

渭河径流年内分配变化特征及其影响因子贡献率分解

黄生志, 黄 强, 王义民, 陈昱潼

(西安理工大学 西北旱区生态水利工程国家重点实验室培育基地, 西安 710048)

摘要: 研究渭河径流年内分配变化特征及其影响因子, 有助于在区域视角下进一步掌握全球变暖与人类活动不断加剧背景下的水文响应。本文基于1960-2005年实测径流、面降雨以及潜在蒸发量的月序列数据, 采用集中度与不均匀系数两个指标分析渭河径流年内分配特征的时空变化规律。运用Mann-Kendall法求算了渭河流域径流集中度与不均匀系数的变化趋势, 采用启发式分割法诊断径流年内分配特征值的变异点, 并运用累积量斜率变化率比较法定量计算气候变化与人类活动对径流年内分配特征变化的贡献率。结果表明: ①渭河实测径流年内分配特征值的年变化过程呈现上升趋势, 其中张家山站呈现显著上升趋势, 该流域旱涝风险有所增加; ②林家村与张家山站的实测径流年内分配特征值均存在1973年这一变异点, 而华县站无变异点存在; ③气候变化与人类活动影响对林家村站径流年内分配集中度与不均匀系数的贡献率分别为27.15%, 72.85%和12.10%, 87.90%, 而对张家山站的贡献率分别为39.11%, 60.89%和33.73%, 66.27%。人类活动是渭河实测径流年内分配特征变化的主要驱动力。

关键词: 径流年内分配; 集中度; 不均匀系数; 启发式分割法; 累积量斜率变化率比较法; 渭河

doi: 10.11820/dlkxjz.2014.08.010

中图分类号: P333

文献标识码: A

1 引言

径流的变化通常可分为径流量的数值变化和径流过程的结构变化(Hannah et al, 2000; Harris et al, 2000; 郑红星等, 2003; 涂新军等, 2012)。在目前众多径流变化特征的研究中, 多数研究侧重于径流量的数值变化(刘海猛等, 2013; 孟德娟, 2013; 奚秀梅等, 2013), 涉及其结构变化的研究相对较少。然而, 以径流年内分配特征为代表的径流结构变化不仅与旱、涝灾害有密切的联系, 而且还与水资源的利用息息相关(Sharma et al, 2006; 李艳等, 2007)。此外, 径流的年内分配也是水利规划、水文区划、农业区划、河流分类及水资源评价的重要指标之一, 是各个用水部门不可或缺的基础数据(刘德林等,

2007)。由于径流过程主要是流域下垫面与气候条件的综合产物(王云琦等, 2011; 涂新军等, 2012), 因此, 在人类活动与气候变化的驱动下, 径流的年内分配特征必然发生相应的变化。水文站所观测到的实测径流过程不仅包含了以降雨、蒸发等气象因素为主的气候变化的影响, 还包含以土地利用、用水消耗及水利工程水量调节等人类活动的影响, 如何定量分解气候变化与人类活动对径流变化的影响, 是当前水文学及水资源研究的热点和难点(陈晓宏等, 2010; 涂新军等, 2012)。目前, 在为数不多的径流结构变化的研究中, 有关河川径流年内分配特征变化的影响因子贡献率分解的成果甚少, 主要有涂新军等(2012)通过比较实测径流、天然径流及降水的集中度与不均匀系数的阶

收稿日期: 2013-12; 修订日期: 2014-02。

基金项目: 国家自然科学基金重大项目(51190093); 国家重大基础研究(973)计划项目(2011CB403306-2); 国家自然科学基金项目(51179148, 51179149)。

作者简介: 黄生志(1988-), 男, 湖南郴州人, 博士研究生, 主要研究方向为水资源系统工程、流域气象水文学, E-mail: huangshengzhi7788@126.com。

通讯作者: 黄强(1958-), 男, 四川梓潼人, 教授, 博导, 主要从事水文水资源系统工程研究, E-mail: wresh@mail.xaut.edu.cn。

段差异,定量分解了气候变化与人类活动对东江径流年内分配特征变化的影响因子贡献率。

但是,不同流域对气候变化及人类活动的水文响应并不相同。渭河流域是典型的干旱半干旱区域,研究该区域的径流年内分配变化特征,有助于深入了解环境变化下区域尺度的水文过程演进规律及水文响应。渭河是关中城市群的水源地,近年来,关中一天水经济区及西咸新区的建立,有力地促进了关中地区经济社会的持续快速发展,同时也导致河道外需水量日益增加,进而加剧了该流域水资源供需矛盾。由于大规模开发、利用地下水及地表水,致使渭河流域的河川径流显著减少。此外,受全球气候变化影响,近年来渭河流域的降雨量亦呈下降趋势,致使渭河径流年内分配特征发生相应变化。因此,研究该流域的径流年内分配变化特征及定量分解气候变化与人类活动的影响将有助于指导该流域的水资源规划与管理。基于此,本文采用集中度与不均匀系数两个指标,分析渭河径流年内分配特征的时空变化规律,运用累积量斜率变化率比较法(王随继等, 2012)定量求出降雨、潜在蒸发量及人类活动对河川径流年内分配特征变化的贡献率。

