

孙悦,李栋梁,朱拥军.渭河径流变化及其对气候变化与人类活动的响应研究进展[J].干旱气象,2013,31(2):396-405,doi:10.11755/j.issn.1006-7639(2013)-02-0396

渭河径流变化及其对气候变化与人类活动的响应研究进展

孙悦¹,李栋梁¹,朱拥军²

(1.南京信息工程大学大气科学学院,气象灾害省部共建教育部重点实验室,江苏南京 210044;2.甘肃省天水市气象局,甘肃天水 741000)

摘要:渭河是黄河流域的最大支流,流域内径流量在1980年代后发生了锐减,对两岸的生态安全和经济发展都造成了威胁。本文总结了近年来在渭河径流变化及其对气候变化和人类活动响应的研究进展。渭河径流空间分布差异大,年内分配不均,年际、年代际丰枯震荡明显;流域内降水量减少、气温升高、蒸发量增大,使得径流量减少;近年来人类活动对径流的直接、间接作用也使得径流量显著下降。同时提出该领域的研究存在一定不足,并指出在未来研究中,应注重将水文模式与统计方法相结合,就渭河径流对气候变化与人类活动的响应进行更加深入的研究。

关键词:渭河流域;径流变化;气候变化;人类活动

文章编号:1006-7639(2013)-02-0396-10 doi:10.11755/j.issn.1006-7639(2013)-02-0396

中图分类号:P461

文献标识码:A

引言

随着全球气候变化和人类土地利用方式的改变,流域水资源正发生着显著的变化,主要表现为河道内径流量的不断减少。随着工业、农业的大力发展,尤其是进入到20世纪80年代后,水资源供需矛盾日渐突出,人类活动的影响日益显著;径流的变化特征已经不单纯由气候因子的时空变化决定,人类活动的影响使径流的变化规律趋于复杂化。

国内外的学者对河川径流的变化及其受气候和人类活动的影响给予了很高的关注。Nemec等^[1]指出若气温升高1℃,降水减少10%,干旱和湿润地区径流的变化幅度为25%及50%,说明了气候因子的变化会在径流的响应中被放大。Pikounism等^[2]利用分布式水文模型SWAT(Soil and Water Assessment Tool)研究了不同土地利用变化对水文循环的影响。李栋梁等^[3]指出前期青藏高原热力作用及大气环流特征对黄河流域夏秋季的径流量预测具有一定指示性。张建云等^[4]对近50a来中国6大流域的年径流变化趋势进行研究,结果表明受人类活

动和气候变化的影响,6大江河的实测径流量整体上呈下降趋势,其中黄河流域中下游地区的径流量减少十分明显。张强等^[5]也指出气候变化背景下,我国西北地区的泾河、渭河水系水资源减少最为明显。

我们关注的研究区域——渭河,位于黄河中游,发源于甘肃省渭源县鸟鼠山东麓,流域涵盖甘肃、宁夏、陕西3省的部分地区,从西至东横贯富饶的关中平原,至陕西省潼关县港口镇汇入黄河,全长818km,流域面积13.43万km²。它是黄河流域的第一大支流,是甘、陕2省的母亲河,担负着两岸人民的生活用水和工农业用水需求;它地处西北比较发达的地区,对西北区域经济的发展有引领作用。所以对渭河径流变化及原因的研究不仅是黄河治理的一个重要部分,对西部大开发也具有重大意义。尤其进入20世纪80年代以后,渭河水量日益减少,水质日益恶化,泥沙大量淤积,洪灾频繁发生,内涝情况加剧^[6],其治理受到党中央、国务院的高度重视和有关专家及社会各界的普遍关注。2001年12月,中央领导批示:“渭河综合治理要列入重要议程,首

收稿日期:2013-02-16;改回日期:2013-05-02

基金项目:2010年公益性行业(气象)科研专项(GYHY201006038;GYHY201306027)资助

作者简介:孙悦(1989-),女,天津市人,硕士研究生,主要从事气候动力学与气候变化研究。E-mail:sun606yue@163.com

通讯作者:李栋梁。E-mail:lidl@nuist.edu.cn

先要充分论证,做好规划”。故本文对渭河径流变化及其对气候变化与人类活动响应方面的研究工作回顾与总结,综合分析已有结论,探讨可能存在的问题和值得深入研究的方向,以期对渭河流域水资源的规划和可持续利用提供更完善的理论依据。

1 渭河径流在不同时间尺度和空间上的变化特征

目前,针对渭河径流变化特征的研究,主要是根据实测径流资料,分析径流的主要变化规律,并以此为基础对未来的径流趋势进行预测。而研究方向主要包括3个方面:(1)对径流年内分配及其随时空变化特征的研究;(2)对径流年际变化及其空间差异的研究;(3)对径流年代际变化及其空间差异的研究。

1.1 径流年内变化特征

渭河位于秦岭以北,属于降水补给性河流,处于夏季风活动北边缘带^[7-8],具有东亚夏季风边缘带一般河流的特点。其年内分配具有明显的时间分形结构,即随降水量季节的变化而呈现不均匀性和周期性变化^[9-10]。研究者通常使用2种方法来分析这个问题:一种是通过计算各月径流百分比来反映径流的年内分配;另一种是采用某些特征值来综合反映径流的年内变化情况。

采用第一种方法,有学者指出渭河径流主要集中在5~10月,占年径流总量的75%左右^[11],进入1970年代后汛期(7~10月)径流占全年的百分比值一般要高于1970年代前,而非汛期(11~6月)则恰恰相反,这体现出年径流量更为集中在汛期,年内分配愈发不均匀^[12];在径流集中期(汛期),渭河上游径流量占年径流总量的56.7%~68%,径流集中程度相对降水滞后一个月^[13]。杨美临等^[14]通过第二种方法揭示径流的年内变化,通过计算年内分配不均匀系数与完全调节系数指出,1990年代,径流年内分配比较集中,而中下游流域均表现为1980年代比较集中,1960年代相对均匀;径流的集中期和集中度也随时间发生了一定改变,且上游与下游存在一定差异;各年代年内分配峰型不同,这可能一定程度上预示了气候波动和人类活动对径流的影响。

