

DOI: 10.11931/guihaia.gxzw201503023

王娟, 尤业明, 黄雪蔓, 等. 锐齿栎林年龄序列土壤呼吸组分特征研究 [J]. 广西植物, 2016, 36(10):1205-1213

WANG J, YOU YM, HUANG XM, et al. Characteristics of soil respiration components in the *Quercus aliena* var. *acuteserrata* forest chronosequence [J]. Guihaia, 2016, 36(10):1205-1213

锐齿栎林年龄序列土壤呼吸组分特征研究

王娟¹, 尤业明², 黄雪蔓², 张建亮^{3*}

(1. 北京林业大学 林学院, 北京 100083; 2. 广西大学 林学院, 南宁 530004; 3. 环境保护部南京环境科学研究所, 南京 210042)

摘要: 林龄作为影响土壤呼吸的因素已是碳循环关注的热点问题之一,且林龄在模拟演替及长期碳动态的监测过程中发挥重要作用。该研究采用 Li-Co-r8100 土壤呼吸仪,研究林龄对土壤呼吸通量及其组分的影响。结果表明:锐齿栎林年龄序列(40 a, 80 a, >160 a)及不同组分的土壤呼吸速率都表现出明显的单峰型季节动态,且与 5 cm 土壤温度呈显著指数相关。这可能是由于温度变化影响土壤生物活性引起的,土壤温度与土壤呼吸关系的指数方程可以解释 80% 以上的土壤呼吸变化。土壤呼吸及其不同组分在林龄间均无明显差异,土壤呼吸对温度的敏感性在锐齿栎林年龄序列及各组间也无显著差异,这可能与林龄间土壤特性、森林生产力、微环境条件等相差不大有关。加倍凋落物的累计土壤呼吸通量显著 ($P < 0.05$) 高于对照、断根和去除凋落物处理的累积呼吸量,说明增加凋落物输入为土壤提供了更丰富的养分,改善了样地微环境,有利于激发土壤微生物活性。锐齿栎林累计土壤呼吸通量与土壤有机碳(SOC)、细根生物量(FR)和微生物呼吸(MR)也显著相关,表明该地区土壤特性以及地下新陈代谢能很好地解释锐齿栎林土壤呼吸格局。

关键词: 林龄, 自养呼吸, 异养呼吸, 土壤, 温度, 土壤特性

中图分类号: Q945, S718.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3142(2016)10-1205-09

Characteristics of soil respiration components in the *Quercus aliena* var. *acuteserrata* forest chronosequence

WANG Juan¹, YOU Ye-Ming², HUANG Xue-Man², ZHANG Jian-Liang^{3*}

(1. College of Forestry, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 2. College of Forestry, Guangxi University, Nanning 530004, China; 3. Nanjing Institute of Environmental Sciences, Ministry of Environmental Protection, Nanjing 210042, China)

Abstract: The forest age as a factor affecting soil respiration is one of the hot issues in the carbon cycle, and forest age also plays an important role in simulating succession and monitoring the long-term carbon dynamic. We investigated soil respiration dynamics and characteristics in warm-temperate oak chronosequence in China, and measured soil respiration with a Li-Cor infrared gas analysis. We studied the effects of forest age on soil respiration flux and different components of *Quercus aliena*. The results showed that the seasonal patterns of soil respiration among the age classes of *Q. aliena* var. *acuteserrata* forest (40 a, 80 a, >160 a) and different components showed the obvious seasonal dynamics, and occurred as a unimodal curve. Soil respiration rate had a significantly exponential correlation to 5 cm soil temperature. This also could be explained by the effects of temperature on the activity of soil organisms. The exponential equations of soil temperature and soil respiration accounted for more than 80% of the variations in soil respiration

收稿日期: 2015-08-13 修回日期: 2015-12-12

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务专项(2015) [Supported by Special Funds of Basic Scientific Research for Central Public-interest Scientific Institution (2015)].

作者简介: 王娟(1983-),女,内蒙古固阳县人,博士,讲师,主要从事全球变化背景下的土壤碳动态机制研究,(E-mail) wangjuan.609@163.com。

*通讯作者: 张建亮,博士,助理研究员,主要从事自然与生物多样性保护工作,(E-mail) zjl@nies.org。

rate. There was no significant variation in soil respiration and its components among different forest ages, and the sensitivity of soil respiration to temperature in different age chronosequence and soil components of *Q. aliena* var. *acuteserrata* forest also had no significant difference, which might be explained by the fact that there was no significant difference among the age classes of *Q. aliena* var. *acuteserrata* forest in soil properties, forest productivity and micro-environmental conditions. The cumulative soil respiration in treatment with doubled litter was significantly ($P < 0.05$) higher than that of other components, which indicated that more litter could provide more abundant nutrient for the activity of soil microorganisms. There were also correlations of cumulative soil respiration with soil organic carbon (SOC), fine root biomass (FR) and microbial respiration (MR), which indicated that the soil properties and underground metabolism could well enough to explain the pattern of soil respiration among the age classes of *Q. aliena* var. *acuteserrata* forest in this region.

Key words: forest age, rhizospheric respiration, heterotrophic respiration, soil temperature, soil properties

土壤作为一个巨大的碳库 (1.394×10^{18} g C), 每年向大气排放大量的 CO_2 , 成为陆地生态系统最大的碳通道之一 (Raich & Schlesinger, 1992)。尽管土壤 CO_2 通量对生态系统 C 收支有重要作用, 但对于地下呼吸过程的了解还知之甚少 (Gomez-Casnovas et al, 2012)。土壤呼吸是由根、菌根以及根系微生物的自养呼吸和土壤微生物、土壤动物分解地上枯落物、地下碎屑和有机物质中产生的异养呼吸两方面组成 (Kuzuyakov & Bol, 2006)。土壤呼吸组分会随着时间、空间和生态类型的变化而改变, 这些变化取决于地下组分对土壤 CO_2 通量的相对贡献, 即地下组分对生物和非生物因子的不同响应 (Davidson & Janssens, 2006)。因此, 划分土壤呼吸组分对评价土壤 C 周转过程中生物和非生物因素的贡献至关重要。土壤呼吸产生的 CO_2 大概是 $68 \text{ Pg} \cdot \text{a}^{-1}$ ($1 \text{ Pg} = 10^{15} \text{ g}$), 而枯落物包括根枯落物分解放出 $50 \text{ Pg} \cdot \text{a}^{-1}$, 占年总碳通量在 70% 以上 (Raich & Schlesinger, 1992)。可见, 植物凋落物分解对土壤 CO_2 通量的调控作用较强。Sayer et al (2006) 研究表明清除枯落物会抑制土壤呼吸, 而加倍枯落物则会对土壤呼吸起促进作用。Maier & Kress (2000) 对火炬松地表枯落物采取不同措施后得出, 添加凋落物量会促进土壤呼吸的显著增强。添加枯落物对土壤呼吸的调控作用要远远大于去枯凋落物对土壤呼吸的作用程度 (Sulzman et al, 2005)。

