

内江市微地形条件影响下土壤团聚体稳定性及分形特征

黄安, 谢贤健, 周贵尧, 谢建平, 熊丽琴

(内江师范学院 地理与资源科学学院, 四川 内江 641112)

摘要:以季节性干旱区—川中丘陵区—内江市农耕地作为研究对象,选择坡向、坡位、土层厚度作为影响土壤团聚体稳定性的作用因子,采用标准化平均质量直径和分形理论,探讨了土壤团聚体的稳定性、分形特征及二者之间的关系。结果表明:研究区土壤团聚体稳定性标准化平均质量直径(NMMD)表现出阳坡>阴坡、下坡>中坡>上坡、15—30 cm>30—45 cm>0—15 cm的特点,说明在坡向上,阳坡的土壤团聚体与阴坡相比较稳定;在坡位变化上,下坡团聚体稳定性最高、中坡次之、上坡最低,在土层深度变化上,15—30 cm团聚体稳定性最高,30—45 cm次之,0—15 cm最低。微地形条件下分形维数的变化特征为:阴坡>阳坡,下坡>中坡>上坡,15—30 cm>30—45 cm>0—15 cm;3个地形因子作用下,分形维数与<0.1 mm的粒级质量分布达到极显著正相关,与其他粒级的质量分布相关性呈显著或不显著。研究结果可以为研究区土地利用及农业耕作提供一定的理论依据。

关键词:内江市;微地形;土壤团聚体;稳定性;分形维数

中图分类号:S152.4

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2012)06-0077-05

The Soil Aggregates Stability and the Fractal Features as Influenced by Tiny Terrain Conditions in Neijiang City

HUANG An, XIE Xian-jian, ZHOU Gui-yao, XIE Jian-ping, XIONG Li-qin

(School of Geography and Resources Science, Neijiang Normal University, Neijiang, Sichuan 641112, China)

Abstract: Agricultural land of Neijiang City, which is seasonal drought area and in the hilly area of central Sichuan, was chosen as the study site. The slope aspect, slope position, soil thickness were chosen as the factors influencing the soil aggregation stability. The stability of soil aggregates, fractal characteristics as well as the relationship between them were discussed by using the method of normal mean mass diameter and fractal theory. The results showed that soil aggregation stability of normal mean mass diameter in this area presented as the sequence of sunny slope>slope, downhill slope>middle slope>uphill slope, 15—30 cm>30—45 cm>0—15 cm. It explained that the soil aggregation stability of sunny slope was higher than that in slope upward, and the soil aggregation stability of downhill slope was the highest, it was the second in middle slope, and was the lowest in uphill in terms of the slope changing, and it was the highest in the layer of 15—30 cm, it was the second in the layer of 30—40 cm, it was the lowest in the layer of 0—15 cm with regard to soil depth. Under the condition of micro-landform, the changing characteristics of fractal dimension was in the order of slope>sunny slope>middle slope>uphill slope, 15—30 cm>0—15 cm. Affected by the three terrain factors, the partial correlation coefficient between fractal dimension and quality of particle size of <0.1 mm was pretty large or was to be direct proportion. The research result can provide some theoretical evidence for the use of land and agriculture cultivation.

Key words: Neijiang City; tiny terrain; soil aggregate; stability; fractal dimension

土壤团聚体是土壤结构构成的基础,是土壤中物质和能量转化及代谢的场所,其数量和质量直接决定

着土壤质量和肥力^[1-2]。由于团聚体含量对协调土壤肥力状况、改善土壤耕性等有着重要作用,影响着土

收稿日期:2012-04-21

修回日期:2012-05-25

资助项目:内江师范学院地理科学专业实践教学改革实验教学示范中心项目(XSJ201103);内江师范学院大学生科研项目(11NSD-158)

