

引用格式:张珮萱,田鹏,穆兴民,赵广举,张雅童. 中国南北过渡带典型流域输沙变化及其驱动因素[J]. 山地学报, 2023, 41(2): 169-179.
ZHANG Peixuan, TIAN Peng, MU Xingmin, ZHAO Guangju, ZHANG Yatong. Sediment load variations and the driving forces in the typical drainage basins of the north-south transitional zone of China [J]. Mountain Research, 2023, 41(2): 169-179.

中国南北过渡带典型流域输沙变化及其驱动因素

张珮萱^{1a}, 田鹏^{1b,2*}, 穆兴民^{1a}, 赵广举², 张雅童^{1a}

(1. 西北农林科技大学 a. 水土保持研究所; b. 资源环境学院, 陕西 杨凌 712100;
2. 南京水利科学研究院 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 南京 210029)

摘要: 南北过渡带是中国重要的地理-生态过渡带。南北过渡带主要河流的径流量和输沙量发生显著变化, 直接影响了流域生态治理、水资源开发利用。前期研究多集中于南北过渡带的某一流域, 针对整个区域河流输沙量时空变化特征及驱动因素仍缺乏较系统深入的研究。本文基于 1961—2016 年渭河、汉江和嘉陵江三个典型流域 56 个代表性水文站实测输沙资料, 采用 Mann-Kendall 趋势检验和 Pettitt 突变检验分析流域输沙时空变化特征, 结合双累积曲线法定量评估输沙变化影响因素。研究结果表明: (1) 三个典型流域内各水文站年输沙量减小趋势均达到极显著水平 ($P < 0.01$), 咸阳、皇庄以及北碚站 2010—2016 年的年均输沙量与 20 世纪 60 年代相比, 减幅超过 84%; (2) 各站输沙序列主要在 20 世纪 60 年代末和 1990 年左右发生突变; (3) 研究区多年平均输沙模数呈现西高东低的空间分布, 且随时间变化整体呈现减小趋势, 主要侵蚀产沙区包括渭河上游、汉江丹江干流沿岸、汉中盆地周边地区、嘉陵江干流中下游及其支流西汉水、白龙江中下游、涪江上游区域; (4) 人类活动是河流输沙量减少的主要驱动因素, 对输沙变化的贡献率均超过 94%; 渭河流域输沙量减少主要受水土保持治理影响, 汉江和嘉陵江流域则与生态工程以及梯级水利工程建设有关。本研究可为南北过渡带不同区域水土流失防治以及流域综合治理提供科学依据。

关键词: 输沙量; 驱动因素; 贡献率; 人类活动; 南北过渡带

中图分类号: P333.4

文献标志码: A

河流水沙是流域气候、植被、地貌和水文等自然条件与人类活动的综合反映。河流水沙变化不仅影响河道演化、河流生态系统与生物地球化学循环, 还会对流域水资源供给和水利工程的运行产生重要影响。近年来, 随着气候变化和人类活动 (如水土保持、生态工程和水利工程等) 的加剧, 中国许多河流的径流量与输沙量变化显著, 直接影响了水利工程规划和水资源开发利用^[1-4]。

南北过渡带是中国重要的地理-生态过渡带, 具

有高度的气候敏感性、环境复杂性和自然地理要素过渡性, 不仅是长江流域和黄河流域的天然界限, 也是南水北调中线工程的主要水源区^[5-6]。研究发现^[7]: 南北过渡带主要河流的径流量和输沙量发生显著变化; 汉江流域受水土保持与大型水利工程影响, 河流水沙急剧减少^[8]; 嘉陵江流域输沙锐减则受降水、水土保持措施、水利工程以及河道采砂等综合影响, 水利工程拦沙和水保持治理的减沙贡献率分别为 30.5% 和 16.3%^[9]。南北过渡带地跨黄

收稿日期 (Received date): 2022-09-01; 改回日期 (Accepted date): 2023-03-21

基金项目 (Foundation item): 国家科技基础资源调查专项 (2017FY100904); 国家自然科学基金 (U2243211)。[National Science and Technology Basic Resource Investigation Program (2017FY100904); National Natural Science Foundation of China (U2243211)]

作者简介 (Biography): 张珮萱 (1998-), 女, 四川成都人, 硕士研究生, 主要研究方向: 土壤侵蚀与水土保持。[ZHANG Peixuan (1998-), female, born in Chengdu, Sichuan province, M. Sc. candidate, research on soil erosion and soil and water conservation] E-mail: peixuanzhang@nwfufu.edu.cn

* 通讯作者 (Corresponding author): 田鹏 (1982-), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向: 土壤侵蚀与水土保持。[TIAN Peng (1982-), female, Ph. D., associate professor, research on soil erosion and soil and water conservation] E-mail: pengtian@nwsuaf.edu.cn

土高原南部与秦巴山区,土壤、地貌和植被等空间差异显著,由此导致各流域土壤侵蚀与河流输沙表现不同特征。已有研究多集中于南北过渡带的某一流域,缺乏对该区域河流输沙变化及其驱动因素的全面对比分析,亦难以识别流域侵蚀产沙热点区域及重点水土流失治理区。因此,开展南北过渡带典型流域输沙时空变化研究,对该区域的水土保持、水利工程建设、河道整治及防洪减灾等方面具有重要的指导意义。

本文选取南北过渡带地区渭河、汉江以及嘉陵江为典型代表流域,基于 1961—2016 年干支流共 56 个水文站点实测输沙数据,采用 Mann-Kendall 趋势检验、Pettitt 突变检验以及双累积曲线等方法,探究典型流域输沙时空变化特征,定量评估气候变化和人类活动对各流域输沙变化的影响,以期为区域水土流失防治和流域综合治理提供参考。

1 研究区概况

南北过渡带位于我国中部($102^{\circ}24' \sim 114^{\circ}06' E, 31^{\circ}12' \sim 35^{\circ}30' N$),总面积约为 $2.32 \times 10^5 \text{ km}^2$,地貌类型复杂多样,主要包括秦岭山地、大巴山山地以及汉江河谷盆地,其中山地丘陵为主要地形。区域内暖温带和亚热带气候并存且差异较大,以秦岭南坡 800 mm 等高线为界,北部为暖温带半湿润气候,南部则为亚热带湿润气候,年均降水量 400 ~ 1300 mm^[6]。本文选取该地区渭河、汉江以及嘉陵江三个典型流域作为研究区,其中渭河南岸、汉江上

