

DOI: 10.5846/stxb201409241890

张正浩, 张强, 肖名忠, 张弛. 辽河流域丰枯遭遇下水库调度. 生态学报, 2016, 36(7): - .

Zhang Z H, Zhang Q, Xiao M Z, Zhang C. Reservoir-based ecological water operation in the Liaohe River basin characterized by synchronous occurrence of wet/dry events. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(7): - .

辽河流域丰枯遭遇下水库调度

张正浩^{1,2}, 张 强^{1,2,*}, 肖名忠^{1,2}, 张 弛³

1 中山大学水资源与环境系, 广州 510275

2 中山大学 华南地区水循环与水安全广东省普通高校重点实验室, 广州 510275

3 大连理工大学 建设工程学部 水资源与防洪研究所, 大连 116024

摘要: 利用 Copula 函数分析辽河流域水库入库流量边缘分布及其生态径流量, 得出水库可调水范围, 在满足生态流量基础上, 保障辽河流域城市供水。研究表明: (1) 英那河与张家堡水库入库流量以对数正态分布为最佳边缘分布, 其余水库入库流量最佳边缘分布均为广义极值分布, 同时, Gumbel Copula 与 Frank Copula 函数对水库入库流量拟合效果最优; (2) 7 组水库组合中有 3 组水库组合入库流量(白石与锦凌、白石与青山、张家堡与碧流河)丰枯异步概率高于丰枯同步概率, 且枯枯遭遇概率较低, 分别为 13%, 12% 以及 13%。其余 4 组水库组合枯枯遭遇概率皆高于 27%, 水库间入库水文过程发生同枯概率可能性较大; (3) 使用 90% 保证率逐月频率计算法所求流量是辽河流域 9 个水库的最佳生态径流量。(4) 枯水月水库间易发生枯枯遭遇, 当水库间入库径流皆低于最小生态径流标准, 水库无法对各自调水城市进行供水调度, 其中, 大伙房与桓仁、白石与锦凌、白石与青山主要在 1、2 月无法对沈阳、凌海和绥中县进行输水, 桓仁与清河水库仅在 2002 年 5 月无法对开原进行供水, 此时需考虑水库提前蓄水以满足城市用水需求。碧流河、英那河和张家堡水库虽两两存在无法输水情况, 但可三者联动对大连进行联合调度, 缓解无法输水问题。

关键词: 边缘分布; Copula 函数; 丰枯遭遇; 生态径流; 水库调度

Reservoir-based ecological water operation in the Liaohe River basin characterized by synchronous occurrence of wet/dry events

ZHANG Zhenghao^{1,2}, ZHANG Qiang^{1,2,*}, XIAO Mingzhong^{1,2}, ZHANG Chi³

1 Department of Water Resources and Environment, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China

2 Key Laboratory of Water Cycle and Water Security in Southern China of Guangdong High Education Institute, Guangzhou 510275, China

3 Institute of water resources and flood control, Faculty of Infrastructure Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China

Abstract: Allocation of water resources from river basins draining into reservoirs is a challenging task, particularly, if the ecological water requirement is taken into account. In this study, copula functions were used to analyze hydrologically the possible synchronous occurrence of dry and wet regimes in the Liaohe River. The ecological streamflow requirements were considered during the water resource allocation. The following results were obtained. (1) The probability distribution with the highest goodness-of-fit for the Yinna River and Zhangjiabao reservoir inflow was the log-normal distribution and that for the reservoir inflow of other rivers was the generalized extreme-value distribution. Further, the Gumbel and Frank copulas had the best fitting efficacy for the inflow series of the reservoirs. (2) The synchronous wet/dry events occurred at a higher probability of more than 27% at 4 out of 7 pairs of water reservoirs and at the rate of 13%, 12%, and 13% at the other

基金项目: 国家自然科学基金重大国际合作研究项目(51320105010); 国家杰出青年科学基金项目(51425903); 中山大学滨海小流域自然地理综合过程观测与实验平台建设(2012 年度)资助

收稿日期: 2014-09-24 网络出版日期: 2015- -

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhangq68@mail.sysu.edu.cn

three pairs of water reservoirs, i.e., Baishi vs. Jinling, Baishi vs. Qingshan, and Zhangjiabao vs. Biliuhe, respectively. Further, the probability of synchronous dry instream events was high in these reservoirs. (3) The method of minimal monthly runoff at 90% guarantee rate suggest the best ecological runoff at the nine water reservoirs. (4) Dry-dry events occurred at a higher frequency during low-flow periods. The water resource allocation or operation cannot be executed when the reservoir instream flow is lower than the minimum ecological streamflow. Joint water operation of the reservoirs based on the occurrence probability of dry-dry events and minimum ecological streamflow can satisfy the regional water requirement.

Key Words: marginal distribution; copula functions; synchronous encounter; ecological flow; reservoir operation

随着经济的发展,水资源供需矛盾愈发突出,水库作为调蓄的主要工程手段,在水资源的优化配置中发挥着愈益重要的作用。分析不同区域水库来水丰枯遭遇,对水资源的区域再分配过程有着重要的意义^[1]。丰枯遭遇事件涉及两两水库的入库流量,需要多变量的方法进行分析。另外,在保障供水的同时,考虑人类供水、水库与生态系统三者共同需求已成为流域水库调度与水资源配置的重点^[2-3]。郭生练等^[4]使用 Copula 对南水北调中线工程水源区与各受水区的丰枯遭遇进行了进一步研究。牛军宜等^[5]利用三维 Copula 函数构造了陡河水库、潘家口水库和于桥水库年入库天然径流系列的三维联合分布,然后利用此联合分布计算了这 3 个水库年天然来水量丰枯遭遇的概率。在流域生态径流研究方面,张强等^[6]系统分析了东江流域生态径流,杨扬^[7]使用逐月最小生态径流法与逐月频率计算法对大伙房、桓仁和碧流河水库入库径流进行了生态流量的分析。前人的研究主要集中于水库多目标调度^[7-9],往往分开对丰枯遭遇与生态需水进行单独研究,本文采用 Copula 函数同时考虑水库入流丰枯遭遇概率以及最小生态基流的水库联合调水问题,不仅能够为水库调度研究提供新的思路,其研究成果也将进一步完善水库间调度的解决方法,为水库调度提供重要的指导建议。

