DOI:10.11705/j.issn.1672-643X.2021.02.04

基于 Copula 函数的三峡库区万州段蓄水前后降雨量-径流量关系分析

王晓菊[1], 毛海涛[1,2], 黄庆豪[1], 程龙飞[1]
(1. 山西农业大学 城乡建设学院, 山西 太谷 030801; 2. 武汉大学 水利水电学院, 湖北 武汉 430072)

摘 要: 三峡水库蓄水对其库区降雨量-径流量关系变化的影响程度对于库区水资源规划有着重要意义。选用万县水文站1977-2017共计41 a的降雨量和径流量实测值,确定了各蓄水阶段降雨量和径流量的分布情况,引入Copula函数模型计算各阶段的联合分布函数,定量分析水库调蓄对两者关系的影响,预测了2017年后水文情势。结果表明:采用Copula函数联合分布数学模型能较好计算三峡库区万州段不同阶段的降雨量-径流量关系。万州段从天然河道变为库区河道后,降雨量-径流量关系发生了较大变化。在天然河道阶段,降雨量和径流量均采用皮尔逊III型分布最为合理;三峡水库工程施工期和初步蓄水阶段,降雨量变为Gumbel分布,径流量变为对数正态分布;试验性蓄水阶段,降雨量变为对数正态分布,径流量恢复至皮尔逊III型分布。年降雨量和年径流量在施工期及初步蓄水阶段较天然河道阶段均有所减少,年降雨量变幅区间减小38.4%,年径流量变幅区间减小20.6%;试验性蓄水阶段的年降雨量增多,变幅区间增大24.5%,而年径流量减少,变幅区间减小57%。通过该数学模型预测三峡库区万州段今后年径流量不小于$3\ 490\times10^8$ m^3(±5%),最大不超过$4\ 055\times10^8$ m^3(±5%);年降雨量不小于1 048 mm(±5%),最大值不超过1 842 mm(±5%)。该研究可为三峡库区万州段流域水资源开发利用与水文序列的重构工作等提供科学依据,也可为其他库区内河道的水文特性变化关系的研究提供参考。

关键词: 降雨-径流关系;Copula函数;年降雨量;年径流量;三峡库区
中图分类号:TV121$^+$.1 **文献标识码**: A **文章编号**: 1672-643X(2021)02-0023-08

Analysis of rainfall – runoff relationship before and after impoundment of Three Gorges Reservoir Wan County section based on Copula function

WANG Xiaoju[1], **MAO Haitao**[1,2], **HUANG Qinghao**[1], **CHENG Longfei**[1]
(1. *College of Urban and Rural Construction, Shanxi Agricultural University, Taigu* 030801, *China*; 2. *School of Water Resources and Hydropower Engineering, Wuhan University, Wuhan* 430072, *China*)

Abstract: The impoundment of the Three Gorges Reservoir affects the changes of rainfall – runoff relationship in reservoir area, so the water resources planning of the reservoir area has to take this effect into consideration. In this paper, the measured rainfall – runoff value of 41 a (1977 – 2017) from Wan County Hydrological Station was selected to study the distribution of rainfall – runoff at each water storage stage, then the joint distribution function of each water storage stage was calculated using the Copula function model to quantatively analyze the effect of reservoir impoundment on its relationships, based on which the hydrological situation in this area after 2017 was predicted. Research indicates that the Copula function joint distribution mathematical model is applicable to the caculation of rainfall – runoff relationship of different stages in Wan County section of the Three Gorges Reservoir. The rainfall – runoff relationship of Wan County section of the Three Gorges Reservoir has changed greatly after it was converted from a natural river course to a part of reservoir course. At the natural river course stage, the marginal distributions of rainfall and runoff in this area were better described using Pearson III distribution.

收稿日期:2020-03-29; **修回日期**:2020-10-30
基金项目:国家自然科学基金项目(51309262、41602367);重庆市科委基础与前沿研究计划项目(cstc2018jcyjA);重庆市教委科学技术研究项目(KJ1601017)
作者简介:王晓菊(1983-),女,四川南充人,博士,讲师,主要从事水环境与水资源方面的研究工作。
通讯作者:毛海涛(1980-),男,山西运城人,博士,教授,主要从事水利工程渗流相关问题的研究。

Whereas the rainfall changed to Gumbel distribution and the runoff changed to lognormal distribution during the construction period and preliminary impoundment stage. At the experimental stage, the rainfall became lognormal distribution, and the runoff returned to the Pearson III distribution. Compared to the natural river course stage, during the construction period and preliminary impoundment stage the annual rainfall decreased by 38.4%, the annual runoff decreased by 20.6%, whereas the annual rainfall increased by 24.5%, and the annual runoff decreased by 57% at the experimental stage. According to the prediction results of this mathematical model, the annual runoff of this area will be no less than 349.0×10^9 m^3 (±5%), but no more than 405.5×10^9 m^3 (±5%), the annual rainfall will be no less than 1 048 mm (±5%), but will not exceed 1 842 mm (±5%). This research can provide a theorectical support for the development and utilization of water resources and the reconstruction of hydrological sequences in the Wan County section of the Three Gorges Reservoir area. It can also provide some reference for the research of hydrological characteristics changes of river channels in other reservoir areas.

