

# 亚热带次生林土壤自养和异养呼吸研究

沈小帅<sup>1,2</sup>, 陈书涛<sup>1,2,3\*</sup>, 胡正华<sup>1,2</sup>, 史艳姝<sup>1,2</sup>, 张勇<sup>1,2</sup>

(1. 南京信息工程大学江苏省大气环境监测与污染控制高技术重点实验室, 南京 210044; 2. 南京信息工程大学环境科学与工程学院, 南京 210044; 3. 中国科学院大气物理研究所大气边界层物理和大气化学国家重点实验室, 北京 100029)

**摘要:**以南京市郊北亚热带次生林为研究对象,于 2010 年设置挖沟断根和不断根处理小区,观测了土壤呼吸、异养呼吸的季节变异规律,并以此计算了自养呼吸速率,同时,观测了土壤温度、湿度等环境因子. 结果表明,土壤呼吸、异养呼吸具有相似的季节变化规律,季节平均土壤呼吸、异养呼吸和自养呼吸速率分别为 3.42、2.36 和 1.06  $\mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$ . 回归分析表明,异养呼吸随土壤呼吸增大而增加,异养呼吸( $y$ )与土壤呼吸( $x$ )之间的关系可用对数回归方程描述,该方程可解释异养呼吸 90.5% ( $R^2=0.905$ ) 的季节变异. 进一步的分析表明,土壤呼吸不同组分与温度间均存在指数回归关系,描述土壤呼吸、异养呼吸、自养呼吸与温度间关系的指数回归方程可分别解释 78.4%、76.4% 和 65.6% 的变异, $P$  值均达到极显著水平 ( $P < 0.01$ ). 根据回归方程估算的土壤呼吸、异养呼吸和自养呼吸温度系数  $Q_{10}$  值分别为 1.97、1.76 和 3.31. 本研究表明,在树木生长的 3~10 月,土壤呼吸自养和异养组分的比例分别为 69% 和 31%,且异养呼吸的温度敏感性显著小于自养呼吸的温度敏感性.

**关键词:**次生林;土壤呼吸;自养呼吸;异养呼吸;温度敏感性

中图分类号:X171.1 文献标识码:A 文章编号:0250-3301(2011)11-3181-07

## Investigation of Heterotrophic and Autotrophic Components of Soil Respiration in a Secondary Forest in Subtropical China

SHEN Xiao-shuai<sup>1,2</sup>, CHEN Shu-tao<sup>1,2,3</sup>, HU Zheng-hua<sup>1,2</sup>, SHI Yan-shu<sup>1,2</sup>, ZHANG Yong<sup>1,2</sup>

(1. Jiangsu Key Laboratory of Atmospheric Environment Monitoring and Pollution Control, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China; 2. School of Environmental Science and Engineering, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China; 3. State Key Laboratory of Atmospheric Boundary Physics and Atmospheric Chemistry, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

**Abstract:** Trenched plots were set up in 2010 in a secondary forest in subtropical China, in order to investigate the seasonal variations of soil respiration ( $R_s$ ) and heterotrophic respiration ( $R_h$ ). Autotrophic respiration ( $R_a$ ) was estimated to be the difference between  $R_s$  and  $R_h$ . Soil temperature and moisture were simultaneously measured during respiration measurements. Results indicated that  $R_s$  and  $R_h$  showed the similar seasonal variations. Seasonal mean rates for  $R_s$ ,  $R_h$  and  $R_a$  were 3.42, 2.36 and 1.06  $\mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$ , respectively. Regression analysis indicated that  $R_h$  increased with the increase of  $R_s$ ; a natural logistic equation could be employed to explained the relationship between  $R_h$  ( $y$ ) and  $R_s$  ( $x$ ). Approximately 90.5% ( $R^2=0.905$ ) variations in  $R_h$  could be explained by the equation. Apparent exponential relationships of  $R_h$  and  $R_a$  with soil temperature existed, but differed from each other and from the relationship for  $R_s$ . The exponential equations explained about 78.4%, 76.4% and 65.6% variations in  $R_s$ ,  $R_h$  and  $R_a$ , respectively, with the  $P$  values less than 0.01. The  $Q_{10}$  values for  $R_s$ ,  $R_h$  and  $R_a$  were 1.97, 1.76 and 3.31, respectively. It was indicated that, seasonally,  $R_h$  and  $R_a$  represented 69% and 31% of  $R_s$ .  $R_a$  showed significantly higher temperature sensitivity than  $R_h$ .

