

基于GIS/CSLE的四川省水土流失重点防治区土壤侵蚀研究

陈锐银^{1,2}, 严冬春^{1,3}, 文安邦¹, 李呈罡¹, 史忠林^{1,3}

(1.中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所,成都 610041;2.中国科学院大学,北京 100049;3.中国科学院山地表生过程与生态调控重点实验室,成都 610041)

摘要: 掌握四川省省级水土流失重点防治区水土流失情况、空间分异规律及其内在驱动因素对生态预警和土壤侵蚀治理等具有重要意义。应用中国土壤流失方程(CSLE)计算四川省省级水土流失重点防治区土壤侵蚀状况,通过不同土壤侵蚀敏感性评价方法识别中国土壤流失方程(CSLE)敏感因子,借助地理探测器探究重点防治区土壤侵蚀空间分异规律及其内在驱动力。结果表明:四川省省级水土流失重点防治区水土流失面积占比27.16%,平均土壤侵蚀模数为806.08 t/(km²·a),属于轻度侵蚀,但区内土壤侵蚀差异明显,局部存在严重水土流失;土壤侵蚀敏感性分析表明,生物措施因子B是中国土壤流失方程(CSLE)中最敏感的因子;不同水土保持分区土壤侵蚀定量归因表明,土地利用方式是土壤侵蚀空间异质性的主要驱动力,且影响因子两两交互均能增加对土壤侵蚀空间分布的解释能力,各因子在不同水土保持分区作用程度存在显著差异。因而,在应用中国土壤流失方程(CSLE)计算土壤侵蚀量时,基于不同研究区针对较为敏感因子建立区域化算法是提高计算精度的关键。

关键词: 水土流失动态监测; 中国土壤流失方程; 敏感因子; 地理探测器

中图分类号:S157.1

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2020)01-0017-10

DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2020.01.003

Research on Soil Erosion in Key Prevention and Control Region of Soil and Water Loss Based on GIS/CSLE in Sichuan Province

CHEN Ruiyin^{1,2}, YAN Dongchun^{1,3}, WEN Anbang¹, LI Chenggang¹, SHI Zhonglin^{1,3}

(1.*Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041;*

2.University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049; 3.The Key Laboratory of

Mountain Surface Process and Ecological Regulation, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041)

Abstract: It is of great importance to know the soil erosion situation, spatial distribution and variation pattern and its internal driving factors in Soil and Water Loss Dynamic Monitoring Area of Sichuan Province for the warning of ecological conditions and controlling of soil erosion. In this paper, China Soil Loss Equation (CSLE) method was used for calculating the overall soil erosion situation of the monitoring area. The different soil erosion sensitivity assessments was used to identify the sensitivity factor in CSLE, GeoDetector was used to explore the spatial distribution and variation pattern and its internal driving factors in the monitoring area. The results indicated that the intensity of soil erosion in the monitoring area was mainly micro erosion, the average modulus of soil erosion was 806.08 t/(km²·a), which belonged to the mild erosion. But the soil erosion in the area was obviously different, and serious soil erosion occurred in some local area. Soil erosion sensitivity analysis showed that biological measure factor B was the most sensitive factor in CSLE. Quantitative attribution of soil erosion in different soil and water conservation zones showed that land use was the main driving force for spatial heterogeneity of soil erosion, and the interaction of the two factors could increase the ability to explain the spatial distribution of soil erosion. There was a significant difference in the extent of each factor in different soil and water conservation zones. Therefore, when using CSLE to calculate the amount of soil erosion, it was the key to improve the calculation accuracy by establishing regionalization algorithms for sensitive factors in different research areas. This study could provide a basic reference for the prevention and control of soil erosion in the monitoring area.

收稿日期:2019-06-28

资助项目:国家重点研发计划项目(2016YFC0402301-02);四川省省级水土流失动态监测项目

第一作者:陈锐银(1994-),女,博士研究生,主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail:chenruiyin@imde.ac.cn

通信作者:严冬春(1981-),男,副研究员,主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail:yandc@imde.ac.cn

Keywords: dynamic monitoring of soil erosion; Chinese Soil Loss Equation; sensitive factor; GeoDetector

土壤侵蚀对土地资源及生态环境的破坏严重影响人类的生存和发展,我国作为深受土壤侵蚀危害的国家之一,土壤侵蚀总面积达 294.91 万 km²,为第一次全国水利普查区域总面积的 31.10%。水土流失动态监测工作定期调查并公告区域土壤侵蚀及其治理状况,是客观反映水土保持治理成效、评价治理效益和编制治理规划的基础^[1]。在水土流失动态监测中,中国土壤流失方程(CSLE)考虑了中国地貌和水土保持措施的特点,能更好地预测土壤侵蚀过程^[2]。

土壤侵蚀敏感性评价是土壤侵蚀发生的可能性以及仅在考虑自然因素时形成的易受土壤侵蚀影响区域的识别^[3]。国内外关于土壤侵蚀敏感性研究成果众多,其中土壤侵蚀敏感性参数计算是土壤侵蚀敏感性评价的主要方法,我国大部分地区都进行了相关研究工作^[4-6],依据不同的土壤侵蚀量划分标准也是常用的土壤侵蚀敏感性评价方法^[7],但针对土壤侵蚀模型主要敏感因子识别研究较少。

土壤侵蚀模型关键因子可通过不同敏感性评价方法分析识别,但土壤侵蚀形成机理复杂,如何科学认识其内在驱动力对水土保持政策制定至关重要。地理探测器不仅可以分析单个自变量对因变量的解释能力,还能在判别各个自变量间差异的基础上,识别自变量两两间的交互作用对因变量的影响,该方法在土壤侵蚀领域的应用也得到了国际认可^[8]。

本研究以 2018 年四川省水土流失动态监测项目为基础,使用中国土壤流失方程(CSLE)对省级水土流失重点防治区土壤侵蚀状况进行评价,结合 4 种土壤侵蚀敏感性分级方法,探寻中国土壤流失方程(CSLE)主要敏感因子,选择监测区所涉及的 8 个水土保持分区代表区县,借助地理探测器方法进行不同水土保持分区土壤侵蚀定量归因研究,为四川省省级水土流失重点防治区进行水土流失防治布局提供科学依据。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

四川省水土流失重点防治区涉及 16 个市(州)的 92 个区县,区内地质构造复杂、地貌复杂多样,具有山地、丘陵、平原和高原 4 种地貌类型;东西气候差异明显,东部的四川盆地属亚热带气候,海拔 3 000 m 以上的川西高原属高原气候,海拔 3 000~4 000 m 相当于寒温带,4 000~5 000 m 相当于亚寒带,4 000~4 200 m 以上年均温 0℃以下,有冻融侵蚀发生,5 000 m 以上为永久冰雪带,以冰蚀、雪蚀作用为主;区内降水量由东南往西北减少,且东部和西部降雨强度相差甚远,以 1 天最大降雨量分布为例,除盆地南部不足 150 mm

