

# 黄土高原藉河流域径流对气候和土地利用变化的响应

郑培龙<sup>1,2</sup>, 李云霞<sup>3</sup>, 寇馨月<sup>4</sup>, 张晓明<sup>1</sup>,  
赵阳<sup>1</sup>, 解刚<sup>1</sup>, 成晨<sup>1</sup>, 殷小琳<sup>1</sup>, 刘冰<sup>1</sup>

(1. 中国水利水电科学研究院, 北京 100048; 2. 北京水保生态工程咨询有限公司, 北京 100053;

3. 中水北方勘测设计研究有限责任公司, 天津 300222; 4. 珠江水利委员会珠江流域水土保持监测中心站, 广东 广州 510611)

**摘要:** [目的] 揭示黄土高原区中尺度流域径流对气候和土地利用变化的响应规律, 为合理解决流域水资源利用和实现水资源的可持续管理提供理论支撑。[方法] 以黄土高原藉河流域为研究对象, 采用 Mann-Kendall 检验、距平累积曲线、双累积曲线以及分离评判法等方法进行研究。[结果] (1) 1962—2010 年藉河流域年降雨呈下降趋势, 但下降趋势不显著 ( $p > 0.05$ ); 流域年径流深呈显著下降趋势 ( $p < 0.001$ ), 且在 1985 年发生减少突变; (2) 坡耕地面积减少, 梯田面积增加是研究时段内流域土地利用变化的最明显特征。[结论] 研究时段内土地利用变化是藉河流域径流量减少的主要驱动因素, 影响贡献率为 90.2%, 而气候变化影响较小, 贡献率仅为 9.8%。

**关键词:** 黄土高原; 径流; 土地利用变化; 气候变化; 藉河流域

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2016)02-0250-04

中图分类号: S714.7

**文献参数:** 郑培龙, 李云霞, 寇馨月, 等. 黄土高原藉河流域径流对气候和土地利用变化的响应[J]. 水土保持通报, 2016, 36(2): 250-253. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2016.02.047

## Effects of Climate Variation and Land Use Change on Runoff in Jiehe Watershed of Loess Plateau

ZHENG Peilong<sup>1,2</sup>, LI Yunxia<sup>3</sup>, KOU Xinyue<sup>4</sup>, ZHANG Xiaoming<sup>1</sup>,  
ZHAO Yang<sup>1</sup>, XIE Gang<sup>1</sup>, CHENG Chen<sup>1</sup>, YIN Xiaolin<sup>1</sup>, LIU Bing<sup>1</sup>

(1. *China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100048,*

*China; 2. Beijing Water Conservation Ecological Engineering Consulting Co. Ltd., Beijing*

*100053, China; 3. China Water Resources Beifang Investigation, Design and Research Co. Ltd.,*

*Tianjin 300222, China; 4. Soil and Water Conservation Monitoring Center of Pearl River Basin, Pearl River Water Resources Commission of the Ministry of Water Resources, Guangzhou, Guangdong 510611, China)*

**Abstract:** [Objective] Studying the impacts of climate variation and land use change on annual runoff in meso-scale watershed in order to provide theoretical basis for basin water resources management and land-use planning in this region. [Method] Jiehe watershed of Loess Plateau was selected as a research area. Mann-Kendall test, accumulative anomaly curve, double mass curve and separation evaluation method were applied to quantify the respective contribution of climate and land use change to annual runoff of the area in the past 50 years. [Results] The annual precipitation among the observed years were not significantly different ( $p > 0.05$ ), whereas the annual runoff had a significant decreasing trend with a change point occurred in 1979 ( $p < 0.001$ ). Slope farmland declined sharply, terrace area increased rapidly during the study period. [Conclusions] Land-use change was the strongest contributor to the reduction in mean annual runoff of Jiehe with 90.2% contribution, and the remaining variation could be interpreted by climate change.

