

$\delta^{13}\text{C}$ 标记林木残体碳在土壤团聚体中的分布*

李涵诗^{1, 2} 毛艳玲^{1, 2†} 邹双全³

(1 福建农林大学资源与环境学院, 福州 350002)

(2 福建省土壤环境健康与调控重点实验室, 福州 350002)

(3 福建农林大学林学院, 福州 350002)

摘要 应用脉冲标记法标记富集 ^{13}C 的杉木幼苗残体; 采集在桔园、杉木人工林、米楮次生林和细柄阿丁枫天然林等不同土地利用方式的土壤表层样品, 通过室内短期培养实验(20 °C, 培养90 d)研究残体在 $> 250 \mu\text{m}$ 、 $53 \sim 250 \mu\text{m}$ 和 $< 53 \mu\text{m}$ 等三个水稳性团聚体粒级组中的分配。结果表明: 在添加 ^{13}C 标记杉木残体下, 不同粒级团聚体的 $\delta^{13}\text{C}$ 值均显著升高, 但以桔园土壤幅度最大; 不同土地利用的土壤中, $\delta^{13}\text{C}$ 丰度值在 $< 53 \mu\text{m}$ 团聚体中最小, $53 \sim 250 \mu\text{m}$ 团聚体中最高。随着外源碳输入量的增加, 进入土壤的新碳含量也随之升高; C/N较大的外源有机残体在短期内更有利于新碳的积累。外源新碳在土壤团聚体中的分配比例由小到大顺序依次为 $> 250 \mu\text{m}$ 、 $53 \sim 250 \mu\text{m}$ 、 $< 53 \mu\text{m}$, 这表明短期培养有利于微团聚体新碳的积累。

关键词 $\delta^{13}\text{C}$; 外源碳; 土壤团聚体; 土地利用方式

中图分类号 S153 **文献标识码** A

土壤碳库是陆地生态系统中最大的碳库, 全球1 m深土层的有机碳贮量约是陆地植被碳贮量的3倍, 是大气碳贮量的2倍, 在全球碳循环中扮演着重要角色^[1]。土壤净碳量取决于碳输入和输出间的平衡, 外源有机植物残体是土壤有机碳的主要来源, 是影响土壤有机碳含量的关键因素^[2]。外源碳添加能抑制或促进土壤有机碳的矿化^[3]。Helal和Sauerbeck^[4]发现添加玉米根系显著促进土壤有机碳的分解; 尹云锋和蔡祖聪^[5]研究结果表明施入玉米秸秆可促进土壤原有有机碳分解, 且随施用量的增多, 分解速度加快。但是劳秀荣等^[6]也报道秸秆还田会使土壤有机碳含量增加约30%。因此, 明确外源碳在土壤中的周转规律, 对阐明土壤对大气 CO_2 的“源/汇”效应具有重要意义。

$\delta^{13}\text{C}$ 方法是研究土壤有机碳分配、转化及迁移的一种新方法, 不仅可以示踪土壤原有有机碳的

转化, 还能监测外源碳在土壤不同组分中的动态变化^[5, 7]。但目前该方法的研究多集中在外源碳对土壤有机碳数量、分解速率的影响等方面^[5, 8-9], 而土壤不同粒级团聚体间的物理结构存在差异, 会影响外源碳在土壤不同组分中的周转和稳定^[10]。此外, 在研究材料选择上, 国内外的学者大多以水稻、玉米、小麦等农田作物作为外源植物材料进行同位素标记^[5, 8, 11], 而木本植物作为外源标记植物的报道甚少。在林地土壤中, 添加农田作物凋落物研究土壤有机质分解规律, 难以表征林地土壤有机质分解的实际过程。因此, 为使外源残体符合森林立地条件, 本文选取杉木作为外源植物残体, 对杉木幼苗进行富集 ^{13}C 标记, 研究其在不同立地土壤中的分解和转化, 探讨外源碳在土壤团聚体中的分配规律, 为亚热带森林土壤有机碳稳定机制提供基础数据。

* 国家自然科学基金项目(30972346)、国家科技支撑计划(2014BAD15B01)和福建省自然科学基金项目(2011J01087)资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 30972346), National Key Technology R&D Program of China (No. 2014BAD15B01), Natural Science Foundation of Fujian Province, China (No. 2011J01087)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: fafum@126.com

作者简介: 李涵诗(1990—), 女, 福建连江人, 硕士研究生, 从事土壤碳循环研究。E-mail: lhs0922@126.com

收稿日期: 2016-10-15; 收到修改稿: 2017-04-09; 优先数字出版日期(www.cnki.net): 2017-04-18

1 材料与方法

1.1 供试材料

富集 ^{13}C 杉木幼苗标记及残体制备: 采用脉冲标记法对盆栽杉木幼苗进行 ^{13}C 同位素富集标记。在杉木生长旺盛期7月至12月, 每月标记1次, 每次在上午8:00至12:00间进行。具体方法是: 在长×高×宽为1.6 m×1.1 m×1.2 m的特制密闭有机玻璃生长箱中放置10盆杉木幼苗, 通入由 $\text{Ba}^{13}\text{CO}_3$ (99 atom% ^{13}C) 与40%乳酸进行反应产生的 $^{13}\text{CO}_2$ 气体, 通过光合作用使标记碳进入杉木体内碳水化合物^[12]。6个月后将收获的杉木根与茎叶分开, 采用四分法取样后烘干粉碎过5 mm筛, 制成富集 ^{13}C 茎叶残体和根残体。茎叶残体的有机碳含量为 417.3 g kg^{-1} , 全氮含量为 5.88 g kg^{-1} , C/N比为70.97, $\delta^{13}\text{C}$ 值为 104.40 ‰ ; 根残体的有机碳含量为 411.9 g kg^{-1} , 全氮含量为 3.47 g kg^{-1} , C/N比为118.83, $\delta^{13}\text{C}$ 值为 91.27 ‰ 。

