

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2023.03.054.

田培, 王哲, 喻海军, 等. 鄂西北山丘区水土流失时空格局及影响因子定量评价[J]. 水土保持研究, 2023, 30(3): 76-85.

TIAN Pei, WANG Zhe, YU Haijun, et al. Quantitative Evaluation of Spatiotemporal Pattern and Influencing Factors of Soil and Water Loss in Hilly Areas of Northwestern Hubei Province[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(3): 76-85.

鄂西北山丘区水土流失时空格局及影响因子定量评价

田培¹, 王哲¹, 喻海军², 平耀东¹, 许盈¹

(1. 华中师范大学 地理过程分析与模拟湖北省重点实验室, 武汉 430079; 2. 中国水利水电科学研究院, 北京 100038)

摘要: [目的] 揭示十堰市水土流失时空格局及影响因子, 可对该区域水土保持及丹江口水库水质保护工作提供科学依据。[方法] 基于 2005—2020 年十堰市水土流失动态监测数据及监测站点长时序观测数据, 探究十堰市水土流失时空变化特征, 并借鉴 RUSLE 模型定量评价其主要影响因子。[结果] 十堰市水土流失在 2005—2011 年处于遏制阶段, 2012—2020 年处于相对稳定阶段; 2020 年十堰市中部地区水土流失呈现面积小、强度高的特点, 南部三区呈现面积广、强度低的特点, 而北部地区呈现面积广、强度高的特点。对于不同土地利用类型的径流小区, 裸地小区平均土壤侵蚀模数最高 [2 320 t/(km² · a)], 随后依次为耕地、经济林和草地小区; 3 个坡度等级 (0°~10°, 10°~20°, 20°~30°) 小区平均土壤侵蚀模数分别为 [616.73, 1 226.65, 2 080.26 t/(km² · a)], 表明坡度超过 10° 后水土流失严重加剧; 与天然植被覆盖小区相比, 紫穗槐植物篱和土坎梯田小区的水土流失明显减弱, 且紫穗槐植物篱的水土保持效果更优; 不同土地利用类型小区的土壤侵蚀模数与坡度、侵蚀性降水量之间均呈显著二元线性或指数函数关系。[结论] 十堰市水土流失的重点区域为郧西和郧阳区, 土地利用类型、坡度、植被覆盖类型及侵蚀性降水量均为该区域水土流失的重要影响因子, 研究结果可为鄂西北地区水土保持措施优化配置及侵蚀模型构建提供科学依据。

关键词: 土壤侵蚀模数; 土壤侵蚀因子; 时空分布; 径流小区; RUSLE; 十堰市

中图分类号: S157.2

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2023)03-0076-10

Quantitative Evaluation of Spatiotemporal Pattern and Influencing Factors of Soil and Water Loss in Hilly Areas of Northwestern Hubei Province

TIAN Pei¹, WANG Zhe¹, YU Haijun², PING Yaodong¹, XU Ying¹

(1. Key Laboratory for Geographical Process Analysis & Simulation, Wuhan 430079, China;

2. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

Abstract: [Objective] Disclosing the spatiotemporal pattern and influencing factors of soil erosion in Shiyan City plays an important guiding role in soil and water conservation and water quality protection of Danjiangkou Reservoir. [Methods] Based on the dynamic monitoring data of soil and water loss and long-term observation data of monitoring stations in Shiyan City from 2005 to 2020, the temporal and spatial variation characteristics of soil and water losses in Shiyan City were explored, and the main influencing factors were quantitatively evaluated by RUSLE model. [Results] Soil and water loss in Shiyan City was in the containment stage from 2005 to 2011 and in the relatively stable stage from 2012 to 2020. In 2020, the soil erosion in the central area of Shiyan City showed the characteristics of small area and high intensity. The three southern areas showed the characteristics of wide area and low intensity, while the northern area showed the characteristics of wide area and high intensity. For runoff plots with different land use types, the average soil erosion modulus of bare land plot was the highest [2 320 t/(km² · a)], followed by cultivated land, economic forest and

收稿日期: 2022-05-19

修回日期: 2022-06-23

资助项目: 国家自然科学基金项目 (41907061); 湖北省自然科学基金面上项目 (2021CFB550); 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室资助项目 (A314021402-2005)

第一作者: 田培 (1988—), 男, 湖北大悟人, 博士, 副教授, 主要从事土壤侵蚀与水土保持、水文水资源研究。E-mail: tianpei@ccnu.edu.cn

通信作者: 喻海军 (1988—), 男, 湖北大悟人, 博士, 高级工程师, 主要从事防洪减灾研究。E-mail: leiwi@gmx.com

<http://stbcyj.paperonce.org>

grassland plot. The average soil erosion moduli of the three slope grades ($0^{\circ}\sim 10^{\circ}$, $10^{\circ}\sim 20^{\circ}$, $20^{\circ}\sim 30^{\circ}$) were $616.73\text{ t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$, $1\,226.65\text{ t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$, $2\,080.26\text{ t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$, respectively, indicating that the soil erosion was seriously aggravated after the slope gradient exceeded 10° . Compared with the natural vegetation coverage area, the soil erosion rates of *Amorpha fruticosa* hedgerow and ridge terrace area were significantly reduced, and the soil and water conservation effect of *Amorpha fruticosa* hedgerow was better. There was a significant binary linear or exponential function relationship between soil erosion modulus and slope and erosive precipitation in different land use types. [Conclusion] Yunxi County and Yunyang District are the key areas of soil and water losses in Shiyan City. The land use type, slope, vegetation cover type and erosive precipitation are the important influencing factors on soil and water losses in this area. These research results can provide scientific basis for the optimal allocation of soil and water conservation measures and the construction of erosion model in northwest Hubei Province.

Keywords: soil erosion modulus; soil erosion factors; spatiotemporal distribution; runoff plot; RUSLE; Shiyan City

水土流失引起土地退化、土壤肥力下降、江河淤积及面源污染等问题,严重制约着区域社会经济发展与生态安全^[1-3]。据《2020年湖北省水土保持公报》,全省水土流失面积为 $31\,639.54\text{ km}^2$, 占国土面积 17.02% ; 其中鄂西北山地丘陵区斜倚于大巴山的余脉,以中、低山为主,谷深坡陡,降雨多而集中,是湖北省水土流失的重点区域。丹江口水库是南水北调中线工程核心水源区,而鄂西北典型山丘区十堰市国土面积的 85% 是丹江口水库的集水区^[4], 因此十堰属于中线水源保护最敏感的区域,其水土流失问题关系到丹江口水库水质安全。探究十堰市水土流失时空格局及演变特征,并定量评价水土流失影响因子,可为十堰市乃至鄂西北地区水土流失防治提供科学依据。

自然降雨条件下的野外径流小区土壤侵蚀观测法,是评价区域水土流失影响因子的常用方法^[5]。国内外学者对此展开了大量研究^[6-8]。田培等^[9]通过湖北省典型山地丘陵地区径流小区观测数据,验证了改进 RUSLE 模型的适用性,并提出了该地区水土保持措施合理配置的建议。Cerdan 等^[10]通过整理欧洲多个观测站点的多组数据,对不同土地利用类型小区的土壤侵蚀模数进行对比分析,并对欧洲的片蚀率与沟蚀率进行了推测。Maetens 等^[11]在欧洲和地中海 103 个站点、353 个径流小区共 2 093 组观测数据的基础上,综述了水土保持技术对土壤侵蚀的控制效益。Egbueri 等^[12]利用修正的通用土壤流失方程(RUSLE)和地理信息学方法,对安那布拉州土壤侵蚀风险进行了评估,以估算土壤侵蚀速率,识别脆弱侵蚀区。Luvai Allois 等^[13]概述了使用 RUSLE 模型估算土壤流失的发展里程碑。王海斌^[14]通过在河北滦平县平坊小流域布设荒草地、山杏、刺槐、油松 4 种径流小区,基于观测

