

川中丘陵区不同治理模式对土壤微团聚体分形特征的影响*

闫建梅¹ 何联君² 何丙辉^{1**} 田太强¹

(1. 西南大学资源环境学院/三峡库区生态环境教育部重点实验室 重庆 400715; 2. 盐亭县水务局 盐亭 621600)

摘要 探讨川中丘陵区不同小流域治理模式对土壤微团聚体分形特征的影响, 可为该区植被恢复与水土流失治理模式提供科学依据。本文通过室内分析, 研究了5种不同小流域治理模式下的土壤微团聚体粒径组成、分形维数特征及其与土壤理化性质的关系。①该区土壤微团聚体组成以0.01~0.05 mm粒径为优势粒径, 含量在0~10 cm和10~20 cm土层分别达28.63%和28.04%; 0.001~0.005 mm粒径为次优势粒径, 在0~10 cm和10~20 cm土层含量分别达25.90%和26.33%; 各土层不同治理模式下各粒径微团聚体含量差异显著。②该区土壤微团聚体分形维数变化范围为2.643~2.717, 不同治理模式土壤微团聚体分形维数呈现水保林<甜橙林<核桃林<裸地<坡改梯<坡减缓的规律, 分形维数与各粒径微团聚体含量呈线性关系。③相关性分析表明, 土壤微团聚体分形维数与速效钾、全钾呈正相关, 与土壤总孔隙、碱解氮、全氮、有机质呈负相关关系。土壤微团聚体分形维数能较好地反映川中丘陵区土壤的理化结构, 是表征该区土壤理化性质的重要指标, 林地是该区植被恢复与水土流失治理选择的最优模式。

关键词 川中丘陵区 水土流失治理模式 土壤微团聚体 分形维数 理化性质
中图分类号: S152.4 文献标识码: A 文章编号: 1671-3990(2014)11-1294-07

Effects of different governance patterns of small watershed on fractal features of soil micro-aggregates in the hilly areas of central Sichuan Basin

YAN Jianmei¹, HE Lianjun², HE Binghui¹, TIAN Taiqiang¹

(1. College of Resources and Environment, Southwest University/Key Laboratory of Eco-environments in Three Gorges Reservoir Region, Chongqing 400715, China; 2. Yanting Water Resources Bureau, Yanting 621600, China)

Abstract The exploration of the fractal features of soil micro-aggregates under different governance patterns of small watershed can provide scientific basis for vegetation restoration and for soil and water loss control in the hilly areas of Sichuan Hilly Basin. Thus this paper analyzed the composition and fractal features of soil micro-aggregates and its relationship with soil physicochemical properties. The results showed that soil micro-aggregates of 0.01–0.05 mm size were dominant aggregates in 0–10 cm soil layer (28.63%) and 10–20 cm soil layer (28.04%). This was followed by soil micro-aggregates of 0.001–0.005 mm size for 0–10 cm soil layer (25.90%) and 10–20 cm soil layer (26.33%). Significant differences were observed among different patterns of governance. The range of fractal features of soil micro-aggregates was 2.643–2.717. The sequence of fractal features of soil micro-aggregates for different governance patterns was conservation forest < orange forest < walnut forest < bare-land < slope-terrace < grading of slope land. Linear relation between fractal features and composition of soil micro-aggregates was observed. Fractal features of soil micro-aggregates showed significant positive correlations with available K and total K. However, negative correlations were noted between fractal features of soil micro-aggregates and total soil porosity, alkali-hydrolyzable N, total N and organic matter. The fractal features of soil micro-aggregates better reflected the physicochemical properties of soils in the hilly areas of central Sichuan Basin. Woodland was the best mode for vegetation restoration and controlling soil and water loss in the basin.

Keywords Central Sichuan Basin hilly areas; Governance pattern of soil and water loss; Soil micro-aggregate; Fractal feature;

* 国家科技支撑计划项目(2011BAD31B03)、国家自然科学基金项目(41271291)和农业部公益性行业科研项目(201003014-6-3)资助

** 通讯作者: 何丙辉, 主要从事土壤侵蚀与小流域综合治理研究。E-mail: hebinghui@swu.edu.cn

闫建梅, 主要从事小流域水土保持研究。E-mail: yanjianmei1024@126.com

收稿日期: 2014-05-08 接受日期: 2014-07-01

Physicochemical properties

(Received May 8, 2014; accepted Jul. 1, 2014)

