

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.20180010

余江游,夏军,余敦先,等.南水北调中线工程水源区与海河受水区干旱遭遇研究[J].南水北调与水利科技,2018,16(1):63-68,194. YU J Y, XIA J, SHE D X, et al. The analysis of encounter probability of drought between the water source area and the Hai River water receiving area in the middle route of the South to North Water Transfer Project in China[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2018, 16(1): 63-68, 194. (in Chinese)

南水北调中线工程水源区与海河受水区干旱遭遇研究

余江游,夏军,余敦先,邹磊,李天生

(1. 武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 武汉 430072; 2. 水资源安全保障湖北省协同创新中心, 武汉 430072)

摘要: 基于 Copula 理论, 以标准化降水蒸散指数 (SPEI) 为干旱指标, 建立了南水北调中线工程水源区与海河受水区汛期、非汛期及全年 SPEI 的联合分布, 并结合未来气候模式数据, 研究了变化情景下南水北调中线工程水源区与海河受水区各时期干旱遭遇概率变化及其对工程运行风险的影响。研究表明: 过去几十年, 南水北调中线工程水源区与海河受水区总体呈现变旱趋势; 在 RCP4.5 和 RCP8.5 两种未来气候变化情景下, 水源区与海河受水区汛期、非汛期及全年同旱事件发生概率较现状有不同程度的增加, 尤其汛期遭遇同旱和非汛期遭遇同旱的概率明显增大, 增加的幅度分别达到 2.99%~6.1% 和 2.67%~3.63%。在未来变化情景下, 水源区与海河受水区干旱遭遇变化可能会对工程运行带来风险, 因此, 有必要研究相应的适应性对策以保证工程的正常安全运行。

关键词: 南水北调; 气候变化; 干旱遭遇; Copula 理论; 干旱指数

中图分类号: P467 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2018)01-0063-06

The analysis of encounter probability of drought between the water source area and the Hai River water receiving area in the middle route of the South to North Water Transfer Project in China

YU Jianguyou, XIA Jun, SHE Dunxian, ZOU Lei, LI Tiansheng

(1. State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China;
2. Hubei Provincial Collaborative Innovation Center for Water Resources Security, Wuhan 430072, China)

Abstract: Based on the Copula theory, this study has constructed the joint distribution of SPEI between the water source area and the Hai River water receiving area in the middle route of the South to North Water Transfer Project in China (SNWTP) at three time scales, i.e. the flooding season, the dry season, and the whole year. Using the future climate model data, we computed the encounter probability of drought between the water source area and the Hai River water receiving area. The results showed that both the water source area and the water receiving area were undergoing a slight drying trend over the past few decades. Compared with the baseline, the probability of concurrent drought events will increase by different degrees in the RCP4.5 and RCP8.5 scenarios. Especially, the probability of concurrent drought during the flooding season and the probability of concurrent heavy drought during the dry season increased obviously by 2.99%~6.1% and 2.67%~3.63%, respectively. The increase in the probability of concurrent drought between the water source area and water receiving area will probably influence the operation of SNWTP. Therefore, it's necessary to take some adaptive measures to ensure the safety and efficiency of SNWTP.

Key words: South to North Water Transfer Project; climate change; drought encounter; Copula theory; drought index

收稿日期: 2017-02-28 修回日期: 2017-09-06 网络出版时间: 2018-01-11
网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20180108.1327.008.html>
基金项目: 国家自然科学基金项目(41571028)

Fund: National Natural Science Foundation of China(41571028)

作者简介: 余江游(1991-), 男, 四川宜宾人, 主要从事水文水资源方面研究。E-mail: 2745537003@qq.com

通讯作者: 夏军(1954-), 男, 湖北孝感人, 中国科学院院士, 博士生导师, 长期从事水文学及水资源方面研究。E-mail: xiaj@igsnr.ac.cn

南水北调中线工程是为了解决我国南北方水资源分布不均、缓解北方地区严重缺水状态的重要工程措施之一。但是,由于区域来水的空间差异性和时间波动性,工程水源区与受水区水资源量不能总能互补,如果出现水源区与受水区同时发生干旱的状况,工程将面临受水区缺水严重而水源区无水可供的两难情形^[1],给南水北调中线工程水资源的正常调度运行带来风险。干旱历来是影响我国发展的主要自然灾害之一,近年来,频发的干旱事件已给我国水资源管理和社会经济发展带来巨大挑战^[2]。联合国政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)指出,全球气候正呈现以变暖为特征的显著变化。随着全球气候变暖,全世界发生干旱事件的概率正呈上升趋势^[3]。大量研究表明,气候变化在引起区域降水、温度变化的同时,对区域间干旱遭遇也有较大改变^[1,2]。因此研究未来南水北调中线工程水源区与受水区干旱遭遇对南水北调中线工程的正常安全运行具有重要意义。

