

川南坡地不同退耕模式对土壤团粒结构分形特征的影响*

王景燕 胡庭兴** 龚 伟 官渊波 罗承德

(四川农业大学林业生态工程省级重点实验室, 四川雅安 625014)

摘 要 运用分形模型,研究了川南坡地及其退耕成慈竹林、杂交竹林、桉木+慈竹混交林和弃耕地5年后土壤团粒结构分形维数,探讨了分形维数与土壤理化性质之间的关系.结果表明:退耕后,不同退耕模式样地 $>0.25\text{ mm}$ 的土壤团聚体和水稳性团聚体含量均显著增加,团粒结构分形维数介于 $1.377\sim 2.826$,为慈竹林 $<$ 杂交竹林 $<$ 桉木+慈竹混交林 $<$ 弃耕地 $<$ 农耕地,并随 $>0.25\text{ mm}$ 的土壤团聚体及水稳性团聚体含量的增加而降低;土壤自然含水量、毛管孔隙、有机质、全氮、碱解氮、全磷和全钾含量增加,而土壤容重、非毛管孔隙和通气度降低.退耕后的慈竹林、杂交竹林、桉木+慈竹混交林和弃耕地的土壤团粒结构分形维数与土壤理化性质相关性较好.农耕地退耕对增加 $>0.25\text{ mm}$ 的土壤团聚体及水稳性团聚体含量和提高土壤结构稳定性具有较好的作用;土壤团粒结构分形维数可以作为坡地退耕后土壤肥力变化的理想指标,在研究区坡地退耕种植慈竹具有较好的培肥改土效益.

关键词 退耕模式 植被恢复 团粒结构 分形维数

文章编号 1001-9332(2010)06-1410-07 **中图分类号** S157.1, S714.2 **文献标识码** A

Fractal features of soil aggregate structure in slope farmland with different de-farming patterns in south Sichuan Province of China. WANG Jing-yan, HU Ting-xing, GONG Wei, GONG Yuan-bo, LUO Cheng-de (Sichuan Provincial Key Laboratory of Ecological Forestry Engineering, Sichuan Agricultural University, Ya'an 625014, Sichuan, China). -Chin. J. Appl. Ecol., 2010, 21(6): 1410–1416.

Abstract: By using fractal model, this paper studied the fractal dimension of soil aggregate structure (D) in the slope farmland (CK), its 5-year de-farmed *Neosinocalamus affinis* plantation (NAP), *Bambusa pervariabilis*×*Dendrocalamopsis oldhami* plantation (BDP), *Alnus crenastogyne* + *Neosinocalamus affinis* plantation (ANP), and abandoned farmland (AFL) in south Sichuan Province of China, and analyzed the relationships between the D and soil physical and chemical properties. In the de-farmed plantations and abandoned farmland, the contents of $>0.25\text{ mm}$ soil aggregates and water-stable aggregates were increased significantly, compared with those in the slope farmland. The D was $1.377\sim 2.826$, being in the order of $\text{NAP} < \text{BDP} < \text{ANP} < \text{AFL} < \text{CK}$, and decreased with the increasing contents of $>0.25\text{ mm}$ soil aggregates and water-stable aggregates. Comparing with CK, de-farming increased the soil natural water content, capillary porosity, and contents of soil organic matter, total N, alkali-hydrolysable N, total P, and total K, and decreased soil bulk density, non-capillary porosity, and aeration porosity. There were close relationships between the fractal dimension of soil aggregate structure and the soil physical and chemical properties. All the results suggested that the de-farming of slope farmland was beneficial to the increase of the contents of $>0.25\text{ mm}$ soil aggregates and water-stable aggregates, and the enhancement of soil structure stability. The D could be used as an ideal index to evaluate soil fertility, and planting *Neosinocalamus affinis* on the de-farming slope farmland was a good measure for the improvement of soil fertility in the research area.

Key words: de-farming pattern; vegetation restoration; aggregate structure; fractal dimension.

* 国家“十五”科技攻关计划项目(2001BA606A-06, 2004BA606A-06)、国家“十一五”科技支撑计划项目(2006BAC01A11)、四川省教育厅项目(08ZB038, 09ZB053)和四川农业大学“211工程”创新团队项目资助。

** 通讯作者. E-mail: hutx001@yahoo.com.cn

2009-11-17 收稿, 2010-03-27 接受。

分形是指具有相似性或膨胀对称性的几何现象,即局部与整体在形态、功能和信息等方面具有统计意义上的相似性^[1-2],分形维数是分形理论及其应用研究中的一个重要参量,能够在深层次上描述、研究和分析自然界中普遍存在的不规则的和随机的现象^[3-4]。土壤是具有不规则形状和自相似结构的多孔介质,具有一定的分形特征^[5]。Arya等^[6]及Turcotte^[7]研究了土壤颗粒的分形现象和分形维数的计算方法,但这些方法难以直接利用常规试验数据进行计算;杨培岭等^[8]在Katz法的基础上,提出用粒径的质量分布取代粒径的数量分布来描述土壤分形特征的模型,该模型较精确、简便。近年来,运用分形模型计算土壤颗粒、团聚体和孔隙度的分形维数来表征土壤质地和结构组成及其均匀程度,已成为定量描述土壤结构特征的新方法^[4,9-10]。土壤团粒结构分形维数能反映团聚体含量对土壤结构稳定性的影响趋势^[11]。土壤团聚体是土粒经各种作用形成的直径在10~0.25 mm的结构单位,其组成和稳定性与肥力水平密切相关,并左右着土壤中水、气、根系穿插及养分活化等状况^[12]。团聚体的稳定性直接影响土壤表层的水、土界面行为,特别是与降雨入渗和土壤侵蚀关系十分密切。

