

# 植被恢复对亚热带侵蚀红壤团聚体养分分布的影响

区晓琳<sup>1,2,3</sup>, 陈志彪<sup>1,2,3</sup>, 姜超<sup>1,2</sup>, 陈志强<sup>1,2,3</sup>, 任天婧<sup>1,2</sup>, 陈海滨<sup>1,2</sup>

(1. 湿润亚热带山地生态国家重点实验室培育基地, 福州 350007; 2. 福建师范大学地理科学学院, 福州 350007; 3. 福建师范大学地理研究所, 福州 350007)

**摘要:** 为深入了解不同植被恢复年限下土壤团聚体养分分布特征, 以典型红壤侵蚀区福建省长汀县河田地区恢复年限分别为 0, 5, 10, 15, 30, 80 a 的坡地土壤为研究对象, 分别对 0—20 cm 和 20—40 cm 土层不同粒径团聚体养分含量进行测定, 并分析了它们与不同团聚体的相关关系。结果表明: (1) 植被恢复过程中, 土壤团聚体有机碳、全氮、全磷、全钾、速效磷和速效钾含量的变化范围分别为 2.06~27.71 g/kg, 0.54~2.12 g/kg, 0.034~0.171 g/kg, 2.20~6.89 g/kg, 0.31~3.30 mg/kg 和 7.35~85.71 g/kg; (2) 有机碳、全氮、全磷和速效磷含量随着团聚体粒径的减小总体上表现出显著升高趋势 ( $P < 0.05$ ), 全钾和速效钾含量无明显差异 ( $P > 0.05$ ); (3) 随植被恢复年限增加, 各粒径团聚体中有机碳、全氮、全磷、速效磷含量总体上呈显著升高趋势 ( $P < 0.05$ ), 全钾含量先升高后降低, 而速效钾含量表现出波动增加趋势; (4) 恢复初期 (0 a 和 5 a) 不同土层间团聚体养分含量无明显变化 ( $P > 0.05$ ), 其它恢复年限 0—20 cm 土层团聚体有机碳、全氮、全磷、速效磷和速效钾含量显著高于 20—40 cm 土层 ( $P < 0.05$ ); (5) 团聚体对土壤养分的贡献率表现为 ( $> 5$  mm)  $>$  (2~5 mm)  $>$  (0.5~1 mm)  $>$  (1~2 mm)  $>$  (0.25~0.5 mm)  $>$  ( $< 0.25$  mm),  $> 2$  mm 粒径养分贡献率达 34.18%~49.93%, 土壤养分含量与  $> 0.25$  mm 粒径相关性较强 ( $P < 0.01$ )。植被恢复在降低土壤侵蚀的同时, 土壤团聚体养分含量明显增加, 土壤结构得以改善, 养分固持能力得到加强。

**关键词:** 植被恢复; 土壤团聚体; 养分分布; 红壤侵蚀区

**中图分类号:** S152.4; 154.4

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1009-2242(2016)06-0230-09

**DOI:** 10.13870/j.cnki.stbcbx.2016.06.039

## Effect of Vegetation Restoration on Nutrient Distribution Within Aggregate of Subtropical Eroded Red Soils

OU Xiaolin<sup>1,2,3</sup>, CHEN Zhibiao<sup>1,2,3</sup>, JIANG Chao<sup>1,2</sup>,

CHEN Zhiqiang<sup>1,2,3</sup>, REN Tianjing<sup>1,2</sup>, CHEN Haibin<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory for Subtropical Mountain Ecology (Ministry of Science and Technology and Fujian Province Funded), Fuzhou 350007; 2. College of Geographical Sciences, Fujian Normal University, Fuzhou 350007; 3. Institute of Geography, Fujian Normal University, Fuzhou 350007)

**Abstract:** In order to understand the distribution characteristics of soil aggregate nutrients under different vegetation restoration times, we selected typical eroded red soil sample plots with different restoration time (0 year, 5 years, 10 years, 15 years, 30 years and 80 years), which located in Hetian Town, Changting County, Fujian Province of subtropical China in this paper. Nutrient contents of different soil aggregate sizes ( $> 5$  mm, 2—5 mm, 1—2 mm, 0.5—1 mm, 0.25—0.5 mm, and  $< 0.25$  mm) with different depths of soil layers (0—20 cm and 20—40 cm) of sample plots were measured, and the correlation of nutrient contents between soil and aggregates were analyzed as well. The results are as follow: (1) The contents of organic carbon, total nitrogen, total phosphorus, total potassium, available phosphorus and available potassium within soil aggregates were 2.06 to 27.71 g/kg, 0.54 to 2.12 g/kg, 0.034 to 0.171 g/kg, 2.20 to 6.89 g/kg, 0.31 to 3.30 mg/kg and 7.35 to 85.71 g/kg, respectively, with the process of vegetation restoration; (2) The contents of organic carbon, total nitrogen, total phosphorus and available phosphorus generally increased with the decreasing of aggregate-size fraction ( $P < 0.05$ ), but the contents of total potassium and

收稿日期: 2016-05-19

资助项目: 国家自然科学基金项目“南方红壤侵蚀区芒萁散布的地学分析及及时空模拟”(41171232); 国家自然科学基金项目“南方离子型稀土矿区芒萁的蔓延格局与稀土迁聚响应”(41371512); 国家科技支撑计划项目“南方红壤水土流失治理技术及示范”(2013BAC08B03)

第一作者: 区晓琳(1991—), 女, 硕士研究生, 主要从事退化地生态恢复与重建研究。E-mail: xiaolinou123@163.com

通信作者: 陈志彪(1962—), 男, 博士, 教授, 主要从事水土保持、自然资源与环境研究。E-mail: chenzhb408@vip.163.com

available potassium had no significant difference ( $P>0.05$ ); (3) During different aggregate size fractions, the contents of organic carbon, total nitrogen, total phosphorus and available phosphorus within soil aggregate generally increased with the years of vegetation restoration ( $P<0.05$ ), while the content of total potassium firstly increased and decreased finally, and the content of available potassium showed a fluctuant increase tendency; (4) At the early period of vegetation restoration (0 and 5 years), the nutrient contents of soil aggregate of 2 layers kept relatively consistent tendency, and soil aggregate nutrient contents in 0—20 cm soil layer were significantly higher than in 0—20 cm layer; (5) The decreasing order of contribute rate of different aggregate fractions to soil nutrient was ( $>5$  mm) $>(2-5$  mm) $>(0.5-1$  mm) $>(1-2$  mm) $>(0.25-0.5$  mm) $>(<0.25$  mm), and the contribute rate of  $>2$  mm aggregates were 34.18% to 49.93%; soil nutrient contents were highly related to the  $>0.25$  mm aggregates ( $P<0.01$ ). In summary, soil aggregate nutrient content increases obviously associated with the improvement of soil structure and the promotion of nutrient sequestration, while soil erosion were controlled by the measure of vegetation restoration.