水资源短缺是辽宁的基本省情,水资源总量逐年减少、时空分布不均、开发利用程度高是辽宁的基本水情。根据辽宁水资源东多西少的分布现状,通过由源头、北线和南线三线水库组成的“东水济西”水资源配置格局,能有效解决辽宁水资源短缺问题。在水库丰枯遭遇研究中,枯水月水库间易发生枯枯型遭遇,枯枯型遭遇发生时,水库入库流量较少,当水库间入库径流皆低于最小生态径流标准,水库无法对各自调水城市进行供水调度,从而对城市用水造成极大影响。因此,研究源头、北线和南线三线水库间丰枯遭遇,对入库流量作定量生态分析,不仅可以为辽河流域城市间输水用水提供解决方案,更能使水库径流生态系统不因调水而受到破坏,其研究结果对维系辽河流域水库生态系统以及辽宁省城市水资源配置具有重大意义。基于此,本文选择辽河流域源头、北线和南线三线 9 个水库进行分析,探讨近 50 年来水库间丰枯遭遇情况,同时研究各水库生态径流,结合水库丰枯遭遇与生态径流情况对输水城市进行水库生态调度,为辽河流域水库水资源的优化配置和区域水资源可持续开发利用提供科学依据。

1 研究区域和数据介绍

辽河流域地处我国东北地区,主要河流包括东辽河、西辽河、辽河干流和浑太河,地跨辽、吉、蒙、冀四省,流域面积 $21.9 \times 10^8 \text{ km}^2$,多年平均降水量在 300-1000 mm 之间。辽河流域水库沿南中北三线分布,本文选取东北地区位于源头、北线、南线三线 9 个主要水库作为研究对象,分别是源头:大伙房、清河、桓仁;南线:英那河、碧流河、张家堡;北线:青山、锦凌、白石共 9 个水库,各水库控制流域位置及周边输水城市见图 1。其中大伙房、清河、桓仁、青山、锦凌、白石水库为 1956—2006 年月入库径流数据,张家堡、英那河以及碧流河水库为 1956—2004 年月入库径流数据,数据完好,无缺省值。

2 研究方法

2.1 边缘分布选择和参数估计

水文频率计算的两个基本问题是分布线型选择和参数的估计^[10]。本文使用皮尔逊三型、广义极值分布

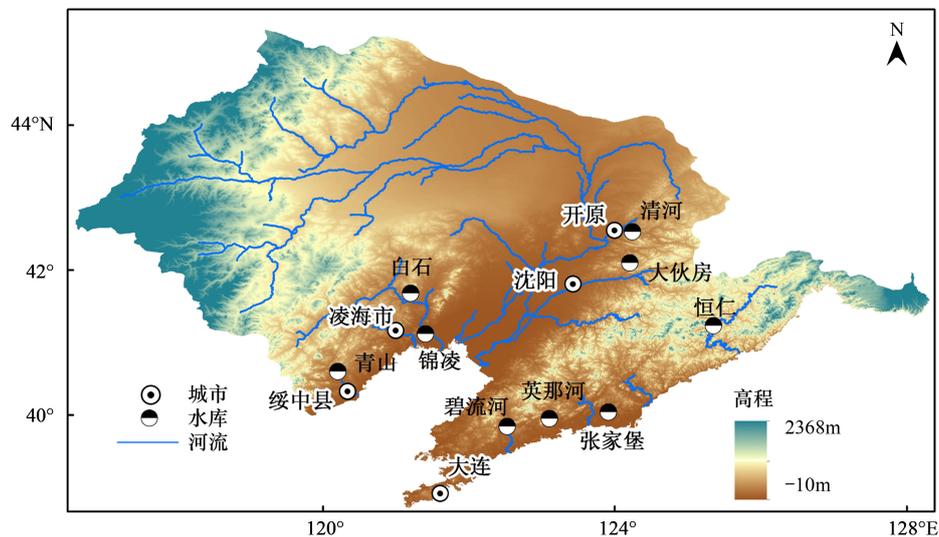


图1 研究区域与水库位置

Fig. 1 Study area and reservoirs location

(GEV)以及对数正态分布(LOGN)对水文变量进行边缘分布拟合,同时通过 AIC 信息准则和 K-S 检验的值检验分布拟合优度。

2.2 二维 Copula 联合分布函数和非参数估计

本文采用此类型二维 Copula 函数中的 Gumbel-Hougaard、Clayton 和 Frank Copula 函数构建不同水库间的径流联合分布函数,通过 Genest 和 Rivest 提出的非参数估计方法计算三种 Copula 函数^[11],再根据 OLS 方法选取最优 Copula 函数进行辽河流域水库间丰枯遭遇分析。

2.3 丰枯遭遇情况划分

丰枯指标分为丰、平、枯 3 级,取丰、枯水划分的累积概率分别为 $p_f = 62.5\%$ 和 $p_k = 37.5\%$ ^[1],通过最优二维 Copula 模型可对水库与水库丰枯的遭遇性进行研究,两个水库的丰枯遭遇可以分为丰丰、丰平、丰枯、平丰、平平、平枯、枯丰、枯平、枯枯共 9 种情况^[1]。

2.4 生态径流及计算方法

河流生态需水量是指满足维持河流系统特定的生态与环境功能(如输沙、防污、防止海水侵、景观娱乐等)而消耗的水量^[12]。通过生态径流计算方法计算河道生态需水量可以为水库调度提供数据支撑。本文将 9 个水库多年逐月入库径流资料作为下游河道天然径流系列,进行河道最小生态径流计算。生态径流计算方法有最小月平均实测法^[13]、逐月最小流量法^[14]、逐月频率计算法^[6]、年内展布计算法^[15],如需对以上方法做进一步了解,可参阅相应参考文献。

