

基于地理探测器的岷江上游地区土壤侵蚀变化

姚 昆¹, 周 兵², 何 磊^{3,4}, 刘 斌^{3,4}, 罗 涵^{3,4}, 刘敦龙^{3,4}, 李玉霞⁵

(1.西昌学院 资源与环境学院, 四川 西昌 615000;

2.国家气候中心 气候服务室, 北京 100081; 3.成都信息工程大学 软件工程学院, 成都 610225;

4.四川省信息化应用支撑软件工程技术研究中心, 成都 610225; 5 电子科技大学 自动化工程学院, 成都 611731)

摘 要:为掌握岷江上游地区土壤侵蚀动态变化规律和驱动力,以修正的土壤侵蚀模型(RUSLE)为基础,实现该地区 2000—2018 年侵蚀定量评价,按照国家水力侵蚀分级标准将其分为 6 个等级,以斜率变化模型完成其动态变化规律的分析,借助地理探测器实现其变化驱动力的探索。结果表明:微度和轻度侵蚀占据全域总面积的 70% 以上;近 20 a 内,全域土壤侵蚀整体得到了有效遏制,整体发展态势相对良好;植被覆盖度、降水和高程是驱动土壤侵蚀强度空间分布格局形成和改变的主要因素,特别是植被度的驱动作用最明显;各因子间产生交互关系时,其协同作用均比单因子产生的驱动作用更明显。岷江上游地区土壤侵蚀强度分布格局差异显著,侵蚀总体得到有效遏制,植被覆盖是驱动该地区土壤侵蚀强度空间分布格局变化的主要因素。

关键词:土壤侵蚀模型(RUSLE); 地理探测器; 驱动力

中图分类号:S157.1

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2022)02-0085-07

Changes in Soil Erosion in the Upper Reaches of the Minjiang River Based on Geo-Detector

YAO Kun¹, ZHOU Bing², HE Lei^{3,4}, LIU Bin^{3,4}, LUO Han^{3,4}, LIU Dunlong^{3,4}, LI Yuxia⁵

(1.College of Resource and Environment, Xichang University, Xichang, Sichuan 615000,

China; 2.Climate Service Room, National Climate center, Beijing 100081, China; 3.School of Software

Engineering, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China; 4.Sichuan Province

Engineering Technology Research Center of Support Software of Informatization Application, Chengdu 610225, China;

5.School of Automation Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China)

Abstract: To grasp the dynamic changes and driving forces of soil erosion in the upper reaches of the Minjiang River, based on the revised soil erosion model (RUSLE), the quantitative evaluation of soil erosion in this area from 2000 to 2018 was realized. The soil erosion was divided into 6 grades according to the national water erosion grading standard. The slope change model was used to complete the analysis of its dynamic change pattern. The geo-detector was used to realize the exploration of its driving force of change. The results show that: mild and light erosion occupied more than 70% of the total area; in the past 20 years, soil erosion in the whole region had been effectively curbed as a whole, and the overall development trend was relatively good; vegetation coverage, precipitation and elevation were the main factors driving the formation and change of the spatial distribution pattern of soil erosion intensity, especially the driving effect of vegetation degree was the most obvious; when there was an interaction between the factors, the synergy effect was more obvious than the driving effect of the single factor. There are significant differences in the distribution patterns of soil erosion intensities in the upper reaches of the Minjiang River, and the overall erosion has been

收稿日期: 2021-03-22

修回日期: 2021-04-12

资助项目: 国家科技部全球变化与应对重点研发项目(2020YFA0608203); 四川省科技厅重点研发项目(2020YFS0338, 2021YFG0258); 四川省教育厅项目(18ZB0541); 凉山州学术和技术带头人培养资助资金(ZRS202001); 西昌学院“两高”人才科研支持计划项目(YBZ202108, YBZ202125); 四川省哲学社会科学重点研究基地“青藏高原经济社会与文化发展研究中心”项目(QZY1905); 四川省大学生创新创业训练计划项目(201810628034); 内江师范学院校级科研项目(2019YB04)

第一作者: 姚昆(1991—), 男, 四川西昌人, 硕士, 讲师, 主要从事地理信息系统应用研究。E-mail: jiangshan996@126.com

通信作者: 周兵(1964—), 男, 江苏常熟人, 研究员, 博士, 主要从事气候变化监测、亚洲季风降水研究。E-mail: bingz@ema.gov.cn

effectively controlled. Vegetation coverage is the main factor driving the change in the spatial distribution pattern of soil erosion intensity in this area.

