

湘中低山丘陵区土壤侵蚀时空变化及其对环境干扰的响应

周婧, 吴利

(玉溪师范学院 地理与国土工程学院, 云南 玉溪 653100)

摘要:为揭示土壤侵蚀时空变化及其对环境干扰的响应,综合运用 CSLE、熵权 TOPSIS、障碍度模型等分析方法,剖析湘中丘陵区 2000—2015 年土壤侵蚀的时空变化和诊断土壤侵蚀风险的障碍因素并提出针对性建议。结果表明:(1)湘中低山丘陵区土壤侵蚀以微度侵蚀为主,面积占比在 50% 以上;(2)2000—2015 年土壤侵蚀流失量呈减小趋势,约下降了 49.75%;(3)土壤侵蚀强度和风险在空间上有显著差异,高值区主要集中在湘中丘陵区西部和南部;(4)湘中低山丘陵区土壤侵蚀主要是由人为干扰引起的,其贡献率达 73.76%,是自然干扰的 3.62 倍,未来应坚持自然恢复为主,避免过度人工干扰。综上,湘中低山丘陵区土壤侵蚀以微度侵蚀为主,存在显著的时空变化特征,人为干扰是其变化的关键驱动力。

关键词:土壤侵蚀;环境干扰;熵权 TOPSIS;障碍度模型;自然恢复

中图分类号:S157.1

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2022)05-0040-08

Temporal and Spatial Variation of Soil Erosion and Its Response to Environmental Disturbances in the Hilly Region of Central Hunan

ZHOU Jing, WU Li

(College of geography and land engineering, Yuxi Normal University, Yuxi, Yunnan 653100, China)

Abstract: In order to reveal the soil erosion spatiotemporal changes and its response to environmental interference, we used CSLE, entropy weight TOPSIS, obstacle degree model and other analysis methods to quantify soil erosion and identify its influencing factors in central Hunan Province from 2000 to 2015, which is mainly covered by low mountains and hills. The results show that: (1) more than 50% of the region was eroded in minor degrees; (2) the soil erosion volumes decreased by 49.75% from 2000 to 2015; (3) the soil erosion intensity and risk varied differently in space, with high values in the west and south of this region; (4) soil erosion in the study area was mainly caused by human disturbance, which was 3.62 times greater contribution (73.76%) than that of natural disturbance. In the future, it is necessary to focus on natural recovery and avoid excessive artificial interference. In general, soil erosion in the middle and low mountain and hilly areas of Hunan Province is mainly slight erosion, there are significant temporal and spatial variation characteristics, and human disturbance is the key driving force of soil erosion change.

Keywords: soil erosion; environmental disturbance; entropy weight TOPSIS; obstacle degree model; natural recovery

土壤侵蚀是世界上主要的环境问题之一,会导致土壤肥力下降、土地退化、生物多样性降低等一系列问题^[1-4]。中国是世界上土壤侵蚀程度最严重的国家

之一^[5],遭受土壤侵蚀的面积约 360 万 km²,占国土面积的 37%^[6],这已严重威胁到区域生态环境和社会经济的可持续发展。因此,掌握土壤侵蚀量时空动

收稿日期:2021-07-04

修回日期:2021-08-02

资助项目:国家自然科学基金地区科学资助项目“乡镇尺度上滇中地区山—坝系统人地耦合演化机理研究”(42161041);云南省教育厅科学研究资助项目“基于人类活动强度的抚仙湖流域景观格局脆弱性分析”(2021J0676)

第一作者:周婧(1988—),女,云南玉溪人,助教,硕士,主要从事景观格局优化研究。E-mail:echo@yxnu.edu.cn

通信作者:吴利(1980—),女,云南玉溪人,副教授,硕士,主要从事土地利用与生态系统服务研究。E-mail:wuli2009@yxnu.edu.cn

态变化规律和成因,对优化国土空间开发格局和推进生态修复具有重要意义。

目前,土壤侵蚀问题在诸多学者的关注下,已经取得了很多成果,主要集中在土壤侵蚀量的估算和影响因素 2 方面。从估算方法来看,通用土壤流失方程(USLE)和修正通用土壤流失方程(RUSLE)得到了广泛的应用,已在我国黄土高原、南方红壤低山丘陵区、广东省、江西省等地被用来计算土壤侵蚀量^[7-10]。但该模型的运用并不完全符合我国陡坡土壤侵蚀的特点,也忽略了水土保持措施的效益。基于此,刘宝元在改进 USLE 和 RUSLE 模型的基础上,提出了适用于中国坡面侵蚀的较为成熟的、结构简单、参数易于获取的 CSLE 模型^[11]。在影响因素上,土壤侵蚀受自然因素和社会因素的共同影响^[12-13]。现有研究侧重于探究降雨、坡度等自然因素^[14-16]和土地利用方式等^[17-18]人类活动对土壤侵蚀的影响。如自然因素上,现有研究主要在探讨降雨强度、植被覆盖度、地形等因素对土壤侵蚀的影响^[19-21]。人类活动上,蔡卓杰等选取 7 个人类干扰指标探究了广西人类活动对土壤侵蚀的影响^[22],魏艳红等探讨了不同土地利用方式对土壤侵蚀的影响^[23]。由此可知,虽然现有研究在涉猎自然或人为因素对土壤侵蚀的影响,但自然环境和人类活动的共同作用会怎样影响土壤侵蚀?在多大程度上影响土壤侵蚀?这都是亟需回答的问题。因此,开展环境干扰对土壤侵蚀的影响研究,对于从决策层面上减小土壤侵蚀,保护生态环境具有重要作用。

