

基于 Copula 相依函数的安徽省气温与降雨量相关性研究¹

叶明华¹, 汪荣明¹, 丁越¹, 束炯²

(1 . 华东师范大学统计学院, 上海 200241 ; 2 . 华东师范大学地理信息科学教育部重点实验室, 上海 200241)

【摘要】当前全球气候变暖大背景下, 气温和降雨量的交互作用引致农业气象灾害频发, 给农业生产造成破坏性风险损失, 因此探讨气温与降雨量之间的动态相依关系尤为重要。搜集安徽省 24 个气象观测站 1980 — 2014 年的气温与降雨量日数据, 对原始数据进行矩平均处理, 使两组数据列满足独立同分布的要求。采用非参数核估计的方法确定气温与降雨量的边缘分布。根据降雨量和气温的均匀分布散点图和频数分布直方图可知, 安徽省气温和降雨量之间呈现一定程度的负相依关系, 即图形中表现出气温与降雨量的上下尾之间的对称性。综上分析, 选择可以刻画两个变量具有上下尾对称关系的 Copula 函数对气温与降雨量的相依关系进行拟合, 最终在平方欧式距离最小的原则下选定二元 t — Copula 函数做出气温与降雨量之间的联合概率密度函数图。研究结果发现: ①据安徽省气温与降雨量联合概率分布可知, 当降雨量上升时, 气温下降; 或气温上升时, 降雨量会下降, 气温与降雨量之间呈现为中等负相关关系 (0.280)。②极值相关性方面, 从 t — Copula 密度函数图和上下尾相关系数看, 安徽省气温与降雨量在极值方面具有较为明显的相依关系, 表现为当气温和降雨量超过正常范畴时, 二者相依关系从负相关转变为正相关, 此现象多出现在极端气候条件下, 例如极端高温和大暴雨时气温与降雨量的正相依性。

【关键词】气温; 降雨量; Copula 函数; 联合概率分布; 极值相关

【中图分类号】5114

【文献标志码】A

【文章编号】1004 — 8227(2017)01 — 0110 — 08

【DOI】10.11870/cjlyzyyhj201701013

降雨量的急剧减少会造成干旱, 而降雨强度和时长的增加又会造成洪涝、泥石流和山体滑坡等自然灾害, 因此, 降雨量的变化深刻影响着生态环境。另一方面, 降雨量的累积变化最终会影响我国水资源的丰歉状态 [1], 从而影响农业生产、财政平衡和国家粮食安全战略 [2]。故此, 降雨量的变化始终是气候学领域一个重要的研究议题 [3]。当前, 国内外对降雨量的研究, 可以分解在两个不同视角: 第一是对降雨量自身变化规律的研究, 尤其是降雨量时空分布的刻画; 第二是对降雨量与其他气象要素之间相关关系的研究 [4]。

¹收稿日期: 2016 — 05 — 20 ;

修回日期: 2016 — 09 — 26

基金项目: 国家自然科学基金 (71403088) [National Natural science Foundation of china (71403088)]; 国家社科基金重大项目 (13 & ZD161) [National social science Fund Key Projects (13 & ZD161)]; 高等学校学科创新引智计划 (B1401g) [supported by the 111 Project (B14019)]

作者简介: 叶明华 (1978 —), 女, 副教授, 研究方向为农业风险管理. E — mail: mhye@stat.ecnu.edu.cn

对降雨量自身变化规律的研究又可归纳在两个方面：其一是对降雨量空间分布的分析，其二是对降雨量时间视角上变动趋势的研究。在降雨量的时间与空间分布特征研究中，既往相关文献因使用的数据样本不同、研究区域不同而获得不同的研究成果，以四川为例的研究发现，降雨强度和日最大降雨量呈上升趋势 [5]；以我国 666 个气象站点近 50a 研究发现，我国整体来看，全国合计降雨量无明显变化 [6]。中美的降雨量比较也印证我国年降雨量总体平稳，美国年降雨量显著增加 [7]。

当前对降雨量与其他气象要素之间关系的研究主要集中在探讨降雨量与气温变化的关系。当前全球气候变暖已经获得基本认可 [8]，在此前提条件下，探讨气候变暖对降雨量的影响，进而对于干旱和洪涝灾害的影响尤为重要。降雨量和气温交互作用的结果使得农业气象灾害频发 [9]，给农业生产造成破坏性风险损失，也使得农业保险机构面临赔付的系统性风险损失 [10]。那么，气温和降雨量之间到底存在怎样的关系？大多数文献研究的基本结论是一致的，即，气温高低与降雨量大小之间存在正向相关关系 [11—13]；或气温上升会影响降雨的时长 [14]。