作者简介:黄安(1990—),男,四川雅安人,本科生,主要从事水土保持理论研究。E-mail:neu_zgy@163.com

通信作者:谢贤健(1978—),男,四川广汉人,副教授,博士,主要从事区域地理、区域可持续发展研究。E-mail:xxj007-14@tom.com

壤孔隙性、持水性和抗蚀性,常被作为衡量土壤肥力水平的重要指标。近几年来,有关团聚体稳定性的影响因素已有较多报道,土壤质地、黏土矿物类型、钙、镁等阳离子的含量、铁和铝氧化物以及土壤有机碳被认为是影响土壤团聚体稳定性的主要因素;然而以往的研究大多数只关注单一条件变化对土壤团聚体稳定性的影响,例如,同一土壤不同施肥、不同植被条件、不同利用方式、不同耕作制度下土壤团聚体稳定性变化,在试验条件下模拟研究某一条件变化对土壤团聚体稳定性影响等研究;而对于微地形条件下的土壤团聚体稳定性研究甚少。因此,本文选择川中丘陵区的内江市为研究对象,根据实测资料,运用土壤颗粒质量分布原理以及分形理论描述微地形条件下土壤颗粒的质量分布和分形特征,探讨微地形因子对土壤团聚体结构和性质的影响,以期为研究区土壤肥力特征描述提供新尺度和新方法,为合理利用土地和制订切实可行的农业耕作措施提供基本依据。

1 研究区概况

研究区位于四川盆地中部,我国最典型的方山丘陵区,地处长江以北和沱江、涪江、嘉陵江的中下游沱江流域^[3]。地理坐标范围为 $29^{\circ}29'—29^{\circ}48'N$, $105^{\circ}04'—105^{\circ}20'E$,丘陵广布,溪沟纵横,海拔在 250~600 m,丘谷高差 50~100 m。

内江市属中亚热带季风气候,全年温和多雨,四季分明。冬季几乎无降雪,夏季高温多雨。全年平均气温 $17.3^{\circ}C$, $10^{\circ}C$ 以上活动积温 $5\,500\sim6\,000^{\circ}C$,年平均降水量 874 mm,年无霜期约 311 d,全年云雾多而日照少,日照时数 1 250.9 h。空气湿度大,昼夜温差小,大风日数少,春、夏旱出现频率高。该地区土壤中多沙和碎石,地带性土壤为黄壤,现以紫色土和冲积土非地带性土壤为主,两种土壤占到了全市耕地土壤的 95%^[4]。

2 研究方法

2.1 野外采样

2.1.1 采样点选取 为了从整体上研究内江市农耕区微地形条件下土壤颗粒组成的特征,根据内江市农耕区区域分布、丘陵地貌变化特点,以典型性和代表性为原则,在内江市行政区内选择郭北镇大堰村、田家镇红碑村、永福乡一大村、永东乡流油村、顺河乡回龙湾村、白合镇道生村、双才镇二坝村、双桥镇马龙村 8 个村作为采样点,样点内农作物主要为蔬菜、玉米、大豆、花生、红薯。样点分布图见图 1。

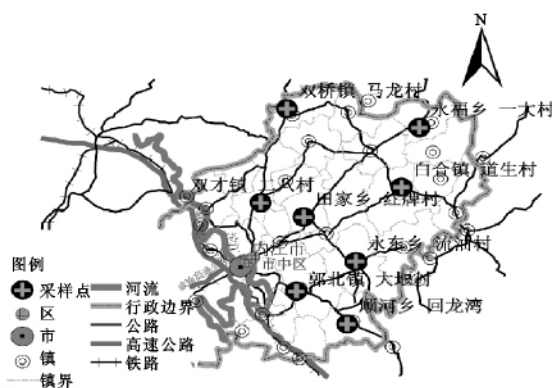


图 1 采样点分布示意图

2.1.2 采样方法 根据阴坡、阳坡坡向和上坡、中坡、下坡坡位设定 6 个取样点,利用 GPS 和地质罗盘仪确定地理纬度和坡度,记录地理经纬度等方位数据,精确至 $0.001''$ 。为减小采样过程中带来的误差,每个样点重复采样两次。每个土样按照“随机”、“等量”和“多点混合”的原则,每隔 20 m 在耕地上选一个样点并且每个样点间间隔 2 m,用小土铲取 0—50 cm 深的原状土样,采集土层深度 0—15 cm, 15—30 cm, 30—45 cm, 每个样点取土 1 kg 左右,共采集土样 144 份,为了降低机械等对土壤结构的破坏,用手将大块土沿自然结构轻轻地剥成直径约 10~12 mm 的小样块,用自封袋封口,带回实验室,使样品在自然状态下风干,除去粗根和小石块,杂质等。