**Key words:** secondary forest; soil respiration; autotrophic respiration; heterotrophic respiration; temperature sensitivity

土壤呼吸的主要生物源包括根的呼吸、微生物分解有机质的基础呼吸、根际微生物呼吸、植物残体分解、根分泌物或植物残体对土壤微生物的激发效应<sup>[1]</sup>,通常可将土壤呼吸( $R_s$ )较简化的划分异养呼吸( $R_h$ )和自养呼吸( $R_a$ ). 区分异养呼吸和自养呼吸对于土壤呼吸的贡献即两者在土壤呼吸中所占的比例对于了解某个特定生态系统的碳收支和生态过程的微观机制均有重要意义<sup>[2]</sup>.

相对于森林土壤呼吸观测研究而言,其异养和

自养组分的区分研究相对较少,一些已有的研究也主要集中在温带森林,例如:Irvine等<sup>[3]</sup>采用根去除法在美国 Sisters 地区进行的研究表明年轻和老龄森林土壤呼吸中自养呼吸的比例分别为 52% 和 46%;

收稿日期:2011-01-05;修订日期:2011-03-14

基金项目:国家自然科学基金项目(41005088);江苏省高校自然科学基金研究计划项目(10KJB610006);中国博士后基金特别资助项目(201003597)

作者简介:沈小帅(1986~),男,硕士研究生,主要研究方向为生态系统碳氮循环与气候变化,E-mail:chachasxs@sina.com

\* 通讯联系人, E-mail:chenstyf@yahoo.com.cn

Pulliam<sup>[4]</sup>在美国 Ogeechee River 地区采用离体法测定的森林土壤呼吸中自养呼吸的比例约为 60% ; Raich 等<sup>[5]</sup>根据文献调研的数据指出,全球平均而言自养呼吸约占土壤呼吸 30% . 目前异养和自养组分区分方法主要有直接和间接法,直接测定法有离体根法、PVC 管气室法、同位素法等;间接测定法有断根法、挖壕沟法、林隙分析、树皮环割法、根生物量外推法等,各种方法均有各自的优缺点<sup>[1]</sup>. 大量研究证明,采用挖壕沟法可较好地地区分异养和自养组分<sup>[3, 6]</sup>.

另外,从现有文献资料看,人们对亚热带森林研究相对较少<sup>[6]</sup>. 我国亚热带地区的常绿阔叶林是全球同纬度特有的重要类型,具有极高的生物量和生产力,对全球陆地生态系统碳贮存发挥着重要贡献,研究这一类型植被下土壤呼吸的组分有助于更全面地了解森林土壤碳循环过程.

本研究以北亚热带次生林为对象,分析土壤呼吸中异养、自养组分比例和季节动态变化规律,以期为了解次生林土壤碳循环过程提供理论依据和数据支撑.

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

于 2010 年 3 ~ 10 月在江苏省南京市郊的龙王山 (118°42'E, 32°11'N) 进行野外原位观测试验,该试验地位于北亚热带的北缘地区,年平均气温 15.5℃, 1 月平均气温 2.2℃, 极端低温 -13.3℃, 7 月平均气温 28.2℃, 极端高温 40.7℃, 无霜期 225 d, 年相对湿度为 76%, 多年平均降水量 1 019.5 mm. 样地地带性植被为亚热带落叶阔叶林,群落郁闭度为 0.9, 林冠层主要树种有白栎 (*Quercus fabri* L.)、化香 (*Platycarya strobilacea* L.)、构树 (*Broussonetia papyrifera* L.). 林下层主要有白檀 (*Symplocos paniculata* L.)、山胡椒 (*Lindera glauca* L.)、狭叶山胡椒 (*angustifolia* L.)、朴树 (*Celtis sinensis* L.)、茶条槭 (*Acer ginnala* L.) 等树种. 草本层有苔草 (*Carex* spp. L.)、天门冬 (*Asparagus cochinchinensis* L.)、繁缕 (*Stellaria media* L.) 等植物.