数据发现鱼鳞坑整地,种植山杏、刺槐、油松等措施能够有效拦蓄径流泥沙。孙从建等^[15]采用 RUSLE 模型,定量分析了黄河中游典型小流域水土流失分布特征,为区域水土流失防治提供重要理论支撑。

十堰市的水土流失治理对南水北调中线水源区水质保护具有重要作用^[16],众多学者进行了相关研究。吴宜进等^[17]综合运用 GIS 和景观生态学方法研究了十堰市景观类型变化特征,为该市土地资源管理、环境保护和可持续发展提供参考。马方正等^[18]基于 RUSLE 综合评价了 2012—2017 年丹江口市土壤侵蚀敏感性,发现 5 年间丹江口市中度敏感、轻度敏感、不敏感区面积呈增加趋势,高度敏感和极敏感区面积呈下降趋势;疏林地和未利用地是研究区高敏感性土地利用类型。王欣等^[19]基于 2000 年、2010 年 Land TM/ETM 数据和生态系统分类体系,分析研究了区域内生态系统格局变化,研究发现 10 年间丹江口库区主要生态类型基本保持稳定。丹江口水库是南水北调中线工程水源地、国家一级水源保护区^[20],十堰市的水土流失直接影响丹江口水库水质安全^[21-22]。当前,相关研究主要集中在十堰市生态效应评价、丹江口水库环境保护等方面,对十堰市水土流失的时空分布特征及演变规律、土壤侵蚀因子定量评价方面的研究鲜见报道。

本文基于《湖北省水土保持公报》和《十堰市水土保持公报》分析近年来十堰市水土流失的时空分布特征,依据十堰市丹江口市、郧西县、竹山县和房县的 4 个水土保持观测站点:丹江口市胡家山、郧西县张家湾竹山县霍河以及房县水土保持站,共 59 个径流小区的 91 组观测数据,定量探究十堰市水土流失的影响因子,计算适用于该区域的 C 因子与 P 因子,以期

为该区域的相关研究提供理论支撑,以及为十堰市水土流失防治提供科学依据。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

十堰市地处鄂西北,汉江中上游地带,位于东经 $109^{\circ}25'—111^{\circ}35'$,北纬 $31^{\circ}31'—33^{\circ}16'$ 。全市面积约 $23\,680\text{ km}^2$,地势南北高,中间低,自西南向东北倾斜。十堰断裂南北两侧地貌形态类型有明显差异:南侧为山高谷深的低山区,阶地不发育;北侧为丘陵区,河谷两侧阶地发育^[23]。该区域为亚热带季风气候,

多年平均降水量为 769.6 mm 且多集中在6—9月。十堰市的水土流失治理与中线水质安全及鄂西北生态环境状况紧密相关。

1.2 径流小区观测数据库构建

本文搜集2017—2020年共四年的《十堰市水土保持公报》,构建十堰市野外径流小区土壤侵蚀观测数据库。观测数据来自十堰市丹江口市、郧西县、竹山县和房县的4个水土保持观测站点:丹江口市胡家山、郧西县张家湾、竹山县霍河以及房县水土保持站,共59个径流小区。其中所有站点的土壤类型均为黄棕壤,纳入本文分析的观测数据见表1。

表1 径流小区布设情况及土壤侵蚀观测样本量

径流小区 类型	水土保持 措施	坡度/(°)	侵蚀性 降水量/mm	小区 面积/ m^2	小区数量	样本量
裸地小区	无特殊水土保持措施	15,20	110.4~610.2	100	4	6
耕地小区		5,8,15,20,25,30	110.4~807.7	100	21	44
草地小区		15	578.5	100	1	1
草地小区		15,20	110.4~807.7	100	4	7
经济林小区	人工植被措施	5,8,15,20,25,30	110.4~610.2	100	13	17
紫穗槐植物篱小区		30	110.4~807.7	100	2	5
石坎梯田小区	工程措施	20	278.8	100	2	2
土坎梯田小区		5	110.4~452.6	100	3	9

1.3 参数计算

(1) 土壤侵蚀模数(SL)。土壤侵蚀模数(Soil Loss)为单位面积的土壤侵蚀量,单位为 $\text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$,是衡量土壤侵蚀程度的重要指标。在本文不同部分,土壤侵蚀模数有着不同的含义:文章第二部分土壤侵蚀模数用于衡量一个地区的土壤侵蚀程度,用于反映十堰市土壤侵蚀的时空分布特征;文中其他部分土壤侵蚀模数用于衡量特定类型径流小区的土壤侵蚀程度,用于定量探究十堰市土壤侵蚀的影响因素。对于非标准的径流小区,要得到土壤侵蚀模数还需要以径流小区面积为权重计算该类小区的平均值,本文数据库中单个径流小区的土壤侵蚀模数来源于水土保持公报的实测数据,其中径流小区面积都为 100 m^2 ,故不用考虑小区面积不同所产生的影响。

(2) 坡度因子(S)。在RUSLE方程^[24-25]中,用坡度因子S来衡量坡度对土壤侵蚀的影响。RUSLE方程的表达式^[26]为:

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

式中:A代表土壤侵蚀模数,单位 $\text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$;R代表降雨侵蚀力因子,单位 $(\text{MJ} \cdot \text{mm})/(\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})$;K代表土壤可蚀性因子,单位 $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{MJ} \cdot \text{mm}$;L,S,C和P分别代表坡长因子、坡度因子、作物管理因子和水土保持措施因子,均无量纲。

下列公式为刘宝元等^[27]提出的坡度因子公式,由于本研究涉及的径流小区坡度均在 $5^{\circ}—25^{\circ}$ 之间,故选择该公式进行转化。

$$S = \begin{cases} 10.8\sin\theta + 0.03 & \theta \leq 5^{\circ} \\ 16.8\sin\theta - 0.50 & 5^{\circ} < \theta \leq 10^{\circ} \\ 21.9\sin\theta - 0.95 & \theta > 10^{\circ} \end{cases} \quad (2)$$

(3) 改进的土壤可蚀性因子(K')。在USLE中,用土壤可蚀性因子K来衡量土壤的可蚀性^[28],指的是在标准小区上,单位降雨侵蚀力所能引起的土壤侵蚀量。利用标准径流小区观测数据,可以根据式(3)直接计算土壤可蚀性因子K:

$$K = \frac{A}{R \times LS} \quad (3)$$

本文结合研究区实际情况,以侵蚀性降水量EP代替降雨侵蚀力因子R,坡度因子S代替LS,以土壤侵蚀模数SL代替A,以改进的土壤可蚀性因子 K' 代替K,计算公式如下:

$$K' = \frac{SL}{EP \times S} \quad (4)$$

(4) 侵蚀性降水量因子(EP)。侵蚀性降水量指每年所有引发土壤侵蚀的降水总量。本文用侵蚀性降水量EP代替USLE方程中的降雨侵蚀力因子R。

(5) 植被覆盖与管理因子(C)与水土保持措施

因子(P)。在 USLE 中,用 C 因子 P 因子来共同衡量植被覆盖与管理方式对土壤侵蚀的影响,其含义分别为有植被覆盖地和水土保持措施地类的土壤侵蚀量与相同条件下裸地的土壤侵蚀量之比^[2,29]。本文将 C 因子和 P 因子合并计算。公式如下:

$$C(P)=\sum_{i=1}^n a_i \frac{SL_i}{S_i (SL_{BL}/S_{BL})} / \sum_{i=1}^n a_i \tag{5}$$