Keywords: soil erosion model (RUSLE); geographic detector; driving force

土壤侵蚀会造成河道淤塞、耕地质量下降和促进泥石流频发等环境问题^[1-3]。区域的地形地貌、气候环境和土壤类型等条件是促进土壤侵蚀形成和改变的先天因素,而后天不合理的人类活动,又会驱动土壤侵蚀强度和分布面积的改变^[4-6]。截至 2020 年,四川省仍有 12.1 万 km² 的地区存在水土流失现象,其中水力侵蚀就占据侵蚀总面积的 94.21%^[7]。因此,加强区域土壤侵蚀(特别是水力侵蚀)的实时监测,掌握其动态变化规律并分析背后的驱动因素是实现侵蚀综合治理重要基础。

为实现土壤侵蚀状况的定量评价,学者们将 RS 和 GIS 技术应用于该领域,并且提出了通用土壤流失方程(USLE)^[8-10]、修正的土壤侵蚀模型(RUSLE)^[11-12]、中国土壤流失方程(CSLE)^[13-15]和四川省土壤流失方程(SCSLE)等^[16]众多模型。田宇等^[5]利用 RUSLE 模型完成 1990—2015 年三峡库区土壤侵蚀定量评价后,还对其时空变化规律和驱动因素进行了探讨;康琳琦等^[12]以 RUSLE 模型为基础,分析了青藏高原近 30 a 来土壤侵蚀的时空变化规律;姜琳等^[17]基于该模型完成了岷江上游流域 2000—2010 年土壤侵蚀时空格局的动态变化分析,并探讨了侵蚀状况与高程、坡度和土地利用类型的关系;龚雪梅等^[18]基于 RUSLE 模型完成了 1995—2014 年岷江上游地区土壤侵蚀的敏感性评价,并分析了“汶川地震”和土地利用类型改变对其变化的影响。

虽然以上成果均为区域土壤侵蚀综合治理提供了重要的参考价值,但是也存在部分不足需要进一步完善。如以往成果在进行驱动力探索时,大都以定性分析或数理统计(相关性或回归分析)^[5,17-18]为主要方法;前者存在较强的主观性未能实现驱动因素较准确的定量分析,而后者实施的前提条件是假设在整个时间序列中,土壤侵蚀与驱动因子间存在显著线性关系,而现实中此关系却不一定存在^[19-20];同时,以上两种方法都未将各因子交互产生的协同作用对侵蚀改变的驱动作用进行分析;而针对以上两点不足地理探测器却较好解决^[3,20]。综上,研究以 RUSLE 模型为基础,完成岷江上游地区 2000—2018 年土壤侵蚀状况定量评价;借助斜率变化模型完成其时空变化规律分析;以地理探测器为工具对影响区域土壤侵蚀变化的驱动力进行探索。期望能为该地区土壤侵蚀综合治理提供科学理论参考。

1 研究区概况

岷江上游地区地处 103°32′—104°15′E, 30°45′—33°09′N, 包括松潘、黑水和茂县等 5 个行政区,幅员面积约 2.4 万 km²,海拔表现为东部比西部相对较高,地形起伏差异相对明显,降水主要集中于夏季(5—10 月),季节性变化明显,全域植被生态系统相对复杂,阔叶林、针叶阔叶林和灌丛等为主要植被类型,土壤则主要包括棕壤、粗骨土和草毡土等,区域地质构造复杂,地质灾害相对频发。

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源

基础数据如下:(1) 1980—2018 年岷江上游地区及周边气象站逐日累计降水量数据,来源于国家气候中心;(2) 各年份 1:10 万土地类型矢量成果,由中国科学院资源环境科学中心(<http://www.resdc.cn>)提供;(3) 90 m 分辨率 DEM 数据,来源于地理空间数据云平台;(4) 研究区 30 m 土壤可侵蚀性(K)因子,由中科院山地所刘斌涛课题组提供;(5) 1:100 万中国土壤类型矢量数据,来自于中国土壤数据库;(6) 各年份 NDVI 为 MOD13Q1 成果,来自 USGS。

2.2 研究方法

2.2.1 RUSLE 模型 通用土壤流失方式表达式如下:

$$A = R \times LS \times K \times C \times P \quad (1)$$

式中:A 为侵蚀模数[t/(hm²·a)];R 为降雨侵蚀力[(MJ·mm)/(hm²·h·a)];K 为土壤可侵蚀[(t·hm²·h)/(MJ·mm·hm²)];LS 为坡度坡长;C, P 分别为植被管理与水土保持因子,均无单位;侵蚀模数乘以 100 单位转换为 t/(hm²·a)。

其中,R 因子以章文波等^[21]提出的日降雨量侵蚀力模型计算;K 因子为基于 EPIC 方程^[22]计算,结合张科利等^[23]提出的修正模型进行校正,最后采用 GIS 空间插值与平滑优化等算法对数据进一步优化以提高精度的成果(图 1);L 因子则以 Liu 等^[24]提出模型计算;S 因子则采用刘斌涛等^[25]修正的方程(图 1);C 因子以蔡崇法等^[26]基于植被覆盖度的模型计算(图 2),而植被覆盖度则采用像元二分模型^[27];P 因子参考已有成果^[28-29]结合区域实际分别赋水田 0.15,旱地 0.35,草地 0.8,林地和未利用为 1 及其他为 0。

