

基于水文连通性的流域输沙量评估 ——以堵河流域为例

张媛平, 刘成帅, 肖海兵, 王 剑, 史志华

(华中农业大学 资源与环境学院, 武汉 430070)

摘 要:水文连通性是指泥沙、营养盐等各种物质以水为载体,在空间异质景观或斑块间进行迁移、传输或扩散的便利程度,对流域产沙具有重要影响。为评估基于水文连通性模拟流域输沙量的可行性,以堵河流域为研究对象,分析了 1990—2010 年流域土壤侵蚀、水文连通性的时空变化特征,并以此估算了流域输沙量。结果表明:1990—2000 年流域土壤侵蚀模数与连通程度不断增加,连通性等级主要由低和中低连通性转变为中高和高连通性。2000—2010 年流域连通程度和土壤侵蚀模数均呈现不断减小的趋势。此外,输沙量估算值与实测值具有显著的线性关系($R^2 = 0.92$),但由于未考虑水库、湖泊等对泥沙输移的拦截效应,输沙量估算值要高于实测值,后续研究需将其纳入模型以更准确地评估流域输沙量。研究结果对于提高模型的适用性以及理解流域泥沙输移过程具有重要意义。

关键词:土壤侵蚀; 水文连通性; 输沙量; 堵河流域; IC 指数

中图分类号:P333.4

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2022)03-0064-07

Evaluation of Watershed Sediment Yield Based on Hydrological Connectivity — A Case Study of Upper Duhe Watershed

ZHANG Yuanping, LIU Chengshuai, XIAO Haibing, WANG Jian, SHI Zhihua

(College of Resources and Environment, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China)

Abstract: Hydrological connectivity refers to the convenience of sediment, nutrients and other materials to migrate, transport or diffuse between spatial heterogeneous landscapes or patches with water as the carrier, which has an important impact on sediment yield. The spatial and temporal variation characteristics of soil erosion and hydrological connectivity were analyzed. Furthermore, the sediment yield of the watershed was further estimated based on the empirical model related to connectivity index and sediment delivery ratio. The results show that the soil erosion modulus and IC index increased continuously during the period 1990—2000; the connectivity level increased from low connectivity and medium-low connectivity to medium-high connectivity and high connectivity; both IC value and soil erosion modulus showed a decreasing trend during the period 2000—2010; in addition, there was a significant linear relationship between the estimated sediment yield and the measured value ($R^2 = 0.92$), but the overestimated sediment yield was observed in this study, which might be related to the interception effect of reservoirs and lakes; it is necessary to incorporate them into the model for further research to more accurately evaluate sediment yield. These results are of the great significance for improving the applicability of the model and understanding the sediment yield processes in the watershed.

Keywords: soil erosion; hydrological connectivity; sediment yield; upper Du watershed; IC index

流域输沙会导致土壤养分流失、污染物扩散和河道淤积,对农业生产和水质健康具有重要影响^[1-2]。针对流域输沙过程及其影响因素^[3-5],国内外学者已经开展

了大量研究。例如,Ranzi 等^[6]评估了水库修建对越南 Lo River 流域输沙量的影响,指出修建水库显著削弱了流域出口的泥沙产量。Wang 等^[7]利用泥沙归因诊断,

收稿日期:2021-04-17

修回日期:2021-05-22

资助项目:国家自然科学基金“流域水文连通性对侵蚀产沙过程的影响与机理”(41930755)

第一作者:张媛平(1997—),男,内蒙古乌兰察布市人,硕士研究生,主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail:zhangyp@webmail.hzau.edu.cn

通信作者:肖海兵(1991—),男,湖南娄底人,博士后,博士,主要从事流域水文连通性与物质运移研究。E-mail:xiaohaibing@mail.hzau.edu.cn

探究了黄河流域输沙量变化的原因,分析了降水、径流系数和含沙量等因素对黄河泥沙量减小的贡献。虽然以往研究已取得较大进展,但对于流域内部的输沙过程仍然缺乏了解。近年来,水文连通性的概念逐渐被研究者关注,它为解决流域输沙过程及其时空变异特征提供了可能,逐步成为研究热点^[8]。

