

文章编号: 1008 - 2786 - (2019)1 - 030 - 11

DOI: 10. 16089/j. cnki. 1008 - 2786. 000396

# 北川震后滑坡体表层土壤颗粒组成及 团聚体空间变化特征

麦积山<sup>1,2</sup>, 郑江坤<sup>1\*</sup>, 赵廷宁<sup>3</sup>, 史常青<sup>3</sup>, 王文武<sup>1</sup>

(1. 四川农业大学林学院 四川省高校水土保持与荒漠化防治重点实验室, 成都 611130;

2. 四川蜀禹水利水电工程设计有限公司, 成都 610072; 3. 北京林业大学 水土保持学院, 北京 100086)

**摘 要:** 滑坡作为西南地区常见的地质灾害, 对坡面土壤结构和植被扰动极大。本文以北川擂鼓镇凤凰山震后滑坡体表层土壤为研究对象, 选取滑坡区(Ⅰ)、过渡区(Ⅱ)和未破坏区(Ⅲ) 3 个样地, 结合网格取样和室内分析, 运用地统计学和经典统计学方法对其颗粒组成和土壤团聚体特征进行分析。结果表明: (1) 3 样地的土壤颗粒组成均以砂粒为主, 显著大于黏粒和粉粒。土壤颗粒组成分形维数与砂粒含量呈极显著性负相关, 与黏粒和粉粒含量均呈极显著性正相关。(2) Ⅰ样地中 >5 mm 的风干性团聚体含量最低, Ⅲ最高。3 样地的土壤水稳性团聚体均以 >2 mm 的粒径为主, 总体上呈现出团聚体数量随粒径的减小而减小的趋势。风干和水稳性土壤团聚体的平均重量直径(MWD)和几何平均直径(GMD)值均表现为Ⅰ样地 < Ⅱ样地 < Ⅲ样地, 风干性团聚体分形维数表现为Ⅰ样地 ≈ Ⅱ样地 > Ⅲ样地, 水稳性团聚体分形维数表现为Ⅰ样地 > Ⅱ样地 > Ⅲ样地。(3) 风干和水稳性团聚体稳定性参数和土壤颗粒组成的半方差函数理论模型拟合程度均较好。除水稳性土壤团聚体 MWD 表现为中等强度空间自相关外, 其他团聚体稳定性参数均表现为强烈空间自相关性; 黏粒表现为中等空间自相关性, 粉粒和砂粒表现为强烈的空间自相关。(4) 风干和水稳性土壤团聚体 MWD 和 GMD 值从Ⅰ样地至Ⅲ样地大致呈逐渐增加趋势, 而土壤团聚体分形维数则呈相反分布规律; 土壤颗粒组成从Ⅰ样地至Ⅲ样地呈砂粒含量逐渐减少而黏粒含量逐渐增加的规律。综上, 滑坡体表层黏粒土壤大量流失后, 表层土壤沙砾化, 土壤团聚体的稳定性降低, 表现出较强的结构性空间自相关。

**关键词:** “5. 12”汶川地震; 滑坡体; 土壤团聚体; 土壤颗粒组成; 空间分布

**中图分类号:** S 153. 6

**文献标志码:** A

地震诱发崩塌、滑坡等次生山地灾害, 造成严重的人员伤亡和生态环境破坏<sup>[1, 2]</sup>。滑坡造成大量表层土壤流失和植被破坏, 破坏土壤团聚体, 改变土壤质地和理化性质, 导致滑坡后的坡面土壤质量严重下降、植被资源衰退等一系列生态环境问题, 同时也

影响到居民点的震后重建<sup>[3, 4]</sup>。土壤团聚体作为土壤物质和能量的转化及代谢场所, 其含量和分布状况必然影响土壤质量和肥力状况, 而土壤颗粒组成将决定土壤的通气透水、调节水肥和温度等功能, 进而影响土壤的理化性质和生物学过程<sup>[5, 6]</sup>。

**收稿日期**(Received date): 2016 - 11 - 19; **改回日期**(Accepted date): 2018 - 11 - 11

**基金项目**(Foundation item): 国家自然科学基金项目(41601028, 41671277); 国家林业局公益性行业科研专项经费项目(201104109); 中国博士后科学基金面上项目(2012M511938)。[National Natural Science Foundation of China (41601028, 41671277); Special Funds for Scientific Research Project of Public Welfare Industry of State Forestry Administration (201104109); General Program of China Postdoctoral Science Foundation (2012M511938)]

**作者简介**(Biography): 麦积山(1991 -), 男, 四川绵阳人, 硕士, 助理工程师, 主要从事水土保持的研究。[MAI Jishan(1991 -), male, born in Mianyang city of Sichuan province, M. Sc. research on soil and water conservation]E-mail: 358418282@qq.com

\* **通讯作者**(Corresponding author): 郑江坤(1982 -), 男, 河北邢台人, 博士, 副教授, 主要从事生态水文的研究。[ZHENG Jiangkun(1982 -), male, born in Xingtai city of Hebei province, Ph. D, associate professor, research on eco-hydrology]E-mail: jiangkunzheng@126.com

土壤是一个时空连续的变体,有高度的空间异质性<sup>[7-8]</sup>。近年来,国内外对土壤空间异质性的研究主要集中在农田<sup>[9]</sup>、林地<sup>[10]</sup>和小流域<sup>[11-12]</sup>等区域,而对于滑坡体这类特殊区域涉及较少。

汶川震后滑坡体表层土壤饱和水含量、毛管持水含量、田间持水量、总孔隙度和毛管孔隙度均低于对照区,而土壤容重却大于对照区,说明滑坡体土壤变得夯实和干燥<sup>[13]</sup>。同时滑坡体表层土壤的通气、透水性能以及土壤质量指标(土壤质地、有机质和矿质元素含量等)总体呈下降趋势<sup>[14-15]</sup>。进而导致滑坡体区域地表径流的增加、土壤侵蚀加剧<sup>[16]</sup>。因此,开展震后滑坡体的土壤调查是灾后水土保持和生态重建的必要环节和前提。

目前,地震诱发的滑坡对土壤物理性质的影响程度及其在空间上的变异特征等问题尚不清楚,导致无法充分认识滑坡体土壤性质特征和震后滑坡对土壤的扰动程度,不利于灾后生态恢复。本文以5.12汶川地震衍生的北川县擂鼓镇凤凰山滑坡体为研究对象,运用经典统计学和地统计学方法分析其土壤颗粒组成及团聚体的空间变异特征,旨在揭示震后滑坡对滑坡体上土壤物理结构性质的影响及空间变异特征,为维系区域生态安全、构筑区域生态屏障提供有效途径。