近年来,已有相关学者从降水、径流等不同的角度分析了南水北调中线工程水源区和各受水区的丰枯遭遇风险。例如,郑红星等^[4]利用同步水文系列,计算了南水北调中线不同水文区降水丰枯的遭遇概率;韩宇平等^[5]根据历年天然径流量资料对南水北调中线工程的水源区与受水区的干旱遭遇做了统计分析;张利平等^[6]利用实测雨量资料,运用集对分析方法对工程水源区与海河受水区的旱涝遭遇进行了研究;闫宝伟^[7]、陈锋^[1]等运用 Copula 方法理论构建了南水北调中线工程水源区与各受水区汛期、非汛期及全年降雨量的联合分布,用所建模型对水源区与各受水区的降水丰枯遭遇进行了研究,并探讨了气候变化情景下,南水北调中线工程水源区与各受水区降水丰枯遭遇的变化;刘小莽等^[2]根据降水资料,以标准化降水指数(Standardized Precipitation Index, SPI)作为干旱指标,基于 Copula 理论建立了南水北调中线工程水源区与受水区 SPI 的联合分布,研究了气候变化下水源区与受水区干旱遭遇变化。

由于人类活动的影响,研究使用径流资料系列已经难以符合样本的可靠性、一致性和代表性要求,因此对南水北调中线工程水源区与受水区干旱遭遇的研究工作主要还是集中在对降水的分析上。但是,在全球变暖背景下,气温的升高已经成为造成干旱加剧的重要因子之一,对干旱状况的客观分析需要考虑降水和气温的综合效应^[8]。由于 Copula 函数易于构造多变量的联合分布,为了综合考虑降水和气温的影响,本文以标准化降水蒸散指数(Standardized

Precipitation Evapotranspiration Index, SPEI) 作为干旱指标^[9],运用 Copula 理论建立了南水北调中线工程水源区与海河受水区汛期、非汛期及全年 SPEI 的联合分布,研究未来气候变化对南水北调中线工程水源区与海河受水区干旱遭遇的影响。

1 研究区域概况及资料

1.1 研究区域概况

南水北调中线工程从丹江口水库引水(近期),跨越长江、淮河、黄河、海河四大流域,北上自流到北京、天津^[6]。工程自2014年12月正式通水以来,直至2015年12月,已累计向各受水区供水达22.2亿 m^3 。待工程最终正常运行后,计划每年向北方地区调水130亿 m^3 ,约占丹江口水库年入库量的33%^[10]。工程水源区丹江口水库以上流域面积9.52万 km^2 ,流域年降水处于700~1100 mm之间,年平均温度15~17 $^{\circ}C$;受水区总面积15.5万 km^2 ,分为唐白河受水区、黄淮受水区和海河受水区^[7]。海河受水区年降水量多间于400~700 mm,年均温度9~11 $^{\circ}C$ ^[2]。南水北调中线工程概况如图1所示。

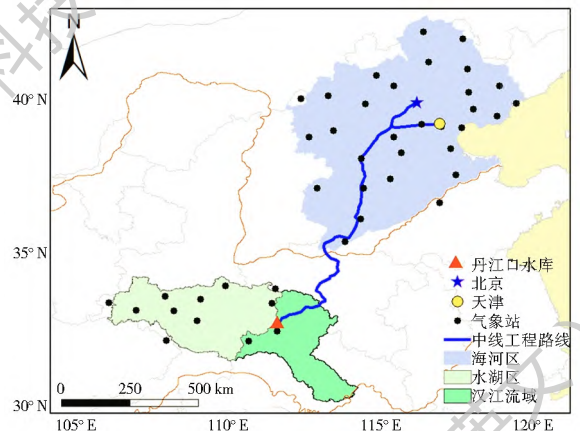


图1 南水北调中线工程示意图

Fig. 1 The middle route of South to North Water Transfer Project

1.2 资料

本文研究使用到的历史气象观测资料来自于中国气象科学数据共享服务网,选取汉江水源区和海河受水区分布较均匀的气象站作为代表站点,分别包括水源区12个气象站(石泉、安康等)及海河受水区29个气象站(邢台、保定等)1960–2014年逐日实测降水、气温数据;未来气候模式数据采用的是由国家气象中心提供的WCRP(The World Climate Research Program)耦合模式比较计划阶段5(The Copula Model Intercomparison Project Phase 5)的多模式集合平均数据,简称CMIP5数据。CMIP5数据提供未来2020–2100年月气象要素数据,其空

