

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2024.03.016.

艾旭城, 高鹏, 穆兴民, 等. 黄土高原林区植被变化对水沙演变的影响:以仕望川流域为例[J].水土保持研究, 2024, 31(3):42-48.

Ai Xucheng, Gao Peng, Mu Xingmin, et al. Impact of Vegetation Changes on Runoff and Sediment Evolution in Forest Regions of the Loess Plateau: A Case Study of Shiwangchuan Basin[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(3):42-48.

# 黄土高原林区植被变化对水沙演变的影响

## ——以仕望川流域为例

艾旭城<sup>1</sup>, 高鹏<sup>1,2</sup>, 穆兴民<sup>1,2</sup>, 范馨逸<sup>1</sup>

(1.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; 2.中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

**摘要:** [目的]研究林区植被变化对水沙演变的影响,可以为黄河流域生态环境建设政策的制定与调整提供科学依据。[方法]基于仕望川流域控制水文站大村站 1959—2018 年的径流量与输沙量数据以及流域内的降水数据,分析了其 60 年水文变化特征。结合 1985—2018 年的 NDVI 数据以及五期土地利用数据,分析讨论了流域水沙变化的植被下垫面驱动效应。[结果]仕望川流域近 60 年来的径流量和输沙量呈显著减少的趋势 ( $p < 0.01$ ),突变年分别在 1988 年和 1983 年,而流域内土地利用情况和降水在 60 年间并无明显的变化趋势,流域内生长季 NDVI 在 2000 年前变化不明显,但在 2000 年后有显著提升趋势。[结论]2000 年以前,各种水土保持治理措施的实施是流域径流量与输沙量减少的主要原因;进入 21 世纪后,流域内植被质量的提升使径流量与输沙量进一步减少。

**关键词:** 仕望川流域; 径流量; 输沙量; NDVI; 植被变化

中图分类号: P333

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2024)03-0042-07

## Impact of Vegetation Changes on Runoff and Sediment Evolution in Forest Regions of the Loess Plateau

### — A Case Study of Shiwangchuan Basin

Ai Xucheng<sup>1</sup>, Gao Peng<sup>1,2</sup>, Mu Xingmin<sup>1,2</sup>, Fan Xinyi<sup>1</sup>

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

Plateau, 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)

**Abstract:** [Objective] The aims of this study are to examine the influence of forest vegetation changes on water-sediment dynamics, and to provide a scientific basis for formulating and adjusting ecological environment development policies in the Yellow River Basin. [Methods] Based on the runoff and sediment discharge data from the Dacun hydrological station in the Shiwangchuan River Basin from 1959 to 2018, as well as precipitation data within the basin, the hydrological changes over a span of 60 years were analyzed. By combining NDVI data from 1985 to 2018 and land use data from five periods, the vegetation underlying surface driving effects on water-sediment changes in the watershed were analyzed and discussed. [Results] The runoff and sediment discharge in the Shiwangchuan River Basin had shown a significant decreasing trend over the past 60 years ( $p < 0.01$ ), with abrupt changes occurring in 1988 and 1983, respectively. However, there had been no significant trends in land use and precipitation within the watershed during this period. The NDVI during the growing season showed little variation before 2000 but exhibited a significant increasing trend after 2000. [Conclusion] Before 2000, the implementation of various soil and water conservation measures was the

收稿日期: 2023-06-12

修回日期: 2023-08-03

资助项目: 国家自然科学基金项目“黄土高原水土保持措施潜力及其对河流泥沙的调控机制”(U2243211)

第一作者: 艾旭城(2001—), 男, 陕西榆林人, 在读硕士研究生, 主要从事生态水文及水土保持研究。E-mail: aixucheng@nwafu.edu.cn

通信作者: 高鹏(1976—), 男, 陕西扶风人, 研究员, 博士, 博士生导师, 主要从事生态水文及水土保持研究。E-mail: gaopeng@ms.iswc.ac.cn

<http://stbcj.paperonce.org>

main reason for the decrease of runoff and sediment transport in the basin; After entering the 21st century, the improvement of vegetation quality in the basin has further reduced runoff and sediment transport.