## 1 研究区域及研究方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于四川省绵阳市北川县(103°44′~104°44′E,31°41′~32°14′N),境内大地构造以北川大断裂地段为界,东南面属龙门山断裂带,西北面属后龙门山断裂带;该地峰峦起伏,沟壑纵横,山脉大致以白什、外白为界,地势西北高,东南低,最高峰海拔4769 m,最低点海拔540 m,密布的溪流顺山势自西北向东南奔流出境;境内主要土壤类型为黄壤土、黄棕壤、暗棕壤、亚高山草甸土和高山草甸土,植被呈带状分布,主要有常绿阔叶林、常绿落叶混交林、针阔叶混交林、高山和亚高山草甸。该地区属亚热带湿润季风气候,多年平均气温15.6℃,平均降雨量1399 mm,降雨集中在6—9月,占全年降雨量的71%~76%,且空间分布不均。擂鼓镇全境皆山,土壤质地以砾石土为主,次为壤土和黏土,粗骨性

强,地质条件差,水文条件复杂,山体岩石破碎,沟谷谷坡较大,是滑坡崩塌泥石流易发区。全镇各类森林面积10000 hm<sup>2</sup>左右,其中天然林7333 hm<sup>2</sup>,人工林2666 hm<sup>2</sup>,森林覆盖率76%。

滑坡体位于擂鼓镇石岩村二社凤凰山(31°46′24″N、104°25′24″E),该堆积体平面形态呈不规则“撮箕”形,前缘陡峭斜坡临空,中部有隆起平台,后缘有崩滑陡壁。主滑方向南偏西44°,滑坡轴斜长749 m,平均长420 m;前缘宽450 m,平均宽400 m,平均厚度60 m,面积1.68×10<sup>5</sup> m<sup>2</sup>,体积1.08×10<sup>7</sup> m<sup>3</sup>,为特大整体滑移型滑坡体。滑坡体顺滑动方向整体呈上陡、中缓、下陡的形态,可分为两阶滑移平台。堆积体前部属平台和斜坡地貌,后侧为平台地形,长约450 m,宽120 m。堆积体前缘为老场口河,距离北川县擂鼓镇约1 km<sup>[17]</sup>。实验区位于前缘陡峭斜坡,属强风化灰岩和白云质灰岩的风化块体,土壤类型为砾质石灰土。

### 1.2 样地设置与样品采集

实验区滑坡前为柏木(*Cpuresus funebris*)次生林,郁闭度高。地震后植被及表层土壤流失殆尽,地表砾石裸露。2010和2011年在当地政府和部分国际组织资助下,采取了工程固坡和灌草措施,一定程度上控制了该区的水土流失。由表1和图1可知,I样地为滑坡区,2011年按2 m×4 m的株行距人工栽植刺槐幼苗;II样地为滑坡区和未破坏区之间的过渡区域,存在少量面蚀和沟蚀,多有灌草植被分布;III样地是未破坏区,植被为柏木次生林<sup>[3]</sup>。2013年7月,利用森林罗盘仪(DQL-1)和海拔仪(Magellan-500E),基于网格法布置45个样点(图1),然后在每个样点附近再选取2点位,用土铲削去地表覆盖物,露出土壤,分别用土铲和自制的原状土取样器分别取表层20 cm×20 cm×10 cm混合土样和原状土带回实验室,其中原状土中较大的土块按其天然破碎面轻轻掰开成直径1 cm左右的小土块,样品风干后,将土壤中的植物落叶、残根、砾石、动物残体等挑出待测<sup>[18]</sup>。同时,在每个样点用手持GPS定位,并记录下海拔、经纬度、坡度、人为干扰等信息。土壤颗粒组成和土壤团聚体参照森林土壤分析方法进行测定<sup>[19]</sup>。根据国际标准划分黏粒、粉粒和砂粒。

表 1 样地基本情况

Tab. 1 Basic information of the plots

样地号 Plot No.	类型 Plot types	坡度 Slope/°	土壤颗粒组成 Soil particle composition/%			样地情况 Plot description
			黏粒 Clay	粉粒 Silt	砂粒 Sand	
I	滑坡区	27	10.30	5.60	84.10	坡脚格宾护坡,坡面沙袋和木栅栏挡护
II	过渡区	25	12.10	7.70	80.20	顺坡有多道深沟,地形破碎
III	未破坏区	26	13.10	10.00	76.90	柏木次生林,胸径 10 cm 左右

注: I 为滑坡体 Landslide area; II 为过渡区 Transition zone; III 为未破坏区 Vegetation zone. 下同 The same below.



图 1 研究区采样点布设

Fig. 1 Soil sampling locations in the research area.

### 1.3 数据处理

(1) 土壤团聚体几何平均直径 (Geometric Mean Diameter, GMD) 计算公式<sup>[20]</sup>:

$$D_{WD} = E_{xp} \left[ \frac{\sum_{i=1}^n \omega_i \ln R_i}{\sum_{i=1}^n \omega_i} \right] \quad (1)$$

(2) 土壤团聚体平均重量直径 (Mean Weight Diameter, MWD) 计算公式<sup>[20]</sup>:

$$D_{MW} = \sum_{i=1}^n (\bar{R}_i \omega_i) / \sum_{i=1}^n \omega_i \quad (2)$$

式中:  $\bar{R}_i$ , 某级团聚体平均直径;  $\omega_i$ , 粒级团聚体重量所占的比例。

(3) 分形维数 (Fractal Dimension, D) 的计算公式为<sup>[21]</sup>:

$$\lg \left[ \frac{M(\delta < \bar{d}_i)}{M_T} \right] = (3 - D) \lg \left( \frac{\bar{d}_i}{d_{\max}} \right) \quad (3)$$

其中:  $D_{WD}$ , 土壤团聚体几何平均直径;  $D_{MW}$ , 土壤团聚体平均重量直径;  $\bar{d}_i$ , 某级土壤颗粒平均直径;  $M(r < \bar{d}_i)$ , 粒径小于  $\bar{d}_i$  的土壤颗粒的重量,  $M_T$ , 土壤颗粒总重量;  $d_{\max}$ , 土壤颗粒的最大粒径。

本实验数据使用 K-S (Kolmogorov-Smirnov) 检验法分析数据是否符合正态分布 (显著性水平  $\alpha = 0.05$ ), 以确保数据符合 Kriging 空间插值要求<sup>[18]</sup>; 采用 GS + Version 9.0 软件进行半方差函数分析和块金值 ( $C_0$ )、基台值 ( $C_0 + C$ )、块基比 [ $C_0 / (C_0 + C)$ ] 和变程 ( $A$ ) 等参数的计算, 模拟出来的模型参数作为 Kriging 插值依据; 采用 Arcgis10.0 软件进行 Kriging 等值线绘制, 进行空间分析<sup>[18]</sup>。方差、相关性分析等采用 SPSS17.0 进行处理。