2.2.2 斜率变化 斜率可以实现土壤侵蚀与时间的回归拟合,对其未来发展趋势进行预测^[30],本文以最小二乘法实现逐像元侵蚀模数随时间的变化分析。表达式如下:

$$K = \frac{n \times \sum_{i=1}^n i \times A_i - \sum_{i=1}^n i \sum_{i=1}^n A_i}{n \times \sum_{i=1}^n i^2 - (\sum_{i=1}^n i)^2}$$

(2)

式中: K 为斜率; n 为年份; A_i 为第 i 年侵蚀模数。 $K < 0$ 代表土壤侵蚀状况有良好的发展趋势;相反, $K > 0$ 则侵蚀状况有加重的倾向。同时,采用 F 检验,以 p 为 0.05 为分界点实现斜率变化的显著性检验。

2.2.3 地理探测器 地理探测器是一种能揭示地理现象空间分异差异和分析自变量与因变量之间相互作用的数学模型。相比传统的相关系数模型,其不仅能实现定量数据分析,也能完成定性数据的处理,同

时又能对各变量之间的交互作用进行分析^[20,31]。

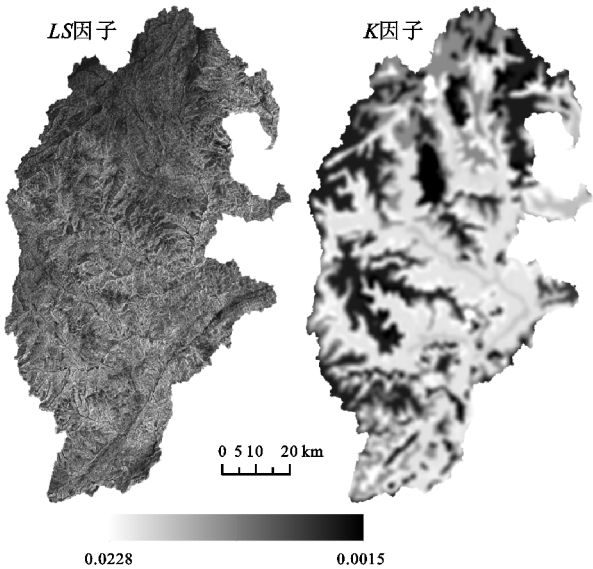


图 1 坡度坡长和 K 因子

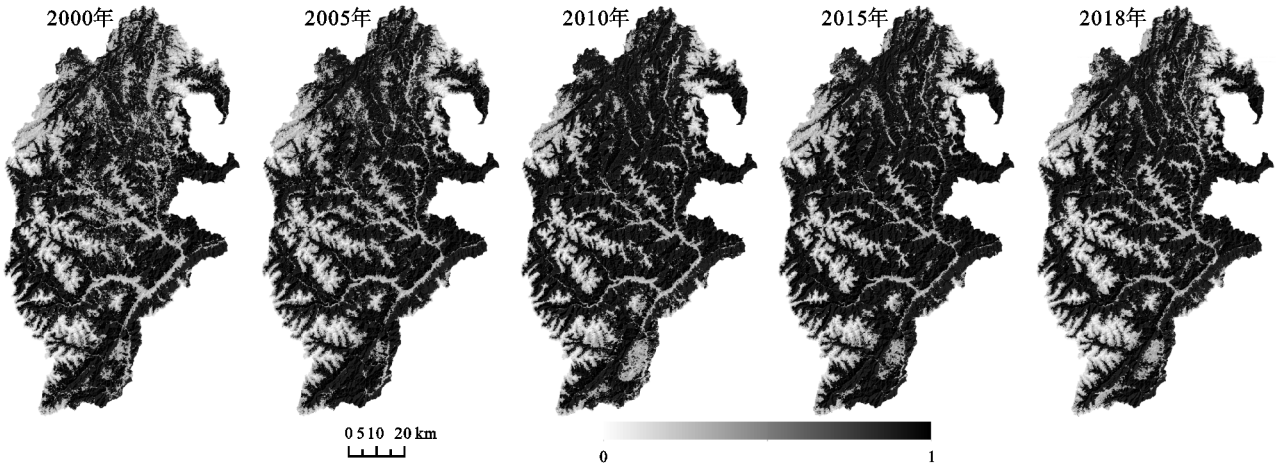


图 2 研究区 C 因子

因子探测器主要用于探测各个自变量 X 对因变量 Y 空间分异的影响力度^[20,31],采用 q 值进行表征:

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \delta_h^2}{N \delta^2} = 1 - \frac{SSW}{SST}$$

(3)

$$SSW = \sum_{h=1}^L N_h \delta_h^2, SST = N \delta^2$$

(4)

式中: q 为因子解释力,数值在 $[0, 1]$; h 为变量 X 或 Y 的分类区间; N_h , N 为各层或者全域的分区数量; SSW , SST 为层内和全区总方差; q 数值越大表明 X 对 Y 的影响力越明显。

