

文章编号: 1006-4710(2014)03-0357-09

不同气候区代表性江河径流变化特征分析

乔雪媛¹, 石朋^{1,2}, 陈喜^{1,2}, 张志才¹, 瞿思敏¹, 吴森¹

(1. 河海大学 水文水资源学院, 江苏 南京 210098;

2. 河海大学 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098)

摘要: 为探索不同气候区江河径流变化特征, 基于渭河、淮河及北江三大流域共 17 个水文站的逐日径流观测资料, 分析了径流量的年内分配不均匀系数、径流集中度与集中期的变化特征; 采用 Mann-Kendall 非参数统计检验方法, 分析了月、年径流量的变化趋势。结果表明: ①北江流域径流年内分配不均匀系数呈减小趋势, 渭河流域除林家村站外, 与淮河流域各站点的年内分配不均匀系数皆无明显变化趋势; ②三大流域的径流集中度与不均匀系数变化规律一致, 集中期则年内分布较稳定, 基本呈一定的周期性交替变化; 渭河流域年径流呈显著的衰减趋势外, 淮河和北江的实测年径流量分别表现为微弱的衰减和增加趋势。对上述径流变化特征进行响应分析, 对应于三大流域的气候要素变化, 其径流表现出一致性时空变化, 其中渭河和北江流域受到人类活动的影响较为突出。

关键词: 径流变化; 集中度; 集中期; 渭河流域; 淮河流域; 北江流域

中图分类号: TV121.2 **文献标志码:** A

Analysis of the change characteristic of river runoff in different climate zones

QIAO Xueyuan¹, SHI Peng^{1,2}, CHEN Xi^{1,2}, ZHANG Zhicai¹, QU Simin¹, WU Miao¹

(1. College of Water Resources and Hydrology, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: In order to probe into river runoff changing characteristics in different climate zones and based on the daily runoff data from 17 hydrological stations in Wei River basin, Huai River basin and Beijiing basin, this paper analyzes the change of annual runoff coefficients of non-uniformity, concentration ratio and concentration period. Mann-Kendall non-parameter statistical test is utilized to analyze the variation trend of monthly and annual runoff series. The results show that: ① the coefficients of non-uniformity appear to decrease in Beijiing basin while in Wei River basin, except Linjiacun station, the coefficient doesn't show obvious change trend, so does the Huai River basin. ② In these three basins, the distribution of concentration period in a year is stable and close to a periodic variation. Apart from Wei River basin's significant attenuation trend in annual runoff, the measured runoff data respectively show a weak decrease and an increasing trend in Huai River basin and Beijiing basin. Reactions to climate change and human activities that cause runoff variations are also analyzed here. It's shown that consistent changes take place between the runoff and precipitation and the human effect upon runoff behaviors in Wei and Beijiing basins cannot be ignored.

Key words: runoff change; concentration ratio; concentration period; Wei River basin; Huai River basin; Beijiing basin

在全球气候变暖的背景之下, 日益剧烈的人类活动, 导致流域下垫面和水文循环特征发生了巨大变化^[1]。极端气候、水文事件的出现日益频繁, 对全

球和区域的水资源与水安全构成了严重威胁, 并直接影响到人类社会的可持续发展^[2]。认识一个区域的径流变化规律, 对研究该区水量平衡和合理开发

收稿日期: 2014-03-02

基金项目: 国家自然科学基金重大资助项目(51190090); 国家自然科学基金资助项目(41371048)。

作者简介: 乔雪媛, 女, 硕士生, 研究方向为水文水资源。E-mail: imqxxxyy@gmail.com。

石朋, 男, 副教授, 博士, 研究方向为流域水文模拟。E-mail: ship@hhu.edu.cn。

水资源具有重要意义。而一个区域的干旱和洪涝灾害,又与该区域河川径流量的年内分配密切相关,因此在关注区域径流年内变化的同时,也应该将年内变化纳入研究范围^[3]。联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)第四次评估报告指出,在全球持续变暖的情况下,探索自然变化和人类活动影响下的水资源演变规律是一个新的水科学问题。国内外许多学者在这一方面做了大量的研究工作。N M Velpuri 和 G B Senay^[4]对 1950—2009 年期间美国共计 62 个城市流域的月降水、径流和径流系数资料进行了季节性 Mann-Kendall 趋势检验,研究所覆盖的 21 个主要城市中心分别发生了不同程度的趋势变化。Daniela Anghileri^[5]针对阿尔卑斯山流域 1974—2010 年间的实测资料,提出了使用 MASH 以探索水文气候因子的变化趋势以及对流域水资源的影响。刘健等^[6]利用鄱阳湖流域 1955—2003 年 3 个主要水文站(外洲、李家渡、梅港)月径流实测资料,采用统计方法和小波方法,分析近 50 年该流域径流的年内、年际和周期变化特征。魏红义等^[7]以渭河流域华县站 1956—2000 年径流资料为基础,运用 R/S 分析法,对渭河流域径流序列进行了趋势分析。刘睿等^[8]以淮河流域上游漯河站为研究对象,采用 Mann-Kendall 法、里海哈林法和滑动游程检验法对 1957—2010 年的年降雨量和年径流深序列跳跃变异进行诊断。时下也有许多针对全国大小流域径流变化的相关研究,绝大多数都是以单个流域作为研究对象,而少有研究者将几个各具代表性的流域放在一起对照分析,Gu Ying^[9]等虽整理总结了我国主要河流的径流变化趋势,但并没有进行过多的细节分析。为更具有参照性地分析流域径流变化,本文选取渭河、淮河和北江三个处于不同气候区的代表性流域,通过分析年内分配不均匀系数、径流集中度和集中期的时空变化规律,以此探讨三大流域近年来的径流变化特征,为流域水利工程建设、生态环境保护和水资源合理利用提供科学依据,具有重要的理论意义和现实意义。

