

汶川震区不同植被下土壤组成及其分型特征

甘凤玲¹, 王涛², 何丙辉¹, 覃自阳¹, 杨兵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. 中国电力工程顾问集团中南电力设计院有限公司, 武汉 430071)

摘要: 目前关于植被恢复对震区土壤颗粒、团聚体、微团聚体粒径分布的影响研究很少, 故本文以植被恢复下汶川震区土壤为研究对象, 采用土壤粒径分形维数的计算方法, 研究了植被恢复类型下对土壤组成及分形特征的影响。结果表明: 震区土壤风干团聚体以 $>5\text{ mm}$ 的大粒径团聚体为主, 湿筛后, 土壤团聚体粒径分布中 $<0.25\text{ mm}$ 粒径的团聚体为优势粒径, 与对照样地相比, 裸地、草地、灌木、经果林和玉米类型样地的土壤水稳性团聚体的 MWD 分别减小 74.88%, 40.30%, 40.73%, 46.98% 和 47.65%。震区土壤微团聚体组成以 $1\sim0.25\text{ mm}$ 粒径为优势粒级, $0.25\sim0.05\text{ mm}$ 为粒径次优势粒级, 该震区土壤微团聚体变化范围为 $2.327\sim2.853$, 呈现如下规律: 玉米 $>$ 经果林 $>$ 灌木 $>$ 裸地 $>$ 草地 $>$ 对照样地; 震区土壤颗粒分形维数与土壤砂粒 ($1\sim0.05\text{ mm}$) 呈负相关性 ($D=2.926\sim0.002X_{\text{砂粒}}$), 与土壤粉粒 ($0.05\sim0.002\text{ mm}$) 呈显著负相关性 ($D=3.05\sim0.008X_{\text{粉粒}}$, $p<0.01$), 与土壤黏粒 ($<0.002\text{ mm}$) 呈极显著正相关性 ($D=2.595+0.009X_{\text{黏粒}}$, $p<0.01$)。震区土壤遭受的扰动较大, 导致震区土壤碎石含量增多, 土壤微团聚体和土壤颗粒分形维数增大, 通过对震区土壤结构特征的研究, 可为震区灾后治理提供参考。

关键词: 汶川地震; 植被恢复; 土壤颗粒; 微团聚体; 分形维数

中图分类号: S152.3; S152.7

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2018)01-0084-08

Fractal Feature of Soil in the Different Types of Vegetation in Wenchuan Earthquake Zone

GAN Fengling¹, WANG Tao², HE Binghui¹, TAN Ziyang¹, YANG Bing¹

(1. College of Resources and Environment, Southwest University, Key Laboratory of Eco-environments in

Three Gorges Reservoir Region, Ministry of Education, Chongqing 400715, China; 2. Central Southern China Electric

Power Design Institute Co., Ltd. of China Power Engineering Consulting Group, Wuhan, Hubei 430071, China)

Abstract: 5·12 Wenchuan earthquake triggered a large number of serious geological disasters, mainly including landslide, collapse, mud-flow, surface subsidence and so on. The earthquake made the environment more fragile, and strongly threatened the safety of people's lives and property. This result showed that vegetation restoration was the key factor to ecological restoration in earthquake area, but few studies had suggested the fractal dimension of water-stable aggregates, micro-aggregates and soil particle in different types of vegetation restoration in earthquake area. This study, therefore, was performed in the Wenchuan earthquake area, where has been restored by vegetation for 8 years. To study the effects of vegetation types on soil fractal dimension, we suggested five vegetation types (bare land, grassland, shrub-land, conservation forest and corn-filed) with 3 treatments and 162 samples. The results showed that air-dried soil aggregate ($>5\text{ mm}$) was the dominant aggregate. After wet screen processing, the soil aggregate ($<0.25\text{ mm}$) was the dominant aggregate. And compared with the control plot, the MWD of soil water-stable aggregates of bare land, grassland, shrub-land, conservation forest and corn-filed reduced by 74.88%, 40.30%, 40.73%, 46.98%, 47.65%, respectively. The soil micro-aggregates of $1\sim0.25\text{ mm}$ size were dominant aggregates in Wenchuan earthquake samples, and followed by soil micro-aggregates of $0.25\sim0.05\text{ mm}$. The range of fractal features of soil micro-aggregates was $2.327\sim2.853$. The sequence of fractal features of soil micro-aggregates for

收稿日期: 2017-02-24

修回日期: 2017-03-16

资助项目: 国家自然科学基金“汶川震区滑坡堆积体土壤侵蚀机理与过程模拟研究”项目(41271291)

第一作者: 甘凤玲(1989—), 女(壮族), 重庆市大足区人, 博士, 主要从事城市水土保持研究。E-mail: 359140315@qq.com

通信作者: 何丙辉(1966—), 男, 湖南省汨罗市人, 教授, 博导, 主要从事土壤侵蚀与小流域综合治理研究。E-mail: hebinghui@yahoo.com.cn

different types of vegetation restoration was corn-filed > conservation forest > shrub-land > bare land > grass-land > control plot. The fractal dimension of particle size distribution was negatively correlated with soil sand ($1 \sim 0.05 \text{ mm}$) ($D = 2.926 - 0.002X_{\text{sand}}$), and significantly negatively correlated with soil silt ($0.05 \sim 0.002 \text{ mm}$) ($D = 3.05 - 0.008X_{\text{silt}}$, $p < 0.01$), and significantly positively correlated with soil clay ($< 0.002 \text{ mm}$) ($D = 2.595 + 0.009X_{\text{clay}}$, $p < 0.01$). The soil was disturbed obviously under the earthquake damage, soil gravel content increased, the fractal dimensions of micro-aggregates and soil particles increased gradually. The results from the study of soil structure characteristics could provide some references for post-quake reconstruction and natural ecological systems.

