

长白山红松针阔混交林与开垦农田 土壤呼吸作用比较

王旭 周广胜* 蒋延玲 李峰

(中国科学院植物研究所植被数量生态学重点实验室 北京 100093)

摘要 利用静态箱式法测定长白山红松 (*Pinus koraiensis*) 针阔混交林及其开垦农田的土壤呼吸作用。结果表明, 两者土壤呼吸作用的日动态和季节动态均主要受温度影响, 农田土壤呼吸作用的日变化极值出现时间较林地提前, 最大值出现在 12:00 左右, 比林地提前 6 h 左右, 最小值在凌晨 5:00 左右, 早于林地 2~3 h, 在生长季, 土壤呼吸速率与 10 cm 土壤含水量关系不显著, 而与土壤 5 cm 温度呈显著的指数关系, 农田土壤温度高于林地, 但在整个生长季(5~9月)林地土壤释放 CO_2 量($2\ 674.4\ \text{g}\cdot\text{m}^{-2}$)约为农田($1\ 285.3\ \text{g}\cdot\text{m}^{-2}$)的 2 倍, 观测期间, 农田土壤呼吸速率占林地的比例范围在 23.4%~76.3% 之间, 说明土壤呼吸作用还受不同土地利用方式下植被类型等的影响。农田和红松针阔混交林土壤呼吸作用的 Q_{10} 值分别为 3.07 和 2.92, 农田土壤呼吸作用的 Q_{10} 值估计可能偏大。森林转变为农田后, 环境、生物因子以及土壤养分含量和物理性质发生改变, 共同影响土壤呼吸作用的强度和动态特征。

关键词 红松针阔混交林 开垦农田 土壤呼吸作用 土地利用

COMPARISON OF SOIL RESPIRATION IN BROAD-LEAVED KOREAN PINE FOREST AND RECLAIMED CROPLAND IN CHANGBAI MOUNTAINS, CHINA

WANG Xu ZHOU Guang-Sheng* JIANG Yan-Ling and LI Feng

(Laboratory of Quantitative Vegetation Ecology, Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100093, China)

Abstract Background and Aims Soil respiration is a major flux in the global carbon cycle. A small change in soil respiration may result in a large increase of atmospheric CO_2 . Land conversion has the greatest impact on the terrestrial ecosystems among the components of global change, but the effects on soil respiration are inadequately understood. Our objective was to examine the response of soil respiration to conversion from forests to agricultural lands, using broad-leaved Korean pine forest and reclaimed cropland in the Changbai Mountains.

Methods We used an Infra-red Gas Analyser (IGA) linked to a 50 cm × 50 cm × 15 cm chamber without a bottom. Three 50 cm × 50 cm steel frames were inserted to a soil depth of 3–5 cm in randomly selected plots one day prior to measurement. When measuring, the chamber was put on the steel frame to make a closed container capturing CO_2 from the soil surface and piping the gas of chamber through the IGA. We repeated measurements every 15 days during the growing seasons from 2003 to 2005.

Key Results Diurnal and seasonal variations of soil respiration were mainly affected by soil temperatures. Soil respiration rate reached a maximum around noon in cropland plots, about six hours earlier than that in forest plots. Minimum rates occurred at 5:00 am in cropland plots and 7:00–8:00 am in forest plots. Diurnal variations were driven mostly by temperature. During the growing season, soil respiration had a statistically significant exponential relationship with soil temperatures at 5 cm depth, but was weakly correlated with soil volumetric water contents at 10 cm depth. Although soil temperatures in cropland plots were higher than those in forest plots, soil CO_2 efflux in forest was about twice that in cropland during the growing season (May to September). During the period of measurement, soil respiration rate of cropland ranged from 23.4% to 76.3% that of forest. Therefore, vegetation types were another factor affecting soil respiration due to the change of land-use.

收稿日期: 2006-01-26 接受日期: 2006-06-02

基金项目: 国家自然科学基金(40231018)和中国科学院知识创新工程项目(KZCX1-SW-01-12)

感谢长白山森林生态系统定位研究站及有关人员以及中国科学院植物所许振柱、王玉辉、宋健、王凤玉、贾丙瑞、周莉、曹铭昌、曾伟等对本项研究工作的支持与帮助

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

Q_{10} values of soil respiration averaged 2.92 for forest plots and 3.07 for cropland plots, which may be overestimated.