块基比 [ $C_0 / (C_0 + C)$ ] 表示随机因素的空间异质性占总系统总变异的大小和土壤性质的空间依赖性, 该比值较高, 表明其变异主要由随机部分造成的, 反之则说明其变异主要由结构性因素引起, 如果该比值接近 1, 那么该变量在整个尺度上具有恒定的变异。大量研究结果表明: 当  $C_0 / (C_0 + C) < 25\%$  时, 变量具有强烈空间相关性; 当  $25\% < C_0 / (C_0 + C) < 75\%$  时, 变量具有中等空间相关性; 当  $C_0 / (C_0 + C) > 75\%$  时, 变量具有弱空间相关性<sup>[22]</sup>。同时, 半变异函数的残差 (RSS) 越小、决定系数 ( $R^2$ ) 越大, 则表明函数的拟合程度越好<sup>[23]</sup>。

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤颗粒组成及其与分形维数的关系

土壤质地是重要的土壤物理性质, 与土壤保水、保肥、通气等关系密切。如表 2 所示, 各样地土壤颗粒组成中砂粒含量最高 (均大于 75%), 显著大于粉粒和黏粒 ( $p < 0.05$ ), 粉粒含量最低 (均小于 11%), 粉粒和砂粒含量之间差异不显著。黏粒和砂粒含量中, 3 个样地间差异不显著; 粉粒含量中 I 样地显著小于 II 样地和 III 样地。

土壤颗粒分形维数与土壤质地关系密切, 反映

不同粒级土壤颗粒分布情况。由图2可知,黏粒含量与  $D$  值呈极显著性对数正相关 ( $R^2 = 0.985$ ,  $p < 0.01$ ),其方程的决定系数  $R^2$  最大,说明  $D$  值受黏粒含量的影响最大。粉粒含量与  $D$  值呈正相关,但拟合效果较差 ( $R^2 = 0.290$ )。砂粒含量与  $D$  值呈极显著负相关 ( $R^2 = 0.725$ ,  $p < 0.01$ )。当黏粒含量少于6时, $D$  值随黏粒含量的增加而陡增,然后增加幅度逐渐变缓。当砂粒含量大于65%左右时, $D$  值随砂粒含量的增加而递减<sup>[18]</sup>。总之,土壤中黏粒等细颗粒含量越高,土壤质地越细,其分形维数越高。

表2 不同样地土壤颗粒组成

Tab.2 Soil particle composition of different sample plots.

样地编号	黏粒含量/%	粉粒含量/%	砂粒含量/%
I	8.50 ± 7.30 aA	4.40 ± 3.40 bA	87.10 ± 8.70 bB
II	12.10 ± 7.40 aA	7.70 ± 4.10 aAB	80.20 ± 10.10 bB
III	12.70 ± 8.30 aA	10.80 ± 4.60 aA	76.50 ± 10.80 bB

注:同行不同大写字母表示同一样地不同粒级间差异显著 ( $p < 0.05$ );同列不同小写字母表示同一粒级不同样地间差异显著  
The different uppercase letter (s) within a given plot are significantly different among different soil size fractions at the level of  $p < 0.05$ . The different lowercase letter (s) within a given soil size fraction are significantly different among different plots at the level of  $p < 0.05$ . 下同  
The same below.

## 2.2 土壤团聚体数量及其稳定性参数特征

### 2.2.1 风干性土壤团聚体数量特征

土壤团聚体作为土壤物质和能量的转化及代谢场所,其含量和分布状况必然影响土壤质量和肥力状况<sup>[4]</sup>。由表3可知,在三个样地中各粒径风干性土壤团聚体含量存在显著性差异<sup>[18]</sup>。I样地中各粒径团聚体含量较一致,其中1~0.5 mm 团聚体含量最高,达25.93%,且与>5mm 和0.5~0.25 mm 的团聚体含量呈显著性差异;II样地中>5 mm 和5~2 mm 的团聚体含量与其他粒径的土壤团聚体含量差异显著;III样地中>5 mm 和5~2 mm 的团聚体含量与其他各粒径团聚体含量均存在显著性差异,而<2 mm 的各粒径团聚体含量之间均无显著性差异。II样地和III样地中>5 mm 的土壤团聚体含量最高,分别为41.25%和47.84%,且显著高于I样地。

### 2.2.2 水稳性土壤团聚体数量特征

土壤水稳性团聚体是保持土壤结构稳定的重要

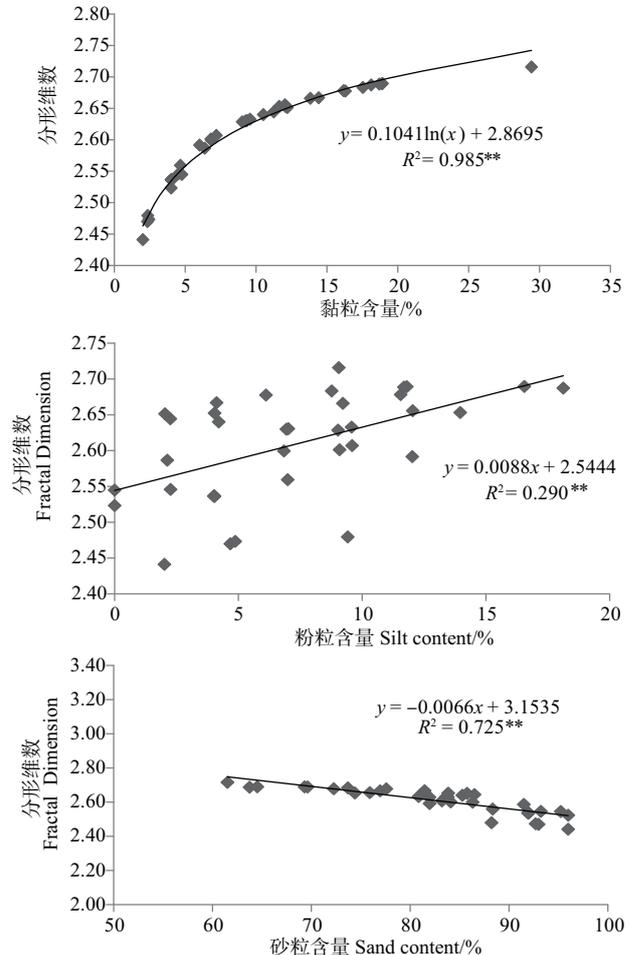


图2 不同粒级与土壤质量分形维数的关系

Fig.2 Correlation between different soil size fraction land soil quality fractal dimension

物质,是衡量土壤抗侵蚀能力的指标之一。由表4可知,>2 mm 土壤水稳性团聚体含量在三个样地中的比例均最高,其中II样地最高,I样地最低,分别为67.05%和29.34%,且II样地、III样地中>2 mm 的水稳性团聚体含量显著大于其他各粒级含量。同时,在I中的各粒级水稳性团聚体含量分别与II、III样地中对应粒级团聚体含量存在显著性差异,II样地、III样地中各对应粒级水稳性团聚体含量之间无显著性差异。土壤水稳性团聚体含量随团聚体粒径减小呈逐渐减少趋势。

