

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*

龚伟 胡庭兴 王景燕 宫渊波 冉华 张世熔

(四川农业大学生态林业工程省级重点实验室, 四川雅安 625014)

FRactal Features of Soil Microaggregates in Soils under Natural and Regenerated Evergreen Broadleaved Forests in South Sichuan Province

Gong Wei Hu Tingxing Wang Jingyan Gong Yuanbo Ran Hua Zhang Shirong

(Sichuan Provincial Key Laboratory of Ecological Forestry Engineering, Sichuan Agricultural University, Ya'an, Sichuan 625014, China)

关键词 微团聚体; 分形维数; 天然常绿阔叶林; 人工更新; 土壤肥力

中图分类号 S152.4; S714.8; S754.3

文献标识码 A

土壤微团聚体是有机-无机复合体经过多次聚合而形成, 以不同粒级微团聚体的形式组合在土体内, 土壤微团聚体的组成密切影响着土壤的保水、供水性能, 是土壤中水分和养分保贮和释供的关键, 与土壤肥力水平存在着明显的相关关系^[1]。土壤微团聚体对土壤理化及生物学性质有多方面的重要作用, 而不同粒级的微团聚体所起的作用又各不相同, 它们影响着土壤肥力水平的高低^[2~5]。根据不同粒级土壤微团聚体的保肥、供肥与保水、供水的不同性能, 陈恩凤等曾用“特征微团聚体”(即 $< 10 \mu\text{m}$ 和 $> 10 \mu\text{m}$ 微团聚体的组成比例)来数量化地界定土壤的肥力水平与培肥效果^[6,7], 但由于缺乏大量观测数据和试验结果, 目前还难以对此作出定论^[8~10]。土壤肥力水平的数量化划分, 即肥力指标的制定, 有其重要的实践意义, 但目前国内外尚没有一个反映土壤本质特性的、综合的土壤肥力指标^[9]。有关土壤团粒结构或颗粒结构分形维数与土壤理化性质和酶活性等的关系研究表明, 分形维数在作为土壤肥力诊断指标等方面具有很好的应用潜力^[11~14]。目前对土壤微团聚体分形特征及其分形维数表征土壤肥力方面的研究报道较少^[15,16]。因此, 龚伟等对川南天然

常绿阔叶林及其人工更新后土壤微团聚体分形特征进行了研究, 探讨微团聚体分形维数与土壤理化性质和微生物数量之间的关系, 试图揭示用土壤微团聚体分形维数来表征土壤肥力状况的可靠性, 为通过分析微团聚体组成来评价土壤肥力和培肥效果提供另一途径, 同时也为保护天然常绿阔叶林及其人工更新过程中选择适宜的造林树种和科学合理地利用林地资源提供科学资料。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

研究区选择四川省沐川县国有林场, 位于东经 $103^{\circ}47' \sim 103^{\circ}49'$, 北纬 $28^{\circ}29' \sim 28^{\circ}54'$ 之间, 五指山东北尾部。地形起伏大, 地势南高北低, 在海拔 $1\,100 \sim 1\,550 \text{ m}$ 之间, 且多陡坡、断岩, 坡度 $25^{\circ} \sim 35^{\circ}$ 左右。气候属亚热带湿润季风气候, 根据沐川县森林经营所气象站(海拔 $1\,097 \text{ m}$)历年气象观测资料统计, 全年日平均气温 12.8°C , 绝对最高气温 30°C , 绝对最低气温 -10°C , 全年降水量 $1\,780 \text{ mm}$, 降雨天数 254 d 左右, 7月和8月为雨季(月平均降

* 国家“十五”科技攻关项目(2001BA510B02-03, 2001BA606A-06)和四川省重点学科建设项目(SZD0419)资助

作者简介: 龚伟, 男, 博士研究生, 现主要从事生态林业工程、水土保持方面教学与科研工作。E-mail: gongwei@sicau.edu.cn, 电话: 13981601095

收稿日期: 2005-12-20; 收到修改稿日期: 2006-04-05

雨 331.6 mm)。土壤以黄壤为主,部分地区有黄棕壤和紫色土。试验地林分为天然常绿阔叶林(Natural evergreen broadleaved forest)、檫木(*Sassafras tzumu*)林、柳杉(*Cryptomeria fortunei*)林和水杉(*Metasequoia glyptostroboides*)林,天然常绿阔叶林郁闭度在 0.9 以上,檫木林、柳杉林、水杉林分别是 1988 年、1990 年、1992 年天然常绿阔叶林皆伐后于 1989 年、1991 年、1993 年人工植苗形成的纯林,林分郁闭度分别为 0.9、0.8、0.8。