Keywords: Wenchuan earthquake area; landslide deposit; fractal dimension; soil micro-aggregate

2008年发生的“5·12”汶川大地震不仅引发次生地质灾害如崩塌、泥石流和滑坡等,其破坏力强,扰动范围极广,严重威胁着震区群众的生产安全和生态环境建设。地震产生了大量的滑坡堆积体,这些滑坡堆积体均为土壤夹杂崩塌所产生的土石混合而成,在降雨的作用下,土石混合体经搬运和侵蚀进入河流与湖泊,其所造成新增水土流失十分剧烈,导致原本脆弱的震后灾区修复更加严峻^[1-2]。

土壤是由各种形状相异的孔隙和土壤颗粒所组成的结构不规则的多孔介质,具有统计意义上的相似性,是一种较典型的分形特征系统^[3]。分形维数 D 大小也能有效地表明土壤样本之间的结构性,能较好地表征震后灾区恢复样地的土壤理化性质,是评价震区植被恢复土壤抗蚀性和肥力的关键指标之一^[4]。因此,对遭受地震严重破坏的汶川灾区,研究其土壤颗粒组成对该地区生态建设和灾后重建具有重要的实际意义。植被恢复是灾后生态恢复和震区治理的主要措施,当前大部分学者主要研究植被恢复对震区土壤质地的影响,主要集中在土壤侵蚀方面,而对于震区这种遭受严重破坏下的土壤在植被恢复下土壤颗粒组成变化的研究较少^[5-6]。因此本研究运用土壤分形理论,以不同植被恢复下震区滑坡堆积体为研究对象,研究震区不同植被恢复程度土壤颗粒径团聚体分形特征进行研究,探讨汶川震区植被恢复的土壤结构特征,为震后生态恢复和灾后重建提供理论依据和技术支持。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本研究区为四川省汶川县,位于四川盆地西北部边缘,阿坝藏族羌族自治州东南部,地理坐标北纬 $30^{\circ}45' - 31^{\circ}43'$,东经 $102^{\circ}51' - 103^{\circ}44'$ 。汶川县地势西北高东南低,自西北向东南倾斜,为高山峡谷地区。县具有冬季气候干燥,夏季温暖湿润多雨的东亚季风气候特征。汶川南北两部地区降雨量相差很大,南多

北少,多年平均降水量为 $1\,190.9 \text{ mm}$ 。汶川县共有 192 条支流,支流多呈树枝状,其河流纵横,沟壑交错^[7]。全县农业土壤类型有:潮土类(即山地冲积土)、黄壤、山地黄棕壤、山地褐色土、山地灰化土、山地草甸土、山地冰冻土、水稻土等。震区内滑坡堆积体高度不一,大小差异较大,坡面大部分裸露,碎石粒径变化大,质量分数在 $55.43\% \sim 100\%$,植被覆盖率平均值在 $0\% \sim 50\%$ 之间^[8],详见图 1。



图 1 震区滑坡堆积体

1.2 试验设计

2016年6月根据地震后区域恢复模式的特点,在该区域选取6个具有代表性的震后恢复土壤样地为研究对象。各恢复样地分别为:WC₀₁,震后地表完全裸露样地,坡面几乎没有植被生长;WC₀₂,震后草地恢复样地,样地零散分布艾草等草本植物,平均植被覆盖率为10%;WC₀₃,震后灌木恢复样地,样地分布马桑、艾蒿等灌木植被,平均植被覆盖率为25%;WC₀₄,震后经果林恢复样地,样地分布女贞、复羽叶栎树等穴种经济作物,平均植被覆盖率为40%;WC₀₅,震后玉米恢复样地,样地改良种植玉米等农作物,平均植被覆盖率为75%;WC₀₆,震后对对照样地,样地完全没有受到地震的破坏,样地平均树高7~10 m,植被覆盖率达到90%以上。根据震区的地形特点将坡面分为坡上、坡中和坡下^[9],并且记录坡面的海拔、坡度、地理位置和周边情况,然后在每个坡面用4个

环刀和铝盒采取剖面原状土,自上而下对 0—10, 10—20, 20—30, 30—40 cm 土层进行采样,分别测定土壤容重、土壤含水率和土壤孔隙。每种恢复样地选

取 3 块典型样地,一共 18 块样地,并在每个坡位选取 3 个土样,共采集 162 个土样。各恢复类型样地基本特征见表 1。

表 1 试验地基本特征

恢复类型	海拔/ m	坡度/ (°)	土壤容重/ (g·cm ⁻³)	土壤 含水率/%	地理 位置	植被 覆盖率/%	主要 植被
裸地	1186	41°	1.58	4.56	103°48'26"E, 31°32'48"N		
草地	1256	40°	1.63	4.86	103°50'12"E, 31°36'31"N	10	艾草
灌木	1197	38°	1.62	6.36	103°52'36"E, 31°39'42"N	25	马桑、艾蒿
经果林	1319	42°	1.55	5.86	103°52'28"E, 31°39'49"N	40	女贞、复羽叶栎树
玉米	1219	39°	1.49	5.89	103°49'31"E, 31°36'36"N	75	玉米、艾草
对照样地	1280	43°	1.05	15.78	103°43'26"E, 31°38'39"N	90	黑松、马尾松、麦冬、铁仔