### 1.2 试验设计

采用在森林生态系统中常用的挖沟断根法来确定总土壤呼吸中异养呼吸和自养呼吸的组分<sup>[2, 7, 8]</sup>. 布设随机区组试验,设置 4 个区组,每个区组中分别随机设置断根(挖壕沟)和不断根(不挖壕沟)2 种处理(每种处理小区面积为 1 m × 1 m). 参

考以往的研究方法<sup>[9, 10]</sup>,在土壤呼吸观测以前,预先在正方形断根小区周边挖沟(沟深 > 30 cm、沟宽约 30 cm)以阻断树木根系进入试验小区的路径,同时,将试验小区内植被地上部分剪断,并定期去除新生长出来的植物. 进行试验处理 1 个月后,在 4 个挖沟小区取出不同深度的土壤,此时判断根系已经出现枯萎,说明根呼吸作用已经基本可以排除,之后,展开土壤呼吸观测.

### 1.3 土壤呼吸观测

预先将测定土壤呼吸的 PVC 底座埋入土壤中,于每个采样日的上午采用土壤 CO<sub>2</sub> 通量自动测定系统(Licor-8100, USA)测定土壤呼吸速率. 定期去掉底座内的植物,以避免测定的土壤呼吸中包含植物的呼吸作用. 每周测定 1 次挖沟断根和不断根小区的土壤呼吸速率,获得土壤呼吸通量数据. 每次观测时,挖沟断根和不断根处理的各个小区土壤呼吸速率在同一时段(一般在 08:00 ~ 10:00)进行测定,并在此时段内进行各个重复的随机观测,以尽量减少土壤温度变异带来的土壤呼吸速率的变化. 采用 Licor-8100 观测每个底座的土壤呼吸速率所需的时间约 10 min,在野外将数据采集完毕后,将数据调入到电脑中安装的 Licor-8100 土壤呼吸速率分析软件程序中,进行回归分析以描述 Licor-8100 仪器测定的 CO<sub>2</sub> 浓度随时间的变异情况,得到土壤呼吸速率. 将不断根小区测定的土壤呼吸速率减去断根小区的土壤异养呼吸速率即为土壤自养呼吸速率(即根呼吸速率).

### 1.4 环境因子测定

每次测定土壤呼吸速率的同时采用 Licor-8100 的温、湿度探头测定试验地点空气温度、5 cm 深土壤温度、湿度(体积含水量).

### 1.5 数据分析

根据每次测定的土壤呼吸、异养呼吸以及通过差减法得到的自养呼吸速率估算土壤呼吸各组分的季节平均通量. 利用对数回归以分析异养呼吸与土壤呼吸的关系、异养呼吸与自养呼吸的关系. 进行指数回归以分析土壤呼吸与温度的关系,进而估算土壤异养和自养呼吸组分的温度敏感系数  $Q_{10}$ .

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤呼吸、异养呼吸季节动态变化

观测结果表明,土壤呼吸、异养呼吸具有相似的季节变化规律(图 1),其变化与温度的变异基本一致(图 2),从春季到秋季,呼吸速率呈现先增后减

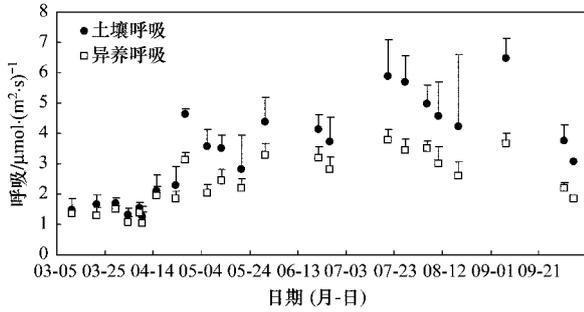


图 1 土壤呼吸、异养呼吸季节动态变化  
Fig. 1 Seasonal variations in soil respiration ( $R_s$ ) and heterotrophic respiration ( $R_h$ )

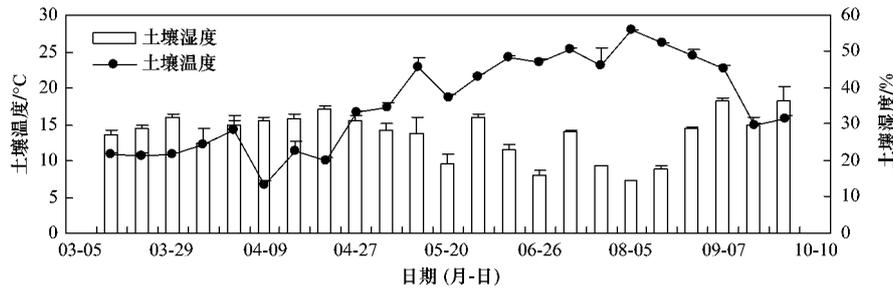


图 2 土壤温度、湿度季节动态变化  
Fig. 2 Seasonal variations in soil temperature and moisture

量过程中,两者在土壤总呼吸速率所占的比例均逐渐接近 0.5 (图 3).

