



DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2016.05.004

吕振豫, 穆建新, 王富强, 等. 基于贝叶斯网络的流域内水文事件丰枯遭遇研究[J]. 南水北调与水利科技, 2016, 14(5): 18-25. LYU Zhenyu, MU Jianxin, WANG Fuqiang, et al. Basin level study on synchronous & asynchronous encounter probability of hydrologic events based on Bayes net theory[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2016, 14(5): 18-25. (in Chinese)

基于贝叶斯网络的流域内水文事件丰枯遭遇研究

吕振豫^{1,2}, 穆建新^{1,2}, 王富强³, 刘姗姗^{1,2}

(1. 流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038; 2. 中国水利水电科学研究院, 北京 100038;
3. 华北水利水电大学, 郑州 450045)

摘要: 基于贝叶斯网络理论结合 Copula 函数建立了东江流域上、中、下游三个站点降雨、径流丰枯遭遇的风险管理模型, 直观地描述了各个站点间降雨、径流的相互关系。利用 Copula 函数建立联合分布模型计算了站点间不同丰枯组合状态调水不利情况的风险概率。通过贝叶斯网络结构的反向推理功能, 以后验知识作为输入, 进一步对流域内未来调水可能面临的丰枯遭遇情况进行了仿真计算。结果表明, 系统中一个节点的变化将会对其他节点的概率值产生巨大影响, 以上、中游降雨为枯水情况作为后验输入, 站点间丰枯遭遇调水不利风险概率增幅至 55% 以上; 仿真结果可以为流域内调水方案的制定提供理论支撑。

关键词: 东江流域; Copula 函数; 贝叶斯网络; 丰枯遭遇; 风险分析

中图分类号: P333.9; X820.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2016)05-0018-08

Basin level study on synchronous-asynchronous encounter probability of hydrologic events based on Bayes net theory

LYU Zhenyu^{1,2}, MU Jianxin^{1,2}, WANG Fuqiang³, LIU Shanshan^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle River Basin, Beijing 100038, China;

2. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China;

3. North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450045, China)

Abstract: A Synchronous-asynchronous encounter risk management model of river poor runoff and precipitation in the upper, middle and lower reaches of Dongjiang river basin was developed using a combined approach based on the copula function and Bayes net works and the interrelation of runoff and precipitation among different three stations were intuitively described. Based on the Copula function, the joint distribution model was established to calculate the risk probability of the diversion adverse situation of Synchronous-asynchronous encounter. On the basis of a posterior knowledge input, the Backward reasoning function of Bayes net was utilized to conduct simulation calculation of the potential Synchronous-asynchronous encounter states in some certain situations which may happen in the future. The result shows that the change of a node probability value in the system would have a big impact on the others, on the premise that the rainfall shortage situation appeared in the upper and middle reaches, the risk probability of water transfer disadvantages, which increased to more than 55%; At last, the result of the simulating calculation would provide theoretical support to formulate the water transfer scheme in river basin.

Key words: Dongjiang river basin; Copula function; Bayes net; synchronous-asynchronous encounter probability; risk analysis

收稿日期: 2015-12-25 修回日期: 2016-02-22 网络出版时间: 2016-08-18

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20160818.1932.002.html>

基金项目: 水利部公益性行业科研专项(201201001; 201201005)

Fund: Public Welfare Industry Research Special Ministry of Water Conservancy(201201001; 201201005)

作者简介: 吕振豫(1993-), 男, 河南新乡人, 主要从事水文水资源和气候变化研究。E-mail: LVZYIWHR@163.com

通讯作者: 穆建新(1970-), 女, 内蒙赤峰人, 教授级高级工程师, 主要从事气候变化、水文水资源及粮食安全等方面的研究。E-mail: mujx@ihwr.com

水文事件丰枯变化的差异性及其不确定性,直接影响流域内调、受水的可控水量,对工程调水风险、流域水资源配置产生重大影响。近年来,不同区域水文事件的丰枯遭遇问题引起了广泛关注^[1,4],分析方法层出不穷。郑红星^[5]和韩宇平^[6]等通过建立联合分布模型采用统计方法计算了南水北调调、受水区水文变量间的丰枯遭遇概率,这种统计方法虽然直观易懂,但不适用于多维随机变量遭遇研究,没有考虑各变量间的相关关系。Copula 函数作为一种新兴的方法弥补了统计方法的不足,是一种将随机变量联合分布与各自边缘分布相结合的理论联合分布。目前基于二维及多维 Copula 函数建立丰枯遭遇联合分布模型已得到大量实践应用^[7-10]。此外,传统风险分析方法只考虑采用降雨、径流事件的先验概率计算风险,并没有考虑后验知识;贝叶斯网络作为一种基于贝叶斯条件概率的风险分析方法,既考虑了先验风险概率,又可以利用后验信息进行仿真模拟^[11],在水文事件丰枯遭遇风险分析中有其显著的优势。康玲等^[12]运用贝叶斯网络理论建立了南水北调中线水源区与受水区降水丰枯遭遇风险管理模型,充分利用贝叶斯网络的情景仿真和后验推理功能,模拟了不同丰枯组合对调水的影响;Daniel^[13]利用并验证了非参数蒙特卡洛贝叶斯理论在洪水频率分析中的独特优势;H. van de Vyver^[14]利用贝叶斯网络的后验推理功能对降雨极值强度-持续时间频率相关关系进行了分析,并与传统方法进行对比验证了贝叶斯方法的优越性。本文以东江流域上游龙川站、中游河源站及下游博罗站实测降雨、径流数据为研究对象,运用 Copula 函数结合贝叶斯网络建立流域内丰枯遭遇风险管理模型,为流域内水资源优化配置决策提供理论支持,具有重要的理论意义和实践意义。

