

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2023.06.027.

叶子萱, 赵广举, 穆兴民, 等. 黄土高原典型流域次洪事件水沙关系变化及其驱动因素[J]. 水土保持研究, 2023, 30(6): 40-48.

Ye Zixuan, Zhao Guangju, Mu Xingmin, et al. Variation of Runoff-Sediment Relationship at Flood Event Scale in Typical Watersheds of the Loess Plateau[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(6): 40-48.

黄土高原典型流域次洪事件水沙关系 变化及其驱动因素

叶子萱¹, 赵广举^{1,2}, 穆兴民^{1,2}, 高鹏^{1,2}, 孙文义^{1,2}

(1.西北农林科技大学 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 2.中国科学院 水利部

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)

摘要: [目的]探究黄土高原典型流域次洪事件水沙关系变化,探讨水土保持综合治理对流域水沙关系的调控,以期黄土高原地区未来的生态恢复与水土保持综合治理提供参考。[方法]基于孤山川、佳芦河和西川河流域1974—1989年和2007—2019年的洪水水文要素资料,采用线性函数分析了流域不同时期水沙关系变化特征,采用皮尔逊相关系数法探讨了径流指标(年径流深、平均洪峰流量和平均流量)和输沙指标(年输沙量、平均最大含沙量和平均含沙量)间的相关性,辨析了不同流域水沙变化的驱动因素。[结果]2007—2019年各流域次洪事件的年均径流深和年均输沙量较1974—1989年均显著减少($p < 0.05$),孤山川流域变化最大,分别减少56.48%, 95.03%;佳芦河流域的年均输沙量变化不明显且年均径流深有所增加,主要由于该流域植被覆盖较差、水土保持措施治理占流域比例小,加之近年来极端降雨量增加。[结论]各流域的水沙关系在经过水土保持综合治理后发生显著变化,径流深-输沙模数线性关系减弱,黄土高原水土保持措施的实施尤其是大规模植被恢复使流域产输沙能力下降,从而导致径流和输沙变化的不同步。

关键词: 次洪事件; 水沙关系; 水土保持措施; 归因分析; 黄土高原

中图分类号: P333; S157

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2023)06-0040-09

Variation of Runoff-Sediment Relationship at Flood Event Scale in Typical Watersheds of the Loess Plateau

Ye Zixuan¹, Zhao Guangju^{1,2}, Mu Xingmin^{1,2}, Gao Peng^{1,2}, Sun Wenyi^{1,2}

(1. Institute of Soil and Water Conservation, 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, CAS&MWR, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: [Objective] The aim of this study is to explore the changes of runoff-sediment relationship at flood event scale in typical watersheds of the Loess Plateau, to discuss the regulation of runoff-sediment relationship by comprehensive management of soil and water conservation, and to provide reference for future ecological restoration and comprehensive management of soil and water conservation in the Loess Plateau. [Methods] We selected the Gushanchuan, Jialuhe and Xichuanhe watershed to explore the changes of runoff-sediment relationship at flood event scale in three watersheds. Based on their flood event data of 1974—1989 and 2007—2019, a linear model was used to analyze the changes of runoff-sediment relationship in different periods of three watersheds, the Pearson correlation coefficient method was used to investigate the correlation of runoff and sediment-related variables, and the driving factors of runoff-sediment relationship change in each watershed were identified. [Results] The runoff depths and sediment yields of flood events in 2007—

收稿日期: 2022-08-26

修回日期: 2022-11-02

资助项目: 国家自然科学基金(U2243211; 42077076; 42077075)

第一作者: 叶子萱(1999—), 女, 江西上饶人, 硕士研究生, 研究方向为土壤侵蚀与水土保持。E-mail: 1776314801@qq.com

通信作者: 赵广举(1980—), 男, 河南驻马店人, 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

<http://stbcj.paperonce.org>

2019 of each watershed significantly reduced ($p < 0.05$) compared with 1974—1989, and the greatest changes were observed in the Gushanchuan watershed, with a decrease of 56.48% and 95.03%, respectively. The change in the amount of sediment yield in the Jialuhe watershed was not obvious and the increase in runoff depth was mainly due to the low degree of vegetation restoration in the watershed, the relatively low impact of soil and water conservation measures, and the increase of rainfall in recent years. [Conclusion] After the implementation of soil and water conservation measures, the runoff-sediment relationship of each watershed had changed significantly, and the linear relationship between runoff depth and sediment yield had weakened, which was due to the implementation of soil and water conservation measures on the Loess Plateau, especially the large-scale vegetation restoration, which had reduced the sediment production and transportation capacity of the unit runoff depth in the watersheds, and resulting in the reduction of sediment into the Yellow River.

Keywords: flood event; runoff-sediment relationship; soil and water conservation measures; attribution analysis; Loess Plateau

黄河是我国第二大河流,也是世界上著名的高含沙河流。黄河水沙变化与下游洪涝灾害防治、水资源合理配置以及生态环境保护等问题息息相关。因此,开展黄河水沙变化研究是我国水科学领域的重大科学问题之一^[1],对于进一步完善治黄方略以及合理布局重大水利工程具有重要的现实意义,也是黄河流域高质量发展的基础^[2]。

河流水沙关系受流域土壤、植被、降雨、土地利用以及水土保持综合治理措施等自然和人为因素的共同影响^[3-4]。近年来有关黄土高原河川径流、输沙关系变化的研究成果众多。刘淑燕等^[5]发现流域水沙关系会随着降雨条件和土地利用类型的改变而发生变化。夏露等^[6]发现听水河 1958—2002 年径流输沙表现出明显的线性关系,2003—2015 年二者的相关性显著减弱,水土保持工程措施的实施是该流域水沙关系变化的主要原因。胡晋飞^[7]研究发现水土保持措施综合治理后,西川河流域 1996—2012 年的日水沙关系较 1974—1989 年发生变化,日流量-输沙率比例模型斜率在后一时段内显著下降。金双彦等^[8]利用降雨-径流-输沙关系模型分析降雨变化和人类活动对孤山川流域 1979 年之后次洪水量和沙量的影响,结果表明降雨变化对次洪水沙的影响呈逐年代递减趋势,2000—2010 年人类活动对次洪水量和沙量的影响均占主导地位。大量研究表明,人类活动尤其是水土保持措施实施是黄河流域水沙变化的主要原因^[9-12],而多数研究集中于年际尺度水沙变化,事件尺度的研究相对较少。由于黄土高原侵蚀产沙多来源于几场较强的极端降雨事件,基于场次降雨事件水沙变化的研究有助于更好地理解径流、输沙变化的动态过程及其对下垫面环境变化的响应。

