

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2025.01.021; CSTR:32311.14.rswc.2025.01.021.

陈玮, 孙彭成, 肖培青, 等. 河龙区间典型流域径流年内分配对水土保持生态建设的响应[J]. 水土保持研究, 2025, 32(1): 141-147, 159.

Chen Wei, Sunpeng Cheng, Xiao Peiqing, et al. Responses of intra-annual runoff to remarkable soil and water conservation projects in the Hekouzheng-Longmen region[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2025, 32(1): 141-147, 159.

# 河龙区间典型流域径流年内分配对 水土保持生态建设的响应

陈 玮<sup>1,2</sup>, 孙彭成<sup>2</sup>, 肖培青<sup>2</sup>, 李琼芳<sup>1</sup>, 焦 鹏<sup>2</sup>

(1.河海大学 水文水资源学院, 南京 210024;

2.黄河水利委员会黄河水利科学研究院 水利部 黄土高原水土保持重点实验室, 郑州 450003)

**摘 要:**[目的]揭示河龙区间不同地貌区下典型流域的多年径流变化特征,明晰水土保持生态建设对其径流年内分配均匀程度的影响。[方法]选取河龙区间风沙区、土石山区和黄土丘陵沟壑区的秃尾河、三川河及延河流域,在收集各流域 1960—2019 年径流观测和水土保持措施数据的基础上,构建基尼系数指标,量化径流年内分配均匀度,分析了流域径流年内分配的演变趋势与空间差异,探究了河龙区间流域径流年内分配对不同水土保持措施的响应特征。[结果](1) 1960—2019 年,3 个典型流域径流量极显著减少,秃尾河、三川河和延河的年径流量减少幅度分别为  $-0.05$  亿  $\text{m}^3/\text{a}$ ,  $-0.03$  亿  $\text{m}^3/\text{a}$ ,  $-0.02$  亿  $\text{m}^3/\text{a}$ ; (2) 3 个典型流域径流年内分配特征显著差异,风沙区的秃尾河流域径流年内分配最为均匀,土石山区次之,黄土丘陵沟壑区的延河流域年内分配最不均匀,各流域的径流基尼系数分别为 0.2, 0.35, 0.6; (3) 不同地貌区径流基尼系数均呈下降趋势,径流年内分配趋向均匀; (4) 水土保持林草植被、梯田和淤地坝建设与径流基尼系数具有显著负相关关系。[结论]水土保持生态建设具有调节径流年内分配,促进河川径流年内分配更加均匀的作用。

**关键词:**水土保持与荒漠化治理; 径流年内分配; 基尼系数; 河龙区间

中图分类号:TV121.2

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2025)01-0141-07

## Responses of intra-annual runoff to remarkable soil and water conservation projects in the Hekouzheng-Longmen region

Chen Wei<sup>1,2</sup>, Sunpeng Cheng<sup>2</sup>, Xiao Peiqing<sup>2</sup>, Li Qiongfang<sup>1</sup>, Jiao Peng<sup>2</sup>

(1.College of Hydrological and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210024,

China; 2.Key Laboratory of Soil and Water Conservation on the Loess Plateau of Ministry of  
Water Resources, Yellow River Institute of Hydraulic Research, Zhengzhou 450003, China)

**Abstract:** [Objective] The aim of this study is to reveal the characteristics of multi-year runoff variation in different geomorphic areas in the Hekouzheng-longmen region, and to investigate responses of intra-annual runoff to soil and water conservation measures in these watersheds. [Methods] Three watersheds in different landform regions (Tuwei River, Sanchuan River, and Yan River) were selected, representing the sandy region, rocky mountain region, and loess cover region, respectively. The Gini coefficient and Lorentz asymmetry coefficient were constructed to quantify the evenness of intra-annual runoff using runoff observations during 1960 to 2019. [Results] (1) Runoff of Tuwei River, Sanchuan River, and Yan River decreased significantly during 1960 to 2019, with the decrease rate of  $-0.05$  million  $\text{m}^3/\text{a}$ ,  $-0.03$  million

收稿日期:2024-02-15

修回日期:2024-03-19

资助项目:国家自然科学基金黄河水利科学联合基金重点项目(U2243210);中央科研院所基本科研业务费项目(HKY-JBYW-2022-09)

第一作者:陈玮(1999—),女,河南南阳人,硕士研究生,研究方向为水文学与水资源。E-mail:weichen990806@163.com

通信作者:肖培青(1972—),女,河南卫辉人,博士,教授级高级工程师,研究方向为土壤侵蚀与水土保持。E-mail:peiqingxiao@163.com

<http://stbcyj.paperonce.org>

$\text{m}^3/\text{a}$ , and  $-0.02$  million  $\text{m}^3/\text{a}$ , respectively. (2) The Intra-annual runoff in different landform regions were different. The Gini coefficients of Tuwei River, Sanchuan River and Yan River were 0.2, 0.35 and 0.6, respectively. The intra-annual runoff in the aeolian sandy area showed the highest evenness, followed by the rocky mountain area, while the loess covered area displayed the most uneven distribution. (3) The Gini coefficient of runoff in the three landform regions showed the decreasing trend, and the concentration rate of intra-annual runoff also decreased during 1960 to 2019. (4) NDVI, terraced fields and silting dam construction had significant negative correlation with Gini coefficient of runoff in the three landform regions. [Conclusion] Soil and water conservation projects in the Hekouzhen-Longmen region played a positive role in regulating the intra-annual runoff.

