

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2023.06.019.

于闰豪, 王国梁, 杨艳芬. 基于Budyko假设的水沙变化归因分析——以安塞纸坊沟小流域为例[J]. 水土保持研究, 2023, 30(6): 86-92, 101.

Yu Runhao, Wang Guoliang, Yang Yanfen. Attribution Analysis of Water and Sediment Changes Based on Budyko Hypothesis[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(6): 86-92, 101.

基于Budyko假设的水沙变化归因分析

——以安塞纸坊沟小流域为例

于闰豪¹, 王国梁^{2,3}, 杨艳芬^{1,2}

(1.西北农林科技大学 资源环境学院, 陕西 杨凌 712100; 2.西北农林科技大学 水土保持研究所
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; 3.中国科学院 安塞水土保持综合试验站, 陕西 安塞 717400)

摘要: [目的]探究小流域径流泥沙变化机制,提升和优化治理方案,实现黄土高原生态高质量可持续发展。[方法]以安塞纸坊沟小流域为研究对象,采用Mann-Kendall趋势检验法和Pettitt突变检验对流域的降雨、径流和输沙量等进行了趋势分析和突变点判断,并使用弹性系数法对径流和泥沙变化归因进行了分析,识别出气候变化和人类活动对径流和输沙量影响的贡献率。[结果](1)径流和输沙量都呈现出下降趋势,其中径流下降趋势不显著,而输沙量下降趋势极显著;(2)径流变化对于降雨最为敏感,退耕还林以来,人类活动对于径流变化的贡献率随着时间变化占主导地位;(3)人类活动对于输沙量的影响程度也随时间逐渐增大,最终贡献率趋于96%。[结论]以退耕还林等措施为主导的人类活动,在黄土高原水土流失治理中取得显著成效。

关键词: Budyko假设; 弹性系数法; 贡献率; 归因分析

中图分类号: S157.1; P333.5

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2023)06-0086-07

Attribution Analysis of Water and Sediment Changes

Based on Budyko Hypothesis

—Taking the Small Watershed of Zhifanggou in Ansai as an Example

Yu Runhao¹, Wang Guoliang^{2,3}, Yang Yanfen^{1,2}

(1.College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2.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; 3.Ansai Research Station of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences, Ansai, Shaanxi 717400, China)

Abstract: [Objective] The aim of this study is to explore the change mechanism of runoff and sediment in small watershed, improve and optimize the treatment scheme, and achieve high-quality sustainable ecological development of the Loess Plateau. [Methods] The small watershed of Zhifanggou in Ansai was taken as the research object. Mann-Kendall trend approach and Pettitt mutation test were used to analyze the trend of basin rainfall and sediment discharge, and identify the mutation point, and elastic coefficient method was used to carry out the runoff and sediment change attribution analysis to identify the climate change and human activities on runoff and sediment quantity contribution. [Results] (1) Both runoff and sediment transport showed a decreasing trend, in which the decreasing trend of runoff was not significant, but the decreasing trend of sediment transport was extremely significant. (2) With the change of time, the contribution rate of human activities to runoff change increased gradually. (3) The influence degree of human activities on

收稿日期: 2022-07-19

修回日期: 2022-09-23

资助项目: 中国科学院“西部之光”人才培养引进计划(XAB2022YW03); 国家自然科学基金面上项目(42271042)

第一作者: 于闰豪(1998—), 男, 河南临颍县人, 硕士研究生, 研究方向为土壤侵蚀与水文模拟。E-mail: yurunhao@qq.com

通信作者: 杨艳芬(1984—), 女, 宁夏银川人, 博士, 副研究员, 主要从事土壤侵蚀与水文模拟研究。E-mail: yfyang@ms.iswc.ac.cn

<http://stbcyj.paperonce.org>

sediment transport gradually increased with time, and finally tended to 96%. [Conclusion] Human activities are the main influencing factors of runoff and sediment transport, and returning farmland to forest is an effective method for soil erosion control in the Loess Plateau.

Keywords: Budyko assumption; elastic coefficient method; contribution rate; attribution analysis

黄土高原是中国水土流失的重灾区^[1-2],流失的泥沙占黄河泥沙的近 90%^[3],是中国生态建设治理的重点区域。1980 年后,我国在黄土高原地区先后开展了坡面治理、沟坡联合治理、小流域综合治理和退耕还林草等工程措施^[4],黄土高原的生态环境得到有效改善;黄河的径流和泥沙量均有明显的变化^[2],黄河干流潼关水文站年均输沙量由 1919—1959 年的 16 亿 t/a 锐减至 2001—2018 年的 2.44 亿 t/a^[4]。气候变化和人类活动是影响流域水沙变化的关键因素,定量区分二者对径流和泥沙变化的贡献率能够帮助深入了解流域水沙变化机理与规律^[5],因此气候变化和人类活动与水沙变化的关系是众多学者关注的主要问题。