间分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$ 。利用泰森多边形法,可以分别得到水源区、海河受水区区域平均降水量及平均气温等相关气象要素数据。

2 研究方法

2.1 标准化降水蒸散指数(SPEI)

SPEI 是 Vicente Serrano 等^[9]在 SPI 基础上提出的新的气候干旱指数。SPI 仅以降水作为输入,虽计算简单并具有多时间尺度特性,但是忽略了气温对干旱过程的影响;而 SPEI 基于降水和气温两大因子,利用降水量与潜在蒸散量差值序列的累积量代替 SPI 中的降水累积量,在考虑温度变化对干旱影响的同时也保持了 SPI 计算简单、多时间尺度的优点,已经成为研究温度变化对干旱过程影响的理想工具。SPEI 对干旱过程的研究有 1、3、6 和 12 个月等不同的时间尺度^[9],本文选择 6 个月及 12 个月两个时间尺度,分别对南水北调中线工程水源区和海河受水区汛期(5 月-10 月)、非汛期(11 月-次年 4 月)及全年三个阶段干旱过程及其遭遇情况进行研究。SPEI 干旱指数具体计算过程可见参考文献[11]。

2.2 Copula 联合分布

2.2.1 二维 Copula 理论

Copula 函数能独立于随机变量的边缘分布,构造不同边缘分布随机变量间的联合分布^[12-13],由于其具有一定的理论基础,且计算简单,在多变量水文分析中得到广泛应用。对于二维随机变量,根据 Sklar 定理:设连续随机变量 $X、Y$ 的边缘分布函数分别是 F_X 和 F_Y , 变量 $X、Y$ 的联合分布函数为 $F(x, y)$, 则存在唯一 Copula 函数 $C_\theta(u, v)$ 使得:

$$F(x, y) = C_\theta(F_X(x), F_Y(y)), \forall x, y \quad (1)$$

式中: $C_\theta(u, v)$ 为 Copula 函数; θ 为对应 Copula 函数参数,其与 Kendall 秩相关系数 τ 相关,秩相关系数 τ 计算式如下:

$$\tau = (C_n^2)^{-1} \sum_{i < j} \text{sign}[(x_i - x_j)(y_i - y_j)] \quad (2)$$

式中: sign 是符号函数,当 $(x_i - x_j)(y_i - y_j) > 0$ 时, $\text{sign} = 1$; 当 $(x_i - x_j)(y_i - y_j) < 0$ 时, $\text{sign} = -1$; 而 $(x_i - x_j)(y_i - y_j) = 0$ 时, $\text{sign} = 0$ 。

2.2.2 边缘分布的确定

干旱严重程度一般用皮尔逊 $\hat{0}$ 型分布函数进行拟合^[14-15],本文以皮尔逊 $\hat{0}$ 型分布函数作为南水北调中线工程水源区和海河受水区 SPEI 指数的边缘分布函数,其概率密度函数为:

$$f(x) = \frac{\beta^\alpha}{\Gamma(\alpha)} (x - a_0)^{\alpha-1} e^{-\beta(x-a_0)}, (x > a_0) \quad (3)$$

式中: Γ 为伽玛函数; $\alpha、\beta、a_0$ 分别为皮尔逊 $\hat{0}$ 型分布的形状、尺度和位置参数。本文采用比较成熟的线性矩法估算皮尔逊 $\hat{0}$ 型分布参数,由各区不同时段 SPEI 统计特征值 $E_X、C_V、C_S$ 推求对应的皮尔逊 $\hat{0}$ 型函数分布参数^[17]。

2.2.3 Copula 函数的选择

Copula 函数众多,其中 Archimedean Copula 函数簇在水文气象领域应用较为广泛。本文研究采用了三种常用的 Archimedean Copula 函数,即 Gumbel-Hougaard Copula, Clayton Copula, Frank Copula(见表 1),表 1 同时给出了三种 Copula 函数参数与 Kendall 秩相关系数的关系^[25]。

表 1 3 种常用 Copula 函数
Tab. 1 Three kinds of frequently used Copula functions

Copula 函数	$C(u, v \theta)$	$\tau = g(\theta)$
Gumbel-Hougaard	$\exp\left\{-\left[\left(-\ln u\right)^\theta + \left(-\ln v\right)^\theta\right]^{1/\theta}\right\}$	$1 - \theta^{-1}, \theta \geq 1$
Frank	$\ln\left[1 + \frac{(e^{-\theta u} - 1)(e^{-\theta v} - 1)}{e^{-\theta} - 1}\right]$	$1 - \frac{4}{\theta} \cdot \left[1 - \frac{1}{\theta} \int_0^\theta \frac{t}{e^t - 1} dt\right], \theta > 0$
Clayton	$(u^{-\theta} + v^{-\theta} - 1)^{-1/\theta}$	$\frac{\theta}{\theta + 1}, \theta > 0$