**Keywords:** vegetation restoration; soil aggregate; nutrient distribution; eroded red soil region

土壤团聚体是土壤结构的基本单元,通常由不同尺度矿物颗粒和胶体物质共同参与下发生凝聚胶结作用结合形成的多孔介质结构体,它是土壤养分的存储场所及微生物的生存环境,对土壤物理、化学和生物学特征产生重要影响<sup>[1]</sup>。在侵蚀退化地区植被恢复过程中土壤碳氮磷钾等养分的固持能力及演变规律是反映土壤肥力与生物地球化学循环的重要环节,也是定量评价恢复效果的重要组成部分<sup>[2-3]</sup>。不同粒径团聚体养分含量存在较大差异,了解土壤养分含量在土壤团聚体中的分布特征,对理解团聚体形成过程与机制、土壤养分循环及肥力保持潜力具有重要意义。通常来说,对土壤养分含量的定义大多只包含氮磷钾矿质元素,而在侵蚀区土壤由于侵蚀破坏造成肥力下降,有机碳在植被恢复过程中所起的作用不容忽视,部分研究<sup>[3-4]</sup>也把有机碳作为土壤养分的组成部分,因此本研究所指养分也为包括碳氮磷钾元素的广义养分。随着植被逐渐恢复,土壤团聚体稳定性、有机碳和全氮含量明显升高,大团聚体有机碳、全氮含量及 C/N 比高于微团聚体<sup>[4]</sup>。Wang 等<sup>[5]</sup>对川西山区不同植茶年限茶园土壤微团聚体有机碳和养分特征研究发现,有机碳和全氮含量主要集中在 50~250  $\mu\text{m}$  粒径,速效磷和速效钾含量在  $<1$   $\mu\text{m}$  粒径最高,微团聚体和土壤养分库随着植茶年限的延长显著增加;Erktan 等<sup>[6]</sup>对阿尔卑斯山南麓强度侵蚀区域沟床系统研究亦显示,在土壤颗粒和植被细根的参与下、团聚体表现出强烈的稳定化特征,土壤固碳能力明显增加。目前,有关土壤团聚体的研究以团聚体形成机制<sup>[4]</sup>、稳定性及分形特征<sup>[4,6]</sup>和固持碳氮<sup>[7]</sup>较多,而在植被恢复过程中土壤团聚体养分含量分布特征的研究相对较少<sup>[8-9]</sup>。

历史上由于植被破坏,福建省长汀县河田镇作为我国中亚热带花岗岩红壤生态系统脆弱区的典型代表,境内多丘陵山地,土壤贫瘠,抗蚀性极差,保水保

肥能力低,生态环境恶化<sup>[10]</sup>。自上世纪 80 年代以来,该地区相继实施一系列以乔—灌—草生态林草措施及封禁措施,生态恢复效果显著;截止 2013 年,该县植被覆盖度明显增加,土壤侵蚀类型以轻度为主,水土流失面积减少 448.39  $\text{km}^2$ ,占全县国土总面积 14.51%<sup>[11]</sup>。已有学者对植被恢复过程中土壤碳矿化<sup>[12]</sup>、非保护性碳动态<sup>[13]</sup>及其生态化学计量特征<sup>[14]</sup>等进行比较系统研究,但对不同粒径团聚体养分含量的分布规律的认识尚较模糊。因此,本文以侵蚀红壤典型地区福建省长汀县不同恢复年限(0,5,10,15,30,80 a)坡地土壤为研究对象,通过时空代换方法,分析了各粒径团聚体土壤有机碳、全氮、全磷、全钾、速效磷和速效钾含量变化特征,探讨植被恢复对侵蚀红壤团聚体养分赋存的影响及土壤与团聚体养分特征的关系,以期揭示地区土壤团聚体养分积累转化及定量评价植被恢复效果提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于福建省西南部长汀县河田镇朱溪小流域境内,属中亚热带季风湿润气候,年均气温 18.5  $^{\circ}\text{C}$ ,年均降雨量 1 710 mm,年均蒸发量 1 403 mm,年均无霜期 260 d, $\geq 10$   $^{\circ}\text{C}$ 积温 4 100~4 650  $^{\circ}\text{C}$ 。土壤类型以燕山运动晚期中粗晶花岗岩风化发育形成的红壤、侵蚀性红壤为主,砂粒含量较高,抗蚀性极差;由于长期的土壤侵蚀和人为干扰,常绿阔叶林为主的地带性植被遭到严重破坏,几乎被马尾松(*Pinus massoniana* Lamb.)等次生林替代。自 20 世纪 80 年代以来,当地水土保持部门在研究区采取种植生态(林)草等植被恢复措施,在保留“老头松”的基础上,补植木荷(*Schima superba* Gardn. et Champ.)、枫香(*Liquidambar formosana* Hance.)、胡枝子(*Lespedeza bicolor* Turcz.)、杉木(*Cunninghamia lanceolata*

(Lamb.) Hook.) 等乡土树种, 辅植宽叶雀稗(*Paspalum wettsteinii* Hackel.)、香根草(*Vetoveria zizanioides* Linn.) 及百喜草(*Paspalum notatum* Flugge.) 等草本植物。采用时空代换方案, 在野外勘查的基础上, 依据典型性和代表性为原则, 考虑成土母质和立地条件等

综合因素, 选取植被恢复前本底值一致, 即土壤母质为花岗岩, 土壤 A 层基本剥蚀殆尽, B 层厚度仅为 5~10 cm, 地形条件、侵蚀状况和人为扰动相似, 恢复年限分别为 0(未治理地), 5, 10, 15, 30, 80 a 的 6 处典型样地进行采样。各样地基本概况见表 1。

表 1 6 处不同恢复年限样地基本概况

| 恢复年限/a | 地理坐标                    | 坡度/(°) | 坡向/(°) | 海拔/m | 样地概况                                                                   |
|--------|-------------------------|--------|--------|------|------------------------------------------------------------------------|
| 0      | N25°39′45″, E116°28′5″  | 13     | SW30   | 367  | 基岩裸露, 坡面侵蚀严重, 浅沟发育, 植被稀少, 株高约 1.6 m“老头松”零散分布, 芒萁镶嵌其中, 植被总盖度 25%。       |
| 5      | N25°39′39″, E116°28′5″  | 25     | NW30   | 388  | 坡顶部分基岩裸露, 凋落物较少; 植被以马尾松、胡枝子、枫香和芒萁为主; 马尾松株高约 1.8 m; 植被总盖度 80%。          |
| 10     | N25°39′32″, E116°27′38″ | 15     | SE18   | 330  | 芒萁覆盖地表, 凋落物厚度 0~3 cm, 植被以马尾松、黄檀木、芒萁和五节芒为主, 马尾松树高约 2.3 m; 植被总盖度 90%。    |
| 15     | N25°40′3″, E116°27′24″  | 20     | SE16   | 320  | 地表基本被芒萁覆盖, 凋落物厚度 0~5 cm, 植物群落以马尾松、黄檀、芒萁和金茅为主, 马尾松树高约 3.2 m; 植被总盖度 90%。 |
| 30     | N25°40′16″, E116°26′7″  | 26     | SW40   | 329  | 林下植被稀少, 凋落物厚度 5~8 cm, 植物群落以杉木马尾松, 胡枝子和芒萁为主, 马尾松树高约 10.5 m; 植被总盖度 95%。  |
| 80     | N25°37′54″, E116°27′39″ | 7      | W10    | 329  | 林下小型灌木较多, 凋落物厚度 5~10cm, 植物群落以马尾松、枫香、荷花玉兰等为主, 马尾松株高约 18 m; 植被总盖度 98%。   |

