工程节点和单元节点的地表径流量,各个节点地表入流量之和等于流域总的地表水资源量。地表入流量的时段划分为与模型计算时段相匹配,即各个节点的地表入流为月、旬径流过程。各节点地表径流过程的确定可依据流域内相关水文站点的径流资料,采用移植法或比拟法进行处理。模型计算所需的地下水可开采量等相关数据采用流域内 1956~2000 年的多年平均值。

在维持饮马河流域现有工程(现有水库及其配套灌区)实际供水条件(简称现状条件,以下同)下,基准年的生态调度按照以下三种方案考虑:方案 系指不考虑河道内生态需水要求的调度;方案 系指基于河道内最小生态流量(简称基本流量,以下同)的生态调度;方案 系指基于河道内适宜生态流量(简称适宜流量,以下同)的生态调度。根据三种不同方案,采用所研发的生态调度模型及其计算软件系统分别对基准年面向引松入长工程的饮马河流域不同情景调度方案进行调节计算,给出其具体调度分析结果。

5.1 河道外调度结果

饮马河流域多年平均需水量为 $16.24 \times 10^8 \text{ m}^3$,包括城镇需水量 $6.28 \times 10^8 \text{ m}^3$,农村需水量 $9.96 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。其中方案 调度结果为:多年平均供水量 $15.44 \times 10^8 \text{ m}^3$,缺水量 $0.81 \times 10^8 \text{ m}^3$,破坏深度 5.0%;供水保证率 95%的供水量 $15.34 \times 10^8 \text{ m}^3$,缺水量 $1.51 \times 10^8 \text{ m}^3$,破坏深度 9.0%。方案 调度结果为:多年平均供水量 $15.41 \times 10^8 \text{ m}^3$,缺水量 $0.84 \times 10^8 \text{ m}^3$,破坏深度 5.2%;保证率 95%的供水量 $14.93 \times 10^8 \text{ m}^3$,缺水量 $1.93 \times 10^8 \text{ m}^3$,破坏深度 11.4%。方案 调度结果为:多年平均供水量 $15.21 \times 10^8 \text{ m}^3$,缺水量为 $1.03 \times 10^8 \text{ m}^3$,破坏深度 6.3%;保证率 95%的供水量 $13.06 \times 10^8 \text{ m}^3$,缺水量 $3.79 \times 10^8 \text{ m}^3$,破坏深度 22.5%。由此可见,河道外的缺水量随着河道内生态需水量的增加呈现递增的态势。同时,虽然长春市并未由于实施流域生态调度而出现缺水,但引松入长工程的供水量却随着河道内生态需水增长而增加,三种方案引松入长工程的多年平均供水量分别为 $2.11 \times 10^8 \text{ m}^3$ 、 $2.15 \times 10^8 \text{ m}^3$ 和 $2.31 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

5.2 河道内调度结果

三种方案的河道内调度结果:方案 的流域河道内控制性断面(农安站与德惠站)满足最小生态流量

(生态基流)的保证率均达到 90% 以上,生态调度的焦点主要集中在满足河流适宜生态流量保证率方面(表 1)。通过计算结果对比分析发现,对于枯季(1~3 月与 11~12 月)来说,河道外“三生”用水的退水都能满足其(农安站与德惠站)适宜生态流量要求,而水库调度的生态补偿主要集中在其余 7 个月份(4~10 月)。在分析三种调度方案生态流量保证率时,以 4~10 月控制断面下泄流量系列的旬、月保证率为准。图 3~6 给出了各方案下主要控制断面的流量过程。

表 1 维持现有工程实际供水条件下河道内生态流量保证率

Table1 The guarantee rate of the river ecologic flow under the condition of maintaining the current engineering water supply

情景方案		农安站	德惠站
方案	满足最小生态流量	95%	100%
	满足适宜生态流量	69%	23%
方案	满足最小生态流量	100%	100%
方案	满足适宜生态流量	95%	70%

