

改变碳源输入对蛟河红松阔叶混交林土壤呼吸的影响*

左强 何怀江 赵秀海**

北京林业大学森林资源与生态系统过程北京市重点实验室 北京 100102

摘要 为了解改变碳源输入方式对土壤呼吸速率及土壤温湿度的影响,于2014年5-12月,在吉林省蛟河红松阔叶混交林地地表无雪期间,利用LI-8100土壤CO₂通量全自动测量系统测定不同处理(对照处理、去凋处理、加倍凋落物处理、切根处理及去凋切根处理)土壤呼吸速率及5 cm处温、湿度。结果表明:不同处理之间5 cm深度土壤温度的差异性不显著($P > 0.05$),土壤湿度差异显著($P < 0.05$)。整个观测期间对照、去凋、加倍凋落物、切根和去凋切根处理的土壤呼吸速率平均值分别为 $3.35 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 、 $3.54 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 、 $4.22 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 、 $2.11 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 和 $2.45 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$,不同处理土壤呼吸速率的变化幅度不相同。去凋、加倍凋落物处理使土壤呼吸速率增加,整个观测期平均增加了1.98%和24.81%。切根、去凋切根处理使土壤呼吸速率降低,整个观测期平均降低了36.49%和28.64%。对照、去凋、加倍凋落物、切根及去凋切根处理的 Q_{10} 值分别是3.32、3.35、3.38、2.59和3.13,切根处理显著低于其他处理。不同处理的土壤呼吸速率与土壤温度之间均呈显著指数相关($P < 0.001$),但与土壤湿度之间相关关系不显著($P > 0.05$)。土壤温度和土壤湿度的双变量复合模型能够更好地解释土壤呼吸的季节变化,决定系数 R^2 值为62%-95%。本研究结果证明改变碳源输入是影响森林CO₂通量的重要因子。图2 表3 参46

关键词 土壤呼吸速率;红松阔叶混交林;凋落物;根系;土壤温度;土壤湿度; Q_{10} 值

CLC S714.2

Influence of carbon input changes on the soil respiration in a mixed broadleaved-Korean pine forest in western foothill of Changbai Mountain*

ZUO Qiang, HE HuaiJiang & ZHAO XiuHai**

Key Laboratory for Forest Resources & Ecosystem Processes of Beijing, Beijing Forestry University, Beijing 100102, China

Abstract We evaluated the impact of the change of carbon input on soil respiration under the mixed broadleaved-Korean pine forest in Jiaohe, Jilin Province. Five treatments including a) a control, b) litter exclusion, c) litter addition, d) root exclusion, e) litter and root exclusion were applied to determine the contribution of carbon input to soil respiration. We measured soil respiration from May to December 2014 by using infrared gas exchange analyzer of Li-Cor 8100. The results showed that there was a similar seasonal respiration curve among different treatments. The annual mean soil respiration rate was $3.35 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ for the control, $3.54 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ for litter exclusion, $4.22 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ for litter addition, $2.11 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ for root exclusion and $2.45 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ for litter and root exclusion. The soil respiration rate with litter exclusion was 1.98% higher than the control, and that with litter addition was 24.81% higher than the control. On the other hand, the soil respiration rate with root exclusion was 36.49% lower than the control, and that with litter and root exclusion was 28.64% lower than the control. The Q_{10} value of the soil respiration was 3.32 in the control, 3.35 with litter exclusion, 3.38 with litter addition, 2.59 with root exclusion and 3.13 with litter and root exclusion. The soil respiration was significantly related to the soil temperature ($P < 0.001$) at 5 cm depth, but not to the soil moisture at 5 cm depth ($P > 0.05$). In order to predict both the soil moisture and soil temperature dependency 4 two-variable linear /non-linear models were developed and evaluated. By use of those models it was possible to predict the soil respiration as a function of both temperature and moisture, with R^2 values ranging from 62%-95%. The results indicated that carbon input is an important factor affecting soil CO₂ efflux in forests.

Keywords soil respiration rate; coniferous and board-leaved mixed forest; litter; root; soil temperature; soil moisture; Q_{10} value

收稿日期 Received: 2015-04-17 接受日期 Accepted: 2015-06-20

*国家“十二五”科技支撑项目(2012BAD22B0203, 2012BAC01B03)资助 Supported by the Sci-tech Pillar Project of the Twelfth Five-year Plan of China (2012BAD22B0203, 2012BAC01B03)

**通讯作者 Corresponding author (E-mail: zhaoxh@bjfu.edu.cn)

土壤碳储量相当于大气碳储量的3.3倍和植物碳储量的4.5倍^[1-2],是陆地生态系统最大的碳库,其碳输入和输出之间的平衡关系可由土壤碳的变化反映^[3-4]。土壤呼吸是土壤碳库的主要通量途径,是大气CO₂的重要来源^[5]。由于土壤碳库十分巨大,土壤呼吸的微小变化都将对温室气体CO₂的释放总量产生显著影响^[6]。研究发现,人为改变碳源的输入可以增强或降低土壤有机碳转化速率,能够在短期内观察到土壤碳库和碳循环的变化^[7]。在森林生态系统中,改变碳源输入可以通过去除、添加凋落物和切根长期野外实验(Detritus input and removal treatments, DIRT)来研究^[8]。

凋落物是土壤有机碳库地上部分的主要碳源,添加或去除凋落物会改变土壤有机碳的供应而影响土壤呼吸,并且引起土壤有机质分解的短期变化(正激发效应和负激发效应)^[8-10],还将显著影响土壤微生物量和活性,影响微生物群落结构,从而影响土壤呼吸速率^[11-12]。在国内,添加和去除凋落物对土壤呼吸的研究仅见于亚热带杉木人工林^[13]、次生栎林和火炬松人工林^[14]、马尾松人工林^[15]以及枫香和樟树林^[16]、温带油松人工林^[17],东北针阔混交林添加或去除凋落物实验尚未见到报道。

根系是植物将光合产物直接输入到地下的唯一途径。Högberg等推测,光合产物分配到根系的碳75%以呼吸方式被释放出来^[18]。去除根系显著降低土壤呼吸速率^[19-21],不同生态系统根系呼吸差异很大,世界范围内根系对土壤总呼吸的贡献率为40%-60%^[22]。在我国东北6种典型森林类型中,因林型不同,根系对土壤总呼吸的贡献率在14.4%-51.4%之间^[23-24]。

