

# 旬河流域景观格局变化对泥沙输出的影响

梅嘉泓<sup>1,2,3</sup>, 刘洋<sup>3,4</sup>, 岳朋芸<sup>3,4</sup>, 李东<sup>1,2,3</sup>, 姜庆虎<sup>3</sup>, 刘峰<sup>3</sup>

(1.西藏大学 青藏高原生态与环境研究中心, 拉萨 850000; 2.西藏大学 理学院, 拉萨 850000;

3.中国科学院 武汉植物园水生植物与流域生态重点实验室, 武汉 430074; 4.中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:**为探究河流输沙量对景观格局变化的响应,以旬河流域为研究区,选取旬河上、中、下游 12 个典型流域,借助 SWAT 模型对各支流泥沙进行了模拟分析;在此基础上,通过 1995 年和 2015 年遥感影像解译及景观指数分析,探究流域内部景观格局变化及其与河流输沙量的关系。结果表明:SWAT 在径流、泥沙模拟过程中,率定期和验证期的决定系数( $R^2$ )均大于 0.75, Nash-Sutcliffe 系数(Ens)为 0.74~0.85,模型的适用性良好。通过遥感影像解译,旬河流域土地利用类型主要以林地和农用地为主。受“退耕还林还草”和“植树造林”等植被恢复措施的影响,2015 年流域景观的优势化程度比 1995 年显著加深,景观类型之间的连通性趋于优良,斑块分布更加集中,景观格局朝着单一化方向发展,导致河流输沙量显著降低。其中,景观水平上的景观分离度指数(DIVISION)和类型水平上水体的斑块密度指数(PD<sub>5</sub>)对输沙量解释度最大。此外,相较于景观水平,以类型水平指数表征对输沙量的解释度,拟合效果优良。该研究可为旬河流域水土流失治理及减缓土壤侵蚀等方面提供一定的科学依据。

**关键词:**土壤侵蚀;景观格局;SWAT 模型;植被恢复;旬河流域

中图分类号:P333; S157

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2020)03-0045-06

## Effects of Landscape Pattern Change on Sediment Transport in the Xunhe River Basin

MEI Jiaming<sup>1,2,3</sup>, LIU Yang<sup>3,4</sup>, YUE Pengyun<sup>3,4</sup>, LI Dong<sup>1,2,3</sup>, JIANG Qinghu<sup>3</sup>, LIU Feng<sup>3</sup>

(1.Research Center for Ecology and Environment of Qinghai-Tibetan Plateau,

Tibet University, Lhasa 850000, China; 2.College of Science, Tibet University, Lhasa 850000,

China; 3.Key Laboratory of Aquatic Botany and Watershed Ecology, Wuhan Botanical Garden, Chinese

Academic of Sciences, Wuhan 430074, China; 4.University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** Landscape pattern change in a watershed is an important factor controlling sediment transportation of a river system. The Xunhe River, a major tributary of the Han River, was chosen as the study site. 12 typical watersheds in the upper, middle and lower reaches of the Xunhe River were selected to simulate and analyze the sediment transportation in each tributary using SWAT model. We interpreted remote sensing images from 1995 and 2015 to obtain land cover and calculate the landscape indices. The relationship between landscape pattern change and sediment transportation was examined. SWAT model performed well in simulating sediment transportation. The coefficients of determination ( $R^2$ ) in calibration and validation periods were both greater than 0.75. The Nash-Sutcliffe indices (Ens) were between 0.74 and 0.85. Forest and agricultural land were the two major land cover types in the Xunhe River watershed. Due to forestation and the conversion of agricultural lands into forests and grasslands, the landscape in 2015 had a significantly higher dominant degree, connection among landscape classes was stronger, distribution of patches was more concentrated than that in 1995. The landscape pattern was evolved to be more simplified, resulting in the significant reduction in river sediment transportation. The DIVISION of the landscape level and the PD<sub>5</sub> of the class level for water were the two indices that contributed the most to sediment transportation. In addition, the

收稿日期:2019-07-20

修回日期:2019-08-20

资助项目:国家自然科学基金(31600377,31700462);科技基础性工作专项“南水北调(中线)水源地生物群落环境调查”(2015FY110400)

第一作者:梅嘉泓(1994—),男,山东烟台人,硕士研究生,主要从事土地利用、土壤侵蚀方面研究。E-mail:mjmdct94@163.com

通信作者:刘峰(1975—),男,山东临沂人,研究员,博士,主要从事全球变化生态学、景观生态学、生态系统生态学及生态模拟等领域的研究。

E-mail:liufeng@wbcas.cn

class level indices performed better in explaining sediment transportation than the landscape level indices. This study can provide the scientific basis for soil erosion control and mitigation in the Xunhe River area.

