

林床清理对落叶松 (*Larix gmelinii*) 人工林 土壤呼吸和物理性质的影响

王文杰, 刘 玮, 孙 伟, 祖元刚*, 崔 崧

(东北林业大学森林植物生态学教育部重点实验室, 哈尔滨 150040)

摘要: 林下可再生生物质资源的利用是当今森林资源利用的热点, 通过林床清理可以获得廉价可再生生物质资源, 但其对林分土壤碳收支的影响尚不清楚。运用红外气体分析法 (IRGA 法) 连续两年观测了林床清理对落叶松 (*Larix gmelinii*) 人工林土壤呼吸及物理性质的影响, 并估算了林床清理生物质资源利用对落叶松人工林碳收支的影响。结果表明: 林床清理能够降低落叶松人工林的土壤呼吸, 2a 的平均值由 $2.20 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 降低到 $1.18 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 平均降低幅度 $1.02 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 年呼吸总量由 $41.2 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 降至 $22.4 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 而且, 使土壤呼吸 Q_{10} 值从 2.33 降低到 2.22, R_0 值从 $0.61 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 降至 $0.36 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$; 林床清理能够使林床土壤温度冬季低于对照, 而夏季则有相反趋势, 清理使得林床土壤湿度变化幅度加大, 而且秋季和春季较对照低, 而夏季偏高; 林床清理使得表层土壤容重重要比对照未清理样地高 53% ($p < 0.05$), 土壤非毛管孔隙度比未处理样地低 49.5% ($p < 0.001$), 毛管孔隙度较对照未清理降低约 15% ($p < 0.001$)。林床清理导致林下生物质资源所储藏的碳非呼吸性释放约 $175.0 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2}$, 当考虑到林床清理导致的土壤呼吸的降低作用时, 所测定的 2a 内土壤净碳支出由 $175.0 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2}$ 降低至 $137.4 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2}$ 。林床清理措施增加生物质资源利用和其所导致的土壤呼吸释放减少, 能够减少非再生资源利用导致的碳释放压力。但仍然需要注意到林床清理使得土壤物理结构发生改变, 可能不利于落叶松的生长和落叶松林生态系统的稳定。

关键词: 林床清理; 生物质资源利用; 落叶松人工林; 土壤呼吸; 土壤物理性质

文章编号: 1000-0933(2008)10-4750-07 中图分类号: Q142, Q945, Q948, S753.53, S791.222 文献标识码: A

Influences of forest floor cleaning on the soil respiration and soil physical property of a larch plantation

WANG Wen-Jie, LIU Wei, SUN Wei, ZU Yuan-Gang*, CUI Song

Key Laboratory of Forest Plant Ecology, Ministry of Education, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China

Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(10): 4750 ~ 4756.

Abstract: Utilization of litters and understory shrubs at forest floor is a hot issue of renewable forest biomaterial exploitation in future; however, the influences on soil respiration and soil property from this utilization are still undefined. Aiming to estimate how forest floor cleaning affect the carbon budget, a 2-years measurement was carried out with a Li-6400 system and soil physical parameters of soil bulk density, capillary porosity, soil temperature and soil volumetric moisture were also measured in a *Larix gmelinii* plantation. Firstly, forest floor cleaning evidently decreased soil respiration. The 2-a mean

基金项目: 国家科技部“973”前期资助项目(2004CCA027008); 国家自然科学基金资助项目(30771698, 40873063)

收稿日期: 2007-12-13; 修订日期: 2008-05-16

作者简介: 王文杰(1974~), 男, 河北易县人, 博士, 主要从事全球变化与植物生理生态学研究。E-mail: wjwang225@hotmail.com

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zygorl@vip.hi.cn

Foundation item: The project was financially supported by the Key Basic Research and Development Plan of China (No. 2004CCA02700) and National Natural Science Foundation of China (No. 30771698, 40873063)

