

基于时变 Copula 模型的多尺度气象干旱、 水文干旱特征及其概率分析

——以黔中水利工程区为例

张浪¹, 贺中华^{1,2,3}, 夏传花¹, 任荣仪¹

(1.贵州师范大学 地理与环境科学学院, 贵阳 550001; 2.贵州师范大学

国家喀斯特石漠化防治工程技术研究中心, 贵阳 550001; 3.贵州省山地资源与环境遥感应用重点实验室, 贵阳 550001)

摘要:为了解区域气象干旱、水文干旱特征及其概率分布情况,基于时变 Copula 模型对黔中水利工程区 1960—2016 年气象、水文资料建立联合模型,深入分析区域多尺度水文干旱、气象干旱特征,并探讨了干旱联合概率、条件概率特征。结果表明:(1)工程区内气象干旱多发,但总体干旱程度偏低,多尺度干旱特征联合总体相似且具有较强的相关性,多尺度干旱特征联合值表现出 6 个月>9 个月>12 个月>3 个月的特点。(2)区域水文干旱程度逐渐加重,干旱频率逐渐上升,主要分布于 20 世纪 80 年代末及进入 21 世纪后,多尺度干旱联合特征值总体偏低,3 个月尺度下发生高频率、程度深的水文干旱可能性最大,最小为 6 个月尺度。(3)4 个研究尺度中干旱联合特征均表现出明显的相似性,干旱指标则表现出 6 个月 SPI 与 12 个月 Ra 相关性最强;20 世纪 80 年代末及进入 21 世纪后,区域干旱联合概率较高,区域多气象、水文干旱,干旱程度较重且频率较高;条件概率总体呈上升趋势,表明气象干旱发生后水文干旱随后发生的概率越来越高。

关键词:气象干旱;水文干旱;联合概率;条件概率;时变 Copula 函数

中图分类号:P426

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2021)06-0115-11

Characteristics of Meteorological Drought and Hydrological Drought on Multi-Scale and Their Probability Analysis Based on the Time-Varying Copula Model

—Taking Water Conservancy Project Area in Central Guizhou as an Example

ZHANG Lang¹, HE Zhonghua^{1,2,3}, XIA Chuanhua¹, REN Rongyi¹

(1.School of Geographic and Environmental Sciences, Guizhou Normal University,

Guiyang 550001, China; 2.National Karst Rocky Desertification Prevention Engineering

Technology Research Center, Guizhou Normal University, Guiyang 550001, China; 3.Guizhou Key

Laboratory of Remote Sensing Application of Mountain Resources and Environment, Guiyang 550001, China)

Abstract: In order to understand the characteristics of regional meteorological drought and hydrological drought and their probability distribution, based on the time-varying Copula model, a joint model for the meteorological and hydrological data of the Qianzhong Water Conservancy Engineering Area from 1960 to 2016 was established, and the characteristics of regional hydrological drought and meteorological drought on multi-scale were deeply analyzed. The characteristics of joint probability of drought and conditional probability were discussed. The results show that: (1) meteorological drought occurs frequently in the project area, but the overall drought degree is low; the characteristics of combined drought on multi-scale are generally similar and have a strong correlation; the combined characteristic value of drought on multi-scale decreases in the order: 6 months>9 months>12 months>3 months; (2) the degree of regional hydrological drought has

收稿日期:2020-11-04

修回日期:2020-12-06

资助项目:国家自然科学基金重大专项(u1612441);国家自然科学基金(41471032);(u1612441;41471032);贵州省水利厅自然科学基金(KT201402);贵州师范大学 2015 年博士科研启动项目

第一作者:张浪(1995—),女(仡佬族),贵州黔西人,在读硕士,研究方向为喀斯特水文水资源与遥感。E-mail:zhanglang95@163.com

通信作者:贺中华(1976—),男,贵州兴义人,博士,教授,主要从事喀斯特水文水资源与遥感研究。E-mail:hezonghua7621@126.com

gradually increased, and the frequency of drought has gradually increased; it mainly distributed in the late 1980s and after entering the 21st century; the combined characteristic values of drought on multi-scale are generally low, and high frequency and deep severity occur on a 3-month scale; hydrological drought is the most likely, and the smallest is 6-month scale; (3) the combined characteristics of drought in the four research scales all show obvious similarities, and the drought index shows the strongest correlation between 6-month SPI and 12-month Ra; the joint probability of regional drought at the end of the 1980s and after entering the 21st century is high. There are many meteorological and hydrological droughts in the region, and the degree of drought is heavier and the frequency is high; the conditional probability is generally on the rise, indicating that the probability of subsequent occurrence of hydrological drought after meteorological drought is increasing.

Keywords: meteorological drought; hydrological drought; joint probability; conditional probability; time-varying Copula function

干旱是一种全球性普遍发生的自然灾害,具有发生频率大、持续时间长、波及范围广的特点,对社会经济和人民生活造成重要影响^[1]。干旱的实质是缺水,根本原因是供水量低于需水量^[2]。自然降水是河川径流量的主要来源,降水稀少并不一定会导致水文干旱,但是水文干旱的发生一定是由于自然降水的短缺,气象干旱与水文干旱之间具有较强的相关性,可用线性函数联系起来^[3]。贵州省黔中地区干旱频发,一是由于季风活动不稳定,导致降水分布不均,二是区域蓄水保水能力差,对黔中水利工程区气象干旱、水文干旱特征及其二者间的联系进行研究,有利于为区域防灾减灾、可持续发展提供科学参考。

对气象干旱与水文干旱特征进行研究的方法众多,Copula函数由于其特有的联结分析特点,逐渐被应用于干旱研究中。Copula函数早期主要应用于经济学领域,用于构造多元分布以研究经济市场资产间相关关系分析^[4]。后被应用于区域自然灾害的不确定性分析,如李彦恒等^[5]利用联结函数(Copula)对地震进行危险性评估分析,通过构造联合概率分布以估计区域地震可能性;周念清等^[6]利用游程理论与Copula函数研究构建干旱历时与干旱烈度的联合分布模型,对区域干旱风险进行评估分析;李明等^[7]与张园^[8]均以二维Copula函数对区域干旱特征进行研究;苏夏羿等^[9]利用Copula函数与SPI值进行干旱趋势研究,研究不同干旱程度下的联合重现期,分析区域气象干旱的时空变化趋势;杨茂灵等^[10]和任璐^[11]将copula函数与水文频率分析相结合,以南盘江流域和汾河流域为例研究区域水文干旱特征,为流域发展规划提供科学参考。以上研究均将Copula函数与区域干旱研究相结合,多注重于干旱历时与干旱程度的联合特征分析并以此延伸至干旱趋势研究,但研究对象多为单一对象,即水文干旱或气象干旱,而对两种干旱类型之间的联合特征及其干旱发生概率进行研究的文章较少。

鉴于此,文中拟以贵州省黔中水利工程区为研究对象,选取工程区内17个水文站点与26个雨量站点,利用时变Copula函数模型与MATLAB程序语言编程,从3个月、6个月、9个月以及12个月共4个研究尺度对区域气象干旱、水文干旱的干旱特征以及二者之间密切联系进行分析研究。简而言之,文章研究目的包括以下3点:(1)基于copula模型分析多尺度气象干旱与多尺度水文干旱的干旱特征;(2)探究气象干旱与水文干旱联合分布特征及其联合概率特征;(3)多尺度气象干旱发生后,对应水文干旱在多尺度中发生的条件概率。

