

湖南会同林区毛竹林地的土壤呼吸

范少辉¹, 肖复明^{2,*}, 汪思龙³, 官凤英¹, 于小军³, 申正其³

(1. 国际竹藤网络中心, 北京 100102; 2. 江西省林业科学院, 南昌 330032;

3. 中国科学院会同森林生态实验站, 湖南会同森林生态系统国家野外观测研究站, 会同 418307)

摘要:采用 CID-301PS 光合分析仪(配带土壤呼吸室),对湖南会同林区毛竹林地土壤呼吸进行测定,结果表明,毛竹林地土壤总呼吸速率、异养呼吸速率、自养呼吸速率及凋落物呼吸速率的年平均值分别为 2.13 、 1.44 、 0.69 $\mu\text{molCO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 0.31 $\mu\text{molCO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,并呈现明显的季节变化规律和日变化规律,季节变化曲线呈单峰型,表现为 1~7 月份随着气温、地温的升高呈上升的趋势,在 8 月达年呼吸速率的最大值,分别达 4.95 、 3.01 、 1.94 $\mu\text{molCO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 0.80 $\mu\text{molCO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,此后随温度的降低而呈逐渐递减的趋势,直到翌年的 1 月份或 2 月份,分别为 0.76 、 0.70 、 0.06 $\mu\text{molCO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 0.05 $\mu\text{molCO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 。日变化曲线表现为单峰形态,一般也是随着温度的升高而加大,随着温度的降低而减小。 $6:00\sim 14:00$,随着土壤温度的升高而增加,一般在 $16:00\sim 18:00$ 出现最高峰,此后,一直递减,直到次日 $4:00\sim 8:00$ 。由此计算出毛竹林地土壤年释放 CO_2 量为 $33.94\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$,其中,林地异养呼吸、自养呼吸和凋落物呼吸分别占总呼吸的 59.5% 、 28.3% 和 12.2% 。

关键词:毛竹林;土壤呼吸;自养呼吸;异养呼吸;凋落物呼吸

文章编号:1000-0933(2009)11-5971-07 中图分类号:Q948 文献标识码:A

Soil respiration of moso bamboo plantation in Huitong, Hu'nan Province

FAN Shao-Hui¹, XIAO Fu-Ming^{2,*}, WANG Si-Long³, GUAN Feng-Ying¹, YU Xiao-Jun³, SHEN Zheng-Qi³

1 International Centre for Bamboo and Rattan, Beijing 100102, China

2 Jiangxi Academy of Forestry, Nanchang 330032, China

3 Huitong Experimental Station of Forest Ecosystem, Chinese Academy of Sciences; Huitong National Research Station of Forest Ecosystem, Huitong 418307, China

Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(11): 5971~5977.

Abstract: The dynamics of CO_2 concentration in Moso bamboo (*Phyllostachys edulis*) plantation was studied with CID-301 portable photosynthesis system in Huitong County, Hunan Province. The results showed that the soil total respiration rate, heterotrophic respiration rate, autotrophic respiration rate and litter annual respiration rate of Moso bamboo plantation were 2.13 , 1.44 , 0.69 and 0.31 $\mu\text{molCO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, respectively. It was obvious that soil respiration rate exhibited strongly annual and daily dynamic pattern in Moso bamboo plantation. The annual dynamic pattern was represented with a single-peak curve. The respiration rates increased with increasing atmospheric and soil temperature from January to July. Total soil total respiration rate, heterotrophic respiration rate, autotrophic respiration rate and litter respiration rate reached their highest values in August, being 4.95 , 3.01 , 1.94 and 0.80 $\mu\text{molCO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, respectively. All of these respiration rates decreased gradually with falling temperature from August to January or February in the next year. At this time, the respiration rates reached their lowest values, which were 0.76 , 0.70 , 0.06 and 0.05 $\mu\text{molCO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, respectively. The daily variation of total soil respiration rate, heterotrophic respiration rate, autotrophic respiration rate and litter respiration rate of Moso bamboo plantation could also be represented with a single-peak curve. They usually showed a strong

基金项目:国家“十一五”科技支撑计划资助项目(No. 2006BAD19B0104)

收稿日期:2009-01-08; **修订日期:**2009-03-18

致谢:本研究得到中国科学院会同森林生态实验站和湖南会同森林生态系统国家野外科学观测研究站开放基金的支持,中国科学院会同森林生态实验站邓仕坚、张秀永等参与了部分数据采集工作,在此一并致谢。

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: jxxiaofuming@163.com

consistency with temperature. From 6:00 to 14:00, the respiration rates increased with increasing temperature, and reached the highest value from 16:00 to 18:00. After this time, they decreased until the time from 4:00 to 8:00 in next day. The amount of CO₂ released from Moso bamboo plantation was 33.94tCO₂·hm⁻²·a⁻¹, including 59.5% heterotrophic respiration, 28.3% autotrophic respiration and 12.2% litter respiration.

