

【编者按】 2011年7月2—9日,第十二届《海峡两岸三地环境资源与生态保育学术研讨会》在江西省南昌市召开.本次会议由中国环境资源与生态保育学会主办,由江西农业大学、江西省科学技术协会、中国科学院地理科学与资源研究所、江西省水利厅等单位承办,由台湾中国文化大学地理系、香港中文大学地理与资源管理学系、广东省生态环境与土壤研究所、江西省水土保持研究所等单位协办,并特别受到中国科学院海峡科技交流中心的支持和资助.来自海峡两岸三地42个单位共180多名环境资源与生态保育领域的专家和学者参加了此次会议.

自2000年首届《两岸三地水土资源保育与生态环境建设学术研讨会》在香港中文大学召开以来,两岸三地的学者们先后在北京、台北、香港、乌鲁木齐、花莲、林芝、广州、武汉、根河、临沂等地定期举办研讨会.借助这一学术交流平台,两岸三地的学者有机会进行广泛和密切的交流和学习,大大提高了两岸三地水土资源保育与生态环境建设的学术水平.

本次会议设置4个分会,来自海峡两岸三地的专家和学者围绕“资源-环境-生态前沿成果为和谐发展服务”的主题进行充分交流和研讨.会议还设置研究生专场并进行了优秀论文评选,以鼓励海峡两岸三地青年学者之间的合作和交流.大会共交流学术论文123篇,评选出优秀研究生论文20篇.现有9篇论文在本刊以专栏形式发表.

第十三届《海峡两岸三地环境资源与生态保育学术研讨会》将于2012年6月在台湾花莲召开,由台湾东华大学自然资源管理研究所承办.本刊将继续报道和发表会议的优秀论文.

# 南方红壤丘陵区不同土地利用方式下土壤有机碳分布特征及其与草本生物量的关系\*

李忠武<sup>1,2\*\*</sup> 郭旺<sup>1,2</sup> 王晓燕<sup>3</sup> 申卫平<sup>4</sup> 张雪<sup>1,2</sup> 陈晓琳<sup>1,2</sup> 张越男<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup>湖南大学环境科学与工程学院,长沙410082; <sup>2</sup>湖南大学环境生物与控制教育部重点实验室,长沙410082; <sup>3</sup>长沙理工大学土木与建筑学院,长沙410076; <sup>4</sup>邵阳市水土保持研究所,湖南邵阳422000)

**摘要** 不同土地利用方式下不同粒径土壤有机碳含量的变化可以在一定程度上反映土壤碳的变化,对揭示土壤有机碳循环过程具有重要意义.本研究在长期水土流失监测的基础上,采用土壤颗粒分级的方法,以南方红壤丘陵区不同土地利用方式(荒地、松林、草地)坡地土壤为研究对象,探讨了不同土地利用方式对不同粒径土壤有机碳分布特征的影响及其与草本生物量的关系.结果表明:土地利用方式和坡位对不同粒径土壤有机碳含量的影响较明显,研究区不同粒径土壤有机碳含量均表现为草地>松林>荒地;不同粒径土壤有机碳所占比例主要取决于土地利用方式,与坡位关系不大;由颗粒有机碳/矿物结合态有机碳(POC/MOC)值可知,草地土壤有机碳较易矿化,而荒地和松林土壤有机碳较稳定;红壤丘陵区坡地土壤砂粒有机碳对草本生物量的影响较大.

**关键词** 红壤丘陵区 土壤粒径 土壤有机碳 草本生物量

**文章编号** 1001-9332(2012)04-0867-08 **中图分类号** Q142.3 **文献标识码** A

**Effects of land use type on the distribution of organic carbon in different sized soil particles and its relationships to herb biomass in hilly red soil region of South China.** LI Zhong-wu<sup>1,2</sup>, GUO Wang<sup>1,2</sup>, WANG Xiao-yan<sup>3</sup>, SHEN Wei-ping<sup>4</sup>, ZHANG Xue<sup>1,2</sup>, CHEN Xiao-lin<sup>1,2</sup>, ZHANG

\* 国家自然科学基金项目(40971170)、教育部新世纪人才项目(NCET-09-330)和湖南省自然科学基金项目(11JJ3041)资助.

\*\* 通讯作者. E-mail: lizw@hnu.edu.cn

2011-09-19 收稿,2012-01-31 接受.

Yue-nan<sup>1,2</sup> (<sup>1</sup> College of Environmental Science and Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China; <sup>2</sup> Ministry of Education Key Laboratory of Environmental Biology and Pollution Control, Hunan University, Changsha 410082, China; <sup>3</sup> College of Civil Engineering and Architecture, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410076, China; <sup>4</sup> Shaoyang Institute of Soil and Water Conservation, Shaoyang 422000, Hunan, China). -Chin. J. Appl. Ecol., 2012, **23** (4): 867–874.

