

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2018.05.045

基于 SPEI 的中国百年干旱时空变化特征分析

刘晓勇

(咸阳市水利局, 陕西 咸阳 712000)

摘要: 基于中国 1901 年—2015 年 SPEI 月数据,通过空间干旱识别方法识别出干旱烈度与干旱面积,分别利用 7 种分布函数拟合干旱特征,选出最优分布;利用 6 种 Copula 函数模拟干旱烈度与干旱面积的联合概率分布,基于 Rosenblatt 变换 Cramer - VonMises 检验统计量拟合方法,优选干旱烈度、面积两变量联合分布的 Copula 模型;基于最优 Copula 模型绘制干旱面积 - 烈度 - 频率曲线。结果表明:中国地区在 1901 年—2015 年,干旱面积与干旱烈度都呈明显上升趋势;干旱面积的最优分布为韦伯分布,干旱烈度的最优分布为广义极值分布,两变量之间的相关度较高,最优联合分布模型为正态 Copula 模型,通过面积 - 烈度 - 频率曲线可以识别给定干旱面积重现期条件下干旱烈度的发生频率,对于区域干旱特征分析及水资源管理具有重要的科学意义。

关键词: 干旱;SPEI;时空特征;Copula 函数

中图分类号: P333

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2018)05-0228-05

Analysis of the Spatial and Temporal Variation Characteristics of the Centurial Drought in China Based on SPEI

LIU Xiaoyong

(Xianyang Water Conservancy Bureau, Xianyang, Shaanxi 712000, China)

Abstract: In this paper, SPEI data sets during 1091 to 2015 year were analyzed to explore drought severity (S) and drought area (A), and 7 kinds of distribution functions were adopted to fit S and A to select the optimal fitting functions. 6 kinds of Copula functions were adopted to simulate the joint probability distribution of drought S and A . Based on Rosenblatt's Cramer-Vonmises test statistical fitting method, the Copula model of combined distribution of S and A was optimized. The drought area - intensity - frequency curve was plotted based on the optimal Copula model. The results showed that from 1901 to 2015, both the S and A of drought increased significantly in China. The optimal distribution of drought area is Weibull distribution, the optimal distribution of drought intensity is the generalized extreme value (GEV) distribution, the correlation between the two variables is relatively high, and the optimal joint distribution model is the normal Copula model. The drought-intensity-frequency curve can be used to identify the occurrence frequency of S under given S return period, which is of great scientific significance for regional drought characteristics analysis and water resource management.

Keywords: drought; SPEI; spatial-temporal characteristics; Copula function

干旱是一种持续时间长、影响范围广、发生频率高的自然灾害^[1]。近年来,随着气候变化、人类活动的加剧,干旱发生的强度和频率都有增加的趋势,频发性、高强度的干旱天气加剧了区域水资源供需矛盾,造成水质恶化,作物减产,生态恶化等一系列连锁灾害^[2]。世界上诸多国家和地区都曾受干旱的侵

扰,严重影响了这些国家地区的自然生态环境和人类生活^[3]。由于季风途径和强弱的年际变化大,长期以来我国大范围的干旱频繁发生^[4],据水利部报道,在 1990 年—2007 年间,平均每两年我国就会发生一次极端干旱事件,平均每次干旱引起的粮食减产达 392 亿 kg,占国民经济生产总值的 1.47%,因

干旱引起的经济损失达 700 多亿元^[5]。进入 21 世纪以来,由于气候变化等的影响,中国面临的干旱风险更加严峻,因此,深入理解干旱时空变化特征对于未来干旱发生风险管理及水资源合理配置具有重要意义。

以往关于干旱的研究多是基于站点进行,通过游程理论识别干旱特征(历时、烈度、烈度峰值),利用 Copula 函数分析多种干旱特征的联合分布特性及变量间相依性^[6]。Copula 函数是 Sklar^[7]提出的一种联接函数,Copula 函数可以通过联接不同的边缘分布,获得多变量联合概率特征,在国内外干旱分析中得到了广泛应用^[1,8-13]。Copula 函数的广泛应用表明其能够对多个特征变量进行更优的联合拟合,对干旱发生特点进行更精确地分析^[11]。但是,基于站点的干旱分析方法可以为小范围的干旱风险管理提供准确信息,但是在大规模的干旱管理与风险评估中的适用性较差^[14]。因此,需要在大规模研究区域干旱时空发生特点,探索区域干旱发生风险。

