

跨流域联合供水水库补偿特性研究

姜 彪¹, 孙万光¹, 邓显羽¹, 郅 君²

(1.中水东北勘测设计研究有限责任公司,吉林 长春 130061;

2.辽宁省水利工程技术审核与造价管理中心,辽宁 沈阳 110003)

摘要:跨流域水库补偿特性主要包括水文补偿特性与库容补偿特性两个方面,以大连市两座重要的供水水源碧流河水库、英那河水库为例,运用 Copula 函数分析了碧流河水库、英那河水库天然入库径流年系列、汛期系列、非汛期系列的丰枯遭遇概率,采用统计学方法分析了两座水库连续枯水系列年的遭遇情况。并建立了考虑外调水源的碧流河、英那河水库联合优化供水调度模型,模拟得出了规划水平年水库供水量与下泄水量,利用两座水库长系列调节历年下泄水量之间的对应关系对水库库容补偿特性进行了分析。研究成果可以为大连市境内水系连通规划提供一定的依据,水库补偿特性研究方法也可为其类似工程规划提供借鉴。

关键词:水文补偿;库容补偿;跨流域调水;湖库连通;联合供水

中图分类号:P333

文献标识码:A

文章编号:1000-0852(2016)05-0033-06

1 引言

我国是水资源紧缺较为严重的国家之一,加之水资源时空分布不均,导致水资源供需矛盾日益尖锐,特别是对于许多沿海发达城市,区域天然径流量少,用水量大,缺水问题已成为制约当地经济社会发展的重要因素^[1]。随着经济社会的日益发展,极端干旱气候条件的不断发生,水资源供给矛盾问题将会越来越突出。近年来,我国开展了大规模的跨流域调水工程与湖库连通工程,通过优化水资源配置,提高水资源利用效率,一定程度上缓解了区域间水资源与经济发展不协调的矛盾^[2]。一般来讲,跨流域调水工程的前期规划论证的重点在于分析流域间或水库间可调水量、调水保证率及工程可以产生的综合效益等,其关键在于分析不同流域间或跨流域水库间的补偿特性。

跨流域水库补偿特性主要包括水文补偿特性与库容补偿特性两个方面。水文补偿特性的研究即通常所说的流域间降雨、径流丰枯遭遇特性分析。韩宇平等^[3]利用统计学方法对南水北调中线水源区与受水区径流丰枯遭遇特性进行了分析,得出水源区对受水区有较好的径流补偿作用;傅玉勇等^[4]通过建立二维 Copula

联合分布函数,研究了渭河与汾河径流丰枯遭遇频率,成果可为黄河中下游水资源的开发利用提供依据;库容补偿特性主要是通过水库间联合优化调度,分析水库间的补偿关系。孙万光等^[5]采用动态规划优化方法,建立了大连地区有外调水源的多年调节水库群供水调度模型研究,通过优化调度,可以充分挖掘本地水资源供水潜力,提高枯水期水库联合供水的保障程度;王强等^[6]针对浑太流域水库群联合供水调度问题,建立了水库群联合调度模型,分析了水库群在联合调度中的补偿作用。从目前研究上看,对单一的丰枯遭遇特性分析与水库联合调度研究较多,对水库的整体补偿特性进行系统分析还较少。本文将从水文补偿、库容补偿及水文、库容补偿之间的对应关系等方面分析跨流域供水水库间的补偿特性。

2 研究背景与资料

2.1 研究背景

大连是我国北方重要的海滨城市,受区域地理条件制约,水资源严重匮乏。为解决经济发展瓶颈,大连市提出通过优化开发本地水资源,加大利用非常规水和雨洪资源,合理实施境外调水,形成“北水南调、东

收稿日期:2015-07-20

基金项目:水利部公益性行业科研专项经费项目(201401036)