针阔混交林是我国东北长白山、小兴安岭等东部山区的地带性顶极植被类型。然而目前有关针阔混交林地土壤呼吸的研究主要集中在森林采伐对土壤呼吸的影响,天然次生林与人工林地下碳等方面^[25-26]。本研究通过去除、添加凋落物和挖壕法切根实验探讨改变碳源输入对针阔混交林土壤呼吸的影响及变化规律,分析影响针阔混交林土壤碳释放模式和强度的环境因子,为理解其碳收支和碳循环提供基础数据和科学支撑。

1 试验地概况

试验地位于吉林省蛟河林业实验管理局,地理位置43°57.524'~43°58.042' N, 127°44.111'~127°44.667' E,海拔459~517 m。土壤为山地暗棕色森林土壤,土层厚度20~100 cm,土壤形态有层次分化,富含有机质。该区气候属于受季风影响的温带大陆性山地气候,年平均气温3.8℃,1月平均气温-18.6℃,7月平均气温21.7℃。年平均降雨量695.9 mm。该区原始植被属于北温带植物区系的针阔混交林,植物种类多样,分布复杂。乔木树种主要包括红松(*Pinus koraiensis*)、沙松(*Abies holophylla*)、千金榆(*Carpinus cordata*)、胡桃楸(*Juglans mandshurica*)、水曲柳(*Fraxinus mandshurica*)、紫椴(*Tilia amurensis*)、白桦(*Betula platyphylla*)、白牛槭(*Acer mandshuricum*)、色木槭(*Acer mono*)、蒙古栎(*Quercus mongolica*)、青杨(*Populus ussuriensis*)、春榆(*Ulmus japonica*)、裂叶榆(*Ulmus laciniata*)、怀槐

(*Maackia amurensis*)等^[27]。

2 研究方法

2.1 区域与试验样地设置

在吉林蛟河红松阔叶混交林内选取3块20 m × 20 m的固定样地。在每个样地内做5种处理(1 m × 1 m),各处理小区均匀分布,小区之间间隔3 m以上。处理1,保留凋落物和保留根系(对照处理);处理2,将小样方内地上凋落物移走(去凋处理),并每个月定期移走样方内新落下的凋落物;处理3,添加从处理2样方内所移走的凋落物(加倍凋落物处理),并每个月定期添加从处理2所移走的凋落物;处理4,保留凋落物切断根系(切根处理),采用挖壕法进行切根处理(2012年布设完成),在样方四周垂直挖深0.8~1.0 m(植物根系分布层以下),然后插入石棉瓦板围绕样方四周把样方外的根系隔开,阻止外围根系向小样方内生长;处理5,去除凋落物并切断根系(去凋切根处理)。每种处理每个样地重复3次。在每个1 m × 1 m的样方中心布置1个内径为20 cm、高为10 cm的PVC环,一端削尖压入土中7~8 cm。在布设土壤环24 h后开始测量,并保持土壤环在观测过程中位置不变^[28]。

2.2 土壤呼吸及温度、湿度测定

在月初、月中选择晴朗天气测量土壤呼吸,使用LI-8100土壤CO₂通量全自动测量系统,测量时间为一天的8:00~18:00。土壤环测量时间设定为2 min,每个土壤环测量3次重复。同时,用LI-8100配套的土壤温度、湿度传感器同步测量土壤5 cm深处的温湿度。由于实验区土壤表面积雪在4月末全部融化,12月初再次被积雪覆盖,因此本次实验测定时间为2014年5月中旬至12月初,每隔15 d测量一次,共测定13次。

2.3 数据统计分析

所有的统计分析均在SPSS22.0中完成,用Repeat measured ANOVA进行方差分析和多重比较检验土壤呼吸季节变化、温度和湿度的显著性。用SigmaPlot 10.0软件作图。土壤呼吸速率变化幅度用下式表示:变幅=(不同处理土壤呼吸速率-对照处理土壤呼吸速率)/对照处理土壤呼吸速率×100%。用线性或非线性方程建立土壤呼吸(R_s)与土壤温度(T)和土壤湿度(W)之间的单因素关系模型。 Q_{10} 值通过下式计算: $Q_{10} = e^{10b}$, b 为温度敏感系数,为土壤呼吸速率与土壤温度指数关系方程($R_s = ae^{bT}$)中的 b 值。并用线性($R_s = a(T \times W) + b$; $R_s = a + bT \times cW$)和非线性($R_s = aT^bW^c$); $R_s = ae^{bT}W^c$)方程模型拟合土壤呼吸速率(R_s)与土壤温度(T)和土壤湿度(W)的双变量关系模型。

3 结果与分析

3.1 土壤温度、土壤湿度

不同处理土壤温度均呈现显著的季节性变化($P < 0.001$),但不同处理之间5 cm深度土壤温度的差异性不显著($P = 0.281$)。对照,去凋处理,加倍凋落物处理,切根处理及去凋切根处理的5 cm深度土壤温度整个观测期变化范围分别为0.51~19.14℃、-0.94~21.64℃、0.65~21.01℃、-0.85~20.18℃和-1.85~21.30℃,最大值均出现在8月初,最小值均

表1 不同处理土壤呼吸速率 (R_s)、5 cm 土壤温度 (T) 和 5 cm 土壤湿度 (W) 平均值多重比较
Table 1 Multiple-range test for soil respiration rate (R_s), soil temperature (T) and soil moisture at 5 cm depth (W) with different treatments

处理 Treatment	土壤呼吸速率 ($R_s/\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) Soil respiration rate		5 cm 土壤温度 ($T/^{\circ}\text{C}$) Soil temperature at 5 cm		5 cm 土壤湿度 ($W/\%$) Soil moisture at 5 cm	
	均值 Mean	标准误 SE	均值 Mean	标准误 SE	均值 Mean	标准误 SE
对照 Control	3.35a	0.11	13.14a	0.33	42.4a	0.68
去凋 Litter exclusion	3.54a	0.12	13.81a	0.35	41.5a	0.75
加倍凋落物 Litter addition	4.22b	0.16	13.80a	0.32	40.9a	0.76
切根 Root exclusion	2.11c	0.08	13.93a	0.38	47.9b	0.57
去凋切根 Litter and root exclusion	2.45d	0.06	14.14a	0.40	46.8b	0.48

表中a、b、c、d表示显著性差异组别 ($\alpha = 0.05$)。Lowercase letters indicate significant difference at the level of 0.05.