1.2 研究方法

在调查试验地的基础上,根据典型性和代表性的原则,分别在 2004 年 7 月中旬和 2005 年 7 月中旬在坡向、坡度、坡位和海拔高度基本一致的天然常绿阔叶林及其人工更新后形成的檫木林、柳杉林和水杉林中建立 20 m×20 m 的标准地各 3 个。在每个标准地内沿对角线设 1 m×1 m 样方 5 个,测定地表枯落物量^[17];采用蛇形五点取样法,按 0~20 cm、20~40 cm 土层用环刀采样,测定土壤物理性质^[18];同时将所取

各样点分层土壤样品混合,运回实验室后立即将其分成两份,一份鲜土样过 2 mm 筛后当天测定土壤微生物数量,将另一份鲜土样于室内平铺于牛皮纸上自然风干后挑去石块、根茎及各种新生体和侵入体,并研磨使其全部通过 2 mm 筛测定土壤微团聚体、碱解氮、有效磷和速效钾含量,用四分法取适量以上通过 2 mm 筛的风干土进一步研磨使其全部通过 0.25 mm 筛测定土壤有机质、全氮、全磷和全钾含量^[18]。

测定方法:土壤微团聚体用吸管法^[18],微生物数量用稀释平板法^[19],有机质用重铬酸钾氧化-外加热法,全氮用半微量凯氏法,碱解氮用碱解-扩散法,全磷用 NaOH 碱熔-钼锑抗比色法,有效磷用 0.03 mol L⁻¹ NH₄F-0.025 mol L⁻¹ 盐酸浸提法,全钾用 NaOH 碱熔-火焰光度法,速效钾用 1 mol L⁻¹ 乙酸铵浸提-火焰光度法^[18]。测定时间在 2004 年 7 月中旬和 2005 年 7 月中旬进行。各林分 0~20 cm、20~40 cm 土层土壤物理性质、养分含量和微生物数量见表 1、表 2 和表 3。

表 1 天然常绿阔叶林人工更新后土壤物理性质

林分类型	土层 (cm)	容重 (g cm ⁻³)	总孔隙 (%)	毛管孔隙 (%)	非毛管孔隙 (%)	初渗系数 <i>k</i> ₁₀ (mm min ⁻¹)	稳渗系数 <i>k</i> ₁₀ (mm min ⁻¹)
天然常绿阔叶林	0~20	0.48±0.05	73.8±3.8	64.3±4.9	9.5±1.4	5.76±2.29	1.39±0.95
	20~40	0.59±0.02	69.8±1.1	62.0±3.2	7.8±3.1	4.76±3.07	1.19±0.37
檫木林	0~20	0.75±0.08	67.3±1.9	58.8±6.0	8.5±4.2	4.97±2.63	0.98±0.45
	20~40	0.78±0.03	64.8±1.5	57.4±3.5	7.4±4.6	3.55±1.03	0.85±0.47
柳杉林	0~20	0.92±0.13	58.2±2.5	50.6±3.2	7.6±5.7	2.51±1.74	0.58±0.31
	20~40	1.27±0.10	45.8±4.8	41.2±3.4	4.6±1.9	2.10±1.16	0.26±0.17
水杉林	0~20	0.71±0.15	65.6±7.1	57.6±10.6	8.0±5.0	3.15±2.52	0.94±0.32
	20~40	0.84±0.01	64.0±2.8	56.6±3.3	7.4±1.5	2.72±1.16	0.79±0.54

表 2 天然常绿阔叶林人工更新后土壤化学性质

林分类型	土层 (cm)	有机质 (g kg ⁻¹)	全氮 (g kg ⁻¹)	碱解氮 (mg kg ⁻¹)	全磷 (mg kg ⁻¹)	有效磷 (mg kg ⁻¹)	全钾 (g kg ⁻¹)	速效钾 (mg kg ⁻¹)
天然常绿阔叶林	0~20	115.8±6.7	1.40±0.15	236.9±20.4	243.5±16.4	2.07±0.19	31.4±2.2	47.3±5.9
	20~40	64.3±4.9	0.84±0.07	157.9±16.8	214.8±15.5	1.16±0.08	31.1±1.9	31.9±3.2
檫木林	0~20	89.2±6.0	1.22±0.05	178.7±12.9	236.6±12.1	1.62±0.10	30.6±1.1	45.6±6.3
	20~40	52.0±5.2	0.76±0.11	145.4±7.7	188.9±9.0	0.98±0.15	28.3±2.5	26.4±2.3
柳杉林	0~20	30.9±3.0	0.59±0.02	92.7±4.3	195.6±12.1	0.83±0.08	22.5±1.7	30.8±3.9
	20~40	17.8±4.4	0.30±0.01	52.4±5.0	139.4±6.8	0.67±0.13	20.8±2.5	20.6±1.8
水杉林	0~20	75.1±7.3	1.13±0.14	163.6±10.7	223.9±12.2	1.29±0.07	29.9±1.8	41.3±4.6
	20~40	38.2±5.9	0.57±0.06	90.3±7.9	179.3±18.2	0.79±0.05	24.3±1.4	24.7±1.7

