

网络出版时间:2014-07-09 11:51

DOI:10.13207/j.cnki.jnwafu.2014.08.024

网络出版地址:http://www.cnki.net/kcms/doi/10.13207/j.cnki.jnwafu.2014.08.024.html

渭河流域气候变化与人类活动对径流影响的定量分析

郭爱军, 畅建霞, 黄 强, 孙佳宁

(西安理工大学 西北水资源与环境生态教育部重点实验室, 陕西 西安 710048)

[摘 要] **【目的】**定量分析渭河流域人类活动和气候变化对径流的影响,为该流域水资源可持续利用与管理提供理论依据。**【方法】**采用累积距平法和 Mann-Kendall 法诊断渭河流域径流序列变异位置,以径流变异之前时间段为基准期,变异点之后时间段为计算期,采用累积量斜率变化率比较法定量分析气候变化和人类活动对径流的影响。**【结果】**渭河流域径流序列分别在 1971、1991 年发生变异,1972—1991 年气候变化对径流减少的贡献率为 14.60%,其中降水、蒸发所占比例分别为 24.55%和 -9.96%,人类活动的贡献率为 85.40%;1992—2005 年,气候变化对径流减少的贡献率为 30.37%(降水占 25.00%,蒸发占 5.37%),人类活动对径流减少的贡献率为 69.63%。**【结论】**人类活动对渭河流域径流的减少有决定性影响,平均贡献率接近 80%。

[关键词] 渭河流域;径流变化;气候变化;人类活动;累积量斜率变化率比较法

[中图分类号] P331

[文献标志码] A

[文章编号] 1671-9387(2014)08-0212-09

Quantitative analysis of the impacts of climate change and human activities on runoff change in Weihe Basin

GUO Ai-jun, CHANG Jian-xia, HUANG Qiang, SUN Jia-ning

(Key Laboratory of Northwest Water Resources and Environment Ecology of MOE,
Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China)

Abstract: **【Objective】** The impacts of climate change and human activities on the decreased runoff in the Weihe Basin was studied to provide theoretical basis for use and management of water resources. **【Method】** Accumulated variance analysis and Mann-Kendall test were used to identify the abrupt change point of runoff, and the method of comparing slope change ratio of cumulative quantity was applied to calculate the effects of climate change and human activities on runoff by taking the period before the abrupt change point as the base period and the period after the abrupt change point as the measurement period. **【Result】** In Weihe Basin the abrupt change points of runoff were 1971 and 1991, respectively. During 1972 to 1991, the contribution of climate change was 14.60%, among which precipitation and evaporation were 24.55% and -9.96%, respectively. The contribution of human activities was 85.40%. During 1992 to 2005, the contribution of climate change was 30.37% (precipitation and evaporation were 25.00% and 5.37%, respectively) while the contribution of human activities was 69.63%. **【Conclusion】** Human activities had the most important influence on decreasing trend of runoff with contribution of ~80% in Weihe Basin.

Key words: Weihe Basin; the variation of runoff; the changing climate; human activities; the slope

[收稿日期] 2013-05-21

[基金项目] 国家自然科学基金项目(51190093, 51179148, 51179149); 水利部公益性行业科研专项(201101043); 高等学校博士学科点专项科研基金项目(20116118110009)

[作者简介] 郭爱军(1990—), 男, 陕西西安人, 在读硕士, 主要从事水资源系统工程研究。E-mail: sfagaj@163.com

[通信作者] 畅建霞(1974—), 女, 山西祁县人, 教授, 博士生导师, 主要从事水资源系统工程研究。E-mail: chxiang@xaut.edu.cn

change ratio of cumulative quantity

近百年来,全球环境变化剧烈,气温显著升高;同时,大规模水利工程、农田水利建设、城市化进程和水土保持工程等人类活动,改变了水文过程的下垫面条件和水循环速度。气候变化和人类活动的双重影响,引发了一系列水资源问题,特别是对河川径流的影响日益剧烈。合理地定量分析气候变化和人类活动对流域水资源的影响,在流域治理、水资源高效利用、提高气候变化影响认识等方面有着极其重要的意义^[1]。

渭河是黄河第一大支流,是关中平原 93.33 万 hm^2 良田的灌溉水源^[2]。然而,近 50 年来,渭河河川径流呈明显减少的趋势,尤其在 20 世纪 90 年代后期,渭河流域的平均入黄水量仅有 35.99 亿 m^3 ,比 50 年代均值减少了 62.06 亿 m^3 ,对社会发展和沿岸生态环境造成了极其不利的影响^[3]。研究表明,降水量的减少和日益频繁的人类活动是渭河流域径流减少的重要影响因素^[4];20 世纪 90 年代以来,与多年平均值相比,降雨量和水土保持措施对渭河入黄径流量减少的贡献率分别为 68.2% 和 8.5%^[5]。但至今尚未见定量分析气候变化和人类活动对渭河流域径流变化影响的相关报道。

为此,本研究选取渭河流域 21 个气象站、华县水文站以及状头水文站 1960—2005 年的径流和气象资料,研究渭河流域径流序列的变异年份,并在此基础上,采用累积量斜率变化率比较法定量计算气候变化(降水和蒸发)和人类活动对渭河流域径流变化量的贡献率,以期对渭河流域水资源可持续利用与管理提供理论依据。

