

# 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

邓浩俊<sup>1</sup>, 张广帅<sup>1</sup>, 俞伟<sup>1</sup>, 吴承祯<sup>1,2</sup>, 洪伟<sup>1</sup>, 林勇明<sup>1,①</sup>

(1. 福建农林大学林学院, 福建 福州 350002; 2. 武夷学院, 福建 南平 354300)

**摘要:** 对汶川地震灾区震后典型植被受损治理区和未受损区(对照)不同坡位土壤的基本性状指标(包括颗粒结构、分布和组成及主要养分含量)进行了测定和比较,并运用分形模型计算这些指标的分形维数;在此基础上对土壤分形维数与土壤基本性状指标间的相关性进行了分析。结果表明:震后植被受损治理区和未受损区不同坡位的土壤均以粒径 0.002~0.050 mm 的颗粒为主,粒径 0.500~1.000 mm 的颗粒较少;土壤分形维数为 2.59~2.68,且治理区各坡位的土壤分形维数均高于未受损区。治理区各坡位土壤中的黏粒含量均显著高于未受损区,而 2 个区域中坡位和下坡位的粉砂粒和砂粒含量无显著差异。治理区各坡位土壤的有机质和全氮含量均显著低于未受损区,而碳氮比差异不显著;在治理区,仅下坡位有机质和全氮含量的恢复率超过 30%,上坡位和中坡位有机质和全氮含量的恢复率均在 30% 以下。相关性分析结果显示:土壤分形维数与土壤颗粒粒径的相关系数均大于 0.9,说明颗粒越大土壤的分形维数越高;土壤分形维数与黏粒含量呈极显著正相关,与砂粒含量呈显著负相关,与粉砂粒含量则无显著相关性;土壤分形维数与有机质和全氮含量总体上呈显著或极显著负相关,而与土壤碳氮比呈正相关。研究表明,震后植被受损治理区的植被恢复有利于土壤养分的积累以及土壤团聚体的形成和改善,但土壤养分的恢复需要较长时间;土壤分形维数与土壤颗粒含量、有机质含量和全氮含量均呈高度线性相关,因此可将土壤分形维数作为震后受损植被土壤恢复程度的评价指标之一。

**关键词:** 地震灾区; 植被恢复; 土壤分形维数; 土壤颗粒; 土壤养分; 相关性分析

中图分类号: X43; S152.4 文献标志码: A 文章编号: 1674-7895(2015)01-0012-07

DOI: 10.3969/j.issn.1674-7895.2015.01.02

**Change in basic characters and fractal dimension of soil in destroyed vegetation management region after earthquake and their correlation analysis** DENG Haojun<sup>1</sup>, ZHANG Guangshuai<sup>1</sup>, YU Wei<sup>1</sup>, WU Chengzhen<sup>1,2</sup>, HONG Wei<sup>1</sup>, LIN Yongming<sup>1,①</sup> (1. College of Forestry, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China; 2. Wuyi University, Nanping 354300, China), *J. Plant Resour. & Environ.*, 2015, 24(1): 12-18

**Abstract:** The basic characters (including structure, distribution and composition of particle and contents of main nutrient components) of soil at different slopes in destroyed vegetation management region and undestroyed region (the control) in Wenchuan earthquake disaster area after earthquake were determined and compared, and the fractal dimension of these indexes was calculated by fractal model. On this basis, correlation between soil fractal dimension and soil basic character indexes was analyzed. The results show that particles with diameter of 0.002-0.050 mm are main in soil at different slopes in destroyed vegetation management region and undestroyed region after earthquake, while particles with diameter of 0.500-1.000 mm are less. The soil fractal dimension is 2.59-2.68, and that at different slopes in management region all are higher than that in undestroyed region. The clay content in soil at different slopes in management region is significantly higher than that in undestroyed region, while there are no significant differences in silt and sand contents in soil at middle and lower slopes between two

收稿日期: 2014-04-29

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41201564); 福建农林大学林学院青年科研基金项目(6112C039Q)

作者简介: 邓浩俊(1990—),男,广东增城人,硕士研究生,主要从事植物地理学研究。

①通信作者 E-mail: monkey1422@163.com

regions. Contents of organic matter and total N in soil at different slopes in management region are significantly lower than those in undestroyed region, but there is no significant difference in C/N ratio. In management region, only the recovery rate of contents of organic matter and total N in soil at the lower slope is over 30%, while that at the upper and middle slopes all are below 30%. The correlation analysis result shows that the correlation coefficient between soil fractal dimension and soil particle diameter all are above 0.9, meaning that the bigger soil particle, the higher soil fractal dimension. Soil fractal dimension has an extremely significantly positive correlation with clay content in soil, has a significantly negative correlation with sand content in soil and has no significant correlation with silt content in soil. And in general, soil fractal dimension has significantly or extremely significantly negative correlations with contents of total N and organic matter in soil, but has positive correlation with C/N ratio in soil. It is suggested that vegetation restoration in destroyed vegetation management region is beneficial to soil nutrient accumulation and formation and improvement of soil aggregate, but soil nutrient recovery needs a longer term. And there is a highly linear correlation between soil fractal dimension and contents of particle, organic matter and total nitrogen in soil, so soil fractal dimension could be used as one of assessment indexes for restoration degree of destroyed vegetation soil after earthquake.

