

变化环境下石羊河流域年径流频率计算

李伶俐^{1,2}, 宋松柏¹, 王银堂², 胡庆芳², 王磊之²

(1. 西北农林科技大学 水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100;

2. 南京水利科学研究所 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:受气候变化与人类活动的影响,水文序列一致性遭到破坏,传统的频率计算方法受到挑战。针对石羊河流域8条河流年径流量序列,在基于水文变异诊断系统进行变异分析的基础上,采用条件概率分布法和混合分布法进行了变化环境下的年径流频率计算。结果表明,石羊河流域年径流量序列以向下跳跃变异为主,变异年份多集中在1960年附近;变异序列的两种分布均通过K-S检验,最优分布的拟合效率系数均大于0.97;对比由考虑变异的理论分布与不考虑变异的一致性P-III型分布确定的设计年径流量,当设计频率高于90%时,大靖河与西营河的设计年径流量值相差较大。因此,石羊河流域新建水利工程的规划设计,应适当考虑水文资料的变异特性,选择合理的频率分析方法确定设计年径流量。

关键词:石羊河流域;年径流量;频率计算;变异诊断;非一致性

中图分类号:P333.9 **文献标识码:**A **文章编号:**1000-0852(2016)04-0019-07

气候变化和人类活动的影响,破坏了水文序列的一致性,使传统意义上基于独立同分布假设的水文频率计算方法遇到了明显的挑战^[1]。因此,探寻变化环境下非一致性水文序列频率计算方法具有重要的理论和实际意义。目前,学术界对于这一问题的研究重点已由还原/还现法逐步转向直接基于概率论与数理统计的分析方法,这些方法概括起来有时变矩模型^[2-3]、混合分布法^[4]和条件概率分布法^[5]等,其中时变矩模型适用于具有趋势变异水文序列频率分布的时变特征分析,而条件概率分布法和混合分布法主要应用于具有跳跃变异水文序列的频率计算。如杜涛等^[2]应用基于广义极值分布的时变矩模型对渭河流域修正后的GCM降雨时间序列进行了频率分析;江聪等^[3]提出了基于P-III型分布的回归模型,研究了汉口站59年间年最小月流量的趋势变化特征;冯平等^[4]运用混合分布法对龙门水库的非一致性洪水序列进行频率计算,揭示

了不同标准设计洪水值减小的事实;宋松柏等^[5]基于全概率公式提出了具有跳跃变异的非一致分布水文序列频率计算方法等。然而变化环境下的水文序列统计特性比较复杂,现有方法的适用性仍有待于深入研究。因此,本文针对石羊河流域8条河流年径流量序列,在基于水文变异诊断系统分析序列变异形式的基础上,采用条件概率分布法和混合分布法开展了变化环境下的年径流频率计算,以对两种方法的适用性作进一步的评估检验,同时相关研究结果可为石羊河流域水利工程的规划与管理提供水文依据。

1 研究区域与数据资料

石羊河流域位于甘肃省河西走廊东部,乌鞘岭以西,祁连山北麓,地理坐标范围101°22'E~104°04'E, 37°07'N~39°27'N,流域面积 $4.16 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。水系由自东向西分布的大靖河、古浪河、黄羊河、杂木河、金塔

收稿日期:2015-07-28

基金项目:国家自然科学基金项目(51179160,51479171,51279166,51479118);水利部公益性行业科研经费专项项目(201501014);国家自然科学基金青年基金项目(51509157);高等学校博士学科点专项科研基金(20110204110017)。

作者简介:李伶俐(1992-),山西吕梁人,硕士研究生,主要从事水文水资源研究。E-mail: lilingjie_water@163.com

河、西营河、东大河及西大河 8 条河流和多条小沟小河组成。流域多年平均径流量为 $15.60 \times 10^8 \text{m}^3$, 与地表水资源不重复的地下水资源量为 $0.99 \times 10^8 \text{m}^3$, 加上景电二期可调入水量 $0.61 \times 10^8 \text{m}^3$ 和“引硫济金”调水 $0.40 \times 10^8 \text{m}^3$, 流域内现状可利用水资源量为 $17.60 \times 10^8 \text{m}^3$ 。按现有人口和耕地面积计, 人均 775m^3 , 耕地亩均 280m^3 , 低于甘肃省人均 1150m^3 和耕地亩均 378m^3 的水平, 属于典型的资源型缺水地区^[6]。