1.2 样品采集与测定

于 2015 年 8 月, 在每个样地内设置 3 个 20 m×20 m 的标准样方, 相邻样方间距约 10 m, 近等高线平行布设(个别样地坡面太短, 未按上下坡布设), 样方共计 18 个。每个样方内按“S”形设置 5 个采样点, 并分 0—20 cm 和 20—40 cm 两个土层采集原状土样, 同一土层的 5 点土样装入 1 个硬质塑料盒内, 用于土壤团聚体组成及养分含量的测定, 整个采样、运输过程密封平放, 尽量避免挤压, 以保持土壤结构, 共采集原状土样 36 份。原状土样在室内自然风干后, 沿自然结构轻轻掰成直径约 1 cm 的小土块, 除去植物残体、砾石等杂物, 采用沙诺维夫干筛法分离出>

5, 2~5, 1~2, 0.5~1, 0.25~0.5, <0.25 mm 共 6 级土壤团聚体百分含量, 其测定结果见表 2。

土壤团聚体养分含量采用常规方法测定, 其中有机碳和全碳含量采用碳氮元素分析仪(Elemantar vario MAX, 德国)测定; 全磷含量采用硫酸—高氯酸消煮定容及过滤, 提取待测液后, 连续流动分析仪(Skalar san<sup>++</sup>, 荷兰)测定; 全钾含量采用氢氟酸—高氯酸消煮定容及过滤, 提取待测液, 火焰分光光度计测定(FP 6140, 中国)测定; 速效磷含量采用 Mehlich3 法浸提后, 连续流动分析仪测定(Skalar san<sup>++</sup>, 荷兰); 速效钾含量采用 1 mol/L NH<sub>4</sub>OAc 浸提后, 火焰光度计法测定。

表 2 不同植被恢复年限土壤团聚体组成

| 恢复年限/a | 土层深度/cm | 团聚体质量百分比含量/% |            |            |            |             |           |
|--------|---------|--------------|------------|------------|------------|-------------|-----------|
|        |         | >5 mm        | 2~5 mm     | 1~2 mm     | 0.5~1 mm   | 0.25~0.5 mm | <0.25 mm  |
| 0      | 0—20    | 15.24±1.11   | 31.48±1.74 | 13.35±0.57 | 18.64±0.99 | 11.72±1.08  | 9.58±1.15 |
|        | 20—40   | 28.47±1.10   | 34.57±1.40 | 11.62±0.78 | 13.67±0.60 | 6.99±0.63   | 4.68±0.75 |
| 5      | 0—20    | 17.92±1.39   | 16.49±1.58 | 20.02±1.88 | 22.06±1.49 | 15.15±1.46  | 8.36±0.97 |
|        | 20—40   | 35.59±2.15   | 27.16±1.42 | 13.89±1.48 | 12.54±1.08 | 6.96±0.96   | 3.86±0.83 |
| 10     | 0—20    | 24.80±1.70   | 15.55±1.30 | 23.07±1.82 | 17.96±1.14 | 10.58±0.88  | 8.04±0.92 |
|        | 20—40   | 29.20±2.99   | 26.08±1.77 | 17.36±1.91 | 14.62±1.11 | 7.50±0.80   | 5.23±0.79 |
| 15     | 0—20    | 27.80±1.49   | 12.51±1.55 | 19.83±1.44 | 18.82±0.96 | 12.09±0.98  | 8.94±1.00 |
|        | 20—40   | 30.81±0.96   | 18.54±1.84 | 17.30±1.27 | 15.65±0.87 | 9.11±0.56   | 8.60±0.74 |
| 30     | 0—20    | 39.24±1.87   | 20.23±1.50 | 15.92±1.52 | 14.27±1.10 | 6.58±0.77   | 3.77±0.45 |
|        | 20—40   | 32.87±1.12   | 22.47±1.69 | 18.87±1.54 | 15.03±0.89 | 6.81±0.57   | 3.97±0.41 |
| 80     | 0—20    | 28.33±0.89   | 17.99±1.76 | 17.96±1.46 | 18.59±0.93 | 11.49±0.63  | 5.65±0.47 |
|        | 20—40   | 34.85±1.30   | 23.47±1.58 | 15.25±1.33 | 15.68±0.78 | 7.47±0.66   | 3.29±0.38 |

1.3 数据处理与分析

各粒径团聚体对土壤养分含量的贡献率的计算公式为:

团聚体对土壤养分含量的贡献率=该级团聚体中养分含量×该级团聚体含量/土壤养分含量×100%

数据经 Excel 初步整理后, 统计分析采用 SPSS 进行, 采用单因素方差分析(One-Way ANOVA)确定不同恢复年限对各粒径土壤团聚体养分的影响, 显著性检验采用 LSD 多重比较法(显著性水平设为 α=0.05), 图表制作通过 Origin 完成, 图表数据均以平

