

黄土丘陵不同土地利用方式下土壤颗粒组成及其分形维数特征

杨婷¹, 景航¹, 姚旭¹, 董昌平³, 由政¹, 薛蕙^{1,2}

(1. 西北农林科技大学, 陕西 杨凌 712100; 2. 中国科学院 水利部 水土保持研究所,

黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100; 3. 重庆市渝北区华蓥山林场, 重庆 401120)

摘要:采用野外采样与室内分析方法,运用颗粒体积分形理论,研究了黄土丘陵区4种土地利用方式下的土壤颗粒组成及其剖面特征。结果表明,4种土地利用方式下的土壤理化性质差异显著,表层土壤除全磷外化学性质总体表现为天然林>人工林>草地>坡耕地,容重坡耕地>草地>人工林>天然林,50—100 cm土壤性质差异减小。土壤以粗粉粒为主,除粗砂粒外,土地利用对其余各粒级含量影响显著,层次性不明显,坡耕地和草地小粒级含量高于天然林和人工林。黏粒和粉粒含量与有机质、全氮极显著负相关,与容重极显著正相关;砂粒与有机质和容重极显著正相关,与容重呈极显著负相关。土壤颗粒组成分形维数为2.52~2.74,各层次坡耕地和草地之间没有显著差异,但显著高于人工林和天然林,随着土层加深坡耕地呈缓慢降低趋势,草地、人工林和天然林呈缓慢增加趋势。土壤分形维数与黏粒和粉粒和容重显著正相关,与砂粒、有机质、全氮显著负相关,与全磷无显著相关性。综上所述,黄土丘陵区不同土地利用方式下土壤颗粒组成差异较大,草地和林地相对于坡耕地大颗粒含量明显增多,小颗粒明显减少。

关键词:黄土丘陵区;土地利用方式;颗粒组成;分形维数

中图分类号:S152.3

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2016)03-0001-05

Soil Particle Composition and Its Fractal Dimension Characteristics of Different Land Uses in Loess Hilly Region

YANG Ting¹, JING Hang¹, YAO Xu¹, DONG Changping³, YOU Zheng¹, XUE Sha^{1,2}

(1. Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Institute of Soil and

Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling,

Shaanxi 712100, China; 3. Chongqing Yubei District Huayingshan Forest Farm, Chongqing 401120, China)

Abstract: Taking field sampling and laboratory analysis method, using the fractal theory of particle volume, we studied soil particles and their features in profiles of four kinds of land use modes in loess hilly-gully region. The results show that the four kinds of land use modes have significant different soil physical and chemical properties, surface soil chemical properties decrease in the order: natural forest>plantation>grassland>farmland except the total phosphorus, bulk densities decrease in the order: farmland>grassland>plantation>natural forests, the difference of soil properties reduce in the layer of 50—100 cm. Coarse silt is dominant in soil, in addition to the coarse sand grains, the land uses have significant effects on the contents of the rest fractions, the hierarchy is not obvious, small fraction contents of slope farmland and grassland are higher than those of natural forests and plantations. A significantly negative correlation between organic matter, total nitrogen and the contents of clay and silt was observed, bulk densities are extremely significantly positively correlated with the contents of clay and silt; sand content is extremely significantly positively correlated with organic matter and density, is very significantly negatively correlated with bulk density. Fractal dimension of soil particles was 2.52~2.74, there is no significant difference between the level of farmland and grassland, but significantly higher than plantations and natural forests. Fractal dimension reduces with the increase of soil depth in farmland, fractal dimensions of the grass, plantations and natural for-

ests show a trend of slow increase. Fractal dimension is significantly positively correlated with contents of clay and silt as well as bulk density, was significantly negatively correlated with contents of sand, organic matter, total nitrogen, there was no significant correlation with the total phosphorus. To sum up, the land uses of loess hilly-gully region have the greater influence on soil particle composition, compared with sloping farmland, the particle sizes of grassland and forest land shift from the small particles to large particles.

