

基于地区线性矩法的大汶河流域极值降雨频率分析

谢玖跃¹, 郭 成², 王 沁², 胡义明¹, 王 军¹

(1. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098; 2. 山东省水文中心, 山东 济南 250014)

摘要:以山东省大汶河流域为例,采用 M-K 检验法对 6、12、24 h 和 3 d 的年极值降雨资料进行一致性分析,在此基础上,采用地区线性矩法推求站点暴雨设计值,将区域设计值结果与单站线性矩法结果进行对比分析,并绘制了大汶河流域 50 年一遇暴雨设计值的空间分布图。结果表明,可将大汶河流域划分为 3 个水文气象一致区,最优分布线型以广义极值分布(GEV)为主;单站线性矩法与地区线性矩法结果的差距(平均绝对相对误差)随样本系列长度的增加而减小,且重现期越大差距越大;大汶河流域暴雨设计值的空间分布不均,但各时段分布态势基本相似。

关键词:地区线性矩法; 水文气象一致区; 极值降雨设计值时空分布; 大汶河流域

中图分类号: TV125; P333

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2023)03-0001-04

1 概况

大汶河流域面积 9 098 km²,从地形上看,流域内总地势为东部与北部高,西部与南部低,大汶口以上北临泰山、中有徂徕山与新甫山、南依沂蒙山脉、东靠鲁山山脉,呈“ \mathcal{J} ”型分布,并向西延伸。从气候背景上看,大汶河流域属典型的季风气候,水汽主要来源于东面的黄海。受地形抬升影响,迎风面雨量大,通常泰山东南坡等迎风面降雨量较大,而背风面的谷底和流域西部降雨量较少^[1]。我国大多数河流的洪水均由暴雨形成,当流量资料缺乏或流量资料还原计算比较困难时通过设计暴雨推求设计洪水是一种可行途径。使用站点频率分析计算方法推求设计暴雨对站点资料系列长度有较高要求,区域频率分析方法可充分利用分区内站群的水文信息,降低站点设计值估计的不确定性。1997 年, HOSKING J R M 等^[2]提出了一种将线性矩法与地区分析法相结合的地区线性矩法。近年来,我国在广西^[3]、广东^[4]、江西^[5]等省份及长江中下游^[6]和太湖^[7]等流域应用该法得到了较为合理的结果。为此,本文以山东省大汶河流域为例,采用 Mann-Kendall(M-K)检验法对 6、12、24 h 和 3 d 年极值雨量资料进行一致性分

析,在此基础上,采用地区线性矩法分析各时段极值降雨频率,包括水文气象一致区划分、频率曲线线型选择、区域频率计算等,并对比分析了区域设计值结果与单站线性矩法结果;此外,绘制了大汶河流域暴雨设计值空间分布图。研究结果可为研究区防洪减灾提供基础技术支持。

2 数据资料与研究方法

2.1 数据资料

选取大汶河流域内水文站、气象站和雨量站 6、12、24 h 和 3 d 的历史年极值降雨资料,经质量控制,最终筛选出资料序列长度在 20 年及以上的站点用于暴雨频率分析,其中 6 h 有 31 站,12 h 有 30 站,24 h 有 30 站,3 d 有 46 站。站点资料序列范围从 1950~2019 年长度不等,平均长度约 44 年。大汶河流域内站点分布见图 1。

2.2 研究方法

2.2.1 数据的统计检验

采用地区线性矩法进行频率分析前需检测样本系列的平稳性和独立性,通常认为年最大值取样方法所得数据相互独立,所以采用 Mann-Kendall 检验法检测数据的平稳性。

在 Mann-Kendall 检验中,原假设 H_0 的样本

收稿日期: 2022-04-22, 修回日期: 2022-06-08

基金项目: 国家高校基本科研业务费专项(B220202031)