2.2 室内分析方法

2.2.1 样品粒度分级 在自然状态下风干土壤后,根据美国土壤质地分类系统,将土壤粒径分为以下 5 个级别, $0\sim0.1\text{ mm}(d_1)$, $0.1\sim0.25\text{ mm}(d_2)$, $0.25\sim0.5\text{ mm}(d_3)$, $0.5\sim1\text{ mm}(d_4)$, $1\sim2\text{ mm}(d_5)$ 。

2.2.2 数据处理 对所得实验数据用 Excel 和 SPSS 17.0 统计分析软件进行分析处理。将 8 个采样地 144 份土壤按坡向因子(阴、阳坡),坡位因子(上、中、下坡)取出 0—15, 15—30, 30—45 cm 土层深度土壤的质量分布求平均值,整理出微地形条件下土壤粒径组成及分形维数(表 1)。

2.2.3 分形模型 团聚体的稳定性采用标准化平均质量直径(Nomal Mean Mass Diameter, NMMD)^[5]进行描述,其计算公式如下:

$$\text{NMMD} = \text{MMD} / (r_{\max} - r_{\min}) \quad (1)$$

式中: r_{\max} ——最大初始筛孔径; r_{\min} ——最小筛子孔径; MMD——平均质量直径,其计算公式为:

$$\text{MMD} = \sum_{i=1}^{n+1} \frac{r_{i-1} + r_i}{2} \times m_i \quad (2)$$

式中: r_i ——第 i 个筛子的孔径(mm), $r_0 = r_1$, $r_n = r_{n+1}$; m_i ——第 i 个筛子中颗粒百分比; n ——筛子的

数量。

已有研究表明,土壤团聚体的分形维数可以作为表征土壤结构和性质的重要参数,也可以作为表征土壤稳定性的指标之一。土壤是具有分形特征的系统,可运用分形理论建立土壤团粒结构的分形模型^[6-7]。小于某一特定测量尺度的累积土粒质量 m_i 与 d_i 之间的分形关系式为:

$$(d_i/d_{\max})^{3-D}=m_i/m_{\max} \tag{3}$$

式中: d_i ——相邻两筛分粒级的粒径平均值(mm);
 d_{\max} ——最大土粒的粒径(mm); m_i ——粒径小于 d_i 的累积土粒质量(kg); m_{\max} ——各粒级质量的总和(kg);
 D ——分形维数。分别以 $\lg(m_i/m_{\max})$, $\lg(d_i/d_{\max})$ 为纵、横坐标作图,则 $3-D$ 是该试验直线的斜率,故可用回归分析方法对土壤分形维数 D 进行测定。