**Key words:** earthquake disaster area; vegetation restoration; soil fractal dimension; soil particle; soil nutrient; correlation analysis

汶川地震主震区位于中国四川的西部山区,由于主震强烈、余震频繁以及次生灾害不断,对震区山体造成了严重的破坏,原有山体表层土壤及植物被大量掩埋,使植物生长的附着基质和定居场所等进一步恶化,造成灾区“植被—土壤”系统严重受损,从而进一步阻碍震区植被和土壤发育,影响植被演替过程,导致景观破碎化<sup>[1-7]</sup>;而景观破碎化程度的加剧又会威胁震后“植被—土壤”系统的稳定性及恢复进程<sup>[8]</sup>。目前,相关研究主要集中在震后植被的恢复情况、恢复潜力及演替趋势以及自然植被恢复的先锋植物特征等方面<sup>[9-13]</sup>,研究重点主要为植被恢复方式、物种多样性变化、自然恢复潜力等,有关受损植被土壤性质变化过程的研究甚少。

土壤是由不同大小、形状和空隙的固体以一定形式连接而成的多孔介质,是植物生长的主要载体,其结构和养分组成对植物生长至关重要。相关的研究结果<sup>[14-18]</sup>均表明土壤具有一定的分形特征,且其分形维数与土壤的有机质和全氮含量以及土壤颗粒组成呈高度的线性关系,因此,土壤的分形维数特征可以客观反映土壤的演变规律和肥力特征。然而,在地震灾区,由于地震扰动和次生灾害的破坏作用,受损植被区域的土壤结构发生重组,致使土壤分形维数发生相应的变化。因此,分析震后受损植被生态恢复区土壤的分形维数可作为评价受损植被土壤质量的快捷手段之一。

鉴于此,作者通过对汶川地震震后典型植被受损治理区土壤的基本性质进行分析,运用土壤分形理论

并结合土壤的颗粒组成以及土壤的养分组成,探讨地震灾区典型植被受损区土壤的受损程度及其恢复潜力,为地震灾区的植被生态恢复提供参考依据。

## 1 研究区概况和研究方法

### 1.1 研究区及样地概况

研究区域位于四川省绵竹市北部的汉旺镇,地处四川盆地的边缘,属亚热带季风性气候,年平均气温为 15℃,年降水量约为 1 097 mm,降雨主要集中在 5 月份至 8 月份,土壤类型主要为黄棕壤。汉旺镇为汶川地震主要受灾区域之一,地震造成的山体崩塌和滑坡均非常严重。

样地的地理坐标为北纬 31°27'40"~31°27'46"、东经 104°09'30"~104°09'38",海拔约 700 m,坡度约 35°。分别选取 1 个植被受损治理区样地(即震后受损植被生态恢复区)和 1 个相邻的未受损区样地(即对照),样地面积均为 40 m×40 m。未受损区样地为扁桃(*Amygdalus communis* Linn.)、水麻(*Debregeasia orientalis* C. J. Chen)和牛尾菜(*Smilax riparia* A. DC.)为优势种的群落;该群落乔木层低矮,层高 6~8 m,群落总盖度约 80%。受损治理区为 2012 年人工种植的 2 年生爆竹柳(*Salix fragilis* Linn.)群落,爆竹柳按照等高线以 2 m 间距种植,平均株高约 6 m;该群落的灌草层低矮且盖度较低(不足 20%),优势种类有小飞蓬 [*Conyza canadensis* (Linn.) Cronq.] 和川滇盘果菊 [*Notoseris henryi* (Dunn) Shih]。

## 1.2 土壤取样和分析方法

于2013年5月在2个样地坡面选取上、中、下3个坡位挖取土壤剖面,不同坡位取样点间隔约15 m;在每个坡位分别取0~10、10~20和20~40 cm 3个层次的土样并混合均匀,作为该坡位的土样;在同一等高线上距该样点左右各2 m处分别设置1个样点,采用上述方法进行重复取样,即每个坡位共取3份土样。标记土样并带回实验室,风干,过孔径1 mm土壤筛,备用。