1 研究区域概况

渭河发源于甘肃渭源县鸟鼠山,流经甘肃、宁夏、陕西 3 省(区),在陕西潼关注入黄河,干流全长 818 km,流域总面积 13.5 万 km^2 。渭河流域内地貌复杂,主要有黄土丘陵沟壑区、黄土阶地区、河谷冲积平原区和土石山区等类型。渭河流域属典型的大陆性季风气候,处于暖温带半湿润气候区,多年平均降水量 634.9 mm,冬季干燥寒冷,降水稀少,夏季高温多雨,降水量年内分配差异大,主要集中在 7—10 月,约占全年降水量的 60% 以上,且多以暴雨形式集中降落。流域多年平均气温在 9.1~13.4 $^{\circ}\text{C}$,由东向西、由渭河向两侧呈递减趋势,最冷月平均气温 -1~-3 $^{\circ}\text{C}$,最热月平均气温为 23~26 $^{\circ}\text{C}$,

气温差一般为 26~28 $^{\circ}\text{C}$ ^[6]。流域各地多年平均水面蒸发量为 660~1 600 mm,最大蒸发量多发生在 6、7 月份,连续 4 个月最大蒸发量可占年蒸发量的 46%~58%^[7]。北洛河是渭河的第二大支流,发源于陕西省吴旗县白于山,流经吴旗、志丹等县,在大荔注入渭河,流域地处暖温带,属大陆性气候。年均降水量 470~600 mm,7—9 月降水占全年的 50%~63%,且多以暴雨形式出现^[8]。

自 20 世纪 70 年代开始,渭河流域开始修建大量的水利水保工程,截至 1996 年底,流域内累计兴修梯田 52.85 万 hm^2 ,完成造林 75.66 万 hm^2 ,种草 20.54 万 hm^2 ,修筑淤地坝 2 336 座、淤成坝地 0.32 万 hm^2 ,建成 100 万 m^3 以上水库 151 座,如冯家山水库和石头河水库等,各类水库总库容达 16.8 亿 m^3 ,万亩以上灌区 99 处,如陇丰渠、宝鸡渠、交口抽渭灌区等^[9]。

2 基本资料的获取

本研究收集了华县水文站和状头水文站的月径流资料(黄河流域水文年鉴),以 2 站年径流量之和为渭河流域年径流量;渭河流域 21 个气象站的资料(含降水、气温、风速等)收集自中国气象科学数据共享服务网,为保证资料系列的同步性和具有较长的观测系列,径流和气象资料均采用 1960—2005 年共 46 年的资料系列。潜在蒸发量采用世界粮农组织(FAO)推荐的 FAO Penman-Monteith 公式计算得到^[10]。渭河流域的降水量与潜在蒸发量根据各站点降雨与潜在蒸发量,采用基于 ArcGis 平台的泰森多边形法计算而来。图 1 为渭河流域气象及水文站点分布图。

3 研究方法

本研究采用累积距平法与 Mann-Kendall 法诊断渭河流域径流序列的变异点。

3.1 累积距平法^[11]

累积距平法是由曲线直观判断离散数据点变化趋势的一种非线性统计方法。对于序列 x ,其某一时刻 t 的累积距平可以表示为:

$$\hat{x} = \sum_{i=1}^t (X_i - \bar{X}), t=1, 2, \dots, n. \quad (1)$$

式中: $\hat{x}$ 为 t 时间时序列累积值; X_i 为 i 时间时序列值; $\bar{X}$ 为序列均值, $\bar{X} = (\sum_{i=1}^t X_i) / t$; t 为时间。

将 n 个时刻的累积距平值全部算出,即可绘出累积距平曲线进行趋势分析。累积距平曲线呈上升

趋势,表示距平值增加,呈下降趋势则表示距平值减小。从曲线的起伏可以诊断出发生变异的年份。

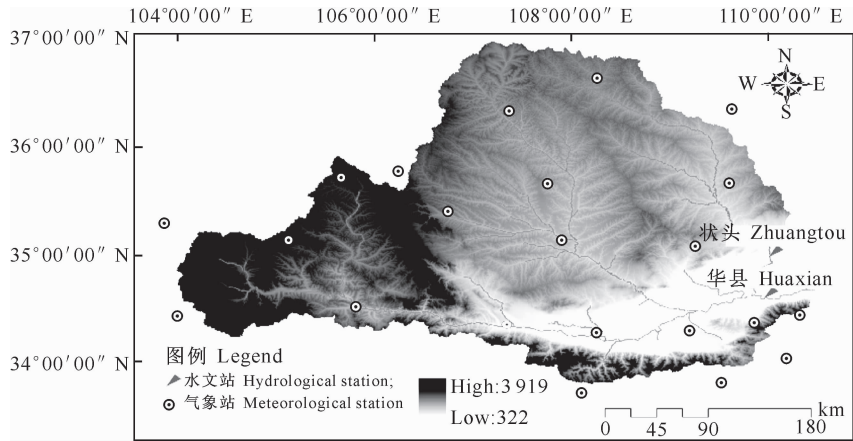


图 1 渭河流域气象及水文站点分布图

Fig. 1 Distribution of the meteorological and hydrological stations in Weihe Basin

3.2 Mann-Kendall 法^[11]

Mann-Kendall 检验法最初由 Mann^[12] 与 Kendall^[13] 提出,现已成为世界气象组织推荐并已广泛使用的非参数检验方法,此方法不需要样本遵从一定的分布,也不受少数异常值的干扰,适用水文、气象等非正态分布的数据,计算简便。

对于具有 r_i 个样本量的时间序列 x ,构造一秩序列:

$$S_k = \sum_{i=1}^k r_i (k=1, 2, \dots, n)。(2)$$

式中: S_k 是第 i 时刻数值大于第 j 时刻数值个数的累计数, r_i 表示第 i 个样本 $x_i > x_j (1 \leq j \leq i)$ 的累计数。