但是，论证气温与降雨量相关性的算法却存在较大差异。最直观的方法是测算二者相关系数 [15]，通过符号判别气温与降雨量之间存在正向相关关系 [16]，这种方法虽简单易算，但计算结果只能获得气温与降雨量基本相关的结论，无法获得二者在不同阶段上的动态相关关系，并且，直接计算相关系数无法排除气温与降雨量之间“伪相关”的可能性。除相关系数测算外，也有学者采用线性方法拟合气温与降雨量的回归方程，此方法的前提假设是气温与降雨量之间存在线性关系 [17]，但是，从统计学角度看，符合线性回归的条件是两个变量的数据列分布符合平稳性。在全球气候变暖获得认可的前提下，即气温存在上升趋势，则气温数据列已然不符合平稳性假设。再则，气温与降雨量之间可能并非简单的线性相关关系 [18, 19]。

综上所述，在全球气候变暖趋势下，理清气温与降雨量之间的相依关系可为气温升高情况下，更好掌握降雨量的变动趋势，从而做好干旱与洪涝灾害的预防与风险管理工作奠定基础。目前，既往相关研究对二者关系测算的统计方法具有一定局限性，本文拟在非参数估计基础上，采用 Copula 函数刻画气温与降雨量之间的联合概率分布。因为非参数估计的方法无需假定气温与降雨量之间具有线性关系，而 Copula 函数获得的气温与降雨量之间的联合概率分布，可以刻画两个气象变量的交互影响过程，而非单向影响关系。

1 研究区概况

安徽省位于我国东部季风区，在 $114^{\circ} 54' E$ — $119^{\circ} 37' E$ ， $29^{\circ} 41' N$ — $34^{\circ} 38' N$ 之间，省内大部分地区年均气温在 $14.5^{\circ} C$ — $17.2^{\circ} C$ ；东面距海洋较近，大部分地区年均降雨量在 800—1700mm。淮河以北属于温带季风气候，淮河以南属于亚热带季风气候。安徽省气候具有明显的过渡型特征，天气多变，气象灾害发生频繁，且种类较多，主要有：暴雨、干旱、台风、暴雨、冰冻、低温、大风、雷电、冰雹等。其中旱涝灾害最为严重，淮北旱涝 2—3 年一遇，淮河以南 3—4 年一遇 [20, 21]。一年中旱涝交替、旱涝并存也时有发生。安徽省是我国江淮流域最重要的粮食主产区，是我国仅有的六个粮食净调出省份之一。影响安徽省粮食生产最重要的气象灾害是旱灾与涝灾，而影响旱涝灾害的关键气象要素是降雨量和气温，因此，破解降雨量与气温之间的相依关系，对深入解析安徽省旱涝灾害成因，做好防灾减灾工作，从而保障安徽省粮食产出的稳定增长具有重要作用。

2 建立气温与降雨量的 Copula 相依函数及数据分析

以下将选择以 Copula 函数来刻画气温与降雨量之间的相依关系。与其他刻画两个变量相关关系的其他统计方法相比，Copula 函数具有一些优势：一是 Copula 函数拟合的变量相依关系可以无需假设变量符合某些既定分布；二是 Copula 给出的是变量之间的联合概率密度函数，而非简单的相关系数，这有利于分析气温与降雨量之间的相互影响，而非单向影响；三是 Copula 函数还可以获得两个变量在极值区域上的相关关系，这提供了计算气温与降雨量极值相关性的一种途径。

2.1 copula 函数

任一 k 维的联合分布都可以分解为 k 个任意形式的边缘分布和一个 Copula 函数 [22], 这个 Copula 函数刻画了 k 维变量之间的相关性。设 F 为一个 n 维的联合分布函数, 各变量的边缘分布函数记为 F_i , 那么存在一个 n 维 Copula 函数 C , 使得:

$$F(x_1, \dots, x_n) = C(F(x_1), \dots, F(x_n)) \quad (1)$$

对随机变量 $X_1, \dots, X_n$ 分别作严格单调递增变换 $Y_i = h_i(X_i)$ ($i=1, \dots, n$), 相应的 Copula 函数不变, 即 $C_{X_1, \dots, X_n} = C_{Y_1, \dots, Y_n}$ 。

假设 X 表示安徽省的降雨量, Y 表示安徽省的气温, 则安徽省气温与降雨量之间的联合分布函数为 $F(x, y)$, $F_X(x)$ 和 $F_Y(y)$ 分别为 (X, Y) 的连续边缘分布函数, 则 (X, Y) 的联合分布函数可以写为:

$$F(x, y) = C(F_X(x), F_Y(y)) \quad (2)$$

其中 C 就是气温与降雨量的 Copula 函数。 C 的概率密度函数 $c(u, v) = \partial^2 C(u, v) / \partial u \partial v$, $F_X(x)$, $F_Y(y)$ 分别为降雨量和温度的边缘分布函数的密度函数, 则 X, Y 的联合分布的密度函数为:

$$f(x, y) = c(u, v) f_X(x) f_Y(y) \quad (3)$$

2.2 数据搜集与预处理

本文选取安徽省 1980 — 2014 年气温与降雨量日数据, 将其转换成月度数据作为研究对象。数据采集自安徽省境内场山、亳州、蒙城、宿县、阜阳、蚌埠、定远、寿县、滁州、六安、霍山、桐城、合肥、巢湖、马鞍山、芜湖、太湖、东至、安庆、铜陵、宁国、黄山、祁门、屯溪等 24 个气象双测站。数据自 1980 年开始是因为安徽省不同气象观测站 1980 年之前的气温与降雨量数据均有不同程度的缺失情况, 虽可使用移动平均等方式进行补缺, 但是由于气象数据具有随机性, 补缺值无法反映真实气象情况。数据来自地理信息科学教育部重点实验室和中国气象局公共气象服务中心, 数据分析和程序运行均采用 Matlab2013 软件完成。

