

基于 *SRI* 与 Copula 函数的黑河流域 水文干旱等级划分及特征分析

张向明, 栗晓玲*, 张更喜

(西北农林科技大学 水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100)

摘要:【目的】基于 *SRI* 对黑河流域水文干旱进行等级划分及特征分析。【方法】利用 2 种不同的径流丰枯等级分类方法, 对黑河流域莺落峡水文站的径流资料进行概率统计分析, 提出基于 *SRI* 的水文干旱等级划分标准(标准 1), 分别采用标准 1 和基于标准化降水指数(*SPI*)的干旱等级划分标准(标准 2), 识别水文干旱历时、烈度、烈度峰值 3 个干旱特征变量, 利用 Copula 函数进行水文干旱多变量联合分布研究, 选取 *RMSE*、*AIC*、*BIC* 准则作为联合分布拟合优度检验的判别依据优选 Copula 函数类型, 计算了不同干旱事件的重现期。【结果】基于标准 1 的水文干旱等级划分结果比标准 2 更符合实际干旱情况; 单变量重现期介于联合重现期与同现重现期之间, 可以进行干旱事件重现期估计; 黑河流域发生持续 2.68 个月的重旱事件的重现期为 3 a。【结论】基于 *SRI* 的干旱等级划分在多变量水文干旱研究中使联合分布函数拟合更优, 分析得到的干旱特征更接近实际情况。

关键词: *SRI*; 干旱; 等级划分; Copula 函数; 重现期; 黑河流域

中图分类号: P333

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.20180327

张向明, 栗晓玲, 张更喜. 基于 *SRI* 与 Copula 函数的黑河流域水文干旱等级划分及特征分析[J]. 灌溉排水学报, 2019, 38(5): 107-113.

0 引言

干旱问题一直是影响人类进步和社会发展的关键问题, 它的频繁发生与长期持续给国民经济造成巨大损失。由于干旱的复杂性, 对其并没有一个完全统一的定义, 比较权威的定义有: 世界气象组织将干旱定义为一种持续的、异常的降水短缺^[1]; 联合国国际减灾战略机构将干旱定义为在一个季度或者更长时期内, 由于降水严重缺少而产生的自然现象^[2]。对于干旱的分类也有较多的方法, 目前比较认可的是美国气象学会的分类, 即将干旱分为气象干旱、水文干旱、农业干旱与社会经济干旱 4 类^[3]。作为最彻底的干旱, 水文干旱是指地表水与地下水收支不平衡而造成的水分短缺现象。干旱指标是描述干旱程度的一个基本特征量, 水文干旱指标的构建一般是在气象干旱指标的理论基础上建立起来的, 通常是基于河流流量, 以时段径流量小于某临界值来定义水文干旱, 研究采用的流量资料依赖基流观测或某时段的平均流量(如月流量或年流量)^[4]。常见的水文干旱指标有: 径流距平指数、旱限水位、缺水量、Palmer 水文干旱强度指数(*PHDI*)、标准化径流指数(Standardized Runoff Index, *SRI*)或标准化流量指数(*SDI*)、区域综合水文干旱指数(*HDI*)、联合亏缺指数等^[5-8]。在这些指标中, 标准化径流指数(*SRI*)是 Nalbantis 等^[9]采用与 *SPI* 相同的方法计算得到的水文多时间尺度的干旱指数。由于其构造简单、资料容易获取、计算方便, 因此在水文干旱分析中得到了广泛的应用: Luciano 等^[10]运用 *SRI* 分析西班牙地区的水文干旱特征; 何福力等^[6]应用 *SPI* 及 *SRI* 采用气候倾向率反距离插值和时滞互相关分析对黄河流域的气象和水文干旱时空分布特征及相互关系进行分析。由于 *SRI* 的构建方法与 *SPI* 的构建方法相同, 以往对于水文干旱的研究中, 干旱等级阈值的选取亦是按照气象干旱等级的临界值来进行选择, 这对以径流资料得到的 *SRI* 而言必然存在一定的偏差^[11]。因此, 研究不同阈值的选

收稿日期: 2018-06-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(51879222)

