

自然降水条件下关中平原农业水资源短缺风险分析

卢泽华^{1,3}, 王君勤²

(1.四川省农田水利局, 成都 610015; 2.四川省水利科学院研究院, 成都 610072; 3.四川大学 水利水电学院, 成都 610041)

摘 要:为有效提升干旱半干旱地区农业水资源管理水平,基于关中平原 6 个代表性站点 1962—2016 年逐日气象资料,计算关中东部和关中西部年有效降水量(P_{ey})、年作物需水量(ET_{cy})及其边缘分布函数,运用 Copula 函数构建了 P_{ey} 和 ET_{cy} 的二维联合概率分布模型,评估了关中平原农业水资源短缺风险。结果表明:关中东部的 P_{ey} 和 ET_{cy} 分别服从对数正态分布和广义极值分布,关中西部 P_{ey} 和 ET_{cy} 分别服从伽马分布和广义极值分布,关中东部的农业水资源短缺程度明显高于关中西部;关中东部、关中西部均表现为当 ET_{cy} 处于高水平($p \leq 37.5\%$)或 P_{ey} 处于低水平($p \geq 62.5\%$)时,自然降水和作物需水处于不协调状况的可能性较高,供水不能满足需水要求的概率较大,重现期较短(1~4 a),农业水资源短缺风险较高,建议关中平原建立与水资源承载能力相适应、与节水增收目标相配套的种植业结构。

关键词:关中平原; Copula 函数; 有效降水量; 作物需水量; 农业水资源短缺

中图分类号: P426.6; S274.3

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2021)06-0364-07

Risk Analysis of Shortage of Agricultural Water Resources in Guanzhong Plain Under Natural Precipitation

LU Zehua^{1,3}, WANG Junqin²

(1.Sichuan Provincial Bureau of Farmland and Water Resources, Chengdu 610015, China; 2.Research Institute of Sichuan Academy of Water Resources, Chengdu 610072, China; 3.College of Water Resource & Hydropower, Sichuan University, Chengdu 610041, China)

Abstract: In order to effectively improve the management level of agricultural water resources in arid and semi-arid regions, we calculated the annual effective precipitation (P_{ey}) and annual crop water requirement (ET_{cy}) with the marginal distribution function of the eastern and western Guanzhong Plains based on the daily meteorological data from six representative stations in the Guanzhong Plain from 1962 to 2016. We mainly used the Copula function to construct a two-dimensional joint probability distribution model of P_{ey} and ET_{cy} to assess the risk of shortage of agricultural water in the Guanzhong Plain. The results show that: P_{ey} and ET_{cy} in the eastern part of Guanzhong followed the lognormal distribution and generalized extreme value distribution, respectively, and the P_{ey} and ET_{cy} in the western part of Guanzhong followed the gamma distribution and generalized extreme value distribution, respectively; the shortage of agricultural water resources in the east of Guanzhong was obviously higher than that in the west of Guanzhong; when ET_{cy} was at a high level ($p \leq 37.5\%$) or P_{ey} was at a low level ($p \geq 62.5\%$) in eastern Guanzhong and western Guanzhong, there was a high probability that the natural precipitation and crop water demand were in an uncoordinated state, and the return period was short (1~4 years), the probability that the water supply could not meet the water demand was greater, and the risk of agricultural water shortage was higher. The research results can provide an important basis for the adjustment of crop planting structure. It is suggested that the cropping structure that is compatible with the carrying capacity of water resources and the goal of saving water and increasing income in the Guanzhong Plain should be established.

Keywords: Guanzhong Plain; Copula function; effective precipitation; crop water demand; agricultural water resources shortage

收稿日期: 2020-09-25

修回日期: 2020-11-09

资助项目: 四川省水科院“四川省东风渠供水区作物需水规律与灌溉制度研究与示范”(SKY-2020-SJZX-16)

第一作者: 卢泽华(1986—), 男, 河北藁城人, 工程师, 硕士研究生, 研究方向为水文水资源管理。E-mail: luzehoo@hotmail.com

通信作者: 王君勤(1973—), 女, 陕西岐山人, 高工, 主要从事节水与水资源管理及相关技术标准、法规、制度等研究。E-mail: 252455821@qq.com

随着全球气候变化和社会经济发展,水资源短缺问题日益严峻,已逐渐成为人类生存与发展的巨额的“生态资源赤字”^[1]。2016 年全国用水总量 6 040.20 亿 m³,其中农业用水(3 768.00 亿 m³)占比 62.38%,灌溉用水占农业用水的 90%~95%,农业是我国的用水大户^[2]。我国农业水资源和农业水管理面临巨大挑战,对水资源系统进行有效的风险管理已成为水资源科学发展的必然趋势^[3]。农业水资源短缺风险评估作为农业水资源风险管理的基础,可为区域水资源优化配置提供基础依据,对区域种植结构调整,干旱风险应对具有重要意义^[4]。

