

DOI: 10.5846/stxb202006291690

韩旭, 田培, 黄建武, 王珂珂, 王瑾钰, 刘目兴, 潘成忠. 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. 生态学报, 2021, 41(10): 3878-3890.

Han X, Tian P, Huang J W, Wang K K, Wang J Y, Liu M X, Pan C Z. Quantitative evaluation of soil erosion factors in Wuhan based on observation data of runoff plots during 2009—2018. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(10): 3878-3890.

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

韩旭^{1,2}, 田培^{1,2,*}, 黄建武^{1,2}, 王珂珂^{1,2}, 王瑾钰^{1,2}, 刘目兴^{1,2}, 潘成忠³

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 华中师范大学城市与环境科学学院, 武汉 430079

3 北京师范大学水科学研究院, 北京 100875

摘要: 武汉市位于桐柏山大别山国家级水土流失预防区与幕阜山省级水土流失治理区之间, 其土壤侵蚀问题对长江中游生态安全具有重要影响。基于 2009—2018 年武汉市蔡店、磨盘山、西湖流域、燕子山等 4 个水土保持监测站 35 个径流小区的观测数据 (139 组), 定量分析了坡度、侵蚀性降水量、土地利用和水土保持措施对土壤侵蚀的影响, 并借鉴 USLE 模型识别土壤侵蚀主导因子。结果表明, 裸地小区的平均土壤侵蚀模数最高 ($2597.57 \text{ t km}^{-2} \text{ a}^{-1}$), 其次是经济林、草地和耕地小区且三者的侵蚀模数相差不大, 土壤侵蚀模数与侵蚀性降雨量、坡度之间呈显著二元线性或幂函数关系; 与天然植被小区相比, 植物篱 (草带、茶树、紫穗槐) 及石坎梯田措施均显著降低了土壤侵蚀模数, 其中植物篱措施的效果更优, 且草带植物篱小区的侵蚀模数最低 ($46.13 \text{ t km}^{-2} \text{ a}^{-1}$); 3 个坡度等级 ($0-10^\circ$ 、 $10-20^\circ$ 、 $20-25^\circ$) 小区平均侵蚀模数分别为 892.07 、 911.15 、 $2087.60 \text{ t km}^{-2} \text{ a}^{-1}$, 表明坡度超过 20° 后土壤侵蚀严重加剧; 武汉市土壤侵蚀的主导因子为水土保持措施、植被覆盖与管理因子。研究结果可为武汉市水土保持措施合理布设及侵蚀预报模型的完善提供依据, 基于径流小区长期观测数据的土壤侵蚀定量研究值得进一步深入。

关键词: 土壤侵蚀模数; 径流小区; 土壤侵蚀因子; 水土保持措施; USLE; 武汉市

Quantitative evaluation of soil erosion factors in Wuhan based on observation data of runoff plots during 2009—2018

HAN Xu^{1,2}, TIAN Pei^{1,2,*}, HUANG Jianwu^{1,2}, WANG Keke^{1,2}, WANG Jinyu^{1,2}, LIU Muxing^{1,2}, PAN Chengzhong³

1 Key Laboratory for Geographical Process Analysis & Simulation of Hubei Province, Central China Normal University, Wuhan 430079, China

2 College of Urban and Environmental Sciences, Central China Normal University, Wuhan 430079, China

3 College of Water Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

Abstract: Wuhan city is located between the National Soil and Water Loss Prevention Area of Dabie Mountain and the Provincial Soil and Water Loss Control Area of Mufu Mountain. The soil erosion issue has an important impact on the ecological security of the middle reaches of the Yangtze River. This study quantitatively analyzed the effects of slope, erosive precipitation, land use, soil and water conservation measures on soil erosion, based on the observation data (139 groups) of 35 runoff plots from four monitoring sites including Caidian, Mopanshan, Xihu, and Yanzishan in Wuhan during 2009—2018. Meanwhile, dominant soil erosion factors were identified using the revised USLE model. The results showed that for

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (41907061); 长江科学院水利部山洪地质灾害防治工程技术研究中心研究基金资助项目 (CKWV2019761/KY); 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室基金资助项目 (A314021402-2005)

收稿日期: 2020-06-29; 网络出版日期: 2021-04-21

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: tianpei@mail.ccnu.edu.cn

the plots with different land use types, the average soil loss of bare land was the highest ($2597.57 \text{ t km}^{-2} \text{ a}^{-1}$), followed by economic forest, grassland, and cultivated plots, and the average soil loss of which were close. There was a significant binary linear or power function relationship between the soil loss, erosive precipitation and slopes. The crop / vegetation types with the highest soil loss reduction rate in granite red soil, yellow brown soil and brown earthl plots of Wuhan City were respectively Chestnut, artificial secondary forest and grassland. Compared with natural vegetation-covered plots, both hedgerows (grass strips, tea plants, *amorpha fruticosa*) and rock ridge terraces significantly reduced the soil loss, and these soil and water conservation measures had stronger soil erosion control effect under lower erosive precipitation. In addition, the effect of hedgerow measures was better than rock terraces, and soil loss of the grass strip hedgerow plots was the lowest ($46.13 \text{ t km}^{-2} \text{ a}^{-1}$). The average soil loss of the plots with slopes of three ranges ($0-10^\circ$, $10-20^\circ$, $20-25^\circ$) were 892.07, 911.15 and $2087.60 \text{ t km}^{-2} \text{ a}^{-1}$, respectively, indicating that soil erosion rapidly increased with the slope exceeding 20° . The dominant erosion factors were soil and water conservation measure, vegetation cover and management factors. There was a good linear relationship between soil loss and the improved soil erodibility factor K' in this paper, which showed that K' had a significant effect in indicating the comprehensive influence of surface cover factors and soil erodibility factors. The results can provide a basis for the reasonable arrangements of soil and water conservation measures and the improvement of erosion model in Wuhan. Furthermore, quantitative assessment of regional soil erosion based on long-term observation data from field runoff plots is worthy of further study.

Key Words: soil loss; runoff plot; soil erosion factor; soil and water conservation measure; USLE; Wuhan city

土壤侵蚀是引起土地退化、洪涝灾害等环境问题的重要原因之一^[1],严重威胁生产生活 and 生态安全^[2]。据《2018 年湖北省水土保持公报》,湖北省土壤侵蚀面积为 32520.16 km^2 ,占其国土面积的 17.51%。湖北省武汉市位于长江中游,处于桐柏山大别山国家级水土流失重点预防区与幕阜山省级水土流失重点治理区之间的过渡地带。据《2018 年武汉市水土保持公报》,武汉市土壤侵蚀面积为 961.42 km^2 ,占其国土面积的 11.22%,土壤侵蚀问题不容忽视。因此,开展武汉市土壤侵蚀影响因素的系统化定量评价研究,识别关键因子,对该区域土壤侵蚀防控及长江中游生态安全具有重要意义。

自然降雨条件下野外径流小区观测法是定量评价土壤侵蚀影响因子的重要方法^[3-4]。近年来,国内外学者通过构建不同地区长观测年限、多径流小区、大数据量的土壤侵蚀观测数据集^[5-8],为定量研究区域土壤侵蚀影响因素、水土保持措施效益等提供了大量基础数据,有效克服了此前研究中小区数量与类型偏少及观测年份有限等问题。如 Cerdan 等^[9]通过整理欧洲 19 个国家 81 个监测站点的 2741 组数据,对比了不同土地利用类型小区的土壤侵蚀模数,并估算了全欧洲的片蚀率与沟蚀率。Guo 等^[10]建立了中国水蚀区 73 个站点 2838 组数据的径流小区观测数据库,研究了不同地区、不同土地利用类型小区土壤侵蚀的总体特征与变异性。结合野外径流小区观测数据及通用土壤流失方程(The Universal Soil Loss Equation, USLE)是定量研究土壤侵蚀因子及构建侵蚀预报模型的重要手段^[4,11-12],部分学者在区域尺度上研究了武汉市土壤侵蚀的生态响应、时空分异规律^[13-15],但结合径流小区长期观测数据与 USLE 模型开展侵蚀因子定量评价的研究相对较少。周耀华等^[16]基于武汉市黄陂区野佛沟径流场观测数据开展了土壤侵蚀预测研究,但该研究仅依托单一径流场的数据。张东升^[17]结合 GIS 和 RUSLE 模型发现武汉市土壤侵蚀的主导因素是土地利用类型;也有研究指出与土地利用相对应的植被覆盖与管理因子(C)及水土保持措施因子(P)对 USLE 模型的预报精度影响较大^[18],然而适用于武汉地区的 C 与 P 因子赋值方法缺乏深入研究。径流小区观测法是 USLE 模型中土壤可蚀性因子(K)的标准计算方法^[19],但该方法在武汉地区的应用研究鲜见报道^[20]。因此,利用野外径流小区观测数据,并结合 USLE 模型对武汉市土壤侵蚀不同影响因素开展定量评价研究亟待深入。