总之,渭河径流的年内分配比较集中,具有较高的不均匀性,汛期径流量的减少是年径流下降的主要原因。

1.2 径流年际变化特征

受大气环流和季风气候的影响,渭河径流量年际变化大,统计结果显示流域内实测最大年径流量与最小年径流量比值最高可达132.5^[11],且年平均径流丰枯变化剧烈,这对渭河沿岸的防汛抗旱和水资源利用都提出了挑战,而确定年径流序列的趋势、丰枯振荡规律和周期性变化是揭示渭河径流年际变化特征的关键所在。

应用Mann-Kendall法,马晓超^[15]指出自1960年代至今渭河流域年平均径流量呈现明显的下降趋势。田宏伟^[16]也指出渭河径流锐减趋势明显,尤其在1990年后产流能力仅为过去的1/3;通过对华县站1937~2004年径流的丰枯年进行统计,发现该站连枯年最长达11a,连丰年最长仅有4a,连枯年出现的次数也多于连丰年;同样,文献^[11]对渭河其他水文站的研究也验证了枯水段在渭河年径流丰枯变频中占优势的结论。

关于径流变化周期性的研究,邓振镛等^[17]指出渭河上游的年径流量存在17a、13a、4a的变化周期;毛明策等^[18]则指出渭河下游年径流存在3a的波动主周期,这也体现了渭河径流量变化存在上、下游的空间差异性。

总之,近50a来渭河径流量年际变化大,具有一定的周期规律,径流总体的下降趋势显著,丰枯震荡剧烈,枯水段出现频次较高。

1.3 径流年代际变化特征

大部分学者利用统计方法计算各年代渭河径流量与多年平均值的比值或根据距平百分率分析渭河的年代际变化,并利用多种检验方法确定径流的突变年。

邢大韦等^[19]指出渭河径流的年代际变幅为71%左右,存在丰—平—枯的时段变化,1960年代为丰水期,1970、1980年代为平水期,1990年代后渭河进入了枯水期。文献^[13]利用距平百分率划分径流的丰枯时段,得到与邢大韦相同的结论,且指出渭河各站枯水段平均径流量仅占丰水段平均径流量的19.2%~38.1%。文献^[11]验证了流域径流的年代际丰枯变化规律,并指出1960~2009年间径流序列的气候倾向率在 $-17.752(\text{m}^3/\text{s})/10\text{a}$ 到 $-37.654(\text{m}^3/\text{s})/10\text{a}$ 之间,径流下降趋势明显。

因为Mann-Kendall检验法可以克服序列开头几年和结尾几年处理的难题,很多学者采用该方法对渭河的突变年份进行检验,但由于得出的具体突变年份和样本容量与样本趋势有关,不同学者应用不同时间段做检验所得的径流由多到少的突变年份并不相同,但基本都在1990年附近摆动^[20-22]。也

有学者^[15]采用其他的突变检验方法(如序列聚类分析法、Petitt 法、秩和检验法)诊断渭河径流序列的突变点,结果与采用 Mann - Kendall 检验法所得结论具有一致性,可见渭河径流量是在进入 20 世纪 90 年代时发生了突变,流域进入枯水期。

可以看出,关于渭河径流年代际变化的研究结论基本一致:渭河流域近 50 a 来在年代际上具有明显的丰枯变化特征,径流量随时间呈现阶梯式递减变化,由丰水期逐步转型为枯水期,且这种变化具有突变的性质,现阶段流域正处于枯水期。

1.4 径流空间分布差异

从径流空间分布上来看,渭河南北两岸径流深度相差可达 7.8 倍,属于不对称水系,南岸径流量较大,占渭河径流量的 70% 以上,而北岸的径流量所占比重不足 30%。这是由渭河两岸的地理环境决定的,南岸支流发源于植被茂盛的秦岭山区,水土涵养功能较好,水量大且含沙量较少;而其北岸支流发源于黄土高原和黄土丘陵,水土涵养功能差,水量小且泥沙含量大。

由于渭河的水系庞大,其上下游径流的变化也存在差异。在年内分配上,通过计算径流特征值可知,渭河下游的径流量年内分配不均匀性通常要大于中上游,更为集中于汛期,并且下游径流的年内变幅也要大于中上游^[14];在年代际变化上,通过计算渭河径流气候倾向率和径流百分比可知,渭河径流减小量自上游到下游逐渐上升,而上游径流在年际丰枯变化上更为剧烈;在空间变化上,应用径流溯源理论可知,1970 年后甘肃段渭河径流空间持续性减小,且下游的减小速度大于上游^[11,23]。除此之外,有学者^[11]也对径流的其他特征及其影响因子进行了比较(表 1):上下游发生突变的时间不尽相同,降水与人类活动对全流域的径流变化都有显著影响,其中人类活动的影响是主要因素,且对上游径流变化的影响更大。

总之,渭河流域内的径流具有很强的空间分布差异,无论在水系分布还是趋势变化上都有所不同,所以对渭河水资源进行利用和抗旱防汛要有区域针对性,从而提高水资源的管理效率。

综上所述,对渭河径流量变化趋势和年内分配的研究已有一定基础,且结论基本一致。但还有一些问题需要解决,比如对径流序列的周期性变化的研究比较薄弱,对年径流丰枯变频特征和短周期振荡规律方面的研究存在不足,尤其缺乏对不同时间尺度周期的分类,这样就不便在下一步研究中寻找存在同样周期变化的影响因子,从而进一步探讨不

同时间尺度下径流变化的原因。

表 1 渭河流域 1960 ~ 2009 年各水文站年径流特征值比较(引自候钦磊(2011))

Tab. 1 Characteristic value comparison of annual runoff in each hydrologic station in Weihe River Basin from 1960 to 2009(From Hou (2011))

	上游 林家村站	中游 咸阳站	下游 华县站
多年平均流量/(m ³ /s)	54.51	120.11	205.01
气候倾向率/((m ³ /s)/10 a)	-17.752	-29.285	-37.654
突变时间	无	1986	1989
年际变差系数 C _v	0.622	0.591	0.520
年际极值比	28.57	21.14	11.10
降水对径流影响率/%	13.82	17.63	20.67
人类活动对径流影响率/%	86.18	82.37	79.33

