

黄河小浪底库区山地栓皮栎人工林 土壤呼吸的季节动态

赵娜^{1,2}, 孟平^{1*}, 张劲松¹, 陆森¹, 宋文琛³

(1. 中国林业科学研究院林业研究所, 林木遗传育种国家重点实验室, 北京 100091; 2. 北京林业大学水土保持学院, 北京 100083;
3. 北京林业大学林学院, 北京 100083)

摘要: [目的] 分离并量化土壤自养呼吸和异养呼吸, 探讨各自贡献率及其随季节变化的动态特征。 [方法] 采用壕沟法和气体红外分析法, 研究黄河小浪底库区山地栓皮栎人工林土壤总呼吸、自养呼吸和异养呼吸速率的季节动态变化、贡献率和环境影响因子。 [结果] 表明: 栓皮栎人工林总土壤呼吸、自养呼吸和异养呼吸均呈夏季速率高、冬季速率低。栓皮栎土壤总呼吸、自养呼吸及异养呼吸速率与 5 cm 土壤温度均呈极显著指数相关, 温度敏感性系数 Q_{10} 值大小为自养呼吸(3.40) > 异养呼吸(2.90) > 土壤总呼吸(2.45); 栓皮栎土壤总呼吸、自养呼吸、异养呼吸速率与 0~10 cm 土壤体积含水量均显著线性相关; 土壤总呼吸、自养呼吸速率与 0~10 cm 土壤电导率显著相关。土壤总呼吸和异养呼吸的温度敏感系数 Q_{10} 值均在冬季最大, 夏秋季最小; 而自养呼吸的 Q_{10} 值则呈相反的变化趋势。栓皮栎人工林自养呼吸和异养呼吸对土壤总呼吸的月贡献率为 13.23%~37.33% 和 62.67%~86.76%, 且自养呼吸的贡献率与土壤温度的季节变化规律相似。土壤总呼吸、异养呼吸与自养呼吸的 CO_2 年通量分别为 1 616.41、1 199.39、417.02 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。 [结论] 经过区分与量化土壤总呼吸及其组分, 确定异养呼吸为本研究区栓皮栎人工林土壤总呼吸的主要组分, 作用于异养呼吸的生物与非生物因子均能显著影响整个森林生态系统表层 CO_2 总排放通量的大小, 进一步为该研究区森林生态系统碳循环与能量流动的进一步量化研究提供参考。

关键词: 栓皮栎; 自养呼吸; 异养呼吸; Q_{10} ; 季节变化; 壕沟法

中图分类号: S792.18

文献标识码: A

Seasonal Dynamics of Soil Respiration of *Quercus variabilis* Plantation in Hilly Area of Xiaolangdi Reservoir of Yellow River

ZHAO Na^{1,2}, MENG Ping¹, ZHANG Jin-song¹, LU Sen¹, SONG Wen-chen³

(1. Research Institute of Forestry, Chinese Academy of Forestry, State Key Laboratory of Tree Genetics and Breeding, Beijing 100091, China;
2. School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;
3. College of Forestry, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: [Objective] To separate and quantify the total, autotrophic and heterotrophic soil respiration. [Method] By the method of infrared gas exchange analyzer in trenching-plot, the total soil respiration (R_S), autotrophic (R_A) and heterotrophic respiration (R_H) in a *Quercus variabilis* plantation were investigated in hilly area of Xiaolangdi Reservoir of Yellow River. The seasonal dynamics contribution rate and the environmental factors of R_S , R_A , and R_H were determined. [Result] The results showed that the R_S , R_A and R_H varied with the season, the maximum and the minimum were observed at summer and winter, respectively. Significant exponential relationships were obtained between R_S , R_A and R_H and soil temperature at 5 cm ($P < 0.01$). Simultaneously, the temperature sensitivity

收稿日期: 2014-02-20

基金项目: 林业行业公益性项目(201104009-04)

