

东南丘陵地区土壤侵蚀时空变化及其驱动因素 ——以湖南省张家界市为例

徐刘洋, 郭伟玲, 贾纪昂

(安徽理工大学 空间信息与测绘工程学院, 安徽 淮南 232001)

摘要: [目的] 探究东南丘陵地区土壤侵蚀状况及其空间分布, 为当地的水土流失和水土保持提供理论依据。[方法] 基于修正版通用流失方程(RUSLE)和地理探测器, 选取中国东南丘陵地区的湖南省张家界市为研究区域, 探究其土壤侵蚀的时空特征变化, 并对土壤侵蚀的驱动力因子进行分析。[结果] ①张家界市 2000, 2010, 2020 年平均土壤侵蚀量为 1.03×10^7 , 2.05×10^7 , 6.74×10^6 t/a, 20 a 平均土壤侵蚀量呈先增加后减少趋势。②土壤侵蚀以林地侵蚀为主, 其他地物类型呈不同程度的侵蚀, 其中侵蚀主要集中于 $8^\circ \sim 35^\circ$ 坡度区域, 侵蚀强度随坡度增加而增加。③研究区内土壤侵蚀由植被覆盖度、坡度、土壤属性和高程等共同作用, 特别是植被覆盖度的驱动作用最明显, 各因子产生交互关系时, 以坡度和植被覆盖度交互时影响力最强。[结论] 张家界土壤侵蚀分布具有明显的时空差异, 后续需要在保障生态安全的前提下, 合理开展水土保持工作。

关键词: 土壤侵蚀; RUSLE; 地理探测器; 时空分析; 湖南省张家界市

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2024)01-0218-09

中图分类号: S157.1

文献参数: 徐刘洋, 郭伟玲, 贾纪昂. 东南丘陵地区土壤侵蚀时空变化及其驱动因素[J]. 水土保持通报, 2024, 44(1): 218-226. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2024.01.022; Xu Liuyang, Guo Weiling, Jia Ji'ang. Spatial and temporal variability and driving factors of soil erosion in hilly areas of Southeast China [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024, 44(1): 218-226.

Spatial and Temporal Variability and Driving Factors of Soil Erosion in Hilly Areas of Southeast China —A Case Study of Zhangjiajie City, Hunan Province

Xu Liuyang, Guo Weiling, Jia Ji'ang

(School of Spatial Information and Surveying Engineering,
Anhui University of Science and Technology, Huainan, Anhui 232001, China)

Abstract: [Objective] The status and spatial distribution of soil erosion in hilly areas were determined in order to provide a theoretical basis for limiting local soil erosion and improving soil conservation practices. [Methods] The study was conducted at Zhangjiajie City, Hunan Province in the hilly area of Southeast China. The revised universal soil loss equation (RUSLE) and geoprobe were used to determine the spatial and temporal changes of soil erosion characteristics and to determine the driving factors of soil erosion. [Results] ① Average soil erosion values at Zhangjiajie City in 2000, 2010, and 2020 were 1.03×10^7 , 2.05×10^7 , and 6.74×10^6 t/a. Average soil erosion over the 20-yr study period initially increased and then decreased. ② Soil erosion was dominated by forest erosion. Other land feature types showed different degrees of erosion, in which erosion was mainly concentrated in the $8^\circ \sim 35^\circ$ slope area. Erosion intensity increased with increasing slope. ③ Soil erosion in the study area was affected by vegetation cover, slope, soil properties, and elevation. The most obvious factor affecting erosion was vegetation cover. The strongest interaction factor influencing erosion was found to be between slope and vegetation cover. [Conclusion] The distribution of soil erosion at Zhangjiajie City had obvious spatial and temporal differences. Soil and water conservation should be carried out reasonably on the premise of ensuring ecological security in the future.

Keywords: soil erosion; RUSLE; geodetector; spatial and temporal analysis; Zhangjiajie City, Hunan Province

收稿日期: 2023-07-15

修回日期: 2023-08-31

资助项目: 安徽省自然科学基金项目联合基金“不同土石含量弃渣场的水土流失规律与防治技术研究”(2208085US21); 国家自然科学基金(42377341)

第一作者: 徐刘洋(1999—), 男(汉族), 安徽省安庆市人, 硕士研究生, 研究方向为 GIS 在水土保持中的应用。Email: 20222017798@aust.edu.cn.

通信作者: 郭伟玲(1979—), 女(汉族), 河南省安阳市人, 博士, 讲师, 主要从事 GIS 与 RS 在水土保持中的应用研究。Email: wlguo28@aust.edu.cn.

土壤侵蚀作为最严重的环境问题之一,影响农业生产力和水资源利用性,进而影响世界的可持续发展^[1]。人为因素诱导的土壤机理改变、时空分布规律以及未来预测和应对恢复措施等问题,已经引起土壤学、农业科学及环境界的广泛的关注^[2-3]。目前在全球范围内,水土流失是一个需要解决的重要问题。各地区都面临不同程度的侵蚀,而中国作为全球受水土流失最为严重的国家之一,仅 2020 年全国水土流失面积就高达 $2.69 \times 10^6 \text{ km}^2$, 占国土面积 28.15%, 是目前急需解决的环境问题^[4]。因此,定量研究分析土壤侵蚀时空分布和驱动力影响因子,对研究区域内的土壤侵蚀进行监测和管控,控制水土流失,保障粮食安全以及实现农业生产的可持续性,都具有重要的意义。

随着国内外学者不断探索,对于土壤侵蚀的监测和预报不断完善,其中,基于经验统计模型和物理成因模型构建的土壤侵蚀模型是目前使用最为广泛的一种方法^[5],如今已经开发了如 WEPP^[6], ANSWERS^[7], USLE 等^[8]土壤侵蚀模型,以 USLE/ RUSLE 模型为代表的因子可根据实际进行调整,可给大部分土壤可蚀性提供计算。陈思旭等^[9]基于 RUSLE 和 GIS 对南方丘陵山区的土壤侵蚀进行定量研究,探究了水土流失的空间分布与坡度和海拔的关系;郭赓等^[10]基于 GIS 和 RUSLE 研究南京市土地利用变化特征和土壤侵蚀时空变化,为当地土地分配和水土保持措施提供科学依据。而结合土壤侵蚀结果对于其内在驱动进行研究,有利于明确治理方向。例如,曹巍等^[11]利用 RUSLE 分析了三江源区 1997—2012 年的土壤侵蚀情况,并利用模型参数控制法分析土壤侵蚀驱动力;李大龙等^[12]基于 USLE 模型方程中的可变因子降雨、植被进行季节区分,对伊犁河谷土壤侵蚀敏感性进行综合评价,分析不同季节下的土壤侵蚀敏感性上的差异。从以往研究来看,对于土壤侵蚀驱动因素研究主要采用传统数理统计和定性分析等方法,仅仅解释了单一因素的驱动性,缺乏对多个因子之间的相互作用性。从 20 世纪 90 年代,土壤侵蚀模型已经被广泛应用于各地的土壤监测,丘陵地区的水土流失严重,以张家界这种地形复杂多样,且以山地居多的地势^[13],对于土壤侵蚀的测定较为困难。由于地理条件的特殊,该地区多以探究旅游布局和农业经济研究为主,针对水土流失方面的研究较少,故本研究利用 RUSLE 模型对此进行定量分析,分析在不同环境和时空背景下土壤侵蚀变化,并基于地理探测器探究其内部驱动力,以便对该研究区域的水土流失给出有效的建议和进行监测预报。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

