

长白山阔叶红松林皆伐迹地土壤呼吸作用

王旭 周广胜* 蒋延玲 曹铭昌 曾伟 宋健

(中国科学院植物研究所植被与环境变化重点实验室 北京 100093)

摘要 利用静态箱式法测量长白山阔叶红松(*Pinus koraiensis*)林伐后13年的皆伐迹地土壤呼吸作用。分析表明,皆伐迹地土壤呼吸作用日变化趋势呈单峰曲线,峰谷值出现时间较林地提前2~4 h,与土壤5 cm深度温度变化趋势基本一致。整个生长季节皆伐迹地土壤呼吸速率约为林地的75%,土壤温度与土壤呼吸作用存在显著的指数关系。在降水量集中的生长季,土壤水分对土壤呼吸作用具有一定的抑制作用,利用温度和水分双因子模型可以较好地解释皆伐迹地土壤呼吸作用的变异。阔叶红松林皆伐后生物量减少和微环境变化是造成土壤呼吸作用强度和动态特征发生变化的重要原因。

关键词 阔叶红松林 皆伐迹地 土壤呼吸作用 温度 土壤水分

SOIL RESPIRATION IN A CLEAR-CUT BROAD-LEAVED KOREAN PINE FOREST OF CHANGBAI MOUNTAIN

WANG Xu, ZHOU Guang-Sheng*, JIANG Yan-Ling, CAO Ming-Chang, ZENG Wei, and SONG Jian

Key Laboratory of Vegetation and Environmental Change, Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100093, China

Abstract Aims Soil respiration is the second largest flux in the global carbon cycle. Human activity, especially forest cutting, had brought a lot release of soil carbon. But the effect of forest clear-cutting on soil respiration was not inadequately understood. We chose Korean pine forest in Changbai Mountain as the case study area. Our aim is to compare soil respiration in clear-cut fields with that in natural Korean pine forests, and to reveal the effects of clear-cut on the density and pattern of soil respiration.

Methods During the growing seasons from 2003 to 2005, soil respiration was measured by a closed static chamber system in the clear-cut fields and Korean pine forests in Changbai Mountain. Soil temperature and moisture during the upper layers were observed by geothermometer and TDR system.

Important findings The results showed that diurnal variation of soil respiration at clear-cut plot could be expressed as single peak curve, and the times of the maximum and the minimum soil respiration values appeared 2-4 hours earlier than those in forest plot, which consisted with that of soil temperature at 5 cm depth. Soil respiration rate at forest plot was higher with the proportion of 75% than that in clear-cut plot during the growing season. Soil temperature had a significant exponential relationship with soil respiration. Soil water may have negative effect on soil respiration during the growing season with high frequency precipitations. The soil respiration model including the effects of soil water and temperature could explain soil respiration variation much better than temperature-based soil respiration model. The management of clear-cut forest had obvious effect on the dynamic characteristics and intensity of soil respiration due to the decrease in biomass and the change in microclimate in Korean pine forest.

Key words broad-leaved Korean pine forest, clear-cut, soil respiration, temperature, soil water content

森林作为陆地生态系统的主体,具有广泛的分布面积和最高的生产力以及最大的生物量积累,是陆地最大的碳库。据统计,森林地上植被碳库(483 Pg C)约占全球地上总碳库(562 Pg C)的86%(Olson *et al.*, 1983),森林在陆地碳循环中具有重要的作用。土壤呼吸作用包括根系呼吸和微生物呼吸以及

土壤矿质化学氧化作用释放的少量CO₂(Lundegårdh, 1927),是全球碳循环的主要通量过程(Raich & Schlesinger, 1992),它的任何微小变化都将引起大气CO₂浓度的明显改变,进一步加剧气候变化(Schlesinger & Andrews, 2000)。人为活动特别是森林砍伐造成的土地利用方式和土地覆被变化,在削

收稿日期:2006-03-13 接受日期:2006-04-14

基金项目:国家自然科学基金项目(4023108)和中国科学院知识创新工程项目(KSCX2-SW-133)

感谢长白山森林生态系统定位研究站及其工作人员对本项研究工作的支持

* 通讯作者 Author for correspondence E-mail: gszhou@ibcas.ac.cn

弱森林碳蓄积能力同时,还将对土壤呼吸作用产生影响,成为陆地生态系统碳源增加的一个重要原因。目前对森林土壤呼吸作用及其影响因子的研究较多,而关于森林皆伐措施对土壤呼吸作用的影响方面研究较少。本文拟通过研究长白山阔叶红松(*Pinus koraiensis*)林及其皆伐迹地土壤呼吸作用,探讨皆伐对森林土壤碳释放模式和强度的影响,为准确评估森林碳收支提供科学依据和参数。

1 研究地点概况

实验地点选在长白山北坡的中国科学院长白山森林生态系统定位研究站,地理位置为 42°24' N, 128°6' E, 海拔 738.1 m。该地区气候属于受季风影响的温带大陆性山地气候,春季干燥而多风,夏季短