1 研究区概况

黔中水利工程区位于贵州省中部黔中地区,工程涉及毕节市、六盘水市、安顺市、贵阳市及黔南州,这是贵州省首个大型跨地区、跨流域长距离水利调水工程,也是黔中地区生存和发展的生命线工程^[12]。区域范围为104°—107°E,25°—27°N,总面积为16 636.38 km²,地形西高东低,海拔为300~2 900 m,西部为岩溶高原、峡谷、峰丛洼地,中部为峰林溶原、丘原,东部为丘陵盆地、峰丛洼地相间分布^[13]。气候属亚热带季风气候,干湿季分明,多年平均降雨量在1 100~2 800 mm,最热月平均气温22℃以上,最冷月0~15℃左右,由于特殊的气候和地貌类型,贵州省降雨呈现出时空分布不均匀的特点^[14]。同时,黔中地区位于长江和珠江两大流域分水岭地带,水资源十分丰富,北部主要河流为三岔河干流及其支流以及乌江一级支流猫跳河、南明河等;南部属珠江流域,分属北盘江、红水河水系等,以及北盘江支流打邦河、王二河、坝陵河,红水河支流猫营河、格凸河等(图1)。黔中地区大部分地区属于云贵高原的喀斯特丘陵地貌,城镇基本分布于山间平地(坝子),可利用的土地资源较少,现有开发强度也不高,地面多易溶性岩石,地表水下渗速度快,不易在地表集聚。

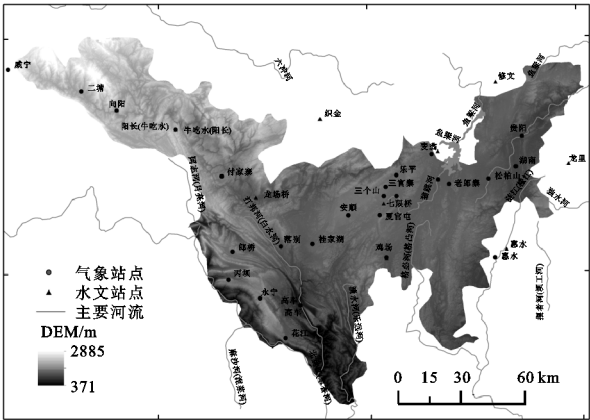


图 1 黔中地区主要河流分布

2 研究数据与方法

2.1 研究数据与分析处理

径流数据来源于黔中水利工程区的 17 个水文站点逐月实测径流数据;降水数据来源于国家气象信息中心“中国数据气象网”平台(<http://data.cma.cn>),共使用 26 个气象站点的逐日降水数据,径流数据与降水数据时间尺度均为 1960—2016 年。贵州省数字高程数据(DEM),来源于中国科学院“地理空间数据云”平台(<http://www.gscloud.cn/>)。其他基础资料主要为 2018 年全国水系分布,来自于贵州省水文水资源局(<http://gzswj.guizhou.gov.cn/>),全国行政区划数据、黔中水利工程区范围数据等均来源于 91 卫图(<http://www.91weitu.com/>)。

表 1 气象干旱与水文干旱等级划分标准

干旱指标	无旱	轻旱	中旱	重旱	特旱
标准化降水指数	$SPI>-0.5$	$-0.5\geq SPI>-1$	$-1\geq SPI>-1.5$	$-1.5\geq SPI>-2$	$SPI\leq -2$
径流距平百分率/%	$Ra>-20$	$-20\geq Ra>-40$	$-40\geq Ra>-60$	$-60\geq Ra>-80$	$Ra\leq -80$

2.2.2 干旱联合特征分析 Copula 理论是 1959 年 Sklar 提出的,实际上是一类可以将多个随机变量的边际分布连接起来并得到其联合分布的函数,也称为“连接函数”^[19]。时变 Copula^[20]模型主要是指参数随时间变化的 Copula 函数模型,文章主要以时变 Copula 模型中的正态 Copula 时变参数模型与 t-Copula 函数为主。

(1) 正态 Copula 函数。正态 Copula 函数的表达式如下^[21]:

$$C(U,V,\rho)=\int_{-\infty}^{\varphi^{-1}(u)}\int_{-\infty}^{\varphi^{-1}(v)}\frac{1}{2\pi\sqrt{1-\rho^2}}e^{-\frac{s^2-2\rho st+t^2}{2(1-\rho^2)}}dsdt$$

(1)

式中: U,V,ρ 为变量间的线性相关系数; φ^{-1} 为标准正态分布函数的逆函数;其余变量为函数中的参数; U 为气象干旱; V 为水文干旱。

(2) t-Copula 函数。t-Copula 函数的表达式如

数据处理与分析主要包括以下 3 个步骤:(1) 干旱特征计算。利用美国国家抗震减灾平台(<https://drought.unl.edu/>)SPI 程序计算多尺度标准化降水指数;利用 Excel 进行多尺度径流距平百分率计算。(2) 概率分析。利用 MATLAB 软件运行 Copula 函数程序,计算出干旱联合分布特征、联合概率分布以及干旱边缘分布。(3) 成果可视化。利用 Furfer 三维制图软件,将研究结果进行可视化显示。

2.2 研究方法

2.2.1 干旱识别 区域内水文干旱与气象干旱的识别主要采用标准化降水指数(standardized precipitation index, SPI)和径流距平百分率(percentage of runoff anomaly, Ra),根据降水资料及径流数据,分别计算 1960—2016 年尺度为 3 个月、6 个月、9 个月、12 个月的 SPI 值与 Ra 值。标准化降水指数(SPI)能够监测长时间的降水情况,揭示区域在一定时间内气候特征与降水缺少的相关关系,可被应用于不同时间尺度的干旱特征描述, SPI 的具体计算方法与气象干旱等级划分可参考马岚^[15]、曾碧球等^[16]的文章。径流距平百分率(Ra)用于表示某时段内径流量与多年均值之间偏差的一种指标,广泛地被应用于干旱监测和评究中,该指标具有计算简单便捷、数据资料简单易获取的特点,是用于水文干旱特征研究的最佳方法,具体计算方法及水文干旱划分标准(表 1)可参考韦开^[17]、马海娇^[18]等计算过程。

下^[21]:

$$C^t(U,V;\rho,k)=\int_{-\infty}^{tK^{-1}(u)}\int_{-\infty}^{tK^{-1}(v)}\frac{1}{2\pi\sqrt{1-\rho^2}}[1+\frac{s^2-2\rho st+t^2}{k(1-\rho^2)}]^{-(k+2)/2}dsdt$$

(2)

式中: k 为分布函数的自由度; t_k^{-1} 为自由度为 k 的一元 t 分布的分布函数的逆函数。

2.2.3 干旱概率分析 概率分析又称为风险分析,是通过研究各种不确定因素发生不同变动幅度的概率分布。基于 Copula 函数的二元干旱频率分布函数确定之后,利用联合概率与条件概率以及边缘概率分布之间的联系,便可确定不同尺度的气象干旱发生之后,水文干旱在不同尺度下随之发生的条件概率。

$$P(AB)=P(A|B)\times P(B)$$

(3)

式中: $P(A)$ 为事件 A 的边缘概率分布; $P(B)$ 为事件 B 的边缘概率分布; $P(A|B)$ 为条件概率; $P(AB)$ 为

联合概率; B 为气象干旱; A 为水文干旱。

(1) 联合概率分析。联合概率特征分布,也称为“联合概率分布”,即事件 A (水文干旱)与事件 B (气象干旱)同时发生的概率分布。利用 Copula 模型对水文干旱概率与气象干旱概率进行联合概率分布计算,以此得到干旱联合概率经验分布函数与密度分布函数,具体计算过程参考吴冬平等^[22]研究过程。

(2) 边缘概率分布。定义:设 $F(x,y)$ 为 X,Y 的联合分布函数,则 $F_X(x)=F(x,+\infty),F_Y(y)=F(+\infty,y)$ 分别称为二维随机变量 (X,Y) 关于 X 和关于 Y 的边缘分布函数。

