

山东省当地典型降水与黄河来水丰枯遭遇分析

王利朵¹, 齐春三², 曹升乐¹, 薛树文¹, 张涛²

(1. 山东大学 土建与水利学院, 山东 济南 250061; 2. 山东省水利勘测设计院, 山东 济南 250014)

摘要: 鲁西北地区水资源较为贫乏,对黄河依赖性很强,但当黄河来水较少时,若鲁东南地区降水较丰,则可利用鲁东南临沂市较为丰富的水资源加以补给。采用 Copula 函数法,研究了黄河来水与临沂市以及临沂市与鲁西北德州市之间的二维丰枯遭遇概率,分析了黄河与临沂市、临沂市与德州市之间的丰枯互补可行性,并与统计法进行对比。结果表明:其对于水资源的优化利用具有重要意义,为后续制定山东省与黄河水的联合调控决策提供技术支撑。

关键词: Copula 函数法; 丰枯遭遇; 丰枯互补; 鲁西北德州市; 临沂市; 黄河

中图分类号: TV12 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-643X(2016)06-0049-05

Study of the wetness – dryness encountering of local typical precipitation of Shandong Province and runoff of the Yellow River

WANG Liduo¹, QI Chunsan², CAO Shengle¹, XUE Shuwen¹, ZHANG Tao²

(1. School of Civil Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China;

2. Shandong Survey and Design Institute of Water Conservancy, Jinan 250014, China)

Abstract: The water resources in Northwest of Shandong Province is relatively poor and heavily depends on the Yellow River. But when the runoff of Yellow River is very small and rainfall in Southeast of Shandong Province is relatively abundant, the abundant water resources of Linyi city in southeast Shandong could be used for supplying the Northwest of Shandong Province. The Copula functions were applied to study the 2 – dimensional wetness – dryness encountering probabilities between the precipitation of Yellow River and Linyi, and of Dezhou and Linyi. Their feasibility of wetness – dryness complementarity were analyzed. A comparison between the results using the Copula functions and Statistical method were conducted. The results showed that, the conclusion was reasonable, it had a great significance in optimally utilizing water resources and provided a technical support for making the united regulation and decision between Shandong Province and the Yellow River.

Key words: copula functions; wetness – dryness encountering; wetness – dryness complementarity; Dezhou city; Linyi city; the Yellow River

鲁西北地区水资源贫乏,对黄河水的依赖性很强。以德州市为例,多年平均降水量仅 561 mm,且地下水多为咸水,每年约需引黄河水 $10 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。近年来进入山东省的水量呈递减趋势,为保障鲁西北地区的用水需求,众多学者在保障山东引黄供水方面做了大量研究^[1-5],主要包括闸门清淤、建设蓄水工程、优化配置、科学管理等,而在挖潜山东省境内其他水资源方面研究较少。由于鲁东南地区水资

源丰富,加之出境水量较大,水资源开发利用潜力巨大,分析空间与水量上的可行性,本文提出当黄河来水较少时,探讨利用鲁东南临沂市丰富的水资源(多年平均降水量为 818 mm)补给德州市用水的可行性,实现山东省水资源与黄河水的优化利用。

丰枯遭遇是指不同水文区域在同一时期内可能发生的丰、枯水变化的组合事件^[6],本质上属于求解具有线性或非线性相关关系的二维或多维变量的

收稿日期:2016-07-19; 修回日期:2016-10-10

基金项目:水利部公益性行业科研专项(201501054)

作者简介:王利朵(1991-),女,河南濮阳人,在读硕士研究生,研究方向为水文学与水资源。

通讯作者:曹升乐(1960-),男,陕西蒲城人,博士,教授,博士生导师,主要研究方向为水文学基本原理、水资源开发利用与管理以及水环境与水工程。

联合分布计算范畴。目前水文序列丰枯遭遇分析方法众多,主要有经验频率法^[7]、Moran 法^[8]、正态变换法^[9]、FGM 法^[10]、Copula 函数法^[11-13]。Copula 函数法计算简便、适用性好,是近年来水文领域研究的焦点,其他几种方法均存在不同程度的精度不佳、计算繁琐、边缘分布固定等局限。因此本文采用 Copula 函数法进行分析。

