

塔河流域枯水流量概率特征及成因与影响研究

张 强^{1,2}, 孙 鹏^{1,2}, 白云岗³, 张江辉³

(1. 中山大学水资源与环境系, 广东 广州 510275; 2. 中山大学华南地区水循环与水安全广东省
普通高校重点实验室, 广东 广州 510275; 3. 新疆水利水电科学研究院, 新疆 乌鲁木齐 830049)

摘要: 选用11种概率分布函数和单参数二维阿基米德族 Copula 函数, 系统分析了塔里木河流域(简称塔河流域) 8个水文站最小连续7日平均流量。研究结果表明: ① 韦克比函数最适合描述塔河流域枯水径流的概率特征; ② 1987年以后重现期较短的干旱发生频率降低, 而重现期较长的干旱事件发生概率增加, 主要是由于气候的季节变化及各河流流量的补给类型不同, 从而对塔河枯水流量有一定影响; 一般来讲, 春季气温对枯水的影响要大于降水变化对枯水的影响; ③ 叶尔羌河、阿克苏河等流域水文干旱联合重现期和同现期变化基本一致; 开都河流域发生干旱概率要小于叶尔羌河和阿克苏两流域, 而开都河流域同时发生干旱的概率大于叶尔羌河和阿克苏河, 3个流域重现期短的干旱遭遇概率较大。研究表明, 气候变化并没有从根本上改变新疆旱灾情况, 同时, 由于耕地面积、人口等的增长, 水资源需求量增加, 在水资源供需方面仍存在非常尖锐的矛盾。

关 键 词: 频率分析; 概率分布函数; Copula 函数; 枯水流量; 塔里木河流域

中图分类号: F512.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0690(2013)04-0465-08

干旱是塔里木河(以下简称塔河)流域农业最普遍、最主要的一种自然灾害。据统计 1978~2007 年新疆旱灾平均受灾面积和成灾面积分别为 $27.76 \times 10^4 \text{hm}^2$ 和 $13.28 \times 10^4 \text{hm}^2$; 而 2000~2007 年的旱灾平均受灾面积和成灾面积达到 $36.06 \times 10^4 \text{hm}^2$ 和 $26.60 \times 10^4 \text{hm}^2$, 旱灾影响范围和成灾面积呈逐年增加趋势^[1,2]。新疆是中国唯一的长绒棉产区, 也是中国最大的植棉基地和北方最大的甜菜基地, 更是中国重要特种果品生产基地、商品粮基地和能源基地^[3]。由于塔河流域内农业是典型的灌溉农业, 而“荒漠绿洲、灌溉农业”是该区域农业的显著特点^[4], 从这个意义上讲, 系统开展塔河流域枯水径流研究和预测, 揭示枯水径流规律, 对于合理开发利用水资源, 提高农业抗旱与节水效率, 解决枯季水资源的供需矛盾具有重要意义。国内外学者对枯水流量变化特征做了大量工作^[5-9], 但在塔河流域相关研究尚不多见, 部分研究也仅局限于天山北坡河流^[9], 基于此, 本文在 Copula 函数等概率分布模型分析基础上, 系统搜集水库资料及水

文数据, 揭示流域气候变化和人类活动对水文极值的影响, 并探讨 1987 年前后枯水频率变化特征及影响因素。该项研究对于科学理解在当前气候变化与人类活动双重影响下, 塔河流域抗旱、生态环境演变与塔河下游生态问题的研究具有一定科学与现实意义。

1 数 据

本文所用数据为塔河流域 8 个主要水文站(图 1) 1962~2008 年最小连续 7 日平均流量^[10], 将其作为水文干旱的指标, 其中沙里桂兰克和协合拉枯水流量数据起止时间是 1962~2007 年, 大山口枯水流量起止时间是 1972~2008 年。水文站数据均来自塔河流域管理局, 部分缺失数据通过与相邻水文站水文序列建立回归关系进行插补($R^2 > 0.8$)。

2 方 法

2.1 Kolmogorov-Smirnov 检验与参数估计

本文选用韦克比分布、威布尔分布、伽玛分

收稿日期: 2012-03-28; **修订日期:** 2012-06-08

基金项目: 水利部公益项目(201001066)、新疆自治区科技攻关项目(200931105)、国家自然科学基金项目(41071020; 50839005)与新世纪优秀人才支持计划资助。

作者简介: 张 强(1974-), 男, 山东沂水人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事流域气象水文学研究、旱涝灾害机理、流域地表水文过程及其对气候变化的响应机制与机理以及流域生态需水等领域的研究工作。E-mail: zhangq68@mail.sysu.edu.cn