张家界市位于湖南西北部($109^{\circ}40' - 111^{\circ}20' \text{ E}$, $28^{\circ}52' - 29^{\circ}48' \text{ N}$, 见图 1), 属武陵山脉腹地, 下辖 2 个区(永定区、武陵源区), 2 个县(慈利县、桑植县), 土地总面积 $9\,463.62 \text{ km}^2$, 其地势总体呈西北高, 东南低, 境内山峦重叠, 地面起伏很大, 最高海拔达 $1\,518.6 \text{ m}$, 而最低海拔只有 75 m , 属于东南丘陵区。气候属于中亚热带山原型季风性湿润气候, 年均气温在 16.6°C 左右, 平均降水量为 $1\,382.4 \text{ mm}$, 且分布不均匀, 呈西多东少的趋势; 河流大小有 200 多条, 但以澧水和溇水为主; 土壤类型主要为黄壤、黄棕壤、红壤等; 森林覆盖率为 70.99%, 以常绿落叶阔叶混交林为主, 植被类型和覆盖度都非常丰富。

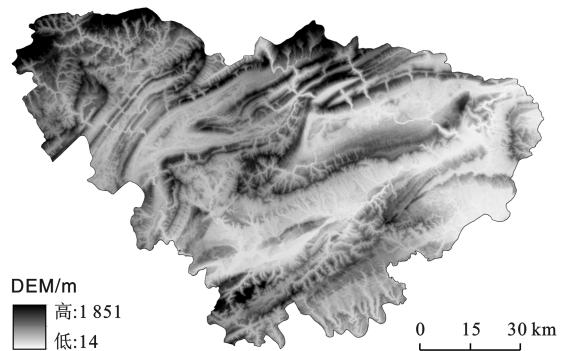


图 1 张家界市地形图

Fig.1 Topographic map of Zhangjiajie City

1.2 数据来源与方法

1.2.1 数据来源与预处理 2000—2020 年张家界区域内年降雨数据通过重新采样插值成 30 m 分辨率, 来源于中国科学院资源环境科学与数据中心 (<http://www.resdc.cn>); DEM 数据为地理空间数据云 (<https://www.gscloud.cn/>) 中所提供 30 m 分辨率的原始数据, 通过对坡度与坡长提取计算, 输出为 30 m 栅格数据; 土地利用数据是通过 Landsat 卫星遥感影像解译, 结合张家界土地利用现状, 建立了 2000—2020 年土地利用数据库; 植被覆盖数据同样基于 Landsat 数据, 通过 ENVI 计算得出; 土壤类型数据来源于世界土壤数据库 (HWSD)。所有数据均采用 UTM 投影、WGS84 坐标系, 栅格数据分辨率重采样为 $30 \text{ m} \times 30 \text{ m}$ 。

1.2.2 土壤侵蚀模型 研究区域大部分属于山地类型, 地形起伏大, 对于资料收集较为困难。结合地理位置与地形条件, 故采用 RUSLE 模型。RUSLE 模型结构简洁, 计算简单, 具有很强的实用性和综合能力, 应用广泛。该模型在不同地区采用不同参数, 计

算公式为:

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

式中: A 为土壤侵蚀模数 $[(t/(hm^2 \cdot a))]$; R 为降雨侵蚀力因子 $[(MJ \cdot mm)/(hm^2 \cdot h \cdot a)]$; K 为土壤可蚀性因子 $[(t \cdot hm^2 \cdot h)/(hm^2 \cdot MJ \cdot mm)]$; L 为坡长坡度因子,无量纲; C 为植被覆盖管理因子,无量纲; P 为水土保持措施因子,无量纲。

(1) 降雨侵蚀力因子(R)。降雨对土壤侵蚀的作用称为降雨侵蚀力因子,是评价降雨对土壤剥离、搬运侵蚀的动力指标。根据降雨强度、降雨动能或者月、年降雨量,有着不同线性和非线性方程来估算降雨侵蚀力。根据研究区域的情况,采取杨子生^[14]所提出降雨模型:

$$R=0.444 \ 88 p^{0.969 \ 82} \quad (2)$$

式中: R 为降雨侵蚀参数 $[(MJ \cdot mm)/(hm^2 \cdot h \cdot a)]$; p 为一定时间间隔内年平均降雨量(mm)。

(2) 地形因子(LS)。地形因子是一个综合参数,包括了影响土壤侵蚀的坡长(L)和坡度(S),这两者在水侵蚀中起着非常重要的决定性因素。RUSLE 模型考虑研究区域泥沙堆积和迁移的边坡长度及倾斜度,侵蚀随着坡度增加而增加,对土壤流失影响也更大。目前, LS 可以直接从坡度和水流堆积层导出,两者可以从数字高程模型(DEM)计算得出,再根据不同的研究区域采用不同方法。本研究采用江忠善等^[15]的 L 计算方法:

$$L=\left(\frac{\lambda}{22.13}\right)^m \quad (3)$$

式中: L 为坡长因子; λ 为坡长(m); m 为坡长指数,其中 $m=0.2, \theta < 1^\circ$; $m=0.3, 1^\circ \leq \theta < 3^\circ$; $m=0.4, 3^\circ \leq \theta < 5^\circ$; $m=0.5, \theta \geq 5^\circ$ 。

对于坡度(S)计算,本研究采用 Liu Baoyuan 等^[16]

$$K=\left\{0.2+0.3 \exp \left[-0.0256 m_{\text{silt}}\left(1-\frac{m_s}{100}\right)\right]\right\} \times\left(\frac{m_s}{m_s+m_c}\right)^{0.3} \times\left[1.0-\frac{0.25 C_i}{C_i+\exp (3.72-2.95 C_i)}\right] \times\left[1.0-\frac{0.7 S A I}{S A I+\exp (-5.51+22.9 S A I)}\right] \quad (8)$$

式中: K 表示土壤可侵蚀因子 $[(t \cdot hm^2 \cdot h)/(hm^2 \cdot MJ \cdot mm)]$; m_c 为黏粒含量(%); m_{silt} 为粉粒含量(%); m_s 为砂砾含量(%); C_i 表示为土壤有机碳含量(%); $SAI=1-m_{\text{silt}}/100$ 。

(5) 水土保持措施因子(P)。 P 是指在相同条件下,特定水土保持措施下土壤流失量与未实施其措施的顺坡耕作时土壤流失量之比,通常的侵蚀控制措施有:等高耕作、修梯田等^[17]。一般定义 P 值范围为 $0 \sim 1$,根据定义可知,当 P 值越小,水土保持措施对土壤侵蚀的措施越明显,反之, P 值越大,水土保