1 研究方法

Copula 函数是连接多变量联合分布及其一维边缘分布的函数,是将变量联合累计分布函数用 Copula 函数 C 表示的一种方法,能够有效地求解线性、非线性二维或多维变量的联合分布。按照 Copula

函数理论,若存在二维变量 $X、Y$,则联合分布 $F(x,y)$ 和 Copula 分布 $C(u,v)$ 之间的关系为:

$$F(x,y) = P(X \leq x, Y \leq y) = C[F_X(x), F_Y(y)] = C(u,v) \tag{1}$$

式中: $F(x,y)$ 为变量 X 与 Y 的联合分布函数; $F_X(x)、F_Y(y)$ 分别为两变量的边缘分布; $C(u,v)$ 为 Copula 函数; $u、v$ 为 Copula 函数对应各变量的累计频率,相当于各变量的边缘分布。

Copula 函数类型较多,其中对称型阿基米德 Copula 函数具有完整的函数表达形式,计算简便易行,在水文领域应用最为广泛,4 种常用的二维 Copula 函数形式以及相应的秩相关系数 τ 与 Copula 函数 θ 之间的关系见表 1。

表 1 4 种常用的二维对称型阿基米德 Copula 函数形式及参数关系

Copula	$C(u,v)$	θ 范围	τ 与 θ 的关系	τ 范围
Clayton	$(u^{-\theta} + v^{-\theta} - 1)^{-1/\theta}$	$(0, \infty)$	$\frac{\theta}{\theta + 2}$	$[-1,1]/\{\theta\}$
G - H	$\exp\{-[(- \ln u)^\theta + (- \ln v)^\theta]^{1/\theta}\}$	$(1, \infty)$	$1 - \frac{1}{\theta}$	$[0,1]$
Frank	$-\frac{1}{\theta} \ln\left[1 + \frac{(e^{-\theta u} - 1)(e^{-\theta v} - 1)}{e^{-\theta} - 1}\right]$	R	其中, $\begin{cases} D_1(\theta) = \frac{1}{\theta} \int_0^\theta \frac{t}{e^t - 1} dt \\ D_1(-\theta) = D_1(\theta) + \frac{\theta}{2} \end{cases}$	$[-1,1]/\{0\}$
A - M - H	$\frac{uv}{1 - \theta(1 - u)(1 - v)}$	$[-1,1]$	$1 - \frac{2[\theta + (1 - \theta)^2 \ln(1 - \theta)]}{3\theta^2}$	$[-0.181726, \frac{1}{3}]$

Copula 函数法在二维丰枯遭遇分析中的应用步骤主要是:

- (1)确定丰枯指标与边缘分布;
- (2)计算秩相关系数 τ 与 Copula 函数参数 θ , 得到 4 种 Copula 函数表达式;
- (3)根据评价指标优选 Copula 函数,建立联合分布模型;
- (4)根据所选模型计算丰枯遭遇概率。

2 模型的应用

2.1 资料选取与处理

黄河流域范围较大,上中下游水量变化悬殊,且上中游水资源开发利用量难以控制,所能控制的仅为经小浪底调蓄后的水量。另外,黄河下游高村站是黄河进入山东省的第一个水文站,直接反映山东省可利用的黄河水量,具有较好地代表性。因此,黄

河水选取黄河高村站多年径流量数据为代表。鲁西北地区德州市与鲁东南地区临沂市均采用各市多年平均面降水量数据。各研究区均选取 1956 - 2014 年共 59 a 的同期水文资料加以分析。

为满足水文数据的一致性,德州市水文序列作极大值处理^[14]。由于小浪底建成调蓄后黄河下游受人类活动影响较小,小浪底建成后的下垫面条件即可反映现状下的下垫面情况,故黄河高村站径流序列作还原处理^[15],将早期下垫面条件下的径流量修正为小浪底水库稳定调蓄后的径流量。临沂与德州市年降水量序列见图 1,黄河高村站年径流序列一致性处理前后情况见图 2。

