李阔,董兆欢,林丽蓉,等.三峡库区典型小流域近30年侵蚀产沙演变及其源-汇调控机制[J].华中农业大学学报,2026,45(3):196-205.
DOI:10.13300/j.cnki.hnlkxb.2026.03.017

三峡库区典型小流域近30年侵蚀产沙演变及其源-汇调控机制

李阔[1],董兆欢[1,2],林丽蓉[1],张娜丽[1],付晓文[3],高超[4]

1.华中农业大学资源与环境学院,武汉 430070; 2.河南省洛阳市嵩县植物保护和检疫站,洛阳 471400;
3.湖北省宜昌市秭归县水利和湖泊局,宜昌 443600; 4.湖北省水土保持监测中心,武汉 430071

摘要 为厘清长江上游水土保持重点防治工程实施后侵蚀“源”与泥沙“汇”的耦合调控机制,基于三峡库区王家桥小流域控制站1989—2021年的降雨、径流、泥沙及土壤、地形、土地利用与植被覆盖等数据,综合运用Mann-Kendall检验、双累积曲线、中国水土流失方程(CSLE)和地理探测器模型等方法分析该小流域水土流失控制情况。结果显示:近33年间,小流域年降雨量及降雨侵蚀力无显著变化;而年径流量和产沙量变化呈极显著下降趋势($P<0.01$),年均降幅分别为1.46×10^5 m^{3}和493.4 t,且均在1999年前后发生突变;与1990年相比,2020年的土壤侵蚀模数下降84.3%;流域土壤侵蚀等级整体向微度侵蚀转变;流域出口输沙模数下降90.8%,泥沙输移比由0.74降至0.43;土地利用优化和植被覆盖度提升等人类活动对坡面产沙和流域输沙减少的贡献率分别为71.3%和88.7%。研究表明,长江上游水土保持重点防治工程通过优化土地利用结构与提升植被覆盖度等措施,在流域尺度上实效了泥沙的持续有效控制。

关键词 侵蚀; 产沙; 源-汇关系; CSLE模型; 三峡库区小流域

中图分类号 S157.1 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2026)03-0196-10

水土流失是全球性的重大环境问题,它威胁着区域生态安全与社会经济的可持续发展[1]。小流域作为水土流失监测与治理的基本单元,其降雨-产流-产沙过程受到降雨、土壤、地形及植被覆盖等多种因素的综合影响[2]。研究表明,降雨是触发水力侵蚀区土壤侵蚀的关键驱动力,降雨强度变化对土壤侵蚀的影响甚至超过降雨量本身[3],三峡库区强降雨的产沙量可达同量级弱降雨的数倍[4]。此外,人类活动通过实施水土保持工程(退耕还林、梯田建设等)改变土地利用,能够显著增强植被冠层截留、根系固土和土壤入渗,从而有效减少地表径流和土壤侵蚀[5-6]。厘清小流域尺度下人类活动对侵蚀产沙长期演变的作用,是揭示水土流失机制、防治成效及指导生态修复的关键。

前人在三峡库区王家桥小流域已开展了诸多研究。早期研究明确了流域的泥沙主要来源于沟道侵蚀和重力侵蚀[7],还基于USLE/RUSLE模型探讨了水土保持规划和景观格局特征[8-9];随后,相关研究进一步聚焦产沙驱动因素与环境变化效应。Fang等[10-11]揭示了极端降雨事件对小流域产沙过程中的主控作用,并指出2000年前后土地利用变化对径流和土壤流失产生了显著影响;秦文静等[12]利用SWAT模型量化了土地利用与气候变化对径流的相对贡献。在流域侵蚀产沙研究中,学者通常通过坡面侵蚀模型模拟、景观格局或泥沙连通性分析以及流域出口水沙序列分析等手段识别侵蚀源区与沉积汇区,并探讨土地利用变化和水土保持措施对泥沙输移过程的影响[13-15]。然而,这些研究多从单一角度分析侵蚀或输沙变化。虽然水沙序列分析能够反映流域整体输沙响应,但难以区分坡面侵蚀削弱与泥沙输移过程调节的相对作用;侵蚀模型模拟能够估算坡面土壤侵蚀强度,却难以直接反映流域尺度泥沙输出的过程变化;景观格局或连通性分析则主要侧重空间格局识别,对长时间序列侵蚀-输沙响应

收稿日期:2026-01-30
基金项目:湖北省水利重点科研项目(HBSLKY202210;HBSLKY202120)
李阔,E-mail:kuoli@webmail.hzau.edu.cn
通信作者:林丽蓉,E-mail:lrlin@mail.hzau.edu.cn

关系的刻画仍较为有限。因此，对长序列实测水沙过程与流域坡面侵蚀模型估算结果之间的响应差异尚缺乏系统认识，尤其缺乏对侵蚀“源”（坡面侵蚀）与泥沙“汇”（河道输沙）过程的定量比较，导致无法获知人类活动在源头减蚀与泥沙拦截中的差异化贡献。

三峡库区是我国长江上游重要的生态屏障区，其水土流失治理成效直接关系到库区生态环境质量和三峡工程的安全运行[16]。该区域以山地丘陵为主，地势陡峭，加之降水充沛且集中，是典型的水土流失高风险区。王家桥小流域地处库区国家级水土流失重点防治区，是典型的山区型小流域。自 1989 年起，该流域被纳入长江上游水土保持重点防治工程（简称“长治”工程）首期示范区，系统性地推进了退耕还林还草、陡坡生态修复及梯田工程建设，为水土保持成效的长期观测和研究提供了宝贵的“野外实验室”[17-18]。

本研究以三峡库区典型的王家桥小流域为研究对象，通过 1989—2021 年（约 30 a）的长序列实测水沙资料分析与 CSLE 模型估算结果，比较流域产沙与坡面土壤侵蚀的时空响应差异，并分离出人类活动对产沙变化的相对贡献，明确泥沙输移比的变化特征，从而加深人们对“长治”工程实施以来流域侵蚀产沙“源-汇”过程协同调控机制的认识，为三峡库区水土流失的科学评估与精准治理提供依据。