表 1 微地形条件下土壤粒径组成及分形维数

地形因子	土层深度/mm	质量分布平均值/%					D	R	NMMD
		<0.1 mm	0.1~0.25 mm	0.25~0.5 mm	0.5~1 mm	1~2 mm			
阳坡	0—15	8.8	18.0	8.9	19.9	44.4	2.316	0.992	0.466
	15—30	9.2	15.5	9.2	18.6	47.4	2.329	0.994	0.483
	30—45	9.1	16.3	8.6	19.5	46.6	2.328	0.993	0.479
阴坡	0—15	9.0	18.7	10.0	21.9	40.4	2.317	0.993	0.445
	15—30	9.6	17.7	10.1	20.6	42.0	2.337	0.994	0.451
	30—45	9.2	19.6	9.2	19.6	42.4	2.330	0.990	0.451
下坡	0—15	9.5	16.8	8.8	19.2	45.7	2.340	0.993	0.472
	15—30	9.9	16.5	8.4	18.2	46.9	2.354	0.992	0.477
	30—45	9.4	17.0	8.4	18.1	47.1	2.339	0.992	0.478
中坡	0—15	8.9	18.4	8.7	19.9	44.1	2.323	0.991	0.463
	15—30	9.5	17.7	8.8	19.5	44.6	2.339	0.992	0.465
	30—45	10.0	17.0	8.7	20.0	44.3	2.352	0.993	0.464
上坡	0—15	8.2	19.9	11.0	23.5	37.3	2.287	0.991	0.430
	15—30	8.8	15.7	11.9	21.1	42.6	2.304	0.997	0.460
	30—45	8.1	19.8	9.5	20.4	42.1	2.293	0.989	0.452

3.2 土壤团聚体的稳定性

由于水、肥、气、热的组合情况不同,以及农业管理措施对团聚体胶结剂质量和保存时间影响较大,土壤团聚体的形成和稳定性必然受影响^[9],团聚体 1~2 mm 极粗砂,0.5~1 mm 粗砂,0.25~0.5 mm 中砂均属较大粒径团聚体,是微团聚体通过有机质胶结而成,是土壤表层中有机质含量较高的组成部分,稳定性强,是土壤肥力的重要物质基础。<0.25 mm 粒径的微团聚体,其数量和组合是构成土壤肥力的实质^[8],但土壤结构具有很大的不稳定性,有机质、养分等营养元素易流失,影响作物正常生长。利用公式(1)和(2)得到表征土壤团聚体稳定性的指标标准化平均质量直径(NMMD)。

3.2.1 土壤团聚体稳定性坡向分析 大团聚体粒径

3 结果与分析

3.1 土壤粒径分布

土壤粒径分布影响土壤的水力特性、土壤肥力状况,并与土壤侵蚀和退化直接相关,是表征土壤物理性质的重要参数之一,通过分析研究区域土壤粒径分布的分形特征,不仅能够表现土壤粒径大小,还能反映质地的均一程度。各个粒径的团聚体在土壤养分水分的供给、保持、转化等方面发挥着不同的作用^[8]。根据不同粒径土壤颗粒质量分布平均值(表 1)可知,不同地形条件下,1~2 mm 的颗粒含量最高,介于 37.3%~47.4%,平均值为 43.9%;其次是 0.5~1 mm 的颗粒,介于 18.1%~21.9%,其总体均值为 20.0%;最低的为<0.1 mm 的颗粒,其均值为 9.1%。

分布平均值阳坡为 46.1%,阴坡为 41.6%,即阳坡更易形成大团聚体;不同坡向条件下的土壤团聚体(NMMD)为 0.445~0.483,平均值阳坡为 0.476,阴坡为 0.449,呈现出阳坡高于阴坡。将阴阳坡土壤团聚体平均质量直径(NMMD)做方差分析得出 $F=24.03$,在 $\alpha=0.01$ 置信水平差异下 $F_{0.01}(1,5)=16.26$,即 $F=24.03>F_{0.01}(1,5)$,说明在坡向因子影响下,团聚体稳定性差异极显著。在阳坡,由于土壤热量的主要来源是太阳辐射,其表现形式是土壤温度,阳坡接受太阳辐射总量较多,因此土壤温度较高;这就使得土壤水分的蒸发和微生物的活动加快,进而影响土壤中矿物质和有机质的分解,土壤水、气、热的优化组合,土壤肥力提高,土壤结构改善,利于有机质的分解形成,有利于土壤大团聚体的形成,对土壤形

成稳定的结构有积极的意义;相反,阴坡背向阳光的一侧,接受太阳辐射较少,温度相对于同一坡位的阳坡较低,水分和微生物活动相对较少^[10]。从团聚体质量分布和平均质量直径的大小比较可知:阴坡形成较大团聚体的能力较弱,土壤结构的稳定性较差。