土壤作为一种由大小、形状不规则的固相组分和孔隙所形成的多孔介质,具有一定的分形特征^[1]。随着分形理论的提出^[2],分形维数也成为土壤研究中分析土壤结构与功能的有效工具。川中丘陵区地质疏松、降雨丰富、雨量集中分布,导致该区土壤极易遭受侵蚀和风化,是四川省乃至长江上游水土流失最为严重的区域之一。近年来通过采取水土保持农业技术措施、水土保持林草措施和水土保持工程措施相结合的方法对小流域进行治理,对该区的土壤质量有一定的改善作用。因此,研究该区不同治理模式下的土壤微团聚体分形特征及其土壤理化性质对该区小流域治理有着重要意义。土壤微团聚体作为土壤结构的颗粒单元,对土壤结构及土壤肥力有重要影响。国内外学者都对其做了大量研究^[3-4]。陈恩凤等^[5]提出以 0.01 mm 为界来划分特征微团聚体,并以其比例高低来评价土壤肥力水平,而龚伟等^[6]却以 0.02 mm 为界;杨培岭等^[7]提出用粒径的重量分布来取代粒径数量分布直接计算粒径分布的分形维数的方法,进而表征土壤粒径大小组成和质地组成的均匀程度;龚伟等^[8]通过 18 a 长期定位施肥试验,探讨了特征微团聚体组成比例和分形维数与施肥的关系;蒲玉琳等^[9]采用数理统计法对植物篱-农耕地土壤微团聚体组成及分形特征进行了研究,表明分形维数可作为反映缓坡耕地土壤物理性质、养分肥力及抗蚀能力的指标;安韶山等^[10]运用分形理论对黄土高原植被群落与团聚体之间的关系进行了探讨;张超等^[11]通过对黄土高原 6 种植被根际土壤微团聚体分形特征的研究指出根际土壤分形维数可以作为黄土高原区植被恢复过程中土壤质地的评价指标。以上研究区域大多集中在黄土高原、华北平原、川南地区,研究内容大多关于植被群落与定位施肥,关于川中丘陵区小流域不同治理模式下土壤微团聚体分形特征与土壤理化性质关系方面的研究鲜见报道。因此,本文以四川省遂宁市船山区桂花镇南垭小流域为研究对象,选择具有代表性的 5 种小流域治理模式,对土壤微团聚体分形特征及其土壤理化性质进行了研究。拟解决的关键问题如下:

川中丘陵区小流域不同治理模式下土壤微团聚体组成及分形特征; 川中丘陵区不同治理模式下土壤基本理化性质; 土壤微团聚体分形维数与土壤理化性质的关系。研究结果可为川中丘陵区小流域综合治理提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

研究区设在四川省遂宁市船山区桂花镇南垭小流域内(东经 105°26'0"~105°26'54", 北纬 30°33'11"~30°34'14"),地貌形态以中浅丘为主,有少量低山,可分河谷、阶地、缓丘、平坝、浅丘、中丘、深丘、低山 8 个地貌类型区。研究区属中亚热带湿润气候,多年平均日照时数为 1 333.4 h,多年平均无霜期 296 d,多年平均气温 17.4 °C,≥10 °C 积温 5 627.1 °C。流域内多年平均降水量 933.3 mm,年内最大降水量 1 443.3 mm,最小降水量 736.7 mm,暴雨多集中在 5—10 月,达 804.5 mm,占年降雨量的 81.0%。土壤类型为水稻土和紫泥土,其中水稻土包括紫色水稻土、黄壤水稻土及冲积水稻土。该流域属四川盆地中部丘陵亚热带常绿阔叶林区,乔木主要以柏树(*Cupressus funebris*)、香樟(*Cinnamomum camphora*)为主,还有部分梧桐(*Firmiana platanifolia*)、桉木(*Alnus cremastogyne*);灌木主要有马桑(*Coriaria nepalensis*)、黄荆(*Vitex negundo*)等;草本主要为芭茅(*Miscanthus floridulus*)、钱线草(*Adiantum capillusveneris*)、野棉花(*Anemone vitifolia*)等;人工栽培种植物主要有水稻(*Oryza sativa*)、玉米(*Zea mays*)、红苕(*Dioscorea esculenta*)、花生(*Arachis hypogaea*)、小麦(*Triticum aestivum*)、油菜(*Brassica campestris*)、海椒(*Capsicum frutescens*)和豆类作物。

1.2 试验设计及样品采集

选取有代表性的 5 种不同小流域治理模式作为本试验样地,另选 1 处裸地(bare land)作为对照,5 种小流域治理模式分别为: 水保林(conservation forest)、甜橙林(orange forest)、核桃林(walnut forest)、坡减缓(slope to slowdown)和坡改梯(slope to terrace)。坡减缓即将坡度较大的坡耕地改为坡度较小的坡耕地,坡改梯即将坡耕地改为梯平地。其中坡减缓和坡改梯为多年连续单一类型土地,裸地为未种植任何农作物的荒地,有少量杂草。核桃林、甜橙林、坡减缓、坡改梯每年均施入一定量化肥,水保林和裸地管理比较粗放,基本无肥料投入。每种治理模式选取 3 个样地面积 10 m×10 m 的研究小区,详见表 1。于 2013 年 3 月在标准样地进行采样,按“S”形选取 5 点,分土层 0~10 cm 和 10~20 cm 采集土样。首先取 1 kg 混合土样,去除植物根系和石块,带回实验室用于测试土壤养分和微团聚体各粒径含量;然后用环

表 1 不同类型小流域治理模式样地基本情况

Table 1 Description of sampling plots of different governance patterns of small watershed in the study area