使用马尔文 MS2000 激光粒度仪(英国马尔文仪器有限公司)测定供试土壤中各粒径颗粒的含量<sup>[19]</sup>,再根据美国土壤质地分类系统并按照颗粒直径( $d$ )将供试土壤颗粒分为 I ( $0.000 \text{ mm} < d \leq 0.002 \text{ mm}$ )、II ( $0.002 \text{ mm} < d \leq 0.050 \text{ mm}$ )、III ( $0.050 \text{ mm} < d \leq 0.100 \text{ mm}$ )、IV ( $0.100 \text{ mm} < d \leq 0.250 \text{ mm}$ )、V ( $0.250 \text{ mm} < d \leq 0.500 \text{ mm}$ )和 VI ( $0.500 \text{ mm} < d \leq 1.000 \text{ mm}$ )共6个等级,依据 $d$ 值将土壤颗粒分为砂粒( $d > 0.100 \text{ mm}$ )、粉砂粒( $0.002 < d \leq 0.100 \text{ mm}$ )和黏粒( $d \leq 0.002 \text{ mm}$ )3类,分别统计各粒径等级和各类型颗粒的含量。采用重铬酸钾氧化-外加热法<sup>[20]</sup>测定土壤中的有机质含量;采用半微量凯氏定氮法<sup>[21]</sup>测定土壤中的全氮含量。根据公式“有机碳含量=有机质含量/1.724”<sup>[20]</sup>计算土壤中的有机碳含量;并根据土壤中的有机碳含量和全氮含量计算土壤碳氮比以及植被受损治理区的土壤养分含量恢复率,计算公式为:土壤中某养分含量的恢复率=(植被受损治理区某养分含量/未受损区某养分含量) $\times 100\%$ 。

## 1.3 土壤分形维数的计算方法

基于土壤是具有自相似结构的多孔介质的特性,Tyler等<sup>[22]</sup>和杨培岭等<sup>[23]</sup>建立了土壤颗粒质量与颗粒直径的分形模型: $\frac{W(r < \bar{d}_i)}{W_0} = \left(\frac{\bar{d}_i}{\bar{d}_{\max}}\right)^{3-D}$ ,式中, $W(r < \bar{d}_i)$ 表示粒径大于 $\bar{d}_i$ ( $d_i > d_{i+1}, i=1, 2, \dots$ )的颗粒的累积质量; $W_0$ 为土壤颗粒的总质量; $\bar{d}_{\max}$ 表示最大粒径的平均直径; $\bar{d}_i = \frac{(d_i + d_{i+1})}{2}$ ;  $D$ 为土壤分形维数; $r$ 为测定维度。

对该公式两边求对数,得到公式  $\lg \left[ \frac{W(r < \bar{d}_i)}{W_0} \right] = (3-D) \lg \left[ \frac{\bar{d}_i}{\bar{d}_{\max}} \right]$ ,该公式表示若以  $\lg \left[ \frac{W(r < \bar{d}_i)}{W_0} \right]$  为横

坐标,  $\lg \left[ \frac{\bar{d}_i}{\bar{d}_{\max}} \right]$  为纵坐标拟合直线,则直线的斜率( $K$ )即为 $3-D$ ,据此求得土壤的分形维数。

## 1.4 数据统计与分析

利用 SPSS 19.0 统计分析软件对实验数据进行回归分析和相关性分析。

## 2 结果和分析

### 2.1 土壤颗粒结构和分形维数及其相关性分析

地震灾区震后植被受损治理区和未受损区(对照)不同坡位土壤颗粒的分布状况和分形维数及其相关系数见表1。

由表1可见:植被受损治理区和未受损区3个坡位的土壤均以粒径0.002~0.050 mm的颗粒为主,各坡位该级别土壤颗粒含量均在47%以上且多在63%以上;粒径为0.500~1.000 mm的土壤颗粒含量最低,均在0.82%以下。植被受损治理区各坡位土壤中大粒径和小粒径颗粒的含量大多高于未受损区,而中等粒径颗粒的含量则大体表现为植被受损治理区低于未受损区。差异分析结果显示:植被受损治理区3个坡位不同粒径土壤颗粒含量大多与未受损区无显著差异。

由表1还可见:植被受损治理区和未受损区3个坡位的土壤分形维数为2.59~2.68,与颗粒粒径的相关系数均大于0.9。植被受损治理区各坡位土壤颗粒的分形维数为2.66~2.68(均值为2.67),均高于未受损区的同一坡位(为2.59~2.62,均值为2.61)。

### 2.2 土壤颗粒组成及其与土壤分形维数的相关性分析

2.2.1 土壤颗粒组成分析 根据土壤颗粒直径( $d$ )可以将植被受损治理区和未受损区的土壤颗粒分为砂粒( $d > 0.100 \text{ mm}$ )、粉砂粒( $0.002 < d \leq 0.100 \text{ mm}$ )和黏粒( $d \leq 0.002 \text{ mm}$ )3类,植被受损治理区和未受损区(对照)不同坡位各类型土壤颗粒的含量见表2。