本文以孤山川、佳芦河、西川河为研究对象,系统搜集整理 3 个流域 1974—1989 年和 2007—2019 年

的洪水水文要素摘录数据,对比研究各流域在不同时段内的水沙关系特征,探讨水土保持综合治理对流域水沙关系的调控,以期为黄土高原地区未来的生态恢复与水土保持综合治理提供参考。

1 研究区概况

本文选取位于黄河中游河龙区间(河口镇至龙门)的孤山川、佳芦河和西川河流域作为研究区(图 1)。孤山川、佳芦河和西川河流域分别位于河龙区间右岸的上、中、下段,流域面积分别为 1 273, 1 134, 801 km²,河长分别为 79.4, 93, 65.3 km,年均降雨量分别为 493, 402, 520 mm。3 个流域均属温带大陆性季风气候,降雨年内分布不均,集中在汛期 6—9 月,多为短历时高强度暴雨。各流域在不同时段内的年均径流深和年均输沙量见表 1。

孤山川流域主要地貌类型为黄土高原丘陵沟壑区第一副区,境内梁峁起伏,沟系发育较好,沟壑密度 2.9 km/km²^[12],主要土壤类型为栗钙土和黄绵土。佳芦河流域主要地貌类型为黄土梁峁丘陵沟壑区,梁峁顶平缓,沟谷较宽阔,土壤类型主要为淡栗钙土和栗钙土。西川河流域主要地貌类型为黄土高原丘陵沟壑区,流域内地形破碎、多为黄土梁峁状丘陵沟谷地貌,黄绵土是该流域主要的土壤类型。研究区内土质较为疏松,透水性良好,再加上植被稀疏,极易形成地表径流,水土流失十分严重。近 70 a 来,黄土高原实施了大规模的水土流失治理,尤其是 1999 年退耕还林还草以来,流域植被状况不断向好,梯田和淤地坝控制面积逐渐增加,有效降低坡面土壤侵蚀和河流输沙量。

2 数据与方法

2.1 数据来源与处理

2.1.1 数据来源 本文采用的基础资料为 3 个水文

站(孤山川流域高石崖站、佳芦河流域申家湾站、西川河流域枣园站)1974—1989 年及 2007—2019 年(其中佳芦河流域 2010 年数据未公开)的实测流量和含

沙量数据。各站点水文数据来源于黄河水利委员会发布的《黄河流域水文年鉴》。数据在发布前经过检验核对,具有可靠性、一致性和代表性。

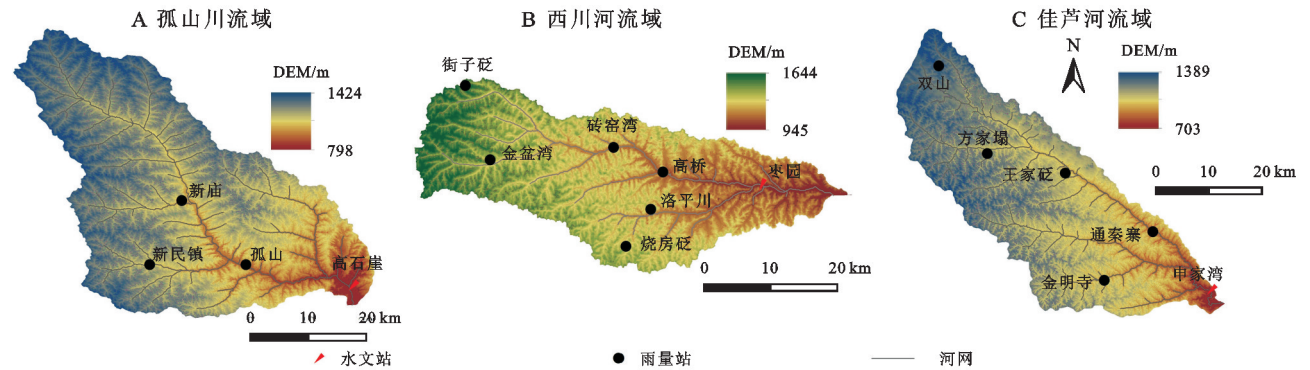


图 1 研究区位置

Fig. 1 The location of study area

表 1 流域概况

Table 1 Information of three watersheds

流域	面积/km ²	河长/km	年均径流深/(mm·a ⁻¹)		年均输沙量/(10 ⁴ t·a ⁻¹)	
			1974—1989 年	2007—2019 年	1974—1989 年	2007—2019 年
孤山川	1273	79.4	4.54	1.98	264.99	13.16
佳芦河	1134	93	1.73	3.39	81.08	65.42
西川河	801	65.3	2.71	1.48	81.35	18.14

2.1.2 数据处理 对于某一特定的洪水事件,洪水事件径流深 H (mm) 可通过以下公式计算:

$$H(t_1, t_2) = \frac{\int_{t_1}^{t_2} Q_t dt}{A} = \frac{\sum Q_t \Delta t}{A} \tag{1}$$

洪水事件输沙量 SY (kg) 计算公式如下:

$$SY(t_1, t_2) = \int_{t_1}^{t_2} Q_t \cdot SSC_t \cdot dt = \sum Q_t \cdot SSC_t \cdot \Delta t \tag{2}$$

式中: Δt 为时间间隔 (min); Q_t 为洪水事件瞬时流量 (m³/s); SSC_t 为洪水事件瞬时含沙量 (kg/m³); A 为水文站控制面积 (m²)。