调控森林生态系统土壤呼吸的因子包括温度尤其是表层土壤温度 (Certini et al, 2003)、土壤湿度 (Maier & Kress, 2000)、土壤养分 (Borken et al, 2002)、底物数量和生产力的高低 (Schlesinger & Lichter, 2001)、植物根系分泌物 (Kuzuyakov & Larionova, 2005)、森林类型 (Raich & Tufekcioglu,

2000)、干扰 (Laporte et al, 2003) 等。林龄作为影响土壤呼吸的又一因素已是碳循环关注的热点问题之一, 利用年龄梯度代替演替以及长期碳动态的监测成为目前常用的手段 (Klopatek, 2002)。然而, 林龄对土壤呼吸的作用至今没有统一模式。Ewel et al (1987) 指出在温带森林, 随着林龄的增加, 土壤呼吸呈减少趋势; 在热带地区则随林龄的增加而增强。而 Law et al (1999) 则认为土壤呼吸随林分年龄呈先下降后上升或保持稳定不变的趋势。Saiz et al (2006) 研究表明, 土壤呼吸随林龄先下降后保持相对稳定。Kolari et al (2004) 认为土壤呼吸随着林龄的增加表现出先增加后减弱的趋势。Smith et al (2007) 表明林龄对土壤呼吸无显著作用。林龄对土壤呼吸组分的调控也表现出不同模式。Bond-Lamberty et al (2004) 研究得出, 自养呼吸对土壤总呼吸的贡献随着林分年龄的增加呈先上升后下降的趋势。Hanh (2003) 则认为自养呼吸对总呼吸的贡献随着林分年龄的增加而减小。Gough et al (2007) 研究认为林龄对土壤呼吸不同组分的作用不显著。鉴于林龄对土壤呼吸的重要作用, 且仍存在许多争议, 因此深入研究不同年龄序列土壤呼吸动态以及林龄对土壤呼吸组分的作用等问题对该区森林碳周转和全球气候变化条件下陆地生态系统碳预算有重要意义。

1 研究样地和实验设计

1.1 研究区概况

研究区位于河南宝天曼自然保护区的长期森林生态定位站 ($33^{\circ}20' \sim 33^{\circ}36' \text{ N}$, $111^{\circ}46' \sim 112^{\circ}04' \text{ E}$, 海拔 600~1 830 m)。属东部季风型大陆气候, 年均

温 15.1 °C, 年均降雨 900 mm。主要土壤类型是不饱和始成土。样地乔木层以锐齿栎、短柄枹、栓皮栎以及华山松和锐齿栎形成的混交林为优势种, 其余植被类型详见 Wang et al (2014)。

1.2 实验设计

选取锐齿栎林的年龄序列由 40 年生、80 年生和约 160 年生的 3 组林龄构成。林龄由森林经营记录结合平均木生长锥获得。每个林龄布设 3 个 20 m × 20 m 的独立真重复样地, 每个样地内系统设 12 个土壤呼吸环 (直径 9.9 cm, 高 6 cm, 其中 4 cm 埋于地下)。为了调查年龄序列林分内土壤呼吸各组分的相对贡献, 每个 20 m × 20 m 的样地设 9 个 2 m × 2 m 小样方分别作为断根处理 (R_D)、去除凋落物处理 (R_Q) 和加倍凋落物处理 (R_J)。具体方法: 挖壕沟 (深度 1 m) 切断植物根系, 用胶板隔断以防止外面的根系再次进入处理样方, 用原来土壤重新回填, 在对土壤最小的扰动范围内去除每个小样方内活的植物体, 并保持每个小样方在整个实验观测期间没有活的植物体生长; 去除凋落物和加倍凋落物处理均在每个 20 m × 20 m 的标准样方中分别随机设 3 个实验处理的小样方, 去除地表凋落物处理为把实验小样方中的地表凋落物全部移除, 而加倍地表凋落物处理为把去除凋落物处理小样方中移除的全部凋落物加入到相应的加倍凋落物处理的小样方中。本研究均以未经过任何处理样方内的实验样品为这些处理的自然对照 (CK)。为减小布置呼吸环时对地面产生扰动, 于实验前 1 周将所有 PVC 环安置到样地内, 整个实验中 PVC 环保持不动。

1.3 环境因素及土壤特性参数

1.3.1 土壤呼吸、土壤温度和土壤湿度的测定 土壤瞬时呼吸由 Li-8100 便携式仪器 (LI-8100, Li-Cor Inc., Lincoln, NE, U.S.A.) 测得。使用纽扣温度数据记录仪 (TidbiT v2 Temp, Onset Computer Corporation, USA) 连续监测土壤温度变化, 频率为 30 min 记录 1 次。另外, 5 cm 土壤温度和湿度由土壤呼吸仪配备的温度和湿度探头测得, 每个呼吸环周围测定 3 次取均值。土壤呼吸每 2 月测 1 次, 选择天气状况良好的日期 (早晨 8:30–11:30) 测定, 测定时保持呼吸环内的凋落物原状不动, 尽量避免对土壤产生扰动而影响测定结果。

1.3.2 凋落物年产量、土壤样品及根系的采集 在每个样地布设 10 个 75 cm × 75 cm, 孔径 1 mm, 距地面高 0.5 m 的凋落物收集框用来测定年凋落物产

量。定期收集并在 65 °C 下烘干至恒重并称量。

在每个样地的各个土壤呼吸环附近用直径 10 cm 的土钻将 0~5 cm 层取 12 个土壤样品的混合样测定土壤理化性质。

整个实验结束后, 将土壤呼吸环拔出, 用直径 10 cm 土钻分 0~5 cm、5~10 cm 两层取土壤样品 (>70% 的细根分布在 0~10 cm 的土层), 过 0.4 mm 网孔筛并冲洗土壤来提取植物根系, 挑选出粗根 (>5 mm)、中根 (2~5 mm)、细根 (<2 mm) 并在 65 °C 下烘干至恒重。

