

红壤侵蚀裸地植被恢复及土壤有机碳对团聚体稳定性的影响

彭新华, 张 斌, 赵其国

(中国科学院南京土壤研究所土壤圈物质循环开放实验室, 南京 210008)

摘要: 植被恢复后土壤有机质提高, 可能提高土壤团聚体稳定性, 从而增强土壤抗蚀性, 防止土壤退化。研究目的: (1) 模拟自然条件下土壤团聚体破碎机制, 研究不同恢复植被下团聚体稳定性的变化; (2) 确定不同恢复植被下土壤有机碳的积累与团聚体稳定性的关系, 以期理解侵蚀裸地植被恢复过程及土壤有机碳对土壤结构性质的贡献。供试土壤采为侵蚀裸地、恢复 14a 的胡枝子和樟树林地、30~40a 树龄的稀疏马尾松林地以及菜园地等 5 种土地利用方式。研究结果表明快速湿润是团聚体破碎的主要机制, 其团聚体稳定性(NMWD)次序为: 快速湿润<湿润震荡<慢速湿润。不同恢复植被对团聚体稳定性影响也表现不同, 在快速湿润中, 马尾松>菜园地>胡枝子>樟树、裸地。湿润震荡处理后, 其稳定性顺序是: 菜园地、马尾松>裸地>樟树>胡枝子。而在慢速湿润中不同植被影响不明显。小团聚体的稳定性显著高于大团聚体的稳定性。快速湿润和湿润震荡下土壤团聚体稳定性与有机碳含量呈显著正相关($r=0.82^{**}$, $r=0.66^{*}$), 但慢速湿润下其相关性很低($r=0.22$)。结果还表明与活性 Al_2O_3 相比, 活性 Fe_2O_3 对团聚体稳定性作用更显著。土壤团聚体湿润破碎后, 有机碳含量和 C/N 比随着破碎团聚体粒级的增大而提高。研究结果说明植被恢复过程中有机碳促进了土壤团聚体的形成, 并提高其稳定性。

关键词: 土壤退化; 植被恢复; 土壤有机碳; 团聚体稳定性

Effect of soil organic carbon on aggregate stability after vegetative restoration on severely eroded red soil

PENG Xin-Hua, ZHANG Bin, ZHAO Qi-Guo (Laboratory of Material Cycling in Pedosphere, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(10): 2176~2183.

Abstract: Vegetation restoration is an effective measure to restore physical stability in severely degraded soil through organic matter deposition. However, the effectiveness of different plants in restoring the structural stability of soil is not well understood. The objectives of the current study were (1) to measure soil aggregate stability under different types of restorative vegetation and (2) to determine the relationship between soil organic matter and soil aggregate stability. Soil samples were derived from a long-term experiment; (1) severely eroded bare land; (2) severely eroded land planted with Camphor trees (*Cinnamomum camphora*), a common deciduous tree in China; (3) severely eroded land planted with Lespedeza shrub (*Lespedeza bicolor*), a legume often grown for soil improvement; (4) one undisturbed soil with 30~40 year old Masson pine forest (*Pinus massoniana*); and (5) a vegetable garden reclaimed since 1987 receiving 30 t/hm² of pig manure annually.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40071055); 中国科学院南京土壤研究所土壤圈物质循环开放室基金项目

收稿日期: 2002-07-31; **修订日期:** 2003-04-16

作者简介: 彭新华(1972~), 男, 湖南人, 博士, 主要从事恢复生态学与土壤结构的研究。E-mail: xhpeng@issas.ac.cn

Foundation item: the Natural Science Foundation of China (No. 40071055) and Laboratory of Material Cycling in Pedosphere of Institute of Soil Science of Chinese Academy of Sciences Foundation

Received date: 2002-07-31; **Accepted date:** 2003-04-16

Biography: PENG Xin-Hua, Ph. D. Mainly engaged in the restorative ecology and soil structure.

The Le Bissonnais' method was applied to simulate the breakdown mechanisms of slaking in fast wetting, differential swelling in slow wetting, and mechanical breakdown by wet stirring. The aggregate stability index, normalized mean weight diameter (NMWD), indicated that the fast wetting caused the most severe disruption to aggregates. The NMWD in the fast wetting treatment ranked in the order of Masson pine > vegetable garden > Lespedeza > Camphor trees, eroded bareland. The NMWD order in the wet stirring treatment was vegetable garden, Masson pine > eroded bareland > Camphor trees > Lespedeza. However, there is no significant difference as affected by restorative vegetations in slow wetting. The organic carbon content in aggregates was significantly related to the NMWD in the fast wetting treatment ($r=0.82^{**}$) and wet stirring treatments ($r=0.66^{*}$). The larger slaked aggregate size had higher organic carbon content and C/N ratio after wetting treatment, indicating that young organic matter improved aggregate stability because C/N ratio was regarded as the degree of decomposition of organic matter. The results suggest that restorative vegetation promotes soil structure formation and soil aggregate stability due to the deposition of soil organic matter.