Conclusions Differences in soil respiration rates and patterns between forests and croplands result from changes in abiotic and biotic factors, including soil physicochemical properties, due to land-use change.

Key words Broad-leaved Korean pine forest, Cropland, Soil respiration, Land-use change

碳循环、水循环、食物与纤维是当前全球变化研究的3大热点问题。土壤呼吸作用不仅是碳循环的重要组成部分(Raich & Schlesinger, 1992),也是土壤有机质矿化速率和异养代谢活性的指示(Ewel *et al.*, 1987)。全球土壤呼吸作用约为 $68 \sim 100 \text{ Pg C} \cdot \text{a}^{-1}$ (Raich & Schlesinger, 1992),是化石燃料释放碳量的10倍左右。因此,土壤呼吸作用的微小变化将引起大气 CO_2 浓度的明显改变,从而将进一步加剧气候变化(Schlesinger & Andrews, 2000)。研究表明,土地利用方式的改变将加剧土壤碳释放(Dixon *et al.*, 1994)。森林开垦为农田后,1 m 深度土层内的土壤碳损失达 $25\% \sim 30\%$,而草地开垦成农田导致1 m 深度土层内的土壤碳损失也可达 $20\% \sim 30\%$ 。因此,准确评估土壤呼吸作用及其对土地利用方式的响应不仅有助于减少全球碳收支评估的不确定性(周广胜等, 2002),而且有助于减缓气候变化及其影响,确保人类生存环境的可持续发展。

国内关于土壤呼吸作用的研究已经很多,但大多集中在典型生态系统(如森林、草原、农田等)蒋高明和黄银晓, 1997;李凌浩和陈佐忠, 1998;黄承才等, 1999;易志刚等, 2003;杨玉盛等, 2005),而对土地利用方式改变对土壤呼吸作用的影响研究则较少。吴建国等(2003)对六盘山林区的不同土地利用方式下的土壤呼吸作用的时间格局进行了比较研究。本文试图通过比较研究长白山原始红松(*Pinus koraiensis*)针阔混交林与开垦农田的土壤呼吸作用,探究森林土地利用方式变化对土壤呼吸作用的影

响,为准确评估森林碳收支提供科学依据与参数。

1 研究区自然概况

实验地点选在位于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附近,地理位置为 $42^{\circ}24' \text{ N}$, $128^{\circ}6' \text{ E}$,海拔 738 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 $0.9 \sim 3.9 \text{ }^{\circ}\text{C}$,年均降水量 $632.8 \sim 782.4 \text{ mm}$ (迟振文等, 1981)。土壤为白浆化暗棕色森林土(王战等, 1980)。

红松针阔叶混交林样地位于研究站1号样地,海拔高度约 748 m,坡度 $1^{\circ} \sim 5^{\circ}$,天然林林龄 180 年左右,组成树种以红松、水曲柳(*Fraxinus mandshurica*)、糠椴(*Tilia mandshurica*)为主(占 90%),混有蒙古栎(*Quercus mongolica*)和一些槭树科树种如色木(*Acer mono*)、青楷槭(*Acer tegmentosum*)、白牛槭(*Acer mandshuricum*)等。林分为复层结构,平均株高 26 m,郁闭度 0.8,下木覆盖度 40%(徐振邦等, 1985)。

开垦农田样地紧邻红松针阔混交林区,海拔高度约 725 m,样地坡度 2° 左右,土地开垦时间 25 年左右,垦前为原始红松针阔混交林。主要农作物为玉米(*Zea mays*),生长期为 5~9 月,成熟期玉米平均株高 2.3 m,种植密度每公顷 52 500~60 000 株,作物群体结构简单,冠层单一。田间管理粗放,基本无灌溉措施,玉米秸秆收获不返田。两样地土壤理化性质见表 1。

表 1 各样地土壤理化性质
Table 1 Soil physicochemical characteristics of experimental plots

土地类型 Land type	有机碳 Organic C ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)	全氮 Total N ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)	碳氮比 C:N ratio	容重 Bulk density ($\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)	总孔隙度 Total porosity (%)	pH 值 pH value
红松针阔混交林 Korean pine forest	125.6	10.6	11.9	0.64	75.9	4.9
开垦农田 Cropland	27.9	2.9	9.6	1.10	58.4	5.7

