

## 土壤温湿度对北京大兴杨树人工林土壤呼吸的影响

谭炯锐<sup>1</sup>, 查同刚<sup>1\*</sup>, 张志强<sup>1</sup>, 孙阁<sup>2</sup>, 戴伟<sup>1</sup>, 方显瑞<sup>1</sup>, 徐枫<sup>1</sup>

1. 北京林业大学水土保持学院/教育部水土保持与荒漠化防治重点实验室, 北京 100083

2. Southern Global Change Program, USDA Forest Service, NC27606, USA

**摘要:** 采用 Li-cor-8150 土壤呼吸测定系统, 对北京大兴杨树人工林(欧美 107, *Populus × euramericana* cv. “74/76”)土壤 CO<sub>2</sub> 释放通量、土壤温度和水分进行了为期 1 年(2007)的定位连续观测, 系统研究土壤温度( $T_s$ )和土壤含水量( $w$ )对土壤呼吸速率( $R_s$ )的影响。结果表明: (1) 土壤呼吸速率日变化呈单峰曲线, 具有明显的白天高, 夜间低的规律。非生长季土壤呼吸速率较低, 自 5 月份土壤呼吸速率上升, 8 月份达到最大值。(2) 土壤温度是影响土壤呼吸速率的主要因素, 用指数模型解释全年过程中土壤温度对土壤呼吸速率变化的能力为 69%。在低温段(<0 °C)土壤呼吸速率随土壤温度升高而下降, 而在土壤温度>0 °C 条件下土壤呼吸速率与土壤温度表现为正相关。土壤呼吸速率随土壤含水量上升表现出先升高后降低的趋势, 三次方程模拟表明土壤水分的贡献率为 33%, 而当土壤含水量低于 9.5%时, 土壤水分的贡献率上升到 51%。(3) 土壤温、湿度共同作用于土壤呼吸, 在不同含水量区间土壤呼吸对土壤温度的响应程度不同: 在 4%~10%土壤含水量范围内, 土壤温度与土壤呼吸的指数模型的  $R^2$  达到 0.86, 而在土壤水分较高或较低时, 其相关系数仅为 0.6。土壤温度是影响土壤呼吸速率变化的主导因素, 当土壤含水量过低或过高时, 土壤温度的主导作用相对减弱, 土壤含水量的影响作用相对加强。土壤呼吸的温度敏感性受土壤温度区间和水分区间的综合影响, 用指数模型模拟土壤温湿度对土壤呼吸的影响不能很好的模拟土壤湿度的作用, 所以单一模型并不是描述土壤温湿度对土壤呼吸的共同影响的最优模型, 而多种模型复合的数学模型有待进一步研究。

**关键词:** 杨树人工林; 土壤呼吸; 土壤温度; 土壤水分

**中图分类号:** S718.55

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1674-5906 (2009) 05-2308-08

随着全球变化逐渐成为公众和科学界关注的热点, CO<sub>2</sub>作为一种重要的温室气体, 其通量的精确测定受到格外重视。土壤CO<sub>2</sub>通量(即土壤呼吸)是土壤碳库输出的主要途径及全球碳循环的主要方式, 主要来自土壤微生物、植物根系<sup>[1]</sup>和土壤动物<sup>[2]</sup>。每年土壤呼吸释放到大气中的CO<sub>2</sub>是化石燃料燃烧释放的10倍以上<sup>[3]</sup>。土壤呼吸即便发生较小的变化, 也会显著地影响大气中CO<sub>2</sub>浓度<sup>[4-5]</sup>, 并影响森林贮存碳的能力<sup>[6]</sup>, 进而影响全球气候的变化。森林生态系统作为陆地生态系统的主体, 不仅本身拥有巨大的碳库(占全球植被碳库的86%以上), 同时也维持着巨大的土壤碳库(约占全球土壤碳库的73%)<sup>[7]</sup>, 在维持全球碳平衡及调节全球气候等方面具有不可替代的作用, 因此森林土壤呼吸是当前陆地生态系统碳循环和全球变化研究的一个重要内容。

土壤呼吸是一种复杂的生物学过程, 不仅受到土壤温度、土壤含水量、降水、凋落物, 以及土壤 C、N 含量等非生物因子的影响, 而且受到植被类型、叶面积指数(LAI)、根系生物量等生物因子和人类活

动的综合影响<sup>[8-9]</sup>。其中土壤温度和土壤水分是影响土壤呼吸最主要的环境因子, 它们与土壤呼吸的关系在不同的研究中有很大的变异性, 尤其是土壤呼吸与土壤湿度的关系, 无法用统一的函数关系来描述<sup>[10-15]</sup>。研究表明, 土壤呼吸和温度之间具有显著的相关关系, 主要有线性关系、二次方程关系、指数关系和Arrhenius方程等<sup>[14]</sup>, 温度变化一般可以解释土壤呼吸日变化和季节性变化的大部分变异<sup>[15]</sup>。土壤湿度对土壤呼吸的影响更为复杂, 在土壤水分过低或过高时都可能抑制土壤呼吸速率, 两者的关系模型有线性的、对数的、二次的等, 但不同的研究者在各自特定条件下所得出的结果有着较大差异, 这些模型都缺乏普适性<sup>[3,6,12,14]</sup>。关于土壤温度和土壤水分对土壤呼吸速率影响的综合研究相对较少, 且多为在室内的模拟研究<sup>[13,16]</sup>。本文运用多通道定位连续土壤呼吸测定系统Licor 8150测定北京大兴杨树人工林生态系统土壤呼吸, 探索土壤温度和水分对人工杨树林土壤呼吸的影响, 以及在不同水热条件下土壤呼吸速率的变化特征。研究结果

**基金项目:** 北京市教育委员会共建项目; 教育部重点项目(105027); 国家林业局“948”项目(2005-04-01); 高等学校博士专项科研基金项目(2004 00222013); 国家“十五”科技攻关课题; 中美碳联盟 USCCC 国际合作项目

**作者简介:** 谭炯锐(1984年生), 女, 硕士研究生, 研究方向土壤生态。E-mail: tir6688@163.com

\*通讯作者, 查同刚(1972年生), 男, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为土壤生态。E-mail: zhtg73@bjfu

**收稿日期:** 2009-07-05

一方面为建立和完善土壤呼吸环境影响模型提供参考, 同时为准确评估杨树人工林的碳收支提供重要的理论支持。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究地自然概况

