

DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2014.0960

涂志华, 庞卓, 赵阳, 等. 2015. 北京西山侧柏人工林土壤呼吸组分及其影响因素[J]. 环境科学学报, 35(9): 2948-2956

Tu Z H, Pang Z, Zhao Y, et al. 2015. Soil respiration components and their controlling factors in a *Platycladus orientalis* plantation in west mountain area of Beijing[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 35(9): 2948-2956

## 北京西山侧柏人工林土壤呼吸组分及其影响因素

涂志华<sup>1</sup>, 庞卓<sup>2</sup>, 赵阳<sup>3</sup>, 郑力文<sup>1</sup>, 余新晓<sup>1,\*</sup>, 陈丽华<sup>1</sup>

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

2. 北京市农林科学院北京草业与环境研究发展中心, 北京 100097

3. 中国水利水电科学研究院, 流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100048

收稿日期: 2014-09-03

修回日期: 2014-10-13

录用日期: 2014-10-13

**摘要:** 采用挖壕法, 利用 LI-8100 土壤 CO<sub>2</sub> 通量自动观测系统, 确定了北京西山侧柏人工林土壤呼吸中异养呼吸和根系自养呼吸的贡献率及其影响因素, 分析了土壤呼吸的日、月际时间尺度的变异特征, 并利用经验模型分析了土壤温度、土壤体积含水量对土壤呼吸的影响。结果表明: ①土壤呼吸速率、异养呼吸速率的昼夜变化呈现单峰变化趋势, 峰值出现在 14:00—15:00; 月际变化也呈单峰变化趋势, 峰值出现在 7—8 月; 观测期内土壤呼吸速率日均值变化范围在 0.09~12.16 μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>, 异养呼吸速率日均值变化范围在 0.02~10.86 μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>, 年均贡献率为 69.59%; 自养呼吸速率日均值为 0.01~6.79 μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>, 年均贡献率为 30.41%。②土壤温度的日、月际变化均呈单峰形曲线变化而土壤体积含水量变化规律不明显; 整个观测期间土壤呼吸速率的温度敏感系数 Q<sub>10</sub> 为 2.91, 异养呼吸速率的 Q<sub>10</sub> 为 3.52。③模型研究表明, 相对于土壤温度、土壤体积含水量单因素模型, 土壤温度与土壤体积含水量的复合模型对土壤呼吸速率变化解释能力为 86.8%, 对异养呼吸速率的解释能力为 74.4%。该研究为森林生态系统碳收支估测及碳循环提供数据依据。

**关键词:** 侧柏人工林; 异养呼吸; 自养呼吸; Q<sub>10</sub> 值; 土壤温度; 土壤体积含水量

文章编号: 0253-2468(2015)09-2948-09

中图分类号: S154.1, X53

文献标识码: A

## Soil respiration components and their controlling factors in a *Platycladus orientalis* plantation in west mountain area of Beijing

TU Zhihua<sup>1</sup>, PANG Zhuo<sup>2</sup>, ZHAO Yang<sup>3</sup>, ZHENG Liwen<sup>1</sup>, YU Xinxiao<sup>1,\*</sup>, CHEN Lihua<sup>1</sup>

1. Key Laboratory of Soil and Water Conservation and Combating Desertification, Ministry of Education; College of Water and Soil Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083

2. Beijing Research and Development Center for Grass and Environment, Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Beijing 100097

3. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100048

Received 3 September 2014;

received in revised form 13 October 2014;

accepted 13 October 2014

**Abstract:** Trenching plots were used to dynamically monitor soil respiration and to determine the factors controlling heterotrophic and autotrophic respiration based on LI-8100 soil respiration carbon dioxide flux measurement system in a *Platycladus orientalis* plantation in Jiufeng National Forest Park, Beijing. Soil temperature and volumetric water content at a depth of 5 cm were also measured. We demonstrated the diurnal and monthly variations of soil respiration, and analyzed the effects of soil temperature and volumetric water content on soil respiration with simple and binary mixed models. The results showed that: ① The diurnal dynamics of soil respiration and heterotrophic respiration had single peaks, with the maxima at 14:00 to 15:00. Moreover, average monthly soil respiration and heterotrophic respiration also had single peaks, with the maxima in July to August. During the measurement periods, soil respiration, heterotrophic respiration, and autotrophic respiration rates ranged from 0.09 to 12.16, 0.02 to 10.86, and 0.01 to 6.79 μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>, respectively. Additionally, the annual mean contributions of heterotrophic and autotrophic respiration to total soil respiration were 69.59% and 30.41%, respectively. ② The diurnal and monthly variations of soil temperature also showed a single peak, but the soil volumetric water content did not. Moreover, the Q<sub>10</sub> values were 2.91 and 3.52 for soil respiration and heterotrophic respiration, respectively. ③ Soil respiration and heterotrophic respiration were

**基金项目:** 国家自然科学基金(No.41430747, 41171028); 国家林业公益性行业科研专项(No.20130430104)

**Supported by** the National Natural Science Foundation of China (No.41430747, 41171028) and the Special Research Program for Forestry Welfare of China (No.20130430104)

**作者简介:** 涂志华(1986—), 男, E-mail: fjsmtzh@126.com; \* 通讯作者(责任作者), E-mail: yuxinxiao125@126.com

**Biography:** TU Zhihua (1986—), male, E-mail: fjsmtzh@126.com; \* **Corresponding author**, E-mail: yuxinxiao125@126.com

significantly correlated with soil temperature but not with volumetric water content. Comparing with the simple model, the goodness of the binary mixed model indicated that the combined effects of soil temperature and volumetric water content on soil respiration and heterotrophic respiration were 86.8%, and 74.4%, respectively. These results suggested that the data basis can contribute to our understanding of the carbon budget estimates and carbon cycle of forest ecosystems.