各林分 0~ 20 cm 土层土壤中< 0.02 mm 与> 0.02 mm 粒级含量的比值(< 0.02 mm)/(> 0.02 mm) 大小顺序为:天然常绿阔叶林(0.184) < 檫木林(0.252) < 水杉林(0.359) < 柳杉林(0.595), 20~ 40 cm 土层的为:天然常绿阔叶林(0.225) < 檫木林(0.291) < 水

杉林(0.517) < 柳杉林(0.782), 可见其比值的大小与分形维数大小趋势一致。对两粒级含量的比值(< 0.02 mm)/(> 0.02 mm) (X) 与分形维数(D) 进行回归分析发现, 两者之间呈极显著正相关, $D = 2.497\ 0 + 0.154\ 7X(r = 0.916\ 6^{**})$ 。

表 4 天然常绿阔叶林人工更新后土壤微团聚体组成(%)

林分类型	土层(cm)	2~ 0.25 mm	0.25~ 0.05 mm	0.05~ 0.02 mm	0.02~ 0.002 mm	< 0.002 mm	分形维数	相关系数 r
天然常绿阔叶林	0~ 20	57.563	17.501	9.404	12.803	2.729	2.501	0.986
	20~ 40	51.308	20.704	9.605	14.859	3.524	2.534	0.984
檫木林	0~ 20	56.466	16.754	6.636	16.732	3.412	2.539	0.978
	20~ 40	49.905	21.156	6.420	18.132	4.387	2.569	0.979
柳杉林	0~ 20	25.170	22.111	15.400	32.601	4.718	2.581	0.919
	20~ 40	15.756	19.625	20.725	37.608	6.286	2.619	0.901
水杉林	0~ 20	35.940	28.976	8.684	22.349	4.051	2.554	0.960
	20~ 40	30.019	27.537	8.376	29.534	4.534	2.575	0.936

由表 4 可知, 各林分 0~ 20 cm 土层土壤微团聚体分形维数大小顺序为:天然常绿阔叶林(2.501) < 檫木林(2.539) < 水杉林(2.554) < 柳杉林(2.581), 20~ 40 cm 土层的为:天然常绿阔叶林(2.534) < 檫木林(2.569) < 水杉林(2.575) < 柳杉林(2.619), 且 0~ 20 cm 土层土壤微团聚体分形维数均低于 20~ 40 cm 土层的。各林分 0~ 20 cm、20~ 40 cm 土层土壤 0.02~ 0.002 mm、< 0.002 mm 粒级含量大小顺序为:天然常绿阔叶林< 檫木林< 水杉林< 柳杉林, 且 0~ 20 cm 土层的低于 20~ 40 cm 土层。导致这一现象的原因可能与各林分地表枯落物有关, 据调查天然常绿阔叶林枯落物层蓄积量分别是檫木林、柳杉林和水杉林的 2.58 倍、22.73 倍和 1.42 倍, 林分地上部分持水量大且土壤腐殖质积累多, 每年有大量的凋落物归还土壤, 土层有机质含量高, 速效性养分供应林木生长发育的能力强, 植物根系较多; 三种人工林, 檫木和水杉均属于落叶树种, 每年都有大量的枯落物归还土壤, 而柳杉属于常绿树种, 归还土壤的枯落物量较少, 柳杉与前二者相比, 其幼树生长缓慢, 郁闭时间较长^[22], 而且地表枯落物层蓄积量较