北京大兴碳水通量定位站位于北京市南郊大兴区榆垓镇大兴林场(N 39°31'50", E 116°15'07"), 是海河水系永定河洪积-冲积平原, 海拔 30 m, 地势平坦。该区属暖温带亚湿润气候区, 年平均气温为 11.6 °C, 极端最低气温-27.4 °C, 极端最高气温 40.6 °C; 年平均无霜期 209 d; 年平均日照总时数 2772 h, 日平均太阳辐射量为 6.7 MJ·m<sup>-2</sup>·d<sup>-1</sup>, 平均风速 2.60 m·s<sup>-1</sup>, 风向变化显著; 年平均降雨量 556 mm, 最少年降雨量为 262 mm, 最多年降雨量为 1058 mm, 其中 7、8、9 月份降水占全年降水总量的 60%~70%。多年平均水面蒸发量达 1500 mm, 最大蒸发出现在 5—6 月, 且显著高于同期降水, 同时期大气湿度也为年内最低, 表现出典型的北方严重春旱的特征。大于 10 °C 的积温为 4143 °C。该区土壤 pH 值为 8.25~8.39, 容重 1.43~1.47 g·cm<sup>-3</sup>, 100 cm 土层以内土壤总孔隙度平均为 45%, 毛管孔隙度为 32%。土质为沙壤土, 通透性好, 保肥蓄水能力差。地下水位 2004—2007 年平均深为 17.5 m。

该林区 1956 年以前为农田和果园, 1956 年由于永定河堤岸冲垮而成为冲积沙地, 1956—1962 年为废弃荒地, 1962 年以后重新造林至今, 期间人为营林管理活动包括: 灌溉, 轮伐, 再植, 土壤深翻, 施肥等措施。目前该林区为 1998、2000 和 2002 年分别营造的人工杨树林, 个别区域混交有刺槐林, 林区周边为大面积的农田用地。试验地为杨树(欧美 107, *Populus×euramericana* cv.“74/76”)人工纯林, 林地总面积 0.8 km<sup>2</sup>, 林木平均胸径为 12.2 cm, 平均树高为 13 m, 平均栽植密度(2 m×2 m)。林下植物种类较少, 优势种为灰绿藜(*Chenopodium glaucum*), 伴生有紫花苜蓿(*Medicago sativa*), 黄香草木樨(*Melilotus officinalis*), 猪毛菜(*Salsola collina*), 蒺藜(*Tribulus terrestris*)等。

### 1.2 研究方法

#### 1.2.1 四通道土壤呼吸自动连续测定系统的布设

2007 年 11 月, 在研究林分内按 Li-Cor-8150 仪器要求进行安装调试。具体为: 以中央控制室为中心, 10 m 为半径随机确定 4 个土壤呼吸测定点, 在每个测定点把 PVC 管(面积为 277.34 cm<sup>2</sup>, 长为 10 cm)永久地插入土壤表面以下 4~5 cm 深处, 这就是土壤隔离圈。将土壤呼吸室安装在土壤隔离圈上, 圈内的地表植被自土壤表层彻底剪除, 但尽量

不破坏土壤, 以减少土壤扰动及根系损伤对测量结果的影响。四个气室通过数据线和采样管连接到以 CR1000 (Campbell Scientific Inc., Utah)数据采集器控制的中央控制室。通过程序设定四个土壤呼吸室依次自动闭合采样测定, 每个呼吸室测定时间为 3 min。设定土壤呼吸的测定时间间隔为 30 min, 数据存储在 CF 卡内。每 7 d 下载数据并通过数据对仪器运行状况进行判断, 发现问题及时检修。在每个呼吸室附近同时布设土壤温度传感器和土壤水分传感器, 与土壤呼吸速率同步测定土壤温度和土壤体积含水量。

#### 1.2.2 土壤呼吸数据质量控制与插补

##### 1.2.2.1 数据质量控制

由于仪器检测及环境条件的影响, Licor8150 获得的连续监测数据存在较多的数据缺损和异常值。为了分析土壤呼吸对土壤温度和土壤水分含量的敏感性, 本文采用剔除法: (1) 降雨时段的土壤呼吸数据; (2) <0 的土壤呼吸数据; (3) 大于 6 倍标准差(6σ)的土壤呼吸数值, 分别对各通道数据进行质量控制。

##### 1.2.2.2 缺损数据插补

经以上数据质量控制后, 获得的 4 个通道数据集分别为 12 358、13 423、11 854 和 13 556 个数据(30 min 均值)。对质量控制后的数据分通道进行土壤呼吸速率和土壤温度的指数方程<sup>[17]</sup>拟合, 得到的相关系数( $r^2$ )分别为 0.78、0.71、0.84、0.74, 均达到极显著水平。以获得的拟合指数方程对相应通道土壤呼吸数据进行插补。

##### 1.2.3 数据分析

方差分析表明, 插补后 4 个通道的数据相互之间差别均不显著( $\alpha=0.10$ ), 因此采用四通道土壤呼吸的均值进行土壤呼吸时间动态分析; 采用质量控制后未插补前数据进行土壤呼吸的土壤温度和土壤水分含量敏感性分析。

土壤呼吸随时间的变化用 Microsoft Excel 2003 软件进行处理。在分析土壤温度和含水量对土壤呼吸的影响时, 使用 SPSS13.0 for Windows(SPSS Inc., Chicago, IL, USA.)来完成。

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤呼吸的动态

土壤呼吸速率的日变化均呈单峰曲线, 夜间值较低, 白天逐渐升高(图 1)。但在不同时期土壤呼吸速率的日变化有不同的特点。冬季的土壤呼吸速率日变化曲线非常平缓, 土壤呼吸的值也很低, 最高值 0.27 μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup> 出现在 16:00—17:00 之间, 最低值 0.10 μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup> 出现在 22:00—00:00 之间。土壤呼吸日变化幅度非常微小, 为 0.17