我国是世界上水土流失最严重的国家之一。由于特殊的自然地理和社会经济条件,水土流失的90%以上发生在山区、丘陵区 and 风沙区,尤其集中分布在国土总面积近70%的山丘区^[13]。川南地区地处长江上游,降雨丰富。多年来,由于对坡地不合理的开垦和耕作,这一区域坡地土壤的退化和水土流失现象严重。目前,有关川南坡地退耕后土壤团粒结构分形维数变化方面的研究尚未见报道,制约了该地区植被恢复及生态建设。本文以长江上游川南坡地不同退耕模式为对象,研究不同退耕模式对土壤团粒结构分形维数和土壤理化性质的影响,探讨分形维数与土壤理化性质的关系,以期退耕还林还草工程中退耕模式的选择及研究区植被恢复提供科学参考。

1 研究地区与研究方法

1.1 试验区自然概况

试验区位于四川省沐川县沐溪镇退耕还林示范区,距沐川县城约3 km(28°58' E, 103°55' N),海拔390~570 m,坡度25°—30°。沐川县现有林业用地 $8.7 \times 10^4 \text{ hm}^2$,其中竹林 $2.8 \times 10^4 \text{ hm}^2$,是国家级“山区综合开发试点县”和省级“农业产业化试点县”,

也是四川省天然林保护工程和生态林业建设工程试点县^[14]。该区地处华西雨屏区,属亚热带湿润季风气候,地带性植被属亚热带常绿阔叶林。根据沐川县气象站(海拔396.9 m)历年气象观测资料统计,全年日平均气温17.3℃,最热月均温26.2℃,最冷月均温7.2℃,全年降水量1332.1 mm,年降雨天数207 d,降雨多集中于5—8月,年蒸发量971.7 mm。供试土壤为紫色土,由于该区水土流失严重,土层瘠薄,厚度一般为30~35 cm,退耕前,采用小麦-玉米一年两熟种植方式,采用传统的人工方式进行土壤耕作和作物收获。试验开始前土壤表层(0~15 cm)的理化性质为:有机质 $7.8 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、全氮 $0.62 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、全磷 $0.68 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、全钾 $8.6 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、有效磷 $254.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、速效钾 $81.7 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和pH 7.98。

退耕试验始于2003年秋季,退耕模式为:慈竹(*Neosinocalamus affinis*)林(NAP)、杂交竹(*Bambusa pervariabilis* × *Dendrocalamopsis oldhami*)林(BDP)、桉木(*Alnus crenastogyne*) + 慈竹混交林(ANP)和弃耕自然恢复地(简称弃耕地, AFL),并设农耕地为对照(CK)。慈竹林和杂交竹林模式林分密度均为900 丛· hm^{-2} ;桉木+慈竹混交林模式中桉木为2003年秋季种植,并在2004年秋季均匀补植慈竹,林分密度为桉木1670 株· hm^{-2} 、慈竹600 丛· hm^{-2} ;弃耕地自弃耕后从未复垦。慈竹林、杂交竹林和桉木+慈竹混交林林分郁闭度分别为0.9、0.7和0.8,弃耕地植被几乎全为草本植物,慈竹林、杂交竹林、桉木+慈竹混交林和弃耕地草本层覆盖度分别约为5%、30%、5%和90%。

1.2 研究方法

在野外调查基础上,根据典型性和代表性的原则,分别在慈竹林、杂交竹林、桉木+慈竹混交林、弃耕地和农耕地(对照)上选择坡向、坡度、坡位和海拔高度基本一致的10 m × 10 m标准地各3个。于2008年10月中旬在每个标准地内采用蛇形5点取样法,用环刀采集表层(0~15 cm)土壤样品,测定土壤水分物理性质^[15],同时取表层土壤混合样测定土壤团粒结构和养分含量。

测定方法:土壤团粒结构采用机械筛分法,土壤有机质采用重铬酸钾氧化-外加热法,全氮采用半微量凯氏法,碱解氮采用碱解-扩散法,全磷采用NaOH碱熔-钼锑抗比色法,有效磷采用Olsen法,全钾采用NaOH碱熔-火焰光度法,速效钾采用 $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 乙酸铵浸提-火焰光度法^[15]。

土壤团粒结构分形维数采用杨培岭等^[8]的方

法计算,分形维数模型参见文献[16].