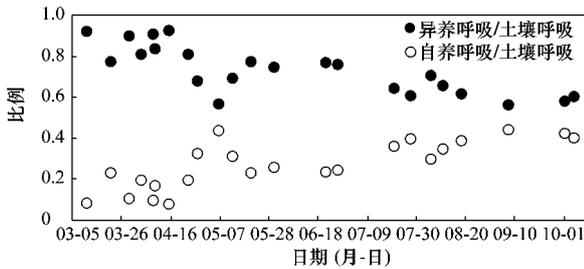


图 3 异养呼吸、自养呼吸分别占土壤呼吸比例的季节动态变化  
Fig. 3 Seasonal variations in the ratios of  $R_h$  to  $R_s$  and  $R_a$  to  $R_s$

2.2 不同呼吸组分间的关系

回归分析表明,异养呼吸随土壤呼吸增大而增加,异养呼吸( $y$ )与土壤呼吸( $x$ )之间的关系可用对数回归方程  $y = 1.620\ln(x) + 0.564$  描述(图 4),以土壤呼吸为自变量的该方程可解释异养呼吸 90.5% ( $R^2 = 0.905$ ) 的季节变异.由此说明,根据本研究观测地点的土壤呼吸可以通过经验的模拟方程

的趋势.土壤呼吸的变异范围为  $1.23 \sim 6.48 \mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$ ,异养呼吸的变异范围为  $1.03 \sim 3.78 \mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$ .季节平均土壤呼吸、异养呼吸和自养呼吸速率分别为 3.42、2.36 和  $1.06 \mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$ ,土壤呼吸自养和异养组分的比例分别为 69% 和 31%,土壤呼吸异养组分所占比例更大.

在 3 ~ 10 月观测过程中,异养呼吸与土壤呼吸的比例呈下降趋势,于 03-11 测得最高值为 0.92,09-07 测得最低值为 0.56;与之相对应,自养呼吸占土壤呼吸的比例呈上升趋势,于 03-11 测得最低值为 0.08,08-20 测得最高值为 0.44. 并且在整个测

拟合得到异养呼吸.此外,异养呼吸( $y$ )与自养呼吸( $x$ )之间也存在显著对数回归关系,二者关系可用对数回归方程  $y = 0.722\ln(x) + 2.60$  描述(图 5),二者的变异具有同步性.