**Keywords:** soil erosion; landscape pattern; SWAT model; vegetation restoration; Xunhe River Basin

土壤侵蚀是指土壤及其母质受风蚀和水蚀等外部作用力的影响,发生剥蚀分离、输移和沉积的生态水文过程<sup>[1]</sup>。该过程中挟带的大量泥沙及营养物质(N,P,K等),造成农用地退化的同时,往往导致下游水体河床升高、湖泊富营养化等,威胁河流生态功能安全<sup>[2]</sup>。研究表明,造成土壤侵蚀的原因有:非合理耕种、过度开发等人类活动因素,以及土壤退化、高强度降水、植被覆盖度降低等自然因素。其中,土地利用带来的区域景观格局变化是近年来影响土壤侵蚀的主因<sup>[3]</sup>。例如,康磊等<sup>[4]</sup>在岷江上游发现以草地恢复为主的景观格局演变,明显降低了该区土壤侵蚀的强度;潘竞虎等<sup>[5]</sup>在甘肃泾河小流域的相关研究中表明,坡度 $>25^{\circ}$ 且海拔低于 1 295 m 的景观破碎化程度严重区域,流域侵蚀严重,河流产沙量显著增加。此外,王计平等<sup>[6]</sup>在黄土丘陵区发现,流域景观格局的变化还会影响局部微气候,进而加重或减轻区域土壤侵蚀程度。因此,明确流域景观格局与土壤侵蚀、泥沙流失过程的关系是景观格局优化的基础,对于水土保持服务有着重要的意义。

近几十年来,遥感(RS)及地理信息系统(GIS)技术发展迅速,推动了景观生态的发展。利用景观格局指数表征格局配置与土壤流失之间的关系,定量土壤侵蚀过程对景观格局变化的响应,是评估生态水文循环的有效手段。基于多年实测气象数据,水文模型能够结合景观格局变化,在大尺度长时间水平上,定量探究流域径流产沙过程对人类活动的响应机制。刘宇<sup>[7]</sup>利用水文模型 WATEM/SEDEM 在延河模拟小流域输沙量时发现,在斑块类型尺度上的景观指数对河道侵蚀产沙程度的表征存在一定不确定性。廖凯涛等<sup>[8]</sup>在江西廉江河流域分析得出,景观多样性程度的加深,可减缓流域侵蚀产沙能力。李晶等<sup>[9]</sup>在延河流域通过 SWAT 模型划分出子流域中的水文响应单元,建立了一种新的综合景观指数,发现该指数与产沙量之间耦合关系呈负相关。以上研究将生态水文循环过程与景观格局指数相耦合,可较完善的阐释出过程与格局之间的关系。因此,利用景观格局指数表征流域土壤侵蚀程度,结合水文模型进行定量的分析流域生态水文循环机制,是未来探究趋势<sup>[10]</sup>。

目前,对于土壤侵蚀的研究多是依靠一个或少数几个流域的监测数据进行分析<sup>[11-12]</sup>,很少对流域按照区位划分,进行系统对比研究。对于较大尺度的流

域,获取水文泥沙数据尚且困难,在部分小流域的泥沙监测数据更为缺乏。泥沙在河流中的运移机制主要受水量、下垫面和泥沙(属性组成,选择性迁移)等多因素共同影响。利用水文模型能够定量计算子流域输沙量的优势,结合景观格局演变特征,开展多流域多区域的对比,有利于更好的阐述泥沙输移的控制机制。基于此,本研究选取位于“南水北调(中线)工程”水源地—丹江口水库上游的旬河流域为研究区,基于 SWAT 模型,模拟整体流域及其子流域的输沙量,同时结合景观分析和多元线性回归分析的方法,将模型划分出的子流域分为上、中、下游,选取能够代表该流域实际生态环境情况的景观指数,分析旬河流域各景观格局指数对输沙量的相关性及其解释度,探究 1995—2015 年景观格局的改变对流域输沙量的影响。为该流域土地利用合理规划及水土流失治理措施提供参考意见,提高生态经济效益。

## 1 研究区概况

旬河流域位于我国南北方交界处的秦岭山脉南麓,发源于陕西省西安市,流经柞水县和镇安县,在旬阳县境内,经汉江干流汇入“南水北调(中线)工程”水源地—丹江口水库。向家坪水文站控制断面以上的流域面积达 6 258 km<sup>2</sup>,范围跨度为 108°24′—109°26′E, 32°48′—33°55′N。流域多年平均径流为 20.67 亿 m<sup>3</sup>,乾佑河为境内最大支流。土壤类型以淋溶土为主。流域地势落差大,山岭峡谷相间排列,水能资源丰富。该流域气候带属我国亚热带湿润季风气候与温带季风气候交汇处,夏季多雨,平均温度为 24.8℃,冬季少雨,平均温度为 7.8℃,四季明显。流域植被类型资源丰富,其中森林植被分布面积最大的是松栎林带,它包含两个亚带:栓皮栎为主的栎林亚带和阔叶松树林亚带;马尾松、侧柏针阔叶混交林带,以及多个植被型和不同群系。流域内总人口约 50 万,经济发展缓慢。分布在流域缓坡地带的农用地主要种植小麦和玉米等农作物。

## 2 研究方法

### 2.1 数据来源

研究区所使用的数字高程数据(DEM)和 Landsat TM/OLI 遥感影像,下载于“中国科学院地理空间数据云”平台(www.gscloud.cn),分辨率皆为 30 m×30 m。

