

毛竹林地土壤团聚体稳定性及其对碳贮量影响研究

肖复明¹, 范少辉^{2,*}, 汪思龙³, 熊彩云¹, 于小军³, 申正其³

(1. 江西省林业科学院, 南昌 330032; 2. 国际竹藤网络中心, 北京 100102;

3. 中国科学院会同森林生态实验站, 湖南会同森林生态系统国家野外观测研究站, 会同 418307)

摘要: 通过对集约经营毛竹林地土壤团聚体的测定, 结果表明毛竹林地 3 个土壤层次各粒径团聚体分布特征为 >5 mm 的含量在土壤团粒结构中占主导地位, 占总团聚体的比例为 26.39%~42.38%; 其次为 1~5 mm 含量, 占 14%~18%; <0.25 mm 的含量最小, 占 2.31%~6.73%。毛竹林土壤团聚体平均重量直径平均值为 0.90 mm, 并且随着土壤层次的增加有逐渐增加的趋势。毛竹林地土壤总有机碳的积累与 0.25~3.15 mm 土壤团聚体中有机碳含量呈显著相关, 与 >3.15 mm 和 <0.25 mm 团聚体有机碳含量相关不显著。毛竹林地 0~20 cm 土壤层中, 分布在 >5 mm 和 3.15~5 mm 粒径土壤团聚体中的有机碳比例分别为 14.86% 和 11.26%, 低于 20~40 cm 和 40~60 cm 土壤。这也说明, 长期集约经营毛竹林后, 林地土壤有机碳含量下降的主要原因可能是 >5 mm 粒径土壤团聚体有机碳含量下降。

关键词: 毛竹林; 土壤团聚体; 土壤碳贮量

中图分类号: S152.4; S153.621

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2008)02-0131-04

Moso Bamboo Plantation Soil Aggregate Stability and Its Impact on Carbon Storage

XIAO Fu-ming¹, FAN Shao-hui^{2,*}, WANG Si-long³, XIONG Cai-yun¹, YU Xiao-jun³, SHEN Zheng-qi³

(1. Jiangxi Academy of Forestry, Nanchang 330032; 2 International Centre for Bamboo and Rattan, Beijing 100102;

3 Huitong Experimental Station of Forest Ecosystem, Chinese Academy of Sciences;

Huitong National Research Station of Forest Ecosystem, Huitong 418307)

Abstract: The intensive management Moso bamboo plantation soil aggregates and its carbon storage were analyzed. The results showed that soil granule structure of Moso bamboo plantation was dominated by >5 mm aggregate for all the three soil layers, accounting for 26.39%~42.38% of all soil aggregate. Soil aggregates of 1~5 mm and <0.25 mm accounted for 14%~18% and 2.31%~6.73%, respectively. Mean weight diameter of soil aggregate in Moso bamboo plantation was 0.90 mm, which tended to increase with descending soil layers. The accumulation of soil organic carbon was significantly related to organic carbon in 0.25~3.15 mm aggregate. However, the correlations between soil organic carbon accumulation and organic carbon in both >3.15 mm and <0.25 mm aggregates were not significant. Moso bamboo plantation soil aggregate ratio of organic carbon in >5 mm and 3.15~5 mm aggregate in 0~20 cm were 14.86% and 11.26%, lower than its 20~40 cm and 40~60 cm layer. That is to say the >5 mm soil diameter aggregate organic carbon content decreased maybe the main reasons of long-term intensive management Mao bamboo plantation soil organic carbon content decreased.

Key words: Moso bamboo plantation; soil aggregate; soil carbon storage

土壤团聚体分布影响有机碳含量及其稳定性。Elliott 等研究表明与大团聚体相联系的有机碳比微团聚体中的有机碳更易矿化^[1], Puget 等认为大团聚体的形成是微团聚体通过有机碳的胶结形成的, 耕作方式和土地利用方式影响微团聚体与大团聚体之间的转化和再分布^[2], 并且大团聚体中有机碳不稳定, 是土壤有机碳损失的途径之一^[1]。作为土壤有机碳稳定性的主要影响因子, 在全球气候变化的背景下, 其研究也就越来越受到重视。目前对其研究主要集中在土壤团聚体的形成、稳定性机制及其主要影响因素等方面^[3-5]。