2 渭河径流变化与气候变化的关系

气候变化对径流的影响是指大气中的温度、降水等因子的变化改变了陆地水文循环,进一步影响了水文径流过程^[24]。目前,渭河径流对气候变化的响应研究主要分为以下 3 个方面:(1)比较长序列径流与气象数据的变化趋势,通过计算两者的相关关系定性分析气候变化对径流的影响;(2)利用水文模型定量计算气候因子和非气候因子在径流变化的驱动力中所占比重,并对未来水资源演变情形进行模拟预测;(3)根据水文数据序列与气象因子序列变化的相关性,选择适当的因子构建多元回归模型,预测未来的水文情况。

气候因子中与径流变化联系最密切的是降水、气温和蒸发这 3 个因子,它们的时空分布特征极大地影响着渭河流域水资源的变化规律及未来情形。

2.1 径流变化与降水变化的关系

很多文献指出降水的变化对径流变化有着十分重要的影响作用。Chiew 等^[25]在研究了气候变化对澳大利亚境内 28 条具有代表性的河流的影响后指出,在干旱流域降水的变化反映在径流的响应上一般会被扩大。张国胜等^[26]和王金花等^[27]均指出,在黄河流域,降水是影响径流变化的主要因子。上文已提及渭河属于降水补给河流,故降水—径流变化的关系一直是学者们关注的重点。

2.1.1 渭河流域降水量的时空变化特征

近 50 a 来渭河流域降水量呈现下降趋势,10 a

平均降幅约为 2 mm,但下降趋势因时间与空间而异^[28]。

在年代际变化上,降水量最多的是 1960 年代,最少的是 1990 年代,进入 1990 年代后降水量急剧下降且变化明显,这与径流变化的趋势也十分吻合。近 50 a 渭河流域降水不存在突变年,而 1982 年与 2003 年为渭河流域降水大的转折年份^[28]。在周期变化方面,降水年际丰枯变化大体上 10 a 发生一次,这个 10 a 周期与太阳黑子的 11 a 活动周期十分接近;王春学等^[29]、王楠等^[30]指出包括渭河流域在内的黄河流域夏季降水存在 2~3 a 的周期变化,这可能是受高原积雪与西太平洋暖池 SST 的影响。

同时,由于渭河流域位于东亚副热带夏季风的北边缘带,降水的季节变化特征也十分明显。暖季的降水变率小、变化平缓;冷季的降水量小、变率大,易出现极值^[31]。冬季受极地大陆冷性气团(以蒙古高压为主)控制,气候干燥而寒冷,降水量仅占全年的 7% 左右;而在夏季随着副热带季风北界的北移^[7-8],热带太平洋水汽沿西太平洋副热带高压西侧,孟加拉湾水汽沿西南低涡下部的西南季风北上在副热带锋区形成大范围降水,使得 6~9 月的降水量达全年的 60% 左右,且降水多以暴雨形式集中出现^[32-33]。

在空间分布上渭河降水具有南北梯度大、东西差异小的特点,等值线分布呈西南—东北走向或东—西走向 2 种类型^[34]。年降水量总体东南多、西北少^[35]。

2.1.2 径流对降水变化的响应

渭河流域降水量对径流的影响表现在直接、间接 2 个方面:降水量减少会直接导致渭河产流量下降,同时也会导致同期人类活动需水量的增大,进一步导致径流量的下降^[16]。利用数理方法(比较同期径流与降水在数量上的差值)和利用平衡水文模型分析渭河径流对降水的响应程度所得结论基本一致:不同时期人类活动和降水变化对径流的影响程度不同,但 1980 年代以来,降水变化造成的影响呈增加趋势;到了 1990 年代,降水的变化已成为径流减少的主要影响因素^[32,34]。

渭河上游降水量的第一显著周期为 17 a,其次是 13 a,年径流量存在 17 a、13 a、4 a 的变化周期,两者的主要波动周期基本一致^[17,36];而渭河下游径流的 3 a 主周期也与黄河流域 2~3 a 降水的主周期基本一致,这说明大气降水的周期性年际变化对渭河径流变化有很大影响。同时,渭河下游汛期降水对径流的影响更为显著,流域内除六盘山地区,各分

区的波动主周期与降水的周期匹配都十分吻合^[18],而渭河径流的周期变化与河西走廊的许多内陆河流具有较高的相似度。

王西琴等^[37]通过比较指出,应用线性相关描述渭河径流与降水的相关关系更为合适。姚玉壁等^[38]计算了两者的线性相关系数,发现为显著的正相关关系,即当降水补给量增加时,径流量随之增加,两者的相关系数通过了 0.01 显著性水平检验。董安祥等^[39]对包括渭河流域在内的西北区域气候变化进行研究时也指出,径流空间分布与降水分布相对应,河流径流量与流域内降水变化呈显著同位相变化。牛最荣^[23]采用延时频率分析 1982 年之前和之后的年径流与降水分布特征,发现甘肃境内渭河径流的延时频率与降水的延时频率分布相似,但存在一定差异,径流量总体上是频率减小,差值增大;而降水随频率变化表现出阶段性差异。由此可见降水并不是影响径流变化的唯一因素。

2.2 径流变化与气温变化的关系

近百年来,全球增温是一个不争的事实,IPCC 第四次评估报告显示近 50 a 来全球平均线性增温速率是近 100 a 的 2 倍之多。它导致了一系列的气候和环境问题,其中温度因子的改变对水资源的数量与质量的影响尤其值得关注^[40]。中国是全球变暖的显著区域,且据研究我国北方地区未来 30~50 a 气温仍可能持续升高^[41]。刘吉峰等^[42]指出,黄河流域的水资源体系对气候系统的变化非常敏感,而气温升高也是影响其径流量锐减的重要原因之一。作为黄河第一大支流的渭河,流域内气温的变化规律也受到越来越多的关注。

2.2.1 渭河流域气温的时空变化特征

渭河流域的多年平均气温具有统计意义上的上升趋势,气候倾向率达 0.3 °C/10 a,冬、春季增温趋势尤其明显,秋季的线性上升趋势最弱^[43-44]。1984 年是渭河增温的转折年份,1984~2008 年的线性增温速率达到 0.5 °C/10 a,高于同期同纬度甘肃省其他地区的平均增温^[45]。除平均气温的变化外,渭河流域的极端气温也发生了变化,焦彩强等^[35]指出渭河主要代表站的极端最高气温呈现先上升后下降的变化趋势,而极端最低气温却与之相反;同时近年来极端最高气温越来越高,极端最低气温越来越低,气温极差增加。文献[23]指出,渭河流域气温的变化与地理高度密切相关;甘肃省内天水市区为相关最高的中心,向四周辐射性降低;同时比较了气温与降水的序列的倾向率,发现气温的递增速率大于降水的递减速率,气温呈现了稳定升高的趋势,尤其进入