本文分别采用以上 3 种 Archimedean Copula 函数拟合南水北调中线工程水源区与海河受水区 SPEI 的联合分布,并采用 David Huard 等^[20]提出的 Bayesian Copula 函数选择方法对拟合优劣性进行评价。表 2 中给出了 Bayesian Copula 选择评价计算结果,选取权重值最大的 Copula 函数作为联合分布函数,从表中可以看出,Clayton Copula 函数对水源区与海河受水区的汛期和全年 SPEI 的联合分布拟合明显更优,而对非汛期联合分布的拟合较 Frank Copula 函数略差,但是相差不大,最终本文统一选择以 Clayton Copula 函数作为南水北调中线工程水源区与海河受水区 SPEI 的联合分布函数。

表 2 Bayesian Copula 选择计算结果

Tab. 2 The calculation result of Bayesian Copula

Copula 函数	汛期	非汛期	全年
Gumbel-Hougaard	0.101	0.097	0.184
Frank	0.374	0.468	0.297
Clayton	0.524	0.435	0.520

2.3 基于 Copula 理论的干旱遭遇

根据相关文献^[9,12]中 SPEI 干旱等级划分标准,将干旱分为无旱、轻旱、中旱、重旱、特旱等五个等级,各级干旱划分指标见表 3。

本文对南水北调中线工程水源区与海河受水区

表 3 SPEI 干旱等级划分标准

Tab. 3 Drought classification standard of SPEI

等级	类型	SPEI
1	无旱	$SPEI > -0.5$
2	轻旱	$-1.0 < SPEI \leq -0.5$
3	中旱	$-1.5 < SPEI \leq -1.0$
4	重旱	$-2.0 < SPEI \leq -1.5$
5	特旱	$SPEI \leq -2.0$

干旱遭遇概率的确定可以通过如下二维变量联合分布概率计算公式求得^[17]：

$$P(x_1 \leq x < x_2, y_1 \leq y < y_2) = F(x_2, y_2) - F(x_1, y_2) - F(x_2, y_1) + F(x_1, y_1) \quad (4)$$

式中： x_1, x_2 和 y_1, y_2 分别是水源区和受水区两个不同干旱等级的 SPEI 阈值。

3 结果及分析

3.1 各区 SPEI 变化

图 2 给出了南水北调中线工程水源区与海河受水区 1960-2014 年汛期、非汛期及全年 SPEI 指数变化情况。从图中可以看出：水源区非汛期和全年 SPEI 指数均有下降趋势，尤其非汛期从 1996 年开始，其 SPEI 指数一直处于低值 ($SPEI < 0$)，说明水源区在非汛期遭遇干旱的概率较大，可能出现水源区可调水量不足情况，汛期却略有上升趋势，但是趋势并不明显；海河受水区干旱状况明显，其汛期、非汛期的 SPEI 指数长期较低，而全年 SPEI 指数从 1998 年前后开始有一定增加趋势，但总体上汛期、非汛期及全年 SPEI 指数均呈现下降趋势。

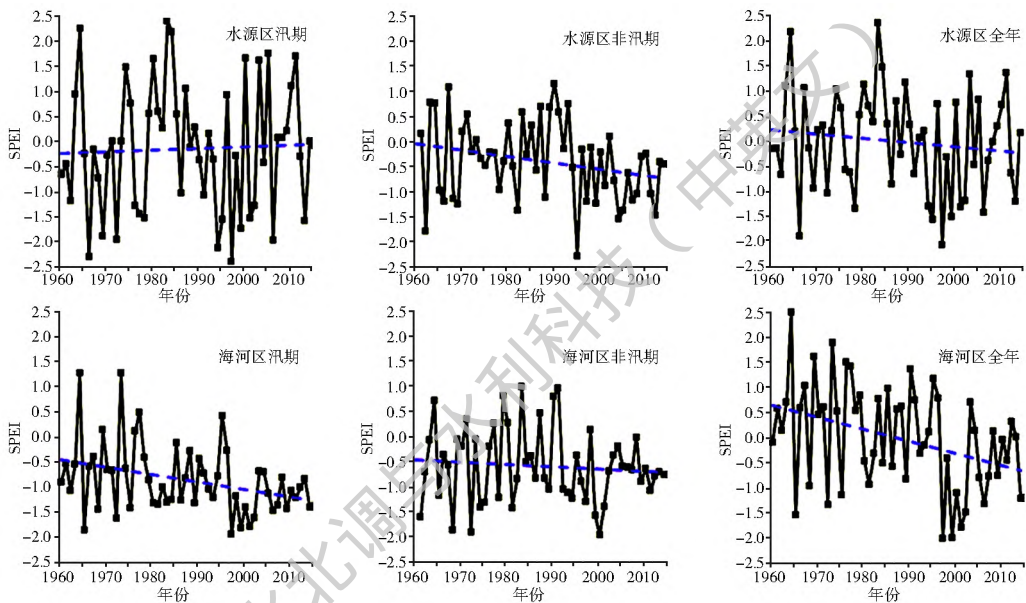


图 2 水源区与海河受水区 SPEI 变化

Fig. 2 The variation of SPEI between the water source area and the Hai River water receiving area