Received date: 2007-12-13; **Accepted date:** 2008-05-16

Biography: WANG Wen-Jie, Ph. D., mainly engaged in global change and plant eco-physiology. E-mail: wjwang225@hotmail.com

value reduced from $2.20 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ at unclean control to $1.18 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ at the cleaning plot. Similarly, annual cumulative soil CO_2 emission decreased from $44.2 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ to $22.4 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$. Q_{10} value for soil respiration in the cleaning plot (2.22) was lower than that in control plot (2.33), and R_0 value were $0.61, 0.36 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ in the cleaning and control plots, respectively. Secondly, cleaning practice at forest floor slightly increased the soil temperature at the vegetative season, but reduced it at the dominant season of winter. The cleaning practice made soil moisture higher in summer, but lower in spring and autumn, which induced a much wider range at the cleaning plots. Moreover, the soil bulk density at the cleaning plot was 53% higher ($p < 0.05$), the soil non-capillary porosity and soil capillary porosity was respectively 49.5% and 15% lower ($p < 0.001$) than that at the un-cleaning control plot. Thirdly, forest floor cleaning of litters and understory shrubs could make a loss of carbon about $175.0 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2}$. This loss decreased from $175.0 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2}$ to $137.4 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2}$ when considering the decrease in soil respiratory carbon loss. Therefore, both utilization of biomaterial of litters and shrubs at forest floor and decrease in CO_2 release from the cleaning practice could mitigate the global warming pressure from utilization fossil fuel. However, the alteration of soil physical characters should be carefully considered since this alteration was not favorable to growth of the larch plantation and stability of larch ecosystem in a long run.

Key Words: forest floor cleaning; biomaterial resource; *Larix gmelinii* forest; soil respiration; soil physical characteristics

以林业生物质为原料的工业发展将使得林内可短期再生的生物质资源,如森林枯枝落叶及林下薪炭材面临减少的压力。尽管从全球碳平衡的角度来讲,加大对生物质资源利用而减少对矿物化石能源的利用,可以降低工业排放 CO_2 ,但是从森林碳循环的角度来讲,这些林内枯枝落叶以及薪炭材等生物质资源的减少,是如何影响森林土壤碳平衡问题还未见报道。在这一背景下,本文选择我国东北典型人工林生态系统——兴安落叶松人工林为研究对象,模拟林下生物质资源枯枝落叶和薪炭材(草本植物和灌木等)等全部被清除利用的情况下,对土壤呼吸和土壤物理性质进行了长期研究,试图探讨林床清理对林分土壤呼吸及林分碳平衡的影响。

1 材料与方法

1.1 实验样地概况

实验地设在黑龙江省尚志市东北林业大学帽儿山实验林场老山人工林实验站($127^{\circ}34'41''\text{E}$, $45^{\circ}20'45''\text{N}$)。年平均气温 2.8°C , 年平均湿度 70%, 年降水量 723.8mm。样地主要优势树种为落叶松(*Larix gmelinii*), 间或白桦(*Betula platyphylla*)、水曲柳(*Fraxinus mandshurica*)、红松(*Pinus koraiensis*), 主要灌木有暴马丁香(*Syringa amurensis*)、春榆(*Ulmus propinqua*)、鼠李(*Rhamnus davuricus*)、毛榛子(*Corylus heterophylla*)、稠李(*Padus asiatica*)、早花忍冬(*Lonicera praeflorens*)等。

1.2 样地设置方法

林床清理时间为 2004 年 10 月, 清理时间距呼吸测定时间为 6 个月。样地设置方法: 样地设置在落叶松次生人工林中, 将样地划分为 8 个相同大小($4\text{m} \times 2\text{m}$)的样方, 按照拉丁方设计方法进行排列如图 1。对样地进行两种处理, 处理 1: 1、2、3、4 样方去除里面所有的凋落物与地表植被, 露出裸地; 处理 2: 5、6、7、8 样方保留凋落物与地表植被, 每个样方内设置 2 个土壤呼吸测定圈。清理方式为清理地表所有可见的未分解部分, 地表植被只清理地上部分, 地下部分不动。

1.3 土壤呼吸及相关土壤温湿度、物理指标测定方法

(1) 土壤呼吸 按照王文杰年的方法用 PVC 环测定^[2,3]。测定时间为 2005 年 4 月~2006 年 10 月, 期间冬季 11 月到翌年 4 月份没有进行测定, 其余时间每个月测定 1 次土壤呼吸。使用 LI-6400 便携式光合测定系