1.2.1 分析方法 土壤容重、土壤含水率、孔隙度测定采用环刀法,土壤团聚体的测定采用干—湿筛法,土壤机械组成和微团聚体的测定采取吸管法^[9]。

土壤分形维数 D 采用黄冠华等^[10]的方法,模型公式为:

$$\lg\left[\frac{M(r<\bar{R}_i)}{M_T}\right] = (3-D)\lg\left(\frac{\bar{R}_i}{R_{\max}}\right)$$

式中: M_T 表示全部土壤颗粒的总质量; $M(r<\bar{R}_i)$ 表示小于某一给定平均粒径 \bar{R}_i 的土壤颗粒的质量; \bar{R}_i 表示土壤颗粒组成中位于两筛分粒级 R_i 和 R_{i+1} 之间的颗粒平均粒径; R_{\max} 表示土壤最大颗粒粒径; D 表示土壤颗粒分形维数。

水稳性团聚体的平均重量直径 (MWD, mm) 计算公式^[11]为:

$$\text{MWD} = \frac{\sum_{i=1}^n \bar{R}_i W_i}{W_T}$$

式中: \bar{R}_i 表示第 i 级团聚体的平均直径 (mm); W_i 表示第 i 级团聚体的重量 (g); W_T 表示供试土壤团聚体的总重量。

$$\text{结构体破坏率} = \frac{>0.25 \text{ mm 团粒(干筛—湿筛)}}{>0.25 \text{ mm 团粒(干筛)}} \times 100\%$$

$$\text{分散率} = \frac{<0.05 \text{ mm 微团聚体分析值}}{<0.05 \text{ mm 机械组成分析值}} \times 100\%$$

1.2.2 数据处理与分析 用 Excel 2010 软件进行图表绘制和数据处理,并用 Spass 19.0 软件进行数据的回归分析、方差分析和相关分析等统计分析。

2 结果与分析

2.1 震后不同植被恢复类型对土壤大团聚体组成的影响

地震引发了大量的滑坡堆积体,其多为土石混合介质,在人为和自然的作用下,均得到了不同程度的恢复,植被覆盖率逐年增加,增加了土壤有机物质的来源,黏粒和粉粒也随之增多,土壤的团聚作用加强。

土壤团聚体是土壤结构的基本单位,也是决定土壤通气性、肥力和土壤保水性等基本性质^[12]。

湿筛法测定震后不同植被恢复类型土壤的水稳性团聚体含量(表 2),土壤团聚体粒径分布中 <0.25 mm 粒径的团聚体为优势粒径,其所占比例为 27.87%~84.82%; >5 mm 和 3~1 mm 居中; $0.5\sim0.25$ mm 这一粒径团聚体含量最少,含量为 8.86% 以下。土壤中的大团聚体即大于 0.25 mm 的粒径的分布特征和数量反映了土壤的抗蚀性大小,是土壤中最好的结构体。在不同植被恢复下的滑坡堆积体在上中下坡位的大团聚体比例 ($R_{0.25}$) 为 46.50% $>$ 43.15% $>$ 40.71%,而裸地的上中下坡位的 $R_{0.25}$ 为 19.74%, 15.18% 和 17.62%,由此可知裸地 $R_{0.25}$ 要明显低于植被恢复样地。震区不同植被恢复类型下在坡上和坡中的 $R_{0.25}$ 均为裸地 $<$ 玉米 $<$ 草地 $<$ 经果林 $<$ 灌木 $<$ 对照样地,而在坡下的 $R_{0.25}$ 为裸地 $<$ 经果林 $<$ 草地 $<$ 玉米 $<$ 灌木 $<$ 对照样地,表明不同坡位和植被恢复类型对震区滑坡堆积体的水稳性团聚体组成有密切的关系,在相同坡位下,灌木对土壤的水稳性结构具有很好的改良作用,对照样地在原生植被的生长作用下能够很好的形成较大的团聚体结构,不同的植被类型下的堆积体均显著高于裸地,差异显著 ($p < 0.05$)。相同植被恢复类型下,裸地、草地和灌木的大团聚体数量表现为坡上 $>$ 坡下 $>$ 坡中,玉米地的大团聚体数量表现为坡下 $>$ 坡中 $>$ 坡上,经果林为坡中 $>$ 坡上 $>$ 坡下,表明在不同坡位下的大团聚体组成较为复杂,其含量差异较大。

土壤团聚体结构破坏率是指非水稳性团聚体在土壤团聚体中得比例,包括非稳性团聚体和水稳性团聚体^[12]。由表 2 可知,6 种震后恢复类型滑坡堆积体在不同坡位中,对照样地的平均团聚体结构破坏率最小,为 16.99%;玉米地的土壤团聚体结构破坏率最

高,高达 56.44%;其他植被恢复样地的土壤团聚体结构破坏率均达 36%以上。除了裸地的>5 mm 的土壤团聚体的平均含量低于 10%,其他各样地>5 mm 土壤团聚体的含量均在 20%以上,说明震区滑坡堆积体以>5 mm 的大粒径团聚体为主。

土壤平均重量直径(MWD)作为土壤稳定性状况和团聚体大小分布的常用指标,MWD 值越大说明土壤稳定性越好,团聚度越高^[13]。从表 2 可知,本试验采用干筛法测定的土壤机械稳定性团聚体的 MWD 值为对照样地最大,其平均值为 3.99 mm,裸