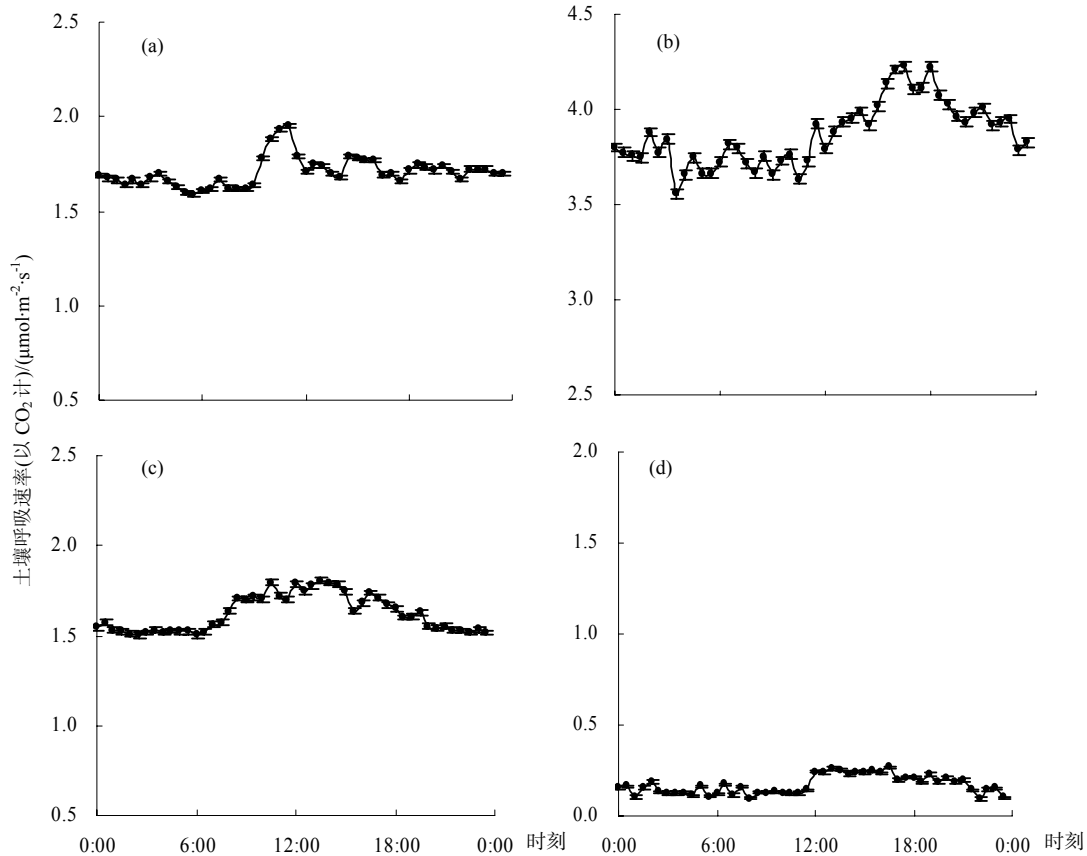


图1 不同时期土壤呼吸速率的日变化

(a) 生长季的早期(5月)、(b)中期(7月)、(c)晚期(9月)及(d)冬季(12月)。每0.5 h一次的数据是每个月

Fig.1 Diurnal course of soil respiration ( $R_s$ ) (a-d) in the polar plantation during the early (May), middle (July) and late (September) parts of the growing season and winter (December) of 2007. Half-hour values are an ensemble average of each month

$\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 。生长季早期土壤呼吸在1 d中的最大值  $1.95 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  出现在 10:00—12:00 之间, 最小值  $1.59 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  出现在 05:00—06:00 之间, 变化幅度  $0.37 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 。生长季(5月到10月)晚期土壤呼吸在1 d中的最大值  $1.80 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  出现在 10:30—13:00 之间, 最小值  $1.50 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  出现在 01:30—06:30 之间, 变化幅度  $0.31 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

在各个时期中, 生长季中期土壤呼吸的最大值出现得最晚, 在 16:00—18:00 之间, 值最高, 为  $4.23 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ , 日变化幅度也最大, 为  $0.67 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 。生长季的中期土壤呼吸最小值  $3.56 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  出现在 03:00—04:00 之间。土壤呼吸速率的日动态在生长季的早期和晚期情况相似, 最大值仅相差  $0.15 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ , 最小值相差不到  $0.1 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ , 而且出现的时间也比较相近。

## 2.2 土壤呼吸与温度的关系

不同研究地点所得到的温度与土壤呼吸间的关系各不相同, 但是温度对土壤呼吸的影响通常用指数模型  $R_s = ae^{bT_s}$  来表示。本站点土壤温度和土壤呼吸的指数模型为:  $R_s = 0.681e^{0.049T_s}$ ,  $R^2 = 0.69$  (图

2)。土壤温度能够单独解释土壤呼吸速率在全年中 69% 的变化。土壤呼吸随着土壤温度的升高呈指数增加。

$Q_{10}$  值是土壤呼吸对温度变化的敏感程度, 即温度每升高  $10^\circ\text{C}$ , 土壤呼吸增加的倍数。通过计算得到本试验点在全年的土壤呼吸  $Q_{10}$  值为 1.63。即土壤

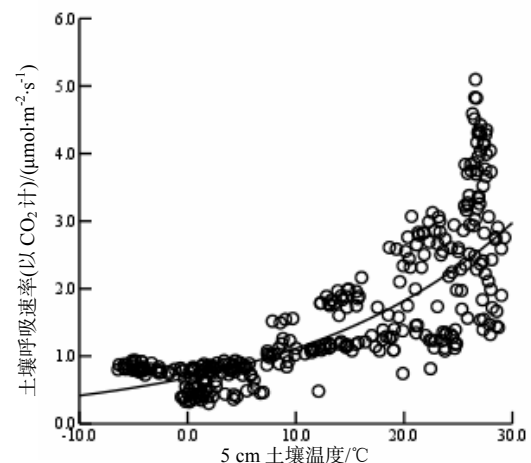


图2 全年土壤呼吸速率和土壤温度的关系

Fig.2 Relationship between soil respiration rate and soil temperature in 2007

温度每升高10℃土壤呼吸速率增大1.63倍。但是在不同的土壤温度和土壤含水量的条件下， $Q_{10}$ 值是不同的。根据本试验点的土壤温度在全年的变化将土壤温度划分为四段，分别计算 $Q_{10}$ 值（表1）。当土壤表面的温度低于零度时指数模型的参数b为负数， $Q_{10}$ 为0.55，即土壤温度每升高10℃土壤呼吸速率降低0.55。当土壤表面的温度在20~30℃范围内时 $Q_{10}$ 大约为1，即土壤温度每升高10℃土壤呼吸速率增大1.09倍。当土壤表面的温度在0~20℃的范围内时 $Q_{10}>2$ ，即在此范围内土壤温度增加10℃土壤呼吸增大2倍多。

