

植被恢复对退化红壤团聚体稳定性及碳分布的影响

谢锦升^{1,2}, 杨玉盛^{1,*}, 陈光水¹, 朱锦懋¹, 曾宏达¹, 杨智杰^{1,2}

(1. 福建师范大学地理科学学院, 福建省亚热带资源与环境重点实验室, 福州 350007; 2. 福建农林大学林学院, 福州 350002)

摘要:土壤有机碳对土壤团聚体的形成与稳定具有重要影响。研究了植被恢复对侵蚀退化红壤团聚体稳定性的影响,在此基础上探讨了有机碳在团聚体中的分布及有机碳与团聚体稳定性的关系。红壤侵蚀裸地大团聚体水稳性程度低,植被恢复后大团聚体稳定性显著提高。裸地各级团聚体有机碳含量基本相似,植被恢复后,有机物质输入的增加促进了团聚体的形成,从而改变了土壤团聚体有机碳含量和分配比例。大团聚体对有机碳具有一定的富集作用,有机碳含量高于全土和微团聚体、粉粒及粘粒有机碳含量,大团聚体有机碳恢复速度也快于微团聚体以及粉粒与粘粒有机碳的恢复速度。植被恢复使裸地 0~10cm 土层大团聚体有机碳占总有机碳的比例从 15% 左右增加到 32%~42%。土壤中增加的有机碳约 41%~51% 储存在大团聚体中,24%~38% 储存在微团聚体中,20%~31% 储存在粉粒及粘粒中。团聚体稳定性的增强与土壤有机碳含量密切相关,植被恢复时间越长,土壤有机碳含量越高,土壤团聚体水稳性程度也越好。

关键词:土壤团聚体;有机碳;植被恢复;退化红壤

文章编号:1000-0933(2008)02-0702-08 中图分类号:Q16,S152.4,S153.6 文献标识码:A

Effects of vegetation restoration on water stability and organic carbon distribution in aggregates of degraded red soil in subtropics of China

XIE Jin-Sheng^{1,2}, YANG Yu-Sheng^{1,*}, CHEN Guang-Shui¹, ZHU Jin-Mao¹, ZENG Hong-Da¹, YANG Zhi-Jie^{1,2}

1 Fujian Provincial Key Laboratory of Subtropical Resources and Environment, College of Geography Science, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China

2 College of Forestry, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China

Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(2): 0702~0709.

Abstract: Soil organic carbon plays a major role in the formation and stabilization of soil aggregates. However, our knowledge on the relationship between organic carbon and stable aggregate is not clear in the restoring process of degraded red soil. Red soil developed by granite has been eroded severely in southern China. Hetian town (25°33'—25°48'N, 116°18'—116°31'E) was one of the typical regions, located in Changting County, Fujian Province, China. The water stability of soil aggregates in five soils (include bare land; three ecosystems which were restored from severely eroded land to *Pinus massoniana* forest, *Castanea mollissima* plantation and *Paspalum notatum* Flugge grassland; protected second forest- next to the village) was measured with dry sieve and wet sieve, then different size aggregates (wet sieve) and whole soil were analyzed for organic carbon content. The influences of vegetation restoration on water stability of soil aggregates, organic carbon distribution in different size aggregates and relationship between organic carbon and stability of aggregate were

基金项目:福建省自然科学基金资助项目(D0510021);高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20060394001)

收稿日期:2006-11-30; **修订日期:**2007-04-29

作者简介:谢锦升(1972~),男,福建上杭人,博士,副教授,主要从事生态恢复与碳循环研究. E-mail: jshxie@163.com

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: geoyys@fjnu.edu.cn

Foundation item: The project was financially supported by Natural Science Foundation of Fujian Province, China (No. D0510021); Specialized Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education (No. 20060394001)

Received date: 2006-11-30; **Accepted date:** 2007-04-29

Biography: XIE Jin-Sheng, Ph. D., Associate professor, mainly engaged in ecological restoration and carbon cycle. E-mail: jshxie@163.com

discussed.

