

麻栎林龄对土壤水稳性团聚体及其有机碳含量的影响^①

王 灿^{1,2}, 胡海波^{1,2*}, 范 真^{1,2}, 连经纬^{1,2}

(1 南京林业大学南方现代林业协同创新中心, 南京 210037; 2 江苏省水土保持与生态修复实验室, 南京 210037)

摘 要: 为了解林龄对土壤团聚体及其有机碳含量的影响, 探求各级团聚体中碳含量与团聚体稳定性之间的关系, 以 17、26 和 65 a 的麻栎人工林为对象, 研究了林地 0~40 cm 土壤水稳性团聚体组成、团聚体水稳性以及各级团聚体有机碳含量的变化规律和相互关系。结果表明: 林龄对土壤团聚体组成及其水稳性影响显著, 影响效果随林龄增加而增强, 随土层加深而减弱; 林龄对土壤团聚体有机碳含量影响显著, 影响程度随林龄增加而增强; <0.25 mm 土壤团聚体有机碳含量与各级土壤有机碳含量密切相关, 也是影响团聚体水稳性的主要因素。

关键词: 土壤团聚体; 有机碳; 稳定性; 麻栎

中图分类号: S714.5 文献标识码: A

土壤团聚体是土壤结构的基本单元, 是土壤中碳储存的重要场所^[1], 全球范围内 70%~73% 的有机碳存在于森林土壤, 90% 集中于表层土壤团聚体中^[2]。土壤碳库中无机碳较为稳定, 因此土壤有机碳是参与碳循环的主要成分^[3]。有机质在胶结土壤颗粒促进微团聚体形成的同时, 也受到了土壤颗粒的包裹, 产生一定物理保护^[4], 性质较为稳定。而由微团聚体胶结形成的大团聚体中的有机碳容易受到土壤表面植被覆盖、土地利用方式、微生物等因素的影响。这些因素通过改变向土壤中有机物质的输入, 使得土壤养分和微生物活性发生变化, 从而造成土壤团聚体结构和土壤有机碳的动态变化^[5-9]。团聚体的稳定性可以作为团聚体保护有机碳能力的指标, 同样也是评价土壤物理性质和抗侵蚀能力的重要指标^[10]。其中, 土壤水稳性团聚体对碳动态变化比较敏感^[11], 被认为是监测土壤碳含量动态变化的指标^[12]。

目前的研究集中于不同土地利用方式^[13-14]以及不同树种^[15-16]对土壤团聚体及其有机碳含量的影响, 而针对同一树种土壤团聚体及其有机碳含量受林龄影响的研究较少。为了了解林龄对土壤团聚体结构变化与有机碳含量的影响, 探求各级团聚体中碳含量与团聚体稳定性之间的关系, 本研究以空间代替时间, 选取 3 块不同林龄的麻栎(*Quercus acutissima*)人工

林, 对土壤水稳性团聚体组成及其有机碳含量进行测定, 期望阐明不同林龄土壤中团聚体组成、有机碳含量和稳定性的变化, 弄清土壤有机碳含量与团聚体稳定性的关系, 掌握土壤团聚体结构和有机碳随林龄的变化趋势, 为进一步研究土壤碳库的动态变化提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验林地位于江苏省镇江南京林业大学实习林场与句容林场, 地理位置位于 119°14'E, 32°7'N。属于亚热带季风气候区, 四季分明, 热量充足。年平均气温 15.2 °C, 极端最高和最低温度为 39.6 °C 和 -16.7 °C, 无霜期平均 233 d, 年平均降水量 1 055.6 mm, 集中在 6—8 月。试验样地土壤质地为黄棕壤, 基本概况见表 1。

1.2 样品采集与试验方法

在选定的 3 块林地中, 沿坡面分别在坡上、坡中、坡下各设 1 个 20 m × 20 m 的正方形样地, 每个样地沿对角线等分, 取 3 个样点。在各样点取 0~10、10~20、20~40 cm 土层的原状土, 将各样点土样分别装入塑料盒运回。剔除土样中的根系、石块, 剥成 8~10 mm 土块置于室内风干, 过 5 mm 筛。