1.3 数据处理

采用 SPSS 10.0 软件对文中数据进行统计分析,表中数据均为平均值±标准差,采用单因子方差分析(ANOVA)和最小显著极差法(SSR)检验不同模式土壤各变量之间的显著性差异.

2 结果与分析

2.1 不同退耕模式土壤团粒结构分形维数

分形维数是反映土壤结构几何形状的参数.运用回归分析法,计算得到各模式类型土壤团粒结构的分形维数在 1.377~2.826(表1).回归分析发现,湿筛条件下,>5 mm (X_1)、5~2 mm (X_2)、2~1 mm (X_3)、1~0.5 mm (X_4)、0.5~0.25 mm (X_5)和>0.25 mm (X_6)水稳性土壤团聚体含量及结构体破坏率(X_7)与团粒结构分形维数 D (湿筛条件)呈极显著线性关系,相关系数分别为-0.897**、-0.778**、-0.891**、-0.844**、-0.903**、-0.983**和-0.983**;干筛条件下,>5 mm (X_8)、5~2 mm (X_9)、2~1 mm (X_{10})、1~0.5 mm (X_{11})、0.5~0.25 mm (X_{12})和>0.25 mm (X_{13})土壤团聚体含量与土壤团粒结构分形维数 D (干筛条件)也呈极显著线性关系,相关系数分别为-0.904**、0.870**、0.899**、0.935**、0.864**和-0.941**.这说明湿筛条件下,土壤团粒结构分形维数与各粒级水稳性团聚体含量呈极显著负相关,与结构体破坏率呈极显著正相关,其中与>0.25 mm 水稳性团聚体含量和结构体破坏率相关性最佳;干筛条件下,团粒结构分形维数与>5 mm 和>0.25 mm

团聚体含量呈极显著线性负相关,而与其他粒级团聚体含量呈极显著线性正相关,其中与>0.25 mm 团聚体含量相关性最佳.因此,团粒结构分形维数能够反映各粒级团聚体含量和土壤结构体破坏率对土壤结构与稳定性的影响趋势,>0.25 mm 团聚体和水稳性团聚体含量是影响团粒结构分形维数的重要粒径含量因素,且干筛和湿筛条件下>0.25 mm 土壤团聚体含量越高,其分形维数越小,土壤结构体破坏率越低,土壤结构越稳定.

由表1可知,各退耕模式间土壤团粒结构分形维数和>0.25 mm 团聚体含量差异显著.与对照(CK)相比,在湿筛条件下,慈竹林、杂交竹林、桉木+慈竹混交林和弃耕地分形维数分别降低10.5%、7.3%、5.3%和3.4%,慈竹林、杂交竹林和桉木+慈竹混交林间差异显著,且均显著低于弃耕地;在干筛条件下,慈竹林、杂交竹林、桉木+慈竹混交林和弃耕地分形维数分别降低25.6%、23.0%、12.0%和11.7%,退耕模式均显著低于农耕地,桉木+慈竹混交林与弃耕地及慈竹林与杂交竹林间无差异显著性,但慈竹林和杂交竹林均显著低于桉木+慈竹混交林和弃耕地.在湿筛条件下,4种模式>0.25 mm 团聚体含量分别增加74.9%、59.5%、47.4%和33.7%,退耕模式均显著高于农耕地,各林地间差异显著且均显著高于弃耕地;在干筛条件下,>0.25 mm 团聚体含量分别增加1.1%、1.0%、0.8%和0.7%,退耕模式均显著高于农耕地,慈竹林与杂交竹林及桉木+慈竹混交林与弃耕地间无差异显著性,但慈竹林和杂交竹林均显著高于桉木+慈竹混交林和弃耕地.从以上结果可以看出,无论在湿筛条

表1 不同退耕模式土壤团聚体组成
Tab.1 Soil aggregate composition under different de-farming patterns (g·kg⁻¹)

林分类型 Stand type	团聚体粒径 Aggregate size (mm)						结构体破坏率 Percent of construction damage (%)	分形维数 Fractal dimension	相关系数 Correlation coefficient
	>5	5~2	2~1	1~0.5	0.5~0.25	>0.25			
NAP	I 923.2±16.7a	62.5±13.6c	10.5±2.7d	2.0±0.4c	0.7±0.1c	998.9a	15.3±1.8e	1.377±0.025c	0.948±0.008**
	II 209.6±27.8a	211.5±20.2a	176.9±10.3a	145.6±5.8a	102.8±4.4a	846.4a		2.529±0.026e	0.993±0.002**
BDP	I 821.1±31.0b	135.6±26.3b	31.3±6.6c	8.7±1.9c	1.3±0.2c	998.0a	22.7±2.2d	1.426±0.020c	0.979±0.001**
	II 189.4±25.5a	201.8±28.0a	164.8±13.5ab	135.2±18.1ab	80.7±8.6b	771.9b		2.621±0.027d	0.995±0.002**
ANP	I 796.2±34.1b	140.4±25.0b	38.3±6.3c	18.2±3.1b	2.8±0.2bc	995.9b	28.3±2.7c	1.629±0.010b	0.983±0.003**
	II 168.8±27.7ab	196.2±33.4a	150.2±22.4bc	129.3±9.4ab	69.1±9.2bc	713.6c		2.676±0.020c	0.993±0.004**
AFL	I 727.7±34.7c	156.4±19.6b	84.4±14.3b	23.0±4.0b	3.9±0.3b	995.4b	35.0±3.0b	1.636±0.042b	0.987±0.001**
	II 138.7±5.1b	173.7±18.7ab	136.4±9.0c	124.9±5.0b	73.6±2.5b	647.3d		2.730±0.021b	0.994±0.001**
CK	I 478.8±56.1d	294.9±34.5a	145.5±12.7a	53.4±9.3a	15.7±2.6a	988.3c	51.0±1.3a	1.852±0.028a	0.994±0.003**
	II 75.2±9.6c	147.0±21.3b	107.4±8.9d	96.7±5.7c	57.7±6.7c	484.0e		2.826±0.006a	0.991±0.003**