山地丘陵区受地形起伏、地质构造、工程建设及城镇化建设等因素的影响,发生的土壤侵蚀尤为严重^[24]。湘中低山丘陵区作为中国水土保持区划中的三级区,2015 年该区域水土流失面积约占区域总面积 17.6%。基于此,本文以湘中低山丘陵区为研究对象,综合运用 CSLE、熵权 TOPSIS、障碍度模型等分析方法,剖析湘中丘陵区 2000—2015 年土壤侵蚀的时空变化和诊断土壤侵蚀风险的障碍因素并提出针对性建议,旨在为促进生态经济高质量发展提供决策依据。

1 研究区概况

湘中低山丘陵区地处湖南省中部和东部,根据湖南省水土保持规划(2016—2030 年)的划分,该区域共包括 58 个县级行政区,土地总面积共 8.64 万 km²。研究区为亚热带湿润季风气候区,降水多在 1 200 mm 以上,若发生持续性暴雨,广泛分布的花岗岩则易崩解、悬移,从而形成严重的地质灾害;境内地形以低缓的丘陵山地为主,土壤以红壤为主,土层深厚,黏性大,渗透性差,通气性不好,红壤抗蚀性弱;境内植被类型以亚热带常绿、落

叶阔叶混交林为主,人工林林种单一,在衡阳盆地、娄邵丘陵区的分布则十分稀少;此外,该区域多处长株潭城市群及周边地区,人口稠密,农业生产活动密集、矿产资源开发、交通建设等导致人为水土流失严重。可见,该区域的水土流失受自然和人为双重因素的影响。在二者的共同作用下,2015 年该区域轻度和中度水土流失面积分别占水土流失总面积的 72.54%和 19.88%,其中崩岗和沟蚀严重的地区年平均土壤侵蚀模数可高达 10 000 t/km²,这不仅影响了地表生产力,还恶化了生态环境,更严重制约着该区域经济社会的可持续发展。因此,解析湘中丘陵区土壤侵蚀的影响因素和剖析其影响程度十分必要,这可为推进生态文明建设提供依据。

2 研究方法

2.1 数据来源及处理

地表起伏度、沟壑密度、>15°坡度面积比等地形地貌数据主要是基于 GIS 中的地形分析工具提取 DEM 数据(分辨率为 30 m)得到^[25];多年平均降雨量、耕地有效灌溉面积、人口密度、人均 GDP、土地垦殖率等数据来源于湖南省统计年鉴(2006—2016 年)及各县的政府网站;水土协调度和食物生产价值主要是基于耕地面积数据计算得出;土地利用类型数据主要依托地理国情监测云平台(<http://www.dsac.cn/>),以 5 月下旬至 6 月中旬的 Landsat TM/ETM 遥感影像(分辨率为 30 m)为数据源,采用人机交互目视判读^[26],并结合中国科学院土地资源分类系统,将土地利用类型划分为耕地、建设用地、林地、草地、水体和未利用地 6 类^[27]。

2.2 土壤侵蚀量估算

本研究运用刘宝元^[11]教授提出的 CSLE 模型估算研究区的土壤侵蚀量。计算公式如下:

$$M=R \times K \times LS \times B \times E \times T \quad (1)$$

式中: M 为年均土壤侵蚀模数[t/(km²·a)]; R 为降雨侵蚀力[MJ·mm/(t/(km²·a))]; K 为土壤可蚀性因子[t/(km²·a·hm²·MJ·mm)]; LS 为坡度坡长因子; B 为生物措施因子; E 为工程措施因子; T 为耕作措施因子。

降雨侵蚀力(R)是指降雨对土壤侵蚀的作用能力,与降雨总量、降雨历时、强度、终速、降雨粒径等有关^[28]。由于降雨侵蚀力难以直接测定,本文基于对各种算法的比较及数据获取情况,采用周伏建等^[29]在我国南方地区提出的降雨侵蚀力估算简易方程:

$$R = \sum_{i=1}^{12} (-1.5527 + 0.1792 P_i) \quad (2)$$

式中： P_i 为月降雨量(mm)。

土壤可蚀性(K)的测定使用较为普遍的模拟方法是 Williams 等^[30]建立的侵蚀/生产力影响模型(EPIC),具体算法如下:

$$K=0.1317\left\{0.2+0.3\exp\left[-0.0256\text{SAN}\left(1-\frac{\text{SIL}}{100}\right)\right]\right\}\times$$
$$\left(\frac{\text{SIL}}{\text{CLA}-\text{SIL}}\right)^{0.3}\times\left(1-\frac{0.25C}{C+\exp(3.72\sim0.95C)}\right)\times$$
$$\left(1\times\frac{0.7\text{SNI}}{\text{SNI}+\exp(-5.51+22.9\text{SNI})}\right) \tag{3}$$

式中:CLA,SIL,SAN 和 C 分别为黏粒、粉粒、砂粒和有机质含量(%); $\text{SNI}=1-\text{SN}/100$ 。

坡度坡长因子(LS)的计算公式如下:

$$LS=(L/72.6)^m\times(65.41\sin\theta+4.56\sin\theta+0.065) \tag{4}$$

式中: LS 是坡度坡长因子; L 是坡长(m); θ 是坡度($^{\circ}$); m 是坡长指数,随坡度而变。

$$m=\begin{cases} 0.2 & \theta<0.57^{\circ} \\ 0.3 & 0.57^{\circ}\leq\theta<1.72^{\circ} \\ 0.4 & 1.72^{\circ}\leq\theta<2.86^{\circ} \\ 0.5 & 2.86^{\circ}\leq\theta \end{cases} \tag{5}$$

生物措施因子(B)^[31]主要是将土地利用类型数据与植被盖度数据相结合,将对应的土地利用栅格结合《第一次水利普查成果丛书》进行赋值计算,见表 1。

表 1 生物措施因子 B 取值

土地利用 类型	植被 覆盖度/%	B 值	土地利用 类型	植被 覆盖度/%	B 值
林地	0~20	0.100	草地	0~20	0.450
	20~40	0.080		20~40	0.240
	40~60	0.060		40~60	0.150
	60~80	0.020		60~80	0.090
	80~100	0.004		80~100	0.043
水域	—	0.000	平地	—	0.230
建设用地	—	0.353	坡耕地	—	0.470