水资源短缺风险是指在特定的时空环境下,由于来水和用水存在的不确定性,使区域水资源系统发生供水短缺的概率及由此产生的损失^[5]。水资源系统是一个复杂的大系统,广泛存在随机性和模糊性^[6]。目前,对水资源短缺风险的研究大多从随机模型或模糊模型的角度探讨水资源短缺风险问题。罗军刚等^[3]构建了基于熵权的水资源短缺风险评价模型;王红瑞等^[6]构建了基于模糊概率的水资源短缺风险评价模型;Feng 等^[7]构建了基于信息扩散理论的水资源短缺风险评价模型;Hsieh 等^[8]构建了基于多站点径流时空随机模拟的灌溉用水短缺风险评价模型;Moursi 等^[9]构建了基于气候响应函数和大气环流模式的未来气候变化下农业水资源短缺风险评价模型。以上模型具有较好的数理基础,评价指标意义明确,但没有充分考虑水资源系统组分间的非线性关系,无法对区域农业供水量和作物需水量之间复杂的非线性关系定量描述。

基于变量间非线性相关关系构建的 Copula 函数能独立于随机变量的边缘分布反映变量间的相关性,可构造任意边缘分布的联合分布函数,且在转换过程中不会改变原始随机变量,在干旱风险分析、洪水遭遇风险分析方面已得到广泛应用^[10-11],也有学者利用 Copula 函数进行水资源短缺风险分析研究^[12-13],如丁志宏等^[12]构建了基于 Copula 函数的宁夏卫宁灌区降水量(P)和参考作物腾发量(ET_0)年际联合分布模型;Zhang 等^[13]构建了基于 Copula 函数的河南省陆浑灌区自然降水条件下的水资源短缺风险模型。然而有效降水量(P_e)和作物需水量(ET_c)是描述灌溉系统的基本变量^[14],二者的演变特征与匹配程度直接影响农业水资源管理策略,比 P 和 ET_0 更直观反映自然降水条件下农业水资源的供需平衡。关中平原地处内陆、远离海洋,其年降水量仅 500~750

mm,对水资源短缺的响应尤为敏感,然而目前对关中平原 P_e 和 ET_c 相关关系的研究较少,且大多是阐释其年内、年际变化和简单的相关关系^[15-16],对其非线性耦合关系还未报道。本文主要在现有研究基础上,首次运用 Copula 函数构建关中平原 P_e 和 ET_c 的二维联合概率分布模型,应用该模型分析 P_e 和 ET_c 的条件联合概率和条件回归周期,为关中平原灌溉农业发展规划制定、作物种植制度优化及区域农业水资源管理等提供理论依据。

1 研究区概况与数据来源

关中平原(106°48′—110°36′E, 33°35′—35°51′N)地处陕西省中部的渭河流域,介于秦岭和渭北北山之间,西起宝鸡,东至潼关,长约 350 km,平均海拔约 500 m,面积约 3.6 万 km²,属暖温带半干旱气候,是陕西省粮棉油主要产区^[17-18]。根据降水量与气候特征,关中平原可分为关中东部和关中西部^[19-20],其中关中东部年降水量 500~650 mm,关中西部年降水量 550~700 mm。关中平原粮食生产以一年两熟的冬小麦和夏玉米轮作为主,冬小麦一般于 10 月初播种,翌年 6 月上旬收获,夏玉米在冬小麦收获后即时播种,当年 9 月底收获^[21]。本文以冬小麦播种—夏玉米收获(10 月—翌年 9 月底)作为一个单位年,计算单位年有效降水量(P_{ey})和作物需水量(ET_{cy})。

结合资料系列的完整性,选取关中平原 6 个代表性站点 1962—2016 年 56 a 逐日气象数据作为基本资料,各站点气象概况见表 1。气象数据来源于中国气象科学数据共享服务网(<http://data.cma.cn/>),包括日最高、最低和平均气温(T_{max} , T_{min} , T_{mean})、相对湿度(RH)、日照时数(n)和距地面 2 m 高处的风速 u_2 (计算时采用 FAO 推荐方法由 10 m 风速换算得出风速 u_2),以及站点经纬度和海拔高度。少数的缺失数据(占全部数据的 0.56%)采用线性内插法和多年平均值法补全。

表 1 关中平原气象站点概况

站点	区站号	经度/ (°)	纬度/ (°)	海拔/ m	平均 温度/℃	相对 湿度/%	年降 水量/mm
凤翔	57025	107.38	34.52	781.10	11.81	69.47	606.65
永寿	57030	108.15	34.70	994.60	11.20	65.73	580.05
武功	57034	108.22	34.25	447.80	13.39	70.99	597.01
蒲城	53948	109.58	34.95	499.20	13.75	61.62	519.75
耀县	57037	108.98	34.93	710.00	12.74	61.35	546.63
秦都	57048	108.72	34.40	472.80	13.20	69.96	515.88