供试土壤: 土壤样品采自福建省建瓯市万木林自然保护区 ($118^\circ 08' 22'' \text{ E} \sim 118^\circ 09' 23'' \text{ E}$,

$27^\circ 02' 28'' \sim 27^\circ 03' 32'' \text{ N}$)。以桔园 (*Citrus aurantium* L.)、杉木 [*Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook.] 人工林、米楮 [*Castanopsis carlesii* (Hemsl.) Hay.] 次生林和细柄阿丁枫 [*Altingia gracilipes* Hemsl.] 天然林等4种土地利用方式下的土壤为研究对象。其中桔园是1980年砍伐杂木林后种植的, 平均树高4 m, 胸径17.7 cm, 定期施化肥并辅施有机肥, 适时喷洒农药, 干旱季节适当灌溉; 杉木人工林是在1969年砍伐后造林形成的, 平均树高18 m, 平均胸径18.3 cm; 米楮林平均树高23 m, 平均胸径29.4 cm; 天然林是历时600多年自然演替形成的, 建群种主要为细柄阿丁枫, 细柄阿丁枫平均树高28 m, 平均胸径45.2 cm。不同利用方式下的土壤本底条件一致, 土壤类型为山地红壤, 气候属亚热带季风型气候区, 海拔234~556 m, 年均气温19.4 $^\circ\text{C}$, 年均降水量1 670 mm, 年均相对湿度81%。表土采集时间为2011年1月, 采样深度为0~20 cm, 按“S”形随机设定5个取样点, 多点混合后带回实验室除去植物残体, 自然风干, 采用玛瑙研钵研磨过2 mm筛备用。土壤理化性质如表1所示。

表1 供试土壤基本理化性状

Table 1 Basic physical and chemical properties of the soil studied

土地利用方式 Land use pattern	pH	有机碳 Organic carbon (g kg^{-1})	全氮 Total N (g kg^{-1})	容重 Bulk density (g cm^{-3})	黏粒 Clay (%)
桔园 ^①	4.5	12.94	0.76	1.16	28.12
杉木 ^②	4.3	16.89	0.87	1.11	34.92
米楮 ^③	4.7	21.71	0.93	1.12	30.33
细柄阿丁枫 ^④	4.6	30.68	1.72	1.16	36.62

①*Citrus aurantium*, ②*Cunninghamia lanceolata*, ③*Castanopsis carlesii*, ④*Altingia gracilipes*

1.2 培养实验

实验设4个处理, 分别为0% (不加杉木残体, CK)、0.2%和1.2%标记茎叶残体 (简称叶残体) 及1.2%标记根残体; 每个处理重复3次。分别称取0、0.2和1.2 g标记茎叶残体和1.2 g标记根残体, 与相当于100 g烘干土重的风干土样充分混匀, 置于500 ml塑料杯中, 加水使土壤含水量至土壤持水量 (Water holding capacity, WHC) 的60%, 用透气的塑料薄膜封口, 置于20 $^\circ\text{C}$ 的培养箱中培养, 每隔48 h称重并补充水分, 90 d后取出土壤, 自然风

干备用。

1.3 土壤团聚体的分离

土壤团聚体分离采用湿筛法, 参照Elliott^[12]的方法略作修改。称取50 g风干土样, 于水中浸泡5 min, 利用筛分仪 (EML 200 digital plus T, 德国) 震荡5 min, 依次分出 $> 250 \mu\text{m}$ 、 $53 \sim 250 \mu\text{m}$ 和 $< 53 \mu\text{m}$ 三个不同粒级的土壤团聚体, 置于烘箱中 (50 $^\circ\text{C}$), 24 h后烘干称重。

1.4 样品分析及方法

杉木残体全碳与全氮含量采用元素分析仪

(Elementar Vario EL III, Elementar, 德国)测定; 土壤和杉木残体的 $\delta^{13}\text{C}$ 值用同位素质谱分析仪 (MAT 253, Thermo Fisher, 德国)测定。土壤有机碳含量采用重铬酸钾-浓硫酸法; 土壤全氮含量采用半微量开氏法; 土壤pH采用电位法 (水土比2.5:1); 土壤容重采用环刀法; 土壤颗粒组成分析采用吸管法^[13]测定。

1.5 计算及数据处理

培养结束时全土或团聚体有机碳来源于杉木残体的比例, 按如下方程计算^[7-8]:

$$f = (\delta\text{C}_{\text{SL}} - \delta\text{C}_{\text{CK}}) / (\delta\text{C}_{\text{L}} - \delta\text{C}_{\text{CK}}) \quad (1)$$

式中, $\delta\text{C}_{\text{SL}}$ 为培养结束时添加标记杉木残体的土壤 $\delta^{13}\text{C}$ 值; $\delta\text{C}_{\text{CK}}$ 为不加杉木残体的土壤 $\delta^{13}\text{C}$ 值; $\delta\text{C}_{\text{L}}$ 为杉木残体的 $\delta^{13}\text{C}$ 值。

培养后土壤样品中来自杉木残体有机碳数量 C_N 由下式估计:

$$C_N = fC \quad (2)$$

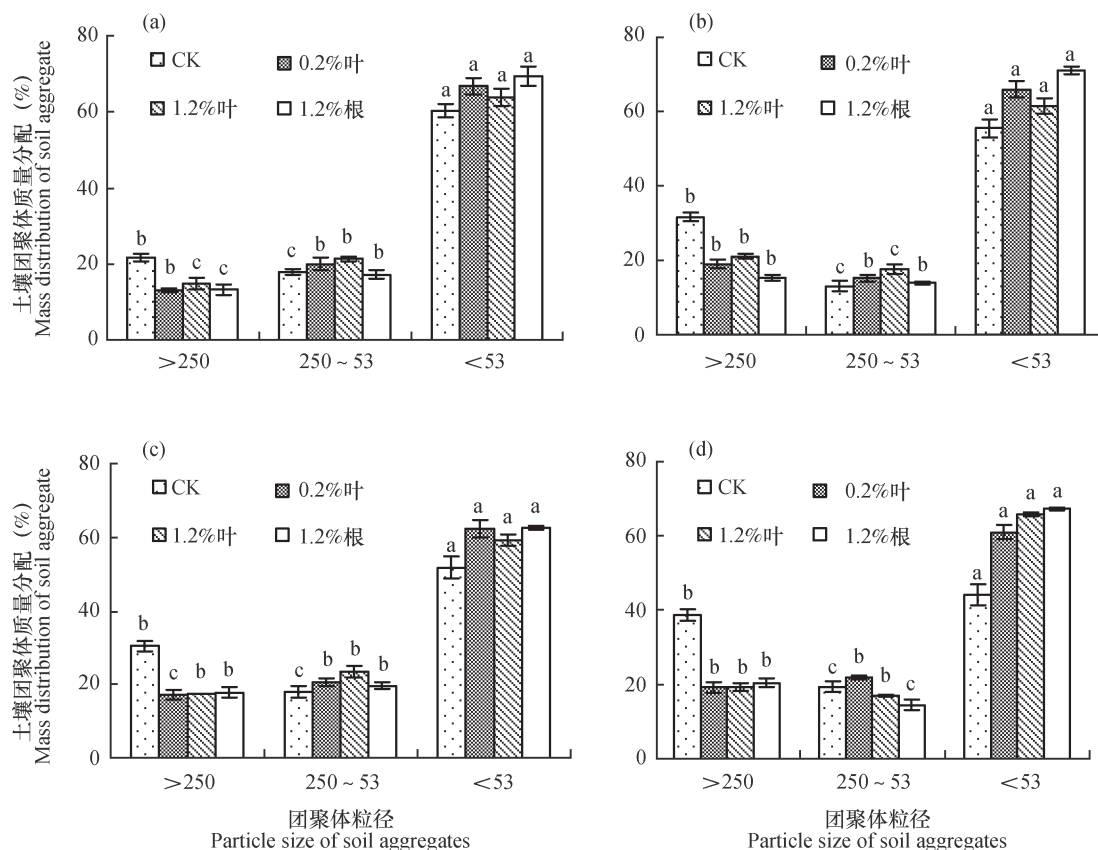
式中, C 为土壤样品的有机碳含量。

数据处理采用 Microsoft Excel 2010 软件进行数据处理; 运用 SPSS 18.0 统计分析软件进行单因素方差分析和独立样本 T 检验, 用最小显著差数法 (Least significant difference, LSD) 作多重比较, 显著性水平为 $p < 0.05$ 。

2 结果与讨论

2.1 外源碳培养后土壤团聚体分布特征

由图1可知, 加入不同数量与质量外源碳培养90 d后, 不同土地利用方式下土壤水稳性团聚体分布特征发生变化, $< 53 \mu\text{m}$ 团聚体含量最高, 含量为59.5%~69.3%, 较对照平均增加了6.3%~20.1%; $> 250 \mu\text{m}$ 大团聚体显著下降, 平均



注: 图中不同字母表示差异显著 ($p < 0.05$), 下同 Note: Different letters in the figure mean significant difference ($p < 0.05$). The same below

图1 外源碳培养后桔园 (a)、杉木人工林 (b)、米楮次生林 (c) 和细柄阿丁枫天然林 (d) 土壤不同粒级团聚体质量百分数

Fig. 1 Mass percentages of different fractions of soil aggregates in the topsoil layers of the citrus orchard (a), the fir plantation (b), the secondary forest (c) and the natural forest (d)

下降了7.9%~18.5%。不同利用方式的土壤 $<250\ \mu\text{m}$ 的微团聚体占团聚体总量的80%以上,是大团聚体数量的4.2倍~6.3倍。在同种土地利用方式下,残体数量增加有助于提高大团聚体的数量(杉木除外)。 $<53\ \mu\text{m}$ 团聚体含较多腐殖化有机物,受到土壤黏粒和粉粒的保护,结构稳定,在土壤中的比例较高。研究结果与谭文峰等^[14]在江汉平原不同土地利用土壤团聚体的结果相似,其研究发现在不同土地利用方式下土壤 $<50\ \mu\text{m}$ 团聚体占团聚体总量比例高达80.8%~94.1%,是其他粒径团聚体的4.2倍~16.0倍。但李辉信等^[15]采用干筛法筛分团聚体,在水稻土中发现团聚体以 $>3\ \text{mm}$ 粒径团聚体为主, $<50\ \mu\text{m}$ 团聚体含量最少,且达显著性差异。这与土壤团聚体分组方法、培养时间、土壤母质及土地利用方式等有关。

2.2 外源碳培养后土壤 $\delta^{13}\text{C}$ 值的变化

$\delta^{13}\text{C}$ 值反映的是土壤中不同来源有机碳的变化。 $\delta^{13}\text{C}$ 标记方法最早用于长期培养条件下土壤有

机质周转的研究,但很多研究表明该方法也可用于短期培养条件下土壤有机质动态过程的分析^[5,7]。由图2可知,输入外源残体培养90 d结束后,不同土地利用方式下的土壤 $\delta^{13}\text{C}$ 值均呈显著提高趋势,其中桔园土壤幅度最大,是原土的75倍,这与在暗棕壤中加入 ^{13}C 较高的玉米秸秆明显增加土壤 $\delta^{13}\text{C}$ 的研究结果相类似^[7]。在培养期间,加入标记富集 ^{13}C 外源植物残体,随培养时间的增加, $\delta^{13}\text{C}$ 值也随之下落,但在短期培养结束(90 d)时,土壤有机质 $\delta^{13}\text{C}$ 值仍然较高。同时由于桔园土壤初始有机碳含量最低,外源碳进入桔园土壤的空间较大,土壤 $\delta^{13}\text{C}$ 值增加的幅度最大。