**Keywords:** Shiwangchuan basin; runoff; sediment discharge; NDVI; vegetation change

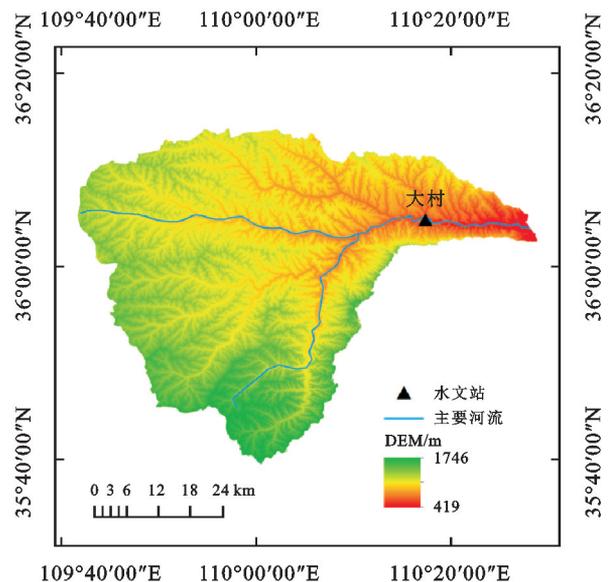
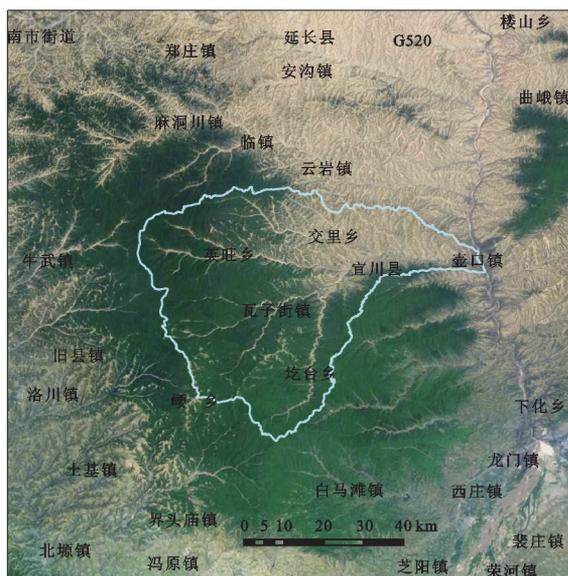
径流泥沙的变化影响着河流健康及沿河地区社会经济的发展<sup>[1]</sup>,研究流域水沙变化原因,对防治水土流失、改善流域生态环境<sup>[2]</sup>、制定可持续的流域管理战略具有重要意义<sup>[3]</sup>。植被的恢复与建设是调控水沙的重要措施<sup>[4]</sup>,植被覆盖度、植被类型、植被质量的变化均会影响流域径流泥沙的变化<sup>[5-6]</sup>。近年来,众多学者对植被恢复与黄土高原各流域水沙变化的关系进行了研究,如 Zhang 等<sup>[7]</sup>通过对黄土高原地区十个流域 20 世纪 50 年代至 2014 年水沙变化以及归因分析,得出水沙减少的主导因子从早年的工程措施转变为植被恢复措施。赵跃中等<sup>[8]</sup>利用 1960—2010 年延河径流泥沙资料,分析了延河流域植被恢复对径流泥沙的影响,得出 1996 年以后植被恢复措施逐渐成为该流域水沙量显著减少的主要驱动因素。高海东<sup>[9]</sup>、张建梅等<sup>[10]</sup>分析了退耕还林工程实施后各种因素对河龙区间水沙变化的影响,结果表明,植被恢复已经成为河龙区间径流量与输沙量减少的主要驱动因素。这些研究主要关注在黄土高原植被条件较差,水土流失严重区域的植被恢复对径流量、泥沙量的影响,而缺乏对黄土高原林区植被进一步优化与水沙变化关系的研究。

仕望川流域处于黄土高原防护林区,林草覆盖度较高,研究流域内植被进一步优化与水沙变化的关系对黄土高原退耕还林工作后续的生态环境建设具有

重要意义。基于此,本文以仕望川流域为研究区域,基于流域 1959—2018 年之间的降水量、径流量及输沙量资料,分析仕望川流域 60 年间的水文要素变化特征,并结合土地利用及 NDVI 数据分析植被变化对仕望川流域水沙变化的影响。本研究可为植被覆盖较好区域继续开展水土保持工作,进行生态环境建设规划提供科学依据。

## 1 研究区概况

仕望川流域位于陕西省延安市境内,发源于陕西黄龙山北麓,在宜川县注入黄河,属于黄河中游的河龙区间。地理坐标 109°54′—110°48′E, 35°52′—36°54′N,流域总面积约 2 400 km<sup>2</sup>。流域控制站为大村水文站,控制流域面积约为 2 141 km<sup>2</sup>,流域多年平均径流量为 6 844.82 万 m<sup>3</sup>,多年平均输沙量为 162.79 万 t,多年平均降水为 546 mm,气候类型属于半干旱半湿润气候。主要地貌类型属于土石山林区,流域主要土壤类型为棉土、褐土等。流域内拥有全国八天然次生林区之一的黄龙山林区,林区植被覆盖率达 90% 以上,该林区属暖温带针阔混交林带,植被以油松、辽东栎次生林为主,主要建群树种有辽东栎、油松等,灌木有黄蔷薇、胡颓子、胡枝子、绣线菊等<sup>[11]</sup>。全流域的林草覆盖率也高达 80% 以上,自身植被条件较好。流域区位图如图 1 所示。



