

中国森林土壤呼吸模式

陈光水, 杨玉盛*, 吕萍萍, 张亿萍, 钱小兰

(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 62 个森林样地的土壤呼吸及相关因子数据, 分析中国森林土壤呼吸模式。结果表明, 中国森林土壤呼吸年通量与年均气温、年均降水量、年凋落物量和年地上净生产力均呈显著的线性正相关, 土壤呼吸的 Q_{10} 则与年均气温和年均降水量均呈显著的负相关。根系呼吸、枯枝落叶层呼吸与土壤呼吸间均呈显著线性正相关; 土壤异养呼吸和枯枝落叶层呼吸与年凋落物量呈显著正相关; 土壤异养呼吸与自养呼吸间呈显著的线性正相关。根系呼吸、枯枝落叶层呼吸、矿质土壤呼吸占土壤呼吸的比例均值分别为 34.7%、20.2% 和 50.2%。矿质土壤呼吸所占比例与气温和降水量呈显著负相关, 而异养呼吸所占比例则与降水量呈显著负相关。根系呼吸所占比例与根系呼吸之间呈渐近线关系(渐近值为 45.9%)。

关键词:森林; 土壤呼吸; Q_{10} 值; 根系呼吸; 矿质土壤呼吸; 枯枝落叶层呼吸; 异养呼吸

文章编号: 1000-0933(2008)04-1748-14 中图分类号: S153.61 文献标识码: A

Regional patterns of soil respiration in China's forests

CHEN Guang-Shui, YANG Yu-Sheng*, LÜ Ping-Ping, ZHANG Yi-Ping, QIAN Xiao-Lan

Key Lab. of Subtropical Resources and Environment of Fujian Province, School of Geographical Sciences, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China
Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(4): 1748 ~ 1761.

Abstract: Regional patterns of soil respiration in China's forests were analysed using published data from 62 plots. Rates of soil respiration were found significantly correlated to mean annual air temperature, mean annual precipitation, annual aboveground litterfall and aboveground net primary production. Q_{10} values of soil respiration showed significant negative correlations to mean annual air temperature and mean annual precipitation. Root respiration and litter respiration were found positively correlated to soil respiration, and soil heterotrophic respiration and litter respiration positively correlated to litterfall. Soil hetero- and autotrophic respiration were found positively correlated. Contributions of root respiration, litter respiration and mineral soil respiration to soil respiration averaged 34.7%, 20.2% and 50.2%, respectively. The contribution of mineral soil respiration to soil respiration showed negatively correlated to mean air temperature and annual rainfall, and contribution of heterotrophic respiration negatively correlated to annual rainfall. Root contribution to soil respiration increased initially and then gradually steady with increase in root respiration, following a symptotic curve with the limit value of 45.9%.

Key Words: forests; soil respiration; Q_{10} ; root respiration; mineral soil respiration; litter respiration; heterotrophic respiration

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(30300272)

收稿日期: 2006-11-11; 修订日期: 2008-01-16

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氮循环研究. 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 Natural Science Foundation of China (No. 30300272)

Received date: 2006-11-11; **Accepted date:** 2008-01-16

Biography: CHEN Guang-Shui, Ph. D. candidate, Associated professor, mainly engaged in root ecology and forest C and N cycling. E-mail: gshuichen@163.com

全球土壤呼吸年通量高达 80.4 Pg C a^{-1} , 仅次于海洋释放到大气中的 CO_2 通量, 是化石燃料燃烧释放 CO_2 的 13 倍^[1], 因而土壤呼吸是全球碳循环的重要流通途径之一, 其动态变化将直接影响全球 C 平衡。森林是全球陆地生态系统的主体, 在全球土壤呼吸通量中占有重要地位。在目前已建立的长期监测 CO_2 通量网站中, 森林土壤呼吸已成为重要的监测项目之一。有关土壤呼吸大尺度规律的研究可为建立区域及全球陆地生态系统碳动态模拟和碳预算提供重要参数。目前, 国外有关土壤呼吸的大尺度(区域、全球)规律已有一些报道, 如 Raich 和 Nadelhoffer 与 Davidson 等分别对全球森林土壤呼吸与凋落物的关系及地下碳分配进行了研究^[2,3]; Raich 和 Schlesinger 研究了全球陆地与湿地生态系统土壤呼吸释放量及其与植被类型和气候因子的关系^[4]; Raich 通过收集全球的土壤呼吸数据和半机理和经验模型研究了全球的土壤 CO_2 排放量模型^[5]; Raich 和 Tufekcioglu 进一步分析了全球土壤呼吸与植被的相关性及其控制因素^[6]; Hanson 等分析了全球根系呼吸占土壤呼吸的比例及变化^[7]; Bond-Lamberty 等利用 54 个森林样地数据研究了土壤自养呼吸、异养呼吸与土壤呼吸的全球关系模式^[8]; Hibbard 等利用 AmeriFlux 和 CarboEurope 中的 31 个样地数据研究了北半球 5 种温带陆地生态系统的土壤呼吸动态差异及影响因素^[9]; Campbell 和 Law 利用美国 Oregon 州有明显气候差异的 3 种森林中的共 36 个样地数据, 研究了森林类型、年龄、气候因素对土壤呼吸的影响^[10]; Chen and Tian 利用 38 个森林样地数据研究了土壤呼吸 Q_{10} 值的全球温度模型^[11]。我国土壤呼吸的研究则开始于 20 世纪 90 年代中后期, 此后逐渐增加, 并已积累了较多的研究资料, 但直至目前, 对中国森林土壤呼吸的区域模式仍缺乏了解。

本文通过收集国内森林土壤呼吸及相关数据, 分析中国森林土壤呼吸及其组成和影响因素, 以期为中国森林碳循环研究提供参考。

1 数据收集和处理

1.1 数据收集

收集国内已发表相关文献中的有关森林土壤呼吸的数据, 同时收集相同试验地的相关数据, 共获得 62 个试验地的土壤呼吸数据, 其中有 21 个土壤呼吸数据采用碱液吸收法测定, 6 个采用静态箱-气相色谱法, 35 个采用 IRGA 法(见附表)。 Q_{10} 值(土壤呼吸温度敏感系数; 即温度增加 10°C 土壤呼吸速率增加的倍数)直接收集于已发表文献中的各森林试验地, 或通过已发表文献中提供的各森林试验地土壤呼吸(R)与土壤温度(t)的指数拟合方程($R = ae^{bt}$), 采用 $Q_{10} = e^{10b}$ 计算。

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红外气体分析法(IRGA), 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。目前国外对两种测定方法比较进行了一些研究^[12-15], 国内亦有杨晶等和谢锦升对 Li6400 和碱吸收法测定结果进行比较^[16,17]。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^[17]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), 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($y = 2.3263x - 1.7738$, $R^2 = 0.7649$)。虽然该方程损失了拟合精度, 但其可以实现土壤呼吸结果的时间尺度外推, 可以对不同研究中碱吸收法测定结果进行校正。

