

格氏栲和杉木人工林地下碳分配

陈光水¹, 杨玉盛^{1*}, 钱 伟¹, 高 人¹, 牛志鹏², 韩永刚², 张有利²

(1. 福建师范大学地理科学学院, 福州 350007; 2. 福建农林大学林学院, 福州 350002)

摘要: 通过对福建三明 36 年生的格氏栲人工林和杉木人工林林木地下 C 分配(TBCA)进行研究, 结果表明, 由分室累加法直接测定的格氏栲和杉木人工林的 TBCA 分别为 8.426 和 $4.040 \text{ t C} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。在格氏栲和杉木人工林 TBCA 组成中, 根系净生产量和根系呼吸各约占 50%; 在根系年净生产量中, 细根年净生产量和粗根年净生产量各约占 75% 和 25%。而格氏栲和杉木人工林的细根年 C 归还量则均约占各自 TBCA 的 1/3(分别为 33% 和 36%)。在假设地下 C 库处于稳定状态时, 由 C 平衡法计算的格氏栲和杉木人工林的 TBCA (分别为 $6.039 \text{ t C} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 和 $2.987 \text{ t C} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$) 低于分室累加法, 这与两种人工林地下 C 库尚未达到稳定状态有关。利用 Raich and Nadelhoffer 全球模式方程推算的格氏栲和杉木人工林的 TBCA (分别为 $9.771 \text{ t C} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 和 $5.344 \text{ t C} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$) 则高于分室累加法, 这与全球模式方程只是一种全球尺度规律有关。

关键词: 格氏栲; 杉木; 地下 C 分配; 根系生产力; 根系呼吸

文章编号: 1000-0933(2005)11-2824-06 **中图分类号:** S153.6; S718.55 **文献标识码:** A

Total belowground carbon allocation in *Castanopsis kawakamii* and Chinese fir plantations in subtropical area of China

CHEN Guang-Shui¹, YANG Yu-Sheng^{1*}, QIAN Wei¹, GAO Ren¹, NIU Zhi-Peng², HAN Yong-Gang², ZHANG You-Li² (1. 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, 2005, 25(11): 2824~ 2829

Abstract Total belowground carbon allocation (TBCA) is defined as that carbon allocated belowground by plants to produce coarse and fine roots, root respiration, and root exudates and mycorrhizae. TBCA can be a large fraction of gross primary production, sometimes exceeding aboveground net primary production. Quantifying the individual components of TBCA is challenging because belowground C processes are intimately associated with the soil matrix. Thus, our understanding of the factors that control TBCA is poor, though increases in the numbers of experiments will help clarify the major role of TBCA in the C balance of terrestrial ecosystems.

TBCA and its components were determined between two 36-year-old plantations of *Castanopsis kawakamii* (CK) and *Cunninghamia lanceolata* (Chinese fir, CF) in sanming, Fujian. We established root-free trenched plots to determine root respiration (R_R), utilized sequential coring method to estimate fine-root production (NPP_{fr}), and developed allometric equation to determine coarse root production (NPP_{cr}). TBCA was calculated by three methods, viz., the component-integrated method ($TBCA_{CI}$), the carbon balance method ($TBCA_{CB}$), and the global trend equation ($TBCA_{GTE}$). $TBCA_{CI}$ was estimated $8.426 \text{ t C} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ and $4.040 \text{ t C} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ for the CK and the CF, respectively. $TBCA_{CI}$ was allocated evenly between root production and respiration, and NPP_{fr} and NPP_{cr} contributed to 75% and 25% of root production for the two plantations.