注:左图基于标准地图服务系统下载的标准图号 GS(2022)3124 号的标准地图制作。

图 1 研究区区位图

Fig. 1 Research Area Map

## 2 数据与方法

### 2.1 数据

本文选用仕望川流域控制水文站大村站 1959—2018 年的径流泥沙数据,数据来源于《黄河流域水文年鉴》。长时间序列降水数据来源于国家科技基础条件平台—国家地球系统科学数据中心—黄土高原分中心 (<http://loess.geodata.cn>),时间跨度为 1959 年 1 月—2018 年 12 月,空间分辨率为  $0.008\ 3^\circ$ (约 1 km)。该数据基于 CRU 发布的全球 55 km 气候数据集,经过 PENG 等<sup>[12]</sup>通过 Delta 空间降尺度方法生成,通过与大村水文站 1959 年以来的年降水数据进行对比,该数据集结果可信。1980 年、1990 年、2000 年、2010 年、2015 年共五期土地利用遥感监测数据集(CNLUCC)来源于资源环境科学数据注册与出版系统(<http://www.resdc.cn/>),空间分辨率 1 km。NDVI 数据使用 FAN 等<sup>[13]</sup>利用 ESTARFM 建立的黄土高原 1985—1999 年分辨率为 250 m 的 NDVI 数据;以及 2000—2018 年 MODIS NDVI 数据,空间分辨率均为 250 m,采用 MVC 最大合成法得到每年的生长季 NDVI。文献中提到,经过对两组数据图像以及散射相关性详细对比分析,二者相关系数  $R^2$  达到 0.93( $p < 0.01$ ),因此,两组数据可以合并使用。

### 2.2 方法

2.2.1 趋势检验 Mann-Kendall 检验法<sup>[14-15]</sup>(简称 M-K),是一种常被应用于水文、气象研究中的非参数检验法<sup>[16]</sup>,利用 M-K 法检验长时间序列的趋势性时,得出  $Z$  若为正值,则说明该序列有增加趋势,反之, $Z$  为负值则说明该序列有减小趋势,当  $Z$  值的绝对值大于 1.96,2.58 时,说明统计值分别通过了 95% 和 99% 的显著性检验。

2.2.2 突变检验 Pettitt 突变检验法<sup>[17]</sup>可以在趋势性存在的前提下检验在长时间序列中的突变现象,该方法能够判断出突变点的数量和位置,还可以判断这些突变点是否在统计意义上显著<sup>[18]</sup>。

## 3 结果与分析

### 3.1 降水量、径流量、输沙量基本特征变化

仕望川流域 1959—2018 年的年降水量变化见图 2,在 1959—2018 年均呈波动状态,但没有明显的变化趋势。60 年间多年平均降水量约为 546.4 mm,变差系数 0.24。最大年降水量为 889.6 mm(1979 年),最小年降水量为 315.8 mm(1962 年)。

流域的径流量与输沙量变化特征如表 1 与图 3 所示,径流量与输沙量在 1959—2018 年均呈波动下降趋势,但输沙量的波动幅度明显大于径流量的波动幅度。在 1959—2018 年,仕望川流域的多年平均流量为 6 717.11 万  $\text{m}^3$ ,最大年径流量为 2.19 亿  $\text{m}^3$ (1964 年),最小年径流量为 1 925.01 万  $\text{m}^3$ (2001 年),最大径年流量为多年平均流量的 3.26 倍,变差系数  $C_v$  值为 0.57,说明仕望川流域径流量年际变化较大;仕望川流域的输沙量变化趋势虽与径流量一致,但其波动程度更大,年平均输沙量为 162.78 万 t,最大年输沙量为 1 020 万 t(1971 年),最小年输沙量为 0(2008 年、2015 年),变差系数高达 1.39,输沙量年际变化非常大。

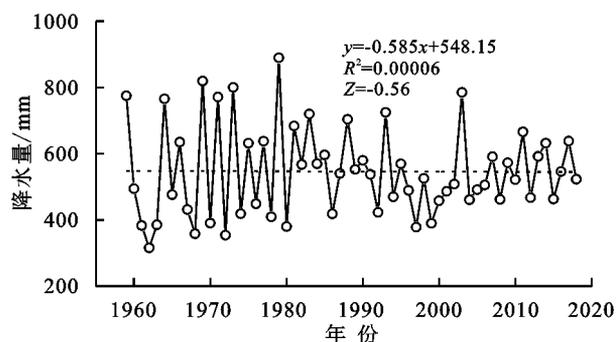


图 2 仕望川流域降水量年际变化

Fig. 2 Inter annual variation of precipitation in the Shiwangchuan River Basin

表 1 仕望川流域径流量、输沙量变化特征

Table 1 Characteristics of changes in runoff and sediment transport in the Shiwangchuan River Basin

