

侯陈瑶, 朱秀芳, 肖名忠, 等. 基于游程理论和 Copula 函数的辽宁省农业气象干旱特征研究[J]. 灾害学, 2019, 34(2): 222-227. [HOU Chenyao, ZHU Xiufang, XIAO Mingzhong, et al. Research on Agricultural Meteorological Drought in Liaoning Province based on Run Theory and Copula Function[J]. Journal of Catastrophology, 2019, 34(2): 222-227. doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2019.02.040.]

基于游程理论和 Copula 函数的辽宁省 农业气象干旱特征研究*

侯陈瑶^{1,2}, 朱秀芳^{1,2}, 肖名忠³, 肖国峰², 陈昌为²

(1. 环境演变与自然灾害教育部重点实验室, 北京师范大学地理科学学部, 北京 100875;
2. 北京师范大学地理科学学部遥感科学与工程研究院, 北京 100875; 3. 河海大学水文水资源学院, 江苏南京 210098)

摘 要: 基于辽宁省近 30 年的气象站点逐月气候数据, 计算 SPEI-3 指数作为农业气象干旱指标, 利用游程理论对辽宁省的干旱特征变量进行识别, 使用 Copula 函数同时从站点尺度和区域尺度对辽宁省干旱特征的联合分布和重现期进行了分析。结果表明: Frank-Copula 函数对辽宁省农业气象干旱特征变量联合分布特征模拟效果最好; 在相同干旱历时和干旱强度的条件下, 各站点的联合重现期比单变量重现期小。干旱事件多集中在干旱历时小于 4 个月, 干旱强度小于 3 的情况下发生; 辽宁省不同干旱类型发生概率由高到低的排序为: 季内中旱、跨季中旱、月内轻旱、半年以上重旱、月内中旱、季内轻旱。其中在季内中旱、月内轻旱和月内中旱的情况下, 辽西地区发生干旱的概率最高; 当干旱历时保持一致, 随着干旱强度的增加, 其最大最小联合重现期有明显增大的趋势; 而当干旱强度保持一致, 随着干旱历时的增加, 不同干旱等级下联合重现期的变化规律不一致。

关键词: 农业气象干旱; SPEI; 游程理论; Copula 函数; 重现期; 辽宁省

中图分类号: X43; X915.5; P426; S423 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-811X(2019)02-0222-06

doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2019.02.040

据统计, 近 60 年来中国年平均受旱面积 2 087 万 hm^2 , 平均因旱损失粮食 163 亿 $\text{kg}/\text{年}$ ^[1], 农业气象干旱灾情严峻。快速准确识别农业气象干旱事件, 分析其发生的频率及重现期, 有助于提高应对农业气象干旱风险的能力, 减少农业生产活动的损失。

在干旱频率和重现期的相关研究中, 最初多以单变量计算为基础, 而单变量重现期只反应单一因素的影响, 无法刻画复杂的干旱特征变量。后来将多种因素进行联合分析的 Copula 方法受到干旱领域研究者的关注, 其能较好的对干旱问题中的多特征变量进行拟合, 并对多变量进行条件概率、重现期分析等^[2]。例如李颖等在辽西地区基于 SPI 指数利用游程理论和 Copula 函数提取干旱历时和干旱强度分析农业气象干旱发生的联合概率和重现期^[3]; 冯星等利用多种 Copula 函数在渭河流域分别构造干旱历时、干旱烈度、干旱峰值之间的两两二维关系, 分析各种干旱特征变量组合的 Copula 拟合效果及水文干旱的特点^[4]; 李阿龙在河南省根据游程理论和 Copula 多维联合分

布理论选取 SPI 为干旱指标提取干旱特征变量对农业干旱的危险性进行分析^[5]。现有研究中对干旱事件的概率分析和对重现期计算分析多集中在站点尺度, 较少有联合概率和重现期的区域尺度分析, 且选用的指标多为降水据平百分率^[6]、修正帕默尔干旱指数(SC-PDSI)^[7]和标准化降水指数(SPI)^[3]等。而利用由 Vicente-Serrano 提出的标准化降水蒸散指数(SPEI)^[8]为农业气象干旱指标较少。该指标不仅考虑降水因素, 还综合考虑蒸散对干旱的综合影响。其中 3 个月 SPEI-3 指数代表季节尺度的水分平衡估计, 可以有效表征农耕地土壤墒情状况^[9-10]。