3 结果

3.1 最优 copula 函数模型的确定

3.1.1 边际最优分布函数的确定

由表 1 可知,在 K-S 临界值为 0.054 的条件下,辽河流域 9 个水库的皮尔逊三型分布 K-S 值均高于临界值,表明对于辽河流域 9 个水库而言,皮尔逊三型分布不适合用于水库入库流量的拟合。除清河、英那河、张家堡水库外,其余六个水库的入库径流最优分布为广义极值分布。对于清河、英那河、张家堡水库而言,清河水库最优分布选择广义极值分布。英那河水库与清河水库分布选取情况相反,对数正态分布的 AIC 值比广义极值分布的值低,而 K-S 值高于广义极值分布,因此,选择对数正态分布为英那河水库最优分布。张家堡水库对数正态分布的 K-S 值和 AIC 值均低于广义极值分布,因此其最优分布为对数正态分布。

表 1 水库边缘分布 K-S 检验与评价结果

Table 1 The result of reservoirs marginal distribution K-S test and evaluation

| 水库 Reservoirs | 皮尔逊三型 Pearson-III distribution | | 广义极值分布 Generalized extreme-value distribution | | 对数正态分布 Log-normal distribution | |
|------------------|---|---|--|---|---|---|
| | 赤池信息量准则 Akaike information criterion AIC | Kolmogorov-Smirnov 检验 Kolmogorov-Smirnov test K-S | 赤池信息量 准则 Akaike information criterion AIC | Kolmogorov-Smirnov 检验 Kolmogorov-Smirnov test K-S | 赤池信息量 准则 Akaike information criterion AIC | Kolmogorov-Smirnov 检验 Kolmogorov-Smirnov test K-S |
| 大伙房 | 3250 | 0.1438 | 3202 | 0.0395 | 3211 | 0.0619 |
| 清河 | 1764 | 0.1389 | 1747 | 0.0238 | 1937 | 0.1233 |
| 桓仁 | 4321 | 0.0997 | 4215 | 0.0437 | 4398 | 0.0997 |
| 白石 | 2619 | 0.152 | 2513 | 0.0466 | 2530 | 0.0648 |
| 锦凌 | 1008 | 0.2271 | 844.6 | 0.032 | 835.7 | 0.0546 |
| 青山 | 484.8 | 0.201 | 308.3 | 0.046 | 296.7 | 0.0566 |
| 英那河 | 1122 | 0.1752 | 1102 | 0.0355 | 1057 | 0.0533 |
| 碧流河 | 1781 | 0.1871 | 1606 | 0.0358 | 1611 | 0.055 |
| 张家堡 | 1047 | 0.1378 | 968.2 | 0.0284 | 953.7 | 0.0277 |

K-S 的临界值 K-S critical value: 0.054

3.1.2 最优 Copula 函数的确定

本文采用普通最小准则 (OLS) 评价 Copula 方法的有效性, 并选取 OLS 最小的 Copula 为最优 Copula。

从表 2 看出, 辽河流域源头水库 (大伙房与桓仁、清河与桓仁) Gumbel Hougaard Copula 函数的 OLS 值均低于 Clayton Copula 函数与 Frank Copula 函数的 OLS 值, Gumbel Hougaard Copula 函数为辽河流域源头水库的最优 Copula 函数; 对于辽河流域北线水库 (白石、锦凌、青山) 而言, 白石与锦凌、白石与青山 Frank Copula 函数的 OLS 最小, 因此, 选取 Frank Copula 为白石与锦凌、白石与青山水库最优 Copula 函数; 辽河流域南线水库 (碧流河、英那河、张家堡) 三者的最优 Copula 函数各不相同, 其中, 英那河与碧流河为 Gumbel Hougaard Copula, 张家堡与英那河为 Frank Copula, 张家堡与碧流河为 Clayton Copula。三种 Copula 函数在辽河流域水库与水库间不具有基本通用性, 但 Gumbel Hougaard Copula 与 Frank Copula 函数对水库拟合效果较优。

表 2 二维 Copula 联合分布函数 OLS 评价结果

Table 2 The result of two-dimension Copula joint distribution OLS evaluation

| 水库 Reservoirs | GH | Clayton | Frank |
|---------------|--|--|--|
| | 普通最小准则 Original Least Square OLS | 普通最小准则 Original Least Square OLS | 普通最小准则 Original Least Square OLS |
| 大伙房与桓仁 | 0.008 | 0.027 | 0.010 |
| 清河与桓仁 | 0.010 | 0.037 | 0.017 |
| 白石与锦凌 | 0.010 | 0.012 | 0.006 |
| 白石与青山 | 0.011 | 0.012 | 0.007 |
| 英那河与碧流河 | 0.005 | 0.037 | 0.012 |
| 张家堡与英那河 | 0.0988 | 0.1040 | 0.0738 |
| 张家堡与碧流河 | 0.0083 | 0.0074 | 0.0092 |

3.2 丰枯遭遇分析

从图 2、图 3、图 4 可以看出, 对于 7 组水库丰枯遭遇情况, 除白石与锦凌水库、白石与青山水库、张家堡与碧流河 3 组水库丰枯组合外, 其余 4 组水库丰枯组合丰枯同步的概率范围从 59% 到 81%, 丰枯异步的概率范围从 19% 到 41%, 枯枯遭遇的概率范围从 27% 到 33%, 丰枯同步的概率远高于丰枯异步的概率, 4 组水库丰枯

组合在正常来水年发生丰枯同步的概率极高,发生枯枯遭遇这种最恶劣情况的概率也不低。白石、锦凌、青山水库同属辽河流域北线水库,张家堡与碧流河水库属于南线水库,3组水库组合丰枯同步概率均低于他们各自的丰枯异步概率,同时,他们的枯枯遭遇概率仅为13%、12%和13%,相对其他4种组合而言,概率较低。为了进一步分析辽河流域水库丰枯遭遇情况,本文分别从水库源头、北线和南线进行分析。

辽河流域源头水库包括大伙房水库、清河水库以及桓仁水库,从图2可知,三大水库枯枯遭遇的概率最大,为32%与27%,丰枯遭遇与枯丰遭遇的概率最小,分别为3%与4%,这表明,三大水库间丰枯同时出现的可能性极小,枯枯出现的概率极大,不利于水库间的调度。图3、图4是北线与南线水库丰枯遭遇情况,与其他4组水库间组合不同,白石与锦凌、白石与青山以及张家堡与碧流河丰枯与枯丰遭遇概率皆高于其枯枯概率,如白石与锦凌的丰枯概率为15%,枯丰概率为14%,枯枯概率为13%。低枯枯遭遇概率有利于水库对下游城市进行调度,因此,三者对下游调水补给优于其他4组水库组合。