本文通过建立一个长观测年限(2009—2018 年共 10 年)、多径流小区(35 个)和大数据量(139 组观测数据)的武汉市野外径流小区自然降雨条件下的土壤侵蚀观测数据库,并借鉴 USLE 模型定量评价武汉市土壤

侵蚀影响因素,识别主导侵蚀因子,以期为构建基于径流小区观测数据的武汉市土壤侵蚀预报模型提供思路,并为该区域水土保持措施合理布设及侵蚀防控提供科学依据。

1 数据与方法

1.1 径流小区观测数据库构建

本文汇编了 2009—2018 年共十年的《武汉市水土保持公报》,构建了武汉市野外径流小区土壤侵蚀观测数据库。观测数据来自武汉市黄陂区、蔡甸区、新洲区的 4 个水土保持监测站点(图 1):蔡店站(土石山区花岗岩红壤)、磨盘山站(黄棕壤)、西湖站(黄棕壤、棕红壤)和燕子山站(黄壤),共 35 个径流小区。这些站点所在区域均属于亚热带季风湿润区,降雨集中在 6—8 月。纳入本文分析的共 139 组观测数据,如表 1 所示;这些数据在坡度、侵蚀性降水量、面积和年份上的分布如图 2 所示。

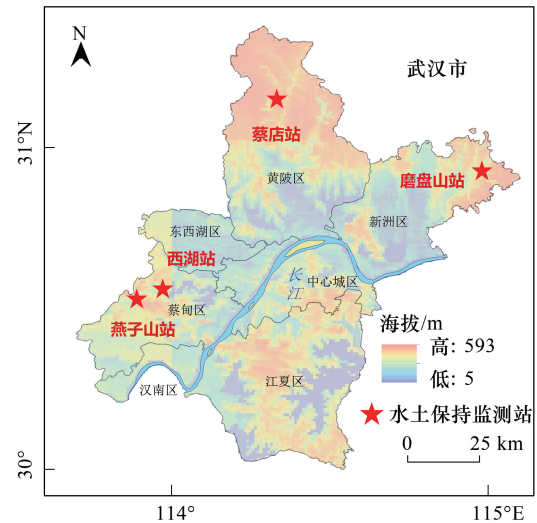


图 1 武汉市水土保持监测站地理位置

Fig. 1 Location of the Wuhan Soil and Water Conservation Monitoring Sites

表 1 径流小区布设情况及土壤侵蚀观测样本量

Table 1 Plots layout and soil loss observation plot-years

径流小区类型 Plot type	水土保持措施 Conservation measures	坡度 Slope/(°)	侵蚀性降水量 Erosive precipitation/mm	小区面积 Area/m ²	小区数量 Plots	样本量 Plot-years
裸地小区 Bare land plots	无特殊水土保持措施	15, 17, 25	380.2—1935.9	20, 30, 50, 100	6	22
耕地小区 Arable plots		15, 17	702.7—1935.9	30, 50	4	16
草地小区 Grassland plots		5, 15, 17, 25	702.7—1935.9	30, 50, 100	5	20
经济林小区 Economic forrest plots		5, 10, 15, 17, 20, 25	380.2—1935.9	20, 30, 50, 100	15	48
草带植物篱小区 Grass belts hedge plots	人工植被措施	15	223.8—1016.6	20	1	7
茶树植物篱小区 Tea tree hedge plots		15	380.2—1016.6	20	2	8
紫穗槐植物篱小区 Amorpha fruticose hedge plots		15	223.8—1093.5	20	2	9
石坎梯田小区 Cross wall terraces plots	工程措施	15	223.8—1093.5	20	1	9

1.2 参数计算方法

(1) 土壤侵蚀模数(SL)

土壤侵蚀模数(Soil Loss, SL)是单位面积土地在单位时间内发生的土壤侵蚀量。按照一定标准对径流小区观测数据进行分类统计,为消除不同小区之间面积差异造成的影响,以小区面积为权重计算出的土壤侵蚀模数平均值作为该类型小区的土壤侵蚀模数。

(2) 坡度因子(S)

USLE 方程表达式^[21]为:

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

式中, A 为土壤侵蚀模数,单位为 $t \text{ hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$; R 为降雨侵蚀力因子,单位为 $\text{MJ mm hm}^{-2} \text{ h}^{-1} \text{ a}^{-1}$; K 为土壤可蚀性

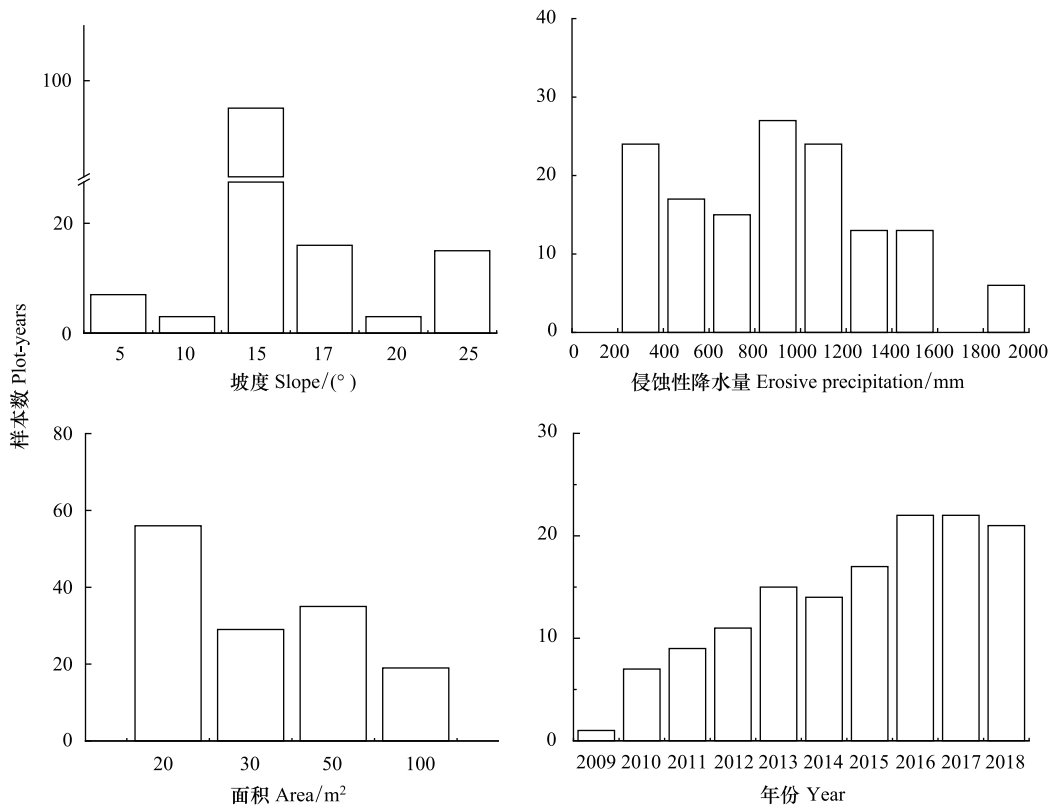


图 2 径流小区观测数据分布

Fig.2 Distribution of observation data of plots

因子,单位为 $t\ hm^2\ h^{-1}\ hm^{-2}\ MJ\ mm$; L 为坡长因子,无量纲; S 为坡度因子,无量纲; C 为植被覆盖与管理因子,无量纲; P 为水土保持措施因子,无量纲。