2 结果

2.1 中国森林土壤呼吸

中国森林土壤呼吸年通量介在 $2.36 \sim 30.19 \text{ t C}$

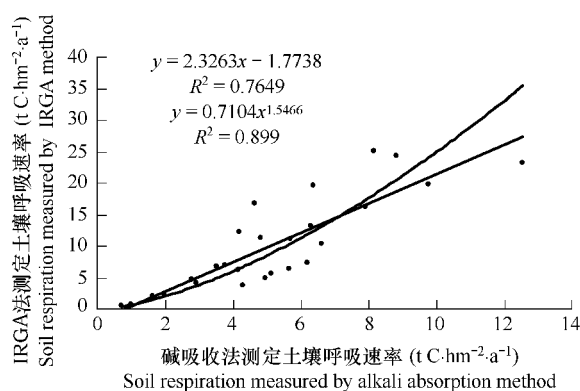


图 1 IRGA 法与碱吸收法测定土壤呼吸速率的关系

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

$\text{hm}^{-2} \text{a}^{-1}$ 之间,平均值为 $9.755 \text{ t C hm}^{-2} \text{a}^{-1}$ (表1)。中国森林土壤呼吸年通量与年均气温和年均降水量均呈显著的线性相关($P < 0.01$),但降水量的线性方程 R^2 高于气温的(图2,图3;表2)。

表1 中国森林土壤呼吸的平均值及变异

Table 1 Mean values and variations of soil respiration in China's forests

	样本数 n	平均值 Mean	最小值 Min.	最大值 Max.	标准差 SD
$SR(\text{t C hm}^{-2} \text{a}^{-1})$	62	9.755	2.360	30.190	4.980
Q_{10}	48	2.65	1.33	5.53	0.78
$RR(\text{t C hm}^{-2} \text{a}^{-1})$	31	3.677	0.310	14.340	2.750
$LR(\text{t C hm}^{-2} \text{a}^{-1})$	15	3.196	0.850	8.270	2.312
$MR(\text{t C hm}^{-2} \text{a}^{-1})$	9	6.554	2.880	10.900	2.217
$HR(\text{t C hm}^{-2} \text{a}^{-1})$	31	6.210	1.800	15.850	3.158
$RR/SR(\%)$	38	34.7	10.0	65.0	12.2
$LR/SR(\%)$	26	20.2	1.7	49.0	12.3
$MR/SR(\%)$	13	50.2	25.1	69.7	15.4
$HR/SR(\%)$	31	65.2	46.2	90.0	11.8

* 表中 SR, RR, LR, MR, HR 分别表示土壤呼吸、根系呼吸、枯枝落叶层呼吸、矿质土壤呼吸、异养呼吸、年均气温和年均降水量 SR, RR, LR, MR, HR represent soil respiration, root respiration, litter respiration, mineral soil respiration, and heterotrophic respiration, respectively; 下同 The same below

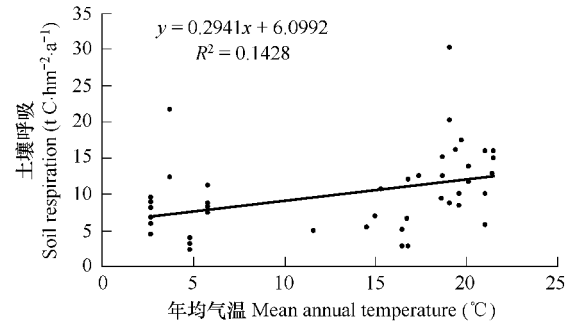


图2 中国森林土壤呼吸与年均气温关系
Fig. 2 Relationship between soil respiration rates and mean annual air temperature

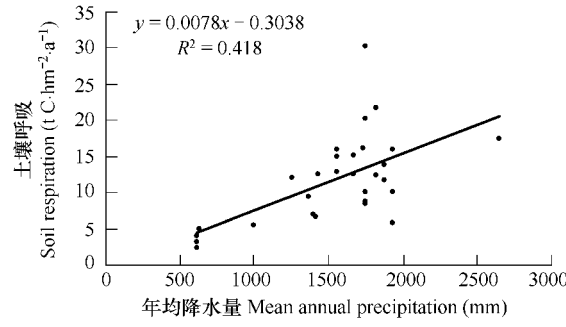


图3 中国森林土壤呼吸与年均降水量关系
Fig. 3 Relationship between soil respiration rates and mean annual precipitation

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($R^2 = 0.299$)(图4),与森林地上净生产力亦呈显著正相关($R^2 = 0.3834$)(图5)。

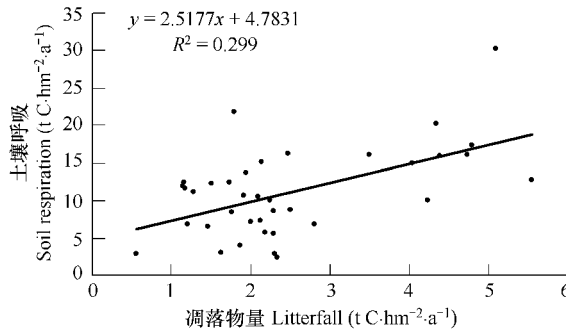


图4 中国森林年土壤呼吸量与年凋落物量的关系
Fig. 4 Relationship between annual soil CO_2 efflux and annual litterfall in China's forests

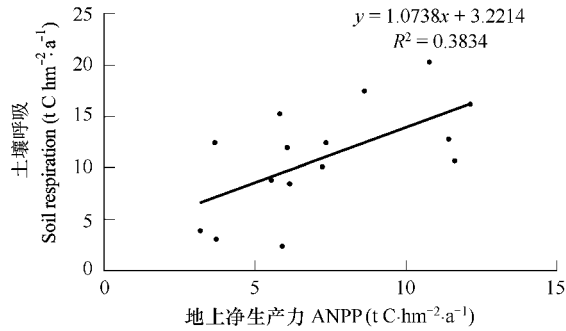


图5 中国森林年土壤呼吸量与年地上净生产力的关系
Fig. 5 Relationship between annual soil CO_2 efflux and ANPP in China's forests

表 2 中国森林土壤呼吸的相关分析

Table 2 Correlation analyses on soil respiration in China's forests

		SR	Q_{10}	RR	LR	MR	HR	RR/SR	LR/SR	MR/SR	HR/SR	T	P
SR	r	1	-0.442	0.929	0.683	0.394	0.947	0.371	-0.012	-0.443	-0.371	0.378	0.647
	p		0.004	0.000	0.005	0.294	0.000	0.040	0.965	0.232	0.040	0.008	0.000
	n	62	40	31	15	9	31	31	15	9	31	48	31
Q_{10}	r		1	-0.394	-0.397	-0.306	-0.487	-0.101	-0.271	0.537	0.141	-0.685	-0.686
	p			0.031	0.180	0.422	0.006	0.553	0.277	0.058	0.456	0.000	0.000
	n		48	30	13	9	30	37	18	13	30	35	27
RR	r			1	0.636	0.055	0.760	0.626	-0.020	-0.699	-0.626	0.481	0.511
	p				0.026	0.889	0.000	0.000	0.951	0.036	0.000	0.037	0.074
	n			31	12	9	31	31	12	9	31	19	13
LR	r				1	0.035	0.658	0.184	0.712	-0.713	-0.184	0.097	0.139
	p					0.928	0.020	0.568	0.003	0.031	0.568	0.764	0.668
	n				15	9	12	12	15	9	12	12	12
MR	r					1	0.677	-0.640	-0.377	0.634	0.640	0.264	0.245
	p						0.045	0.063	0.317	0.067	0.063	0.567	0.597
	n					9	9	9	9	9	9	7	7
HR	r						1	0.106	0.055	-0.113	-0.106	0.679	0.625
	p							0.570	0.865	0.773	0.570	0.001	0.022
	n						31	31	12	9	31	19	13
RR/SR	r							1	-0.082	-0.862	-1.000	0.128	0.345
	p								0.763	0.000	0.000	0.532	0.136
	n							38	16	13	31	26	20
LR/SR	r								1	-0.693	0.253	0.257	0.097
	p									0.009	0.428	0.237	0.694
	n								26	13	12	23	19
MR/SR	r									1	0.815	-0.806	-0.784
	p										0.008	0.003	0.004
	n									13	9	11	11
HR/SR	r										1	-0.143	-0.650
	p											0.558	0.016
	n										31	19	13
T	r											1	0.736
	p												0.000
	n											63	42
P	r												1
	p												
	n												42