2 数据与方法

2.1 研究区域

作为黄河流域最大的一级支流,渭河发源于甘肃省内渭源县的乌鼠山,自西向东分别流经甘肃的陇西、天水,陕西的宝鸡、西安、渭南,并于潼关汇入黄河(张宏利等, 2008)。渭河的干流全长约 818 km,流域面积约 13.5 万 km²。渭河流域位于 34°~38°N 和 104°~110°E 之间,属大陆性季风气候,春季温暖少雨,夏季雨热同期且有伏旱,秋季凉爽湿润,冬季寒冷少雨。流域的最冷月平均气温为-3~-1℃,最热月平均气温大约为 23~26℃(张宏利等, 2008)。流域降雨空间分布不均,由东南向西北递减,秦岭南麓雨水充沛,最大年降水量在 1000 mm 以上,而平原地区仅为 500 mm 左右(张宏利等, 2008)。流域降水年内分配不均且年际变化大,汛期降水量约占全年的 65%。

为了更好地研究不同子区域的水文响应,将研究区域划分为 3 个部分:①林家村水文站以上流域,代表渭河流域的中上游;②张家山水文站以上

流域,代表渭河最大的支流泾河流域;③华县水文站以上流域,代表整个渭河流域。

2.2 研究数据

本文所用数据包括渭河流域 21 个气象站的日值数据及林家村、张家山与华县水文站的 1960-2005 年的日径流序列。通过求和得到各水文站的月径流量和降雨量,通过彭曼公式计算得到潜在蒸发量(Monteith et al, 1965)。渭河流域及相关气象、水文站所在位置如图 1 所示。以上数据均来自于中国国家气象中心,所有数据在使用之前分别通过邻近站资料比较法、双累积曲线法以及周期分析法进行了“三性审查”。

2.3 研究方法

2.3.1 集中度与不均匀系数

假设某一水文气象序列 $Q(t, \tau)$, $t=1, 2, \dots, n$; $\tau=1, 2, \dots, 12$, 其中, t 表示年数; τ 表示年内某月(郭巧玲, 2011; 涂新军等, 2012), 则有:

$$C_d(t) = Q_{xy}(t) / \sum_{\tau=1}^{12} Q(t, \tau) \quad (1)$$

$$C_u(t) = \sigma(t) / \bar{Q}(t) \quad (2)$$

其中,

$$Q_{xy}(t) = \sqrt{Q_x^2(t) + Q_y^2(t)} \quad (3)$$

$$Q_x(t) = \sum_{\tau=1}^{12} Q(t, \tau) \cos \theta(t), \quad Q_y(t) = \sum_{\tau=1}^{12} Q(t, \tau) \sin \theta(t) \quad (4)$$

$$\sigma(t) = \sqrt{\sum_{\tau=1}^{12} [Q(t, \tau) - \bar{Q}(t, \tau)]^2 / 12} \quad (5)$$

$$\bar{Q}(t) = \sum_{\tau=1}^{12} Q(t, \tau) / 12 \quad (6)$$

式中: $C_d(t)$ 与 $C_u(t)$ 分别表示第 t 年的集中度与不均匀系数; $Q(t, \tau)$ 代表第 t 年 τ 月的径流量、降雨量或潜在蒸发量; $Q_x(t)$ 和 $Q_y(t)$ 分别表示 $Q(t, \tau)$ 在 x 和 y 两个方向上的分矢量; $Q_{xy}(t)$ 表示合矢量模; $\theta(t) = 2\pi\tau/12$, 表示第 τ 时段的矢量角度; $\sigma(t)$ 表示第 t 年月径流量、降雨量或潜在蒸发量的均方差; $\bar{Q}(t)$ 表示第 t 年月径流、降雨以及潜在蒸发量的均; $\bar{Q}(t, \tau)$ 第 t 年 τ 月的径流量、降雨量或潜在蒸发量。

2.3.2 启发式分割算法

某一时间序列 $x(t)$ 由 N 个点组成, 其中一个分割点 i 从序列的左边沿着该序列依次向右边滑动, 分割点左边和右边部分的平均值分别为 $\mu_1(i)$ 和 $\mu_2(i)$, 其标准差分别是 $s_1(i)$ 和 $s_2(i)$, i 点的合并偏差 $S_b(i)$ 可表示为(封国林等, 2005; 陈广才等, 2008; 李海彬等, 2010):