计算公式:

$$S=\begin{cases} 10.8 \sin \theta+0.03 & (\theta < 5^\circ) \\ 16.8 \sin \theta-0.50 & (5^\circ \leq \theta < 10^\circ) \\ 21.9 \sin \theta-0.96 & (\theta \geq 10^\circ) \end{cases} \quad (4)$$

式中: S 为坡度因子; θ 为坡度值($^\circ$)。

(3) 植被覆盖与管理因子(C)。 C 因子作为一个人为可控的因子,在土壤侵蚀模型中起很重要的作用,对减少土壤侵蚀和水土流失有很大的影响。主要指在植被覆盖与管理等措施下土壤流失量与同等条件下耕作的土壤流失量之比,不同的耕作和管理方法都会影响 C 值,其取值范围一般为 $0 \sim 1$ 。本研究植被覆盖度是基于归一化植被指数(NDVI)的植被覆盖度转化模型进行估算得到,然后再根据植被覆盖度与 C 因子值之间的回归方程计算得到 C 值^[17]。公式为:

$$NDVI=f_c \times NDVI_{\max}+(1-f_c) \times NDVI_{\min} \quad (5)$$

$$f_c=\frac{NDVI-NDVI_{\min}}{NDVI_{\max}-NDVI_{\min}} \quad (6)$$

$$C=\begin{cases} 1 & (f_c=0) \\ 0.650 \ 8-0.343 \ 6 \lg f_c & (0 < f_c \leq 78.3 \%) \\ 0 & (f_c > 78.3 \%) \end{cases} \quad (7)$$

式中: C 为植被覆盖与管理因子; f_c 为单位像元中植被含量; $NDVI_{\max}$ 和 $NDVI_{\min}$ 分别取累计概率对应为 95% 和 5% 的 NDVI 值。

(4) 土壤可蚀性因子(K)。土壤可蚀性因子 K 广泛应用于土壤侵蚀模型的主要参数之中,其决定了土壤固有性质对侵蚀过程的影响。用于计算因子的方法选择取决于研究区域可获得的土壤参数,决定 K 因子值的主要有土壤地质、有机质、土壤结构和土壤剖面中顶层的渗透性^[18]。本研究采用 EPIC 模型来估算土壤可侵蚀因子 K ^[19]。公式为:

持措施对土壤侵蚀措施无效。根据相关研究成果和研究区域情况,对不同地物类型的水土保持因子进行赋值^[20-21]。具体赋值见表 1。

通过以上对 RUSLE 模型的各个因子计算,得出研究区域计算所需的各个因子数据,统一输出栅格为 $30 \text{ m} \times 30 \text{ m}$,计算结果如图 2 所示。

1.2.3 地理探测器 地理探测器是一种能探测地理要素空间分异性和分析其自变量和因变量之间交互作用的一种模型。该模型通过分析空间内要素之间的整体差异性来定量判断自变量对于因变量的重要性,目前广泛的使用于社会经济和生态环境^[22-23]。

表 1 不同土地类型水土保持措施因子(P)值

Table 1 Soil and water conservation factor (P) value for different land types

项目	耕地	林地	草地	湿地	水体	人造地表	裸地
P	0.65	1	1	0.5	0	0	1

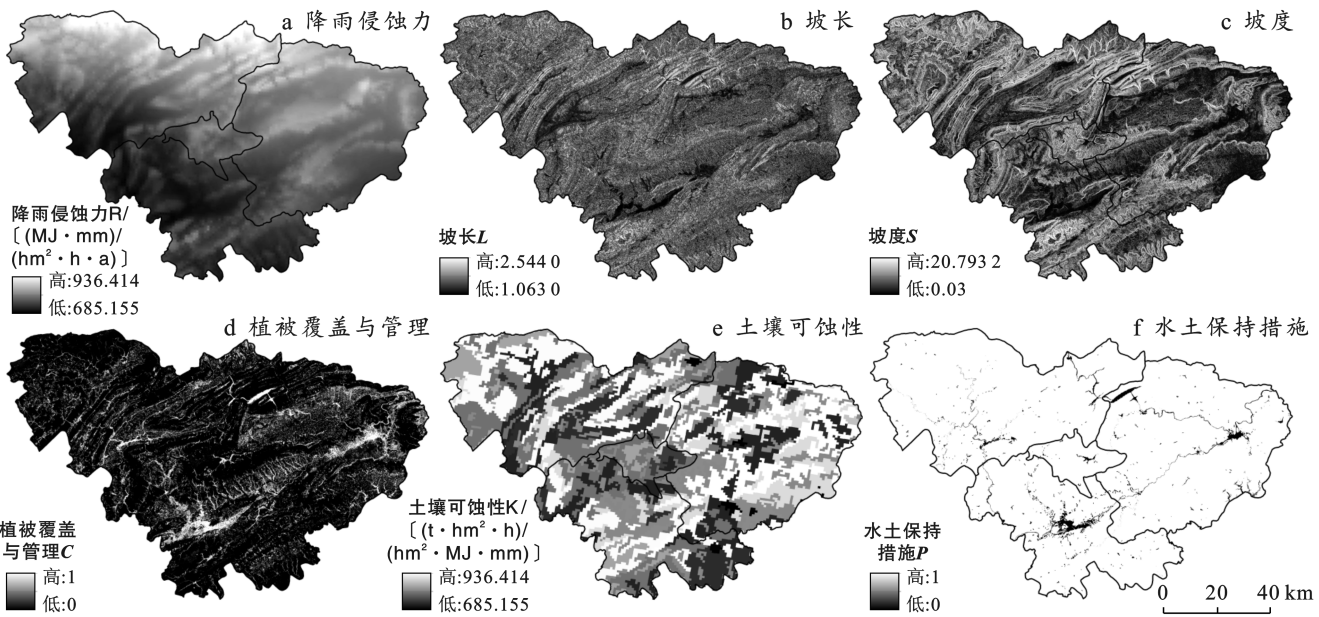


图 2 张家界各侵蚀因子示意图

Fig.2 Schematic diagram of each erosion factor at Zhangjiajie City

因子探测器主要用来探测自变量 X 对属性 Y 的解释程度,采用 q 来表示,取值范围为 $0\sim1$, q 值越大,表示其解释力越强,表达式为:

$$q=1-\frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2}=1-\frac{SSW}{SST} \tag{9}$$

$$SSW=\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2, SST=N \sigma^2 \tag{10}$$

式中: q 为因子解释力; N_h , N 分别为层 h 和全域的分区数量; σ_h^2 和 σ^2 分别是层 h 和全区的 Y 值的方差; SSW , SST 分别为层内方差之和与全区总方差。

交互探测器是能够分析不同的自变量 X 之间交互作用对因变量 Y 的解释力是增强还是减弱^[24],是地理探测器的优势之处,具体交互作用见表 2。

表 2 双因子交互作用

Table 2 A two-factor interaction

判断依据	交互作用
$q(X_1 \cap X_2) < \min[q(X_1), q(X_2)]$	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