表中数据为 0~10 cm 深度土壤测定值 Values in table measured in 0-10 cm depth under soil surface

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(大小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速率日动态,每小时测量1次,同时测量大气压、箱体内空气温度和相对湿度。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,红外分析仪测量一次箱体内空气CO₂浓度值,测量时间持续180 s。

2.2 测量时间

土壤呼吸速率测定主要在生长季进行,具体时间为2003年8~10月、2004年11月、2005年5~8月,从月初开始,每15 d左右测量1次,每次测量在8:00~10:00之间进行(这一时间土壤呼吸速率测量值与日平均值基本一致),取两次平均值代表当月土壤呼吸速率。2003年8月13日和20日测定红松阔混交林和农田土壤呼吸作用24 h日变化。

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0、5、10、15和20 cm深度土壤温度,采用水分仪(PR1/4,Delta-T Devices Ltd.CAMBRIDGE CB5 0EJ UK)测量10 cm深度土壤水分含量(上层土壤对土壤呼吸作用影响较大)。箱体內的空气温度由安装在箱体內的空气温、湿度探头(NKHT,北京鑫诺金电子科技有限公司)测量,气压表测量大气压强。

2.4 数据分析

土壤呼吸速率计算如下:

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

式中, Q 表示土壤呼吸速率($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$), 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CO₂浓度变化速率($\mu\text{mol} \cdot \text{s}^{-1}$), $T_0 = 273.15 \text{ K}$, T 为箱內的绝对温度(K), P 为当地的实际大气压(hPa), P_0 为标准大气压($1.013 \times 10^5 \text{ hPa}$)。

数据分析采用EXCEL和SPSS统计分析软件,Sigmaplot软件辅助作图。

3 结果和分析

3.1 红松阔混交林和开垦农田土壤呼吸速率日动态

红松阔混交林和开垦农田土壤呼吸速率日变化均呈单峰曲线,且白天波动幅度大于夜间(图1a)。林地全天土壤呼吸速率为 $3.92 \sim 6.51 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,峰值出现在18:00,谷值在7:00和8:00左右。农田土壤呼吸速率则表现出较林地土壤呼吸速率的波峰和波谷前移,最大值出现在12:00左右,最小值出现在5:00左右,变化范围为 $1.99 \sim 4.26 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。土壤温度的日变化也表现出类似的特征(图1b),表明土壤呼吸速率与土壤温度关系密切,其中土壤呼吸速率日变化与5 cm土壤温度的相关关系最为显著(表2),红松阔混交林和玉米农

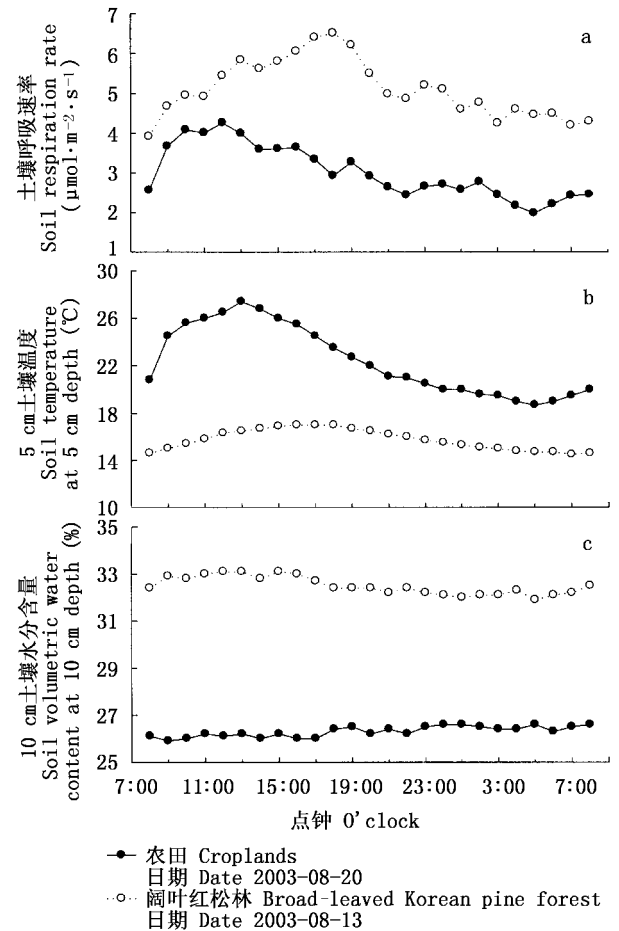


图1 红松阔混交林和农田土壤呼吸(a)、土壤温度(b)和土壤含水量日变化(c) in broad-leaved Korean pine forest plot and cropland plot