Key Words: Moso bamboo plantation; soil respiration; autotrophic respiration; heterotrophic respiration; litter respiration

全球性温室效应、气候变暖等生态问题严重威胁人类生存和社会经济的可持续发展,已成为全世界共同关注的焦点问题之一。据 IPCC(1990 年)公布的数据,大气中 CO₂ 浓度现正呈上升趋势(年增长率为 1.8μL/L),到 2030 年前后,空气中 CO₂ 浓度将会达到 550μL/L,为产业革命前的 2 倍^[1]。土壤作为一个巨大的碳库(1394PgC),每年以呼吸的形式释放到大气中的 CO₂ 量是化石燃料释放量的 10 倍以上^[2],其微小的变化可能导致大气 CO₂ 浓度的变化^[3],而森林生态系统作为陆地生态系统的重要组成部分,研究林地土壤 CO₂ 释放对于探讨全球 CO₂ 变化及其影响,具有十分重要的意义。

随着《京都议定书》的生效实施,在较小尺度上研究某个地区、某个林种对大气 CO₂ 的固定能力也就显得十分迫切,并且估算生态系统的净初级生产力(NPP)和净生态系统生产力(NEP)均需量化自养呼吸(R_A)和异养呼吸(R_H)^[4]。同时,在全球变化的背景下,R_A和 R_H对环境变化的响应和适应性也可能不同^[5,6],从而形成不同的碳释放格局。所以土壤呼吸及其组分的分离和量化已成为生态系统生态学、环境科学和全球变化模拟的一个重要议题^[7,8]。近年来,国内外有很多学者对森林生态系统中土壤呼吸组分的动态过程、生物环境控制因子及分离与量化等进行了研究,也取得了一定的成绩^[8~14],但对于我国南方重要的森林资源——毛竹林地土壤呼吸各组分的分离与量化研究尚未见报道。因此,本研究采用 CID-301PS 光合分析仪(配带土壤呼吸室),对湖南会同林区毛竹林地土壤呼吸进行测定,目的在于揭示其林地 CO₂ 释放量的生态因子,阐述毛竹林土壤 CO₂ 释放规律,为进一步揭示土壤 CO₂ 释放的过程机理提供基础实验数据,从而也为科学估算我国亚热带人工林森林土壤碳库动态和人工林生态系统碳平衡研究提供科学依据。

1 试验地概况

研究样地毛竹林位于湖南省会同县肖家乡坡脚村(109°53'E,27°03'N),气候属于亚热带湿润气候,年均温度 16.5℃,极端最高温和最低温分别为 36.4℃和 -4.4℃,年均降雨量为 1200~1400mm,年均相对湿度在 80%以上,年均日照 1445.4h,无霜期 304d,海拔高为 300~500m,土壤为红黄壤。试验林原为荒芜低产毛竹林,1988 年冬经过砍杂除茆、全垦深挖、调整结构、适量施肥等措施改造而成,现在林分立竹度为 1800~2400 株·hm⁻²,林分胸径加权平均为 12.6cm,竹高为 12.3m。由于每年对林地进行抚育,林地灌木基本没有,生长季节林下植被主要以马唐(*Digitaria sanguinalis*)、鸡失藤(*Paederia scandens*)、鱼腥草(*Houttuynia cordata*)、蛇葡萄(*Ampelopsis aconitifolia*)、油莎草(*Cyperus esculentus*)、铁芒萁(*Dicranopteris linearis*)等为主。林地的主要理化性质如表 1 所示。

表 1 林地土壤理化性质一览表
Table 1 Basic soil characteristics of experimental stands

取样深度 Soil depth (cm)	土壤的机械组成 Soil particle size distribution			土壤质地 名称 Name of soil texture	土壤容重 Bulk density (g/cm ³)	土壤总孔 隙度 Total porosity (%)	土壤 有机质 SOC (%)	全氮 Total N (%)	全磷 Total P (%)	有效磷 Available P (μmol/mol)
	各粒级土粒(直径 mm) ^① %									
	砂粒 ^② (2 ~0.05)	粉砂粒 ^③ (0.05 ~ 0.002)	粘粒 ^④ (<0.002)							
0 ~40	6.7	50	43.3	粉砂质 粘壤土 ^⑤	1.05	67.72	3.61	0.133	0.058	1.957