鉴于本研究涉及的所有径流小区的坡度均在 5° — 25° 之间,故使用刘宝元等^[22]提出的坡度因子公式进行转化。

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

(3) 侵蚀性降水量因子 (EP)

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

(4) 改进的土壤可蚀性因子 (K')

USLE 模型中的土壤可蚀性因子 K 指单位降雨侵蚀力在标准小区所能引起的土壤侵蚀量^[23],径流小区测定法直接从土壤可蚀性的定义出发,是土壤可蚀性因子的标准测定方法^[19]。若目标小区为标准小区,则 K 直接由土壤侵蚀模数除以降水侵蚀力因子得到;但若观测小区不是标准小区,则需要将观测资料订正到统一的标准条件下^[24]。杨欣等^[20]基于非标准径流小区观测资料对全国不同类型区土壤可蚀性因子进行了计算,将非标准小区的坡度、坡长统一订正到了 22.13 m 坡长和 5° 坡度的标准小区条件下,计算公式如下:

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

式中,各符号含义同公式(1)。本文借鉴此方法并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 ,以坡度 S 代替地形因子 LS ,以土壤侵蚀模数的缩写 SL 代替 A ,以“改进的土壤可蚀性因子 (K')”代替

USLE 模型中的 K , 计算公式如下:

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

若计算某一类型小区的平均 K' , 则可表示在该地表覆盖类型下土壤对侵蚀的敏感性, 使用小区面积作为权重进行加权平均得到, 计算公式如下:

$$K' = \sum_{i=1}^n \left(a_i \frac{SL_i}{EP_i \cdot S_i} \right) / \sum_{i=1}^n a_i \quad (5)$$

式中, K' 为改进的土壤可蚀性因子, 单位为 $t \text{ km}^{-2} \text{ a}^{-1} \text{ mm}^{-1}$; SL_i 为土壤侵蚀模数, 单位为 $t \text{ km}^{-2} \text{ a}^{-1}$; EP_i 为侵蚀性降水量, 单位为 mm ; S_i 为坡度因子, 无量纲; a_i 为小区面积, 作为权重, 单位为 m^2 。

该方法可将非标准小区的坡度和坡长修正为统一条件, 但未对土地利用方式和水土保持措施进行修正。理论上, 土壤可蚀性因子 K 应由土壤本身性质决定^[25], 但不同地表覆盖条件对土壤性质也有重要影响^[12], 如作物根系会影响土壤结构, 耕作方式会影响土壤紧实程度等。故本文的 K' 因子不仅仅代表土壤本身性质对土壤可蚀性的影响, 还考虑了不同径流小区土地利用方式和水土保持措施的差异性对 K' 取值的影响。

(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 与 P 因子共同衡量地表覆盖对土壤侵蚀的影响, 其含义分别为有植被覆盖和实施水土保持措施地类的侵蚀量与相同条件下裸地之比^[18]。本文将 C 与 P 因子合并计算, 涉及实施水土保持措施的径流小区时采用 P 因子, 反之则采用 C 因子。考虑到各小区的坡度存在差异, 故参考前文对 K' 因子的修正方法, 将各小区的土壤侵蚀模数修正到统一的标准坡度条件下:

$$SL_i' = \frac{SL_i}{S_i} \quad (6)$$

计算不同土壤类型裸地小区的平均土壤侵蚀模数 SL , 结果表明, 土石山区花岗岩红壤裸地小区的平均 SL 为 $56.28 t \text{ km}^{-2} \text{ a}^{-1} \text{ mm}^{-1}$, 黄棕壤为 $280.46 t \text{ km}^{-2} \text{ a}^{-1} \text{ mm}^{-1}$, 红壤为 $921.95 t \text{ km}^{-2} \text{ a}^{-1} \text{ mm}^{-1}$, 黄壤为 $694.62 t \text{ km}^{-2} \text{ a}^{-1} \text{ mm}^{-1}$ 。再将每个小区的 SL' 除以对应土壤类型裸地小区的平均 SL , 得到该小区的 $C(P)$ ^[4]。若计算某一类型小区的平均 $C(P)$, 则使用小区面积作为权重进行加权平均得到。公式如下:

$$C(P) = \sum_{i=1}^n a_i \frac{SL_i'}{SL_{\text{Bare Land}}} / \sum_{i=1}^n a_i \quad (7)$$

式中, C, P 因子均无量纲; SL_i' 是修正为统一标准坡度后的土壤侵蚀模数, $t \text{ km}^{-2} \text{ a}^{-1}$; $SL_{\text{Bare Land}}$ 为对应土壤类型裸地小区的平均土壤侵蚀模数, $t \text{ km}^{-2} \text{ a}^{-1}$; a_i 为小区面积, m^2 , 作为权重。

(6) 土壤侵蚀削减率 (SLRR)

土壤侵蚀削减率 (Soil Loss Reduction Rate, SLRR) 指地表覆盖对裸地土壤侵蚀量的削减比例, 能够反映指定作物、植被或水土保持措施的水土保持效益^[26]。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:

$$\text{SLRR} = 100\% - \frac{SL_{\text{Land Use}}}{SL_{\text{Bare Land}}} \quad (8)$$

式中, SLRR 为土壤侵蚀削减率, 无量纲; $SL_{\text{Land Use}}$ 为某土地利用类型小区的土壤侵蚀模数, $t \text{ km}^{-2} \text{ a}^{-1}$; $SL_{\text{Bare Land}}$ 为裸地小区的土壤侵蚀模数, $t \text{ km}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 。

1.3 统计分析方法

本文在数据分析过程中主要采用了求均值、可视化对比等方法分析不同因素对土壤侵蚀的影响, 采用 person 相关分析、线性拟合、幂函数拟合等方法建立 SL 与 S, EP 之间的定量关系, 具体在 SPSS 25、origin 2018 和 Excel 2016 中完成。

2 结果与分析

2.1 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^[27],裸地小区属于中度侵蚀等级,经济林、草地和耕地小区属于轻度侵蚀等级(图 3)。与 SL 不同,4 种土地利用类型小区的 EP 并无太大差异,而 K' 的相对大小则同 SL 基本一致(表 2),表明不同土地利用类型小区土壤对侵蚀的敏感性不同。另外,耕地、草地、经济林和裸地小区的 C 因子分别为 0.23、0.33、0.51 和 1.00。

表 2 不同土地利用类型小区土壤侵蚀观测数据及因子取值

Table 2 Soil erosion observation data of plots with different land use type and the factor values

土地利用类型 Land use types	侵蚀性降水量 Erosive precipitation/mm	K' 因子 K'-value/ (t km ⁻² a ⁻¹ mm ⁻¹)	C 因子 C-value	总面积 Area/m ²	侵蚀级别 Loss level
裸地 Bare land	1057.63(±382.37)	0.37(±0.28)	1.00(±0.65)	1400	中度
耕地 Arable	1157.60(±415.88)	0.11(±0.08)	0.23(±0.16)	560	轻度
草地 Grassland	1208.13(±308.82)	0.10(±0.11)	0.33(±0.47)	1010	轻度
经济林 Economic forrest	1049.29(±425.91)	0.25(±0.51)	0.51(±0.73)	2010	轻度
总计 Sum	1096.03(±396.60)	0.24(±0.38)		4980	轻度

