

DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2016.04.002

变化环境下渭河流域水文干旱演变特征剖析

任立良^{1,2}, 沈鸿仁^{1,2}, 袁飞^{1,2}, 赵崇旭^{1,2}, 杨肖丽², 郑培丽²

(1. 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; 2. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 环境变化影响区域水资源的可持续开发利用, 导致水文过程出现非平稳特征, 需发展非平稳水文干旱评估方法。选取渭河流域为研究区, 依据流域内2个水文站、62个雨量站和24个气象站1961—2013年数据, 基于可变下渗容量模型定量分离气候变化和人类活动对径流衰减的贡献; 采用标准化径流指数(Standardized Runoff Index, SRI)剖析水文干旱时空演变特征; 提出多种SRI参数化方案, 对比评定各方案表征非平稳干旱的合理性以及环境变化对干旱演变的影响作用。结果表明: 自1991年以来渭河流域年径流量呈显著衰减趋势, 人类活动是径流演变的主要因素, 对咸阳和华县站径流量变化的贡献率分别为-66.7%和-71.0%; 时变参数方案计算的干旱指数能合理重建历史水文干旱序列; 人类活动是渭河流域1991年以来短历时水文干旱发生的主导因素, 气候变化主要影响长历时旱涝的演变趋势。

关键词: 气候变化; 人类活动; 径流; 水文干旱; 时空特征; 渭河流域

中图分类号: TV122 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-6791(2016)04-0492-09

气候变化和人类活动不仅是影响水文循环过程、驱动水资源演变的两大因素^[1], 也是区域干旱发生演变的重要驱动力^[2]。水文干旱是地表水和地下水量异常偏少的现象, 水文干旱和社会系统的物理机制联系及其相互影响, 已成为国际水文科学协会(IAHS)发起的新十年科学计划(2013—2022年)“Panta Rhei”的重要研究内容之一^[3]。

过去几十年, 随着经济社会发展和人口快速增长, 人类对水资源的需求不断增大, 中国很多流域水资源遭到过度开采利用, 导致某些地区地表径流明显衰减, 北方半干旱地区尤为突出^[4]。标准化径流指数(Standardized Runoff Index, SRI)^[5]是常用于水文干旱监测评估的干旱指标, 该方法基于样本独立同分布及时间序列的平稳性假设。由于环境变化导致水文过程出现非平稳特征, 传统干旱评估方法的假设前提不再成立, 其结果受到质疑^[6-7], 因此, 开展非平稳水文干旱研究在理论探索和实践指导方面都具有重要意义。

本文以渭河流域为研究区, 采用可变下渗容量(Variable Infiltration Capacity, VIC)模型定量估算环境变化引起的径流响应, 对比评定多参数方案计算的SRI表征水文干旱的合理性, 评估水文干旱时空演变特性以及环境变化对干旱发生演变的影响作用, 为适应环境变化的水资源管理和旱灾防治提供科学依据。

1 研究区概况

渭河(图1)是黄河第一大支流, 发源于甘肃渭源鸟鼠山, 流经甘肃、宁夏及陕西三省(区)。华县水文站以上集水区面积为10.6万km², 位于33°N—38°N、104°E—110°E之间。流域内地貌以黄土高原和关中盆地

收稿日期: 2015-10-22; 网络出版时间: 2016-06-22

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/32.1309.P.20160622.2215.002.html>

基金项目: “十三五”国家重点研发计划资助项目(2016YFA0601504); 国家自然科学基金资助项目(41323001)

作者简介: 任立良(1963—), 男, 江苏扬中人, 教授, 博士, 主要从事水文循环基础理论与现代模拟技术研究。

E-mail: RLL@hhu.edu.cn

通信作者: 沈鸿仁, E-mail: shrhongren@163.com

为主, 地势西高东低起伏较大, 高程 336~3 929 m。渭河干流全长 818 km, 两岸支流众多, 其中泾河是渭河最大支流, 河长 455 km, 流域面积 4.5 万 km², 占渭河流域面积的 42.5%。渭河流域地处干旱地区与湿润地区过渡地带, 属大陆性季风气候, 冬季寒冷干燥, 降水稀少; 夏季炎热多雨。根据 1961—2013 年气象资料, 渭河流域多年平均气温为 8.7 ℃, 降水量为 539.7 mm, 蒸发量为 488.3 mm。流域土壤以黄褐土、褐土、黄壤和棕壤为主, 主要植被类型为落叶阔叶林。关中平原地处渭河中下游, 是中国重要的工农业生产基地, 有效灌溉面积为 92 万 hm², 该地区也是渭河流域人口分布最密集的区域。