**Keywords:** *Platycladus orientalis* plantation; heterotrophic respiration; autotrophic respiration;  $Q_{10}$  value; soil temperature; soil volumetric water content

## 1 引言 (Introduction)

土壤呼吸是陆地生态系统与大气之间碳交换的第二大通量组分 (Raich and Schlesinger, 1992; Davidson *et al.*, 2006a), 是土壤碳的主要输出途径, 占总土壤碳输出的 30% ~ 80% (Davidson *et al.*, 2006b), 是陆地生态系统碳循环和碳平衡的重要环节. 研究表明, 在全球尺度上土壤呼吸排放  $\text{CO}_2$  总量约 79.3 ~ 81.8 Pg(C) (Raich *et al.*, 2002), 每年大气中 10% 左右的  $\text{CO}_2$  输入来源于土壤呼吸 (Thierron *et al.*, 1996). 土壤呼吸分为土壤微生物和动物的异养呼吸以及根系的自养呼吸 2 个组分. 量化不同组分方法通常采用成分综合法、根排除法、生物量外推法和同位素标记法等 (Luo and Zhou, 2006). 由于野外观测条件的复杂性, 不同的观测方法各有优缺点 (程慎玉和张宪洲, 2003). 针对林地不同土壤呼吸组分的分离方法, 根排除法被认为是研究林地土壤呼吸组分的有效方法之一 (Bowden *et al.*, 1993; Hanson *et al.*, 2000; Sulzman *et al.*, 2005), 在实际过程中得到广泛的应用. 由于研究区域和研究对象不同, 各研究结果不尽相同. Hanson 等 (2000) 对全球范围的相关研究结果进行分析, 发现根系呼吸占土壤总呼吸的 10% ~ 90%, 平均而言, 林地根系呼吸占土壤总呼吸的 45.8%. 由于土壤微生物呼吸、植被根系呼吸具有不同的生物学和生态学过程, 对环境变化的响应和适应性存在较大的差异 (Thierron *et al.*, 1996; Luo and Zhou, 2006), 尤其是土壤温度以及土壤水分等影响因子的响应. 因而精确区分土壤呼吸各组分并深入研究各组分呼吸的机理及其对环境变化的响应较为关键, 已经在世界范围内形成热点 (唐罗忠, 2008).

侧柏 (*Platycladus orientalis*), 原产于我国西北部, 广泛分布于亚洲大陆, 具有耐干旱瘠薄、适应性强、萌芽能力强等特点, 是北方开展京津风沙源治理、退耕还林、天然林保护等重点林业生态工程建设树种之一 (高润清, 2005; 李会杰等, 2014). 目前, 我国学者对侧柏人工林生态系统土壤呼吸已有研究, 主要集中在不同时间尺度上土壤呼吸动态变

化及其影响因子 (王鹤松, 2007; 王鹤松等, 2008; 2009; 李红生等, 2008; 李会杰等, 2014), 但对于侧柏人工林中土壤呼吸不同组分的研究鲜见报道, 尤其是通过不同的经验模型对土壤呼吸各组分与环境因子相互影响的研究较少. 因而, 本研究针对北京山区侧柏典型林分自然状态对照处理和挖壕法处理的土壤呼吸、土壤温度以及土壤含水量进行了长期连续性观测, 分析了土壤呼吸各组分的典型日变化特性、月际变化特性和全年观测动态变化特性及其与土壤温度、土壤含水量的关系, 以期确定该区域侧柏人工林土壤自养呼吸以及异养呼吸的贡献率及其对土壤环境影响因子的响应, 为进一步研究侧柏人工林的碳循环规律提供科学依据.

## 2 材料与方法 (Materials and methods)

### 2.1 研究区概况与样地描述

研究区位于鹫峰国家森林公园内的北京林业大学教学试验林场 (40°03'N, 116°05'E), 该区地处北京市西北郊太行山北部, 燕山东端, 距北京市西北约 30 km, 气候类型为具有山地特征的暖温带半湿润半干旱大陆性季风气候, 年平均气温为 11.6 °C, 最高气温达 41.6 °C, 最低气温为 -19.6 °C, 年平均降水量为 630 mm, 6—9 月降雨总量占全年降雨量的 80% 以上, 多年平均水面蒸发量为 1800 ~ 2000 mm, 土壤类型为褐土, 平均土层厚度 55 cm, 其透气性较差. 植被类型为温带落叶林, 主要乔木有: 侧柏 (*P. orientalis*)、油松 (*Pinus tabulaeformis*)、刺槐 (*Robinia pseudoacacia*)、栓皮栎 (*Quercus variabilis*) 等.

监测样地布设依托国家林业局首都圈森林生态系统定位观测研究站. 以该研究区典型的人工侧柏中龄林为研究对象, 林分密度为 1531 株 ·  $\text{hm}^{-2}$ , 平均年龄 53 a, 郁闭度 0.7, 林分平均树高为 10.7 m, 胸径为 20.9 cm. 林下灌木层盖度 40%, 主要有: 荆条 (*Vitex negundo* var. *heterophylla*)、孩儿拳头 (*Grewia biloba* var. *parviflora*)、小叶鼠李 (*Rhamnus parvifolia*)、胡枝子 (*Lespedeza bicolor*) 等. 草本层盖度 20%, 主要有: 白毛羊胡子草 (*Eriophorum*

*vaginatum*)、鸭跖草 (*Commelina communis*)、黄背草 (*Themeda japonica*) 等. 样地基本概况具体见表 1.

表 1 样地概况

Table 1 Summary information of experimental forest plots

林分	经纬度	海拔/m	优势树种	土壤厚度/cm	主要林下灌木	凋落物平均厚度/cm	坡度/(°)	坡向	标准地规格/(m×m)
侧柏	40°03'N 116°05'E	145	侧柏、油松、 栓皮栎、 刺槐	52	荆条、 孩儿拳头、 小叶鼠李等	4.2±0.9	15	南偏东 68°	40×40

## 2.2 试验方法

在样地内分别设置保留根系 (对照) 和切断根系 (挖壕法) 2 种处理, 每处理布设 3 个重复. 2008 年 4 月, 布设测定保留根系土壤呼吸的监测点. 2009 年 11 月, 在样地内选取 3 个 1 m×1 m 小样方, 在样方四周往外延伸 0.2 m 宽处挖壕沟, 壕沟挖至无根系土层, 土壤按不同土壤层放置. 切断根系后, 2009 年 11 月—2010 年 10 月期间, 壕沟保持不回填状态, 期间定期剪去从周围长出的根系, 于 2010 年 10 月在壕沟内布设 4 层尼龙纱窗网, 然后按原来不同土壤层回填土壤. 整个观测期间定期除去壕沟小样方内所有活体植物, 同时在距离壕沟 2.5 m 范围内用铁网拦住, 以保证测定期间不被扰动.