本文收集了石羊河流域大靖河等 8 条河流 1950~2000 年实测年径流量序列, 对应的水文站点分布如图 1 所示。年径流量序列的可靠性与代表性较好, 可以满足计算要求^[7]。



图 1 石羊河流域水系示意图

Fig.1 The river network in the Shiyanghe River basin

2 研究方法

2.1 年径流量序列变异诊断方法

水文序列变异分析是非一致性水文频率计算的第一步工作。本文采用谢平等^[8]提出的水文变异诊断系统对石羊河流域年径流量序列进行变异分析。该方法对序列的变异诊断包括初步诊断、详细诊断和综合诊断三部分。其中, 初步诊断采用 Hurst 系数法对年径流序列进行随机性检验, 从定量的角度判断序列是否变异; 详细诊断采用 Spearman 秩次相关检验法等 3 种方法对趋势成分详细诊断, 采用 Lee-Heghinian 法、有序聚类法等 10 种方法对跳跃成分详细诊断; 综合诊断分别进行趋势综合与跳跃综合。对趋势和跳跃变异均显著的情形, 分别计算效率系数, 以拟合效率系数高者作为诊断结果, 并结合物理成因分析结果的可靠性。

2.2 非一致性年径流频率计算方法

2.2.1 条件概率分布法

2005 年, Singh 等^[9]最早提出条件概率分布法, 在分析形成机理不同的季节性洪水分布的基础上, 研究了年最大洪水的频率问题。宋松柏等^[5]基于此法提出了具有跳跃变异的非一致性水文序列频率计算方法。该方法以变异点为节点, 将容量为 N 的水文序列划分为 S 个互不重叠的子序列, 子序列的长度分别为 N_1, N_2, \dots, N_S , 且子序列服从各自的分布。水文变量 X 可能以不同的概率发生在不同的子序列内, 根据全概率公式, 可得到条件概率分布为:

$$F(x) = P(X \geq x) = \sum_{i=1}^S P(A_i) P(X \geq x | A_i) = \sum_{i=1}^S P(A_i) P(x | A_i) \quad (1)$$

式中: $P(A_i)$ 为水文变量 X 在第 i 个子序列 X_i 内发生的概率, 其值等于 N_i/N ; $P(x | A_i)$ 为事件 $\{X \geq x\}$ 在第 i 个子序列 X_i 内发生的概率, 可由子序列 X_i 选择适当的分布线型进行计算。

2.2.2 混合分布法

1972 年, Singh 等^[10]首次提出混合分布法, Alila 等^[11]应用此法对希拉河流域的长期水文气象观测资料进行了研究, 发现混合分布与经验点据的拟合效果优于传统的单分布模型。该方法假设样本系列概率分布是由 S 个子分布(一致性分布)加权混合而成, 其分布可表示为

$$F(x) = \alpha_1 F_1(x) + \alpha_2 F_2(x) + \dots + \alpha_S F_S(x) \quad (2)$$

式中: $F_1(x), F_2(x), \dots, F_S(x)$ 为各子分布的累积概率分布函数, 子分布的线型可以根据实际情况灵活选用; $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_S$ 为各子分布对应的权重, 且应满足 $\alpha_1 + \alpha_2 + \dots + \alpha_S = 1$ 。

条件概率分布法与混合分布法的主要区别是子分布权重的确定方式不同, 前者采用频率近似, 后者则需要通过优化算法率定。将传统的一致性分布改写为子序列的分布形式为:

$$F(x) = F_0(x) = \alpha_1 F_0(x) + \alpha_2 F_0(x) + \dots + \alpha_S F_0(x) \quad (3)$$

式中: $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_S$ 为各子序列的权重, 权重之和为 1; $F_0(x)$ 为基于一致性假设的全序列理论分布。当(3)式中 $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_S$ 的取值与条件概率分布或混合分布相同时, 对比(1)~(3)式, 发现子序列分布的差异是这两种方法与一致性分布的主要区别。