假定时间序列随机独立,定义如下统计量:

$$UF_k = (S_k - E(S_k)) / \sqrt{Var(S_k)} (k=1, 2, \dots, n)。(3)$$

式中: UF_k 为标准正态分布; $E(S_k)$ 、 $Var(S_k)$ 分别是 S_k 的均值和方差,其中 $E(S_k) = k(k-1)$; $Var(S_k) = k(k-1)(2k+5)/72$ 。

给定置信度 α ,若 $|UF_k| > U_{\alpha/2}$,则表示时间序列有明显的变化趋势存在。

将时间序列 x 按逆序排列,再按上式计算,同时使

$$\begin{cases} UB_k = -UF_k \\ k = n+1-k \end{cases} (k=1, 2, \dots, n)。(4)$$

将 UF_k 和 UB_k 绘制成曲线 UF 和 UB ,若 UF 和 UB 2 条曲线在临界直线之间出现交点,那么该交点就是变异开始的时间。

3.3 累积量斜率变化率比较法^[14]

本研究中,采用累积量斜率变化率比较法计算

气候变化(降水和潜在蒸发)和人类活动对径流变化量的贡献率,相比于多元回归法(多元回归法计算气候变化及人类活动对径流变化的贡献率时,各影响因素的权重分摊具有人为性,且各影响因素之间的复相关系数较小,因此结果精度较小),累积量斜率变化率比较法引入了年份与累积量,有效地避免了多元回归法的不足,因此具有更大的适应性。

设累积径流量-年份线性关系式的斜率在拐点前后 2 个时期的径流量分别为 S_{Rb} 和 S_{Ra} ($10^8 \text{ m}^3/\text{年}$),累积降水量-年份线性关系式的斜率在拐点前后 2 个时期的降水量分别为 S_{Pb} 和 S_{Pa} ($\text{mm}/\text{年}$),则累积径流量斜率变化率为 $(S_{Ra} - S_{Rb}) / |S_{Rb}|$,同样,累积降水量斜率变化率为 $(S_{Pa} - S_{Pb}) / |S_{Pb}|$,那么降水量对径流量变化的贡献率 $C_p (\%)$ 为:

$$C_p = (S_{Pa} - S_{Pb}) / |S_{Pb}| / ((S_{Ra} - S_{Rb}) / |S_{Rb}|) \times 100\%。(5)$$

同样,可计算潜在蒸发对径流量变化的贡献率。设累积潜在蒸发量-年份线性关系式的斜率在拐点前后 2 个时期的潜在蒸发量分别 S_{Eb} 和 S_{Ea} ($\text{mm}/\text{年}$),则累积潜在蒸发量斜率变化率为 $(S_{Ea} - S_{Eb}) / |S_{Eb}|$,那么潜在蒸发量对径流量变化的贡献率 $C_E (\%)$ 为:

$$C_E = -(S_{Ea} - S_{Eb}) / |S_{Eb}| / ((S_{Ra} - S_{Rb}) / |S_{Rb}|) \times 100\%。(6)$$

由于渭河流域地下水的交换对径流量变化的影响不显著,相对其他因素来说非常有限,因此,这里认为其贡献率近似为 0。

依据水量平衡原理,人类活动对径流量变化的贡献率 $C_H(\%)$ 为:

$$C_H=1-C_P-C_E。(7)$$

4 渭河流域径流演变趋势及变异点分析

4.1 径流、降雨及潜在蒸发演变趋势分析

表 1 给出了渭河流域径流、降水及潜在蒸发年际变化特征值的统计结果,从变差系数 C_v 值来看,

表 1 渭河流域径流、降水及潜在蒸发年际变化特征值

Table 1 Eigenvalues of the inter-annual runoff,precipitation and potential evapotranspiration in Weihe Basin			
特征 Characteristic	径流量 Runoff	降水量 Precipitation	潜在蒸发量 Potential evapotranspiration
均值 Mean	70.09 亿 m ³	548.17 mm	847.33 mm
C_v	0.49	0.18	0.06
年份 Year	1964	1964	1997
极大值			
极值 Max	207.67 亿 m ³	806.92 mm	934.38 mm
与多年均值比值 Max/Mean	2.76	1.47	1.1
年份 Year	1995	1997	1964
极小值			
极值 Min	21 亿 m ³	366.97 mm	720.57 mm
与多年均值比值 Max/Mean	0.28	0.67	0.85
极值比 Max/Min	9.89	2.2	1.3