作者简介: 张向明(1993-), 男, 甘肃白银人。硕士研究生, 主要从事水文模拟研究。E-mail: 1186748961@qq.com

通信作者: 栗晓玲(1968-), 女, 四川开江人。教授, 博士生导师, 主要从事水文模拟与水资源可持续利用研究。E-mail: suxiaoling17@126.com

取对于区域干旱识别的影响是水文干旱研究的必要前提。通过对黑河流域莺落峡水文站提供的径流资料进行计算分析,得到基于 *SRI* 的水文干旱等级划分阈值,结合参照 *SPI* 的阈值实现干旱识别并进行多变量联合分布的对比分析,以确定该阈值的实用性。

作为我国第二大内陆河的黑河流域,干旱是限制该区域经济社会发展主要障碍,也是造成其生态环境极度脆弱的主要原因,因此对黑河流域水文干旱特征的概率分析,能够为流域水资源规划和管理提供依据。*Copula* 函数是连接一维边际分布以形成在[0,1]上的多元分布的函数,自 1959 年 Sklar 形成 *Copula* 理论后被广泛应用于保险和金融业中来度量变量间的相依性结构和联合概率分布计算^[12]。水文干旱的特征分析,通常是将干旱的发生看作一种随机事件,利用随机理论方法分析其干旱特征变量的特征,而 *Copula* 函数由于构造简单、灵活方便且不受边缘分布类型的影响,被广泛地应用于干旱多变量联合分布的研究中。

1 研究方法

1.1 丰枯等级分类方法

根据径流量距平百分比,选择 2 种分类方法^[13-14]对径流量 *Q* 进行丰枯等级划分,具体见表 1。

表 1 2 种径流量丰枯等级分类方法

方法	分类依据	丰枯等级				
		丰水	偏丰	正常	偏枯	枯水
方法一	径流量距平百分比Δ	Δ>20%	10%<Δ≤20%	-10%≤Δ≤10%	-20%≤Δ<-10%	Δ<-20%
方法二	径流量距平百分比Δ	Δ>30%	10%≤Δ≤30%	-10%≤Δ<10%	-30%≤Δ<-10%	Δ<-30%

1.2 标准化径流指数

标准化径流指数(*SRI*)是假设径流量满足伽马分布后进行正态标准化得到的,具体计算方法如下。

假设某一时段的径流量 *x* 满足 *Γ* 分布的概率密度函数 *f*(*x*) 计算式为:

$$f(x)=\frac{1}{\gamma^{\beta}\Gamma(\beta)}x^{\beta-1}e^{\frac{-x}{\gamma}}, \tag{1}$$

式中:γ、β 分别是形状参数和尺度参数,x>0、γ>0、β>0,γ、β 用极大似然法计算,而一定时间尺度的径流量 *x* 的累积概率 *F*(*x*) 计算式为:

$$F(x)=\int_0^xf(x)dx。 \tag{2}$$

对 *Γ* 分布概率进行正态标准化得到:

$$SRI=S\frac{t-(c_2t+c_1)t+c_0}{((d_3t+d_2)t+d_1)t+1.0}, \tag{3}$$

$$t=\sqrt{-2\ln(F)}, \tag{4}$$

式中:当 *F*>0.5 时,*S*=1;当 *F*≤0.5 时,*S*=-1。其中 *c*₀=2.515 517,*c*₁=0.802 853,*c*₂=0.010 328,*d*₁=1.432 788,*d*₂=0.189 269,*d*₃=0.001 308 均为经验数值。

1.3 游程理论

游程理论又称轮次理论,是一种时间序列分析方法。应用游程理论进行干旱识别的具体过程为:选取阈值 *R*,当干旱指数序列在某一时间段内连续小于 *R* 时出现负游程,即认为发生干旱事件,其中负游程的长度为干旱历时,干旱历时时段内干旱指数的累加绝对值为干旱烈度,负游程极大值的绝对值定义为烈度峰值。兹选取当发生轻旱时干旱指数对应的临界值作为阈值 *R*。