治理模式 Governance pattern	海拔 Altitude (m)	坡度 Slope degree (°)	坡向 Slope aspect	主要植被 Main vegetation	林龄 Age (a)	胸径 Diameter at breast height (cm)	树高 Plant height (m)	密度 Density (plants·hm ⁻²)	植被覆盖率 Vegetation coverage (%)
裸地 Bare land	273.9	10	NE42°	少量杂草 Weed	—	—	—	—	—
坡减缓 Grading of slope land	294.7	10	WS35°	油菜 <i>Brassica campestris</i>	—	—	—	—	—
坡改梯 Slope to terrace	290.9	<5	WS30°	油菜 <i>Brassica campestris</i>	—	—	—	—	—
核桃林 Walnut forest	294.7	10	WS35°	核桃树 <i>Juglans regia</i>	8	7.2	4.0	600	70
甜橙林 Orange forest	270.9	10	NW33°	甜橙树 <i>Citrus sinensis</i>	8	6.8	3.5	750	70
水保林 Conservation forest	275.6	10	NW30°	香樟、滇柏、铁芒箕等 <i>Cinnamomum camphora</i> , <i>Cipressusduclouxiana</i> , <i>Dicranopteris linearis</i> , et al.	15	10.5	6.2	900	60

刀、铝盒分坡位取各样地表层原状土，用来测定土壤孔隙、土壤容重，其中环刀体积为 100 cm³。

1.3 样品测定与数据分析

将所有土样带回实验室内充分混匀风干过 1 mm 和 0.25 mm 筛后测定土壤基本理化性质以及微团聚体组成。微团聚体采用吸管法测定，有机质采用重铬酸钾-外加加热法测定，全氮采用半微量凯氏定氮法测定，全磷采用酸溶-钼锑抗比色法测定，全钾采用 NaOH 熔融-火焰光度法测定，有效氮采用碱解扩散法测定，有效磷采用 0.5 mol·L⁻¹ 碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法测定，速效钾则采用 NH₄OAc 浸提火焰光度法测定，容重和孔隙度均采用环刀法测定。

所有数据采用 SPSS 18.0 软件进行统计，采用 Pearson 法进行相关分析和回归分析，图表采用 Microsoft Excel 2010 软件绘制。

1.4 分形维数的计算方法

土壤分形维数模型的推导^[7]：具有相似结构的多孔介质土壤由大于某一粒径 d_i ($d_i > d_{i+1}$, $i=1, 2, 3, \dots$) 的土粒构成的体积 $V(d_i)$ ，可由公式表示：

$$V(\delta > d_i) = A [1 - (d_i/k)^{3-D}] \quad (1)$$

式中： δ 为尺码，A 和 k 均表示常数，D 为颗粒大小分布的分形维数。

通常用一定粒径重量分布表示粒径分析资料。以 \bar{d}_i 表示两筛分粒径 d_i 与 d_{i+1} 间的粒径平均值，忽略各粒径之间土粒比重的差异，即 $\rho_i = \rho$ (1, 2, 3, ...)，则：

$$W(\delta > \bar{d}_i) = V(\delta > \bar{d}_i) \rho = \rho A [1 - (d_i/k)^{3-D}] \quad (2)$$

式中： $W(\delta > \bar{d}_i)$ 表示粒径大于 d_i 的土粒累积重量。以 W_0 表示土壤各个粒径土壤重量之和，定义 $\lim_{i \rightarrow \infty} d_i = 0$ ，则由式(2)可得：

$$W_0 = \lim_{i \rightarrow \infty} W(\delta > \bar{d}_i) = \rho A \quad (3)$$

由式(2)和(3)可推导出：

$$W(\delta > \bar{d}_i) / W_0 = 1 - (d_i/k)^{3-D} \quad (4)$$

设 \bar{d}_{\max} 为最大粒径土壤的平均直径， $W(\delta > \bar{d}_{\max}) = 0$ 代入(4)中有 $k = \bar{d}_{\max}$ 。由此推出分形公式为：

$$W(\delta > \bar{d}_i) / W_0 = 1 - (d_i / \bar{d}_{\max})^{3-D} \quad \text{或者} \quad \left(\frac{\bar{d}_i}{\bar{d}_{\max}} \right)^{3-D} = W(\delta < \bar{d}_i) / W_0 \quad (5)$$

式中： $W(\delta < \bar{d}_i)$ 为粒径小于 d_i 的土粒累积重量。以 $\lg [W(\delta < \bar{d}_i) / W_0]$ 为纵坐标， $(3-D) \lg \left(\frac{\bar{d}_i}{\bar{d}_{\max}} \right)$ 为横坐标， $3-D$ 为其斜率，D 即可用回归分析方法得到。

特征微团聚体的组成比例是指小粒径微团聚体 (<0.01 mm) 与大粒级微团聚体 (>0.01 mm) 的比值，特征微团聚体比例的计算方法为：小粒级微团聚体含量 (<0.01 mm) / 大粒级微团聚体含量 (>0.01 mm)^[5]。