现有分析水沙变化归因分析方法有经验统计法、水文模型法和弹性系数法等,不同的方法存在略微差异^[6],大致结果主要把径流和泥沙的变化归于自然和人类活动两种因素影响;Wu 等^[7]在使用不同的方法探究环境和人类活动对径流的影响时,发现经验统计法并不适合延河流域,其结果与 SWAT 水文模型相差较大,反观弹性系数与 SWAT 模型的结果接近;蒋凯鑫等^[8]对比了弹性系数法、水文法、水保法和双累积曲线法分析径流泥沙变化的结果,结果表明在径流方面,弹性系数法和水文法在物理意义上比双累积法更为清晰,泥沙方面 4 种方法均是人类活动占据主导作用;王陇等^[9]在分析黄土高原沟壑区典型小流域变化时提出,弹性系数法更适合沟壑区小流域的径流变化分析。相对比之下,经验法简单易懂,广泛使用,但不能表示水沙变化的非线性过程和特征^[10-12],易忽略潜在蒸散发、降雨等对输沙量变化的影响,且突变点具有较强的主观人为性^[6],水文模型法虽然可以分析不同情况下的产沙量,有较高的精度,但是数据难以获取^[7,11-12],而弹性系数法的数据易获取,可分离降雨和径流对输沙量变化的贡献率^[6],更好地反映径流量和输沙量变化的机理,因此本文选取弹性系数法进行分析。

以小流域为单元探究水土流失治理方案是最有效的途径,安塞纸坊沟作为小流域综合治理试验示范区^[12-14],退耕还林工程实施 20 a 来,水土流失得到有效的治理,输沙模数从 1990—1994 年 5 906.8 t/(km²·a)减少到 2015—2019 年的 135.3 t/(km²·a),但是该流域有关气候变化和人类活动对径流和输沙量变化影响

的相关研究较少,为小流域治理提供相关理论支持和决策依据,本文选取弹性系数法按照不同时间年限结合植被覆盖度和土地利用类型变化分析纸坊沟小流域的水沙变化规律和归因。

1 研究区概况

纸坊沟(109°14′—109°16′E,36°43′—36°46′N)位于陕西省延安市安塞区,处于延河中上游,是延河支流杏子河下游的一级支沟^[15]。流域属于黄土高原典型的梁峁状丘陵区,处于温暖带森林草原过渡带,植被以灌草为主^[16],流域面积为 8.27 km²,海拔 1 032~1 393 m,年均气温为 8~9℃,无霜期 157 d,年日照时数为 2 395.6 h,年均降雨量 550~650 mm,年内降雨分布不均,以暴雨为主,多集中在 6—9 月^[15]。土壤类型为黄绵土,土质疏松,抗侵蚀能力极弱,1973 年以来,实施水土保持综合规划和治理后,生态逐渐恢复,并起到了良好的示范作用^[17]。

2 数据与方法

2.1 数据与处理方法

1990—2019 年安塞纸坊沟流域的实测逐日径流量、降雨量、输沙量和含沙量均来自陕西省安塞区纸坊沟把口站观测站,气象数据采用国家气象局整编的 1990—2019 年的数据,包括温度、气压、风速、热辐射和湿度等资料,使用 Penman 公式^[18]计算出流域的潜在蒸散发。植被覆盖度采用的中国科学院成都山地灾害与环境研究所《中国 30 m 分辨率植被覆盖度数据集》,通过 ArcGIS 按照掩膜提取,获得不同时间的植被覆盖度。为研究流域不同年限的水沙变化关系,本文选择按年代划分时间序列,例如 1990—1994 年 5 a 为一个时期,并以此类推。

2.2 研究方法

2.2.1 Mann-Kendall 和 Pettitt 检验法

本文采用 Mann-Kendall 趋势检验对纸坊沟流域的径流、泥沙、潜在蒸散发以及降雨进行趋势分析。在 Mann-Kendall^[19]中,原假设 H_0 为时间序列数据 (x_1, \dots, x_n) , 是 n 个独立的随机变量同分布的样本;备择假设 H_1 是双边检验,对于所有的 $k, j \leq n$, 且 $k \neq j$, x_k 和 x_j 的分布是不相同的,检验的统计变量 S 计算如下式:

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sgn}(x_j - x_k) \quad (1)$$

$$\text{其中, sgn} = \begin{cases} +1 & (x_j - x_k) > 0 \\ 0 & (x_j - x_k) = 0 \\ -1 & (x_j - x_k) < 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中: S 为正态分布, 其均值为 0, 方差 $\text{var}(S) = n(n-1)(2n+5)/18$ 。当 $n > 10$ 时, 标准的正态统计量通过下式计算:

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{var}(S)}} & S > 0 \\ 0 & S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{var}(S)}} & S < 0 \end{cases} \quad (3)$$

对于统计变量 Z , 大于 0 时, 是上升趋势; 小于 0 时, 则是下降趋势。 Z 的绝对值在大于等于 1.28, 1.64, 2.32 时, 分别表示通过了信度 90%, 95%, 99% 的显著性检验。

Pettitt 方法是目前广泛应用的水文序列突变点检测的非参数检验法^[20], 计算简便。给定 n 个样本的时间序列 $X_i, i=1, 2, 3, \dots, n$, 定义统计变量 U_i , 公式如下:

$$U_{i,n} = U_{i-1,n} + V_{i,n} \quad (4)$$

其中 $V_{i,n}$ 的具体表达式与公式 (1) 类似, Pettitt 定义统计量 K_i 获取最显著的可能突变点年份:

$$K_i = \max_{1 \leq t \leq n} |U_i| \quad (5)$$

利用统计量 p 判断突变点是否满足给定显著性水平:

$$p = 2 \exp \left[\frac{-6K_i^2}{n^3 + n^2} \right] \quad (6)$$

当 $p < \text{显著水平 } \alpha$ 时, 表示存在统计显著的突变点。

2.2.2 基于 budyko 假设对径流变化的归因分析

基于 budyko^[21] 假设, Zhang 等^[22-25] 推算出的流域长期水热平衡关系式可表示为:

$$\frac{ET}{P} = \frac{1 + \omega \frac{E_0}{P}}{1 + \omega \frac{E_0}{P} + \left(\frac{E_0}{P}\right)^{-1}} \quad (7)$$