3.2 干旱遭遇分析

3.2.1 历史干旱遭遇分析

基于 Clayton Copula 函数建立南水北调中线工程水源区和海河受水区汛期、非汛期及全年 SPEI

指数联合分布，图 3 绘出了 1960-2014 年水源区与海河受水区各时段 SPEI 指数的联合分布等值线图（从左至右分别是汛期、非汛期、全年），其中空心圆点代表实际计算 SPEI 值。

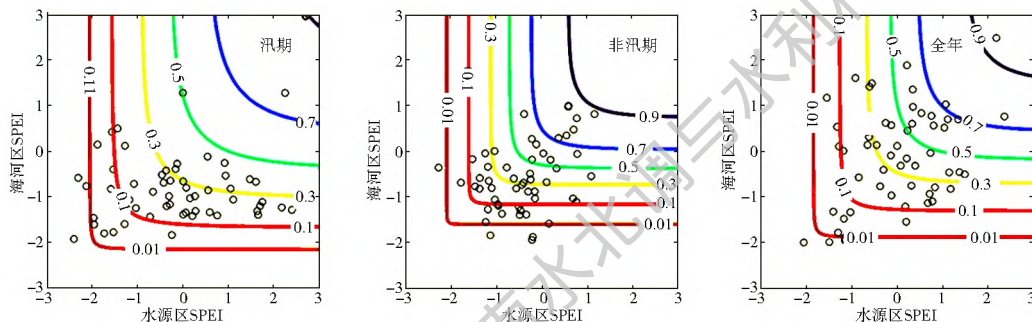


图 3 水源区与海河受水区 SPEI 联合分布等值线

Fig. 3 Contours of SPEI joint distribution between the water source area and the Hai River water receiving area

根据前面给出的二维变量联合分布概率计算公式(4),并结合干旱分级指标,从图3中可以得出不同时段水源区与受水区不同干旱遭遇组合的概率。表4列出了水源区和海河受水区1960-2014年干旱遭遇情况,其中水源区与海河受水区分别用南、北表示。当南北同时发生干旱($SPEI \leq -0.5$),水源区与海河受水区可能同时缺水,造成工程无水可调,而对工程的正常运行带来影响,尤其当南北同时发生重旱($SPEI \leq -1.5$)情况时,即考虑南北遭遇同旱的极端情况,水源区与海河受水区均将出现严重缺水的状况,可以看成是对工程运行最不利的情况。当水源区和受水区干旱情况异步(南早北无旱或者南无旱北旱),或者南北同时无旱时,工程面临的调水风险会相对较小。

表4 1960-2014年水源区与受水区干旱遭遇概率

Tab. 4 Encounter probability of drought between the water source area and the water receiving area in 1960-2014 (%)

干旱遭遇组合	汛期	非汛期	全年
南北同重旱	7.35	3.59	4.39
南北同旱	26.62	38.22	23.38
南北同无旱	37.27	35.05	48.6
南早北无旱	16.46	13.66	13.51
南无旱北旱	19.45	12.87	14.31

由表4看出,工程水源区与海河受水区汛期、非汛期及全年同时发生干旱的概率分别是26.62%,38.22%和23.38%,而同时发生无旱的概率分别是37.27%,35.05%和48.6%,相较而言,汛期及全年同时发生无旱的概率要大于同时发生干旱的概率,而非汛期同时发生无旱的概率小于同时发生干旱概率;其中汛期、非汛期及全年同时发生重旱的概率分别是7.35%,3.59%和4.39%,说明工程汛期遭遇运行最不利情况概率较大;同时工程水源区与受水区发生干旱异步(南早北无旱或者南无旱北旱)的概率分别为35.91%,26.53%及27.82%。

3.2.2 气候变化对干旱遭遇的影响

气候变化不仅会影响南水北调中线工程水源区和海河受水区降水、温度大小的变化,同时还会引起区域之间干旱遭遇情况的变化。本文利用CMIP5数据,考虑未来RCP4.5、RCP8.5两种排放情景下,分别研究未来2020-2060年和2060-2100年水源区与海河受水区干旱遭遇概率变化。表5给出了未来气候变化情景下水源区与海河受水区汛期、非汛期及全年干旱遭遇频率的变化。