1　材料与方法

1.1　研究区概况

王家桥小流域（31°13′～31°16′N，110°38′～110°42′E）位于湖北省宜昌市秭归县，属于长江二级支流。小流域主河道流向自东北向西南（图 1），全长 6.44 km，流域面积 16.65 km²。高程在 185～1 085 m，地势陡峭，两侧坡度落差较大，坡度从 0°～58°不等（平均坡度为 27°）。小流域具有亚热带大陆性季风气候，四季分明，雨热同期，年均温度 17.3 ℃。降雨集中在夏季的 6—8 月，年均降雨量 647.1～1 352.5 mm。王家桥小流域的土壤类型主要是水稻土和紫色土，土壤质地类型以壤土和砂壤土为主，有机质含量平均值为 21.81 g/kg。流域土地利用类型以耕地、林地为主，森林覆盖率为 67.4%，植被类型以次生阔叶林和针阔混交林为主[12]。

1.2　数据来源

本研究的降雨、径流、泥沙数据均来自于王家桥小流域监测站（2007—2022 年是水利部水土保持监测中心直接管理的全国监测站点之一）1989—2021 年年度动态观测资料。降雨量采用小流域的气象观测站自记式雨量计观测，由次降雨量统计得到年降雨量。径流量通过小流域出口观测的流速、水位和产流时间计算得到，流速用 LS25-1 型流速仪测定，水位用水尺和 SW40 自记水位计测定，观测时间是每日 08:00、20:00，雨季和行洪期根据洪水涨落情况增加观测次数。泥沙量观测与测流同步进行，采用手动瓶式采样器取样，用质量法测定产沙率，再通过产沙率和产沙时间计算产沙量。

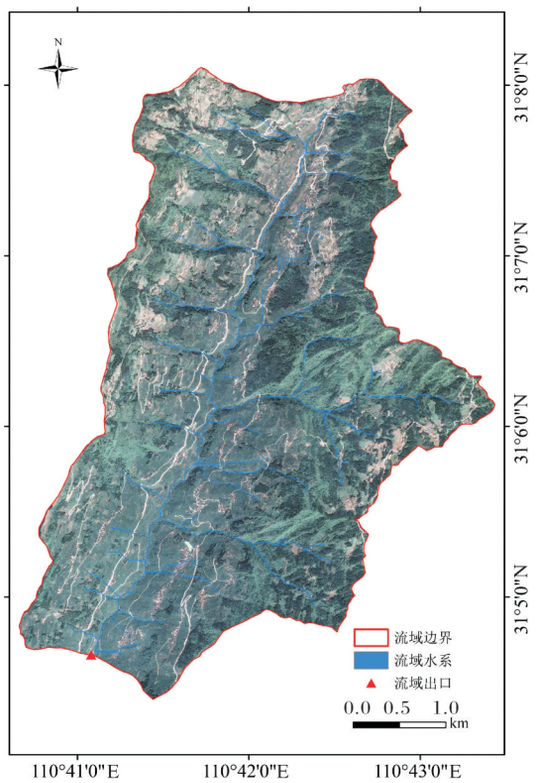


图 1　王家桥小流域示意图

Fig.1　Schematic map of the Wangjiaqiao small catchment

小流域的土壤数据以第二次全国土壤普查土壤图为基础，通过野外调查进行修正和补充。地形数据采用湖北省水利厅提供的分辨率为 8 m 的 DEM 数据。该数据获取时间为 2023 年，用于提取流域坡度、坡长及高程等地形参数。DEM 数据在使用前用 ArcGIS 进行了填洼、流向分析及坡度计算等预处理。土地利用数据使用中科院资源环境科学与数据中心的空间分辨率为 30 m 的土地利用数据。植被覆盖数据选用地理空间数据云平台 Landsat 系列 1990—2020 年（5 a/期，共 7 期）卫星影像，选用 5—10 月期间

含云量低于10%的遥感影像。利用ArcGIS中重采样和投影变换工具将不同源数据统一变换成分辨率为30 m×30 m，地理坐标系和基准面设为GCS_WGS_1984，参照流域边界裁减，最终得到小流域的相关空间信息数据。

1.3 数据分析方法

1)趋势与突变分析。采用Mann-Kendall(M-K)趋势检验法分析降雨和水沙序列的变化趋势与显著性，并利用M-K突变检验法识别序列的突变时间点。检验采用双侧检验，显著性水平设定为α=0.05，应用双累积曲线(DCC)方法分析降雨-产流、降雨-产沙关系的转折特征及响应突变的时间节点。

2)降雨侵蚀力计算。本研究采用日降雨量数据计算降雨侵蚀力，公式如下：

$$M_i=\alpha\sum_{j=1}^{k}(D_j)^{\beta} \tag{1}$$

式(1)中，M_i表示第i个半月时段的降雨侵蚀力值，MJ·mm/(hm²·h)；D_j、k分别代表半月时段内的第j天日雨量和该时段内的时长，d；日雨量D_j≥12 mm(侵蚀性雨量标准)。模型参数α和β的计算公式如下：

$$\alpha=21.586\beta^{-7.1891}$$
$$\beta=0.8363+\frac{18.144}{P_{d12}}+\frac{24.455}{P_{y12}} \tag{2}$$

式(2)中，P_{d12}和P_{y12}分别表示在日雨量≥12 mm基础上统计的日降雨量和年降雨量。最后，将半月时段降雨侵蚀力累加，得到年降雨侵蚀力。

3)土壤侵蚀模数估算。采用ArcGIS10.2和中国水土流失方程(CSLE)估算小流域土壤侵蚀模数，CSLE公式如下：

$$A=R\cdot K\cdot L\cdot S\cdot B\cdot E\cdot T \tag{3}$$

式(3)中：A为土壤侵蚀模数，t/(km²·a)；R为降雨侵蚀力因子；K为土壤可蚀性因子；L为坡长因子；S为坡度因子；B为植被覆盖与生物措施因子；E为工程措施因子；T为耕作措施因子。

R因子计算见本文“1.3 2)降雨侵蚀力计算”，其他因子计算如下：土壤可蚀性因子(K)的确定，基于2023年7月在研究区采集的62个土壤样品(0～20 cm深度)的机械组成和有机碳含量测定数据，采用EPIC模型计算K值，并进行K值的克里金空间插值。其中，采样点根据流域土壤类型、土地利用类型及地形特征在研究区内均匀布设，具有空间代表性。

地形因子(L、S)的确定，基于DEM数据(8 m分辨率)，根据坡度θ分段计算S因子，当坡度θ<10°时采用McCool等[19]提出的坡度因子计算公式，当坡度θ>10°时，采用Liu等[20]提出的公式；L因子则根据坡度(θ)采用Liu等[21]的公式计算坡长指数(m)后得出。