Keywords: the loess hilly region; land use; soil particle composition; fractal dimension

土壤是由形状与大小各异的土壤颗粒组成的多孔介质,作为土壤结构体的基本单元,土壤颗粒在一定程度上决定了土壤的结构和性质,并间接影响了土壤的水分特性、肥力状况以及侵蚀强度等理化性质^[1-2]。近年来随着分形几何学的发展,分形理论及其方法逐步应用到土壤科学研究中,涉及了土壤机械组成、水分特征、土壤肥力等方面,在一定程度上推动土壤形态、过程等复杂问题的定量化解决^[3]。Tyler^[4]、杨培岭^[5]等提出土壤颗粒粒径分布的质量分形维数计算公式,黄冠华等^[6]应用土壤颗粒的质量分形维数结合幂函数模型来估算土壤水分特性曲线。吴承祯等^[7]研究表明分形维数可以很好地反映土壤的肥力特征。随着激光衍射技术的发展和运用,土壤颗粒体积分布特征更容易且精确得到,王国梁等^[8]在前人的公式和模型的基础上,采用土壤颗粒体积分形维数的概念,被越来越多的学者应用于土壤分形特征的研究中。

土地利用与覆被变化是全球变化研究的热点问题。土地利用变化可引起许多自然现象和生态过程变化,揭示土壤颗粒组成变化特征是土地利用和管理活动研究中的一个重要部分。通过不同土地利用方式土壤颗粒时空分异特征,可以分析土壤的发育状况,物理化学性状及生态环境变化情况,研究表明土壤分形维数值可以作为土壤侵蚀方式的判断指标^[9-11]。黄土高原丘陵区地形破碎,土质疏松,抗蚀力弱,脆弱的自然生态系统叠加了不合理的人类活动导致自然植被破坏,土壤结构疏松,是中国水土流失严重的地区之一,近年来开展的生态建设和退耕还林(还草)生态工程极大地改善了该区的生态环境,使得该区的生态环境得到了相应改善。本文以黄土丘陵区的不同土地利用类型土壤为研究对象,分析不同深度土壤颗粒组成及其分形维数特征,探讨其与土壤养分的关系,以期为进一步揭示土壤颗粒组成的分形维数的内涵,将土壤颗粒分形维数应用于判断黄土高原地区生态恢复情况的评价指标提供数据支持。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于陕西省延安市志丹县境内,地处黄土

高原中部(108°38′—110°29′E, 36°21′—37°19′N),该地形破碎,沟壑纵横,梁峁起伏,属黄土丘陵沟壑地貌,为典型的侵蚀环境,海拔 1 068~1 609 m,属暖温带半干旱季风气候,年平均温度为 9.2℃,平均无霜期 142 d,年平均降雨量 500 mm,降水年际变化较大,且年内分配不均,大部分降水在 7—9 月。土壤为黄土母质上发育的黄绵土,土壤抗冲抗蚀能力差。植被类型处于暖温带落叶阔叶林向干草原过渡的森林草原带。

1.2 样地选择和样品采集

2011 年 7 月下旬,在研究区选取 4 种不同土地利用类型,分别为人工侧柏林、天然辽东栎林、草地和坡耕地,记录取样点的坡度、坡位、坡向、地形、海拔等环境因子特征(表 1)。在每种土地利用方式选取 20 m×30 m 的研究小区,每个小区间隔 200 m 以上,其中在草地设置 4 个重复,其余为 3 个重复,共计 13 个研究小区。每个小区内选取 10 个点,用土钻按“S”形取出。取样前去除表层的植被与枯落物,对 0—10 cm, 10—20 cm, 20—30 cm, 30—50 cm, 50—100 cm 的土壤进行样品收集,采集样品混合风干后,过 1 mm 和 0.25 mm 筛,装袋待测,共计 65 个样品。

1.3 测定与计算方法

土壤颗粒组成采用英国马尔文公司的 MS 2000 型激光粒度仪测定。土壤化学性质采用常规测定方法^[12]。有机碳用重铬酸钾氧化外加加热法;全氮用半微量凯氏法;全磷用硫酸—高氯酸消煮法;土壤容重采用环刀法测定。