注:数据起止年份为 1962—2016 年,平均温度、相对湿度、年降水量均为 56 a 平均值。

2 研究方法

2.1 反距离权重法

反距离权重法 IDW (inverse distance weighted) 是一种充分考虑各因素之间地域性联系的空间展布方法,因其原理简便,结果精确,已被广泛应用^[22]。关中平原地形地貌复杂,不同站点海拔差异明显,所以直接将区域内各站点 P_{ey} 和 ET_{cy} 取平均或选择典型站点来代表区域 P_{ey} 和 ET_{cy} 具有明显局限性。为增强选择站点的代表性,本文将关中东部和关中西部各站点经度、纬度、海拔做平均,得到 2 个虚拟站点,根据反距离权重法分别计算各站点对应虚拟站点的权重,将各站点气象因子乘以权重后相加,得到 2 个虚拟站点 56 a 逐日气象资料,再计算 2 个虚拟站点的 P_{ey} 和 ET_{cy} ,分别代表关中东部和关中西部的 P_{ey} 和 ET_{cy} ,权重计算公式如下:

$$r_i = \sqrt{(x_i - x_m)^2 + (y_i - y_m)^2 + (z_i - z_m)^2} \quad (1)$$

$$w_i = \frac{1}{r_i^2} / \sum_{i=1}^n \frac{1}{r_i^2} \quad (2)$$

式中: x_i, y_i, z_i 分别为各站点的经度(°)、纬度(°)和海拔(m); x_m, y_m, z_m 分别为虚拟站点的经度、纬度、海拔; r_i 为第 i 个站点到虚拟站点的距离; n 为区域站点个数; w_i 为第 i 个站点的权重。

2.2 有效降水量(P_{ey})和作物需水量(ET_{cy})

关中平原 P_{ey} 的估算参考段爱旺^[23]的研究成果, ET_{cy} 采用单作物系数法计算^[17]。其中,关中平原冬小麦和夏玉米生育期的划分及 K_c 的选取参考康绍忠^[17]和时学双等^[19]的研究成果。

2.3 构建 P_{ey} 和 ET_{cy} 的边缘分布函数

采用 Copula 函数进行 P_{ey} 和 ET_{cy} 2 个特征变量的联合之前,首先要确定其边缘分布函数,同时要考虑变量间的相关性。设 X 和 Y 分别代表 P_{ey} 和 ET_{cy} ,其边缘分布函数分别为 $F_X(x)$ 和 $F_Y(y)$,选用常见的 5 种单变量分布函数(正态分布、伽马分布、对数正态分布、广义极值分布及韦尔布分布)^[24-25] 分别对其进行拟合,利用 K-S 检验确立最优边缘分布函

$$\begin{cases} F_{Y_i|x_f}(X, Y_i) = P(Y_i \geq y | X \geq x_{p_f}) = [1 - F_X(x_{p_f}) - F_Y(y) + F(x_{p_f}, y)] / [1 - F_X(x_{p_f})] \\ F_{Y_i|x_p}(X, Y_i) = P(Y_i \geq y | x_{p_k} < X < x_{p_f}) = [F(x_{p_k}, y) - F(x_{p_f}, y) + F_X(x_{p_f}) - F_X(x_{p_k})] / [F_X(x_{p_f}) - F_X(x_{p_k})] \\ F_{Y_i|x_k}(X, Y_i) = P(Y_i \geq y | X \leq x_{p_k}) = [F_X(x_{p_k}) - F(x_{p_k}, y)] / F_X(x_{p_k}) \end{cases}$$

$$\begin{cases} T_{Y_i|x_f}(X, Y_i) = 1 / F_{Y_i|x_f}(X, Y_i) \\ T_{Y_i|x_p}(X, Y_i) = 1 / F_{Y_i|x_p}(X, Y_i) \\ T_{Y_i|x_k}(X, Y_i) = 1 / F_{Y_i|x_k}(X, Y_i) \end{cases} \quad (5)$$

数。同时采用 Kendall 秩相关系数(τ)、Spearman 秩相关系数(ρ)和 Pearson 相关系数(γ)度量关中东部和关中西部 1962—2016 年 P_{ey} 和 ET_{cy} 的相关性。本文中单变量分布函数及联合分布函数中所含参数均采用极大似然法进行估计^[24]。

2.4 构建 P_{ey} 和 ET_{cy} 的 Copula 联合概率分布

Copula 函数主要基于变量间相关性进行边缘变量联合,根据其定义可知 P_{ey} 和 ET_{cy} 的联合分布函数 $F(x, y)$ 为:

$$F(x, y) = P(X \leq x, Y \leq y) = C[F_X(x), F_Y(y)] \quad (3)$$

常见的 Copula 函数有 Archimedean Copula, 椭圆 Copula, Plackett Copula 以及经验 Copula 函数。其中, Archimedean Copula 函数结构简单, 计算简便, 可以构造出形式多样、适应性强的多变量联合分布函数, 能满足多领域应用要求, 在实际应用中占有重要地位。目前常用的 Archimedean Copula 函数有 Frank, Ali-Mikhail-Haq, Clayton 和 Gumbel-Hougaard Copula 函数, 常见的相关性测度 τ 与 Archimedean Copula 函数的参数 θ 之间保持着一种对应关系, 具体形式见参考文献^[11]。其中 τ 是可以描述变量之间非线性相关性的 Kendall 相关系数。由参考文献中 Copula 函数参数 θ 和 Kendall 秩相关系数 τ 间关系式可知: Clayton Copula 和 Gumbel-Hougaard Copula 函数秩相关系数 τ 的范围为 $\tau > 0$, Ali-Mikhail-Haq Copula 函数秩相关系数 τ 的范围为 $-0.1817 \leq \tau \leq 0.3333$, Frank Copula 函数秩相关系数 τ 的范围为 $\tau \in R$ 。本文基于 P_{ey} 和 ET_{cy} 两个特征变量, 分别采用参考文献中 Copula 函数拟合这两个变量的联合分布函数, 并采用 K-S 检验对 Copula 函数进行拟合检验^[10]。