作者简介: 赵娜, 博士. 主要研究方向: 土壤生态学. 电话: 15652635885. E-mail: zhaona1019@126.com

* 通讯作者. E-mail: mengpingcaf@126.com

ties of R_A , R_H , and R_s , (Q_{10}) were calculated as 3.40, 2.90 and 2.45 respectively. The R_s , R_A and R_H were significantly lined with soil volumetric water content at 0 ~ 10 cm ($P < 0.05$). In addition, The R_s and R_A had a linear correlation with soil pore water conductivity at 0 ~ 10 cm ($P < 0.05$). The Q_{10} of R_s and R_H had the highest value in summer and the lowest in winter. Compared with Q_{10} in R_s and R_H , the seasonal variation in Q_{10} of R_A presented opposite trend. The estimated contributions of R_A and R_H on R_s were 13.23% ~ 37.33% and 62.67% ~ 86.76%, respectively. The contribution of R_A on R_s was consistent with soil temperature seasonally. In this study, the annual CO_2 flux of R_s , R_H and R_A in the *Q. variabilis* plantation were 1 616.41, 1 199.39 and 417.02 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, respectively. [**Conclusion**] As the main component of total soil respiration, the heterotrophic respiration was significantly correlated with environmental factors, which could influence the overall emission from soil surface and provide theoretical support for further research about carbon cycle and energy exchange in forest ecosystems.

Keywords: *Quercus variabilis*; autotrophic respiration; heterotrophic respiration; Q_{10} ; seasonal dynamics; trenching-plot method

土壤表面释放的 CO_2 总通量 (R_s) 即土壤总呼吸作为大气与陆地生态系统间第二大通量途径^[1], 每年以 80 ~ 100 Pg C 的速率释放到环境中^[2], 其数量超过化石燃料排放 CO_2 的 10 倍^[3], 且其在全球范围内调控大气 CO_2 浓度和气候变化动态方面具有决策作用。土壤总呼吸主要有 2 个产生碳源, 即由自养源 (植物活根系及根际微生物) 和异养源 (脱离根系独立生存的土壤微生物群) 产生。由此本研究将土壤总呼吸划分为自养呼吸 (R_A , 称为根呼吸或根源呼吸) 和异养呼吸 (R_H , 非根源呼吸) 两部分。由于土壤异养呼吸是生态系统呼吸最大的异养组分, 并且经常将其与净初级生产力相比较来评价某一森林是碳源还是碳汇^[4]。同时值得关注的是, 气候变化可能会影响到土壤自养和异养呼吸在土壤总呼吸中所占比率及其反馈机制^[5]。在一个森林系统中, 影响地下过程——直接因子 (例如, 土壤温度、湿度、土壤碳含量以及根系活动等) 和间接因子 (枯落物质量、土壤微量营养元素、土壤质地、地上生产力以及地形等) 均会对土壤总呼吸、自养呼吸以及异养呼吸产生不同程度的影响作用^[6]。因此, 土壤呼吸组分的量化及其季节动态的分析对生态系统碳循环过程与碳源汇研究非常必要。

一直以来, 有关土壤呼吸各组分的区分方法与机理探讨都是生态学家们争议与研究的热点与难点。现有的多种区分方法各有长处与不足^[7-9], 其中, 一种较常见的方法即壕沟法, 切断现有根系以中断光合碳分配的运输途径, 可认为此方法将残存的异养活动留在土壤中并直接获得异养呼吸^[9]。虽然该法要求断根样方大且需长时间的缓冲期, 但其能够从代谢源头彻底切断自养与异养呼吸的基底碳

源, 而且实验经济且易操作。目前, 利用根排除法 (壕沟法) 区分土壤呼吸的方法改进方向主要包括: (1) 土壤环境的修正 (由于断根和径流淋溶对蒸散产生改变); (2) 异养呼吸的增加 (断根土壤中近期死亡的根系); (3) 具有大量碳水化合物存储的被切断的根系继续进行自养呼吸; (4) 微生物群落组成的变化 (不稳定底物的消失以及能够分解顽固有机质的微生物逐渐占优势)^[7-9]。为此, 本研究采用根袋分解法^[10-11], 通过计算不同径级残存根系的分解速率, 推导出断根样方内释放的 CO_2 通量, 同时垂直布设透水透气的纱网以阻隔根系向断根样方生长, 以期尽量减少断根处理所带来的环境干扰和系统误差。