土壤中>0.25 mm 的土壤水稳性团聚体是土壤中最好的结构体,通常被称作土壤团聚结构体,其数量往往决定土壤稳定性状况。综合来看,本研究中>0.25 mm 的土壤团聚体含量顺序为I样地<III样地<II样地,II样地和III样地中>0.25 mm 土壤团聚体含量明显大于I样地,表明滑坡对土壤团聚体的破坏较大。

表 3 土壤风干团聚体粒径分布特征

Tab. 3 Particle size distribution of soil dry aggregates under different sample plots

样地编号	土壤团聚体粒径分布/%					
	>5 mm	5~2 mm	2~1 mm	1~0.5 mm	0.5~0.25 mm	<0.25mm
I	10.82aA	15.96aAB	16.40aAB	25.93aB	8.11aA	22.79aB
II	41.25bA	33.01bA	8.39bB	10.24bB	2.38bB	4.73bB
III	47.84bA	28.23abB	6.99bC	7.56bC	2.53bC	5.86bC

表 4 土壤水稳性团聚体粒径分布特征

Tab. 4 Size distribution of water-stable aggregate in soil of different sample types

样地编号	土壤团聚体粒径分布/%				
	>2mm	2~1mm	1~0.5mm	0.5~0.25mm	<0.25mm
I	29.34aA	24.81aAB	20.96aAB	11.97aB	12.12aB
II	67.05bA	14.15bB	8.45bB	5.77bB	4.57bB
III	61.31bA	14.34bB	12.10abB	6.27bB	5.95bB

### 2.2.3 土壤团聚体稳定性特征

不同粒级的土壤团聚体对土壤的保持与供应、水力性质、孔隙组成和生物运动等均具有不同的作用,所以在团聚体总量的基础上,土壤团聚体的大小分布情况和土壤的质量之间存在更加紧密的关系。通常用土壤团聚体的 MWD 和 GMD 这两个指标来反映团聚体大小分布状况,其值越大,表示土壤团聚体的团聚度越高,稳定性越好。从表 4 可知,干筛处理下,三样地的 MWD 值和 GMD 值的变化顺序均为: I 样地 < II 样地 < III 样地,且 I 样地与 II 样地、III 样地均存在显著性差异, I 样地的 MWD 值较 II 样地、III 样地分别减少 52.6% 和 54.3%, GMD 值较 II 样地、III 样地分别减少 58.0% 和 59.1%。这表明滑坡对土壤团聚体大小分布状况影响较大。

湿筛处理下, I 样地与 II 样地、III 样地的水稳性团聚体 MWD、GMD 值存在显著性差异, II 样地和 III 样地无显著性差异,其中 I 样地的 MWD 和 GMD 值最小,分别为 1.14 和 0.96 且 MWD 值较 II 样地、III 样地分别减少 26.9% 和 30.5%, GMD 值较 II 样地、III 样地分别减少 32.4% 和 35.6%。II 样地和 III 样地的稳定性较好, I 样地的稳定性最差,说明滑坡对破坏土壤稳定性的影响较大。三种样地干筛法测得的 MWD 值分别是湿筛法 MWD 值的 1.43、2.20 和 2.18 倍, GMD 值分别是湿筛法的 1.26、2.03 和 1.99 倍。这是风干性团聚体在水的浸泡作用下,大量非水稳性团聚体发生分解而造成的,所以用风干性团

聚体的 MWD 和 GMD 来反映土壤团聚体质量差异不够精确,而用水稳性团聚体的 MWD 和 GMD 评价土壤团聚体实际情况更具说服力。土壤团聚体粒径分布的分形维数表征土壤水稳性团聚体对土壤结构与稳定性的影响,也就是其分形维数越小,土壤结构和稳定性越强,抗蚀能力越好。由表 5 可知,三种样地的土壤团聚体分形维数相比, I 样地与 II 样地、III 样地均存在显著性差异, II 样地与 III 样地之间无显著性差异。干筛处理下, I 样地的分形维数最大(2.47), II 样地和 III 样地均为 2.10,说明 I 样地的土壤团聚体状况最差。这是由于滑坡对表层土壤的巨大机械扰动,严重破坏分散土壤团聚体,所以非水稳性团聚体的分形维数显著大于其他两个样地。水稳性团聚体分形维数的变化顺序为 I (2.17) > II (1.99) > III (1.86),其中 I 样地的分形维数值显著大于 II 样地与 III 样地, II 样地与 III 样地间无显著性差异。由此可见, I 样地表层土壤受滑坡扰动影响而导致土壤抗蚀能力最弱, II 样地次之, III 样地最强。

## 2.3 土壤颗粒组成及团聚体稳定性参数的空间结构特征

### 2.3.1 土壤颗粒组成空间结构分析

由表 6 可知,研究区内黏粒含量的最优半方差函数拟合模型为球状模型,粉粒和砂粒含量的最优拟合模型均为指数模型,且三种粒径拟合的模型决定系数较大,残差很小,能够有效地反映土壤颗粒的

空间特征。

3 种粒径的土壤颗粒块金值均很小,分别为 0.0028、0.0001 和 0.0008,变程之间差距不大,其中黏粒最大(94.8 m),粉粒最小(57.5 m),即它们的空间自相关性距离差距较小。黏粒的块基比为 45.9%,表现为中等空间相关性。粉粒和砂粒的块基比均小于 25%,表现为强烈空间自相关性,说明其空间变异主要受结构性因素的影响,而随机性部分影响较小。

2.3.2 土壤团聚体稳定性参数空间结构分析

利用地统计学方法分析各土壤指标的空间变化特征。由表 7 可知,干筛处理下,MWD 和 GMD 的最优半方差函数拟合模型为高斯模型,D 的最优拟合为球状模型。湿筛处理下,MWD 的最优拟合模型为线性模型,GMD 和 D 的最优拟合为指数模型。

两种处理方式下土壤团聚体稳定性参数的块金值均较小,说明由实验或采样尺度误差引起的随机变异较小,且参数拟合模型的拟合程度较好,都能较好地反映其空间变异特征。

土壤团聚体稳定性参数的变程顺序为:干筛 GMD(382.3 m) > 干筛 MWD(364.6 m) > 湿筛 MWD(147.6 m) > 湿筛 D(99.6 m) > 干筛 D(73.4 m) > 湿筛 GMD(69.9 m),其中干筛 GMD 的变程最大,说明其空间连续性较好,可能需要更小尺度的分析。湿筛 D、干筛 D 和湿筛 GMD 变程之间的差距很小,即其空间自相关性的距离差距较小。各稳定性参数的块基比中除了湿筛 MWD 为中等强度空间自相关以外,其余各团聚体稳定性指标的块基比均小于 25%,表现为强烈空间自相关性。

表 5 不同样地土壤团聚体稳定性参数

Tab 5 Stability parameters of soil aggregates under different sample plots

样地编号	干筛			湿筛		
	MWD/mm	GMD/mm	D	GMD/mm	GMD/mm	D
I	1.63a	1.21a	2.47a	1.14a	0.96a	2.17a
II	3.44b	2.88b	2.10b	1.56b	1.42b	1.99b
III	3.57b	2.96b	2.10b	1.64b	1.49b	1.86b

注: 同列不同字母表示差异显著  $p < 0.05$ 。Note: Different letters in the same column mean significant different at level of  $p < 0.05$ .