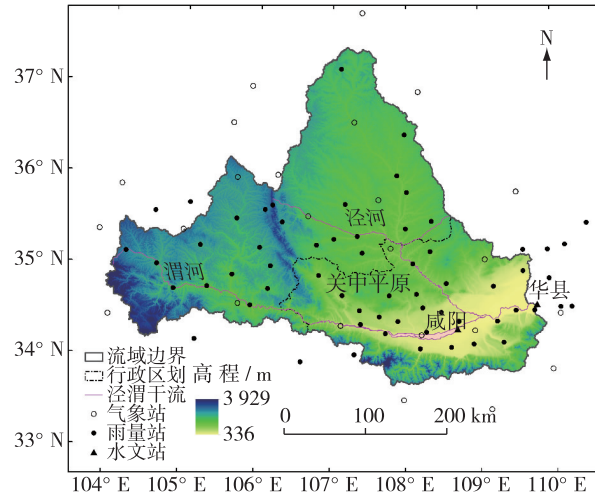


图1 渭河流域气象站、雨量站和水文站示意

Fig. 1 Sketch map of meteorological and hydrological stations over the Weihe catchment

2 数据及方法

2.1 研究数据

本文选取咸阳和华县水文站作为流量控制站, 集水面积分别为 4.7 万 km² 和 10.6 万 km²。本研究收集的数据包括: ① 中国科学院计算机网络信息中心提供的 SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) 90 m DEM 数据; ② 国家气象局提供的 24 个气象台站 1961—2013 年数据, 包括日降水量、日最高、最低和平均气温以及 10 m 平均风速; ③ 1961—2013 年咸阳和华县站日流量及 62 个雨量站日降水量, 均摘自渭河流域《水文年鉴》; ④ 陕西省统计局提供的关中平原经济社会统计数据。

2.2 研究方法

2.2.1 径流变化归因分析

采用反距离平方加权法将站点气象数据插值到 0.25°×0.25° 空间网格, 按面积权重计算子流域面平均气象要素值。采用 Penman-Monteith 公式^[8] 计算潜在蒸散发量。应用 Mann-Kendall (MK) 趋势检验、Pettitt 突变点检测及降水与径流双累积曲线分析渭河流域水文气象要素变异性^[9], 揭示非平稳水文过程事实。采用基于 VIC 模型定量估算气候变化和人类活动的径流响应框架^[8], 对渭河流域咸阳和华县两水文站径流变化进行归因分析。该评估框架基于以下假设: ① 气候变化和人类活动是引起径流变化的主要因素; ② 二者相互独立, 即忽略气候反馈及人类社会与气候系统间的相互作用, 如陆面土壤湿度、植被等变化以及温室气体的排放对气候系统的影响。

依据径流变异诊断结果, 将研究期划分为受人类活动干扰较弱的基准期和人类活动影响较强的变化期; 采用 VIC 模拟渭河流域基准期水文过程, 并保持基准期模型参数不变, 采用变化期大气强迫数据作为模型输入, 重建受人类干扰相对较弱的径流序列。流域径流变化总量可表示为

$$\Delta Q_{\text{tot}} = \Delta Q_{\text{cv}} + \Delta Q_{\text{ha}} = \bar{Q}_{2, \text{obs}} - \bar{Q}_{1, \text{obs}} \quad (1)$$

其中 ΔQ_{cv} 和 ΔQ_{ha} 可表示为

$$\Delta Q_{\text{cv}} = \bar{Q}_{2, \text{sim}} - \bar{Q}_{1, \text{sim}} \quad \Delta Q_{\text{ha}} = \Delta Q_{\text{tot}} - \Delta Q_{\text{cv}} = (\bar{Q}_{2, \text{obs}} - \bar{Q}_{1, \text{obs}}) - (\bar{Q}_{2, \text{sim}} - \bar{Q}_{1, \text{sim}}) \quad (2)$$

故气候变化和人类活动对径流变化的影响可定量分离为

$$I_{\text{cv}} = \frac{\Delta Q_{\text{cv}}}{|\Delta Q_{\text{tot}}|} \times 100\% \quad I_{\text{ha}} = \frac{\Delta Q_{\text{ha}}}{|\Delta Q_{\text{tot}}|} \times 100\% \quad (3)$$

式中： ΔQ_{tot} 和 $|\Delta Q_{\text{tot}}|$ 分别为径流变化总量及其绝对值； ΔQ_{cv} 和 ΔQ_{ha} 分别为气候变化和人类活动引起的径流变化量； $\bar{Q}_{1, \text{obs}}$ 和 $\bar{Q}_{2, \text{obs}}$ 分别为基准期和变化期实测年平均径流量； $\bar{Q}_{1, \text{sim}}$ 和 $\bar{Q}_{2, \text{sim}}$ 分别为基准期和变化期模拟年平均径流量； I_{cv} 和 I_{ha} 分别为气候变化和人类活动对径流量变化的贡献率。

2.2.2 非平稳水文干旱评估

本文提出多种参数化方案计算 1~24 月等 24 种时间尺度标准化径流指数 SRI (“SRI-3”表示 3 月尺度 SRI)，采用基于实测降水系列计算的标准化降水指数 (Standardized Precipitation Index, SPI) 及相关文献记录辅助验证 SRI 合理性。对比评定各 SRI 参数化方案对非平稳干旱评估的影响，应用干旱游程理论^[10] 识别水文干旱特征变量，分析渭河流域水文干旱时空演变特性。SRI 和 SPI 计算步骤及早涝等级划分可参考文献 [5, 11]。