1 研究方法

1.1 不均匀系数、集中度、集中期

由于气象因素(气温、降水等)存在季节性变化,导致径流也随之发生季节性的变化。为反映径流在年内分配的不均匀程度,本文采用径流年内分配不均匀系数^[10]来分析径流的年内变化。年内分配不均匀系数的计算公式为:

$$C_v = \sigma/\bar{R} \quad (1)$$

其中:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{12} \sum_{i=1}^{12} (R_i - \bar{R})^2}$$

$$\bar{R} = \frac{1}{12} \sum_{i=1}^{12} R_i$$

式中, R_i 为年内各月份径流量; \bar{R} 为年内月平均径流量; C_v 为不均匀系数,其值越大,表明年内各月份之间径流量差距越大,年内分配越不均匀^[11]。

集中度和集中期的计算则是将一年中各月的径流量作为向量,其径流量的大小为向量长度,所处月份作为向量方向^[12]。径流集中度指各月径流量按月以向量方式叠加,其各分量的合成向量占年径流量的百分数,反映径流量在年内的集中程度。集中期是指各月径流向量合成后向量所指方向对应的月份,反映全年径流量集中的重心指向的月份^[13]。1~12月份对应的向量方位角分别为: $0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, \dots, 360^\circ$,将每个月的径流量分解到 x 和 y 两个方向上,得到 x 和 y 方向的分量分别为 R_x 和 R_y :

$$\begin{cases} R_x = \sum_{i=1}^{12} R_i \cos\theta_i \\ R_y = \sum_{i=1}^{12} R_i \sin\theta_i \end{cases} \quad (2)$$

于是径流的合成量 $R = \sqrt{R_x^2 + R_y^2}$,集中度 C_d 与集中期 D 的计算公式如下:

$$C_d = R / \sum_{i=1}^{12} R_i \quad (3)$$

$$D = \arctan(R_y/R_x) \quad (4)$$

1.2 Mann-Kendall 非参数统计检验法

Mann-Kendall 检验法(以下简称为 MK 法)是一种时间序列趋势的检验方法。对于时间序列 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$,定义检验统计量 S 为^[14]:

$$S = \sum_{i < j} a_{ij} \quad (5)$$

式中:

$$a_{ij} = \text{sgn}(x_j - x_i) = \begin{cases} 1 & x_j > x_i \\ 0 & x_j = x_i \\ -1 & x_j < x_i \end{cases}$$

假设各变量独立同分布,则统计量 S 近似服从正态分布,其均值、方差分别为:

$$E(S) = 0 \quad (6)$$

$$\text{Var}(S) = \frac{n(n-1)(2n-5)}{18} - \sum_{j=1}^m \frac{t_j(t_j-1)(2t_j+5)}{18} \quad (7)$$

式中, m 为序列中秩次相同的组数; t_j 为第 j 个秩次相同的组中所包含观测值的个数。

当 $n > 10$ 时,用式(8)计算 MK 法的统计量。

$$U_c = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & S > 0 \\ 0 & S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & S < 0 \end{cases} \quad (8)$$

当样本数量 n 比较大时, U_c 近似服从标准化正态分布。假设序列无趋势,给定显著性水平 α ,则根据 $|U_c|$ 与临界值 $U_{\alpha/2}$ 的比较结果判定序列趋势的统计显著性^[15]。

2 研究区概况与资料

2.1 流域概况

渭河是黄河流域面积最大、水量最多的第一大支流,发源于甘肃省渭源县鸟鼠山,全长 818 km。渭河流域地处东经 $103.5^\circ \sim 110.5^\circ$ 和北纬 $33.5^\circ \sim 37.5^\circ$ 之间,流域总面积 13.48 万 km^2 ,北部为黄土高原,南部为秦岭山区。流域地处大陆性季风气候区、干旱地区和湿润地区的过渡地带,春暖干旱,夏季热而多雨且有伏旱,秋凉湿润,冬季气候干燥寒冷、降水稀少。流域多年平均降水量 610.4 mm,受地形等因素影响,流域降水分布由东南向西北递减,南部秦岭山麓降水充沛,最大年降水量在 1 000 mm 以上,平原地区年降水量约为 500 mm^[16]。

淮河流域位于长江和黄河两流域间(东经 $111.9^\circ \sim 121.8^\circ$,北纬 $30.9^\circ \sim 36.6^\circ$),跨湖北、河南、安

徽、江苏、山东五省,流域面积 27 万 km^2 ,是南北气候带的自然分界区。淮河以北属暖温带区,以南属亚热带区,该地区四季分明,雨热同季,多年平均降水量 888 mm 左右,由于影响流域降水的水汽主要来自孟加拉湾和太平洋,因此南、东部的降水较北、西部多^[17]。淮河流域地形总态势为西高东低。流域西部、南部和东北部为山区、丘陵,约占总面积的三分之一;其余为广阔平原,约占三分之二。

北江隶属珠江水系,是珠江流域三大河流之一,发源于江西省信丰县石碣大茅山的浈江。浈江向南流经广东省的南雄、始兴,至韶关市与武江汇合后称为北江。流域面积 4.67 万 km^2 ,占珠江流域总面积的 10.3%。北江流域属亚热带季风性气候。北江流域径流补给的主要方式是降水,多年平均降水量 1 800 mm,自南向北递减,变化范围在 1 300~2 400 mm 之间^[18]。北江上源的浈江,除源头 8 km 左右为山地河流,大部分河段蜿蜒流动于始兴—南雄盆地与仁化—丹霞盆地中。盆地里的地形以和缓的丘陵与平原为主,地势较平缓,河流呈羽状水系。