采用 LI-8100 自动土壤 CO<sub>2</sub> 通量观测系统 (LI-COR, Lincoln, NE, USA) 测定土壤呼吸速率. 测量前将定制的塑料环 (高 11.4 cm、内径 21.3 cm) 布设在保留根系 (自然对照) 和挖壕沟小样方内, 在不扰动原状土壤的前提下, 将塑料环轻轻砸入林地表层, 深度大约为 8 cm, 保持塑料环横截面与竖轴垂直. 监测系统周围 2.5 m 范围内用网拦住, 以保证测定期间不被扰动. 测量时间设定为 2 min, 测定频率为 1 h, 全天 24 h 不间断监测. 同时, 在两监测点布设 (深度为 5 cm 处) 测定土壤温度和土壤体积分含水量的探针 (型号: 5TE; Decagon Devices, Inc., Pullman, Washington), 测量频率为 1 h, 全天 24 h 不间断监测. 同时, 在样地内布设倾斜式雨量计 (型号: TE525; Dynamax Inc., Houston, Texas), 记录林内降雨.

本文用挖壕沟处理的土壤呼吸值来表征异养呼吸速率, 用对照土壤呼吸速率与异养呼吸速率的差值来估计自养呼吸速率 (汪金松等, 2013).

## 2.3 数据分析方法

本文选取 2010 年 10 月 25 日—2011 年 10 月 25 日期间观测的数据进行整理, 剔除异常值以及因仪器故障造成的无效值, 其中日变化以 00:00—

23:00 之间的数值进行分析, 月际变化特性以每月均值进行分析, 观测期间变化以每日均值进行分析.

关于典型日确定方法: 土壤呼吸日变化受天气状况的影响很大, 阴天或晴天、有无降水、风速等, 都能显著地改变土壤呼吸日变化特性. 因此, 典型日的选择应遵循如下原则: (1) 晴朗无云, 测定前 3 d 无降雨; (2) 林内全天平均风速不超过 0.5 m·s<sup>-1</sup>; 基于以上原则, 本研究选择 2011 年 1 月 14 日 (冬)、2011 年 4 月 4 日 (春)、2011 年 7 月 29 日 (夏) 和 2011 年 10 月 1 日 (秋) 4 个典型日进行日动态变化分析.

土壤呼吸与土壤温度、土壤体积分含水量之间的关系选用常见的经验模型: 土壤呼吸与土壤温度之间的关系采用指数模型来拟合; 用线性和二次曲线模型拟合土壤呼吸与土壤含水量的关系; 用线性或非线性模型来拟合土壤温度、土壤体积分含水量对土壤呼吸共同影响.

$$R_s = ae^{bT}, \quad Q_{10} = e^{10b} \quad (1)$$

$$R_s = a + bVWC, \quad R_s = a + bVWC + cVWC^2 \quad (2)$$

$$R_s = a + bTVWC, \quad R_s = a + bT + cVWC, \\ R_s = aT^bVWC^c, \quad R_s = ae^{bT}VWC^c \quad (3)$$

式中,  $R_s$  为平均土壤呼吸速率 ( $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ),  $T$  为平均土壤温度 (°C),  $VWC$  为平均土壤体积分含水量 ( $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ );  $a$ 、 $b$ 、 $c$  分别为拟合参数;  $Q_{10}$  值为土壤呼吸的敏感系数, 是指土壤温度升高 10 °C, 土壤呼吸速率的变化熵.

文中数据统计分析利用 SPSS 17.0 软件进行, 采用 Origin 7.5 软件作图.

## 3 结果与分析 (Results and analysis)

### 3.1 各组分土壤呼吸的昼夜变化

2011 年 1 月 14 日, 土壤呼吸速率、异养呼吸速率日变化呈单峰型变化, 最大值均出现在 15:00. 土壤呼吸日均值为  $0.12 \pm 0.11 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ , 最小值为  $0.01 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ , 出现在 1:00—2:00. 而异养呼

吸速率日均值为  $0.11 \pm 0.05 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ , 最小值为  $0.01 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ , 出现在 0:00 (图 1a1).

2011 年 4 月 4 日, 土壤呼吸速率、异养呼吸速率日变化呈现单峰模式变化, 最大值均出现在 14:00, 其值分别为  $0.76$ 、 $0.42 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ . 土壤呼吸日均值为  $0.56 \pm 0.06 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ , 最小值为  $0.46 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ , 出现在凌晨 4:00. 而异养呼吸速率日均值为  $0.32 \pm 0.05 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ , 最小值为  $0.22 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ , 出现在凌晨 6:00 (图 1b1).

2011 年 7 月 29 日, 土壤呼吸速率、异养呼吸速率日变化均呈现单峰变化趋势, 最大值分别出现在 15:00、14:00, 其值分别为  $17.59$ 、 $11.67 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ . 土壤呼吸最小值为  $9.20 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ , 出现在凌晨 0:00, 日均值为  $11.47 \pm 1.91 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ . 而异养呼吸速率最小值为  $9.78 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ , 出现在凌晨 2:00, 日均值为  $10.65 \pm 0.59 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  (图 1c1).

2011 年 10 月 1 日, 土壤呼吸速率、异养呼吸速

率日变化均呈现单峰变化趋势, 最大值均出现在 14:00, 其值分别为  $1.29$ 、 $0.98 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ . 土壤呼吸最小值为  $0.97 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ , 出现在凌晨 5:00, 日均值为  $1.09 \pm 0.09 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ . 而异养呼吸速率最小值为  $0.66 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ , 出现在凌晨 6:00, 日均值为  $0.77 \pm 0.08 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  (图 1d1).

对照与挖壕法处理土壤温度日变化呈现单峰形曲线变化规律(二者差异不显著), 温度的峰值与土壤呼吸速率的最大值出现的时间基本一致(图 1a2、b2、c2、d2). 土壤含水量的日变化幅度不大, 其中对照处理的土壤含水量显著大于挖壕法处理的土壤含水量(图 1a3、b3、c3、d3).