**Abstract:** The changes in organic carbon content in different sized soil particles under different land use patterns partly reflect the variation of soil carbon, being of significance in revealing the process of soil organic carbon cycle. Based on the long-term monitoring of soil erosion, and by the methods of soil particle size fractionation, this paper studied the effects of different land use types (wasteland, pinewood land, and grassland) on the distribution of organic carbon content in different sized soil particles and its relationships to the herb biomass. Land use type and slope position had obvious effects on the organic carbon content in different sized soil particles, and the organic carbon content was in the order of grassland > pinewood land > wasteland. The proportion of the organic carbon in different sized soil particles was mainly depended on the land use type, and had little relationships with slope position. According to the analysis of the ratio of particle-associated organic carbon to mineral-associated organic carbon (POC/MOC), the soil organic carbon in grassland was easily to be mineralized, whereas that in wasteland and pinewood land was relatively stable. On the slopes mainly in hilly red soil region, the soil organic carbon in sand fraction had great effects on herb biomass.

**Key words:** hilly red soil region; soil particle size; soil organic carbon; herb biomass.

土壤有机碳(SOC)在土壤物理、化学和生物学特性中发挥着极其重要的作用,被公认为对土壤进化和植物生长具有重要作用<sup>[1-2]</sup>. 随着对土壤有机碳研究的不断深入,不同粒径土壤有机碳的动态变化研究逐渐成为土壤碳研究领域的热点<sup>[3-7]</sup>. 不同粒径土壤颗粒对有机碳的吸附力明显不同,因此,不同粒径土壤颗粒中有机碳对土壤干扰的敏感程度也明显不同<sup>[8-9]</sup>. 目前,关于不同粒径土壤有机碳的研究主要集中在土地利用变化<sup>[10-11]</sup>、侵蚀<sup>[12]</sup>、植被恢复<sup>[13-14]</sup>、大气 CO<sub>2</sub> 浓度升高<sup>[15]</sup> 等条件下的相关研究,结果表明,砂粒有机碳所占比例越大,越易受到土壤侵蚀作用破坏;粒径越细,土壤有机碳含量越高. 但目前对不同粒径土壤有机碳数量与质量的关系以及不同粒径土壤有机碳与土地生产力之间关系的研究尚有待加强.

本文以南方红壤丘陵区典型区域的不同土地利用方式(荒地、松林、草地)坡地土壤为研究对象,在对多年无施肥标准径流小区进行监测的基础上,采用土壤颗粒分级的方法,对坡面不同粒径土壤有机碳的分布及其与草本生物量的关系进行探讨,以期揭示侵蚀环境下土地生产力下降的本质,从而为我国南方红壤丘陵区土壤有机碳变化规律研究和土壤固碳潜力与生产力稳定的长效机制探讨提供依据.

## 1 研究地区与研究方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于湖南省邵阳市水土保持研究所(27°03' N, 111°22' E),海拔 231.18 ~ 276.63 m,土壤以红壤为主,其次是紫色土、石灰土,土层较厚,土壤质地以壤粘土为主. 研究区属中亚热带湿润季风气候,温暖、湿润、雨量充沛,年均气温 17.1 °C,年均降水量 1218.5 ~ 1473.5 mm,年无霜期 272 ~ 304 d. 受地形、气象条件等因素影响,研究区降水集中在 4—9 月,有时出现夏秋连汛.

2002 年,邵阳市水土保持研究所建立长 15 m、宽 5 m、坡度 15°的无施肥标准径流小区 3 个,小区下方设置径流池,2003 年将小区的土地利用方式分别设置为荒地、松林和草地,用于监测红壤丘陵区坡地的水土流失状况. 其中,荒地坡面的植被 85% 以上是狗尾草(*Setaria viridis*),其余为小蓬草(*Conyza canadensis*)、马唐(*Digitaria sanguinalis*)、白茅(*Imperata cylindrica*)、败酱叶菊苣(*Erechtites valerianaeifolia*)、南艾蒿(*Artemisia verlotorum*)、鸡眼草(*Kummerowia striata*);松林坡面的草本植物包括芒(*Miscanthus sinensis*)、一年蓬(*Erigeron annuus*)、野老鹳草(*Geranium carolinianum*)、马蹄金(*Dichondra micrantha*)、杠板归(*Polygonum perfoliatum*);草地坡

面为人工种植的百喜草(*Paspalum natatu*)。荒地、松林和草地坡面的覆盖度分别为 70%、65% 和 100%。径流池收集了 2008 年 8 月到 2010 年 2 月的泥沙, 荒地、松林和草地的泥沙量分别为 55.5、29 和 19 kg。经历长期的侵蚀和沉降, 小区坡面已接近自然坡面。因此, 本研究将每个小区坡面从上至下按每 3 m 等分成坡顶、坡上、坡中、坡下和坡底 5 个坡位, 分别用数字 1、2、3、4、5 表示。

## 1.2 样品采集与分析

2010 年 5 月 25 日, 在每个坡位按照倒“品”字型设定 3 个 1 m×1 m 小样方, 在小样方里分别采集土壤样品和草本生物量样品, 3 个小样方表示 3 个重复。在小样方中按“X”型采集 0~20 cm 土层的土样, 带回室内风干、去除杂草和植物根系, 研磨过 2 mm 筛, 装瓶待用。土壤容重采用环刀法测定, 环刀样品在小样方的中心位置采集。草本生物量样品采集是将小样方内 1/4 草本植物的地上部分和地下部分全部收割, 带回室内烘干至恒量, 称其干质量( $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ )。