2.2 研究方法

2.2.1 径流、输沙特征指标选取 根据《黄河流域水文年鉴》中洪水事件的流量和含沙量实测数据计算流域次洪事件年均径流深、年均输沙量、年均洪峰流量以及年均最大含沙量 4 个径流输沙特征指标,通过统计和对比分析各流域在不同时段内径流输沙特征指标的变化趋势及空间差异。选取径流深 (H , mm) 和输沙模数 (SSY , t/km²) 来探讨治理后各流域场次洪水事件的水沙关系变化。选取年内多场洪水的平均总历时 (T , h)、年径流深 (H , mm)、年内多场洪水的平均洪峰流量 (Q_{max} , m³/s)、年内多场洪水的平均流量均值 (Q_m , m³/s)、年输沙量 (SY , t)、年内多场洪水的平均最大含沙量 (S_{max} , kg/m³) 和年内多场洪水的平均含沙量均值 (SSC , kg/m³) 进行相关性分析,识别治理前后两个时段内各流域径流、输沙特征指标间

的相关性。

2.2.2 次洪事件水沙关系 用于表征河流洪水事件径流深和输沙模数间相关关系的水沙关系曲线主要包括幂函数和线性函数两种函数形式。前人研究发现黄土高原的水沙关系不适合用幂函数来拟合,且线性比例函数可以更加有效地表征流域水沙关系^[13]。因此,本文将线性函数与幂函数的拟合结果进行了对比分析,最终采用线性函数对各个流域次洪事件的径流深和输沙模数进行拟合,分析各流域次洪过程的水沙关系变化。

2.2.3 径流和输沙特征指标的相关性分析 采用皮尔逊相关系数法计算各流域不同时段内径流与输沙特征指标间的相关性。皮尔逊相关系数^[14]用于度量两个变量间的线性相关性,其取值范围为 $[-1, 1]$ 。计算公式如下:

$$r(X, Y) = \frac{\text{cov}(X, Y)}{\sqrt{\text{var}(X) \text{var}(Y)}} \tag{3}$$

式中: $\text{cov}(X, Y)$ 为 X 与 Y 的协方差; $\text{var}(X)$ 为 X 的方差; $\text{var}(Y)$ 为 Y 的方差。

输沙指标与径流指标的相关系数越大,则两者的相关性越好,说明输沙受径流的影响越大。

3 结果与分析

3.1 洪水事件水沙特征变化

表 2 为 3 个流域在研究时段内的洪水事件频次,

包括孤山川的 144 场、佳芦河的 143 场和西川河的 116 场洪水。由表可知,各流域在 2007—2019 年的洪水总场次以及年均场次较 1974—1989 年均显著减少。孤山川、佳芦河和西川河流域 2007—2019 年的洪水总场次较 1974—1989 年分别减少 72.57%,57.00%,73.91% 年均洪水场次分别减少 66.20%,42.86%,68.97%。

表 2 各流域研究时段内的洪水次数及年均场次

Table 2 Frequency of flood events during study periods in three watersheds			
流域	1974—1989 年	2007—2019 年	研究时段内 洪水总次数
	洪水次数 (年均场次)	洪水次数 (年均场次)	
孤山川	113(7.1)	31(2.4)	144
佳芦河	100(6.3)	43(3.6)	143
西川河	92(5.8)	24(1.8)	116

1974—1989 年和 2007—2019 年两个时段内各流域次洪事件的水沙变化如图 2 所示,年均径流深、年均输沙量、年均洪峰流量及年均最大含沙量均有不同程度的减少。2007—2019 年孤山川、佳芦河和西川河流域的年均输沙量和年均最大含沙量均低于 1974—1989 年,年均输沙量分别下降了 95.03%,32.93%,77.70%,其中减幅最大的是孤山川,由 1974—1989 年的 2.65×10^6 t 减少为 2007—2019 年的 1.32×10^5 t;年均最大含沙量分别下降 89.49%,

65.96%,43.10%。孤山川和西川河流域的年均径流深由 1974—1989 年的 4.55,2.71 mm 减少为 2007—2019 年的 1.98,1.48 mm,分别下降了 56.48%,45.39%;年均洪峰流量分别下降 79.05%,63.04%。而佳芦河流域在后一研究时段内的年均径流深以及年均洪峰流量呈上升趋势,其 2007—2019 年的年均径流深和年均洪峰流量较 1974—1989 年分别增加 94.83%,24.77%。各流域治理后(2007—2019 年)场次洪水事件对应的最大含沙量和洪峰流量较前一时段均显著降低,且洪峰流量的降幅低于最大含沙量,说明水土保持措施可以有效地减少高含沙水流。年均径流深和年均输沙量显著降低,且年均输沙量的减幅大于年均径流深,表明黄土高原大规模水土保持综合治理改变了流域次洪输沙能力。

孤山川流域较其他流域具有较大的变异系数,不同指标波动变化剧烈,其中孤山川流域 1974—1989 年的年均径流深范围为 0.58~9.62 mm,佳芦河和西川河流域 1974—1989 年的年均径流深分别介于 0.20~3.89 mm 和 0.46~5.20 mm。对比 3 个流域在不同时段的各个指标发现,孤山川流域的年均径流深、年均洪峰流量、年均输沙量以及年均最大含沙量在 1974—1989 年最大,在 2007—2019 年最小,由此可以推断出治理后孤山川流域年均径流深和年均输沙量降幅最大。

