

北亚热带-南暖温带过渡区典型森林生态系统 土壤呼吸及其组分分离

常建国^{1,2}, 刘世荣^{1,*}, 史作民¹, 陈宝玉³, 朱学凌⁴

(1. 中国林业科学研究院森林生态环境与保护研究所, 北京 100091 2. 中国林业科学研究院华北林业研究所, 太原 030012 ;
3. 北京师范大学生命科学学院, 北京 100875 ;4. 河南宝天曼自然保护区管理局, 内乡 474300)

摘要 :为阐明北亚热带-南暖温带过渡区典型森林生态系统土壤呼吸与其组分的碳排放速率及其对土壤水热变化的响应规律,本研究用壕沟断根法布设了土壤呼吸组分分离试验,并对土壤温湿度与呼吸速率进行了一年的观测。统计分析结果表明:土壤呼吸及其组分的呼吸速率在夏秋季较高、春冬季较低,土壤温度低于 15℃ 时,呼吸速率的季节性变化主要受控于土壤温度;土壤温度高于 15℃,而含水量低于 0.20 kg·kg⁻¹ 时,含水量对呼吸速率有明显的抑制作用;当土壤温湿度分别高于 15℃ 与 0.20 kg·kg⁻¹,呼吸速率同时受到土壤温湿度的影响;土壤温湿度分别能解释呼吸速率季节性变化的 80.36%~94.94% 与 7.20%~48.45%。温度的影响高于含水量。5 种类型中土壤呼吸、自养与异养呼吸的 Q_{10} 值变化范围分别为 2.30~2.44、2.49~2.82 与 2.09~2.35,每个类型中自养呼吸的温度敏感性均为最高,其次为土壤呼吸,异养呼吸最低。锐齿栎幼林、锐齿栎老林、华山松与短柄枹针阔混交林、千金榆与短柄枹阔叶混交林及栓皮栎林自养呼吸日贡献率的变化范围分别为 35.19%~57.73%、28.73%~49.24%、28.67%~49.82%、24.24%~41.70% 与 30.07%~46.22%,土壤呼吸的年排放量分别为 1105.15 gC·m⁻²·a⁻¹、779.12 gC·m⁻²·a⁻¹、821.23 gC·m⁻²·a⁻¹、912.19 gC·m⁻²·a⁻¹ 与 899.50 gC·m⁻²·a⁻¹,其中自养呼吸的年贡献率分别为 52.89%、39.77%、44.17%、38.15% 与 43.26%。若考虑断根样方内细根分解的影响,则自养呼吸的年贡献率分别为 65.56%、47.95%、53.80%、46.83% 与 53.86%。5 个林分间的土壤呼吸速率、异养呼吸速率没有显著差异 ($p>0.05$),而自养呼吸速率存在显著差异 ($p<0.05$)。类型间活细根生物量的差异解释了自养呼吸速率差异的 94.71%。

关键词 :土壤呼吸;自养呼吸;异养呼吸;土壤温度;土壤含水量;组分分离

文章编号:1000-0933(2007)05-1791-12 中图分类号:Q948.5718.5 文献标识码:A

Soil respiration and its components partitioning in the typical forest ecosystems at the transitional area from the northern subtropics to warm temperate, China

CHANG Jian-Guo^{1,2}, LIU Shi-Rong^{1,*}, SHI Zuo-Min¹, CHEN Bao-Yu³, ZHU Xue-Ling⁴

1 The Research Institute of Forest Ecology, Environment and Protection, CAF Beijing 100091, China

2 Research Institute of Forestry in North China, CAF Taiyuan 030012, China

3 College of Life Science, Beijing Normal University Beijing 100875, China

4 Baotianman Nature Reserve Administration, Neixiang 474350, China

基金项目 :国家自然科学基金重大资助项目(30590383);国家自然科学基金杰出青年基金资助项目(30125036);国家“十一五”科技支撑资助项目(2006BAD03A04)

收稿日期 :2006-11-23; **修订日期** :2007-02-20

作者简介 :常建国(1971~),男,山西太原人,博士生,高级工程师,主要从事森林生态系统与碳循环研究。E-mail: cjl9710322@yahoo.com.cn

* **通讯作者** Corresponding author. E-mail: Liusr@caf.ac.cn

Foundation item :This work was financially supported by the Major Project of National Natural Science Foundation of China (No. 30590383), the Outstanding Young Scientist Program of National Natural Science Foundation of China (No. 30125036) and China National Scientific and Technical Key Project (No. 2006BAD03A04)

Received date :2006-11-23; **Accepted date** :2007-02-20

Biography :CHANG Jian-Guo, Ph. D. candidate, Senior engineer, mainly engaged in forest ecosystem and carbon cycling. E-mail: cjl9710322@yahoo.com.cn

Abstract : In order to ascertain the carbon emission rate and soil respiration response by its components to changing soil temperature and water content in the five typical forest stands at the transitional area from the northern subtropics to warm temperate , the root-excluded quadrates by trenching were set up to partition soil respiration components and the soil temperature , soil water content and respiration rate in each plot were simultaneously measured over the whole year experiment. The results indicate that respiration rates of the total soil respiration and its different components are higher in summer and autumn than that in spring and winter. The respiration rate is largely controlled by soil temperature when soil temperature is below 15 ℃ , while it is clearly limited by soil water content when soil temperature is above 15 ℃ and soil water content is below 0.20 kg·kg⁻¹. However , it is simultaneously affected by both soil temperature and soil water content when soil temperature is above 15 ℃ and soil water content is above 0.20 kg·kg⁻¹. Soil temperature and soil water content can account for 80.36%—94.94% and 7.20%—48.45% of seasonal variation in respiration rates , respectively , suggesting that the effect of soil temperature on soil respiration is greater than that of soil water content. The Q_{10} values for autotrophic respiration , soil respiration and heterotrophic respiration are 2.49—2.82 , 2.30—2.44 and 2.09—2.35 , respectively , in the five stands. The temperature sensitivity of autotrophic respiration is the highest , followed by soil respiration and the heterotrophic respiration is the lowest , regardless of stands. The contribution rates of daily autotrophic respiration in *Quercus aliena* var. *acuteserrata* young stand , *Quercus aliena* var. *acuteserrata* old stand , broadleaf/coniferous mixed stand , broadleaf mixed forest and *Quercus variabilis* stand are 35.19%—57.73% , 28.73%—49.24% , 28.67%—49.82% , 24.24%—41.70% and 30.07%—46.22% , respectively. Their annual amounts of carbon release through soil respiration are 1105.15 , 779.12 , 821.23 , 912.19 gC·m⁻²·a⁻¹ and 899.50 gC·m⁻²·a⁻¹ , respectively. Their annual contribution percentages of autotrophic respiration are 52.89% , 39.77% , 44.17% , 38.15% and 43.26% , respectively , while if taking account of fine root decomposition in root-excluded quadrates , their annual contribution rates of autotrophic respiration increase to 65.56% , 47.95% , 53.80% , 46.83% and 53.86% , respectively. The statistical analysis indicates there is no significant differences in soil respiration rate and the heterotrophic respiration rate among the five stands ($p>0.05$) , but the significant differences occur in the autotrophic respiration rate ($p<0.05$). The live fine root biomass accounts for 94.71% of the difference of autotrophic respiration rates among the five stands.

