

引用格式:

丰秋兰, 周运超. 喀斯特山区土壤颗粒的分布特征及其对可蚀性的影响[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2022, 48(5): 563–571.

FENG Q L, ZHOU Y C. Soil particle size distribution and effects on erodibility in karst district[J]. Journal of Hunan Agricultural University(Natural Sciences), 2022, 48(5): 563–571.

投稿网址: <http://xb.hunau.edu.cn>



## 喀斯特山区土壤颗粒的分布特征及其对可蚀性的影响

丰秋兰<sup>1,2</sup>, 周运超<sup>1,2\*</sup>

(1.贵州省森林资源与环境研究中心, 贵州 贵阳 550025; 2.贵州大学林学院, 贵州 贵阳 550025)

**摘 要:** 采用野外调查与室内试验相结合的方法, 分析喀斯特山区有林地、灌木林地、灌丛、荒草地、退耕地和耕地等 6 种土地利用类型的土壤颗粒组成, 探究不同土地利用类型土壤颗粒分布、分形及可蚀性差异, 并阐明土壤粒径分布特征与土壤可蚀性的关系。结果表明: 6 种土地利用类型土壤粒径分布均表现为粉粒、黏粒、砂粒质量分数依次减少, 灌木林地和灌丛砂粒质量分数显著高于退耕地和耕地的, 退耕地黏粒质量分数显著高于灌木林地、灌丛及荒草地的; 6 种土地利用类型土壤分形维数为 2.822~2.873, 灌木林地、灌丛、荒草地、有林地、耕地、退耕地的土壤可蚀性大小依次降低; 土壤分形维数与土壤砂粒和粉粒质量分数呈显著负相关, 与黏粒质量分数呈显著正相关; 土壤可蚀性与土壤砂粒和粉粒质量分数呈显著正相关, 与土壤黏粒质量分数呈显著负相关; 通过土壤颗粒分形维数与黏粒质量分数的关系模型所得的土壤分形维数拟合值与实测值间的相对误差最大为 0.11%, 最小为 0.03%, 说明该模型有较高程度的可靠性和准确性, 可用来代替实测法计算土壤颗粒分形维数。在喀斯特山区的灌木林地和灌丛土壤最易受到侵蚀, 应加强对其的防治, 尤其是在坡度较大区域。

**关 键 词:** 喀斯特山区; 土地利用类型; 土壤粒径分布; 分形维数; 可蚀性  $K$  值

中图分类号: S152.3 文献标志码: A 文章编号: 1007-1032(2022)05-0563-09

## Soil particle size distribution and effects on erodibility in karst district

FENG Qiulan<sup>1,2</sup>, ZHOU Yunchao<sup>1,2\*</sup>

(1. Guizhou Provincial Forest Resources and Environment Research Center, Guiyang, Guizhou 550025, China; 2. College of Forestry, Guizhou University, Guiyang, Guizhou 550025, China)

**Abstract:** To study the particle size distribution, effects on erodibility and to clarify the relationship between soil particle size distribution and erodibility of six land use types in karst district, we combined field sampling and laboratory analysis of the soil particle composition, and the differences in soil particle distribution, fractal and erodibility. The six land use types included forest land, shrub land, scrub, grassland, returned farmland and cultivated land. The results showed that the mass fractions of silt, clay and sand decreased successively among the studied six type use lands. The sand mass fractions of shrub land and scrub were significantly higher than those of returned farmland and cultivated land, and the clay mass fractions of returned farmland was significantly higher than those of shrub land, scrub and grassland. The soil fractal dimension was 2.822-2.873. The soil erodibility of shrub land, scrub, grassland, woodland, cultivated land and returned farmland decreased in turn. Soil fractal dimension was significantly negatively correlated with the mass fractions of soil sand and silt, and significantly positively correlated with the mass fraction of clay. Soil erodibility was significantly positively correlated with the mass fractions of soil sand and silt, and negatively correlated with the mass

收稿日期: 2022-06-10

修回日期: 2022-10-20

基金项目: 贵州省人才团队项目(QKHPTRC[2018]5261、QKHPTRC[2019]5614); 贵州省一流学科建设项目(GNYL[2017]007); 贵州省科技计划项目(QKHZC[2018]2305)

作者简介: 丰秋兰(1996—), 女, 贵州铜仁人, 硕士研究生, 主要从事水土保持与荒漠化防治研究, [fb199703@163.com](mailto:fb199703@163.com); \*通信作者, 周运超, 博士, 教授, 主要从事森林土壤研究, [yc409@163.com](mailto:yc409@163.com)

fraction of soil clay. The maximum relative error between the fitting value of soil fractal dimension and the measured value was 0.11%, and the minimum was 0.03%, which showed that the model had high reliability and accuracy and could be used to calculate the fractal dimension of soil particles instead of the measured method. Shrub land and scrub soils were most vulnerable to erosion in karst mountainous areas, and their prevention and control should be strengthened, especially in areas with high slopes.

