

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2024.01.003

王丽园, 赵体侠, 朱文博, 等. 基于 RUSLE 模型的秦岭—大巴山地土壤侵蚀时空特征分析[J]. 水土保持学报, 2024, 38(1): 113-121.

WANG Liyuan, ZHAO Tixia, ZHU Wenbo, et al. The spatiotemporal characteristics of soil erosion in the Qinling-Daba Mountains based on RUSLE model[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(1): 113-121.

基于 RUSLE 模型的秦岭—大巴山地土壤侵蚀时空特征分析

王丽园, 赵体侠, 朱文博, 朱连奇

(河南大学地理与环境学院, 河南 开封 475004)

摘 要: [目的] 秦岭—大巴山地(秦巴山地)是我国重要的南北地理—生态过渡带主体, 对秦巴山地的土壤侵蚀研究将有助于该区域的生态保护和水土资源管理。[方法] 基于 RUSLE 模型计算秦巴山地的土壤侵蚀模数, 并量化分析了该区域的土壤侵蚀的时空分布格局。[结果] (1) 2000—2020 年秦巴山地的微度侵蚀面积呈上升趋势, 轻度侵蚀及其以上等级的土壤侵蚀面积均呈下降趋势; 从空间来看, 秦巴山地东北和西南部的土壤侵蚀等级较高, 中间较低; (2) 秦巴山地的土壤侵蚀相对集中在 500~1 500 m、坡度 15°~25°区域内; (3) 秦巴山地发生土壤侵蚀最主要的土地利用类型为林地, 耕地、林地的微度侵蚀以及草地的微度、剧烈侵蚀面积呈上升趋势; (4) 秦巴山地土壤侵蚀主要分布在陕西、四川和甘肃, 且甘肃和四川的剧烈侵蚀呈上升趋势。[结论] 2000—2020 年秦巴山地的侵蚀面积和强度呈“双下降”的态势, 其整体侵蚀状况好转, 但侵蚀分布存在明显空间差异。

关键词: 秦巴山地; 土壤侵蚀; RUSLE 模型; 土地利用; 地形因子

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242-(2024)01-0113-09

The Spatiotemporal Characteristics of Soil Erosion in the Qinling-Daba Mountains Based on RUSLE Model

WANG Liyuan, ZHAO Tixia, ZHU Wenbo, ZHU lianqi

(The College of Geography and Environment Science, Kaifeng, Henan 475004, China)

Abstract: [Objective] The Qinling-Daba Mountains region (QDM) is the important geographical transitional zone across the north and south of China. A comprehensive and systematic analysis of soil erosion in QDM is essential for the planning of soil and water conservation measures, and the sustainable agriculture development. [Methods] Based on the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE), we calculate the soil erosion modulus in the QDM and analyze the spatiotemporal characteristic of the soil erosion in the study region from 2000 to 2020. [Results] (1) From 2000 to 2020, the areas of soil erosion in the QDM showed an upward trend. Spatially, the areas of higher soil erosion modulus were located in the northeast and southwest of the QDM, while the areas of lower soil erosion modulus were distributed in the central of the study region; (2) The areas with severe soil erosion are mainly concentrated in area with 500 ~ 1 500 m, and areas with 15° ~ 35°; (3) The land-use pattern with the highest soil erosion rates were forest, and the lowest soil erosion rate were found grass; (4) The areas with soil erosion were mainly located in Shaanxi, Sichuan, and Gansu. Severe erosion showed an upward trend in Gansu and Sichuan during 2000—2020. [Conclusion] Both erosion area and erosion intensity in the QDM showed decreasing trend, while the differences in the distribution pattern of erosion intensity were found in this study region.

Keywords: Qinling-Daba Mountains; soil erosion; revised universal soil loss equation; land use; topographical factor

Received: 2023-08-19

Revised: 2023-10-05

Accepted: 2023-10-18

Online(www.cnki.net): 2023-11-08

收稿日期: 2023-08-19

修回日期: 2023-10-05

录用日期: 2023-10-18

网络首发日期(www.cnki.net): 2023-11-08

资助项目: 国家重点研发计划项目(2021YFE0106700); 国家科技基础资源调查专项(2017FY100902)

第一作者: 王丽园(1992—), 女, 博士, 主要从事气候变化与土壤侵蚀研究。E-mail: 727198939@qq.com

通信作者: 朱连奇(1963—), 男, 教授, 主要从事气候变化和山地地理研究。E-mail: lqzhu@henu.edu.cn

http://stbxb.alljournal.com.cn

土壤侵蚀是指土壤在外力作用下被分散、剥离、搬运与沉积的过程,是发生在陆地表面自然与人文交互耦合的复杂地理过程^[1]。土壤侵蚀影响土壤性质,破坏土壤结构,造成化学元素迁移,土壤肥力降低,减少作物产量,影响区域的社会经济发展和国家的粮食安全^[2-3]。土壤侵蚀同时还引起河流、库塘和湖泊泥沙的淤积,导致含沙量增加、水质恶化、生物多样性降低等生态环境问题,影响人类健康安全^[2,4]。土壤侵蚀模型用来预测土壤侵蚀过程,是分析土壤侵蚀格局及演变的基础。目前,RUSLE 模型能较为全面地考虑土壤侵蚀的影响因子,是进行土壤侵蚀过程定量研究的有效方法,已被广泛应用^[5-6]。

秦岭—大巴山(秦巴山地)是由秦岭和大巴山双列山地组成的完整的地理单元,是我国重要的南北过渡带主体,它对于中国地理格局的形成、生物区系的演化、自然资源的分布都具有重要的意义^[7]。秦巴山地是渭河、汉江的主要源地,更是南水北调中线水源区,也是朱鹮、大熊猫等珍稀动植物栖息地和分布区^[8],其影响范围巨大而深远,对于国家生态安全和水安全具有重要的影响。土壤侵蚀是秦巴山地需要关注和深入研究的重要生态环境问题,因此,秦巴山地的土壤侵蚀研究对该区域的水土资源的规划和管理,以及生态安全具有极为重要的现实意义。以往对秦巴山地的土壤侵蚀研究多以省、市、县、流域等尺度为主,研究区域相对零星且分散。党广善等^[9]研究表明,陇南市水土流失总面积逐年减少,且减少幅度逐年上升;高艳丽等^[10]研究发现,2000—2015 年汉江流域土壤侵蚀量呈下降趋势,空间上侵蚀量高值区位于流域中部,而低值区分布于流域东西两侧;郭思琪等^[5]研究发现,秦岭地区的土壤侵蚀强度存在明显的东西差异,其中嘉陵江流域的土壤侵蚀最为严重。这些研究为秦巴山地的土壤侵蚀研究提供一定的参考,但完整而全面的土壤侵蚀研究相对较少^[11]。本文以秦巴山地为研究对象,通过 RUSLE 模型对该区域的土壤侵蚀时空格局进行分析,以期为该地区的水土保持和水土资源规划,及政府决策和相关管理者提供相关的理论依据和科学参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