1 数据和方法

1.1 数据来源

本文所用数据均由广东省气象局提供,包括东江流域上游龙川站、中游河源站以及下游博罗站三个代表性水文站点 1956 年-2005 年年尺度实测降雨、径流资料。流域概况及水文站点分布情况见图 1。

1.2 研究方法

1.2.1 二维 Copula 函数理论

Copula 函数是定义在 $[0, 1]$ 区间上均匀分布的多维联合分布函数,其主要构造形式如下:

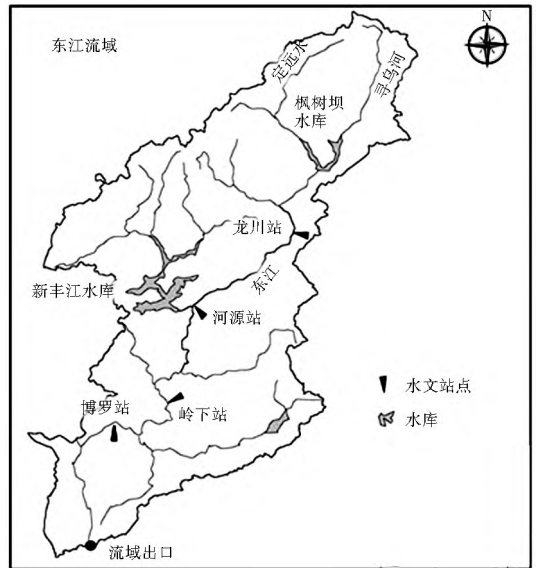


图 1 流域概况及水文站点分布

Fig. 1 Location of research area and hydrological stations

$$F(x_1, x_2, \dots, x_n) = C_\theta(F_1(x), F_2(x), \dots, F_n(x)) \quad (1)$$

式中: $C_\theta()$ 为 Copula 函数; θ 为 Copula 函数的参数; F_1, F_2, \dots, F_n 为随机变量的边缘分布。根据 Sklar 定理, 设 X, Y 为随机变量, 边缘分布函数为 F_x 和 F_y , $F(x, y)$ 为联合分布函数, 若 F_x, F_y 连续, 则存在唯一的函数 $C_\theta(u, v)$ 使得:

$$F(x, y) = C_\theta(u, v) = C_\theta(F_x(x), F_y(y)), \quad \forall x, y \quad (2)$$

式中: $C_\theta(u, v)$ 为 Copula 函数。Copula 函数主要包括椭圆型、阿基米德型(Archimedean)及二次型等 3 种主要类型。鉴于 Archimedean Copula 函数构造简单、计算简便、适应性强等特点, 水文分析中应用较多^[15-16]。

1.2.2 常见二维 Archimedean Copula 函数及其参数估计

Archimedean Copula 函数簇主要是通过算子 ϕ (又称生成函数) 构造而成, 以两变量情况为例, 其构造形式如下:

$$C(u_1, u_2) = \phi^{-1}\{\phi(u_1) + \phi(u_2)\} \quad (3)$$

式中: $C(u_1, u_2)$ 为 Copula 函数; $u_1, u_2 = F(x), F(y)$ 分别为随机变量 X, Y 的边缘分布; ϕ 为生成算子。算子的表达式不同可以生成不同的 Archimedean Copula 函数。几种常用的二维 Archimedean Copula 函数及其参数估计方法见表 1。

1.2.3 多维 Copula 函数

三维及多维 Copula 函数的构造形式与二维情况类似, 篇幅限制这里不再赘述, 其构造形式详见文献[17]。对于多维 Copula 函数的参数估计(以三维为例), 不能直接利用参数与变量的 Kendall 秩相关系数的关系直接计算, 一般采用两阶段极大似然进

表 1 常用 Copula 函数

Tab. 1 Copula function in common use

名称	函数形式	参数估计
Clayton	$(u^{-\theta} + v^{-\theta} - 1)^{-1/\theta}$	$\tau = \frac{\theta}{\theta + 1}$
Gumbel Hougaard	$\exp\{-[(-\ln u)^\theta + (-\ln v)^\theta]^{1/\theta}\}$	$\tau = 1 - \frac{1}{\theta}$
Frank	$-\frac{1}{\theta} \ln \left[1 + \frac{(e^{-\theta} - 1)(e^{-\theta} - 1)}{e^{-\theta} - 1} \right]$	$\tau = 1 - \frac{4}{\theta} \left[1 - \frac{1}{\theta} \int_0^{\theta} \frac{t}{\exp(t) - 1} dt \right]$

注: 表中 τ 为随机变量的 Kendall 秩相关系数, 计算公式见文献[9]。

行估计, 分以下两步进行。

(1) 估计边缘分布中参数 α_i 。

$$\hat{\alpha}_i = \arg \max_{\alpha_i} \sum_{j=1}^n \ln f_i(x_{ij}; \alpha_i) \quad (4)$$

(2) 极大似然估计 Copula 函数参数 θ 。

$$\hat{\theta} = \arg \max_{\theta} \sum_{i=1}^n \ln c(F_1(x_{1i}, \hat{\alpha}_1), F_2(x_{2i}, \hat{\alpha}_2), F_3(x_{3i}, \hat{\alpha}_3); \theta) \quad (5)$$