The stability of macroaggregate was lower in bare land than that in *Pinus massoniana* plantation forest, *Castanea mollissima* plantation and *Paspalum notatum* Flugge grassland, and the best one was in protective second forest. Organic carbon contents of different size aggregates were not changed in bare land. However, after vegetation restored, organic carbon content and distribution proportion in different size aggregates were changed since organic material inputs increased. The macroaggregate had greater organic carbon content than the whole soil, microaggregate and silt and clay particles. The restoration speed of organic carbon in macroaggregate was faster than that in microaggregate and silt and clay particles. The proportion of organic carbon in macroaggregate comprised of about 15% of total organic carbon in 0—10cm soil layer of bare land, and the data were between 32% and 42% in other soils. After vegetation restored, the increase of carbon accumulated in soil macroaggregate, microaggregate and silt and clay particles accounted for 41%—51%, 24%—38% and 20%—31% of total increased carbon, respectively. The water stability of soil aggregates was related to soil organic carbon content. The higher concentrations of total organic carbon were recorded in the soils with higher aggregate stability.

Key Words: soil aggregate; organic carbon; vegetation restoration; degraded red soil

土壤结构是维持土壤功能的关键要素,土壤团聚体稳定性常作为土壤结构的一个重要指标,土壤团聚体的数量和大小分布影响着土壤质量^[1],良好的土壤结构和稳定的团聚体对于改良土壤肥力,增加生产力,提高孔隙度和降低可蚀性具有重要作用^[2]。人们较早就认识到土壤有机碳水平的提高有利于土壤结构的形成和增强土壤结构的稳定性^[3]。土壤有机碳与水稳性团聚体关系密切,对土壤团聚体的数量和大小分布具有重要影响^[4],而团聚体的形成反过来影响土壤有机碳的分解,微团聚体对土壤碳具有物理保护作用被认为是碳吸存的主要场所^[1]。土壤侵蚀常造成土壤结构的退化和有机碳的大量损失,而植被恢复则能改良土壤结构、增强团聚体的稳定性和增加土壤有机质。我国红壤地区由于长期以来人为干扰和破坏严重,导致土壤侵蚀严重,该区先后进行了许多水土保持生态恢复与重建工作,植被覆盖发生了巨大变化,虽然一些研究先后对土壤有机碳与团聚体关系进行了探讨^[5,6],但一些关键问题仍不完全清楚,如在植被恢复过程中土壤团聚体的形成机制,新碳在土壤中的分布位置及其对团聚体稳定性的影响等。因此,研究植被恢复对土壤有机碳分布及其与团聚体稳定的关系是必要的,将有助于揭示侵蚀红壤的碳吸存及恢复机制,为水土保持生态恢复实践提供理论依据。

1 研究区和试验地概况

长汀县河田镇地处福建西部,东经 116°18′~116°31′,北纬 25°33′~25°48′,中亚热带季风气候。年均降雨量 1737mm,年均气温 17.5~18.8℃,平均无霜期 260d,平均日照时数 1925 h,≥10℃年积温为 4100~4650℃。河田镇属河谷盆地,低山高丘环抱四周,土壤为燕山运动早期形成的中粗粒花岗岩发育的红壤,抗蚀能力低,地带性植被(常绿阔叶林)破坏殆尽,现有植被主要以马尾松(*Pinus massoniana*)次生林和人工林为主。河田镇是全国极强度水土流失区之一,许多地方表土层丧失殆尽,植被恢复困难。据 2003 年遥感调查,该镇水土流失面积 13587 hm²,占全镇土地面积的 46.7%。

试验地包括裸地(植被恢复前的对照),在裸地上治理恢复的马尾松林地、板栗(*Castanea mollissima*)园及百喜草(*Paspalum notatum*)地(治理前均为 A 层土壤流失殆尽,B 层出露,本底条件相似)和次生林(植被恢复后的参照系统)。

裸地属强度土壤侵蚀,B 层出露,地表仅偶见有零星的马尾松小老头树和野古草(*Arundinella setosa*)。马尾松林是 1981 年治理后形成的,平均树高 10.95m,平均胸径 9.0cm,郁闭度 90%,间杂有木荷(*Schima superba*)。灌木主要有胡枝子(*Lespedeza bicolor*)、黄瑞木(*Adinandra millettii*)、油茶(*Camellia oleifera*)等,草本植物以芒萁(*Dicranopteris dichotoma*)占绝对优势。板栗园是 1999 年治理后形成的,梯田整地,亩植板栗 26 株,田埂及梯壁种植百喜草,田面每年除草 2~3 次,春季翻耕田面,深约 10~15cm。百喜草地是 2000 年治理