21 世纪后升温速率更加显著。

渭河流域气温变化与全球气温变化的趋势基本一致,说明全球增温是渭河流域增温的大背景,而渭河流域的增温是全球增温的组成部分。

2.2.2 径流对气温变化的响应

沈大军等^[46]指出气温对径流的影响体现于 2 方面,一是气温的升高会导致区域潜在蒸发量的增加;二是气温的增高会加剧水文系统的循环,在蒸发量增加的情况下会引起更多的降水量,故气温对径流变化是一个间接的作用因子。国内学者主要是通过计算长时间的气温与径流序列的相关系数来定性研究这个问题。

研究证明,虽然降水对径流变化的影响更为显著,但在降水量相同的情况下,渭河径流量较为明显地受到同期气温变化的影响^[47];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,经检验两者的相关关系通过了 0.01 显著性水平^[37-38]。和宛琳等^[48]利用偏相关分析法也得出了径流与气温的变化有显著相关的结论,并结合降雨量构建了研究渭河干旱程度的干旱指数与径流的丰枯变化进行比较,经验证明该指数具有较高的适用性,这也从一个侧面验证了气温是径流变化的原因之一。可见,虽然渭河径流变化与气温的相关性低于与降水的相关性,但气温的变化仍然是导致径流变化的一个不可忽视的原因,尤其在全球变暖的气候背景下,径流受气温影响的机制研究更应该受到学者的重视。

综上所述,关于渭河径流对气温的响应已经有了一定的研究基础,但这方面的研究相对与降水关系的研究还比较薄弱,尤其缺乏定量性质的结论,这样就不便我们对径流的变化进行归因与预测。

2.3 径流对蒸发因子的响应

上文已提及,气温升高会直接导致流域潜在蒸发量的增大,使得地表水资源减少。故蒸发的改变是除降水量的改变之外对径流量影响最直接的一个因子,故其时空变化也引起了学者的关注。

2.3.1 渭河流域蒸发量的时空变化特征

渭河流域水面蒸发量呈现由南向北、由山区向平原递增的特点。全年最小蒸发量一般出现在 1 月和 12 月,最大蒸发量一般出现在 6 月^[6]。

利用 FAO Penman - Monteith 公式计算可得,自 1970 年代以来,渭河上游潜在蒸散量具有先下降后上升的趋势,转折年份是 1983 年,逐季的蒸散量变化趋势也有所不同^[44]。胡凝等^[49]对陕西渭河流域 1981 ~ 2010 年 20 cm 口径蒸发皿观测值进行统计

后指出,流域内蒸发量呈微弱上升趋势,这与平均气温、日照时数和降水量的变化有密切关系。王升等^[50]也认为,上述因子对区域潜在蒸散量的变化影响很大,且由于未来一段时间内相对湿度下降,气温升高,区域潜在蒸散量将会升高。左德鹏等^[51]应用降尺度模式对渭河潜在蒸散量未来的时空变化进行模拟指出,年潜在蒸散量未来一段时间内会呈现出明显上升趋势,且 A2(人口快速增长,经济发展缓慢、技术进步缓慢)情形高于 B2(人口和经济增长速度处于中等水平,强调经济、社会和环境的可持续发展)情形下的增幅;增幅较大的地区主要分布在渭河南岸,渭河北岸大部分地区变幅较小。

2.3.2 径流对蒸发量变化的响应

李林等^[52]指出由于流域内日照时数、气温及空气饱和差呈上升趋势,黄河上游蒸散量随之增大,故而水资源随之减少;又由于同期降水量的减少,加剧了黄河上游气候的干旱化,构成了黄河径流断流的主要气候原因。张学成等^[53]指出,由于蒸发损失增加导致渭河的入黄水量减少 1.66 亿 m^3 , 占有减少量的 5%。李荣等^[54]指出人类活动和包括蒸散量在内的气候因子对黄河三花间径流的影响较大,在 20 世纪 90 年代两者的比例为 5.5:4.5,而近年来上升至 7:3。王云琦等^[55]应用分布式水文模型 PRMS 对美国 Trent 流域径流对气候变化的敏感性进行模拟,发现年产流量受降水的影响最大,其次就是气温和蒸散量;在未来 8 种土地利用与气候变化条件下对径流量进行预测,发现流域蒸散和产流量变化趋势与降水量基本一致。

有关文献表明在我国年降水量 < 800 mm 的区域,蒸发能力远大于降水量,它对径流量的变化有着直接且明显的影响作用^[56],可见考虑蒸发量的变化与径流变化的关系是十分必要的,但尚未有学者研究其对渭河径流变化的影响。而在近 100 a 的时段上,我国西部大部分地区仍处在一个干旱化的进程中,虽然部分地区有由暖干向暖湿转变的迹象,但西北东部目前仍比较干旱^[57-58],这对渭河径流变化的影响也十分显著。深入分析蒸散量变化对径流影响,可以很好地补充这方面研究的不足,完善干旱气候背景下径流变化的特征研究。

关于渭河径流变化与气候变化两者的关系已具有一定的研究基础,但对于气温、蒸散等因子的研究还十分薄弱,只有少数定性结论初步解释了它们与径流变化的关系;相比之下,关于降水—径流关系的结论比较清楚,但我们也看到,研究者更多把关注点放在降水量与径流量的关系上,而忽略了降水性质

对径流的影响,且对流域面雨量与径流关系的关注度也还不够。同时,径流对不同时间尺度的气候变化的响应和丰、枯年对应何种大气环流异常型并没有给出相应结论,而这是解释气候变化导致径流量异常形成机理的关键。

3 渭河径流变化与人类活动的关系

目前,人类活动在一定程度上逐渐无意识地破坏了西北地区水循环的脆弱平衡,对包括渭河在内的河流造成了直接和间接的影响,并导致了一系列的生态环境问题^[59]。直接影响是指由于渭河沿岸人口增加和经济社会发展引起的用水量增加,使得流域内地表径流量减少;间接作用是指由于土地利用、土地覆盖变化对渭河流域的产、汇流造成了影响,从而导致了渭河径流量的变化^[60]。其中间接作用又称为人类活动导致的土地利用/覆盖变化(LUCC)带来的水文水资源效应^[61],它具体是指由于水资源的开发利用、水利工程的兴建、农业灌溉面积的增大、城市化的推进等种种因素的影响,使得土地的覆盖状态发生了改变,影响到以土地为下垫面的水文循环和水资源形成过程,从而导致水资源在时间和空间上的分布特征都发生了显著的变化。

