

# 区域气象干旱评估分析模式

刘文琨<sup>1</sup>, 裴源生<sup>1</sup>, 赵勇<sup>2</sup>, 肖伟华<sup>1</sup>

(1. 中国水利水电科学研究院水资源研究所, 北京 100038; 2. 流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038)

**摘要:** 为应对全球范围内日益严重的干旱问题, 对区域气象干旱相对完整的评估分析模式开展了探讨。提出了从区域气象干旱识别到干旱特征值计算, 再到干旱特征多变量分析的3个分析评估步骤。并以渭河流域为例, 对研究区域进行了矩形干旱评估单元划分, 选取了RDI(Reconnaissance Drought Index)为评估指标对区域内各单元各时段的干旱状态进行了识别, 结果与历史记载的干旱年份吻合较好。分别采用了分布拟合、相关系数和Copula函数等统计学方法对区域干旱的干旱特征值(干旱历时、干旱面积、干旱强度和干旱频率)进行了特征分析, 得出了一系列的单变量、双变量及多变量特征分析对比结果。通过对各类分布函数的计算和绘图, 得到了渭河流域干旱事件发生的条件概率和重现期, 形成了一套相对完整的区域干旱评估分析模式。

**关键词:** 气象干旱; 干旱监测指数; 区域干旱; 干旱特征值; Copula函数; 渭河流域

**中图分类号:** S423

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1001-6791(2014)03-0318-09

在变化环境的背景下, 近年来中国干旱呈现出广发频发的态势, 严重影响人民生产活动, 同时也制约了社会经济的发展。未来全球大部分地区因蒸发量增加和土壤水分减少, 干旱化趋势明显, 持续干旱将对包括中国在内的大多数国家造成严重影响<sup>[1]</sup>。

最初的干旱评估是根据站点监测数据, 计算干旱指标对该站点的干旱强度进行分析(认为干旱指标值即干旱强度); 随着游程理论出现并伴随着其在干旱识别中的应用<sup>[2]</sup>, 可进行干旱起止时间及历时等特征指标的分析计算, 干旱评估由单一的干旱强度分析发展到多个变量干旱特征的分析, 但是依然难以获取准确的干旱覆盖面积; 直到3S技术的推广应用, 才能识别出干旱空间分布, 获取干旱面积特征, 进而可对干旱时空分布特征进行分析<sup>[3-4]</sup>。目前干旱评估研究趋向于多尺度、多特征变量分析, 但尚未形成一套系统完善的评估框架<sup>[5-6]</sup>。

可见, 开展区域干旱研究在理论和指导社会实践上都具有重要意义。本文将在梳理现有研究成果基础上, 针对渭河流域开展区域干旱研究, 利用实测气象数据对渭河流域1951—2012年的区域气象干旱演变规律进行统计分析, 对相对完整的区域气象干旱评估模式开展探讨。

## 1 区域气象干旱评估方法

基于前人在区域气象干旱研究领域的研究成果, 提出本文研究区域气象干旱的3个步骤: ①选取某个干旱评估指标对区域的各评估单元进行干旱识别; ②计算区域气象干旱的各类特征指标, 如干旱历时、面积、强度和频率等; ③通过统计学方法对各类干旱特征指标进行单变量、双变量及多变量分析。其技术框架如图1所示。

本文以渭河流域为例, 研究评估其近62年来(1951—2012年)流域气象干旱的时空演变规律。渭河流域面积为13.5万km<sup>2</sup>, 流经甘肃、宁夏、陕西三省(区)。其地处干旱与湿润地区的过渡带, 雨热同季, 多年平均降水量为589mm, 流域年水面蒸发量为660~1600mm, 年陆面蒸发量为500mm左右。

**收稿日期:** 2013-08-15; **网络出版时间:** 2014-04-10

**网络出版地址:** <http://www.cnki.net/kcms/detail/32.1309.P.20140410.0952.015.html>

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(51379216); 国家重点基础研究发展计划(973计划)资助项目(2010CB951102)