本文选取了土壤侵蚀量为因变量,以土壤类型(X_1)、高程(X_2)、坡度(X_3)、植被覆盖度(X_4)、降雨

(X_5)、土地利用类型(X_6)作为因变量,对张家界市土壤侵蚀主导因子分析。其中:土壤类型参照《1:100 万中华人民共和国土壤图》将其分为 23 类;坡度按照 $0^\circ\sim5^\circ, 5^\circ\sim8^\circ, 8^\circ\sim15^\circ, 15^\circ\sim25^\circ, 25^\circ\sim35^\circ, >35^\circ$ 分成 6 类;植被覆盖度按照 $<0.3, 0.3\sim0.4, 0.4\sim0.5, 0.5\sim0.6, 0.6\sim0.7, 0.7\sim0.8, 0.8\sim0.9, 0.9\sim1$ 分成 8 类;高程和降雨按照“自然断点法”分成 9 类;土地利用类型按照耕地、林地、草地湿地、水体、人造地表和裸地等分为 6 个一级类;将张家界市划分为 $1\text{ km}\times1\text{ km}$ 的研究单元,以每个研究单元中心为采样点,对于各个属性数值进行赋值。

1.2.4 土壤侵蚀强度分级 根据中国水利部颁布的《土壤侵蚀分级分类标准》(SL190—2007),以土壤侵蚀模数为基础,将研究区域土壤侵蚀等级划分为 6 个等级:每年 1 km^2 土壤侵蚀量小于 200 t 为微度侵蚀,微度侵蚀 $0\sim200\text{ t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$,轻度侵蚀 $200\sim2\,500\text{ t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$,中度侵蚀 $2\,500\sim5\,000\text{ t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$,强度侵蚀 $5\,000\sim8\,000\text{ t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$,极强度侵蚀 $8\,000\sim15\,000\text{ t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$,剧烈侵蚀 $>15\,000\text{ t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$ 。

2 结果与分析

2.1 张家界市土壤侵蚀时空变化特征

在各个因子计算的基础下,得出张家界市土壤侵蚀空间分布图(图 3)。2000 年张家界市土壤侵蚀总量为

1.03×10⁷ t/a,土壤侵蚀模数为 1 091.99 t/(km²·a),属于微度侵蚀;2010 年土壤侵蚀总量为2.05×10⁷ t/a,土壤侵蚀模数为 2 167.58 t/(km²·a),属于轻度侵蚀;2020 年土壤侵蚀总量为6.74×10⁶ t/a,土壤侵蚀模数为 712.13 t/(km²·a),属于微度侵蚀,整体侵蚀呈先增加后减少的趋势。从表 3 看出,张家界在 2000 和 2010 年主要以微度侵蚀和轻度侵蚀为主,各面积占比分别为 46.65%,36.57%和 35.19%,33.31%。在 2020 年侵蚀强度发生改变,主要以微度侵蚀为主,

面积占比为 72.57%,总体上土壤侵蚀相对于 2010 年有着明显好转。从整体上看,2000—2010 年研究区域土壤侵蚀呈上升趋势,以微度侵蚀下降为主,中度以上侵蚀强度不同程度上升。到 2010—2020 年侵蚀情况有所改观,侵蚀面积大幅度降低转移,尤其是轻度侵蚀强度面积下降明显,幅度约为 16.89%。微度侵蚀面积增加,但是土壤侵蚀总量降低,从轻度侵蚀到微度侵蚀的改变,表明在这 10 a 间,土壤侵蚀情况有着明显好转。

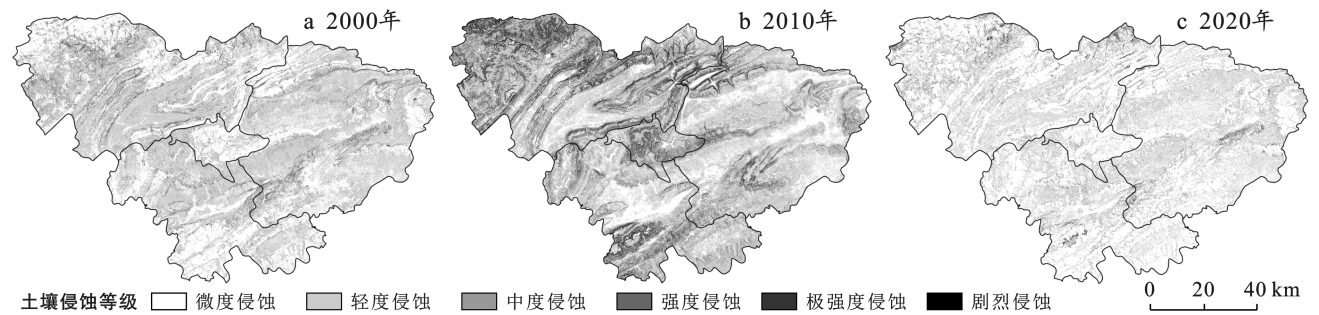


图 3 张家界 2000—2020 年土壤侵蚀强度等级分布
Fig.3 Distribution of soil erosion intensity levels at Zhangjiajie City from 2000 to 2020

表 3 张家界 2000—2020 年各侵蚀强度等级的土壤侵蚀面积和比例						
Table 3 Soil erosion area and proportion of each erosion intensity class at Zhangjiajie City from 2010 to 2020						
分 级	面积/km ²			比例/%		
	2000 年	2010 年	2020 年	2000 年	2010 年	2020 年
微度侵蚀	4 414.78	3 330.08	6 870.23	46.65	35.19	72.60
轻度侵蚀	3 461.38	3 152.76	1 552.18	36.58	33.31	16.40
中度侵蚀	1 272.98	1 789.01	685.45	13.45	18.90	7.24
强度侵蚀	278.87	802.37	246.92	2.95	8.48	2.60
极强侵蚀	35.37	370.73	102.09	0.37	3.92	1.08
剧烈侵蚀	0.23	18.68	7.74	0.00	0.20	0.08
合 计	9 463.62	9 463.62	9 463.62	100.00	100.00	100.00

根据 ArcGIS 的分区统计,得到张家界市不同区(县)的土壤侵蚀情况表 4。由表知,2000 年张家界整体土壤侵蚀分布均匀,主要集中在桑植县和慈利县,而武陵源区的土壤侵蚀情况较轻;到了 2010 年,土壤侵蚀加重,尤其是以西北地区为主,侵蚀模数以桑植县和武陵源区为最大,永定区和慈利县较小;到了 2020 年,张家界市各地区的土壤侵蚀模数都有着不同程度的减少,但依然以北部地区为主,桑植县、慈利县、永定区和武陵源区的侵蚀模数由大到小。由土壤侵蚀量看,2000—2020 年以桑植县土壤侵蚀量均最大,分别达到 4.49×10⁶,1.06×10⁷,2.96×10⁶ t/a,最小侵蚀量均为武陵源区,各区县的土壤侵蚀量都有明显上升一下降的趋势。通过对轻度及以上面积占比计算得出,2000 年武陵源区轻度以上侵蚀强度最小,但到了 2010 年增长高达 90.23%,永定区、慈利县和桑植县轻度及以上侵蚀强度也分别不同程度增加;而

