

紫色丘陵区不同土地利用方式土壤剖面微团聚体组成及分形特征

代文才, 高明, 王子芳, 黄容, 高莅淞

(西南大学资源环境学院, 重庆 400715)

摘要: 通过野外采样和室内分析相结合的方法, 研究了紫色丘陵区不同土地利用方式下的土壤剖面微团聚体组成及分形特征。结果表明: 林地、花椒地、旱地、水田和柑橘园土壤微团聚体组成以 0.25~0.05 mm 粒级为优势粒级, 0.05~0.01 mm 次之, 占比 18.80%~35.57%, <0.001 mm 粒级含量最少, 为 0.33%~2.57%; 0—20 cm 土层土壤微团聚体平均重量比表面积(MWSSA)表现为林地(161.04 cm²/g)>柑橘园(134.49 cm²/g)>花椒地(117.31 cm²/g)>水田(100.67 cm²/g)>旱地(96.94 cm²/g), 且林地土壤微团聚体 MWSSA 显著大于其他土地利用方式; 0—20 cm 土层林地土壤团聚状况和团聚度显著高于其他土地利用方式, 且其团聚体状况分别比花椒地、旱地、水田和柑橘园提高了 16.55%, 20.15%, 11.23% 和 7.68%; 20—40 cm 土层各土地利用方式土壤微团聚体分形维数 *D* 值表现为柑橘园(2.41)>林地(2.40)>花椒地(2.32)>水田(2.31)>旱地(2.12), 且旱地土壤微团聚体 *D* 值显著低于其他利用方式; 5 种土地利用方式土壤微团聚体分形维数与各因子的相关性分析有一定的相似性, 同时也存在一定的差异性。因此, 不同土地利用方式下土壤微团聚体分形维数在一定程度上能表征土壤物理性质的优劣、养分肥力的高低以及抗蚀能力的强弱。

关键词: 紫色丘陵区; 土地利用方式; 分形维数; 土壤微团聚体; 抗蚀性

中图分类号: S152.3; S152.4

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2016)06-0259-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2016.06.043

Composition and Fractal Features of Soil Micro-aggregates Under Different Land-use Types in Purple Hilly Area

DAI Wencai, GAO Ming, WANG Zifang, HUANG Rong, GAO Lisong

(College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715)

Abstract: Through filed sampling and laboratory analysis, the composition and fractal features of profile soil micro-aggregates in purple hilly area with different land use types were studied. The results showed as follows: Among woodland, pepper filed, dry land, paddy and citrus orchard, micro-aggregates of 0.25 to 0.05 mm was dominant, followed by micro-aggregates of 0.05 to 0.01 mm, which appropriated 18.80% to 35.57% of the total samples, the least were <0.001 mm, which proportion was between 0.33% to 2.57%. In 0—20 cm soil layer, the annual mean weight soil surface area (MWSSA) sequence was woodland (161.04 cm²/g)>citrus orchard (134.49 cm²/g)>pepper land (117.31 cm²/g)>paddy (100.67 cm²/g)>dry land (96.94 cm²/g). In this layer, the MWSSA of woodland micro-aggregates was significantly higher than other land use types, which aggregate state and aggregate degree superior than others as its aggregate state showed a 16.55%, 20.15%, 11.23% and 7.68% higher than pepper filed, upland, paddy and citrus orchard, respectively. In 20—40 cm soil layer, the fractal features *D* of each land use type is like citrus orchard (2.41)>woodland (2.40)>pepper field (2.32)>paddy (2.31)>upland (2.12), the *D* value of upland is significantly lower than other lands. The fractal features of these five land correlate with the result of factor analysis, though some inconsistent exist. Hence, the fractal features of micro-aggregates in different land use type can be, to some extent, seen as an index to characterize superior or inferior of soil physical properties, fertility level and corrosion resistance.