地、草地、灌木、经果林和玉米类型样地的土壤机械稳定性团聚体的平均 MWD 与对照样地相比,分别减小 69.34%,2.76%,27.76%,24.60%和 14.17%,依次为 1.22,3.89,2.89,3.02,3.43 mm。对照样地的湿筛法测定的水稳性团聚体的平均 MWD 为 3.15 mm,且 MWD 随坡位的降低而降低,坡上中下土层的 MWD 依次为 3.18,3.17,3.10 mm。与对照样地相比,裸地、草地、灌木、经果林和玉米类型样地的土壤水稳性团聚体的 MWD 分别减小 74.88%,40.30%,40.73%,46.98%和 47.65%。

表 2 不同植被恢复类型下土壤各粒级团聚体组成

恢复类型	坡位	处理	各粒径团聚体含量/%						大团聚体含量 $R_{0.25}/\%$	MWD	结构破坏率
			>5 mm	5~3 mm	3~1 mm	1~0.5 mm	0.5~0.25 mm	<0.25 mm			
裸地	坡上	干筛	13.11	7.01	7.95	5.86	4.50	61.57	38.43	1.56	48.63
		湿筛	7.79	3.67	4.68	1.95	1.65	80.26	19.74	0.95	
	坡中	干筛	5.59	4.14	4.83	4.40	5.07	75.96	24.04	0.83	36.85
		湿筛	4.65	2.06	2.42	3.44	2.62	84.82	15.18	0.62	
	坡下	干筛	9.81	7.45	6.08	4.34	5.04	67.28	32.72	1.29	46.15
		湿筛	6.50	3.26	3.00	2.18	2.68	82.38	17.62	0.81	
草地	坡上	干筛	35.10	19.37	16.79	10.04	3.86	14.83	85.17	3.85	49.97
		湿筛	15.81	3.72	19.75	2.24	1.08	57.39	42.61	1.82	
	坡中	干筛	37.55	20.11	15.27	9.81	5.28	11.98	88.02	4.03	50.99
		湿筛	21.12	8.61	9.08	3.05	1.29	56.86	43.14	2.21	
	坡下	干筛	33.41	20.36	16.53	13.00	5.69	11.01	88.99	3.78	62.40
		湿筛	14.48	6.69	7.02	3.57	1.69	66.54	33.46	1.61	
灌木	坡上	干筛	19.65	17.27	20.23	17.48	6.92	18.45	81.55	2.75	22.62
		湿筛	13.46	13.42	16.55	12.71	6.98	36.89	63.11	2.04	
	坡中	干筛	20.07	18.08	21.78	17.22	6.82	16.03	83.97	2.84	45.79
		湿筛	12.01	7.36	13.15	8.01	4.99	54.48	45.52	1.60	
	坡下	干筛	23.69	19.32	18.65	14.87	6.57	16.90	83.10	3.08	41.42
		湿筛	15.71	10.12	11.74	7.25	3.86	51.31	48.69	1.95	
经果林	坡上	干筛	26.63	22.64	16.71	14.51	5.18	14.34	85.66	3.38	45.29
		湿筛	15.03	9.80	14.70	4.79	2.55	53.13	46.87	1.93	
	坡中	干筛	23.14	15.66	19.37	16.55	6.55	18.74	81.26	2.92	41.54
		湿筛	14.36	9.60	11.20	9.01	3.34	52.50	47.50	1.83	
	坡下	干筛	19.13	18.06	20.72	16.95	5.62	19.52	80.48	2.74	59.34
		湿筛	9.11	6.68	7.96	7.15	1.83	67.28	32.72	1.25	
玉米	坡上	干筛	35.30	19.52	18.20	13.45	2.96	10.57	89.43	3.92	61.37
		湿筛	16.28	6.06	8.88	2.29	1.04	65.46	34.54	1.74	
	坡中	干筛	33.80	17.53	16.31	13.68	3.89	14.79	85.21	3.70	58.42
		湿筛	15.25	6.81	7.73	3.40	2.23	64.57	35.43	1.69	
	坡下	干筛	20.77	14.82	17.92	16.42	5.55	24.52	75.48	2.68	49.54
		湿筛	11.56	7.28	11.73	5.15	2.37	61.91	38.09	1.52	
对照样地	坡上	干筛	33.93	15.76	21.18	11.85	4.03	3.68	86.75	3.71	16.85
		湿筛	20.74	14.01	18.62	11.66	7.10	27.87	72.13	3.18	
	坡中	干筛	41.02	16.70	18.27	9.31	3.05	4.05	88.35	4.20	18.36
		湿筛	21.22	13.39	18.13	11.38	8.01	27.87	72.13	3.17	
	坡下	干筛	39.47	16.85	18.46	9.36	3.34	3.99	87.48	4.09	15.76
		湿筛	20.58	14.05	18.21	11.99	8.86	26.31	73.69	3.10	

2.2 震后不同植被类型对土壤微团聚体组成及其分形维数的影响

直径小于 0.25 mm 的土壤团聚体称为微团聚体,其对土壤中营养元素和水分的保持、转化及释供等方面有着重要的发挥作用,影响着土壤结构的改善和土壤肥力的高低水平^[14]。由表 3 可知,不同植被恢复模式下各坡位各粒径含量差异显著,坡上 1~0.25 mm,0.25~0.05 mm,0.05~0.01 mm,0.01~0.005 mm,0.005~0.002 mm,0.002~0.000 1 mm、<0.000 1 mm 粒径微团聚体含量平均值分别为 44.98%,24.57%,7.08%,8.83%,5.13%,3.80%,5.61%,1~0.25 mm 粒径为优势粒级,0.25~0.05 mm 为粒径次优势粒级;同样,根据计算不同坡位的各粒径微团聚体含量的平均值,可知在坡上、坡中和坡下的优势粒级均为 1~0.25 mm,次优势粒级为 0.25~0.05 mm。分析不同植被恢复类型的土壤微团聚体的平均值,可知 1~0.25 mm 粒径含量规律为经果林>草地>灌木>对照样地>裸地>玉米;0.25~0.05 mm 粒径含量规律为裸地>玉米>对照样地>草地>灌木>经果林;0.05~0.01 mm 粒径含量规律为对照样地>经果林>灌木>玉米>裸地>草地;0.01~0.005 mm 粒径含量规律为玉米>灌木>草地>经果林>对照样地>裸地;0.005~0.002 mm 粒径含量规律为草地>灌木>经果林>玉米>裸地>对照样地;0.002~0.000 1 mm 粒径含量规律为草地>灌木>玉米>经果林>裸地>对照样地;