栓皮栎 (*Quercus variabilis* Blume) 作为黄河小浪底库区低丘山区荒山造林的主要树种之一, 具有重要的生态、经济和社会效益。关于该地区栓皮栎土壤呼吸的研究已见报道^[12-13], 但精确区分地下碳循环过程对于估算森林生态系统碳平衡尤为重要, 而涉及栓皮栎土壤呼吸各组分的研究至今尚无报道。因此, 本研究以黄河小浪底库区低山丘陵典型树种栓皮栎人工林为研究对象, 采用切断根系的壕沟法, 探讨栓皮栎人工林土壤总呼吸及其各组分的季节动态, 以评价自养与异养呼吸贡献比重, 探讨各呼吸组分对主要环境影响因子的敏感性, 以期进一步量化暖温带华北低丘山地人工林生态系统碳通量, 为评价该区域荒山造林生态工程的生态、经济与社会效益提供参考。

1 研究区概况

本研究固定样地位于黄河小浪底森林生态系统研究站 (35° 01' N, 112° 28' E) 内, 属太行山南段南

麓,毗邻黄河小浪底水利枢纽,地处河南省济源市境内,为典型低山丘陵石质山区。位于暖温带大陆性季风气候区,年均气温 12.4 ~ 14.3℃,年日照时数 2 367.7 h,年均降水量 641.7 mm,其中,6—9 月降水量占全年的 68.3%。栓皮栎为试验区内主要树种之一。栓皮栎人工林样地位于半阳坡中部的荒山造林地内。林内土壤以石灰岩风化母质淋溶性褐色土为主。

2 研究方法

2.1 样地设置与试验安排

为了避免壕沟法所带来的环境扰动,于 2011 年 12 月(正式测量试验开始前几个月),避开林缘地带,在栓皮栎人工林半阳坡内,设置 3 个面积为 20 m × 33 m 固定样地(样地间距不超过 500 m)。样地内主要乔木树种为栓皮栎,林下植被主要为扁担木(*Grewia biloba* G. Don var. *parviflora* (Bunge) H. - M.) 和狗尾草(*Setaira viridis* (Linn.) Beauv) 等。林分密度 1 100 株 · hm⁻²,栓皮栎平均林龄 32 a,平均树高 9.9 m,平胸胸径 11.2 cm,郁闭度 0.9,土层平均厚度为 32 cm。0 ~ 5、5 ~ 10、10 ~ 20 cm 土层的有机质含量分别为 41.00、14.10、15.23 g · kg⁻¹,根系生物量 9 120 g · m⁻³。

在每个栓皮栎固定样地内,设置断根样方和对照样方。

断根样方:分别于栓皮栎人工林每个样地内设置 3 个断根样方(壕沟样方,面积 1 m × 1 m)。具体方法为:在正方形样方四周挖壕沟直至土壤母质层,垂直埋置透水气纱布(孔径小于最小根直径),以隔断样方外根系的干扰,同时移除样方上方生长的所有活体植物及其根系(保留枯落物和死体植被)。随后及时清理断根样方内后期长出的活体植被。

对照样方:在距离断根样方附近(大于 3 m,小于 10 m),分别于每个栓皮栎人工林每个样地内设置 3 个对照样方(面积 1 m × 1 m)。同时,分别于断根和对照样方内,随机布设 3 个土壤呼吸测定点。将 9 cm × 9 cm 的 PVC 垂直向插入土内(入土部分 7 cm,露出部分 2 cm),平衡缓冲 7 d 后,利用便携式土壤呼吸观测系统(Li-8100, Li-Cor, USA)进行土壤表层 CO₂ 通量的测定。观测期为 2012 年 4 月—2013 年 3 月,选取典型天气(晴好天气,避开雨天),于每月上旬、月下旬进行土壤呼吸测定,以 9:00—11:00^[14]测定均值代表日均值。

在测定土壤表层 CO₂ 通量的同时,利用土壤温湿度计 W. E. T. Sensor(ΔT device, UK)测定土壤温度(T_s , 5 cm)、土壤体积含水率(W , 0 ~ 10 cm)及土壤电导率(EC_p , 0 ~ 10 cm)。