从图2中还可以看出,不同土地利用方式下土壤 $\delta^{13}\text{C}$ 值会随输入碳数量的增加而增大,但输入等量根残体和叶残体时, $\delta^{13}\text{C}$ 值总是呈现出根残体培养高于叶残体培养的趋势。在不同粒径团聚体中,尽管碳输入数量和质量不同,不同土地利用方式下的4种土壤的 $\delta^{13}\text{C}$ 值,总是 $<53\ \mu\text{m}$ 团聚体中最小,

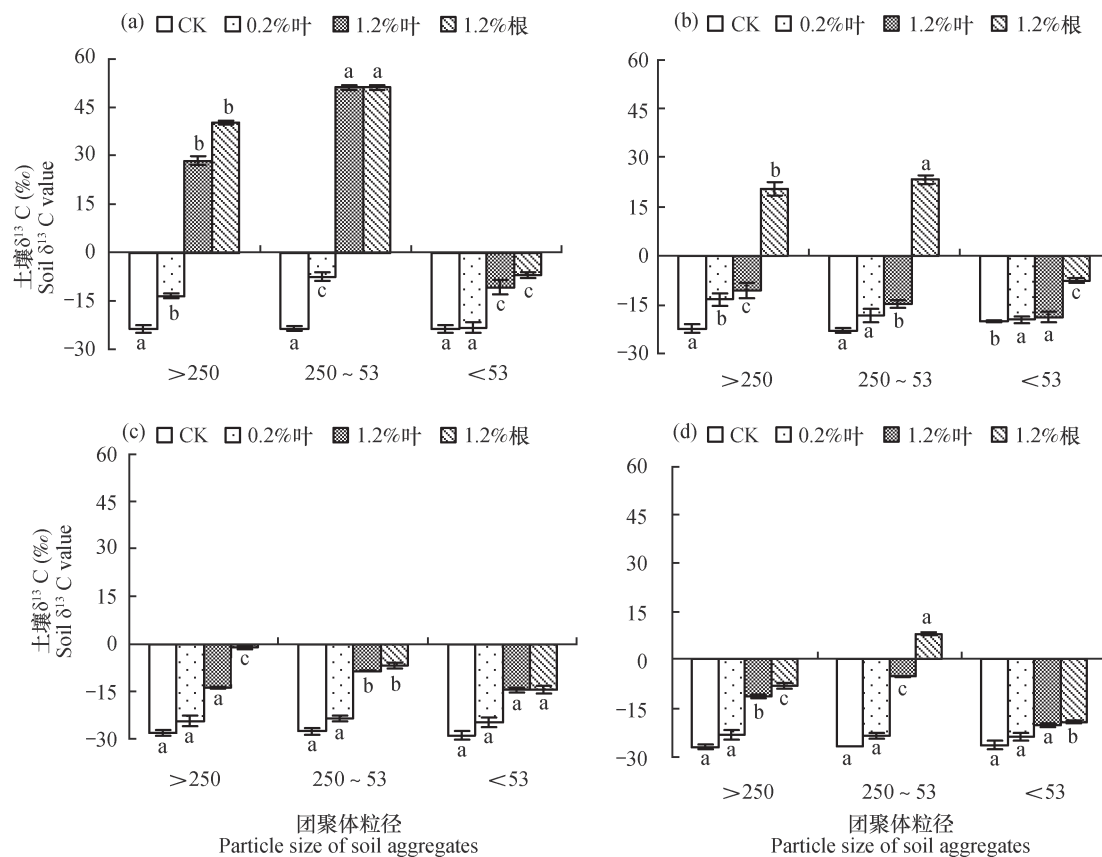


图2 外源碳培养后桔园(a)、杉木人工林(b)、米楮次生林(c)和细柄阿丁枫天然林(d)土壤不同粒级团聚体 $\delta^{13}\text{C}$ 值的变化

Fig. 2 Change in $\delta^{13}\text{C}$ in soil aggregates of different fractions in the topsoil layers of the citrus orchard (a), the fir plantation (b), the secondary forest (c) and the natural forest (d) amended with extraneous carbon and incubated

而53 ~ 250 μm 团聚体中最大(除米楮次生林土壤外),这与慈恩等^[16]在长期耕作水稻土中发现的土壤 $\delta^{13}\text{C}$ 最小值在>250 μm 团聚体不同,造成这种差异的原因主要可能与本试验的培养周期较短有关。很多研究认为,有机物在降解过程中,不同土壤粒级间的迁移次序为:粗砂→细砂→粗粉→黏土→细粉^[17],同时外源残体C/N不同也会影响有机物的周转,C/N较小的残体分解速率较高,而本研究中杉木残体C/N远高于其他研究中所添加的秸秆C/N^[18],因此在本研究短期培养条件下,外源杉木残体尚未降解充分进入更小粒级土壤组分中,而更多残留在较大粒级中。

2.3 外源碳培养后土壤及团聚体中新碳的残留

表2是根据式(2)估计的培养后来自标记碳的数量。输入外源叶残体0.2%和1.2%培养90 d后,新碳在桔园土壤中的含量分别为0.50 g kg^{-1} 和5.34 g kg^{-1} ,而在杉木人工林土壤中分别为0.74 g kg^{-1} 和4.72 g kg^{-1} ;新碳在米楮次生林土壤中的含量(0.80 g kg^{-1} 和4.04 g kg^{-1})与在细柄阿丁枫天然林土壤中的含量(0.92 g kg^{-1} 和4.17 g kg^{-1})相当。方差分析结果表明,随着添加量的增加,新碳含量显著提高。这与其他研究结果相似,王志明等^[19]在田间试验时发现随秸秆还田量的增加,土壤原有机碳分解速率增加,即新碳残留量增加;Jenkinson^[20]在 ^{14}C 标记的土壤中输入新有机碳,发现源于土壤的 ^{14}C 量随新碳输入量的增加而降低。但并非外源碳的添加量越高越好,达到饱和点时土壤有机碳不增加甚至会出现下降。如路文涛等^[21]通过添加不同秸秆归还量的田间试验发现,培养3年结束后土壤有机碳(SOC)含量呈现出中量秸秆>低量秸秆>高量秸秆>CK的趋势。因此,有关土壤有机碳与外源碳添加量之间的关系有待进一步探讨。