Keywords: purple hilly area; land use types; fractal features; soil micro-aggregate; anti-erodibility

收稿日期: 2016-07-19

资助项目: 国家“十二五”科技支撑计划项目(2012BAD14B18)

第一作者: 代文才(1992—), 男, 重庆垫江人, 硕士研究生, 主要从事土壤质量与环境研究。E-mail: 295386744@qq.com

通信作者: 高明(1965—), 男, 重庆合川人, 博士, 研究员, 博导, 主要从事土壤质量与环境 and 土地整理研究。E-mail: gaoming@swu.edu.cn

土壤微团聚体是有机—无机复合体经过多次聚合而成的土壤结构颗粒单元,并以不同粒级微团聚体的形式分布在土体内^[1],可反映土壤团聚程度和粘粒行为,其化学结构和组成特点对土壤物理和化学过程有重要的影响^[2]。作为土壤最基本的物质和功能单元,土壤微团聚体在土壤养分保持、供应以及转化等方面发挥着重要作用^[3],且其组成比例与土壤肥力、抗蚀性存在显著相关性^[4]。土壤是由不同颗粒组成,并具有不规则形状和自相似结构的多孔介质,因而具有一定的分形特征^[5]。根据粒径质量分布计算分形维数,以表征土粒直径的大小和质地组成的均匀程度^[6]。蒲玉琳等^[7]研究表明,土壤微团聚体分形维数能反映坡耕地土壤物理性质的优劣、肥力的高低以及抗蚀能力的强弱,可作为土壤抗蚀性的评价指标。也有研究表明,根际土壤分形维数可作为黄土高原区植被恢复过程中土壤质地的评价指标^[8]。龚伟等^[9]研究表明,不同施肥处理下土壤微团聚体分形维数与土壤有机质和碱解氮含量相关性好,可作为土壤肥力水平的评价指标。目前,对土壤微团聚体组成及分形特征研究主要集中于不同林分 and 不同施肥处理的土

壤^[10-11],而对不同土地利用方式下紫色丘陵区土壤微团聚体组成及分形特征的研究还鲜有报道。因此,本文对重庆市江津区先锋镇仙池坝附近 5 种典型土地利用方式进行研究,分析土壤微团聚体组成及其分形维数与土壤理化性质之间的关系,以期对紫色丘陵区不同土地利用方式下土壤结构与土壤侵蚀关系以及土壤肥力评价提供理论依据。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

研究区位于重庆市江津区先锋镇仙池坝农科院果树研究所的现代果树生态示范园附近(29°12'8"—29°13'32" N,106°16'38"—106°17'55" E)。研究区属于北半球亚热带季风气候,年平均温度 18.4℃,冬季平均气温 7.7℃,夏季平均气温 28.5℃,年均降水量 1 030.7 mm,集中在 6—9 月,年日照时数 1 273.6 h,无霜期 341 d,年湿度 81%。土壤类型为紫色土,地貌以低山丘陵为主,林地、花椒地、旱地、水田和柑橘园 5 种采样地存在不同程度的水土流失。研究区样点具体情况见表 1。

表 1 研究区样地基本特征

采样地	海拔/m	自然 坡度/(°)	土层 深度/cm	pH	有机质/ (g·kg ⁻¹)	全氮/ (g·kg ⁻¹)	全磷/ (g·kg ⁻¹)	全钾/ (g·kg ⁻¹)
林地	525	22	37	7.9	29.4	1.29	0.788	31.7
花椒地	399	13	42	8.0	21.6	1.41	0.963	30.2
旱地	283	4	43	5.8	13.8	0.903	0.902	23.4
水田	278	<3	>60	7.8	28.5	1.64	0.737	26.7
柑橘园	294	<3	>60	5.5	15.1	0.853	0.332	25.6

1.2 试验设计与样品采集

2015 年 5 月在江津区选取 5 种典型土地利用类型,用于研究土壤分形维数和土壤微团聚体,土地利用类型包括:林地、花椒地、旱地、水田和柑橘园。在每个土地利用类型布设 3 块典型样地(20 m×20 m),每块样地按照梅花形,避开路边、河边和大棚设置 5 个样点,分别采集 0—20,20—40 cm 或者 0—20,20—40,40—60 cm 土层原状土样,将同一层次的 5 点土样采用四分法均匀混合成重量约 2 kg 的样品,共采集 15 个样点,36 个样品;在采集和运输过程中尽量减少对土样的扰动,以免破坏团聚体。室温下自然风干备用,风干过程中除去植物残体、小石块和土壤动物。

1.3 样品测定与数据处理

1.3.1 样品测定 土壤机械组成采用 6% H₂O₂ 去除有机质,并加入 10% HCl 去除碳酸盐和氧化物,再加入分散剂,加热使其微沸 1 h 后采用吸管法测定其颗粒组成,土壤微团聚体采用蒸馏水浸泡土壤 24 h 后再振荡 2 h,采用吸管法测定各粒级微团聚体含量^[12];土壤有机质含量采用外加热—重铬酸钾容量法测定;土壤 pH、全氮、全磷、全钾均采用常规方法

