

DOI: 10.16198/j.cnki.1009-640X.2015.04.016

刘勇, 王银堂, 胡庆芳, 等. 基于联合分布的太湖流域梅雨特征研究[J]. 水利水运工程学报, 2015(4): 98-105. (LIU Yong, WANG Yin-tang, HU Qing-fang, et al. Characteristics analysis of Plum rains in Taihu Lake basin based on joint distribution[J]. Hydro-Science and Engineering, 2015(4): 98-105.)

基于联合分布的太湖流域梅雨特征研究

刘勇, 王银堂, 胡庆芳, 崔婷婷, 王磊之

(南京水利科学研究院 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210029)

摘要: 为了研究太湖流域梅雨特征量中入梅时间和梅雨量之间的相互关系, 首先利用3种拟合评价方法优选单变量的边缘分布, 然后基于Copula函数理论构造两变量的联合分布, 并用所建的联合分布分析不同情况下入梅时间与梅雨量的遭遇概率和条件概率。结果表明: 太湖流域不同入梅时间遭遇不同梅雨量的概率有明显差异, 总体上仍以入梅时间和梅雨量正常遭遇为主, 不同入梅条件下仍是出现正常梅雨的概率较高, 但入梅偏早时出现梅雨偏丰的概率达0.417, 入梅偏晚时出现梅雨偏枯的概率也达到0.374。因此, 在太湖流域入梅偏早的情况下要密切关注流域防洪情势的变化; 而当入梅时间偏晚时, 则应注意流域出现干旱的情况。研究可为流域相关部门尽早采取防汛抗旱及水资源调度措施提供决策依据。

关键词: 入梅时间; 梅雨量; 联合分布; Copula函数; 太湖流域

中图分类号: P426.62; P339 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-640X(2015)04-0098-08

梅雨是我国太湖流域春末夏初过渡季节中的重要天气气候现象, 每年入出梅的早迟、梅雨期的长短以及梅雨量的多寡, 都会对流域内是否发生旱涝灾害产生严重影响。因此, 研究太湖流域梅雨的长期变化特征及影响成因具有重要意义。目前针对梅雨长期特征的一系列研究^[1-9], 主要集中在分析单个梅雨特征量的趋势、周期及突变等规律性以及年际和年代际变化特征等方面, 而对于梅雨特征量之间的内在联系研究则较为少见, 叶香^[10]、毛文书^[11]等在相关分析的基础上, 简单分析了梅雨特征量之间的关系, 并未进一步深入。Copula函数是一种描述变量之间相关性结构的有效方法, 近年来在水文变量相关性分析方面得到了广泛应用^[12-17]。本文基于Copula函数理论, 对太湖流域梅雨特征量中的入梅期和梅雨量之间的相互关系进行研究, 首先通过单变量分析, 确定两个变量的边缘分布, 然后利用Copula函数构造两个变量的联合分布, 根据联合分布研究入梅期和梅雨量之间不同情况下的遭遇及条件概率, 可为太湖流域的防洪、抗旱和水资源管理提供科学依据。

1 资料与方法

1.1 基本资料

太湖流域地跨苏、浙、沪、皖四省市, 位于长江三角洲核心区域, 流域面积36 895 km²^[18]。本次研究的梅雨特征资料为太湖流域管理局提供的1954—2009年的入梅时间及相应的梅雨量, 1954—2005年资料来自太湖流域综合规划成果, 2006—2009年数据来自太湖流域水情年报。

1.2 方法

1.2.1 基于Copula理论的多变量联合分布 Copula函数是定义域为[0, 1]均匀分布的多维联合分布函

收稿日期: 2014-12-19

作者简介: 刘勇(1984—), 男, 安徽广德人, 高级工程师, 博士, 主要从事水文气象及水文不确定性研究。

E-mail: Yongliu@nhri.com

数。Sklar 定理^[12]是利用 Copula 函数构造多维随机变量的联合分布的理论依据,根据定理:如果 X 和 Y 为连续随机变量, $H(x, y)$ 为变量 X 和 Y 的联合分布函数, $F(x)$ 和 $G(y)$ 为其边缘分布函数,那么存在唯一的 Copula 函数 $C(u, v)$, 对 $\forall x, y \in R$, 使得:

$$H(x, y) = C(F(x), G(y)) \quad (1)$$

从理论上讲, Copula 函数可以将任何单变量的分布连接成多维随机变量的联合分布^[19]。Archimedean 族 Copula 构造的形式灵活, 参数估计简单方便, 并且可以反映变量间偏态结构等性质, 因此在水文领域得到广泛应用。由于入梅时间与梅雨量之间存在负相关关系, 本次研究选用了能够描述负相关关系的 Frank Copula 函数, 表达式为:

$$C(u, v) = -\frac{1}{\theta} \ln \left[1 + \frac{(\exp(-\theta u) - 1)(\exp(-\theta v) - 1)}{(\exp(-\theta) - 1)} \right], \quad \theta \in R \quad (2)$$

式中: u, v 为边缘分布函数; θ 为参数, 与变量间的 Kendall 相关系数 τ 的关系如下:

$$\tau = 1 + \frac{4}{\theta} \left[\frac{1}{\theta} \int_0^\theta \frac{t}{\exp(t) - 1} dt - 1 \right] \quad (3)$$

Kendall 相关系数是度量变量间相关性的指标, 计算如下:

$$\tau = (C_n^2)^{-1} \sum_{i < j} \operatorname{sgn}[(x_i - x_j)(y_i - y_j)], \quad i, j = 1, 2, \dots, n \quad (4)$$

式中: (x_i, y_i) 是观测点据; $\operatorname{sgn}(\cdot)$ 是符号函数。当 $(x_i - x_j)(y_i - y_j) > 0$ 时, $\operatorname{sgn}(\cdot) = 1$; 当 $(x_i - x_j)(y_i - y_j) = 0$ 时, $\operatorname{sgn}(\cdot) = 0$; 当 $(x_i - x_j)(y_i - y_j) < 0$ 时, $\operatorname{sgn}(\cdot) = -1$ 。

1.2.2 拟合评价指标 本项研究需要对边缘分布的线型进行优选, 同时还要对联合分布的 Copula 函数的有效性进行评价。边缘分布的线型优选主要采用概率点距相关系数检验法 (PPCC)、线性矩系数检验法 (TW) 和拟优确定性系数 (QD) 检验法^[20], 联合分布的有效性评价主要采用 Kolmogorov-Smirnov (K-S) 检验方法^[21]。其中概率点距相关系数检验法和拟优确定性系数检验法较为简单, 不做详述, 线性矩系数检验法 (TW) 和 K-S 检验方法如下:

(1) 线性矩系数检验法 (TW)。分别求出样本和理论分布的线性矩系数, 当二者差别越小, 则分布线型为最优线型。本文主要采用三阶和四阶的线性矩系数, 令样本三、四阶线性矩系数分别为 τ_3^R 和 τ_4^R , 假设分布三、四阶线性矩系数分别为 τ_3^{DIST} 和 τ_4^{DIST} , 即满足 $\min |\tau_i^R - \tau_i^{DIST}|$ ($i = 3, 4$) 为最优线型。三、四阶线性矩系数如下:

$$\tau_i = l_i / l_2 \quad (i = 3, 4) \quad (5)$$

式中: l_2, l_3, l_4 分别为二、三、四阶线性矩。

$$\begin{cases} l_2 = 2b_1 - b_0 \\ l_3 = 6b_2 - 6b_1 + b_0 \\ l_4 = -b_0 + 12b_1 - 30b_2 + 20b_3 \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} b_k = \frac{1}{n} \sum_{i=k+1}^n \frac{(i-1)(i-2)\cdots(i-k)}{(n-1)(n-2)\cdots(n-k)} x_{i,n} \\ x_{1,n} \leq x_{2,n} \leq \cdots \leq x_{n,n} \end{cases} \quad (7)$$

式中: $x_{i,n}$ 为观测样本。

(2) Kolmogorov-Smirnov (K-S) 检验方法。检验统计量如下:

$$D_n = \sup_{-\infty < x < \infty} |F_n(x) - F_0(x)| \quad (8)$$

式中: $F_n(x)$ 为经验分布函数, $F_0(x)$ 为理论分布函数。根据给定的显著性水平 α , 样本容量 n , 可以得到置信度为 $1 - \alpha$ 的假设临界值 D_α , 若 $D_n < D_\alpha$, 则接受假设, 否则拒绝假设。