暂,温暖而多雨,秋季凉爽而多雾,冬季漫长,晴朗而寒冷。年均气温 0.9~3.9 °C,年均降水量 632.8~782.4 mm(迟振文等,1981)。阔叶红松林样地位于研究站 1 号标准地,样地坡度 1°~5°,天然林林龄 180 年左右,林分为复层结构,优势树种平均株高 26 m,郁闭度 0.8,下木覆盖度 40%(徐振邦等,1985)。皆伐样地紧邻阔叶红松林样地,海拔高度约 744 m,为原始阔叶红松林皆伐后形成。采伐时林木残体(如枝、叶)未被清理,植被自然恢复 13 年左右,植被主要由低矮落叶乔灌木及五味子(*Schisandra chinensis*)、山葡萄(*Vitis amurensis*)、蚊子草(*Filipendula palmate*)、厥类(*Botrychium*)等藤草本类植物组成,样地盖度为 95% 以上(表 1)。

表 1 试验地概况
Table 1 Characteristics of the experimental fields

主要因子 Important factor	阔叶红松林 Broad-leaved Korean pine forest	皆伐迹地 Clear-cut field
主要优势植物种类 Dominant plant species	红松(<i>Pinus koraiensis</i>)、水曲柳(<i>Fraxinus mandshurica</i>)、糠椴(<i>Tilia mandshurica</i>)	春榆(<i>Ulmus davidiana</i>)、大青杨(<i>Populus ussuriensis</i>)、柳属(<i>Salix</i>)
地上生物量 Aboveground biomass ($10^3 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	287.2(徐振邦,1985)	
凋落物量 Litter mass ($\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$)	1 106.6	1 103.3
地下生物量 Belowground biomass ($\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$)	1 798.1	751.9
土壤容重 Bulk density ($\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)	0.639	0.496
土壤有机碳 Organic C ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)	125.62	172.38
土壤全氮 Total N ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)	10.56	14.38
碳氮比 C:N proportion	11.01	10.67
土壤 pH 值 Soil pH value	4.91	5.13

表中容重、有机碳、全氮为土壤深度 0~10 cm 测定值。Values of bulk density, organic C and total N were measured in the soil depth between 0~10 cm

2 实验方法

2.1 土壤呼吸作用测量方法

用静态密闭箱式法测量土壤呼吸作用。该仪器由 CO₂ 红外线分析仪(GXH-3010D,北京市电脑技术应用研究所生产)和密闭箱(50 cm × 50 cm × 15 cm)组成,由导管通过密闭箱侧壁上的进出气孔和 CO₂ 分析仪相连。选择晴天测量土壤呼吸作用日动态,每小时测量 1 次,同时测量环境因子。测量前一天,在样地内随机选取 50 cm × 50 cm 面积的样方 3 个,把钢圈基座嵌入表层土壤中,深度约 3~5 cm,尽量不破坏原来土壤物理结构,并剪除样方中地表以上的植物活体部分。测量时,密闭箱紧密扣合到前一天设置在土壤表面的钢圈底座上,形成密闭气室。测量时,每间隔 10 s,红外分析仪测量 1 次箱体内存

气 CO₂ 浓度值,测量时间持续 180 s。

2.2 测量时间

土壤呼吸作用测定主要在生长季进行,具体时期为 2003 年 8~10 月、2004 年 11 月、2005 年 5~8 月,观测频率为 20~30 d 1 次,测量时间为 9:00~11:00 之间(这个时间段的土壤呼吸速率观测值与全天土壤呼吸速率平均值接近)。在 2003 年 8 月 13 日和 15 日测定阔叶红松林和皆伐迹地土壤呼吸作用全天 24 h 昼夜变化,每小时观测 1 次。

2.3 环境因子测定

在进行土壤呼吸作用测定的同时,利用曲管温度表(上海医用仪表厂)测量样地 0、5、10、15 和 20 cm 深度的土壤温度,采用水分仪(PR1/4, Delta-T Devices Ltd. Cambridge, UK)测量 10 cm 深度的土壤水分体积含量。箱体内存的空气温度由安装在箱体内存

空气温、湿度探头(NKHT,北京鑫诺金科技发展有限公司)测量,气压表测量空气气压。

2.4 数据分析

箱式法土壤呼吸作用速率的计算公式如下:

$$Q = \Delta CO_2 \times (h / 22.41 \times 10^{-3}) \times (T_0 / T) \times (P / P_0) \quad (1)$$

式中, Q 表示土壤呼吸作用速率($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$), 22.41×10^{-3} 为理想气体摩尔体积($\text{m}^3 \cdot \text{mol}^{-1}$), h 代表箱体高度(m), ΔCO_2 为箱内 CO_2 浓度变化速率($\mu\text{mol} \cdot \text{s}^{-1}$), $T_0 = 273.15 \text{ K}$, T 为箱内的绝对温度(K), P 为当地的实际大气压(hPa), P_0 为标准大气压($1.013 \times 10^5 \text{ hPa}$)。本研究数据分析采用Excel2003和SPSS12.0统计分析软件,Sigmaplot9.0软件辅助作图。