测定^[13]。

1.3.2 数据处理 土壤微团聚体平均重量直径(MWD)计算公式为:

$$MWD = \sum_{i=1}^n \bar{x}_i \cdot w_i \quad (1)$$

式中: \bar{x}_i 为某级微团聚体的平均直径(mm); w_i 为某级微团聚体质量百分比(%)。

土壤微团聚体平均重量比表面积(MWSSA)计算公式^[14]为:

$$MWSSA = \sum_{i=1}^n \frac{6W_i}{\rho_i \bar{d}_i} \quad (2)$$

式中: \bar{d}_i 为第*i*级别微团聚体直径的平均值; W_i 为第*i*级别微团聚体质量百分含量;假设土壤微团聚体大致形状为球体,忽略各粒级间土壤密度的差异,即 $\rho_i = \rho_n = 2.65 \text{ g/cm}^3$ 。

土壤微团聚体特征组成计算公式为^[8]:

团聚状况(%)=(>0.05 mm 微团聚体百分含量) - (>0.05 mm 机械组成百分含量) (3)

团聚度(%)= $\frac{\text{团聚状况}}{\text{>0.05 mm 微团聚体百分含量}} \times 100\%$ (4)

$$\text{分散系数}(\%) = \frac{\leq 0.001 \text{ mm 微团聚体百分含量}}{\leq 0.001 \text{ mm 机械组成百分含量}} \times 100\% \quad (5)$$

$$\text{分散率}(\%) = \frac{\leq 0.05 \text{ mm 微团聚体百分含量}}{\leq 0.05 \text{ mm 机械组成百分含量}} \times 100\% \quad (6)$$

微团聚体分形维数 D 的推导公式^[15]为:

$$\frac{M(r < \bar{x}_i)}{M_T} = \left(\frac{\bar{x}_i}{x_{\max}}\right)^{3-D} \quad (7)$$

式中: \bar{x}_i 为某级微团聚体平均直径(mm); $M(r < \bar{x}_i)$ 为粒径小于 x_i 的微团聚体的质量(g); M_T 为微团聚体总质量(g); x_{\max} 为微团聚体的最大粒径(mm)。利用公式(2),通过数据拟合,可求出分形维数 D 。

所有运算采用 Excel 2010 和 SPSS 17.0 软件进行处理,方差分析采用最小显著极差法(LSD),不同字母表示显著性差异($P < 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 不同土地利用方式土壤微团聚体分布特征

由表 2 可知,不同土地利用方式下土壤微团聚体各粒级含量不同。总体上,0.25~0.05 mm 粒级微团聚体含量显著高于其他粒级,含量为 19.24%~51.46%;1~0.25 mm 粒级微团聚体含量为 6.79%~50.19%,最大值和最小值分别是花椒地 20—40 cm 土层土壤和柑橘园 40—60 cm 土层土壤;0.05~0.01 mm 粒级微团聚体含量介于 18.80%~35.57%,平均值为 27.11%;0.01~0.005 mm 粒级微团聚体含量在柑橘园 20—40 cm 土层达最大值 8.94%,是最小值(天然林地 20—40 cm 土层,4.11%)的 2.18 倍;0.005~0.001 mm 粒级含量为 2.11%~9.72%;<0.001 mm 粒级含量介于 0.33%~2.57%。由此可见,各粒级含量大小顺序为 $M_{0.25\sim 0.05 \text{ mm}} > M_{0.05\sim 0.01 \text{ mm}} > M_{1\sim 0.25 \text{ mm}} > M_{0.01\sim 0.005 \text{ mm}} > M_{0.005\sim 0.001 \text{ mm}} > M_{<0.001 \text{ mm}}$,表明 0.25~0.05 mm 粒级是组成各土地利用方式土壤微团聚体的主体,其次是 0.05~0.01 mm 粒级,<