秦岭—大巴山地位于我国中西部(102°54′—112°40′E, 30°50′—34°59′N),地跨河南、陕西、甘肃、四川、湖北、重庆 6 个省市(图 1),涵盖陕西秦岭山脉、东秦岭伏牛山区、西秦岭甘南和川西北地区和大巴山段,东西长约 1 000 km,南北宽约 300 km,总面积约 30 万 km²^[12]。该区域地势西高东低,东西承接青藏

高原与东部平原,地形地貌类型复杂,山地、谷地、平原、丘陵横贯其中^[13]。秦巴山地气候敏感,复杂多样,从西北到东南逐渐由暖温带过渡到北亚热带季风气候,区内年平均气温 12~16 °C,年降水量 450~1 300 mm^[13]。土壤类型以黄棕壤、棕壤、褐土、暗棕壤、和紫色土等为主。植被覆盖高值区主要为秦岭、米仓山和神农架等山地,低值区主要为西部高海拔区和东部低海拔区等区域^[14]。

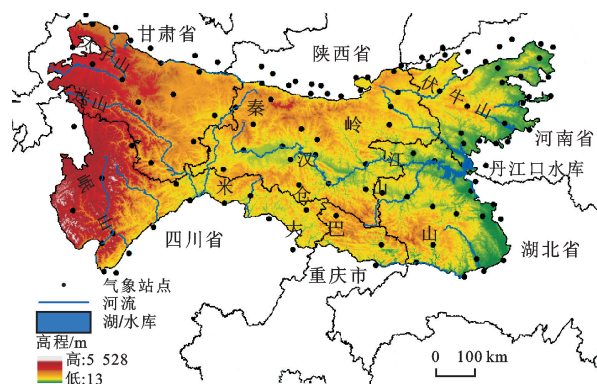


图 1 研究区域与气象站点位置

Fig. 1 The study area and meteorological station locations

1.2 数据来源

本文共收集秦巴山地及周边地区共 115 个国家气象站点 2000—2020 年逐日降雨量,该数据下载于中国气象科学数据共享服务网 (<http://cdc.cma.gov.cn>);DEM 数据来源于中国科学院计算机网络信息中心国际科学数据镜像网站 (<http://datamirror.csdb.cn>),空间分辨率为 30 m。土壤数据包括土壤类型、土壤质地、土壤有机质含量,其中土壤类型和土壤质地空间分布数据(空间分辨率 1 km)来源于中国科学院资源环境科学数据中心 (<https://www.resdc.cn>);土壤有机质来源于国家青藏高原数据中心中国土壤有机质数据 (<https://data.tpcd.ac.cn/home>)。土地利用数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心 (<http://www.resdc.cn>),空间分辨率为 1 km。按照中国科学院 LUCC 分类系统,将土地利用类型分为 6 个一级类,分别为耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地。在 ArcGIS 中通过镶嵌、重投影及裁剪等预处理得到研究区各类数据,并将所有数据重采样为 1 km 以便后续使用。

1.3 RUSLE 模型计算

本文采用修正土壤流失方程(RUSLE)对秦巴山地的土壤侵蚀进行量化,计算公式为:

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

式中: A 为平均土壤侵蚀量[t/(hm² · a)],即土壤侵蚀模数; R 为降雨侵蚀力因子[(MJ · mm)/(hm² · h · a)]; K 为土壤可蚀性因子[(t · hm² · h)/(hm² ·

MJ·mm)]; LS 为坡长坡度因子(无量纲); C 为植被覆盖与经营管理因子(无量纲); P 为土壤保持措施因子(无量纲)。在 ArcGIS 中将这些因子转化为栅格图,并进行各因子相乘,即可算出土壤侵蚀模数(A)。

1.3.1 降雨侵蚀力(R) 降雨侵蚀力因子(R)表示土壤侵蚀中降雨条件的潜在影响力。国内外的学者们以日、月、年等精度的降水数据为基础,建立降雨侵蚀力的简易算法。章文波等^[15]提出的以日雨量为基础的降雨侵蚀力计算方法,其结构简单,数据易获得,并在计算降雨侵蚀力方面考虑侵蚀性降雨,其在以往秦巴山地及其相关区域的降雨侵蚀力研究中得到较好的应用^[16-17]。故本研究中采用章文波等^[15]提出降雨侵蚀模型,计算秦巴山地的降雨侵蚀力。其计算公式为:

$$R_i = \alpha \sum_{j=1}^k (p_j)^\beta \tag{2}$$

式中: R_i 为第 i 个半月时段的侵蚀力值[(MJ·mm)/(hm²·h·a)]; k 为该半月时段的天数,以每月第 15 日为界; p_j 为半月时段内第 j 天的侵蚀性日雨量(侵蚀性降雨标准≥12 mm),否则以 0 计算; α 和 β 为模型待定参数,计算公式为:

$$\beta = 0.836\ 3 + \frac{18.177}{P_{d\ 12}} + \frac{24.455}{P_{y\ 12}} \tag{3}$$

$$\alpha = 21.586\beta^{-7.189\ 1} \tag{4}$$

式中: $P_{d\ 12}$ 为日降雨量≥12 mm 的日平均雨量; $P_{y\ 12}$ 为日降雨量≥12 mm 的年平均雨量。利用公式(2)~(4)估算出每个站点逐年各半月时段的降雨侵蚀力,累加得到年降雨侵蚀力。

1.3.2 土壤可蚀性因子(K) 土壤可蚀性因子(K)能够反映土壤对侵蚀敏感程度以及衡量土壤颗粒被水力分离和搬运的难易程度^[2]。本研究采用 WIL-LIAMS 等^[18]出的 EPIC 模型,以土壤有机质和颗粒组成比例估算 K 因子,其计算公式为:

$$K = \left\{ 0.2 + 0.3 \exp \left[-0.025\ 6 S_d \left(1 - \frac{S_i}{100} \right) \right] \right\} \left(\frac{S_i}{C_l + S_i} \right)^{0.3} \times \left[1 - \frac{0.25C}{C + \exp(3.72 - 2.95C)} \right] \times \left[1 - \frac{0.7SN}{SN + \exp(-5.51 + 22.9SN)} \right] \tag{5}$$