利用 ENVI 5.1, 将 1995 年 6 月 8 日和 2015 年 4 月 28 日, 两期研究区遥感影像监督分类处理, 划分出 5 种土地利用类型: 林地、农用地、灌草地、建设用地、水体。土壤类型数据来源于中国科学院“寒区旱区科学数据中心”(westdc.westgis.ac.cn), 其分辨率为 1 : 100 万。旬河流域出水口向家坪水文站于 1956 年设立, 由长江水利委员会水文局提供其监测的 1995—2015 年共 21 a 间径流量(月值)与输沙量(月值)数据。于“中国气象数据网”(data.cma.cn)下载镇安和旬阳气象站相同年份的气象数据(日值)。

## 2.2 径流产沙模拟分析

SWAT 模型具有很强的地理空间特性, 能够较准确的反映生态系统水文循环过程。以空间数据(DEM、土地利用图与土壤类型图)和属性数据(气候与土壤性质)为基础, 构建旬河流域 SWAT 水文模型, 通过设定研究区集水面积最小阈值(8 500 hm<sup>2</sup>), 划分出 41 个子流域(图 1)。以 1995—1997 年为模型预热期, 1998—2008 年为率定期, 2009—2015 年为验证期。率先进行径流量(m<sup>3</sup>/s)的模拟, 直至达到模拟标准精度, 再进行输沙量的模拟。将 1995 年和 2015 年旬河流域土地利用图带入模型, 分别模拟在不同土地利用情景下, 流域输沙量情况。

评价模型拟合优良程度有 3 个方面指标: 决定系数( $R^2$ ) > 0.6, Nash-Sutcliffe 系数(Ens) > 0.5 且相对偏差系数|PBIAS| < 25%。

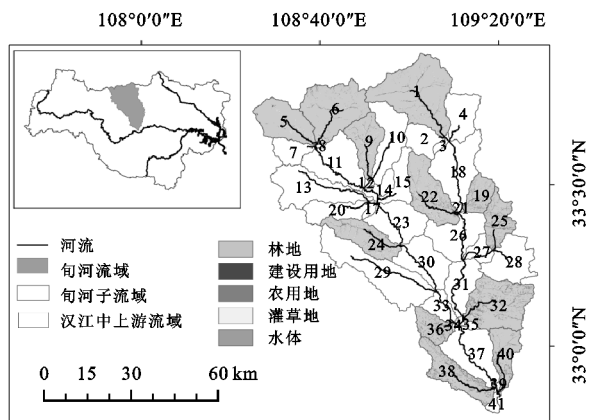


图 1 旬河流域及子流域分布

## 2.3 景观格局变化分析

景观生态学是分析景观组成结构、生态学功能及时空动态的一门学科, 其中景观格局分析是其研究内容的重要方面。景观格局的空间信息(破碎化、异质化和均匀度等)可通过景观水平指数和斑块类型水平指数来衡量。

以 SWAT 模型划分出研究区的河网水系为基础, 将其分为上、中、下游, 分别选取 4 个子流域, 共 12 个。上游选取的子流域为 1, 5, 6, 9 号, 中游为 19,

22, 24, 25 号, 下游为 32, 36, 38, 40 号。其中位于上游的 1 号(465.46 km<sup>2</sup>)面积最大, 位于中游的 19 号(100.59 km<sup>2</sup>)面积最小, 平均面积为 220.83 km<sup>2</sup>。利用 ArcGIS 10.2 将旬河流域 1995 年、2015 年及各子流域的土地利用数据格式转换为 Grid, 带入景观分析软件 Fragstats 4.2 中, 选取能够反映该流域景观结构且相互独立的景观指数进行计算。基于 Canoco 5.0, 将分布在上、中、下游各子流域景观水平指数进行 PCA 排序。

其中, 在景观水平上选取斑块密度指数(PD)、最大斑块指数(LPI)、景观形状指数(LSI)、景观蔓延度指数(CONTAG)、景观分离度指数(DIVISION)、shannon's 多样性指数(SHDI)和 shannon's 均匀度指数(SHEI)。在斑块类型水平上选取土地利用类型所占景观面积比例指数(PLAND)、斑块密度指数(PD)、景观形状指数(LSI)、平均邻接度指数(CONTIG\_MN)、聚集度指数(AI)和平均斑块分维数(FRAC\_MN)。

## 2.4 流域产沙过程对景观指数变化的响应分析

将 SWAT 模型划分出的 12 个子流域输沙量模拟值于 Excel 统计, 分析年内 4 个季度平均输沙量变化趋势。将旬河流域 1995 年和 2015 年土地利用数据相对比, 分析近 20 a 来研究区土地利用类型转变情况及流域土地利用变化对流域输沙量的影响。基于 IBM SPSS Statistics 21.0 软件: 利用单因素方差分析法, 将 12 个子流域年内四季度输沙量平均值按照区位(上、中、下游)进行统计分析; 利用 Spearman 相关分析法, 分析 12 个子流域景观指数的变化与输沙量之间的相关性; 基于 R-3.6.0, 以子流域景观格局指数作自变量, 输沙量作响应变量, 采用多元线性回归法, 探讨在景观水平和类型水平各景观指数对流域输沙量的解释度。