游、丹江流域以及嘉陵江上游主要位于过渡带区域。

渭河作为黄河流域第一大支流,其干流长为 818 km,南岸支流多发源于秦岭北麓,河流湍急,水量丰沛;北岸支流流经黄土丘陵沟壑区,含沙量大,区域输沙模数 $5000 \sim 15\,000 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2}$ ^[10]。咸阳站为泾河汇入渭河干流前的控制站,控制面积 $4.68 \times 10^4 \text{ km}^2$,占全流域的 43.4%。汉江是长江流域的最大支流,干流长度 1577 km,包括旬河、丹江、唐河以及白河等支流,构成叶脉状水系。流域多年平均输沙量 $2.82 \times 10^7 \text{ t}$,输沙年际和年内变化较大。皇庄站位于流域中下游交界处,控制面积为 $1.42 \times 10^5 \text{ km}^2$,占全流域的 89.31%。嘉陵江是长江流域的第二大支流,干流长度 1345 km,上游流经狭窄河谷地带,中游流经丘陵地区,下游主要经过川中盆地,其干流、涪江和渠江等水系于重庆合川区汇合并呈扇形分布。该流域是长江上游的重点产沙区,流域面积仅占上游 15.5%,但来沙量占比高达 30.5%,多年平均输沙量 $9.12 \times 10^7 \text{ t}$ ^[11]。北碚站位于干流下游,集水面积为 $1.56 \times 10^5 \text{ km}^2$ 。本文研究区包括咸阳站以上渭河干流区域、皇庄站以上汉江区域以及北碚站以上的嘉陵江区域,流域水系以及水文站分布见图 1。

2 数据来源及研究方法

2.1 数据收集与整理

本研究收集整理了三个典型流域具有代表性的 56 个水文站实测年输沙量数据,其中,林家村、魏家

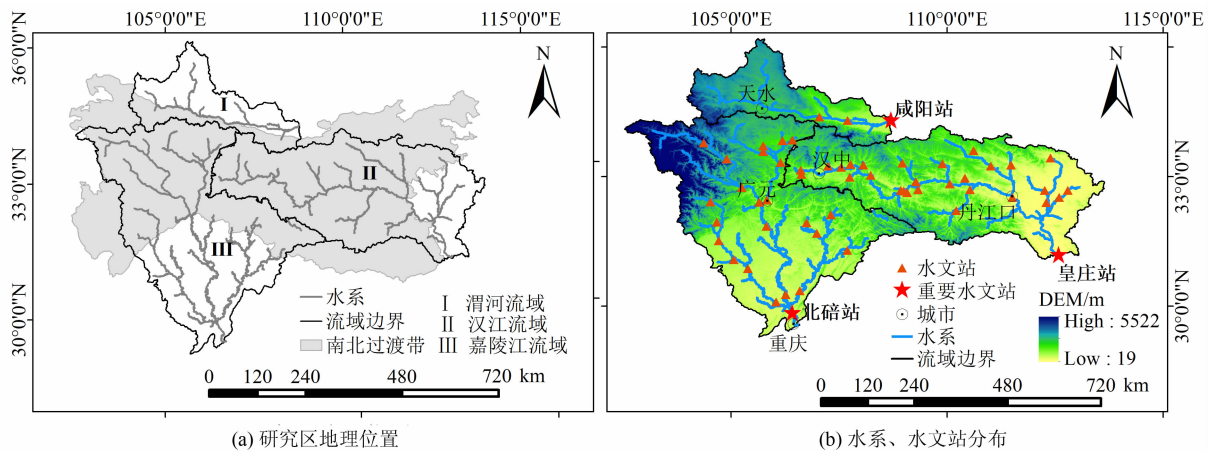


图 1 研究区示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the study area

注:底图审图号 GS(2020)4626 号,下载地址: <http://bzdt.ch.mnr.gov.cn/>

堡、咸阳等 9 个站点(表 1)数据年份为 1961—2016 年,其余 47 个站点数据年份为 1961—1987 年和 2007—2016 年;整理了研究区内气象站的日降雨资料,利用算术平均法计算流域的面平均雨量。输沙资料摘录自《黄河流域水文年鉴》和《长江流域水文年鉴》,降雨资料来源于国家气象科学数据中心(<http://data.cma.cn>)。DEM 数据空间分辨率为 90 m×90 m,来源于国家地球系统科学数据中心(<http://www.geodata.cn>)。

依据水文站的分布情况及其输沙数据的完整性,本文将研究区划分为 56 个集水区间(图 2),基于 1961—1987 年和 2007—2016 年的输沙数据序列,计算各集水区间的输沙模数(即某一时间内区域来沙量与对应集水面积之比),对比分析三个流域不同年代的侵蚀产沙特征。

2.2 研究方法

本研究采用线性趋势法、Mann-Kendall 趋势检验法以及 Pettitt 突变检验法分析三条典型流域输沙量变化特征,采用双累积曲线法定量评估流域输沙变化对降水与人类活动的响应。

(1) Mann-Kendall 趋势检验法

Mann-Kendall 趋势检验法(以下简称 M-K 趋势

检验)可用于检验水文要素序列的变化趋势及显著性水平,要求时间序列随机独立,概率分布等同^[12]。

表 1 典型流域 1961—2016 年各站输沙量 M-K 趋势检验

Tab. 1 M-K trend tests of sediment load in the typical drainage basins from 1961 to 2016

流域	水文站	控制面积/ (10 ⁴ km ²)	年均变化率/ (10 ⁸ t)	Z 值
渭河	林家村	3.07	-0.0378	-6.87 **
	魏家堡	3.70	-0.0387	-6.52 **
	咸阳	4.68	-0.0387	-6.64 **
汉江	白河	5.91	-0.0114	-6.37 **
	皇庄	14.21	-0.0168	-6.95 **
嘉陵江	罗渡溪	3.81	-0.0045	-3.43 **
	小河坝	2.89	-0.0037	-4.76 **
	武胜	7.97	-0.0180	-5.92 **
	北碚	15.67	-0.0346	-6.58 **

注: * 表示序列趋势通过 95% 的显著性检验, ** 表示通过 99% 的显著性检验。

对于时间序列 $X = (x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$, 其统计量为:

$$S = \sum_{i=2}^n \sum_{j=1}^{i-1} \text{sgn}(x_i - x_j)$$

(1)

式中, $\text{sgn}(x_i - x_j)$ 为符号函数; n 为时间序列长度;