以外,其余地区普遍可达 150 mm 以上;区内土壤类型多样,主要有 19 个土类,且区域差异明显;整个监测区位于中国大陆地势三大阶梯中的第 1 级和第 2 级,即处于第 1 级青藏高原和第 2 级长江中下游平原的过渡带,高差悬殊,西高东低的特点明显,区内西部为高原、山地,海拔多在 4 000 m 以上,东部为盆地、丘陵,海拔 1 000~3 000 m,涉及四川盆地、川西北高原和川西南山地三大区域。由于地质地貌及气候等的影响,监测区内植被类型和土地利用方式差异巨大。

1.2 研究方法

1.2.1 土壤侵蚀模数计算 中国土壤流失方程^[9](Chinese Soil Loss Equation)的基本形式为:

$$A=R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot B \cdot E \cdot T \quad (1)$$

式中: A 为土壤流失量(t/(hm²·a)); R 为降雨侵蚀力(MJ·mm/(hm²·h·a)); K 为土壤可蚀性(t·hm²·h/(MJ·hm²·mm)); L 为坡长因子(无量纲); S 为坡度因子(无量纲); B 为植被覆盖与生物措施因子(无量纲); E 为工程措施因子(无量纲); T 为耕作措施因子(无量纲)。

(1)降雨侵蚀力因子 R 。雨滴击溅作用和因降雨产生的径流是最主要的土壤侵蚀动力,降雨侵蚀力就反映了这种作用,它是指降雨引起土壤侵蚀的潜在能力。降雨侵蚀力计算公式^[10]为:

$$\bar{R} = \sum_{k=1}^{24} \bar{R}_{\text{半月}k} \quad (2)$$

$$\bar{R}_{\text{半月}k} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sum_{j=0}^m (\alpha P_{i,j,k}^{1.7265}) \quad (3)$$

$$\overline{WR}_{\text{半月}k} = \frac{\bar{R}_{\text{半月}k}}{\bar{R}} \quad (4)$$

式中: \bar{R} 为多年平均年降雨侵蚀力((MJ·mm)/(hm²·h·a)); $k=1,2,\dots,24$,指将一年划分为 24 个半月; $\bar{R}_{\text{半月}k}$ 为第 k 个半月的降雨侵蚀力((MJ·mm)/(hm²·h)); $i=1,2,\dots,N$,指 1988—2017 年时间序列; $j=0,\dots,m$,指第 i 年第 k 个半月内侵蚀性降雨日的数量(侵蚀性降雨日指日雨量≥12 mm); $P_{i,j,k}$ 为第 i 年第 k 个半月第 j 个侵蚀性日雨量(mm);如果某年某个半月内没有侵蚀性降雨量,即 $j=0$,则令 $P_{i,0,k}=0$; α 为参数,暖季(5—9 月) $\alpha=0.3937$,冷季(10—12 月,1—4 月) $\alpha=0.3101$; $\overline{WR}_{\text{半月}k}$ 为第 k 个半月平均降雨侵蚀力($\bar{R}_{\text{半月}k}$)占多年平均年降雨侵蚀力(\bar{R})的比例,所得降雨侵蚀力因子值见图 1a。

(2)土壤可蚀性因子 K 。土壤可蚀性是指土壤具有抵抗雨滴打击分离土壤颗粒和径流冲刷的能力,其计算公式^[11]为:

$$K=A/R \quad (5)$$

式中: A 为坡长 22.13 m,坡度为 9%(5°)的清耕休闲径流小区观测的多年平均(一般需要 12 年以上连续观测,南方观测年限可适当减少)土壤侵蚀模数($t/(hm^2 \cdot a)$); R 为与小区土壤侵蚀观测对应的多年平

均降雨侵蚀力($(MJ \cdot mm)/(hm^2 \cdot h \cdot a)$)。本研究采用第一次全国水利普查水土保持情况普查成果数据中的土壤可蚀性因子数据,所得土壤可蚀性因子值见图 1b。

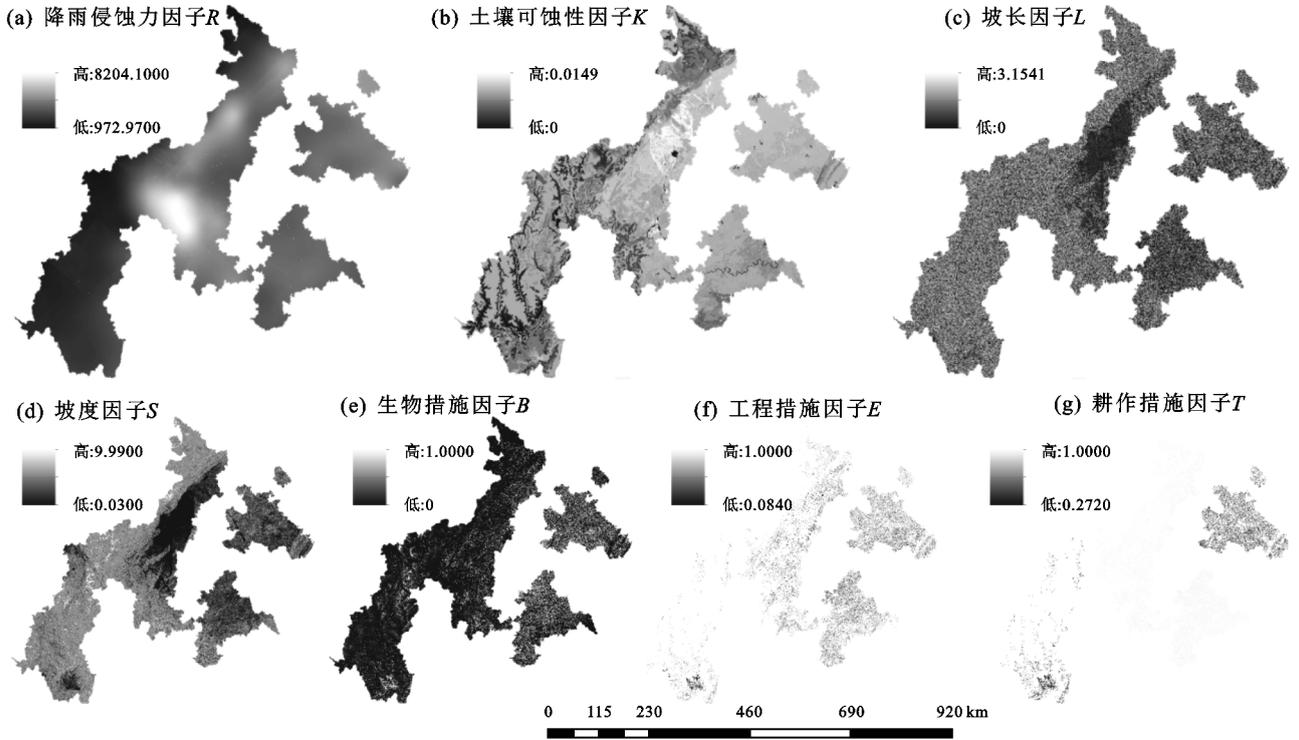


图 1 CSLE 模型影响因子

(3)坡长因子 L 。坡长因子定量反映了坡长与土壤流失量之间的关系,其计算公式^[12]为:

$$L_i = \frac{\lambda_i^{m+1} - \lambda_{i-1}^{m+1}}{(\lambda_i - \lambda_{i-1}) \cdot (22.13)^m} \quad (6)$$

