

# 黄土高原典型流域河川径流水文情势变化及其归因分析

张舒羽<sup>1</sup>, 赵广举<sup>1,2</sup>, 穆兴民<sup>1,2</sup>, 田鹏<sup>3</sup>, 高鹏<sup>1,2</sup>, 孙文义<sup>1,2</sup>

(1.西北农林科技大学 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100;

2.中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 3.西北农林科技大学 资源与环境学院, 陕西 杨凌 712100)

**摘要:** [目的] 分析黄土高原典型流域河川径流水文情势变化及其原因, 为该区域水土保持与水资源高效利用提供科学支撑。[方法] 选取渭河支流散渡河与无定河支流大理河为研究区, 利用甘谷站和绥德站1965—2018年的气象水文资料, 采用线性回归、Mann-Kendall 检验、累积距平和双累积曲线法分析散渡河和大理河的径流变化特征及其驱动因素, 采用改进的RVA法分析梯田和淤地坝为主的水土保持措施对不同河流水文情势变化的影响。[结果] 两条河流的年径流量呈显著减少趋势( $p < 0.01$ ), 并在20世纪90年代前后发生突变。采用改进的变异性范围(RVA)法计算散渡河和大理河的径流综合改变度分别属高度改变(90.12%)和中度改变(60.66%), 32个水文变化指标中, 流量变化改变率指标受到的影响最为显著。[结论] 以梯田措施为主的散渡河月中值流量和年最小流量均大幅减小, 年最小流量发生时间明显延迟且低流量脉冲历时增加。以坝库工程为主的大理河月中值流量受季节变化影响, 年最小1d和3d流量增加且低流量脉冲次数减小。

**关键词:** 黄土高原; 河川径流; 水文变化指标; RVA法; 水土保持; 驱动因素

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2021)04-0001-08

中图分类号: TV121.4; P333

**文献参数:** 张舒羽, 赵广举, 穆兴民, 等. 黄土高原典型流域河川径流水文情势变化及其归因分析[J]. 水土保持通报, 2021, 41(4): 1-8. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2021.04.001; Zhang Shuyu, Zhao Guangju, Mu Xingmin, et al. Hydrologic regime change and its attribution analysis of river runoff in typical watershed on Loess Plateau [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021, 41(4): 1-8.

## Hydrologic Regime Change and Its Attribution Analysis of River Runoff in Typical Watershed on Loess Plateau

Zhang Shuyu<sup>1</sup>, Zhao Guangju<sup>1,2</sup>, Mu Xingmin<sup>1,2</sup>, Tian Peng<sup>3</sup>, Gao Peng<sup>1,2</sup>, Sun Wenyi<sup>1,2</sup>

(1.State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau,

Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2.Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3.College of Resource and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** [Objective] The hydrologic regime change in typical watershed on Loess Plateau was studied, and its attribution analysis was carried out, in order to provide scientific support for soil and water conservation and efficient utilization of water resources in different regions of the Loess Plateau. [Methods] Sandu River (a tributary of Weihe River) and Dali River (a tributary of Wuding River) were selected as the study areas, and the traits in variations of streamflow and their driving factors from 1965 to 2018 were analyzed based on meteorological and hydrological data at Gangu and Suide hydrological stations by using the linear regression, Mann-Kendall test, accumulated anomaly, and double mass curve methods. The improved range of variability

收稿日期: 2021-03-28

修回日期: 2021-04-25

资助项目: 国家重点研发计划项目“黄河水沙变化机理与趋势预测”(2016YFC0402401); 国家自然科学基金项目(42077076; 42077075); 中国科学院“西部之光”项目(XAB2017A03)

第一作者: 张舒羽(1997—), 女(汉族), 陕西省西安市人, 硕士研究生, 研究方向为流域水沙过程与土壤侵蚀。Email: shuyuzhang@nwf.edu.cn.

通讯作者: 赵广举(1980—), 男(汉族), 河南省驻马店市人, 博士, 研究员, 主要从事流域水沙过程与水土保持研究。E-mail: gjzhao@ms.iswc.ac.cn.

approach was employed to analyze the impact of the hydrological alterations in different river by soil and water conservation dominated by terracing and damming. [Results] The annual runoff showed significant decreasing trends ( $p < 0.01$ ) and the abrupt changes occurred in around 1990s in Sandu River and Dali River. The alteration degree of runoff in Sandu River was high (90.12%) and in Dali River was moderate (60.66%) calculated by the improved range of variability approach (RVA) method. Among 32 indicators of hydrologic alteration (IHA), the rise and fall rate of flow were affected most significantly. [Conclusion] In the Sandu River (dominated by terracing), both the magnitude of monthly median flow and the annual minimum flow decreased dramatically, timing of annual minimum flow delayed and duration of low pulses increased. In the Dali River (dominated by damming), the magnitude of monthly median flow depended on the seasonal alteration. The annual 1-day and 3-day minimum flow increased and frequency of low pulses declined.