称取 500 g 风干土, 将水土比为 10:1 的土样, 用超声波仪分散(300 w)30 min 后过 140 目湿筛, 将土壤转移至 10 L 塑料桶内, 并将未过筛的残渣烘干称量, 保持土壤悬液浓度 $\leq 4\%$ ; 根据 Stokes 定律计算每一粒径的沉降时间, 用虹吸法分别提取 $<2 \mu\text{m}$ 、 $2 \sim 50 \mu\text{m}$  和  $>50 \mu\text{m}$  3 个粒径的颗粒, 颗粒悬液用巴氏滤管抽滤, 40℃烘箱烘去多余水分后再自然风干, 称量磨细进行化学分析。土壤及不同粒径中有机碳含量采用油浴外加热法测定。

## 1.3 数据处理

不同粒径土壤有机碳含量( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) = 不同粒径颗粒物中有机碳含量( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )×不同粒径颗粒物占土壤的百分比(%)

不同粒径土壤有机碳分配比例 = 不同粒径土壤有机碳含量( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )/土壤总有机碳含量( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )×100%

结合在土壤细颗粒组分中的有机碳含量( $\text{MOC}, \text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) = (粉粒有机碳×粉粒百分比+粘粒有机碳×粘粒百分比)/(粉粒百分比+粘粒百分比)

采用 SPSS 13.0 对数据进行统计分析, 计算每组数据平均值(mean)、标准差(SD)以及差异显著性(双尾,  $\alpha=0.05$ )。基于 Canoco 4.5, 采用冗余分析(RDA)对草本生物量与不同粒径土壤有机碳之间的关系进行 RDA 约束排序分析。RDA 分析需要 2 个矩阵, 分别是物种数据和环境数据。其中, 物种数

据包括草本地上生物量和地下生物量, 环境因子指不同粒径土壤有机碳含量及其分配比例、颗粒有机碳/矿物结合态有机碳(POC/MOC)。排序之前, 对所有量纲不同的数据进行标准化处理, 在排序图(biplot)中, 每个环境因子箭头长度所代表的特征向量的长度可以表示环境因子对生物量的解释程度; 两个箭头之间的夹角表示环境因子与草本生物量的相关性大小, 当夹角在 0~90°时, 表示两个变量呈正相关, 当夹角为 90°时, 表示二者没有显著的相关关系, 当夹角在 90°~180°时, 二者呈负相关关系。

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤颗粒组成和容重

土壤质地对土壤物理、化学和生物学特性具有非常重要的影响, 决定了土壤养分状况以及土壤对养分吸附能力的强弱。由于本文中各小区土地覆盖度均大于 50%, 导致各坡面内部不同部位土壤颗粒组成的差异不显著( $P>0.05$ , 表 1)。荒地坡面以砂粒( $>50 \mu\text{m}$ )含量最高, 粘粒( $<2 \mu\text{m}$ )次之, 粉粒( $2 \sim 50 \mu\text{m}$ )最低; 松林坡面和草地坡面均以粘粒含量最高, 砂粒次之, 粉粒最低。有研究表明, 坡地土壤颗粒组成的变化主要受坡面微地形、土壤侵蚀和土壤发育等因素影响<sup>[16-17]</sup>, 其中, 土壤侵蚀所起的作用不可低估。荒地坡面由于部分土壤裸露, 地表抗风蚀能力较弱, 加上长时间的地表径流, 造成土壤砂粒含量较高; 松林坡面虽然草本植物覆盖度较小, 但松树能有效降低地表径流作用, 所以松林坡面土壤颗粒组成的分布规律与草地一致。由于研究区降雨比较集中, 土壤粘化作用显著, 使 3 个小区的土壤容重均较大, 依次为荒地( $1.62 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )<松林( $1.68 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )<草地( $1.80 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ), 特别是草地小区坡下部位的土壤容重达到  $1.91 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ (表 1)。由于草地土壤本身较板结, 故土壤容重较大, 而荒地和松林土壤在遭受侵蚀冲刷后变得疏松, 导致其容重较小。

### 2.2 不同粒径土壤有机碳的坡面分布特征

土壤有机碳主要存在于细小颗粒中, 以 $<2 \mu\text{m}$ 粘粒中的有机碳含量最高<sup>[8, 18-19]</sup>。从表 2 可以看出, 3 个小区不同粒径土壤有机碳含量均表现为粘粒有机碳最高, 砂粒有机碳次之, 粉粒有机碳最低, 说明土壤颗粒对有机碳的吸附作用随着颗粒粒径减小而逐渐增强<sup>[13, 20-22]</sup>; 不同土地利用方式下不同粒径土壤有机碳含量均表现为草地>松林>荒地, 表明荒地和松林坡面土壤可能存在较大的土壤碳流失现象,



表 1 不同径流小区土壤颗粒组成和容重  
Table 1 Soil particle-size fractions and bulk density in different runoff plots ( mean±SD)