作者简介:姜彪(1986-),男,工程师,硕士,主要从事水利规划与防洪减灾研究工作。E-mail:jiangbiaosky@163.com

西互济、多源联动、丰枯调剂”的水资源配置格局。通过境外与境内水源连通联调,常规与非常规水源的联调,提高城市供水能力和供水保障程度^[7]。

碧流河水库位于辽宁省普兰店市双塔镇与庄河市荷花山镇分界的碧流河干流上,坝址以上控制流域面积 2 085km²,英那河水库位于英那河中游塔岭乡境内的姜石磊村,控制流域面积 692km²。目前,碧流河水库与英那河水库是大连市重要的供水水源水库,主要为大连市金州以南地区城市供水,同时,两座水库还为下游河道生态及农业灌溉提供部分水源。考虑到大连市远期发展需求,目前,大连市已建成大伙房水库输水应急入连工程,将大伙房水库水调入碧流河水库,设计年调水规模为 3×10⁸m³(其中 1×10⁸m³为协议用水量)。转角楼水库与英那河水库为两个相邻流域,目前双向连通工程已经建成运行,在汛期时将英那河水库多余的水量引入转角楼水库,减小英那河水库的防洪压力,增加转角楼水库的发电效益,同时在英那河水库供水能力不足时,将转角楼水库的水引入英那河水库,通过联合调度满足大连市供水需求。大连市境内、境外水库连通与供水关系如图 1 所示:

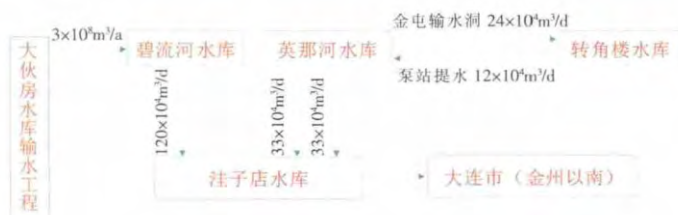


图1 大连市境内、境外水库连通与供水关系图

Fig.1 The relationship of the connectivity and water supply between the reservoirs inside and outside of Dalian city

为满足大连市的远期供水需求,考虑区域内水资源优化配置的可能性,大连市水资源可持续利用综合规划中提出将英那河水库与碧流河水库连通,将英那河水库的水引入碧流河水库,实现碧流河水库与英那河水库的联合调度。本文在此背景下,开展碧流河水库、英那河水库两座供水水库的补偿特性分析,以期水库连通工程及类似工程规划提供一定的依据。

2.2 基础资料

(1)水库径流资料。采用碧流河、英那河水库实测径流资料,系列年限为 1956~2007 年。碧流河水库考虑到水库上游农业用水、支流玉石水库运行的影响,对系列资料进行还原;英那河水库径流还原主要考虑水库上游农业用水。通过还原,将实测径流系列转换成水

库坝址处天然径流系列,用于水文补偿特性与库容补偿特性分析。

(2)需水量资料。水库下游城市生活和工业需水量按计算水平年需水量预测结果分摊到每个时段。河道环境水量按历年天然最枯月 90%保证率平均流量考虑,当河道水量小于此流量时,由水库放水满足河道环境需水。农业需水量根据不同农作物生长发育期的需水量,以及灌区灌溉水利用系数等综合确定。

(3)供调水工程特性资料。大伙房水库输水应急入连工程设计调水规模为 3.0×10⁸m³/a、管线供水能力为 90×10⁴m³/d;引碧入连工程供水能力是 120×10⁴m³/d,通过暗渠自流至洼子店水库,通过洼子店水库加压泵站输水至大连,引英入连工程总供水能力是 66×10⁴m³/d,分一、二期工程,通过泵站加压输水至洼子店水库,供大连城市用水。

3 水文补偿特性

采用 Copula 函数与统计学法两种方法计算碧流河水库入库径流与英那河水库入库径流的丰枯遭遇频率,分析两座水库的水文补偿特性。

3.1 天然径流丰枯遭遇 Copula 函数法

Copula 函数基本原理与建立步骤如下^[8]:

(1)二维 Copula 理论

Sklar 定理:设 X, Y 为连续的随机变量,边缘分布函数分别为 F_X 和 F_Y , $F(x, y)$ 为变量 X 和 Y 的联合分布函数,如果 F_X 和 F_Y 连续,则存在唯一的函数 $C_\theta(u, v)$ 使得:

$$F(x, y) = C_\theta(F_X(x), F_Y(y)), \forall x, y \quad (1)$$

式中: $C_\theta(u, v)$ 为 Copula 函数; θ 为待定参数。

表 1 列出了 3 种比较常用的 Copula 函数,并给出了函数 θ 的范围及 τ 和 θ 的关系。其中 τ 为 Kendall 秩相关系数,用下式计算:

$$\tau = (C_n^2)^{-1} \sum_{i < j} \text{sign}[(x_i - x_j)(y_i - y_j)] \quad (2)$$

式中: $\text{sign}(\cdot)$ 是符号函数,当 $(x_i - x_j)(y_i - y_j) > 0$ 时, $\text{sign} = 1$; $(x_i - x_j)(y_i - y_j) < 0$ 时, $\text{sign} = -1$; $(x_i - x_j)(y_i - y_j) = 0$ 时, $\text{sign} = 0$ 。

(2) Copula 函数选择方法

采用 Kolmogorov-smirnov (K-S) 检验来对 Copula 函数进行拟合检验,采用离差平方和 (OLS) 最小准则对 Copula 函数进行拟合优度评价。

(3)基于 Copula 理论联合分布的建立

①确定各变量的边缘分布,对入库径流频率进行计算。假定水库径流服从 P- 型分布,根据碧流河、英那河

表1 3种常用Copula函数
Table1 The 3 common copula functions

名称	copula 函数 $C_\theta(u, v)$	参数范围	τ 和 θ 的关系
Clayton	$(u^{-\theta} + v^{-\theta} - 1)^{-1/\theta}$	$\theta > 0$	$\tau = \theta / (\theta + 1)$
Frank	$-\frac{1}{\theta} \ln \left[1 + \frac{(e^{-\theta u} - 1)(e^{-\theta v} - 1)}{e^{-\theta} - 1} \right]$	$\theta > 0$	$\tau = 1 - \frac{4}{\theta} \left[1 - \frac{1}{\theta} \int_0^\theta \frac{t}{\exp(t) - 1} dt \right]$
Gumbel-Hougaard	$\exp \{ - [(-\ln u)^\theta + (-\ln v)^\theta]^{1/\theta} \}$	$\theta \geq 1$	$\tau = 1 - \frac{1}{\theta}$

水库 1956~2007 年共 52a 的天然入库径流量, 包括年径流系列、汛期径流系列(7~9 月)、非汛期径流系列。采用优化适线法估计碧流河水库与英那河水库天然入库径流量分布频率曲线的统计参数 \bar{x} 、 C_v 、 C_s ;

②选择 Clayton 和 Gumbel-Hougaard 两种 Copula 函数来构造联合分布函数, 利用公式(2)计算 Kendall 秩相关系数 τ ;

③根据表 1 中 τ 与 θ 的关系确定 θ ;

④采用 K-S 检验方法选择 Copula 函数, 建立联合分布, 根据检验结果, 两种 Copula 函数均能通过 K-S 检验, 其中, 年径流系列、汛期径流系列检验采用 Copula 函数离差平方和 OLS 小, 非汛期径流系列检验采用 Gumbel-Hougaard 函数离差平方和 OLS 小, 为保持一

致性, 径流丰枯遭遇分析中统一选取 Clayton Copula 作为联结函数。

⑤根据所建立的 Clayton Copula 分布函数分析入库径流的丰枯遭遇特性, Clayton Copula 联合分布等值线图(全年、汛期、非汛期)如图 2~图 4 所示, Clayton Copula 年径流联合分布如图 5 所示。

(4) 丰枯遭遇特性分析

研究中采用通用的 Gamma 分布法, 把丰、枯指标分为 3 级, 丰、枯水划分相应的保证率, 分别为 $P_f=37.5\%$ 和 $P_k=62.5\%$, 根据建立的 Clayton Copula 径流联合分布对碧流河水库与英那河水库入库径流的丰枯遭遇特性进行分析, 两个水文区的丰枯遭遇可以分为丰丰型、丰平型、丰枯型、平平型、平枯型、枯丰型、