出现在12月初。整个观测期土壤温度平均值分别为13.14 $^{\circ}\text{C}$ 、13.81 $^{\circ}\text{C}$ 、13.80 $^{\circ}\text{C}$ 、13.93 $^{\circ}\text{C}$ 和14.14 $^{\circ}\text{C}$ (表1)。在生长旺盛期 (5-8月), 去凋切根处理土壤温度显著高于其他处理 ($P < 0.01$), 对照处理土壤温度显著低于其他处理 ($P < 0.03$)。但在生长非旺盛期 (9-12月), 去凋切根处理土壤温度显著低于其他处理 ($P < 0.001$)。

不同处理土壤湿度均呈现显著的季节性变化且不同处理间土壤湿度差异显著 ($P < 0.05$)。对照、去凋处理、加倍凋落物处理、切根处理及去凋切根处理的5 cm深度土壤湿度整个观测期变化范围分别为26.0%-53.1%、21.0%-53.5%、21.8%-51.8%、20.2%-53.7%和33.6%-53.0%, 最大值分别出现在7月中、7月中、6月初、6月初和6月初。最小值分别出现在5月初、10月中、9月中、9月中和10月中。整个观测期土壤湿度平均值分别为42.4%、41.5%、40.9%、47.9%和46.8% (表1)。在生长旺盛期 (5-8月) 和非生长旺盛期 (9-12月), 均表现为切根处理和去凋切根处理显著高于对照、去凋处理和加倍凋落物处理 ($P < 0.001$)。

3.2 土壤呼吸速率

在季节动态上, 吉林红松阔叶混交林的5种处理土壤呼吸速率均呈现显著的季节性变化且呈现相似的曲线格局 (图1)。5种处理的变化范围分别为0.20-7.13 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 、0.36-6.70 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 、0.51-9.96 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 、0.29-4.86 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 和0.24-6.25 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 。对照处理、去凋处理、加倍凋落物处理, 切根处理及去凋切根处理最小值均出现在12月初, 去凋处理土壤呼吸速率最大值出现在8月初, 而其他处理的土壤呼吸速率最大值均出现在7月初。整个观测期土壤呼吸速率平均值分别为 3.35 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 、3.54 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 、4.22 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 、2.11 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 和2.45 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (表1)。在生长旺盛期 (5-8月) 除对照处理与去凋处理差异不显著外 ($P = 0.245$), 其他处理之间差异性显著 ($P < 0.001$), 在非生长旺盛期 (9-12月) 对照处理与去凋处理、切根处理及去凋切根处理差异性不显著 ($P = 0.470$, $P = 0.846$)。总体来看, 加倍凋落物处理的土壤呼吸速率显著大于对照处理和去凋处理 ($P < 0.001$), 对照处理和去凋处理的土壤呼吸速率显著大于切根处理和去凋切根处理 ($P < 0.001$)。

3.3 不同处理土壤呼吸变化幅度

改变碳源输入对红松阔叶混交林土壤呼吸产生明显的影响 (图2)。不同处理土壤呼吸速率的变化幅度不相同。去除凋落物处理和加倍凋落物处理使土壤呼吸速率增加, 变化范围分别为-24.03%-11.72%和6.46%-37.53%, 平均增加了1.98%和24.81%, 去除凋落物处理土壤呼吸速率最大值出

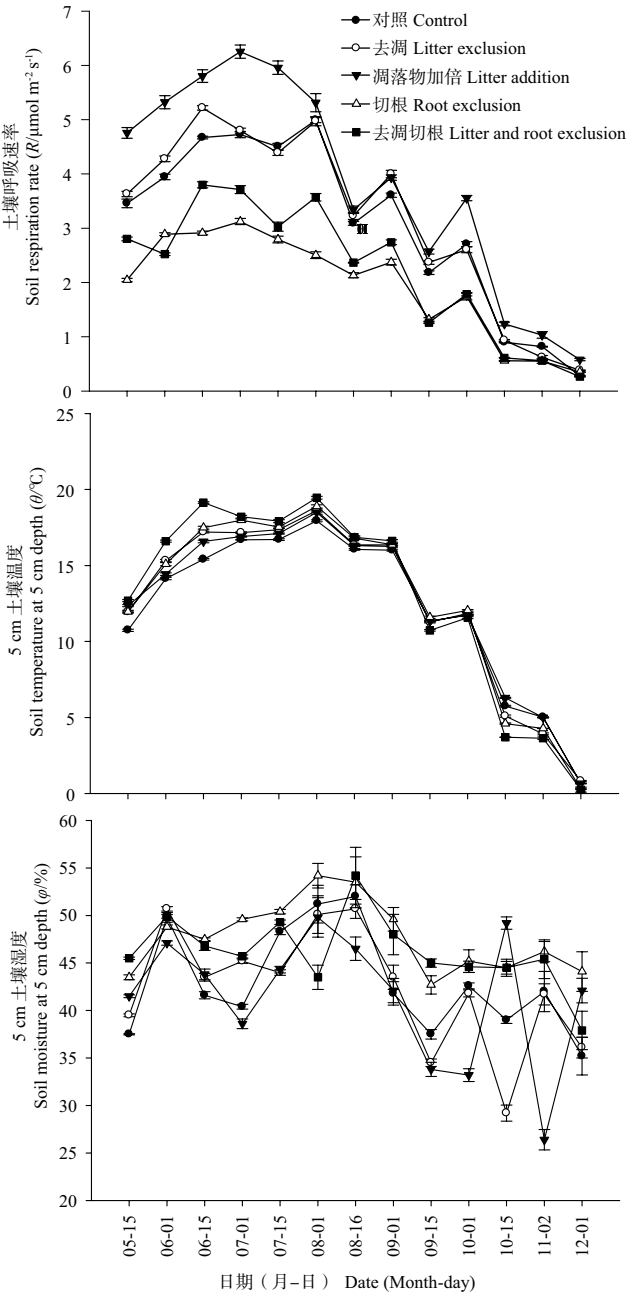


图1 不同处理土壤呼吸速率、5 cm 土壤温度和5 cm 土壤湿度季节动态。误差项为标准误。

Fig. 1 Seasonal dynamics of soil respiration rate, soil temperature and moisture at 5 cm depth in different treatments. Error bars indicate standard error.