表 2 红松针阔混交林和农田土壤呼吸作用速率与土壤温度的相关系数

Table 2 Correlative coefficients between soil respiration and soil temperature in Korean pine forest plot and cropland plot

土地利用类型 Land-use type	T_a	T_0	T_5	T_{10}	T_{15}	T_{20}
红松针阔混交林 Korean pine forest	0.424	0.585	0.937*	0.819	0.525	0.230
农田(玉米) Cropland (Maize)	0.858	0.872	0.957*	0.685	0.315	0.057

T_a : 气温 Air temperature T_0 : 地表温度 Surface temperature $T_5, T_{10}, T_{15}, T_{20}$ 表示 5、10、15、20 cm 深度土壤温度 $T_5, T_{10}, T_{15}, T_{20}$ mean soil temperature at 5, 10, 15, 20 cm depths * : 显著水平 Significant level $p < 0.01$

田土壤呼吸速率与 5 cm 土壤温度的相关系数分别为 0.937 和 0.957 ($p < 0.01, n = 25$)。土壤含水量在一天内变化不大(图 1c), 因此土壤含水量对土壤呼吸速率日动态的影响可以忽略。这表明, 土壤温度可能是导致林地和农田土壤呼吸作用日变化差异的主要因素(表 2)。

3.2 红松针阔混交林和农田土壤呼吸速率季节动态

从 5~11 月, 红松针阔混交林和农田土壤呼吸速率存在明显的季节变化, 与土壤温度变化趋势一致(图 2)。长白山地区红松针阔混交林和农作物生长旺季在 7~8 月, 这一时期土壤温度较高, 土壤呼吸速率也最大, 2005 年 8 月林地和农田的土壤呼吸速率可达 8.36 和 6.34 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$; 在生长季前期(5、6 月), 土壤呼吸速率随温度升高逐渐增大, 后期(9~11 月)则呈递减趋势。在观测期间, 农田土壤呼吸速率与红松针阔混交林的比例范围在 23.4%~76.3% 之间。方差分析结果(表 3)表明, 整个生长季林地和农田的土壤呼吸速率差异显著 ($p < 0.05$) 林地土壤呼吸作用强度明显高于农田。

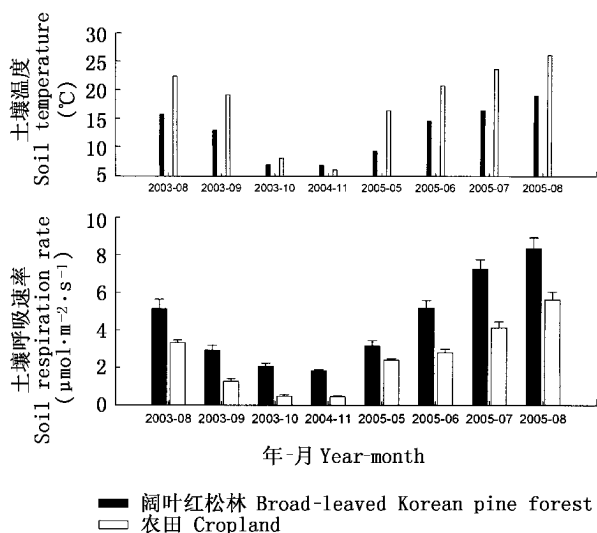


图 2 红松针阔混交林和农田土壤呼吸季节动态比较

Fig. 2 Seasonal variations of soil respiration between broad-leaved Korean pine forest plot and cropland plot

由图 2 还可以看出, 农田土壤呼吸作用的季节动态变率大于红松针阔混交林, 变异系数(CV)分别为 0.707 和 0.538, 这表明红松针阔混交林土壤呼吸季节变化比农田趋势缓和, 而两者土壤温度的季节变率相差不大, CV 分别为 0.350 和 0.338, 说明土壤温度不是影响土壤呼吸作用季节变异的唯一因素, 可能还与地下生物量及土壤养分等有关。