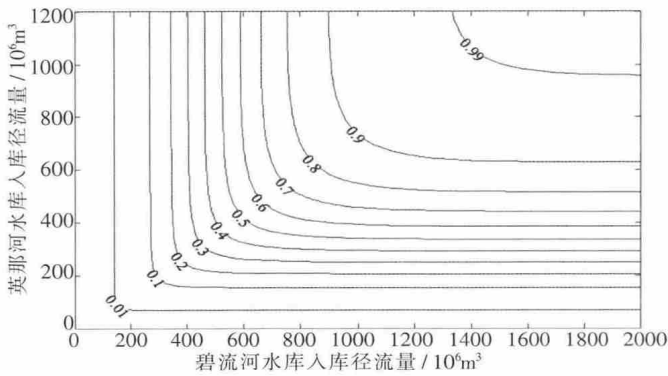


图 2 两库入库径流联合分布等值线图(全年)

Fig.2 The joint distribution contour of the runoff (annual)

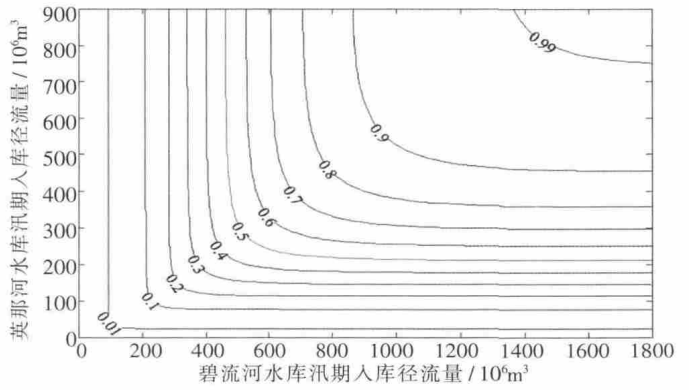


图 3 两库入库径流联合分布等值线图(汛期)

Fig.3 The joint distribution contour of the runoff (flood season)

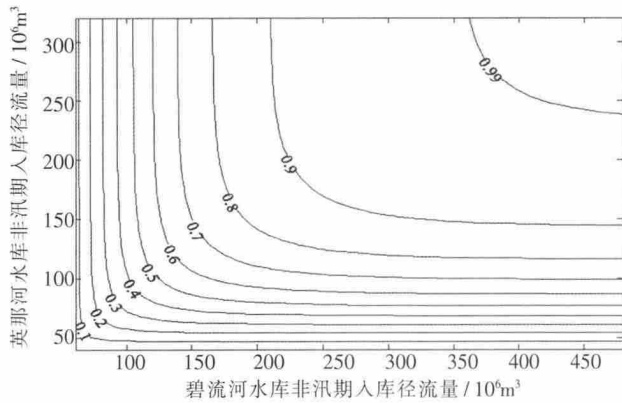


图 4 两库入库径流联合分布等值线图(非汛期)

Fig.4 The joint distribution contour of the runoff (non-flood season)

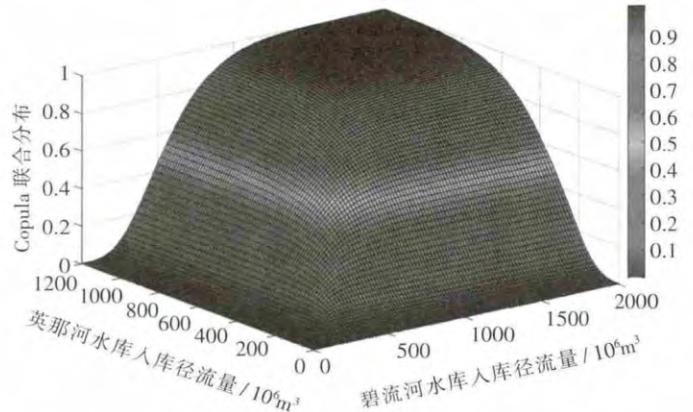


图 5 两库天然年入库径流联合分布图

Fig.5 The joint distribution of the natural annual runoff

枯平型、枯枯型 9 种情况。将这 9 种情况分为丰枯同步和丰枯异步两种情形,其中丰枯异步包括碧流河水库偏丰英那河水库偏枯与碧流河水库偏枯英那河水库偏丰两种情形。计算结果如下:

(1)碧流河水库、英那河水库年天然入库径流的丰枯同步频率为 59.48%,丰枯异步频率为 40.52%,其中同丰频率为 23.83%,同枯频率为 27.03%;汛期天然入库径流的丰枯同步频率为 61.62%,丰枯异步频率为 38.38%,其中同丰频率为 24.65%,同枯频率为 27.91%;非汛期天然入库径流的丰枯同步频率为 51.79%,丰枯异步频率为 48.20%,其中同丰频率为 20.38%,同枯频率为 23.54%。从时间尺度上看,汛期丰枯同步频率最大,全年次之,非汛期最小。三个尺度整体上看,两水库天然入库径流丰枯同步频率较高,丰枯补偿特征不十分明显,主要原因是由于碧流河水库与英那河水库地理位置比较接近,气候条件相似。

(2)英那河水库对碧流河水库具有良好补偿能力的组合是当英那河水库入库径流为丰水时,碧流河水库来水为平水或枯水两种情形,年时段具有良好补偿能力的频率合计为 13.67%,汛期时段具有良好补偿能力的频率合计 12.85%,非汛期时段具有良好补偿能力的频率合计 16.67%。

(3)英那河水库对碧流河水库具有一定补偿能力的组合是当英那河水库入库径流为平水时,碧流河水库来水为平水或枯水两种情形,年时段具有一定补偿能力的频率合计为 15.21%,汛期时段具有一定补偿能力的频率合计 15.40%,非汛期时段具有一定补偿能力的频率合计 14.85%。

3.2 连续丰枯特性统计分析

对 52a 碧流河水库、英那河水库年径流系列资料进行分析,统计具有代表性的历史连续丰水年与连续枯水年,结果如表 2 所示。

表2 连续丰枯遭遇统计

Table2 The statistics of the continuous wetness-dryness encountering

年份	碧流河水库年天然径流	英那河水库年天然径流
1959~1964	连续 6 年丰水年	连续 6 年丰水年
1989~1993	连续 5 年枯水年	4 年枯水 1 年平水
1999~2003	4 年枯水 1 年平水	连续 5 年枯水年

由表 2 可以看出,碧流河水库、英那河水库年天然入库径流连续丰枯同步特性明显,当碧流河水库出现多年连续丰水或枯水年时,英那河水库出现相应连续丰水或枯水年的频率较高。

4 库容补偿特性

4.1 两库库容系数分析

库容系数是水库调节库容与多年平均来水量的比值,水库调节性能根据水库的任务确定,库容系数越小,相应的调节性能越低。库容系数计算结果如表 3 所示。

表3 水库库容系数计算表

Table3 The storage coefficient calculation of the reservoirs

项目	天然来水量 /10 ⁴ m ³	兴利库容 /10 ⁴ m ³	库容 系数
碧流河水库	61 859	64 400	1.04
英那河水库	33 576	20 896	0.62
转角楼水库	7 320	10 820	1.48
英那河水库+转角楼水库	40 896	31 716	0.78
碧流河水库(调水 1×10 ⁸ m ³)	71 859	64 400	0.90
碧流河水库(调水 3×10 ⁸ m ³)	91 859	64 400	0.70

由表 3 可以看出,单库调度中,转角楼水库调节性能最大,碧流河水库次之,英那河水库最小。英那河水库与转角楼水库进行串联联合调度后,提高了英那河水库的调节性能;碧流河水库接纳大伙房水库输水应急入连工程调水后,碧流河水库库容系数降低,调节性能也相应降低。

4.2 两库联合供水优化调度模型

碧流河水库、英那河水库供水联合优化调度结果是进行水库库容补偿分析的基础,通过对调度结果中水库下泄水量、水库供水量的统计,分析两库在联合调度中的相互补偿作用。两库联合调度需考虑大伙房水库外调水源,其目标函数为供水成本最小,由供水经济效益分析可知,在供水成本中,主要包含调水成本和共同供水任务(引碧工程供水量和引英工程供水量)的供水成本,特定供水任务的供水成本不计算在内,当削减供水时,以罚函数的形式计入目标函数。具体表达式如式(3)^[5]:

$$\min P = P_B \sum_i WS_{BDL,i} + P_Y \sum_i WS_{YDL,i} + P_D \sum_i WT_i \quad (3)$$