根据激光颗粒仪所获得粒径体积数据,采用王国梁等^[8]提出的计算公式计算土壤颗粒分形维数:

$$\frac{V(r < R)}{V_T} = \left(\frac{R}{\lambda_v}\right)^{3-D}$$

式中: V ——粒径大于 R 或小于 R 的全部土壤颗粒的总体积; r ——土壤粒径; V_T ——土壤颗粒的总体积; λ_v 在数值上等于最大粒径数(常数); D ——土壤颗粒的体积分形维数,其值为 3 与 $\frac{V(r < R)}{V_T}$ 和 $\frac{R}{\lambda_v}$ 的对数线性回归拟合方程的斜率的差值。

1.4 数据处理

所测数据采用 Microsoft Excel 2007 和 SPSS 18.0 软件进行统计分析,多重比较采用 Duncan 法。

表 1 样地基本特征

样地编号	经度 E	纬度 N	海拔/m	坡向	坡位	坡度	植被类型	群落名称
1	109°15.199′	36°44.235′	1270.6	东	中坡	24	农地	谷子
2	109°15.198′	36°44.264′	1281.09	东	中坡	19	农地	黄豆
3	109°15.202′	36°44.176′	1290.1	东	上坡	24.5	农地	谷子
4	108°50.106′	36°35.449′	1473.99	东	上坡	29	铁杆蒿	铁杆蒿—艾蒿—披针苔草
5	108°52.123′	36°36.062′	1570.59	东	上坡	12	茭蒿	茭蒿—本氏针茅
6	108°50.026′	36°35.494′	1473.99	南	上坡	31	铁杆蒿	铁杆蒿—艾蒿
7	108°52.109′	36°36.085′	1576.5	东北	上坡	17	茭蒿	茭蒿—铁杆蒿—本氏针茅
8	108°50.009′	36°35.033′	1059.9	东	上坡	28	温性针叶林	侧柏—披针苔草
9	108°50.007′	36°35.027′	1457.8	东	上坡	22	温性针叶林	侧柏—披针苔草
10	108°50.004′	36°35.030′	1499.3	南	上坡	30	温性针叶林	侧柏—披针苔草
11	108°52.003′	36°36.003′	1570.3	西	上坡	28	落叶阔叶林	辽东栎—水栒子—披针苔草
12	108°51.060′	36°36.002′	1553.9	北	上坡	28	落叶阔叶林	辽东栎—水栒子—披针苔草
13	108°51.059′	36°36.030′	1552	东北	下坡	45	落叶阔叶林	辽东栎—水栒子—披针苔草

2 结果与分析

2.1 不同土地利用方式下土壤理化性质

除全磷外,土地利用方式和土壤深度对土壤理化性质影响显著(图 1)。不同土地利用方式下土壤有机质和全氮含量变化规律相似,在 0—10 cm 均表现为天然林>人工林>草地>坡耕地;10—20 cm 天然林最高,其次是人工林和草地,两者没有显著差异,高于坡耕地但是仅草地有机质含量达到显著水平;20—30 cm

天然林和草地显著高于人工林和坡耕地,人工林高于坡耕地但是未达到显著水平;30—50,50—100 cm 天然林和草地高于人工林和坡耕地,但是总体上未达到显著水平。有机质和全氮含量在各土地利用方式中呈现明显的剖面特征,从表层到下层依次降低。不同土地利用方式下的土壤容重从表层向下逐渐增加,各土层均表现为坡耕地最大,其次为草地、人工林,天然林最低,其中坡耕地在 0—50 cm 显著高于其他土地利用方式,人工林和天然林在各土层均没有显著差异。