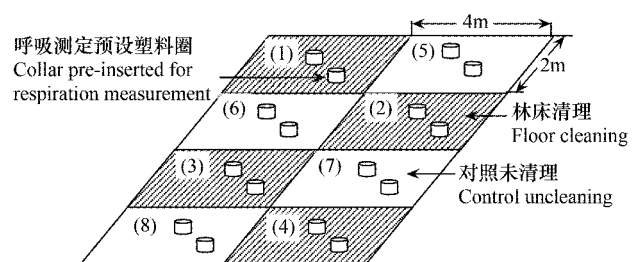


图 1 林床清理对土壤呼吸及土壤性质影响的实验设计图示

Fig. 1 Experimental design for comparing the effect of forest floor cleaning on soil respiration and soil feature

统测定(LI-COR Inc, USA)。同时使用附带的温度探头测定土壤表层温度(5cm)。使用土壤水分测定仪(TDR-300, Spectrum, 美国)的8cm探针测定表层单位体积土壤含水率。2005年土壤含水率使用的数据为距离测定地点30m的通量塔测定的5cm深度的TDR数据,该测定地点的林床未清理,用作对照,其数据测定频率为30min/次,文中所用数据为1d的平均值。土壤温度的长期自动监测使用自动温度测定仪(Thermo Recorder mini Rt-21s, Espec, Japan)进行测定,测定频率为30min/次。

(2) 土壤取样方法 采用机械分层法,分别于5、15、30cm处用100cm³环刀取样,采用常规方法^[4]测定土壤水分物理性质等指标。测定指标包括土壤容重和土壤毛细管孔隙度、非毛细管孔隙度和总孔隙度。

(3) 数据处理 林床清理对土壤呼吸速率的影响使用单因素方差分析进行差异性检验。土壤呼吸与温度的相关关系使用指数方程拟合, $R = a \times \exp(b \times T_{\text{soil}})$, 式中, R 和 T_{soil} 为实测土壤呼吸和土壤温度。 a 和 b 是拟合值,其生态学意义为0℃时土壤呼吸速率和温度敏感系数,土壤呼吸的 Q_{10} 值即基于 b 值计算得出, $Q_{10} = \exp(10 \times b)$ 。 Q_{10} 值反映了温度每变化10℃,土壤呼吸的相对变化^[5]。

为了探讨林床清理措施对林分土壤系统碳支出的影响程度,计算了林床清理和未清理样地的非呼吸碳损失 ΔB 和呼吸消耗碳支出 ΔR 。其中 ΔB 包括枯枝落叶去除量和灌木等薪炭材去除量等两个部分,生物量与碳量的转换系数为0.5 kg C kg⁻¹生物量; ΔR 的计算是,基于在两个样地连续测定的土壤温度数据(30min间隔)和本文所确定的两个处理的土壤呼吸-土壤温度指数相关关系,进行土壤呼吸的尺度放大,并计算出测定期间2005年和2006年的呼吸总量即为 ΔR 。依据林床清理和未清理对照样地的 ΔB 和 ΔR 数据,定量计算林床清理对土壤碳支出的影响程度。

林床清理对土壤容重、土壤毛细管孔隙度、土壤非毛细管孔隙度以及总孔隙度的影响使用单因素方差分析进行差异性检验。

2 实验结果与讨论

2.1 林床清理对落叶松林土壤呼吸的影响

图2是林床清理后与对照未清理土壤呼吸的变化。2005~2006年进行的测定中,除早春(4月或5月份)以及深秋(10月份)的测定结果未显示出显著差异外($p > 0.05$),其余结果均表明林床清理显著降低了土壤总呼吸($p < 0.05$),降低的幅度最大的月份是2005年7月份,降低近3倍。

基于测定呼吸值和同时测定的土壤温度,确定了土壤温度与土壤呼吸的相关关系(图3)。林床清理与未清理对照都具有显著相关的指数关系方程($p < 0.001$),但是林床清理使得指数相关关系变得较弱, r^2 值从0.63降低到0.45。拟合参数 R_0 值和 b 值存在明显差异,林床清理使得 R_0 值从0.61 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 降低到0.31 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,降低幅度将近1倍;使得 b 值从0.0879降低到0.0796,降低约10%。依据 b 值计算的土壤呼吸温度依赖系数 Q_{10} 值($Q_{10} = \exp(10 \times b)$)结果显示,林床清理使得 Q_{10} 值从2.33降低到2.22。