毛竹 (*Phyllostachy edulis*) 是我国南方重要的森林资源, 据不完全统计, 我国现有毛竹林面积达 300 万 hm^2 以上, 约占全世界竹林面积的 20%, 并且近年来种植面积有不断扩大趋势^[6]。由于毛竹林有别于其它人工林的经营模式, 尤其是随着毛竹集约经营程度的提高, 林地土壤生物学性质明显下降^[7], 但对其林地土壤团聚

体中有机碳含量及其稳定性知之甚少。因此,本文以集约经营近 20 年的毛竹林为对象,并以杉木人工林和亚热带天然次生常绿阔叶林为对照,探讨其土壤团聚体分布特征及其对土壤有机碳含量的影响,旨在为今后林分尺度上合理经营毛竹林和进一步评价毛竹林土壤碳源/汇功能变化提供理论依据。

1 试验地概况

研究样地位于湖南省会同县境内,气候属亚热带湿润气候,年均温度 16.5℃,极端最高温和最低温分别为 36.4℃和-4.4℃,年均降雨量为 1 200~1 400 mm,年均相对湿度在 80%以上,年均日照 1 445.4 h,无霜期 304 d,海拔为 300~500 m,土壤为红黄壤。毛竹林位于湖南省会同县肖家乡坡脚村(109°53'E,27°03'N),试验林原为荒芜低产毛竹林,是 1988 年冬经低产林改造后而建立的,林分现有立竹度为 1 800~2 400 株/hm²,林地灌木基本没有,林下植被生长季节以马唐(*Digitaria sanguinalis*)、鸡屎藤(*Paederia scandens*)、鱼腥草(*Houttuynia cordata*)、蛇葡萄(*Ampelopsis aconitifolia*)、莎草(*Cyperus difformis*)、铁芒萁(*Dicranopteris linearis*)等杂草为主。对照样地设在中国科学院会同森林生态实验站(109°30'E,26°48'N),杉木林龄为 15 年生,林分现有密度为 1 530 株/hm²,林分平均胸径为 14.8 cm,平均树高为 12.6 m,造林地前茬为杉木林,林地灌木主要以杜茎山(*Maesa japonica*)、格药桉(*Eurya muricata*),草本以狗脊(*Woodwardia japonica*)、中华里白(*Dipcopterygium chinensis*)等为优势种的生态系统。天然次生常绿阔叶林主要乔木树种有樟科、壳斗科、金缕梅科、木犀科等 16 科树种,优势木有青冈栎属(*Cyclobalanopsis*)、栲属(*Castanopsis*)、润楠属(*Machilus*)、枫香属(*Liquidambar*)等,林分现有密度为 1 124 株/hm²,其中红栲(*C. hystrix*) 356 株/hm²、青冈(*C. glauca*) 168 株/hm²、刨花楠(*M. pauhoi*) 116 株/hm²。林地的主要理化性质如表 1 所示。

表 1 林地土壤理化性质

林型 类型	取样深度 (cm)	各粒级(mm)土壤的机械组成(%)			土壤质地	土壤容重 (g/cm ³)	土壤总孔 隙度(%)	土壤有机质 (%)	全氮 (%)	全磷 (%)	有效磷 (mg/kg)
		砂粒 (2~0.05)	粉砂粒 (0.05~0.002)	粘粒 (<0.002)							
毛竹林	0~40	6.7	50	43.3	粉砂质粘壤土	1.05	67.72	3.61	0.133	0.058	1.957
杉木纯林	0~40	3.2	53.9	43.8	粉砂质粘壤土	1.24	58.57	1.52	0.112	0.043	0.343
常绿阔叶林	0~40	4.1	54	41.9	粉砂质粘壤土	0.97	66.72	2.07	0.183	0.047	0.909

2 研究方法

2006 年 9 月在毛竹、杉木和常绿阔叶林固定样地中随机选取 9 个点,按上、中、下坡“S”形进行采样,并分 0~20 cm,20~40 cm 和 40~60 cm 三个层次用直径为 4.5 cm 的土钻分别采集原状土,重复 4 次。样品带回试验室内风干后,用萨维诺夫干筛和湿筛法测定<0.25 mm,0.25~0.5 mm,0.5~1.0 mm,1.0~2.0 mm,2.0~3.15 mm,3.15~5 mm,>5 mm 等 7 个土壤粒径含量,并风干后采用重铬酸钾外加热法测定其有机碳含量^[8]。