3.3 土壤呼吸作用与土壤温度和水分的关系

研究表明, 土壤呼吸作用和土壤温度具有密切关系, 土壤呼吸速率随温度升高而增强。红松针阔混交林和农田的土壤呼吸速率与土壤 5 cm 温度存在着指数关系 ($p < 0.05$) (图 3):

$$\text{红松针阔混交林: } Q = 0.848e^{0.1072T} \quad R^2 = 0.854 \quad n = 93 \quad (1)$$

$$\text{农田: } Q = 0.231e^{0.1120T} \quad R^2 = 0.9131 \quad n = 55 \quad (2)$$

公式(1)和(2)中, Q 表示土壤呼吸速率 ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$), T 代表土壤温度 ($^{\circ}\text{C}$)。土壤温度可以解释红松针阔混交林和农田土壤呼吸作用季节变化的 85% 和 91% 的变异, 而土壤含水量对土壤呼吸作用影响较小, 二者关系不显著(图 4)。

从图 3 还可以看出, 红松针阔混交林和农田的土壤呼吸速率与土壤温度的指数曲线并不平行, 随温度的升高, 林地与农田的土壤呼吸作用速率的差

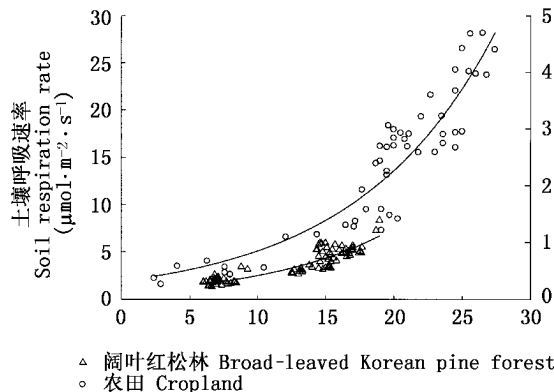


图 3 土壤呼吸速率和土壤 5 cm 温度的关系

Fig. 3 Relationship between soil respiration and soil temperature at 5 cm depth in broad-leaved Korean pine forest plot and cropland plot

表 3 红松阔混交林和农田土壤呼吸速率方差分析

Table 3 ANOVA analyses of soil respiration between broad-leaved Korea pine forest plot and cropland plot

差异源 Source of variance	平方和 Sum of squares	自由度 Degree of freedom	方差 Mean square	F 值 F value	p 值 p value
组间 Intergroup	18.090	1	18.090	5.384	0.031
组内 Intragroup	67.198	20	3.360		
总计 Total	85.288	21			

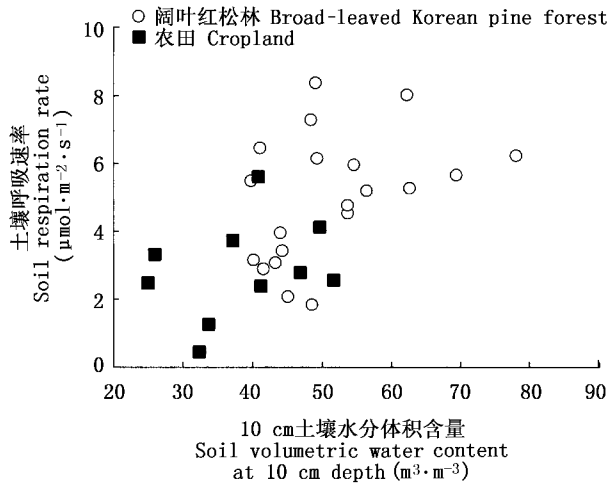


图 4 土壤呼吸与 10 cm 土壤水分体积含量的关系

Fig. 4 Relationship between soil respiration and soil water volumetric content at 10 cm depth in broad-leaved Korea pine forest plot and cropland plot