1.4 Copula 函数

Copula 函数适合于构建任意边缘分布的联合分布,具有灵活方便和应用范围广等特点,近年来得到了广泛应用。按照 Sklar 理论,存在 *Copula* 函数 *C*,对于 *x*∈*R*,*R*∈(-∞,∞),多元分布 *F*(*x*₁,*x*₂,...,*x*_{*d*}) 和 *Copula* 分布 *C*(*u*₁,*u*₂,...,*u*_{*d*}) 之间的关系^[12,15-16]为

$$F(x_1,x_2,\cdots,x_d)=P(X_1\leq x_1,X_2\leq x_2,\cdots,X_d\leq x_d)=C[F_1(x_1),F_2(x_2),\cdots,F_d(x_d)]=C(u_1,u_2,\cdots,u_d), \tag{5}$$

式中:*F*(*x*_{*i*})=*u*_{*i*},*i*=1,2,...,*d*; *F*_{*i*} 为连续函数, *U*_{*i*}~*U*(0,1)。

由于单变量分析不能完整而准确地刻画水文干旱的属性及属性间的相互关系,水文干旱的多变量分析

成为一种必然^[17]。用游程理论分析识别水文干旱过程,确定干旱历时、干旱面积和干旱烈度等干旱特征变量,用 Copula 函数方法估计干旱特征变量的联合概率分布是当前干旱研究分析的有效方法^[118-24]。提取干旱历时、干旱烈度、烈度峰值作为干旱特征变量,选取 Gumbel、Clayton、Frank、Joe、Normal、t-Copula 等 Copula 函数分别进行两变量、三变量联合分布研究。

1.5 拟合优度检验

通过均方根误差准则(RMSE)、赤池信息量准则(AIC)与贝叶斯信息准则(BIC)检验选取 Copula 函数,判断的依据是数值最小,计算式为:

$$\begin{cases} MSE = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (Pe_i - P_i)^2 \\ RMSE = \sqrt{MSE} \\ AIC = n \ln(MSE) + 2l \\ BIC = n \ln(MSE) + \ln(n)l \end{cases}, \quad (6)$$

式中: l 与 Copula 函数的参数个数一致; Pe_i 与 P_i 分别为联合分布的经验频率与理论频率; n 为序列的长度。

1.6 重现期计算

单变量重现期的分析往往会导致给定事件评估的不准确性,从而使事件存在一定的风险^[25]。因此本文在给定单变量重现期的基础上进行多变量联合分布重现期分析。由式(5)的 Copula 理论,可得到两变量、三变量联合分布的重现期公式^[26],由于计算原理相同,现只列出两变量联合分布的重现期计算式为:

$$\begin{cases} T = \frac{E(L)}{P(X_1 \geq x_1 \cap X_2 \geq x_2)} = \frac{E(L)}{1 - F_1(x_1) - F_2(x_2) + C(F_1(x_1), F_2(x_2))} \\ T^0 = \frac{E(L)}{P(X_1 \geq x_1 \cup X_2 \geq x_2)} = \frac{E(L)}{1 - C(F_1(x_1), F_2(x_2))} \end{cases}, \quad (7)$$

式中: $E(L)$ 表示干旱时间间隔,等于干旱历时与非干旱历时各自的期望之和; T 和 T^0 分别表示同现重现期(同时大于某一特定值的重现期)与联合重现期(至少一个变量大于某一特定值的重现期);其他符号意义同式(5)。

2 结果与分析

2.1 研究区概况和数据来源

黑河为我国第二大内陆河,位于甘肃省河西走廊中部。由莺落峡和正义峡2个水文断面将流域分为上、中、下游。从发源地祁连山北坡到居延海全长821 km,流域面积约14.29万km²,分属青海省、甘肃省和内蒙古自治区。黑河流域所处的地带属于温带气候区和暖温带偏干旱荒漠气候交汇地带,年降水量中游地区介于200~100 mm之内,下游地区小于60 mm。根据1951年以来气象资料统计,中游地区旱灾发生年5—7月降水总量显著低于非干旱年,而这期间正好是该区主要作物即春小麦的生育需水高峰期,其需水量占小麦全生育期的70%~80%,往往造成农牧业生产大幅度下降^[27]。以黑河流域莺落峡水文站1945—2013年的逐月径流数据,计算SRI并进行干旱等级划分,在此基础上分析水文干旱特征。径流数据来源于国家自然科学基金委员会“黑河数据计划管理中心”。