表5 气候变化下水源区与受水区干旱遭遇频率变化

Tab. 5 Changes of drought encounter probability between the water source area and the water receiving area under climate change (%)

		情景	时间	汛期	非汛期	全年
南北同重旱	RCP4.5		现状	7.35	3.59	4.39
			2020-2060	8.69	6.26	6.48
			2060-2100	7.93	7.07	5.69
	RCP8.5		2020-2060	9.05	6.83	7.21
			2060-2100	8.07	7.22	6.45
			现状	26.62	38.22	23.38
南北同旱	RCP4.5		2020-2060	31.05	37.39	28.56
			2060-2100	32.72	38.49	26.97
			2020-2060	29.61	38.42	26.87
	RCP8.5		2060-2100	31.39	37.77	28.05

由表5可适,南水北调中线工程水源区与海河受水区干旱遭遇在未来情景下具有如下规律:就汛期而言,水源区与受水区同重旱的概率增加0.58%~1.7%,而同时发生干旱的概率增加2.99%~6.1%,增大较明显;对于非汛期,南北遭遇同重旱的概率增加较大,未来概率达6.26%~7.22%,几乎为现状概率的两倍,而同时发生干旱的概率变化不大,但是还是处于较高值,可以看出非汛期将面临比较严重的缺水状况,需要配套其它措施进行联合调度以保证工程正常运行;而就全年而言,与现状相比,南北同重旱、南北同旱的概率均有一定程度的增加,同时发生重旱的概率为5.69%~7.21%,同旱的概率为26.87%~28.56%。

研究表明,以SPEI指数为干旱指标计算的南水北调工程水源区与海河受水区同时遭遇干旱及严重干旱的概率均增大,这与陈峰^[1]、刘小莽^[2]等以降水、SPI作为指标得出的研究结果基本一致,这说明用Copula函数描述南水北调中线工程水源区与海河受水区SPEI指数联合分布是可行的。另外,基于SPEI指数的干旱指标同时考虑了降水和温度的影响,而考虑到全球气候变暖的影响,区域气温增加幅度大,计算得到的干旱遭遇概率会相对较高,但理论上应该更接近实际情况。

4 结论

本文以具有更好代表性的SPEI指数作为干旱指标,同时考虑降水和温度对干旱过程的影响,运用Copula理论建立了南水北调中线工程水源区与海河受水区汛期、非汛期及全年SPEI的联合分布,并基于CMIP5未来气候模式数据,用所建联合分布研

究了气候变化情景下,南水北调中线工程水源区与海河受水区干旱遭遇概率的变化情况。研究表明南水北调中线工程水源区与海河受水区干旱遭遇概率将增加,研究结果一定程度上能为未来南水北调中线工程的运行提供理论参考。

但是,目前的气候变化研究还存在很大程度上的不确定性,未来气候变化的预测水平严重依赖于气候模式及排放情景,对气候变化对水资源系统影响的研究还需要加强。同时,为保证调水工程的安全运行,以更大的发挥工程调水效益,还需要研究相关气候变化影响下的适应性对策,并考虑同其它调蓄工程联合运行,增强对水资源的科学管理。

参考文献(References):

