

Copula-based Analysis of Spatial Distribution Characteristics of Drought in Songnen Grassland

Wurina¹, Jiquan Zhang^{1*}, Laiquan^{1,2}, Siqin Tong¹

¹College of Environment, Northeast Normal University, Jilin Changchun 130024, China

²College of Geographical, Inner Mongolia Normal University, Inner Mongolia Huhhot010022, China

基于 Copula 函数的松嫩草原干旱空间分布特征研究

乌日娜¹, 张继权^{1*}, 来全^{1,2}, 佟斯琴¹

¹东北师范大学环境学院, 吉林长春 130117

²内蒙古师范大学地理科学学院, 内蒙古呼和浩特 010022

Abstract

In this paper, daily temperature and daily precipitation data at 15 meteorological stations from 1960 to 2014 in Songnen Grassland were used to analyze the characteristics of spatial distribution of drought. A drought event is defined by the run theory and the drought event is described by two characteristic variables, i.e., drought duration and drought severity. Then, three Archimedean Copula functions are used to construct the joint distribution of two characteristic variables and finally the GIS as spatial statistical analysis tool to analyze spatial distribution of the drought return period. The results shows that the Frank Copula well reflect the relationships among drought characteristic variables. The characteristics of the spatial distribution of drought return periods of Songnen grassland are obviously different. The study of return period can provide the scientific basis for risk assessment and drought management for Songnen grassland.

Keywords: Drought spatial analysis; Standardized precipitation Evapotranspiration index (SPEI); Copula; Return period

摘要

本文以松嫩草原 15 个气象站点 1960-2014 年的日气温和日降水资料为基础, 选用游程理论识别了草原干旱特征变量, 并利用 3 种 Archimedean Copula 函数分别构建了干旱历时和干旱强度两个干旱特征变量之间的联合分布特征, 最后以 GIS 的空间统计分析为工具, 分析了松嫩草原在指定重现期下干旱重现期和同现期的空间分布特征。研究表明: 经拟合优度评价, Frank Copula 对干旱历时和干旱强度的拟合度最好; 通过 GIS 空间分析发现重现期空间分布差异很明显; 各气象站点干旱程度差异较大。重现期的研究能够为松嫩草地干旱灾害风险评价与管理提供科学依据。

关键词: 空间分布特征; 标准化降水蒸腾指数 (SPEI); Copula 函数; 重现期

1. 引言

干旱由于发生频率高、持续时间长、涉及范围广、造成的经济损失巨大等特点, 成为所有自

作者简介: 乌日娜 (1988-), 女, 蒙古族, 东北师范大学博士, 主要从事灾害与风险评估与管理。通
***通讯作者简介:** 张继权 (1965-), 男, 吉林九台人, 教授, 博士生导师, 主要从事区域灾害与综合风险评估、预警与应急管理研究。
E-mail: zhangjq022@nenu.edu.cn

Risk Analysis and Crisis Response in Big Data Era (RAC-16)

然灾害中破坏最为严重的灾种。其中,草原干旱灾害给牧区造成的破坏尤其要引起重视。中国草原的主体位于在年降水量小于 400 毫米的北部、西部广大地区,干旱发生频繁,易形成畜牧业灾害。其危害程度,位于我国牧区各类畜牧业气象灾害之首。在中国的牧区,对干旱灾害的防灾减灾能力较为低下,农牧民防灾避灾知识缺乏,在一定程度上增加了灾害造成的损失。因此,进行草原干旱时空分布特征分析,实现草原干旱灾害管理已经成为一项十分紧迫的任务,对保护草原生态安全、促进牧区社会经济可持续发展具有重大意义。

干旱形成原因复杂,受多种因素影响,因此需要建立干旱评价指标。目前气象干旱指标主要有降水距平百分率、标准化降雨量指数(Standard Precipitation Index, SPI)、帕默尔指数(PDSI)、降水 Z 指数(Moisture Anomaly Index, Z-index)、综合指数(CI)、有效干旱指数(Effective Drought Index, EDI)、Bhalme - Mooley index (BMI)、SPEI (Standard Precipitation Evapotranspire Index) 等。每种评价指标都有其优势和不足之处,对不同的研究地区应选择合适的干旱评价指标。而且多数对干旱时空演变规律的研究都侧重关注干旱历时和干旱强度两个方面。传统的统计方法计算联合分布时要求二变量的边缘分布为相同的分布类型,但是干旱历时和干旱强度的分布类型并不相同,使得利用传统的统计方法分析二者的联合分布特征变得困难。为了解决以上研究的不足,本文将选取