* 表中 T、P 分别表示年均气温和年均降水量 T and P respiration mean annual air temperature and mean precipitation, respectively

2.2 中国森林土壤呼吸 Q_{10} 值

中国森林土壤呼吸 Q_{10} 值介在 1.33 ~ 5.53 之间,平均值为 2.65(表 1)。 Q_{10} 值与年均气温和年均降水量均呈显著的负相关,亦与土壤呼吸呈负相关(表 2)。

2.3 中国森林土壤呼吸的组成

中国森林根系呼吸、枯枝落叶层呼吸、矿质土壤呼吸和异养呼吸变化范围分别在 0.31 ~ 14.34 t C hm⁻² a⁻¹、0.85 ~ 8.27 t C hm⁻² a⁻¹、2.88 ~ 10.90 t C hm⁻² a⁻¹和 1.80 ~ 15.85 t C hm⁻² a⁻¹之间,平均值分别为 3.677 t C hm⁻² a⁻¹、3.196 t C hm⁻² a⁻¹、6.554 t C hm⁻² a⁻¹和 6.210 t C hm⁻² a⁻¹(表 1)。中国森林根系呼吸

与土壤呼吸呈较好的线性相关, R^2 高达 0.86 (图 6)。枯枝落叶层呼吸与土壤呼吸亦呈显著的线性相关, 但相关性较低 ($R^2 = 0.47$) (图 7)。

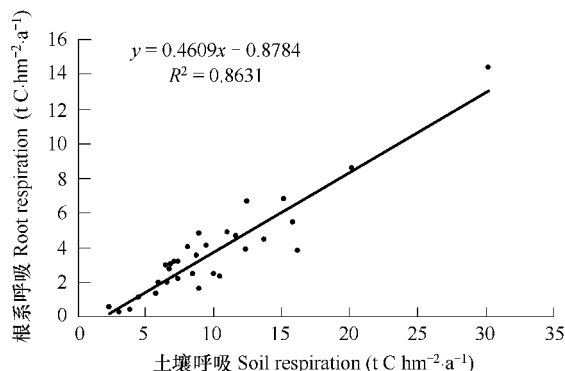


图 6 根系呼吸与土壤呼吸相关关系

Fig. 6 Relationship between root respiration and soil respiration in China's forests

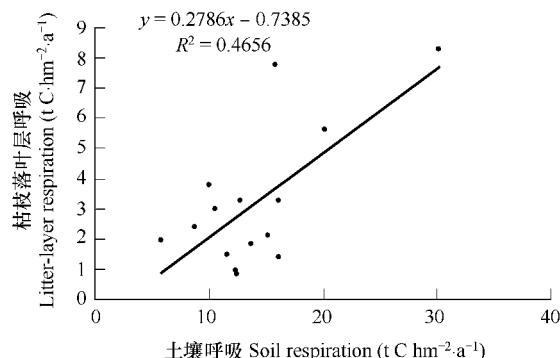


图 7 枯枝落叶层呼吸与土壤呼吸相关关系

Fig. 7 Relationship between litter-layer respiration and soil respiration in China's forests

中国森林土壤异养呼吸与凋落物呈显著的正相关 (图 8), 其相关性高于土壤呼吸与凋落物的相关性。枯枝落叶层呼吸亦与凋落物呈显著的线性关系, R^2 高达 0.61 (图 9)。异养呼吸与自养呼吸间呈显著的线性正相关 (图 10)。

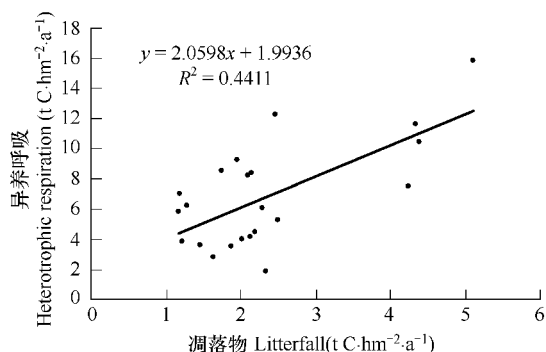


图 8 土壤异养呼吸与凋落物相关关系

Fig. 8 Relationship between heterotrophic respiration and litterfall in China's forests

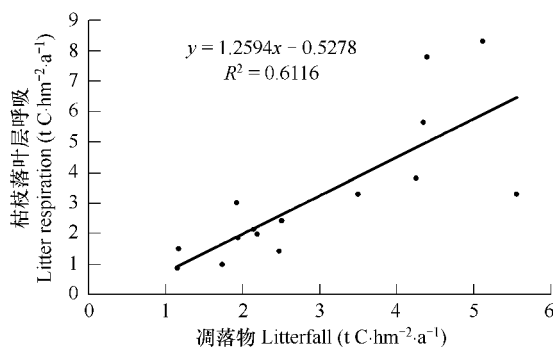


图 9 枯枝落叶层呼吸与凋落物相关关系

Fig. 9 Relationship between litter respiration and litterfall in China's forests

中国森林根系呼吸、枯枝落叶层呼吸、矿质土壤呼吸占土壤呼吸的比例均值分别为 34.7%、20.2% 和 50.2% (表 1), 表明土壤呼吸组成中, 以矿质土壤呼吸比重最大, 而枯枝落叶层呼吸比重最小。矿质土壤呼吸所占比例与气温和降水量呈显著负相关, 而异养呼吸所占比例则与降水量呈显著负相关 (表 2)。根系呼吸所占比例与根系呼吸之间呈渐近线关系, 随根系呼吸增加, 其所占比例先增加, 后逐渐趋向于一稳定值 (45.93%) (图 11)。

3 讨论

3.1 中国森林土壤呼吸

不同森林类型土壤呼吸的差异可能与年均气温、年均降水量的差异有关。本研究表明, 中国森林土壤呼吸速率与年均气温和年均降水量均呈显著正相关, 这与在全球尺度上, 土壤呼吸速率与年均气温和年均降水量均呈显著相关的报道相一致^[4]。刘绍辉和方精云^[18]分析表明全球土壤呼吸量随着纬度的增加而逐渐降低, 亦间接表明气温对土壤呼吸的影响。本研究中中国森林土壤呼吸与年均气温和年均降水量均呈正相关关

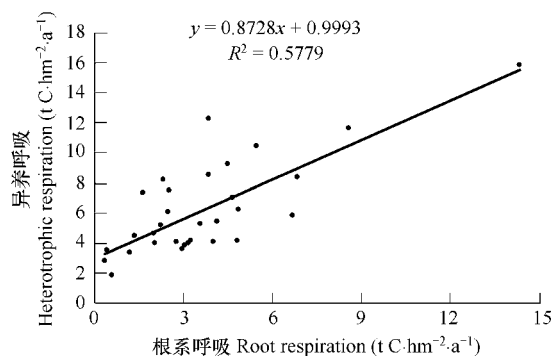


图 10 土壤异养呼吸与自养呼吸相关关系

Fig. 10 Relationship between soil heterotrophic and autotrophic respiration in China's forests