**作者简介:** 刘文琨(1987—), 男, 湖北汉川人, 博士研究生, 主要从事水循环模型和水资源合理配置研究。

**E-mail:** mosoney@qq.com

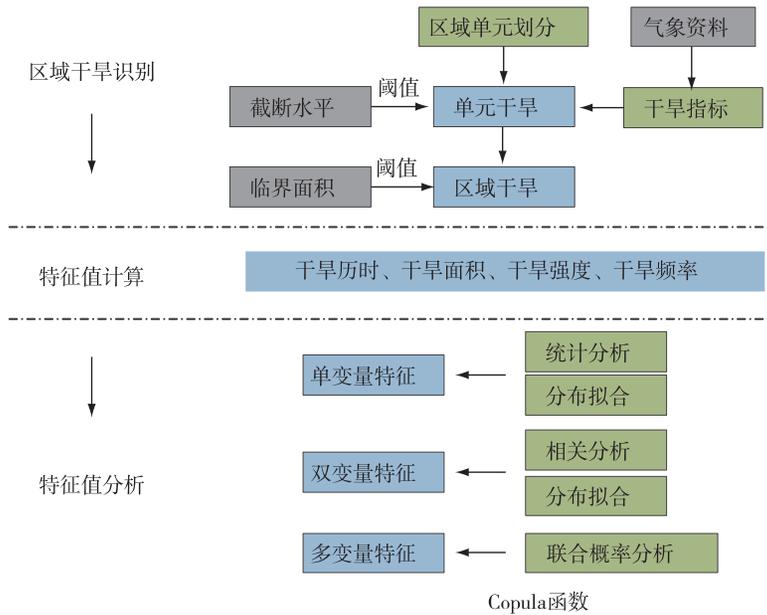


图 1 区域气象干旱评估分析框架

Fig. 1 Framework of regional meteorological drought assessment and analysis

计算选取“月”和“10 km×10 km 矩形网格”作为干旱评估的时间和空间尺度，因此共有 744 个干旱评估时段和 1 469 个干旱评估单元，如图 2 所示。此外，计算所需的气象数据全部来源于“中国地面气候资料日值数据集(V3.0)”（中国气象数据共享服务网），本次评估分析计算按照泰森多边形从中选取了渭河流域的 37 个相关气象站，并以考虑高程差的协克里金插值法进行数学编程，将逐日气象资料插值展布到各干旱评估单元。本文统计分析和相关分析采用 fortran 与 matlab 混合编程的方法。

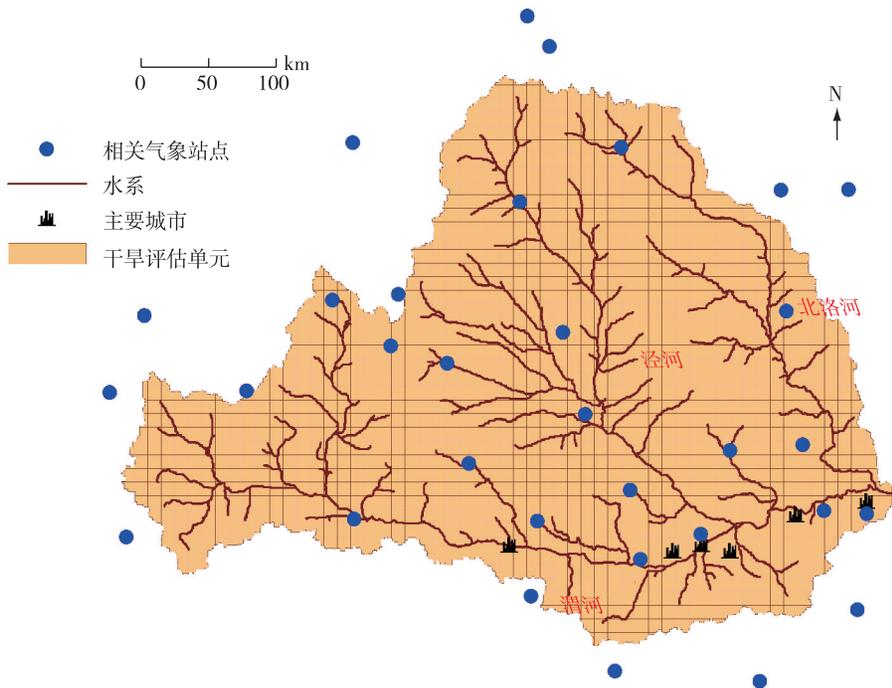


图 2 渭河流域干旱评估单元

Fig. 2 Drought evaluation units of Weihe River basin

### 1.1 干旱评估指标计算

研究选取 RDI (Reconnaissance Drought Index) 为干旱评估指标, RDI 是同时考虑降水和蒸发因素的气象干旱指标<sup>[7]</sup>, 其计算方法类似于标准化降水指数 (Standardized Precipitation Index, SPI), 该指标对外界环境变化敏感, 可用于分析气候变化对干旱的影响。且 RDI 可与水文干旱及农业干旱建立有效联系, 虽然比单因素指标计算复杂, 但相对于多因素指标计算要更简单。相对于采用序列降水与潜在蒸发比值的平均值作为标准化基准的  $K$  干旱指数, RDI 指标采用分布函数对降水和潜在蒸发比值进行拟合, 评价标准更为明确。其计算方法概述如下: 首先计算各单元各时段的降水量和潜在蒸发量的比值  $a_{i,j}$  (第  $i$  评估单元第  $j$  月的降水量和潜在蒸发量比值), 然后假设  $a_{i,j}$  序列服从  $\Gamma$  分布, 继而计算出某时段  $a_{i,j}$  值的  $\Gamma$  分布概率后, 再将其进行正态标准化处理, 其函数形态参数  $Z$  值即为 RDI 值, 最后用标准化累积频率分布来划分其干旱等级。RDI 值具体计算公式如下:

$$a_{i,j} = \frac{P_{i,j}}{ET_{p(i,j)}} \quad i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

$$f(x) = \frac{1}{\beta^\gamma \Gamma(\gamma)} x^{\gamma-1} e^{-\frac{x}{\beta}} \quad x > 0 \quad (2)$$

$$F(x < x_0) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^\infty e^{-\frac{z^2}{2}} dx \quad (3)$$

式中  $m$  为评估单元个数;  $n$  为评估时段个数;  $P_{i,j}$  和  $ET_{p(i,j)}$  分别为第  $i$  评估单元第  $j$  月的降水量和潜在蒸发量;  $f(x)$  为以  $a_{i,j}$  为随机变量  $x$  的  $\Gamma$  分布的概率密度函数;  $\beta > 0$ ,  $\gamma > 0$  分别表示尺度参数和形状参数, 可用极大似然估计方法求得;  $F(x < x_0)$  为随机变量  $x$  小于  $x_0$  事件的概率;  $z$  值即为要求的 RDI 值。