2.2 边缘分布及丰枯指标的确定

水文序列丰、平、枯划分方法常见的有三种,即要素距平值法(GB/T 22482 - 2008)、均值标准差法及保证率划分法。其中要素距平值法只考虑了均值

影响,适用于离散程度较小的水文序列,对于方差较大的水文序列影响较大;均值标准差法同时考虑了均值和方差的影响,对于离散程度较大的水文序列划分较为合理,当水文序列离散程度较小时,要素距平值法和均值标准差法均适用,且划分结果较为接近。保证率划分方法存在较大的主观因素,受人为因素及水文区域的影响,保证率划分标准不一。因此,综合考虑,本次研究丰枯划分方法采用均值标准差法,丰枯划分标准见表 2。

Copula 函数法对边缘分布无限制,假设所有水

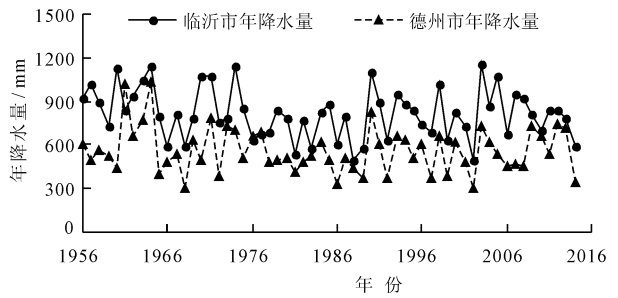


图 1 临沂市与德州市年降水量序列

文序列边缘分布均服从皮尔逊 - III 型分布,采用适线法计算统计参数,根据丰枯划分标准计算各丰枯区间分界点,结果见表 3。根据分界点及频率曲线得到 Copula 函数中的 u 、 v 值,即 $u_{枯}$ 、 $u_{偏枯}$ 、 $u_{偏丰}$ 、 $u_{丰}$ 及 $v_{枯}$ 、 $v_{偏枯}$ 、 $v_{偏丰}$ 、 $v_{丰}$ 。对于丰枯划分三分法, $u_{枯}$ 表示水文区枯水年所占频率, $u_{丰}$ 表示枯水年与平水年所占频率;对于丰枯划分五分法, $u_{偏枯}$ 表示水文区枯水年与偏枯年所占频率, $u_{偏丰}$ 表示水文区枯水年、偏枯年与平水年所占频率,其余 u 、 v 以此类推。下文中相应表示含义相同,不再赘述。

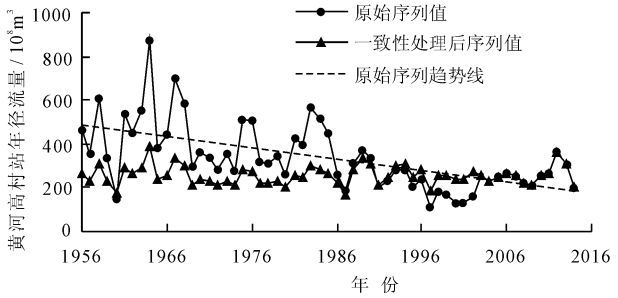


图 2 黄河高村站年径流量一致性处理前后序列

表 2 采用均值标准差法划分的丰枯指标标准表

三分法			五分法			
枯水年	平水年	丰水年	枯水年	偏枯年	平水年	偏丰年
$[0, EX - 0.75s]$			$[0, EX - 1.0s]$			
$(EX - 0.75s, EX + 0.75s]$			$(EX - 1.0s, EX - 0.5s]$			
$> EX + 0.75s$			$(EX - 0.5s, EX + 0.5s]$			
			$(EX + 0.5s, EX + 1.0s]$			
			$> EX + 1.0s$			