土壤呼吸与土壤温度之间具有显著的相关关系,土壤呼吸随土壤温度上升呈指数上升趋势^[12~15]。 Q_{10} 值反映了土壤呼吸对温度变化的响应, R_0 值则反映了土壤微生物等维持性呼吸速率得高低,其降低说明,处理后样地土壤呼吸对于温度变化的响应变得不敏感^[16,17]。林床清理所导致的土壤结构变化,可能导致土壤呼吸对土壤温度响应的差异,并最终导致其土壤呼吸向大气中释放CO₂的过程对全球变暖反应更加迟钝。因此,尽管林床清理样地土壤长期监测的温度,特别是夏季温度高于对照(图4),这一土壤温度提高所提高的土壤

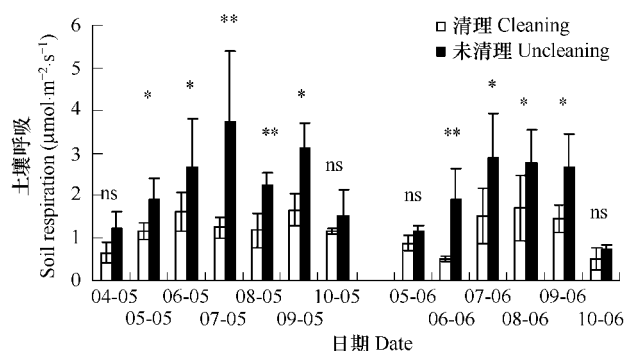


图2 林床清理与未清理样地土壤呼吸的比较

Fig. 2 Comparison of soil respiration rate between forest floor cleaning plot and un-cleaning plot from 2005 to 2006

* 为差异显著, ** 为差异极显著, ns 为无显著差异 * $p < 0.05$, ** $p < 0.001$, ns $p > 0.05$

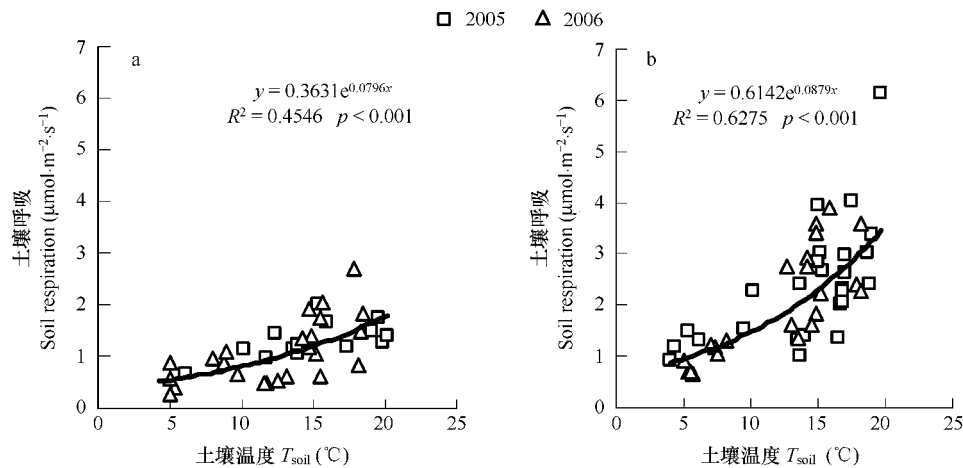


图3 林床清理(a)与未清理(b)样地土壤呼吸与温度相关关系差异

Fig. 3 Difference in the correlations between soil respiration and soil temperature at forest floor cleaning (a) and un-cleaning (b) plots

呼吸释放量,需要综合考虑其低 Q_{10} 值以及低 R_0 值所导致的呼吸总量下降,才能最终确定土壤呼吸对林床清理措施的响应。

2.2 林床清理对土壤温湿度、湿度的影响

林床清理使得林床土壤温度有所提高,在 2005~2006 年度间,只有 5 个月份出现林床清理土壤温度显著高于未清理林分的情况(分别是 2005 年 5 月、6 月和 8 月以及 2006 年的 5 月和 8 月)($p < 0.05$),而其它月份的土壤温度数据差异不显著($p > 0.05$)(图 4a)。基于土壤长期连续土壤温度测定仪的结果显示出类似的情况:未清理样地冬季土壤温度高于清理样地,夏季则低于清理样地(图 4a)。