RDI 的评价标准同 SPI, 本文采用中国《气象干旱等级》中的标准, 见表 1。其中单元月潜在蒸发量按照联合国粮食及农业组织 (FAO) 发布的 Penman-Monteith 公式<sup>[8]</sup> 计算所得。

### 1.2 区域干旱识别

干旱识别即辨识某个评估对象某时段是否处于干旱状态, 目前一般采用基于游程理论的阈值法<sup>[9]</sup>, 即评价对象的指标值超过一定的阈值就认为该对象处于干旱状态。区域气象干旱识别分为 2 个层次: 第 1 层是识别各干旱评估单元各时段是否干旱。设任意评价单元  $k$  在  $t$  时段的干旱指标值  $z(t,k)$ , 给定一个阈值 (截断水平)  $z(p,k)$ , 当  $z(t,k) < z(p,k)$  时, 则该单元在  $t$  时段处于干旱状态。按照表 1, 本文选取截断水平为  $-0.5$ 。

第 2 层是识别总的研究区域各时段是否干旱。统计各时段干旱单元面积占总面积的比例  $A(t)$ , 给定一个阈值 (临界面积)  $A_c$ , 当  $A(t) \geq A_c$  时, 则区域在  $t$  时段处于干旱状态。按照前人研究经验<sup>[10]</sup>, 基于渭河流域实际情况选取临界面积百分比为 5%。

### 1.3 干旱特征值的计算

某次区域干旱事件可用干旱历时、干旱面积、干旱强度和干旱频率等指标来表征其干旱状态, 并依此来衡量该次干旱事件的严重程度。

(1) 干旱历时 ( $D$ ), 即某次区域干旱事件的总持续时间。根据区域干旱识别结果, 若研究区域从  $i$  时段开始干旱一直持续到  $i+T$  时段, 则该次干旱事件历时为  $T$ 。

(2) 干旱面积 ( $A$ ) 百分比, 即某次区域干旱事件在其干旱历时 ( $D$ ) 内各时段发生干旱的区域面积与区域总面积之比的平均值。

(3) 干旱强度 ( $S$ ), 即某次区域干旱事件在其干旱历时 ( $D$ ) 内各时段各干旱评估单元的干旱强度面积加权之和。各时段各干旱评估单元的干旱强度为截断水平与干旱指标的差值。

表 1 基于 RDI 的气象干旱等级划分

Table 1 Meteorological drought hierarchies based on RDI

状态	RDI 指标值 $z$	等级
0	$z > -0.5$	无旱
1	$-1.0 < z \leq -0.5$	轻旱
2	$-1.5 < z \leq -1.0$	中旱
3	$-2.0 < z \leq -1.5$	重旱
4	$z \leq -2.0$	特旱

(4) 干旱频率( $F$ ), 即一定时期内发生某种特征区域干旱事件的频繁程度, 本文采用基于 Copula 函数<sup>[11]</sup>的联合概率分布法来进行干旱频率与其他干旱特征指标之间的双变量以及多变量分析, 先基于经验频率计算结果, 根据参数法<sup>[9,12]</sup>(某种含有参数的分布)或非参数法<sup>[12]</sup>(基于经验分布和核密度估计)拟合出干旱各单一特征指标的边缘分布函数, 然后再利用 Copula 函数将两个或多个特征指标的边缘分布连接起来, 构造联合分布函数并对其参数进行估计; 最后基于构造好的联合分布函数计算考虑两种或多种特征变量特征的干旱发生概率。

## 2 评估结果分析

基于渭河流域 1951—2012 年气象数据, 采用前文所述的干旱评估方法对气象干旱事件进行干旱识别, 并对每次干旱事件的特征指标值进行计算, 得到渭河流域 1951—2012 年气象干旱事件序列见图 3。可以看出, 渭河流域近 62 年间, 共发生了 155 次气象干旱事件。其中, 最长持续时间的干旱发生在 2010 年 6 月至 2011 年 8 月, 干旱持续时间达 15 个月。最高强度的干旱发生在 1998 年 8 月至 1999 年 3 月, 干旱强度为 5.39。