已知 $P(X=x_i,Y=y_j)=P_{ij}$,其中 $i,j=1,2,\cdots$,为 (X,Y) 的联合分布律,则,离散型边缘概率分布函数:

$$F_X(x)=\sum_{j=1}^{\infty}p_{ij}\quad(i=1,2,\cdots)\quad(4)$$

$$F_Y(y)=\sum_{i=1}^{\infty}p_{ij}\quad(j=1,2,\cdots)\quad(5)$$

已知连续型随机变量 (X,Y) 的联合概率密度 $f(x,y)$ 以及联合分布函数 $F(x,y)$,则,连续型边缘概率分布函数:

$$F_X(x)=F(x,+\infty)=\int_{-\infty}^{+\infty}f(x,y)dydx\quad(6)$$

$$F_Y(y)=F(+\infty,y)=\int_{-\infty}^{+\infty}f(x,y)dx dy\quad(7)$$

(3) 条件概率分析。对于二维随机变量 (X,Y) ,可以考虑在其中一个随机变量取得(可能的)固定值的条件下,另一随机变量的概率分布,这样得到的 X 或 Y 的概率分布叫做“条件概率分布”,即指定条件事件 A (气象干旱)发生,事件 B (水文干旱)也发生的概率。

$$P(A|B)=P(AB)/P(B)\quad(8)$$

式中: $P(A|B)$ 为水文干旱条件概率; $P(AB)$ 为联合概率; $P(A)$ 为水文干旱边缘概率分布; $P(B)$ 为气象干旱边缘概率分布。

3 结果与分析

3.1 Copula 模型下的气象干旱特征分析

3.1.1 干旱程度特征分析

为进一步研究气象干旱

变化特征,从 3 个月、6 个月、9 个月、12 个月 4 个时间尺度对黔中水利枢纽工程区干旱程度特征进行了分析(图 2)。研究区气象干旱程度总体偏低,干旱多发生于 21 世纪以后,其中以 2003—2013 年气象干旱较为严重,尤其是 2010—2013 年这一时间内区域出现了严重程度的气象干旱,这是由于 2011—2015 年贵州省干旱历时、干旱烈度上升速率较大,气象干旱加重明显^[22]。从尺度上看,在 3 个月尺度内,气象干旱程度普遍较低,SPI 极低值出现于 2013 年($SPI=-1.30$),区域发生中等程度的气象干旱,接着是 2011 年中度干旱($SPI=-1.06$),2010 年轻度干旱($SPI=-0.98$),干旱年约占 15.79%;6 个月尺度内,2013 年干旱程度最高($SPI=-1.82$),中等气象干旱主要发生于 1989 年、2006 年、2010 年、2011 年以及 2013 年,另外区域内发生两场重旱,分别为 2011 年与 2013 年,SPI 值均低于 -1.5 ,近 57 a 来,干旱年约占 19.30%,主要以轻旱为主;9 个月尺度内,黔中地区干旱年约占 19.30%,同 6 个月尺度一致,但重度干旱只出现于 2013 年($SPI=-1.65$),气象干旱主要以中度干旱为主;同样,在 12 个月尺度中,干旱发生主要以中度干旱为主,干旱年约占 17.54%,无重度干旱发生。从时间上看,在七八十年代,区域降水较多,水资源丰富,气象干旱极少发生,而在 20 世纪以后,气象干旱程度较为严重,干旱频率较高。另外,并非研究尺度越长干旱程度越明显,即研究尺度的长短与干旱程度的高低之间无明显相关关系,同一年份中,6 个月与 9 个月尺度的气象干旱程度较为明显,SPI 值亦普遍比 3 个月与 12 个月尺度的 SPI 值高。从整体上看,黔中水利枢纽工程区 57 a 来气象干旱发生较少,干旱程度普遍偏低,2000 年以后干旱程度总体呈增加的趋势^[23]。在 3 个月尺度下气象干旱程度最低,干旱发生中轻旱占比最高,12 个月尺度下的干旱程度次之,9 个月和 6 个月尺度下气象干旱程度较高,其中,6 个月尺度下区域出现两场严重干旱。按区域整体干旱程度对多尺度气象干旱进行排序,依次为:6 个月>9 个月>12 个月>3 个月。

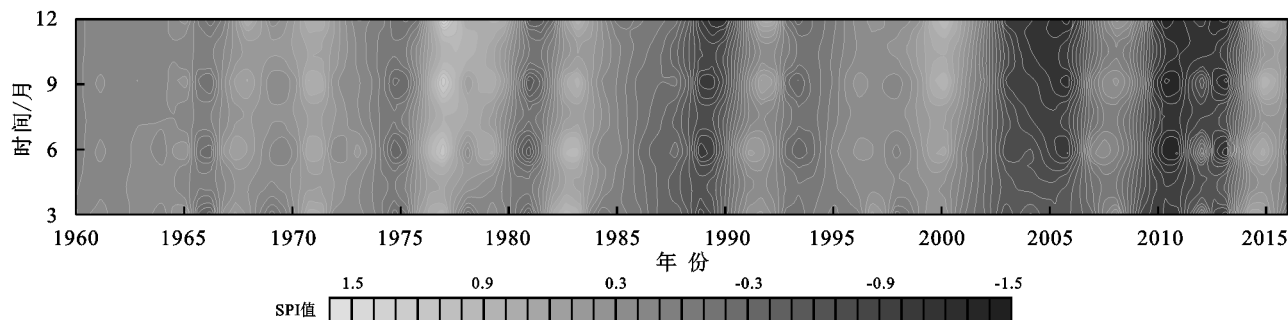


图 2 多尺度气象干旱程度等值线

3.1.2 干旱频率特征分析 对多尺度气象干旱及其 SPI 值出现频率进行统计,以分析气象干旱频率特征(图 3)。为了便于描述和理解干旱频率特征,将干旱频率分为如下标准:极少发生(0%~20%),较少发生(20%~40%),经常发生(40%~60%),频繁发生(60%~80%),极频繁发生(80%~100%)^[24]。根据区域气象干旱频率分布,可了解到:近 57 a 间,黔中水利工程区气象干旱多发时段为 20 世纪 80 年代末 90 年代初以及进入 21 世纪后,区域进入少雨时期,极端天气气候事件加剧,导致气象干旱频发^[25]。两个时段内干旱频率均高于 50%,其中 80 年代末 90 年代初时,区域气象干旱多发,尤其 1989 年、1990 年极频繁地出现连续多日高温,降水稀少,水资源短缺。进入 21 世纪贵州主要以夏旱为主,区域干旱日数增加、重旱特旱发生频次高、影响范围扩大,主要以 2011 年、2013 年干旱发生极为频繁,而旱情亦为近几十年来最重。4 个研究尺度中,区域气象干旱频率依次为:12 个月>9 个月>6 个月>3 个月,即 3 个月尺度下区域气象干旱频率偏低,12 个月尺度下区域气象干旱频发,干旱频率偏高。从 SPI 频率分布上看(图 4),非干旱占据主导地位(SPI ≥ -0.5),表明区域内整体干旱程度偏低,近 57 a 间区域气象干旱主要以轻旱和无旱为主,降水资源丰富。在发生气象干旱情况下,SPI 值越趋近于-0.5,则干旱程度越轻,出现频率逐渐增加,而在 SPI 大于-0.5 时,SPI 值越大,黔中地区降水越丰富,无明显气象干旱发生。频率分布以 SPI=0 为对称轴,各不同程度干旱出现频率由此向两侧逐渐递减,多尺度 SPI 频率总体上呈“ Δ ”型分布,局部存在差异性。

3.1.3 干旱程度与干旱频率联合分布特征 以干旱程度与干旱频率作为变量,采用二元 Copula 函数拟合出二者边缘分布及最佳联合分布函数,对识别的区域气象干旱进一步作特征联合分析(图 5)。结果表明,多尺度下干旱联合特征总体相似,干旱频率与干旱程度之间具有较强正相关性,同一干旱频率下,干旱程度边缘分布越趋近于 1,则特征联合度越高。在 3 个月、9 个月、12 个月尺度下,干旱程度与干旱频率联合度均表现为 0.6~0.65,这表明此时区域内频繁发生气象干旱且干旱程度较为严重。而在 6 个月尺度时,区域干旱特征联合度有所加重,当干旱程度边缘分布为 0.6~0.95,而干旱频率的边缘分布均高于 0.85 时,区域联合特征极大值为 0.65~0.7,可见与其余 3 个研究尺度相比,6 个月尺度下发生的气象干旱频率更高且程度更为严重。综合以上结果,6 个月尺度下区域出现高频率、程度深的气象干旱的可能性最