水文连通性是指泥沙、营养盐、生物体等各种物质以水为载体,在空间异质景观或斑块间进行迁移、传输或扩散的便利程度^[9]。根据其功能定位,可分为结构连通性和功能连通性。结构连通性反映了流域景观单元的空间分布特征,可通过连通性指数定量表征。目前应用较为普遍的有汇流路径长度指数 Flowlength^[10]、方向性渗透指数 DLI^[11]、地形湿度指数 TWI^[12]和连通性指数 IC 等^[13]。由于 IC 指数计算简单、数据要求低且精度高,应用最为广泛^[14-15]。近年来,国内外学者尝试将 IC 指数与土壤侵蚀模型相结合,以评估流域输沙量^[8]。例如,Zhao 等^[16]通过应用 IC 指数与泥沙输移比的经验关系,准确评估了黄土高原延河流域输沙量。Sean 等^[17]结合 RUSLE 模型与 IC 指数,绘制了流域输沙空间分布图,强调基于水文连通性评估流域输沙量的可行性。虽然,相关研究已证实基于水文连通性可有效评估流域输沙量,但不同流域自然背景差异较大,受人类影响的程度也不同。因此,模型的适用性仍需进一步研究。

堵河流域位于湖北省西北部汉江南岸,流域内山脉连绵、坡陡、谷深、地势落差大,是水土流失多发地区^[18]。流域经历了耕作和再造林时期,输沙量年变化显著。因此,本文以堵河流域为研究对象,分析流域退耕前后土壤侵蚀模数和水文连通性的时空特征,并基于 IC 指数进一步估算流域输沙量,评估基于水文连通性估算流域输沙量的可行性。研究结果对于提高模型的适用性以及理解流域泥沙输移过程具有重要意义。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

本研究以竹山站为界的堵河流域(31°30′—32°37′,109°11′N—110°25′E)为研究对象(图 1),流域面积为 8973 km²,地势西南高东北低,以亚高山地貌为主。该地区属于北亚热带季风气候,年均气温 14℃,年均降雨量 810 mm,主要集中在 6—10 月。土壤类型主要以黄棕壤为主(占流域总面积 70%以上),有机质含量丰富,易被降水冲刷和淋溶^[19]。域内植被覆盖率高,类型多样,主要有亚热带常绿阔叶林和常绿落叶阔叶混交林。年均径流量约为 5.03×10^9 m³,多年平均输沙量为 3.62×10^6 t,年平均侵蚀模数为

4.04 万 t/hm²。为有效防控水土流失,当地政府先后实施了一系列水土流失防治措施,如“丹江口水库水源区水土保持重点防治工程”等。结合堵河流域的历史背景,将研究时段划分为 P₁(1990—2000 年,退耕前)和 P₂(2000—2010 年,退耕后)两个时期。

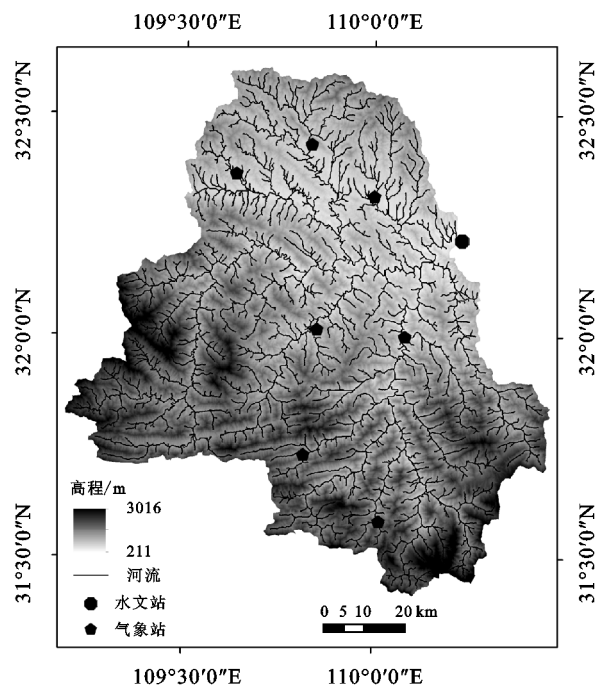


图 1 堵河流域地理位置

1.2 数据来源

流域 1990 年、1995 年、2000 年、2005 年、2010 年的遥感影像数据,来源于中国科学院计算机网络信息中心地理空间数据云平台(<http://www.gscloud.cn>)。数字高程模型(DEM)来源于国家基础地理信息中心,比例尺为 1:5 万。土地利用主要为耕地、林地、草地、水域和居民用地,来源于中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn>)。降雨数据和水文数据来源于湖北省水利厅,包括流域内 7 个气象站日尺度降雨量数据及竹山水文站日径流泥沙数据。土壤可蚀性因子(K)源于国家科技基础条件平台—国家地球系统科学数据中心—地理资源分中心。本研究用数据空间分辨率均为 30 m,与国内外其他类似研究一致^[4-6, 16]。