植被覆盖与生物措施因子(B)的确定，基于Landsat系列影像，计算植被覆盖度(FVC，公式中用F_{VC})，并采用蔡崇法等[8]方法计算B因子，公式如下：

$$B=\begin{cases}1, & F_{VC}=0\\ 0.6508-0.3436\lg(F_{VC}), & 0<F_{VC}\leqslant 78.3\%\\ 0, & F_{VC}>78.3\%\end{cases} \tag{4}$$

水土保持措施因子(E、T)：参考文献[22]和相关研究，结合流域土地利用类型和坡度数据，对工程措施(E)和耕作措施(T)进行赋值，再根据SL190—2007《土壤侵蚀分类分级标准》，将土壤侵蚀模数A划分为微度、轻度、中度、强烈、极强烈、剧烈6个侵蚀等级。

4)驱动力定量归因分析。采用地理探测器(Geodetector)模型，计算解释力q值，定量辨识各驱动因子对土壤侵蚀空间分异的贡献。q值范围为[0，1]，值越大，表明该因子对土壤侵蚀空间分布的贡献越强。

5)气候变化与人类活动贡献率归因。为定量区分气候变化与人类活动对坡面侵蚀及流域输沙变化的贡献，分别采用CSLE模型情景模拟和双累积曲线斜率偏差法进行归因分析。对于坡面侵蚀变化，基于CSLE模型设置基准期情景，并在其他因子保持不变的条件下分别替换降雨侵蚀力因子(R)与下垫面因子，计算不同情景下的土壤侵蚀模数，通过比较各情景侵蚀模数差异估算气候变化和人类活动导致的侵蚀变化量，并计算二者的贡献率。

对于流域输沙变化，基于流域出口实测输沙资料建立累积降雨量与累积输沙量的双累积关系，并确定基准期与变化期，分别拟合2个时期降雨-输沙关系斜率k_a和k_b。结合基准期与变化期年均降雨量P_a和P_b，计算人类活动贡献率(C_H)[6]：

$$C_H=\frac{|(k_a-k_b)P_a|}{|k_b(P_a-P_b)|+|(k_a-k_b)P_a|}\times 100\% \tag{5}$$

2 结果与分析

2.1 降雨-产流-产沙的时间序列变化特征

1)降雨与降雨侵蚀力变化特征。1989—2021年，王家桥小流域的年降雨量与年降雨侵蚀力(R因子)呈现波动下降变化(图2)。其中，年降雨量在647.1～1 352.5 mm波动，总体下降趋势较弱(降

幅－5.32 mm/a)，且无显著性。R因子在观测期内的年际波动节律与年降雨量高度一致(R^2=0.89)，变幅在1 860.5～7 647.0 MJ·mm/(hm²·h·a)，同样不具有显著性。这表明研究期内王家桥小流域的气候相对稳定，降雨主要影响产流产沙的年际波动，而非其长期趋势。

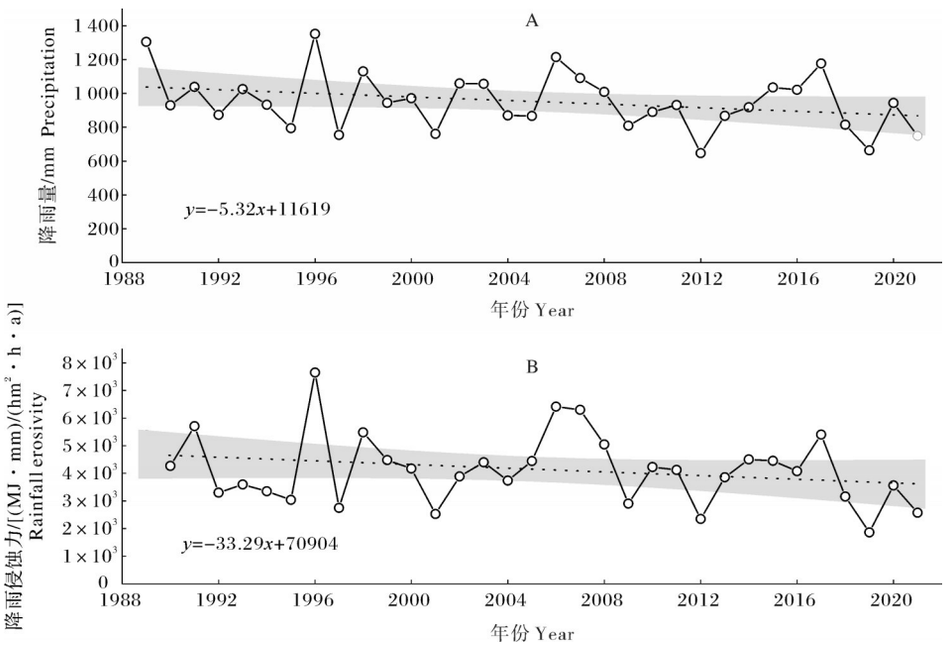


图2　王家桥小流域降雨量(A)与降雨侵蚀力(B)的年动态变化

Fig.2　Annual dynamics of precipitationa(A) and rainfall erosivity(B) in the Wangjiaqiao small watershed

2)产流与产沙变化特征。①产流变化特征。在研究期内(图3A)，王家桥小流域的年径流量呈现极显著下降趋势(Z为－2.96，P<0.01)，年际递减率约为1.46×10^5 m³/a。同时，径流量也呈现出明显的“前高后低”的阶段性特征。2000年以前，径流量处于高位震荡期(年均6.872×10^6 m³)，多次出现超过1×10^7 m³的峰值；而2000年以后，5 a滑动平均线出现明显的台阶式回落，且年际波动幅度收窄(年均3.229×10^6 m³)。这表明小流域的水文调节能力发生了质的改变，对极端降雨的缓冲作用增强了。

②产沙变化特征。年产沙量的衰减也很显著(图3B)，降幅493.4 t/a，由MK趋势显著性检验得到产沙量的Z=－2.87、P<0.01。此外，产沙量趋势表现出极不稳定的特征，变异系数CV为1.32，极值差高达41 308 t。产沙量最大值和最低值分别出现在1991年(高达41 466 t)和2010年(仅为158 t)，两者相差2个数量级。