现在6月中, 最小值出现在11月中旬, 加倍凋落物处理土壤呼吸速率最大值出现在5月中旬, 最小值出现在8月初. 切根处理和去凋切根处理使土壤呼吸速率降低, 变化范围分别为-49.83%-26.73%和-42.24%-18.66%, 平均降低了36.49%和28.64%, 切根处理土壤呼吸速率最大值出现在6月初旬, 最小值出现在8月初, 去凋切根处理土壤呼吸速率最大值出现在9月中旬, 最小值出现在6月中.

3.4 土壤呼吸与水热因子的关系

土壤呼吸速率与5 cm处土壤温度的相关关系表明, 改变碳源输入并没有改变土壤呼吸速率与5 cm处土壤温度之间的关系, 不同处理的土壤呼吸速率与土壤温度之间均呈显著指数相关 ($P < 0.001$). 回归方程的系数如表2.

本实验中, 对照处理、去凋处理、加倍凋落物处理、切根处理及去凋切根处理土壤呼吸的温度敏感系数 Q_{10} 值分别是3.32、3.35、3.38、2.59和3.13. 其表现为加倍凋落物>去凋处理>对照处理>去凋切根处理>切根处理.

土壤呼吸速率与5 cm处土壤湿度的相关关系表明, 不同

处理的土壤呼吸速率与土壤湿度之间均呈二次曲线相关, 但相关关系不显著 ($P > 0.05$).

利用线性和非线性的双变量复合模型对土壤呼吸与土壤温度和土壤湿度的复合关系进行分析. 结果表明, 4种复合模型中, 2种线性的复合模型对不同处理的拟合效果不如单因素模型, 2种非线性的复合模型的决定系数 R^2 值相比单因素模型有一定程度的提高, 土壤温度和土壤湿度能够共同解释土壤呼吸季节变化的62%-95%, 表明复合模型对土壤呼吸的预测准确性提高(表3).

4 讨论与结论

4.1 根系对土壤呼吸的影响

切断根系土壤呼吸降低的直接原因是切断了植物生理活动的维持呼吸, 阻止植物地上部分的光合产物向地下部分的分配并通过根系分泌向土壤中的输入碳, 从而影响了土壤微生物量, 特别是以根系提供的活性碳源作为能量来源的根

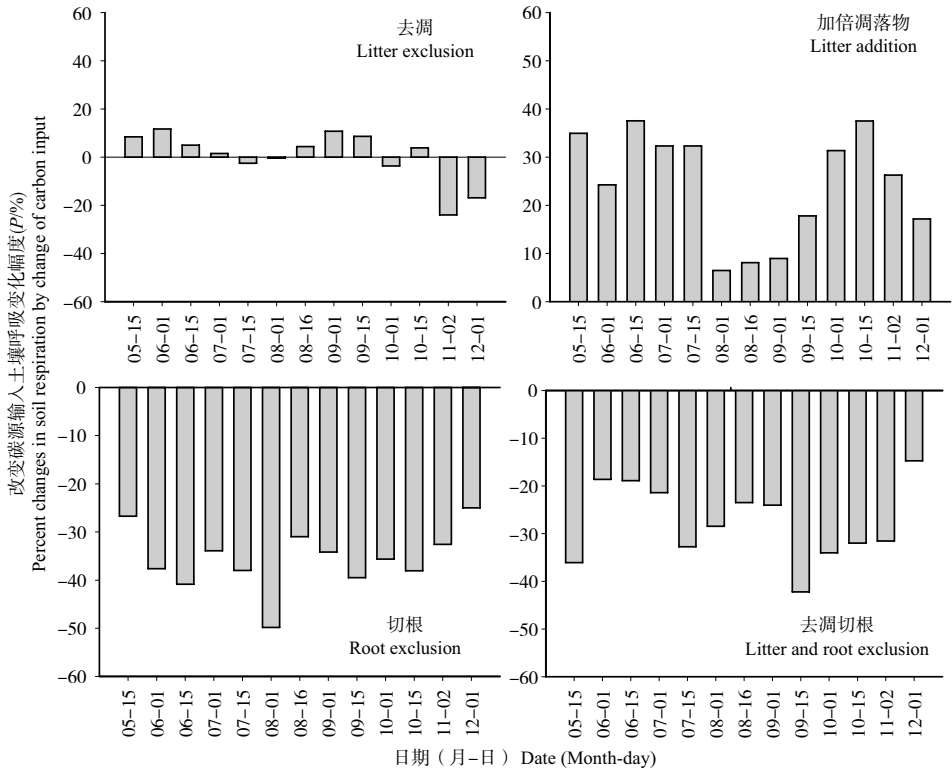


图2 不同处理土壤呼吸速率变化幅度.
Fig. 2 Percent changes in soil respiration rate with different treatments.

表2 土壤呼吸速率与5 cm土壤温度的指数关系模型($R_t = ae^{bT}$).
Table 2 Exponential relationship between soil respiration rate and soil temperature at 5 cm depth ($R_t = ae^{bT}$).