2 结果与分析

2.1 不同小流域治理模式下土壤微团聚体组成

从表 2 可以看出，不同小流域治理模式下各土层各粒径含量差异显著，0~10 cm 土层 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 粒径微团聚体含量平均值分别为 2.68%、15.92%、28.63%、17.17%、25.90%、9.70%，0.05~0.01 mm 粒径为优势粒级，0.005~0.001 mm 为粒径次优势粒级；1~0.25 mm 粒径含量规律为甜橙林 > 坡减缓 > 水保林 > 核桃林 > 坡改梯 > 裸地，0.25~0.05 mm 粒径含量规律为水保林 > 甜橙林 > 坡改梯 > 裸地 > 核桃林 > 坡减缓，0.05~0.01 mm 粒径含量在所有治理模式下没有显著差异，0.01~0.005 mm 粒径呈现核桃林 > 坡减缓 > 坡改梯 > 裸地 > 甜橙林 > 水保林的规律，0.005~0.001 mm 粒径呈坡减缓 > 水保林 > 核桃林 > 裸地 > 坡

表 2 不同类型小流域治理模式的土壤微团聚体组成及分形维数
Table 2 Composition and fractal features of soil micro-aggregates of different governance patterns of small watershed

土层 Soil layer (cm)	治理模式 Governance pattern	微团聚体分布 Micro-aggregate distribution (%)						分形维数 Fractal dimension	<0.01 mm/ (0.01~ 1 mm)
		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		
0~10	裸地 Bare land	1.27a	12.79a	32.55a	17.70bc	26.25c	9.44b	2.680	1.146
	坡减缓 Grading of slope land	2.76a	9.53a	27.15a	20.43c	29.73c	10.40bc	2.700	1.535
	坡改梯 Slope to terrace	1.52a	14.79ab	27.55a	19.73c	25.05ab	11.36c	2.700	1.280
	核桃林 Walnut forest	2.07a	10.73a	29.78a	21.19c	26.29c	9.94bc	2.687	1.349
	甜橙林 Orange forest	6.01b	19.70b	29.35a	13.66ab	21.29a	9.98bc	2.674	0.816
	水土保持 Conservation forest	2.45a	28.00c	25.37a	10.28a	26.78c	7.10a	2.643	0.791
	平均值 Average	2.68	15.92	28.63	17.17	25.90	9.70	—	—
10~20	裸地 Bare land	1.32a	18.58a	27.20a	15.56a	26.41ab	10.93bc	2.696	1.123
	坡减缓 Grading of slope land	2.03a	10.84a	27.46a	17.56a	30.12c	12.00c	2.717	1.480
	坡改梯 Slope to terrace	1.15a	15.05a	32.11a	14.49a	25.37ab	11.83bc	2.702	1.070
	核桃林 Walnut forest	1.72a	11.59a	30.85a	18.18a	27.66ab	10.00abc	2.689	1.264
	甜橙林 Orange forest	4.95b	24.57a	27.66a	12.21a	20.83a	9.77ab	2.669	0.749
	水土保持 Conservation forest	2.40a	25.80a	22.97a	13.16a	27.56ab	8.12a	2.663	0.954
	平均值 Average	2.26	17.74	28.04	15.19	26.33	10.44	—	—

同列数据后不同小写字母表示不同处理间差异显著($P < 0.05$), 下同。Different small letters in the same column indicate significant difference among different patterns at $P < 0.05$. The same below.

改梯>甜橙林, <0.001 mm 粒径呈坡改梯>坡减缓>甜橙林>核桃林>裸地>水土保持规律。

10~20 cm 土层 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 粒径微团聚体含量平均值分别为 2.26%、17.74%、28.04%、15.19%、26.33%、10.44%、0.05~0.01 mm 粒径为优势粒级, 0.005~0.001 mm 为粒径次优势粒级; 1~0.25 mm 粒径为甜橙林>水土保持>坡减缓>核桃林>裸地>坡改梯, 0.005~0.001 mm 粒径呈坡减缓>核桃林>水土保持>裸地>坡改梯>甜橙林的规律, <0.001 mm 粒径呈坡减缓>坡改梯>裸地>核桃林>甜橙林>水土保持的规律, 0.25~0.05 mm、0.05~0.01 mm、0.01~0.005 mm 粒径微团聚体含量在各个模式之间差异不显著。

特征微团聚体的组成比例能综合反映土壤对于水、肥的保供性能, 可作为评价土壤肥力水平的重要指标^[5]。本研究发现, 0~10 cm 土层的特征微团聚体比例规律为: 坡减缓>核桃林>坡改梯>裸地>甜橙林>水土保持, 变化范围为 0.791~1.535; <0.01 mm 粒径团聚体含量依次为坡减缓>核桃林>坡改梯>裸地>甜橙林>水土保持; 10~20 cm 土层特征微团聚体比例规律为坡减缓>核桃林>裸地>坡改梯>水土保持>甜橙林, 变化范围为 0.749~1.480, <0.01 mm 粒径团聚体含量依次为坡减缓>核桃林>裸地>坡改梯>水土保持>甜橙林。

2.2 不同小流域治理模式下土壤微团聚体分形维数

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, 表现为黏粒含量越高, 其分形维数越高, 单一粒径的集中程度对分形维数也有重要影