土地利用方式 Land use type	坡位 Position	砂粒(>50 μm) Sand (%)	粉粒(2~50 μm) Silt (%)	粘粒(<2 μm) Clay (%)	容重 Bulk density(g·cm <sup>-3</sup> )
荒地 Wasteland	坡顶 Summit	36.7±0.9aA	27.1±2.4aA	36.3±2.1aA	1.68±0.11aA
	坡上 Upper	36.6±1.1aA	28.2±2.5aA	35.2±1.4aA	1.56±0.06aA
	坡中 Middle	37.2±2.3aA	29.3±1.0aA	33.5±2.4aA	1.68±0.04aA
	坡下 Lower	38.3±1.5aA	27.7±1.0aA	34.0±0.6aA	1.56±0.34aA
	坡底 Foot	39.0±0.7aA	27.8±0.4aA	33.1±0.8aA	1.60±0.05aA
松林 Pinewood	坡顶 Summit	33.5±2.3aA	27.6±0.9aA	38.9±2.2aA	1.66±0.02aA
	坡上 Upper	32.8±0.9aA	27.6±0.5aA	39.6±1.3aB	1.61±0.05aA
	坡中 Middle	33.4±1.2aA	27.9±0.9aB	38.7±1.8aA	1.76±0.09aA
	坡下 Lower	33.3±1.5aB	27.3±2.5aA	39.5±4.0aA	1.82±0.01aA
	坡底 Foot	34.7±0.5aB	27.4±0.7aA	37.9±1.1aA	1.54±0.07aA
草地 Grassland	坡顶 Summit	35.2±2.7aA	27.7±0.3aA	37.1±2.6aA	1.81±0.02aA
	坡上 Upper	36.5±1.3aB	27.3±1.1aA	36.0±1.2aA	1.68±0.12aA
	坡中 Middle	36.9±0.3aA	27.8±1.6aA	35.3±1.6aA	1.75±0.19aA
	坡下 Lower	36.0±1.1aB	27.5±0.7aB	36.5±1.3aA	1.91±0.03aA
	坡底 Foot	35.9±0.4aAB	27.7±0.6aA	36.4±0.3aA	1.85±0.10aA

不同小写字母表示不同坡面部位颗粒组成的差异显著( $P<0.05$ ),不同大写字母表示相同坡面部位不同土地利用类型间的差异显著( $P<0.05$ )  
Different small letters meant significant difference of soil particle-size fractions at different slope positions at 0.05 level, while different capital letters meant significant difference at same slope position among different land uses at 0.05 level.

表 2 不同粒径土壤有机碳含量  
Table 2 Soil organic carbon content in different sized particles ( g·kg<sup>-1</sup>, mean±SD)

土地利用方式 Land use type	粒径 Sized particle (μm)	坡位 Slope position				
		坡顶 Summit	坡上 Upper	坡中 Middle	坡下 Lower	坡底 Foot
荒地 Wasteland	>50	1.45±0.44a	1.97±0.32ab	2.49±0.43bc	1.60±0.13a	2.35±0.17bc
	2~50	1.56±0.02ab	1.77±0.58abc	2.31±0.52c	1.19±0.45a	2.06±0.12bc
	<2	2.90±0.22a	2.82±0.45ab	3.16±0.13a	2.16±0.60b	3.08±0.22a
松林 Pinewood	>50	2.07±0.30a	1.91±0.95a	2.36±0.60a	2.42±0.68a	1.84±0.28a
	2~50	2.01±0.22a	1.78±1.19a	2.17±0.97a	1.66±0.47a	1.64±0.12a
	<2	3.75±0.64a	3.24±1.70a	3.64±1.39a	2.93±0.14a	2.98±0.18a
草地 Grassland	>50	2.02±0.16a	2.53±0.71a	4.80±0.95b	4.17±0.43b	2.69±0.87a
	2~50	1.95±0.66ac	2.00±0.96ac	2.83±0.58a	2.61±0.58ac	1.61±0.20ac
	<2	3.73±1.13a	3.34±1.12a	3.79±0.53a	3.33±0.76a	2.39±0.23a

同行数据后不同字母表示差异显著( $P<0.05$ ) Different letters in the same row meant significant difference at 0.05 level.

坡面径流携带的土壤碳不容忽视. 荒地坡面不同粒径土壤有机碳随不同坡位的变化显著( $P<0.05$ );松林坡面不同粒径土壤有机碳的变化很小( $P>0.05$ );草地坡面砂粒有机碳和粉粒有机碳在不同坡位之间的变化显著( $P<0.05$ ),而粘粒有机碳的变化则不明显( $P>0.05$ ). 以上研究结果表明,土地利用方式和坡位对坡地不同粒径土壤有机碳含量的影响较明显.

不同粒径土壤颗粒中有机碳含量占相应土壤有机碳含量的比例,可反映不同粒径土壤有机碳的分布状况. 研究区不同土地利用方式土壤均以粘粒有机碳所占比例最高,平均值分别为 43.3% (荒地)、45.6% (松林)和 38.5% (草地);其次为砂粒,分别为 30.1% (荒地)、29.5% (松林)和 36.7% (草地);粉粒最小,分别为 26.6% (荒地)、24.9% (松林)和

24.8% (草地)(图 1). 不同粒径土壤有机碳所占比例在不同坡位间无显著变化( $P>0.05$ ). 表明不同粒径土壤有机碳所占比例主要取决于土地利用方式,与坡位关系不大. 王岩等<sup>[23]</sup>研究认为,土壤中细小颗粒对有机碳的吸附能力强于土壤中粗颗粒,有机碳的分布以粘粉粒为主. 本研究中土壤有机碳的分布表现为粘粒>砂粒>粉粒,与一些研究结果<sup>[12,18,23]</sup>不同,可能是由于本研究区存在部分高度风化的石灰岩,其风化产物参与了土壤的形成.