1.2.4 贝叶斯网络概述

贝叶斯网络^[18]简称 BN, 是基于贝叶斯定理和条件概率建立的有向无环图, 它由代表变量的节点和连接各节点的有向边构成, 以图形化的形式直观地表达系统内各元素之间的相互影响关系。一个完整的贝叶斯网络模型由网络结构和网络参数两部分组成。图 2 所示为一个 6 节点贝叶斯网络模型, 可用 $N = \langle \langle V, E \rangle, P \rangle$ 表示^[19], 其中:

(1) $\langle V, E \rangle$ 表示网络结构有向无环图。图中节点 $V = \{V_1, V_2, \dots, V_6\}$ 表示变量, 节点间的有向边 E 代表变量间的相关关系。对于有向边 (V_i, V_j) , V_i 称为 V_j 的父节点, V_j 则为 V_i 的子节点, 没有父节点的称为根节点 (V_1), 没有子节点的称为叶节点 (V_6)。规定 V_i 的父节点集合及非后代节点集合分别用 $fa(V_i)$ 和 $A(V_i)$ 表示, 则贝叶斯网络系统包含如下条件假设:

$$P(V_i | fa(V_i), A(V_i)) = P(V_i | fa(V_i)) \quad (6)$$

即, 在给定父节点情况下, 子节点与其非父节点条件独立。

(2) P 表示系统根节点概率和非根节点条件概率。由条件独立性假设可知, 非根节点的条件概率分布可用 $P(V_i | pa(V_i))$ 表示, 表达了节点与其父节点的相关关系。给定根节点先验概率及非根节点条件概率分布, 可据此计算包含所有节点的联合概率分布, 图 2 所示包含全部节点的联合概率分布函数为:

$$P(V_1, V_2, V_3, V_4, V_5, V_6) = P(V_6 | V_4, V_5) \cdot P(V_5 | V_2, V_3) \cdot P(V_4 | V_2) \cdot P(V_3 | V_1) \cdot P(V_2 | V_1) \cdot P(V_1) \quad (7)$$

2 结果分析

2.1 多情境丰枯遭遇组合概率

流域内降雨、径流的丰枯变化受地区气候特性

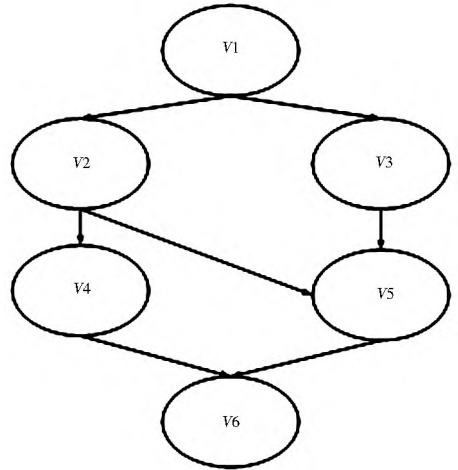


图 2 简单贝叶斯网络结构

Fig. 2 Simple Bayesian networks

及下垫面等的影响, 不同区间的遭遇概率往往是随机的。上游出现某一量级枯水年情况时, 中、下游可能出现不同量级的丰、枯情况。为定量分析流域内不同区间降雨、径流的丰枯遭遇情况, 计算其遭遇概率及条件概率, 文中采用 Copula 函数, 通过建立丰枯遭遇理论联合分布模型进行研究。频率分析中我国一般采用 $P-\hat{\theta}$ 曲线作为降雨、径流的边缘分布, 其构造形式如下:

$$f(x) = \frac{\beta^\alpha}{\Gamma(\alpha)} (x - a_0)^{\alpha-1} e^{-\beta(x-a_0)} \quad (8)$$

式中: $\Gamma(\alpha)$ 是 α 的伽马函数; α, β, a_0 分别是 $P-\hat{\theta}$ 型分布的形状、尺度及位置参数。

利用线性矩法计算得到流域上、中、下游三个站点降雨、径流的参数估计结果见表 2。分析可知, 流域内年降雨量上游龙川站最小为 1 610.18 mm, 中游河源站最大达 1 850.65 mm; 径流量从上游到下游递增趋势, 变异系数分别为 0.4、0.62 和 0.22, 说明径流变化在空间上属于中等变异。

采用单参数 Archimedean-Copula 函数建立降雨、径流丰枯遭遇的联合分布函数, 不同 Copula 函数的拟合优度情况与随机变量的相关性有关^[20]。考虑到流域内降雨、径流存在较强正相关性, 结合几种 Copula 函数的构造形式及其参数估计方法, 文中选取 Clayton Copula 函数作为两站点降雨、径流丰

表 2 年降雨、径流边缘分布参数估计结果

Tab. 2 Results of Marginal distribution parameter estimation of annual runoff and precipitation

测站	项目	x	C_e	C_s
龙川站	降雨/mm	1 610.18	0.2	0.62
	径流/亿 m ³	63.2	0.33	0.4
河源站	降雨/mm	1 850.65	0.23	0.16
	径流/亿 m ³	145.07	0.29	0.62
博罗站	降雨/mm	1 793.17	0.2	0.04
	径流/亿 m ³	232.7	0.27	0.22