综上所述,7组水库组合仅有3组(白石与锦凌、白石与青山、张家堡与碧流河)丰枯异步概率高于丰枯同步概率,且枯枯遭遇概率较低,其余4组水库组合枯枯遭遇概率皆高于27%,水库间发生同枯可能性较大,在同枯遭遇下,水库间供水量同时不足,无法为下游城市进行有效调水,因此,有必要先考虑各水库的生态径流状况,求出各水库最小生态径流,再结合研究中普遍采用的37.5%枯水期分界线,对水库进行生态径流条件下的水库供水调配,使水库同时满足生态与供水需求。

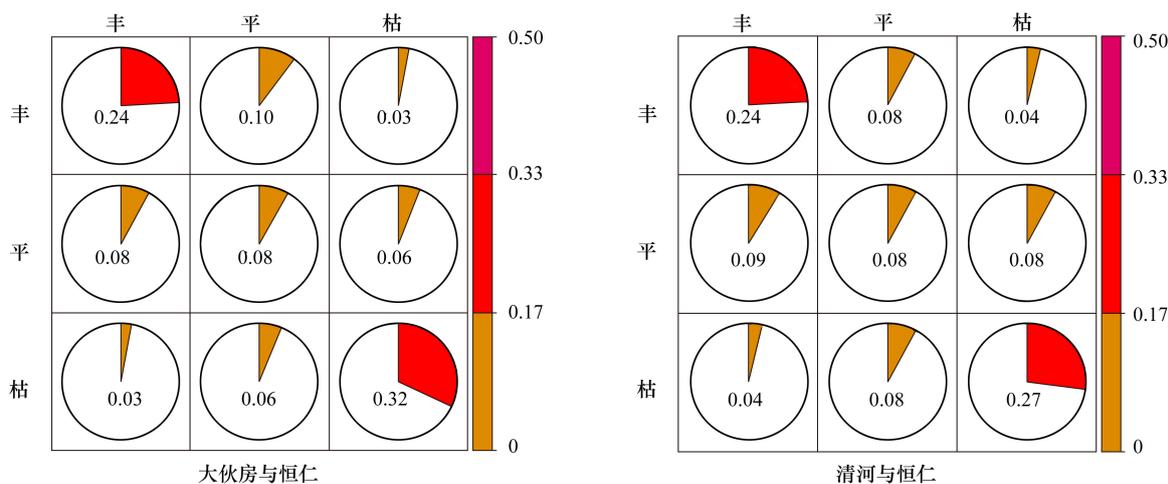


图2 辽河流域源头水库丰枯遭遇图

Fig. 2 The source reservoirs of Synchronous/asynchronous encounter in Liaohe basin

(A) 大伙房与桓仁 (B) 清河与桓仁

(A) Dahuofang and Huanren (B) Qinghe and Huanren

3.3 辽河流域水库生态径流分析

辽河流域水库最小生态径流评价分析

本文运用4种方法计算的辽河流域9个水库最小生态径流,再通过Tennant法对各种方法进行评价,评价结果见表3。根据Tennant法的评价标准^[16],可知:

1) 对辽河流域9个水库而言,最小月平均流量法计算的径流量并不能能使栖息地质量维持在令人满意的标准,除了大伙房、清河以及张家堡水库占多年实测流量百分比高于10%外,其余6个水库皆低于10%。

2) 虽然整体上逐月最小流量法与年内展布计算法占多年实测流量百分比相同,但是由于逐月最小流量法取最小值容易出现极端情况,所以年内展布计算法计算所得径流量优于逐月最小流量法^[15]径流量。

3) 总体而言,通过对比计算,90%保证率逐月频率计算法计算所得径流量最好,除青山水库计算径流量为60.47 m³/s 低于10%,因此采用Tennant法建议的最小流量66.52 m³/s外,锦凌、清河与碧流河的最佳生态径流量分别为126.41 m³/s、318.08 m³/s、288.34 m³/s,处于Tennant评价标准的10%—20%范围内,基本符合生态

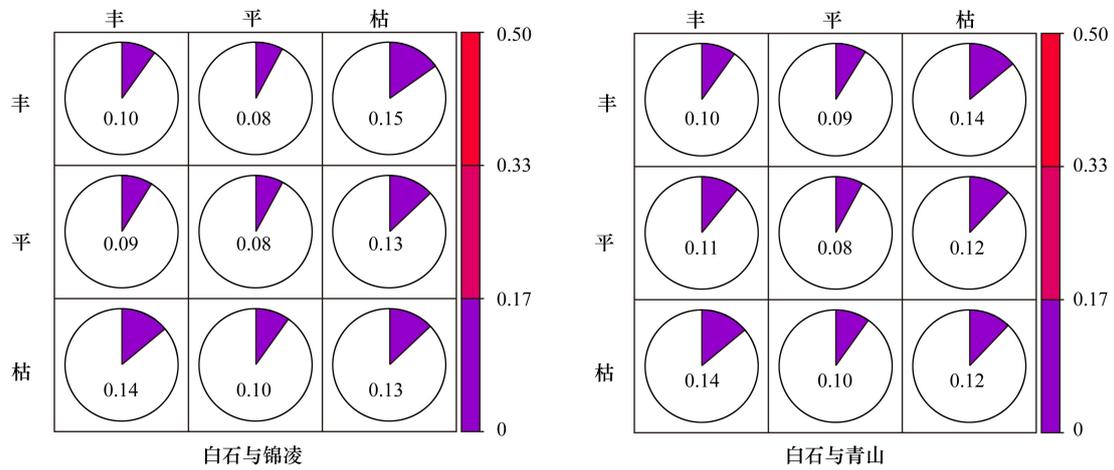


图3 辽河流域北线水库丰枯遭遇图

Fig. 3 The north line reservoirs of Synchronous asynchronous encounter in Liaohe basin