异逐渐增大, Q_{10} 值分别为 3.07 和 2.92。

3.4 生长季土壤呼吸作用量估算

利用当地气象站观测的土壤温度资料与样地同步观测资料进行线性回归分析, 得出关系式如下:

$$\text{红松阔混交林: } T_1 = 0.576 T_0 + 3.415$$

$$R^2 = 0.955 (n = 63 \quad p < 0.01) \quad (3)$$

$$\text{农田: } T_2 = 1.033 T_0 + 0.035$$

$$R^2 = 0.911 (n = 54 \quad p < 0.01) \quad (4)$$

T_1 、 T_2 、 T_0 分别表示红松阔混交林、农田和气象站 5 cm 土壤温度(°C)。利用公式(3)和(4)对气象站土壤温度资料进行转换, 再通过公式(1)和(2)模拟计算日土壤释放 CO_2 量, 累加估算出生长季(5~9月)红松阔混交林和农田土壤释放 CO_2 总量分别为 2 674.4 和 1 285.3 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$, 林地土壤呼吸作用释放 CO_2 量约为农田的 2.1 倍。

4 结论与讨论

土地利用方式发生改变将影响土壤碳库和碳通量(Lal 2005)。森林转变为农田后, 生物量减少, 土壤碳输入量降低, 土壤温湿度状况发生变化, 以及凋

落物的 C:N 比例发生变化, 土壤理化性质改变, 使土壤碳的释放速率加快, 而土壤的贮碳能力大幅下降。生态系统微环境、植被类型和土壤性质的改变, 必然将影响土壤呼吸作用的方式和强度, 具体表现如下:

土壤呼吸作用日动态变化表现在土壤呼吸作用速率极值时间提前, 由林地的 18:00 出现峰值, 提前到农田(玉米)的 12:00 左右, 提前了 6 h 左右; 最小值则出现在 5:00, 与林地 7:00、8:00 谷值相比, 推移了 2~3 h(图 1a), 在其它地区或作物类型的农田, 也有类似的土壤呼吸速率日动态特征(王立刚等, 2002; 贾金生等, 2003; 陈述悦等, 2004)。显然, 植被类型简单、结构单一的农田生态系统, 与植被类型多样、结构复杂和高大郁闭的森林生态系统相比, 更容易受到外界环境的影响, 同时, 森林冠层和复杂的结构以及凋落物层对土壤呼吸速率日动态的“时滞效应”也是农田生态系统所缺乏的。研究还发现, 农田土壤呼吸速率峰值出现在 12:00, 比森林提前 6 h 左右, 而在较低温度的谷值, 二者仅相差 2~3 h, 其原因可能与植被光合作用有关。已有研究表明, 除温度和水分外, 植物光合作用对土壤呼吸作用也有驱动作用(Rochette *et al.*, 1997; Tang *et al.*, 2005), 并且促进根系和根际微生物活动。一般农作物根际呼吸作用(包括根系及周围微生物呼吸作用)对土壤呼吸作用的贡献可达 51%~89%(Domanski *et al.*, 2001), 玉米在生长期的根际呼吸作用比例高达 93%~95%(杨兰芳和蔡祖聪, 2005), 而温暖森林根系呼吸占总土壤呼吸的比例在 33%~50%(Raich & Tufekcioglu, 2000), 其比重小于农田根系呼吸, 所以光合作用对农田土壤呼吸作用的间接影响较大。王庆成等(2001)研究发现, 玉米的群落光合作用速率最大值出现在太阳辐射较强的 12:00, 这与农田土壤呼吸的峰值出现时间接近, 可能此时温度和光合作用共同驱动土壤呼吸作用; 而在温度和光合作用较低的凌晨, 根系活动和呼吸微弱, 土壤呼吸作用主要受温度影响, 因此林地和农田出现最低值的时差

较峰值短。

土壤呼吸作用季节动态主要受温度和水分影响 (Lloyd & Taylor, 1994; Davidson *et al.*, 1998)。长白山地区是我国长江以北也是东北地区降水量最多的地区, 年均降水量 632.8 ~ 782.4 mm, 且主要集中在夏季, 6 ~ 9 月降水量占全年的 80% (迟振文等, 1981), 这段时期土壤含水量对土壤呼吸作用影响不明显 (图 4), 而土壤呼吸作用主要受土壤温度主导, 土壤呼吸和土壤温度表现显著的指数关系 (公式 (1) 和 (2)), 所以温度最高的 8 月, 土壤呼吸速率全年最大 (图 3)。在观测期间 (除 11 月), 农田土壤温度高于林地, 但林地土壤呼吸速率明显高于农田 (图 2), 利用气象站地温资料估算生长季 5 ~ 9 月林地和农田土壤释放 CO₂ 量分别为 2 674.4 和 1 285.3 g · m⁻², 林地约为农田 2 倍, 这说明土壤呼吸强度除受环境因子控制外, 可能还受到其它生物因素 (如生物量和凋落物) 和土壤理化性质等影响。