2.2.3 参数估计方法

鉴于我国水文序列的长度较短, 宋松柏等^[5]建议仅

考虑 1 个变异点,将序列分割为 2 个子序列。故取 $S=2$,即条件概率分布与混合分布中包含 2 个子分布。子分布线型选用我国水文频率计算推荐的 P-III 型分布,即:

$$P(x|A_i)=F_i(x)=1-\int_{c_i}^x \frac{1}{a_i \Gamma(b_i)} \left(\frac{x-c_i}{a_i}\right)^{b_i-1} e^{-\frac{x-c_i}{a_i}} dx; i=1,2 \quad (4)$$

式中: a_i 、 b_i 、 c_i 分别为 P-III 型分布的尺度参数、形状参数和位置参数。参数与序列统计参数均值、变差系数和偏态系数的关系为:

$$\bar{x}=a_i b_i+c_i, C_{vi}=\frac{\sqrt{b_i}}{b_i+c_i/a_i}, C_{si}=\frac{2}{\sqrt{b_i}} \quad (5)$$

可以看出,条件概率分布中共有 \bar{x}_1 、 C_{v1} 、 C_{s1} 、 \bar{x}_2 、 C_{v2} 、 C_{s2} 6 个未知参数,混合分布中有 α_1 、 \bar{x}_1 、 C_{v1} 、 C_{s1} 、 \bar{x}_2 、 C_{v2} 、 C_{s2} 7 个未知参数。分布参数数量的增加进一步加大参

数估计的难度。成静清等^[12]在应用混合分布法分析陕北地区非一致性年径流序列时,采用模拟退火算法估计参数。由于并未考虑参数间的关系,导致某些序列的 C_v/C_s 值与中国规范推荐值相差较大^[1],李新等^[13]在目标函数中增加 C_v/C_s 范围约束条件解决了该问题。

本文以含有约束条件的效率系数^[14]最小作为目标函数,采用具有全局优化功能的模拟退火粒子群优化算法^[15]估计条件概率分布与混合分布的待求参数。

3 结果分析

3.1 年径流量序列变异诊断结果

绘制大靖河与古浪河的年径流量过程线,如图 2 所示。从图 2 可以看出,大靖河与古浪河的年径流量过程线呈下降趋势,并且 5a 滑动平均过程线在 1960 年以后多低于均值线,表明年径流量序列可能包含了向下跳跃的变异成分。

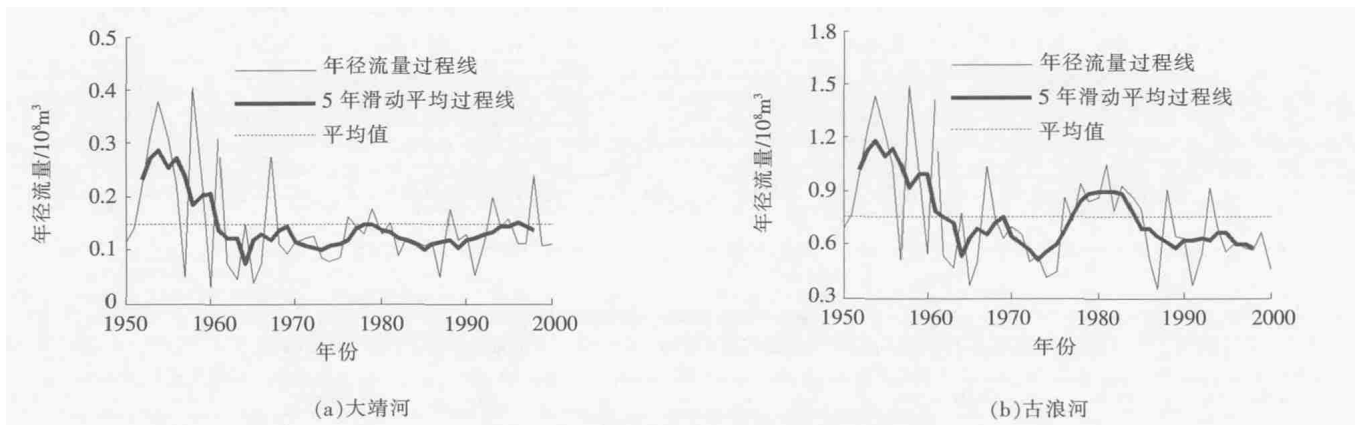


图 2 大靖河与古浪河年径流量过程线
Fig.2 The annual runoff hydrographs of the Dajinghe River and Gulanghe River