水稳定性团粒平均重量直径(MWD)由 Van Bavel(1949)提出的^[9],其公式可表示为: $MWD = \sum_{i=1}^n X_i W_i$

式中: MWD——团粒平均重量直径(mm); X_i ——任一粒级范围内团聚体的平均直径(mm); W_i ——对应于 X_i 的团聚体百分含量(以小数表示)。

表 2 不同林分类型土壤团聚体特征

林分类型	土壤深度	% 粒径/mm						
		>5 mm	3.15~5 mm	2~3.15 mm	1~2 mm	0.5~1 mm	0.25~0.5 mm	<0.25 mm
毛竹林	0~20 cm	26.39	17.45	14.32	17.99	10.78	7.14	6.73
	20~40 cm	41.10	16.03	12.74	14.77	7.93	4.29	3.37
	40~60 cm	42.48	18.81	13.33	14.11	6.34	3.04	2.31
杉木林	0~20 cm	34.56	17.55	14.06	16.86	9.27	4.46	3.16
	20~40 cm	33.90	19.97	15.63	16.64	7.71	3.58	2.55
	40~60 cm	31.34	23.16	17.94	15.86	10.21	3.06	2.01
阔叶林	0~20 cm	41.58	15.92	11.01	13.52	8.39	4.95	4.43
	20~40 cm	37.26	18.50	13.73	15.34	8.19	4.12	2.77
	40~60 cm	34.13	20.98	14.94	15.75	7.83	3.75	2.66

3 结果与分析

3.1 土壤团聚体的分布

由表 2 可知,毛竹林地土壤 0~20 cm,20~40 cm,40~60 cm 三个层次土壤各粒径团聚体占总团聚体的比例为>5 mm 的含量最大,分别为 26.39%,41.1%和 42.38%,表明该粒径团聚体在土壤团粒结构中占主导地位。其次为 1~2 mm 和 3.15~5 mm 含量,占 14%~18%,<0.25 mm 的含量最小,分别为 6.73%,3.37%和 2.31%。杉木和阔叶林地土壤团聚体各粒径分布特征也表现出同样的特征,即>5 mm 的团聚体含量最大,<

0.25 mm 的团聚体含量最小,不同土壤层次团聚体各粒径所占比例基本上随着粒径的增大而增加。

3.2 植被对土壤团聚体平均重量直径的影响

图 1 的结果表明,毛竹林地土壤在 0~20 cm,20~40 cm,40~60 cm 三个层次的分布中,土壤团聚体平均重量直径分别为 0.45 mm,1.12 mm 和 1.14 mm,土壤团聚体平均重量直径随着土壤层次的增加有逐渐增加的趋势,而杉木和阔叶林地土壤在 0~20 cm,20~40 cm,40~60 cm 三个层次的分布中,土壤团聚体平均重量直径则正好相反,随着土壤层次的增加而递减,这可能与不同林分的经营措施有关,毛竹林每年抚育除草,致使表层土壤相对要疏松,并且林下植被不多,因此其抗侵蚀能力相对较弱。杉木虽为人工林,但一般是造林前 5 年有抚育、除草等人为活动,郁闭成林后基本上无人干扰,因此其多年生长后,土壤团聚体平均重

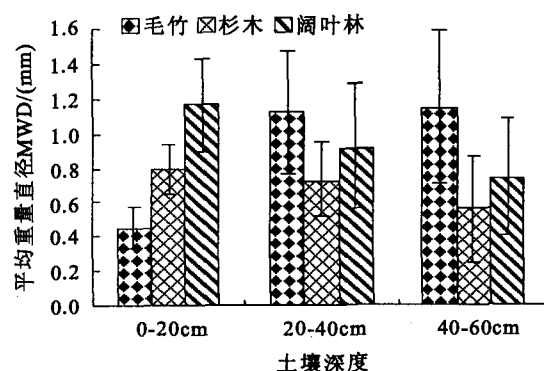


图 1 不同林地土壤平均重量直径

量直径与阔叶林表现出同样的特征,此外,对照林分表层土壤团聚体平均重量直径要大于其它两层次,可能与表层土壤有机质含量较高有关,有机质含量高有利于促进土壤团聚体的形成。从土壤团聚体平均重量直径平均值来看,毛竹林与阔叶林基本相近,分别为 0.90 mm 和 0.94 mm,是杉木林的 1.29 倍和 1.35 倍,说明毛竹林地土壤的抗侵蚀能力一定程度上还是要高于杉木林,这可能与毛竹林根系生物量大于杉木林有关。

