

杉木人工林去除根系土壤呼吸的季节变化及影响因子

朱 凡^{1,2}, 王光军^{1,2}, 田大伦^{1,2}, 闫文德^{1,2}, 项文化^{1,2}

(1. 中南林业科技大学生命科学与技术学院, 长沙 410004; 2. 南方林业生态应用技术国家工程实验室, 长沙 410004)

摘要: 2007 年 1 月至 2008 年 12 月, 在长沙天际岭国家森林公园内, 采用挖壕法研究杉木人工林去除根系后土壤呼吸速率季节动态及其与 5 cm 土壤温、湿度的相关关系。结果表明: 去除根系与对照 5 cm 土壤温度的差异性不显著 ($P=0.987$), 5 cm 土壤湿度差异显著 ($P=0.035$)。杉木林去除根系处理后土壤呼吸速率明显降低, 2007 至 2008 两年实验期间去除根系与对照处理变化范围分别为 $0.19-2.01 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $0.26-2.61 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, 年均土壤呼吸速率分别为 $0.90 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $1.30 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 。去除根系土壤呼吸速率降低幅度为 9.4%—59.7%, 平均降低了 30.4%。去除根系和对照的土壤呼吸速率与 5 cm 土壤温度之间均呈显著指数相关, 模拟方程分别为: $y=0.120e^{0.094x}$ ($R^2=0.882, P=0.000$), $y=0.291e^{0.069x}$ ($R^2=0.858, P=0.000$)。 Q_{10} 值分别为 2.56 和 2.01。

关键词: 杉木人工林; 土壤呼吸; 挖壕法; 根系; 生态因子

Seasonal variation of soil respiration by root exclusion and its controlling factors in a *Cunninghamia lanceolata* plantation

ZHU Fan^{1,2}, WANG Guangjun^{1,2}, TIAN Dalun^{1,2}, YAN Wende^{1,2}, XIANG Wenhua^{1,2}

1 College of Life Science and Technology, Central-South University of Forestry Technology, Changsha Hunan 410004, China

2 National Engineering Laboratory for Applied Technology of Forestry & Ecology in South China, Changsha Hunan 410004, China

Abstract: Soil respiration (R_s), the emission of CO_2 from the soil surface, is one of major carbon fluxes from terrestrial ecosystems to the atmosphere, and is therefore an important component of the global carbon balance. Total respiration from soils is mainly comprised of both the heterotrophic respiration of microorganisms (soil bacteria, fungi, and fauna) and autotrophic respiration from roots and their associated mycorrhizae. While R_s has received considerable attention in recent decades, much less is known about the contribution of heterotrophic or autotrophic component to the total R_s . A large part of gross primary production is consumed in heterotrophic respiration, and published estimates of the contribution of heterotrophic respiration to total R_s vary greatly and ranged from 10% to 90%. As a result, precise assessment of the contribution of autotrophic respiration to the total R_s is important to understand the effects of global climate change and human management practices on carbon sequestration and cycling in terrestrial ecosystems.

This study aimed to reveal seasonal changes of R_s and the contribution of root respiration to total R_s in a *Cunninghamia lanceolata* plantation in the Tianjiling Forestry Park ($113^\circ 01' - 113^\circ 02' \text{ E}$, $28^\circ 06' - 28^\circ 07' \text{ N}$) of Changsha, Hunan Province, China. A trenching method, in which the roots existing in a given area are severed at the plot boundary but not removed, was used to determine the contribution of root respiration to total soil CO_2 efflux. The R_s rates were measured from January 2007 to December 2008 by using infrared gas exchange analyzer of Li-Cor 6400-09. The results showed that the soil temperature at 5 cm depth between trenched plots (without living roots) and control plots (with living roots) was not significant difference ($P=0.987$), but soil moisture at 5 cm depth between these two types of plots was significant difference

基金项目: 国家林业公益性行业科研专项经费资助项目 (200804030); 湖南省杰出青年基金资助项目 (07JJ1004); 国家林业局“948”资助项目 (2007-4-19, 2008-4-36); 国家自然科学基金资助项目 (30571487); 湖南省科技厅重点资助项目 (06FJ3083, 05NK3026); 中南林业科技大学青年科学研究基金资助项目 (2008003A)

收稿日期: 2009-09-22; **修订日期:** 2010-01-18

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: forestranger33@hotmail.com

($P=0.035$). The R_s rates in control plots increased from May to August and then decreased during autumn. A similar seasonal pattern of R_s process was found in the trenched plots, but the R_s rates in the trenched plots were lower than the controls, and the difference was significant in 2008 ($P=0.021$). The rates of soil CO_2 efflux within the trenched and control plots ranged $0.19-2.01$ and $0.26-2.61 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ respectively. The annual R_s in the trenched and control plots averaged 0.90 and $1.30 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, respectively. The R_s rates were decreased $9.4\%-59.7\%$ with an annual value of 30.4% in trenched plots when compared with the control plots. There was a significant exponential relationship ($R^2=0.882$, $P=0.000$) between R_s within the trenched plots and soil temperature. The Q_{10} value, representing the sensitivity of R_s to soil temperature was higher in the trenched plots (2.56) than the control plots (2.01). It was worth mentioning that great decreases of R_s within the trenched plots was suppressed in September 2008 due to natural distribution of precipitation and the variation of soil moisture in the study area.