植被覆盖度(FVC)是由归一化植被指数(NDVI)计算得到:

$$\text{FVC}=\frac{\text{NDVI}-\text{NDVI}_{\min}}{\text{NDVI}_{\max}-\text{NDVI}_{\min}} \tag{6}$$

式中:FVC 代表植被覆盖度(%);NDVI 为归一化植被指数; NDVI_{\max} 和 NDVI_{\min} 为最大和最小的 NDVI 值。

工程措施因子(E)是指通过修建梯田、拦河坝等工程来改变地形,从而减少径流和土壤流失^[31]。公式如下:

$$E=\left[\frac{(S_{t1}\times E_{t1})+(S_{t2}-E_{t1})}{S_{t2}}\right] \tag{7}$$

式中: E 为梯田因子在耕地中的平均值; S_{t1} 为梯田面积; E_{t1} 为梯田的因子值; S_{t2} 为耕地面积。

耕作措施因子(T)主要是通过农业耕作行为的改变,从而减少或防治土壤侵蚀。通常采用中国农业区划图和水土保持工程措施因子中的数据对耕作措施因子进行赋值得到^[32]。

2.3 CSLE 模型估算可行性验证

由于缺乏实测数据,本研究将湖南省水土保持规划(2016—2030 年)中 2015 年平均土壤侵蚀模数的统计数据和 CSLE 模型的模拟得到的湘中红壤丘陵区平均土壤侵蚀模数进行比较,得到模拟结果和统计值间的相对误差为 6.89%,反映出了 CSLE 模型模拟精度高达 93%,说明 CSLE 模型在湘中红壤区模拟土壤侵蚀量的可行性,这也进一步说明了本研究可利用 CSLE 模型模拟的结果进行分析。

2.4 土壤侵蚀综合指数

土壤侵蚀程度反映区域水土流失现状,基于土壤侵蚀量的估算和 SL190-2007 中土壤侵蚀的分级标准^[33],以土壤侵蚀综合指数(INDEX)作为因变量,从而反映土壤受侵蚀的强烈程度,其计算公式如下:

$$\text{INDEX}=\sum_{i=1}^n\sum_{j=1}^mW_{ij}A_{ij} \tag{8}$$

式中: A_{ij} 为第 i 类第 j 级土壤侵蚀强度面积比例; W_{ij} 为第 i 类第 j 级土壤侵蚀强度的分级。

2.5 指标选取及依据

为探究自然和人为变量对土壤侵蚀的影响,基于前人已有的研究基础,结合研究区的实际,本研究共选取了 10 个环境干扰指标。其中,自然环境干扰包括地表起伏度 X_1 ,沟壑密度 X_2 ,多年平均降雨量 X_3 ,林草覆盖率 X_4 , $>15^{\circ}$ 坡度面积比 X_5 共 5 个指标,人为环境干扰包括人口密度 X_6 ,水土协调度 X_7 ,人均 GDP X_8 ,食物生产价值 X_9 ,土地垦殖率 X_{10} 共 5 个指标。

其中,选择地表起伏度 X_1 是由于研究区相对高差达 1 964 m,地势起伏大,容易发生水土流失;沟壑密度 X_2 可衡量地表破碎度,对水土流失监测及规划具有重要意义^[34];降雨 X_3 是水土流失的重要诱发因子^[35],而植被覆盖 X_4 可以缓冲降雨对地表的冲刷力,增强地表物质的稳定性;坡度 X_5 主要从径流侵蚀、土壤入渗^[36]的土壤抗蚀性等方面影响土壤侵蚀过程。社会经济条件对水土流失的作用具有双向性,本研究基于前言已有的研究基础,通过人口密度、人均 GDP 因子反映区域经济和城镇化发展水平的差异;此外,研究区为中国重要的农产品主产区,农业生产活动对土壤侵蚀有一定影响。因此,本研究选取水土协调度 X_7 (耕地有效灌溉面积占耕地面积)、食物

生产价值 X_9 , 土地垦殖率 X_{10} 这 3 个指标用于反映农业生产活动对土壤侵蚀的影响^[36]。

2.6 熵权 TOPSIS

熵权 TOPSIS 法是一种基于多属性问题的统计方法。首先利用熵权法确定各指标权重, 再根据逼近理想值的思想, 比较各指标与正、负理想解的接近程度进行方案的优劣排序, 从而更为客观地反映评价对象的水平^[37]。

设共有 m 个评价对象, 每个评价对象有 n 个评价指标。设 $X = (x_{ij})_{m \times n}$ 为由各区域各指标组成的矩阵, 其中 x_{ij} 表示第 i ($i = 1, 2, \dots, m$) 个区域的第 j ($j = 1, 2, \dots, n$) 个指标值^[38]。记 x_j 为矩阵 X 的第 j 列。熵权 TOPSIS 的具体分析步骤如下:

(1) 数据规范化。数据规范化处理有利于消除各指标量纲差异对计算结果准确性的影响, 计算如下:

$$\text{对于越大越优型指标: } y_{ij} = \frac{x_{ij} - \min x_j}{(\max x_j - \min x_j)} \quad (9)$$

$$\text{对于越小越优型指标: } y_{ij} = \frac{\max x_j - x_{ij}}{(\max x_j - \min x_j)} \quad (10)$$