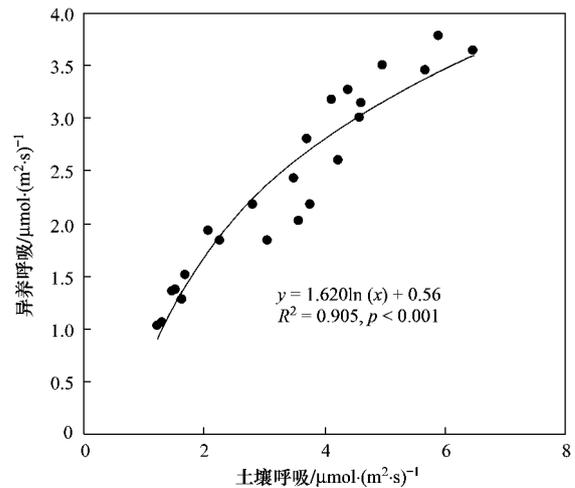


图 4 自养呼吸与土壤呼吸的关系  
Fig. 4 Relationship between  $R_h$  and  $R_s$

2.3 土壤呼吸各组分的温度敏感性

回归分析结果表明,土壤呼吸不同组分与温度

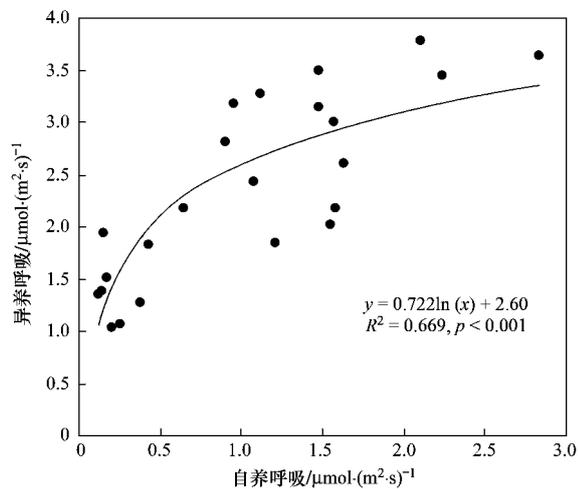


图5 异养呼吸与自养呼吸的关系

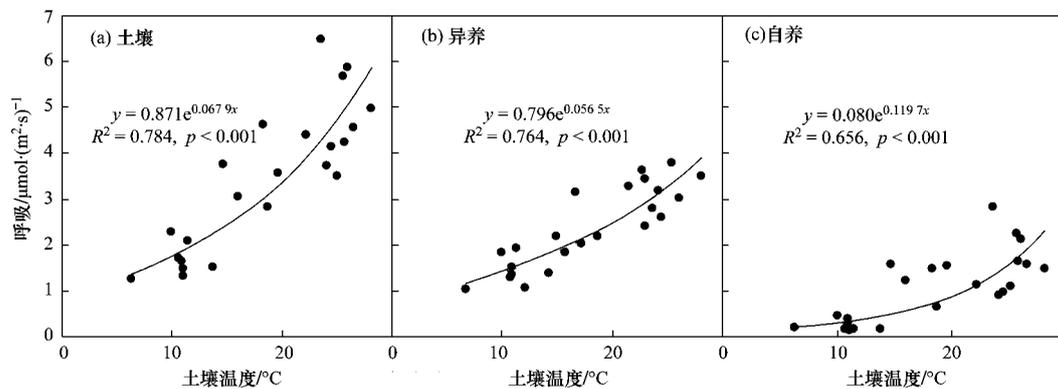
Fig. 5 Relationship between  $R_h$  and  $R_a$ 

图6 呼吸组分与土壤温度的关系

Fig. 6 Relationship between respiratory components and soil temperature

位素法等;间接测定法包括挖沟断根法、林隙分析法和树木环割实验法等,各种方法均有各自的优缺点<sup>[11]</sup>,比如:离体法可直接测定根呼吸强度,但人为扰动作用可能会导致测定的根呼吸速率偏高<sup>[12]</sup>;同位素法可测定土表释放的 $\text{CO}_2$ 来源于那个土壤呼吸组分,但由于标记结果仅能在短期内有效,因而不宜在生长季尺度上获取土壤呼吸各个组分所占比例<sup>[13, 14]</sup>;挖沟断根法可在生长季尺度上确定土壤呼吸各个组分所占比例,但挖沟断根处理的小区短期内根系仍会有活力,并且其分解产生的 $\text{CO}_2$ 量值难以精确定量<sup>[10]</sup>;树木环割实验法有助于了解植物光合作用对土壤呼吸的重要性<sup>[15]</sup>,但也不能精确确定根分泌物激发效应对土壤呼吸的贡献<sup>[16]</sup>.正是由于观测方法的差异和不同生态系统类型的差异导致了人们估算的自养呼吸占土壤呼吸比例存在较大差

间均存在指数回归关系(图6),描述土壤呼吸、异养呼吸和自养呼吸的指数回归方程可分别解释78.4%、76.4%和65.6%的变异(图6), $P$ 值均达到极显著水平( $P < 0.01$ ).根据回归方程估算的土壤呼吸、异养呼吸和自养呼吸温度系数 $Q_{10}$ 值分别为1.97、1.76和3.31,异养和自养呼吸组分的 $Q_{10}$ 值存在显著差异.这表明,在本研究所处的林木生长阶段内,温度每升高 $10^\circ\text{C}$ ,土壤呼吸、异养呼吸和自养呼吸的速率分别变为原来的1.97、1.76和3.31倍.

### 3 讨论

#### 3.1 呼吸组分区分

目前,林地自养呼吸和异养呼吸的区分方法包括直接法和间接法这2种,直接测定法有离体法、同

异(表1).