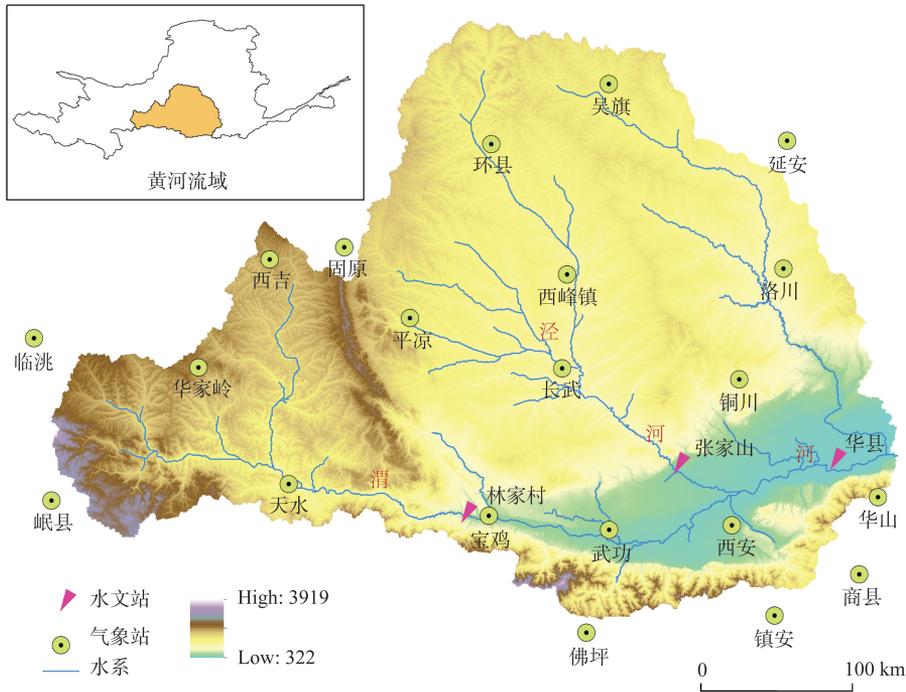


图1 渭河流域及相关气象水文站位置

Fig.1 The Wei River Basin and location of hydro-meteorological stations

$$S_D(i) = \left(\frac{(N_1 - 1)s_1^2 + (N_2 - 1)s_2^2}{N_1 + N_2 - 2} \right)^{1/2} \left(\frac{1}{N_1} + \frac{1}{N_2} \right)^{1/2} \quad (7)$$

式中: N_1 、 N_2 分别表示 i 点左边与右边部分的点数。其中, i 点左右两边两子序列均值的差异使用 t 检验统计值 $T(i)$ 来进行度量(陈广才等, 2008):

$$T(i) = \left| \frac{\mu_1(i) - \mu_2(i)}{S_D} \right| \quad (8)$$

T 值越大, 说明该点左右两边两子序列的差异越明显。计算 $T(i)$ 中最大值 T_{max} 所对应的统计显著性概率 $P(T_{max})$, 其计算公式如下(陈广才等, 2008):

$$P(t_{max}) \approx \left\{ 1 - I_{\left[\frac{v}{v+t_{max}^2} \right]}(\delta v, \delta) \right\}^\eta \quad (9)$$

通过蒙特卡洛模拟可得: $\eta = 4.19 \ln N - 11.54$ 且 $\delta = 0.40$ 。其中, N 表示该序列的长度, $v = N - 2$, $I_x(a, b)$ 为不完全 β 函数。预先设定一个临界值 P_0 , 当 $P(T_{max}) \geq P_0$, 则在该点处将此序列分割成左右两个均值差异较大的子序列, 否则不进行分割(陈广才等, 2008)。对得到的新序列不断进行迭代并重复以上操作, 直到子序列的长度小于 ℓ_0 (ℓ_0 是最小分割尺度) 时便停止对其分割。由此, 将原序列分割成几个均值不同的子序列, 而分割点则为该序列

的均值变异点。

通常情况下, P_0 取值范围为 0.5~0.95, 而 ℓ_0 的取值则不应小于 25(封国林等, 2005)。通过不断调整 ℓ_0 的大小, 能够实现对时间序列不同尺度上的变异检测(陈广才等, 2008)。