3.2.2 土壤团聚体稳定性坡位分析 大团聚体坡位分布的平均值,下坡为 46.6%,中坡为 44.3%,上坡为 40.7%,即形成大团聚体容易度的排序为下坡>中坡>上坡。坡位因子条件下,土壤团聚体 NMMD 介于 0.430~0.478,平均 NMMD 下坡为 0.476、中坡 0.464、上坡为 0.447;呈现出下坡>中坡>上坡的趋势,将上、中、下坡土壤团聚体(NMMD)做方差分析得出 $F=7.22$,在 $\alpha=0.05$ 置信水平差异下 $F_{0.05}(2,8)=4.46$,即 $F=7.22>F_{0.05}(2,8)$,说明在坡位因子影响下,团聚体稳定性差异显著。由于农耕地经常重复耕作,在降雨和风力的作用下很容易发生土壤流失,土壤颗粒富集程度从丘体下部往上部减少^[11],即土壤厚度由下往上逐渐变小,土壤大小颗粒变化随之变化,这是坡位对土壤团聚体稳定性影响显著以及表现出下坡>中坡>上坡特征的重要原因。

3.2.3 土壤团聚体不同土层深度分析 不同土层深度间平均质量直径(NMMD):0—15 cm 为 0.455,15—30 cm 为 0.467,30—45 cm 为 0.464,顺序为 15—30 cm 最大,30—45 cm 次之,0—15 cm 最低;将不同土层深度土壤团聚体(NMMD)做方差分析得出 $F=0.96$,在 $\alpha=0.05$ 置信水平差异下 $F_{0.05}(2,14)=3.74$,即 $F=0.95<F_{0.05}(2,14)$,即在土层深度因子影响下,土壤团聚体稳定性表现出 15—30 cm>30—45 cm>0—15 cm,但其差异不显著。

土壤颗粒的组成均继承了母质一定特性,并综合了环境变化的影响^[12],是土壤本质属性之一。不同土层深度对土壤团聚体稳定性影响不显著,这主要与川中丘陵区地形地貌及气候条件有关,该地区属于地上丘陵区,土壤中多沙和碎石,加之土壤的人为扰动强烈^[13],因此土层间的稳定性基本保持一致性。

3.3 微地形条件下土壤颗粒分形特征及其与土壤颗粒级分布的关系分析

3.3.1 分形特征 利用公式(3)计算得到两种微地形因子影响下土壤颗粒分形维数 D (表 1)。由表 1 可知,在坡向因子影响下,分形维数介于 2.317~2.337,平均值阴坡为 2.330,阳坡为 2.324,呈现出阴坡>阳坡的趋势,方差分析得出 $F=0.26<F_{0.05}(1,5)=6.61$,说明差异性不显著;在坡位因子影响下,分形维数介于 2.287~2.354,平均值下坡为 2.344、中坡为 2.338、上坡为 2.295,呈现出下坡>中坡>上坡

趋势,方差分析得出 $F=18.49>F_{0.01}(2,8)=8.65$,说明差异性极显著。在土层深度因子影响下,平均值 0—15 cm 为 2.317、15—30 cm 为 2.332、30—45 cm 为 2.328,表现顺序为 15—30 cm 最高,30—45 cm 次之,0—15 cm 最低,方差分析得出 $F=0.87<F_{0.05}(2,14)=3.74$,说明差异性不显著。