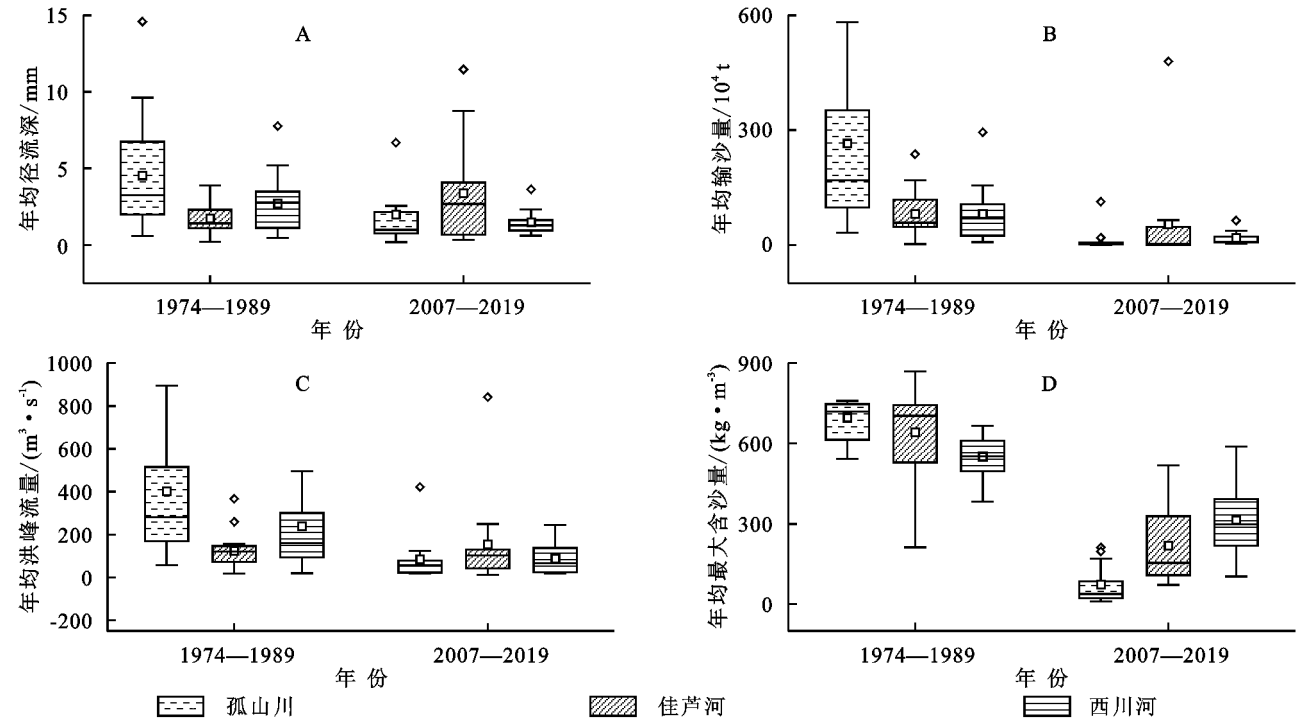


图 2 3 个流域不同时期洪水事件特征值

Fig. 2 Characteristics of flood events during different periods in three watersheds

3.2 洪水事件水沙关系变化

利用线性函数进一步探究 3 个流域次洪事件的

水沙关系变化。如图 3 所示,3 个流域的径流深-输沙模数(H -SSY)在 1974—1989 年均呈现出较好的

线性关系($R^2 > 0.9$),且西川河流域各时段内模型方程决定系数最高,线性模型拟合效果最好。对比而言,2007—2019年,3个流域的径流深-输沙模数的决定系数由1974—1989年的0.95,0.95,0.96分别下降为2007—2019年的0.39,0.60,0.69。

水沙线性关系模型中,可用回归方程的一次项系数来表征洪水事件单位径流深的产输沙能力即历次洪水事件的平均含沙量。由线性方程拟合结果可知,3个流域在2007—2019年的模型关系斜率较1974—1989年都发生了显著下降,分别下降了87.04%,55.48%,52.60%,降幅最大的是孤山川,由1974—1989年的530.67降为2007—2019年的68.78,降幅最小的是佳芦河,由1974—

1989年的510.50降为2007—2019年的241.96,表明流域次洪事件过程中的水沙关系发生了变化,径流输沙能力下降,水土保持措施对洪沙调控起到重要作用。孤山川和西川河关系模型常数项显著减少,佳芦河关系模型常数项呈增加的变化趋势。以上结果表明大规模水土保持及退耕还林还草工程对流域场次洪水事件水沙变化的综合影响,流域内水土保持防护体系逐步完善,林草植被覆盖率增加。3个流域中,佳芦河在两个时间段内的模型关系斜率最大(即平均含沙量最大),分别为602.98,268.47,表明该流域在两个时间段内的土壤侵蚀更为严重,单位径流深的输沙能力较强。

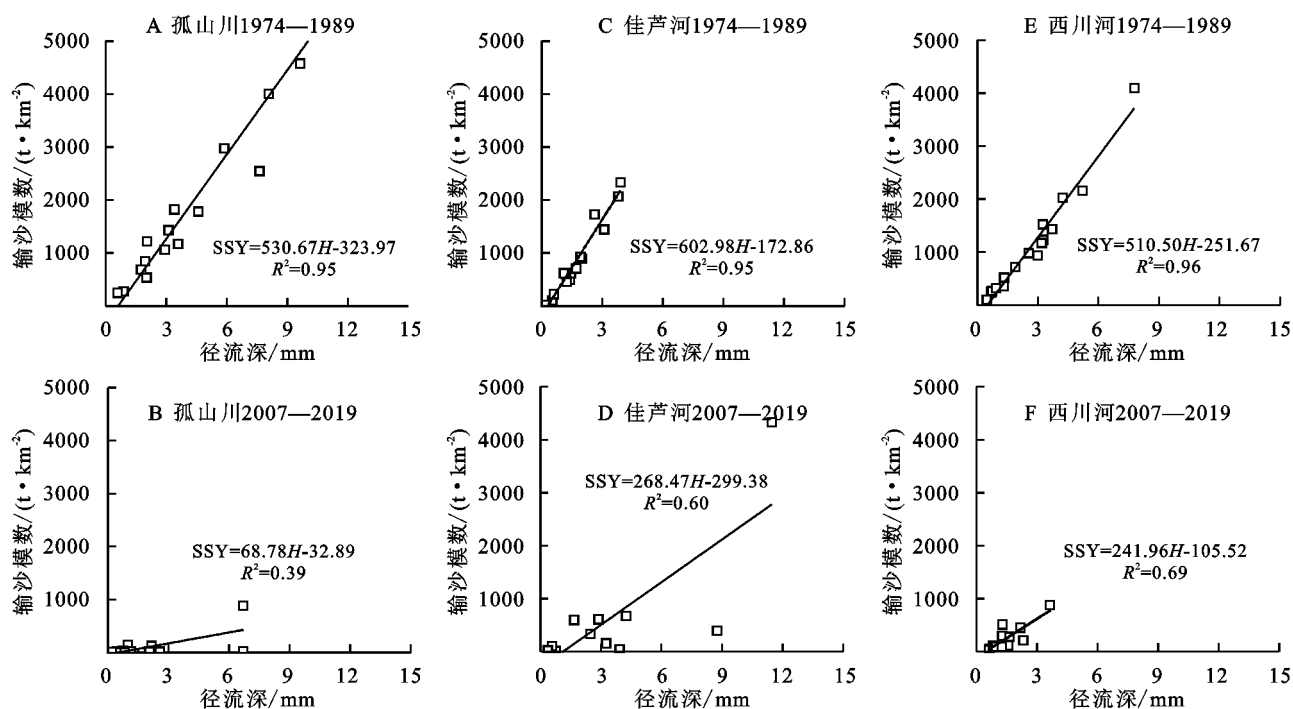


图3 3个流域不同时期次洪水水沙关系曲线

Fig. 3 The flow-sediment relationship curve of flood events during different periods in three watersheds