式中: K 为土壤可蚀性单位为美制,转换为国际制单位,需乘 0.131 7; S_d 、 S_i 和 C_l 分别为砂粒、粉粒和黏粒含量(%); C 为有机碳含量(%); $SN=1-S_d/100$ 。

1.3.3 坡长坡度因子(LS) 坡长坡度因子(LS)用于反映地形地貌对土壤侵蚀的影响。一般情况下,坡度越大,坡长越长,土壤侵蚀越剧烈^[19]。本研究基于秦巴山地 30 m 分辨率 DEM 数据,借助 ZHANG 等^[19]开发的 LS 因子计算工具,采用中国水利普查规定的 CSLE 中 LS 因子算法得到整个秦巴山地的

LS 因子值,其计算公式为:

$$S = \begin{cases} 10.8 \sin \theta + 0.03 & \theta < 5^\circ \\ 16.8 \sin \theta - 0.50 & 5^\circ \leq \theta < 10^\circ \\ 21.9 \sin \theta - 0.96 & \theta \geq 10^\circ \end{cases} \tag{6}$$

$$L = (\lambda / 22.1)^m \tag{7}$$

$$m = \begin{cases} 0.2 & \theta \leq 1^\circ \\ 0.3 & 1^\circ \leq \theta \leq 3^\circ \\ 0.4 & 3^\circ \leq \theta \leq 5^\circ \\ 0.5 & \theta \geq 5^\circ \end{cases} \tag{8}$$

式中: S 为坡度因子(无量纲); θ 为坡度值(°); L 为坡长因子(无量纲); λ 为坡长(m); m 为坡长指数。

1.3.4 植被覆盖与经营管理因子(C) 植被覆盖因子(C)能够反映土地利用类型和植被覆盖度等对土壤侵蚀的影响。本研究中对水泥地面固化的建设用地和物质沉积的水域,均认为不存在显著的土壤侵蚀,因此默认 C 值取 0^[20]。其他区域采用蔡崇法等^[21]根据植被覆盖与经营管理因子 C 与植被覆盖度(f)的关系进行 C 值的计算,值为 0~1,其计算公式为:

$$C = \begin{cases} 1 & f = 0 \\ 0.650\ 8 - 0.343\ 6 * \lg f & 0 < f < 78.3\ \% \\ 0 & f \geq 78.3\ \% \end{cases} \tag{9}$$

1.3.5 水土保持措施因子(P) 水土保持措施因子(P)表示采取特定水保措施后土壤侵蚀量与不采取任何措施时土壤侵蚀量的比值,实施水保措施后未发生土壤侵蚀的区域 P 值取 0,不采取任何水保措施区域 P 值取 1.00,其他情况 P 取值 0~1.00。本研究参照美国农业部手册和相关研究^[6,11],并结合当地实际情况对秦巴山地水土保持措施因子 P 赋值见表 1。

表 1 秦巴山地不同土地利用 P 值

Table 1 P -values of different land use pattern in the QDM

一级类型	二级类型	P	一级类型	二级类型	P
耕地	水田	0.01	水域	河渠	0
	旱地	0.40		湖泊	0
	有林地	1.00		水库坑塘	0
林地	灌木林	0.70		永久性冰川雪地	0
	疏林地	0.70		滩地	1.00
草地	其他林地	0.50	未利用土地	沙地	1.00
	高覆盖度草地	1.00		盐碱地	1.00
	中覆盖度草地	0.70		沼泽地	1.00
	低覆盖度草地	0.70		裸土地	1.00
城乡、工矿、居民用地	城镇用地	0		裸岩石质地	0
	农村居民点	0		其他	1.00
	其他建设用地	0			

利用公式(1)计算得到秦巴山地 2000—2020 年的土壤侵蚀模数,并按《土壤侵蚀分级标准》(SL 190—2007)^[22]对秦巴山地的土壤侵蚀模数进行土壤侵蚀强

度分级,共分为微度、轻度、中度、强烈、极强烈和剧烈 侵蚀 6 个级别。秦巴山地土壤侵蚀分级结果见图 2。

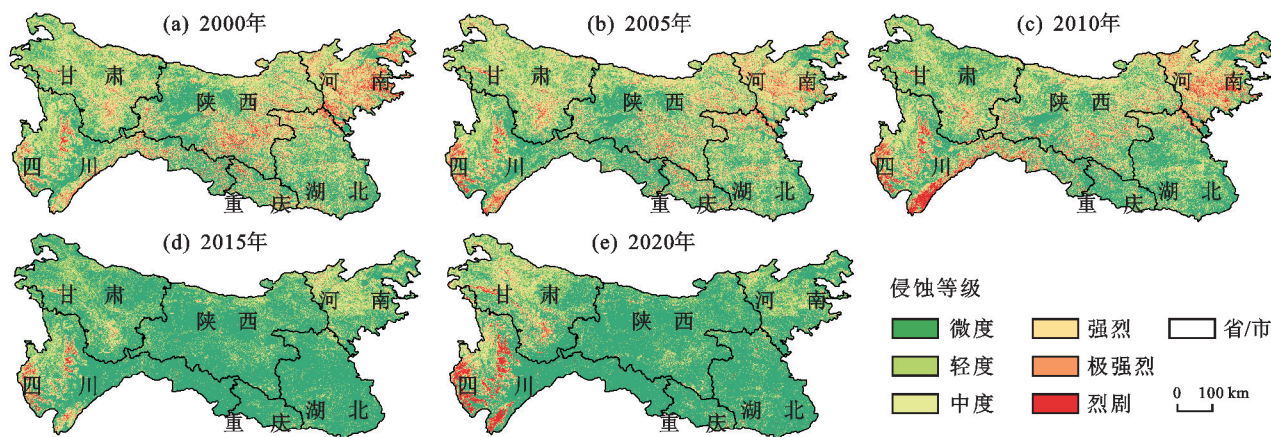


图 2 秦巴山地土壤侵蚀空间分布

Fig. 2 The spatial distribution pattern of soil erosion in the QDM

2 结果与分析

2.1 秦巴山地土壤侵蚀时空分布特征

由表 2 可知,2000—2020 年秦巴山地的微度侵蚀面积占比呈增加趋势,其他侵蚀等级面积占比则表现为不同程度的下降趋势。微度侵蚀年均变化率为 5.0%,其中面积占比最高为 72.9%(2015 年),最低为 35.1%(2000 年);轻度、中度、强烈、极强烈、剧烈侵蚀均表现为下降趋势,其年均下降率分别为 -1.9%,2.9%, -3.4%, -3.9%, -1.1%。总体上,秦巴山地的土壤侵蚀状况呈逐步改善趋势,且土壤侵蚀类型以微度侵蚀为主,这与李艳红^[11]的研究结论一致。由图 2 可知,2000—2020 年秦巴山地不同等级的土壤侵蚀的分布状况呈逐渐变化态势。随着时间变化,秦巴山地微度侵蚀由陕西西南部和湖北等地区逐步分布到几乎秦巴山地全部地区,其相对集中在研究区的中部;中度及其以上等级的土壤侵蚀面积逐年减少,并逐步由秦巴山地的东北和西南部转移到研究区的四川西部和甘肃境内。