作者简介: 谢玖跃(1998-),男,硕士研究生,研究方向为水文水资源, E-mail: 2692790800@qq.com

通讯作者: 胡义明(1986-),男,博士、副教授,研究方向为水文水资源, E-mail: yiming.hu@hhu.edu.cn

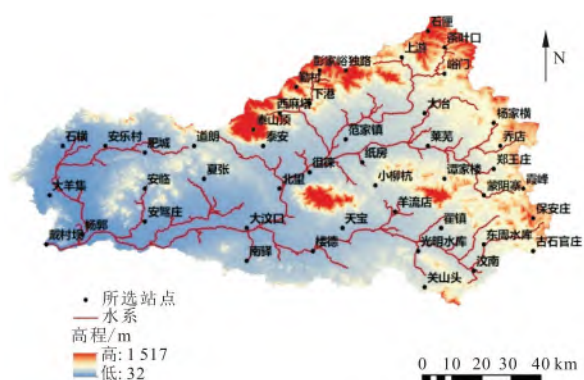


图 1 大汶河流域站点分布

Fig. 1 Distribution of stations in Dawen River Basin

系列无明显变化趋势。备择假设 H_1 为双边检验,通过标准化统计量 S 得到统计量 Z 。在给定的 α 置信水平上,若 $|Z| > Z_{(1-\alpha)/2}$ (α 取 5%,对应的 $Z_{(1-\alpha)/2}$ 为 1.96) 时,则样本系列趋势变化显著,否则不显著;当 $Z > 0$ 时表示上升趋势, $Z < 0$ 时表示下降趋势。

2.2.2 地区线性矩法

地区线性矩法是线性矩法与地区分析法的结合,使用线性矩法进行参数估计,通过水文气象一致的准则划分一致区,并为各一致区选择最优分布线型,再运用地区分析法求得站点设计值。

(1) 线性矩法。将次序统计量按一定的线性组合来计算矩,并将其定义为线性矩(简称 L -矩)^[8]。与常规矩类似,样本线性矩系数定义为均值(L -mean), l_1 ; 线性离势系数(L - C_V), $t = l_2/l_1$; 线性偏态系数(L - C_S), $t_3 = l_3/l_2$; 线性峰度系数(L - C_K), $t_4 = l_4/l_2$ 。在计算区域线性矩系数时,以一致区内各雨量站样本系列长度为权重得到区域线性离势系数 t^R 、区域线性偏态系数 t_3^R 和区域线性峰度系数 t_4^R 。

(2) 水文气象一致区划分。水文气象一致区的划定主要从气象相似性、水文相似性及不和谐检验三方面进行:①气象相似性。一致区内的站点具有相似的气候背景,产生暴雨的水汽入流和成因背景需一致。②水文相似性。一致区内各站点的统计参数 L - C_V 和 L - C_S 在一定的容忍度(H)内。本文采用线性离势系数 L - C_V 离散程度的异质性检验指标 H_1 判断分区的一致性,具体做法见文献[2]。当 $-2 < H_1 < 1$ 时表示研究区为一致区;当 $1 < H_1 < 2$ 时表示可能为异质区;当 $H_1 > 2$ 时表示为异质区;当 $H_1 < -2$ 时表示区域内站点可能存在大量相关性。③不和谐检验。检验一致区内是否存在不和谐的站点, HOSKING J R M 等^[2]给出了不和谐系数(D_i)计算方法及 D_i 临界值表。若站点的 D_i 小于临