①The grain size soil particles(diameter); ②Sand; ③Silt; ④Clay; ⑤Silty clay loam

2 研究方法

在 3 个固定样地的每个样地内选择 6 个不同的位置(上、中、下坡位,每个坡位 2 个不同位置),采用壕沟法进行切断根系去除凋落物(-R-L)、保留根系保留凋落物(+R+L)和保留根系去除凋落物(+R-L)3 种处理进行试验^[7,11,15],具体操作是 2005 年 10 月在选定的 60cm×60cm 小样方,四周插入 4 块 60cm×60cm 的硬塑料板,插入深度为 60cm 进行挖壕断根处理(壕沟深度达基岩或根系分布层以下)。自 2006 年 1 月~2006 年 12 月,每月中旬选择 1 个晴天昼夜利用 CID 公司的土壤呼吸室与 CID-301 光合测定仪进行土壤呼吸观测,每次测定前一天对小样方进行检查和测定前准备,测定时间间隔为 2h,每个处理每次仪器测定 3~5min,仪器采样速率为 30s,气室内 CO₂ 浓度降至等于大气中浓度后才能进行下一个测定。测定林地土壤呼吸的同时,采用数字式瞬时温度计(Long-stem thermometer 6310)和湿度计(HH2 moisture meter)测定观测点附近地表温度和土壤含水量以及土层 5cm、10cm、20cm 深的温度。

数据处理采用 Spss12.0 和 Excel2003 统计分析,土壤各呼吸组分计算如下:

$$\text{土壤总呼吸速率} = \text{呼吸速率}_{(+R+L)}$$

$$\text{异养呼吸速率} = \text{呼吸速率}_{(-R-L)}$$

$$\text{自养呼吸速率} = \text{呼吸速率}_{(+R-L)} - \text{呼吸速率}_{(-R-L)}$$

$$\text{凋落物层呼吸速率} = \text{呼吸速率}_{(+R+L)} - \text{呼吸速率}_{(+R-L)}$$

3 结果与分析

3.1 土壤呼吸的季节变化规律

由图 1 可以看出,毛竹林地土壤总呼吸速率、异养呼吸速率、自养呼吸速率及凋落物呼吸速率的年平均值分别为 2.13、1.44、0.69 $\mu\text{molCO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 0.31 $\mu\text{molCO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,并呈现明显的季节变化规律,季节变化曲线呈单峰型,表现为 1 至 7 月份随着气温、地温的升高呈上升的趋势,在 8 月份达年呼吸速率的最大值,分别为 4.95、3.01、1.94 $\mu\text{molCO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 0.80 $\mu\text{molCO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,此后随温度的降低而呈逐渐递减的趋势,直到次年的 1 月份或 2 月份,达呼吸速率最低值,分别为 0.76、0.71、0.06 $\mu\text{molCO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 0.05 $\mu\text{molCO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

另外,林地土壤呼吸速率在 6~9 月份维持在相对较高水平,主要可能因为该地区在 6~9 月份水热条件较好,有利于土壤微生物和根系的活动,因此土壤总呼吸速率也较高。凋落物呼吸主要集中在 5~9 月份,这期间的呼吸占全年凋落物呼吸的 73.6%。说明在 5~9 月份水热条件较好的情况下,有利于土壤微生物活动的同时,也有利于凋落物分解,排放 CO₂ 速率也就大。另外,毛竹林凋落物呼吸速率在 1~5 月份较低,这可能与毛竹林的经营措施和年生长规律有关,每年 11、12 月份进行林地垦翻后,林地部份凋落物混入土壤中,凋落物现存量减少,直到次年 4~6 月份大量落叶后,现存量才增加,并且此时温、湿度适宜,有利于凋落物分解。

3.2 土壤呼吸日变化规律

陆地生态系统的动态过程主要受太阳辐射影响,与土壤温度和生物活动密切相关的土壤呼吸过程也不例外。太阳辐射的昼夜变化引起气温的昼夜变化,相应引起土壤温度和土壤生物,尤其是微生物活动强度的变化,进而引起土壤呼吸速率的昼夜变化。