3.3 土壤团聚体有机碳含量

由表 3 可知,3 个林分林地 0~20 cm 土壤各个粒径团聚体有机碳含量都高于 20~40 cm 和 40~60 cm,并且随着土壤层次的加深,土壤各个粒径团聚体有机碳含量有逐渐降低的趋势。这可能与凋落物在土壤表面形成腐殖质层有关,这与宋日等研究草地时的结果相似^[10],也就是说不同植被对土壤有机碳含量的影响可能主要是通过改变林地凋落物的数量和质量及其环境条件,从而影响土壤有机碳的储存量、组成和稳定性。

表 3 不同粒径土壤团聚体有机碳含量

林分类型	土壤层次	>5 mm	3.15~5 mm	2~3.15 mm	1~2 mm	0.5~1 mm	0.25~0.5 mm	<0.25 mm
毛竹林	0~20 cm	1.468	1.683	1.687	1.433	1.496	1.725	1.073
	20~40 cm	1.373	1.270	1.028	0.760	0.668	0.808	0.689
	40~60 cm	1.306	1.102	1.241	0.717	0.634	0.643	0.447
杉木林	0~20 cm	1.358	1.651	1.892	1.319	1.433	1.177	0.694
	20~40 cm	1.459	0.804	0.877	1.093	1.011	1.069	0.876
	40~60 cm	0.742	0.786	0.848	1.121	1.269	1.378	1.544
阔叶林	0~20 cm	2.056	1.648	1.308	1.531	1.307	1.143	0.882
	20~40 cm	1.222	0.855	0.449	0.341	0.682	0.588	0.564
	40~60 cm	0.337	0.381	0.411	0.455	0.433	0.475	0.660

另外,从不同层次土壤团聚体有机碳含量来看,毛竹林地 0~20 cm 土壤中 0.25~0.5 mm 粒径土壤团聚体有机碳含量最高,为 1.725%,20~40 cm 和 40~60 cm 土壤为 >5 mm 粒径土壤团聚体有机碳含量最高,分别为 1.373% 和 1.306%,而粒径 <0.25 mm 的土壤团聚体有机碳含量基本上是一层土壤团聚体粒径中最低的分别为 1.073%,0.689% 和 0.447%。杉木和阔叶林地土壤 0~20 cm 土壤团聚体有机碳含量最高的分别为 2~3.15 mm 粒径和 >5 mm 粒径,分别为 1.892% 和 2.056%,<0.25 mm 粒径团聚体有机碳含量最低,分别为 0.694% 和 0.882%。20~40 cm 和 40~60 cm 土层土壤团聚体有机碳含量基本上随着团聚体粒径的增大有增加的趋势,这可能与大团聚体中的有机碳含量多是植物残体及其半分解的产物有关。植物残体在土壤中受到微生物作用,在分解过程中体积逐渐减小,同时也逐渐与大团聚体机械混合在一起,而在团聚体的分离过程中,这一部分不可能完全分离出来,从而导致大团聚体中有机碳含量较高。这也从另一侧面说明,长期集约经营毛竹林后,林地土壤有机碳含量下降的主要原因可能是 >5 mm 粒径团聚体有机碳含量下降。

3.4 土壤团聚体分布与土壤团聚体有机碳含量的关系

由表 4 可知,土壤总有机碳含量与团聚体中的有机碳含量呈正相关关系。毛竹林地 1~2 mm,2~3.15 mm 和 0.5~1 mm 团聚体中有机碳含量与土壤总有机碳含量呈极显著正相关,与 0.25~0.5 mm 呈显著相关,与 >3.15 mm 和 <0.25 mm 团聚体相关性不显著。说明毛竹林地土壤总有机碳的积累受到 0.25~3.15 mm 团聚体中有机碳含量的影响较大,而受 >3.15 mm 和 <0.25 mm 团聚体有机碳含量影响较小。而从阔叶林来看,粒