表2结果还表明,不同土地利用方式下输入等量不同残体培养90 d结束后,来源于根残体的新碳含量显著高于叶残体($p < 0.05$),除细柄阿丁枫和米楮中的<53 μm 团聚体无显著性差异外。李玉进和王百群^[22]研究发现施用相同量的柳枝稷茎和叶时,由于叶分解率较茎的高,因此柳枝稷茎在土壤中的周转期更长,更易于促进土壤有机碳的积累。Sariyildiz和Anderson^[23]发现外源碳的C/N越大,耐分解化合物含量越高,其分解率低,残留量高。本研究中的根残体C/N较大,分解较慢,而叶

残体的主要成分为多糖、纤维素、木质素等,较易分解。因此根残体在土壤中的残留量较叶高,更有利于土壤有机碳的固定。这是由于外源碳作为土壤物质和能量的主要来源,不同的外源物料对土壤有机质的激发效应是不同的。不同的植物残体通过影响土壤生物活性、数量和组成等,从而影响土壤有机碳的周转进程^[24]。添加高量外源残体培养结束后,进入桔园土壤中的新碳含量最高,与其他土地利用方式达显著性差异($p < 0.05$),且呈现出:桔园>杉木人工林>细柄阿丁枫天然林>米楮次生林的规律,其主要原因是土壤有机碳含量主要取决于土壤初始有机碳与外源碳分解之间的平衡^[4],而桔园土壤初始有机碳含量最低,新碳可进入的空间则较大。

2.4 外源碳培养后残留碳的土壤团聚体分配

在培养90 d后,不同土地利用方式下外源新碳主要集中在土壤粒级<53 μm 的微团聚体中,含量高达50.5%~70.5%。细柄阿丁枫天然林与米楮次生林土壤残留碳在土壤粒级中的分布特征相同,比例从小到大为:>250 μm 、53~250 μm 、<53 μm ,且差异达显著水平($p < 0.05$)。杉木人工林和桔园土壤均表现出在加入根残体时,新碳分配比例是随着粒径的增加而减小,与天然林、次生林相同;但加入叶残体,新碳在团聚体中残留比例最小的53~250 μm 粒级,含量为14.7%~18.5%,但杉木人工林土壤在>250 μm 与53~250 μm 粒级之间并没有显著差异($p < 0.05$)。虽然短期培养后,大团聚体有机碳浓度较微团聚体高,但由于微团聚体质量比例占优势,因而土壤团聚体粒级越细,其新碳分配比例越高,这也与其他很多研究者的结果接近。薛丽佳^[25]研究发现,培养360 d结束后土壤中外源新碳含量与土壤黏粒呈显著正相关;黄耀等^[26]研究表明土壤黏粒含量增加10%,小麦秸秆的分解量会大约减少7.4 mg。主要是因为土壤黏粒可以保持碳稳定,由于在<53 μm 团聚体中含较多的黏粒,物理保护作用强,微生物活性弱,有机残体分解受到限制,故有更多的新碳残留在该组团聚体中。而一些学者发现与本研究并不一致。如吕元春等^[8]在红壤、黄红壤和草甸土三种类型土壤中添加1%秸秆于20 $^{\circ}\text{C}$ 下培养360 d结束后,新碳在>250 μm 大团聚体中残留率高达56.8%~59.6%。Helfrich等^[27]添加0.5%玉米叶和根在15 $^{\circ}\text{C}$ 下培养84 d后,新碳在团聚体中分配比例从小到大的顺序

表2 培养后土壤不同粒级团聚体中来自标记残体的碳含量

土地利用方式 Land use pattern	残体添加量 Residue addition	全土 Bulk soil (g kg^{-1})	团聚体粒组 Aggregate size fraction		
			$>250 \mu\text{m}$	$250 \sim 53 \mu\text{m}$	$<53 \mu\text{m}$
桔园 <i>Citrus aurantium</i>	0.2% 叶	$0.50 \pm 0.03\text{b}$	$0.16 \pm 0.01\text{b}$	$0.11 \pm 0.02\text{b}$	$0.23 \pm 0.05\text{b}$
	1.2% 叶	$5.34 \pm 0.04\text{aB}$	$0.82 \pm 0.01\text{aB}$	$0.70 \pm 0.01\text{aB}$	$3.82 \pm 0.05\text{aB}$
杉木 <i>Cunninghamia lanceolata</i>	1.2% 根	$7.76 \pm 0.01\text{A}$	$1.14 \pm 0.01\text{A}$	$1.52 \pm 0.01\text{A}$	$5.09 \pm 0.02\text{A}$
	0.2% 叶	$0.74 \pm 0.01\text{b}$	$0.15 \pm 0.02\text{a}$	$0.06 \pm 0.01\text{a}$	$0.54 \pm 0.03\text{b}$
米楮 <i>Castanopsis carlesii</i>	1.2% 叶	$4.72 \pm 0.08\text{aB}$	$0.41 \pm 0.01\text{bB}$	$0.30 \pm 0.02\text{aB}$	$4.01 \pm 0.09\text{aA}$
	1.2% 根	$6.34 \pm 0.06\text{A}$	$1.00 \pm 0.01\text{A}$	$1.88 \pm 0.01\text{A}$	$3.46 \pm 0.07\text{B}$
细柄阿丁枫 <i>Altingia gracilipes</i>	0.2% 叶	$0.80 \pm 0.03\text{b}$	$0.08 \pm 0.01\text{b}$	$0.17 \pm 0.01\text{b}$	$0.55 \pm 0.03\text{b}$
	1.2% 叶	$4.04 \pm 0.01\text{aB}$	$0.58 \pm 0.03\text{aB}$	$1.19 \pm 0.02\text{aA}$	$2.26 \pm 0.04\text{aA}$
	1.2% 根	$4.63 \pm 0.03\text{A}$	$1.08 \pm 0.03\text{A}$	$1.33 \pm 0.03\text{B}$	$2.22 \pm 0.04\text{A}$
	0.2% 叶	$0.92 \pm 0.06\text{b}$	$0.17 \pm 0.03\text{b}$	$0.22 \pm 0.04\text{b}$	$0.53 \pm 0.01\text{b}$
	1.2% 叶	$4.17 \pm 0.04\text{aB}$	$0.66 \pm 0.03\text{aB}$	$1.39 \pm 0.03\text{aB}$	$2.12 \pm 0.05\text{aA}$
	1.2% 根	$5.54 \pm 0.04\text{A}$	$1.08 \pm 0.01\text{A}$	$2.07 \pm 0.04\text{A}$	$2.38 \pm 0.01\text{A}$