3 结果与分析

3.1 阔叶红松林与皆伐迹地微环境差异

不同植被类型的小气候环境存在差异,由于两个样地类型的土壤温度观测数据缺乏同步性,因此以当地气象站土壤温度资料作为对照,通过拟和样地土壤温度实际观测值和气象站同步观测值的回归关系(图1),使两种类型样地的环境因子具有可比性。两类型样地土壤温度与气象站观测值存在极显著的线性回归关系($p < 0.001$),表达式分别为:

$$T_K = 0.784T_q + 1.710 \quad R^2 = 0.955 \quad n = 56 \quad (2)$$

$$T_C = 0.576T_q + 3.415 \quad R^2 = 0.880 \quad n = 63 \quad (3)$$

式中, T_q 代表气象站土壤温度, T_K 和 T_C 分别表示阔叶红松林和皆伐样地土壤温度。利用公式(2)、(3)估算生长季(5~9月)皆伐地平均土壤温度为 15.2°C ,高于阔叶红松林地(13.3°C)约 1.9°C 。从图1可以看出,当外界(即气象站)土壤温度大于一个临界值(约 8.2°C)时,皆伐迹地土壤温度高于阔叶红松林地,且随外界土壤温度升高,差距逐渐增大,而低于这个临界值,林地土壤温度反而略高于皆伐迹地土壤温度。

皆伐迹地和阔叶红松林的土壤水分状况同样也存在着差异,根据2005年5~8月两类型样地6个观测日的土壤含水量结果,皆伐迹地土壤水分体积含量平均高于阔叶红松林约19%,方差分析结果 F 值为8.967,二者差异显著($p < 0.05$)。

3.2 土壤呼吸作用日动态比较

根据2003年8月13~14日和15~16日对阔叶红松林和皆伐迹地24h土壤呼吸速率的测定结果

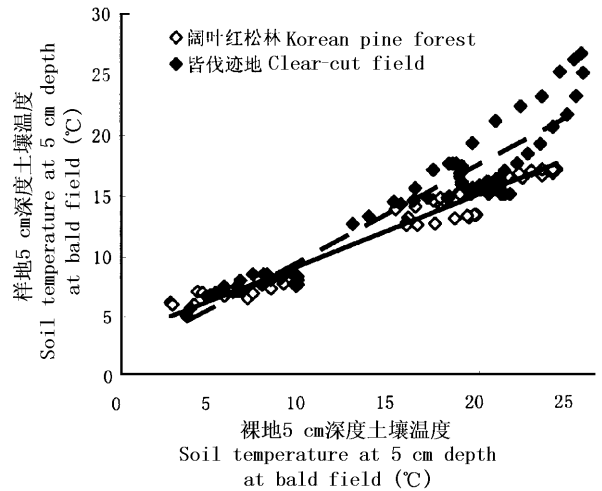


图1 阔叶红松林和皆伐迹地与裸地土壤温度比较

Fig. 1 Comparison of soil temperatures among the experimental plots (Korean pine forest and clear-cut field) and bald field

(图3)可以看出,皆伐迹地土壤呼吸作用24h日变化趋势与阔叶红松林类似,表现为单峰曲线,这与两类型样地的5cm土壤温度日变化趋势基本一致,一日之内土壤呼吸速率与土壤温度呈显著线性相关($p < 0.05$),相关性 R^2 分别为0.887和0.876(图4),而土壤水分日变化不明显,对土壤呼吸日变化影响不大。这说明皆伐迹地和阔叶红松林的土壤呼吸作用日变化主要受温度影响。

皆伐迹地和林地土壤呼吸作用日动态特征存在着差异,主要表现在皆伐迹地土壤呼吸速率日变幅大于林地,变异系数分别为0.172和0.140,另外皆伐地土壤呼吸速率最大值出现时间在14:00左右,而林地出现在18:00前后,最小值则分别出现在早上5:00~6:00和7:00~8:00之间,与林地相比,皆伐迹地土壤呼吸速率日变化峰谷值出现时间提前约2~4h,这些差异主要是由于林地转变为皆伐地后土壤温度日动态发生变化造成的。

3.3 土壤呼吸作用季节动态

从2003到2005年生长季土壤呼吸速率的测量结果(图5)表明,两类型样地土壤呼吸作用变化具有明显的季节动态,即从5月开始,土壤呼吸速率逐渐增大,至8月土壤呼吸速率为全年最大,其中皆伐迹地最大值可达 $7.99 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,阔叶红松林最大值也达 $8.36 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,此后土壤呼吸速率逐渐降低。在冬季限于仪器使用的温度环境,未能确定出全年土壤呼吸速率的极低值及出现时间。从2005年5、6和8月的同日观测结果可以看出,阔叶