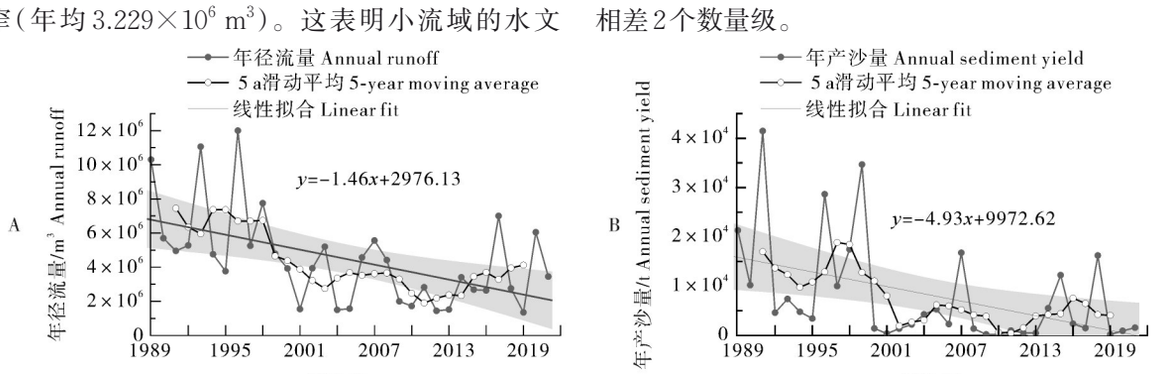


图3　王家桥小流域的产流(A)与产沙(B)年动态变化

Fig.3　Annual dynamics of runoff(A) and sediment yield(B) in the Wangjiaqiao small watershed

3)产流产沙过程的突变时间点识别。M-K检验结果显示了王家桥小流域水沙关系发生结构性变化的具体时间(图4)。年径流量的UF与UB曲线在1998—1999年出现交点，而年产沙量的交点出现在1999—2000年。两者虽存在约1 a的偏移，但均指向1999年前后作为流域水沙过程发生明显转

折的关键时期。图5进一步印证了这一判断，其中降雨-产流与降雨-产沙累积曲线均为清晰的“两段式”结构。在1999年之前，2条趋势线的斜率较大，分别为0.069、0.130，之后曲线斜率明显减小，分别为0.033、0.040；在降雨差异不明显条件下，1999年之后的流域产流量下降52%，产沙量下降71%，且产沙衰减幅度更为明显。综上，可以将1999年确定为王家桥小流域水沙响应特征突变的时间节点，并将径流、泥沙的时间序列划分为基准期（1989—1999年）与变化期（2000—2021年），以便后续更好地识别下垫面变化对产流产沙过程的影响。

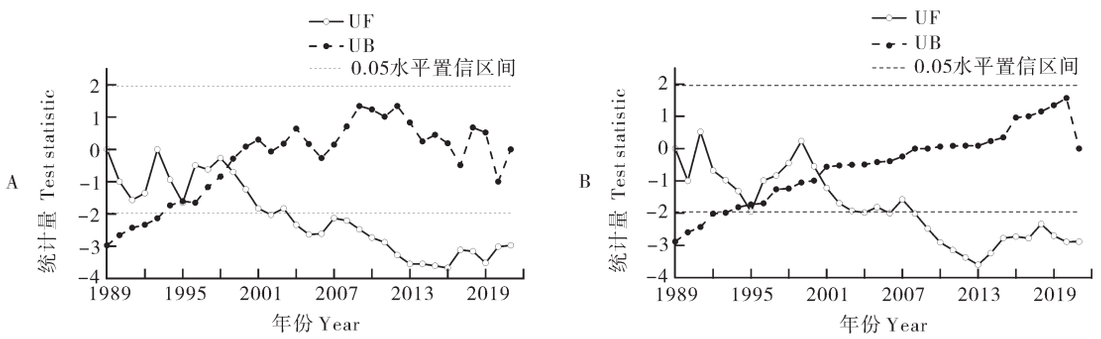


图4 年径流量（A）和年产沙量（B）M-K统计量曲线

Fig.4 M-K statistics curve of annual runoff（A） and sediment yield（B）

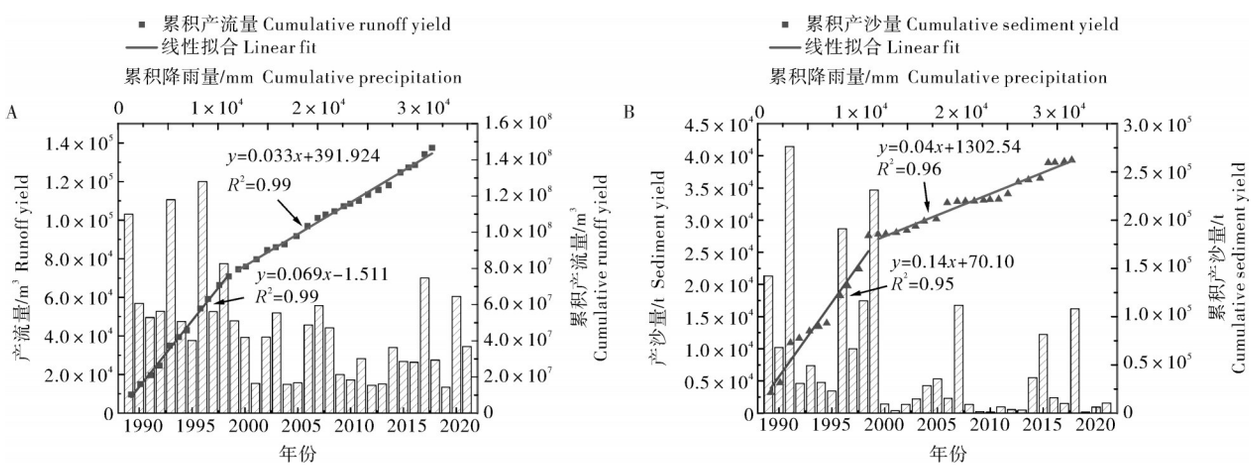


图5 降雨-产流（A）与降雨-产沙（B）双累积曲线

Fig.5 Double cumulative curves of precipitation-runoff（A） and precipitation-sediment（B） relationships

2.2 小流域土壤侵蚀的空间演变特征

1）土壤侵蚀模数的时空演变。王家桥小流域土壤侵蚀模数在近30 a间显著下降（图6）：1990年侵蚀模数为824.94 t/(km²·a)，属于轻度侵蚀；2020年下降至129.42 t/(km²·a)，降幅达到84.3%，整体转为微度侵蚀。该变化表明，在持续的水土保持治理措施作用下，流域水土流失状况得到明显改善。从空间分布上看，高侵蚀强度区域的格局也发生了明显改变，1990年为0～16 071 t/(km²·a)，大于500 t/(km²·a)的土壤侵蚀斑块主要集中在主河道两侧及中部、西北部的陡坡地带，呈带状或连片状分布；2020年，流域侵蚀模数范围降低至0～10 710 t/(km²·a)，大部分区域侵蚀强度明显降低，仅在流域西北部局部区域仍保留相对集中的高侵蚀斑块，后者可能主要与高陡地形条件有关，在整体侵蚀强度显著下降的背景下，其相对侵蚀水平差异更加突出。总体而言，流域侵蚀模数在数值和空间格局上的同步改善，说明下垫面条件的改变对抑制坡面侵蚀起到了持续且决定性的作用。