NAP: 慈竹林 *Neosinocalamus affinis* plantation; BDP: 杂交竹林 *Bambusa pervariabilis*×*Dendrocalamopsis oldhami* plantation; ANP: 桉木+慈竹混交林 *Alnus crenastogyne* + *Neosinocalamus affinis* plantation; AFL: 弃耕地 Abandoned farmland; CK: 农耕地 Slope farmland. I: 干筛 Dry sieving; II: 湿筛 Wet sieving. 同一列数据后不同字母表示差异显著($P<0.05$) Different letters following mean within the same column meant significant difference among patterns at 0.05 level. * $P<0.05$; ** $P<0.01$. 下同 The same below.

件下还是在干筛条件下,农耕地土壤团粒结构分形维数最大,土壤团聚体和水稳性团聚体含量最低,土壤结构破坏率最高,且显著高于各退耕模式.所以,农耕地退耕对增加团聚体及水稳性团聚体含量和提高土壤结构稳定性具有较好的作用.

2.2 分形维数与土壤物理性质的关系

由表 2 可知,各模式间土壤自然含水量、容重、非毛管孔隙、毛管孔隙、总孔隙和通气度差异显著.与农耕地相比,退耕模式慈竹林、杂交竹林、桉木+慈竹混交林和弃耕地的土壤自然含水量分别增加 49.7%、36.8%、27.6% 和 14.1%,退耕模式均显著高于农耕地,各林地间差异显著且均显著高于弃耕地;容重分别增加 3.8%、12.0%、14.3% 和 15.0%,除慈竹林外其他各模式均显著高于农耕地,杂交竹林、桉木+慈竹混交林和弃耕地间差异不显著,但三者均显著高于慈竹林;非毛管孔隙分别降低 63.4%、72.5%、75.8% 和 77.8%,退耕模式间无差异显著性,但四者均显著低于农耕地;毛管孔隙分别增加 44.6%、41.1%、34.0% 和 28.8%,退耕模式均显著高于农耕地,慈竹林显著高于桉木+慈竹混交林和弃耕地,但与杂交竹林无差异显著性;总孔隙分别增加 6.8%、1.4%、-4.3% 和 -8.7%,农耕地显著高于弃耕地和低于慈竹林,并与杂交竹林和桉木+慈竹混交林无差异显著性;通气度分别降低 36.6%、45.8%、54.9% 和 57.7%,退耕模式均显著低于农耕地,慈竹林显著高于桉木+慈竹混交林和

弃耕地,但与杂交竹林无差异显著性.结果说明,随着退耕后植被的恢复土壤自然含水量增加,由于避免了人为耕作、除草等农业经营管理活动,土体变得紧实,大孔隙减小而小孔隙增加,通气度相对降低,由于不同植被根系对土壤穿插及对孔隙度的改善不同,使得慈竹林和杂交竹林总孔隙增加,而其他两种模式降低.

对土壤物理性质与土壤团粒结构分形维数回归分析结果表明(表 3),干筛和湿筛得到的土壤团粒结构分形维数均与自然含水量、非毛管孔隙和毛管孔隙间呈显著负相关,而与容重、总孔隙和通气度间相关性不显著.导致这一现象的原因与农耕地土壤松散、容重低、总孔隙和通气度大有关.

2.3 分形维数与土壤养分的关系

由表 4 可知,与农耕地相比,退耕模式慈竹林、杂交竹林、桉木+慈竹混交林和弃耕地有机质含量分别增加 105.3%、76.3%、64.5% 和 43.4%,退耕模式均显著高于农耕地,杂交竹林与桉木+慈竹混交林间无差异显著性,但两者均显著低于慈竹林,且各林地均显著高于弃耕地;全氮含量分别增加 88.5%、65.6%、55.7% 和 39.3%,退耕模式均显著高于农耕地,各林地间差异显著且均显著高于弃耕地;碱解氮含量分别增加 129.0%、96.2%、68.2% 和 47.0%,退耕模式均显著高于农耕地,各林地间差异显著且均显著高于弃耕地;全磷含量分别增加 13.4%、10.4%、7.5% 和 3.0%,除弃耕地外,其他