式中: P 为实测降雨量 (mm); ET 为实际潜在蒸散发量 (mm); E_0 为潜在蒸散发量 (mm); ω 为下垫面参数, 反映下垫面的特征, ω 值越大, 表示该地区的下垫面和植被覆盖度较高^[26], 通过将多年均降雨量, 潜在蒸散发量和径流深带入公式 (7) 中求得。

将流域水热平衡方程 $P = ET + R$ 带入公式 (7) 中, 得到 $R = f(P, E_0, \omega)$ 函数, 对其求偏导得到:

$$\frac{dR}{R} = \frac{\partial R/R}{\partial P/P} \frac{dP}{P} + \frac{\partial R/R}{\partial E_0/E_0} \frac{dE_0}{E_0} + \frac{\partial R/R}{\partial \omega/\omega} \frac{d\omega}{\omega} \quad (8)$$

式中: $\frac{\partial R/R}{\partial P/P}, \frac{\partial R/R}{\partial E_0/E_0}, \frac{\partial R/R}{\partial \omega/\omega}$ 分别为径流对应降雨、潜在蒸散发量和下垫面参数的弹性系数, 分别是 $\epsilon_p, \epsilon_{E_0}, \epsilon_w$ 。当弹性系数为正值时, 表示径流量随该变量增大而增大, 为负值时, 表示径流量随该变量增大而减少^[10]。

根据径流对应的各弹性系数来估算不同因素引起的径流变化:

$$\Delta R_p = \epsilon_p \frac{\Delta P}{P} R; \Delta R_{E_0} = \epsilon_{E_0} \frac{\Delta E_0}{E_0} R; \Delta R_w = \epsilon_w \frac{\Delta \omega}{\omega} R \quad (9)$$

式中: $\Delta R_p, \Delta R_{E_0}, \Delta R_w$ 分别为径流、潜在蒸散发和下垫面参数变化引起的径流变化量; $\Delta P, \Delta E_0, \Delta \omega$ 是降雨、潜在蒸散发、下垫面参数的变化量。

径流总的变化量 ΔR 可表示为各因素引起径流变化的综合:

$$\Delta R = \Delta R_p + \Delta R_{E_0} + \Delta R_w \quad (10)$$

则降雨、潜在蒸散发和下垫面对径流变化的贡献率 C_p, C_{E_0}, C_w 可分别表示为:

$$\begin{aligned} C_p &= \frac{\Delta R_p}{\Delta R} \times 100\% \\ C_{E_0} &= \frac{\Delta R_{E_0}}{\Delta R} \times 100\% \\ C_w &= \frac{\Delta R_w}{\Delta R} \times 100\% \end{aligned} \quad (11)$$

2.2.3 泥沙变化的归因分析 在计算泥沙的贡献率时, 为了消除流域面积对径流和输沙量关系的影响, 本文拟合了多年来输沙量和径流深的关系式^[9, 27]:

$$S = 0.0086R^2 - 0.0804R + 0.5848 \quad (12)$$

公式 (12) 的 $R^2 = 0.6$, T 检验结果大于 0.5, 实测值与拟合值差异不显著。将 $R = f(P, E_0, \omega)$ 函数带入到公式 (12) 中, 得到关于 $S = f(P, E_0, \omega)$ 的函数关系式, 然后对其求偏导:

$$\frac{dS}{S} = \frac{\partial S/S}{\partial P/P} \frac{dP}{P} + \frac{\partial S/S}{\partial E_0/E_0} \frac{dE_0}{E_0} + \frac{\partial S/S}{\partial \omega/\omega} \frac{d\omega}{\omega} \quad (13)$$

式中: $\frac{\partial S/S}{\partial P/P}, \frac{\partial S/S}{\partial E_0/E_0}, \frac{\partial S/S}{\partial \omega/\omega}$ 分别为泥沙对应降雨、潜在蒸散发、下垫面的弹性系数。贡献率以此类推参考公式 (9) — (11)。

3 结果与分析

3.1 径流泥沙趋势分析

采用 M-K 趋势检验法分析安塞纸坊沟流域的径流、输沙、降雨和潜在蒸散发的变化趋势 (表 1, 图 1),

结果表明,径流总体呈减少趋势,但趋势不显著,2010年后径流量明显低于2010前的径流量;输沙量在1900—2000年间总体较高,自2000年实行退耕还林工程后呈减少趋势,在2010年后年输沙量不足1万t,在2013年陕西发生特大洪涝灾害,降雨量剧增,导致输沙量增加,产生强烈的起伏;潜在蒸散发量表现为不显著的减少趋势,降雨呈不显著的增加趋势。流域降雨量增加,而径流量和输沙量反而减少,其原因可能是植被退耕还林后,随着林龄的增长,使得人工林土壤抗侵蚀能力增强^[28],流域的生态环境得到明显的改善,因此泥沙和径流的减少与人类活动有很大的关系,下文将对此假设展开分析。Pettitt 突变点检验