# 3 结果与分析

## 3.1 旬河流域产沙模拟分析

利用旬河流域出水口—向家坪水文站的实测径流量和输沙量数据(月值), 进行 SWAT 模型校准和验证。径流量模拟精度达到要求标准, 且在输沙量的模拟过程中, 校准期决定系数  $R^2$  为 0.75, Nash-Sutcliffe 系数(Ens)为 0.74, 相对偏差系数(PBIAS)为 -4.8%。验证期  $R^2$  和 Ens 皆不小于 0.75, 且 PBIAS 在偏差范围内(表 1)。

以上结果表明, SWAT 模型在旬河流域适用性优良, 可进行产沙模拟分析。

分析 12 个子流域年内四季度平均输沙量模拟值发现: 上游子流域的产沙量显著低于下游。这可能是由于



旬河上游流域地形复杂,人类活动影响小,森林覆盖率高,对土壤的固持能力强,而下游地形多以平原丘陵分布,农用地及城市建设用地多集中在此,土壤下垫面性质及结构易受破坏,土壤抗侵蚀能力减弱,致使河道输沙量较高;在第 3、4 季度,位于下游的子流域输沙量均值分别达到了 36.393 万 t,5.325 万 t,显著高于中上游流域的输沙量。这可能是由于旬河流域受季风气候影响,夏季降水量丰富且降水强度大,导致地表径流速度升高,河道对沿线土壤的侵蚀加重。在第 3 季度,中游和下游的子流域输沙量标准差较大,说明其输沙量模拟值较为离散,同时极差也反映出此特征;年内 4 个季度中,位于中游的子流域输沙量变异系数最高,这可是由于中游地区所受气候条件和人类活动等因素兼有上、下游的特征,变异最强烈(表 2)。

评价标准	校准期		验证期	
	(1998—2008 年)		(2009—2015 年)	
	径流	泥沙	径流	泥沙
$R^2$	0.85	0.75	0.87	0.86
Ens	0.85	0.74	0.84	0.75
PBIAS/%	9.50	-4.80	6.80	6.20

表 2 旬河 12 个子流域四季度输沙量比较					
季节	区位	均值/ $10^4$ t	标准差/ $10^4$ t	极差/ $10^4$ t	变异系数
第一季度	上游	0.088±0.023a	0.046	0.100	0.523
	中游	0.410±0.185ab	0.369	0.86	0.900
	下游	0.823±0.508b	0.508	1.100	0.617
第二季度	上游	0.865±0.229a	0.458	0.99	0.529
	中游	3.730±2.293ab	4.586	9.84	1.229
	下游	11.845±3.803b	7.607	16.58	0.642
第三季度	上游	1.390±0.362a	0.723	1.55	0.520
	中游	7.933±6.693a	13.387	27.3	1.688
	下游	36.393±12.192b	24.385	51.85	0.670
第四季度	上游	0.215±0.053a	0.107	0.23	0.498
	中游	1.253±1.047a	2.093	4.26	1.670
	下游	5.325±1.771b	3.541	7.53	0.665

注:同列数据后标相同字母表示差异不显著, $p<0.05$ 。

### 3.2 旬河流域景观格局指数空间分异特征

将旬河 12 个子流域的 7 个景观水平指数进行 PCA 排序, $PC_1$  和  $PC_2$  的累计解释度达到了 97.55%。 $PC_1$  较准确地反映出景观指数空间分异特征。从上游至下游,景观形状指数(LSI)、Shannon's 均匀度指数(SHEI)、Shannon's 多样性指数(SHDI)、斑块密度(PD)和景观分离度指数(DIVISION)存在增加趋势,说明斑块形状复杂化、景观破碎化和分离化程度加深,斑块类型空间分布趋于均匀。最大斑块指数(LPI)和景观蔓延度指数(CONTAG)在上游地区较大,说明其斑块类型(林地)优势程度和聚集程度较高(图 2)。

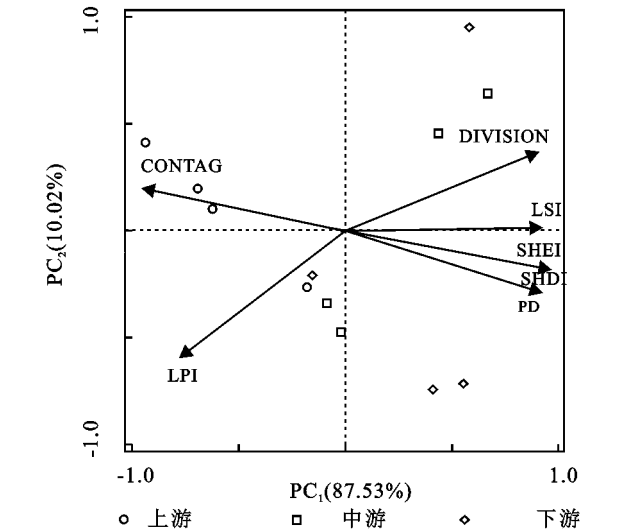


图 2 旬河 12 个子流域景观水平指数 PCA 排序

### 3.3 旬河流域景观格局变化对输沙量的影响

旬河流域位于秦岭山脉南端,土地利用类型主要以林地和农用地为主,建设用地、灌草地和水体的面积综合占比不足 10%。在 1999 年国家实施“退耕还林工程”之前,旬河流域毁林开垦、陡坡化耕种情况严重。经过十几年的植被恢复与改善,至 2015 年,旬河流域林地面积得到显著提升,占比达到 84.79%。1995 年有 1 565.77 km<sup>2</sup> 的农用地转化为林地,231.35 km<sup>2</sup> 的农用地转化为灌草地。1995 年土地利用情景下年均输沙量模拟值为 67.16 万 t,至 2015 年,降低为 25.07 万 t。