界值,则表明该站点与分区内其他站点为和谐,反之则认为其为奇异站点。

(3) 一致区线分布型的选择。选择常用的 3 参数分布(包括广义逻辑斯蒂分布(GLO)、广义极值分布(GEV)、广义正态分布(GNO)、广义帕累托(GPA)和皮尔逊 III 型分布(P-III))作为一致区的备择分布。为一致区优先分布时,以蒙特卡罗模拟检测为主要方法,以样本线性矩均方误差检测和实测数据检验为辅助方法:①蒙特卡罗(Monte-Carlo)模拟检测(Z^{DIST})。该检测通过比较区域平均的线性峰度系数 t_4^R 与备择分布的线性峰度系数 τ_4^R 之间的差异来优选分布,统计量 Z^{DIST} 的具体公式见文献[2]。当 $|Z^{\text{DIST}}| \leq 1.64$ 时,则认为拟合结果合理可接受。 $|Z^{\text{DIST}}|$ 越接近于零,表明候选分布函数的拟合效果越好。②样本线性矩均方误差检测(R_{RMSE})。使用站点真实样本系列的 L - C_S 和 L - C_K 与备择分布的 L - C_S 和 L - C_K 的差距来优选分布。统计量 R_{RMSE} 的具体公式见文献[9],具有最小 R_{RMSE} 值的分布即为最佳分布函数。③实测数据检验。计算一致区内所有样本实际资料的经验频率 F_{i,T_j} 与理论频率 P_{T_j} 之间的相对误差 R_{RE} , R_{RE} 的具体公式见文献[9]。计算得到的 R_{RE} 值越小,表明当前分布的拟合效果越好。判别指标的优先级顺序为 $Z^{\text{DIST}} > R_{\text{RMSE}} > R_{\text{RE}}$ 。

(4) 站点设计值计算。地区分析法将一致区内的站点降雨系列分为“地区分量”(反映区域共有降雨特性)和“站点分量”(反映站点特有降雨特性),在每个一致区内推求一条最优的无量纲的地区频率增长曲线,将其与“站点分量”相结合,即得该站点的设计暴雨值。其公式为:

$$Q_{T,i,j} = q_{T,i} \bar{x}_{i,j} \quad (1)$$

式中, $Q_{T,i,j}$ 为第 i 区第 j 站重现期为 T 的设计暴雨值; $q_{T,i}$ 为第 i 区重现期为 T 时的地区频率增长因子; $\bar{x}_{i,j}$ 为第 i 区第 j 站的多年平均降雨量。

3 结果与分析

3.1 数据的统计检验

对大汶河流域不同时段(6、12、24 h 和 3 d)共 137 个样本系列进行趋势检验,未通过 Mann-Kendall 趋势检验的样本系列具体信息见表 1。由表 1 可看出,6 个样本系列的 Z 统计量大于 1.96,且均大于 0,即这些样本系列呈显著增加趋势,无法通过趋势检验。由此可见,137 个样本系列中有 131 个系列无趋势,合格率达到 95.6%。

表 1 未通过 Mann-Kendall 趋势检验的样本系列
Tab. 1 Sample series that failed the Mann-Kendall trend test

站名	时段	Z 统计量	$Z_{(1-\alpha)/2}$	趋势
彭家峪	3 d	2.49	1.96	显著增加
徂徕	24 h	2.14	1.96	显著增加
翟镇	12 h	2.02	1.96	显著增加
	3 d	2.33	1.96	显著增加
天宝	6 h	2.51	1.96	显著增加
	12 h	2.05	1.96	显著增加

且未通过检验的样本系列的 Z 统计量值与阈值相差不大,因此认为大汶河流域 137 个样本系列满足平稳性的要求,可用于后续基于地区线性矩法的暴雨频率计算。

3.2 水文气象一致区划分

从大汶河流域的地形和气候背景上考虑水文气象一致区的初步划分,将北部、东部和西部划分不同的一致区,且山脉迎风面和背风面之间要进行区分。为使分区内的 $L-C_V$ 和 $L-C_S$ 在一定的容忍度内,尽量将 $L-C_V$ 和 $L-C_S$ 接近的站点划分为一个子区,以 3 d 时段的 $L-C_V$ 和 $L-C_S$ 为例,其空间分布见图 2。