0.001 mm 粒级所占比例最小。

由表 2 还可看出,同一土地利用方式不同土层不同粒级微团聚体含量存在显著性差异。林地 0—20 cm 土层 1~0.25 mm 粒级微团聚体达最大值 36.14%,分别是 0.25~0.05 mm,0.05~0.01 mm,0.01~0.005 mm,0.005~0.001 mm 和 <0.001 mm 粒级含量的 1.06, 1.92, 7.86, 8.05, 17.66 倍。柑橘园 0—20 cm 土层 0.25~0.05 mm 粒级微团聚体含量最大为 47.97%,分别比 1~0.25 mm,0.05~0.01 mm,0.01~0.005 mm,0.005~0.001 mm 和 <0.001 mm 粒级含量高 35.92%, 23.03%, 39.08%, 42.74% 和 47.05%;20—40 cm 土层 0.25~0.05 mm 粒级为优势粒级,分别是 1~0.25 mm, 0.05~0.01 mm, 0.01~0.005 mm, 0.005~0.001 mm 和 <0.001 mm 粒级含量的 6.78, 1.58, 5.15, 6.21, 28.26 倍。旱地 20—40 cm 土层 0.25~0.05 mm 粒级含量最大为 50.19%,其次 0.05~0.01 mm 粒级含量为 29.51%,最小为 <0.001 mm 粒级含量 0.33%。花椒地 20—40 cm 土层 1~0.01 mm 粒级含量为 89.70%,可见, 1~0.01 mm 粒级为花椒地土壤优势粒级。水田 0.25~0.05 mm 粒级含量为 42.48%,分别是 1~0.25 mm, 0.05~0.01 mm, 0.01~0.005 mm, 0.005~0.001 mm 和 <0.001 mm 粒级含量的 4.78, 1.19, 4.85, 11.46, 70.30 倍。

由表 2 可知,同一土层不同土地利用方式微团聚体含量也存在显著性差异。在 0—20 cm 土层,花椒地 1~0.25 mm 粒级团聚体含量最大为 44.75%,分别比林地、旱地、水田和柑橘园该粒级团聚体含量高 8.60%, 34.09%, 26.59% 和 32.69%;旱地 0.05~0.01 mm 粒级团聚体最大为 33.64%,是林地 18.80%(最小值)的 1.78 倍。在 20—40 cm 土层,花椒地 1~0.25 mm 粒级团聚体含量显著高于其他利用方式土壤该粒级团聚体含量,分别比林地,旱地,水田和柑橘园增加了 33.65%, 414.73%, 277.58%, 638.94%。

表 2 不同土地利用方式土壤微团聚体组成

土层/cm	土地利用方式	各级土壤微团聚体组成/%					
		1~0.25 mm	0.25~0.05 mm	0.05~0.01 mm	0.01~0.005 mm	0.005~0.001 mm	<0.001 mm
0—20	天然林地	36.15a	33.92b	18.80b	4.59b	4.48ab	2.04a
	花椒地	44.75a	21.15c	23.21b	5.72b	4.13ab	1.03b
	旱地	10.65b	44.32a	33.64a	8.44ab	2.49b	0.44b
	水田	18.16b	41.41ab	30.12ab	6.67ab	3.02b	0.62b
	柑橘园	12.05b	47.97a	24.94b	8.88a	5.23a	0.92b
20—40	天然林地	37.56b	26.57b	24.36ab	4.12a	2.40ab	1.50a
	花椒地	50.20a	19.25b	20.28b	4.82a	4.83ab	0.62b
	旱地	9.75c	50.19a	29.51ab	8.09a	2.11b	0.34b
	水田	13.29c	40.73a	34.17a	8.19a	2.58b	1.03ab
	柑橘园	6.79c	46.11a	29.10ab	8.94a	7.41a	1.63a
40—60	水田	8.88a	42.48b	35.57a	8.74a	3.70b	0.60b
	柑橘园	7.24a	51.47a	21.64b	7.34a	9.72a	2.58a

注:同一列不同小写字母表示各利用方式达到差异性显著($P < 0.05$)。下同。

2.2 不同土地利用方式土壤微团聚体结构特征

土壤微团聚体平均重量比表面积(MWSSA)值越大,土壤质地越细,分散性就越强。从表 3 可以看出,0—20 cm 土层土壤微团聚体 MWSSA 表现为林地(161.04 cm²/g) > 柑橘园(134.49 cm²/g) > 花椒地(117.31 cm²/g) > 水田(100.67 cm²/g) > 旱地(96.94 cm²/g),且林地土壤微团聚体 MWSSA 显著大于其他土地利用方式;20—40 cm 土层土壤微团聚体 MWSSA 值达显著性差异,且柑橘园土壤微团聚体 MWSSA 达最大值 186.01 cm²/g,分别是林地、花椒地、旱地和水田的 1.25,1.87,2.16,1.51 倍;40—60 cm 土层柑橘园土壤微团聚体 MWSSA 值显著高于水田,且比水田 MWSSA 值增加了 105.31%。由此可见,各土层柑橘园和林地土壤团聚体 MWSSA 值显著高于花椒地、水田和旱地,表明柑橘园和林地土壤结构性比花椒地、水田和旱地土壤结构性差。