相较于 1995 年、2015 年旬河流域景观格局变化显著,具体表现在:林地面积的大幅提升,促进了斑块密度指数(PD)微降,景观破碎化程度降低;最大斑块指数(LPI)和景观蔓延度指数(CONTAG)有显著提升,这有助于提高景观连通性,减缓径流;景观形状指数(LSI)由 126.48 增加至 131.95,变化较小,可忽略;景观分离度指数(DIVISION)降低了近 50%,说明景观的组成类型分布更加集中;shannon's 多样性指数(SHDI)和 shannon's 均匀度指数(SHEI)都有所降低,反映出该流域景观内部的斑块类型之间联系更加紧密。总体而言,旬河流域景观格局朝着单一化方向发展,利于降低河道产沙能力,改善研究区水土流失状况(表 3)。

### 3.4 子流域景观格局指数与输沙量相关性及解释度

在类型水平,以 1 表示林地、2 表示建设用地、3 表示农用地、4 表示灌草地、5 表示水体。与输沙量呈显著性关系的景观指数有:PLAND<sub>1</sub>, PLAND<sub>3</sub>, PD<sub>1</sub>, PD<sub>3</sub>, PD<sub>4</sub>, PD<sub>5</sub>, LSI<sub>1</sub>, LSI<sub>3</sub>, LSI<sub>4</sub>, CONTIG\_MN<sub>3</sub>, AI<sub>1</sub> 和 AI<sub>3</sub>。其中水体的斑块密度(PD<sub>5</sub>)与流域输沙量相关性最强,相关系数达到了 0.875。林地的斑块类型面积百分比指数(PLAND<sub>1</sub>)和聚集度指数(AI<sub>1</sub>)与输沙量呈负相关关

系,说明林地面积的增加及其聚集程度的上升,有利于减缓流域水文流域产沙过程。而随着农用地 PLAND<sub>3</sub>和 AI<sub>3</sub>值的升高,流域产沙量上升。林地、农用地和灌草地的斑块密度指数(PD)及形状指数(LSI)值的增加,表明斑块类型的空间分布趋于破碎化且形状更为复杂,易受到地表径流的侵蚀(表 4)。

表 3 1995—2015 年景观格局指数变化

年分	斑块密度 PD	最大斑块 指数 LPI	景观形状 指数 LSI	景观蔓延度 指数 CONTAG	景观分离度 指数 DIVISION	多样性 指数 SHDI	均匀度 指数 SHEI
1995	6.33	39.53	126.48	59.00	0.84	0.95	0.59
2015	5.19	72.38	131.95	72.42	0.47	0.56	0.35

表 4 旬河 12 个子流域景观类型水平指数变化与输沙量波动相关性

类型 水平	斑块类型面积 百分比 PLAND	斑块密度 指数 PD	景观形状 指数 LSI	平均邻接度指数 CONTIG_MN	聚集度 指数 AI	平均斑块分维数 FRAC_MN
林地	−0.765**	0.798**	0.781**	0.513	−0.706*	0.498
建设用地	0.215	0.432	0.458	−0.44	−0.179	−0.514
农用地	0.827**	0.622*	0.667*	0.582*	0.618*	0.435
灌草地	0.423	0.707*	0.605*	−0.477	−0.538	−0.321
水体	0.031	0.875**	0.387	−0.18	−0.126	−0.118

注: \*\* 表示在 0.01 水平(双侧)显著相关, \* 表示在 0.05 水平(双侧)显著相关。n=12,下同。

表 5 旬河 12 个子流域景观水平指数变化与输沙量波动相关性

景观水平	斑块 密度 PD	最大斑块 指数 LPI	景观形状 指数 LSI	景观蔓延度 指数 CONTAG	景观分离度 指数 DIVISION	多样性 指数 SHDI	均匀度 指数 SHEI
相关系数	0.72**	−0.61*	0.78**	−0.71**	0.63*	0.72**	0.72**

选择与流域输沙量相关关系显著的景观指数,在类型水平和景观水平上,分别构建多元线性回归模型。利用双向逐步回归法,剔除对响应变量影响较小的自变量进行拟合。拟合结果: $p<0.05$ ,说明模型通过了显著性检验,具有统计学意义;决定系数  $R^2>0.6$ ,即表明相关性优良。

由拟合模型得出:在类型水平,PD<sub>5</sub>和 PD<sub>1</sub>对流

在景观水平,流域土壤侵蚀程度与最大斑块指数(LPI)以及蔓延度指数(CONTAG)呈负相关,相关系数分别为−0.61和−0.71。斑块密度(PD)、景观形状指数(LSI)、景观分离度指数(DIVISION)、Shannon’s 多样性指数(SHDI)和 Shannon’s 均匀度指数(SHEI)皆与流域输沙量呈正相关关系(表 5)。