Key words: rainfall – runoff relationship; Copula function; annual rainfall; annual runoff; Three Gorges Reservoir area

1 研究背景

三峡水库自 2003 年蓄水以来,改变了库区内水文循环的时空分布,具有非线性、多尺度等突出特性[1-2]。近年来,多位学者对三峡库区蓄水后流域内降雨 – 径流关系进行了研究。如邬昀等[3]在三峡水库早期蓄水期对库区内径流量进行了回归分析,推求了库区各分流域未来径流量;Bosshard 等[4]对三峡水库蓄水初期用半分布式水文模型 PREVA 对库区内水文参数进行分析,表明三峡水库在蓄水初期的度汛性能良好;Fang 等[5]利用逐步多元回归方法分析了三峡大坝建成后径流变化情况,指出降雨是引起径流变化的主要原因。上述学者均针对三峡库区蓄水对水文情势的影响进行了研究,但在时间或地域上有一定的局限性,未将三峡水库各个蓄水期的水文参数进行对比研究,也未针对库区内部的水文情势进行探索。此外,三峡库区降雨 – 径流与水库调蓄的内在关系还存在影响因素多且分布复杂等特点,需要探索新的方法进行研究。

三峡库区万州段位于长江上游下段,地处三峡库区腹地,常年受三峡水库调蓄影响,降雨 – 径流关系与天然河道具有明显的差别,其内在机理对于库区内部水文情势有着重要的价值。Copula 函数具有较强的捕捉随机变量间非线性关系等优点,可构建随机变量的联合分布,以诊断变量间的相关性结构变化[6]。因此,本文在构建三峡库区万州段降雨 – 径流联合分布的基础上,采用 Copula 函数诊断流域降雨 – 径流相关性结构的变异情况,以期为三峡库区降雨 – 径流等多水文要素关系变异诊断提供一条新的思路。

2 研究区域概况及数据来源

2.1 研究区域概况

三峡库区万州段位于长江中上游地区东经 107°55′22″ ~ 108°53′25″、北纬 30°24′00″ ~ 31°14′58″之间,属亚热带季风湿润带,气候四季分明,日照充足,雨量充沛,霜雪稀少,无霜期长。研究区年平均气温 17.7 °C,年平均年日照时数 1 484.4 h,年平均降水量 1 243 mm,年平均蒸发总量达 110×10^8 m^3。全区东西长 97.25 km,南北长 67.25 km,总面积为 3 457 km^2。境内河流纵横,均属长江水系,河流和溪涧切割深、落差大、高低悬殊,呈枝状分布。三峡水库库区主要水系图如图 1 所示。

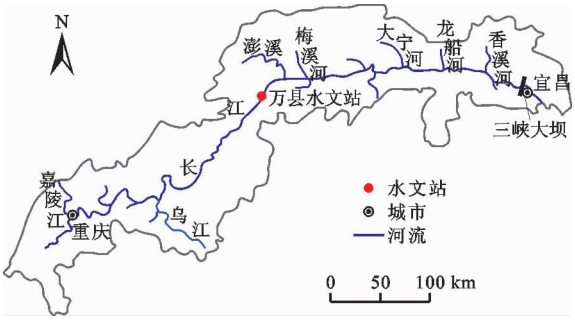

图 1 三峡水库库区主要水系图

2.2 水文测点概况

万县水文站位于重庆市万州区牌楼水厂处,东经 108°24′,北纬 30°47′,万县水文站为长江上游下段及三峡水库库区重要的控制站,是国家基本站(流量、泥沙一类精度站),也是库区内水文、泥沙的重要控制站和代表站,距三峡大坝约 288 km,集水面积 974 881 km^2。万县水文站测船采用走航式

ADCP 常规测验方法测定年径流量,采用 20cmJDZ05 翻斗式自记雨量计观测降雨量。其地理位置见图 1。

2.3　数据来源

收集了 1977 - 2017 年三峡水库蓄水前后 41 a 的降雨和径流资料。其中,最大年降雨量为 1 678.5 mm,最小年降雨量为 808.3 mm,多年平均降雨量为 1 178 mm;最大年径流量为 4 518 $\times 10^8$ m^3,最小年径流量为 2 573 $\times 10^8$ m^3,平均年径流量 3 705 $\times 10^8$ m^3。将 1977 - 2017 年年降雨量和年径流量按照降序排列后得到二者的关系如图 2 所示。

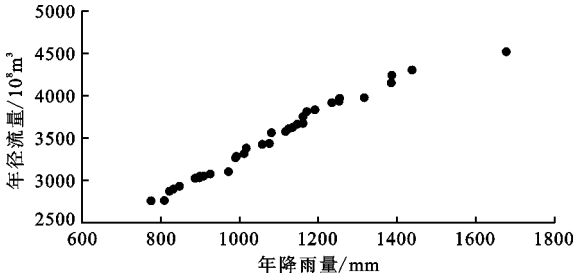

图 2　1977 - 2017 年三峡水库万州段降雨量 - 径流量关系

由图 2 可知,在三峡水库蓄水前后,库区内的降雨量 - 径流量关系总体呈现出一定的线性相关趋势,说明库区内降雨与径流之间仍具有水文参数的一般规律。

2.4　径流序列平稳性检测

考虑到水文序列自相关性对检测结果的影响,采取 TFPW 算法对各时段的实测降雨量和径流量进行序列相关性检验,即代入 Pettitt - BS 耦合模型进行编译检验[7-8]。经检验,三峡库区径流序列潜在变异点分别为 2003、2007 和 2013 年,与三峡水库施工蓄水、初期蓄水和试验性蓄水的时间相吻合。