2 联合模型的建立

2.1 单变量分布函数的确定

本次研究主要分析太湖流域梅雨特征量中的入梅时间与梅雨量之间的关系,首先选择单变量分布函数,然后进行参数估计,在假设检验的基础上,最后确定研究对象的合理线型。

经统计发现,1954—2009年的入梅时间均在5月1日之后,因此,为了便于分析,本研究取5月1日为研究范围的起点,记为1;5月2日,记为2;依此类推,梅雨量则不做变化。由于太湖流域1958,1965和1978年为空梅年,属于极端情况,不能提取相关变量值,因此这3年不纳入样本中。考虑目前水文气象方面的单变量分布函数相关研究,选择正态分布、威布尔分布、极值I型分布、三参数对数正态分布和Von Mises分布^[14]作为入梅时间的备选线型,选择正态分布、威布尔分布、极值I型分布、三参数对数正态分布和P-III型分布作为梅雨量的备选线型,表1为入梅时间和梅雨量的线型拟合检验结果。

表1 入梅时间和梅雨量的线型拟合检验结果

Tab. 1 Results of liner fitting tests for onset and quantity of Plum rains

评价指标	入梅时间					梅雨量				
	正态	威布尔	极值I型	对数正态	Von Mises	正态	威布尔	极值I型	对数正态	P-III型
PPCC	0.965	0.975	0.983	0.941	0.969	0.927	0.962	0.853	0.981	0.986
TW3	0.138	0.069	0.016	0.232	0.138	0.249	0.120	0.403	0.024	0.013
TW4	0.094	0.095	0.072	0.087	0.081	0.133	0.145	0.111	0.112	0.082
QD	0.931	0.950	0.951	0.857	0.933	0.859	0.923	0.257	0.954	0.972
优选线型	极值I型分布					P-III型分布				

从表1可以看出,4个评价指标结果具有一致性,对于入梅时间,4个指标均显示极值I型为最优拟合线型,对于梅雨量,P-III型为其最优拟合线型。因此本次研究确定太湖流域的入梅时间的优选线型为极值I型分布,梅雨量的优选线型为P-III型分布。根据选择的线型,以下分别绘制了单变量的频率曲线拟合图(图1)。图中经验频率采用期望公式 $p = m/(n + 1)$ 进行计算,由图可以看出两种线型拟合情况较好,基本反映了两变量的分布状况。

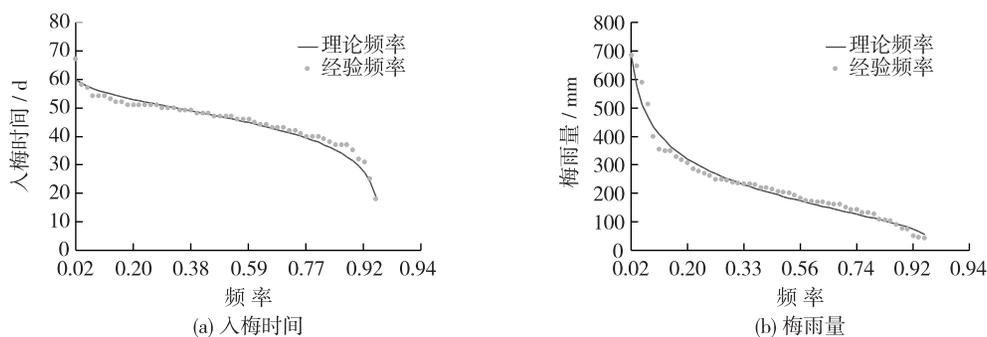


图1 边缘分布频率曲线拟合结果

Fig. 1 Results of fitting for frequency curves of onset and quantity of Plum rains

2.2 联合分布函数的确定

在梅雨特征参数中,梅雨量与入梅时间具有密切的相关关系,本文利用Copula函数,通过构造联合分布来描述这种相关结构。由于梅雨量与入梅时间之间存在负相关关系,因此选用了能够描述负相关关系的Frank Copula函数来构造两变量的联合分布。首先计算边缘分布之间的Kendall系数 τ ,然后利用相关指标