辽宁省是东北地区重要的粮食主产区, 同时也是我国东北地区干旱的多发区, 据《中国气象灾害大典-辽宁卷》记载辽宁省干旱灾害频发, 严重影响社会经济的发展和人民生活水平的提高^[11]。以往对于辽宁省的干旱研究多集中在利用干旱指标描述辽宁省不同季节干旱时空分布特征^[12-14], 干旱对于农作物的影响^[15-16], 或抗旱作物的发展^[17-18]等方向, 分析辽宁省不同场景下干旱发生

* 收稿日期: 2018-09-17 修回日期: 2018-11-11

基金项目: 国家“高分辨率对地观测系统”重大专项资助项目; 国家自然科学基金青年基金资助项目(41401479)

第一作者简介: 侯陈瑶(1993-), 女, 山西晋城人, 硕士, 研究方向为干旱监测. E-mail: houcy@mail.bnu.edu.cn

通讯作者: 朱秀芳(1982-), 女, 浙江天台人, 副教授, 主要从事遥感应用研究. E-mail: zhuxiufang@bnu.edu.cn

的概率及重现期的研究少。开展干旱特征变量的联合概率分布和重现期分析, 有利于认清辽宁省的旱灾频率和联合重现期分布规律, 同时对其他地区干旱特征识别与分析有借鉴和指导意义。

鉴此, 选择辽宁省为研究区, 基于辽宁省近 30 年的气象站点逐月气候数据, 通过 R 语言计算 3 个月 SPEI-3 指数作为农业气象干旱指标, 利用游程理论和 Copula 函数提取干旱特征变量并分别从站点尺度和区域尺度实现对辽宁省干旱事件特征变量的频率特征以及重现期的分析。

1 数据来源

研究数据为辽宁省 27 个气象台站的逐月气象数据序列, 主要包括气压、气温、相对湿度、降水、蒸发、风向风速和日照时数等。其中, 草河口、皮口和长海气象台站由于缺失数据被剔除, 时间跨度为 1991 年 1 月到 2016 年 5 月, 所选站点均经过了严格的质量检查和控制, 包括极值检验和时间一致性检验等, 消除了非气候因素造成的影响, 以上数据取自中国气象科学数据共享服务网(<http://cdc.cma.gov.cn>)。

2 研究方法

2.1 SPEI 指数

标准化降水蒸散指数(SPEI)是基于月尺度的水平衡模型, 对降水量与潜在蒸散量差值序列的累积概率值进行正态标准化后构建的指数。其分级标准是: $(-\infty, -2]$ 为特旱, $(-2.0, -1.5]$ 为重旱, $(-1.5, -1.0]$ 为中旱, $(-1.0, -0.5]$ 为轻旱, $(-0.5, 0.5]$ 为无旱^[8]。已有学者基于 SPEI-PM 对东北地区干旱演变特征分析, 结果表明 SPEI-PM 指数可以表征东北地区的干旱特征^[19-20]。考虑到 SPEI 最初主要是采用 Thornthwaite 模型估算潜在蒸散量^[21], 在干旱区有较大的不确定性。本文采用联合国粮农组织推荐的 Penman-Monteith (P-M) 模型^[22] 计算潜在蒸散。

2.2 游程理论

游程理论也叫轮次理论, 是分析时间序列的

一种有效方法, Herbst 等首先运用该方法对干旱进行识别^[23]。运用游程理论进行干旱识别^[24], 首先给定一个截断水平即阈值来分离随时间变化的干旱指标序列, 当干旱指标序列在一个或者多个时间内出现连续大于阈值, 则出现正游程, 反之, 出现负游程。本文以 SPEI 的分级标准为参考, 选取 -0.5 作为截断水平进行阈值设定。

2.3 Copula 函数和重现期

Copula 函数是由 Sklar 和 Nelsen 分别提出和发展的联合分布函数, 能够将多个一维边缘分布函数在 $[0, 1]$ 区间连接在一起^[25]。其中对称型的 Archimedean Copula 函数构造简单、仅含一个参数、容易求解, 已被广泛的应用于水文多变量频率计算^[26]。常用的对称式 Archimedean Copula 主要包括 Gumbel、Clayton 和 Frank Copula。本文选择这三种函数分析的干旱特征变量之间的关系。