SPEI 指数作为干旱分析指标。采用游程理论从干旱指数中分离出干旱灾害事件的干旱历时和干旱强度,再利用 Copula 函数建立起两者的二维概率密度函数,进而计算不同历时和不同强度干旱时间的概率。最后通过估计指定重现期下的各站的干旱重现期,以及运用 GIS 的空间差值功能对其进行反距离权重差值并利用 ARCGIS 的空间分布功能进行空间展布,并深入分析草原干旱的空间分布特征,从而为松嫩草地干旱灾害风险评价、旱情评估和风险管理提供有效的科学依据。

2. 研究区概况与数据来源

本研究以松嫩草原为研究区(图 1),研究区位于东北的中部,地处北纬 $43^{\circ} 30' \sim 48^{\circ} 05'$ 、东经 $122^{\circ} 12' \sim 126^{\circ} 20'$,三面群山环抱,西部是大兴安岭,北部是伊勒呼里山和小兴安岭,东部是长白山系的张广才岭,南面横卧着的低丘为松辽分水岭,是松花江、嫩江、洮儿河和霍林河冲积作用为主而形成的平原,是我国三大平原之一东北平原的主要组成部分。研究区处于西风带内,天气变化比较频繁,年降水量为 350~500 mm,干燥度 1.1~1.5,为草甸草原带。松嫩平原由于土壤类型的多样,因此,植被类型也多样,是欧亚草原带植被类型最丰富的地带。主要的优势种有羊草、芦苇、小花碱茅、罗布麻、全叶马兰和寸草苔等。本文数据主要来自于松嫩草原内分布的 15 个气象站点(图 1)的从 1960.1.1-2014.12.1 的日气温和日降水量数据。

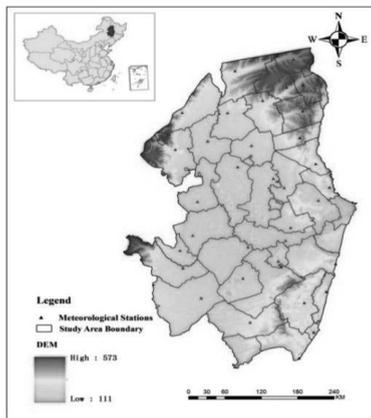


图 1 研究区示意图和气象站点分布图

3. 研究方法

3.1 标准化蒸散指数 (SPEI)

Vicente-serrano[1]等人构建了 SPEI 指数, 该指数同时具备了 SPI 和帕尔默干旱指数 (PDSI) 的优点。并且该指数具有 SPI 的多时间尺度计算的优点, 可以识别不同历时的干旱。由于 SPEI 通过概率密度函数求解累积概率, 再将累积概率标准正态化而得, 消除了降水和气温的时空分布差异, 在不同区域和时段均能有效地反映干旱状况。详细信息可以参考[1], 因篇幅有限不再细述。

3.2 基于游程理论的干旱识别

游程理论也叫轮次理论, 是分析时间序列的一种最有效的方法。游程理论是指在连续出现的同类事件过程中, 它的前后发生的是另外一类事件, 如旱涝、连续无雨日、有雨日、河流水丰枯交替出现等自然现象。本论文对于旱事件的识别利用游程理论方法。SPEI 作为识别干旱指标, 对照干旱本身的特点, 便可以把一次负游程认为一次干旱事件, 一个干旱事件从开始到结束的时间定义为干旱历时, 而负游程的值为本次干旱事件的强度。计算公式为:

$$S = -\sum_{i=1}^d SPEI_i \quad (1)$$

在干旱过程识别中, 通过程序识别出在植被生育期 4-9 月这期间的干旱事件。

3.3 Copula 函数

Copula 作为一种全新的、适用性极强的相关性度量工具, 是由 Sklar[2]在 1959 第一次提出。Sklar 定理是 Copula 函数研究领域中最重要中的一个定理, 它证明了 Copula 函数存在的唯一性。即假设 X 和 Y 是两个随机变量, 它们的联合概率分布函数为 G(x, y), 如果它们的边缘分布函数分别为 $F_x(x)$ 和 $F_y(y)$, 则一定存在着连接函数 Copula C, 满足 $G(x, y) = C(F_x(x), F_y(y))$ 。如果 $F_x(x)$ 和 $F_y(y)$ 是连续的, 那么 C 是唯一的。相反, 如果 C 是一个 Copula, $F_x(x)$ 和 $F_y(y)$ 是分布函数, 则由 $G(x, y) = C(F_x(x), F_y(y))$ 所定义的 G(x, y) 是一个联合概率分布函数, 并且其边缘分布函数分别是 $F_x(x)$ 和 $F_y(y)$ 。