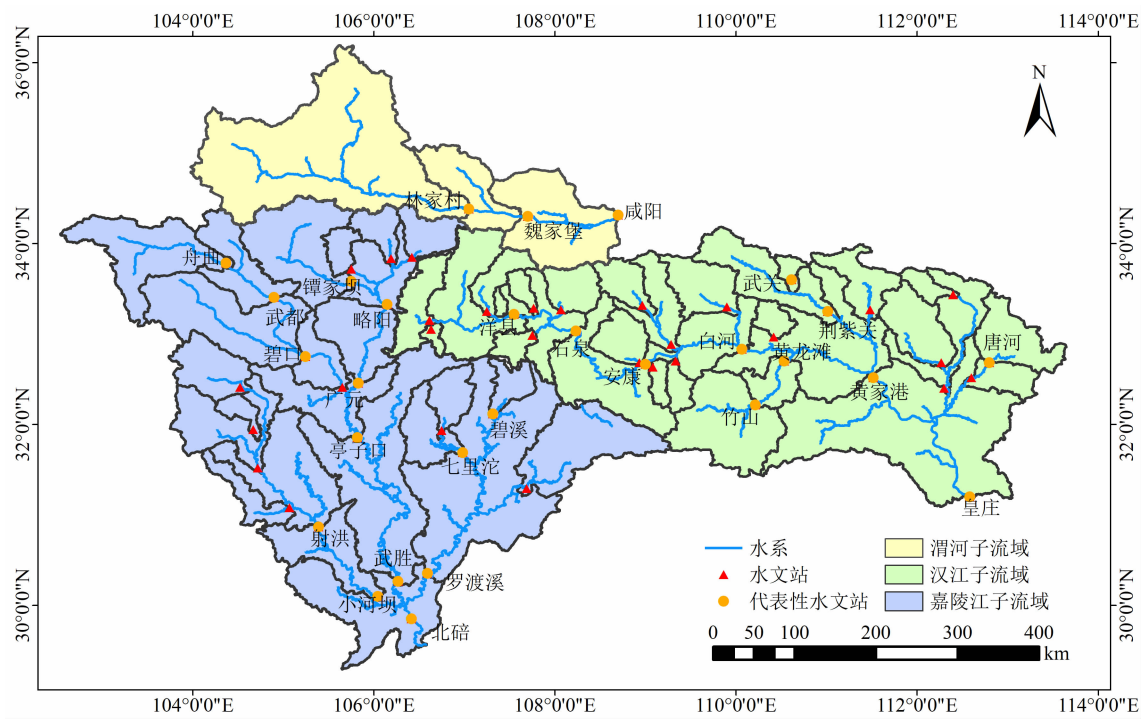


图 2 典型流域子流域划分

Fig. 2 Distribution of the sub-watersheds within the typical drainage basins

x_i 和 x_j 分别为序列上第 i 年和第 j 年的数据值。当 $x_i - x_j$ 小于、等于或者大于 0 时, $\text{sgn}(x_i - x_j)$ 取值分别为 -1、0 和 1, 则 M-K 趋势检验的统计结果为:

$$Z = \begin{cases} \frac{(S-1)}{\sqrt{n(n-1)(2n+5)/18}} & (S > 0) \\ 0 & (S = 0) \\ \frac{(S+1)}{\sqrt{n(n-1)(2n+5)/18}} & (S < 0) \end{cases} \quad (2)$$

在给定的置信水平下, 若 Z 为正值则表明序列呈现增加趋势, 若为负值则呈现减少趋势。若 $|Z|$ 大于等于 1.28、1.64、2.32 时, 表示序列趋势分别通过 90%、95%、99% 的显著检验。

(2) Pettitt 突变检验法

Pettitt 突变检验法以水文要素序列发生趋势性变化为前提, 依据序列均值变化规律判断其发生突变的具体时间, 检验结果可能得到多个突变点, 最终需要依据实际情况及具体原因确定最佳突变点^[12]。对于时间序列, 构造统计量^[13]为:

$$U_{t,n} = U_{t-1,n} + \sum_{j=1}^n \text{sgn}(x_i - x_j) \quad (3)$$

式中, j 和 t 分别为 $2, \dots, n$ 。同理, 当 $x_i - x_j$ 小于、等于或者大于 0 时, $\text{sgn}(x_i - x_j)$ 分别取值为 -1、0 和 1。

根据统计量 U 可计算得到以下关系式, 并判断得出时间序列的突变时间:

$$K_{t,n} = \max |U_{t,n}| \quad (1 \leq t \leq n) \quad (4)$$

(3) 双累积曲线法

双累积曲线法常用于检验水文要素一致性及其演变趋势^[14]。其中, 年降水量-年输沙量双累积曲线可用于研究人类活动引起河流输沙变化的突变时间和趋势性强度, 若累积曲线的斜率发生明显偏离,

则说明人类活动显著影响输沙量变化, 偏离点对应年份即为突变年份, 斜率偏离程度越高, 表明人类活动干扰程度越大。

3 结果与分析

3.1 输沙量时间变化特征

3.1.1 输沙量年际变化趋势

分析三个流域出口控制水文站 1961—2016 年输沙序列的线性变化趋势, 结果如图 3 所示。咸阳、皇庄以及北碚站 1961—2016 年实测输沙量均呈减小趋势, 多年平均输沙量分别为 8.88×10^7 t、 2.82×10^7 t 和 9.12×10^7 t。对比不同时段平均输沙量(图 4)可知, 1961—1969 年咸阳、皇庄和北碚站年平均输沙量分别为 2.00×10^8 t、 9.92×10^7 t 和 1.88×10^8 t, 而 2010—2016 年间 3 个站点年平均输沙量分别为 1.35×10^7 t、 3.81×10^6 t 和 2.99×10^7 t, 减幅由大到小分别为皇庄站(96.15%)、咸阳站(93.27%)、北碚站(84.14%), 其中皇庄站和北碚站输沙量分别在 1970 s 和 1990 s 锐减, 减幅分别为 71.52% 和 65.69%。输沙量锐减差异主要与各流域水土保持治理和水利工程建设等人类活动实施有关。

根据流域内 9 个主要水文站 1961—2016 年输沙序列的 M-K 趋势检验结果(表 1)可知: 各水文站输沙量锐减趋势均达到极显著水平($P < 0.01$)。汉江皇庄站年输沙量减少趋势最显著(Z 值为 -6.95), 其次为渭河林家村站(Z 值为 -6.87), 嘉陵江干流武胜和北碚站年输沙量减少趋势较支流罗渡溪和小河坝站更为明显。

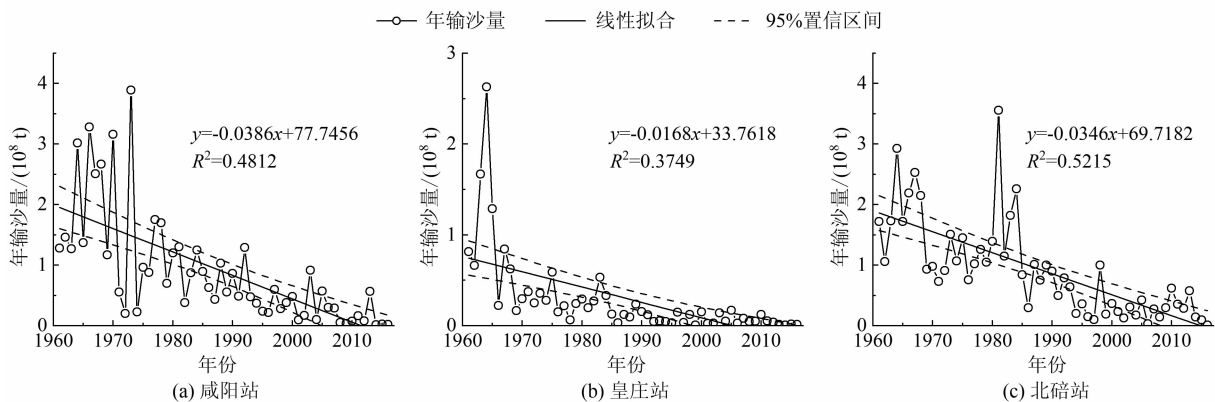


图 3 典型流域 1961—2016 年三站输沙量线性变化趋势分析

Fig. 3 Linear trend analysis of annual sediment load in the typical drainage basins from 1961 to 2016