均值±标准差表示。

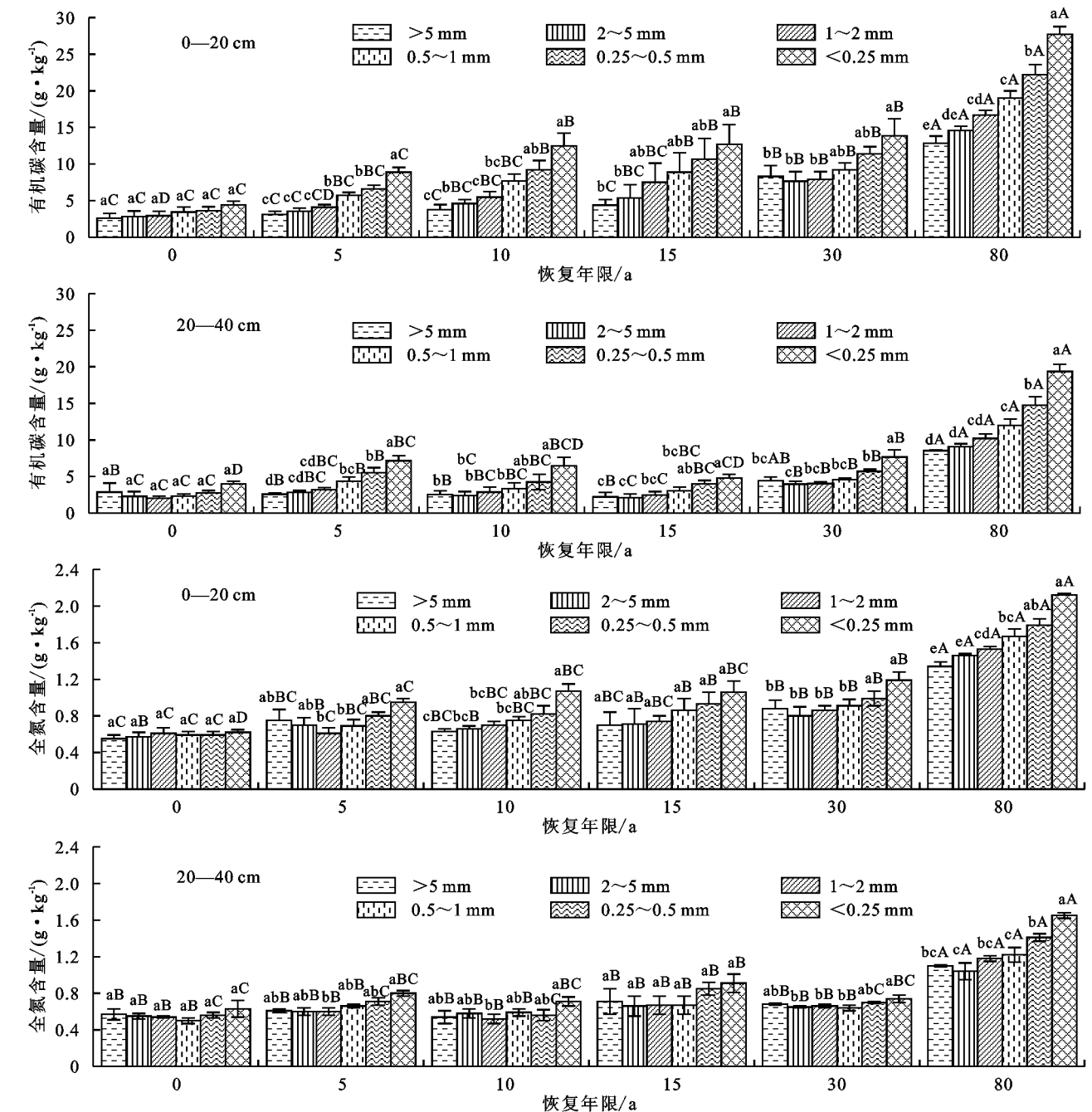
## 2 结果与分析

### 2.1 不同恢复年限土壤团聚体有机碳和全氮特征

由图1可知,不同恢复年限土壤团聚体内各粒径有机碳和全氮含量分别介于2.06~27.71 g/kg和0.54~2.12 g/kg之间,表现为随着粒径减小而显著升高的趋势(除恢复0年的未治理地团聚体有机碳和全氮含量及恢复15年全氮含量外),其中<0.25 mm粒径有机碳和全氮含量分别是>5 mm粒径的1.39~3.31倍和1.09~1.70倍,有机碳含量的增加幅度明显高于全氮含量,并且均在恢复80年后增幅达到最高。不同土层间团聚体有机碳和全氮含量的粒径分配特

征基本一致。

0—20 cm土层各粒径团聚体有机碳和全氮含量均呈现出随着恢复年限的增加而显著升高的趋势( $P<0.05$ ),其中恢复80年其含量分别是恢复0年的4.93~6.27倍和2.44~3.42倍;20—40 cm土层其含量在植被恢复前中期间(恢复30年之前)无明显差异( $P>0.05$ ),在恢复80年各粒径团聚体有机碳和全氮含量显著升高( $P<0.05$ ),分别是恢复0年的2.98~5.31倍和1.89~2.62倍。总体来说,土壤团聚体各粒径有机碳和全氮含量在0—20 cm土层普遍高于20—40 cm土层( $P<0.05$ ),表现出明显的表层富聚特征。



注:图中不同小写字母表示同一恢复年限各粒径差异显著( $P<0.05$ ),不同大写字母表示同一粒径各恢复年限差异显著( $P<0.05$ )。下同。

图1 不同植被恢复年限土壤团聚体有机碳和全氮含量

2.2 不同恢复年限土壤团聚体全磷和全钾特征

由图 2 可知,不同恢复年限团聚体侵蚀红壤各粒径全磷含量变化相对较小,变化范围为 0.034~0.171 g/kg,基本表现为 0—20 cm 土层高于 20—40 cm 土层。同一恢复年限内 0—20 cm 土层其含量在不同粒径间的分布特征与有机碳和全氮基本一致,<0.25 mm 粒径团聚体全磷含量显著高于>5 mm 粒径(恢复 0,10,15 年除外);其含量从高到低的顺序为 80 a>30 a>15 a>10 a>0 a>5 a,其中恢复 8 年是恢复 5 年的 2.64~3.57 倍。对于 20—40 cm 土层,各恢复年限从>5 mm 粒径至<0.25 mm 粒径其含量均无显著差异( $P>0.05$ ),其中恢复 0 年各粒径其含量略有升高,恢复 5 年各粒径其含量先降低后升

高,在 1~2 mm 粒径达到最小值,恢复 10 年各粒径其含量先升高后降低,0.5~1 mm 粒径出现最大值,恢复 15,30,80 年各粒径其含量呈升高趋势。

相比于全磷,不同恢复年限团聚体内各粒径全钾含量变化幅度较大,介于 2.20~6.89 g/kg 之间,且各粒径其含量随土壤深度的增加无明显差异( $P>0.05$ ) (图 2)。同一恢复年限内各粒径其含量无显著差异( $P>0.05$ );除恢复 30 年外,其他恢复年限其含量均表现出随着粒径减小略有降低的趋势。其中,不同恢复年限各粒径其含量分布特征表现为 30 a>80 a>15 a≈10 a>5 a>0 a,恢复 30 年各粒径其含量显著高于其他年限( $P<0.05$ ),是恢复 0 年全钾含量的 2.28~2.51 倍。