**Keywords:** Loess Plateau; river runoff; indicators of hydrologic alteration (IHA); range of variability approach (RVA); soil and water conservation; driving factors

近年来,随着人类活动的日益加剧,世界大约有 24% 的河流径流量变化发生显著变化<sup>[1]</sup>,如美国的哥伦比亚河<sup>[2]</sup>、埃及的尼罗河<sup>[3]</sup>、中国的长江<sup>[4]</sup>与黄河<sup>[5]</sup>人类活动主要是通过大型基础设施(如水库)、城市化和生态恢复等方式改变河流水文情势,但河流的可取水量和其自然流动状况可改变的程度必然有限。为此,诸多学者<sup>[6]</sup>分析了河流水文情势变化及其主要驱动因素,以满足生态系统对水的需求。Richter 等<sup>[7]</sup>提出了与自然水流状况相关的水文变化指标(indicators of hydrologic alteration, IHA)评估河川径流情势变化情况。为了反映河流生态系统受影响的程度,使用变异性范围(RVA)法可以分析河流不同时期水文指标值的可被改变的程度<sup>[8]</sup>。Yang 等<sup>[9]</sup>采用 RVA 法对黄河中下游水文情势改变程度进行了评价,结果表明小浪底水库对花园口站水文情势影响较大。Zhang 等<sup>[10]</sup>在使用 IHA/RVA 法的基础上,结合与 IHA 指标具有良好相关性的生态指标,来分析大坝建设与生态水流状况之间的关系,发现黄河上中游段水文情势因梯级水库的调度发生了较大的变化。Tian 等<sup>[11]</sup>采用 IHA/RVA 法分析评价了无定河流域的水文改变度,并发现其与水文连通性指数(IC)和流域水库指标(RI)具有较好的相关性,表明土地利用变化和水库是改变河流水文情势的重要指标。此外,亦有相关研究分析水利工程及林草植被措施对基流、年径流系数等水文变量的影响<sup>[12]</sup>,但少有研究利用 IHA 指标体系综合评价不同水土保持措施配置模式下的河川径流水文情势变化特征。

黄河干支流水文情势的改变源于黄土高原地区大规模水土保持措施的实施、干流水库群建设及不同河段的取用水。1996 年以来,黄土高原的水保措施取得了显著的成效,使得黄河中游水沙急剧减少<sup>[13]</sup>。为进一步明确不同水土保持措施对河川径流的水文情势变化,本文选取梯田为主的散渡河和淤地坝为主的大理

河,采用 IHA 与改进的 RVA 法评价了河川径流水文情势变化特征,量化了降雨变化与人类活动对径流变化贡献率。研究结果可为区域水土保持措施空间配置优化提供决策,对实施黄土高原未来水土保持,助力流域高质量发展战略的实现具有重要意义。

## 1 研究区概况

黄土高原位于黄河中游,地处半湿润半干旱的气候过渡带。作为黄河泥沙的主要源头,黄土高原的水土流失影响着黄河的生态安全,是实施水土保持和生态修复工程的重点区域<sup>[14]</sup>。本文选取该区域内实施水土保持措施的典型流域——散渡河和大理河作为研究区。散渡河流域位于渭河上游,河长 228 km,甘谷水文站设在距河口 1 km 处,流域面积为 2 484 km<sup>2</sup>。该流域为大陆性季风气候,降水偏少,气候干燥。流域内几乎全部为黄土覆盖,植被覆盖度低,河流挟沙量大。面对恶劣的自然条件和严重的水土流失问题,自 20 世纪 70 年代以来,该流域进行了以坡改梯为主的水土保持措施综合治理。大理河流域地处黄土高原中部,是无定河最大的一级支流。流域干流全长 170 km,起源于靖边县。绥德水文站为大理河流域出口水文站,集水面积为 3 893 km<sup>2</sup>。大理河流域属于暖温带半干旱大陆性季风气候,降水年内分配不均并且降水历时短,强度大。该流域属于黄土丘陵沟壑区,地形破碎严重,沟壑纵横,主要土壤类型为易受侵蚀的黄绵土和新积土。流域土壤侵蚀严重,也是黄河流域粗泥沙的主要来源区之一。截止 2011 年,流域内累计建设骨干淤地坝 279 座<sup>[15]</sup>,受坝库工程的调蓄作用,近几十年来河流输沙量出现显著下降趋势。

## 2 材料与方法

### 2.1 数据来源

分别收集整理了散渡河和大理河流域出口的甘

谷和绥德水文站 1965—2018 年的实测日径流数据,以及流域内雨量站的月降雨量数据。其中,54 a 间的日径流数据序列资料来源于水利部出版的《中华人民共和国水文年鉴—黄河流域水文资料》,降雨量数据从中国气象数据科学数据共享服务网(<http://cdc.cma.gov.cn/>)获得,并运用反距离加权方法插值得到流域年平均降雨量。2017 年各流域的水土保持措施(包括梯田、淤地坝和水库)的空间分布是通过 Google Earth 卫星影像进行手动勾绘得出,并在流域内选取了 8 个 1 km<sup>2</sup> 左右的典型小流域进行无人机航拍,对勾绘数据的精度进行了验证,结果表明平均解译精度超过了 90%。

## 2.2 研究方法

2.2.1 径流时间序列分析 采用线性趋势法,非参

数 Mann-Kendall(MK)趋势检验法、累积距平法对年流量进行趋势性和突变性检验。采用流量与降雨量双累积曲线量化分析人类活动与降雨对径流变化的贡献率。受篇幅限制,上述 4 种较为常用方法的具体计算步骤可参考相关文献<sup>[16-18]</sup>。

2.2.2 改进的水文变异范围法 为了定量分析水土保持措施对河流水文情势的变化程度,本研究采用了包括流量、流量脉冲、发生时间、历时和改变率等 5 个方面 32 个水文变化指标(indicators of hydrologic alteration, IHA)对河流的水文特征进行描述,具体参数详见表 1。在此基础上,采用欧氏距离计算径流突变年份前后典型年份(丰、平、枯水年)的变化;结合 IHA 水文特征指标的改变度和欧氏距离,计算河流水文情势的综合改变度。