森林砍伐开垦为农田以后, 生物量和地下根系量降低, 因而输入土壤中的有机质也减少, 长时期的农田耕作造成土壤养分含量损耗和表层土壤物理性质的劣化 (表 1)。有研究 (Davidson & Ackerman, 1993; Murty *et al.*, 2002) 发现, 森林转变为农田一段时期, 有机碳损失约 30% ~ 50%, 本研究中农田土壤有机碳含量约为林地的 22% (表 1), 土壤有机碳损失量高于同类研究, 这可能与土壤取样深度较浅 (0 ~ 10 cm) 有关。农田土壤养分如碳氮贮量减少, 土壤容重增加和孔隙度减少 (表 1), 一定程度上限制了土壤呼吸作用强度。

Q₁₀ 表示一个生态系统类型土壤呼吸作用对温度的敏感性。本研究表明农田 Q₁₀ 值大于林地, 但是由于森林土壤有机碳和土壤呼吸速率基数较大, 全球变化引起的温度升高对森林土壤呼吸作用的影响远大于农田。Curiel-Yuste 等 (2004) 发现, 同一地区常绿林和落叶林 Q₁₀ 值存在差异主要是由于植被类型的季节性引起。农作物在发育期, 根际呼吸对土壤呼吸作用有重要影响, 且不同发育阶段对土壤呼吸作用的贡献也不同 (杨兰芳和蔡祖聪, 2005), 使得农田土壤呼吸作用较森林土壤呼吸作用具有更强的季节特征, 从而放大了温度对农田土壤呼吸的作用, 造成 Q₁₀ 值估计偏大。因此, 在估算土壤呼吸作用时, 不仅考虑到土地利用方式改变后, 环境变化对土壤呼吸强度产生的影响, 还应充分考虑不同植被类型下土壤呼吸作用的特征。

参 考 文 献

- Chen SY (陈述悦), Li J (李俊), Lu PL (陆佩玲), Wang YH (王迎红), Yu Q (于强) (2004). Soil respiration characteristics in winter wheat field in North China Plain. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 15, 1552 - 1560. (in Chinese with English abstract)
- 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)
- Curiel-Yuste J, Janssens IA, Carrara A, Ceulemans R (2004). Annual Q₁₀ of soil respiration reflects plant phenological patterns as well as temperature sensitivity. *Global Change Biology*, 10, 161 - 169.
- Davidson EA, Ackerman IL (1993). Changes in soil carbon inventories following cultivation of previously untilled soils. *Biogeochemistry*, 20, 161 - 193.
- 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.
- Dixon RK, Brown S, Houghton RA, Solomon AM, Trexler MC, Wisniewski J (1994). Carbon pools and flux of global forest ecosystems. *Science*, 263, 185 - 190.
- Domanski G, Kuzyakov Y, Siniakina S (2001). Carbon flows in the rhizosphere of ryegrass (*Lolium perenne*). *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 164, 381 - 387.
- Ewel KC, Cropper JWP, Gholz HL (1987). Soil CO₂ evolution in Florida slash pine plantations. I. Changes through time. *Canadian Journal of Forest Research*, 17, 325 - 329.
- Huang CC (黄承才), Ge Y (葛滢), Chang J (常杰), Lu R (卢蓉), Xu QS (徐青山) (1999). Studies on the soil respiration of three woody plant communities in the east mid-subtropical zone, China. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 19, 324 - 328. (in Chinese with English abstract)
- Jia JS (贾金生), Li J (李俊), Zhang YQ (张永强) (2003). Study on CO₂ emission from soil of typical farmland in North China Plain. *Chinese Journal of Eco-Agriculture* (中国生态农业学报), (3), 1 - 4. (in Chinese with English abstract)
- Jiang GM (蒋高明), Huang YX (黄银晓) (1997). A study on the measurement of CO₂ emission from the soil of the simulated *Quercus liaotungensis* forest sampled from Beijing mountain areas. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 17, 477 - 482. (in Chinese with English abstract)
- Lal R (2005). Forest soils and carbon sequestration. *Forest Ecology and Management*, 220, 242 - 258.
- Li LH (李凌浩), Chen ZZ (陈佐忠) (1998). Soil respiration in grassland communities in the world. *Chinese Journal of Ecology* (生态学杂志), 17(4), 45 - 51. (in Chinese with English abstract)