1.3 侵蚀模数估算

采用 RUSLE 模型^[20]估算土壤侵蚀模数:

$$A = R \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P$$

式中:A 为土壤侵蚀模数 t/(hm²·a);R 为降雨侵蚀力因子[MJ·mm/(hm²·h·a)],采用章文波等^[21]提出的基于日降雨量的半月降雨侵蚀力模型计算;K 为土壤可蚀性因子[t·h/(MJ·mm)],依据国家地球系统科学数据中心绘制的全国 30 m 分辨率的土壤类型分布图进行计算;LS 是坡长坡度因子(无量纲),采用 Wischmeier 等^[22]和刘宝元等^[23]的方法计

算; C 为植被覆盖与管理因子(无量纲),采用 Dur-
igon 等^[24]提出的基于归一化植被指数(NDVI)的方
法计算; P 为水土保持措施因子(无量纲),采用 Fu
等^[25]基于坡度的方法计算。计算公式如下:

$$P=0.2+0.03S$$

式中: S 为坡度(%)。根据水利部颁布的《土壤侵蚀
分级标准》(SL190-2007),将流域土壤侵蚀划分为 6
个等级:微度、轻度、中度、强烈、极强烈和剧烈。

1.4 水文连通性评估

采用 IC 指数评估流域水文连通性:

$$IC=\lg(\frac{D_{up}}{D_{dn}})=\lg(\frac{WS\sqrt{A}}{\sum_i\frac{d_i}{W_iS_i}})$$

式中: W 为上坡贡献区的平均权重因子(无量纲),用
RUSLE 模型中的 C 因子定量表征; S 是上坡贡献区
的平均坡度(m/m); A 是上坡贡献区的面积(m²); d_i
是沿着水流路径第 i 个单元的长度(m); W_i 是第 i 个
单元的权重(无量纲); S_i 是第 i 个单元的坡度(m/
m)。IC 范围为 $[-\infty, +\infty]$,其值越大,表明水文连
通性越大。为了更好地解释结果,采用 Crema 和
Cavalli 等^[26]的方法将 IC 值分为 4 个等级:低、中低、
中高和高连通性。

1.5 泥沙输移比(SDR)和输沙量估算

采用 SDR 分布式模型计算泥沙输移比,公式如下:

$$SDR=\frac{SDR_{max}}{1+\exp(\frac{IC_{0,i}-IC_i}{K_{IC,i}})}$$

式中: SDR_{max} 为流域内泥沙输移比最大值,取值范围
为 $[0, 1]$; $IC_{0,i}$ 及 $K_{IC,i}$ 是校正参数,分别取 0.5, 2^[27],
 IC_i 为第 i 个单元的 IC 值。

流域输沙量计算如下:

$$Q=\sum_{i=1}^nE_i\cdot SDR_i$$

式中: Q 为输沙量(t/a); E_i 为第 i 个单元的侵蚀量
(t/a); SDR_i 为第 i 个单元的泥沙输移比(无量纲); n
是流域像元总数。

1.6 统计分析

利用 SPSS 22.0 软件进行输沙量估算值和实测
值间的相关性分析;利用 MATLAB 计算均方根误差
(RSME)和平均绝对误差(MAE),评估实测输沙量
和估算值间的相对偏差,确定模拟的准确性。

2 结果与分析

2.1 土壤侵蚀模数时空分布特征

流域土壤侵蚀模数呈现先增大后减小的趋势。
2000 年流域土壤侵蚀模数最大,为 17.17 t/(hm² · a);
2010 年最小,为 3.48 t/(hm² · a)。P₁ 时期,流域土壤侵
蚀模数增加了 215.05%,其中轻度侵蚀面积增加了
41.86%,中度侵蚀和强烈以上侵蚀面积呈指数增加。P₂
时期,土壤侵蚀等级主要由轻度向微度侵蚀转变(表 1,
图 2)。流域东北部、北部和河道附近土壤侵蚀模数大,
西南、南部和中北部平原地区侵蚀模数小。总的来说,
土壤侵蚀空间分布呈现边缘大,中间小的特点。微度侵
蚀集中于流域中北部平原丘陵区,在坡度为 15°~35°的
区域零散分布;轻度侵蚀与中度侵蚀主要分布在流域北
部和东北部坡度>25°的区域(图 3);强烈侵蚀及以上侵
蚀主要以点和线状分布在流域东、北及河道景观附近。

表 1 流域土壤侵蚀等级面积占比及其变化

侵蚀等级	各侵蚀等级面积占			面积变化率/%	
	流域总面积的百分比/%				
	1990 年	2000 年	2010 年	P ₁	P ₂
微度	61.00	24.73	78.57	-59.46	217.70
轻度	37.70	53.49	21.05	41.86	-60.65
中度	1.18	16.67	0.35	1316.89	-97.92
强烈及以上	0.12	5.11	0.04	4149.24	-99.24