1.3.3 土壤化学分析 土壤 pH 值由土壤水溶液测得 (1:2.5), 土壤有机碳浓度采用重铬酸钾-硫酸外加热法, 土壤全氮由凯氏定氮仪测得, 土壤铵态氮和硝态氮通过相当于 10 g 干土的鲜土, 加入 50 mL 2 mol · L⁻¹ 的 KCL 溶液提取后用流动分析仪测定。

1.3.4 土壤微生物测定 土壤微生物碳和活性均由提取到的 0~5 cm 的表层土壤测定。土壤微生物碳用氯仿熏蒸浸提法测得 (Vance et al, 1987)。土壤微生物活性由微生物基础呼吸速率测定 (Jin et al, 2010)。

1.4 数据分析

土壤呼吸和土壤温度的关系用简单经验指数模型 (消除由于测量时间及其温度的不同对土壤呼吸造成的影响) 来描述: $R_s = \alpha e^{\beta T}$ (1)

式中, R_s 为土壤呼吸, α, β 是方程拟合参数, T 是土壤 5 cm 处温度。温度敏感性通常用 Q_{10} 来描述: $Q_{10} = e^{10\beta}$ (2)

式中, 自养呼吸 (R_R) 和异养呼吸 (R_H) 通过样地总的土壤呼吸 (R_s) 和断根处理 (R_D) 估算得到。将各样地内实际测得的单个土壤温度值和定位站内其他样点监测到的连续瞬时土壤温度值做线性拟合, 推算每个样地/样方的连续土壤温度值, 结合指数方程估算样地总呼吸速率 (R_s)、断根后的呼吸速率 (R_D)、去除凋落物呼吸速率 (R_Q) 和加倍凋落物呼吸速率 (R_J)。

$$R_R = R_s - R_D \quad (3)$$

断根处理后的土壤呼吸在前期会有所增加, 是因为大量死根提供了丰富的可利用营养物质。随着时间的增长 (约 3 个月), 这种效应会基本消失至忽略不计 (Lee et al, 2003)。因此, 把断根处理后样方内的土壤呼吸近似等同于异养呼吸 (R_H), 即 $R_H \approx R_D$ 。凋落物对土壤呼吸的贡献 (R_L) 可通过样地总呼吸速率减去去除凋落物呼吸速率得到。年龄序列、样方不同处理间土壤呼吸差异由方差分析 LSD

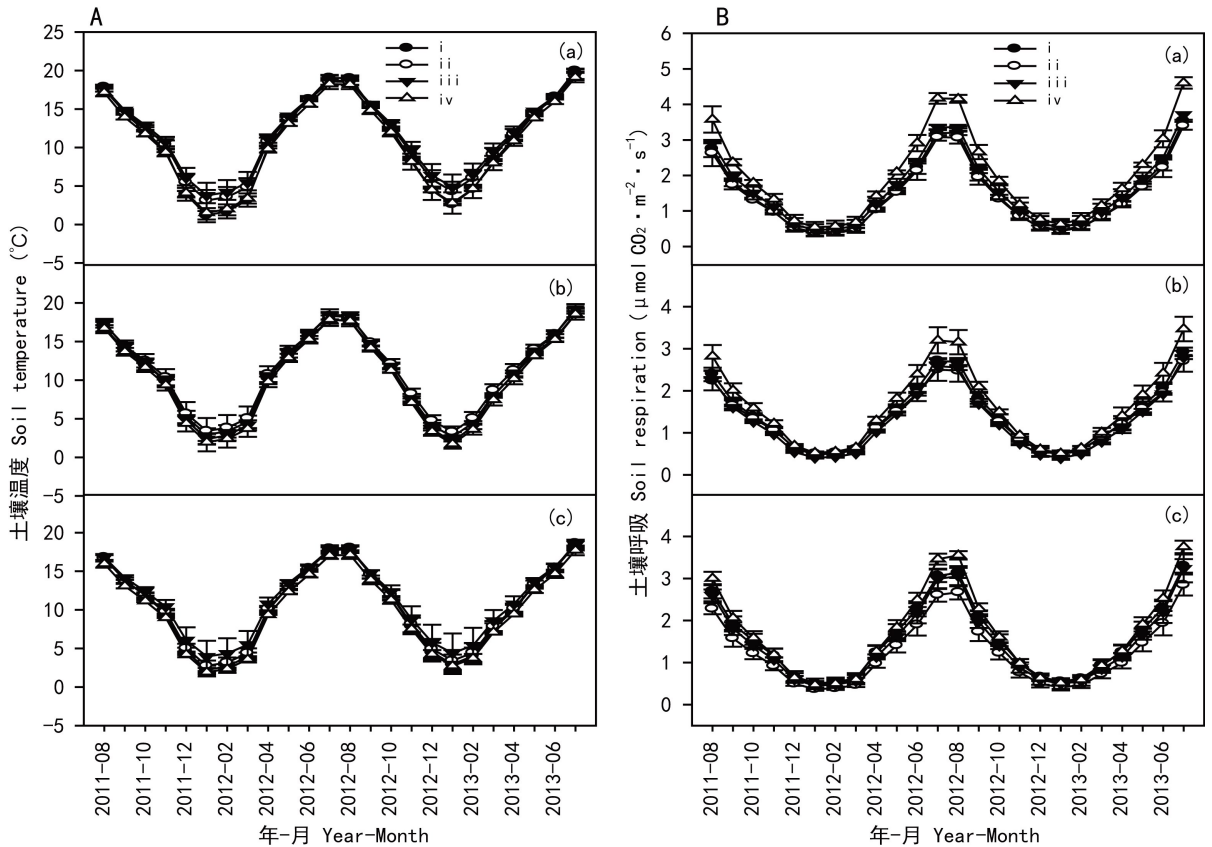


图1 锐齿栎林年龄序列不同处理的土壤温度 A. 以及土壤呼吸速率; B. 季节动态。误差线为标准误($n = 3$)。i. 对照; ii. 断根; iii. 去除凋落地; iv. 加倍凋落地。(a) 幼龄林; (b) 中龄林; (c) 老龄林。下同。

Fig. 1 Seasonal dynamics in soil temperature A. Soil respiration rate; B. Different treatments of stand age classes in *Q. aliena* forest. Vertical bars indicate one standard errors of means ($n = 3$). i. Control; ii. Root pruned; iii. Litter removed; iv. Litter doubled. (a) Young age forest; (b) Middle age forest; (c) Old age forest. The same below.