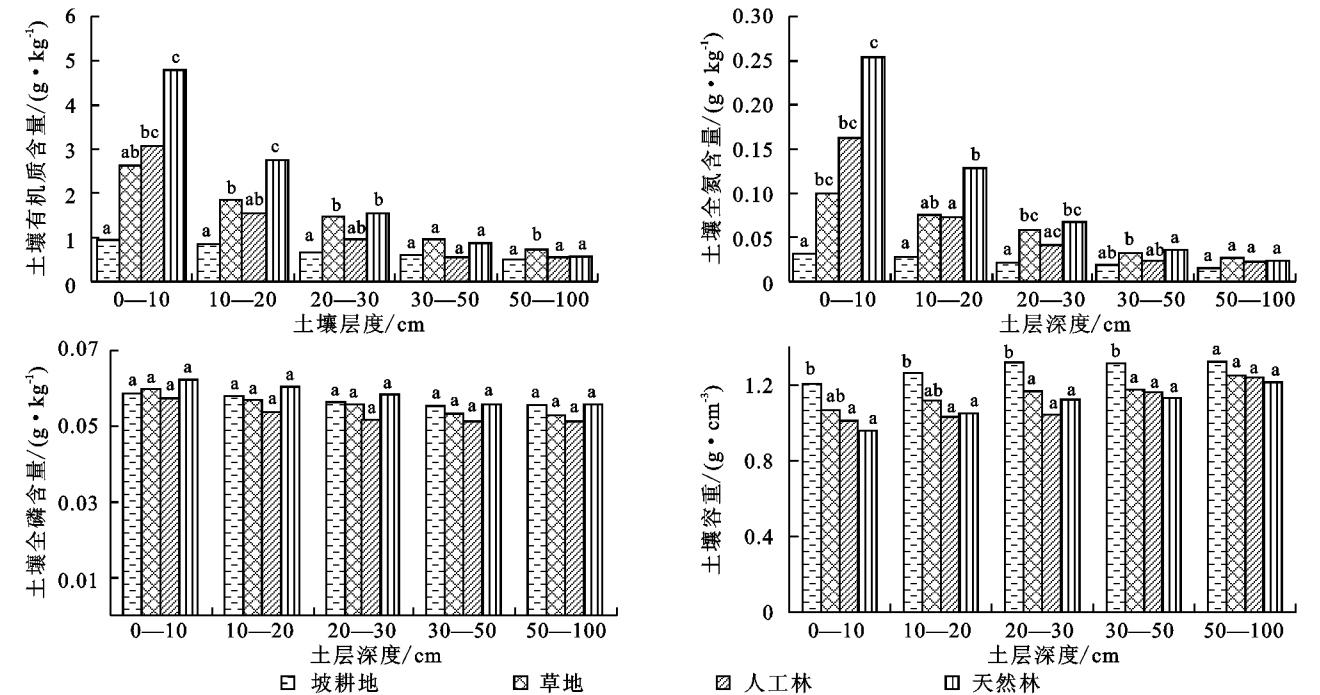


图 1 不同土地利用方式下的土壤理化性质分异特征

2.2 不同土地利用方式下土壤颗粒组成特征

按照中国土壤粒级分类制度将土壤颗粒划分 6 级,具体见表 2。粗粉粒(52.6%~60.4%)所占比例最高,其次依次是细砂粒(16.3%~32.0%)、黏粒(6.7%~17.3%)、中粉粒(3.8%~7.4%)、细粉粒(2.3%~4.8%)

和粗砂(0%~2.6%)。除粗砂粒外,不同土地利用方式下其余各粒级含量差异显著,随土层深度变化各粒级变化无明显规律。在各土层下不同粒级整体表现为坡耕地与草地之间差异不显著,天然林与人工林之间差异不显著,坡耕地和草地小粒级含量高于天然林和人工林。

