

# 贵州省土壤可蚀性 $K$ 值空间分布特征及主要影响因子

高家勇<sup>1,2</sup>, 李瑞<sup>1,2</sup>, 杨坪坪<sup>1,2</sup>, 盘礼东<sup>1,2</sup>, 黄凯<sup>1,2</sup>

(1.贵州师范大学喀斯特研究院, 贵阳 550001; 2.国家喀斯特石漠化防治工程技术研究中心, 贵阳 550001)

**摘要:**为揭示贵州省土壤对侵蚀的敏感程度,阐明贵州省土壤可蚀性的空间分布特征,利用全国第二次土壤调查数据及《贵州土种志》,采用 EPIC(Erosion-productivity impact calculator)模型计算贵州省全省土壤可蚀性  $K$  值,在 ArcGIS 中运用克里金插值法,对贵州省土壤可蚀性  $K$  值进行了空间插值,探究了土壤可蚀性的变化规律及空间分布特征,并重点分析成土母质、海拔和土地利用方式等对  $K$  值的影响关系。结果表明:(1) 贵州省各土壤类型表层的平均  $K$  值介于  $0.0230 \sim 0.0477 \text{ t} \cdot \text{hm}^2 \cdot \text{h}/(\text{MJ} \cdot \text{mm} \cdot \text{hm}^2)$ ,其中红黏土的  $K$  值最大,为  $0.0477 \text{ t} \cdot \text{hm}^2 \cdot \text{h}/(\text{MJ} \cdot \text{mm} \cdot \text{hm}^2)$ ,其次是潮土为  $0.0460 \text{ t} \cdot \text{hm}^2 \cdot \text{h}/(\text{MJ} \cdot \text{mm} \cdot \text{hm}^2)$ ,新积土的  $K$  值最小,为  $0.0230 \text{ t} \cdot \text{hm}^2 \cdot \text{h}/(\text{MJ} \cdot \text{mm} \cdot \text{hm}^2)$ ;(2) 全省以中低和中可蚀性土壤为主,土壤可蚀性值较高,土壤侵蚀风险大;(3) 全省  $K$  值分布的空间差异性较大,从西向东逐渐增加,呈黔东>黔中部>黔西的变化趋势,南北方向上呈黔南南部>黔中>黔北北部>黔南的变化趋势;(4) 各类成土母质形成土壤的可蚀性值介于  $0.0284 \sim 0.0468 \text{ t} \cdot \text{hm}^2 \cdot \text{h}/(\text{MJ} \cdot \text{mm} \cdot \text{hm}^2)$ ,页岩发育形成土壤的  $K$  值都较大(黄棕壤除外),砂岩发育形成土壤的  $K$  值较小;(5) 随着海拔的升高,土壤可蚀性  $K$  值总体上呈现出降低的趋势;(6) 土地利用方式对  $K$  值有明显的影响,其土壤可蚀性值大小依次为水田>旱地>草地>灌木>林地。研究结果较好地显示了贵州省土壤可蚀性  $K$  值的空间分布特征及主要的影响因素,可为贵州省土壤流失预报、水土保持普查等提供参考。

**关键词:**土壤可蚀性;母质;土地利用;海拔;空间分布;贵州省

中图分类号:S157.1

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2022)05-0077-08

## Spatial Distribution Characteristics and Main Influencing Factors of Soil Erodibility $K$ Values in Guizhou Province

GAO Jiayong<sup>1,2</sup>, LI Rui<sup>1,2</sup>, YANG Pingping<sup>1,2</sup>, PAN Lidong<sup>1,2</sup>, HUANG Kai<sup>1,2</sup>

(1.School of Karst Science, Guizhou Normal University, Guiyang 550001, China;

2.State Engineering Technology Institute for Karst Desertification Control, Guiyang 550001, China)

**Abstract:** In order to reveal the sensitivity of soil to erosion and clarify the spatial distribution characteristics of soil erodibility in Guizhou Province, based on the data of the Second National Soil Survey and soil type records of Guizhou, the soil erodibility  $K$  values of Guizhou Province were calculated by EPIC (erosion productivity impact calculator) model, and the soil erodibility  $K$  values of Guizhou Province were spatially interpolated by Kriging interpolation method in ArcGIS, so as to explore the change pattern and spatial distribution characteristics of soil erodibility, the influences of soil parent material, altitude and land use mode on  $K$  values were analyzed. The results show that: (1) the average  $K$  values of topsoils of various soil types in Guizhou Province ranged from  $0.0230$  to  $0.0477 \text{ t} \cdot \text{hm}^2 \cdot \text{h}/(\text{MJ} \cdot \text{mm} \cdot \text{hm}^2)$ , among which the  $K$  value of red clay was the largest, was  $0.0477 \text{ t} \cdot \text{hm}^2 \cdot \text{h}/(\text{MJ} \cdot \text{mm} \cdot \text{hm}^2)$ , followed by tidal soil, which was  $0.0460 \text{ t} \cdot \text{hm}^2 \cdot \text{h}/(\text{MJ} \cdot \text{mm} \cdot \text{hm}^2)$ , and the  $K$  value of newly deposited soil was the smallest, which was  $0.0230 \text{ t} \cdot \text{hm}^2 \cdot \text{h}/(\text{MJ} \cdot \text{mm} \cdot \text{hm}^2)$ ; (2) low and medium erodible soils were main soil types in Guizhou Province, and the whole province was with high soil erodibility  $K$  values and high potential soil erosion risks; (3) the spatial difference of  $K$  value distribution in the whole province was large, which gradually

收稿日期:2021-07-05

修回日期:2021-08-09

资助项目:国家自然科学基金项目(32060372);贵州省科技计划项目(黔科合支撑[2021]一般 462 号)

第一作者:高家勇(1997—),男,重庆万州人,硕士研究生,主要研究方向:土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail:1242751678@qq.com

通信作者:李瑞(1979—),男(彝族),贵州盘州人,博士,研究员,主要研究方向:土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail:rlfer@126.com

increases from west to east, showing a change trend: east Guizhou>Central Guizhou>west Guizhou, and a change trend: south of northern Guizhou>central Guizhou>north of northern Guizhou>south Guizhou in the north-south direction; (4) the erodibility  $K$  values of soils formed by various soil forming parent materials were between  $0.028\ 4\sim 0.046\ 8\ t\cdot h/(MJ\cdot mm\cdot hm^2)$ ; the  $K$  value of soil formed by shale development is large (except for yellow brown soil), and the  $K$  value of soil formed by sandstone development was small; (5) with the increase of altitude, the soil erodibility value generally showed a downward trend; (6) land use mode had a significant impact on  $K$  value, and the soil erodibility  $K$  value decreased in the order: paddy field>dry land>grassland>shrub>forestland. The results show the spatial distribution characteristics and main influencing factors of soil erodibility  $K$  values in Guizhou Province, which can provide reference for soil loss prediction and soil and water conservation survey in Guizhou Province.