土壤微团聚体平均重量直径(MWD)越大,表明土壤团聚体结构稳定性越高,抗蚀能力越强。从表 3 可以看出,0—20 cm 土层不同土地利用方式土壤微

团聚体 MWD 介于 0.14~0.32 mm,且林地和花椒地土壤微团聚体 MWD 显著高于其他利用方式;20—40 cm 土层花椒地土壤微团聚体 MWD 最大为 0.35 mm,显著高于其他利用方式,且其 MWD 分别比林地、旱地、水田和柑橘园 MWD 增加了 0.23,1.39,1.25,1.87 倍;40—60 cm 土层水田和柑橘园土壤微团聚体 MWD 无显著差异。由此可见,花椒地土壤微团聚体抗蚀能力最强。

团聚状况、团聚度、分散系数和分散率常用作土壤微团聚体稳定性的评价指标,一般团聚状况和团聚度越高,分散系数与分散率越低,土壤微团聚体稳定性越高,抗蚀能力越强。由表 3 可知,0—20 cm 土层林地土壤团聚状况和团聚度显著高于其他利用方式,且其团聚体状况分别比花椒地,旱地,水田和柑橘园提高了 16.55%,20.15%,11.23%,7.68%;20—40 cm 土层林地土壤团聚度显著高于其他土地利用方式的团聚度,且比水田土壤团聚度 38.47%(最小值)增加了 26.18%;40—60 cm 土层水田和柑橘园土壤分散率无显著差异,仅水田土壤分散系数大于柑橘园土壤。

表 3 不同土地利用方式土壤微团聚体结构

土层深度/cm	土地利用方式	平均重量比表面积/(cm ² ·g ⁻¹)	平均重量直径/mm	团聚状况/%	团聚度/%	分散系数/%	分散率/%
0—20	林地	161.04a	0.28a	42.10a	60.19a	14.65a	41.38b
	花椒地	117.31b	0.32a	25.54b	39.06b	11.86a	57.08a
	旱地	96.94b	0.14b	21.95b	39.94b	2.89b	67.48a
	水田	100.67b	0.19b	30.86ab	50.77ab	2.84b	57.10a
	柑橘园	134.49ab	0.16b	34.42ab	56.96ab	7.77ab	54.32ab
20—40	林地	148.64b	0.28b	41.30a	64.65a	12.26a	46.17b
	花椒地	99.31c	0.35a	31.05ab	44.74ab	6.46ab	49.56b
	旱地	85.74c	0.15c	29.27ab	47.50ab	2.50b	58.73b
	水田	123.13bc	0.16c	21.35b	38.47b	8.26ab	69.06a
40—60	柑橘园	186.01a	0.12c	24.02b	44.86ab	10.84a	66.81ab
	水田	115.31b	0.13a	19.25a	37.55a	3.33b	71.37a
	柑橘园	236.74a	0.13a	30.48a	51.96a	16.58a	57.63a

2.3 不同土地利用方式土壤微团聚体分形特征

土壤微团聚体分形维数是反映土壤团粒结构的几何形状参数,表现为粘粒含量越高,其分形维数越大,单一粒径的集中程度对分形维数也存在重要影响。由表 4 可知,不同土地利用方式土壤微团聚体分形维数差异显著,变化为 2.18~2.48。0—20 cm 土层林地土壤微团聚体分形维数较高,分别比花椒地、旱地、水田和柑橘园土壤微团聚体 *D* 值增加了 3.88%,10.59%,9.83%,4.59%,且与旱地、水田和柑橘园土壤微团聚体 *D* 存在显著差异;20—40 cm 土层各土地利用方式土壤微团聚体 *D* 值表现为柑橘园(2.41) > 林地(2.40) > 花椒地(2.32) > 水田(2.31) > 旱地(2.12),且旱地土壤微团聚体 *D* 值显著低于其他利用方式;40—60 cm 土层柑橘园土壤微团聚体 *D* 值为 2.48,显著高于水田土壤,为水田土壤的 1.14 倍。