2.2 基于SRI的干旱等级划分

利用前述2种分类方法对莺落峡水文站的径流资料进行整理计算,从月尺度、季尺度和年尺度分别得到各等级所占百分比以及平均百分比如表2所示。以枯水的平均百分比及最低百分比确定特旱及重旱的概率,即枯水最低百分比为特旱概率,枯水平均百分比中其余的部分为重旱概率;以偏枯的平均百分比及最低百分比确定中旱及轻旱的概率,即偏枯最低百分比为中旱概率,偏枯平均百分比中其余的部分为轻旱概率;除此之外则为无旱概率。由表2可以看出,方法二计算的年尺度枯水百分比低至1.45%,认为约2%的径流量低于多年平均径流量的程度特别严重,以此作为特旱概率;平均枯水百分比约为11%,除特旱的2%外,剩余9%作为重旱概率;方法一计算的年尺度偏枯百分比低至14.49%,以14%作为中旱概率;平均偏枯百分比约为21%,除中旱的14%外,剩余7%作为轻旱概率;则无旱概率即为68%。得到黑河流域水文干旱等级概率及累积概率见表3。

表2 不同丰枯等级划分方法下的丰枯百分比

%

丰枯等级	丰枯百分比						平均
	方法一			方法二			
	月尺度	季尺度	年尺度	月尺度	季尺度	年尺度	
丰水	18.00	14.18	11.59	10.87	8.73	7.25	11.77
偏丰	10.27	16.00	14.49	17.39	21.45	18.84	16.41
正常	36.47	34.55	49.28	36.47	34.55	49.27	40.10
偏枯	14.61	18.91	14.49	26.33	28.00	23.19	20.92
枯水	20.65	16.36	10.15	8.94	7.27	1.45	10.80

表3 黑河流域水文干旱等级的概率及累积概率

%

干旱等级	特旱	重旱	中旱	轻旱	无旱
概率	2	9	14	7	68
累积概率	2	11	25	32	100

计算同一时间序列的 SRI 值,绘制累计频率曲线,见图1。由图1可获得干旱等级累积概率2%、11%、25%与32%对应的 SRI 值分别为-2、-1.189、-0.635 9、-0.414 7,即基于 SRI 的干旱等级划分的4个阈值,因此得到基于 SRI 的水文干旱等级划分标准(标准1)。与参考 SPI 的干旱等级划分标准(标准2)相比(表4):无旱、中旱与特旱基本一致;本标准下轻旱范围较小,重旱范围较大。

2.3 基于 Copula 函数的多变量联合分布

应用黑河流域莺落峡水文站 1945—2013 年的月径流资料计算 SRI ,结合表4选取阈值 R ,得到2种标准下的干旱识别情形,利用游程理论识别出干旱历时(D)、干旱烈度(S)与烈度峰值(M)作为干旱特征变量,得到各特征变量的最佳边缘分布,并采用6种 Copula 函数进行二变量联合分布($D\&S$ 、 $D\&M$ 、 $S\&M$)与三变量联合分布($D\&S\&M$)的拟合,通过拟合优度检验得到各自拟合效果最好的联合分布函数,2种标准下拟合效果最好

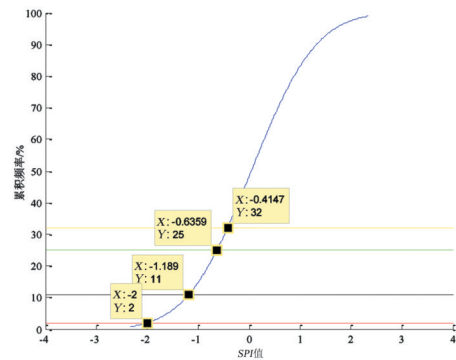
图1 SRI 累积频率曲线

表4 黑河流域水文干旱等级划分表

干旱等级	干旱类型	标准1(本标准)	标准2(参考 SPI 划分标准)
1	无旱	$SRI > -0.41$	$SRI > -0.50$
2	轻旱	$-0.64 < SRI \leq -0.41$	$-1.00 < SRI \leq -0.50$
3	中旱	$-1.19 < SRI \leq -0.64$	$-1.50 < SRI \leq -1.00$
4	重旱	$-2.00 < SRI \leq -1.19$	$-2.00 < SRI \leq -1.50$
5	特旱	$SRI \leq -2.00$	$SRI \leq -2.00$