处理 Treatment	参数 Parameter				
	$a \pm SE$	$b \pm SE$	R^2	P	Q_{10}
对照 Control	0.60*** $\pm$ 0.05	0.120*** $\pm$ 0.006	0.70	< 0.001	3.32
去凋 Litter exclusion	0.56*** $\pm$ 0.05	0.121*** $\pm$ 0.006	0.73	< 0.001	3.35
加倍凋落物 Litter addition	0.67*** $\pm$ 0.07	0.122*** $\pm$ 0.007	0.67	< 0.001	3.38
切根 Root exclusion	0.50*** $\pm$ 0.10	0.095*** $\pm$ 0.006	0.63	< 0.001	2.59
去凋切根 Litter and root exclusion	0.41*** $\pm$ 0.02	0.114*** $\pm$ 0.004	0.86	< 0.001	3.13

***表示在0.001水平上差异显著. *** indicates significant difference at the level of 0.001.

表3 土壤呼吸速率 (R_s) 与 5 cm 深度土壤温度 (T) 及土壤湿度 (W) 的复合关系模型
Table 3 Combined relationship model of soil respiration to soil temperature and soil moisture at 5 cm depth

处理 Treatment	线性关系 Linear relationship		非线性关系 Non-linear relationship	
	$R_s = a(T \times W) + b$	$R_s = a + bT + cW$	$R_s = aT^bW^c$	$R_s = ae^{bT}W^c$
对照 Control	$R_s = 0.628(T \times W) + 0.06$ $R^2 = 0.57^{***}$	$R_s = -3.392 + 0.3T + 7.08W$ $R^2 = 0.61^{***}$	$R_s = 0.192T^{-1.36}W^{0.74}$ $R^2 = 0.70^{***}$	$R_s = 1.510e^{0.107T}W^{-0.80}$ $R^2 = 0.65^{***}$
去凋 Litter exclusion	$R_s = 0.582(T \times W) + 0.36$ $R^2 = 0.69^{***}$	$R_s = -2.189 + 0.23T + 6.59W$ $R^2 = 0.69^{***}$	$R_s = 0.352T^{-1.11}W^{0.58}$ $R^2 = 0.79^{***}$	$R_s = 1.737e^{0.107T}W^{-0.77}$ $R^2 = 0.75^{***}$
加倍凋落物 Litter addition	$R_s = 0.724(T \times W) + 0.06$ $R^2 = 0.38^{***}$	$R_s = -2.221 + 0.46T + 1.64W$ $R^2 = 0.51^{***}$	$R_s = 0.072T^{-1.61}W^{0.12}$ $R^2 = 0.67^{***}$	$R_s = 0.707e^{0.137T}W^{-0.08}$ $R^2 = 0.62^{***}$
切根 Root exclusion	$R_s = 0.296(T \times W) + 0.17$ $R^2 = 0.50^{***}$	$R_s = 0.552 + 0.19T - 2.24W$ $R^2 = 0.61^{***}$	$R_s = 0.056T^{-1.28}W^{-0.31}$ $R^2 = 0.78^{***}$	$R_s = 3.26e^{0.097T}W^{-0.09}$ $R^2 = 0.95^{***}$
去凋切根 Litter and root exclusion	$R_s = 0.404(T \times W) - 0.16$ $R^2 = 0.54^{***}$	$R_s = 0.973 + 0.23T - 3.36W$ $R^2 = 0.70^{***}$	$R_s = 0.090T^{-1.14}W^{-0.33}$ $R^2 = 0.78^{***}$	$R_s = 1.38e^{0.117T}W^{-0.20}$ $R^2 = 0.81^{***}$

在0.001水平上差异显著。 indicates significant difference at the level of 0.001.

际微生物。切断根系后,土壤微生物所能利用的活性碳输入下降将明显降低微生物的数量和活性^[19]。根系属于土壤呼吸中自养呼吸部分,环境因子的变化影响自养呼吸和异养呼吸的比例而影响土壤呼吸,根生物量和单位根呼吸速率决定根系所产生的CO₂量,植物的种类、生活史和生长环境的变化使根系呼吸受到许多生物因子和非生物因子的调控。在本实验中,与对照处理相比,切断根系土壤呼吸速率降低幅度为26.73%-49.83%,年平均降低了36.49%。这一结果低于Ruehr和Buchman等瑞士山地混交林生长季和非生长季切除根系使土壤呼吸分别降低了50%和40%的研究结果^[29],高于朱凡等杉木人工林切除根系使土壤呼吸降低了30.4%的研究结果^[30],高于汪金松等油松人工林切除根系使土壤呼吸降低了10.76%的研究结果^[17],这种情况可能与不同的立地条件、森林类型、气候等因素差异有关。另外,切根处理所用的挖壕法的理论基础是植物根系活动在挖壕小样方中完全被抑制^[31]。然而在实际中,植物根系在切断后可能仍会生存一段时间,维持一段时间呼吸,并且死根在分解过程中,会增加挖壕小样方中的分解底物,所以切根初期土壤呼吸会受到根呼吸的干扰,出现土壤呼吸速率并未立即降低甚至增加的现象。Lee等在研究日本北温带落叶松时发现,挖壕前2个月样方土壤呼吸与对照样方相比土壤呼吸速率明显增加,挖壕3个月后样方土壤呼吸与挖壕1年后土壤呼吸速率相当^[31]。Yi等在研究我国亚热带森林时发现,挖壕4个月后样方土壤呼吸趋与稳定,可忽略根呼吸的干扰^[32]。本研究于2013年春季进行切根处理,2014年进行观测,于挖壕后一年开始测量,所以实验初期土壤呼吸速率并未受到根呼吸的扰动,可以很好地估计根系呼吸对土壤呼吸的贡献率。

4.2 凋落物对土壤呼吸的影响

凋落物对土壤呼吸的贡献机理是一个非常复杂的生物学过程。土壤有机碳库的绝大部分来源于凋落物的分解,凋落物的添加或去除会改变土壤有机碳的供应而影响土壤呼吸^[33],并且会直接影响凋落物自身分解释放的CO₂量而影响土壤呼吸。凋落物量也将通过影响土壤温度、土壤容积含水量而间接影响土壤呼吸。Boone等在对哈佛森林凋落物控制实验的结果表明:添加凋落物使土壤呼吸速率增加20%^[34],去除凋落物使土壤呼吸速率降低25%。Raich等^[22]和王光军等^[13, 15-16]在我国亚热带人工近熟林,汪金松等在我国温带油