表 2 2000—2020 年秦巴山地土壤侵蚀面积占比及变化率

Table 2 Proportion and change rate of soil erosion areas in QDM during 2000—2020 %

年份	侵蚀等级面积占比					
	微度	轻度	中度	强烈	极强烈	剧烈
2000	35.1	21.8	20.3	11.0	8.6	3.2
2005	37.1	20.9	20.9	11.1	7.8	2.2
2010	39.3	21.0	18.9	10.0	7.4	3.5
2015	72.9	15.9	7.2	2.2	1.3	0.5
2020	69.9	13.4	8.7	3.6	1.9	2.5
2000—2020 年 变化率	5.0	-1.9	-2.9	-3.4	-3.9	-1.1

由表 3 可知,秦巴山地的各土壤侵蚀均发生一定程度转移,研究区内有 $14.86 \times 10^4 \text{ km}^2$ 发生侵蚀等

级由高向低的转移,其中轻度、中度侵蚀是转移面积较多的土壤侵蚀类型,微度侵蚀是转入最多的土壤侵蚀类型,这说明多数区域的侵蚀等级下降,土壤侵蚀状况得到改善。秦巴山地内有 $3.55 \times 10^4 \text{ km}^2$ 由低等级侵蚀转向高侵蚀等级,其中 $1.02 \times 10^4 \text{ km}^2$ 的微度侵蚀转移向更高侵蚀等级。这说明秦巴山地的土壤侵蚀存在“边治理,边破坏”的情况,即在土壤侵蚀普遍好转的同时却依然存在着局部地区土壤侵蚀加剧的情况。

表 3 2000—2020 年秦巴山地不同侵蚀等级的转移矩阵

Table 3 Transfer matrix of different erosion intensity of the QDM 10^4 km^2

2000 年	2020 年						合计
	微度	轻度	中度	强烈	极强烈	剧烈	
微度	—	0.66	0.23	0.07	0.03	0.03	1.02
轻度	4.25	—	0.84	0.22	0.06	0.03	5.40
中度	3.61	0.99	—	0.46	0.22	0.12	5.40
强烈	1.97	0.58	0.32	—	0.14	0.19	3.20
极强烈	1.43	0.46	0.31	0.11	—	0.25	2.56
剧烈	0.42	0.14	0.16	0.07	0.04	—	0.83
合计	11.68	2.83	1.86	0.93	0.49	0.62	18.41

2.2 秦巴山地土壤侵蚀与海拔的关系

由图 3 可知,随海拔升高,秦巴山地土壤侵蚀面积呈现出“上升—下降—上升”的变化规律。秦巴山地土壤侵蚀集中在 500~1 500 m 地区,该地区由于受人类的活动干扰较为强烈,原始森林植被遭到破坏,植被组成单一,植被覆盖较差^[14],因此造成该区域的土壤侵蚀偏高。2 000~3 000 m 的海拔梯度内,人为干扰较小,以林地、草地为主,植被覆盖较好,从而这个海拔梯度内土壤侵蚀较低。秦巴山地 >3 000 m 区域主要分布其西部,该区域生态环境脆弱,森林过度砍伐、草地破坏,水土保持能力较差,因而土壤侵蚀面积较大。

由图 3 可知,微度、轻度侵蚀是各海拔梯度内主要侵蚀类型,且随着侵蚀等级的升高,侵蚀面积逐步下降的。值得注意的是,在高于 3 000 m 海拔区域内的剧烈侵蚀面积明显高于其他海拔梯度。2000—2020 年秦巴山地不同海拔梯度下的土壤侵蚀等级面积变化率不同;在<500, 500~1 000, 1 000~1 500

m 梯度内,微度侵蚀面积呈上升趋势,其他土壤侵蚀等级的面积均为下降趋势(表 4)。

总体来说,秦巴山地低于 2 000 m 区域土壤侵蚀状况逐步好转,而西部高海拔地区虽然侵蚀率在逐年下降,但中度及其以上等级的土壤侵蚀却呈增加趋势。

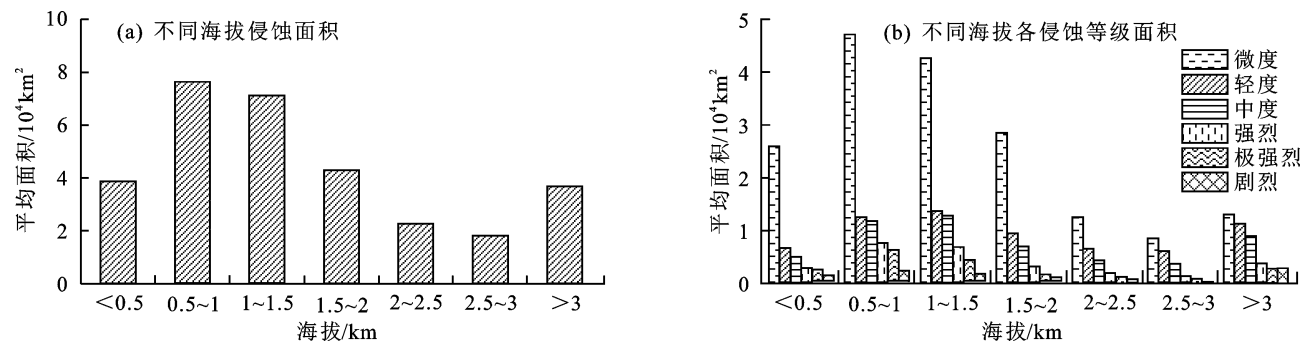


图 3 不同海拔土壤侵蚀平均面积

Fig. 3 The mean of soil erosion area at different altitude areas in the QDM

表 4 不同海拔各土壤侵蚀强度面积变化率

Table 4 The change rate of erosion intensity at different altitudes in the QDM

侵蚀等级	土壤侵蚀强度面积变化率/%						
	<0.5 km	0.5~1 km	1~1.5 km	1.5~2 km	2~2.5 km	2.5~3 km	>3 km
微度	5.4	8.3	6.9	3.1	2.1	0.5	0.5
轻度	-1.7	-1.5	-1.9	-2.2	-1.4	-2.0	-2.4
中度	-3.5	-3.8	-3.9	-3.2	-1.3	0.6	-0.8
强烈	-4.2	-4.6	-4.5	-3.5	-1.7	4.6	3.0
极强烈	-4.6	-4.8	-4.6	-3.3	-1.8	5.2	1.7
剧烈	-4.6	-4.6	-3.7	4.5	16.6	44.7	20.6