表1 不同土壤温度条件下土壤呼吸和温度的关系

Table 1 Relationship of soil respiration rate and soil temperature in different temperature condition

温度范围/℃	$R_S = ae^{bTS}$	$R^2$	$Q_{10}$
-7~0	$R_S = 0.574e^{-0.0807TS}$	0.42**	0.55
0~10	$R_S = 0.523e^{0.0787TS}$	0.36**	2.30
10~20	$R_S = 0.936e^{0.0267TS}$	0.06	2.11
20~30	$R_S = 0.602e^{0.0567TS}$	0.10**	1.09

\*\* $P < 0.01$ ，下同。

### 2.3 土壤呼吸与土壤含水量的关系

土壤呼吸和土壤含水量在不同研究地点有不同的相互关系，有线性关系，二次方程关系，三次方程关系，指数关系，对数关系以及没有关系。全年范围内土壤呼吸和土壤含水量的关系很难用一个模型来描述。在生长季中土壤呼吸和土壤含水量的关系相对来说就比较清晰。用三次方程拟合得到： $R_S = 0.005 w^3 - 0.171 w^2 + 1.684 w - 1.973$ ， $R^2 = 0.33$ 。

整个生长季中当土壤含水量为9.49%时土壤呼吸达到最高值(图3)。如果以9.5%的土壤含水量作为分界线，当土壤含水量小于9.5%时，土壤呼吸随

着土壤含水量的增加而升高，用三次方程拟合后得到： $R_S = 4.236 w^3 - 0.633 w^2 + 0.031 w - 6.163$ ， $R^2 = 0.51$ 。当土壤含水量大于9.5%时，数据点比较分散，但是土壤呼吸不但没有随着土壤含水量的增加而升高，反而越来越低。

为了了解不同水分条件下 $Q_{10}$ 的变化，根据本试验点的土壤含水量在一年中的变化及分布密度变化将其划分为四段，分别计算 $Q_{10}$ 值（表2）。

表2 不同土壤水分条件下土壤呼吸和含水量的关系

Table 2 Soil respiration rate and soil water content in different soil water conditions

水分范围/%	$R_S = ae^{bTS}$	$R^2$	$Q_{10}$
2~4	$R_S = 0.766e^{0.0287TS}$	0.62	1.28
4~8	$R_S = 0.593e^{0.0617TS}$	0.88**	1.57
8~10	$R_S = 0.501e^{0.0797TS}$	0.87**	1.89
10~16	$R_S = 0.609e^{0.0607TS}$	0.66**	1.61

当土壤水分在2%~4%范围内时， $Q_{10}$ 最小。当土壤水分在8%~10%范围内时， $Q_{10}$ 达到最大，接近2。当土壤水分在10%~16%范围内时， $Q_{10}$ 值减小。

### 2.4 土壤温度、含水量共同对土壤呼吸的影响

土壤温度和土壤含水量对土壤呼吸的影响并不是分裂开来的，而是同时进行的。土壤呼吸速率在一年的尺度上变化趋势大体与土壤温度相似，土壤呼吸随温度的升高而增大，在生长季中期达到最高，随后温度逐渐降低，土壤呼吸也随之减小；土壤含水量并没有这样的趋势。但是在小的时间尺度上土壤含水量的每一次峰值变化都会引起土壤呼吸曲线相应的震荡，这种情况多出现于降水事件的发生过程中（图4）。土壤温度对土壤呼吸的影响可以用一个指数函数来描述，且 $R^2 = 0.69$ （图2），但是如果按土壤含水量对数据进行分割，再分别对它们进行指数拟合就可以得到不同的指数方程（表2）。当土

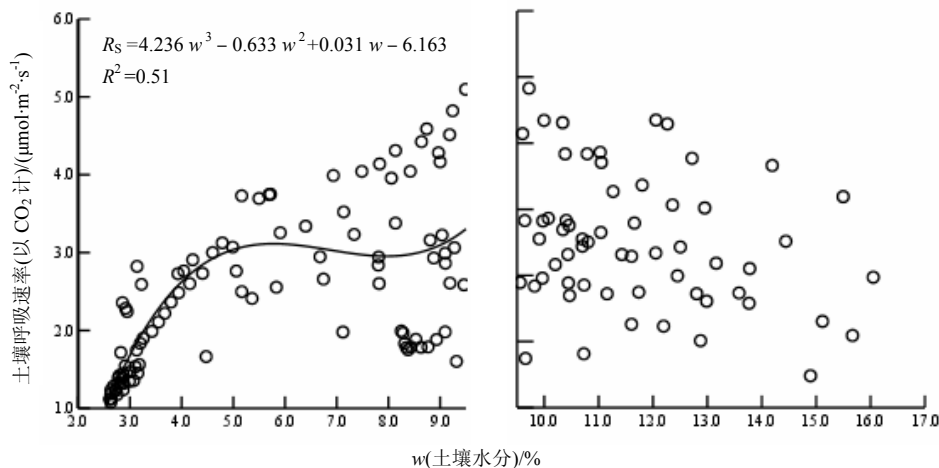


图3 生长季土壤呼吸和土壤含水量的关系

Fig.3 Relationship between soil respiration rate and soil water content in growing season

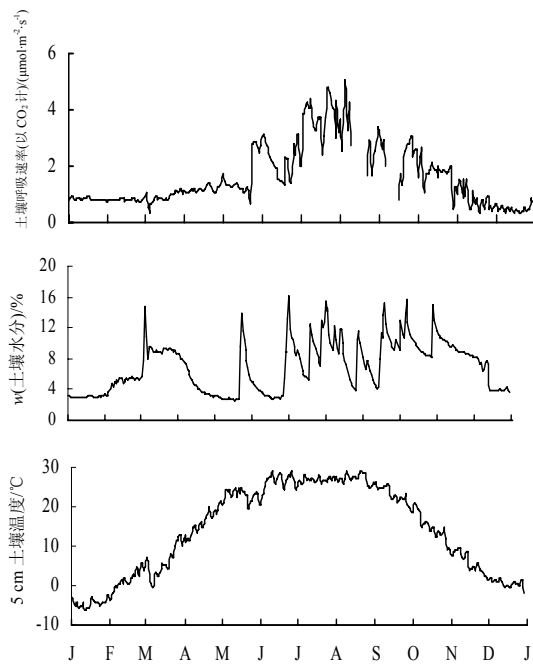


图4 土壤呼吸速率、土壤含水量及土壤温度全年动态  
Fig.4 The variations of soil respiration rate, soil water content and soil temperature in 2007