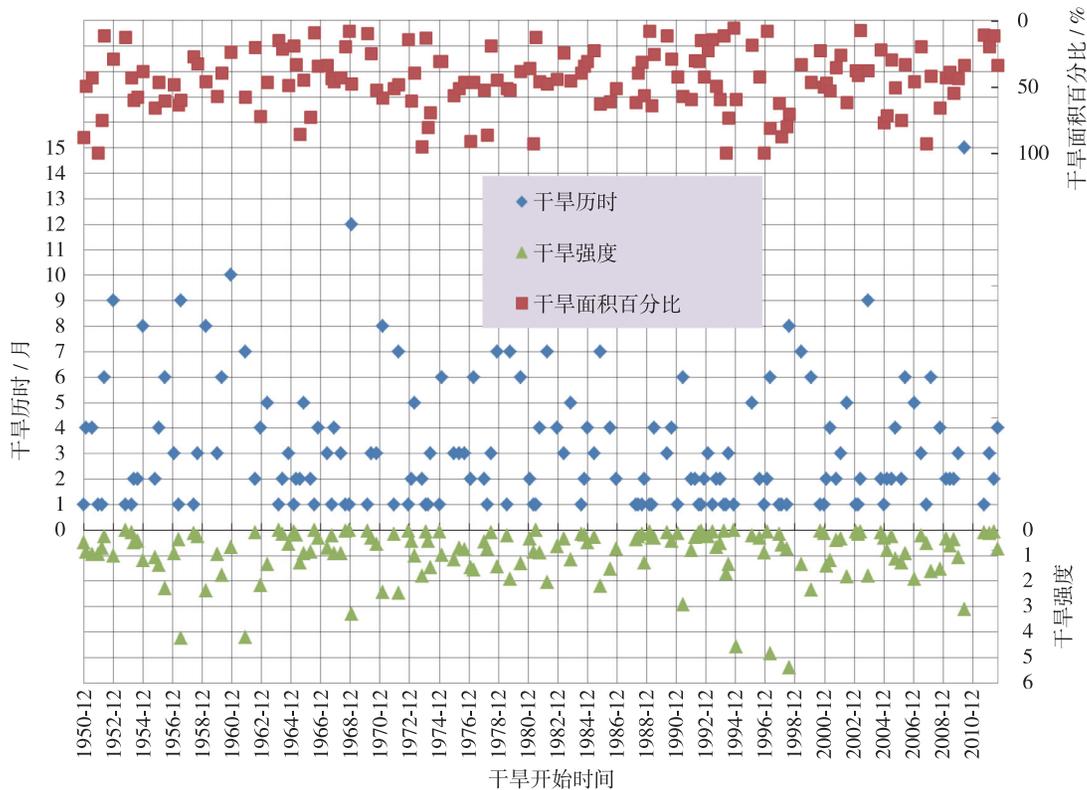


图 3 渭河流域近 62 年气象干旱事件序列

Fig. 3 Meteorological drought event sequence of Weihe River basin by nearly 62 years

最大干旱面积百分比为 100%, 发生在 1995 年 12 月等。根据《中国历史干旱 (1949—2000)》记载, 渭河流域特大旱灾事件发生在 1965 年、1969 年、1971—1972 年、1977 年、1982 年、1986 年、1994 年、1995 年及 1997 年。参照图 3 可见干旱评估结果与历史记载的严重干旱年份吻合, 证明本文对关键参数的选取是合理的。

### 2.1 单变量特征

根据气象干旱事件计算结果(图 3), 对渭河流域近 62 年来干旱事件的历时、面积及强度等单一特征指标进行统计, 得到主要统计特征值见表 2。从各特

表 2 气象干旱单一特征指标统计特征值

Table 2 Meteorological drought index of single feature statistical characteristic value

单变量特征	干旱历时 $D/月$	干旱面积 $A/%$	干旱强度 $S$
均值	3.2	45	0.88
标准差	2.6	22	0.99
最大值	15.0	100	5.39
最小值	1.0	6	0.01
变异系数	0.8	50	1.12
偏度	1.6	40	2.12

征指标标准差、变异系数来看，干旱面积离散程度最小，其次是干旱历时，干旱强度分布最为离散；从各特征指标偏态系数来看，干旱历时和干旱强度分布与正态分布相比呈现右偏，而干旱面积分布则和正态分布较为接近。

2.2 双变量特征

(1)  $S \sim D$ 、 $S \sim A$ 、 $D \sim A$  关系

基于渭河流域气象干旱事件序列，分别对干旱历时、面积和强度 3 个特征指标两两间关系进行相关性分析，采用 Pearson 线性相关系数  $\rho$ 、Kendall 秩相关系数  $\tau$  和 Spearman 秩相关系数  $\rho_s$  来进行特征指标值的相关性分析<sup>[13]</sup>，相关系数的绝对值越接近于 1，说明两变量之间的相关性越强。计算结果见表 3。

表 3 气象干旱特征指标之间的相关性度量

Table 3 Correlation between meteorological drought characteristics indexes

相关系数	$S \sim D$	$S \sim A$	$D \sim A$
$\rho$	0.74	0.44	0
$\tau$	0.72	0.65	0.06
$\rho_s$	0.57	0.46	0.04

可以看出，干旱历时和面积相关关系不明显，而强度与历时的线性相关性较好，Pearson 线性相关系数达到 0.74，而强度与面积的秩相关性相对较好，Kendall 秩相关系数达到 0.65。基于上述计算可对强度与历时进行线性拟合，对强度与面积进行乘幂拟合，结果见图 4。