(C)白石与锦凌(D)白石与青山

(C) Baishi and Jinling(D) Baishi and Qingshan

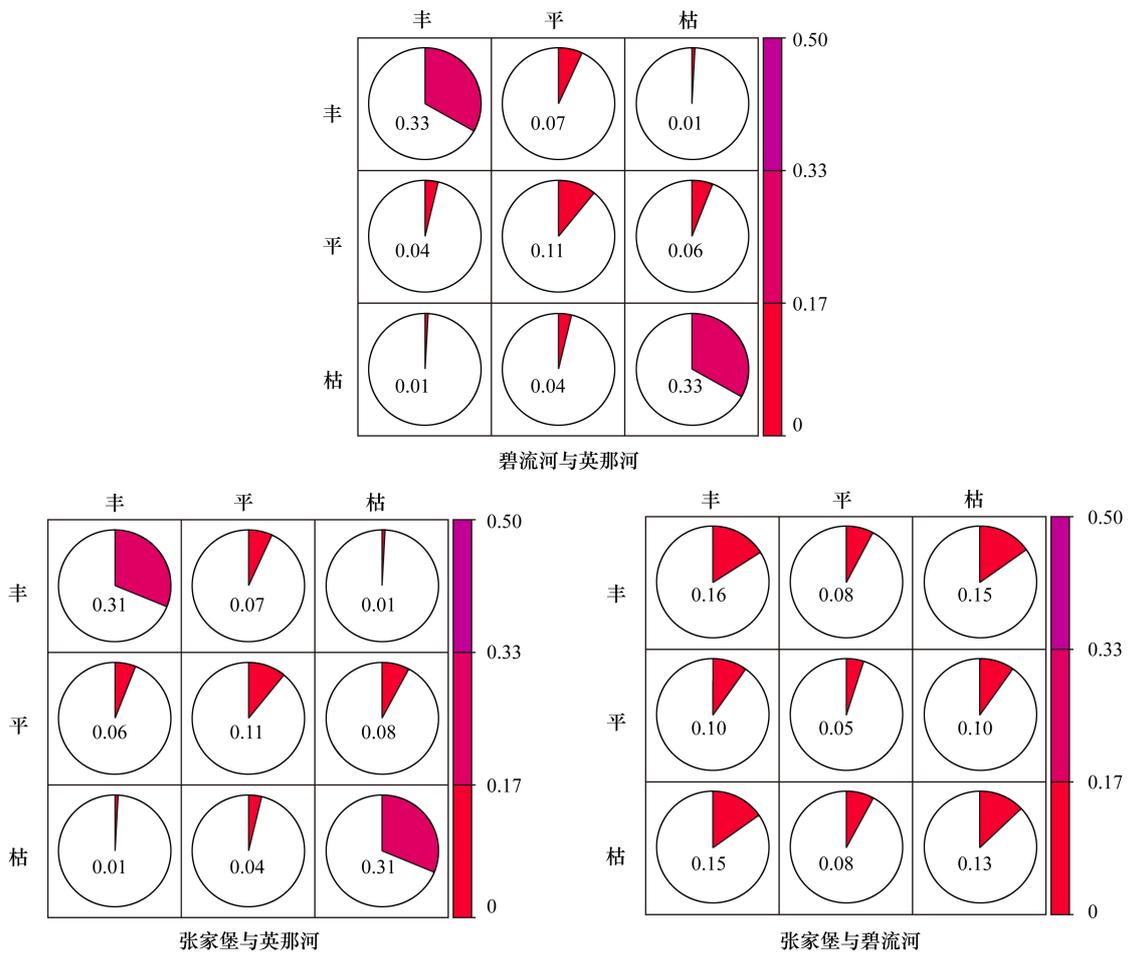


图4 辽河流域北线水库丰枯遭遇图

Fig. 4 辽河流域北线水库丰枯遭遇图

(E)碧流河与英那河 (F) 张家堡与英那河 (G) 张家堡与碧流河

(E) Biliu River and Yinna River(F) Zhangjiabao River and Yinna River(G) Zhangjiabao River and Biliu River

需求;英那河与张家堡水库径流量为 $217.65 \text{ m}^3/\text{s}$ 和 $256.41 \text{ m}^3/\text{s}$, 高于 20%, 两个水库栖息地质量维持在适当的标准;大伙房、桓仁与白石水库径流量分别为 $1736.9 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $4067.1 \text{ m}^3/\text{s}$ 与 $1995.1 \text{ m}^3/\text{s}$, 百分比处于 30%–60% 内, 其质量皆能维持在最佳的标准。因此, 本文根据 90% 保证率逐月频率计算法计算 9 个水库最小生态径流, 并以此作为水库调度的最低标准。

表 3 辽河流域 9 个水库最小生态径流结果对比

Table 3 The results of minimum ecological runoff of 9 reservoirs in the Liaohe River basin

| 水库 Reservoirs | 最小月平均流量 Minimum monthly flow | | 逐月最小流量 Monthly minimum flow | | 90% 保证率 逐月频率计算流量 90% monthly frequency flow | | 年内展布计算流量 Dynamic calculation flow | |
|------------------|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 计算结果 results/ (m^3/s) | 占多年实测 流量百分比 The percentage of observed flow for years | 计算结果 results/ (m^3/s) | 占多年实测 流量百分比 The percentage of observed flow for years | 计算结果 results/ (m^3/s) | 占多年实测 流量百分比 The percentage of observed flow for years | 计算结果 results/ (m^3/s) | 占多年实测 流量百分比 The percentage of observed flow for years |
| 大伙房 | 563.72 | 10.82% | 1135.2 | 21.78% | 1736.9 | 33.33% | 1135.2 | 21.78% |
| 清河 | 187.28 | 11.55% | 70.73 | 4.36% | 318.08 | 19.61% | 70.73 | 4.36% |
| 桓仁 | 850.43 | 6.62% | 1473.9 | 11.47% | 4067.1 | 31.66% | 1473.9 | 11.47% |
| 白石 | 111.59 | 3.32% | 474.25 | 14.13% | 1995.1 | 59.44% | 474.25 | 14.13% |
| 锦凌 | 89.87 | 9.11% | 41.84 | 4.24% | 126.41 | 12.82% | 41.84 | 4.24% |
| 青山 | 52.75 | 7.93% | 13.11 | 1.97% | 66.52 | 10% | 13.11 | 1.97% |
| 英那河 | 59.1 | 5.88% | 75.19 | 7.49% | 217.65 | 21.67% | 75.19 | 7.49% |
| 碧流河 | 114.52 | 6.56% | 112.9 | 6.47 | 288.34 | 16.52% | 112.9 | 6.47 |
| 张家堡 | 108.96 | 11.87% | 150.37 | 16.37% | 256.41 | 27.92% | 150.37 | 16.37% |