3.3 次洪水沙特征指标间的关系

基于皮尔逊相关系数法对1974—1989年以及2007—2019年两个时段内流域洪水事件不同径流输沙指标间的相关性进行分析。

由图4可知,孤山川流域1974—1989年的各项径流指标中,年径流深(H)、平均洪峰流量(Q_{\max})以及平均流量(Q_m)与年输沙量(SY)呈极显著正相关关系($p < 0.01$),其相关系数分别为0.98,0.95,0.91,其中年径流深与年输沙量的相关系数最高,表明次洪事件过程中的侵蚀产沙强度与年径流深关系最为紧密;2007—2019年,年输沙量与各径流指标的相关性降低,其中变化最大的是年输沙量与年径流深的相关性,其相关系数由1974—1989年的0.98下降为2007—2019年的0.63。

1974—1989年径流特征指标中的平均洪峰流量与平均流量、年径流深显著相关($p < 0.05$),其相关系数分别为0.95,0.94;2007—2019年反映径流特征指标间的相关性较1974—1989年无明显差异。

图5为佳芦河流域次洪事件径流与输沙特征指标的相关矩阵图。1974—1989年,年径流深(H)、平均洪峰流量(Q_{\max})以及平均流量(Q_m)与年输沙量(SY)呈极显著正相关关系($p < 0.01$),其相关系数分别为0.95,0.87,0.86,其中年径流深与年输沙量的相关系数最大,达0.9以上,由此可知佳芦河流域洪水事件过程中的侵蚀产沙强度也与年径流深的关系最为密切;2007—2019年,年输沙量与年径流深的相关性减弱,其相关系数由1974—1989年的0.95下降为

2007—2019 年的 0.78。1974—1989 年反映径流特征的 3 个指标间均呈显著正相关关系($p<0.01$),其相

关系数均在 0.85 以上;2007—2019 年反映径流特征指标间的相关性较 1974—1989 年无明显差异。

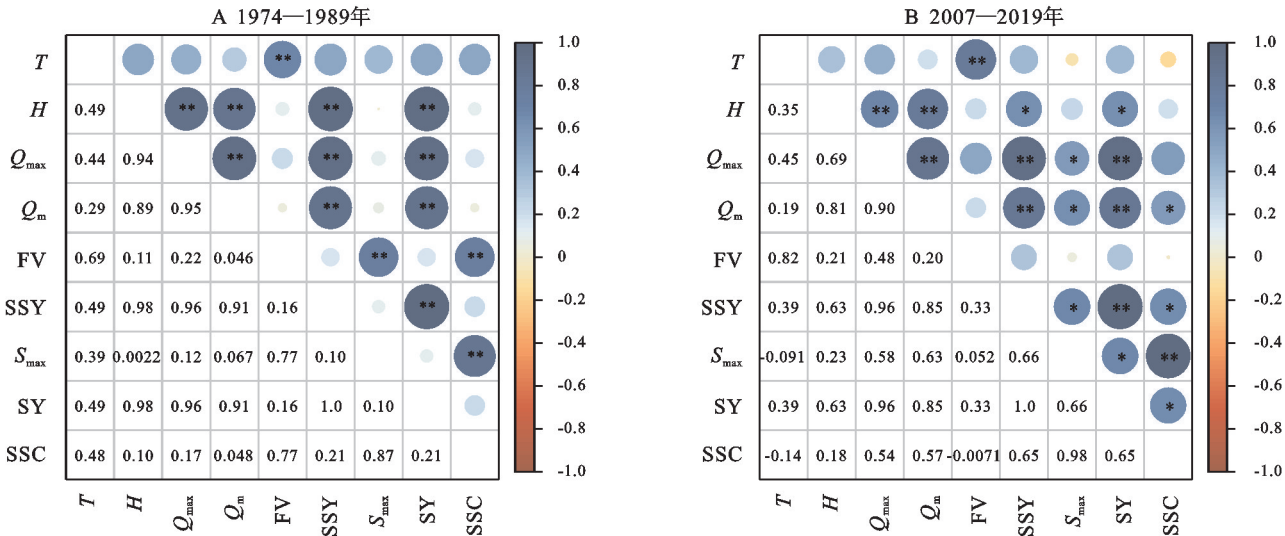


图 4 孤山川流域不同时段次洪径流输沙指标相关性分析

Fig. 4 Correlation analysis between runoff and sediment variables of flood events in the Gushanchuan watershed