到了 2020 年,各地区轻度及以上所占面积比例均大幅度下降,其中,以武陵源区变化最为明显,下降幅度达 73.13%,其他地区轻度及其以上侵蚀面积均下降到 30%左右。

统计 2000—2020 年不同土壤侵蚀强度的面积转移矩阵(见表 5)。在 2000 年—2010 年土壤侵蚀强度转移中,主要以微度至剧烈向中度转移最明显。其中微度向轻度和中度分别转移 32.27%,28.33%,轻度向微度转移 35.26%,其他侵蚀等级转移不明显。而在 2010—2020 年土壤侵蚀强度转移中,主要以轻度至剧烈向微度转移,其中轻度向微度转移 44.20%,中度向微度转移 91.79%,强度向中度转移 34.83%。从整体转移矩阵上看,2000—2020 年侵蚀强度主要是以微度、轻度和中度之间的转移,中度及以上侵蚀强度转移不明显。总体上,转移矩阵先是从低强度向高强度转移,然后再由高强度向低强度转移。

表 4 张家界市不同区(县)土壤侵蚀情况

Table 4 Soil erosion in different districts (counties) of Zhangjiajie City

地 区	2000 年		2010 年		2020 年	
	土壤侵蚀量/ (10 ⁴ t·a ⁻¹)	轻度及其以上侵蚀 面积所占比例/%	土壤侵蚀量/ (10 ⁴ t·a ⁻¹)	轻度及其以上侵蚀 面积所占比例/%	土壤侵蚀量/ (10 ⁴ t·a ⁻¹)	轻度及其以上侵蚀 面积所占比例/%
永定区	193.10	50.14	392.66	76.63	127.08	25.18
武陵源区	31.82	37.20	120.43	90.23	22.18	17.10
慈利县	358.81	57.88	482.76	70.94	228.62	31.12
桑植县	449.49	52.63	1 055.45	85.69	296.07	26.31

表 5 张家界 2000—2020 不同侵蚀强度面积转移矩阵

Table 5 Area transfer matrix for different erosion intensities at Zhangjiajie City from 2000 to 2020

km²

年份	2010 年面积						合 计
	微度侵蚀	轻度侵蚀	中度侵蚀	强度侵蚀	极强度侵蚀	剧烈侵蚀	
微强度侵蚀	763.36	1 424.32	12 501.38	645.84	314.39	15.73	4 415.02
轻强度侵蚀	1 221.10	2 199.47	41.08	0.00	0.00	0.00	3 461.65
中强度侵蚀	47.76	719.82	432.44	72.51	0.71	0.00	1 273.24
强烈度侵蚀	9.94	49.08	96.95	81.32	40.91	0.00	278.21
极强烈侵蚀	2.12	2.40	5.23	7.66	15.08	2.78	35.27
剧强烈侵蚀	0.02	0.01	0.00	0.01	0.04	0.16	0.23
合 计	2 043.30	4 395.10	1 827.08	807.33	371.13	18.68	9 463.62

年份	2020 年面积						合 计
	微度侵蚀	轻度侵蚀	中度侵蚀	强度侵蚀	极强度侵蚀	剧烈侵蚀	
微强度侵蚀	1 040.39	899.55	75.71	17.79	9.39	1.04	2 043.88
轻强度侵蚀	3 035.46	651.76	557.98	129.55	21.59	0.33	4 396.67
中强度侵蚀	1 676.35	3.32	50.12	71.65	24.44	0.50	1 826.38
强烈度侵蚀	754.54	0.13	2.14	25.86	23.38	0.76	806.81
极强烈侵蚀	343.83	0.01	0.03	1.49	22.94	2.92	371.22
剧强烈侵蚀	16.20	0.00	0.00	0.001	0.28	2.19	18.68
合 计	6 866.78	1 554.77	685.98	246.35	102.01	7.74	9 463.62

2.2 不同因子下土壤侵蚀变化特征

2.2.1 不同土地利用类型下土壤侵蚀变化 将 2020 张家界土地利用现状图与土壤侵蚀图进行叠加分析得到见图 4。

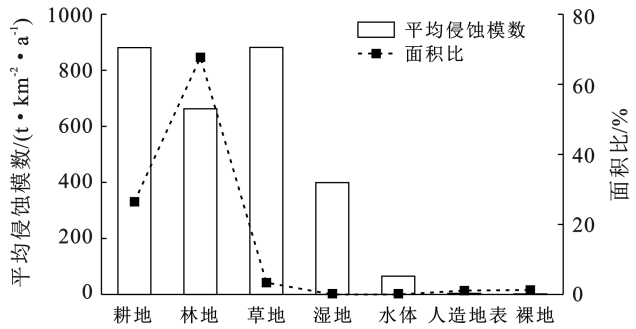


图 4 张家界市不同地物类型土壤侵蚀模数与面积比

Fig.4 Soil erosion modulus to area ratio for different feature types at Zhangjiajie City

不同土地利用类型的土壤侵蚀情况各异,其中耕地与草地的平均土壤侵蚀模数最大且基本一致,其次

是林地、湿地、人造地表和裸地。侵蚀面积主要是以林地为主,所占比例均达到 60%以上,其次为耕地。通过对不同土地利用类型侵蚀强度分析可得:大部分地物类型的土壤侵蚀主要表现为微强度,而耕地主要受微度侵蚀和轻度侵蚀为主,需要重点关注林地和耕地的水土保持措施。

2.2.2 土壤侵蚀与坡度关系 根据 2020 年土壤侵蚀图与坡度现状图叠加分析,得出不同坡度条件下的土壤侵蚀情况。由表 6 知,不同坡度等级与土壤侵蚀具有较强的相关性,在 0°~25°的坡度范围内,随着坡度的增加,土壤侵蚀模数呈不同程度的增加,当坡度大于 25°时,土壤侵蚀模数有所降低。坡度在 0°~5°属于微度侵蚀,大于 5°均为轻度侵蚀。其中,坡度 15°~25°的土壤侵蚀模数和所占面积最大,而 0°~5°的坡度土壤侵蚀模数最小,坡度大于 35°所占面积最小,坡度在 8°~35°的平均土壤侵蚀模数均在 800 t/(km²·a) 的左右,且该土壤侵蚀量占研究区域总量的 82.98%。由此可见,在张家界针对

8°~35°的坡度范围的地区,需要重点进行水土保持措施。

2.3 土壤侵蚀影响因子分析

根据表 7 可知,对所选取的影响因子进行分析后发现,不同年份的不同因子对土壤侵蚀变化的驱动作用有着不同的差异。其中,植被覆盖度的解释力显著大于其他 5 个因子,说明其对土壤侵蚀的空间分布和改变影响最大;降雨和土壤属性的 q 值最小,表明其因子对土壤侵蚀影响最小。