表 2 不同退耕模式土壤物理性质
Tab.2 Soil physical properties under different de-farming patterns

林分类型 Stand type	自然含水量 Natural water content (%)	容重 Bulk density (g·cm ⁻³)	非毛管孔隙 Non-capillary porosity (%)	毛管孔隙 Capillary porosity (%)	总孔隙 Total porosity (%)	通气度 Aeration porosity (%)
NAP	27.7±0.9a	1.38±0.08b	5.6±0.5b	41.2±0.9a	46.8±0.8a	9.0±0.5b
BDP	25.3±1.2b	1.49±0.08a	4.2±0.6b	40.2±2.7ab	44.4±2.3ab	7.7±0.4bc
ANP	23.6±0.5c	1.52±0.01a	3.7±0.4b	38.2±0.6bc	41.9±0.6bc	6.4±0.5c
AFL	21.1±0.6d	1.53±0.04a	3.4±0.6b	36.7±1.1c	40.0±0.5c	6.0±0.5c
CK	18.5±0.5e	1.33±0.01b	15.3±2.4a	28.5±0.7d	43.8±1.7b	14.2±2.7a

表 3 分形维数与土壤物理性质的关系
Tab.3 Relationship between fractal dimension and soil physical properties

项目 Item	拟合回归方程 Linear regression equation		相关系数 Correlation coefficient	
	I	II	I	II
自然含水量 Natural water content	$D=3.3766-0.0301X$	$D=2.7177-0.0488X$	-0.966**	-0.927**
容重 Bulk density	$D=2.7438-0.0465X$	$D=2.1179-0.3681X$	-0.042	-0.197
非毛管孔隙 Non-capillary porosity	$D=2.5898+0.0134X$	$D=1.4262+0.0245X$	0.610*	0.660**
毛管孔隙 Capillary porosity	$D=3.3751-0.0189X$	$D=2.8021-0.0330X$	-0.867**	-0.897**
总孔隙 Total porosity	$D=3.5169-0.0194X$	$D=2.8950-0.0302X$	-0.484	-0.448
通气度 Aeration porosity	$D=2.5511+0.0144X$	$D=1.3535+0.0266X$	0.446	0.487

表 4 不同退耕模式土壤养分含量
Tab.4 Soil nutrients content under different de-farming patterns

林分类型 Stand type	有机质 Organic matter (g · kg ⁻¹)	全 氮 Total N (g · kg ⁻¹)	碱解氮 Alkaline hydrolysis N (mg · kg ⁻¹)	全 磷 Total P (g · kg ⁻¹)	有效磷 Available P (mg · kg ⁻¹)	全 钾 Total K (g · kg ⁻¹)	速效钾 Available K (mg · kg ⁻¹)
NAP	15.6±0.5a	1.15±0.02a	96.4±7.5a	0.76±0.01a	225.6±6.0b	9.0±0.1a	67.1±3.0b
BDP	13.4±0.8b	1.01±0.02b	82.6±3.4b	0.74±0.02ab	207.3±6.9c	8.9±0.2ab	56.4±3.0c
ANP	12.5±0.4b	0.95±0.03c	70.8±4.9c	0.72±0.01b	176.7±4.5d	8.7±0.2abc	48.6±1.8d
AFL	10.9±0.6c	0.85±0.05d	61.9±3.3d	0.69±0.01c	152.5±10.8e	8.7±0.1bc	45.2±1.2d
CK	7.6±0.3d	0.61±0.01e	42.1±2.3e	0.67±0.02c	248.7±5.7a	8.5±0.2c	79.6±1.8a

表 5 分形维数与土壤养分的关系
Tab.5 Relationship between fractal dimension and soil nutrients content

项目 Item	拟合回归方程 Linear regression equation		相关系数 Correlation coefficient	
	I	II	I	II
有机质 Organic matter	$D=3.1211-0.0371X$	$D=2.2976-0.0595X$	-0.987 **	-0.939 **
全氮 Total N	$D=3.1727-0.05428X$	$D=2.3994-0.08916X$	-0.968 **	-0.943 **
碱解氮 Alkaline hydrolysis N	$D=3.0512-0.0053X$	$D=2.2012-0.0087X$	-0.980 **	-0.957 **
全磷 Total P	$D=4.4937-2.5438X$	$D=4.6909-4.3488X$	-0.881 **	-0.893 **
有效磷 Available P	$D=2.6605+0.0001X$	$D=1.4780+0.0005X$	0.026	0.106
全钾 Total K	$D=5.8700-0.3654X$	$D=6.7662-0.5929X$	-0.801 **	-0.771 **
速效钾 Available K	$D=2.5884+0.0015X$	$D=1.3613+0.0037X$	0.186	0.279

退耕地均显著高于农耕地,各林地均显著高于弃耕地,而杂交竹林与慈竹林和桉木+慈竹混交林间无差异显著;有效磷含量分别降低 9.3%、16.6%、29.0% 和 38.7%,退耕模式均显著低于农耕地,各林地间差异显著且均显著高于弃耕地;全钾含量分别增加 5.9%、4.7%、2.4% 和 2.4%,除慈竹林和杂交竹林显著高于农耕地外,其他退耕模式与农耕地间无差异显著性;速效钾含量分别降低 15.7%、29.1%、38.9% 和 43.2%,退耕模式均显著低于农耕地,各林地间差异显著,且慈竹林和杂交竹林显著高于弃耕地.退耕后有效磷和速效钾含量的降低与农耕地化肥施用有关.这说明退耕有利于土壤有机质、全氮、碱解氮、全磷和全钾含量的增加.