基金项目: 国家林业局长江三角洲森林生态系统定位研究项目(2018-LYPT-DW-159)和江苏省高等学校林学优势学科建设项目(164010641)资助。

* 通讯作者(huhb2000@aliyun.com)

作者简介: 王灿(1994—), 男, 江苏镇江人, 硕士研究生, 主要研究方向林业生态工程。E-mail: 469636501@qq.com

表 1 试验样地概况表
Table 1 Information of experimental plots

林地	坡度(°)	林龄(a)	胸径(cm)	树高(m)	郁闭度	土壤容重(g/cm ³)	pH	有机质(g/kg)
1	25	17	10.5	9.38	0.62	1.47	4.61	3.33
2	5	26	14.4	11.52	0.81	1.60	4.63	4.67
3	15	65	26.3	14.49	0.79	1.41	4.55	5.33

土壤水稳性团聚体(简称团聚体)测定:使用 Yoder 湿筛法^[17],取过筛土样 50 g,先用慢速湿润法湿润样本 5 min^[18],再置于团聚体分析仪上,以 30 次/min、振幅 3.2 cm,震荡 30 min。分析仪套筛孔径分别为 2、1、0.5、0.25 mm。烘干,称重。土壤容重测定:环刀法;pH 测定:pH 计法;土壤团聚体有机碳含量测定采用重铬酸钾外加热法^[19]。

1.3 数据计算与处理

平均重量直径(mean weight diameter, MWD)、>0.25 mm 水稳性团聚体百分比($R_{0.25}$, %)是描述团聚体水稳性的常用参数,可以判断土壤结构的优劣,其值越大,土壤结构越好,水稳性越强^[21]。其计算方式如下。

平均重量直径:

$$MWD = \sum_{i=1}^n (\bar{X}_i W_i) \quad (1)$$

式中: \bar{X}_i 为过湿筛后 i 级土壤团聚体平均直径(mm); W_i 为 i 级团聚体占总团聚体的质量百分比(%)。

表 2 林分因子协方差分析 P 值
Table 2 P values of covariance analysis on forest factors

林分因子	土层(cm)	粒径(mm)					MWD	$R_{0.25}$ (%)
		>2	1~2	0.5~1	0.25~0.5	<0.25		
坡度	0~10	0.939	0.058	0.489	0.123	0.885	0.895	0.953
	10~20	0.687	0.491	0.800	0.780	0.652	0.679	0.585
	20~40	0.977	0.451	0.559	0.509	0.653	0.967	0.646
郁闭度	0~10	0.614	0.067	0.171	0.281	0.827	0.825	0.663
	10~20	0.181	0.950	0.384	0.944	0.101	0.153	0.097
	20~40	0.599	0.227	0.121	0.454	0.571	0.863	0.560

注: $P>0.05$ 表示林分因子影响不显著。

2.2 林龄对土壤团聚体组成的影响

土壤植被变化会导致土壤团聚体组成的变化,3 块林地土壤团聚体组成如表 3。从表 3 看出,>2 mm 土壤团聚体含量最高,0.25~0.5 mm 土壤团聚体次之,其余 3 个等级在不同林地不同土层中分布各有差异。总体趋势表现为,>1 mm 的土壤团聚体随土层加深而减小,<0.5 mm 的团聚体随土层加深而增加。

使用 Excel 和 SPSS 23.0 软件对坡度、郁闭度进行协方差分析,对同林龄不同土层与同土层不同林龄的土壤团聚体含量、团聚体水稳性、有机碳含量进行方差分析及多重比较,对各级水稳性团聚体有机碳含量与其水稳性特征值进行相关分析。

2 结果与分析

2.1 林分因子对土壤团聚体组成及其稳定性的影响

林地坡度、郁闭度影响降雨条件下林内地表径流的产生以及林内土壤受到的雨水冲刷^[20],从而对林内土壤团聚体组成及其稳定性产生作用。为了明确本研究中坡度、郁闭度因素的影响,以各级团聚体颗粒含量、团聚体水稳性指标为因变量,将林龄作为主变量,分别对林地坡度、郁闭度因素进行协方差分析,结果见表 2。由表可知,林地坡度、郁闭度对于土壤团聚体颗粒含量组成及其稳定性无显著影响,在进行林龄对团聚体及其稳定性分析时,可将其剔除。