由于气温与降雨量具有很强的随机变动特征, 无法假定其具有线性趋势或正态分布, 因此以下运用非参数核估计方法对安徽省气温与降雨量的分布形态进行研究。非参数核估计要求降雨量和气温的时间序列符合独立同分布。然而降雨量和气温的原始月度数据仅满足独立性条件。经过初步分析发现安徽省不同地区、不同月份的降雨量和气温数据差别较大, 两组数据列不满足同分布的条件, 因此需要对降雨量和气温的月度数据进行矩平均处理。首先, 对每个观测站计算各个月份降雨量的平均值 $\bar{x}_i$; 然后, 用各个观测站降雨量的月度原始数据减去对应月份降雨量的平均值, 再除以平均值, 得到各个观测站降雨的矩平均数据。最后, 取 24 个观测站月度矩平均数据的平均值作为安徽省的降雨量数据, 气温数据也做类似处理, 得到安徽省降雨量数据列 $\{X_i\}_{i=1}^{420}$ 和气温数据列 $\{Y_i\}_{i=1}^{420}$ 。

对安徽省降雨量数据列 $\{X_i\}_{i=1}^{420}$ 和气温数据列 $\{Y_i\}_{i=1}^{420}$ 进行描述性统计分析, 图 1 显示了安徽省降雨量的频率直方图, 图 2 显示了气温的频率直方图。

据图 1 的降雨量频率直方图可知，降雨量数据分布具有非对称性，呈现一定的右偏特征；据图 2 的气温频率直方图可知，气温数据分布基本对称，但呈现出尖峰、厚尾的分布特征。接着计算降雨量和气温的偏度和峰度，结果如表 1 所示。气温和降雨量的偏度和峰度值都偏离正态分布所需具备的偏度和峰度，因此可以初步判定安徽省的气温和降雨量数据列都不服从正态分布。

为进一步验证安徽省的气温与降雨量的分布形态，对两组数据列进行正态性假设检验，结果如表 2 和表 3 所示。其中 Jarque—bera 检验、Kolmogorov-Smirnov 检验和 Lilliefors 检验的显著性水平都是 1%。3 种检验的 h 值均为 1, p 值均小于 0.01，因此有理由认为安徽省的气温和降雨量数据不符合正态分布的假设。

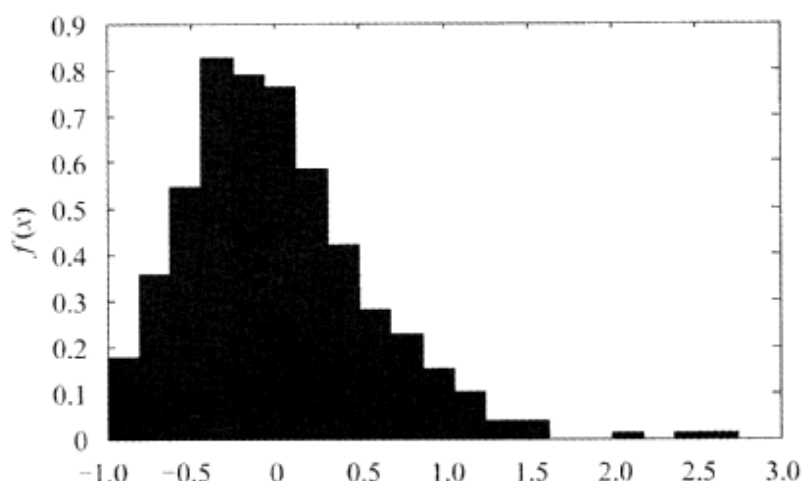


图 1 安徽省降雨量数据 $\{X_i\}_i$ 的频率直方图(1980~2014)
Fig.1 Rainfall Data $\{X_i\}_i$ Frequency Histogram of Anhui Province