径>0.5 mm 以上的团聚体有机碳含量对土壤总有机碳含量均有显著相关,而粒径<0.5 mm 的团聚体有机碳含量对土壤总有机碳含量影响不大,杉木林地则是粒径>5 mm 和<0.25 mm 的团聚体有机碳含量对土壤总有机碳含量均有显著相关,即不同粒径团聚体中,>5 mm 及 3~5 mm 是影响土壤有机质含量的主导因子,也就说明土壤团聚体有机碳含量,首先是增加较大粒径团聚体的有机碳含量,这与汪思龙等的研究结果相似^[11]。

表 4 不同粒径团聚体有机碳含量与土壤总有机碳含量的关系方程

粒径大小	毛竹林		杉木林		阔叶林	
	方程	R ²	方程	R ²	方程	R ²
>5 mm	$y = 1.1368 + 0.5819x$	0.2576	$y = 0.5089 + 0.8187x$	0.5309	$y = 0.3908 + 1.1620x$	0.8859**
3.15~5 mm	$y = 0.8016 + 0.7298x$	0.2999	$y = 1.0361 + 0.3111x$	0.3091	$y = 0.3258 + 1.444x$	0.9421**
2~3.15 mm	$y = 0.2740 + 1.2590x$	0.7693**	$y = 1.1575 + 0.1911x$	0.2340	$y = 0.3151 + 1.6752x$	0.8571**
1~2 mm	$y = 0.4115 + 1.2720x$	0.8068**	$y = 1.2475 + 0.1325x$	0.0275	$y = 0.5514 + 1.2566x$	0.7489**
0.5~1 mm	$y = 0.6343 + 0.9820x$	0.6605**	$y = 1.2063 + 0.1548x$	0.0327	$y = 0.2062 + 1.5741x$	0.7138**
0.25~0.5 mm	$y = 0.7000 + 0.7722x$	0.5448*	$y = 1.6897 - 0.2187x$	0.0487	$y = 0.4386 + 1.3614x$	0.4477
<0.25 mm	$y = 0.9972 + 0.6655x$	0.3319	$y = 2.2025 - 0.6993x$	0.6828*	$y = 1.300 + 0.5566x$	0.0890

3.5 团聚体中有机碳的分布特点

土壤有机碳的团聚体分量是土壤团聚体保持有机碳的容量指标,以土壤团聚体分量值除以有机碳总量,可以得出各粒径团聚体有机碳的分配比例,它反映了某一粒径团聚体中有机碳的相对数量。由表 5 可知,3 种林分中土壤有机碳在>5 mm,3.15~5 mm,2~3.15 mm,1~2 mm 团聚体中分配比例分别为 14.86%~54.66%,9.5%~24.83%,4.62%~16.34%和 3.92%~24.25%。毛竹林地 0~20 cm 土壤层中,分布在>5 mm 和 3.15~5 mm 团聚体中的比例分别为 14.86%和 11.26%,低于毛竹林地 20~40 cm 和 40~60 cm 土壤,也低于杉木林和阔叶林表层土壤,这可能与毛竹林地每年垦翻、除草等经营措施有关。

表 5 不同粒径团聚体有机碳占总有机碳的百分比

		%						
林分类型	土壤层次	>5 mm	3.15~5 mm	2~3.15 mm	1~2 mm	0.5~1 mm	0.25~0.5 mm	<0.25 mm
毛竹林	0~20 cm	14.86	11.26	9.27	9.89	6.18	4.72	2.77
	20~40 cm	36.20	13.06	8.40	7.20	3.40	2.22	1.49
	40~60 cm	54.66	20.42	16.30	9.97	3.96	1.93	1.02
杉木林	0~20 cm	26.71	16.49	15.14	12.66	7.56	2.99	1.25
	20~40 cm	38.28	12.43	10.61	14.08	6.04	2.96	1.73
	40~60 cm	31.72	24.83	20.76	24.25	17.67	5.75	4.23
阔叶林	0~20 cm	30.97	19.50	5.22	7.50	3.98	2.05	1.41
	20~40 cm	34.13	11.86	4.62	3.92	4.19	1.82	1.17
	40~60 cm	15.29	10.63	8.16	9.52	4.51	2.36	2.33