2.2 数据分析

运用 SPSS18.0 回归模型进行数据分析,利用曲线估计拟合回归模型分析土壤呼吸、自养呼吸和异养呼吸分别与土壤温度、土壤水分及土壤电导率间的敏感程度。采用单因素 ANOVA 分析,对 5 cm 土壤温度(T_s)、0 ~ 10 cm 土壤体积含水量(W)、0 ~ 10 cm 土壤电导率(EC_p)、土壤总呼吸、自养呼吸及异养呼吸速率于不同月份间均值的差异性分析。

本文利用 Lloyd 等^[15]推导的 Van't Hoff 模型(式 1)来拟合土壤呼吸速率与土壤温度间的指数关系。

$$R_s = R_0 e^{bT} \quad (1)$$

式中: R_s 为土壤总呼吸速率($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$); R_0 为土壤温度在 0℃ 时的土壤总呼吸速率($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$); b 为模型参数(无量纲); T_s 为指定土层的温度(℃)。

Q_{10} 值常用来描述土壤呼吸速率对温度变化的敏感度,即温度每升高 10℃ 时,土壤呼吸速率所增加的倍数:

$$Q_{10} = \frac{R_{T_0+10}}{R_{T_0}} \quad (2)$$

式中: R_{T_0} 和 R_{T_0+10} 分别表示指定温度 T_0 和 $T_0 + 10$ ℃ 时的土壤呼吸速率。依据土壤呼吸速率与土壤温度间的指数关系(式 1),推算出 Q_{10} 为:

$$Q_{10} = e^{10b} \quad (3)$$

为推算断根样方中残存的腐烂根系在相应时期内释放的 CO₂ 速率(R_d)^[10-11],本研究利用根袋分解法来减小估算异养呼吸速率过程中的误差:在设置断根样方的同时,收集挖取壕沟时土壤中的根系,分粗根、中根及细根(各 15 根)称量初始质量,并将同等规格的根系包裹于透水气的同一纱布袋内,根分解袋共计 9 袋。随后将含有不同规格根系的根分解袋置于 10 ~ 20 cm 土壤中埋好,每月取出全部根分解袋,测定根干质量损失量。

根据 Lee 等^[11]的方法计算不同规格残留根在给定时间 t 内分解释放的 CO₂ 速率(R_d , g · m⁻² · d⁻¹):

$$R_d = B_r (ae^{-v(t-1/365)} - ae^{-vt}) \quad (4)$$

式中: B_r 为根生物量(g · m⁻²), a 为系数。根

分解速率 v 由 $v=0.64k$ 计算^[16], k 是根分解指数衰减方程中的相对损失速率常数。

$$\frac{X}{X_0} = a_1 e^{-kt} \quad (5)$$

式中: X 为 t 时刻挖出的根干质量; X_0 为根初始干质量, a_1 为系数。

所有规格残留根在给定时间内分解释放的 CO_2 速率的总和 (R_D) 为:

$$R_D = \sum R_d \quad (6)$$

异养呼吸速率 (R_H)、自养呼吸速率 (R_A) 及自养呼吸组分占土壤表层 CO_2 总通量(即土壤总呼吸)的比率 (RC) 由下式计算:

$$R_H = R_T - R_D \quad (7)$$

$$R_A = R_s - R_H \quad (8)$$

$$RC = \frac{R_A}{R_s} \times 100\% \quad (9)$$

式中: R_T 为断根样方土壤呼吸测定点所观测到的土壤表层释放 CO_2 速率 ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)。

3 结果与分析

3.1 栓皮栎人工林土壤总呼吸及其组分组分的季节变化

利用 Li-8100 土壤分析系统观测到的断根样方的土壤表层释放 CO_2 速率 (R_T), 再根据公式 (4)~(6) 计算出残留于断根样方内土壤中的根系分解所释放的 CO_2 速率 (R_D), 最终计算得到自养呼吸速率 (R_A , 公式 (7)~(8))。图 1 表明: 栓皮栎人工林土壤总呼吸、自养呼吸及异养呼吸速率的季节变化趋势基本一致, 三者的日平均 CO_2 排放速率均在 7—9 月达到最大, 分别为 2.55、0.92、1.65 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 在翌年 1 月达到最小值, 分别为 0.25、0.10、0.14 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。在土壤温度大于 15 $^{\circ}\text{C}$, 且土壤体积含水量大于 0.2 $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ 的月份, 土壤总呼吸及异养呼吸速率均大于 1.3 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 且呼吸速率与温度、湿度的变化趋势一致。2012 年 5、6 月降雨较少, 土壤体积含水量急剧降低, 土壤呼吸速率呈下降趋势。10 月—翌年 1 月, 由于土壤温湿度骤减, 呼吸速率减弱。土壤电导率与土壤水分关系密切, 在土壤体积含水量小于 0.1 $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ 时, 土壤空隙中水分含量过少, 土壤电导率骤减 (图 2)。