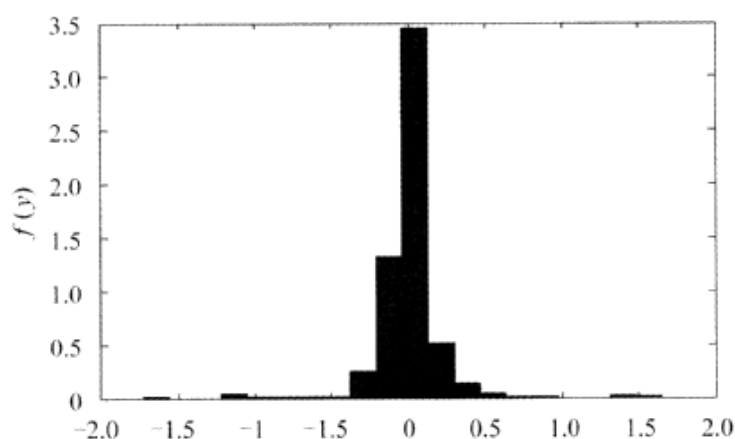


图 2 安徽省气温数据 $\{Y_i\}_i$ 的频率直方图(1980~2014)
Fig.2 Temperature Data $\{Y_i\}_i$ Frequency Histogram
of Anhui Province

表 1 安徽省气温和降雨量的偏度和峰度

Tab.1 Skewness and Kurtosis of Temperature and Rainfall

变量	偏度	峰度	结论
降雨量	1.037	5.362	非正态
气温	0.113	24.653	非正态

表 2 安徽省降雨量的正态性假设检验

Tab.2 Results of Normality Test of Rainfall

假设检验类型	H	p	结论
Jarque-Bera	1	<1.000 0e-03	非正态
Kolmogorov-Smirnov	1	0.031	非正态
Lilliefors	1	<1.000 0e-03	非正态

表 3 安徽省气温的正态性假设检验

Tab.3 Results of Normality Test of Temperature

假设检验类型	h	p	结论
Jarque-Bera	1	<1.000 0e-03	非正态
Kolmogorov-Smirnov	1	5.700 0e-16	非正态
Lilliefors	1	<1.000 0e-03	非正态

2.3 非参数核密度估计

在分析气温和降雨量的边缘分布时，有参数估计和非参数估计两种方法。由于气温与降雨量大多具有随机特征，难以假定其符合正态分布或其他既定分布，因此以下考虑应用非参数核密度估计方法来估计气温与降雨量的边缘分布，并对 Copula 中的参数口进行参数估计和统计检验。利用核密度函数得到降雨量和气温的非参数核密度估计分别为：

$$\begin{cases} \hat{f}_X(x) = \frac{1}{nh_X} \sum_{i=1}^n K_X\left(\frac{x-X_i}{h_X}\right) \\ \hat{g}_Y(y) = \frac{1}{nh_Y} \sum_{i=1}^n K_Y\left(\frac{y-Y_i}{h_Y}\right) \end{cases} \quad (4)$$

其中 K_X, K_Y 分别表示降雨量和气温的核函数， h_X, h_Y 分别表示降雨量和气温的光滑参数。通过不断调整光滑参数，可以得到降雨量和气温较为满意的密度曲线估计；在大样本情况下，核密度函数具有渐进相容性和渐进正态性 [23]，因此可以采用

正态分布核函数来选择光滑参数，从而得到气温和降雨量两个数据列的核密度函数估计 $\hat{f}_X(x), \hat{g}_Y(y)$ 。

根据核密度函数，可以得到降雨量和气温的核分布估计，即

$$\begin{cases} \hat{u}_i = \hat{F}_X(X_i) = \int_{-\infty}^{X_i} \hat{f}_X(x) dx \\ \hat{v}_i = \hat{F}_Y(Y_i) = \int_{-\infty}^{Y_i} \hat{f}_Y(y) dy \end{cases} \quad (5)$$

据此做出降雨量和气温的核分布估计图和经验分布函数图，如图 3 和图 4 所示。从图形的形态上看，安徽省气温和降雨量的经验分布函数和核分布估计几乎重合，说明 $\{\hat{u}_i\}_{i=1}^{420}, \{\hat{v}_i\}_{i=1}^{420}$ 是来自 $[0, 1]$ 上的均匀分布。

2.4 气温与降雨量的 Copula 函数选取

由已得到的 Copula 函数中的 (u_i, v_i) 的估计值 $(\hat{u}_i, \hat{v}_i)$ ，绘制气温和降雨量的均匀分布散点图和频数分布直方图，如图 5 和图 6 所示。

据图 5 降雨量和气温的均匀分布散点图和图 6 的降雨量和气温的频数分布直方图可知，安徽省气温和降雨量之间呈现一定程度的负相依关系，并且图形中同时表现出气温与降雨量的上下尾之间的对称性。根据两者上下尾的对称性，据此选择可以刻画两个变量具有上下尾对称关系的二元正态 Copula、t-Copula 和 Frank-Copula 进行拟合；最后再依据 3 个 Copula 函数的平方欧式距离最小的原则最终确定具体的 Copula 密度函数表达式。