林床清理使得土壤湿度秋季和春季偏低,而夏季偏高。在 2006 年的 7 月到 9 月的测定中,林床清理土壤的湿度可以达到体积分数 70% 左右,而对照未清理的土壤湿度仅为体积分数 57% 左右,二者之间的差异达到的极显著水平($p < 0.05$)。而在 5 月、6 月和 10 月份的测定中,对照未清理土壤湿度一般均高于林床清理林分土壤约 5%,但差异未达到了显著水平($p > 0.05$)(图 4b)。

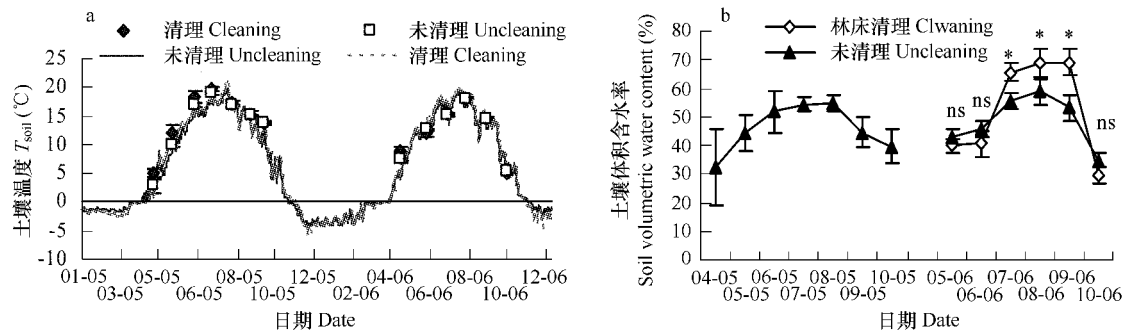


图4 落叶松人工林林床清理样地与未清理样地土壤温度(a)和土壤含水率(b)的比较

Fig. 4 Comparison of soil temperature (a) and soil volumetric moisture (b) between cleaning and uncleaning plots of the larch plantation

枯枝落叶及灌木层不但可以起到阻挡降水冲击土表的作用,还是土壤水分涵养、分配的缓冲器。在干燥少雨的春季,地表植被与凋落物起着阻挡阳光直射,调节土壤温度,保持土壤水分的作用,经过林床清理的样方由于没有这样的保护,土表暴露在空气中,水分流失很快,因此使得土壤含水率低。夏季则相反。土壤含水率与呼吸的关系相对复杂:当土壤水分含量较低时增加土壤水分能够显著增加土壤呼吸,而当土壤水分含量过高时,土壤呼吸会因为氧气供应不足以及土壤通透性差而导致呼吸显著下降^[7,8]。但是,这一临界值目前还存在不同看法^[9~11]。王文杰等^[5]在同一林分发现过高的水分会显著降低土壤呼吸。因此,林床清理所导

致的土壤过高的含水率可能是阻碍土壤 CO_2 释放的主要因素之一。

2.3 林床清理对土壤物理性质的影响

表 1 是经过林床清理两年后,2 种处理样地的土壤结构状况:经过林床清理的样地 0~10cm 层土壤容重要比未清除样地高 53%,两种处理样地土壤容重的差异达到显著水平($p < 0.05$)。尽管更深层土壤 10~20cm 层以及 20~40cm 土壤的容重具有相同的趋势,但是差异没有达到显著水平($p > 0.05$)。经过林床清理的样地土壤非毛管孔隙度比未处理样地低 49.5%,差异达到极显著水平($p < 0.001$),而且随着深度的增加,非毛管孔隙度的差距逐渐减小,但基本上没有显著差异。与此类似,林床清理使得毛管孔隙度较对照未清理降低约 15%,并达到了极显著水平($p < 0.001$),而深层尽管出现相类似的趋势,但没有达到显著水平($p > 0.05$)。林床清理处理使得 0~20cm 土壤的土壤总孔隙度均显著降低 10%~20% ($p < 0.05$),而对更深层土壤没有显著影响(表 1)。

表 1 林床清理对落叶松林土壤性质的影响

Table 1 Soil physical characters of forest floor after cleaning and without cleaning