重现期表示气象灾害事件发生周期^[3], 联合重现期指大于或等于某一特定值的事件每次发生所需的平均时间间隔。假设干旱历时(d)和干旱强度(s)的边缘分布函数分别为 $F(d)$ 、 $F(s)$, 将其表示为 u 和 v ; 则单变量联合重现期分别表示为: $T_d = \frac{E(L)}{1-F(d)}$, $T_s = \frac{E(L)}{1-F(s)}$, 其中 L 为干旱事件发生的时间间隔(以年为单位), $E(L)$ 为干旱事件发生的平均时间间隔。 $E(L) = N/n$, N 代表干旱的时间序列长度(年), n 为发生干旱事件次数。二维联合重现期表示为:

$$T(d, s) = \frac{E(L)}{P(D \gg d \cup S \gg s)} = \frac{E(L)}{1 - F(d, s)} = \frac{E(L)}{1 - C[F(d), F(s)]} \quad (1)$$

当 $S \gg s$ 的条件时, S 的条件概率分布为:

$$F_{D|S}(d, s) = P(D \leq d | S \geq s) = \frac{P(D \leq d, S \geq s)}{P(S)} = \frac{u - C(u, v)}{1 - v} \quad (2)$$

与此同时, 相应的条件重现期表示为:

$$T_{D|S}(d, s) = \frac{E(L)}{1 - F_{D|S}(d, s)} = \frac{E(L)}{1 - P(D \leq d | S \geq s)} = \frac{E(L)(1 - v)}{[1 - u - v + C(u, v)]} \quad (3)$$

表 1 基于单变量的重现期和相应的联合重现期

绥中				沈阳			
单变量重现期/年	干旱历时/月	干旱强度	联合重现期/年	单变量重现期/年	干旱历时/月	干旱强度	联合重现期/年
2	3.154	2.909	1.760	2	3.033	2.807	1.744
5	4.516	5.256	3.819	5	4.445	4.434	3.769
10	5.385	7.390	6.724	10	5.385	5.793	6.638
20	6.169	9.887	12.039	20	6.253	7.290	11.921
50	7.114	13.817	27.299	50	7.320	9.506	27.151

3 结果分析

本文选取在干旱事件特征研究中应用广泛的 Gamma 函数, 对数正态分布, 威布尔分布以及指数分布函数来拟合每个站点的干旱历时和干旱强度的边缘分布函数。采用全极大似然法估计对边缘分布函数的参数估计, 并使用 $K-S$ 方法进行拟合优度检验, 在保证最多站点通过显著性检验的基础上, 选用通过显著性检验的各站点 p 值均值最高的分布。最终选择采用 p 值均值为 0.442 的威布尔分布对干旱历时进行拟合, 采用 p 值均值为 0.793 的对数正态分布对干旱强度进行拟合。所有站点的 Spearman 相关系数均大于 0.9 以上, 符合 Copula 函数在联合分布研究中对两组数据变量之间具有的相关性的要求。

基于干旱历时和干旱强度的边缘分布函数, 建立了干旱历时与干旱强度之间的三种 Copula 模型, 利用极大似然法对 Copula 函数中未知参数进行了估计。通过计算理论 Copula 与经验 Copula 值间的欧式距离, AIC 指标和 BIC 指标, 对模型的拟合优度进行评价, 数值越小, 模型拟合度越好。所有站点的三种评价指标均值都表明 Frank-Copula 拟合最好。所以本文选取 Frank-Copula 进行联合概率和重现期的分析。

3.1 站点尺度辽宁省干旱特征分析

经过计算发现各站点的二维联合分布和联合重现期的变化趋势基本一致。因此, 本文以位于辽西地区的绥中和辽中地区的沈阳两个站点为例, 对比分析站点尺度识别出的干旱事件特征对应的二维联合分布以及重现期的变化。两个站点有着相同的干旱历时和干旱强度范围, 便于对比分析在相同的干旱历时和干旱强度的情况下, 不同站点的联合概率分布和联合重现期。

表 1 显示了在单变量重现期分别为 2、5、10、20 和 50 年一遇的情况下, 绥中站和沈阳站对应的干旱历时和干旱强度的值, 以及在相同的干旱历时和干旱强度的组合下, 两站点的特征变量的联合重现期。

例如当单变量重现期为 2 年时, 绥中站对应的干旱历时为 3.154 月, 沈阳站对应的干旱历时为 3.033 月, 绥中站对应的干旱强度为 2.909, 沈阳站对应的干旱强度为 2.807。在此干旱强度和干旱历时的组合下, 绥中站和沈阳站的联合重现期分别为 1.760 年和 1.744 年。由表 1 可知, 在相同的干旱历时和干旱强度条件下, 两站点的联合重现期都比单变量重现期小, 这是由于计算单变量重现期只考虑单一因素, 而联合重现期考虑两个因素共同的影响。