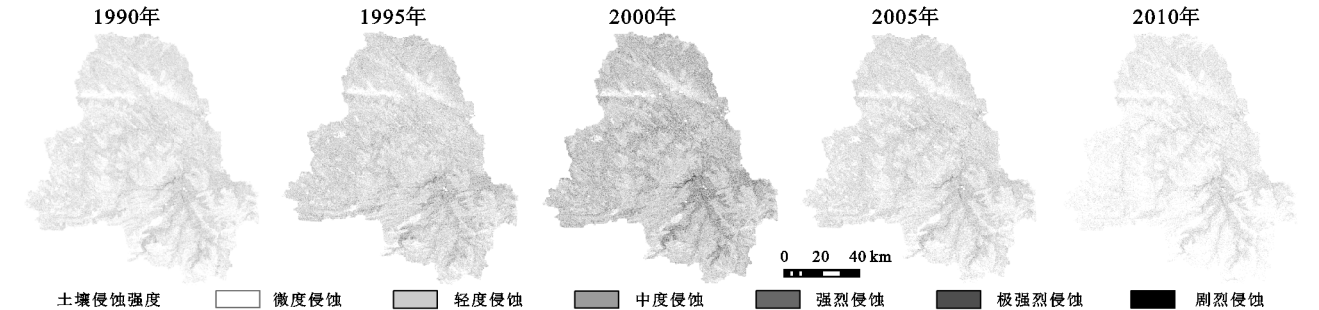


图 2 堵河流域土壤侵蚀等级分布

2.2 水文连通性的时空变化规律

由表 2 看出,2000 年流域 IC 均值最高,为 0.08;2010
年最低,为-1.11。P₁ 时期,IC 均值增加了 114.81%。其
中,中高和高连通性面积分别增加了 24.99%和 16.37%。
P₂ 时期流域 IC 均值减小了 105.56%,中高连通性及

以上的面积减小了 66.38%,而低和中低连通性面积
分别增加了 54.9%和 12.0%(图 4—5)。总的来说,
1990—2010 年流域 IC 值呈现先增大后减小的变化
趋势。此外,IC 值呈现“靠近河道大、远离河道小”的
空间分布特征。流域低连通性主要分布在居民用

地和林地,中低和中高连通性集中分布在坡度较陡的坡耕地与沟谷附近,高连通性则主要分布在流域坡度>25°的地区和靠近河道的区域。

表 2 堵河流域 IC 值统计

年份	最小值	最大值	平均值
1990	-6.98	4.24	-0.54
1995	-6.36	4.77	-0.01
2000	-6.24	4.71	0.08
2005	-7.16	4.22	-0.65
2010	-7.76	3.75	-1.11

2.3 流域输沙量估算

流域输沙量估算值呈现先增大后减小的年际变化趋势。2000 年输沙量估算值最大,为 9.42×10^6 t/a,2010 年最小,为 1.27×10^6 t/a。输沙量实测值与估算值呈现明显的线性关系($R^2=0.92$)(图 6),均方根误差(RSME)与平均绝对误差(MAE)表明估算输沙量与实测输沙量间差异较小(RSME=2.81;MAE=2.01),模拟结果可接受。但是,流域输沙量估算值均大于实测值,其中 2000 年流域输沙量估算甚至达到实测值的 2.5 倍。研究结果表明基于 IC 指数与 SDR 的关系模型估算流域输沙量可能会在一定程度上造成数值偏高。

3 讨论

研究结果表明退耕前(P₁时期)堵河流域主要土壤侵蚀等级由微度逐渐转变为轻度,退耕后(P₂时期)则主要由轻度转变为微度。以往研究指出土壤侵蚀年际变化主要受土地利用、降雨与地形等因素的影响^[28]。自 20 世纪 70—80 年代“家庭联产承包责任制”在全国范围的推广,堵河流域大面积林地和草地被开垦为耕地,这一举措加剧了水土流失与土地退化,导致 P₁时期土壤侵蚀模数显著增加。90 年代末国家“退耕还林”政策的施行,以及当地政府先后启动了“丹江口水库水源区水土保持重点防治工程”、“生态县”和“农发基金”等建设项目。流域林地和草地面积得以恢复,土壤侵蚀模数和侵蚀等级不断下降(2000 年>2005 年>2010 年)。其次,降雨量是流域土壤侵蚀变化的关键影响因子^[29]。2000 年流域降雨量最大,其年降雨侵蚀力最高,因而其对表层土壤的剥蚀和运输能力最大。与之相反,2010 年流域降雨量大于 1995 年和 1990 年,但其土壤侵蚀模数却最小,这可能是由于土地利用变化对土壤侵蚀的影响远大于降雨所造成的。此外,坡度^[23]对土壤侵蚀也具有重要影响,主要表现为坡度越陡,侵蚀发生的潜力越大。以上结果与黄莹等^[19]在该流域的研究结果一致。