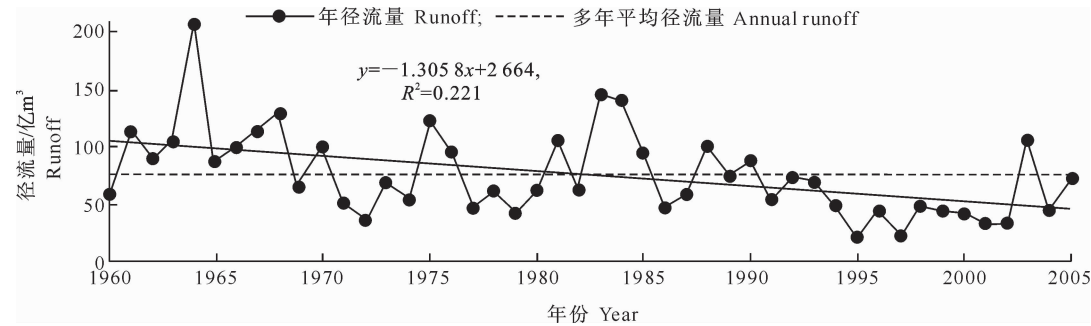


图 2 渭河流域径流量的年际变化
Fig.2 Inter-annual variations of stream flow in Weihe Basin

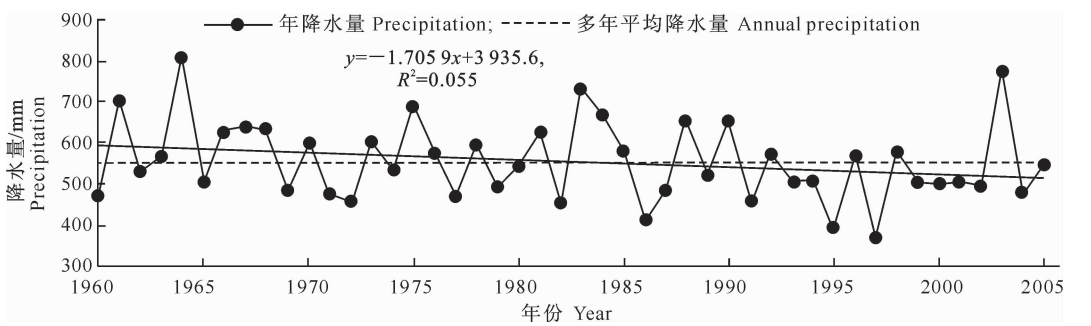


图 3 渭河流域降水量的年际变化
Fig.3 Inter-annual variations of precipitation in Weihe Basin

由图 2,3,4 和表 2 可知,渭河径流量与降水量分别以 1.31 亿 m³/年、1.70 mm/年的趋势减少;径流量与降水量在 20 世纪 90 年代减少得最为剧烈,

径流量的年际变化幅度最大($C_v=0.49$),潜在蒸发量的年际变化幅度最小($C_v=0.06$)。从极值比来看,径流量的极值比最大,为 9.89,潜在蒸发量的极值比最小,为 1.3,径流序列的波动程度要远远大于降雨和潜在蒸发序列的波动。

对渭河流域径流、降水及潜在蒸发进行统计分析,得到渭河流域径流、降水及潜在蒸发的年际变化如图 2,3,4 所示,其代际变化率如表 2 所示。

相对于 20 世纪 60 年代分别减少 52.12% 和 10.95%;渭河流域径流量的减少趋势大于降水量;潜在蒸发量以 0.14 mm/年的趋势增加,在 2000 年

后达到最大。

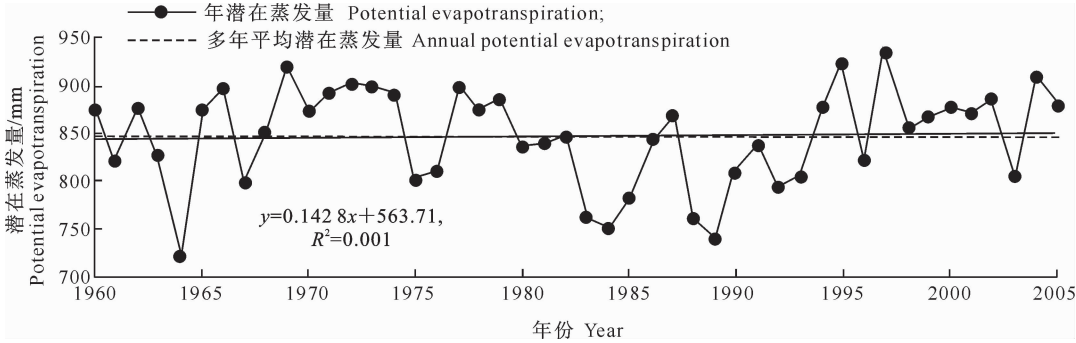


图 4 渭河流域潜在蒸发量的年际变化

Fig. 4 Inter-annual variations of potential evapotranspiration in Weihe Basin

表 2 渭河流域径流、降水及潜在蒸发量代际变化率(相对于 20 世纪 60 年代)

Table 2 Decadal variations of the intergenerational runoff, precipitation and potential evapotranspiration in Weihe Basin (compared to the 1960s)

代际变化 Decadal variations	径流量 Runoff		降水量 Precipitation		潜在蒸发量 Potential evapotranspiration	
	相对变化量/ 10^8 m^3 Relative change	相对变化率/% Relative ratio	相对变化量/mm Relative change	相对变化率/% Relative ratio	相对变化量/mm Relative change	相对变化率/% Relative ratio
1970s	-38.53	-36.19	-24.40	-4.27	25.99	3.07
1980s	-17.93	-16.86	-4.85	-0.85	-42.83	-5.06
1990s	-55.45	-52.12	-62.59	-10.95	6.39	0.75
2000 年后 After 2000	-51.54	-48.49	-24.88	-4.35	28.64	3.39