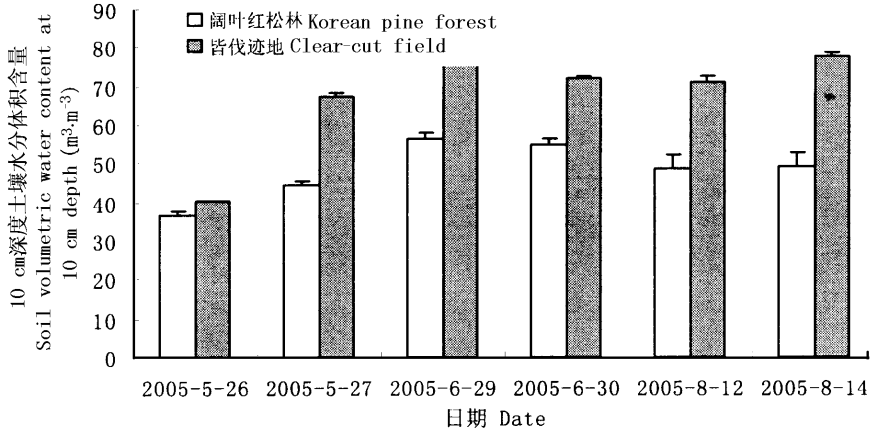


图2 阔叶红松林与皆伐迹地土壤水分含量比较

Fig.2 Comparison of soil water contents between Korean pine forest and clear-cut field

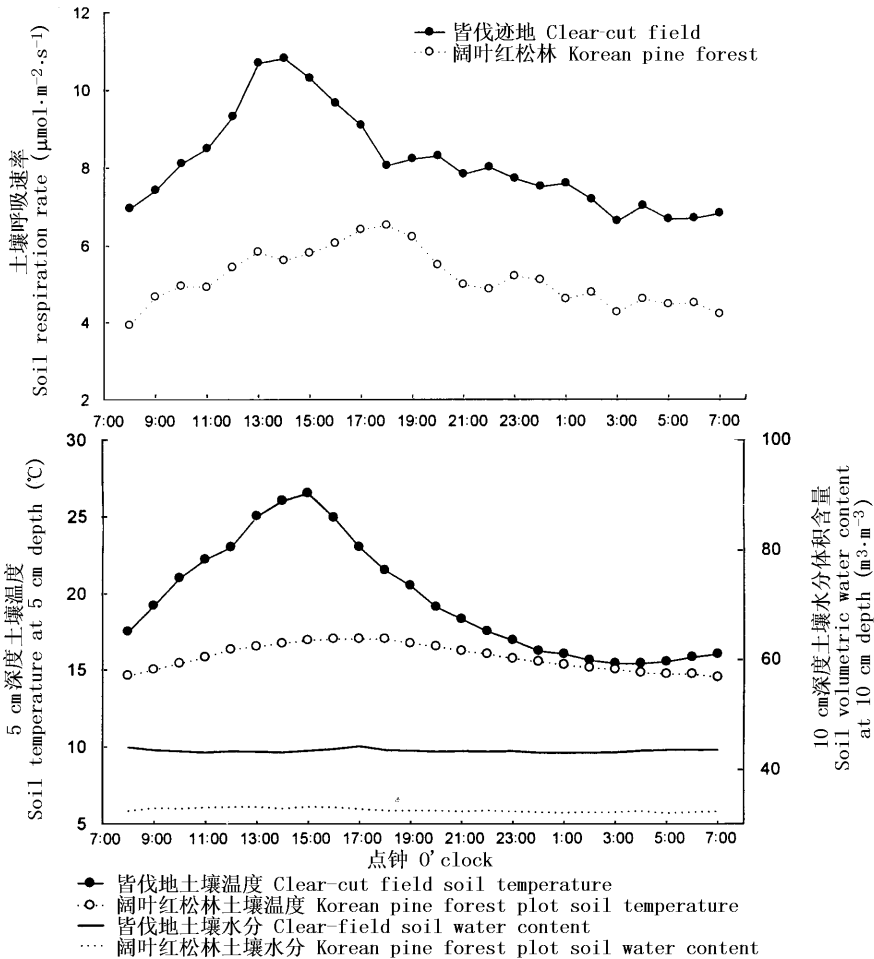


图3 皆伐迹地与阔叶红松林土壤呼吸作用日变化

Fig.3 Diurnal variations of soil respiration rates at clear-cut field and Korean pine forest plots