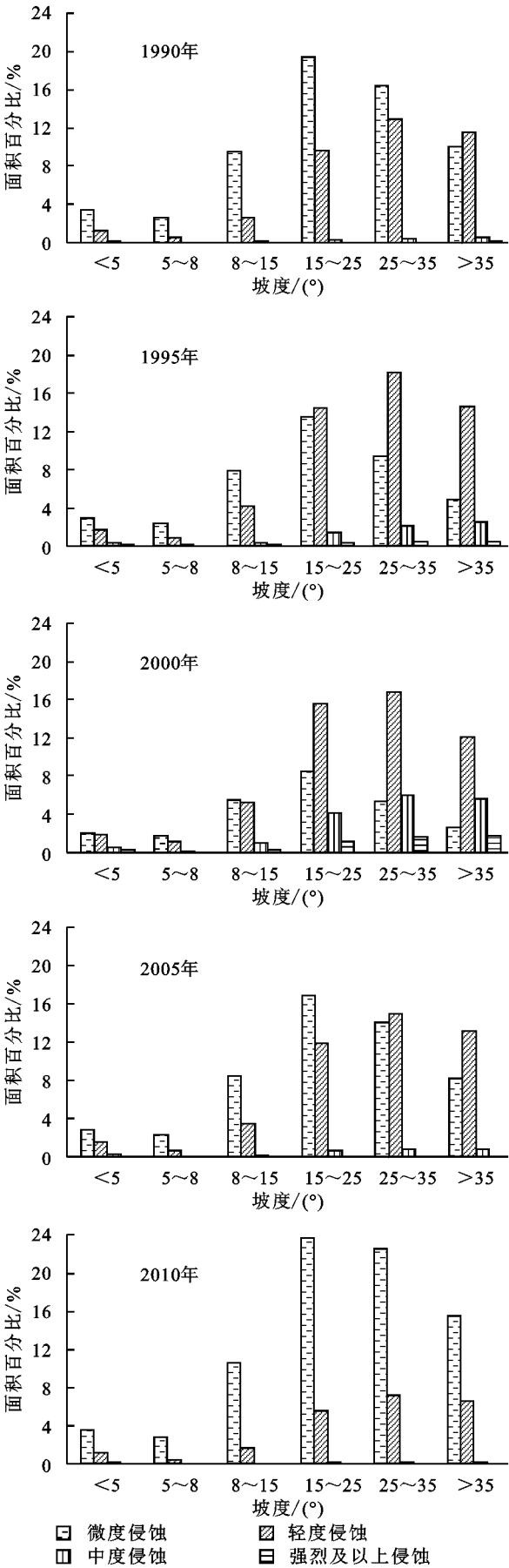


图 3 不同坡度土壤侵蚀等级面积占比

水文连通性与土壤侵蚀的年际变化趋势一致,主

要受流域土地利用、植被和地形的影响。其中土地利用变化可能是影响水文连通性的关键因素。土地利用通过改变地表粗糙度、土壤有机质含量、土壤结构和入渗速率^[30],进而影响水文连通性。相比耕地,林地和草地具有较高的保水能力和泥沙拦截系数,水文连通性较低。因而,退耕前流域连通程度增大与耕地面积增加密切相关。其次,植被主要通过植被密度和群落结构影响水文连通性。通过冠层截留,枯落物蓄水、改善土壤结构延缓和阻碍径流,降低水文

连通性^[31]。袁亚男等^[32]分析了昕水河流域的土地利用/覆被与水文连通性的关系,指出 IC 指数受土地利用/覆被的影响较为明显,不同土地利用/覆被下的水文连通性差异显著,而同一土地利用/植被覆盖条件下的水文连通性则变化较小。此外,流域地形(坡度等)会影响地表径流产生和发展。通常坡度越陡,地表径流产生的概率越大,水文连通性越强^[33]。堵河流域东南部坡度普遍大于西北部,因而该区域水文连通性较大。