由表2可见:植被受损治理区不同坡位土壤的黏粒含量均显著高于未受损区( $P < 0.05$ ),其上坡位、中坡位和下坡位土壤的黏粒含量分别较未受损区相应坡位提高31%、53%和27%。植被受损治理区上坡位土壤的粉砂粒含量显著低于未受损区,降幅约为28%;而其中坡位和下坡位土壤的粉砂粒含量则与未



表 1 震后植被受损治理区和未受损区不同坡位土壤颗粒分布状况及分形维数 ( $\bar{X} \pm SE$ )<sup>1)</sup>Table 1 Distribution status and fractal dimension of soil particle at different slopes in destroyed vegetation management region and undestroyed region after earthquake ( $\bar{X} \pm SE$ )<sup>1)</sup>

坡位 <sup>2)</sup> Slope <sup>2)</sup>	不同粒径土壤颗粒含量/% <sup>3)</sup> Content of soil particle with different particle diameters <sup>3)</sup>						分形维数 Fractal dimension	相关系数 Correlation coefficient
	I	II	III	IV	V	VI		
US	12.80±0.25a	47.33±0.63b	9.39±0.21a	11.67±0.37a	17.99±1.03a	0.82±0.04a	2.66±0.00a	0.97±0.00
US <sub>0</sub>	9.81±0.76b	69.40±7.78a	9.07±1.08a	6.72±2.26b	4.79±5.06b	0.30±0.23a	2.62±0.01b	0.91±0.02
MS	14.09±1.55a	73.43±3.10a	7.36±1.71a	3.84±1.45a	1.24±0.94a	0.12±0.06a	2.68±0.02a	0.90±0.01
MS <sub>0</sub>	9.20±1.03b	70.96±4.14a	8.62±0.72a	6.41±0.94a	4.66±3.93a	0.23±0.20a	2.59±0.05a	0.91±0.01
LS	12.12±1.00a	66.69±1.95a	7.75±0.90b	6.26±1.81a	6.87±2.68a	0.32±0.20a	2.66±0.01a	0.92±0.01
LS <sub>0</sub>	9.55±0.58b	63.67±4.95a	12.06±1.53a	8.38±2.27a	6.10±1.60a	0.24±0.06a	2.62±0.01b	0.92±0.01

<sup>1)</sup> 同列中不同的小写字母表示 2 个区域间同一坡位同一指标差异显著 ( $P < 0.05$ ) Different small letters in the same column indicate the significant difference of the same index at the same slope between two regions ( $P < 0.05$ ).

<sup>2)</sup> US: 植被受损治理区上坡位 The upper slope of destroyed vegetation management region; US<sub>0</sub>: 未受损区(对照)上坡位 The upper slope of undestroyed region (CK); MS: 植被受损治理区中坡位 The middle slope of destroyed vegetation management region; MS<sub>0</sub>: 未受损区(对照)中坡位 The middle slope of undestroyed region (CK); LS: 植被受损治理区下坡位 The lower slope of destroyed vegetation management region; LS<sub>0</sub>: 未受损区(对照)下坡位 The lower slope of undestroyed region (CK).

<sup>3)</sup>  $d$ : 粒径 Particle diameter; I:  $0.000 \text{ mm} < d \leq 0.002 \text{ mm}$ ; II:  $0.002 \text{ mm} < d \leq 0.050 \text{ mm}$ ; III:  $0.050 \text{ mm} < d \leq 0.100 \text{ mm}$ ; IV:  $0.100 \text{ mm} < d \leq 0.250 \text{ mm}$ ; V:  $0.250 \text{ mm} < d \leq 0.500 \text{ mm}$ ; VI:  $0.500 \text{ mm} < d \leq 1.000 \text{ mm}$ .

表 2 震后植被受损治理区和未受损区不同坡位不同类型土壤颗粒的分布状况 ( $\bar{X} \pm SE$ )<sup>1)</sup>Table 2 Distribution status of soil particle with different types at different slopes in destroyed vegetation management region and undestroyed region after earthquake ( $\bar{X} \pm SE$ )<sup>1)</sup>

坡位 <sup>2)</sup> Slope <sup>2)</sup>	不同类型土壤颗粒含量/% Content of soil particle with different types		
	黏粒 Clay	粉砂粒 Silt	砂粒 Sand
US	12.80±0.25a	56.72±0.74b	30.48±0.71a
US <sub>0</sub>	9.81±0.76b	78.47±6.80a	11.72±7.55b
MS	14.09±1.55a	80.79±1.89a	5.12±2.55a
MS <sub>0</sub>	9.20±1.03b	79.58±4.06a	11.22±5.06a
LS	12.12±1.00a	74.43±1.74a	13.45±2.74a
LS <sub>0</sub>	9.54±0.58b	75.73±3.95a	14.73±3.93a

<sup>1)</sup> 同列中不同的小写字母表示 2 个区域间同一坡位同一指标差异显著 ( $P < 0.05$ ) Different small letters in the same column indicate the significant difference of the same index at the same slope between two regions ( $P < 0.05$ ).