红松林的土壤呼吸速率大于皆伐迹地,在温度较高的6月和8月差距更显著,而2003、2004年两样地的测量不在同一天进行,环境条件不同,造成可比性较

差。

3.4 土壤呼吸作用与温度水分关系比较

阔叶红松林在皆伐后,温度和水分状况发生变

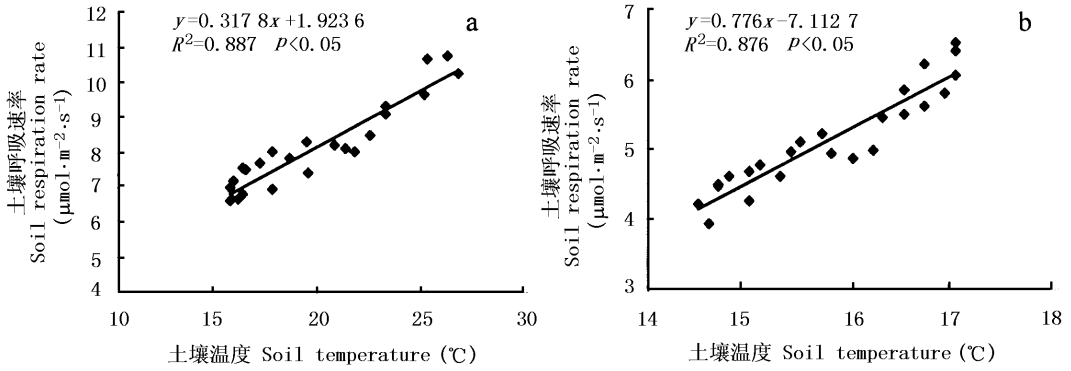


图 4 24 h 土壤呼吸速率与土壤温度关系

Fig. 4 Relationships between soil respiration rate and soil temperature during 24 hours
a : 皆伐迹地 Clear-cut field b : 阔叶红松林 Korean pine forest

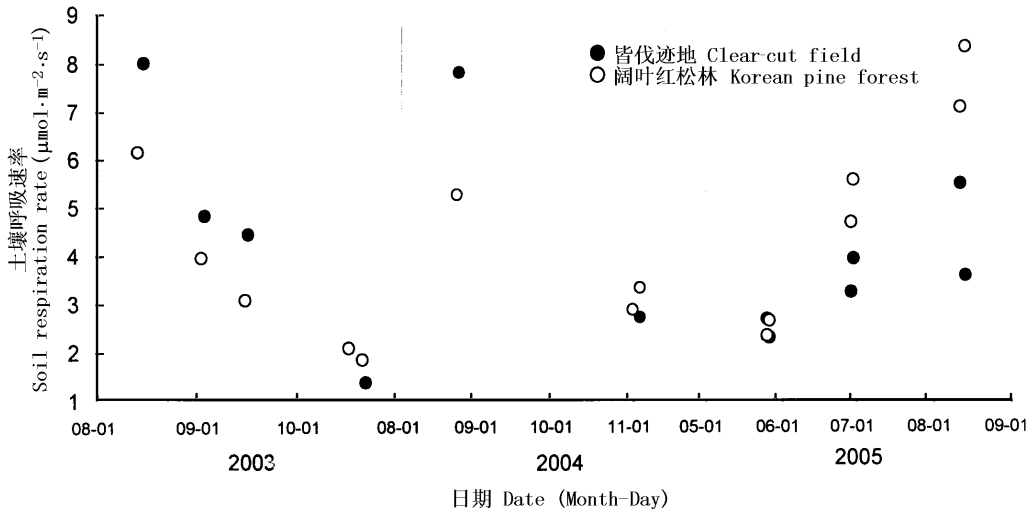


图 5 皆伐迹地与阔叶红松林土壤呼吸作用季节变化

Fig. 5 Seasonal variations of clear-cut field and Korean pine forest

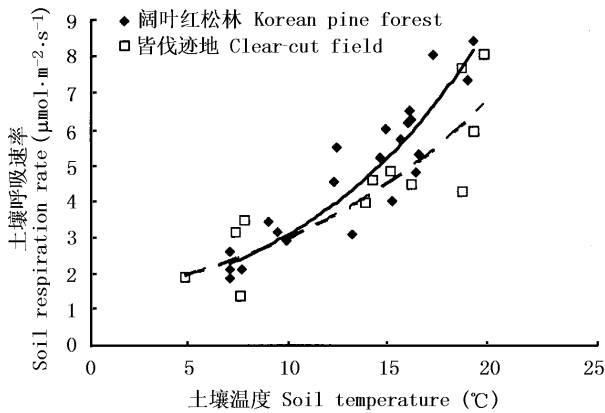


图 6 土壤呼吸作用与温度的关系

Fig. 6 Relationships between soil respiration and soil temperature

6) 结果表明两种类型样地的土壤呼吸速率和土壤温度之间均存在显著的指数关系 ($p < 0.05$), 回归关系表达式分别为:

$$Q_K = 1.082e^{1.066T} \quad R^2 = 0.854 \quad n = 22 \quad (4)$$

$$Q_C = 1.312e^{0.083T} \quad R^2 = 0.736 \quad n = 12 \quad (5)$$

式中, Q_K 、 Q_C 分别表示阔叶红松林和皆伐迹地的土壤呼吸速率, T 为土壤温度。用温度指数关系可以分别解释林地和皆伐地土壤呼吸作用约 85% 和 74% 的变异。根据公式 (4) 和 (5) 计算得出皆伐地和林地生长季 5 ~ 9 月的平均土壤呼吸速率分别为 3.69 和 4.92 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, 这与林丽莎等 (2005) 测定的长白山阔叶红松林年土壤呼吸速率 0.21 ~ 4.86 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 范围相近, 皆伐迹地土壤呼吸速率约为林地的 75%。皆伐迹地和阔叶红松林地的 Q_{10} 值分别为 1.88 和 2.90, 说明皆伐迹地土壤呼吸作用对温度敏感程度小于林地。从图 6 也可以看出, 非生