<0.000 1 mm 粒径含量规律为经果林>灌木>玉米>草地>裸地>对照样地;

特征微团聚体的组成比例是土壤保水保肥性能的判别指标之一,其能够较好的反映土壤肥力水平的高低。本研究发现,不同植被恢复类型的土壤特征微团聚体比例规律为:草地>灌木>玉米>经果林>裸地>对照样地,变化范围为 0.111~0.434;<0.01 mm 粒径团聚体含量依次为草地>灌木>玉米>经果林>裸地>对照样地。

土壤微团聚体分形维数体现的是土壤团粒结构几何形状参数,其分形维数越高,表明土壤质地越细、黏粒含量越高。本研究中,不同植被恢复类型的土壤微团聚体分形维数为 2.327~2.853,呈现规律为玉米>经果林>灌木>裸地>草地>对照样地;与对照样地相比,裸地、草地、灌木、经果林和玉米的分形维数分别增加 13.89%,13.08%,16.12%,18.49%,22.58%。将土壤微团聚体各粒径含量百分数与分形维数进行回归分析,结果表明,不同恢复类型的滑坡堆积体土壤微团聚体分形维数与 1~0.25 mm,0.25~0.05 mm,0.01~0.005 mm,0.005~0.002 mm,0.002~0.000 1 mm,<0.000 1 mm 粒径含量呈正相关关系,与 0.05~0.01 mm 粒径含量呈负相关关系($R^2=0.609^{**}$, $p<0.01$)。对大粒(>0.01 mm)微团聚体与分形维数进行线性回归,关系式为 $D=3.459\sim0.011X_{\text{大粒}}$ ($R^2=0.468$, $p=0.025$),这表明>0.01 mm 粒径含量越多,土壤微团聚体分形维数越小。

表 3 不同植被恢复类型下土壤微团聚体组成及分形维数

恢复类型	坡位	各粒径微团聚体含量/%							D	R ²	<0.01 mm/ (0.01~1 mm)
		1~0.25	0.25~0.05	0.05~0.01	0.01~0.005	0.005~0.002	0.002~0.0001	<0.0001			
		mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm			
裸地	坡上	39.97	37.33	4.92	8.33	2.70	2.35	4.40	2.650	0.942	0.216
	坡中	37.32	45.93	1.27	2.53	3.60	4.60	4.75	2.676	0.921	0.183
	坡下	41.35	40.15	2.54	6.16	4.95	1.25	3.60	2.626	0.934	0.190
草地	坡上	45.20	15.20	1.60	13.20	11.90	12.50	0.40	2.475	0.921	0.613
	坡中	50.18	20.82	2.87	8.53	6.35	5.10	6.15	2.711	0.975	0.354
	坡下	43.54	27.25	2.55	5.46	11.40	3.15	6.65	2.709	0.959	0.364
灌木	坡上	50.80	19.82	6.05	13.18	2.15	0.15	7.85	2.711	0.873	0.304
	坡中	39.59	13.07	9.04	10.10	11.40	13.20	3.60	2.668	0.939	0.621
	坡下	48.43	21.77	1.68	7.82	9.95	2.55	7.80	2.729	0.946	0.391
经果林	坡上	54.63	15.32	5.69	3.11	4.63	1.62	15.00	2.808	0.848	0.322
	坡中	51.63	12.22	6.05	9.15	9.45	4.40	7.10	2.724	0.966	0.431
	坡下	55.35	11.20	5.25	6.80	9.20	4.20	8.00	2.742	0.956	0.393
玉米	坡上	33.60	34.82	3.88	9.90	8.20	4.75	4.85	2.670	0.982	0.383
	坡中	42.39	24.89	7.05	11.32	3.52	2.73	8.10	3.182	0.985	0.345
	坡下	42.50	22.62	2.49	11.39	6.85	8.30	5.85	2.707	0.986	0.479
对照样地	坡上	45.65	24.96	20.35	5.24	1.19	1.45	1.17	2.339	0.998	0.099
	坡中	44.23	26.36	21.12	6.03	0.38	0.59	1.29	2.327	0.999	0.090
	坡下	44.33	24.19	18.88	6.39	3.42	1.67	1.11	2.316	0.999	0.144

2.3 震后不同植被恢复类型的土壤颗粒组成及其分形特征

由表 4 可知,汶川震区土壤多为砂质壤土,其中裸地为砂质黏壤土,草地、灌木、经果林和玉米为砂质壤土,对对照样地为砂质粉土。各植被恢复类型下的不同粒径颗粒含量均达到极显著水平($p<0.01$)。在砂粒含量(1~0.05 mm)粒级范围内,经果林含量最大,达到了 52.70%,玉米地颗粒含量最小,为 38.28%,两者相差 14.42%,此外,裸地、草地、灌木和对对照样地的颗粒含量分别比玉米样地大 6.52%,7.60%,8.38%和 7.58%。在粉粒含量(0.05~0.002 mm)粒级范围内,对对照样地的颗粒含量最大,为 43.11%,裸地的颗粒含量最小,为 12.19%,两者相差 30.92%,草地、灌木、经果林和玉米大 11.75%,21.11%,11.4%和 20.36%。在砂粒含量(1~0.05 mm)粒级范围内则表现为经果林(52.70%)>灌木(46.66%)>裸地(46.18%)>草地(45.88%)>对对照样地(45.86%)>玉米(38.28%)。在黏粒含量(<0.002 mm)粒级中,裸地含量最大,为 41.63%,对对照样地含量最少,为 11.03%,两者相差 30.6%,草地、灌木、经果林和玉米样地相差为 11.45%,21.59%,17.92%和 12.46%。