Copula 函数的经验频率与理论频率的对比见图2,表5为2种标准最优 Copula 函数的拟合优度检验准则数值对比。在应用 Copula 函数进行干旱多变量联合分布的研究中,联合分布函数拟合的优劣直接决定结果分析的准确性,由图2与表5可以看出,标准1比标准2拟合效果更优,可见基于 SRI 的水文干旱等级划分比参

照 SPI 的等级划分在水文干旱多变量联合分布的研究中更加合理。

2.4 重现期分析

对标准1识别的水文干旱进一步进行重现期分析,以研究黑河流域水文干旱的特征。给定单变量重现期(T)水平分别为2、5、10、20、50和100 a,通过计算单变量干旱特征值进而得到两变量、三变量联合分布的同现重现期与联合重现期,结果见表6,其中 T_1 、 T_2 、 T_3 、 T_4 分别为 $D\&S$ 、 $D\&M$ 、 $S\&M$ 、 $D\&S\&M$ 的同现重现期, T_1^0 、 T_2^0 、 T_3^0 、 T_4^0 为对应的联合重现期。

由表6可知,①单变量重现期均介于联合重现期与同现重现期之间,表明联合重现期与同现重现期可以作为单变量重现期的上下阈值。以 $S\&M$ 为例,单变量重现期100 a介于 $T_3^0=67.986 7$ a与 $T_3=184.752 0$ a之间。②同一单变量重现期(T)水平下,两变量联合分布中干旱历时(D)与干旱烈度(S)的同现重现期最大,而对应的联合重现期最小,表明二者的相关程度最低;同时干旱烈度(S)与烈度峰值(M)的同现重现期最小,而对应的联合重现期最大,表明二者的相关程度最高;相关程度越高说明某个特征变量发生时,另一个特征变量发生的概率越大,干旱风险也就越高^[24]。以 $T=50$ a为例, $D\&S$ 的同现重现期 $T_1=676.246 3$ a最大,联合重现期 $T_1^0=26.030 0$ a最小; $S\&M$ 的同现重现期 $T_3=87.783 4$ a最小,联合重现期 $T_3^0=35.082 5$ a最大。③同一单变量重现期(T)水平下,两变量同现重现期小于三变量同现重现期;两变量联合重现期大于三变量联合重现期,这与联合重现期及同现重现期的概念相一致。以 $T=50$ a为例, $D\&S\&M$ 的同现重现期 $T_4=1 845.390 5$ a

大于 $T_1=676.246\ 3\ \text{a}$; $D\&S\&M$ 的联合重现期 $T_4^0=24.332\ 7\ \text{a}$ 小于 $T_1^0=26.030\ 0\ \text{a}$ 。