为了验证变异点的检验效果,对不同时段的径流序列统计参数进行对比分析,如表 1 所示。由表 1 可见,总体而言,2007 年前后的径流量均值有一定差异,标准差、方差、偏态系数变化不大,一阶偏自相关系数差异较大,尤其是水库蓄水前后差异较为明显。所以,库区内部水文序列特性与天然河道相比存在变异性,三峡水库蓄水过程对二者关系有一定的影响,需要进一步评估。

表 1　1977 - 2017 年不同时段研究区径流序列统计参数对比

时段	径流量均值/10^8 m^3	标准差/10^8 m^3	方差	变差系数	偏态系数	一阶偏自相关系数
蓄水前(1977 - 2002 年)	4643	15.43	218.56	0.32	0.54	-0.21
施工期蓄水(2003 - 2006 年)	4632	15.51	219.36	0.45	0.51	0.06
初期蓄水(2007 - 2012 年)	4580	8.68	187.60	0.53	0.69	0.01
试验性蓄水(2013 - 2017 年)	4496	7.64	128.76	0.65	0.87	-0.03

3　降雨 - 径流 Copula 函数的建立

3.1　边缘分布函数

由于 Copula 函数模型不受边缘分布型式的限制,可以择优采用边缘分布[9],对年降雨量、年径流量在 1977 - 2002(阶段 1),2003 - 2012(阶段 2),2013 - 2017(阶段 3)3 个阶段的边缘分布分别采用皮尔逊Ⅲ型分布(P - Ⅲ)[10]、对数正态分布(logarithmic normal distribution, log n)[10] 和 Gumbel 分布[12]进行经验频率拟合计算,其计算式分别如下。

皮尔逊Ⅲ型分布函数:

$$P(X \leqslant x) = 1 - \frac{\beta^{\alpha}}{\Gamma(\alpha)} \cdot \int_{x}^{\infty} (x - a_0)^{\alpha-1} \exp(-\beta(x - a_0))\,\mathrm{d}x \quad (1)$$

$$\alpha = \frac{4}{C_S^2} \quad (2)$$

$$\beta = \frac{2}{C_V C_S \bar{x}} \quad (3)$$

$$a_0 = \bar{x}\left(1 - \frac{2C_V}{C_S}\right) \quad (4)$$

式中:P 为 $X \leqslant x$ 的拟合理论概率;$\Gamma(\alpha)$ 为 α 的伽玛函数;α 和 β 均为运算参数;C_V 为离差系数;C_S 为偏差系数;$\bar{x}$ 为样本的均值;a_0 为曲线的起点 $(a_0,0)$ 与系列零点的距离。

对数正态分布函数:

$$P(X \leqslant x) = \int_0^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\delta x} \exp\left(\frac{-(\ln x - u)^2}{2\delta^2}\right)\mathrm{d}x \quad (x \geqslant 0) \quad (5)$$

式中:P 为 $X \leqslant x$ 的拟合理论概率;$u = E_x$ 为样本的对数均值;δ 为样本的对数均方差。

Gumbel 分布函数:

$$P(X \leqslant x) = \exp\left(-\exp\left(-\frac{x - \mu}{\eta}\right)\right) \quad (6)$$

$$\eta = S\frac{\sqrt{6}}{\pi} \quad (7)$$

$$\mu = K - r\eta \quad (8)$$

式中:P 为 $X \leqslant x$ 的拟合理论概率;μ 为位置参数;η 为尺度参数;S 为样本的均值;K 为样本的均方差;r 为欧拉常数。

采用矩估计法对上述不同边缘分布模型进行参数估计,分别计算出降雨量和径流量对应公式(1)~(8)中的关键参数,结果见表 2。

由表 2 确定出 1977 – 2017 年不同阶段各边缘分布函数,进而绘制万县水文站年降雨量和年径流量的各边缘分布曲线。同时将各实测的数据与边缘分布曲线进行对比,如图 3 所示。

表 2 1977 – 2017 年不同阶段各边缘分布函数降雨量和径流量对应参数的估计结果

年份	降雨量与径流量均值		皮尔逊 III 型		对数正态分布		Gumbel 分布	
			C_V	C_S/C_V	E_x	δ	η	μ
1977 – 2002	降雨量/mm	1150.0	0.19	3.1	7.1	0.20	168.5	1069.4
(阶段 1)	径流量/$10^8 m^3$	3771.8	0.14	2.6	8.2	0.14	403.3	3479.0
2003 – 2012	降雨量/mm	1133.8	0.13	2.3	7.0	0.11	111.5	1069.5
(阶段 2)	径流量/$10^8 m^3$	3703.0	0.13	3.4	8.2	0.10	372.5	3488.0
2013 – 2017	降雨量/mm	1317.4	0.21	2.3	7.2	0.20	214.2	1301.0
(阶段 3)	径流量/$10^8 m^3$	3645.3	0.07	3.6	8.2	0.05	152.1	3555.9