交互探测器可用于分析当各不同自变量 X 因子存在交互作用时,其交互作用对因变量 Y 的驱动解释力是增强或者减弱^[20,32-33]。其先分别单独计算自变量因子 X_1 和 X_2 分别对 Y 的解释力 $q(X_1)$ 和 $q(X_2)$,其次计算 $q(X_1 \cap X_2)$,最后将这 3 个变量的 q 值进行比较以此完成交互影响作用的判定(表 1)。

本文选取多年平均 $NDVI(X_1)$ 、高程(X_2)、多年

平均降雨量(X_3)、土壤类型(X_4)、土地利用类型(X_5)和坡度(X_6)共计 6 个因子为自变量,而将多年平均土壤侵蚀模数为因变量。

表 1 交互作用判定

判定依据	解释
$q(X_1 \cap X_2) < \min[q(X_1), q(X_2)]$	非线性减弱
$\min[q(X_1), q(X_2)] < q(X_1 \cap X_2) < \max[q(X_1), q(X_2)]$	单因子非线性减弱
$q(X_1 \cap X_2) > \max[q(X_1), q(X_2)]$	双因子增强
$q(X_1 \cap X_2) = q(X_1) + q(X_2)$	独立
$q(X_1 \cap X_2) > q(X_1) + q(X_2)$	非线性增强

基于王劲峰等^[20]提出的数据离散化和先验知识,在参考已有成果^[4,19,30]的基础上利用“自然间断点分级”将高程、坡度和多年平均降雨量均分为 9 类,而多年平均 $NDVI$ 分为 13 类;土壤类型参照《1:100 万中华人民共和国土壤图》将其分为 17 类,土地利用类型按照耕地、林地和草地等分为 6 个一级类。同时,以 $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ 网格完成该地区中心样点的规则取样。

3 结果与分析

3.1 土壤侵蚀评价

研究基于 USLE 模型完成 2000—2018 年各年份土壤侵蚀模数的计算,并按《土壤侵蚀分类分级标准(2008)》文件^[34]完成各年份侵蚀程度的等级划分(图 3)。

结合图 3 分析,该地区土壤侵蚀强度空间分布变化规律与姜琳等^[17]基本吻合,间接证明研究成果基本可靠。以 2018 年岷江上游地区侵蚀强度分级结果为例,该地区侵蚀以微度和轻度为主,它们占据

了全域总面积的 77.59%,这些土壤侵蚀现象并不明显的地区在整个研究区的分布范围最广,分布在全域的大部分地区。结合土地利用类型和地形地貌数据分析可知,微度和轻度区地貌大多以中—高海拔的山地为主,而这些地区土地类型则又主要为有林地、灌木林地和高度盖度草地等,这些区域植被生态环境相对良好且覆盖度相对较高,良好的植被生态环境对调节气候变化和生态环境好转又起到了有利的促进作用,微度侵蚀全域分布范围广可能就是得益于此。

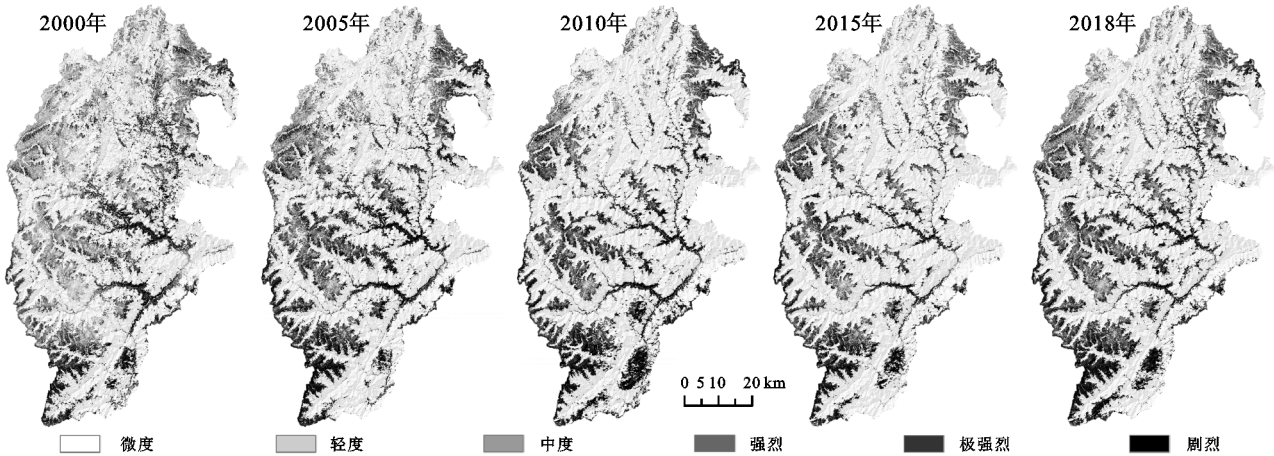


图 3 2000—2018 年土壤侵蚀强度分级

相反,中度及以上程度在全域分布范围仅占据全域总面积的 22.41%,它们绝大部分分布于高海拔且地形起伏差异明显的高山和极高山地区,这些地区呈现出植被覆盖度相对较低,地形陡峭,特殊的气候易引发岩石风化和土壤剥离搬运等现象,因此土壤侵蚀程度相对明显。此次,它们还有极小部分分布于岷江、黑水河和杂谷脑河等江河水系两侧,这些地区虽然地势相对平缓,但它们是社会经济发展的核心地带,也是受人类活动影响相对明显的区域,全域主要的农牧生产均主要集中于此,促成了这些地区土壤侵蚀现象相对明显现象的产生。