表 2 土壤颗粒组成体积百分含量

深度/cm	土地利用类型							%
		粗砂粒 >0.25 mm	细砂粒 0.25~0.05 mm	粗粉粒 0.05~0.01 mm	中粉粒 0.01~0.005 mm	细粉粒 0.005~0.002 mm	黏粒 <0.002 mm	
0—10	坡耕地	0	18.60±3.33a	53.99±1.69a	6.51±0.56b	4.38±0.30b	16.52±0.99c	
	草地	0	21.37±1.44a	54.15±0.62a	6.21±0.33b	4.12±0.29b	14.15±1.24b	
	人工林	1.53±0.76	29.01±0.24b	54.27±0.70a	4.28±0.21a	2.70±0.13a	8.21±0.55a	
	天然林	2.57±0.87	32.00±2.83b	52.56±2.48a	3.85±0.26a	2.35±0.17a	6.67±0.52a	
10—20	坡耕地	0	18.67±4.94a	53.63±0.93a	6.41±1.02b	4.37±0.63b	16.92±2.40b	
	草地	0	19.24±1.07a	55.03±0.50ac	6.60±0.28b	4.28±0.15b	14.85±0.63b	
	人工林	0	25.88±1.65b	57.09±1.21b	4.83±0.17a	2.98±0.11a	9.21±0.22a	
	天然林	0.89±0.76	27.11±1.27b	56.60±1.24bc	4.52±0.20a	2.76±0.11a	8.12±0.37a	
20—30	坡耕地	0	19.33±4.57ab	53.85±0.91a	6.20±1.00b	4.23±0.60b	16.38±2.16b	
	草地	0	18.48±0.97a	54.84±1.78a	6.72±0.03b	4.41±0.14b	15.56±0.84b	
	人工林	0	24.57±2.99b	57.91±1.36b	5.01±0.47a	3.06±0.31a	9.44±1.01a	
	天然林	0	24.90±0.33b	58.06±0.27b	4.93±0.07a	3.02±0.02a	9.10±0.15a	
30—50	坡耕地	0	20.21±3.57ab	53.40±1.44a	5.94±0.79ab	4.10±0.56b	16.34±2.53b	
	草地	0	18.00±1.88a	53.40±2.06a	6.94±0.31b	4.66±0.28b	17.01±1.34b	
	人工林	0	22.55±3.58ab	58.63±1.83b	5.46±0.58a	3.32±0.32a	10.04±0.91a	
	天然林	0	25.05±0.54b	57.55±0.26b	4.99±0.17a	3.08±0.09a	9.33±0.21a	
50—100	坡耕地	0	20.73±2.59ab	54.34±1.13a	5.75±0.42a	3.91±0.27b	15.26±1.10b	
	草地	0	16.25±1.88a	54.15±2.88a	7.44±0.32b	4.86±0.23c	17.30±1.26b	
	人工林	0	19.96±3.83ab	60.41±1.16b	5.95±0.85a	3.51±0.47ab	10.18±1.35a	
	天然林	0	23.88±0.77b	58.74±0.79b	5.14±0.14a	3.10±0.06a	9.15±0.07a	

2.3 土壤分形维数及其与土壤颗粒组成关系

根据体积分形维数计算公式,计算土壤样品的分形维数 D 值分布在 2.52~2.74(图 2)。土地利用方式下土壤颗粒分形维数差异显著,各层次坡耕地和草地没有显著差异,但显著高于人工林和天然林,天然林仅在 0—10 cm 显著低于人工林,其余层次二者均无显著差异。

随着土层加深仅坡耕地呈缓慢降低趋势,草地、人工林和天然林均呈缓慢增加趋势。相关性分析结果表明土壤分形维数 D 值与黏粒和粉粒的体积百分含量呈显著正相关关系,与砂粒体积百分含量呈显著负相关关系(图 3)。

2.4 土壤颗粒组成、分形维数与土壤性质的关系

相关性分析结果表明(表 3),土壤分形维数 D 值与黏粒和粉粒含量呈显著正相关关系,与砂粒体积百分含量呈显著负相关关系;与有机质、全氮呈极显著

负相关,与容重极显著正相关,与全磷无显著相关性。

黏粒含量与砂粒、有机质、全氮呈极显著负相关,与容重极显著正相关;粉粒与砂粒、有机质、全氮呈极显著负相关,与容重显著正相关;砂粒与粉粒、黏粒和容重呈极显著负相关,与有机质和容重极显著正相关;各颗粒组成均与全磷无显著相关性。