对土壤养分含量与土壤团粒结构分形维数回归分析结果表明(表 5),不论是干筛还是湿筛条件下,土壤团粒结构分形维数与有机质、全氮、碱解氮、全磷和全钾呈显著负相关,而与有效磷和速效钾相关性不显著.导致这一现象的原因与农耕地施肥,有效磷和速效钾含量较高有关.

3 讨 论

土壤团聚体是土壤结构构成的基础,影响土壤的各种理化性质^[13,17],且土壤水稳性团聚体大小、数量和稳定性决定土壤孔隙大小、结构的稳定性,影响土壤通透性、抗蚀性,是表征土壤结构的重要指标

之一^[18-19]. 本研究发现,坡地退耕后土壤团聚体、水稳性团聚体和有机质含量增加. 研究报道,土壤耕作会降低土壤有机质含量及结构稳定性,加剧土壤侵蚀,造成土壤营养物质流失^[20];耕作活动为土壤有机质的分解转化创造了有利条件,且耕作强度增加可促进土壤有机质周转^[21]. 有机胶结物的增加是形成和维持土壤结构的主要方面,土壤有机质水平的提高有利于土壤良好结构的形成和土壤稳定性的提高^[22]. 赵勇钢等^[11]的研究也发现,退耕地较好的土壤团粒结构与其较高的有机质含量密切相关. 因此,本研究中土壤团聚体及水稳性团聚体含量的增加,与退耕后减免了人为活动对土壤结构的破坏及耕作对土壤有机质矿化分解的影响有关. 同时,退耕后尤其是退耕还林后,每年有大量的枯落物归还土壤转化为有机质,使土壤有机胶体含量增加,有利于土壤团聚体和大粒径团聚体形成及稳定性增加,进而导致坡地退耕后土壤团粒结构分形维数降低和土壤结构改善.

表征土壤结构分布的分形维数 D 能够反映土壤颗粒大小的影响,分形维数 D 通常介于 2~3^[23],当 $D=0$ 时,土壤由单一直径的颗粒组成;当 $0<D<3.0$ 时,大颗粒占优;当 $D>3.0$ 时,小颗粒占优^[24-25]. 本研究中,各退耕模式湿筛条件下土壤团粒结构分形维数介于 2~3,干筛条件下土壤团粒结构分形维数为 1.377~1.852,与周萍等^[26]对黄土丘

陵区不同土地利用方式干筛条件下土壤团粒结构分形维数(1.641~2.114)研究结果相似. Castrignanò 等^[27]研究发现,当 D 接近 2 时,表明团聚体主要由数量很少的大团聚体组成,而随着 D 值的增大,土壤中小尺寸团聚体的数量也随之增加. 因此,造成本研究中干筛条件下土壤团粒结构分形维数 <2 的原因与各退耕模式土壤大粒径团聚体组成有关.

土壤容重是土壤物理性质的一个重要指标,容重大小反映出土壤透水性、通气性和根系伸展时阻力状况^[18]. 土壤孔隙组成是土壤养分、水分和空气以及微生物、植物根系活动的通道,可以直接反映整个土体构造状况,是土壤肥力的重要指标之一^[12]. 土壤矿物质是土壤的骨骼,碳、氮、磷和钾等元素的含量状况不仅能够反映土壤的总体肥力,而且是评价管理措施优劣的主要指标,还可以阐明土壤对植物营养成分的供应状况^[28]. 吴承桢等^[16]研究发现,土壤团粒结构分形维数能够较好地反映土壤水稳性团聚体及水稳性大团聚体含量对土壤结构与稳定性的影响,且表现为团粒结构分形维数越小,土壤结构和稳定性越好,并提出分形维数是较为理想的土壤物理肥力指标. 之后,许多学者对土壤分形维数与土壤肥力指标间的关系进行了研究并得出,土壤分形维数越小, >0.25 mm 团聚体与水稳性团聚体含量越高,土壤肥力也越高^[21,29-30]. 本研究结果发现,土壤团粒结构分形维数与自然含水量、非毛管孔隙、毛管孔隙、有机质、全氮、碱解氮、全磷和全钾相关性达显著水平,而与土壤容重、总孔隙、通气度、有效磷和速效钾之间相关性不显著. 导致这一现象的原因,与农耕地经营管理过程中耕作对土壤容重、总孔隙和通气度的影响,及施肥对土壤有效磷和速效钾含量的影响有关. 据此,去除农耕地仅对退耕地(桉木+慈竹混交林、杂交竹林、慈竹林和弃耕地)土壤团粒结构分形维数与土壤容重、总孔隙、通气度、有效磷和速效钾之间相关性进行线性相关分析发现,相关性均达到极显著水平,说明土壤团粒结构分形维数能够较好地评价坡地退耕后土壤理化性质变化. 慈竹属于乡土竹种比较适生于研究区贫瘠的土壤,而杂交竹属引进竹种与慈竹相比长势要稍微差一些,而桉木的长势及生物量明显不如两个竹种,且在桉木+慈竹混交林中慈竹是第 2 年补植的,各竹种须根较发达对土壤性质的改良较好,且据调查地表枯落物蓄积量也是慈竹林>杂交竹林>桉木+慈竹混交林>弃耕地. 因此,退耕有利于研究区土壤肥力提高和土壤结构改善,各退耕模式以慈竹林最好.