高,而 3 个月、9 个月、12 个月尺度下发生的气象干旱与之相比,发生频率较低,干旱程度较轻。

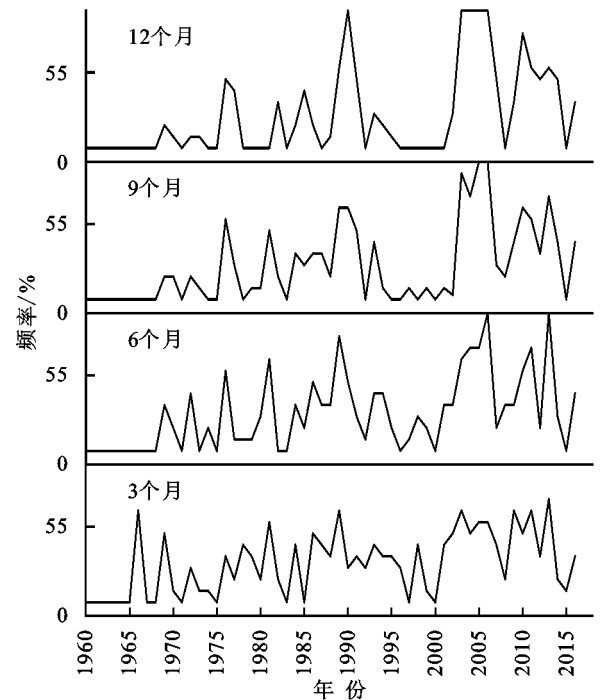


图 3 多尺度气象干旱频率分布

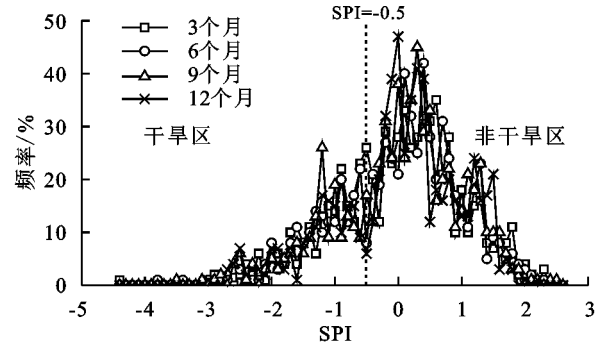


图 4 多尺度 SPI 频率分布

3.2 Copula 模型下的水文干旱特征分析

3.2.1 干旱程度特征分析 黔中水利工程区自 1960 年以来,区域水文干旱程度逐渐加重,水文干旱虽时有发生,但区域干旱程度整体偏低,干旱主要发生于 1985—1990 年、2003—2006 年、2010—2013 年共 3 个时段内,其余时间段虽局部地区出现水资源短缺,河流径流量减少,但区域总体旱情较轻。虽然贵州的年平均降水较高,但由于坡度较陡、土层薄、保水能力差等原因,加上地形地貌复杂导致降雨不均匀,所以临时性干旱极易发生。3 个月尺度上,水文干旱主要以轻旱为主,径流距平百分率最低为-31.43%(2010 年),其次为-30.99%(1986 年);而在 6 个月尺度上,黔中地区水文干旱主要集中于 1987—1993 年,此时段内出现中等程度的水文干旱,距平百分率达到-44.50%(1991 年),干旱程度与 3 个月尺度相比有所加重;研究尺度为 9 个月、12 个月时,在 20 世纪 80 年代末,水资

源匮乏,黔中水利工程区遭受中等程度的水文干旱($Ra_9=-45.72\%$, $Ra_{12}=-47.40\%$),进入 21 世纪后,干旱发生较为频繁且主要以轻旱为主,区域整体旱情较重为 2011 年,两个研究尺度的径流距平百分率分别为 -36.75% , -39.62% ,干旱程度为 21 世纪最高。从黔中地区多尺度水文干旱等值线分布(图 6),明显看到区域干旱主要发生于 20 世纪 80 年代和进

入 21 世纪以后,其中 80 年代属于贵州省少雨时期,气象干旱频发,极易发生水文干旱^[25]。进入 21 世纪后,水文干旱发生频率有所增加,由于受持续少雨及高温天气影响,贵州省于 2011 年遭受了继 2009—2010 年西南大旱之后的又一次严重干旱,黔中水利工程区受此灾害影响,区域内供水量远远低于需水量,河流枯竭干涸,水资源严重缺乏^[26]。

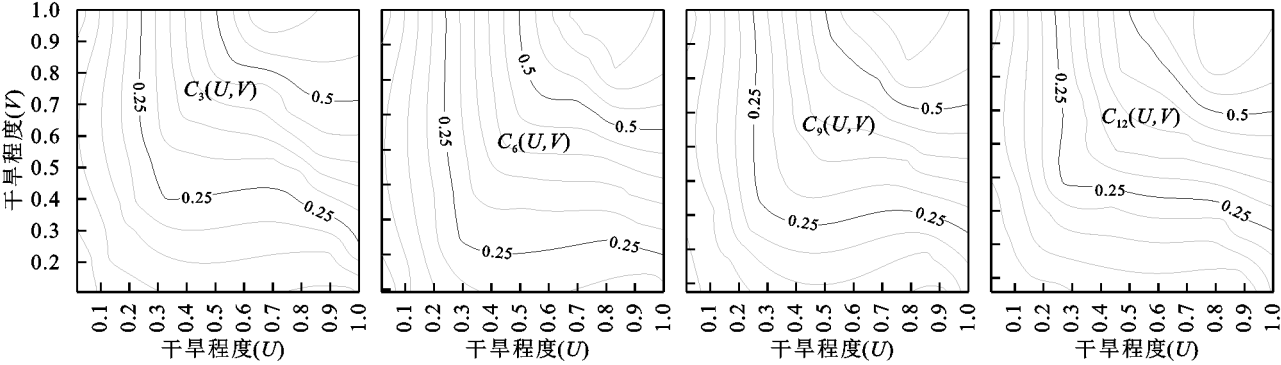


图 5 干旱程度与干旱频率的二元 Copula 联合分布

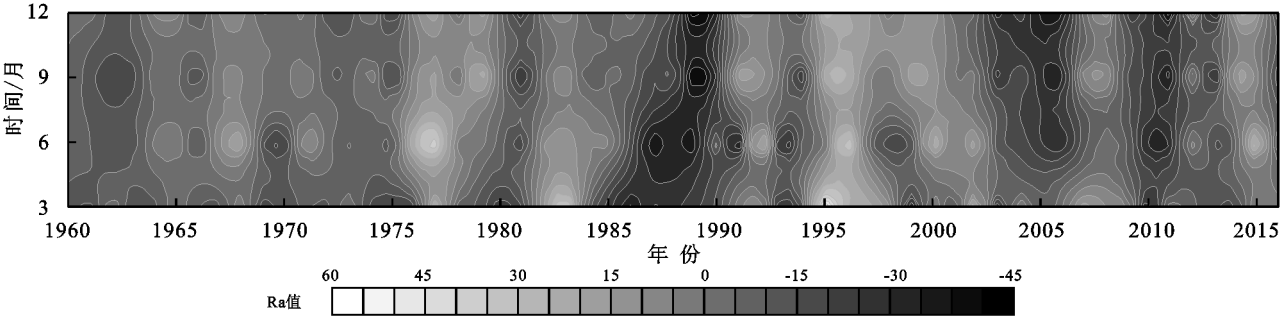


图 6 多尺度水文干旱程度等值线

3.2.2 干旱频率特征分析 从黔中水利枢纽工程区近 57 a 水文干旱频率分布可知:区域水文干旱频发,多尺度间干旱频率分布大体一致,且干旱频率起伏与干旱程度高低总体对应。由图 7 可知,黔中地区几乎年年有旱,且干旱发生普遍频繁,其中有 3 个时段水文干旱发生极为频繁($p>80\%$),分别为 20 世纪 80 年代—90 年代初期,以及 2000 年之后。同时,利用干旱站次比进一步分析不同干旱对区域的影响情况,具体标准参考云南红河流域干旱研究^[27]。图 8 表明区域水文干旱站次比分布与水文干旱严重程度大致对应,全域性干旱($p>50\%$)主要发生于 80 年代及 2000 年以后,区域水文干旱频率较高,干旱程度逐渐严重。整体上看,全域性干旱主要发生于干旱频繁年代,在各尺度下发生的比例相差不大,区域内干旱影响范围最广为 12 个月尺度下 1989 年,站次比约为 100%,干旱频率约为 98.2%;干旱影响力位居第二的是 9 个月尺度下 1989 年,站次比约 92.86%,频率约为 98.2%,由此可见时段内区域干旱对区域产生的影响涉及范围较广,遍及区域内各水文站点,干旱程度