枯遭遇联合分布模型的构造函数;三站点丰枯遭遇组合则选取 Gumbel Hougard Copula 函数构造;各站点组合 copula 联合分布函数参数估计结果见表 3。降雨、径流按枯水年($x \leq x_{37.5\%}$)、平水年($x_{37.5\%} \leq x \leq x_{62.5\%}$)、丰水年($x \geq x_{62.5\%}$)划分。鉴于二维 Copula 函数构造联合分布计算两变量理论概率方法相似,篇幅限制,以中游河源站和下游博罗站径流遭遇概率计算为例,丰枯遭遇有九种不同的情况,遭遇概率计算结果详见表 4。

表 3 各站点组合 copula 函数参数估计结果

Tab. 3 Results of parameter estimation of Copula function in different stations

变量	测站						
	龙-龙	龙-河	龙博	河-河	河博	博-博	龙河博
降雨	-	2.175	1.066	-	1.02	-	2.42
径流	-	1.976	2.484	-	2.65	-	3.37
降雨 径流	1.217	0.927	1.488	0.931	1.545	1.381	-
径流 降雨	-	1.119	0.942	-	0.605	-	-

注:表中降雨-径流表示前一站点降雨遭遇后一站点径流,径流-降雨类同。

表 4 两站点径流遭遇特征值计算结果

Tab. 4 Values of runoff encountering in two stations

测站	遭遇	博罗站			调水不利	正常调水
		丰	平	枯		
河源站	丰	0.260	0.092	0.023		
	平	0.092	0.099	0.059	0.293	0.707
	枯	0.023	0.059	0.293		

注:鉴于流域上、中、下游间已建立具有多年调节功能的枫树坝水库和新丰江水库,文中规定两站点同枯为调水不利情况。

图 3 所示为 Copula 函数建立的中、下游径流丰枯遭遇理论联合分布与经验联合频率的拟合情况(经验频率计算公式详见文献[21])。从图中可以看出,理论联合分布与经验频率拟合良好。为量化两站点不同量级径流遭遇概率大小,文中绘制出丰枯遭遇等值线详见图 4,可以直接从图中查询得到固定值径流遭遇概率大小。

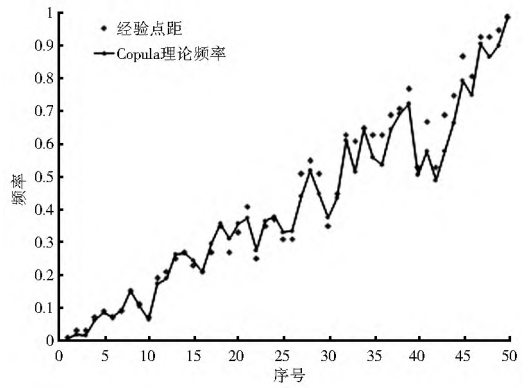


图 3 河源、博罗站径流丰枯遭遇理论分布与经验频率拟合情况

Fig. 3 fitting results between empirical cumulative frequency and theoretical cumulative frequency of runoff encountering in Heyuan and Boluo stations

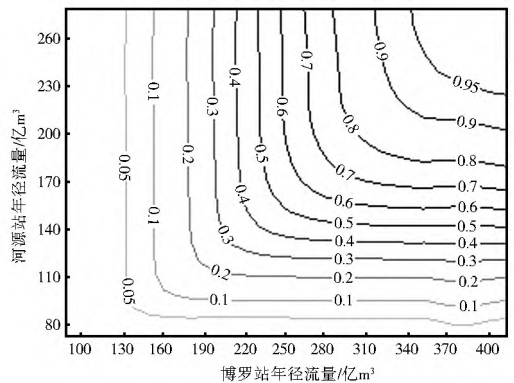


图 4 河源、博罗站径流丰枯遭遇联合分布等值线

Fig. 4 Isograms for joint distribution of runoff between Heyuan and Boluo stations

2.2 丰枯遭遇条件概率

基于贝叶斯网络建立丰枯遭遇的风险管理模型,需要确定站点间降雨、径流丰枯遭遇的条件概率作为网络的初始参数。以已知上游来水情况,中、下游遭遇条件概率计算为例,公式如下:

$$F(Z_i, y_i | x_i) = \frac{F(x_i, y_i, z_i)}{F_X(x_i)} = \frac{P(X \leq x_i, Y \leq y_i, Z \leq z_i)}{P(X \leq x_i)} \quad (9)$$

式中: x_i, y_i, z_i 分别代表上、中、下游降雨或径流值。

采用 Gumbel Hougard Copula 函数构造三站点降雨、径流丰枯遭遇理论联合分布,其与经验频率的拟合情况见图 5、图 7,观察可知,理论分布与经验频率拟合情况良好。图 6、图 8 所示为上游龙川站降雨、径流为枯水情况下,中游河源站与下游博罗站不同量级降雨、径流遭遇的条件概率等值线,可从图中直接定量出某一固定值丰枯遭遇条件概率大小。如,上游径流为枯水情况,中、下游同为枯水时的概

率 $P(Y \leq y_{37.5\%}, Z \leq z_{37.5\%} | X \leq x_{37.5\%}) = P(Y \leq 128.03, Z \leq 210.66 | X \leq 55.36) = 0.685$ 。