式中: y_{ij} 为指标标准化后的值; $\max x_j$ 、 $\min x_j$ 分别为同指标下所有样本的最大值和最小值。

(2) 计算评价指标的熵权。信息熵被定义为 $E(y_j) = -\sum_{i=1}^m y_{ij} \ln y_{ij}$ 。信息熵 $E(y_j)$ 的大小受评价指标变异程度的影响。当变异程度越大时, 信息熵 $E(y_j)$ 就越小, 评价指标提供的信息量就越大, 指标权重也就越大。计算过程如下:

$$\text{计算输出熵: } E_j = E(y_j) / \ln m \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (11)$$

$$\text{计算指标的差异度: } d_j = 1 - E_j \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (12)$$

$$\text{求解熵权: } W_j = \frac{d_j}{\sum_{i=1}^n d_i} \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (13)$$

式中: W_i 为指标权重; E_j 为信息熵; d_j 为指标特征比重; E 为常数, $E = \frac{1}{\ln m}$; m 为指标个数; j 为年份数。

(3) 构造加权规范化矩阵 V 。基于(2)中构造的熵权, 对(1)规范化后的数据进行加权, 构造如下加权规范化矩阵:

$$V = (V_{ij})_{m \times n} = \begin{bmatrix} w_1 y_{11} & w_2 y_{12} & \cdots & w_n y_{1n} \\ w_1 y_{21} & w_2 y_{22} & \cdots & w_n y_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ w_1 y_{m1} & w_2 y_{m2} & \cdots & w_n y_{mn} \end{bmatrix} \quad (14)$$

式中: V 为评价矩阵; w_{mn} 表示第 i 个指标第 j 年的原数值; y_{mn} 表示第 m 个指标第 n 年的权重。

(4) 确定正/负理想解。正/负理想解是理想的最佳/最劣方案, 基于第(3)步, 正理想解 V^+ 和负理想解 V^- 被定义如下:

$$V^+ = (v_j^+)_{j \in J} = \{(\max v_{ij} | j \in J) \quad i = 1, 2, \dots, m\} \quad (15)$$

$$V^- = (v_j^-)_{j \in J} = \{(\min v_{ij} | j \in J) \quad i = 1, 2, \dots, m\} \quad (16)$$

式中: V^+ 表示正理想解; V^- 表示负理想解; $\max v_{ij}$ 表示不同指标的最优解; $\min v_{ij}$ 表示不同指标的最差解。 $j \in J$ 表示第 j 年的指标规范后的数据值集合 J 。

(5) 计算正/负理想解的距离。基于第(3)步和第(4)步, 计算评价对象与正/负理想解的距离 d_i^+ , d_i^- :

$$\begin{cases} d_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^+)^2} \\ d_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^-)^2} \end{cases} \quad (17)$$

式中: $i = 1, 2, \dots, m$ 。

(6) 计算相对贴近度 C_i

相对贴近度 C_i 的大小可以反映评价对象当前状态与其最优状态的贴近程度。计算如下:

$$C_i = \frac{d_i^-}{d_i^+ + d_i^-} \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (18)$$

式中: d_i^+ 为正理想解; d_i^- 为负理想解之间的距离; C_i 为相对贴近度(正负理想解之间的距离), $C \in [0 \sim 1]$, C 越大表明评价对象的当前状态越优, C 越小, 土壤侵蚀风险越高, 当 C 为 1 时, 土壤侵蚀风险为 0。

2.7 障碍因素诊断模型

土壤侵蚀风险评价的目的在于知现状谋未来。为此, 本研究建立土壤侵蚀风险障碍因素诊断模型^[39], 诊断土壤侵蚀风险障碍因子, 并提出相应的改进策略。

$$N_i = \frac{S_i \times M_i}{\sum_{i=1}^{16} S_i \times M_i} \quad (19)$$

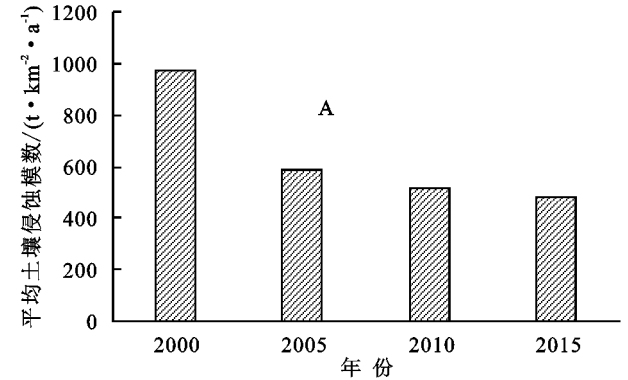
式中: N_i 为指标障碍度; M_i 为指标贡献度, 值为熵权法修正后指标层第 i 项指标综合权重; S_i 为指标偏离度; X_i 为第 i 项指标归一化值, $S_i = 1 - X_i$ 。 N_i 数值越大, 说明该项指标对降低土壤侵蚀的阻碍作用越大。

3 结果与分析

3.1 土壤侵蚀时间变化特征

基于 CSLE 模型计算得到湘中红壤区 2000—2015 年土壤侵蚀模数。2000—2015 年湘中红壤区土壤侵蚀量显著减小(图 1), 平均侵蚀模数从 2000 年的 968.98 t/(km² · a) 下降到 2015 年的 482.09 t/(km² · a), 约下

降了 49.75%。从不同侵蚀强度等级来看,2000—2015 年湘中红壤区土壤侵蚀主要以微度和轻度侵蚀为主。其中,微度侵蚀面积占总侵蚀面积的比重呈上升趋势,2015 年和 2000 年相比,侵蚀面积占比约增长了 27.50%;而轻度侵蚀、中度侵蚀、强烈侵蚀、极强烈侵蚀、剧烈侵蚀的面积占比呈现不同程度的下降



趋势,轻度侵蚀面积占比减少最大,减少率为 22.70%。这与 2000 年以来退耕还林工程实施中更加注意植被保护和恢复,以及水土保持资金投入的增加有关^[8,40],因为现有研究表明“退耕还林”政策的实施能有效降低极端降雨对土壤的侵蚀,能够提升研究区的水土保持效益^[40-41]。