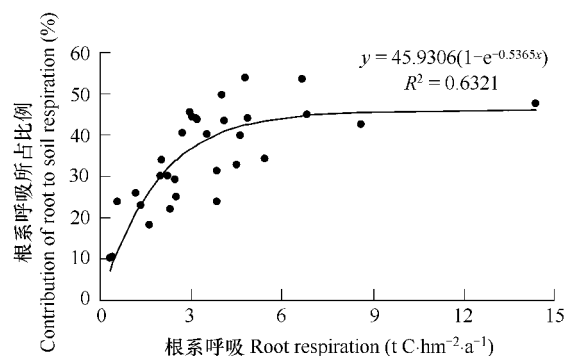


图 11 根系呼吸占土壤呼吸比例与土壤呼吸相关关系

Fig. 11 Relationship between root respiration and root contribution to soil respiration in China's forests

系,这与我国森林区气温和降水量的同向变化有关,如表 2 中表明,我国森林区气温与降水量呈显著的正相关。但本研究中中国森林土壤呼吸与年均降水量的相关性高于年均气温的结论,则与全球尺度上土壤呼吸与年均气温的相关性高于年均降水量的结论不尽相同^[4],表明降水量对我国森林土壤呼吸的影响较气温的大。通过对中国所有森林土壤呼吸与气温建立指数回归方程,得出中国森林土壤呼吸随年平均气温变化的 Q_{10} 值为 1.36。刘绍辉和方精云^[18]研究表明全球土壤呼吸随年平均气温变化的 Q_{10} 值为 1.57。这种差异则可能与所研究的尺度不同有关。

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的报道一致^[2,3]。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。

本文中森林土壤呼吸与森林地上净生产力亦呈显著正相关关系,这与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(呼吸)有关,与他人的研究相一致,如全球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^[2];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^[1];Irvine 和 Law^[19]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^[20]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^[21]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%。在 Michigan 低地和 Alaska 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^[22,23]。

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^[24,25]。Giardina 和 Ryan 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^[26]。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^[3]。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($y = -5.272x + 19.902, R^2 = 0.141, P = 0.255$)。

3.2 中国森林土壤呼吸 Q_{10} 值

本研究中的立地尺度上 Q_{10} 值范围在 1.33 ~ 5.53 之间,大于 Raich 和 Schlesinger 报道的范围(1.3 ~ 3.3)^[4],而介于 Chen 和 Tian 报道的范围(0.9 ~ 14.2)中部^[11]。土壤呼吸 Q_{10} 值小的变化将导致土壤呼吸估计值的较大变化^[27],因而,在全球升温的背景下,有关土壤呼吸(包括各组分)对温度的敏感性问题是目前国

际关注的热点之一。许多生态系统模型(如 Biome-BGC, PnET, TEM 等)中曾假定土壤呼吸的 Q_{10} 为一常数^[28~30]。本研究表明,中国森林土壤呼吸 Q_{10} 与气温呈负相关,这与许多研究发现 Q_{10} 值在温度高时较大,而在温度低时较小相一致^[4,31]。Chen 和 Tian 亦报道全球植被 Q_{10} 值随热带/亚热带、温带、寒温带而增大^[11]。这表明温度升高对北半球高纬区的土壤呼吸的影响将更大。另外,本研究及其他研究中 Q_{10} 值随温度升高而降低的结论间接地支持了土壤呼吸可能存在对温度的适应性,虽然这种温度适应性是否存在还存在争议^[32]。然而,中国森林土壤呼吸 Q_{10} 值与温度的相关性较低,这与 Chen 和 Tian 报道包括热带/亚热带、温带、寒温带在内的全球 Q_{10} 单指数模型中温度仅能解释 Q_{10} 值变化的 36%,而简单线性模型则仅能解释 13% 的变化相一致^[11]。 Q_{10} 值与温度这种低的相关性可能与土壤呼吸组成复杂和 Q_{10} 值影响因素多样有关。Janssens 等曾指出, Q_{10} 值不只是对温度敏感性的一种量度,而是对温度、根生物量和活性、水分条件和其他因子响应的综合结果^[33]。Xu 和 Qi 亦表明 Q_{10} 值与土壤温度和水分紧密相关,而且 Sierra Nevada forest 不同深度的 Q_{10} 值亦有很大的变化^[27]。根呼吸和土壤微生物呼吸亦可能对土壤温度的响应不一^[34~36],而且两者对温度的响应可能随生态系统类型的变化而变化。虽然一些研究表明,土壤水分条件对土壤呼吸 Q_{10} 值有一定影响^[37~39],但有关降水量对 Q_{10} 值如何影响尚无人研究。本研究表明,中国森林土壤呼吸 Q_{10} 值与年均降水量呈显著负相关。土壤呼吸 Q_{10} 值与降水量的相关性原因除了我国森林降水量与气温同步变化有关外,亦可能与降水量在一定程度上反映了土壤水分状况有关,但降水量对土壤呼吸 Q_{10} 值的影响机理还有待于进一步研究。

3.3 中国森林土壤呼吸的组成

本研究中根系呼吸、枯枝落叶层呼吸与土壤呼吸间,及根系呼吸与异养呼吸间呈显著正相关,表明了土壤呼吸各组分均随土壤呼吸的增加而增加,这种相关性产生的原因是土壤呼吸及其各种组分(根系呼吸与异养呼吸)均紧密依赖于植物所提供的光合产物,因而随光合产物的增加,土壤呼吸及各组分均增加。本研究中中国森林根系呼吸与土壤呼吸呈高度的线性相关,这与 Bond-Lamberty 等研究表明全球根系呼吸与土壤呼吸紧密相关的结果类似($R_A^{0.5} = -7.97 + 0.93R_S^{0.5}$, $R^2 = 0.87$, $P < 0.001$)^[8]。

本研究中森林土壤异养呼吸与凋落物量呈显著正相关,且相关性高于土壤呼吸与凋落物的相关性,表明凋落物可更好地解释土壤呼吸中的异养部分,但这种预测能力仍然较低(R^2 仅为 0.44, 图 8),表明了凋落物与土壤异养呼吸关系的复杂性。枯枝落叶层呼吸主要来自地上部分凋落物量的分解,假定成熟林的地下碳库处于稳定状态,则地上部分的年凋落物量与每年的枯枝落叶层呼吸数量相等。本研究中,枯枝落叶层呼吸与凋落物间呈显著的正相关(R^2 高达 0.61);当强制截距为 0 时,线性拟合方程的系数为 1.1,接近于 1,表明了枯枝落叶层呼吸大致与年凋落量相等。

中国森林枯枝落叶层呼吸、根系呼吸和矿质土壤呼吸占土壤呼吸的比例均值分别为 20.2%、34.7% 和 50.2%,这与 Sulzman 等报道老龄 Douglas-fir 林的根系、地上凋落物呼吸和地下凋落物对土壤呼吸的贡献分别为 23%、19% 和 58%^[40];Rey 等报道栎树矮林(coppice oak forest)根系、地上凋落物呼吸和地下凋落物对土壤呼吸的贡献分别为 23.3、21.9 和 54.8% 的结果相似^[41]。但与 Bowden 等报道温带阔叶混交林根系、地上凋落物呼吸和地下凋落物的贡献分别为 33%、37% 和 30% 的不尽相同^[42]。