表 1 IHA 指标参数分组描述

组别	各组内容	IHA 指标	符号表示
G <sub>1</sub>	各月流量	1—12 月均流量中值	Jan, Feb., ..., Dec.
G <sub>2</sub>	年极端流量	年最小 1,3,7,30,90 d 径流量、 年最大 1,3,7,30,90 d 径流量 基流系数	min 1/3/7/30/90 max 1/3/7/30/90 BFI
G <sub>3</sub>	年极端流量值发生时间	年最小(大)流量发生时间	D <sub>min</sub> /D <sub>max</sub>
G <sub>4</sub>	高、低流量发生频率及持续时间	低流量的发生次数与平均历时 高流量的发生次数与平均历时	LPC/LPD HPC/HPD
G <sub>5</sub>	流量变化改变率及频率/次	流量平均增加率(减少率) 每年流量逆转次数	RR/FR NoR

(1) 单一指标改变度。代表单一指标的改变程度( $D_i$ ),具体计算方法为:

$$D_i = \frac{N_{oi} - N_{ei}}{N_{ei}} \times 100\% \quad (1)$$

$$N_{ei} = r_i \cdot N_T \quad (2)$$

式中: $D_i$ 表示第  $i$  个 IHA 指标的改变程度; $N_{oi}$ 表示第  $i$  个指标在变化后实际落入变化范围内的年数; $N_{ei}$ 表示第  $i$  个指标变化后预期落入变动范围内的年数; $r_i$ 表示变化前第  $i$  个指标落在变化范围内的比例; $N_T$ 表示变化后受影响的径流量总年数。

(2) 水文情势综合改变度。为直观地评价流域水文特征的变化,体现出各指标权重大小,用公式将 32 个水文指标联系起来,并对较大的  $D_i$  值赋予较大权重,计算出河川水文情势变化的综合改变程度  $D_0$ :

$$D_0 = \sqrt{\frac{1}{32} \sum_{i=1}^{32} D_i^2} \quad (3)$$

一般将  $D_i$  和  $D_0$  分为 3 个等级进行量化评价,即  $0 \leq |D_i| < 33\%$  为无改变或低度改变,用 L 表示; $33\% \leq |D_i| < 67\%$  为中度改变,用 M 表示; $67\% \leq |D_i| \leq 100\%$  为高度改变,用 H 表示。

(3) 考虑典型年份变化的综合改变度。Yin 等<sup>[19]</sup>

发现传统的河流水文情势变化评价方法低估了潜在的流态变化程度,为使得计算结果更为合理,其在此基础上考虑了径流典型年份的变化,对原 RVA 法计算的综合改变度  $D_0$  进行了改进,采用欧氏距离计算典型年份即“丰水年、平水年和枯水年”的变化。丰、平、枯水年分别赋值 2,1,0。径流突变前后典型年份的分布情况为  $(A_1, A_2, \dots, A_a)$  和  $(B_1, B_2, \dots, B_b)$ 。 $A_i$  和  $B_i = 0, 1, 2$ 。欧氏距离(ED)由下面公式确定:

$$ED = \begin{cases} \sqrt{\sum_i^a (A_i - B_i)^2} & (a=b) \\ \min \sqrt{\sum_i^b (A_{k+i} - B_i)^2} & (a>b) \\ \min \sqrt{\sum_i^a (A_i - B_{k+i})^2} & (a<b) \end{cases} \quad (4)$$

其中, $k=0, 1, 2, \dots, n-k$ 。并将计算出的欧氏距离进行标准化,计算公式为:

$$S = \frac{ED}{T \times \min(\sqrt{a}, \sqrt{b})} \quad (5)$$

式中: $S$ 表示标准化后的欧氏距离,用于衡量径流的丰、平、枯水年的变化,变化范围为  $[0, 1]$ ,数值越大表示变化越大;ED表示欧氏距离; $T$ 表示典型年份的最大距离,当有 3 种典型年份(丰、平、枯水年)时, $T=2$ 。

根据 Grantz 等<sup>[20]</sup> 所定义典型年的方法, 将 1965—2018 年共 54 a 采用该方法划分为丰水年、平水年和枯水年, 并将其考虑到综合改变度 OD 计算的公式中:

$$OD = 1 - (1 - D_0)(1 - S) \quad (6)$$

参照  $D_i$  与  $D$  的分级标准, OD 一样划分为 3 个不同的等级来客观反映考虑典型年变化的综合水文改变的程度, 便可以对河流水文情势进行量化, 对河道生态系统的改变状况进行分析。