由于人类活动具有很大的复杂性和变化性,准确地定量其影响率具有很大的困难,一般都采用估算或定性的分析^[62]。目前,研究渭河流域的人类活动对径流的影响方法主要有以下3种:(1)分项统计法。对人类活动引发的水文事件消耗的径流量做统计,与实际径流量相加后得到天然径流量,分析人类活动消耗的径流量与天然径流量的比值,估算人类活动造成的影响。(2)数理分析法。对长期的水文数据做数理统计,利用线性分析计算法计算出人类活动的贡献量,或绘制累计曲线法估算人类活动的影响,通过判断累积曲线发生系统偏离的拐点和偏离程度,估算人类活动对径流影响开始的年份及影响率。(3)水文模拟法。利用合适于该区域的水文模式,基于数学或物理机制,率定由气候变化和人类活动造成影响的参数,模拟计算2种因素对径流变化影响的比重,旨在从过程和机理上深入研究径流对人类活动的响应。

3.1 分项统计法

通过对工程引水、水库蓄水、灌溉用水等各种人为因素的用水量进行统计,发现20世纪90年代,相比气候变化,以水土保持工程为主的人为因素约占渭河下游径流减少量的60%,是径流减少的主要诱因^[19]。以陕西省境内渭河水资源的构成为例,通过

对天然径流量和还原水量随时间的趋势变化及两者的比值随时间的变化进行分析可知,近50 a来人类活动影响的比重增大了3倍,是渭河径流减少的重要原因之一^[32]。刘登伟等^[63]则指出渭河径流系统的突变与局部的人类活动没有直接的关系,而是由大尺度的气候变化引起的;人类活动对环境的影响是平缓的量变过程,发展到一定的阶段不排除质变的可能。

3.2 数理分析法

有学者采用线性分析法计算各因子对渭河径流改变的贡献量,指出气候因子的贡献量随时间逐渐减少,1980年代前它是径流改变的主因,而1980年代后人为因素逐渐成为主要的影响因素^[37]。也有学者选择径流累计曲线法对渭河径流受人类影响的开始时间及程度进行分析。祝田多娃等^[64]指出渭河上游在1980年代中期后,累计曲线偏离了系统且偏离趋势逐渐增加,表明径流在1980年代中期开始受到人类活动影响,且程度逐渐增大。魏红义等^[65]指出渭河下游流域受人类活动影响的开始时间更早,在1970年曲线就偏离了系统;将1956~1969年径流作为未受人类活动干扰“前期”序列与1970~2000年的“后期”序列进行比较可知,气候和人类活动对径流减少的影响率基本各占50%。若假设降水是径流变化的唯一气候因素,构造降水—径流双积累曲线计算气候因素和人类活动对径流变化的影响率,所得人为因素影响率显著增大,达到79%以上^[11],可知气温与蒸散量等其他气候因素在径流的变化中确实具有不可忽视的作用,加强该方面的研究,对推进径流变化原因的定量化分析十分必要。

3.3 水文模式法

王海龙等^[66]依据SWAT在渭河流域一级支流藉河的一条支沟应用的不适用性对模型进行调整,调整后该模型对此小型流域模拟的精度和相关性都有所增加,极大地提高了SWAT模型在黄土丘陵沟壑区的可用性。因为近50 a来人类利用土地方式的改变对渭河流域水资源系统的影响是不可忽视的,所以LUCC对水文循环系统的影响也是目前水文学研究的热点与难点。应用SWAT,胡宏昌等^[67]指出20世纪80、90年代渭河年平均径流量的变化受气候波动的影响为85%,受LUCC的影响约为15%;而非汛期径流量的变化受气候影响约为70%,LUCC的影响约为30%,可见人类活动对非汛期水资源的影响更大。牛最荣等^[68]利用数理方法和水文模型研究LUCC的变化及其对径流的影响,也证实人类活动对渭河年径流量的变化有显著影

响,且该影响具有季节性特征,对暴雨形成的洪水过程的影响有延时效应。

总之,渭河流域的人类活动对径流的影响具有一定的研究基础,但是采用不同方法进行研究得到的结论并不一致。目前,运用前 2 类方法对人类活动做估算的研究成果比较多且结论大致相似,但是其考虑的变化因子过于单调,统计量的精确度不高,数理统计的结果只能在宏观角度帮助我们认识这个问题。利用水文模型模拟不同情况下流域的产流情况从而分析不同影响因子的影响率是水文研究的新方向,它不仅可以提高研究结果的精度,同时可以从机制上帮助我们理解水文过程存在的问题;但水文模式在渭河流域的应用目前还在起步阶段,研究结果有一定的局限性,这也是我们未来研究的着眼点。

4 径流未来的变化趋势

随着未来一段时间社会发展和气候的变化,渭河径流也会随之产生变化,而这种变化的趋势与两岸居民的生产生活密切相关,故很多学者也就该问题展开了一定研究。

由径流自身的持续性变化特征,有学者^[65,69]采用重新标度分析法(Rescaled Range Analysis,简称 R/S 分析法)预测渭河径流量未来的变化趋势,结果表明未来径流的变化趋势与历史流量呈明显正相关,未来一段时间内很有可能依旧呈下降趋势。未来 50 a 内影响径流的气候因素也会发生变化,据李栋梁等预测渭河流域可能发生气温上升、降水量由异常偏少转为偏多的变化,2010~2050 年渭河流域的旱涝等级会由 20 世纪末的干旱级转为正常^[57]。综合 IPCC、区域气候模式和大气环流模式等模式的模拟结果也可验证,至 2050 年黄河流域的气温将明显升高,降水可能略有增加,这一结果可能会导致水资源继续减少^[42]。除气候变化外,据孙国武等预测西北地区未来人口还将继续增多,在 2050 年将达到顶峰,城镇化率达 52%,这些经济社会发展的结果会导致用水量的增多,即使在充分考虑节水和高效用水的前提下,新增需水量也会达到 80 亿 m^3 ;且同期渭河流域生态需水量也在增多,这些因素都将对径流的变化产生剧烈影响^[70]。考虑到经济发展带来的社会需水量和土地利用的变化,周祖昊等^[71]利用流域水资源二元演化模型模拟了渭河流域水资源未来一段时间的循环过程,预测在 2020 年由于气候变化和人类活动的双重影响,狭义水资源和广义水资源都将减少。