法得出,土壤呼吸各组份年龄序列及不同处理间差异由线性回归分析,所有统计分析由 SPSS 软件完成。

2 结果与分析

2.1 土壤呼吸与土壤温度的季节动态及相关性

锐齿栎 3 个林龄的 5 cm 土壤温度呈相似的格局并表现出明显的季节动态且不同年龄序列间差异不大($P > 0.05$, 图 1: A)。3 个年龄阶段不同处理(壕沟断根、去除凋落物和加倍凋落物)土壤温度的动态格局与各林龄的土壤温度动态趋势一致,也表现出明显的季节性变异,且处理间差异不显著($P > 0.05$, 图 1: A)。

不同林龄的土壤呼吸速率均呈现出明显的季节性格局,且土壤呼吸速率在不同林龄以及不同月份间都存在显著差异($P < 0.05$)。由图 1: B 得出,3 个林

龄的土壤呼吸均表现为单峰型,且都与土壤温度的季节规律一致(图 1: A, B)。最大值一般在夏季,而最小值常在冬季。同样地,年龄序列不同处理的土壤呼吸速率与样地总呼吸的动态一致,呈明显的单峰型季节变异且不同处理间差异显著($P < 0.05$)。表现为在冬季温度最低的一月,土壤呼吸速率最小,随着土壤温度的回升,土壤呼吸速率开始增加,在夏季七月份达到峰值,然后又随着温度的降低而减少。

将锐齿栎各林龄及处理测得的瞬时土壤呼吸速率与 5 cm 土壤温度做统计分析,发现二者呈显著的指数相关($P < 0.001$, 图 2)。描述土壤温度与土壤呼吸关系的指数方程可以解释 80% 以上的土壤呼吸变异(所能解释的呼吸速率变化是用统计分析中的 R^2 值来表示的, P 值均达到极显著水平 0.001)。除了锐齿栎幼林的断根处理为 0.878 和锐齿栎中林的对照为 0.876 外,其他土壤呼吸的 R^2 均大于 0.9。

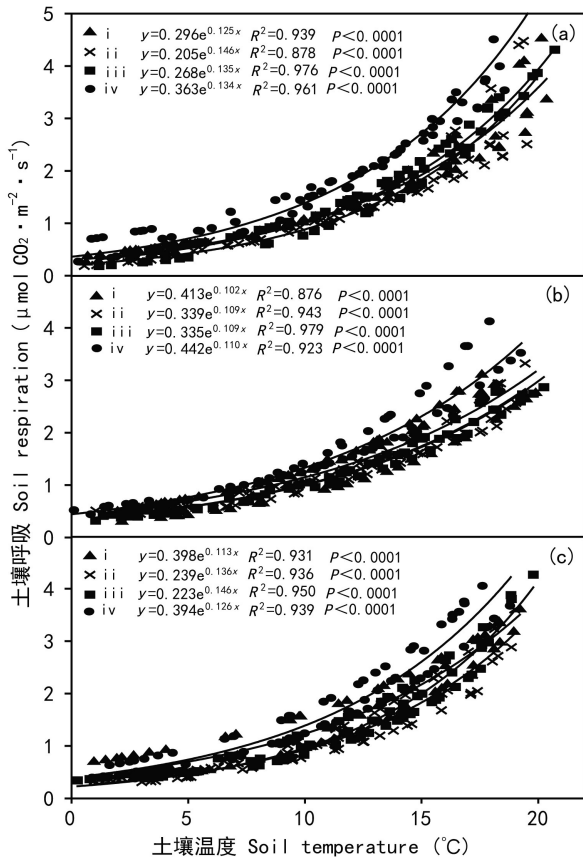


图 2 锐齿栎林不同林龄不同处理土壤呼吸速率与土壤温度的关系

Fig. 2 Relationship between soil respiration and soil temperature for different treatments of stand age classes in *Q. aliena* forest

表明土壤温度可以很好地解释锐齿栎林不同林龄土壤总呼吸、自养呼吸和异养呼吸的季节波动动态。

根据土壤呼吸对温度的敏感性公式 (2), 计算锐齿栎林不同林龄及各处理的 Q_{10} 值发现幼林、中林和老林总呼吸的 Q_{10} 值分别为 3.42、3.20 和 3.31, 且土壤总呼吸温度敏感性在林龄间差异不显著 ($P>0.05$)。幼林、中林和老林异养呼吸的 Q_{10} 值分别为 3.91、2.98 和 3.65, 自养呼吸的 Q_{10} 值分别为 3.03、2.67 和 3.35, 各处理在林龄间差异不显著 ($P>0.05$), 且各处理间差异也均不显著 ($P>0.05$), 说明不同林龄对土壤呼吸 Q_{10} 值无明显作用。

锐齿栎林不同年龄序列土壤呼吸速率与土壤水分含量做统计分析, 发现除了锐齿栎中林有较弱的线性相关外 ($R^2<0.1$, $P<0.05$, 图 3), 幼龄林和老龄林均无显著的统计相关性 ($R^2<0.1$, $P>0.05$), 图

3)。说明土壤湿度在解释锐齿栎不同年龄序列土壤呼吸季节波动动态方面较土壤温度差。因此, 本研究仅考虑了土壤温度为参数的累积呼吸量。

2.2 不同林龄及各组分年累计土壤呼吸通量

年累积土壤呼吸通量在锐齿栎不同林龄间差异不显著 ($P>0.05$, 表 1)。自养呼吸和异养呼吸在三个林龄间差异也不显著 ($P>0.05$, 表 1), 说明林龄对土壤呼吸组分的影响较小。而凋落物呼吸在林龄间存在显著差异 ($P<0.05$, 表 1), 幼林的年累计呼吸通量显著高于其他两个林龄, 比中林高出 64.8%, 约是老林 2.8 倍。锐齿栎不同林龄各组分对土壤总呼吸的贡献均以异养呼吸为主, 凋落物只贡献了 5.6%~15.5%。

林龄累积土壤呼吸通量在各处理间表现出不同的差异情况 (图 4)。锐齿栎幼林和中林均为加倍凋落物显著 ($P<0.05$) 高于其他组分。而锐齿栎老林中, 断根处理后的累积土壤呼吸量显著 ($P<0.05$) 低于呼吸总量和加倍凋落物处理后的累积呼吸量。去除凋落物处理的累积土壤呼吸量与其他处理差异不显著 ($P>0.05$)。