### 3 结果与分析

#### 3.1 径流量变化趋势分析

3.1.1 径流年际变化特征 根据散渡河控制站甘谷站和大理河绥德水文站 1965—2018 年径流数据, 采用线性回归分析流域径流的年际变化趋势(图 1)。

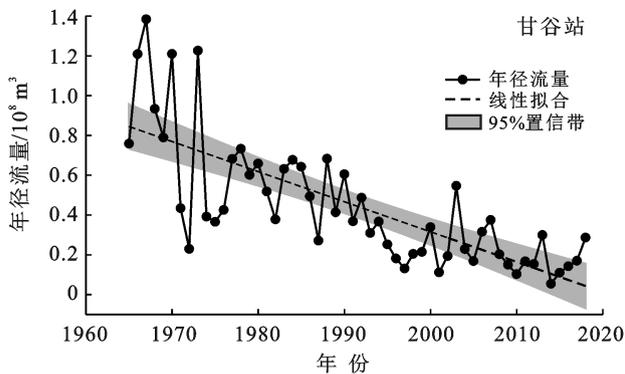


图 1 甘谷站和绥德站 1965—2018 年径流量年际变化过程

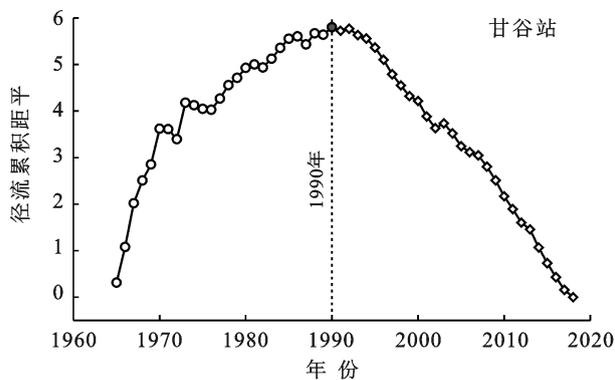


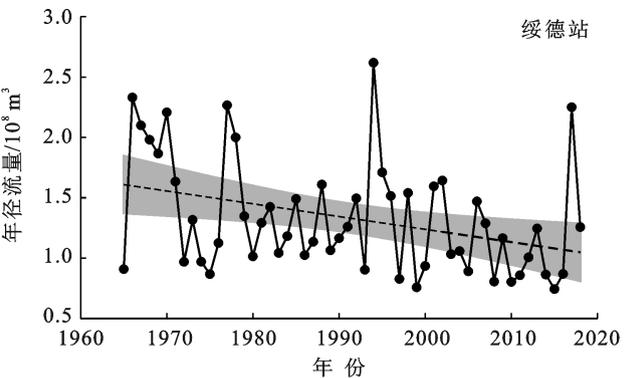
图 2 甘谷站和绥德站径流量累积距平突变点识别

#### 3.2 流域生态水文变异情况

3.2.1 IHA 水文指标变化 为定量评估甘谷站与绥德站的水文变异情况, 依据突变年份分别计算突变前后不同时期的水文情势指标(图 3), 各组指标的具体变化为: ①月流量中值。与突变前相比, 甘谷站月流量中值均显著减小, 且减小幅度均超过 50%, 其中以 6 月流量减少最多, 而绥德站除 1 月流量增加 5.93%

结果表明, 近 50 a 来两个站的年径流量均呈现显著下降趋势( $p < 0.01$ )。比较而言, 甘谷站流量的减少速率( $1.51 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{a}$ )略高于绥德站( $1.06 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{a}$ )。根据非参数 MK 趋势检验, 甘谷站的标准统计量  $Z = |-6.55|$  大于绥德站( $Z = |-2.716|$ ), 表明甘谷站的径流量减少更为显著。

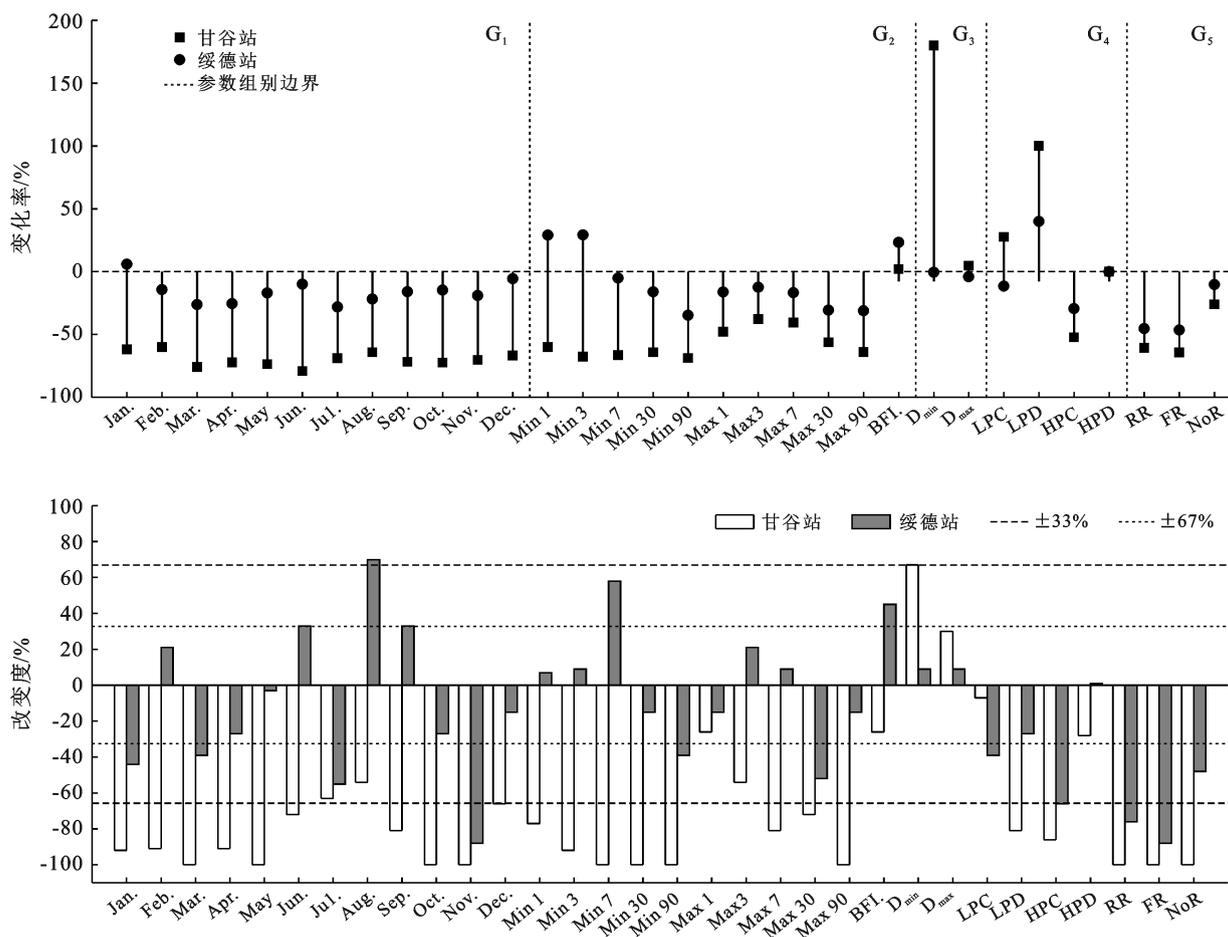
3.1.2 径流情势的突变分析 从年径流量累积距平变化曲线可以看出(图 2), 1965—2018 年期间各站径流呈现出相对明显的阶段性变化特征。研究发现, 两站的径流量累积距平以 20 世纪 90 年代为突变点, 在突变点之前呈现波动上升趋势, 此后呈波动下降趋势。综上分析, 甘谷站和绥德站的径流量突变年份分别为 1990 年和 1996 年, 并将整个研究时段分为两个时段: 突变年份前的时期为基准期, 后一时期因受降水以及人类活动影响较为显著被称为变化期。