以上分析可得, 土壤呼吸各组分的峰值出现在 14:00—15:00, 而谷值出现在凌晨 0:00—1:00、4:00—6:00; 在 8:00—10:00 对土壤呼吸速率观测可以代表日呼吸速率.

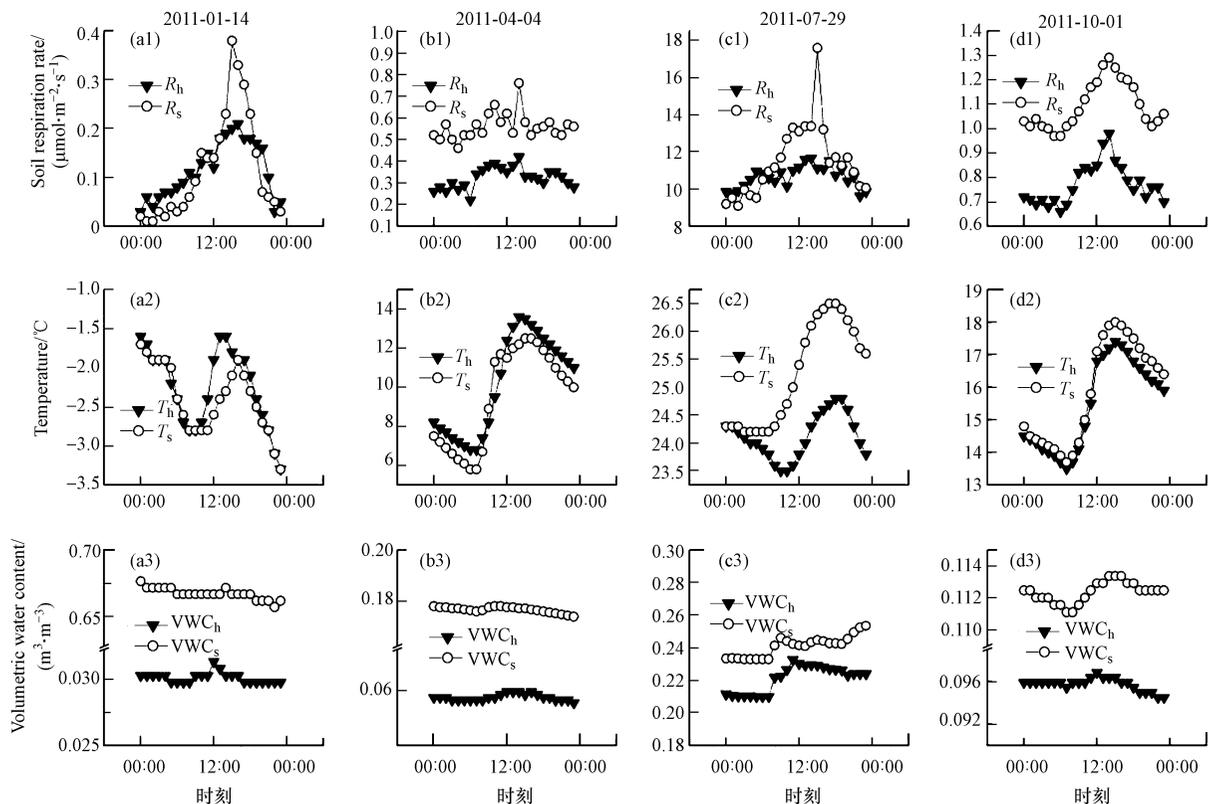


图 1 土壤呼吸速率、土壤温度及土壤体积分含水量的日变化(注:  $R_s$ 、 $R_h$ ;  $T_s$ 、 $T_h$ ;  $VWC_s$ 、 $VWC_h$  分别为土壤呼吸速率、异养呼吸速率及其相对应的土壤温度和体积分含水量)

Fig.1 Diurnal change of soil respiration rate, temperature, and volumetric water content

### 3.2 各组分土壤呼吸的月际变化

侧柏人工林土壤呼吸速率、异养呼吸速率随着

土壤温度的升高而增大, 其月际动态变化特征呈现明显的季节变化, 其中夏季最高, 春、冬季最低. 试验

期间土壤呼吸速率的月均值最大值出现在7月,为 $(8.12 \pm 2.32) \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ,次之为8月 $(5.72 \pm 2.43) \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ;最小值为 $(0.15 \pm 0.05) \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ,出现在1月份.异养呼吸速率月均值最大值亦出现在7月,为 $(6.79 \pm 2.56) \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ,次之为8月 $(4.02 \pm 2.14) \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ;最小值为 $(0.08 \pm 0.01) \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ,出现在1月份(图2a).异养呼吸的月贡献率变化范围在37.34%~81.73%,其中7、8、9月份的异养呼吸贡献率较大.侧柏人工林自养呼吸速率月动态变化亦出现明显的季节变化(图3),其变化范围在 $(0.08 \pm 0.05) \sim (1.70 \pm 1.47) \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ,7、8、9月份的自养呼吸贡献率较小分别为:18.27%、28.35%、24.87%,2月份的异养呼吸贡献率最大为62.66%.

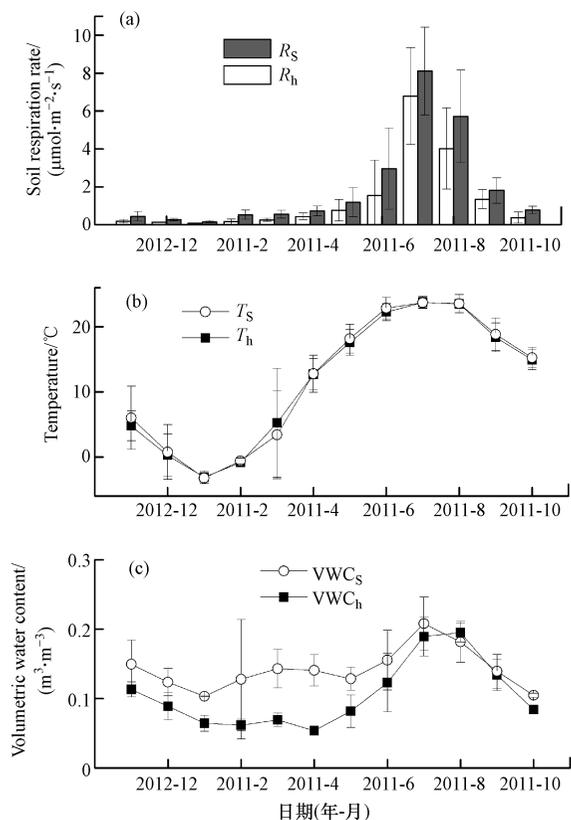


图2 土壤呼吸速率、土壤温度和土壤体积含水量的月际变化 ( $R_s$ 、 $R_h$ ;  $T_s$ 、 $T_h$ ;  $VWC_s$ 、 $VWC_h$ 分别为土壤呼吸速率、异养呼吸速率及其相对应的土壤温度和体积含水量)