<sup>2)</sup> US: 植被受损治理区上坡位 The upper slope of destroyed vegetation management region; US<sub>0</sub>: 未受损区(对照)上坡位 The upper slope of undestroyed region (CK); MS: 植被受损治理区中坡位 The middle slope of destroyed vegetation management region; MS<sub>0</sub>: 未受损区(对照)中坡位 The middle slope of undestroyed region (CK); LS: 植被受损治理区下坡位 The lower slope of destroyed vegetation management region; LS<sub>0</sub>: 未受损区(对照)下坡位 The lower slope of undestroyed region (CK).

受损区无显著差异。植被受损治理区上坡位土壤的砂粒含量显著高于未受损区,较未受损区高约 160%;而其中坡位土壤的砂粒含量显著低于未受损区,降幅约为 54%;其下坡位土壤的砂粒含量则与未受损区无显著差异。

2.2.2 颗粒组成与分形维数的相关性分析 回归分析和相关性分析结果表明:植被受损治理区和未受损

区的土壤分形维数 ( $D$ ) 与土壤的黏粒含量 ( $x$ ) 均呈极显著正相关 ( $P < 0.01$ ), 相关系数分别为 0.996 和 0.876, 其拟合回归方程分别为  $D = 2.502 + 0.013x$  和  $D = 2.290 + 0.034x$ 。由表 2 还可见: 植被受损治理区中坡位的土壤黏粒含量最高 (14.09%), 其分形维数也最高 ( $D = 2.68$ ); 未受损区中坡位的土壤黏粒含量最低 (9.20%), 其分形维数也最低 ( $D = 2.59$ )。植被受损治理区和未受损区的土壤分形维数与土壤粉砂粒含量的相关系数分别为 0.364 和 0.499, 相关性均不显著, 其拟合回归方程分别为  $D = 2.623 + 0.001x$  和  $D = 2.374 + 0.003x$ 。而植被受损治理区和未受损区的土壤分形维数与土壤砂粒含量呈显著负相关 ( $P < 0.05$ ), 相关系数分别为 -0.572 和 -0.577, 其拟合回归方程分别为  $D = 2.677 - 0.001x$  和  $D = 2.649 - 0.003x$ 。

## 2.3 土壤养分含量及其与土壤分形维数的相关性分析

2.3.1 土壤养分含量分析 植被受损治理区和未受损区(对照)不同坡位土壤有机质和全氮含量、碳氮比以及植被受损治理区土壤有机质和全氮含量的恢复率见表 3。

由表 3 可见: 植被受损治理区和未受损区(对照)间不同坡位土壤的有机质含量和全氮含量均有显著差异, 植被受损治理区各坡位土壤的养分含量均显著低于未受损区。植被受损治理区土壤的有机质和全氮含量恢复率均随坡位降低而升高, 植被受损治理区上、中、下 3 个坡位土壤的有机质含量恢复率分别为

表3 震后植被受损治理区和未受损区不同坡位土壤中主要养分含量的比较 ( $\bar{X} \pm SE$ )<sup>1)</sup>Table 3 Comparison on content of main nutrient components in soil at different slopes in destroyed vegetation management region and undestroyed region after earthquake ( $\bar{X} \pm SE$ )<sup>1)</sup>

坡位 <sup>2)</sup> Slope <sup>2)</sup>	有机质 Organic matter		全氮 Total nitrogen		碳氮比 C/N ratio
	含量/ $g \cdot kg^{-1}$ Content	恢复率/% Recovery rate	含量/ $g \cdot kg^{-1}$ Content	恢复率/% Recovery rate	
US	13.44±1.31b	27.27	0.83±0.14b	25.35	9.57±0.28a
US <sub>0</sub>	49.28±3.92a		3.25±0.14a		8.83±0.42a
MS	16.42±2.01b	28.65	0.93±0.12b	27.79	10.41±0.78a
MS <sub>0</sub>	57.29±1.73a		3.35±0.19a		9.95±0.17a
LS	20.68±2.20b	39.59	1.63±0.12b	52.66	7.45±0.50a
LS <sub>0</sub>	52.24±2.34a		3.09±0.39a		9.95±0.54a

<sup>1)</sup> 同列中不同的小写字母表示2个区域间同一坡位同一指标差异显著 ( $P < 0.05$ ) Different small letters in the same column indicate the significant difference of the same index at the same slope between two regions ( $P < 0.05$ ).