中国森林土壤呼吸中根系呼吸所占比例为 10.03% ~ 65.0% (表 2),与一般报道的根系呼吸占土壤呼吸的 10% ~ 90% 的结果相似^[7];中国森林根系呼吸所占比例平均值为 34.7%,与世界范围内根呼吸占土壤呼吸的比例主要集中在 40% ~ 60% 相比偏低^[4,6,19,42]。

Bond-Lamberty 等发现根系呼吸占土壤呼吸比例与土壤呼吸间呈渐近线关系,并用对数方程进行了拟合($R^2 = 0.38$)^[8]。本研究中亦有类似趋势,但 R^2 较低;但本研究发现,根系呼吸占土壤呼吸比例与根系呼吸间则呈明显的渐近线关系,渐近值为 45.9%。根系呼吸所占比率的这种变化趋势表明了根系呼吸与异养呼吸随土壤呼吸数量变化而发生不同步变化,即土壤呼吸较小时,根系呼吸所占比例较小,随土壤呼吸数量的增大,根系呼吸所占比例逐渐增加而趋于一个稳定值。

利用本研究收集的数据计算表明,中国森林成熟林的年凋落物量占土壤呼吸比例平均值为 25.8%,其数

值与本研究中国森林枯枝落叶层呼吸所占比例 20.2% 接近。

3.4 影响分析结果的可能因素

本文所收集到的土壤呼吸测定方法不一,可能对本文的分析结果产生一定影响。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(中亚热带)获得,运用到其它森林可能产生一定误差。因为碱液吸收法和 IRGA 法结果间的关系可能受到不同地区气候条件、土壤条件的影响而改变。理想的解决办法是在不同森林气候类型内分别建立碱液吸收法和 IRGA 法的校正方程。其次,IRGA 法和静态箱-气相色谱法以及不同的 IRGA 方法间测定土壤呼吸结果的差异亦可能对本文的分析结果产生一定影响。另外,本文所收集的数据大部分来自温带森林,而热带和亚热带森林的数据偏少,这种数据分布的不平衡亦可能对本文分析结果产生某种影响。

References:

- [1] Schlesinger W H, Andrews J A. Soil respiration and the global carbon cycle. *Biogeochemistry*, 2000, 48: 7—20.
- [2] Raich J W and Nadelhoffer K J. Belowground carbon allocation in forest ecosystems: global trends. *Ecology*, 1989, 70(5): 1346—1354
- [3] 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.
- [4] Raich J W and Schlesinger W H. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate. *Tellus*, 1992, 44B: 81—92
- [5] Raich J W and Potter C S. Global patterns of carbon dioxide emissions from soils. *Global Biogeochem. Cycles*, 1995, 9: 23—36.
- [6] Raich J W and Tufekcioglu A. Vegetation and soil respiration: Correlations and controls. *Biogeochemistry*, 2000, 48: 71—90.
- [7] Hanson P J, Edwards N T, Garten C T, *et al.* Separating root and microbial contributions to soil respiration: A review of methods and observations. *Biogeochemistry*, 2000, 48(1): 115—146.
- [8] Bond-Lamberty B, Wang C K and Gower ST. A global relationship between the heterotrophic and autotrophic components of soil respiration? *Global Change Biology*, 2004, 10: 1756—1766.
- [9] Hibbard K. A. Law B. E. Reichstein M, *et al.* An analysis of soil respiration across northern hemisphere temperate ecosystems. *Biogeochemistry*, 2005, 73: 29—70.
- [10] Campbell J L, Law B E. Forest soil respiration across three climatically distinct chronosequences in Oregon. *Biogeochemistry*, 2005, 73: 109—125.
- [11] Chen H, Tian H Q. Does a general temperature-dependent Q_{10} model of soil respiration exist at biome and global scale? *Journal of Integrative Plant Biology*, 2005, 47 (11): 1288—1302.
- [12] Bekku Y, Koizumi H, Nakadai T, *et al.* Examination of four methods for measuring soil respiration. *Applied Soil Ecology*, 1997, 5: 247—254.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] Liu S H, Fand J Y. Effect factors of soil respiration and the temperature's effects on soil respiration in the global scale. *Acta Ecologica Sinica*, 1997, 17(5): 469—476.
- [19] Irvine J and Law B E. Contrasting soil respiration in young and old-growth ponderosa pine forests. *Global Change Biology*, 2002, 8(12): 1183—1193.
- [20] Weber M G. Forest soil respiration after cutting and burning in immature aspen ecosystems. *For. Ecol. Manage.*, 1990, 31: 1—14
- [21] Raich J W. Aboveground productivity and soil respiration in three Hawaiian rain forests. *Forest Ecology and Management*, 1998, 107: 309—318.
- [22] 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.

- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] Nadelhoffer K J, Raich J W, Aber J D. A global trend in belowground carbon allocation: comment. *Ecology*, 1998, 79(5): 1822—1825.
- [26] 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.
- [27] Xu M, Qi Y. Spatial and seasonal variations of Q_{10} determined by soil respiration measurements at a Sierra Nevada forest. *Global Biogeochem Cycles*, 2001, 15: 687—696.
- [28] Aber J D, Ollinger S W, Driscoll C T. Modeling nitrogen saturation in forest ecosystems in responses to land use and atmospheric deposition. *Ecol Model*, 1997, 101: 61—78.
- [29] Hunt E R Jr, Piper S C, Nemani R, Keeling C D, Otto R D, Running S R. Global net carbon exchange and intra-annual atmospheric CO₂ concentrations predicted by an ecosystem process model and three-dimensional atmospheric transport model. *Global Biogeochem Cycles*, 1996, 10: 431—456.
- [30] Tian H, Melillo J M, Kicklighter D W, McGuire D A, Helfrich J V K III. The sensitivity of terrestrial carbon storage to historical climatic variability and atmospheric CO₂ in the United States. *Tellus*, 1999, 51B: 414—452.
- [31] Kirschbaum M U F. Will changes in soil organic carbon act as a positive or negative feedback on global warming?. *Biogeochemistry*, 2000, 48: 21—51.
- [32] Kirschbaum M U F. Soil respiration under prolonged soil warming are rate reductions caused by acclimation or substrate loss?. *Global Change Biology*, 2004, 10: 1870—1877.
- [33] Janssens I A, Dore S, Epron D, *et al.* Climatic influences on seasonal and spatial differences in soil CO₂ efflux. In: Valentini R, ed. *Canopy Fluxes of Energy, Water and Carbon Dioxide of European Forests*. Berlin: Springer, 2003. 235—256.
- [34] Boone R D, Nadelhoffer K J, Canary J D, Kaye J P. Roots exert a strong influence on the temperature sensitivity of soil respiration. *Nature*, 1998, 396: 570—572.
- [35] Chen H, Harmon M E, Griffiths R P, Hicks B. Effects of temperature and moisture on carbon respired from decomposing woody roots. *For Ecol Manage*, 2000, 138: 51—64.
- [36] 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.
- [37] Smith V R. Moisture, carbon and inorganic nutrient controls of soil respiration at a sub-Antarctic island. *Soil Biology & Biochemistry*, 2005, 37: 81—91.
- [38] Conant R T, Dalla-Betta P, Klopatek C C, *et al.* Controls on soil respiration in semiarid soil. *Soil Biology & Biochemistry*, 2004, 36: 945—951.
- [39] Sheng H, Yang Y S, Chen G S, *et al.* Controls on the temperature sensitivity of soil heterotrophic respiration: BerlinQ Berlin₁₀ variability and analysis. *Journal of Subtropical Resources and Environment*, 2006, 1(1): 74—83.
- [40] Sulzman E W, Brant J B, Bowden R D, *et al.* Contribution of aboveground litter, belowground litter, and rhizosphere respiration to total soil CO₂ efflux in an old growth coniferous forest. *Biogeochemistry*, 2005, 73: 231—256.
- [41] Rey A, Pegoraro E, Tedeschi V, *et al.* Annual variation in soil respiration and its components in a coppice oak forest in Central Italy. *Global Change Biol.*, 2002, 8(9): 851—866.
- [42] Bowden R D, Nadelhoffer K J, Boone R D, *et al.* Contributions of above ground litter, below ground litter, and root respiration to total soil respiration in a temperate mixed hardwood forest. *Can. J. For. Res.*, 1993, 23(7): 1402—1407.
- [43] Liu Y. Soil carbon efflux in the typical forest ecosystems of Changbai Mountains. Doctor Thesis for SAE Institute of CAS, 2005.
- [44] 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.
- [45] Tang L Z, Haibara 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.
- [46] 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.
- [47] Liu S H, Fang J Y, Makoto K. Soil respiration of mountainous temperate forests in Beijing, China. *Acta Phytocologica Sinica*, 1998, 22(2): 119—126.
- [48] 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.
- [49] Luo T S, Chen B F, Li Y D, *et al.* Litter and soil respiration in a tropical mountain rain forest in Jianfengling, Hainan Island. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21(12): 2013—2017.
- [50] 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.
- [51] 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.
- [52] 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.
- [53] 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.
- [54] 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.
- [55] 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.
- [56] 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.
- [57] 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.
- [58] Huang C C, Ge Y, Chang J, *et al.* Studies on the soil respiration of three woody plant communities in the east mid-subtropical zone, China. *Acta Ecologica Sinica*, 1999, 19(3): 324—328.
- [59] Ran J C, He S Y, Cao J H. Preliminary study on soil CO₂ transfer in subtropical forest Karst area. *Guizhou Geology*, 2001, 18(4): 247—252.
- [60] Fang Q L, Sha L Q. Soil respiration in a tropical seasonal rain forest and Rubber plantation in Xishuangbanna, Yunman, SW China. *Journal Plant Ecology* (formerly *Acta Phytocologica Sinica*), 2006, 30(1): 97—103.
- [61] 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.
- [62] Sha L Q, Zheng Z, Tang J W, *et al.* Soil respiration in tropical monsoon rain forest in Xishuangbanna. *Science in China Ser. D Earth Sciences*, 2004, 34 (Sp.2): 167—174.
- [63] 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.
- [64] 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.
- [65] Huang Y. Studies on soil quality under pure Chinese fir stand, mixtures of Chinese fir-broadleaves and pure broadleaved stand ecosystem. Doctor Thesis of Research Centre for Eco-environmental Sciences, CAS. 2004.
- [66] 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.
- [67] Wu J G, Zhang X Q, Xu D Y. The temporal variations of soil respiration under different land use in Liupan Mountain forest zone. *Environmental Science*, 2003, 24(6): 23—32.
- [68] Yang J Y, Wang C K. Soil carbon storage and flux of temperate forest ecosystems in northeastern China. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(1): 2875—2882.
- [69] Sun X Y, Qiao J, Tan X. Flux of Carbon dioxide (CO₂) in Temperate Forest Soils. *Journal of Northeast Forestry University*, 2001, 29(1): 34—39.
- [70] Jiang L F, Shi F C, Li B, *et al.* Separating rhizosphere respiration from total soil respiration in two larch plantations in northeastern China. *Tree Physiology*, 25, 1187—1195.
- [71] Lei P F. Preliminary study on soil carbon storage of Chinese fir plantation and its formation mechanism. Master Dissertation for Central South Forestry University, 2004.
- [72] 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.
- [73] Lin B. Litter of the artificial and natural subalpine *Picea* forest in western Sichuan. Master Thesis for Chengdu Institute of Biology, CAS, 2002.

- [74] Sheng H. Carbon pools and belowground carbon balance in a natural mid-subtropical evergreen broad-leaved forest. Master Thesis for Fujian Normal University, 2007.
- [75] 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.
- [76] Zhou Z T, Cheng S K, Liu Y F, *et al.* CO₂ emission of soil under different land-use types in subtropical red soil hilly areas in China: preliminary exploration. *Resources Science*, 2002, 24(2): 83–87.
- [77] Ran J C, He J Y, Cao J H, *et al.* A preliminary research on CO₂ release in subtropical karst forest soil. *Guizhou Science*, 2002, 20(2): 42–47.
- [78] Fang X, Tian D L, Zhang S J. A study of forest soil CO₂ release rates in the artificial forests of *Cinnamomum camphora* (L.) Presl. *Journal of Central South Forestry University*, 2002, 22(1): 11–16.
- [79] Lin L S, Han S J, Wang Y S, *et al.* Soil CO₂ flux in several typical forests of Mt. Changbai. *Chinese Journal of Ecology*, 2004, 23(5): 42–45.
- [80] Zhou C Y, Zhou G Y, Wang Y H, *et al.* Soil respiration of a coniferous and broad-leaved mixed forest in Dinghushan Mountain, Guangdong Province. *Journal of Beijing Forestry University*, 2005, 27(4): 23–27.
- [81] Zhang X Q, Wang W J, Zu Y G, *et al.* The Difference between Different components of soil respiration in several types of forests in Northeastern China. *Journal of Northeast Forestry University*, 2005, 33(2): 46–47, 73.
- [82] Yang Z J. Carbon storage and balance in *Cunninghamia lanceolata* and *Schima superba* plantations. Dissertation for Master's Degree of Fujian Agriculture & Forestry University, 2007.
- [83] Huang S D. Effects of vegetation reconstruction on soil respiration in degraded red soil. Dissertation for Master's Degree of Fujian Agriculture & Forestry University, 2007.
- [84] Wang X, Zhou G S, Jiang Y L, *et al.* Comparison of soil respiration in broad-leaved Korean pine forest and reclaimed cropland in Changbai Mountains, China. *Acta Phytocologica Sinica*, 2006, 30(6): 887–893.

参考文献:

- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 刘绍辉, 方精云. 土壤呼吸的影响因素及全球尺度下温度的影响. *生态学报*, 1997, 17(5): 469–476.
- [36] 杨玉盛, 董彬, 谢锦升, 等. 林木根系呼吸及测定方法进展. *植物生态学报*, 2004, 28(3): 426–434.
- [39] 盛浩, 杨玉盛, 陈光水, 等. 土壤异养呼吸温度敏感性 (BerlinQ Berlin₁₀) 的影响因子. *亚热带资源与环境学报*, 2006, 1(1): 74–83.
- [43] 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.
- [45] 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.
- [46] 刘绍辉, 方精云, 清田信. 北京山地温带森林的土壤呼吸. *植物生态学报*, 1998, 22(2): 119–126.
- [48] 罗辑, 杨忠, 杨清伟. 贡嘎山东坡峨眉冷杉林区土壤 CO₂ 排放. *土壤学报*, 2000, 37(3): 402–409.
- [49] 骆土寿, 陈步峰, 李意德, 等. 海南岛尖峰岭热带山地雨林土壤和凋落物呼吸研究. *生态学报*, 2001, 21(12): 2013–2017.
- [50] 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.
- [51] 刘建军, 王得祥, 雷瑞德, 吴钦孝. 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.
- [52] 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.
- [53] 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.
- [54] 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.
- [55] 杨玉盛, 郭剑芬, 林鹏, 等. 格式栲天然林与人工林凋落物数量、养分归还及凋落叶分解. *生态学报*, 2003, 23(7): 1278–1289.
- [56] 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.
- [57] 黄承才, 张信娣, 沈军全, 陈剑波. 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.
- [58] 黄承才, 葛滢, 常杰, 等. 中亚热带东部三种主要木本群落土壤呼吸的研究. *生态学报*, 1999, 19(3): 324–328.
- [59] 冉景丞, 何师意, 曹建华. 亚热带森林岩溶区土壤 CO₂ 迁移动态初步研究. *贵州地质*, 2001, 18(4): 247–252.
- [60] 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): 97–103.
- [61] 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.
- [62] 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.