**Keywords:** karst district; land use type; soil particle distribution; fractal dimension; erodibility  $K$  value

土壤侵蚀是全球性的生态环境问题,是造成土壤退化及破坏的主要原因,严重制约了人类的生存与发展<sup>[1]</sup>。除气候、地形、植被及土壤类型外,土地利用类型和土壤自身抗蚀性也对土壤侵蚀有很重要的影响<sup>[2]</sup>。喀斯特环境是自然环境中一种比较脆弱的系统,主要特点为土层较薄,营养保墒能力差,抗干扰能力弱,受干扰后难以恢复。20 世纪 60 年代,由于森林砍伐、荒山开垦等活动频繁,导致了土地利用类型的多样化<sup>[3]</sup>。而不同的土地利用方式又是土壤发生变化最普遍、最直接的原因。了解喀斯特山区不同土地利用类型下土壤颗粒分布特征和土壤可蚀性  $K$  值的差异,可为合理规划土地资源、改善土地利用方式及农业可持续发展等提供参考依据<sup>[4-5]</sup>。21 世纪初,学者们开始关注岩溶地区的土壤侵蚀问题,在西南岩溶地区开展了土壤抗蚀性的研究,取得了一系列具代表性的成果。刘鹏等<sup>[6]</sup>对岩溶盆地不同坡位下土壤颗粒的组成及可蚀性进行了研究。刘宽梅等<sup>[7]</sup>和唐夫凯等<sup>[8]</sup>对喀斯特地区不同土地利用类型下土壤抗蚀性进行了研究。鲍恩侯等<sup>[9]</sup>研究了西南喀斯特地区坡地、洼地及落水洞 3 种不同侵蚀场地土壤粒径的分布及土壤可蚀性。上述研究均对喀斯特地区不同植被恢复阶段、不同土地利用类型土壤粒径分布及抗侵蚀能力进行了研究,但针对普定后寨河流域,基于高密度采样的土壤可蚀性  $K$  值和土壤粒径分布的研究仍较少。基于此,本研究中,以普定县马官镇 6 种不同土地利用类型(耕地、退耕地、荒草地、灌丛、灌木林地、有林地)的土壤为研究对象,采用实地调查与室内试验相结合的方法,探究不同土地利用类型的土壤可蚀性  $K$  值和土壤颗粒分布特征,试图阐明以下问题:①土壤粒径分布特征如何响应不同土地利用方式的变化;②不同土地利用方式下土壤可蚀性如何;③土壤颗粒组成与土壤侵蚀的关系及意义如何。以期为喀斯特山区不同土地利用类型土壤的科学评价与合理保护、利用提供依据,同时为当地石漠化治理、水土流失防治

及生态环境的修复和重建提供参考。

## 1 研究区概况

普定县位于贵州省安顺市,地理坐标为 105°27'49"E~105°58'51"E、16°26'36"N~26°31'42"N,海拔高度 1223.4~1567.4 m,属于亚热带季风性湿润气候,年平均气温 15~18 °C,年平均日照时数为 1164.9 h,年降水量 1100~1400 mm。在流域南部有溶丘盆地和峰林盆地,北部则是峰丛洼地及峰丛峡谷,是典型的喀斯特地貌。研究区土地利用类型有耕地、有林地、草地、灌木林地、水域、未利用地及建设用地等,前 4 类分别占 41.35%、10.63%、8.92%、16.02%,水域、建设用地、未利用地等占 23.08%<sup>[10]</sup>。区内土壤侵蚀与土地利用类型有较强的相关性,水土流失面积高达 79.77%。土层较薄,大多为 10~60 cm,多呈微酸至微碱性。区内植被以亚热带种类为主,有各类植物 600 余种。乔木树种主要有柏木(*Cupressus funebris*)、构树(*Broussonetia papyrifera*)、樟树(*Cinnamomum camphora*)、圆果化香(*Platycarya longipes*)、朴树(*Celtis sinensis*)和杉木(*Cunninghamia lanceolata*)等;灌木主要有火棘(*Pyracantha fortuneana*)、樱桃(*Cerasus pseudocerasus*)、香椿(*Toona sinensis*)、马桑(*Coriaria nepalensis*)、竹叶椒(*Zanthoxylum armatum*)和小果蔷薇(*Rosa cymosa*)等;灌丛主要是荚蒾(*Viburnum dilatatum*)、马桑、竹叶椒、火棘等;农作物主要是玉米(*Zea mays*)、水稻(*Oryza sativa*)、大豆(*Glycine max*)和油菜(*Brassica napus*)等。

## 2 材料与方法

### 2.1 样品采集与处理

利用 ArcGIS 9.3,依据网格法原理在研究区域设置采样单元网格(图 1),实地大小为 150 m×150 m,采样点为采样单元格的中心。根据设置的样点分布地形图并结合 GPS 定位确定采样点。采用剖面

法从下往上分层采集土壤样品。土壤剖面挖掘深度 $\leq 1\text{ m}$ ，土层深挖至 $1\text{ m}$ ；若土层厚度达不到 $1\text{ m}$ ，

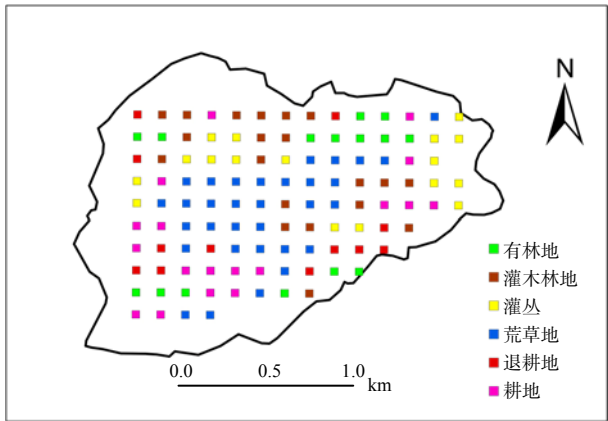


图 1 研究区的采样点及土地利用类型分布

Fig.1 Distribution of sampling points and land use types in the study area

则采集到基岩为止。将剖面按取样断面分为 12 层， $0\sim 20\text{ cm}$  均分为 4 层，每层厚度 $5\text{ cm}$ ； $>20\sim 100\text{ cm}$  均分为 8 层，每层厚度 $10\text{ cm}$ 。同时记录各采样点的本底信息。根据野外调查土地利用方式结合植被覆盖状况，按人为干扰程度的大小将土地利用类型分为耕地、退耕地、荒草地、灌丛、灌木林地及有林地，各土地利用类型的基本信息列于表 1。少部分采样点落在居民房、公路河流等特殊用地上，则在其周围采集样品。共采集土壤样品 114 个，其中，有林地 15 个、灌木林地 20 个、灌丛 17 个、荒草地 32 个、退耕地 12 个、耕地 18 个(图 1)。将采集的土壤样品运回实验室，经自然风干后用镊子检出杂物，依照试验要求进行研磨后过筛。