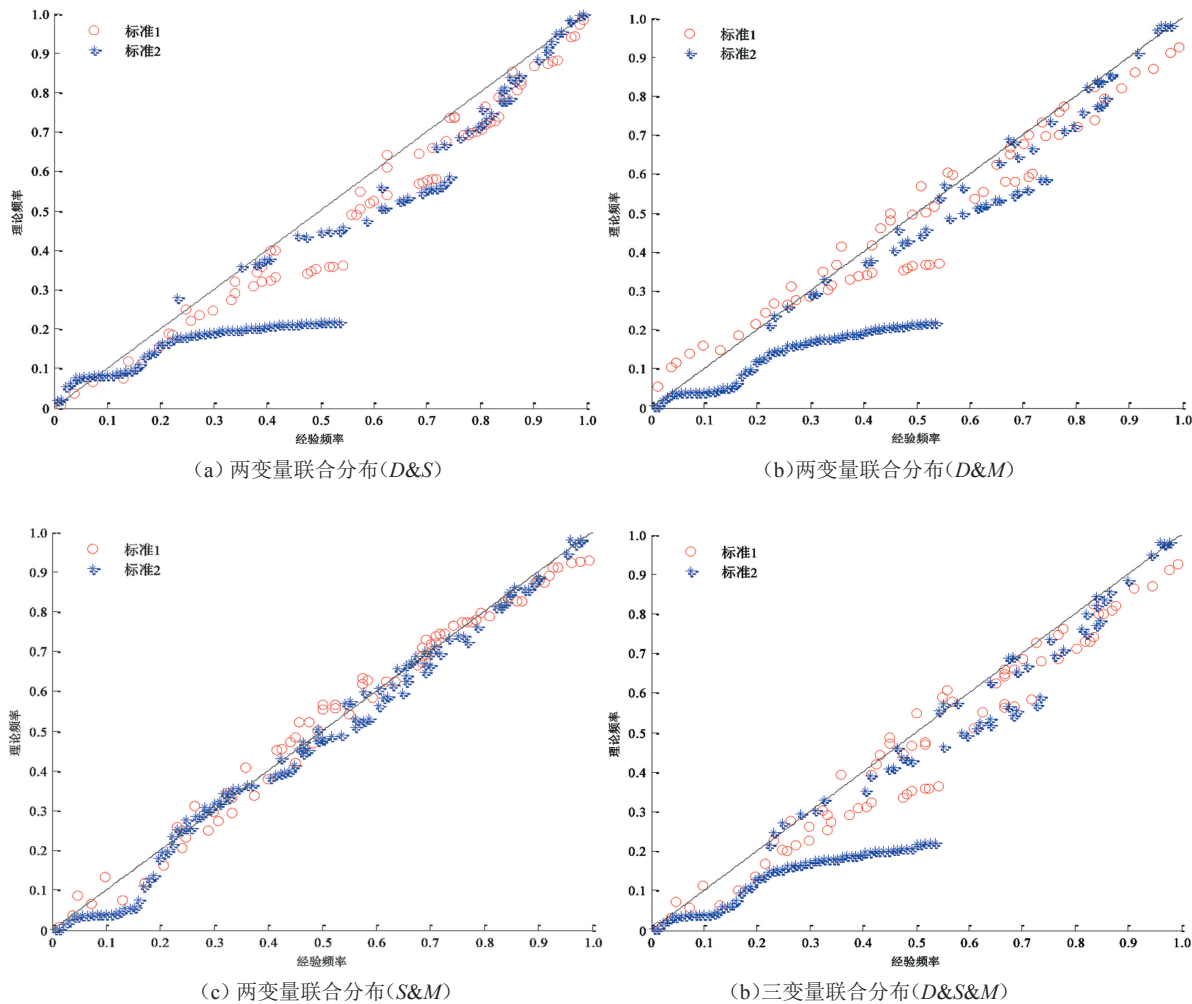


图2 2种标准下最优联合分布的经验频率与理论频率对比图

表5 2种标准下最优Copula函数拟合优度检验准则数值对比

变量	划分标准	最优函数	RMSE 准则	AIC 准则	BIC 准则
D&S	2	Normal	0.124 7	-476.874 5	-474.129 5
	1	Frank	0.077 1	-607.765 7	-604.986 5
D&M	2	Normal	0.128 2	-470.509 6	-467.764 7
	1	Normal	0.067 7	-638.795 8	-636.016 7
S&M	2	Frank	0.032 3	-787.754 9	-785.010 0
	1	Normal	0.032 9	-810.855 6	-808.076 5
D&S&M	2	t	0.127 3	-470.135 9	-464.646 1
	1	Normal	0.078 6	-603.273 9	-600.494 8

表6 多变量联合分布的同现重现期与联合重现期

重现期/a	2	5	10	20	50	100
历时/月	2.676 4	4.647 3	6.140 3	7.631 5	9.606 4	11.079 0
烈度(S)	1.438 6	3.058 1	4.764 7	6.974 8	10.845 0	14.570 1
峰值(M)	0.911 3	1.582 4	2.090 7	2.598 5	3.270 9	3.772 3
(D&S) T_1	3.106 3	11.045 6	34.731 4	119.600 8	676.246 3	2 562.222 2
T_1^0	1.475 1	3.231 4	5.846 8	10.922 7	26.030 0	50.681 3
(D&M) T_2	2.897 8	9.861 5	23.312 6	54.615 0	167.193 5	383.209 3
T_2^0	1.527 3	3.349 0	6.372 2	12.254 4	29.485 6	57.104 1
(S&M) T_3	2.504 7	6.986 3	15.049 7	32.217 9	87.783 4	184.752 0
T_3^0	1.665 0	3.893 1	7.497 4	14.519 1	35.082 5	67.986 7
(D&S&M) T_4	3.339 7	14.082 6	51.269 1	241.749 5	1 845.390 5	9 560.530 7
T_4^0	1.364 4	2.976 8	5.521 5	10.384 6	24.332 7	47.108 1