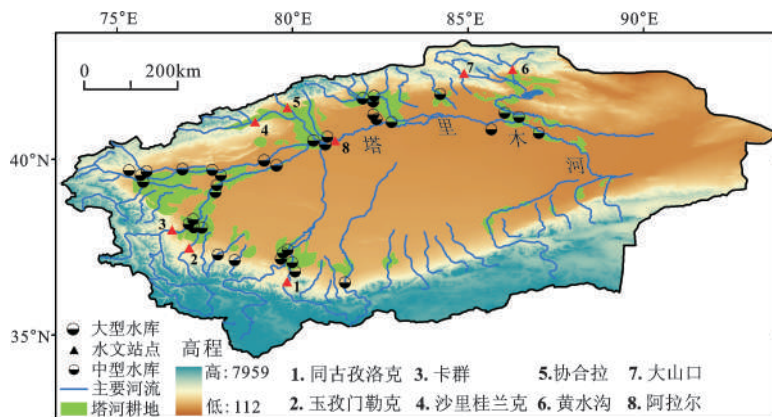


图1 塔里木河流域水文站点、主要水库以及灌区地理位置

Fig.1 Location of the Tarim River, hydrological stations, water reservoirs and irrigation areas in the Tarim River Basin

布、对数正态分布、对数逻辑分布、广义帕累托分布、广义极值分布、极值分布、耿贝尔(极大值)分布、耿贝尔(极小值)分布共11种分布拟合8个水文站的极值流量序列,并用K-S的统计值 D 检验分布拟合优度。由Ana Justel^[12]研究的检验总体的分布函数是否服从某一函数 $F_n(x)$ 的假设条件为: $H_0: F(x) = F_n(x)$, $H_a: F(x) \neq F_n(x)$ 。如果原假设成立,那么 $F(x)$ 和 $F_n(x)$ 的差距就较小。当 n 足够大时,对于所有的 x 值, $F(x)$ 和 $F_n(x)$ 之差很小这一事件发生的概率为1,即:

$$D_n = \max_{-\infty < x < \infty} |F(x) - F_n(x)|; P\left\{\lim_{n \rightarrow \infty} D_n = 0\right\} = 1 \quad (1)$$

式(1)中, $F(x)$ 与 $F_n(x)$ 分别为理论与经验分布函数。若 $D_n < D_{n,\alpha}$ (显著水平为 α ,容量为 n 的K-S检验临界值),认为理论分布与样本序列的经验分布拟合较好,无显著差异。11种分布函数的参数统一用线性矩来估计^[13]。

2.2 Copula函数的定义

Copula函数是边缘分布为 $[0,1]$ 区间均匀分布的联合分布函数,Sklar's定理给出了Copula函数和两变量联合分布的关系。设 X, Y 为连续的随机变量,其边缘分布函数分别为 F_X 和 F_Y , $F(x, y)$ 为变量 X 和 Y 的联合分布函数,那么存在唯一的Copula函数 C ,使得:

$$F(x, y) = C_\theta(F_X(x), F_Y(y)), \forall x, y \quad (2)$$

式中: $C_\theta(F_X(x), F_Y(y))$ 为Copula函数; θ 为待定参数。

从Sklar's定理可以看出,Copula函数能独立于随机变量的边缘分布,反映随机变量的相关性结构,从而可将二元联合分布分为2个独立的部分,即变量间的相关性结构和变量的边缘分布来

分别进行处理,其中变量间的相关性结构用Copula函数来描述。本文采用在水文上常用的Kendall秩相关系数 τ 度量 X, Y 相应的连接函数Copula变量的相关性,Kendall相关系数 τ 与Copula函数 $C(x, y)$ 存在以下关系^[14]:

$$\tau = 4 \iint_{I^2} C_\theta(x, y) dC(x, y) - 1 \quad (3)$$

2.3 Copula函数的选择及参数估计

分布线型选择和参数估计是水文频率计算中的两个基本问题。本文枯水流量频率曲线选用韦克比分布曲线拟合,该频率分布函数在许多流域验证拟合非常好^[15]。边缘分布 F_X 和 F_Y 的参数估计通常采用线性矩法,Copula函数的参数估计采用相关性指标法^[16,17]。Copula函数总体上可以分为椭圆型、阿基米德型和二次型3类,其中生成元为1个参数的阿基米德型Copula函数的应用最为广泛^[14,18],本文仅列出了在水文及相关领域文献里经常出现的3种阿基米德型Copula,并且利用变量间的Kendall秩相关系数 τ 与Copula函数参数 θ 存在确定的解析关系,计算出单参数的二维阿基米德族Copula函数的参数 θ 。