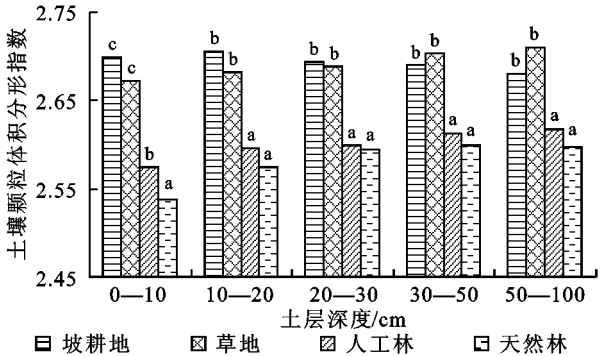


图 2 不同土地利用方式土壤颗粒体积分形维数的剖面特征

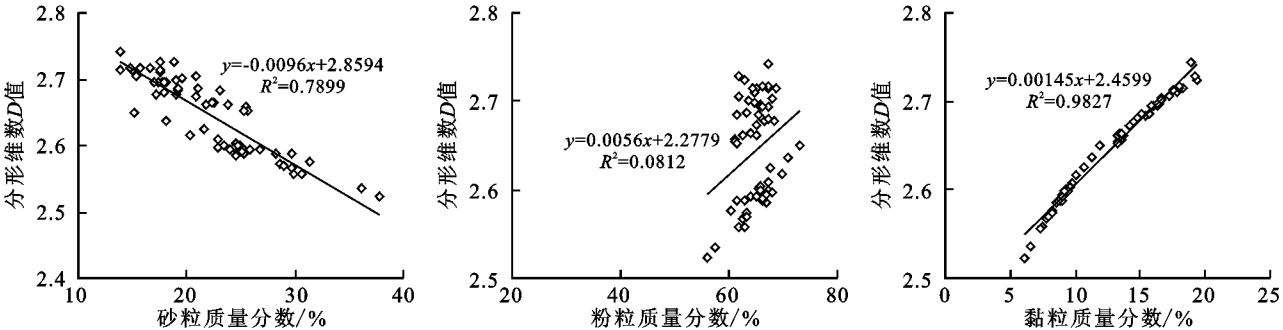


图 3 分形维数 D 值与土壤粒径体积百分数的关系

表 3 土壤分形维数与土壤质地及土壤理化性质的相关关系

土壤性质	分行维数	黏粒体积 分数	粉粒体积 分数	砂粒体积 分数	有机质	全氮	全磷
黏粒体积分数	0.991**						
粉粒体积分数	0.285*	0.191					
砂粒体积分数	-0.889**	-0.844**	-0.688**				
有机质	-0.536**	-0.478**	-0.570**	0.665**			
全氮	-0.463**	-0.412**	-0.544**	0.602**	0.983**		
全磷	-0.160	-0.138	-0.224	0.225	0.542**	0.602**	
容重	0.573**	0.555**	0.305*	-0.577**	-0.652**	-0.670**	-0.162

注: ** 表示相关性极显著($p<0.01$), * 表示相关性显著($p<0.05$)。

3 讨论

土壤颗粒组成是土壤重要的物理特性之一,对土壤肥力状况、水分特征等物理性质有着明显影响,在反映土地利用方式变化对土壤侵蚀的影响有重要的意义。本研究中土壤颗粒组成以粗粉粒(0.05~0.01 mm)为主,与前人研究结果相似^[13-14],符合刘东生^[15]划分的黄土带特征。相较于坡耕地,天然林、人工林和草地在 0—20 cm 土层土壤大粒径颗粒呈现增加趋势,其中林地增加幅度达到显著水平。坡耕地由于人为耕作导致土壤结构体破坏,小粒径颗粒很难形成大颗粒,另一方面由于耕作管理方式和土壤侵蚀的作用,坡耕地的作物秸秆和根系很难返回到土壤中,从而降低了有机物质对土壤颗粒的粘结作用,因此坡耕地的耕作层小粒径颗粒较多^[16-17]。草地和林地由于无耕作措施,增加了根系对土壤团聚体的粘结作用,促进了小颗粒通过团聚作用形成大颗粒,在本研究中林地中大粒径增加幅度要大于草地,该结论和丁敏等^[18]研究结果相似,这主要是由于林地较草地有更好的植被群落结构,凋落物和根系更为丰富,对小粒径颗粒的粘结作用更加大,另外良好的植被层次保证了林地水分条件更好,为微生物提供了更好的生境,促进了微生物的生长与代谢,进一步促进了小粒径团聚为大粒径。

分形维数常被用来反映土壤质地、均一程度、物理性状及肥力特征,与土壤结构稳定性关系紧密,分形维数越小结构稳定性越强^[19-20]。本研究中发现天然林和人工林在各土层分形维数均低于坡耕地和草地,表明林地的土壤结构较好,结构性更强,这和林地具有较好的植被群落结构和复杂的根系系统有关,根系对土壤的穿插和缠结加速了土壤结构体的形成,根系表面的分泌物、根毛等物质也促进了土壤颗粒的粘结,提高了结构体的稳定性。草地虽然较坡耕地没有显著变化,但是在 0—20 cm 仍旧呈降低趋势,表明耕作对结构体的影响还是比较明显的。土壤颗粒分形维数的大小与土壤质地密切相关。土壤质地越粗分形维数越小,质