4.2 渭河流域径流序列变异点诊断

4.2.1 累积距平法 采用累积距平法对渭河流域的径流序列进行变异点诊断,结果见图 5。由图 5

可以看出,1971 与 1991 年前后径流量的累积距平值先增大后减小,因此 1971 与 1991 年为径流发生变异的年份。

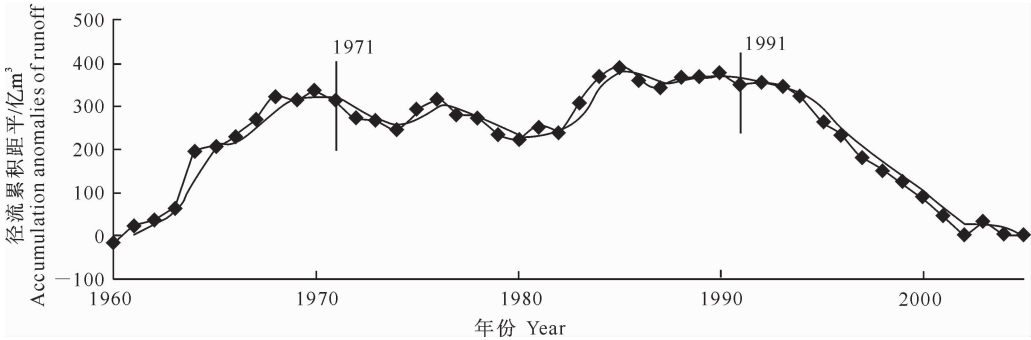


图 5 渭河流域年径流量的累积距平

Fig. 5 Cumulative anomaly of annual runoff in Weihe Basin

4.2.2 Mann-Kendall 法 通过 Mann-Kendall 检验法对渭河流域的径流序列进行变异点诊断,结果如图 6 所示,从中可清楚地辨析 1960—2005 年径流量的变化趋势及发生变异的年份。图 6 表明,1960—1971 年渭河径流量呈上升趋势,1971 年以后逐年减少。UF 和 UB 曲线相交于 1991 年,且位于临界线之间(置信水平 $\alpha=0.05$),于 1994 年超过 $\alpha=0.05$ 显著性水平线,表明 1991 年是变异开始的时间。

间,1994 年之后减少趋势显著。

4.2.3 变异年份的确定 20 世纪 70 年代以来,渭河流域水利水保工程修建频繁,其中大、中及小型蓄水、引水工程 300 余座,如宝鸡峡灌区、段家峡灌区、金盆水库以及冯家山水库等,人类活动对径流量的影响逐年增大^[15]。

众多学者的研究表明,自 1990s 以来,渭河流域年平均气温和年平均最低温度上升趋势明显,年平

均气温大于 9℃ 的区域面积从 1950s 的 47.30% 上升至 2000 年后的 82.08%, 年平均最低气温大于 3℃ 的区域面积从 1950s 的 68.55% 上升至 2000 年后的 85.75%^[16-18]; 1990s 以来降水持续减少, 20 世纪

90 年代的降雨量较多年平均值减少 60.0 mm, 减少了 10.4%, 流域进入连续干旱少雨的时期, 其中 1982 和 2003 年为渭河流域大的降水转折年^[19]。

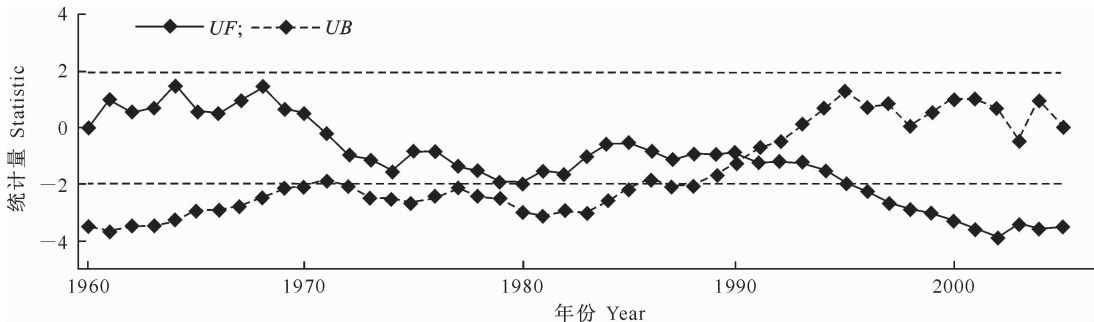


图 6 渭河流域径流序列变异点的 Mann-Kendall 分析
Fig. 6 Mann-Kendall analysis of the abrupt points of annual runoff in Weihe Basin

结合累积距平法、Mann-Kendall 法以及对渭河流域人类活动和气候变化的分析, 将 1971 和 1991 年作为渭河流域径流量发生变异的年份。据此将整个径流序列划分为 3 个时段, 即 1960—1971 年、1972—1991 年和 1992—2005 年, 由于 1971 年之前渭河流域受人类活动影响较小, 因此将 1960—1971 年近似作为渭河流域的天然时期(基准期), 1972—1991 年和 1992—2005 年为受人类活动和气候变化影响较高的时期(计算期)。

5 气候变化和人类活动对渭河径流影响的定量分析

5.1 累积径流量-年份变化关系

针对渭河流域的径流序列绘制其累积径流量与年份的线性关系图, 得到基准期和计算期的斜率(设累积径流量与年份线性关系式的斜率为 S_R) 如图 7 所示。根据累积径流量与年份之间拟合的线性关系式, 各时间段相关系数 R 均达到 0.99 以上。