响^[12]。本研究中, 0~10 cm 土层土壤微团聚体分形维数为 2.643~2.700, 在不同治理模式下其分形维数呈现如下规律: 水土保持<甜橙林<裸地<核桃林<坡减缓=坡改梯; 与对照相比, 坡减缓和坡改梯的分形维数均增加 0.75%, 核桃林增加 0.26%, 而甜橙林和水土保持分别降低 0.22%和 1.38%。10~20 cm 土层的分形维数为 2.663~2.717, 不同模式的变化规律为水土保持<甜橙林<核桃林<裸地<坡改梯<坡减缓; 与对照相比, 坡减缓和坡改梯的分形维数分别增加 0.76%和 0.23%, 而核桃林、甜橙林和水土保持分别降低 0.28%、0.99%和 1.24%。

将土壤微团聚体分形维数(D)与各粒径含量(X)百分数进行回归分析。结果(表 3)表明, 在 0~10 cm 土层和 10~20 cm 土层土壤微团聚体分形维数与 1~0.25 mm、0.25~0.05 mm 粒径含量均呈负相关关系, 与 0.05~0.01 mm、0.01~0.005 mm、0.005~0.001 mm、<0.001 mm 粒径含量均呈正相关关系, 其中与 0.25~0.05 mm 和 <0.001 mm 粒径含量均达极显著, 这表明<0.01 mm 粒径含量越高, 土壤微团聚体分形维数越大。

2.3 不同小流域治理模式下的土壤理化性质

表 4 结果表明, 0~10 cm 土层中有机质、全氮、全钾含量差异不显著, 碱解氮含量表现为水土保持略微高于其他模式, 速效钾表现为坡改梯略高, 全磷、有效磷均是核桃林略高于其他模式, 土壤容重及孔隙度差异较显著。10~20 cm 土层呈现与 0~10 cm 土层相似的规律, 所有的理化性状特征除了土壤容重, 其他性质均是 0~10 cm 土层含量比 10~20 cm 土层含量高。

表 3 不同类型小流域治理模式的不同土层土壤微团聚体分形维数与土壤各粒径含量之间的关系

Table 3 Correlation between fractal feature dimensions of soil micro-aggregates and contents of aggregates of each diameter of different soil layers under different governance patterns of small watershed

粒径 Diameter (mm)	0~10 cm			0~20 cm		
	回归方程	相关系数 r	显著性 P	回归方程	相关系数 r	显著性 P
	Regression model	Correlation coefficient	Significance	Regression model	Correlation coefficient	Significance
1~0.25	$D=-0.002X_1+2.686$	0.177	0.738	$D=-0.009X_1+2.686$	0.793	0.215
0.25~0.05	$D=-0.003X_2+2.723$	0.881	0.020	$D=-0.003X_2+2.738$	0.866	0.026
0.05~0.01	$D=0.002X_3+2.621$	0.243	0.643	$D=0.003X_3+2.595$	0.528	0.282
0.01~0.005	$D=0.004X_4+2.604$	0.909	0.012	$D=0.006X_4+2.598$	0.702	0.120
0.005~0.001	$D=0.001X_5+2.643$	0.186	0.724	$D=0.003X_5+2.599$	0.527	0.283
<0.001	$D=0.014X_6+2.544$	0.951	0.004	$D=0.013X_6+2.552$	0.951	0.005

表 4 不同小流域治理模式下土壤理化性质

Table 4 Soil physicochemical properties under different governance patterns of small watershed

土层 Soil layer (cm)	治理模式 Governance pattern	有机质 Organic matter (g·kg ⁻¹)	全氮 Total N (g·kg ⁻¹)	碱解氮 Available N (mg·kg ⁻¹)	全钾 Total K (g·kg ⁻¹)	速效钾 Available K (g·kg ⁻¹)	全磷 Total P (g·kg ⁻¹)	有效磷 Available P (g·kg ⁻¹)	土壤容重 Bulk density (g·cm ⁻³)	总孔隙 Total pore (%)
0~10	裸地 Bare land	12.10a	0.97a	110.63a	18.31a	124.30a	0.43a	3.38a	1.51c	48.90a
	坡减缓 Grading of slope	11.57a	0.98a	100.76ab	19.45a	141.43a	0.50a	4.05a	1.31ab	53.87ab
	坡改梯 Slope to terrace	12.81a	1.00a	102.83a	20.47a	169.73b	0.50a	3.73a	1.47bc	50.40a
	核桃林 Walnut forest	12.39a	0.99a	120.11ab	18.70a	132.01a	0.64b	6.92b	1.34ab	53.73ab
	甜橙林 Orange forest	12.31a	0.98a	111.46ab	18.58a	116.55a	0.49a	3.91a	1.23a	59.90b
	水保林 Conservation forest	12.61a	1.03a	124.21b	19.18a	119.10a	0.47a	2.73a	1.46bc	53.17ab
	平均值 Average	12.19	0.99	112.38	19.11	133.85	0.51	4.12	1.39	53.33
10~20	裸地 Bare land	10.11a	0.80a	86.75b	16.40ab	108.22ab	0.37a	1.61a	1.49b	46.36ab
	坡减缓 Grading of slope	9.33a	0.68a	64.98a	19.37bc	108.93ab	0.44a	2.36a	1.55b	41.26a
	坡改梯 Slope to terrace	9.30a	0.73a	99.75b	19.66c	98.92a	0.39a	1.92a	1.52b	46.20ab
	核桃林 Walnut forest	10.11a	0.79a	100.87b	19.14bc	115.53b	0.55b	5.04b	1.52b	45.87ab
	甜橙林 Orange forest	10.97a	0.69a	92.50b	17.34ab	94.33a	0.46ab	3.02ab	1.30a	54.15b
	水保林 Conservation forest	10.70a	0.89a	97.32b	15.71a	92.75a	0.41a	3.11ab	1.52a	45.97ab
	平均值 Average	10.09	0.76	92.66	17.94	103.11	0.43	2.84	1.48	46.64