**Keywords:** soil erodibility; parent material; land use; altitude; spatial distribution; Guizhou Province

水土流失是西南喀斯特地区最为严峻的生态问题之一,2018年西南石漠化地区水土流失面积为25.18万 $km^2$ ,占土地总面积的23.82%<sup>[1]</sup>,严重的水土流失导致生态恶化、石漠化加剧,制约着西南地区社会经济的可持续发展。水土流失与地质、地形、降水、温度、植被和土壤等自然因素有关<sup>[2]</sup>,土壤可蚀性(Erodibility)是土壤的内在因素,是反映土壤对侵蚀敏感性的指标,也是对土壤侵蚀预报和水保措施效益评价的重要参数,通常用 $K$ 值来表示。土壤可蚀性 $K$ 这一指标自20世纪60年代提出以来<sup>[3]</sup>,广泛运用到多个模型中,如USLE/RUSLE,CSLE,WEPP和SWAT模型等。刘宝元等探究了土壤可蚀性的不同计算方法,倡导开发我国的土壤侵蚀经验模型<sup>[4]</sup>,张科利等研究表明土壤可蚀性受土壤物理性质、降雨强度等影响会发生变化<sup>[5]</sup>,同时根据径流小区实测资料,采用不同的方法计算土壤可蚀性值,并做出了修正,估算了中国土壤可蚀性值<sup>[6]</sup>。随着研究的深入,诸多学者研究了土壤可蚀性与环境因子的关系,如坡地土壤可蚀性的变化<sup>[7-8]</sup>;不同土地利用方式下土壤可蚀性的变化<sup>[9-12]</sup>;砾石与土壤可蚀性的关系<sup>[13-14]</sup>;海拔、土壤质地和成土母质等因子与土壤可蚀性的关系<sup>[15-16]</sup>。随着地理信息技术的发展,对土壤可蚀性的研究已逐步转换到空间尺度上,目前的空间估算方法主要包括属性连接法<sup>[17-19]</sup>、空间自相关法和地理信息综合法等<sup>[20]</sup>,其中空间自相关法应用最为广泛<sup>[21]</sup>。通过采集土壤样点,根据样点数据,计算土壤可蚀性值,在ArcGIS中用克里金插值法生成土壤可蚀性 $K$ 值的空间插值图<sup>[16,22-24]</sup>,实现了对区域内土壤可蚀性的空间分析。

贵州省是我国土壤侵蚀最严重的省份之一,依据《贵州省水土保持公告》(2006—2010年),贵州省水土流失面积为55 269.40 $km^2$ ,占国土总面积的31.37%<sup>[25]</sup>,长期的水土流失造成区域表层土大量流失,石漠化现

象日趋严重<sup>[26]</sup>,制约着当地生态与经济的发展。为平衡区域人地矛盾和实现可持续发展,开展生态治理刻不容缓<sup>[27]</sup>。而土壤侵蚀的首要对象是表层土,当表层土流失后,侵蚀对象会转变为深层土。深层土的可蚀性值高于表层土<sup>[11,28]</sup>,抗侵蚀能力更弱,更易被侵蚀,因此保护表层土成为了防治水土流失的关键。目前对贵州省土壤可蚀性的研究较少,而基于贵州全省空间尺度的探讨暂未见到报道,故开展省域尺度土壤可蚀性相关研究具有较为重要的现实意义,可填补相关研究的不足。本文的研究目的主要包括:(1)构建贵州省土壤可蚀性 $K$ 值空间数据库;(2)探讨贵州省土壤可蚀性 $K$ 的空间分布特征及主要影响因素。以期为USLE/RUSLE,CSLE等相关土壤流失模型在贵州省及类似地区的应用提供参考,为贵州省水土保持普查等生产实践提供参考和支撑。

## 1 材料与方 法

### 1.1 研究区概况

贵州省位于中国西南部,面积17.616 7万 $km^2$ ,地理坐标范围为 $103^{\circ}36'\sim 109^{\circ}35'E, 24^{\circ}37'\sim 29^{\circ}13'N$ 。地势西高东低,自中部向北、东、南三面倾斜,平均海拔1 100 m左右,海拔最高点为西部的乌蒙山脉韭菜坪,2 900.6 m,最低点地处东部黎平县地坪乡,147.8 m(图1)。贵州省地貌类型可概括为高原、山地、丘陵和盆地4种,其中山地和丘陵占92.5%,喀斯特分布范围广泛,喀斯特面积11.25万 $km^2$ ,占全省面积的63.8%。研究区气候温暖湿润,属亚热带湿润季风气候,最冷月为1月,平均气温在 $3\sim 6^{\circ}C$ ,最热月为7月,平均气温在 $22\sim 25^{\circ}C$ 。降雨充沛,但年内分配不均,多集中于5—10月,年均降雨量1 100~1 400 mm。贵州处长江和珠江水系的上游交错地带,全省水系顺地势由西部、中部向北、东、南三面分流,境内重要流

域包括长江水系乌江、赤水河流域,珠江水系南、北盘江流域等。土壤类型复杂多样,主要包括黄壤、石灰(岩)土、水稻土、紫色土、粗骨土、红壤等。贵州全境植被类型分为亚热带具热带成分的常绿阔叶林亚带、贵州高原湿润性常绿阔叶林地带和云贵高原半湿润常绿阔叶林地带 3 个植被分布单元。

依据贵州省自然特征将全省划分为 6 个水土流失类型区(表 1),即黔西高原山地区、黔西南山原丘陵区、黔北中山峡谷区、黔中山原丘陵区、黔南低山河谷区和黔东低山丘陵区<sup>[29]</sup>。