形成的,小条沟撒播百喜草,前2年每年追肥2次(尿素 $150\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)。百喜草盖度95%以上,坡面有治理时保留的马尾松小老头树,水湿条件较好地方有少量芒萁。取样时尽可能避开马尾松和芒萁。次生林主要树种为马尾松和木荷,马尾松平均胸径37.3cm,平均树高20.7m,木荷平均胸径25.3cm,平均树高18.2m,林下植被盖度达90%,灌木层主要有木荷、黄瑞木等植物,草本层主要以芒萁为主。

2 研究方法

于2005年4月下旬在每个样地按S形布设取样点5个,调查土壤剖面特征,用环刀法测定土壤容重,3次重复,每个取样点分0~5cm和5~10cm取原状土样,大小约为20cm×20cm。

将野外取回的原状土样,按土壤自然裂隙轻轻掰成10mm左右的团粒,在阴凉处风干。风干土样用于筛法测定非水稳性团聚体组成,湿筛法测定水稳性团聚体组成^[7]。全土以及不同粒径的土壤水稳性团聚体研磨过150 μm 土壤筛后,用碳氮元素分析仪(Elementar Vario EL III)测定其碳含量。团聚体破坏率和团聚体几何平均直径用下述公式计算:

$$\text{团聚体破坏率} = \frac{>0.25\text{mm 不稳定团聚体(干筛-湿筛)}}{>0.25\text{mm 团聚体(干筛)}}$$

$$\text{团聚体几何平均直径(GMD)} = \exp \left[\sum (W_i \times \log x_i / w_i) \right]^{[8]}$$

式中, W_i 为某一径级水稳性团聚体重量, x_i 为某一径级团聚体平均直径, w_i 为分析样品的重量。

3 结果与分析

3.1 植被恢复对团聚体稳定性的影响

本文采用3个指标即>0.25mm水稳性团聚体比例、团聚体破坏率、GMD指示团聚体稳定性,结果均为次生林>马尾松林>百喜草地>板栗园>裸地(表1)。

裸地0~5cm和5~10cm土层深度土壤干筛>0.25mm团聚体占供试土壤重量的80%以上(表1),湿筛后各级水稳性团聚体数量剧减,>0.25mm团聚体仅占12%~16%,团聚体破坏率高达80%~85%,GMD较小,约为0.65mm左右。植被恢复后,马尾松林、百喜草地和板栗园0~5cm的土壤>0.25mm水稳性团聚体含量分别是裸地的2.26倍、1.57倍和1.37倍,5~10cm的分别是裸地的2.83倍、1.52倍和1.69倍,团聚体破坏率下降到54%~75%,GMD上升至0.68~0.82mm,而次生林>0.25mm水稳性团聚体含量约占40%左右,团聚体破坏率为47%~54%,GMD约为0.87mm。表明裸地>0.25mm团聚体稳定性低,极易被水分散,而植被恢复后>0.25mm团聚体稳定性增强。

3.2 植被恢复对不同粒径团聚体碳含量的影响

植被恢复显著增加了土壤有机碳含量,对土壤不同粒径团聚体的有机碳含量具有明显的影响。裸地2~5mm团聚体有机碳含量略高,其余粒径团聚体的有机碳含量均与全土有机碳含量接近,约为0.17%,而植被恢复后,土壤有机碳含量显著增加,不同粒径团聚体有机碳含量亦有较大差异(表2)。大团聚体(>0.25mm)的有机碳含量一般高于微团聚体(0.05~0.25mm)、粉粒与粘粒(<0.05mm)以及全土的有机碳含量,微团聚体(0.05~0.25mm)、粉粒及粘粒(<0.05mm)的有机碳含量一般低于全土的有机碳含量,0.25~2mm径级的团聚体有机碳含量最高,而微团聚体的有机碳含量最低(表2)。