2012 年 4 月至 2013 年 3 月, 栓皮栎林土壤总呼吸与异养呼吸的月均速率的差异不显著; 异养呼吸月

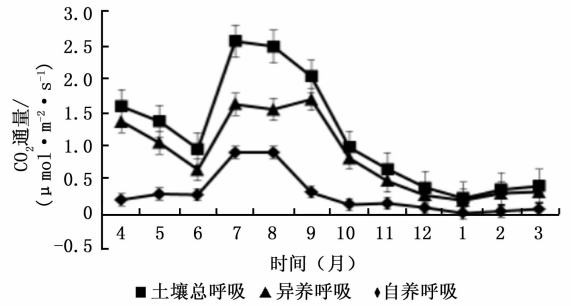


图 1 栓皮栎人工林土壤总呼吸、异养呼吸和自养呼吸的季节变化

均值显著高于自养呼吸 ($P < 0.05$)。9 月、11 月—翌年 2 月, 对照样方月平均温度显著高于断根样方 ($P < 0.05$), 其他月份二者的差异不显著。由图 2 可知: 全年各月份断根样方内土壤体积含水量均高于对照样地, 5—9 月二者的差异显著 ($P < 0.05$)。除 5 月和 6 月断根样方土壤电导率显著高于对照样地外 ($P < 0.05$), 其他月份二者的差异不显著。

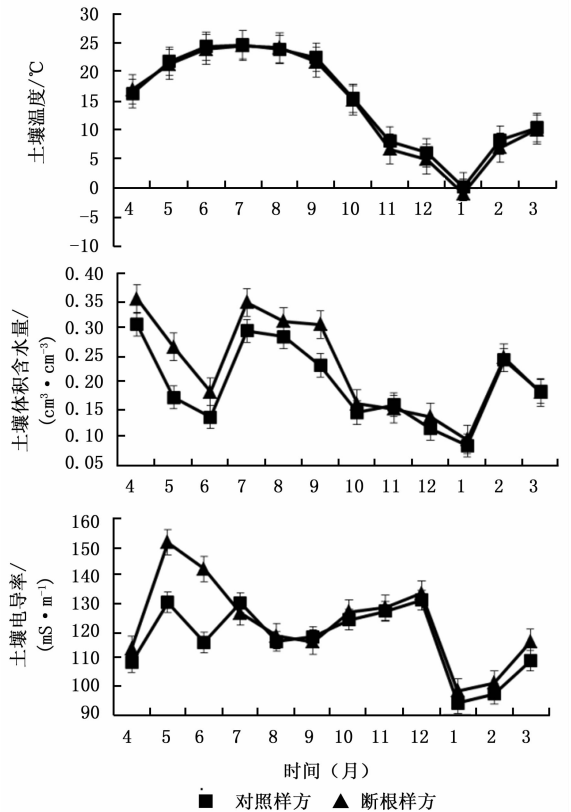


图 2 栓皮栎人工林断根处理后土壤温度、体积含水量及电导率的季节变化

3.2 栓皮栎人工林土壤总呼吸及其各组分呼吸速率与土壤温度、体积含水及电导率间的相关关系

3.2.1 土壤总呼吸及其组分的呼吸速率与土壤温度的关系 由图 3a~c 发现: 栓皮栎土壤总呼吸、

自养呼吸、异养呼吸速率与土壤温度均极显著相关 ($P < 0.01$), 其中, 土壤温度可分别解释 R_S 、 R_H 及 R_A 变异的 69.03%、65.52% 及 50.11%。从图 3c 可知: 在温度超过 25°C 后, 自养呼吸速率急剧增大, 说明 25°C 为自养呼吸速率的一个升高节点。土壤呼吸的温度敏感性系数 Q_{10} 的排序为: 自养呼吸 (3.40) > 异养呼吸 (2.90) > 土壤总呼吸 (2.45)。