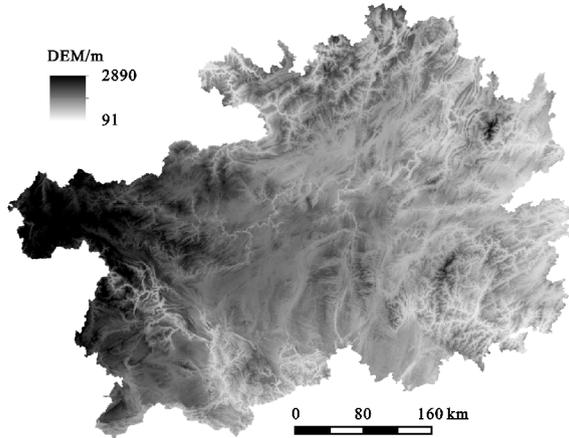


图 1 贵州省 DEM

表 1 贵州省水土流失分区

分区	简称	行政区
黔西高原山地区	黔西(QX)	毕节市
黔西南山原丘陵区	黔西南(QXN)	黔西南、六盘水
黔北中山峡谷区	黔北(QB)	遵义、铜仁
黔中山原丘陵区	黔中(QZ)	贵阳、安顺
黔南低山河谷区	黔南(QN)	黔南
黔东低山丘陵区	黔东(QD)	黔东南

## 1.2 数据来源与研究方法

1.2.1 数据来源及分析方法 本研究使用的数据主要包括土壤数据、行政区数据和 DEM(30 m)数据等,其中土壤数据来自中国土壤数据库(<http://vdb3.soil.csdb.cn>)中的二调土壤剖面数据,以及《贵州土种志》,土壤样点数据主要包括样点的粒径含量、有机质含量、成土母质、海拔和土地利用方式等。对数据进行整合、筛选,录入 Excel,剔除不完整的数据,共 15 个土类,31 个亚类,151 个采样点(图 2),行政区数据和 DEM(30 m)数据来自中国科学院资源环境科学与数据中心([www.resdc.cn](http://www.resdc.cn))。采用 SPSS 24.0 软件对数据分析处理,并运用 Origin 2018 软件绘图。

1.2.2 土壤粒径转换 我国第二次土壤调查采用的是国际制土壤粒径分级,>2 mm 为石砾、2~0.02 mm 为砂粒、0.02~0.002 mm 为粉粒、<0.002 mm

为黏粒,而本研究选用的 EPIC 模型中的土壤粒径为美国制,即>2 mm 为石砾、0.10~2 mm 为砂粒、0.05~0.10 mm 为极细砂、0.002~0.05 mm 为粉粒、<0.002 mm 为黏粒。本文采用三次样条插值法<sup>[30]</sup>,运用 MATLAB 软件进行土壤粒径转换。

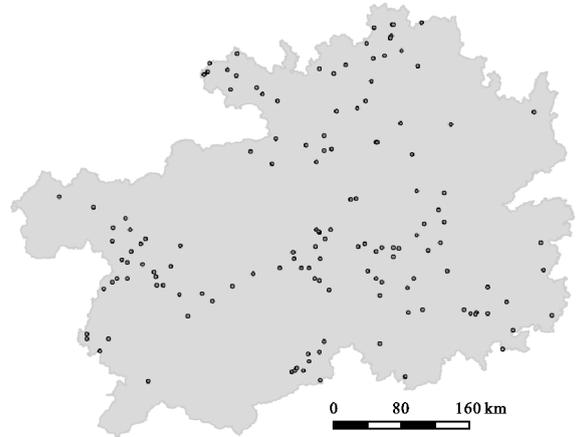


图 2 样点分布

1.2.3 K 值计算 目前国内外常用的 K 值计算方法有诺模方程和修正诺模方程、EPIC 模型、几何平均粒径模型计算公式等。EPIC 模型由于其需要的数据信息相对较少、计算简单和较好的估算效果等优点,目前使用较为广泛,因此本文采用 EPIC 模型计算 K 值。

$$K = 0.2 + 0.3 \exp[-0.0256 \text{SAN} \cdot (1 - \text{SIL}/100)] \cdot \left( \frac{\text{SIL}}{\text{CLA} + \text{SIL}} \right)^{0.3} \cdot \left[ 1.0 - \frac{0.25C}{C + \exp(3.72 - 2.95C)} \right] \cdot \left[ 1.0 - \frac{0.7 \text{SN}_1}{\text{SN}_1 + \exp(-5.51 + 22.9 \text{SN}_1)} \right]$$

式中:SAN 为砂粒含量(0.05~2.00 mm);SIL 为粉粒含量(0.002~0.05 mm);CLA 为黏粒含量(<0.002 mm); $\text{SN}_1 = 1 - \text{SAN}/100$ ;C 为有机碳含量(%);所得结果乘以 0.131 7 转换为国际制,单位为  $\text{t} \cdot \text{hm}^2 \cdot \text{h}/(\text{MJ} \cdot \text{mm} \cdot \text{hm}^2)$ 。

1.2.4 克里金插值 克里金插值法又被称为空间自协方差最佳插值法,基于变异函数理论和结构分析,在一定区域内对区域化变量进行无偏最优估计的一种方法,在土壤制图中得到广泛运用<sup>[21]</sup>。计算公式为:

$$P(x_0) = \sum_{i=1}^n w_i P(x_i)$$

式中: $P(x_0)$  为  $x_0$  处土壤可蚀性 K 值的估计值; $P(x_i)$  为第  $i$  个点实算的 K 值; $w_i$  为第  $i$  个点点对插值点的权重; $n$  为实算 K 值点的个数。克里金插值法包括普通克里金方法、泛克里金方法和协同克里金方法等<sup>[17]</sup>,本文结合采集样点的土壤数据特征,采用 EPIC 模型计算出土壤可蚀性 K 值,在 ArcGIS 中选用普通克里金方法,建立 K 值的协方差函数,根据方差变异分析结果,选用球面模型作为变异函数模型,完成 K 值的空间插值,形成 K 值空间数据库。