从土壤颗粒的分形维数可看出,草地的分形维数最大,为 2.938 8,对对照样地最小,为 2.631 6,裸地、灌

木、经果林和玉米分别为 2.903 1,2.786 3,2.826 9,2.837 0。同时,分形维数呈随着黏粒的减小而减小的规律,随着粉粒含量的减小而增加。对分形维数进行变异分析,其变异系数(CV)为 1.65%,说明震区植被恢复区土壤颗粒分形维数变异性极弱($CV>100\%$ 为高度变异性, $10\%<CV<100\%$ 为中等变异性, $CV<10\%$ 为弱变异性)。各植被恢复类型下的分形维数回归方程决定系数 R^2 为 0.770~0.979,这说明分形维数能很好地表示震区植被恢复土壤粒径分布。通过对各粒径含量与分形维数进行相关性分析发现:颗粒分形维数与 0.25~0.05,0.05~0.01,0.01~0.005,0.005~0.002,0.002~0.000 1 mm 含量均呈负相关,但与 0.25~0.05,0.05~0.01 mm 的含量达到显著水平($p<0.05$),与 0.01~0.005 mm 的含量达到极显著相关($p<0.01$),与 1~0.25 mm 含量呈正相关(未达到显著),与<0.000 1 mm 含量呈极显著正相关($p<0.01$)。对分形维数与土壤砂粒(1~0.05 mm)、粉粒(0.05~0.002 mm)、黏粒(<0.002 mm)作线性回归,关系式为 $D=2.926\sim0.002X_{\text{砂粒}}$,相关系数为 0.013; $D=3.05\sim0.008X_{\text{粉粒}}$,相关系数为 0.540**; $D=2.595+0.009X_{\text{黏粒}}$,相关系数为 0.624**。这说明决定汶川震区土壤颗粒分形维数大小的排序为黏粒>砂粒>粉粒,且随着黏粒含量的减小,分形维数随之减小,随着土壤砂粒的减小,分形维数增加。

表 4 不同植被恢复类型下土壤颗粒及分形维数

恢复类型	坡位	机械组成/%							D	R ²
		1~0.25 mm	0.25~0.05 mm	0.05~0.01 mm	0.01~0.005 mm	0.005~0.002 mm	0.002~0.0001 mm	<0.0001 mm		
裸地	坡上	25.14	17.83	9.70	2.20	2.26	1.20	41.67	2.9058	0.812
	坡中	27.53	21.67	6.60	1.26	1.78	1.46	39.70	2.9032	0.771
	坡下	25.19	21.18	10.54	1.72	0.50	0.88	39.99	2.9003	0.770
草地	坡上	37.05	8.05	16.60	3.16	2.40	1.92	30.82	2.8749	0.841
	坡中	36.28	10.18	17.58	5.44	2.74	3.30	24.48	2.8468	0.893
	坡下	36.85	9.23	17.04	3.50	3.36	4.80	25.22	3.0946	0.942
灌木	坡上	33.35	13.19	19.63	7.70	6.62	3.05	16.47	2.7955	0.939
	坡中	31.10	15.44	26.78	7.46	3.46	4.80	10.95	2.7459	0.944
	坡下	34.96	11.94	18.14	5.78	4.32	6.26	18.60	2.8176	0.954
经果林	坡上	37.37	10.68	15.72	6.72	1.34	3.94	24.22	2.8473	0.890
	坡中	37.29	8.10	13.24	9.46	3.82	1.42	26.67	2.8560	0.883
	坡下	46.66	17.99	9.30	8.28	2.88	2.00	12.89	2.7773	0.900
玉米	坡上	28.75	11.13	23.02	5.38	7.88	4.62	19.22	2.8135	0.952
	坡中	26.42	10.19	21.72	5.64	4.34	7.22	24.47	2.8440	0.953
	坡下	31.91	6.43	19.36	3.42	6.88	6.50	25.50	2.8534	0.954
对对照样地	坡上	30.14	17.57	29.04	9.06	5.59	6.35	2.25	2.5827	0.978
	坡中	27.90	17.67	28.19	11.97	3.22	6.30	4.75	2.6540	0.970
	坡下	28.86	15.45	24.03	11.70	6.51	9.16	4.29	2.6581	0.979