2.5 基于 P_{ey} 和 ET_{cy} 的条件概率和回归周期

本文主要考虑在 P_{ey} 分别处于高($p \leq 37.5\%$)、中($37.5\% < p < 62.5\%$)、低($p \geq 62.5\%$) 3 种水平条件下, ET_{cy} 大于等于某特定值的概率和回归周期, 计算公式为:

同理, 可以计算 ET_{cy} 分别处于高($p \leq 37.5\%$)、中($37.5\% < p < 62.5\%$)、低($p \geq 62.5\%$) 3 种水平条件下, P_{ey} 小于等于某特定值的概率与其条件重现期。

3 结果与分析

3.1 基于 Copula 函数的农业水资源短缺风险模型

3.1.1 P_{ey} 和 ET_{cy} 的边缘分布函数确定 选用 5 种单变量分布函数分别对关中东部、关中西部 P_{ey} 和 ET_{cy} 进行拟合,利用 K-S 检验确立最优边缘分布函数,K-S 检验结果见表 2,可以看出 5 种单变量分布函数对关中东部、关中西部 P_{ey} 和 ET_{cy} 的拟合优度均达显著水平($\alpha<0.05$)。其中,关中东部拟合最优的分布函数分别是对数正态分布和广义极值分布,关中西部拟合最优的分布函数分别是伽马分布和广义极值分布。

关中东部、关中西部 P_{ey} 和 ET_{cy} 边缘分布函数的具体参数值见表 3,可以看出关中东部 P_{ey} 多年平均值小于关中西部,而 ET_{cy} 多年平均值大于关中东部;关中东部、关中西部均表现为 P_{ey} 的变异系数大于 ET_{cy} ,即 P_{ey} 相比 ET_{cy} 变化更不稳定;关中东部、关中

西部 P_{ey} 和 ET_{cy} 的经验累积概率与理论累积概率拟合较好,均呈极显著相关($\alpha<0.01$),进一步表明边缘分布及参数的选择较为合理。刘俊民等^[20]研究发现关中平原 P 的多年变幅较大,薛璐^[26]研究发现关中平原 ET_0 年际变化具有较好的稳定性,均与本文结果一致。

表 2 5 种分布函数对关中平原 P_{ey} 和 ET_{cy} 拟合的 K-S 检验结果

分布函数	关中东部		关中西部	
	P_{ey}	ET_{cy}	P_{ey}	ET_{cy}
正态分布	0.1117 *	0.0854 *	0.0874 *	0.0514 *
伽马分布	0.0900 *	0.0596 *	0.0805 *	0.0565 *
韦尔布分布	0.1252 *	0.1170 *	0.1024 *	0.0639 *
对数正态分布	0.0810 *	0.0722 *	0.0995 *	0.0604 *
广义极值分布	0.0860 *	0.0563 *	0.0880 *	0.0432 *

注: * 表示拟合优度达显著水平($\alpha<0.05$),表中带下划线的值为各分布函数 K-S 检验统计量 D 的最小值。

表 3 关中平原 P_{ey} 和 ET_{cy} 边缘分布的参数值、经验概率与理论概率的决定系数

子区域	变量	平均/mm	变异系数	参数					R^2	分布函数
				σ	μ	k	α	β		
关中东部	P_{ey}	532.55	0.17	0.168	6.264				0.988 **	$F_x(X)=\frac{1}{0.421}\int_0^x\frac{e^{\frac{-(\ln t-6.264)^2}{0.056}}}{t}dt$
	ET_{cy}	996.90	0.07	69.226	967.030	-0.170			0.994 **	$F_Y(y)=\exp[-(1+\frac{y-875.130}{-185.536})^{3.012}]$
关中西部	P_{ey}	598.78	0.17				33.459	17.896	0.995 **	$F_X(x)=\frac{1}{17.897^{33.459}}\int_0^x t^{32.459}e^{\frac{-1}{17.896}t}dt$
	ET_{cy}	894.95	0.07	61.598	875.130	-0.332			0.991 **	$F_Y(y)=\exp[-(1+\frac{y-875.130}{-185.536})^{3.012}]$

注:表中对数正态分布参数 μ 和 σ 为相应正态分布的均值和标准方差;广义极值分布参数 μ 为位置参数, σ 为尺度参数, k 为形状参数;伽马分布参数 α 为形状参数, β 为尺度参数,* * 表示相关性达极显著水平($\alpha<0.01$)。

3.1.2 P_{ey} 和 ET_{cy} 的二维联合概率分布 采用 Kendall 秩相关系数 τ 分析度量关中东部、关中西部 P_{ey} 和 ET_{cy} 间的相关性,根据 τ 与 θ 的关系,计算 Copula 函数的参数 θ ,并对 Copula 函数进行拟合优度评价,结果见表 5。可以看出关中东部、关中西部 P_{ey} 和 ET_{cy} 均呈负相关, τ 分别为-0.403 和-0.228,因此仅 Frank Copula 函数适合描述 P_{ey} 和 ET_{cy} 间的相关关系。对关中东部、关中西部 P_{ey} 和 ET_{cy} 联合概率分布的 Frank Copula 函数进行 K-S 检验,取显著性水平 $\alpha=0.05$, $n=55$ 时,查柯尔莫格洛夫检验分位数表得出对应分位点 D_0 为 0.179 8,表 5 中检验统计量 D 小于分位点 0.179 8,表明拟合优度均达显著水平($\alpha<0.05$), P_{ey} 和 ET_{cy} 联合分布的经验累积概率与理论累积概率拟合较好, R^2 分别为 0.976,0.987,且均呈极显著相关($\alpha<0.01$),因此关中东部、关中西部