3.1.2 输沙量突变特征

采用 Pettitt 突变检验法分析 3 个干流水文站 1961—2016 年输沙序列的突变特征(图 5)可知,各站年输沙量突变年份存在差异。咸阳站年输沙量在 1970 年和 1992 年发生突变,皇庄站为 1968 年和 1984 年,北碚站为 1968 年和 1990 年,检验结果达到了 95% 的置信水平。

根据各站突变分析结果可将突变前后时间段划分为基准期和变化期,对比分析不同阶段三个典型流域输沙变化特征(表 2)。结果显示,各站点年平均输沙量均在变化期显著减少。与基准期相比,咸阳站变化期输沙量分别减少了 52.70% 和 87.20%;皇庄站变化期输沙量分别减少 73.64% 和 93.10%,变化期 I (1969—1984 年)输沙量变化主要受 1967 年丹江口水库蓄水影响;北碚站变化期输沙量分别减少 39.57% 和 83.89%,变化期 II (1991—2016 年)输沙量减少主要与 1989 年嘉陵江流域推行“长治”工程有关。各站点输沙数据的极值比和变差系

数也发生明显变化,咸阳、皇庄以及北碚站的极值比分别由基准期的 2.8、11.79 和 2.76 升高至变化期 II 的 65.29、33.71 和 93.46,同时三站年输沙量变差系数在变化期均呈现增大趋势,表明流域输沙量年际变化波动加剧。

表 2 典型流域不同阶段输沙量变化特征分析

Tab.2 Variation characteristics of sediment load in different periods in the typical drainage basins

水文 站点	时段	年平均输沙 量/(10 ⁸ t)	变化率/%	极值比	变差 系数
咸阳站	1961—1970 年	2.12	—	2.80	0.42
	1971—1992 年	1.00	52.70	19.45	0.77
	1993—2016 年	0.27	87.20	65.29	0.86
皇庄站	1961—1968 年	1.10	—	11.79	0.69
	1969—1984 年	0.29	73.64	9.46	0.46
	1985—2016 年	0.08	93.10	33.71	0.78
北碚站	1961—1968 年	2.00	—	2.76	0.29
	1969—1990 年	1.21	39.57	12.11	0.55
	1991—2016 年	0.32	83.89	93.46	0.75

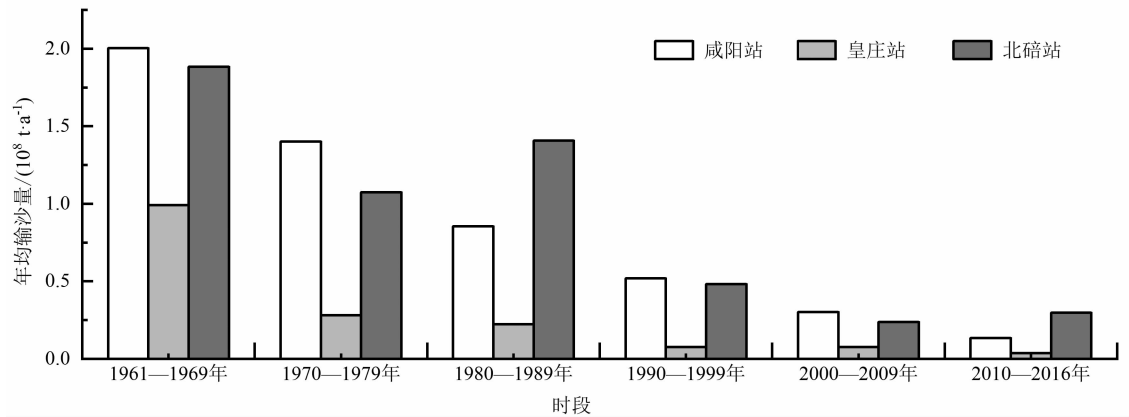


图 4 典型流域 1961—2016 年三站输沙量年际变化特征

Fig.4 Temporal variations of sediment load in the typical drainage basins from 1961 to 2016

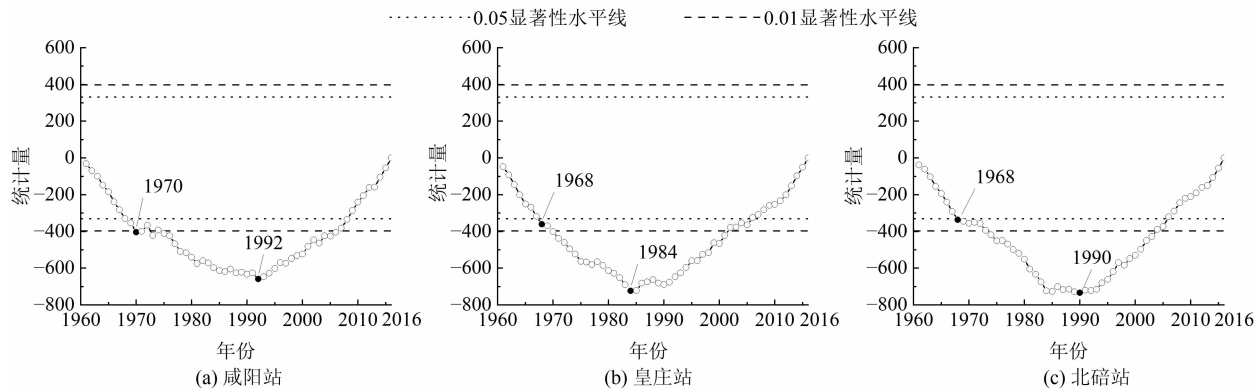


图 5 典型流域 1961—2016 年三站输沙量 Pettitt 突变检验

Fig.5 Pettitt's tests of sediment load in the typical drainage basins from 1961 to 2016

3.2 区域输沙模数时空变化特征

依据 56 个水文站的输沙数据序列,对比分析南北过渡带不同集水区间输沙的阶段性与空间分异。部分区间输沙数据不完整,输沙模数计算结果缺失,图中用阴影表示(图 6)。结果表明,研究区各子流域输沙模数总体呈现西高东低的空间分布。渭河和嘉陵江流域 1961—1987 年间的土壤侵蚀程度明显高于汉江流域,输沙模数多年均值分别为 1819.52、894.50 和 414.34 $\text{t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。各子流域输沙模数随时间变化整体呈现减小趋势,其中汉江和嘉陵江流域输沙模数在 20 世纪 80 年代略有升高,与流域内局部地区强降水导致侵蚀产沙量明显增加有关。