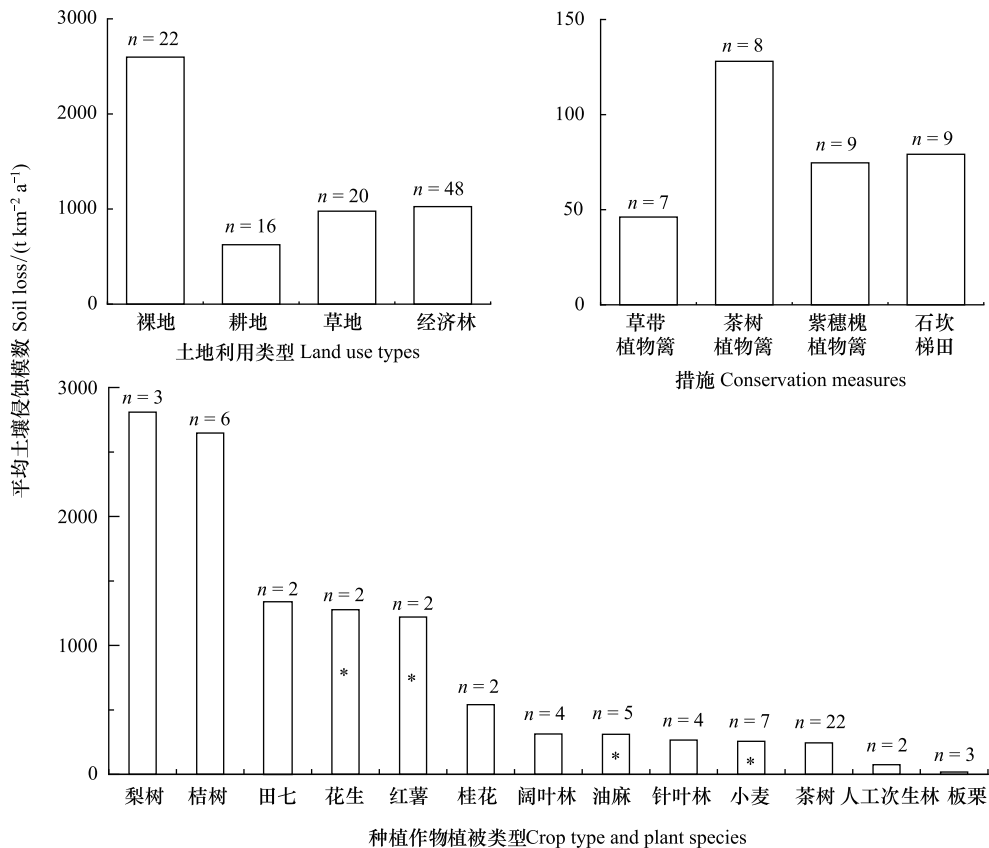


图 3 不同类型径流小区的土壤侵蚀模数

Fig.3 Soil loss of different plots types

图中矩形框外数值为平均 SL, n 为样本数;标星号(*)的为耕地作物,其他为经济林植被

在耕地和经济林两种土地利用类型下,分别划分了 4 种作物类型和 9 种植被类型,大多数作物/植被类型

小区属微度侵蚀等级 ($<500 \text{ t km}^{-2} \text{ a}^{-1}$), 在红壤区的容许流失量以内 (图 3)。轻度侵蚀等级包含田七、花生、红薯和桂花, 中度侵蚀等级内仅有梨树和桔树。在经济林中, 梨树和桔树会造成极大的土壤侵蚀, 而板栗仅有的 $18.71 \text{ t km}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 的 SL 。表 3 显示, 对土石山区花岗岩红壤而言, 板栗的侵蚀削减率最高 (93%)、茶树最低 (68%)。对黄棕壤而言, 人工次生林的侵蚀削减率最高 (96%), 草地最低 (28%)。对棕红壤而言, 草地的侵蚀削减率最高 (96%), 田七最低 (69%)。

表 3 不同作物/植被类型小区的土壤侵蚀削减率/%

Table 3 Soil loss reduction rate of different crop types and plant species

种植作物/植被类型 Crop types and plant species	土石山区花岗岩红壤 Granite red soil	黄棕壤 Yellow brown soil	棕红壤 Brown earth
板栗 Chestnut	93		
茶树 Tea tree	68		
人工次生林 Artificial secondary forest		96	
小麦 * Wheat		86	
油麻 * Batched jute		83	
桂花 Osmanthus fragrans		70	
草地 Grassland		28	96
针叶林 Coniferous forest			94
阔叶林 Broad-leaved forest			93
红薯 * Sweet potato			72
花生 * Peanut			71
田七 Pseudo-ginseng			69

每一列从上到下按削减率从高到低排序; 标星号 (*) 的为耕地作物

2.2 水土保持措施因子 P

4 个实施水土保持措施的小区 (共 33 组样本) 均位于黄陂区蔡店站, 土壤类型为土石山区花岗岩红壤, 小区坡度均为 15° 。图 4 显示二者 EP 相差不大, 但实施水土保持措施小区的 SL 和 K' 值却显著低于未实施小区。

如表 4 所示, 茶树植物篱的 SL 最高, 其次是石坎梯田和紫穗槐植物篱, 草带植物篱最低, 且均属微度侵蚀等级。不同水土保持措施之间的 EP 无明显差异, 而 K' 值的大小关系与 SL 一致, 可见草带植物篱的水土保持效益最好。

表 4 不同水土保持措施小区土壤侵蚀观测数据及因子取值

Table 4 Soil erosion observation data of plots with different water and soil conservation measures and the factor values

水土保持措施类型 Measures	侵蚀性降水量 Erosive precipitation/mm	K' 因子 K' -value/ ($\text{t km}^{-2} \text{ a}^{-1} \text{ mm}^{-1}$)	C 因子 C -value	总面积 Area/ m^2	侵蚀级别 Loss level
草带植物篱 Grass belts hedge	610.63 (± 251.76)	0.015 (± 0.006)	0.17 (± 0.12)	140	微度
茶树植物篱 Tea tree hedge	692.61 (± 254.77)	0.032 (± 0.024)	0.43 (± 0.45)	160	微度
紫穗槐植物篱 Amorpha fruticosa hedge	640.52 (± 281.92)	0.026 (± 0.015)	0.32 (± 0.30)	180	微度
石坎梯田 Cross wall terraces	640.52 (± 281.92)	0.023 (± 0.013)	0.30 (± 0.27)	180	微度

2.3 坡度因子 S

将小区坡度分为 3 个等级: A ($0^\circ \leq \text{坡度} \leq 10^\circ$, $n = 10$)、B ($10^\circ < \text{坡度} < 20^\circ$, $n = 78$)、C ($20^\circ \leq \text{坡度} \leq 25^\circ$, $n = 18$)。A、B、C 等级小区的平均 SL 分别为 $892.07 (\pm 1198.18) \text{ t km}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 、 $911.15 (\pm 1306.73) \text{ t km}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 、 $2087.60 (\pm 1999.82) \text{ t km}^{-2} \text{ a}^{-1}$, 依次属于轻度、轻度和中度侵蚀等级。A、B 等级小区的 SL 相差不大, 但 C 等级小区的 SL 远高于 A 和 B, 可见当坡度超过 20° 时土壤侵蚀会严重加剧。