基金项目: 国家教育部高等学校优秀青年教师教学科研奖励计划资助项目; 国家自然科学基金资助项目(30300272); 福建省自然科学基金资助项目(B0310014)

收稿日期: 2005-05-16; **修订日期:** 2005-08-29

作者简介: 陈光水(1976~), 男, 福建仙游人, 硕士, 讲师, 主要从事森林生态学研究。

* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: geoyys@fjnu.edu.cn

Foundation item: The Teaching and Research Award Program for MOE P. R. C. (TRAPOYT); the National Natural Science Foundation of China (No. 30300272); the Natural Science Foundation of Fujian (No. B0310014)

Received date: 2005-05-16; **Accepted date:** 2005-08-29

Biography: CHEN Guang-Shui, Master, Lecturer, mainly engaged in root ecology and carbon management in forests

About one third of $TBCA_{CIW}$ was converted into root detritus

$TBCA_{CB}$ was calculated as $6.039 \text{ t C} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ and $2.987 \text{ t C} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, and $TBCA_{GTE}$ was estimated as $9.771 \text{ t C} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ and $5.344 \text{ t C} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ for the CK and the CF, respectively. Difference between $TBCA_{CI}$ and $TBCA_{CB}$ might be resulted from the non-steady state in the belowground C pool of the two plantations. The discrepancy between $TBCA_{CI}$ and $TBCA_{GTE}$ implicated that the global trend equation proposed by Raich and Nadelhoffer might fail in predicting the TBCA of a certain forest.

Key words: *Castanopsis kawakamii*; Chinese fir; total belowground carbon allocation (TBCA); root production; root respiration

地下 C 分配 (Total belowground carbon allocation, TBCA) 可定义为植物分配到地下的用于包括粗根和细根生长、根系呼吸、根系分泌及维持菌根菌生长在內所需的 C 量^[1]。TBCA 在地球碳循环中发挥着十分重要的作用。TBCA 是地球上通过生物媒介的第三大 C 通量, 仅次于陆地生态系统的光合作用和海洋的光合作用。陆地植物每年分配到地下部分的 C 高达 60 Pg C (大部分集中在森林生态系统), 是陆地植被每年光合作用固定 C 量 (120 Pg C) 的 50%^[2,3], 是人类每年化石燃料燃烧释放到大气中 C 量 (约为 6 Pg C) 的 10 倍^[2]。同时, TBCA 是陆地生态系统总初级生产力中的一个最大的汇^[4,5], 其占陆地植被总初级生产量的比例 (通常超过 30%) 可超过地上部分的凋落物和净初级生产力^[6-8]; 同时, 它亦是土壤有机 C 的一个重要来源, 与土壤呼吸和 C 截获有着密切的联系^[1,8,9]。

然而, 尽管通量十分巨大, TBCA 却是目前植物群落中被了解最少的 C 通量之一^[4,10,11], 有关 TBCA 的控制机理仍不清楚^[11]。与植物地上部分可精确地用基于叶生理过程模型描述不同^[12], 有关地下过程的控制机理至今则极少可用过程模型描述。有关发展地下模型的努力常常受制于植物地上和地下部分与区域和全球环境因素交互作用的复杂性。另外, 由于根系隐藏在地下使 TBCA 研究的所有方面变得极其复杂。目前有许多方法用于测定地下 C 循环过程, 但仍没有一种精确有效的方法。因而, 有关 TBCA 对全球变化变量响应的概念和理论模型仍存在极高的不确定性^[13-15], 而许多生态系统模型则经常假设地上部分的功能和动态可同样适用于描述地下部分的功能和动态。

目前林木地下 C 分配的组成部分中对细根净生产量的研究最多, 研究方法主要有连续土芯法、内生长法、根屏栅法、微根管法以及土芯法和微根管法的结合等。这些方法运用的前提假设常不易检验, 且存在统计问题, 不同方法研究结果差异较大; 同时由于工作量巨大而使得取样样本数偏小导致平均值变异较大^[16,17]。而目前有关根系呼吸研究则相对薄弱, 精确实用的测定方法则仍在探索之中, 其测定方法有直接和间接测定, 直接测定法有离体根法 (In vitro root methods)、PVC 管气室法 (Cuvette methods)、同位素法 (Isotopic methods) 等; 间接测定有排除根法 (Root exclusion methods), 包括切除根法 (Root removal)、挖壕法 (Trenching)、林隙分析 (Gap analysis) 和环割实验 (girdling experiment) 等, 但各种方法均有各自的缺点^[18-20]。除此之外, TBCA 中其他组分 (如根分泌、菌根呼吸和周转) 则大都被忽略。由于 TBCA 各组分的测定均十分困难且工作量巨大, 加上很少研究能同时测定 TBCA 的各个组分, 目前有关 TBCA 的直接测定极少。Raich and Nadelhoffer^[11]基于质量守恒定律提出用 C 平衡法来间接推算 TBCA, 目前已运用于一些研究中^[9,10,21-28], 但该方法适用于成熟林 (或近熟林), 而应用于中、幼龄林则有较大误差^[1,9,28]。目前为止, 国外有关 TBCA 有一定研究, 而国内则尚未见报道。