P_{ey} 和 ET_{cy} 的联合分布拟合效果较好,即选用 Frank Copula 函数是合理的。

3.2 农业水资源短缺风险模型应用

关中平原不同频率的 P_{ey} 和 ET_{cy} 阈值见表 5,可以看出关中东部的 P_{ey} 小于关中西部的 P_{ey} ,而关中东部的 ET_{cy} 高于关中西部 ET_{cy} ,因此关中东部的农业水资源短缺程度明显高于关中西部。

表 4 关中平原 P_{ey} 和 ET_{cy} 间的相关性度量及 Copula 函数的参数和拟合优度评价

子区域	Kendall 秩相关系数(τ)	θ	K-S 统计量(D)	R^2
关中东部	-0.403	-4.2025	0.0809 *	0.976 **
关中西部	-0.228	-2.1434	0.0646 *	0.987 **

注: * 表示拟合优度达显著水平($\alpha<0.05$),* * 表示相关性达极显著水平($\alpha<0.01$)

表 5 关中平原不同频率的 P_{ey} 和 ET_{ey} 阈值

子区域	变量/mm	频率/%			
		12.5	37.5	62.5	87.5
关中东部	P_{ey}	637	554	498	433
	ET_{ey}	1084	1015	967	914
关中西部	P_{ey}	719	626	561	482
	ET_{ey}	966	916	876	824

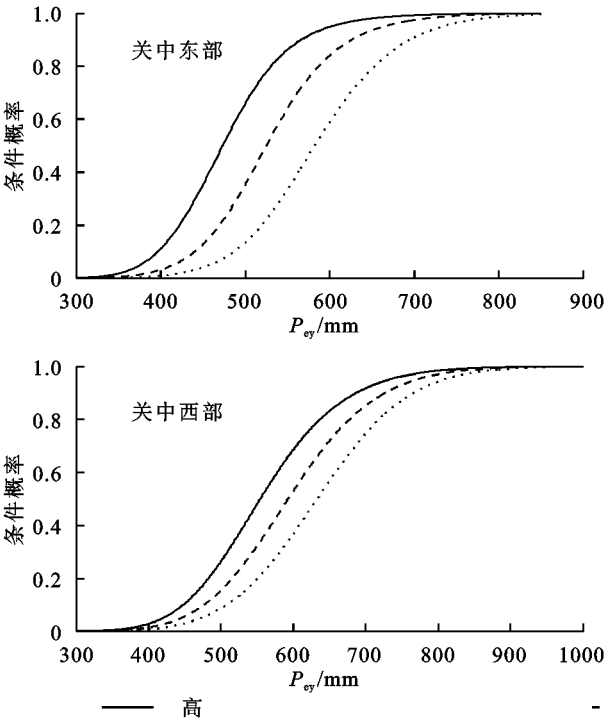


图 1 给出了 ET_{ey} 分别处于高 ($p \leq 37.5\%$)、中 ($37.5\% < p < 62.5\%$)、低 ($p \geq 62.5\%$) 3 种水平的情况下, P_{ey} 不超过某一特定值的条件概率和重现期。图 2 给出了 P_e 分别处于高 ($p \leq 37.5\%$)、中 ($37.5\% < p < 62.5\%$)、低 ($p \geq 62.5\%$) 3 种水平的情况下, ET_{ey} 超过某一特定值的条件概率和重现期。