对土壤理化指标(X)与团聚体分形维数(D)进行回归分析,结果见表 5。在 0~10 cm 和 10~20 cm 土层,分形维数与有机质、碱解氮和全氮均呈负相关关系,其中碱解氮在 10~20 cm 土层相关性不显著,有机质在 10~20 cm 土层相关性达极显著,其余均达到显著水平;与全钾和速效钾在 0~10 cm 和 10~20 cm 土层均呈正相关,但相关性不显著;与全磷和有效磷在 0~10 cm 土层呈现不显著正相关,在 10~20 cm 呈现不显著负相关;与土壤容重在 0~10 cm 土层呈不显著负相关,在 10~20 cm 土层呈现不显著正相关;与孔隙度在 2 个土层均呈现不显著负相关关系。

3 讨论

微团聚体是土壤的重要组成部分,其组成主要受施肥与土地利用方式的影响^[9]。刘晔等^[13]对耕地、蚕地、林地 3 种土地利用方式的研究表明,表层土壤<0.01 mm 粒径的微团聚体含量及其特征微团聚体比例呈现如下趋势:耕地>蚕地>林地,而>0.01 mm 粒径刚好呈相反规律;龚伟等^[8]研究表明,施肥是

改善土壤微团聚体、降低土壤团聚体分形维数及提高土壤保肥能力的关键。本研究发现<0.01 mm 粒径的微团聚体含量及其特征微团聚体比例在 0~10 cm 土层为:坡减缓>核桃林>坡改梯>裸地>甜橙林>水保林,10~20 cm 土层为:坡减缓>核桃林>裸地>坡改梯>水保林>甜橙林,这与刘晔等^[13]和龚伟等^[8]的研究基本保持一致,造成这一结果的原因可能是,耕地比林地人为扰动较大,对土壤破坏程度增加,而引起大粒径团粒结构破坏成小粒径微团聚体,而林地破坏较小,其枯枝落叶比较多,增加了地表土壤有机物来源,使土壤颗粒间有机质胶结作用加强,林地的植物地下根系较多且发达^[14],同时枯枝落叶对地面保护较大,减少雨滴的击溅,大微团聚体的分散相对较少,从而农耕地<0.01 mm 微团聚体含量大于林地。

本研究 5 种不同治理模式下土壤团聚体分形维数在 0~10 cm 和 10~20 cm 土层分别表现出水保林<甜橙林<裸地<核桃林<坡减缓<坡改梯和水保林<甜橙林<核桃林<裸地<坡改梯<坡减缓,表明林地的土

表 5 不同小流域治理模式下不同土层土壤微团聚体分形维数与土壤理化性质的关系

Table 5 Correlation between fractal dimensions of soil micro-aggregates and physicochemical properties of different soil layers under different governance patterns of small watershed

理化指标 Physical-chemical index	0~10 cm			10~20 cm		
	回归方程	相关系数	显著性	回归方程	相关系数	显著性
	Regression model	Correlation coefficient	Significance	Regression model	Correlation coefficient	Significance
有机质 Organic matter	$D=-0.046X_1+3.235$	0.841	0.036	$D=-0.028X_1+2.966$	0.948	0.004
全氮 Total nitrogen	$D=-0.512X_2+3.180$	0.914	0.048	$D=-0.260X_2+2.890$	0.897	0.015
碱解氮 Available nitrogen	$D=-0.002X_3+2.880$	0.815	0.048	$D=-0.001X_3+2.825$	0.750	0.086
全钾 Total potassium	$D=0.11X_4+2.472$	0.402	0.429	$D=0.009X_4+2.535$	0.710	0.114
速效钾 Available potassium	$D=0.001X_5+2.577$	0.724	0.104	$D=0.001X_5+2.545$	0.627	0.183
全磷 Total phosphorus	$D=0.089X_6+2.635$	0.299	0.564	$D=-0.039X_6+2.552$	0.123	0.817
有效磷 Available phosphorus	$D=0.006X_7+2.655$	0.564	0.412	$D=-0.006X_7+2.706$	0.367	0.475
土壤容重 Soil bulk density	$D=-0.038X_8+2.733$	0.199	0.705	$D=0.118X_8+2.514$	0.535	0.274
孔隙度 Porosity	$D=-0.001X_9+2.728$	0.162	0.759	$D=-0.003X_9+2.843$	0.675	0.141

壤结构比农耕地好,这可能是由于林地中的植物根系比较庞大,根系在土壤中的穿插和扎深,有效促进了土壤微团粒结构的形成,同时根系强大的合成功能也能增加分泌物的生成,而这些分泌物也对土壤微团聚体的形成有一定促进作用^[14],从而其通透性较强,保水保肥效果也较明显。