3.3 植被恢复对不同粒径团聚体有机碳分配的影响

裸地大团聚体有机碳储量低,约占总有机碳的15%,而微团聚体和粉粒及粘粒的有机碳约占85%,植被恢复后马尾松林、百喜草地和板栗园的大团聚体(含游离的轻组有机质)有机碳比例在0~5cm土层分别增加到46.71%、44.10%和37.69%,5~10cm土层分别增加到44.95%、32.40%和33.66%,而微团聚体和粉粒及粘粒的有机碳占总有机碳的比例在0~5cm和5~10cm土层则分别下降到53.29%、55.90%、62.31%和55.04%、67.60%、66.34%。而在次生林中,0~5cm和5~10cm土层大团聚体有机碳约占总有机碳的47.11%和40.20%(表3)。以上结果表明植被恢复增加了大团聚体中有机碳占总有机碳的比例,而减少了微团聚体和粉粒及粘粒有机碳占总有机碳的比例。

接表 1,表 2

植被恢复后,土壤大团聚体有机碳恢复速度更快。如马尾松林、百喜草地和板栗园 0~5cm 土层土壤有机碳储量分别是裸地的 9.6 倍、11.3 倍和 3.4 倍,但大团聚体有机碳储量分别是裸地的 26.5 倍、34.8 倍和 7.6 倍,而微团聚体和粉粒与粘粒有机碳储量之和分别是裸地的 6.1 倍、7.6 倍和 2.5 倍;5~10cm 土层有相似规律。在增加的有机碳中,约 41%~51% 储存在大团聚体中,24%~38% 储存在微团聚体中,20%~31% 储存在粉粒及粘粒中。

表 3 不同粒径水稳性团聚体有机碳储量($t \cdot hm^{-2}$)及分配比例(%)

Table 3 Reserves and distribution proportion of organic carbon in different size water-stable aggregates for soil

植被恢复类型 Types of vegetation restoration	土层深度(cm) Soil depth	>5mm		2~5mm		0.25~2mm	
		储量	比例	储量	比例	储量	比例
		Reserves	Proportion	Reserves	Proportion	Reserves	Proportion
次生林 CK1	0~5	0.663	6.26	1.378	13.03	2.941	27.80
	5~10	0.706	8.40	0.420	5.00	2.245	26.71
马尾松林 A	0~5	0.630	7.72	1.051	12.88	2.131	26.11
	5~10	0.119	2.42	0.457	9.31	1.633	33.23
百喜草地 B	0~5			0.339	3.52	3.905	40.58
	5~10			0.115	4.94	0.637	27.46
板栗园 C	0~5			0.152	5.27	0.937	32.42
	5~10			0.162	5.79	0.781	27.87
裸地 CK2	0~5			0.021	2.46	0.123	14.39
	5~10			0.054	6.72	0.068	8.39

植被恢复类型 Types of vegetation restoration	土层深度(cm) Soil depth	0.05~0.25mm		<0.05mm	
		储量	比例	储量	比例
		Reserves	Proportion	Reserves	Proportion
次生林 CK1	0~5	2.885	27.27	2.711	25.63
	5~10	3.000	35.69	2.034	24.20
马尾松林 A	0~5	2.201	26.96	2.149	26.33
	5~10	1.279	26.03	1.425	29.01
百喜草地 B	0~5	3.229	33.55	2.151	22.35
	5~10	0.851	36.71	0.716	30.89
板栗园 C	0~5	0.868	30.03	0.933	32.28
	5~10	0.838	29.91	1.020	36.43
裸地 CK2	0~5	0.362	42.44	0.347	40.73
	5~10	0.282	34.85	0.405	50.04

CK1: second forest; A: *Pinus massoniana* plantation forest; B: *Paspalum notatum* Flugge grassland; C: *Castanea mollissima* plantation; CK2: Bare land

4 讨论

4.1 植被恢复对团聚体有机碳含量与分布的影响

裸地由于长期遭受侵蚀,因此土壤有机碳含量低,不同粒径团聚体含量无明显差异。植被恢复后,不同粒径团聚体有机碳含量具明显提高,而 0.25~2mm 团聚体的有机碳含量最高,这与土壤中游离的轻组物质较多有关。大团聚体有机碳含量一般高于全土的有机碳含量,表明大团聚体对有机碳具有一定的富集作用^[9~12]。微团聚体有机碳含量低于大团聚体的,因为有机质是团聚体形成的主要黏结介质,有机分子与粘粒和阳离子相互胶结形成微团聚体,微团聚体与周围基本粒子或微团聚体之间相互胶结形成大团聚体^[12]。同时在大团聚体内部由于颗粒有机质的分解,大团聚体解体,也可形成微团聚体^[1],从而使微团聚体有机碳含量更低。