根据各级土壤团聚体含量在同林龄不同土层与同土层不同林龄的差异显著性分析可以看出,在 17 a 生林地各土层与各林地 20~40 cm 土层中,各级土壤团聚体含量无显著差异。然而随林龄的增加,各级团聚体在不同土层、不同林龄间产生显著差异。

>2 mm 团聚体在 0~10、10~20 cm 土层中的含量随林龄增加而升高,0~10 cm 土层中 17、26 a 间无显著差异,65 a 林地显著增加,与 17、26 a 林

表 3 不同林地土壤团聚体分布(%)
Table 3 Distribution of soil water-stable aggregates under different forests

林地	林龄(a)	土层(cm)	粒径(mm)				
			>2	1~2	0.5~1	0.25~0.5	<0.25
1	17	0~10	29.64 aB	14.63 aB	16.66 aAB	21.24 aA	15.65 aA
		10~20	26.16 aA	14.74 aAB	16.94 aAB	23.45 aA	16.15 aB
		20~40	24.28 aA	13.46 aA	15.47 aA	23.40 aA	16.91 aB
2	26	0~10	31.69 aB	17.79 aA	19.06 aA	18.88 aA	11.49 cAB
		10~20	28.93 aA	13.52 bB	12.07 bB	26.16 bA	19.32 bA
		20~40	22.52 bA	11.63 bA	17.30 aA	21.83 abA	26.69 aA
3	65	0~10	46.93 aA	16.63 aB	13.94 aB	12.56 bB	9.94 bB
		10~20	35.21bA	16.76 aA	18.61 aA	19.12 aA	10.20 bB
		20~40	26.22 bA	15.64 aA	18.55 aA	24.99 aA	14.60 aB

注：同列数据小写字母不同表示同林龄不同土层间差异显著 ($P < 0.05$)，大写字母不同表示同土层不同林龄间差异显著($P < 0.05$)，下表同。

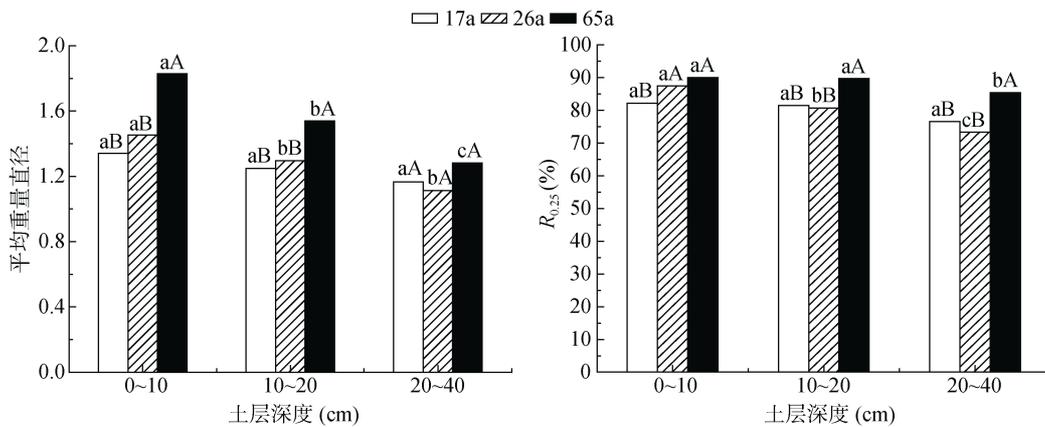
地相比,增加比例为 58.33%、48.09% ;在 10~20 cm 土层中,3 个林龄间 >2 mm 团聚体含量均无显著差异,65 a 林地与 17、26 a 林地相比,增加比例分别为 34.59%、21.71%,增加比例随土层加深而减小。由于不同土层团聚体含量随林龄变化量不同,>2 mm 团聚体含量在 26 a 林地 0~10、10~20 与 20~40 cm 土层间产生显著差异,65 a 林地 0~10 cm 与 10~20、20~40 cm 土层间产生显著差异。26、65 a 生林地郁闭度高,土壤表层枯落物丰富,能够有效拦截降雨,减少地表径流,减轻土壤受到的机械破坏作用。同时随着林龄增长,林地土壤有机碳含量的增加也促进了大团聚体的形成。