Copula 函数种类繁多, 各有特点, 详细

信息可以参考[3、4、5], 本文选用 Frank、G-H、Calyton 等三种 Copula 函数联接干旱历时和干旱严重程度的边缘分布函数, 并利用 RMSE[6]和 AIC[7]进行优度检验。

3.4 重现期

重现期代表了某次干旱强度和干旱历时的干旱风险连续出现两次的平均时间间隔, 是某一干旱历时和干旱强度下的干旱风险发生概率的倒数。因此干旱历时和干旱强度分别超过某一数值的重现期, 计算公式如下:

$$T(t) = \frac{E(L)}{P(T)t} = \frac{E(L)}{1 - F_T(t)} \quad (2)$$

$$T(d) = \frac{E(L)}{P(D)d} = \frac{E(L)}{1 - F_D(d)} \quad (3)$$

考虑干旱历时和干旱强度联合分布的干旱风险重现期有两种情形: $T \cup t$ 或 $T > d$ 且 $D > d$,

分别记为 $T_{\cup}(t, d)$, $T_{\cap}(t, d) D > d$ 。SHIAU

(2003) [8]推导出计算公式如下:

$$\begin{aligned} T_{\cup}(t, d) &= \frac{E(L)}{P(T)t \cup D > d} = \frac{E(L)}{1 - F_{T,D}(t, d)} \\ &= \frac{E(L)}{1 - C(F_T(t), F_D(d))} \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} T_{\cap}(t, d) &= \frac{E(L)}{P(T)t \cap D > d} = \\ &= \frac{E(L)}{1 - F_T(t) - F_D(d) + C(F_T(t), F_D(d))} \end{aligned} \quad (5)$$

本文以月为计算单位, 因此重现期也应以月为单位。由上述一系列公式可以估计出某一时间段的干旱历时、干旱强度的重现水平。

4. 结果与分析

4.1 基于游程理论的干旱识别

与 SPI 一样, SPEI 是基于概率计算得到的, 因此 SPI 的干旱等级划分标准 SPEI 同样适用, 根据中华人民共和国《气象干旱等级》[9]国家标准来划分干旱等级, 如表 1 所示。SPEI 可根据不同尺度进行计算, 一般有 1、3、

Risk Analysis and Crisis Response in Big Data Era (RAC-16)

6、12、24 和 48 个月时间尺度。由于松嫩草地一年中降水主要集中在生长季 (6-8 月), 生长季又是温度较高的夏半年, 蒸发旺盛, 因此为较好的识别干旱情况, 本文选用 3 个月时间尺度的 SPEI-3。

表 1 干旱等级划分

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

表2 基于游程理论的干旱识别结果

站名	站号	经度	纬度	海拔	干旱事件次数	平均历时	平均强度	最大强度
乾安	50948	124.02	45.00	146.30	157	2.36	1.67	6.85
克山	50658	125.88	48.05	234.60	173	1.99	1.53	4.49
前郭	50949	124.87	45.08	136.20	159	2.04	1.68	6.43
北安	50656	126.52	48.28	269.70	157	2.14	1.64	14.34
双辽	54142	123.53	43.50	114.90	174	1.95	1.53	9.32
安达	50854	125.32	46.38	149.30	165	2.06	1.66	7.10
扶余	54063	126.00	44.97	196.80	173	1.92	1.55	8.33
富裕	50742	124.48	47.80	162.70	169	1.95	1.58	6.06
明水	50758	125.90	47.17	247.20	160	2.14	1.64	8.93
泰来	50844	123.42	46.40	149.50	170	1.96	1.60	7.89
白城	50936	122.83	45.63	155.30	175	1.93	1.52	7.71
通榆	54041	123.07	44.78	149.50	165	1.99	1.59	6.85
长岭	54049	123.97	44.25	188.90	174	1.96	1.50	7.72
长春	54161	125.22	43.90	236.80	165	1.98	1.60	9.18
齐齐哈尔	50745	123.92	47.38	147.10	165	1.99	1.62	8.85

由表 2 可知, 各个气象站点间的干旱事件次数、平均历时、平均强度和最大强度差距不是很明显, 说明各站点的干旱平均水平大体相当。54 年间白城站点发生的干旱事件是最多的, 然而乾安站点和北安站点的干旱事件是相对较少的, 但是乾安站点的平均干旱历时最长, 白城站点的平均干旱历时最短, 这个现象正好跟干旱事件次数是相反规律。最大强度依次发生在北安站点、双辽站点和长春站点。可见, 各站的干旱特性具有显著差异性, 研究它们之间的关系对草原干旱空间特征分析具有重要意义。