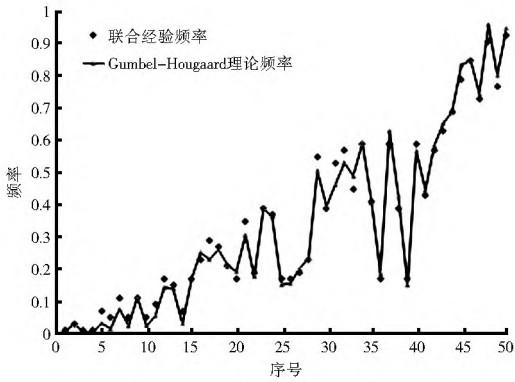


图 5 三站点降雨丰枯遭遇理论联合分布与经验频率拟合情况

Fig. 5 Fitting results between empirical cumulative frequency and theoretical cumulative frequency of precipitation encountering in three stations

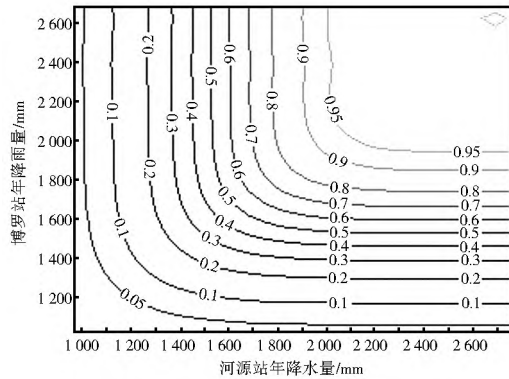


图 6 上游降雨为枯水情况下,中下游不同量级降雨遭遇条件概率等值线

Fig. 6 Synchronous asynchronous encounter condition probability of midstream and downstream precipitation variation given the condition of upstream precipitation shortage

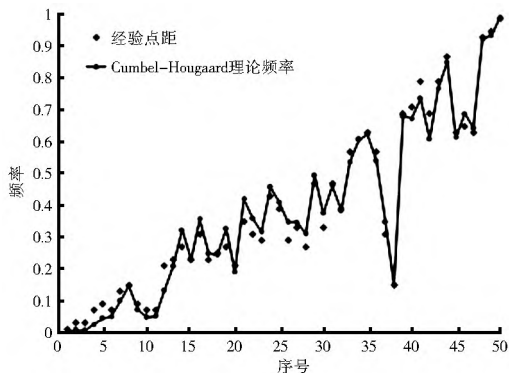


图 7 三站点径流丰枯遭遇理论联合分布与经验频率拟合情况

Fig. 7 Fitting results between empirical cumulative frequency and theoretical cumulative frequency of runoff encountering in three stations

水情况,中、下游河源、博罗站不同量级径流遭遇条件概率等值线有明显的前移趋势,等值线密集程度增加,中、下游径流同丰概率由 0.260 降低到 0.003,同枯风险概率由原来的 0.293 增加到现在的 0.685,增长了近 2.5 倍,调水不利风险急剧增大。

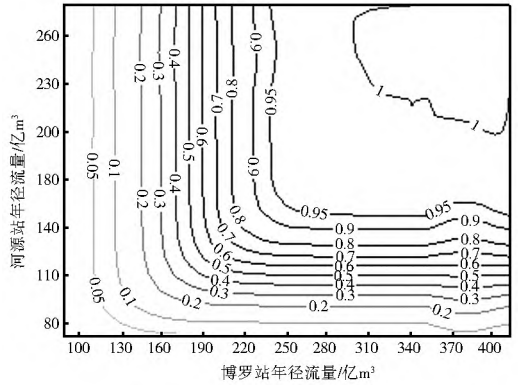


图 8 上游径流为枯水情况下,中下游不同量级径流遭遇条件概率等值线

Fig. 8 Synchronous asynchronous encounter condition probability of midstream and downstream runoff variation given the condition of upstream precipitation shortage

2.3 流域内丰枯遭遇风险管理模型建立

利用贝叶斯网络构造流域内丰枯遭遇的风险管理模型一般包括三个步骤:(1)确定网络结构;(2)确定初始网络参数;(3)根据后验知识进行仿真推理。

2.3.1 初始网络结构确定

对于网络结构的确定有两种方法^[22],一种是利用大量的实测数据通过不同的优化算法进行结构学习,确定最优网络结构模型,这种方法是在大量数据的基础上实现的;第二种方法是根据专家知识结合数据间的相关关系,直接勾画出网络结构,这种方法对数据的多少要求不高,计算简便。本文使用第二种方法构造流域内降雨、径流丰枯遭遇的贝叶斯网络结构模型,结合流域上、中、下游站点降雨、径流的丰枯遭遇关系,确定贝叶斯网络结构模型见图 9。网络结构图充分说明了上、中、下游降雨、径流之间的内在联系,上游龙川站降雨为根节点 A1,其子节点包括河源站降雨 B1、博罗站降雨 C1 以及龙川站径流 A2;叶子节点 D1、D2、D3、D4 为各站点径流丰枯遭遇对调水不利的风险概率。

2.3.2 确定网络参数

贝叶斯网络结构的参数包括各节点的先验概率及非根节点的条件概率。根据实测资料计算得各站点降雨、径流发生丰、平、枯情况的概率,结合 Copula 函数计算得到各种组合情况的丰枯遭遇概率,输入到网络结构中得到贝叶斯网络初始模型详见图