## 2 结果与分析

### 2.1 贵州省土壤可蚀性 $K$ 值与空间分布特征

(1) 贵州省土壤类型及  $K$  值总体状况。贵州省土壤类型包括黄壤、石灰土、水稻土、紫色土、粗骨土、红壤、黄棕壤、山地草甸土、潮土、棕壤、石质土、沼泽土、泥炭土、新积土和红黏土等 15 类。黄壤主要分布在黔北和黔中地区；石灰土在贵州省分布十分广泛，有石灰岩的地方都有石灰土分布；水稻土集中在黔中山原丘陵区、黔北中山峡谷区、黔东低山丘陵区 and 黔南低山河谷区；紫色土主要分布在黔北地区。贵州省各类型表层土壤平均  $K$  值为 0.023 0~0.047 7，面积加权平均值为 0.034 8，其中红黏土的  $K$  值最大，为 0.047 7，其次是潮土，为 0.046 0；黄壤、红壤、石灰土、紫色土、水稻土是贵州省主要的土壤类型，加权  $K$  值依次为 0.037 4，0.041 0，0.035 0，0.035 1，0.038 0，见表 2。

表 2 贵州省土壤可蚀性统计

序号	土类	面积/hm <sup>2</sup>	加权 $K$ 值
1	黄壤	4445000.00	0.0374
2	石灰土	1884266.67	0.0350
3	水稻土	1294760.00	0.0380
4	紫色土	510066.67	0.0351
5	粗骨土	432006.67	0.0351
6	红壤	211993.33	0.0410
7	黄棕壤	174433.33	0.0357
8	山地草甸土	9533.33	0.0381
9	潮土	5000.00	0.0460
10	棕壤	5466.67	0.0404
11	石质土	1133.33	0.0306
12	沼泽土	533.33	0.0368
13	泥炭土	400.00	0.0298
14	新积土	200.00	0.0230
15	红黏土	200.00	0.0477

根据梁音等<sup>[14]</sup>采用的土壤可蚀性  $K$  值的分级指标，将贵州省的土壤可蚀性  $K$  值进行分级。由图 3 可知，贵州省土壤可蚀性等级包括较低可蚀性土壤、中低可蚀性土壤、中可蚀性土壤、中高可蚀性土壤和高可蚀性土壤 5 个等级，其中分布最广的是中可蚀性土壤，占 33.39%，其次是中低可蚀性土壤，占 25.60%，中高可蚀性土壤占 16.35%，较低可蚀性土壤占 16.21%，高可蚀性土壤占 8.45%，中可蚀性土壤等级以上的土壤占 58.19%。总的来说，贵州省土壤可蚀性较高，中可蚀性土壤等级以上的土壤超过一半，无低可蚀性土壤级别，表明贵州省土壤侵蚀风险较高。

(2) 贵州省土壤可蚀性  $K$  值空间分布特征。从图 4 不难看出，全省  $K$  值分布的空间差异性较大，土壤

可蚀性从西向东逐渐增加，与贵州省西高东低的地势走向相反。在东西方向上， $K$  值黔东>黔中>黔西，南北方向上， $K$  值黔北南部>黔中>黔北北部>黔南。土壤可蚀性较高的区域主要集中在黔东和黔北南部，土壤可蚀性低的区域分布在黔南和黔北的西北部。

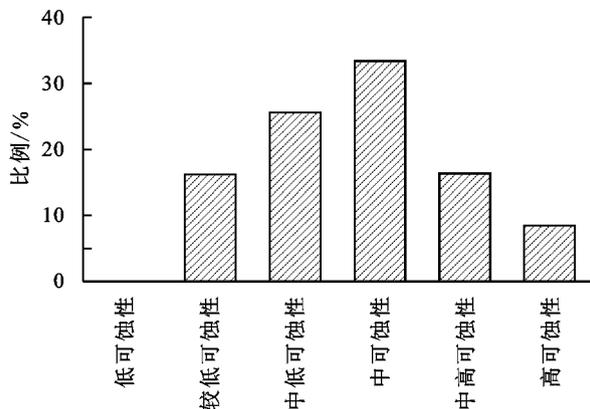


图 3 贵州省土壤可蚀性分级

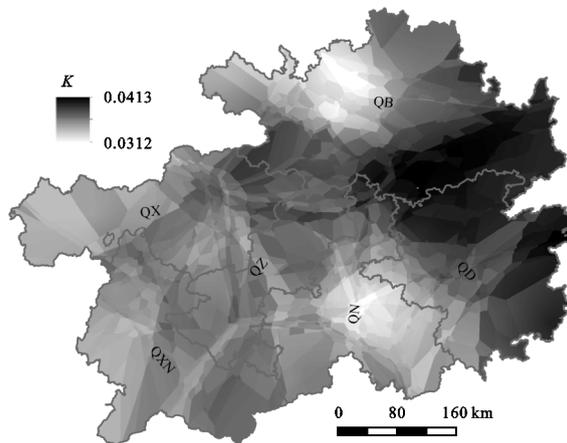


图 4 贵州省土壤可蚀性空间分布

### 2.2 贵州省土壤可蚀性 $K$ 的主要影响因子

(1) 成土母质与土壤可蚀性。不同成土母质形成的同类土壤，其  $K$  值有明显的差异；同种成土母质形成的不同土壤类型，其  $K$  值也有明显的差异（表 3）。各类成土母质形成土壤的可蚀性  $K$  值主要分布在 0.028 4~0.046 8 的范围内，页岩风化形成的红壤  $K$  值最大，为 0.046 8；砂页岩风化形成黄壤的  $K$  值最小，为 0.028 4。页岩发育形成土壤的  $K$  值都较大（黄棕壤除外），处于中可蚀性级别；砂岩发育形成土壤的  $K$  值较小，处于中低可蚀性级别。

(2) 海拔与土壤可蚀性的相关性分析。对剖面点的海拔、 $K$  值、砂粒、粉粒、黏粒和有机碳等数据进行相关性分析，结果见表 4。海拔与  $K$  值呈负相关，即随着海拔的升高， $K$  值有降低的趋势，但未达显著水平 ( $p > 0.05$ )。海拔对  $K$  值的影响，通过对土壤有机碳，以及土壤结构指标砂粒、粉粒和黏粒含量的影响而间接产生影响，可以看出，海拔与土壤有机碳呈

显著正相关( $p < 0.01$ ),即随着海拔的升高,土壤有机碳呈增加趋势;海拔与砂粒、粉粒含量呈显著正相关( $p < 0.01$ ),即随着海拔的升高,土壤砂粒、粉粒含量呈增加趋势;同时,还可以看出,海拔与黏粒含量呈负