2.3 锐齿栎林年龄序列土壤呼吸各组分与环境因子的关系

总累计土壤呼吸量与 0~5 cm 土壤有机碳、微生物呼吸 (MR) 和细根生物量 (FR) 均相关 ($P<0.05$, 图 5:a, b, c)。异养呼吸量与微生物呼吸 (MR) 和细根生物量 (FR) 呈显著正相关 ($P<0.05$, 图 5:e, f), 而与 0~5 cm 土壤有机碳不相关 ($P>0.05$, 图 5:d)。自养呼吸量与细根生物量 (FR) 呈显著正相关 ($P<0.05$, 图 5:i), 与微生物呼吸 (MR) 呈弱线性负相关 ($P<0.05$, 图 5:h), 而与 0~5 cm 土壤有机碳不相关 ($P>0.05$, 图 5:g)。而凋落物累计呼吸量则与 0~5 cm 土壤碳氮比、微生物呼吸 (MR) 和微生物生物量碳 (MBC) 这 3 个因子相关, 且分别与微生物呼吸 (MR) 和微生物生物量碳 (MBC) 呈显著正相关 ($P<0.05$, 图 5:k, l), 与 0~5 cm 土壤碳氮比显著负相关 ($P<0.05$, 图 5:j)。

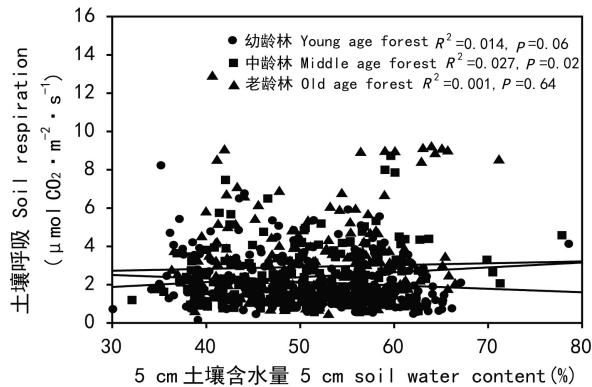
3 讨论

在气候变暖的背景下, 估算土壤表层 CO_2 释放量对于评价生态系统功能至关重要, 因为土壤呼吸决定着生态系统的净碳平衡 (Zhou et al, 2013)。土壤呼吸是一个十分复杂的生物学过程, 包含植被

表 1 锐齿栎林年龄序列土壤呼吸各组分年累计呼吸通量

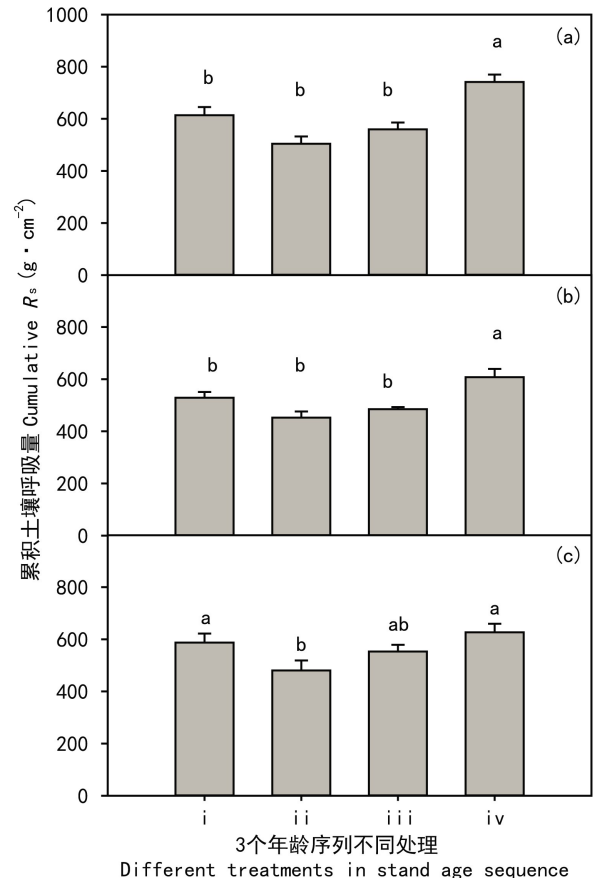
Table 1 Annually cumulative soil surface CO₂ flux from different components of stand age class in *Q. aliena* forest (means ± SE)

林分 Stand age	总呼吸 Total soil respiration R_t (g C · m ⁻²)	自养呼吸 Autotrophic respiration R_A (g C · m ⁻²)	异养呼吸 Heterotrophic respiration R_H (g C · m ⁻²)	凋落物呼吸 Litter respiration R_L (g C · m ⁻²)	异养呼吸贡献率 Contribution rate of R_H (%)	凋落物贡献率 Contribution rate of R_L (%)
40 a	613.75 ± 34.74a	109.57 ± 20.37a	504.18 ± 28.45a	96.72 ± 13.78a	82.15	15.46
80 a	528.74 ± 22.41a	76.17 ± 19.86a	452.57 ± 23.62a	58.70 ± 11.54b	85.59	10.75
160 a	587.32 ± 34.74a	107.03 ± 30.55a	480.29 ± 38.43a	34.79 ± 10.21b	81.78	5.59

注: 同一列相同字母表示在 $P=0.05$ 水平上差异不显著。 Note: Same letters mean no significant difference at $P=0.05$.图 3 锐齿栎林龄土壤呼吸速率与土壤水分含量的关系
Fig. 3 Relationship between soil respiration rate and soil water content of stand age classes in *Q. aliena* forest

根际的自养呼吸和由土壤微生物活性产生的异养呼吸 (Kuzakov & Bol, 2006), 并受到很多因素的影响。林龄作为影响土壤呼吸的因素在模拟森林生态系统长期碳动态研究中发挥了重要作用 (Klopatek, 2002)。本研究发现锐齿栎林 3 个年龄序列 (40 a, 80 a, >160 a) 以及不同组分的土壤呼吸速率都表现出明显的单峰型季节动态, 且呼吸速率与 5 cm 土壤温度呈很好的指数相关, 土壤温度与土壤呼吸关系的指数方程可以解释 80% 以上的土壤呼吸变异。锐齿栎林龄间的年累积土壤呼吸通量差异不显著, 自养呼吸和异养呼吸在林龄间差异不显著, 说明林龄对土壤呼吸及其组分的影响较小。对比土壤呼吸组分间差异发现锐齿栎幼林和中林的加倍凋落物呼吸量显著高于其他组分, 这可能与额外的养分输入刺激了现存有机物的分解有关。

锐齿栎林年龄序列及不同组分的土壤呼吸季节动态都与土壤温度的季节动态一致且呈显著指数相关, 这与 Tang et al (2006) 和 Yang et al (2007) 的结