表 7 张家界市驱动因子探测结果

Table 7 Driver detection results of Zhangjiajie City

驱动因子	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6
2000 年	0.019 6	0.043 4	0.029 2	0.344 2	0.010 0	0.029 1
2010 年	0.154 4	0.255 9	0.562 2	0.560 8	0.212 2	0.234 2
2020 年	0.005 8	0.017 5	0.010 4	0.191 1	0.002 3	0.038 5

注: X_1 为土壤类型, X_2 为高程, X_3 为坡度, X_4 为植被覆盖度, X_5 为降雨量;下同。

结合 q 值和实际情况可知,张家界是一个生态功能区,植被覆盖广泛,全市森林植被覆盖率达 70.98%。植被具有良好的保水能力,可以防止降雨和风力对土壤的侵蚀,像植被的叶子和树枝在减少雨量的同时,还能减少雨滴的动能,从而对土壤侵蚀的发生具有一定的抑制作用;近年来区域内加强土地利用总体规划和计划,优化土壤结果和空间布局,对土壤保护产生了积极影响;此外,张家界地势复杂,整体呈北高南低,且由于地壳的上升,加强溪流的切割作用,还未加宽河流就使河谷形成峡谷,坡度陡峭,是促使区域内土壤侵蚀扩张的主要因素。综上所述,可以

表 6 张家界市不同坡度土壤侵蚀情况

Table 6 Soil erosion on different slopes of Zhangjiajie City

坡度等级/(°)	面积/ km ²	平均土壤侵蚀模数/ [t·(km ² ·a) ⁻¹]	侵蚀量/ (10 ⁴ t·a ⁻¹)
[0,5)	1 143.27	161.99	18.52
[5,8)	1 046.92	383.22	40.11
[8,15)	2 478.73	838.26	207.78
[15,25)	2 670.89	926.50	247.45
[25,35)	1 473.64	705.73	103.99
[35,∞)	650.30	862.21	56.07

看出自然因素是影响张家界市土壤侵蚀空间分布的主要原因。

根据图 5 对 3 个年份的不同因子交互分析可得:当植被覆盖度和土地利用交互时,对土壤侵蚀分布格局是双因子增强影响,而其他几类因子交互是非线性增强。以植被覆盖度与其他因子交互时远比其他因子之间的交互作用要强,是影响土壤侵蚀空间分布的主要因子,表明植被覆盖度差异大的地区土壤侵蚀情况差距明显。此外,坡度和植被覆盖度的交互作用的解释力最强,解释力达到了 0.257 8,表明张家界市需要重点关注对于坡度大的植被覆盖地区。

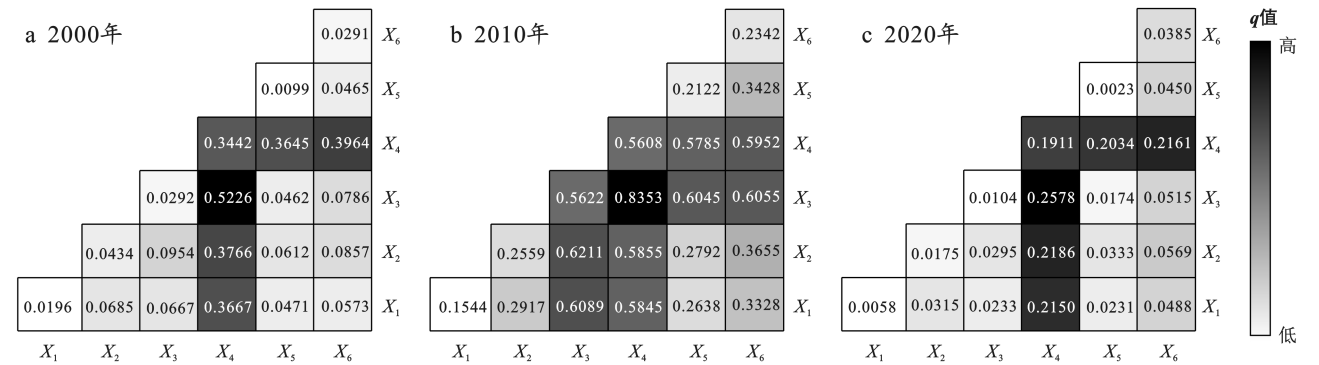


图 5 张家界市双因子交互探测结果

Fig.5 Results of two-factor interaction probes at Zhangjiajie City

3 讨论

3.1 张家界土壤侵蚀时空演变分析

不同地区的土壤侵蚀主要受自然、社会和人为因素的干扰,其中,人为因素是造成土壤侵蚀变化的主要原因,作为一个以旅游立市的地区,在水土流失的背景下,随经济发展转型和城市化的建设,大量的农

业开发、矿产资源的开发和基础性的设备建设,土壤侵蚀情况加剧。

2000 年张家界刚处于初创期,还处于发展规划中,到了 2010 年是实现“十一五”规划的最后一年,张家界的社会经济发展迅速^[25],以经济发展为主而忽视了对资源环境的影响,造成张家界土壤侵蚀尤为严重。随后为贯彻党中央、国务院重大战略部署,推动

新时期水土保持工作,当地政府制定了水土保持规划,加强水土保持工作的展开,2020 年张家界土壤侵蚀有着明显好转。从这 10 a 的变化看出,人类活动对土壤侵蚀有着主动性的影响,在人与自然共处的时代,尊重并保护自然环境,合理利用资源,增强人们的保护意识,才能减少土壤侵蚀的发生。

3.2 土壤侵蚀因子讨论

土壤侵蚀受多方面的因素影响,如自然环境、人为干扰等,其明显的空间特性受大量研究者探索。中国南方的土壤侵蚀主要分布以长江流域的区域,呈现西高东低,张洁发现南方植被得到了有效改善,尤其是坡度较大的农田,对于减少水土流失起着重要的作用,他认为增加林地面积能够有效减少径流和土壤侵蚀^[26-27],这与本研究的结论一致。此外,许多学者发现林地的平均侵蚀最低,茂密的树叶和丰富的植被都能很好减少降雨对土壤的侵蚀^[28],而像坡度耕作和裸露的土地侵蚀是最严重的,没有任何措施而导致严重的水土流失^[29]。以耕地为例,以耕作为主且高坡度的地区尤为严重,目前政府通过森林来减少水土流失,像中国南方丘陵地区通过种植人工林来减少侵蚀。

由于张家界作为一个具有特殊地势的丘陵地区,代表就是峰林地貌,再加上丰富的森林资源,地理探测器发现在植被覆盖度和坡度交互下,对于土壤侵蚀有很强的解力,这与实际符合。针对于这种特殊地貌,在不能改变地质地貌的前提下,单一提升植被覆盖度没有大的提升。根据研究发现,张家界主要受人为生产建设活动造成水土流失,像坡耕地、农田、村庄和工程建设等,需要针对性进行如林草、耕作、工程和管理等一系列措施,在保障生态安全的前提下,合理开展水土保持工作。