相关关系,即随着海拔的升高,黏粒含量呈下降趋势,但未达显著水平( $p > 0.05$ )。故海拔对土壤可蚀性 K 的影响是对土壤有机碳、土壤砂粒、粉粒及黏粒含量综合影响的结果。

表 3 贵州省主要成土母质发育形成土壤的 K 值

土壤类型	成土母质类型							
	砂页岩	页岩	灰岩	砂岩	白云岩	板岩	玄武岩	泥岩
黄壤	0.0284	0.0395	0.0396	0.0260	0.0326	0.0385	0.0354	0.0414
黄棕壤	0.0396	0.0290	0.0402	0.0306	—	—	0.0314	—
红壤	0.0389	0.0468	0.0313	0.0257	—	0.0407	—	—
石灰土	—	—	0.0313	—	0.0384	—	—	—
紫色土	0.0373	0.0384	—	0.0319	—	—	—	0.0378
水稻土	0.0384	0.0372	0.0384	0.0316	—	0.0392	—	0.0407
粗骨土	0.0381	0.0311	—	—	0.0410	—	0.0439	—

表 4 土壤数据集的皮尔逊相关系数矩阵

类别	海拔	K 值	砂粒	粉粒	黏粒	有机碳
海拔	1					
K 值	-0.104	1				
砂粒	0.060	-0.716**	1			
粉粒	0.003	0.800**	-0.661**	1		
黏粒	-0.083	0.222	-0.727**	-0.034	1	
有机碳	0.444**	-0.168	0.032	0.153	-0.182	1

注:\*\* 在 0.01 级别(双尾),相关性显著。

### 2.3 土地利用方式对土壤可蚀性的影响

同种类型的土壤有多种利用方式,如水稻土利用方式是主要是水田、旱地、草地等,紫色土利用方式有旱地、林地、灌木林、草地等,从表 5 可知,不同土地利用方式下土壤可蚀性 K 值不同,水田的土壤可蚀性均值最大,0.038 2;其次是旱地,为 0.037 1;林地的土壤可蚀性均值最小,0.033 9。耕地的土壤可蚀性值明显大于其他用地类型,人为活动越强烈,土壤的可蚀性值越高。各用地类型 K 值的变异系数都较小,主要处于中小变异等级,各类土地利用的可蚀性值比较集中,变化范围不大。

表 5 不同土地利用方式 K 值分布

土地利用方式	样点数	K 值范围	K 平均值	变异系数/%	
耕地	水田	50	0.0279~0.0565	0.0382	12.21
	旱地	34	0.0230~0.0484	0.0371	14.79
草地	22	0.0218~0.0468	0.0364	19.37	
灌木	25	0.0239~0.0498	0.0359	16.73	
林地	20	0.0228~0.0477	0.0339	18.13	

## 3 讨论

### 3.1 贵州省土壤可蚀性 K 值与其他地区的比较

贵州省是典型的喀斯特地区,碳酸盐岩出露率高,呈现地带性土壤与非地带性的石灰土交错分布的规律<sup>[31]</sup>,K 值介于 0.023 0~0.047 7 t·hm<sup>2</sup>·h/

(MJ·mm·hm<sup>2</sup>),低于西北黄土区<sup>[32]</sup>和北方土石山区<sup>[33]</sup>,高于南方红壤区<sup>[33]</sup>和东北黑土区<sup>[34]</sup>。土壤可蚀性是土壤的内在属性,受自然环境条件和社会经济因素的影响。西北黄土区土壤可蚀性较高的原因可能是西北地区干旱少雨,植被破坏严重,土层十分深厚,质地为粉砂壤土,土体松散,通气透水性强,土壤中的粉砂含量通常在 50%以上,碳酸钙含量平均在 10%左右<sup>[35]</sup>,有机碳集中在 1~4 kg/m<sup>2</sup><sup>[36]</sup>;南方红壤区雨热充足,母质风化十分强烈,土层深厚,以红壤与砖红壤为主,砖红壤的黏粒含量高达 50%,红壤的黏粒含量高达 70%,土壤中腐殖质含量不高,呈弱酸性,红壤的黏粒含量更高,呈酸性到强酸性,有机质贫乏<sup>[37]</sup>,所以土壤可蚀性低;而贵州省壤土分布广泛,土层浅薄,粉粒含量高达 70%,黏粒和砂粒含量较低,有机质总体水平较高,平均为 4.06%,且贵州省人地矛盾更为突出,土地资源未能得到合理利用,造成土壤质地下降,所以 K 值高于南方红壤区和低于西北黄土区。此外土壤样点的海拔、土地利用方式、温度和成土母质等自然因素,都会对土壤质地产生影响,进而影响土壤可蚀性。

### 3.2 贵州省 K 值空间分布特征与水土流失状况

从空间分布看,全省的土壤可蚀性从西向东呈现逐渐增加的趋势,黔东和黔北部分地区的土壤可蚀性高。同时,依据《贵州省水土保持公告》(2006—2010 年)<sup>[26]</sup>,全省的水土流失率从西北向东南呈现逐渐减轻的特点。具体表现为:黔西地区水土流失率 37.91%,黔西南地区为 37.42%,黔北地区为 37.14%,黔中地区为 29.52%,黔南地区为 24.98%,黔东地区为 17.79%(图 5)。贵州省土壤可蚀性与水土流失的空间特征存在较大差异,可能是因为土壤可蚀性受土壤质地和有机质的直接影响,而水土流失与土壤可蚀性、坡度、植被

覆盖率和人类活动等因素有关<sup>[2]</sup>。虽然黔西和黔西南的土壤可蚀性低,但是地势起伏变化大,植被覆盖率低,土层浅薄,石漠化严重,坡耕地多且生态环境较差,人类活动强烈,因而土壤侵蚀量大<sup>[38]</sup>;而黔东地区尽管土壤可蚀性高,但地势起伏变化相对较小,植被覆盖率高,土层较厚,石漠化面积小<sup>[29]</sup>,人类活动较弱,因而土壤侵蚀量较小。因此,土壤可蚀性只是影响水土流失的一个因素,可蚀性值高的区域,水土流失不一定严重,但土壤可蚀性高,抗侵蚀能力就弱,易发生水土流失,在采取水保措施的时候,一定要引起重视。