此外,对比分析图 4 和图 8,已知上游径流为枯

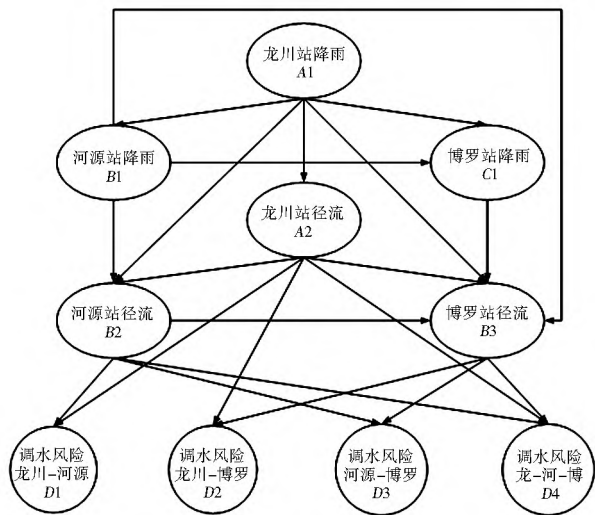


图9 三站点降雨、径流丰枯遭遇贝叶斯网络结构

Fig. 9 Bayesian network of precipitation and runoff encountering in three stations

10. 鉴于东江流域内已建成枫树坝水库、新丰江水库等具有年调节功能的大型水库,规定,两个或两个以上站点同为枯水年是对调水构成风险的情况,其中,三站同枯为调水最不利情况。分析图 10 可知,河源站降雨枯水情况发生概率为 40%,易于丰水情况发生;博罗站降雨枯水情况发生概率 36%,难于丰水情况发生,说明流域内降雨在空间上存在差异性;流域内径流三站点丰、平、枯水情况发生概率大致相同;龙-河径流遭遇调水不利风险概率 27%,龙-博、河-博径流遭遇调水不利风险概率均为 29%,调水最不利情况(三站同枯)发生概率 26%,表明流域内基本可以实现正常调水。

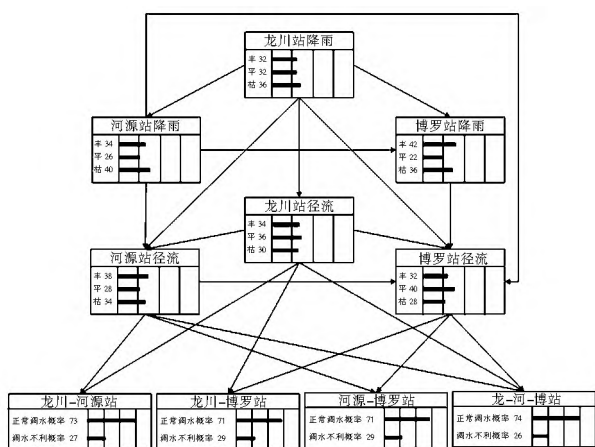


图 10 丰枯遭遇贝叶斯网络风险管理模型(初始)

Fig. 10 Bayesian network risk management model for Synchronous/asynchronous encounter(Initial)

2.3.3 仿真模拟

利用贝叶斯网络构造流域内降雨、径流的丰枯遭遇风险管理模型,不仅可以通过实测数据计算各

站点丰枯遭遇调水不利情况的发生概率(先验概率),还可以通过预测某一节点或者某几个节点的发生情况,作为后验信息输入到网络模型中,利用贝叶斯网络的反向推理功能,推测出这一节点变化对其他节点条件概率的影响,为决策者制定应急方案提供数据支撑。为充分体现贝叶斯网络仿真模拟在流域内降雨、径流丰枯遭遇分析中的优越性,本文以龙川站降雨为枯水和龙川、河源降雨均为枯水两种情境作为后验信息输入到贝叶斯网络中进行仿真研究。

(1) 第一次仿真模拟:将龙川站降雨为枯水情况这一后验信息输入到网络结构中得到仿真计算结果见图 11。对比图 10 分析可知,当输入龙川站降雨为枯水这一后验信息后,其他节点各种情况的发生概率均发生较大变化。以三站点降雨及调水风险发生概率为例,只输入先验知识情况下,河源站降雨丰、枯水情况发生概率分别为 34%、40%;博罗站降雨丰、枯水发生概率分别为 42%、36%;几种调水不利情况风险概率均低于 30%。输入龙川站降雨为枯水这一后验知识后,河源站丰、枯水情况发生概率分别为 8%、75%;博罗站发生概率为 17%、63%;调水不利风险概率基本在 50% 以上;各站点枯水情况发生概率有大幅度增加。

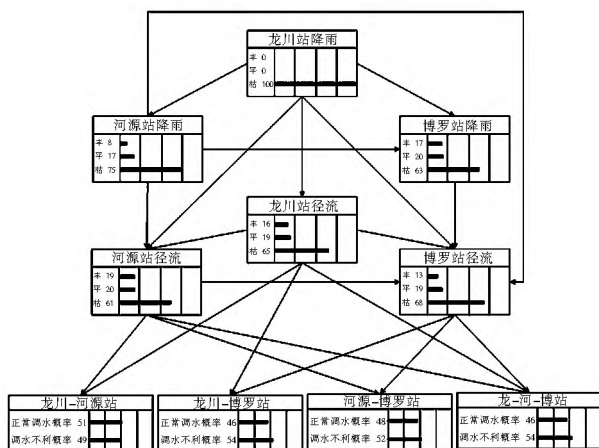


图 11 降雨、径流丰枯遭遇贝叶斯网络仿真模拟(第一次)

Fig. 11 Bayesian network simulation for Synchronous/asynchronous encounter(The first time)