3.3 不确定性与未来展望

本研究还存在一些不确定性和需要去解决的问题:①这里探究了张家界市 20 a 土壤侵蚀的时空变化和内部的驱动力,缺乏对于内部的机理和多方面因素的考究。②本研究只考虑的水力侵蚀,像张家界这样以高大石林柱为主奇特的丘陵地区,需要考虑风力侵蚀和重力侵蚀对土壤侵蚀的影响。③本研究在一定程度上揭示了张家界土壤侵蚀的时空变化,但是缺乏实际数据的验证和支持,需要实际进行采样才能准确分析侵蚀因子的影响。④像张家界这样的旅游立市地区,其产业的布置是否对土壤侵蚀空间布局产生影响,在后续研究可以结合产业结构进行评估土壤侵蚀。

由于研究区域和研究资料等限制,其研究结果存在一定的偏差。对于研究结果的分析中,只考虑影响因素较大的因素,与实际情况有所偏差,不同因子之

间的影响效果没有考虑。在后续的研究中,还需要进一步提高数据的精确性和准确性,以对研究区域的水土流失提供更为可靠的理论支撑。

4 结 论

(1) 张家界土壤侵蚀区域主要分布在北部和中南部地区,其他地区呈轻微状态,侵蚀面积较为集中。2000—2010 年张家界土壤侵蚀情况加重,土壤侵蚀量增加了 1.02×10^7 t/a;2010—2020 年土壤侵蚀情况好转,侵蚀量下降,总体来说,土壤侵蚀呈先增加后减少的趋势。

(2) 在不同土地利用类型中,林地的土壤侵蚀最为严重,土壤侵蚀量高达 4.25×10^6 t/a,但其平均土壤侵蚀模数不高。其次是耕地,土壤侵蚀量为 2.21×10^6 t/a,最后是草地。对于不同坡度因子对土壤侵蚀的影响,随着坡度的增加,土壤侵蚀强度先增加后减缓,且土壤侵蚀主要发生在坡度 $8^\circ \sim 35^\circ$ 的地区。

(3) 根据地理探测器对不同因子分析结果可知,植被覆盖度是具有最强的解释力,即是张家界土壤侵蚀的主导因子。植被覆盖度和坡度的交互作用解释力最大,说明需要重点关注地势起伏大且大范围的植被覆盖地区。

[参 考 文 献]

[1] 崔键,周静,马友华,等.我国红壤旱地氮素平衡特征[J].土壤,2008,40(3):372-376.
Cui Jian, Zhou Jing, Ma Youhua, et al. Characteristic of N-balance in red soil upland in China [J]. Soils, 2008,40 (3):372-376.

[2] 南秋菊,华珞.国内外土壤侵蚀研究进展[J].首都师范大学学报(自然科学版),2003,24(2):86-95.
Nan Qiuju, Hua Luo. Recent progress of the soil erosion in the world [J]. Journal of Capital Normal University, 2003,24(2):86-95.

[3] 冷疏影,冯仁国,李锐,等.土壤侵蚀与水土保持科学重点研究领域与问题[J].水土保持学报,2004,18(1):1-6.
Leng Shuying, Feng Renguo, Li Rui, et al. Key research issues of soil erosion and conservation in China [J]. Journal of Soil Water Conservation, 2004,18(1):1-6.

[4] 曹文洪,秦伟.水土保持率目标实现路径探讨[J].中国水利,2023(10):9-12.
Cao Wenhong, Qin Wei. Exploring the path to achieve the soil and water conservation rate target [J]. China Water Resources, 2023(10):9-12.

[5] 蔡强国,刘纪根.关于我国土壤侵蚀模型研究进展[J].地理科学进展,2003,22(3):142-150.
Cai Qiangguo, Liu Jigen. Evolution of soil erosion models in China [J]. Progress In Geography, 2003,22(3):142-150.

- [6] Wilcox B P, Sbaa M, Blackburn W H, et al. Runoff prediction from sagebrush rangelands using water erosion prediction project (WEPP) technology [J]. *Journal of Range Management*, 1992, 45(5): 470.
- [7] Carra B G, Bombino G, Lucas-Borja M E, et al. Modeling the event-based hydrological response of Mediterranean forests to prescribed fire and soil mulching with fern using the curve number, horton and USLE-family (universal soil loss equation) models [J]. *Land*, 2021, 10(11): 1166.
- [8] Mitra B, Scott H D, Dixon J C, et al. Applications of fuzzy logic to the prediction of soil erosion in a large watershed [J]. *Geoderma*, 1998, 86(3/4): 183-209.
- [9] 陈思旭, 杨小唤, 肖林林, 等. 基于 RUSLE 模型的南方丘陵山区土壤侵蚀研究[J]. *资源科学*, 2014, 36(6): 1288-1297.
Chen Sixu, Yang Xiaohuan, Xiao Linlin, et al. Study of soil erosion in the southern hillside area of China based on RUSLE model [J]. *Resources Science*, 2014, 36(6): 1288-1297.
- [10] 郭赓, 丁鸣鸣, 钱洲, 等. 1986—2013 年南京市土地利用变化对土壤侵蚀的影响[J]. *水土保持研究*, 2022, 29(5): 108-116.
Guo Geng, Ding Mingming, Qian Zhou, et al. Effect of land use change on soil erosion in Nanjing from 1986 to 2013 [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2022, 29(5): 108-116.
- [11] 曹巍, 刘璐璐, 吴丹. 三江源区土壤侵蚀变化及驱动因素分析[J]. *草业学报*, 2018, 27(6): 10-22.
Cao Wei, Liu Lulu, Wu Dan. Soil erosion changes and driving factors in the Three-River headwaters region [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2018, 27(6): 10-22.
- [12] 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.
Li Dalong, Yang Jing, Li Weihong, et al. Evaluating the sensitivity of soil erosion in the Yili River valley based on GIS and USLE [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2016, 35(4): 942-951.
- [13] 吴桂平, 曾永年, 冯学智, 等. CLUE-S 模型的改进与土地利用变化动态模拟: 以张家界市永定区为例[J]. *地理研究*, 2010, 29(3): 460-470.
Wu Guiping, Zeng Yongnian, Feng Xuezhi, et al. Dynamic simulation of land use change based on the improved CLUE-S model: A case study of Yongding County, Zhangjiajie [J]. *Geographical Research*, 2010, 29(3): 460-470.
- [14] 杨子生. 云南省金沙江流域土壤流失方程研究[J]. *山地学报*, 2002, 20(增刊 1): 1-9.
Yang Zisheng. Study on soil loss equation in Jinsha River Basin of Yunnan Province [J]. *Journal of Mountain Research*, 2002, 20(Suppl.1): 1-9.
- [15] 江忠善, 郑粉莉. 坡面水蚀预报模型研究[J]. *水土保持学报*, 2004, 18(1): 66-69.
Jiang Zhongshan, Zheng Fenli. Water erosion prediction model at hillslope scale [J]. *Journal of Soil Water Conservation*, 2004, 18(1): 66-69.
- [16] Liu Baoyuan, 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.
- [17] 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 Chongfa, Ding Shuwen, Shi Zhihua, et al. Study of applying USLE and geographical information system IDRISI to predict soil erosion in small watershed [J]. *Journal of Soil Water Conservation*, 2000, 14(2): 19-24.
- [18] Ebrahimzadeh S, Motagh M, Mahboub V, et al. An improved RUSLE/SDR model for the evaluation of soil erosion [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2018, 77(12): 454.
- [19] 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.
Wei Jianmei, Li Changbin, Wu Lei, et al. Study on soil erosion in Northwestern Sichuan and Southern Gansu (NSSG) based on USLE [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2021, 35(2): 31-37.
- [20] 陈红, 江旭聪, 任磊, 等. 基于 RUSLE 模型的淮河流域土壤侵蚀定量评价[J]. *土壤通报*, 2021, 52(1): 165-176.
Chen Hong, Jiang Xucong, Ren Lei, et al. Quantitative evaluation of soil erosion in the Huaihe River basin based on RUSLE model [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2021, 52(1): 165-176.
- [21] 王万忠, 焦菊英. 中国的土壤侵蚀因子定量评价研究[J]. *水土保持通报*, 1996, 16(5): 1-20.
Wang Wanzhong, Jiao Juying. Quantitative evaluation on factors influencing soil erosion in China [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 1996, 16(5): 1-20.
- [22] 陈万旭, 李江风, 曾杰, 等. 中国土地利用变化生态环境效应的空间分异性与形成机理[J]. *地理研究*, 2019, 38(9): 2173-2187.
Chen Wanxu, Li Jiangfeng, Zeng Jie, et al. Spatial heterogeneity and formation mechanism of eco-environmental effect of land use change in China [J]. *Geographical Research*, 2019, 38(9): 2173-2187.
- [23] 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.
Wang Jinfeng, Xu Chengdong. Geodetector: Principle and prospective [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(1): 116-134.