式中: SL_i 和 SL_{BL} 分别代表土壤侵蚀模数和裸地小区的土壤侵蚀模数,单位均为 $t/(km^2 \cdot a)$; S_i 和 S_{BL} 为分别代表坡度因子和裸地小区的坡度因子,均为无量纲; a_i 代表小区面积(m^2)。

(6) 土壤侵蚀削减率(SLRR)。壤侵蚀削减率(Soil Loss Reduction Rate),指一定地表覆盖类型对相同土壤类型下的裸露土地土壤侵蚀能的削减比例,能够反映指定作物、植被或水土保持措施的水土保持效益,进而为当地选择合适的土壤侵蚀治理方式提供参考。通过计算指定类型小区与同类土壤裸地小区的土壤侵蚀模数,得到对应土壤侵蚀削减率,公式如下:

$$SLRR=1-\frac{SL_{LU}}{SL_{BL}} \times 100 \% \tag{6}$$

式中:SLRR 代表土壤侵蚀削减率,无量纲; SL_{LU} 和 S_{BL} 分别代表代表某土地利用类型的土壤侵蚀模数和裸地小区的土壤侵蚀模数,单位均为 $t/(km^2 \cdot a)$ 。

2 十堰市水土流失时空格局

2.1 时间变化特征

根据 2005—2020 年开展的多次水土流失普查结果进行计算^[30-32],十堰市 2005—2020 年的分级土壤侵蚀面积见图 1 和图 2。

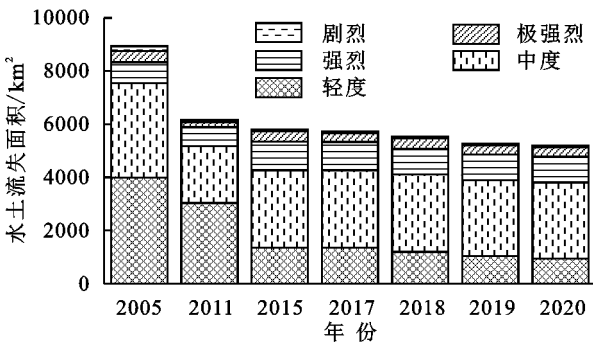


图 1 十堰市水土流失面积的时间变化特征 (侵蚀等级结构)

结果显示,2005 年以来十堰市水土流失面积逐年减少,总体呈下降趋势。2005 年全市的水土流失面积高达 8 935.67 km^2 ,这可能与步入 21 世纪以来十堰市经济迅速增长、城市化进程加快、大规模开展工程建设有关。相较于 2005 年、2011 年全市的水土流失面积为 6 165.9 km^2 ,减少了 2 769.77 km^2 ,变化率高达 30.1%,该结果说明在此 7 a 间十堰市的水土

保持工作取得了显著的成效。此外,在 2015—2019 年这五年间,十堰市水土流失面积在稳步减少的同时,其水土流失面积变化率也在稳步提升。尤其在 2018 年和 2019 年,变化率分别高达 3.11% 和 5.07%,水土流失总面积减少速度之快,这表明十堰市的水土流失治理工作(减少水土流失总体面积)越来越全面,取得的成效也越来越显著。

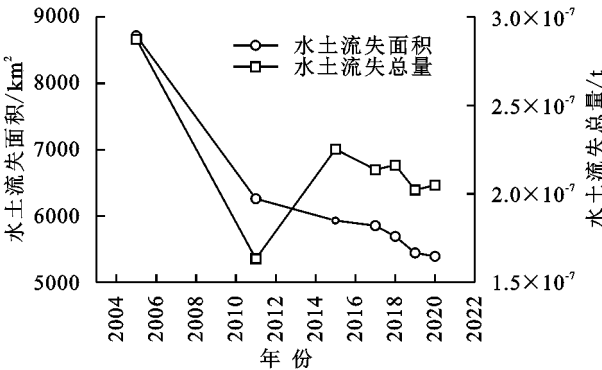


图 2 十堰市水土流失面积及总量时间变化

图 2 还展示了 2005—2020 年十堰市水土流失总量的时间变化情况。与水土流失面积逐年递减的情况不同,水土流失总量在这一时期呈现的总体变化情况为减少—增加—减少—增加—减少。这段时间内出现了 2005 年($2.75 \times 10^7 t$),2015 年($2.25 \times 10^7 t$)和 2018 年($2.18 \times 10^7 t$)3 个峰值。同 2011 年($1.76 \times 10^7 t$)相比,2015 年的水土流失总面积减少,但水土流失总量却增加,这种情况可能是十堰市轻度水土流失面积减少,高等级尤其是中度和强烈水土流失面积增加所导致的。此外,由图 1 可知 2018 年十堰市水土流失总体面积虽少,但却呈现出了强侵蚀倾向的等级结构,极强烈和剧烈等级水土流失面积均 2011 年以后的首位。可以推测,相较于 2017 年($2.16 \times 10^7 t$),2018 年的水土流失总量略微增加,出现峰值,这是低等级水土流失面积变化不大,极强烈和剧烈等级水土流失面积增加所引起的。

综合十堰市水土流失总面积和十堰市水土流失总量两组结果,2005 年以来十堰市水土流失的时间变化可归纳为以下两个阶段:(1) 2005—2011 年,水土流失遏制阶段,水土流失面积和水土流失总量均呈下降趋势;(2) 2011—2020 年,水土流失持续稳定阶段,水土流失总面积基本不变,但等级结构向强侵蚀高等级变化,且水土流失总量呈上升趋势。结果显示,从水土流失总面积的角度来看,近年来处于最低水平,十堰市此方面水土保持工作取得了较显著的成效;但从水土流失总量的角度出发,2011 年处于最低水平,2011 年以后,原先水土流失区域的侵蚀程度加剧,需要采取有效的水土保持措施。

2.2 空间布局及变化特征

2020年,十堰市水土流失面积为 $5\,196.66\text{ km}^2$,占国土面积的 21.95% ,共侵蚀土壤 $2.09\times 10^7\text{ t}$,土壤侵蚀模数为 $880.69\text{ t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$,属于轻度侵蚀。根据2020年调查的数据^[33],分别计算十堰市各行政区

的水土流失面积(及其占全市的比例)、水土流失总量(及其占全市的比例)、水土流失面积占国土面积比例和土壤侵蚀模数,以及2017—2020年调查的空间可视化结果(图3)可以展示十堰市水土流失的空间格局。