2.3 秦巴山地土壤侵蚀与坡度的关系

坡度是影响土壤侵蚀的重要因素之一,坡度影响径流速度,同时也是影响土壤入渗与径流量的大小的重要因素,即影响地表侵蚀的方式、强度和过程^[23-24]。

由图 4 可知,随着坡度的增加,秦巴山地的土壤侵蚀率呈“下降—上升—下降”变化规律。由秦巴山地的在 15°~35°的侵蚀面积最大,5°~8°的侵蚀面积最小。在各坡度带内,土壤侵蚀均以微度侵蚀为主,随着侵蚀等级增加,侵蚀面积逐渐减小,剧烈侵蚀的面积最小。

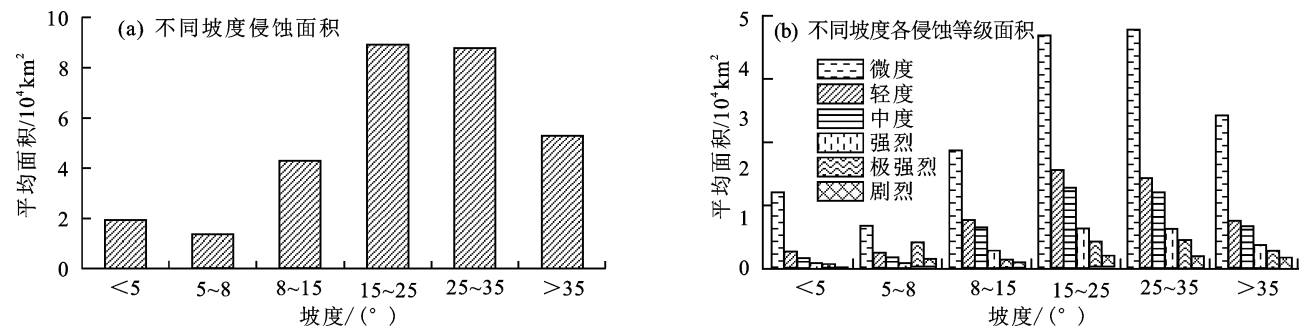


图 4 不同坡度下土壤侵蚀平均面积

Fig. 4 The mean of soil erosion area in the different slope areas

由表 5 可知,秦巴山地 35°以下区域,微度侵蚀面积呈增加趋势,而其他侵蚀等级面积为下降趋势;剧烈侵蚀则逐渐集中在研究区>35°区域内,这可能是由于坡度较大地区的植被覆盖相对较差,土体稳定性差,从而导致剧烈侵蚀的增加。

2.4 秦巴山地土壤侵蚀与土地利用类型的关系

土地利用反映人类根据自然与社会经济环境改造自然和利用自然的结果^[11,24],土地利用通过扰动表层土壤及改变地面植被覆盖来影响降水与地表径流对坡面的侵蚀效果^[23]。

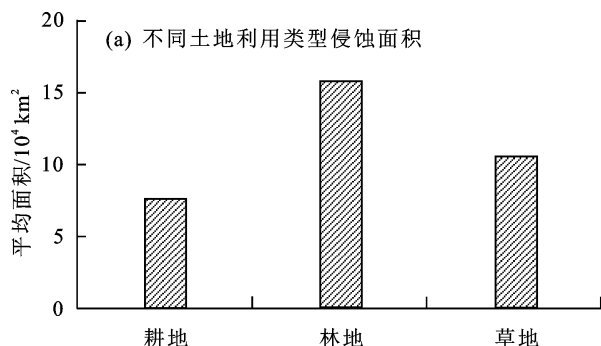
表 5 不同坡度各土壤侵蚀等级面积变化率

Table 5 The change rate of soil erosion intensity in different slopes areas

侵蚀等级	土壤侵蚀强度面积变化率/%					
	<5°	5°~8°	8°~15°	15°~25°	25°~35°	>35°
微度	2.3	4.8	5.5	5.9	5.3	4.3
轻度	-1.9	-1.6	-1.4	-1.8	-2.1	-2.5
中度	-3.2	-3.0	-2.7	-2.7	-2.9	-3.0
强烈	-3.7	-3.8	-3.6	-3.4	-3.2	-3.1
极强烈	-4.2	-4.3	-4.2	-4.1	-3.7	-3.5
剧烈	-3.5	-3.3	-2.9	-2.2	-0.4	2.5

由于在计算 P 和 C 因子时,水域和建设用地被赋值为 0,而未利用地在本研究区的分布极小,故本文仅分析耕地、林地、草地等 3 类土地利用类型与土壤侵蚀的关系。

由图 5 可知,2000—2020 年秦巴山地发生土壤侵蚀的主要土地利用类型为林地,其次为草地,最后是耕地。耕地的土壤侵蚀以微度侵蚀为主,占耕地



总侵蚀面积的 64.5%。林地的土壤侵蚀也同样以微度侵蚀为主,中度以上侵蚀的面积较小。对草地来说,微度侵蚀虽是其最主要的侵蚀类型,占草地总侵蚀面积的 36.6%,但这低于其在草地、林地中的总侵蚀面积中的占比。草地的剧烈侵蚀面积占比是 3 类土地利用类型中最大的,占剧烈侵蚀总面积的 50% 以上。