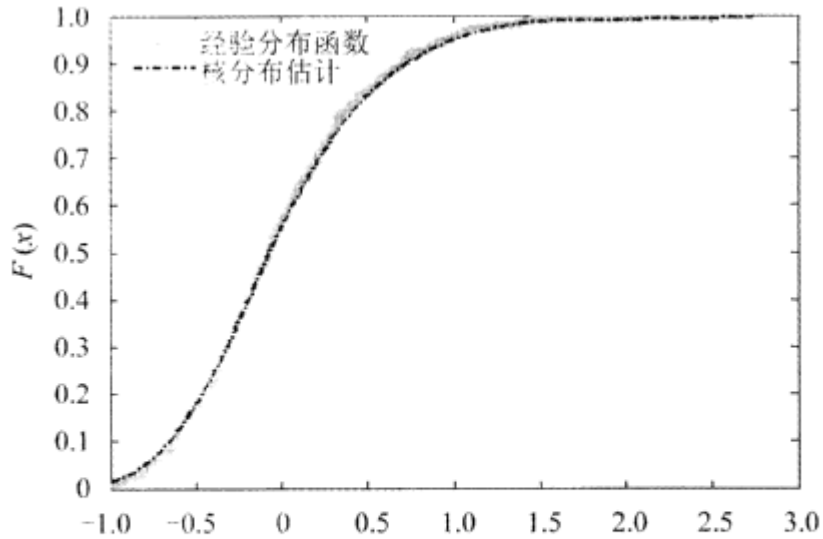


图 3 降雨量的核分布估计和经验分布函数

Fig.3 Kernel Estimation Distribution and Empirical Distribution of Rainfall

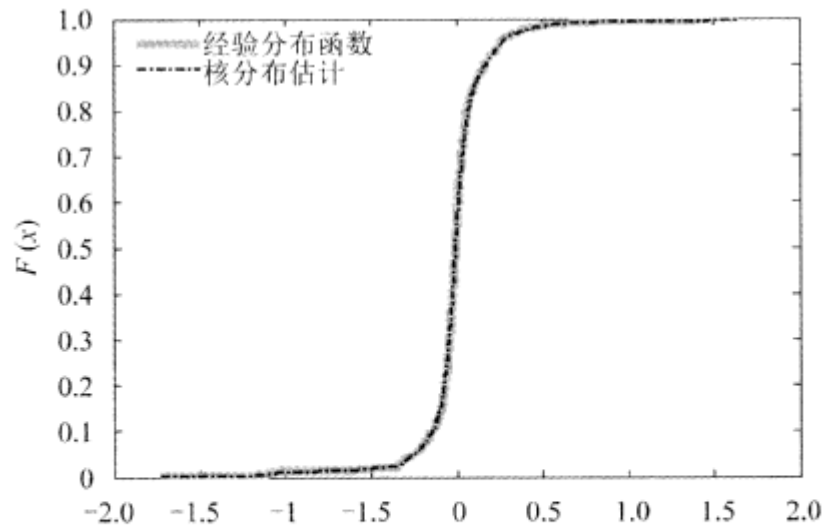


图 4 气温的核分布估计和经验分布函数

Fig.4 Kernel Estimation Distribution and Empirical Distribution of Temperature

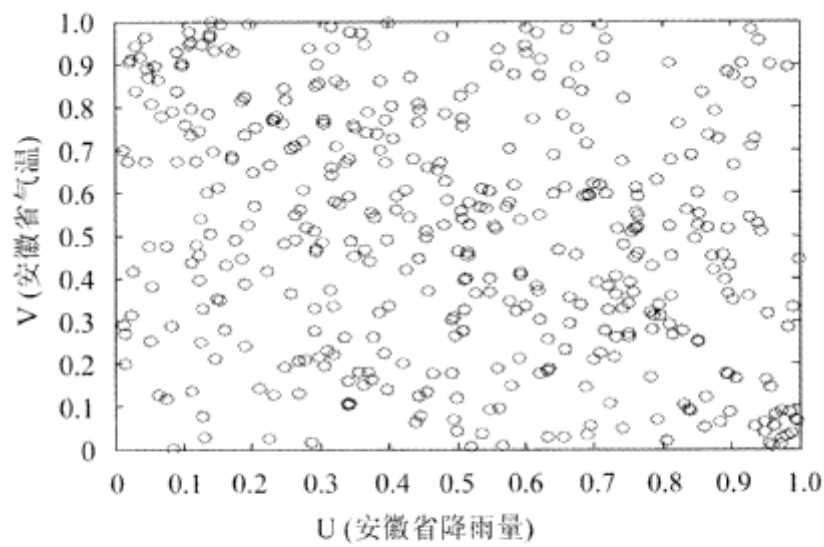


图 5 气温和降雨量的均匀分布散点图

Fig.5 Uniformly Distributed Scatter Plot of Rainfall and Temperature

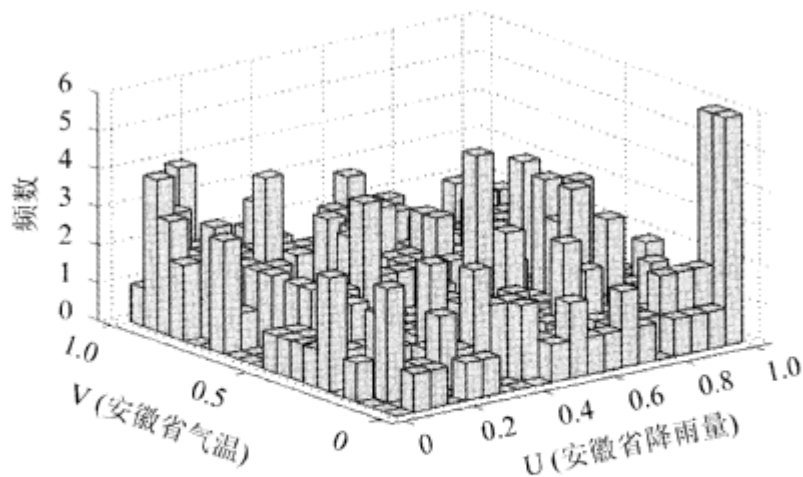


图 6 气温和降雨量的频数分布直方图

Fig.6 Absolute Frequency Histogram of Rainfall and Temperature

3 气温与降雨量 Copula 函数的参数估计和相关系数计算

在选定了二元正态 Copula、t-Copula 和 Frank-Copula 来刻画气温与降雨量之间的相依关系后，需妥议其概率密度函数的参数进行估计。

3.1 参数估计

前述已得到气温和降雨量的核分布估计，即 Copula 函数中 (u_i, v_i) 的估计值 $(\hat{u}_i, \hat{v}_i)$ ，以下利用极大似然法分别估计气温与降雨量的二元正态 Copula、t-copula 和 Frank-Copula 概率密度函数的参数 α 。结果如表 4 所示。

表 4 气温与降雨量的 3 种 Copula 函数的参数估计值
Tab.4 Estimate Value of Parameter of Three Copula Models

Copula 函数类型	参数	自由度
正态 copula	-0.274	-
t-copula	-0.297	6.376