表 6 土壤颗粒组成半方差函数模型及相关参数

Tab. 6 Semi-variogram models and their parameters of soil particle composition

粒径	模型	块金值 $C_0$	基台值 $C_0 + C$	块金值/ 基台值 $C_0 / (C_0 + C)$	变程 $A/m$	决定系数 $R^2$	残差 $RSS$
黏粒	球状	0.28E-02	0.61 E-02	0.46	94.80	0.87	2.60E-06
粉粒	指数	0.01E-02	0.19 E-02	0.00	57.50	0.45	3.50E-05
砂粒	指数	0.08E-02	1.00 E-02	0.08	77.60	0.68	2.10E-05

表 7 土壤团聚体稳定性参数半方差函数模型及相关参数

Tab. 7 Semi-variogram model and parameter of soil aggregate stability parameter

参数	模型	块金值 $C_0$	基台值 $C_0 + C$	块金值/ 基台值 $C_0 / (C_0 + C)$	变程 $A/m$	决定系数 $R^2$	残差 $RSS$
干筛 MWD	高斯	0.64	3.29	0.19	364.60	0.56	0.71
干筛 GMD	高斯	0.61	3.22	0.19	382.30	0.74	0.25
干筛 D	球状	0.01	0.06	0.19	73.40	0.65	2.30E-04
湿筛 MWD	线性	0.08	0.12	0.65	147.60	0.33	2.10E-03
湿筛 GMD	指数	0.00	0.14	0.00	69.60	0.36	2.30E-03
湿筛 D	指数	0.02	0.13	0.15	99.60	0.65	1.32E-03

这表明土壤团聚体稳定性参数具有重要的空间结构,其空间变异主要受结构性部分的影响。

## 2.4 土壤颗粒组成及团聚体稳定性参数空间分布格局

### 2.4.1 土壤颗粒组成空间分布

由图 3 可知,研究区表层土壤黏粒含量呈斑块状分布,低值区位于研究区左侧,含量为 17.9% ~ 29.4% 的高值区主要位于研究区右上侧,黏粒含量整体表现为从左至右逐渐增加的分布规律。粉粒含量分布相对比较均匀,总体表现为从左至右逐渐增加的分布规律,但其渐变幅度较小,含量为 1.0% ~ 3.3% 的低值区位于研究区左侧,其面积约占总面积的 25%。砂粒含量表现出与黏粒和粉粒相反的空间分布规律,总体来看土壤砂粒含量最高均大于 60%。通过比较图 3a 和图 3c,研究区中砂粒含量的高值区与黏粒含量的低值区有着较明显的互补关系。

### 2.4.2 土壤团聚体稳定性参数空间分布

基于半方差函数分析基础上,利用克里金插值法绘制出土壤团聚体稳定性参数的空间分布图。由

图 4 可知,对于研究区整体而言,干筛和湿筛的 MWD 和 GMD 值大致呈现出从左至右(由 I 至 III)逐渐增加的分布规律,干筛和湿筛的 D 值与 MWD 和 GMD 值的空间分布规律大致相反。干筛 MWD 值中的 0.44 ~ 1.6 低值区主要位于研究区左侧,高值区位于研究区右上角。干筛 GMD 值的空间分布规律与干筛 MWD 基本一致,其中 GMD 值为 1.12 ~ 3.30 的面积所占比例最大。其 D 值为 2.46 ~ 2.77 范围的高值区位于研究区左侧,呈现出从左至右逐渐递减的条带状分布格局。湿筛处理下, MWD 和 GMD 的空间分布格局非常相似,均表现为从左至右逐渐增加的带状分布,其低值区均位于研究区左侧,高值区位于研究区右上侧,且高值区的面积大于低值区。其 D 值为 2.35 ~ 2.56 的高值区位于研究区左上侧, D 值为 1.31 ~ 1.49 的低值区位于研究区右侧。