**Keywords:** soil and water conservation; intra-annual runoff; Gini coefficient; Hekouzhen-Longmen region

黄河流域生态脆弱,水少沙多,水沙关系不协调是黄河复杂难治的症结所在。为减轻水土流失,调节水沙关系,确保黄河长治久安,国家在黄土高原地区持续开展了大规模的以造林种草,修建梯田,淤地坝建设等为重点的水土保持生态建设<sup>[1]</sup>,在减少泥沙入黄、减轻河道和水库淤积、改善河流水生态环境等方面发挥了重要作用。近年研究发现,水土保持措施还显著影响流域产汇流能力,大幅减少流域径流,在黄河中游的部分流域,水土保持生态建设对河川径流减少的贡献可达到 70% 以上<sup>[2-3]</sup>。河川径流对水土保持生态建设响应机制研究成为区域水资源管理和水土保持措施优化的重要基础。

河川径流年内分配特征是影响河流生态系统健康的重要因素,关系区域水资源管理和水安全保障<sup>[4]</sup>。径流年内分配特征的改变会对水资源管理、农业以及水生生态系统健康带来巨大的影响<sup>[5]</sup>。在降雨特征变化<sup>[6]</sup>、森林砍伐<sup>[7]</sup>、城市扩张等<sup>[8]</sup>环境扰动作用下,全球不同地区流域都出现了径流年内分配改变的现象<sup>[9]</sup>。

在水土保持生态建设作用下,流域微地形和土地利用特征剧烈变化,导致流域产汇流机制发生改变<sup>[10]</sup>。林草植被覆盖增加了地表糙度,降雨入渗增强,并延长坡面径流汇集<sup>[11]</sup>;梯田修建改变原地形,减小坡度,减缓径流流速,并提高土壤蓄水能力<sup>[12-13]</sup>;淤地坝建设降低沟道连通性,延迟径流洪峰,增加土壤和地下水补给,调整径流成分<sup>[14]</sup>。然而,在流域尺度上,水土保持措施作用下径流年内分配的变化特征仍不明确,尤其是缺少径流年内分配的量化表征及其与水土保持措施之间的统计研究,制约了水土保持措施作用下流域水资源演变的精准预评估测。

河龙区间位于黄土高原中部,地貌特征多样,地形破碎,植被覆盖度低,年内侵蚀降雨集中,是黄河中游主要产沙区<sup>[15]</sup>,也是黄河流域水土保持建设最

富有成效的地区。近年来,河龙区间径流输沙剧烈变化<sup>[16]</sup>,2010 年河龙区间一级支流径流量与 1954 年相比减少了 80%<sup>[17]</sup>,多数研究认为<sup>[18]</sup>,水土保持措施是该地区径流减少的主导性成因。为此,本研究针对河川径流年内分配对水土保持生态建设响应的科学问题,以水土保持建设最为强烈的河龙区间为研究对象,选取 3 种地貌区的不同流域,基于 1960—2019 年径流观测资料,量化径流年内分配特征及其变化趋势,研究植被、梯田和淤地坝建设对基尼系数的影响,阐明水保措施对径流年内分配的影响。研究结果可以进一步深化水土保持措施对河川径流影响的机理认识,为流域水土保持措施优化配置提供科技支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况与数据来源

黄河中游河口—龙门区间(图 1),位于北纬  $35^{\circ}25'$ — $40^{\circ}39'$ ,东经  $107^{\circ}13'$ — $112^{\circ}53'$ ,属于温带大陆性季风气候,夏季高温多雨,冬季寒冷干燥,地貌类型以黄土丘陵沟壑区、风沙区、土石山区为主,是黄河流域水土流失最严重的地区之一<sup>[19]</sup>。新中国成立后,河龙区间持续开展以造林种草、梯田修建和淤地坝建设为主导的水土保持生态建设<sup>[20]</sup>,水土保持建设成效显著。在充分考虑地貌差异,结合河龙区间地貌分布<sup>[21]</sup>,本文分别在风沙区、土石山区、黄土丘陵沟壑区选取典型支流秃尾河、三川河和延河,分别分析各地貌类型区径流年内分配对水土保持生态建设的响应。结合区域水文监测站点布设情况,各流域分别选取两个水文监测站点。秃尾河、三川河及延河的把口水文站分别为高家川、后大成、甘谷驿。6 个水文站的逐日径流、降雨数据均来自黄河水利委员会出版的《中华人民共和国水文年鉴—黄河流域水文资料》。

## 1.2 研究方法

1.2.1 统计学方法 本文通过 Mann-Kendall 非参数检验和 Pettitt 突变检验分析径流以及径流年内分配特征参数的长时序变化特征。Mann-Kendall 非参数检验法<sup>[22]</sup>用于分析径流和径流年内分配的变化趋势及其显著性。该检验方法不需要样本遵从一定的分布,部分数据缺失不会对结果造成影响,不受少数异常值的干扰,能够很好地揭示时间序列的变化趋势,广泛应用于水文气象方面的研究<sup>[18,23]</sup>。Pettitt 突变检验判断径流和径流年内分配特征是否存在突变点,并检验突变是否显著<sup>[24]</sup>。