3.2 趋势变化分析

结合岷江上游地区土壤侵蚀斜率变化(图 4)计算结果分析可知:2000—2018 年内,土壤侵蚀呈现好转($K < 0$)的地区全域面积占比为 75.60%;而整个岷江上游地区仅有 25.40%的侵蚀呈现出严重化发展趋势。结合显著性检验结果又可知:整个时段内,有 21.14%的地区土壤侵蚀呈现明显好转的发展状态,它们主要分布于松潘县东部地区、岷江、黑水河以及杂谷脑河等江河水系两侧地形相对平缓的区域;侵蚀状况未发生明显改变(好转或严重化)的地区全域面积占比最大为 76.99%,在全域的大部分范围均有分

布;仅有 1.87%的地区呈现出土壤侵蚀明显严重化的发展倾向,结合地形地貌数据分析可以发现,它们主要分布在海拔 4 000 m 以上的高山地区。

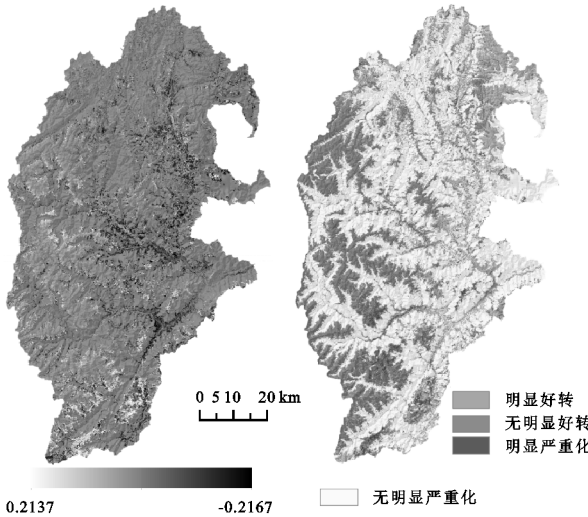


图 4 斜率及显著检验

3.3 侵蚀驱动因子探测

3.3.1 侵蚀驱动因子探测 结合(表 2)对土壤侵蚀驱动因子的关系进行分析可知:各个因子对区域土壤侵蚀空间分布格局变化的驱动作用存在不同差异;其影响力大小关系为多年平均 NDVI>多年平均降水>高程>土壤类型>土地利用类型>坡度;6 个因子中多

年平均 NDVI 的 q 值最大为 0.331 4,说明其对土壤侵蚀空间分布格局形成和改变的影响力最大,坡度的 q 值最小仅为 0.017 2,和其他 5 个因子相比坡度对侵蚀强度空间分布格局变化的驱动作用最不明显。

表 2 驱动因子探测结果

驱动因子	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6
q	0.3314	0.1414	0.1546	0.0849	0.0311	0.0172
p	0	0	0	0	0	0

结合 q 值变化与实际分析可知:岷江上游地区森林和中高覆盖度草地分布范围相对较广,全域 95%以上为林草区(其中,中高植被覆盖区又占据林草区总面积的 80%以上),全域植被覆盖状况整体相对良好,植被对土壤侵蚀的形成与变化起到相对明显的抑制作用;区域海拔差异明显,地形起伏相对较大,降雨又主要集中于下半年(5—10 月)和海拔 2 500 m 以下的河谷地带,夏季暴雨相对频发,降雨强度也相对较大,是促进岷江上游地区土壤侵蚀面积扩张和程度加深的主要因素;此外,多年平均植被覆盖度、高程和多年平均降雨量这 3 个因子的解释力均明显远大于土地利用类型;综上,客观程度可以判定,自然因子是影响区域土壤侵蚀空间分布格局变化的主要驱动因素。

3.3.2 交互探测 交互探测主要用于判定,若两个驱动因子产生交互关系时,其交互作用对土壤侵蚀变化的影响作用为增强、减弱或者相互独立。通过交互探测器完成岷江上游地区土壤侵蚀与各驱动因子的交互探测,结果表明各驱动因子间不存在相互独立作用,因子交互作用表现为非线性增强和双因子增强两种。