式中: P 为总供水成本; P_B 、 P_Y 分别为碧流河水库和英那河水库城市供水单价; P_D 为调水单价;引碧工程为重力流输水,供水成本最小,引英工程和调水工程均为长距离有压输水,三者关系为 $P_B < P_Y < P_D$; $WS_{BDL,i}$ 、 $WS_{YDL,i}$ 分别为 i 时段引碧工程和引英工程供水量; WT_i 为 i 时段大伙房输水工程调水量。

约束条件包括水量平衡约束、水库上下限约束、最

大破坏深度约束、工程供水能力约束、水库末库容约束。

选取 2015 年为计算水平年,长系列调节年限为 1956~2007 年,两库天然年入库年径流量如图 6 所示,模型求解采用 GA 与逐步计算算法相结合的分离式优化方法对上述考虑外调水源的碧流河水库、英那河水库联合供水系统进行优化,通过模型优化,得出水库优化供水调度规则与水库历年下泄水量,如图 7 所示。

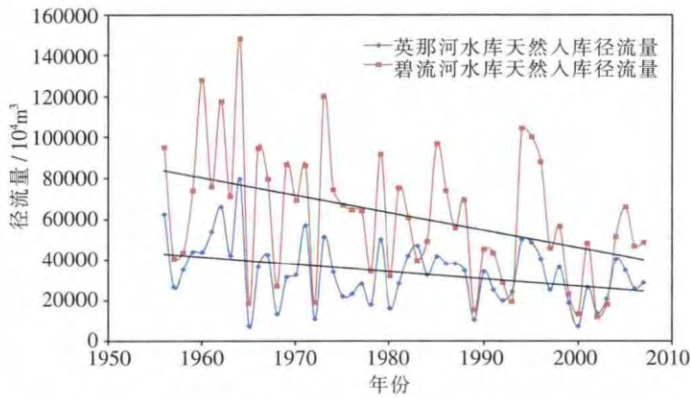


图 6 1956~2007 年两库天然入库径流系列

Fig.6 The natural runoff series into the 2 reservoirs from 1956 to 2007

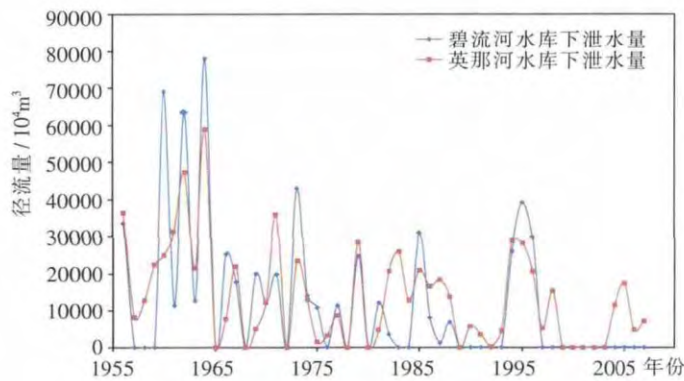


图 7 1956~2007 年两库联合优化调度下泄水量

Fig.7 The discharged water series by joint operation for the 2 reservoirs from 1956 to 2007

对联合供水优化调度结果进行分析可以得出,1956~2007 年 52a 长系列优化调度计算中,碧流河水库发生下泄水量的年份共有 25a,总泄水时段为 79 个,均发生在汛期,多年平均下泄水量 $12\,453 \times 10^4 \text{m}^3$;英那河水库发生泄水的年份共有 41a,总泄水时段为 263 个,多年平均下泄水量 $14\,684 \times 10^4 \text{m}^3$,其中非汛期泄水共有 20a,非汛期下泄水量较小,多年平均下泄水量 $536 \times 10^4 \text{m}^3$ 。