3.4 辽河流域水库调度分析

本文选取 9 个水库最后 5 年枯水月 (1、2、3、4、5、10、11、12 月) 进行水库调度分析, 其中, 枯水期分界线为径流序列累积频率 37.5% 分界线, 最小生态径流为 90% 逐月频率计算法结果。从图 5、图 6、图 7 可以看出, 源头水库中的大伙房水库与桓仁水库可调水量最大, 两者调水的目的地是沈阳, 近 5 年 1 月与 2 月皆发生枯枯遭遇, 且两水库入库流量不能满足生态系统最低标准, 在考虑水库生态系统的条件下无法对沈阳进行调水。桓仁与清河水库调水目的地是开原, 虽然清河可调水量并不多, 但是从 2005 年开始, 2005 年与 2006 年基本上枯水月的水量均高于最小生态径流, 两年间可调水量最小时为 $200.2 \text{ m}^3/\text{s}$, 最大时为 $1856.3 \text{ m}^3/\text{s}$, 可对开原进行少量调水。除 2002 年 5 月两个水库入库径流皆低于最小生态径流标准, 无法对开原进行调水外, 其余时间两水库均能进行交替式或叠加式调水。对于以上两种无法调水情况, 可令大伙房水库与桓仁水库在 12 月提前蓄水, 以及引入其他水库和从外调水以满足沈阳 1、2 月枯水月的用水要求, 同时令桓仁与清河水库在 4 月提前蓄水以满足开原 5 月用水需求。再分析辽河流域北线水库, 三个水库中, 白石水库是引水水库, 锦凌水库与青山水库是受水水库, 但是, 白石水库最小生态径流为 $1995.1 \text{ m}^3/\text{s}$, 高于其枯水期分界线 $1208 \text{ m}^3/\text{s}$, 因此, 当白石水库与锦凌水库、白石水库与青山水库枯枯遭遇时, 白石水库无法进行调水, 所以对白石水库与锦凌水库而言, 当锦凌水库入库流量也低于最小生态径流, 如 2002 年 1 月、12 月、2003 年 1 月、2 月、12 月以及 2004 年 1 月和 2 月, 两者无法对凌海市进行调水。对于白石水库与青山水库而言, 虽然两者枯枯遭遇概率并不高, 从图 6 可知, 近 5 年白石与青山水库均没有发生枯枯遭遇, 青山水库近 5 年枯水月入库流量均高于枯水线, 但是, 由于青山水库入库径流较少, 当其流量处于枯水线附近时, 如 2002 年 4 月、12 月, 2003 年 1、2、3、4 月等, 其可调水量仅为 $59.06 \text{ m}^3/\text{s}$, 此时, 若遭遇白石水库入库径流低于最小生态径流时, 如 2003 年与 2004 年 1、2 月, 则难以对绥中县进行调水。在这两种情况下, 由于白石水库无法调水, 应考虑锦凌水库与青山水库分别提前蓄水或引入外调水来满足凌海市与绥中县的用水需求。

对于辽河流域南线水库, 碧流河、英那河以及张家堡水库的调水区域是大连, 他们枯水期分界线与最小生

态径流线皆非常接近,其中,英那河水库的枯水期分界线为 $320.87 \text{ m}^3/\text{s}$,最小生态径流为 $217.64 \text{ m}^3/\text{s}$,在这范围内可调水仅为 $103.23 \text{ m}^3/\text{s}$,而碧流河水库与张家堡水库在最小生态径流与枯水期分界线范围内的可调水分别为 $194.36 \text{ m}^3/\text{s}$ 与 $68.42 \text{ m}^3/\text{s}$,所以三者发生两两枯枯遭遇时对调水容易产生不利影响,由于三个水库都是对大连进行调水,因此考虑三者联合调水,当三个水库中有任意一个水库可进行调水即可对大连进行水量的调度,所以一共有三种情况:情况一:其中一个水库调水,另外两个水库不调水;情况二:两个水库调水,另外一个水库不调水;情况三:三个水库同时调水;对于情况一,如 2000 年 1 月,英那河水库与张家堡水库入库流量皆低于最小生态径流,此时,碧流河水库入库流量高于枯水期分界线,可用于对大连调水,调水量为 $206.5 \text{ m}^3/\text{s}$ 。对于情况二,如 2004 年 3 月,英那河水库无法进行调水,而张家堡水库和碧流河水库可以进行联合调水,其可调水量为两个水库可调水量总和,为 $1317.86 \text{ m}^3/\text{s}$ 。第三种情况是最佳状况,如 2004 年 10 月,联合可调水量最大,为 $7303 \text{ m}^3/\text{s}$ 。但是,最不利调水情况即三个水库同时低于最小生态径流情况仍然存在,如 2000 年 4 月,2001 年 4 月、5 月,2002 年 5 月,2003 年 1 月、5 月以及 2004 年 1、2、4 月,这些月份三个水库均无法在维持生态系统的条件下对大连进行供水,因此需要考虑外调水进行大连市的调水。