4 小结与讨论

(1) 毛竹林地土壤 0~20 cm,20~40 cm,40~60 cm 三个层次土壤各粒径团聚体占总团聚体的比例为>5 mm 的含量最大,分别为 26.39%,41.1%和 42.38%,表明该粒级团聚体在土壤团粒结构中占主导地位。其次为 1~5 mm 含量,占 14%~18%,<0.25 mm 的含量最小,分别为 6.73%,3.37%和 2.31%,并且不同土壤层次团聚体各粒径所占的比例基本上是随着粒径的增大而增加。

(2) 毛竹林地(0~60 cm)土壤团聚体平均重量直径为 0.90 mm,与阔叶林基本相近,是杉木林的 1.29 倍。毛竹林地土壤在 0~20 cm,20~40 cm,40~60 cm 三个层次的分布中,土壤团聚体平均重量直径分别为 0.45 mm,1.12 mm 和 1.14 mm,即土壤团聚体平均重量直径随着土壤层次的增加有逐渐增加的趋势。

(3) 从不同层次土壤团聚体有机碳含量来看,毛竹林地 0~20 cm 层土壤团聚体中 0.25~0.5 mm 粒径含量最高,为 1.725%;20~40 cm 和 40~60 cm 土壤为>5 mm 粒径团聚体有机碳含量为最高,分别为 1.373%和 1.306%,而粒径<0.25 mm 的团聚体有机碳含量基本上是同一层团聚体粒径中最低的,分别为 1.073%,0.689%和 0.447%;20~40 cm 和 40~60 cm 土层土壤团聚体有机碳含量基本上是随着团聚体粒径的增大有增加的趋势。

(4) 毛竹林地土壤总有机碳的积累与 0.25~3.15 mm 团聚体中有机碳含量呈显著相关,而与>3.15 mm 和<0.25 mm 团聚体有机碳含量相关性不显著。毛竹林地在 0~20 cm 土壤层中,分布在>5 mm 和 3.15~5 mm 团聚体中的有机碳比例分别为 14.86%和 11.26%,低于 20~40 cm 和 40~60 cm 土壤,说明长期集约经营毛竹林后,林地土壤有机碳含量下降的主要原因可能是>5 mm 粒径团聚体有机碳含量下降。

参考文献:

- [1] XING Bao-shan, LIU JU-dong, LIU Xiao-bing, Han Xiao-zeng. Extraction and characterization of humic acids and humin Fractions from a Black Soil of China[J]. *Pedosphere*, 2005, 15(1): 1-8.
- [2] Gordon M K, John F P. Equilibrium parameters for the sorption of copper, cadmium and zinc ions onto peat[J]. *Chemical Technology and Biotechnology*, 1997, 69: 309-320.
- [3] Marcelo J, Kevin J. Disaggregation kinetics of a peat humic acid: mechanism and pH effects[J]. *Environmental Science Technology*, 2002, 36: 5100-5105.
- [4] Joanna C, Slawomir S. Properties of humic acids as biomarkers of lake catchment management[J]. *Aquatic Sciences*, 2004, 66: 178-184.
- [5] 范春杰,刘懿善,孟庆春,等. 新型颗粒生物有机肥的生产工艺研究[J]. *齐齐哈尔大学学报*, 2002, 18(3): 22-24.
- [6] 武丽萍,成少鑫. 包裹型长效腐殖酸尿素的化学组成结构研究[J]. *燃料化学学报*, 2000, 29(5): 7-11.
- [7] 刘方春,邢尚军,刘春生,等. 褐煤腐殖酸对钾的吸附特性研究[J]. *农业工程学报*, 2006, 22(8): 27-31.
- [8] 李丽,武丽萍,成绍鑫. 腐殖酸磷肥的开发与作用机理研究进展[J]. *磷肥与复肥*, 1999(3): 58-61
- [9] 刘方春,邢尚军,刘春生,等. 无机酸处理对褐煤腐殖酸含量及其特性影响[J]. *水土保持学报*, 2004, 18(5): 31-34.
- [10] Muljadi D, Posner A M, Quirk J P. The mechanism of phosphate adsorption by kaolinite gibbsite and pseudoboehmite[J]. *Soil Science*, 1966, 17: 238-247.
- [11] 岳廷盛,张汉文,王玉琨. 褐煤中腐殖酸对 $^{65}\text{Zn}^{2+}$ 的吸附与交换[J]. *铀矿冶*, 1996, 15(4): 276-279.