域输沙量的解释度较高,其次是 PLAND<sub>3</sub>,PD<sub>3</sub>和 AI<sub>3</sub>;在景观水平,DIVISION 对输沙量解释度最大。对比两个水平上决定系数( $R^2$ )得出:类型水平上的景观指数可更好地表征流域输沙量情况。而景观水平上的指数,虽然整体与输沙量相关关系显著,但由于其计算原理的缘故,变化趋势较不稳定,不能较好的反映土壤侵蚀程度(表 6)。

表 6 景观指数对输沙量的解释度

指标	回归模型	$p$	$R^2$
类型水平	$y=18.564\text{PLAND}_3-66.091\text{PD}_1-13.6\text{PD}_3+66.802\text{PD}_5-0.227\text{LSI}_3-3.317\text{AI}_3+202.082$	0.005	0.943
景观水平	$y=2.973\text{LSI}-25.571\text{DIVISION}-0.713\text{CONTAG}+17.163$	0.043	0.619

## 4 讨论

在生态水文循环过程中,引发土壤侵蚀的因素有多种:土壤因素(质地、团聚体和渗透指数)、气候因素(降水量、降水强度)、生物因素(植被冠层截留、根系固持和凋落物截留)、人为因素(耕作方式)以及地形因素等,各因素之间复杂的相互作用同样对河道产沙影响强烈<sup>[13]</sup>。在自然景观角度,生态过程和分布格局是紧密联系的有机整体<sup>[14]</sup>。景观格局由于能反映景观中各土地利用类型的分布情况,而对流域水沙输移过程有重要影响<sup>[15]</sup>。本研究将表征景观空间分布格局

信息的景观指数与土壤侵蚀过程相耦合,基于 SWAT 水文模型技术,揭示了旬河流域景观格局时空变化趋势与输沙量之间的关系。结果表明,旬河流域景观格局整体向着良性发展,水土流失状况有所改善。这与郭思琪等<sup>[16]</sup>在秦岭研究得出的水文产沙与景观格局时空动态演变规律相一致。相较于景观水平,类型水平上的指数能更加完善对流域输沙量状况的表征。

本研究结果表明,旬河流域土壤侵蚀程度时空分异显著。在空间尺度上,旬河各子流域的土壤流失情况自上游至下游呈加重的趋势,输沙量逐渐增多。这可能是受下游区域地势相对平坦的影响,使得该区域

内人类活动频繁,加重了区域景观的干预,使得景观破碎化和分离化程度加深,进而导致下游河道沿线子流域的土壤侵蚀量较高<sup>[17]</sup>。在时间尺度上,1995—2015年,旬河流域森林植被恢复良好,林地类型在景观中的优势度得到进一步提高,景观内部之间的斑块类型联系更加紧密,有利于减缓流域水文产沙<sup>[18]</sup>。此外,由于人们环境保护意识的提升,推行积极的水土流失治理工作,使研究区水土涵养功能进一步得到增强<sup>[19]</sup>。因此,为实现研究区可持续发展,在保证农业生产基本要求的情况下,应继续推进“退耕还林”政策,协调配置区域土地利用规划,减少人类社会发展对流域生态环境造成的破坏。

景观格局整体的空间分布情况及内部斑块类型之间的组成结构,可反映流域土壤抗侵蚀能力的强弱<sup>[20]</sup>。本研究将耦合流域水文产沙过程的景观格局指数与 SWAT 模型相整合,在模型划分出的子流域水平(上、中、下游),以各子流域景观指数表征其产沙程度,探析景观水平和类型水平上各景观指数之间对流域侵蚀产沙的解释度,增强了评价结果的可靠性。本文较完善的体现出整个旬河流域景观格局配置情况及其景观指数对水文产沙的效应,可为水土流失治理服务。

有研究表明地表粗糙度对土壤流失有重要影响。目前,地形坡度、植被类型的空间覆盖度及其垂直结构是反映地表粗糙度的主要指标。然而本研究所使用的景观空间分布数据(土地利用图)是一个“二维”平面,不能反映出研究区植被“三维”状况<sup>[21]</sup>,且本研究缺乏考虑,组成林地的不同林分之间土壤理化性质的差异性对持水固沙的作用<sup>[22]</sup>。因此,在未来的研究工作中,应深入探究复合生态水文循环过程中的地表粗糙度(土壤理化性质、植被长势)、水陆交错区域及气候和土壤流失之间的耦合机理,揭示流域土壤流失时空变化趋势规律。

## 5 结论

(1) 与上游地区相比,旬河下游区域受人类活动(农业措施、城市化建设)的影响较大,景观破碎化程度显著增加,使得土壤抗侵蚀能力减弱,对应子流域河流输沙量较高。

(2) 受“退耕还林”等植被恢复措施的影响,水土流失状况得到有效控制。1995—2015年旬河流域的景观优势化程度加深,景观类型之间的连通性趋于优良,斑块分布更加集中,河流输沙量显著降低。