<sup>2)</sup> US: 植被受损治理区上坡位 The upper slope of destroyed vegetation management region; US<sub>0</sub>: 未受损区(对照)上坡位 The upper slope of undestroyed region (CK); MS: 植被受损治理区中坡位 The middle slope of destroyed vegetation management region; MS<sub>0</sub>: 未受损区(对照)中坡位 The middle slope of undestroyed region (CK); LS: 植被受损治理区下坡位 The lower slope of destroyed vegetation management region; LS<sub>0</sub>: 未受损区(对照)下坡位 The lower slope of undestroyed region (CK).

27.27%、28.65%和39.59%，全氮含量恢复率分别为25.35%、27.79%和52.66%。植被受损治理区上坡位和中坡位土壤的碳氮比均明显高于下坡位，但差异并不显著；而未受损区各坡位土壤的碳氮比差异却较小，且各坡位间碳氮比无显著差异。

2.3.2 养分含量与分形维数的相关性分析 回归分析和相关性分析结果表明：土壤分形维数与土壤的有机质含量和全氮含量均呈负相关，说明土壤分形维数越高土壤中的有机质含量和全氮含量越低。植被受损治理区的土壤分形维数与土壤的有机质含量和全氮含量分别呈不显著和显著负相关，相关系数分别为-0.332和-0.596，其拟合回归方程分别为  $D = 2.685 - 0.001x$  和  $D = 2.685 - 0.018x$ ；而未受损区土壤分形维数与土壤的有机质含量和全氮含量均呈极显著负相关，相关系数分别为-0.945和-0.753，其拟合回归方程分别为  $D = 2.826 - 0.004x$  和  $D = 2.942 - 0.103x$ 。植被受损治理区和未受损区的土壤分形维数与土壤的碳氮比分别呈极显著和不显著正相关，相关系数分别为0.688和0.001，其拟合回归方程分别为  $D = 2.596 + 0.008x$  和  $D = 2.576 + 0.003x$ 。

### 3 讨论和结论

#### 3.1 震后植被受损治理区与未受损区土壤颗粒类型和养分的差异

土壤质地改变对土壤的理化性质有重要影响<sup>[24]</sup>。上述研究结果表明：植被受损治理区土壤的

黏粒含量显著高于未受损区(对照)，增幅均在27%以上；不同坡位土壤的组成也有明显差异，植被受损治理区上坡位的土壤粉砂粒含量显著低于未受损区，而黏粒和砂粒含量则显著高于未受损区；中坡位的土壤砂粒含量明显低于未受损区，而黏粒和粉砂粒含量则高于未受损区；下坡位的黏粒含量显著高于未受损区，粉砂粒和砂粒含量与对照无显著差异。造成这一现象的主要原因可能是由于地震及其次生灾害使得植被遭到严重破坏，导致地表裸露；降雨造成的侵蚀作用又产生大量粉砂粒并堆积在中坡位和下坡位，导致中坡位和下坡位土壤中黏粒和粉砂粒含量增加。此外，土壤中黏粒含量增加导致土壤容重增大，使土壤出现板结、通气性差、雨水难以下渗等问题，表现为土壤储水和供水能力变差，不利于震后灾区受损植被的恢复。

震后植被受损治理区土壤的有机质含量和全氮含量均显著低于未受损区，说明震后植被受损治理区的土壤性质尚未恢复至受损前的水平。Cheng等<sup>[25]</sup>的研究结果表明：造成土壤养分大量流失的原因主要是由于地震扰动使得土壤剖面结构和质地改变、表层高腐殖性土壤流失所致。有机胶结物是形成及维持土壤结构的主要物质<sup>[24,26]</sup>，因而土壤有机质含量对土壤的结构和稳定性有重要影响。在震后对受损区进行植被恢复的过程中会有大量的植物凋落物进入土壤并转化为有机质，使土壤中有机胶结物增加，这对土壤团聚体和大颗粒团聚体有一定的形成和稳定作用。然而，虽然灾后治理区良好的水热条件有利于植

物凋落物的分解,但由于土壤黏粒的增加使得土壤变得较为板结,表层腐殖质容易被侵蚀,土壤有机质难以积累,因此植被受损治理区的土壤有机质含量在短期内并没有快速提高。实际上,由地震造成的土壤养分流失状况非常严重,在短期内土壤养分含量的恢复进程相对较慢,因此,地震灾区的生态恢复过程必然需要较长时间才能达到或接近震前水平。本研究中,植被受损治理区上坡位和中坡位土壤的碳氮比明显大于下坡位,推测其主要原因可能是由于震后不同坡位土壤有机质和全氮含量的恢复程度不同所致,上坡位和中坡位土壤的有机质和全氮含量的恢复率较为接近,但下坡位土壤全氮含量的恢复率明显高于有机质含量的恢复率,导致下坡位土壤的碳氮比较低。