结合(表 3)对各因子之间的交互影响作用进行分析:多年平均 NDVI 分别与高程、多年平均降雨量或土地利用类型;高程分别与多年平均降雨量、土壤类型、土地利用类型、多年平均降雨量或坡度。以上几类驱动因子产生交互关系时,它们的交互协同作用对土壤侵蚀分布格局变化产生双因子增强影响;其他几类因子产生交互关系时,交互协同作用对土壤侵蚀分布格局变化产生的影响作用为非线性增强;当多年平均 NDVI 分别与多年平均降雨量、高程或土壤类型产生交互关系时,它们的协同作用对土壤侵蚀分布格局变化的影响力均达到 40%以上,客观程度表征了 3 类组合产生的交互作用对土壤侵蚀分布格局变化影响的贡献作用最大;相反,土壤类型和坡度产生交互关系时,其协同作用对土壤侵蚀分布格局变化的影响力最小,仅产生 5%左右的驱动作用;多年平均 NDVI 与其他驱动因子产生交互关系时,它们产生的

协同作用对土壤侵蚀分布格局变化的影响力都在 30%以上,均比其他因子间产生交互的影响力大,这也意味着植被覆盖度差异较大的地区土壤侵蚀程度通常也呈现出较明显的差异。

表 3 因子交互探测结果

q (变量 1)	q (变量 2)	q (两因子交互)	q (变量 1)+ q (变量 2)	结果判定
$X_1=0.3314$	$X_2=0.1414$	$X_1 \cap X_2=0.3982$	0.4728	双因子增强
$X_1=0.3314$	$X_3=0.1546$	$X_1 \cap X_3=0.4144$	0.4860	双因子增强
$X_1=0.3314$	$X_4=0.0849$	$X_1 \cap X_4=0.4266$	0.4163	非线性增强
$X_1=0.3314$	$X_5=0.0311$	$X_1 \cap X_5=0.3502$	0.3625	双因子增强
$X_1=0.3314$	$X_6=0.0172$	$X_1 \cap X_6=0.3923$	0.3486	非线性增强
$X_2=0.1414$	$X_3=0.1546$	$X_2 \cap X_3=0.2348$	0.2960	双因子增强
$X_2=0.1414$	$X_4=0.0849$	$X_2 \cap X_4=0.2201$	0.2263	双因子增强
$X_2=0.1414$	$X_5=0.0311$	$X_2 \cap X_5=0.1596$	0.1725	双因子增强
$X_2=0.1414$	$X_6=0.0172$	$X_2 \cap X_6=0.1782$	0.1586	非线性增强
$X_3=0.1546$	$X_4=0.0849$	$X_3 \cap X_4=0.2398$	0.2395	非线性增强
$X_3=0.1547$	$X_5=0.0311$	$X_3 \cap X_5=0.1863$	0.1858	非线性增强
$X_3=0.1548$	$X_6=0.0172$	$X_3 \cap X_6=0.1706$	0.1720	双因子增强
$X_4=0.0849$	$X_5=0.0311$	$X_4 \cap X_5=0.1161$	0.1160	非线性增强
$X_4=0.0849$	$X_6=0.0172$	$X_4 \cap X_6=0.1166$	0.1021	非线性增强
$X_5=0.0311$	$X_6=0.0173$	$X_5 \cap X_6=0.0601$	0.0484	非线性增强

4 讨论与结论

4.1 讨论

岷江上游地区既是四川省西部生态高原建设的重要功能区,也是土壤侵蚀问题相对典型的地区之一。因此,较全面掌握其空间分布特征、时间变化规律和变化驱动因素对科学实现该地区土壤侵蚀综合治理有着重要意义。研究以 RUSLE 为基础,完成该地区 2000—2018 年土壤侵蚀状况的定量评价与侵蚀动态变化规律的探索,结合地理探测器对影响岷江上游地区土壤侵蚀空间分布格局和变化的驱动因素进行分析。对研究结果分析可知,本文采用的方法可行,预期目标也基本实现。

相比以往成果,本研究引入用于分析长时间序列数据空间变化规律分析的线性回归模型,其能较好避免由于某时期数据突变而造成整体趋势变化规律出现异常现象的发生,这对较全面掌握区域土壤侵蚀真实的变化规律更具价值;采用地理探测器对影响区域土壤侵蚀空间分布格局变化因素进行探索,其不仅能较有效探测地理现象空间差异性,揭示其背后驱动力,还能分析因子交互协同作用对侵蚀强度空间分布格局变化的影响作用;其较有效弥补了以往成果仅从单因子对驱动力进行分析的不足,进一步促进了对驱动力的较全面掌握。

植被覆盖度(NDVI)、海拔和降水是影响岷江上游地区土壤侵蚀分布及程度改变的主要驱动因素。特别是植被覆盖度,单因子探测结果显示其影响力几乎是海拔和降水的两倍。双因子交互探测结果也显示,植被覆盖度(NDVI)与其他因子产生交互协同作用的驱动力也比其他因子两两交互产生的影响力大。以上两点均表明,植被覆盖度(NDVI)是驱动该地区土壤侵蚀形成与变化的最主要因素,其影响力远远大于其他因子的驱动作用。在整个研究时段内,岷江上游地区土壤侵蚀状况整体得到有效遏制,对祝聪等^[30]研究成果分析可知,整个阶段内岷江上游地区植被覆盖度整体处于良好发展的趋势,植被生态环境的改善对区域土壤侵蚀的改变起到了有效的抑制作用。因此,今后对该地区土壤侵蚀进行综合治理时,加强区域植被的保护与努力提高植被覆盖度仍然是一项重要的工作。