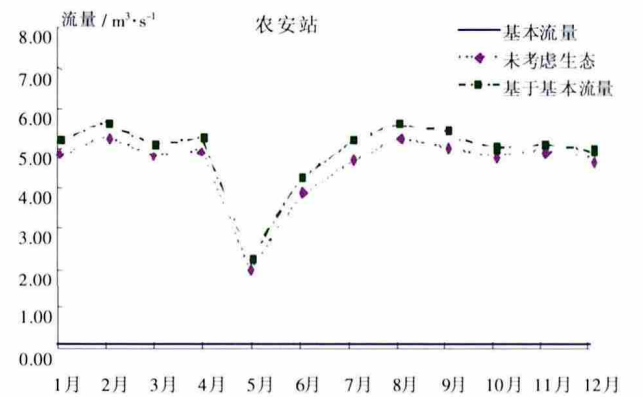


图 3 方案、生态调度农安站下泄流量过程线图(P=90%)
Fig.3 The discharge hydrograph of ecological operation scheme and for the Nongan station(P=90%)

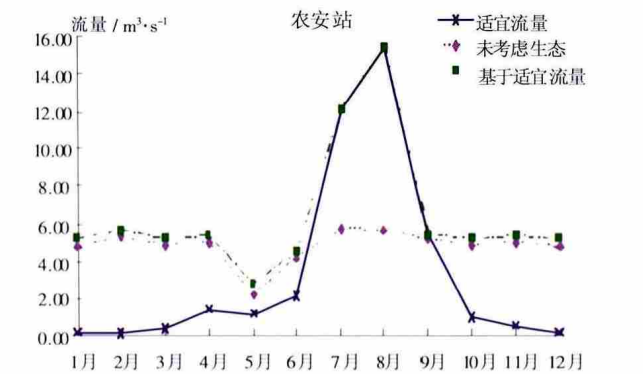


图 5 方案、生态调度农安站下泄流量过程线图(P=75%)
Fig.5 The discharge hydrograph of ecological operation scheme and for the Nongan station(P=75%)

5.3 水库生态调度线

饮马河流域生态调度主要通过调整水库调度方式来实现。因此,流域内的大中型水库是主要研究对象,河道内生态环境流量是其调度目标,而实现水库生态调度的简单易行方法则是制定新的调度图与水库调度线。饮马河流域内新立城水库与石头口门水库是两座大型水库,且分别位于伊通河和饮马河的干流上,对于调节河道内生态环境流量起到决定性作用。因此,本次重点研究在于调整新立城水库与石头口门水库的调度线,并兼顾其他大中型水库的调度方式。

水库生态调度线的拟定和调算步骤:首先,在不考虑水库生态调度线情况下,按照优先满足河道外城镇需水、后满足河道外农村需水和河道内控制断面生态基流的规则,利用模型进行长系列年逐时段调节计算,调算完毕后,根据河道内生态环境用水保证率绘出相应水库各年蓄水位的上、下外包线,其中上包线以上区域可认为是生态加大放流区,下包线区域为生态限制

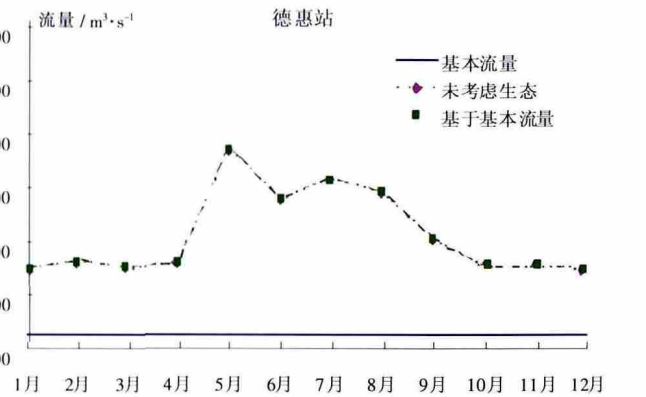


图 4 方案、生态调度德惠站下泄流量过程线图(P=90%)
Fig.4 The discharge hydrograph of ecological operation scheme and for the Dehui station(P=90%)