采用水文变异诊断系统对各年径流量序列进行诊断,取第一信度水平 $\alpha=0.05$,第二信度水平为 $\beta=0.01$,诊断结果见表 1。由表 1 可知,石羊河流域年径流量序列变异以向下跳跃变异为主,年径流呈现减少态势;西营河年径流量序列变异年份为 1989 年,其余河流年径流量序列变异年份多集中 1960 年附近。

上述诊断方法仅从统计角度对年径流序列的变异性做出考量,仍需要结合物理成因对诊断结果进行分析。1957 年石羊河流域开始修建了黄羊河、金川峡和红崖山等水库;到 20 世纪 60 年代初,受自然灾害的影响,流域内大量人口涌向上游山区,开垦了大片草场和湿地,致使耕地面积猛增至 $268 \times 10^4 \text{hm}^2$,原始森林保有量锐减 $74 \times 10^4 \text{hm}^2$ 。这些水利工程的建

设和土地资源的不合理开发,导致流域水土流失面积扩大,下垫面条件遭到了一定程度的破坏^[6]。因此,本文确定的石羊河流域年径流序列变异年份是合理的。

3.2 年径流频率计算结果

3.2.1 分布参数估计

为提高参数估计的效率及精度,首先计算各年径流量序列子序列的 P-III 型分布参数。子序列和被认为是各自相对一致的物理条件下形成的,对其采用最大熵原理法^[16]进行频率分析,以此子序列分布参数作为初值,采用模拟退火粒子群优化算法估计参数。条件概率分布的参数估计结果见表 2,混合分布的参数估计结果见表 3。

表1 石羊河流域年径流量序列变异诊断结果
Table1 The variation diagnosis results of the annual runoff series in the Shiyanghe River basin

水文序列		大靖河	古浪河	黄羊河	杂木河	金塔河	西营河	东大河	西大河	
初步诊断	Hurst 系数 H	0.80	0.81	0.80	0.86	0.84	0.76	0.79	0.64	
	整体变异程度	中变异	中变异	中变异	中变异	中变异	中变异	中变异	无变异	
趋势 诊断	相关系数检验	-0.31(-)	-0.41(+)	-0.42(+)	-0.42(+)	-0.46(+)	-0.62(+)	-0.42(+)		
	Spearman 检验	-1.11(-)	-2.36(-)	-3.19(+)	-3.57(+)	-3.12(+)	-5.17(+)	-3.06(+)		
	Kendall 检验法	-0.98(-)	-2.30(-)	-2.98(+)	-3.39(+)	-2.90(+)	-4.28(+)	-2.88(+)		
	Lee-Heghinian	1959(0)	1961(0)	1964(0)	1959(0)	1959(0)	1989(0)	1959(0)		
	有序聚类法	1959(0)	1961(0)	1964(0)	1959(0)	1959(0)	1989(0)	1959(0)		
详细 诊断	最优信息二分法	1958(0)	1961(0)	1964(0)	1959(0)	1967(0)	1989(0)	1956(0)		
	R/S 检验法	1959(0)	1984(0)	1982(0)	1989(0)	1973(0)	1989(0)	1966(0)		
	跳跃 诊断	Brown-Forsythe 法	1959(+)	1961(+)	1994(+)	1955(+)	1959(+)	1993(+)	1959(+)	
	滑动 F 法	1967(+)	1988(+)	1956(+)	1967(+)	1967(+)	1956(+)	1967(+)		
	滑动 T 法	1959(+)	1961(+)	1964(+)	1959(+)	1959(+)	1989(+)	1959(+)		
	滑动秩和法	1961(+)	1961(+)	1964(+)	1961(+)	1961(+)	1989(+)	1961(+)		
	滑动游程法	-	1971(+)	-	-	1970(+)	1979(+)	-		
	Mann-Kendall 法	1957(+)	1961(+)	1964(+)	1961(+)	1959(+)	1986(+)	1959(+)		
	趋势	综合显著性	3(-)	(-)	3(+)	3(+)	3(+)	3(+)	3(+)	
		跳跃点	1959	1961	1964	1959	1959	1989	1959	
跳跃	综合权重	0.50	0.55	0.41	0.40	0.53	0.54	0.55		
	综合显著性	2(+)	3(+)	3(+)	(+)	3(+)	2(+)	3(+)		
选择 指标	效率	趋势	-	-	0.21	0.18	0.21	0.38	0.17	
	系数	跳跃	0.29	0.31	0.39	0.37	0.39	0.40	0.33	
诊断结果		1959 ↓	1961 ↓	1964 ↓	1959 ↓	1959 ↓	1989 ↓	1959 ↓	无变异	