4 结 论

退耕 5 年后,与农耕地相比,退耕还林地(慈竹林、杂交竹林和桉木+慈竹混交林)或弃耕自然恢复地(弃耕地)均可增加土壤团聚体和水稳性团聚体含量,降低土壤团粒结构分形维数,改善土壤结构;与弃耕地相比,退耕还林地对增加土壤团聚体及水稳性团聚体含量,降低土壤分形维数的效果更好,并以慈竹林最好,杂交竹林次之. 退耕地土壤团粒结构分形维数与土壤理化性质具有较好的相关性,可以作为坡地退耕后土壤肥力变化的评价指标. 退耕还林地通过地上部巨大的生物量和地表丰富的枯落物对土壤有较好的避护作用,其地下部大量的根系和有机物质输入量对土壤理化性质有较好的改良作用,从而改善了土壤结构,降低了团粒结构分形维数. 因此,采用坡地退耕,尤其是退耕还林,并选择适宜的植被恢复模式,对改善川南坡地土壤结构,提高土壤肥力,减少水土流失和促进区域生态环境可持续发展具有重要意义.

参考文献

- [1] Su YZ, Zhao HL, Zhao WZ, *et al.* Fractal features of soil particle size distribution and the implication for indicating desertification. *Geoderma*, 2004, **122**: 43-49
- [2] Wang X, Li M, Liu S, *et al.* Fractal characteristics of soils under different land-use patterns in the arid and semiarid regions of the Tibetan Plateau, China. *Geoderma*, 2006, **134**: 56-61
- [3] Zhao S, Su J, Yang Y, *et al.* A fractal method of estimating soil structure changes under different vegetations on Ziwuling Mountains of the Loess Plateau, China. *Agricultural Sciences in China*, 2006, **5**: 530-538
- [4] Miao C-Y (缪驰远), Wang Y-F (汪亚峰), Wei X (魏 欣), *et al.* Fractal characteristics of soil particles in surface layer of black soil. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2007, **18**(9): 1987-1983 (in Chinese)
- [5] Liang S-C (梁士楚), Dong M (董 鸣), Wang B-S (王伯荪), *et al.* Fractal characteristics of particle size distributions of mangroves soils in Yingluo Bay. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2003, **14**(1): 11-14 (in Chinese)
- [6] Arya LM, Paris JF. A physicoempirical model to predict the soil moisture characteristic from particle-size distribution and bulk density data. *Soil Science Society of America Journal*, 1981, **45**: 1023-1031
- [7] Turcotte DL. Fractals and fragmentation. *Journal of Geophysical Research*, 1986, **91**: 1921-1926
- [8] Yang P-L (杨培岭), Luo Y-P (罗远培), Shi Y-C (石元春). Fractal feature of soil on expression by weight distribution of particle size. *Chinese Science Bulletin* (科学通报), 1993, **38**(20): 1896-1899 (in Chinese)
- [9] Jia X-H (贾晓红), Li X-R (李新荣), Li Y-S (李元