2）土壤侵蚀强度等级构成。1990—2020年，王家桥小流域土壤侵蚀强度等级构成发生了明显变化。在面积占比变化中，微度侵蚀由89.14%提升至96.05%，与此同时其他侵蚀强度等级的面积占比都在下降（轻度＞中度＞强烈＞极强烈＞剧烈）（表1）；从侵蚀量组成占比来看，占主体的仍然是微度与轻度侵蚀，二者在1990、2020年的侵蚀量总计分别为

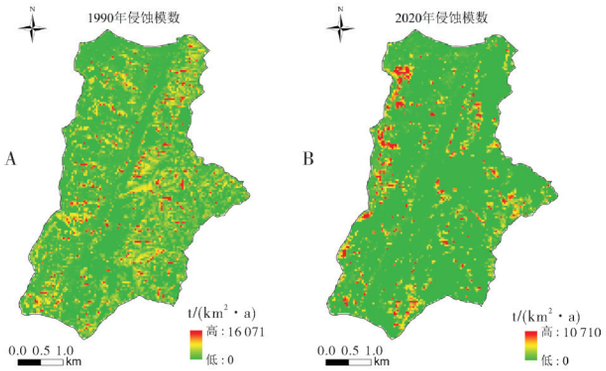


图 6　王家桥小流域 1990 年（A）和 2020 年（B）的土壤侵蚀模数空间分布

Fig.6　Spatial distribution of soil erosion modulus in the Wangjiaqiao small watershed in 1990（A）and 2020（B）

84.90%、87.34%。侵蚀量增加的等级包括微度、轻度、强烈，其他侵蚀等级的侵蚀量都在减小。说明微、轻度侵蚀是王家桥小流域产沙的主要来源，但是小流域水土流失转好的主要贡献来自中度、极强烈、剧烈这 3 个侵蚀等级的侵蚀量减小。因此，在过去 30 a 中流域内部的产沙经历了系统性削弱，这为实测产沙量的长期下降提供了直接的依据。

2.3　小流域侵蚀产沙变化的驱动机制定量分析

1）侵蚀产沙的“源-汇”关系。CSLE 模型估算的坡面侵蚀模数表征土壤分离与剥蚀过程的“源”强度，而流域出口实测产沙模数则反映泥沙经输移、沉积等过程综合作用后的“汇”结果。表 2 显示，基准期（1990—1995 年）与变化期（2000—2020 年）内，侵蚀模数与产沙模数整体上都呈下降趋势；基准期与变化期的泥沙输移比均值分别为 0.63、0.46，标志着流域从“泥沙高效输移系统”向“泥沙有效拦截系统”的积极转变，下游的泥沙灾害风险得到缓解。基于上述分析可以得出，侵蚀“源”强度的减弱与泥沙输移“汇”能力的下降共同促进了流域输沙量的减少。在此背景下，人类活动作为流域变化的主要驱动力，其对侵蚀产沙过程的具体影响程度与作用机制亟待进一步明确。

表 1　王家桥小流域不同侵蚀等级的面积占比与侵蚀量占比的变化

Table 1　Changes in the proportions of area and soil loss by different erosion classes in the Wangjiaqiao small watershed

%

侵蚀等级 Erosion intensity class	面积占比 Proportion of area			侵蚀量占比 Proportion of erosion amount		
	1990 年	2020 年	变幅 Change	1990 年	2020 年	变幅 Change
微度侵蚀 Slight erosion	89.14	96.05	+6.91	44.82	46.03	+1.21
轻度侵蚀 Light erosion	10.15	3.74	−6.41	40.08	41.31	+1.23
中度侵蚀 Moderate erosion	0.53	0.14	−0.39	8.95	6.54	−2.41
强烈侵蚀 Intense erosion	0.12	0.06	−0.06	3.47	4.97	+1.50
极强烈侵蚀 Very intense erosion	0.05	0.01	−0.04	2.08	1.15	−0.93
剧烈侵蚀 Extreme erosion	0.01	0.00	−0.01	0.60	0.00	−0.60

表 2　土壤侵蚀模数、产沙量及泥沙输移比

Table 2　Soil erosion modulus, sediment yield, and sediment delivery ratio

阶段 Period	年份 Year	CSLE 估算的土壤侵蚀模数/[t/(km²·a)] Soil erosion modulus estimated by CSLE	实测的输沙模数/[t/(km²·a)] Measured sediment delivery modulus	泥沙输移比 Sediment delivery ratio (SDR)
基准期 Baseline period	1990	824.89	613.10	0.74
	1995	392.42	206.61	0.53
变化期 Change period	2000	289.46	85.14	0.29
	2005	475.35	319.74	0.67
	2010	173.34	9.54	0.06
	2015	885.80	734.79	0.83
	2020	129.42	56.29	0.43
平均值 Mean value	1990—1995	608.66	409.85	0.63
	2000—2020	390.67	241.10	0.46

注 Note：基准期和变化期的划分主要是根据输沙量突变的时间点，泥沙输移比＝流域出口总产沙量/流域总侵蚀量 Baseline/change periods were defined by the abrupt shift year in sediment yield. SDR＝watershed outlet sediment yield/watershed gross erosion.