SRI 参数化方案包括：① 传统的时不变参数方案，即采用一种经验分布函数 (两参数 Log-normal 分布^[5]) 拟合整个研究期径流序列，计算 SRI_t 序列；② 时变参数方案，即对基准期和变化期分别选取最优拟合分布函数，计算基准期 SRI_b 和变化期 SRI_v 序列 (合并得到 SRI_v 序列)；③ 移植参数方案，即先假设研究区干旱为平稳过程，直接移植 SRI_b 的径流分布及参数，计算变化期序列 SRI_t，再依据标准化干旱指数的统计特性分析 SRI_t 的合理性；④ 基于 VIC 重建径流计算变化期 SRI_v 序列，VIC 模型重建的变化期径流主要反映气候变化的影响，故 SRI_t 表征了单一气候因素对旱涝的影响；SRI_b 则为实际旱涝序列，刻画了气候变化和人类活动对旱涝的共同影响作用。

由此，对比参数化方案①方案②结果与 SPI 可评价 SRI_t 和 SRI_v 重建非平稳干旱序列的可靠性和准确性；对比参数化方案②方案③结果可验证变化期径流序列出现的非平稳事实，论证 SRI_v 评估非平稳干旱过程的适用性；对比参数化方案②方案④结果可评估气候变化和人类活动对水文干旱的影响，本文假定气候变化和人类活动对干旱的影响是独立的，采用 SRI_b 与 SRI_t 之差值 (SRI_{b-t}) 表征人类活动对干旱的影响，负值表示人类活动加重旱情，正值表示减缓旱情。

3 结果分析

3.1 水文气象要素变异分析

渭河流域 1961—2013 年水文气象要素序列 (图 2) 显示：该流域年降水量、咸阳及华县站年径流量均呈总体下降趋势，气候倾向率分别为 -14.0 mm/10 a、-7.800 亿 m³/10a 和 -10.21 亿 m³/10 a；年最高、平均、最低气温和潜在蒸散发量均呈上升趋势，气候倾向率分别为 0.32 °C/10 a、0.29 °C/10 a、0.32 °C/10 a 和 11.9 mm/10 a。MK 趋势检验结果 (表 1) 进一步表明：渭河流域年降水量呈不显著减小趋势；咸阳和华县站年径流量则显著减小，其 MK 统计量分别为 -3.81 和 -3.18。Pettitt 突变点检测 (表 1) 和降水与径流双累积曲线 (图 3) 一致表明：该流域年降水量未发生突变，两水文站年径流量均在 1990 年突变，并通过显著性水平 $\alpha=0.05$ 的假设检验。因此，选取 1961—1990 年为基准期，表示水文过程受环境变化干扰相对较弱，选取 1991—2013 年为变化期，表示气候变化和人类活动对水文过程的影响相对剧烈。

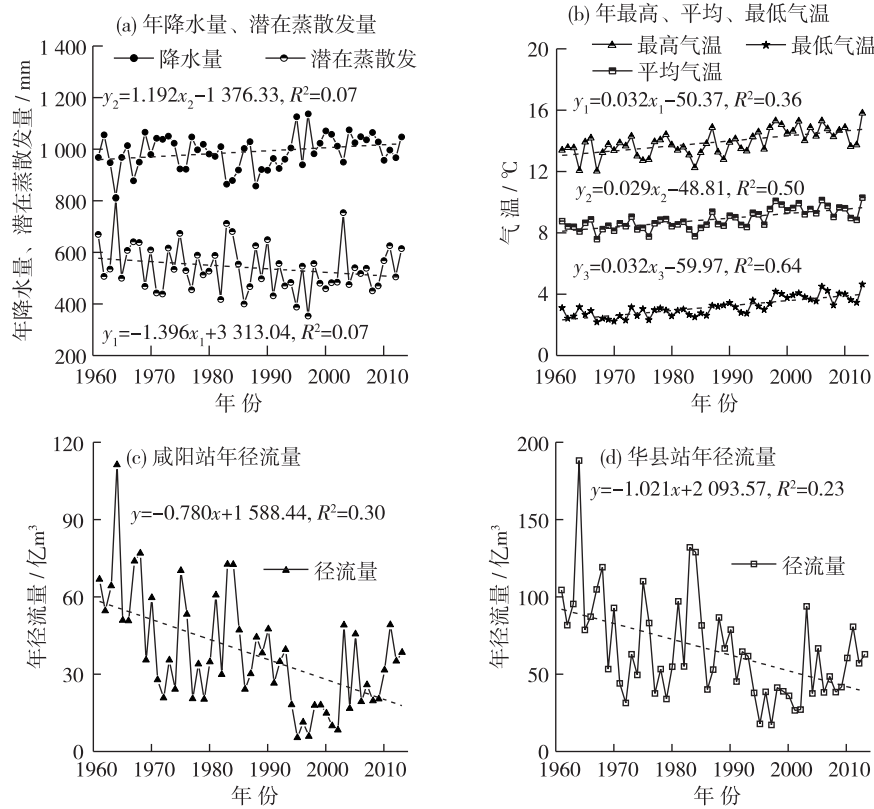


图 2 渭河流域 1961—2013 年水文气象要素过程线

Fig. 2 Evolutions of annual hydro-meteorological variables of the Weihe catchment