壤含水量在2%~4%和10%~16%这两个范围内时  $R^2 < 0.69$ , 当土壤含水量在4%~8%和8%~10%两个范围内时  $R^2$  较高, 都是0.87。也就是说在不同的土壤水分水平上, 土壤呼吸对土壤温度变化的响应是不同的。将土壤含水量的4%~8%和8%~10%两个范围合并, 土壤温度和土壤呼吸的指数模型为:  $R_s = 0.555 e^{0.0687T}$ , 可以解释86%的土壤呼吸速率的变化, 土壤温度是影响土壤呼吸速率变化的主导因素。土壤含水量在2%~4%和10%~16%范围内时, 指数模型分别可以解释62%和66%的土壤呼吸速率的变化, 土壤温度的主导影响因素地位相对较低, 可能是过低和过高的土壤水分在其中起到一定的作用。

用指数模型对全年的土壤温度、土壤含水量和土壤呼吸进行拟合得到本站点土壤温度和含水量共同影响土壤呼吸的模型为:  $\ln R_s = -0.51 + 0.05 T_s + 0.02 w$ ,  $R^2 = 0.70$ 。指数模型下土壤温度和含水量可以共同解释70%的土壤呼吸速率的变化。当土壤含水量在4%~10%范围内时, 指数模型为:  $\ln R_s = -0.65 + 0.07 T_s + 0.01 w$ ,  $R^2 = 0.86$ 。土壤温度、土壤含水量和土壤呼吸的指数模型可以解释86%的土壤呼吸速率的变化。当土壤含水量在10%~16%范围内时, 指数模型为:  $\ln R_s = 0.67 + 0.06 T_s - 0.10 w$ ,  $R^2 = 0.75$ 。三者的指数模型可以解释75%的土壤呼吸速率的变化。当土壤含水量在2%~4%范围内时, 指数模型为:  $\ln R_s = 0.55 + 0.03 T_s - 0.25 w$ ,  $R^2 = 0.65$ 。三者的指数模型只能解释65%的土壤呼吸速率的变化。

### 3 讨论

#### 3.1 土壤呼吸的时间变化

土壤呼吸速率日变化呈明显的昼夜规律, 夜间土壤呼吸速率维持在较低的水平, 白天较高。日变化过程为单峰曲线, 相同的土壤在不同时期的土壤呼吸速率的高低峰值出现的时间以及变化幅度不同, 与其他研究的结论相似<sup>[21-23]</sup>。人工杨树林的土壤呼吸日变化幅度在生长季的中期最大 ( $0.67 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ), 在冬季最小 ( $0.17 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )。生长季的早期和晚期的土壤呼吸速率的日变化在各方面都较为相似。土壤呼吸速率在全年中呈多峰曲线, 但总的趋势为单峰曲线(图4)。土壤呼吸速率最大值为  $5.10 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ , 最小值为  $0.30 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 。与天山云杉(*Picea schrenkiana* var. *tianschanica*(Rupr.))天然林<sup>[24]</sup>和东北温带落叶松(*Larix* spp.)人工林<sup>[25]</sup>的数据相似, 较黑河流域山区<sup>[23]</sup>牧坡草地, 加拿大北方成熟颤杨林(*P. tremuloides*)<sup>[26]</sup>和川西亚高山针叶林<sup>[27]</sup>的数据稍低。由于植被类型和空间上的异质性, 森林土壤呼吸呈现不同的季节变化。本站点土壤呼吸速率在5、6、7月份逐渐上升, 在8月份到达顶峰, 随后开始逐渐下降, 与川西亚高山林区<sup>[27]</sup>瑞典针叶林<sup>[28]</sup>、加拿大北部森林<sup>[29]</sup>和加利福尼亚北部森林<sup>[30]</sup>的研究结论相似。但Vanhala<sup>[31]</sup>在芬兰对松林的研究表明, 春季和夏季呼吸速率降低, 最小值发生在8月末, 秋季又开始升高, 但未达到春季的最大值。

#### 3.2 土壤呼吸与土壤温湿度的关系

##### 3.2.1 土壤呼吸与土壤温度的关系

不同研究地点所得到的温度与土壤呼吸速率之间的具体关系可能各不相同, 但是温度对土壤呼吸速率的影响一般都可以用一个指数模型来表示。本站点的研究表明土壤温度对土壤呼吸产生了显著的影响, 土壤呼吸速率随温度的升高而升高, 二者之间具有显著的指数函数关系, 此结论与多数室内外的研究结果相吻合<sup>[25,27]</sup>; 土壤温度对土壤呼吸速率变化的解释能力为68.9%, 低于大多数样地尺度上的研究结论<sup>[18,21,23]</sup>。Markus等<sup>[32]</sup>对德国南部森林原状土柱的室内培养与实地观测后证实单变量(土壤温度)模型的解释能力很难超过80%。

实际上土壤呼吸不可能随着温度的升高或降低而出现无限增长或降低<sup>[33]</sup>。对土壤温度和呼吸的指数拟合可以看到当土壤温度小于零时土壤呼吸速率的值明显高于拟合的曲线(图2), 土壤呼吸是随着土壤温度的升高而减小的(表1), 目前在其它的研究中, 还很少有类似的报道。一方面土壤生物活动, 特别是土壤微生物活动, 对土壤  $\text{CO}_2$  释放具有非常重要的作用, 而在土壤温度较低的时

候, 土壤微生物的活动受温度的限制<sup>[34]</sup>, 而且呼吸酶在不同的温度条件下有可能有不同的活性<sup>[33]</sup>。另一方面当土壤温度低于零, 土壤中的水分开始结冰, 由于溶质是通过土壤水而运动的, 如果土壤水冻结, 溶质的运动受到抑制, 呼吸底物和氧气的运输受到抑制从而土壤呼吸受到抑制。