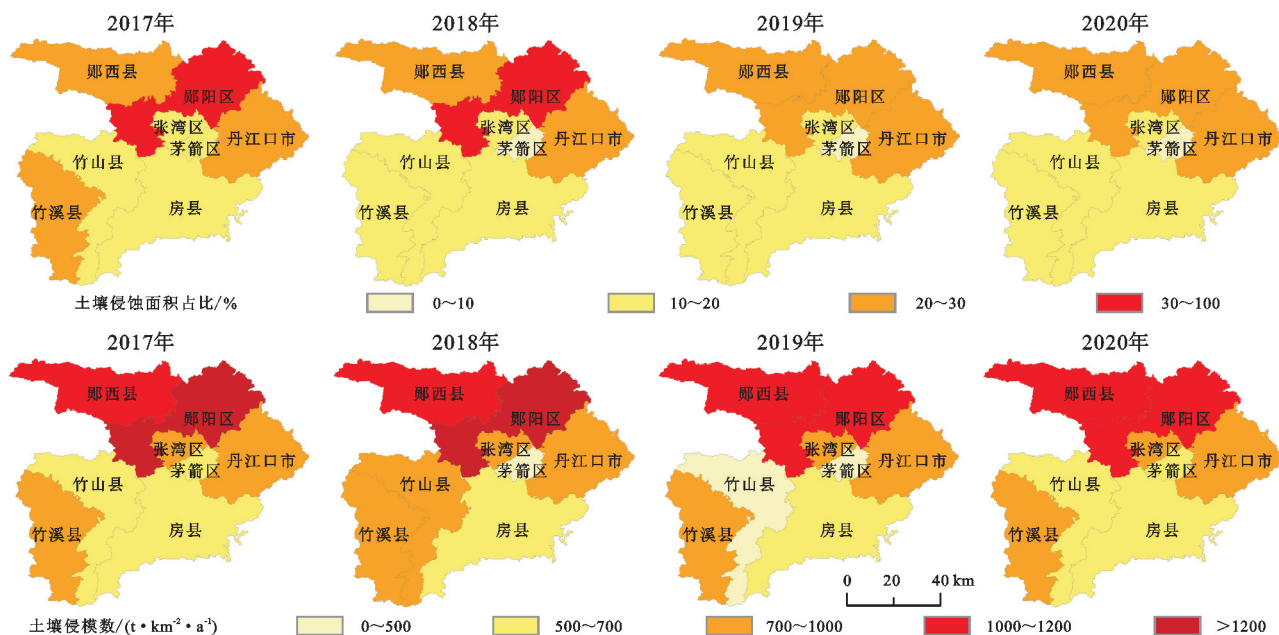


图3 十堰市各行政区的水土流失面积占比(与该区国土面积的比值)与土壤侵蚀模数。

由十堰市近年来水土流失时间变化特征和水土流失空间变化可视化结果(图3)可知,从2017年以来十堰市水土流失程度总体上呈减轻趋势。根据水利部发布的土壤侵蚀强度分级标准^[34],2017—2020年十堰市各区的土壤侵蚀强度大部分属于轻度等级,总体上来看,十堰市水土流失的空间布局有以下特点:

(1) 总体呈现出北重南轻的特点。水土流失面积占国土面积比例和土壤侵蚀模数能够反映单位面积水土流失的严重程度,2020年,北部三区(郧西县、郧阳区、丹江口市)、南部三区(竹山县、竹溪县、房县)和中部两区(张湾区、茅箭区)的水土流失面积占国土面积比分别为 27.24% 、 17.26% 和 14.30% ;北部三区、南部三区和中部两区的平均土壤侵蚀模数分别为 $1\,070.88\text{ t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$ 、 $711.50\text{ t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$ 、 $660.82\text{ t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$ 。由此可见,北部地区的水土流失严重程度明显高于中部和南部地区。

(2) 2020年,十堰市北部三区、南部三区和中部两区的水土流失面积分别占全市水土流失总面积的 55.00% 、 41.20% 和 3.29% ;北部三区、南部三区和中部两区的水土流失总量分别占全市水土流失总量的 53.88% 、 42.33% 和 3.79% 。北部地区土壤侵蚀程度严重、面积占比高,对全市水土流失的影响最大;南部地区虽然侵蚀程度相对较低,但总面积广,仍对全市水土流失造成了一定影响;中部地区由于面积小,占比不高。

(3) 2017—2020年,十堰市水土流失的空间布局并没有发生显著变化,总体上呈现出北重南轻的分布,其中郧西县和郧阳区最为严重。2020年郧阳区和郧西县的土壤侵蚀模数分别为第一位和第二位。二者总体的水土流失面积和水土流失总量占全市的 39.03% 、 41.19% 。因此郧西县和郧阳区的水土流失问题应该受到重点关注。此外,受丹江口水库战略性地位的影响,丹江口市的水土保持工作也必须稳步推进。

3 基于径流小区观测数据的十堰市水土流失定量评价

3.1 土地利用类型对水土流失的影响

本次搜集到丹江口胡家山站以及郧西县水土保持试验站天然植被覆盖检测数据共75组(2010—2019),根据土地利用类型分为裸地、耕地、草地、经济林4类(图4),均未施加任何工程措施和耕作措施,模拟正常土地利用条件下的土壤侵蚀情况。

由图4看出,在裸地、耕地、草地和经济林4类土地利用类型中,裸地的平均土壤侵蚀模数最高,高达 $2\,320\text{ t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$,在水利部发布的土壤侵蚀强度分级^[34]中属中度侵蚀等级 $500\text{ t}/(\text{km}^2\cdot\text{a}) < \text{SL} < 2\,500\text{ t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$ 。其后依次为耕地、经济林和草地,草地和经济林二者相差不大且均低于全部试验的

总平均值[1 276.715 t/(km² · a)]。由此数据显示可得,裸地会造成严重的水土流失,而在耕地、草地、经济林这 3 种土地利用类型中,草地和经济林的水土保持效益最好,耕地相对较差。

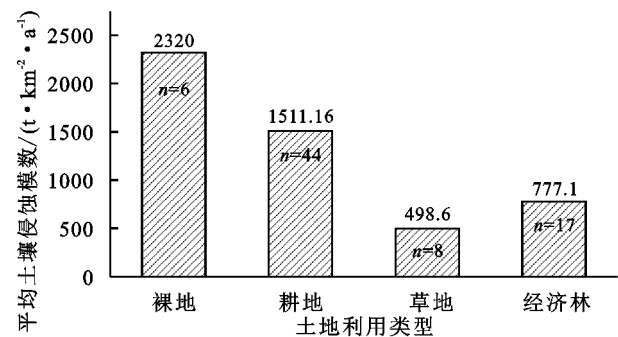


图 4 不同土地利用类型径流小区的土壤侵蚀模数

3.2 坡度对水土流失的影响

本数据库中径流小区的坡度范围是 5°~30°, 将其分为 3 个等级: A(0°≤坡度≤10°), 15 组观测数据; B(10°<坡度<20°), 7 组观测数据; C(20°≤坡度≤30°), 23 组观测数据。统计不同坡度等级的径流小区观测结果, A, B, C 这 3 个等级的平均土壤侵蚀模数分别为 (616.73±413.31) t/(km² · a), (1 226.65±1 314.55) t/(km² · a), (2 080.26±1 648.64) t/(km² · a), B, C 两个等级均远高于 A 等级的土壤侵蚀模数。当坡度超过 10°时, 水土流失会严重加剧, 因此对 15°以上的山坡应当格外关注。