年份	年径流量		年输沙量	
	平均值/万 $\text{m}^3$	变差系数 $C_v$	平均值/万 t	变差系数 $C_v$
1959—1969	10080.11	0.40	377.91	0.62
1970—1979	7785.58	0.43	318.30	0.89
1980—1989	8307.63	0.45	124.64	1.25
1990—1999	4143.82	0.32	55.05	0.85
2000—2009	4499.26	0.61	11.88	1.21
2010—2018	5827.25	0.57	56.83	2.31
多年平均	6844.82	0.57	162.79	1.39

### 3.2 降水量、径流量、输沙量变化趋势及变点分析

利用 M-K 检验法对仕望川流域 1959—2018 年降水量进行趋势检验,得出  $Z$  值为 0.56,说明降水量在 60 年间没有明显的增加或减少趋势;从径流年际变化图以及线性拟合的曲线可以看出,仕望川流域 60 年间的径流量有下降趋势。

通过 M-K 趋势检验,对 1959—2018 年大村站的径流量进行分析,得到  $Z$  值为 -4.46,通过了显著性

水平为 99% 的检验,即流域内的径流量在 60 年间有显著减少的趋势。而从泥沙量的年际变化图以及拟合的线性关系可以看出,在 20 世纪 90 年代之前,仕望川流域的泥沙波动幅度非常大,但整体呈下降的趋势。通过 M-K 趋势检验对大村站 1959—2018 年的泥沙量进行检验,得到 Z 值为 -6.58,说明流域内的输沙量在 60 年间有显著减少的趋势,并且通过了置

信度为 99% 的显著性检验。

利用 Pettitt 法突变分析大村站的径流量与泥沙量突变结果如图 4 所示,得出 1988 年为径流突变点,且通过置信度为 99% 的显著性检验。而大村站的泥沙量在 1983 年发生突变,并且通过了置信度为 99% 的显著性检验。仕望川流域的径流与泥沙均在 20 世纪 80 年代发生了突变。

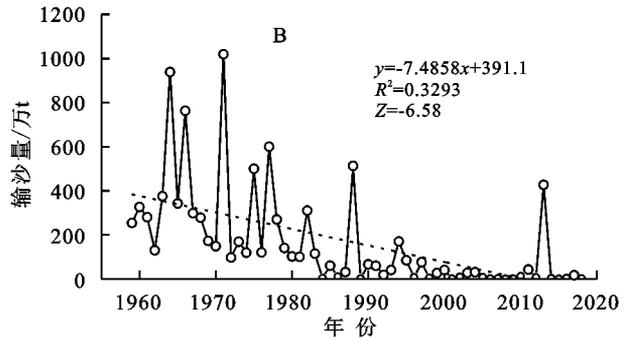
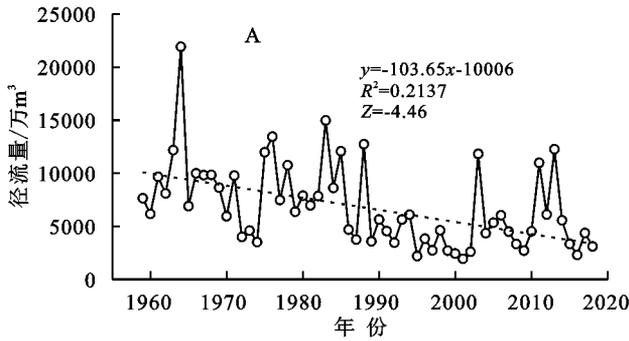


图 3 仕望川流域径流量与输沙量年际变化

Fig. 3 Annual variation of runoff and sediment transport in the Shiwangchuan Basin