(3) 从景观格局角度分析,与景观水平上的指数相比,类型水平上的景观指数可以更好地表征流域输沙量。其中,景观水平上的分离度指数(DIVISION)

和类型水平上水体的斑块密度指数(PD<sub>s</sub>)对输沙量解释度最大。

(4) 将 SWAT 水文模型模拟的输沙数据与景观格局演变特征结合,开展旬河流域多区域的对比分析,可以较好的阐述旬河泥沙的产沙机制,对于区域景观合理规划和水土保持服务具有重要的指导意义。

## 参考文献:

- [1] Buttafuoco G, Conforti M, Auceili C, et al. Assessing spatial uncertainty in mapping soil erodibility factor using geostatistical stochastic simulation [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2012, 66(4): 1111-1125.
- [2] 王甜, 黄志霖, 曾立雄. 三峡库区退耕还林土壤侵蚀及养分流失控制: 以兰陵溪小流域为例 [J]. *水土保持研究*, 2018, 25(5): 83-88.
- [3] Leh M, Bajwa S, Chaubey I. Impact of land use change on erosion risk: an integrated remote sensing, geographic information system and modeling methodology [J]. *Land Degradation & Development*, 2013, 24(5): 409-421.
- [4] 康磊, 刘世荣, 刘宪钊. 岷江上游景观格局与土壤侵蚀变化: 以杂古脑流域为例 [J]. *水土保持通报*, 2019, 39(1): 23-28, 3.
- [5] 潘竟虎, 文岩. 基于 RUSLE-SMA 的黄土丘陵沟壑区土壤侵蚀评价及景观格局分析: 以庆城县蔡家庙流域为例 [J]. *生态学杂志*, 2013, 32(2): 436-444.
- [6] 王计平, 杨磊, 卫伟, 等. 黄土丘陵区景观格局对水土流失过程的影响: 景观水平与多尺度比较 [J]. *生态学报*, 2011, 31(19): 5531-5541.
- [7] 刘宇. 景观指数耦合景观格局与土壤侵蚀的有效性 [J]. *生态学报*, 2017, 37(15): 4923-4935.
- [8] 廖凯涛, 胡建民, 宋月君, 等. 南方红壤丘陵区流域植被景观格局变化及水沙响应关系 [J]. *水土保持学报*, 2019, 33(3): 36-42, 50.
- [9] 李晶, 周自翔. 延河流域景观格局与生态水文过程分析 [J]. *地理学报*, 2014, 69(7): 933-944.
- [10] 秦伟, 曹文洪, 郭乾坤. 植被格局对侵蚀产沙影响的研究评述 [J]. *生态学报*, 2017, 37(14): 4905-4912.
- [11] Mukundan R, Pierson D C, Schneiderman E M, et al. Using detailed monitoring data to simulate spatial sediment loading in a watershed [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2015, 187(8): 1-10.
- [12] 马芊红, 张科利. 西南喀斯特地区土壤侵蚀研究进展与展望 [J]. *地球科学进展*, 2018, 33(11): 1130-1141.
- [13] Ferreira V, Panagopoulos T, Andrade R, et al. Spatial variability of soil properties and soil erodibility in the Alqueva reservoir watershed [J]. *Solid Earth*, 2015, 6(2): 383-392.
- [14] 刘宇, 吴炳方, 曾源, 等. 耦合过程和景观格局的土壤侵蚀水环境影响评价 [J]. *应用生态学报*, 2013, 24(9): 2581-2589.