2.3.3 累积量斜率变化率比较法

气候因素中对径流年内分配特征影响较大的是降雨量与蒸发量, 因此, 本文从气候变化的角度研究降雨量和潜在蒸发量对径流年内分配特征的影响。假设累积径流年内分配集中度一年份线性关系式的斜率在不同的两个时期分别为 S_{R1} 和 S_{R2} , 则累积径流集中度斜率变化率 R_{SRJ} (单位为%) 如式(10)所示(王随继等, 2012):

$$R_{SRJ} = 100 \times (S_{R2} - S_{R1}) / S_{R1} \quad (10)$$

同理可分别求得累积降雨量、潜在蒸发量年内分配集中度的斜率变化率为 R_{SPJ} 和 R_{SEJ} 。降雨量变化对径流年内分配集中度变化的贡献率 C_{PJ} (单位为%) 可表示为:

$$C_{PJ} = 100 \times R_{SPJ} / S_{SRJ} \quad (11)$$

同理, 可求得潜在蒸发量对径流集中度变化的贡献率 C_{EJ} 。

由于人类对径流年内分配集中度的影响因素比较复杂,不仅包括土地利用及覆盖变化,还有水利工程的调蓄以及用水消耗等,加之数据限制的原因不能通过直接计算获得,可通过求算后的气候变化对径流年内分配集中度变化的贡献率间接求得人类活动对径流集中度变化的贡献率。计算公式如式(12)所示:

$$C_{HJ} = 100 - C_{PJ} - C_{EJ} \quad (12)$$

同样地,可求算出气候变化及人类活动对于径流年内分配不均匀系数的贡献率。

3 结果与分析

3.1 基于启发式分割法的径流年内分配特征的变异点诊断

采用启发式分割算法,将 P_0 设定为0.9, ℓ_0 的取值为25,分别得到林家村、张家山以及华县站的径流年内分配集中度的变异分析结果(图2)。由图2可知,林家村、张家山以及华县的 T 值均在1973年时最大。其中,林家村和张家山站 T 值所对应的概率 $P > P_0$,说明,这两个站点的径流集中度序列的变异点均为1973年;但华县站 T 值所对应的概率 $P < P_0$,因此,华县站的径流集中度序列不存在变异点。同样地,采用该算法可诊断出渭河径流年内分配的不均匀系数序列的变异点。与集中度一样,林家村与张家山站的径流不均匀系数序列的变异点

均为1973年,而华县站不存在变异点。

可见,张家山站与林家村站的实测径流年内分配集中度与不均匀系数序列均存在时序变点,而华县站却无时序变点。主要原因在于华县站控制几乎整个渭河流域的集水面积,虽然局部地区人类活动剧烈,致使径流集中度与不均匀系数序列出现变异点,但就全流域而言,人类活动的影响(包括兴建的水库、引水工程等)毕竟有限,且在中上游消耗的水有一部分通过中水回流等方式又补充至位于渭河下游的华县站,因此,总的来说,其径流集中度与不均匀系数序列还是稳定的。

3.2 实测径流年内分配特征时空变化规律

由表1可知,渭河径流年内分配的集中度与不均匀系数的多年均值范围分别为0.41~0.53与0.72~1.13,其变差系数均约为0.3,与珠江流域的东江相比较(涂新军等,2012),渭河径流年内分配的集中度与不均匀系数均要高于东江,一定程度上反映了干旱半干旱地区和湿润地区径流年内分配特征的差异。张家山站以上的泾河径流年内分配的特征值最大,意味着在渭河流域中泾河流域遭受旱涝灾害的可能性要高于其他地区。此外,采用Mann-Kendall检验法,对3个水文站的实测径流年内分配的集中度与不均匀系数序列进行趋势分析,其结果如表1所示。由表1趋势分析的统计量可知,3个水文站的径流年内分配的集中度与不均匀系数在整个时间序列中均表现为上升的趋势,其中张家山站有显著的上升趋势。

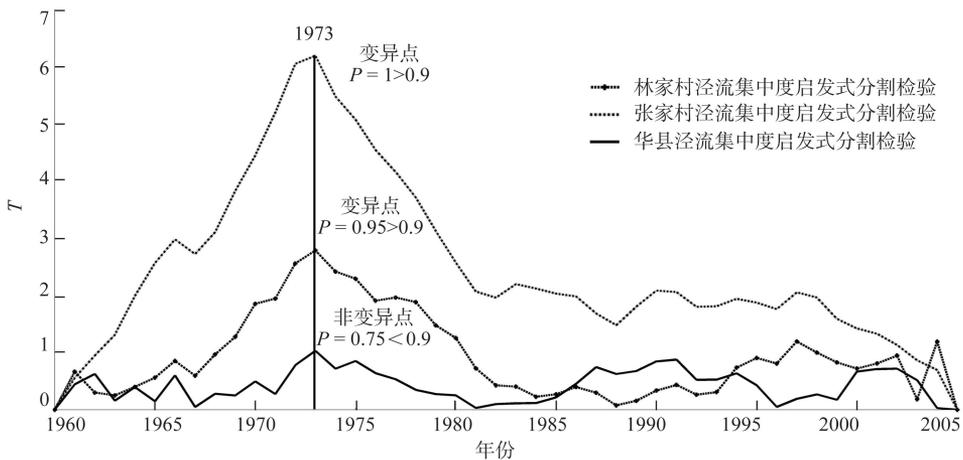


图2 1960-2005年渭河流域径流年内分配集中度启发式分割检验图

Fig.2 Test of the concentration ratio of runoff seasonal distribution based on heuristic segmentation method for the Wei River Basin, 1960-2005