化, 对土壤呼吸作用与环境因子的关系可能造成一定的影响。我们分析生长季皆伐迹地和阔叶红松林日土壤呼吸速率与 5 cm 深处土壤温度的关系(图

长季土壤温度较低时期,土壤呼吸作用差别不大,随着温度升高,阔叶红松林土壤呼吸作用强度增加要高于皆伐地。

土壤呼吸作用与土壤水分的关系则没有温度明显,可以分别用线性关系和二次方程描述(图7),其回归决定系数 R^2 分别为 0.176 和 0.134,回归关系并不显著($p > 0.05$),但从图中的变化趋势来看,皆伐迹地土壤水分含量较高时,土壤呼吸速率呈下降趋势,说明土壤含水量过高可能对土壤呼吸产生抑制作用。我们用温度和水分的双因素模型 $Q = ae^{bT}W^c$ 对林地和皆伐地土壤呼吸速率与温度、水分之间的关系进行模拟,得到公式(6)(7):

$$Q_K = 0.799e^{0.099T}W^{0.105} \quad R^2 = 0.812$$

$n = 22$ (6)

$$Q_C = 32.039e^{0.084T}W^{-0.777} \quad R^2 = 0.857$$

$n = 12$ (7)

式中: Q_K 、 Q_C 与公式(3)(4)意义相同, W 表示土壤水分体积含量。Xu 和 Qi (2001)及杨玉盛等(2005)利用双因素模型 $Q = ae^{bT}W^c$ 很好地拟合出受土壤水分胁迫(过湿或者干旱)情况下的土壤呼吸作用,本研究利用双因素模型可以解释皆伐迹地土壤呼吸作用的 86% 变异,相对温度单因子模型提高了约 12% 的模拟精度(公式 7);但对阔叶红松林地土壤呼吸作用的模拟精度并未提高(公式 6),说明阔叶红松林地土壤水分对土壤呼吸作用的影响很小,这也反映出原始森林在皆伐后土壤呼吸作用的主要影响因子(温度和水分)的地位和作用可能发生变化。

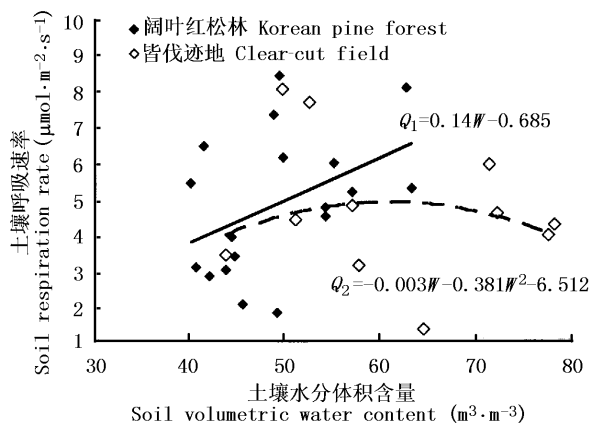


图 7 土壤呼吸作用与土壤水分关系

Fig. 7 Relationships between soil respiration and soil water content

Q_1 : 阔叶红松林地土壤呼吸 Korean pine forest soil respiration
 Q_2 : 皆伐地土壤呼吸 Clear-cut field soil respiration W : 土壤水分体积含量 Soil volumetric water content