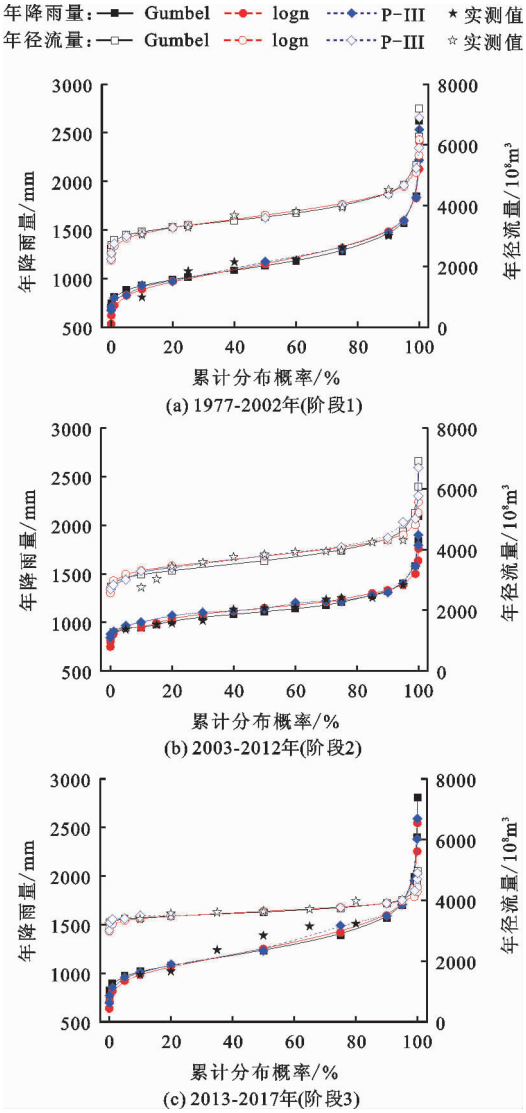

图 3 1977 – 2017 年不同阶段万县水文站年降雨量和年径流量的边缘分布曲线

由图 3 可知,不同阶段年降雨量和年径流量的边缘分布曲线呈现出不同的趋势,但 3 种边缘分布曲线与实际数据均能较好地拟合。

将上述 3 种边缘分布函数拟合的经验频率与实际经验频率进行误差分析,通过评价指标选择拟合效果最好的(即误差最小)的缘分布函数进行联合分布计算。

3.2 评价指标

分别计算出各边缘分布对应的均方根误差(root mean squared error, *RMSE*)和赤池信息准则(Akaike information criterion, *AIC*)指标,模型的检验结果见表 3。由表 3 可知,依据指标值最小准则,降雨分布模型拟合优度评价指标在阶段 1 的最小值分别为 78.2 和 80.7(*RSME* 和 *AIC*, 下同),阶段 2 最小值分别为 34.6 和 70.0,阶段 3 最小值分别为 112.3 和 134.4;径流分布模型拟合优度评价指标在阶段 1 的最小值分别为 193.9 和 202.4,阶段 2 最小值分别为 132.3 和 193.2,阶段 3 最小值分别为80.5 和 90.3。进而遴选出不同阶段降雨量和径流量的最佳的边缘分布函数进行联合分布计算。

3.3 Copula 联合分布的建立

选用 Clayton Copula 和 Gumbel – Hougaard Copula 两种构造函数来建立联合分布函数[13],结合 Copula 函数模型对其进行计算,以得到降雨 – 径流的联合分布函数。不同阶段两种 Copula 联合分布函数参数 θ 的计算结果如表 4 所示。

由表 4 可见,库区蓄水前后的降雨 – 径流联合分布有所改变,θ 值也需采用 *RMSE* 与 AIC 指标进

行检验,即选取较小的指标值来确定出不同阶段最佳的联合分布函数[14]。具体如下:

表 3　1977 - 2017 年不同阶段万县水文站降雨量和径流量分布模型拟合优度检验结果

年份	项目	皮尔逊 III 型		对数正态		Gumbel	
		RMSE	*AIC*	*RMSE*	*AIC*	*RMSE*	*AIC*
1977 - 2002	降雨量	78.2	80.7	81.9	84.6	101.1	107.3
(阶段 1)	径流量	193.9	202.4	193.9	214.7	231.9	238.6
2003 - 2012	降雨量	38.2	79.3	36.4	74.8	34.6	70.0
(阶段 2)	径流量	195.1	207.3	132.0	193.2	180.5	194.8
2013 - 2017	降雨量	200.6	224.2	112.3	134.3	132.6	178.8
(阶段 3)	径流量	80.5	90.3	82.7	102.6	94.7	92.3

表 4　不同阶段两种 Copula 联合分布函数参数 θ 值

构造函数	阶段 1	阶段 2	阶段 3
Clayton Copula	3.24	3.77	2.72
Gumbel - Hougaard Copula	4.17	2.73	2.02

1977 - 2002 年(阶段 1),θ 最佳值为 3.24,降雨 - 径流联合分布服从 Clayton Copula 分布:

$$\varphi(x,y) = (u_1^{-3.24} + u_2^{-3.24} - 1)^{1/-3.24} \quad (9)$$

2003 - 2012 年(阶段 2),θ 最佳值为 2.73,降雨 - 径流联合分布服从 Gumbel - Hougaard Copula 分布:

$$\varphi(x,y) = \exp\left\{-\left[(-\ln(u_1))^{2.73} + (-\ln(u_2))^{2.73}\right]^{1/2.73}\right\} \quad (10)$$

2013 - 2017 年(阶段 3),θ 最佳值为 2.02,降雨 - 径流联合分布服从 Gumbel - Hougaard Copula 分布:

$$\varphi(x,y) = \exp\left\{\left[(-\ln(u_1))^{2.02}) + (-\ln(u_2))^{2.02}\right]^{1/2.02}\right\} \quad (11)$$