20 世纪 60 年代,渭河流域林家村以上区间的输沙模数大于 6000 $\text{t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,林家村—咸阳区间输沙模数小于 1400 $\text{t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,表明上游区间是渭河干流的主要侵蚀产沙区。70 年代以来,各区间输沙模数总体呈现减小趋势。林家村以上区间多年(2007—2016 年)平均输沙模数减小至 400 $\text{t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 以下,减幅高达 94.57%。1961—1969 年汉江干流石泉—白河、黄家港—皇庄和支流的悬河口、南宽坪、武关—荆紫关、唐河以上区间的输沙模数大于 800 $\text{t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,白河—黄家港区间输沙模数多年均值为负数。21 世纪初,汉江流域各区间的输沙模数均减少至 600 $\text{t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 以下,

洋县—安康、竹山—黄龙滩、白河—黄家港以及白土岗—湔滩—新店铺区间输沙模数为负值。20 世纪 60 年代嘉陵江流域谭家坝以上区间及三江汇流区输沙模数多年均值大于 3000 $\text{t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,舟曲—碧口、亭子口—武胜、涪江桥以上区间的输沙模数均大于 1000 $\text{t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,表明该流域侵蚀产沙强度较高的区域主要集中在西汉水、白龙江中下游、涪江上游以及干流中下游区域。2007—2016 年间,仅有涪江桥以上以及略阳—广元区间的输沙模数仍然大于 1000 $\text{t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,其余区间的输沙模数均减少至 800 $\text{t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 以下,茨坝—略阳、武都—三磊坝、涪江桥—小河坝以及三江汇流区的输沙模数多年均值为负值。

3.3 降水变化与人类活动对输沙量的影响

为定量分析三个典型流域输沙量锐减成因,结合各站点年输沙量序列的突变分析结果,采用年降水量与年输沙量的双累积曲线法对输沙量变化进行归因分析(图 7)。将变化期实测降水资料带入基准期的降水-输沙回归方程式可得到变化期年均输沙量的估算值,其中变化期与基准期估算值之差为气候变化的减沙量,变化期内估算值与实测值之差为人类活动的减沙量,二者与实际输沙变化量的比值即为气候变化和人类活动对流域输沙变化的贡献率。

研究结果显示不同时段人类活动对各站点的减

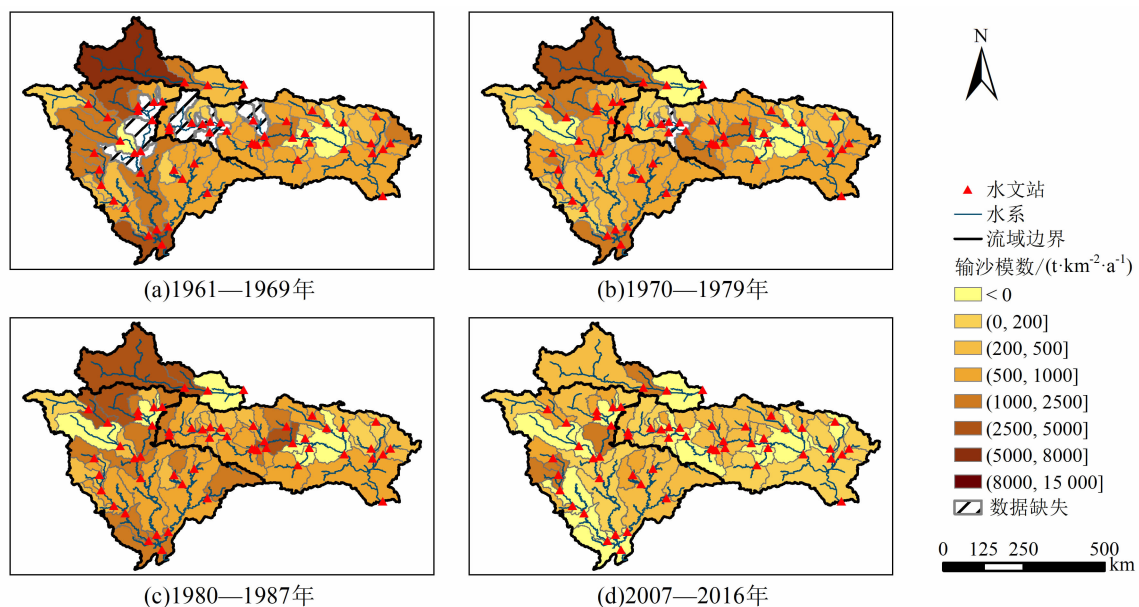


图 6 典型流域不同时段输沙模数时空变化分布

Fig. 6 Spatial-temporal variations of specific sediment yield in the typical drainage basins

沙贡献率均超过 94%,说明人类活动是流域输沙量锐减的主导因素(表 3)。气候变化引起咸阳站 1971—1992 年输沙量增加 6.28×10^6 t, 皇庄站 1969—1984 年、1985—2016 年分别增加 1.00×10^7 和 5.80×10^6 t,而人类活动使其分别减少了 1.18×10^8 、 9.07×10^7 和 1.08×10^8 t,人类活动贡献率高达 105.62%、112.42% 和 105.69%。由此可见,咸阳站 1971—1992 年(变化期 I)、皇庄站 1969—1984 年(变化期 I)及 1985—2016 年(变化期 II)输沙量的减少完全是人类活动所致。从区位看,人类活动对三个典型流域平均减沙贡献率由大到小依次为皇庄站(109.05%)、咸阳站(100.11%)、北碚站(95.92%),说明汉江流域受人类活动影响程度最高,渭河干流次之。

4 讨论

4.1 流域输沙量的空间差异

南北过渡带是长江中上游区、黄河中游区、青藏高原冻融区、北方土石山区以及南方红壤丘陵区交界区,区域内地质地貌、植被以及土壤等自然因素差异较大,是引起各流域输沙特征空间差异的主要原因^[9]。本研究发现南北过渡带输沙模数整体呈西高东低的分布格局。北部渭河以及西部的西汉水流经黄土丘陵沟壑区和土石山区,植被覆盖率低,是最主要的侵蚀产沙区,输沙模式多年均值超过 $3000 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。西部嘉陵江以及岷江流域地跨青藏高原和四川盆地,山高坡陡,岭谷纵横,其中白龙江流域地表物质以黄土和松散堆积物为

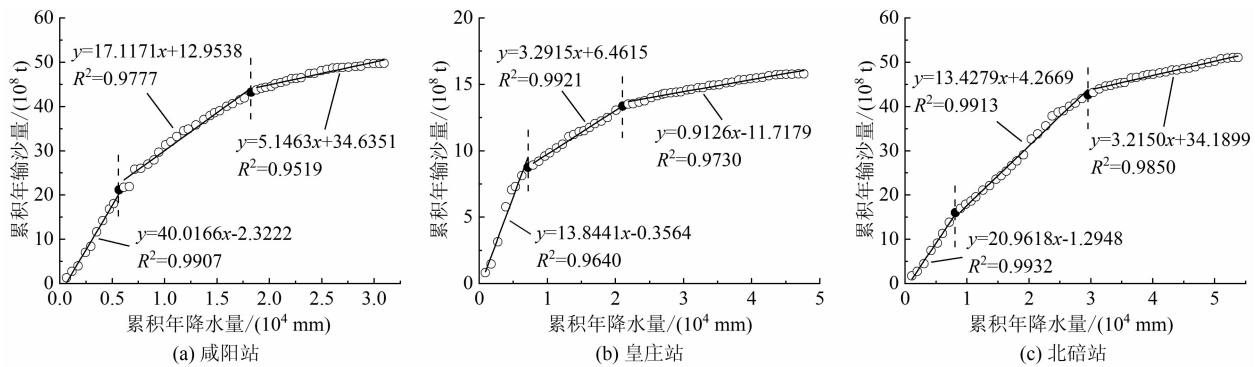


图 7 典型流域各站 1961—2016 年年降雨量-年输沙量双累积曲线

Fig. 7 Double mass curves of annual precipitation and sediment load in the typical drainage basins from 1961 to 2016