表 1 供试 6 种土地利用类型的基本信息

Table 1 Basic information of six land use types

土地 利用类型	坡度 均值/(°)	土层厚度 均值/cm	坡位上样本数占总样本数的比例/%					植被类型
			坡顶	坡上部	坡中部	坡下部	坡脚	
退耕地	15.29	61.43	—	—	29	14	57	杂草、杉木、蒿草
有林地	30.80	39.55	—	18	18	27	37	杂草、马桑、杉木、樟树
灌木林地	33.56	35.00	—	11	23	22	44	樱桃、小果蔷薇、鼠李、竹叶椒、火棘
灌丛	52.11	24.44	—	56	11	11	22	茛苳、马桑、火棘、圆果化香、花椒
荒草地	37.54	37.74	3	23	29	16	29	蕨、火棘、杂草、三叶草、蒲公英
耕地	10.63	56.15	—	8	—	15	77	油菜、玉米、水稻、蚕豆

2.2 样品测定

采用比重计法测定土壤颗粒组成。根据美国土壤粒径分级标准将土壤粒径分为砂粒( $>0.050\sim 2.000\text{ mm}$ )、粉粒( $>0.002\sim 0.050\text{ mm}$ )、黏粒( $\leq 0.002\text{ mm}$ )<sup>[11]</sup>。采用重铬酸钾-硫酸氧化法<sup>[12]</sup>测定土壤有机碳。

2.3 土壤分形维数和可蚀性 K 值的计算

根据杨培岭等<sup>[13]</sup>推导的以不同级别颗粒的质量分布表征的土壤分形模型计算土壤分形维数(D)。采用 WILLIAMS 等<sup>[14]</sup>推导的 EPIC 模型估算土壤可蚀性 K 值，并结合鲍恩侯等<sup>[9]</sup>的划分标准，将其划分为低可蚀性( $\leq 0.10$ )、较低可蚀性( $>0.10\sim 0.20$ )、中等可蚀性( $>0.20\sim 0.25$ )、较高可蚀性( $>0.25\sim 0.30$ )、高可蚀性( $\geq 0.30$ )等 5 个等级。

2.4 数据处理

采用 Excel 2010 对所得数据进行计算、整理及

绘图；采用 SPSS 25.0 进行单因素方差分析及 Pearson 相关性分析。

3 结果与分析

3.1 不同土地利用类型土壤粒径分布特征

由表 2 可知，各土地利用类型土壤颗粒均以粉粒为主，平均质量分数为 49.79%；黏粒次之，平均质量分数为 32.21%；砂粒最少，平均质量分数为 18.00%。退耕地和耕地土壤砂粒质量分数显著低于灌木林地和灌丛的，退耕地黏粒质量分数显著高于灌木林地、灌丛和荒草地的。6 种土地利用类型的土壤分形维数(D)均值由大到小依次为退耕地(2.873)、耕地(2.853)、有林地(2.853)、荒草地(2.848)、灌丛(2.824)、灌木林地(2.822)。退耕地的 D 显著高于其他土地利用类型的，灌木林地和灌丛的 D 显著低于其他土地利用类型的。

表 2 6 种土地利用类型土壤的颗粒组成及分形维数

Table 2 Soil particle size distribution and fractal dimension of six land use types

土地 利用类型	土壤颗粒组成/%			<i>D</i>
	砂粒(>0.050~2.000 mm)	粉粒(>0.002~0.050 mm)	黏粒(≤0.002 mm)	
有林地	(17.45±2.72)ab	49.51±0.92	(33.04±2.20)ab	(2.853±0.004)b
灌木林地	(22.01±1.00)a	49.75±1.26	(28.24±2.06)b	(2.822±0.006)c
灌丛	(21.36±1.42)a	51.21±2.78	(27.43±2.40)b	(2.824±0.008)c
荒草地	(19.75±1.60)ab	50.54±1.24	(29.71±1.86)b	(2.848±0.007)b
退耕地	(13.21±1.82)b	46.12±2.51	(40.67±3.40)a	(2.873±0.005)a
耕地	(14.23±0.67)b	51.63±1.32	(34.14±1.52)ab	(2.853±0.003)b

同列不同字母示不同土地利用类型间的差异有统计学意义( $P<0.05$ )。

由图 2 可知,在 0~100 cm 土层,随土层的加深,不同土地利用类型土壤各粒径质量分数及分形维数的变化趋势均有所差异。有林地土壤砂粒质量分数在 0~60 cm 土层随土层加深呈减少的趋势,随后基本稳定;粉粒质量分数在 0~30 cm 土层随土层加深呈减少的趋势,在 >30~60 cm 土层随土层加深呈增加的趋势,在 >50~60 cm 土层的最高,随后又随土层加深逐渐减少;黏粒质量分数和  $D$  在 0~30 cm 土层均随土层加深呈增加的趋势,在 >30~60 cm 土层则随土层加深减少,随后又随土层加深呈增加的趋势。灌木林地土壤砂粒质量分数在 0~40 cm 土层随土层加深呈减少的趋势,随后大幅增加,在 >50~60 cm 土层又减少;粉粒质量分数在 0~30 cm 土层随土层加深稍微减少,随后随土层加深呈增加