本文着重探讨格氏栲 (*Castanopsis kawakamii*) 人工林与杉木 (*Cunninghamia lanceolata*) 人工林地下 C 分配差异, 为深入研究中亚热带森林生态系统 C 循环特别是地下 C 循环机制提供基础数据。

1 试验地概况^[29,30]

试验地位于福建省三明市莘口镇, 试验地自然概况及格氏栲人工林 (CK) 和杉木人工林 (CF) 林分特征、土壤性质参见文献^[29,30]。格氏栲人工林和杉木人工林均为 1967 年在格氏栲天然林采伐迹地上营造, 2002 年调查时年龄均为 36 年生。

2 研究方法

2.1 TBCA 直接测定方法

采用分室累加法直接测定地下 C 分配 (TBCA), 计算公式如下:

$$TBCA = P_{fr} + P_{cr} + R_r \quad (1)$$

式中, P_{fr} 为细根年净生产量, P_{cr} 为粗根年净生产量, R_r 为根系呼吸。(1) 式中忽略了根系分泌物和菌根菌 C 分配。

各森林的细根净生产力 (包括细根归还量) 采用改进的分室通量模型计算, 具体测定方法见参考文献^[29,31]。利用粗根生物量与 D^2H 建立回归方程, 采用相对生长法推算 36 年生时的粗根净生产力。各森林根系呼吸采用挖壕沟+静态碱吸收法测定, 具体测定方法见参考文献^[32]。本文中细根净生产力、细根归还量、粗根净生产力、根系呼吸均为 2002 年数据。

2.2 TBCA 间接测定方法

本文采用碳平衡法和全球模式方程法间接计算各森林 TBCA^[1], 以与直接测定的 TBCA 进行比较。

2.2.1 碳平衡法 当 C 淋滤损失可忽略不计时, 根据地下 C 库质量平衡, TBCA 计算公式如下^[1]:

$$TBCA = R_s - LF + \Delta C_b \quad (2)$$

式中, R_s 为土壤呼吸, LF 为凋落物 C 归还量, ΔC_b 为地下 C 库增量, 包括(枯枝落叶层、矿质土壤、根系生物量 C 增量)。

假设地下 C 库处于稳定状态(即 $\Delta C_b \approx 0$), 则 TBCA 计算公式如下^[1]:

$$TBCA = R_s - LF \quad (3)$$

土壤呼吸及凋落物归还量测定方法见参考文献^[33, 35]。本文中土壤呼吸和凋落物归还量均为 2002 年数据。

2.2.2 全球模式方程法 Raich and Nadelhoffer^[11]通过对全球森林凋落物($\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)与土壤呼吸($\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)的关系研究, 发现两者间存在如下关系:

$$R_s = 2.92 LF + 130 \quad (4)$$

假定地下 C 库处于稳定状态, 根据(3)式, 可通过凋落物求得 TBCA ($\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$):

$$TBCA = 1.92 LF + 130 \quad (5)$$

3 结果与分析

3.1 分室累加法直接测定的 TBCA 及其分室组成

由分室累加法计算的格氏栲人工林的 TBCA 为 $8.426 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 是杉木人工林的 2.1 倍(表 1)。格氏栲人工林根系年 C 净生产量($3.956 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)是杉木人工林的 2.0 倍, 而根系 C 呼吸($4.470 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)则是杉木人工林的 2.1 倍(表 1)。格氏栲人工林和杉木人工林 TBCA 中根系年 C 净生产量和根系 C 呼吸均各约占 50%; 而在根系年净生产量中, 细根年净生产量和粗根年净生产量均分别约占 75% 和 25%(表 1)。