Key words: soil degradation; vegetation restoration; soil organic carbon; aggregate stability

文章编号:1000-0933(2003)10-2176-08 中图分类号:Q142.3,Q948,S181 文献标识码:A

随着土地的不断开发和集约化利用,土壤退化成为当今全球普遍关注的紧迫问题之一。我国东南部红壤面积 113 万 km^2 ,其中侵蚀面积占 22%,达 25 万 km^2 。如何减少水土流失,改善区域水土环境,是亟待解决的问题^[1]。土壤结构退化是土壤退化最重要的过程之一,其最明显特征表现在土壤团聚体构成比例失调以及团聚体稳定性下降。

土壤团聚体是土壤结构最基本的单元。自然条件下土壤团聚体破碎的机制包括快速湿润条件下土壤团聚体中空气压缩产生的应力而引起破碎(又称糊化作用),土壤矿物湿润后非均匀膨胀引起的破裂以及雨滴打击和耕作等外力机械作用引起的破碎^[2]。不稳定团聚体在这些外界应力的作用下,产生更小的可移动的颗粒,不仅可能在土壤表面形成土壤结壳,加剧地表径流和土壤侵蚀^[3],而且恶化土壤水热传输过程和养分保持供应过程。除了土壤矿物质如铁铝氧化物外,土壤有机质被认为是形成稳定土壤结构的重要条件。Tisdall 等^[4]认为大团聚体主要是通过有机残体和菌丝胶结形成的,小团聚体主要是多糖、或无机胶体通过阳离子桥而胶结形成的。Puget 等^[5]也发现小团聚体中的有机碳比大团聚体中的有机碳老化,而有机碳的含量,尤其是新形成的有机碳更受利用方式的影响^[6,7]。因此如何利用土壤新增加的有机碳改善土壤结构功能有着生态学的意义。

在侵蚀裸地,提高土壤有机质的主要措施之一是植被恢复。植被恢复是充分利用土壤-植物复合系统改善土壤功能,其中很显著的特征是其凋落物和根系及其微生物等向土壤提供新的碳源,提高了土壤肥力^[8,9]和微生物的多样性^[10]。但是有机碳的数量和质量对土壤团聚体的形成过程及其稳定性的影响远未被人们所认识。

本研究利用侵蚀裸地植被恢复长期定位试验地,其研究目标是:(1)研究不同恢复植被下团聚体稳定性的变化;(2)确定不同恢复植被下团聚体稳定性与有机碳的关系,以期了解侵蚀土壤植被恢复及土壤有机碳对红壤结构稳定性恢复的贡献。

1 材料与方 法

1.1 植被类型

本试验位于江西鹰潭刘家站中国科学院红壤生态试验站。土地利用和植被类型包括:(1)网纹层裸露的侵蚀裸地;(2)自 1987 年开始在侵蚀裸地上人工恢复形成的胡枝子(*Lespedeza bicolor*)灌丛和樟树(*Cinnamomum camphora*)林地;(3)30~40a 树龄的稀疏马尾松(*Pinus massoniana*),是该地区典型植被;(4)稀疏马尾松自 1987 年开垦成的菜园地,猪粪量施用为 3000 $\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 。

1.2 土壤

供试土壤发育于第四纪红黏土。根据美国土壤分类系统,属于壤黏老成土;根据中国土壤系统分类,属于富铁土。粘土矿物主要以高岭土为主。

1.3 土壤团聚体稳定性的测定方法

1.3.1 土壤样品的准备 取样时用铲子在同一样区取表层土壤(0~5 cm)。每区随机采集五点,然后混匀,用硬质盒把土样带回实验室风干。当土块含水量达到塑限时,用手把大土块沿自然破碎面板开,干筛法选取 2~3 mm 和 3~5 mm 的团聚体。试验前把团聚体放在 40℃ 的烘箱内烘 24 h,使团聚体土壤含水量一致。根据 Le Bissonnais 方法^[2],团聚体经过不同湿润破碎处理,再进行破碎团聚体粒级分级。

1.3.2 湿润处理 处理 1 快速湿润,取 5g 团聚体浸没在盛有 50 ml 去离子水的 250 ml 烧杯中,浸泡 10 min 后用移液管把水吸掉。

处理 2 湿润震荡,取 5g 团聚体浸没在盛有 50 ml 95% 酒精的 250 ml 烧杯中排出团聚体内空气,浸泡 10 min 后用移液管把酒精吸掉,把土壤移入盛有 50 ml 去离子水的 250 ml 锥形瓶中,然后加水至 200 ml,用橡皮塞把锥形瓶塞紧,上下颠倒 20 次。静置 30 min 使粗分散体沉淀。用吸管吸去多余的水。

处理 3 缓慢湿润,取 5g 团聚体放在张力为 -0.3 kPa 的滤纸上,静置 30 min (土壤质地过粘需延长长时间)使团聚体完全湿润。

1.3.3 破碎团聚体粒级分级 将已湿润处理的土壤移到浸没在 95% 酒精中的 50 μm 孔径筛子中,在酒精中上下震荡 20 次(幅度 2 cm);然后把筛子放入烘箱 40℃ 下烘 10~20 min 至酒精蒸发完为止,然后将土壤移到已编号称重的铝盒中;再把铝盒放到烘箱 40℃ 下烘干过夜,称重。将烘干土壤通过一组孔径依次为 3 mm、2 mm、1 mm、0.5 mm、0.25 mm、0.1 mm 和 0.05 mm 的筛子,称重得到每个粒级的破碎团聚体。