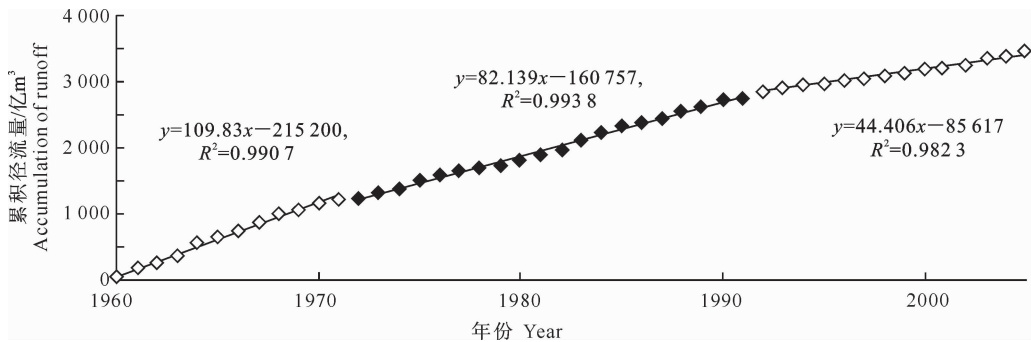


图 7 渭河流域累积径流量与年份的线性关系
Fig. 7 Relationship between year and cumulative runoff in Weihe Basin

根据不同时期得到的累积径流量与年份之间的线性关系, 得计算期相对于基准期的变化率见表 3, 1972—1991 年累积径流量-年份线性关系式的斜率相对于基准期(1960—1971 年)减少 $27.69 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{年}$, 减少率为 25.21%; 1992—2005 年相对于基准期减少 $65.42 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{年}$, 减少率为 59.57%, 径流量自 20 世纪 70 年代以来逐年递减, 且递减趋势显著。

5.2 累积降水量、潜在蒸发量-年份变化关系

按同样方法可获得变异点前后时段累积降水

量、潜在蒸发量与年份的线性关系图, 得到基准期和计算期的斜率如图 8、9 所示。设累积径流量、累积降水量和潜在蒸发量与年份线性关系式的斜率分别为 S_R 、 S_P 和 S_E , 计算结果列于表 3。表 3 表明, 1972—1991 年累积潜在蒸发量-年份线性关系式的斜率比基准期(1960—1971 年)减少 21.22 mm/年, 减少率为 2.51%; 1992—2005 年比基准期增加 27.07 mm/年, 增加率为 3.20%; 1972—1991 年累积降水量-年份线性关系式的斜率比基准期减少 37.28 mm/年, 减少率为 6.19%; 1992—2005 年比

基准期减少 89.68 mm/年,减少率为 14.89%,降水量在 1991 年前后呈显著减少趋势。

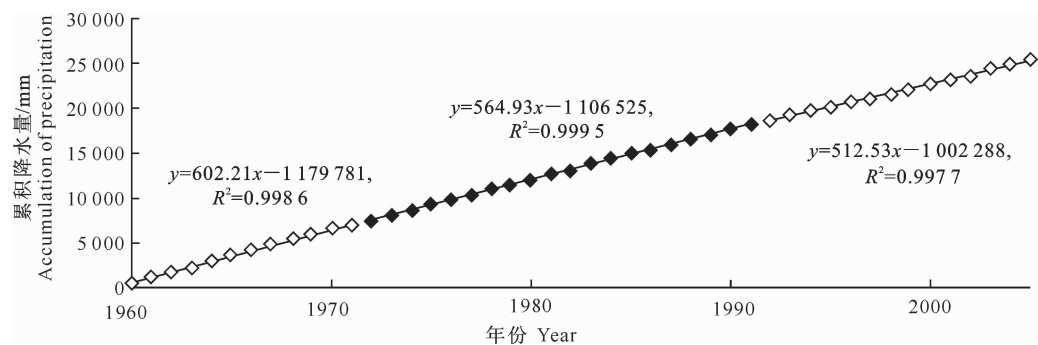


图 8 渭河流域累积降水量与年份的线性关系

Fig. 8 Relationship between year and cumulative precipitation in Weihe Basin

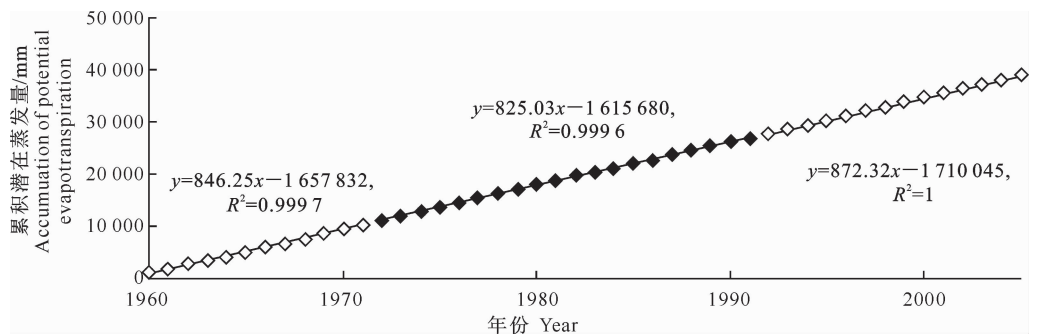


图 9 渭河流域累积潜在蒸发量与年份的线性关系

Fig. 9 Relationship between year and cumulative potential evapotranspiration in Weihe Basin

表 3 渭河流域累积径流量、潜在蒸发量、降水量斜率及其变化率

时段 Periods	径流量 Runoff			潜在蒸发量 Potential evapotranspiration			降水量 Precipitation		
	$S_R/$ ($10^8 \text{ m}^3 \cdot$ 年^{-1})	变化量/ ($10^8 \text{ m}^3 \cdot$ 年^{-1})	变化率/% Ratio	$S_E/$ ($\text{mm} \cdot \text{年}^{-1}$)	变化量/ ($\text{mm} \cdot$ 年^{-1})	变化率/% Ratio	$S_P/$ ($\text{mm} \cdot \text{年}^{-1}$)	变化量/ ($\text{mm} \cdot$ 年^{-1})	变化率/% Ratio
		Change			Change			Change	
1960—1971	109.83	—	—	846.25	—	—	602.21	—	—
1972—1991	82.14	−27.69	−25.21	825.03	−21.22	−2.51	564.93	−37.28	−6.19
1992—2005	44.41	−65.42	−59.57	872.32	27.07	3.20	512.53	−89.68	−14.89

注：—表示相对于基准期本身变化量与变化率为 0。
Note: “—” means the change and ratio are 0 compared with the base period.