式中: λ_i 和 λ_{i-1} 分别为第 i 个和第 $i-1$ 个坡段的坡长(m); m 为坡长指数,随坡度而变,所得坡长因子值见图 1c。

$$m = \begin{cases} 0.2 & \theta \leq 1^\circ \\ 0.3 & 1^\circ < \theta \leq 3^\circ \\ 0.4 & 3^\circ < \theta \leq 5^\circ \\ 0.5 & \theta > 5^\circ \end{cases} \quad (7)$$

(4)坡度因子 S 。坡度因子定量反映了坡度与土壤流失量之间的关系,本研究结合 McCool 等^[13]的缓坡坡度公式和 Liu 等^[14-15]的陡坡坡度公式,最终表达式为:

$$S = \begin{cases} 10.8 \sin \theta + 0.03 & \theta < 5^\circ \\ 16.8 \sin \theta - 0.50 & 5^\circ \leq \theta < 10^\circ \\ 21.9 \sin \theta - 0.96 & \theta \geq 10^\circ \end{cases} \quad (8)$$

式中: S 为坡度因子; θ 为地面的坡度(°)。所得坡度因子值见图 1d。

(5)生物措施因子 B 。中国土壤流失方程(CSLE)将 USLE/RUSLE 中覆盖与管理因子(C)和水土保持措施因子(P)进一步细分为生物措施因子

(B)、工程措施因子(E)和耕作措施因子(T),其中 B 因子反映植被覆盖对土壤侵蚀的作用, T 因子反映耕作管理对土壤侵蚀的作用, E 因子反映水土保持工程对土壤侵蚀的作用^[16]。本研究参照《区域水土流失动态监测技术规定(试行)》^[17]分不同土地利用计算 B 值,如果是耕地、居民点及工矿用地、交通运输用地、水域及水利设施用地、或其他土地等类型,直接查表对该土地利用类型地块赋值。土地利用类型为农林草的计算公式为:

$$B = \sum_{i=1}^{24} SLR_i \cdot WR_i \quad (9)$$

式中: WR_i 为前面计算的第 i 个半月降雨侵蚀力占全年侵蚀力比例,取值范围为 0~1; SLR_i 为第 i 个半月园地、林地和草地的土壤流失比例,无量纲,取值范围为 0~1。

茶园和灌木林地 SLR_i 计算公式为:

$$SLR_i = \frac{1}{1.17647 + 0.86242 \times 1.05905^{100 \times FVC}} \quad (10)$$

果园、其他园地、有林地和其他林地 SLR_i 计算公式为:

$$SLR_i = 0.44468 \times e^{(-3.20096 \times GD)} - 0.04099 \times e^{(FVC - FVC \times GD)} + 0.025 \quad (11)$$

草地 SLR_i 计算公式为:

$$SLR_i = \frac{1}{1.25 + 0.78845 \times 1.05968^{100 \times FVC}} \quad (12)$$

式中: FVC 为基于近 3 年 MOSIS NDVI 数据通过参数修正法计算的植被覆盖度,取值范围为 0~1; GD 为乔木林的林下盖度,取值范围为 0~1,包括除乔木林冠层以外的所有植被(灌木、草本和枯落物)构成的林下盖度,按实地调查及经验取值,所得生物措施因子值见图 1e。

(6)工程措施因子 E。工程措施因子表示实际工程措施下(其他条件与标准小区相同)的土壤流失量与标准小区土壤流失量的比值^[18],定义中所指的标准小区是指坡度 15°、坡长 20 m、宽 5 m 的清耕休闲地。本研究依据《区域水土流失动态监测技术规范(试行)》^[17]中水土保持工程措施因子赋值表进行赋值,研究区所包含的工程措施见表 1,所得工程措施因子值见图 1f。

表 1 研究区水土保持工程措施因子赋值

二级级类	工程措施名称	工程措施代码	因子值 E
梯田	土坎水平梯田	20101	0.0840
地埂	/	202	0.3470

(7)耕作措施因子 T。耕作措施因子是指采取某种耕作措施的土壤流失量与同等条件下传统耕作

表 2 研究区轮作区名称及代码(含 T 赋值)

一级区	一级区名	二级区	二级区名	T 因子值
01	青藏高原喜凉作物一熟轮歇区	11	藏东南川西河谷地喜凉作物一熟区	0.2720
07	西南中高原山地旱地二熟一熟水田二熟区	71	秦巴山区旱地二熟一熟兼水田两熟区	0.4030
09	四川盆地水旱二熟兼三熟区	91	盆西成都平原水田麦稻两熟区	0.4220
		92	盆东丘陵低山水田旱地两熟三熟区	0.4110

表 3 4 种土壤侵蚀敏感性分级方法规则

单位:t/(hm²·a)

分级	自然间断点	相等间隔	几何间隔	侵蚀强度分级
1	0~1814.026855	0~46439.0875	0~896.353207	0~500
2	1814.026855~7256.107422	46439.0875~92878.175	896.353207~954.039539	500~2500
3	7256.107422~23582.349121	92878.175~139317.2625	954.039539~1850.392746	2500~5000
4	23582.349121~60769.899658	139317.2625~185756.35	1850.392746~15778.285907	5000~8000
5	60769.899658~232195.4375	185756.35~232195.4375	15778.285907~232195.4375	8000~15000
6	/	/	/	>15000

1.2.3 土壤侵蚀定量归因 《四川省水土保持规划(2015—2030 年)》^[21]为了科学合理进行水土流失防治总体布局,在全国水土保持区划的基础上,综合考虑四川省各地生态功能和社会经济结构区域性差异,将全省划分为 16 个水土保持分区,监测区涉及其中 8 个水土保持分区,挑选每个水土保持分区中代表区县(表 4)进行土壤侵蚀定量归因研究,旨在以 8 个区

土壤流失量之比(传统耕作一般指顺坡平作或垄作),反映了水土保持耕作措施的作用^[19]。本研究依据《区域水土流失动态监测技术规范(试行)》^[17]中全国轮作区名称及代码对 T 因子赋值,研究区所包含的耕作措施见表 2,所得耕作措施因子值见图 1g。

1.2.2 中国土壤流失方程敏感因子分析 土壤侵蚀敏感性是指在自然状况下发生土壤侵蚀的潜在可能性及其程度^[20]。其本质是在仅考虑自然因素条件下对容易受土壤侵蚀影响区域的判别^[3]。本研究敏感性分析的主要目的是探讨防治区内中国土壤流失方程(CSLE)的主导敏感因子,因此从土壤侵蚀量计算结果出发,结合前人^[19]研究成果及实际情况,采用 4 种土壤侵蚀敏感性分级方法,分析模型各因子在不同方法下的分布情况,推算 CSLE 模型敏感因子。4 种方法为自然间断点分级法、相等间隔法、几何间隔法和侵蚀强度分级法,具体划分方法见表 3。再将 4 种土壤侵蚀敏感性分级结果分别与计算出的降雨侵蚀力因子 R、土壤可蚀性因子 K、坡长因子 L、坡度因子 S、生物措施因子 B、工程措施因子 E 和耕作措施因子 T 进行区域分析,获得每种方法下各因子在不同敏感程度的分布情况。