2)人类活动因素对产沙的贡献。依据流域出口实测泥沙数据,采用双累积曲线斜率偏差法计算得到人类活动因素对产沙的贡献。与基准期相比,变化期人类活动对流域产沙量减少的贡献率达88.7%,而气候因素(降雨变化)的贡献率仅为11.3%。这表明在流域输沙过程中,人类活动是导致泥沙锐减的绝对主导因素。基于CSLE模型的情景模拟,通过控制变量法交叉替换基准期与变化期的降雨侵蚀力(R因子)与下垫面因子,计算坡面土壤侵蚀模数变化。结果显示,由降雨侵蚀力下降引起的气候减蚀贡献率为28.7%,而人类活动通过植被恢复与土地利用优化实现减蚀贡献率为71.3%。因此,人类活动在"坡面减蚀"环节的贡献率明显低于其在"流域减沙"的贡献率。这一差异表明,除抑制坡面侵蚀外,人类活动在泥沙输移过程中亦可能通过改变水沙输移条件发挥重要作用。

3)人类活动关键因子对水土流失的解释力。自1989年"长治"工程实施以来,王家桥小流域通过退耕还林等植被恢复措施减轻坡面侵蚀,并依托梯田、塘堰等工程措施增强泥沙拦截能力,驱动泥沙输移比持续下降。流域土地利用与植被状况显著变化(图7):耕地面积由1990年约7.3 km²(占比43.8%)降至2020年约3.9 km²(占比23.4%),林草地面积相应增加;植被覆盖度由基准期(1989—1999年)的0.55增加到变化期(2000—2021年)的0.62,2020年达0.74。地理探测器分析表明(表3),单因子中解释力(q)从大到小的顺序依次是植被覆盖度(0.057)>土地利用(0.023)>坡度(0.022)>高程(0.008)。尽管单因子解释力整体较低,但是植被覆盖度与土地利用在各因子中表现出更高的解释力,说明人类活动对侵蚀格局的影响已超越地形背景。结合前文流域植被恢复和土地利用变化的长期趋势,说明下垫面条件的持续改善是侵蚀减弱的重要驱动因素。且因子交互呈现增强效应,其中"植被覆盖度∩土地利用"组合解释力最高(q=0.097),显著高于单因子,表明土地利用调整与植被恢复具有协同抑蚀作用。

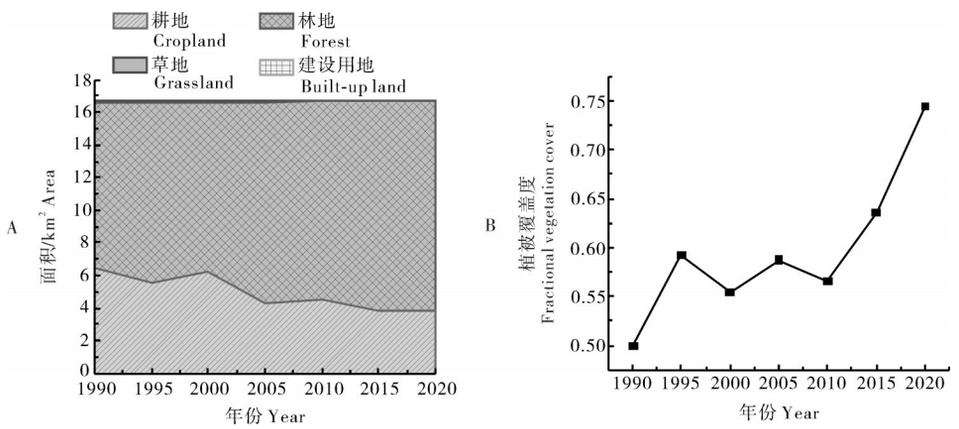


图7 1990—2020年土地利用结构(A)与植被覆盖度(B)变化趋势

Fig.7 Trends in land use structure(A) and fractional vegetation cover(B) from 1990 to 2020

表3 水土流失中人类活动关键影响因子交互作用的解释力q值

Table 3 Explanatory power (q value) of the interactions among key human activity factors on soil and water loss

影响因子 Driving factor	坡度 Slope	植被覆盖度 Vegetation coverage	土地利用 Land use	高程 Elevation
坡度 Slope	0.022	—	—	—
植被覆盖度 Vegetation coverage	0.088	0.057	—	—
土地利用 Land use	0.043	0.097	0.023	—
高程 Elevation	0.037	0.057	0.036	0.008

注Note:对角线为单因子q值,非对角线为交互q值。Values on the diagonal represent q-values for individual factors; values off the diagonal represent q-values for factor interactions.

3 讨 论

1989年,"长治"水土保持工程开始在王家桥小流域实施。本研究结果表明,1989—2021年王家桥小流域降雨量与降雨侵蚀力均没有明显趋势性变化,而同期的年径流量与年产沙量均显著下降,而且径流、泥沙均在1999年前后发生突变,这与Fang等[10]在该区域的研究结论一致。水沙响应关系调整

的时间突变节点晚于水保工程实施的时间，这符合水土保持措施效益滞后的普遍规律，其原因主要与植被恢复的累积效应及工程措施初期扰动有关[5,23]。综上，王家桥小流域水沙突变源于其下垫面条件（如植被恢复与土地利用调整）的根本性改善，而非降雨等气候因子驱动。

降雨侵蚀力与年产沙量之间存在较强的年际相关性，表明降雨仍是诱发侵蚀的重要动力[24-25]；然而，年降雨量与R因子均未呈现显著趋势性变化，无法解释产沙量“阶梯式”持续下降的长期趋势。在排除气候因子趋势性影响后，人类活动成为驱动流域减沙的主要因素[26]。基于实测数据与CSLE模型的对比分析结果进一步表明，人类活动的减沙贡献率随空间尺度扩大而显著增强：在坡面侵蚀环节为71.3%，在流域出口输沙环节则上升至88.7%。本研究地理探测器的因子解析结果也支持上述判断，植被覆盖度与土地利用类型对土壤侵蚀空间分异的解释力最强，且二者交互作用显著增强，这与三峡库区相关研究结论一致[27-28]。此外，坡度与土地利用、植被的交互作用可共同解释大部分侵蚀空间异质性[29]，而土地利用变化对植被提升贡献显著，进一步促进了泥沙输移的减少[30]。以上结果综合说明，人类活动（水土流失治理）通过植被恢复与土地利用优化等途径持续改善流域下垫面条件，并在流域尺度上形成减沙效果的放大效应。

CSLE估算的小流域侵蚀模数与小流域出口实测产沙量均呈下降趋势，流域泥沙输移比由治理初期（基准期）的0.63下降至后期（变化期）的0.46。泥沙输移比的下降表明，单位坡面侵蚀量转化为流域出口输沙量的比例明显降低。一方面，植被恢复与退耕还林直接减少了坡面土壤剥离（源头控制）；另一方面，梯田、塘堰及植被缓冲带等地表措施通过增大粗糙度、削减径流能量，促进了泥沙在坡沟系统中的沉积与滞留。研究显示，三峡库区植被恢复不仅抑制坡面侵蚀，也改变了泥沙输移路径[31-32]。坡面侵蚀减弱与泥沙输移条件变化共同影响了流域泥沙的输出，使部分泥沙在流域内部沉积滞留，从而降低了输移比。结合王家桥小流域水土保持措施的布局特征，泥沙滞留主要可能发生在坡面植被恢复区、坡脚梯田以及沟道塘堰等措施区域。这体现了“源-汇”系统的双重调控机制，说明水土保持措施在源头控制与输移过程2个环节均发挥了重要减沙作用[33]。