图 2 和图 3 分别为毛竹林生长季 6 月份和非生长季 12 月份林地土壤呼吸速率各组分的昼夜变化曲线,由此可以看出,林地土壤呼吸速率的昼夜变化在不同时间呈现了一定的变化规律:一天中,毛竹林地土壤总呼吸、异养呼吸、自养呼吸和凋落物呼吸曲线图基本上均呈单峰形态,8:00~16:00,随着土壤温度的升高而增

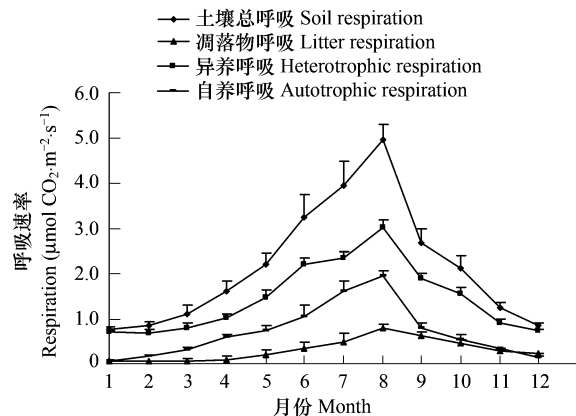


图 1 毛竹林地土壤呼吸季节变化曲线

Fig. 1 The annual changing pattern of soil respiration in Moso bamboo plantation

加,一般在 14:00 ~ 16:00 出现最高峰,此后,一直递减,直到次日 4:00 ~ 8:00。

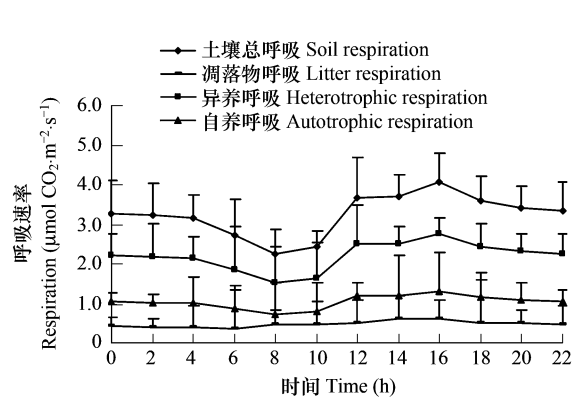


图2 毛竹林地土壤呼吸 6 月份日变化曲线
Fig.2 The daily changing pattern of soil respiration in Moso bamboo plantation in June

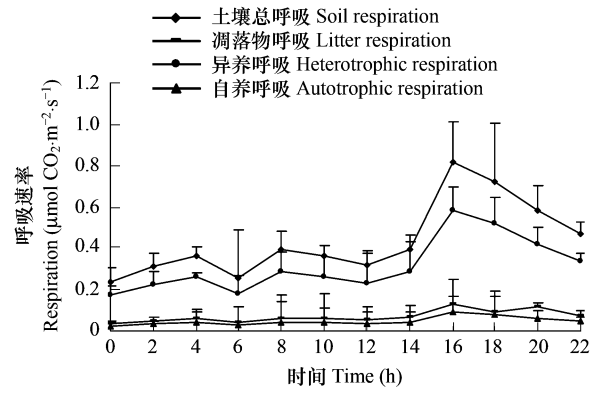


图3 毛竹林地土壤呼吸 12 月份日变化图
Fig.3 The daily changing pattern of soil respiration in Moso bamboo plantation in December

此外,从毛竹生长季的日变化幅度来看,非生长季节林地土壤呼吸要比生长季节林地土壤呼吸的日变化幅度要相对平缓,6 月份变异幅度分别为 $1.8178\mu\text{molCO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,比非生长季的 12 月份要高 61.4%,这可能主要与非生长季节的温度昼夜温差小有关,12 月份的昼夜温差是 6 月份的 27.9%。

3.3 毛竹林土壤 CO₂年排放量及其组分分离

由表 2 可知,毛竹林地土壤年释放 CO₂量平均为 $33.941\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$,其变异范围为 $30.757\sim37.125\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$,月平均为 $2.828\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$,其中,林地异养呼吸、自养呼吸和凋落物呼吸分别占 59.5%、28.3% 和 12.2%。

表 2 林地释放 CO₂量的季节变化
Table 2 The respiration consumption in different month of Moso bamboo and Chinese fir plantation land