3 讨论

汶川县属四川山区丘陵区,在全国土壤侵蚀类型中属水力侵蚀类型西南土石山区,水土流失严重,属中度、强烈侵蚀,并常有泥石流发生,是长江上游泥沙的主要来源之一^[15]。从微观角度看,土壤侵蚀的实质是土壤颗粒发生了位移的改变^[16]。土壤质地是土壤重要的组成,其组成一方面反映土壤水分特征、肥力状况,另一方面又反映土地利用方式对土壤侵蚀的影响^[17]。土壤颗粒是土壤的重要组成部分,起着支撑植株生长的作用,其颗粒大小、组成与排列状况直接影响土壤的基本性状,与土壤的持肥、持水能力及土壤抗蚀性能有着密切相关^[18]。其中,砂质黏土比壤质黏土的土壤通气性更强,但蓄水和保水能力更弱,赵明月^[19]等认为植被盖度、相对海拔和坡位相对于土地利用类型、坡向和坡度对土壤粒径影响较大,从坡上冲刷下来的细土粒易沉积在坡下。本文中,不同坡位的土壤组成差异显著,上坡位和中坡位的植被恢复下的土壤样地的土壤砂粒和粉粒平均含量低于对照样地,而黏粒平均含量则显著高于对照样地;下坡位的砂粒和黏粒平均含量高于对照样地,粉粒平均含量低于对照样地。造成这一结果的主要原因可能是由于在地震造成大量山体松动、裂缝、崩塌,地植被遭到严重破坏,在降雨的作用下,山体的粉砂粒被冲刷并堆积体在中下坡位,导致土壤中的黏粒和粉粒均集中在山体的中下坡位。此外,土壤中的表面石头过多,黏粒含量集中在下坡位,使土壤出现板结、雨水难以下渗、养分含量少等问题,从而土壤的供水和储水能力差,导致震后灾区生态难以得到恢复。

闫建梅等^[20]研究表明,团粒结构的分形维数越大,土壤的稳定性和结构越差。本研究发现震后不同植被恢复的样地中,其土壤结构和稳定性均得到提高,且其土壤微团聚体分形维数研究呈现为玉米>经果林>灌木>裸地>草地>对照样地,其中草地和裸地相差不大。说明植被恢复样地中,其土壤结构均未达到震前土壤结构的水平,邓浩俊等^[15]研究表明:造成地震灾区土壤分形变大的原因是,地震扰动使得土壤质地和坡面结构改变,表层有机胶结物大量流失。对震后灾区进行植被修复中,草地和灌木的修复能力较林地好,这可能是因为林地土壤的根系在短时间尚未形成完整的根系,再加上汶川地震造成的土壤养分流失非常严重,碎石含量较多,土壤稳定性差,林地的树苗尚在幼龄阶段,所以土壤分形维数较高,震区植被生长的环境恶劣,而草本作物却能够在贫瘠环境中生长,并且草地和灌木样地根系在短时间能迅速

成长,其枯落物也较林地多,有机质含量能迅速周转,对改良土壤团聚体结构的效果要比林地高,唐骏等^[13]研究也显示在短时间内,草本相对于林地的生态恢复具有较好的水土保持能力,其改良效果要优于林地。而玉米样地是因为在人为和地震的扰动下,土壤结构遭到严重破坏,虽然植被恢复能够加速土壤团聚体的形成,增加植被盖度及土壤养分等,实际上,因为地震造成的土壤结构破坏非常严重,植被生长的土壤环境十分恶劣,要恢复一个完整的生态系统,尤其对于土壤结构和质地的改良需要一个相当长的恢复过程,再加上震区土壤结构的特殊性,其植被恢复的效果与该地区没有遭受地震灾害的土壤有很大差异,不能照搬前人植被恢复的技术经验,应根据震区的受损情况和恢复目的选择恰当的植被恢复模式。

分析比较不同植被恢复样地土壤各分形维数,可知灌木、经果林、玉米和对照样地表现为 $D_{\text{湿筛}} > D_{\text{颗粒}} > D_{\text{微团}} > D_{\text{干筛}}$,裸地表现为 $D_{\text{湿筛}} > D_{\text{干筛}} > D_{\text{颗粒}} > D_{\text{微团}}$,草地表现为 $D_{\text{颗粒}} > D_{\text{湿筛}} > D_{\text{微团}} > D_{\text{干筛}}$,玉米表现为 $D_{\text{湿筛}} > D_{\text{微团}} > D_{\text{颗粒}} > D_{\text{干筛}}$, $D_{\text{颗粒}}$ 的最大值出现在草地样地, $D_{\text{微团}}$ 最大值出现在玉米样地上,而对照样地的土壤 $D_{\text{颗粒}}$ 、 $D_{\text{微团}}$ 值最小。土壤颗粒组成的分形维数随着植被的恢复等级的增加而减少,但均显著大于对照样地。这说明震后灾区植被恢复下的土壤分形维数相对于未受损区较大,土壤黏粒较多,土壤极易出现板结,通透性变差,并且在地震的次生灾害作用下,土壤有向粘质化发展的方向。同时,从植被恢复等级来看,土壤微团聚体分形维数大体上是随着植被恢复程度的提高而提高;各植被恢复下的土壤风干团聚体经过湿筛处理后,分形维数均显著升高。

赵世伟^[21]指出植被恢复就是利用土壤—植被之间的相互关系来改良土壤结构和提高土壤肥力,尽而达到改良生态环境的目的。Zhou H^[22]通过同步辐射对团聚体内部微结构进行了研究,表明植被恢复能够增加土壤的孔隙性,改良土壤内部的微结构。Hao等^[23]研究分析了土壤与植被的演替过程,发现不同的植被恢复类型在土壤水分、土壤肥力和土壤结构的改良过程中发挥着重要的作用。本文研究了不同植被恢复类型对汶川震区土壤团聚体数量和粒径分布的影响,虽然不同植被恢复下土壤有着不同的改善,但由于受地震灾区的次生灾害,土壤黏粒的增加使土壤变得板结,有机质难以积累,因此震后灾区土壤在短时间内很难得到修复,因此,在震后灾区达到稳定状态后,还需对后期植被与土壤之间的相互关系进行深入研究,为震区植被的快速恢复提供科学依据。