少, 雨滴直接冲击地表, 易造成土壤板结。
2.2 土壤分形维数与土壤理化性质及其微生物数量的关系

为了进一步分析天然常绿阔叶林及其人工更新成檫木林、柳杉林和水杉林后土壤理化性质和微生物数量与土壤微团聚体分形维数变化的规律, 对 0~ 20 cm、20~ 40 cm 土层土壤理化性质和土壤微生物数量(X) 与土壤微团聚体分形维数(D) 进行回归分析, 结果见表 5。由表 5 可知, 土壤微团聚体分形维数与土壤理化性质均呈极显著直线关系, 而且与细菌、真菌和放线菌数量也呈极显著直线关系, 表明土壤微团聚体分形维数随着天然常绿阔叶林人工更新后土壤容重的增大而增大, 随总孔隙、毛管孔隙、非毛管孔隙、初渗系数和稳渗系数的降低而增大, 随有机质、全氮、碱解氮、全磷、有效磷、全钾、速效钾含量的降低而增大, 随细菌、真菌和放线菌数量的降低而增大。因此, 土壤微团聚体分形维数值的高低能够反应土壤物理性质的优劣, 表征土壤养分含量状况, 反应土壤微生物数量的多寡。

表 5 土壤分形维数与土壤理化性质及其微生物数量的关系

拟合回归方程			相关系数 r	拟合回归方程			相关系数 r
容重	$D = 2.445\ 3 + 0.143\ 5X$		0.957 3**	碱解氮	$D = 2.639\ 9 - 0.000\ 6X$		- 0.956 8**
总孔隙	$D = 2.809\ 6 - 0.003\ 9X$		- 0.942 8**	全磷	$D = 2.754\ 7 - 0.001\ 0X$		- 0.929 1**
毛管孔隙	$D = 2.816\ 3 - 0.004\ 6X$		- 0.932 7**	速效磷	$D = 2.639\ 0 - 0.068\ 0X$		- 0.906 8**
非毛管孔隙	$D = 2.736\ 7 - 0.023\ 4X$		- 0.919 9**	全钾	$D = 2.767\ 4 - 0.007\ 6X$		- 0.901 7**
初渗系数	$D = 2.651\ 8 - 0.025\ 2X$		- 0.935 5**	速效钾	$D = 2.658\ 8 - 0.003\ 0X$		- 0.837 1**
稳渗系数	$D = 2.646\ 1 - 0.099\ 9X$		- 0.980 2**	细菌	$D = 2.669\ 9 - 0.018\ 6X$		- 0.933 5**
有机质	$D = 2.621\ 3 - 0.001\ 0X$		- 0.940 9**	真菌	$D = 2.597\ 9 - 0.019\ 2X$		- 0.860 2**
全氮	$D = 2.632\ 9 - 0.086\ 8X$		- 0.910 2**	放线菌	$D = 2.613\ 9 - 0.009\ 3X$		- 0.849 0**

3 讨 论

天然常绿阔叶林人工更新成檫木林、柳杉林和水杉林后土壤微团聚体分形维数升高, 其大小顺序为: 檫木林 < 水杉林 < 柳杉林, 而且分形维数与 $0.02 \sim 0.002 \text{ mm}$ 、 $< 0.002 \text{ mm}$ 粒级含量之间存在极显著正相关, 也就是说随着土壤微团聚体中粉粒 ($0.02 \sim 0.002 \text{ mm}$) 和粘粒 ($< 0.002 \text{ mm}$) 含量的增加, 分形维数增大, 这与苏永中等^[13]对土壤颗粒分形维数的研究结果相同。各林分 $0 \sim 20 \text{ cm}$ 土层土壤 $0.02 \sim 0.002 \text{ mm}$ 、 $< 0.002 \text{ mm}$ 粒级含量低于 $20 \sim 40 \text{ cm}$ 土层的, 且天然常绿阔叶林的低于其更新后人工林的, 这可能是由于天然常阔叶林人工更新后有机质含量减少和胶体质量降低, 粘粒有向下淋溶和悬移的趋势^[23], 所以一般下层土壤的粘粒含量高于上层, 粘粒的增加意味着土壤更紧实, 必然占用通气孔隙, 孔隙过小则土壤持水也多以低效或无效的非活性水为主, 土壤的水容量和热容量降低, 加剧了土壤的水肥矛盾^[15], 这可能也是导致各林分 $0 \sim 20 \text{ cm}$ 土层土壤物理性质、养分含量和微生物数量优于 $20 \sim 40 \text{ cm}$ 土层的, 且天然常绿阔叶林优于其更新后人工林的原因。相关分析表明, 天然常绿阔叶林及其人工更新后林分土壤微团聚体分形维数与土壤物理性质、养分含量和微生物数量均呈显著直线关系, 土壤物理性质越好, 土壤养分含量越高, 土壤微生物数量越多, 土壤微团聚体分形维数越低, 这也说明土壤微团聚体分形维数与土壤团粒结构或颗粒结构分形维数一样在作为土壤肥力诊断指标等方面具有很好的应用潜力^[11~14]。土壤微团聚体分形维数越低, 表征土壤肥力越高。因此, 土壤微团聚体分形维数可作为定量化描述林地土壤肥力状况的尺度。