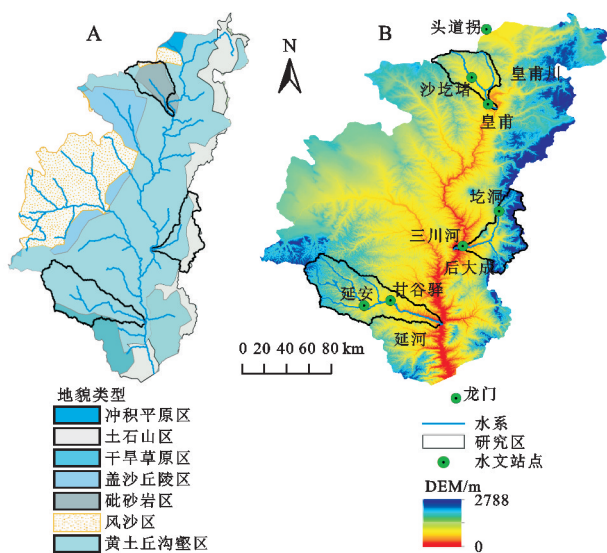


图1 流域地理位置

Fig. 1 Location of the Watershed

1.2.2 不均匀性分析指标 洛伦兹曲线(图2)最早是由美国统计学家提出的一条用于描绘社会收入分配不均匀程度的曲线,洛伦兹曲线横轴为累积人口百分比,纵轴为累积收入百分比,中间的ac直线为绝对均匀线代表社会收入分配绝对均匀,而折线abc则代表的是社会收入分配绝对不均匀。绝对均匀线和绝对不均匀线之间的曲线为洛伦兹曲线,能够直观地反映收入分配的不均匀程度。为表征径流分配的不均匀程度,洛伦兹曲线被引入用于水文特征分析<sup>[5,25]</sup>。本文构建的洛伦兹曲线(图2)横轴为时间累积比值,纵坐标为日径流量累积比值。对角线代表径流量在年尺度上的分配绝对均匀,而洛伦兹曲线离绝对均匀线越远代表有较多的天数却占有较少的径流量,径流年内分配不均匀,反之,越均匀。

基尼系数可以用于量化径流年内分配的不均匀程度,基尼系数是洛伦兹曲线中绝对均匀线和洛伦兹曲线之间的面积(A)和绝对均匀线与绝对不均匀折线之间的面积(A+B)之比。基尼系数取值在0~1,

越接近0分配表明径流年内分配越均匀,反之,越接近1分配越不均匀。

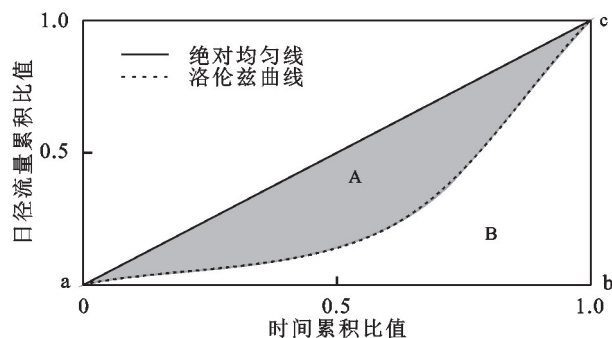


图2 洛伦兹曲线概念图

Fig. 2 Lorentz curve concept diagram

## 2 结果与分析

### 2.1 典型流域的径流变化特征

不同地貌区典型流域径流总量具有显著差异,在1960—2019年,多年平均径流深从大到小分别为风沙区、土石山区、黄土丘陵沟壑区。秃尾河多年平均径流深为113 mm,显著高于其他流域;延河多年平均径流深最小,为32 mm,统计结果显示3种地貌区的多年径流深存在显著差异。Mann-Kendall 检验结果(图3,表1)显示,秃尾河、三川河及延河的多年径流量均呈现显著下降趋势,其中秃尾河径流量减少最为迅速,年均减少幅度为 $-0.05$  亿  $\text{m}^3/\text{a}$ ,三川河与延河的径流量减少幅度分别为 $-0.03$ ,  $-0.02$  亿  $\text{m}^3/\text{a}$ 。其中,除圪洞站点Z值为 $-2.17$ 通过0.05显著性水平检验以外,其余5个站点的径流变化趋势检验均通过了0.01的显著性水平( $|Z|$ 均大于2.56)。

Pettitt 突变检验显示(表1),3个流域径流量均发生显著突变( $p < 0.05$ ),三川河和延河的突变年份分别为1980年、1997年,秃尾河高家堡站点突变年份为1980年,高家川站点为1982年,检验分析表明,3个流域的面降雨量未发生显著变化。

### 2.2 不同地貌区典型流域径流年内分配的空间差异

风沙区、土石山区和黄土丘陵沟壑区典型流域的径流分配特征见图4,风沙区秃尾河多年月径流量呈现明显的双峰型分布特征,年内存在两个丰水期分别为2—4月和6—10月。三川河和延河流域的月径流年内分布是单峰型,径流集中汛期的6—10月,分别占到年内总径流量的60%和70%。

基于洛伦兹曲线和基尼系数分析<sup>[26]</sup>,秃尾河高家堡、高家川分别为0.19,0.24,三川河圪洞、后大成的径流基尼系数多年平均分别为0.38,0.36,延河流域延安和甘谷驿的径流基尼系数多年平均分



别为 0.61,0.58。可以看出,黄土丘陵沟壑区的延河流域径流年内分配与其他两个地貌区相比,更为不均匀,不同地貌区下流域的径流年内分配特征存在显著差异。3 个流域把口水文站汛期径流量均在

20 世纪60 年代达到最大。秃尾河流域汛期径流在 2010—2019 年达到最小,三川河及延河流域在 2000—2009 年达到最小,汛期径流量峰值下降明显,径流集中度降低。