松林的研究结果^[17]均表明添加凋落物将增加土壤呼吸速率,去除凋落物将降低土壤呼吸速率。在本实验中,与对照处理相比,添加凋落物使土壤呼吸速率平均增加了24.81%。去除凋落物土壤呼吸速率呈现先增加后降低的趋势,变化范围为-24.03%-11.72%,平均增加了1.98%,这种情况可能是由于去凋处理后短期内凋落物呼吸的减少和土壤碳源的减少对土壤呼吸的影响小于去凋处理所造成土壤温度增加对土壤呼吸的影响。但在去根去凋处理中,平均温度值最大,而土壤呼吸速率降低了28.64%,表明土壤温度、土壤碳源等共同影响着土壤呼吸速率。去除凋落物前期土壤呼吸的增加可能与寒温带针阔混交林立地条件下,土壤养分充足,土壤碳源充足,所以去凋所造成的土壤温度升高对去凋前期土壤呼吸的影响更大有关。也可能由于向土壤中添加或去除凋落物而引起土壤有机质分解的短期变化,从而引起土壤呼吸的正激发效应和负激发效应^[8-10]。而不同的森林类型所引起的激发效应持续时间也不同^[35-36]。同时已有研究表明,去除和添加凋落物还将显著影响土壤微生物量和活性,影响微生物群落结构,从而影响土壤呼吸速率^[11-12]。

4.3 土壤水热因子对土壤呼吸的影响

改变碳源输入对土壤温度和土壤湿度产生影响。在本实验中,不同处理间土壤温度之间差异不显著,整个观测期平均观测温度表现为去凋切根处理>切根处理>去凋处理>加倍凋落物处理>对照处理。由于土壤呼吸速率与土壤温度呈现正指数关系,如果改变碳源输入使土壤温度升高,那么土壤呼吸速率就会增加。而我们实际观察的结果是去掉切根处理和切根处理的土壤呼吸速率显著低于其他处理,这表明土壤温度的变化在改变碳源输入的土壤呼吸变化中所起作用很小。不同处理间土壤湿度差异显著,整个观测期平均观测湿度表现为切根处理>去凋切根处理>对照处理>去凋处理>加倍凋落物处理。挖壕法切除根系影响根系对水分的吸收,隔离样方外根系侵入样方所用的挡板阻碍样方内水分的流失,显著增加了土壤湿度。去除凋落物处理和加倍凋落物处理显著降低了土壤湿度。土壤湿度通过影响土壤微生物活性和土壤根系生长来影响土壤呼吸。因此土壤湿度的变化在改变碳源输入的土壤呼吸变化中起重要作用,这与汪金松等人的研究结果^[17]一致。

在本实验中,改变碳源输入各处理土壤呼吸速率均与

5 cm深度土壤温度呈显著指数关系 ($P < 0.001$)。5 cm处土壤温度解释了土壤呼吸速率变异的63%-86%。这与Savage等^[37]、Wieser等^[38]、Yan等^[39]、Hou等^[40]、Wang等^[17]和Wang等^[13, 15-16]的研究结果一致, 均表明不同处理土壤温度与土壤呼吸速率之间存在着显著指数关系。与土壤温度相比, 土壤呼吸速率与5 cm深度土壤湿度的相关性较差, 5 cm深度土壤湿度解释土壤呼吸速率变异的能力较差。这主要是因为土壤湿度只有在最高和最低的情况下才会抑制土壤呼吸, 而本地区降雨量充足, 土壤比较湿润, 适合土壤微生物的活动及土壤根系的生长, 所以土壤湿度不是土壤呼吸的抑制因子。许多研究表明, 单因子很难客观描述土壤呼吸的复杂变化, 而双因子能相应提高模型的预测能力, 土壤温度与土壤湿度是交互影响森林生态系统土壤呼吸过程, 可以共同解释土壤呼吸变化的67.5%-90.6%^[41]。在本实验中, 线性关系的2种土壤温度和土壤湿度的复合模型的拟合效果不如单因素关系模型, 而非线性的2种复合模型的决定系数 R^2 比单一的环境因子的模型要有一定程度的提高, 这与刘保新、金冠一的研究结果一致^[42-43], 决定系数 R^2 值为62%-95%。表明复合非线性模型是预测针阔混交林土壤呼吸的较优模型。

Q_{10} 值是土壤呼吸速率对土壤温度的敏感系数, 全球 Q_{10} 值的变化范围是1.8-4.1^[42-43]。在本实验中, 针阔混交林去除凋落物和加倍凋落物的 Q_{10} 值分别为3.25和3.38, 高于对照的 Q_{10} 值3.32, 这表明去除凋落物和加倍凋落物处理使土壤呼吸的温度敏感性增强。这与王光军等的研究结果^[13, 15-16]一致。切根和切根去凋处理的 Q_{10} 值分别为2.59和3.13, 去根处理 Q_{10} 值显著低于对照处理, 表明去根处理使土壤呼吸的温度敏感性降低, 去根处理后土壤呼吸对环境变化抵御能力减弱。相关研究表明, Q_{10} 值与土壤温度有关, 高温会出现低 Q_{10} 值而低温会出现高 Q_{10} 值^[44], 而本实验中, 去根处理显著增加了土壤温度。

本文通过研究改变碳源输入对针阔混交林土壤呼吸的影响, 分析了红松阔叶混交林改变碳源输入后环境因子的变化及对土壤碳释放的相对作用。由于本研究只有1年数据, 具有一定的局限性, 还需要进一步的长期试验验证。

参考文献 [References]