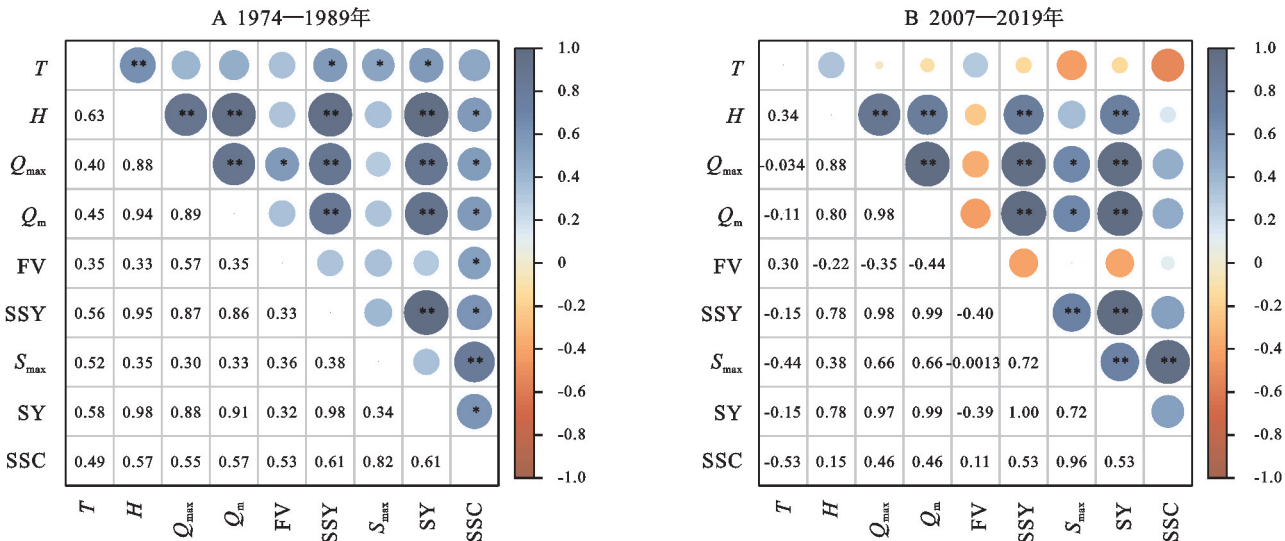


图 5 佳芦河流域不同时段次洪径流输沙指标相关性分析

Fig. 5 Correlation analysis between runoff and sediment variables of flood events in the Jialuhe watershed

由图 6 可知,1974—1989 年,在各项径流指标中,年径流深(H)、平均洪峰流量(Q_{\max})以及平均流量(Q_m)与年输沙量(SY)呈极显著正相关关系($p<0.01$),其相关系数分别为 0.98,0.97,0.86,其中年径流深、平均洪峰流量与年输沙量的相关系数均在 0.95 以上,表明西川河流域洪水事件过程中的侵蚀产沙强度与年径流深和平均洪峰流量的关系更为密切;2007—2019 年,年输沙量与各径流指标的相关性减弱,其年输沙量与年径流深、平均洪峰流量的相关系数由 1974—1989 年的 0.98,0.97 分别下降为 2007—2019 年的 0.83,0.77。1974—1989 年反映径流特征的指标中,年径流深与平均流量、平均洪峰流量显著

相关($p<0.01$),其相关系数分别为 0.90,0.94;2007—2019 年反映径流特征的指标中年径流深与平均流量以及平均洪峰流量的相关性减弱,其相关系数由 1974—1989 年的 0.90,0.94 分别下降为 2007—2019 年的 0.66,0.55。

孤山川、佳芦河和西川河流域场次洪水事件反映输沙特征的指标中,平均含沙量(SSC)与平均最大含沙量(S_{\max})显著相关($p<0.01$),且各流域 2007—2019 年反映输沙特征指标间的相关性较 1974—1989 年无明显差异。各流域两个时段的年内多场洪水平均总历时(T)与径流指标(年径流深、平均流量、平均洪峰流量)和输沙指标(年输沙量、平均含沙量、平均最大含沙量)的相关性不显著。

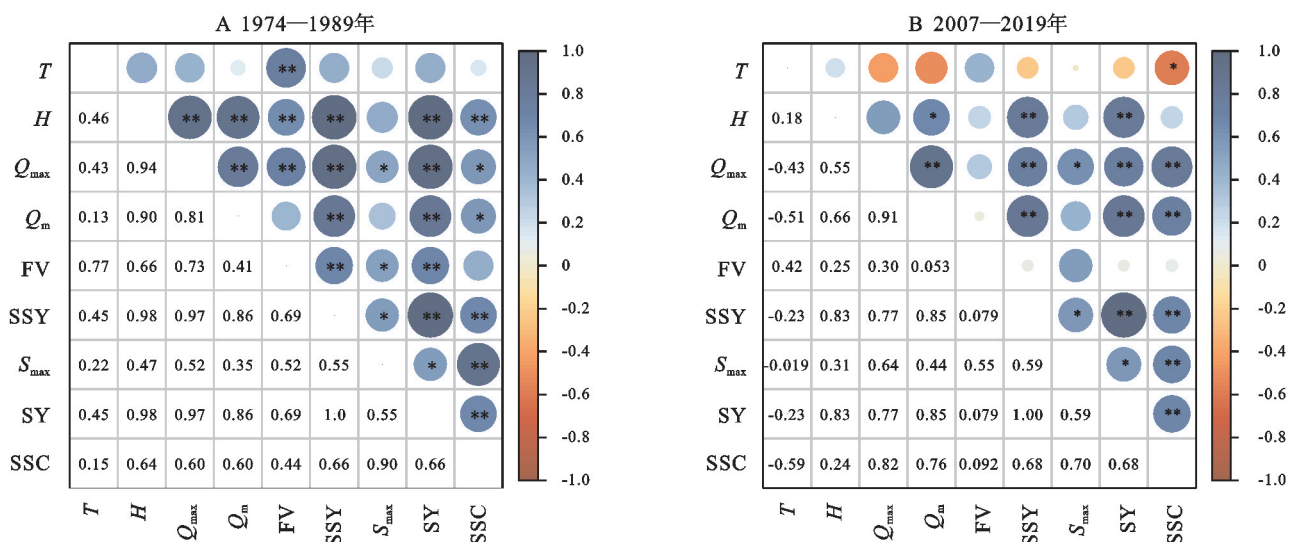


图 6 西川河流域不同时段次洪径流输沙指标相关性分析

Fig. 6 Correlation analysis between runoff and sediment variables of flood events in the Xichuanhe watershed