本文以整个中国为研究对象,基于 1901 年—2015 年的月 SPEI 数据,通过空间干旱特征识别方法识别干旱面积与干旱烈度,分析中国百年干旱的时空发生特点,并利用 Copula 函数探究干旱面积与干旱烈度相依性,并绘制干旱烈度—面积—频率曲线。

1 研究资料与方法

1.1 研究数据

本文的研究区域为整个中国地区,数据为 1901 年—2015 年共 115 年的月 SPEI 指数监测干旱,SPEI 指数是 Vicente - Serrano 等^[15]在标准化降水指数(SPI)的基础上通过引入潜在蒸散量构建的,融合了 SPI 和帕尔默干旱指数(PDSI)的优点,SPEI 用水分亏缺量和持续时间 2 个因素来描述干旱,可以很好地表示干旱的程度^[16]。SPEI 数据来源于网站(<http://spei.csic.es/index.html>),空间分辨率为 0.5°。

1.2 干旱特征识别

本研究所用干旱特征包括:

(1) 干旱影响面积(A_t): A_t 表示时刻 t 区域干旱面积($\eta_{\text{spei}} < \eta_{\text{speithr}}$)所占比例,公式为:

$$A_t = \frac{\sum_{i=1}^{N_p} I[\eta_{\text{spei } i, t} \leq \eta_{\text{speithr}}] \times a_i}{\sum_{i=1}^{N_p} a_i} \quad (1)$$

式中: $I[\cdot]$ 为逻辑指标函数; $\eta_{\text{spei } i, t}$ 为第 i 个栅格 t 时期的 SPEI 值; η_{speithr} 为干旱阈值,本文取为 0; a_i 表示第 i 个栅格的面积值; N_p 为栅格总数。

(2) 干旱烈度(S_t):

$$S_t = \frac{\sum_{i=1}^{N_p} I[\eta_{\text{spei } i, t} \leq \eta_{\text{speithr}}] \times \eta_{\text{spei } i, t}}{Nc_t} \quad (2)$$

式中: Nc_t 表示 t 时期干旱栅格总数。

1.3 基于 Copula 的联合概率函数

Copula 函数的理论基础是 Sklar 定理,假设 F_{xy} 是二维联合概率分布函数,其边缘分布为 F_x 与 F_y , 存在一个 Copula 函数使得:

$$F_{xy} = C(F_x, F_y) = C(u, v) \quad (3)$$

如果 F_x 与 F_y 是连续的,则 C 是唯一的,否则 C 由 $\text{ran} F_x \times \text{ran} F_y$ 唯一确定^[17]。

Copula 函数有不同的函数族,本文选用以下 6 种 Copula 函数作为备选 Copula: Gumbel Copula、Clayton Copula、Frank Copula、Joe Copula、Galambos Copula 和 Normal Copula。

1.4 基于 Copula 的条件重现期

干旱烈度关于干旱影响面积的条件重现期可以表示为:

$$T_{s|A}(S | a) = \frac{\mu}{1 - C_{S|A=a}} \quad (4)$$

式中: $\mu = N/n$, N 为数据系列长度(年); n 为干旱发生次数; $C_{S|A=a}$ 表示给定干旱面积 a 时,干旱烈度 S 的累积概率函数。联合 Copula 的条件分布根据下式计算:

$$C_{S|A=a} = \frac{\partial C(F_s(S), F_A(a))}{\partial F_A(a)} \quad (5)$$

2 结果与分析

2.1 干旱特征分析

首先利用 0.5° 分辨率的 SPEI 数据计算出了中国地区的干旱烈度(S)与干旱面积(A) (见图 1)。中国地区 1901 年—2015 年干旱烈度与干旱面积总体呈增加趋势,干旱烈度与干旱面积的变化趋势一致,为探索干旱烈度与干旱面积的关系,首先对两者进行边缘分布拟合,选择最优拟合函数。

