

基于 Copula 函数的泾河流域水沙丰枯遭遇频率分析

姚曼飞¹, 党素珍², 孟美丽¹, 张文鸽², 殷会娟², 董国涛²

(1. 华北水利水电大学 水利学院, 郑州 450046; 2. 黄河水利委员会 黄河水利科学研究院, 郑州 450003)

摘 要:流域水沙关系变化是洪旱灾害防治、重大水利工程布局的重要理论基础,同时又对人们的生产、生活产生重大影响。根据泾河流域主要控制水文站的年径流量和年输沙量数据,采用 P-Ⅲ 型曲线分别拟合计算得到各水文站的径流量和输沙量序列的边缘分布函数,然后采用 Copula 函数建立了泾河流域水沙联合分布模型,计算泾河流域各水文站水沙丰枯遭遇频率。结果表明:(1) Clayton Copula, Frank Copula, Gumbel copula 函数均能较好地拟合泾河流域各水文站的水沙数据,根据拟合优度评价结果选用 Frank Copula 函数拟合各站的水沙联合分布;(2) 在所研究的泾河流域 8 个控制水文站水沙丰枯遭遇均表现为水沙丰枯同步频率大于异步频率。在水沙丰枯同步频率中,同丰的遭遇频率基本与同枯的遭遇频率相同,二者均大于同平的遭遇频率。(3) 在水沙丰枯异步遭遇频率中,丰枯遭遇频率最小的组合是水枯沙丰和水丰沙枯。该水沙联合分布模型对流域治理规划、防灾减灾及生态恢复等具有重要意义。

关键词: Copula 函数; 水沙关系; 丰枯遭遇频率; 泾河流域

中图分类号: P333.4

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2019)01-0192-05

Copula-Based Analysis of Occurent Probability on Rich-Scarce Runoff and Sediment in the Jinghe River Basin

YAO Manfei¹, DANG Suzhen², MENG Meili¹, ZHANG Wenge², YIN Huijuan², DONG Guotao²

(1. School of Water Conservancy, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450046, China; 2. Yellow River Institute of Hydraulic Research, Yellow River Conservancy Commission, Zhengzhou 450003, China)

Abstract: Based on the annual runoff and sediment discharge data of the main control hydrological stations in the Jinghe River Basin, P-Ⅲ distribution curve was applied to fit the marginal distribution of annual runoff and sediment discharge. Then the Copula function was used to establish the joint distribution model of runoff and sediment discharge, to calculate the occurent probability of rich-scarce runoff and sediment discharge in Jinghe River Basin. The results showed that: (1) all of Clayton Copula, Frank Copula and Gumbel copula functions could well simulate the joint distribution of runoff and sediment discharge; according to the ordinary least square (OLS) and AIC (Akaike information criterion) information criterion, the Frank Copula function was used to simulate the joint distribution of runoff and sediment discharge in each hydrological station; (2) according to the occurent probability of rich-scarce runoff and sediment discharge of 8 hydrological stations, the frequency synchronization of rich-scarce runoff and sediment was larger than the asynchronous frequency; the frequency of rich water-rich sediment approximately equaled the frequency of scarce water-scarce sediment, and the frequency of normal water-normal sediment was the lowest; (3) the frequency of the encounter of opposite status of runoff and sediment (the frequency of rich water-scarce sediment and the frequency of scarce water-rich sediment) was the lowest among the asynchronous frequencies of rich-scarce runoff and sediment occurrences. The research results can provide the theoretical basis for the planning of watershed management, ecological restoration and disaster prevention and reduction.

收稿日期: 2018-02-26

修回日期: 2018-03-21

资助项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0402400); 国家自然科学基金(41301030; 51779099; 41301496)

第一作者: 姚曼飞(1992—), 女, 河南偃师人, 硕士研究生, 主要从事水利工程方面研究。E-mail: 1067511535@qq.com

通信作者: 党素珍(1983—), 女, 河南灵宝人, 工程师, 博士, 主要从事水文水资源方面研究。E-mail: dangsz_hky@163.com

Keywords: Jinghe River Basin; Copula function; relationship between runoff and sediment discharge; probability of rich-scarce occurrence