- Lal R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security [J]. *Science*, 2004, **304** (5677): 1623-1627
- Schulze ED, Freibauer A. Environmental science: carbon unlocked from soils [J]. *Nature*, 2005, **437** (7056): 205-206
- Davidson EA, Janssens IA. Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change [J]. *Nature*, 2006, **440** (7081): 165-173
- Busse MD, Sanchez FG, Ratcliff AW, Butnor JR, Carter EA, Powers RF. Soil carbon sequestration and changes in fungal and bacterial biomass following incorporation of forest residues [J]. *Soil Biol Biochem*, 2009, **41** (2): 220-227
- Raich JW, Schlesinger WH. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate [J]. *Tellus B*, 1992, **44** (2): 81-99
- Burton AJ, Pregitzer KS. Field measurements of root respiration indicate little to no seasonal temperature acclimation for sugar maple and red pine [J]. *Tree physiol*, 2003, **23** (4): 273-280
- Crow SE, Lajtha K, Bowden RD, Yano Y, Brant JB, Caldwell BA, Sulzman EW. Increased coniferous needle inputs accelerate decomposition of soil carbon in an old-growth forest [J]. *For Ecol Manage*, 2009, **258** (10): 2224-2232
- Nadelhoffer KJ, Boone RD, Bowden RD, Canary JD, Kaye J, Micks P. The DIRT experiment: litter and root influences on forest soil organic matter stocks and function [M]//Foster D, Aber J eds. *Forests in Time: The Environmental Consequences of 1000 Years of Change in New England*. New Haven, CT: Yale University Press, 2004: 300-315
- Kuzyakov Y, Bol R. Sources and mechanisms of priming effect induced in two grassland soils amended with slurry and sugar [J]. *Soil Biol Biochem*, 2006, **38** (4): 747-758
- Fontaine S, Barot S, Barré P, Nadia B, Mary B, Rumpel C. Stability of organic carbon in deep soil layers controlled by fresh carbon supply [J]. *Nature*, 2007, **450** (7167): 277-280
- Kuzyakov Y. Priming effects: interactions between living and dead organic matter [J]. *Soil Biol Biochem*, 2010, **42** (9): 1363-1371
- Wang S, Zhao X, Qu H, Zuo X, Lian J, Tang X, Powers R. Effects of shrub litter addition on dune soil microbial community in horqin sandy land, Northern China [J]. *Arid Land Res Manage*, 2011, **25** (3): 203-216
- 王光军, 田大伦, 闫文德, 朱凡, 项文化, 梁小翠. 改变凋落物输入对杉木人工林土壤呼吸的短期影响[J]. *植物生态学报*, 2009, **33** (4): 739-747 [Wang GJ, Tian DL, Yan WD, Zhu F, Xiang WH, Liang XC. Effects of aboveground litter exclusion and addition on soil respiration in a *Cunninghamia lanceolata* plantation in China [J]. *J Plant Ecol*, 2009, **33** (4): 739-747]
- 王国兵, 唐燕飞, 阮宏华, 施政, 何容, 王莹, 蔺菲, 苏广鑫. 次生栎林与火炬松人工林土壤呼吸的季节变异及其主要影响因子[J]. *生态学报*, 2009, **29** (2): 966-975 [Wang GB, Tang YF, Ruan HH, Shi Z, He R, Wang Y, Lin F, Su GX. Seasonal variation of soil respiration and its main regulating factors in a secondary oak forest and a pine plantation in north-subtropical area in China [J]. *Acta Ecol Sin*. 2009, **29** (2): 966-975]
- 王光军, 田大伦, 闫文德, 朱凡, 李树战. 马尾松林土壤呼吸对去除和添加凋落物处理的响应[J]. *林业科学*, 2009, **45** (1): 27-30 [Wang GJ, Tian DL, Yan WD, Zhu F, Li SZ. Response of soil respirations to litterfall exclusion and addition in *Pinus massoniana* plantation in Hunan, China [J]. *Sci Silv Sin*, 2009, **45** (1): 27-30]
- 王光军, 田大伦, 闫文德, 朱凡, 李树战. 去除和添加凋落物对枫香(*Liquidambar formosana*)和樟树(*Cinnamomum camphora*)林土壤呼吸的影响[J]. *生态学报*, 2009, **29** (2): 643-652 [Wang GJ, Tian DL, Yan WD, Zhu F, Li SZ. Impact of litter addition and exclusion on soil respiration in a *Liquidambar formosana* forest and a nearby *Cinnamomum camphora* forest of central southern China [J]. *Acta Ecol Sin*, 2009, **29** (3): 1607-1615]
- 汪金松, 赵秀海, 张春雨, 康峰峰, 尚宝山, 池青俊. 改变C源输入对油松人工林土壤呼吸的影响[J]. *生态学报*, 2012, **32** (9): 2768-2777 [Wang JS, Zhao XH, Zhang CY, Kang FF, Shang BS, Chi QJ. Changes of carbon input influence soil respiration in a *Pinus tabulaeformis* plantation [J]. *Acta Ecol Sin*, 2012, **32** (9): 2768-2777]
- Högberg P, Nordgren A, Buchmann N, Taylor AF, Ekblad A, Högberg MN, Nyberg G, Ottosson-Löfvenius M, Read DJ. Large-scale forest girdling shows that current photosynthesis drives soil respiration [J].