地越细分形维数越大。这与伏耀龙对岷江上游干旱河谷不同土地利用方式下土壤表层的体积分形维数的研究结论较为一致。杨培岭等^[5]发现,土壤颗粒质量分形维数与土壤黏粒、粉粒、砂粒的质量百分含量均具有极显著的相关关系,其中黏粒含量越高,土壤质量分形维数越大,粉粒和砂粒含量越高,土壤质量分形维数越低。本研究土壤黏粒、粉粒含量与土壤有机质、土壤全氮含量均达到了极显著负相关水平,而土壤砂粒含量与土壤有机质、全氮含量为正相关,而土壤颗粒组成与土壤全磷含量均未达到显著水平,这和党亚爱等^[9]的研究结果相似,证明了土壤颗粒组成继承了土壤母质的特征,受环境生态等过程的影响。

4 结论

- (1) 黄土丘陵区 4 种土地利用方式下的土壤理化性质差异显著,表层土壤除全磷外化学性质总体表现为天然林>人工林>草地>坡耕地,容重坡耕地>草地>人工林>天然林,50—100 cm 土壤性质差异减少。
- (2) 土壤以粗粉粒为主,除粗砂粒外,不同土地利用方式下其余各粒级含量差异显著,层次性不明显,坡耕地和草地小粒级含量高于天然林和人工林。土壤颗粒组成分形维数为 2.52~2.74,各层次坡耕地和草地没有显著差异,但显著高于人工林和天然林。随着土层加深坡耕地呈缓慢降低趋势,草地、人工林和天然林呈缓慢增加趋势。

参考文献:

[1] 鲁植雄,张维强,潘君拯. 分形理论及其在农业土壤中的应用[J]. 土壤学进展,1994,22(5):40-45.

[2] 董莉丽,郑粉莉. 陕北黄土丘陵沟壑区土壤粒径分形特征[J]. 中国水土保持科学,2009,7(2):35-41.

[3] Campbell P, Abhyankar S. Fractals, form, chance and dimension[J]. The Mathematical Intelligencer, 1978,1(1):35-37.

(2) 土壤全磷、有效磷含量均与海拔高度不相关, 0—20 cm 层土壤中, 土壤有机质、碱解氮与海拔高度显著相关, 有机质随海拔的增加呈先提高后下降的趋势, 在海拔 1 450 m 达到最大值, 碱解氮随海拔的增加而增加; 20—40 cm 层土壤各项指标与海拔高度不相关; 40—60 cm 层土壤中, 有机质、全氮含量与海拔高度显著相关, 均随海拔的增加而增加。

(3) 0—20, 20—40 cm 层土壤各生态化学计量指标均与海拔高度无明显相关关系, 40—60 cm 层土壤碳磷比、氮磷比与海拔高度显著相关, 均随海拔的增加而增加。

参考文献:

- [1] 王铮, 王莹, 李山, 等. 贵州省旅游业区位重构研究[J]. 地理研究, 2003, 22(3): 313-323.
- [2] 吴明开, 沈志君, 刘海, 等. 梵净山自然保护区珙桐天然种群生命表与生存分析[J]. 生态学杂志, 2012, 31(6): 1419-1424.
- [3] 李晓笑, 王清春, 崔国发, 等. 濒危植物梵净山冷杉野生种群结构及动态特征[J]. 西北植物学报, 2011, 31(7): 1479-1486.
- [4] 鲁道旺, 宋邦喜, 吴仕国, 等. 梵净山药用植物初步调查及保护策略[J]. 广东农业科学, 2013, 40(18): 144-148.
- [5] 牛克锋, 崔多英, 石磊, 等. 黔金丝猴(*Rhinopithecus brelichi*)雪季地表食物利用[J]. 野生动物学报, 2014, 35(1): 31-37.
- [6] 杨海龙, 李迪强, 朵海瑞, 等. 梵净山国家级自然保护区植被分布与黔金丝猴生境选择[J]. 林业科学研究, 2010(3): 393-398.
- [7] 张玉武, 杨红萍. 贵州梵净山生物圈保护区藤本植物资源特点[J]. 贵州科学, 2003, 21(3): 75-80.
- [8] 朱映安, 和加卫, 杨正松, 等. 贵州梵净山自然保护区悬钩子属植物资源考察及开发利用[J]. 中国农学通报, 2007, 23(9): 504-508.
- [9] 廖雯, 左经会. 贵州梵净山国家自然保护区药用种子植物区系研究[J]. 安徽农业科学, 2008, 36(34): 1503-1504.
- [10] 刘高峰, 杨茂发. 贵州梵净山自然保护区土壤甲螨群落季节动态[J]. 动物学杂志, 2013, 48(1): 58-64.
- [11] 张凤海, 张明. 梵净山土壤研究报告[C]//梵净山科学考察集编辑委员会. 梵净山科学考察集. 贵阳: 贵州省环境保护局, 贵州省环境科学学会, 1982.
- [12] Tian H, Chen G, Zhang C, et al. Pattern and variation of C:N:P ratios in China's soils: a synthesis of observational data[J]. Biogeochemistry, 2010, 98(1/3): 139-151.
- [13] 何腾兵, 朱军, 杨柳, 等. 贵州望漠苏铁自然保护区土壤研究[C]//罗扬, 刘浪. 贵州望漠苏铁自然保护区科学考察集. 贵阳: 贵州科技出版社, 2010.
- [14] 何腾兵, 朱军, 涂成龙, 等. 黎平太平山自然保护区土壤研究[C]//张华海, 李明晶, 邓锦光. 黎平太平山自然保护区综合科学考察集. 贵阳: 贵州科技出版社, 2006.

(上接第 5 页)

- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 黄冠华, 詹卫华. 土壤水分特性曲线的分形模拟[J]. 水科学进展, 2002, 13(1): 55-60.
- [7] 吴承祯, 洪伟. 不同经营模式土壤团粒结构的分形特征研究[J]. 土壤学报, 1999, 36(2): 62-166.
- [8] 王国梁, 周生路, 赵其国. 土壤颗粒的体积分形维数及其在土地利用中的应用[J]. 土壤学报, 2005, 42(4): 545-550.
- [9] 党亚爱, 李世清, 王国栋, 赵坤. 黄土高原典型土壤剖面土壤颗粒组成分形特征[J]. 农业工程学报, 2009, 25(9): 74-78.
- [10] 董莉丽, 郑粉莉. 陕北黄土丘陵沟壑区土壤粒径分形特征[J]. 中国水土保持科学, 2009, 7(2): 35-41.
- [11] 王德, 傅伯杰, 陈利顶, 等. 不同土地利用类型下土壤粒径分形分析: 以黄土丘陵沟壑区为例[J]. 生态学报, 2007, 27(7): 3081-3089.
- [12] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2001.
- [13] 陈俊杰, 孙莉英, 蔡崇法, 等. 不同土壤坡面细沟侵蚀差异与其影响因素[J]. 土壤学报, 2013, 50(2): 281-288.
- [14] 黄自立, 张文孝. 陕北黄绵土的性质与改良利用[J]. 土壤通报, 1987(3): 108-110.
- [15] 刘东生. 黄土与环境[M]. 北京: 科学出版社, 1985.
- [16] 孙彩丽, 薛莲, 刘国彬, 等. 黄土区不同施肥对土壤颗粒及微团聚体组成的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(3): 550-561.
- [17] 张超, 刘国彬, 薛莲, 等. 黄土丘陵区不同植被类型根际土壤微团聚体及颗粒分形特征[J]. 中国农业科学, 2011, 44(3): 507-515.
- [18] 丁敏, 庞奖励, 刘云霞, 等. 黄土高原不同土地利用方式下土壤颗粒体积分形特征[J]. 干旱区资源与环境, 2010, 24(11): 161-165.
- [19] 周萍, 刘国彬, 侯喜禄. 黄土丘陵区不同土地利用方式土壤团粒结构分形特征[J]. 中国水土保持科学, 2008, 6(2): 75-82.
- [20] 宫阿都, 何毓蓉. 金沙江干热河谷区退化土壤结构的分形特征研究[J]. 水土保持学报, 2001, 15(3): 112-115.