**Keywords:** Loess Plateau; runoff; land use change; climate change; Jiehe watershed

收稿日期: 2014-08-21

修回日期: 2014-09-29

资助项目: 国家自然科学基金项目“自然—人为耦合驱动的流域水沙运移尺度效应及其尺度依存”(51379008), “华北土石山区变化环境下的流域径流响应规律及其尺度变异”(41501041); 水利部公益性行业科研专项(201501045)

第一作者: 郑培龙(1976—), 男(汉族), 山西省孟县人, 硕士, 工程师, 主要从事水土保持研究工作。E-mail: zhengpeilong1122@163.com。

通信作者: 赵阳(1986—), 男(汉族), 河北省枣强县人, 博士, 工程师, 主要从事水土保持方面的研究工作。E-mail: zhaoyang1224@163.com。

黄土高原是中国水土流失最严重的地区<sup>[1]</sup>。近年来,在气候和土地覆被变化(land use and land cover change, LUCC)共同影响下,黄河流域水沙量发生了明显变化<sup>[2-4]</sup>。目前,流域水沙动态变化对气候和土地利用变化的响应研究,已成为流域生态水文研究领域的热点问题<sup>[5-8]</sup>。穆兴民等<sup>[9]</sup>研究发现水利水保措施是黄河中游近 50 a 径流显著减少的主要原因;刘昌明等<sup>[10]</sup>研究认为区域降雨变化是引起黄河上游流域径流变化的主要原因,而黄河中游流域人类活动影响更为显著;李丽娟等<sup>[11]</sup>研究认为由于研究流域地理位置、气候条件、水土保持措施和农林业开发活动强度等存在差异,导致流域研究结果不尽相同。黄土高原是中国生态环境最为脆弱的区域之一<sup>[12]</sup>。近几十年黄土高原土地覆被格局发生较大变化,改变了流域下垫面条件,进而对流域径流过程产生了深远影响<sup>[13]</sup>。因此,本研究以黄土高原藉河流域为研究对象,采用累积距平分析、Mann-Kendall 趋势检验、双累积曲线以及分离评判等方法,定量分析藉河流域气候和土地利用变化对流域径流量动态变化的影响,旨在为进一步合理解决流域水资源利用和实现水资源的可持续管理提高科技支撑。

## 1 研究区概况及研究方法

### 1.1 研究区概况

藉河地处甘肃西南部黄土高原,全长 85 km,流域面积 1 019 km<sup>2</sup>,属渭河一级支流。地理坐标为 34°20′9″—34°38′59″N,105°07′50″—106°00′45″E,属黄土丘陵沟壑第三副区。流域年平均降雨量为 560 mm,年均气温 10.8 ℃左右。区域内土壤类型比较复杂,海拔由高至低依次分布的是褐色土、黑垆土、黄绵土、红土、淀土。植被以暖温带落叶阔叶林为主,黄土梁峁及低山丘陵的下部为天然灌丛草原,草本植物以豆科、菊科、蔷薇科为主,为森林草原到草原过渡地带。流域涉及天水市秦川区 300 多个行政村,总人口达 20 多万人。

### 1.2 数据收集

根据中国科学院地理研究所数据中心提供的藉河流域 1975,1990,2000 和 2008 年 4 期分辨率为 30 m 的 Landsat TM 卫星图像为基础,运用 ERDAS Imagine 和 ArcGIS 9.2 等软件,以 2007 年《全国土地利用分类系统》为依据,结合流域土地覆被现状,将藉河流域土地利用划分为 7 种类型:林地、草地、坡耕地、梯田、水域、未利用地和城镇用地。藉河流域日径流水文数据收集于流域下游天水水文控制站,时间时

限为 1962—2010 年。流域降雨数据(1962—2010 年)来自流域内 4 个雨量站,流域平均降雨量采用空间克里格法<sup>[14]</sup>计算。

### 1.3 研究方法

1.3.1 Mann-Kendall 检验 Mann-Kendall 趋势检验<sup>[15-16]</sup>目前广泛应用于检验气候和水文时间序列数据的变化趋势。该方法主要利用 Z 值进行研究序列数据趋势统计的显著性检验。首先提出假设,假定被检测时间序列参数无明显变化趋势,因此可通过两尾检验查得在一定显著水平下的临界检验值  $Z_{1-\alpha/2}$ ,当  $|Z| < Z_{1-\alpha/2}$  时,原假设成立;当  $|Z| > Z_{1-\alpha/2}$  时,则原假设不成立,被检测时间序列参数有明显变化趋势。当 Z 大于 0 时表示被检测时间序列参数呈现上升趋势,当 Z 小于 0 时表示被检测时间序列参数呈现下降趋势,Z 绝对值越大,表示被检测时间序列参数变化趋势越显著。

1.3.2 距平累积曲线 距平累积法可显现水文要素年际变化的阶段性特征。该方法首先计算每年的水文要素距平,然后按年序累加,得到距平累积序列。采用累积距平法判断径流量的序列突变年份。该方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<sup>[17]</sup>。