3.3.2 土壤颗粒分形维数与土壤颗粒级分布的关系分析 由土壤分形维数的计算可知,分形维数与土壤颗粒含量从小到大的累计含量有关。表 2 为对分形维数与不同粒径分布含量单相关分析结果。微地形因子条件下,分形维数与<0.1 mm 粒径含量呈极显著正相关,与 0.25~0.5 mm、0.5~1 mm 粒径含量呈显著负相关,与 1~2 mm 粒径含量呈显著正相关。表明土壤颗粒分形维数对各个土壤粒径分布含量的响映程度不同,其中响映程度最大的是<0.1 mm 含量,其次是 0.5~1 mm、0.25~0.5 mm 和 1~2 mm 含量,即土壤颗粒分形维数越大,土壤中<0.1 mm 含量越高,0.5~1 mm、0.25~0.5 mm 含量越低。对不同地形条件下 5 个粒级粒径含量与分形维数进行多元线性逐步回归分析,发现分形维数与<0.1 mm 粒径含量的偏相关关系达到极显著,与其他粒径含量的偏相关关系不显著。关系式为: $D=2.004+0.035d_1$ ($R=0.973^{**}$,经 t 检验,回归系数 d_1 的 P 值为 0.000,在 $\alpha=0.01$ 的水平下有显著意义)。因此,决定微地形条件土壤颗粒分形维数的粒径分布为<0.1 mm,其余粒径分布的影响程度相对较小。土壤颗粒分形维数作为描述土壤结构几何形体的参数,实质上反映的是土壤颗粒对空间的填充能力^[14-15],即土壤颗粒直径越小,细粒物质含量越高,对空间的填充能力越强,土壤分形维数就越大。这是研究区在坡向和坡位因子影响下,分形维数与<0.1 mm 粒径含量呈极显著正相关,与较大团聚体呈负相关的重要原因。由于该地区土壤中多沙和碎石,土壤中大团粒结构的物质含量较多,从而引起土壤颗粒中 1~2 mm 的含量较其他粒径的土壤颗粒含量高,这是分形维数与 1~2 mm 粒径含量呈显著正相关的原因^[16]。

采样区大部分为常年耕作区,不同土地利用下,耕地是产流产沙、土壤侵蚀、固体和液体养分流失最严重的土地利用类型^[17],从而导致土壤团聚体以及土壤颗粒处于同一条件下来比较各个影响因子产生的影响作用;另一方面,由于水土流失的严重性,则导致土壤颗粒在坡向、坡位以及不同土层深度条件下表现出以上特征。

表 2 分形维数 D 与土壤团聚体分布含量 d 的线性关系

粒径分布/ mm	分形维数与各级 含量相关的关系	R^2	显著性 概率 sig.
<0.1	$D=0.035d+2.004$	0.946	0.000
$0.1\sim0.25$	$D=-0.007d+2.450$	0.005	0.052
$0.25\sim0.5$	$D=-0.013d+2.451$	0.474	0.005
$0.5\sim1$	$D=-0.010d+2.531$	0.533	0.002
$1\sim2$	$D=0.005d+2.114$	0.471	0.005

坡向因子影响下,由于阳坡向水肥气热的组合条件优于阴坡,阳坡比阴坡更易于形成大团聚体,即在阴坡上土壤颗粒粒径小于阳坡,故其分形维数阴坡 $>$ 阳坡;坡位因子影响下,上坡位有利于大团粒结构的团聚体形成,下坡位中细黏粒的含量相对较多,土壤质地也就越来越细,孔隙度逐渐降低,并且土壤的团聚度逐渐增加,土壤中各种养分含量大部分也就随坡度的降低而逐渐增加,这是由于在丘陵区,丘体的下坡位是土壤养分的一个聚集点,丘体的上坡位及中坡位由于长期的冲刷和淋溶等作用,使坡面地表的养分物质流失并向下坡位富集^[13,18],使得分形维数在坡位变化上表现出下坡 $>$ 中坡 $>$ 上坡以及影响显著的特征;在土层因子影响下,分形维数表现出 15—30 cm $>$ 30—45 cm $>$ 0—15 cm,由于农耕区基本属于旱地直播,在耕作层的第一层种植,细粒物质容易向第二层富集,导致该层分形维数值最大,而 0—15 cm 属于耕作层,腐殖质、人工施肥使得该层土壤团聚体易形成大团粒结构^[10],故其分形维数最小。