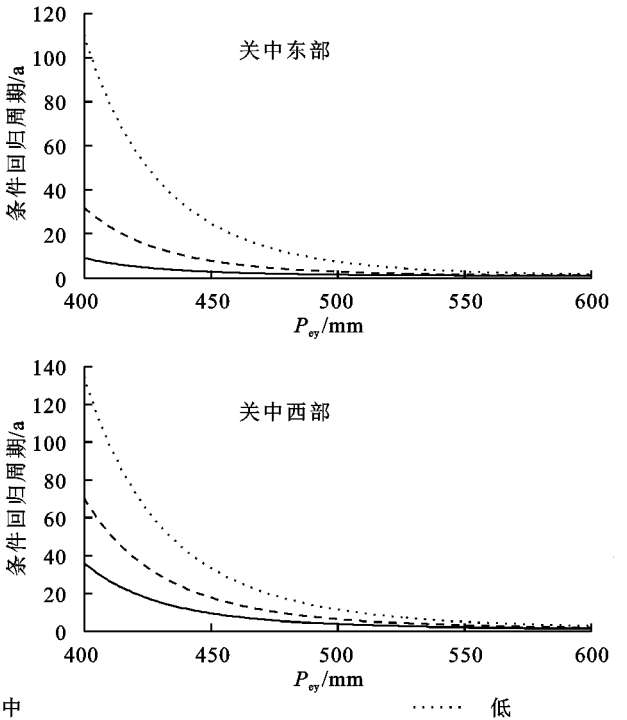


图 1 关中平原年作物需水量 (ET_{ey}) 处于不同水平时年有效降水量 (P_{ey}) 小于等于某特定值的条件概率和条件回归周期

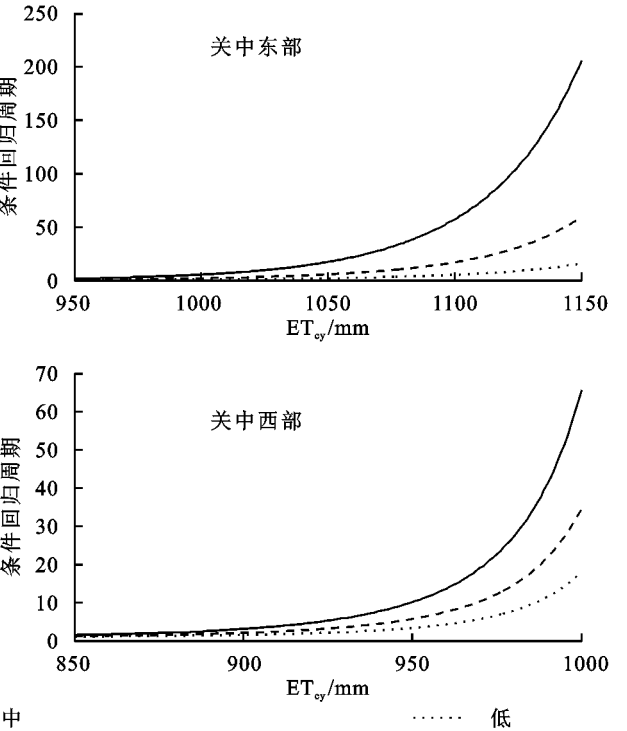
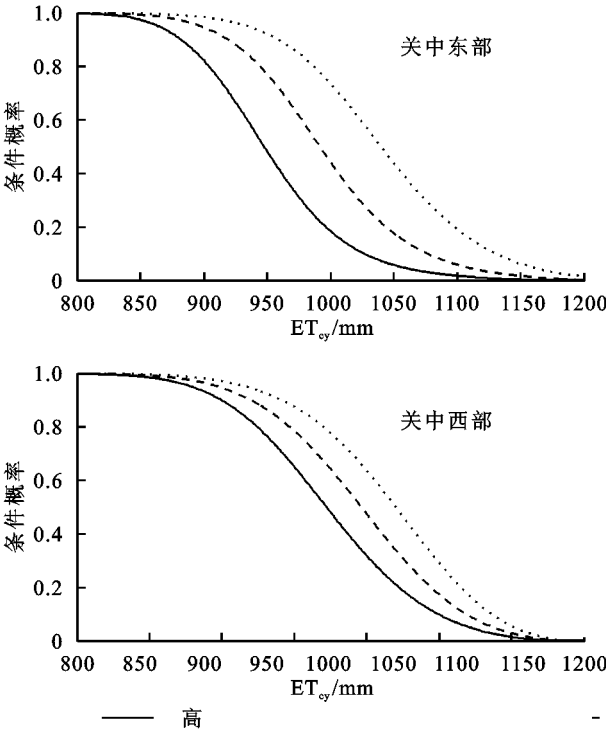


图 2 关中平原年有效降水量 (P_{ey}) 处于不同水平时年作物需水量 (ET_{ey}) 大于等于某特定值的条件概率和条件回归周期

P_{ey} 分别为频率 37.5%, 62.5%, 87.5% 的阈值时, 由图 1 可知, 关中东部的 ET_{ey} 在处于高 ($p \leq 37.5\%$)、中 ($37.5\% < p < 62.5\%$)、低 ($p \geq 62.5\%$) 3 种水平时, $P_e \leq 554$ mm 的条件概率分别为 0.87,

0.66, 0.35, 重现期分别为 1.15, 1.52, 2.86 a; $P_e \leq 498$ mm 的条件概率分别为 0.65, 0.34, 0.13, 重现期分别为 1.54, 2.94, 7.69 a; $P_e \leq 433$ mm 的条件概率分别为 0.25, 0.08, 0.03, 重现期分别为 4.00, 12.50, 33.33 a。中西部的 ET_{cy} 在处于高 ($p \leq 37.5\%$)、中 ($37.5\% < p < 62.5\%$)、低 ($p \geq 62.5\%$) 3 种水平时, $P_e \leq 626$ mm 的条件概率分别为 0.77, 0.63, 0.47, 重现期分别为 1.30, 1.58, 2.13 a; $P_e \leq 561$ mm 的条件概率分别为 0.53, 0.37, 0.23, 重现期分别为 1.89, 2.70, 4.35 a; $P_e \leq 482$ mm 的条件概率分别为 0.20, 0.11, 0.06, 重现期分别为 5.00, 9.09, 16.67 a。