Key Words : soil respiration ; autotrophic respiration ; heterotrophic respiration ; soil temperature ; soil water content ; component partition

森林土壤呼吸由自养呼吸 (根呼吸)和异养呼吸 (土壤微生物、土壤动物呼吸及土壤有机质分解排放CO₂)复合而成^[1]。土壤呼吸及其组分不仅在不同的时间尺度、不同的水热环境、不同的森林生态系统及不同的分离方法下存在较大变异、而且对变异产生的驱动变量也存在争论^[2,3]。

土壤温湿度对土壤呼吸及其组分的影响一直是研究的重点^[4,5]。有的研究认为自养呼吸的温度敏感性高于异养呼吸,有的认为异养呼吸的温度敏感性高于自养呼吸^[6,7],或认为二者具有相同的温度敏感性^[8]。土壤含水量对土壤呼吸组分的影响比较复杂^[9],多数研究认为土壤含水量与呼吸成正相关关系、但也有研究表明二者成负相关或没有相关性^[10-13]。另外,短期、长期气候变化下自养与异养呼吸的相对重要性还存在争论^[10,14],所以,深入了解土壤温湿度对土壤呼吸及其组分的影响机制尚需开展进一步的研究。

不同森林类型间的土壤呼吸及其组分存在差异,如北方森林中自养呼吸对土壤呼吸的贡献率为62%~89%,而在其它一些森林生态系统中异养呼吸 (贡献率为70%)构成了土壤呼吸的主体^[15-17]。认为差异产生的主要驱动变量是环境因子与土壤理化性质^[18],也有认为是森林生产力^[19],如何分离单个因子对森林生态系统土壤呼吸及其组分差异的影响并据此确定主要驱动变量仍是未来研究中的难点。

除森林生态系统类型、土壤温湿度外,呼吸组分分离方法的不统一被认为是导致争议的一个主要原

因^[20]。因此,用相同的方法对不同森林生态系统的土壤呼吸组分进行分离、量化与比较,探索各组分对环境与生物因子变异的响应规律,并揭示不同系统间土壤呼吸及其组分变异的主要驱动变量,对阐明森林生态系统的碳平衡机理有重要意义。

本研究针对目前土壤呼吸组分分离中的热点与难点问题,在北亚热带-暖温带过渡区选择分布面积较大、有代表性的5种典型林分类型,采用相同的分离方法(壕沟断根法),研究揭示:(1)土壤呼吸及其组分随土壤温湿度的季节性变化规律及与土壤温湿度之间的量化关系;(2)土壤呼吸及其组分温度敏感性指数(Q_{10} 值)的变化范围;(3)土壤呼吸及其组分在不同时期C排放量与贡献率;(4)不同林分间土壤呼吸及其组分的变异及变异产生的主要驱动变量。

1 研究区域与试验样地概况

研究地点位于河南省内乡县宝天曼自然保护区(111°47′~112°04′E,33°20′~33°36′N),是北亚热带向南暖温带的过渡区域。区内年均气温15.1℃,最低月平均气温1.5℃(1月份),最高月平均气温27.8℃(7月份)。全年降雨量900 mm。植被以暖温带落叶阔叶林为主,兼有北亚热带常绿阔叶林的特点。林地土壤的垂直分布比较明显,海拔600~800 m为山地褐土,800~1 300 m为山地黄棕壤。2005年在每个林分类型中各选择一块面积为20m×20m的试验样地,样地的概况为:

锐齿栎(*Quercus aliena* var. *acuteserrata*)幼龄林样地位于海拔1 350m的阳坡,坡度21°,林分的平均年龄为40a,密度1 500株·hm⁻²,平均高度15 m,平均胸径13.8 cm。伴生乔木有短柄枹(*Quercus glandulifera* var. *brevipetiolata*)、灯台树(*Bothrocaryum controversum*)等,郁闭度0.85,灌木层有山梅花(*Philadelphus incanus*)等,盖度0.23。土壤为山地黄棕壤。

栓皮栎(*Quercus variabilis*)林样地位于海拔1 300 m的半阳坡,坡度21°,林分平均年龄45a,密度1300株·hm⁻²,林分平均胸径17.1 cm,平均高度16.1m,郁闭度0.80。伴生乔木有化香(*Platycarya strobilacea*)、千金榆(*Carpinus cordata*)等。伴生灌木包括胡枝子(*Lespedeza buergeri*)、绣线菊(*Spiraea fritschiana*)等,其中胡枝子占优势,灌木层的总盖度为0.30。土壤为山地黄棕壤。

千金榆与短柄枹混交林(以下简称阔叶混交林)样地位于海拔1 290 m的阳坡,坡度22°,林分平均年龄35a,密度1 350株·hm⁻²,林分平均胸径12.1 cm,平均高度14.5 m,郁闭度0.80,乔木层主要由千金榆与短柄枹组成,其他伴生乔木包括青冈(*Quercus glauca*)、山桃木(*Juglans mandshurica*)等,林下灌木层包括胡枝子、连翘(*Forsythia suspensa*)、荚迷(*Viburnum dilatatum*)等,灌木总盖度为0.30。土壤为沙壤土。

短柄枹与华山松(*Pinus armandii*)混交林(以下简称针-阔混交林)位于海拔1290 m的半阳坡,坡度22°,林分平均年龄50a,密度1 400株·hm⁻²,林分平均胸径15.2 cm,平均高度14.8 m,郁闭度0.85,林下灌木包括胡枝子、连翘等,总盖度为0.20。土壤为沙壤土。

锐齿栎老林位于海拔1270 m的阴坡,坡度22°,林分平均年龄为85a,密度为800株·hm⁻²,林分平均高21.3 m,平均胸径32.5 cm,伴生乔木包括千金榆、短柄枹、椴树(*Tilia tuan*)等,郁闭度0.85,林下灌木包括胡枝子等,灌木总盖度0.35,土壤为山地黄棕壤。各样地土壤的理化性质见表1。

2 研究方法

2.1 试验设计

2005年3月,在每个样地中用壕沟法(壕沟深度达基岩或根系分布层以下,壕沟内插入薄塑料板阻止根系进入)随机设置了5组(每组2个)有枯落物的断根样方(1.5m×1.5m),在每组中的一个样方内安置2个土壤呼吸测定环对断根样方内的总呼吸速率(R_{NR})进行测定,另外一个用于土壤含水量的观测;此外,在断根样方外随机选择10个观测点,每个观测点处设置2个小样方(0.5m×0.5 m),其中的一个去除枯落物后安置1个土壤呼吸测定环用于土壤呼吸速(R_s)的观测^[21],另外一个保留枯落物同样安置1个土壤呼吸测定环用于样地总呼吸速率(R_{Total})的测定。这样每种林分类型的样地中共设置30个土壤呼吸测定环对断根样方内外的呼吸速率进行观测与对比,据此分离与量化土壤呼吸及其组分。

表 1 0 ~ 20 cm 土壤理化性质及细根生物量 *

林分类型 Stand types	土壤理化性质 Physical and chemical properties of soil				细根生物量 (<5mm) The biomass of fine root (t·hm ⁻²)	
	有机碳 (%) Organic carbon	全氮 (%) Total N	PH 值 PH value	容重 (g·cm ⁻³) Soil bulk density	活细根 Live fine root	死细根 Dead fine root
林分 1 Stand 1	5.08	0.30	4.10	0.99	9.87	3.12
林分 2 Stand 2	3.44	0.22	4.33	1.02	4.43	1.32
林分 3 Stand 3	3.55	0.26	4.65	0.96	5.59	1.76
林分 4 Stand 4	3.31	0.22	4.20	1.01	5.53	1.65
林分 5 Stand 5	3.53	0.23	4.36	0.99	6.68	1.89