表 1 不同森林类型地下 C 分配及分室组成($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)

Table 1 Magnitude and component of TBCA ($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$) in the CK and CF

森林类型 Forest type	根系年 C 净生产量 Root production			根系呼吸 Root respiration	地下 C 分配 TBCA
	细根年 C 净生产量 Fine root production	粗根年 C 净生产量 Coarse root production	小计 Subtotal		
CF	1.498	0.431	1.929	2.111	4.040
CK	2.879	1.077	3.956	4.470	8.426

格氏栲人工林细根年净生产量为杉木人工林的 1.9 倍(表 2)。格氏栲人工林和杉木人工林 $< 0.5 \text{ mm}$ 细根年净生产量占总细根年净生产量的比例均最高, 但杉木人工林 $< 0.5 \text{ mm}$ 细根年净生产量所占比例(73%)则远高于格氏栲人工林(38%)(表 2)。格氏栲人工林细根年 C 归还量为杉木人工林的 1.8 倍(表 2)。2 种森林 $< 0.5 \text{ mm}$ 细根年 C 归还量占总细根年 C 归还量的比例均最高, 但杉木人工林 $< 0.5 \text{ mm}$ 细根所占比例(74%)则远高于格氏栲人工林(39%)(表 2)。格氏栲和杉木人工林细根年净生产量占 TBCA 的比例分别为 34% 和 37%, 而细根年 C 归还量占 TBCA 的比例则分别为 33% 和 36%(表 2)。

表 2 不同森林类型细根($< 2 \text{ mm}$)年 C 净生产量和年 C 归还量($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)

Table 2 Annual fine-root ($< 2 \text{ mm}$) carbon production and carbon return ($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$) in the CK and CF

森林类型 Forest type		径级 Diameter						
		1~ 2mm	比例 Ratio (%)	0.5~ 1mm	比例 Ratio (%)	< 0.5mm	比例 Ratio (%)	总和 Total
细根年 C 净生产量	CF	0.205	13.7	0.193	12.9	1.098	73.3	1.498
Annual fine-root production	CK	1.051	36.5	0.731	25.4	1.094	38	2.879
细根年 C 归还量	CF	0.194	13.4	0.184	12.7	1.069	73.8	1.448
Annual fine-root mortality	CK	0.989	35.7	0.709	25.6	1.070	38.6	2.771

3.2 TBCA 不同测定方法的比较

格氏栲和杉木人工林 2002 年实测的凋落物年 C 归还量分别为 $4.412 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 和 $2.106 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 而 2002 年实测的年土壤 C 呼吸则分别为 $10.451 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 和 $5.093 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。在假设地下 C 库处于稳定状态时, 由 C 平衡法计算的格氏栲人工林和杉木人工林的 TBCA 分别为 $6.039 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 和 $2.987 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ (表 3), 均低于分室累加法, 其中格氏栲和杉木人工林分别偏低 28% 和 26%(表 3)。

利用 Raich and Nadelhoffer 全球模式方程推算的格氏栲人工林和杉木人工林的土壤 C 呼吸分别为 $14.183 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$

和 $7.450 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 而 TBCA 则分别为 $9.771 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 和 $5.344 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$; 与分室累加法的相比, 格氏栲和杉木人工林的 TBCA 分别偏高 16% 和 32% (表 3)。

表 3 不同方法测定的不同森林地下 C 分配 ($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)

Table 3 Total belowground carbon allocation in the NF, CK and CF estimated by different methods				
林分 Forest	分室累加法	C 平衡法	Raich and Nadelhoffer 全球模式方程法	
	Component-integrated method	Carbon budget method	推算的土壤呼吸	TBCA
	TBCA	TBCA	Predicted soil respiration	
CF	4.040	2.987	7.450	5.344
CK	8.426	6.039	14.183	9.771