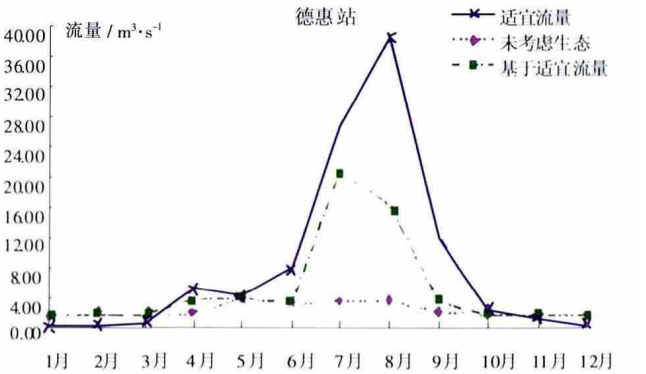


图 6 方案、生态调度德惠站下泄流量过程线图(P=75%)
Fig.6 The discharge hydrograph of ecological operation scheme and for the Dehui station(P=75%)

放流区,在水库蓄水位上、下包线之间的区域选取一条线作为该水库的初始生态调度线;其次,把该水库初始生态调度线代入模型,采用如下生态调度规则进行长系列调节计算:如果时段初库容位于水库生态调度线以上区域,则优先满足河道内生态环境需水;如果时段初库容位于水库生态调度线以下区域,则优先满足河道外城镇及农村需水,并在满足河道外农村需水允许破坏深度的同时,考虑河道内生态环境需水要求,否则不予考虑河道内生态环境需水要求。水库生态调度调算完成后,则需判断河道内生态环境流量的保证率是否达到要求,如果达到要求则确定水库生态调度线;如果没达到要求,则重新修改初始生态调度线,重复上述步骤,直到达到要求为止。水库生态调度线调节计算过程框图,见图7。