表 3 降水量和人类活动对典型流域输沙量减少的贡献率

Tab. 3 Contribution rates of precipitation and human activities on sediment load reduction

水文站	时段	输沙量		输沙量变化		气候变化贡献		人类活动贡献	
		实测值/ (10^8 t)	计算值/ (10^8 t)	变化量/ (10^8 t)	百分比/%	变化量/ (10^8 t)	百分比/%	变化量/ (10^8 t)	百分比/%
咸阳站	1961—1970 年	2.12		—	—	—	—	—	—
	1971—1992 年	1.00	2.18	1.12	52.70	-0.06	-5.62	1.18	105.62
	1993—2016 年	0.27	2.02	1.85	87.20	0.10	5.40	1.75	94.60
皇庄站	1961—1968 年	1.10	1.38	—	—	—	—	—	—
	1969—1984 年	0.29	1.20	0.81	73.65	-0.10	-12.42	0.91	112.42
	1985—2016 年	0.08	1.15	1.02	93.10	-0.06	-5.69	1.08	105.69
北碚站	1961—1968 年	2.00	2.25	—	—	—	—	—	—
	1969—1990 年	1.21	1.99	0.79	39.57	0.02	2.34	0.77	97.66
	1991—2016 年	0.32	1.91	1.68	83.89	0.10	5.83	1.58	94.17

主,地震活动活跃,加之地表侵蚀营力剧烈,土壤侵蚀尤为严重^[15]。中部汉中盆地及东部汉江丹江干流沿岸主要为低山丘陵区,石泉至白河区间坡耕地集中,林地多为人工林或次生林,流域内水力、重力侵蚀频繁,输沙模数多年均值高达 $1000 \sim 2800 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ^[16]。

4.2 流域输沙变化的驱动因素

渭河、汉江以及嘉陵江流域的年输沙量均显著减少,人类活动是输沙变化的主要驱动因素,这与以往的研究结果一致^[7-8]。相关研究发现岷江流域1950—2017年输沙量呈现下降趋势,人类活动(尤其是水电站建设)对河流输沙变化占据主导地位^[17]。由此可见,南北过渡带各流域受气候变化和人类活动的双重影响,输沙量普遍呈现减少趋势,各要素的贡献比例差异与各流域治理措施的实施年限、范围、强度等相关。

降水是流域侵蚀产沙和泥沙输移的主要驱动力。已有研究表明,20世纪80年代中期秦巴山区的极端降水事件发生频数最高,西部地区较东部地区年均降水量少,但发生极端降水事件的可能性更高^[18]。南北过渡带降雨侵蚀力多年均值呈现北低南高的空间分布格局,低值区位于西北部松潘、岷县和武都一带,高值区为万源、镇巴一带^[19]。该结论与本研究区域输沙模数空间分布格局不一致,过渡带内渭河和嘉陵江流域的输沙模数更高,其原因可能是陇南、甘南以及天水等地表层黄土松散,且多为耕地区,受极端降水事件影响,滑坡泥石流频发,水土流失更为严重。

就人类活动而言,南北过渡带内黄土高原区域输沙量锐减主要受水土保持措施实施的影响,秦巴山区则主要是受生态恢复以及梯级水利工程建设的影响。20世纪70年代以来,黄土高原地区实施了大规模植树种草、梯田、淤地坝等水土保持措施,改变了流域土地利用和植被覆盖条件,进而影响流域产汇流及土壤侵蚀过程,流域侵蚀产沙量减少。截止2016年,渭河干流区域的林地面积达 8546 km^2 ,草地 3347 km^2 ,梯田 7070 km^2 ,坝地 19 km^2 ,植被覆盖度由1986年的63%增加至2019年的86%,流域内植被恢复成效显著^[20]。此外,流域内兴修引水灌溉工程以及水库等水利工程增加了水面蒸发,并拦蓄了大量泥沙,使得河流输沙量显著减少^[21]。秦巴山区各流域自20世纪80年代以来实施了“长治”

工程、“退耕还林(草)工程”以及“天保”工程等一系列生态恢复工程。汉江流域增设“丹治”工程,促使坡耕地退耕还林草,2007—2010年间治理水土流失 7691.63 km^2 ,年减少泥沙量 $4.88 \times 10^7 \text{ t}$,流域植被覆盖率增加17.43%^[22]。嘉陵江流域植被恢复、小流域治理措施配置以及坡面水系工程对川中丘陵区坡面侵蚀泥沙的拦截作用显著^[23],流域内44.69%的区域植被呈现改善状态,主要位于东南部低海拔地区和陇南地区^[24]。此外,相关研究表明梯级水利工程建设对汉江和嘉陵江流域减沙效应更明显,主要通过改变河道天然径流时空分布特征,充分发挥蓄水拦沙作用,致使河流输沙量显著减少。汉江流域建设了丹江口、石泉、安康、黄龙滩等一系列大型水库,致使石泉—白河区间的输沙模数显著下降。嘉陵江流域已建成不同类型水库5140座,总库容 $2.36 \times 10^{10} \text{ m}^3$,总淤积量 $1.7 \times 10^9 \text{ m}^3$ ^[25]。碧口和宝珠寺水库的联合调度,基本将白龙江流域来沙全部拦蓄,干流中下游亭子口、草街等梯级水利枢纽的联合运行延缓了下游河段的淤积^[26]。

由此可见,生态恢复工程以及水利水保措施等人类活动是南北过渡带各流域输沙量锐减的主导因素,而气候变化的减沙效应相对较弱。本文采用了双累积曲线量化降水变化和人类活动对输沙变化的贡献率,后续仍需深入探讨其他气候要素变化与不同类型的人类活动对河流输沙量变化的影响。

5 结论

本研究通过对南北过渡带地区渭河、汉江以及嘉陵江三个主要控制水文站以及近60个集水区间1961—2016年实测降水输沙数据序列进行统计分析,探究了三个典型流域输沙时空演变特征,定量分析了流域输沙变化的驱动因素,主要结论如下:

(1)三个典型流域年输沙量减少趋势均达到极显著水平($P < 0.01$)。渭河咸阳站输沙数据序列突变年份为1970年和1992年,汉江皇庄站为1968年和1984年,嘉陵江北碛站为1968年和1990年。

