

中国森林的地下碳分配

陈光水, 杨玉盛*, 谢锦升, 杜紫贤, 张 静

(福建省亚热带资源与环境重点实验室 福建师范大学地理科学学院, 福州 350007)

摘要:通过收集国内 33 个森林样地的土壤呼吸和年凋落物量数据, 分析中国森林地下碳分配 (TBCA) 模式。结果表明, 中国森林土壤呼吸年通量与年凋落物量呈显著的线性相关 ($R^2 = 0.3319$, $P = 0.000$), 其中成熟林土壤呼吸与年凋落物量间呈显著的线性相关 ($R^2 = 0.3245$, $P = 0.004$), 但未成熟林土壤呼吸与年凋落物量间的线性相关不显著 ($R^2 = 0.3485$, $P = 0.092$)。中国森林的地下碳分配变化范围 $1.460 \sim 25.100 \text{ t C hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$, 平均值为 $9.217 \text{ t C hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$; 中国森林的 TBCA 与年均气温相关关系不显著 ($P = 0.196$), 但与年均降水量则呈显著正相关 ($R = 0.480$, $P = 0.021$)。中国森林 TBCA 和凋落物对土壤呼吸的平均贡献分别为 74.2% 和 25.8%; 中国森林 TBCA 对土壤呼吸的贡献随土壤呼吸增大而增大, 而凋落物对土壤呼吸的贡献则随土壤呼吸的增大而降低。

关键词:森林; 地下碳分配; 土壤呼吸; 凋落物

文章编号: 1000-0933(2007)12-5148-10 中图分类号: Q94 文献标识码: A

Total belowground carbon allocation in China's forests

CHEN Guang-Shui, YANG Yu-Sheng*, XIE Jin-Sheng, DU Zi-Xian, ZHANG Jing

Key Laboratory of Subtropical Resources and Environment of Fujian Province, School of Geographical Science, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China
Acta Ecologica Sinica, 2007, 27(12): 5148 ~ 5157.

Abstract: Total belowground carbon allocation (TBCA) in China's forests is estimated from published data on soil respiration and litterfall in 33 plots. Rates of soil respiration and aboveground litter production are significantly correlated in mature (≥ 45 age) forests and insignificantly correlated in young forests (< 45 age). While pooling data of mature and young forests together, a significant correlation occurs between soil respiration and litter production. Based on assumption of steady-state of belowground carbon pool in mature forests, estimates of TBCA range from 1.460 to 25.100 $\text{t C hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ and average 9.217 $\text{t C hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ in China's forests. TBCA shows significantly correlated to mean annual precipitation and insignificantly to mean annual air temperature. The contributions of TBCA and litterfall to soil respiration averaged 74.2% and 25.8%, respectively. The contribution of TBCA show an increase trend with increase in soil respiration, whereas that of litterfall show a decrease trend.

Key Words: forests; total belowground carbon allocation; soil respiration; litterfall

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

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (30300272)

收稿日期: 2006-10-25; 修订日期: 2007-07-12

作者简介: 陈光水 (1976 ~), 男, 福建仙游人, 博士生, 副教授, 主要从事根系生态学和森林碳循环研究. E-mail: gshuichen@163.com

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

Foundation item: The project was financially supported by National Science Foundation of China (30300272)

Received date: 2006-10-25; Accepted date: 2007-07-12

Biography: CHEN Guang-Shui, Ph. D. candidate, Associate professor, mainly engaged in root ecology and carbon cycle in forest ecosystems. E-mail: gshuichen@163.com

根生长、根系呼吸、根系分泌及维持菌根菌生长在内所需的 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,由于已知的任何方法用于测定根系过程(如根系呼吸、根系生产量、菌根生产量等)均有较大困难,因而目前直接测定 TBCA 的研究极少。在假定地下 C 库处于稳定状态下,Raich and Nadelhoffer^[1]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^[9~18],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^[1,9,18]。同时,Raich and Nadelhoffer^[1]亦研究了全球尺度的森林地下碳分配模式,发现了土壤呼吸和 TBCA 与凋落物年碳归还量间呈显著的线性相关。针对 Raich and Nadelhoffer 研究中的土壤呼吸数据大多来源于碱吸收法而可能使土壤呼吸结果偏低这一问题,Davidson 等通过收集 IRGA 法测定的土壤呼吸数据,对全球森林土壤呼吸与凋落物关系进行了重新分析^[14]。而目前国内有关 TBCA 的研究尚仅见陈光水等对格氏栲和杉木人工林 TBCA 的研究^[19]以及于水强等有关树木根系碳分配格局及影响因子的综述^[20]。

本文通过收集国内已报道的森林土壤呼吸和年凋落物量数据,分析中国森林土壤呼吸和年凋落物量关系及地下碳分配模式,以期为中国森林碳循环研究提供基础资料。

1 数据收集和处理

1.1 数据收集

收集国内已报道文献中同时具有土壤呼吸和凋落物数据的样地 33 个(表 1),其中土壤呼吸测定方法分为 3 类:碱液吸收法样地 10 个、IRGA 法(所使用仪器有 Licor6400、NDIR、CID301PS、GXH-305、CI310)样地 17 个、静态箱-气相色谱法 6 个。

1.2 碱吸收法测定土壤呼吸数据的校正

目前土壤呼吸的腔室测量中最常用的方法是 IRGA 法,而碱液吸收法作为早期测定方法已被认为严重低估了土壤呼吸结果。故需对碱液吸收法测定的土壤呼吸数据进行校正。目前国内外对两种测定方法比较进行了一些研究^[47~50],国内亦有杨晶等和谢锦升等对 Li6400 和碱吸收法测定结果进行比较^[52,53]。由于谢锦升等研究中土壤呼吸速率范围相对较宽,故本文采用谢锦升等的测定结果进行校正。