表 1 渭河流域 1961—2013 年降水量和径流量序列 Mann-Kendall 趋势分析及 Pettitt 突变检验结果

Table 1 Results of Mann-Kendall trend test and Pettitt test for the annual precipitation and runoff series over the Weihe catchment in the period of 1961—2013

| 序号 | 变量 | MK 统计量 | 趋势 | Pettitt 统计量 | 突变年份 |
|----|-------------|--------|----|-----------------------|------|
| 1 | 咸阳以上集水区面降水量 | -1.59 | ↓ | 0.094 9 | — |
| 2 | 华县以上集水区面降水量 | -1.37 | ↓ | 0.199 0 | — |
| 3 | 咸阳站径流量 | -3.81 | ↓↓ | 1.73×10^{-4} | 1990 |
| 4 | 华县站径流量 | -3.18 | ↓↓ | 1.47×10^{-3} | 1990 |

注: “↓”表示呈下降趋势, “↓↓”表示通过显著性水平 $\alpha=0.05$ 的 MK 检验, 呈显著下降趋势; “—”表示未通过显著性水平 $\alpha=0.05$ 的 Pettitt 检验, 即序列无突变点。

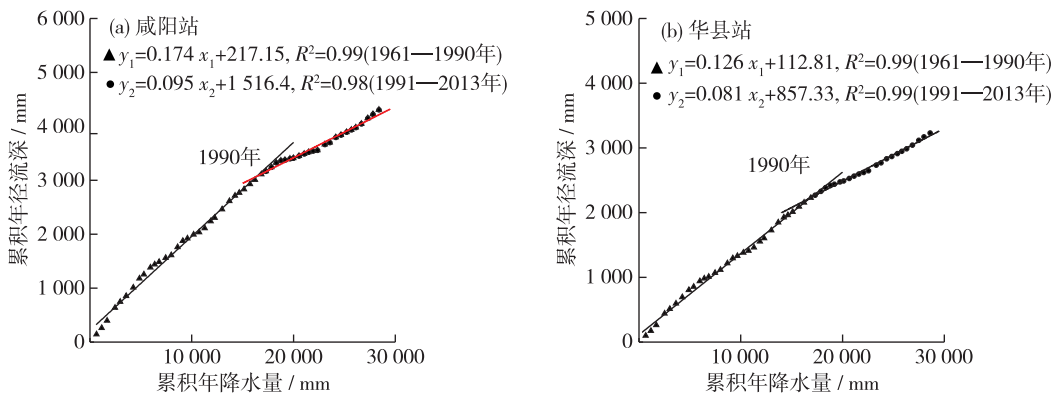


图 3 渭河流域(咸阳及华县以上集水区)年降水量与径流深双累积曲线

Fig. 3 Double mass curve of the cumulative precipitation and runoff depth

3.2 径流衰减归因分析

采用咸阳和华县站实测日径流量率定基准期 VIC 模型参数, 以 Nash-Sutcliffe 效率系数 (E_{NSC}) 大于 0.60、径流深相对误差 (E_R) 绝对值小于 15% 作为约束条件^[12], 得到的 E_{NSC} 最小为 0.71, E_R 绝对值最大为 6.0%, 表明两水文站流量过程模拟精度均满足要求。采用基准期模型参数重建变化期径流序列, 按照环境变化的径流响应评估框架, 定量分离气候变化和人类活动对渭河径流量减少的贡献率(表 2), 结果显示: 人类活动是引起渭河流域变化期径流量衰减的主要原因, 咸阳和华县站由人类活动引起的径流变化量分别为 -16.10 亿 m^3 和 -23.10 亿 m^3 , 对总径流下降的贡献率分别为 -66.7% 和 -71.0%。

气候变化对径流衰减的贡献主要表现为降水减少引起径流补给量下降。3.1 节分析表明: 渭河流域年降水量和径流量均呈总体减小趋势; 尽管自 2000 年后降水量及径流量呈一定的增加趋势(图 2), 但由于降水量和径流量仍低于基准期水平, 采用基准期作为衡量标准, 气候变化仍然是引起变化期年径流量均值下降的因素之一。人类活动是影响径流衰减的另一重要因素, 如地表、地下水开采、农业灌溉以及水土保持等措施。关中平原经济社会数据显示: 随着人口数量的快速增长(变化期内人口增加约 253 万), 农业生产规模不断扩大, 变化期国内生产总值 GDP 年平均增长率较基准期增加 3.26%。截至 2012 年, 关中地区水库总数达 403 座, 总库容 16.50 亿 m^3 , 有效灌溉面积 92 万 hm^2 。变化期农业耗水量呈增长趋势, 年均消耗 16.70 亿 m^3 , 且保持每年 0.400 0 亿 m^3 的速度增长, 农业耗水约占总耗水量的 71%, 水库、塘坝等水利工程支持下的农业灌溉已成为该地区主要耗水途径。