## 3 结论与讨论

### 3.1 土壤颗粒组成及空间分布特征

土壤颗粒组成可表征土壤质地、结构组成和土

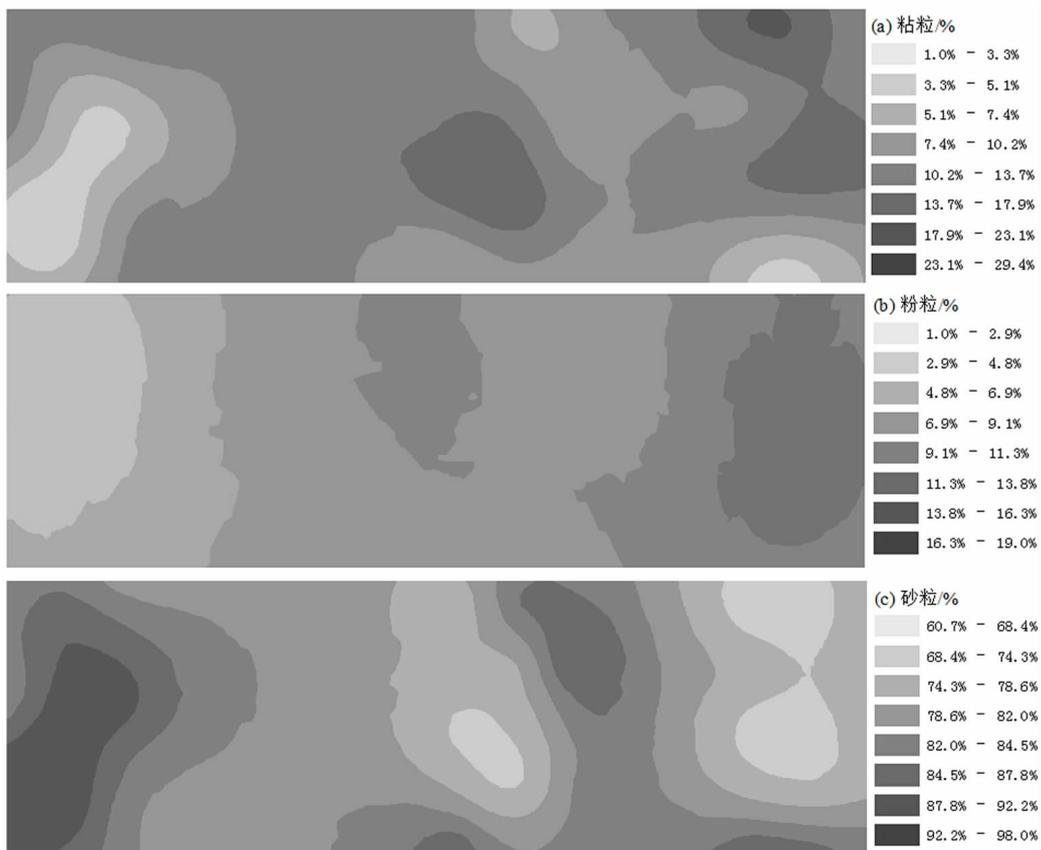


图 3 土壤颗粒组成空间分布

Fig. 3 Spatial distribution maps of soil particle composition

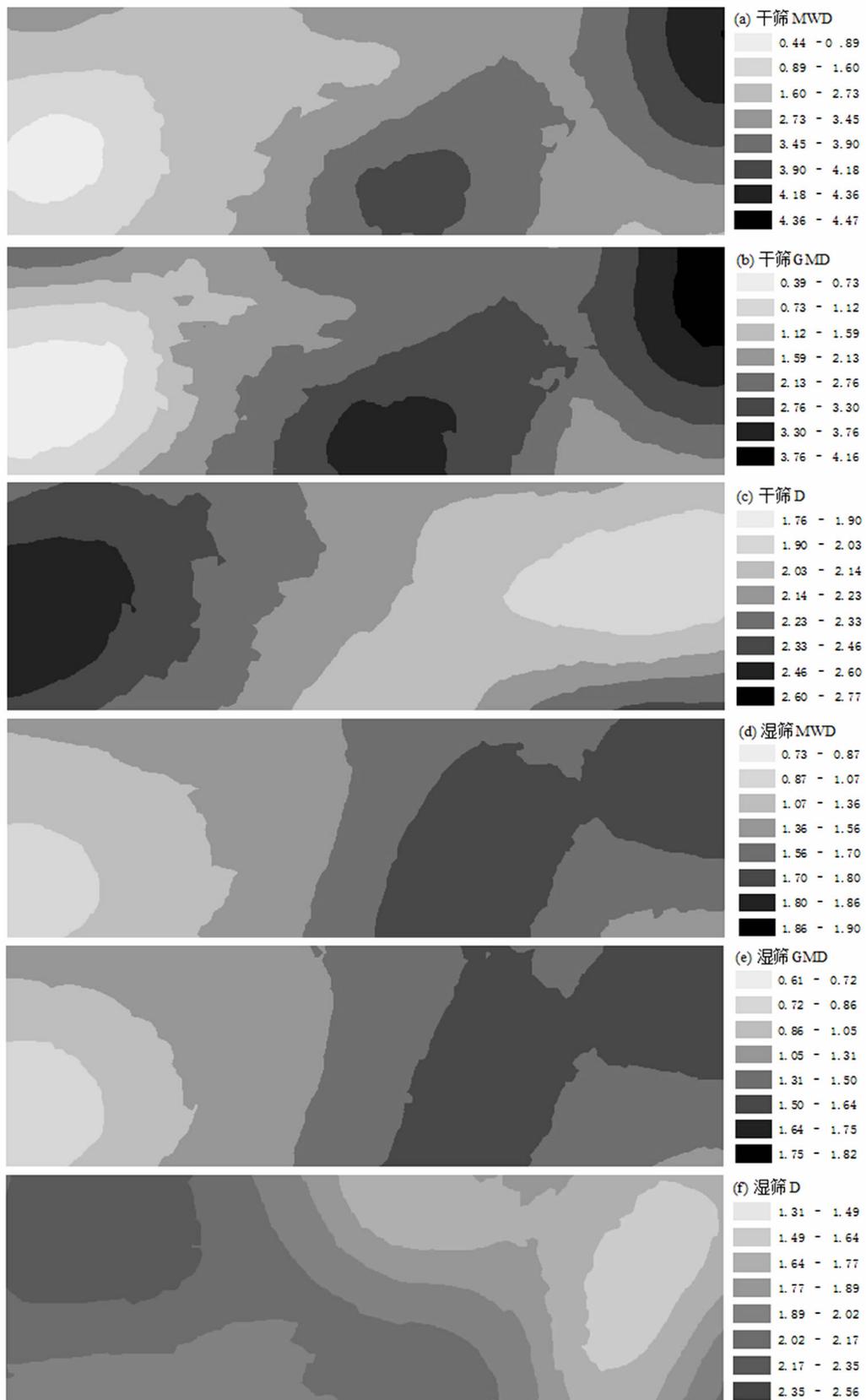


图 4 土壤团聚体稳定性参数空间分布图

Fig. 4 Spatial distribution maps of soil aggregate stability parameter

壤通透性等结构组成特征。本研究得出土壤颗粒质量分形维数  $D$  值与砂粒含量呈极显著性负相关,与黏粒和粉粒含量呈极显著性正相关,这与党爱亚等<sup>[24]</sup>在黄土高原典型土壤剖面的研究结果较为一致;石占飞等<sup>[25]</sup>也认为  $D$  值与黏粒、粉粒和砂粒的质量百分比含量均呈极显著性相关。滑坡区表层土壤受滑坡扰动影响大,大量土壤细颗粒物随滑坡而流失,植被破坏严重,地表处于裸露状态,造成表层土壤细颗粒被降雨冲刷和风蚀,不利于成土作用,所以该位置土壤颗粒以粒径较大的砂粒为主;过渡区尽管发育有几道冲沟,但坡面养分含量高,坡度中部灌草植被覆盖率高,对土壤细颗粒物质的拦截富集作用优于上坡位和下坡位,因而过渡区中间位置的黏粒含量较高,未破坏区土壤黏粒和粉粒所占比例较大,坡面分布较均匀,这是由于高密度柏木次生林减少了坡面水土流失,通过凋落物分解和根系改善了土壤粒径组成结构,同时大量的土壤动物也起到积极的作用。

滑坡区山体裸露率大,坡度较陡,水土流失现象将会持续发生,而目前以人工石笼、沙石袋护坡和栽植刺槐幼苗等简单粗放的治理措施为主进行治理,生态恢复效果较差。可采用铺设生态毯防护技术来有效固定地震滑坡区的石砾和土壤颗粒,增加坡面粗糙度,改善土壤通气透水等水热条件,促进植被恢复,增加土壤养分含量、增强土壤微生物和植被根系活性,逐渐提高土壤养分含量<sup>[26]</sup>。

### 3.2 土壤团聚体分布特征及稳定性特征

滑坡区受到外营力扰动,地表土体松散,加上实施了大量水土保持工程,人为干扰严重,大粒径的土壤团聚体被破碎分散, $>5$  mm 的土壤团聚体含量明显低于过渡区和未破坏区,土壤团聚体的稳定性下降,土壤水稳性团聚体和风干性团聚体的变化特征基本一致,风干性团聚体的 MWD 和 GMD 值均比水稳性团聚体大,这与谭秋锦等<sup>[27]</sup>的研究结果一致。滑坡区大量土壤黏粒、有机质等土壤团聚体的胶结剂损失,进而导致土壤团聚体稳定性降低,土壤抗蚀能力下降。过渡区和未破坏区植被覆盖度高,地表枯落养分归还,增加土壤有机质含量,且植被根际微生物量丰富,而土壤有机质、黏土矿物和菌丝等是促进土壤团聚体的形成和提高团聚体稳定性的主要胶结物质<sup>[28, 29]</sup>。