外, 其余月份均减小, 以 7 月的  $1.96 \text{ m}^3/\text{s}$  降低至  $1.41 \text{ m}^3/\text{s}$  的变化率最大; 甘谷站月流量中值发生高度改变居多, 而 6 月和 8 月改变度最小, 为 63% 和 54%, 属于中度改变。在绥德站, 仅 8 月、11 月流量变化最为剧烈, 属于高度改变。②年极端流量大小。由图 3 可看出, 自 1990 年后甘谷站的年极端流量均减小, 年最小 90 日(d) 流量的减小量最多, 最大 3 d

流量的减小量最少。绥德站仅年最小 1 d, 3 d 流量呈增加趋势, 其余指标均减小; 分析年极端流量改变度发现, 甘谷站年最小流量均为高改变度, 而年最大 1 d, 3 d 流量改变度为 26% 和 54%, 分别为低、中度改变。绥德站年最小 7 d 流量的改变度最大, 数值为 58%, 属于中度改变。③年极端流量发生时间: 甘谷站在变化期, 每年极端流量发生时间均推迟, 其中年最小流量为高改变度, 出现日期推迟了 13.5 d, 属于高度改变, 但年最大流量出现日期为低度改变; 在绥德站, 突变后每年极端流量出现的时间均有小幅缩短, 属于低度改变。两站的基流指数较突变前均有明显增加, 绥德站基流指数的变化率和改变度较甘谷站高。④高、低流量的频率及历时。由图 4 可以看出,

两站的低流量脉冲历时增加, 高流量脉冲次数减小且历时未出现变化。低流量脉冲历时和高流量脉冲次数, 在甘谷站的水文改变度均达到 80% 左右, 属于高度改变。但在绥德站, 低流量脉冲历时和高流量脉冲次数分别属于低度和中度改变。其次, 突变后低流量脉冲次数在甘谷站增加了 27.59%, 为低度改变; 在绥德站减小了 11.54%, 为中度改变。⑤流量变化改变率及频率: 突变后, 甘谷站流量增加率和减少率均减小, 逆转次数由 138 次减少至 102 次, 改变度高达 100%; 在绥德站流量增加率和减少率较突变前均减少了大约 46%, 属于高度改变。流量逆转次数也有小幅减少, 但为中度改变。河流流量逆转次数大小关系着河流的生态水文节律。



注: 图中各指标符号对应表 1 IHA 指标名称。下同。

图 3 甘谷站和绥德站 32 个 IHA 水文指标的变化率及改变度

3.2.2 水文情势改变度变化 由表 2 可知, 甘谷站第 1 组水文指标改变度最大(为 69.77%)为高度改变, 其他组的水文指标均为中度改变; 绥德站除第 5 组水文指标改变度为 34.05%, 属中度改变外, 其余水文指标为低度改变。两个站点不同的改变程度, 表明了水文突变对河川径流水文情势的影响程度不同。采用

RVA 方法计算的甘谷站和绥德站的综合改变度  $D_0$  分别为高度改变(76.1%)和中度改变(34.56%), 可知两个水文站的水文指标在变化期发生显著改变, 以散渡河水文情势变化最为显著。但为了考虑径流的典型年份变化的影响, 计算了标准化后的欧氏距离  $S$  (表 2), 可知甘谷站和绥德站的改进的综合水文改变

度 OD 分别为 90.12% 和 60.66%。比较改进前 ( $D_0$ ) 后 (OD) 综合水文改变度大小可看出, 将径流典型年份的变化纳入水文情势变化评价后, 两站的综合水文改变计算值增大, RVA 法低估了流域水文情势综合改变度大小。

表 2 甘谷站和绥德站水文情势综合改变度计算结果

站点	IHA 组别	平均改变度	$D_0$	ED	S	OD
甘谷	1	69.77%(H)				
	2	52.31%(M)				
	3	42.41%(M)	76.10%	6	0.588	90.12%
	4	44.96%(M)				
	5	50.33%(M)				
绥德	1	17.00%(L)				
	2	22.24%(L)				
	3	2.30%(L)	34.56%	3.74	0.399	60.66%
	4	20.24%(L)				
	5	34.05%(M)				