图 2 3 d 时段 $L-C_V$ 和 $L-C_S$ 空间分布图

Fig. 2 Spatial distribution of $L-C_V$ and $L-C_S$ in 3 d duration

通过综合地形、迎风坡、背风坡、水汽入流等气象因素及站点 $L-C_V$ 、 $L-C_S$ 空间分布情况,对分区进行多次调整,最终将 4 个时段均分为相同的 3 个子区见图 3。

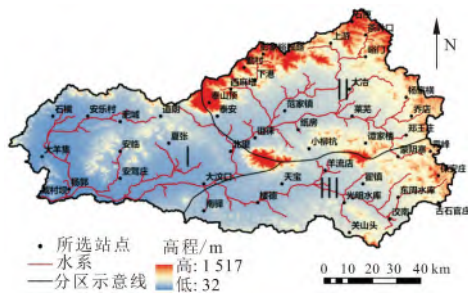


图 3 各时段分区结果

Fig. 3 Partition results of each time period

进一步对四个时段的分区结果进行异质性检验,表 2 为各水文气象一致区异质性检验结果。由表 2 可知,各时段所有子区的 H_1 值最大为 0.259,最小为-1.927,即所有划分的子区可视为水文气象一致区。此外,各时段所有子区的不和谐指标值均未超出各区的临界值,表明各分区内无不和谐的站点。因此,所划分的水文气象一致

表 2 各水文气象一致区异质性检验结果
Tab. 2 Heterogeneity test results of each hydrometeorological consistent region

子区	H_1 值			
	6 h	12 h	24 h	3 d
I 区	-0.195	-0.377	0.259	-0.645
II 区	-0.986	-1.025	-1.297	-1.927
III 区	-1.767	-1.594	-1.583	-1.302

区是合理的。

3.3 一致区线型选择

表 3 为大汶河流域各时段水文气象一致区拟合优度检验结果,根据判别指标 $Z^{\text{DIST}} > R_{\text{RMSE}} > R_{\text{RE}}$ 的优先级顺序,最终得到 4 个时段一共 12 个一致区的最优分布线型。其中,选择 GEV 为最优分布的一致区为 7 个,选择 GNO 与 P-III 为最优分布的一致区分别为 2 个,选择 GLO 为最优分布的一致区为 1 个。

表 3 大汶河流域水文气象一致区拟合优度检验结果
Tab. 3 Goodness of fit test results of hydrometeorological consistent region in Dawen River Basin

检测指标	分布线型	6 h			12 h			24 h			3 d		
		I 区	II 区	III 区	I 区	II 区	III 区	I 区	II 区	III 区	I 区	II 区	III 区
Z^{DIST}	GLO	1.84	0.20	1.37	3.10	0.89	1.08	3.24	1.22	1.05	3.17	4.32	3.10
	GEV	0.11	0.57	0.15	1.06	0.06	0.61	1.04	0.25	0.55	0.05	1.86	0.54
	GNO	0.51	1.38	0.55	0.66	0.74	0.78	0.70	0.55	0.86	0.34	0.79	0.02
	PE3	1.38	2.76	1.36	0.24	2.10	1.31	0.13	1.92	1.55	1.30	1.14	1.22
	GPA	4.51	2.81	3.66	3.55	2.31	4.27	3.84	2.40	4.13	7.02	4.15	5.28
	R_{RMSE}	GLO	0.07	0.05	0.05	0.09	0.06	0.07	0.08	0.08	0.05	0.07	0.06
R_{RE}	GEV	0.05	0.05	0.02	0.06	0.04	0.06	0.05	0.06	0.04	0.05	0.05	0.04
	GNO	0.05	0.05	0.03	0.06	0.04	0.06	0.05	0.06	0.05	0.05	0.04	0.04
	PE3	0.06	0.09	0.04	0.06	0.06	0.07	0.06	0.08	0.06	0.06	0.04	0.04
	GPA	0.09	0.08	0.08	0.07	0.07	0.11	0.07	0.08	0.10	0.10	0.06	0.08
	GLO	0.14	0.18	0.13	0.15	0.18	0.16	0.15	0.21	0.15	0.13	0.13	0.11
	GEV	0.14	0.17	0.14	0.15	0.17	0.15	0.15	0.21	0.16	0.12	0.11	0.10
优选分布	GNO	0.15	0.19	0.14	0.15	0.16	0.16	0.14	0.20	0.17	0.12	0.11	0.10
	PE3	0.17	0.27	0.15	0.18	0.19	0.17	0.18	0.18	0.18	0.12	0.10	0.10
	GPA	0.28	0.28	0.20	0.18	0.20	0.25	0.16	0.19	0.34	0.29	0.11	0.14
	GNO	0.28	0.28	0.20	0.18	0.20	0.25	0.16	0.19	0.34	0.29	0.11	0.14