图 4 锐齿栎林不同林龄不同处理年平均累积土壤通量
Fig. 4 Annual mean cumulative soil CO₂ efflux for different treatments of stand age classes in *Q. aliena* forest

果相同。这是由于冬季当土壤温度下降时, 地上植物和地下土壤生物的活动减慢进入休眠, 抑制了陆地生态系统的碳释放速度。随着土壤温度回升, 光照、水分等逐渐充沛, 动植物代谢活性增强, 加快了土壤的呼吸速率 (刘绍辉和方精云, 1997)。由于本研究中连续瞬时土壤呼吸速率是通过连续瞬时温

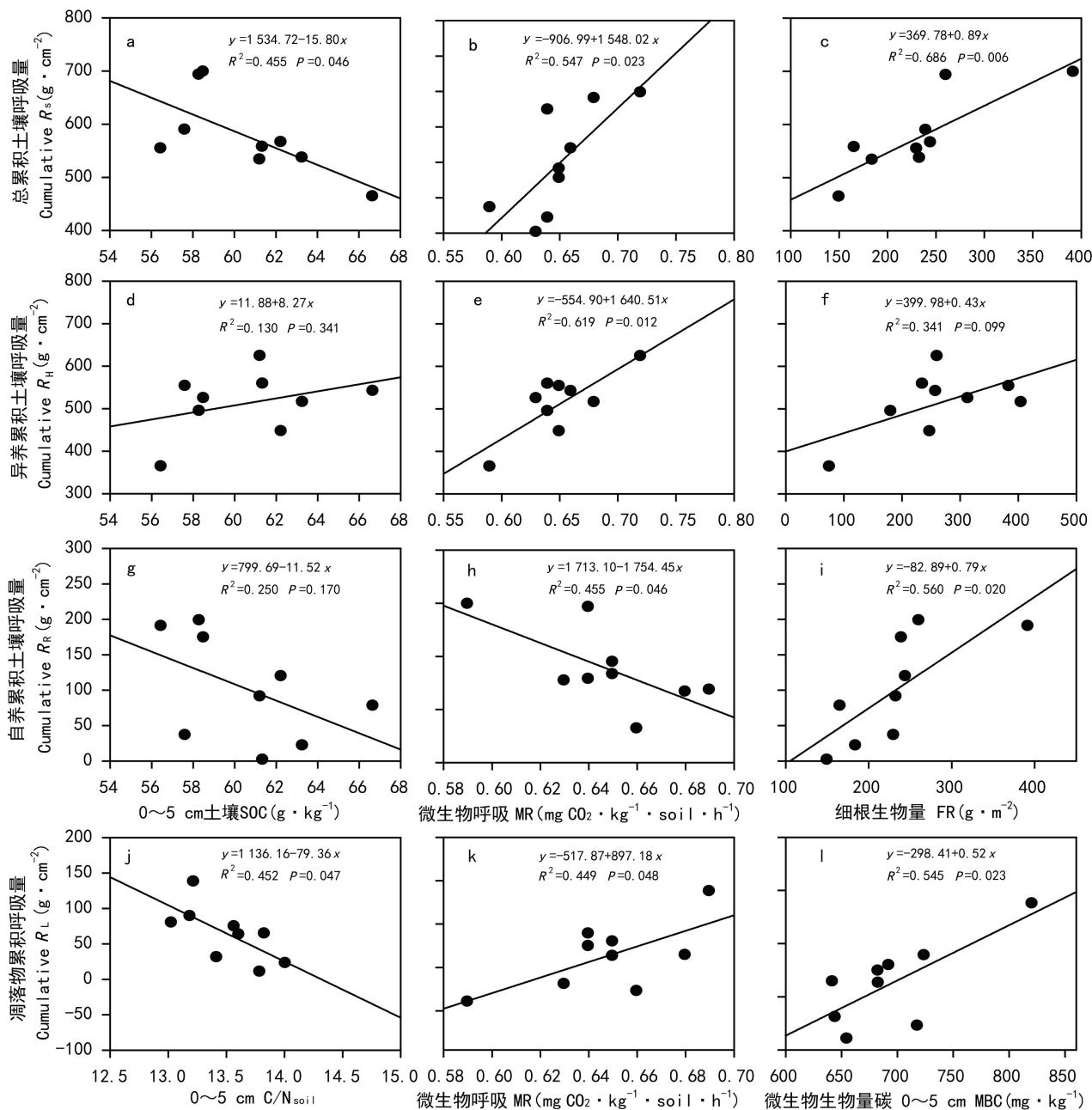


图 5 土壤呼吸组分累积呼吸量与土壤 SOC、微生物呼吸速率、细根生物量以及微生物生物量的相关关系

Fig. 5 Relationship between different cumulative components of soil respiration and SOC, MR, FR and MBC

度推算而出,因此会增加温度和土壤呼吸拟合程度偏高的可能性。虽然土壤异养呼吸对温度的敏感性低于自养呼吸 (Lavigne et al, 2003),但在本研究中土壤呼吸对温度的敏感性在锐齿栎林不同年龄序列及各组分间均无显著差异。实际上,自养呼吸与异养呼吸对温度的敏感性差异不大 (Bååth & Wallander, 2003)。这是因为某些环境因子与温度共同作用于土壤生物呼吸。如光照条件相同的情况下,

根系呼吸与微生物呼吸的 Q_{10} 值差异较小。锐齿栎林年龄序列土壤湿度除了在中龄林与土壤呼吸存在较弱的相关关系外,其他林分中均无统计性相关。这与栾军伟 (2010) 关于暖温带锐齿栎林土壤呼吸的研究结果相同。据其推测,这可能是由于该地区位于南暖温带向北亚热带的过渡区,具备特殊的降雨格局,较大的季节波动性导致土壤呼吸在季节变异上与土壤含水量解耦联而造成的。

锐齿栎林土壤呼吸碳通量在林龄间的差异不显著。Smith et al (2007) 在火烧干扰后的短叶松年龄序列中发现土壤呼吸并无显著差异,体现土壤呼吸组分在年龄序列间的不同变化。土壤呼吸组分随林龄变化的研究有不同观点 (Bond-Lamberty et al, 2004; Tedeschi et al, 2006), 本研究得出土壤呼吸不同组分在年龄间无明显差异。Gough et al (2007) 研究发现,美国混交林年龄序列土壤呼吸组分随年龄的变化不显著。生态系统生长发育梯度上的土壤自养呼吸和异养呼吸的平衡取决于土壤微环境和碳基底的可利用性 (Gough et al, 2007)。而本研究中土壤呼吸差异不显著可能与锐齿栎林龄间土壤养分特性、森林生产力、微环境条件等相差不大有关 (Wang et al, 2014)。锐齿栎幼林的凋落物累积呼吸量显著高于中林和老林,这是由于生长快速的植物其结构成分中氮含量高而碳含量低,更易被土壤微生物降解;而生长缓慢的植物不仅光合固定的碳少,而且释放的抗性成分也较少,不利于微生物分解 (Metcalf et al, 2011)。