2.2 干旱特征边缘分布优选及相依性度量

选择 7 种常用分布函数(Gamma, Weibull, Normal, Lognormal, Logistics, Loglogistics, Gev)对干旱烈度与干旱面积进行拟合,选择 KS 检验与 AD 检验两种检验方法对不同分布进行拟合优度检验,检验结果如表 1 所示,对于干旱面积(A),Weibull 分布的拟合效果最好,对于干旱烈度(S),Gev 分布的拟合效果最好。

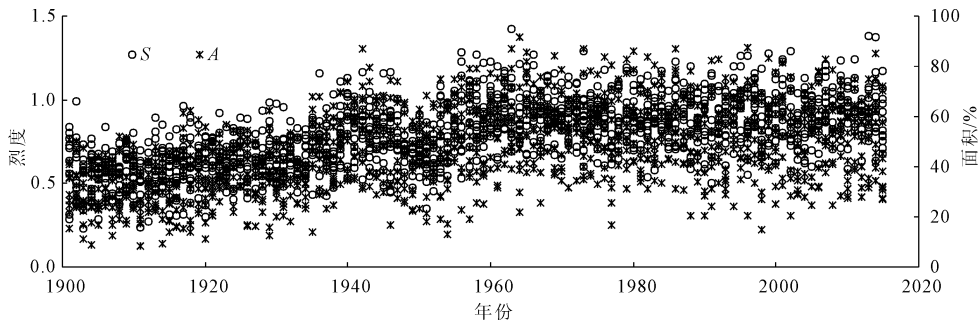


图 1 1900 年—2015 年干旱烈度/面积变化

表 1 干旱面积/烈度边缘分布 KS、AD 拟合优度检验结果

函数类型	A 参数不同检验下 p		S 参数不同检验下 p	
	KS	AD	KS	AD
Gamma	0.0032	0.0015	0.0067	0.0142
Weibull	0.1504	0.1432	0.1869	0.0956
Normal	0.0327	0.0273	0.0818	0.1983
Lognormal	0.000	0.000	0.0001	0.0002
Logistic	0.006	0.0016	0.0106	0.0125
Loglogistic	0.0016	0.000	0.0119	0.0005
Gev	0.095	0.0995	0.3647	0.4572

图 2 中给出了 Weibull 分布拟合干旱面积(A)和 Gev 分布拟合干旱烈度(S)的概率密度图、累积概率分布图、 $P-P$ 图及 $Q-Q$ 图,结果显示, Weibull 分布对于 A 的拟合良好, Gev 分布对 S 的拟合良好,因此,选择 Weibull 分布为 A 的边缘分布, Gev 分布为 S 的边缘分布。

在利用 Copula 函数对变量进行联合之前,首先

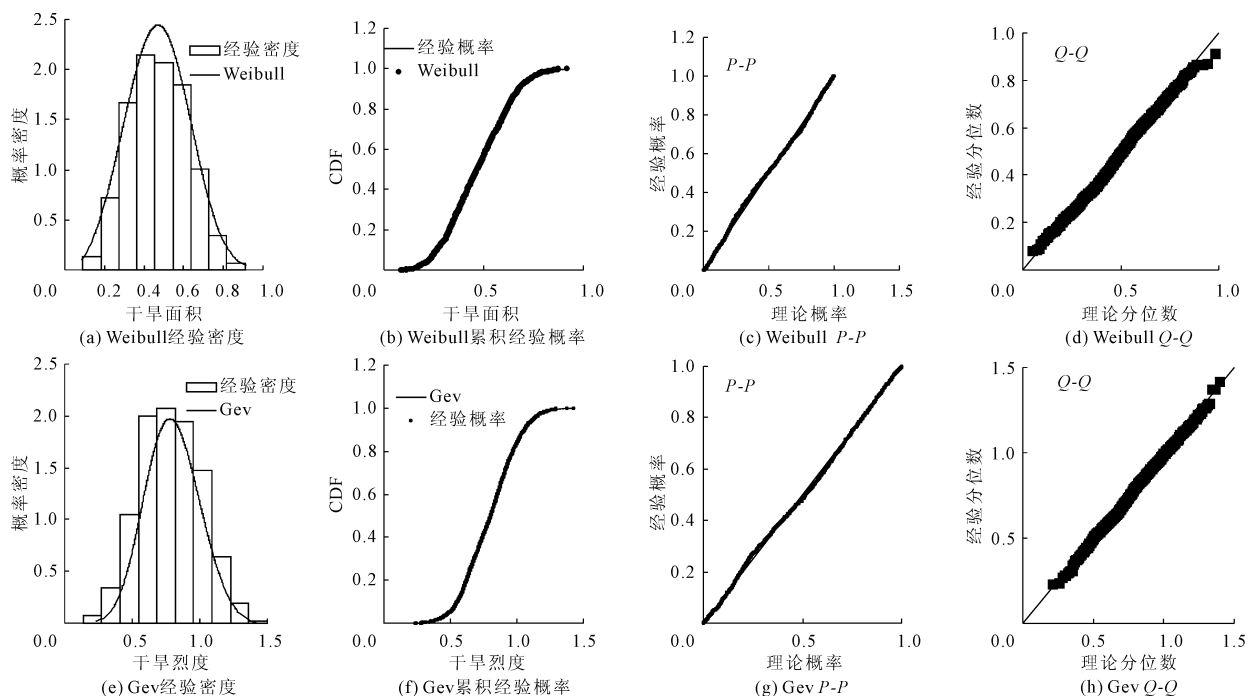
需要对变量的相依性进行度量,判定变量与变量之间是否存在强相依关系。分别绘制了干旱面积与干旱烈度的分级排序散点图、Chi 图和 Kendall 图(见图 3),结果显示,干旱面积与干旱烈度之间存在较强的相依性,可以利用 Copula 函数联结。