- [1] 陈锋,谢正辉.气候变化对南水北调中线工程水源区与受水区降水丰枯遭遇的影响[J].气候与环境研究,2012(2):139-148. (CHEN F, XIE Z H. Effects of climate change on 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]. Climatic and Environmental Research, 2012(2): 139-148. (in Chinese)) DOI: 10.7878/j.issn.1006-9585.2011.10097.
- [2] LIU X, LUO Y, YANG T, et al. Investigation of the probability of concurrent drought events between the water source and destination regions of China's Water Diversion Project[J]. Geophysical Research Letters, 2015, 42(20): 94-102. DOI: 10.1002/2015GL065904.
- [3] DAI A. Increasing drought under global warming in observations and models[J]. Nature Climate Change, 2013, 3(1): 52-58. DOI: 10.1038/nclimate1633.
- [4] 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(5):523-532. (ZHENG H X, LIU C M. Analysis on a synchronism-synchronism of regional precipitation in planned south to north water transfer areas[J]. Acta Geographica Sinica, 2000(5): 523-532. (in Chinese)) DOI: 10.11821/xb200005002.
- [5] 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].华北水利水电大学学报(自然科学版),2007,28(1):8-11. (HAN Y P, JIANG R F, RUAN B Q. 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)) DOI: 10.3969/j.issn.1002-5634.2007.01.003.
- [6] 张利平,秦琳琳,张迪,等.南水北调中线水源区与海河受水区旱涝遭遇研究[J].长江流域资源与环境,2010(8):940-945. (ZHANG L P, QIN L L, ZHANG D, et al. Drought-waterlogging encounter probability research between the water source area and water receiving areas in the middle route of south to north water transfer project[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2010(8): 940-945. (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(10):1178-1185. (YAN B W, GUO S L, XIAO Y. 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(10): 1178-1185. (in Chinese)) DOI: 10.3321/j.issn:0559-9350.2007.10.005.
- [8] DAI A G. Drought under global warming: a review[J]. Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change, 2011, 2(1): 45-65.
- [9] VICENTE-SERRANO S M, BEGUERÍA S, LÓPEZ-MORENO J L. A multi-scalar drought index sensitive to global warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index-SPEI[J]. Journal of Climate, 2010, 23(7): 1696-1718. DOI: 10.1175/2009JCLI2909.1.
- [10] STONE R, JIA H. Going against the flow[J]. Science, 2006, 313, 1034-1037. DOI: 10.1126/science.313.5790.1034.
- [11] PALMER W C. Meteorological Drought[M]. Washington DC: Department of Commerce Weather Bureau, 1965.
- [12] 苏宏新,李广超.基于SPEI的北京低频干旱与气候指数关系[J].生态学报,2012,32(17):5467-5475. (SU H X, LI G Q. Low-frequency drought variability based on SPEI in association with climate indices in Beijing[J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(17): 5467-5475. (in Chinese)) DOI: 10.5846/stxb201111071684.
- [13] NELSEN R B. An Introduction to Copulas[M]. New York: Springer, 1999.
- [14] 熊立华,郭生练,肖义,等. Copula 联结函数在多变量水文频率分析中的应用[J].武汉大学学报:工学版,2005,38(6):16-19. (XIONG L H, GUO S L, XIAO Y, et al. Application of copulas to multivariate hydrological frequency analysis[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2005, 38(6): 16-19. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1671-8844.2005.06.004.
- [15] SHIAU J T. Fitting Drought Duration and Severity with Two-Dimensional Copulas[J]. Water Resources Management, 2006, 20(5): 795-815. DOI: 10.1007/s11269-005-9008-9.
- [16] MATHIER L, PERREAULT L, BOBÉ E B, et al. The use of geometric and gamma related distributions for frequency analysis of water deficit[J]. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 1992, 6(4): 239-254. DOI: 10.1007/BF01581619.
- [17] 魏宗舒. 概率论与数理统计教程[M]. 北京: 高等教育出版社, 2003, 118-119. (WEI Z S. 2003. Probability and Mathematical Statistics[M]. Beijing: Higher Education Press, 2003, 118-119. (in Chinese))
- [18] 肖名忠,张强,陈晓宏.基于多变量概率分析的珠江流域干旱特征研究[J].地理学报,2012(1):83-92. (XIAO M Z, ZHANG Q, CHEN X H. Spatial-temporal patterns of drought risk across the Pearl River Basin[J]. Journal of Geographical Sciences, 2012(1): 83-92. (in Chinese)) DOI: 10.11821/xb201201009.

(下转第194页)