综上所述，1989—2021年，王家桥小流域的气候无显著变化，而同期的水沙演变以1999年为显著突变点，在此后年径流量与年产沙量均呈极显著下降趋势（$P<0.01$）。从空间过程来看，2020年流域平均土壤侵蚀模数较1990年下降了84.3%，泥沙输移比由治理初期（1990—1995年）的0.63显著降至0.46（2000—2020年）。定量归因证实，人类活动对王家桥小流域出口产沙减少的贡献率高达88.7%，明显高于其对坡面侵蚀减少的贡献率（71.3%）。王家桥小流域侵蚀与产沙的“源-汇”差异表明，退耕还林与水土保持工程在削弱坡面侵蚀“源”的同时，也通过改变坡沟系统径流与泥沙输移条件，使得更多泥沙在流域内部沉积滞留，从而主导了流域产沙量的长期衰减。

参考文献 References

[1] VANMAERCKE M, MAETENS W, POESEN J, et al. A comparison of measured catchment sediment yields with measured and predicted hillslope erosion rates in Europe[J]. Journal of soils and sediments, 2012, 12(4): 586-602.

[2] ZHANG S H, LI Z H, HOU X N, et al. Impacts on watershed-scale runoff and sediment yield resulting from synergetic changes in climate and vegetation[J]. CATENA, 2019, 179: 129-138.

[3] NEARING M A, JETTEN V, BAFFAUT C, et al. Modeling response of soil erosion and runoff to changes in precipitation and cover[J]. CATENA, 2005, 61(2/3): 131-154.

[4] WANG L, SHI Z H, WANG J, et al. Rainfall kinetic energy controlling erosion processes and sediment sorting on steep hillslopes: a case study of clay loam soil from the Loess Plateau, China[J]. Journal of hydrology, 2014, 512: 168-176.

[5] ZHANG B Q, HE C S, BURNHAM M, et al. Evaluating the coupling effects of climate aridity and vegetation restoration on soil erosion over the Loess Plateau in China[J]. Science of the total environment, 2016, 539: 436-449.

[6] YU Y, WEI W, CHEN L D, et al. Quantifying the effects of precipitation, vegetation, and land preparation techniques on runoff and soil erosion in a Loess watershed of China[J]. Science of the total environment, 2019, 652: 755-764.

[7] 夏艳华，张平仓. 基于侵蚀力学机制的流域土壤侵蚀模型研究：以长江三峡库区王家桥流域为例[J]. 水土保持学报，2003, 17(1): 152-154. XIA Y H, ZHANG P C. Study on watershed soil erosion models based on erosion mechanics mechanism: taking Yangtze River Three Gorges Reservoir area as an example[J] Journal of soil and water conservation, 2003, 17(1): 152-154(in Chinese with English abstract).

[8] 蔡崇法，丁树文，史志华，等. 应用USLE模型与地理信息系统IDRISI预测小流域土壤侵蚀量的研究[J]. 水土保持学报，

2000,14(2):19-24.CAI C F,DING S W,SHI Z H,et al. Study of applying USLE and geographical information system IDRISI to predict soil erosion in small watershed[J].Journal of soil and water conservation,2000,14(2):19-24(in Chinese with English abstract).

[9] SHI Z H,CAI C F,DING S W,et al.Soil conservation planning at the small watershed level using RUSLE with GIS:a case study in the Three Gorge Area of China[J].CATENA,2004,55(1):33-48.

[10] FANG N F,SHI Z H,LI L,et al.The effects of rainfall regimes and land use changes on runoff and soil loss in a small mountainous watershed[J].CATENA,2012,99:1-8.

[11] FANG N F,SHI Z H,YUE B J,et al.The characteristics of extreme erosion events in a small mountainous watershed[J/OL].PLoS One,2013,8(10):e76610[2026-01-30].https://doi.org/10.1371/journal.pone.0076610.

[12] 秦文静,王云琦,王彬,等.土地利用和气候变化对王家桥小流域径流的影响[J].水文,2019,39(2):49-54.QIN W J,WANG Y Q,WANG B,et al.Impacts of land use and climate change on runoff in Wangjiaqiao watershed[J].Journal of China hydrology,2019,39(2):49-54(in Chinese with English abstract).

[13] WALLING D E.The sediment delivery problem[J].Journal of hydrology,1983,65(1/2/3):209-237.

[14] FU B J,LIU Y,LÜ Y H,et al.Assessing the soil erosion control service of ecosystems change in the Loess Plateau of China[J].Ecological complexity,2011,8(4):284-293.

[15] HECKMANN T,CAVALLI M,CERDAN O,et al.Indices of sediment connectivity:opportunities,challenges and limitations[J].Earth-science reviews,2018,187:77-108.

[16] 黄波林,殷跃平,李滨,等.三峡工程库区岩溶岸坡岩体劣化及其灾变效应[J].水文地质工程地质,2020,47(4):51-61.HUANG B L,YIN Y P,LI B,et al.Rock mass deterioration and its catastrophic effect of Karst bank slope in the Three Gorges Project Reservoir area[J].Hydrogeology & engineering geology,2020,47(4):51-61(in Chinese with English abstract).

[17] 邓欧,尹忠东,冯仲科,等.四川省长江上游水土保持工程生态经济综合评价[J].农业工程学报,2010,26(5):88-95.DENG O,YIN Z D,FENG Z K,et al.Comprehensive evaluation for ecological economy of soil and water conservation engineering in Upper Yangtze River in Sichuan Province[J].Transactions of the CSAE,2010,26(5):88-95(in Chinese with English abstract).

[18] 封扬帆,李鹏,张祎,等.西柳沟流域拦沙坝沟道冲刷减蚀能力模拟[J].水土保持学报,2022,36(5):24-31.FENG Y F,LI P,ZHANG Y,et al.Simulation on the gully erosion reduction ability of check dam in Xiliugou basin[J].Journal of soil and water conservation,2022,36(5):24-31(in Chinese with English abstract).

[19] McCOOL D K,FOSTER G R,MUTCHLER C K,et al.Revised slope length factor for the universal soil loss equation[J].Transactions of the ASAE,1989,32(5):1571-1576.