注:表中“(+)”表示趋势或跳跃显著,“(-)”表示趋势或跳跃显著不显著,“(0)”表示不能进行显著性检验。

表2 条件概率分布参数估计结果
Table2 The parameter estimation results of the conditional probability distribution

河流	N_1/N	$\bar{x}_1/10^8\text{m}^3$	C_{e1}	C_{s1}	N_2/N	$\bar{x}_2/10^8\text{m}^3$	C_{e2}	C_{s2}
大靖河	0.196	0.242	0.489	1.021	0.804	0.123	0.457	0.999
古浪河	0.235	1.044	0.336	0.695	0.765	0.667	0.314	0.629
黄羊河	0.294	1.666	0.202	0.403	0.706	1.258	0.255	0.539
杂木河	0.196	3.189	0.293	0.940	0.804	2.294	0.193	0.787
金塔河	0.196	1.787	0.171	0.427	0.804	1.324	0.192	0.557
西营河	0.784	3.870	0.175	0.457	0.216	2.767	0.151	0.563
东大河	0.196	3.740	0.209	0.519	0.804	2.936	0.148	0.591

表3 混合分布参数估计结果
Table3 The parameter estimation results of the mixed distribution

河流	α_1	$\bar{x}_1/10^8\text{m}^3$	C_{e1}	C_{s1}	α_2	$\bar{x}_2/10^8\text{m}^3$	C_{e2}	C_{s2}
大靖河	0.157	0.234	0.526	1.052	0.843	0.126	0.425	0.938
古浪河	0.286	1.050	0.320	0.751	0.714	0.647	0.310	0.675
黄羊河	0.283	1.646	0.204	0.423	0.717	1.266	0.256	0.523
杂木河	0.197	3.104	0.291	0.784	0.803	2.258	0.152	0.679
金塔河	0.196	1.832	0.189	0.555	0.804	1.323	0.188	0.758
西营河	0.785	3.865	0.184	0.468	0.216	2.803	0.184	0.558
东大河	0.197	3.748	0.210	0.427	0.804	2.934	0.138	0.808

3.2.2 分布拟合检验与优度评价

对于分布的拟合情况,采用柯尔莫哥洛夫-斯米尔诺夫检验法(K-S 检验)进行检验。取 K-S 检验的显著性水平 $\alpha=0.05$,与 $N=51$ 对应的临界值近似为

0.190 4,当统计量 D 小于 0.190 4 时通过检验。选择效率系数 R^2 、 OLS 、 AIC 和 $SBC4$ 种指标对不同分布的拟合优度进行评价。综合分析不同分布 4 种评价指标的大小,优选最优分布。具体检验与评价结果见表 4。

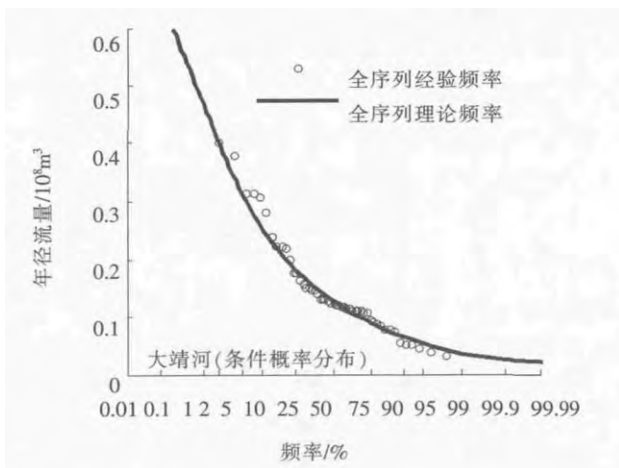
表4 变异年径流量序列的分布拟合检验及优度评价
Table4 The fitting test and evaluation of the goodness-of-fit for the variant annual runoff series