分形维数 *D* 值大小能够反映土壤结构稳定性的强弱,*D* 值越小,表明土壤结构稳定性越强。总体上,旱地土壤微团聚体分形维数值均小于其他土地利用方式下的 *D* 值,表明不同土地利用方式下旱地土壤结构稳定性最强。

表 4 不同土地利用方式土壤团聚体分形维数

土层深度/cm	土地利用方式				
	林地	花椒地	旱地	水田	柑橘园
0—20	2.44a	2.35ab	2.21c	2.22c	2.33b
20—40	2.41a	2.32a	2.13b	2.31a	2.41a
40—60	—	—	—	2.18b	2.48a

2.4 不同土地利用方式土壤微团聚体分形维数与理化性质的相关性分析

张昌顺等^[16]研究表明,土壤微团聚体分形维数与其理化性质存在一定的相关性。由表 5 可知,林地

土壤分形维数与 <0.001 mm 微团聚体、MWSSA、分散系数存在极显著正相关,与 $0.05\sim 0.01$ mm 粒级微团聚体、 $0.005\sim 0.001$ mm 粒级微团聚体、容重、分散率、团聚度呈负相关,但未达显著水平,与其他因子存在一定程度的正相关关系;花椒地土壤微团聚体分形维数与 <0.001 mm 微团聚体、MWSSA、分散系数存在显著或极显著正相关,与 $0.25\sim 0.05$ mm 粒级微团聚体、 $0.05\sim 0.01$ mm 粒级微团聚体、容重、全磷、速效钾、团聚状况存在负相关关系,且未达显著水平;旱地土壤微团聚体分形维数与 $0.25\sim 0.05$ mm 粒级微团聚体和团聚状况存在显著或极显著负

相关,与 $0.05\sim 0.01$ mm、 <0.001 mm 微团聚体、分散系数、分散率呈现显著或极显著正相关,与其他因子存在一定的相关性,但未达显著水平。

总体上,5 种土地利用方式土壤微团聚体分形维数与各因子的相关性分析有一定的相似性,同时也存在一定的差异性。分散率和团聚状况仅与旱地土壤微团聚体分形维数存在显著相关性,与林地、花椒地、水田、柑橘园土壤微团聚体分形维数存在相关性但不显著。因此,不同土地利用方式下土壤微团聚体分形维数能在一定程度上表征土壤物理性质的优劣、养分肥力的高低以及抗蚀能力的强弱。

表 5 不同土地利用方式土壤微团聚体分形维数与土壤理化性质及团聚结构相关性

项目	土地利用方式				
	林地	花椒地	旱地	水田	柑橘园
1~0.25 mm 粒级微团聚体	0.263	0.188	-0.029	0.571	-0.494
0.25~0.05 mm 粒级微团聚体	0.087	-0.403	-0.964**	0.056	0.433
0.05~0.01 mm 粒级微团聚体	-0.182	0.131	0.954**	-0.577	-0.324
0.01~0.005 mm 粒级微团聚体	0.587	-0.343	0.094	-0.198	0.058
0.005~0.001 mm 粒级微团聚体	-0.620	0.218	0.292	-0.835*	0.739*
<0.001 mm 粒级微团聚体	0.942**	0.879*	0.986**	0.963**	0.989**
容重	-0.559	-0.586	0.020	-0.060	0.481
有机质	0.736	0.520	-0.152	0.071	-0.606
全氮	0.757	0.627	-0.123	0.213	-0.569
全磷	0.623	-0.468	-0.264	-0.171	-0.256
速效钾	0.611	-0.169	0.403	-0.796	-0.546
总孔隙度	0.200	0.335	0.618	0.11	-0.336
MWSSA	0.978**	0.951**	0.809	0.287	0.975**
分散系数	0.933**	0.862*	0.936**	0.817*	0.687*
分散率	-0.228	0.175	0.904*	-0.393	0.292
团聚状况	0.164	-0.033	-0.868*	0.339	-0.350
团聚度	-0.101	0.107	-0.739	0.160	-0.326
MWD	0.453	0.126	-0.454	0.595	-0.476