谢锦升等^[52]研究表明,Li6400 和碱吸收法每次测定结果间存在幂函数关系(图 1)。然而由于幂函数不利于土壤呼吸测定结果的时间尺度外推,本文采用线性方程对数据进行重新拟合($y = 2.3263x - 1.7738, R^2 = 0.7649$)。虽然该方程拟合精度有所降低,但可以证明其在时间外推时能够保持尺度不变性,因而可以对不同研究中碱吸收法测定结果进行校正。

1.3 统计分析

假设成熟林的地下碳库处于稳定状态,则通过土壤呼吸减去年凋落物量即可得到地下碳分配^[1,12]。由于不同森林地下碳库达稳定的年龄很难测定,为了比较,一些研究者采用 45a 作为森林达到地下碳稳定的标志。因而,本文规定年龄 ≥ 45 年生为成熟林, <45 年生为未成熟林^[14]。同时假定凋落物中碳含量为 48%。

利用 SPSS13.0 软件对土壤呼吸与凋落物进行线性回归,并对不同回归方程的斜率、截距和余差进行差异显著性检验。不同方程的一致性检验采用虚拟变量法^[53]。

2 结果

2.1 土壤呼吸与凋落物的关系

中国森林土壤呼吸年通量与年凋落物量呈显著的线性相关($R^2 = 0.3319, P = 0.000$)(图 2);该直线斜率

(2.8246 ± 0.692) 和截距 (3.6015 ± 2.108) 与 Davison 研究^[14] 中的斜率 (3.630 ± 0.377) 和截距 (1.780 ± 1.022) 均无显著差异 ($P = 0.8262$; $p = 0.8313$), 但余差 (分别为 29.055 和 7.560) 则有显著差异 ($P = 0.0001$)。方程一致性检验亦表明两条直线不存在显著性差异 ($P = 0.5479$)。

表 1 中国不同森林类型的年土壤呼吸与年凋落物

Table 1 Annal soil CO₂ efflux and litterfall in various forests of China

森林类型 Forest type ¹⁾	年龄 Age ²⁾	气温 MAT(°C)	降水量 MAR(mm)	土壤呼吸 SR (t C hm ⁻² a ⁻¹)	测定方法 Method ³⁾	参考文献 Ref.	凋落物量 LF (t C hm ⁻² a ⁻¹)	参考文献 Ref.
阔叶红松林	OG	-7.3~4.9	600~900	7.392	IRGA	21	2.118	21
红松云冷杉林	OG	-7.3~4.9	600~900	7.182	IRGA	21	2.009	21
岳桦云冷杉林	OG	-7.3~4.9	600~900	6.507	IRGA	21	1.456	21
岳桦林	OG	-7.3~4.9	600~900	6.841	IRGA	21	1.211	21
油松林	30	4.8	611.9	2.370	IRGA	22	2.340	22
白桦林	OG	4.8	611.9	3.090	IRGA	22	1.630	22
辽东栎林	OG	4.8	611.9	3.900	IRGA	22	1.870	22
冷杉林	OG	3.7	1817	21.749	IRGA	23	1.790	23
冷杉林	50	3.7	1817	12.320	IRGA	23	1.500	23
油松林	55	8~10	900~1200	6.088	AA	24	1.744	39
锐齿栎林	45	8~10	900~1200	7.705	AA	24	2.470	39
阔叶红松林	180	-7.3~4.9	600~900	10.599	SCGC	25	1.920	40
冷杉林	OG	6~12	600~1100	8.543	IRGA	26	2.288	41
云杉林	44	6~12	600~1100	10.487	IRGA	26	2.102	41
云杉林	34	6~12	600~1100	11.061	IRGA	26	1.282	41
格氏栲天然林	OG	19.1	1749	13.742	AA	27	5.097	42
杉木林	33	19.1	1749	4.543	AA	27	2.502	42
格氏栲人工林	33	19.1	1749	9.439	AA	27	4.337	42
松阔混交林	OG	19.6	1743.88	9.990	IRGA	28	2.236	28
马尾松林	OG	19.6	1743.88	8.462	IRGA	28	1.770	28
细柄阿丁枫林	OG	19.4	1731.4	20.889	IRGA	29	3.046	43
季风常绿阔叶林	400	21	1927	15.860	SCGC	30	4.380	30
针阔叶混交林	100	21	1927	10.010	SCGC	30	4.240	30
马尾松林	50~60	21	1927	5.780	SCGC	30	2.190	30
热带山地雨林	OG	19.7	2651.6	8.243	AA	31	4.799	31
热带季雨林	OG	21.5	1557	7.200	AA	32	4.042	44
橡胶林	20	21.5	1557	7.636	AA	32	4.728	44
热带季雨林	OG	21.4	1557	12.736	SCGC	33	5.552	45
杉木林	11	16.8	1250	5.908	AA	34	1.141	34
马尾松林	25	15	1400	6.908	IRGA	35	2.799	46
杉木林	20	16.5	1200~1400	2.868	IRGA	36	2.616	36
杉木林	16	16.8	1100~1400	2.857	IRGA	37	0.557	37
杨树林	10	14.5	1000	5.500	SCGC	38	2.290	38