项目 Item	处理 Treatment	土层厚度 (cm) Soil thickness		
		0~10	10~20	20~40
容重($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	清理 Cleaning	$0.98 \pm 0.12^*$	$1.23 \pm 0.17\text{ns}$	$1.40 \pm 0.11\text{ns}$
Bulk density	未清理 Uncleaning	$0.64 \pm 0.09^*$	$1.11 \pm 0.24\text{ns}$	$1.38 \pm 0.26\text{ns}$
非毛管孔隙度(%)	清理 Cleaning	$6.13 \pm 0.73^{**}$	$6.07 \pm 0.79\text{ns}$	$6.04 \pm 1.11\text{ns}$
Non-capillary porosity	未清理 Uncleaning	$9.17 \pm 0.59^{**}$	$6.17 \pm 1.23\text{ns}$	$6.14 \pm 0.84\text{ns}$
毛管孔隙度(%)	清理 Cleaning	$58.33 \pm 4.58^{**}$	$45.65 \pm 7.25\text{ns}$	$42.71 \pm 3.21\text{ns}$
Capillary porosity	未清理 Uncleaning	$73.41 \pm 5.33^{**}$	$57.61 \pm 5.24\text{ns}$	$44.57 \pm 4.56\text{ns}$
总孔隙度(%)	清理 Cleaning	$64.46 \pm 3.46^*$	$51.73 \pm 6.24^*$	$48.75 \pm 2.34\text{ns}$
Total porosity	未清理 Uncleaning	$82.58 \pm 5.77^*$	$63.94 \pm 5.97^*$	$50.71 \pm 4.77\text{ns}$

* $p < 0.05$, ** $p < 0.001$, ns $p > 0.05$

土壤中的孔隙是土壤 CO_2 释放的通道,孔隙度小表明 CO_2 释放的通道受阻,会阻碍土壤 CO_2 的释放。林床清理导致的这种土壤结构的改变也是引起土壤呼吸显著降低的一个原因:土壤表层变得致密,孔隙度降低均不利于土壤中 CO_2 的释放。

2.4 林床清理对土壤总碳支出的影响

基于连续测定的土壤温度数据(图 4a)和拟合的土壤温度与土壤呼吸的指数关系(图 3),计算了日呼吸速率的年变化(图 5)。较未清理样地,清理后样地土壤呼吸速率显著降低,2005、2006 年 2a 的土壤日呼吸速率均表现出非生长季(11 月至翌年 4 月份)土壤呼吸差异较小,未清理样地较清理样地高 62%~83%;而生长季(5 月至 11 月份)土壤呼吸差异较大,未清理样地较清理样地高 69%~125%。

表 2 为落叶松人工林林床清理与未清理条件下土壤碳支出比较,林床清理去除凋落物等折合碳支出约 $166.7\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}$,去除的林下薪碳材折合碳支出约 $8.3\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}$,即林床清理所去除的生物质材料如果通过发电、燃烧等利用方式完全转化成 CO_2 ,每平方米林床能够释放出 175mol 的碳。通过对土壤呼吸的研究发现,林床清理能够显著降低落叶松人工林的土壤呼吸,2005、2006 年林床清理后土壤呼吸分别降低了 46.2% 和 45.2%,这说明林床清理通过降低土壤呼吸可以减少碳释放量 $18.22 \sim 19.41\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 。总体来看,生物质材料的利用是一个碳释放增加的过程,但是林床清理对土壤呼吸的降低作用可以抵消一部分这种碳释放,

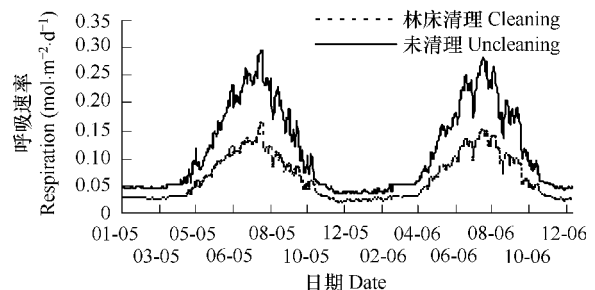


图 5 2005~2006 年落叶松人工林林床清理与未清理条件下土壤日呼吸速率的比较

Fig. 5 Comparison of daily soil respiration rate at the cleaning and uncleaning plots of larch plantation from 2005 to 2006

使得每平方米的净碳支出由 $175 \text{ mol} \cdot \text{a}^{-1}$ 降低至 $137.37 \text{ mol} \cdot \text{a}^{-1}$, 即使得生物质材料的利用少向大气中排放了约 11% 的碳, 但是这种降低是建立在土壤结构改变的条件下的。