注: 同一列中不同小写字母表示改变碳输入数量时差异达显著水平 ($p < 0.05$); 不同大写字母表示改变碳输入质量时差异达显著水平 ($p < 0.05$) Note: The different lowercase letters in the same column represent significant differences ($p < 0.05$) between treatments in quantity of extraneous organic C. The different capital letters in the same column represent significant differences ($p < 0.05$) between treatments in quality of exogenous organic C

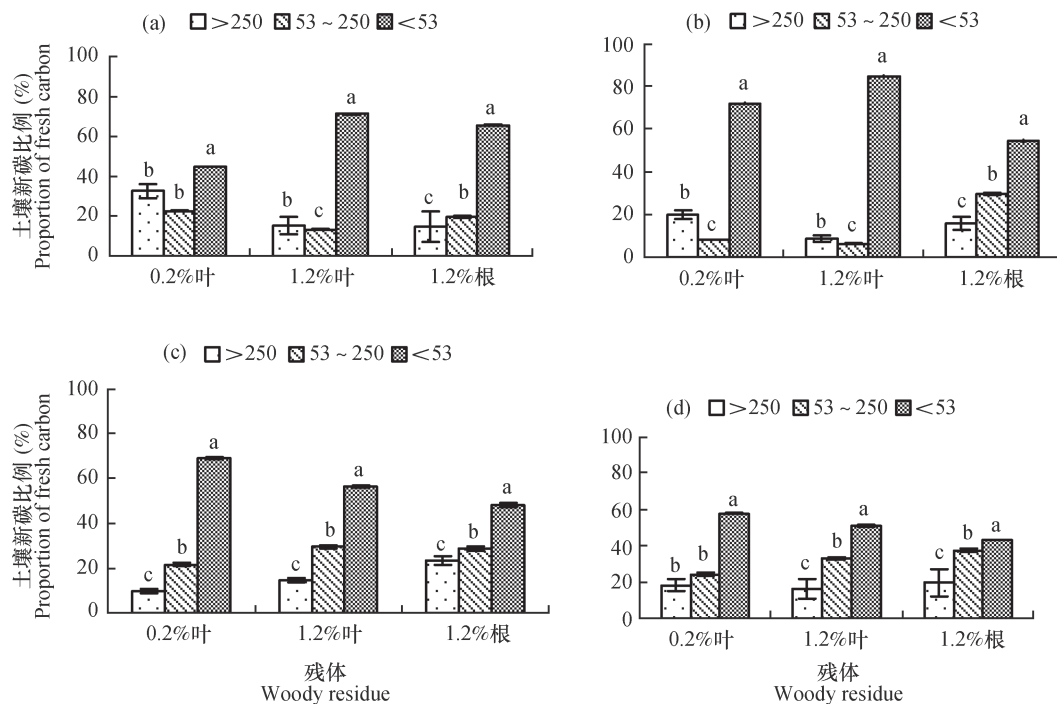


图3 外源碳培养后残留碳在桔园土壤 (a)、杉木土壤 (b)、米楮土壤 (c) 和细柄阿丁枫土壤 (d) 不同粒级团聚体的分配比例

Fig. 3 Proportion of fresh carbon in soil aggregates different in fraction after incubation of the soil samples amended with ^{13}C labeled wood residue relative to land use

均为： $53 \sim 250 \mu\text{m}$ 、 $< 53 \mu\text{m}$ 、 $> 250 \mu\text{m}$ 。这说明外源新碳在土壤团聚体中的分配动态并不一致，主要原因可能是土壤理化性质、培养条件（时间、温度和水分等）、外源碳数量和质量等方面的差异，其中培养时间不同可能是更重要的原因。

土地利用方式影响了外源新碳在土壤团聚体中的分配。在 $> 250 \mu\text{m}$ 团聚体中，桔园土壤新碳比例平均为20.9%，杉木人工林土壤平均为14.8%，米楮次生林土壤平均为15.8%，细柄阿丁枫天然林土壤平均为18.0%；新碳在 $53 \sim 250 \mu\text{m}$ 团聚体中的平均分配比例，桔园、杉木人工林、米楮次生林和细柄阿丁枫天然林土壤分别为18.5%、14.7%、26.6%、31.4%；在 $< 53 \mu\text{m}$ 团聚体中的平均分配比例，分别为60.1%、70.5%、57.7%、50.4%。除 $53 \sim 250 \mu\text{m}$ 团聚体外，新碳进入团聚体的比例均表现为园地、人工林、次生林高于天然林。这可能是由于天然林转换为其他土地利用方式后，林地覆盖率减少，土壤有机质含量下降^[28]，因此外源新碳可进入的空间增大。