月份 Month	异养呼吸 Heterotrophic respiration ($\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$)	自养呼吸 Autotrophic respiration ($\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$)	凋落物呼吸 Litter respiration ($\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$)	林地释放量 Release ($\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$)	RC (%)
1	0.827 ± 0.049	0.074 ± 0.010	0.074 ± 0.019	0.976 ± 0.075	7.56 ± 1.46
2	0.728 ± 0.074	0.184 ± 0.021	0.050 ± 0.017	0.962 ± 0.071	19.10 ± 2.78
3	0.930 ± 0.137	0.367 ± 0.050	0.095 ± 0.058	1.392 ± 0.230	26.38 ± 1.81
4	1.171 ± 0.097	0.661 ± 0.087	0.229 ± 0.100	2.061 ± 0.261	32.06 ± 3.31
5	1.728 ± 0.179	0.866 ± 0.120	0.408 ± 0.114	3.002 ± 0.291	28.84 ± 5.16
6	2.508 ± 0.168	1.186 ± 0.281	0.549 ± 0.156	4.242 ± 0.570	27.95 ± 5.92
7	2.752 ± 0.178	1.884 ± 0.272	0.735 ± 0.208	5.371 ± 0.623	35.07 ± 3.40
8	3.548 ± 0.200	2.287 ± 0.141	0.940 ± 0.091	6.775 ± 0.406	33.75 ± 2.05
9	2.155 ± 0.124	0.907 ± 0.134	0.516 ± 0.088	3.579 ± 0.332	25.36 ± 2.74
10	1.833 ± 0.141	0.646 ± 0.113	0.335 ± 0.099	2.814 ± 0.323	22.96 ± 2.67
11	1.038 ± 0.093	0.494 ± 0.018	0.141 ± 0.038	1.674 ± 0.138	29.54 ± 1.31
12	0.971 ± 0.044	0.041 ± 0.023	0.083 ± 0.016	1.094 ± 0.065	3.72 ± 3.42
合计 Total	20.190 ± 1.350	9.596 ± 0.756	4.155 ± 1.100	33.941 ± 3.184	28.27 ± 1.75

表中数据为平均值 ± 标准误差 Data of the table represent average value ± standard error

另外,毛竹林土壤呼吸速率随时间的波动,可以通过其最大值与最小值的比来反映,毛竹林的最大值/最小值比为 7.04,相差较大,这也从另外一个侧面说明毛竹林的土壤 CO₂释放容易受到外界气候因子的影响。

3.4 毛竹林土壤呼吸与其他地区土壤呼吸比较

本实验测得的数据与其他已发表的数据进行比较,为了便于比较,将其它单位都转化为 $\text{tCO}_2\cdot\text{hm}^{-2}$ 。由

表 3 可知,从北温带到热带不同森林类型间的土壤年呼吸量从 1.83 ~ 50.38 tCO₂·hm⁻²,并且随着纬度由高到低,不同森林类型的林地土壤年呼吸量呈逐渐增加的趋势,期间偶尔出现有波动,可能与不同的测定方法和不同样地选择有关系,但是总体来说,不同气候区域的林地土壤释放 CO₂ 量差异较大,并且同一气候区的不同森林类型或同一森林类型的不同年龄阶段的森林土壤呼吸量也有差异。因此,对各生态系统的土壤呼吸及其规律的进一步研究将有助于正确评价不同森林类型的碳源/汇功能。

表 3 世界范围内一些陆地生态系土壤的年呼吸量 (tCO₂·hm⁻²)
Table 3 Annual soil respiration amount of major forest ecosystems in the world

编号 No.	森林生态系统类型 Forest ecosystems	气候带 Regions	呼吸量 Amount of respiration	资料来源 Data source
1	美国田纳西州栎树林 Russian Jaiga	北温带 North temperate	1.83 ~ 22.00	[16]
2	俄罗斯泰加林 Quercu forest in Tennessee of U. S. U	温带 Temperate	17.5 ~ 39.05	[17]
3	北京温带森林 Temperate forest in Beijing	温带 Temperate	8.66 ~ 25.07	[17,18]
4	秦岭天然油松、锐齿栎林 Natural forest of <i>P. tabulaeformi</i> and <i>Q. aliena</i> in Qinling mountains	北亚热带 Height subtropical	22.32 ~ 28.25	[19]
5	福建格氏栲人工林和天然林 Natural and plantation forest of <i>Castanopsis kawakamii</i> in Fujian	中亚热带 Middle subtropical	16.66 ~ 50.38	[20]
6	湖南会同天然次生阔叶林 Secondary evergreen broadleaved forest in Huitong of Hunan	中亚热带 Middle subtropical	22.791	[21]
7	湖南会同 11 年生杉木林 11-year-old Chinese fir plantation in Huitong of Hunan	中亚热带 Middle subtropical	31.52	[22]
8	湖南会同毛竹林 Moso bamboo plantation in Huitong of Hunan of Hunan	中亚热带 Middle subtropical	33.94	本研究 This study
9	广东南亚热带马尾松林 Lower subtropical coniferous forest in Guangdong	南亚热带 Lower subtropical	36.63	[16]
10	海南岛尖峰岭热带山地雨林 Tropical forest in Jianfengling of Hainan island	热带 Tropical	33.16	[23]