表1 1960-2005年不同阶段渭河径流年内分配特征指标变化特征

Tab.1 Variation in characteristic values of runoff seasonal distribution of the Wei River, 1960-2005

特征指标	站名	统计特征 (1960-2005年)		趋势分析		变点检验		变点前 (1960-1973年)		变点后 (1974-2005年)	
		均值	变差系数	统计量	Sig.	统计量	年份	均值	变差系数	均值	变差系数
集中度	林家村	0.41	0.34	0.22	0.05	2.82	1973	0.36	0.42	0.47	0.28
	张家山	0.53	0.33	2.91	0.01	6.23	1973	0.37	0.41	0.61	0.21
	华县	0.42	0.31	0.43	0.05	-	-	-	-	-	-
不均匀系数	林家村	0.72	0.30	0.41	0.05	3.21	1973	0.79	0.24	0.91	0.25
	张家山	1.13	0.32	2.92	0.01	6.02	1973	0.73	0.39	1.22	0.45
	华县	0.82	0.31	0.74	0.05	-	-	-	-	-	-

注:Sig.表示指显著性水平,统计量指的是趋势统计量Z值,变点值采用的3.1小节所诊断出的变异点。

通过对表1中变点前与变点后林家村和张家山站径流年内分配的集中度与不均匀系数的均值和变差系数分析可知,两站变点前的径流年内分配集中度均值均小于变点后,而变差系数正好相反;两站变点前的径流年内分配的不均匀系数的均值与变差系数均小于变异后。由此可知,渭河径流年内分配的集中度与不均匀系数均有上升的趋势,该流域旱涝风险有所增加。

3.3 定量分解气候变化与人类活动对径流年内分配特征变化的贡献率

由于华县站的径流年内分配集中度与不均匀系数序列无变异点存在,因此仅定量分解气候变化与人类活动对林家村和张家山站的径流年内分配特征变化的贡献率。由于篇幅限制,本文只列举林家村站的累积径流、面降雨以及潜在蒸发量年内分配的集中度和不均匀系数随不同年份的变化(图3-4)。

由图3-4可知,渭河中上游的面降雨和潜在蒸发量年内分配的集中度和不均匀系数均呈下降的趋势,并通过了置信度为95%的显著性检验,而其他的均未通过置信度为95%的显著性检验。而径流年内分配的集中度和不均匀系数却有上升的趋势,并通过了置信度为95%的显著性检验。对面降雨、潜在蒸发量与径流的年内分配特征指标进行相关分析,可知面降雨和潜在蒸发量的年内分配特征指标与径流年内分配特征指标联系密切,由此可通过该气象因子的年内分配特征值的变化率来推求其对径流年内分配特征变化的贡献率,并均通过了置信度为95%的显著性检验。

根据公式(10)分别求出累积径流、降雨以及潜在蒸发量年内分配的集中度与不均匀系数的斜率(表2)。由表2可知,无论是林家村还是张家山站,

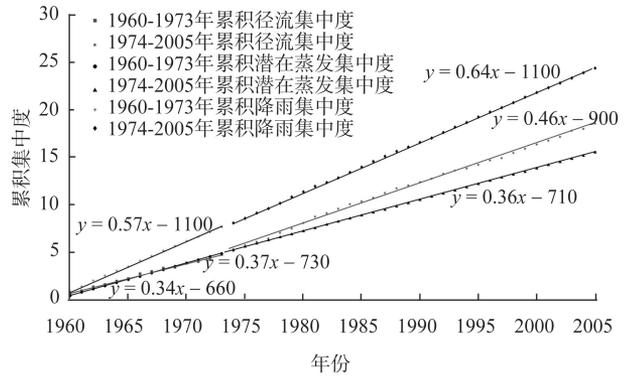


图3 1960-2005年林家村站累积径流、降雨以及潜在蒸发量的年内分配集中度变化趋势

Fig.3 Trend of accumulative concentration ratio of runoff, precipitation and potential evaporation seasonal distribution at Linjiacun Station, 1960-2005