注:“L”,“M”,“H”分别代表低度、中度、高度改变。

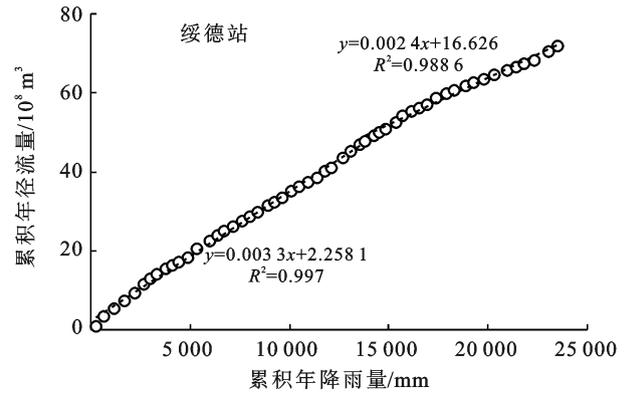
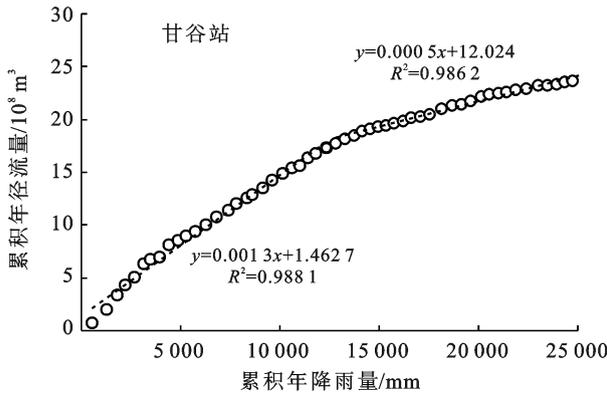


图 4 两站 1965—2018 年降水—径流双累积曲线

表 3 不同时段降水与人类活动对各站的径流减少的贡献分析

水文站	年份	实测值/ $10^8 \text{ m}^3$	计算值/ $10^8 \text{ m}^3$	实测径流变化		降雨影响		人类活动影响	
				变化量/ $10^8 \text{ m}^3$	比例/%	变化量/ $10^8 \text{ m}^3$	比例/%	变化量/ $10^8 \text{ m}^3$	比例/%
甘谷	1965—1990	0.67	0.59	—	—	—	—	—	—
	1991—2018	0.24	0.58	0.43	64.18	0.09	20.93	0.34	79.07
绥德	1965—1996	1.46	1.37	—	—	—	—	—	—
	1997—2018	1.13	1.46	0.33	22.60	0	0	0.33	100

## 4 讨论

20 世纪 60 年代以来, 黄土高原实施了大规模的水土保持措施。据统计截止 2015 年, 黄土高原已修建梯田  $5.50 \times 10^6 \text{ hm}^2$ , 主要分布在黄河上游和渭河中游地区; 淤地坝 5.84 万座<sup>[21]</sup>, 其中大型淤地坝 5 500 余座。1999 年后, 大规模的退耕还林(草)使得黄土高原植被状况显著改善。通过 MODIS 影像分

## 3.3 水文情势变化的归因识别

河川径流的变化在流域内受到气候变化与人类活动两大因素的共同作用。为对两流域径流的变化进行归因辨析, 在基准期与变化期分别对累积径流量与累积降水量进行线性回归分析。由图 4 双累积曲线所示, 甘谷站的基准期与变化期内年份与累积径流量之间的线性关系的斜率分别约为  $1.30 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{a}$  与  $5.00 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$ ; 而绥德站斜率分别约为  $3.30 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{a}$  与  $2.40 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{a}$ 。曲线的斜率代表单位降雨产生的径流量, 变化期的线性拟合方程的斜率明显减小, 表明人类活动导致流域的径流量发生了变化。径流实测值远远小于计算值(表 3), 说明受人类活动的影响, 流域的径流量显著减小。在甘谷站, 人类活动与降水变化对径流减少的贡献率分别为 79.07% 和 20.93%; 而在绥德站, 人类活动是径流量减少的主要驱动力。由此看出, 近几十年来河川径流减少主要是受到了人类活动影响, 如坝库建设和水土保持措施实施。

析可知, 黄土高原植被覆盖度由 1999 年的 30% 左右提高到 2018 年的近 70%<sup>[22]</sup>。大规模的梯田、淤地坝、植树种草等水保措施是导致黄河泥沙锐减的根本原因, 其对流域产汇流、产输沙过程产生显著的影响, 进而改变河川的水文情势。如图 5 所示, 散渡河流域分布着大面积的梯田, 占该流域总面积的 72.76%, 大理河流域以坝库工程为主, 控制面积接近流域面积的 50%(表 4), 是导致径流量显著减少的主要因素。据

调查,在渭河上游、泾河上中游等地,绝大部分梯田均为水平梯田<sup>[23]</sup>。梯田措施既改变了原地形的下垫面特征,也改变了降雨、径流的路径,同时使降雨径流就地拦蓄入渗,并将拦蓄的径流储存于土壤中,引起土壤水、壤中流及基流的增加,而储存在土壤水库的水分也增大了土壤蒸散及植物蒸腾,最终减少了流域总产流量。焦菊英等<sup>[24]</sup>研究发现水平梯田不仅可容纳本地产流,而且至少可承受 3 倍于自身面积的上方坡面汇水。比较均匀的小于 50 mm 的日降水量可以全部入渗,避免了径流的产生,起到了蓄水减沙的作用<sup>[25]</sup>。综合计算结果发现,散渡河的径流量和各指标大小在突变年后呈现明显的减小趋势,汛期的各月流量中值都有大幅度的减少,但以非汛期的改变度最大。低流量脉冲次数增加,年最小流量发生时间推迟。该流域综合水文改变度为高度改变,水文情势的变化对年最小 30 d、90 d 流量、最大 90 d 流量、流量变化改变率及逆转次数这些指标的影响更为深刻。由此可知,除了受降水等气候影响因素外,散渡河流