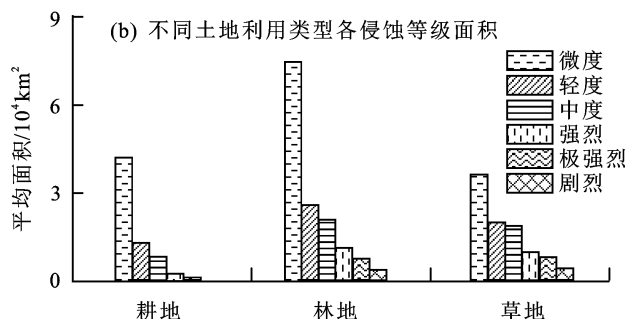


图 5 不同土地利用类型土壤侵蚀平均面积

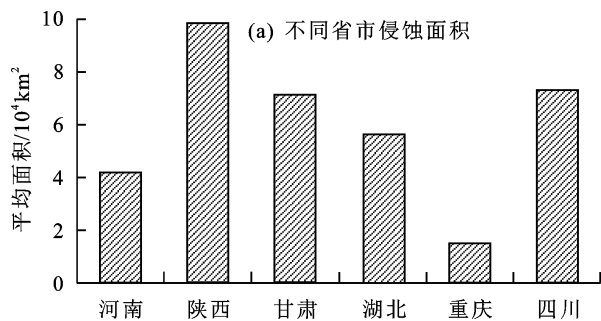
Fig. 5 The mean soil erosion areas of the different land use types

由表 6 可知,耕地和林地的微度侵蚀面积呈上升趋势,其他侵蚀等级面积均为下降趋势;而草地的微度和剧烈侵蚀面积均呈上升趋势,其他侵蚀等级呈下降趋势。这可能是由于秦巴山地的草地相对集中在研究区的西部,该区域生态环境脆弱,人类不合理的土地利用、草地过度放牧及森林砍伐等易造成其地面裸露,导致剧烈土壤侵蚀的增多。

表 6 不同土地利用类型下各侵蚀等级变化率

Table 6 The proportion and change rate of different erosion intensity area of land, forest and grassland in the QDM %

土地利用类型	侵蚀等级					
	微度	轻度	中度	强烈	极强烈	剧烈
耕地	3.3	-2.3	-3.8	-4.2	-4.4	-3.2
林地	5.2	-2.0	-3.0	-3.8	-4.3	-2.6
草地	7.2	-1.6	-2.2	-2.6	-3.4	0.3



2.5 秦巴山地内不同省市土壤侵蚀

省市之间的差异是综合自然、人口、经济等诸多因子的不同,从而造成不同省市的土壤侵蚀状况的时空特征^[11]。由图 6 可知,秦巴山地的土壤侵蚀集中在陕西、四川、甘肃等地区。各省市内侵蚀面积为微度侵蚀>轻度侵蚀>中度侵蚀>强烈侵蚀>极强烈侵蚀>剧烈侵蚀。河南省的微度、轻度与中度侵蚀面积较大,剧烈侵蚀面积虽小,但仅次于四川省。陕西与四川的侵蚀格局相似,微度侵蚀面积较大,占其总侵蚀面积的 50% 以上,其他侵蚀的面积明显小于微度侵蚀,但四川省的剧烈侵蚀面积占四川土壤侵蚀总面积的比例明显高于其他省份。甘肃中度以下等级的侵蚀之间的面积差异不大。湖北和重庆的微度侵蚀面积占其侵蚀总面积的 60% 以上,尤其是重庆的微度侵蚀面积占其总侵蚀面积的 68.1%,而其他侵蚀等级面积较小。

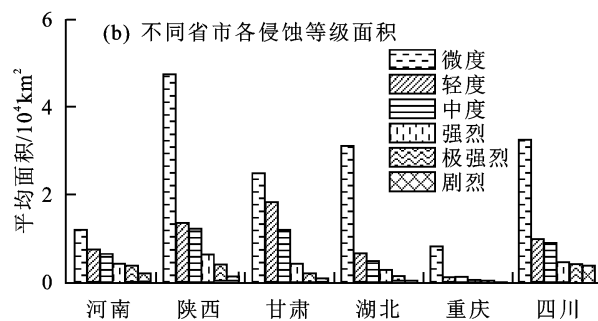


图 6 不同省市的土壤侵蚀平均面积

Fig. 6 The mean soil erosion area of different provinces in the QDM

由表 7 可知,2000—2020 年河南省微度与轻度侵蚀面积呈上升趋势,变化率分别为 13.83%, 2.81%;其他侵蚀等级面积呈不同程度下降趋势。该区域是秦巴山地重要的生态保护区以及水源区,但同

时也是人类活动较多以及开发建设项目较多的地区,从而造成该区域土壤侵蚀在改善的同时轻度侵蚀也有所增加。陕西、湖北与重庆的微度侵蚀呈上升趋势,其他侵蚀均为下降趋势。甘肃和四川省微度和剧

烈侵蚀呈上升趋势,其他侵蚀为下降趋势;且这 2 个省的剧烈侵蚀是增加趋势,其变化率分别 11.76%, 9.98%。这可能是由于甘肃和四川位于秦巴山地西部,海拔较高,坡度较大,植被覆盖差,耕地资源有限,地表覆盖破坏之后恢复难度较大,加之经济发展相对落后,森林破坏以及草地的过度放牧等情况较为严重等原因造成的。因此,该区域以后应平衡保护生态和发展社会经济之间的关系,因地制宜发展特色农业、开展生态旅游等措施,逐步恢复提高森林、草地覆盖。

表 7 不同省市的侵蚀强度面积变化率

Table 7 The change rate of erosion intensity area in different provinces %

侵蚀等级	侵蚀强度面积变化率					
	河南	陕西	甘肃	湖北	重庆	四川
微度	13.83	6.20	3.21	4.87	3.95	2.90
轻度	2.81	-2.05	-1.74	-3.13	-2.62	-3.26
中度	-2.56	-4.03	-1.05	-4.04	-3.65	-2.64
强烈	-4.33	-4.60	-0.59	-4.40	-4.01	-1.57
极强烈	-4.76	-4.79	-0.75	-4.58	-4.52	-2.12
剧烈	-4.84	-4.65	11.76	-4.09	-4.09	9.98

3 讨论

秦巴山地是我国重要的南北过渡带主体区,是南水北调中线水源地,该地区的土壤侵蚀对我国水安全,珍稀动植物保护,区域社会经济发展均有重大影响,因此,对该区域的土壤侵蚀时空格局研究对以后区域的水土保持、水土资源规划是必要的。秦巴山地的土壤侵蚀逐年改善,水土流失面积和强度呈现“双下降”态势,这与李艳红^[11]的研究结论一致。郭思琪等^[5]研究分析秦岭地区的土壤侵蚀时空变化发现,秦岭的土壤侵蚀在空间上呈现由西向东、由南至北减弱的特征,且嘉陵江流域土壤侵蚀是研究区最为严重的,这与本研究中秦岭地区的土壤侵蚀的空间分布是相对一致的。黄硕文等^[6]以 RUSLE 模型为基础研究分析河南省近 10 年来土壤侵蚀时空变化发现,中度及其以上侵蚀主要分布在河南西部的三门峡、洛阳等地区,这与本研究内相同区域的侵蚀状况是基本一致。对比《2020 陕西省水土保持公报》^[25]中商洛市、汉中市以及安康市的侵蚀状况可知,与本研究中的侵蚀等级分布规律基本一致。由于使用的模型、数据类型,以及侵蚀因子计算方法等的不同造成该研究与前人^[10-11]的研究结果之间的差异,但本研究结果是可靠的。在空间上,秦巴山地中度以上等级的土壤侵蚀向生态更脆弱的地区西部转移集中,这对秦巴山地以后的水土保持工作提出了更高的要求,既要巩固水土保持的成果,又要对重点区域进行有效治理,避免和减少该地的人为的水土流失。