Key Words: *Cunninghamia lanceolata* plantation; soil CO_2 efflux; trenching method; root respiration; temperature; moisture

森林生态系统中,土壤呼吸主要由自养呼吸(根和菌根)和微生物呼吸组成^[1-2],其中林木根呼吸占土壤呼吸的 $10\%-90\%$ (主要集中在 $40\%-60\%$),释放光合作用固定 CO_2 的 $8\%-52\%$,是森林碳循环的重要碳途径之一^[3-6]。植物根呼吸作为陆地碳循环的重要组成部分,植物将光合作用固定的 $35\%-80\%$ 的碳输送到地下,保证根、菌根共生体和根分泌物生产和呼吸^[2],其碳释放量高达 $18 \text{Pg}\cdot\text{a}^{-1}$ ^[7],比 20 世纪 90 年代全球化石燃料燃烧年均碳排放总量(6.5Pg)^[8] 还大一个数量级,因此对森林地下 C 库的 C 预算以及确定森林地下 C 库是 C 源或汇上起着关键性作用^[9]。尽管最近 10a 来总呼吸和异养呼吸受到相当大的关注,还是很少知道自养呼吸对总呼吸量的贡献^[10]。根系碳输入和凋落物分解作为土壤有机质的主要来源,在很大程度上影响着土壤有机质的形成和对植物的养分供应和土壤 CO_2 通量^[11],因此从土壤叶分解、根凋落物分解和土壤有机质中分离土壤自养呼吸(包括根生长呼吸和活根的维持呼吸)成为目前最为关注的焦点^[12]。特别是对其主要组成部分土壤微生物和根系呼吸作用的影响机理,是深入理解影响土壤呼吸作用的主导因子,精确预测陆地与大气之间碳交换需要。

野外条件下,区分和量化土壤呼吸中的异养呼吸和根系自养呼吸非常困难,至今尚无完美的测定方法。目前根呼吸的测定方法有直接和间接测定。直接测定法有离体根法、PVC 管气室法、同位素法等。间接测定有排除根法等,用排除根法测定的根呼吸包括根际微生物呼吸^[3]。挖壕法是排除根法中的一种方法,在小区四周挖壕沟切断根(不移走)后插入障碍物以阻止根向小区内生长^[13]。挖壕法作为野外分离土壤呼吸的方法之一,比其它方法具有对保留的树干干扰较少,维持大部分野外条件(土壤温度日变化和季节变化、降水、凋落物、土壤的基质等),实验的实施也相对简单^[7]。这种方法可信程度高,能连续估算土壤呼吸各成分^[9,14]。

杉木(*Cunninghamia lanceolata*)在我国亚热带森林资源中占有十分重要的地位。但目前对杉木人工林碳循环的研究并不多见^[15-6]。本试验以杉木人工林为研究对象,用挖壕去除植物根系试验方法,测定去除根系后样地的土壤表面 CO_2 通量,并与对照进行比较,以确定去除根系土壤呼吸的季节动态,量化自养呼吸的贡献量及其影响因子,从而增进对杉木人工林生态系统土壤碳库和碳循环过程的全面理解。

1 实验地概况

试验地位于湖南省长沙市南郊的天际岭国家森林公园($113^\circ 01'-113^\circ 02'E$, $28^\circ 06'-28^\circ 07'N$),核心区面积约 4356hm^2 ,海拔 $46-114 \text{m}$,坡度为 $5-25^\circ$ 。当地年平均气温 17.2°C ,1 月份最冷,平均 4.7°C ,极端最低温度 -11.3°C ;7 月份最热,平均气温 29.4°C ,极端最高气温 40.6°C ;无霜期为 $270-300 \text{d}$,日照时数年均 1677.1h ;雨量充沛,年平均降雨量 1422mm 。属典型的亚热带湿润季风气候。其地层主要是第四纪更新世的冲积性网纹红土和砂砾,属典型红壤丘陵区,园内小生境众多,植物种类达 2200 余种,植被以人工林