法建立 Kendall 系数与 Copula 函数中参数 θ 的关系,再根据 Kolmogorov-Smirnov (K-S) 检验方法对拟合情况进行检验,最后根据建立的分布函数进行相应分析。

根据太湖流域梅雨特征量资料,入梅时间、梅雨量以及联合分布的计算参数列于表 2。

表 2 入梅时间、梅雨量以及联合分布的计算参数

Tab. 2 Calculation parameters of onset and quantity for Plum rains and their joint distribution

极值 I 型		P-III 型分布			两变量联合分布	
μ	σ	EX	Cv	Cs	τ	θ
49.33	7.72	229.57	0.59	1.50	-0.332 4	-3.294 6

如果 X 和 Y 为连续随机变量, $F_X(x)$, $F_Y(y)$ 分别为变量 X 和 Y 的边缘分布函数, $F(x,y)$ 为变量 X 和 Y 的联合分布函数,那么根据表 2 计算的 θ 值,可以得到入梅时间和梅雨量的联合分布函数为:

$$F(x,y) = C(F_X(x), F_Y(y)) = \frac{1}{3.2946} \ln \left[1 + \frac{(\exp(3.2946 F_X(x)) - 1)(\exp(3.2946 F_Y(y)) - 1)}{(\exp(-\theta) - 1)} \right] \quad (9)$$

根据 K-S 检验法对上述联合分布的拟合情况进行检验,其中二元经验频率采用 $p(i) = m(i)/(n + 1)$ 计算, $m(i)$ 为联合观测值样本中满足条件 $x \leq x_i$ 且 $y \leq y_i$ 的联合观测值个数。经计算,统计量 $D_n = 0.1278$, $D_\alpha = 0.1648$,由于 $D_n < D_\alpha$,检验通过,因此所建立的模型是适宜的。

图 2(a)为顺序统计量 X 和 Y 的联合经验点据与理论分布曲线的拟合,图中横坐标为按计算分布升序后对应的观测值序号,可见两者拟合较好;图 2(b)为联合经验频率与理论分布的散点图,点据基本都落在 45° 对角线附近,相关系数也达到了 0.997,因此,采用 Copula 函数建立入梅时间和梅雨量的联合分布合理。

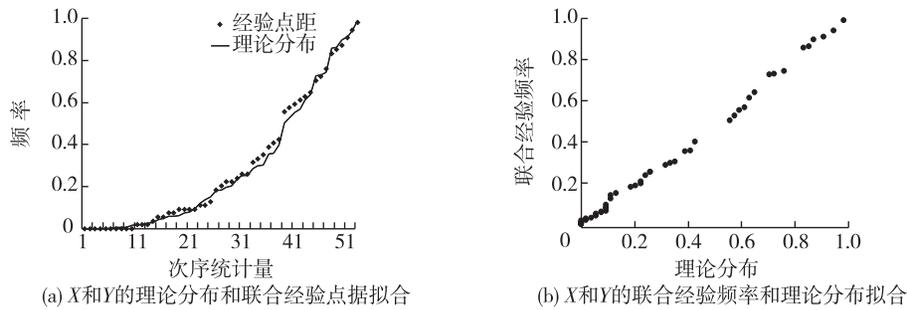


图 2 边缘分布频率曲线拟合

Fig. 2 Results of fitting for frequency curves of edge distribution

根据计算出的联合分布,可以绘制入梅时间和梅雨量的联合分布图以及联合分布的等值线图,见图 3。

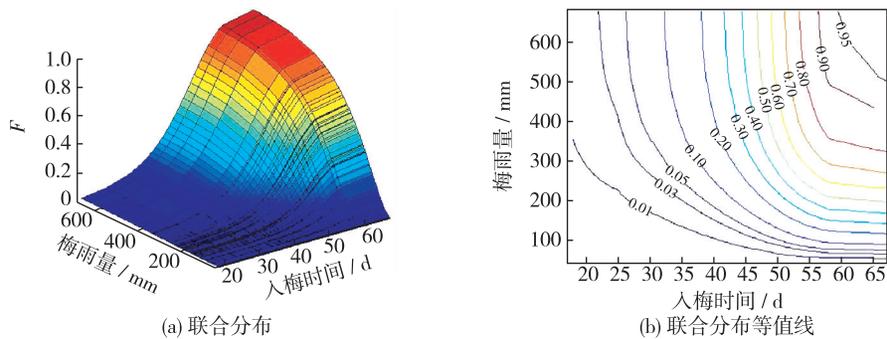


图 3 入梅时间和梅雨量联合分布及联合分布等值线

Fig. 3 Contours of onset and quantity for Plum rains and their joint distribution