1) 阔叶红松林 broadleaved-Korean pine forest; 红松云冷杉林 Korean pine and spruce-fir mixed forest; 岳桦云冷杉林 *Betula ermanii* and spruce-fir mixed forest; 岳桦林 *Betula ermanii* forest; 油松林 *Pinus tabulaeformis*; 白桦林 *Betula platyphylla*; 辽东栎林 *Quercus liaotungensis*; 冷杉林 *Abies Fabri*; 锐齿栎林 *Quercus aliena* var. *acuteserrata*; 云杉林 *Picea asperata*; 格氏栲天然林 *Castanopsis kawakamii* natural forest; 杉木林 Chinese fir; 格氏栲人工林 *Castanopsis kawakamii* plantation; 松阔混交林 mixed pine-broad-leaved forest; 马尾松林 *Pinus massoniana* Forest; 细柄阿丁枫林 *Altingia gralilipes*; 季风常绿阔叶林 monsoon evergreen broadleaved forest; 针阔叶混交林 mixed coniferous-broadleaved forest; 热带山地雨林 tropical mountain rain forest; 热带季雨林 tropical monsoon rain forest; 橡胶林 *Hevea brasiliensi*; 杨树林 *Populus deltoides* Bartr. cv. "Lux"; 2) OG: 老龄林 old-growth; 3) IRGA: 红外气体分析法 infrared gas analysis; AA: 碱液吸收法 alkaline absorb method; SCGC: 静态箱-气相色谱法 static chamber-gas chromatogram

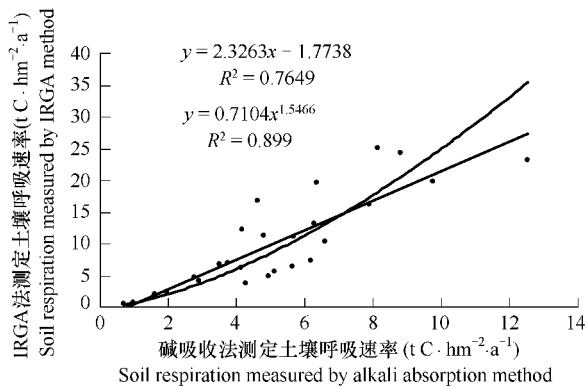


图1 IRGA法与碱吸收法测定土壤呼吸速率的关系

Fig. 1 Relationship between soil respiration rates estimated by IRGA method and alkali absorption method

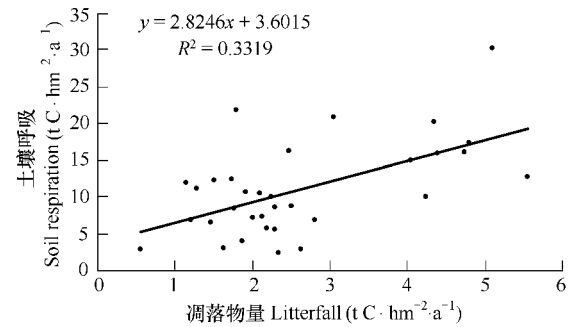


图2 中国森林年土壤呼吸量与年凋落物量的关系

Fig. 2 Relationship between annual soil CO₂ efflux and annual litterfall in forests of China

成熟林土壤呼吸与年凋落物量间呈显著的线性相关($R^2 = 0.3245$, $P = 0.004$) (图3),但未成熟林土壤呼吸与年凋落物量间的线性相关不显著($R^2 = 0.3485$, $P = 0.092$) (图4)。成熟林直线方程斜率(2.7864 ± 0.830)和截距(4.4422 ± 2.596)与未成熟林方程中的斜率(2.6849 ± 1.358)和截距(2.246 ± 3.810)均无显著差异($P = 0.9975$; $p = 0.9381$),余差(分别为30.495和28.719)亦无显著差异($P = 0.5055$)。方程一致性检验亦表明两条直线不存在显著性差异($P = 0.6991$)。

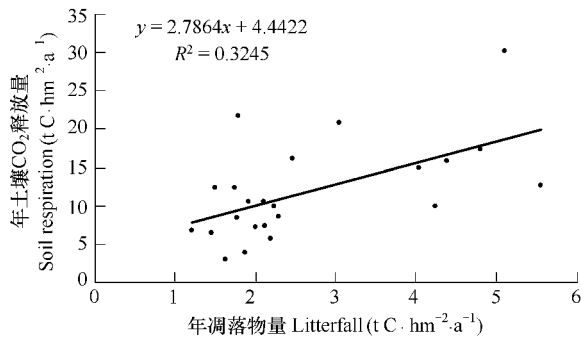


图3 中国成熟森林年土壤呼吸量与年凋落物量的关系

Fig. 3 Relationship between annual soil CO₂ efflux and annual litterfall in mature forests of China

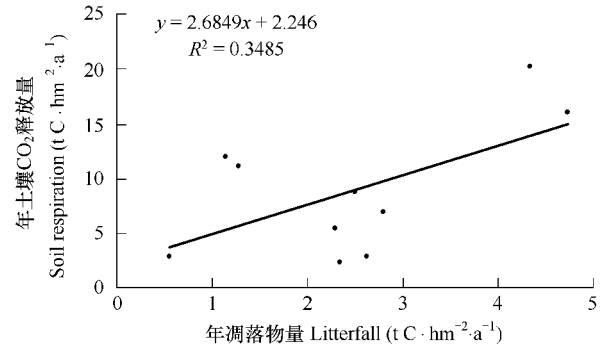


图4 中国未成熟森林年土壤呼吸量与年凋落物量的关系

Fig. 4 Relationship between annual soil CO₂ efflux and annual litterfall in young forests of China

中国成熟林直线方程斜率和截距与 Davison 研究^[14]中的成熟林方程中的斜率(2.806 ± 0.451)和截距(3.133 ± 1.132)均无显著差异($P = 0.9817$; $p = 0.8974$),余差则与 Davison 研究^[14]中的余差(4.898)有显著差异($P = 0.000$)。中国未成熟林直线方程斜率、截距和余差与 Davison 研究中的未成熟林方程中的斜率(4.193 ± 0.600)、截距(1.270 ± 1.826)和余差(10.129)均无显著差异($P = 0.8235$; $P = 0.9283$; $P = 0.066$)。方程一致性检验表明,中国成熟林与未成熟林方程与 Davison 研究中的方程均无显著差异($P = 0.6563$ 和 $P = 0.2339$)。