为主。

本实验从 2006 年 12 月开始,选择杉木人工林作为研究对象,调查杉木林的主要组成成分分别为:以杉木为优势种,林中有樟树(*Cinnamomum camphora*)、山矾(*Symplocos caudata*)、檫木(*Sassafras tsumu*)、大青(*Clerodendron cyrtophyllum*)等,草本植物有肾蕨(*Nephrolepis auriculata*)、淡竹叶(*Lophantherrum gracile*)、五节芒(*Miscanthus floridulus*)和商陆(*Phytolacca acinosa*)等。

2 研究方法

2.1 试验样地的设置

2007 年 1 月—2008 年 12 月,在天际岭国家森林公园内杉木林生态系统中,选择小地形相似的位置,设立 4 块半径为 15 m 的圆形固定样地。在每个固定样地内均匀设置 3 个不做任何处理的 PVC 土壤环,为对照点;在邻近对照点的地方,采用挖壕法设置 3 个 0.6 m×0.6 m 去除根系处理小区。挖壕法即用铁锹在小区四周挖壕沟,垂直挖深 0.6—0.8 m(看不到根系的深度),切断根(不移走)后插入 0.6 cm 厚塑料板以阻止根向小区内生长^[13]。共 24 个 PVC 土壤环测点。PVC 土壤环的内径 10.5 cm,高 4.5 cm,平放压入土中 2 cm 左右。测量在安放土壤环 24h 之后开始,并保持土壤环在整个测定期间位置不变。

表 1 杉木林群落林分特征和土壤性质

Table 1 Stand characteristics and soil properties in *Cunninghamia lanceolata* plantation

年龄 Year/a	每公顷株数 Number of per hm ²	胸径 DBH /cm	树高 High of tree /m	枝下高 High of branch/m	郁闭度 Crown density	全 C Total C /(mg·g ⁻¹)	全 N Total N /(mg·g ⁻¹)	碳/氮 C to N	pH
18	1102	16.3 (3.9)	12.5	5.3	0.8	0.78(0.24)	0.09(0.05)	11.83	3.55(0.09)

括号内的数值为标准误差

2.2 土壤呼吸及温度、湿度的测定

采用 Li-cor-6400-09(土壤呼吸室)连接到 Li-6400 便携式 CO₂/H₂O 分析系统(Li-cor Inc., Lincoln, NE, USA)测定土壤呼吸速率。在上午 9:00—11:00 每 15d 测定 1 次。2a 共测定 47 次(2008 年 1 月下旬因冰冻灾害少测定 1 次)。同时,用 Li-6400-09 的土壤温度探针测定土壤中 5 cm 的温度,用 ECH₂O Check(Decagon, USA)连接 ET-5 测定各样点土壤 5 cm 湿度(体积含水量,%)。

2.3 土壤理化性质测量

土壤有机碳用重铬酸钾氧化-外加热法测定;全氮用半微量凯氏法测定;pH 值采用电位法测定;土壤容重用环刀法测定^[17]。

2.4 数据统计分析

所有的统计分析都在 SPSS13.0 软件中进行,用 Repeated measured ANOVA 进行方差分析和多重比较检验土壤呼吸季节变化、不同森林间土壤呼吸、温度和湿度的显著性,用 SigmaPlot 9.0 软件作图。土壤呼吸与温度之间关系采用如下指数模型^[18-19]: $y = ae^{bT}$ 式中, y 为土壤呼吸速率; T 为土壤温度; a 是温度为 0℃ 时的土壤呼吸^[18]; b 为温度反应系数。 Q_{10} 值通过下式确定^[20]: $Q_{10} = e^{10b}$ 式中, b 为温度反应系数。根呼吸贡献率用下式:贡献率(%) = 100 × (对照的土壤呼吸速率 - 去除根系土壤呼吸速率)/对照的土壤呼吸速率。

3 结果与分析

3.1 去根对土壤温度、湿度的影响

杉木林生态系统去除根系与对照处理的土壤温度呈现显著的季节性变化(图 1a)($P = 0.000$)。但去除根系 2a 总的 5 cm 土壤温度与对照处理之间差异性不显著(图 1a)($P = 0.987$),它们土壤温度最大值为 30.4℃ 和 29.9℃,均出现在 2008 年 6 月上旬,最小值为 4.5℃ 和 4.5℃,均出现在 2008 年 12 月(2008 年 1 月气象观测最低温度为 0.7℃,由于地面冰冻,没有测量土壤呼吸)。两年平均温度分别为 18.0℃ 和 18.5℃。