Fig.2 Inter-monthly change of soil respiration rate, temperature, and volumetric water content

观测期间土壤温度的变化趋势与土壤呼吸一样,呈单峰形曲线变化规律,对照处理与壕沟处理的土壤温度之间差异不显著,变化范围分别为 $(-3.23 \pm 0.46) \sim (23.73 \pm 1.33) ^\circ\text{C}$ 、 $(-3.11 \pm 0.99) \sim$

$(23.78 \pm 0.87) ^\circ\text{C}$ ,最大值均出现在7月份,最小值均出现在1月份(图2b),这与土壤呼吸速率各组分最大值、最小值出现的时间一致.而各处理土壤含水量的月份呈现微弱的单峰变化趋势,在雨季急剧增大,而非雨季变化波动较小(图2c).

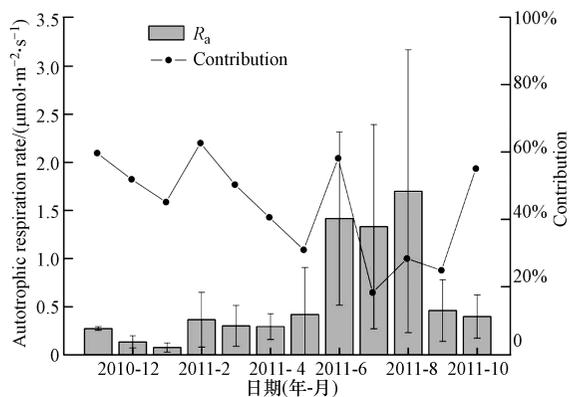


图3 自养呼吸的月际变化特性

Fig.3 Monthly change of autotrophic soil respiration rate

### 3.3 各组分土壤呼吸的全年变化

基于长期连续观测数据分析,发现侧柏林内全年的各组分呼吸速率呈现单峰形变化(图4a),在非生长季节较低,在生长季节较高.同时,从图4中可以得知,观测期内降雨促进了各组分土壤呼吸速率,主要原因可能是降雨改善了土壤的土壤水分状况,提高了根系以及微生物的活性.全年观测期内,土壤呼吸速率日均值变化范围为 $0.09 \sim 12.16 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ,均值为 $(1.94 \pm 2.69) \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ;异养呼吸速率日均值变化范围为 $0.02 \sim 10.86 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ,均值 $(1.35 \pm 2.27) \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ,贡献率为0.18%~95.45%,年均贡献率为69.59%;自养呼吸速率日均值变化范围为 $0.01 \sim 6.79 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ,均值 $(0.59 \pm 0.81) \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ,贡献率为4.55%~99.81%,年均贡献率为30.41%.

观测期内,对照处理土壤温度的变化范围在 $-4.50 \sim 26.50 ^\circ\text{C}$ ,平均值为 $(11.75 \pm 9.82) ^\circ\text{C}$ ;土壤体积含水量的变化范围在 $0.099 \sim 0.277 \text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ ,平均值为 $(0.153 \pm 0.047) \text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ ;挖壕法处理的土壤温度的变化范围在 $-4.35 \sim 25.90 ^\circ\text{C}$ ,平均值为 $(11.57 \pm 9.69) ^\circ\text{C}$ ;体积含水量的变化范围在 $0.049 \sim 0.233 \text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ ,平均值为 $(0.106 \pm 0.049) \text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ .

通过估算,观测期内侧柏林内土壤呼吸量为 $734.12 \text{g}(\text{C}) \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ,异养呼吸量为 $510.88 \text{g}(\text{C}) \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ,自养呼吸量为 $223.24 \text{g}(\text{C}) \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ .

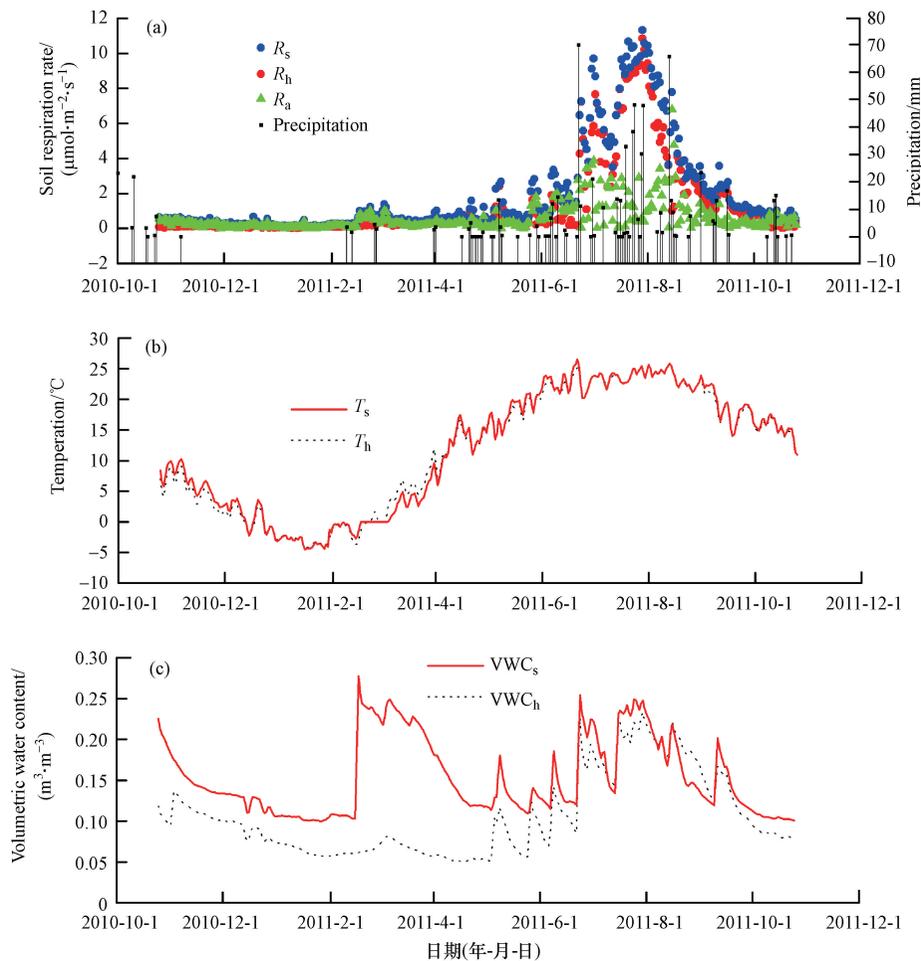


图4 土壤呼吸速率、土壤温度和土壤体积分水量的年变化(注: $R_s$ 、 $R_h$ ;  $T_s$ 、 $T_h$ ;  $VWC_s$ 、 $VWC_b$ 分别为土壤呼吸速率、异养呼吸速率及其相对应的土壤温度和体积分水量; $R_a$ 为自养呼吸速率)

Fig.4 Variation of soil respiration rate, temperature, and volumetric water content

### 3.4 各组分土壤呼吸与土壤温度、土壤含水量之间的关系

利用指数模型对土壤呼吸与土壤温度之间的关系进行了分析,从表2中可以看出,对照处理土壤呼吸速率伴随土壤温度的升高而增大,土壤温度可以解释72.8%的土壤呼吸速率变化.异养呼吸速率亦与土壤温度呈指数相关( $p < 0.001$ ),解释能力为66.8%.

利用土壤温度拟合对照和壕沟处理土壤呼吸速率得出不同的温度敏感系数 $Q_{10}$ 值,对照的 $Q_{10}$ 值(2.91)小于壕沟处理的 $Q_{10}$ 值(3.52),说明了壕沟处理土壤呼吸对温度的敏感性大于对照处理.

土壤水分也是影响土壤呼吸速率的重要因素之一.由表2可知,土壤体积分水量与土壤呼吸速率的相关性不高,但挖壕法处理土壤水分对土壤呼吸的影响( $R^2 = 0.413$ )大于对照处理( $R^2 = 0.292$ ).

表2结果表明,与单因子模型相比,土壤温度、含水量复合模型的拟合效果有一定程度的提高,其中幂-指数模型能更好的解释土壤呼吸的变化情况,该模型中土壤温度、土壤含水量能够共同解释对照处理的土壤呼吸变化的86.8%,而挖壕法处理的解释能力为74.4%,因而,与单因素模型相比,复合模型的解释能力更强,更能说明土壤呼吸与环境因子的关系.

## 4 讨论 (Discussion)

### 4.1 土壤呼吸各组分的动态变化

土壤呼吸速率、异养呼吸速率昼夜呈现单峰形变化规律,总体来说,白天波动变化较大,夜晚与凌晨变化较小,峰值出现在14:00—15:00,孟春等(2013)对白桦林各组分土壤呼吸研究表明,清晨出现谷值,午后出现峰值;在日尺度上,土壤呼吸主要

受土壤温度变化的调控,从表 2 可以看出,土壤呼吸随着土壤温度的升高而增大,与土壤体积分水量的

相关性较低.许多研究结果与此相似,表明土壤呼吸主要受到土壤温度的影响(汪金松等,2013).

表 2 土壤呼吸速率与土壤温度、体积分水量的关系

Table 2 Relationship between soil respiration and soil temperature and soil volumetric water content

处理	关系	模型特性	模型	$R^2$	$P$	$Q_{10}$
对照	$R_s$ & $T_s$	指数模型	$R_s = 0.258 e^{0.1077T_s}$	0.728	<0.001	2.91
	$R_s$ & $VWC_s$	线性模型	$R_s = -2.862 + 31.3117 VWC_s$	0.291	<0.05	
		二次曲线模型	$R_s = -3.979 + 45.639 VWC_s - 42.098 VWC_s^2$	0.292	<0.05	
	$R_s$ & $T_s$ 、 $VWC_s$	线性模型	$R_s = -0.591 + 1.350 T_s VWC_s$	0.754	<0.001	
			$R_s = -3.881 + 0.159 T_s + 25.781 VWC_s$	0.617	<0.001	
		幂-指数模型	$R_s = 6.518 e^{0.096 T_s} VWC_s^{1.626}$	0.868	<0.001	
幂模型		$R_s = 6.593 T_s^{0.911} VWC_s^{2.089}$	0.708	<0.001		
壕沟	$R_h$ & $T_h$	指数模型	$R_h = 0.102 e^{0.1267T_h}$	0.668	<0.001	3.52
	$R_h$ & $VWC_h$	线性模型	$R_h = -2.649 + 37.885 VWC_h$	0.378	<0.05	
		二次曲线模型	$R_h = -2.495 + 59.286 VWC_h - 376.572 VWC_h^2$	0.413	<0.05	
	$R_h$ & $T_h$ 、 $VWC_h$	线性模型	$R_h = -0.397 + 1.38 T_h VWC_h$	0.711	<0.001	
			$R_h = -2.597 + 34.436 T_h + 0.027 VWC_h$	0.685	<0.001	
		幂-指数模型	$R_h = 2.623 e^{0.092 T_h} VWC_h^{1.215}$	0.744	<0.001	
幂模型		$R_h = 11.459 T_h^{0.482} VWC_h^{1.787}$	0.668	<0.001		

注:  $R_s$ 、 $R_h$ ;  $T_s$ 、 $T_h$ ;  $VWC_s$ 、 $VWC_h$  分别为土壤呼吸速率、异养呼吸速率及其相对应的土壤温度和体积分水量.

