

滇东喀斯特山原红壤退化过程中剖面颗粒分形特征

张磊¹, 王家文², 王嘉学¹, 尹一凡¹, 赵茜¹, 肖梦景¹

(1. 云南师范大学 旅游与地理科学学院, 昆明 650092; 2. 昆明理工大学 环境科学与工程学院, 昆明 650093)

摘要: 山原红壤是在古气候影响下残存于高原面的古红土, 近年来退化严重。为认识山原红壤的质地和退化程度, 以滇东山原红壤典型发育地带为研究对象, 对灌丛、草地、松林、红裸土剖面的土壤颗粒分形特征进行研究分析。结果表明: 土壤颗粒分形维数在 2.734~2.829, 土壤质地整体属于粉质粘壤土。随着深度的增加, 灌丛、草地、松林的土壤分形维数逐渐变大, 红裸土则呈现出相反的规律。黏粒含量与土壤颗粒分形维数在土壤剖面上表现出相同的变化规律, 砂粒和粉粒规律不明显。分形维数与黏粒呈极显著正相关, 主要由黏粒决定, 与粗砂呈负相关, 与细砂和粉粒呈正相关, 但均不显著 ($p < 0.05$)。分形维数与有机质呈正相关, 与速效钾、速效磷、硝态氮呈负相关, 均不显著 ($p < 0.05$)。分形维数可以表征山原红壤退化过程中剖面质地的均一程度, 作为判断土壤质地差异的重要指标, 在一定程度上也可以反映土壤的肥力特征。

关键词: 山原红壤; 剖面; 质地; 分形维数

中图分类号: S155

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2015)04-0018-06

Fractal Characteristics of Particles in Soil Profile During the Process of Mountain Red Earth Degradation in the Karst Area of East Yunnan

ZHANG Lei¹, WANG Jiawen², WANG Jiaxue¹, YIN Yifan¹, ZHAO Qian¹, XIAO Mengjing¹

(1. School of Tourism and Geographical Science, Yunnan Normal University, Kunming, Yunnan 650092, China; 2. Faculty of Environmental Science and Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming, Yunnan 650093, China)

Abstract: Mountain red earth is the relic ancient clay remained on the Yunnan Plateau formed under the influence of paleoclimate, however, this soil has experienced degradation recently. To understand the texture and the degree of degradation of mountain red earth, this study examined the mountain red earth based on the analysis of soil profile particle volume fractal dimension (FD) associated with different vegetation types. Particularly, soil samples were taken from areas covered with pineland, shrubland, grassland or unvegetated red soils respectively in the karst area of east Yunnan. The results indicated that FD varied from 2.734 to 2.789, which overall belonged to the silty clay loam. Soil FDs of shrublands, grassland, and pineland became larger with the increase of depth, while red bare soil presented the opposite trend. And the relationship between the content of clay particle and the FD in the soil profile showed the same trend while the distribution characteristics of sand and silt in the soil profile were not obvious. There was a significantly positive correlation between FD and clay which was mainly decided by the clay. FD was negatively correlated with coarse sand, and positively correlated with fine sand and silt. So FD can be expressed in a uniform degree of soil texture in the mountains red earth of degradation process, and an important indicator to determine differences in soil texture. FD was significantly positively correlated with organic matter, and negatively correlated with potassium, available phosphorus, and nitrate nitrogen. Therefore, FD can be used to describe the fertility levels of degradation of mountain red earth fertility characteristics of the soil profile.

Keywords: mountain red earth; soil profile; texture; fractal dimension

从植被冠层到地下含水层的部位被称为“地球关键带”,土壤作为地球关键带的核心要素,不仅为许多生物、物理和化学过程的进行提供场所,也为植物的生长和发育提供必要的坏境^[1-2]。山原红壤是云贵高原主要的土壤类型之一,有别于其它红壤,目前多认为是在第三纪末期以来,早期高温高湿条件下经脱硅富铝化形成的大面积深厚高富铝红色风化壳,伴随着新构造运动大面积间歇性均衡抬升降起后发育形成的^[3]。山原红壤区广布喀斯特地貌,土体深厚,适宜多种林木、牧草和农作物生长,近年来,山原红壤退化严重,局部地段已多年裸露,呈现出一种与石漠化相伴生的特殊“土漠化”景观——“红裸土”。