4 结论

(1) 震区土壤微团聚体主要以大粒径($>0.01\text{ mm}$)微团聚体为主, $>0.01\text{ mm}$ 粒径含量越多,土壤微团聚体分形维数越小。各植物恢复样地干团聚体中 $>0.25\text{ mm}$ 经过湿筛后均大量减少,只有 $<0.25\text{ mm}$ 土壤团聚体含量有所提高。土壤颗粒分形维数为 $2.631\ 6\sim 2.938\ 7$,且土壤颗粒分形维数与土壤黏粒含量呈极显著正相关关系、与土壤粉粒含量呈负相关关系。这与前人研究的结论相类似,较细颗粒含量决定分形维数的大小。

(2) 不同植被恢复样地土壤各分形维数,可知灌木、经果林、玉米和对照样地表现为 $D_{\text{湿筛}} > D_{\text{颗粒}} > D_{\text{微团}} > D_{\text{干筛}}$,裸地表现为 $D_{\text{湿筛}} > D_{\text{干筛}} > D_{\text{颗粒}} > D_{\text{微团}}$,草地表现为 $D_{\text{颗粒}} > D_{\text{湿筛}} > D_{\text{微团}} > D_{\text{干筛}}$,玉米表现为 $D_{\text{湿筛}} > D_{\text{微团}} > D_{\text{颗粒}} > D_{\text{干筛}}$, $D_{\text{颗粒}}$ 的最大值出现在草地样地, $D_{\text{微团}}$ 最大值出现在玉米样地上,而对照样地的土壤 $D_{\text{颗粒}}$ 、 $D_{\text{微团}}$ 值最小。

(3) 通过回归分析表明黏粒含量是影响震区颗粒分形维数的主要原因,均可通过黏粒含量确定土壤颗粒的分形维数,而分形维数则在一定程度上反映了震区土壤结构的特征。

参考文献:

- [1] 甘凤玲,何丙辉,王涛.人工模拟降雨下汶川震区滑坡堆积体产沙规律[J].农业工程学报,2016,29(6):158-164.
- [2] Poesen J. Surface sealing as influenced by slope angle and position of simulated stones in the top layer of loose sediments[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 1986,11(1):1-10.
- [3] 王佩将,戴全厚,丁贵杰,等.喀斯特植被恢复过程中的土壤分形特征[J].水土保持学报,2012,26(4):178-182.
- [4] 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.
- [5] 张超,刘国彬,薛莲,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.
- [6] 魏茂宏,林慧龙.江河源区高寒草甸退化序列土壤粒径分布及其分形维数[J].应用生态学报,2014,25(3):679-686.
- [7] 甘凤玲,何丙辉,王涛.汶川震区滑坡堆积体降雨入渗产流特征人工模拟试验研究[J].水利学报,2016,47(6):780-788.
- [8] 李天阳,何丙辉,雷廷武,等.汶川震区滑坡堆积体土石

混合坡面细沟水动力学特征室内试验[J].水利学报,2014,45(8):892-902.

- [9] 徐小军.汶川地震新生水土流失对土壤与植被的影响[D].重庆:西南大学,2013.
- [10] 徐小军,何丙辉,胡恒,等.汶川地震区土壤物理性质与渗透性的坡面分布特征[J].水土保持学报,2011,25(6):34-39.
- [11] 黄冠华,詹卫华.土壤颗粒的分形特征及其应用[J].土壤学报,2002,39(4):490-497.
- [12] 吕文星,张洪江,王伟,等.重庆四面山不同林地土壤团聚体特征[J].水土保持学报,2010,24(4):192-197.
- [13] 唐骏,党廷辉,薛江,等.植被恢复对黄土区煤矿排土场土壤团聚体特征的影响[J].生态学报,2016,36(16):1-11.
- [14] 邱莉萍,张兴昌,张晋爱.黄土高原长期培肥土壤团聚体中养分和酶的分布[J].生态学报,2006,26(2):364-372.
- [15] 邓浩俊,张广帅,俞伟,等.震后植被受损治理区土壤基本性状和分形维数变化及其相关性分析[J].植物资源与环境学报,2015,24(1):12-18.
- [16] 刘霞,姚孝友,张光灿,等.沂蒙山林区不同植物群落下土壤颗粒分形与孔隙结构特征[J].林业科学,2011,47(8):31-37.
- [17] 程曼,朱秋莲,刘雷,等.宁南山区植被恢复对土壤团聚体水稳定及有机碳粒径分布的影响[J].生态学报,2013,33(9):2835-2844.
- [18] Gao F, Jia Z Z, Han Q F, et al. Effects of different organic fertilizer treatments on distribution and stability of soil aggregates in the semiarid area of South Ningxia[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2010,28(3):100-106.
- [19] 赵明月,赵文武,刘源鑫.不同尺度下土壤粒径分布特征及其影响因子:以黄土丘陵沟壑区为例[J].生态学报,2015,35(14):4625-4632.
- [20] 闫建梅,何联君,何丙辉,等.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[J].中国生态农业学报,2014,22(11):1294-1300.
- [21] 赵世伟,苏静,杨永辉,等.宁南黄土丘陵区植被恢复对土壤团聚体稳定性的影响[J].水土保持研究,2005,12(3):27-29.
- [22] Zhou H, Peng X, Peth S, et al. Effects of vegetation restoration on soil aggregate microstructure quantified with synchrotron-based micro-computed tomography[J]. Soil & Tillage Research, 2012,124:17-23.
- [23] Hao X X, Dou S, AN F H, et al. Humus composition and structural characteristics of humic acid in soil aggregates under different utilization of land[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2010,24(5):248-252.