* 表 1 中的林分 1、林分 2、林分 3、林分 4 与林分 5 分别表示锐齿栎幼林、锐齿栎老林、针-阔混交林、阔叶混交林与栓皮栎林, 下同。The stand 1 , stand 2 , stand 3 , stand 4 and stand 5 in Tab. 1 represent *Quercus aliena* var. *acuteserrata* young stand , *Quercus aliena* var. *acuteserrata* old stand , broadleaf and needle leaf mixed stand , broadleaf mixed stand and *Quercus variabilis* stand respectively , the same below

2.2 土壤温湿度的观测

在土壤呼吸速率观测期 5 种林分土壤温度 (5 cm 土层) 的观测频率与呼吸速率相同 (7 ~ 10 次/d) ρ ~ 10 cm 土壤含水量用烘干法测定, 具体观测日期见图 1 ~ 图 5 ; 全年其它日期的土壤温湿度由宝天曼森林生态站按观测技术规程完成, 每天数次观测的土壤温湿度均值为日平均土壤温湿度。

2.3 细根生物量的观测

首先在断根样方设置初期 (2005 年 3 月) 对每个林分样地内的细根生物量进行一次观测, 其后在土壤封冻期外每 3 个月选择一天, 当呼吸速率测定结束后, 用内径 10 cm , 高 20 cm 的环刀采集断根样方外 10 个基座下 0 ~ 20 cm 的土壤, 用水洗筛选法^[22]人工分拣直径 < 5 mm 的死、活细根, 烘干称重后确定细根生物量。

2.4 呼吸速率的观测

本研究在断根后定期测定断根样方内外的呼吸速率, 当二者出现明显差异且断根样方内呼吸速率相对稳定后, 于 2005 年 10 月 (断根 7 个月后) 开始全面观测。呼吸速率观测是用便携式红外气体分析仪 (LI-6400P , LI-COR Inc.) 配备的土壤呼吸室 (LI-6400P-09 , LI-COR Inc.) 完成的。基座插入土壤的深度为 3 cm , 在夏秋季温度较高时的观测频率为 10 次/d , 具体的观测时间为 0 :00、3 :00、6 :00、8 :00、10 :00、12 :00、15 :00、18 :00、21 :00 与 24 :00 , 在春冬季温度较低时的观测频率为 7 次/d , 具体观测时间为 2 :00、6 :00、9 :00、12 :00、15 :00、18 :00、22 :00。取每日数次观测的平均值作为日平均呼吸速率。

2.5 土壤呼吸及其组分的模拟及相关因子的计算

本研究利用 Rey 等^[16]的方法对土壤的自养与异养呼吸速率进行区分与推算 :

$$R_A = R_{Total} - R_{NR} \quad R_H = R_S - (R_{Total} - R_{NR})$$

土壤呼吸及其组分呼吸速率与土壤温度间的关系采用指数模型模拟^[23] :

$$R_s \text{ (} R_H \text{ 或 } R_A \text{)} = R_0 e^{\beta T}$$

式中 R_s 、 R_H 与 R_A 分别为日平均土壤呼吸速率 ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)、日平均异养呼吸速率 ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) 与日平均自养呼吸速率 ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) ; T 为日平均土壤温度 (°C) ; R_0 为 0°C 的呼吸速率 ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) ; β 为温度反应系数。土壤温度所能解释的呼吸速率变化用该回归模型的决定系数 R^2 的百分数表示。

温度敏感性指数 Q_{10} 是指温度升高 10°C 时土壤呼吸速率变化的倍数 :

$$Q_{10} = e^{10\beta}$$

式中 β 为温度反应系数。

使用实测数据与多种回归曲线对土壤含水量与呼吸速率间的关系进行拟合, 结果表明一元一次方程的拟合优度 (R^2) 与回归关系的显著性较高, 因此本研究采用如下模型对土壤含水量与呼吸速率间的关系进行模拟 :

$$R_s (R_H \text{ 或 } R_A) = aW + b$$

式中, W 为日平均土壤含水量 ($\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$) ; a b 为参数 ;土壤含水量所能解释的呼吸速率变化用该回归模型的决定系数 R^2 的百分数表示。

土壤呼吸及其组分在不同时期的 C 排放量根据回归模型 (表 2)推算 ;不同时期土壤呼吸组分的贡献率为各组分在该时期的 C 排放量占该时期土壤呼吸 C 排放量的百分比。

2.6 数据处理

数据统计分析是在 SPSS12.0 for Windows 软件下完成 ,用 One-way ANOVA 模块对不同林分类型及处理间的土壤含水量、土壤温度、土壤呼吸、自养呼吸、异养呼吸进行方差分析 ;用曲线估计 (Curve estimation)法对呼吸速率与土壤含水量、土壤温度间的回归关系做拟合 ,在对多种回归曲线对比分析的基础上 ,选择拟合优度较高的模型用于统计预测。动态曲线用 Sigmaplot9.0 软件绘制。

3 结果分析

3.1 土壤温湿度的季节变化

宝天曼森林生态定位站的观测结果表明 ,锐齿栎幼林、锐齿栎老林、针-阔混交林、阔-阔混交林及栓皮栎林的日平均土壤温度有明显的季节性变化 ,从一月起持续上升 ,于夏季 7 月 19 日达到最高 ,分别为 21.89 $^{\circ}\text{C}$ 、21.24 $^{\circ}\text{C}$ 、21.64 $^{\circ}\text{C}$ 、21.98 $^{\circ}\text{C}$ 和 21.88 $^{\circ}\text{C}$,然后开始下降在冬季的 12 月 17 日降至最低 ,分别为 -4.96 $^{\circ}\text{C}$ 、-5.36 $^{\circ}\text{C}$ 、-5.16 $^{\circ}\text{C}$ 、-4.66 $^{\circ}\text{C}$ 与 -5.06 $^{\circ}\text{C}$,年平均土壤温度分别为 10.01 $^{\circ}\text{C}$ 、9.50 $^{\circ}\text{C}$ 、9.80 $^{\circ}\text{C}$ 、10.32 $^{\circ}\text{C}$ 、9.90 $^{\circ}\text{C}$ 。分布在阳坡的锐齿栎幼林、阔-阔混交林与栓皮栎林的土壤温度略高于分布在阴坡的锐齿栎老林与半阳坡的针阔混交林 ,但林分间土壤温度没有显著差异 ($p > 0.05$)。

5 种林分 0 ~ 10 cm 层的土壤含水量也有明显的季节性变化且变化趋势基本相同 (图 1 ~ 图 5) 。3 月初土壤开始解冻 ,覆雪融化 ,土壤含水量较高 (0.20 ~ 0.30 $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$) ;4 ~ 6 月上旬降水较少 ,含水量处于全年的最低水平 ,有降水时会出现一个跳跃 ;6 月下旬 ~ 10 月降水增多 ,含水量保持在全年的最高状态 ,11 月后随降水减少而缓慢下降。呼吸速率观测期 ,锐齿栎老林、锐齿栎幼林、栓皮栎林、针-阔混交林与阔-阔混交林日平均土壤含水量变化范围为 0.17 ~ 0.46 $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、0.17 ~ 0.44 $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、0.18 ~ 0.40 $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、0.17 ~ 0.35 $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 与 0.11 ~ 0.30 $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$,林分间的土壤含水量存在极显著差异 ($p < 0.001$)。