土壤退化(Soil degradation)的过程中,土壤的养分状况和物理性质也会随之变化^[4-5]。土壤在物理性质方面的退化首先表现为地表物质颗粒组成的变化,在自然状态下,土壤的退化在地表最直接的表现是覆被类型的变化,这是由于植被与土壤是相互作用协调发展的统一体,植被的演替伴随着土壤性状的改变^[6]。因此,对山原红壤退化过程中不同覆被下土壤粒径分布特征的分析,对研究区土壤水土流失以及生态恢复有着重要的意义。

土壤粒径分布的测量方法主要有直接测量法、沉降法、显微镜法等,近年来激光粒度分析仪得到了广泛的应用,激光测量法具有适应性广、测量迅速、和精度较高等优点,但该方法测量的粒径范围仍然有限^[7]。为了对土壤粒径分布进行量化描述,Tyler 等^[8]建立了用土壤粒径的体积分布计算土壤的粒径分布的三维空间分形维数模型,Tyler 等^[9]和杨培岭等^[10]分别推导出计算土壤粒径分布分形维数的重量分布模型。

研究表明,土壤颗粒组成与成土母质及其理化性

状和侵蚀强度密切相关,土壤的粒径分布在一定程度上决定了土壤的结构和性质,常被作为分析和预测土壤性质的重要指标^[11-16]。现有研究对其他土壤的颗粒分形作了较为详细的量化分析,但对喀斯特地区山原红壤的分形维数鲜有报道。本文选择滇东喀斯特山原红壤区未受人为耕作影响的 4 种不同覆被条件下土壤剖面土壤的粒度组成和分形特征,以及与土壤肥力之间的相互关系,确立不同覆被土壤剖面颗粒体积分形维数的变化规律,可以为喀斯特山原红壤的固有属性和土壤肥力状况研究提供重要参数,并为研究区土壤水土流失以及生态恢复等实践活动提供基础科学资料。

1 研究区概况

云贵高原喀斯特山原红壤区地形复杂、景观破碎,耕作土受人为活动的影响较大,同一区域同一坡面不同覆被条件的自然土样能更好地揭示山原红壤退化中的颗粒分形的规律。经过野外考察和室内遥感资料分析,本文在遴选的 14 个坡面综合分析基础上,选择云南省富源县海田后山西南向坡面作为研究样区。样区位于小江断裂东侧的乌蒙山脉中段的准高原面上,均为山原红壤,下伏二叠纪浅海相灰岩,同时具有云南松林、火棘灌丛、草地(主要为扁茅)和裸地(“红裸土”)4 种覆被条件(基本情况见表 1)。本区夏半年受西南季风和东南季风控制,温暖湿润,冬半年受热带大陆气团控制,干燥少雨^[17]。近 30 a 平均降雨为 1 084 mm,年平均气温 14℃左右,年日照时数在 1 328~1 800 h,pH 值为 5.26~7.50,属于酸性土和中性土。山顶部位及部分坡面石漠化严重,云南松林、火棘灌丛、扁茅及红裸土斑块呈面积不大的散块状与裸岩相伴,坡麓及坡面局部为低产坡耕地,部分已撂荒。

表 1 样地基本情况

样地	经度	纬度	海拔/m	样方坡度/(°)	坡向/(°)	根系分布/cm
松林	104°20′77.62″	25°74′41.16″	2050.5	3.2	NW75	0~130
灌丛	104°20′65.20″	25°75′79.00″	2222	4.1	NW69	0~60
草地	104°18′84.68″	25°72′73.33″	2070	2.5	NW76	0~130
红裸土	104°18′81.69″	25°72′73.34″	2053	1.8	NW76	0

2 材料与方法

2.1 样品的采集

2013 年 9 月,在考虑其下伏基岩均为二叠纪灰岩,坡度、坡向和海拔等环境条件大体相似的基础上,采用随机采样法,选取云南松林、火棘灌丛、草地、红裸土 4 种不同覆被条件下的山原红壤进行剖面采样,使用 GPS 定位,在不同覆被条件下选取代表性地段,