### 3.2.2 土壤呼吸和土壤含水量的关系

土壤水分状况是影响森林生态系统土壤表面CO<sub>2</sub>通量的又一个重要环境因子。土壤含水量和土壤呼吸的关系可用多种函数来表示。本站点在生长季土壤含水量和呼吸的相互关系可以用一个三次方程来描述, 土壤含水量可以解释人工杨树林生长季土壤呼吸速率变化的32.8%。图3显示当土壤含水量小于9.5%时, 土壤呼吸随着湿度的增加而增加, 一开始其增加速度非常快, 之后速度降低, 三次方模型可以解释51%的土壤呼吸速率的变化; 当土壤含水量达到9%~10%时土壤呼吸会随着湿度的增加而减小, 但是这种减小的速率相对较小。有研究者进行土壤湿度和土壤呼吸的研究时有相似的发现, 原因是当含水量增加, 新陈代谢所需要的激发能减少, 土壤呼吸增加比较迅速, 如果水分过高则会导致CO<sub>2</sub>和O<sub>2</sub>传输困难, 但是CO<sub>2</sub>仍然产生, 所以其斜率较前者小<sup>[35]</sup>。

### 3.2.3 土壤温度、含水量共同对土壤呼吸的影响

由于土壤水热条件的交互作用(表2)和互逆相关, 在野外条件下难以独立控制并区分其效应。在指数模型下全年的土壤温度和含水量可以共同解释70%的土壤呼吸速率变化。当土壤含水量在4%~10%范围内时土壤温度起到相当大的主导作用, 可以单独解释86%的土壤呼吸速率的变化。当土壤含水量<4%和>10%时, 土壤温度的主导影响因素地位相对较低, 可能是较低和较高的土壤含水量对土壤呼吸的影响作用相对上升。这与Markus等<sup>[32]</sup>的研究结果相印证, 他们认为单变量(土壤温度)模型的解释能力很难超过80%。

土壤含水量在4%~10%范围时, 土壤温度和含水量可共同解释87%的土壤呼吸速率的变化。土壤含水量>10%时, 土壤温度和含水量可共同解释75%的土壤呼吸的变化。土壤含水量<4%时, 土壤温度和含水量可共同解释65%的土壤呼吸的变化。Jia等<sup>[9]</sup>在生长季的内蒙的羊草草原(*Leymus chinensis* (Trin.) Tzvel.)用同一模型计算得出的数据是87%。也有研究者使用线性模型拟合, 如黑河流域山区牧坡草地84%土壤呼吸由温度和水分共同决定, 塔里木河下游荒漠河岸胡杨(*Populus euphratic*)群落的90%~94%土壤呼吸由温度和水分共同决定, 怪柳(*Tamarix* spp.)群落的76%~93%土壤呼吸由温度和

水分共同决定<sup>[36]</sup>。但是这些研究中的温度都是气温, 而非土壤温度。指数模型下温湿度可共同解释70%的土壤呼吸变化, 而土壤温度可以单独解释69%的土壤呼吸变化, 两者相差非常小, 所以用指数模型模拟温湿度对土壤呼吸的共同作用时并不能很好地描述土壤含水量对土壤呼吸的影响作用。因此, 单一模型可能并不适合于模拟两因素的共同影响, 用两种或两种以上的模型复合模拟的效果可能会更好一些。

### 3.3 土壤呼吸的温度敏感性

有学者研究认为全球范围森林植被的 $Q_{10}$ 平均为1.5<sup>[17]</sup>, 北温带森林的 $Q_{10}$ 值在0.9~2.2之间<sup>[37]</sup>。北京人工杨树林2007年的 $Q_{10}$ 为1.63, 比全球范围森林植被的平均 $Q_{10}$ 稍高, 且处于北温带森林 $Q_{10}$ 的范围之内。

土壤温度和含水量能够影响土壤呼吸的温度敏感性。土壤温度小于零的条件下 $Q_{10} < 1$ , 土壤温度在10~20 °C范围内时 $Q_{10}$ 达到最大2.30, 之后随土壤温度的升高 $Q_{10}$ 不断的降低(表1)。在土壤温度高于零的情况下, 土壤呼吸的温度敏感性 $Q_{10}$ 与土壤温度呈负相关。这与锐齿栎林观测结果相似<sup>[18]</sup>, 也与许多研究者在不同生态系统中对土壤长期升温观测到的结果一致<sup>[38]</sup>。 $Q_{10}$ 在不同的水分条件下呈现出先增大后减小的趋势(表2), 在土壤含水量在8%~10%的条件下 $Q_{10}$ 达到最大值, 土壤含水量继续增大时 $Q_{10}$ 开始降低。这一结论与一些研究的报告相同<sup>[35, 39]</sup>。

## 4 结论

(1) 土壤呼吸速率日变化呈单峰曲线, 夜间较低, 白天较高。年尺度上, 生长季高于非生长季, 自5月份土壤呼吸速率上升, 8月份达到最大值, 土壤呼吸日变化幅度也表现出相同的规律。

(2) 土壤温度是影响土壤呼吸速率的主要因素, 用指数模型解释全年过程中土壤温度对土壤呼吸速率变化的能力为69%。按温度区间分析表明, 在低温段(<0 °C)随土壤温度升高土壤呼吸速率下降, 而在其它温度条件下土壤温度与土壤呼吸速率表现为正相关。随土壤含水量的上升, 土壤呼吸速率表现为先升高后降低的趋势, 三次方程模拟表明土壤水分的贡献率为0.33, 而当土壤含水量低于9.5%时, 土壤水分的贡献率上升到51%。因此低含水量段, 土壤水分是影响土壤呼吸的重要因子。

(3) 土壤温湿度对土壤呼吸的影响是同时进行的, 但不同含水量区间土壤呼吸对土壤温度的响应程度不同, 在4%~10%土壤含水量范围内, 土壤温度与土壤呼吸的指数模型的 $R^2$ 达到0.86, 土壤温度是影响土壤呼吸速率变化的主导因素, 当土壤含水

量过低或过高时,土壤温度的主导作用相对减弱,土壤含水量的影响作用相对加强。用指数模型模拟全年当中土壤温湿度对土壤呼吸速率的共同影响并不能很好地描述土壤含水量的作用。因此单一模型不是模拟全年土壤温湿度对土壤呼吸的共同影响的最优选择,用两种或两种以上的模型复合模拟的效果可能会更好一些。同时,土壤呼吸的温度敏感性受土壤温度区间和水分区间的综合影响。