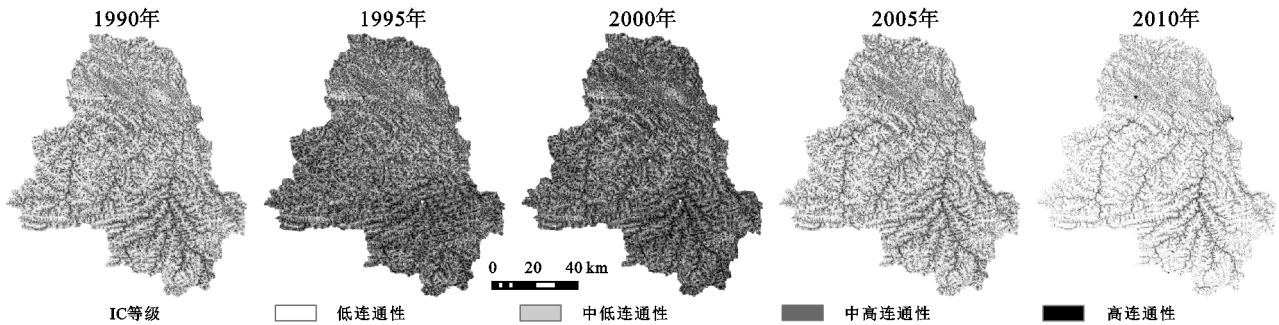


图 4 堵河流域 IC 等级分布

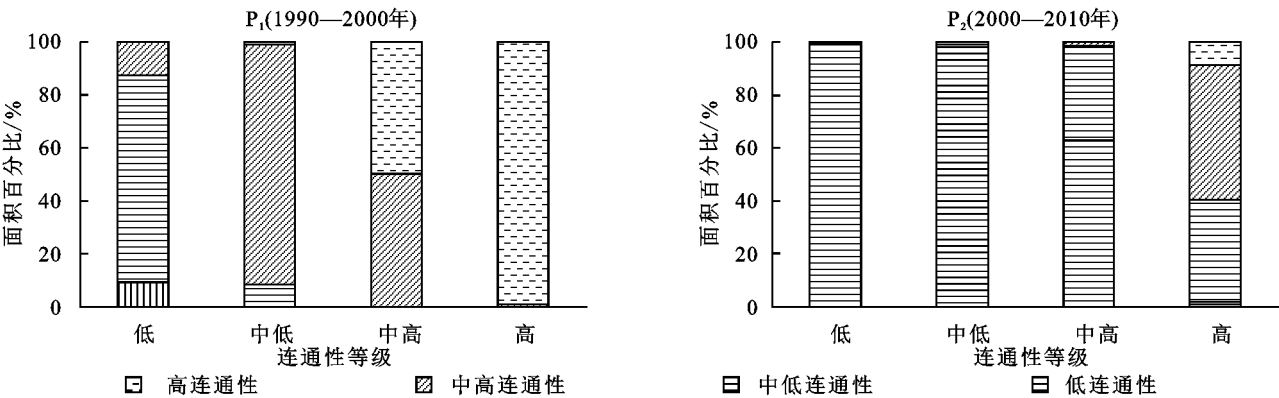


图 5 不同时期水文连通性等级的面积变化

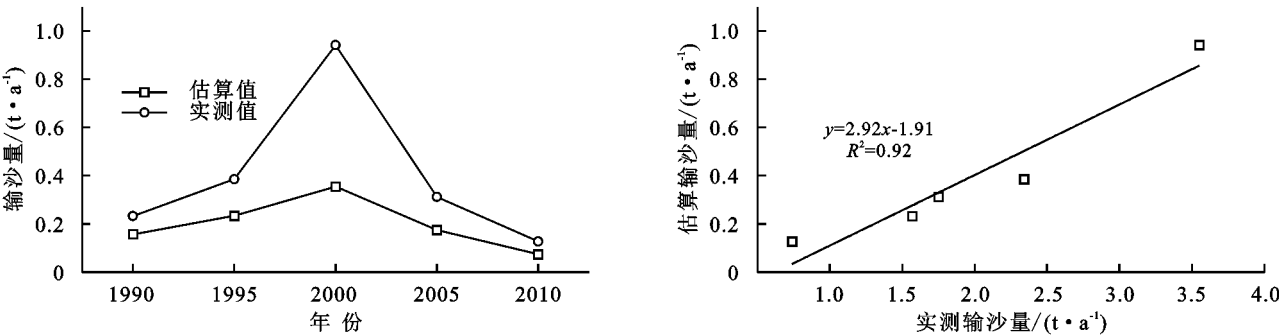


图 6 输沙量估算值和实测值

本研究基于 IC 指数进一步估算了流域输沙量,结果显示流域输沙量估算值与实测值具有显著的线性关系($R^2=0.92$),但估算值要高于实测值。这表明该模型会高估流域实测输沙量。本文的研究结果与 Zhao 等^[16]在黄土高原延河流域类似研究的结果相似,他们认为模型总体上可以较好的估算出低值年输沙量,