较重。此外,1989 年、2003 年、2006 年、2011 年均 有 3 个及以上研究尺度发生全域性干旱,据历史资料统计(来自于中国天气网),这几个年份内贵州省发生了严重的水文干旱,黔中地区因此出现江河来水量急剧减少,加上区域蓄水不足,地表下渗能力强等原因导致干旱波及较广。综上所述,20 世纪 80 年代中后期及 21 世纪初期是区域水文干旱频发期,多年来干旱频率呈增长趋势,影响范围逐渐扩大,水文干旱发生频率越高则造成的受灾范围越广^[28]。

3.2.3 干旱程度与干旱频率联合分布特征 为进一步对多尺度水文干旱特征进行分析,利用联结函数拟合出干旱特征联合经验函数(图 9)。结果表明,干旱程度和频率越高则区域水文干旱特征联合度越高,但多尺度间干旱联合特征值总体偏低。明显看到,3 个月尺度时,干旱特征联合度最高且极值为 0.65~0.7,表明区域极大可能遭受频率较高、程度较重的水文干旱。其次是 12 个月尺度,特征联合值为 0.41~0.46,表明此尺度下虽然区域仍旧发生水文干旱,但是干旱程度与频率却比 3 个月尺度小得多。最后是 6 个月

与 9 个月尺度,干旱特征联合值均远低于前两个尺度,分别为 0.25~0.3,0.33~0.38,联合等值线较为稀疏,表明两个尺度下干旱程度与干旱频率之间变化不大,而区域干旱发生率亦较低。综合以上结果,3 个月尺度下区域水文干旱程度与干旱频率均高于其余 3 个尺度,干旱特征联合值趋近于 0.7,区域干旱频发,水资源匮乏,黔中地区受到较为严重的水文干旱,而在 6 个月尺度下,区域发生的水文干旱频率最低,干旱程度较为轻缓。

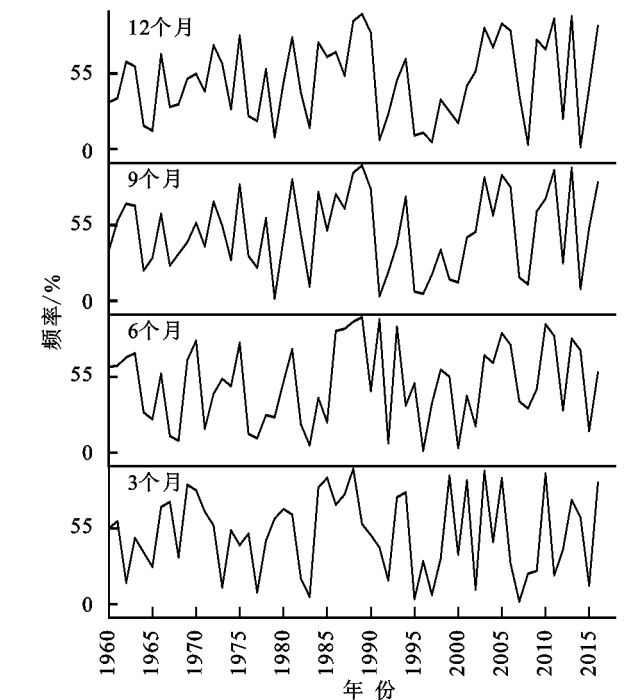
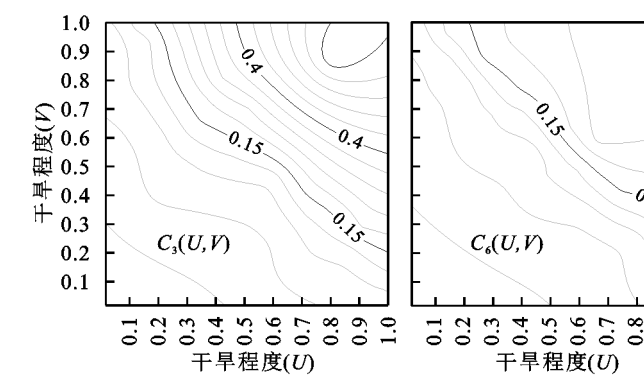


图 7 多尺度水文干旱频率分布

3.3 Copula 模型下气象干旱与水文干旱概率分析
3.3.1 气象干旱与水文干旱联合分布特征 将气象干旱与水文干旱的边缘分布函数进行联合,得到满足二者分布特征的联合经验分布函数,进一步分析两者



为进一步了解多尺度气象干旱与多尺度水文干旱之间的紧密程度,采用 Pearson 和 Kendall 相关系数计算两种干旱类型间多尺度指标的两两相关性(图 11)。从二元正态 Copula 函数上看,在 Kendall

之间联结特征(图 10)。从整体联合变化上看,4 个尺度中均呈现出明显的相似性,在时间分布上呈“低—高一低”状分布具有规律性。两种干旱类型联合度较低时段为 1985—1990 年、2000—2015 年,结合气象干旱与水文干旱事件分布情况(图 2,图 6),结果表明:时段内水文干旱与气象干旱并非都发生,区域干旱主要以水文干旱为主,在区域干旱灾害中占主要地位,产生的灾后影响也最为重大。从局部联合变化上看,在 4 个研究尺度中两种干旱类型于 1977 年联合程度较高 $[C(U,V)>0.9]$,尤其是 6 个月尺度下,两种干旱联合趋近于 1,这表明两种干旱类型在此年份内都发生,且二者对区域的作用和影响力相当,间接说明区域长时间降水量不足,多高温天气并由气象干旱引发区域水文干旱,河流湖泊枯竭,区域严重缺水。干旱联合程度偏低主要分布于 3 个月尺度下 1985—1990 年,联合值最低时近似于 0,表明这段时间内某一干旱在黔中水利工程区内占据主导地位,两种干旱类型之间力量相差悬殊,主要以水文干旱为主,间接说明区域发生干旱是由于下垫面因素所导致,因地处典型喀斯特地区,地表水不易留存,地表径流流失严重,侧面增强区域水文干旱的发生。

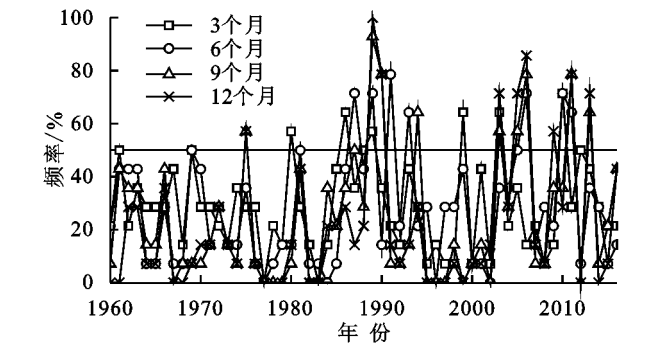


图 8 多尺度干旱站次比分布

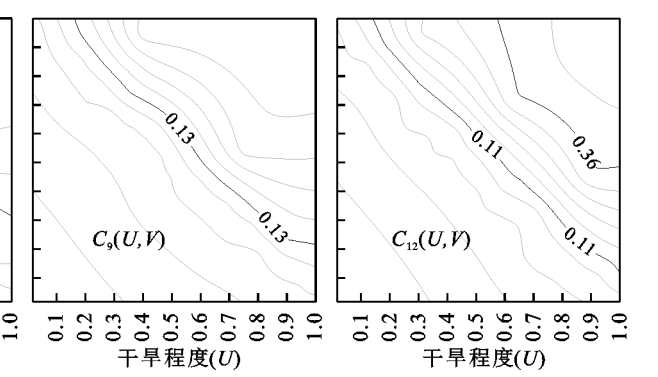


图 9 干旱程度与干旱频率的二元 Copula 联合分布

相关系数中(图 11A),两种干旱类型的相关系数值介于 0.2~0.6,同一尺度的 SPI 指标下,水文干旱研究尺度越长则两种指标间的相关性越强,相关系数趋近于 0.6;在 Spearman 相关系数中(图 11B),多尺