4 讨论

(1) 土壤呼吸速率在生长季不同月份表现明显的变化格局。如 Fang 等发现佛罗里达州 26 年生的湿地松 (*Pinus elliottii* Engdm) 人工林土壤呼吸速率在 10 月份最高,而在 1 月份最低^[24]; Xu 和 Ye 发现土壤呼吸速率最高值在 6 月和 11 ~ 12 月份,最低值在中夏^[25]; Davidson 等发现土壤呼吸速率在 6 ~ 7 月份最高,在 8 月中旬到 9 月初下降^[26]。土壤呼吸速率季节性差异主要受土壤温度和土壤湿度变化的共同影响,但温度和湿度对土壤呼吸速率的影响程度不同,通常夏天的温度较高,土壤呼吸速率应该较高,但夏天的干旱和洪涝可能也会限制土壤呼吸,从而抵消温度升高对土壤呼吸的促进作用^[27],因此对于不同区域的毛竹林土壤呼吸变化规律的比较分析还有待于进一步研究。

(2) 土壤呼吸速率具有明显的昼夜变化格局,而这种变化格局主要与土壤温度的昼夜变化格局密切相关,土壤温度的昼夜变化又主要受空气温度的昼夜变化影响。如 Xu 等发现内华达山脉 8 年生的西黄松 (*Pine ponderosa* Dougl.) 人工林土壤呼吸速率最小值在 9:00,最大值在 14:00^[25], Davidson 等发现土壤呼吸速率的昼夜变化格局与土壤温度的昼夜变化格局类似^[26]。本研究结果与这些结果基本一致。但是,不同林分中植被对土壤温度的影响及土壤热传导特性的不同都将导致土壤呼吸速率昼夜变化幅度的差异,并且不同林地土壤有机碳含量、有机质稳定性及生物多样性的差异等也影响土壤呼吸速率的昼夜变化格局,因此阐明影响毛竹林地土壤 CO₂ 释放的主要影响因子,可望为毛竹林生态系统土壤碳通量评估提供依据。

(3) 自养呼吸占林地土壤总呼吸量的比例 (RC),是近年来森林生态研究的热点之一。由于实际测量中无法直接把自养和土壤区分开来测定,只能应用人工除去根系进行对比试验或采用其他间接方法推算,

得出自养呼吸释放碳量占林地土壤总呼吸释放碳量的 10% ~ 90% (主要集中在 40% ~ 60% 内)^[24], 本研究得出自养呼吸占土壤呼吸所释放碳量的 28.27%, 和其他大多数研究结果基本一致^[28], 稍微有点偏低, 但与张宪权等在东北地区的落叶松 (*Larix gmelini*)、樟子松 (*Pinus sylvestris* var. *mongolica* Litv.)、红松 (*Pinus koraiensis*) 和白桦 (*Betula platyphylla* Suk.) 人工林根系呼吸结果相近^[10], 这可能与人工林群落组成、林木生长状况及林地理化性质等差异有关。当然, 本研究用对照样地土壤总呼吸速率减去断根样地土壤呼吸速率而得出自养呼吸速率, 由于断根后的根系在观测期间内的 CO₂ 释放量不会立即降低到零, 所以观测结果会低于实际值^[29]。