根据Genest和Rivest^[19]提出的一种选择Copula函数的方法,分别计算理论估计值 $K_c(t)$ 和经验估计值 $K_e(t)$ (或称参数估计值和非参数估计值),然后点绘 $K_c(t) - K_e(t)$ 关系图,如果图上的点都落在45°对角线上,那么表明 $K_c(t)$ 和 $K_e(t)$ 完全相等,即Copula函数拟合得很好。因此, $K_c(t) - K_e(t)$ 关系图可以用来评价和选择Copula。

在枯水事件中对于两变量的Copula联合分布,我们关注水文变量 X 或 Y 不超过某一特定值,

即联合重现期 T_0 ;水文事件中 X 和 Y 都不超过某一特定值,即同现重现期 T_a 。上述重现期可以通过下面的公式计算:

$$T_0(x,y)=\frac{1}{P[X<x \text{ or } Y<y]}=\frac{1}{C(F_X(x),F_Y(y))} \quad (4)$$

$$T_a(x,y)=\frac{1}{P(X<x, Y<y)}=\frac{1}{F_X(x)+F_Y(y)-C(F_X(x),F_Y(y))} \quad (5)$$

变量 X 和 Y 的单变量重现期(或称边缘重现期):

$$T(x)=\frac{1}{1-F_X(x)} \quad T(y)=\frac{1}{1-F_Y(y)} \quad (6)$$

根据各自边缘分布,变量 X 和 Y 分别取 T 年一遇设计值时,根据两变量联合分布的 T_0 和 T_a 的定义,该组合 (x_T, y_T) 的联合重现期 T_0 对应的事件为 x_T 或 y_T 中有一个被超过,同现重现期 T_a 对应的事件为 x_T 和 y_T 均被超过。由此可见,联合重现期 T_0 小于或等于边缘重现期,同现重现期 T_a 大于或等于边缘重现期,即:

$$T_0(x,y)\leq \min(T(x),T(y))\leq \max(T(x),T(y))\leq T_a(x,y) \quad (7)$$

3 结果分析

3.1 单频率分布函数结果分析

3.1.1 概率分布函数选择

运用线性矩法估计11个分布函数的参数,并用K-S法进行拟合优度检验,结果表明11种分布函数中除卡群站的耿贝尔极大值分布未通过K-S检验,其余分布均通过K-S检验。韦克比分布在玉孜门勒克、沙里桂兰克、协合拉和黄水沟水文站拟合最好,阿拉尔和大山口拟合次之。这主要是由于韦克比分布有5个参数,较其他分布函数相比在描述水文极值分布特征方面灵活性更强,其次拟

合较好分布函数是伽玛分布、对数正态分布、对数逻辑分布和广义极值分布。基于此,本文运用韦克比分布函数研究塔河流域极值流量变化特征。

3.1.2 不同重现期对应枯水流量变化

同古孜洛克、玉孜门勒克、卡群、沙里桂兰克、协合拉、黄水沟和大山口都是各河流的出山口控制站,枯水流量主要是受气候变化的影响;阿拉尔站是塔河干流上游控制站,枯水流量受源流区的人类活动和气候变化的影响。新疆气候在1987年左右发生突变,随着温度上升,降水量、冰川消融量和径流量连续多年增加,植被有所改善,沙尘暴日数锐减^[20],同时1990年以后,塔河流域在18 a间净增耕地面积 $68.75\times 10^4 \text{ hm}^2$,年均递增3.80%^[21],因此1987年以后气候变化和人类活动开始加剧,因此本文将1987年作为枯水流量的分界点^[22],研究分界点前后不同重现期对应枯水流量的变化。对比表1和表2知,以1987年为时间节点,同古孜洛克、玉孜门勒克、沙里桂兰克、黄水沟和阿拉尔站在1987年以后枯水流量增加;协合拉和大山口在1987年以后重现期小于20 a的枯水流量增大;卡群在重现期小于10 a的枯水流量1987年以后略有减小;阿拉尔站1987年前后枯水流量比最低。同古孜洛克1987年以后70 a重现期对应枯水流量与1987年以前2 a重现期对应枯水流量相等,同古孜洛克的变化幅度仅次于阿拉尔。协合拉1987年前后重现期对应枯水流量变化最不明显,其次是卡群。

3.2 二维联合Copula函数结果分析

本文分别选取玉孜门勒克与卡群(1962~2008年)、沙里桂兰克与协合拉(1962~2007年)、大山口与黄水沟(1972~2008年)枯水流量概率分布作为边缘分布函数。由Genest-Rivest检验法计算的 $K_c(t)-K_c(t)$ 关系图(图2)可知,Gumbel-Hougaard Cop-