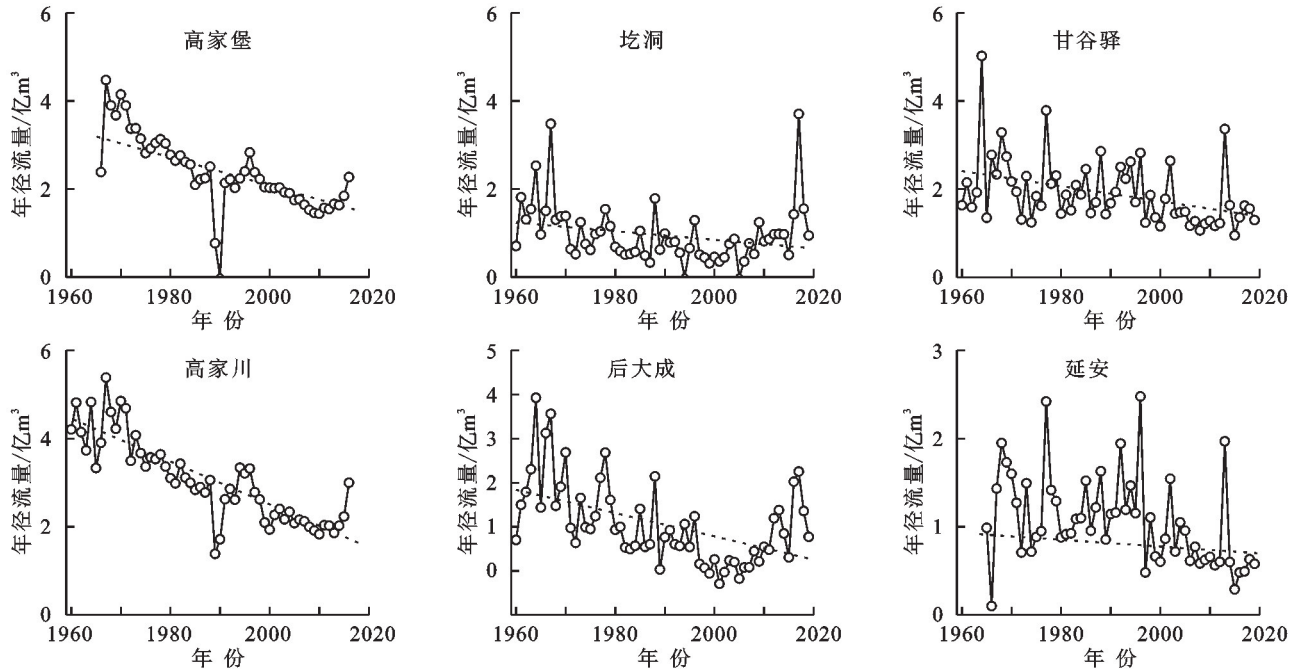


图 3 1960—2019 年秃尾河、三川河及延河年径流量变化

Fig. 3 Process of annual runoff in Tuwei River, Sanchuan River and Yan River during 1960—2019

表 1 1960—2019 年秃尾河、三川河及延河径流量、降雨量变化趋势及突变检验结果

Table 1 M-K and Pettitt test of runoff and rainfall in Tuwei River, Sanchuan River and Yan River during 1960—2019

流域	地貌区	水文站	Pettitt		Mann-Kendall	
			年径流量		年径流量	
			突变年份	显著性	Z 值	显著性
三川河	土石山区	圪洞	1980	*	-2.17	*
		后大成	1982	*	-4.02	**
秃尾河	风沙区	高家堡	1985	*	-7.76	**
		高家川	1984	*	-7.63	**
延河	黄土丘陵沟壑区	甘谷驿	1997	*	-3.58	**
		延安	1997	*	-3.82	**

注:“\*”“\*\*”分别代表 0.05,0.01 水平显著。

### 2.3 典型流域径流年内分配的演变特征

从图 5 中可以看出,近 60 年来,风沙区、土石山区及黄土丘陵沟壑区的径流基尼系数呈现下降趋势,三川河流域后大成站点的径流基尼系数减少了 12%,秃尾河高家堡、高家川站点分别减少了 30%,11%,延河流域甘谷驿站点的径流基尼系数降幅达到 24%,表明 3 个不同地貌区下流域的径流年内分配均趋向于均匀。统计结果表明,延河流域的径流基尼系数在 1960—2019 年下降趋势显著( $p<0.01$ ),延安站点径流基尼系数在 1997 年发生了突变情况,突变前后径流基尼系数的下降幅度为 22%。

### 2.4 径流年内分配变化对水土保持生态建设的响应

径流是降雨和流域下垫面共同作用的结果。通过对降雨分析显示,近 60 年来秃尾河、三川河及延河流域的降雨量未发生显著的趋势性变化,相关分析结果表明,3 个不同地貌区典型流域径流的基尼系数和淤地坝坝控面积占比、梯田面积占比和均一化植被指数(NDVI)都呈现显著负相关性(图 6),随着植被盖度增加、梯田面积比例及淤地坝坝控面积比例的增加,不同地貌区下的径流基尼系数均在减小,也即水土保持生态建设使得流域径流年内分配趋向均匀。