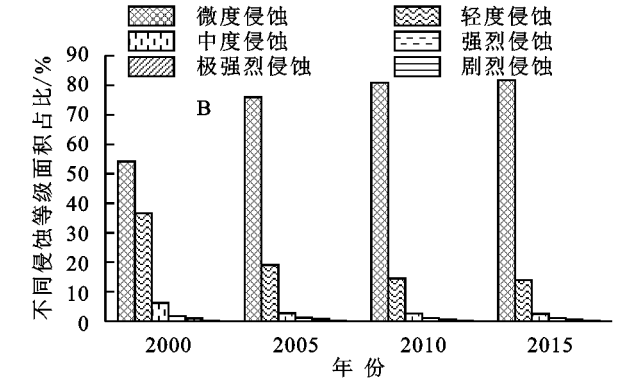


图 1 2000—2015 年土壤侵蚀时间变化

3.2 土壤侵蚀空间变化特征

根据 2000—2015 年湘中丘陵区不同侵蚀强度等级的空间分布图(图 2),可以看出 15 a 来土壤侵蚀强度在空间分布上有显著差异,高值区主要集中在湘中丘陵区的西南部,主要是由于该区域位于湖南省的罗霄山脉地段和雪峰山脉地段,地形以山地为主,海拔多在 1 000 m 以上,且暴雨强度大,多年平均降水量在 1 350 mm 左右,易引发崩岗,造成较高的土壤侵蚀危险性。同时,罗霄山脉地段矿产资源丰富,是湖南省重点开发区,城镇化率高,人口密集,且 78.27%的区域人口密度高于平均值,70%以上的区域植被覆盖率低于平均值,高强度的人为活动和较低的植被覆盖率加剧水土

流失。而 2000—2015 年,土壤侵蚀在空间上均以微度侵蚀(占土壤侵蚀总面积的 54%以上)为主,主要分布在湘中红壤丘陵区的西部,2015 年,2000 年相比,微度侵蚀的空间分布面积约增加 50.77%,轻度、中度、强烈、极强烈侵蚀的空间分布面积约减少了 162.57%,145.24%,57.82%,54.99%,54.97%,这离不开水土流失治理措施的采取和落实。从 58 个县(市、区)的土壤侵蚀模数看,2000—2015 年,有 18~20 个县(市、区)的平均土壤侵蚀模数高于平均值,最高的是涟源市(娄底)和新宁县(邵阳),最低的是祁阳县(永州),这主要是由于娄邵丘陵区植被十分稀少,加上人为的陡坡垦殖,导致土壤遇水极易发生崩塌和沟蚀。

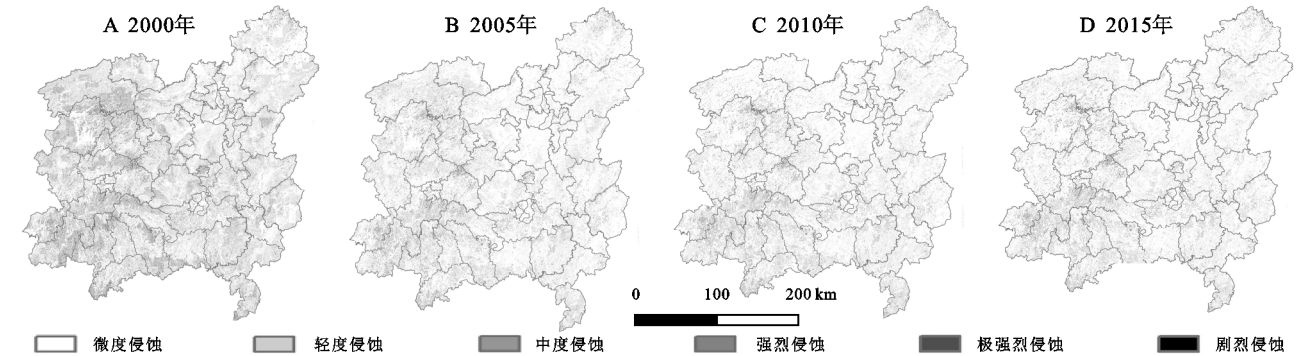


图 2 2000—2015 年湘中丘陵区不同侵蚀强度分布

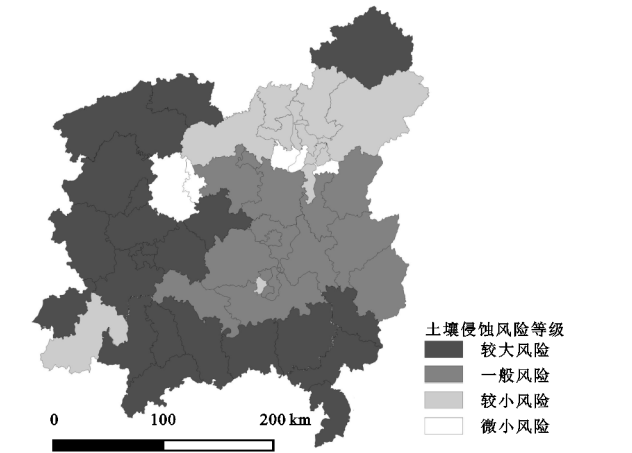
3.3 环境干扰对土壤侵蚀的影响

在选取的 10 个环境变量中,信息熵值均在 0.85 以上,说明自然和人为干扰系统的无序度较高(表 2)。在人为干扰维度中,发现 2000—2015 年对湘中红壤区土壤侵蚀影响最大的是人口密度 X_6 (0.296 7)、食物生产价值 X_9 (0.176 9)和人均 GDP X_8 (0.154 3),在自然干扰维度中, $>15^\circ$ 坡度面积比 X_5 (0.115 2)和地表起伏度 X_1