4.3 两库库容补偿特性分析

(1)在碧流河水库与英那河水库联合优化调度中,由于没有考虑英那河水库与转角楼水库的相互调水过

程,英那河水库自身调节能力较小,因此,在调节计算中,英那河发生下泄水量的年份较多,占调节计算年的 79%,在 52a 长系列中,只有 11a 未发生泄水。

(2)从碧流河水库与英那河水库入库径流丰枯遭遇特性分析中可以看出,碧流河水库与英那河水库汛期来水丰枯同步频率为 61.62%,同步遭遇频率较高。从两库泄水过程分析也可以看出,在碧流河水库发生泄水的 25a 中,当碧流河水库发生泄水时,相应年份英那河水库也同时发生泄水,英那河水库下泄水量通过调水至碧流河水库后,经碧流河水库调节也将在汛期下泄,因此,当英那河水库与碧流河水库丰丰同步,泄水同步遭遇时,英那河水库与碧流河水库之间进行库容补偿,会造成二次泄水,补偿效益不明显。在碧流河水库、英那河水库枯枯遭遇典型时段 1999~2003 年间,碧流河水库发生 5a 连续枯水段时,英那河水库 4 年枯水 1 年平水,未发生泄水,难以补偿碧流河水库缺水。

(3)当英那河水库发生泄水,碧流河水库不发生泄水,即英那河水库丰水或平水、碧流河水库平水或枯水时,英那河水库与碧流河水库可以通过输水达到两库库容补偿目的,在两库有一定库容补偿特性的 16a 中,英那河水库共有 89 个泄水时段(包括旬、月时段),占总计算时段的 6.6%,两库库容补偿保证率低,效益不明显。

(4)从英那河水库泄水量上看,可补偿调水年份中,英那河水库最大下泄水量 $22\,276 \times 10^4 \text{m}^3$,发生在 1964 年,最小泄水量 $335 \times 10^4 \text{m}^3$,发生在 1992 年。根据金屯输水洞的设计日平均输水能力 $24 \times 10^4 \text{m}^3$ 计算,发生泄水的年份中,有 8a 的泄水量小于金屯输水洞的设计引水能量,只有 8a 需要增加外调水能力,减小英那河水库的下泄水量。

5 结论

文中采用 Copula 函数分析了碧流河水库、英那河水库天然入库径流年系列、汛期系列、非汛期系列的丰枯遭遇特性,采用统计学方法分析了两座水库连续枯水系列年的遭遇情况。并利用联合优化供水调度模型,对水库联合调度下泄水量之间的补偿关系进行了阐述,主要研究结论如下:

(1)碧流河水库、英那河水库天然入库径流丰枯同步频率较高,两库全年、汛期、非汛期天然入库径流丰枯同步频率分别为 59.48%、61.62%、51.47%,汛期径流同步性高于全年、非汛期。两库径流丰枯补偿特征不明显。

(2)由两库库容补偿特性结果可以看出,在长系列供水调节计算中,英那河水库发生泄水的年份,碧流河水库不发生泄水时,可以通过输水达到两库库容补偿目的,但补偿时段占总计算时段 6.6%,保证率低,效益不明显;碧流河水库在 1999~2003 年连续干旱年缺水极需补水的同时,英那河水库 4 年枯水 1 年平水,均不发生泄水,难以补偿碧流河水库缺水。且英那河水库与转角楼水库联合调度后,提高了水库的调节性能,在一般年份,英那河水库可以将多余水量通过金屯输水洞向转角楼水库输水,供水库电站发电,在英那河水库来水量较大年份,随着大连市城市供水需求的增加,一方面可以增加英那河水库直供城市供水量,补偿碧流河水库的供水不足,同时下泄水量也可以补偿下游河道的生态用水。

(3)跨流域间水库库容补偿特性的研究是开展湖库连通及跨流域调水工程的前期工作,通过补偿特性分析,可以初步论证补调水工程的可行性,更好地进行流域间水库联合调度,充分发挥水库间的补偿作用,优化水资源配置,保障供用水安全。

参考文献:

- [1] 丛方杰. 基于水基和复杂适应理论的北方沿海城市水资源可持续利用研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2008. (CONG Fangjie. Research on Urban Water Resources Sustainable Utilization in North Coastal Cities Based on Water-based Theory and Complex adaptive Theory[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2008. (in Chinese))
- [2] 梁国华, 王国利, 王本德, 等. 大伙房跨流域引水工程预报调度方式研究[J]. 水力发电学报, 2009,28(3):32-36. (LIANG Guohua, WANG Guoli, WANG Bende. Study on forecast-based operation mode for Dahuofang inter-basin water transfer project [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2009,28(3):32-36. (in Chinese))
- [3] 韩宇平, 蒋任飞, 阮本清. 南水北调中线水源区与受水区丰枯遭遇分析[J]. 华北水利水电学院学报, 2007,28(1):8-11. (HAN Yuping, JIANG Renfei, RUAN Benqing. Analysis on wetness-dryness encountering of runoff flow between water source region and receiving water region in the middle route of the south to north water transfer project [J]. Journal of North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power, 2007,28(1):8-11. (in Chinese))
- [4] 傅玉勇, 闫澎旺, 丁志宏. 基于 GH Copula 的渭河与汾河径流丰枯遭遇频率研究[J]. 水利水电技术, 2010,41(1):15-17. (FU Yuyong, YAN Shuwang, DING Zhihong. Study on probability of encounter between abundant and low runoffs from weihe river and fenhe river based on Gumber-Hougaard Copula [J]. Resources and Hydropower Engineering, 2010,41(1):15-17. (in Chinese))
- [5] 孙万光, 杨斌斌, 徐岩彬, 等. 有外调水源的多年调节水库群供水优化调度模型研究[J]. 水力发电学报, 2015,34(6):21-26. (SUN Wangguang, YANG Binbin, XU Yanbin, et al. Study on optimal water supply operation model of pluriennial regulation reservoir groups with external water resource [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2015,34(6):21-26. (in Chinese))
- [6] 王强, 周惠成, 梁国华, 等. 浑太流域水库群联合供水调度模型研究[J]. 水力发电学报, 2014,33(3):42-54. (WANG Qiang, ZHOU Huicheng, LIANG Guohua, et al. Joint operation of multi-reservoir system in the Huntai basin [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2014,33(3):42-54. (in Chinese))
- [7] 大连市水务局. 大连市水务现代化规划 (2011-2020)[R]. 2012. (Dalian Water Affairs Bureau. Water modernization plan of Dalian (2011-2020)[R]. 2012. (in Chinese))
- [8] 闫宝伟, 郭生练, 肖义. 南水北调中线水源区与受水区降水丰枯遭遇研究[J]. 水利学报, 2007,38(10):1178-1185. (YAN Baowei, GUO Shenglian, XIAO Yi. Synchronous asynchronous encounter probability of rich-poor precipitation between water source area and water receiving areas in the middle route of south-to-north water transfer project [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007,38(10):1178-1185. (in Chinese))

Study on Compensation Characteristics for Joint Water Supply of Inter-basin Reservoirs

JIANG Biao¹, SUN Wanguang¹, DENG Xianyu¹, KUAI Jun²

(1. China Water Northeastern Investigation, Design & Research Co. Ltd., Changchun 130061, China;

2. Hydraulic Engineering Technical Audit and Cost Management Center of Liaoning Province, Shenyang 110003, China)

Abstract: Water transfer compensation characteristics include the two aspects of hydrological compensation and reservoir capacity compensation. Taking the 2 important water supply reservoirs of Biliuhe and Yingnahe as an example, the Copula function was applied to analyze the wetness-dryness encountering probability of the annual natural inflow of the reservoirs, the inflow in flood season and dry season. The statistical method was used to analyze the wetness-dryness encountering of consecutive dry years between the reservoirs. The joint water supply dispatching optimization model with external water resources was established to simulate the water supply and discharged water of the reservoirs in planned year. With the simulation result of the relationship between the discharged water over the years, the capacity compensation characteristics of the reservoirs was analyzed.

Key words: hydrological compensation; reservoir capacity compensation; inter-basin water transfer; lakes and reservoirs communication; joint water supply