植被恢复对土壤团聚体有机碳分配有重要影响。在植被恢复过程中,大团聚体有机碳储量的增幅明显快于微团聚体和粉粒与粘粒有机碳储量的增幅(表 3),说明新增加的碳可能首先出现在大团聚体中,因而增加

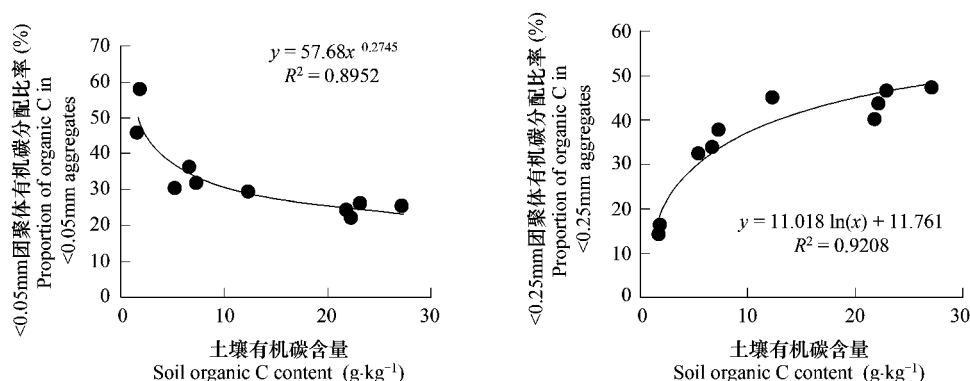


图1 团聚体有机碳分配比率与土壤有机碳含量的关系

Fig. 1 Relationship between SOC content and C distribution ratio of different size aggregates

了大团聚体中有机碳的分配比例。Gale 等也认为新输入的有机碳首先出现在大团聚体中,大团聚体的形成速度比微团聚体快^[13]。同时微团聚体通过有机质的胶结形成大团聚体而减少了微团聚体有机碳的比例^[12],从而增加了大团聚体有机碳分配比例。对不同粒径的团聚体有机碳分配比例与土壤有机碳含量进行相关分析,发现 <0.05mm 的粉粒与粘粒有机碳分配比例与土壤有机碳含量呈显著的负幂函数关系,而 >0.25mm 的大团聚体有机碳分配比例与土壤有机碳含量有显著的对数函数关系(图 1),表明在植被恢复过程中,土壤有机碳含量较低时,单位土壤有机碳含量形成大团聚体的速度快于土壤有机碳含量较高时的形成速度。随着土壤有机碳含量的增加,大团聚体、微团聚体、粉粒与粘粒中的有机碳分配比例趋于平衡(图 1),土壤有机碳可能达到饱和状态。

微团聚体内的有机碳比大团聚体内的有机碳更不易变化^[9],与微团聚体结合的有机质大部分是由高度腐殖化的惰性组分组成,且受到物理保护,因而微团聚体有机碳的周转时间显著高于大团聚体的^[12]。对团聚体破碎后的矿化作用研究也表明,与大团聚体结合的有机质比与微团聚体结合的有机质更易矿化^[10]。本研究中,裸地上大团聚体中的有机碳占总有机碳的比例仅 15% 左右,而微团聚体中的有机碳和粉粒及粘粒结合的有机碳比例分别为 34% ~ 42% 和 40% ~ 50%,表明在土壤侵蚀退化过程中大团聚体内有机质更易受微生物的降解和矿化。植被恢复后,微团聚体以及粘粒与粉粒有机碳储量约为裸地的 2.3 ~ 7.6 倍,这部分新增加的有机碳将成为长期的土壤碳汇;而大团聚体有机碳比例增加,由于大团聚体有机碳比微团聚体有机碳更易被微生物分解,在较短的时间内分解释放部分养分供植物吸收利用,这对于贫瘠的侵蚀退化地的恢复具有积极意义。