在分形维数与各个粒径之间的关系研究中发现,在 0~10 cm 土层和 10~20 cm 土层土壤微团聚体分形维数与 1~0.25 mm、0.25~0.05 mm 粒径均呈负相关关系,与 0.05~0.01 mm、0.01~0.005 mm、0.005~0.001 mm、<0.001 mm 粒径均呈正相关关系,这表明小粒径微团聚体含量越高,土壤微团聚体分形维数越大。土壤分形维数可作为反映土壤结构的重要指标,土壤分形维数越高,小粒径微团聚体含量相对较多,土壤就越紧实,从而通透性相对较差;相反,土壤通透性相对较好^[7]。林地中的小粒径微团聚体含量较低,所以林地的土壤结构相对较好。

宫阿都等^[15]研究表明,团粒结构的分形维数愈小,土壤的结构和稳定性愈好。本研究在 0~10 cm 土层和 10~20 cm 土层都呈现林地类型<裸地<耕地类型规律,这与周萍等^[14]的微团聚体分形维数研究结论基本保持一致,即耕地>梯平地>草地>果园。说明林地的土壤结构和稳定性比较好,这可能是因为林地土壤具有庞大根系,其根系加速了土壤团聚体的形成,同时促进了分泌物形成,分泌物对土壤具有胶结作用,更提高了土壤的稳定性^[16-17];耕地在人为干扰下,土壤结构遭到破坏,导致土壤分形维数较高。土壤团聚体分形维数除了能反映土壤粒径大小和质地的均匀程度外^[7],还可反映土壤理化性质的变化情况^[14],很多学者对此做了大量研究,但研究结果不尽一致。龚伟等^[6]研究表明,天然林及更新后的人工林土壤微团聚体分形维数与有机质、有效磷、碱解氮呈显著负相关;张超等^[11]和蒲玉琳

等^[9]研究表明,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;周萍等^[14]研究表明,分形维数与土壤容重、非活性孔隙度、全磷、速效钾及氨态氮呈正相关关系,与土壤活性孔隙度、孔隙比、有机质、全氮、碱解氮呈负相关关系。本研究中分形维数与有机质、碱解氮、全氮、全钾、速效钾和孔隙度的关系跟龚伟等^[6,14]的研究结果保持一致,与蒲玉琳等^[9,11]的研究相悖,全磷、有效磷和土壤容重在 0~10 cm 和 10~20 cm 土层呈现出不一致的规律。这可能是由于<0.01 mm 粒径微团聚体对全钾和速效钾的吸收有一定促进作用,同时<0.01 mm 粒径微团聚体粒径较小,其组成土壤之间的孔隙比较小,所以其孔隙度减小,土壤容重增加;而耕地经过翻耕之后,有机质易于分解,含量减少,并且表层疏松,小粒径微团聚体含量增大,水土流失加剧,耕地土壤中的氮素随水土流失的增加而减少,磷素富集于较细的土壤粒径中^[18],容易随径流泥沙流失掉。

分形维数大小由微团聚体不同粒径组成的含量决定,而分形维数与理化性质也有着紧密联系。林地类型大粒径微团聚体含量较高,分形维数较低,相反耕地类型分形维数较高;林地类型养分含量较高,而耕地土壤养分含量较低,这表明土壤微团聚体分形维数能很好地反映该区土壤理化性质特征,是表征土壤理化性质的重要指标,有助于该区建立土壤微团聚体分形维数与土壤理化性质的定量关系模型。

4 结论

0.01~0.05 mm 粒径为川中丘陵区土壤团聚体优势粒径,其含量在 0~10 cm 和 10~20 cm 土层分别达到 28.63%和 28.04%;0.05~0.01 mm 粒径为次优势粒径,其含量在 0~10 cm 和 10~20 cm 土层分别达到 25.90%和 26.33%。不同小流域水土流失治理模式下,0~10 cm 和 10~20 cm 土层各粒径微团聚体含量差异显著。土壤微团聚体分形维数变化范围为 2.643~

2.717; 土壤团聚体分形维数与 1~0.25 mm、0.25~0.05 mm 粒径均呈线性负相关关系, 与 0.05~0.01 mm、0.01~0.005 mm、0.005~0.001 mm、<0.001 mm 粒径微团聚体含量呈线性正相关关系。分形维数能从一定程度上表征土壤的组成结构, 可以作为评价土壤质量的指标之一。

回归分析表明: 土壤微团聚体分形维数与有机质、全氮、碱解氮和孔隙度呈负相关关系, 与全钾和速效钾呈正相关关系, 土壤微团聚体分形维数能很好地反映该区土壤理化性质特征, 是表征土壤理化性质的重要指标, 有助于该区建立土壤微团聚体分形维数与土壤理化性质的定量关系模型。10~20 cm 土层的分形维数依次为水保林<甜橙林<核桃林<裸地<坡改梯<坡减缓, 表明林地的土壤结构、通透性比农耕地好, 具有较好的保水保肥效果, 是该区植被恢复与水土流失治理的首选模式。