河流	理论分布	D	R^2	OLS	AIC	SBC	最优分布
大靖河	条件概率分布	0.107	0.973	0.010	-424.73	-413.14	条件概率分布
	混合分布	0.098	0.941	0.021	-385.57	-373.98	
古浪河	条件概率分布	0.051	0.988	0.045	-346.45	-334.86	混合分布
	混合分布	0.045	0.989	0.041	-351.11	-339.52	
黄羊河	条件概率分布	0.068	0.983	0.113	-299.59	-288.00	条件概率分布
	混合分布	0.067	0.982	0.121	-296.34	-284.75	
杂木河	条件概率分布	0.065	0.973	0.531	-220.81	-209.22	条件概率分布
	混合分布	0.076	0.949	0.994	-188.85	-177.26	
金塔河	条件概率分布	0.061	0.977	0.126	-294.19	-282.60	混合分布
	混合分布	0.061	0.985	0.082	-316.21	-304.62	
西营河	条件概率分布	0.062	0.984	0.429	-231.71	-220.12	条件概率分布
	混合分布	0.057	0.980	0.523	-221.55	-209.96	
东大河	条件概率分布	0.070	0.985	0.236	-262.22	-250.63	混合分布
	混合分布	0.080	0.987	0.206	-269.00	-257.41	

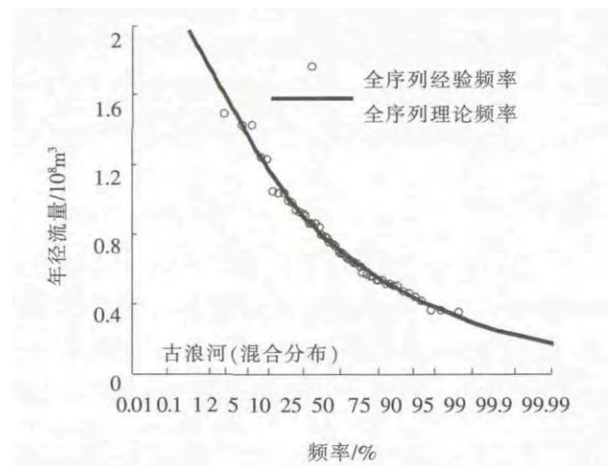
由表 4 可知,对于大靖河等 7 个具有跳跃变异的年径流量序列,条件概率分布与混合分布的 K-S 检验统计量 D 均小于临界值,即所有分布均通过了检验。以大靖河年径流量序列为例,从表 4 可以看到条件概率分布的效率系数 R^2 大于混合分布,并且 OLS 、 AIC 和 SBC 的值小于混合分布,这表明条件概率分布拟合