1~2 mm、0.5~1 mm 团聚体含量稳定,在 0~10 cm 土层中表现为 26 a 林地最高,而 10~20 cm 土层中则 26 a 林地最低。仅 26 a 林地中存在不同土层间的显著差异,随林龄变化的显著性差异仅存在于 26、65 a 林地之间。

0.25~0.5 mm 和<0.25 mm 土壤团聚体在 0~10 cm 土层中都随林龄增大而减小,65 a 林地团聚体含量与 17、26 a 相比差异显著;10~20 cm 土层中这两个等级的团聚体含量表现出先增大再减小的趋势,仅 26 a 林地中<0.25 mm 团聚体含量与 16、65 a 林地之间显著差异。0.25~0.5 mm 团聚体含量在各林龄 0~10、10~20 cm 土层间差异显著,26、65 a 林地 10~20 cm 土层中的含量比 0~10 cm 土层中含量分别高 38.56%、52.23%,说明小粒径团聚体在 0~10 cm 土层中受到胶结作用强于 10~20 cm 土层。<0.25 mm 团聚体在 17 a 林地各土层间无显著差异;26 a 林地的 3 个土层间差异显著;65 a 林地中<0.25 mm 团聚体含量在 0~10 cm 与 10~20 cm 土层中大幅减少,使两个土层间无显著差异,这一趋势随着林龄增大是否会继续,需要进一步研究。

2.3 林龄对土壤团聚体水稳定性的影响

平均重量直径(MWD)和 >0.25 mm 水稳性团聚体百分比($R_{0.25}$)是表征团聚体水稳定性的重要指标。林分土壤团聚体水稳定性特征值如图 1。



(图中小写字母不同表示同林龄不同土层间差异显著 ($P < 0.05$)，大写字母不同表示同土层不同林龄间差异显著($P < 0.05$))

图 1 不同土层土壤水稳定性特征值随林龄变化
Fig.1 Eigenvalue of soil water stability in different depths

从图 1 可以看出,随着土层深度增加,同林龄土壤平均重量直径和 $R_{0.25}$ 都呈现减小趋势,随着麻栎林龄的增加,差异达显著性水平。因此,随着土层深度的加深,土壤团聚体的水稳定性减弱,表层枯落物、较高的有机质含量、较好的外部环境条件都是产生这一现象的原因^[21-22]。

在 0~10 cm 与 10~20 cm 土层中,平均重量直径呈现随林龄增加而增加的趋势,17 a 与 26 a 之间的差异较小,65 a 与 26、17 a 相比,差异显著增加。20~40 cm 土层平均重量直径随林龄变化没有显著差异,但 65 a 与 17、26 a 相比,还是表现出一定的增大。就各土层平均重量直径随林龄的增量而言,0~10 cm 土层中 17~26 a、26~65 a、17~65 a 的增量分别为 0.11、0.38、0.49;10~20 cm 土层中这一值的大小为 0.06、0.24、0.30;20~40 cm 土层中则为 -0.06、0.17、0.11。可以看到,随着土层加深,增量值逐渐减小,说明林龄对土壤水稳定性团聚体的影响随土层深度的增加而减弱。

>0.25 mm 水稳性团聚体百分比($R_{0.25}$)随林龄的显著变化主要发生在 26 a 林地的 0~10 cm 土层,65 a 林地的 10~20 cm 土层与 20~40 cm 土层中。26 a 与 17 a 相比较,17 a $R_{0.25}$ 随土层增加无显著变化,26 a 3 个土层的变化量分别为 5.87%、-0.82%、-4.85%;而 65 a 与 17 a 相比, $R_{0.25}$ 变化量相对稳定,分别是