公式(9)、(10)和(11)即为三峡库区万州段在各蓄水阶段的 Copula 联合分布,联合分布函数模型至此已经建立完毕,后文将基于上述公式和参数进行分析。

4　三峡水库蓄水过程对万州段降雨量和径流量的影响

4.1　边缘分布的改变

在三峡水库的蓄水过程中,库区内部万州段的降雨量和径流量的边缘分布均发生了较大的改变。

阶段 1:该阶段长江万州段属于天然河道,根据表 3 中降雨量和径流量分布模型拟合优度的检验结果,未蓄水时长江中上游的降雨量和径流量的边缘分布均采用皮尔逊 III 型分布最为合理,其 C_V 值分别为 0.19 和 0.14,对应的 C_S/C_V 分别为 3.1 和 2.6(表 2),符合我国水利行业规范所推荐的河道水文参数的频率曲线,说明此时降雨量和径流量边缘分布满足一般天然河道的特点。

阶段 2:三峡水库处于相对低水位蓄水运行(蓄水位为 135 ~ 156 m),库水位变动较大。根据表 3,降雨量边缘分布采用 Gumbel 分布最为合理,其尺度参数 η = 111.5,位置参数 μ = 1 069.5(表 2);径流量边缘分布最合理的是对数正态分布,其样本对数均值 E_x = 8.2,对数均方差 δ = 0.1(表 2)。这说明在施工期蓄水和初期蓄水阶段,三峡水库万州段已经不同于天然河道,其降雨和径流分布开始受到影响。

阶段 3:随着库水位 175 m 试验性蓄水的进行,径流量在水库的调蓄下趋于稳定,降雨量呈现出新的分布情况。根据表 3,此时降雨量的边缘分布采用对数正态分布最合理,其样本对数均值 E_x = 7.2,样本均方差 δ = 0.2(表 2);而径流量恢复至皮尔逊 III 型分布,但参数有所改变,此时 C_V = 0.07,C_S/C_V = 3.6。

4.2　联合分布的改变

根据 3.3 节降雨量 - 径流量联合分布函数的模拟计算结果,绘制 1977 - 2017 年不同阶段三峡库区万州段降雨量 - 径流量联合分布图及等值线图,如图 4 所示。

由图 4 并结合 Copula 的函数特性可知,联合分布在单一平面上的投影是该平面对应的边缘分布函数,等值线图中的拐点为联合分布的精确值。图 4 中用虚线连接各联合分布概率等值线的拐点值,并称这一虚线为联合概率分布趋势线。此外,对比图 4 各阶

段联合分布图和分布概率等值线图不难发现,等值线的疏密反映了降雨量和径流量年际波动的大小,等值线越稀疏,说明该参数年际波动越大;反之,则说明参数的波动和变化较小,联合概率分布趋势线会偏向波动较小的参数等值线[15]。为了定量分析库区内蓄水前后水文参数的变化,将分布概率为 0.2 的等值线对应的值视为小概率值,其反映了某阶段较难发生的水文情况;将分布概率为 0.8 的等值线对应的值视为大概率值;将分布概率为0.2 ~0.8 的等值线范围称为分布区间,反映了某阶段水文变化程度。基于此,分析各阶段变化规律如下:

阶段 1,降雨量和径流量年际变化和波动均较大,联合概率分布趋势线基本位于分布概率等值线图的对角线位置,符合天然河道水文参数变化规律。研究区域年降雨量均值为 1 150 mm,Copula 模拟年降雨量对应的小概率值和大概率值分别为 971.1 和 1 358.2 mm。年径流量的小概率值和大概率值分别为 3 263.7 $\times 10^8$ 和 4 129.0 $\times 10^8$ m^3。