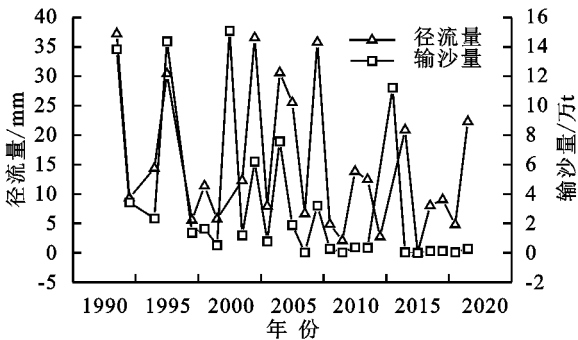


图 1 纸坊沟小流域径流、泥沙、降雨和潜在蒸散发量趋势

Fig. 1 Trends of runoff, sediment, rainfall and potential evapotranspiration in Zhifanggou small watershed

3.2 径流的变化归因分析

基于 Budyko 假设对纸坊沟流域的径流变化进行归因分析(表 2),1990—1995 年,下垫面参数由 5.23 降低至 2.65,植被覆盖度从原来的 61.06 下降至 57.71,下垫面条件明显恶化,2000 年实施退耕还林工程后至 2019 年,下垫面参数从 3.37 增加到 19.02,该时期流域的植被的覆盖变化比较剧烈,从 2000 年的 51.51%增加到 2020 年的 87.38%,下垫面条件得到显著改善。径流对应降雨、潜在蒸散发量和下垫面参数的弹性系数范围分别

结果表明(表 1),径流和泥沙的突变点分别在 2006 年、2005 年,泥沙在 2005 年的突变呈现出极显著,因此本研究以 2005 年作为突变点,将 2005 年以前作为基准期、2005 年之后作为措施期进行分析研究。

表 1 M-K 和 Pettitt 检验

Table 1 M-K and Pettitt test

气候要素	Mann-Kendall 检验		Pettitt 检验		突变年份
	z 值	显著性水平	U 值	显著性水平	
径流	-1.33	0.18	62	0.31	2006
泥沙	-3.39	0.0068 **	135	0.0008	2005 **
潜在蒸散发	-0.14	0.89	73	0.46	1996
降雨	1.94	0.05 *	122	0.02	2011

注: * 代表显著, ** 代表极显著。

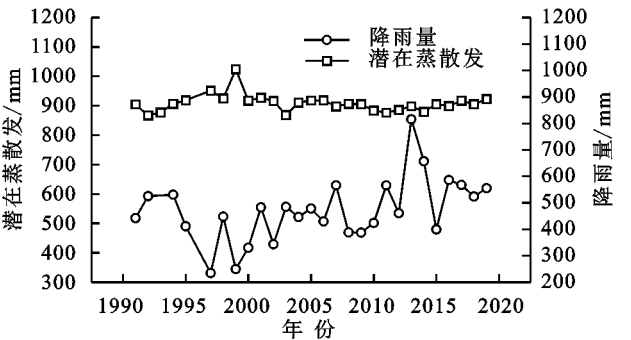


表 2 基于 Budyko 假设的纸坊沟流域径流量弹性系数

Table 2 Elastic coefficient of runoff in Zhifanggou watershed based on Budyko hypothesis

时间段	R	P	E ₀	τ _w	ε _p	ε _{E0}	ε _w
1990—1994	25.82	499.32	888.88	5.23	2.80	-1.80	-0.86
1995—1999	13.28	335.86	954.86	2.65	2.81	-1.81	-0.85
2000—2004	41.40	417.52	908.14	3.37	2.78	-1.78	-0.83
2005—2009	14.99	449.82	909.30	6.60	2.87	-1.87	-0.90
2010—2014	83.95	526.83	884.91	14.02	2.91	-1.91	-0.94
2015—2019	8.83	526.36	909.97	19.02	2.94	-1.94	-0.95

注: P 为实测降雨量,ET 为实际潜在蒸散发量;E₀为潜在蒸散发量;τ_w为下垫面参数,降雨,潜在蒸散发量和下垫面参数的弹性系数,分别是 ε_p,ε_{E0},ε_w。

基于每 5 a 为一个年代的划分,得到不同年代纸坊沟流域各因素对径流变化的贡献率,如图 2 所示,贡献率为正值时表示因素对径流影响的趋势与径流变化方向一致,负值则相反。结果表明在突变年 2005 年之前,

是 2.78~2.94,-1.78~-1.93 和 -0.83~-0.95,降雨每增加 1%,径流深度增加 2.78%~2.94%,而潜在蒸散发和下垫面参数每增加 1%,径流分别减少 -1.78%~-1.93%和 -0.83%~-0.95%,从绝对值上来看,降雨的弹性系数最大,下垫面最小,表明降雨的变化对径流的影响程度最大,而下垫面最小。综上分析表明,径流变化的与降雨呈现出正相关,与潜在蒸散发和下垫面呈负相关,此外径流变化对于降雨最为敏感,其次为潜在蒸散发和下垫面。