3 结果分析

3.1 遭遇情况分析

根据上面建立的联合分布模型,可以分析不同入梅时间与不同梅雨量的遭遇组合概率,并可通过图3(b)中两变量遭遇的联合分布等值线图,直接查出入梅时间与梅雨量不同情况下的遭遇概率。本次研究主要分析以下9种情况:

早枯型: $p_1 = P(X \leq x_1, Y \leq y_1)$; 早平型: $p_2 = P(X \leq x_1, y_1 < Y < y_2)$; 早丰型: $p_3 = P(X \leq x_1, Y \geq y_2)$;

中枯型: $p_4 = P(x_1 < X < x_2, Y \leq y_1)$; 中平型: $p_5 = P(x_1 < X < x_2, y_1 < Y < y_2)$; 中丰型: $p_6 = P(x_1 < X < x_2, Y \geq y_2)$;

晚枯型: $p_7 = P(X \geq x_2, Y \leq y_1)$; 晚平型: $p_8 = P(X \geq x_2, y_1 < Y < y_2)$; 晚丰型: $p_9 = P(X \geq x_2, Y \geq y_2)$ 。

太湖流域梅雨丰枯及入梅早晚的划分标准: 丰梅为梅雨量大于常年50%以上的梅雨, 枯梅为梅雨量小于常年50%以上的梅雨; 早梅为入梅时间较常年偏早10 d, 即6月5日之前入梅, 晚梅为入梅时间较常年偏晚10 d, 即6月25日以后入梅。根据上述划分标准取 $x_1 = 37$, $x_2 = 54$, $y_1 = 108.9$, $y_2 = 326.6$, 各种情况的遭遇概率见表3。

由表3可以看出,太湖流域不同入梅时间遭遇不同梅雨量的概率明显不同。总体来说仍以入梅时间和梅

雨量正常遭遇为主,其中,入梅时间正常的概率为0.645,梅雨量正常的概率为0.637,两者遭遇的概率达到了0.438,但针对目前太湖流域的水资源利用现状,更需重视不利条件下的遭遇概率,其中,入梅时间偏早遭遇梅雨量偏丰的概率达到了0.078,在过去的53年中出现过5次,特别是1954,1991和1999年的丰梅年大洪水均遭遇了入梅偏早情况,导致了太湖流域严重的洪涝灾害,另外,入梅时间偏晚遭遇梅雨量偏枯的概率为0.063,该遭遇情形导致了1959及1964年的太湖全流域大旱,同样给流域人们的生产生活带来不利影响。

3.2 条件概率分析

由于入梅时间是梅雨的起始条件,在时间上和梅雨量存在先后关系,因此,除了考虑入梅时间与梅雨量的遭遇情况,还需要分析不同入梅时间出现不同梅雨量的条件概率,可为梅雨期太湖流域水资源管理提供决策依据。本文主要分析的同样是在入梅偏早,正常和偏晚3种条件下出现不同梅雨量的概率,条件分布函数如下:

$$F(y|X \leq x_1) = p(Y \leq y|X \leq x_1) = F(x_1, y)/F(x_1) \quad (10)$$

$$F(y|x_1 \leq X \leq x_2) = p(Y \leq y|x_1 \leq X \leq x_2) = [F(x_2, y) - F(x_1, y)]/[F(x_2) - F(x_1)] \quad (11)$$

$$F(y|X \geq x_2) = p(Y \leq y|X \geq x_2) = [F(y) - F(x_2, y)]/[1 - F(x_2)] \quad (12)$$