**致谢:**对中国科学院沈阳应用生态研究所的曾德慧老师为本文所提出的宝贵建议表示衷心的感谢;对北京林业大学水土保持学院博士研究生张燕同学和本科生杨强强同学提供的帮助谨表谢忱。

### 参考文献:

- [1] MATHES K, SCHRLCFER T. Soil respiration during secondary succession: Influence of temperature and moisture[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1985, 17(22): 205-211.
- [2] RICHARDSON A M M, MORTON H P. Terrestrial amphipods(Crustacea, Amphipoda, F.Talitridae)and soil respiration[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1986, 18(22): 197-200.
- [3] RAICH J W, POTTER C S. Global patterns of carbon dioxide emissions from soils[J]. *Global Biogeochemistry Cycles*, 1995, 9(1): 23-36.
- [4] SCHLESINGER W H, ANDREWS J A. Soil respiration and the global carbon cycle[J]. *Biogeochemistry*, 2000, 48(1): 7-20.
- [5] BURTON A J, PREGITZER K S. Field measurements of root respiration indicate little to no seasonal temperature acclimation for sugar maple and red pine[J]. *Tree Physiology*, 2003, 23(4): 273-280.
- [6] DIXON R K, BROWN S, HOUGHTON R A, et al. Carbon pools and flux of global forest ecosystems[J]. *Science*, 1994, 263(5144): 185-190.
- [7] POST W M, EMANUEL W B, ZINKE P J, et al. Soil carbon pools and world life zones[J]. *Nature*, 1982, 298(5870): 156-159.
- [8] LUNDEGARDH H. Carbon dioxide evolution and crop growth[J]. *Soil Science*, 1927, 23: 417-453.
- [9] JIA B, ZHOU G, WANG Y, et al. Effects of temperature and soil water-content on soil respiration of grazed and ungrazed *Leymus chinensis* steppes, Inner Mongolia[J]. *Journal of Arid Environments*, 2006, 26(1): 60-67.
- [10] THORNLEY J H M, CANNELL M G R. Soil carbon storage response to temperature: a hypothesis[J]. *Annals of Botany*, 2001, 87(5): 591-598.
- [11] NOORMETS A, DESAI A R, COOK B D, et al. Moisture sensitivity of ecosystem respiration: Comparison of 14 forest ecosystems in the Upper Great Lakes Region, USA[J]. *Agricultural and forest meteorology*, 2008, 148(2): 216-230.
- [12] 陈全胜, 李凌浩, 韩兴国, 等. 水分对土壤呼吸的影响及机理[J]. *生态学报*, 2003, 23(5): 972-978.  
CHEN Quansheng, LI Linghao, HAN Xingguo, et al. Effects of water content on soil respiration and the mechanisms[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(5): 972-978.
- [13] 潘新丽, 林波, 刘庆. 模拟增温对川西亚高山人工林土壤有机碳含量和土壤呼吸的影响[J]. *应用生态学报*, 2008, 19(8): 1637-1643.  
PAN Xinli, LIN Bo, LIU Qing. Effects of elevated temperature on soil organic carbon and soil respiration under subalpine coniferous forest in western Sichuan Province, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(8): 1637-1643.
- [14] FANG C, MONCRIEF J B. The dependence of soil CO<sub>2</sub> efflux on temperature[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2001, 33(2): 155-165.
- [15] LIU X Z, WAN S Q, SU B, et al. Response of soil CO<sub>2</sub> efflux to water manipulation in a tall grass prairie ecosystem[J]. *Plant and Soil*, 2002, 240(2): 213-223.
- [16] LI H, YAN J, YUE X F, et al. Significance of soil temperature and moisture for soil respiration in a Chinese mountain area[J]. *Agricultural and forest meteorology*, 2008, 148(3): 490-503.
- [17] LUO Y, WAN S, HUI D, et al. Acclimatization of soil respiration to warming in a tall grass prairie[J]. *Nature*, 2001, 413(6856): 622-265.
- [18] 常建国, 刘世荣, 史作民, 等. 锐齿栎林土壤呼吸对土壤水热变化的响应[J]. *林业科学*, 2006, 42(12): 21-27.  
CHANG Jianguo, LIU Shirong, SHI Zuomin, et al. Response of soil respiration to soil temperature and moisture regimes in the natural forest of *Quercus aliena* var. *acuteserrata*[J]. *Scientia Silvae Sinica*, 2006, 42(12): 21-27.
- [19] DAVIDSON E A., VERCHOT L V, CATTANIO J H, et al. Effects of soil water content on soil respiration in forests and cattle pastures of eastern Amazonia[J]. *Biogeochemistry*, 2000, 48(11): 53-69.
- [20] REINERS W A. Carbon dioxide evolution from the floor of three Minnesota Forests[J]. *Ecology*, 1968, 49(3): 471-483.
- [21] 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[J]. *植物生态学报*, 2003, 27(2): 202-209.  
CHEN Quansheng, LI Linghao, HAN Xingguo, et al. Influence of temperature and soil moisture on soil respiration of a degraded steppe community in the Xilin River basin of Inner Mongolia[J]. *Acta Phytocologica Sinica*, 2003, 27(2): 202-209.
- [22] 崔骁勇, 陈四清, 陈佐忠. 大针茅典型草原土壤CO<sub>2</sub>排放规律的研究[J]. *应用生态学报*, 2000, 11(3): 390-394.  
CUI Xiaoyong, CHEN Siqing, CHEN Zuozhong. CO<sub>2</sub> release from typical *Stipa grandis* grassland soil[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2000, 11(3): 390-394.
- [23] 常宗强, 史作民, 冯起, 等. 黑河流域山区牧坡草地土壤呼吸的时间变化及水热因子影响[J]. *应用生态学报*, 2005, 16(9): 1630-1606.  
CHANG Zongqiang, SHI Zuomin, FENG Qi, et al. Temporal variation of soil respiration on sloping pasture of Heihe River basin and effects of temperature and soil moisture on it[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16(9): 1630-1606.
- [24] 刘华, 臧润国, 江晓珩, 等. 天山云杉天然林分土壤呼吸速率的时空变化规律分析[J]. *自然资源学报*, 2007, 22(4): 568-578.  
LIU Hua, ZANG Runguo, JIANG Xiaohang, et al. Spatial and temperature variation in soil respiration of *Picea schrenkiana* var. *tianschanica* (Rupr.) Chen et Fu natural stand in the Tianshan mountains[J]. *Journal of Natural Resources*, 2007, 22(4): 568-578.
- [25] 周海霞, 张彦东, 孙海龙, 等. 东北温带次生林与落叶松人工林的土壤呼吸[J]. *应用生态学报*, 2007, 18(12): 2668-2674.  
ZHOU Haixia, ZHANG Yandong, SUN Hailong, et al. Soil respiration in temperate secondary forest and *Larix gmelinii* plantation in Northeast China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18(12): 2668-2674.
- [26] DAVID G G, ANDREW T B, TIM J G, et al. Interpreting the dependence of soil respiration on soil temperature and water content in