4 讨论

格氏栲人工林 TBCA ($8.426 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 分室累加法) 落入已报道的热带森林 TBCA 数值范围内, 而杉木人工林的则偏小。如 Raich^[33] 报道 3 种夏威夷雨林的 TBCA 分别为 5.95 , $5.01 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 和 $4.17 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。Clark 等^[10] 报道 4 种夏威夷 *Metrosideros* 森林 TBCA 分别为: 5.7 , 6.3 , 8.7 , $6.8 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$; 巴西两种 terra firme 森林分别为 $8.8 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 和 $17.0 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 马来西亚 dipterocarp 森林为 $9.1 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。格氏栲和杉木人工林的 TBCA (分室累加法) 均远小于热带速生桉树林 ($18.8 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)^[22], 这除了与树种特性差异有关外, 可能亦与不同林分所处生长阶段差异有关。如 Christian 等研究表明 TBCA 随林龄而呈线性下降^[22]; Giardina and Ryan 的研究亦表明, TBCA 在树冠郁闭时最大, 而随着年龄增长, TBCA 则可下降 30%^[34]。

本研究中分室累加法计算的各森林地下 C 分配均超过地上部分凋落物 C 归还量, 这与一般报道的 TBCA 可相当或超过地上凋落物 C 归还量的结果相似^[1]。本研究中格氏栲人工林和杉木人工林 TBCA (分室累加法) 占土壤呼吸的比例分别为 81% 和 79%, 略高于已报道的数值范围 (69%~77%)^[34]。

在全球范围内, 各种成熟森林的 TBCA 与 ANPP (地上部分净生产力, aboveground net primary production) 比率的平均值约为 $1.5^{[1, 24, 33]}$, 表明在全球尺度上 TBCA 对 GPP 的汇作用通常比 ANPP 更大。本研究的格氏栲人工林和杉木人工林的 ANPP 分别为 9.792 和 $4.719 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 则其 TBCA/ANPP 的比值分别为 0.86 和 0.85 , 表明格氏栲和杉木人工林 TBCA 对 GPP 的汇作用相似, 但 TBCA 对 GPP 的汇作用均低于 ANPP, 这可能与格氏栲和杉木人工林尚未完全达到成熟阶段有关。

由于缺乏相应的数据, BNPP (地下部分净生产力或根系净生产力, belowground net primary production) 占 TBCA 的比例很少被测定, 但它却对正确模拟生态系统碳循环和地下碳循环十分关键。长久以来一些 C 预算模型简单地假定 BNPP/TBCA 比值为 50%^[7, 8, 26, 35, 36]。本研究中格氏栲人工林和杉木人工林的 BNPP/TBCA 的比值分别为 47% 和 48%, 研究结果支持了 BNPP/TBCA 比值约为 50% 的假设。这与 Ewel 等^[36] 报道 Florida slash pine 人工林林木地下 C 分配中约 50% 为根系呼吸, McDowell 等^[26] 报道 98 年生 Douglas fir 林根系生产量占 TBCA 的 53%~64% 的结果相似。

枯死细根归还是土壤有机 C 的重要来源之一, 对土壤的碳贮存有着重要的作用。然而, 目前有关枯死细根 C 归还量占 TBCA 比例则尚不清楚。本研究表明, 格氏栲和杉木人工林的 TBCA 中约有 $1/3$ (33%~36%) 将转化为细根 C 归还量, 表明枯死细根 C 归还 TBCA 中占有十分重要的比例, 因而, TBCA 的大小将直接影响到土壤的 C 贮存。由于研究较少, 细根 C 归还量在目前各种森林 C 预算中经常被忽略。已有研究表明, 作为林木根系最活跃部分之一的细根占林木总生物量比例虽不到 5%, 但其每年通过细根周转所形成的地下凋落物可占总枯落物 (地下和地上凋落物) 输入的 6.2%~88.7% (平均 50% 左右), 占土壤有机碳总输入量的 14%~86.8% (大多数在 40% 以上)^[16, 17, 31, 37], 成为森林生态系统中一个重要的、潜在的 C 汇。本研究中格氏栲人工林和杉木人工林细根生物量占总生物量均不到 1% (0.6%~0.8%), 但格氏栲和杉木人工林细根年 C 归还量则分别占其地上凋落物年 C 归还量的 63% 和 69%, 占年总 C 归还量的 39% 和 41%, 表明细根 C 归还量在森林 C 预算特别是土壤 C 预算中不能被忽略。