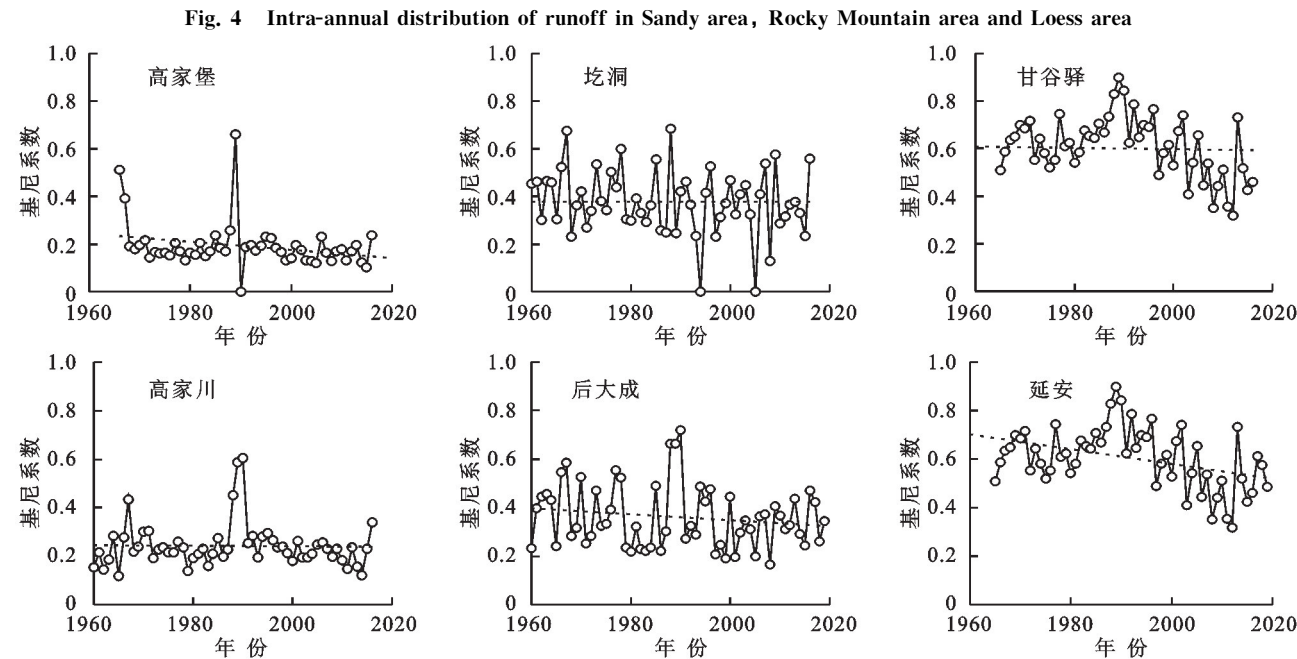
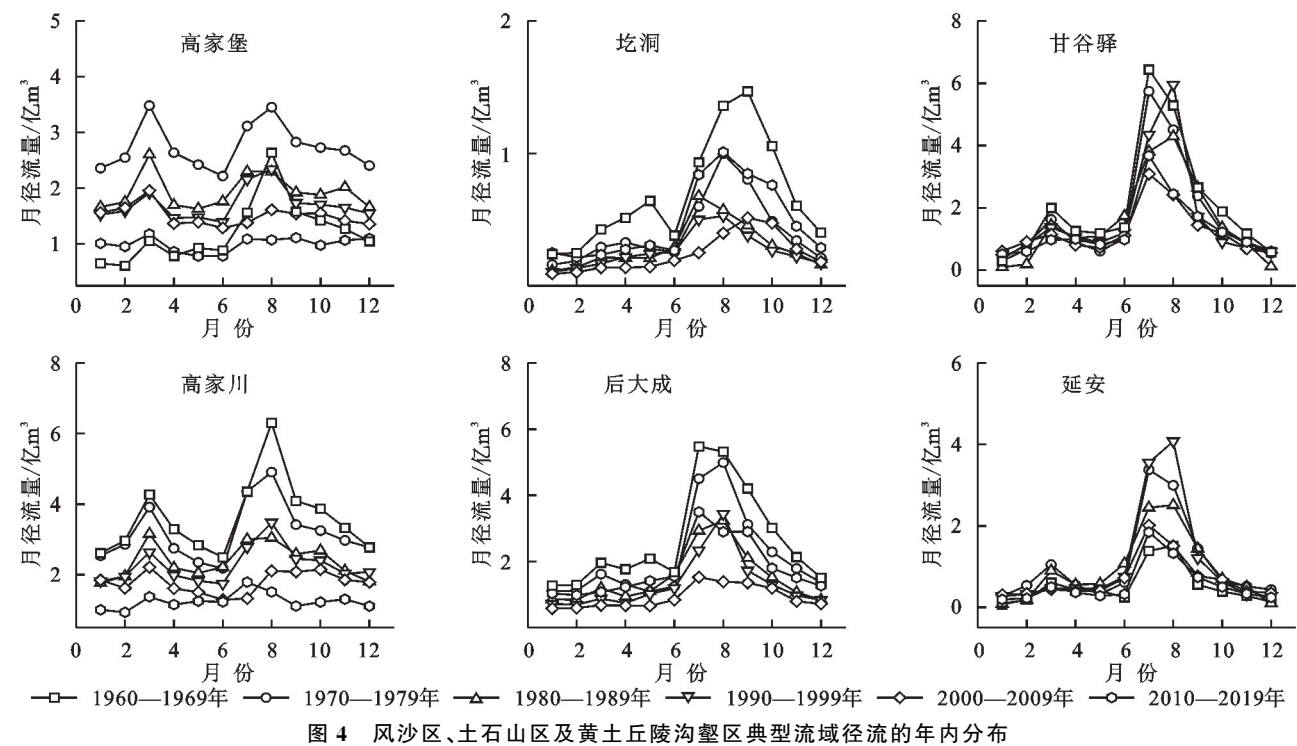