表1 水文站1987年以前各重现期(a)对应极值流量的设计值(m^3/s)

Table 1 Designed minimum mean 7-days streamflow (m^3/s) and related return periods(a) before 1987

水文站	$T=2$	$T=3$	$T=5$	$T=7$	$T=10$	$T=20$	$T=30$	$T=50$	$T=70$	$T=100$
同古孜洛克	5.53	4.94	4.33	3.98	3.67	3.23	3.06	2.91	2.85	2.80
玉孜门勒克	2.26	2.09	1.92	1.78	1.63	1.33	1.20	1.07	1.01	0.97
卡群	39.5	37.8	36.5	35.9	35.5	35.0	34.8	34.7	34.5	33.8
沙里桂兰克	10.3	9.05	7.87	7.28	6.80	6.20	5.98	5.81	5.73	5.67
协合拉	22.1	21.3	20.5	20.1	19.8	19.4	19.3	19.2	19.14	19.11
大山口	36.7	34.3	31.9	30.6	29.5	28.0	27.5	27.0	26.8	26.6
黄水沟	2.36	2.15	1.99	1.92	1.87	1.81	1.79	1.77	1.73	1.66
阿拉尔	4.95	2.83	1.20	0.51	0	0	0	0	0	0

表2 水文站 1987 年以后各重现期(a)对应极值流量的设计值(m³/s)

水文站	T=2	T=3	T=5	T=7	T=10	T=20	T=30	T=50	T=70	T=100
同古孜洛克	7.93	7.18	6.62	6.38	6.12	5.93	5.78	5.62	5.53	5.46
玉孜门勒克	3.14	2.71	2.42	2.30	2.22	2.12	2.09	2.06	2.03	1.94
卡群	43.6	41.8	39.4	37.5	35.3	31.4	29.7	28.1	27.4	26.8
沙里桂兰克	13.0	10.8	9.16	8.50	8.02	7.47	7.29	7.14	7.08	7.04
协合拉	23.6	22.9	22.3	21.9	21.2	19.7	18.8	17.9	17.5	16.2
大山口	44.9	39.1	34.7	32.8	31.4	28.1	24.8	19.4	15.7	12.2
黄水沟	3.34	2.95	2.57	2.39	2.24	2.07	2.01	1.96	1.94	1.92
阿拉尔	13.0	11.2	10.0	9.31	8.41	6.10	4.69	3.18	2.39	1.75

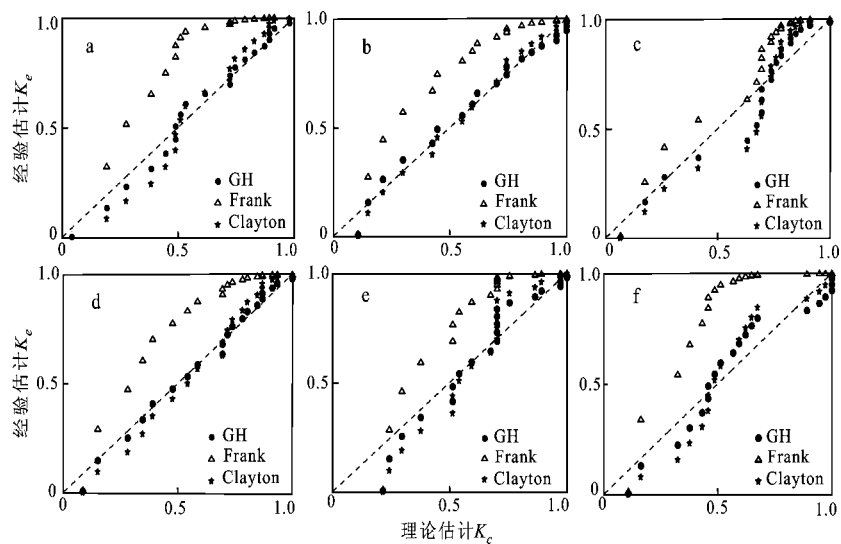


图2 Genest-Rivest 方法检验结果(a~f: 玉孜门勒克、卡群、沙里桂兰克、协合拉、大山口、黄水沟)

Fig. 2 Test results of Genest-Rivest method

(a-f: Yuzimenleke, Kaqun, Shaliguilanke, Xiehela, Dashankou, Huangshuigou)

ula(简称 GH Copula)函数图上的点较之 Frank Copula、Clayton Copula 更接近于 45° 对角线,即表示 GH Copula 其拟合效果最好,因此本文选取 GH Copula 函数来拟合塔河流域枯水径流的联合分布。玉孜门勒克与卡群(叶儿羌河流域)、沙里桂兰克与协合拉(阿克苏河流域)、大山口与黄水沟(开都河流域)两边缘分布均采用韦克比分布,并用线性矩法确定各边缘分布的参数。