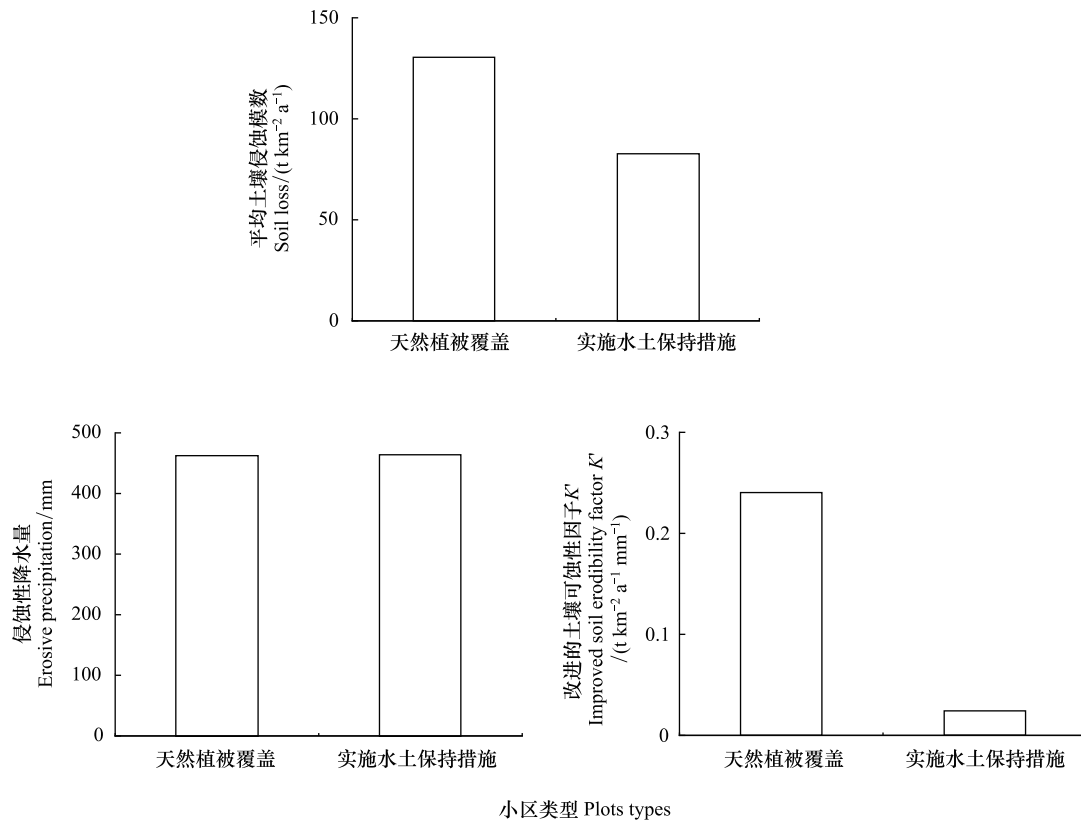


图 4 有、无水土保持措施的径流小区观测数据对比

Fig.4 Comparison of observation data with or without water and soil conservation measures

各图左侧柱形为未实施水土保持措施的自然植被覆盖 (n=25), 右侧柱形为实施了水土保持措施的对值 (n=33)

图 5 显示,9 个不同坡度-土地利用类型组合中,侵蚀程度最高的为裸地-C,最低的为草地-A。不同坡度等级经济林的侵蚀程度相差不大,而草地土壤侵蚀程度却有较大差距。SL 和坡度因子 S 的 person 相关性分析表明,对 4 种土地利用类型而言,二者之间均呈显著相关关系。其中裸地和草地的 person 相关系数分别为 0.629 与 0.777,表现为较强的正相关;经济林为 0.117,表现为极弱的正相关;而耕地为-0.460,表现为中等程度的负相关。坡度因子 S 是武汉市土壤侵蚀的关键因子之一,坡度对裸地和草地土壤侵蚀的影响比较强烈,而对经济林影响极弱。

图 6 为 4 种土地利用类型小区坡度的正弦值 (S') 和 SL 的线性与幂函数拟合结果,其中幂函数拟合效果更好,裸地和草地的拟合结果较好。

2.4 侵蚀性降水量因子 EP

person 相关性分析表明,对 4 种土地利用类型而言,EP 和 SL 之间均呈显著正相关关系。草地和经济林的 SL 和 EP 呈现中等程度正相关;裸地和耕地的 SL 和 EP 均表现为较强的正相关。在 4 种土地利用类型中,耕地的 SL 对 EP 的响应最为强烈,随后依次是裸地、经济林和草地。图 7 分别为 4 种土地利用类型下的 SL 与