Frank Copula	-1.826	-

在气温与降雨量的 3 个 Copula 函数的参数都估计出来之后，需要对其进行取舍，寻找最能刻画二者相依关系的 copula 函数，基于经验 copula 函数，利用最小平方欧式距离对不同 Copula 函数的拟合优度进行评价。平方欧式距离反映不同 Copula 的拟合情况，平方欧式距离越小，说明拟合效果越好。各 Copula 函数的平方欧式距离如表 5 所述。

表 5 气温与降雨量的3种Copula函数的平方欧式距离计算结果

Tab.5 Squared Euclidean Distance of Three Copula Models

Copula函数	平方欧式距离
正态Copula	0.019
t-Copula	0.019
Frank Copula	0.030

据表 5 可知，在气温与降雨量的 3 种 Copula 函数中，t-Copula 函数的平方欧式距离最短，表示其与真实值的偏差最小，因此对气温与降雨量之间相依关系的拟合效果最好。选定具体的 Copula 函数之后，可据此做出降雨量和气温的 t-Copula 概率密度函数和分布函数图以便观察气温与降雨量之间的尾部相关特征。图 7 显示了气温与降雨量相依关系的 t-Copula 概率密度函数。

据图 7 可知，气温与降雨量的 t-Copula 密度函数在尾部体现出较明显的厚尾特征，这说明降雨量和气温之间的尾部相关性能被 t-Copula 函数清晰地刻画出来，但是气温与降雨量之间准确的相依关系还需要通过计算相关系数获得。

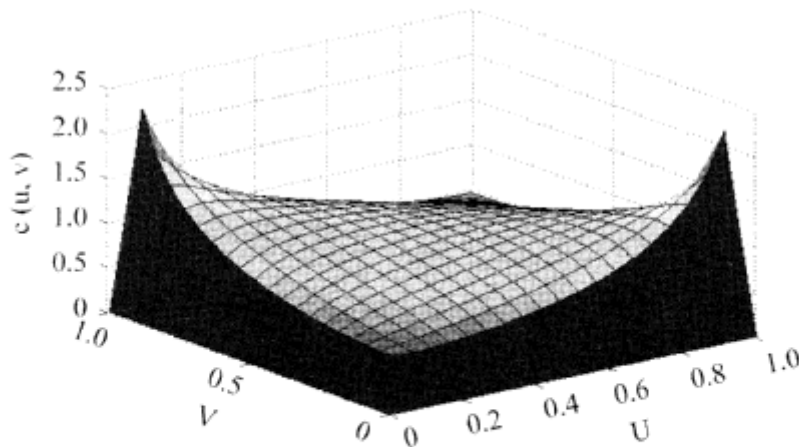


图 7 气温与降雨量的二元t-Copula密度函数

Fig.7 Probability Density Function Diagram of Rainfall and Temperature in t-copula Model

3.2 气温与降雨量不同 Copula 函数的相关系数计算

依 Copula 函数的相关性质可知，当随机变量严格单调变换时，Copula 函数不变。可得到气温与降雨量在不同 Copula 函数情形下的相关系数值及其尾部相关关系。