- Lloyd J, Taylor JA(1994). On the temperature-dependence of soil respiration. *Functional Ecology*, 8, 315 – 323.
- Murty D, Kirschbaum MF, Mcmurtrie RE, Mcgilvray H(2002). Does conversion of forest to agricultural land change soil carbon and nitrogen? A review of the literature. *Global Change Biology*, 8, 105 – 123.
- Raich JW, Schlesinger WH(1992). The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate. *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*, 44, 81 – 99.
- Raich JW, Tufekcioglu A(2000). Vegetation and soil respiration: correlations and controls. *Biogeochemistry*, 48, 71 – 90.
- Rochette P, Ellert B, Gregorich EG, Desjardins RL, Pattey E, Lessard R, Johnson BG(1997). Description of a dynamic closed chamber for measuring soil respiration and its comparison with other techniques. *Canadian Journal of Soil Science*, 77, 195 – 203.
- Schlesinger WH, Andrews JA(2000). Soil respiration and the global carbon cycle. *Biogeochemistry*, 48, 7 – 20.
- Tang J, Baldocchi DD, Xu L(2005). Tree photosynthesis modulates soil respiration on a diurnal time scale. *Global Change Biology*, 11, 1298 – 1304.
- Wang LG (王立刚), Qiu JJ (邱建军), Li WJ (李维炯) (2002). Study on the dynamics of soil respiration in the field of summer-corn in Huanghuaihai region in China. *Soils and Fertilizers (土壤肥料)*, (6), 13 – 17. (in Chinese with English abstract)
- Wang QC(王庆成), Liu KC(刘开昌), Zhang XQ(张秀清), Wang CY(王春英) (2001). Canopy photosynthesis of maize. *Journal of Maize Sciences (玉米科学)*, 9, 57 – 61. (in Chinese with English abstract)
- Wang Z(王战), Xu ZB(徐振邦), Li X(李昕), Peng YS(彭永山), Qian JJ(钱家驹), Liu ZD(刘子德), Yang Y(杨野), Wei CL(魏成录), Li YZ(李延增) (1980). The main forest types and their features of community structure in northern slope of Changbai Mountain. *Research of Forest Ecosystem (森林生态系统研究)*, 1, 25 – 42. (in Chinese with English abstract)
- Wu JG(吴建国), Zhang XQ(张小全), Xu DY(徐德应) (2003). The temporal variations of soil respiration under different land use in Liupan Mountain forest zone. *Environmental Science (环境科学)*, 24(6), 23 – 32. (in Chinese with English abstract)
- 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 LF(杨兰芳), Cai ZC(蔡祖聪) (2005). Soil respiration during growth period affected by N application rates. *Acta Pedologica Sinica (土壤学报)*, 42, 9 – 15. (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), Gao R(高人), Li Z(李震), Jin Z(金钊) (2005). Response of soil CO₂ efflux to forest conversion in subtropical zone of China. *Acta Ecologica Sinica (生态学报)*, 25, 1684 – 1690. (in Chinese with English abstract)
- Yi ZG(易志刚), Yi WM(蚁伟民), Zhou GY(周国逸), Zhou LX(周丽霞), Zhang DQ(张德强), Ding MM(丁明懋) (2003). Soil carbon effluxes of three major vegetation type in Dinghushan Biosphere Reserve. *Acta Ecologica Sinica (生态学报)*, 23, 1673 – 1678. (in Chinese with English abstract)
- Zhou GS(周广胜), Wang YH(王玉辉), Jiang YL(蒋延玲), Yang LM(杨利民) (2002). Conversion of terrestrial ecosystems and carbon cycling. *Acta Photoecologica Sinica (植物生态学报)*, 26, 250 – 254. (in Chinese with English abstract)