表 2 落叶松人工林林床清理与未清理条件下土壤碳支出比较

Table 2 Difference in the carbon output from soils at cleaning and uncleaning plots of the larch plantation

指标 Parameter		林床清理 Cleaning	未清理对照 Uncleaning	二者之差 Difference
非呼吸消耗 Non-respiratory consumption	枯枝落叶 Litter removing ($\text{mol} \cdot \text{m}^{-2}$)	166.7(25)	0	-166.7(25)
	薪炭材去除量 Shrubs removing ($\text{mol} \cdot \text{m}^{-2}$)	8.3(2.3)	0	-8.3(2.3)
	二者之和 Sum of above two	175.0(17.5)	0	-175.0(17.5)
土壤呼吸释放总量 Soil respiration ($\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)	2005 年 Year 2005	22.62(2.3)	42.03(4.2)	+19.41(1.9)
	2006 年 Year 2006	22.13(2.2)	40.35(4.0)	+18.22(1.8)
	两年之和 Sum of two year	44.75(4.5)	82.38(8.2)	+37.63(3.63)
	合计 Sum	219.75	82.38	-137.37

2005 年、2006 年呼吸年释放总量数据由图 4 计算得出, 括号内给出 10% 的误差; 其它括号内数据为实测数据的标准偏差 annual efflux in 2005 and 2006 were calculated from Fig. 4 and the data in parenthesis is a 10% error; Other data in the parenthesis are the standard deviation of measured data

枯枝落叶去除导致了枯枝落叶分解减少。测定期间土壤呼吸平均值及年呼吸量均降低近 50%。这一呼吸所占总呼吸的比例降低远高于以往报道的有关枯枝落叶呼吸所占总土壤呼吸的水平, 其它人的研究结果^[5~7]报道枯枝落叶呼吸所占总呼吸的比例在 5% ~ 30% 之间, 最高约 37%。从这些值均小于林床清理所导致的土壤呼吸下降幅度可以推论, 林床清理去除的枯枝落叶呼吸是土壤呼吸显著下降的一个主要原因。但其他土壤温度、湿度、物理性质的变化也是影响释放总量变化的重要因素^[18~20]。

3 结论

林床清理明显降低落叶松人工林的土壤呼吸, 两年的平均值平均降低了 $1.02 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 并且减弱土壤呼吸与温度之间的指数相关关系。林床清理提高了土壤温度, 增大了土壤湿度的变化幅度。

林床清理显著增大了林床表层土壤容重(53%), 土层深度增加, 这种差异逐渐减小; 林床清理显著降低了土壤的毛管、非毛管、总孔隙度, 这种改变会阻碍土壤 CO_2 的释放。

通过计算, 发现林下生物质资源的利用是一种碳释放的过程, 每平方米林床去除的生物质材料如果完全利用, 能够释放出 175 mol 的碳。而林床清理对土壤呼吸的降低作用能够使得每平方米面积的净碳支出由 $175 \text{ mol} \cdot \text{a}^{-1}$ 降低至 $137.37 \text{ mol} \cdot \text{a}^{-1}$, 减少生物质资源利用对环境的碳释放压力, 但是会造成土壤表层容重加大, 孔隙度降低, 土层致密, 这种变化都不利于落叶松的生长和落叶松林生态系统的稳定。

References:

- [1] Mi T, Tang R J, Chen H P, *et al.* Utilization technology of biomass energy and it's research progress. *Gas & Heat*, 2004, 24(12), 701—705.
- [2] Wang W J, Zu Y G, Wang H M, *et al.* Effect of collar insertion on soil respiration measurements by LI-6400 in a larch forest. *Journal of Forest Research*, 2005, 10: 57—60.
- [3] Wang H M, Zu Y G, Wang W J, *et al.* Notes on the forest soil respiration measurement by a Li-6400 system. *Journal of Forestry Research*, 2005, 16(2): 132—136.
- [4] Zhang W R, Xu B T. Method of location study on forest soil. Beijing: China Forest Press, 1986.
- [5] Wang W J, Wang H M, Zu Y G. CO_2 Flux of a Larch Plantation in Northeast China. Beijing: Science Press, 2006.
- [6] Reinke J J, Adriano D C, Mcleod K W. Effects of litter alteration on carbon dioxide evolution from a south Carolina Pine forest floor. *Soil Sci Soc Am J*, 1981, 45: 620—623.
- [7] Hanson P J, O'Neill E G, Chambers M S, *et al.* Soil respiration and litter decomposition. In: Hanson P J and Wullschlegel S D. eds. North American temperate deciduous forest responses to changing precipitation regimes. New York: Springer, 2003.