杉木林去除根系与对照处理的土壤湿度均呈现显著的季节性变化(图 1b)($P = 0.000$)。去除根系两年

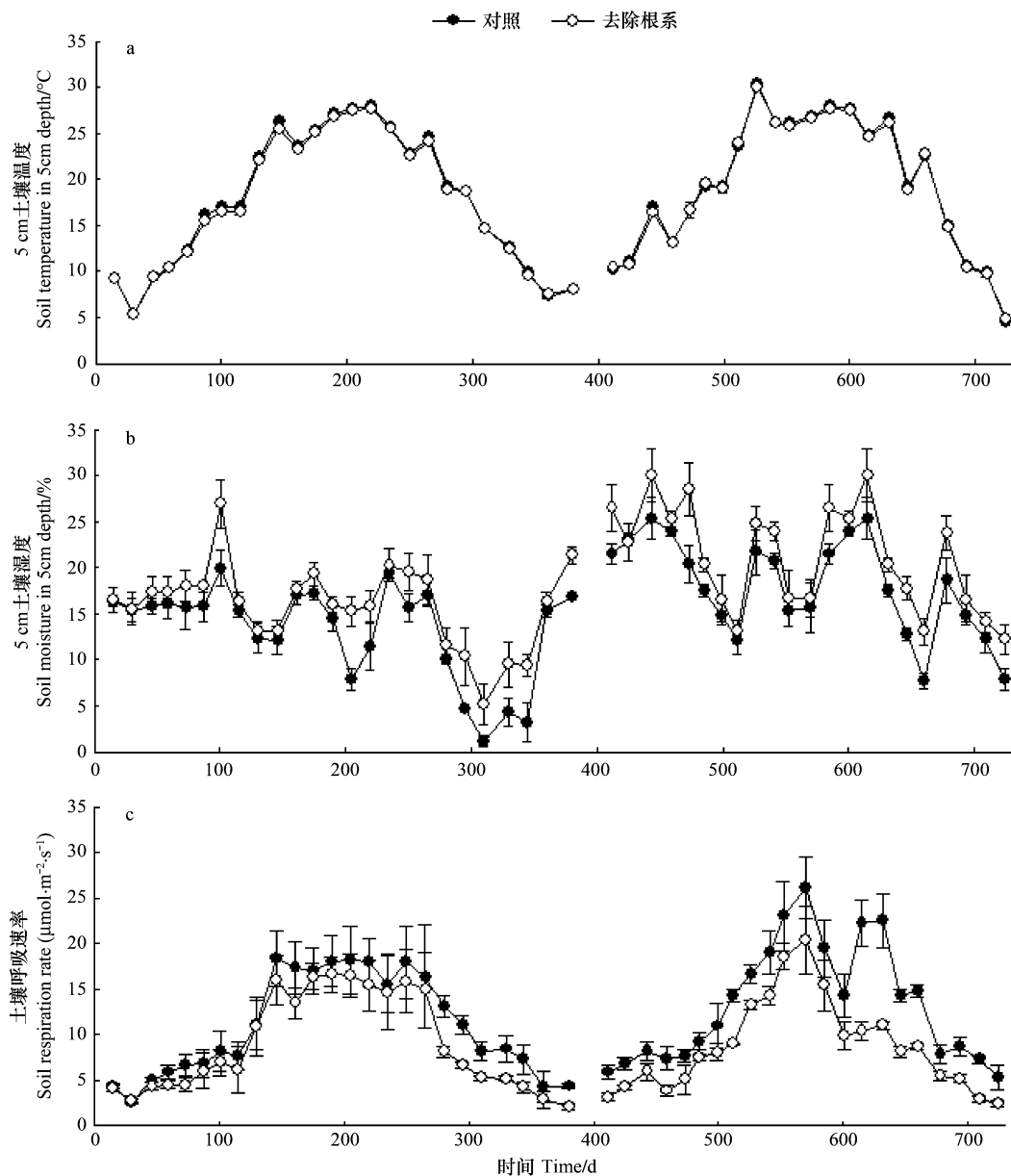


图1 杉木人工林去除根系和对照的土壤呼吸速率、温度和湿度季节动态(每个点数据是4块样地的平均值,样本数为12, bar是标准误)

Fig. 1 Seasonal dynamics of soil respiration rates, soil temperatures and moistures at 5 cm depth of different treatments without root (No root) and with root (control) in *Cunninghamia lanceolata* plantation

总的5 cm 土壤湿度与对照之间的差异性显著(图1b) ($P=0.035$), 分年度的差异性没有达到显著($P=0.091$ 和 $P=0.103$)。它们土壤湿度最大值30.1%和25.4%, 分别出现在2008年4月上旬和3月下旬。最小值5.2%和1.2%, 均出现在2007年11月上旬(连续2个月干旱)。两年平均湿度分别为18.1%和15.3%。