3.4 地区极值降雨设计值计算

确定各一致区分布线型后,即可求出其频率增长曲线,由式(1)计算可得到各一致区重现期为 2、5、10、20、50、100 年下的站点设计值,发现同一站点,重现期越长,地区频率增长因子越大、设计值越大;同一重现期下,站点均值越大,设计值越大。

3.5 单站线性矩法与地区线性矩法的对比

基于单站线性矩法与地区线性矩法得到不同时段下,重现期为 2、5、10、20、50、100 年的设计值结果比较见图 4。

由图 4 可看出,各时段单站与区域设计值的线性相关关系较好, R^2 值均在 0.86 以上。当单站与区域设计值较小时,散点均位于 45° 线附近,表明两者差距很小。随单站与区域设计值的增大,即重现期越长,散点偏于 45° 线的程度就越明

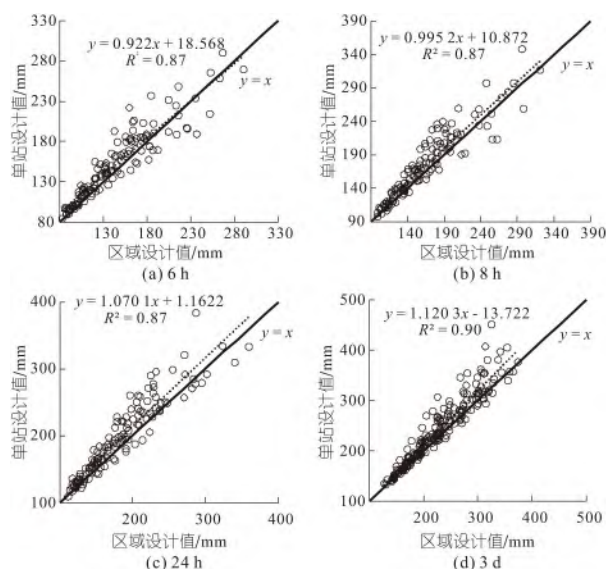


图 4 不同时段下单站设计值与区域设计值结果比较

Fig. 4 Comparison of single station design value and regional design value in different durations

显,表明两者差距越大。产生这种现象的原因可能是对单站线性矩法结果,随重现期增加,站点的样本系列长度会对设计值的不确定性产生极大影响,若样本系列过短,则大重现期下的设计值将变得“不可靠”。

因此,选取各时段典型代表站的样本系列,绘制站点样本系列长度与平均绝对相对误差之间的关系曲线见图 5。由图 5 可知,单站与区域设计值平均绝对相对误差随站点样本系列长度的增加而减小。因此,当单站样本系列较短时,可利用地区线性矩法进行频率分析计算,以提高极值降雨设计值的准确性。