径流与泥沙二者的关系密切相关,在水科学领域长久以来都占据重要地位的就是研究流域的水沙关系。近年来,受各种气候、人为等因素的影响,水沙关系在全球的河流中都发生了些许变化。Des Walling^[1-2]就河流下游水沙关系的变化趋势对全球 140 多条大型河流进行了对比,分析发现其中有近 1/4 的河流年径流量有下降的趋势,但在年输沙量方面却有近半数的河流是在下降。刘成等^[3]在水沙变化方面对我国主要河流进行了对比分析,结果表明在我国的大多数河流中明显存在输沙量有所下降的现象。降雨的侵蚀冲刷造成地表水土流失,从而增加了河流的泥沙含量,使得河道泥沙淤积和洪水位上升,结果加大了发生洪涝灾害的几率,泥沙和径流的关系变化对人们的生产、生活都有很大影响。因此,流域的水沙的丰枯遭遇情况的研究对流域的水沙调控和防洪减灾起到了重要作用。

黄河作为我国最大的多沙河流,学者们对黄河主要干支流的水沙关系从不同角度进行了大量研究。泾河从我国水土流失最严重的黄土高原地区穿过,造成河流的含沙量大,水土流失问题严重,成为渭河流域水患灾害的频发地区^[4],对泾河流域的水沙关系研究是黄河水沙研究的重要组成部分。颜明等^[5]将流域基于水沙异源的特性分成南北两个分支,并通过 Mann-Kendall 检验方法得到出突变时间点,对比突变前后水沙效应的异同;崔小红等^[6]通过对泾河流域 16 个水文站的水沙过程研究,得到输沙率与集水面积的空间尺度关系。郭爱军、张金萍等^[7-8]应用 Copula 理论对泾河张家山站水沙关系演变特征进行了分析。已有研究多集中在对径流或泥沙单个变量变化的研究,对径流与泥沙变量组合条件下的研究略显不足。目前泾河流域已开展的研究仅分析了流域出口水文站水沙丰枯遭遇情况。通过分析流域内干支流不同水文站水沙丰枯频率,可定量揭示流域内不同区域水沙灾害发生频率,为流域水沙调控提供决策支持。因此,本文基于泾河流域洪德、杨家坪、雨落坪、张家山等 8 个水文站 1965—2015 年实测年输沙量和年径流量资料,采用 P-Ⅲ(皮尔逊)型曲线对各站水沙序列进行拟合,得到各控制水文站径流量和输沙量各自的边缘分布函数,然后利用 Copula 确定水沙二维联合分布函数,计算得到泾河流域的水沙丰枯遭遇频率,分析泾河流域的水沙关系,为泾河流域的规划治理、水沙调控、防洪减灾和生态保护等提供参考依据。

1 研究区概况

泾河是渭河的第一大支流,黄河的二级支流,干流长达 455.1 km,发源于宁夏六盘山东麓(106°14′—108°42′E,34°46′—37°19′N),穿过甘肃省,流经杨家坪进陕西省,最后流过高陵县陈家滩汇入渭河(图 1)。泾河流域面积 45 421 km²,流域内水土流失情况最为严重的是黄土丘陵沟壑区和黄土高原沟壑区^[9],占流域面积的比例分别为 41.3%和 39.7%。泾河流域位于大陆性气候区内,流域内的地形则由东南向西北呈上升趋势,降水量则是相反,呈递降趋势。泾河流域多年平均气温在 8.9℃左右,多年平均潜在蒸散量为 934.6 mm^[10]。1966—2015 年流域的年降水量在 350~700 mm 间,降水主要集中在夏季,降水量占到全年的 60%以上,且多为高强度降水。