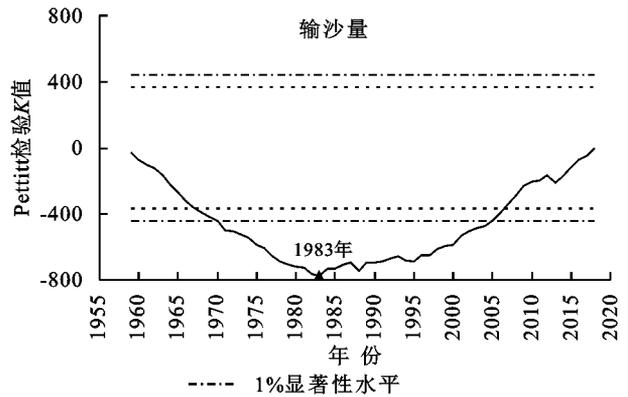
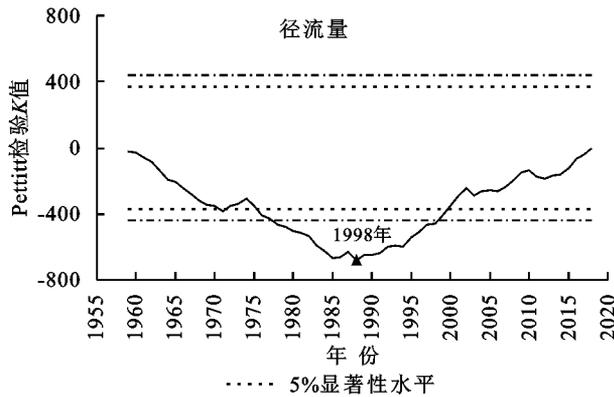


图 4 径流量与输沙量 Pettitt 突变检验

Fig. 4 Runoff and sediment transport Pettitt mutation test

### 3.3 土地利用结构变化

仕望川流域 1980 年、1990 年、2000 年、2010 年和 2015 年的不同土地利用类型占地面积及比例如表 2 所示。结果表明,仕望川流域的主要土地利用类型为耕地、林地与草地,三者占比 99% 以上。其中,林地与草地面积分布最广,在五期土地利用数据中,林草地总面积分别为 2 002 km<sup>2</sup>, 1 996 km<sup>2</sup>, 1 955 km<sup>2</sup>, 1 977 km<sup>2</sup>, 1 976 km<sup>2</sup>, 占仕望川流域总面积的 84.29%, 84.66%, 82.32%, 83.24% 和 83.20%。耕地的分布面积小于林地和草地,在 2000 年后有所减小,但减小幅度不大。五期土地利用数据中,耕地面积分别为 370 km<sup>2</sup>, 359 km<sup>2</sup>, 415 km<sup>2</sup>, 392 km<sup>2</sup>, 392 km<sup>2</sup>, 分别占仕望川流域总面积的 15.58%, 15.22%, 17.47%, 16.51% 和 16.51%。流域的土地利用结构在 35 a 内没有明显的变化趋势。

### 3.4 生长季 NDVI 变化特征

图 5 为仕望川流域生长季 NDVI 年际变化图,可以看出,1985—2018 年仕望川流域植被的 NDVI 值总体上呈上升趋势,且变化趋势可以明显地分为两个时期。1985—2018 年期间,仕望川流域内的 NDVI 值波动较大,在 0.736 2~0.803 1,有轻微增加的趋势,但 1998—2000 年的 NDVI 有明显的减少;2000 年以后,流域内的 NDVI 值表现为增加趋势,范围为 0.680 3~0.850 2,最大值出现在 2012 年。

利用 M-K 检验法分别对仕望川流域 1985—1999 年以及 2000—2018 年生长季 NDVI 值进行趋势检验,得出 Z 值分别为 0.49, 5.11, 说明 1985—1999 年生长季 NDVI 值增加的趋势不明显;2000—2018 年生长季 NDVI 值有明显的增加趋势,且通过置信度为 99% 的显著性检验。

表 2 仕望川流域土地利用类型变化

Table 2 Changes in land use types in the Shiwangchuan River Basin

土地利用类型	1980 年		1990 年		2000 年		2010 年		2015 年	
	面积/km <sup>2</sup>	比例/%								
耕地	370	15.58	359	15.22	415	17.47	392	16.51	392	16.51
林地	990	41.68	995	42.20	992	41.77	1008	42.44	1007	42.40
草地	1012	42.61	1001	42.46	963	40.55	969	40.80	969	40.80
水域	2	0.08	2	0.08	2	0.08	2	0.08	2	0.08
建设用地	1	0.04	1	0.04	3	0.13	4	0.17	5	0.21
未利用地	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
总计	2375	100	2358	100	2375	100	2375	100	2375	100

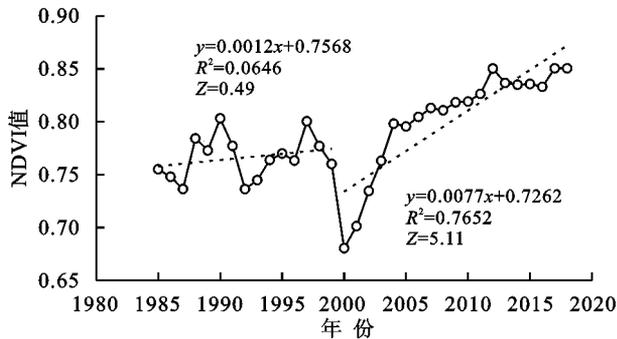


图 5 仕望川流域生长季 NDVI 年际变化

Fig. 5 Inter annual variation of NDVI during the growing season in the Shiwangchuan River Basin