Copula 函数参数采用非参数估计法估计(表 3)。由 4 个站联合分布函数,并根据式(4)、(5)计算枯水联合重现期、同现重现期。枯水流量联合重现期、同现重现期对应流量差值随重现期增加而减小,较大重现期对应的枯水流量变化较明显,而较小重现期对应的流量大小变化不明显。

表 4 是叶尔羌河流域、阿克苏河流域、开都河

表3 GH Copula 函数参数估计结果

Table 3 The results of Parameter Estimation of GH Copula function

	τ	θ
玉孜门勒克和卡群枯水联合分布	0.261	1.353
沙里桂兰克和协合拉枯水联合分布	0.270	1.369
大山口和黄水沟联合分布	0.502	2.009

流域在不同频率下枯水联合分布。由表 4 可知:枯水流量联合重现期小于设计重现期,而其同现重现期则大于设计重现期,枯水联合重现期与设计重现期差值小于同现重现期与设计重现期的差值。叶尔羌河流域、阿克苏河流域的联合重现期和同现期变化基本一致;相同频率下开都河流域的联合重现期大于叶尔羌河流域和阿克苏河流域的联合重现期,而同现重现期小于叶尔羌河流域

表4 不同频率组合、不同水文站点组合下枯水流量联合重现期 and 同现重现期(a)

Table 4 Different frequency combinations, different combinations of hydrological site low flow return period and with the current joint return period (a)

设计重现期 T	玉孜门勒克和卡群		沙里桂兰克和协合拉		大山口和黄水沟	
	联合重现期 T_0	同现重现期 T_a	联合重现期 T_0	同现重现期 T_a	联合重现期 T_0	同现重现期 T_a
2	1.5	3.2	1.5	3.2	1.6	2.7
3	2.0	6.3	2.0	6.2	2.2	4.7
5	3.0	14.7	3.0	14.4	3.4	9.7
7	4.1	25.7	4.1	25.2	4.5	15.6
10	5.6	46.7	5.6	45.6	6.2	25.8
20	10.7	148.4	10.7	144.1	11.7	68.7
30	15.8	292.0	15.8	282.3	17.1	121.8
50	25.9	684.9	26.0	658.9	27.8	250.6
70	36.1	1200.9	36.1	1151.5	38.3	403.0
90	46.1	1826.8	46.2	1747.3	48.8	574.6
100	51.2	2178.0	51.2	2081.0	54.1	666.8

和阿克苏河流域的联合重现期。叶尔羌河流域、阿克苏河流域干旱在3 a重现期以下同时遭遇的频率大,开都河流域干旱在5 a重现期以下同时遭遇的频率大,开都河的较大重现期对应干旱同时发生的概率要远大于叶尔羌河流域、阿克苏河流域。

4 讨论

同古孜洛克、玉孜门勒克、沙里桂兰克、黄水沟、阿拉尔1987年以后重现期对应的枯水流量增加;卡群站1987年以后大于10 a重现期对应枯水流量增加,协合拉、大山口1987年以后大于30 a重现期对应枯水流量也增加。虽然西北地区由暖干向暖湿转变的问题存在争议,但是大量研究已经证明从1987年以来新疆的气温和降水呈显著增加趋势^[20,22,23]。大部分水文站点在1987年以后重现期对应枯水流量大于1987年以前也很好的证明了这一结论,特别是阿拉尔的枯水变化比较明显。但是叶尔羌河的卡群、阿克苏河的协合拉以及开都河的大山口枯水流量在1987年以后重现期对应的枯水流量却小于1987年以后重现期对应的枯水流量。叶尔羌河是典型的雪冰补给河流,流域多年平均冰川消融量约占出山口的卡群站多年平均径流量的64.0%,雨雪混合补给占13.4%,地下水补给占22.6%;提兹那甫河冰川融水量占玉孜门勒克多年平均径流量的29.9%,雨雪补给量占55.3%,地下水补给占14.8%,卡群径流量补给主要依靠冰雪融水,玉孜门勒克的径流量主要是雨雪补给^[24,25]。新

疆地区气温和降水整体呈增加趋势,但是叶尔羌河流域的帕米尔高原区的秋季升温最明显,春季次之,而冬季最不显著;帕米尔高原区夏季降水的线性增湿最为显著^[25]。春季、冬季气温增加趋势并没有秋季的明显,以主要依靠冰雪融水补给的叶尔羌河流域春、冬季的枯水流量增加并不是很明显,只能缓解小于7 a一遇的干旱,对于重现期比较大的干旱的缓解作用尚不明显。叶尔羌河流域的农业灌溉面积是全疆最大的,且耕地面积也呈增加趋势,因此降水量的增加并不能从根本上解决叶尔羌河的干旱问题。