由上述三个流域基本概况可知,渭河、淮河、北江分别位于我国不同地理位置,有显著的气候差异与地貌差异,具有代表性,故选取这三个流域进行径流变化特征分析。

2.2 资料情况

渭河流域、淮河流域、北江流域各站点实测径流资料序列如表 1 所示。

表 1 三大流域各站点实测径流资料序列
Tab.1 Data series of measured runoff in three basins

流域	站点	起止年份	流域	站点	起止年份	流域	站点	起止年份
渭河流域	华县	1936—2007	淮河流域	班台	1952—2003	北江流域	长坝	1954—2008
	林家村	1935—2008		蒋家集	1956—2003		高道	1955—2004
	咸阳	1957—2007		漯河	1951—2010		横石	1954—1998
	魏家堡	1945—2008		沙颍河	1951—2003		犁市	1956—2008
	张家山	1932—2008		王家坝	1953—2008		石角	1952—2008
				息县	1951—2003			
				新蔡	1952—2003			

在考虑资料系列的代表性等综合因素后,选取了渭河、淮河、北江三个流域片共 17 个站点的逐日径流资料进行研究。其中,渭河流域选取了华县、林家村、咸阳、魏家堡、张家山 5 个控制站,淮河流域选取了班台、蒋家集、漯河、沙颍河、王家坝、息县、新蔡 7 个控制站,北江流域选取了长坝、高道、横石、犁市、石角 5 个控制站。表 1 列出了各控制站选取径流资料序列的起止年份。本文研究对象中渭河侧重于中下游,淮河侧重于上游片的分析。

3 径流特征及趋势分析

3.1 年内分配特征

利用 17 个站点的逐日径流资料,按式(1)计算各个站点不同时期的年内分配不均匀系数,以年代划分,经整理后列于表 2。

按式(3)和式(4)分别计算各站点的径流集中度和集中期,按同样的划分标准,列于表 3。

表2 三大流域各站点实测径流量年内分配不均匀系数 C_v
 Tab.2 The non-uniform coefficient of annual runoff distribution (C_v) in each station in three basins

流域	站点	1950年以前	1951—1960	1961—1970	1971—1980	1981—1990	1991—2000	2000年以后
渭河流域	华县	0.81	0.89	0.77	0.94	0.91	0.82	0.86
	林家村	0.69	0.80	0.70	0.98	1.12	1.19	1.31
	咸阳		0.95	0.80	0.93	0.91	0.78	0.99
	魏家堡	0.72	0.88	0.81	1.02	1.02	0.89	1.10
	张家山	1.11	1.17	0.90	1.22	0.96	1.21	1.12
淮河流域	班台		1.35	1.22	1.17	1.09	0.97	1.24
	蒋家集		0.97	1.05	1.02	1.21	1.07	1.17
	漯河		1.41	1.08	1.24	1.06	0.90	1.04
	沙颍河		1.27	0.98	1.38	1.08	1.01	1.25
	王家坝		1.02	0.81	0.91	0.87	0.94	0.95
	息县		1.10	1.14	0.99	1.07	0.88	1.14
	新蔡		1.40	1.05	1.16	0.98	1.11	1.28
北江流域	长坝		0.87	0.86	0.73	0.72	0.69	0.68
	高道		0.96	0.90	0.83	0.86	0.90	
	横石		0.92	0.87	0.85	0.85	0.72	
	犁市		0.88	0.82	0.73	0.80	0.80	0.71
	石角		0.90	0.83	0.75	0.77	0.72	0.77

表3 三大流域各站点实测径流量集中度(C_d)与集中期(D)
 Tab.3 Concentration ratio (C_d) and period (D) of measured runoff in three basins

流域	站点	1950年以前	1951—1960	1961—1970	1971—1980	1981—1990	1991—2000	2000年以后
渭河流域	华县	0.41/8.8	0.45/8.4	0.32/7.5	0.44/8.5	0.49/8.4	0.42/7.7	0.46/9.5
	林家村	0.36/8.6	0.43/8.3	0.35/8.5	0.49/8.3	0.58/7.9	0.58/7.7	0.65/8.7
	咸阳		0.47/8.0	0.33/7.2	0.43/8.5	0.49/8.4	0.40/7.6	0.50/9.3
	魏家堡	0.34/8.6	0.46/8.5	0.39/8.6	0.49/8.4	0.53/8.1	0.46/7.5	0.56/9.1
	张家山	0.56/8.5	0.54/8.1	0.46/8.5	0.60/8.6	0.52/8.4	0.58/7.9	0.61/8.6
淮河流域	班台		0.59/7.9	0.53/7.7	0.51/7.6	0.50/8.9	0.48/7.3	0.59/7.2
	蒋家集		0.47/6.8	0.36/9.0	0.45/6.9	0.52/8.0	0.39/7.5	0.59/6.6
	漯河		0.59/7.9	0.45/8.4	0.48/8.0	0.47/8.1	0.50/7.9	0.48/8.1
	沙颍河		0.52/7.7	0.41/8.5	0.57/8.2	0.48/8.1	0.50/7.3	0.52/8.0
	王家坝		0.51/7.9	0.37/6.8	0.45/7.7	0.43/7.4	0.47/7.4	0.41/6.6
	息县		0.48/7.1	0.48/7.9	0.45/7.1	0.51/8.0	0.37/6.9	0.53/7.2
	新蔡		0.62/8.1	0.47/7.8	0.52/7.6	0.46/8.7	0.51/7.4	0.55/7.2
北江流域	长坝		0.48/6.2	0.45/6.1	0.40/6.2	0.39/5.7	0.38/6.2	0.36/6.4
	高道		0.56/6.1	0.48/6.2	0.48/6.1	0.49/5.8	0.48/6.2	
	横石		0.52/6.2	0.47/6.3	0.46/6.3	0.47/6.2	0.42/6.1	
	犁市		0.45/5.9	0.43/5.9	0.39/6.1	0.42/5.6	0.41/6.0	0.39/7.2
	石角		0.51/6.3	0.46/6.5	0.44/6.3	0.43/5.9	0.43/6.4	0.46/6.6