2.3 基于 Copula 的干旱特征分析

文中选择了 6 种 Copula 函数 (Clayton, Gumbel, Frank, Joe, Galambos, Normal) 对干旱面积与干旱烈度进行联结,并与经验联合概率进行对比,选择 CM (S_n) 检验方法对拟合结果进行检验,结果表明(表 2) Normal Copula 分布的拟合效果最好。

表 2 不同类型 Copula 模型参数估计及拟合优度检验

模型类型	Clayton	Gumbel	Frank	Joe	Galambos	Normal
参数	1.452	2.058	6.766	2.363	1.340	0.759
CM(S_n)	0.943	0.167	0.044	0.962	0.173	0.025
p	0.005	0.005	0.002	0.002	0.002	0.098

图 2 基于最优分布函数的干旱面积(A)、干旱烈度(S)PDF、CDF、 $P-P$ 、 $Q-Q$ 图

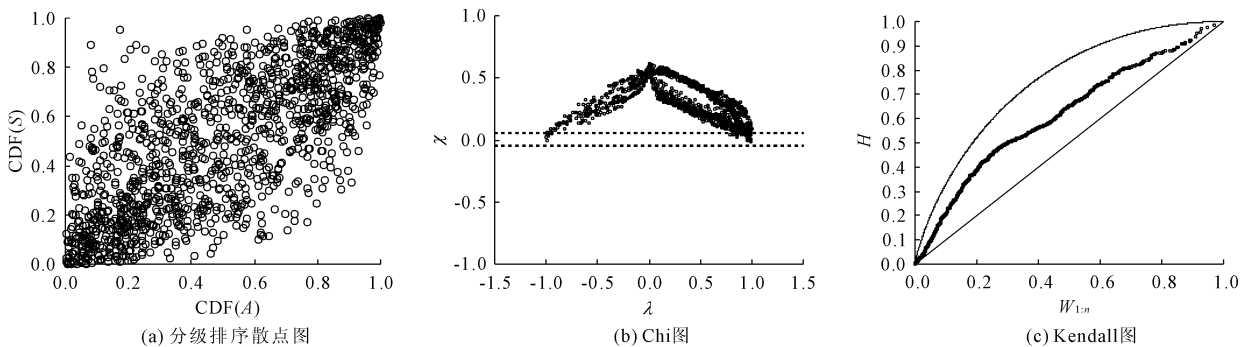


图 3 干旱面积与干旱烈度的相依性度量

为了比较不同 Copula 函数的拟合效果,分别绘制了基于不同 Copula 模型的干旱面积和干旱烈度实测值与随机生成值的累积概率散点图(见图 4)及基于不同 Copula 模型的干旱面积和干旱烈度实测

值与随机生成值散点图,结果表明 Normal Copula 函数的模型效果最好,实测值与随机生成值的匹配效果最优,因此,选择 Normal Copula 函数作为干旱面积与干旱烈度的联接函数。