每种林分中断根样方内的土壤温湿度略高于对照

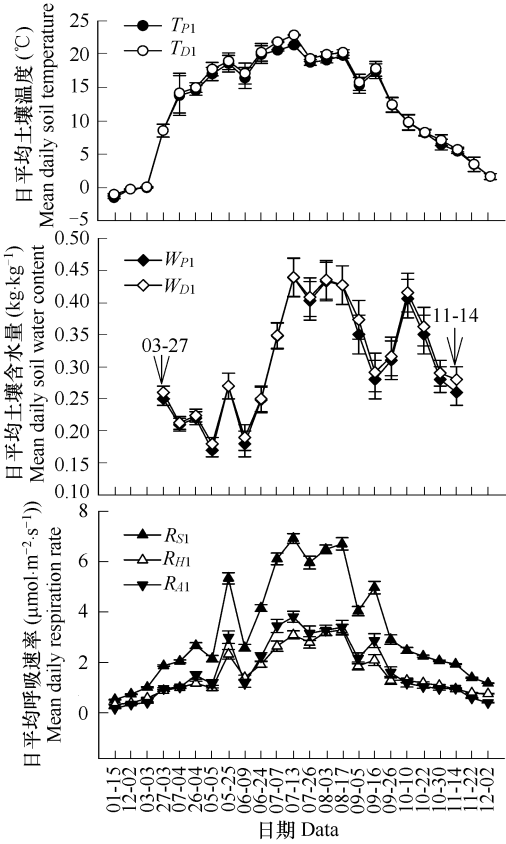


图 1 林分 1 的呼吸速率随土壤温湿度的季节变化

Fig.1 Seasonal course of respiration rate of stand 1 varying with soil temperature and soil water content

图 R_{S1} 表示林分的日平均土壤呼吸速率 ; R_{H1} 表示林分的日平均异养呼吸速率 ; R_{A1} 表示林分的日平均自养呼吸速率 ; T_{P1} 表示林分样地的日平均土壤温度 ; T_{D1} 表示林分断根样方的日平均土壤温度 ; W_{D1} 表示林分断根样方的日平均土壤含水量 ; W_{P1} 表示林分样地的日平均土壤含水量 ,误差线表示 $\pm$ S. E. ,以下同。

R_{S1} in Fig represent the mean daily soil respiration rates ; R_{H1} represent the mean daily heterotrophic respiration rates of stands ; R_{A1} represent the mean daily autotrophic respiration rates of stands ; T_{P1} represent the mean daily soil temperature in plots of stands ; T_{D1} represent the mean daily soil temperature in root-excluded quadrates of stands ; W_{D1} represent the mean daily soil water content in root-excluded quadrates of stands ; W_{P1} represent the mean daily soil water content in plots of stands ; Error bars mean $\pm$ S. E. ; the same below

(图 1 ~ 图 5) ,这是因为断根样方内活根死亡后减少了对水分的吸收 ,并对土壤温度产生了一定的影响 ,但与对照 (断根样方外的 10 个观测点)间没有显著差异 ($p>0.05$) 。

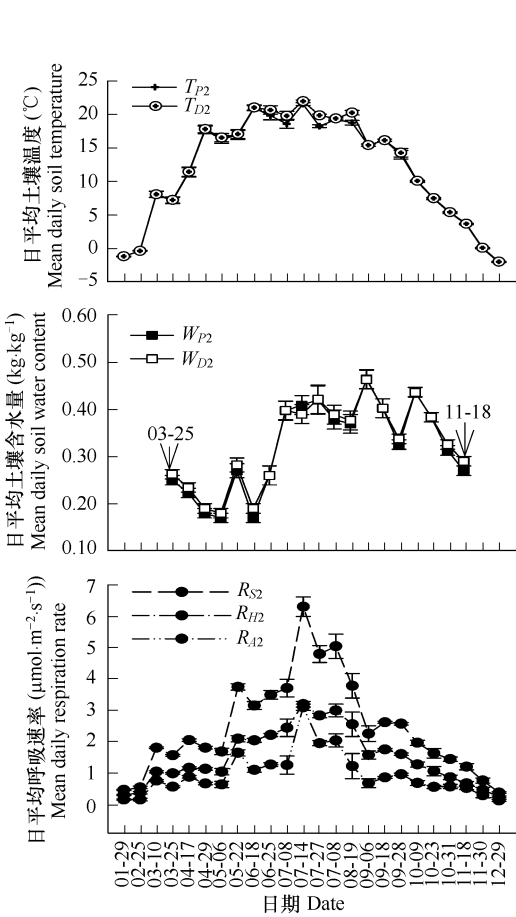


图 2 林分 2 的呼吸速率随土壤温湿度的季节变化

Fig. 2 Seasonal course of respiration rate of stand 2 varying with soil temperature and soil water content

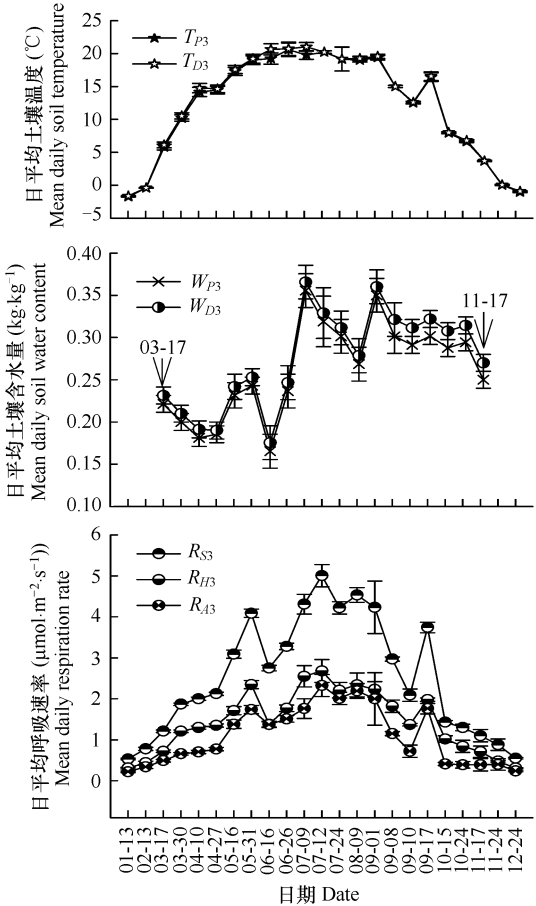


图 3 林分 3 的呼吸速率随土壤温湿度的季节变化

Fig. 3 Seasonal course of respiration rate of stand 3 varying with soil temperature and soil water content

3.2 土壤呼吸及其组分呼吸速率随土壤温湿度的季节性变化及与土壤温湿度的关系

5 种林分的土壤呼吸、自养呼吸与异养呼吸速率均随土壤温湿度的变化表现出明显的季节性波动 (图 1 ~ 图 5)。3 月初土壤含水量较高 ,其后因降水减少开始下降 ,呼吸速率没有受此影响仍随土壤温度的升高而上升 ,但在土壤温度高于 15℃ 而含水量低于 0.20 kg·kg⁻¹ 时出现明显下落。此后进入雨季 (6 月下旬) ,土壤含水量不再成为呼吸速率的限制因子 ,呼吸速率随土壤温湿度在波动中攀升 ,于夏季 7 月达到最大。进入秋季后 ,含水量继续保持在 0.25 kg·kg⁻¹ 以上 ,但呼吸速率随土壤温度在波动中下降。冬季时 ,呼吸速率与土壤温度均降至全年最低 ,二者的变化趋势保持高度一致。