说明:表中数据为 a/b 的形式,其中“/”左边的数字 a 表示集中度 C_d 的值,“/”右边的数字 b 表示集中期 D 的值。

由表2可以看出以下几点。

1) 三大流域的径流年内分配不均性具有明显的地域性差异,北江各站点的 C_v 值皆未超过 1.00,总体上小于淮河和渭河流域的 C_v 值。从大于 1.00 的 C_v 值所占的比例来看,淮河流域的比例要稍高于渭河流域。

2) 年内分配不均匀程度不仅在流域之间存在着明显差异,流域各站点间也呈现不同的差异,如渭

河流域中张家山的 C_v 值始终大于同时期的华县和咸阳站;在淮河流域中仅有班台站一直稍大于同时期的息县站,其它站点之间则无明显的大小关系;北江流域的长坝站 C_v 值亦始终小于同时期的高道和横石站。

3) 在自然因素和人为因素的多重影响下,各个流域的径流年内分配情况在近几十年间也发生了不

同程度的变化,其中淮河流域各站点的 C_v 值年际变化未呈现趋势性,表现为随年代交替变化;渭河流域中除林家村站的不均匀程度有明显的增长趋势,其余 5 个站点的 C_v 值皆为无趋势性的波动变化。而北江流域的分析表明,各站点的年内分配不均匀性皆有减小趋势,且上世纪 70 年代与之前相比有明显的减幅。

从表 3 可以看出以下几点。

1) 渭河流域的集中期稍晚一些,在 7~9 月间波动,淮河流域的集中期在 6 月中下旬至 8 月之间波动,北江流域的集中期稍早一些,处于 5~7 月间。流域各自站点之间总体来说比较接近,相近程度与流域的尺度和所处的地理位置有关,从表 3 可知北江流域各站点的集中期最为接近的。

2) 三大流域的集中期没有随时间变化的明显趋势,又以北江的最为稳定。值得注意的是,渭河流域各站点的集中期都在 2000 年之后达到一个新的峰值。

3) 集中度的规律与不均匀系数一致,北江流域的集中度呈一定的递减趋势,淮河流域的站点皆无明显的变化趋势。

图 1 列举了渭河流域的林家村、华县、张家山三站的不均匀系数和集中度随时间变化趋势图,从图

中可以直观看出,三个站点的 C_v 与 C_d 变化趋势基本吻合,其中,林家村的不均匀程度增加趋势明显,而华县、张家山及其余站点并未呈现出特定趋势。

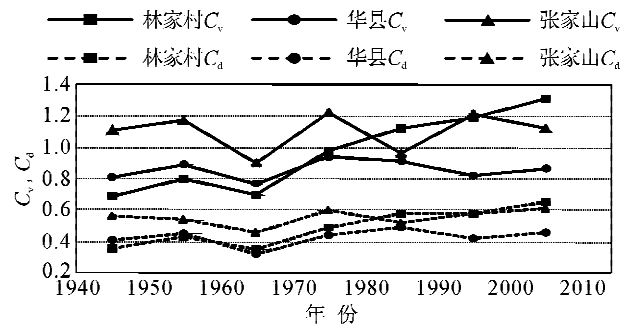


图 1 林家村、华县、张家山不均匀系数(C_v)及集中度(C_d)时间序列变化图

Fig. 1 Variation of C_v and C_d of annual runoff in Linjiacun, Huaxian and Zhangjiashan

3.2 径流年际变化趋势

同样,在气候条件变化和人类活动影响等多重作用下,各流域的年径流量和年内分配也发生了一定变化,采用 MK 非参数统计检验法检验各站点的实测径流量变化趋势及显著性。

按式(8)计算各月份及月平均径流量的 MK 统计量,列于表 4 中,图 2 给出了三大流域月平均 MK 值站点分布图。

表 4 三大流域各站点实测径流量 MK 统计结果

Tab. 4 MK statistical result of measured runoff in each station of three basins

流域	站点	月份												月平均	倾斜度
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
渭河流域	华县	-3.82	-4.09	-3.60	-3.18	-2.30	-1.94	-3.09	-2.23	-3.04	-1.32	-2.46	-3.61	-4.19	-2.86
	林家村	-5.68	-5.54	-5.29	-4.98	-4.13	-4.06	-3.74	-4.34	-4.05	-3.46	-5.94	-6.23	-5.95	-1.19
	咸阳	-3.66	-3.75	-3.15	-3.46	-4.01	-1.48	-2.82	-1.28	-2.48	-1.68	-3.15	-3.44	-3.83	-2.59
	魏家堡	-5.14	-5.11	-4.96	-4.90	-3.70	-2.70	-3.39	-2.74	-2.98	-2.17	-5.03	-5.57	-4.74	-1.73
	张家山	-2.58	-3.19	-3.31	-2.38	-0.04	-1.63	-2.60	-3.18	-2.72	-1.85	-2.83	-3.44	-4.35	-0.43
淮河流域	班台	-0.89	-1.51	-1.11	-1.96	-1.66	0.31	-0.85	-1.39	-1.44	-0.59	-0.65	-0.86	-1.44	-0.79
	蒋家集	-0.77	-0.89	0.17	-1.95	-2.19	0.39	-0.59	-1.31	-1.41	-1.04	-0.90	0.24	-1.69	-0.91
	漯河	-1.43	-1.67	-0.99	-1.73	-1.88	0.34	-0.87	-1.18	-1.19	-0.70	-1.74	-0.90	-2.09	-0.81
	沙颍河	-2.70	-2.60	-2.86	-2.78	-1.51	-0.17	-1.13	-1.59	-2.01	-1.85	-2.03	-1.91	-2.34	-1.21
	王家坝	1.03	-0.05	0.34	-0.83	-0.98	1.11	0.86	0.17	1.54	1.54	1.06	1.42	0.49	0.53
	息县	0.12	0	-0.93	-1.88	-1.46	1.48	0.17	0.42	1.40	1.31	0.51	0.20	0	0.01
北江流域	新蔡	-1.16	-1.41	-1.45	-2.21	-1.72	0.35	-0.48	-1.46	-1.70	-0.65	-0.96	-1.02	-1.14	-0.26
	长坝	2.30	2.00	1.53	0.66	-0.85	-1.70	1.07	1.63	1.51	1.60	1.23	1.49	0.65	0.38
	高道	2.13	1.44	1.76	1.09	-0.48	-0.92	1.50	-0.24	0.05	0.44	0.17	0.57	1.34	1.39
	横石	2.27	1.62	2.31	1.40	-0.29	-1.21	1.06	-0.14	0.57	1.30	0.70	1.56	0.79	3.02
	犁市	1.79	0.86	1.49	0.98	0.67	0.31	2.59	1.91	1.90	1.07	0.84	1.20	2.32	1.55
石角	0.90	0.72	1.15	0.42	-1.51	-1.22	1.21	-0.09	0.18	0.83	0.39	0.92	0.22	0.50	