设置 3 个(1 m×1 m)样方,用陶瓷工具(避免对测定微量元素的影响)每层 10 cm,按照土壤发生层次采集剖面土壤样品(采样过程中发现 C 层厚度薄且不明显,为了反映剖面的整体变化规律,将 B 层与基岩结合处 10 cm 土层归为 C 层,红裸土缺失 A 层),将每种利用类型的相同层次进行混合(10 cm),总重量控制在 1 kg 左右,具体层次划分见表 2,以备实验室对土壤颗粒的测定。

2.2 土壤颗粒的测定

将采集的样品带入实验室,经过自然风干,过 2 mm 的筛子,用 4 分法取出约 0.5 g 土样置于 100 ml 玻璃杯,用氢氧化钠溶液浸泡 24 h,使土粒分散,超声波振荡约 5 min,在土壤理化实验室用马尔文激光粒度仪(MALVERN2 000)测定土壤颗粒,其测定范围为 0.002~2 mm,粒径分别设为 2~1 mm(x_1),1~0.5 mm(x_2),0.5~0.25 mm(x_3),0.25~0.1 mm(x_4),0.1~0.05 mm(x_5),0.05~0.002 mm(x_6),<0.002 mm(x_7)。重复测量误差小于 2%(文中数据为重复测定三次取平均值),在测定过程中要根据土壤颗粒的实际情况进行泵速的调整,及时清洗泵管,确保数据的可靠性。

根据粒度仪分析得到样品的粒级体积百分含量数据,采用杨培岭等^[10]提出的体积分形维数计算方法,得出土壤粒径分布的体积分形维数(FD)。

$$\lg\left[\frac{M(r<\bar{X}_i)}{M_t}\right]=(3-\text{FD})\lg\left(\frac{\bar{X}_i}{X_{\max}}\right)$$

式中: $M(<\bar{X}_i)$ ——粒径小于 \bar{X}_i 的团聚体的质量; M_t ——测定团聚体的总质量; X_{\max} ——团聚体的最大粒径;FD——通过取对数后,以左边为纵坐标,右边为横坐标进行线性回归,3-FD 即为直线斜率,从而求出 FD 值。

2.3 土壤肥力的测定

有机质分析采用室内水合热—光电比色法测定,其他性质测定参照文献[18],所有样品均三次重复测定,取平均值。

2.4 数据统计分析采用

试验数据采用 Excel 2007 和 SPSS 19.0 软件进行统计分析,单因素方差分析(One-way ANOVA)方法进行数据间的显著性分析,在差异显著时进行多重比较($p<0.05$,LSD, T 检验),用 Origin 9.0 制图。

3 结果与分析

3.1 土壤机械组成特征

研究区不同覆被土壤剖面粉粒(0.002~0.05 mm)含量最高,在 49.80%~69.32%,平均值为(57.49±5.68)%($n=11$),黏粒(<0.002 mm)在 24.37%~44.21%,平均值为(34.81±5.75)%($n=56$),砂粒(0.05~2 mm)含量最少,在 3.02%~13.77%,平均值为(7.71±4.43)%($n=11$)。根据美国制土壤质地分类标准,研究区不同覆被剖面土壤质地整体土壤质地整体属于粉质黏壤土,松林的 A 层属于粉砂壤土,是由于粉粒含量多,C 层属于粉质黏土,则是由于其黏粒含量多的原因。

3.2 土壤颗粒的分形特征

研究区不同覆被下土壤剖面上的分形维数在 2.701~2.837(表 2),平均值为 2.771,大于农业上大多数的壤土平均值(2.645)^[19-20]。

从表 2 可知,4 种不同覆被 A 层土壤颗粒的分形维数为:草地(2.751)>灌丛(2.734)>松林(2.701),差异显著($p<0.05$),这主要是相比松林,灌丛和草地拥有大量的枯枝落叶层,可以有效拦截水流中的细粒物质,使得草地、灌丛 A 层的黏粒分别达到 32.40%和 28.89%。