注: * 表示差异达显著水平($P<0.05$), ** 表示差异达极显著水平($P<0.01$)。

3 讨论

3.1 不同土地利用方式对土壤微团聚体分布的影响

刘梦云等^[17]的研究表明,在 $0\sim 20$ cm 土层中 $1\sim 0.01$ mm 微团聚体含量表现为人工草地 $>$ 天然草地 $>$ 灌木林地 $>$ 农地 $>$ 果园,在 $20\sim 40$ cm 土层灌木林地和天然草地 $1\sim 0.01$ mm 微团聚体含量较果园和人工草地高;安韶山等^[18]研究发现,长芒草群落表层土壤 $1\sim 0.25$ mm 微团聚体含量远大于开垦地,其余各粒级微团聚体均表现为封禁地大于开垦地;铁杆蒿群落表层土壤中 $1\sim 0.01$ mm 微团聚体表现为放牧地 $>$ 封禁地 $>$ 开垦地,而 <0.01 mm 微团聚体含量却相反。林草地土壤大粒级微团聚体含量大于农耕地,表明随着干扰程度的增强,土壤大粒级微团聚体含量减少,小粒级微团聚体所占比例则增大。本研究发现 $0\sim 20$ cm 土层林地、花椒地、旱地、水田和柑橘园 5 种土地利用方式土壤中 >0.05 mm 粒级微团聚体含量高低顺序表现为林地 $>$ 花椒地 $>$ 柑橘园 $>$ 水田 $>$ 旱地,而 $20\sim 40$ cm 土层呈

现出花椒地 $>$ 林地 $>$ 旱地 $>$ 水田 $>$ 柑橘园,表明表层土壤受到扰动,导致土壤大粒级微团聚体破碎,数量减少,小粒级含量增加,这与刘晔等^[19]的研究结果相似,可能是林地、果园和花椒地土壤表面枯枝落叶量较多,增加了土壤有机质含量,提高了微生物活性,经过微生物的作用使得土壤颗粒胶结,改善团粒结构,从而表现出这 3 种土地利用方式土壤大粒级微团聚体含量高于旱地和水田。

3.2 不同土地利用方式对土壤微团聚体分形维数与土壤理化性质相关性的影响

土壤团粒分形维数既能表征土粒直径的大小和质地组成的均匀程度^[6],还能有效表征土壤理化性质的变化趋势。很多学者对此进行研究,但结果不尽相同。有研究发现,林地土壤微团聚体分形维数与容重呈极显著正相关,而与总孔隙度、毛管孔隙度、有机质、全氮、有效磷和速效钾等呈极显著负相关^[16,20]。也有研究指出土壤微团聚体分形维数与有机质、有效磷、碱解

氮呈显著正相关^[7-8]。本研究得出,林地土壤微团聚体分形维数与土壤理化性质的相关性与龚伟等^[20]和张昌顺等^[16]研究结果相反,与张超等^[8]的研究结果相似,但相关性未达显著水平,这可能是本研究研究的紫色土与其他土壤理化性质差异所导致的。龚伟等^[20]研究的林地土壤有机质丰富,平均值达 60 g/kg,土壤微团聚体形成以大粒级为主,分形维数与大粒级微团聚体含量呈显著负相关关系,而本研究中紫色土有机质含量相对偏低,土壤养分主要靠无机胶体即黏粒级微团聚体保蓄,分形维数与小粒级微团聚体含量呈负相关,从而导致与前人研究结果的差异。

土壤团粒的分形维数也能表征土壤结构的稳定性,一般表现为团粒结构分形维数越小,土壤团聚性越强,结构越稳定,其抗蚀能力也越强。研究表明,5种土地利用方式土壤分形维数与团聚状况,团聚度、分散系数和分散率均存在相关性,其中5种土地利用方式与分散系数均呈显著或极显著正相关,林地土壤微团聚体分形维数与分散率和团聚度呈负相关,花椒地土壤微团聚体分形维数与团聚状况呈负相关,旱地土壤微团聚体分形维数与团聚状况和团聚度呈负相关,水田土壤微团聚体分形维数仅与分散率呈负相关,果园土壤微团聚体分形维数与团聚状况和团聚度呈负相关。土壤分形维数与各指标相关性小,可能是由于研究区域属于紫色丘陵区,水土及养分流失比较严重,或者与自身土壤理化性质有关,但是在一定程度上能反映土壤养分状况。