2.2 中国森林的地下碳分配

中国森林的地下碳分配变化范围 $1.460 \sim 25.100 \text{ t C hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$,平均值为 $9.217 \text{ t C hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$,标准差为 $1.198 \text{ t C hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ (表2)。中国森林的 TBCA 与年均气温相关关系不显著($P = 0.196$),但与年均降水量则呈显著正相关($R = 0.480$, $P = 0.021$)。

表 2 中国森林地下碳分配及其占土壤呼吸比例

Table 2 TBCA and its contribution to annal soil CO₂ efflux under China's forests

项目 Item	样本数 N	最小值 Min.	最大值 Max.	平均值 Mean	标准差 SD
TBCA (t C hm ⁻² a ⁻¹)	23	1.460	25.100	9.217	1.198
TBCA 占土壤呼吸比例 Contribution of TBCA to soil respiration(%)	23	47.3	91.8	74.2	2.5
凋落物占土壤呼吸比例 Contribution of litterfall to soil respiration(%)	23	8.2	52.8	25.8	2.5

2.3 中国森林 TBCA 占土壤呼吸比例

中国森林 TBCA 占土壤呼吸比例平均值为 74.2%, 变化范围为 47.3% ~ 91.8%, 标准差为 2.5% (表 2)。TBCA 占土壤呼吸比例与年均降水量呈正相关 ($R^2 = 0.290, P = 0.047$)。凋落物占土壤呼吸比例平均值为 25.8%, 变化范围为 8.23% ~ 52.8%, 标准差为 2.49% (表 2)。中国森林 TBCA 占土壤呼吸比例随土壤呼吸的增加而增加, 呈 S 曲线变化 ($y = \exp(4.501 - 1.861/x), R^2 = 0.521, P = 0.000$) (图 5); 而凋落物占土壤呼吸比例则随土壤呼吸的增加而降低, 呈反曲线变化 ($y = 12.163 + 121.901/x, R^2 = 0.485, P = 0.000$) (图 6)。

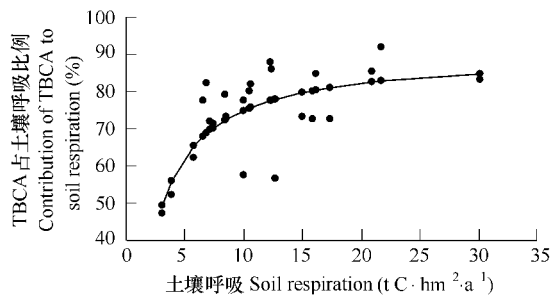


图 5 TBCA 占土壤呼吸比例随土壤呼吸的变化

Fig. 5 Relationship between contribution of TBCA to soil respiration and soil respiration

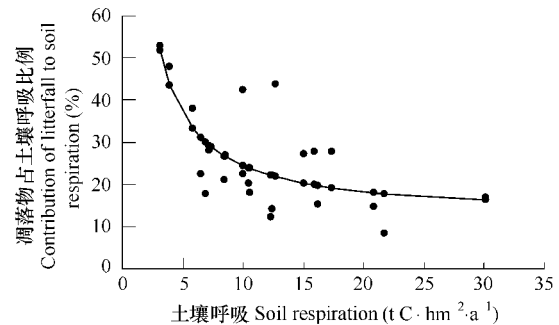


图 6 凋落物占土壤呼吸比例随土壤呼吸的变化

Fig. 6 Relationship between contribution of litterfall to soil respiration and soil respiration

4 讨论

4.1 森林土壤呼吸与凋落物量的关系

中国森林土壤呼吸与年凋落物量呈显著的正相关, 与在全球尺度上森林土壤呼吸速率与森林凋落物量呈正相关^[1,14]的报道一致。这种相关性与森林凋落物作为土壤微生物呼吸的一个重要底物有关。随着凋落物量的增加, 土壤微生物呼吸底物增加, 从而使土壤呼吸提高。由于森林生产力的增加一般亦可提高森林凋落物产量和根系生物量, 因而土壤呼吸与生产力间亦存在一定的相关关系, 如 Raich 等观察到在成龄森林生态系统中土壤呼吸速率随凋落物和林地生产力的增加而增加^[1]。热带森林土壤的呼吸速率最大与热带林的生长量和凋落量大且环境条件也较适于分解者活动有关^[54]。Irvine 等^[55]对比了幼龄和老龄西黄松 (*Pinus ponderosa*) 林的土壤呼吸, 观察到老龄林之所以有较高的土壤呼吸, 是因为老龄林立地上有较大的生产力和易分解的碎屑。但 Weber^[56]观察到白杨林的土壤呼吸速率只略大于相似林龄的较低生产力的北美短叶松 (*Pinus banksiana*)。Raich 观察到高生产力的夏威夷森林比较低生产力的 NPP 高 86%, 但土壤呼吸速率只高 36%^[57]。在 Michigan 低地^[58]和 Alaska^[59]等地亦观察到地上生产力显著不同的森林有相似的土壤呼吸速率。

Davidson 等报道森林土壤呼吸与凋落物量线性方程中成熟林的截距大于未成熟林, 并认为可能与未成熟林中根系呼吸和根凋落物对土壤呼吸的贡献较大而地上凋落物的贡献较小有关, 并且认为这与未成熟林一般维持庞大根系以满足养分、水分需求、维持其快速生长的状况一致^[14]。但本文中虽然成熟林的截距大于未成