(0.090 9)对土壤侵蚀的影响最大,这与蔡卓杰等人在探究广西人类活动对土壤侵蚀的影响中得到的结论类似^[22]。这主要是由于人是社会经济活动的主体,随着城镇化的不断扩张,人口增长、人口密度增大,人类对自然环境和资源的干扰增强,因此人口密度对湘中丘陵区土壤侵蚀影响是最大的。但总体来讲,农村人口在总人口中仍然占有相当大的比重,为获取生产生活资

料和提高食物生产价值,即使在丘陵地形较为限制的条件下,仍然会在 $>15^{\circ}$ 坡耕地上进行农业生产活动,这样会进一步增加人为活动对土地的扰动,影响土壤侵蚀。这与黄栋等人在江西省社会经济因素对区域土壤侵蚀的影响中得到的结论相似^[13]。

根据风险等级划分标准,将土壤侵蚀风险相对贴近度划分为 4 级(图 3),分别为较大风险区、一般风险区、较小风险区和微小风险区。其中,较大风险区和一般风险区共包括 39 个县(市、区),主要分布在湘中红壤丘陵区的中部偏南地区,约占总县(市、区)数量的 67.25%,主要分布在湘中红壤丘陵区的东部,这是人为和自然因素交互作用导致。一方面,该区域暴雨强度大,容易引发崩岗和土壤流失;另一方面,该区域农业活动密集,农业生态系统服务价值低^[26],这使得坡耕地、经济林下水土流失严重^[42]。因此,该区域应大力推广水土保持型经济农业的发展,在保证居民收益的同时促进生态防护,改进农业技术,完善农业开发的



3.4 土壤侵蚀风险障碍度诊断

依据障碍诊断模型,对 2000—2015 年土壤侵蚀风险准则层障碍度进行排序(表 3),发现人为因素 $>$ 自然因素。自然和人为障碍度均值分别为 21.64%和 78.36%,人为障碍度对土壤侵蚀的影响是自然障碍度的 3.62 倍。从指标层来看,障碍度排名位于前 6 位的指标由高到低依次排序为 $X_6, X_8, X_9, X_5, X_7, X_1$,即将人口密度、人均 GDP、食物生产价值、 $>15^{\circ}$

配套基础设施,实施农业精细化管理,优化生态环境,如通过施用有机肥等土壤改良剂提高土壤肥力,修复土壤^[43-44],降低水土流失易发性,提高生态系统稳定性,实现经济发展与环境保护的双赢目标。

表 2 环境干扰系统各指标的权重

因素	指标	信息熵值 e	信息效用值 d	权重系数 $w/\%$
自然干扰	地表起伏度 X_1	0.95	0.05	9.09
	沟壑密度 X_2	0.99	0.01	1.50
	多年平均降雨量 X_3	0.99	0.00	0.16
	林草覆盖率 X_4	0.98	0.02	3.97
	$>15^{\circ}$ 坡度面积比 X_5	0.94	0.06	11.52
人为干扰	人口密度 X_6	0.85	0.15	29.67
	水土协调度 X_7	0.96	0.04	7.81
	人均 GDP X_8	0.92	0.08	15.43
	食物生产价值 X_9	0.91	0.09	17.69
	土地垦殖率 X_{10}	0.98	0.02	3.16

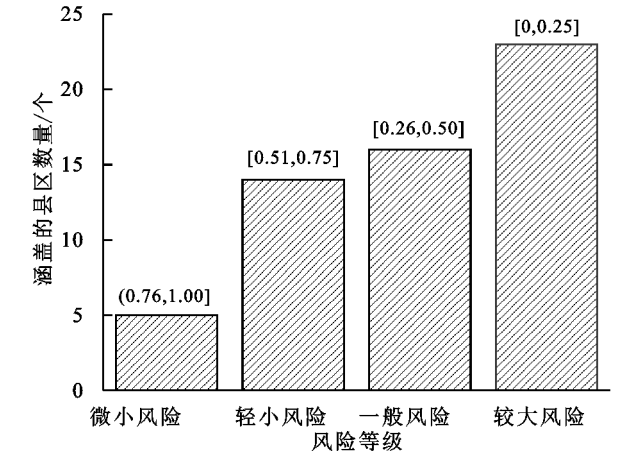


图 3 土壤侵蚀风险等级区间划分

坡度面积比、水土协调度、地表起伏度其作为本研究土壤侵蚀风险的主要障碍因子。全球范围的研究表明,土地利用/覆盖变化引起的土壤退化,导致全球土壤侵蚀面积增加了大约 60%^[45-46],并且人类活动对土壤侵蚀的影响往往会高于气象因素^[47-48],而该结论仍然适用于湘中红壤低山丘陵区,即人口密度、人均 GDP、食物生产价值等人类活动因子对土壤侵蚀的障碍是要高于 $>15^{\circ}$ 坡度面积比等自然因子的。

表 3 湘中红壤丘陵区土壤侵蚀风险障碍度及排序

准则层	自然环境干扰					人为环境干扰				
指标层	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9	X_{10}
障碍度/ $\%$	3.73	0.70	0.07	1.67	6.37	21.13	4.85	9.41	8.45	1.61
平均值	0.06	0.01	0.00	0.03	0.11	0.36	0.08	0.16	0.15	0.03

从 58 个县(市、区)的障碍度来看(图 4), X_1 — X_{10} 的指标障碍度中,有 44.83%~74.14%的县(市、区)低于平均值。 X_5 和 X_8 的障碍度最高区域分别是

株洲市的芦淞区和邵阳市的北塔区,障碍度分别为 0.09%和 0.23%,而 $X_1, X_2, X_3, X_4, X_6, X_7, X_9$ 和 X_{10} 的障碍度最高区域是衡阳市的南岳区、衡南县和