说明:月平均 MK 统计量为一年 12 个月平均径流的 MK 统计量,并非由每个月的统计量求得平均值。

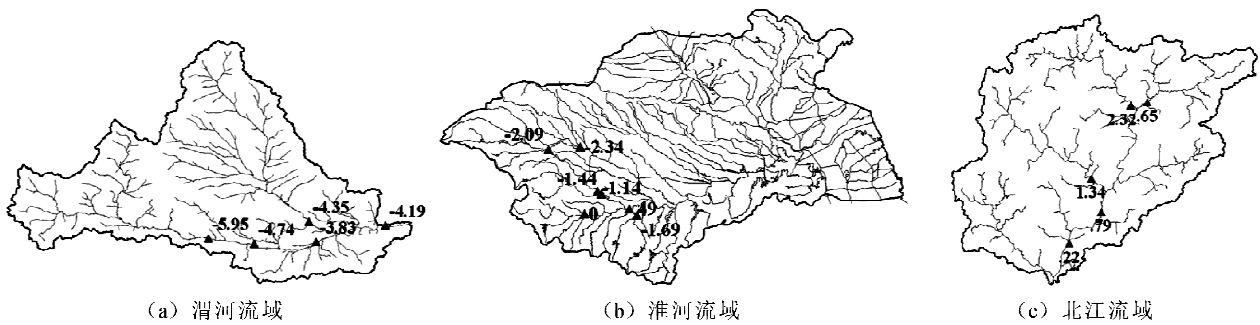


图2 三大流域月平均MK值站点分布图

Fig. 2 The distributions of monthly average MK statistics in three basins

从表4可以看出以下几点。

1) 渭河流域的径流年际变化趋势明显,年序列变化的MK统计量绝对值皆大于2.58,满足99%的显著性检验,呈明显的径流减少趋势,其中又以林家村的趋势最为明显,其统计量达到-5.95。所有测站12个月份的月径流量无一不呈现衰减趋势,而且非汛期的MK统计值的绝对值明显大于汛期的统计值。径流年际变化的倾斜度与显著性并无相关性,其中以华县的减小程度最大,其次为咸阳站,张家山径流减弱程度最小。

2) 淮河流域径流量总体呈不显著的衰减趋势,各站之间存在较大的差异,其中蒋家集月平均径流量的MK统计量为-1.69,通过90%的显著性检验,漯河站和沙颍河站的统计量分别为-2.09和-2.34,皆通过了95%的显著性检验。从各月的分析结果来看,除王家坝、息县外,其余5个测站一年至少有10个月的统计量为负值,表现为径流量的衰减趋势,所有测站的MK月统计量在12个月份中以6月份的值最大,说明淮河流域一年中径流在6月份有最强的增加趋势或者最弱的衰减趋势。从空间分布格局而言,北部衰减趋势强于流域上游地区。倾斜度与显著性的变化具有较好的一致性,整体变化幅度较小,而流域西北部,例如沙颍河、漯河站的削减幅度较为明显,而西南部的王家坝、息县站则有微弱的增幅。

3) 北江流域月径流量总体呈缓慢增长的趋势,以1月份增幅最为明显;其中犁市站全年12月MK统计量皆为正值,并且月平均的MK统计量达到2.32,通过95%的显著性检验,其余4个测站在5、6月份皆出现了径流衰减的趋势;北江流域各站点非汛期MK统计量的明显大于汛期的值,干流西北侧增加趋势较东南侧更为明显。流域所有站点倾斜度皆为正值,除表现出最大的年径流增幅的横石站,其余站点显著性与倾斜度具有较好的相关性。