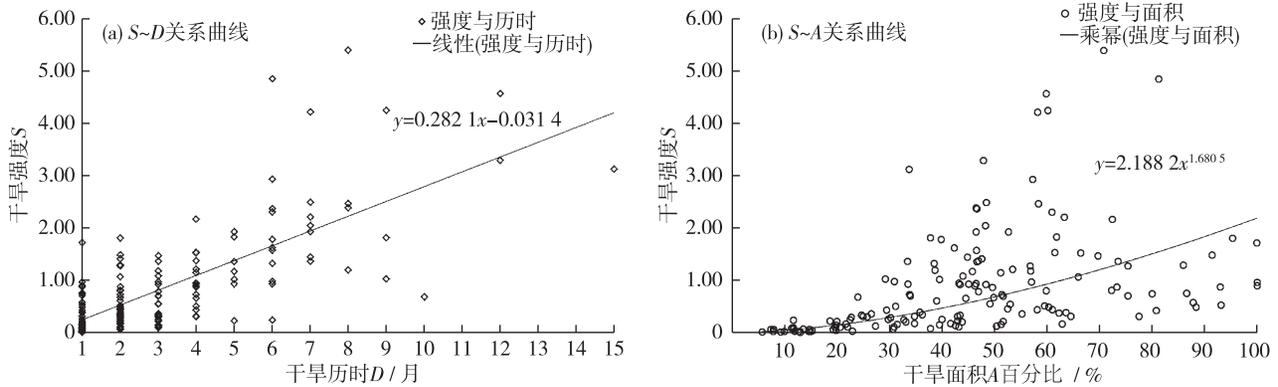


图 4 气象干旱特征指标之间的关系

Fig. 4 Relationship between the meteorological drought characteristic indexes

(2)  $S \sim F$ 、 $D \sim F$ 、 $A \sim F$  关系

采用概率分布方法对各干旱特征指标进行频率分析。先选用正态分布、 $\gamma$  分布等常见的函数分布对各特征指标概率分布进行拟合，并使用 Kolmogorov-Smirnov 检验方法<sup>[14]</sup>对拟合优度进行检验，若通过检验，则得到相应分布函数曲线；若未通过检验，则采用核密度函数进行拟合。干旱历时、面积和强度分布拟合参数估计及拟合优度检验见表 4。同时考虑是否通过检验与显著性水平高低( $p$  值)，则可认为干旱面积符合正态分布，而干旱强度符合  $\gamma$  分布。对于干旱历时利用常用分布进行拟合，发现其均不能通过检验。故可采用非参

表 4 气象干旱特征指标概率分布拟合的参数估计及拟合优度检验

Table 4 Probability distribution fitting parameter estimation of meteorological drought characteristics indexes

指标	正态分布					$\gamma$ 分布				
	参数估计		Kolmogorov-Smirnov 检验			参数估计		Kolmogorov-Smirnov 检验		
	均值 $\mu$	方差 $\sigma$	$h$ 值	$p$ 值	是否通过检验	尺度参数 $\alpha$	形状参数 $\beta$	$h$ 值	$p$ 值	是否通过检验
干旱历时 $D$ /月	3.25	2.59	1	0	否	1.95	1.66	1	0	否
干旱面积 $A$ /%	0.45	0.22	0	0.73	是	3.32	0.14	0	0.10	是
干旱强度 $S$	0.88	0.99	1	0	否	0.84	1.05	0	0.98	是

注：显著性水平  $\alpha=0.05$ ， $h=0$  且  $p>\alpha$  表示通过检验。

数法, 利用经验分布函数和核密度函数对干旱历时进行分布拟合。如此, 可根据各特征指标的概率分布函数, 任意给定干旱特征指标值, 通过计算其对应的分布函数值, 得出特征值小于或等于该值的干旱发生频率, 为干旱应对提供依据。

### 2.3 多变量特征

根据前文的双变量特征关系分析结果, 干旱历时和面积相关关系不显著, 认为其相互独立, 不需要构造 Copula 函数来分析其联合概率(频率)分析, 而干旱强度与面积、干旱强度与历时则有显著相关关系, 因此, 将选用合适的 Copula 函数来构造其联合分布, 分析干旱强度~面积~频率关系( $S \sim A \sim F$  关系)和干旱强度~历时~频率关系( $S \sim D \sim F$  关系)。前文已通过对各特征指标的频率分析得出气象干旱强度、面积和历时分别服从  $\gamma$  分布、正态分布和核密度分布。这里选用正态 Copula、 $t$ -Copula、Clayton-Copula、Frank-Copula 和 Gumbel-Copula 等 5 种函数构造  $S \sim A \sim F$  和  $S \sim D \sim F$  的联合分布, 并采用平方欧式距离法 (Squared Euclidean Distance, SED) 对拟合优度进行检验<sup>[15]</sup>, 按照 SED 最小最优的原则来选取 Copula 函数, 各类 Copula 函数参数估计结果及拟合优度评价指标计算结果见表 5。可以看出,  $t$ -Copula 函数对于  $S \sim D \sim F$  拟合效果最好、Gumbel-Copula 函数对于  $S \sim A \sim F$  拟合效果最好。其概率分布函数的数学表达式如下:

表 5 Copula 函数参数及拟合优度评价指标计算结果  
Table 5 Copulas connect function parameters and the goodness of fit index calculation results

Copula 函数	参数估计及检验值	干旱强度~干旱历时 (S~D)	干旱强度~干旱面积 (S~A)
正态 Copula	$\rho_1$	0.735	0.608
	SED	0.528	0.682
$t$ -Copula	$\rho_2$	0.754	0.610
	SED	0.492	0.684
Frank	$\alpha_1$	6.241	4.620
	SED	0.527	0.704
Clayton	$\alpha_2$	1.522	1.846
	SED	0.769	0.927
Gumbel	$\alpha_3$	2.039	1.433
	SED	0.586	0.551
最优函数	min(SED)	$t$ -Copula	Gumbel-Copula

$$F_{S,A} = C(x, y) = \exp\{- [(-\ln x)^\theta + (-\ln y)^\theta]^{1/\theta}\} \quad (4)$$

$$F_{S,D} = C(x, z) = \int_{-\infty}^{t_k^{-1}(x)} \int_{-\infty}^{t_k^{-1}(z)} \frac{1}{2\pi(1-\rho^2)^{1/2}} \left\{ 1 + \frac{s^2 - 2\rho st + t^2}{k(1-\rho^2)} \right\}^{-(k+2)/2} ds dt \quad (5)$$