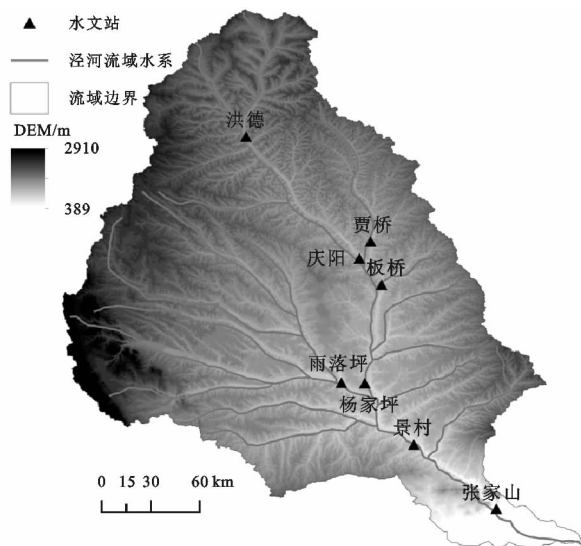


图 1 泾河流域水文站点分布

2 研究数据和方法

2.1 研究数据

本文采用泾河流域干支流 8 个水文站 1965—2015 年实测年径流量和年输沙量数据,资料来源于黄河流域水文年鉴。水文站位置详见图 1。

2.2 研究方法

2.2.1 Copula 函数的定义、性质和主要类型 Copula 的概念首次引入是在 1959 年,Sklar^[11]为了回答 M. Frechet 提出的关于多维联合分布函数和低维边缘分布之间的关系这个问题,他将任意的一个 n 维联合分布函数分解为 n 个描述变量分布的边缘分布函

数和一个描述变量间的相关性的 Copula 函数。

二维 Sklar 定理如下: $H(x, y)$ 是具有边缘分布 $F_1(x), F_2(y)$ 的联合分布函数, 存在一个 C 是二维 Copula 函数, 使得

$$H(x, y) = C(F_1(x), F_2(y)) \tag{1}$$

如果 $F_1(x), F_2(y)$ 连续, 则存在唯一的 Copula 函数。

由 Sklar 定理就可以看出 Copula 函数所反映的随机变量的相关性是不受随机变量的边缘分布影响的, 联合分布里包含了变量的全部信息, 转换的过程中不会发生信息失真。总体上 Copula 函数可以分为 3 类: 椭圆型、二次型和 Archimedean 型^[12]。其中在水文事件研究中使用最多的是阿基米德 Copula 函数簇, 具体的表达式及参数关系见表 1。

表 1 3 种常用的 Archimedean Copula 函数

名称	$C(u, v)$ 的形式	τ 与 θ 的关系
Clayton Copula	$C(u, v) = (u^{-\theta} + v^{-\theta} - 1)^{-1/\theta}$	$\tau = \frac{\theta}{2 + \theta}, \theta \in (0, \infty)$
Frank Copula	$C(u, v) = -\frac{1}{\theta} \left[1 + \frac{(e^{-\theta u} - 1)(e^{-\theta v} - 1)}{(e^{-\theta} - 1)} \right]$	$\tau = 1 - \frac{4}{\theta} \left[-\frac{1}{\theta} \int_{-\theta \exp(t) - 1}^0 \frac{t}{\exp(t) - 1} dt - 1 \right], \theta \in R$
Gumbel Copula	$C(u, v) = \exp\{-[(-\ln u)^\theta + (-\ln v)^\theta]^{1/\theta}\}$	$\tau = 1 - \frac{1}{\theta}, \theta \in [1, \infty)$

2.2.2 函数的参数估计 常用于 Copula 函数的参数估计方法有非参数估计法、适线法以及极大似然法^[13]。本文中用非参数估计法计算阿基米德 Copula 函数的参数 θ 的值, 由表 1 中的 Copula 函数的参数 θ 与 Kendall 相关系数 τ 之间的关系来估计。

2.2.3 函数的拟合优度检验 本文对 Copula 函数的拟合优度检验使用离差平方和最小准则(OLS)和 AIC 信息准则法^[14]进行。OLS 计算公式为:

$$OLS = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (p_{ei} - p_i)^2} \tag{2}$$

式中: p_{ei} 为经验频率和; p_i 为理论频率; i 为数据序号。

AIC 信息准则法的计算公式为:

$$AIC = n \lg(RSS/n) + 2m \tag{3}$$

式中: n 为样本个数; RSS 为残差平方和; m 为参数个数。

累积频率:

$$H(x) = P(X \leq x_m) = (m - 0.44) / (N + 0.12) \tag{4}$$

式中: P 为 $X < x_m$ 的经验概率; m 为 x_m 的序号; N 为样本容量。

对水文变量的 P-Ⅲ型分布采用适线法进行参数的估计, 最终得到水文站年径流量和年输沙量分布拟合情况(以张家山站为例)及参数的估计值, 见图 2 和表 2。从频率曲线的拟合结果能够看出, 各边缘分布对年输沙量和年径流量的经验频率分布拟合较好。