### 3.2 土壤分形维数与土壤颗粒类型和养分的关系

土壤分形维数通常为 $2 \sim 3$ <sup>[27]</sup>,其数值的大小能够客观反映土壤颗粒对土壤结构分布的影响。本研究中,植被受损治理区和未受损区土壤的分形维数均为 $2.59 \sim 2.68$ ,与杨培岭等<sup>[23]</sup>和黄冠华等<sup>[28]</sup>采用相同方法测定的多种类型土壤的分形维数基本一致。土壤颗粒类型与土壤分形维数的相关性分析结果表明:土壤的砂粒含量与土壤分形维数呈显著负相关,而黏粒含量则与土壤分形维数呈极显著正相关,粉砂粒含量与土壤分形维数呈不显著正相关。本研究中,植被受损治理区和未受损区的土壤砂粒含量与土壤分形维数的相关系数为 $-0.572$ 和 $-0.577$ ,与黄冠华等<sup>[28]</sup>的研究结果有一定差异,这可能与本研究涉及的土壤颗粒为 $0 \sim 1$  mm的中小颗粒有关。土壤养分含量与土壤分形维数的相关性分析结果表明:土壤有机质含量和全氮含量均与土壤分形维数呈负相关,说明随着土壤分形维数的增大,土壤的有机质含量和全氮含量呈不断下降的趋势。随土壤中黏粒含量的增加,土壤性状发生明显变化,导致土壤的有机质含量和全氮含量有所改变。植被受损治理区土壤分形维数与土壤有机质和全氮含量的相关性均不显著,相关系数分别只有 $-0.332$ 和 $-0.596$ ,这可能与地震前后土壤养分差异较大且植被受损后的恢复速率和土壤分形维数的变化速率不一致有关。

### 3.3 震后植被受损治理区土壤分形维数变化及其应用意义

地震灾区受损植被土壤分形维数增大,主要是由地震及其次生灾害对土壤和植被的破坏作用造成的,导致植被受损区土壤养分流失、土壤中黏粒含量增

加;对植被受损区进行植被恢复有利于土壤养分的积累以及形成和改善土壤团聚体。但是,由于汶川地震造成的土壤养分流失非常严重,因此植被受损区土壤养分仍需较长时间才能达到或接近震前水平。

研究表明:土壤分形维数与土壤不同类型颗粒含量、有机质含量和全氮含量均呈明显的线性关系,说明土壤分形维数特征能客观反映土壤的结构、稳定性和肥力特征。因此,土壤分形维数可作为研究地震灾区受损植被土壤恢复的重要指标之一,可为震后植被受损区的生态恢复评价提供依据。

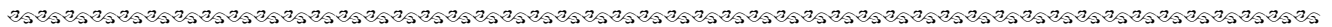
#### 参考文献:

- [1] 崔鹏,韦方强,陈晓清,等.汶川地震次生山地灾害及其减灾对策[J].中国科学院院刊,2008,23(4):317-323.
- [2] 包维楷.汶川地震重灾区生态退化及其恢复重建对策[J].中国科学院院刊,2008,23(4):324-329.
- [3] CUI P, HU K H, ZHANG J Q, et al. Prediction of debris-flow danger area by combining hydrological and inundation simulation methods[J]. Journal of Mountain Science, 2011, 8(1): 1-9.
- [4] CUI P, ZHU Y Y, HAN Y S, et al. The 12 May Wenchuan earthquake-induced landslide lakes: distribution and preliminary risk evaluation[J]. Landslides, 2009, 6(3): 209-223.
- [5] WANG Z Y, CUI P, WANG R Y. Mass movements triggered by the Wenchuan earthquake and management strategies of quake lakes[J]. International Journal of River Basin Management, 2009, 7: 1-12.
- [6] WANG Z Y, SHI W J, LIU D D. Continual erosion of bare rocks after the Wenchuan earthquake and control strategies[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2011, 40: 915-925.
- [7] ZHANG J D, HULL V, XU W H, et al. Impact of the 2008 Wenchuan earthquake on biodiversity and giant panda habitat in Wolong Nature Reserve, China[J]. Ecological Research, 2011, 26: 523-531.
- [8] 刘彬,吴福忠,张健,等.岷江干旱河谷-山地森林交错带震后生态恢复的关键科学技术问题[J].生态学报,2008,28(12):5892-5898.
- [9] 徐小军.汶川地震区新生水土流失对土壤与植被的影响[D].重庆:西南大学资源环境学院,2012.
- [10] 林勇明,俞伟,刘奕,等.汶川震区典型区不同受损阶段群落多样性特征——以北川县为例[J].北京林业大学学报,2012,34(6):75-79.
- [11] 林勇明,吴承祯,洪伟,等.汶川地震灾区典型区不同植被类型土壤种子库特征——以北川县苏保河、魏家沟流域为例[J].中国生态农业学报,2012,20(1):99-104.
- [12] 张翔,王庆安,方自力,等.汶川地震灾区自然植被恢复的先鋒植物特征分析[J].中国水土保持,2011(4):47-49.
- [13] CUI P, LIN Y M, CHEN C. Destruction of vegetation due to geohazards and its environmental impacts in the Wenchuan earthquake areas[J]. Ecological Engineering, 2012, 44: 61-69.