- [8] Cavelier J, Penuela M C. Soil respiration in the cloud forest and dry deciduous forest of Serrania de Macuria. Colombia. *Biotropica*, 1990, 22 (4): 346—352.
- [9] Schwendenmann L, Veldkamp E, Brenes T, *et al.* Spatial and temporal variation in soil CO₂ efflux in an old-growth neotropical rain forest, La Selva, Costa Rica. *Biogeochemistry*, 2003, 64: 111—128.
- [10] Lee M, Nakane K, Nakatsubo T, *et al.* Effects of rainfall events on soil CO₂ flux in a cool temperate deciduous broad-leaved forest. *Ecological Research*, 2002, 17: 401—409.
- [11] Davison E A, Savage K, Verchot L V, *et al.* Minimizing artifacts and biases in chamber-based measurements of soil respiration. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2002, 113: 21—37.
- [12] Singh J S, Gupta S R. Plant decomposition and soil respiration in terrestrial ecosystems. *Bot Rev*, 1997, 43: 449—528.
- [13] Bridge B J, Mott J J, Hartigan R J, *et al.* The formation of degraded areas in the dry savanna woodlands of northern Australia. *Australian Journal of Soil Research*, 1983, 21: 91—104.
- [14] Chen Q S, Li L H, Han X G, *et al.* Temperature sensitivity of soil respiration in relation to soil moisture in 11 communities of typical temperate steppe in Inner Mongolia. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(4): 831—836.
- [15] Chen Q S, Li L H, Han X G, *et al.* Influence of temperature and soil moisture on soil respiration of a degraded steppe community in the XiLin river basin of inner Mongolia. *Acta Phytocologica Sinica*, 2003, 27(2): 202—209.
- [16] Wang W J, Wang H M, Zu Y G, *et al.* Characteristics of root, stem, and soil respiration Q₁₀ temperature coefficients in forest ecosystems. *Acta Phytocologica Sinica*, 2005, 29: 680—691.
- [17] 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.
- [18] Zhang X Q, Chen X G, Wu S H. Methodological issues related to measuring and monitoring carbon stock changes induced by land use change and forestry activities. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(9): 2068—2073.
- [19] Wang C L, Zhou G Y, Tang X L, *et al.* Ecosystem respiration and its controlling factors in a coniferous and broad-leaved mixed forest in Dinghushan, China. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(7): 2659—2668.
- [20] Fan H B, Huang Y Z, Yuan Y H, *et al.* Carbon cycling of forest ecosystems in response to global nitrogen deposition: a review. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(7): 2997—3009.

参考文献:

- [1] 米铁, 唐汝江, 陈汉平, 等. 生物质利用技术及研究进展. *煤气与热力*, 2004, 24(12): 701~705.
- [4] 张万儒, 许本彤. 森林土壤定位研究方法. 北京: 中国林业出版社, 1986.
- [14] 陈全胜, 李凌浩, 韩兴国, 等. 典型温带草原群落土壤呼吸温度敏感性与土壤水分的关系. *生态学报*, 2004, 24(4): 831~836.
- [15] 陈全胜, 李凌浩, 韩兴国, 等. 水热条件对锡林河流域典型草原退化群落土壤呼吸的影响. *植物生态学报*, 2003, 27(2): 202~209.
- [16] 王文杰, 王慧梅, 祖元刚, 等. 林木非同化器官与土壤呼吸的温度依赖系数 Q₁₀ 值的特征分析. *植物生态学报*, 2005, 29: 680~691.
- [18] 张小全, 陈先刚, 武曙红. 土地利用变化和林业活动碳贮量变化测定与监测中的方法学问题. *生态学报*, 2004, 24(9): 2068~2073.
- [19] 王春林, 周国逸, 唐旭利, 等. 鼎湖山针阔叶混交林生态系统呼吸及其影响因子. *生态学报*, 2007, 27(7): 2659~2668.
- [20] 樊后保, 黄玉梓, 袁颖红, 等. 森林生态系统碳循环对全球氮沉降的响应. *生态学报*, 2007, 27(7): 2997~3009.