地形因子是影响土壤侵蚀的重要因子,但 DEM 分辨率不可避免对计算结果产生一定的影响,可能与实际的坡度和坡长存在误差^[24,26]。在以后的研究中应考虑到 DEM 分辨率对结果的影响^[26],选择使用最适合本区域的高精度 DEM 数据,以提高研究结果的可靠性。本文中对秦巴山地土壤侵蚀的时空变化特征进行分析,但未量化海拔、坡度等因子对土壤侵蚀的贡献,在以后的研究中应探索自然、社会经济等因素中单个及多个因素对土壤侵蚀的贡献度等问题。

全球变暖,极端降水事件的增多可能加剧土壤侵蚀^[27],由此加剧土壤有机碳的剥蚀、迁移和沉积过程,因而也改变陆地碳源汇的大小和空间分布^[28]。秦巴山地作为气候敏感区,在后续的相关研究中可探讨全球气候变化、极端气候对该地区土壤侵蚀时空格局的影响,以提升该区域应对气候变化的能力。在未来的相关研究中应收集对比区域内的径流小区、水土保持站等实测数据,结合试验和实测数据对各侵蚀因子参数进行有效修正,进一步增强模型结果的可靠性,并逐步构建土壤侵蚀实时动态定量监测方法,降低土壤侵蚀对该区域生态、水土资源的影响。

4 结论

(1)2000—2020 年秦巴山地的土壤侵蚀状况整体好转,侵蚀面积和侵蚀强度均呈下降趋势;中度及其以上等级的土壤侵蚀逐渐从研究区的东北、西南部逐渐转移到秦巴山地的西部;中部区域土壤侵蚀较低,以微度、轻度侵蚀为主。

(2)秦巴山地的土壤侵蚀与海拔、坡度等地形因子有密切关系。随海拔升高,秦巴山地土壤侵蚀面积呈现出“上升—下降—上升”的变化规律;受坡度变化影响,研究区土壤侵蚀面积以 15°~25°为中心向两侧减少趋势。海拔 500~1500 m、坡度 15°~25°是该区域侵蚀集中区域,是土壤侵蚀防治的重要区域。

(3)秦巴山地发生土壤侵蚀的主要土地利用类型为林地,其次为草地和耕地。耕地和林地的微度侵蚀呈下降趋势,其他侵蚀等级呈下降趋势;草地的微度和剧烈侵蚀呈上升趋势,其他侵蚀等级呈下降趋势。过去 20 多年,秦巴山地土壤侵蚀集中在分布在陕西、四川和甘肃等地区,且甘肃、四川的剧烈侵蚀面积呈上升趋势。

参考文献:

[1] 陈世发.南方红壤区典型流域土壤侵蚀格局与风险评价[D].福州:福建师范大学,2018.
CHEN S F. Evaluation of soil erosion patterns and risk in typical watershed of southern red soil region[D]. Fuzhou: Fujian Normal University,2018.

[2] 史志华,刘前进,张含玉,等.近十年土壤侵蚀与水土保持研究进展与展望[J].土壤学报,2020,57(5):1117-1127.