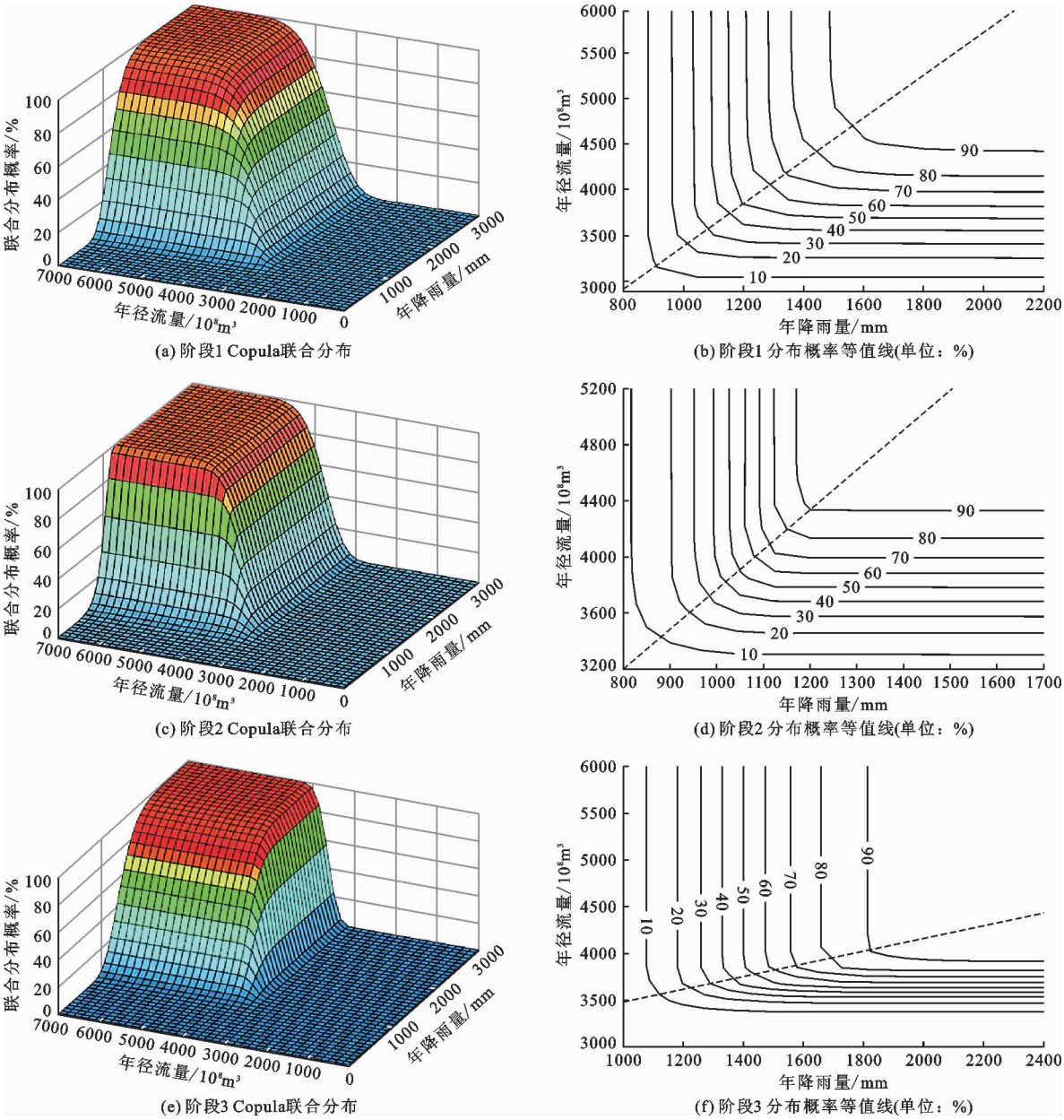

图 4 1977 – 2017 年不同阶段研究区降雨量 – 径流量 Copula 联合分布模拟结果

阶段 2,径流量受三峡水库蓄水水位波动(蓄水位在 135 ~156 m 之间波动)的影响,年径流量年际变化较大,而期间降雨并未受到较大影响。联合概率分布趋势线偏向降雨量等值线,斜率相对阶段 1 变大。年降雨量均值为 1 133.8 mm,年均降雨量较阶段 1 减少 1.4%,变化幅度较小。年降雨量对应

的小概率值和大概率值分别为 901.3 和 1 139.5 mm,较阶段 1 的年降雨量小概率值和大概率值均有减少,其减幅分别为 7.2% 和 16.1%,其降雨量联合分布区间变幅减小了 38.4%,减幅明显。年径流量对应的小概率值和大概率值分别为 3 453.5 × 10^8 和 4 140.5 × 10^8 m^3,较阶段 1 年径流量的小概率值和大概率值分别增加 5.8% 和 0.3%,年径流量分布区间由 865.3 × 10^8 m^3 减小至 687 × 10^8 m^3,减小了 20.6%,减幅明显。

阶段 3,三峡水库试验性蓄水后并出现常态化(蓄水位 175 m),受水库调蓄作用的影响,年径流量处于相对稳定状态,年际变化较小,而年降雨量等值线间距大,年际变化也较大,降雨量处于整体增大的状态。此时,联合概率分布趋势线明显偏向径流量等值线,斜率变小。年降雨量均值为 1 317.4 mm,较阶段 1 年降雨量均值增大 14.6%,增幅明显,对应的小概率值和大概率值分别为 1 178.8 和1 660.5 mm,较阶段 1 均有增大,增幅大约 20%,年降雨量分布区间变幅增加了 24.5%。年径流量对应的小概率值和大概率值分别为 3 466.8 × 10^8 和 3 838.5 × 10^8 m^3,与其他两个阶段相比,其小概率值均增加而大概率值均减小,与阶段 1 相比,小概率值增幅为 6.2%;大概率值减幅为 7.0%,变幅区间 371.7 × 10^8 m^3,减少 57%。

4.3　边缘—联合分布趋势分析

为了更好地分析三峡水库蓄水前后研究区降雨 - 径流关系和预测未来水文变化趋势,将边缘分布和联合分布进行整合分析,所得趋势线分布图如图 5 所示。根据图 5,拟合出不同阶段年径流量和年降雨量边缘—联合分布趋势线的线性表达式,如表 5 所示。

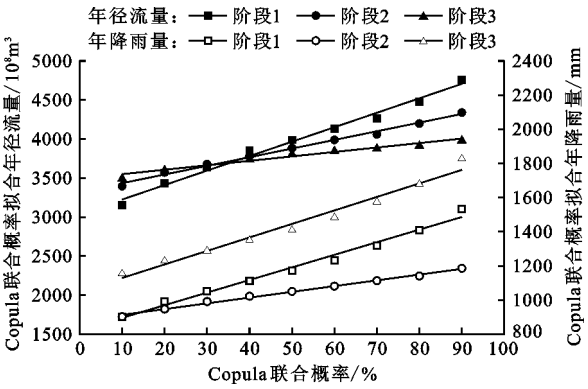

图 5　1977 - 2017 年不同阶段研究区降雨量和径流量边缘—联合分布趋势

表 5　1977 - 2017 年不同阶段研究区年径流量和年降雨量边缘—联合分布趋势线的线性表达式

年径流量			年降雨量		
阶段 1	阶段 2	阶段 3	阶段 1	阶段 2	阶段 3
$y = 1855x + 3039$ ($R^2 = 0.99$)	$y = 1108x + 3323$ ($R^2 = 0.99$)	$y = 571x + 3490$ ($R^2 = 0.97$)	$y = 740x + 820$ ($R^2 = 0.98$)	$y = 337.5x + 878$ ($R^2 = 0.99$)	$y = 792.5x + 1048$ ($R^2 = 0.97$)