但我们也要认识到,由于观测数据的精度、预测

方法的发展水平等问题,对未来气候进行预测是存在很大不确定性的;水文模式预测的结果虽然具有定量价值,但在中国流域的模拟精度也有待提高;故各个水利部门应按需制定适应性对策,以配合水资源未来的不确定性变化。

5 存在问题与展望

5.1 存在问题

关于渭河径流变化及其对气候变化和人类活动的响应已经取得一定的研究成果,渭河径流量空间分布差异大,年代际、年际丰枯震荡明显,年内分配不均;近 20 a 来流域内降水量减少、气温升高、蒸发量增大,使得径流量减少;人类活动对径流的直接、间接作用也使得径流量显著下降。但是对该领域的研究也存在如下的问题。

(1)对径流的变频特征研究比较薄弱,尤其缺乏研究有相同周期变化的气候因子对径流的影响。

(2)分析降水径流关系时基本上都是应用点雨量来研究,但是某一点的雨量并不能准确地代表渭河流域的平均降水情况。同时,以往的研究偏重关注降水累积量对径流量的影响,而忽视了降水性质对流域径流的影响,而不同性质的降水(如夏季暴雨与华西秋雨)对径流产汇流的影响机制相去甚远。

(3)关于气温、蒸发量对径流影响的研究目前还比较薄弱,只有较少的定性结论,这样在定量分析各个因素对径流变化的贡献时,会造成分析结论有所偏颇;且若用气温或蒸发量作为径流的预报因子就会有一定的不可靠性,预测精度也会相应下降。

(4)在研究气候因子变化与径流的关系时缺乏机理分析,且对水文极端事件的关注较少。

(5)目前,利用水文模式研究径流变化规律、预测未来径流变化是水文领域的热点与难点,在其他国家的许多流域,水文模型已经广泛应用于水沙模拟和水资源管理^[72-73],国内也有学者应用不同的分布式水文模式对黄河流域、黑河流域和汉江流域的径流过程进行模拟,模拟结果精度高,并很好地反映了水文水资源的形成和演变的空间变异^[74-77]。应用水文模型可以深化水资源形成物理过程的研究,相对数理统计方法有较大优越性,但是在渭河流域的应用尚不多见。

(6)由于研究选取的资料长度不同、站点各异以及研究方法的侧重点和精确度不同,关于气候变化和人类活动对渭河径流变化造成影响所占的比重并没有统一结论。

5.2 展望

随着气候变化和人类活动对渭河径流影响范围的扩大、影响程度的加强,渭河流域水资源的变化必将受到更多学者的关注,在今后的研究中,我们认为有必要在以下方面进行更深一步的探讨。

(1)加强对径流变频特征的研究,寻求存在同样周期变化的气候因子,研究不同的时间尺度下,各影响因子对径流的影响机制。

(2)加强对流域面雨量的分析,从而进一步研究区域降水与径流的关系,提高定量分析的精确度;开展不同性质降水对径流的影响过程研究。

(3)加强渭河径流量对气温和蒸散量的响应研究;同时,在研究气候变化对径流的影响时,应加强已有规律变化的研究。

(4)因渭河是旱涝灾情多发流域,未来应加强对水文极端事件的研究,这一方面完善了水文系统平衡态与极端事件之间的非线性关系的研究,丰富了水文系统对气候变化和人类活动的响应机制研究;另一方面提高了业务部门在实际应用中对于防灾减灾、抗洪防涝、未来水资源持续利用的指导价值。

(5)重视水文模式的发展,提高水文模式在渭河流域的适用性,减小模拟误差,提高拟合精度;提高水文数据的观测质量和中间观测资料的检验精度;考虑由降尺度与土地利用/覆盖变化估计产生的不确定性并将不确定性定量化处理,这些问题都是我们在未来研究中的着眼点。

(6)在未来的工作中,我们应当更加注重水文资料的优化选取,并采用水文模型与统计技术相结合的方法对观测的以及未来预测的渭河径流变化趋势进行气候变化与人类活动变化的检测与归因研究,从而得出更加全面和可信的分析结论。

参考文献:

[1] Nemeec J, Schaake J. Sensitivity of water resource systems to climate variation[J]. Hydrologic Science Journal, 1982, 27(2): 327-343.

[2] Pikounism, Varanoue, Baltase, et al. Application of the SWAT model in the pinios river basin under different land-use scenarios[J]. Global Nest: The Int J, 2003, 5(2): 71-79.

[3] 李栋梁, 张佳丽, 全建瑞, 等. 黄河上游径流量演变特征及成因研究[J]. 水科学进展, 1998, 9(1): 22-28.

[4] 张建云, 章四龙, 王金星, 等. 近50年来中国六大流域年际径流变化趋势研究[J]. 水科学进展, 2007, 18(2): 230-234.

[5] 张强, 张存杰, 白虎志, 等. 西北地区气候变化新动态及对干旱环境的影响—总体暖干化, 局部出现暖湿迹象[J]. 干旱气象, 2009, 28(1): 1-7.

[6] 张艳玲. 陕西省渭河流域水文特性分析[A]. 西北水资源与水利工程, 2002, 13(2): 62-64.

[7] 黄菲, 李栋梁, 汤旭, 等. 用过程透雨量确定的东亚夏季风北边缘带特征[J]. 应用气象学报, 2009, 20(5): 530-538.

[8] 李栋梁, 邵鹏程. 近60a东亚副热带夏季风北边缘位置的地域特征[J]. 中国沙漠, 2013, 33(待发表).

[9] 查小春, 延军平. 全球变化下秦岭南北河流径流泥沙比较分析[J]. 地理科学, 2002, 22(4): 403-407.

[10] 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, 22(6): 585-590.

[11] 候钦磊, 白红英, 任园园, 等. 50年来渭河干流径流变化及其驱动力分析[J]. 资源科学, 2011, 33(8): 1505-1502.