观测期内,侧柏人工林各组分土壤呼吸速率在生长季旺盛的夏季最高,而在生长季初、末期最低.汪金松等(2013)对油松林,常建国等(2007)对常绿阔叶林,褚金翔和张小全(2006)对云杉林,杨金艳和王传宽(2006)对东北落叶松等 6 种典型森林,唐罗忠等(2012)对南方杨树人工林的研究中都发现,在不同的生态系统中都观察到了各组分土壤呼吸的具有明显的季节变化,在 6—8 月份各组分土壤呼吸最高,在 1—2 月最低.其原因是受植被生长和气候因子季节性变化的影响导致的(常建国等,2007; 颜学佳等,2013).在土壤温度和湿度条件比较优越夏季,根系活力增强,且土壤微生物代谢旺盛,有机质的分解也大幅度提高(杨金艳和王传宽,2006; 常建国等,2007; 孟春等,2013; 汪金松等,2013; 颜学佳等,2013),因而促进了土壤呼吸.

#### 4.2 土壤呼吸各组分的贡献率

国内外学者研究发现,根系呼吸对土壤总呼吸的贡献率存在较大差异.Tate 等(1993)研究山毛榉根系呼吸对土壤总呼吸的贡献率为 23%,Thierron 等(1996)对以针叶林研究发现其贡献率高达 90%,Ewel 等(1987)研究发现沼泽松林根系呼吸贡献率为 52%;而杨金艳和王传宽(2006)研究发现,东北东部不同森林生态系统根系呼吸贡献率为 28.82%~46.23%,本研究发现根系呼吸年均贡献率为

30.41%,处于上述范围之内,与吴君君等(2014)对米楮人工林的研究得出根系呼吸年通量占土壤呼吸年通量的 32.5%,褚金翔和张小全(2006)研究发现的冷杉林根系呼吸贡献率为 29%较为接近,但低于常建国等(2007)对北亚热带-南暖温带过渡区 5 种林分的研究得出林根系呼吸的年贡献率为 39.77%~52.89%.根系呼吸贡献率大小差异可能与不同研究区域的立地条件、物种组成、气候以及林分龄等诸多因素有关,同时还可能受植被的光合产物的分配格局、植被根系特性以及土壤水、肥、热状况等因子的综合影响(常建国等,2007; 汪金松等,2013; 颜学佳等,2013).

同时,本研究发现侧柏人工林的土壤微生物呼吸贡献率为 69.59%,张宪权等(2005)研究发现土壤微生物呼吸贡献率平均在 60%以上,吴君君等(2014)研究发现米楮和杉木人工林异养呼吸所占比例分别为 67.5%和 75.9%的结论一致,总的来说,土壤微生物的贡献率较高.土壤微生物呼吸贡献率的差异可能是因为不同林分类型土壤微生物的数量与质量存在差异,以及不同研究区的土壤理化性质、地上及地下凋落物数量、土壤有机质含量、水热条件的差异而存在差异(张宪权等,2005; 张金池等,2010).

#### 4.3 土壤温度和体积含水量对各组分土壤呼吸的影响

土壤呼吸是一个复杂生态系统过程,土壤温度和湿度通常是影响土壤呼吸的主导因素.本研究发 现,土壤温度对土壤各组分呼吸的日、月际变化的影响显著,这与前人类似的研究结果(孟春等, 2013; 汪金松等, 2013; 颜学佳等, 2013)相同,因为 土壤温度不仅影响植物地上部分的生理活动,还影响 了地下根系呼吸、土壤微生物生长繁殖,进而对 土壤呼吸各组分产生了影响.土壤呼吸对温度的敏 感性一般用  $Q_{10}$  值来表示,整个观测期的对照处理 土壤呼吸速率的  $Q_{10}$  为 2.91,挖壕沟处理异养呼吸 的  $Q_{10}$  为 3.52,皆大于全球  $Q_{10}$  的中间值 2.4,处在 我国陆地生态系统的范围内(1.28~4.75)(展小云等, 2012).

Kelting 等(1998)研究发现,土壤水分对土壤呼 吸的影响主要是通过改变底物和氧气的扩散而间 接地影响土壤呼吸.本研究中发现,各组分土壤呼 吸与土壤体积含水量的相关性小于与土壤温度的 相关性,由表 2 可知,对照处理、挖壕法处理的土壤 含水量对土壤呼吸的解释能力分别为 29.1%~29.2%、 37.8%~41.3%,挖壕法处理的解释能力高于对照的 可能是因为不受根系对土壤呼吸的影响,而受到了 土壤温度、含水量的影响,故而其相关性较高.

许多研究结果表明,土壤呼吸是受到土壤水热 条件的共同影响,因而通常采用复合模型来解释土 壤呼吸的变化(常建国等, 2007; 杨金艳和王传宽, 2006; Wang *et al.*, 2006). Wang 等(2006)对我国 6 个温带森林土壤呼吸研究发现,复合模型的解释能 力通常在 50%以上,一般比单一因子模型的解释能 力强.本研究发 现土壤温度、含水量复合模型能够分 别共同解释自然对照处理、挖壕法处理的土壤呼吸 变化的 86.8%、74.4%,说明了复合模型更能说明土 壤呼吸与环境因子的关系(孟凡乔等, 2006; 李化山 等, 2014).

## 5 结论 (Conclusions)

1)北京西山侧柏人工林各组分土壤呼吸的昼 夜变化规律呈单峰变化趋势,峰值出现在 14:00— 15:00;月份变化明显,最大值出现在水热条件较好 的夏季 6—8 月.土壤呼吸速率和异养呼吸速率与土 壤温度的相关性较大,与土壤含水量的相关性较小. 整个观测期间对照处理土壤呼吸速率温度敏感系

数  $Q_{10}$  为 2.91,异养呼吸速率的  $Q_{10}$  为 3.52.

2)在侧柏人工林的整个观测期间,土壤呼吸速 率年均值为  $1.94 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ;异养呼吸速率年均 值  $1.35 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ,年均贡献率为 69.59%;自养 呼吸年均贡献率为 30.41%.

3)相对于土壤水分,土壤温度是各组分土壤呼 吸速率的主要影响因子.在该研究区,复合模型能够 较好的描述土壤呼吸速率、异养呼吸速率的对土壤 温度的响应,解释能力分别为 86.8%、74.4%.