- (Huaihe Water Conservancy Commission of the Ministry of Water Resources, Haihe River Water Conservancy Commission of the Ministry of Water Resources. Brief programming introduction of the East Route in the South to North Water Diversion Project (2001) [J]. China Water Resources, 2003 (1): 43-47. (in Chinese))
- [14] 水利部长江水利委员会. 南水北调中线工程规划(2001年修订)简介[J]. 中国水利, 2003(1): 48-55. (Changjiang Water resources Commission of the Ministry of Water Resources. Brief programming introduction of the Middle Route in the South to North Water Diversion Project (2001) [J]. China Water Resources, 2003(1): 48-55. (in Chinese))
- [15] CHENG W C, HSU N S, CHENG W M, et al. A flow path model for regional water distribution optimization[J]. Water Resources Research, 2009, 45(9): 706-715.
- [16] HAROU J J, PULIDO-VELAZQUEZ M, ROSENBERG D E, et al. Hydro economic models: concepts, design, applications, and future prospects[J]. Journal of Hydrology, 2009, 375(3-4): 627-643.
- [17] 李良县, 甘泓, 汪林, 等. 水资源经济价值计算与分析[J]. 自然资源学报, 2008, 23(3): 494-499. (LI L X, GAN H, WANG L, et al. Calculation and analysis of the economic value of water resource[J]. Journal of Natural Resources, 2008, 23(3): 494-499. (in Chinese))
- [18] 甘泓, 汪林, 倪红珍, 等. 水经济价值计算方法评价研究[J]. 水利学报, 2008, 39(11): 1160-1166. (GAN H, WANG L, NI H Z, et al. Assessment on methods for calculating economic value of water[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 39(11): 1160-1166. (in Chinese)) DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.2008.11.018.
- [19] 张平. 南水北调工程受水区资源优化配置研究[D]. 南京: 河海大学, 2006. (ZHANG P. Water resources optimal allocation of the water imported areas in the South to North Water Transfer Project [D]. Nanjing: Hohai University, 2006. (in Chinese))
- [20] 胡周汉, 方国华, 马兆龙, 等. 南水北调东线一期输水工程水量损失计算方法及应用[J]. 水电能源科学, 2016, 34(8): 45-49. (HU Z H, FANG G H, MA Z L, et al. Calculation and application of water losses in the first phase in East Route of South to North Water Diversion Project [J]. Water Resources and Power, 2016, 34(8): 45-49. (in Chinese))
- [21] 黄会勇. 南水北调中线总干渠水量调度模型研究及系统开发[D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2013. (HUANG H Y. Study of Water supply and control model for Middle Route Main Canal of South to North Water Transfer First Stage Project and software system development [D]. Beijing: China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2013. (in Chinese))
- [22] 杨桂元, 宋马林. 影子价格及其在资源配置中的应用研究[J]. 运筹与管理, 2010, 19(5): 39-44. (YANG G Y, SONG M L. Shadow price and its applied research in the allocation of resources [J]. Operations Research and Management Science, 2010, 19(5): 39-44. (in Chinese))
- [23] 毛春梅, 袁汝华. 黄河流域水资源价值的计算与分析[J]. 中国人口·资源与环境, 2003, 13(3): 25-29. (MAO C M, YUAN R H. Calculation and analysis of the theory value of water resources of Huanghe River [J]. China Population, Resources and Environment, 2003, 13(3): 25-29. (in Chinese))
- [24] 蒋剑勇. 水资源价值模型综述[J]. 水利水电科技进展, 2005, 25(1): 61-63. (JIANG J Y. Comments on models of water resources value [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2005, 25(1): 61-63. (in Chinese))
- [25] 彭晓明, 王红瑞, 董艳艳, 等. 水资源稀缺条件下的水资源价值评价模型及其应用[J]. 自然资源学报, 2006, 21(4): 670-675. (PENG X M, WANG H R, DONG Y Y, et al. Evaluation model of water resources value under the condition of water shortage and its application [J]. Journal of Natural Resources, 2006, 21(4): 670-675. (in Chinese))
- [26] 张立平, 胡志芳, 秦琳琳, 等. 2050年前南水北调中线工程水源地地表径流的变化趋势[J]. 气候变化研究进展, 2010(6): 391-397. (ZHANG L P, HU Z F, QIN L L, et al. Surface runoff change in the water source area for the middle route project of south to north water transfer before 2050 [J]. Advances in Climate Change Research, 2010(6): 391-397. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1673-1719.2010.06.001.
- [27] SINGH V P, ZHANG L. Bivariate Flood Frequency Analysis Using the Copula Method [J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2006, 11(2): 150-164. DOI: 10.1061/(ASCE)1084-0699(2006)11:2(150).
- [28] HOSKING J R M. L-Moments: Analysis and estimation of distributions using linear combinations of order statistics [J]. Journal of the Royal Statistical Society, 1990, 52(1): 105-124.
- [29] GENEST C, RIVEST L P. Statistical Inference Procedures for Bivariate Archimedean Copulas [J]. Journal of the American Statistical Association, 1993, 88(423): 1034-1043. DOI: 10.2307/2290796

(上接第68页)

- [19] XU K, YANG D, YANG H, et al. Spatial temporal variation of drought in China during 1961-2012: A climatic perspective [J]. Journal of Hydrology, 2015, 526(3): 253-264. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2014.09.047.
- [20] HUARD D, VIN G, FAVRE A C. Bayesian copula selection [J]. Computational Statistics & Data Analysis, 2006, 51(51): 809-822. DOI: 10.1016/j.csda.2005.08.010.
- [21] 张岳军, 郝智文, 王雁, 等. 基于 SPEI 和 SPI 指数的太原多尺度干旱特征与气候指数的关系 [J]. 生态环境学报, 2014(9): 1418-1424. (ZHANG Y J, HAO Z W, WANG Y, et al. Multi-scale characteristics of drought based on SPEI and SPI in association with climate index in Taiyuan [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2014(9): 1418-1424. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1674-5906.2014.09.002.
- [22] 张利平, 胡志芳, 秦琳琳, 等. 2050年前南水北调中线工程水源地地表径流的变化趋势 [J]. 气候变化研究进展, 2010(6):