- [63] 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
- [64] 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.
- [65] 黄宇. 杉木纯林、杉-阔混交林与阔叶纯林生态系统土壤质量研究. 中国科学院生态环境研究中心博士学位论文, 2004.
- [66] 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.
- [67] 吴建国,张小全,徐德应. 六盘山林区几种土地利用方式土壤呼吸时间格局. 环境科学, 2003, 24(6): 23 ~ 32.
- [68] 杨金艳,王传宽. 东北东部森林生态系统土壤碳贮量和碳通量. 生态学报, 2005, 25(1): 2875 ~ 2882.
- [69] 孙向阳,乔杰,谭笑. 温带森林土壤中的 CO₂ 排放通量. 东北林业大学学报, 2001, 29(1): 34 ~ 39.
- [71] 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.
- [72] 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.
- [73] 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.
- [74] 盛浩. 细柄阿丁枫天然群落碳储量和地下碳平衡. 福建师范大学硕士学位论文, 2007.
- [76] 周志田,成升魁,刘允芬,等. 中国亚热带红壤丘陵区不同土地利用方式下土壤 CO₂ 排放规律初探. 资源科学, 2002, 24(2): 83 ~ 87.
- [77] 冉景丞,何师意,曹建华,等. 亚热带喀斯特森林土壤 CO₂ 排放量动态研究. 贵州科学, 2002, 20(2): 42 ~ 47.
- [78] 方晰,田大伦,张仕吉. 樟树人工林林地 CO₂ 释放量的研究. 中南林学院学报, 2002, 22(1): 11 ~ 16.
- [79] 林丽莎,韩士杰,王跃思,等. 长白山四种林分土壤 CO₂ 释放通量的研究. 生态学杂志, 2004, 23(5): 42 ~ 45.
- [80] 周存宇,周国逸,王迎红,等. 鼎湖山针阔叶混交林土壤呼吸的研究. 北京林业大学学报, 2005, 27(4): 23 ~ 27.
- [81] 张宪权,王文杰,祖元刚,等. 东北地区几种不同林分土壤呼吸组分的差异性. 东北林业大学学报, 2005, 33(2): 46 ~ 47, 73.
- [82] 杨智杰. 杉木、木荷人工林碳吸存与碳平衡研究. 福建农林大学硕士学位论文, 2007.
- [83] 黄石德. 侵蚀退化红壤区植被重建对土壤呼吸的影响. 福建农林大学硕士学位论文, 2007.
- [84] 王旭,周广胜,蒋延玲,等. 长白山红松针阔混交林与开垦农田土壤呼吸作用比较. 植物生态学报, 2006, 30(6): 887 ~ 893.

附录: 中国森林土壤呼吸数据

Appendix: Published data of soil respiration in China's forests

森林类型 Forest type	年龄 Age (a)	SR ⁽¹⁾	方法 ⁽²⁾ Method	RR ⁽¹⁾	LR ⁽¹⁾	MR ⁽¹⁾	LF ⁽¹⁾	Q ₁₀	ANPP ⁽¹⁾	T ⁽¹⁾	P ⁽¹⁾	参考文献 Reference
阔叶红松林 Mixed broadleaved-Korean pine		7.392	IRGA	43.6			2.118	2.40		-7.3 ~ -4.9	600 ~ 900	[43]
红松云冷杉林 Mixed Korean pine-spruce fir		7.182	IRGA	44.1			2.009	2.31		-7.3 ~ -4.9	600 ~ 900	[43]
岳桦林 <i>Betula ermanii</i>		6.841	IRGA	44.4			1.211	1.85		-7.3 ~ -4.9	600 ~ 900	[43]
岳桦云冷杉林 Mixed <i>Betula ermanii</i> -spruce fir		6.507	IRGA	45.5			1.456	2.40		-7.3 ~ -4.9	600 ~ 900	[43]
季风常绿阔叶林 Monsoon evergreen broadleaved forest	400	15.860	SCGC	34.3	49.0		4.380	2.27		21	1927	[44]
针阔叶混交林 Mixed coniferous-broadleaved forest	100	10.010	SCGC	25.0	38.0		4.240	2.39		21	1927	[44]
针叶林 Coniferous	50 ~ 60	5.780	SCGC	22.8	34.0		2.190	2.41		21	1927	[44]
杨树林 <i>Populus deltoides</i>	10	5.500	SCGC				2.290	2.92		14.5	1000	[45]
白桦林 <i>Betula platyphylla</i>		3.087	IRGA	10.0			1.630	4.10	3.73	4.8	611.9	[46,47]
辽东栎林 <i>Quercus liaotungensis</i>		3.903	IRGA	10.5			1.870	2.56	3.2	4.8	611.9	[46,47]
油松林 <i>Pinus tabulaeformis</i>	30	2.362	IRGA	23.6			2.340		5.89	4.8	611.9	[46,47]
冷杉林 <i>Abies Fabri</i>		21.749	IRGA				1.790			3.7	1817	[48]
冷杉林 <i>Abies Fabri</i>	50	12.320	IRGA				1.500			3.7	1817	[48]
热带山地雨林 Tropical mountain rain forest			IRGA		2.8		4.800			19.7	2651.6	[49]
热带山地雨林 Tropical mountain rain forest			IRGA		1.7		4.499			19.7	2651.6	[49]
热带山地雨林 Tropical mountain rain forest	35	8.243	AA	8.8	9.9		4.799		8.62	19.7	2651.6	[50]
油松林 <i>Pinus tabulaeformis</i>	55	6.088	AA	31.1	7.8	61.0	1.744	1.68	7.36	8 ~ 10	900 ~ 1200	[51,52]
锐齿栎林 <i>Quercus aliena</i> var. <i>acuteserrata</i>	45	7.705	AA	23.8	8.7	67.5	2.470	1.88	12.11	8 ~ 10	900 ~ 1200	[51,52]
杉木林 Chinese fir	11	5.908	AA				1.141		6.08	16.8	1250	[53]
格氏栲天然林 <i>Castanopsis kawakamii</i>		13.742	AA	47.5	27.4	25.1	5.097	1.33		19.1	1749	[54,55]
格氏栲人工林 <i>Castanopsis kawakamii</i>	33	9.439	AA	42.5	27.9	29.6	4.337	1.63	10.79	19.1	1749	[54,55]
杉木林 Chinese fir	33	4.543	AA	40.2	27.0	32.8	2.502	1.92	5.55	19.1	1749	[54,55]
马尾松林 <i>Pinus massoniana</i>	25	6.908	IRGA				2.799	2.84		15	1400	[56,57]
青冈林 <i>Quercus glauca</i>		6.578	IRGA					2.54		16.7	1410	[58]
常绿落叶混交林 Mixed evergreen-deciduous		5.345	AA							15.3	1750 ~ 1950	[59]
热带季雨林 Tropical monsoon rain forest		7.200	AA				4.042	2.16		21.5	1557	[60,61]
橡胶林 <i>Hevea brasiliensi</i>	20	7.636	AA				4.728	2.18		21.5	1557	[60,61]
热带季雨林 Tropical monsoon rain forest		12.736	SCGC		25.5		5.552	2.03	11.41	21.4	1557	[62,63]
阔叶红松林 Mixed broadleaved-Korean pine	180	10.599	SCGC		28.0		1.920		11.62	-7.3 ~ -4.9	600 ~ 900	[62,63]
杉木林 Chinese fir	20	2.868	IRGA				2.297	2.36		16.5	1200 ~ 1400	[64,65]
常绿阔叶林 Evergreen broadleaved		5.155	IRGA					2.06		16.5	1200 ~ 1400	[64]
松阔混交林 Mixed pine-broadleaved		9.990	IRGA				2.236		7.23	19.6	1743.88	[66]
马尾松林 <i>Pinus massoniana</i>		8.462	IRGA				1.770		6.15	19.6	1743.88	[66]
杂灌林 Mixed shrubbery		3.960	AA							5.8	400 ~ 676	[67]
山杨林 <i>Populus davidanda dode</i>		4.060	AA							5.8	400 ~ 676	[67]
辽东栎林 <i>Quercus liaotungensis</i>		4.510	AA							5.8	400 ~ 676	[67]
落叶松 Larch	13	4.310	AA							5.8	400 ~ 676	[67]
落叶松 Larch	18	4.110	AA							5.8	400 ~ 676	[67]
落叶松 Larch	25	5.550	AA							5.8	400 ~ 676	[67]