1.3.4 数据处理 为了比较不同粒级团聚体的稳定性,引用标准化平均当量直径(NMWD):

$$NMWD = \frac{MWD}{r_{\max} - r_{\min}} \quad (1)$$

其中, r_{\max} 为最大初始筛子孔径, r_{\min} 为最小筛子孔径。MWD 表示团聚体稳定性,其计算公式为:

$$MWD = \sum_1^{n+1} \frac{r_{i-1} + r_i}{2} \times m_i \quad (2)$$

其中, r_i 是第 i 个筛子孔径(mm), $r_0 = r_1$, $r_n = r_{n+1}$, m_i 是第 i 个筛子的破碎团聚体重量百分比。标准化平均当量直径 NMWD 是衡量团聚体稳定性的一个指标,其值越低,表示团聚体稳定性越小。

为了比较不同湿润处理的影响,用相对糊化指数(RSI)和相对机械破碎指数(RMI):

$$RSI = \frac{MWD_{sw} - MWD_{fw}}{MWD_{sw}} \times 100 \quad (3)$$

$$RMI = \frac{MWD_{sw} - MWD_{ws}}{MWD_{sw}} \times 100 \quad (4)$$

其中, MWD_{sw} 为慢速湿润的 MWD, MWD_{fw} 为快速湿润的 MWD, MWD_{ws} 为湿润震荡的 MWD。根据不同恢复植被团聚体中的相对糊化指数和相对机械破碎指数来解释其团聚体稳定性机制。相对糊化指数反映了土壤湿润速度快的情况下,孔隙中空气受压而造成团聚体分散。相对机械破碎指数则反映了雨滴打击、耕作、根系穿透等外应力作用下的团聚体稳定性。相对糊化指数和相对机械破碎指数越高,其稳定性越低。

1.4 其它理化性质测定方法^[1]

有机碳采用重铬酸钾外加热法,全氮采用半微量凯氏法,孔隙度采用环刀法,质地采用吸管法,活性铁铝氧化物采用草酸-草酸铵法,土壤矿质元素先用碳酸钠碱熔,然后采用火焰光度计法测定 K_2O , 邻啡啉比色法测定 Fe_2O_3 , 氟化钾取代 EDTA 容量法测定 Al_2O_3 。

2 结果

2.1 退化红壤植被恢复后土壤基本性质的变化

侵蚀裸地植被恢复后和稀疏马尾松开垦为菜园地后,土壤有机碳含量、全氮和土壤孔隙度都有明显提高(表 1)。与侵蚀裸地相比,胡枝子和樟树处理下有机碳含量增加了 5 倍多,全氮也提高了近 2 倍,土壤孔隙度分别提高了 7% 和 12%。菜园地由于高量有机肥施入,有机碳含量也比马尾松处理提高了 1.5 倍,土壤

孔隙度提高了5%。植被恢复后 pH 值变化不明显除菜园地的 pH 接近中性,其它利用方式都显酸性(pH: 4.6~5.4)。

表 1 退化土壤植被恢复后土壤某些性质

Table 1 Some soil properties of degraded soils after vegetation restoration

| 植被 Vegetation | 砂粒 Sand (g/kg) | 粉粒 Silt (g/kg) | 黏粒 Clay (g/kg) | K ₂ O (g/kg) | Fe ₂ O ₃ (g/kg) | Al ₂ O ₃ (g/kg) | 有机碳 Organic C (g/kg) | 全氮 Total N (g/kg) | C/N | 孔隙度 Porosity % | pH (H ₂ O) |
|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------------|--|--|----------------------------|-------------------------|------|----------------------|--------------------------|
| 菜园地 Vegetable garden | 194 | 345 | 461 | 12.8 | 48.4 | 130.3 | 19.27 | 1.88 | 10.3 | 54 | 6.2 |
| 马尾松 Masson pine | 90 | 456 | 454 | 12.6 | 58.4 | 152.6 | 12.49 | 1.02 | 12.2 | 49 | 5.0 |
| 胡枝子 Lespedeza | 183 | 314 | 503 | 20.1 | 86.8 | 179.6 | 7.94 | 0.73 | 10.9 | 55 | 5.4 |
| 樟树 Camphor trees | 138 | 340 | 522 | 16.2 | 75.6 | 177.9 | 7.63 | 0.79 | 9.7 | 60 | 4.6 |
| 裸地 Eroded bareland | 164 | 294 | 542 | 15.6 | 72.7 | 179.7 | 1.39 | 0.41 | 3.4 | 48 | 5.0 |

2.2 不同破碎机制下团聚体分散后粒级分布

3~5 mm 团聚体在不同破碎机制下形成的粒级重量比例分布如图 1 所示。结果表明:团聚体在不同破碎机制处理下,其破碎程度不同。快速湿润处理对团聚体结构的破坏程度最大,形成<3 mm 团聚体的比例>40%;湿润震荡处理下,<3 mm 团聚体颗粒都在<45%以下;而缓慢湿润处理下几乎不破坏团聚体,<3 mm 团聚体颗粒仅为<5%。植被类型和土地利用方式对破碎团聚体分布的影响主要表现在快湿润处理中。马尾松、菜园地、胡枝子和樟树中>3 mm 团聚体颗粒的百分比分别为 56%、52%、41%和 18%,而裸地仅为 17%。说明马尾松、菜园地和胡枝子受到的破碎程度均小于裸地,而樟树植被恢复后,减少破碎程度不明显。