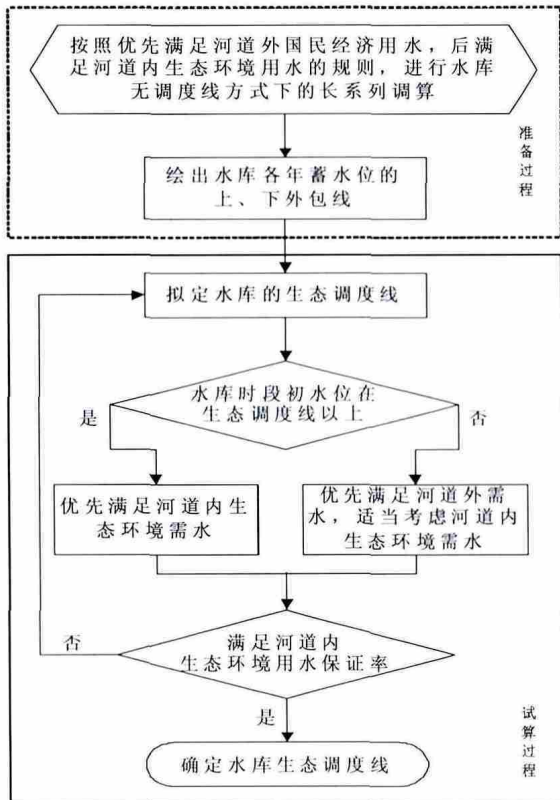


图7 水库生态调度线调算过程框图

Fig.7 The calculation process of the ecological operation line

根据上述水库生态调度线调算方法,分析和给出基准年新立城水库与石头口门水库的生态调度线。其中维持现有工程原设计条件的生态调度线,见图8与图9。

5.4 生态调度成本分析

饮马河流域生态调度是通过调整水库调度方式实现,水库按照生态调度线运行就有一部分原先用于满

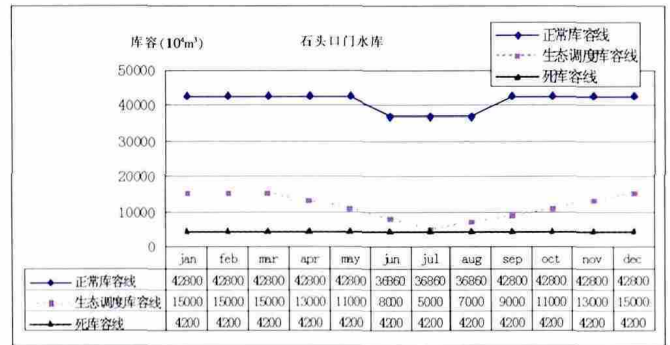


图8 基准年石头口门水库生态调度线图

Fig.8 The ecological operation line for the Shitoukoumen reservoir in the base year

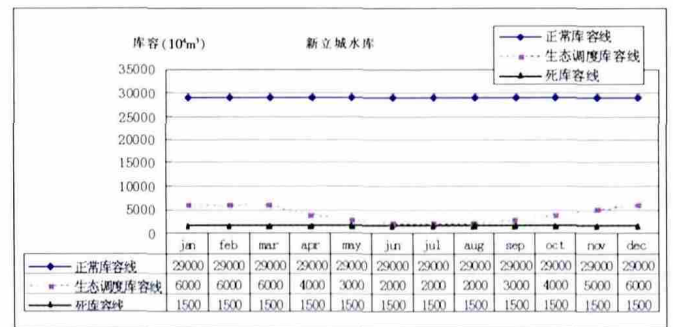


图9 基准年新立城水库生态调度线图

Fig.9 The ecological operation line for the Xinlicheng reservoir in the base year

足河道外需水的水量转而用于满足河道内生态环境需水,这部分用于改善河流生态环境水量,并不产生直接经济效益,对水库运行与管理部门来说,这部分水量是不产生效益的,也可看作是水库实施生态调度的成本。基于这种考虑,需要分析和估算生态调度成本。

生态调度成本核算的基本思路是:首先,确定水库实施生态调度对河道内的生态补水量,通过分析水库在考虑与不考虑河道内生态环境需水情景下河道内下泄量之差来确定;其次,在水库的河道内生态补水量确定后,根据现行的水库不同行业的供水价格,确定水库的生态调度成本。具体估算结果,见表2。

从表2中可以看出,饮马河流域仅新立城水库和石头口门水库两座大型水库的生态调度成本在河道内不同生态流量情景下就相差很大,高达2个数量级的差别。如基于最小生态流量的生态调度成本为80.50万元,基于适宜生态流量的生态调度成本为2 195.99~2 540.63万元,二者相差2 115~2 460万元,高出26.3~30.6倍。

6 结语

流域生态调度涉及河、渠、水库等多个节点,需要

表 2 基准年生态调度成本估算结果(多年平均)
Table2 The estimation results of the ecological operation cost in the base year (Multi-year average)

情景	生态调度 方案	新立城水库				石头口门水库			合计 /万元
		河道内补水量/10 ⁴ m ³		供水价格	成本	河道内生态	综合供水	成本	
		蒸发	河道	/元.m ⁻³	/万元	补水量/10 ⁴ m ³	价格/元.m ⁻³	/万元	
现状条件	基于最小生态流量	146	0	0.55	80.50	0	0.41	0.00	80.50
	基于适宜生态流量	146	1 891	0.55	1 120.55	3 471	0.41	1 420.09	2 540.63
设计条件	基于最小生态流量	146	0	0.55	80.50	0	0.41	0.00	80.50
	基于适宜生态流量	146	1 490	0.55	899.81	3 168	0.41	1 296.18	2 195.99