图 1 为绥中站(图 1a)和沈阳站(图 1b)联合概率分布等值线图。随着干旱历时和干旱强度值的

增大, 两者的联合累积概率值在不断增大, 其中绥中站干旱历时小于 4 个月, 干旱强度小于 3 时, 发生干旱的联合累积概率增长较为迅速, 在这种情况下, 有大约 70% 的干旱事件发生; 沈阳站干旱历时小于 4 个月, 干旱强度小于 2 时, 发生干旱的联合累积概率增长较为迅速, 在这种情况下, 有大约 50% 的干旱事件发生。

图 2 为绥中站和沈阳站的联合重现期及联合重现期等值线图。随着干旱历时和干旱强度的增大, 两个站点的干旱事件发生的重现期在逐渐增大, 其中绥中站在干旱历时大于 4 个月并且干旱强度大于 4 时, 发生干旱事件的重现期增长迅速(图 2a 和图 2c); 沈阳站在干旱历时大于 4 个月并且干旱强度大于 3 时发生干旱事件的重现期增长迅速(图 2b 和图 2d)。当干旱历时和干旱强度同为相同的条件下的最大值时, 绥中站的重现期为 25 年, 沈阳站的重现期为 15 年(图 2a 和图 2b), 说明绥中地区在同等高强度长历时的条件下发生重旱的频率较低。绥中站的历史干旱事件集中发生在干旱历时小于 3 个月, 干旱强度小于 4 的情况下, 沈阳站的历史干旱事件集中发生在干旱历时小于 5 个月, 干旱强度小于 5 的情况下(图 2c 和图 2d)。

3.2 区域尺度辽宁省干旱特征分析

参考左冬冬等对于干旱历时和干旱强度的划分^[27], 将辽宁省的干旱划分为 16 种情况: 月内轻旱, 月内中旱, 月内重旱, 月内特旱, 季内轻旱, 季内中旱, 季内重旱, 季内特旱, 跨季轻旱, 跨季中旱, 跨季重旱, 跨季特旱, 半年以上轻旱, 半年以上中旱, 半年以上重旱, 半年以上特旱。

基于辽宁省各站点的 Copula 联合累积分布, 分别计算在 16 种情况下各个站点发生干旱事件的概率, 利用 ArcGIS 中 IDW 插值实现空间化, 得到辽宁省各区域在不同情境下的干旱事件发生的概率分布图 3。就整个辽宁省区域而言, 季内中旱、跨季中旱、月内轻旱、半年以上重旱、月内中旱和季内轻旱的情况出现的概率较高。在这六种情况中, 辽宁省发生干旱情况出现概率最高到最低的依次排序为: 季内中旱、跨季中旱、月内轻旱、半年以上重旱、月内中旱、季内轻旱。季内中旱、月内轻旱和月内中旱的情况下, 辽西地区的发生干旱的概率最高。

基于辽宁省各站点的联合重现期, 计算在各种情况下每个站点的最大联合重现期和最小联合重现期, 利用 ArcGIS 中的 IDW 插值得到辽宁省各区域在不同情境下的最大联合重现期分布图 4 和最小联合重现期分布图 5。干旱历时半年以上, 干旱强度大于 2 的情况下不存在最大联合重现期。由图 4 知, 当干旱强度属于“轻旱”, 随着干旱历时的增加, 辽宁省整个区域的最大联合重现期增加, 而当干旱强度分别属于“中旱”和“重旱”的情况下,