土壤呼吸组分间的累积呼吸通量存在显著差异,加倍凋落物显著高于其他组分。这说明增加凋落物输入数量,为土壤提供了更丰富的养分,有助于激发土壤微生物活性而加快其对有机物的分解 (Sayer et al, 2006)。同时增加凋落物量提供了一个绝缘层,减弱了昼夜温差,改善了样地的微环境条件 (Sulzman et al, 2005)。Maier & Kress (2000) 认为随着地表凋落物的增加土壤呼吸呈线性增加。Jonasson et al (2004) 的研究也发现,改变凋落物的输入可显著影响土壤呼吸,清除地表凋落物可降低土壤呼吸的 25%,而增加凋落物输入能增加土壤呼吸约 20%。本研究中去除凋落物虽然没有显著地减少土壤呼吸通量,但是均比土壤总呼吸量低,是因为移除凋落物不仅降低了供微生物生存所需的基底数量和生境空间,而且通过减少土壤湿度而改善了局地的微环境 (Sayer et al, 2006)。

土壤理化特性是调控土壤呼吸的重要因素之一。在土壤温度和湿度相对稳定的条件下,土壤有机碳 (SOC) 作为微生物的物质基础,决定土壤的碳排放 (Priess et al, 2001)。本研究中,锐齿栎林总土壤呼吸与 0~5 cm SOC 呈弱相关,这与 Frank et al (2002) 和 Scott-Denton et al (2006) 研究结果一致。然而,异养呼吸和自养呼吸均与 0~5 cm SOC 不相关,说明土壤表层有机碳对土壤呼吸的解释较差,可

能与较深层次的 SOC 存在相关。黄雪蔓 (2013) 研究表明,土壤异养呼吸年通量与 0~50 cm 土壤有机碳含量关系密切。本研究中锐齿栎林中林的 0~5 cm 土壤有机碳显著高于锐齿栎幼林,而锐齿栎幼林的土壤呼吸通量和异养呼吸通量均高于中林 (但无显著差异),说明 0~5 cm 土壤有机碳在该地区锐齿栎林不同年龄序列的土壤呼吸中并非主要因子。土壤总呼吸还与表层微生物呼吸和细根生物量显著相关。这可能是因为植物根系集中于土壤上层,且土壤有机质和表层温度较高,而导致土壤生物尤其是微生物数量和活性的提高,对土壤呼吸的作用较显著 (Chapman et al, 1996)。异养呼吸和自养呼吸均与细根生物量呈显著正相关,且异养呼吸还与 10~20 cm SOC ($P = 0.02$)、土壤全氮 (TN) ($P = 0.01$) 显著正相关。说明当下层土壤有机质、氮含量有效性发生较大改变时,如凋落物/细根的大量输入,导致微生物活性增强,从而激发土壤的异养呼吸 (耿远波等, 2001)。凋落物呼吸与 0~5 cm C/N_{soil} 显著负相关,与微生物呼吸和微生物量碳呈显著正相关。这说明土壤中抗性成分较高时,可供土壤生物的高效养分相对变少,抑制了土壤微生物对凋落物的降解,导致其呼吸量减少 (Prescott et al, 2010)。

参考文献:

- BÅÅTH E, WALLANDER H, 2003. Soil and rhizosphere microorganisms have the same Q_{10} for respiration in a model system [J]. *Glob Chang Biol*, 9(12): 1788-1791.
- BOND-LAMBERTY B, WANG CK, GOWER ST, 2004. A global relationship between the heterotrophic and autotrophic components of soil respiration [J]. *Glob Chang Biol*, 10(10): 1756-1766.
- BORKEN W, MUHS A, BEESE F, 2002. Application of compost in spruce forests, effects on soil respiration, basal respiration and microbial biomass [J]. *For Ecol Manag*, 159(1-2): 49-58.
- CERTINI G, CORTI G, AGNELLI A, et al, 2003. Carbon dioxide efflux and concentrations in two soil under temperate forests [J]. *Biol Fert Soils*, 37(1): 39-46.
- CHAPMAN SJ, THURLOW M, 1996. The influence of climate on CO₂ and CH₄ emission from organic soils [J]. *Agr For Meteorol*, 79(4): 205-217.
- DAVIDSON EA, JANSSENS I, 2006. Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change [J]. *Nature*, 440(9): 165-173.
- EWEL KC, CROPPER WP, GHOLZ HL, 1987. Soil CO₂ evolution in Florida slash pine plantations. I. Changes through time [J]. *Can J For Res*, 17(4): 325-329.
- FRANK AB, LIEBIG MA, HANSON JD, 2002. Soil carbon dioxide fluxes in northern semiarid grasslands [J]. *Soil Biol Biochem*, 34(9): 1235-1241.
- GENG YB, ZHANG S, DONG YS, et al, 2001. The content of soil