表 3 研究区水文变量统计参数及丰枯划区间分界点统计表

研究区	均值	均方差 s	C_V	C_S	C_V/C_S	$EX - 0.75s$	$EX + 0.75s$	$EX - 1.0s$	$EX - 0.5s$	$EX + 0.5s$	$EX + 1.0s$
黄河	257.57	43.71	0.18	0.72	4.00	224.785	290.345	213.858	235.712	279.419	301.272
临沂市	817.80	172.42	0.22	0.21	0.95	688.480	947.120	645.380	731.590	904.010	990.220
德州市	548.52	136.43	0.27	0.43	1.59	446.200	650.840	412.090	480.310	616.730	684.950

2.3 联合分布的确定

二维阿基米德 Copula 函数参数计算采用 Kendall 秩相关系数法^[16],计算过程中需根据各函数对应的参数范围加以取舍,秩相关系数 τ 与 Copula 参数 θ 计算结果见表 4。

将表 4 中的参数 θ 代入表 1 Copula 函数表达

式,而后采用 K - S 检验、均方根误差 RMSE 及 AIC 准则 3 个指标作为依据^[17-18],选取拟合最优的 Copula 函数建立丰枯遭遇模型。优选过程中通过 K - S 检验且 D 值、RMSE 及 AIC 越小拟合越优,拟合优选结果见表 5。

表 4 黄河与临沂市以及临沂市与德州市二维丰枯遭遇参数估计值

水文区二维组合	参数 τ	Clayton	G - H	Frank	A - M - H
黄河与临沂市	-0.0041	-0.0081	0.9959	1.1210	-0.0185
临沂市与德州市	0.3933	1.2967	1.6484	0.3116	不适用

表 5 黄河与临沂市以及临沂市与德州市二维联合分布拟合优选结果

水文区二维组合	Clayton			G - H			Frank			A - M - H		
	D_{K-S}	RMSE	AIC	D_{K-S}	RMSE	AIC	D_{K-S}	RMSE	AIC	D_{K-S}	RMSE	AIC
黄河与临沂市	0.436	0.059	-331.3	0.454	0.062	-327.0	0.109	0.025	-431.1	0.108	0.021	-455.5
临沂市与德州市	0.048	0.018	-470.9	0.072	0.025	-431.3	0.143	0.058	-333.8			

由表 5 可知,黄河高村站与临沂市丰枯遭遇的最优联合分布为 A - M - H Copula 函数,临沂市与德州市联合分布为 Clayton Copula 函数。同时绘制二维联合分布“计算频率 - 经验频率 Q - Q 图”对最优联合分布函数进行检验,拟合结果见图 3 ~ 图 4。由图可知,图上的点都落在 45° 对角线附近,表明拟合效果较好,所选模型较好。

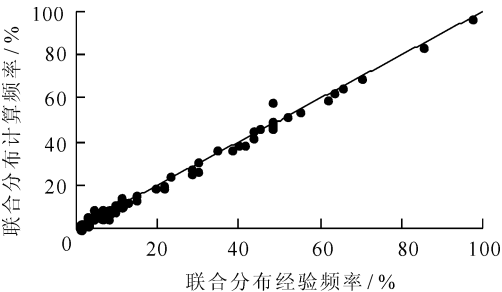


图 3 黄河与临沂市计算频率 - 经验频率 Q - Q 图

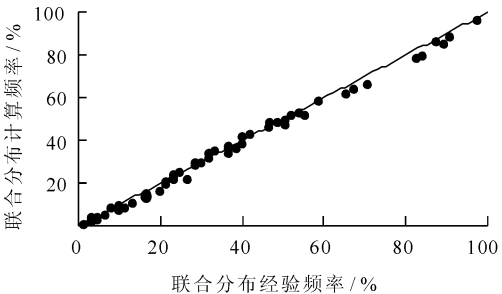


图 4 临沂市与德州市计算频率 - 经验频率 Q - Q 图

2.4 丰枯遭遇概率计算及丰枯互补相关规定

丰枯划分三分法中,二维丰枯遭遇共 9 种组合,丰枯划分五分法共 25 种组合。根据 Copula 函数原理可得丰枯遭遇概率如下:

① X 枯 Y 枯的概率:

$$P(X \leq x_{枯}, Y \leq y_{枯}) = F(x_{枯}, y_{枯}) = C(u_{枯}, v_{枯})$$

② X 枯 Y 偏枯的概率:

$$P(X \leq x_{枯}, y_{枯} \leq Y \leq y_{偏枯}) = C(u_{枯}, v_{偏枯}) - C(u_{枯}, v_{枯})$$

其余丰枯遭遇组合概率计算式以此类推。

丰枯同步、丰枯异步分别定义如下:

丰枯划分三分法中,将“同丰、同平、同枯”遭遇组合定义为“丰枯同步”,其余组合定义为“丰枯异步”;丰枯划分五分法中,由于“枯水、偏枯”以及“丰水、偏丰”相邻等级组合在实际应用中具有相似同步的特性,因此将“同丰、同偏丰、同平、同偏枯、同枯、枯水偏枯、丰水偏丰”组合定义为“丰枯同步”,其余组合定义为“丰枯异步”。

一般而言,当丰枯异步概率大于同步概率时,初步认为不同水文区之间丰枯互补性较好。

3 实例计算分析

3.1 黄河与临沂市丰枯遭遇分析

基于 Copula 函数理论得到黄河与临沂市二维丰枯遭遇概率,结果见表 6。

由表 6 可知,黄河与临沂市丰枯遭遇中,三分法:同步概率为 38.91%,异步概率为 61.09%;五分法:同步概率为 33.39%,异步概率为 66.61%。丰枯异步概率远大于同步概率,有利于实现黄河与临沂市丰枯互补。三分法异步概率中,黄河枯水或平水同时临沂丰水的概率为 17.91%;五分法异步概率中,黄河枯水、偏枯或平水同时临沂丰水或偏丰的概率为 21.85%。说明黄河与临沂丰枯互补性较好,当黄河来水较少时,可利用临沂市水资源补给鲁西北地区用水。

表 6 黄河与临沂市丰枯遭遇概率表 %

丰枯划分(三分法)					丰枯划分(五分法)					
丰枯情况		临沂市			丰枯情况		临沂市			
		枯水年	平水年	丰水年			枯水年	偏枯年	平水年	偏丰年
黄 河	枯水年	6.05	13.62	5.92	枯水年	2.80	2.65	6.31	2.38	2.86
	偏枯年				偏枯年	3.02	2.84	6.75	2.54	3.04
	平水年	12.53	27.88	11.99	平水年	6.05	5.69	13.43	5.03	6.00
	偏丰年				偏丰年	2.02	1.89	4.45	1.66	1.98
	丰水年	5.32	11.70	4.98	丰水年	2.81	2.63	6.16	2.29	2.72

3.2 临沂市与德州市丰枯遭遇分析

同理,基于 Copula 函数理论得到临沂市与德州市二维丰枯遭遇概率,结果见表 7。

由表 7 可知,临沂市与德州市丰枯遭遇中,三分法:同步概率为 56.50%,异步概率为 43.50%;五分法:同步概率为 52.69%,异步概率为 47.31%。丰

枯同步概率略大于异步概率,二者较为接近,这与两个水文区处于同一气候条件下有关。但是,考虑到临沂市属于山东省境内丰水区域,德州市属鲁西北严重缺水区,在来水量悬殊较大的情况下,二者也具有一定的丰枯互补性,利用临沂市水资源补给鲁西北地区用水具有一定的可行性。

表 7 临沂市与德州市丰枯遭遇概率表 %

		丰枯划分(三分法)			丰枯划分(五分法)				
丰枯情况		德州市			丰枯情况	德州市			
		枯水年	平水年	丰水年		枯水年	偏枯年	平水年	偏丰年 丰水年
临沂市	枯水年	15.47	7.32	1.12	枯水年	10.57	3.11	2.30	0.37 0.35
	偏枯年				偏枯年	3.64	4.23	5.48	1.16 1.19
	平水年	8.86	31.60	12.74	平水年	2.93	6.30	15.94	5.32 6.61
	偏丰年				偏丰年	0.47	1.39	5.62	2.61 3.81
	丰水年	1.28	12.19	9.44	丰水年	0.39	1.27	6.16	3.34 5.44