3.3 径流响应分析

近40年来渭河流域年均气温逐年升高趋势明显,到90年代平均气温急剧上升,冬季上升最显著,整体上来从东向西、从南向北递减的趋势。径流与气温变化呈负相关关系,即气温的升高会导致径流的减少。流域大部分地区潜在蒸散量呈增大趋势,空间上呈现出由东北向西南递减^[19-20]。流域年内降水集中在夏季和秋季,年降水量从1951—2009年有逐年下降的趋势。1990年后降水量急剧下降且变化明显。序列分析表明,气候因素和人类活动的影响对渭河径流量的影响基本各占1/2,变化期相对基准期的年平均径流变化量中,气候因素贡献率为49.0%,人类活动贡献率占51.0%^[21]。气候变化对径流的影响主要表现为变化期降水减少45.9 mm,潜在蒸散增加35.0 mm^[21]。自1970年以来,由于流域开展了大规模的水利水保工程建设,如宝鸡峡灌溉工程、交口抽渭灌溉工程、冯家山水库和石头河水库等一批大型灌区和水库的建设,人类对水资源的需求不断加大,工农业耗水量呈上升趋势。渭河上中游林家村、魏家堡、咸阳站控制流域中人类活动对径流变化影响分别占65%、59%和55%,这意味着人类活动相比气候变化而言,对径流减少具有相对重要的作用^[22]。上世纪70年代以来,建设水利水保工程等对地表径流的拦蓄利用而使径流量的减少十分显著,进入20世纪90年代渭河径流量的减少主要受气候作用的影响较大。

淮河流域近50年来平均气温呈显著上升趋势,冬季平均气温的增温幅度最大,春、秋季次之;相对而言,淮河流域东部尤其是东北部地区的升温趋势更加明显^[23]。淮河流域蒸发皿蒸发量存在显著的下降趋势。在一年的四季中,春夏季节蒸发量最大,下降趋势最强;淮河流域北部和西部蒸发量最大,下降趋势最强^[24-25]。淮河流域降水年内分布主要集中在6月下旬至7月中旬,空间分布基本呈南高北低

的格局,较南部地区而言,北部地区降水相对集中^[17]。降水水质心呈向西南方向偏移趋势,其中向南偏移更为显著^[26]。对于流域降水集中度的变化与迁移,径流有相一致的变化,从表2可以看出,处于北部的沙颍河、漯河、班台三个站点的 C_v 值相对同时期的流域其他站点都要高一些,并且表现为随时间推移而减小。近45年来淮河流域降水量的年际振荡较为剧烈,年降水量呈下降趋势,各季节变化趋势不一,但均未达显著水平。流域内汛期和年降水量的年际变化则具有明显的阶段性,主要表现在上世纪90年代前基本为下降趋势,2000年后明显上升。流域6~8月份的总降雨均呈减少趋势,但淮河水系6月份呈增加趋势^[27],解释了表4中淮河流域各站点径流的弱减少趋势以及6月份的反常变化。45年来,降水的空间格局发生了一定的变化,表现在淮河中上游和淮河沿岸地区的降水量增加,而流域东北部的降水量则呈减少趋势^[17]。对照图2,可以发现径流发生了一致性变化,流域北部出现较明显的衰减趋势,而上游部分则呈现较弱的衰减或者弱增加趋势。

北江流域年平均气温整体呈显著上升趋势,各季节平均气温均有上升趋势,其中夏秋两季上升较为明显^[28]。就流域蒸发皿蒸发量而言,北江上游有微弱增加趋势而下游地区则呈显著减少趋势,针对各个月份,除6、11、12月3个月份呈不显著增加趋势外,其余9个月份均呈不同程度的下降趋势,其中1月份下降最为显著。北江流域雨量多、强度大,降雨多集中在汛期的4~9月,又以5月降水最多^[29-30]。对比可知,北江的径流集中期由此早于渭河和淮河流域。近四十年来,流域降雨量总体呈不显著的增加趋势,其中西北部趋势较明显,后汛期(7~9月)较前汛期(4~6月)趋势更明显,1月份的降水增加趋势显著,近20年来汛期径流占年径流的比例略有减小,强降水期有“6月-5月-6月”的推移过程^[30],与表4结论中径流变化特征一致,同时也对应了表2中北江流域径流集中期的波动变化。北江流域降雨与径流的相关性较好,降雨序列基本上不存在趋势,而径流序列呈缓慢上升趋势,这说明径流的增加主要受到了人类活动的影响。人类活动的间接影响主要表现为植被改变、水土流失、城镇化等造成的下垫面条件变化。近20年来,人类活动导致了流域内水土流失的进一步发生与发展,植被覆盖率呈下降趋势。人类活动间接减小了流域的蒸发和蒸腾量,这是引起流域内径流增加的主要原因^[31]。同时由于1970年后流域内兴建了较多的水利工程,如

飞来峡水库、北江大堤等,加大了对流域径流的调节力度,使得其年内分配不均匀系数于上世纪70年代有明显的减幅。

4 结 论

1) 三个流域的径流年内分配存在地域性差异,北江流域的径流年内分配不均匀程度要小于渭河和淮河流域,并且流域各测站间的差异明显,较集中期的分布差异而言,北江流域也明显早于渭河、淮河流域。

2) 在受到不同程度的自然气候条件和人类活动等多重影响下,北江流域的不均匀程度和集中度随时间变化一致呈减小趋势,渭河除了林家村站有明显增大的趋势,其余站点与淮河均无明显变化趋势;渭河流域的各站点年径流量一年12个月皆呈明显的衰减趋势,淮河流域年径流量呈缓慢衰减趋势,6月份存在反常的趋势,空间上北部趋势较流域上游更为明显,而北江流域呈缓慢增长趋势,干流西北侧的趋势较为明显。

3) 径流变化响应分析中,渭河流域受到自然和人为因素影响各占1/2,其中自然因素表现为降雨量的下降和潜在蒸发量的增大,以及上世纪70年代以来,建设水利水保工程等对地表径流的拦蓄利用而使径流量的减少十分显著;对应于淮河流域降水集中度、降水周期、格局的变化,其径流具有一致性的时空变化,表现为流域北部站点径流年内分配不均匀系数较高并呈减小趋势,所有站点年、月径流量(除6月份径流量)呈不显著的减弱趋势,在径流空间格局中亦有流域北部衰减更为明显的现象。北江流域的径流集中度随降水发生了一致的推移变化,降雨径流相关性较好,而降雨序列基本上不存在趋势,而径流序列呈缓慢上升趋势,这说明径流的增加主要受到了人类活动的影响。