熟林,但差异不显著,这可能与中国森林土壤呼吸与年凋落物数据离散程度较大有关。

与全球尺度相比,中国的森林土壤呼吸与凋落物量之间的相关性明显较小,同时回归方程的余差亦显著增加,用年凋落物量预测土壤呼吸和 TBCA 的能力降低,表明随着空间尺度的缩小,土壤呼吸或 TBCA 与年凋落物量间的关系变得更加复杂,因而这种全球或区域尺度的规律能否普遍适用于特定森林生态系统尚需要进一步验证^[9,18]。Giardina and Ryan^[60]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。Davison 等研究亦表明,温带阔叶林的土壤呼吸与年凋落物量间不存在显著的线性关系^[14]。本文通过对数据最多的我国温带针叶/针阔混交林的土壤呼吸与年凋落物量进行回归分析表明,土壤呼吸与年凋落物量亦不存在显著的线性相关,且两者呈现出负相关的趋势($y = -5.272x + 19.902, R^2 = 0.141, P = 0.255$)。

4.2 森林地下碳分配

本研究中国森林的 TBCA 数值范围在 $1.46 \sim 25.1 \text{ t C hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 之间,超过 Davison 等研究得出的数值范围($3.65 \sim 18.3 \text{ t C hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$)^[14],并大于 Raich 和 Nadelhoffer 研究中的全球森林 TBCA 数值范围($2.6 \sim 11.0 \text{ t C hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$)^[1]。Raich 和 Nadelhoffer 研究中的土壤呼吸大多采用碱吸收法测定,导致土壤呼吸结果偏低而使 TBCA 估算值偏低^[1]。中国亚热带、热带森林的 TBCA 数值亦与已报道的热带森林结果相当,如 Raich^[57]报道 3 种夏威夷雨林的 TBCA 分别为 $5.95, 5.01 \text{ t C hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 和 $4.17 \text{ t C hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 。Clark 等^[10]报道 4 种夏威夷 *Metrosideros* 森林分别为: $5.7, 6.3, 8.7, 6.8 \text{ t C hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$; 巴西两种 terra firme 森林分别为 8.8 和 $17.0 \text{ t C hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$, 马来西亚 dipterocarp 森林为 $9.1 \text{ t C hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 。由于本文中缺乏成熟阔叶树人工林数据,从而无法进行阔叶树和针叶树人工林 TBCA 的比较。但作者前期曾报道,相同年龄(36 年生)相同立地上的杉木人工林 TBCA 远小于格氏栲人工林^[19]。本研究中各森林地下 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^[1,14]。

Giardina 等研究^[61]曾表明,全球尺度的森林地下碳分配与年平均气温呈现极显著的正相关($R^2 = 0.45, P < 0.01$)。然而,中国森林的地下碳分配与年均气温仅呈弱相关,但与年均降水量则呈显著相关。造成这种差异的原因,除了与研究尺度范围不同外,亦可能与中国森林所处气候条件(季风气候)与全球其它森林有所差异有关。

4.3 TBCA 和凋落物对土壤呼吸的贡献

假设成熟林地下 C 库处于稳定状态,则土壤呼吸来源于 TBCA 和地上凋落物,TBCA 和地上凋落物占土壤呼吸比例则分别代表根系和地上凋落物对土壤呼吸的贡献。中国森林地下碳分配(根系)和地上年凋落物量对土壤呼吸的平均贡献分别为 74.2% 和 25.8% ,这与 Davidson 研究中的相似(分别为 76.0% 和 24.0%)^[14]。而 Raich 和 Nadelhoffer 研究中年凋落物量和 TBCA 的比例则约为 $1:2$,这与该研究中土壤呼吸多采用碱吸收法导致土壤呼吸结果偏低有关^[1]。另外,本研究中 TBCA 占土壤呼吸比例随土壤呼吸的增大而增大,而凋落物占土壤呼吸比例则降低,表明随土壤呼吸增大,根系对土壤呼吸的贡献增大,而凋落物的相对贡献则降低。

但应用碳平衡方法无法得知 TBCA 的组成(如根系呼吸和根系生产量的相对组成),然而揭示 TBCA 的组成则十分重要,因为其 C 的去向不同,对生态系统的碳吸存作用亦不同。目前有关 TBCA 组成的研究很少,由碳平衡法所得到的 TBCA 只能作为其不同组分(如根系呼吸、根系生产量)的数量上限。另外 TBCA 的估计结果结合 ANPP 和地上部分呼吸可以估计总初级生产力^[6]。许多森林碳预算模型较早就简单假定 TBCA 中的根系生产力和根系呼吸数值相等^[59,62],而这种假定目前亦被一些研究所证实^[16,19,63]。

应用碳平衡法计算 TBCA 是基于地下 C 库变化及其它未能测定的 C 通量与凋落物和土壤呼吸相比相对较小的假定上,然而,Clark 等曾指出,由于未能对许多地下 C 过程(如土壤有机 C 库变化、细根和粗根净生物量变化、C 淋溶、除细凋落物外的地上其它 C 输入),将可能造成 TBCA 的低估或高估^[10]。同时,凋落物和土壤呼吸的年际变化亦可能对碳平衡法得到的 TBCA 结果产生影响。本文所收集的凋落物和土壤呼吸数据,大