表 2 土壤颗粒的分形特征

样地	土壤层次/ cm	粗砂 2~0.25 mm	细砂 0.25~0.05 mm	粉粒 0.05~0.002 mm	黏粒 <0.002 mm	分形维数	R^2
灌丛	A(0—30)	0	8.86±6.57	62.24±1.66	28.89±6.23	2.7335±0.03	0.7348
	B(30—60)	0	4.44±4.89	57.58±2.10	37.98±6.67	2.7952±0.01	0.7093
	C(60—70)	0	4.86±1.98	56.21±4.34	38.93±7.76	2.7998±0.07	0.7147
草地	A(0—10)	4.65±2.24	9.12±3.41	53.83±7.77	32.40±8.81	2.7510±0.09	0.7708
	B(10—200)	0.02±0.06	3.76±2.89	59.10±7.08	36.23±6.15	2.7855±0.07	0.6868
	C(200—210)	0.25±0.10	11.91±7.67	49.80±5.50	38.04±8.38	2.7862±0.10	0.7874
松林	A(0—10)	0.63±0.25	5.68±3.31	69.32±4.62	24.37±5.32	2.7014±0.12	0.7072
	B(10—170)	2.02±4.62	5.58±4.42	58.10±9.04	34.30±6.67	2.7517±0.09	0.7494
	C(170—180)	0	3.05±1.18	50.73±5.89	46.22±7.53	2.8373±0.11	0.7031
裸地	B(0—90)	0.21±0.55	2.81±1.27	61.83±4.92	35.15±5.44	2.7808±0.02	0.6926
	C(90—100)	2.17±1.21	10.06±3.97	55.20±3.67	32.56±7.02	2.7541±0.03	0.7661

B 层与 A 层呈现出不同规律:灌丛(2.795)>草地(2.786)>红裸土(2.781)>松林(2.752),其中,灌丛和草地分形维数显著大于松林的值($p<0.05$),这可能和灌草根系的生长会产生大量缠绕菌丝,进一步

对土壤的物理、化学和酶的活性产生影响,使得土壤的风化速度加快,有利于细粒的固定有关。C 层呈现出松林(2.834)>灌丛(2.800)>草地(2.786)>红裸土(2.754)的规律,这与土壤的质地有关系。

3.3 土壤颗粒及分形维数在土壤剖面上的变化

图 1 反映了 4 种不同覆被下土壤的颗粒组成和分形维数在土壤剖面上的变化。黏粒和分形维数在剖面上均呈现出一致的规律,砂粒和粉粒与分形维数的变化规律不明显。

松林的土壤分形维数变异程度最为显著($p < 0.05$),A 层的土壤分形维数为 2.701,随土层加深分形维数分别增加到 B 层的 2.752,C 层的 2.834,这和其 A 层黏粒的含量最少,C 层黏粒含量最多有直接关系。灌丛、草地、松林土壤分形维数均呈现出 A 层 < B 层 < C 层的规律,这可能是由于黏粒等细颗粒物