从图 1 ~ 图 5 可知 ,土壤温度低于 15℃ 时 ,含水量对土壤呼吸、自养与异养呼吸速率变化的影响很小 ,土壤温度是主要的影响因子 ;当土壤温湿度分别高于 15 ℃ 与 0.20 kg·kg⁻¹ 时 ,呼吸速率同时受到土壤温湿度的影响 ,但土壤温度的影响更为明显 ;当土壤温度高于 15 ℃ 和土壤含水量低于 0.20 kg·kg⁻¹ 时 ,土壤含水量对呼吸速率有明显的抑制作用。季节变化中 ,5 种林分异养呼吸速率的变异系数分别为 51.00% ~ 58.61% (平均为 54.70%) ,自养呼吸速率的变异系数为 61.05% ~ 73.38% (平均为 65.59%) ,可见自养、异养呼吸都存在较大的季节性变异 ,但自养呼吸的变异高于异养呼吸。

从图 1 ~ 图 5 可以看出 ,锐齿栎幼林的土壤温度较低时异养呼吸速率高于自养呼吸 ,温度较高时自养呼

吸速率高于异养呼吸,但是,其它四个林分中所有观测日期的异养呼吸速率均高于自养呼吸,土壤温湿度的季节性变化对此没有影响。

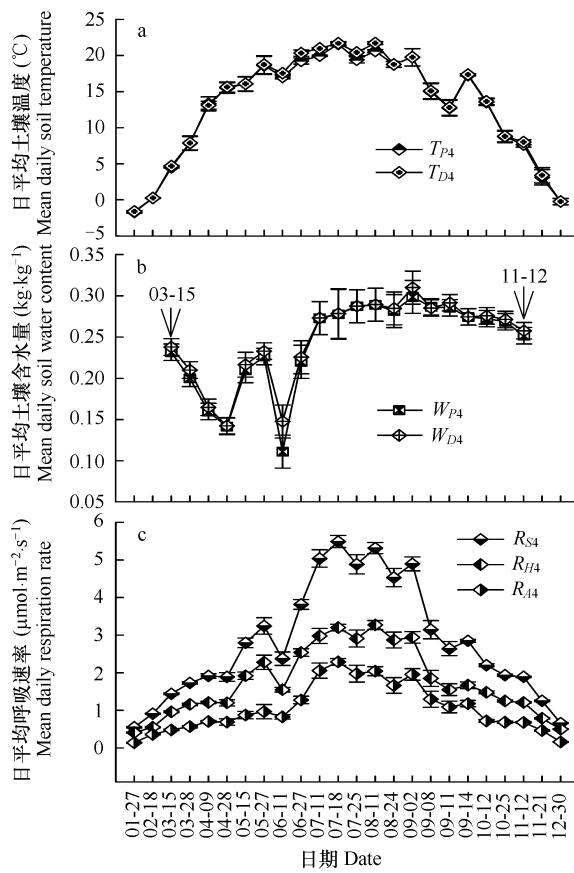


图4 林分4的呼吸速率随土壤温湿度的季节变化

Fig.4 Seasonal course of respiration rate of stand 4 varying with soil temperature and soil water content

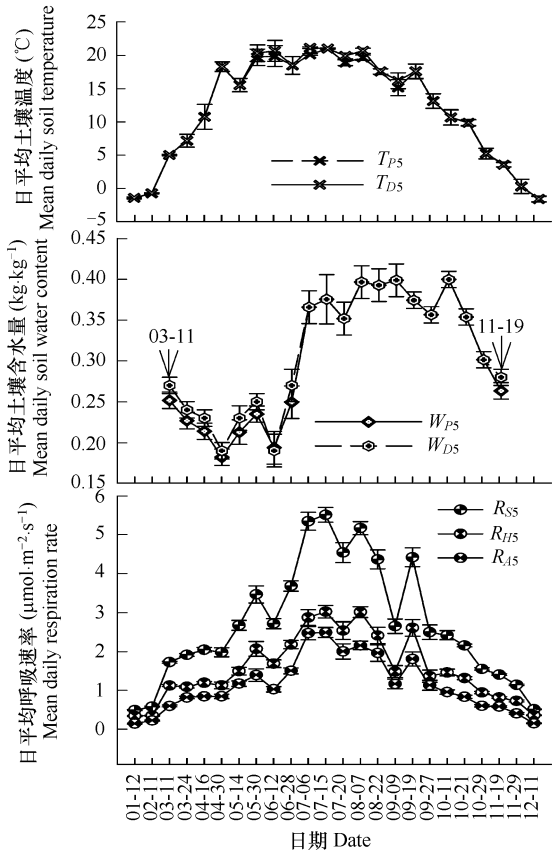


图5 林分5的呼吸速率随土壤温湿度的季节变化

Fig.5 Seasonal course of respiration rate of stand 5 varying with soil temperature and soil water content

利用图1~5中的测定结果对5种林分类型的土壤温度与土壤呼吸速率、自养呼吸速率及异养呼吸速率分别进行回归,结果表明土壤温度与呼吸速率成极显著的指数函数关系(表2),土壤温度可以分别解释土壤呼吸速率、异养呼吸速率及自养呼吸速率季节变化的85.46%~94.94%(平均89.01%)、82.63%~93.34%(平均88.33%)与80.36%~91.88%(平均86.16%);土壤呼吸、异养呼吸及自养呼吸的温度敏感性指数(Q_{10} 值)的变化范围分别为2.30~2.44(平均为2.38)、2.09~2.35(平均为2.19)与2.49~2.82(平均为2.61),每种林分中土壤呼吸及其组分的温度敏感性大小顺序均为,自养呼吸温度敏感性>土壤呼吸>异养呼吸。

从表2可知,除分布在阴坡的锐齿栎老林外,其他4种林分的土壤呼吸及其组分呼吸速率均与土壤含水量成显著($p<0.05$)的一元一次函数关系。土壤含水量对土壤呼吸、异养呼吸及自养呼吸速率季节性变化的解释能力分别为23.80%~47.10%、23.06%~48.45%和20.45%~41.14%,对土壤温度不能解释的部分起到了补充解释的作用,但远低于土壤温度的解释能力。

3.3 土壤呼吸及其组分的碳排放量

在该区域的5种林分类型,土壤温度是呼吸速率季节性变化中最主要的控制因子,对呼吸速率的季节性变化有很高的解释能力(80.36%~94.94%),因此本研究利用表2中呼吸速率与土壤温度间的回归模型与全年的日平均土壤温度对5种林分的土壤呼吸及其组分全年逐日的平均呼吸速率分别进行了模拟,并据此推算了不同时期的碳排放量。结果表明五种林分土壤呼吸、异养和自养呼吸的月排放量在1月最低,平均分别

为 21.51、13.71 gC·m⁻²与 7.80 gC·m⁻²,然后逐月上升,于 7 月份达到最高,平均分别为 140.98、75.67 gC·m⁻²与 65.31 gC·m⁻²,此后逐月下降。月排放量在全年的变化趋势为单峰曲线,每种林分中月排放量的变化均与此相同。

若按中国农历将全年划分为春季(2 月 4 日~5 月 4 日)、夏季(5 月 5 日~8 月 6 日)、秋季(8 月 7 日~11 月 6 日)和冬季(11 月 7 日~翌年 2 月 3 日),五种类型的土壤呼吸、异养呼吸及自养呼吸在夏秋两季的排放量占全年相应排放量的比例较高,分别为 72.93%~76.55% (平均为 75.10%)、54.03%~59.50% (平均为 56.53%)与 74.25%~82.21% (平均为 78.21%) ,这与两个季节中土壤温湿度相对较高,呼吸速率较快有关。