的趋势;黏粒质量分数和  $D$  在 0~40 cm 土层随土层加深呈增加的趋势,随后大幅减少,在 >50~60 cm 土层又略有增加。在 0~30 cm 土层,灌丛土壤砂粒质量分数随土层加深呈减少的趋势,粉粒质量分数变化不明显,黏粒质量分数和  $D$  则随土层加深呈增加的趋势。耕地土壤砂粒质量分数在 0~30 cm 土层小幅度上下波动,随后减少并基本稳定;粉粒质量分数在 0~30 cm 土层随土层加深呈减少的趋势,在 >30~70 cm 土层则上下波动,随后急剧增加,在 >80~90 cm 土层的最高,在 >90~100 cm 土层又小幅减少;黏粒质量分数和  $D$  在 0~70 cm 土层随土层加深呈增加的趋势,随后急剧减少,在 >90~100 cm 土层又增加。退耕地土壤砂粒质量分数在 0~20 cm 土层随土层加深呈减少的趋势,在 >20~60 cm 土层

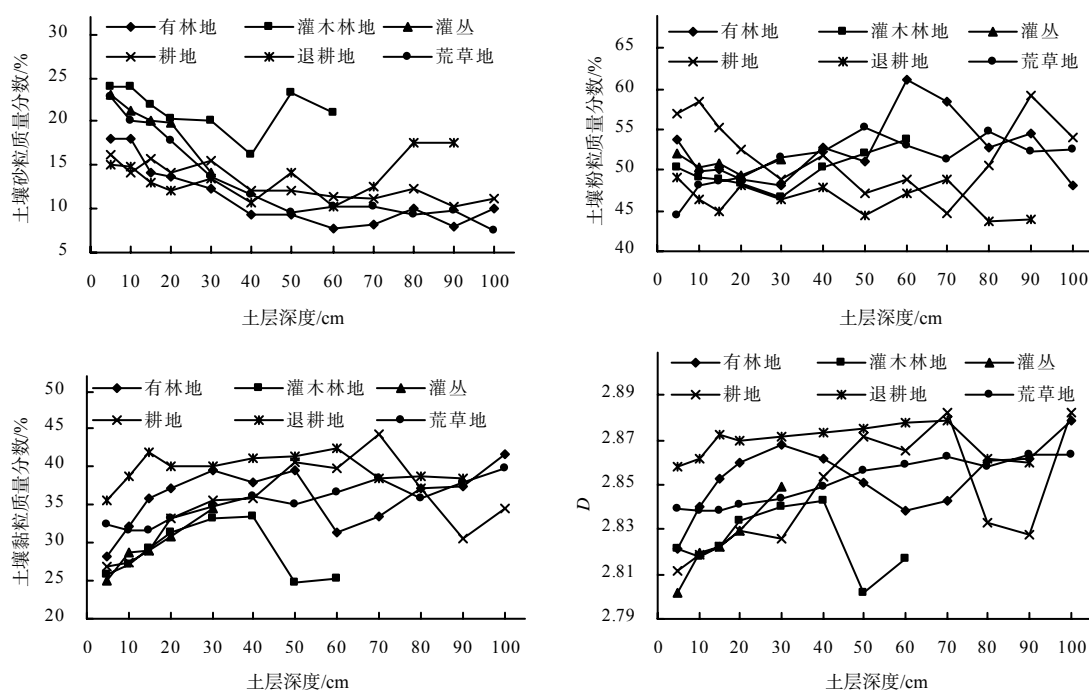


图 2 6 种土地利用类型土壤的颗粒组成和分形维数在土壤剖面上的变化

Fig.2 Changes of soil particle composition and fractal dimension in soil profile of six land use types

上下波动,在>60~100 cm 土层随土层加深呈增加的趋势;粉粒在 0~100 cm 土层变化不明显;黏粒质量分数和  $D$  在 0~15 cm 土层随土层加深呈增加的趋势,随后较平稳,黏粒质量分数在>60~70 cm 土层略有减少后再保持平稳,而  $D$  则在>70~80 cm 土层略有减小后再保持平稳。荒草地土壤砂粒质量分数在 0~100 cm 土层随土层加深呈减少的趋势,粉粒、黏粒质量分数和  $D$  均呈增加趋势。在 0~100 cm 土层,灌木林地土壤砂粒质量分数在各土层均高于其他土地利用类型的,而土壤黏粒质量分数和  $D$  均低于其他土地利用类型的。

3.2 土壤可蚀性  $K$  值的分布特征

由表 3 可知,荒草地土壤可蚀性  $K$  值为 0.17~0.32,变化范围较大;有林地土壤可蚀性  $K$  值

为 0.19~0.21,变化范围最小;各土地利用类型土壤可蚀性  $K$  值都受到不同程度的异质性值的影响。变异系数可表征土壤可蚀性  $K$  值的离散程度,根据变异程度将其分为强变异性(>1.0)、中等变异性(>0.1~1.0)、弱变异性(0.0~0.1)<sup>[15]</sup>。本研究中,有林地、灌木林地、荒草地、耕地、退耕地均属于中等程度的变异性。各土地利用类型土壤可蚀性  $K$  的均值与中值相差不大,表明各土地利用类型  $K$  值的分布都较均匀,受异常值影响的概率较小。由表 4 可知,有林地、灌木林地、荒草地均以可蚀性  $K$  值为>0.10~0.20 的土壤为主,其中灌木林地、灌丛、荒草地还有少部分可蚀性  $K$  值为>0.25~0.30 的土壤,说明灌木林地、灌丛及荒草地土壤质地较一致。

表 3 6 种土地利用类型土壤的可蚀性  $K$  值  
Table 3  $K$  value of soil erodibility for six land use types

土地利用类型	样本数	土壤的可蚀性 $K$ 值					
		最小值	最大值	平均值	中值	标准差	变异系数
有林地	15	0.19	0.21	0.20	0.20	0.01	0.05
灌木林地	20	0.17	0.26	0.21	0.21	0.03	0.14
灌丛	17	0.17	0.26	0.21	0.22	0.03	0.14
荒草地	32	0.17	0.32	0.21	0.20	0.04	0.19
退耕地	12	0.15	0.22	0.18	0.17	0.03	0.17
耕地	18	0.16	0.23	0.20	0.20	0.02	0.10