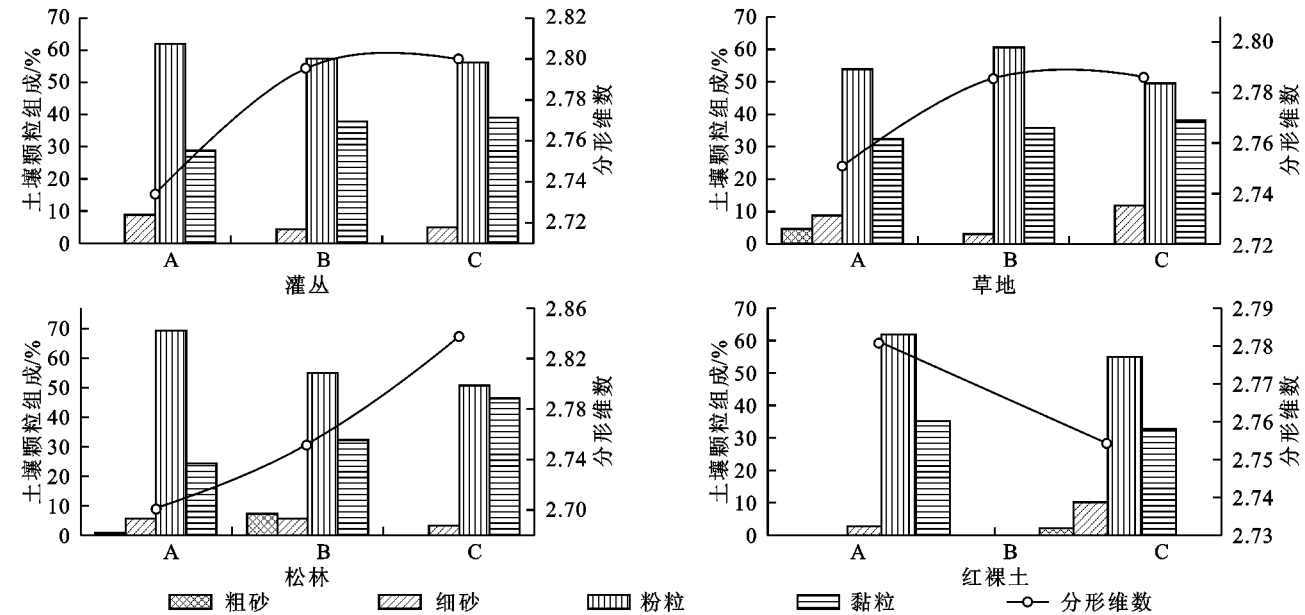


图 1 土壤颗粒及分形维数在土壤剖面上的变化

3.4 分形维数与粒径分布的关系

对不同覆被下土壤剖面颗粒体积分形维数(FD)与土壤粒径的体积百分含量分别做回归分析,统计结果表明山原红壤退化过程中土壤分形维数与土壤各粒径的体积百分含量的分布均相关(图 2)。其中,FD 与 0.25~2 mm 呈负相关,但不显著($p < 0.05$),相关系数为-0.078,与 0.05~0.25 mm 和 0.002~0.05 mm 土壤粒径呈正相关,均不显著($p < 0.05$),相关系数分别为 0.187,0.300,与 <0.002 mm 土壤粒径存在呈极显著性正相关($p < 0.05$),相关系数到达 0.958。表明土壤剖面砂粒含量越高,分形维数越小,土壤质地越松散,黏粒含量越高,分形维数越大,质地越细,土壤越紧实。这与很多学者对不同区域土壤的分形维数研究结果一致^[13-14,20-21,23]。因此,土壤粒径分形维数可以表征山原红壤退化过程中土壤剖面质地的均一程度,可以作为判断土壤质地差异的重要指标。

质随壤中流迁移到土壤深层并积淀,加深土壤的质地有关。这与王贤^[20]、张昌顺^[21]、刘阳^[22]等的研究结果基本一致,但王贤的研究中只有楠竹林地呈现出随着深度的增加,分形维数减小,而阔叶林地、针叶林和针阔混交林地则呈现出随着深度的增加分形维数逐渐变大的规律,这可能与不同区域以及不同覆被条件有关。红裸土(缺失 A 层)呈现 B 层 > C 层的规律,由于红裸土 B 层上层的黏土层厚度大,使其紧实而通气透水性能差,干时坚硬易龟裂,湿时膨胀易闭结,不易旱,亦不耐涝,使得植被的根系难以发育生长,是不良质地的剖面。

3.5 分形维数与肥力的关系

土壤肥力是土壤的本质属性和特殊功能,它反映了土壤系统本身的物质成分、结构和土体构型,以及土壤各种过程和性质,而土壤的颗粒组成则是构成土壤结构的物质基础,其质地状况会直接影响到土壤的理化性质,进一步影响土壤的肥力^[20,24-26]。

土壤肥力与分形维数的线性回归(图 3):土壤分形维数与有机质呈现出正相关($p < 0.05$),与速效钾、速效磷、硝态氮均呈负相关,均不显著($p < 0.05$),表明分形维数越大,有机质含量越高,速效钾、速效磷、硝态氮的含量则越少。因此土壤颗粒分形可以在一定程度上反映山原红壤退化过程中剖面的土壤肥力状况。

刘阳等的研究表明分形维数与速效氮和有机质呈显著负相关,与速效钾呈负相关,但相关性不显著。程先富^[27]、张昌顺等^[21]认为分形维数与有机质呈负相关,但张昌顺认为分形维数与速效磷呈极显著负相