度指标间的相关系数介于 0.3~0.8,6 个月 SPI 与 12 个月 Ra 相关系数趋近于 0.8,最低相关系数略高于 0.3。两种相关系数虽均为正相关,但 Spearman 方法下的相关性明显稍强,相关系数约为 0.32~0.79。从二元 T-Copula 函数上看,在 Kendall 相关系数(图 11C),两种干旱指标间相关系数略高于同等方法下的二元正态 Copula 函数,为 0.27~0.63,而在 Spearman 相关系数等值线中(图 11D),呈现出的

相关系数值高于其余几种情况,在 T-Copula 函数中,Spearman 相关系数介于 0.39~0.82,两种干旱指标间相关性达到最强,为 4 种情况之最。以上结果表明,两种干旱指标均表现出较强的相关性,其中以 6 个月 SPI 与 12 个月 Ra 为相关性最强,3 个月尺度的 SPI 与 Ra 之间的相关性最弱,当 SPI 在同一尺度下,水文干旱研究尺度越长,则两种指标间的相关性也随之增长。

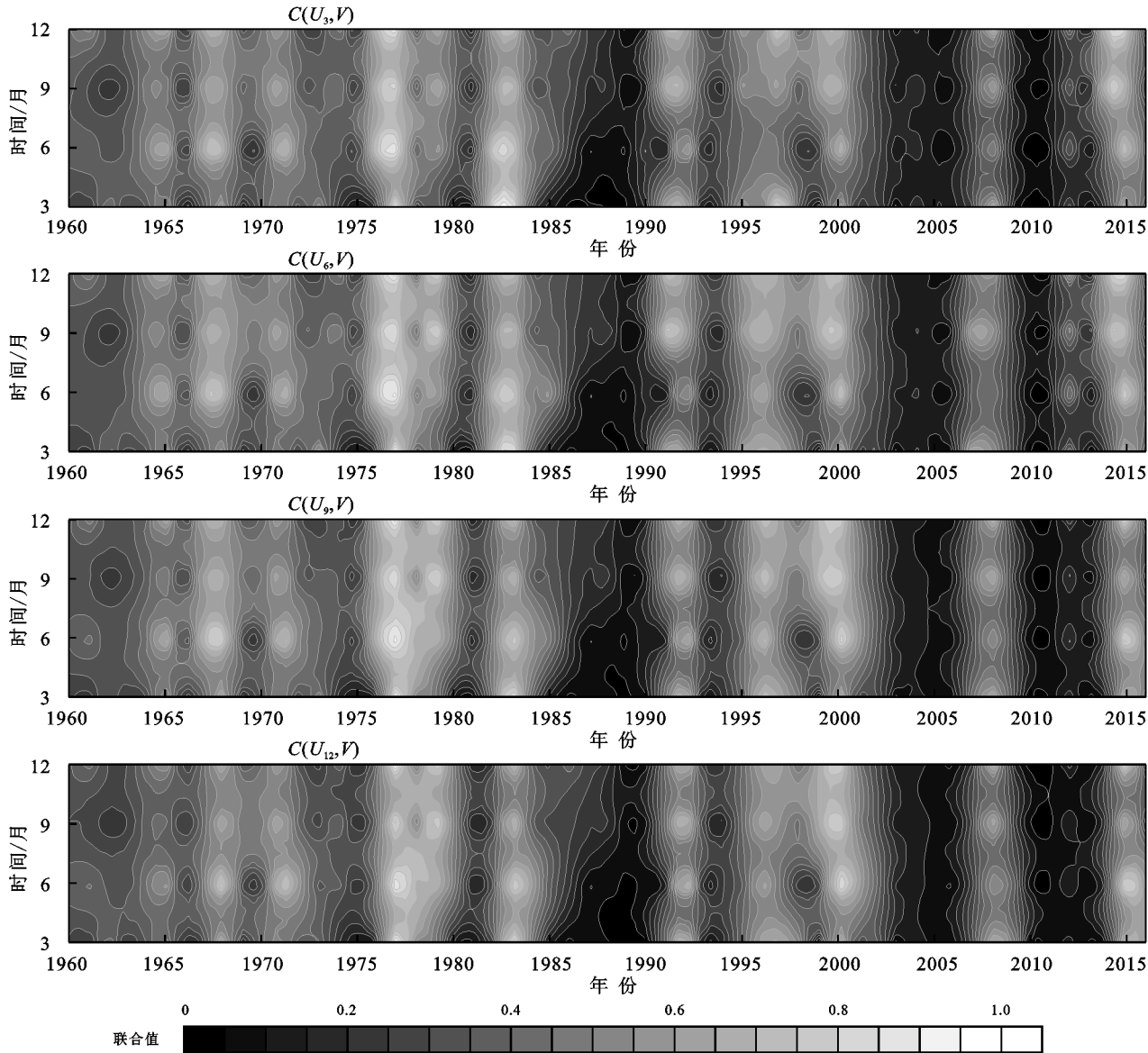


图 10 气象干旱与水文干旱联合分布

3.3.2 多尺度下的干旱联合概率分析 图 12 为黔中水利枢纽工程区多尺度气象干旱、水文干旱在某时段内频发的概率分布,结果表明:干旱联合概率在多尺度上的特征并不明显,各尺度间概率分布差异不大,联合概率并不会随着研究尺度的增加而增加;但在时间上却有明显分布特征,干旱联合概率偏高的时段主要为 80 年代中后期、2003—2005 年以及 2010—2013 年,此时段内区域多水文干旱与气象干旱,干旱

程度较重,发生频率较高。根据联合分布等值线可了解到,等值线数值越高则两种干旱高频发生的概率越高,而数值越低则表明两种干旱都发生的可能性越低。由图 12 明显看出,两种干旱类型在 1989 年、2003 年、2005 年、2011 年、2013 年出现联合概率极大值,概率主要分布于[0.9,1],在此 5 个年份内,黔中水利工程区频繁出现水文干旱与气象干旱,在双重干旱发生下,区域因长时间降水不足,蒸散发量增加,从

而导致地表径流量减少,地表水通过蒸发和入渗等方式消散而不汇流聚集。联合概率极低值主要出现于 1995—1997 年,概率主要分布于 $[0,0.05]$,表明黔中