本文针对选取的渭河、淮河、北江三大流域着重进行了径流量的年内分配不均匀系数、径流集中度与集中期的变化及月、年径流量的变化趋势,在前人研究基础上分析了径流变化对于气候变化的响应,仍有部分现象无法解释,有待采用更多的径流变化指标来定量分析流域径流变化趋势及其背后原因。

参考文献:

- [1] 宋晓猛,张建云,占车生,等. 气候变化和人类活动对水文循环影响研究进展[J]. 水利学报, 2013, 44(7): 779-790.
Song Xiaomeng, Zhang Jianyun, Zhan Chesheng, et al. Review for impacts of climate change and human activi-

- ties on water cycle[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2013, 44(7):779-790.
- [2] 杨涛, 陆桂华, 李会会, 等. 气候变化下水文极端事件变化预测研究进展[J]. *水科学进展*, 2011, 22(2):279-286.
Yang Tao, Lu Guihua, Li Huihui, et al. Advances in the study of projection of climate change impacts on hydrological extremes[J]. *Advances in Water Science*, 2011, 22(2):279-286.
- [3] 杨美临, 范晓梅. 渭河流域径流年内分配变化规律分析[J]. *安徽农业科学*, 2010, 38(21):11233-11235.
Yang Meilin, Fan Xiaomei. Analysis on the variation law of annual runoff distribution in the Weihe Basin[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2010, 38(21):11233-11235.
- [4] Velpuri N M, Senay G B. Analysis of long-term trends (1950—2009) in precipitation, runoff and runoff coefficient in major urban watersheds in the United States[J]. *Environmental Research Letters*, 2013, 8(2): 024020.
- [5] Anghileri D, Pianosi F, Soncini-Sessa R. Trend detection in seasonal data: from hydrology to water resources[J]. *Journal of Hydrology*, 2014, 511: 171-179.
- [6] 刘健, 张奇, 许崇育, 等. 近 50 年鄱阳湖流域径流变化特征研究[J]. *热带地理*, 2009, 29(3):213-218.
Liu Jian, Zhang Qi, Xu Chongyu, et al. Characteristics of runoff variation of poyang lake watershed in the past 50 years[J]. *Tropical Geography*, 2009, 29(3): 213-218.
- [7] 魏红义, 李靖, 王江, 等. 渭河流域径流变化趋势及其影响因素分析[J]. *水土保持通报*, 2008, 28(1):76-80.
Wei Hongyi, Li Jing, Wang Jiang, et al. Analysis on runoff trend and influence factors in Weihe River Basin[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2008, 28(1):76-80.
- [8] 刘睿, 夏军. 气候变化和人类活动对淮河上游径流影响分析[J]. *人民黄河*, 2013, 35(9):30-33.
Liu Rui, Xia Jun. Influence analysis of climate change and human activities on runoff of the upper Huaihe River[J]. *Yellow River*, 2013, 35(9):30-33.
- [9] Gu Ying, Lin Jing, Wang Xianglan, et al. Trend of annual runoff for major rivers in China under climate change[J]. *Procedia Engineering*, 2012, 28: 564-568.
- [10] 汤奇成, 程天文, 李秀云. 中国河川月径流的集中度和集中期的初步研究[J]. *地理学报*, 1982, 37(4):383-393.
Tang Qicheng, Cheng Tianwen, Li Xiuyun. Preliminary study on the time of concentration of monthly runoff of Chinese streams [J]. *Acta Geographica Sinica*, 1982, 37(4):383-393.
- [11] 卢路, 刘家宏, 秦大庸, 等. 海河流域天然径流年际变化规律分析[J]. *水电能源科学*, 2011, 29(6):11-13, 99.
Lu lu, Liu Jiahong, Qin Dayong, et al. Analysis of variation characteristics of annual runoff series in Haihe River Basin[J]. *Water Resources and Power*, 2011, 29(6):11-13, 99.
- [12] 郑红星, 刘昌明. 黄河源区径流年内分配变化规律分析[J]. *地理科学进展*, 2003, 33(6):585-591.
Zheng Hongxing, Liu Changming. Changes of annual runoff distribution in the headwater of the Yellow River Basin[J]. *Progress in Geography*, 2003, 33(6):585-591.
- [13] 王金星, 张建云, 李岩, 等. 近 50 年来中国六大流域径流年内分配变化趋势[J]. *水科学进展*, 2008, 19(5):656-660.
Wang Jinxing, Zhang Jianyun, Li Yan, et al. Variation trends of runoffs seasonal distribution of the six larger basins in China over the past 50 years[J]. *Advances in Water Science*, 2008, 19(5): 656-660.
- [14] Kendall M G. Rank correlation methods[M]. London: Griffin, 1975.
- [15] 周芬. Kendall 检验在水文序列趋势分析中的比较研究[J]. *人民珠江*, 2005, (S1):35-37.
Zhou Fen. Research in the analysis of Kendall test used in hydrologic data series[J]. *Pearl River*, 2005, (S1): 35-37.
- [16] 张宏利, 陈豫, 任广鑫, 等. 近 50 年来渭河流域降水变化特征分析[J]. *干旱地区农业研究*, 2008, 26(4):236-241.
Zhang Hongli, Chen Yu, Ren Guangxin, et al. The characteristics of precipitation variation of Weihe River Basin in Shaanxi Province during recent 50 years[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2008, 26(4): 236-241.
- [17] 卢燕宇, 吴必文, 田红, 等. 1961—2005 年淮河流域降水时空演变特征分析[C]//第 26 届中国气象学会年会论文集. 杭州, 2009:7-15.
Lu Yanyu, Wu Biwen, Tian Hong, et al. Analysis on the change characteristic of precipitation in Huaihe River Basin from 1961—2005[C]// Conference Record of Chinese Meteorological Society 26th Annual Meeting, Hangzhou, 2009:7-15.
- [18] 王亚雄, 黄淑娴, 刘祖发, 等. 变化环境下北江下游年径流量的加权马尔可夫链预测[J]. *生态环境学报*, 2011, 20(4):754-760.
Wang Yaxiong, Huang Shuxian, Liu Zufu, et al. Forecast of yearly river runoff in lower reaches of Bei-jiang River by Weighted Markov-Chain Method in changing environments[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2011, 20(4):754-760.