由于影响土壤侵蚀变化的因素相对较多,同时受数据收集的限制,本研究仍然存在一定的不足尚需完善。如在计算土壤侵蚀模数时,本文以 250 m 的栅格尺寸为尺度,虽然利用遥感技术进行时空变化规律分析时大都更侧重宏观角度,该地区范围也相对较大,该栅格尺度未能对动态变化规律分析产生较明显干扰,但若采用更高分辨率数据进行分析,那研究结果的可靠性会进一步提高;同时,研究在进行驱动力因子选取时,主要选择了部分典型因子,今后的研究中若加入地层岩性、人口和 GDP 等更多因子进行探讨,那么驱动力探讨的结果也更具价值。

4.2 结论

(1) 岷江上游地区土壤侵蚀整体状况相对良好,中度以上侵蚀区全域的分布范围相对较少,并且它们主要集中于地形起伏较大且植被覆盖度相对较低的高海拔山地区;近 20 a 内,整个地区土壤侵蚀呈现出良好的发展趋势。

(2) 因子探测结果表明,在众多驱动因素中,植被覆盖度(NDVI)、降雨量和海拔三者占据了促进土壤侵蚀形成与变化因素的前 3 位,其中植被覆盖度(NDVI)的驱动作用最明显;交互探测结果显示,当影响土壤侵蚀变化的各因子产生交互作用时,它们的协同驱动作用均比单因子的影响力明显。

(3) 对该地区土壤侵蚀时空变化规律和驱动力分析可知,加强该地区植被的恢复建设,努力提高区域植被覆盖度是有效治理地区土壤侵蚀的重要方法,也是今后治理工作的重点努力方向。

参考文献:

- [1] Deng Y, Wang S, Bai X, et al. Characteristics of soil moisture storage from 1979 to 2017 in the karst area of China[J]. *Geocarto International*, 2019,36(8):903-917.
- [2] Wang L, Huang J, Yun D, et al. Dynamic assessment of soil erosion risk using landsat TM and HJ satellite data in Danjiangkou Reservoir Area, China[J]. *Remote Sensing*, 2013,5(8):3826-3848.
- [3] 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.
- [4] 邹雅婧,闫庆武,谭学玲,等.渭北矿区土壤侵蚀评估及驱动因素分析[J].*干旱区地理*,2019,42(6):1387-1394.
- [5] 田宇,朱建华,李奇,等.三峡库区土壤保持时空分布特征及其驱动力[J].*生态学杂志*,2020,39(4):1164-1174.
- [6] 陈朝良,赵广举,穆兴民,等.基于 RUSLE 模型的湟水流域土壤侵蚀时空变化[J].*水土保持学报*,2021,35(4):73-79.
- [7] 陈锐银,严冬春,文安邦,等.基于 GIS/CSLE 的四川省水土流失重点防治区土壤侵蚀研究[J].*水土保持学报*,2020,34(1):17-26.
- [8] 魏健美,李常斌,武磊,等.基于 USLE 的甘南川西北土壤侵蚀研究[J].*水土保持学报*,2021,35(2):31-37.
- [9] Madasamy N, Joshua M B, Rajangam L.. Estimation of soil loss by an integrated approach of USLE and geospatial techniques: a case study of Kumulur watershed[J]. *Arabian journal of geosciences*, 2020, 13(19). DOI: 10.1007/s12517-020-05929-z.
- [10] 彭双云,杨昆,洪亮,等.基于 USLE 模型的滇池流域土壤侵蚀时空演变分析[J].*农业工程学报*,2018,34(10):138-146.
- [11] 王欢,高江波,侯文娟.基于地理探测器的喀斯特不同地貌形态类型区土壤侵蚀定量归因[J].*地理学报*,2018,73(9):1674-1686.
- [12] 康琳琦,周天财,干友民,等.1984—2013 年青藏高原土壤侵蚀时空变化特征[J].*应用与环境生物学报*,2018,24(2):245-253.
- [13] 陈美洪,魏欣,张科利,等.基于 CSLE 模型的贵州省水土流失规律分析[J].*水土保持学报*,2017,31(3):16-21.
- [14] 程琳,杨勤科,谢红霞,等.基于 GIS 和 CSLE 的陕西省土壤侵蚀定量评价方法研究[J].*水土保持学报*,2009,23(5):61-66.
- [15] 陈锐银,严冬春,文安邦,等.基于 GIS/CSLE 的四川省水土流失重点防治区土壤侵蚀研究[J].*水土保持学报*,2020,34(1):17-26.
- [16] 刘斌涛,宋春风,陶和平.成都市土壤侵蚀定量评价研究[J].*长江科学院院报*,2016,33(9):40-47.

[17] 姜琳,边金虎,李爱农,等.岷江上游 2000—2010 年土壤侵蚀时空格局动态变化[J].水土保持学报,2014,28(1):18-25.