毛竹自养呼吸的 RC 的季节动态主要受土壤温度和植被本身根系物候的驱动所影响。毛竹林在 4 ~ 9 月份期间其 RC 值就一直维持在 30% 以上, 这期间是根鞭生长比较快的时期, 尤其是 8、9 月份正好是光合产物向地下根分配时期。也就是说不同树种的光合产物分配格局可能影响自养呼吸 RC 的季节变化^[30]。自养呼吸贡献率还受植被根系特性^[31]、土壤水热状况等因子的综合影响, 如 Burton 等对不同北美森林生态系统的根呼吸研究发现, 裸子植物 (白云杉 *P. glauca*, 赤松 *P. resinosa*, 湿地松) 比被子植物 (香脂杨 *P. balsamifera*, 栎-山核桃 *Quercus-Carya*, 北美鹅掌楸 *Liriodendron tulipifera* Linn., 糖槭 *Acer saccharum*) 根呼吸速率低, 主要原因是前者细根氮浓度较低^[31], 因此加强毛竹自养呼吸与经营措施及其根系生物量、细根周转等的关系研究也就成为本文有待完善的内容。

(4) 土壤呼吸是一个包括自养呼吸和异养呼吸在内的复杂过程, 除与土壤物理、化学性质有关外, 还受气候、陆地植被及生物的综合影响。这些都是构成不同生态系统之间土壤呼吸释放碳量差异的可能原因。本文仅以一定地域毛竹林为对象, 研究了其林地土壤呼吸变化规律, 但为准确评价我国毛竹林生态系统对全球气候变化的响应及其在全球碳循环中的功能和作用, 还应加强对不同区域、不同经营措施下的毛竹林地土壤呼吸研究。此外, 采用统一规范的研究方法, 获取大量有代表性的毛竹林生态系统土壤呼吸实测数据, 也是减少区域尺度碳平衡研究中的不确定性, 从而更精确地评价其在全球变化和气候系统中作用的极为重要的研究内容之一。

References:

- [1] IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, 1990.
- (Intergovernmental Panel on Climate Change). Climate Change 1990: the Science of Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press,
- [2] Raich J W, Potter C S. Global patterns of carbon dioxide emissions from soils. Global Biogeochemical Cycles, 1995, 9: 23–36.
- [3] Liu S H, Fang 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.
- [4] Gower S T, Krankina O N, Olson R J, et al. Net primary production and carbon allocation patterns of boreal forest ecosystems. Ecological Applications, 2001, 11: 1395–1411.
- [5] Boone R D, Nadelhoffer K J, Canary J D, et al. Roots exert a strong influence on the temperature sensitivity of soil respiration. Nature, 1998, 396: 570–572.
- [6] Widén B, Majdi H. Soil CO₂ efflux and root respiration at three sites in a mixed pine and spruce forest: seasonal and diurnal variation. Canadian Journal of Forest Research, 2001, 31: 786–796.
- [7] Hanson P J, Edwards N T, Garten C T, et al. Separating root and soil microbial contributions to soil respiration: A review of methods and observations. Biogeochemistry, 2000, 48: 115–146.
- [8] Bond L B, Wang C K, Cower S T. The contribution of root respiration to soil surface CO₂ flux in a boreal black spruce chronosequence. Tree Physiology, 2004, 22: 993–1001.
- [9] Jiang L F, Shi F C, Wang H T, et al. Root respiration in *Larix gmelinii* plantations in Northeast China. Plant Physiology Communications, 2004, 40(2): 27–30.
- [10] 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): 46–48.
- [11] Yang J Y, Wang C K. Partitioning soil respiration of temperate forest ecosystems in Northeastern China. Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(6): 1640–1647.
- [12] 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.
- [13] Wang C K, Yang J Y. Rhizospheric and heterotrophic components of soil respiration in six Chinese temperate forests. Global Change Biology,