关。周先容^[28]、伏耀龙^[23]、李进峰^[29]等的研究表明分形维数和有机质没有达到显著水平,赵来^[25]、贾晓红^[30]、赵文智^[16]等认为分形维数和有机质存在显著

正相关关系。本研究与其他研究结果尚有差异,这主要受土壤类型、质地类型和母岩的不同而具有很强的空间特异性的原因。

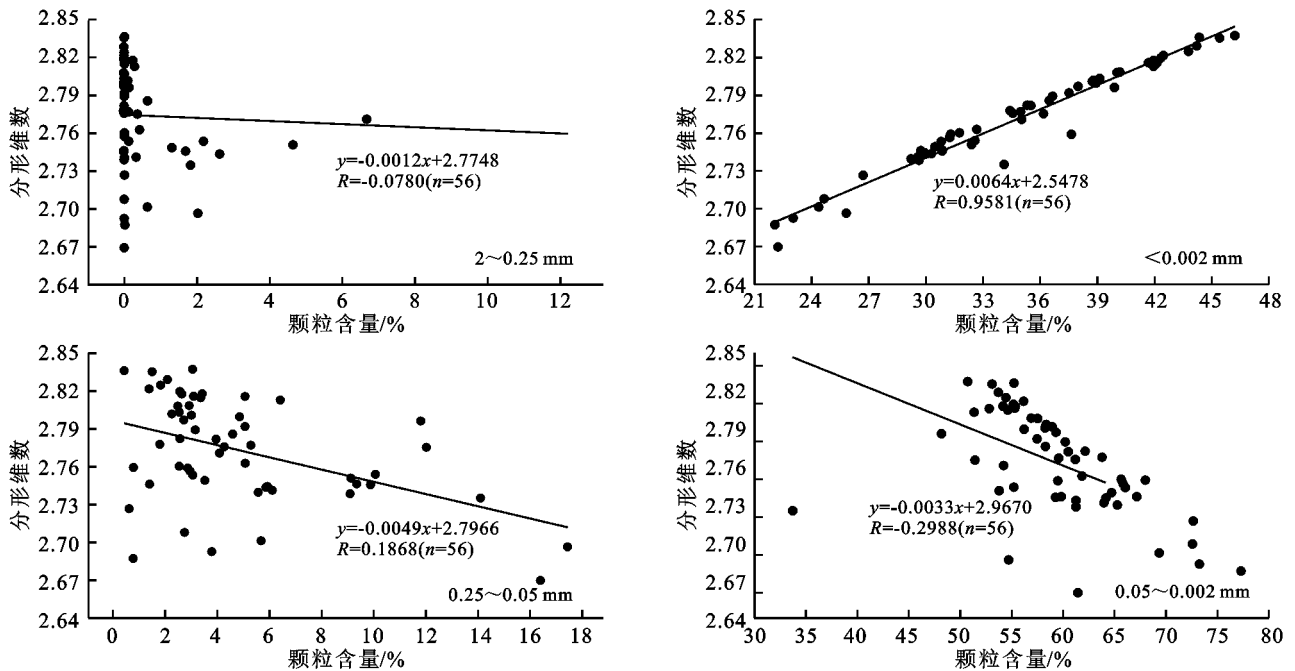


图 2 土壤颗粒含量与分形维数的关系

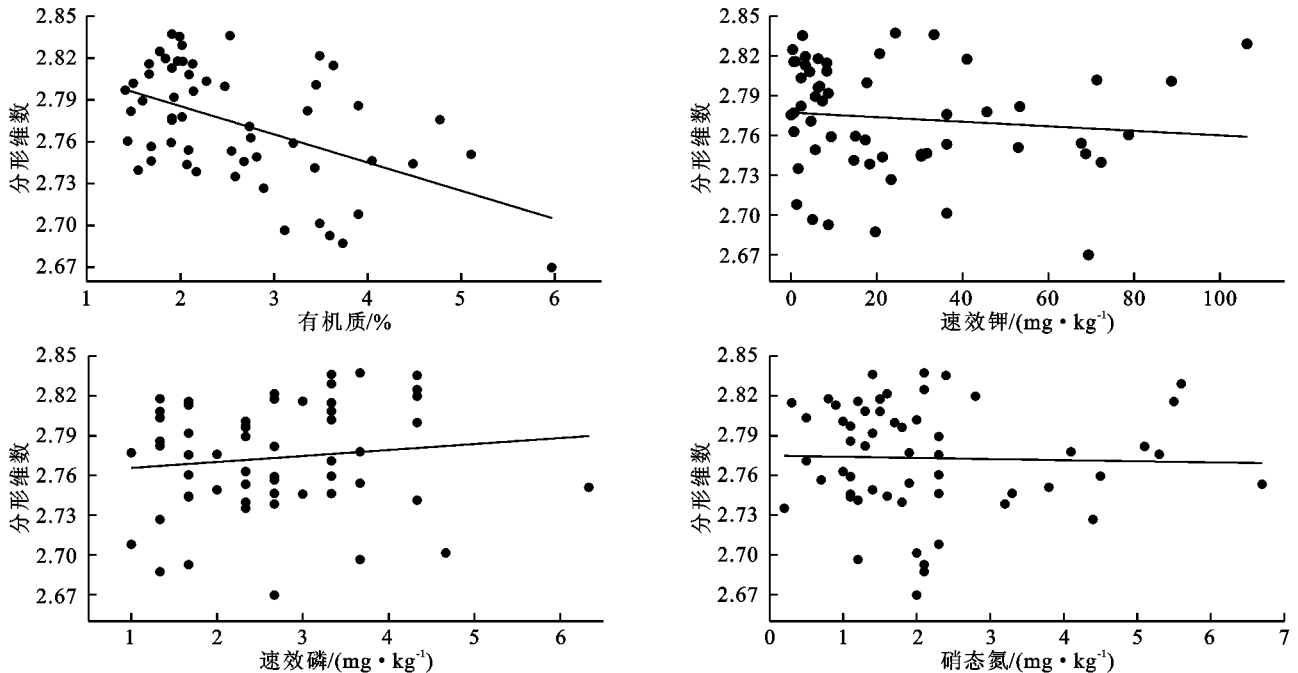


图 3 土壤肥力与分形维数的关系

4 结论

(1) 研究区不同覆被下土壤剖面上的分形维数在 2.734~2.829, 土壤质地整体属于粉质黏壤土。

(2) A, B, C 各层土壤颗粒的分形维数在不同覆被下规律不明显。灌丛、草地、松林的分形维数土壤剖面上均呈现出 A 层 < B 层 < C 层的规律, 红裸土 (A 层缺失) 则呈现出 B 层 > C 层的规律, 红裸土剖面

为不良质地剖面, 使得植被根系难以发育。黏粒含量与土壤颗粒分形维数在土壤剖面上表现出相同的变化规律, 砂粒和黏粒规律不明显。

(3) 分形维数能够表征土壤颗粒特征, 但对不同粒级颗粒含量的反映程度不同。山原红壤分形维数与黏粒呈极显著正相关 ($p < 0.05$), 与粗砂呈负相关, 与细砂和粉粒呈正相关, 但均不显著 ($p < 0.05$)。土壤粒径分形维数在一定程度上可以表征山原红壤

退化过程中土壤质地的均一程度,可以作为判断土壤质地差异的重要指标。

(4) 分形维数与有机质呈正相关,与速效钾、速效磷、硝态氮负相关,均不显著($p < 0.05$),在一定程度上可以反映山原红壤退化过程中剖面的肥力特征。

参考文献:

- [1] 张磊,王嘉学,刘保强,等.喀斯特山原红壤退化过程中土壤表层团聚体变化规律[J].山地学报,2015,33(1):8-15.
- [2] 李小雁.干旱地区土壤—植被—水文耦合、响应与适应机制[J].中国科学:地球科学,2011,41(12):1721-1730.
- [3] 周乐福.云南土壤分布的特点及地带性规律[J].山地学报,1983,1(4):31-38.
- [4] 赵中秋,后立胜,蔡运龙.西南喀斯特地区土壤退化过程与机理探讨[J].地学前缘,2006,13(3):185-189.
- [5] 赵勇钢,赵世伟,华娟,等.半干旱典型草原封育草地土壤结构特征研究[J].草地学报,2009,17(1):106-112.
- [6] 陈孙华.衡阳紫色土丘陵坡地不同恢复阶段土壤理化特征[J].水土保持研究,2013,20(1):57-60.
- [7] 陈子玉,顾祝军.南方水蚀区不同侵蚀程度土壤粒径分形研究[J].水土保持研究,2013,20(4):13-16.
- [8] Tyler S W, Wheatcraft S W. Application of fractal mathematics to soil water retention estimation[J]. Soil Science Society of America Journal, 1989,53(4):987-996.
- [9] Tyler S W, Wheatcraft S W. Fractal scaling of soil particle size distributions: analysis and limitation[J]. Soil Science Society of America Journal, 1992,56(2):362-369.
- [10] 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.
- [11] 罗明达,杨吉华,房用,等.沂源石灰岩山地不同植被类型土壤颗粒分形特征研究[J].水土保持研究,2010,17(3):18-21.
- [12] 高君亮,李玉宝,虞毅,等.毛乌素沙地不同土地利用类型土壤分形特征[J].水土保持研究,2010,17(6):220-223.
- [13] 杜海燕,周智彬,刘凤山,等.绿洲化过程中阿拉尔垦区土壤粒径分形变化特征[J].干旱区研究,2013,30(7):615-622.
- [14] 罗绪强,王世杰,张桂玲,等.喀斯特石漠化过程中土壤颗粒组成的空间分异特征[J].中国农学通报 2009,25(12):227-233.
- [15] 姜永见,朱丽东,叶玮,等.庐山 JL 剖面红土粒度体积分形特征及其环境意义[J].山地学报,2008,26(1):36-44.
- [16] 赵文智,刘志民,程国栋.土地沙质荒漠化过程的土壤分形特征[J].土壤学报,2002,39(6):877-881.
- [17] 陈虎,王嘉学,胡灿灿,等.滇东喀斯特地区石漠化裸露红土的表层有机质含量分析[J].中国岩溶,2012,31(4):423-425.
- [18] 鲍士旦.土壤农化分析[M].3版.北京:中国农业出版社,2000.
- [19] 李德成,张桃林.中国土壤颗粒组成的分形特征研究[J].土壤与环境,2000,9(4):263-265.
- [20] 王贤,张洪江,程金花,等.重庆四面山几种林地土壤颗粒分形特征及其影响因素[J].水土保持学报,2011,25(3):154-159.
- [21] 张昌顺,范少辉,漆良华,等.闽北典型毛竹林土壤微团聚体分形特征研究[J].水土保持报,2008,22(6):170-175.
- [22] 刘阳,陈波,杨新兵,等.冀北山地典型森林土壤颗粒分形特征[J].水土保持学报,2012,26(3):159-164.
- [23] 伏耀龙,张兴昌,王金贵.岷江上游干旱河谷土壤粒径分布分形维数特征[J].农业工程学报,2012,28(5):120-125.
- [24] 葛东媛,张洪江,郑国强,等.重庆四面山4种人工林地土壤粒径分形特征[J].水土保持研究,2011,18(2):148-151.
- [25] 赵来,吕成文.土壤分形特征与土壤肥力关系研究:以皖南地区水稻土为例[J].中国土壤肥料,2005(6):7-11.
- [26] 黄安,谢贤健,周贵尧,等.内江市微地形条件影响下土壤团聚体稳定性及分形特征[J].水土保持研究,2012,19(6):77-81.
- [27] 程先富,史学正,王洪杰.红壤丘陵区耕层土壤颗粒的分形特征[J].地理科学,2003,23(5):617-621.
- [28] 周先容,陈劲松.川西亚高山针叶林土壤颗粒的分形特征[J].生态学杂志,2006,25(8):891-894.
- [29] 李进峰,宫渊波,陈林武.广元市不同土地利用类型土壤的分形特征[J].水土保持学报,2007,21(5):167-171.
- [30] 贾晓红,李新荣,李元寿.干旱沙区植被恢复过程中土壤颗粒分形特征[J].地理研究,2007,26(3):518-525.