表 2 土壤温湿度与土壤呼吸及其组分间的关系

Table 2 Relationships of soil respiration and its components with soil temperature and soil water content						
模型及 Q_{10} Models and Q_{10}	林分类型 Stand types					
	林分 1 Stand 1	林分 2 Stand 2	林分 3 Stand 3	林分 4 Stand 4	林分 5 Stand 5	
Model	$R_{s1} = 0.9217e^{0.0892T}$	$R_{s2} = 0.6815e^{0.0894T}$	$R_{s3} = 0.7238e^{0.0871T}$	$R_{s4} = 0.8049e^{0.0842T}$	$R_{s5} = 0.8320e^{0.0833T}$	
R^2	0.8684	0.8642	0.9494	0.9139	0.8546	
p	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
Q_{10}	2.44	2.44	2.39	2.32	2.30	
Mod1	$R_{H1} = 0.5278e^{0.0739T}$	$R_{H2} = 0.4334e^{0.0857T}$	$R_{H3} = 0.4437e^{0.0808T}$	$R_{H4} = 0.5487e^{0.0778T}$	$R_{H5} = 0.5365e^{0.0746T}$	
R^2	0.8263	0.8898	0.9206	0.9334	0.8463	
p	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
Q_{10}	2.09	2.35	2.24	2.18	2.11	
Model	$R_{A1} = 0.3956e^{0.1037T}$	$R_{A2} = 0.2467e^{0.0912T}$	$R_{A3} = 0.2738e^{0.0959T}$	$R_{A4} = 0.2496e^{0.0945T}$	$R_{A5} = 0.2957e^{0.0938T}$	
R^2	0.8812	0.8036	0.9188	0.8566	0.8479	
p	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
Q_{10}	2.82	2.49	2.61	2.57	2.55	
Model	$R_{s1} = 15.48W - 0.83$	$R_{s2} = 5.01W + 1.35$	$R_{s3} = 10.82W + 0.08$	$R_{s4} = 13.40W - 0.02$	$R_{s5} = 9.29W + 0.29$	
R^2	0.4710	0.1168	0.238	0.3064	0.297	
p	0.001	0.126	0.030	0.011	0.012	
Model	$R_{H1} = 6.94W - 0.3$	$R_{H2} = 3.92W + 0.46$	$R_{H3} = 5.12W + 0.25$	$R_{H4} = 7.90W + 0.06$	$R_{H5} = 5.5433W + 0.07$	
R^2	0.4845	0.1207	0.2306	0.2548	0.2904	
p	0.003	0.072	0.037	0.025	0.013	
Model	$R_{A1} = 8.19W - 0.40$	$R_{A2} = 2.14W + 0.44$	$R_{A3} = 4.98W - 0.05$	$R_{A4} = 6.23W - 0.30$	$R_{A5} = 4.34W - 0.001$	
R^2	0.4114	0.0899	0.2045	0.3531	0.3021	
p	0.002	0.184	0.049	0.006	0.011	

锐齿栎幼林、锐齿栎老林、针-阔混交林、阔-阔混交林与栓皮栎林土壤呼吸全年的碳排放量分别为：1105.15、779.12、821.23、912.19 gC·m⁻²·a⁻¹和 899.50 gC·m⁻²·a⁻¹,其中自养呼吸的碳排放量分别为 584.47、309.87、362.74、348.02 gC·m⁻²·a⁻¹与 389.16 gC·m⁻²·a⁻¹,异养呼吸的碳排放量分别为 520.68、469.25、458.49、564.17、510.34 gC·m⁻²·a⁻¹。自养呼吸与异养呼吸的年排放量在 5 种林分中的变异系数分别为 20.90%与 10.24%,自养呼吸的变异高于异养呼吸。

3.4 土壤呼吸组分的贡献率及其变化趋势

从表 3 中可知,5 种林分土壤自养呼吸在不同时间尺度上对土壤呼吸的贡献率不同,日贡献率的变化范围最大。就均值来看,不论在那个时间尺度上,林分间自养呼吸贡献率的大小顺序均为:锐齿栎幼林>针-阔混交林>栓皮栎林>锐齿栎老林>阔-阔混交林。

表 3 土壤自养呼吸的贡献率*

Table 3 The contribution rates of soil autotrophic respiration

林分类型 Stand types	日贡献率(%) Daily contribution rates	月贡献率(%) Monthly contribution rates	年贡献率(%) Annual contribution rates
林分 1 Stand 1	35.19 ~ 57.73 (49.77 ± 1.25)	41.58 ~ 56.13 (49.56 ± 1.66)	52.89
林分 2 Stand 2	28.73 ~ 49.24 (37.30 ± 1.06)	35.84 ~ 40.80 (38.65 ± 0.57)	39.77
林分 3 Stand 3	28.67 ~ 49.82 (41.49 ± 1.23)	37.91 ~ 45.83 (42.41 ± 0.90)	44.17
林分 4 Stand 4	24.24 ~ 41.70 (35.77 ± 1.00)	31.17 ~ 40.08 (36.22 ± 1.01)	38.15
林分 5 Stand 5	30.07 ~ 46.22 (40.49 ± 0.89)	34.39 ~ 45.69 (40.85 ± 1.29)	43.26

*表 3 中的日贡献率是根据实测值推算的结果,月贡献率与年贡献率是根据模拟值推算的结果,括号中的数值为对应平均值±标准误差
The daily contribution rates in table 3 is estimated by the values from field survey , the monthly and annual contribution rates are estimated by the analogy values , values in parentheses represent corresponding means ± S. E.

从图 6 可以看出,土壤自养呼吸月贡献率的变化趋势与土壤温度相同,而异养呼吸贡献率的变化趋势与自养呼吸相反。这是因为随土壤温度升高,根系代谢活动与呼吸速率增强,再加上自养呼吸的温度敏感性高于异养呼吸与土壤呼吸,所以自养呼吸的贡献率随温度的升高而增加,而异养呼吸的贡献率出现下降。

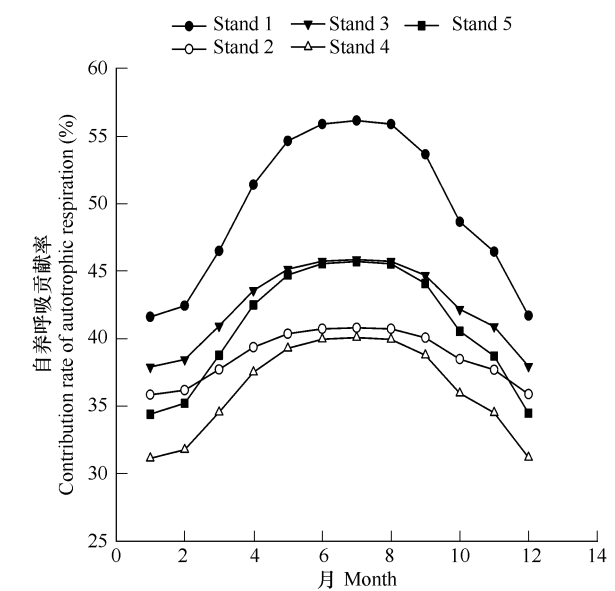


图 6 5 种林分自养呼吸贡献率的季节变化

Fig.6 Seasonal course of contribution rates of autotrophic respiration in five stands