虽然格氏栲和杉木人工林 TBCA (分室累加法) 中各组分所占比例相似, 但格氏栲人工林的 TBCA 约是杉木人工林的 2 倍, 这与两个树种生物学特性差异有关。与杉木人工林相比, 格氏栲人工林的光合作用速率高, GPP 较大, 从而有更多的 C 分配到地下用于根系的生长和维持。由于 TBCA 与细根 C 归还量及土壤 C 吸存紧密相关, 因而, 格氏栲人工林更高的 TBCA 将比杉木人工林更有利于土壤 C 吸存。

C 平衡法计算的格氏栲人工林和杉木人工林地下 C 分配均低于分室累加法的 (表 4), 这与两种森林地下 C 库尚未完全处于稳定状态而导致 C 平衡法计算的 TBCA 偏低有关。地下 C 库增量包括枯枝落叶层、矿质土壤、根系 C 库增量, 由于缺乏直接测定的枯枝落叶层和矿质土壤 C 库增量, 因而, 无法探讨地下 C 库增量对 TBCA 大小的影响。但本文可以探讨根系 C 库增量

小对 TBCA 估算的影响。本研究中格氏栲和杉木人工林的粗根 C 库增量(即粗根 C 净生产力)分别为 $1.077 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 和 $0.431 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ (表 1), 而细根 C 库增量(细根生物量净增量, 即细根 C 净生产力减去细根 C 归还量)分别为 $0.108 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 和 $0.050 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ (表 2), 因而格氏栲和杉木人工林的根系 C 库增量分别为 $1.185 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 和 $0.481 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 分别占 TBCA (分室累加法)的 14% 和 12%, 表明格氏栲和杉木人工林的根系 C 库增量在 TBCA 中占有较高的比例。考虑到该阶段格氏栲和杉木人工林枯枝落叶层 C 库和矿质土壤 C 库可能仍处于积累过程, 因而, 整个地下 C 库增量占 TBCA 的比例可能要更高。如果假定地下 C 库处于稳定状态, C 平衡法估算格氏栲和杉木人工林的 TBCA 将产生较大误差。这与其他研究报道一致^[1, 22~28]。另外, 虽然许多研究表明在完全郁闭森林下土壤 C 淋滤损失很小, 但 C 平衡法由于忽略了 C 淋滤损失亦可能在一定程度上影响估算结果。

与分室累加法相比, 用 Raich and Nadelhoffer 全球模式方程^[11]推算的 TBCA 则偏高了, 表明 Raich and Nadelhoffer 全球模式方程^[11]只是一种全球尺度的规律, 能否普遍适用于所有特定森林生态系统尚需要进一步验证^[9, 28]。Giardina and Ryan^[34]亦曾报道凋落物量不能用于预测其所研究森林的 TBCA, 且他们认为这种情况与地下 C 库稳定状态的假设无关, 而与 TBCA 与凋落物间复杂的关系有关。

然而, 本研究中分室累加法计算的 TBCA 与真实值相比可能亦有所偏高。本研究中根系呼吸采用挖壕沟法测定, 由于该方法中无根小区排除了根枯落物呼吸而将导致根系呼吸测定结果偏高(采用未挖壕沟小区土壤呼吸减去挖壕沟小区土壤呼吸所获得的根系呼吸中实际上包括了根系+根际土呼吸和根枯落物呼吸)^[32], 因而分室累加法计算 TBCA 时实际上重复计算了部分根枯落物呼吸。