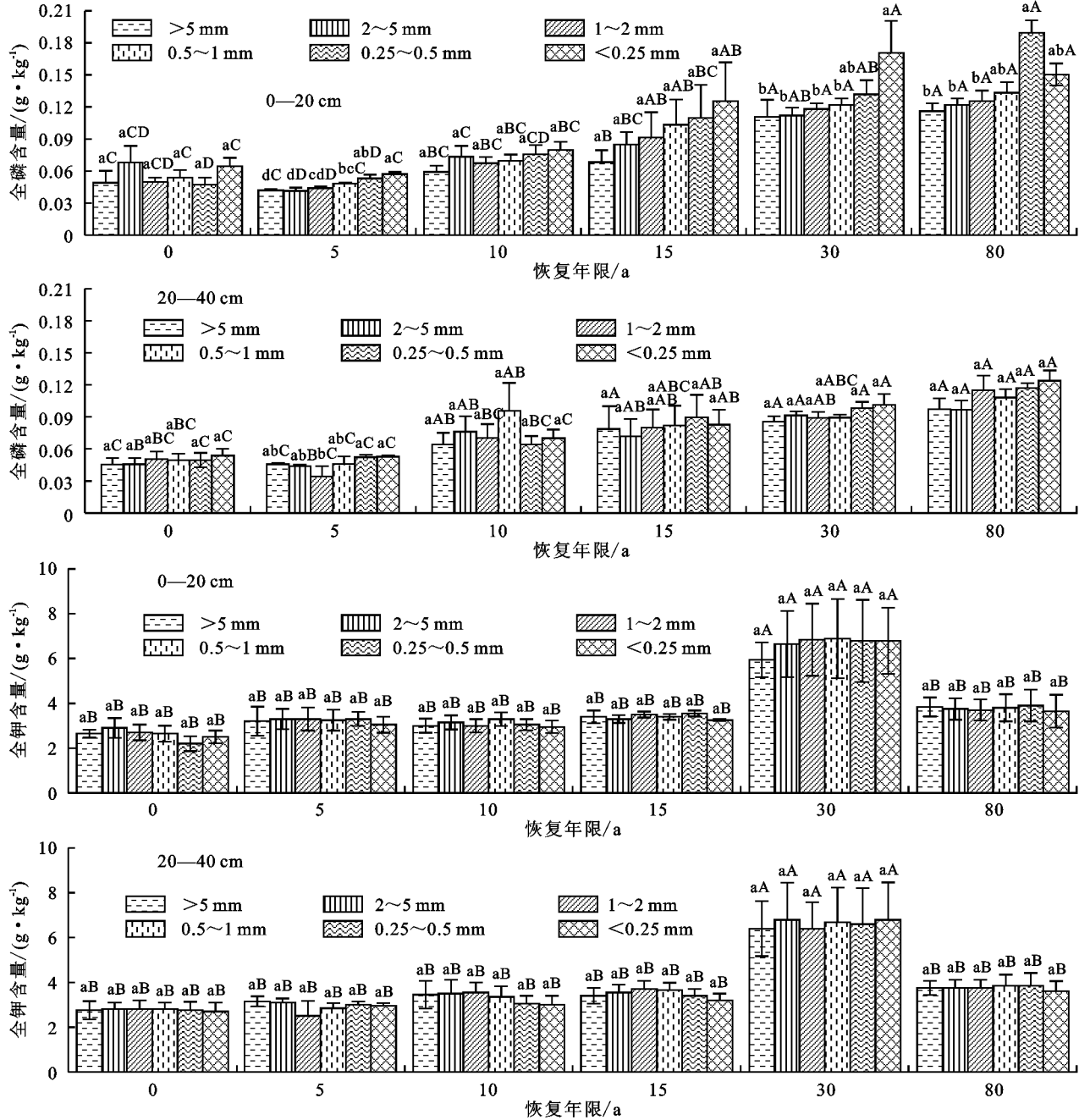


图 2 不同恢复年限土壤团聚体全磷和全钾含量

2.3 不同恢复年限土壤团聚体速效磷和速效钾特征

由图 3 可知,不同恢复年限侵蚀红壤团聚体各粒径速效磷含量差异较大,介于 0.31~3.30 mg/kg 之间,恢复 0 年和 5 年的 0—20 cm 土层其含量略高于 20—40 cm 土层,其他恢复年限内均呈现出随土壤深度增加而显著降低的趋势( $P<0.05$ )。同一恢复年限内各粒径团聚体速效磷含量的分布特征与全磷基本一致,即随着粒径的减小,速效磷含量明显升高( $P<0.05$ ),特别是植被恢复的中、后期阶段(恢复 10,15,30,80 a)。随着恢复年限的增加,其表现为 80 a>30 a>15 a>10 a>5 a>0 a,其中恢复 80 年土壤团聚体速效磷含量显著高于其它恢复年限( $P<0.05$ ),是恢复 0 年的 2.40~8.45 倍,是恢复 5 年的 2.64~

3.57 倍,恢复 10 年和 15 年土壤团聚体速效磷含量无显著差异( $P>0.05$ )。

从图 3 还可以看出,不同恢复年限团聚体内速效钾含量介于 7.35~85.71 mg/kg 之间,不同土层间团聚体速效钾含量表现为 0—20 cm 土层高于 20—40 cm 土层。恢复 10 年和 15 年土壤团聚体速效钾含量随着粒径的减小而显著升高( $P<0.05$ ),其他恢复年限各粒径团聚体无显著差异( $P>0.05$ ),同一恢复年限内各粒径其含量无显著差异( $P>0.05$ );其含量从高到低的顺序为 80 a>5 a≈10 a>30 a>0 a>15 a,恢复 80 年各粒径团聚体速效钾含量显著高于其他年限( $P<0.05$ ),是恢复 15 年速效钾含量的 3.09~11.33 倍。