根据表6重现期计算结果,结合本文得到的水文干旱等级划分标准(标准1)可知:烈度峰值最小为0.911 3,大于重旱阈值0.78且小于特旱阈值1.59,属于重旱范围,可见黑河流域发生干旱的程度较为严重;当 $T=2$ a时, $D&S$ 、 $D&M$ 、 $S&M$ 、 $D&S&M$ 的同现重现期分别为3.106 3 a、2.897 8 a、2.504 7 a、3.339 7 a,基本一致,可见发生持续2.68个月的重旱事件的重现期约为3 a;当 $T=5$ a时,干旱历时(D /月)约为4.65,烈度峰值(M)约为1.59,而此时 $D&M$ 的同现重现期为9.861 5 a,可见发生持续4.65个月的特旱事件的重现期约为10 a;同样地,由 $T=10$ a可得,发生持续半年的特旱事件的重现期约为23 a。

3 讨论与结论

1)基于 SRI 的水文干旱等级划分标准与参考 SPI 的干旱等级划分标准对轻旱和重旱阈值相差较大,应用Copula函数的水文干旱多变量联合分布中,拟合优度检验结果表明,基于 SRI 的水文干旱等级划分标准下的理论频率与经验频率拟合更好,更符合实际干旱特征。

2)经过拟合优度检验,对于两变量联合分布, $D&S$ 、 $D&M$ 与 $S&M$ 的最优Copula函数分别为Frank、Normal和Normal;对于三变量联合分布,最优Copula函数为Normal。利用Copula函数得到的多变量联合分布考虑到了干旱历时、干旱烈度与烈度峰值的不同组合情况,对于干旱特征分析更加准确。

3)通过对联合重现期及同现重现期的计算,得出黑河流域发生干旱的程度较为严重。发生持续2.68个月的重旱事件的重现期约为3 a,发生持续4.65个月的特旱事件的重现期约为10 a,发生持续半年的特旱事件的重现期约为23 a。

将得到的基于 SRI 的水文干旱等级划分标准与基于 SPI 的标准进行对比,以Copula函数拟合最佳情况下对应的标准为较优,只针对在应用Copula函数进行多变量联合分布以分析水文干旱特征的研究中。因此,为了得到能够准确描述区域干旱情形的基于 SRI 的水文干旱等级划分标准,应在本研究基础上结合实际干旱情况进行阈值的调整。同时本研究提出的基于 SRI 的水文干旱等级划分标准,仅在黑河流域莺落峡水文站进行了分析,该标准是否存在区域性差异,需要在不同流域更多水文站进行验证。

参考文献:

- [1] WMO. Report on Drought and Countries Affected by Drought During 1974-1985[R]. Geneva:WMO,1986.
- [2] UNISRD. Living with Risk: An Integrated Approach to Reducing Societal Vulnerability to Drought[R]. New York: ISDR Ad Hoc Discussion Group Drought: UNISRD, 2005.
- [3] American Meteorological Society. Meteorological drought: Policy statement[J]. Bulletin of American Meteorological Society,1997(78):847-849.
- [4] 张俊,陈桂亚,杨文发. 国内外干旱研究进展综述[J]. 人民长江, 2011, 42(10):65-69.
- [5] JOHN Keyantash, JOHN A Dracup, 周跃武, 等. 干旱的量化:干旱指数的评价[J]. 干旱气象, 2005(2):85-94.
- [6] 何福力,胡彩虹,王纪军,等. 基于标准化降水、径流指数的黄河流域近50年气象水文干旱演变分析[J]. 地理与地理信息科学, 2015, 31(3):69-75.
- [7] 周玉良,周平,金菊良,等. 基于供水水源的干旱指数及在昆明干旱频率分析中应用[J]. 水利学报, 2014, 45(9):1 038-1 047.
- [8] KAO S C, GOVINDARAJU R S. A copula-based joint deficit index for droughts[J]. Journal of Hydrology, 2010, 380(1):121-134.
- [9] NALBANTIS I, TSAKIRIS G. Assessment of hydrological drought revisited[J]. Water Resources Management, 2009, 23(5):881-897.
- [10] LUCIANO T, MICHELE L, IGNACIO L M, et al. Investigation of scaling properties in monthly streamflow and Standardized Streamflow Index (SSI) time series in the Ebro basin (Spain)[J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2012, 391(4):1 662-1 678.
- [11] HONG X, GUO S, ZHOU Y, et al. Uncertainties in assessing hydrological drought using streamflow drought index for the upper Yangtze River basin[J]. Stochastic Environment Research And Risk Assessment, 2014, (29):1 235-1 247.
- [12] 宋松柏. Copulas函数及其在水文中的应用[M]. 北京:科学出版社, 2012.
- [13] 水利部水文局. 水文情报预报规范:GB/T 22482—2008[S]. 北京:中国标准出版社, 2008.
- [14] 王劲松,郭江勇,周跃武,等. 干旱指标研究的进展与展望[J]. 干旱区地理, 2007, 30(1):60-65.
- [15] NELSEN B. An introduction to copulas[M]. New York: Springer,1998.
- [16] SAVU C, TREDE M. Hierarchies of Archimedean copulas[J]. Quantitative Finance, 2010, 10(3):295-304.
- [17] 董前进,谢平. 水文干旱研究进展[J]. 水文, 2014, 34(4):1-7.
- [18] 金菊良,杨齐祺,周玉良,等. 干旱分析技术的研究进展[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2016, 37(2):1-15.
- [19] 李天水,王顺,庄文化,等. 游程理论和Copula函数在二维干旱变量联合分布中的应用[J]. 干旱区资源与环境, 2016, 30(6):77-82.
- [20] 冯波,闫佰忠,章光新. 松花江流域水文干旱联合概率分布特征研究[J]. 节水灌溉, 2014(5):38-42.
- [21] 肖名忠,张强,陈永勤,等. 基于三变量Copula函数的东江流域水文干旱频率分析[J]. 自然灾害学报, 2013, 22(2):99-108.
- [22] 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.
- [23] 王晓峰,张园,冯晓明,等. 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.

- [24] 马建琴, 和鹏飞, 彭高辉, 等. 基于三维 Copula 函数的沙颍河流域水文干旱频率分析[J]. 灌溉排水学报, 2017, 36(9):102-107.
- [25] 冯星, 孙东永, 胡维登, 等. Copula 函数在渭河流域干旱分析中的应用研究[J]. 灌溉排水学报, 2017, 36(12):110-117.
- [26] 马明卫, 宋松柏. 椭圆型 Copulas 函数在西安站干旱特征分析中的应用[J]. 水文, 2010, 30(4):36-42.
- [27] 王学良, 吴宜芳. 黑河流域水文站网现状及设站年限分析[J]. 甘肃水利水电技术, 2010, 46(9):13-16.

Classifying Drought in Heihe Basin Using *SRI* Index and Copula Function

ZHANG Xiangming, SU Xiaoling*, ZHANG Gengxi

(College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling 712100, China)

Abstract:【Objective】The purpose of this paper is to present a method to classify drought based on the measured data in Heihe basin.【Method】Two methods based on runoff-frequency classification were used to realize probabilistic statistical analysis of the runoff data at the Yingluoxia hydrological station in the Heihe River Basin. The *SRI*-based hydrological drought classification standard (Standard 1) was proposed. The Standard 1 and drought standardization criteria (Standard 2) based on the standardized precipitation index (*SPI*) were used to identify three drought characteristic variables of hydrological drought, including duration, intensity, and peak intensity. The Copula function was used to study the multivariate joint distribution of hydrological drought, the *RMSE*, *AIC*, and *BIC* criteria was selected as the discriminant basis for the joint distribution goodness of fit test to optimize the Copula function type and then calculated the return period for different drought events.【Result】The classification of hydrological drought grade based on Standard 1 is more consistent with the real drought situation than Standard 2. The univariate return period is between the joint return period and the cooccurrence return period, it therefore is possible to estimate the return period of the drought events. A severe drought lasting for 2.68 months occurs about every three years in the basin.【Conclusion】The *SRI*-based classification of drought in the multivariable hydrological drought study improves the joint distribution function, and the calculated drought characteristics marched historical data.

Key words: *SRI*; drought; grade division; Copula function; return period

责任编辑:赵宇龙