降雨对径流变化的影响程度占主要地位,最大贡献率为 144%,且变化趋势相同,其次是下垫面和潜在蒸散发,从 2005 年之后,下垫面对径流变化的影响起到了主要作用,2010—2019 年,降雨量变化不显著,因此降雨对于径

流变化的贡献率仅为 0.65%，该时期植被覆盖度增加，下垫面条件改变，因此下垫面在径流变化中起到主导作用，最贡献率达到 210%。从贡献率的绝对值来看，退耕还林之后，下垫面对于径流变化的贡献率最大。综上分析，径流变化受到下垫面变化影响程度随年份增加逐渐增强，其主要原因是人类活动引起下垫面条件的发生了剧烈的变化。

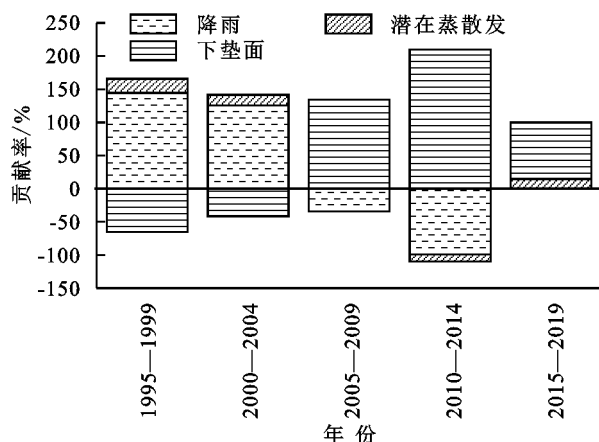


图 2 1990—2020 年纸坊沟流域各时期径流变化归因分析

Fig. 2 Attribution analysis of runoff changes in Zhifanggou watershed in different periods from 1990 to 2020

3.3 泥沙的变化归因分析

通过多年的径流泥沙数据拟合出径流泥沙的关系式，于 Budyko 假设求出纸坊沟流域泥沙变化对应不同因素的弹性系数。由表 3 可知，2000 年之前降雨的弹性系数范围为 0.000 11~0.000 17，潜在蒸散发的弹性系数范围为 -0.000 055~-0.000 067，下垫面的弹性系数范围为 -0.000 083~-0.000 16，与薛帆等^[10]在北洛河流域研究结果近似，可见在 2000 年以前降雨对泥沙的影响程度最大，下垫面参数次之，从 2000 年实行退耕还林工程之后，降雨的弹性系数范围变为 0.000 68~0.007 7，而下垫面增加到 -0.000 93~-0.026，下垫面成为对输沙量变化影响程度最大的因素。综上分析表明，下垫面变化对输沙量的影响程度随着时间逐渐增大，由此说明人类活动成为泥沙变化的主要影响因素。

在 1990s—2000s 期间(图 3)，由于年降雨量减小幅度较大，下垫面参数减小，下垫面条件变差，导致泥沙的减小幅度不明显，因此降雨和下垫面的贡献率远超正常值。在突变年 2000 年之后，在降雨趋于稳定的情况下，降雨对于输沙量的变化的贡献率越来越低，下垫面对输沙量变化贡献率占主要部分，平均高达 96%，可见人类活动对输沙量变化的影响越来越大，因此流域展开的退耕还林还草等水保措施对减少流域输沙量发挥着长远关键的作用。综上所述，随着

退耕还林工程的实施，对于输沙量减小的贡献率成为主要因素。

表 3 纸坊沟流域输沙量的弹性系数

Table 3 Elastic coefficient of sediment transport in Zhifanggou watershed

年份	$S(t)$	ϵ_p	ϵ_{E0}	ϵ_w
1990—1994	49026.50	0.000537	-0.000346	-0.000164
1995—1999	44774.95	0.000123	-0.000079	-0.000091
2000—2004	61661.43	0.000111	-0.000055	-0.000084
2005—2009	10835.25	0.000682	-0.000312	-0.000937
2010—2014	2524.99	0.003428	-0.001304	-0.008538
2015—2019	1123.40	0.007699	-0.003015	-0.026041

注： S 为输沙量、降雨、潜在蒸散发量和下垫面参数的弹性系数，分别是 ϵ_p 、 ϵ_{E0} 、 ϵ_w 。

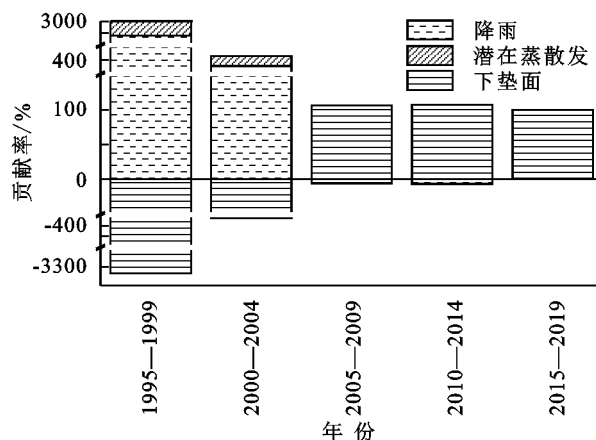


图 3 1990—2020 年纸坊沟流域各时期泥沙变化归因分析

Fig. 3 Attribution analysis of sediment changes in Zhifanggou watershed in various periods from 1990 to 2020