### 参考文献 (References)

[1] 崔鹏, 韦方强, 何思明, 等. 5·12 汶川地震诱发的山地灾害及减

灾措施[J]. 山地学报, 2008, 26(3): 280 - 282. [ CUI Peng, WEI Fangqiang, HE Siming, et al. Mountain disasters induced by the earthquake of May 12 in Wenchuan and the disasters mitigation [J]. Mountain Research, 2008, 26(3): 280 - 282. ]

- [2] 殷跃平. 汶川八级地震滑坡特征分析[J]. 工程地质学报, 2009, 17(1): 29 - 38. [ YIN Yueping. Features of landslides triggered by the Wenchuan earthquake [J]. Journal of Engineering Geology, 2009, 17(1): 29 - 38 ]
- [3] 麦积山, 赵廷宁, 郑江坤, 等. 北川震后滑坡体表层土壤养分的空间变化[J]. 应用生态学报, 2015, 26(12): 3588 - 3594. [ MAI Jishan, ZHAO Tingning, ZHENG Jiangkun, et al. Spatial variability of surface soil nutrients in the landslide area of Beichuan County, South-west China, after 5.12 Wenchuan Earthquake [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, 26(12): 3588 - 3594 ]
- [4] 汤家法, 胥恣旻, 张雅茜. 北川震后重建居民点存在的问题与调控对策[J]. 山地学报, 2016, 34(2): 242 - 248. [ TANG Jiafa, XU Minmin, ZHANG Yaxi. Some problems and its adjustment measures of reconstructed settlements after earthquake in Beichuan [J]. Mountain Research, 2016, 34(2): 242 - 248 ]
- [5] 王德, 傅伯杰, 陈利顶, 等. 不同土地利用类型下土壤粒径分形分析——以黄土丘陵沟壑区为例[J]. 生态学报, 2007, 27(7): 3081 - 3089. [ WANG De, FU Bojie, CHEN Liding, et al. Fractal analysis on soil particle size distributions under different land-use types: a case study in the loess hilly areas of the Loess Plateau, China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2007, 27(7): 3081 - 3089 ]
- [6] 吕圣桥, 高鹏, 耿广坡, 等. 黄河三角洲滩地土壤颗粒分形特征及其与土壤有机质的关系[J]. 水土保持学报, 2011, 25(6): 134 - 138. [ LV Shengqiao, GAO Peng, GENG Guangpo, et al. Characteristics of soil particles and their correlation with soil organic matter in lowlands of the Yellow river delta [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2011, 25(6): 134 - 138 ]
- [7] 张淑娟, 何勇, 方慧. 基于 GPS 和 GIS 的田间土壤特性空间变异性的研究[J]. 农业工程学报, 2003, 19(2): 39 - 44. [ ZHANG Shujuan, HE Yong, FANG Hui. Spatial variability of soil properties in the field based on GPS and GIS [J]. Transactions of the Chinese Society Agricultural Engineering, 2003, 19(2): 39 - 44 ]
- [8] HUGGETT R J. Soil chronosequences, soil development, and soil evolution: a critical review [J]. Catena, 1998, 32(3): 155 - 172.
- [9] 刘国顺, 常栋, 叶协锋, 等. 基于 GIS 的缓坡烟田土壤养分空间变异研究[J]. 生态学报, 2013, 33(8): 2586 - 2595. [ LIU Guoshun, CHANG Dong, YE Xiefeng, et al. Spatial variability characteristics of soil nutrients in tobacco fields of gentle slope based on GIS [J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(8): 2586 - 2595 ]
- [10] 吴昊. 秦岭山地松栎混交林土壤养分空间变异及其与地形因子的关系[J]. 自然资源学报, 2015, 30(5): 858 - 869. [ WU Hao. The relationship between terrain factors and spatial variability of soil nutrients for Pine-Oak mixed forest in Qinling Mountains [J]. Journal of Natural Resources, 2015, 30(5): 858 - 869 ]
- [11] 王晓军, 武江涛, 王兵, 等. 黄土丘陵沟壑区小流域土壤水分空间变异[J]. 生态学杂志, 2015, 34(9): 2568 - 2575. [ WANG