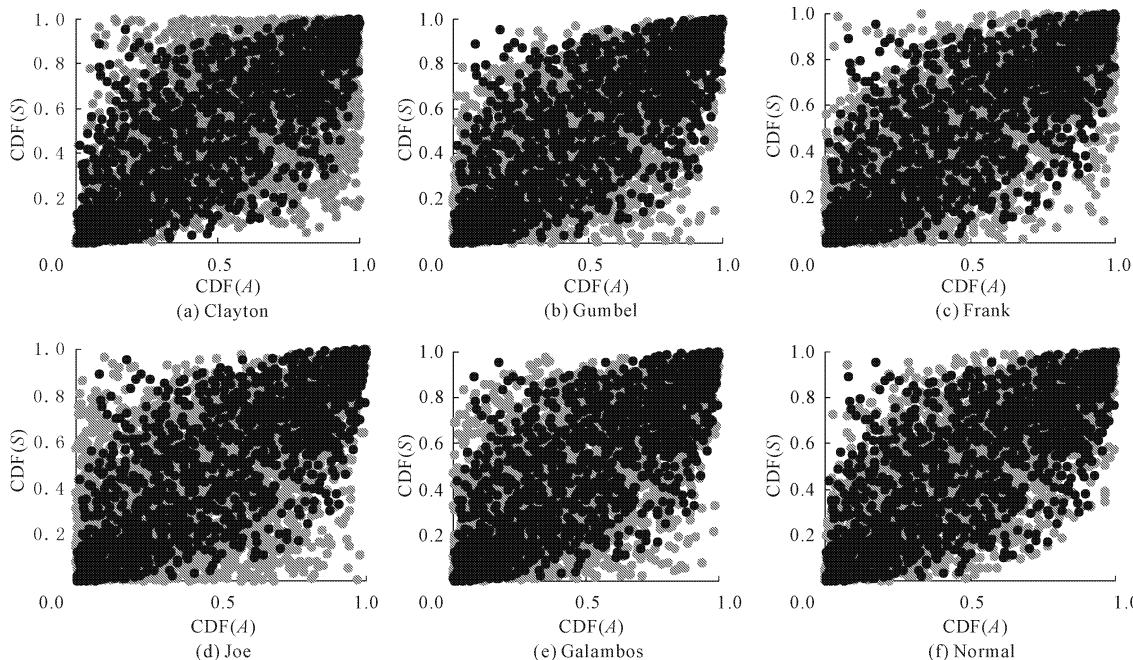


图 4 基于不同 Copula 模型的干旱面积和干旱烈度实测(黑色)与生成(灰色)累积概率散点图

2.4 干旱烈度 - 面积 - 频率曲线

干旱烈度 - 面积 - 频率曲线表示给定干旱面积重现期的条件下干旱烈度的重现期,表示干旱面积对干旱烈度的影响程度,计算公式为:

$$C_{S|A=a} = \Phi\left(\frac{\Phi^{-1}(u_2) - \rho_{12}\Phi^{-1}(u_1)}{\sqrt{1 - \rho_{12}^2}}\right) \quad (6)$$

$$T_{S|A}(S | a) = \frac{\mu}{1 - C_{S|A=a}} \quad (7)$$

式中 $u_1 = F_A(a)$, $u_2 = F_S(s)$, Φ 表示正态变换,具体过程可参见宋松柏教授的 Copulas 函数及其在水文中的应用^[18]。对应不同重现期的干旱烈度 - 面积 - 频率曲线如图 5 所示,随着干旱烈度的增加,干旱

面积也呈增加趋势。根据干旱烈度 - 面积 - 频率曲线图可以识别给定干旱面积重现期条件下干旱烈度的发生频率。对于区域干旱特征分析及水资源管理具有重要的科学意义。

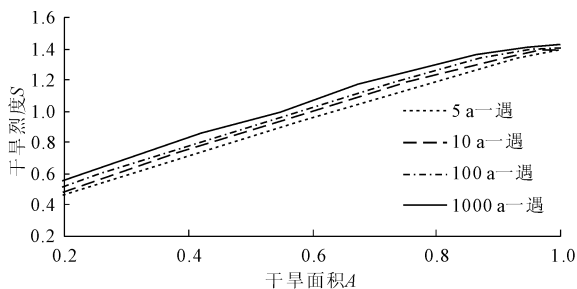


图 5 不同重现期对应的面积 - 烈度 - 概率曲线

3 结 论

正确识别区域干旱特征对于水资源管理具有重要的指导意义。本文基于中国地区 1901—2015 年的月 SPEI 数据对干旱烈度与干旱面积进行识别,并优选出最适宜边缘分布函数,进而优选 Copula 函数对干旱面积与干旱烈度进行联合,最后绘制干旱烈度-面积-频率曲线,对干旱特征进行分析,得到以下主要结论:

(1) 1901 年—2015 年间,中国地区基于 SPEI 指数识别的干旱烈度与干旱面积总体呈增加趋势,且两者趋势一致,具有较强的相依性。

(2) 干旱面积最适宜的边缘分布函数为 Weibull 分布,干旱烈度最适宜的分布函数为 Gev 分布,干旱面积与干旱烈度的最适宜联接函数为 Normal Copula 函数。

(3) 根据干旱烈度-面积-频率曲线,随着干旱烈度的增加,干旱面积也呈增加趋势,根据干旱烈度-面积-频率曲线图可以识别给定干旱面积重现期条件下干旱烈度的发生频率,对于区域干旱特征分析及水资源管理具有重要的科学意义。

参考文献:

- [1] Chang J, Li Y, Wang Y, et al. Copula-based drought risk assessment combined with an integrated index in the Wei River Basin, China[J]. *Journal of Hydrology*, 2016, 540: 824-834.
- [2] Sheffield J, Wood E F, Roderick M L. Little change in global drought over the past 60 years[J]. *Nature*, 2012, 491: 435-438.
- [3] Dai A. Increasing drought under global warming in observations and models[J]. *Nature Climate Change*, 2012, 3(1): 52-58.
- [4] 程 亮,金菊良,酆建强.干旱频率分析研究进展[J]. *水科学进展*, 2013, 24(2): 296-302.
- [5] Xu K, Yang D, Yang H, et al. Spatio-temporal variation of drought in China during 1961—2012: A climatic perspective[J]. *Journal of Hydrology*, 2015, 526(3): 253-264.
- [6] 涂新军,陈晓宏,赵 勇,等.变化环境下东江流域水文干旱特征及缺水响应[J]. *水科学进展*, 2016, 27(6): 810-821.
- [7] Sklar M. Fonctions de répartition à n dimensions et leurs marges[J]. *Publ. Inet. Statist University Paris*, 1959, 8: 229-231.
- [8] Kao S-C, Govindaraju RS. A copula-based joint deficit index for droughts[J]. *Journal of Hydrology*, 2010, 380(1): 121-134.
- [9] 李 扬,宋松柏.基于分层阿基米德 Copulas 的干旱特征多变量联合概率分布研究[J]. *水力发电学报*, 2013, 32(2): 35-42.
- [10] 陆桂华,闫桂霞,吴志勇.基于 copula 函数的区域干旱分析方法[J]. *水科学进展*, 2010, 21(2): 188-193.
- [11] 王晓峰,张 园,冯晓明.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.
- [12] 许月萍,张庆庆,楼章华,等.基于 Copula 方法的干旱历时和烈度的联合概率分析[J]. *天津大学学报*, 2010, 43(10): 928-932.
- [13] 周玉良,袁潇晨,金菊良.基于 Copula 的区域水文干旱频率分析[J]. *地理科学*, 2011, 31(11): 1383-1388.
- [14] Amirataee B, Montaseri M, Rezaie H. Regional analysis and derivation of copula-based drought Severity-Area-Frequency curve in Lake Urmia basin, Iran[J]. *J Environ Manage*, 2018, 206: 134-144.
- [15] Thornthwaite C W. An approach toward a rational classification of climate[J]. *Geography Review*, 1948, 38(1): 55-89.
- [16] 芦佳玉,延军平,李英杰.基于 SPEI 及游程理论的云贵地区 1060—2014 年干旱时空变化特征[J]. *浙江大学学报(理学版)*, 2018, 45(3): 363-372.
- [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] 宋松柏,蔡焕杰,金菊良,等. Copulas 函数及其在水文中的应用[M]. 北京:科学出版社, 2012.