- [19] 左德鹏,徐宗学,程磊,等.渭河流域潜在蒸散量时空变化及其突变特征[J].资源科学,2011,33(5):975-982.
Zuo Depeng, Xu Zongxue, Cheng Lei, et al. Spatial-Temporal variations and mutations of potential evapotranspiration in the Weihe River Basin[J]. Resources Science, 2011, 33(5): 975-982.
- [20] 王帅,李院生,张峰,等.近55年渭河流域气温演变规律分析[J].中国农业气象,2013,34(5):512-518.
Wang Shuai, Li Yuansheng, Zhang Feng, et al. Analysis on spatio-temporal variation of temperature in Weihe River Basin in recent 55 years[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2013, 34(5): 512-518.
- [21] 毕彩霞,穆兴民,赵广举,等.渭河流域气候变化与人类活动对径流的影响[J].中国水土保持科学,2013,11(2):33-38.
Bi Caixia, Mu Xingmin, Zhao Guangju, et al. Effects of climate change and human activity on streamflow in the Wei River Basin[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2013, 11(2): 33-38.
- [22] 左德鹏,徐宗学,隋彩虹,等.气候变化和人类活动对渭河流域径流的影响[J].北京师范大学学报:自然科学版,2013,49(2):115-123.
Zuo Depeng, Xu Zongxue, Sui Caihong, et al. Impact of climate change and human activity on streamflow in the Wei River Basin[J]. Journal of Beijing Normal University(Natural Science), 2013, 49(2): 115-123.
- [23] 卢燕宇,田红,吴必文.近45年淮河流域温度时空变化特征[C]//第27届中国气象学会年会论文集,中国北京,2010:1-8.
Lu Yanyu, Tian Hong, Wu Biwen. Analysis on the space-time change characteristic of temperature in Huaihe River Basin in recent 45 years[C]// Conference Record of Chinese Meteorological Society 27th Annual Meeting, Beijing, 2010: 1-8.
- [24] 王珂清,曾燕,谢志清,等.1961—2008年淮河流域气温和降水变化趋势[J].气象科学,2012,32(6):671-677.
Wang Keqing, Zeng Yan, Xie Zhiqing, et al. Change trend of temperature and precipitation in Huaihe River Basin from 1961 to 2008[J]. Journal of the Meteorological Sciences, 2012, 32(6): 671-677.
- [25] 荣艳淑,周云,王文,等.淮河流域蒸发皿蒸发量变化分析[J].水科学进展,2011,22(1):15-22.
Rong Yanshu, Zhou Yun, Wang Wen, et al. Analysis of pan evaporation changes in the Huaihe River Basin [J]. Advances in Water Science, 2011, 22(1): 15-22.
- [26] 袁喆,杨志勇,郑晓东,等.近50年来淮河流域降水时空变化特征分析[J].南水北调与水利科技,2012,10(2):98-103.
Yuan Zhe, Yang Zhiyong, Zheng Xiaodong, et al. Spatial and temporal variations of precipitation in Huaihe River Basin in recent 50 years[J]. South-to-North Water Diversion and Water Science & Technology, 2012, 10(2): 98-103.
- [27] 杨明明,钟平安,魏蓬,等.淮河流域主汛期降水演变规律研究[J].水电能源科学,2012,30(7):37-40.
Yang Mingming, Zhong Ping'an, Wei Peng, et al. Study on precipitation evolution rule of Huaihe River Basin in main Flood period[J]. Water Resources and Power, 2012, 30(7): 37-40.
- [28] 张峰,雷晓辉,蒋云钟,等.珠江上游流域近55年气温变化特征分析[J].水资源与水工程学报,2012,23(2):20-25.
Zhang Feng, Lei Xiaohui, Jiang Yunzhong, et al. Analysis on character of temperature variation in upstream of Pearl River basin during recent 55 years[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2012, 23(2): 20-25.
- [29] 刘占明,陈子桑,路剑飞,等.广东北江流域降水时空分布及其与Nino3区SST相关性分析[J].自然资源学报,2013,(5):786-798.
Liu Zhanming, Chen Zishen, Lu Jianfei, et al. Analysis of correlation between the spatio-temporal distribution of precipitation in Beijiang River Basin and SST in Nino3[J]. Journal of Natural Resources, 2013, (5): 786-798.
- [30] 罗律,张广存,吴俊宁.1965—2010年广东北江流域汛期降雨量的气候特征分析[J].广东气象,2012,34(3):13-15.
Luo Lü, Zhang Guangcun, Wu Junning. Analysis on the climate characteristic of precipitation in flood season of Beijiang Basin in Guangdong Province from 1965 to 2010[J]. Guangdong Meteorology, 2012, 34(3): 13-15.
- [31] 李艳,陈晓宏,王兆礼.人类活动对北江流域径流系列变化的影响初探[J].自然资源学报,2006,21(6):910-915.
Li Yan, Chen Xiaohong, Wang Zhaoli. A tentative discussion on the impact of human activities on the variability of runoff series of the Beijiang River Basin[J]. Journal of Natural Resources, 2006, 21(6): 910-915.

(责任编辑 王卫勋)