4 结论与讨论

4.1 森林皆伐后微环境的变化

一般而言,森林被采伐后,失去了林木冠层的保护作用,土壤温度升高,持水能力降低,土壤水分含量减少,凋落物层分解加快,生物量的减少导致土壤输入有机质减少,而分解加快,土壤养分如有机碳、氮含量迅速减少;而且由于砍伐森林时的人为活动,使土壤容重不同程度地增加,土壤孔隙度减少,土壤 pH 值增加等(满秀玲等,1997;康文星和闫文德,2003;Yang *et al.*, 2003),这些变化往往体现在森林砍伐后植被尚未或者初步恢复时期。与以往研究不同的是,本文研究的阔叶红松林皆伐迹地经过 13 d 左右的自然植被恢复,少量先锋树种幼苗开始占据优势,与灌木和草本类植物共同组成较高盖度的植物群落,具备一定的构建气候微环境和改善土壤特性的能力,其微环境特征与皆伐初期存在着异同点。首先,阔叶红松林皆伐迹地植物群落冠层较矮,结构相对简单,受外界环境影响仍然较大,表现在生长季其土壤平均温度高于林地 1.9 °C(图 1)。这与 Weber(1990)、Striegl 和 Wickland(1998)、杨玉盛等(2005)等的研究结果一致;土壤温度的日变化特征也与林地存在着差异,主要表现在温度日变化幅度和极值出现时间的不同(图 3),这可能与两者植被冠层特点和土壤性状有关。其次,已有研究(张凤山,1985;Yang *et al.*, 2003)发现皆伐迹地由于植被覆盖少,接受太阳辐射较林地多,蒸发量大,导致皆伐迹地土壤水分湿度要低于林地。而本研究中的皆伐迹地样地紧邻阔叶红松林,地形上处于缓坡下部位置,这可能是位于缓坡上部的林地土壤含水量低于皆伐地的重要原因。另外,皆伐迹地经过一段时期的自然恢复,植被覆盖度增加,对土壤水分蒸发起到阻挡作用,而土壤中植被根系恢复和大量凋落物产生有利于改善土壤理化性质(表 1),使土壤持水能力增强,能更有效地保持土壤水分。

森林在采伐后生态系统遭到破坏,自然状态下需要经历相当长时期的自我修复,在这个过程中植被不断演替更新,与环境与土壤发生相互作用,形成不同演替阶段“植被-环境-土壤”系统的动态特征,这可能是本研究中皆伐迹地的土壤和微环境状况与其它研究有所区别的原因。

4.2 森林皆伐对土壤呼吸作用的影响

森林土壤呼吸作用主要源于林木根系的自养呼吸和土壤微生物的异养呼吸,森林砍伐后,根系和地

上生物量大幅减少,人为活动对凋落物和土壤结构的破坏以及土壤碳输入减少,都将影响土壤呼吸作用的强度和动态特征。现有研究表明,森林皆伐短时期(小于1年)内,由于土壤温度升高,森林砍伐残留的枯枝落叶和土壤有机质加速分解,土壤呼吸速率迅速增加(Edwards & Ross-Todd, 1983; Lytle & Cronan, 1998; 杨玉盛等, 2005)。经过一段时期(一般为1年以上),随着土壤根系死亡和有机质含量减少,土壤呼吸作用趋于减弱。Striegle 和 Wickland(1998)指出加拿大短叶松(*P. banksiana*)林皆伐迹地经过一个生长季,土壤呼吸速率减少了60%,而主要原因在于土壤根系量的减少。Weber(1990)和 Ponder(2005)也分别指出森林砍伐后2~4年皆伐迹地土壤呼吸速率显著低于未砍伐林地。也有研究表明,皆伐迹地土壤呼吸作用与未砍伐林差异不明显(Toland & Zak, 1994)或者经过一段时间恢复后较林地有所增强(Gordon *et al.*, 1987)。在本研究中皆伐迹地土壤呼吸作用低于林地约25%(5~9月),这与上述多数研究结果类似。虽然皆伐迹地植被经过一段时期恢复,与阔叶红松林地相比凋落物量相差不大,土壤有机碳、氮含量分别增加了37.2%和36.2%,但地下生物量仅为林地的42%左右(表1),由于温带森林根系呼吸占土壤呼吸总量的33%~62%(Raich & Tufekcioglu, 2000),因此土壤根系量减少是造成阔叶红松林皆伐后土壤呼吸强度减弱的重要原因。

土壤呼吸作用主要受温度和水分的影响(Lloyd & Taylor, 1994; Davidson *et al.*, 1998)。阔叶红松林皆伐后微环境变化特别是土壤水热状况改变,对土壤呼吸作用的强度和特征也有重要影响,表现在土壤呼吸作用日动态特征的变化,皆伐迹地全天土壤呼吸速率极值出现时间较阔叶红松林提前2~4h(图3),其原因在于土壤温度日变化特征不同。另外,在生长季节皆伐迹地土壤水分含量高于林地19%(图2),土壤水分过大抑制了土壤呼吸作用对温度的敏感性(图6,图7),也可能是皆伐地土壤呼吸作用强度小于林地的一个重要原因。

综上所述,森林采伐后的皆伐迹地在自然演替和恢复的过程中,植被、环境和土壤之间相互作用,共同形成了一个“植被-环境-土壤”系统,它在不同演替阶段可能表现出不同的特征,并且对土壤呼吸作用产生重要影响,森林砍伐在初期可能导致土壤呼吸作用的增加,但随着时间的推移,土壤呼吸作用将减少,从而将可能导致固碳能力的增加。因此在