- organic carbon and total nitrogen and correlativity between their content and fluxes of CO₂, N₂O and CH₄ in Xilin River Basin steppe [J]. *Acta Geogr Sin*, 56(1): 44–53. [耿远波, 章申, 董云社, 等, 2001. 草原土坡的碳氮含量及其温室气体通量的相关性 [J]. *地理学报*, 56(1): 44–53.]
- GOMEZ-CASANOVA N, MATAMALA R, COOK DR, et al, 2012. Net ecosystem exchange modifies the relationship between the autotrophic and heterotrophic components of soil respiration with abiotic factors in prairie grasslands [J]. *Glob Chang Biol*, 18(8): 2532–2542.
- GOUGH CM, VOGEL CS, HARROLD KH, et al, 2007. The legacy of harvest and fire on ecosystem carbon storage in a north temperate forest [J]. *Glob Chang Biol*, 13(9): 1935–1949.
- HUANG XM, 2013. The dynamic and regulation mechanisms of soil carbon in eucalyptus plantations in southern China [D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry: 23–32. [黄雪蔓, 2013. 南亚热带桉树人工林不同经营模式土壤碳动态变化及其调控机制 [D]. 北京: 中国林业科学研究院: 23–32.]
- JIN HM, SUN OJ, LIU JF, 2010. Changes in soil microbial biomass and community structure with addition of contrasting types of plant litter in a semiarid grassland ecosystem [J]. *J Plant Ecol*, 3(3): 209–217.
- JONASSON S, CASTRO J, MICHELSEN A, 2004. Litter, warming and plant affect respiration and allocation of soil microbial and plant C, N and P in arctic mesocosms [J]. *Soil Biol Biochem*, 36(7): 1129–1139.
- KLOPATEK JM, 2002. Belowground carbon pools and processes in different age stands of Douglas-fir [J]. *Tree Physiol*, 22(2–3): 197–204.
- KOLARI P, PUMPANEN J, RANNIK Ü, et al, 2004. Carbon balance of different aged Scots pine forests in Southern Finland [J]. *Glob Chang Biol*, 10(7): 1106–1119.
- KUZUYAKOV Y, BOL R, 2006. Sources and mechanisms of priming effect induced in two grassland soils amended with slurry and sugar [J]. *Soil Biol Biochem*, 38(4): 747–758.
- KUZUYAKOV Y, LARIONOVA AA, 2005. Root and rhizomicrobial respiration: a review of approaches to estimate respiration by autotrophic and heterotrophic organism in soil [J]. *J Plant Nutr*, 168(4): 503–520.
- LAPORTE MF, DUCHESNE LC, MORRISON IK, 2003. Effect of clearcutting, selection cutting, shelterwood cutting and microsites on soil surface CO₂ efflux in a tolerant hardwood ecosystem of northern Ontario [J]. *For Ecol Manag*, 174(1): 565–575.
- LAVIGNE MB, BOUTIN R, FOSTER RJ, et al, 2003. Soil respiration responses to temperature are controlled more by roots than by decomposition in balsam fir ecosystems [J]. *Can J For Res*, 33(9): 1744–1753.
- LAW BE, RYAN MG, ANTHONI PM, 1999. Seasonal and annual respiration of a ponderosa pine ecosystem [J]. *Glob Chang Biol*, 5(2): 169–182.
- LEE MS, NAKANE K, NAKATSUBO T, et al, 2003. Seasonal changes in the contribution of root respiration to total soil respiration in a cool-temperate deciduous forest [J]. *Plant Soil*, 255(1): 311–318.
- LIU SH, FANG JY, 1997. Effect factors of soil respiration and the temperature's effects on soil respiration in the global scale [J]. *Acta Ecol Sin*, 17(5): 469–476. [刘绍辉, 方精云, 1997. 土壤呼吸的影响因素及全球尺度下温度的影响 [J]. *生态学报*, 17(5): 469–476.]
- LUAN JW, 2010. Temporal and spatial variations of soil respiration and its controlling factors in warm-temperate Oak (*Quercus acutidentata*) forests [D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry: 19–29. [栾军伟, 2010. 暖温带锐齿栎林土壤呼吸时空变异及其调控机理 [D]. 北京: 中国林业科学研究院: 19–29.]
- MAIER CA, KRESS LW, 2000. Soil CO₂ evolution and root respiration in 11-year-old loblolly pine (*Pinus taeda*) plantation as affected by moisture and nutrient availability [J]. *Can J For Res*, 30(3): 347–359.
- METCALFE DB, FISHER RA, WARDLE DA, 2011. Plant communities as drivers of soil respiration: pathways, mechanisms, and significance for global change [J]. *Biogeosciences*, 8(2): 2047–2061.
- PRESCOTT CE, 2010. Litter decomposition: what controls it and how can we alter it to sequester more carbon in forest soils [J]. *Biogeochemistry*, 101(1–3): 133–149.
- PRIESS JA, KONING GH, VELDKAMP, 2001. Assessment of interactions between land use change and carbon and nutrient fluxes in Ecuador [J]. *Agr Ecosyst Environ*, 85(1–3): 269–279.
- RAICH JW, TUFEKCIOGLU A, 2000. Vegetation and soil respiration: correlations and controls [J]. *Biogeochemistry*, 48(1): 71–90.
- SAIZ G, BYRNE KA, BUTTERBACH-BAHL K, et al, 2006. Stand age-related effects on soil respiration in a first rotation Sitka spruce chronosequence in central Ireland [J]. *Glob Chang Biol*, 12(6): 1007–1020.
- SAYER EJ, TANNER EVJ, LACEY AL, 2006. Effects of litter manipulation on early-stage decomposition and meso-arthropod abundance in a tropical moist forest [J]. *For Ecol Manag*, 229(1–3): 285–293.
- SCHLESINGER WH, LICHTER J, 2001. Limited carbon storage in soil and litter of experimental forest plots under increased atmospheric CO₂ [J]. *Nature*, 411(24): 466–469.
- SMITH D, KADUK JD, BALZTER H, et al, 2007. Soil respiration from a boreal forest fire scar chronosequence [R]. American Geophysical Union, Fall Meeting.
- SULZMAN EW, BRANT JB, BOWDEN RD, et al, 2005. Contribution of aboveground litter, belowground litter, and rhizosphere respiration to total soil CO₂ efflux in an old growth coniferous forest [J]. *Biogeochemistry*, 73(1): 231–256.
- TANG XL, LIU SG, ZHOU GY, et al, 2006. Soil-atmospheric exchange of CO₂, CH₄ and N₂O in three subtropical forest ecosystems in southern China [J]. *Glob Chang Biol*, 12(3): 546–560.
- TEDESCHI V, REY A, MANCA G, et al, 2006. Soil respiration in a Mediterranean oak forest at different developmental stages after coppicing [J]. *Glob Chang Biol*, 12(1): 110–121.
- VANCE ED, BROOKES PC, JENKINSON DS, 1987. An extraction method for measuring soil microbial biomass C [J]. *Soil Biol Biochem*, 19(6): 703–707.
- WANG J, YOU YM, TANG ZX, et al, 2014. Variations in foliar litter decomposition across contrasting forest stands and controlling factors at local scale [J]. *J Plant Ecol*, 8(3): 261–272.
- YANG YS, CHEN GS, GUO JF, et al, 2007. Soil respiration and carbon balance in a subtropical native forest and two managed plantations [J]. *Plant Ecol*, 193(1): 71–84.
- ZHOU Z, ZHANG Z, ZHA T, et al, 2013. Predicting soil respiration using carbon stock in roots, litter and soil organic matter in forests of Loess Plateau in China [J]. *Soil Biol Biochem*, 57(2): 135–143.