参考文献

- [1] 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
Li D C, Zhang T L. Fractal features of particle size distribution of soils in China[J]. Soil and Environmental Sciences, 2000, 9(4): 263-265
- [2] Mandelbrot B B. Fractals: Form, Chance, and Dimension[M]. San Francisco: W. H. Freeman & Company, 1977: 1-234
- [3] Rieu M, Sposito G. Fractal fragmentation, soil porosity and soil water properties. Application[J]. Soil Science Society of America Journal, 1991, 55: 1231-1238
- [4] Arya L M, Paris J F. A physical empirical model to predict the soil moisture characteristic from particle-size distribution and bulk density data[J]. Soil Science Society of America Journal, 1981, 45(6): 1023-1030
- [5] 陈恩凤, 周礼恺, 武冠云. 微团聚体的保肥供肥性能及其组成比例在评断土壤肥力水平中的意义[J]. 土壤学报, 1994, 31(1): 18-25
Chen E F, Zhou L K, Wu G Y. Performances of soil micro-aggregates in storing and supplying moisture and nutrients and role of their compositional proportion in judging fertility level[J]. Acta Pedologica Sinica, 1994, 31(1): 18-25
- [6] 龚伟, 胡庭兴, 王景燕, 等. 川南天然常绿阔叶林人工更新后土壤微团聚体分形特征研究[J]. 土壤学报, 2007, 44(3): 571-575
Gong W, Hu T X, Wang J Y, et al. Fractal feature of soil microaggregates in soil under natural and regenerated evergreen broadleaved forests in south Sichuan Province[J]. Acta Pedologica Sinica, 2007, 44(3): 571-575
- [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
Yang P L, Luo Y P, Shi Y C. Using weight distribution of soil particle size to express soil fractal features[J]. Chinese Science Bulletin, 1993, 38(20): 1896-1899
- [8] 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
Gong W, Yan X Y, Cai Z C, et al. Effects of long-term fertilization on composition and fractal feature of soil micro-
- aggregates under a wheat-maize cropping system[J]. Acta Pedologica Sinica, 2011, 48(6): 1141-1148
- [9] 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
Pu Y L, Xie D T, Lin C W, et al. Composition and fractal features of soil micro-aggregates in sloping farmland with hedgerow[J]. Acta Pedologica Sinica, 2012, 49(6): 1069-1077
- [10] 安韶山, 张扬, 郑粉莉. 黄土丘陵区土壤团聚体分形特征及其对植被恢复的响应[J]. 中国水土保持科学, 2008, 6(2): 66-70
An S S, Zhang Y, Zheng F L. Fractal dimension of the soil aggregate and its responds to plant rehabilitation in the hilly-gully region of loess plateau[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2008, 6(2): 66-70
- [11] 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
Zhang C, Liu G B, Xue S, et al. Fractal features of rhizosphere soil microaggregate and particle-size distribution under different vegetation types in the Hilly-gully region of Loess Plateau[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2011, 44(3): 507-515
- [12] 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): 162-167
Wu C Z, Hong W. Study on fractal features of soil aggregate structure under different management patterns[J]. Acta Pedologica Sinica, 1999, 36(2): 162-167
- [13] 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
Liu Y, Tai R J, Geng Y, et al. Influence of composition of soil micro-aggregates under different land use types[J]. Liaoning Agricultural Sciences, 2010(4): 1-5
- [14] 周萍, 刘国彬, 侯喜禄. 黄土丘陵区不同恢复年限草地土壤微团粒分形特征[J]. 草地学报, 2008, 16(4): 396-402
Zhou P, Liu G B, Hou X L. Study on fractal features of soil microaggregates during different restoration stages in the Loess Hilly Region[J]. Acta Agrestia Sinica, 2008, 16(4): 396-402
- [15] 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
Gong A D, He Y R. Study on fractal features of soil structure of degraded soil in dry and hot valley region of Jinsha River[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2001, 15(3): 112-115
- [16] 张超, 刘国彬, 薛蕙, 等. 黄土丘陵区不同林龄人工刺槐林土壤抗蚀性演变过程[J]. 中国水土保持科学, 2010, 8(2): 1-7
Zhang C, Liu G B, Xue S, et al. Evolution of soil anti-erodibility of *Robinia pseudoacacia* L. plantation at different ages in hilly-gully region of loess plateau[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2010, 8(2): 1-7
- [17] 张学利, 杨树军, 张百习, 等. 不同林龄樟子松根际与非根际土壤的对比[J]. 福建林学院学报, 2005, 25(1): 80-84
Zhang X L, Yang S J, Zhang B X, et al. Comparative research on rhizosphere soil and non-rhizosphere soil properties in different stand age of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* sand-fixation forest[J]. Journal of Fujian College of Forestry, 2005, 25(1): 80-84
- [18] 邱莉萍, 张兴昌. 子午岭不同土地利用方式对土壤性质的影响[J]. 自然资源学报, 2006, 21(6): 965-972
Qiu L P, Zhang X C. Effects of land use on soil properties in Ziwuling Region[J]. Journal of Naturel Resources, 2006, 21(6): 965-972