结合在土壤细颗粒组分中(<50 μm)的有机碳被称为矿物结合态有机碳(mineral associated organic carbon, MOC),是有机物最终分解的产物,周转较慢且稳定,一般被认为是非活性有机碳<sup>[24]</sup>,其含量多少可间接表征土壤有机碳的抗氧化程度与难利用程度<sup>[25]</sup>. 与砂粒结合的有机碳为颗粒有机碳

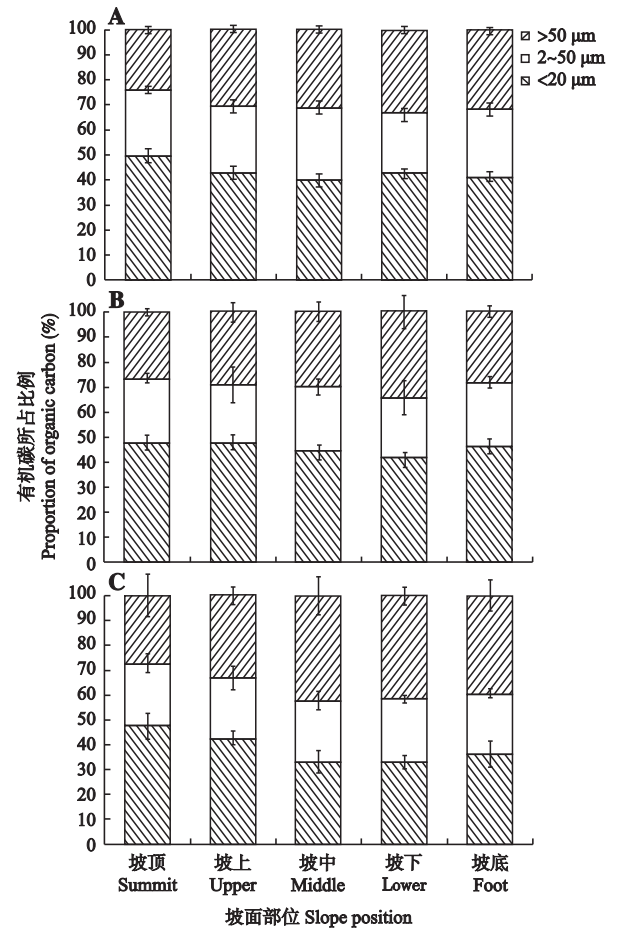


图1 研究区不同粒径土壤中有有机碳含量的比例  
Fig.1 Proportion of organic carbon in different sized particles in the study area (mean±SD).  
A: 荒地 Wasteland; B: 松林 Pinewood; C: 草地 Grassland. 下同 The same below.

(POC),指处于新鲜的动植物残体与腐殖化有机物之间的暂时或过渡的有机碳,一般被称为活性有机碳<sup>[26]</sup>.相对于MOC而言,POC对表层土壤中植物残体的积累和根系分布的变化非常敏感<sup>[27]</sup>,植被生长过程中,枯枝落叶积累量和根系的增加使POC形成量增加,导致与砂粒结合的有机碳含量增加,所以草地砂粒有机碳含量比荒地和松林大.

POC/MOC值可在一定程度上反映土壤有机碳的质量和稳定程度.一般来说,POC/MOC值越大,表明土壤有机碳越易矿化、周转期越短或有机碳活性越高,POC/MOC值越小,表明土壤有机碳越稳定,越不易被生物利用<sup>[25]</sup>.本研究中不同土地利用类型的POC/MOC值依次为草地>荒地>松林,其平均值分别为38.56、28.76和27.50(图2),表明草地土壤有机碳较易矿化,而荒地和松林土壤有机碳较稳定,主要是由于不同土地利用方式下土壤碳输入的差异所致<sup>[28]</sup>.吴建国等<sup>[29]</sup>应用土壤培养法的研

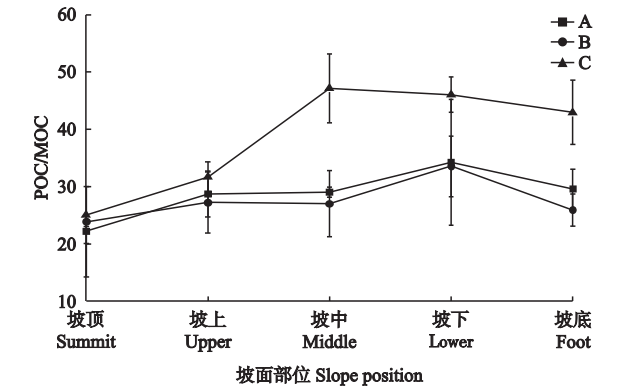


图2 研究区不同坡面位置土壤有机碳的 POC/MOC 值  
Fig.2 POC/MOC value of soil organic carbon in different slope positions of the study area (mean±SD).

究结果表明,草地土壤碳矿化速率低于天然次生林和人工林,与本研究结果不一致,可能是由于研究方法和研究区域的差异所致.相对于坡顶和坡上,3个小区坡中、坡下和坡底的POC/MOC值均较大.主要原因是在植被生长较好的坡位,归还到土壤的植物残体和腐殖物质较多,导致土壤砂粒有机碳含量较大<sup>[13]</sup>.