式中  $x$  为干旱强度  $S$  的  $\gamma$  分布函数;  $y$  为干旱面积  $A$  的核密度分布函数;  $z$  为干旱历时  $D$  的正态分布函数;  $C(x, y)$  为干旱强度与面积的联合分布函数;  $\theta$  为参数, 这里  $\theta=2.86$ , 其与 Kendall 秩相关系数  $\tau$  有关,  $\theta=1/(1-\tau)$ ;  $C(x, z)$  为干旱强度与历时的联合分布函数;  $k$  为自由度, 这里  $k=14.9$ ;  $\rho$  为干旱强度与面积的线性相关系数, 这里  $\rho=0.74$ ,  $t_k^{-1}$  表示自由度为  $k$  的一元  $t$  分布的分布函数的逆函数;  $s, t$  为  $t$ -Copula 函数的二重积分变量。

利用 Matlab 软件作其概率分布及概率密度图, 如图 5(a)~图 5(d) 所示。从概率密度图 5(c) 和图 5(d) 可以看出,  $S \sim D \sim F$  与  $S \sim A \sim F$  联合概率密度呈现两头翘的情势, 对于  $S \sim D \sim F$  来说, 出现干旱历时长干旱强度小和干旱历时长干旱强度大的干旱事件频率较高, 而出现干旱历时长干旱强度小和干旱历时短干旱强度大的干旱时间频率较低。同时, 根据 Copula 函数分布以及图 5(a) 与图 5(b), 可通过计算或绘图获取一个特征指标值固定, 而一个特征指标值变化的干旱事件发生的条件概率, 如设定  $A=0.6$ , 则有  $P(S \geq 0.1 | A=0.6) = 0.53$ 、 $P(S \geq 0.5 | A=0.6) = 0.34$ 、 $P(S \geq 1 | A=0.6) = 0.29$ 、 $P(S \geq 3 | A=0.6) = 0.20$ , 可见在干旱面积出现某特定值的条件下, 干旱发生的条件概率随强度增大而减小。

给定单变量重现期为 5 年、10 年、50 年和 100 年, 由单变量边缘分布函数求其逆函数, 得到干旱强度、面积和历时等特征值, 并求出其对应的联合重现期和同现重现期, 计算公式如下:

$$T_0 = \frac{N}{nP(X_D \geq D \cap X_S \geq S)} = \frac{N}{n(1-u-v+c(u,v))} \quad (6)$$

$$T_a = \frac{N}{nP(X_D \geq D \cup X_S \geq S)} = \frac{N}{n(1-c(u,v))} \quad (7)$$