- a boreal aspen stand[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2006, 140(1-4): 220-235.
- [27] 陈宝玉, 刘世荣, 葛剑平, 等. 川西亚高山针叶林土壤呼吸速率与不同土层温度的关系[J]. *应用生态学报*, 2007, 18(6): 1219-1224.  
CHEN Baoyu, LIU Shirong, GE Jianping, et al. The relationship between soil respiration and the temperature at different soil depths in subalpine coniferous forest of western Sichuan Province[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18(6): 1219-1224.
- [28] WIDEN B. Seasonal variation in forest-floor CO<sub>2</sub> exchange in a Swedish coniferous forest[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2002, 111(2): 283-297.
- [29] RAYMENT M B, JARVIS P G. Temporal and spatial variation of soil CO<sub>2</sub> efflux in a Canadian boreal forest[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2000, 32(1): 35-45.
- [30] XU M, QI Y. Soil-surface CO<sub>2</sub> efflux and its spatial and temporal variations in a young ponderosa pine plantation in northern California[J]. *Global Change Biology*, 2001, 7(6): 667-677.
- [31] VANHALA P. Seasonal variation in the soil respiration rate in coniferous forest soils[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2002, 34(9): 1375-1379.
- [32] MARKUS R, JENSARNE S, ANDEW C A, et al. Does the temperature sensitivity of decomposition of soil organic matter depend upon water content, soil horizon, or incubation time?[J]. *Global Change Biology*, 2005, 11(3): 1754-1767.
- [33] LUO Y Q, ZHOU X H. *Soil Respiration and the Environment*[M]. San Diego: Elsevier Inc, 2006: 72.
- [34] 储金翔, 张小泉. 川西亚高山林区三种土地利用方式下土壤呼吸动态及组分区分[J]. *生态学报*, 2006, 26(3): 1693-1700.
- CHU Jinxiang, ZHANG Xiaoquan. Dynamic and fractionalization of soil respiration under three different land use covers in the subalpine region of western Sichuan Province, China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(3): 1693-1700.
- [35] 杨金艳, 王传宽. 土壤水热条件对东北森林土壤表面CO<sub>2</sub>通量的影响[J]. *植物生态学报*, 2006, 30(2): 286-294.  
YANG Jinyan, WANG Chuankuan. Effects of soil temperature and moisture on soil surface CO<sub>2</sub> flux of forests in northeastern China[J]. *Acta Phytocologica Sinica*, 2006, 30(2): 286-294.
- [36] 黄湘, 李卫红, 陈亚宁, 等. 塔里木河下游荒漠河岸林群落土壤呼吸及其影响因素[J]. *生态学报*, 2007, 27(5): 1951-1960.  
HUANG Xiang, LI Weihong, CHEN Yanning, et al. Soil respiration of desert riparian forests in the lower reaches of Tarim River as affected by air temperature at 10 cm above the ground surface and soil water[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(5): 1951-1960.
- [37] GULLEDGE J, SCHIMEL J P. Controls on soil carbon dioxide and methane fluxes in a variety of taiga forest stands in interior Alaska[J]. *Ecosystems*, 2000, 3(3): 269-282.
- [38] ZHOU X H, WAN S Q, LUO Y Q. Source components and interannual variability of soil CO<sub>2</sub> efflux under experimental warming and clipping in a grassland ecosystem[J]. *Global Change Biology*, 2007, 13(4): 761-755.
- [39] 李玉强, 赵哈林, 赵学勇, 等. 土壤温度和水分对不同类型沙丘土壤呼吸的影响[J]. *干旱区资源和环境*, 2006, 20(3): 154-158.  
LI Yuqiang, ZHAO Halin, ZHAO Xueyong, et al. Effects of soil temperature and moisture on soil respiration in different sand dune types[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2006, 20(3): 154-158.

## Effects of soil temperature and moisture on soil respiration in a poplar plantation in Daxing district, Beijing

TAN Jiongrui<sup>1</sup>, ZHA Tonggang<sup>1</sup>, ZHANG Zhiqiang<sup>1</sup>, SUN Ge<sup>2</sup>, DAI Wei<sup>1</sup>, FANG Xianrui<sup>1</sup>, XU Feng<sup>1</sup>

1. Key Laboratory of Soil and Water Conservation and desertification Combating, Ministry of Education/Water and Soil Conservation College at Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 2. Southern Global Change Program, USDA Forest Service, NC27606, USA

**Abstract:** Continuous half-hourly measurements of soil CO<sub>2</sub> efflux with Li-Cor-8150 in a poplar plantation in Daxing District of Beijing between January and December 2007 were made to investigate the seasonal and diurnal dependence of soil respiration ( $R_s$ ) on soil temperature ( $T_s$ ) and water content ( $w$ ). The results showed: (1) The diurnal variation of  $R_s$  was described as a single-peak curve, high during daytime and low during night.  $R_s$  was low during the non-growing season, but it increased from May and reached the maximum in August. (2)  $T_s$  was the main factor that influences  $R_s$ . An exponential model explained 69% of the annual  $R_s$  variation. In a low temperature environment ( $<0\text{ }^\circ\text{C}$ ),  $R_s$  decreased with the increase in  $T_s$ . There was a positive correlation between  $R_s$  and  $T_s$  when  $T_s > 0\text{ }^\circ\text{C}$ .  $R_s$  increased at first and then decreased with the increase of  $w$ . A cubic model indicated that  $w$  contributed 33% of the variation of  $R_s$ . The contribution increased to 51% when  $w$  was lower than 9.5%.  $T_s$  was also an important factor to  $R_s$ . (3) The influences of  $w$  and  $T_s$  on  $R_s$  acted together.  $R_s$  responded to  $T_s$  differently under different  $w$  conditions. The  $R^2$  of the exponential model between  $R_s$  and  $T_s$  reached 0.86 with  $w$  was the range of 4%-10%; when  $w$  was too high or too low, the influence of  $T_s$  was relatively weakened, while the effect of  $w$  was relatively strengthened. We conclude that the sensitivity of  $R_s$  was affected by  $w$  and  $T_s$  in a non-linear fashion and could not be described by a exponential function. This study suggest multiple functions are needed to describe the complex relationship between  $R_s$  and environmental factors.

**Key words:** poplar plantation; soil respiration; soil temperature; soil water content