由表 5 中各拟合式的 R^2 值可知,各拟合线的误差均较小,可以作为预测的数据支撑,将各阶段具体分析如下:

阶段 1,年降雨量和年径流量的线性趋势基本一致。阶段 2,两线有一定的发散趋势,其中年径流量的拟合线斜率比阶段 1 减小 747,减幅为 40.3%,初始值则增加 284,增幅为 9.3%。阶段 3 的年径流量趋势线斜率较阶段 1、2 明显减小,变化趋缓,表明在三峡水库的调控下,年径流量已趋于稳定;阶段 3 的年降雨量分布也同样变化明显,起始值比阶段 1 增大 27.8%,但斜率仅增大 7.1%,表明研究区在三峡水库蓄水完毕后降雨总量增大,但与自然阶段相近。

4.4　研究区未来降雨量 - 径流量变化预测

三峡库区万州段的年降雨量 - 径流量受水库调蓄等因素影响,将处于一个比较稳定的分布区间,2013 年水库试验性蓄水以后,根据年径流量线性拟合式 $y = 571x + 3\,490$ 可推测未来径流分布,三峡库区万州段最小年径流量大致为 3 490 × 10^8 m^3(±5%),最大年径流量约为 4 055 × 10^8 m^3(±5%)。同理根据年降雨量的线性拟合公式 $y = 792.5x + 1\,048$,可知该区域最小年降雨量为 1 048 mm(±5%),最大值不超过 1 842 mm(±5%)。

此外,根据上述关系还可以推断出不同保证率情况下,对应的降雨量和径流量。

5　讨　论

5.1　降雨量变化的讨论

阶段 3 降雨量较阶段 1、2 均有所增加,且维持相对稳定的波动区间。降雨是水文循环的重要环节,降雨量主要受海陆位置、地形地貌等宏观层面因素的影响,王文鹏等[1]研究发现三峡水库蓄水后,上游流域短历时降水集中出现的次数增加,降水强

度增大,该类降水量占总降水量的比例较大,而长历时降水出现频次降低[16]。

长江流域与其他地区许多河流相比,整个流域的降雨量非常大,尤其在长江中上游地区,而年际变化很小。三峡水库蓄水至 175 m 后,流域库区水体表面积扩大了 3 ~4 倍[17],从而产生丰富的水汽,在山区特殊的地形地貌下,促使水汽上升,加大了降水概率。当然,作为水文循环的一部分,区域降雨量的主要影响因素还是宏观层面的,上述分析只是研究区在阶段 3 降雨量增加的可能原因。

5.2 径流量减小的原因

三峡水库蓄水后,万州段水文关系出现变化还可能与以下因素有关。

(1)上游水库大坝的修建:除了宏观水文循环因素,导致径流量减小的主要原因还是人为作用。自 2003 年三峡水库蓄水以来,水库上游修建了大量的梯级电站和用于灌溉、调水等的水库[18]。根据国际大坝委员会(International Commission on Large Dams, ICOLD)数据集[19],长江流域有22 185座水坝,总库容量为 $2\ 320 \times 10^8$ m^3,约占长江年径流量的 26.0%;其中,位于万州上游的大坝数量约占总数的 74.3%。在所有水坝中有 840 座为灌溉型水坝,另有 762 座水坝以灌溉为主要目的,两者总库容为 55×10^8 m^3,占长江年径流量的 0.6%。

(2)水土保持:导致径流减少的另一个因素为上游植被覆盖率的变化。自三峡水库蓄水后,近十多年来国家在水土保持和植被恢复方面投入力度越来越大[20],长江上游植被覆盖率明显增大。植被覆盖的增大使沿江地区的水土保持能力更好,降雨水量更多地被滞留在了陆地上。

(3)城镇化建设和人口发展:万州及其上游长江流域城镇化建设发展迅猛,人口急剧增加,从而导致对水的需求量增大。但也有研究表明,在城镇化较高地区,这些增加的生活用水量部分又以废水形式最终返回河流,因而对流域径流量的影响有限[21]。因此,关于该部分的影响评估仍需要开展大量的研究工作。此外,影响长江上游径流量的因素还有很多,如跨流域调水等。

6 结 论

(1)Copula 模型能较好诊断三峡库区特定河段的水文关系,这为库区河道多水文要素关系变异诊断提供了新思路。

(2)三峡水库万州段在天然河道阶段,降雨量和径流量均采用皮尔逊 III 型分布最为合理,其 Copula 联合分布采用 $\theta = 3.24$ 的 Clayton Copula 分布较好;施工期和初步蓄水阶段,降雨量分布变为 Gumbel 分布,径流变为对数正态分布,其联合分布变为 $\theta = 2.73$ 的 Gumbel – Hougaard Copula 分布;试验性蓄水阶段,降雨量分布变为对数正态分布,径流量恢复至皮尔逊 III 型分布,其联合分布变为 $\theta = 2.02$的 Gumbel – Hougaard Copula 分布。

(3)施工期及初步蓄水阶段较天然河道阶段的降雨量联合分布区间变幅减小 38.4%;年径流量变幅区间减少 20.6%。试验性蓄水阶段的年降雨量较天然河道增大,变幅区间增加 24.5%,年径流量变幅区间减少 57%,变化梯度趋缓。

(4)预测三峡库区万州段未来年径流量应不小于 $3\ 490 \times 10^8$ m^3(±5%),最大年径流量不超过 $4\ 055 \times 10^8$ m^3(±5%);年降雨量不小于 1 048 mm(±5%),最大年降雨量不超过 1 842mm(±5%)。

参考文献:

[1] 王文鹏, 陈元芳, 刘 波. 长江上游时空相关气候要素的区域趋势诊断[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2017,45(1):14 –21.