上接第134页

(5) 本文以集约经营毛竹林为对象,研究了其林地土壤团聚体稳定性及其对碳贮量的影响,但为准确评价我国毛竹林生态系统土壤团聚体稳定性及其在全球碳循环中的功能和作用,还应加强对不同区域、不同经营措施下的毛竹林地土壤团聚体稳定性进行研究。

参考文献:

- [1] Elliott E T, Cambardella C A. Physical separation of soil organic matter[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 1991, 34: 407-419.
- [2] Puget P, Chenu C, Balesdent J. Dynamic of soil organic matter associated with particle-size fractions of water-stable aggregate[J]. *European Journal of Soil Science*, 2000, 51: 595-605.
- [3] 王清奎,汪思龙. 土壤团聚体形成与稳定机制及影响因素[J]. *土壤通报*, 2005, 36(3): 415-421.
- [4] 杨建国,安韶山,郑粉莉. 宁南山区植被自然恢复中土壤团聚体特征及其与土壤性质关系[J]. *水土保持学报*, 2006, 20(1): 72-98
- [5] 赵世伟,苏静,吴金水,等. 子午岭植被恢复过程中土壤团聚体有机碳含量变化[J]. *水土保持学报*, 2006, 20(3): 114-117.
- [6] 江泽慧. 世界竹类[M]. 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 2002.
- [7] 周国模,徐建明,吴家森,等. 毛竹林集约经营过程中土壤活性有机碳库演变[J]. *林业科学*, 2006, 42(6): 124-128.
- [8] 刘光崧. 中国生态系统研究网络观测与分析标准方法: 土壤理化分析与剖面描述[M]. 北京: 中国标准出版社, 1996.
- [9] Van Bavel C H M. Mean weight diameter of soil aggregates as a statistical index of aggregation[J]. *Soil Science Society of American Journal*, 1949, 14: 20-23.
- [10] 宋日,吴春胜,郭继勋. 东北草原植物残体腐解动态研究[J]. *草业学报*, 2002, 11(2): 105-108.
- [11] 汪思龙,廖利平,于小军,等. 杉木人工林退化土壤生态恢复过程中有机碳积累与土壤结构的改善[J]. *应用生态学报*, 2000, 11(增刊): 191-196.

上接第161页

- [4] 苏永中,赵哈林,张铜会,等. 不同强度放牧后自然恢复的沙质草地土壤性状特征[J]. *中国沙漠*, 2002, 22(4): 333-338.
- [5] 钱亦兵,周华荣,赵锐锋,等. 塔里木河中下游湿地及其周边土壤理化性状的空间异质性[J]. *水土保持学报*, 2005, 19(6): 31-34.
- [6] 周瑞莲,赵哈林,王海鸥. 科尔沁沙地植物演替的生理机制[J]. *干旱区研究*, 2001, 18(3): 13-19.
- [7] Rosell R A, Galantini J A, Suter L G. Long-term crop rotation effect on organic carbon, nitrogen, and phosphorus in Haplustoll soil fractions[J]. *Arid Soil Research and Rehabilitation*, 2000, 14(4): 309-315.
- [8] 苏永中,赵哈林,文海燕. 退化沙质草地开垦和封育对土壤理化性状的影响[J]. *水土保持学报*, 2002, 16(4): 5-8.
- [9] 贾晓红,李新荣,李元寿. 干旱沙区植被恢复过程中土壤颗粒分形特征[J]. *地理研究*, 2007, 26(3): 518-525.
- [10] 程杰,高亚军. 云雾山封育草地土壤养分变化特征[J]. *草地学报*, 2007, 15(3): 273-277.
- [11] 张永涛,杨吉华,夏江宝,等. 石质山地不同条件的土壤入渗特性研究[J]. *水土保持学报*, 2002, 16(4): 123-126.
- [12] 赵哈林,赵学勇,张铜会. 科尔沁沙地沙漠化过程及其恢复机理[M]. 北京: 海洋出版社, 2003: 167-187.