图 5 展示了 9 个不同坡度—土地利用类型组合的平均土壤侵蚀模数。因为观测数据不足的原因, 裸地只和 B 等级相组合。水土流失程度最高的组合方式为裸地—B, SL 高达 2 791.49 t/(km² · a), 水土流失程度最低的组合方式为草地—B, 仅为 423.89 t/(km² · a)。草地—C[1 021.57 t/(km² · a)]也是低于其他 C 等级的土地类型。由此可见, 相较于其他土地类型, 草地的水土保持效益最好。

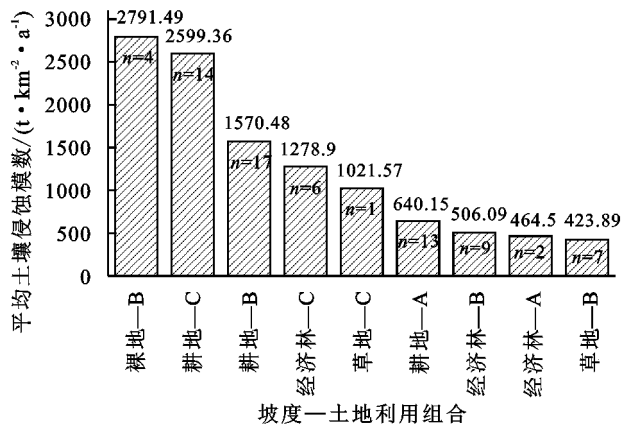


图 5 不同坡度—土地利用类型组合的土壤侵蚀模数

不同坡度等级下的耕地水土流失程度有较大差距, 耕地—B 和耕地—C 组合的土壤侵蚀模数要远高于耕地—A 组合, A, B 坡度等级下的经济林水土流失程度相差不大, 但是经济林—C 组合的土壤侵蚀模数(1 278.9 t/(km² · a))也要高于经济林—A 和经济林—B 组合。C 坡度等级下的其他两个土地利用类型 SL 值也均在 1 000 t/(km² · a) 以上, 其中组合方式耕地—C 的 SL 值高达 2 599.36 t/(km² · a), 接近于水土流失程度最高的裸地—B。可见, 当坡度超过 20°时, 水土流失同样会严重加剧。

SL 和坡度因子 S 的 pearson 相关性分析表明, 对 3 种土地利用类型(耕地、草地、经济林)而言, 二者之间均呈显著相关关系。其中草地的 pearson 相关系数最高, 为 0.74, 表现为较强的正相关; 而耕地和经济林的 pearson 相关系数分别为 0.637, 0.531, 也表现为较强的正相关。坡度因子 S 是十堰市水土流失的关键因子之一, 坡度对草地的影响比较强烈, 相比草地而言, 经济林受坡度的影响略弱。图 6 为 3 种土地利用类型小区(耕地、草地、经济林)坡度的正弦值(S')和 SL 的拟合结果, 其中, 耕地的指数函数拟合效果最好, 草地和经济林的线性拟合效果最好。

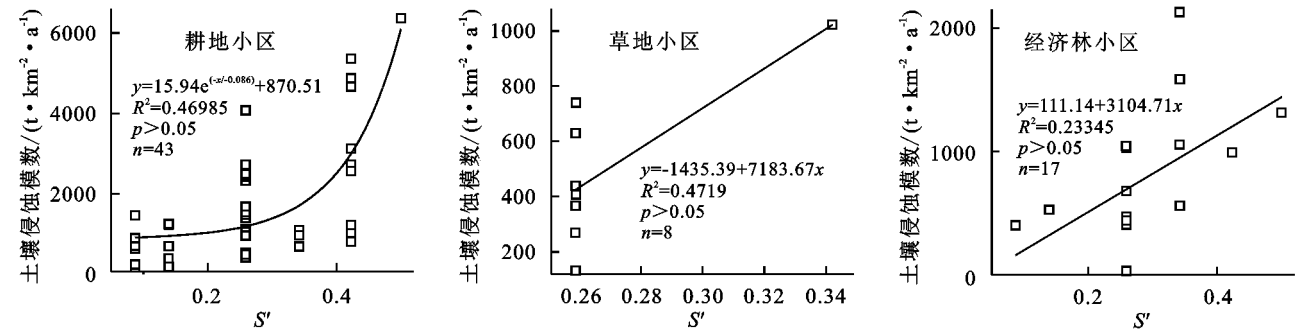


图 6 天然植被覆盖下土壤侵蚀模数与坡度的拟合结果

3.3 水土保持措施对水土流失的影响

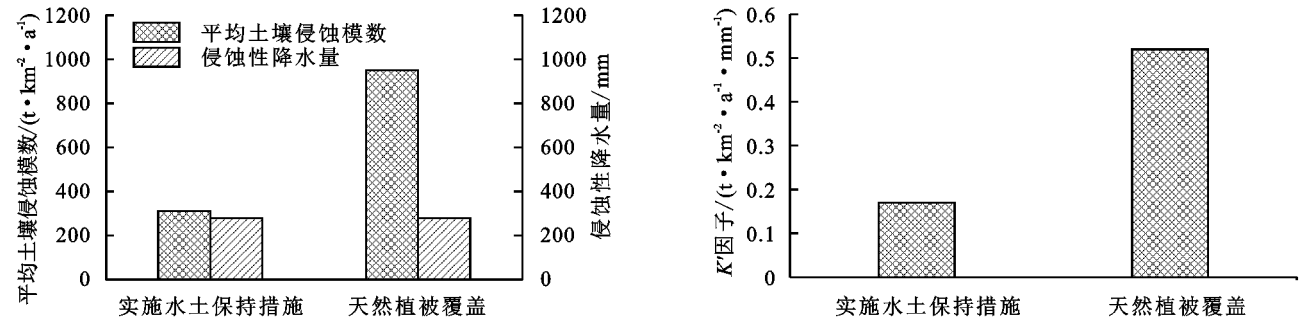
除了 4 个土地利用类型的 75 组天然植被覆盖径流小区观测数据外, 数据库还载入了 17 组实施水土保持措施的径流小区观测数据, 均来自丹江口市水土

保持观测站。其中包含土坎梯田这类工程措施, 以及紫穗槐植物篱这一类植被措施, 土壤类型均为黄棕壤。此处用各小区的土壤侵蚀模数除以坡度正弦值来消除坡度不同带来的影响。

对十堰市丹江口站实施了水土保持措施的径流小区(石坎梯田、黄棕壤、20°)和未实施水土保持措施的径流小区(无水土保持措施、黄棕壤、20°)进行统计,并计算SL,EP, K' 因子(图 7)。图 7 发现,实施了水土保持措施的径流小区和未实施水土保持措施的径流小区的 EP 基本相同,但未实施水土保持措施的小区 SL 和 K' 因子

值显著高于实施了水土保持措施的小区。

由表 2 看出,在同等坡度和侵蚀性降水量的条件下,紫穗槐植物篱的 SL 低于土坎梯田,且 K' 因子显著小于土坎梯田,据土壤侵蚀强度分级标准,二者均属于微度侵蚀。由此可见,紫穗槐植物篱的水土保持效益要优于土坎梯田。



注:从左至右两张图的柱形依次为实施了水土保持措施的 SL,EP, K' 因子对应值(样本数 $n=2$)和未实施水土保持措施的自然植被覆盖的 SL,EP, K' 因子对应值(样本数 $n=2$)。