## 4 讨论

植被建设对于调控水沙具有明显作用,植被状况的改变将直接影响流域内的水沙变化<sup>[19]</sup>,生长季 NDVI 的变化能够很好地反映流域内的植被变化情况,而植被生长季也是径流量与输沙量最大的季节。通过对生长季 NDVI 变化特征的分析,以 2000 年为界将仕望川流域植被变化分为两个阶段,1999 年以前,仕望川流域生长季 NDVI 值没有显著的变化,结合土地利用情况的变化,流域内的植被状况没有太大变化,且降水量也无明显的变化趋势,但流域径流量与泥沙量仍持续减少,根据徐家隆<sup>[20]</sup>研究可知,流域内各种水土保持治理措施对径流量与泥沙量减少的贡献率分别为 59% 与 70.5%,是这一阶段水沙变化的主要原因。同时,根据黄河水利委员会的资料,截至 1996 年,仕望川水土保持措施总面积超过 20 km<sup>2</sup><sup>[21]</sup>。这一时期流域内水沙变化的主要原因为各种水土保持措施的实施。

1999—2000 年,NDVI 值有明显的下降,这是由于 1999—2001 年降水明显偏少,以及退耕还林草初期植被栽植和工程措施导致 NDVI 值明显下降<sup>[22]</sup>。自 2000 年以来,流域内生长季 NDVI 值有明显的上升趋势,这一趋势与黄土高原地区的研究结果一致<sup>[23]</sup>,且在后期显著高于前期 NDVI 值。这是由于

降水量有所回升以及大规模退耕还林措施的实施<sup>[24]</sup>。流域所在的宜川县与黄龙县政府积极响应国家政策,在植被较少的宜川县实施了晋陕峡谷绿化工程 5 期,完成石坑客土造林 20 km<sup>2</sup>,普通人工造林 36 km<sup>2</sup>,有效改善了流域沿岸生态环境。截至 2020 年,宜川县累计完成各类营造林 1 000 km<sup>2</sup>,实施水土保持治理面积 1 519.34 km<sup>2</sup>。而仕望川流域的植被主要集中于黄龙县北部,黄龙县对林区制定了以生态清洁小流域和封山育林为主的政策,防止林草植被的破坏,对黄龙山林区进行预防监督和管理措施,并根据林地类型和立地条件进行疏林补植、促进林下植被生长的工作。这些措施有效的保护了仕望川的原有植被,并进一步提升了植被质量。虽然土地利用情况变化不大,植被覆盖度没有明显提升,但植被质量的提升使得 NDVI 指数显著提高,对于流域水沙维持在较低水平具有较大作用。

2013 年 7 月,延安地区出现了极端连续降雨天气,平均降水量达到 419 mm,是多年平均值的 3.8 倍,是自有气象观测记录以来降水量最大的月份<sup>[25]</sup>。根据大村水文站的降水数据,7 月累计降水量也超过 400 mm,同样打破了历史记录,这导致仕望川流域的径流量和输沙量大幅增加,径流量达到 1.227 亿 m<sup>3</sup>,输沙量高达 427 万 t,但远低于历史最高值,且径流量与输沙量在次年迅速恢复到较低的水平,这同样说明流域多年的植被建设与各种水土保持措施取得了显著成效。

## 5 结论

(1) 1959—2018 年,仕望川流域的降水量无明显变化趋势,流域内径流量和泥沙量呈显著性减少的趋势,径流和泥沙的突变点均在 20 世纪 80 年代,分别为 1988 年和 1983 年。

(2) 利用仕望川流域内土地利用变化情况进行分析,得到仕望川流域的植被覆盖度自 20 世纪 80 年代以来基本不变。

(3) 2000 年以前,流域生长季 NDVI 没有明显变化

趋势,流域内水沙减少的主要原因为各种水土保持措施的实施;进入 21 世纪后,流域的生长季 NDVI 值有显著提升,流域内一系列的植被恢复与保护措施有效提升了植被质量,使流域内径流量与输沙量进一步减少。