县为代表甄别不同水土保持分区土壤侵蚀空间异质性及其背后驱动力。

地理探测器是探测空间分异性以及揭示其背后驱动力的一组统计学方法^[22]。该方法的核心思想即为当自变量对于因变量的影响至关重要时,自变量与因变量的空间分布理应存在相似性,因而该方法在空间分异性研究领域具备突出优势^[23-27]。地理探测器

组成包括因子探测器、生态探测器、交互作用探测器和风险探测器。

表 4 监测区内省级水土保持分区代表县

省级水土保持分区	市(州)	县(市、区)	国土面积/km ²
盆北高丘、中丘保土人居环境维护区	德阳市	广汉市	549
龙门山山地减灾生态维护区	雅安市	名山区	614
川渝平行岭谷山地保土人居环境维护区	广安市	华蓥市	466
峨眉山地减灾生态维护区	乐山市	金口河区	598
盆南中丘、低丘土壤保持区	眉山市	彭山区	465
大娄山高原山地保土蓄水	宜宾市	珙县	1150
大凉山高山峡谷保土减灾区	凉山州	盐源县	8388
南部高山深谷生态维护水源涵养区	甘孜州	泸定县	1525

注:由于盐源县面积过大,提取点数量超过地理探测器最大数据限制,截取盐源县南部作为地理探测器输入数据,其面积为 2 477.71 km²。

因子探测器用以探测因变量 Y 的空间分异性,且用 q 值大小来衡量自变量 X 多大程度上解释了因变量 Y 的空间分布特征^[23,26]在本研究中, q 值越接近 1 说明自变量对土壤侵蚀空间分布特征解释能力越强,反之则越弱。

生态探测器则是用于比较 2 个因子 X_1 和 X_2 对属性 Y 的空间分布的影响是否有显著的差异,以 F 统计量来衡量^[22],在本研究中可判别不同水土保持分区中各因子之间对土壤侵蚀空间分布的影响是否有显著差异。

交互作用探测器用以识别不同风险因子 X_s 之间的交互作用,即评估因子 X_1 和 X_2 共同作用时是否会增加或减弱对因变量 Y 的解释力,或这些因子对 Y 的影响是相互独立的^[22],本研究中可探究不同因子之间的交互作用对土壤侵蚀空间分布的影响。

风险探测器用于判断 2 个子区域间的属性均值是否有显著的差别,在本研究中可识别土壤侵蚀高风险区域^[28]。

本研究选取的影响因子有土地利用类型、植被覆盖度、海拔、坡度、地形地貌和年平均降雨量,由于地理探测器自变量须为类型量,按照专家知识及经验对数据进行离散化处理,其中土地利用数据按照《土地利用现状分类》(GB/T 21010—2017)^[29]进行类别划分,植被覆盖度按照 0~0.3,0.3~0.45,0.45~0.6,0.6~0.75,>0.75 分为 5 类,海拔按照 0~1 000,1 000~3 500,3 500~5 000,>5 000 m 分为 4 类、坡度按照 0~5°,5°~10°,10°~15°,15°~20°,20°~25°,25°~30°,30°~35°,>35°分为 8 类,地形地貌直接采用《中华人民共和国地貌图集(1:100 万)》^[30]中的编码,年均降雨量按照相等间隔分类法划分为 9 类。由于自变量数据和因变量数据皆为栅格数据,通过 ArcGIS 创建渔网,设置其间隔为 500 m,再根据渔网

点将 8 个水土保持分区代表县的自变量和因变量的值提取到点,作为地理探测器的输入数据。

1.3 数据来源

计算降雨侵蚀力因子数据为省级监测区及其周边范围内 145 个(省内 128 个、省外 17 个)气象站 1986—2015 年逐年逐日降雨量;土壤可蚀性因子数据为“第一次全国水利普查”水土保持情况普查成果;坡度坡长因子数据来源于省级监测区域内 5 m 及 25 m 分辨率 DEM 数据;生物措施因子、工程措施因子及耕作措施因子计算数据为 2015 年、2016 年和 2017 年每年 24 个半月分辨率为 250 m 的 MODIS MOD13Q1 数据以及分辨率为 2 m 的高分一号遥感数据,并辅以 2017 年“地理国情监测”影像。

2 结果与分析

2.1 监测区整体土壤侵蚀状况

在 ArcGIS 中按照中国土壤流失方程(CSLE)将土壤侵蚀的 7 个影响因子图层进行栅格代数运算,获得省级监测区土壤侵蚀模数后,依据《土壤侵蚀分类分级标准》(SL 190—2007)^[31]对土壤侵蚀强度进行级别划分,得到省级监测区土壤侵蚀强度分级图(图 2)。整个省级监测区土壤侵蚀强度以微度侵蚀为主,统计侵蚀强度分布状况,该侵蚀强度面积为总面积的 72.84%,即监测区水土流失面积所占比例为 27.16%,且监测区平均土壤侵蚀模数为 806.08 t/(hm²·a),属于轻度侵蚀。总体来看,监测区土壤侵蚀强度较轻,但仍有不可忽略的范围属于中度以上的侵蚀级别,表明监测区土壤侵蚀强度差异较大,局部存在严重水土流失。