4.2 植被恢复过程中土壤有机碳与团聚体稳定性关系

土壤有机碳含量与团聚体破坏率呈显著的负相关关系(图 2),表明土壤有机碳的恢复能提高土壤团聚体的稳定性。土壤有机质是形成土壤团聚体的主要胶结物质,裸地的植被恢复提高了土壤有机碳含量,促进了土壤团聚体的形成,从而提高了土壤团聚体的稳定性。土壤团聚体的稳定性也受土壤黏结介质持久性的影响,有机黏结介质基于时间的持久性分成三大类:瞬时的(主要是多糖),暂时的(根、真菌菌丝、微生物细胞、藻类),持久的(与多价金属阳离子联系的芳香腐殖物质和受粘粒强烈吸附的聚合物)^[12]。微团聚体被认为是稳定的主要是由于持久介质的作用,也存在一些瞬时的物质,而大团聚体是通过瞬时和暂时介质黏结在一起的^[1,12]。但持久性的有机黏结介质不仅影响微团聚体的稳定性,也可能影响大团聚体的稳定性。侵蚀裸地由于有机质基本丧失殆尽,归还的有机物质也少^[14],在团聚体形成过程中无机胶体占主导作用,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,是热带亚热带土壤微团聚体形成的主要机制之一^[5,15,16]。在侵蚀裸地恢复植被初期(板栗园和百喜草地),多数有机质是新近形成的,有机黏结介质可能多属瞬时和暂时性的物质,因而稳定性较低,虽然百喜草地 0 ~ 5cm 土壤有机碳含量约为板栗园土壤有机碳含

量的3倍,但土壤团聚体稳定性相似。而马尾松林植被恢复时间较长,有机质腐殖化程度较高,可能导致持久性的有机黏结介质增加,团聚体的稳定性进一步提高。次生林形成时间最长,形成的持久性黏结介质比例也最大,因而团聚体稳定性最高。土壤团聚体稳定性还与植被类型有关,不同质量的碳源不仅影响着有机介质的持久性,还影响着有机质亲水性和疏水性物质的比例,从而影响团聚体的水稳性。如马尾松松针含较多树脂和蜡质等疏水性物质,阻碍了水的湿润速度,导致团聚体内的空气缓慢释放,从而增强了团聚体的稳定性^[5]。因此,在植被恢复过程中,保护地表的有机物质不受破坏,有助于水稳性团聚体的形成,从而增强土壤的抗蚀性。但由于研究区还较为贫困,群众燃料比较缺乏,地表枯枝落叶被扒走当燃料的现象极为严重,不利于土壤有机质的恢复和稳定性团聚体的形成。

5 结论

裸地大团聚体水稳性程度低,植被恢复后大团聚体稳定性显著增加,>0.25mm水稳性团聚体含量是裸地的1.5~2.8倍。植被恢复改变了土壤团聚体有机碳含量,裸地各级团聚体有机碳含量基本相似,植被恢复后,大团聚体有机碳含量一般高于全土有机碳含量,而微团聚体、粉粒及粘粒有机碳含量一般低于全土有机碳含量,大团聚体对有机碳具有一定的富集作用。植被恢复增加了大团聚体中有机碳分配比例,大团聚体有机碳恢复速度快于微团聚体以及粉粒与粘粒有机碳的恢复速度,而增加的有机碳约41%~51%储存在大团聚体中,24%~38%储存在微团聚体中,20%~31%储存在粉粒及粘粒中。团聚体稳定性与土壤有机碳含量密切相关,植被恢复促进了土壤有机质的恢复,从而促进了团聚体的形成,提高了团聚体的稳定性,植被恢复时间越长,土壤有机碳含量越高,土壤团聚体水稳性程度也越好。因此,在侵蚀地进行生态恢复时,通过适当的土壤管理措施输入有机质和保护地表的枯枝落叶层,将有助于水稳性团聚体的形成和增强土壤抗蚀性。

References:

- [1] Six J, Elliott E T, Paustian K. Soil macroaggregate turnover and microaggregate formation: A mechanism for C sequestration under no-tillage agriculture. *Soil Biol. Biochem.*, 2000, 32: 2099—2103.
- [2] Bronick C J, Lal R. Soil structure and management: a review. *Geoderma*, 2005, 124: 3—22.
- [3] Peng X H, Zhang B, Zhao Q G. A review on relationship between soil organic carbon pools and soil structure stability. *Acta Pedologica Sinica*, 2004, 41(4): 618—623.
- [4] Unger P W. Aggregate and organic carbon concentration interrelationships of a Torricic Paleustoll. *Soil and Tillage Research*, 1997, 42: 95—113.
- [5] Peng X H, Zhang B, Zhao Q G. Effect of soil organic carbon on aggregate stability after vegetative restoration on severely eroded red soil. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(10): 2176—2183.
- [6] Zhang M K, He Z L, Chen G C, *et al.* Formation of water-stable aggregates in red soils as affected by land use. *Acta Pedologica Sinica*, 1997, 34(4): 359—366.
- [7] Science and technology department of China Forestry Administration. Forestry standard compilation (three). Beijing: China Forestry Publishing House, 1991.
- [8] Pinheiro E F M, Pereira M G, Anjos L H C. Aggregate distribution and soil organic matter under different tillage systems for vegetable crops in Red Latosol from Brazil. *Soil and Tillage Research*, 2004, 77: 79—84.
- [9] Cambardella C A, Elliott E T. Carbon and nitrogen distribution in aggregates from cultivated and native grassland soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1993, 57: 1071—1076.
- [10] Gregorich E G, Kachanoski R G, Voroney R P. Carbon mineralization in soil size fractions after various amounts of aggregate disruption. *J. Soil*

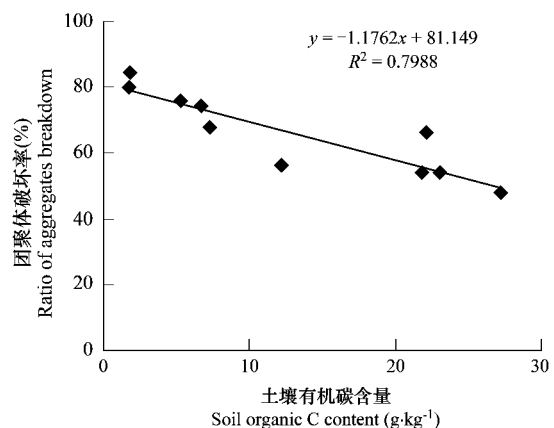


图2 土壤有机碳含量与团聚体破坏率的关系

Fig. 2 Relationship between soil organic carbon content and ratio of aggregates breakdown

- Sci. , 1989, 40: 649 — 659.
- [11] Jastrow J D, Boutton T W, Miller R M. Carbon dynamics of aggregate-associated organic matter estimated by carbon-13 natural abundance. Soil Sci. Soc. Am J. , 1996, 60: 801 — 807.
- [12] Tisdall J M, Oades J M. Organic matter and water-stable aggregates. J. Soil Sci. , 1982, 33: 141 — 163.
- [13] Gale W J, Cambardella C A, Bailey T B. Root-derived carbon and the formation and stabilization of aggregates. Soil Sci. Soc. Am. J. , 2000, 64: 201 — 207.
- [14] Xie J S, Yang Y S, Chen G S, *et al.* Changes of annual fluxes of nutrient after vegetation restoration of eroded red soil in subtropical region of China. Acta Ecologica Sinica, 2005, 25(9): 2312 — 2319.
- [15] 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.
- [16] Puget P, Chenu C, Balesdent J. Total and young organic matter distributions in aggregates of silty cultivated soils. Eur. J. Soil Sci. , 1995, 46: 449 — 459.

参考文献:

- [3] 彭新华, 张斌, 赵其国. 土壤有机碳库与土壤结构稳定性关系的研究进展. 土壤学报, 2004, 41(4): 618 ~ 623.
- [5] 彭新华, 张斌, 赵其国. 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. 生态学报, 2003, 23(10): 2176 ~ 2183.
- [6] 章明奎, 何振立, 陈国潮, 等. 利用方式对红壤水稳性团聚体形成的影响. 土壤学报, 1997, 34(4): 359 ~ 366.
- [7] 林业部科技司. 林业标准汇编(三). 北京: 中国林业出版社, 1991.
- [14] 谢锦升, 杨玉盛, 陈光水, 等. 亚热带侵蚀红壤植被恢复后营养元素通量的变化. 生态学报, 2005, 25(9): 2312 ~ 2319.