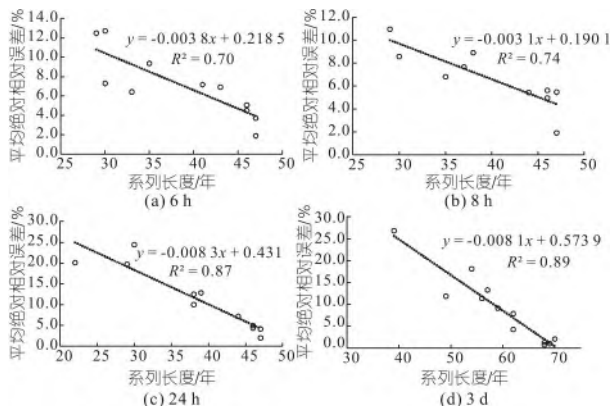


图 5 站点样本系列长度与平均绝对相对误差关系图

Fig. 5 Relationship diagram between sample series length and average absolute relative error

3.6 极值降雨设计值空间分布图

通过 Arcgis 软件中的克里金法对各时段重现期为 50 年的降雨设计值进行空间插值,得到 6、12、24 h 和 3 d 时段下重现期为 50 年的极值降雨设计值空间分布情况:不同时段极值降雨设计

值空间分布态势基本相似,从东北向西南逐渐减小,东部与北部山脉的迎风坡区大、西部平原区小。此外,单时段大汶河流域的极值降雨设计值分布不均,以 24 h 50 年为例,其最大值可达 302 mm,最小值则仅为 174 mm。这与大汶河流域复杂的地势密切相关,流域东北部山区极值降雨设计值明显高于南部与西部的平原区,且受地形抬升影响,泰山东南坡、徂徕山与新甫山东北坡极值降雨设计值最大。

4 结论

a. 大汶河流域 4 种时段共 137 组年暴雨极值系列基本满足地区线性矩法对数据的平稳性要求,通过水文气象一致区分析,可将大汶河流域暴雨分为 3 个一致区,一致区的最优分布线型以 GEV 为主。

b. 单站线性矩法与地区线性矩法的对比结果表明,当单站样本系列较短时,应利用地区线性矩法进行频率分析计算,以提高单站设计值估计的可靠性。

c. 大汶河流域暴雨设计值的空间极不均匀但分布态势基本相似,大体上均呈由东北向西南逐渐减小,东部与北部山脉的迎风坡区大、西部平原区小的特点。

参考文献:

- [1] 宋西文. 大汶河流域设计洪水分析研究[D]. 南京: 河海大学, 2006.
- [2] HOSKING J R M, WALLIS J R. Regional frequency analysis; an approach based on L-moments [M]. New York: Cambridge University Press, 1997.
- [3] 陈希, 林炳章, 吴俊梅, 等. 水文气象分区线性矩法在广西暴雨频率分析中的应用[J]. 水电能源科学, 2014, 32(11): 5-9.
- [4] 廖一帆, 林炳章, 丁辉. 广东省小时时段的暴雨高风险区划[J/OL]. 水资源保护, 2021: 1-12. [2021-12-27]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1356.TV.20210816.1610.006.html>.
- [5] 刘梦洋, 尹义星, 韩翠, 等. 基于地区线性矩法的江西省极值降水频率分析[J]. 水电能源科学, 2018, 36(9): 1-5.
- [6] 陈元芳, 王庆荣, 沙志贵, 等. 线性矩法在长江中下游区域水文频率计算中的应用[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2003(2): 207-211.
- [7] 吴俊梅. 地区线性矩法在太湖流域暴雨频率分析中的应用[C]//第 33 届中国气象学会年会 S9 水文气象灾害预报预警, 2016: 230-241.