4.2 Copula 函数分析

依据上述方法可以得到各个气象站点干旱历时和干旱强度的历史样本(1960-2014 年), 对于干旱历时和干旱强度分布类型每个研究者有不同的见解, 比如说 Zenlenhastic 和 Salvai[10]以及 Shiau 和 Hsieh[11]指出干旱历时符合指数分布, 而干旱强度则符合 verGamma 分布。本研究中, 通过 K-S 方法[12]来拟合两个特征变量干旱历时和干旱强度的边缘分布函数。结果发现干旱历时符合 Gamma 分布函数, 干旱强度符合广义极值分布 (GEV) 函数。Zeng X Ket al., [13]等比较几种拟合方法发现众多拟合方法中 K-S 方法具有其独特的优势, 因此其拟合结

果具有可靠性。

由上述方法得到的干旱历时和干旱强度的边缘分布,但是因二者的分布函数类型不一致,可以通过 Copula 函数得打二者的联合分布概率。因 Copula 函数的有多种类型,选择不同类型的 Copula 函数计算得到的联合分布存在明显的差异。因此,本研究选取比较常用的阿基米德 Copula 函数,分别是 Frank 类型、G-H 类型和 Clayton 类型,并利用 赤池 信息 量 准 则

(Akaike Information Criterion (AIC)) 和均方根误差 (RMSE) 方法选择最优的 Copula 函数。结果发现, Frank 函数的 paramater、AIC、RMSE 系数最小,因此选择 Frank Copula 函数构建松嫩草原干旱特征变量的联合概率分布。因气象站点较多,本文中未能一一列出各站点的分布情况,图 2 为随机选取长岭气象站点的联合同现期三维图、联合重现期的三维图和联合重现期的等值线图。

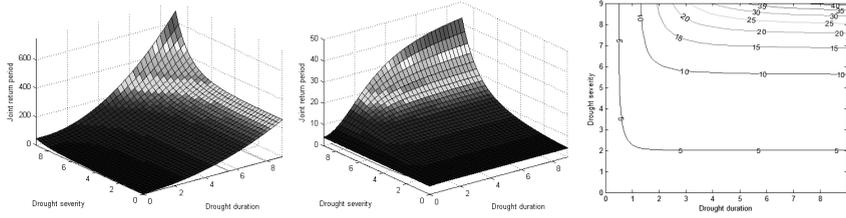


图 2 长岭气象站点的联合同现期三维图、联合重现期三维图和联合重现期等值线图(从左到右)

4.3. 重现期空间分布特征分析

图 3 和图 4 为指定重现期下的各站点干旱历时和干旱强度的联合重现期和同现重现期的空间分布特征。从图 3 可知,重现期为 10 个月、20 个月和 50 个月下的联合重现期空间分布特征变化基本一致,重现期为 5 个月的联合重现期稍微有差别,但是最大差别不是很明显。从图 4 可知,重现期为 10 个月、20 个月和 50 个月的同现重现期有一致的空间分布特征变化,然而重现期为 5 个月同现重现期的空间分布特征有明显的差

别,但是最大差别还是不是很明显。在不同重现期下,北安、明水和乾安对应的联合重现期大于其他站点对应的联合重现期,然而在安达、扶余和前郭对应的联合重现期是最小的。在不同重现期条件下,各站点对应的干旱历时和干旱强度的同现重现期变化与对应联合重现期空间变化基本相反,具体情况是白城、扶余、肇东和富裕对应的同现重现期最大,北安和乾安对应的同现重现期最小。可见,干旱空间特征分析能够为区域干旱灾害风险管理提供有效的科学依据。