- 寿). Fractal dimension of soil particle size distribution during the process of vegetation restoration in arid sand dune area. *Geographical Research* (地理研究), 2007, **26**(3): 518–525 (in Chinese)
- [10] Wen H-Y (文海燕), Fu H (傅 华), Zhao H-L (赵哈林). Fractal features of soil particle size distribution in degraded sandy grassland during reclamation and enclosure. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2006, **17**(1): 55–59 (in Chinese)
- [11] Zhao Y-G (赵勇钢), Zhao S-W (赵世伟), Cao L-H (曹丽花), *et al.* Soil structural characteristics and its effect on infiltration on abandoned lands in semi-arid typical grassland areas. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering* (农业工程学报), 2008, **24**(6): 14–20 (in Chinese)
- [12] Yang Y-S (杨玉盛), Li Z-W (李振问), Yu X-T (俞新妥), *et al.* Studies on the characteristics of structure and moisture properties of the soil in complex agroforestry management system of Chinese fir, *Aleurites fordii* Hemsl and *Mesona chinensis* Benth. *Journal of Nanjing Forestry University* (南京林业大学学报), 1993, **17**(3): 75–79 (in Chinese)
- [13] Zhou J-X (周金星), Qi L-H (漆良华), Zhang X-D (张旭东), *et al.* Structure characteristics and health evaluation of soil in different vegetation restoration communities. *Journal of Central South Forestry University* (中南林学院学报), 2006, **26**(6): 32–37 (in Chinese)
- [14] Li Z-C (李正才), Fu M-Y (傅懋毅), Xie J-Z (谢锦忠), *et al.* Carbon sequestration of 5 ecological reestablishment vegetation types in Muchuan County of Sichuan. *Journal of Zhejiang Forestry College* (浙江林学院学报), 2004, **21**(4): 382–387 (in Chinese)
- [15] China Standards Press (中国标准出版社). The Collection of China Forestry Standardization (Afforestation Volume). Beijing: China Standards Press, 1998 (in Chinese)
- [16] Wu C-Z (吴承祯), Hong W (洪 伟). Study on fractal features of soil aggregate structure under different management patterns. *Acta Pedologica Sinica* (土壤学报), 1999, **36**(2): 162–167 (in Chinese)
- [17] Li J-F (李军锋), Zhao X-H (赵秀海). Application of fractal theory in studying soil aggregates under different skidding modes. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2005, **16**(9): 1795–1797 (in Chinese)
- [18] Qiu R-H (邱仁辉), Yang Y-S (杨玉盛), Yu X-T (俞新妥). Soil structure characteristics in the plantations of *Cunninghamia lanceolata* on different rotations. *Journal of Beijing Forestry University* (北京林业大学学报), 1998, **20**(4): 6–11 (in Chinese)
- [19] Ning L-D (宁丽丹), Shi H (石 辉), Zhou H-J (周海军), *et al.* Quantitative characteristics of soil aggregates under different vegetations in upper reach of Minjiang River. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2005, **16**(8): 1405–1410 (in Chinese)
- [20] Luo Z-Z (罗珠珠), Huang G-B (黄高宝), Xin P (辛平), *et al.* Effects of tillage measures on soil structure and organic carbon of surface soil in semi-arid area of the western Loess Plateau. *Agricultural Research in the Arid Areas* (干旱地区农业研究), 2008, **26**(4): 53–58 (in Chinese)
- [21] Sun T-C (孙天聪), Li S-Q (李世清), Shao M-A (邵明安). Effects of long-term fertilization on fractal features for soil aggregates in semi-arid farmland ecological system. *Plant Nutrition and Fertilizer Science* (植物营养与肥料学报), 2007, **13**(3): 417–422 (in Chinese)
- [22] Liu Y-L (柳云龙), Lü J (吕 军), Wang R-C (王人潮), *et al.* Soil structure, nutrient accumulation and water retention character in eroded hilly red soil after virecence. *Journal of Soil and Water Conservation* (水土保持学报), 2000, **14**(4): 79–82, 98 (in Chinese)
- [23] Su L-T (苏里坦), Song Y-D (宋郁东), Tao H (陶辉). Fractal dimension of particle size for different aeolian sandy soils. *Chinese Journal of Soil Science* (土壤通报), 2008, **39**(2): 244–248 (in Chinese)
- [24] Liu Y-H (刘永辉), Cui D-J (崔德杰). Effects of long-term fertilization on fractal dimension. *Chinese Journal of Soil Science* (土壤通报), 2005, **36**(3): 324–327 (in Chinese)
- [25] Li B-G (李保国). Application and expectation of fractal theory in soil science. *Progress in Soil Science* (土壤学进展), 1994, **22**(1): 1–10 (in Chinese)
- [26] Zhou P (周 萍), Liu G-B (刘国彬), Hou X-L (侯喜禄). Fractal features of soil aggregate structure under different land use in the hilly-gully region of Loess Plateau. *Science of Soil and Water Conservation* (中国水土保持科学), 2008, **6**(2): 75–82 (in Chinese)
- [27] Castrignanò A, Stelluti M. Fractal geometry and geostatistics for describing the field variability of soil aggregation. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 1999, **73**: 13–18
- [28] Wang J-K (汪景宽), Yu S (于 树), Li C (李 丛), *et al.* Contents of main nutrient elements in varied levels of micro-aggregates of different soils. *Journal of Soil and Water Conservation* (水土保持学报), 2007, **21**(6): 320–323 (in Chinese)
- [29] Liu J-F (刘金福), Hong W (洪 伟), Wu C-Z (吴承祯). Fractal features of soil clusters under some precious hardwood stands in the central subtropical region, China. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2002, **22**(2): 1998–2005 (in Chinese)
- [30] Gong W (龚 伟), Hu T-X (胡庭兴), Wang J-Y (王景燕), *et al.* Study on fractal features of soil aggregate structure under natural evergreen broadleaved forest and artificial regenerations in southern Sichuan Province. *Chinese Journal of Plant Ecology* (植物生态学报), 2007, **31**(1): 56–65 (in Chinese)

作者简介 王景燕,女,1980年生,博士研究生,讲师.主要从事林业生态工程方面的教学与研究,发表论文10余篇.
E-mail: wangjingyan@sicau.edu.cn

责任编辑 李凤琴