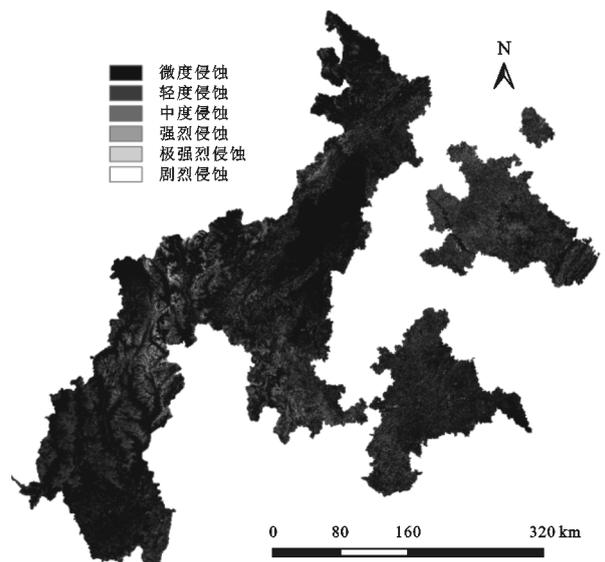


图 2 监测区土壤侵蚀强度分布

2.2 土壤侵蚀敏感性分析

4 种土壤侵蚀敏感性分级结果与各因子进行区域分析获得的各影响因子的分布情况见表 5。

表 5 4 种土壤侵蚀敏感性分级结果及 CSLE 因子分布统计

分级方法	级别	面积比	B 均值	E 均值	T 均值	R 均值	K 均值	L 均值	S 均值
侵蚀强度分级	微度	72.8400	0.0645	0.9471	0.9704	3574.0679	0.0071	1.5262	3.4378
	轻度	19.3010	0.2261	0.8873	0.8897	3597.0619	0.0078	2.0696	4.3763
	中度	4.4460	0.6058	0.7252	0.6821	3706.9447	0.0079	2.1282	4.7000
	强烈	1.9880	0.7544	0.6686	0.6097	3832.8494	0.0080	2.2953	5.4302
	极强烈	1.1420	0.7779	0.6843	0.6320	3983.2303	0.0081	2.4180	6.4446
	剧烈	0.2830	0.7938	0.8538	0.8439	4486.2092	0.0082	2.3969	6.3959
自然间断点	低度	88.9827	0.0884	0.9387	0.9589	3576.8331	0.0072	1.6316	3.6192
	较低	9.2023	0.5851	0.7343	0.6943	3711.1857	0.0079	2.1330	4.7197
	中度	1.7018	0.7744	0.6927	0.6411	4009.7848	0.0081	2.4104	6.3213
	较高	0.0928	0.8376	0.9535	0.9696	4420.3567	0.0081	2.2784	5.9060
	高度	0.0204	0.9794	0.9868	1.0000	5164.5253	0.0083	2.4747	8.0020
相等间隔	低度	99.9636	0.1464	0.9157	0.9291	3597.2082	0.0073	1.6915	3.7681
	较低	0.0312	0.9558	0.9836	0.9998	4693.6134	0.0081	2.3860	7.1831
	中度	0.0045	0.9954	0.9883	1.0000	5712.2194	0.0085	2.5991	8.6956
	较高	0.0006	0.9966	0.9917	1.0000	7021.7427	0.0088	2.6944	8.9923
	高度	0.0001	1.0000	0.9934	1.0000	7384.4418	0.0093	3.0076	8.9983
几何间隔	低度	80.7299	0.0710	0.9453	0.9677	3575.7292	0.0071	1.5860	3.5406
	较低	0.8524	0.1832	0.9058	0.9137	3562.7656	0.0078	2.0694	4.3832
	中度	7.5946	0.2711	0.8696	0.8662	3591.4868	0.0079	2.0784	4.3868
	较高	10.5666	0.6168	0.7253	0.6828	3750.4089	0.0080	2.1751	4.9625
	高度	0.2565	0.7979	0.8709	0.8648	4510.8905	0.0082	2.3813	6.3386

从土壤侵蚀量出发的 4 种土壤侵蚀敏感性评价表明,相等间隔法结果显示监测区土壤侵蚀最不敏感,其中低度敏感区所占面积比例达 99.96%,几何间隔法结果则显示监测区土壤侵蚀最敏感,中度及以上的敏感区面积占比最高,达 18.42%。敏感性分级与中国土壤流失方程(CSLE)因子的区域分析结果显示,侵蚀强度分级法和自然间断点分级法中生物措施因子、降雨侵蚀力因子和土壤可蚀性因子均值随土壤侵蚀敏感程度增高而增大,其余因子均值与土壤侵蚀敏感程度则无明显正相关或负相关关系。相等间隔法与其他方法差异明显,该方法中所有因子均值波动均与土壤侵蚀敏感程度呈正相关,其原因主要在于研究区绝大部分都属于低度敏感区,因此低度敏感区各因子均值接近整体研究区均值,其余敏感区多为模型因子取极值区域。几何间隔法中除工程措施因子和耕作措施因子外,其余因子均值波动与土壤侵蚀敏感性皆为正相关关系。

不同土壤侵蚀敏感性分级方法中各因子最大变化率统计(图 3)结果表明,7 个因子中最大变化率的平均值排列顺序为生物措施因子 $B >$ 坡度因子 $L >$ 坡长因子 $S >$ 降雨侵蚀力因子 $R >$ 耕作措施因子 $T >$ 工程措施因子 $E >$ 土壤可蚀性因子 K 。4 种分级方法中,生物措施因子最大变化率差异最大,土壤可蚀性因子差异最小,但综合而言无论在何种敏感性分级

方法下生物措施因子的最大变化率都远高于其他因子,由此可见,生物措施因子随着敏感程度变化而相应改变,但其他因子趋于稳定,对土壤侵蚀敏感性变化的响应较小,说明 7 个影响因子之中,相对敏感的因子为生物措施因子。依据各因子最大变化率排序,坡度因子在 4 种方法中均属于第 2 位,可知其为本研究中 CSLE 模型的第 2 敏感因子,除此之外,其余因子在 4 种方法中顺序各异,且由于不同研究中采用的土壤侵蚀敏感性分级方法不同^[7,32],这些因子的敏感性需结合所采用的分级方法进行判别。

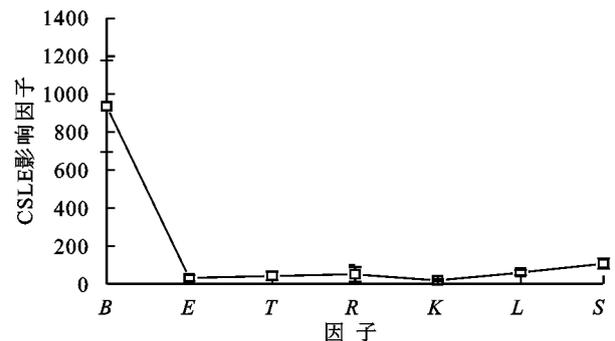


图 3 各因子最大变化率统计

2.3 省级水土保持分区土壤侵蚀定量归因结果分析

2.3.1 因子探测器结果 大娄山高原山地保土蓄水区(珙县)中,根据 q 值大小判定影响该区土壤侵蚀最主要的因子为土地利用类型,该因子对本区土壤侵蚀

空间分布解释能力达 48.31%,其余因子对本区土壤侵蚀空间分布解释能力依次为坡度(0.74%)>海拔(0.58%)>年平均降雨量(0.36%),而植被覆盖度和地形地貌因子在该区对土壤侵蚀空间分布的解释能力不显著。盆北高丘、中丘保土人居环境维护区(广汉市)中,地形地貌对本区土壤侵蚀空间分布解释能力最强,为 13.12%,紧随其后的为土地利用类型,解释能力为 10.53%,其余因子解释能力大小依次为植被覆盖度(0.70%)>年平均降雨量(0.29%),且依据本研究海拔等级划分方法,本区海拔皆属于同一等级,因而不作讨论。川渝平行岭谷山地保土人居环境维护区(华蓥市)中,土地利用类型对本区土壤侵蚀空间分布解释能力最强,达 47.13%,其余影响因子解释能力依次为植被覆盖度(1.17%)>坡度(0.81%)>年平均降雨量(0.30%),海拔和地形地貌 q 值未通过显著性检验。峨眉山山地减灾生态维护区(金口河区)中,土地利用类型作为影响本区土壤侵蚀空间分布的主导因子,其解释能力达 35.72%,地形地貌(4.96%)和植被覆盖(4.37%) q 值大小相差无几,年平均降雨量(2.75%)和海拔(2.17%)解释能力较为接近,而坡度对本区的土壤侵蚀空间分布解释能力不显著。南部高山深谷生态维护水源涵养区(泸定县)