5.3 气候变化和人类活动对径流量的影响

流减少的贡献率为 C_E ,降水对径流减少的贡献率为 C_P ,气候变化对径流减少的贡献率为 $C_E + C_P$,人类活动对径流减少的贡献率为 C_H ,结果见表 4。

表 4 气候变化和人类活动对渭河流域径流量变化的贡献率

时段 Periods	径流量/ 10^8 m^3 Runoff	潜在蒸发量/mm Potential evapotranspiration	降水量/mm Precipitation	$C_E/\%$	$C_P/\%$	$(C_E + C_P)/\%$	$C_H/\%$
1960—1971	101.15	851.78	585.64	—	—	—	—
1972—1991	77.58	831.52	558.65	−9.96	24.55	14.60	85.40
1992—2005	49.8	866.1	519.08	5.37	25.00	30.37	69.63

20 世纪 70 年代渭河流域开始实施大规模、频繁的水利水保措施,因此进入 1970s 以来,人类活动

是影响渭河流域径流量减少的主要因素。由表 4 可知,1972—1991 年人类活动对径流减少的贡献率为 85.40%;气候变化对径流减少的贡献率为 14.60%,其中降水占 24.55%,蒸发占 9.96%,潜在蒸发对径流的贡献率为负,相对于基准期潜在蒸发对径流的作用有所减小。1992—2005 年,人类活动仍然是影响径流减少的主要因素,贡献率为 69.63%,相对于 1972—1991 年人类活动的影响明显减弱,减少了 15.77%。

表 4 表明,1992—2005 年,气候变化对径流减少的贡献率为 30.37%,相对于 1972—1991 年影响率逐渐增大,增加了 15.77%,其中蒸发对径流减少的贡献率为 5.37%,降水的贡献率为 25.00%。这主要是因为进入 1990s 以来渭河流域降水减少,气温上升幅度明显,蒸发对径流减少的贡献率增加较为明显,相对于 1972—1991 年蒸发对径流减少的贡献率增加了约 15%。

6 结 论

1)渭河流域径流量与降水量呈逐年减小趋势,径流量变化幅度大于降水的变化,最小年径流量出现在 1995 年,仅为多年均值的 0.28。潜在蒸发量呈逐年增加趋势,进入 20 世纪以来潜在蒸发量达到最大。

2)采用累积距平法、Mann-Kendall 法,确定出渭河流域径流变异发生在 1971 年和 1991 年,自 1994 年之后径流呈显著减少趋势,这与很多学者的研究结果一致。

3)采用累积量斜率变化率比较法定量计算了人类活动和气候变化对径流变化的贡献率。相对于基准期,1972—1991 年与 1992—2005 年人类活动对径流变化的贡献率分别为 85.40%和 69.63%,贡献率虽然变小,但是人类活动对径流变化的影响作用一直处于主导地位;气候变化对径流变化的贡献率从 1972—1991 年的 24.55%到 1992—2005 年的 25.00%,呈不明显增加趋势。

4)本研究采用统计学方法,揭示了渭河流域近 50 年来径流、降水及潜在蒸发的变化趋势,定量地分析了人类活动和气候变化对径流变化的贡献率,对未来水资源的高效开发与管理具有重要的指导意义。

[参考文献]

[1] 王国庆,张建云,刘久夫,等. 气候变化和人类活动对河川径流

影响的定量分析 [J]. 中国水利,2008(2):55-58.
Wang G Q,Zhang J Y,Liu J F,et al. Quantitative assessment for climate change and human activities impact on river runoff [J]. Journal of China Water Resources,2008(2):55-58. (in Chinese)
[2] 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.
Liu Y,Li X L,Hu A Y. Response of runoff to precipitation changes:Taking a case of Weihe [J]. Journal of Arid Land Geography,2007,30(1):49-52. (in Chinese)
[3] 夏 军,乔云峰,宋献方,等. 岔巴沟流域不同下垫面对降雨径流关系影响规律分析 [J]. 资源科学,2007,29(1):70-76.
Xia J,Qiao Y F,Song X F,et al. Analysis about effect rules of underlying surface change to the relationship between rainfall and runoff in the Chabagou Catchment [J]. Journal of Resources Science,2007,29(1):70-76. (in Chinese)
[4] 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]. 西北水资源与水工程,1996,7(3):26-32.
Feng G Z,Li P C. A primary analysis of influence of human activities on runoff regime in the Weihe River Basin [J]. Journal of Water Resources & Water Engineering,1996,7(3):26-32. (in Chinese)
[5] 栗晓玲,康绍忠,魏晓妹,等. 气候变化和人类活动对渭河流域入黄径流的影响 [J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版,2007,35(2):153-159.
Su X L,Kang S Z,Wei X M,et al. Impact of climate change and human activity on the runoff of Wei River basin to the Yellow River [J]. Journal of Northwest A&F University:Natural Science Edition,2007,35(2):153-159. (in Chinese)
[6] 张艳玲. 陕西省渭河流域水文特性分析 [J]. 西北水资源与水工程,2002,13(2):62.
Zhang Y. L Hydrologic feature analysis for Weihe basin in Shaanxi province [J]. Journal of Northwest Water Resources & Water Engineering,2002,13(2):62. (in Chinese)
[7] 王 煜,张 玫,龚 华,等. 渭河流域重点治理规划 [R]. 郑州:黄河勘测设计有限公司,2005.
Wang Y,Zhang M,Gong H,et al. Weihe watershed key management planning [R]. Zhengzhou: Yellow River Reconnaissance Planning Design Ltd,2005. (in Chinese)
[8] 莫 莉,穆兴民,王 勇,等. 近 50 多年来北洛河水沙变化特征及原因分析 [J]. 泥沙研究,2009(6):30-36.
Mo L,Mu X M,Wang Y,et al. Change of runoff and sediment of Beiluo River and reason analysis [J]. Journal of Sediment Research,2009(6):30-36. (in Chinese)
[9] 王 宏,秦百顺,马 勇,等. 渭河流域水土保持措施减水减沙作用分析 [J]. 人民黄河,2001,23(2):18-20.
Wang H,Qin B S,Ma Y,et al. Analysis of water and sediment reduction effects by soil and water conservation treatments in Wei River Basin [J]. Journal of Yellow River,2001,23(2):18-20. (in Chinese)
[10] Allen R G,Pereira L S,Raes D,et al. Crop evapotranspiration:Guidelines for computing crop water requirements [R].