图 5 秃尾河、三川河及延河径流基尼系数变化趋势

Fig. 5 Variation trend of Gini coefficient of runoff in Tuwei River, Sanchuan River and Yan River

表 2 1960—2019 年秃尾河、三川河及延河径流、降雨基尼系数 Mann-Kendall 检验结果

流域	地貌区	水文站	径流基尼系数		降雨基尼系数	
			Z 值	显著性	Z 值	显著性
三川河	土石山区	圪洞	-1.07	ns	—	ns
		后大成	-1.00	ns	—	ns
秃尾河	风沙区	高家堡	-1.77	ns	—	ns
		高家川	-0.27	ns	—	ns
延河	黄土丘陵沟壑区	甘谷驿	-3.57	* *	-1.69	ns
		延安	-2.50	*	-1.43	ns

注：“\*”“\*”“\*”分别代表 0.05,0.01 水平显著,ns 代表不显著。

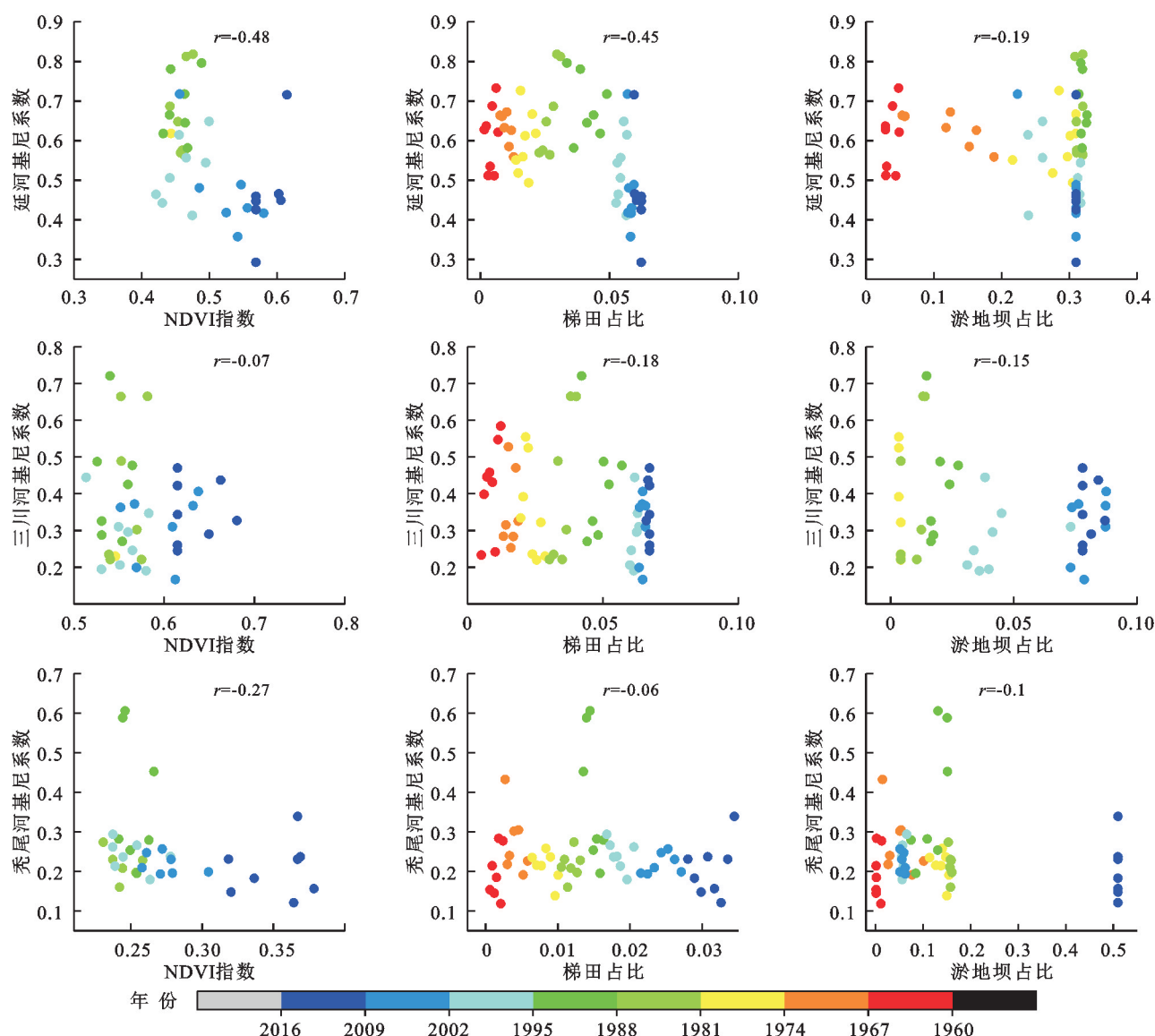


图 6 不同地貌区典型流域径流基尼系数与不同水保措施的相关关系

Fig. 6 Correlation between Gini coefficient of runoff and different water conservation measures in different geomorphic areas

### 3 结论

(1) 河龙区间不同地貌区径流空间差异明显且都呈现出显著的减少趋势。风沙区的多年平均径流深最大,黄土丘陵沟壑区多年平均径流深流域最小。1960—2019 年,风沙区、土石山区及黄土丘陵沟壑区的径流量均呈极显著下降趋势,下降速率分别为  $-0.05$  亿  $\text{m}^3/\text{a}$ ,  $-0.03$  亿  $\text{m}^3/\text{a}$ ,  $-0.02$  亿  $\text{m}^3/\text{a}$ 。