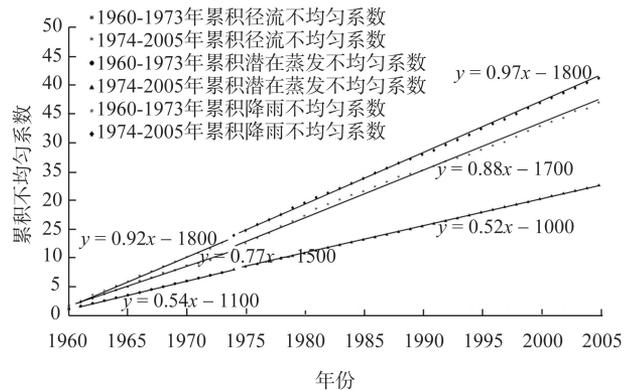


图4 1960-2005年林家村站累积径流、降雨以及潜在蒸发量的不均匀系数变化趋势

Fig.4 Trend of accumulative uneven coefficient of runoff, precipitation and potential evaporation seasonal distribution at Linjiacun Station, 1960-2005

累积径流的年内分配特征值的斜率改变率均远高于降雨及潜在蒸发量。

根据公式(11)、(12),可求得气候变化与人类活动对林家村和张家山站的径流年内分配特征变化的贡献率(表3)。由表3可以看出,对于林家村和张家山站,人类活动对集中度和不均匀系数的贡献率均大于气候变化。其中,潜在蒸发量对渭河径流年内分配的集中度与不均匀系数起抑制作用,而降雨和以土地利用/土地覆盖变化、水利工程调蓄及用水消耗等为主的人类活动,对径流年内分配的特征值起促进作用;降雨对径流年内分配特征变化的贡献率要高于潜在蒸发量的贡献率。无论是渭河中上游流域还是泾河流域,人类活动均是导致径流年内分配变化的最主要的驱动因子。

4 结论与讨论

为了探究渭河径流年内分配特征的时空分布规律,以及定量分解气候变化及人类活动对径流年

内分配特征变化的贡献率,采用启发式分割法对径流年内分配特征值序列进行变异点诊断,并运用累积量斜率变化率比较法定量计算降雨、潜在蒸发量及人类活动对径流年内分配特征变化的贡献率,得出结论如下:

(1) 渭河实测径流年内分配集中度与不均匀系数的年变化过程均呈现上升的趋势,其中张家山以上的泾河实测径流年内分配集中度与不均匀系数呈显著上升趋势,流域旱涝风险有所增加。

(2) 林家村和张家山站的实测径流年内分配集中度与不均匀系数序列均存在一个时序变异点,变异点均为1973年,而华县站均无时序变点。

(3) 气候变化与人类活动影响对林家村站径流年内分配集中度与不均系数的贡献率分别为27.15%、72.85%和12.10%、87.90%,而对张家山站的贡献率分别为39.11%、60.89%和33.73%、66.27%。因此,无论是渭河中上游流域还是泾河流域,人类活动均为导致径流年内分配变化的最主要的驱动因子。

表2 1960–2005年累积径流、降雨以及潜在蒸发量的年内分配特征值的斜率改变率

Tab.2 Change ratio of the slopes of accumulative characteristic values of runoff, precipitation, and potential evaporation seasonal distribution, 1960–2005

站名	影响因素	时间段	集中度			不均匀系数		
			累积量斜率	改变量	改变率/%	累积量斜率	改变量	改变率/%
林家村	径流	1960-1973	0.34	-	-	0.77	-	-
		1974-2005	0.46	0.12	35.29	0.88	0.11	14.29
	降雨	1960-1973	0.57	-	-	0.92	-	-
		1974-2005	0.64	0.07	12.28	0.97	0.05	5.43
	潜在蒸发量	1960-1973	0.37	-	-	0.54	-	-
		1974-2005	0.36	-0.01	-2.70	0.52	-0.02	-3.70
张家山	径流	1960-1973	0.35	-	-	0.68	-	-
		1974-2005	0.59	0.24	68.57	1.2	0.52	76.47
	降雨	1960-1973	0.55	-	-	0.96	-	-
		1974-2005	0.64	0.09	16.36	1.04	0.04	4.17
	潜在蒸发量	1960-1973	0.39	-	-	0.57	-	-
		1974-2005	0.38	-0.01	-2.56	0.55	-0.02	-3.51

表3 气候变化与人类活动对林家村和张家山站的径流年内分配特征变化的贡献率

Tab.3 Contribution of climate change and human activities to the change in characteristic values of runoff seasonal distribution at the Linjiacun and Zhangjiashan Stations