效果优于混合分布。同理得到各变异序列的最优分布,可以看到最优分布的效率系数 R^2 均大于 0.97,表明分布拟合效果较为理想。

基于最优分布的参数估计结果,选择大靖河和古浪河,绘制年径流量序列频率曲线,如图 3 所示。从图 3 中可以看出,最优分布与经验点据的拟合效果较好。



(a)大靖河



(b)古浪河

图 3 年径流量序列频率曲线

Fig.3 The frequency curves of the annual runoff series

3.2.3 设计年径流量比较

基于各变异年径流量序列最优分布的参数估计结果,

按照牛顿迭代法计算不同频率对应的设计年径流量,并将其与不考虑变异的P-III分布设计值进行比较,结果见表5。

表5 设计年径流量比较
Table5 Comparison of the design annual runoff

年径流序列		不同频率设计年径流量/ 10^8m^3						
		25%	50%	70%	75%	90%	95%	98%
大靖河	条件概率分布	0.181	0.128	0.098	0.091	0.068	0.058	0.051
	P-III 分布	0.188	0.127	0.092	0.084	0.058	0.047	0.039
	变化比例/%	-3.54	0.62	6.36	8.30	16.77	22.75	31.01
古浪河	混合分布	0.911	0.700	0.576	0.545	0.436	0.381	0.327
	P-III 分布	0.900	0.700	0.578	0.547	0.447	0.401	0.360
	变化比例/%	1.20	0.02	-0.23	-0.42	-2.38	-4.93	-9.33
黄羊河	条件概率分布	1.625	1.360	1.179	1.133	0.973	0.903	0.849
	P-III 分布	1.601	1.345	1.166	1.118	0.937	0.839	0.738
	变化比例/%	1.55	1.10	1.13	1.33	3.84	7.55	15.09
杂木河	条件概率分布	2.746	2.340	2.102	2.043	1.844	1.756	1.686
	P-III 分布	2.788	2.339	2.061	1.992	1.756	1.647	1.548
	变化比例/%	-1.50	0.03	2.00	2.59	5.02	6.63	8.93
金塔河	混合分布	1.602	1.359	1.214	1.178	1.052	0.990	0.929
	P-III 分布	1.607	1.370	1.215	1.176	1.035	0.966	0.899
	变化比例/%	-0.37	-0.80	-0.08	0.23	1.65	2.50	3.37
西营河	条件概率分布	4.147	3.605	3.180	3.060	2.629	2.425	2.241
	P-III 分布	3.944	3.431	3.157	3.096	2.918	2.853	2.807
	变化比例/%	5.16	5.06	0.72	-1.19	-9.91	-15.01	-20.17
东大河	混合分布	3.353	2.965	2.739	2.682	2.485	2.386	2.289
	P-III 分布	3.390	2.985	2.749	2.693	2.512	2.435	2.372
	变化比例/%	-1.08	-0.68	-0.38	-0.39	-1.09	-2.02	-3.50

由表 5 可知,当设计频率高于 90%时,大靖河与西营河依据考虑变异理论分布求得的设计年径流量与不考虑变异的一致性 P-III 型分布设计年径流值相差较大。而年径流频率分析中,设计年径流量对灌溉、水电等工程规模的确定具有重要作用。因此,该流域新建水利工程在规划设计阶段,应适当考虑水文资料的变异特性,选用合理的频率分析方法确定设计年径流量。

4 结论

本文以石羊河流域 8 条河流年径流量序列为研究对象,采用水文变异诊断系统对序列的变异形式进行诊断,根据变异形式,选择条件概率分布法和混合分布法进行了变化环境下的年径流频率计算,主要结论如下:

(1) 石羊河流域年径流量变异以向下跳跃变异为主,年径流呈现减少态势,除西营河外其余河流年径流量序列的变异年份多集中在 1960 年附近。

(2) 石羊河流域年径流量序列频率计算结果显示,各变异年径流量序列的条件概率分布与混合分布均通过了 K-S 检验,最优分布的拟合效率系数均大于 0.97,拟合效果较好。

(3) 当设计频率高于 90%时,大靖河与西营河依据考虑变异理论分布求得的设计年径流量与不考虑变异的一致性 P-III 型分布得到的设计年径流量相差较大。因此,该流域新建水利工程的规划设计,应适当考虑水文资料的变异特性,选择合理的频率分析方法确定设计年径流量。

参考文献:

- [1] 梁忠民,胡义明,王军. 非一致性水文频率分析的研究进展[J]. 水科学进展, 2011,22(6):864-871. (LIANG Zhongmin, HU Yiming, WANG Jun. Advances in hydrological frequency analysis of non-stationary time series[J]. Advances in Water Science, 2011,22(6): 864-871. (in Chinese))
- [2] 杜涛,熊立华,江聪. 渭河流域降雨时间序列非一致性频率分析[J]. 干旱区地理, 2014,37(3):468-479.(DU Tao, XIONG Lihua, JIANG