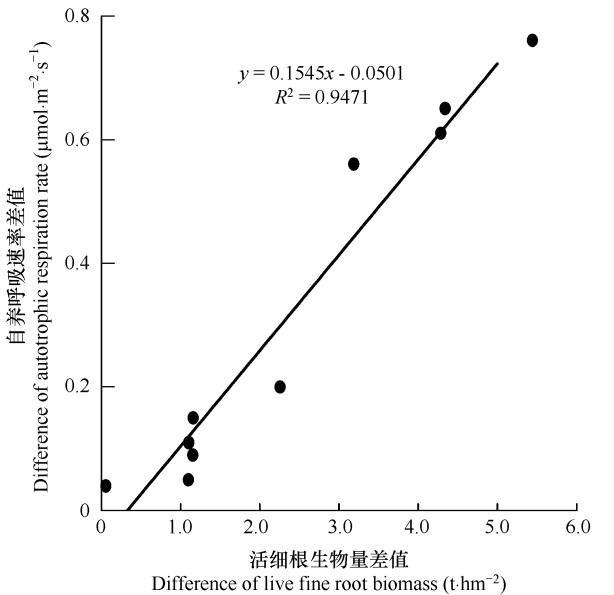


图 7 活细根生物量差值与自养呼吸速率差值间的关系

Fig.7 Relationship between the difference of live fine root biomass and the difference of autotrophic respiration rate

3.5 土壤呼吸及其组分在林分类型间的变异

实测期内,土壤呼吸速率均值的大小顺序为:锐齿栎幼林 (3.28 μmol·m⁻²·s⁻¹) > 阔-阔混交林林 (2.82 μmol·m⁻²·s⁻¹) > 栓皮栎林 (2.71 μmol·m⁻²·s⁻¹) > 针-阔混交林 (2.52 μmol·m⁻²·s⁻¹) > 锐齿栎老林 (2.45 μmol·m⁻²·s⁻¹);异养呼吸速率为:阔-阔混交林 (1.77 μmol·m⁻²·s⁻¹) > 锐齿栎幼林 (1.58 μmol·m⁻²·s⁻¹) > 栓皮栎林 (1.57 μmol·m⁻²·s⁻¹) > 锐齿栎老林 (1.51 μmol·m⁻²·s⁻¹) > 针-阔混交林 (1.43 μmol·m⁻²·s⁻¹);自养呼吸速率为:锐齿栎幼林 (1.70 μmol·m⁻²·s⁻¹) > 栓皮栎林 (1.14 μmol·m⁻²·s⁻¹) > 针-阔混交林 (1.09 μmol·m⁻²·s⁻¹) > 阔-阔混交林林 (1.05 μmol·m⁻²·s⁻¹) > 锐齿栎老林 (0.94 μmol·m⁻²·s⁻¹)。5 个林分间的土壤呼吸速率、异养呼吸速率不存在显著差异 (p > 0.05),而自养呼吸速率存在显著差异 (p < 0.05)。因为林分间的土壤温度没有显著差异显然不能对此做出解释,土壤含水量虽然存在极显著差异 (p < 0.001)但解释能力仅为 2.04% (一元一次函数的回归结果)。林分间自养呼吸速率差值与林分间活细根生物量差值间的回归

关系 (图 7)表明,活细根生物量的差异可以解释自养呼吸速率差异的 94.71%。

4 讨论

4.1 土壤温湿度与土壤呼吸及其组分间的关系

本研究中,5 种林分的土壤呼吸及其组分随土壤温湿度的季节性变化规律及它们之间的量化关系与绝大多数森林生态系统研究的结果基本一致^[10,13,23,24],但存在区域性的特点。

土壤呼吸及其组分的温度敏感性指数 (Q_{10} 值)多为 2~3^[8]。本研究林分的自养呼吸、土壤呼吸与异养呼吸温度敏感性指数的变化范围分别为 2.49~2.82 (平均为 2.61)、2.30~2.44 (平均为 2.38)与 2.09~2.35 (平均为 2.19), Q_{10} 值的大小处在正常的范围。每种林分中 Q_{10} 值的大小顺序均与 Boone 等^[6]、Epron 等^[7]的结论一致,即自养呼吸的 Q_{10} 值 > 土壤呼吸 > 异养呼吸,说明在该区域的森林生态系统中土壤自养呼吸的温度敏感性高于异养呼吸。

本研究表明在土壤含水量较低而温度较高时,含水量对呼吸速率具有抑制作用,这一现象也被其它研究所证实并对其机理进行了解释^[25]。在宝天曼的锐齿栎幼林、针阔混交林、阔叶混交林及栓皮栎林中,土壤含水量与呼吸速率间有显著的一元一次函数关系,而锐齿栎老林却不然,这是因为该林分地处阴坡,年平均土壤含水量不仅在 5 种林分中最高,且在全年的多数时间保持在较高水平,对呼吸速率变化的影响较小,也说明土壤含水量与呼吸速率间的关系比较复杂,二者的相关性可能还受到其它因子的协同影响^[9]。

4.2 土壤呼吸及其组分的碳排放量及贡献率

欧洲 18 个森林生态系统土壤呼吸的年排放量为 (760 ± 340) $\text{gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ^[19],温带森林土壤异养呼吸和自养呼吸的年排放量范围分别为 310~692 $\text{gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 与 122~663 $\text{gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ^[26]。宝天曼 5 种林分土壤呼吸,异养呼吸及自养呼吸的年排放量范围分别为 779.12~1105.15 g 、458.49~564.17 $\text{gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 与 309.87~584.47 $\text{gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,与上述结论相近。

温带森林自养呼吸的年贡献率为 30%~70%^[6,27],宝天曼 5 种林自养呼吸的年贡献率为 39.77%~52.89%,处于上述范围之中。由于没有考虑非正常死亡细根分解的影响,所以本研究估算的自养呼吸贡献率可能偏低。根据 Rey 等^[16]对误差的估算方法及刘建军等^[28]在气候、林分特征相似区域的研究结论(栎类阔叶林细根经 7 个月分解后的残留率为 58.12%、年分解率为 57.10%)与本研究在断根初(2005 年 3 月)对 4 个阔叶林活细根生物量的测定结果(林分 1、2、4 与 5 分别为 9.28、4.22、5.24 $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 与 6.31 $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$),如果细根切断后即死亡并在第一个月内开始分解^[29],那么到 2005 年 10 月(断根 7 个月后)开始对断根样方呼吸速率测定时,上述 4 种阔叶林断根样方内细根干物质的残留量分别为 5.45、2.47、3.08、3.71 $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$,在此后 1a 的呼吸速率测定中,断根样方内细根分解的排放量(2005 年 10 月细根干物质的残留量 $\times$ 年分解率 $\times$ 碳转换率 0.45)分别为 140.05、63.68、79.12 $\text{gC} \cdot \text{m}^{-2}$ 与 95.27 $\text{gC} \cdot \text{m}^{-2}$,自养呼吸年贡献率低估的百分比分别为 12.67%、8.18%、8.68%与 10.60%;研究证实针阔混交林细根的分解速率在针叶林与阔叶林

之间^[30],根据这一结论与刘建军等^[28]及本研究的观测结果推算,宝天曼针阔混交林自养呼吸年贡献率低估的百分比约为 9.59%~9.63%。

4.3 林分间土壤呼吸及其组分的变异及其驱动变量

研究发现 5 种林分间的土壤呼吸速率、异养呼吸速率均不存在显著差异 ($p > 0.05$),这与 Werner 等^[31]在德国 3 个温带森林研究结论一致。但是,5 个林分间的自养呼吸速率存在显著差异 ($p < 0.05$),林分间活细根生物量的差异解释了自养呼吸速率差异的 94.71%,这与 Campbell 等^[32]的研究结论有本质的相同之处,说明活细根生物量是林分间自养呼吸变异的主要驱动变量之一。林龄对土壤呼吸通量的影响是一个重要的研究领域,但老林与幼林的呼吸速率在以往的研究中很少加以比较。Irvine 等^[33]的研究发现,有的年份中幼林的土壤呼吸高于老林,而有的年份中老林高于幼林。在一年观测的中,宝天曼锐齿栎幼林的土壤呼吸年排放量高于老林,土壤呼吸年排放量的差异有 84.23%是自养呼吸排放量的差异造成的。

References :

[1] Laurae S D , Todd N , Rosensti E L , *et al.* Differential controls by climate and substrate over the heterotrophic and rhizospheric components of soil respiration. *Global Change Biology* ,2005 ,11 :1 — 12.