3.2 去除根系土壤呼吸的季节变化

杉木林去除根系与对照处理的土壤呼吸速率均呈现显著的季节性变化(图1c) ($P=0.000$), 与土壤温度变化具有相似的曲线格局。杉木林去除根系与对照处理的土壤呼吸速率基本上呈相似的曲线格局(图1c)。为减少去除根系对实验产生的干扰, 去除了2007年1—3月的测量数据。去除根系与对照处理两年(2007—2008)的差异显著($P=0.007$) (表2), 分年度2007年差异性不显著($P=0.163$), 2008年差异性显著($P=0.021$)。

3.3 根呼吸对土壤呼吸的贡献率

杉木林去除根系处理对土壤呼吸速率产生了明显的影响,导致了土壤呼吸速率明显降低(图 1)。2007 至 2008 两年实验期间去除根系与对照处理变化范围分别为 0.19—2.61 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 和 0.26—2.61 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$,年均土壤呼吸速率分别为 0.90 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 和 1.30 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 。去除根系土壤呼吸速率降低幅度为 9.4%—59.7%,平均降低了 30.4%。其中:2007 年去除根系土壤呼吸速率平均为 0.98 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$,比对照年均值 1.31 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 降低 25.2%,2008 年年均为 0.82 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$,比对照年均值 1.29 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 低 36.4%。

表 2 杉木人工林去除根系和对照处理的土壤呼吸(SR)、土壤温度(ST)和湿度(SM)年均值及其差异

Table 2 Annual mean values and variations of soil respiration (SR), soil temperature (ST) and soil moisture (SM) with no roots and controls in *Cunninghamia lanceolata* plantation community

项目 Items		2007		2008		2007—2008	
		对照 Control	去除根系 No root	对照 Control	去除根系 No root	对照 Control	去除根系 No root
土壤呼吸 SR/ ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$)	年均值 Mean value	1.31(0.11)	0.98(0.11)	1.29(0.11)	0.82(0.11)	1.30(0.09)	0.90(0.08)
	<i>F</i>		2.034		5.696		7.713
	<i>P</i>		0.163		0.021		0.007
土壤温度 ST /°C	年均值 Mean value	17.96(1.47)	18.04(1.48)	18.97(1.47)	18.98(1.48)	18.47(1.06)	18.50(1.07)
	<i>F</i>		0.001		0.000		0.001
	<i>P</i>		0.983		0.996		0.987
土壤湿度 SM /%	年均值 Mean value	12.68(1.05)	15.73(0.90)	18.01(1.05)	20.62(0.91)	15.29(0.85)	18.13(0.80)
	<i>F</i>		3.016		2.767		4.593
	<i>P</i>		0.091		0.103		0.035

* 括号内的数值为标准误

3.4 去根土壤呼吸与土壤温度的关系

土壤呼吸速率与 5 cm 土壤温度相关分析表明(图 2),去除根系并没有改变土壤呼吸速率与 5 cm 土壤温度之间的关系,去除根系和对照处理的土壤呼吸速率与土壤温度之间均呈显著指数相关($P < 0.001$)。回归关系方程表达式分别为:

去除根系 $y = 0.120e^{0.094x} \quad R^2 = 0.882, P = 0.000$

对照 $y = 0.291e^{0.069x} \quad R^2 = 0.858, P = 0.000$

式中, y 表示土壤呼吸速率, x 表示 5 cm 土壤温度。

本试验中,杉木去除根系和对照处理土壤呼吸的温度敏感系数 Q_{10} 值分别为 2.56 和 2.01,其去除根系的 Q_{10} 值 > 对照的 Q_{10} 值。

3.5 去根土壤呼吸与土壤湿度的关系

去除根系土壤呼吸速率与 5 cm 土壤湿度相关分析表明(图 3),杉木林去除根系和对照处理的土壤呼吸速率与土壤湿度之间均呈二次曲线相关,但相关关系均不显著($P > 0.05$)。回归拟合它们之间的关系,可以得到下面两个方程表达式:

去除根系 $y = -0.003w^2 + 0.123w - 0.246, R^2 = 0.052, P = 0.309$

对照 $y = -0.001w^2 + 0.046w + 0.796, R^2 = 0.024, P = 0.581$

式中, y 表示土壤呼吸速率, w 表示 5 cm 土壤湿度。

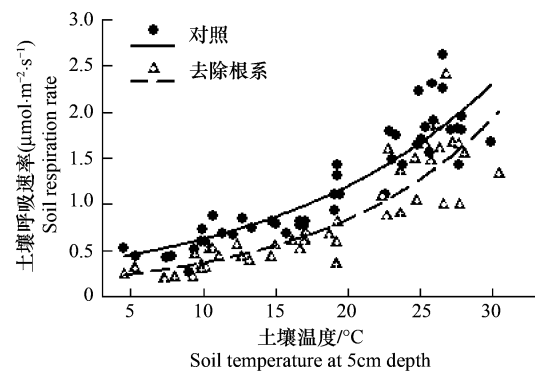


图 2 去除根系和对照的土壤呼吸与 5 cm 土壤温度相关关系
Fig. 2 The relationships between soil temperatures at 5 cm depth and soil respirations of different treatments with without root and with root (control) in *Cunninghamia lanceolata* plantation