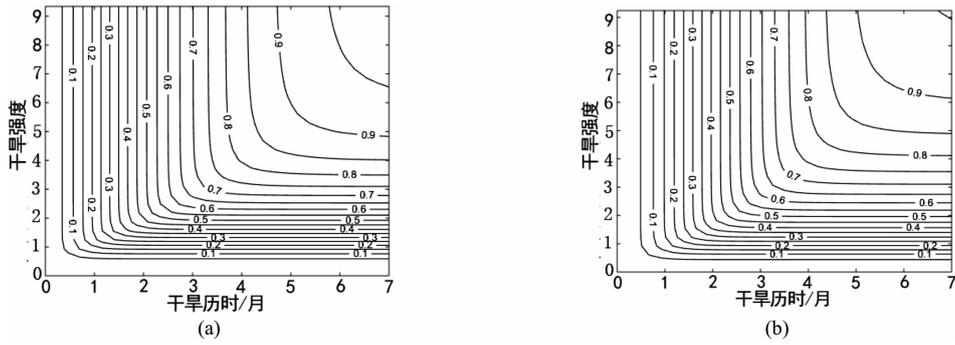


图1 典型站点联合概率分布等值线图

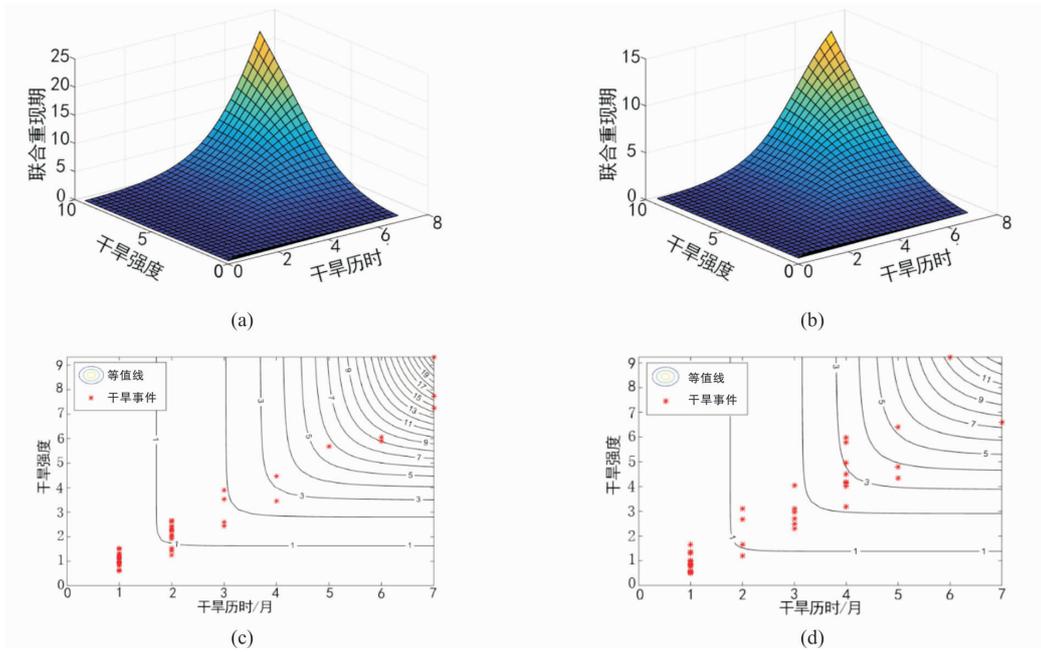


图2 典型站点联合重现期和联合重现期等值线

随着干旱历时的增加, 辽宁省整个区域的最大联合重现期没有明显变化。而当干旱历时分别属于“月内”、“季内”和“跨季”时, 随着干旱强度的增加, 辽宁省各区域的最大联合重现期表现出明显的增加趋势。说明当干旱历时一致时, 干旱强度对于各种情况下的最大联合重现期更敏感。由图 5 知, 当干旱强度属于“轻旱”和“中旱”时, 随着干旱历时的增加, 辽宁省各区域的最小联合重现期增加; 当干旱强度属于“中旱”和“特旱”时, 辽宁省各区域的最小联合重现期没有明显变化; 当干旱历时分别属于“月内”、“季内”、“跨季”和“半年以上”时, 随着干旱强度的增大, 辽宁省各区域的最小联合重现期明显增大。这说明当干旱历时一致时, 干旱强度对于各种情况下的最小联合重现期更敏感。

4 结论和讨论

本文利用辽宁省 24 个气象站点近 30 年逐月降水数据, SPEI-3 基于游程理论从序列中分离出干旱事件, 再利用 Copula 函数建立的二维联合分布

分析辽宁省干旱特征并得到结果如下:

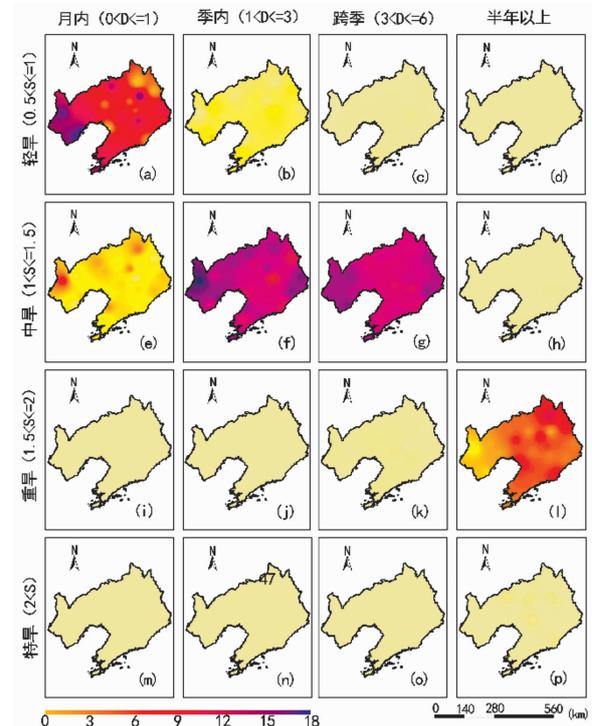


图3 不同情境下的干旱事件发生概率分布图

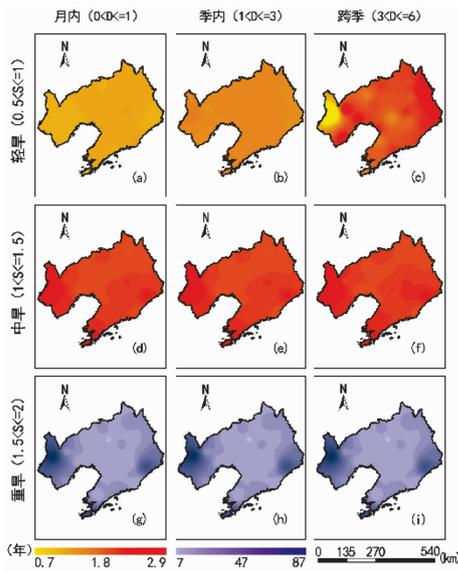


图4 不同情境下的最大联合重现期分布图

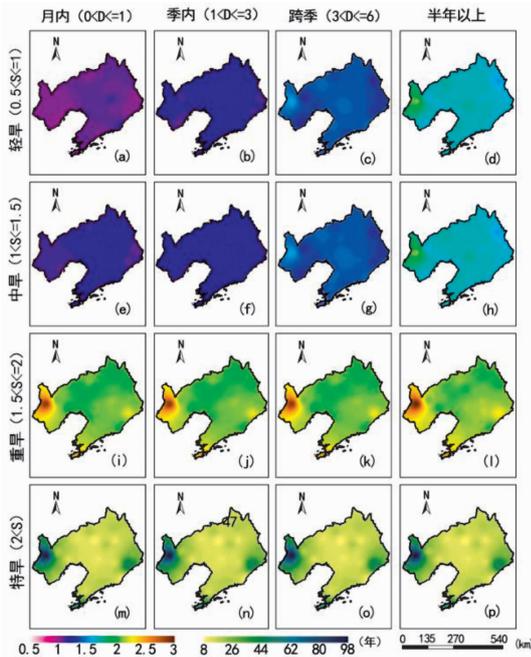


图5 不同情境下的最小联合重现期分布图

(1) 辽宁省干旱事件中的特征变量干旱历时符合威布尔分布, 干旱强度符合对数正态分布。通过多种 Copula 函数进行了辽宁省干旱特征变量联合分布特征的分析, Frank-Copula 函数模拟效果最好。

(2) 站点尺度的分析显示所有站点的二维联合概率分布和联合重现期的趋势总体保持一致。在相同的干旱历时和干旱强度的条件下, 各站点的联合重现期都比单变量重现期小。干旱事件多集中在干旱历时小于 4 个月, 干旱强度小于 3 的情况下发生。

(3) 区域尺度的分析显示辽宁省发生干旱情况出现概率最高到最低的排序为: 季内中旱 > 跨季中旱 > 月内轻旱 > 半年以上重旱 > 月内中旱 > 季内中旱。在季内中旱、月内轻旱和月内中旱的情况下, 辽西地区发生干旱的概率最高。每个站点的最大联合重现期和最小联合重现期表现为: 当干旱历时保持一致, 随着干旱强度的增加, 其联