部分不是同年测定。而许多研究发现因年际气候波动常会造成土壤呼吸和凋落物的年际变化^[64~66]。因而,虽然某个森林的地下碳库可能在较长时间尺度(如数十年)上接近于稳定状态,但在年尺度上可能因气候变化对叶生长量、凋落物和分解的影响,而使地下碳库可能有较大变化。因而,在用碳平衡法估算 TBCA 时,最好有某个森林多年平均的土壤呼吸和凋落物数据,因为这样相对能满足地下碳库稳定这一假设^[14]。另外,土壤呼吸测定方法的不同,亦可能导致 TBCA 估算值的差异。虽然本文中对碱吸收法的测定结果进行了校正,但由于此校正方程只在一个地点获得,运用到其它森林其误差大小如何尚无法估计。以上这些因素均可能影响到本文中有关森林土壤呼吸和凋落物量的相关关系以及对中国森林 TBCA 的估算^[67]。

References:

- [1] Raich J W, Nadelhoffer K J. Belowground carbon allocation in forest ecosystems: 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, Gower S T. Annual carbon cost of autotrophic respiration in boreal forest ecosystems in relation to species and climate. *J. Geophys. Res.*, 1997, 102(D24): 28871—28884.
- [7] Giardina C P, Ryan M G, Binkley D, Fownes J H. 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] 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.
- [12] Giardina C P, Ryan M G. Total belowground carbon allocation in a fast-growing *Eucalyptus* plantation estimated using a carbon balance approach. *Ecosystems*, 2002, 5: 487—499.
- [13] Coble D, Marshall J. Aspect differences in above-and belowground carbon allocation: a Montana case-study. *Environmental Pollution*, 2002, 116: 149—155.
- [14] 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.
- [15] Haynes B E, Gower S T. Belowground carbon allocation in unfertilized and fertilized red pine plantations in northern Wisconsin. *Tree Physiology*, 1995, 15: 317—325.
- [16] McDowell N G, Balster N J, Marshall J D. Belowground carbon allocation of Rocky Mountain Douglas-fir. *Can. J. For. Res.*, 2001, 31(8): 1425—1432.
- [17] Nadelhoffer K J, Raich J W. Fine root production estimates and belowground carbon allocation in forest ecosystems. *Ecology*, 1992, 73(4): 1139—1147.
- [18] Nadelhoffer K J, Raich J W, Aber J D. A global trend in belowground carbon allocation: comment. *Ecology*, 1998, 79(5): 1822—1825.
- [19] Chen G S, Yang Y S, Qian W, *et al.* Total belowground carbon allocation in *Castanopsis kawakamii* and Chinese fir plantations in subtropical area of China. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(11): 2824—2829.
- [20] Yu S Q, Wang Z Q, Shi J W, *et al.* Research review on the pattern of carbon allocation to roots and environmental factors in forest ecosystem. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(8): 2663—2669.
- [21] Liu Y. Soil carbon efflux in the typical forest ecosystems of Changbai Mountains. Doctor Thesis for SAE Institute of CAS, 2005.
- [22] Fang J Y, Liu G H, Zhu B, *et al.* Carbon budgets of three temperate forest ecosystems in Dongling Mt., Beijing, China. *Science in China Ser.*

- D Earth Sciences, 2007, 50(1): 92—101.
- [23] Luo J, Yang Z, Yang Q W. CO₂ emissions from soils in *Abies Fabri* forest region on the east slope of Gongga Mountain. *Acta Pedologica Sinica*, 2000, 37(3): 402—409.
- [24] Liu J J, Wang D X, Lei R D, *et al.* Soil respiration and release of carbon dioxide from natural forest of *Pinus tabulaeformis* and *Quercus aliena* var. *acuteserrata* in Qinling Mountains. *Scientia Silvae Sinicae*, 2003, 39(2): 8—13.
- [25] Wang M, Han S J, Wang Y S. Important factors controlling CO₂ emission rates from forest soil. *Chinese Journal of Ecology*, 2004, 23(5): 24—29.
- [26] Chu J X. Effects of land use and land cover changes on soil respiration in subalpine region in western Sicuan. Master Thesis for Shandong Agriculture University, 2005.
- [27] Yang Y S, Chen G S, Wang X G, *et al.* Response of soil CO₂ efflux to forest conversion in subtropical China. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(7): 1684—1690.
- [28] Yang Q P. Ecological characteristics of NPP, photosynthesis and respiration of forest ecosystems in successional process in Heishiding, Guangdong, China. Doctor Thesis for Zhongshan University, 2001.
- [29] Yang S H. Effects of land uses on soil organic carbon and soil respiration in subtropical China. Master Thesis for Fujian Agriculture and Forestry University, 2006.
- [30] Yang J H, Wang Y P, Zhou G Y and Zhang D J. Estimates of soil respiration and net primary production of three forests at different succession stages in South China. *Global Change Biology*, 2006, 12: 1—12.
- [31] Li Y D, Wu Z M, Zeng Q B, *et al.* Carbon pool and carbon dioxide dynamics of tropical mountain rain forest ecosystem at Jianfengling, Hainan Island. *Acta Ecologica Sinica*, 1998, 18(4): 371—378.
- [32] Fang Q L, Sha L Q. Soil respiration in a tropical seasonal rain forest and Rubber plantation in Xishuangbana, Yunnan, SW China. *Journal Plant Ecology* (formerly *Acta Phytocologica Sinica*), 2006, 30(1): 97—10.
- [33] Sha L Q, Zheng Z, Tang J W, *et al.* Soil respiration in tropical monsoon rain forest in Xishuangbana. *Science in China Ser. D Earth Sciences*, 2004, 34 (Sp.2): 167—174.
- [34] Fang X, Tian D L, Xiang W H, *et al.* Carbon dynamics and balance in the ecosystems of the young and middle-aged second-generation Chinese fir plantation. *Journal of Central South Forestry University*, 2002, 22(1): 1—6.
- [35] Huang C C. A study on the soil respiration of *Pinus massoniana* forest in Zhejiang Province. *Journal of Shaoxing College of Arts and Science*, 1999, 19(5): 65—69.
- [36] Xiao F M, Wang S L, Du T Z, *et al.* A Study on Forest Soil Respiration in Chinese Fir Plantation. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*, 2005, 27(4): 580—584.
- [37] Lei P F. Primary study on soil carbon pool and its control factors in Chinese fir plantations. Master Thesis for Central South Forestry University, 2004.
- [38] Tang L Z, Haihara K, Huang B L, *et al.* Storage and dynamics of carbon in a poplar plantation in Lixiahe Region, Jiangsu Province. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition)*, 2004, 28(2): 1—6.
- [39] Liu G Q, Tu X N, Zhao S D, *et al.* Distributional characteristics on biomass and nutrient elements of pine-oak forest belt in Mt. Qinling. *Scientia Silvae Sinicae*, 2001, 37(1): 28—36.
- [40] Zhang N, Yu G R, Zhao S D, *et al.* Carbon budget of ecosystem in Changbai Mountain Natural Reserve. *Environmental Science*, 2003, 24(1): 25—32.
- [41] Lin B. Litter of the artificial and natural subalpine *Picea* forest in western Sichuan. Master Thesis for Chengdu Institute of Biology, CAS, 2002.
- [42] Yang Y S, Guo J F, Lin P, *et al.* Litter production and leaf-litter decomposition in natural and monoculture plantation forests of *castanopsis kawakamii* in subtropical China. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(7): 1278—1289.
- [43] Yang Y S, Guo J F, Chen G S, *et al.* Litter production, seasonal pattern and nutrient return in seven natural forests compared with a plantation in southern China. *Forestry*, 2005, 78(4): 403—415.
- [44] Ren Y H, Cao M, Tang J W, *et al.* A comparative study on litterfall dynamics in a seasonal rain forest and a rubber plantation in Xishuangbanna, SW China. *Acta Phytocologica Sinica*, 1999, 23(5): 418—425.
- [45] Zheng Z, Feng Z L, Cao M, *et al.* Biomass and net primary production of primary tropical wet seasonal rainforest in Xishuangbanna. *Acta Phytocologica Sinica*, 2000, 24(2): 197—203.
- [46] Huang C C. Studies on Litterfall and Carbon Storage of *Pinus massoniana* Forest in Zhejiang Province. *Journal of Shaoxing College of Arts and Science*, 2000, 20(6): 61—64.
- [47] Bekku Y, Koizumi H, Nakadai T, *et al.* Examination of four methods for measuring soil respiration. *Applied Soil Ecology*, 1997, 5: 247—254.