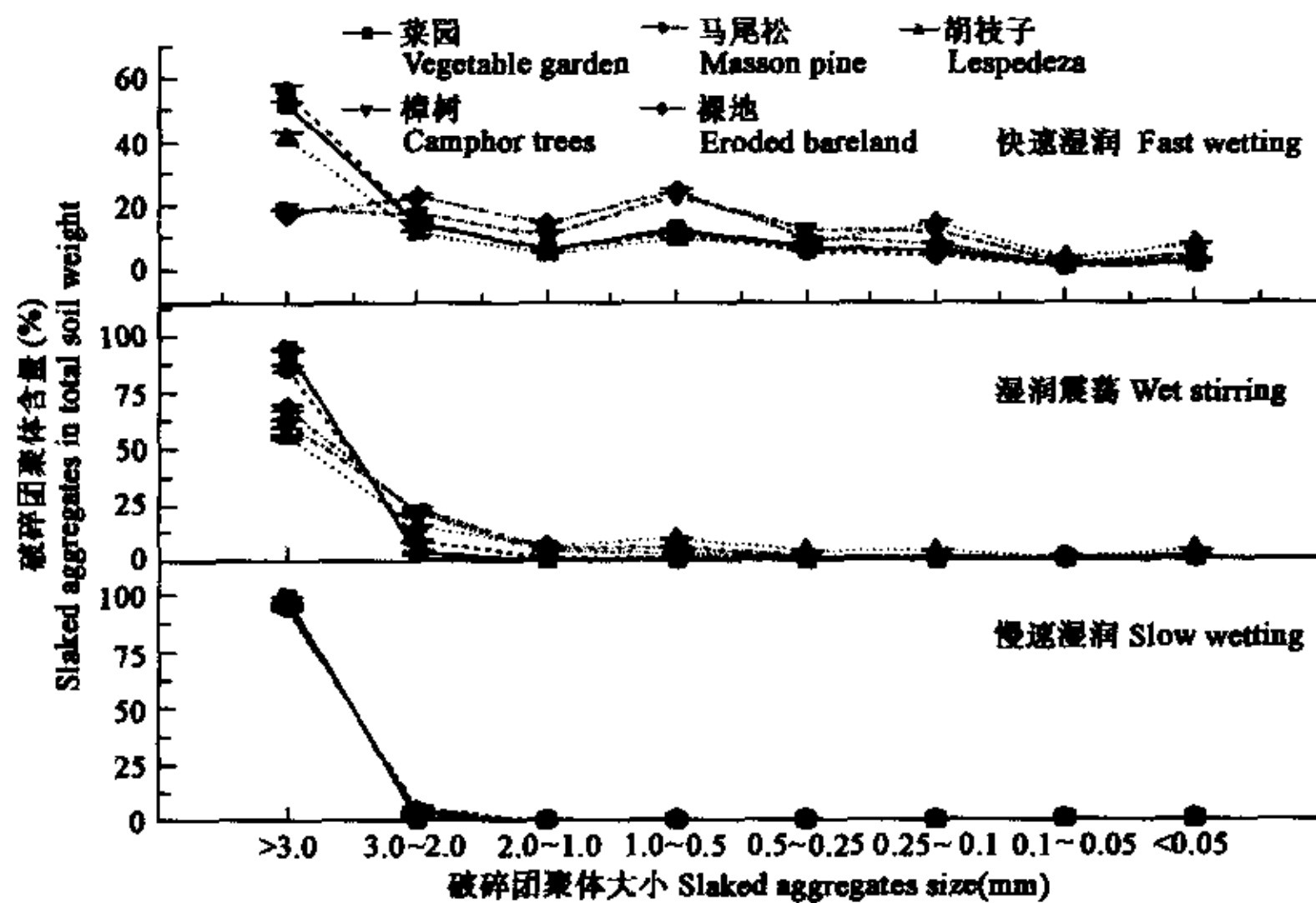


图 1 不同破碎机制下 3~5 mm 团聚体破碎后其粒级分布

Fig. 1 Distribution of slaked aggregates of 3~5 mm aggregates under different wetting treatments

2.3 破碎团聚体中有机碳含量和 C/N 比的变化

3~5 mm 团聚体快速湿润后形成的不同大小破碎团聚体中有机碳含量及其 C/N 比如图 2 所示。侵蚀裸地土壤有机碳含量不随粒级大小而变化,而其它处理中有机碳含量随粒级的减小而降低。各处理间>3 mm 破碎团聚体的有机碳含量差异显著,这种差异随着粒径的减小而逐渐降低。并且>3 mm 破碎团聚体有机碳含量高于容积土壤的有机碳含量(表 1)。图 2 还表明破碎团聚体的 C/N 比值在植被恢复中随粒级

的减小而减小的趋势,但是在菜园地和侵蚀裸地中 C/N 比在不同大小粒径之间基本保持一致。

2.4 不同粒径团聚体稳定性

在 3 种不同破碎机制处理中,团聚体稳定性在不同植被恢复下均是快速湿润 < 湿润震荡 < 缓慢湿润 (图 3)。快速湿润处理后,马尾松和裸地的 2~3 mm 团聚体稳定性显著大于 3~5 mm 团聚体 ($P < 0.05$)。不同植被类型下土壤团聚体稳定性指标 NMWD 大小依次为:马尾松 > 菜园地 > 胡枝子 > 樟树,裸地。湿润震荡处理后,其稳定性顺序是:菜园地,马尾松 > 裸地 > 樟树 > 胡枝子。缓慢湿润处理后,除了菜园地的稳定性稍高外,其它不同恢复植被下的团聚体稳定性差异不明显 ($P > 0.05$)。在湿润震荡和缓慢湿润过程中,2~3 mm 团聚体的稳定性都显著低于 3~5 mm 团聚体的稳定性 ($P < 0.05$)。