ET_{cy} 分别为频率 62.5%, 37.5%, 12.5% 的阈值时, 由图 2 可知, 关中东部 P_{ey} 分别处于高 ($p \leq 37.5\%$)、中 ($37.5\% < p < 62.5\%$)、低 ($p \geq 62.5\%$) 3 种水平条件下, $ET_{cy} \geq 967$ mm 的条件概率分别是 0.36, 0.68, 0.88, 重现期分别为 2.78, 1.47, 1.14 a; $ET_{cy} \geq 1015$ mm 的条件概率分别是 0.14, 0.36, 0.68, 重现期分别为 7.14, 2.78, 1.47 a; $ET_{cy} \geq 1084$ mm 的条件概率分别是 0.03, 0.21, 0.43, 重现期分别为 33.33, 4.76, 2.33 a。关中西部的 P_{ey} 分别处于高 ($p \leq 37.5\%$)、中 ($37.5\% < p < 62.5\%$)、低 ($p \geq 62.5\%$) 3 种水平条件下, $ET_{cy} \geq 876$ mm 的条件概率为别为 0.46, 0.62, 0.82, 重现期分别为 2.17, 1.61, 1.22 a; $ET_{cy} \geq 916$ mm 的条件概率为别为 0.24, 0.38, 0.54, 重现期分别为 4.17, 2.63, 1.85 a; $ET_{cy} \geq 966$ mm 的条件概率分别为 0.06, 0.12, 0.22, 重现期分别为 16.67, 8.33, 4.55 a。

因此, 关中东部、关中西部均表现为当 ET_{cy} 处于高水平 ($p \leq 37.5\%$) 时, P_{ey} 不超过某一特定值的条件概率最大, 重现期最短; 当 P_{ey} 处于低水平 ($p \geq 62.5\%$) 时, ET_{cy} 超过某一特定值的条件概率最大, 重现期最短, 即当 ET_{cy} 处于高水平 ($p \leq 37.5\%$) 或 P_{ey} 处于低水平 ($p \geq 62.5\%$) 时, 关中平原自然降水和作物需水处于不协调状况的可能性较高, 供水不能满足需水要求的概率较大, 重现期较短 (1~4 a), 农业水资源短缺风险较高。

因此关中东部和关中西部根据该区域的自然降水情况, 有效地调节作物种植结构, 充分利用区域自然资源, 以水资源总量控制作物布局, 以水布局产业发展, 建立与水资源承载力相适应、与节水增收目标相配套的种植业结构。此外应该在考虑关中东部和西部灌区的特点基础之上, 推进农村特色产业区域化布局、规模化发展、产业化经营, 形成产业聚集效应和发展的比较优势, 促进高效节水产业的快速发展。

本文对 P_{ey} 和 ET_{cy} 两个特征变量进行分析只适

用于描述自然降水条件下的农业水资源短缺风险, 增加灌溉用水量、作物产量等特征变量, 可进一步建立针对作物不同生育期不同环境下的农业水资源短缺风险, 自然降水和灌溉水量组合条件下的农业水资源短缺风险等也是今后研究的主要内容。

4 结论

(1) 关中东部和关中西部 P_{ey} 和 ET_{cy} 拟合最优的边缘分布函数为正态分布和广义极值分布, 关中西部 P_{ey} 和 ET_{cy} 拟合最优的边缘分布函数为伽马分布和广义极值分布, Frank Copula 函数可较好反映 P_{ey} 和 ET_{cy} 间的联合分布特性。

(2) 关中东部的农业水资源短缺程度明显高于关中西部, 当 P_e 处于低水平 ($p \geq 62.5\%$) 或 ET_e 处于高水平 ($p \leq 37.5\%$) 条件下, 关中平原自然降水不能满足作物需水的概率较大, 重现期较短 (1~4 a), 农业水资源短缺风险较高。

(3) 本文基于 P_{ey} 和 ET_{cy} 两个变量来进行关中平原农业水资源短缺风险分析, 因为历史数据资料局限性, 且随机变量 P_{ey} 和 ET_{cy} 本身可能具有自相关性, 本文所建立的联合分布模型初步表征了 P_{ey} 和 ET_{cy} 在普遍意义下的统计特征, 但二者同期空间相依关系仍需进一步探究。对随机变量 P_{ey} 和 ET_{cy} 的自相关性进行研究, 并基于此考虑单变量的短期时序相依关系, 将是下一阶段的主要研究内容。

参考文献:

- [1] 姜秋香, 周智美, 王子龙, 等. 基于水土资源耦合的水资源短缺风险评价及优化[J]. 农业工程学报, 2017, 33(12): 136-143.
- [2] 高晓薇, 邵薇薇, 刘学欣, 等. 城镇化与工业化进程对农业用水的影响[J]. 人民黄河, 2015, 37(7): 59-63.
- [3] 罗军刚, 解建仓, 阮本清. 基于熵权的水资源短缺风险模糊综合评价模型及应用[J]. 水利学报, 2008, 39(9): 1092-1097.
- [4] 林小敏, 张金萍, 靳玉莹, 等. 灌区自然供水条件下的水资源短缺风险模型及应用[J]. 灌溉排水学报, 2017, 36(2): 64-68.
- [5] 阮本清, 韩宇平, 王浩, 等. 水资源短缺风险的模糊综合评价[J]. 水利学报, 2005, 36(8): 906-912.
- [6] 王红瑞, 钱龙霞, 许新宜, 等. 基于模糊概率的水资源短缺风险评价模型及其应用[J]. 水利学报, 2009, 40(7): 813-821.
- [7] Feng L H, Huang C F. A risk assessment model of water shortage based on information diffusion technology and its application in analyzing carrying capacity of water resources [J]. Water Resources Management, 2008, 22(5): 621-633.