表 2 气候变化和人类活动对咸阳及华县站 1991—2013 年径流衰减的贡献率

Table 2 Effects of climate change and human activities on runoff reduction at the Xianyang and Huaxian stations in the period of 1991—2013

| 水文站 | $\Delta Q_{tot}/\text{亿}m^3$ | $\Delta Q_{cv}/\text{亿}m^3$ | $I_{cv}/\%$ | $\Delta Q_{ha}/\text{亿}m^3$ | $I_{ha}/\%$ |
|-----|------------------------------|-----------------------------|-------------|-----------------------------|-------------|
| 咸阳 | -24.20 | -8.070 | -33.3 | -16.10 | -66.7 |
| 华县 | -32.60 | -9.470 | -29.0 | -23.10 | -71.0 |

3.3 非平稳水文干旱时空演变特征

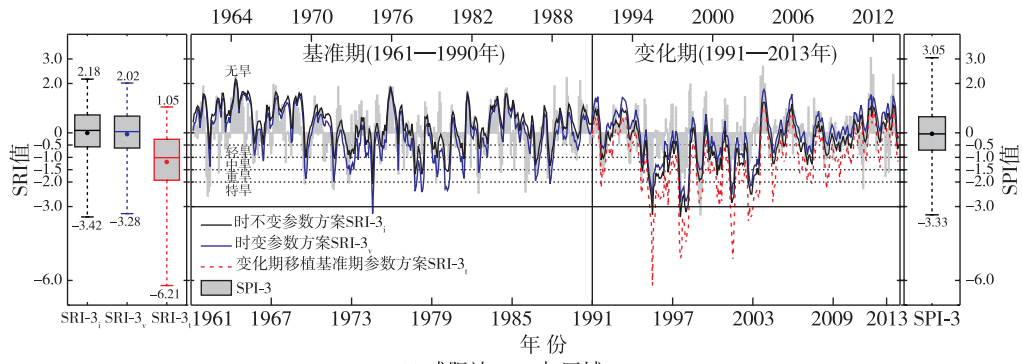
3.3.1 SRI 参数方案优选

采用咸阳站短历时 (SRI-3, 反映短期旱涝波动) 和长历时 (SRI-12, 反映长期旱涝趋势) 尺度 SRI 与 SPI 对比评定不同参数方案 SRI 表征非平稳旱涝序列的合理性(图 4), 结果显示: SPI 识别的旱情与文献[13-14] 的干旱评估结果基本一致, 证明本研究所采用的 SPI 能有效识别研究区的气象干旱过程。对比 SRI_t 和 SRI_v 过程线(图 4), 发现 SRI_t 识别的基准期重早年的干旱程度(如 1962 年、1969 年、1971—1972 年、1982 年和 1986 年)较 SRI_v 偏轻, 而变化期重早年干旱程度较 SRI_v 偏重(如 1994—1995 年、1997 年、1999 年、2002 年和 2011 年)。此外, SRI 样本在统计特性上应服从标准化正态分布, 即满足单位方差和零均值, 超出 ± 3.0 范围应考虑视为异常值^[15]。图 4 箱线图显示 SRI_v 数据对称性优于 SRI_t 及 SRI_l , 且异常值减少, 样本更接近正态分布, 表明采用时变参数方案可有效降低非平稳水文序列造成的 SRI 计算不确定性。 SRI_t 在统计特性上较标准化正态分布出现了较大偏离, 证明变化期径流分布与基准期差别较大, 即该流域干旱过程不满足平稳性假设, 直接移用基准期参数或将基准期和变化期序列概化为同一分布的计算均不合理。

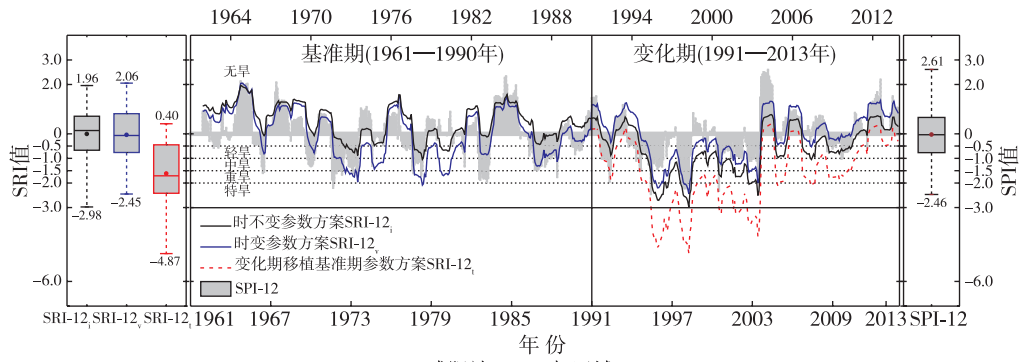
此外, 图 4 还表明: SRI_t 识别的水文干旱较 SPI 表征的气象干旱过程存在发生滞后、强度衰减的特点, 反映了由降水偏差引起的气象干旱传播至水文干旱的滞后特性^[16]。