- SHI Z H, LIU Q J, ZHANG H Y, et al. Study on soil erosion and conservation in the past 10 years: Progress and prospects[J]. Acta Pedologica Sinica, 2020, 57(5): 1117-1127.
- [3] 赵楠, 李明明, 方珂, 等. 雨强与水土保持措施对西南植烟红壤 Cu、Mo 和 Zn 流失的影响[J]. 水土保持学报, 2023, 37(5): 305-311, 319.
- ZHAO N, LI M M, FANG K, et al. Effects of rain intensity and soil and water conservation measures on the loss of Cu, Mo and Zn in tobacco planting red soil in southwest China[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2023, 37(5): 305-311, 319.
- [4] 张科利, 蔡强国, 柯奇画. 中国土壤侵蚀研究重大成就及未来关键领域[J]. 水土保持通报, 2022, 42(4): 373-380.
- ZHANG K L, CAI Q G, KE Q H. Major achievements and future key fields of soil erosion research in China[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(4): 373-380.
- [5] 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.
- GUO S Q, HAN L, ZHAO Y H, et al. Spatiotemporal variation and landscape pattern of soil erosion in Qinling Mountains[J]. Chinese Journal of Ecology, 2019, 38(7): 2167-2176.
- [6] 黄硕文, 李健, 张欣佳, 等. 河南省近十年来土壤侵蚀时空变化分析[J]. 农业资源与环境学报, 2021, 38(2): 232-240.
- HUANG S W, LI J, ZHANG X J, et al. Analysis of spatial and temporal changes in soil erosion in Henan Province over the last ten years[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2021, 38(2): 232-240.
- [7] 张百平. 中国南北过渡带研究的十大科学问题[J]. 地理科学进展, 2019, 38(3): 305-311.
- ZHANG B P. Ten major scientific issues concerning the study of China's north-south transitional zone[J]. Progress in Geography, 2019, 38(3): 305-311.
- [8] 刘佳杰. 全球气候变化背景下秦巴山地朱鹮适生区变化研究[D]. 河南 开封: 河南大学, 2021.
- LIU J J. Study on the changes of suitable area of *Crested Ibis* in Qinba Mountain under the background of global climate change[D]. Kaifeng, Henan: Henan University, 2021.
- [9] 党广善, 刘世生, 宋振威. 陇南市水土流失变化趋势及原因分析[J]. 农业科技与信息, 2022(14): 45-48.
- DANG G S, LIU S S, SONG Z W. Change trend and cause analysis of soil erosion in Longnan City [J]. Agricultural Science-Technology and Information, 2022(14): 45-48.
- [10] 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 Y L, LI H B. Influence of landscape pattern change on soil erosion in Han River Basin[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(6): 2248-2260.
- [11] 李艳红. 秦巴山地土壤侵蚀多维变化研究[D]. 河南 开封: 河南大学, 2020.
- LI Y H. Study on multidimensional changes of soil erosion in Qinba Mountains [D]. Kaifeng, Henan: Henan University, 2020.
- [12] 赵芳, 张百平, 朱连奇, 等. 秦巴山地垂直带谱结构的空间分异与暖温带—亚热带界线问题[J]. 地理学报, 2019, 74(5): 889-901.
- ZHAO F, ZHANG B P, ZHU L Q, et al. Spectra structures of altitudinal belts and their significance for determining the boundary between warm temperate and subtropical zones in the Qinling-Daba Mountains[J]. Acta Geographica Sinica, 2019, 74(5): 889-901.
- [13] 刘俊杰, 潘自武, 秦奋, 等. 基于 MODIS 的秦巴山地气温估算与山体效应分析[J]. 地理研究, 2020, 39(3): 735-748.
- LIU J J, PAN Z W, QIN F, et al. Estimation of air temperature based on MODIS and analysis of mass elevation effect in the Qinling-Daba Mountains[J]. Geographical Research, 2020, 39(3): 735-748.
- [14] 陈超男, 朱连奇, 田莉, 等. 秦巴山区植被覆盖变化及气候因子驱动分析[J]. 生态学报, 2019, 39(9): 3257-3266.
- CHEN C N, ZHU L Q, TIAN L, et al. Spatial-temporal changes in vegetation characteristics and climate in the Qinling-Daba Mountains [J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(9): 3257-3266.
- [15] 章文波, 谢云, 刘宝元. 利用日雨量计算降雨侵蚀力的方法研究[J]. 地理科学, 2002, 22(6): 705-711.
- ZHANG W B, XIE Y, LIU B Y. Rainfall erosivity estimation using daily rainfall amounts[J]. Scientia Geographica Sinica, 2002, 22(6): 705-711.
- [16] 邹玉霞, 樊国中, 刘淑娟, 等. 1960—2017 年重庆市不同量级降雨侵蚀力 R 值的时空变化特征[J]. 水土保持学报, 2022, 36(6): 41-48.
- ZOU Y X, FAN G Z, LIU S J, et al. Spatio-temporal variations of rainfall erosivity R values of different magnitudes in Chongqing from 1960 to 2017[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022, 36(6): 41-48.
- [17] 邵祎婷, 何毅, 穆兴民, 等. 秦巴山区降雨侵蚀力时空变化特征[J]. 长江流域资源与环境, 2019, 28(2): 416-425.
- SHAO Y T, HE Y, MU X M, et al. Spatiotemporal variation of rainfall erosivity in Qin-Ba Mountains region[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2019, 28(2): 416-425.
- [18] WILLIAMS J, NEARING M, NICKS A, et al. Using soil erosion models for global change studies [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1996, 51: 381-385.
- [19] ZHANG H M, WEI J C, YANG Q K, et al. An improved method for calculating slope length (λ) and the LS parameters of the Revised Universal Soil Loss Equation

- for large watersheds[J]. *Geoderma*, 2017, 308: 36-45.
- [20] 李天奇. 东北黑土区侵蚀沟成因与模型研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2012.
- LI T Q, A cause study and module simulation of gully erosion in black soil region[D]. Beijing: Chinese Academy of Sciences, 2012.
- [21] 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 C F, DING S W, SHI Z H, 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.
- [22] 水利部. 土壤侵蚀分类分级标准: SL 190—2007[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2008.
- Ministry of Water Resources. Soil erosion classification standard: SL 190-2007 [S] Beijing: China Water Resources and Hydropower Press, 2008.
- [23] 黄振华, 余健, 房莉, 等. 基于 InVEST 模型的青弋江流域土壤侵蚀与影响因素研究[J]. 水土保持学报, 2023, 37(5): 189-197.
- HUANG Z H, YU J, FANG L, et al. Research on soil erosion and influencing factors in Qingyi River Basin based on InVEST model[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2023, 37(5): 189-197.
- [24] 何莎莎, 朱文博, 崔耀平, 等. 基于 InVEST 模型的太行山淇河流域土壤侵蚀特征研究[J]. 长江流域资源与环境, 2019, 28(2): 426-439.
- HE S S, ZHU W B, CUI Y P, et al. Study on soil erosion characteristics of Qihe Watershed in Taihang Mountains based on the InVEST model[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2019, 28(2): 426-439.
- [25] 陕西省水利厅. 2020 年陕西省水土保持公报[Z]. 西安: 2020.
- Shaanxi Provincial Department of Water Resources. Shaanxi Provincial soil and water conservation bulletin in 2020 [Z]. Xi'an, 2020.
- [26] 汤国安, 杨勤科, 张勇, 等. 不同比例尺 DEM 提取地面坡度的精度研究: 以在黄土丘陵沟壑区的试验为例[J]. 水土保持通报, 2001, 21(1): 53-56.
- TANG G A, YANG Q K, ZHANG Y, et al. Research on accuracy of slope derived from DEMs of different map scales[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2001, 21(1): 53-56.
- [27] MA X F, ZHAO C Y, ZHU J T. Aggravated risk of soil erosion with global warming: A global meta-analysis[J]. *Catena*, 2021, 200(1): 105-129.
- [28] 朴世龙, 张新平, 陈安平, 等. 极端气候事件对陆地生态系统碳循环的影响[J]. 中国科学: 地球科学, 2019, 49(9): 1321-1334.
- PIAO S L, ZHANG X P, CHEN A P, et al. Effects of extreme climate events on carbon cycle of terrestrial ecosystem[J]. *Scientia Sinica (Terrae)*, 2019, 49(9): 1321-1334.
- (上接第 112 页)
- [24] PHAM B T, VAN D D, ACHARYA T D, et al. Performance assessment of artificial neural network using Chi-square and backward elimination feature selection methods for landslide susceptibility analysis[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2021, 80(20): e686.
- [25] SUN D L, GU Q Y, WEN H J, et al. Assessment of landslide susceptibility along mountain highways based on different machine learning algorithms and mapping units by hybrid factors screening and sample optimization[J]. *Gondwana Research*, 2022, 123(2023): 89-106.
- [26] 邢昕芙, 吴承龙, 李金辉, 等. 采用修正逻辑回归方法对降雨滑坡的敏感性评价[J]. 自然灾害, 2021, 106(1): 97-117.
- XING X F, WU C L, LI J H, et al. Susceptibility assessment for rainfall-induced landslides using a revised logistic regression method[J]. *Natural Hazards*, 2021, 106(1): 97-117.