站名	对集中度的贡献率/%				对不均匀系数的贡献率/%			
	降雨	潜在蒸发	气候变化	人类活动	降雨	潜在蒸发	气候变化	人类活动
林家村	34.8	-7.65	27.15	72.85	38.00	-25.89	12.11	87.89
张家山	46.36	-7.25	39.11	60.89	58.29	-24.56	33.73	66.27

本文分解出的人类活动影响的贡献率实际上包括了所有类型的人类活动对径流年内分配的影响,包括水利工程的调蓄、用水消耗、土地利用/土地覆盖变化等。由于缺乏相关数据且因子间的相互作用十分复杂,因此,如何进一步定量分解这些人类活动因子对径流年内分配特征的影响,还需作进一步的深入研究。此外,启发式分割法的分割结果也会受到其参数,如概率临界值及最小分割尺度的影响,因此,对这两个参数的不确定性分析需要在今后的工作中进一步深入研究。

参考文献(References)

- 陈广才, 谢平. 2008. 基于启发式分割算法的水文变异分析研究. 中山大学学报: 自然科学版, 47(5): 122-125. [Chen G C, Xie P. 2008. Change point analysis of hydrologic time series based on heuristic segmentation method. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 47(5): 122-125.]
- 陈晓宏, 涂新军, 谢平, 等. 2010. 水文要素变异的人类活动影响研究进展. 地球科学进展, 25(8): 800-811. [Chen X H, Tu X J, Xie P, et al. 2010. Progresses in the research of human induced variability of hydrological elements. *Advances in Earth Science*, 25(8): 800-811.]
- 封国林, 龚志强, 董文杰, 等. 2005. 基于启发式分割算法的气候突变检测研究. 物理学报, 54(11): 5494-5499. [Feng G L, Gong Z Q, Dong W J, et al. 2005. Abrupt climate change detection based on heuristic segmentation algorithm. *Acta Physica Sinica*, 54(11): 5494-5499.]
- 郭巧玲, 杨云松, 畅祥生, 等. 2011. 1957-2008年黑河流域径流年内分配变化. 地理科学进展, 30(5): 550-556. [Guo Q L, Yang Y S, Chang X S, et al. 2011. Annual variation of Heihe River runoff during 1957-2008. *Progress in Geography*, 30(5): 550-556.]
- 李艳, 陈晓宏, 张鹏飞. 2007. 北江流域径流序列年内分配特征及其趋势分析. 中山大学学报: 自然科学版, 46(5): 113-116. [Li Y, Chen X H, Zhang P F. 2007. Research on annual distribution and its trends of runoff in Beiji River, Guangdong. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 46(5): 113-116.]
- 李海彬, 张小峰, 胡春宏, 等. 2010. 基于B-G分割算法的河川年输沙量突变分析. 水利学报, 41(12): 1387-1391. [Li H B, Zhang X F, Hu C H, et al. 2010. Analysis on annual sediment transport abruption of river basin based on B-G segmentation algorithm. *ShuiLi XueBao*, 41(12): 1387-1391.]
- 刘德林, 刘贤赵, 李嘉竹, 等. 2007. 胶东山丘区典型流域径流年内分配特征量化研究. 山地学报, 25(3): 295-301. [Liu D L, Liu X Z, Li J Z, et al. 2007. Runoff of the representative drainage basin in Jiaodong massif area. *Journal of Mountain Science*, 25(3): 295-301.]
- 刘海猛, 石培基, 周俊菊, 等. 2013. 石羊河中游径流损耗特征及其影响因素. 地理科学进展, 32(1): 87-94. [Liu H M, Shi P J, Zhou J J, et al. 2013. Characteristics and influencing factors of runoff consumption in the midstream of Shiyang river. *Progress in Geography*, 32(1): 87-94.]
- 孟德娟, 莫兴国. 2013. 气候变化对不同气候区流域年径流影响的识别. 地理科学进展, 32(4): 587-594. [Meng D J, Mo X G. Identification of impact of climate change on annual runoff in typical basins of different climate zones. *Progress in Geography*, 32(4): 587-594.]
- 涂新军, 陈晓宏, 张强, 等. 2012. 东江径流年内分配特征及影响因素贡献分解. 水科学进展, 23(4): 493-501. [Tu X J, Chen X H, Zhang Q, et al. 2012. Streamflow annual distribution and its influencing factors in Dongjiang River, South China. *Advances in Water Science*, 23(4): 493-501.]
- 王云琦, 齐实, 孙阁, 等. 2011. 气候与土地利用变化对流域水资源的影响: 以美国北卡罗莱纳州Trent流域为例. 水科学进展, 22(1): 51-58. [Wang Y Q, Qi S, Sun G, et al. 2011. Impacts of climate and land-use change on water resources in a watershed: a case study on the Trent River Basin in North Carolina, USA. *Advances in Water Science*, 22(1): 51-58.]
- 王随继, 闫云霞, 颜明, 等. 2012. 皇甫川流域降水和人类活动对径流量变化的贡献率分析: 累积量斜率变化率比较方法的提出及应用. 地理学报, 67(3): 388-397. [Wang S J, Yan Y X, Yan M, et al. 2012. Contributions of precipitation and human activities to the runoff change of the Huangfuchuan drainage basin: application of comparative method of the slope changing ratio of cumulative quantity. *Acta Geographica Sinica*, 67(3): 388-397.]
- 奚秀梅, 刘海隆. 2013. 塔里木河干流径流量变化与太阳黑子活动的关系. 地理科学进展, 32(6): 880-886. [Xi X M, Liu H L. 2013. Relationship between annual runoff of the mainstream of Tarim River and sunspots activity. *Progress in Geography*, 32(6): 880-886.]
- 郑红星, 刘昌明. 2003. 黄河源区径流年内分配变化规律分析. 地理科学进展, 22(6): 585-590. [Zheng H X, Liu C M. 2003. Changes of annual runoff distribution in the headwater of the Yellow River Basin. *Progress in Geography*, 22(6): 585-590.]
- 张宏利, 陈豫, 任广鑫, 等. 2008. 近50年来渭河流域降水变化特征分析. 干旱地区农业研究, 26(4): 236-241. [Zhang H L, Chen Y, Ren G X, et al. 2008. The characteristics of precipitation variation of Weihe River Basin in Shaanxi Province during recent years. *Agricultural Re-*