### 2.3 草本生物量的坡面分布特征

各小区不同坡位地上生物量与地下生物量的变化趋势基本一致(图3).由于草本覆盖度的不同,3个小区坡面生物量表现为草地最高,地上和地下生物量平均值分别为173.19和20.98 g·m<sup>-2</sup>;荒地次之,地上和地下生物量平均值为44.75和14.19 g·m<sup>-2</sup>;松林最低,地上和地下生物量平均值为42.04和8.52 g·m<sup>-2</sup>.各小区草本生物量随不同坡位的变化存在很大差异,如松林小区坡顶和坡底松树生长较差,草本植物的生长条件较好,所以草本生物量以坡顶(72.2 g·m<sup>-2</sup>)和坡底(58.7 g·m<sup>-2</sup>)较高,而坡上位置草本生物量很低,主要是由于该部位松树生长较好,一定程度上限制了林下草本植物的生长.与荒地和松林相比,草地坡面的生物量水平较高,各坡位草本生物量维持在120~220 g·m<sup>-2</sup>.

### 2.4 土壤不同粒径有机碳对草本生物量的影响

为更加直观地反映各坡面土壤不同粒径有机碳与草本生物量的关系,本文利用砂粒有机碳、粉粒有机碳、粘粒有机碳、POC/MOC、砂粒有机碳所占比例、粉粒有机碳所占比例、粘粒有机碳所占比例以及地上生物量和地下生物量9个变量,得到草本生物量变化特征的RDA排序图(图4).

RDA分析结果显示,第1轴解释了92.6%的变异信息,第2轴解释了0.5%的变异信息(P=

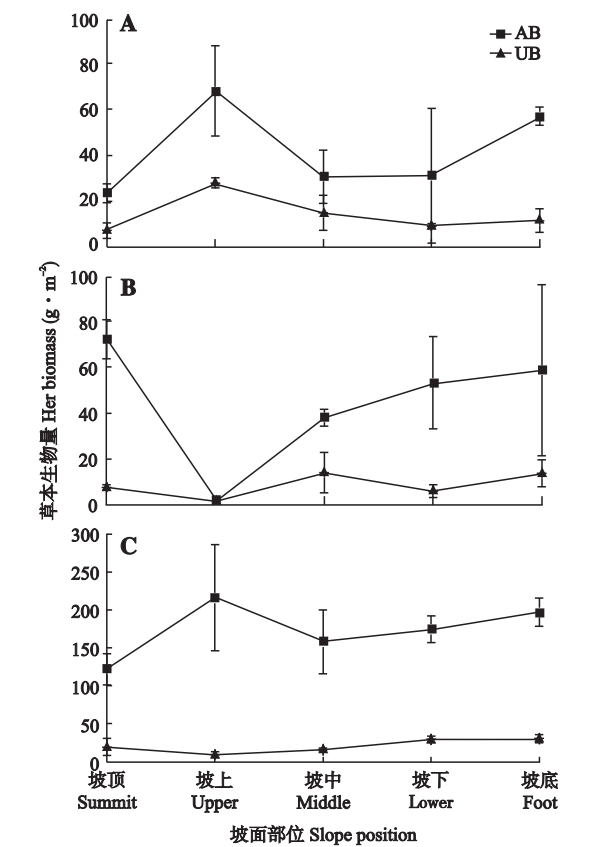


图3 草本生物量的坡面分布特征

Fig. 3 Distributions of herb biomass on slope (mean±SD).

AB: 地上生物量 Aboveground biomass; UB: 地下生物量 Underground biomass. 下同 The same below.

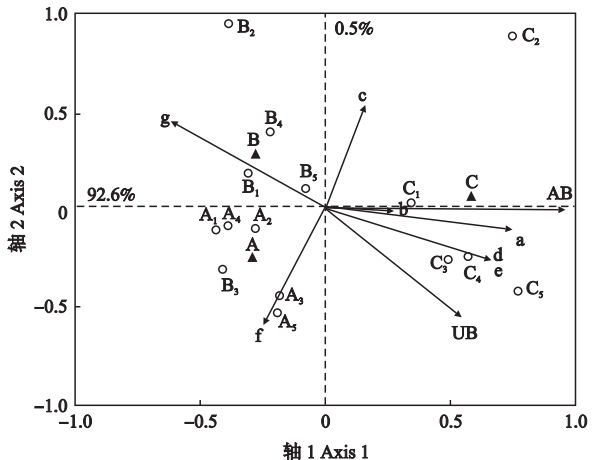


图4 草本生物量与土壤因子的二维 RDA 排序图

Fig. 4 RDA biplot of herb biomass and soil factors.

a) 砂粒有机碳 Organic carbon in sand; b) 粉粒有机碳 Organic carbon in silt; c) 粘粒有机碳 Organic carbon in clay; d) POC/MOC; e) 砂粒有机碳所占比例 Proportion of organic carbon in clay; f) 粉粒有机碳所占比例 Proportion of organic carbon in silt; g) 粘粒有机碳所占比例 Proportion of organic carbon in clay. 1) 坡顶 Slope summit; 2) 坡上 Slope upper; 3) 坡中 Slope middle; 4) 坡下 Slope lower; 5) 坡底 Slope foot.