4 结论与讨论

挖壕法的理论前提是在挖壕的区域内完全抑制了植物根的呼吸活动^[10],然而有些研究表现在挖壕后,根从主干上被切断后仍能存活并维持呼吸^[21-22],而且在许多情况下在根去除(挖壕)后,土壤呼吸没有立即下降。在研究开始的1—2月内,也出现这些情况。过这个时期后,去除根系处理的土壤呼吸比对照有了明显降低,这可能主要由于植物根离体后逐渐死亡而停止了呼吸活动而引起的。尽管没有办法测定去除根系样点内根系的生存情况,根据 Lee 等^[10]在日本岐阜北温带落叶林的实验证实,根在挖壕后2—3个月变黑,3个月后可以忽略根呼吸的干扰。根据这一结论,进行计算时排除了2007年1—3月的数据。

从图1c中可以看出,过了这一时期,去除根系处理明显导致土壤呼吸比对照处理的土壤呼吸低,表明挖壕法降低了土壤呼吸。实验期间杉木去除根系土壤呼吸速率降低幅度为9.4%—59.7%,年均降低了30.4%。分年度计算结果2007年降低25.2%,2008年降低36.4%。

去除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碳输入。这一结果直接影响到土壤微生物量,特别是根际微生物依赖于根系提供的活性碳源作为能量来源,根系去除所引起的活性碳输入的降低必然引起微生物量和活动的下降^[23]。在德国东南部的挪威云杉林(*Picea abies*)树木环割同样导致O层真菌和微生物量碳的降低^[24]。根系去除还可以显著降低外生真菌的种群大小、物种组成和根系感染率^[25]。尽管去除根系没有发现影响矿质土壤的微生物量,但是却降低了有机层的真菌生物量、改变了细菌群落的结构^[26-28],表明土壤微生物通过改变自身区系结构和活性来调控对去除根系的响应,增强对非活性有机底物,即土壤中有有机碳的利用率,保证生态系统的稳定循环。土壤呼吸对环境因子变化的潜在响应取决于自养呼吸和异养呼吸所占的比例,因为二者对环境变量的响应有所不同^[29]。通过根系呼吸产生的CO₂量是由根生物量和单位根呼吸速率所决定的,而植物分配给根生长的糖类随着植物的种类、年龄以及生长环境的改变而变化。因此根呼吸受到许多生物和非生物因子的调控,这些因子与植物的状况、生活史和环境有关^[30-31]。

杉木去除根系处理后5cm土壤温度与对照处理之间差异性不显著($P=0.987$)。而去除根系的土壤呼吸速率与土壤温度之间的相关关系回归方程表明,去除根系的土壤呼吸速率与土壤温度之间均呈显著指数相关($P<0.001$),与对照处理与土壤温度间的回归关系是一致的。去除根系的土壤呼吸速率与土壤温度回归方程的决定系数大于对照,并且它的温度敏感系数 Q_{10} 值大于对照的 Q_{10} 值,这与 Ngao 等^[12]在法国东北部用挖壕法估算根呼吸贡献率的结果是一致的。这主要是土壤呼吸受土壤温度的影响,是光、温度和湿度对土壤呼吸过程的复合影响^[32]。温度通过影响土壤基质供应的季节性而影响枝条和根生长的物候学特征^[33],进而对土壤呼吸产生影响。当温度较低时,呼吸主要是受生物化学反应限制,根呼吸随温度的升高呈指数增加^[34];温度较高时,那些主要依赖扩散运输的代谢底物和代谢产物(如糖、氧气、CO₂等)就成了限制因子。

湖南长沙属于土壤湿度变化较大的地区,从本研究结果看,挖壕法明显干扰了根系对土壤水分的吸收,去除根系样方内的土壤湿度年均明显比对照高,与对照之间的差异达到了显著($P=0.035$)。从实验结果看,2008年度8、9月和10月,降水减少导致土壤湿度下降后,去除根系土壤呼吸速率降低幅度最大。土壤呼吸与土壤湿度呈现二次方程关系。土壤湿度只有在最高和最低的情况下才会抵制土壤呼吸^[35-36]。去除根系处理的微生物活动,当土壤水分过低时,微生物缺少必需的生存环境,产生CO₂的量将会减少;如果土壤水分过