石鼓区,障碍度介于 $0.00\% \sim 0.56\%$,这主要是由于该区域主要位于湘江流域中游地段,耕地面积约占总面积的 40.8% ,农业生产活动密集,农业人口占比大,土地垦殖率和食物生产价值较高。同时,该区域地处衡邵阳丘陵盆地,受山脉的阻挡,是典型的少雨区,在

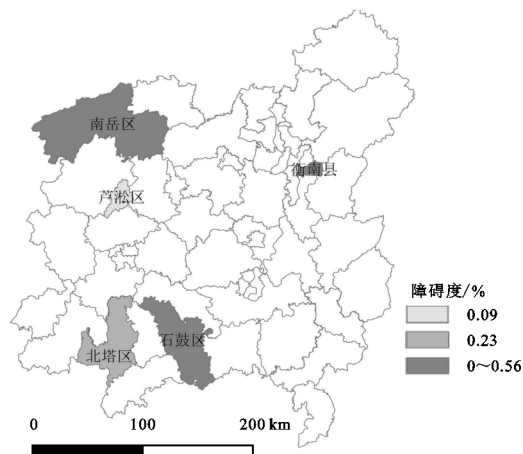
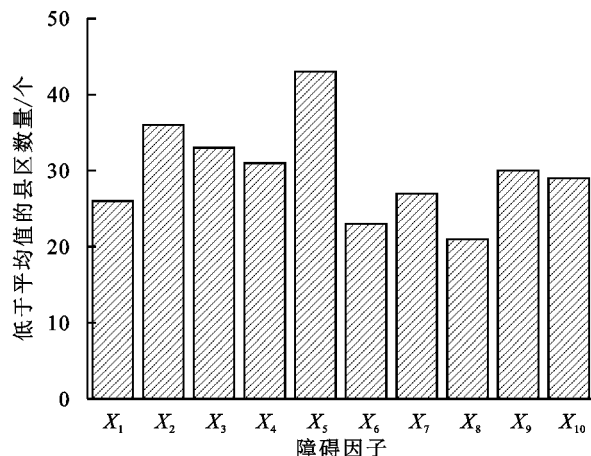


图 4 指标障碍度最高区域空间分布和低于平均值的县区数量

发展经济和保护生态的权衡过程中,更多注重进行城镇开发、矿产资源开发、交通建设等人类活动发展经济,较少对裸地等土地利用类型采取植树种草和矿山修复等生态保护活动,导致林草覆盖率较低^[8],生态环境逐步恶化,这些均构成了土壤侵蚀的主要障碍。



4 结论

2000—2015 年湘中低山丘陵区土壤侵蚀以微度侵蚀为主,面积占比在 50% 以上;土壤侵蚀流失量呈减小趋势,约下降了 49.75% ;土壤侵蚀强度和风险在空间上有显著差异,高值区主要集中在湘中丘陵区西部和南部;土壤侵蚀主要是由人为干扰引起的,其贡献率为 73.76% ,是自然干扰障碍的 3.62 倍。未来应遵循自然地理格局,坚持自然恢复为主,避免过度人为干扰,依土壤侵蚀程度分区采取科学的水土保持措施。研究成果可为国土空间生态修复和水土保持规划提供借鉴。

参考文献:

[1] 朱军,李益敏,蒋德明.基于 GIS 和 RUSLE 的高山峡谷区土壤侵蚀研究:以云南省泸水县为例[J].水土保持通报,2016,36(3):277-283.

[2] Hata K, Osawa T, Hiradate S, et al. Soil erosion alters soil chemical properties and limits grassland plant establishment on an oceanic island even after goat eradication [J]. Restoration Ecology, 2019,27(2):333-342.

[3] 钟莉娜,王军,赵文武.多流域降雨和土地利用格局对土壤侵蚀影响的比较分析:以陕北黄土丘陵沟壑区为例[J].地理学报,2017,72(3):432-443.

[4] Li H, Cruse R M, Liu X, et al. Effects of topography and land use change on gully development in typical mollisol region of Northeast China [J]. Chinese Geographical Science, 2016,26(6):779-788.

[5] 张养安,张鑫,江仕嵘.基于 GIS 与 RS 的杨陵区土壤侵蚀时

空变异性研究[J].水土保持学报,2018,32(6):130-133.

[6] 刘盼,任春颖,王岩松,等.基于 RUSLE 模型的梅河口市土壤侵蚀动态分析[J].水土保持通报,2019,39(1):172-179.

[7] 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.

[8] 胡晓倩,李忠武,陈佳,等.南方红壤丘陵区退耕还林还草工程土壤保持效应评估[J].水土保持学报,2020,34(6):95-100.

[9] Gao F, Wang Y, Yang J. Assessing soil erosion using USLE model and MODIS data in the Guangdong, China [C] // Iop Conference Series: Earth and Environmental Science. Iop Publishing, 2017,74(1):012007.

[10] 刘桂成,李相玺,万小星,等.江西省 2018 年度省级重点监测区水土流失动态监测中存在的问题与建议[J].中国水土保持,2019(12):29-32.

[11] 刘宝元,张科利,焦菊英.土壤可蚀性及其在侵蚀预报中的应用[J].自然资源学报,1999,14(4):345-350.

[12] 王红兵,许炯心,颜明.影响土壤侵蚀的社会经济因素研究进展[J].地理科学进展,2011,30(3):268-274.

[13] 黄栋,杨小唤,蔡红艳.江西省社会经济因素对区域土壤侵蚀的影响[J].水土保持通报,2020,40(3):110-117.

[14] 甘艺贤,戴全厚,伏文兵,等.基于模拟降雨试验的喀斯特坡耕地土壤侵蚀特征[J].应用生态学报,2016,27(9):2754-2760.