- 2007,13:123—131.
- [14] Liu Y, Han S J, Li X F, *et al.* The contribution of root respiration of *Pinus koraiensis* seedlings to total soil respiration under elevated CO₂ concentrations. *Journal of Forest Research*, 2004, 15(3): 187—191.
- [15] Burton A J, Pregitzer K S. Field measurement of root respiration indicate little to no seasonal temperate acclimation for sugar maple and red pine. *Tree Physiology*, 2003, 23: 273—280.
- [16] Yang Q P, Li M G, Wang B S. Study on soil respiration of the lower subtropical successive forest communities. *Guihaia*, 2004, 24(5): 443—449.
- [17] Liu S H, Fang J Y, Makoto K. Soil respiration of mountainous of mountainous temperate forests in Beijing, China. *Acta Phytocologica Sinica*, 1998, 22(2): 119—126.
- [18] Sun X Y, Guo Q J. Study on the forest soil CO₂ evolution rates at Miaofeng mountain. *Journal of Beijing Forestry University*, 1995, 17(4): 22—28.
- [19] 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.
- [20] Yang Y S, Chen G S, Wang X G, *et al.* Response of soil CO₂ efflux to forest conversion in subtropical zone of China. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(7): 1684—1690.
- [21] Xiao F M. A study on the carbon balance in Chinese fir plantation ecosystem. Master Degree Thesis of Jiangxi Agricultural University, 2003: 1—40.
- [22] Fang X, Tian D L, Xiang W H, *et al.* Soil CO₂ release rate and its effect factors in Chinese Fir plantation. *Scientia Silvae Sinicae*, 2005, 41(2): 1—7.
- [23] Wu Z M, Zeng Q B, Li Y D, *et al.* A preliminary research on the carbon storage and CO₂ release of the tropical forest soils in Jianfengling, Hainan island, China. *Acta Phytocologica Sinica*, 1997, 21(5): 416—423.
- [24] Fang C, Moncrief J B, Gholz H L, *et al.* Soil CO₂ efflux and its spatial variation in a Florida slash pine plantation. *Plant and Soil*, 1998, 205: 135—146.
- [25] Xu M, Ye Q. Soil-surface CO₂ efflux and its spatial and temporal variations in a young ponderosa pine plantation in northern California. *Global Change Biology*, 2001, 7: 667—677.
- [26] Davidson E A, Belk E, Boone R D. Soil water content and temperature as independent of confounded factors controlling soil respiration in a temperate mixed hard forest. *Global Change Biology*, 1998, 4: 217—227.
- [27] Yang Y S, Chen G S, Dong B, *et al.* Responses of soil respiration to soil rewetting in a natural forest and two monoculture plantations in subtropical China. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(5): 953—958.
- [28] Risk D, Kellman L, Beltrami H. Carbon dioxide in soil profiles: production and temperature dependence. *Geophysical Research Letters*, 2002, 29(6): 11—14.
- [29] Cheng S Y, Zhang X Z. A review on differential methods for root and soil microbial contributions to total soil respiration. *Advance in Earth Sciences*, 2003, (4): 597—602.
- [30] Höglberg P, Nordgren A, Agren G I. Carbon allocation between tree root growth and root respiration in boreal pine forest. *Oecologia*, 2002, 132: 579—581.
- [31] Burton A J, Pregitzer K S, Ruess R W, *et al.* Root respiration in North American forests: effect of nitrogen concentration and temperature across biomes. *Oecologia*, 2002, 131: 559—568.

参考文献:

- [3] 刘绍辉,方精云. 土壤呼吸的影响及全球尺度下温度的影响. *生态学报*, 1997, 17(5): 469—476.
- [9] 姜丽芬,石福臣,王化田,等. 东北地区落叶松人工林的自养呼吸. *植物生理学通讯*, 2004, 40(2): 27—30.
- [10] 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—48.
- [11] 杨金艳,王传宽. 东北东部森林生态系统土壤呼吸组分的分离量化. *生态学报*, 2006, 26(6): 1640—1647.
- [12] 陈光水,杨玉盛,王小国,等. 格氏栲天然林与人工林自养呼吸季节动态及影响因素. *生态学报*, 2005, 25(8): 1941—1947.
- [16] 杨清培,李鸣光,王伯荪. 亚热带森林群落演替过程中林下土壤的呼吸特征. *广西植物*, 2004, 24(5): 443—449.
- [17] 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.
- [18] 孙向阳,郭青俊. 妙峰山林地 CO₂ 释放量的初步研究. *北京林业大学学报*, 1995, 17(4): 22—28.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] 肖复明,汪思龙,范少辉,等. 湖南会同天然次生常绿阔叶林群落呼吸量测定. *北京林业大学学报*, 2006, 28(S2): 40—44.
- [22] 方晰,田大伦,项文化,等. 杉木人工林林地土壤 CO₂ 释放量及其影响因子的研究. *林业科学*, 2005, 41(2): 1—7.
- [23] 吴仲民,曾庆波,李意德,等. 尖峰岭热带山地雨林土壤 C 储量和 CO₂ 排放量的初步研究. *植物生态学报*, 1997, 21(5): 416—423.
- [27] 杨玉盛,陈光水,董彬,等. 格氏栲天然林和人工林土壤呼吸对干湿交替的响应. *生态学报*, 2004, 24(5): 953—958.
- [29] 程慎玉,张宪洲. 土壤呼吸中自养与微生物呼吸的区分方法与应用. *地球科学进展*, 2003(4): 597—602.