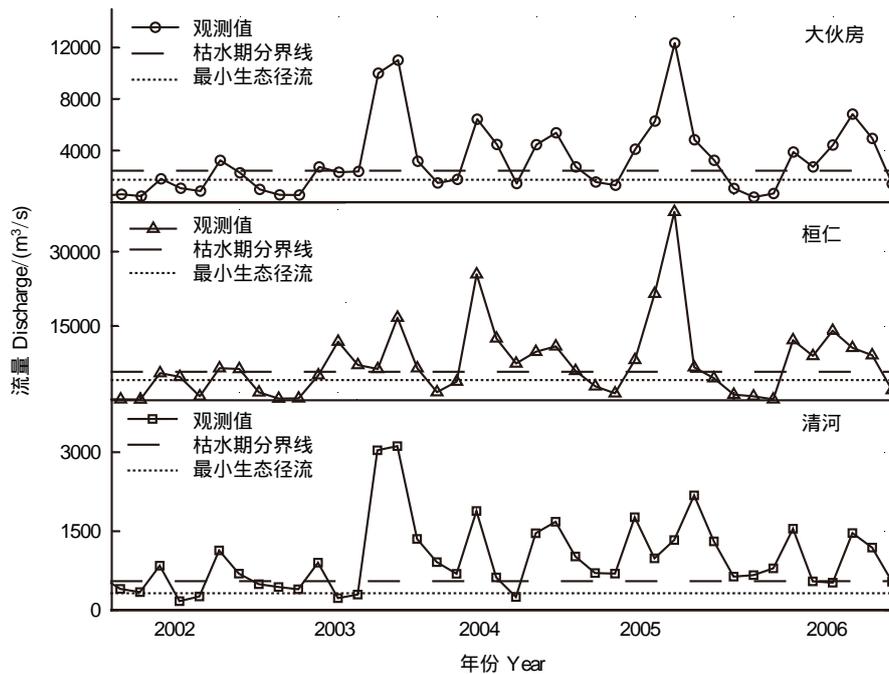


图 5 辽河流域源头水库枯水月调度分析

Fig. 5 The source reservoirs regulation analysis of low flow months in Liaohe basin

(a) 大伙房 (b) 桓仁 (c) 清河

4 结论

1) 对于辽河流域 9 个水库而言,皮尔逊三型分布不适合用于水库入库流量的拟合。对于清河、英那河、张家堡水库而言,广义极值分布和对数正态分布的 K-S 值均低于临界值,通过检验,其中,清河水库对数正态分布的 K-S 值为 0.12,低于广义极值分布的 0.0238,但是对数正态分布的 AIC 值为 1937 高于广义极值分布的 1747,在 K-S 值均通过检验的情况下,AIC 值较低分布拟合效果更好,因此,选择广义极值分布为清河水库最优分布。英那河水库与清河水库情况相反,对数正态分布的 AIC 值比广义极值分布的值低,而 K-S 值高于广义极值分布,在这种情况下,选择对数正态分布为英那河水库最优分布。对于张家堡水库而言,对数正态分布的 K-S 值和 AIC 值均低于广义极值分布,因此张家堡水库的最优分布为对数正态分布。其余六个水库的入库径流最优分布为广义极值分布。

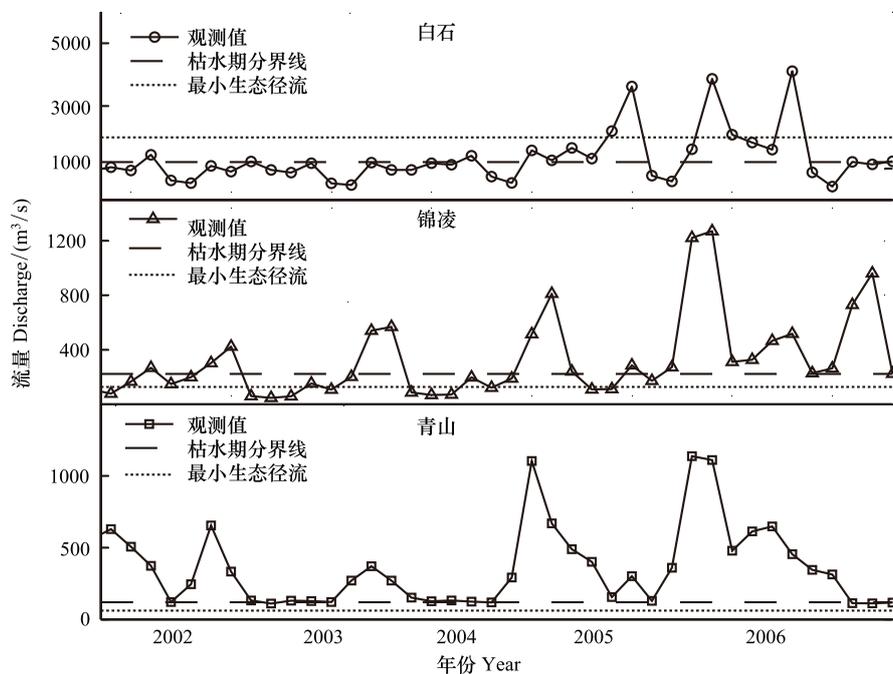


图 6 辽河流域北线水库枯水月调度分析

Fig. 6 The north line reservoirs regulation analysis of low flow months in Liaohe basin

(d) 白石(e) 锦凌(f) 青山

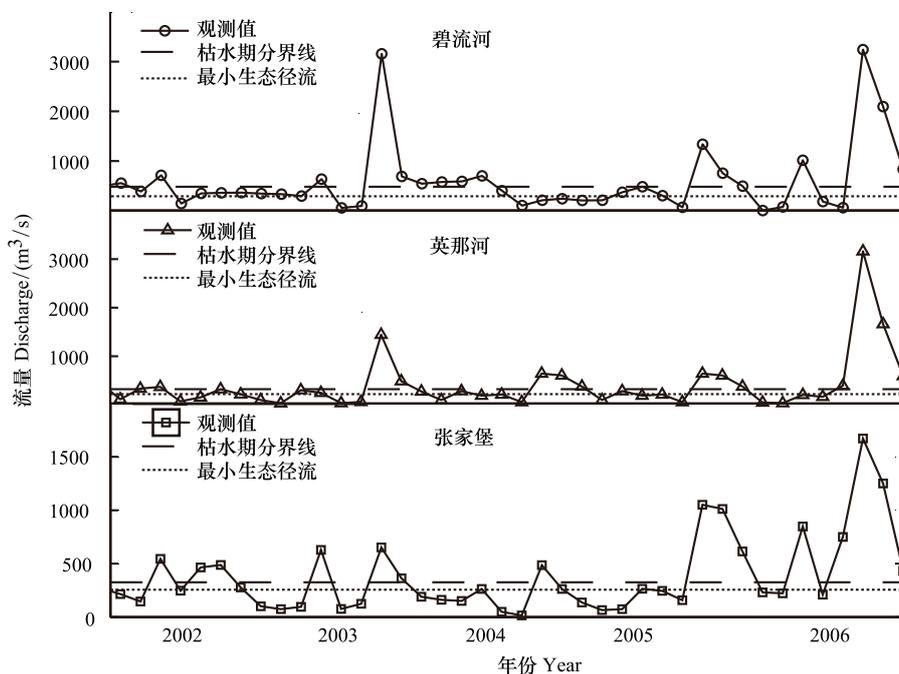


图 7 辽河流域南线水库枯水月调度分析

Fig. 7 The south line reservoirs regulation analysis of low flow months in Liaohe basin