根据3种不同的入梅条件,图4给出了相应的入梅偏早、正常和偏晚条件分布曲线。

根据上述分析,得到了入梅偏早、正常和偏晚条件下出现梅雨偏枯、正常和偏丰的概率见表4。可见,不同入梅条件下出现不同梅雨量的概率也有明显差异,总体仍以出现正常梅雨的概率较高,其中入梅偏早、正常和偏晚条件下梅雨量正常的概率分别为0.544,0.679和0.580。当入梅偏早时,出现梅雨偏丰的概率也较高(达0.417),基本不会出现偏枯的梅雨;当入梅正常时,出现正常梅雨的概率要远远大于出现极端梅雨的概率;当入梅偏晚时则出现梅雨偏枯的概率会升高(达0.374),出现梅雨偏丰的概率则大为降低。因此,在太湖流域入梅偏早情况下要密切注意流域防洪情势的变化,而当入梅时间偏晚时,则应注意流域出现干旱的情况,尽早采取相关应对措施。

表3 入梅时间和梅雨量的遭遇概率

Tab. 3 Encounter probability of onset and quantity for Plum rains

入梅时间	梅雨量			合计
	枯	平	丰	
早	0.007	0.102	0.078	0.187
中	0.097	0.438	0.110	0.645
晚	0.063	0.097	0.008	0.168
合计	0.167	0.637	0.196	1.000

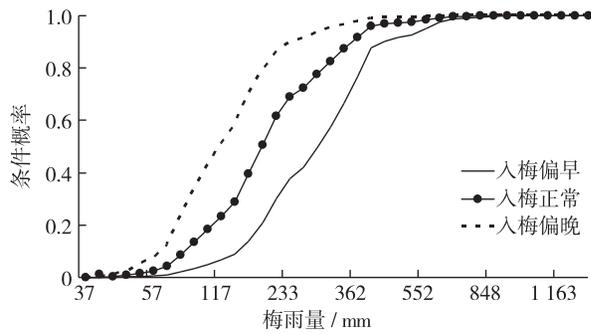


图4 入梅偏早、正常和偏晚条件分布曲线

Fig.4 Conditional distribution curves for early, normal and late onset of Plum rains

表4 不同入梅时间下不同梅雨量的条件概率分析
Tab.4 Conditional probability for different quantities of Plum rains under different onsets of Plum rains

入梅时间	梅雨量		
	枯	平	丰
早	0.039	0.544	0.417
中	0.151	0.679	0.170
晚	0.374	0.580	0.046

4 结 语

本文基于 Copula 函数理论,对太湖流域梅雨特征量中的入梅日期和梅雨量之间的相互关系进行了研究,通过3种拟合评价方法确定了变量的边缘分布,利用 Frank Copula 函数构造两个变量的联合分布,在此基础上,对入梅日期和梅雨量之间不同情况下的遭遇及条件分布概率进行了分析。主要结论有:

(1) 太湖流域入梅时间服从极值 I 型分布,而梅雨量则服从 P-III 分布。

(2) 太湖流域不同入梅时间遭遇不同梅雨量的概率明显不同,总体来说仍以入梅时间和梅雨量正常遭遇为主,不利条件下的遭遇概率中入梅时间偏早遭遇梅雨量偏丰的概率达到了 0.078,入梅时间偏晚遭遇梅雨量偏枯的概率为 0.063,这两种遭遇情况会给流域人们的生产生活带来不利影响。

(3) 不同入梅条件下出现不同梅雨量的概率也有明显差异,总体仍以出现正常梅雨的概率较高,入梅偏早时出现梅雨偏丰的概率以及入梅偏晚时则出现梅雨偏枯的概率也很高,分别达 0.417 和 0.374。

因此,在太湖流域入梅偏早情况下要密切注意流域防洪情势的变化,而当入梅时间偏晚时,则应注意流域出现干旱的情况,该研究可为流域相关部门尽早采取防汛抗旱及水资源调度措施提供决策依据。

参 考 文 献:

[1] 徐群. 121年梅雨演变中的近期强年代际变化[J]. 水科学进展, 2007, 18(3): 327-335. (XU Qun. Recent strong decadal change of Meiyu in 121 years [J]. Advances in Water Science, 2007, 18(3): 327-335. (in Chinese))