由表1可见,在北半球中纬度(主要是北亚热带和北温带地区)地区,观测的自养呼吸占土壤呼吸比例在0.29~0.90之间变异.本研究所测定的生长季尺度内自养呼吸占土壤呼吸的平均比例为0.31,虽然该比例与Raich等<sup>[5]</sup>调研得到的全球各生态系统中根呼吸平均约占土壤呼吸30%的结论基本吻合,但在表1中的森林生态系统中处于相对较低的比例.这可能与两方面原因有关:首先,不同观测方法间存在差异,这可能会造成结果的不同.总体来看,采用离体法测定的根呼吸占土壤呼吸的比例普遍较高,在比利时的Chimay地区采用离体测定法得到的自养呼吸比例最高,达0.90,这一结果与其他研究结果相差较大;在美国Ogeechee River地区进行的离体测定结果表明,根呼吸占土壤呼吸比

例在 0.60 ~ 0.63 之间<sup>[4]</sup>. 而本研究结果基本处于采用根去除法、挖沟法所得到的比例范围之内, 由于 2 种方法在试验处理上具有相似性, 因此其结果也更

具有可比性. 其次, 本研究所处地点为次生林, 相对于郁闭度更高的森林而言, 根系相对不发达, 由此导致根呼吸所占比例偏低.

表 1 北半球中纬度地区自养呼吸占土壤呼吸比例的测定结果比较<sup>1)</sup>  
Table 1 Comparison of the ratios of  $R_a$  to  $R_s$  measured in northern mid-latitude zone

区分方法	地点	国家	常绿或落叶型 <sup>2)</sup>	平均土壤呼吸速率 $/\mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$	$R_a/R_s$	文献
离体测定	Chimay	比利时	D	5.04	0.90	[17]
根去除法	Fichtelgebirge	德国	E	1.88	0.30	[18]
组分法	Åheden	瑞典	E	0.73	0.54	[15]
离体测定	Uppsala	瑞典	E	0.26	0.29	[19]
离体测定	Uppsala	瑞典	E	0.39	0.33	[19]
离体测定	Moselle	法国	D	1.74	0.40	[20]
差减法	Moselle	法国	D	1.74	0.52	[21]
根去除法	Roccarespampani	意大利	D	2.90	0.45	[22]
根去除法	Harvard Forest	美国	D	0.98	0.33	[9]
根去除法	Sisters, OR	美国	E	1.35	0.52	[3]
根去除法	Sisters, OR	美国	E	1.35	0.46	[3]
同位素法	Duke Forest, NC	美国	E	2.53	0.30	[13]
离体测定	Laurinburg, NC	美国	E	3.34	0.52	[23]
组分法	Oak Ridge, TN	美国	D	1.99	0.52	[24]
离体测定	Ogeechee River, GA	美国	D	2.33	0.63	[4]
离体测定	Ogeechee River, GA	美国	D	2.38	0.60	[4]
组分法	Kyushu	日本	E	1.64	0.49	[25]
挖沟法	三明	中国	E	3.63	0.48	[6]
挖沟法	三明	中国	E	2.49	0.43	[6]
挖沟法	三明	中国	D	1.20	0.40	[6]
挖沟法	长沙	中国	D	1.30	0.69	[26]
挖沟法	南京	中国	D	3.42	0.31	本研究

1) 表中相同地点的不同观测结果为不同森林类型下的观测数据; 2) D: 落叶林; E: 常绿林.

### 3.2 呼吸的温度敏感性

在本研究中, 在不同的生长季节, 异养和自养呼吸组分对土壤呼吸的贡献大小不同, 异养呼吸占土壤呼吸比例及自养呼吸占土壤呼吸比例均随土壤温

度的变化而变化, 其比例随温度的变异均可用对数方程拟合, 异养呼吸占土壤呼吸比例随温度升高而降低, 而自养呼吸占土壤呼吸比例随温度升高而升高(图 7). 由于温度的变异在某种程度上体现了树