表 4 6 种土地利用类型土壤可蚀性  $K$  值的分级与所占比例  
Table 4 Soil erodibility  $K$  grading and its proportion in six land use types

土地 利用类型	$K$ 值 变化范围	样本数	占总样本数 比例/%
有林地	>0.10~0.20	11	73
	>0.20~0.25	4	27
灌木林地	>0.10~0.20	6	30
	>0.20~0.25	12	60
	>0.25~0.30	2	10
灌丛	>0.10~0.20	8	47
	>0.20~0.25	6	35
	>0.25~0.30	3	18
荒草地	>0.10~0.20	14	44
	>0.20~0.25	15	47
	>0.25~0.30	2	6
	>0.30	1	3
退耕地	>0.10~0.20	8	67
	>0.20~0.25	4	33
耕地	>0.10~0.20	8	44
	>0.20~0.25	10	56

由表 3 可知,各利用类型土壤可蚀性  $K$  值均值表现为退耕地最小,均值为 0.18,灌木林地、灌丛、

荒草地三者土壤可蚀性  $K$  值较大,均值均为 0.21。由图 3 可知,在 0~100 cm 土层,随土层加深,不同土地利用类型  $K$  值的变化均存在差异。有林地土壤可蚀性  $K$  值在 0~30 cm 土层随土层加深逐渐减小,随后逐渐增大,在>60~100 cm 土层又随土层加深呈减小的趋势,在>20~30 cm 土层  $K$  值最小;灌木林地土壤可蚀性  $K$  值在 0~20 cm 土层随土层加深逐渐减小,随后逐渐增大,在>40~50 cm 土层又减小,在>15~20 cm 土层  $K$  值最小;灌丛土壤可蚀性  $K$  值在 0~5 cm 土层较大,随后减小并基本平稳;耕

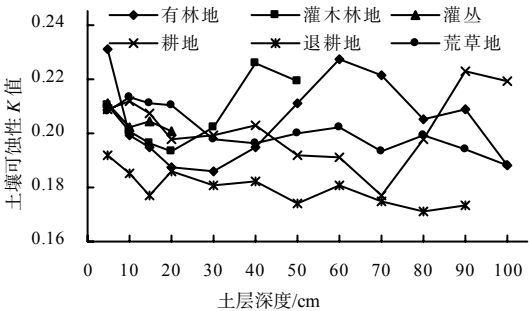


图 3 6 种土地利用类型土壤可蚀性  $K$  值在剖面上的变化  
Fig.3 Changes of soil erodibility  $K$  in soil profile of six land use types

地土壤可蚀性  $K$  值在 0~70 cm 土层随土层加深呈减小的趋势, 在 >60~70 cm 土层的  $K$  值最小, 随后急剧增大, 在 >90~100 cm 土层又略有减小; 退耕地和荒草地土壤可蚀性  $K$  值在 0~100 cm 土层均呈减小的趋势。在各土层, 退耕地的  $K$  值均低于其他土地利用类型的。

### 3.3 土壤颗粒与分形维数及可蚀性 $K$ 值的关系

#### 3.3.1 土壤颗粒与分形维数的关系

由图 4 可知, 各土地利用类型土壤分形维数与

土壤砂粒和粉粒质量分数呈显著 ( $P < 0.05$ ) 负相关, 与黏粒质量分数呈显著 ( $P < 0.05$ ) 正相关。通过比较决定系数 ( $R^2$ ), 土壤黏粒质量分数能解释分形维数的信息为 0.988 7, 土壤砂粒质量分数能解释的信息为 0.625 9, 土壤粉粒质量分数能解释的信息较少, 为 0.223 6。说明在决定各土地利用类型土壤分形维数的大小时, 土壤黏粒质量分数的作用最大, 其次为砂粒, 粉粒最弱。

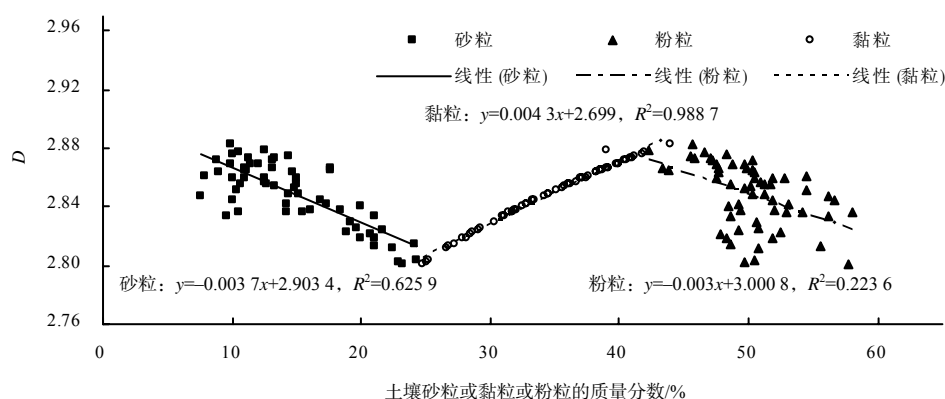


图 4 不同粒径土壤颗粒质量分数与分形维数的关系

Fig.4 Relationship between soil particle mass fraction and fractal dimension with different particle sizes

利用所测的各土地利用类型土壤黏粒质量分数的部分数据与土壤分形维数进行回归分析(图 5)可知, 各土地利用类型土壤的黏粒质量分数与分形维数均存在显著正相关性。将回归分析中未利用的实测值代入模型, 得到相应的土壤分形维数拟合值, 并与公式计算的分形维数值进行对比(表 5), 实测值与拟合值的相对误差表明, 各土地利用类型下

两者的相对误差最大为 0.11%, 最小为 0.03%, 均小于 1%, 实测值与拟合值十分接近, 说明该模型有较高的可靠性和准确性。对于研究区而言, 在大量实测数据的基础上建立的土壤分形维数与土壤黏粒质量分数的关系模型, 可用来代替实测法计算出土壤的分形维数。