4 结论

(1) 研究区土壤团聚体稳定性标准化平均质量直径(NMMD)表现出阳坡 $>$ 阴坡、下坡 $>$ 中坡 $>$ 上坡、15—30 cm $>$ 0—15 cm $>$ 30—45 cm 的特点;说明在坡向上,阳坡的土壤团聚体比阴坡相对比较稳定;在坡位变化上,下坡团聚体稳定性最高、中坡次之、上坡最低;在土层深度变化上,15—30 cm 团聚体稳定性最高,0—15 cm 次之,30—45 cm 最低;在坡位因子和土层因子条件下,由于该区所处的地理环境、人为扰动等因素的影响使其差异不显著。

(2) 微地形条件下分形维数的变化特征为阴坡 $>$ 阳坡,下坡 $>$ 中坡 $>$ 上坡,15—30 cm $>$ 30—45 cm $>$ 0—15 cm。在坡向和坡位因子影响下,分形维数与 <0.1 mm 的粒级质量分布偏相关系数达到极显著正相关,这与谢贤健和韦方强^[19]的研究一致;与其他粒级的质量分布相关性不显著;这是研究区微地形条件下土壤颗粒的分形学机制。

综上所述,研究区在阳坡下坡的土壤肥力较高,因此,在研究区阳下坡进行耕作,对保障农作物正常

生长和肥力需求将具有积极的意义。

参考文献:

[1] Six J, Paustian K, Elliott E T, et al. Soil structure and soil organic matter: distribution of aggregate size classes and aggregate associated carbon[J]. Soil Science Society of America Journal,2000,64(2):681-689.

[2] 彭新华,张斌,赵其国. 土壤有机碳库与土壤结构稳定性关系的研究进展[J]. 土壤学报,2004,41(4):618-623.

[3] 傅绥宁. 川中丘陵地区的人口、资源、环境问题和国土整治对策[J]. 经济地理,1983,4(2):16-21.

[4] 赵济,陈传康. 中国地理[M]. 北京:高等教育出版,1999.

[5] 姚贤良. 土壤结构的肥力意义[J]. 土壤学报,1965,13(1):15.

[6] Rieu M, Sposito G. Fractal fragmentation, soil porosity and soil water properties: application[J]. Soil Science Society of America Journal, 1991,55(4):1231-1238.

[7] 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.

[8] 赵光,唐晓红,罗友进. 保护性耕作对四川紫色水稻土团聚体组成及有机碳含量与分布的影响[J]. 江苏农业科学,2010(1):288-292.

[9] Jiao Y, Whalen J K, Hendershot W H. No-tillage and manure applications increase aggregation and improve nutrient retention in a sandy-loam soil[J]. Geoderma, 2006,134(1/2):24-33.

[10] 李杰天,赵焯,张科利,等. 土壤地理学[M]. 北京:高等教育出版社,2004.

[11] 魏翔,李占斌. 土壤侵蚀对生态系统的影响[J]. 水土保持研究,2006,13(1):245-248.

[12] 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.

[13] 魏玲娜,陈喜,王文,等. 山体土壤水分分布特征及其影响因素:以东江流域为例[J]. 水土保持研究,2009,16(5):154-152.

[14] 梁士楚,董鸣,王伯荪,等. 英罗港红树林土壤粒径分布的分形特征[J]. 应用生态学报,2003,14(1):11-14.

[15] 刘云鹏,王国栋,张社奇. 陕西 4 种土壤粒径分布的分形特征[J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版,2003,31(2):92-94.

[16] 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):17-21.

[17] 李品荣,孟广涛,李国昌. 不同土地利用方式下土壤地力变化和水土流失状况研究[J]. 水土保持研究,2009,16(3):95-99.

[18] 吕贻忠,张凤荣,孙丹峰. 百花山山地土壤中有机质的垂直分布规律[J]. 土壤学报,2005,37(3):277-283.

[19] 谢贤健,韦方强. 泥石流频发区不同盖度草地土壤颗粒的分形特征[J]. 水土保持学报,2011,25(4):202-207.