- Cong. Nonstationary frequency analysis of rainfall time series in Weihe River basin[J]. *Arid Land Geography*, 2014,37(3):468–479. (in Chinese)
- [3] 江聪,熊立华. 基于 GAMLSS 模型的宜昌站年径流序列趋势分析[J]. *地理学报*, 2012,67(11):1505–1514. (JIANG Cong, XIONG Lihua. Trend analysis for the annual discharge series of the Yangtze River at the Yichang hydrological station based on GAMLSS[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2012,67(11):1505–1514. (in Chinese))
- [4] 冯平,曾杭,李新. 混合分布在非一致性洪水频率分析的应用[J]. *天津大学学报(自然科学与工程技术版)*, 2013,46(4):298–303. (FENG Ping, ZENG Hang, LI Xin. Non-stationary flood-frequency analysis based on mixed distribution[J]. *Journal of Tianjin University (Science and Technology)*, 2013,46(4):298–303. (in Chinese))
- [5] 宋松柏,李扬,蔡明科. 具有跳跃变异的非一致分布水文序列频率计算方法[J]. *水利学报*, 2012,43(6): 734–739+748. (SONG Songba, LI Yang, CAI Mingke. Methods of frequency analysis for hydrologic data with jump up components[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2012,43(6):734–739+748. (in Chinese))
- [6] 陈德兴. 沧桑石羊河 [M]. 兰州: 甘肃文化出版社, 2008. (CHEN Dexing. *The Vicissitudes of Shiyang River*[M]. Lanzhou: Gansu Culture Press, 2008. (in Chinese))
- [7] 王双银, 宋孝玉. 水资源评价 [M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2014. (WANG Shuangyin, SONG Xiaoyu. *Water Resources Assessment*[M]. Zhengzhou: Yellow River Conservancy Press, 2014. (in Chinese))
- [8] 谢平, 陈广才, 雷红富, 等. 水文变异诊断系统 [J]. *水力发电学报*, 2010,29(1):85–91. (XIE Ping, CHEN Guangcai, LEI Hongfu, et al. Hydrological alteration diagnosis system [J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2010,29(1):85–91. (in Chinese))
- [9] Singh V P, Wang S X, Zhang L. Frequency analysis of nonidentically distributed hydrologic flood data [J]. *Journal of Hydrology*, 2005,307: 175–195.
- [10] Singh K P, Sinclair R A. Two-distribution method for flood frequency analysis[J]. *Journal of Hydraulics Division*, 1972,98(1):28–44.
- [11] Alila Y, Miraoui A. Implications of heterogeneous flood-frequency distributions on traditional stream-discharge prediction techniques[J]. *Hydrological Processes*, 2002,(16):1065–1084.
- [12] 成静清,宋松柏. 基于混合分布非一致性年径流序列频率参数的计算[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2010,38(2):229–234. (CHENG Jingqing, SONG Songba. Calculation of hydrological frequency parameters of inconsistent annual runoff series based on mixed distribution [J]. *Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition)*, 2010,38(2):229–234. (in Chinese))
- [13] 李新,曾杭,冯平. 洪水序列变异条件下的频率分析与计算[J]. *水力发电学报*, 2014,33(6):11–19+45. (LI Xin, ZENG Hang, FENG Ping. Flood frequency analysis considering variation in flood time series[J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2014,33(6):11–19, 45. (in Chinese))
- [14] Kachroo R K. River flow forecasting. Part 1: A discussion of the principles[J]. *Journal of Hydrology*, 1992,133: 1– 15.
- [15] 高鹰, 谢胜利. 模拟退火粒子群优化算法 [J]. *计算机工程与应用*, 2004,40(1):47–50. (GAO Ying, XIE Shengli. Particle swarm optimization algorithms based on simulated annealing[J]. *Computer Engineering and Applications*, 2004,40(1):47–50. (in Chinese))
- [16] 肖可以,宋松柏. 最大熵原理在水文频率参数估计中的应用[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2010,38(2):197–205. (XIAO Keyi, SONG Songbai. Application of maximum entropy principle in the estimation of hydrological frequency parameter[J]. *Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition)*, 2010,38(2): 197–205. (in Chinese))

Frequency Analysis of Annual Runoff for Shiyanghe River in A Changing Environment

LI Lingjie^{1,2}, SONG Songbai¹, WANG Yintang², HU Qingfang², WANG Leizhi²

(1. *College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling 712100, China*; 2. *State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China*)

Abstract: With the impact of climate change and human activities, the consistency of hydrological series is destroyed. Thus, traditional frequency calculation methods are challenged. The variation characteristics of 8 river annual runoff series in the Shiyanghe River Basin were detected using the hydrological alteration diagnosis system, conditional probability distribution and mixed distribution methods were employed to calculate the frequency of annual runoff. The results indicate that the dominant variation type of annual runoff series in Shiyanghe River Basin is a downward jump and the aberrance years are mainly around 1960; the two kinds of distributions of variant series pass the K-S test with all the efficiency coefficients of optimal distributions exceeding 0.97; when design frequency is more than 90%, the design annual runoff of the Dajinghe River and Xiyinghe River derived from the theoretical distribution considering variation has a great difference from that obtained by consistent P-III distribution without regard to variation. Therefore, during the planning design phase of newly-built water projects, the emphasis is analyzing variation features of hydrological data appropriately and selecting rational frequency calculation method for design annual runoff.

Key words: Shiyanghe River Basin; annual runoff; frequency calculation; variation diagnosis; inconsistency