- [14] 李保国. 分形理论在土壤科学中的应用及其展望[J]. 土壤学进展, 1994, 22(1): 1-10
- [15] 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.
- [16] 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形特征[J]. 生态学报, 2002, 22(2): 197-205.
- [17] 贾晓红, 李新荣, 李元寿. 干旱沙区植被恢复过程中土壤颗粒分形特征[J]. 地理研究, 2007, 26(3): 518-524.
- [18] 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[J]. 生态学报, 2004, 24(1): 71-74.
- [19] 谢贤健, 韦方强. 泥石流频发区不同盖度草地土壤颗粒的分形特征[J]. 水土保持学报, 2011, 25(4): 202-206.
- [20] 中国林业科学研究院林业研究所森林土壤研究室. LY/T 1237—1999 森林土壤有机质的测定及碳氮比的计算[S]. 北京: 中国标准出版社, 1999.
- [21] 中国林业科学研究院林业研究所森林土壤研究室. LY/T 1269—1999 森林植物与森林枯枝落叶层全氮的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 1999.
- [22] TYLER S W, WHEATCRAFT S W. Fractal scaling of soil particle size distributions; analysis and limitations[J]. Soil Science Society of America Journal, 1992, 56: 362-369.
- [23] 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.
- [24] 柳云龙, 吕军, 王人潮. 低丘侵蚀红壤复垦后土壤微生物特征研究[J]. 水土保持学报, 2001, 15(2): 64-67.
- [25] CHENG S, YANG G, YU H, et al. Impacts of Wenchuan earthquake-induced landslides on soil physical properties and tree growth[J]. Ecological Indicators, 2012, 15: 263-270.
- [26] 王景燕, 胡庭兴, 龚伟, 等. 川南坡地不同退耕模式对土壤团粒结构分形特征的影响[J]. 应用生态学报, 2010, 21(6): 1410-1416.
- [27] 苏里坦, 宋郁东, 陶辉. 不同风沙土壤颗粒的分形特征[J]. 土壤通报, 2008, 39(2): 244-248.
- [28] 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.

(责任编辑: 佟金凤)



## 欢迎订阅 2015 年《植物资源与环境学报》

全国中文核心期刊 中国科技核心期刊  
中国科学引文数据库核心期刊 RCCSE 中国核心学术期刊(A)  
“中国期刊方阵”双效期刊 “江苏期刊方阵”优秀期刊

季刊, 单价 20 元, 邮发代号 28-213, 国内统一连续出版物号 CN 32-1339/S

《植物资源与环境学报》系江苏省·中国科学院植物研究所、江苏省植物学会等单位联合主办的学术期刊, 国内外公开发行。本刊为 BA、CA、CAB、Elsevier's、中国生物学文摘、中国环境科学文摘、中国科学引文数据库、万方数据——数字化期刊群、中国学术期刊(光盘版)和中文科技期刊数据库等国内外著名刊库收摘, 并被 Ulrich's 期刊指南等所收录。2013 年本刊荣获首届“江苏省新闻出版政府奖——报刊奖”及江苏省科学技术协会“精品科技期刊”称号; 2015 年荣获江苏科技期刊“精品期刊奖”。

本刊围绕植物资源与环境两个中心命题, 报道我国植物资源的考察、开发利用和植物物种多样性保护, 自然保护区与植物园的建设和管理, 植物在保护和美化环境中的作用, 环境对植物的影响以及与植物资源和植物环境有关的学科领域的原始研究论文、研究简报和综述等。凡从事植物学、生态学、自然地理学以及农、林、园艺、医药、食品、轻化工和环境保护

等领域的科研、教学、技术人员及决策者均可以从本刊获得相关学科领域的研究进展和信息。

本刊为季刊, 大 16 开本。每期定价 20 元, 全年 80 元, 全国各地邮局均可订阅。若错过征订时间或需补齐 1992 年至 2014 年各期者, 请直接与编辑部联系邮购。1992 年至 1994 年每年 8 元, 1994 年至 2000 年每年 16 元, 2001 年至 2005 年每年 24 元, 2006 年至 2008 年每年 40 元, 2009 年至 2011 年每年 60 元, 2012 年至 2015 年全年 80 元(均含邮资), 如需挂号另付邮挂费 3 元。

编辑部地址: 江苏省南京市中山门外 江苏省中国科学院植物研究所内(邮编 210014); 电话: 025-84347014; E-mail: zwzy@cnbg.net; QQ: 2219161478. 惟一投稿网址: <http://www.cnbg.net/Tg/Contribute/Login.aspx>.

欢迎订阅! 欢迎投稿!