而对高输沙量会产生错误估计。主要原因是水库、大坝的运行,会导致下游实测泥沙量出现异常变化,从而导致模型对泥沙量的高估或低估。本研究认为产生该结果的原因如下:(1) IC 指数是基于流域土地利用和地形参数建立起来的,并未考虑降雨,入渗等的影响,因而导致估算值与实测值存在偏差;(2) 流

域内水库和湖泊的建造,会影响河流流速,降低水体含沙量,进而拦截相当数量的泥沙,降低流域输沙量。本研究结果证明了基于IC指数评估流域输沙量的可行性,为该模型的广泛应用提供了依据。后续研究需充分考虑沟渠、水库、湖泊等人为工程设施对流域输沙的影响,改进模型以更准确评估流域输沙量。

4 结论

流域土壤侵蚀模数和IC值均呈现先增加后减小的年际变化趋势。2000年,流域土壤侵蚀模数最大,为 $17.17 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$,侵蚀强度以轻度侵蚀为主;平均IC值为0.18,水文连通性最强。2010年,流域土壤侵蚀模数最小,为 $3.48 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$,侵蚀强度以微度侵蚀为主;IC均值为-1.11,连通程度最弱。此外,流域水文连通性呈现“靠近河道大,远离河道小”的空间分布特征。流域输沙量估算值与实测值均呈现先增大后减小的年际变化规律。RSME(2.81)和MAE(2.01)表明两者差异较小,模拟结果可接受。但由于模型尚未考虑水库等对流域输沙的影响,导致输沙量估算值大于实测值。因此,后续研究中应进一步改进模型以准确评估流域输沙量。

参考文献:

- [1] 冯家豪,赵广举,穆兴民,等.黄河中游泥沙输移特性及机理研究[J].泥沙研究,2020,45(5):34-41.
- [2] 李占斌,朱冰冰.土壤侵蚀与水土保持研究进展[J].土壤学报,2008,45(5):802-809.
- [3] Chuenchum P, Xu M Z, Tang W Z. Predicted trends of soil erosion and sediment yield from future land use and climate change scenarios in the Lancang-Mekong River by using the modified RUSLE model[J]. International Soil and Water Conservation Research, 2020,8(3):213-227.
- [4] Aneseyee A B, Elias E, Soromessa T, et al. Land use/land cover change effect on soil erosion and sediment delivery in the Winike watershed, Omo Gibe Basin, Ethiopia[J]. Science of the Total Environment, 2020,728:138776, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138776>.
- [5] Rajbanshi J, Bhattacharya S. Assessment of soil erosion, sediment yield and basin specific controlling factors using RUSLE-SDR and PLSR approach in Konar river basin, India [J]. Journal of Hydrology, 2020,587:124935, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.124935>.
- [6] Ranzi R, Le T H, Rulli M C. A RUSLE approach to model suspended sediment load in the Lo River (Vietnam): Effects of reservoirs and land use changes [J]. Journal of Hydrology, 2012,422(5):17-29.
- [7] Wang S, Fu B J, Piao S L, et al. Reduced sediment transport in the Yellow River due to anthropogenic changes[J]. Nature Geoscience, 2015,9(1):38-41.
- [8] Mishra K, Sinha R, Jain V, et al. Towards the assessment of sediment connectivity in a large Himalayan river basin[J]. Science of the Total Environment, 2019,661:251-265.
- [9] 高常军,高晓翠,贾朋.水文连通性研究进展[J].应用与环境生物学报,2017,23(3):586-594.
- [10] Mayorá G, Bautista S, Small E E, et al. Measurement of the connectivity of runoff source areas as determined by vegetation pattern and topography: A tool for assessing potential water and soil losses in drylands [J]. Water Resources Research, 2008,44(10):doi.org/10.1029/2007WR006367.
- [11] Ludwig J A, Eager R W, Bastin G N, et al. A leakiness index for assessing landscape function using remote sensing [J]. Landscape Ecology, 2002,17(2):157-171.
- [12] Jancewicz K, Migon P, Kasprzak M. Connectivity patterns in contrasting types of tableland sandstone relief revealed by Topographic Wetness Index[J]. Science of the Total Environment, 2019,656:1046-1062.
- [13] Borselli L, Cassi P, Torri D. Prolegomena to sediment and flow connectivity in the landscape: A GIS and field numerical assessment[J]. Catena, 2008,75(3):268-277.
- [14] Cavalli M, Trevisani S, Comiti F, et al. Geomorphometric assessment of spatial sediment connectivity in small Alpine catchments [J]. Geomorphology, 2013,188:31-41.
- [15] Ortiz-Rodríguez A J, Muñoz-Robles C, Borselli L. Changes in connectivity and hydrological efficiency following wildland fires in Sierra Madre Oriental, Mexico [J]. Science of the Total Environment, 2019,655:112-128.
- [16] Zhao G J, Gao P, Tian P, et al. Assessing sediment connectivity and soil erosion by water in a representative catchment on the Loess Plateau, China [J]. Catena, 2020,185:doi.org/10.1016/j.catena.2019.104284.
- [17] Woznicki S A, Cada P, Wickham J, et al. Sediment retention by natural landscapes in the conterminous United States [J]. Science of the Total Environment, 2020,745:doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140972.
- [18] 艾蕾.南水北调中线水源区典型流域土壤侵蚀与水环境特征研究[D].武汉:华中农业大学,2013.
- [19] 黄萱.植被覆盖和降雨变化对流域水沙过程的影响机制:以堵河流域为例[D].武汉:华中农业大学,2019.
- [20] Renard K G, Foster G R, Weeies G A. RUSLE a