[18] 龚雪梅,冯文兰,郑杰,等.岷江上游土壤侵蚀敏感性评价[J].干旱区资源与环境,2017,31(9):68-74.

[19] 彭文甫,张冬梅,罗艳玫,等.自然因子对四川植被 NDVI 变化的地理探测[J].地理学报,2019,74(9):1758-1776.

[20] 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.

[21] 章文波,谢云,刘宝元.中国降雨侵蚀力空间变化特征[J].山地学报,2003,21(1):33-40.

[22] 张恩伟,彭双云,冯华梅.基于 GIS 和 RUSLE 的滇池流域土壤侵蚀敏感性评价及其空间格局演变[J].水土保持学报,2020,34(2):115-122.

[23] 张科利,彭文英,杨红丽.中国土壤可蚀性值及其估算[J].土壤学报,2007,44(1):7-13.

[24] Liu B Y, Nearing M A, Risse L M. Slope length effects on soil loss for steep slopes[J].Soil Science Society of America Journal,2000,64(5):1759-1763.

[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(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] 李苗苗,吴炳方,颜长珍,等.密云水库上游植被覆盖度的遥感估算[J].资源科学,2004,26(4):153-159.

[28] 黄凤琴,第宝锋,黄成敏,等.基于日降雨量的年均降雨侵蚀力估算模型及其应用:以四川省凉山州为例[J].山地学报,2013,31(1):55-64.

[29] 王潇,刘汉湖,吴冰.四川境内赤水河流域上中游水土流失时空变化研究[J].河南理工大学学报:自然科学版,2019,38(3):70-80.

[30] 祝聪,彭文甫,张丽芳,等.2006—2016 年岷江上游植被覆盖度时空变化及驱动力[J].生态学报,2019,39(5):1583-1594.

[31] 黄木易,岳文泽,方斌,等.1970—2015 年大别山区生态服务价值尺度响应特征及地理探测机制[J].地理学报,2019,74(9):1904-1920.

[32] 王晓峰,张明明,尹礼唱,等.2000—2015 年中国干旱半干旱地区沙漠化进程驱动力研究[J].生态环境学报,2019,28(5):948-957.

[33] 贺倩,杨雪琴,戴晓爱.2010—2015 年三江源地区植被净初级生产力变化特征及影响因素分析[J].长江科学院院报,2020,37(5):59-66.

[34] 中华人民共和国水利部.土壤侵蚀分类分级标准 SL190—2007[S].北京:中国水利水电出版社,2008.

(上接第 84 页)

[19] Guo H L, Sun L Q, Wu S F, et al. Erosion evolution processes and hydraulic characteristics analysis of fish-scale pit slop on Loess Plateau region[J]. Acta Pedologica Sinica, 2017,54(5):1125-1135.

[20] McColl K A, Alemohammad S H, Akbar R, et al. The global distribution and dynamics of surface soil moisture[J]. Nature Geoscience, 2017,10(2):100-104.

[21] Vereecken H, Huisman J A, Pachepsky Y, et al. On the spatio-temporal dynamics of soil moisture at the field scale [J]. Journal of Hydrology, 2014,516:76-96.

[22] Di Prima S, Concialdi P, Lassabatere L, et al. Laboratory testing of Beerkan infiltration experiments for assessing the role of soil sealing on water infiltration[J]. Catena, 2018,167:373-384.

[23] Hou X K, Li T L, Vanapalli S K, et al. Water percolation in a thick unsaturated loess layer considering the ground-atmosphere interaction [J]. Hydrological Processes, 2019,33(5):794-802.

[24] 宋小林,吴普特,赵西宁,等.黄土高原肥水坑施技术下苹果树根系及土壤水分布[J].农业工程学报,2016,32(7):121-128.

[25] 李虹辰,赵西宁,高晓东,等.鱼鳞坑与覆盖组合措施对陕北旱作枣园土壤水分的影响[J].应用生态学报,2014,25(8):2297-2303.

[26] 李萍,朱清科,赵磊磊,等.黄土丘陵沟壑区鱼鳞坑雨季土壤水分状况[J].农业工程学报,2011,27(7):76-81.

[27] Guo H L, Zhang B L, Hill R L, et al. Fish-scale pit effects on erosion and water runoff dynamics when positioned on a soil slope in the Loess Plateau region, China[J]. Land Degradation & Development, 2019,30(15):1813-1827.

[28] 宋小林,赵西宁,高晓东,等.黄土高原雨水集聚深层入渗(RWCI)系统下山地果园土壤水分时空变异特征[J].应用生态学报,2017,28(11):3544-3552.

[29] 吴发启,赵西宁,余雕.坡耕地土壤水分入渗影响因素分析[J].水土保持通报,2003,23(1):16-18.

[30] 马蒙蒙,林青,徐绍辉.不同因素影响下层状土壤水分入渗特征及水力学参数估计[J].土壤学报,2019,57(2):347-358.