- [6] 陆敬山. 内蒙古自治区土地资源退化与防治措施[J]. 吉林农业:学术版, 2012(5):42-42.
- [7] 杨浩, 赵云, 张德罡. 高寒地区多年生人工草地土壤有机质含量的研究[J]. 中国草食动物科学, 2013, 33(6):52-55.
- [8] 娜日斯. 内蒙古地区自然生态环境建设与可持续发展[J]. 前沿, 2010, 03(11):144-146.
- [9] 南岭, 杜灵通, 展秀丽. 土壤风蚀可蚀性研究进展[J]. 土壤, 2014, 46(2):204-211.
- [10] 常海涛, 刘任涛, 刘佳楠, 等. 草方格造林固砂过程中土壤性质变化及分形特征:以腾格里沙漠东南缘为例[J]. 水土保持学报, 2018, 32(6):58-65, 165.
- [11] 王铁浩, 耿养会, 黄仲华. 三峡库区紫色土植被恢复过程的土壤团粒组成及分形特征[J]. 生态学报, 2013, 33(18):5493-5499.
- [12] 张超, 刘国彬, 薛莲, 等. 黄土丘陵区不同群落类型根际土壤微团聚体及颗粒分形特征[J]. 中国农业科学, 2011, 44(3):507-515.
- [13] 王佩将, 戴全厚, 丁贵杰, 等. 喀斯特植被恢复过程中的土壤分形特征[J]. 水土保持学报, 2012, 26(4):178-182, 230.
- [14] 管光玉, 范燕敏, 武红旗, 等. 不同利用方式土壤颗粒分形特征及其与土壤有机碳库稳定性的关系[J]. 草地学报, 2016, 24(2):258-262.
- [15] 陶高粱, 张季如, 庄心善, 等. 描述黏粒含量对土—水特征曲线影响规律的分形模型[J]. 水利学报, 2014, 45(4):490-496.
- [16] 张晓娜, 蒙仲举, 杨振奇. 不同封育措施下希拉穆仁荒漠草原土壤质量评价[J]. 土壤通报, 2018, 49(4):788-793.
- [17] 王则宇, 蒙仲举, 崔向新, 等. 希拉穆仁天然草地不同群落土壤入渗特征[J]. 水土保持学报, 2017, 31(3):112-117.
- [18] 李永强, 李治国, 董智, 等. 内蒙古荒漠草原放牧强度对风沙通量和沉积物粒径的影响[J]. 植物生态学报, 2016, 40(10):1003-1014.
- [19] 黄昕, 蒙仲举, 汪季, 等. 希拉穆仁草原退化评价及地表风蚀颗粒表征[J]. 水土保持研究, 2016, 23(5):141-146, 151.
- [20] 席小康, 朱仲元, 郝祥云. 锡林河流域草原植物群落分类及其多样性分析[J]. 生态环境学报, 2016, 25(8):1320-1326.
- [21] 朱瑜, 张卓栋, 刘畅, 等. 激光粒度仪与吸管法测定土壤机械组成的比较研究:以不同退化程度栗钙土为例[J]. 水土保持研究, 2018, 25(3):62-67.
- [22] 丁延龙, 高永, 蒙仲举, 等. 希拉穆仁荒漠草原风蚀地表颗粒粒度特征[J]. 土壤, 2016, 48(4):803-812.
- [23] 杨培岭, 罗远培, 石元春. 用粒径的重量分布表征的土壤分形特征[J]. 科学通报, 1993, 38(20):1896-1899.
- [24] 袁久坤, 周英. 利用取土钻改进环刀法准确测定土壤容重和孔隙度[J]. 中国园艺文摘, 2014, 30(3):25-26.
- [25] 夏江宝, 谢文军, 陆兆华, 等. 再生水浇灌方式对芦苇地土壤水文生态特性的影响[J]. 生态学报, 2010, 30(15):4137-4143.
- [26] 梁博, 林田苗, 任德智, 等. 土地利用方式对雅江中游土壤理化性质及颗粒分形特征的影响[J]. 土壤, 2018, 50(3):613-621.
- [27] 高广磊, 丁国栋, 赵媛媛, 等. 4 种粒径分级制度对土壤体积分形维数测定的影响[J]. 应用基础与工程科学学报, 2014, 22(6):1060-1068.
- [28] 赵明月, 赵文武, 刘源鑫. 不同尺度下土壤粒径分布特征及其影响因子:以黄土丘陵沟壑区为例[J]. 生态学报, 2015, 35(14):4625-4632.
- [29] 高君亮, 李玉宝, 虞毅, 等. 毛乌素沙地不同土地利用类型土壤分形特征[J]. 水土保持研究, 2010, 17(6):220-223.
- [30] 刘云鹏, 王国栋, 张社奇, 等. 陕西 4 种土壤粒径分布的分形特征研究[J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版, 2003, 31(2):92-94.
- [31] 许景伟, 李传荣, 夏江宝, 等. 黄河三角洲滩地不同林分类型的土壤水文特性[J]. 水土保持报, 2009, 23(1):173-176.
- [32] 黄冠华, 詹卫华. 土壤颗粒的分形特征及其应用[J]. 土壤学报, 2002, 39(4):490-497.

(上接第 50 页)

- [15] 黄婷, 于德永, 乔建民, 等. 内蒙古锡林郭勒盟景观格局变化对土壤保持能力的影响[J]. 资源科学, 2018, 40(6):1256-1266.
- [16] 郭思琪, 韩磊, 赵永华, 等. 秦岭地区土壤侵蚀时空变化及景观格局[J]. 生态学杂志, 2019, 38(7):2167-2176.
- [17] 赵亮, 刘宇. 耦合景观破碎化和土壤侵蚀的“源”“汇”边界指数[J]. 地理与地理信息科学, 2018, 34(1):98-104.
- [18] 王金花, 李占斌, 张荣刚, 等. 水蚀风蚀交错区流域景观格局变化及水沙响应关系[J]. 中国水土保持科学, 2016, 14(3):68-75.
- [19] Ouyang W, Hao F, Skidmore K, et al. Soil erosion

and sediment yield and their relationships with vegetation cover in upper stream of the yellow river[J]. Science of the Total Environment, 2010, 409(2):396-403.

[20] Xu Y, Tang H, Wang B, et al. Effects of landscape patterns on soil erosion processes in a mountain-basin system in the north china[J]. Natural Hazards, 2017, 87(3):1567-1585.

[21] 姚雄, 余坤勇, 刘健, 等. 南方水土流失严重区的生态脆弱性时空演变[J]. 应用生态学报, 2016, 27(3):735-745.

[22] 闫玮明, 孙冰, 裴男才, 等. 粤北阔叶人工林和次生林植物多样性与土壤理化性质相关性研究[J]. 生态环境学报, 2019, 28(5):898-907.