(2) 第二次仿真模拟:贝叶斯网络构造风险管理模型对输入后验知识的节点个数没有限制,可能出现同时输入多节点后验知识的情况。以输入两个节点的后验知识为例,将龙川、河源站降雨均为枯水这一后验知识输入到初始网络结构中,得到第二次仿真模拟结果见图 12。对比初始网络模型(图 10)分析可知,输入龙川、河源站为枯水情况这一后验知识后,博罗站降雨及三个站点径流枯水情况的发生概率均有大幅度增加,达到 65% 以上;博罗站径流枯

水情况发生概率增幅最大,由原来的 28%,增加到现在的 82%,受上、中游降雨变化影响最为严重。就调水风险来看,各站点丰枯遭遇调水不利风险概率均超过 55%,其中河源-博罗站调水不利情况最易发生,风险概率达 67%;三站点同枯风险发生概率 63%。针对这一情况,当气象部门侦测到流域上、中游降雨同为枯水情况时,相关部门需要制定出具有针对性的应急预案措施。

模型的仿真模拟结果,为流域内水资源的合理调配及可持续利用提供理论支撑,具有理论和实践意义。

参考文献(References):

[1] 冉啟香,张翔.多变量水文联合分布方法及 Copula 函数的应用研究[J].水电能源科学,2010,28(9):8-11. (RAN Qi xiang, ZHANG Xiang. Review on methods of multivariate hydrological joint distribution and Copula function[J]. Water Resources and Power, 2010, 28(9): 8-11. (in Chinese))

[2] 费永法.多元随机变量的条件概率计算方法及其在水文中的应用[J].水利学报,1995(8):60-66. (FEI Yong fa. A method for estimating the conditional probability of multi random variables and its application in hydrology[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1995(8): 60-66. (in Chinese))

[3] Grimaldi S, Serinaldi F. Asymmetric copula in multivariate flood frequency analysis [J]. Advances in Water Resources, 2006, 29(8): 1155-1167.

[4] 戴昌军,梁忠民.多维联合分布计算方法及其在水文中的应用[J].水利学报,2006,37(2):160-165. (DAI Chang jun, LIANG Zhong min. Computation methods of multivariate joint probability distribution and their applications in hydrology[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006, 37(2): 160-165. (in Chinese))

[5] 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[J].地理学报,2000,55(5):523-532. (ZHENG Hong xing, LIU Chang ming. Analysis on asynchronism synchronism of regional precipitation in planned South to North Water Transfer Areas[J]. Acta Geographica Sinica, 2000, 55(5): 523-532. (in Chinese))

[6] 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 Yu ping, JIANG Ren fei, RUAN Ben qing. 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))

[7] 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 Bao wei, GUO Sheng lian, 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))

[8] 冯平,李新.基于 Copula 函数的非一致性洪水峰量联合分析[J].水利学报,2013,44(10):1137-1147. (FENG Ping, LI Xin. Bivariate frequency analysis of non stationary flood time series based on Copula methods[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, 44(10): 1137-1147. (in Chinese))

[9] 杨志勇,袁喆,方宏阳,等.基于 Copula 函数的滦河流域旱涝组合事件概率特征分析[J].水利学报,2013,44(5):556-562. (YANG Zhi yong, YUAN Zhe, FANG Hong yang, et al. Study

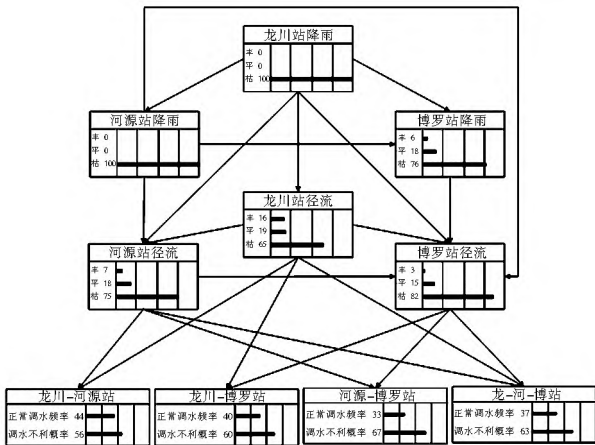


图 12 降雨、径流丰枯遭遇贝叶斯网络仿真模拟(第二次)

Fig. 12 Bayesian network simulation for

Synchronous asynchronous encounter(The second time)

3 结论

针对流域内不同区间降雨、径流的丰枯遭遇组合状况,以东江流域上游龙川站、中游河源站及下游博罗站年尺度降雨、径流为研究对象,运用 Copula 函数方法建立了流域内不同站点降雨、径流丰枯遭遇组合的联合分布模型,结合贝叶斯网络理论以实测资料及 Copula 函数计算概率作为先验知识输入,构建了流域内三个站点降雨、径流丰枯遭遇的风险管理模型。通过模型计算,不考虑后验知识的情况下,各种组合调水不利风险发生概率在 25%~30% 之间。利用贝叶斯网络的反向推理功能,分别以上游龙川站降雨为枯水和上游龙川站、中游河源站降雨同为枯水两种情境作为后验知识输入网络结构,对流域内可能发生的丰枯组合状态进行仿真模拟计算。计算结果显示,输入上游龙川站为枯水情况时,各站点丰枯遭遇组合调水不利风险概率达到 50% 左右,其中三站同枯调水最不利风险发生概率达 54%;输入上游龙川站、中游河源站降雨同枯情况时,站点间降雨、径流丰枯遭遇调水不利风险概率增加到 60% 左右,其中河源-博罗站调水不利风险概率最大,达 67%;文中不同情境下降雨、径流丰枯遭遇概率和条件概率的计算结果以及基于贝叶斯