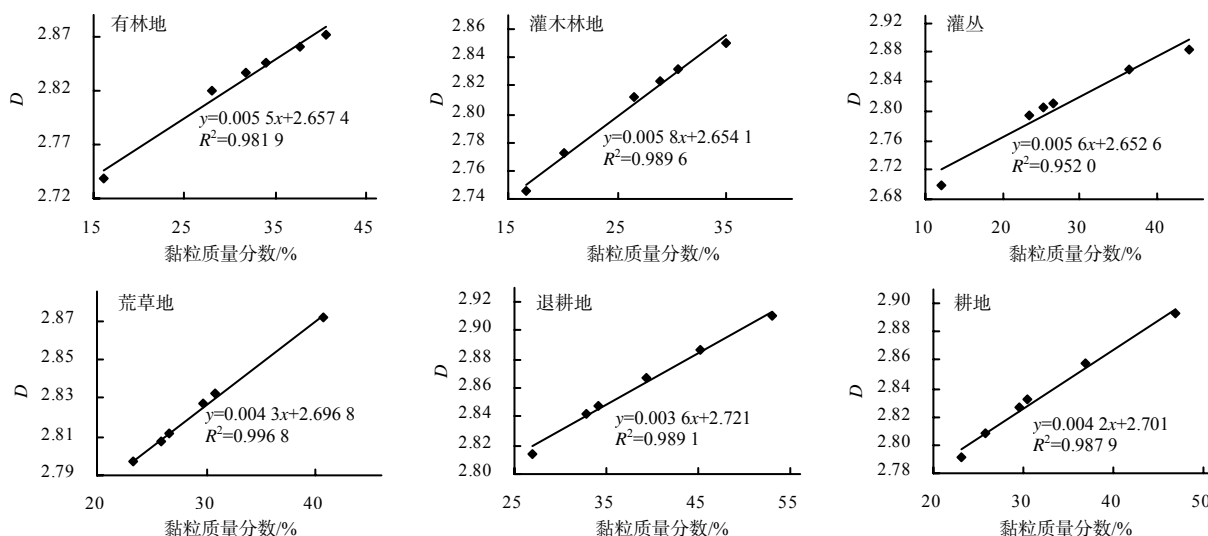


图 5 土壤黏粒质量分数与分形维数的关系

Fig.5 Relationship model between soil clay mass fraction and fractal dimension

表 5 土壤分形维数的模型拟合值与实测值

Table 5 The model and measured values of soil fractal dimension

土地 利用类型	土壤 黏粒/%	D		相对误差/%
		实测值	拟合值	
有林地	37.80	2.861 9	2.865 3	0.11
灌木林地	26.99	2.813 6	2.810 6	0.11
灌丛	36.88	2.858 1	2.859 1	0.03
荒草地	33.25	2.843 0	2.839 8	0.11
退耕地	48.51	2.897 7	2.895 6	0.07
耕地	33.65	2.845 5	2.842 3	0.11

3.3.2 土壤颗粒与土壤可蚀性 K 值的关系

由图 6 可知,各土地利用类型土壤可蚀性 K 值与土壤砂粒和粉粒的质量分数均呈正相关,与土壤黏粒的质量分数均呈负相关。通过对比各土地利用类型下的决定系数,决定各土地利用类型土壤可蚀性 K 值大小的主要是土壤粉粒质量分数,其次是黏粒质量分数。表明土壤粉粒质量分数越高,各土地利用类型土壤可侵蚀性 K 值越大,土壤受侵蚀风险越大;土壤黏粒质量分数越高,各土地利用类型土壤可侵蚀性 K 值越小,土壤受侵蚀风险越小。