- [48] King J A, Harrison R. Measuring soil respiration in the field: an automated closed chamber system compared with portable IRGA and alkali absorption methods. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2002, 33: 403—423.
- [49] Nakadai T, Koizumi H, Usami Y, *et al.* Examination of the methods for measuring soil respiration in cultivated land: effect of carbon dioxide concentration on soil respiration. *Ecological Research*, 1993, 8: 65—71.
- [50] Nay S M, Mattson K G, Bormann B T. Biases of chamber methods for measuring soil CO₂ efflux demonstrated with a laboratory apparatus. *Ecology*, 1994, 75: 2460—2463.
- [51] Yang J, Huang J H, Zhan X M, *et al.* The diurnal dynamic patterns of soil respiration for different plant communities in the agro-pastoral ecotone with reference to different measuring methods. *Acta Phytocologica Sinica*, 2004, 28(3): 318—325.
- [52] Xie J S, Yang Y S, Zeng H D, *et al.* Diurnal dynamics of soil respiration for different restoration communities in eroded bare land and comparison of soil respiration rates measured by two methods. *Journal of Subtropical Resources and Environment*, 2006, 2(1): 21—29.
- [53] Zar J H. *Biostatistical Analyses*. Prentice-Hall, Upper Saddle River, NJ., 1996.
- [54] Schlesinger W H and Andrews J A. Soil respiration and the global carbon cycle. *Biogeochemistry*, 2000, 48: 7—20.
- [55] Irvine J, Law B E. Contrasting soil respiration in young and old-growth ponderosa pine forests. *Global Change Biol.*, 2002, 8(12): 1183—1193.
- [56] Weber M G. Forest soil respiration after cutting and burning in immature aspen ecosystems. *For. Ecol. Manage.*, 1990, 31: 1—14.
- [57] Raich J W. Aboveground productivity and soil respiration in three Hawaiian rain forests. *Forest Ecology and Management*, 1998, 107: 309—318.
- [58] Jurik T W, Briggs G M, Gates D M. Soil respiration of five aspen stands in northern Lower Michigan. *Am. Midl. Nat.*, 1991, 126: 68—75.
- [59] Ruess R W, Van C K, Yarie J, *et al.* Contributions of fine root production and turnover to the carbon and nitrogen cycling in taiga forests of the Alaskan interior. *Can. J. For. Res.*, 1996, 26: 1326—1336.
- [60] 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.
- [61] Giardina C P, Coleman M D, Hancock J E, *et al.* The response of belowground carbon allocation in forests to global change. In: Binkley, D., and O. Menyailo eds. *Tree Species Effects on Soils: Implications for Global Change*. NATO Science Series, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 2005. 119—154
- [62] Waring R H, Landsberg J J, Williams M. Net primary production of forests: a constant fraction of gross primary production? *Tree Physiol.*, 1998, 18: 129—134.
- [63] Ewel K C, Cropper W P Jr, Gholz H L. Soil CO₂ evolution in Florida slash pine plantations. 2. Importance of root respiration. *Can. J. For. Res.*, 1987, 17: 330—333.
- [64] Borken W, Xu Y J, Brumme R, Lamersdorf N. A Climate Change Scenario for Carbon Dioxide and Dissolved Organic Carbon Fluxes from a Temperate Forest Soil. *Drought and Rewetting Effects*. *Soil Science Society of America Journal*, 1999, 63: 1848—1855.
- [65] Davidson E A, Ishida F Y, Nepstad D C. Effects of an experimental drought on soil emissions of carbon dioxide, methane, nitrous oxide, and nitric oxide in a moist tropical forest. *Global Change Biology*, 2004, 10: 718—730.
- [66] Pregitzer K S, Burton A J. Sugar maple seed production and nitrogen in litterfall. *Can. J. For. Res.*, 1991, 21: 1148—1153.
- [67] Chen G S, Yang Y S, Liu L Z, *et al.* Research review on total belowground carbon allocation in forest ecosystems. *Journal of Subtropical Resources and Environment*, 2007, 2(1): 34—42.