**责任作者简介:**余新晓(1961—),男,甘肃平凉人,教授,博 导生导师,主要研究方向为森林水文、水土保持、森林土壤碳 氮循环研究, E-mail: yuxinxiao125@126.com.

#### 参考文献 (References):

- Bowden R D, Nadelhoffer K J, Boone R D, *et al.* 1993. Contributions of aboveground litter, belowground litter, and root respiration to total soil respiration in a temperate mixed hardwood forest [J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 23(7): 1402-1407
- 常建国,刘世荣,史作民,等. 2007. 北亚热带—南暖温带过渡区典型森林生态系统土壤呼吸及其组分分离[J]. *生态学报*, 27(5): 1791-1802
- 程慎玉,张宪洲. 2003. 土壤呼吸中根系与微生物呼吸的区分方法与应用[J]. *地球科学进展*, 18(4): 597-602
- Davidson E A, Janssens I A, Luo Y Q. 2006a. On the variability of respiration in terrestrial ecosystems: moving beyond  $Q_{10}$  [J]. *Global Change Biology*, 12(2): 154-164
- Davidson E A, Richardson A D, Savage K E, *et al.* 2006b. A distinct seasonal pattern of the ratio of soil respiration to total ecosystem respiration in a spruce-dominated forest [J]. *Global Change Biology*, 12(2): 230-239
- Ewel K C, Cropper W P Jr, Gholz H L. 1987. Soil  $\text{CO}_2$  evolution in Florida slash pine plantations. II. Importance of root respiration [J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 17(4): 330-333
- 高润清. 2005. 园林树木学(第 2 版)[M]. 北京: 气象出版社
- Hanson P J, Edwards N T, Garten C T, *et al.* 2000. Separating root and soil microbial contributions to soil respiration: a review of methods and observations [J]. *Biogeochemistry*, 48(1): 115-146
- 李红生,刘广全,王鸿喆,等. 2008. 黄土高原四种人工植物群落土壤呼吸季节变化及其影响因子[J]. *生态学报*, 28(9): 4099-4106
- 李化山,汪金松,刘星,等. 2014. 模拟氮沉降对大岳山油松林土壤呼吸的影响及其持续效应[J]. *环境科学学报*, 34(1): 238-249
- 李会杰,饶良懿,宋丹丹,等. 2014. 华北土石山区不同龄组侧柏人工林土壤呼吸及其与环境因子的关系[J]. *干旱区资源与环境*, 28(5): 847-903
- Luo Y Q, Zhou X H. 2006. *Soil Respiration and the Environment* [M]. New York: Academic Press
- Kelting D L, Burger J A, Edwards G S. 1998. Estimating root

- respiration, microbial respiration in the rhizosphere, and root-free soil respiration in forest soils[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 30(7): 961-968
- 孟春, 罗京, 庞凤艳. 2013. 白桦人工林土壤各组分呼吸通量的变化特征[J]. *林业科学*, 49(10): 28-34
- 孟凡乔, 关桂红, 张庆忠, 等. 2006. 华北高产农田长期不同耕作方式下土壤呼吸及其季节变化规律[J]. *环境科学学报*, 26(6): 992-999
- Raich J W, Schlesinger W H. 1992. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate [J]. *Tellus B*, 44(2): 81-99
- Raich J W, Potter C S, Bhagawati D. 2002. Interannual variability in global soil respiration, 1980-94 [J]. *Global Change Biology*, 8(8): 800-812
- Sulzman E W, Brant J B, Bowden R D, *et al.* 2005. Contribution of aboveground litter, belowground litter, and rhizosphere respiration to total soil CO<sub>2</sub> efflux in an old growth coniferous forest [J]. *Biogeochemistry*, 73(1): 231-256
- 唐罗忠. 2008. 土壤中根系呼吸通量的分离测定方法综述[J]. *南京林业大学学报:自然科学版*, 32(2): 97-102
- 唐罗忠, 葛晓敏, 吴麟, 等. 2012. 南方型杨树人工林土壤呼吸及其组分分析[J]. *生态学报*, 32(22): 7000-7008
- Tate K R, Ross D J, O'Brien B J, *et al.* 1993. Carbon storage and turnover, and respiratory activity, in the litter and soil of an old-growth southern beech (*nothofagus*) forest [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 25(11): 1601-1612
- Thierron V, Laudelout H. 1996. Contribution of root respiration to total CO<sub>2</sub> efflux from the soil of a deciduous forest [J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 26(7): 1142-1148
- Wang C K, Yang J Y, Zhang Q Z. 2006. Soil respiration in six temperate forests in China [J]. *Global Change Biology*, 12(11): 2103-2114
- 王鹤松. 2007. 华北石质山区典型人工林土壤呼吸特征的研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院
- 王鹤松, 张劲松, 孟平, 等. 2008. 华北山区非主要生长季典型人工林土壤呼吸变化特征[J]. *林业科学研究*, 20(6): 820-825
- 王鹤松, 张劲松, 孟平, 等. 2009. 侧柏人工林地土壤呼吸及其影响因素的研究[J]. *土壤通报*, 40(5): 1031-1035
- 汪金松, 范娟, 赵秀海, 等. 2013. 大岳山油松人工林土壤呼吸组分及其影响因子[J]. *林业科学*, 49(2): 1-7
- 吴君君, 杨智杰, 刘小飞, 等. 2014. 米楮和杉木人工林土壤呼吸及其组分分析[J]. *植物生态学报*, 38(1): 45-53
- 颜学佳, 魏江生, 周梅, 等. 2013. 兴安落叶松林土壤呼吸及组分的变化特征[J]. *生态环境学报*, 22(6): 948-954
- 杨金艳, 王传宽. 2006. 东北东部森林生态系统土壤呼吸组分的分离量化[J]. *生态学报*, 26(6): 1640-1647
- 展小云, 于贵瑞, 郑泽梅, 等. 2012. 中国区域陆地生态系统土壤呼吸碳排放及其空间格局——基于通量观测的地学统计评估[J]. *地理科学进展*, 31(1): 97-108
- 张金池, 孔雨光, 王因花, 等. 2010. 苏北淤泥质海岸典型防护林地土壤呼吸组分分离[J]. *生态学报*, 30(12): 3144-3154
- 张宪权, 王文杰, 祖元刚, 等. 2005. 东北地区几种不同林分土壤呼吸组分的差异性[J]. *东北林业大学学报*, 33(2): 46-47
- 褚金翔, 张小全. 2006. 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*, 26(6): 1693-1700