(2)研究区多年平均输沙模数在空间上总体呈现西高东低的分布,随时间变化整体呈现减少趋势,其中,渭河和嘉陵江流域输沙模数明显高于汉江流域。研究区主要侵蚀产沙区包括渭河上游、汉江丹江干流沿岸以及汉中盆地周边地区,嘉

陵江干流中下游及其支流西汉水、白龙江中下游、涪江上游区域。

(3) 人类活动是三个流域输沙量减少的主导因素, 减沙贡献率超过 94%, 位于黄土高原的渭河流域输沙量锐减与大规模实施水土保持措施有关, 而秦巴山区的汉江和嘉陵江流域输沙量变化主要是受生态恢复和梯级水利工程建设的影响。

参考文献 (References)

- [1] 胡春宏, 王延贵, 张燕菁, 等. 中国江河水沙变化趋势与主要影响因素[J]. 水科学进展, 2010, **21**(4): 524–532. [HU Chunhong, WANG Yangui, ZHANG Yanjing, et al. Variation tendency of runoff and sediment load in China major rivers and its causes [J]. Advances in Water Science, 2010, **21**(4): 524–532] DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2010.04.009
- [2] ZHAO Guangju, MU Xingmin, JIAO Juying, et al. Evidence and causes of spatiotemporal changes in runoff and sediment yield on the Chinese Loess Plateau [J]. Land Degradation and Development, 2017, **28**(2): 579–590. DOI: 10.1002/ldr.2534
- [3] ZHANG Yatong, TIAN Peng, YANG Lin, et al. Relationship between sediment load and climate extremes in the major Chinese rivers [J]. Journal of Hydrology, 2023, **617**: 128962. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2022.128962
- [4] 胡巍巍, 郑明国. 1970 年以来赣江流域水沙变化及归因分析[J]. 山地学报, 2021, **39**(6): 821–829. [HU Weiwei, ZHENG Mingguo. Water and sediment changes in the Ganjiang River Basin of China since 1970 and its attribution analysis [J]. Mountain Research, 2021, **39**(6): 821–829] DOI: 10.16089/j.cnki.1008–2786.000641
- [5] 张百平. 中国南北过渡带研究的十大科学问题[J]. 地理科学进展, 2019, **38**(3): 305–311. [ZHANG Baiping. Ten major scientific issues concerning the study of China's north-south transitional zone [J]. Progress in Geography, 2019, **38**(3): 305–311] DOI: 10.18306/dlkxjz.2019.03.001
- [6] 果华雯, 张元伟, 宋小燕, 等. 中国南北过渡带干旱时空变化[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2020, **18**(2): 79–85 + 158. [GUO Huawen, ZHANG Yuanwei, SONG Xiaoyan, et al. Spatiotemporal changes of drought in the North-South transitional zone of China [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science and Technology, 2020, **18**(2): 79–85 + 158] DOI: 10.13476/j.cnki.nsbddqk.2020.0029
- [7] 李怡颖, 范继辉, 廖莹. 近 60 年来嘉陵江流域水沙变化特征[J]. 山地学报, 2020, **38**(3): 339–348. [LI Yiyang, FAN Jihui, LIAO Ying. Variation characteristics of streamflow and sediment in Jialing River Basin in the past 60 years, China [J]. Mountain Research, 2020, **38**(3): 339–348] DOI: 10.16089/j.cnki.1008–2786.000514
- [8] 王延贵, 刘茜, 史红玲. 长江中下游水沙态势变异及主要影响因素[J]. 泥沙研究, 2014(5): 38–47. [WANG Yangui, LIU Xi, SHI Hongling. Variations and influence factors of runoff and sediment in the lower and middle Yangtze River [J]. Journal of Sediment Research, 2014(5): 38–47] DOI: 10.16239/j.cnki.0468–155x.2014.05.009
- [9] 许全喜, 陈松生, 熊明, 等. 嘉陵江流域水沙变化特性及原因分析[J]. 泥沙研究, 2008(2): 1–8. [XU Quanxi, CHEN Songsheng, XIONG Ming, et al. Analysis on runoff and sediment characteristics and affecting factors of the Jialing River Basin [J]. Journal of Sediment Research, 2008(2): 1–8] DOI: 10.16239/j.cnki.0468–155x.2008.02.004
- [10] TIAN Peng, LIU Likun, TIAN Xiaojing, et al. Sediment yields variation and response to the controlling factors in the Wei River Basin, China [J]. Catena, 2022, **213**: 106181. DOI: 10.1016/j.catena.2022.106181
- [11] 许炯心. 人类活动和降水变化对嘉陵江流域侵蚀产沙的影响[J]. 地理科学, 2006, **26**(4): 432–437. [XU Jiongxin. Effect of human activities and precipitation on sediment yield of the Jialing River [J]. Scientia Geographica Sinica, 2006, **26**(4): 432–437] DOI: 10.3969/j.issn.1000–0690.2006.04.008
- [12] 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 Xiaojing, ZHAO Guangju, MU Xingmin, et al. Comparison study on hydrological time series change-point testing methods [J]. Journal of Sediment Research, 2019, **44**(2): 33–40] DOI: 10.16239/j.cnki.0468–155x.2019.02.005
- [13] 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 Yang, HU Chunhong, ZHANG Xiaoming, et al. Analysis on runoff and sediment regimes and its causes of the Yellow River in recent 70 years [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, **34**(21): 112–119] DOI: 10.11975/j.issn.1002–6819.2018.21.014
- [14] 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. [MU Xingmin, ZHANG Xiuqin, GAO Peng, et al. Theory of double mass curves and its applications in hydrology and meteorology [J]. Journal of China Hydrology, 2010, **30**(4): 47–51] DOI: 10.3969/j.issn.1000–0852.2010.04.011
- [15] 孟兴民, 陈冠, 郭鹏, 等. 白龙江流域滑坡泥石流灾害研究进展与展望[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2013, **33**(4): 1–15. [MENG Xingmin, CHEN Guan, GUO Peng, et al. Research of landslides and debris flows in Bailong River Basin: Progress and prospect [J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 2013, **33**(4): 1–15] DOI: 10.3724/SP.J.1140.2013.04001
- [16] 高艳丽, 李红波. 汉江流域景观格局变化对土壤侵蚀的影响[J]. 生态学报, 2021, **41**(6): 2248–2260. [GAO Yanli, LI Hongbo. Influence of landscape pattern change on soil erosion in