4 结论

(1)林地、花椒地、旱地、水田和柑橘园土壤微团聚体 1~0.05 mm 为优势粒级,含量均>50%;0—20 cm 土层 5 种土地利用方式土壤中大于 0.05 mm 大粒级微团聚体含量表现为林地>花椒地>柑橘园>水田>旱地。

(2)5 种土地利用方式下土壤团聚状况大小顺序表现为林地>柑橘园>水田>花椒地>旱地,平均重量直径表现为林地最大,其次是水田,最小是旱地。林地土壤抗蚀性最强。

(3)紫色丘陵区紫色土壤微团聚体分形维数与其理化性质和团聚体结构存在较好的相关性,可用微团聚体分形维数表征土壤物理性质的优劣、养分肥力的高低以及抗蚀能力的强弱。

参考文献:

[1] 王晟强,郑子成,李廷轩.四川茶园土壤微团聚体组成及其分形特征[J].林业科学,2014,50(9):10-17.
 [2] 王展,张玉龙,虞娜,等.冻融作用对土壤微团聚体特征及分形维数的影响[J].土壤学报,2013,50(1):83-88.
 [3] Tisdall J M, Oades J M. Landmark Papers; No. 1. Organ-

ic matter and water-stable aggregates in soils[J]. European Journal of Soil Science, 2012, 63(1): 8-21.

- [4] 徐文远,刘玉花,王晓春,等. G111 公路纳嫩段 9 种护坡灌木根系增强土壤抗蚀性比较[J]. 水土保持学报, 2011, 25(2): 72-77.
 [5] Deneff K, Six J. Contributions of incorporated residue and living roots to aggregate-associated and microbial carbon in two soils with different clay mineralogy[J]. European Journal of Soil Science, 2006, 57(6): 774-786.
 [6] 黄欢,何丙辉,鲍玉海,等. 不同模式地埂植物篱对土壤颗粒组成特征参数的影响[J]. 水土保持学报, 2014, 28(6): 256-261.
 [7] 蒲玉琳,谢德体,林超文,等. 植物篱—农作坡耕地土壤微团聚体组成及分形特征[J]. 土壤学报, 2012, 49(6): 1069-1077.
 [8] 张超,刘国彬,薛蕙,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.
 [9] 龚伟,颜晓元,蔡祖聪,等. 长期施肥对小麦—玉米轮作土壤微团聚体组成和分形特征的影响[J]. 土壤学报, 2011, 48(6): 1141-1148.
 [10] 张大鹏,范少辉,蔡春菊,等. 川南不同退耕还竹林土壤团聚特征比较[J]. 林业科学, 2013, 49(1): 27-32.
 [11] 孙彩丽,薛蕙,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.
 [12] 吴铭,郑子成,李廷轩,等. 不同植茶年限土壤微团聚体及有机碳分布特征[J]. 长江流域资源与环境, 2014, 23(7): 1041-1047.
 [13] 杨剑虹. 土壤农化分析与环境监测[M]. 北京: 中国大地出版社, 2008: 26-171.
 [14] 安娟,卢嘉,郑粉莉,等. 不同地表条件下黑土区坡耕地侵蚀过程中土壤团聚体迁移[J]. 水土保持学报, 2011, 25(6): 100-104.
 [15] 代文才,钱盛,高明,等. 施用生物质灰渣对柑橘园土壤团聚体及有机碳分布的影响[J]. 水土保持学报, 2016, 30(2): 260-271.
 [16] 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]. 水土保持学报, 2008, 22(6): 170-175.
 [17] 刘梦云,常庆瑞,齐雁冰. 不同土地利用方式的土壤团粒及微团粒的分形特征[J]. 中国水土保持科学, 2006, 4(4): 47-51.
 [18] 安韶山,黄懿梅,郑粉莉. 宁夏黄土区不同植物群落土地利用方式对土壤质量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2008, 14(2): 300-307.
 [19] 刘晔,邵日晶,耿涌,等. 不同利用方式对棕壤微团聚体组成的影响[J]. 辽宁农业科学, 2010(4): 1-5.
 [20] 龚伟,颜晓元,蔡祖聪,等. 长期施肥对小麦—玉米轮作土壤微团聚体组成和分形特征的影响[J]. 土壤学报, 2011, 48(6): 1141-1148.