地区同时出现两种高频干旱的概率趋近于 0,结合 4.1.1 与 4.2.1 研究结果,此时段内黔中地区雨水充足,地表河流湖泊水量丰富,发生干旱的可能性极低。

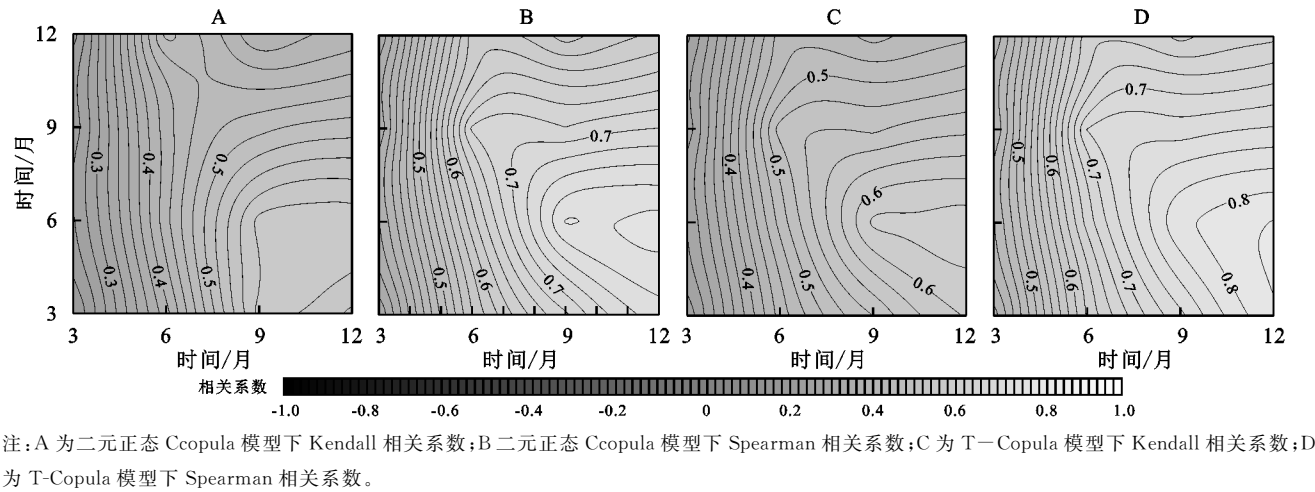


图 11 多尺度干旱指标相关系数

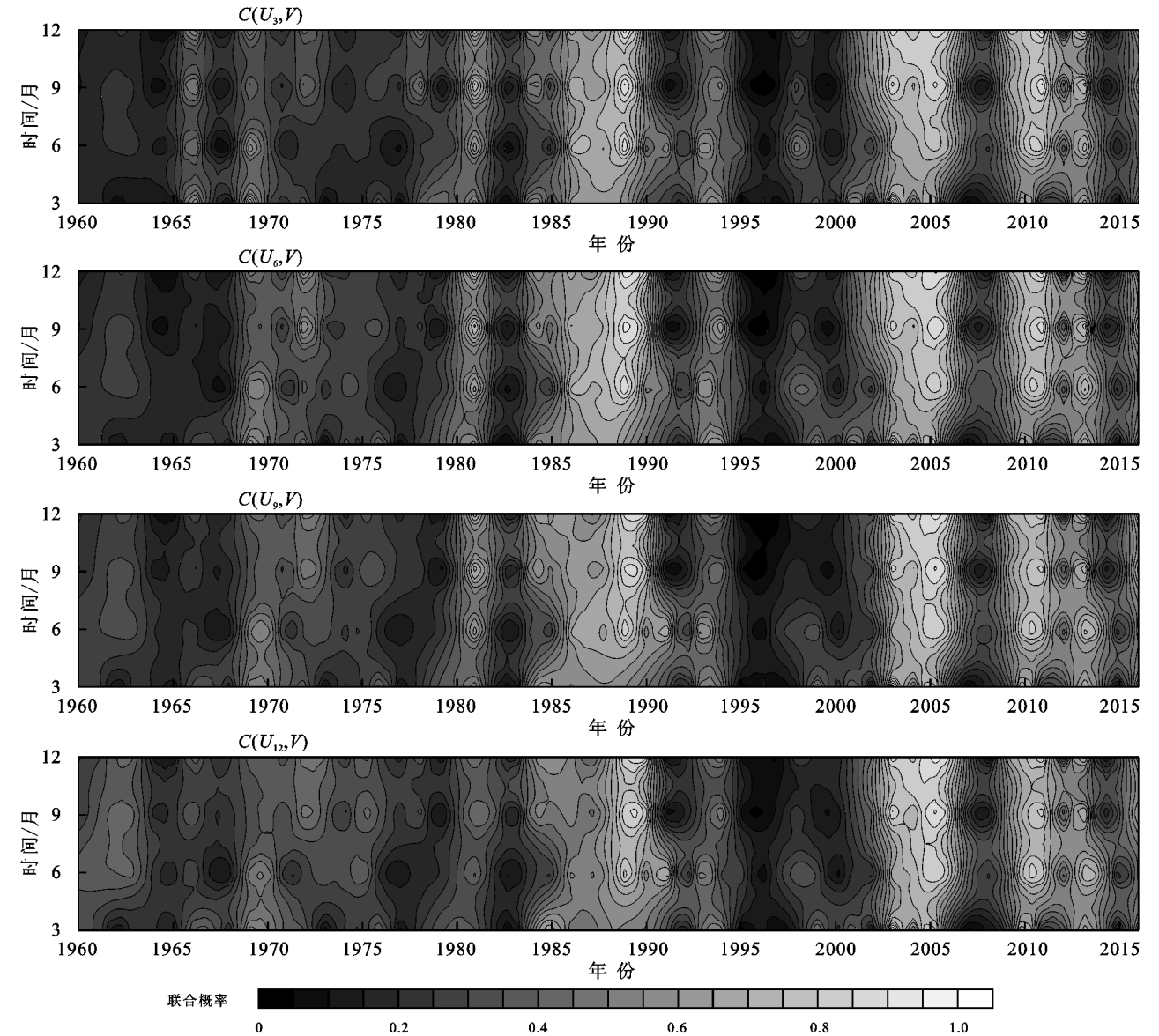


图 12 多尺度下干旱联合概率分布

3.3.3 多尺度下的干旱条件概率分析 气象干旱与水文干旱之间有着密切的联系,一定时期内无降水或降水不足导致的区域蒸散发需求加剧了大气干燥状况从而促进了水文干旱的发展,但区域在一定时期内无降水或降水量极少不一定导致水文干旱的发生^[29]。图 13 为某一尺度气象干旱(U)发生后,各尺度下水文干旱(V)发生的条件概率 $[C(U,V)]$,由等值线分布情况可知,水文干旱条件概率较高时期主要为 1984—1990 年,概率区间主要在 $[0.9,1]$,即区域发生气象干旱,长时间降雨不足后极有可能引发区域水文干旱。从整体上看,多尺度水文干旱在各尺度气象干旱发生下的条件概率大体一致,可见气象干旱的研究尺度长短对多尺度水文干旱发生概率影响不大。但是从局部差异上看,在条件概率概率偏高时段即 1985—1990 年,3 个月与 6 个月尺度下的气象干旱发

生,均导致水文干旱在 9 个月尺度下发生概率最高;9 个月与 12 个月尺度下的气象干旱发生,导致水文干旱在 6 个月与 9 个月尺度下发生概率最高,但我们能明显看到 12 个月尺度下气象干旱发生后,水文干旱在 6 个月尺度内发生的高概率时段较长。另外,根据黔中水利枢纽工程区 57 a 间条件概率分布(图 14),区域水文干旱发生概率波动较大,当区域气象干旱发生后,水文干旱于 1989 年达到概率极大值,条件概率约为 0.940,于 1983 年达到极小值,概率约为 0.156,整体呈上升趋势。综合以上结果,12 个月尺度下气象干旱的发生,导致 6 个月尺度下水文干旱发生的概率偏高且干旱时段较长,57 a 来黔中地区水文干旱发生的条件概率总体呈上升趋势,其中以 20 世纪 80 年代中后期及进入 21 世纪后的概率变化较为显著,在长时间的降水不足情况下,区域发生水文干旱的概率偏高。