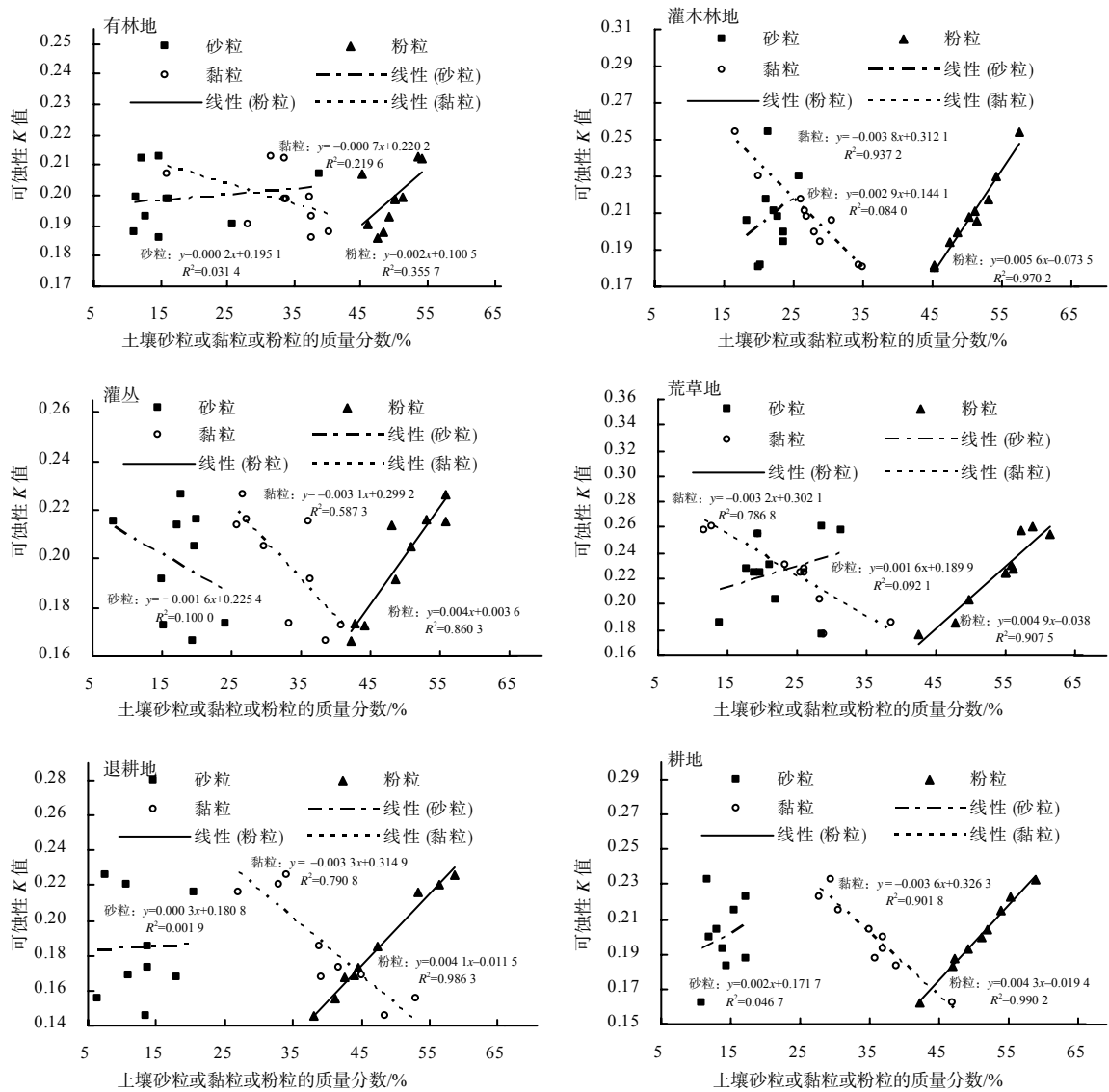


图 6 不同粒径土壤颗粒质量分数与土壤可蚀性 K 的关系

Fig.6 Relationship between soil particle mass fraction and fractal dimension and erodibility K value with different particle sizes

4 结论与讨论

本研究中,喀斯特后寨河流域 6 种不同土地利用类型土壤颗粒均以粉粒为主,砂粒最少;灌木林

地、灌丛土壤砂粒质量分数显著高于退耕地和耕地的,退耕地黏粒质量分数显著高于灌木林地、灌丛及荒草地。土地利用类型改变土壤颗粒组成,使土壤粒径发生改变,进而影响土壤分形维数。土壤分

形维数是表征土壤粒径分布特征的重要指标,可表征土壤的复杂程度。通常土壤中细颗粒物含量越低,分形维数就越小;反之,则分形维数越高。研究区 6 种土地利用类型均以粉粒质量为主,土壤分形维数均值由大到小依次为退耕地(2.873)、耕地(2.853)、有林地(2.853)、荒草地(2.848)、灌丛(2.824)、灌木林地(2.822)。究其原因可能与地形、受人为干扰程度及植被覆盖有关。由于人们的主观选择,耕地和退耕地多位于坡脚,坡度均值分别为 10.63°和 15.29°,土层较厚,加上人为增设的植物篱、田埂等阻挡了土壤中细颗粒物质的流失,土壤中细颗粒物含量增加,土壤分形维数增大;有林地植被主要为杉木、樟树、马桑等,在土壤表面会形成一层枯落物层,增加地表覆盖度,减弱水力侵蚀作用,同时推进土壤颗粒的细质化,增加土壤表层中细颗粒物含量,土壤分形维数也因此增大;而灌丛和灌木林地的生长地坡度均值分别为 52.11°和 33.56°,土层较薄,土壤中细颗粒物质易在地表径流等的作用下流失,土壤中细颗粒物质减少,土壤分形维数减小。赵光辉等<sup>[16]</sup>对辽河干流上游不同土地利用类型土壤分形维数的研究结果表明,农田(2.55)、林地(2.39)、草地(2.33)的分形维数依次减小;张海廷等<sup>[17]</sup>对山东省不同土地利用类型土壤颗粒分形特征的研究结果表明,耕地(2.963)、草地(2.894)、农地(2.785)、林地(2.783)的分形维数依次减小;邱捷等<sup>[18]</sup>研究的海涂围垦区撂荒地的分形维数(2.21)大于耕地的(2.16)。本研究结果与这些研究结果大致相符。

本研究中,不同土地利用类型土壤颗粒中黏粒质量分数与分形维数的相关关系最好,黏粒质量分数与分形维数的关系模型的  $R^2$  达 0.988 7,呈显著正相关关系;砂粒和粉粒质量分数与分形维数均呈负相关关系,其关系模型的  $R^2$  均较低,砂粒和粉粒对分形维数的影响较小。利用本研究中建立的土壤颗粒分形维数与黏粒质量分数的关系模型所得的土壤分形维数拟合值与其实测值间的相对误差最大为 0.11%,最小为 0.03%,均小于 1%,拟合值与实测值十分接近,说明该模型有较高程度的可靠性和准确性。可见,对于研究的喀斯特地区而言,在大