参考文献:

- [19] 陈光水, 杨玉盛, 钱伟, 等. 格氏栲与杉木人工林地下碳分配. *生态学报*, 2005, 25(11): 2824—2829.
- [20] 于水强, 王政权, 史建伟, 等. 树木根系碳分配格局及其影响因素. *生态学报*, 2006, 26(8): 2663—2669.
- [21] 刘颖. 长白山典型森林生态系统土壤碳通量研究. 中国科学院沈阳应用生态研究所博士学位论文, 2005.
- [23] 罗辑, 杨忠, 杨清伟. 贡嘎山东坡峨眉冷杉林土壤 CO₂ 排放. *土壤学报*, 2000, 37(3): 402—409.
- [24] 刘建军, 王得祥, 雷瑞德, 等. 秦岭天然油松、锐齿栎林地土壤呼吸与 CO₂ 释放. *林业科学*, 2003, 39(2): 8—13.
- [25] 王森, 韩士杰, 王跃思. 影响阔叶红松林土壤 CO₂ 排放的主要因素. *生态学杂志*, 2004, 23(5): 24—29.
- [26] 褚金翔. 川西亚高山林区土地利用与覆盖变化对土壤呼吸的影响. 山东农业大学硕士学位论文, 2005.
- [27] 杨玉盛, 陈光水, 王小国, 等. 中国亚热带森林转换对土壤呼吸动态及通量的影响. *生态学报*, 2005, 25(7): 1684—1690.
- [28] 杨清培. 黑石顶森林演替群落生产力及光合与呼吸的生态特征. 中山大学博士学位论文, 2001.
- [29] 杨少红. 不同土地利用对土壤有机碳和土壤呼吸的影响. 福建农林大学硕士学位论文, 2006.
- [31] 李意德, 吴仲民, 曾庆波, 等. 尖峰岭热带山地雨林生态系统碳平衡的初步研究. *生态学报*, 1998, 18(4): 371—378.
- [32] 房秋兰, 沙丽清. 西双版纳热带季节雨林与橡胶林土壤呼吸. *植物生态学报*, 2006, 30(1): 97—101.
- [33] 沙丽清, 郑征, 唐建维, 等. 西双版纳热带季节雨林的土壤呼吸研究. *中国科学 D 辑地球科学*, 2004, 34(增刊 II): 167—174.

- [34] 方晰,田大伦,项文化,等. 第二代杉木中幼林生态系统碳动态与平衡. 中南林学院学报, 2002, 22(1): 1~6.
- [35] 黄承才. 浙江省马尾松林(*Pinus massoniana*)林土壤呼吸的研究. 绍兴文理学院学报, 1999, 19(5): 65~69.
- [36] 肖复明,汪思龙,杜天真,等. 杉木人工林林地土壤呼吸研究. 江西农业大学学报, 2005, 27(4): 580~584.
- [37] 雷丕锋. 杉木人工林土壤碳贮量及形成机理的初步研究. 中南林学院硕士学位论文, 2004.
- [38] 唐罗忠,生原喜久雄,黄宝龙,等. 江苏省里下河地区杨树人工林的碳储量及其动态. 南京林业大学学报(自然科学版), 2004, 28(2): 1~6.
- [39] 刘广全,土小宁,赵士洞,等. 秦岭松栎林带生物量及其营养元素分布特征. 林业科学, 2001, 37(1): 28~36.
- [40] 张娜,于贵瑞,赵士洞,等. 长白山自然保护区生态系统碳平衡研究. 环境科学, 2003, 24(1): 25~32.
- [41] 林波. 川西亚高山人工针叶林与天然林凋落物的比较研究. 中国科学院成都生物研究所硕士学位论文, 2002.
- [44] 任泳红,曹敏,唐建维,等. 西双版纳季节雨林与橡胶多层林凋落物动态的比较研究. 植物生态学报, 1999, 23(5): 418~425.
- [45] 郑征,冯志立,曹敏,等. 西双版纳原始热带湿性季节雨林生物量及净初级生产. 植物生态学报, 2000, 24(2): 197~203.
- [46] 黄承才,张信娣,沈军全,等. 浙江省马尾松林(*Pinus massoniana*)林凋落物量及土壤碳库的初步研究. 绍兴文理学院学报, 2000, 20(6): 61~64.
- [51] 杨晶,黄建辉,詹学明,等. 农牧交错区不同植物群落土壤呼吸的日动态观测与测定方法比较. 植物生态学报, 2004, 28(3): 318~325.
- [52] 谢锦升,杨玉盛,曾宏达,等. 侵蚀红壤植被恢复后土壤呼吸日动态及日呼吸速率测定方法比较. 亚热带资源与环境学报, 2006, 2(1): 21~29.
- [67] 陈光水,杨玉盛,刘乐中,等. 森林地下碳分配(TBCA)研究进展. 亚热带资源与环境学报, 2007, 2(1): 34~42.