2.5 影响团聚体稳定性的因素

表 2 为不同破碎机制下有机碳、活性 Fe_2O_3 和活性 Al_2O_3 与团聚体稳定性的线性关系。结果表明快速湿润和湿润震荡下土壤团聚体稳定性与有机碳含量呈显著的正相关 ($r = 0.82^*$, $r = 0.66^*$),但慢速湿润下

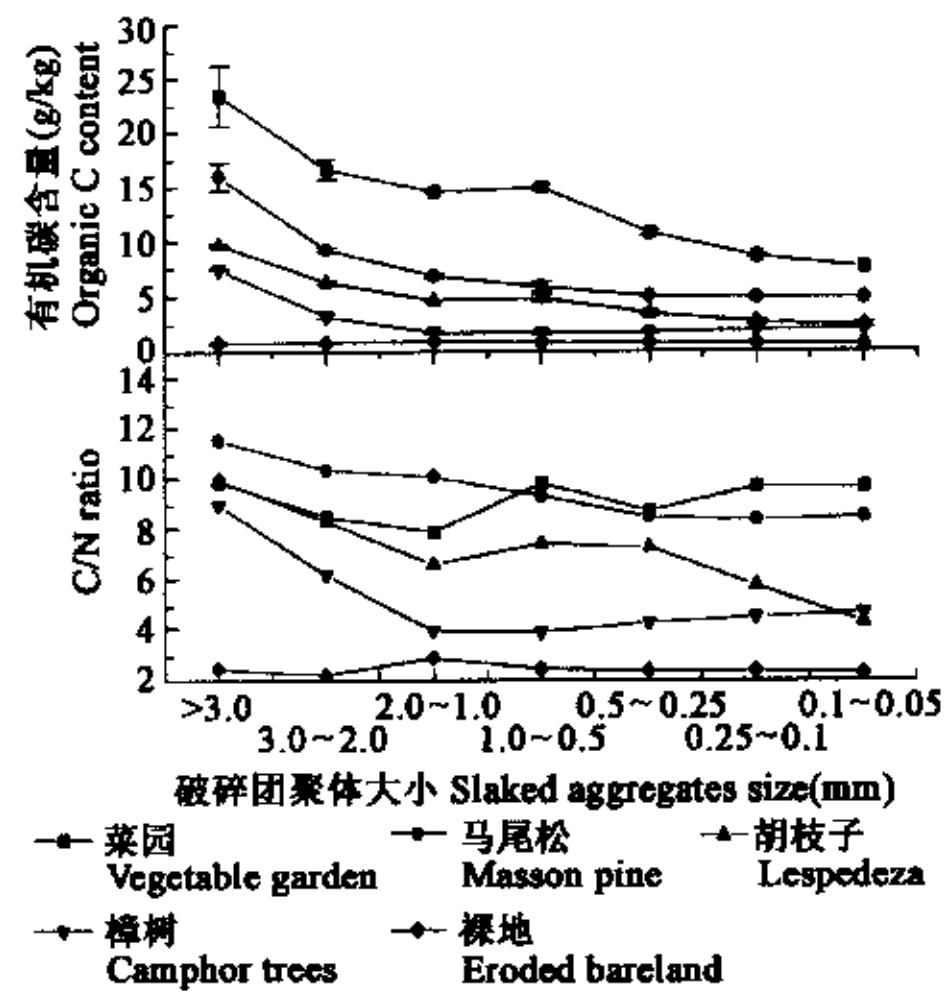


图 2 有机碳含量和 C/N 比在 3~5 mm 团聚体快速湿润下破碎团聚体粒径中的分布

Fig. 2 Distributions of organic C content and C/N ratio in slaked aggregates of 3~5 mm aggregates under fast wetting treatment