0.006). 所选环境因子对草本生物量的梯度分布均有不同程度的影响: 砂粒有机碳、粉粒有机碳、

POC/MOC、砂粒有机碳所占比例、粘粒有机碳与地上生物量呈正相关,粉粒有机碳所占比例和粘粒有机碳所占比例与地上生物量呈负相关,这说明坡地上长期的水土流失导致土壤粉粒有机碳所占比例和粘粒有机碳所占比例降低是地上生物量的限制性因子;粉粒有机碳、粉粒有机碳所占比例、砂粒有机碳、砂粒有机碳所占比例、POC/MOC 与地下生物量呈正相关,其中,相关性较好的是 POC/MOC 和粉粒有机碳所占比例,其次是砂粒有机碳和粉粒有机碳;粘粒有机碳、粘粒有机碳所占比例与地下生物量呈负相关. 此外,不同土地利用方式下草地上和地下生物量均表现为草地 > 荒地 > 松林,这与图 3 的结果一致,其中,松林坡面的草本生物量较小,可能是由于松树覆盖度对树下草本植物生长有一定影响.

综上,红壤丘陵区坡地草本生物量主要通过影响砂粒有机碳、砂粒有机碳所占比例和 POC/MOC 在土壤碳固定方面扮演重要角色. Cardon 等<sup>[30]</sup>通过草地实验发现,土壤粒径<53 μm 的老有机碳<sup>[31-32]</sup>的分解减缓,但没有发现>250 μm 部分的老有机碳的分解减缓,与本文结论不尽一致,主要是由于 Cardon 等<sup>[30]</sup>的研究是在高 CO<sub>2</sub> 浓度条件下开展,这表明大气 CO<sub>2</sub> 浓度的高低对草本生物量与不同粒径有机碳之间关系的影响显著. 本文中砂粒有机碳及砂粒有机碳所占比例对荒地和草地坡面上草本生物量的影响较大,但其原因究竟是不同土地利用方式的差异还是大气 CO<sub>2</sub> 浓度的影响,尚待深入的研究来证实.

### 3 结 论

本研究结果表明,土地利用方式对不同粒径土壤有机碳含量的影响较明显,其含量水平表现为草地>松林>荒地;不同粒径土壤有机碳所占比例也主要取决于土地利用方式,但与坡位关系不大. POC/MOC 值分析表明,草地土壤有机碳较易矿化,而荒地和松林土壤有机碳较稳定. RDA 分析结果表明,红壤丘陵区坡地土壤砂粒有机碳对草本生物量的影响较大.

### 参考文献

[1] Fenton TE, Kazemi M, Lauterbach-Barrett MA. Erosional impact on organic matter content and productivity of selected Iowa soils. *Soil & Tillage Research*, 2005, **81**: 163-171