表 1 不同粒径团聚体的分布

Table 1 Distribution of different size of dry aggregates and water-stable aggregates in soil

植被恢复类型 Types of vegetation restoration	土层深度 (cm) Soil depth	不同粒径团聚体占总重的比例(%) Dry weight proportion of different size aggregates					>0.25mm 水稳性 团聚体(%) Proportion of >0.25mm size water stable aggregates	团聚体破 坏率(%) Ratio of aggregate breakdown	团聚体几何 平均直径 (mm) Geometric mean diameter of aggregate
		Dry weight proportion of different size aggregates							
		>5mm	2 ~ 5mm	0.25 ~ 2mm	0.05 ~ 0.25mm	<0.05mm			
次生林 CK1	0 ~ 5	26.03 6.87	18.86 12.88	35.29 22.76	19.01 35.24	0.80 22.25	42.51	46.98	0.867
	5 ~ 10	38.62 12.50	21.57 4.64	24.93 22.11	14.36 36.64	0.53 24.11	39.25	53.89	0.856
马尾松林 A	0 ~ 5	15.76 36.64	21.76 11.62	41.48 36.64	20.80 32.73	0.20 31.04	36.23	54.14	0.819
	5 ~ 10	7.77 1.81	29.74 7.85	41.28 24.90	21.06 31.69	0.14 33.75	34.56	56.14	0.766
百喜草地 B	0 ~ 5	4.41 0	21.29 3.20	45.36 21.21	28.41 46.93	0.53 28.66	24.41	65.65	0.709
	5 ~ 10	10.76 0	31.01 2.95	36.66 16.22	21.25 43.53	0.32 37.30	19.17	75.56	0.680
板栗园 C	0 ~ 5	3.78 0	13.39 3.36	50.20 18.57	31.91 40.83	0.72 37.24	21.93	67.45	0.690
	5 ~ 10	5.50 0	25.10 4.26	49.14 16.38	20.03 37.82	0.23 41.54	20.64	74.12	0.684
裸地 CK2	0 ~ 5	8.7 0	32.71 1.65	40.87 14.41	17.49 41.90	0.23 42.04	16.06	80.48	0.660
	5 ~ 10	8.92 0	31.18 3.83	41.47 78.37	17.82 36.37	0.60 51.43	12.20	85.04	0.644

分子为干筛,分母为湿筛 numerator is dry sieve, denominator is wet sieve; CK1: second forest; A: *Pinus massoniana* plantation forest; B: *Paspalum notatum* Flugge grassland; C: *Castanea mollissima* plantation; CK2: bare land

表 2 不同粒径水稳性团聚体的有机碳含量 (g·kg⁻¹)

Table 2 Organic carbon content of different size water-stable aggregates (g·kg⁻¹)

粒径 (mm) size	次生林 CK1			马尾松林 A		百喜草地 B			板栗园 C			裸地 CK2		
	0 ~ 5cm	5 ~ 10cm		0 ~ 5cm	5 ~ 10cm	0 ~ 5cm	5 ~ 10cm		0 ~ 5cm	5 ~ 10cm	0 ~ 5cm	5 ~ 10cm		
<0.05	21.2	21.8		19.3	10.5	17.3	4.5		6.2	5.8	1.7		1.6	
0.05 ~ 0.25	21.0	21.2		18.8	10.0	15.9	4.6		5.3	5.3	1.8		1.6	
0.25 ~ 2	33.1	26.3		32.2	16.2	42.5	9.1		12.5	11.3	1.8		1.6	
2 ~ 5	27.4	23.4		25.3	14.4	24.4	9.0		11.3	9.0	2.6		2.9	
>5	24.7	14.6		28.7	16.2	—	—		—	—	—		—	
全土 Whole soil	27.3	21.8		23.1	12.2	22.2	5.4		7.2	6.6	1.7		1.7	

CK1: second forest; A: *Pinus massoniana* plantation forest; B: *Paspalum notatum* Flugge grassland; C: *Castanea mollissima* plantation; CK2: bare land