[15] Shi Z H, Fang N F, Wu F Z, et al. Soil erosion processes and sediment sorting associated with transport mechanisms on steep slopes [J]. Journal of Hydrology, 2012,454:123-130.

[16] 黄凯,刘瑞禄,覃莉,等.不同降雨条件下坡长对喀斯特

- 坡面土壤侵蚀的影响[J].应用生态学报,2021,32(1): 271-280.
- [17] 王永平,周子柯,滕昊蔚,等.滇南小流域3种土地利用方式下土壤侵蚀及养分流失特征[J].水土保持研究,2021,28(1):11-18.
- [18] 魏艳红,焦菊英.黄土丘陵沟壑区不同土地利用方式下小流域侵蚀产沙特征[J].水土保持学报,2021,35(3): 96-103.
- [19] Asadi H, Ghadiri H, Rose C W, et al. Interrill soil erosion processes and their interaction on low slopes[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2010, 32(5): 711-724.
- [20] 朱方方,程金花,王书韬,等.湖北低山丘陵区侵蚀泥沙颗粒特征及其与地形因子的关系[J].水土保持学报,2021,35(4):27-33.
- [21] 常梦迪,王新军,李娜,等.基于CSLE模型的天山北坡中段山区水力侵蚀时空变化特征及影响因素研究[J].干旱区研究,2021,38(4):939-949.
- [22] 蔡卓杰,卢远,谢坤坚.广西人类活动对土壤侵蚀的影响[J].中国水土保持,2017(2):51-53.
- [23] 魏艳红,焦菊英.黄土丘陵沟壑区不同土地利用方式下小流域侵蚀产沙特征[J].水土保持学报,2021,35(3): 96-103.
- [24] Alewell C, Paul S, Lischheid G, et al. Co-regulation of redox processes in freshwater wetlands as a function of organic matter availability[J]. *Science of the Total Environment*, 2008, 404(2/3):335-342.
- [25] 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.
- [26] 邓楚雄,朱大美,李忠武,等.湘中丘陵区农业生态系统服务价值与城镇化水平弹性关系研究[J].中国生态农业学报,2021,29(8):1453-1466.
- [27] Liu J, Liu M, Tian H, et al. Spatial and temporal patterns of China's cropland during 1990—2000: An analysis based on Landsat TM data[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2005, 98(4):442-456.
- [28] Blanco H, Lal R. Principles of soil conservation and management[M]. New York:Springer,2008.
- [29] 周伏建,黄炎和.福建省降雨侵蚀力指标R值[J].水土保持学报,1995,9(1):13-18.
- [30] William J R, Arnold J G. A system of erosion/sediment yield models[J].*Soil Technology*, 1997, 11(1):43-55.
- [31] Baoyuan L, Keli Z, Yun X. An empirical soil loss equation [C]//Proc.12 th Isco Conf, 2002,2:21-25.
- [32] 郭乾坤,刘宝元,朱少波,等.中国主要水土保持耕作措施因子[J].中国水土保持,2013(10):22-26.
- [33] 中华人民共和国水利部.土壤侵蚀分类及分级标准: SL190-2007[S].北京:中国水利水电出版社,2008:1-20.
- [34] 黄福卫.水土保持区划及功能定位研究[D].贵州:贵州师范大学,2016.
- [35] 尹忠东,周心澄,朱金兆.影响水土流失的主要因素研究概述[J].世界林业研究,2003,16(3):32-36.
- [36] 李毅,邵明安.间歇降雨和多场次降雨条件下黄土坡面土壤水分入渗特性[J].应用生态学报,2008,19(7): 1511-1516.
- [37] Liu Z, Jiang Z, Xu C, et al. Assessment of provincial waterlogging risk based on entropy weight TOPSIS-PCA method[J]. *Natural Hazards*, 2021:1-23.
- [38] 任志安,马朝阳.淮河生态经济带绿色发展水平测度及空间分异分析[J].生态经济,2020,6(7):83-89.
- [39] 孙茜,张捍卫,张小虎.河南省资源环境承载力测度及障碍因素诊断[J].干旱区资源与环境,2015,29(7):33-38.
- [40] 易文明,李正南.湘中丘陵区典型小流域治理前期水土流失规律研究[J].中国水土保持,2002(5):18-20.
- [41] 林锦阔.河西地区土壤侵蚀时空分异及其驱动因素[D].兰州:兰州大学,2020.
- [42] Hu X, Li Z, Nie X, et al. Regionalization of Soil and Water conservation Aimed at ecosystem Services improvement[J]. *Scientific Reports*, 2020,10(1):1-10.
- [43] Sui Y, Jiao X, Chen W, et al. Labile organic matter content and distribution as affected by six-year soil amendments to eroded Chinese mollisols[J]. *Chinese Geographical Science*, 2013,23(6):692-699.
- [44] Qadeer S, Anjum M, Khalid A, et al. A dialogue on perspectives of biochar applications and its environmental risks[J]. *Water, Air, & Soil Pollution*, 2017, 228(8):1-26.
- [45] Sharma A, Tiwari K, Bhadoria P B S. Effect of land use land cover change on soil erosion potential in an agricultural watershed[J]. *Environmental Monitoring & Assessment*, 2011,173:789-801.
- [46] Zare M, Panagopoulos T, Loures L. Simulating the impacts of future land use change on soil erosion in the Kasilian watershed, Iran[J]. *Land Use Policy*, 2017, 67:558-572.
- [47] Li Y, Li J, Are K S, et al. Livestock grazing significantly accelerates soil erosion more than climate change in Qinghai-Tibet Plateau: Evidenced from ^{137}Cs and ^{210}Pb measurements[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2019,285:106643.
- [48] Xiao L, Zhao R, Kuhn N J. No tillage is not an ideal management for water erosion control in China[J]. *Science of the Total Environment*, 2020,736:1-7.