4 讨论

近年来人类活动和气候变化使黄河流域的生态发生了显著的变化，流域内径流量和泥沙量出现不同程度的减少趋势^[29]。本文使用 M-K 趋势检验对纸坊沟流域径流和泥沙的趋势进行分析，结果表明径流呈现出显著的减少趋势，而泥沙呈现出极显著的下降趋势。王陇等^[9]在分析南小河沟流域径流变化趋势时使用 M-K 趋势检验发现，径流呈现出显著的减小趋势；Wu 等^[7]在分析延河流域内气候和人类活动变化对水文变化的响应时使用 Pettitt 检验表明，径流深度显著低于基期；蒋凯鑫等^[8]在对黄土高原典型流域水沙变化归因对比中使用 M-K 趋势检验和 Pettitt 检验发现无定河径流量和输沙量都呈现出显著下降。由于纸坊沟流域缺少相关分析，结合相关研究，本文使用的 M-K 趋势检验对纸坊沟流域的径流和泥沙趋势分析的结果与其他研究人员的研究结果相似。措施期植被覆盖与基期相比，植被覆盖度由 1990 年的 51.51% 增长到 2020 年的 81.38%，流域的

输沙量显著下降,水土流失得到有效治理;另外随着退耕还林工程中人工林林龄的增长,植物生长发育的发耗水量和蒸腾量增加^[30],以及农业生产生活用水需求都会造成流域的径流量减小。

本文对纸坊沟流域的径流和输沙量变化原因进行分析时发现;与基准期相比,当降雨量趋于稳定后,人类活动对于径流和输沙量变化的影响占主要部分。Liang 等^[31]采用了基于 Budyko 假设的弹性系数对黄土高原 14 个主要流域的径流变化贡献率进行分析,结果表明人类活动是径流减少的主要原因,气候变化影响较小,贡献率分别为 68%,32%;Zhang 等^[25]使用弹性系数法分割了人类活动和气候变化对径流和输沙量减少贡献率,结果表明在 2000 年实施退耕还林后,人类对径流减少的贡献率从 55%增加至 75%,对泥沙减少的贡献率从 63%增加到 81%。本文研究与以往研究相一致,在降雨和潜在蒸散发变化不显著的纸坊沟流域,人类活动是径流和输沙量减少的主要原因。

人类活动是指城镇建设、水土保持工程、生产生活用水以及水利工程等,它们直接或间接通过改变下垫面条件^[31]影响流域内径流和输沙量的变化。表 4 是本文获取纸坊沟流域 1990—2020 年土地利用类型,在 2000 年以前,耕地的总数呈现出上升趋势,从原来 2.541 6 km²增加的 2.734 2 km²,林地仅有 0.297 0~0.328 5 km²,从 2000 年实施退耕还林工程之后,该区林地从最低的 0.297 0 km²增加到 1.986 3 km²,扩大了 6.7 倍,耕地则减少至 1.136 7 km²,而草地、灌木、建设用地等土地利用类型变化不显著,因此在人类活动中,植被恢复对于流域径流量和输沙量减少起到了关键的作用。

表 4 纸坊沟流域土地利用面积

Table 4 Land use area of Zhifanggou watershed

	km ²				
年份	耕地	林地	灌木	草地	建设用地
1990	2.5416	0.2970	0.0018	7.4088	0.0045
1995	2.7342	0.3222	0.0045	7.1883	0.0045
2000	1.8603	0.3285	0.0018	8.0541	0.0090
2005	1.4310	0.5049	0.0036	8.3052	0.0090
2010	1.2357	0.7227	0.0018	8.2845	0.0090
2015	1.3392	1.3257	0.0090	7.5708	0.0090
2020	1.1367	1.9863	0.0090	7.0974	0.0243

5 结 论

(1) 通过 M-K 趋势检验和 Pettitt 突变检验可知,纸坊沟流域的径流和输沙量均呈现出减少趋势,其中泥沙减少趋势极显著,径流趋势不显著,径流突变年份为 2006 年,泥沙的突变年份为 2005 年。

(2) 纸坊沟流域径流变化对于降雨变化最敏感,其次是人类活动的影响;人类活动对于径流变化的贡献率在 2000s 之后呈增加趋势。

(3) 人类活动对该流域泥沙变化的影响程度随时间的增加逐渐加深,在 2000s 之后其贡献率趋近于 96%,因此人类活动是输沙量减少的主要因素。

参考文献:

[1] Wang F, Mu X, Li R, et al. Co-evolution of soil and water conservation policy and human-environment linkages in the Yellow River Basin since 1949[J]. Science of the Total Environment, 2015,508:166-177.

[2] 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.

Liu G B, Shangguan Z P, Yao W Y, et al. The ecological effectiveness of ecological engineering in the Loess Plateau[J]. Journal of the Chinese Academy of Sciences, 2017,32(1):11-19.

[3] Wang S, Fu B, Piao S, et al. Reduced sediment transport in the Yellow River due to anthropogenic changes[J]. Nature Geoscience, 2016,9(1):38-41.

[4] 胡春宏,张晓明,赵阳.黄河泥沙百年演变特征与近期波动变化成因解析[J].水科学进展,2020,31(5):725-733.