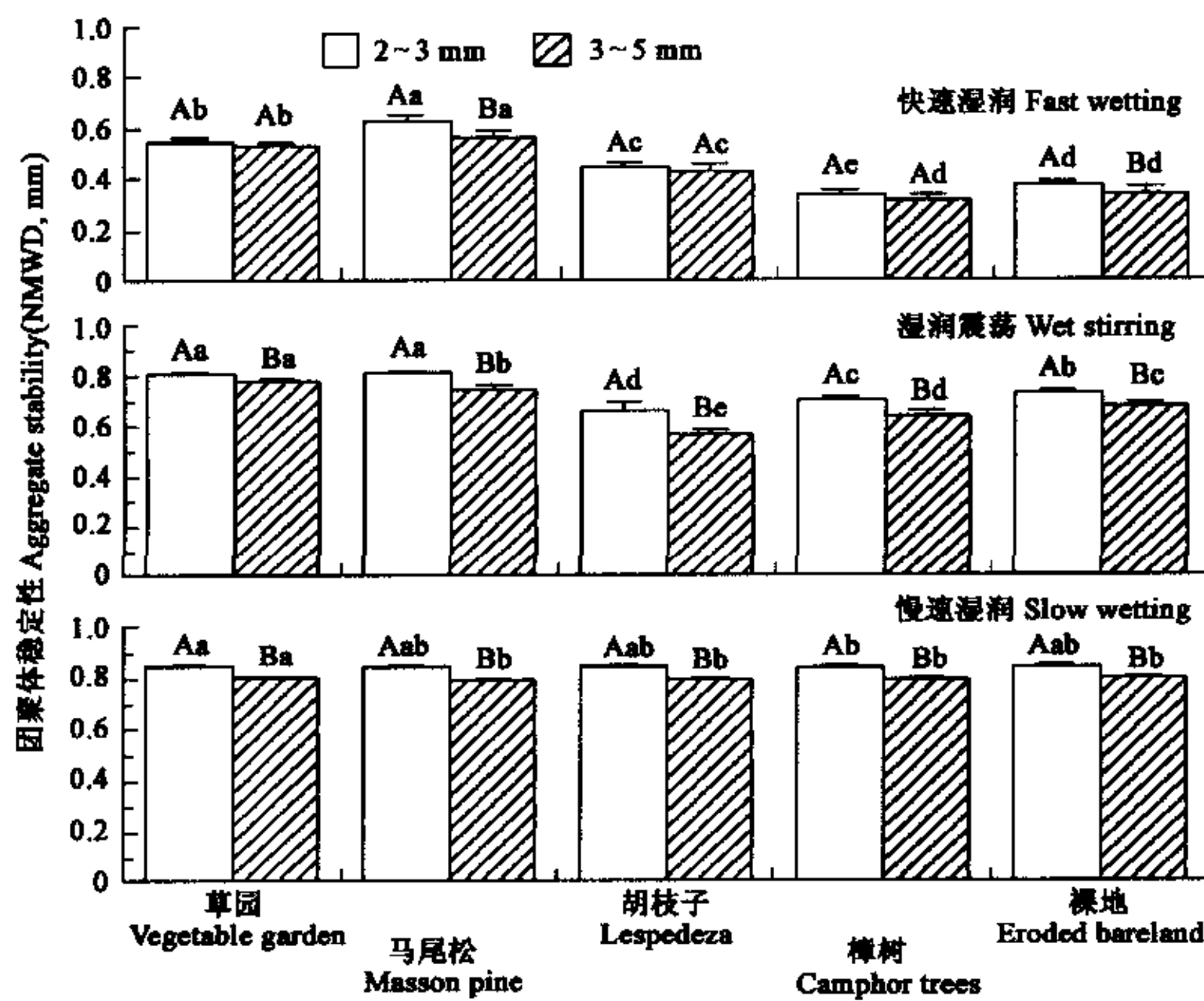


图 3 不同破碎机制下植被恢复后团聚体稳定性

Fig. 3 Aggregate stability as affected by vegetation restoration under different wetting treatments

不同大写字母表示粒径之间的显著水平,不同小写字母表示恢复植被之间的显著水平, $P < 0.05$ Different capital letters indicate the significant difference at $P < 0.05$ among aggregate sizes and different small letters indicate the significant difference at $P < 0.05$ among vegetation restoration

无显著相关性($r=0.22$)。活性 Fe_2O_3 与快速湿润和湿润震荡下团聚体稳定性也呈显著的正相关($r=0.88^{**}$, $r=0.83^{**}$), 而活性 Al_2O_3 与各不同破碎机制下团聚体稳定性均无显著相关性。

表 3 结果表明马尾松的团聚体抗糊化应力最强, 而菜园地抗机械破碎应力最大。而樟树在抗糊化和机械破碎方面都比裸地稍低。在同一恢复植被的不同粒径之间的相对糊化指数和相对机械破碎指数并没有明显的差异。

3 讨论

侵蚀裸地植被恢复和高量施用有机肥提高了土壤有机碳含量并明显地促进土壤团聚体结构形成及其稳定性提高。团聚体湿润破碎后形成更小的团聚体, 其有机碳含量随破碎团聚体粒径的增大而提高, 说明有机碳对小团聚体的胶结作用是大团聚体形成的重要机制。C/N 比由于随着有机物的分解而下降可以作为有机物分解程度的一个指标^[12]。C/N 比随着破碎团聚体粒径的减小而降低, 说明较大的团聚体是分解程度低的有机质参与了其团聚作用, 而较小的团聚体则主要是分解程度较高的有机质作用。这与 Puget^[5] 等报道稳定的团聚体是由新有机碳胶结较小的团聚体的结果一致。而在菜园地和裸地中, C/N 比并不随破碎团聚体颗粒大小而变化。菜园土壤在耕作过程中对团聚体的破碎而使有机质重新分布, 可能导致了有机质的性质在不同大小团聚体之间差异减小。裸地的团聚体在缺少有机质的参与下, 无机胶体起主导作用^[13]。无机胶体如铁铝氧化物可以通过阳离子桥与粘粒表面电荷形成团聚体^[5], 是热带亚热带土壤微团聚体形成的主要机制之一^[14]。

有机碳水平的高低与土壤团聚体稳定性密切相关, 但影响程度因植被类型而异。菜园地土壤的有机碳含量最大, 稳定性却不是最高, 而马尾松处理下土壤团聚体表现出最稳定。可见不同数量和质量的碳源同时作用于团聚体的稳定性, 其中在快速湿润下影响最明显。尽管马尾松的凋落物较少, 但种植时间较长(30~40a), 林下表层土壤仍积累了较高的有机碳(12.49 g/kg)。并且松针含较多树脂和蜡质等疏水性物质^[15], 阻碍了水的湿润速度^[16], 导致团聚体内部空气缓慢释放, 从而增强其抗破碎能力。稀疏马尾松开垦后菜园地虽然连续施入高量有机肥料, 由于耕作过程对团聚体的破碎作用^[6, 7], 反而导致其稳定性有所下降。因此, 如果红壤开垦后没有连续的有机质投入, 土壤团聚体稳定性的下降幅度可能会更大。在非耕作扰动下, 胡枝子生物量高, 且凋落物和根系生长量达到 1 500~2 500 kg/(hm²·a)^[17], 土壤有机质恢复很快并且土壤团聚体稳定性提高显著($P<0.05$)。