- [8] Hsieh H I, Su M D, Cheng K S. Multisite spatiotemporal streamflow simulation-with an application to irrigation water shortage risk assessment[J]. *Terrestrial Atmospheric & Oceanic Sciences*, 2014,25(2):255-266.
- [9] Moursi H, Kim D, Kaluarachchi J J, et al. A probabilistic assessment of agricultural water scarcity in a semi-arid and snowmelt-dominated river basin under climate change[J]. *Agricultural Water Management*, 2017,193:142-152.
- [10] Ganguli P, Reddy M J. Risk assessment of droughts in Gujarat using bivariate copulas[J]. *Water Resources Management*, 2012,26(11):3301-3327.
- [11] 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:地球科学版*,2011,41(4):1130-1135.
- [12] 丁志宏,何宏谋,王浩.灌区降水量与参考作物腾发量的联合分布模型研究[J].*水利水电技术*,2011,42(7):15-18.
- [13] Zhang J P, Lin X M, Zhao Y, et al. Encounter risk analysis of rainfall and reference crop evapotranspiration in the irrigation district [J]. *Journal of Hydrology*, 2017, 552:62-69.
- [14] 张秋平,杨晓光,薛昌颖,等.北京地区早稻作物需水与降水的耦合分析[J].*农业工程学报*,2007,23(10):51-56.
- [15] 曹红霞,栗晓玲,康绍忠,等.关中地区气候变化对主要作物需水量影响的研究[J].*灌溉排水学报*,2008,27(4):6-9.
- [16] 姚德龙,高繁,李志军,等.杨凌地区冬小麦—夏玉米水分供需适配性分析[J].*干旱地区农业研究*,2018,36(1):115-120.
- [17] 康绍忠.陕西省作物需水量及分区灌溉模式[M].北京:中国水利电力出版社,1992.
- [18] Huang S Z, Hou B B, Chang J X, et al. Copulas-based probabilistic characterization of the combination of dry and wet conditions in the Guanzhong Plain, China[J]. *Journal of Hydrology*, 2014,519:3204-3213.
- [19] 时学双,曹红霞,李天军.基于 Penman-Monteith 公式的关中地区作物系数研究[J].*灌溉排水学报*,2009,28(2):26-29.
- [20] 刘俊民,郭瑞.关中平原降水特征分析[J].*人民黄河*,2008,30(5):22-24.
- [21] 常艳丽,刘俊梅,李玉会,等.陕西关中平原小麦/玉米轮作体系施肥现状调查与评价[J].*西北农林科技大学学报:自然科学版*,2014,42(8):51-61.
- [22] 贾悦,崔宁博,魏新平,等.基于反距离权重法的长江流域参考作物蒸散量算法适用性评价[J].*农业工程学报*,2016,32(6):130-138.
- [23] 段爱旺.北方地区主要农作物灌溉用水定额[M].北京:中国农业科学技术出版社,2004.
- [24] 王晓峰,张园,冯晓明,等.基于游程理论和 Copula 函数的干旱特征分析及应用[J].*农业工程学报*,2017,33(10):206-214.
- [25] Xu K, Yang D W, Xu X Y, et al. Copula based drought frequency analysis considering the spatio-temporal variability in Southwest China[J]. *Journal of Hydrology*, 2015,527:630-640.
- [26] 薛璐.陕西关中地区 ET₀时空变化及简化计算方法的适用性[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2015.

(上接第 363 页)

- [21] 胡锋,安裕伦,赵海兵.基于土地利用转型视角的“亚喀斯特”区域生态环境效应研究:以黔中部分地区为例[J].*地球与环境* 2016,44(4):447-454.
- [22] 中国科学院地理科学与资源研究所.资源环境数据云平台[EB/OL].[2020-12-21].<https://www.resdc.cn/>.
- [23] Peng W F, Zhou J M, Fan S, et al. Effects of the Land Use Change on Ecosystem Service Value in Chengdu, Western China from 1978 to 2010[J]. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 2016,44(2):197-206.
- [24] Shuai L Y, Ren C L, Yan W B, et al. Different elevational patterns of rodent species richness between the southern and northern slopes of a mountain[J]. *Scientific Reports*, 2017,7(1):1-12.
- [25] 李广东,方创琳.城市生态—生产—生活空间功能定量识别与分析[J].*地理学报*,2016,71(1):49-65.
- [26] 朱会义,李秀彬.关于区域土地利用变化指数模型方法的讨论[J].*地理学报*,2003,58(5):643-650.
- [27] 李晓文,方创琳,黄金川,等.西北干旱区城市土地利用变化及其区域生态环境效应:以甘肃河西地区为例[J].*第四纪研究*,2003,23(3):280-289.
- [28] 罗刚,廖和平,李强,等.基于“三生空间”的土地利用主导功能转型及其生态环境响应:以重庆市巴南区为例[J].*西南大学学报:自然科学版*,2018,40(4):105-113.
- [29] Liu Y, Gao J, Yang Y. A holistic approach towards assessment of severity of land degradation along the Great Wall in northern Shaanxi Province, China[J]. *Environmental Monitoring & Assessment*, 2003, 82(2):187-202.