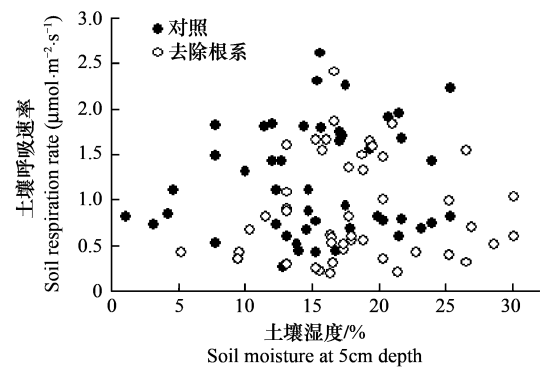


图3 去除根系和对照的土壤呼吸与5cm土壤湿度相关关系

Fig. 3 The relationships between soil moistures at 5 cm depth and soil respirations of different treatments without root and with root (control) in *Cunninghamia lanceolata* plantation

高,土壤孔隙减小,异氧呼吸所需氧气的进入以及呼吸产物 CO_2 的排放都会受到限制^[37]。在杉木林生态系统中去除根系和对照处理之间的土壤湿度差异显著,年均湿度比对照的高,因此土壤湿度的变化有可能对去除根系土壤呼吸降低的变化中起着作用。

References:

- [1] Andersen C P, Nikilov I, Nikolova P, Matyssek R, Häberle K H. Estimating 'autotrophic' belowground respiration in spruce and beech forests: decreases following girdling. *European Journal of Scientific Research*, 2005, 124:155-163.
- [2] Ryan M G, Law B E. Interpreting, measuring, and modeling soil respiration. *Biogeochemistry*, 2005, 73: 3-27.
- [3] Atkin O K, Edwards E J, Loveys B R. Response of root respiration to changes in temperature and its relevance to global warming. *New Phytologist*, 2000, 147, 141-154.
- [4] Yang Y S, Dong B, Xie J S, Chen G S, Li L, Liu G X, Li Z. A review of tree root respiration: significance and methodologies. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 28(3): 426-434.
- [5] Yang Y S, Dong B, Xie J S, Chen G S, Gao R, Li L, Wang X G, Guo J F. Soil respiration of forest ecosystems and its response to global change. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(3): 583-591.
- [6] Jiang L F, Shi F C, Wang H T, Zu Y G, Xiao C X L. Root respiration in *Larix gmelinii* plantations in northeast China. *Plant Physiology Communications*, 2004, 40(1): 27-30.
- [7] Raich J W, Schlesinger W H. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate. *Tellus*, 1992, 44 (B): 81-99.
- [8] Philips D L, Brown S L, Schroeder P E, Birdsey R A. Toward error analysis of large-scale forest carbon budgets. *Global Ecology & Biogeography*, 2000, 9: 305-313.
- [9] Hanson P J, Edwards N T, Garten C T, Andrews J A. Separating root and soil microbial contributions to soil respiration: A review of methods and observations. *Biogeochemistry*, 2000, 48: 115-146.
- [10] Lee M S, Nakane K, Nakatsubo T, Koizumi H. 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.
- [11] Prescott C E. Do rates of litter decomposition tell us anything we really need to know?. *Forest Ecology and Management*, 2005, 220, 66-74.
- [12] Ngao J, Longdoz B, Granier A, Epron D. Estimation of autotrophic and heterotrophic components of soil respiration by trenching is sensitive to corrections for root decomposition and changes in soil water content. *Plant Soil*, 2007, 301: 99-110.
- [13] Kuzyakov Y. Sources of CO_2 efflux from soil and review of partitioning methods. *Soil Biology and Biochemistry*, 2006, 38: 425-448.
- [14] 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: 1756-1766.
- [15] Wang G J, Tian D L, Yan W D, Zhu F, Li X S. Soil system respiration and its controlling factor in Chinese Fir and Masson Pine communities of subtropics. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2009, 33(1): 53-62.
- [16] Wang G J, Tian D L, Yan W D, Zhu F, Xiang W H, Liang X C. Effects of aboveground litter exclusion and addition on soil respiration in a *Cunninghamia lanceolata* plantation in China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2009, 33 (4): 739-747.
- [17] Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences. *Soil Physical and Chemical Analysis*. Shanghai: Shanghai Scientific & Technical Publishers, 1978.
- [18] Luo Y Q, Wan S Q, Hui D F, Wallace L L. Acclimatization of soil respiration to warming in a tall grass prairie. *Nature*, 2001, 413, 622-625.
- [19] Raich J W, Potter C S. Global patterns of carbon dioxide emissions from soils. *Global Biogeochemical Cycles*, 1995, 9, 23-36.
- [20] 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.
- [21] Tate K R, Ross D J, O'Brien B J, Kelliher F M. Carbon storage and turnover, and respiratory activity, in the litter and soil of an old-growth southern beech (*Nothofagus*) forest. *Soil Biology Biochemistry*, 1993, 25: 1601-1612.
- [22] Uchida M, Nakatsubo T, Horikoshi T, Nakane K. Contribution of micro-organisms to the carbon dynamics in black spruce (*Picea mariana*) forest soil in Canada. *Ecology Research*, 1998, 13: 17-26.
- [23] Li Y Q, Xu M, Sun O J, Cui W. Effects of root and litter exclusion on soil CO_2 efflux and microbial biomass in wet tropical forests. *Soil Biology and Biochemistry*, 2004, 36, 2111-2114.
- [24] Subke J A, Hahn V, Battipaglia G, Linder S, Buchmann N, Cotrufo M F. Feedback interactions between needle litter decomposition and rhizosphere activity. *Oecologia*, 2004, 139: 551-559.