- on the characteristic of multiply events of drought and flood probability in Luanhe River Basin based on Copula[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, 44(5): 556-562. (in Chinese)
- [10] 冯平, 牛军宜, 张永, 等. 南水北调西线工程水源区河流与黄河的丰枯遭遇分析[J]. 水利学报, 2010, 41(8): 900-907. (FENG Ping, ZHU Yrjun, ZHANG Yong, et al. Analysis of wetness-dryness encountering probability among water source rivers and the Yellow River in the Western Route of South to North Water Transfer Project[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, 41(8): 900-907. (in Chinese))
- [11] 康玲, 何小聪. 南水北调中线降水丰枯遭遇风险分析[J]. 水科学进展, 2011, 22(1): 44-50. (ZHANG Ling, HE Xiaocong. Risk analysis of synchronous/asynchronous encounter probability of rich/poor precipitation in the Middle Route of South to North Water[J]. Advances in Water Science, 2011, 22(1): 44-50. (in Chinese))
- [12] 康玲, 何小聪, 熊其玲. 基于贝叶斯网络理论的南水北调中线工程水源区与受水区降水丰枯遭遇风险分析[J]. 水利学报, 2010, 41(8): 908-913. (KANG Ling, HE Xiaocong, XIONG Qrling. Risk analysis for precipitation rich/poor encounter between source area and receiving area of the Middle Route of South to North Water Transfer Project Based on Bayesian network theory[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, 41(8): 908-913. (in Chinese))
- [13] Ó Connell D R H. Nonparametric Bayesian flood frequency estimation[J]. Journal of Hydrology, 2005, 313(s 1-2): 79-96.
- [14] H. Van de Vyver. Bayesian estimation of rainfall intensity duration frequency relationships [J]. Journal of Hydrology, 2015: 1451-1463.
- [15] 张雨, 宋松柏. 基于 Archimedean Copula 的三维干旱特征变量联合分布研究[J]. 中国农村水利水电, 2011(1): 65-68. (ZHANG Yu, SONG Song bai. Research on three dimensional joint distribution of drought characteristics based on Archimedean Copulas [J]. China Rural Water and Hydropower, 2011(1): 65-68. (in Chinese))
- [16] 张冬冬, 鲁帆, 严登华, 等. 基于 Archimedean Copula 函数的洪水多要素联合概率分布研究[J]. 中国农村水利水电, 2015(1): 68-74. (ZHANG Dongdong, LU Fan, YAN Denghua, et al. Research on multi-dimensional joint distribution of flood characteristics based on Archimedean Copula [J]. China Rural Water and Hydropower, 2015(1): 68-74. (in Chinese))
- [17] NELSON R B. An introduction to copulas[M]. New York: Springer, 2006.
- [18] Murphy K P. A brief introduction to graphical models and bayesian networks[J]. Borgelt Net, 1998.
- [19] 周忠宝, 马超群, 周经伦, 等. 基于贝叶斯网络的多态故障树分析方法[J]. 数学的实践与认识, 2008, 38(19): 89-95. (ZHOU Baozhong, MA Chaqun, ZHOU Jinglun, et al. Multistate fault tree analysis method based on Bayesian Networks [J]. Mathematics in Practice and Theory, 2008, 38(19): 89-95. (in Chinese))
- [20] 谢华, 罗强, 黄介生. 基于三维 copula 函数的多水文区丰枯遭遇分析[J]. 水科学进展, 2012, 23(2): 186-193. (XIE Hua, LUO Qiang, HUANG Jiesheng. Synchronous/asynchronous encounter analysis of multiple hydrologic regions based on 3D copula function [J]. Advances in Water Science, 2012, 23(2): 186-193. (in Chinese))
- [21] Singh V P, Zhang L. Bivariate Flood Frequency Analysis Using the Copula Method [J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2006, 11(2): 150-164.
- [22] 张兵利, 裴亚辉. 贝叶斯网络模型概述[J]. 电脑与信息技术, 2008, 16(5): 41-42. (ZHANG Bingli, PEI Yrui. Summary of Bayesian Network [J]. Computer and Information Technology, 2008, 16(5): 41-42. (in Chinese))

(上接第 17 页)

- [27] 杨元元. 异构模型集成交互机制的研究与应用[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2008. (YANG Yuan yuan. Research and application on the integration and interactive mechanism of heterogeneous models [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2008. (in Chinese))
- [28] 吴辉. 基于 OpenMI 的多尺度流域模型集成和应用研究[D]. 南京: 南京师范大学, 2010. (WU Hui. Studied the multiscale watershed model integration using OpenMI [D]. Nanjing: Nanjing Normal University, 2010. (in Chinese))
- [29] 雷四华, 陈鸣, 魏俊彪, 等. 基于 OpenMI 技术的墒情预报模型[J]. 水利水运工程学报, 2013(3): 32-37. (LEI Sihua, CHEN Ming, WEI Junbiao, et al. Soil moisture forecast model based on OpenMI technology [J]. Hydro Science and Engineering, 2013(3): 32-37. (in Chinese))
- [30] 周密, 程闯闯, 方盛. 基于 OpenMI 技术的新安江模型开发与集成研究[J]. 三峡大学学报: 自然科学版, 2014, 36(2): 24-27. (ZHOU Mi, CHENG Chuangchuang, FANG Sheng. XIn' an jiang model development and intergration based on OperMI [J]. Journal of China Three Gorges University: Natural Sciences, 2014, 36(2): 24-27. (in Chinese))