- Xiaojun, WU Jiangtao, WANG Bing, et al. Spatial variability of soil moisture in hilly and gully Loess Plateau [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2015, **34** (9): 2568–2575]
- [12] 薛涛. 小流域土壤团聚体稳定性及空间变异特性研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2010: 23–36. [XUE Tao. Characteristics of soil aggregation stability and its spatial variability in the Small Watershed of south Hunan Province [D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2010: 23–36]
- [13] CHENG Song, YANG Gang, YU Hui, et al. Impacts of Wenchuan Earthquake-induced landslides on soil physical properties and tree growth [J]. *Ecological Indicators*, 2012, **15** (1): 263–270.
- [14] WALKER L R, VELAZQUEZ E, SHIELS A B. Applying lessons from ecological succession to the restoration of landslides [J]. *Plant & Soil*, 2009, **324** (1): 157–168.
- [15] 吴聪, 王金牛, 卢涛, 等. 汶川地震对龙门山地区山地土壤理化性质的影响[J]. *应用与环境生物学报*, 2012, **18** (6): 911–916. [WU Cong, WANG Jinniu, LU Tao, et al. Effect of Wenchuan earthquake on soil physical and chemical properties of the Longmen Mountain, southwestern China [J]. *Chinese Journal of Applied & Environmental Biology*, 2012, **18** (6): 911–916]
- [16] 王金牛, 孙庚, 石福孙, 等. 汶川地震对典型亚热带森林地表径流和土壤侵蚀的影响[J]. *应用与环境生物学报*, 2013, **19** (5): 766–773. [WANG Jinniu, SUN Geng, SHI Fusun, et al. runoff and soil loss of a typical subtropical forest stricken by Wenchuan Earthquake [J]. *Chinese Journal of Applied & Environmental Biology*, 2013, **19** (5): 766–773]
- [17] 甘建军. 汶川地震区大型堆积体变形破坏模式及稳定性研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2014: 56–58. [GAN Jianjun. Stability analysis of loose large-scale deposits in Wenchuan Earthquake areas: deformation and failure modes [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2014: 56–58]
- [18] 麦积山. 北川震后滑坡体表层土壤理化性质空间变化特征[D]. 成都: 四川农业大学, 2016: 1–47. [MAI Jishan. Spatial variability properties of surface soil physiochemical in the landslide area of Beichuan County, Southwestern China, after 5.12 Wenchuan Earthquake [D]. Chengdu: Sichuan Agricultural University, 2016: 1–47]
- [19] 张万儒, 杨光滢, 屠星南. 森林土壤分析方法[M]. 北京: 中国标准出版社, 2000: 57–70. [ZHANG Wanru, YANG Guangying, TU Xingnan. Forest Soil Analysis Method [M]. Beijing: China Standards Press, 2000: 57–70]
- [20] 周虎, 吕贻忠, 杨志臣, 等. 保护性耕作对华北平原土壤团聚体特征的影响[J]. *中国农业科学*, 2007, **40** (9): 1973–1979. [ZHOU Hu, LV Yizhong, YANG Zhichen, et al. Effect of conservation tillage on soil aggregates in Huabei plain, China [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2007, **40** (9): 1973–1979]
- [21] 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 Peiling, LUO Yuanpei, SHI Yuanchun. Soil fraction property by particle size gravity distribution [J]. *Chinese Science Bulletin*, 1993, **38** (20): 1896–1899]
- [22] 郭旭东, 傅伯杰, 马克明, 等. 基于GIS和地统计学的土壤养分空间变异特征研究——以河北省遵化市为例[J]. *应用生态学报*, 2000, **11** (4): 101–105. [GUO Xudong, FU Bojie, MA Keming, et al. Spatial variability of soil nutrients based on geostatistics combined with GIS—A case study in Zunhua City of Hebei Province [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2000, **11** (4): 101–105]
- [23] 司建华, 冯起, 鱼腾飞, 等. 额济纳绿洲土壤养分的空间异质性[J]. *生态学杂志*, 2009, **28** (12): 2600–2606. [SI Jianhua, FENG Qi, YU Tengfei, et al. Spatial heterogeneity of soil nutrients in Ejina oasis [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2009, **28** (12): 2600–2606]
- [24] 党亚爱, 李世清, 王国栋, 等. 黄土高原典型土壤剖面土壤颗粒组成分性特征[J]. *农业工程学报*, 2009, **25** (9): 74–78. [DANG Yaai, LI Shiqing, WANG Guodong, et al. Fractal characteristics of soil particle composition for typical types of soil profile on Loess Plateau [J]. *Transactions of the Chinese Society Agricultural Engineering*, 2009, **25** (9): 74–78]
- [25] 石占飞, 王力, 王建国. 陕北神木矿区土壤颗粒体积分性特征及意义[J]. *干旱区研究*, 2011, **28** (3): 394–400. [SHI Zhanfei, WANG Li, WANG Jianguo. Volume fractal characteristics and significance of soil particles in the Shenmu Colliery in North Shaanxi Province [J]. *Arid Zone Research*, 2011, **28** (3): 394–400]
- [26] 姬慧娟, 徐国栋, 张利, 等. 地震滑坡区覆盖生态毯对土壤湿度和养分的影响[J]. *四川林业科技*, 2014, **35** (6): 47–50. [JI Huijuan, XU Guodong, ZHANG Li, et al. The effect of applying the eco-blanket on the soil moisture and nutrient in landslide areas caused by the earthquake [J]. *Journal of Sichuan Forestry Science and Technology*, 2014, **35** (6): 47–50]
- [27] 谭秋锦, 宋同清, 彭晚霞, 等. 峡谷型喀斯特不同生态系统土壤团聚体及有机碳特征[J]. *应用生态学报*, 2014, **25** (3): 671–678. [TAN Qiujin, SONG Tongqing, PENG Wanxia, et al. Spatial and organic carbon characteristics of soil aggregates under different ecosystem in karst canyon region [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2014, **25** (3): 671–678]
- [28] 史奕, 陈欣, 沈善敏. 土壤团聚体的稳定机制及人类活动的影响[J]. *应用生态学报*, 2002, **13** (11): 1495–1498. [SHI Yi, CHEN Xin, SHEN Shanmin. Mechanisms of organic cementing soil aggregate formation and its theoretical models [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, **13** (11): 1495–1498]
- [29] 姚贤良, 许绣云, 于德芬. 不同利用方式下红壤结构的形成[J]. *土壤学报*, 1990, **27** (1): 25–33. [YAO Xianliang, XU Xiuyun, YU Defang. Formation of structure in red soils under different forms of utilization [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1990, **27** (1): 25–33]

## Spatial Variability of Post-shock Surface Soil Aggregates and Particle Composition in the Landslide Area of Beichuan County, South-western China

MAI Jishan<sup>1,2</sup>, ZHENG Jiangkun<sup>1\*</sup>, ZHAO Tingning<sup>3</sup>, SHI Changqing<sup>3</sup>, WANG Wenwu<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Soil and Water Conservation&Desertification Combating of Sichuan Provincial

Colleges and Universities, College of Forestry, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China;

2. Water Conservancy and Hydropower Engineering Design Co., Ltd. of Shuyu in Sichuan Province, Chengdu 610072, China;

3. School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100086, China)

**Abstract:** After May 12 Wenchuan earthquake, a large number of geological hazards appeared such as landslides and collapses. As a common geological hazard, landslides seriously destructed mountain vegetation and soil structure. In the landslide of Fenghuang Mountain in the Leigu town, Beichuan County, landslide area ( I ), transition area ( II ) and non-damaged area ( III ) were selected as the research plots. Combined with the grid sampling, laboratory analysis, Geo-statistics, and classical statistics methods, the characteristics of soil physical properties were studied. The results showed that sand contents was the dominant fraction of soil in three plots which was significant higher than that of clay and silt. The fractal dimension of soil particle composition had high negative correlation with sand content. However, it had high positive correlation with clay and slit contents. The soil dry aggregates content in plot I and plot III were the lowest and highest among three plots whose diameter were more than 5 mm, respectively. Meanwhile, soil water stable aggregates accounted for the largest proportion whose diameter was more than 2 mm. Furthermore, soil water stable aggregate contents generally decreased with the decrease of aggregate diameter size. The values of Mean Weight Diameter (MWD) and Geometric Mean Diameter (GMD) were the biggest in plot III, followed by plot II and plot I for soil water stability aggregates and soil dry aggregates. The fractal dimensions of soil dry aggregate almost were equal between plot I and plot II which are bigger than that of plot III. Nevertheless, the fractal dimension of soil water stability aggregates was biggest in plot I, followed by plot II and plot III. The semi-variance model of soil aggregates stability parameters and soil particle composition had a higher fitting degree. The block ratio of clay particle and the MWD of soil water stability aggregates were 45.9% and 65.3%, respectively, With the exception of MWD as moderate spatial autocorrelation. Soil aggregate parameters and soil particles showed highly spatial autocorrelation. The MWD and GMD values of soil dry aggregates and water stability aggregates increased gradually from plot I to plot III. However, the distribution of soil aggregate fractal dimension appeared opposite order. Content of sand soil and clay soil decreased and increased gradually from plot I to plot III, respectively. Above all, loss of soil clay particles resulted in sand granulation of surface soil. The stability of the aggregate decreased. Moreover, soil particle composition and aggregate showed a strong spatial autocorrelation.

**Key words:** Wenchuan earthquake; landslide; soil aggregates; soil particle composition; spatial variability.