时间序列  $X(x_1, x_2, \dots, x_n)$ , 其在某一时刻  $t$  的累积距平为:

$$LP_i = \sum_1^i (x_i - \bar{x}) \quad (1)$$

式中:  $LP_i$ ——第  $i$  年的距平累积值;  $x_i$ ——第  $i$  年的水文要素值;  $\bar{x}$ ——某水文要素的多年平均值。

根据距平有正有负的特点,当距平累积持续增大时,表明该时段内水文要素值大于平均值;当距平累积持续不变,表明该时段水文要素值等于平均值;当距平累积持续减小时,表明时段内水文要素值小于平均值。

1.3.3 双累积曲线法 双累积曲线是进行水文数据时间序列分析的一种常用方法<sup>[18]</sup>,基本原理是两个变量按同一时间长度逐步累加,一个变量作为横坐标,另一个变量作为纵坐标,降雨与径流的双累积曲线可以揭示径流是否有趋势性变化(即是否存在径流变化突变点)。在本文中,该方法用于分析流域径流突变点,进而将研究时序划分为基准期和措施期。

1.3.4 分离评判法 通过采用数理统计方法构建流域基准期降水—径流相关关系方程,用以模拟计算措施期的预期自然径流量,将其与基准期平均径流量相比得到降雨变化对径流的影响量,将其与实际观测径

流量对比,得到人类活动影响量。流域径流变化总量  $\Delta S$  是措施期实测径流量  $Q_{S2}$  与基准期径流量  $Q_{S1}$  之差,它包括人类活动的影响量  $\Delta S_1$  和降雨变化的影响量  $\Delta S_2$ 。人类活动对流域径流的影响量  $\Delta S_1$  是实测措施期径流量  $Q_{S2}$  与基于降雨-径流关系模拟的措施期径流量  $\Delta Q_{S2}$  之差,而降雨变化对径流的影响量  $\Delta S_2$  是措施期模拟径流量  $\Delta Q_{S2}$  与基准期实测径流量  $\Delta Q_{S1}$  之差<sup>[19]</sup>,具体计算公式为:

$$\Delta S = Q_{S2} - Q_{S1} = \Delta S_1 + \Delta S_2 \quad (2)$$

$$\Delta S_1 = \Delta Q_{S2} - \Delta Q_{S1}^1 \quad (3)$$

$$\Delta S_2 = \Delta Q_{S2}^1 - \Delta Q_{S1} \quad (4)$$

## 2 结果与分析

### 2.1 流域降雨年际变化规律及检验

图 1 为藉河流域 1962—2010 年的降雨年际变化规律。线性趋势分析表明,近 50 a 藉河流域降雨呈现出波动变化趋势。从 5 a 滑动平均趋势线可看出藉河流域 90 年代前降雨量呈现较为稳定的波动变化,但 1991—2001 年降雨量下降趋势明显,2003 年之后开始回升。结合流域降雨 Mann-Kendall 趋势检验和 Spearman 趋势检验结果可知,藉河流域检验统计值均为负值,分别为  $-0.80$  和  $-0.14$ ,说明研究时期内藉河流域降雨量呈减少趋势;但  $|Z| < 1.96$ ,  $|R| < 0.313$ ,说明流域降雨量减少趋势不显著。

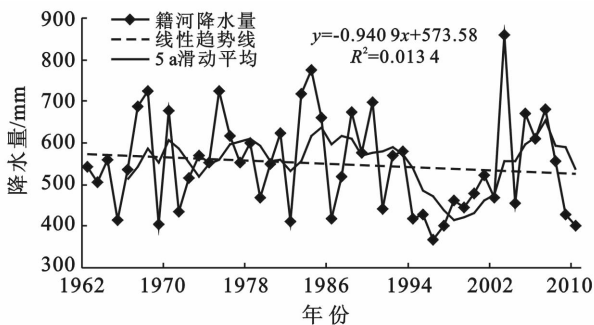


图 1 藉河流域年际降雨变化

### 2.2 流域径流年际变化规律及检验

图 2 为藉河流域 1962—2010 年径流深年际变化规律。由线性回归方程斜率为负值可知,流域年径流深总体呈现减少趋势,且以  $21 \text{ mm}/10 \text{ a}$  的速度递减。为探讨流域径流减少趋势是否显著,采用 Mann-Kendall 和 Spearman 方法进行趋势检验可知,检验统计值均为负值,表明流域径流量呈现减少趋势。而  $|Z| > 2.32$ ,  $|R| < 0.259$ ,说明流域径流量减少趋势显著(99.9%置信水平)。结合图 3 流域径流累