3.2 确定 Copula 函数

(1) 二维联合经验分布。按照年径流量由小到大的顺序将年径流量(X)和年输沙量(Y)进行重新排列, 联合分布的经验频率值就是通过在排列好次序的序列中选择 $X_i \leq X_j, Y_i \leq Y_j (i < j = 1, \dots, n)$ 的数据对来进行计算的。计算公式如下:

$$H(x_i, y_i) = p(X \leq x_i, Y \leq y_i) = \frac{\sum_{m=1}^i \sum_{n=1}^i N_{mn} - 0.44}{N + 0.12} \tag{5}$$

式中: P 为 $X \leq x_i, Y \leq y_i$ 的二维联合概率值; N_{mn} 为数据对的序号; N 为总的的数据对数目。

3 结果与分析

3.1 选择边缘分布

构建 Copula 函数前需先确定研究变量各自的边缘分布, 在水文事件的单变量的水文数据分析中, 常先假定水文序列服从 P-Ⅲ型分布, 再利用优化适线法估计水文变量的频率分布的统计参数。采用 Gringorton 经验频率公式计算变量边缘分布的经验

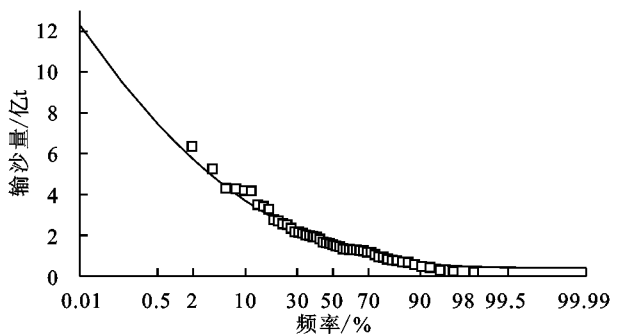
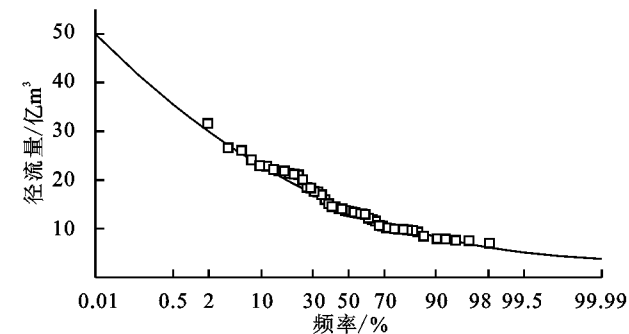


图 2 张家山站年径流量、年输沙量 P-Ⅲ型分布频率曲线

表 2 各边缘分布参数

站名	E_x		C_v		C_s	
	径流量	输沙量	径流量	输沙量	径流量	输沙量
张家山	15.00	1.91	0.41	0.72	1.08	1.60
景村	13.12	1.82	0.42	0.76	0.35	1.87
洪德	0.62	0.35	0.58	0.79	1.67	1.99
杨家坪	6.32	0.57	0.52	1.01	1.70	2.21
庆阳	1.95	0.71	0.40	0.70	1.53	1.95
板桥	0.14	0.02	0.45	1.25	1.76	2.74
雨落坪	4.11	1.06	0.35	0.68	1.15	1.59
贾桥	0.81	0.18	0.40	0.88	1.55	1.99

(2) 二维联合理论分布。计算得到年输沙量和径流量的 Kendall 秩相关系数见表 3,从表中看出水沙相

表 3 年输沙量和径流量的 Kendall 秩相关系数

站名	张家山	景村	雨落坪	杨家坪	庆阳	板桥	洪德	贾桥
Kendall 秩相关系数 τ	0.54	0.49	0.67	0.48	0.91	0.84	0.54	0.80