#### 参考文献 (References):

- [1] 穆兴民,贾昊,高鹏,等.水土保持生态建设对黄河中游水文情势影响研究[J].人民黄河,2021,43(10):44-50.  
Mu X M, Jia H, Gao P, et al. Effects of soil and water conservation ecological construction projects on hydrological regime changes in the middle reaches of the Yellow River[J]. Yellow River, 2021,43(10):44-50.
- [2] Das A K, Sah R K, Hazarika N. Bankline change and the facets of riverine hazards in the floodplain of Subansiri-Ranganadi Doab, Brahmaputra Valley, India [J]. Natural Hazards, 2012,64(2):1015-1028.
- [3] 王蕊,姚治君,刘兆飞.西北干旱区气候和土地利用变化对水沙运移的影响:以小南川流域为例[J].应用生态学报,2018,29(9):2879-2889.  
Wang R, Yao Z J, Liu Z F. Impacts of climate and land use change on water and sediment load in the Northwest arid region, China: With Xiaonanchuan River Basin as a case[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2018,29(9):2879-2889.
- [4] Zuazo V H, Pleguezuelo C R R. Soil-erosion and runoff prevention by plant covers. A review[J]. Agronomy for Sustainable Development, 2008,28(1):65-86.
- [5] 朱冰冰,李占斌,李鹏,等.草本植被覆盖对坡面降雨径流侵蚀影响的试验研究[J].土壤学报,2010,47(3):401-407.  
Zhu B B, Li Z B, Li P, et al. Effect of grass coverage on sediment yield of rain on slope[J]. Acta Pedologica Sinica, 2010,47(3):401-407.
- [6] 赵炯昌,卫伟,段兴武.模拟降雨下黄土坡面水沙过程对 3 种灌草植被垂直结构变化的响应[J].生态学报,2021,41(21):8602-8611.  
Zhao J C, Wei W, Duan X W. Response of the runoff and sediment process on loess slope to the vertical structure changes of three shrub and grass vegetations under simulated rainfall[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021,41(21):8602-8611.
- [7] Zhang J J, Gao G Y, Fu B J, 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.
- [8] 赵跃中,穆兴民,严宝文,等.延河流域植被恢复对径流泥沙的影响[J].泥沙研究,2014(4):67-73.  
Zhao Y Z, Mu X M, Yan B W, et al. Influence of vegetation restoration on runoff and sediment of Yanhe Basin [J]. Journal of Sediment Research, 2014(4):67-73.
- [9] 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.
- [10] 张建梅,马燮铤,李艳忠.1980—2016 年黄河中游河龙区间植被动态及其对径流的影响[J].南水北调与水利科技(中英文),2020,18(3):91-109.  
Zhang J M, Ma X Y, Li Y Z. Vegetation dynamics and its impact on runoff in the Hekouzhen-Longmen region of the middle reaches in the Yellow River from 1980—2016[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2020,18(3):91-109.
- [11] 王乃江,张文辉,同金霞,等.黄土高原蔡家川林场森林质量评价[J].林业科学,2010,46(9):7-13.  
Wang N J, Zhang W H, Tong J X, et al. Forest quality evaluation in Caijiachuan state forest station on Loess Plateau[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2010,46(9):7-13.
- [12] Peng S, Gang C, Cao Y, et al. Assessment of climate change trends over the Loess Plateau in China from 1901 to 2100[J]. International Journal of Climatology, 2018,38(5):2250-2264.
- [13] Fan X Y, Gao P, Tian B Q, et al. Spatio-temporal patterns of NDVI and its influencing factors based on the ESTARFM in the Loess Plateau of China[J]. Remote Sensing, 2023,15(10):2553.
- [14] Mann H B. Nonparametric tests against trend[J]. Econometrica, 1945,13(3):245-259.
- [15] Kendall M G. Rank correlation methods[J]. British Journal of Psychology, 1990,25(1):86-91.
- [16] 田小靖,赵广举,穆兴民,等.水文序列突变点识别方法比较研究[J].泥沙研究,2019,44(2):33-40.  
Tian X J, Zhao G J, Mu X M, et al. Comparison study on hydrological time series change-point testing methods[J]. Journal of Sediment Research, 2019,44(2):33-40.
- [17] Pettitt A N. A non-parametric approach to the change-point problem[J]. Applied Statistics, 1979,28(2):126-135.
- [18] 李占玲,徐宗学.近 50 年来黑河流域气温和降水量突变特征分析[J].资源科学,2011,33(10):1877-1882.  
Li Z L, Xu Z X. Detection of change points in temperature and precipitation time series in the Heihe River Basin over the past 50 years[J]. Resources Science, 2011,33(10):1877-1882.
- [19] 苗连朋,温仲明,张莉.植被变化与水沙响应关系研究:以延河流域为例[J].干旱区资源与环境,2015,29(5):75-81.  
Miao L P, Wen Z M, Zhang L. Study on the relation-