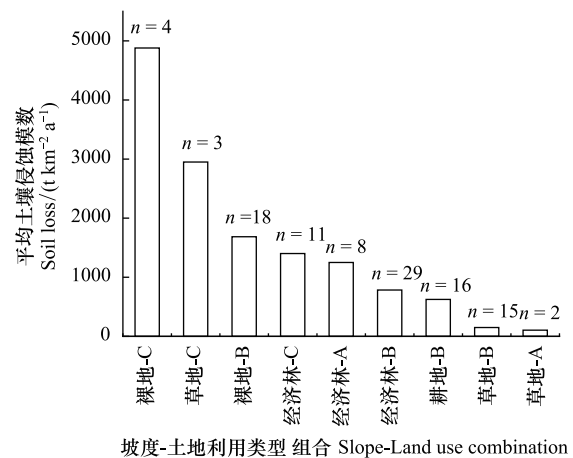


图 5 不同坡度-土地利用类型组合小区的土壤侵蚀模数

Fig.5 Soil loss of different slope-land use combination

图中矩形框外的数值代表平均 SL,矩形框从左到右按照平均 SL 由高到低排序;A、B、C 分别代表 0—10°、10—20°、20—25° 三个坡度等级

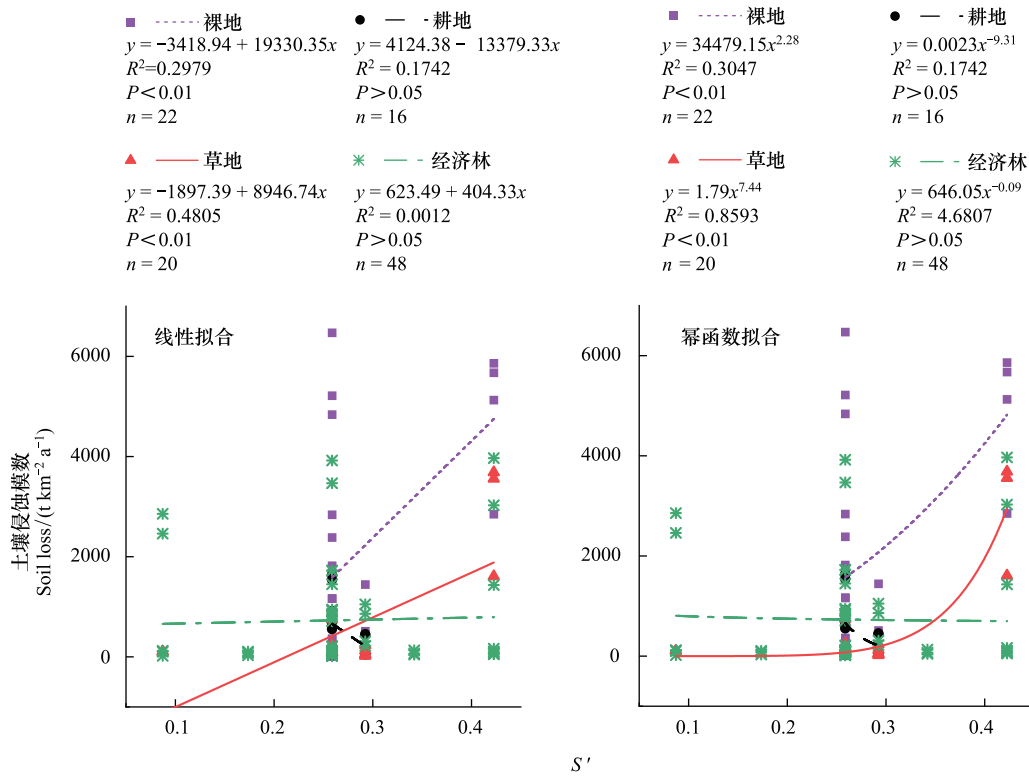


图 6 天然植被覆盖下土壤侵蚀模数与坡度的拟合结果

Fig.6 Fitting results of soil loss and slope under natural vegetation cover

S': 坡度的正弦值 Sine value of slope

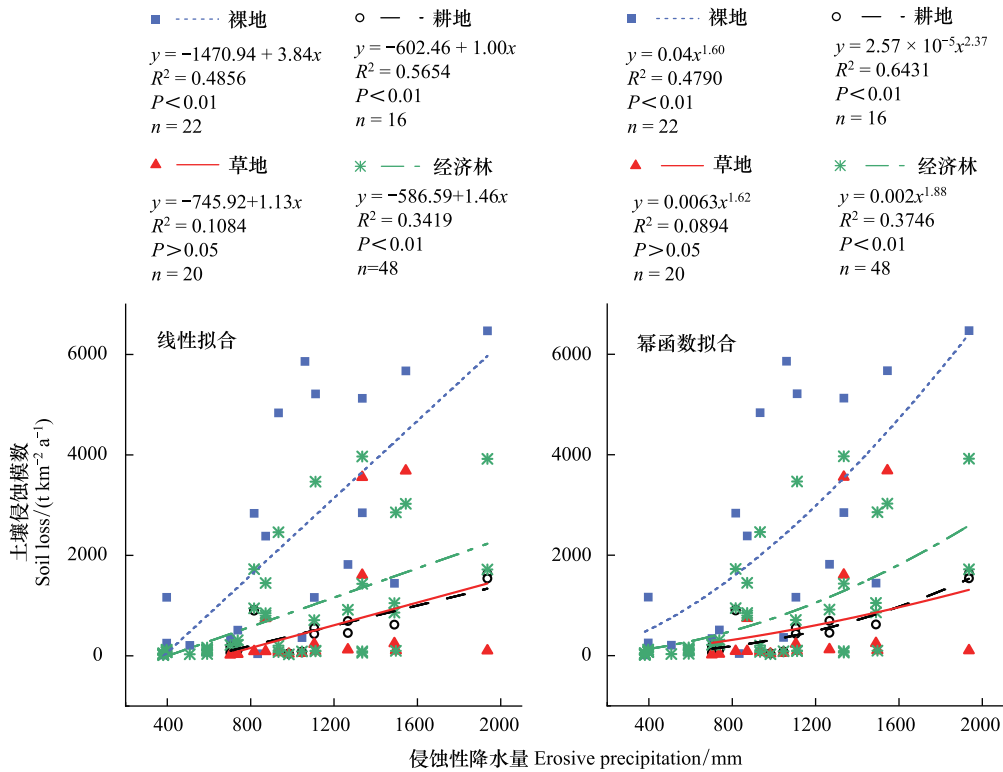


图 7 天然植被覆盖下土壤侵蚀模数与侵蚀性降水量的拟合结果

Fig.7 Fitting results of soil loss and erosive precipitation under natural vegetation cover

EP 的线性与幂函数拟合结果,两种函数拟合曲线在图像上表现出较强一致性,除草地小区线性和幂函数拟合均未通过显著性检验外,裸地、耕地、经济林的最优拟合方式分别为线性、幂函数、幂函数拟合。

person 相关性分析表明,对所有类型水土保持措施小区而言,其 SL 和 EP 在统计学上均有显著正相关关系。草带植物篱、茶树植物篱、紫穗槐植物篱和石坎梯田的 person 相关系数分别为 0.814、0.765、0.782 和 0.765。相对于无水土保持措施小区,有措施小区的 person 相关系数普遍更高,其 SL 对 EP 的响应更为强烈。选择土壤类型为土石山区花岗岩红壤、EP 在 1000 mm 以下的样本,对于实施水土保持措施小区 (S=200 m², n=10) 和无水土保持措施小区 (S=440 m², n=14) 的 SL,当 EP<500 mm 时,前者的 SL 仅占后者的 24.09%,而这一比例在 500 mm<EP<1000 mm 的花岗岩红壤小区和全部花岗岩红壤小区中,分别为 51.84%和 63.34%;由此可见,水土保持措施在低侵蚀性降水量条件下的土壤侵蚀控制作用更强。

图 8 为 4 种水土保持措施下 SL 与 EP 的拟合关系,幂函数拟合效果更好。在 EP 较小时,茶树植物篱的 SL 最小,其他三种措施的 SL 差异不大;但当 EP 较大时,4 种措施的 SL 差异明显,这说明不同水土保持措施效果的差异主要体现在其对高侵蚀性降水量所致的土壤侵蚀控制上。对 SL 与 S 和 EP 的二元拟合结果表明,线性拟合对于裸地、耕地和草地小区效果更优,而幂函数拟合对经济林更优(表 5)。

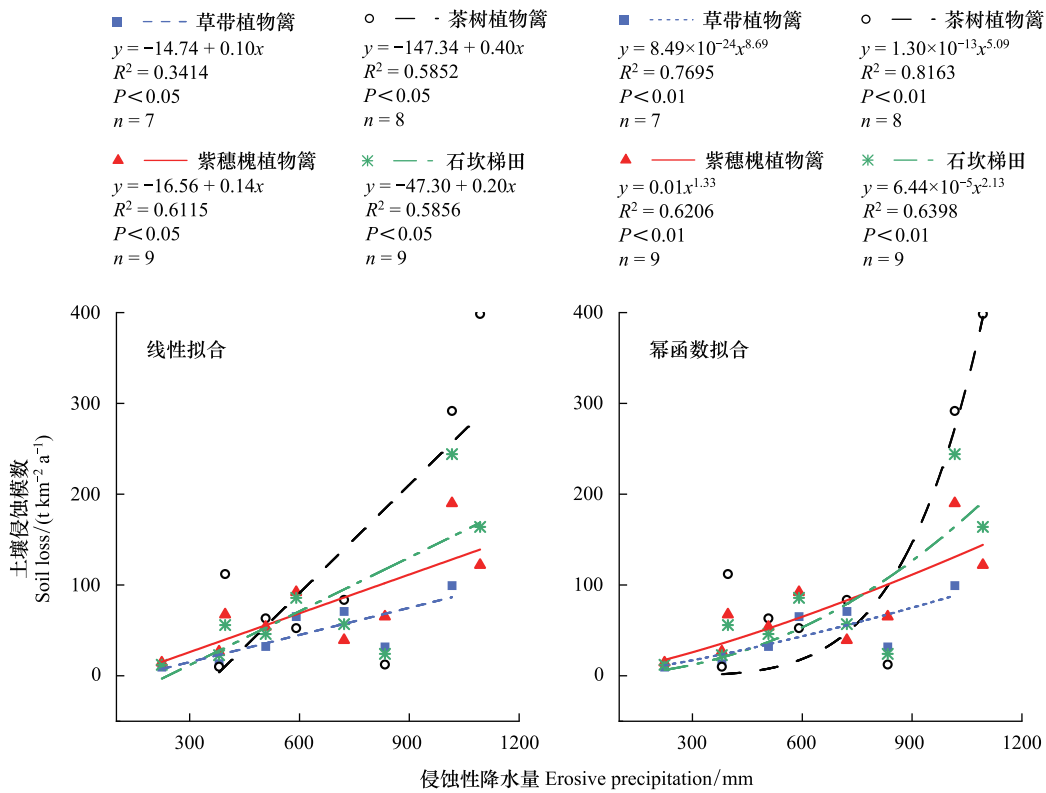


图 8 水土保持措施下土壤侵蚀模数与侵蚀性降水量的拟合结果
Fig.8 Fitting results of soil loss and erosive precipitation with water and soil conservation measures

2.5 土壤侵蚀主导因子识别

C(P)、S、EP 因子分别与 SL 的 person 相关性分析表明,C(P)同 SL 的相关系数为 0.631,表现为显著的强正相关;S、EP 与 SL 的相关系数分别为 0.476 和 0.441,均表现为显著的中等正相关。因此,植被覆盖与管理因子 C 和水土保持措施因子 P 是武汉市土壤侵蚀的主导因子,其次为坡度因子 S 与侵蚀性降水量因子 EP。

3 讨论

3.1 不同因素对土壤侵蚀影响机制

本研究发现裸地小区的 SL,K',SL 与 S 的 person 相关系数以及 SL 与 EP 的 person 相关系数均较高,主要

是由于雨滴的击溅蚀作用和径流的冲刷作用均较其他类型小区更强烈。而在其他三种土地利用类型小区中,耕地小区的 SL 略低于草地小区和经济林小区,应当是耕地小区的坡度普遍较低所致,这也同该区域在坡度较陡处实施退耕还林还草的实际情况相符^[28]。有研究指出,耕地土壤在降水初期的含水量较低,大量降水下渗、存蓄在土壤中致使径流较少^[8];这可能是耕地小区 SL 较低的原因之一,但该解释在本研究中的适用性有限,因为武汉市位于亚热带季风湿润区,其土壤含水量通常较高;且面对短历时暴雨,下渗对径流的削减有限,而一年内的土壤侵蚀量主要由少数几场大暴雨事件所致^[8]。但耕地土壤在降水初期含水量较低却在耕地小区的 SL 与 EP 的相关性分析结果中有明显体现,当 EP 较小时,耕地土壤的蓄水作用对径流的削减十分明显,且削减程度随 EP 增加而减弱,因此土壤侵蚀量增加较快,故表现出 4 种地类中耕地的 SL 对 EP 响应最为强烈的现象。经济林小区的 SL 与 EP 的相关性较强而草地小区的较弱,主要是因为与草地相比,经济林包含林冠层、灌木层、枯枝落叶层等多重具有截留作用的结构,故其在降水初期的截留作用更为明显^[29]。本研究还发现,当坡度超过 20° 时土壤侵蚀会显著加剧。Koulouri 等^[30] 基于地中海的研究发现,坡度较陡时 (25° 左右) 土壤侵蚀显著增加;与地中海气候区相比,武汉降水更为充沛且多暴雨,因此临界坡度阈值可能更低。