[2] 魏凤英, 张京江. 1885—2000年长江中下游梅雨特征量的统计分析[J]. 应用气象学报, 2004, 15(3): 313-321. (WEI Feng-ying, ZHANG Jing-jiang. Climatic variation of Meiyu in the middle-lower reaches of Changjiang River during 1885—2000 [J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2004, 15(3): 313-321. (in Chinese))

[3] 杨静, 钱永甫. 121a梅雨序列及其时变特征分析[J]. 气象科学, 2009, 29(3): 285-290. (YANG Jing, QIAN Yong-fu. Temporal evolution of 121a Meiyu series [J]. Journal of the Meteorological Sciences, 2009, 29(3): 285-290. (in Chinese))

[4] 葛全胜, 郭熙凤, 郑景云, 等. 1736年以来长江中下游梅雨变化[J]. 科学通报, 2007, 52(23): 2792-2797. (GE Quan-sheng, GUO Xi-feng, ZHENG Jing-yun, et al. Variation of Meiyu in the middle-lower reaches of Changjiang River since 1736 [J]. Chinese Science Bulletin, 2007, 52(23): 2792-2797. (in Chinese))

[5] 刘勇, 王银堂, 陈元芳, 等. 太湖流域梅雨时空演变规律研究[J]. 水文, 2011, 31(3): 36-43. (LIU Yong, WANG Yin-tang, CHEN Yuan-fang, et al. Spatial-temporal evolution characteristics of Plum rains in Taihu Lake basin [J]. Journal of China Hydrology, 2011, 31(3): 36-43. (in Chinese))

[6] 邓汗青, 罗勇. 近50年长江中下游春季和梅雨期降水变化特征[J]. 应用气象学报, 2013, 24(1): 23-31. (DENG Han-qing, LUO Yong. Continuous spring and Meiyu rainfall in the mid-lower reaches of the Yangtze during the past 50 years [J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2013, 24(1): 23-31. (in Chinese))