域大规模的梯田措施的布设对径流水文情势具有重要影响,主要以减少径流为主且对水文流态的调控作用显著,同时该流域的河流生态系统稳定性易受到破坏<sup>[26]</sup>。研究发现淤地坝对黄土高原区的流域水文过程产生显著影响。一方面,坝地的淤积使得沟道形态发生改变,比降降低,过流断面面积变大,从而造成水流通道断面形态发生变化;另一方面,降低了沟道的过流能力,显著削弱了流域的洪峰流量<sup>[27]</sup>。大理河流域的淤地坝已于 20 世纪 70 年代开始修建,淤地坝可有效的削减沟道洪峰下泄,拦蓄泥沙<sup>[15]</sup>;水库则通过蓄洪补枯对径流的年内分配调整。总体而言,大理河年径流量呈减少趋势,但 IHA 指标减少幅度不大,说明水利工程措施坦化了河流洪峰过程。具体表现为,月流量中值在汛期减少而在非汛期略有增加,也一定程度上减少了低流量脉冲发生的次数。较为均一化的水流下泄过程,使得河流丰水期、枯水期的年内变化规律受到影响甚至会逐步消失,对枯水期的影响尤其明显<sup>[29]</sup>。

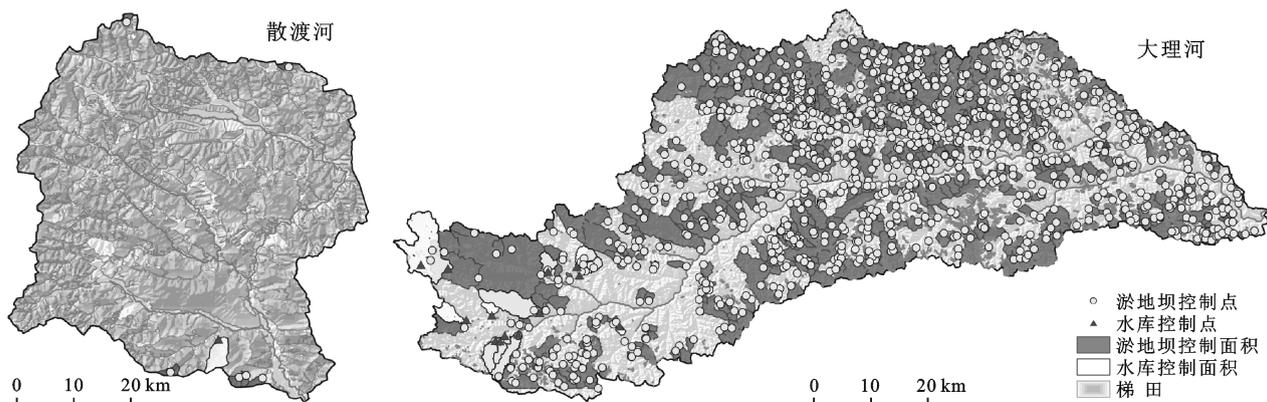


图 5 散渡河和大理河流域水土保持措施的空间分布

表 4 淤地坝、梯田和水库措施的控制面积及比例

水文站	淤地坝		梯田		水库	
	控制面积/km <sup>2</sup>	比例/%	控制面积/km <sup>2</sup>	比例/%	控制面积/km <sup>2</sup>	比例/%
甘谷	15.42	0.62	1 807.45	72.76	13.77	0.55
绥德	1 750.3	44.96	222.33	5.71	108.96	2.80

## 5 结论

(1) 散渡河和大理河流域的年径流量均呈现显著减少趋势,减少速率分别为  $1.51 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{a}$  与  $1.06 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{a}$ 。年径流分别在 1990 与 1996 年发生突变,与人类大规模实施的水土保持措施密不可分。

(2) 以梯田为主要措施的散渡河流域,年径流的变异性较高,综合水文改变度为 90.12%,属于高度改

变,表明河川水文情势发生剧烈变化。变化期,大部分水文指标均呈大幅度减少,其中,月流量中值、年最小 30 d、90 d 流量、最大 90 d 流量、流量变化改变率及逆转次数为高度改变;而低流量脉冲次数增加,年最小流量发生时间的推迟;说明散渡河水文情势的变化对年最小值流量的影响更加剧烈,且梯田措施的布设主要以减少径流为主,其对水文流态的调控会对河流生态系统产生较为明显的影响。

(3) 以坝库工程为主的大理河流域,年径流变异性不大,综合水文改变为 60.66%,属于中度改变。较基准期,变化期(1997—2018 年)的大部分指标均呈减小趋势,变化率未超过 50%。该流域汛期流量减小而非汛期增加,年最小 1 d 和 3 d 流量增大,低流量脉冲次数减小。表明坝库工程措施使得径流量发生

了强烈的季节性变化,同时显著削减了洪峰,使流量过程坦化,形成了均一化的水流下泄过程,使得河流的典型年在年内的变化规律受到影响。

本文通过对比两个流域发现,相比坝库工程的建设,大规模的梯田布设会造成径流量显著减少。坝库工程措施布设可对径流量的年内分配进行调节,丰蓄枯补作用大大彰显。针对黄土高原的水土保持现状,需要结合生物措施制定水土保持优化配置方案,在有效减蚀拦沙的基础上,减少径流的损失。在对水资源进行合理的开发利用的同时,平衡生态用水量,重点考虑水文情势变化引发的潜在生态环境问题。建议应该注重梯田布设的规模,因地制宜推进分区精准治理,并优化水库调度模式,提高水资源可持续利用率。