7.48%、8.21%、7.24%。同样,在 26~65 a 这一较长时间段内,各土层 $R_{0.25}$ 的变化量分别是 1.61%、9.03%、12.09%,表现出增长趋势,并且土层越深增量越大。这一现象说明麻栎林在较长时间尺度上能够稳定地改良土壤团聚体结构。

2.4 林龄对土壤团聚体有机碳的影响

土壤有机碳含量与土壤水稳性团聚体形成密切相关,团聚体是有机碳的重要储存场所,而大团聚体是由微团聚体受有机质的胶结形成(表 4)。

由表 4 可以看出,各林龄土壤有机碳含量总体表现为 0~10 cm>10~20 cm>20~40 cm。17、26 a 林地中,0~10 cm 与 10~20 cm 两个土层间部分等级团聚体有机碳含量差异显著;65 a 林地中,0~10 cm 土层各级团聚有机碳含量与 10~20 cm 土层有显著差异;各林龄 20~40 cm 土层各级团聚体有机碳含量均低于 0~10、10~20 cm 土层,且大部分团聚体在 10~20、20~40 cm 两个土层间有机碳含量差异显著。目前,学者们对人工林土壤碳储量变化进行了深入研究^[23-25],认为导致土壤碳储量变化的原因是由于同一树种在不同林龄状态下,其林分密度、郁闭度以及林下植被不同所致。植物生长所需的营养主要来自根系吸收,经凋落物腐化转移至表层土壤,从而具有随林龄增加土壤有机碳含量差异逐渐增大的特征。

表 4 土壤团聚体有机碳含量(g/kg)

Table 4 Organic carbon contents in soil aggregates in different sizes

林地	土层(cm)	团聚体大小(mm)				
		>2	1~2	0.5~1	0.25~0.5	<0.25
1	0~10	21.4 aC	21.8 bC	24.5 aB	24.5 aB	22.1 aB
	10~20	14.9 bB	33.3 aA	28.5 aB	22.7 aB	11.7 bC
	20~40	12.1 cB	14.2 cB	14.3 bC	11.1 bA	10.1 bB
2	0~10	29.2 aB	25.0 aB	24.7 bB	20.9 aC	19.4 bC
	10~20	29.0 bA	27.0 aB	34.8 aB	27.5 aA	22.6 aB
	20~40	11.0 cC	22.1 aA	26.4 bA	12.5 bB	09.4 cB
3	0~10	47.9 aA	48.8 aA	44.8 aA	45.8 aA	46.5 aA
	10~20	24.0 bA	32.6 bA	37.6 bA	26.0 bA	27.7 bA
	20~40	18.9 bA	20.0 cA	19.7 cB	17.8 cA	18.6 cA

将不同林龄同层土壤中各级团聚体有机碳含量进行比较:0~10 cm 土层中,65 a 林地中各级团聚体有机碳含量远高于 17、26 a 林地且差异显著;在 17、26 a 林地中,除 0.5~1 mm 外的 4 个等级团聚体有机碳含量均随林龄增加产生显著性差异;其中 >2 mm、1~2 mm 团聚体有机碳含量随林龄增加而升高,0.25~0.5 mm、<0.25 mm 则相反。10~20 cm

土层中,各级土壤团聚体有机碳含量随林龄增加的增量较小,仅 65 a 林地中<0.25 mm 团聚体有机碳含量与 26、17 a 存在显著差异;20~40 cm 土层各级团聚体有机碳含量在 17、26 a 林地中基本保持稳定,65 a 团聚体有机碳含量显著增加。0~10 cm 土层中,由于林冠、地被和枯落物对地表土壤的保护及低强度的人为活动干扰,使得土壤团聚体免遭破坏,对有机碳

起到保护作用,有利于土壤有机质的不断累积,而 10~20、20~40 cm 土层中团聚体有机碳含量主要受到植物根系影响,因此较为稳定^[26]。

2.5 土壤有机碳含量与团聚体稳定性的关系

对各级水稳性团聚体有机碳含量与其水稳性特征值进行相关分析(表 5)。从表 5 可以看出,各等级团聚体有机碳含量之间都有显著的正相关关系。>2 mm、1~2 mm、0.5~1 mm 土壤团聚体有机碳含量在 $P<0.05$ 水平上显著相关,相关系数在 0.714~0.774 之间;0.25~0.5 mm、<0.25 mm 土壤团聚体有机碳