- 动因素探究:以七都镇为例[J].西北林学院学报, 2023,38(2):257-264.
- Ding Jinhua, Wu Xin. Landscape pattern evolution and the driving factors in Southern Jiangsu water network area: A case study of Qidu township [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2023,38(2):257-264.
- [30] 司文涛,张宁慧,叶海鹏,等.基于长时间序列夜间灯光数据的京津冀城市群城市化过程[J].资源科学,2022, 44(10):2114-2124.
- Si Wentao, Zhang Ninghui, Ye Haipeng, et al. Urbanization in the Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration in China based on long-term nighttime light data [J]. Resources Science, 2022,44(10):2114-2124.
- [31] 王一航,吕彩凤,潘鑫豪,等.青藏高原城镇化水平时空动态及影响因素:基于长时间序列夜间灯光数据的分析[J].北京师范大学学报(自然科学版),2023,59(1): 163-174.
- Wang Yihang, Lü Caifeng, Pan Xinhao, et al. Spatial-temporal changes in urbanization level and influencing factors on the Tibetan Plateau: Perspectives from long-term time series nighttime light data [J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2023,59 (1):163-174.
- [32] 李翔,陈振杰,吴洁璇,等.基于夜间灯光数据和空间回归模型的城市常住人口格网化方法研究[J].地球信息科学学报,2017,19(10):1298-1305.
- Li Xiang, Chen Zhenjie, Wu Jiexuan, et al. Gridding methods of city permanent population based on night light data and spatial regression models [J]. Journal of Geo-Information Science, 2017,19(10):1298-1305.
- [33] 李峰,米晓楠,刘军,等.基于 NPP-VIIRS 夜间灯光数据的北京市 GDP 空间化方法[J].国土资源遥感,2016,28 (3):19-24.
- Li Feng, Mi Xiaonan, Liu Jun, et al. Spatialization of GDP in Beijing using NPP-VIIRS data [J]. Remote Sensing for Land & Resources, 2016,28(3):19-24.
- [34] 孙阳,刘新,苏亚聪,等.基于夜间灯光数据估算安徽省县级尺度城镇化水平[J].地球信息科学学报,2020,22 (9):1837-1847.
- Sun Yang, Liu Xin, Su Yacong, et al. County urbanization level estimated from nighttime light data in Anhui Province [J]. Journal of Geo-Information Science, 2020,22(9):1837-1847.
- [35] 赵安周,张向蕊,相恺政,等.基于夜间灯光和统计数据的黄土高原城镇化水平时空格局分析[J].自然资源遥感,2023,35(3):253-263.
- Zhao Anhou, Zhang Xiangrui, Xiang Kaizheng, et al. Quantifying urbanization levels on the Loess Plateau with nighttime light and statistical data [J]. Remote Sensing for Natural Resources, 2023,35(3):253-263.
- ~~~~~
- (上接第 226 页)
- [24] 汪宙峰,樊尚杰,汪裕峻,等.基于地理探测器的四川地区冰川面积变化影响因素探究[J].测绘地理信息, 2023,48(2):97-101.
- Wang Zhoufeng, Fan Shangjie, Wang Yujun, et al. Research on influencing factors of glacier area change in Sichuan based on geographic detectors [J]. Journal of Geomatics, 2023,48(2):97-101.
- [25] 罗文斌,楚雪莲.旅游产业发展与土地利用结构耦合协调演化研究:以国际旅游城市张家界为例[J].陕西师范大学学报(自然科学版),2023,51(2):36-46.
- Luo Wenbin, Chu Xuelian. The coupled and coordinated evolution of tourism industry development and land use structure: Taking the international tourism city of Zhangjiajie as an example [J]. Journal of Shaanxi Normal University (Natural Science Edition), 2023,51 (2):36-46.
- [26] Zhang Jien, Felzer B S, Troy T J. Projected changes of carbon balance in mesic grassland ecosystems in response to warming and elevated CO₂ using CMIP5 GCM results in the Central Great Plains, USA [J]. Ecological Modelling, 2020,434:109247.
- [27] 高艳丽,李红波.汉江流域景观格局变化对土壤侵蚀的影响[J].生态学报,2021,41(6):2248-2260.
- Gao Yanli, Li Hongbo. Influence of landscape pattern change on soil erosion in Han River basin [J]. Acta Ecologica Sinica, 2021,41(6):2248-2260.
- [28] Esmaeili Gholzom H, Ahmadi H, Moieni A, et al. Soil erosion risk assessment in the natural and planted forests using ICONA model and GIS technique [J]. International Journal of Environmental Science and Technology, 2022,19(5):3947-3962.
- [29] 罗辅燕,张泽洪,葛秋玲,等.金沙江流域干旱河谷区坡耕地作物类型对耕作侵蚀的影响[J].水土保持研究, 2023,30(2):22-28.
- Luo Fuyan, Zhang Zehong, Ge Qiuling, et al. Effects of crop types on tillage erosion in the dry valleys of Jinsha River basin [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023,30(2):22-28.