积距平分析可看出,藉河流域年径流深在 1985 年前后发生减少突变。

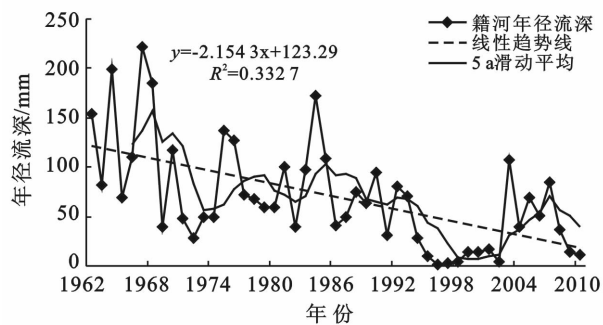


图 2 藉河流域径流深变化趋势

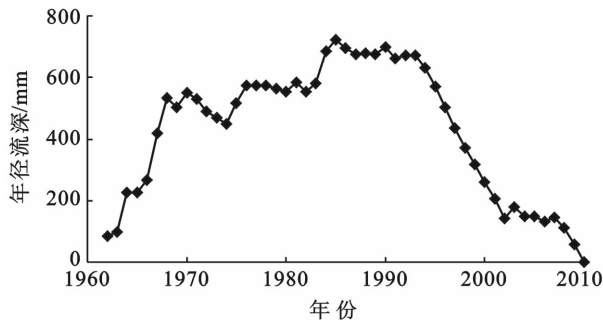


图 3 流域年径流深累积距平图

### 2.3 流域土地利用变化分析

由流域土地利用情况可知,藉河流域林草面积所占流域面积比例在研究时段内变化较小。由 1975—1990 年的平均 51%,增加到 1990 年后的 54%,增幅约 3%。坡耕地面积逐年降低,由研究初期占流域总面积的 40%,减少至 2008 年的 9%,其中,1978—1990 年间坡耕地面积减少最为显著,减幅为 26%。而梯田面积变化趋势相反,研究初期仅占 7%,到 2008 年已增至 34%,这一明显变化与同时期内区域坡改梯工程的全面开展密切相关。此外,居民地、水域和未利用地面积研究时段内基本保持稳定,变化幅度相对较小。

### 2.4 流域气候/土地利用变化对径流的影响分析

根据研究流域降雨-径流的双累积曲线(图 4),并结合流域径流累积距平分析结果,将藉河流域径流研究时序划分为:基准期(1962—1985 年)和措施期(1986—2010 年)。采用分离评判法分别计算了研究流域气候变化和土地利用变化对流域径流量的影响贡献率(表 1)。由表 1 可知,藉河流域土地利用变化对流域径流影响贡献率为 90.2%,说明人类活动影响下的土地利用变化是藉河流域径流发生突变减少的主要驱动因素;气候对流域径流变化产生影响贡献率均较小,仅为 9.8%。

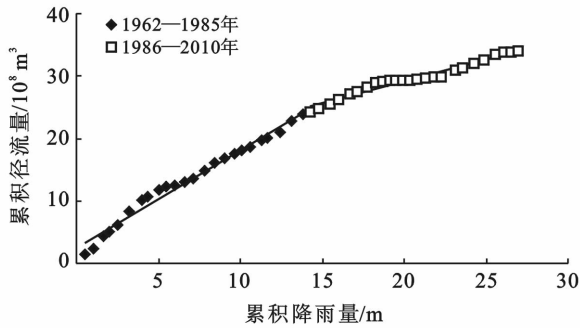


图4 藉河流域不同时段降雨量-径流量双累积曲线

表1 藉河流域径流量对气候和土地利用变化的响应

| 年份        | 累积降雨/<br>mm | 径流/ $10^8 \text{ m}^3$ |       |       | 降雨因素                    |       | 土地利用变化                  |       |
|-----------|-------------|------------------------|-------|-------|-------------------------|-------|-------------------------|-------|
|           |             | 实测值                    | 计算值   | 总减少量  | 影响量/ $10^8 \text{ m}^3$ | 贡献率/% | 影响量/ $10^8 \text{ m}^3$ | 贡献率/% |
| 1962—1985 | 13 827.75   | 0.996                  | —     | —     | —                       | —     | —                       | —     |
| 1986—2010 | 13 125.02   | 0.405                  | 0.938 | 0.591 | 0.058                   | 9.8%  | 0.533                   | 90.2% |