4 讨论

对比两个时段次洪水沙变化特征,孤山川和西川河流域治理后(2007—2019年)的年均径流深、年均洪峰流量、年均输沙量以及年均最大含沙量均远低于治理前(1974—1989年),这与 Tian 等^[15]的研究结果一致。佳芦河流域治理后的年均输沙量和年均最大含沙量显著减少,年均径流深和年均洪峰流量有所增加,这是由于 2007—2019 年流域次洪降雨量较前一时段有所增加^[10]。各流域治理后径流深-输沙模数线性比例模型斜率显著下降,单位径流深的产输沙能力下降,且治理后年输沙量与径流指标(年径流深、平均洪峰流量)的相关性也显著降低,表明 3 个流域的水沙关系在治理后均发生了显著变化。2000 年后黄河中游输沙量减少主要受人类活动的影响^[16],水土保持措施是黄土高原径流输沙减少的主要原因^[17-18]。流域不同水土保持措施改变了流域坡面侵蚀、河道泥沙输移过程,进而导致河流水沙发生显著变化。孤山川流域自 20 世纪 70—80 年代以来进行了大规模的水土保持综合治理,流域内林草覆盖面积由 1975 年的 806.71 km² 增加到 2012 年的 976.55 km²^[19];梯田与淤地坝控制面积达到 453.19 km²,占流域面积的 35.6%^[15],水土保持措施的实施改变了流域水沙关系,降低了流域次洪事件中单位径流深的输沙能力(图 3),加之该流域在 2007—2019 年的洪水总场次远低于前一时段(表 2),使得治理后孤山川流域的径流、输沙量大幅下降。1999 年以来,在黄土高原进行的大规模植被恢复显著改变了下垫面环境,从而增加了降雨截留、下渗,同时增加了地表粗糙度,降低水流动力,使流域输沙量大幅减少。高海东等^[17]发现植

被措施对黄河中游输沙量减少的贡献为 54%,远高于工程措施(34%)和水库(12%)的贡献率。冉大川等^[20]对佳芦河“2012-07-27”洪水的分析也验证了植被对洪水泥沙的削减作用高于工程措施。统计各流域 2007—2019 年归一化植被指数(NDVI)发现,佳芦河流域治理后(2007—2019 年)的植被覆盖率为 51.72%,远低于孤山川和西川河流域的 64.35%,67.99%,同时佳芦河流域场次极端暴雨量增加是该流域径流增加、而输沙量减少不明显的原因。

5 结论

(1) 孤山川和西川河流域 2007—2019 年场次洪水事件的年均径流深、年均洪峰流量、年均输沙量以及年均最大含沙量较 1974—1989 年均明显下降,其中年均径流深分别下降 56.48%,45.39%,年均输沙量分别下降 95.03%,77.70%;佳芦河治理后的年均输沙量下降了 32.93%,年均径流深升高了 94.83%。佳芦河流域变化最不显著可能是由于该流域 2007—2019 年的次洪降雨量较前一时段有所增加且流域内植被覆盖率较低。

(2) 治理后径流深-输沙模数线性函数斜率降低并且年输沙量与径流指标(年径流深、平均洪峰流量、平均流量)的相关性减弱,表明水土保持措施等人类活动改变了流域的水沙关系,单位径流深的产输沙能力下降,高含沙水流出现频次和量级均显著下降。

本研究仅对 3 个流域的径流、输沙相关指标进行统计分析并讨论了导致水沙变化的原因,需在今后的研究中进一步量化人类活动以及降水对流域次洪过程中水沙通量减少的贡献率。

参考文献:

- [1] 罗娅,杨胜天,刘晓燕,等.黄土高原次降雨径流产沙变化及其与雨强和植被盖度变化的相关性[J].干旱区研究,2015,32(4):698-709.
Luo Y, Yang S T, Liu X Y, et al. Changes in event-based rainfall-runoff-sediment and the relationships between these changes and rainfall intensity and vegetation coverage variations in Loess Plateau of China[J]. Arid Zone Research, 2015,32(4):698-709.
- [2] 姚文艺,焦鹏.黄河水沙变化及研究展望[J].中国水土保持,2016(9):55-63,93.
Yao W Y, Jiao P. Prospects in runoff and sediment variation and study of the Yellow River[J]. Soil and Water Conservation in China, 2016(9):55-63,93.
- [3] 王芸,刘文兆,李怀有,等.黄土高原沟壑区砚瓦川流域水沙关系及其对流域治理的响应[J].自然资源学报,2015,30(8):1403-1413.
Wang Y, Liu W Z, Li H Y, et al. The flow-sediment relationship and its response to watershed management in Yanwachuan watershed, Loess Plateau Gully Region, China[J]. Journal of Natural Resources, 2015, 30(8): 1403-1413.
- [4] Wang Z J, Xu M Z, Liu X, et al. Quantifying the impact of climate change and anthropogenic activities on runoff and sediment load reduction in a typical Loess Plateau watershed[J]. Journal of Hydrology: Regional Studies, 2022,39:100992.
- [5] 刘淑燕,余新晓,信忠保,等.黄土丘陵沟壑区典型流域土地利用变化对水沙关系的影响[J].地理科学进展,2010,29(5):565-571.
Liu S Y, Yu X X, Xin Z B, et al. Effects of land use change on runoff-sediment relationship at watershed in the Loess Hilly Region[J]. Progress in Geography, 2010,29(5):565-571.
- [6] 夏露,马耘秀,宋孝玉,等.黄河中游昕水河流域水沙变化及归因研究[J].水土保持学报,2021,35(6):109-115.
Xia L, Ma Y X, Song X Y, et al. Study on the variation and attribution of runoff and sediment in Xinshui River watershed of Middle Yellow River[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021,35(6):109-115.
- [7] 胡晋飞.黄土丘陵沟壑区流域水沙动态及其对变化环境的响应[D].北京:中国科学院大学,2020.
Hu J F. Response of Runoff-sediment Dynamics to Changing Environment in a Loess Plateau catchment, China[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2020.
- [8] 金双彦,蒋昕晖,钱云平,等.孤山川流域次洪水量和沙量影响因素分析[J].人民黄河,2016,38(3):1-4.
Jin S Y, Jiang X H, Qian Y P, et al. Analysis of impacting factors on runoff and sediment transport of flood event in Gushanchuan Basin[J]. Yellow River, 2016,38(3):1-4.
- [9] 刘建军,赵丽霞,田文君,等.孤山川流域水沙变化情况[J].东北水利水电,2017,35(12):28-30,72.
Liu J J, Zhao L X, Tian W J, et al. Analysis on water and sediment variation of Gushanchuan River Basin[J]. Water Resources & Hydropower of Northeast China, 2017,35(12):28-30,72.
- [10] 翟婷婷,赵广举,穆兴民,等.黄河中游典型流域极端降雨条件的水沙过程变化[J].泥沙研究,2021,46(1):57-63,41.
Zhai T T, Zhao G J, Mu X M, et al. Processes of water and sediment in the representative catchments of the middle Yellow River under extreme rainfalls[J]. Journal of Sediment Research, 2021,46(1):57-63,41.
- [11] 俞奇骏,张洪波,陈克宇,等.佳芦河流域水沙演变及其驱动因素分析[J].水资源与水工程学报,2015,26(3):151-156.
Yu Q J, Zhang H B, Chen K Y, et al. Analysis of evolution and driving force factor of runoff and sediment in Jialu River watershed[J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2015,26(3):151-156.
- [12] 巩瑶.变化环境对流域洪水的影响研究[D].西安:西安理工大学,2019.
Gong Y. Study on the Influence of Changing Environment on Flood[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2019.
- [13] Zheng M G. A spatially invariant sediment rating curve and its temporal change following watershed management in the Chinese Loess Plateau[J]. Science of the Total Environment, 2018,630:1453-1463.
- [14] 张家权.辽河汛期水质水量相关性分析[J].陕西水利,2021(10):107-109.
Zhang J Q. Correlation analysis of water quality and quantity of Liaohe River in flood season[J]. Shanxi Water Resources, 2021(10):107-109.
- [15] Tian P, Feng J H, Zhao G J, et al. Rainfall, runoff, and suspended sediment dynamics at the flood event scale in a Loess Plateau watershed, China[J]. Hydrological Processes, 2022,36(2):e14486.
- [16] 周才钰,何毅,穆兴民,等.黄河中游极端降雨对输沙量影响的时序分析[J].人民黄河,2019,41(3):6-10,15.
Zhou C Y, He Y, Mu X M, et al. Time series analysis of rainfall extremes change on sediment discharge in the Middle Yellow River[J]. Yellow River, 2019,41(3):6-10,15.
- [17] 高海东,刘晗,贾莲莲,等.2000—2017年河龙区间输沙量