含量与绝大部分团聚体有机碳含量在 $P<0.01$ 水平上相关,相关系数在 0.802~0.942 之间。<0.25 mm 与其余各级团聚体的相关系数随着团聚体粒径的增大而减小(>2 mm 除外),<0.25 mm 与 0.25~0.5 mm、>2 mm 团聚体有机碳含量的相关系数处于较高水平,分别为 0.942、0.870。由此可见,>0.5 mm 团聚体有机碳含量之间的相互影响与其受到<0.5 mm 团聚体有机碳含量的影响相比,相对较小;而<0.25 mm 与 0.25~0.5 mm 团聚体中有机碳含量对土壤各级团聚体有机碳含量有重要影响。

表 5 土壤水稳性团聚体有机碳含量与稳定性的相关关系
Table 5 Correlation between organic carbon content of soil water-stable aggregates and their stability

	>2 mm	1~2 mm	0.5~1 mm	0.25~0.5 mm	<0.25 mm	MWD	$R_{0.25}$
>2 mm	1						
1~2 mm	0.714*	1					
0.5~1 mm	0.762*	0.774*	1				
0.25~0.5 mm	0.882**	0.873**	0.870**	1			
<0.25 mm	0.870**	0.728*	0.802**	0.942**	1		
MWD	0.806**	0.722*	0.769*	0.902**	0.955**	1	
$R_{0.25}$	0.612	0.426	0.512	0.666	0.746*	0.861**	1

注: * 表示在 $P<0.05$ 水平(双侧)上显著相关, ** 表示在 $P<0.01$ 水平(双侧)上显著相关。

平均重量直径与各级有机碳含量都显著相关,相关系数随团聚体粒径减小呈“V”型分布,与<0.25 mm、0.25~0.5 mm 团聚体碳含量相关系数分别为 0.955、0.902。 $R_{0.25}$ 与平均重量直径相关关系在 $P<0.01$ 水平上显著;与各级团聚体碳含量都表现出一定的正相关关系,但仅与<0.25 mm 团聚体碳含量在 $P<0.05$ 水平上显著。可见,土壤团聚体水稳性的影响因素以<0.25 mm 团聚体有机碳含量为主,其原因可能是有机碳主要分布于<0.25 mm 团聚体中^[27],而大团聚体主要依靠<0.25 mm 团聚体胶结所致。

3 讨论

本研究中选取了 17、26、65 a 3 个林龄的麻栎作为研究对象,其中 17 a 与 26 a 之间时间跨度较短,而 26 a 与 65 a 时间跨度较长。研究发现,各级土壤团聚体分布较为均匀,其中 >2 mm 团聚体含量稍多,这可能与植物种类以及土质有关,土质决定了团聚体的基本分布结构,植物能对团聚体结构起到改良作用。罗珠珠等^[7]在研究黄土高原苜蓿种植年限对土壤团聚体影响时,在多个种植年限下测得<0.25 mm 水稳性团聚体占主要地位;王连晓等^[28]在研究热带地区砖红壤种植不同年限的橡胶树时,测得 0.5~1 mm、<0.25 mm 水稳性团聚体占主要地位。

土壤各级团聚体有机碳含量、团聚体稳定性随土壤深度加深而减小的趋势与目前已有的研究基本一致,但土壤有机碳含量、团聚体稳定性随林龄的变化趋势不尽相同。刘敏英等^[29]在茶园研究中发现 20~22 a 的土壤团聚体稳定性最强,并且随林龄增大而减弱;王连晓等^[28]在研究橡胶树时,也发现 20 a 橡胶树林土壤团聚体稳定性大于 10、30 a 的橡胶树林。其原因主要是由树木本身特性以及人为活动干扰造成的。谢涛等^[30]在研究沿海地区不同杨树林有机碳时发现,在杨树生长过程中土壤有机碳含量升高,并在过熟林阶段有所降低但相对稳定;苗娟等^[23]研究了 10、20、27 a 云南松的土壤有机碳变化,文雨等^[31]研究了 10、24、25 a 马尾松-樟树混交林的土壤有机碳变化,都发现各层土壤有机碳含量随林龄增加而增加,本文结果与此一致。因此,林分类型以及人为活动可能对土壤有机碳产生重要影响。