Hu C H, Zhang X M, Zhao Y. Analysis of the characteristics of the century-long evolution and recent fluctuation causes of sediment in the Yellow River[J]. Advances in Water Science, 2020,31(5):725-733.

[5] 杨启红.黄土高原典型流域土地利用与沟道工程的径流泥沙调控作用研究[D].北京:北京林业大学,2009.

Yang Q H. Study on the Regulation of Runoff and Sediment by Land Use and Channel Engineering in Typical Watersheds of the Loess Plateau[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2009.

[6] 程思,于兴修,李振炜,等.流域输沙量变化归因分析方法综述[J].地理科学进展,2021,40(12):2140-2152.

Cheng S, Yu X X, Li Z W, et al. A review of attribution analysis methods for sediment transport changes in watersheds[J]. Advances in Geographic Sciences,2021, 40(12):2140-2152.

[7] Wu J, Miao C, Zhang X, et al. Detecting the quantitative hydrological response to changes in climate and human activities[J]. Science of the Total Environment, 2017,586:328-337.

[8] 蒋凯鑫,于坤霞,曹文洪,等.黄土高原典型流域水沙变化归因对比分析[J].农业工程学报,2020,36(4):143-149.

Jiang K X, Yu K X, Cao W H, et al. Comparative analysis of water and sediment changes and their attributions in typical watersheds of the Loess Plateau[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020,36(4):143-149.

- [9] 王陇,宋孝玉,李蓝君,等.黄土高原沟壑区典型小流域径流变化趋势及归因分析[J].水土保持研究,2021,28(4):48-53,69.
Wang L, Song X Y, Li L J, et al. Trend and attribution analysis of runoff changes in typical small watersheds in the gully region of the Loess Plateau [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2021,28(4):48-53,69.
- [10] 薛帆,张晓萍,张楷,等.基于Budyko假设和分形理论的水沙变化归因识别:以北洛河流域为例[J].地理学报,2022,77(1):79-92.
Xue F, Zhang X P, Zhang L, et al. Attribution identification of water and sediment changes based on the Budyko hypothesis and fractal theory: A case study of the Beiluo River Basin [J]. Acta Geographica Sinica, 2022,77(1):79-92.
- [11] Devia G K, Ganasri B P, Dwarakish G S. A review on hydrological models [J]. Aquatic Procedia, 2015, 4: 1001-1007.
- [12] 刘国彬,许明祥,王国良,等.黄土高原小流域综合治理及生态恢复过程:以安塞纸坊沟小流域为例[C]//水利部,中国科学院,世界银行.中国水土保持探索与实践:小流域可持续发展研讨会论文集.中国水利水电出版社,2005.
Liu G B, Xu M X, Wang G L, et al. The process of comprehensive management and ecological restoration of small watersheds on the Loess Plateau: Taking Ansai Zhifanggou small watershed as an example[C]//Ministry of Water Resources, Chinese Academy of Sciences, World Bank. China Soil and Water Conservation Exploration and Practice: Proceedings of the Symposium on Sustainable Development of Small Watersheds. China Water Conservancy and Hydropower Press, 2005.
- [13] 张明媛,李星耀,童伟,等.小流域综合治理是抵御水旱灾害的有效措施[J].北方环境,2013,25(10):156-158.
Zhang M Y, Li X Y, Tong W, et al. Comprehensive management of small watersheds as an effective measure against water and drought disasters[J]. Northern Environment, 2013,25(10):156-158.
- [14] 张新玉,杨元辉.我国水土保持小流域综合治理模式研究[J].中国水利,2011(12):58-61.
Zhang X Y, Yang Y H. Research on the comprehensive management model of soil and water conservation small watersheds in China[J]. China Water Resources, 2011(12):58-61.
- [15] 张萍.安塞纸坊沟流域刺槐人工林生物量及N,P年际变化[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2019.
Zhang P. Interannual Variations of Biomass and N, P in the *Robinia pseudoacacia* Plantation in Ansai Zhifanggou Watershed[D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2019.
- [16] 孔正红,张新时.安塞纸坊沟流域草地资源利用空间结构及其畜牧业发展潜力[J].草地学报,2004,12(3):246.
Kong Z H, Zhang X S. Spatial structure of grassland resource utilization and its potential for livestock development in the Zhifanggou Watershed, Ansai[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2004,12(3):246.
- [17] 刘庆新,吴发启,刘海斌,等.纸坊沟流域土壤酶活性与土壤肥力关系研究[J].植物营养与肥料学报,2009,15(5):1100-1106.
Liu Q X, Wu F Q, Liu H B, et al. Study on the relationship between soil enzyme activity and soil fertility in the Zhifanggou Watershed [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2009,15(5):1100-1106.
- [18] Null N. Hydrology Handbook[M]. Virginia, USA: American Society of Civil Engineers, 1996.
- [19] 曹洁萍,迟道才,武立强,等.Mann-Kendall检验方法在降水趋势分析中的应用研究[J].农业科技与装备,2008(5):35-37.
Cao J P, Chi D C, Wu L Q, et al. Application research of Mann-Kendall test method in precipitation trend analysis [J]. Agricultural Science and Technology & Equipment, 2008(5):35-37.
- [20] 刘茂峰,高彦春,甘国靖.白洋淀流域年径流变化趋势及气象影响因子分析[J].资源科学,2011,33(8):1438-1445.
Liu M F, Gao Y C, Gan G J. Analysis of annual runoff trends and meteorological influencing factors in the Baiyangdian Watershed[J]. Resources Science, 2011, 33(8):1438-1445.
- [21] Budyko M I. Climate and Life[R]. New York and London: Academic Press, 1974.
- [22] Zhang L, Dawes W R, Walker G R. Response of mean annual evapotranspiration to vegetation changes at catchment scale[J]. Water Resources Research, 2001, 37(3):701-708.
- [23] Zhang J, Zhang X, Li R, et al. Did streamflow or suspended sediment concentration changes reduce sediment load in the middle reaches of the Yellow River [J]. Journal of Hydrology, 2017,546:357-369.
- [24] Zhang J, Gao G, Fu B, et al. Explanation of climate and human impacts on sediment discharge change in Darwinian hydrology: Derivation of a differential equation[J]. Journal of Hydrology, 2018,559:827-834.
- [25] Zhang J, Gao G, Fu B, et al. Formulating an elasticity approach to quantify the effects of climate variability and ecological restoration on sediment discharge change in the Loess Plateau, China [J]. Water Resources Research, 2019,55(11):9604-9622.