Rome, Italy: FAO, 1998.

[11] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术 [M]. 北京: 气象出版社, 1999.

Wei F Y. Modern technology of statistics, diagnosis and forecast for climate [M]. Beijing: China Meteorological Press, 1999. (in Chinese)

[12] Mann H B. Nonparametric tests against trend [J]. *Econometrica*, 1945, 13: 245-259.

[13] Kendall M G. Rank correlation methods [M]. London: Charles Griffin & Co, 1975.

[14] Wang S J, Yan M, Yan Y X, et al. Contributions of climate change and human activities to the changes in runoff increment in different sections of the Yellow River [J]. *Quaternary International*, 2012, 282: 66-77.

[15] 王 宏, 杨国礼, 王瑞芳, 等. 渭河流域水利水保措施对泥沙、径流影响分析计算 [J]. *水土保持通报*, 1994, 14(5): 48-52.

Wang H, Yang G L, Wang R F, et al. Analysis and calculation for effect of engineering measures on sediment and runoff in Weihe Watershed [J]. *Journal of Bulletin of Soil and Water Conservation*, 1994, 14(5): 48-52. (in Chinese)

[16] 何 毅, 王 飞, 穆兴民. 渭河流域 60 年来气温变化特征与区域差异 [J]. *干旱区资源与环境*, 2012, 26(9): 14-21.

He Y, Wang F, Mu X M. Air temperature variation of Weihe river basin in recent 60 years and its regional differences [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2012, 26(9): 14-21. (in Chinese)

[17] 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分析 [J]. *北京师范大学学报: 自然科学版*, 2006, 42(1): 102-106.

He W L, Xu Z X. Spatial and temporal characteristics of the long-term trend for temperature and pan evaporation in the Wei River Basin [J]. *Journal of Beijing Normal University: Natural Science*, 2006, 42(1): 102-106. (in Chinese)

[18] 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.

Jiao C Q, Wang F, Mu X M, et al. Climate change of Weihe River Basin and its regional differences [J]. *Journal of Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2010, 30(5): 27-32. (in Chinese)

[19] 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 H L, Chen Y, Ren G X, et al. The characteristics of precipitation variation of Weihe River Basin in Shaanxi Province during recent 50 years [J]. *Journal of Agricultural Research in the Arid Areas*, 2008, 26(4): 236-241. (in Chinese)

(上接第 211 页)

[11] 赵 伟, 蔡兴盛, 曲慧燕. 一种基于惩罚函数和新信息素更新方式的蚁群算法 [J]. *计算机工程与科学*, 2013, 35(3): 103-107.

Zhao W, Cai X S, Qu H Y. An ant colony algorithm based on penalty function and new pheromone updating [J]. *Computer Engineering & Science*, 2013, 35(3): 103-107. (in Chinese)

[12] Betul Y H, Mehmet M Y. A multi-objective ant colony system algorithm for flow shop scheduling problem [J]. *Expert Systems with Applications*, 2010, 37(7): 1361-1368.

[13] 曾 艳. 蚁群算法在组合优化中的应用 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2006.

Zeng Y. The application of ant colony algorithm in combinatorial optimization [D]. Xi'an: Xidian University, 2006. (in Chinese)

[14] 李建勋, 解建仓, 沈 冰, 等. 基于博弈论的区域二次配水方案及其改进遗传算法解 [J]. *系统工程理论与实践*, 2010, 30(10): 1914-1920.

Li J X, Xie J C, Shen B, et al. Secondary water distribution based on game analysis and solution by improved genetic algorithm [J]. *Systems Engineering-Theory & Practice*, 2010, 30(10): 1914-1920. (in Chinese)

[15] Frisvold G B, Caswelk M F. Trans boundary water management game-theoretic lessons for projects on the US-Mexico Border [J]. *Agricultural Economics*, 2000, 55(24): 101-111.

[16] 冯文琦, 纪昌明. 水资源优化配置中的市场交易博弈模型 [J]. *华中科技大学学报: 自然科学版*, 2006, 34(11): 83-85.

Feng W Q, Ji C M. Study of market transaction game model in water resources optimal allocation [J]. *J Huazhong Univ of Sci & Tech: Nature Science Edition*, 2006, 34(11): 83-85. (in Chinese)