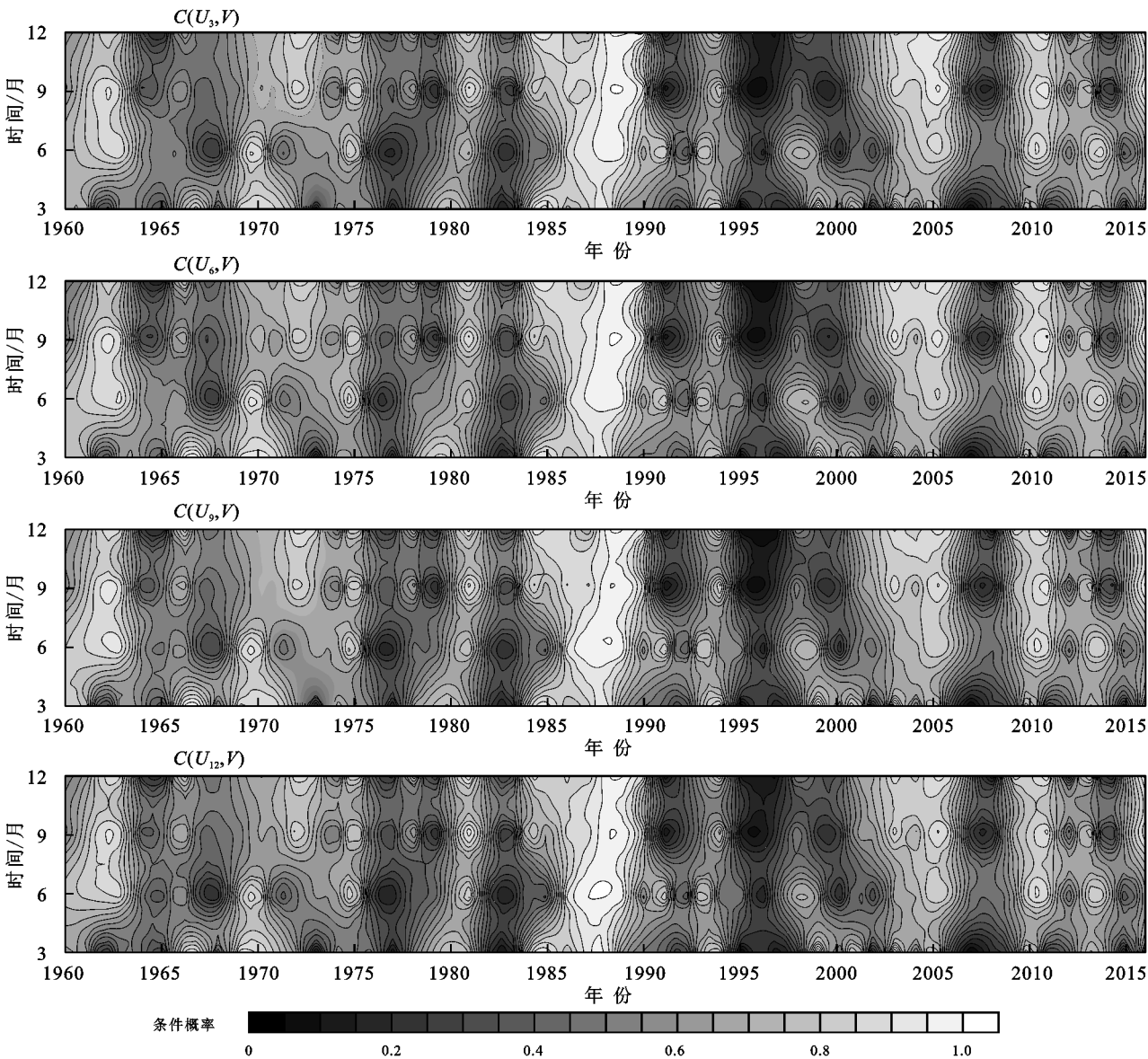


图 13 多尺度下水文干旱条件概率分布

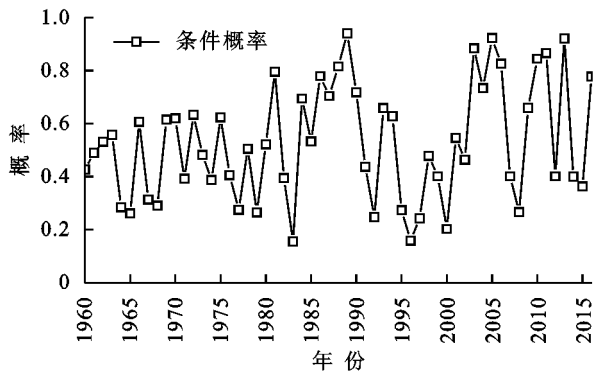


图 14 水文干旱条件概率分布

4 结论

(1) 进入 21 世纪之后,黔中水利枢纽工程区气象干旱频发,干旱程度较为严重,但区域气象干旱程度总体偏低。区域多尺度气象干旱按发生程度依次为:6 个月>9 个月>12 个月>3 个月,干旱频率总体呈上升趋势。各尺度间干旱特征联合总体相似,但与 3 个月、9 个月、12 个月尺度的气象干旱相比,6 个月尺度下的区域气象干旱频率更高、干旱程度更严重。

(2) 黔中水利工程区自 1960 年以来,区域水文干旱程度逐渐加重,发生频率逐渐增加,但区域干旱程度整体偏低,干旱主要多发于 1985—1990 年、2003—2006 年、2010—2013 年 3 个时段内,其余时间段虽局部地区出现水资源短缺,河流径流量减少,但区域总体旱情较轻。在联合特征中,多尺度间干旱联合特征值总体偏低,多尺度下区域出现高频率、程度深的水文干旱可能性最大为 3 个月尺度,最小为 6 个月尺度。

(3) 在干旱联合特征中,4 个时间尺度的联合特征均呈现出明显的相似性,区域干旱主要以水文干旱为主,两种干旱指标间以 6 个月 SPI 与 12 个月 Ra 为相关性最强,3 个月尺度的 SPI 与 Ra 之间的相关性最弱,当 SPI 在同一尺度下,水文干旱研究尺度越长,则两种指标间的相关性越强。干旱联合概率在时间分布上具有明显特征,联合概率较高时段主要为 80 年代中后期,区域多水文干旱与气象干旱,而概率极低值主要分布于 1995—1997 年,黔中地区出现两种高频干旱的概率极低。在 57 a 间水文干旱发生概率总体呈上升趋势,且 12 个月尺度下气象干旱的发生,导致水文干旱在 6 个月尺度下发生的概率最高。

参考文献:

[1] 张强.华北地区干旱指数的确定及其应用[J].灾害学,1998,13(4):3-5.

[2] 钱莉莉,贺中华,梁虹,等.基于降水 Z 指数的贵州省农业干旱时空演化特征[J].贵州师范大学学报:自然科学版,2019,37(1):10-14,19.

[3] Zhao P, Lü H, Wang W, et al. From meteorological droughts to hydrological droughts: a case study of the Weihe River Basin, China[J].Arabian Journal of Geosciences,2019,12(11):1-13.

[4] 薛凯丽.基于时变 Copula 模型的资产间相关关系研究[D].西安:西安工程大学,2019.

[5] 李彦恒,史保平,张健.联结(copula)函数在概率地震危险性分析中的应用[J].地震学报,2008,30(3):292-301,328.

[6] 周念清,李天水,刘铁刚.基于游程理论和 Copula 函数研究岷江流域干旱特征[J].南水北调与水利科技,2019,17(1):1-7.

[7] 李明,张永清,张莲芝.基于 Copula 函数的长春市 106 年来的干旱特征分析[J].干旱区资源与环境,2017,31(6):147-153.

[8] 张园.基于 Copula 函数的陕西省干旱特征分析及应用[D].西安:长安大学,2018.

[9] 苏夏羿,张鑫,王云,等.基于 SPI 和 Copula 的湟水流域干旱趋势研究[J].中国农村水利水电,2016,58(12):151-155.

[10] 杨茂灵,王龙,余航,等.基于 Pair-copula 函数和标准化径流指数的水文干旱频率分析:以南盘江流域为例[J].长江流域资源与环境,2014,23(9):1315-1321.

[11] 任璐.基于 Copula 的汾河上游水文干旱频率的多时间尺度分析[D].太原:太原理工大学,2016.

[12] 任荣仪,贺中华,梁虹,等.黔中岩溶山区近 50 年降水时空变化:以黔中水利枢纽工程区为例[J].贵州科学,2020,38(4):54-62.

[13] 安全,贺中华,赵翠薇,等.喀斯特分布区小比例尺地表水系提取及阈值分析:以黔中水利枢纽工程区为例[J].水利水电技术,2018,49(12):17-26.

[14] 夏传花,贺中华,梁虹,等.基于 landsat 8 的贵州省 2015 年农业干旱监测研究[J].现代农业科技,2020,49(10):140-143.

[15] 马岚.气象干旱向水文干旱传播的动态变化及其驱动力研究[D].西安:西安理工大学,2019.

[16] 曾碧球,解河海,查大伟.基于 SPI 和 SRI 的马别河流域气象与水文干旱相关性分析[J].湖北农业科学,2020,59(12):40-44.

[17] 韦开,王全九,周蓓蓓,等.基于降水距平百分率的陕西省干旱时空分布特征[J].水土保持学报,2017,31(1):318-322.

[18] 马海娇,严登华,翁白莎,等.典型干旱指数在滦河流域的适用性评价[J].干旱区研究,2013,30(4):728-734.

[19] 刘晓云,王劲松,李耀辉,等.基于 Copula 函数的中国南方干旱风险特征研究[J].气象学报,2015,73(6):1080-1091.

[20] 蒋学伟.基于时变因子 Copula 的系统性风险度量[D].杭州:浙江工商大学,2016.