[2] Kuzyakov Y. Separating microbial respiration of exudates from root respiration in non-sterile soils : a comparison of four methods. *Soil Biology and Biochemistry* ,2002 ,34 :1621 — 1631.

[3] Lee M S , Nakane K , Nakatsubo T. Seasonal changes in the contribution of root respiration to total soil respiration in a cool-temperate deciduous forest. *Plant and Soil* ,2003 ,255 :311 — 318.

[4] Bhupinderpal S , Nordgren A , Ottosson L A , *et al.* Tree root and soil heterotrophic respiration as revealed by girdling of boreal Scots pine forest : extending observations beyond the first year. *Plant , Cell and Environment* ,2003 ,26 :1287 — 1296.

[5] 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. *Canadian Journal of Forest Research* ,2003 ,33 :1744 — 1753.

[6] 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.

[7] Epron D L , Dantec V , Dufrene E , *et al.* Seasonal dynamics of soil carbon dioxide efflux and simulated rhizosphere respiration in a beech forest. *Tree Physiology* ,2001 ,21 :145 — 152.

[8] Erland B , Hakan W. Soil and rhizosphere microorganisms have the same Q_{10} for respiration in a model system *Global Change Biology* ,2003 ,9 :1788 — 1791.

[9] Burton A J , Pregitzer K S , Ruess R W , *et al.* Root respiration in North American forest : effects of nitrogen concentration and temperature across biomes. *Oecologia* ,2002 ,131 :559 — 568.

[10] Davidson E A , Verchot L V , Cattanio J H , *et al.* Special Issue. Controls on soil respiration : implications for climate change. Effects of soil water content on soil respiration in forests and cattle pastures of eastern Amazonia. *Biogeochemistry* ,2000 ,48 (1) :53 — 69.

[11] Lambers H , Stulen I , Werf A. Carbon use in root respiration as affected by elevated atmosphere CO_2 . *Plant and Soil* ,1996 ,187 :251 — 263.

[12] Widén , Majdi B H. Soil CO_2 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.

[13] O'Neill K P , Kasischeke E S , Richter D D. Environmental controls on soil CO_2 flux following fire in black spruce , white spruce , and aspen stands of interior Alaska. *Canadian Journal of Forest Research* ,2002 ,32 (9) :1525 — 1541.

[14] Giardina C P , Ryan M G. Evidence that decomposition rates of organic carbon in mineral soil do not vary with temperature. *Nature* ,2000 ,404 :858 ~ 861.

[15] Buchmann. Biotic and abiotic factors controlling soil respiration rates in *Picea abies* stands. *Soil Biology and Biochemistry* ,2002 ,32 :1625 — 1635.

[16] Rey A ,Emillano P , Vanessa T , *et al.* Annual variation in soil respiration and its components in a coppice oak forest in Central Italy. *Global Change Biology* ,2002 ,8 :851 — 866.

[17] 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 Biology* ,2002 ,8 :851 — 866.

[18] Mirco R , Alessandro C. Main determinants of forest soil respiration along an elevation/temperature gradient in the Italian Alps. *Global Change Biology* ,2005 ,11 :1024 — 1041.

[19] 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.

[20] 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.

[21] Yang J Y , Wang C K. Partitioning soil respiration of temperate forest ecosystems in Northeastern China. *Acta Ecologica Sinica* 2006 ,26 (6) :1640 — 1647.

[22] Liu J J , Wang D X , Lei R D , *et al.* Fine roots biomass and spatial dynamic in the natural stands of sharptooth oak Chinese Pine at Huo Ditang forest. *Region Journal of Northwest Forestry University* ,2004 ,19 (1) :1 — 4.

[23] Luo Y , Wan S , Hui D , *et al.* Acclimatization of soil respiration to warming in a tall grass prairie. *Nature* 2001 ,413 :622 — 625.

[24] Maier C A , Kress L W. Soil CO_2 evolution and root respiration in 11 year old loblolly pine plantations as affected by moisture and nutrient availability. *Canadian Journal of Forest Research* ,2000 ,30 (3) :347 — 359.

[25] Xu M , Qi Y. Spatial and seasonal variations of Q_{10} determined by soil respiration measurements at a Sierra Nevada forest. *Global Biogeochemical Cycles* ,2001 ,15 :687 — 696.

[26] Bond-Lamberty B , Wang C , Gower S T. A global relationship between the heterotrophic and autotrophic components of soil respiration ?*Global Change Biology* ,2004 ,10 :1756 — 766.

[27] 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) . *Soil Science Society of America Journal* ,1999 ,63 :1429 — 1435.

[28] Liu J J , Wang D X , Lei R D , *et al.* Turnover processes and energy change of fine roots of *Pinus tabulaeformis* and *Quercus aliena* var. *acuteserrata* natural forests in Qinling Mountains . *Scientia Silvae Sinicae* 2002 ,38 (4) :1 — 6.

[29] Kelting D L , Burger J A , Edwards G S. Estimating root respiration , microbial respiration in the rhizosphere , and rootfree soil respiration in forest soils. *Soil Biology and Biochemistry* ,1998 ,30 :961 — 968.

[30] Wen D Z , Wei P , Zhang Y C , *et al.* Dry mass loss and chemical changes of the decomposed fine roots in three China South subtropical forests at Dinghushan. *Chinese Journal of Ecology* ,1998 ,17 (2) :1 — 6.

[31] Werner B , Yi J X , Eric A D , *et al.* Site and temporal of soil respiration in European beech , Norway spruce , and Scots pine forests. *Global Change Biology* ,2002 ,8 :1205 — 1216.

[32] Campbell J L , Law B E. Forest soil respiration across three climatically-distinct chronosequences in Oregon. *Global Change Biology* ,2004 ,10 :1857 — 1869.

[33] Irvine J , Law B E. Contrasting soil respiration in young and old-growth ponderosa pine forests. *Global Change Biology* ,2002 ,8 :1 — 12.

参考文献：

[21] 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.

[22] 刘建军 , 王得祥 , 雷瑞德 , 等. 火地塘天然油松锐齿栎林细根生物量及其空间变化. *西北林学院学报* ,2004 ,19 (1) :1 ~ 4.

[28] 刘建军 , 王得祥 , 雷瑞德 , 等. 秦岭林区天然油松、锐齿栎林细根周转过程与能态变化. *林业科学* 2002 ,38 (4) :1 ~ 6.

[30] 温志达 , 魏平 , 张佑昌 , 等. 鼎湖山亚热带森林细根分解干物质损失和元素动态. *生态学杂志* ,1998 ,17 (2) :1 ~ 6.