- search in the Arid Areas. 26(4): 236-241.]
- Hannah D M, Smith B P G, Gurnell A M, et al. 2000. An approach to hydrograph classification. *Hydrological Processes*, 14: 317-338.
- Harris N M, Gurnell A M, Hannah D M, et al. 2000. Classification of river regimes: a context for hydroecology. *Hydrological Processes*, 14: 2831-2848.
- Monteith J L. 1965. Evaporation and environment. *Symposia of the Society for Experimental Biology*, 19: 205-234.
- Sharma R H, Sharya N M. 2006. Hydrological changes and its impact on water resources of Bagmati watershed, Nepal. *Journal of Hydrology*, 327(3-4): 315-322.

Change in runoff seasonal distribution and the decomposition of contribution rate of impacting factors in the Wei River

HUANG Shengzhi, HUANG Qiang, WANG Yimin, CHEN Yutong

(State Key Laboratory of Eco-Hydraulic Engineering in Arid Areas, School of Water Resources and Hydropower, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: Investigating the change characteristics of seasonal runoff distribution and analyzing the contribution of the impacting factors will help to further understand the hydrological responses of river runoff to global warming and the increasingly intensified human activities in the Wei River Basin. In this study, concentration ratio and unevenness coefficient indices were employed to analyze the spatiotemporal trend of seasonal runoff distribution of the Wei River based on the runoff, precipitation, and potential evaporation monthly time series data in 1960-2005. The Mann-Kendall method was used to analyze the trend of the concentration ratio and unevenness coefficient at the Linjiacun, Zhangjiashan, and Huaxian Stations; the heuristic segmentation method was used to detect the change points of the runoff distribution characteristic values; and the slope change ratio comparison method was employed to quantitatively compute the contribution of climate change and human activities to the change in runoff seasonal distribution characteristic values. The results indicate that: (1) characteristic values of the observed season runoff distribution (concentration ratio and unevenness coefficient) of the Wei River show an upward trend and at the Zhangjiashan Hydrological Station these values show a remarkably increasing tendency, which is significant at the 99% levels. The risk of drought and flood has increased in this basin as a result of this change; (2) the characteristic values of the observed runoff seasonal distribution at the Linjiacun and Zhangjiashan Stations have a change point in 1973, while those at the Huaxian Station has no change point. The possible reason for this difference is that the Huaxian Station receives runoff from nearly the whole river basin where the effect of human activities, for example, construction of reservoirs and water diversion works, is limited. Part of the water diverted at the upper and middle reaches returns to the lower reach of the Wei River; (3) the contribution of climate change and human activities to the change in runoff concentration ratio and unevenness coefficient at the Linjiacun Station is 27.15%, 72.85% and 12.1%, 87.9%, respectively and that at the Zhangjiashan Station is 39.11, 60.89% and 4.62%, 95.38%, respectively. The main driving factor of the change in runoff seasonal distribution of the Wei River is human activities, but climate change has also played an important role. Since the Wei River Basin is a typical arid and semi-arid region, the findings of this research can be an useful reference for other similar areas of the world.

Key words: runoff seasonal distribution; concentration ratio; unevenness coefficient; heuristic segmentation method; slope change ratio comparison; the Wei River