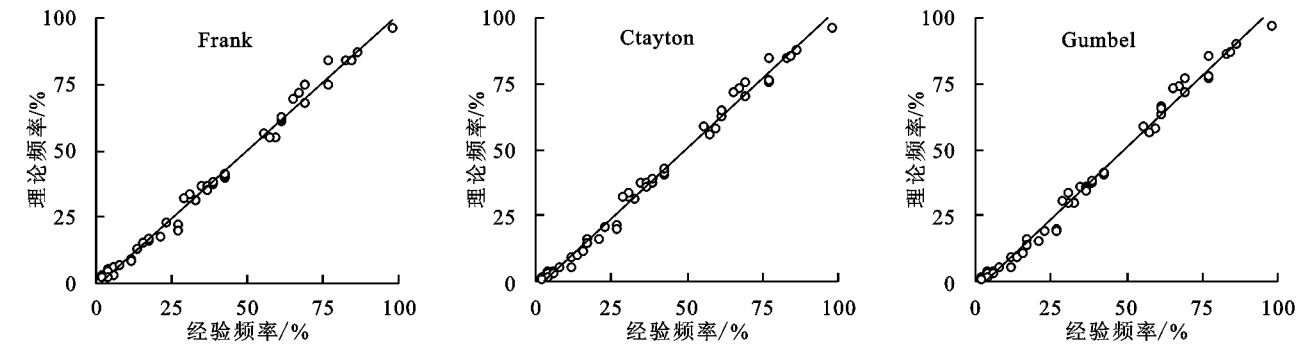


图 3 张家山站水沙经验频率与各 Copula 函数拟合结果

表 4 各 Copula 函数拟合优度检验

站名	检验方法	Clayton Copula	Frank Copula	Gumbel Copula
张家山	OLS	0.025	0.031	0.037
	AIC	-185.357	-174.684	-166.764
景村	OLS	0.023	0.021	0.025
	AIC	-190.620	-194.060	-185.806
雨落坪	OLS	0.022	0.019	0.021
	AIC	-192.006	-199.081	-195.413
杨家坪	OLS	0.032	0.024	0.025
	AIC	-173.938	-187.186	-187.132
庆阳	OLS	0.025	0.028	0.031
	AIC	-187.084	-179.871	-175.522
板桥	OLS	0.046	0.043	0.041
	AIC	-154.876	-158.249	-160.670
洪德	OLS	0.025	0.029	0.030
	AIC	-185.278	-178.828	-176.371
贾桥	OLS	0.023	0.021	0.023
	AIC	-190.234	-195.183	-190.926

3.3 泾河流域水沙丰枯遭遇频率分析

根据确立的水沙联合分布函数,设年径流量的累积分布和年输沙量二者的累积分布为 X,Y ,则关于

关性较好的是板桥、庆阳、贾桥这 3 个站。以张家山站为例,采用 3 种 Copula 函数计算的理论分布与经验分布的拟合效果如图 3 所示,其理论频率与经验频率的相关系数均大于 0.99,拟合效果较好,说明可以采用 Archimedean Copula 函数建立水沙二维联合分布。综合比较 Clayton Copula, Frank Copula, Gumbel copula 函数的离差平方和最小准则(OLS)和 AIC 信息准则的值(表 4),选择 Frank Copula 函数作为水沙联合分布的连结函数。张家山站采用 Frank Copula 函数构建的水沙联合分布与不同重现期等值线图如图 4 所示,根据等值线图即可查得任意重现期下张家山站径流量和输沙量的各种组合。

两者的联合分布可表示为:

$$F(X,Y)=-\frac{1}{\theta}\left[1+\frac{(e^{-\theta x}-1)(e^{-\theta y}-1)}{(e^{-\theta}-1)}\right] \quad (6)$$

采用频率法将径流量与输沙量分为丰、平、枯 3 种状态,丰枯频率的划分标准则是 $pr=37.5\%$ 、 $pp=62.5\%$,可以组合为以下 9 种水沙丰枯遭遇情况:

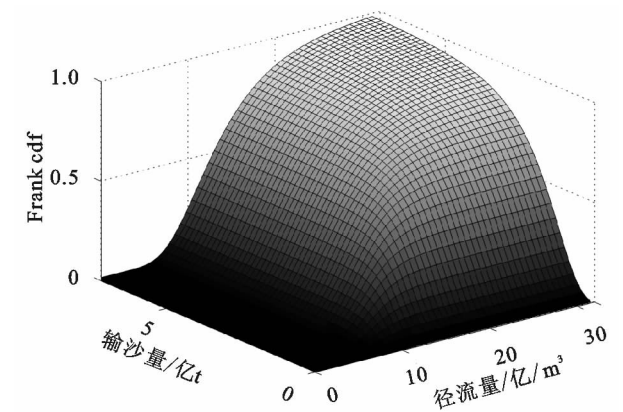


图 4 张家山站水沙二维联合与不同重现期等值线

经计算,得到泾河流域的水沙丰枯遭遇频率,结果见表 5。由表 5 可知:在所研究的泾河流域 8 个控制水文站的 9 种水沙丰枯遭遇组合频率中,水沙丰

枯同步的频率都要比水沙丰枯异步频率大,特别是洪德、贾桥、庆阳、雨落坪水文站,二者相差超过 50%。在研究流域水沙遭遇的丰枯同步频率中,同丰、同枯组合的遭遇频率基本相等,同平的频率要小很多。Copula 函数是一个对称函数,基于此性质可知,在研究流域水沙遭遇的丰枯异步频率中,水沙状态恰好相反的有三组,即丰平与平丰、丰枯与枯丰、平枯与枯平,三组相反状态的遭遇频率相差不大,而其中遭遇频率最小的则是水沙状态完全相反的

水丰沙枯和水枯沙丰组合,甚至洪德、庆阳站的出现频率只有 0.01%。本文研究结果与其他学者在泾河流域的研究结果一致。郭爱军等^[7]应用 Copula 理论分析得出泾河张家山站 1982 年前后两个阶段水沙丰枯同步频率都大于丰枯异步频率,而“水丰沙枯或水枯沙丰”的遭遇组合概率最小。张金萍等^[8]对张家山站水沙组合丰枯遭遇的研究也表明水沙同步概率大于异步概率,水丰(枯)沙枯(丰)这种极端组合的概率为 2.7%。

表 4 水沙丰枯遭遇组合

水沙丰枯遭遇组合	沙丰	沙平	沙枯
水丰	$p_1 = P(X \geq x_{pr}; Y \geq y_{pp})$	$p_4 = P(X \geq x_{pr}; y_{pp} < Y < y_{pr})$	$p_7 = P(X \geq x_{pr}; Y \leq y_{pp})$
水平	$p_2 = P(x_{pp} < X < x_{pr}; Y \geq y_{pr})$	$p_5 = P(x_{pp} < X < x_{pr}; y_{pp} < Y < y_{pr})$	$p_8 = P(x_{pp} < X < x_{pr}; Y \leq y_{pp})$
水枯	$p_3 = P(X \leq x_{pp}; Y \geq y_{pr})$	$p_6 = P(X \leq x_{pp}; y_{pp} < Y < y_{pr})$	$p_9 = P(X \leq x_{pp}; Y \leq y_{pp})$

表 5 泾河流域水沙丰枯遭遇频率

站名	水沙丰枯同步频率/%				水沙丰枯异步频率/%						
	同丰	同平	同枯	合计	丰平	丰枯	平丰	平枯	枯丰	枯平	合计
张家山	25.90	12.01	26.75	64.66	7.14	1.69	8.30	6.94	2.26	9.02	35.34
景村	23.17	11.15	25.42	59.73	9.61	2.65	10.66	6.00	3.50	7.85	40.27
杨家坪	25.04	12.24	23.54	60.82	8.81	2.44	8.07	8.10	2.53	9.24	39.18
雨落坪	29.30	15.37	29.41	74.07	5.91	0.49	6.46	5.67	0.58	6.82	25.93
庆阳	32.16	22.54	32.32	87.02	2.70	0.01	3.83	2.10	0.01	4.32	12.98
板桥	26.31	12.23	25.18	63.72	9.54	1.86	6.38	6.54	1.87	10.09	36.28
贾桥	31.41	19.79	31.78	82.98	4.49	0.04	3.45	4.39	0.05	4.59	17.02
洪德	32.33	23.74	32.54	88.62	2.08	0.01	3.20	0.59	0.01	5.49	11.38