合重现期有明显增大的趋势, 说明干旱强度在干旱历时保持一致时, 对各种情况的最大最小联合重现期更敏感; 当干旱强度保持一致, 干旱强度为轻旱时, 随着干旱历时增加, 最大最小联合重现期增大, 属于中旱时, 随着干旱历时增加, 最小联合重现期增加, 为其它干旱强度等级时, 最大最小联合重现期没有明显变化。

在已有研究中, 不同指数在干旱等级和变化特征中有着明显差异, 在区域尺度尤其明显^[28]。本文选取是 3 个月尺度的 SPEI, 主要表征季节尺度内水分亏缺情况, 适用于反映农业干旱情况^[29]。如果选取其他尺度的 SPEI 指数, 干旱事件的识别将发生变化。同时, 在基于游程理论的干旱事件识别与分析中, 阈值选取没有统一的规定, 已有研究中, 学者多采取单个阈值^[27], 进行干旱事件的判别, 容易降低识别干旱事件的精确度, 所以可以进一步优化阈值设置的方法^[30]。本文仅针对干旱历时和干旱强度的两个特征变量进行联合, 现有研究已有选用多个变量^[31-32], 而随着干旱特征变量的增加, 多变量联合函数的结构也会更加复杂。干旱特征对于时间和空间有着较强的敏感性, 不同的区域的时空特性使得 Copula 函数对于干旱的应用问题具有时变性^[2]。所以, 干旱指标选取、阈值优化、Copula 多维特征变量分析和时变性探究都将是未来的研究重点。

参考文献:

- [1] 赵勇. 干旱驱动机制与模拟评估[M]. 北京: 科学出版社, 2017.
- [2] 于忱, 陈隽, 王红瑞, 等. 多变量 Copula 函数在干旱风险分析中的应用进展[J]. 南水北调与水利科技, 2018, 16(1): 14-21.
- [3] 李颖, 冯玉, 唐伟男, 等. 基于 Copula 函数的辽西地区农业气象干旱灾害分析[J]. 干旱地区农业研究, 2018, 36(2): 279-287.
- [4] 冯星, 孙东永, 胡维登, 等. Copula 函数在渭河流域干旱分析中的应用研究[J]. 灌溉排水学报, 2017, 36(12): 110-117.
- [5] 李阿龙. 河南省农业旱灾风险分析[D]. 保定: 华北水利水电大学, 2016.
- [6] 高贵生, 霍金虎, 金显玲. 降水距平百分率指标对西宁市农业气象干旱的适用性及干旱预测[J]. 青海草业, 2017, 26(4): 26-31.
- [7] 叶建刚, 申双和, 吕厚荃. 修正帕默尔干旱指数在农业干旱监测中的应用[J]. 中国农业气象, 2009, 30(2): 257-261.
- [8] Vicenteserrano S M, Beguería S, Lópezmoreno J I. A multiscalar drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index. [J]. Journal of Climate, 2010, 23(7): 1696-1718.
- [9] Potopová V, Štěpánek P, Možný M, et al. Performance of the standardised precipitation evapotranspiration index at various lags for agricultural drought risk assessment in the Czech Republic [J]. Agricultural & Forest Meteorology, 2015, 202(202): 26-38.
- [10] Lloyd-Hughes B. A spatio-temporal structure-based approach to drought characterisation[J]. International Journal of Climatology, 2012, 32(3): 406-418.