(下转第 34 页)

观需求。但由于推荐的景观下泄生态流量小于多年平均流量,因此在该流量下泄时,河道两岸有一定宽度的河漫滩出露,因此可考虑在出露的河漫滩部分采取植被种植等景观措施来进一步提升减水河道景观质量。

c. 随着旅游业的不断开发,该河段景观需求将逐渐增大,后续研究中将考虑年内旅游淡季及旺季对河流景观的需求,有针对性地进行景观需水量研究,为景观下泄流量调度提供研究支撑。

参考文献:

- [1] 国家能源局. 水电工程生态流量计算规范: NB/T 35091-2016[S]. 北京: 中国电力出版社, 2016.
- [2] 吴文佑, 彭金涛, 刘湘春. 水力开发河流景观质量评价初探[J]. 水电站设计, 2011, 27(4): 72-76.
- [3] 陆菲. 苏州古城区河流景观质量分析与评价——以干将河为例[D]. 苏州: 苏州大学, 2016.
- [4] 栾丽, 杨玖贤, 谭平, 等. 基于模糊层次分析法的河流景观需水量评价指标体系的建立[J]. 水电站设计, 2012, 28(4): 80-83.

Calculation Method of Water Demand for Water-reduced River Landscape Under Condition of Hydropower Development

WU Zi-han¹, LU Yun¹, CHENG Bi-xin², YAN Xin², QING Jie², SUN Gan³

(1. State Key Laboratory of Hydraulics and Development and Protection of Mountain Rivers, Sichuan University, Chengdu 610065, China; 2. Shanghai Survey and Design Institute, Shanghai 200093, China; 3. Three Gorges Construction (Group) Co., Ltd., Chengdu 610041, China)

Abstract: In order to explore the calculation method of water demand of water-reduced river landscape under hydropower development, combined with the data of hydrology and social economy in the region, this paper compared the changes of landscape characteristics after water reduction in similar projects. Taking the water reduction channel caused by Danba Hydropower Station as an example, the landscape evaluation factors were chosen comprehensively. Considering human visual effects, the landscape water demand evaluation system was established. A calculation method for the landscape water demand of the water-reduced reaches caused by the construction of hydropower stations was proposed. Based on the hydraulic model, the landscape indicators of each river section were calculated according to the determined index system, and the water volume required for the wide valley section, canyon section and county river section to meet the landscape requirements of water-reduced river channels is 70.4 m³/s, 64.8 m³/s, 50.7 m³/s. The 70.4 m³/s is taken as the landscape water demand of the whole reach of the reduced water.

Key words: water-reduced river course; landscape water demand; river landscape evaluation; hydraulic model

(上接第4页)

- [8] HOSKING J R. L-moments: Analysis and estimation of distributions using linear combinations of order statistics[J]. Journal of the royal statistical society: series B(methodological), 1990, 52(1): 105-124.
- [9] LIN B, BONNIN G M, MARTIN D L, et al. Re-

gional frequency studies of annual extreme precipitation in the United States based on regional L-moments analysis[C]//World Environmental and Water Resource Congress 2006: Examining the Confluence of Environmental and Water Concerns. 2006: 1-11.

Frequency Analysis of Extreme Rainfall in Dawen River Basin Based on Regional L-Moments Method

XIE Jiu-yue¹, GUO Cheng², WANG Qin², HU Yi-ming¹, WANG Jun¹

(1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Shandong Hydrology Center, Jinan 250014, China)

Abstract: Taking Dawen River Basin in Shandong Province as an example, Mann-Kendall method was used to analyze the consistency of the 6 h, 12 h, 24 h and 3 d annual extreme rainfall data. The regional linear moment method was used to infer the design value of the site rainstorm, and the regional design value was compared with the single-station linear moment method. The spatial distribution map of the design value of the 50-year rainstorm in Dawen River Basin was drawn. The results show that the Dawen River Basin can be divided into 3 hydrometeorological homogeneous regions, and the optimal distribution frequency linetype is dominated by the generalized extreme-value distribution (GEV). The difference (mean absolute relative error) between the results of single-station L-moment frequency analysis method and regional L-moments frequency analysis method decreases with the increase of the length of the sample series, and the larger the return period is, the greater the gap is; The spatial distribution of the designed rainstorm values in Dawen River Basin is not uniform, but the distribution trend of each period is basically similar.

Key words: regional L-moments method; hydrometeorological homogeneous region; temporal and spatial distribution of extreme rainfall design value; Dawen River Basin