团聚体破碎程度还受土壤物理性质和非生物因素的影响。快速湿润主要取决于团聚体初始含水量和湿润速度而导致孔隙中的空气受压破碎团聚体。在含水量一致的情况下, 团聚体的孔隙度是影响快速湿润的主要因素。樟树下土壤由于干湿强度较大, 形成的孔隙度较大^[16]。因而在快速湿润处理中大孔隙中的空气更易形成被压缩空气而爆裂。因此在快速湿润下, 尽管植被恢复后有机碳含量得到了提高, 但是其团聚体稳定性反而比紧实的裸地有所下降。孔隙度较大, 团聚体内颗粒之间的接触点将下降, 也有降低团聚体强度的可能^[18]。裸地网纹层中由三氧化二铁胶结的“假砂”对提高团聚体抗机械破碎能力强^[14], 从而在

表 2 不同破碎机制下有机碳、活性 Fe_2O_3 和活性 Al_2O_3 与团聚体稳定性的线性相关系数 ($n=10$)

Table 2 Linear relationship coefficient between organic C, active Fe_2O_3 and active Al_2O_3 and aggregate stabilities under different wetting treatments ($n=10$)

| 处理 Treatments | 有机碳 Organic C (g/kg) | 活性 Fe_2O_3 Active Fe_2O_3 (g/kg) | 活性 Al_2O_3 Active Al_2O_3 (g/kg) |
|-------------------|----------------------------|--|--|
| 快速湿润 ^① | 0.82** | 0.88** | -0.24 |
| 湿润震荡 ^② | 0.66* | 0.83** | -0.01 |
| 慢速湿润 ^③ | 0.22 | 0.13 | -0.32 |

*, ** 表示显著水平分别为 $P<0.05$ 和 $P<0.01$, eans significant level at $P<0.05$ and $P<0.01$, respectively; ① Fast wetting, ② Wet stirring, ③ Slow wetting

表 3 不同恢复植被下团聚体的相对糊化指数(RSI)和相对机械破碎指数(RMI)

Table 3 Relative slaking index (RSI) and relative mechanical breakdown index (RMI) of aggregates under different vegetation restoration

| 植被 Vegetation | RSI (%) | | RMI (%) | |
|------------------|---------|--------|---------|--------|
| | 2~3 mm | 3~5 mm | 2~3 mm | 3~5 mm |
| 菜园地 ^① | 35 | 33 | 4 | 3 |
| 马尾松 ^② | 25 | 28 | 3 | 6 |
| 胡枝子 ^③ | 46 | 46 | 21 | 28 |
| 樟树 ^④ | 59 | 59 | 16 | 19 |
| 裸地 ^⑤ | 55 | 57 | 13 | 15 |

① Vegetable garden, ② Masson pine, ③ Lespedeza, ④ Camphor trees, ⑤ Eroded bareland

湿润震荡处理下,孔隙度较大的胡枝子和樟树下土壤团聚体稳定性都表现出比富含“假砂”的裸地还低。可见三氧化物对提高团聚体抗机械破碎能力显著。然而缓慢湿润过程中不同恢复植被下的团聚体稳定性差异不明显,并且有机碳和活性三氧化物对缓慢湿润下团聚体稳定性影响都不明显。这是因为本研究供试土壤的粘土矿物均以非膨胀 1:1 型高岭土为主,且土壤矿物组成没有差异。

不同尺度的团聚体稳定性存在差异。与大团聚体相比,小团聚体的孔隙更小,其弯曲度更大,并容积密度更高^[18]。从而较小的团聚体内聚力大于较大的团聚体^[19],导致小团聚体的稳定性高于大团聚体的稳定性。

4 结论

土壤侵蚀裸地植被恢复后土壤有机碳提高很快,新增加的有机碳对大团聚体的胶结作用比小团聚体的更明显。侵蚀土壤植被恢复后,土壤团聚体稳定性的变化因破碎机制和植被类型而异。快速湿润是团聚体破碎最主要的机制,不同植被类型向土壤提供不同数量和质量有机碳影响其团聚体稳定性。富含蜡脂等疏水性物质的马尾松土壤团聚体稳定性最高,胡枝子植被恢复后团聚体稳定性增加明显,而菜园地和樟树处理下土壤因耕作和孔隙度等非生物因素的影响可能掩盖了有机碳对团聚体稳定性的作用。土壤有机碳对快速湿润和湿润震荡机制下团聚体稳定性呈显著的正相关,活性 Fe_2O_3 对提高土壤团聚体稳定性影响也表现显著。但如何区别有机和无机胶结机制对土壤结构功能的影响是需要进一步探讨的问题。

References:

- [1] Zhao Q G, Lu R K, Zhang T L. Mechanism, temporal- spatial changes and control measures of soil degradation in hilly red soil region of southeast China. *Acta Pedologica Sinica*, 2000, **37** (Supplement): 1~62.
- [2] Le Bissonnais Y. Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility I. Theory and methodology. *European Journal of Soil Science*, 1996, **47**: 425~428.
- [3] Le Bissonnais Y, Arrouays D. Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility II. Application to humic loamy soils with various organic carbon contents. *European Journal of Soil Science*, 1997, **48**: 39~48.
- [4] Tisdall J M, Oades J M. Organic matter and water-stable aggregates. *Journal of Soil Science*, 1982, **33**: 141~163.
- [5] Puget P, Chenu C, Balesdent J. Dynamics of soil organic matter associated with particle-size fractions of water-stable aggregates. *European Journal of Soil Science*, 2000, **51**: 595~605.
- [6] Six J, Elliot E T, Paustian K, et al. Aggregation and soil organic matter accumulation in cultivation and native grassland soils. *Soil Science Society of America Journal*, 1998, **62**: 1367~1377.
- [7] Chan K Y. Soil particulate organic carbon under different land use and management. *Soil Use and Management*, 2001, **17**: 217~221.
- [8] Yang Y Sh, He Z M, Qiu R H, et al. Effects of different recover and restoration measures on plant diversity and soil fertility for serious degradation ecosystem. *Acta Ecologica Sinica*, 1999, **19**: 490~494.
- [9] Hu B, Duang Ch Q, Wang Zh H, et al. Effect of vegetation rehabilitation measures on soil fertility and soil enzymatic activity in degradation ecosystem. *Acta Pedologica Sinica*, 2002, **39**: 604~608.
- [10] Liu M Q, Hu F, Li H X, et al. Soil arthropod communities under different artificial woodland restored on degraded red soil. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, **22**: 54~61.
- [11] ISSAS. *Soil Physical and Chemical Analysis*. Shanghai Science and Technology Press, Shanghai, 1978.
- [12] Baldock J A, Oades J M, Waters A G, et al. Aspects of the chemical structure of soil organic materials as revealed by solid-state ^{13}C NMR spectroscopy. *Biogeochemistry*, 1992, **15**: 1~42.
- [13] Bartoli F, Burtin G, Guerif J. Influence of organic matter on aggregation in Oxisols rich in gibbsite or in goethite II; clay dispersion, aggregate strength and water-stability. *Geoderma*, 1992, **54**: 259~274.
- [14] Yao X L, Xu X Y, Yu D F. Formation of structure in red soils in the different forms of utilization. *Acta Pedologica Sinica*, 1990, **27**: 25~33.

- [15] Doerr S H, Shakesby R A, Walsh R P D. Soil water repellency; its causes, characteristics and hydro-geomorphological significance. *Earth-Science Reviews*, 2000, **51**: 33~65.
- [16] Peng X H, Zhang B, Zhao Q G, et al. Influence of types of restorative vegetation on the wetting properties of a degraded clayey Ultisol in subtropical China. *Geoderma*, 2003, **115**: 313~324.
- [17] Wang M Z, Cai S K. Lespedeza——A pioneer plant of recovering vegetation on wasted red soils. *Research on Red Soil Ecosystem*, 1993, **2**: 55~58.
- [18] Horn R. Aggregate characterization as compared to soil bulk properties. *Soil and Tillage Research*, 1990, **17**: 265~289.
- [19] Dexter A R. Advances in characterization of soil structure. *Soil and Tillage Research*, 1988, **11**: 199~238.

参考文献:

- [1] 赵其国, 张桃林, 鲁如坤. 我国东部红壤地区土壤退化的时空变化、机理及调控对策的研究. *土壤学报*, 2000 (增刊), **37**: 1~62.
- [8] 杨玉盛, 何宗明, 邱任辉, 等. 严重退化生态系统不同恢复和重建措施的植物多样性和地力差异研究. *生态学报*, 1999, **19**: 490~494.
- [9] 胡斌, 段昌群, 王振洪, 等. 植被恢复措施对退化生态系统土壤酶活性及肥力的影响. *土壤学报*, 2002, **39**: 604~608.
- [10] 刘满强, 胡锋, 李辉信, 等. 退化红壤不同人工林恢复下土壤节肢动物群落特征. *生态学报*, 2002, **22**: 54~61.
- [11] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析. 上海: 上海科学技术出版社, 1978.
- [14] 姚贤良, 许绣云, 于德芬. 不同利用方式下红壤结构的形成. *土壤学报*, 1990, **27**: 25~33.
- [17] 王明珠, 蔡守坤. 胡枝子——红壤荒丘复被的先锋植物. *红壤生态系统研究*, 1993, **2**: 55~58.

《生态学报》2004 年征订启事

《生态学报》是中国生态学学会主办的综合性学术刊物,创刊于 1981 年。主要报道动物生态、植物生态、微生物生态、农业生态、森林生态、草地生态、土壤生态、海洋生态、淡水生态、景观生态、区域生态、化学生态、污染生态、经济生态、系统生态、城市生态、人类生态等生态学各领域的学术论文;特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;原创性研究报告和研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评介和学术、科研动态及开放实验室介绍等。为促进学术、科研信息的交流,欢迎踊跃投稿。

《生态学报》为月刊,176 页,2004 年改为大 16 开本,信息容量由 36 万字增加到 44 万字,期定价 45 元,年定价 540 元。全国各地邮局均可订阅,望广大读者互相转告,以便及时订阅。

地址:100085 北京海淀区双清路 18 号 《生态学报》编辑部 电话 (010)62941099 E-mail: Shengtaixuebao@sina.com 或 Shengtaixuebao@mail.rcees.ac.cn

本刊国内邮发代号:82-7,国外邮发代号:M670,标准刊号:ISSN1000-0933/CN11-2031/Q