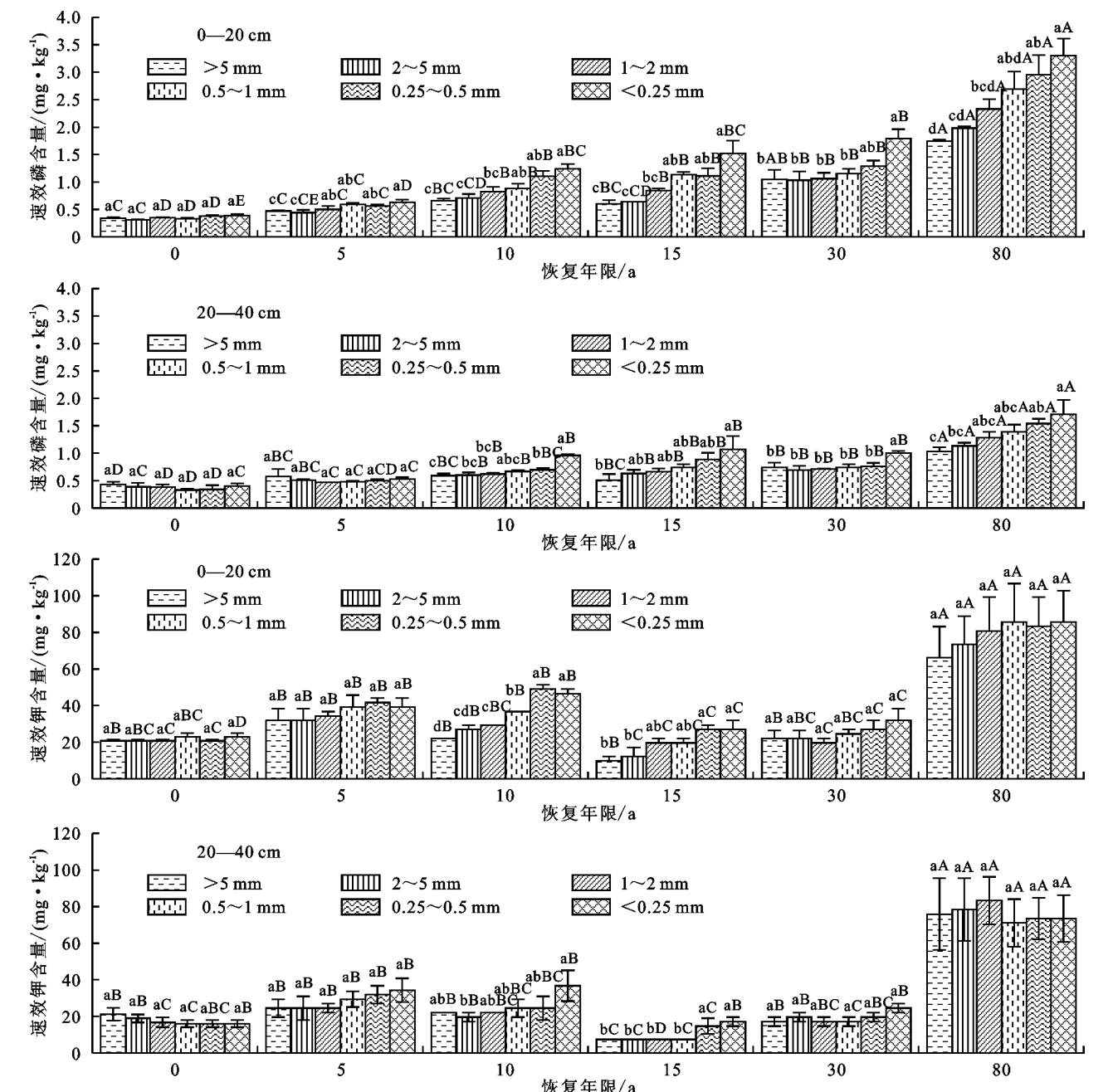


图 3 不同恢复年限土壤团聚体速效磷和速效钾含量

2.4 各养分含量在土壤与团聚体的分布关系

通过土壤团聚体组成、各粒径团聚体养分含量以及土壤中对各养分含量,可推算出不同粒径团聚体养分对土壤养分的贡献特征。

从表 3 可知,在典型红壤侵蚀区植被恢复过程中各粒径团粒体对土壤有机碳、全氮、全磷、全钾、速效磷和速效钾含量的累积贡献率分别为 89.80%,

96.60%,90.96%,97.74%,71.99%和 91.92%,不同粒径团聚体对土壤养分含量的贡献大小表现为(>5 mm)>(2~5 mm)>(0.5~1 mm)>(1~2 mm)>(0.25~5 mm)>(<0.25 mm),其中 34.18%~49.93%的贡献率来自>2 mm 粒径团聚体,0.5~2 mm 粒径团聚体占 24.2%~33.3%,<0.5 mm 粒径团聚体占 13.61%~21.42%。

表 3 植被恢复过程中各粒径团聚体对土壤养分含量的贡献

| 土壤养分 | 土壤团聚体对土壤养分含量的贡献率/% |              |              |              |              |            |
|------|--------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|------------|
|      | >5 mm              | 2~5 mm       | 1~2 mm       | 0.5~1 mm     | 0.25~0.5 mm  | <0.25 mm   |
| 有机碳  | 21.79±1.95a        | 16.05±1.65ab | 13.91±1.18bc | 16.63±1.49ab | 11.62±1.25cd | 9.80±1.17d |
| 全氮   | 26.29±1.65a        | 20.27±1.32b  | 15.86±0.78c  | 16.22±0.93c  | 10.17±0.78d  | 7.79±0.74e |
| 全磷   | 22.93±1.69a        | 22.38±3.31a  | 14.43±.83b   | 15.14±1.95b  | 9.44±1.00c   | 6.64±0.84d |
| 全钾   | 28.01±2.03a        | 21.92±1.47b  | 16.32±0.80c  | 16.98±0.77c  | 8.89±0.65d   | 5.62±0.48e |
| 速效磷  | 19.72±1.90a        | 14.46±0.98b  | 11.82±0.78b  | 12.38±0.89b  | 7.73±0.72c   | 5.88±0.63d |
| 速效钾  | 23.42±2.02a        | 18.89±1.53ab | 15.39±1.04b  | 16.26±1.26b  | 10.62±1.05c  | 7.34±0.74d |

注:同行数据不同小写字母表示不同粒径间差异显著( $P<0.05$ )。

为进一步阐明土壤和团粒结构各养分含量的分布关系,对植被恢复过程中侵蚀红壤原土和团聚体各粒径中各养分的相关程度进行逐步线性回归分析(表 4)。结果表明,土壤中各养分含量与团聚体中对应养分含量的决定系数( $R^2$ )介于 0.209~0.868 之间,其中土壤有机碳含量与 0.25~0.5 mm 粒径团聚体有机碳含量呈极显著正相关( $P<0.01$ ),土壤全氮含量与 1~2 mm 和<0.25 mm 粒径团聚体全氮含量呈极显著正相关

( $P<0.01$ ),土壤全磷含量与 1~2 mm 粒径团聚体全磷含量呈极显著正相关( $P<0.01$ ),土壤全钾含量与>5 mm 粒径团聚体全钾含量呈极显著正相关( $P<0.01$ ),土壤速效磷含量与>5 mm 和 0.25~0.5 mm 粒径团聚体速效磷含量呈极显著正相关( $P<0.01$ ),与 2~5 mm 粒径团聚体速效磷含量呈极显著负相关( $P<0.01$ ),土壤速效钾含量与 0.25~0.5 mm 粒径团聚体速效钾含量呈极显著正相关( $P<0.01$ )。

表 4 植被恢复过程中土壤(Y)和团聚体(X)各养分含量的逐步回归方程

| 土壤养分 | 回归方程式                                                        | 决定系数 $R^2$ | 显著性水平 |
|------|--------------------------------------------------------------|------------|-------|
| 有机碳  | $Y=0.80X_{0.25\sim0.5mm}+0.22$                               | 0.868      | 0.000 |
| 全氮   | $Y=0.58X_{1\sim2mm}+0.35X_{<0.25mm}+0.01$                    | 0.868      | 0.000 |
| 全磷   | $Y=0.72X_{1\sim2mm}+0.04$                                    | 0.460      | 0.000 |
| 全钾   | $Y=0.53X_{>5mm}+1.95$                                        | 0.209      | 0.005 |
| 速效磷  | $Y=1.11X_{0.25\sim0.5mm}-1.29X_{2\sim5mm}+0.57X_{>5mm}+0.45$ | 0.802      | 0.000 |
| 速效钾  | $Y=0.77X_{0.25\sim0.5mm}+9.73$                               | 0.758      | 0.000 |

3 讨论

团聚体作为土壤肥力的调节器,其数量和质量不仅影响土壤孔隙性、抗蚀性等土壤物理特性,一定程度上也反映了土壤养分供储与转化能力。本研究中侵蚀红壤团聚体以>1 mm 粒径为主,占 54.43~76.64%,随着恢复年限的增加,0—20 cm 土层大团聚体(>5 mm 粒径)显著增加,<0.25 mm 粒径团聚体含量明显减少,20—40 cm 土层各粒径团聚体组成特征无明显变化(表 2),这种变化规律反映了植被恢复对不同粒径及土层团聚体分布特征的影响。