托什干河控制站沙里桂兰克和库玛拉克河控制站协合拉同属于阿克苏河流域,但是阿克苏河1987年前后重现期对应枯水流量变化并不一致。托什干河和库玛拉克河的主要补给来源是冰川融水和降雨^[26],1987年以后阿克苏河流域春季、冬季降水量和冬季气温均增加,春季气温减小,库玛拉克河水源补给因为春季气温减小而受影响^[27]。阿克苏河流域年际变化较小,水量稳定,严重旱涝灾害发生概率较低。两站重现期对应枯水流量仅次于卡群、大山口。开都河流域主要依靠降雨,冰雪融水补给,春季由于季节性积雪融水的补给,径流量占全年的23.2%,远大于其他流域控制站^[27]。重现期对应的枯水流量仅次于卡群,但其流域面积仅为叶尔羌河流域的1/5。开都河流域在12月至次年3月平均气温为-20.4℃,蒸发微弱,降雪不能即时融化补给径流,径流完全靠地下水补给,其

夏、秋季节降水量变化将直接影响冬季径流量变化^[26]。据统计,巴音郭楞蒙古自治州在1979~1987年连续发生干旱,开都河流域春季干旱连枯期一般是3~4 a,开都河流域的干旱年与新疆地区的干旱年比较同步^[1],因此新疆气候变化引起开都河径流量的增加缓解重现期较小干旱发生的频率,但是不能缓解重现期较大干旱发生频率。

叶尔羌河流域、阿克苏河流域的联合重现期和同现期变化基本一致;相同频率下开都河流域的联合重现期大于叶尔羌河流域和阿克苏河流域的联合重现期,而同现重现期小于叶尔羌河流域和阿克苏河流域的联合重现期。该流域同属塔河流域,联合重现期和同现重现期表现却不相同,叶尔羌河流域和阿克苏河流域的重现期基本同步,但却与开都河不同,主要是因为流域面积不同,开都河流域面积小于阿克苏河和叶尔羌河,且开都河大山口和黄水沟的流域控制面积和径流量相差很大,流域面积较大且两支流流域面积相差不大的,其干旱遭遇频率小。3个流域同现重现期较小的干旱遭遇几率很大,这论证了新疆“十年九旱”现象^[1]。

虽然塔河大部分地区在1987年以后重现期对应的枯水流量大于1987年以前枯水流量,1987年前后塔河流域的和田地区、喀什地区、阿克苏地区、巴音郭楞蒙古自治在1950~2008年发生灾害的年数分别是8 a、13 a、12 a、17 a和8 a、7 a、4 a、10 a,1987年以后发生干旱年份小于1987年以前。但是图3显示19世纪80年代以来,特别是2000年以后的旱灾成灾面积都远远的大于前期,年均增加

$0.23 \times 10^4 \text{ hm}^2/\text{a}$ 。同古孜洛克、卡群、沙里桂兰克和协合拉的枯水流量与旱灾成灾面积趋势比较(图3)发现:1987年以前枯水流量的变化与旱灾面积变化基本呈相反趋势;1987年以后,卡群的枯水流量的减小趋势对应着旱灾成灾面积的增加趋势,2000年以来的农作物播种面积增加趋势明显,由2000年的 $339.2 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 增加到2008年 $448.7 \times 10^4 \text{ hm}^2$,年均增加 $12.2 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 。土地面积的增加加大了缺水时期对水资源的消耗,导致旱灾成灾面积的增加。因此,1987年以后枯水流量的增加没有抑制旱灾成灾面积增加趋势。经近60 a水利事业发展,新疆塔河流域目前大中型水库数量、渠首数量及防渗率等有了长足进步^[26]。新疆农业特点是灌溉农业,2000年新疆有效灌溉面积占耕地面积得比重占到69.7%,是中国灌溉面积比重最大省份^[28]。塔河流域土地增加经历3个时期,分别是1949~1960年增加 $44.88 \times 10^4 \text{ hm}^2$,1963~1978年增加 $\times 10^4 \text{ hm}^2$,1990~2008年增加 $68.75 \times 10^4 \text{ hm}^2$ ^[21]。在以水资源开发利用为核心的人类社会生产活动影响下,各支流耗水量呈增加趋势,大型水利枢纽并不能满足耕地和人口增长所需水量,这样导致流入塔河干流水量并没有随着支流径流量的增加而增加^[29]。尽管新疆气候趋向于暖湿,但是由于人类活动的影响,其干旱受灾面积连年增加的趋势并没有从根本上扭转。