中,对本区土壤侵蚀空间分布解释能力最强的因子为土地利用类型,其值为 19.53%,其余因子的解释能力大小依次为:年平均降雨量(7.78%)>地形地貌(7.76%)>海拔(7.31%)>植被覆盖度(4.72%)>坡度(0.94%)。龙门山山地减灾生态维护区(名山区)中,土地利用类型对本区土壤侵蚀空间分布解释能力最强,其值高达 58.13%,地形地貌解释能力大于坡度, q 值大小分别为 3.25%和 1.46%,植被覆盖度和海拔在该区对土壤侵蚀空间分布解释能力不显著,而根据本研究年平均降雨量的分级方法,本区中该因子属于同一等级。盆南中丘、低丘土壤保持区(彭山区)中,土地利用类型对本区土壤侵蚀空间分布的解释能力远大于其他因子,其值为 24.15%,其余因子解释能力大小依次为地形地貌(6.41%)>坡度(2.36%)>植被覆盖度(0.67%),年平均降雨量的 q 值未通过显著性检验,且依据本研究海拔分级方法,本区海拔均属于同一级别。大凉山高山峡谷保土减灾区(盐源县)中,土地利用类型同样作为影响本区土壤侵蚀空间分布的主导因子,其解释能力达 21.15%,除此之外,其余影响因子解释能力大小依次为地形地貌(5.19%)>植被覆盖度(2.53%)>坡度(0.82%)>海拔(0.59%)>年平均降雨量(0.58%)(表 6)。

表 6 各省级水土保持分区代表区县影响因子 q 值统计

监测区	土地利用类型	植被覆盖度	海拔	坡度	地形地貌	年平均降雨量
珙县	0.4831	—	0.0058	0.0074	—	0.0036
广汉市	0.1053	0.0070	/	0.0509	0.1312	0.0029
华蓥市	0.4714	0.0117	—	0.0081	—	0.0030
金口河区	0.3572	0.0437	0.0217	—	0.0496	0.0275
泸定县	0.1953	0.0472	0.0731	0.0094	0.0776	0.0778
名山区	0.5813	—	—	0.0146	0.0325	/
彭山区	0.2415	0.0067	/	0.0236	0.0641	—
盐源县	0.2115	0.0253	0.0059	0.0082	0.0519	0.0058

注:—表示 q 值未通过显著性检验($p < 0.05$);/表示分区内该影响因子在本研究设定的等级划分标准中不存在空间分异。

从整体来看,不同的水土保持分区主导因子及其解释能力大小具有显著差异,首先土地利用类型解释能力远高于其他因子,除盆北高丘、中丘保土人居环境维护区(广汉市)外,其他水土保持分区最主要的影响因子皆为土地利用类型,且所有分区中的土地利用类型解释能力均大于 10%,最大值接近 60%;植被覆盖度解释能力趋势则呈现南部高山深谷生态维护水源涵养区(泸定县)>峨眉山山地减灾生态维护区(金口河区)>大凉山高山峡谷保土减灾区(盐源县)>川渝平行岭谷山地保土人居环境维护区(华蓥市)>盆北高丘、中丘保土人居环境维护区(广汉市)>盆南中丘、低丘土壤保持区(彭山区)规律;南部高山深谷生态维护水源涵养区(泸定县)中海拔对土壤侵蚀空间

分布的解释能力高于其他水保分区,但总体上海拔的解释能力都相对较低;坡度 q 值均小于 0.0509,整体趋势为盆北高丘、中丘保土人居环境维护区(广汉市)>盆南中丘、低丘土壤保持区(彭山区)>龙门山山地减灾生态维护区(名山区)>南部高山深谷生态维护水源涵养区(泸定县)>大凉山高山峡谷保土减灾区(盐源县)>川渝平行岭谷山地保土人居环境维护区(华蓥市)>大娄山高原山地保土蓄水区(珙县);而地形地貌因子在各水土保持分区差异较大,其在盆北高丘、中丘保土人居环境维护区(广汉市)作为最主要的影响因子,解释能力为 13.12%,而龙门山山地减灾生态维护区(名山区)中该因子解释能力仅为 3.25%;整体来说,年平均降雨量 q 值相对较小,最小值仅为

0.29%，总体解释能力趋势为南部高山深谷生态维护水源涵养区(泸定县) > 峨眉山山地减灾生态维护区(金口河区) > 大凉山高山峡谷保土减灾区(盐源县) > 大娄山高原山地保土蓄水区(珙县) > 川渝平行岭谷山地保土人居环境维护区(华蓥市) > 盆北高丘、中丘保土人居环境维护区(广汉市)。

2.3.2 生态探测器结果 生态探测器计算结果表明,在大娄山高原山地保土蓄水区(珙县)、川渝平行岭谷山地保土人居环境维护区(华蓥市)、峨眉山山地减灾生态维护区(金口河区)和龙门山山地减灾生态维护区(名山区)和盆南中丘、低丘水土保持区(彭山区)中土地利用类型和其他因子对土壤侵蚀空间分布的影响具有显著的差异;在盆北高丘、中丘保土人居环境维护区(广汉市)、大凉山高山峡谷保土减灾区(盐源县)中土地利用类型与地形地貌对土壤侵蚀空

间分布的影响分别与其他因子对土壤侵蚀空间分布的影响存在显著差异,而在广汉市中 2 个因素对土壤侵蚀空间分布的影响差异并不显著;除此之外,南部高山深谷生态维护水源涵养区(泸定县)中土地利用类型、植被覆盖度和坡度对土壤侵蚀空间分布的影响和其他因子存在显著差异。

2.3.3 交互作用探测器结果 依据交互作用探测器计算结果,统计每个水土保持分区中 q 值大小位于前 4 位的交互作用方式,除南部高山深谷生态维护水源涵养区(泸定县)中土地利用类型与年降雨量的交互结果为双因子增强($q(X1 \cap X2) > \text{Max}(q(X1), q(X2))$)外,其余交互方式结果均为非线性增强($q(X1 \cap X2) > q(X1) + q(X2)$),表明统计的交互方式中,两因子叠加对土壤侵蚀空间分布的解释能力远大于单因子对土壤侵蚀空间分布的解释能力(表 7)。

表 7 各省级水土保持分区代表区县影响因子交互作用统计

参数	珙县	广汉市	华蓥市	金口河区	泸定县	名山区	彭山区	盐源县
交互作用 1	土地利用 类型∩坡度	植被覆盖度 ∩坡度	土地利用 类型∩坡度	土地利用 类型∩坡度	土地利用类型 ∩地形地貌	土地利用类型 ∩地形地貌	土地利用类型 ∩地形地貌	土地利用类型 ∩植被覆盖度
q 值	0.6332	0.5203	0.6692	0.5854	0.3574	0.8367	0.6204	0.3851
交互作用 2	土地利用类型 ∩植被覆盖度	土地利用 类型∩坡度	土地利用类型 ∩地形地貌	土地利用类型 ∩地形地貌	土地利用类型 ∩植被覆盖度	土地利用 类型∩坡度	土地利用类型 ∩植被覆盖度	土地利用类型 ∩地形地貌
q 值	0.5043	0.3459	0.5326	0.5628	0.3000	0.7690	0.3500	0.3712
交互作用 3	土地利用类型 ∩地形地貌	土地利用类型 ∩植被覆盖度	土地利用类型 ∩植被覆盖度	土地利用类型 ∩植被覆盖度	土地利用类型 ∩年降雨量	土地利用类型 ∩植被覆盖度	土地利用 类型∩坡度	土地利用 类型∩坡度
q 值	0.5041	0.3492	0.5192	0.4661	0.2703	0.5918	0.3405	0.3082
交互作用 4	土地利用类型 ∩年降雨量	土地利用类型 ∩地形地貌	土地利用类型 ∩年降雨量	土地利用类型 ∩年降雨量	土地利用 类型∩坡度	土地利用 类型∩海拔	土地利用类型 ∩年降雨量	土地利用类型 ∩年降雨量
q 值	0.4891	0.3419	0.4965	0.4043	0.2484	0.5867	0.2644	0.2299