目前有关植被恢复过程中土壤团聚体养分含量粒径分配关系的研究结论存在一定差异:王景燕等<sup>[15]</sup>对川西退耕 5 年坡地研究发现,团聚体有机碳和全氮含量随粒径的减小呈“V”形变化趋势;刘毅等<sup>[16]</sup>对黄土高原不同植被类型土壤研究发现,团聚体有机氮含量先升高后减低,最大值出现在 1~2

mm 粒径;谢锦升等<sup>[17]</sup>亦对长汀地区植被恢复前中期坡地土壤研究发现,团聚体有机碳含量随粒径的减小表现出波动变化。本研究中侵蚀红壤团聚体中有机碳、全氮、全磷和速效磷含量随着粒径的减小总体上呈增加趋势,全钾和速效钾含量无明显差异。导致各粒径团聚体养分分布特征存在较大差异的可能原因包括不同成土母质化学组成差异、土壤类型、植被条件、侵蚀状况及人为活动影响等;不同团聚体测试方法也是引起团聚体养分含量差异的重要因素,本研究采用干筛法分离团聚颗粒,一定程度上减小了湿筛筛离过程对团聚体中养分溶解及流失的影响,研究结果与前人通过干筛法获得的研究结果基本一致<sup>[9]</sup>。

植被恢复能明显增加水稳性团聚体含量,促进大团聚体形成,对改善土壤结构具有重要影响;与此同时,良好的团聚结构能在土壤水、气、热和养分循环过程中充分发挥积极效应,地上植被生长及改善土壤环

境创造有利条件。王涛等<sup>[18]</sup>研究表明,随着黄花种植年限的增加,川中地区护坡土壤风干和水稳性团聚体含量明显增加;黄晓强等<sup>[19]</sup>研究发现,随着林龄的增加,北方山区人工林土壤团聚体有机碳含量及储量均表现出增加趋势。在本研究中,恢复0年土壤 $>5$  mm 粒径大团聚体含量明显偏低,且团聚体中养分含量均处于极低水平,表现出明显退化的特征。随着植被恢复年限的延长,各粒径团聚体有机碳、全氮、全磷、速效磷含量明显升高,全钾含量先升高后降低,在恢复30年达到最大值,速效钾含量表现出升高—降低—升高的波动变化,最高含量出现在恢复80年的样地。植被恢复过程中不同养分在团聚体的分布特征具有一定差异,这主要与特定养分的输入/输出方式有关,如退化生态系统枯枝、落叶及根系等凋落物矿化分解是侵蚀地区土壤有机碳与全氮含量的重要来源<sup>[20]</sup>;中亚热带地区土壤全磷含量普遍较低,主要与红壤成土过程、风化特征以及土壤侵蚀有关<sup>[21]</sup>;恢复年限30年样地团聚体全钾含量显著高于其他植被恢复年限,可能与母岩中富含钾矿物风化有关<sup>[17]</sup>;作为植物生长发育所需营养的直接来源,速效磷和速效钾含量受到凋落物分解归还、植被吸收利用及降雨淋溶流失等因素的综合影响,往往对环境变化更加敏感。总体来看,植被恢复在显著增加土壤大团聚体含量的同时,对各粒径团聚体养分含量亦明显增加(全钾含量除外),且在恢复80年内未出现养分增加阈值,表明土壤恢复可能需要更长的时限。

本研究中表层 $>2$  mm 粒径团聚体含量总体上低于20—40 cm,其中恢复0年和5年表层 $>5$  mm 粒径团聚体含量明显低于20—40 cm 土层,土壤团聚体养分含量无明显变化,表明植被恢复初期土壤,植被盖度较差,侵蚀还比较严重,土壤结构遭受严重的破坏,土壤肥力较低。随着植被盖度逐渐提高后生物小循环的作用,0—20 cm 土层团聚体养分含量明显高于20—40 cm 土层(全钾含量除外),表明植被恢复对改善团聚体结构、调节土壤团聚体养分垂直分布具有重要影响。从团聚体各粒径对土壤养分的贡献率表明,团粒结构是土壤养分主要的储存场所,占养分总量71.99%~97.74%,尤其是 $>2$  mm 粒径的贡献最大,尽管较大粒径养分含量相对较低,但其数量在各粒径团聚体中占有绝对优势。土壤与团聚体养分含量逐步回归分析亦表明,土壤全氮、全磷、全钾和速效磷含量与较大粒径团聚体( $>1$  mm)的养分含量具有较强相关关系( $P<0.01$ ),而土壤有机碳含量和速效钾含量与0.25~5 mm 较小粒径团聚体的相关性较强( $P<0.01$ ),表明不同粒径对团聚体养分特征的影响具有一定差异。因此,植被恢复过程中各粒径团聚体不同养分间交互效应尚不够清楚,如土壤团聚体养分与土壤微生物结构、酶活性及有机物料矿化分解

等的关系亦有待进一步研究。

## 4 结论

(1)典型红壤侵蚀区在植被恢复过程中,土壤团聚体中有机碳、全氮、全磷和速效磷含量随着粒径的减小呈明显升高趋势,全钾和速效钾含量在各粒径间分布无明显差异。

(2)随着植被恢复年限增加,各粒径团聚体中有机碳、全氮、全磷、速效磷含量呈明显升高趋势,全钾含量先升高后降低,在恢复30年达到最大值,速效钾含量表现升高—降低—升高的波动变化。

(3)在植被恢复初期(恢复0年和5年)0—20 cm 和20—40 cm 土层团聚体养分含量无明显变化,其他恢复年限内0—20 cm 土层团聚体有机碳、全氮、全磷、速效磷和速效钾含量明显高于20—40 cm 土层,不同土层间团聚体全钾含量无明显差异。

(4)团聚体对土壤养分的贡献率从大到小为( $>5$  mm) $>(2\sim5$  mm) $>(0.5\sim1$  mm) $>(1\sim2$  mm) $>(0.25\sim5$  mm) $>(<0.25$  mm), $>2$  mm 粒径占34.18%~49.93%,土壤全氮、全磷、全钾和速效磷含量与 $>0.25$  mm 粒径团聚体对应养分含量具有较强相关关系( $P<0.01$ ),土壤有机碳含量与速效钾含量与0.25~5 mm 粒径团聚体的相关性较强( $P<0.01$ )。

以上结果表明,通过植被恢复措施,侵蚀红壤土壤团粒结构逐渐得以改善,团聚体中各养分含量明显增加,土壤肥力保育能力得到加强。

### 参考文献:

- [1] Six J, Bossuyt H, Degryze S, et al. A history of research on the link between micro-aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics[J]. Soil and Tillage Research, 2004, 79(1): 7-31.
- [2] Zuo X A, Zhao X Y, Zhao H L, et al. Spatial heterogeneity of soil properties and vegetation-soil relationships following vegetation restoration of mobile dunes in Horqin Sandy Land, Northern China[J]. Plant and Soil, 2009, 318(1/2): 153-167.
- [3] Feng X M, Fu B J, Lu N, et al. How ecological restoration alters ecosystem services: An analysis of carbon sequestration in China's Loess Plateau[J]. Scientific Reports, 2013, 3: 2846.
- [4] An S S, Mentler A, Mayer H, et al. Soil aggregation, aggregate stability, organic carbon and nitrogen in different soil aggregate fractions under forest and shrub vegetation on the plateau, China[J]. Catena, 2010, 81(3): 226-233.
- [5] Wang S Q, Li T X, Zheng Z C. Effect of tea plantation age on the distribution of soil organic carbon and nutrient within micro-aggregates in the hilly region of western Sichuan, China[J]. Ecological Engineering, 2016, 90(5): 113-119.