3.3.2 水文干旱演变分析

采用游程理论, 分析不同年代际渭河流域干旱频率和干旱强度特征(图 5)。结果表明: 从干旱频率看, 渭河流域存在年代际尺度的旱涝交替现象, 20 世纪 70 年代和 90 年代流域总体呈现干旱频发的特征, 其中关中地区 70 年代短历时干旱频率为 23%~44%, 长历时干旱频率为 37%~72%; 90 年代局部短历时干旱频率达 59%, 长历时干旱频率平均为 63%。70 年代和 90 年代关中地区平均短历时和长历时干旱强度均大于 1.0, 表明该地区短期和长期干旱情势较严重。2000 年后泾河区域干旱频率较高, 干旱强度的高值区集中在泾河上游和关中平原。



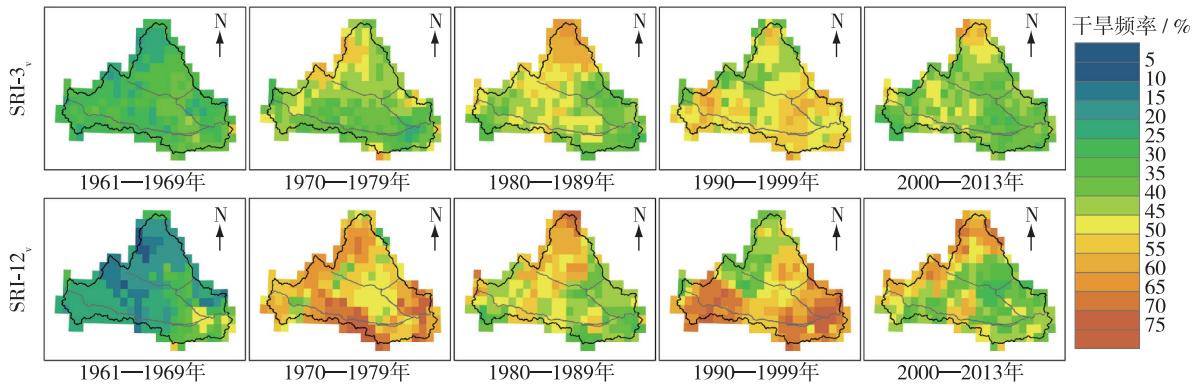
(a) 咸阳站SRI-3与区域SPI-3



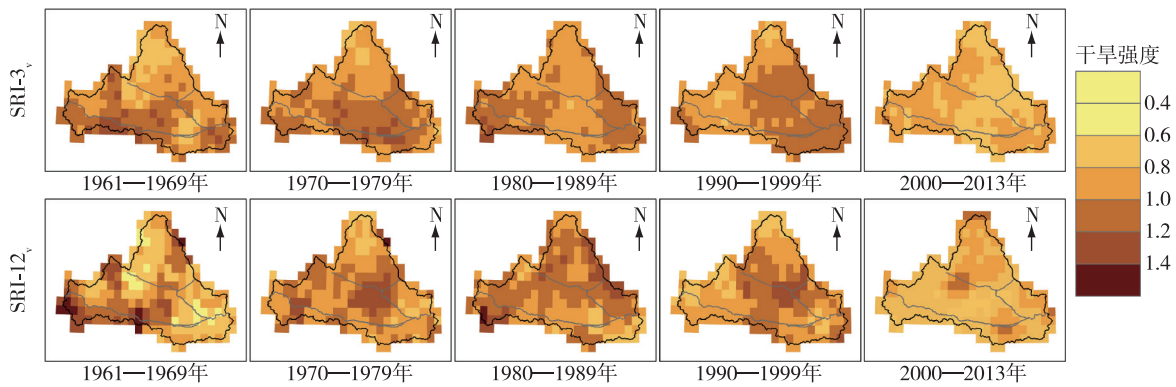
(b) 咸阳站SRI-12与区域SPI-12

图 4 咸阳站 1961—2013 年不同参数方案 SRI-3 及 SRI-12 与区域 SPI 对比

Fig. 4 Comparisons of the SRI-3 and SRI-12 at the Xianyang station with the regional SPI from 1961 to 2013



(a) 干旱频率时空演变



(b) 干旱强度时空演变

图 5 渭河流域 1961—2013 年不同年代际干旱频率及干旱强度空间分布

Fig. 5 Spatial variations of the drought frequency and intensity in each decade over the Weihe catchment from 1961 to 2013

水的供给和需求互为矛盾、互相牵制,共同促使水文干旱的发生演变。降水是渭河河川径流量的主要补给来源,而人类活动主要表现为对水的需求与耗用。采用 SRI_n 、 SRI_t 和 SRI_{n-t} 序列进一步诠释环境变化对水文干旱的影响(图6),结果表明:气候变化和人类活动均是影响渭河流域变化期旱涝演化的重要因素,其中人类活动是短历时水文干旱发生的主导因素,气候变化主要影响长历时旱涝的演变趋势。渭河流域在1995—2002年间处于持续干旱期,而人类活动是诱发1995年、2001年、2002年等多场短历时水文干旱的主导因素。2003年是一个较湿润年份,且气候条件占主导因素,其后气候条件对旱涝波动的影响减小;人类活动对干旱的影响在2003—2004年达到最大值,与气候因素有反相波动的特点。2010—2013年流域进入湿润时期, SRI_{12} 显示气候变化是湿润化趋势的主导因素。