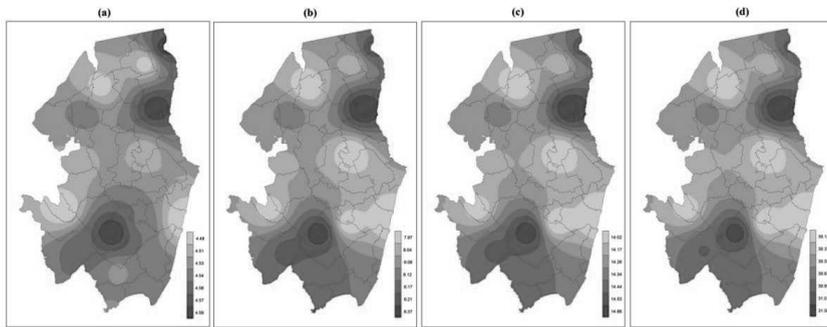


图 3a、b、c、d 分别是松嫩草原干旱在指定重现期 5 个月、10 个月、20 个月、50 个月下的联合重现期的空间分布特征

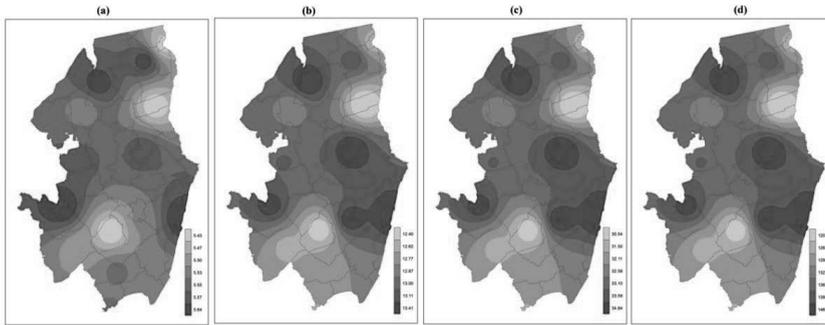


图4 a、b、c、d 分别是松嫩草原干旱在指定重现期5个月、10个月、20个月、50个月下的同现重现时期的空间分布特征

5. 结论

本文以中国北方草原松嫩草地为研究区，选取干旱历时和干旱强度为干旱特征变量并利用游程理论对其进行识别，根据 Copula 函数建立了两者之间的联合分布函数并计算其重现期，最后探讨了指定重现期下的干旱重现期和同现期的空间分布情况。研究表明：Copula 函数为研究多变量干旱特征分析提供了有效的手段，弥补了传统干旱单变量特征分析的不足。通过优度拟合分析发现 Frank copula 函数对各站干旱特征变量间的联合分布具有较好的拟合结果。通过分析重现期空间分布特征发现，各站点具有显著的空间分布特性，各站点干旱重现期的差异较大。通过对重现期的深入研究能够为松嫩草地干旱灾害风险评价与管理提供科学依据。

Acknowledgements

This study is supported by the National Key Technology R&D Program of China under Grant Nos.2013BAK05B02 and 2013BAK05B01 and the National Non-Profit Research Program of China (No.201401015).

致谢

本研究得到了“十二五”国家科技支撑项目（2013BAK05B02、2013BAK05B01）和水利部公益性行业科研专项经费项目（201401015）的资助。

参考文献

- [1] S.M. Vicente-Serrano, S. Beguería, J.I. López-Moreno, A multi-scalar drought index sensitive to global warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index-SPEI, *Journal of Climate*. 23(7): 1696-1718, 2010.
- [2] A. Sklar. Fonctions de répartition à n dimensions et leurs marges, *Publ. Inst. Stat University Paris, Paris France*. pp 229-231, 1959.
- [3] A. Sklar. Random variables, joint distribution functions, and copulas, *Kybernetika -Praha*. 9(6): 449-460, 1973.
- [4] R. B. Nelsen. An introduction to copulas, *Technometrics*. 42(4): xx 315, 2000.
- [5] G. Salvadori, C.D. Michele, N.T. Kottegoda, et al. *Extremes in Nature: An Approach Using Copulas*, Berlin Springer 49(1): 5-89, 2007.
- [6] C.J. Willmott. On the validation of models, *Physical Geography*. 2:184-194, 1981.
- [7] H. Akaike. A new look at the statistical model identification, *Automatic Control IEEE Transactions on*. 19(6): 716-723, 1974.
- [8] J.T. Shiau. Return period of bivariate distributed extreme hydrological events, *Stochastic Environmental Research & Risk Assessment*. 17(1):42-57, 2003.

- [9]National Standard of People's Republic of China GB/T 20481-2006 the grade of meteorological drought Beijing China Standard Press. (2006) (in Chinese).
- [10]Zelenhasić E, Salvai A. A method of streamflow drought analysis. *Water Resour Res* 23(1) (1987)156–168.
- [11]Shiau J, Shen H. Recurrence analysis of hydrologic droughts of differing severity. *J Water Resour Plan Manag* 127(1):30–40, 2001.
- [12] J. Frank, J. Massey. The Kolmogorov-Smirnov Test for Goodness of Fit, *Journal of the American Statistical Association*. 46(253):68-78, 2012.
- [13]X .K. Zeng, D. Wang, J.C. Wu. Evaluating the Three Methods of Goodness of Fit Test for Frequency Analysis. *Journal of Risk Analysis and Crisis Response*. 5(3) (2015); 178-187.