### [参 考 文 献]

- [1] Li Li, Ni Jinren, Fang Chang, et al. Global trends in water and sediment fluxes of the world's large rivers [J]. *Science Bulletin*, 2020, 65(1): 62-69.
- [2] Naik P K, Jay D A. Human and climate impacts on Columbia River hydrology and salmonids [J]. *River Research & Applications*, 2011, 27(10): 1270-1276.
- [3] Hasan E, Tarhule A, Kirstetter P, et al. Runoff sensitivity to climate change in the Nile River basin [J]. *Journal of Hydrology*, 2018, 561(3/4): 312-321.
- [4] Xu Jiongxin. Plausible causes of temporal variation in suspended sediment concentration in the upper Changjiang River and major tributaries during the second half of the 20th century [J]. *Quaternary International*, 2009, 208(1/2): 85-92.
- [5] 胡春宏, 张晓明. 论黄河水沙变化趋势预测研究的若干问题 [J]. *水利学报*, 2018, 49(9): 1028-1039.
- [6] 赵广举, 穆兴民, 田鹏, 等. 近 60 年黄河中游水沙变化趋势及其影响因素分析 [J]. *资源科学*, 2012, 34(6): 1070-1078.
- [7] Richter B, Baumgartner J, Wigington R, et al. How much water does a river need? [J]. *Freshwater Biology*, 1997, 37(1): 231-249.
- [8] Olden J D, Poff N L. Redundancy and the choice of hydrologic indices for characterizing streamflow regimes [J]. *River Research and Applications*, 2010, 19(2): 101-121.
- [9] Yang Tao, Zhang Qiang, Chen Yongqin David, et al. A spatial assessment of hydrologic alteration caused by dam construction in the middle and lower Yellow River, China [J]. *Hydrological Processes*, 2008, 22(18): 3829-3843.
- [10] Zhang Hongbo, Singh V P, Zhang Qiang, et al. Variation in ecological flow regimes and their response to dams in the upper Yellow River basin [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2016, 75(11): 1-16.
- [11] Tian Xiaojing, Zhao Guangju, Mu Xingmin, et al. Hydrologic alteration and possible underlying causes in the Wuding River, China [J]. *the Science of the Total Environment*, 2019, 693(25): 133551-133556.
- [12] 宁珍, 高光耀, 傅伯杰. 黄土高原流域水沙变化研究进展 [J]. *生态学报*, 2020, 40(1): 2-9.
- [13] 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.
- [14] 刘国彬, 上官周平, 姚文艺, 等. 黄土高原生态工程的生态成效 [J]. *中国科学院院刊*, 2017, 32(1): 11-19.
- [15] 贾路, 任宗萍, 李占斌, 等. 基于耦合协调度的大理河流域径流和输沙关系分析 [J]. *农业工程学报*, 2020, 36(11): 86-94.
- [16] Burn D H, Elnur M. Detection of hydrologic trends and variability [J]. *Journal of Hydrology*, 2002, 255(1/4): 107-122.
- [17] 穆兴民, 张秀勤, 高鹏, 等. 双累积曲线方法理论及在水文气象领域应用中应注意的问题 [J]. *水文*, 2010, 30(4): 47-51.
- [18] 赵阳, 胡春宏, 张晓明, 等. 近 70 年黄河流域水沙情势及其成因分析 [J]. *农业工程学报*, 2018, 34(21): 112-119.
- [19] Yin X A, Yang Z F, Petts G E. A new method to assess the flow regime alterations in riverine ecosystems [J]. *River Research and Applications*, 2015, 31(4): 497-504.
- [20] Grantz K, Rajagopalan B, Clark M. A technique for incorporating large-scale climate information in basin-scale ensemble streamflow forecasts [J]. *Water Resources Research*, 2005, 41(10): 10410-10411.
- [21] 李文学. 黄河治理开发与保护 70 年效益分析 [J]. *人民黄河*, 2016, 38(10): 1-6.
- [22] 姚文艺. 新时代黄河流域水土保持发展机遇与科学定位 [J]. *人民黄河*, 2019, 41(12): 1-7.
- [23] 刘晓燕, 王富贵, 杨胜天, 等. 黄土丘陵沟壑区水平梯田减沙作用研究 [J]. *水利学报*, 2014, 45(7): 793-800.
- [24] 焦菊英, 王万忠, 李靖, 等. 黄土高原丘陵沟壑区淤地坝的减水减沙效益分析 [J]. *干旱区资源与环境*, 2001, 15(1): 78-83.
- [25] 冉大川, 赵力仪, 王宏, 等. 黄河中游地区梯田减洪减沙作用分析 [J]. *人民黄河*, 2005, 27(1): 51-53.
- [26] 袁水龙, 李占斌, 李鹏, 等. MIKE 耦合模型模拟淤地坝对小流域暴雨洪水过程的影响 [J]. *农业工程学报*, 2018, 34(13): 152-159.
- [27] 高海东, 贾莲莲, 李占斌, 等. 基于图论的淤地坝对径流影响的机制 [J]. *中国水土保持科学*, 2015, 13(4): 1-8.
- [28] 郭文献, 陈鼎新, 李越, 等. 基于 IHA-RVA 法金沙江下游生态水文情势评价 [J]. *水利水电技术*, 2018, 49(8): 155-162.