[2] 董钊煜,彭 涛,董晓华,等. 1960 –2016 年三峡库区极端降水事件时空变化特征[J]. 水资源与水工程学报, 2020,31(5):93 –101.

[3] 邬 昀,陈海山,倪东鸿. 三峡库区降水 – 径流关系及径流量预报模型研究[J]. 气象与减灾研究, 2010,33(1):46 –52.

[4] BOSSHARD T, ZAPPA M. Regional parameter allocation and predictive uncertainty estimation of a rainfall – runoff model in the poorly gauged Three Gorges area (PR China)[J]. Physics and Chemistry of the Earth, 2008,33(17 –18):1095 –1104.

[5] FANG Nufang, SHI Zhihua, LI Lu, et al. Rainfall, runoff, and suspended sediment delivery relationships in a small agricultural watershed of the Three Gorges area, China[J]. Geomorphology, 2011,135(1 –2):158 –166.

[6] 刘章君, 郭生练, 何绍坤, 等. 基于 Copula 函数的多变量水文不确定性处理器[J]. 水利学报, 2018,49(3):332 –342.

[7] 兰 甜. 水文变异的综合诊断体系研究[D]. 西安:长安大学, 2017.

[8] 郭爱军, 黄 强, 王义民, 等. 基于 Archimedean Copula 函数的流域降雨 – 径流关系变异分析[J]. 水力发电学报, 2015,34(6):7 –13.

(下转第 37 页)

and multivariate analysis[J]. Journal of Hydrology, 2010, 385(1－4): 13－22.
[18] PHAM Q B, YANG Taochang, KUO Chenmin, et al. Combing random forest and least square support vector regression for improving extreme rainfall downscaling[J]. Water, 2019, 11(3): 451－467.
[19] LU Yan, QIN Xiaosheng. A coupled K－nearest neighbour and Bayesian neural network model for daily rainfall downscaling[J]. International Journal of Climatology, 2014, 34(11): 3221－3236.
[20] DEVAK M,DHANYA C T, GOSAIN A K. Dynamic coupling of support vector machine and K－nearest neighbour for downscaling daily rainfall[J]. Journal of Hydrology, 2015, 525: 286－301.
[21] 曹雪松,唐如洋,王卫光,等.两种统计降尺度模型在滦河流域的降水预估[J].扬州大学学报(自然科学版),2016,19(2): 28－32.
[22] 曾思栋,夏 军,杜 鸿,等.气候变化、土地利用/覆被变化及 CO2 浓度升高对滦河流域径流的影响[J].水科学进展,2014,25(1): 10－20.
[23] 赵铜铁钢,杨大文,蔡喜明,等.基于随机森林模型的长江上游枯水期径流预报研究[J].水力发电学报,2012,31(3):18－24＋38.
[24] 张 楠,夏自强,江 红. 基于多因子量化指标的支持向量机径流预测[J]. 水利学报, 2010, 41(11): 1318－1324.

(上接第 30 页)

[9] 王康宁,李劭珉,林 路. 基于 copula 函数的纵向数据复合分位数回归及变量选择[J]. 中国科学:数学, 2020, 50(8):1097－1116.
[10] 刘光文. 皮尔逊Ⅲ型分布参数估计[J]. 水文, 1990, 10(5):1－15.
[11] 杨清华. 混合对数正态分布广义线性联合均值与散度模型的参数估计[J]. 曲阜师范大学学报(自然科学版), 2020,46(4):35－40.
[12] 陶 鹏,牛为华,吴宏波,等. 基于 Gumbel copula 联合概率分布的电力系统综合净负荷预测[J].华北电力大学学报(自然科学版), 2020, 47(2):25－37.
[13] 梁忠民, 郭 彦, 胡义明, 等. 基于 copula 函数的三峡水库预泄对鄱阳湖防洪影响分析[J]. 水科学进展, 2012,23(4):485－492.
[14] DEHGHANI M, ZARGAR M, RIAHI－MADVAR H, et al. A novel approach for longitudinal dispersion coefficient estimation via tri-variate archimedean copulas[J]. Journal of Hydrology, 2020,584:124662.
[15] NELSEN R B. An introduction to copulas[M]. Berlin: Springer, 2006.
[16] 尹志杰,王 容,李 磊,等. 长江流域“2017·07”暴雨洪水分析[J]. 水文, 2019,39(2):86－91.
[17] CHEN Jing, WU Xiaodan, Finlayson B L, et al. Variability and trend in the hydrology of the Yangtze River, China: Annual precipitation and runoff[J]. Journal of Hydrology, 2014,513:403－412.
[18] 张洪记,陈 磊,黄仁勇. 溪洛渡、向家坝建库对三峡水库淤积影响计算研究[J]. 中国水运(下半月), 2019, 19(4):166－167＋169.
[19] CIGB ICOLD. Dams for hydroelectric energy[M]. Boca Raton:CRC Press, 2020.
[20] 彭彩云,王 戈,赵 波,等. 长江上游典型人工植被下中小型土壤动物群落结构特征[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2019,45(5):585－595.
[21] 杨晶晶. 长江经济带经济与生态关系演变的历史分析(1979－2015 年)[D]. 武汉:中南财经政法大学, 2018.