$(< 0.02 \text{ mm}) / (> 0.02 \text{ mm})$ 粒级含量比值与分形维数之间呈极显著正相关关系, 分形维数能够表征土壤肥力状况, 因此 $(< 0.02 \text{ mm}) / (> 0.02 \text{ mm})$ 粒级含量比值的高低也应该能够用来表征土壤肥力的高低。本研究结果与“特征微团聚体”的研究结果相似, 只是研究方法^[7]与陈恩凤等^[7]的有一定差异, 但不同的研究方法得出的结果却具有相同的规律性, 从侧面也证明了陈恩凤等提出的“特征微团聚体”组成比例是可以用来数量化地界定土壤肥力水平与培肥效果。因此, “特征微团聚体”组成比例和土壤微团聚体分形维数在评价土壤肥力方面都具有重要的作用和意义。

参 考 文 献

- [1] 沈慧, 姜凤岐, 杜晓军, 等. 水土保持林土壤肥力及其评价指标. 水土保持学报, 2000, 14(2): 60~65
- [2] 陈恩凤, 周礼恺, 邱凤琼. 土壤肥力实质的研究 I. 黑土. 土壤学报, 1984, 21(3): 229~237
- [3] 陈恩凤, 周礼恺, 邱凤琼. 土壤肥力实质的研究 II. 棕壤. 土壤学报, 1985, 22(2): 113~119
- [4] 周礼恺, 严昶升, 武冠云, 等. 土壤肥力实质的研究 III. 红壤. 土壤学报, 1986, 23(3): 193~203
- [5] 邱凤琼, 严昶升, 陈恩凤. 土壤肥力实质的研究 IV. 水稻土. 土壤学报, 1987, 24(3): 232~238
- [6] 陈恩凤, 周礼恺, 武冠云, 等. 土壤的自动调节性能与抗逆性能. 土壤学报, 1991, 28(2): 168~176
- [7] 陈恩凤, 周礼恺, 武冠云. 微团聚体的保肥性能及其组成比例在评断土壤肥力水平中的意义. 土壤学报, 1994, 31(1): 18~28
- [8] 陈利军, 张岫岚, 周礼恺. 土壤保肥-供肥机理及其调节 I. 棕壤型菜园土的 P 素保持与供应. 应用生态学报, 1998, 9(3): 254~256
- [9] 陈恩凤, 关连珠, 汪景宽, 等. 土壤特征微团聚体的组成比例与肥力评价. 土壤学报, 2001, 38(1): 49~53
- [10] 汪景宽, 张继宏, 王雷, 等. 棕壤不同粒级微团聚体中磷素的保持与供应. 土壤通报, 2001, 32(3): 113~115
- [11] 刘金福, 洪伟, 吴承祯. 中亚热带几种珍贵树种林分土壤团粒结构的分维特征. 生态学报, 2002, 22(2): 1998~2005
- [12] 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. 地理科学, 2003, 23(5): 617~621
- [13] 苏永中, 赵哈林. 科尔沁沙地农田沙漠化演变中土壤颗粒分形特征. 生态学报, 2004, 24(1): 71~74
- [14] 封磊, 洪伟, 吴承祯, 等. 杉木-观光木混交林不同经营模式土壤团粒结构的分形特征. 山地学报, 2004, 22(3): 315~320
- [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. 水土保持学报, 2001, 15(3): 112~115
- [16] 廖咏梅, 陈劲松. 米亚罗地区亚高山针叶林在不同人为干扰条件下的土壤分形特征. 生态学杂志, 2005, 24(8): 878~882
- [17] 宋轩, 李树人, 姜凤岐. 长江中游栓皮栎林水文生态效益研究. 水土保持学报, 2001, 15(2): 76~79
- [18] 中国标准出版社. 中国林业标准汇编(营造林卷). 北京: 中国标准出版社, 1998. 1~78
- [19] 许光辉, 郑洪元主编. 土壤微生物分析方法手册. 北京: 农业出版社, 1986
- [20] 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. 科学通报, 1993, 38(20): 1896~1899
- [21] 吴承祯, 洪伟. 不同经营模式土壤团粒结构的分形特征研究. 土壤学报, 1999, 36(2): 162~167
- [22] 中国树木志编委会主编. 中国主要树种造林技术. 北京: 农业出版社, 1977. 29~31, 36~38, 545~547
- [23] 孙波, 张桃林, 赵其国. 我国中亚热带缓丘区红粘土红壤肥力的演化 I. 物理学肥力的演化. 土壤学报, 1999, 36(1): 35~47