总体来看,不同水土保持分区主导的交互作用因子及其 q 值大小存在显著差异,8 个水土保持分区中 q 值最大可达 0.836 7,最小仅为 0.229 9;对土壤侵蚀空间分布解释能力最强的交互作用中,除盆北高丘、中丘保土人居环境维护区(广汉市)外,其余皆为其他因子与土地利用类型的协同作用,表明在其他因子相同但土地利用类型不同的条件下,土壤侵蚀空间分布仍会存在巨大差异。盆北高丘、中丘保土人居环境维护区(广汉市)的因子探测器计算结果表明,地形地貌和土地利用类型是该区土壤侵蚀空间分布最具影响的 2 个因子,但交互作用探测器计算结果则显示出这 2 个因子协同作用对土壤侵蚀空间分布的影响远低于植被覆盖度和坡度协同作用对土壤侵蚀空间分布的影响。

2.3.4 风险探测器结果 根据风险探测器运行结果,8 个省级水土保持分区代表区县高风险区域差异显著,土壤侵蚀高风险区域的土地利用类型主要为采矿用地、裸土地及早地,其中有超过半数水土保持分区的高风险区域土地利用类型为采矿用地,但从土壤

侵蚀强度来看,裸地的土壤侵蚀远大于采矿用地和旱地;土壤侵蚀高风险区域多集中于中低植被覆盖度区域,除大娄山高原山地保土蓄水区(珙县)外,其余水土保持区的高风险区域植被覆盖度皆小于 0.6,且 8 个水土保持分区中高植被覆盖度地域均未出现土壤侵蚀高风险;海拔等级与土壤侵蚀的高风险区域分布不存在明显的相关关系;各水土保持分区高风险区域坡度均大于 25° ,除盆北高丘、中丘保土人居环境维护区(广汉市)、南部高山深谷生态维护水源涵养区(泸定县)和大凉山高山峡谷保土减灾区(盐源县)外,其余水土保持分区土壤侵蚀强度与坡度的关系存在转折点,即开始土壤侵蚀强度随坡度增大而增大,当到达某一临界阶段时,土壤侵蚀强度又随坡度增加而减小,南部高山深谷生态维护水源涵养区(泸定县)和大凉山高山峡谷保土减灾区(盐源县)的土壤侵蚀强度和坡度则为正相关关系,其土壤侵蚀强度随坡度增大而增大,而盆北高丘、中丘保土人居环境维护区(广汉市)中土壤侵蚀强度随坡度增加则出现先增大后减

小并再次增大的现象;地形地貌与土壤侵蚀高风险区域分布也无明显相关性,各水土保持分区高风险土壤侵蚀区的地形地貌几乎各不相同,且仅有的相同地形地貌对应的土壤侵蚀模数也差异显著;年降雨量在 913.47 mm 以下的区域并未出现高风险的土壤侵蚀,但年降雨量在 1 453.16 mm 以上的区域同样未出现高风险土壤侵蚀,且各水土保持分区土壤侵蚀强度与年降雨量的关系并无明显的正向或负向的相关关系。

3 讨论

土壤侵蚀强度分级结果表明,省级监测区内土壤侵蚀状况差异明显,整体上监测区侵蚀并不严重,但局部存在严重水土流失,其中强烈侵蚀、极强烈侵蚀及剧烈侵蚀分布较为集中的区县有康定市、马边彝族自治县和峨边彝族自治县,均位于四川省西南地区。

土壤侵蚀敏感性评价可进一步判断监测区土壤侵蚀发生的潜在可能性及其分布位置,同时对中国土壤流失方程(CSLE)的主要敏感因子进行识别,从土壤侵蚀量计算结果出发,选用的 4 种敏感性分级方法结果显示,几何间隔分级方式使得监测区内发生高强度土壤侵蚀可能性最大,而相等间隔分级法使得监测区发生高强度土壤侵蚀的面积最小。但如何科学选择土壤侵蚀敏感性分级方法需结合实际需求,目前最主流的方法为侵蚀强度分级法和自然间断点分级法,本研究中关于敏感性研究重点是识别 CSLE 关键因子,敏感性划分方法选择在今后的研究中将进一步讨论。土壤侵蚀敏感性分析结果表明,生物措施因子 B 是中国土壤流失方程(CSLE)中最敏感的因子,除耕作措施因子和工程措施因子这 2 个受人为影响的因子外,坡度因子和坡长因子敏感性也相对较大,但生物措施因子敏感度远大于其他因子,说明在监测区中,除生物措施因子外,其他因子较为稳定。该结果与其他学者^[7,19,33]研究成果相对接近,表明结果可信度高,因此在应用中国土壤流失方程(CSLE)计算土壤侵蚀量时,正确计算生物措施因子值是准确评价监测区土壤侵蚀状况的关键。我国幅员辽阔,侵蚀环境差异巨大,但在水土流失监测中,所有地区 B 因子计算方法皆为统一公式实则不妥,因地制宜建立生物措施因子计算方法是精确进行区域水土流失评价的突破性工作。

本研究中土壤侵蚀敏感性分析仅针对中国土壤流失方程(CSLE)找出了主要敏感性因子,但从模型角度而言并不能解释监测区土壤侵蚀的内在驱动力。通过地理探测器,对省级水土保持分区代表县进行土壤侵蚀定量归因研究表明,土地利用类型对监测区所包含的 7 个水土保持分区的土壤侵蚀空间分布

解释能力最强,此项结果与喀斯特地区^[8]研究结果类似,因此制定科学合理的土地利用方式是减轻土壤侵蚀最有效的措施。植被覆盖度和年平均降雨量对土壤侵蚀空间分布解释能力规律相似,原因为植被生长离不开丰沛降水,验证了 CSLE 中生物措施 B 因子算法需结合降雨侵蚀力的正确性,但各水保分区植被覆盖度解释能力各异,制定区域 B 因子算法更能提高水土流失动态监测精度。各因子之间对土壤侵蚀空间分布的解释能力差异明显,但土壤侵蚀过程复杂,通常并非单因素独立作用,而是多因素共同作用,影响因子间的耦合机制及其对土壤侵蚀的响应仍是一大难题。本研究探讨了影响土壤侵蚀双因子的交互作用,结果表明,影响因子两两交互对土壤侵蚀空间分布的影响均大于单因子作用,区别仅在于增强方法为非线性增强或双因子增强。影响因子之间的耦合作用也论证了土壤侵蚀高风险区并非皆为单因子极值区,因此在进行水土流失治理时应因地制宜全面考虑影响因素。