根据 Kendall 相关系数、Spearman 相关系数和上下尾相关系数的计算式，求出气温与降雨量样本数据的各相关系数及二元 t-Copula 函数对应的相关系数，如表 6 所示。

表 6 安徽省气温与降雨量的 3 种 Copula 函数的相关系数值
Tab.6 Temperature and Rainfall Correlation Coefficient of Three
Copula Models in Anhui Province

Copula 函数	Kendall 的 τ	Spearman 的 ρ	上尾系数 λ^U	下尾系数 λ^L
正态 Copula	-0.177	-0.262	0	0
t-Copula	-0.192	-0.280	0.003	0.003
Frank Copula	-0.197	-0.292	0	0

根据表 6 中 3 种 Copula 函数的 Kendall 相关系数 τ 值和 Spearman 的 ρ 相关系数值可知，安徽省气温和降雨量变化一致的概率小于变化不一致的概率，也即整体来看，气温和降雨量之间存在较为明显的负相关关系，其中 t-Copula 概率密度函数将二者在不同取值阶段上的负相关关系进行了较为清晰的刻画。根据气温与降雨量 Copula 的概率密度图可知二者具有尾部相依关系，表 6 则具体显示了气温与降雨量尾部相关性具有明显的对称性特征，其中上尾和下尾的相依系数均为 0.003，这意味着安徽省气温和降雨量同时出现极大值（或极小值）的概率为 0.3%。

3.3 造成气温与降雨量相关关系的机理分析

关于气温与降雨量相关关系的上述测算结果，可以从大气环流及其全球气候变化的机理进行解析。近百年来全球和中国的气候正经历一次以变暖为主要特征的显著变化。首先，气候变暖导致陆地和海洋表面增温，蒸发蒸腾量增加，大气水汽含量也会增加，增加了水循环的强度。其次，气候变暖导致大气的持水能力增加，这就需要大气中有更多水汽才能饱和。如没有形成降水的条件，则陆地更干，形成干旱，一旦大气达到饱和，达到降水条件，则由于此前“吞噬”、“封存”的水汽，此时的降水强度加强，导致洪涝灾害。再者，气候变暖改变了地球的热量平衡，减弱大气环流的纬向流动，但增强大气环流经向流动。这种纬向型环流的减弱，经向型环流的增强，导致南北热量和水汽交换加强，天气往往产生异常。最后，气候变暖导致水循环变化，大气环流异常，异常天气气候事件不断发生：例如干旱增多、面积增大，降雨增强，在有些地区，小到中雨频率减少，大到暴雨强度和频率增加。因此在一定条件下，本文以安徽省气象数据为例测算获得的气温增高导致的降水量增加，在一定的时段和范围内，具有统计学的规律，在一定程度上有其物理学的解释。

4 结论

本文以安徽省 24 个气象观测站 1980—2014 年的气温与降雨量的日数据为基础，为剔除周期性因素及其满足数据独立同分布的要求，对原始数据进行矩平均处理，采用非参数核密度估计确定了气温与降雨量的边缘分布，最终获得二者的 Kendall 相关系数值和 Spearman 相关系数值。根据计算结果，可获得如下结论及研究结果的可能应用之处。

(1) 从安徽省气温与降雨量频数分布直方图来看，二者之间具有较为明显的相关关系。而 t-Copula 函数的计算结果则验证了气温与降雨量在两个层面的具体相关性：第一，从气温与降雨量的联合概率分布来看，二者整体表现出负相关关系，也即，当降雨量上升时，气温会下降；或气温上升时，降雨量会下降，二者的整体负相关程度为中等相关关系（-0.280）。究其原因：一是降雨量较大时一般云层较厚，太阳辐射低，因此气温较低。例如梅雨时节，长期连阴雨，太阳辐射减少，则气温下降；二是秋冬季节的降雨常为冷平流造成，易出现降雨增多，气温下降现象。第二，从二者的 t-Copula 概率密度函数图和上下尾相

关系数来看,安徽省气温与降雨量在极值方面具有较为明显的正向相依关系,这是因为安徽省雨热同步,5—9月既是气温最高的时段,又是一年中降雨最多的时段,气温最高时段和降雨最多时段在时间序列上的一致性使二者呈现极值正相关性。

(2) 本文研究结果在未来相关领域的可能应用。既往理论分析和灾害决策层面对于干旱的预测较多采用 Palmer 干旱指数 [24],但是该指数仅使用降雨量这个单一的气象因素。实际上,从干旱区域的实际分布情况来看,干旱并非仅受降雨量影响,而是气温与降雨量交互作用的结果,因此,本文研究获得的气温与降雨量之间的 Copula 联合概率分布对于将来采用两气象因素甚至多重气象因素方法综合评估干旱程度和频数提供了基于 Copula 函数的数理基础。

参考文献:

- [1] LIU ZY , ZHOUP , CHEN XZ , et al . A multivariate conditional model for streamflow prediction and spatial precipitation refinement [J] . Journal of Geophysical Research : Atmospheres , 2015 , 120 (19) : 10116 — 10129 .
- [2] 魏柱灯,方修琦,苏绮.气候变化对中国古代财政平衡的影响团.地理科学,2015,35(9):1156—1163.
- [3] SCHLONZEN KH , HOFFMANNP , ROSENHAGENG , et al . Long - te 溯 changes and regional differences in temperature and precipitation in the metropolitan area of Hamburg [J] . International Journal of Climatology , 2010 , 30 (8) : 1121 — 1136 .
- [4] 虞海燕,刘树华,赵娜,等.我国近59年日照时数变化特征及其与温度、风速、降水的关系口].气候与环境研究,2011,16(3):389—398.
- [5] ZENGW , Yuz , wu sH , et al . Changes in annual , seasonal and monthly precipitation events and their link with elevation in Sichuan province , China [J] . International Journal of Climatology , 2015 , 36 (5) : 2303 — 2322 .
- [6] WU YJ , WU SY , WEN JH , et al . Changing characteristics of precipitation in China during 1960 — 2012 [J] . International Journal of Climatology , 2016 , 36 (3) : 1387 — 1402 .
- [7] WANGF , YANGs , HIGGINsW , et al . Long - term changes in total and extreme precipitation over China and the United States and their links to oceanic — atmospheric features [J] . International Journal of Climatology , 2014 , 34 (2) : 286 — 302 .
- [8] AGHAKOUCHAKA , CHENG LY , MAZDIYASNIO , et al . Global warming and changes in risk of concurrent climate extremes : Insights from the 2014 California drought [J] . Geophysical Research Letters , 2014 , 41 (24) : 8847 — 8852 .
- [9] OKHRIN O , ODENING M , XU W . Systemic weather risk and crop insurance : the case of China [J] . Journal of Risk and Insurance , 2013 , 80 (2) : 351 — 372 .
- [10] 王柳,熊伟,温小乐,等.温度降水等气候因子变化对中国玉米产量的影响 [J] . 农业工程学报,2014,30(21):138—146.
- [11] 崔耀鹏,魏海宁,张凯荣,等.1961—2000年中国降水与气温变化的关系分析 [J] . 现代农业科技,2015(5):239—242.

-
- [12] 黄晓璐, 徐海明, 邓洁淳. 冬季中国近海海表温度的长期升高及其对中国降水的影响 [J]. 气象学报, 2015, 73 (3) : 505 — 514 .
- [13] 孙微, 李建, 宇如聪. 华南暖季极端降水与气温的对应关系 [J]. 气候变化研究进展, 20 13 , 9 (2) : 96 — 1 01 .
- [14] GYASI — AGYEI Y . Evaluation of the effects of temperature changes on fine timescale rainfall [J] . Water Resources Research , 20 13 , 49 (7) : 4379ee4398 .
- [15] 汪宝龙, 张明军, 魏军林, 等. 西北地区近 50a 气温和降水极端事件的变化特征 [J]. 自然资源学报, 20 12 , 27 (10) : 1 720 — 1 733 .
- [16] 杨春艳, 沈渭寿, 林乃峰. 青藏高原近 50 年气温和降水时空变化特征研究 [J]. 干旱区资源与环境, 20 13 , 27 (12) : 1 67 — 1 72 .
- [17] 孙道勋, 杨海军. 温室气体变化数值模拟试验中全球降水和温度变化的迟滞效应 [J]. 北京大学学报 (自然科学版), 2015 , 51 (4) : 763 — 77 1 .
- [18] 李佩成, 郭曼, 王丽霞, 等. 近 60 年来中国大陆降水、气温动态及其相互关系的初步研究 [J]. 中国工程科学, 2011 , 13 (4) : 29 — 36 .
- [19] 张玉虎, 王深茜, 刘凯利, 等. 不同概率分布函数降雨极值的适用性分析 [J]. 地理科学, 2015 , 35 (11) : 1460 — 1467 .
- [20] 张润霞, 侯茂生, 陈宇卫, 等. 安徽省主要自然灾害及综合减灾战略构思 [J]. 自然灾害学报, 1994 , 3 (1) : 15 — 24 .
- [21] 胡预生, 搏可钦. 安徽淮北地区旱涝灾害分析阴. 安徽农业科学, 1964 (1) : 14 — 19 .
- [22] SKLAR A . Fonctions de répartition an dimensions et leurs marges [J] . Paris : Publications del ' Institut de Statistique de l ' Universit6 de Paris , 1959 : 229 — 331 .
- [23] PARZEN E . On estimation of a probability density function and mode [J] . The Annals of Mathematical Statistics , 1 962 , 33 (3) : 1065 — 1076 .
- [24] GANGULIP , REDDY M J . Ensemble prediction of regional droughts using climate inputs and the SVM — copula approach [J] . Hydrological Processes , 20 14 , 28 (19) : 4989 — 5009 .