(2) 河龙区间不同地貌区典型流域径流年内分配特征存在显著空间差异。风沙区秃尾河和土石山区三川河的径流基尼系数分别为 0.20, 0.38, 径流年内分配相对均匀,黄土丘陵沟壑区延河的径流基尼系数在 0.6 左右,径流年内分配最不均匀。

(3) 不同地貌区典型流域径流年内分配趋向于更加均匀。不同地貌区各典型流域基尼系数均呈现下降趋势,三川河下降幅度为 12%,秃尾河高家堡、高家川站

点分别为 30%, 11%, 延河流域径流基尼系数突变前后降幅达 24% 左右。径流年内分配都趋向于更加均匀。

(4) 水土保持生态建设是河龙区间不同地貌区径流年内分配趋向均匀的主要原因。不同地貌区各流域径流的基尼系数与各类型水土保持措施表征参数(NDVI、梯田占比以及淤地坝坝控面积占比)都存在显著负相关关系,水土保持生态建设作用下河龙区间流域径流年内分配趋向于均匀。

#### 参考文献 (References):

- [1] 傅伯杰, 刘彦随, 曹智, 等. 黄土高原生态保护和高质量发展现状、问题与建议[J]. 中国科学院院刊, 2023, 38(8): 1110-1117.  
Fu B J, Liu Y S, Cao Z, et al. Current conditions, issues, and suggestions for ecological protection and high-quality development in Loess Plateau[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2023, 38(8): 1110-1117.

- [2] 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.  
Hu C H, Zhang X M. Several key questions in the researches of runoff and sediment changes and trend predictions in the Yellow River[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2018,49(9):1028-1039.
- [3] 刘姗姗,李小兵,刘思君,等.黄土丘陵沟壑区典型小流域不同空间尺度水沙变化研究[J].泥沙研究,2022,47(6):51-58.  
Liu S S, Li X B, Liu S J, et al. Study on water and sediment variation of the typical small watershed in loess hilly and Gully Region at different spatial scales[J]. Journal of Sediment Research, 2022,47(6):51-58.
- [4] Zhang M F, Wei X H. Deforestation, forestation, and water supply[J]. Science, 2021,371(6533):990-991.
- [5] Ye Q J, Li Z W, Duan L X, et al. Decoupling the influence of vegetation and climate on intra-annual variability in runoff in karst watersheds[J]. Science of the Total Environment, 2022,824:153874.
- [6] 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.
- [7] 王凯利,王志慧,肖培青,等.基于水量平衡原理的黄土高原林草植被覆盖度恢复潜力评估[J].生态学报,2022,42(20):8352-8364.  
Wang K L, Wang Z H, Xiao P Q, et al. Evaluation of restoration potential of shrubs-herbs-arbor vegetation coverage on the Loess Plateau based on the principle of water balance[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022,42(20):8352-8364.
- [8] 李国婉,夏兵,隋己元,等.海绵城市建设对流域海绵体生态水文过程的改善[J].生态学报,2022,42(24):10098-10110.  
Li G W, Xia B, Sui J Y, et al. Sponge city construction improves eco-hydrological process of spongy body in watershed[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022,42(24):10098-10110.
- [9] 任婵月,张艺帆,李正阳,等.全球主要流域径流变化趋势分析与定量归因[J].地球科学,2023,48(9):3518-3525.  
Ren C Y, Zhang Y F, Li Z Y, et al. Evaluation and quantitative attribution of streamflow trends over the global major river basins[J]. Earth Science, 2023,48(9):3518-3525.
- [10] Yan Z, Lei H, Gao H, et al. Simulating the hydrological impacts of intensive soil and water conservation measures in the Yellow River basin using a distributed physically based model[J]. Journal of Hydrology, 2023,625:129936.
- [11] 杨春霞,姚文艺,肖培青,等.植被覆盖结构对坡面产流产沙的影响及调控机制分析[J].水利学报,2019,50(9):1078-1085.  
Yang C X, Yao W Y, Xiao P Q, et al. Effects of vegetation cover structure on runoff and sediment yield and its regulation mechanism[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2019,50(9):1078-1085.
- [12] Ben Khelifa W, Strohmeyer S, Benabdallah S, et al. Evaluation of bench terracing model parameters transferability for runoff and sediment yield on catchment modelling[J]. Journal of African Earth Sciences, 2021,178:104177.
- [13] Zhao Y, Yin X, Zhang X, et al. Effect of soil and water conservation measures on the reduction of runoff and sediment load in a loess hilly-gully region[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021,76(1):52-64.
- [14] Luo Z B, Yong C X, Fan J, et al. Precipitation recharges the shallow groundwater of check dams in the loessial hilly and gully region of China[J]. Science of the Total Environment, 2020,742:140625.
- [15] 宁珍,高光耀,傅伯杰.黄河河龙区间输沙变化特征及归因分析[J].水土保持研究,2022,29(3):38-42.  
Ning Z, Gao G Y, Fu B J. Characteristics and attribution analysis of sediment yield changes in Helong Region of the Yellow River[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2022,29(3):38-42.
- [16] 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.
- [17] 岳晓丽.黄河中游径流及输沙格局变化与影响因素研究[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2016.  
Yue X L. Spatial patterns and trends in runoff and sediment load in the middle Reaches of the Yellow River and their potential cause [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A & F University, 2016.
- [18] Yang L, Zhao G J, Tian P, et al. Runoff changes in the major river basins of China and their responses to potential driving forces[J]. Journal of Hydrology, 2022,607:127536.
- [19] 黄萱,丁继辉,邹钰文,等.黄河中游河龙区间侵蚀产沙对景观特征的非线性响应[J].水土保持学报,2021,35(6):88-94.  
Huang X, Ding J H, Zou Y W, et al. Nonlinear responses of sediment yield modulus to watershed landscape characteristics in Hekouzhong Longmen section of the middle reaches of Yellow River[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021,35(6):88-94.