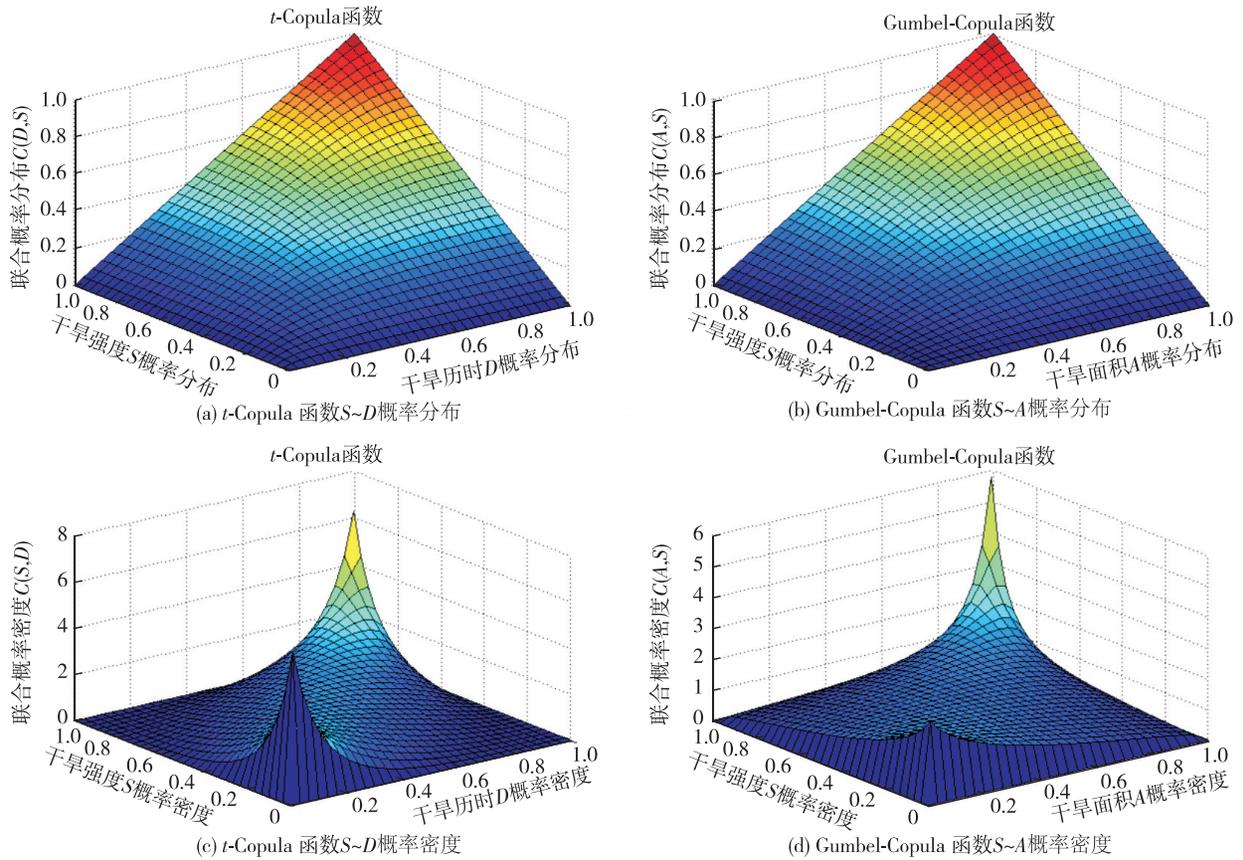


图 5 基于 Copula 函数的 S~A~F、S~D~F 关系分析

Fig. 5 Relationship analysis of S~A~F and S~D~F based on Copulas connect function

式中  $T_0$  为干旱历时和干旱强度的同现重现期； $T_a$  为干旱历时和干旱强度的联合重现期； $N$  为干旱序列长度，年； $n$  为干旱发生次数； $u$ 、 $v$  分别为给定干旱历时  $D$ 、干旱强度  $S$  的干旱发生的频率； $c(u, v)$  为根据干旱历时和强度边缘分布确定的 Copula 函数分布。

干旱特征指标边缘分布的重现期及对应的组合重现期的计算结果见表 6。可以看出，单变量的重现期介于联合重现期  $T_a$  和同现重现期  $T_0$  之间，即联合分布的两种组合重现期可以看作是边缘分布重现期的两个极端；在各单变量增加相同幅度下，相应的同现重现期  $T_0$  比联合重现期  $T_a$  增幅要大。

表 6 气象干旱特征指标边缘分布的重现期及对应的组合重现期

Table 6 Meteorological drought characteristic indexes of the return period of marginal distribution

重现期/a	强度 S	面积 A/%	历时 D/月	S&A		S&D	
				联合重现期 $T_a$	同现重现期 $T_0$	联合重现期 $T_a$	同现重现期 $T_0$
5	2.38	81	6.48	2.7	34.05	3.02	14.63
10	3.09	86	8.20	5.2	130.84	5.57	48.94
50	4.76	94	12.21	25.2	3 164.31	25.62	1 027.68
100	5.49	99	13.94	50.2	12 603.84	50.63	4 011.44

### 3 结 论

本文通过对渭河流域的区域气象干旱评估分析，对区域干旱评估的分析模式进行了探讨和创新。研究选取了 RDI 作为干旱评估指标，识别出了渭河流域 1951—2012 年间的 155 次区域干旱事件，通过对区域干旱事件的干旱强度、干旱面积、干旱历时以及干旱频率的分析，得出以下结论：

(1) 在研究期内,干旱历时  $D$  和面积  $A$  相关关系不明显;而强度  $S$  与历时  $D$  的线性相关性较好,线性相关系数为 0.74;强度  $S$  与面积  $A$  的秩相关性相对较好,相关系数为 0.65。

(2) 通过对干旱特征指标的频率分析得出了气象干旱的强度  $S$ 、面积  $A$  和历时  $D$  分别服从  $\gamma$  分布、正态分布和核密度分布。

(3) 对干旱特征的多变量特征采用了 Copula 函数来分析其联合概率,甄别出了最优 Copula 函数,发现  $t$ -Copula 函数对于  $S \sim D \sim F$  拟合效果最好、Gumbel-Copula 函数对于  $S \sim A \sim F$  拟合效果最好。其概率密度图均呈现两头翘的情势,说明干旱强度大的干旱事件往往伴随有面积广、历时长的特点。

(4) 通过对干旱特征值对应的联合重现期和同现重现期计算,发现单变量的重现期介于联合重现期  $T_a$  和同现重现期  $T_0$  之间,即联合分布的两种组合重现期可以看作是边缘分布重现期的两个极端;同时在各单变量增加相同幅度下,相应的同现重现期  $T_0$  比联合重现期  $T_a$  增幅要大。

但是,本文在干旱评估结果分析方面还不够深入,未来一方面可从干旱的多变量概率分析、单次或多次气象干旱时空演变分析、干旱驱动因素及其协同胁迫作用上进行更多的研究分析。另一方面,可结合适当数学模型和干旱评估指标对其他类型的干旱,如水文干旱、农业干旱进行分析,以期在更多的领域和方向做更多的研究。