- 和养分的分布特征及其关系研究[J].西北植物学报, 2017, 37(8):1635-1644.
- Li X B, Zhang Y F, Chen L, et al. Relationship between soil particle size distribution and soil nutrient distribution characteristics in typical communities of desert grassland[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2017, 37(8):1635-1644.
- [27] 吕圣桥.黄河三角洲滩地土壤颗粒分形特征及其与土壤性质的相关性研究[D].山东农业大学, 2012.
- Lv S Q. Study on Fractal Characteristics of Soil Particles and Their Correlation with Soil Properties In Lowlands of The Yellow River Delta[D]. Shandong Agricultural University, 2012.
- [28] 韩旭娇, 张国明, 刘连友, 等.呼伦湖西南部咸水湖干涸湖滨带沉积物粒度特征[J].中国沙漠, 2019, 39(2):158-165.
- Han X J, Zhang G M, Liu L Y, et al. Grain size characteristics of sediments in the dry lakeside of salt lake in the southwest of Hulun Lake[J]. Journal of Desert Research, 2019, 39(2):158-165.
- [29] 杨文斌, 李卫, 党宏忠, 等.低覆盖度治沙原理、模式与效果[M].北京:科学出版社, 2016.
- Yang W B, Li W, Dang H Z, et al. Desertification Control with Low Coverage Vegetation[M]. Beijing: Science Press, 2016.
- [30] 孙传龙, 张卓栋, 邱倩倩, 等.锡林郭勒草地表层土壤粒度分形特征及其与风蚀的关系[J].中国沙漠, 2017, 37(5):978-985.
- Sun C L, Zhang Z D, Qiu Q Q, et al. Fractal characteristics of surface soils in the Xilinguole grassland landscape system and its relationship to wind erosion [J]. Journal of Desert Research, 2017, 37(5):978-985.
- [31] 高瑞忠, 张阿龙, 张生, 等.西北内陆盐湖盆地土壤重金属 Cr, Hg, As 空间分布特征及潜在生态风险评价[J].生态学报, 2019, 39(7):2532-2544.
- Gao R Z, Zhang A L, Zhang S, et al. Spatial distribution characteristics and potential ecological risk assessment of Cr, Hg, and As in soils of the salt lake basin in Northwest China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(7):2532-2544.
- ~~~~~
- (上接第92页)
- [26] 季芳, 范林峰, 匡星星, 等.青藏高原多年冻土退化对蒸散发的影响[J].水科学进展, 2022, 33(3):390-400.
- Ji F, Fan L F, Kuang X X, et al. Impact of permafrost degradation on evapotranspiration in the Qinghai-Tibet Plateau[J]. Advances in Water Science, 2022, 33(3):390-400.
- [27] 孙倩.无定河流域水沙变化归因分析[D].西安:西安理工大学, 2018.
- Sun Q. Attribution Analysis of Water and Sediment Changes in the Wuding River Basin[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2018.
- [28] 孙龙, 张光辉, 王兵, 等.黄土高原不同退耕年限刺槐林地土壤侵蚀阻力[J].农业工程学报, 2017, 33(10):191-197.
- Sun L, Zhang G H, Wang B, et al. Soil erosion resistance of *Robinia pseudoacacia* plantations with different years of cropland abandonment in the Loess Plateau [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(10):191-197.
- [29] 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.
- Zhao Y, Hu C H, Zhang X M, et al. Water-sediment situation and its causative analysis in the Yellow River Basin over the past 70 years[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(21):112-119.
- [30] 邵全忠, 杨丹, 刘华, 等.秦岭华北落叶松人工林耗水规律与环境因子关系研究[J].中国农村水利水电, 2019(3):66-72.
- Shao Q Z, Yang D, Liu H, et al. Study on the water consumption characteristics of *Larix principis-rupprechtii* plantations in the Qinling Mountains and their relationship with environmental factors [J]. China Rural Water and Hydropower, 2019(3):66-72.
- [31] Liang W, Bai D, Wang F, et al. Quantifying the impacts of climate change and ecological restoration on streamflow changes based on a Budyko hydrological model in China's Loess Plateau[J]. Water Resources Research, 2015, 51(8):6500-6519.