- guide to conservation planning with the revised universal soil loss equation [R]. Usda Agricultural Handbook, 1997.
- [21] 章文波, 谢云, 刘宝元. 利用日雨量计算降雨侵蚀力的方法研究[J]. 地理科学, 2002, 22(6): 705-711.
- [22] Wischmeier W H, Johnson C B, Cross B V. Soil erodibility nomograph for farmland and construction sites [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1971, 26(5): 189-193.
- [23] 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.
- [24] Durigon V L, Carvalho D F, Antunes M A H, et al. NDVI time series for monitoring RUSLE cover management factor in a tropical watershed[J]. International Journal of Remote Sensing, 2014, 35(2): 441-453.
- [25] Fu B J, Zhao W W, Chen L D, et al. Assessment of soil erosion at large watershed scale using RUSLE and GIS: A case study in the Loess Plateau of China[J]. Land Degradation & Development, 2005, 16(1): 73-85.
- [26] Crema S, Cavalli M. Sed in connect: A stand-alone, free and open source tool for the assessment of sediment connectivity [J]. Computers & Geosciences, 2018, 111: 39-45.
- [27] Vigiak O, Borselli L, Newham L T H, et al. Comparison of conceptual landscape metrics to define hillslope-scale sediment delivery ratio [J]. Geomorphology, 2012, 138(1): 74-88.
- [28] Hassen E E, Assen M. Land use/cover dynamics and its drivers in Gelda catchment, Lake Tana watershed, Ethiopia[J]. Environmental Systems Research, 2018, 6(1): 1-13.
- [29] Nosipho Makaya, Timothy Dube, Khoboso Seutloali, et al. Geospatial assessment of soil erosion vulnerability in the upper uMgeni catchment in KwaZulu Natal, South Africa[J]. Physics and Chemistry of the Earth, 2019, 112: 50-57.
- [30] Yan B, Fang N F, Zhang P C, et al. Impacts of land use change on watershed streamflow and sediment yield: An assessment using hydrologic modelling and partial least squares regression[J]. Journal of Hydrology, 2013, 484: 26-37.
- [31] 张光辉. 从土壤侵蚀角度诠释泥沙连通性[J]. 水科学进展, 2021, 32(2): 295-308.
- [32] 袁亚男. 听水河流域土地利用与植被变化对水文连通性影响研究[M]. 北京: 华北电力大学, 2019.
- [33] 王盛萍, 姚安坤, 赵小婵. 基于人工降雨模拟试验的坡面水文连通性[J]. 水科学进展, 2014, 25(4): 526-533.

~~~~~

(上接第 63 页)

- [25] 刘斌涛, 宋春风, 史展, 等. 西南土石山区土壤流失方程坡度因子修正算法研究[J]. 中国水土保持, 2015, 401(8): 49-51.
- [26] 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.
- [27] 李益敏, 袁静, 王东驰, 等. 基于 GIS 的贡山县土壤侵蚀动态变化研究[J]. 水土保持研究, 2020, 27(4): 8-15.
- [28] Wang Jinfeng, Li Xinhua, Christakos G, et al. Geographical detectors-based health risk assessment and its application in the neural tube defects study of the Heshun Region, China[J]. International Journal of Geographical Information Science, 2010, 24(1): 107-127.
- [29] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望[J]. 地理学报, 2017, 72(1): 116-134.
- [30] 牛丽楠, 邵全琴, 刘国波, 等. 六盘水市土壤侵蚀时空特征及影响因素分析[J]. 地球信息科学学报, 2019, 21(11): 1755-1767.
- [31] 中华人民共和国水利部. SL 190-2007, 土壤侵蚀分类分级标准[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2008.