表 5 各土地利用类型土壤侵蚀模数与侵蚀性降水量和坡度之间的二元拟合方程

Table 5 Binary fitting equations between soil loss and erosive precipitation and slope for each land use type

土地利用类型 Land use types	拟合方式 Fitting method	方程 Equation	R^2	P	n
裸地 Bare land	线性拟合	$y = -3813.95 + 3.12x_1 + 10407.81 x_2$	0.5080	$P < 0.01$	22
耕地 Arable		$y = 1985.45 + 0.93x_1 - 9317.42 x_2$	0.5928	$P < 0.01$	16
草地 Grassland		$y = -2687.34 + 0.79x_1 + 8499.82 x_2$	0.5323	$P < 0.01$	20
经济林 Economic forest		$y = -400.39 + 1.48x_1 - 778.67 x_2$	0.3461	$P < 0.01$	48
裸地 Bare land	幂函数拟合	$y = 1.00 \times 10^{-3} \cdot x_1^{2.34} x_2^{1.77}$	0.4579	$P < 0.01$	22
耕地 Arable		$y = 6.22 \times 10^{-9} \cdot x_1^{2.10} x_2^{-7.52}$	0.3480	$P < 0.05$	16
草地 Grassland		$y = 4.89 \times 10^{-5} \cdot x_1^{2.39} x_2^{1.34}$	0.2923	$P < 0.05$	20
经济林 Economic forest		$y = 8.95 \times 10^{-5} \cdot x_1^{2.13} x_2^{-0.35}$	0.4191	$P < 0.01$	48

y : 土壤侵蚀模数 Soil loss; x_1 : 侵蚀性降水量 Erosive precipitation; x_2 : 坡度的正弦值 Sine value of slope

3.2 改进的土壤可蚀性因子 K' 的指示意义

考虑 USLE 各因子对土壤侵蚀影响时,会发现 LS 因子只取决于地形, R 因子只取决于当地气候,且二者同其他因子之间是互相独立的。但土壤可蚀性因子 K 取决于土壤性质,而土壤性质同其他因素之间却不是完全独立的,而是会受到地表覆盖影响^[12]。考虑 K 和地表覆盖因子 (C/P) 对土壤侵蚀影响时,二者之间的交互作用不可忽略。因此,使用土壤理化性质测定法、仪器测定法等得到的 K 值虽然是由土壤本身性质直接决定,但其仍受地表覆盖的间接影响,实质上并没有完全剥离 K 和 C/P 的交互效应。

本文通过非标准径流小区实测数据计算得到的 K' 因子,因无法对地表覆盖条件进行订正,故 K' 不仅仅代表土壤性质对土壤侵蚀的影响,其代表的是由地表覆盖因素和土壤可蚀性因素共同组成的、内部存在复杂交互作用的整体。不同土地利用类型及不同水土保持措施小区 K' 的相对大小关系均与 SL 基本一致,且 K' 同 SL 之间具有良好线性关系(图 9)。可见, K' 在指示地表覆盖因素和土壤可蚀性因素的综合影响方面效果显著,一定程度上可为解决二者之间交互作用对土壤侵蚀影响的复杂性提供思路。杨欣等^[20] 利用径流小区观测资料建立了我国土壤可蚀性因子数据库,并指出积累更多观测数据有助于获取更准确的 K 值,本文基于径流小区实测资料开展的 K' 计算也可为此提供借鉴。

3.3 不同水土保持措施效益评价

实施水土保持措施小区的 K' 、 SL 分别为 0.025 、 $82.75 \text{ t km}^{-2} \text{ a}^{-1}$, 均显著低于无水土保持措施小区的 0.24 、 $130.64 \text{ t km}^{-2} \text{ a}^{-1}$, 表明水土保持措施能显著降低土壤对侵蚀的敏感性,进而有效控制侵蚀^[5,7-8]。在中国采取水土保持措施总体上可以减少约 70% 的土壤侵蚀量^[10]; 其中,石坎梯田是防治山区侵蚀的一种常见工程措

施,能够有效削减坡面产流产沙^[8],然而由于造价高、易遭受洪水冲毁等原因,石坎梯田在南方丘陵山区的推广受到了较大限制^[8]。植物篱作为一种效果同样显著并在红壤区应用广泛的植被措施^[31],可能成为石坎梯田的合理替代措施。本研究表明植物篱表现出了明显优于石坎梯田的水土保持效益,武汉市最适宜的植物篱措施类型为草带植物篱。且植物篱措施还有着可使用的坡度范围广、控制面源污染和保持土壤养分能力强、对地貌破坏小、不易损毁及成本低等优点^[32-34]。需要指出的是,不同类型植物篱措施之间的水土保持效益有较大差异^[34],因而探究当地最适宜的植物篱类型与实施模式具有重要意义。此外,有学者提出将植物篱措施同石坎梯田措施相结合^[33],这也值得深入研究。

3.4 武汉市土壤侵蚀防治建议

张永利等^[35]认为武汉市土壤侵蚀的重点区域在黄陂北部山区和江夏中部山区,本研究发现当坡度超过 20°时土壤侵蚀会严重加剧,且坡度对裸地和草地土壤侵蚀的影响较为强烈,而对经济林影响较弱。因此针对黄陂与江夏地区 20°以上的陡坡,加大荒坡治理、退草还林、植树造林等措施能有效遏制土壤侵蚀。以草带为代表的植物篱措施显示出了良好的水土保持效果与经济效益,值得在武汉及周边地区大力推广。板栗、人工次生林、草被可分别大幅削减武汉市土石山区花岗岩红壤、黄棕壤、棕红壤径流小区的土壤侵蚀模数,因此针对不同土壤类型种植合适经济作物或植被可起到良好侵蚀防控效果。本文认为武汉市土壤侵蚀主导因子为 C 与 P ,张东升^[17]认为土地利用类型是武汉市土壤侵蚀主导因素;因此,优化土地利用结构、严控开山采石及滥砍滥伐行为对武汉市侵蚀治理具有重要意义。

4 结论与展望

基于 2009—2018 年武汉市野外径流小区长时期观测数据并结合改进的 USLE 模型,定量研究了坡度、侵蚀性降水量、土地利用、水土保持措施对土壤侵蚀的影响,识别了主导侵蚀因子并提出了武汉市土壤侵蚀防治建议,主要结论如下:

(1)对于不同土地利用类型小区,裸地的侵蚀模数最高(2597.57 $\text{t km}^{-2} \text{a}^{-1}$),随后依次是经济林、草地和耕地小区;(2)土壤侵蚀模数与侵蚀性降雨量、坡度之间均呈显著二元线性关系或幂函数关系;(3)板栗、人工次生林和草带分别是武汉市土石山区花岗岩红壤、黄棕壤、棕红壤小区土壤侵蚀削减率最高的作物/植被类型;(4)与天然植被小区相比,植物篱及石坎梯田措施均显著降低了侵蚀模数,其中植物篱措施的效果更优、且草带植物篱的水土保持效果最佳,表明以草带为代表的植物篱措施可以在武汉地区大力推广;(5)3 个坡度等级(0—10°、10—20°、20—25°)小区的平均侵蚀模数分别为 892.07、911.15、2087.60 $\text{t km}^{-2} \text{a}^{-1}$,表明坡度超过 20°后土壤侵蚀严重加剧;(6)武汉市土壤侵蚀的主导因子为水土保持措施、植被覆盖与管理因子。