- [7] 马音, 陈文, 冯瑞权, 等. 我国东部梅雨期降水的年际和年代际变化特征及其与大气环流和海温的关系[J]. 大气科学, 2012, 36(2): 397-410. (MA Yin, CHEN Wen, FENG Rui-quan, et al. Interannual and interdecadal variations of precipitation over eastern China during Meiyu season and their relationships with the atmospheric circulation and SST[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2012, 36(2): 397-410. (in Chinese))
- [8] 蒋薇, 高辉. 21世纪长江中下游梅雨的新特征及成因分析[J]. 气象, 2013, 39(9): 1139-1144. (JIANG Wei, GAO Hui. New features of Meiyu over middle-lower reaches of Yangtze River in the 21st century and the possible causes[J]. Meteorological Monthly, 2013, 39(9): 1139-1144. (in Chinese))
- [9] 应瑶, 冯利华, 王学焯, 等. 金华市 1961—2011 年梅雨特征量的统计分析[J]. 安徽农业科学, 2014, 42(29): 10242-10244, 10247. (YING Yao, FENG Li-hua, WANG Xue-ye, et al. The statistic analysis of Meiyu's characteristic features in Jinhua during 1961—2011[J]. Journal of Anhui Agricultural Science, 2014, 42(29): 10242-10244, 10247. (in Chinese))
- [10] 叶香, 刘梅, 姜爱军, 等. 南京梅雨特征量统计分析及其对区域性增暖的响应[J]. 气象科学, 2012, 32(4): 451-458. (YE Xiang, LIU Mei, JIANG Ai-jun, et al. The statistical analysis of Meiyu's characteristic features and its response to regional warming in Nanjing [J]. Journal of the Meteorological Sciences, 2012, 32(4): 451-458. (in Chinese))
- [11] 毛文书, 王谦谦, 马慧, 等. 江淮梅雨的时空变化特征[J]. 南京气象学院学报, 2008, 31(1): 116-122. (MAO Wen-shu, WANG Qian-qian, MA Hui, et al. Temporal evolution and spatial distribution characteristics of Meiyu in Changjiang-Huaihe River valley[J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology, 2008, 31(1): 116-122. (in Chinese))
- [12] SHENG Yue. The Gumbel logistic model for representing a multivariate storm event [J]. Advances in Water Resources, 2001, 24(2): 179-185.
- [13] ZHANG L, SINGH V P. Bivariate rainfall frequency distributions using Archimedean copulas [J]. Journal of Hydrology, 2007, 332(1-2): 93-109.
- [14] 方彬, 郭生练, 肖义, 等. 年最大洪水两变量联合分布研究[J]. 水科学进展, 2008, 19(4): 505-511. (FANG Bin, GUO Sheng-lian, XIAO Yi, et al. Annual maximum flood occurrence dates and magnitudes frequency analysis based on bivariate joint distribution [J]. Advances in Water Science, 2008, 19(4): 505-511. (in Chinese))
- [15] 闫宝伟, 郭生练, 陈璐, 等. 长江和清江洪水遭遇风险分析[J]. 水利学报, 2010, 41(5): 553-559. (YAN Bao-wei, GUO Sheng-lian, CHEN Lu, et al. Flood encountering risk analysis for the Yangtze River and Qingjiang River [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, 41(5): 553-559. (in Chinese))
- [16] 闫宝伟, 郭生练, 肖义. 南水北调中线水源区与受水区降水丰枯遭遇研究[J]. 水利学报, 2007, 38(10): 1178-1185. (YAN Bao-wei, GUO Sheng-lian, XIAO Yi. Synchronous-asynchronous encounter probability of rich-poor precipitation between water source area and water receiving areas in the middle route of South-to-North Water Transfer Project [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007, 38(10): 1178-1185. (in Chinese))
- [17] 冯平, 毛慧慧, 王勇. 多变量情况下的水文频率分析方法及其应用[J]. 水利学报, 2009, 40(1): 33-37. (FENG Ping, MAO Hui-hui, WANG Yong. A method for hydrological reoccurrence frequency analysis under the condition of multivariate [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2009, 40(1): 33-37. (in Chinese))
- [18] 王同生. 太湖流域防洪与水资源管理[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2006. (WANG Tong-sheng. Flood control and water management for the Taihu Lake basin[M]. Beijing: China Water Power Press, 2006. (in Chinese))
- [19] NELSEN R B. An introduction to Copulas[M]. New York: Springer, 1999.
- [20] 李兴凯, 陈元芳. 暴雨频率分布线型优选方法的研究[J]. 水文, 2010, 30(2): 50-53. (LI Xing-kai, CHEN Yuan-fang. Study on selection methods for the best frequency distribution of rainstorm [J]. Journal of China Hydrology, 2010, 30(2): 50-53. (in Chinese))
- [21] 郭生练. 设计洪水研究进展与评价[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2005. (GUO Sheng-lian. Progress and evaluation of research on flood design [M]. Beijing: China Water Power Press, 2005. (in Chinese))

Characteristics analysis of Plum rains in Taihu Lake basin based on joint distribution

LIU Yong, WANG Yin-tang, HU Qing-fang, CUI Ting-ting, WANG Lei-zhi

(*State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China*)

Abstract: In order to carry out studies of the relationships between the onset of Plum rains and the rainfall amount during Plum rains period in the Taihu Lake basin, the authors have firstly selected optimal univariate marginal distribution, and then established the joint distribution of two variables based on the Copula function, and at last, analyzed the encounter probability and the conditional distribution probability between the onset of Plum rains and the rainfall amount during Plum rains period under different circumstances. The analysis results show that there are significant differences in the encounter probability between different onsets of Plum rains and different rainfall amounts during Plum rains period, and that in general the maximum probability is encountered between the normal onset of Plum rains and the average rainfall amount during Plum rains period. There is high probability for the conditional distribution probability that the average rainfall amount during Plum rains period appears in the different onsets of Plum rains. But the probability of wet Plum rains in the early onset of Plum rains is 0.417, and meanwhile, the probability of dry Plum rains in the late onset of Plum rains is 0.374. So close attention should be paid to the changes of flood when appearing in the early onset of Plum rains, and the changes of the drought when appearing in the late onset of Plum rains. This study can provide a reference for taking measures of flood and drought control and water resources regulation for the Taihu Lake basin as soon as possible.

Key words: onset of Plum rains; rainfall amount during Plum rains period; joint distribution; Copula function; Taihu Lake basin