- [25] Simard S W, Perry D A, Smith J E, Molina R. Effects of soil trenching on occurrence of ectomycorrhizas on *Pseudotsuga menziesii* seedlings grown in mature forests of *Betula papyrifera* and *Pseudotsuga menziesii*. *New Phytologist*, 1997, 136: 327-340.
- [26] Fisk M C, Fahey T J. Microbial biomass and nitrogen cycling responses to fertilization and litter removal in young northern hardwood forests. *Biogeochemistry*, 2001, 53: 201-223.
- [27] Siira-Pietikainen A, Haimi J, Kanninen A, Pietikainen J, Fritze H. Responses of decomposer community to root-isolation and addition of slash. *Soil Biology and Biochemistry*, 2001, 33: 1993-2004.
- [28] Nadelhoffer K J, Boone R D, Bowden R D, Canary J D. The DIRT experiment: litter and root influences on forest soil organic matter stocks and function // Foster D, Aber J, eds, *Forests in Time: The Environmental Consequences of 1000 Years of Change in New England*. New Haven: Yale University Press, 2004: 300-315.
- [29] Gholz H L, Perry C S, Cropper W P, Hendry L C. Litterfall, decomposition, and nitrogen and phosphorus dynamics in a chronosequence of slash pine (*Pinus elliottii*) plantations. *Plant Ecology*, 1985, 31(2): 463-478.
- [30] Amthor J S. Plant respiratory responses to the environment and their effects on the carbon balance // Wilkinson R E, ed. *Plant-Environment Interactions*. New York: Marcel Dekker, 1994: 501-554.
- [31] Wang H, Curtis P. A meta-analytical test of elevated CO₂ effects on plant respiration. *Plant Ecology*, 2002, 161: 251-261.
- [32] Davidson E A, Richardson A D, Savage K E, Hollinger D Y. A distinct seasonal pattern of the ratio of soil respiration to total ecosystem respiration in a spruce-dominated forest. *Global Change Biology*, 2005, 11, doi: 10. 1111/j. 1365-2486. 01062. X.
- [33] Dunne J, Harte J, Taylor K. Response of subalpine meadow plant reproductive phenology to manipulated climate change and natural climate variability. *Ecological Monograph*, 2003, 73, 69-86.
- [34] Atkin O K, Edwards E J, Loveys B R. Response of root respiration to changes in temperature and its relevance to global warming. *New Phytologist*, 2000, 147, 141-154.
- [35] Liu X Z, Wan S Q, Su B, Hui D, Luo Y. Response of soil CO₂ efflux to water manipulation in a tall grass prairie ecosystem. *Plant and Soil*, 2002, 240: 213-223.
- [36] Xu L K, Baldocchi D D, Tang J W. How soil moisture, rain pulses, and growth alter the response of ecosystem respiration to temperature. *Global Biogeochemical Cycles*, 2004, 18, GB4002, doi: 10. 1029/2004GB 002281.
- [37] Zhang W, Parker K M, Luo Y, Wan S, Wallace L L, Hu S. Soil microbial responses to experimental atmospheric warming and clipping in a tallgrass prairie. *Global Change Biology*, 2005, 11, 266-277.

参考文献:

- [4] 杨玉盛, 董彬, 谢锦升, 陈光水, 李灵, 刘东霞, 李震. 林木根呼吸及测定方法进展. *植物生态学报*, 2004, 28(3): 426-434.
- [5] 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. *生态学报*, 2004, 24(3): 583-591.
- [6] 姜丽芬, 石福臣, 王化田, 祖元刚, 小池孝良. 东北地区落叶松人工林的根系呼吸. *植物生理学通讯*, 2004, 40(1): 27-30.
- [15] 王光军, 田大伦, 闫文德, 朱凡, 李树战. 亚热带杉木和马尾松群落土壤系统呼吸及其影响因子的研究. *植物生态学报*, 2009, 33(1), 53-62.
- [16] 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. *植物生态学报*, 2009, 33(4), 739-747.
- [17] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析. 上海: 上海科学技术出版社, 1978.