5 结 论

通过对塔河流域8个水文站的频率分析和6个水文站的Copula联合分布的分析,得到以下有

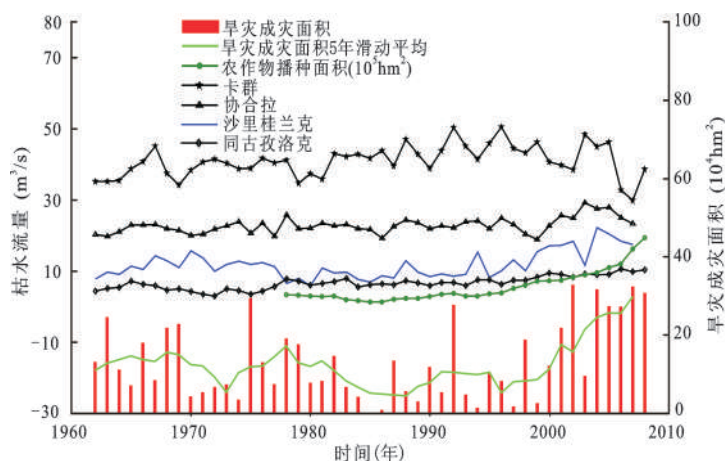


图3 1950~2007年新疆旱灾成灾面积

Fig. 3 Drought-destroyed crop areas in Xinjiang from 1950 to 2007

意义的结论:① 运用11种概率分布函数对塔河流域的8个水文站极值流量进行系统分析,韦克比函数最适合塔河流域的频率分析,伽玛分布、对数正态分布、对数逻辑分布和广义极值分布也拟合的较好。② 1987年以后气温和降水量的增加引起重现期对应的枯水流量大于1987年以前的枯水流量,但是塔河地区气候的季节变化、各河流流量的补给类型的不同对塔河枯水流量有一定的影响,因此降低了1987年以后重现期较小的干旱发生频率;对于1987年以后重现期较大的干旱,部分站点发生的频率甚至高于1987年以前,春季的气温变化对枯水的影响要大于降水量对枯水的影响。③ 叶尔羌河流域、阿克苏河流域的联合重现期和同现期变化基本一致;开都河流域的发生干旱的频率小于叶尔羌河流域和阿克苏河流域,而开都河流域同时发生干旱的频率大于叶尔羌河流域和阿克苏河流域,3个流域重现期较小的干旱遭遇的几率很大。气候变化并没有从根本上改变新疆旱灾情况,由于耕地面积、人口的增长,水资源供需矛盾仍然非常尖锐。

参考文献:

- [1] 温克刚,史玉光.中国气象灾害大典-新疆卷[M].北京:气象出版社,2006.
- [2] 新疆维吾尔自治区地方志编纂委员会.新疆年鉴[M].乌鲁木齐:新疆人民出版社,2002~2003.
- [3] 姚宇飞,木巴拉克,周国良.浅论新疆干旱农业区的特点[J].新疆农业科学,2001,38(2):102~103.
- [4] 白玉玺,徐德源,新疆维吾尔自治区地方志编纂委员会.新疆通志-气象志[M].乌鲁木齐:新疆人民出版社,1995.
- [5] Smakhtin V U.Low flow hydrology: a review[J].Journal of Hydrology, 2001, 240:147-186.
- [6] 汤奇成,李秀云.新疆枯水流量的初步计算[J].干旱区地理, 1985, 8(4):15~20.
- [7] 冯国章.新疆内陆河流水文干旱特征浅析[J].干旱地区农业研究,1994,12(2):69~78.
- [8] 周玉良,袁潇晨,金菊良,等.基于Copula的区域水文干旱频率分析[J].地理科学,2011,31(11):1383~1388.
- [9] 霍 丽,龚建新,王作彬.乌鲁木齐河枯水径流变化趋势分析[J].新疆水利,2007,4:25~28.
- [10] Svensson C, Kundzewicz Z W, Maurer T.Trend detection in river flow series:2.Flood and low-flow index series[J].Hydrological Sciences Journal,2005,50(5):811-824
- [11] David R M.水文学手册[M].张建业,李纪生译.北京:科学出版社,2002:8~35.
- [12] Ana J, Daniel P, Rubrn Z.A multivariate Kolmogorov-Smimov test of goodness of fit[J].Statistics and Probability Letters,1997, 35:251-259.
- [13] Hosking J R M.L-moments:analysis and estimation of distributions using linear combinations of order statistics[J].Journal of the Royal Statistical Society,1990,52:105-124.
- [14] Nelson R B.An introduction to Copulas[M].New York:Springer, 1999.
- [15] Zhang Q, Sun P, Chen X H, et al.Hydrological extremes in the Poyang Lake basin, China: changing properties, causes and impacts[J].Hydrological Processes,2011,25: 3121-3130.
- [16] Salvadori G, Michelele C D.Frequency analysis via Copulas:Theoretical aspects and applications to hydrological events[J].Water Resource Research,2004,40(12):1-17.
- [17] Zhang L, Singh V P.Bivariate flood frequency analysis using the copula method[J].Journal of Hydrologic Engineering ASCE, 2006,11:150-164.
- [18] Kao S C, Rao S G.A copula-based joint deficit index for droughts[J].Journal of Hydrology,2010,380:121-134.
- [19] Genest C, Rivest L.Statistical inference procedures for bivariate Archimedean copulas[J].Journal of American Statistical Association,1993,88:1034-1043.
- [20] 施雅风,沈永平,李栋梁,等.中国西北气候由暖干向暖湿转型的特征和趋势探讨[J].第四纪研究,2003,23(2):152~163.
- [21] 满苏尔·沙比提,努尔卡木里·玉素甫.塔里木河流域绿洲耕地变化及其河流水文效应[J].地理研究,2010,29(12):2251~2260.
- [22] 张 强,李剑锋,陈晓宏,等.基于Copula函数的新疆极端降水概率时空变化特征[J].地理学报,2011,66(1): 3~12.
- [23] Zhang Q, Li J F, Singh V P, et al. Application of Archimedean Copulas in the analysis of the precipitation extremes: effects of precipitation changes[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2012,107(1-2), 255-264.
- [24] 周聿超.新疆河流水文资源[M].乌鲁木齐:新疆科技卫生出版社, 1999.
- [25] 孙本国,毛炜峰,冯燕茹,等.叶尔羌河流域气温、降水及径流变化特征分析[J].干旱区研究,2006,23(2): 203~209.
- [26] 邓铭江.中国塔里木河治水理论与实践[M].北京:科学出版社, 2009.
- [27] 孙晓娟,赵成义,郑金丰.阿克苏河流域近46年气候变化研究[J].干旱区资源与环境,2011,25(3):78~83.
- [28] 梁书升,沈镇昭,中国农业年鉴编辑.中国农业年鉴[M].北京:中国农业出版社, 2000.
- [29] 邓铭江.塔里木河流域径流与耗水变化及其综合治理对策研究[J].干旱区地理,2008,31(4):550~559.

Probability Behaviors of the Low Flow of the Tarim River Basin: Possible Causes and Implications

ZHANG Qiang^{1,2}, SUN Peng^{1,2}, BAI Yun-gang³, ZHANG Jiang-hui³

(1. Department of Water Resources and Environment, Sun Yat-sen University, Guangzhou, Guangdong 510275, China;

2. Guangdong University Key Laboratory of Water Cycle and Security in South China, Sun Yat-sen University,

Guangzhou, Guangdong 510275, China; 3. Xinjiang Research Institute of Water Resources

and Hydropower, Urumqi, Xinjiang 830049, China)

Abstract: In this article, 11 probability distribution functions and two dimensional Archimedes Copula function are adopted to systematically analyze the probability behaviors of the 7-day low flow regimes (the minimum average flow for the consecutive 7 days) at eight hydrological stations located in the Tarim River Basin. The L-moment technique is used to estimate the parameters of the probability functions and the Kolmogorov-Smirnov method (K-S) is accepted to evaluate the goodness-of-fit of the probability functions. Possible causes and implications of low flow changes are analysis. The results show that: 1) Wake distribution is the candidate distribution function with the highest goodness-of-fit in the study of the extreme flow regimes over the Poyang Lake basin; 2) Climate changes after 1987 has reduced the frequency of drought of low return period. While Climate changes after 1987 has not reduced the frequency of drought of high return period in some stations, which is caused by climate seasonal changes and type of river supplies. Moreover, the temperature impact of low flow is greater than the rain in the spring. 3) The changes of joint return period and return period in the Aksu River are same with the changes in the Yarkand River. However, drought frequency in the Kaidu River is less than the Aksu River and the Yarkand River. While frequency of drought occurred in the same time in tributary of the Kaidu River is more than the Aksu River and the Yarkand River. Because the population and cultivate areas increase fast, climate change have not basically changed the drought in the Tarim River Basin.

Key words: frequency analysis; probability distribution function; Copula function; low flow; the Tarim River Basin