- Nature*, 2001, **411** (6839): 789-792
- 19 Li YQ, Xu M, Sun OJ, Cui WC. Effects of root and litter exclusion on soil CO₂ efflux and microbial biomass in wet tropical forests [J]. *Soil Biol Biochem*, 2004, **36** (12): 2111-2114
 - 20 Fisk MC, Fahey TJ. Microbial biomass and nitrogen cycling responses to fertilization and litter removal in young northern hardwood forests [J]. *Bioremed Ser*, 2001, **53** (2): 201-223
 - 21 Brant JB, Myrold DD, Sulzman EW. Root controls on soil microbial community structure in forest soils [J]. *Oecologia*, 2006, **148** (4): 650-659
 - 22 Raich JW, Schlesinger WH. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate [J]. *Tellus B*, 1992, **44** (2): 81-99
 - 23 杨金艳, 王传宽. 土壤水热条件对东北森林土壤表面CO₂通量的影响[J]. 植物生态学报, 2006, **30** (2): 286-294 [Yang JY, Wang CK. Effects of soil temperature and moisture on soil surface CO₂ flux of forests in Northeastern China [J]. *J Plant Ecol*, 2006, **30** (2): 286-294]
 - 24 Wang C, Yang J. Rhizospheric and heterotrophic components of soil respiration in six Chinese temperate forests [J]. *Glob Change Biol*, 2007, **13** (1): 123-131
 - 25 杨玉盛, 董彬, 谢锦升, 陈光水, 高人, 李灵, 王小国, 郭剑芬. 森林土壤呼吸及其对全球变化的响应[J]. 生态学报, 2004, **24** (3): 583-591 [Yang YS, Dong B, Xie J, Chen GS, Gao R, Li L, Wang XG, Guo JF. Soil respiration of forest ecosystems and its response to global change [J]. *Acta Ecol Sin*, 2003, **24** (3): 583-591]
 - 26 Striegl RG, Wickland KP. Soil respiration and photosynthetic uptake of carbon dioxide by ground-cover plants in four ages of jack pine forest [J]. *Can J For Res*, 2001, **31** (9): 1540-1550
 - 27 姜俊, 张春雨, 赵秀海. 吉林蛟河42 hm²针阔混交林样地植物种-面积关系[J]. 植物生态学报, 2012, **36** (1): 30-38 [Jiang J, Zhang CY, Zhao XH. Plant species-area relationship in a 42-hm² research plot of coniferous and broad-leaved mixed forest in Jiaohe, Jilin Province [J]. *J Plant Ecol*, 2012, **36** (1): 30-38]
 - 28 Wang C, Bond LB, Gower ST. Soil surface CO₂ flux in a boreal black spruce fire chronosequence [J]. *J Geophys Res- Atmos*, 2002, **107** (3): 1-5
 - 29 Ruehr NK, Buchmann N. Soil respiration fluxes in a temperate mixed forest: seasonality and temperature sensitivities differ among microbial and root-rhizosphere respiration [J]. *Tree Physiol*, 2010, **30** (2): 165-176
 - 30 朱凡, 王光军, 田大伦, 闫文德, 项文化. 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 [Zhu F, Wang GJ, Tian DL, Yan WD, Xiang WH. Seasonal variation of soil respiration by root exclusion and its controlling factors in a *Cunninghamia lanceolata* plantation [J]. *Acta Ecol Sin*, 2010, **30** (9): 2499-2506]
 - 31 Lee M, Nakane K, Nakatsubo T, Koizumi H. Seasonal changes in the contribution of root respiration to total soil respiration in a cool-temperate deciduous forest [J]. *Plant Soil*, 2003, **255** (1): 311-318
 - 32 Yi ZG, Fu SL, Yi WM, Zhou GY, Mo JM, Zhang DQ, Ding MM, Wang XM, Zhou LX. Partitioning soil respiration of subtropical forests with different successional stages in south China [J]. *For Ecol Manage*, 2007, **243** (2): 178-186
 - 33 Wood TE, Lawrence D, Clark DA, Chazdon RL. Rain forest nutrient cycling and productivity in response to large-scale litter manipulation [J]. *Ecology*, 2009, **90** (1): 109-121
 - 34 Boone RD, Nadelhoffer KJ, Canary JD, Kaye JP. Roots exert a strong influence on the temperature sensitivity of soil respiration [J]. *Nature*, 1998, **396** (6711): 570-572
 - 35 Nottingham AT, Griffiths H, Chamberlain PM, Stott AW, Tanner EVJ. Soil priming by sugar and leaf-litter substrates: a link to microbial groups [J]. *Appl Soil Ecol*, 2009, **42** (3): 183-190
 - 36 Prévost-Bouré NC, Soudani K, Damesin C, Berveiller D, Lata JC, Dufrêne E. Increase in aboveground fresh litter quantity over-stimulates soil respiration in a temperate deciduous forest [J]. *Appl Soil Ecol*, 2010, **46** (1): 26-34
 - 37 Savage K, Davidson EA, Tang J. Diel patterns of autotrophic and heterotrophic respiration among phenological stages [J]. *Glob Change Biol*, 2013, **19** (4): 1151-1159
 - 38 Wieser G. Seasonal variation of soil respiration in a *Pinus cembra* forest at the upper timberline in the Central Austrian Alps [J]. *Tree Physiol*, 2004, **24** (4): 475-480
 - 39 严俊霞, 秦作栋, 张义辉, 李洪建. 土壤温度和水分对油松林土壤呼吸的影响[J]. 生态学报, 2009, **29** (12): 6366-6376 [Yan JX, Qin ZD, Zhang YH, Li HJ. Effect of soil temperature and moisture on soil CO₂ efflux in a *Pinus tabulaeformis* forest [J]. *Acta Ecol Sin*, 2009, **29** (12): 6366-6376]
 - 40 侯确红, 雷瑞德, 张硕新, 刘建军. 秦岭火地塘林区油松林土壤呼吸时空变异[J]. 生态学报, 2010, **30** (19): 5225-5236 [Hou QL, Lei RD, Zhang SX, Liu JJ. Temporal and spatial variation of soil respiration in *Pinus tabulaeformis* forest at Huoditang forest zone in the Qinling Mountains, China [J]. *Acta Ecol Sin*, 2010, **30** (19): 5225-5236]
 - 41 Bowden RD, Newkirk KM, Rullo GM. Carbon dioxide and methane fluxes by a forest soil under laboratory-controlled moisture and temperature conditions [J]. *Soil Biol Biochem*, 1998, **30** (12): 1591-1597
 - 42 刘保新, 汪金松, 康峰峰, 尚宝山, 赵秀海. 太岳山油松人工林土壤呼吸对抚育强度的响应[J]. 应用与环境生物学报, 2012, **18** (1): 17-22 [Liu BX, Wang JX, Kang FF, Shang BS, Zhao XH. Response of soil respiration in *Pinus tabulaeformis* plantation to tending intensities in the Taiyue Mountain, China [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2012, **18** (1): 17-22]
 - 43 金冠一, 赵秀海, 郭依秋. 太岳山油松人工林干湿交替时期土壤呼吸特征[J]. 应用与环境生物学报, 2012, **18** (6): 904-910 [Jin GY, Zhao XH, Guo YQ. Dynamics of soil respiration during alternate drying-wetting period in *Pinus tabulaeformis* plantation of the Taiyue Mountain, China [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2012, **18** (6): 904-910]
 - 44 Bååth E, Wallander H. Soil and rhizosphere microorganisms have the same Q_{10} for respiration in a model system [J]. *Glob Change Biol*, 2003, **9** (12): 1788-1791
 - 45 Ohashi M, Gyokusen K, Saito A. Measurement of carbon dioxide evolution from a Japanese cedar (*Cryptomeria japonica* D. Don) forest floor using an open-flow chamber method [J]. *For Ecol Manage*, 1999, **123** (2): 105-114
 - 46 Keith H, Jacobsen KL, Raison RJ. Effects of soil phosphorus availability, temperature and moisture on soil respiration in *Eucalyptus pauciflora* forest [J]. *Plant Soil*, 1997, **190** (1): 127-141