- Yue S P, Yan Y C, Zhang S W, et al. Spatiotemporal variations of soil freeze-thaw state in Northeast China based on the ERA5-LAND dataset[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2021, 76(11): 2765-2779.
- [23] Li X, Jin R, Pan X D, et al. Changes in the near-surface soil freeze-thaw cycle on the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2012, 17: 33-42.
- [24] 林笠, 王其兵, 张振华, 等. 温暖化加剧青藏高原高寒草甸土非生长季冻融循环[J]. *北京大学学报: 自然科学版*, 2017, 53(1): 171-178.
- Lin L, Wang Q B, Zhang Z H, et al. Warming enhances soil freezing and thawing circles in the non-growing season in a Tibetan alpine grassland[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2017, 53(1): 171-178.
- [25] 王佃来, 刘文萍, 黄心渊. 基于 Sen+Mann-Kendall 的北京植被变化趋势分析[J]. *计算机工程与应用*, 2013, 49(5): 13-17.
- Wang D L, Liu W P, Huang X Y. Trend analysis in vegetation cover in Beijing based on Sen+Mann-Kendall method[J]. *Computer Engineering and Applications*, 2013, 49(5): 13-17.
- [26] 金凯, 王飞, 韩剑桥, 等. 1982—2015 年中国气候变化和人类活动对植被 NDVI 变化的影响[J]. *地理学报*, 2020, 75(5): 961-974.
- Jin K, Wang F, Han J Q, et al. Contribution of climatic change and human activities to vegetation NDVI change over China during 1982—2015[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2020, 75(5): 961-974.
- [27] 杨淑华, 吴通华, 李韧, 等. 青藏高原近地表土壤冻融状况的时空变化特征[J]. *高原气象*, 2018, 37(1): 43-53.
- Yang S H, Wu T H, Li R, et al. Spatial-temporal changes of the near-surface soil freeze-thaw status over the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *Plateau Meteorology*, 2018, 37(1): 43-53.
- [28] 邵婉婉. 利用被动微波遥感监测北半球高分辨率土壤冻融变化[D]. 兰州: 兰州大学, 2021.
- Shao W W. High-resolution near-surface soil freeze/thaw status and changes in northern hemisphere based on passive microwave remote sensing[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2021.
- [29] 高思如, 曾文钊, 吴青柏, 等. 1990—2014 年西藏季节冻土最大冻结深度的时空变化[J]. *冰川冻土*, 2018, 40(2): 223-230.
- Gao S R, Zeng W Z, Wu Q B, et al. Temporal and spatial variations of the maximum frozen depth of seasonally frozen soil in Tibet from 1990 to 2014[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2018, 40(2): 223-230.
- [30] 王一博, 王根绪, 常娟. 人类活动对青藏高原冻土环境的影响[J]. *冰川冻土*, 2004, 26(5): 523-527.
- Wang Y B, Wang G X, Chang J. Impacts of Human Activity on Permafrost Environment of the Tibetan Plateau[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2004, 26(5): 523-527.

~~~~~

(上接第 147 页)

- [20] 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]. *Sci. Sin. Tech.*, 2015, 45(10): 1052-1059.
- [21] 刘晓燕, 党素珍, 高云飞, 等. 黄土丘陵沟壑区林草变化对流域产沙影响的规律及阈值[J]. *水利学报*, 2020, 51(5): 505-518.
- Liu X Y, Dang S Z, Gao Y F, et al. The rule and threshold of the effect of vegetation change on sediment yield in the Loess Hilly Region, China[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2020, 51(5): 505-518.
- [22] Gocic M, Trajkovic S. Analysis of changes in meteorological variables using Mann-Kendall and Sen's slope estimator statistical tests in Serbia[J]. *Global and Planetary Change*, 2013, 100: 172-182.
- [23] Tian S M, Xu M Z, Jiang E H, et al. Temporal variations of runoff and sediment load in the upper Yellow River, China[J]. *Journal of Hydrology*, 2019, 568: 46-56.
- [24] Pettitt A N. A non-parametric approach to the change-point problem[J]. *Journal of the Royal Statistical Society*, 1979, 28(2): 126-135.
- [25] 胡彩霞, 谢平, 许斌, 等. 基于基尼系数的水文年内分配均匀度变异分析方法: 以东江流域龙川站径流序列为例[J]. *水力发电学报*, 2012, 31(6): 7-13.
- Hu C X, Xie P, Xu B, et al. Variation analysis method for hydrologic annual distribution homogeneity based on Gini coefficient: a case study of runoff series at Longchun Station in Dongjiang River Basin[J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2012, 31(6): 7-13.
- [26] 贾玲, 张百祖, 牛最荣, 等. 疏勒河上游径流变化与预测分析[J]. *干旱区研究*, 2022, 39(5): 1588-1597.
- Jia L, Zhang B Z, Niu Z R, et al. Analysis of runoff variation and forecast in the upper reaches of the Shule River[J]. *Arid Zone Research*, 2022, 39(5): 1588-1597.