- ship between vegetation change and runoff-sediment: A case of the Yanhe Basin[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2015, 29(5): 75-81.
- [20] 徐家隆. 汾川河仕望河流域水土保持措施的减水减沙效益研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2014.
- Xu J L. Study on water and sediment reduction benefits of soil and water conservation measures in Shiwang River Basin of Fenchuan River[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2014.
- [21] 付艳玲. 近 50 年来黄河中游典型流域水沙变化趋势分析[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2011.
- Fu Y L. Trend of Streamflow, sediment load and their dynamic relation at watershed in the middle reaches of Yellow River during the past five decades[D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2011.
- [22] 信忠保, 许炯心, 郑伟. 气候变化和人类活动对黄土高原植被覆盖变化的影响[J]. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2007, 37(11): 1504-1514.
- Xin Z B, Xu J X, Zheng W. Effects of climate change and human activities on vegetation cover change in Loess Plateau[J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2007, 37(11): 1504-1514.
- [23] 张翀, 任志远. 黄土高原地区植被覆盖变化的时空差异及未来趋势[J]. *资源科学*, 2011, 33(11): 2143-2149.
- Zhang C, Ren Z Y. Temporal and spatial differences and its trends in vegetation cover change over the Loess Plateau[J]. *Resources Science*, 2011, 33(11): 2143-2149.
- [24] 修丽娜, 颜长珍, 钱大文, 等. 生态工程背景下黄土高原植被变化时空特征及其驱动力[J]. *水土保持通报*, 2019, 39(4): 214-221, 228, 2.
- Xiu L N, Yan C Z, Qian D W, et al. Analysis of spatial-temporal change and driving forces of vegetation in Loess Plateau under background of ecological engineering[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2019, 39(4): 214-221, 228, 2.
- [25] 雷向杰, 李芳, 赵晓萌. 延安市 2013 年 7 月极端连续降水致灾评估分析[J]. *暴雨灾害*, 2016, 35(6): 521-528.
- Lei X J, Li F, Zhao X M. Evaluation and analysis of extreme continuous precipitation induced disasters of Yan'an city in 2013 July[J]. *Torrential Rain and Disasters*, 2016, 35(6): 521-528.

(上接第 41 页)

- [27] Ang B W, Liu N. Handling zero values in the logarithmic mean Divisia index decomposition approach[J]. *Energy Policy*, 2007, 35(1): 238-246.
- [28] 陈浩, 张晓萍, 权伟, 等. 退耕还林前后北洛河上游流域土壤侵蚀时空变化分析[J]. *人民黄河*, 2023, 45(6): 111-116, 127.
- Chen H, Zhang X P, Quan W, et al. Spatial and temporal changes of soil erosion in the upper reaches of Beiluo River Watershed Before and After the Grain for Green Project[J]. *Yellow River*, 2023, 45(6): 111-116, 127.
- [29] 赵文启, 刘宇, 罗明良, 等. 黄土高原小流域植被恢复的土壤侵蚀效应评估[J]. *水土保持学报*, 2016, 30(5): 89-94.
- Zhao W Q, Liu Y, Luo M L, et al. Effect of revegetation on soil erosion in small watershed of the Loess Plateau[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2016, 30(5): 89-94.
- [30] 杨波, 王全九, 郭思琪. 1988—2013 年陕北风沙区秃尾河流域土壤侵蚀时空变化特征[J]. *中国水土保持科学*, 2018, 16(4): 56-65.
- Yang B, Wang Q J, Guo S Q. Characteristic of temporal and spatial variation of soil erosion in Tuwei River watershed from 1988 to 2013[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2018, 16(4): 56-65.
- [31] 杨强, 何立恒, 鲍其胜. 延安市 1980—2010 年气温和降水的年际变化特征[J]. *南京林业大学学报: 自然科学版*, 2014, 38(6): 179-183.
- Yang Q, He L H, Bao Q S. Characteristics of annual change in temperature and precipitation in Yan'an region during 1980-2010[J]. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition)*, 2014, 38(6): 179-183.
- [32] 李斌, 解建仓, 胡彦华, 等. 1951—2013 年延安降水特征与典型暴雨分析[J]. *干旱区资源与环境*, 2015, 29(12): 190-197.
- Li B, Xie J C, Hu Y H, et al. Precipitation characteristics and typical rainstorm in Yan'an during 1951—2013[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2015, 29(12): 190-197.
- [33] 聂桐, 董国涛, 蒋晓辉, 等. 延安地区植被覆盖度时空变化及驱动力[J]. *水土保持研究*, 2021, 28(5): 340-346.
- Nie T, Dong G T, Jiang X H, et al. Spatiotemporal variation and driving forces of vegetation coverage in Yan'an area[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2021, 28(5): 340-346.