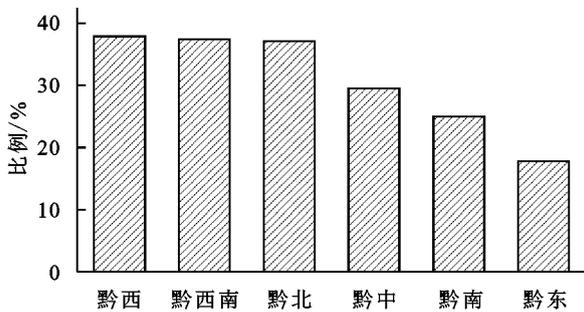


图 5 贵州省各地区水土流失分布面积比例

### 3.3 贵州省土壤可蚀性 $K$ 的影响因素

(1) 成土母质对土壤可蚀性的影响。成土母质决定了土壤的类型和土壤质地,相同母质形成不同土壤类型,其质地和有机质也不相同,砂页岩形成的水稻土的砂粒含量明显低于紫色土,粉粒含量高于紫色土,因而水稻土的  $K$  值高于紫色土。不同成土母质形成的相同土壤类型,其质地和有机质存在着较大差异,就紫色土而言,页岩形成的紫色土黏粒和粉粒含量高,砂岩形成的紫色土的砂粒含量较高,这与侯大斌<sup>[39]</sup>的研究结论一致,因此页岩发育形成紫色土的  $K$  值高于砂岩发育形成紫色土的  $K$  值。总的来说,成土母质对土壤可蚀性的影响是多方面的,一方面成土母质直接影响土壤质地和有机质含量,进而影响了土壤可蚀性,另一方面成土母质受气候、降雨等影响导致母质风化程度不同,形成土壤的微地形、土层厚度和土壤特性发生变化,进而影响了土壤可蚀性。

(2) 海拔对土壤可蚀性的影响。海拔升高,土壤可蚀性有降低的趋势(图 6),与荆莎莎<sup>[40]</sup>、李子君<sup>[41]</sup>等的研究结果一致。因为海拔是通过影响土壤质地和有机碳含量,进而间接影响土壤可蚀性。而土壤可蚀性与砂粒、粉粒、黏粒、有机碳含量密不可分,与有机碳含量呈负相关,与砂粒含量呈显著负相关,与粉粒和黏粒含量呈正相关,其中与粉粒含量相关性显著,海拔通过影响前述土壤指标间接影响土壤可蚀性,使得土壤可蚀性随海拔的升高呈降低的趋势。随着海拔的

升高,土壤有机碳含量有增加的趋势,这一结论与王琳<sup>[42]</sup>、彭新华<sup>[43]</sup>和 JavedMallick<sup>[44]</sup>等研究的结果一致,其原因可能是海拔升高,温度降低,分解速率下降,腐殖质层中的枯枝落叶堆积更多,有机质含量增加。本研究中海拔升高,砂粒与粉粒含量有增加的趋势,而黏粒含量有降低的趋势,这与 JavedMallick 等<sup>[44]</sup>、舒锟等<sup>[45]</sup>的研究结果相反,他们的研究表明,海拔升高,砂粒含量降低,而黏粒和粉粒含量是增加的。原因可能是因为本研究从全省的角度,整体上分析了海拔与土壤砂粒、粉粒和黏粒的关系,而非仅针对同一种土壤分析海拔与土壤质地的关系。

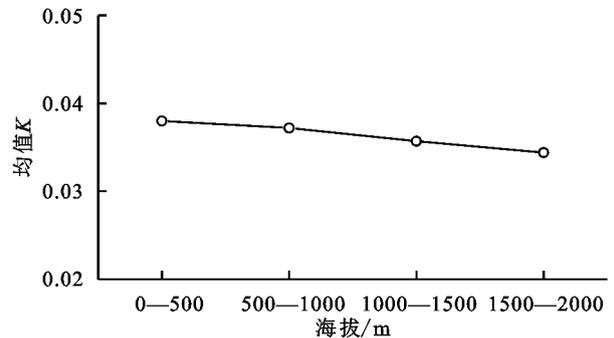


图 6 不同海拔梯度  $K$  值变化趋势

(3) 土地利用方式对土壤可蚀性的影响。就土地利用方式而言,同种土壤由于不同的利用方式,其土壤可蚀性  $K$  值会有所不同<sup>[9,46]</sup>。整体上,贵州省林地的土壤可蚀性最低,耕地的土壤可蚀性最高,而水田虽然可蚀性较高,但由于梯平化的影响,一般土壤侵蚀风险较低,旱地则多为坡耕地,受地形的影响更易发生水土流失。这一结果与尖山河小流域土壤可蚀性  $K$  值空间变异研究结果相同<sup>[47]</sup>,与坡面不同种植措施的径流小区观测结果相同,即坡耕地 > 草地 > 林地的产流产沙规律<sup>[48-49]</sup>,表明土壤经过多年的耕种其抗侵蚀能力下降,土壤侵蚀风险更大,是区域水土流失的主要策源地<sup>[9,46]</sup>。不同土地利用方式条件下,土壤可蚀性出现差异的原因,一方面林地与草地发达的根系可以固结土壤,改良土壤质地,植被冠层起到截流的作用,减少雨水对土壤的溅蚀作用;另一方面,枯枝落叶腐解后能够增强土壤中的有机质含量,从而增强土壤可蚀性。总体而言,人类活动对土壤可蚀性有明显的影响,人为干扰越大的地方,土壤可蚀性越高,土壤侵蚀风险越大。因此在生境复杂的喀斯特区域,需要合理规划土地利用方式,降低人为活动的影响,从而减少对土地资源的影响,降低土壤侵蚀风险。此外,对于土壤可蚀性高和水土流失严重的坡耕地,更需要重点关注,相关研究表明,秸秆覆盖是控制喀斯特地区坡耕地水土流失,减小土壤可蚀性的有效途径<sup>[50-51]</sup>,对于坡耕地的水土流失防治有重要意义。