[2] Lal R. Soil carbon sequestration to mitigate climate

- change. *Geoderma*, 2004, **123**: 1–22
- [3] Piccolo GA, Galantini JA, Rosell RA. Organic carbon fractions in a yerba mate plantation on a subtropical Kandiumult of Argentina. *Geoderma*, 2004, **123**: 333–341
- [4] Sevink J, Obale-ebanga F, Meijer HAJ. Land-use related organic matter dynamics in North Cameroon soils assessed by  $^{13}\text{C}$  analysis of soil organic matter fractions. *European Journal of Soil Science*, 2005, **56**: 103–111
- [5] Olk DC, Gregorich EG. Overview of the symposium proceedings, “Meaningful pools in determining soil carbon and nitrogen dynamics”. *Soil Science Society of America Journal*, 2006, **70**: 967–974
- [6] Shrestha BM, Singh BR, Sitaula BK, *et al.* Soil aggregate- and particle-associated organic carbon under different land uses in Nepal. *Soil Science Society of America Journal*, 2007, **71**: 1194–1203
- [7] Liang AZ, Yang XM, Zhang XP, *et al.* Soil organic carbon changes in particle-size fractions following cultivation of Black soils in China. *Soil & Tillage Research*, 2009, **105**: 21–26
- [8] Wang H-J (王洪杰), Li X-W (李宪文), Shi X-Z (史学正), *et al.* Distribution of soil nutrient under different land use and relationship between soil nutrient and soil granule composition. *Journal of Soil and Water Conservation* (水土保持学报), 2003, **17**(2): 44–50 (in Chinese)
- [9] He NP, Wu L, Wang YS, *et al.* Changes in carbon and nitrogen in soil particle-size fractions along a grassland restoration chronosequence in northern China. *Geoderma*, 2009, **150**: 302–308
- [10] Liao JD, Boutton TW, Jastrow JD. Storage and dynamics of carbon and nitrogen in soil physical fractions following woody plant invasion of grassland. *Soil Biology & Biochemistry*, 2006, **38**: 3184–3196
- [11] Wu J-G (吴建国), Zhang X-Q (张小全), Wang Y-H (王艳辉), *et al.* The effect of land use changes on the distribution of soil organic carbon in physical fractionation of soil. *Scientia Silvae Sinicae* (林业科学), 2002, **38**(4): 19–29 (in Chinese)
- [12] Li G-L (李光录), Yao J (姚军), Pang X-M (庞小明). Distribution and erosion process of organic carbon in the different particle size fractions in Loess Hills region. *Acta Pedologica Sinica* (土壤学报), 2008, **45**(4): 740–744 (in Chinese)
- [13] Liu T-Z (刘涛泽), Liu C-Q (刘丛强), Zhang W (张伟). Distribution characteristics of organic carbon and  $\delta^{13}\text{C}$  composition in different soil particle size in the slope of vegetation recovery. *Ecology and Environment* (生态环境), 2008, **17**(5): 2031–2036 (in Chinese)
- [14] Li L-Q (李恋卿), Pan G-X (潘根兴), Zhang P-J (张平究), *et al.* Vegetation recovery in degraded red earth: Effect on organic carbon and Pb and Cd partitioning in soil particle size fractions. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2001, **21**(11): 1769–1774 (in Chinese)
- [15] Ma H-L (马红亮), Zhu J-G (朱建国), Xie Z-B (谢祖彬), *et al.* Effect of  $\text{CO}_2$  concentration increase in the atmosphere on carbon in different sized soil particles. *Journal of Subtropical Resources and Environment* (亚热带资源与环境学报), 2006, **1**(1): 33–40 (in Chinese)
- [16] Norton JB, Sandor JA, White CS. Hill slope soils and organic matter dynamics within a native American agroecosystem on the Colorado Plateau. *Soil Science Society of America Journal*, 2003, **67**: 225–234
- [17] Zhang J-Y (张继义), Zhao H-L (赵哈林). Changes in soil particles fraction and their effects on stability of soil-vegetation system in restoration processes of degraded sandy grassland. *Ecology and Environmental Sciences* (生态环境学报), 2009, **18**(4): 1395–1401 (in Chinese)
- [18] Jia X-H (贾晓红), Li X-R (李新荣), Chen Y-W (陈应武), *et al.* The influence of vegetation recovery on organic carbon and nitrogen distribution in surface soil particle of dry area. *China Environmental Science* (中国环境科学), 2006, **26**(5): 560–564 (in Chinese)
- [19] Zhao LP, Sun YJ, Zhang XP, *et al.* Soil organic carbon in clay and silt sized particles in Chinese mollisols: Relationship to the predicted capacity. *Geoderma*, 2006, **132**: 315–323
- [20] Tang G-M (唐光木), Xu W-L (徐万里), Sheng J-D (盛建东), *et al.* The variation of soil organic carbon and soil particle-sized in Xinjiang oasis farmland of different years. *Acta Pedologica Sinica* (土壤学报), 2010, **47**(2): 279–284 (in Chinese)
- [21] Peng X-H (彭新华), Zhang B (张斌), Zhao Q-G (赵其国). Effect of soil organic carbon on aggregate stability after vegetative restoration on severely eroded red soil. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2003, **23**(10): 2176–2183 (in Chinese)
- [22] Virto I, Moni C, Swanston C, *et al.* Turnover of intra- and extra-aggregate organic matter at the silt-size scale. *Geoderma*, 2010, **156**: 1–10
- [23] Wang Y (王岩), Yang Z-M (杨振明), Shen Q-R (沈其荣). Distribution of C, N, P and K in different particle size fractions of soil and availability of N in each fraction. *Acta Pedologica Sinica* (土壤学报), 2000, **37**(1): 85–94 (in Chinese)
- [24] Christensen BT. Physical Fraction of Soil and Organic

Matter in Primary Particle Size and Density Separates: Advances in Soil Science. New York: Springer Verlag, 1992

[25] Rosell RA, Galantini JA, Suner LG. Long-term crop rotation effect on organic carbon, nitrogen, and phosphorus in Haplustoll soil fraction. *Arid Soil Research and Rehabilitation*, 2000, **14**: 309–315

[26] Mrabeta R, Saber N, Elbrahlia A, *et al.* Total, particulate organic matter and structural stability of a Calcixeroll soil under different wheat rotations and tillage systems in a semiarid area of Morocco. *Soil & Tillage Research*, 2001, **57**: 225–235

[27] Franzluebbers AJ, Stuedemann JA, Schomberg HH, *et al.* Soil organic C and N pools under long-term pasture management in the Southern Piedmont USA. *Soil Biology & Biochemistry*, 2000, **32**: 469–478

[28] Giardina CP, Ryan MG, Hubbard RM, *et al.* Tree species and soil textural controls on carbon and nitrogen mineralization rates. *Soil Science Society of America Journal*, 2001, **65**: 1272–1279

[29] Wu J-G (吴建国), Zhang X-Q (张小全), Xu D-Y (徐德应). The mineralization of soil organic carbon under different land uses in the Liupan Mountain forest zone. *Acta Phytocologica Sinica* (植物生态学报), 2004, **28**(4): 530–538 (in Chinese)

[30] Cardon ZG, Hungate BA, Cambardella CA, *et al.* Contrasting effects of elevated CO<sub>2</sub> on old and new soil carbon pools. *Soil Biology & Biochemistry*, 2001, **33**: 365–373

[31] Li L-Q (李恋卿), Pan G-X (潘根兴), Zhang X-H (张旭辉), *et al.* Stable isotopic composition of organic carbon in soil aggregates. *Journal of Nanjing Agricultural University* (南京农业大学学报), 2000, **23**(1): 114–116 (in Chinese)

[32] Xu R-M (徐汝民), Li Z-P (李忠佩), Che Y-P (车玉萍), *et al.* Temperature sensitivity of organic C mineralization in gray forest soils after land use conversion. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2009, **20**(5): 1020–1025 (in Chinese)

作者简介 李忠武,男,1972 年生,博士,教授. 主要从事土壤侵蚀及其环境效应研究. E-mail: lizw@hnu.edu.cn

责任编辑 杨 弘