References

- [1] Raich J W, Nadelhoffer K J. Belowground carbon allocation in forest ecosystem s: global trends. *Ecology*, 1989, **70**(5): 1346~ 1354
- [2] Schimel D S, Braswell B H, Holland E A, *et al*. Climatic, edaphic, and biotic controls over storage and turnover of carbon in soils. *Global Biogeochemical Cycle*, 1994, **8**: 279~ 293.
- [3] Grace J, Rayment M. Respiration in the balance. *Nature*, 2000, **404**: 819~ 820
- [4] Ryan M G, Hubbard R M, Pongracic S, *et al*. Autotrophic respiration in *Pinus radiata* in relation to nutrient status. *Tree Physiology*, 1996, **16**: 333~ 343
- [5] Janssens I A, Lankreijer H, Matteucci G, *et al*. Productivity overshadows temperature in determining soil and ecosystem respiration across European forests. *Global Change Biology*, 2001, **7**: 269~ 278
- [6] Ryan M G, Lavigne M B and Gower S T. Annual carbon cost of autotrophic respiration in boreal forest ecosystem s in relation to species and climate. *J. Geophys Res*, 1997, **102**(D24): 28871~ 28884
- [7] Giardina C P, Ryan M G, Binkley D, *et al*. Primary production and carbon allocation in relation to nutrient supply in an experimental tropical forest. *Global Change Biology*, 2003, **9**: 1438~ 1450
- [8] Law B E, Ryan M G, Anthoni P M. Seasonal and annual respiration of a ponderosa pine ecosystem. *Global Change Biology*, 1999, **5**: 169~ 182
- [9] Gower S T, Pongracic S, Landsberg J J. A global trend in belowground carbon allocation: can we use the relationship at smaller scales? *Ecology*, 1996, **77**(6): 1750~ 1755
- [10] Clark D A, Brown S, Kicklighter D W, *et al*. Net primary production in tropical forests: an evaluation and synthesis of existing field data. *Ecological Applications*, 2001, **11**(2): 371~ 384
- [11] Giardina C P, Binkley D, Ryan M G, *et al*. Belowground carbon cycling in a humid tropical forest decreases with fertilization. *Oecologia*, 2004, **139**: 545~ 550
- [12] Landsberg J J, Gower S T. *Applications of physiological ecology to forest management*. New York: Academic Press, 1997. 354
- [13] Giardina C P, Ryan M G. Evidence that decomposition rates of organic carbon in mineral soil do not vary with temperature. *Nature*, 2000, **404**: 858~ 861
- [14] Holland E A, Neff J C, Townsend A R, *et al*. Uncertainties in the temperature sensitivity of decomposition in tropical and subtropical ecosystem s: Implications for models. *Global Biogeochemical Cycle*, 2000, **14**: 1137~ 1151
- [15] Pendall E, Bridgman S, Hanson P J, *et al*. Below-ground process responses to elevated CO₂ and temperature: a discussion of observations, measurement methods, and models. *New Phytol*, 2004, **162**: 311~ 322
- [16] Eissenstat D M and Yanai R D. The ecology of root lifespan. *Adv. Ecol Res*, 1997, **27**: 1~ 60
- [17] Vogt K A, Vogt D J, Palmiotto P A, *et al*. Review of root dynamics in forest ecosystem s grouped by climate, climatic forest type and species. *Plant and Soil*, 1996, **187**: 159~ 219