## 4 结论

(1) 贵州省各土壤类型表层土的平均K值介于0.023 0~0.047 7 t·hm<sup>2</sup>·h/(MJ·mm·hm<sup>2</sup>),其中红黏土的K值最大,为0.047 7 t·hm<sup>2</sup>·h/(MJ·mm·hm<sup>2</sup>),其次是潮土为0.046 0 t·hm<sup>2</sup>·h/(MJ·mm·hm<sup>2</sup>),新积土的K值最小,为0.023 0 t·hm<sup>2</sup>·h/(MJ·mm·hm<sup>2</sup>)。

(2) 贵州省以中低和中可蚀性土壤为主,中可蚀性土壤占33.39%,中低可蚀性土壤占25.60%,土壤可蚀性值较高,潜在土壤侵蚀风险大。

(3) 从空间分布看,全省的土壤可蚀性从西向东逐渐增加,黔东和黔北南部土壤可蚀性最大,黔中次之,黔北北部和黔南的土壤可蚀性最低;南北方向上呈现出:黔北南部>黔中>黔北北部>黔南。

(4) 各类成土母质形成土壤的可蚀性值介于0.028 4~0.046 8 t·hm<sup>2</sup>·h/(MJ·mm·hm<sup>2</sup>),页岩发育形成土壤的K值都较大(黄棕壤除外),砂岩发育形成土壤的K值较小。

(5) 海拔通过影响土壤质地和有机碳含量,进而间接影响土壤可蚀性,即随着海拔升高,土壤可蚀性有降低的趋势。

(6) 不同土地利用方式下土壤可蚀性值不同,总体上呈现出水田>旱地>草地>灌木>林地的特征。

### 参考文献:

[1] 中华人民共和国水利部.中国水土保持公报(2018年)[R/OL]. [http://www.mwr.gov.cn/sj/tjgb/zgstbcgb/201908/t20190820\\_1353674.html](http://www.mwr.gov.cn/sj/tjgb/zgstbcgb/201908/t20190820_1353674.html).

[2] 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):32-37.

[3] Olson TC, Wischmeier WH. Soil erodibility evaluation for soils on the runoff and erosion stations[J]. Soil Sci. Soc. Am. Proc., 1963, 27(5): 590-592.

[4] 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.

[5] 张科利,蔡永明,刘宝元,等.土壤可蚀性动态变化规律研究[J].地理学报,2001,56(6):673-681.

[6] 张科利,彭文英,杨红丽.中国土壤可蚀性值及其估算[J].土壤学报,2007,44(1):7-13.

[7] 杨子生.滇东北山区坡耕地土壤可蚀性因子[J].山地学报,1999,17(S):10-15.

[8] 郑海金,杨洁,喻荣岗,等.红壤坡地土壤可蚀性K值研究[J].土壤通报,2010,41(2):425-428.

[9] 海春兴,赵焯,陈志凡,等.河北省坝上不同土地利用方式土壤可蚀性研究:以河北省丰宁县大滩乡三道河为例[J].中国生态农业学报,2005,13(1):146-147.

[10] 李鹏,李占斌,郑郁.不同土地利用方式对于热河谷地

区土壤可蚀性的影响[J].水土保持研究,2011,18(4):16-19.

[11] 杨帆,张洪江,程金花,等.北京市延庆县不同土地利用方式下的土壤可蚀性研究[J].水土保持通报,2013,33(6):19-23.

[12] 薛永伟,王茹.紫色土丘陵区不同土地利用条件土壤的可蚀性K值[J].江苏农业科学,2016,44(11):488-491.

[13] 师长兴.砾石对土壤可蚀性的影响及土壤可蚀性值估算方法[J].土壤通报,2009,40(6):1398-1401.

[14] 王洪德,徐小明,余冬立.砾石覆盖对海涂围垦区粉砂土坡面土壤可蚀性影响试验研究[J].排灌机械工程学报,2019,37(6):498-503.

[15] 梁音,史学正.长江以南东部丘陵山区土壤可蚀性K值研究[J].水土保持研究,1999,6(2):47-52.

[16] 仲嘉亮,郭朝霞.新疆土壤可蚀性K值空间插值及其分布特征研究[J].新疆环境保护,2014,36(3):1-4,10.

[17] 汪邦稳.安徽省土壤可蚀性K值及其分布特征[J].中国水土保持科学,2019,17(6):132-139.

[18] Zhou Q W, Yang S T, Zhao C S, et al. A soil erosion assessment of the Upper Mekong River in Yunnan Province, China[J]. Mountain Research and Development, 2014, 34(1):36-47.

[19] Baskan O, Cebel H, Akgul S, et al. Conditional simulation of USLE/RUSLE soil erodibility factor by geostatistics in a Mediterranean Catchment, Turkey [J]. Environmental Earth Ence, 2010, 60(6):1179-1187.

[20] 李季孝,丁剑宏,陶余铨,等.云南省土壤可蚀性及其空间分布特征[J].人民黄河,2019,41(8):103-106.

[21] 周秋文,罗雅雪,张思琪,等.喀斯特地区土壤可蚀性因子空间估算研究进展[J].贵州师范大学学报:自然科学版,2017,35(6):16-21.

[22] Zhang J C, Li H D, Lin J, et al. Spatial variability of soil erodibility(K-Factor) at a catchment scale in China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(5): 2199-2206.

[23] Jiang Q H, Zhou P, Liao C, et al. Spatial pattern of soil erodibility factor(K) as affected by ecological restoration in a typical degraded watershed of central China [J]. Science of the Total Environment, 2020, 749: 141609.

[24] Liu X J, Zhang Y, Li P. Spatial variation characteristics of soil erodibility in the Yingwugou watershed of the middle dan river, China [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2020, 17(10):3568.

[25] 贵州省水利厅.贵州省水土保持公告(2006—2010)[R/OL]. 2013-02-24. [http://mwr.guizhou.gov.cn/xxgk/zd-lygk/stbc\\_87055/201812/t20181224\\_21803097.html](http://mwr.guizhou.gov.cn/xxgk/zd-lygk/stbc_87055/201812/t20181224_21803097.html).

[26] 魏兴萍,袁道先,谢世友.西南岩溶区水土流失与石漠化的变化关系研究:以重庆南川岩溶区为例[J].中国岩溶,2010,29(1):20-26.