[12] 冯国章, 李佩成. 人类活动对渭河流域径流情势的影响浅析[J]. 西北水资源与工程, 1996, 7(3): 26-42.

[13] 张瑞祥. 渭河上游50a来实测径流量变化特征[J]. 甘肃水利水电技术, 2009, 45(12): 7-9.

[14] 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, 11241.

[15] 马晓超, 粟晓玲, 薄永占. 渭河生态水文特征变化研究[J]. 水资源与水工程学报, 2011, 22(1): 16-21.

[16] 田宏伟. 渭河径流特性研究[J]. 灾害学, 2006, 21(2): 99-102.

[17] 邓振镛, 张强, 李栋梁, 等. 气候变化对渭河上游径流量和输沙量的影响[J]. 中国沙漠, 2006, 26(6): 983-986.

[18] 毛明策, 王琦. 渭河流域近40a来汛期降水特征分析[J]. 人民黄河, 2010, 32(12): 64-65.

[19] 邢大韦, 王耀荣, 张玉芳. 渭河径流变化的影响原因分析[J]. 水资源与水工程学报, 2007, 18(2): 1-4.

[20] 王生雄, 魏红义, 郑晓梅. 渭河流域径流序列趋势及突变分析[J]. 水资源研究, 2008, 29(3): 1-3.

[21] 刘登伟, 延军平. 秦岭南北径流变化特征对比分析[J]. 干旱区资源与环境, 2008, 22(11): 63-68.

[22] 陈强, 陈建国. 渭河下游水沙变化趋势分析[J]. 水利科技与经济, 2012, 18(4): 45-47.

[23] 牛最荣, 赵文智, 刘进琪, 等. 甘肃渭河流域气温、降水和径流变化特征及其研究[J]. 水文, 2012, 32(2): 79-85.

[24] 董磊华, 熊立花, 于坤霞, 等. 气候变化与人类活动对水文影响的研究进展[J]. 水科学进展, 2012, 23(2): 279-286.

[25] Chiew F H S, McMahon T A. Application of the daily rainfall-runoff model MODHYDROLOG to 28 Australian catchments[J]. Journal of Hydrology, 1994, 153: 386-416.

[26] 张国胜, 莅临, 时兴合, 等. 黄河上游地区气候变化及其对黄河水资源的影响[J]. 水科学进展, 2000, 11(3): 277-233.

[27] 王金花, 康玲玲, 余辉, 等. 气候变化对黄河上游天然径流量影响分析[J]. 干旱区地理, 2005, 28(3): 288-231.

[28] 张宏利, 陈瑜, 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.

[29] 王春学, 李栋梁. 基于MTM-SVD方法的黄河流域夏季降水年际变化及其主要影响因子分析[J]. 大气科学, 2012, 36(4): 823-834.

[30] 王楠, 李栋梁, 张杰. 黄河中上游流域夏季异常降水的变化特征及环流分析[J]. 干旱区地理, 2012, 35(5): 754-763.

[31] 李国军, 李晓媛, 王振国, 等. 黄河上游水源补给区气候变化及对水资源的影响[J]. 干旱气象, 2007, 25(2): 67-70, 89.