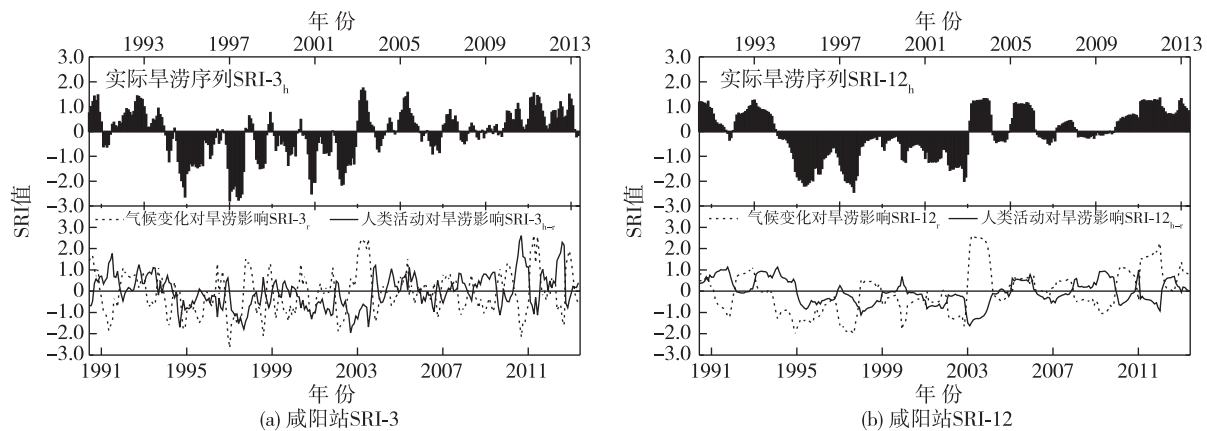


图6 咸阳站1991—2013年实际水文干旱序列及气候变化和人类活动对旱涝演变影响

Fig. 6 Hydrological drought evolutions and the impacts of climate change and human activities on drought at the Xianyang station in the period of 1991—2013

4 结 论

(1) 渭河流域年降水量呈下降趋势,气候倾向率为 $-14.0 \text{ mm}/10\text{a}$,年最高、平均、最低气温以及潜在蒸散发量均呈上升趋势,气候倾向率分别为 $0.32 \text{ }^\circ\text{C}/10\text{a}$ 、 $0.29 \text{ }^\circ\text{C}/10\text{a}$ 、 $0.32 \text{ }^\circ\text{C}/10\text{a}$ 以及 $11.9 \text{ mm}/10\text{a}$ 。MK检验、Pettitt突变点检测及降水与径流双累积曲线均一致表明:咸阳和华县水文站年径流量均呈显著减小趋势且在1990年序列出现突变。

(2) 应用VIC模型对渭河流域径流衰减进行归因分析,发现人类活动是引起1991年以来渭河流域径流量衰减的主要因素,人类活动对咸阳和华县站径流变化的贡献作用分别为 -66.7% 和 -71.0% ,社会发展和农业生产的水需求增长是引起径流下降的主要原因。

(3) 对比评定SRI多参数化方案表征非平稳水文干旱的合理性,发现基于时变参数方案计算的 SRI_n 能合理重建历史水文干旱序列,准确识别1962年、1969年、1971—1972年、1982年、1986年、1994—1995年、1997年、1999年、2002年和2011年等干旱年份,并满足标准化干旱指数的统计特性。

(4) 基于 SRI_t 评估渭河流域水文干旱时空演变特性,发现渭河流域存在年代际尺度的旱涝交替现象;气候变化和人类活动均是影响渭河流域变化期旱涝演化的重要因素,其中人类活动是短历时水文干旱发生的主导因素,气候变化主要影响长历时旱涝的演变趋势。