4 结论

(1)四川省省级水土流失重点防治区水土流失面积所占比例为 27.16%,监测区平均土壤侵蚀模数为 806.08 t/(km²·a),属于轻度侵蚀,但区内土壤侵蚀强度差异明显,局部存在严重水土流失。

(2)统计 4 种土壤侵蚀敏感性分级结果及中国土壤流失方程(CSLE)各因子分布情况表明生物措施因子 B 为该模型中最敏感的因子,因地制宜建立区域生物措施因子计算方法是准确进行水土流失动态监测的关键。

(3)探究监测区内 8 个水土保持分区代表区县土壤侵蚀空间分布在驱动因素表明,土地利用类型对各区县土壤侵蚀空间分布解释能力最强,但不同水保分区影响因素解释能力各不相同,除科学合理规划土地利用方式外,更应结合实地情况对应主导驱动土壤侵蚀的内在动力采取相应措施减轻土壤侵蚀。土壤侵蚀形成机理复杂,影响因素并非单独作用,两两间交互均增加了对土壤侵蚀空间分布的解释能力,在识别土壤侵蚀高风险区时应综合考虑各影响因素。

(4)土壤侵蚀状况及影响因素存在明显空间分异性,尽管在进行水土流失动态监测时采用统一的模型及计算方式有利于结果汇总比较,但针对较为敏感的因子应制定区域化算法以保证监测精度。

参考文献:

- [1] 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.

- [2] Zhang H, Zhang R, Qi F, et al. The CSLE model based soil erosion prediction: Comparisons of sampling density and extrapolation method at the county level [J]. *Catena*, 2018, 165: 465-472.
- [3] Zhang R H, Liu X, Heathman G C, et al. Assessment of soil erosion sensitivity and analysis of sensitivity factors in the Tongbai-Dabie mountainous area of China [J]. *Catena*, 2013, 101: 92-98.
- [4] 陈学华, 周建中. 基于 GIS 和 RS 的四川省彭州市土壤侵蚀敏感性评价[J]. *山地学报*, 2011, 29(6): 707-712.
- [5] 李大龙, 杨井, 李卫红, 等. 基于 GIS 和 USLE 的伊犁河谷土壤侵蚀敏感性评价[J]. *生态学杂志*, 2016, 35(4): 942-951.
- [6] 杨新华, 王侃, 李加林, 等. 基于 GIS 的慈溪市土壤侵蚀敏感性评价[J]. *水土保持通报*, 2016, 36(4): 210-215.
- [7] 王钧, 周平, 宫清华, 等. 基于 RUSLE 的广东南岭土壤侵蚀敏感性研究[J]. *热带地理*, 2018, 38(3): 347-355.
- [8] Wang H, Gao J B, Hou W J. Quantitative attribution analysis of soil erosion in different geomorphological types in karst areas: Based on the geodetector method [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2019, 29(2): 271-286.
- [9] Liu B Y, Zhang K L, Yun X. An Empirical Soil Loss Equation [C] // Proceedings of 12th International Soil Conference Organization Conference. Vol. III. Beijing: Tsinghua University Press, 2012: 21-25.
- [10] 殷水清, 章文波, 谢云, 等. 基于高密度站网的中国降雨侵蚀力空间分布[J]. *中国水土保持*, 2013(10): 45-51.
- [11] Olson T C, Wischmeier W H. Soil-erodibility evaluations for soils on the runoff and erosion stations1 [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2010, 27(5): 590-592.
- [12] Foster G R. Evaluating irregular slopes for soil predictions [J]. *Trans Asae Gen Ed Am Soc Agric Eng*, 1974, 17: 305-309.
- [13] McCool D, Wischmeier W, Johnson L. Adapting the universal soil loss equation to the Pacific Northwest [J]. *Transactions of the ASAE*, 1982, 25(4): 928-934.
- [14] Liu B Y, Nearing M, Shi P, et al. Slope length effects on soil loss for steep slopes [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2000, 64(5): 1759-1763.
- [15] 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.
- [16] 于悦, 章文波, 王国燕. 果园植被盖度季节变化监测及生物措施因子测算[J]. *应用生态学报*, 2015, 26(3): 761-768.
- [17] 水利部水土保持监测中心. 区域水土流失动态监测技术规范(试行) [EB/OL]. (2018-08-27) [2019-09-12]. <http://www.swcc.org.cn/gglm/2019/0121/29303.html>.
- [18] 符素华, 刘宝元, 路炳军, 等. 官厅水库上游水土保持措施的减水减沙效益[J]. *中国水土保持科学*, 2009, 7(2): 18-23.
- [19] Chen S F, Zha X, Bai Y H, et al. Evaluation of soil erosion vulnerability on the basis of exposure, sensitivity, and adaptive capacity: A case study in the Zhuxi watershed, Changting, Fujian Province, Southern China [J]. *Catena*, 2019, 177: 57-69.
- [20] 乔治, 徐新良. 东北林草交错区土壤侵蚀敏感性评价及关键因子识别[J]. *自然资源学报*, 2012, 27(8): 1349-1361.
- [21] 四川省水利厅. 四川省水土保持规划(2015—2030年) [EB/OL]. (2016-11-21) [2019-09-12]. <http://www.sc.gov.cn/10462/10464/10727/10866/2016/11/21/10404617.shtml>.
- [22] 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.
- [23] Wang J F, Li X H, 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.
- [24] Wang J F, Hu Y. Environmental health risk detection with GeogDetector [J]. *Environmental Modelling & Software*, 2012, 33: 114-115.
- [25] 李佳洺, 陆大道, 徐成东, 等. 胡焕庸线两侧人口的空间分异性及其变化[J]. *地理学报*, 2017, 72(1): 148-160.
- [26] 阮文奇, 郑向敏, 李勇泉, 等. 中国入境旅游的“胡焕庸线”空间分布特征及驱动机理研究[J]. *经济地理*, 2018, 38(3): 181-199.
- [27] 王凤, 刘艳芳, 孔雪松, 等. 中国县域粮食产量时空演变及影响因素变化[J]. *经济地理*, 2018, 38(5): 142-151.
- [28] 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.
- [29] 中国国家标准化管理委员会. GB/T 21010—2017 土地利用现状分类[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017: 2-6.
- [30] 资源环境数据云平台. 中国 100 万地貌类型空间分布数据 [EB/OL]. [2019-09-02]. <http://www.resdc.cn/data.aspx?DATAID=124>.
- [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: 3-8.
- [32] Zhu M. Soil erosion assessment using USLE in the GIS environment: A case study in the Danjiangkou Reservoir Region, China [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2015, 73(12): 7899-7908.
- [33] 郝姗姗, 李梦华, 马永强, 等. 黄土丘陵区土壤侵蚀因子敏感性分析[J]. *中国水土保持科学*, 2019, 17(2): 77-86.