(g) 碧流河(h) 英那河(i) 张家堡

2) 辽河流域南线水库(碧流河、英那河、张家堡)三者的最优 Copula 函数各不相同,其中,英那河与碧流河为 Gumbel Hougaard Copula,张家堡与英那河为 Frank Copula,张家堡与碧流河为 Clayton Copula。除张家堡与碧流河外,其余 6 组水库组合 Gumbel Hougaard Copula 与 Frank Copula 函数的 OLS 值均低于 Clayton Copula 的

OLS 值,这表明,三种 Copula 函数在辽河流域水库与水库间不具有基本通用性,但 Gumbel Hougaard Copula 与 Frank Copula 函数对水库拟合效果较优。

3)7 组水库组合仅有三组(白石与锦凌、白石与青山、张家堡与碧流河)丰枯异步概率高于丰枯同步概率,且枯枯遭遇概率较低,枯丰、丰枯、平枯、枯平相加概率较高,其余 6 组水库组合枯枯遭遇概率皆高于 27%,水库与水库间发生同枯可能性较大。

4)本文逐月频率计算法选择 90%的保证率,通过各水库最优分布进行计算,得出结果除青山水库外,其余水库能够较好地体现径流的年内丰枯变化过程。其中,大伙房水库、桓仁水库以及白石水库效果最佳,其最小生态径流量分别为 $1736.9 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $4067.1 \text{ m}^3/\text{s}$ 和 $1995.1 \text{ m}^3/\text{s}$,达到 Tenant 法评价下的“满意”水平。综上所述,90%保证率逐月频率计算法可求出辽河流域 9 个水库的最佳生态径流量,其次是年内展布计算法的结果,而最小月平均实测法效果最差。

5)9 个水库对各自调水城市均存在无法进行水库调度的情况,其中,源头水库中,大伙房水库与桓仁水库无法调水情况主要发生在枯水月 1 月与 2 月,由于两大水库可调水量最大,发生无法调水情况时,对调水区域沈阳影响最大。桓仁与清河水库调水目的地是开原,除 2002 年 5 月两个水库入库径流皆低于最小生态径流标准,无法对开原进行调水外,其余时间两水库均能进行交替式或叠加式调水。流域北线水库中,由于引水水库白石水库最小生态径流为 $1995.1 \text{ m}^3/\text{s}$,高于其枯水期分界线 $1208 \text{ m}^3/\text{s}$,只要白石水库入库流量处于枯水期,则无法进行调水,所以存在较多无法调水的情况。对于源头和北线水库无法调水的所有情况,需要考虑各供水水库提前蓄水,同时引入外调水进行调度,以满足城市用水需求。对于流域南线水库,由于三个水库都是对大连进行调水,而他们两两间调水较为困难,因此考虑三者联合调水,以解决大连用水问题。

参考文献 (References):

- [1] 郑红星,刘昌明.南水北调东中两线不同水文区降水丰枯遭遇性分析.地理学报,2000,(5):523-532.
- [2] Lajoie F, Assani A A, Roy A G, Mesfioui M. Impacts of dams on monthly flow characteristics. The influence of watershed size and seasons. Journal of Hydrology, 2007, 334(3/4): 423-439.
- [3] Yin X A, Yang Z F, Petts G E, Kondolf G M. A reservoir operating method for riverine ecosystem protection, reservoir sedimentation control and water supply. Journal of Hydrology, 2014, 512: 379-387.
- [4] 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.水利学报,2007,38(10):1178-1185.
- [5] 牛军宜,冯平,丁志宏.基于多元 Copula 函数的引滦水库径流丰枯补偿特性研究.吉林大学学报:地球科学版,2009,39(6):1095-1100.
- [6] 张强,崔瑛,陈永勤.水文变异条件下的东江流域生态径流研究.自然资源学报,2012,27(5):790-800.
- [7] 杨扬.考虑生态需水分析的水库调度研究[D].大连:大连理工大学,2012
- [8] 周惠成,刘莎,程爱民,张春波.跨流域引水期间受水水库引水与供水联合调度研究.水利学报,2013,44(8):883-891.
- [9] 祝雪萍.跨流域引水与水库供水联合调度及变化条件对其影响研究[D].大连:大连理工大学,2013.
- [10] 陈永勤,孙鹏,张强,陈晓宏.基于 Copula 的鄱阳湖流域水文干旱频率分析.自然灾害学报,2013,(1):75-84.
- [11] Genest C, Rivest L P. Statistical inference procedures for bivariate Archimedean Copulas. Journal of the American Statistical Association, 1993, 88(423):1034-1043.
- [12] 张丽,李丽娟,梁丽乔,李九一,姜德娟,胥铭兴,宋文献.流域生态需水的理论及计算研究进展.农业工程学报,2008,24(7):307-312.
- [13] 李丽娟,郑红星.海滦河流域河流系统生态环境需水量计算.地理学报,2000,55(4):495-500.
- [14] 于龙娟,夏自强,杜晓舜.最小生态径流的内涵及计算方法研究.河海大学学报:自然科学版,2004,32(1):18-22.
- [15] 潘扎荣,阮晓红,徐静.河道基本生态需水的年内展布计算法.水利学报,2013,44(1):119-126.
- [16] 郭利丹,夏自强,林虹,王勇.生态径流评价中的 Tennant 法应用.生态学报,2009,29(4):1787-1792.