丰枯频率结果表明水沙频率有较强的相关性,引起这种差异的原因与泾河流域水沙基本特征有着一定的联系:把泾河流域分为两条主要支流,由洪德、贾桥、庆阳、板桥、雨落坪站控制的支流为北支流,毛家河、泾川、杨家坪站控制的支流为南支流,而两只支流汇流后流入景村,水流继续向东南流经张家山水文站。在汇入景村的径流量中杨家坪占 48.17%,雨落坪占 31.33%,而多年平均输沙量中,杨家坪站的年输沙量仅为景村的 31.32%,雨落坪站的年输沙量占景村的 58.24%(表 2)。从以上数据可以看出南支流水多沙少,而北支流与南支流正好相反为水少沙多,汇流之后到达景村水文站,这正好与北部支流各站的水沙相关性强且丰枯频率变化明显的结果相一致。因此,整个泾河流域的水沙丰枯的各种遭遇组合频率中,景村的水沙丰枯的频率相较于雨落坪、杨家坪等处分布更为均匀。

4 结论

(1) 本文选用的 Clayton Copula, Frank Copula, Gumbel copula 函数均能较好的拟合泾河流域 8 个

水文站的水沙数据,综合比较不同的 Copula 函数的离差平方和 (OLS) 和 AIC 信息准则,选用 Frank Copula 函数来构建各站的水沙联合分布。

(2) 在所研究的泾河流域 8 个水文站中,水沙丰枯同步的频率均大于水沙丰枯异步的频率,特别是洪德、贾桥、庆阳、雨落坪 4 个水文站的丰枯同步频率与异步的频率相差超过 50%。水沙遭遇的丰枯同步频率时,同丰、同枯组合的遭遇频率基本相等,同平的频率要小很多。

(3) 在所研究的 8 个水文站的水沙丰枯遭遇频率中,遭遇频率最小的是水沙丰枯状态完全相反的水枯沙丰和水丰沙枯组合。

通过 Copula 函数建立的泾河流域各水文站水沙联合分布模型,可以进一步了解泾河流域的水沙情况,为泾河流域的水沙调控和防灾减灾提供指导意见。

参考文献:

[1] Walling D E, Fang D. Recent trends in the suspended sediment loads of the world's rivers[J]. Global & Planetary Change, 2003, 39(1): 111-126.

(2) 实际蒸发量反映出地面蒸发状况与蒸发皿蒸发量相反。全省的年实际蒸发量占蒸发皿年蒸发量的 25%, 这个比例在全省范围上由西部向东南部呈阶梯状增加。近 40 a 来吉林省年实际蒸发量呈上升趋势, 变化趋势不显著。春、夏、秋三季实际蒸发量存在微弱的上升趋势, 而在冬季中蒸发量则呈下降趋势, 变化趋势均不显著。

(3) 过去 40 a 中风速和温度日较差是影响蒸发皿年蒸发量变化的主要因子。其中风速与蒸发量的完全相关系数最大为 0.42, 其次是温度日较差为 0.29。降水在 40 a 中的变化趋势并不显著, 温度日较差与年实际蒸发量的完全相关系数为 0.23, 因此影响实际蒸发量变化的主要原因是温度日较差。

参考文献:

- [1] Chahine M T. The hydrological cycle and its influence on climate[J]. *Nature*, 1992, 359(6394): 373-380.
 - [2] 申双和, 盛琼. 45 年来中国蒸发皿蒸发量的变化特征及其成因[J]. *气象学报*, 2008, 66(3): 452-460.
 - [3] Cohen S, Ianetz A, Stanhill G. Evaporative climate changes at Bet Dagan, Israel, 1964—1998[J]. *Agricultural & Forest Meteorology*, 2002, 111(2): 83-91.
 - [4] 朱红蕊, 刘赫男, 张洪玲, 等. 1971—2010 年黑龙江省蒸发量气候变化特征[J]. *气象与环境学报*, 2013, 29(3): 63-68.
 - [5] Roderick M L, Farquhar G D. The Cause of Decreased Pan Evaporation over the past 50 Years[J]. *Science*, 2002, 298(5597): 1410-1411.
 - [6] 杜军, 房世波, 唐小萍, 等. 1981—2010 年西藏怒江流域潜在蒸发量的时空变化[J]. *气候变化研究进展*, 2012, 8(1): 35-42.
 - [7] 王艳君, 姜彤, 许崇育, 等. 长江流域 1961—2000 年蒸发量变化趋势研究[J]. *气候变化研究进展*, 2005, 1(3): 99-105.
 - [8] 曾燕, 邱新法, 刘昌明. 黄河流域近 40 年蒸发皿蒸发量的气候变化特征[C]//中国气象学会 2005 年年会论文集, 2005.
 - [9] 高国栋, 陆渝蓉, 李怀瑾. 我国陆面蒸发量和蒸发耗热量的研究[J]. *气象学报*, 1980, 38(2): 165-176.
 - [10] 刘波, 马柱国, 丁裕国. 中国北方近 45 年蒸发变化的特征及与环境的关系[J]. *高原气象*, 2006, 25(5): 840-848.
 - [11] 刘敏, 沈彦俊, 曾燕, 等. 近 50 年中国蒸发皿蒸发量变化趋势及原因[J]. *地理学报*, 2009, 64(3): 259-269.
 - [12] 文敏, 陈创买. 珠海市近 50 年水资源变化特征及评估[J]. *中山大学学报: 自然科学版*, 2005, 44(S): 272-275.
 - [13] 付菁, 范广洲, 周定文. 高桥公式在拉萨地区的适用性分析及其修正[C]//中国气象学会年会, 2011.
 - [14] 陶云, 赵获, 何华, 等. 云南省大气中水资源分布特征初探[J]. *应用气象学报*, 2007, 18(4): 506-515.
 - [15] 任芝花, 黎明琴, 张纬敏. 小型蒸发器对 E-601 B 蒸发器的折算系数[J]. *应用气象学报*, 2002, 13(4): 508-512.
-
- (上接第 196 页)
- [2] Walling D E. Human impact on land-ocean sediment transfer by the world's rivers[J]. *Geomorphology*, 2006, 79(3): 192-216.
 - [3] 刘成, 王兆印, 隋觉义. 我国主要入海河流泥沙变化分析[J]. *水利学报*, 2007, 38(12): 1444-1452.
 - [4] 朱红艳, 韩彩波, 贾志峰, 等. 泾河张家山水文站水沙特性分析及工程实例[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(19): 48-55.
 - [5] 颜明, 郑明国, 舒畅, 等. 泾河流域径流—泥沙的尺度效应研究[J]. *水土保持通报*, 2016, 36(6): 184-188.
 - [6] 崔小红, 周祖昊, 邱林. 泾河流域水沙特性空间尺度变化分析[J]. *华北水利水电大学学报: 自然科学版*, 2013, 34(3): 51-54.
 - [7] 郭爱军, 黄强, 畅建霞, 等. 基于 Copula 函数的泾河流域水沙关系演变特征分析[J]. *自然资源学报*, 2015, 30(4): 673-683.
 - [8] 张金萍, 丁志宏, 郭兵托. 泾河水沙丰枯演化规律及组合遭遇风险研究[J]. *水力发电学报*, 2015, 34(1): 11-16.
 - [9] 冉大川, 刘斌, 罗全华, 等. 泾河流域人为活动对水沙变化的影响分析: 兼议泾河流域治理方略[J]. *水土保持学报*, 2001, 15(6): 32-35.
 - [10] 赵姣, 李志, 刘文兆, 等. 泾河流域潜在蒸散量的时空变异[J]. *生态学报*, 2014, 34(19): 5600-5608.
 - [11] Sklar M. Fonctions de repartition an dimensions et leurs marges[J]. *Publ. Inst. Statist. Univ. Paris*, 1959, 8: 229-231.
 - [12] 丁志宏, 张金良, 冯平. 黄河中游汛期水沙联合分布模型及其应用[J]. *吉林大学学报(地)*, 2011, 41(4): 1130-1135.
 - [13] 邱小霞, 刘次华, 吴娟. Copula 函数中参数极大似然估计的性质[J]. *经济数学*, 2008, 25(2): 210-215.
 - [14] Joe H. Multivariate models and multivariate dependence concepts[M]. Chapman and Hall/Crc, 1997.