准确评估森林碳收支时,皆伐迹地不同恢复时期的碳收支状况是一个不可忽略的动态因素。

参 考 文 献

- Chi ZW(迟振文), Zhang FS(张凤山), Li XY(李晓晏)(1981). The primary study on water-heat conditions of forest ecosystem on northern slope of Changbai Mountain. *Research of Forest Ecosystem* (森林生态系统研究), 2, 167-178. (in Chinese with English abstract)
- Davidson EA, Belk E, Boone RD(1998). Soil water content and temperature as independent or confounded factors controlling soil respiration in a temperate mixed hardwood forest. *Global Change Biology*, 4, 217-227.
- Edwards NT, Ross-Todd BM(1983). Soil carbon dynamics in a mixed deciduous forest following clear-cutting with and without residue removal. *Soil Science Society of America Journal*, 47, 1014-1021.
- Gordon AM, Schlentner RE, van CK(1987). Seasonal patterns of soil respiration and CO₂ evolution following harvesting in the white spruce forests of interior Alaska. *Canadian Journal of Forest Research*, 17, 304-310.
- Kang WX(康文星), Yan WD(闫文德)(2003). The effect of forest harvest on the soil thermal regime in the watershed of Chinese fir. *Scientia Silvae Sinicae* (林业科学), 39, 156-160. (in Chinese with English abstract)
- Lin LS(林丽莎), Han SJ(韩士杰), Wang YS(王跃思)(2005). The soil CO₂ efflux in broad-leaved Korean pine forests of Changbai Mountain. *Journal of Northeast Forestry University* (东北林业大学学报), 33(1), 11-13. (in Chinese with English abstract)
- Lloyd J, Taylor JA(1994). On the temperature dependence of soil respiration. *Functional Ecology*, 8, 315-323.
- Lytle DE, Cronan CS(1998). Comparative soil CO₂ evolution, litter decay, and root dynamics in clearcut and uncut spruce-fir forest. *Forest Ecology and Management*, 103, 121-128.
- Lundegårdh H(1927). Carbon dioxide evolution and crop growth. *Soil Science*, 23, 417-453.
- Olson JS, Watts JA, Allison LJ(1983). *Carbon in Live Vegetation of Major World Ecosystems. Report ORNT-5862*. Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee.
- Man XL(满秀玲), Yu FH(于凤华), Dai WG(戴伟光), Cai TJ(蔡体久)(1997). Effect of forest harvesting and afforestation on physical property of soil water. *Journal of Northeast Forestry University* (东北林业大学学报), 25(5), 57-60. (in Chinese with English abstract)
- Ponder F(2005). Effect of soil compaction and biomass removal on soil CO₂ efflux in a Missouri forest. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 36, 1301-1311.
- Raich JW, Schlesinger WH(1992). The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate. *Tellus*, 44B, 81-99.
- Raich JW, Tufekcioglu A(2000). Vegetation and soil respiration:

- correlations and controls. *Biogeochemistry*, 48, 71 – 90.
- Schlesinger WH, Andrews JA(2000). Soil respiration and the global carbon cycle. *Biogeochemistry*, 48, 7 – 20.
- Striegl RG, Wickland KP(1998). Effects of a clear-cut harvest on soil respiration in a jack pine-lichen woodland. *Canadian Journal of Forest Research*, 28, 534 – 539.
- Toland DE, Zak DR(1994). Seasonal patterns of soil respiration in intact and clear-cut northern hardwood forests. *Canadian Journal of Forest Research*, 24, 1711 – 1716.
- Weber MG(1990). Forest soil respiration after cutting and burning in immature aspen ecosystems. *Forest Ecology and Management*, 31, 1 – 14.
- Xu M, Qi Y(2001). Soil-surface CO₂ efflux and its spatial and temporal variations in a young ponderosa pine plantation in northern California. *Global Change Biology*, 7, 667 – 677.
- Xu ZB(徐振邦), Li X(李昕), Dai HC(戴洪才), Tan ZX(谭征祥), Zhang YP(章依平), Guo XF(郭杏芬), Peng YS(彭永山), Dai LM(代力民) (1985). Study on biomass of the broad-leaved Korean pine forest in Changbai Mountain. *Research of Forest Ecosystem(森林生态系统研究)*, 5, 33 – 47. (in Chinese with English abstract)
- Yang YS(杨玉盛), Chen GS(陈光水), Wang XG(王小国), Xie JS(谢锦升), Dong B(董彬), Li Z(李震), Gao R(高人) (2005). Effect of clear-cutting on soil respiration of Chinese fir plantation. *Acta Pedologica Sinica(土壤学报)*, 42, 584 – 589 (in Chinese with English abstract)
- Yang YS, Guo JF, Chen GS, He ZM, Xie JS(2003). Effects of slash burning on nutrient removal and soil fertility in Chinese fir and evergreen broadleaved forests of mid-subtropical China. *Pedosphere*, 13, 87 – 96.
- Zhang FS(张凤山) (1985). A preliminary study of soil moisture in major ecosystems of Changbai Mountain. *Research of Forest Ecosystem(森林生态系统研究)*, 5, 231 – 235 (in Chinese with English abstract)

责任编辑:欧阳 华 责任编辑:姜联合