3 结论

通过添加 ^{13}C 标记杉木残体培养90 d结束后，不同土地利用方式下的土壤团聚体 $\delta^{13}\text{C}$ 值显著增加；不同粒级团聚体中的 $\delta^{13}\text{C}$ 值最小的是 $< 53 \mu\text{m}$ 团聚体，最大为 $53 \sim 250 \mu\text{m}$ 团聚体。进入土壤团聚体的新碳含量随外源输入碳的增加而增加；输入等量不同外源残体时，来源于根残体的新碳含量显著高于叶残体。此外，新碳在 $> 250 \mu\text{m}$ 团聚体中残留的比例平均为14.8%~20.9%，残留在微团聚体（ $< 250 \mu\text{m}$ ）中的比例平均在80%以上，这表明90 d短期培养时间内微团聚体对于新碳的积累贡献更大。

参考文献

- [1] 周晓宇, 张称意, 郭广芬. 气候变化对森林土壤有机碳贮藏影响的研究进展. 应用生态学报, 2010, 21 (7): 1867—1874
Zhou X Y, Zhang C Y, Guo G F. Effects of climate change on forest soil organic carbon storage (In Chinese). Chinese Journal of Applied Ecology, 2010, 21 (7): 1867—1874
- [2] Abiven S, Menasseri S, Chenu C. The effects of organic inputs over time on soil aggregate stability: A literature analysis. Soil Biology & Biochemistry, 2009, 41: 1—12
- [3] Hamer U, Marschner B. Priming effects of sugars, amino acids, organic acids and catechol on the mineralization of lignin and peat. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2002, 165 (3): 261—268
- [4] Helal H M, Sauerbeck D R. Influence of plant roots on C and P metabolism in soil. Plant and Soil, 1984, 76 (1): 175—182
- [5] 尹云峰, 蔡祖聪. 利用 $\delta^{13}\text{C}$ 方法研究添加玉米秸秆下红壤总有机碳和重组有机碳分解速率. 土壤学报, 2007, 44 (6): 1022—1027
Yin Y F, Cai Z C. Decomposition rates of organic carbon in whole soil and heavy fraction of red soil incorporated with maize stalks using carbon-13 natural abundance (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2007, 44 (6): 1022—1027
- [6] 劳秀荣, 孙伟红, 王真, 等. 秸秆还田与化肥配合施用对土壤肥力的影响. 土壤学报, 2003, 40 (4): 618—623
Lao X R, Sun W H, Wang Z, et al. Effect of matching use of straw and chemical fertilizer on soil fertility (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2003, 40 (4): 618—623
- [7] 窦森, 张晋京, Lichtfouse E. 等. 用 $\delta^{13}\text{C}$ 方法研究玉米秸秆分解期间土壤有机质数量动态变化. 土壤学报, 2003, 40 (3): 328—334
Dou S, Zhang J J, Lichtfouse E, et al. Study on dynamic change of soil organic matter during corn stalk decomposition by $\delta^{13}\text{C}$ method (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2003, 40 (3): 328—334
- [8] 吕元春, 薛丽佳, 尹云峰, 等. 外源新碳在不同类型土壤团聚体中的分配规律. 土壤学报, 2013, 50 (3): 534—539
Lü Y C, Xue J L, Yin Y F, et al. Distribution of fresh carbon in aggregate fractions of different soil types (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2013, 50 (3): 534—539
- [9] 张晋京, 窦森, 江源, 等. 玉米秸秆分解期间土壤有机质数量的动态变化研究. 吉林农业大学学报, 2000, 22 (3): 67—72
Zhang J J, Dou S, Jiang Y, et al. Dynamic changes of organic carbon contents in soil during period of decomposition of corn stalks (In Chinese). Journal of Jilin Agricultural University, 2000, 22 (3): 67—72
- [10] Elliott E T. Aggregate structure and carbon, nitrogen, and phosphorus in native and cultivated soils. Soil Science Society of America Journal, 1986, 50 (3): 627—633