本文探讨了仅依靠野外径流小区观测数据开展土壤侵蚀因子定量评价的方法,并以武汉市为例开展应用研究,研究结果与当地实际情况较吻合,且可为当地水土保持措施合理布置及侵蚀模型构建提供依据。随着我国各地径流小区观测数据不断积累,基于长时间序列观测数据的土壤侵蚀定量研究值得进一步深入。

参考文献 (References):

- [1] 刘国华,傅伯杰,陈利顶,郭旭东. 中国生态退化的主要类型、特征及分布. 生态学报, 2000, 20(1): 13-19.
- [2] 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. 生态学报, 2000, 20(1): 9-12.
- [3] Boix-Fayos C, Martínez-Mena M, Arnao-Rosalén E, Calvo-Cases A, Castillo V, Albaladejo J. Measuring soil erosion by field plots: understanding

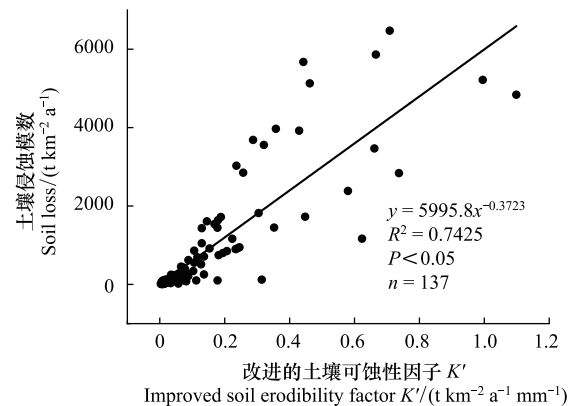


图9 K' 因子与土壤侵蚀模数的拟合结果

Fig.9 Fitting results of soil loss and K' factor

- the sources of variation. *Earth-Science Reviews*, 2006, 78(3/4): 267-285.
- [4] 黄俊, 金平伟, 姜学兵, 林丽萍, 寇馨月, 徐舟, 刘斌, 方宗福. 南方红壤区植被覆盖因子估算模型构建与验证. *农业工程学报*, 2020, 36(17): 106-114.
- [5] Maetens W, Poesen J, Vanmaercke M. How effective are soil conservation techniques in reducing plot runoff and soil loss in Europe and the Mediterranean? *Earth-Science Reviews*, 2012, 115(1-2): 21-36.
- [6] Xiong M Q, Sun R H, Chen L D. Effects of soil conservation techniques on water erosion control: a global analysis. *Science of the Total Environment*, 2018, 645: 753-760.
- [7] Zhao J L, Yang Z Q, Govers G. Soil and water conservation measures reduce soil and water losses in China but not down to background levels: evidence from erosion plot data. *Geoderma*, 2019, 337: 729-741.
- [8] Fang N F, Wang L, Shi Z H. Runoff and soil erosion of field plots in a subtropical mountainous region of China. *Journal of Hydrology*, 2017, 552: 387-395.
- [9] Cerdan O, Govers G, Le Bissonnais Y, Van Oost K, Poesen J, Saby N, Gobin A, Vacca A, Quinton J, Auerswald K, Klik A, Kwaad F J P M, Raclot D, Ionita I, Rejman J, Rousseva S, Muxart T, Roxo M J, Dostal T. Rates and spatial variations of soil erosion in Europe: a study based on erosion plot data. *Geomorphology*, 2010, 122(1/2): 167-177.
- [10] Guo Q K, Hao Y F, Liu B Y. Rates of soil erosion in China: a study based on runoff plot data. *CATENA*, 2015, 124: 68-76.
- [11] Nearing M A. Evaluating soil erosion models using measured plot data: accounting for variability in the data. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2000, 25(9): 1035-1043.
- [12] 陈正发. 基于 RUSLE 模型的重庆市土壤流失方程研究[D]. 重庆: 西南大学, 2011.
- [13] 王志刚, 韩培, 周耀华, 华忠光, 蔡劲松, 赵元凌, 张平仓. 超大城市水土流失空间分布格局及其防治策略——以武汉市为例. *水土保持通报*, 2018, 38(5): 122-126.
- [14] 何建华, 詹皖欣, 黄俊龙. 基于 GIS 的武汉市生态红线划定的技术方法研究. *生态科学*, 2018, 37(5): 131-139.
- [15] 徐智章. 基于 ArcGIS 的武汉市农业面源污染风险评价[D]. 武汉: 华中科技大学, 2017.
- [16] 周耀华, 张涛, 郭国先, 王天巍. 径流场监测结果在武汉黄陂区水土流失预测中的应用. *水土保持研究*, 2013, 20(6): 10-13.
- [17] 张东升. 基于 GIS 城市土壤侵蚀量的计算——以武汉市为例[D]. 重庆: 西南大学, 2011.
- [18] 吴发启, 林青涛, 路陪, 王钰. 我国坡地土壤侵蚀影响因子 C 的研究进展. *中国水土保持科学*, 2015, 13(6): 1-11.
- [19] 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. *自然资源学报*, 1999, 14(4): 345-350.
- [20] 杨欣, 郭乾坤, 王爱娟, 刘宝元, 张蒙娜, 常琪琪. 基于小区实测数据的不同类型土壤可蚀性因子计算. *水土保持通报*, 2019, 39(4): 114-119.
- [21] 吴芳, 朱源, 许丁雪, 施晶晶, 江源. 涪公河流域土壤侵蚀空间特征及其优先治理区确定. *生态学报*, 2019, 39(13): 4761-4772.
- [22] Liu B Y, Nearing M A, Shi P J, Jia Z W. Slope length effects on soil loss for steep slopes. *Soil Science Society of America Journal*, 2000, 64(5): 1759-1763.
- [23] Olson T C, Wischmeier W H. Soil-erodibility evaluations for soils on the runoff and erosion stations. *Soil Science Society of America Journal*, 1963, 27(5): 590-592.
- [24] 张科利, 彭文英, 杨红丽. 中国土壤可蚀性值及其估算. *土壤学报*, 2007, 44(1): 7-13.
- [25] 张科利, 蔡永明, 刘宝元, 彭文英. 土壤可蚀性动态变化规律研究. *地理学报*, 2001, 56(6): 673-681.
- [26] 刘艳, 刘学全, 崔鸿侠, 周金星, 何丙辉. 低丘黄壤区不同植被恢复模式水土保持功能分析. *水土保持研究*, 2010, 17(6): 48-52.
- [27] 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.
- [28] 黄麟, 曹巍, 祝萍. 退耕还林还草工程生态效应的地域分异特征. *生态学报*, 2020, 40(12): 4041-4052.
- [29] 李瑞, 李勇, 刘云芳. 贵州喀斯特地区降雨与坡面土壤侵蚀关系研究. *水土保持研究*, 2012, 19(3): 7-11.
- [30] Koulouri M, Giourga C. Land abandonment and slope gradient as key factors of soil erosion in Mediterranean terraced lands. *CATENA*, 2007, 69(3): 274-281.
- [31] 蔡旭东, 周怡雯, 刘窑军, 李朝霞, 戴翠婷, 王天巍, 邓俊. 南方红壤区坡耕地不同耕作措施综合生态效益评价. *水土保持研究*, 2020, 27(5): 281-287.
- [32] 王学强. 红壤地区水土流失治理模式效益评价及其治理范式的建立[D]. 武汉: 华中农业大学, 2008.
- [33] 马根录. 植物篱技术在湖北坡耕地治理中的应用和效益分析. *长江科学院院报*, 2009, 26(3): 9-12.
- [34] 杨一松, 王兆骞, 陈欣, 张如良. 南方红壤坡地不同利用模式的水土保持及生态效益研究. *水土保持学报*, 2004, 18(5): 84-87.
- [35] 张永利, 王晖, 王留林, 刘汉生, 吴宜进. 武汉市水土流失现状及综合治理对策. *中国水土保持*, 2015, (8): 42-44.