3.3 研究成果的合理性检验

丰枯遭遇分析方法众多,本文采用最为简便的统计法作为依据以验证研究成果的合理性。统计法即是依据丰枯指标分析各水文区各时间尺度的丰枯情况,再统计各水文区丰枯遭遇频次,计算组合频率。此处不再详细列出各组合结果,仅就丰枯同步、异步概率加以分析,结果见表 8。

表 8 Copula 函数法与统计法计算结果比较 %

研究区		丰枯划分三分法		丰枯划分五分法	
丰枯遭遇组合	研究方法对比	同步	异步	同步	异步
		概率	概率	概率	概率
黄河与临沂市	Copula 函数法	38.91	61.09	33.39	66.61
	统计法	40.68	59.32	27.12	72.88
	绝对差值	-1.77	1.77	6.27	-6.27
临沂市与德州市	Copula 函数法	56.50	43.5	52.69	47.31
	统计法	66.10	33.90	57.63	42.37
	绝对差值	-9.60	9.60	-4.94	4.94

由表 8 可知,利用 Copula 函数法和统计法计算得到的各二维丰枯遭遇组合概率较为接近,两种方法所得丰枯同步、异步概率结论相同,且异步概率绝对差值最小为 1.77%,最大为 9.6%,说明基于 Copula 函数理论得到的二维丰枯遭遇结果是合理的,研究成果可行,结论可信。

4 结 论

(1)黄河与临沂市丰枯异步概率远大于丰枯同步概率,异步概率中最有利于实现丰枯互补的遭遇

组合概率约为 20%,表明二者丰枯互补性较好。当黄河来水较少时,利用山东省境内临沂市较为丰富的水资源具有一定的可行性。

(2)临沂市与德州市丰枯同步概率与异步概率较为接近。但是,考虑到二者降水量悬殊较大,即使二者同处于平水年状态,利用水量间的巨大差异,也可实现临沂市向德州市补水,因此,二者也具有一定的丰枯互补性。在工程允许的条件下,由临沂市向鲁西北德州市补水具有一定的可行性。

(3)采用统计法计算结果加以分析比较,成果较为接近,表明由 Copula 函数法研究二维丰枯遭遇方法可行,结论可信。

(4)分析黄河与临沂市以及临沂市与德州市之间的丰枯遭遇特性,对鲁西北地区的水资源调配具有一定的理论及应用价值。

参考文献:

[1] 马光清,王福恩,杨金荣,等. 黄河水资源与山东引黄灌溉的关系[J]. 城市建设理论研究,2011(24):1-3.
[2] 于晓龙,李希宁. 黄河调水调沙以来山东引黄能力分析[J]. 人民黄河,2011,33(12):85-87+91.
[3] 孟 斌. 山东黄河水量优化调度方案研究[D]. 济南:济南大学,2014.
[4] 孙开岗. 山东黄河水资源管理制度研究[D]. 济南:山东师范大学,2013.
[5] 王德福,陈 春. 浅议山东黄河引黄水闸的维修与养护[J]. 科技视界,2016(18):253-253.

考虑区域生产和消费的产品的虚拟水含量,未对产品加工以及服务的各个环节消耗的虚拟水进行详细计算,工业虚拟水含量以本地用水量代替,忽略产品贸易,因此有待进一步研究。

参考文献:

[1] 张林波,李文华,刘孝富,等. 承载力理论的起源、发展与展望[J]. 生态学报,2009,29(2):878-888.

[2] 刘晓,陈隽,范琳琳,等. 水资源承载力研究进展与新方法[J]. 北京师范大学学报(自然科学版),2014,50(3):312-318.