- [11] Li Z, Yagi K. Rice root-derived carbon input and its effect on decomposition of old soil carbon pool under elevated CO_2 . *Soil Biology & Biochemistry*, 2004, 36 (12): 1967—1973
- [12] 于晓燕, 池丽娟, 毛艳玲. 应用脉冲标记法对杉木富集 ^{13}C 技术的初步研究. *核农学报*, 2014, 28 (8): 1473—1477
Yu X Y, Chi L J, Mao Y L. A preliminary study on ^{13}C enrichment of in *Cunninghamia lanceolata* using pulse labeling technique (In Chinese). *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2014, 28 (8): 1473—1477
- [13] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社, 2000
Lu R K. Analytical methods for soil and agro-chemistry (In Chinese). Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000
- [14] 谭文峰, 朱志锋, 刘凡, 等. 江汉平原不同土地利用方式下土壤团聚体中有机碳的分布与积累特点. *自然资源学报*, 2006, 21 (6): 973—980
Tan W F, Zhu Z F, Liu F, et al. Organic carbon distribution and storage of soil aggregates under land use change in Jianghan Plain, Hubei Province (In Chinese). *Journal of Natural Resources*, 2006, 21 (6): 973—980
- [15] 李辉信, 袁颖红, 黄欠如, 等. 不同施肥处理对红壤水稻土团聚体有机碳分布的影响. *土壤学报*, 2006, 43 (3): 422—429
Li H X, Yuan Y H, Huang Q R, et al. Effects of fertilization on soil organic carbon distribution in various aggregates of red paddy soil (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2006, 43 (3): 422—429
- [16] 慈恩, 杨林章, 马力, 等. 长期耕作水稻土的有机碳分布和稳定碳同位素特征. *水土保持学报*, 2007, 21 (5): 72—75
Ci E, Yang L Z, Ma L, et al. Distribution and stable carbon isotope character of organic carbon of paddy soils with long-term cultivation (In Chinese). *Journal of Soil and Water Conservation*, 2007, 21 (5): 72—75
- [17] 刘启明, 王世杰, 朴河春. 稳定碳同位素示踪农林生态转换系统中土壤有机质的迁移和赋存规律. *环境科学*, 2002, 23 (4): 89—92
Liu Q M, Wang S J, Piao H C. The dynamics rules of soil organic matter of turnover ecosystems traced by stable carbon isotopes (In Chinese). *Chinese Journal of Environmental Science*, 2002, 23 (4): 89—92
- [18] 王晓峰, 汪思龙, 张伟东. 杉木凋落物对土壤有机碳分解及微生物生物量碳的影响. *应用生态学报*, 2013, 24 (9): 2393—2398
Wang X F, Wang S L, Zhang W D. Effects of Chinese fir litter on soil organic carbon decomposition and microbial biomass carbon (In Chinese). *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2013, 24 (9): 2393—2398
- [19] 王志明, 朱培立, 黄东迈, 等. 秸秆碳的田间原位分解和微生物量碳的周转特征. *土壤学报*, 2003, 40 (3): 446—453
Wang Z M, Zhu P L, Huang D M, et al. Straw carbon decomposition in situ in field and characteristics of soil biomass carbon turnover (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2003, 40 (3): 446—453
- [20] Jenkinson D S. Studies on the decomposition of plant material in soil. VI: The effect of rate of addition. *Journal of Soil Science*, 1997, 28: 417—423
- [21] 路文涛, 贾志宽, 张鹏, 等. 稻秆还田对宁南旱作农田土壤活性有机碳及酶活性的影响. *农业环境科学学报*, 2011, 30 (3): 522—528
Lu W T, Jia Z K, Zhang P, et al. Effect of straw returning on soil labile organic carbon and enzyme activity in semi-arid areas of southern Ningxia, China (In Chinese). *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30 (3): 522—528
- [22] 李玉进, 王百群. 施用柳枝稷茎和叶对土壤有机碳与微生物量碳的影响及其分解特征. *水土保持研究*, 2012, 19 (5): 78—82
Li Y J, Wang B Q. Effect of amendment of leaf and stem of switchgrass (*Panicum virgatum*) on soil organic carbon and microbial biomass carbon as well as the decomposition characteristic of the leaf and stem (In Chinese). *Research of Soil and Water Conservation*, 2012, 19 (5): 78—82
- [23] Sariyildiz T, Anderson J M. Interactions between litter quality, decomposition and soil fertility: A laboratory study. *Soil Biology & Biochemistry*, 2003, 35 (3): 391—399
- [24] Abiven S, Menasseri S, Angers D A, et al. Dynamics of aggregate stability and biological binding agents during decomposition of organic materials. *European Journal of Soil Science*, 2007, 58 (1): 239—247
- [25] 薛丽佳. 武夷山不同类型土壤有机碳组分及动态研究. 福州: 福建师范大学, 2011
Xue L J. Soil organic carbon fractions and its dynamic in different soil types of Wuyi Mountains (In Chinese). Fuzhou: Fujian Normal University, 2011
- [26] 黄耀, 刘世梁, 沈其荣, 等. 环境因子对农业土壤有机碳分解的影响. *应用生态学报*, 2002, 13 (6): 709—714
Huang Y, Liu S L, Shen Q R, et al. Influence of environment factors on the decomposition of organic

- carbon in agricultural soils (In Chinese) . Chinese Journal of Applied Ecology, 2002, 13 (6) : 709—714
- [27] Helfrich M, Ludwig B, Potthoff M, et al. Effect of litter quality and soil fungi on macroaggregate dynamics and associated partitioning of litter carbon and nitrogen. Soil Biology & Biochemistry, 2008, 40 (7) : 1823—1835
- [28] 吴建国, 张小全, 徐德应. 土地利用变化对土壤有机碳贮量的影响. 应用生态学报, 2004, 15 (4) : 593—599
- Wu J G, Zhang X Q, Xu D Y. Impact of land-use change on soil carbon storage (In Chinese) . Chinese Journal of Applied Ecology, 2004, 15 (4) : 593—599

Distribution of $\delta^{13}\text{C}$ -labeled Wood Residue Carbon in Soil Aggregates

LI Hanshi^{1, 2} MAO Yanling^{1, 2†} ZOU Shuangquan³

(1 College of Resources and Environment, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China)

(2 Fujian Provincial Key Laboratory of Soil Environmental Health and Regulation (Fujian Agriculture and Forestry University) , Fuzhou 350002, China)

(3 College of Forestry, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China)

Abstract The pulse labeling technique was used to label ^{13}C -enriched wood residue of *Cunninghamia lanceolata* sapling, which was then mixed, separately, with soil samples collected from the topsoil layers of a citrus orchard (*Citrus aurantium*), a fir plantation (*Cunninghamia lanceolata*), a secondary forest of *Castanopsis carlesii*, and a natural forest of *Altingia gracilipes*). To trace dynamics of fresh carbon in soil aggregates, the mixtures were incubated at 20 °C for 90 d and then analyzed for distribution of ^{13}C -labeled wood residue carbon in the three fractions of soil aggregates, i.e. >250 μm , 53 ~ 250 μm and <53 μm . Results show that in the soil samples amended with ^{13}C -labeled wood residue, $\delta^{13}\text{C}$ value increased in all the fractions of soil aggregates, especially in the soil samples of the orchard. In all the soil samples, regardless of land use, $\delta^{13}\text{C}$ value was the lowest in the <53 μm fraction of soil aggregates, and the highest in the 53 ~ 250 μm fraction. Once extraneous carbon was amended into the soil samples, the content of fresh carbon therein increased instantly. And the content of fresh carbon and $\delta^{13}\text{C}$ value was higher in the root than in the leaf, as the ratio of C/N is higher in the former. In terms of content of fresh carbon, the three fractions of soil aggregates displayed an order of <53 μm > 53 ~ 250 μm > >250 μm , which indicates that a short term of incubation facilitates accumulation of fresh carbon in micro soil aggregates.

Key words $\delta^{13}\text{C}$; Exogenous carbon; Soil aggregates; Land use types

(责任编辑: 陈德明)