[32] 刘燕, 李小龙, 胡安焱. 河川径流对降水变化的响应研究——以

- 渭河为例[J]. 干旱区地理, 2007, 30(1): 49-52.
- [33] 王楠, 李栋梁, 张杰. 黄河中上游季节内强降水的时间非均匀性特征及其对大气环流的响应[J]. 中国沙漠, 2013, 33(1): 239-248.
- [34] 王云璋, 王国庆, 王昌高. 近十年渭河流域降水特点及其对径流影响的初步分析[J]. 人民黄河, 1998, 20(10): 4-7.
- [35] 焦彩强, 王飞, 穆兴民, 等. 渭河流域气候变化与区域分异特征[J]. 水土保持通报, 2010, 30(5): 27-32.
- [36] 朱拥军, 王秀花. 渭河上游干旱特征与降水对天水市水资源的影响[J]. 干旱气象, 2003, 21(4): 50-54.
- [37] 王西琴, 张远, 张艳会. 渭河上游天然径流变化及其自然与人为因素影响贡献量[J]. 自然资源学报, 2006, 21(6): 981-990.
- [38] 姚玉璧, 张秀云, 段志勇, 等. 渭河源区气候变化及其对水资源的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2011, 29(5): 247-252.
- [39] 董安祥, 白虎志, 雷小斌. 中国西北地区干旱气候学的新进展及其主要科学问题[J]. 干旱气象, 2006, 24(4): 57-62.
- [40] Solomon S, Qin Dahe, Manning M, et al. Climate Change 2007. The Physical Science Basis. I [M]. Cambridge and New York: Cambridge University Press, 2007: 117-118.
- [41] 李维京, 赵振国, 李想, 等. 中国北方干旱的气候特征及其成因的初步研究[J]. 干旱气象, 2003, 21(4): 1-5.
- [42] 刘吉峰, 王金花, 焦敏辉, 等. 全球气候变化背景下中国黄河流域的响应[J]. 干旱区研究, 2011, 28(5): 860-865.
- [43] 和宛琳, 徐宗学. 渭河流域气温与蒸发量时空分布及其变化趋势[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2006, 42(1): 102-106.
- [44] 姚小英, 蒲金涌, 乔艳君, 等. 近 39 年来渭河上游主要气候因子变化特征[J]. 安徽农业科学, 2010, 38(34): 19636-19637, 19721.
- [45] 蒲金涌. 渭河流域上游干湿状况时空分布及其与地表水资源的关系[J]. 资源科学, 2011, 33(7): 1242-1248.
- [46] 沈大军, 刘昌明. 水文水资源系统对气候变化的响应[J]. 地理研究, 1998, 17(4): 435-443.
- [47] 康玲玲, 张亚民, 王玲玲, 等. 黄河中游干旱指数计算方法探讨[J]. 人民黄河, 2004, 26(8): 31-33.
- [48] 和宛琳, 徐宗学. 渭河流域干旱特征及干旱指数计算方法初探[J]. 气象, 2006, 32(1): 24-29.
- [49] 胡凝, 高蓓. 陕西渭河流域蒸发皿蒸发量的气候变化分析[J]. 安徽农业科学, 2011, 39(33): 20877-20880.
- [50] 王升, 王全九. 近 50 年黄土地区气候与潜在蒸散量变化及其影响因素分析[J]. 干旱地区农业研究, 2012, 30(1): 270-278.
- [51] 左德鹏, 徐宗学, 李景玉. 气候变化情景下渭河流域潜在蒸散量[J]. 水科学进展, 2011, 22(4): 455-461.
- [52] 李林, 张国胜, 汪青春, 等. 黄河上游流域蒸散量及其影响因子研究[J]. 气象, 2000, 26(2): 6-10.
- [53] 张学成, 匡铨, 井涌. 20 世纪 90 年代渭河入黄水量锐减成因初步分析[J]. 水文, 2003, 22(3): 43-45.
- [54] 李荣, 阮祥, 王记芳, 等. 气候变化对黄河三花间径流量的影响[J]. 人民黄河, 2007, 29(10): 42-46.
- [55] 王云琦, 齐石, 孙阁, 等. 气候与土地利用变化对流域水资源的影响——以美国北卡罗来纳州 Trent 流域为例[J]. 水科学进展, 2011, 22(1): 51-58.
- [56] 石教智, 陈晓宏. 流域水文模型研究进展[J]. 水文, 2006, 26(1): 18-23.
- [57] 李栋梁, 魏丽, 蔡英, 等. 中国西北现代气候变化事实与未来趋势展望[J]. 冰川冻土, 2003, 25(2): 136-143.
- [58] 马柱国, 黄刚, 甘文强, 等. 近代中国北方干湿变化趋势的多时段特征[J]. 大气科学, 2005, 29(5): 671-681.
- [59] 张强, 赵映东, 张存杰, 等. 西北干旱水循环与水资源问题[J]. 干旱气象, 2008, 26(2): 1-8.
- [60] 刘春蓁. 气候变化对江河流域变化趋势影响研究进展[J]. 地球科学进展, 2007, 22(8): 777-783.
- [61] 陈晓宏, 涂新军, 谢平, 等. 水文要素变异的人类活动影响研究进展[J]. 地球科学进展, 2010, 25(8): 800-811.
- [62] 许炯心, 孙季. 嘉陵江流域年径流量的变化及其原因[J]. 山地学报, 2007, 25(2): 153-159.
- [63] 刘登伟, 延军平. 秦岭南北径流变化特征对比分析[J]. 干旱区资源与环境, 2008, 22(11): 63-68.
- [64] 祝田多娃, 刘燕. 渭河径流的演变分析[J]. 地下水, 2008, 30(1): 103-106.
- [65] 魏红义, 李靖, 王江, 等. 渭河流域径流变化趋势及其影响趋势分析[J]. 水土保持通报, 2008, 28(1): 76-80.
- [66] 王海龙, 余新晓, 武思宏, 等. SWAT 模式灵敏度分析模块在黄土高原典型流域的应用[J]. 北京林业大学学报, 2007, 29(2): 238-242.
- [67] 胡宏昌, 王根续, 李志, 等. 渭河径流对 LUCC 和气候波动的响应研究[J]. 人民黄河, 2008, 30(7): 25-26.
- [68] 牛最荣, 赵文智, 刘进琪, 等. 甘肃渭河流域土地利用及覆被变化对径流的影响研究[J]. 水利水电技术, 2012, 43(4): 5-10.
- [69] 梁东业, 李艳萍, 王晶才. 渭河上游河川径流演变特性分析[J]. 人民长江, 2012, 43(8): 52-55.
- [70] 孙国武. 我国西北地区水的问题综述[J]. 干旱气象, 2004, 22(4): 76-81.
- [71] 周祖昊, 邱亚琴, 贾仰文, 等. 变化环境下渭河流域水资源演变规律分析[J]. 水文, 2009, 29(1): 21-25.
- [72] Santhi C, Arnold J G, William J R, et al. Validation of the SWAT model on a large river basin with point and nonpoint sources[J]. Journal of the American Water Resources Association, 2001, 37(5): 1169-11881.
- [73] Chanasyk D S, Mapfumo E, Willms W. Quantification and simulation of surface runoff from fescue grassland watersheds[J]. Agricultural Water Management, 2003, 59: 137-153.
- [74] 郑红星, 刘昌明, 王忠根, 等. 黄河典型流域分布式水文过程模拟[J]. 地理研究, 2004, 23(4): 2-9.
- [75] 程磊, 徐宗学, 罗睿, 等. SWAT 在干旱半干旱地区的应用——以窟野河流域为例[J]. 地理研究, 2009, 28(1): 65-73.
- [76] 李志, 刘文兆, 张勋昌, 等. 未来气候变化对黄土高原黑河流域水资源的影响[J]. 生态学报, 2009, 29(7): 3456-3464.
- [77] 夏智宏, 周月华, 徐红梅. 基于 SWAT 模型的汉江流域径流模拟[J]. 气象, 2009, 35(9): 59-67.

Advances in Study About Runoff Variation of the Weihe River and its Response to Climate Change and Human Activities

SUN Yue¹, LI Dongliang¹, ZHU Yongjun²

(1. *College of Atmospheric Science, Key Laboratory of Meteorological Disaster
of Ministry of Education, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China;*
2. *Tianshui Meteorological Bureau of Gansu Province, Tianshui 741000, China*)

Abstract: The Weihe River is the largest branch of the Yellow River basin, its runoff has decreased sharply since the 1980s and the ecological security and economic development are threatened. This paper summarizes the recent progress of runoff variation in the Weihe River and its response to climate change and human activities. The results show that the runoff variation has significant spatial differences affected by climate change and human activities, it is mainly concentrated in the flood season with obvious shock in decadal, annual and seasonal variation. In recent years, because precipitation reduced, temperature rised and evaporation increased, the runoff of Weihe River decreased significantly. At the same time, the human activity also unconsciously destroyed fragile balance of northwest water circulation to a certain extent and impacted the runoff of Weihe River in direct and indirect way, and caused a series problems of ecological and environmental aspects. We found that the research on the relationship between temperature, evaporation and runoff was relatively weak. Compared with the mathematical statistical method, the hydrological model has more advantages, but it was rarely applied in Weihe Basin, and the existing conclusion of specific contribution of each factor on the variation of runoff is not uniform, and in the future research we should pay much attention to the response of the runoff to climate and human activities.

Key words: Weihe River; runoff variation; climate change; human activities