4 结论

- 1) 林龄对土壤团聚体组成及其水稳性影响显著,影响效果随林龄增加而增强,随土层加深而减弱。
- 2) 林龄对土壤团聚体有机碳含量影响显著,影响程度随林龄增加而增强。
- 3) <0.25 mm 土壤团聚体有机碳含量与各级土壤

有机碳含量密切相关,也是影响团聚体水稳定性的主要因素。

参考文献:

- [1] Tang F K, Cui M, Lu Q, et al. Effects of vegetation restoration on the aggregate stability and distribution of aggregate-associated organic carbon in a typical karst gorge region[J]. *Solid Earth Discussions*, 2016, 7(3): 2213–2242
- [2] Jastrow J D. Soil aggregate formation and the accrual of particulate and mineral-associated organic matter[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 1996, 28(4/5): 665–676
- [3] 张国盛, 黄高宝, Yin C. 农田土壤有机碳固定潜力研究进展[J]. *生态学报*, 2005, 25(2): 351–357
- [4] Zhang W, Yu Y Q, Sun W J, et al. Simulation of soil organic carbon dynamics in Chinese rice paddies from 1980 to 2000[J]. *Pedosphere*, 2007, 17(1): 1–10
- [5] 张芝, 戴齐, 廖超林, 等. 增施或减施有机物料对长期培肥红壤性水稻土团聚体组成的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2017(1): 28–32
- [6] 刘晶, 陈一民, 付岩梅, 等. 长期施肥下不同有机质含量农田黑土水稳性团聚体中氮、磷的分布特征[J]. *中国农学通报*, 2014, 30(12): 140–146
- [7] 罗珠珠, 李玲玲, 牛伊宁, 等. 土壤团聚体稳定性及有机碳组分对苜蓿种植年限的响应[J]. *草业学报*, 2016, 25(10): 40–47
- [8] 刘恩科, 赵秉强, 梅旭荣, 等. 不同施肥处理对土壤水稳性团聚体及有机碳分布的影响[J]. *生态学报*, 2010, 30(4): 1035–1041
- [9] 王学君, 董晓霞, 孙泽强, 等. 水肥调控对土壤团聚体及有机碳的影响[J]. *山东农业科学*, 2009(9): 64–66, 69
- [10] Sui Y Y. Water-stable aggregates and their organic carbon distribution after five years of chemical fertilizer and manure treatments on eroded farmland of Chinese Mollisols[J]. *Canadian Journal of Soil Science*, 2012, 92(3): 551–557
- [11] Bongiovanni M D, Lobartini J C. Particulate organic matter, carbohydrate, humic acid contents in soil macro- and microaggregates as affected by cultivation[J]. *Geoderma*, 2006, 136(3): 660–665
- [12] Li L G. Association of soil aggregation with the distribution and quality of organic carbon in soil along an elevation gradient on Wuyi Mountain in China[J]. *Plos One*, 2016, 11(3): e0150898
- [13] 张曼夏, 季猛, 李伟, 等. 土地利用方式对土壤团聚体稳定性及其结合有机碳的影响[J]. *应用与环境生物学报*, 2013, 19(4): 598–604
- [14] 张宝军, 唐崑, 芦红超, 等. 土地利用方式对土壤大团聚体的影响[J]. *安徽农业科学*, 2013, 41(12): 5306–5308
- [15] 曾天慧, 胡海波, 张勇, 等. 不同植被群落土壤水溶性有机碳的变化特征[J]. *水土保持通报*, 2015, 35(3): 49–54
- [16] 刘艳, 查同刚, 王伊琨, 等. 北京地区栓皮栎和油松人工林土壤团聚体稳定性及有机碳特征[J]. *应用生态学报*, 2013, 24(3): 607–613
- [17] 王秀颖, 高晓飞, 刘和平, 等. 土壤水稳性大团聚体测定方法综述[J]. *中国水土保持科学*, 2011, 9(3): 106–113
- [18] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析[M]. 上海: 上海科技出版社, 1978
- [19] 王小红, 杨智杰, 刘小飞, 等. 天然林转换成人工林对土壤团聚体稳定性及有机碳分布的影响[J]. *水土保持学报*, 2014, 28(6): 177–182
- [20] 潘义国. 不同植被条件下土壤的抗侵蚀研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2008
- [21] 肖复明, 范少辉, 汪思龙, 等. 毛竹林地土壤团聚体稳定性及其对碳贮量影响研究[J]. *水土保持学报*, 2008, 22(2): 131–135
- [22] 苗娟, 李世杰, 闫俊华. 不同林龄云南松林土壤有机碳和全氮积累特征[J]. *应用生态学报*, 2014, 25(3): 625–631
- [23] 刘恩, 王晖, 刘世荣. 南亚热带不同林龄红锥人工林碳贮量与碳固定特征[J]. *应用生态学报*, 2012, 23(2): 335–340
- [24] 梁宏温, 温远光, 温琳华, 等. 连栽对尾巨桉短周期人工林碳贮量的影响[J]. *生态学报*, 2009, 29(8): 4242–4250
- [25] 王英俊, 李同川, 张道勇, 等. 间作白三叶对苹果/白三叶复合系统土壤团聚体及团聚体碳含量的影响[J]. *草地学报*, 2013, 21(3): 485–493
- [26] 张勇, 胡海波, 黄玉洁, 等. 不同植被恢复模式对土壤有机碳分子结构及其稳定性的影响[J]. *环境科学研究*, 2015, 28(12): 1870–1878
- [27] 王连晓, 史正涛, 刘新有, 等. 不同林龄橡胶林土壤团聚体分布特征及其稳定性研究[J]. *浙江农业学报*, 2016, 28(8): 1381–1388
- [28] 刘敏英, 郑子成, 李廷轩. 不同植茶年限土壤团聚体的分布特征及稳定性研究[J]. *茶叶科学*, 2012, 32(5): 402–410
- [29] 谢涛, 王明慧, 郑阿宝, 等. 苏北沿海不同林龄杨树林土壤活性有机碳特征[J]. *生态学杂志*, 2012, 31(1): 51–58
- [30] 文丽, 雷丕锋, 吴子剑, 等. 樟树-马尾松混交林不同林龄土壤有机碳氮贮量及分布特征[J]. *广西林业科学*, 2014, 43(4): 365–370, 457