图 7 有无水土保持措施的径流小区观测数据对比

表 2 不同水土保持措施小区土壤侵蚀观测数据及因子取值

水土保持措施类型	侵蚀性降水量/mm	K' 因子/ ($t \cdot km^{-2} \cdot a^{-1} \cdot mm^{-1}$)	C 因子	总面积/ m^2	侵蚀级别
紫穗槐植物篱	191.6±71.12	0.61±0.12	0.18±0.04	100	微度
土坎梯田	19.16±71.12	1.64±0.54	0.59±0.39	300	微度

3.4 植被覆盖与管理因子 C

根据水利部发布的土壤侵蚀强度分级标准,裸地小区属于中度侵蚀,耕地小区、草地小区和经济林小区均属于轻度侵蚀(表 3)。与 SL 不同,4 种土地利用类型小区的 EP 相差不大。裸地小区的 K' 因子远大于其他 3 种土地利用类型小区,并且草地和经济林

小区的 K' 因子值显著小于耕地小区。同样,耕地、草地和经济林小区的 C 因子分别为 0.17,0.04,0.07,均显著小于 1。结果表明裸地小区土壤对侵蚀最为敏感,耕地、草地和经济林能够显著降低土壤可蚀性、减少土壤侵蚀量,其中,草地和经济林的水土保持效益最好。

表 3 不同土地利用类型径流小区的侵蚀性降雨量与水土流失观测数据

土地利用类型	侵蚀性降水量/mm	K' 因子/ ($t \cdot km^{-2} \cdot a^{-1} \cdot mm^{-1}$)	C 因子	总面积/ m^2	侵蚀级别
裸地	313.08±169.51	3.01±4.81	1±0.95	600	中度
耕地	411.52±210.27	1.2±1.14	0.17±0.12	4400	轻度
草地	397.39±219.97	0.45±0.44	0.04±0.02	800	轻度
经济林	328.04±137.73	0.58±0.36	0.07±0.05	1700	轻度
总计	382.83±197.98	1.12±1.76		7500	轻度

在耕地、草地和经济林 3 种土地利用类型下,分别划分了 3 种作物类型和 5 种植被类型(见图 8)。在耕地小区中,玉米的平均土壤侵蚀模数最高[1 476.52 $t/(km^2 \cdot a)$],其后依次为花生[1 460.25 $t/(km^2 \cdot a)$]、黄豆[1 022.8 $t/(km^2 \cdot a)$],三者都达到了轻度侵蚀水平。在经济林小区中,枇杷[641.7 $t/(km^2 \cdot a)$]和柏树[631.7 $t/(km^2 \cdot a)$]属于轻度侵蚀,茶叶和金银花的土壤侵蚀模数仅有 28.8 $t/(km^2 \cdot a)$,24.9 $t/(km^2 \cdot a)$,均属于微度侵蚀[$<500 t/(km^2 \cdot a)$]。种植苜蓿的草

地小区 SL 为 439.4 $t/(km^2 \cdot a)$,也属于微度侵蚀。图 8 显示,对于黄棕壤而言,经济林用地类型中的茶叶和金银花的侵蚀削减率最高(99%),其次是草地用地类型中的苜蓿(84%),耕地用地类型中的玉米和花生最低(47%,48%)

3.5 侵蚀性降水量因子 EP

SL 和侵蚀性降水量因子 EP 的 Pearson 相关性分析表明,对于未实施水土保持措施(耕地)和水土保持措施(紫穗槐植物篱、土坎梯田)小区而言,二者之间均呈显著相关关系。其中土坎梯田小区的 Pearson 相关

系数最高,为 0.984,表现为极强的正相关;其次为紫穗槐植物篱小区,相关系数为 0.981;而耕地 Pearson 相关系数为 0.342,具有弱相关性。侵蚀性降水量因子 EP 是十堰市水土流失的关键因子之一,相比于耕地而言,侵蚀性降水量因子对实施了水土保持措施的小区影响更为强烈。由此可见,相对于无水土保持措施小区,有措施小区的 Pearson 相关系数普遍更高,其 SL 对 EP 的响应更为强烈。图 9 为土坎梯田和紫穗槐植物篱小区 SL 与 EP 的拟合关系,对于紫穗槐植物篱小区而言,线性拟合效果最佳;而土坎梯田小区的指数函数拟合效果最佳。

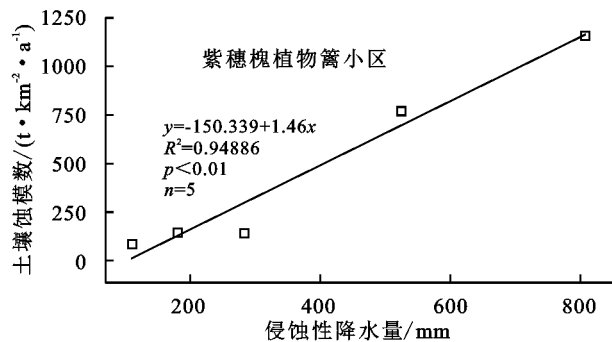


图 9 水土保持措施下土壤侵蚀模数与侵蚀性降水量的拟合结果

4 讨论

4.1 不同因素对十堰市水土流失影响机制

本研究发现裸地小区的 SL, K' 因子处于较高水平,其原因不难理解,裸地小区表面没有任何植被覆盖,受到的降雨冲击力和径流的冲蚀力度更大,同时因为裸地土壤内部缺少根系的固定作用以及土壤团聚结构较差等原因,裸地小区更容易发生水土流失。此外和耕地小区相比,草地和经济林的水土保持效果更好,其原因可能是该类小区土壤表面覆盖枯落物后,阻碍了土壤表面蒸发水分,土壤蒸发量减少,枯枝落叶层腐烂后,形成腐殖质和有机质,参与土壤团粒结构的形成,特别是还能组合粗粒土壤和增加粘重土壤的孔隙度,使前者持水量增加,使后者易于通气透水,促进雨水的迅速下渗,从而减少了地表径流对土壤的冲刷^[35]。因此退耕还林还草是防治水土流失的重要举措。

紫穗槐植物篱小区和土坎梯田小区的 SL 与 EP 的相关分析表明,实施水土保持措施能够有效防止水土流失,该作用在 EP 较小时十分明显,但随着 EP 增加,水土保持措施的减蚀效应减弱。研究发现,当坡度超过 10° 时水土流失会显著加剧。其原因可能是随着坡度的增加,土壤内部结构因为重力的影响而发生变化,使其阻碍径流的作用受到削弱^[36]。此外 Koulouri 等^[37]研究表明随着坡度的增加,对土壤侵蚀防护作用较强的多年生乔木覆盖度降低,而相比之下防护作用较弱