续表

森林类型 Forest type	年龄 Age (a)	SR ⁽¹⁾	方法 ⁽²⁾ Method	RR ⁽¹⁾	LR ⁽¹⁾	MR ⁽¹⁾	LF ⁽¹⁾	Q ₁₀	ANPP ⁽¹⁾	T ⁽¹⁾	P ⁽¹⁾	参考文献 Reference
杂木林 Mixed woodland	61	9.510	IRGA	43.2				3.55		2.7	600~800	[68]
硬阔叶林 Hardwood	52	8.920	IRGA	53.8				2.94		2.7	600~800	[68]
杨桦林 Mixed poplar-birch	55	8.120	IRGA	49.5				3.54		2.7	600~800	[68]
蒙古栎林 <i>Quercus mongolica</i>	56	6.780	IRGA	40.3				2.32		2.7	600~800	[68]
红松林 Korean pine	51	5.960	IRGA	33.7				2.76		2.7	600~800	[68]
落叶松林 Larch	46	4.510	IRGA	25.7				2.57		2.7	600~800	[68]
侧柏新造林地 <i>Platycladus orientalis</i>	4	2.871	AA							11.6	630	[69]
侧柏幼林 <i>Platycladus orientalis</i>	15	2.854	AA							11.6	630	[69]
侧柏林 <i>Platycladus orientalis</i>	35	2.862	AA							11.6	630	[69]
落叶松 Larch	31		IRGA	25.0				3.94		2.8	724	[70]
落叶松 Larch	17		IRGA	65.0				3.70		2.8	724	[70]
杉木林 Chinese fir	16	2.857	IRGA				0.557			16.8	1100~1400	[71]
冷杉林 <i>Abies Fabri</i>		8.543	IRGA	29.0			2.288	2.73		6~12	600~1100	[72,73]
红桦冷杉混交林 Mixed birch-fir		6.623	IRGA	30.0				2.99		6~12	600~1100	[72]
云杉林 <i>Picea asperata</i>	74	8.939	IRGA	18.0				2.28		6~12	600~1100	[72]
云杉林 <i>Picea asperata</i>	44	10.487	IRGA	22.0			2.102	2.44		6~12	600~1100	[72,73]
云杉林 <i>Picea asperata</i>	34	11.061	IRGA	44.0			1.282	3.09		6~12	600~1100	[72,73]
云杉林 <i>Picea asperata</i>	24	7.447	IRGA	30.0				5.53		6~12	600~1100	[72]
细柄阿丁枫林 <i>Altingia gracilipes</i>		16.140	IRGA		20.1		3.490			19.4	1731.4	[74,75]
杉木林 Chinese fir	14	9.325	IRGA					1.68		18.6	1361	[76]
常绿阔叶林 Evergreen broadleaved forest		5.337	AA							15.3	1750~1950	[77]
樟树林 <i>Cinnamomum camphora</i>	15	6.150	AA							17.4	1430.8	[78]
阔叶红松林 Mixed broadleaved-Korean pine					17.5					2.8	600~900	[79]
山杨白桦林 Mixed poplar-birch					30.1					2.8	600~900	[79]
山杨林 <i>Populus davidiana</i>					14.2					2.8	600~900	[79]
白桦林 <i>Betula platyphylla</i>					26.6					2.8	600~900	[79]
针阔叶混交林 Mixed conifer-broadleaved forest					42.0			2.62		20.9	1956	[80]
落叶松林 Larch	35	5.880		34.9	6.0	61.6		4.37		2.8	723.8	[81]
红松林 Korean pine	35			20.1	10.3	69.7		3.63		2.8	723.8	[81]
樟子松林 <i>Pinus sylvestris</i> var. <i>mongolica</i> Lito	35			26.9	18.2	67.7		2.89		2.8	723.8	[81]
白桦林 <i>Betula platyphylla</i>	35			28.7	16.2	55.1		2.50		2.8	723.8	[81]
长白松林 Changpai Scotch Pine				38.1				2.44		3.9	700.5	[43]
杉木林 Chinese fir	20	12.440	IRGA	53.5	6.8	39.6	1.160	2.56	3.66	18.7	1663.7	[82]
木荷林 <i>Schinus superba</i>	20	15.160	IRGA	45.0	13.9	41.2	2.140	2.68	5.84	18.7	1663.7	[82]
马尾松林 <i>Pinus massoniana</i>	>20	11.640	IRGA	39.9	12.8	47.3	1.175	2.18		20.1	1876	[83]
针阔次生林 Mixed conifer-broadleaved forest	60~100	13.730	IRGA	32.6	13.5	54.0	1.951	1.97		20.1	1876	[83]
红松针阔混交林 Mixed Korean pine-broadleaved forest	180	7.294	IRGA					2.92		0.9~3.9	632.8~782.4	[84]

(1) SR, 土壤呼吸 soil respiration ($\text{t C hm}^{-2} \text{a}^{-1}$); RR, 根系呼吸 root respiration ($\text{t C hm}^{-2} \text{a}^{-1}$); LR, 枯枝落叶层呼吸 litter respiration ($\text{t C hm}^{-2} \text{a}^{-1}$); MR, 矿物质土壤呼吸 mineral soil respiration ($\text{t C hm}^{-2} \text{a}^{-1}$); LF, 凋落物量 litterfall ($\text{t C hm}^{-2} \text{a}^{-1}$); ANPP, 地上净生产力 aboveground net primary production ($\text{t C hm}^{-2} \text{a}^{-1}$); T, 年平均气温 mean air temperature ($^{\circ}\text{C}$); P, 年平均降水量 mean annual precipitation (mm); (2) IRGA, 红外气体分析法 infrared gas analysis method; SCGC, 静态箱-气相色谱法 Static chamber - gas chromatogram method; AA, 碱吸收法 alkaline absorption method