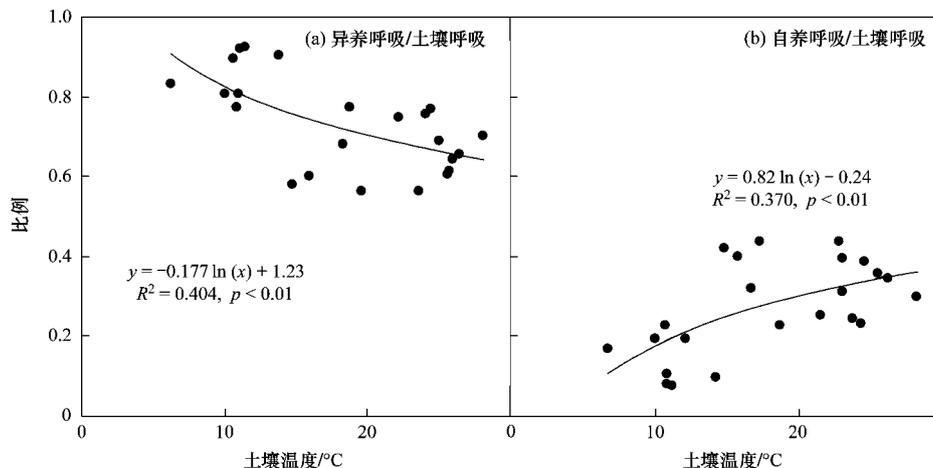


图 7 自养呼吸占土壤呼吸比例及异养呼吸占土壤呼吸比例与土壤温度的关系

Fig. 7 Relationships between the ratio of  $R_h$  to  $R_s$  and soil temperature, and between the ratio of  $R_a$  to  $R_s$  and soil temperature

木根系的生长节律,因而其比例随温度的变化也体现了自养和异养呼吸组分随树木根系生长的相对消长关系.即:温度升高的同时树木根系活动也日趋旺盛,自养呼吸组分对土壤呼吸的贡献程度日益增大.进一步而言,在温度增加的情况下,自养呼吸的响应更加明显,其  $Q_{10}$  值比异养呼吸大 68%,这一结果与 Boone 等<sup>[27]</sup>在美国 Harvard 森林所观测的结果具有一致的规律,他们发现在无根土壤上测定的呼吸速率温度敏感系数  $Q_{10}$  值为 2.5,而根呼吸的温度敏感系数  $Q_{10}$  值为 4.6,后者比前者高 84%. Zogg 等<sup>[28]</sup>和 Burton 等<sup>[29]</sup>也发现了类似的现象.由此推断,在全球变暖背景下,林木自养呼吸比异养呼吸对温度响应可能更快,这将会导致树木根系周转速度加快.那么,虽然在变暖情况下,植物生长可能会得到促进,但这些固定的碳可能会很快又释放到大气中,换言之,生物碳的不稳定性可能会增大.

#### 4 结论

(1)在树木生长的 3~10 月,次生林土壤呼吸中异养呼吸的比例呈减小趋势,而自养呼吸的比例呈增大趋势.

(2)在生长季尺度上,异养呼吸与土壤呼吸之间以及异养呼吸与自养呼吸之间的关系均可用对数方程拟合.

(3)异养呼吸的温度敏感性显著低于自养呼吸的温度敏感性.

致谢:感谢南京信息工程大学的张寒、古康乐、杨集在田间样品采集和分析中给予的帮助.

参考文献:

- [ 1 ] Kuzyakov Y. Sources of CO<sub>2</sub> efflux from soil and review of partitioning methods [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2006, **38**(3): 425-448.
- [ 2 ] Bond-lamberty B, Wang C K, Gower S T. A global relationship between the heterotrophic and autotrophic components of soil respiration [J]. *Global Change Biology*, 2004, **10**(10): 1756-1766.
- [ 3 ] Irvine J, Law B E. Contrasting soil respiration in young and old-growth ponderosa pine forests [J]. *Global Change Biology*, 2002, **8**(12): 1183-1194.
- [ 4 ] Pulliam W M. Carbon dioxide and methane exports from a southeastern floodplain swamp [J]. *Ecological Monographs*, 1993, **63**(1): 29-53.
- [ 5 ] Raich J W, Schlesinger W H. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate [J]. *Tellus*, 1992, **44**(2): 81-99.
- [ 6 ] 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 [J]. *生态学报*, 2005, **25**(8): 1941-1947.
- [ 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 [J]. *Biogeochemistry*, 2000, **48**(1): 115-146.
- [ 8 ] 杨玉盛, 董彬, 谢锦升, 等. 林木根呼吸及测定方法进展 [J]. *植物生态学报*, 2004, **28**(3): 426-434.
- [ 9 ] Bowden R, Nadelhoffer K J, Boone R D, *et al.* Contribution of aboveground litter, belowground litter, and root respiration to total soil respiration in a temperate mixed hardwood forest [J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 1993, **23**(7): 1402-1407.
- [ 10 ] Lavigne M B, Boutin R, Foster R J, *et al.* Soil respiration responses to temperature are controlled more by roots than by decomposition in balsam fir ecosystems [J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 2003, **33**(9): 1744-1753.
- [ 11 ] Kuzyakov Y, Larionova A A. Review of methods and results of separation of root and rhizomicrobial respiration [J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2005, **168**(4): 503-520.
- [ 12 ] Dioumaeva I, Trumbore S E, Schuur E A G, *et al.* Decomposition of peat from upland boreal forest: temperature dependence and sources of carbon [J]. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 2002, **108**(D3): 8222, doi:10.1029/2001JD000848.
- [ 13 ] Andrews J A, Harrison K G, Matamala R, *et al.* Separation of root respiration from total soil respiration using carbon-13 labeling during free-air carbon dioxide enrichment (FACE) [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1999, **63**(5): 1429 - 1435.
- [ 14 ] Kuzyakov Y, Domanski G. Model for rhizodeposition and CO<sub>2</sub> efflux from planted soil and its validation by <sup>14</sup>C pulse labelling of ryegrass [J]. *Plant and Soil*, 2002, **239**(1): 87-102.
- [ 15 ] Höglberg P, Nordgren A, Buchmann N, *et al.* Large-scale forest girdling shows that current photosynthesis drives soil respiration [J]. *Nature*, 2001, **411**(6839): 789-792.
- [ 16 ] Subke J A, Hahn V, Battipaglia G, *et al.* Feedback interactions between needle litter decomposition and rhizosphere activity [J]. *Oecologia*, 2004, **139**(4): 551-559.
- [ 17 ] Thierron V, Laudelout H. Contribution of root respiration to total CO<sub>2</sub> efflux from the soil of a deciduous forest [J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 1996, **26**(7): 1142-1148.
- [ 18 ] Buchmann N. Biotic and abiotic factors controlling soil respiration rates in *Picea abies* stands [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2000, **32**(11): 1625-1635.
- [ 19 ] Widén B, Majdi H. Soil CO<sub>2</sub> efflux and root respiration at three sites in a mixed pine and spruce forest: seasonal and diurnal variation [J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 2001, **31**(5): 786-796.
- [ 20 ] Epron D, Farque L, Lucot E, *et al.* Soil CO<sub>2</sub> efflux in a beech forest: the contribution of root respiration [J]. *Annals of Forest Science*, 1999, **56**(4): 289-295.
- [ 21 ] Epron D, LeDantec V, Dufrene E, *et al.* Seasonal dynamics of

- soil carbon dioxide efflux and simulated rhizosphere respiration in a beech forest [J]. *Tree Physiology*, 2001, **21**(2): 145-152.
- [22] Rey A, Pegoraro E, Tedeschi V, *et al.* Annual variation in soil respiration and its components in a coppice oak forest in Central Italy [J]. *Global Change Biology*, 2002, **8**(9): 851-866.
- [23] Maier C A, Kress L W. Soil CO<sub>2</sub> evolution and root respiration in 11 year-old loblolly pine (*Pinus taeda*) plantations as affected by moisture and nutrient availability [J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 2000, **30**(3): 347-359.
- [24] Malhi Y, Baldocchi D D, Jarvis P G. The carbon balance of tropical, temperate and boreal forests [J]. *Plant, Cell and Environment*, 1999, **22**(6): 715-740.
- [25] Ohashi M, Gyokusen K, Saito A. Contribution of root respiration to total soil respiration in a Japanese cedar (*Cryptomeria japonica* D. Don) artificial forest [J]. *Ecological Research*, 2000, **15**(3): 323-333.
- [26] 朱凡, 王光军, 田大伦, 等. 杉木人工林去除根系土壤呼吸的季节变化及影响因子[J]. *生态学报*, 2010, **30**(9): 2499-2506.
- [27] Boone R D, Nadelhoffer K J, Canary J D, *et al.* Roots exert a strong influence on the temperature sensitivity of soil respiration [J]. *Nature*, 1998, **396**(6711): 570-672.
- [28] Zogg G P, Zak D R, Burton A J, *et al.* Fine root respiration in northern hardwood forests in relation to temperature and nitrogen availability [J]. *Tree Physiology*, 1996, **16**(8): 719-725.
- [29] Burton A J, Pregitzer K S, Zogg G P, *et al.* Latitudinal variation in sugar maple fine-root respiration [J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 1996, **26**(10): 1761-1768.