- [6] Erktan A, Cécillon L, Graf F, et al. Increase in soil aggregate stability along a Mediterranean successional gradient in severely eroded gully bed ecosystems; Combined effects of soil, root traits and plant community characteristics[J]. *Plant and Soil*, 2016, 398(1/2): 121-137.
- [7] Cheng M, Xue Z J, Xiang Y, et al. Soil organic carbon sequestration in relation to revegetation on the Loess Plateau, China[J]. *Plant and Soil*, 2015, 397(1/2): 31-42.
- [8] 邢旭明, 王红梅, 安婷婷, 等. 长期施肥对棕壤团聚体组成及其主要养分赋存的影响[J]. *水土保持学报*, 2015, 29(2): 267-273.
- [9] 郑子成, 何淑勤, 王永东, 等. 不同土地利用方式下土壤团聚体中养分的分布特征[J]. *水土保持学报*, 2010, 24(3): 170-174.
- [10] 马华, 钟炳林, 岳辉, 等. 典型红壤区自然生态修复的适用性[J]. *生态学报*, 2015, 35(18): 6148-6156.
- [11] 周伟东, 汪小钦, 吴佐成, 等. 1988—2013 年南方花岗岩红壤侵蚀区长汀县水土流失时空变化[J]. *中国水土保持科学*, 2016, 14(2): 49-58.
- [12] 张浩, 吕茂奎, 江军, 等. 侵蚀红壤区植被恢复对表层与深层土壤有机碳矿化的影响[J]. *水土保持学报*, 2016, 30(1): 244-249.
- [13] 吕茂奎, 谢锦升, 周艳翎, 等. 红壤侵蚀地马尾松人工林恢复过程中土壤非保护性有机碳的变化[J]. *应用生态学报*, 2014, 25(1): 37-44.
- [14] 张秋芳, 陈奶寿, 陈坦, 等. 不同恢复年限侵蚀红壤生态化学计量特征[J]. *中国水土保持科学*, 2016, 14(2): 59-66.
- [15] 王景燕, 龚伟, 胡庭兴. 川南坡地不同退耕模式对土壤腐殖质及团聚体碳和氮的影响[J]. *水土保持学报*, 2012, 26(2): 155-160.
- [16] 刘毅, 李世清, 李生秀. 黄土高原不同类型土壤团聚体中氮库分布的研究[J]. *中国农业科学*, 2007, 40(2): 304-313.
- [17] 谢锦升, 杨玉盛, 陈光水, 等. 植被恢复对退化红壤团聚体稳定性及碳分布的影响[J]. *生态学报*, 2008, 28(2): 702-709.
- [18] 王涛, 何丙辉, 秦川, 等. 不同种植黄花生生物埂护坡土壤团聚体组成及其稳定性[J]. *水土保持学报*, 2014, 28(5): 153-158.
- [19] 黄晓强, 信忠保, 赵云杰, 等. 北京山区典型人工林土壤团聚体组成及其有机碳分布特征[J]. *水土保持学报*, 2016, 30(1): 235-243.
- [20] 朱秋莲, 邢肖毅, 张宏, 等. 黄土丘陵沟壑区不同植被区土壤生态化学计量特征[J]. *生态学报*, 2013, 33(15): 4674-4682.
- [21] Cleveland C C, Liptzin D. C : N : P stoichiometry in soil: Is there a “Redfield ratio” for the microbial biomass? [J] *Biogeochemistry*, 2007, 85(3): 235-252.
- (上接第 213 页)
- [15] 习斌, 翟丽梅, 刘申, 等. 有机无机肥配施对玉米产量及土壤氮磷淋溶的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2015, 21(2): 326-335.
- [16] 胡宏祥, 汪玉芳, 陈祝, 等. 秸秆还田配施化肥对黄褐土氮磷淋失的影响[J]. *水土保持学报*, 2015, 29(5): 101-105.
- [17] 李同杰, 刘晶晶, 刘春生, 等. 磷在棕壤中淋溶迁移特征研究[J]. *水土保持学报*, 2006, 20(4): 35-39.
- [18] 李学平, 石孝均. 模拟条件下农田磷素渗漏淋失特征研究[J]. *环境科学与技术*, 2010, 33(3): 32-36.
- [19] 李学平, 邹美玲. 农田土壤磷素流失研究进展[J]. *中国农学通报*, 2010, 26(11): 173-177.
- [20] 王心芳, 魏复盛, 齐文启, 等. 水和废水监测分析方法[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [21] 鲍士旦. 土壤农业化学分析方法[M]. 第 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [22] 杨剑虹. 土壤农化分析与环境监测[M]. 北京: 中国大地出版社, 2008.
- [23] 李建军. 《测土配方施肥技术规范》贯彻实施指导与作物配方肥技术手册[M]. 北京: 科技文化出版社, 2006.
- [24] 孔文杰. 水稻轮作下有机无机肥配施对作物产量及氮磷流失的影响[J]. *作物杂志*, 2013(3): 63-66.
- [25] 李仁英, 沈孝辉, 谢晓金, 等. 施硅对土壤—水稻系统中磷迁移的影响[J]. *土壤学报*, 2014, 51(2): 423-428.
- [26] 杜加银, 茹美, 倪吾钟. 减氮控磷钾施肥对水稻产量及养分积累的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2013, 19(3): 523-533.
- [27] 莫钊文, 李武, 段美洋, 等. 减磷对华南早晚兼用型水稻稻米品质、源库特性及磷积累的影响[J]. *西南农业学报*, 2013, 26(6): 2361-2366.
- [28] 郝小雨, 高伟, 王玉军, 等. 有机无机肥料配合施用对设施番茄产量、品质及土壤硝态氮淋失的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2012, 31(3): 538-547.
- [29] 张玉平, 荣湘民, 刘强, 等. 有机无机肥配施对旱地作物养分利用率及氮磷流失的影响[J]. *水土保持学报*, 2013, 27(3): 44-48.
- [30] 章明奎, 王丽平. 旱耕地土壤磷垂直迁移机理的研究[J]. *农业环境科学学报*, 2007, 26(1): 282-285.
- [31] 项大力, 杨学云, 孙本华, 等. 灌溉水平对壤土磷素淋失的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2010, 16(1): 112-117.
- [32] 李想, 刘艳霞, 刘益仁, 等. 有机无机肥配合对土壤磷素吸附、解吸和迁移特性的影响[J]. *核农学报*, 2013, 27(2): 253-259.
- [33] 刘之广, 陈宝成, 张民, 等. 模拟条件下太湖直湖港地区桃园土壤不同施肥处理氮磷淋失特征[J]. *水土保持学报*, 2014, 28(3): 227-231.
- [34] Azeez J O, Van Averbeke W. Fate of manure phosphorus in a weathered sandy clay loam soil amended with three animal manures [J]. *Bioresource Technology*, 2010, 101(16): 6584-6588.