- [27] 戴全厚, 严友进. 西南喀斯特石漠化与水土流失研究进展[J]. 水土保持学报, 2018, 32(2): 1-10.
- [28] 郑永林, 王海燕, 王一格, 等. 三峡库区笋溪河流域面源污染及其与土壤可蚀性 K 值的关系[J]. 应用与环境生物学报, 2021, 27(1): 208-213.
- [29] 史鹏韬, 刘子琦, 李开萍. 贵州省水土流失时空变化特征[J]. 地球与环境, 2019, 47(5): 586-593.
- [30] 蔡永明, 张科利, 李双才. 不同粒径制间土壤质地资料的转换问题研究[J]. 土壤学报, 2003, 40(4): 511-517.
- [31] 黄会前, 何腾兵, 牟力. 贵州母岩(母质)对土壤类型及分布的影响[J]. 浙江农业科学, 2016, 57(11): 1816-1820.
- [32] Zhang K L, Shu A P, Xu X L, et al. Soil erodibility and its estimation for agricultural soils in China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 72(6): 1002-1011.
- [33] 冯克义. 我国土壤可蚀性 K 值研究[J]. 水利水电技术, 2019, 50(S2): 225-228.
- [34] 王彬, 郑粉莉, 王玉玺. 东北典型薄层黑土区土壤可蚀性模型适用性分析[J]. 农业工程学报, 2012, 28(6): 126-131.
- [35] 张耀方, 赵世伟, 王子龙, 等. 黄土高原土壤团聚体胶结物质的分布及作用综述[J]. 中国水土保持科学, 2015, 13(5): 145-150.
- [36] 徐香兰, 张科利, 徐宪立, 等. 黄土高原地区土壤有机碳估算及其分布规律分析[J]. 水土保持学报, 2003, 17(3): 13-15.
- [37] 陈晓安, 杨洁, 熊永, 等. 红壤区崩岗侵蚀的土壤特性与影响因素研究[J]. 水利学报, 2013, 44(10): 1175-1181.
- [38] 熊康宁, 李晋, 龙明忠. 典型喀斯特石漠化治理区水土流失特征与关键问题[J]. 地理学报, 2012, 67(7): 878-888.
- [39] 侯大斌. 川渝地区土壤可蚀性评价[D]. 成都: 四川农业大学, 2001.
- [40] 荆莎莎, 张荣华, 张庆红, 等. 沂蒙山区典型县土壤可蚀性 K 值空间变异研究[J]. 土壤通报, 2017, 48(2): 278-284.
- [41] 李子君, 王硕, 林锦阔, 等. 沂河流域土壤可蚀性空间变异研究[J]. 土壤通报, 2019, 50(1): 45-51.
- [42] 王琳, 欧阳华, 周才平, 等. 贡嘎山东坡土壤有机质及氮素分布特征[J]. 地理学报, 2004, 59(6): 1012-1019.
- [43] 彭新华, 李元沅, 赵其国. 我国中亚热带山地土壤有机质研究[J]. 山地学报, 2001, 19(6): 489-496.
- [44] Mallick J, Al-Wadi H, Rahman A, et al. Spatial variability of soil erodibility and its correlation with soil properties in semi-arid mountainous watershed, Saudi Arabia[J]. *Geocarto International*, 2016, 31(6): 661-681.
- [45] 舒锬, 张家春, 张珍明, 等. 不同海拔梯度下梵净山土壤机械组成及养分特征[J]. 四川农业大学学报, 2017, 35(1): 52-59.
- [46] 陈英, 魏兴萍, 雷珊. 青木关岩溶槽谷流域不同土地利用类型土壤可蚀性分析[J]. 中国岩溶, 2020, 39(6): 836-844.
- [47] 王敬贵, 亢庆, 邝高明, 等. 尖山河小流域土壤可蚀性 K 值空间变异研究[J]. 生态环境学报, 2014, 23(4): 555-560.
- [48] 杨青, 杨广斌, 赵青松, 等. 喀斯特地区不同降雨和植被覆盖的坡面产流产沙特征[J]. 水土保持通报, 2020, 40(1): 9-16.
- [49] 黄凯, 李瑞, 李勇, 等. 贵州省黔南地区不同侵蚀性雨型条件下生物措施对坡面产流产沙的响应[J]. 水土保持学报, 2020, 34(6): 14-21.
- [50] 盘礼东, 李瑞, 黎庆贵, 等. 黔西喀斯特区秸秆覆盖对坡耕地产流产沙特征的响应[J]. 水土保持学报, 2021, 35(1): 9-16.
- [51] 黄新君, 陈尚洪, 刘定辉, 等. 秸秆覆盖和有机质输入对紫色土土壤可蚀性的影响[J]. 中国农业气象, 2016, 37(3): 289-296.

(上接第 76 页)

- [15] Renard K G, Freimund J R. Using monthly precipitation data to estimate the R-factor in the revised USLE[J]. *Journal of Hydrology*, 1994, 157: 287-306.
- [16] 刘刚, 李鹏, 张旭, 等. 西安市水土流失空间分布特征与管控空间划分[J]. 水土保持学报, 2020, 34(3): 91-97.
- [17] McCool D K, Brown L C, Foster G R, et al. Revised slope steepness factor for the Universal Soil Loss Equation[J]. *Transactions of the Asae*, 1987, 30(5): 1387-1396.
- [18] 黄金良, 洪华生, 张路平, 等. 基于 GIS 和 USLE 的九龙江流域土壤侵蚀量预测研究[J]. 水土保持学报, 2004, 18(5): 75-79.
- [19] 王文娟, 张树文, 李颖, 等. 基于 GIS 和 USLE 的三江平原土壤侵蚀定量评价[J]. 干旱区资源与环境, 2008, 22(9): 112-117.
- [20] 水利部. SL 190-2007 土壤侵蚀分类分级标准[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2007: 8-9.
- [21] 杨吉山, 史学建, 侯素珍, 等. 2016 年“8·17”暴雨西柳沟土壤侵蚀产沙量分析[J]. 人民黄河, 2020, 42(1): 82-85, 90.
- [22] 王金花, 李占斌, 张荣刚, 等. 水蚀风蚀交错区流域景观格局变化及水沙响应关系[J]. 中国水土保持科学, 2016, 14(3): 68-75.
- [23] 章影, 廖畅, 姜庆虎, 等. 丹江口库区土壤侵蚀对土地利用变化的响应[J]. 水土保持通报, 2017, 37(1): 104-111, 2.