[20] LIU B Y,NEARING M A,RISSE L M.Slope gradient effects on soil loss for steep slopes[J].Transactions of the ASAE,1994,37(6):1835-1840.

[21] LIU B Y,NEARING M A,SHI P J,et al.Slope length effects on soil loss for steep slopes[J].Soil science society of America journal,2000,64(5):1759-1763.

[22] 《第一次全国水利普查成果丛书》编委会.第一次全国水利普查成果丛书[M].北京:中国水利水电出版社,2017.Compilation Committee of the "*First National Water Resources Census Achievements Series*".First national water resources census achievements series[M].Beijing:China Water Power Press,2017(in Chinese).

[23] ZHAO Z X,HUO A D,CHENG Y X,et al.Impacts of different gully consolidation and highland protection models on the runoff and sediment yield in small watershed of the Chinese Loess Plateau:a case study of Fengbugou in Qingyang City of Gansu[J/OL].Water,2023,15(15):2764[2026-01-30].https://doi.org/10.3390/w15162971.

[24] SHI D M,JIANG G Y,PENG X D,et al.Relationship between the periodicity of soil and water loss and erosion-sensitive periods based on temporal distributions of rainfall erosivity in the Three Gorges Reservoir Region,China[J/OL].CATENA,2021,202:105268[2026-01-30].https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105268.

[25] ZHOU J,BAO Y H,HE X B,et al.Risk analysis of rainfall erosion on upland adjacent to riparian zone of the Three Gorges Reservoir[J/OL].CATENA,2023,232:107458[2026-01-30].https://doi.org/10.1016/j.catena.2023.107458.

[26] 栗珂珂,周詹杭,王真.中国土壤侵蚀的社会经济空间驱动因素研究:基于多尺度地理加权回归模型的分析[J].华中农业大学学报,2024,43(6):29-38.LI K K,ZHOU Z H,WANG Z.Analyzing socio-economic spatial factors driving soil erosion in China based on multi-scale geographically weighted regression model[J].Journal of Huazhong Agricultural University,2024,43(6):29-38(in Chinese with English abstract).

[27] HUANG C B,ZHOU Z X,TENG M J,et al.Effects of climate,land use and land cover changes on soil loss in the Three Gorges Reservoir area,China[J].Geography and sustainability,2020,1(3):200-208.

[28] LI S C,BING Z L,JIN G.Spatially explicit mapping of soil conservation service in monetary units due to land use/cover change for the Three Gorges Reservoir area,China[J/OL].Remote sensing,2019,11(4):468[2026-01-30].https://doi.org/10.3390/rs11040468.

[29] CHU L,SUN T C,WANG T W,et al.Temporal and spatial heterogeneity of soil erosion and a quantitative analysis of its determinants in the Three Gorges Reservoir area,China[J/OL].International journal of environmental research and public

health, 2020, 17(22): 8486[2026-01-30]. https://doi.org/10.3390/ijerph17228486.

[30] MA Y M, LI M Y, YAO H M, et al. Change of NDVI in the upper reaches of the Yangtze River and its influence on the water - sand process in the Three Gorges Reservoir[J/OL]. Sustainability, 2025, 17(2): 739[2026-01-30]. https://doi.org/10.3390/su17020739.

[31] TENG M J, HUANG C B, WANG P C, et al. Impacts of forest restoration on soil erosion in the Three Gorges Reservoir area, China[J/OL]. Science of the total environment, 2019, 697: 134164[2026-01-30]. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134164.

[32] XIAO Y, XIAO Q, XIONG Q L, et al. Effects of ecological restoration measures on soil erosion risk in the Three Gorges Reservoir area since the 1980s[J/OL]. GeoHealth, 2020, 4(12): e2020GH000274 [2026-01-30]. https://doi.org/10.1029/2020GH000274.

[33] 王丹, 邵景安, 王金亮, 等. 近 20 a 三峡库区泥沙输移比估算与吸附态氮磷污染负荷模拟[J]. 农业工程学报, 2015, 31(15): 167-176. WANG D, SHAO J A, WANG J L, et al. Estimation of sediment delivery ratio and modelling of absorbed nitrogen and phosphorus load in Three Gorges Reservoir area nearly 20 years[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(15): 167-176(in Chinese with English abstract).

Evolution of erosion and sediment yield in a typical small watershed in Three Gorges Reservoir area over past 30 years and its source-to-sink regulation mechanisms

LI Kuo[1], DONG Zhaohuan[1,2], LIN Lirong[1], ZHANG Nali[1], FU Xiaowen[3], GAO Chao[4]

1. *College of Resources and Environment, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China*;
2. *Songxian County Plant Protection and Quarantine Station, Luoyang 471400, China*;
3. *Zigui County Bureau of Water Resources and Lake Management, Yichang 443600, China*;
4. *Hubei Province Monitoring Center of Soil and Water Conservation, Wuhan 430071, China*

Abstract　The implementation of key projects of conserving soil and water in the upper reaches of the Yangtze River has effectively promoted the control of soil erosion in the Wangjiaqiao small watershed in the Three Gorges Reservoir area. Mann-Kendall test, double cumulative curve method, Chinese Soil Loss Equation (CSLE), and Geodetector model were comprehensively used to analyze data including the rainfall, runoff, sediment, soil properties, topography, land use, and vegetation coverage collected at the Wangjiaqiao small watershed control station from 1989 to 2021 to clarify the coupling regulation mechanism between erosion "source" and sediment "sink" after implementing the project. The results showed that there was no significant change in the annual rainfall and rainfall erosivity in small watershed in the past 33 years. The annual runoff and sediment yield had a significant downward trend ($P<0.01$), with an average annual decrease of 1.46×10^5 m^3 and 493.4 t, respectively, and both experienced sudden changes around 1999. Compared to 1990, the soil erosion modulus in 2020 decreased by 84.3%. The overall intensity of soil erosion in the watershed shifted towards micro-erosion. The sediment yield modulus at the outlet of the watershed decreased by 90.8%, and the sediment delivery ratio decreased from 0.74 to 0.43. The contribution rates of human activities including optimizing land use and improving vegetation coverage to the reduction of slope sediment yield and watershed sediment delivery were 71.3% and 88.7%, respectively. It is indicated that the key projects of preventing and controlling soil and conserving water in the upper reaches of the Yangtze River have achieved sustainable and effective control of sediment at the watershed scale by optimizing the structure of land use and increasing vegetation coverage.

Keywords　erosion; sediment yield; source-sink relationship; CSLE model; small watersheds in the Three Gorges Reservoir area

(责任编辑：陆文昌)