(3) 藉河流域土地利用变化对流域径流影响贡献率为90.2%,气候变化对流域径流减少影响仅为9.8%。

(4) 气候变化因子主要有降雨、温度、辐射、湿度、风速等,但由于数据限制,本研究中气候变化主要指降雨变化,这对研究结果的准确性有一定影响,条件允许的情况下应当加强对影响生态水文过程的其他气候因子的分析。此外,流域水沙产生为伴生过程,本研究仅就单一径流对气候和土地利用变化的响应进行了研究,并未对研究时段水沙自身关系进行阐述,应在未来研究中进一步加强。

#### [ 参 考 文 献 ]

[1] 黄志霖,傅伯杰,陈利顶.恢复生态学 with 黄土高原生态系统的恢复与重建问题[J].水土保持学报,2002,16(3):122-125.

[2] 王延贵,胡春宏,史红玲.黄河流域泥沙配置状况及其资源化[J].中国水土保持科学,2010(4):20-26.

[3] 姚文艺.黄河流域水沙变化研究新进展[N].黄河报,2009-9-24(3).

[4] 姚文艺,冉大川,陈江南.黄河流域近期水沙变化及其趋势预测[J].水科学进展,2013,24(5):607-616.

[5] Nie Wenming, Yuan Yongping, Kepner W, et al. Assessing impacts of landuse and landcover changes on hydrology for the upper San Pedro watershed [J]. Journal of Hydrology, 2011, 407(S1/4):105-114.

[6] Doerr S H, Shakesby R A, Blake W H, et al. Effects of differing wildfire severities on soil wettability and implications for hydrological response [J]. Journal of Hydrology, 2006, 319(S1/4):295-311.

[7] Wang Shengping, Zhang Zhiqiang, Sun Ge, et al. Long-term streamflow response to climatic variability in the Loess Plateau, China [J]. Journal of the American Water Resources Association, 2008, 44(5):1098-1107.

### 3 讨论与结论

(1) 1962—2010年流域降雨呈微弱减少趋势,但减少趋势不显著( $p > 0.05$ );径流减少趋势在99%置信区间内达到显著水平( $p < 0.001$ ),且流域径流在1985年发生减少突变;

(2) 研究时段内流域土地利用结构发生了重大变化,坡耕地大幅减少约26%,而梯田面积大幅增加,约27%。

[8] Liu C, Sui J, Wang Z Y. Changes in runoff and sediment yield along the Yellow River during the period from 1950 to 2006 [J]. Journal of Environmental Informatics, 2008, 12(2):129-139.

[9] 穆兴民,巴桑赤烈,张鲁,等.黄河河口镇至龙门区间来水来沙变化及其对水利水保措施的响应[J].泥沙研究,2007(2):36-41.

[10] 刘昌明,张学成.黄河干流实际来水量不断减少的成因分析[J].地理学报,2004,59(3):323-330.

[11] 李丽娟,姜德娟,李九一.土地利用/覆被变化的水文效应研究进展[J].自然资源学报,2007,22(2):211-223.

[12] 杨国安,徐勇,郭腾云.基于脆弱性和可持续生计视角的黄土高原生态环境治理研究[J].水土保持研究,2010,17(2):64-69.

[13] 王盛萍,张志强,孙阁,等.黄土高原流域土地利用变化水文动态响应:以甘肃天水吕二沟流域为例[J].北京林业大学学报,2006,28(1):48-54.

[14] 常文渊,戴新刚,陈洪武.地质统计学在气象要素场插值的实例研究[J].地球物理学报,2004,47(6):982-990.

[15] Hirsch R M, Slack J R, Smith R A. Techniques of trend analysis for monthly water quality data [J]. Water Resources Research, 1982, 18(18):107-121.

[16] Hirsch R M, Slack J R, Smith R A. Techniques of trend analysis for monthly water quality data [J]. Water Resources Research, 1982, 18(18):107-121.

[17] 赵广举,穆兴民,温仲明,等.皇甫川流域降雨和人类活动对水沙变化的定量分析[J].中国水土保持科学,2013,11(4):1-8.

[18] Mu Xingmin, Chille B S, Zhang Lu, et al. Impact of soil conservation measures on runoff and sediment in Hekou-Longmen region of the Yellow River [J]. Journal of Sediment Research, 2007(2):36-41.

[19] 王国庆.气候变化对黄河中游水文水资源影响的关键问题研究[D].江苏南京:河海大学,2006.