本文在定量评价水文干旱驱动因素方面还存在不足,未来可增加水文干旱监测及人类社会取用水数据,更准确、精细地评估气候变化和人类活动对水文干旱演变的影响作用。

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 X M, ZHANG J Y, ZHAN C S, et al. Review for impacts of climate change and human activities on water cycle [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, 44(7): 779-790. (in Chinese))
- [2] 裴源生, 蒋桂芹, 翟家齐. 干旱演变驱动机制理论框架及其关键问题[J]. 水科学进展, 2013, 24(3): 449-456. (PEI Y S, JIANG G Q, ZHAI J Q. Theoretical framework of drought evolution driving mechanism and the key problems [J]. Advances in Water Science, 2013, 24(3): 449-456. (in Chinese))
- [3] MONTANARI A, YOUNG G, SAVENIJE H, et al. "Panta Rhei (Everything Flows)": change in hydrology and society: The IAHS Scientific Decade 2013—2022[J]. Hydrological Sciences Journal, 2013, 58(6): 1256-1275.
- [4] REN L, WANG M, LI C, et al. Impacts of human activity on river runoff in the northern area of China[J]. Journal of Hydrology, 2002, 261(1): 204-217.
- [5] SHUKLA S, AW WOOD. Use of a standardized runoff index for characterizing hydrologic drought[J]. Geophysical Research Letters, 2008, 35(2): 405-411.
- [6] CANCELLIERE A, BONACCORSO B. Uncertainty analysis of the standardized precipitation index in the presence of trend[C]// Colorado: 29th Annual American Geophysical Union Hydrology Days, 2009: 14-26.
- [7] 李析男, 谢平, 李彬彬, 等. 变化环境下不同等级干旱事件发生概率的计算方法: 以无定河流域为例[J]. 水利学报, 2014, 45(5): 585-594. (LI X N, XIE P, LI B B, et al. A probability calculation method for different grade drought event under changing environment: taking Wuding River basin as an example[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, 45(5): 585-594. (in Chinese))
- [8] YONG B, REN L, HONG Y, et al. Spatial-temporal changes of water resources in a typical semiarid basin of North China over the past 50 years and assessment of possible natural and socioeconomic causes [J]. Journal of Hydrometeorology, 2013, 14(4): 1009-1034.
- [9] 左德鹏, 徐宗学, 李景玉, 等. 气候变化情景下渭河流域潜在蒸散量时空变化特征[J]. 水科学进展, 2011, 22(4): 454-461. (ZUO D P, XU Z X, LI J Y, et al. Spatiotemporal characteristics of potential evapotranspiration in the Weihe River basin under future climate change[J]. Advances in Water Science, 2011, 22(4): 454-461. (in Chinese))
- [10] YEVJEVICH V. An objective approach to definitions and investigations of continental hydrologic droughts [J]. Hydrology, 1967, 23: 7-25.
- [11] MCKEE T B, DOESKEN N J, KLEIST J. The relationship of drought frequency and duration to time scales [J]. American Meteorological Society, 1993, 17(22): 179-183.
- [12] XIE Z, YUAN F, DUAN Q, et al. Regional parameter estimation of the VIC land surface model: methodology and application to river basins in China [J]. Journal of Hydrometeorology, 2007, 8(3): 447-468.
- [13] 刘文琨, 裴源生, 赵勇, 等. 区域气象干旱评估分析模式[J]. 水科学进展, 2014, 25(3): 318-326. (LIU W K, PEI Y S, ZHAO Y, et al. Research of the regional meteorological drought assessment analysis model [J]. Advances in Water Science, 2014, 25(3): 318-326. (in Chinese))
- [14] 雷江群, 黄强, 王义民, 等. 基于可变模糊评价法的渭河流域综合干旱分区研究[J]. 水利学报, 2014, 45(5): 574-584. (LEI J Q, HUANG Q, WANG Y M, et al. Variable fuzzy evaluation on comprehensive divisions of drought in the Wei River basin [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, 45(5): 574-584. (in Chinese))
- [15] HU Y M, LIANG Z M, LIU Y W, et al. Uncertainty analysis of SPI calculation and drought assessment based on the application of Bootstrap [J]. International Journal of Climatology, 2015, 35(8): 1847-1857.
- [16] van LOON A F. Hydrological drought explained [J]. Wiley Interdisciplinary Reviews: Water, 2015, 2(4): 359-392.

Hydrological drought characteristics in the Weihe catchment in a changing environment*

REN Liliang^{1,2}, SHEN Hongren^{1,2}, YUAN Fei^{1,2}, ZHAO Chongxu^{1,2}, YANG Xiaoli², ZHENG Peili²

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

Abstract: Environmental change not only quantitatively affects water resources, but also causes non-stationarity in hydrological processes, which challenges the applicability of traditional drought assessment methodologies. Based on data for 1961 to 2013 from two hydrological stations, 62 rain gauge stations, and 24 meteorological stations within the Weihe catchment, this study evaluated the effect of climate change and human activities on runoff reduction using a macro-scale distributed hydrological model along with the Variable Infiltration Capacity (VIC) model. The spatiotemporal characteristics of hydrological drought were analyzed by the Standardized Runoff Index (SRI) which was calculated by multi-parameterization schemes. The robustness of SRI under non-stationarity as well as the impact of environmental change on the hydrological evolution were analyzed. Results showed that the observed significant runoff reduction at the Xianyang and Huaxian hydrological stations in the period of 1991—2013 was mainly due to human activities, which accounted for -66.7% and -71.0% of the total change, respectively. The SRI_v series that were based on the time-variant parameterization scheme, could rationally reproduce the historical hydrological droughts. It was also found that after 1991 human activities mainly resulted in the short-term drought fluctuation and climate change mainly led to the trends of droughts and floods in the Weihe catchment.

Key words: climate change; human activity; runoff; hydrological drought; spatiotemporal characteristics; Weihe catchment

论文优先数字出版说明

为即时确认作者科研成果、彰显论文传播利用价值,从2011年1月起,将于《水科学进展》印刷版期刊出版的定稿论文优先在“中国知网”(http://www.cnki.net)以数字出版方式提前出版(优先数字出版)。欢迎读者在中国知网“中国学术期刊网络出版总库”检索、引用本刊作者最新研究成果。

《水科学进展》编辑部

* The study is financially supported by the National Key Research and Development Plan of China (No. 2016YFA0601504) and the National Natural Science Foundation of China (No. 41323001).