- Han River Basin [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, **41** (6): 2248 – 2260] DOI: 10.5846/stxb201910232222
- [17] 吕超楠, 金中武, 林木松, 等. 岷江流域水库建设对水沙输移的影响[J]. 长江科学院院报, 2020, **37** (8): 9 – 15 + 21. [LYU Chaonan, JIN Zhongwu, LIN Musong, et al. Impact of reservoir construction on water and sediment transport in Minjiang River Basin [J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2020, **37** (8): 9 – 15 + 21] DOI: 10.11988/ckyyb.20190573
- [18] 杨波, 张勃, 安美玲, 等. 1961 – 2011 年秦巴山区极端降水事件的时空特征分析[J]. 水土保持研究, 2014, **21** (1): 110 – 116. [YANG Bo, ZHANG Bo, AN Meiling, et al. Spatiotemporal characteristics of precipitation extremes in the Qinba Mountains Region during 1961 – 2011 [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2014, **21** (1): 110 – 116] DOI: 10.13869/j.cnki.rswc.2014.01.022
- [19] 邵伟婷, 何毅, 穆兴民, 等. 秦巴山区降雨侵蚀力时空变化特征[J]. 长江流域资源与环境, 2019, **28** (2): 416 – 425. [SHAO Yiting, HE Yi, MU Xingmin, et al. Spatiotemporal variation of rainfall erosivity in Qin-Ba Mountains region [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2019, **28** (2): 416 – 425] DOI: 10.11870/cjlyzyhj201902018
- [20] 黄晨璐, 杨勤科. 渭河与泾河流域水沙变化规律及其差异性分析[J]. 干旱区地理, 2021, **44** (2): 327 – 336. [HUANG Chenlu, YANG Qinke. Runoff and sediment variation rules and differences in Wei River and Jing River Basins [J]. *Arid Land Geography*, 2021, **44** (2): 327 – 336] DOI: 10.12118/j.issn.1000 – 6060.2021.02.04
- [21] 刘晓燕, 高云飞, 田勇, 等. 黄河潼关以上坝库拦沙作用及流域百年产沙情势反演[J]. 人民黄河, 2021, **43** (7): 19 – 23. [LIU Xiaoyan, GAO Yunfei, TIAN Yong, et al. Sediment intercepted by dams and the sediment production situation restoration of the last 100 years in the Yellow River Basin [J]. *Yellow River*, 2021, **43** (7): 19 – 23] DOI: 10.3969/j.issn.1000 – 1379.2021.07.004
- [22] 张秦岭, 李占斌, 王星. 陕西省丹汉江流域重点水土保持工程适宜性评价[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2014, **42** (10): 225 – 234. [ZHANG Qinling, LI Zhanbin, WANG Xing. Suitability evaluation of key soil and water conservation projects in Dan-Han River watershed of Shaanxi province [J]. *Journal of Northwest Agriculture and Forest University (Natural Science Edition)*, 2014, **42** (10): 225 – 234] DOI: 10.13207/j.cnki.jnwafu.2014.10.036
- [23] 张信宝, 王安邦. 长江上游干流和支流河流泥沙近期变化及其原因[J]. 水利学报, 2002(4): 56 – 59. [ZHANG Xinbao, WEN Anbang. Variations of sediment in upper stream of Yangtze River and its tributary [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2002(4): 56 – 59] DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.2002.04.011
- [24] 胡孟珂, 于欢, 孔博, 等. 2001 ~ 2020 年嘉陵江流域植被覆盖度时空变化特征[J]. 人民长江, 2022, **53** (1): 82 – 89 + 96. [HU Mengke, YU Huan, KONG Bo, et al. Spatial-temporal variations of fractional vegetation coverage in Jialing River Basin from 2001 to 2020 [J]. *Yangtze River*, 2022, **53** (1): 82 – 89 + 96] DOI: 10.16232/j.cnki.1001 – 4179.2022.01.013
- [25] 袁晶, 许全喜, 熊明, 等. 嘉陵江流域水库拦沙及其减沙贡献权重研究[J]. 人民长江, 2019, **50** (11): 24 – 29 + 43. [YUAN Jing, XU Quanxi, XIONG Ming, et al. Study on reservoirs' sediment retaining and its contribution weight of sediment reduction in Jialing River Basin [J]. *Yangtze River*, 2019, **50** (11): 24 – 29 + 43] DOI: 10.16232/j.cnki.1001 – 4179.2019.11.003
- [26] 刘扬扬, 李斐, 许秀贞. 嘉陵江中下游干流水电开发对水文情势的影响[J]. 人民长江, 2014, **45** (5): 10 – 15. [LIU Yangyang, LI Fei, XU Xiuzhen. Impacts of hydropower development on hydrological regime in mainstream of mid-lower Jialing River [J]. *Yangtze River*, 2014, **45** (5): 10 – 15] DOI: 10.16232/j.cnki.1001 – 4179.2014.05.012

Sediment Load Variations and the Driving Forces in the Typical Drainage Basins of the North-South Transitional Zone of China

ZHANG Peixuan^{1a}, TIAN Peng^{1b,2*}, MU Xingmin^{1a}, ZHAO Guangju², ZHANG Yatong^{1a}

(1. a. Institute of Soil and Water Conservation; b. College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling 712100, Shaanxi, China; 2. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210019, China)

Abstract: The north-south transitional zone is an important geographical-ecological transitional zone in China.

Runoff and sediment discharge of the main rivers in the north-south transitional zone have changed significantly, which directly affects the basin-level ecological management and the development and utilization of regional water resources. Previous studies mostly focused on a specific river basin, thus, there was a lack of systematic and in-depth research on the spatial-temporal variation characteristics and driving factors of river sediment load in this zone.

In this study, three main rivers in the transitional zone were targeted for investigation into sediment load variations. It collected data of 1961 to 2016 at 56 representative hydrological observation stations located along the Hanjiang River basin, the Jialingjiang River basin, and the mainstream of the Weihe River basin. The spatial-temporal variations of sediment load and the responses to driving factors were detected by using the Mann-Kendall trend test, Pettitt' test and double mass curve method.

We have following findings: (1) During 1961 – 2016, annual sediment load decreased significantly at all hydrological observation stations ($P < 0.01$), with sharp drops in sediment load at Xianyang, Huangzhuang and Beibei stations by more than 84% during 2010 – 2016 as compared with those in the 1960s. (2) Sediment load sequences at each station mainly mutated in the late 1960s and around the 1990s. (3) The special sediment yield in the study area presented a spatial distribution of high in the west and low in the east, with a decreasing trend by time, which indicated that sediment was mainly contributed from the upstream of the Weihe River, the mainstream of the Hanjiang River and the Danjiang River, the surrounding areas of the Hanzhong basin, the lower-middle reach of the Jialingjiang River, the lower-middle reach of the Bailongjiang River, the upstream of the Fujiang River and the Western Han River. (4) Human activities were the dominant driving factors for reduction of sediment load, accounting for more than 94% of the total reduction. To be specific, sediment load reduction in the Weihe River basin was affected mostly by successful soil and water conservation projects, while in the Hanjiang River and Jialing River basins the progress in sediment relief contributed to ecological restoration projects and cascade reservoirs engineering. This study can provide a scientific basis for the prevention and control of soil erosion and the integrated management of watersheds in whole regions of the north-south transitional zone of China.

Key words: sediment load; driving factors; contribution rate; human activity; the North-South Transitional Zone of China

(责任编辑 钟雨倩)