[3] 段新光,栾芳芳. 基于模糊综合评判的新疆水资源承载力评价[J]. 中国人口资源与环境,2014,24(S1):119-122.

[4] 王好芳,郭乐,窦实,等. 基于主成分分析的东江流域水资源承载力评价[J]. 水文,2008,28(4):16-19.

[5] 张光凤,张祖陆. 基于GIS的济宁市水资源承载力的主成分分析[J]. 水电能源科学,2013,31(12):21-24.

[6] 卜楠楠,唐德善,尹筭. 基于AHP法的浙江省水资源承载力模糊综合评价[J]. 水电能源科学,2012,30(3):42-44.



(上接第53页)

[6] 王伟,钟永华,雷晓辉,等. 引汉济渭工程水源区与受水区丰枯遭遇分析[J]. 南水北调与水利科技,2012,10(5):23-26+36.

[7] 王志良,杨弘. 天津市水源地降水丰枯遭遇性分析[J]. 海河水利,2004(6):15-18.

[8] 戴昌军. 多维联合分布计算理论在南水北调东线丰枯遭遇分析中的应用研究[D]. 南京:河海大学,2005.

[9] 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.

[10] 谢华,黄介生. 两变量水文频率分布模型研究述评[J]. 水科学进展,2008,19(3):443-452.

[11] 丁志宏,冯平,张永. 基于Copula模型的丰枯频率分析——以南水北调西线工程调水区径流与黄河上游来水的丰枯遭遇研究为例[J]. 长江流域资源与环境,2010,19(7):759-764.

[12] 张忠波,张双虎,王浩. 基于Copula函数的三峡工程供

[7] 方国华,胡玉贵,徐瑶. 区域水资源承载能力多目标分析评价模型及应用[J]. 水资源保护,2006,22(6):9-13.

[8] 付湘,李娟,梅亚东. 武汉市水资源承载能力研究[J]. 水电能源科学,2006,24(1):84-86.

[9] 刘宝勤,封志明,姚治君. 虚拟水研究的理论、方法及其主要进展[J]. 资源科学,2006,28(1):120-127.

[10] 马晶,彭建. 水足迹研究进展[J]. 生态学报,2013,33(18):5458-5466.

[11] 戚瑞,耿涌,朱庆华. 基于水足迹理论的区域水资源利用评价[J]. 自然资源学报,2011,26(3):486-495.

[12] 宋永永,米文宝,杨丽娜. 基于水足迹理论的宁夏水资源安全评价[J]. 中国农村水利水电,2015(5):58-62.

[13] 段春青,刘昌明,陈晓楠,等. 区域水资源承载力概念及研究方法的探讨[J]. 地理学报,2010,65(1):82-90.

[14] 姬生才,何海,吴志勇. 环境库兹涅茨曲线在水资源领域的应用进展[J]. 水资源保护,2014,30(6):1-6.

[15] 韩桂兰,孙建光. 新疆人口分布与水资源承载力协调的量化评价与分析[J]. 新疆财经,2010(3):11-14.

水期丰枯遭遇分析[J]. 人民长江,2012,43(3):5-8.

[13] 刘招,田智,乔长录,等. 基于Copula函数的关河流水文丰枯遭遇特征分析[J]. 干旱地区农业研究,2013,31(4):245-248.

[14] 曹升乐,于翠松,孙秀玲. 年降水量和年径流量序列中特大(小)值分析处理方法研究[J]. 水文,1998,18(2):22-26.

[15] 成静清. 非一致性年径流序列频率分析计算[D]. 西安:西北农林科技大学,2010.

[16] 刘祖发,谭圣林,罗勇强,等. 基于Copula函数的东江流域3大水库丰枯遭遇分析[J]. 湖泊科学,2015,27(2):361-370.

[17] 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.

[18] 陈睿智,桑燕芳,王中根,等. 丰枯遭遇对引汉济渭受水区水资源配置的影响研究[J]. 资源科学,2013,35(8):1577-1583.