- [18] Hanson P J, Edwards N T, Garten C T, *et al*. Special Issue Controls on soil respiration: implications for climate change Separating root and microbial contributions to soil respiration: a review of methods and observations *Biogeochemistry*, 2000, **48**: 115~ 146
- [19] Desrochers A, Landh usser SM & Leffers V J. Coarse and fine root respiration in aspen (*Populus trem uloides*). *Tree Physiology*, 2002, **22**: 725~ 732
- [20] Yang Y S, Dong B, Xie J S, *et al*. A review of tree root respiration: significance and methodologies *Acta Phytocologica Sinica*, 2004, **28**(3): 426~ 434
- [21] Carter D C, Hendricks J J, Mitchell R J, *et al*. Fine root carbon allocation and fates in longleaf pine forests *Forest Science*, 2004, **50** (2): 177~ 187.
- [22] Giardina C P, Ryan M G. Total below ground carbon allocation in a fast-growing Eucalyptus plantation estimated using a carbon balance approach *Ecosystems*, 2002, **5**: 487~ 499.
- [23] Coble D and Marshall J. A spect differences in above- and belowground carbon allocation: a Montana case-study. *Environmental Pollution*, 2002, **116**: 149~ 155
- [24] Davidson E A, Savage K, Bolstad P, *et al*. Belowground carbon allocation in forests estimated from litterfall and IRGA-based soil respiration measurements *Agricultural and Forest Meteorology*, 2002, **113**: 39~ 51.
- [25] Haynes B E and Gower S T. Below ground carbon allocation in unfertilized and fertilized red pine plantations in northern Wisconsin. *Tree Physiology*, 1995, **15**: 317~ 325
- [26] McDowell N G, Balster N J, Marshall J D. Below ground carbon allocation of Rocky Mountain Douglas-fir *Can. J. For. Res*, 2001, **31** (8): 1425~ 1432
- [27] Nadelhoffer K J and Raich J W. Fine root production estimates and belowground carbon allocation in forest ecosystems *Ecology*, 1992, **73**(4): 1139~ 1147.
- [28] Nadelhoffer K J, Raich J W, Aber J D. A global trend in below ground carbon allocation: comment *Ecology*, 1998, **79**(5): 1822~ 1825
- [29] Yang Y S, Chen G S, Lin P, *et al*. Fine root distribution, seasonal pattern and production in a native forest and monoculture plantations in subtropical China *Acta Ecologica Sinica*, 2003, **23**(9): 1719~ 1730
- [30] Yang Y S, Lin P, Guo J F, *et al*. Litter production, nutrient return and leaf-litter decomposition in natural and monoculture plantation forests of *Castanopsis kawakamii* in subtropical China *Acta Ecologica Sinica*, 2003, **23**(7): 1278~ 1289
- [31] Chen G S, He Z M, Xie J S, *et al*. Comparatively study on fine root production, distribution and turnover between plantations of *Fokienia hodginsii* and *Cunninghamia lanceolata*. *Scientia Silvae Sinicae*, 2004, **40**(4): 15~ 21.
- [32] Chen G S, Yang Y S, Wang X G, *et al*. Root respiration in a natural forest and two plantations in subtropical China: seasonal dynamics and controlling factors *Acta Ecologica Sinica*, 2005, **25**(8): 1941~ 1947.
- [33] Raich J W. Aboveground productivity and soil respiration in three Hawaiian rain forests *Forest Ecology and Management*, 1998, **107**: 309~ 318
- [34] Giardina C P and Ryan M G. Soil surface CO₂ efflux, litterfall, and total belowground carbon allocation in a fast growing Eucalyptus plantation *Ecosystems*, 2002, **5**: 487~ 499.
- [35] Waring R H, Landsberg J J and Williams M. Net primary production of forests: a constant fraction of gross primary production? *Tree Physiol*, 1998, **18**: 129~ 134
- [36] Ewel K C, Cropper W P Jr and Gholz H L. Soil CO₂ evolution in Florida slash pine plantations 2 Importance of root respiration *Can. J. For. Res*, 1987, **17**: 330~ 333
- [37] McClaugherty C A, Aber J D and Melillo J M. The role of fine roots in the organic matter and nitrogen budgets of two forested ecosystems *Ecology*, 1982, **63**(5): 1481~ 1490

参考文献:

- [20] 杨玉盛, 董彬, 谢锦升, 等. 林木根系呼吸及其测定方法进展. *植物生态学报*, 2004, **28**(3): 426~ 434
- [29] 杨玉盛, 陈光水, 林鹏, 等. 格氏栲天然林与人工林细根生物量、季节动态及净生产力. *生态学报*, 2003, **23**(9): 1719~ 1730
- [30] 杨玉盛, 林鹏, 郭剑芬, 等. 格氏栲天然林与人工林凋落物数量、养分归还及凋落叶分解(英文). *生态学报*, 2003, **23**(7): 1278~ 1289
- [31] 陈光水, 何宗明, 谢锦升, 等. 福建栎与杉木人工林细根生产力、分布与周转. *林业科学*, 2004, **40**(4): 15~ 21.
- [32] 陈光水, 杨玉盛, 王小国, 等. 格氏栲天然林与人工林根系呼吸季节动态及影响因素. *生态学报*, 2005, **25**(8): 1941~ 1947.