量的实测数据的基础上建立的土壤颗粒分形维数与黏粒质量分数关系模型可用来代替实测法计算土壤颗粒分形维数。

土壤可蚀性的大小很大程度上受土壤自身理化性质的影响,土地利用方式也会间接地影响土壤理化特性,进而改变土壤的可蚀性<sup>[19]</sup>。荆莎莎等<sup>[20]</sup>研究了沂蒙山区不同土地利用方式土壤可蚀性表明,园地(0.291 5)、耕地(0.280 1)、林地(0.264 8)、草地(0.259 6)的土壤可蚀性依次降低。陈英等<sup>[21]</sup>对青木关岩溶槽谷流域不同土地利用类型土壤可蚀性的研究结果表明,耕地(0.056 3)、荒草地(0.051 6)、林地(0.048 1)的土壤可蚀性依次降低。本研究中,退耕地和耕地土壤可蚀性较小,灌木林地和灌丛土壤可蚀性较大,与荆莎莎等<sup>[20]</sup>和陈英等<sup>[21]</sup>的研究结果不一致,可能与它们所处区域的坡度、土层厚度及人为干扰等有关。坡度较大区域土壤水分入渗量少,地表径流的流速大,土壤流失量较大,土层浅薄,受侵蚀作用较强;坡度较小区域,土壤入渗量大,地表径流流速小,土壤流失量少,土层深厚,土壤受侵蚀可能性小。本研究中,退耕地和耕地所处区域坡度均值分别为 15.29°和 10.63°,土层厚度均值均大于 55 cm,加上各种诸如增设土埂、植物篱等人为管理措施有效减缓了土壤细颗粒物质的流失,防止了水土流失的发生;因此,退耕地和耕地土壤可蚀性较小。而灌木林地和灌丛所处区域坡度均值分别为 33.56°和 52.11°,土层厚度均值分别为 35.00、24.44 cm,加上研究区降水量较大,年降水量为 1100~1400 mm,土壤中细颗粒物质极易在地表径流的作用下发生迁移,土壤可蚀性  $K$  值较大。可见,不同土地利用类型土壤抗侵蚀的能力存在差异,主要与坡度、土层厚度等有关。本研究中,退耕地的抗侵蚀能力较强,而灌木林地和灌丛抗侵蚀的能力较弱。可见,在喀斯特山区应更加重视对灌木林地和灌丛的综合防治,特别是其坡度较大区域的水土流失的综合治理。

不同土地利用类型地表植被的覆盖度存在差异,对土壤颗粒的截留效果不同,土壤遭受侵蚀的风险也不同。土壤侵蚀可引起土壤颗粒迁移,造成土壤颗粒的再分布。本研究中,土壤可蚀性  $K$  值与



土壤砂粒和粉粒质量分数呈显著正相关,与黏粒质量分数呈显著负相关,这与前人<sup>[22-23]</sup>的研究结果大致相符。可见,降低土壤中砂粒和粉粒质量分数或增加土壤中黏粒质量分数,可降低土壤可蚀性。其原因在于砂粒和粉粒的黏结力较弱,抗侵蚀能力弱,而黏粒黏结力较强,抗侵蚀能力也强。说明喀斯特山区不同土地利用类型下决定土壤可蚀性 $K$ 值大小的主要是黏粒质量分数。

#### 参考文献:

- [1] 张明礼. 137Cs 示踪滇池流域的土壤侵蚀及其对生态环境的影响[D]. 南京: 南京师范大学, 2009.
- [2] 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.
- [3] 杨丰. 贵州不同土地利用方式对土壤性质的影响[D]. 贵阳: 贵州大学, 2016.
- [4] 李慧. 黄河三角洲典型地区土地利用及其变化对土壤理化性质的影响[D]. 泰安: 山东农业大学, 2017.
- [5] 刘晓华. 江淮丘陵区不同土地利用类型土壤侵蚀与土壤颗粒分布特征[D]. 泰安: 山东农业大学, 2018.
- [6] 刘鹏, 蒋忠诚, 李衍青, 等. 岩溶断陷盆地高原面洼地不同坡位土壤抗蚀性研究[J]. 地球学报, 2021, 42(3): 373-381.
- [7] 刘宽梅, 周秋文. 典型喀斯特森林土壤的抗蚀性[J]. 生态学报, 2020, 40(2): 568-577.
- [8] 唐夫凯. 岩溶峡谷区不同土地利用方式土壤抗蚀性研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2016.
- [9] 鲍恩侯, 熊康宁, 刘子琦, 等. 喀斯特不同侵蚀场地土壤颗粒分布及可蚀性特征[J]. 森林与环境学报, 2020, 40(2): 156-163.
- [10] 韦丹, 陈起伟. 贵州省普定县水土流失区土地利用结构研究[J]. 安顺学院学报, 2017, 19(5): 129-133.
- [11] 王敬哲, 丁建丽, 王飞, 等. 艾比湖湿地不同盐渍化土壤粒度组成及可蚀性研究[J]. 土壤, 2018, 50(3): 598-605.
- [12] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [13] 杨培岭, 罗远培, 石元春. 用粒径的重量分布表征的土壤分形特征[J]. 科学通报, 1993, 38(20): 1896-1899.
- [14] WILLIAMS J R. The erosion-productivity impact calculator(EPIC) model: a case history[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series B: Biological Sciences, 1990, 329: 421-428.
- [15] 雷志栋, 杨诗秀, 许志荣, 等. 土壤特性空间变异性初步研究[J]. 水利学报, 1985, 16(9): 10-21.
- [16] 赵光辉, 苏芳莉, 李海福, 等. 辽河干流上游流域土地利用对土壤颗粒分形维数影响[J]. 中国沙漠, 2016, 36(6): 1622-1627.
- [17] 张海廷, 时延庆. 山东省不同土地利用方式土壤颗粒组成及其分形维数特征[J]. 水土保持研究, 2018, 25(1): 126-131.
- [18] 邱捷, 王洪德, 郑一鹏, 等. 海涂围垦区不同土地利用类型土壤颗粒分形特征[J]. 农业现代化研究, 2020, 41(5): 882-888.
- [19] 胡云锋, 刘纪远, 庄大方, 等. 不同土地利用/土地覆盖下土壤粒径分布的分维特征[J]. 土壤学报, 2005, 42(2): 336-339.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] 梁博, 聂晓刚, 万丹, 等. 喜马拉雅山脉南麓典型林地对土壤理化性质及可蚀性  $K$  值影响[J]. 土壤学报, 2018, 55(6): 1377-1388.
- [23] 徐文秀, 韦杰, 李进林, 等. 三峡库区紫色土坡耕地表土的可蚀性研究[J]. 水土保持通报, 2019, 39(3): 7-11.

责任编辑: 邹慧玲

英文编辑: 柳 正