- [11] 李波. 中国气象灾害大典. 辽宁卷[M]. 北京: 气象出版社, 2005.
- [12] 吴琼, 赵春雨, 王大钧, 等. 1951—2014 年辽宁省气象干旱时空特征分析[J]. 干旱区资源与环境, 2016, 30(3): 151—157.
- [13] 何鑫, 吴吉东, 李颖, 等. 基于 SPEI 的辽西地区气象干旱时空分布特征[J]. 干旱区地理, 2017, 40(2): 340—347.
- [14] 张运福, 房一禾, 龚强. 基于 SPEI 指数的辽宁省生长季干旱时空特征[J]. 生态学杂志, 2017, 36(1): 190—197.
- [15] 王春乙, 蔡菁菁, 张继权. 基于自然灾害风险理论的东北地区玉米干旱、冷害风险评价[J]. 农业工程学报, 2015, 31(6): 238—245.
- [16] 蔡福, 张淑杰, 纪瑞鹏, 等. 近 30 年辽宁玉米水分适宜度时空演变特征及农业干旱评估[J]. 应用生态学报, 2015, 26(1): 233—240.
- [17] 王凯, 雷虹, 刘建华. 春季辽宁西北部主要绿化树种根叶抗旱生理性状评价[J]. 应用生态学报, 2016, 27(6): 1853—1860.
- [18] 马一泓, 王术, 于佳禾, 等. 水稻生长对干旱胁迫的响应及抗旱性研究进展[J]. 种子, 2016, 35(7): 45—49.
- [19] 高蓓, 姜彤, 苏布达, 等. 基于 SPEI 的 1961—2012 年东北地区干旱演变特征分析[J]. 中国农业气象, 2014, 35(6): 656—662.
- [20] 徐一丹, 任传友, 马熙达, 等. 基于 SPI/SPEI 指数的东北地区多时间尺度干旱变化特征对比分析[J]. 干旱区研究, 2017, 34(6): 1250—1262.
- [21] Thornthwaite C W. An Approach toward a Rational Classification of Climate[J]. Geographical Review, 1948, 38(1): 55—94.
- [22] 赵静, 严登华, 杨志勇, 等. 标准化降水蒸发指数的改进与适用性评价[J]. 物理学报, 2015, 64(4): 382—390.
- [23] Herbst P H, Breckenkamp D B, Barker H M G. A technique for the evaluation of drought from rain-fall data[J]. Journal of Hydrology, 1966, 4(66): 264—272.
- [24] 芦佳玉, 延军平, 李英杰. 基于 SPEI 及游程理论的云贵地区 1960—2014 年干旱时空变化特征[J]. 浙江大学学报(理学版), 2018, 5(3): 363—372.
- [25] 宋松柏. Copulas 函数及其在水文中的应用[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- [26] 侯芸芸. 基于 Copula 函数的多变量洪水频率计算研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2010.
- [27] 左冬冬, 侯威, 颜鹏程, 等. 基于游程理论和两变量联合分布的中国西南地区干旱特征研究[J]. 物理学报, 2014, 63(23): 45—56.
- [28] Dai A. Increasing drought under global warming in observations and models[J]. Nature Climate Change, 2013, 3(1): 52—58.
- [29] 杨思遥, 孟丹, 李小娟, 等. 华北地区 2001—2014 年植被变化对 SPEI 气象干旱指数多尺度的响应[J]. 生态学报, 2018, 38(3): 1028—1039.
- [30] 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.
- [31] 张雨, 宋松柏. Copulas 函数在多变量干旱联合分布中的应用[J]. 灌溉排水学报, 2010, 29(3): 64—68.
- [32] 肖名忠, 张强, 陈永勤, 等. 基于三变量 Copula 函数的东江流域水文干旱频率分析[J]. 自然灾害学报, 2013, 22(2): 99—108.

Research on Agricultural Meteorological Drought in Liaoning Province based on Run Theory and Copula Function

HOU Chenyao^{1,2}, ZHU Xiufang^{1,2*}, XIAO Mingzhong³, XIAO Guofeng² and CHEN Changwei²

(1. Key Laboratory of Environmental Change and Natural Disaster, Ministry of Education, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. Institute of Remote Sensing Science and Engineering, Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 3. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: This paper takes Liaoning Province as the research area, uses the monthly climate data of the meteorological stations of nearly 30 years recorded in Liaoning Province to calculate SPEI-3 agricultural meteorological drought index, and identifies drought events in Liaoning Province based on the run theory. Finally, the Copula function was used to analyze the joint distribution and return period of drought events in Liaoning Province at both site scale and regional scale. The results show that: the characteristics of joint distribution of agricultural meteorological drought feature variables in Liaoning Province were analyzed by Frank-Copula function simulation performed best. Under the same drought duration and drought intensity conditions, the joint return period of each site was smaller than the univariate return period. The most frequent drought events were droughts with duration of less than 4 months and intensity of less than 3. The occurrence probability of drought in Liaoning Province was ranked in descending order as follows: mid-season drought, inter-season drought, light month drought, heavy drought more than six months, medium-term drought, and light season drought. With the drought in the season, light drought in the month, and moderate drought in the month, the probability of drought in the western Liaoning was the highest. When the drought duration was consistent, the joint return period increased significantly with the increase of drought intensity. When the drought intensity kept consistent, with the increase of drought duration, the variation rule of joint return period under different drought grades was inconsistent.

Key words: agricultural meteorological drought; SPEI; theory of run; copula function; return period; Liaoning Province