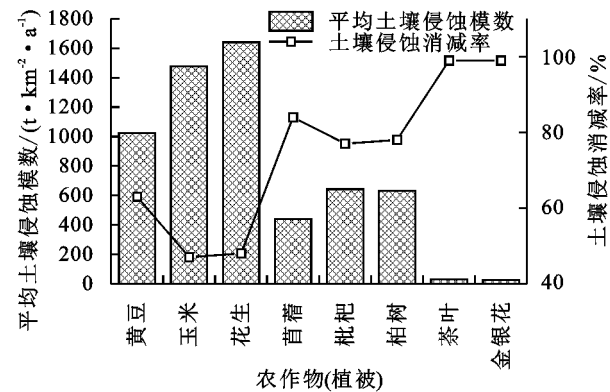
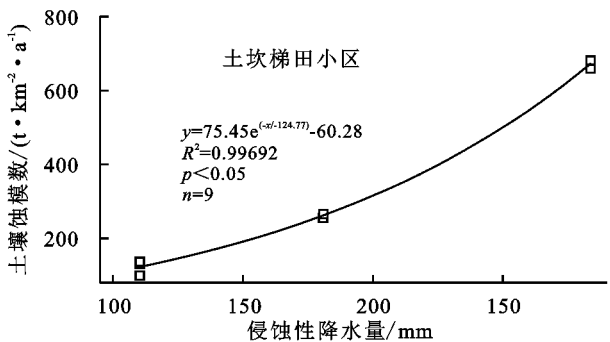


图 8 不同农作物(植被)类型小区平均土壤侵蚀模数和土壤侵蚀削减率



的低矮灌木与草本所占比例随之上升。

4.2 改进土壤可蚀性因子 K' 的指示意义

土壤可蚀性因子 K 代表了土壤性质对水土流失的影响,与 SL 和 R 因子等不同, K 因子与其他因子之间并不是完全独立的,会受到地表覆盖的影响。使用仪器测定法等测得的 K 值虽然是由土壤本身性质决定,但是地表覆盖等因素对它产生的间接交互作用也不可忽略^[2]。本文所计算采用的改进的土壤可蚀性因子 K' 也是代表了土壤内部性质与 C/P 因子共同组成的复杂交互作用的整体^[2]。通过对丹江口水土保持观测站数据进行拟合,发现 K' 因子和土壤侵蚀模数存在良好的线性相关关系(图 10)。因此可见, K' 因子在一定程度上可以显著代表土壤性质与植被覆盖对水土流失的交互影响。

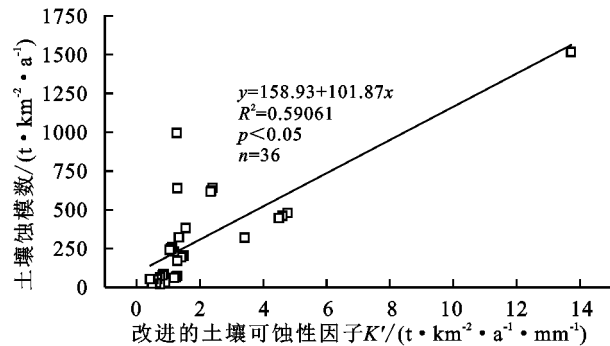


图 10 K' 因子与土壤侵蚀模数的拟合结果

4.3 十堰市水土流失防治建议

在 2017—2020 年,十堰市水土流失空间格局总

体表现为北重南轻,因此北部三区(郧西县、郧阳区、丹江口市)的水土保持状况需要重点关注。尤其是丹江口市,丹江口水库是南水北调中线工程的水源地^[38],当地水土流失严重会导致水库水质变差、养分流失以及污染物质输移等问题。切实加强库区乃至整个汉江流域的生态环境保护,特别防治丹江口水库水源区水土流失,对保障南水北调中线工程的顺利实施和更好地发挥效益具有十分重要的意义^[39-40]。丹江口水库库区的土地利用类型以耕地为主,长此以往这可能导致库水总氮浓度增加,威胁水库水质安全,因此建议对丹江口水库周边的林地草地进行保护管理、优化土地利用结构、进一步实施退耕还林还草政策;坡度和植被覆盖是影响流域水土流失的重要原因^[41],因此建议加大对丹江口水库周边的荒坡处理的力度,减少土地裸露;在周边不同的土壤类型土地上种植针对性的农林作物也能对丹江口水库周边的水土流失发挥抑制作用。

十堰市水土流失的重点区域为郧西县和郧阳区,这与张玉娇等^[42]的研究结果一致。研究发现坡度超过 10° 后水土流失严重加剧,且裸地的平均土壤侵蚀模数最高 $[2\ 320\ \text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})]$,随后依次为耕地、经济林和草地。因此针对郧西县和郧阳区等重点区域 10° 以上的陡坡,加大荒坡处理、退耕还林还草等措施的实施力度能够有效遏制水土流失。实施水土保持措施能够显著降低十堰市的水土流失程度,其中石坎梯田和紫穗槐等植物篱等措施具有代表性,值得十堰市各地区因地制宜采纳实施;此外,本研究还发现金银花和茶叶对十堰市黄棕壤有着很高的侵蚀削减率,都达到了99%,因此在黄棕壤类型的土地上种植针对性的作物也可起到较好的水土流失抑制效果。

5 结论

本文基于十堰市水土保持公报及十堰市4个水土保持观测站点的观测数据,定量分析了土地利用、坡度、水土保持措施、植被覆盖与侵蚀性降水量对十堰市水土流失的影响。主要结论如下:

(1) 2005年以来,十堰市水土流失的时间变化特征可以归纳为两个阶段:2005—2011年,水土流失遏制阶段,水土流失面积和水土流失总量均呈下降趋势;2011—2020年,水土流失持续阶段,水土流失面积稳步小幅度减小,并没有发生较大变化,但等级结构向强侵蚀高等级变化,侵蚀总量呈上升趋势。

(2) 2020年十堰市水土流失的空间布局特征:2020年十堰市水土流失总量为 $2.09 \times 10^7\ \text{t}$ 。南部三区(竹山县、竹溪县、房县)的水土流失则更趋向于面

积广、等级低;北部三区(郧西县、郧阳区、丹江口市)的水土流失面积更广,等级更高;中部地区(张湾区、茅箭区)的水土流失更趋向于面积小、等级高;十堰市水土流失的重点区域为郧西县和郧阳区。

(3) 对于不同土地利用类型小区,裸地的平均土壤侵蚀模数最高 $[2\ 320\ \text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})]$ 。随后依次为耕地、经济林和草地;3个坡度等级($0^\circ \sim 10^\circ$, $10^\circ \sim 20^\circ$, $20^\circ \sim 30^\circ$)径流小区平均土壤侵蚀模数分别为 $616.73, 1\ 226.65, 2\ 080.26\ \text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$,表明坡度超过 10° 后水土流失严重加剧;不同土地利用类型小区的土壤侵蚀模数与坡度、侵蚀性降水量之间均呈显著的二元线性关系与指数函数关系。

(4) 与天然植被覆盖小区相比,紫穗槐植物篱和土坎梯田小区的水土流失程度明显减弱,且紫穗槐植物篱的水土保持效果更优,表明以紫穗槐为代表的植物篱措施可以在鄂西北进一步推广;相对于无水土保持措施的小区,有措施小区的土壤侵蚀模数对侵蚀性降水量的响应更为强烈,其中紫穗槐植物篱小区和土坎梯田小区的土壤侵蚀模数和侵蚀性降水量之间分别呈显著线性与指数函数关系。

参考文献:

- [1] 刘国华,傅伯杰,陈利顶,等.中国生态退化的主要类型、特征及分布[J].生态学报,2000,20(1):14-20.
- [2] 韩旭,田培,黄建武,等.基于2009—2018年径流小区观测数据的武汉市土壤侵蚀因子定量评价[J].生态学报,2021,41(10):3878-3890.
- [3] 欧阳志云,王效科,苗鸿.中国生态环境敏感性及其区域差异规律研究[J].生态学报,2000,20(1):10-13.
- [4] 徐文佳,李天宏,贾振邦,等.十堰市非点源污染状况及其区域分布特征[J].北京大学学报:自然科学版,2010,46(4):667-673.
- [5] 姜娜,邵明安.黄土高原小流域不同坡地利用方式的水土流失特征[J].农业工程学报,2011,27(6):36-41.
- [6] Xiong Muqi, Sun Ranhao, Chen Liding. Effects of soil conservation techniques on water erosion control: A global analysis[J]. Science of the Total Environment, 2018,645(15):753-760.
- [7] Zhao Jianlin, Yang Zhiqiang, Govers Gerard. Soil and water conservation measures reduce soil and water losses in China but not down to background levels: Evidence from erosion plot data[J]. Geoderma, 2019,337(1):729-741.
- [8] Tian Pei, Gong Yuwei, Hao Fanghua, et al. Comparing erosion and rill development processes by simulated up-slope inflow in two red soils from subtropical China[J]. Catena, 2022,213:106139.
- [9] Tian Pei, Zhu Zhanliang, Yue Qimeng, et al. Soil erosion assessment by RUSLE with improved P factor and

- its validation; Case study on mountainous and hilly areas of Hubei Province, China[J]. International Soil and Water Conservation Research, 2021,9(3):433-444.
- [10] Cerdan O, Govers G, Le Bissonnais Y, et al. Rates and spatial variations of soil erosion in Europe: A study based on erosion plot data[J]. Geomorphology, 2010,122(1/2):176-177.
- [11] Maetens W, Poesen J, Vanmaercke M. How effective are soil conservation techniques in reducing plot runoff and soil loss in Europe and the Mediterranean? [J]. Earth-Science Reviews, 2012,115(1/2):21-36.
- [12] Egbueri Johnbosco C, Igwe Ogbonnaya, Ifediegwu Stanley I. Erosion risk mapping of Anambra State in southeastern Nigeria: soil loss estimation by RUSLE model and geoinformatics[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 1435-9529, 2022,81(3):1-15.
- [13] Allois L, John O, Christian O, et al. Soil Loss Assessment Using the Revised Universal Soil Loss Equation(RUSLE) Model[J]. Applied and Environmental Soil Science, 2022,2022(4):1-14.
- [14] 王海斌.不同水土保持措施下径流小区降雨与产流产沙关系研究[J].水土保持研究, 2011,18(5):63-66.
- [15] 孙从建,林若静,郑振婧,等.基于水土流失经验模型(RUSLE模型)的黄河中游典型小流域水土流失特征分析[J].西南农业学报, 2022,35(1):200-208.
- [16] 纪念.十堰市水土保持生态建设刍议[J].亚热带水土保持, 2006,18(4):35-36,51.
- [17] 吴宜进,奚悦,涂文娜,等.生态敏感区景观安全评价与时空变化研究:以湖北省十堰市为例[J].人民长江, 2018,49(23):32-37.
- [18] 马方正,于兴修,胡砚霞,等.丹江口市土壤侵蚀敏感性时空变化特征[J].农业资源与环境学报, 2021,38(6):999-1009.
- [19] 王坎,吴兴华,文威,等.湖北省丹江口库区生态系统格局遥感监测评估[J].环境科学与技术, 2020,43(S2):250-254.
- [20] 李学敏,文力,刘琛,等.丹江口水库库区及周边地区水土流失空间分布特征及影响因素[J].湖南农业科学, 2018(9):54-59.
- [21] 李建,尹炜,贾海燕,辛小康,王超.汉江中下游水华防控生态调度研究[J/OL].湖泊科学, 2022,34(3):740-751.
- [22] 井柳新,马乐宽,续衍雪,等.“十四五”丹江口库区及上游生态环境保护思路研究[J].环境保护, 2021,49(14):59-62.
- [23] 十堰市水利和湖泊局.十堰市水土保持规划(2018—2030年)[R].十堰市水利和湖泊局, 2018.
- [24] Suryawanshi Ashwini, Nema Anupam Kumar, Jaiswal Rahul Kumar, et al. Identification of Soil Erosion Prone Areas of Madhya Pradesh using USLE/RUSLE[J]. Journal of Agricultural Engineering, 2022,58(2):178-191.
- [25] Saoud, Mohammed, Meddi, et al. Mapping of Erosion Using USLE, GIS and Remote Sensing in Wadi El Hachem Watershed (Northern Algeria): Case Study [J]. Journal of the Indian Society of Remote Sensing, 2022,50(3):569-581.
- [26] Petr Karásek, Michal Pochop, Jana Konečná, et al. Comparison of the Methods for LS Factor Calculation when Evaluating the Erosion Risk in a Small Agricultural Area Using the USLE Tool[J]. Journal of Ecological Engineering, 2022,23(1):100-109.
- [27] 王秀颖,刘和平,刘宝元.变雨强人工降雨条件下坡长对径流的影响研究[J].水土保持学报, 2010,24(6):1-5.
- [28] 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.
- [29] 吴发启,林青涛,路陪,等.我国坡地土壤侵蚀影响因子C的研究进展[J].中国水土保持科学, 2015,13(6):1-11,159.
- [30] 张岩,袁建平,刘宝元.土壤侵蚀预报模型中的植被覆盖与管理因子研究进展[J].应用生态学报, 2002,13(8):1033-1036.
- [31] 王海,黄跃飞,赵泉,等.2009—2019年湖北省土壤侵蚀时空变化分析[J].中国水土保持, 2021(6):43-46.
- [32] 芦婕.湖北省2005—2015年水土流失时空变化分析[D].武汉:华中师范大学, 2019.
- [33] 湖北省水利厅.2020年湖北省水土保持公报[R].武汉:湖北省水利厅, 2021.
- [34] 中华人民共和国水利部. SL 190-2007, 土壤侵蚀分类分级标准.北京:中国水利水电出版社, 2008.
- [35] 李险峰,郭昭滨.森林水土保持功能与生态效益评价[J].防护林科技, 2018,8(179):62-63.
- [36] Sonia Gannouni, Hamdi Kahri, Abir Marzouki, et al. The comparison between the Universal Soil Loss Equation(USLE) and the HEUSCH model for the assessment and mapping of water erosion of the Sidi Saad dam watershed in Tunisia[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2022,15(6):1-17.
- [37] M. Koulouri, Chr. Giourga. Land abandonment and slope gradient as key factors of soil erosion in Mediterranean terraced lands[J]. Catena, 2006,69(3):274-281.
- [38] 王新才,吴敏.关于加强南水北调中线水源地保护和管理的思考[J].长江科学院院报, 2019,36(9):1-5.
- [39] 白亮,许全喜,董炳江.丹江口水库蓄水以来汉江中下游河床冲淤变化研究[J].人民长江, 2021,52(12):15-20.
- [40] 左建,林云发.丹江口水库兴利效益影响因素分析[J].长江科学院院报, 2022,39(5):22-27.
- [41] 阮舒荷,庄艳华,王立辉,等.汉江中下游流域土壤侵蚀高风险期及优先控制区协同分析[J].长江流域资源与环境, 2019,28(6):1491-1501.
- [42] 张玉娇,曾杰,陈万旭,等.基于适应性循环的丹江口库区生态风险评估[J].水土保持研究, 2022,29(1):349-360.