Effects of *Quercus Acutissima* Age on Composition and Organic Carbon Content of Soil Water-stable Aggregates

WANG Can^{1,2}, HU Haibo^{1,2*}, FAN Zhen^{1,2}, LIAN Jingwei^{1,2}

(1 *Co-Innovation Center for Sustainable Forestry in Southern China, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China;*
2 *Laboratory of Soil and Water Conservation and Ecological Restoration in Jiangsu Province, Nanjing 210037, China*)

Abstract: In order to further understand the effects of *quercus acutissima* age on soil aggregates and their organic carbon contents and explore the relationship between aggregate stabilities and carbon contents in aggregates of different sizes, artificial *Quercus acutissima* forests of 17, 26 and 65 a were selected to investigate water-stable aggregate composition, aggregate water stability, and changes and correlations of organic carbon contents in different size aggregates in 0–40 cm depth. The results showed that forest age had a significant effect on the composition and water stability of soil aggregates, and the effect increased with the increase of forest age but decreased with the increase of soil depth; Forest age also had a significant effect on organic carbon contents in soil aggregates, and the effect increased with the increase of forest age; Organic carbon content in <0.25 mm aggregates had an important effect on soil organic carbon contents in aggregates in different sizes, and is the main factor affecting water stability of soil aggregates.

Key words: Soil aggregate; Organic carbon; Stability; *Quercus acutissima*