- 锐减归因分析[J].地理学报,2019,74(9):1745-1757.
- Gao H D, Liu H, Jia L L, et al. Attribution analysis of precipitous decrease of sediment loads in the Hekou-Longmen section of Yellow River since 2000[J]. Acta Geographica Sinica, 2019,74(9):1745-1757.
- [18] 刘晓燕,杨胜天,李晓宇,等.黄河主要来沙区林草植被变化及对产流产沙的影响机制[J].中国科学:技术科学,2015,45(10):1052-1059.
- Liu X Y, Yang S T, Li X Y, et al. The current vegetation restoration effect and its influence mechanism on the sediment and runoff yield in severe erosion area of Yellow River Basin[J]. Science China: Technological Sciences,2015,45(10):1052-1059.
- [19] 王小燕,杨勤科.中尺度流域土地利用变化对土壤侵蚀的影响:以孤山川流域为例[J].水土保持通报,2016,36(2):1-7,349.
- Wang X Y, Yang Q K. Effects of land use on soil erosion in Mesoscale Watershed: A case study at Gushanchuan Watershed[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation,2016,36(2):1-7,349.
- [20] 冉大川,齐斌,肖培青,等.佳芦河流域特大暴雨洪水对下垫面治理的响应[J].水土保持研究,2015,22(6):7-13.
- Ran D C, Qi B, Xiao P Q, et al. Response of extraordinary rainstorm and flood to the harnessing for underlying surface in Jialu River Basin[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2015,22(6):7-13.

(上接第31页)

- [22] Xin Z, Yu X, Li Q, et al. Spatiotemporal variation in rainfall erosivity on the Chinese Loess Plateau during the period 1956—2008 [J]. Regional Environmental Change, 2011,11(1):149-159.
- [23] 章文波,谢云,刘宝元.中国降雨侵蚀力空间变化特征[J].山地学报,2003,21(1):33-40.
- Zhang W B, Xie Y, Liu B Y. Spatial distribution of rainfall erosivity in China [J]. Journal of Mountain Research, 2003,21(1):33-40.
- [24] Guo B, Luo W, Han B, et al. Multiple spatial-temporal scale change patterns of rainfall erosivity in China over past 58 years based on gravity centre model [J]. Geomatics, Natural Hazards and Risk, 2019,10(1):2200-2219.
- [25] 韩建,占车生,王飞宇,等.太行山区降水空间扩展方法与垂直地带性分析[J].山地学报,2017,35(6):761-768.
- Han J, Zhan C S, Wang F Y, et al. Comparison of the methods of precipitation spatial expansion and analysis of vertical zonality in the Taihang Mountains [J]. Journal of Mountain Research, 2017,35(6):761-768.
- [26] 夏正兵.黄河流域极端气候下降雨侵蚀力时空特征研究[J].水电能源科学,2021,39(7):16-19.
- Xia Z B. Study on temporal and spatial characteristics of rainfall erosion under extreme climate in the Yellow River Basin[J]. Water Resources and Power, 2021,39(7):16-19.

(上接第39页)

- [29] 张学珍,郑景云,郝志新.中国主要经济区的近期气候变化特征评估[J].地理科学进展,2020,39(10):1609-1618.
- Zhang X Z, Zheng J Y, Hao Z X. Climate change assessments for the main economic zones of China during recent decades[J]. Progress in Geography, 2020,39(10):1609-1618.
- [30] 杨永辉,赵世伟,雷廷武,等.耕作对土壤入渗性能的影响[J].生态学报,2006,26(5):1624-1630.
- Yang Y H, Zhao S W, Lei T W, et al. Tillage on soil infiltration under simulated rainfall conditions[J]. Acta Ecologica Sinica, 2006(5):1624-1630.
- [31] 殷建华.南方红壤丘陵区不同植被类型土壤不同土层水分对降水的响应[J].东北林业大学学报,2017,45(11):72-77.
- Yin J H. Response of soil moisture to rainfall in *Pinus massoniana* stands and *Paspalum notatum* grassland in hilly red soil region of southern China[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2017,45(11):72-77.
- [32] Wang Y, Xie Z, Malhi S S, et al. Effects of rainfall harvesting and mulching technologies on water use efficiency and crop yield in the semi-arid Loess Plateau, China[J]. Agricultural Water Management, 2009,96(3):374-382.