#### 参考文献:

- [1] IPCC. Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2012.
- [2] DRACUP J A, LEE K S, PAULSON E G. On the statistical characteristics of drought events[J]. Water Resources Research, 1980, 16(2): 289-296.
- [3] TALLAKSEN L M, HISDAL H, HENNY A J, et al. Space-time modelling of catchment scale drought characteristics[J]. Journal of Hydrology, 2009, 375:363-372.
- [4] 周振民. 区域干旱特征理论及其应用[J]. 水科学进展, 2004, 15(4): 479-484. (ZHOU Zhenmin. Theory and application of regional drought characteristics [J]. Advances in Water Science, 2004, 15(4): 479-484. (in Chinese))
- [5] 程亮, 金菊良, 郦建强, 等. 干旱频率分析研究进展[J]. 水科学进展, 2013, 24(2): 296-302. (CHENG Liang, JIN Juliang, LI Jianqiang, et al. Advance in the study of drought frequency analysis [J]. Advances in Water Science, 2013, 24(2): 296-302. (in Chinese))
- [6] 裴源生, 蒋桂芹, 翟家齐. 干旱演变驱动机制理论框架及关键问题研究[J]. 水科学进展, 2013, 24(3): 464-471. (PEI Yuansheng, JIANG Guiqin, ZHAI Jiaqi. Theoretical framework of drought evolution driving mechanism and the key problems[J]. Advances in Water Science, 2013, 24(3): 464-471. (in Chinese))
- [7] TSAKIRIS G, VANGELIS H. Establishing a drought index incorporating evapotranspiration[J]. Europe Water, 2005, 9/10:3-11.
- [8] 左德鹏, 徐宗学, 李景玉, 等. 气候变化情景下渭河流域潜在蒸散量时空变化特征[J]. 水科学进展, 2011, 22(4): 454-461. (ZUO Depeng, XU Zongxue, LI Jingyu, et al. Spatiotemporal characteristics of potential evapotranspiration in the Weihe River basin under future climate change [J]. Advances in Water Science, 2011, 22(4): 454-461. (in Chinese))
- [9] YEVJEVICH V. Methods for determining statistical properties of droughts[M]. Colorado: Water Resources Publications, 1983:22-43.
- [10] ELEANOR J, SIMON J. Regional drought over the UK and changes in the future [J]. Journal of Hydrology, 2010, 394:471-485.
- [11] NELSON R B. An introduction to Copulas[M]. New York: Springer, 1999.
- [12] 谢华, 黄介生. 两变量水文频率分布模型研究述评[J]. 水科学进展, 2008, 19(3): 443-452. (XIE Hua, HUANG Jiasheng. A review of bivariate hydrological frequency distribution[J]. Advances in Water Science, 2008, 19(3):443-452. (in Chinese))
- [13] 余敦先, 夏军, 杜鸿, 等. 黄河流域极端干旱的时空演变特征及其多变量统计模型研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2012, 20(9): 15-29. (SHE Dunxian, XIA Jun, DU Hong, et al. Spatiotemporal analysis and multi-variable statistical models of extreme drought events in Yellow River basin[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2012, 20(9):15-29. (in Chinese))
- [14] FRANK J, MASSEY J R. The Kolmogorov-Smirnov test for goodness of fit[J]. Journal of the American Statistical Association, 1951, 46(3): 68-78.
- [15] HANIF D, CIHAN H. A squared-euclidean distance location-allocation problem[J]. Naval Research Logistics, 1992, 39(6):

447-469.

- [16] 吴迪, 裴源生, 赵勇, 等. 基于区域气候模式的流域农业干旱成因分析[J]. 水科学进展, 2012, 23(5): 599-608. (WU Di, PEI Yuansheng, ZHAO Yong, et al. Driving forces analysis and estimation of agriculture drought in river basins using regional climate model [J]. Advances in Water Science, 2012, 23(5): 599-608. (in Chinese))

## Research of the regional meteorological drought assessment analysis model\*

LIU Wenkun<sup>1</sup>, PEI Yuansheng<sup>1</sup>, ZHAO Yong<sup>2</sup>, XIAO Weihua<sup>1</sup>

(1. Water Resources Department, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China;

2. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of River Basin Water Cycle, Beijing 100038, China)

**Abstract:** In order to cope with the increasingly serious global drought issue, this treatise investigates the relatively complete evaluation and analysis model on the regional meteorological drought. It proposes a three-step evaluation and analysis method, which includes the regional meteorological drought identification, the drought characteristic value calculation and the multivariable analysis on drought characteristics. Taking Weihe River basin as a case study example, the treatise first carries out a rectangular drought evaluation-unit division on the research area, selecting reconnaissance drought index as an evaluation indicator to identify drought conditions in each unit at different time periods in the research area. The result is almost in accordance with the historical record on the years of drought. Then the treatise uses statistical methods such as the distribution fitting, the correlation coefficient, the copulas function to carry out characteristic analysis on the regional drought characteristic values (the drought duration, the drought area, the drought severity and the drought frequency), drawing a series of analytic and comparative results on the univariate, the bivariate and the multivariate characteristics. Based on the distribution function calculation and construction on different distribution functions, the treatise comes to the occurrence conditional probability and recurrence interval of droughts in Weihe Basin, forming a relatively complete evaluation and analysis model on the regional meteorological drought.

**Key words:** meteorological drought; reconnaissance drought index; regional drought; drought characteristics values; Copulas connect function; Weihe River basin

---

\* The study is financially supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51379216) and the National Basic Research Program of China (No. 2010CB951102).