综合考虑河道内、外用需水量,调度过程复杂。本文利用建立的流域生态调度模型,通过模型求解,给出了饮马河流域河道内、外的生态调度结果,并绘制了石门口门水库、新立成水库的生态调度线。

文中最后对流域生态调度成本进行了分析,估算了基于最小生态流量和基于适宜生态流量两种方案下的生态调度成本。考虑到饮马河流域生态调度的客观需要与实际可能,引松入长工程运行成本以及当地经济承受能力等因素,建议选择基于河道内最小生态流量的生态调度方案作为最佳推荐方案。

参考文献:

[1] 王浩,宿政,谢新民,等. 饮马河流域生态调度理论与实践[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2009. (WANG Hao, SU Zheng, XIE Xinmin, et al. Theory and Practice of Ecological Regulation in Yinma River Basin [M]. Beijing: China WaterPower Press, 2009. (in Chinese))

[2] 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,(1): 28-32. (DONG Zheren, SUN Dongya, ZHAO Jinyong. Multi-objective ecological operation of reservoirs [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2007,(1): 28-32. (in Chinese))

[3] 郝增超,尚松浩. 基于栖息地模拟的河道生态需水量多目标评价方法及其应用[J]. 水利学报, 2008,39(5): 557-561. (HAO Zengchao, SHANG Songhao. Multi-objective assessment method based on physical habitat simulation for calculating ecological river demand [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006, 39(5):557-561. (in Chinese))

[4] 崔国韬,左其亭. 生态调度研究现状与展望 [J]. 南水北调与水利科技, 2011, 9(6):90-97. (CUI Guotang, ZUO Qiting. Research status and prospect of ecological regulation [J]. South-to-North Water Diversion and Water Science & Technology, 2011,9(6): 90-97. (in Chinese))

[5] 崔瑛,张强,陈晓宏,等. 生态需水理论与方法研究进展[J]. 湖泊科学, 2010, 22(4): 465-480. (CUI Ying, ZHANG Qiang, CHEN Xiaohong, et al. Advances in the theories and calculation methods of ecological water requirement [J]. Journal of Lake Sciences, 2010, 22(4): 465-480. (in Chinese))

[6] 艾学山,范文涛. 水库生态调度模型及算法研究 [J]. 长江流域资源与环境, 2008,17(3): 451-455. (AI Xueshan, FAN Wentao. Study on reservoir ecological operation model [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2008,17(3):451-455. (in Chinese))

[7] 康玲,黄云燕,杨正祥,等. 水库生态调度模型及其应用[J]. 水利学报, 2010,41 (2):134-141. (KANG Ling, HUANG Yunyan, YANG Zhengxiang, et al. Reservoir ecological operation model and its application [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, 41 (2):134-141. (in Chinese))

[8] 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. (WANG Xia, ZHENG Xiongwei, CHEN Zhigang. Reservoir ecological regulation model based on ecological water need of river and its application [J]. Water Resources and Power, 2012, 30(6): 59-61. (in Chinese))

Study on Ecological Operation in Yinmahe River Basin

LIU Hai¹, QI Wenbiao¹, YU Dewan¹, XIE Xinmin²

(1. Jilin Investigation and Design Institute of Water Resources and Hydropower, Changchun 130021, China;
2. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

Abstract: The Yinma River Basin in Jilin Province was taken as a case to study the ecological operation in this paper. The basin ecological operation model was established and a two-period calculation software system was also developed. Moreover, the ecological operation results and ecological operation line of reservoirs were given for maintaining water supply condition of existing reservoirs and supporting irrigation districts, and ecological operation cost was analyzed in detail. The research results can provide scientific and technological support for scientific management and reasonable scheduling of water conservancy projects in the Yinma River Basin.

Key words: Yinmahe River; ecological operation; water demand prediction; ecological operation line of reservoir