3.2.2 土壤总呼吸及其组分与土壤体积分含水量的关系 由图 3d~f 可知: 栓皮栎土壤总呼吸、异养呼吸、自养呼吸速率与土壤体积分含水量均显著相关, 且

土壤体积分含水量可分别解释 R_S 、 R_H 及 R_A 变异的 36.18%、33.09% 及 13.25%, 而且在土壤体积分含水量为 0.1~0.2 $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ 时, 土壤呼吸及其各组分的呼吸速率与土壤体积分含水量的线性方程拟合程度更优。

3.2.3 土壤总呼吸及其组分的呼吸速率与土壤电导率的关系 虽然土壤总呼吸、自养呼吸速率与土壤电导率均呈显著相关 ($P < 0.05$, 图 3g~i), 但拟合函数方程的 R^2 较低; 而异养呼吸与土壤电导率的相关性不显著 ($P > 0.05$)。

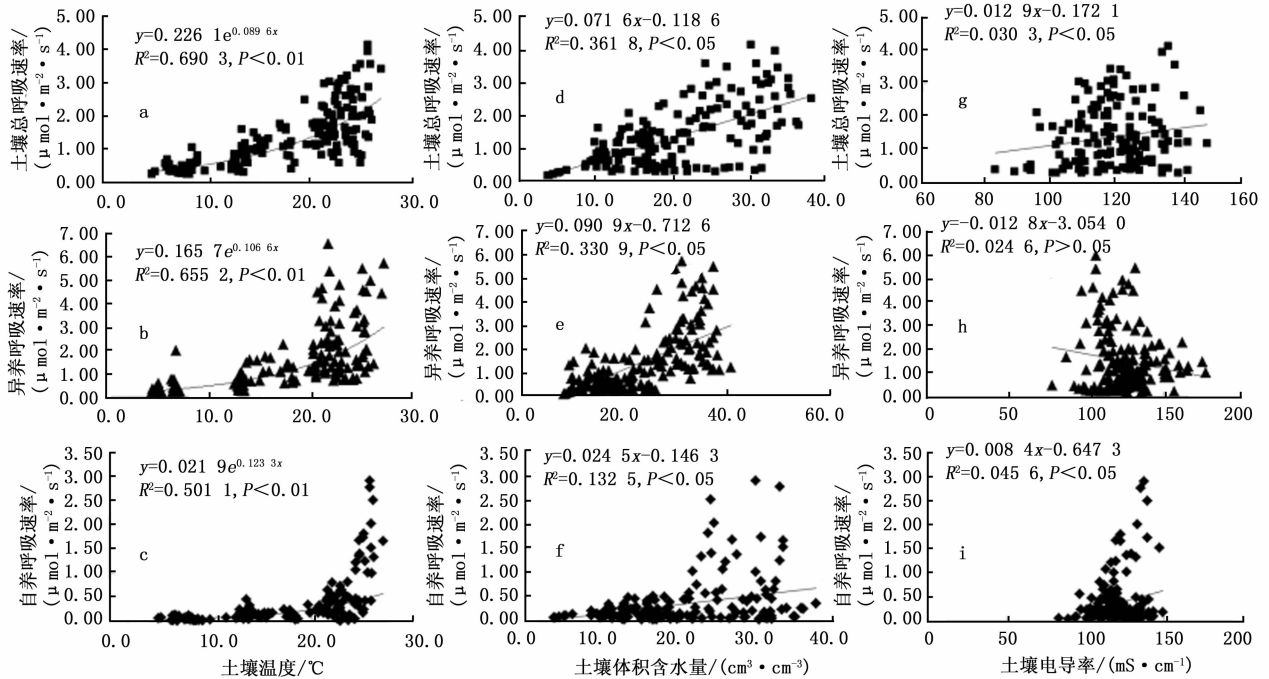


图3 土壤总呼吸、异养呼吸、自养呼吸与5 cm土壤温度(a、b、c)、0~10 cm土壤体积分含水量(d、e、f)和0~10 cm土壤电导率(g、h、i)的关系

表1 土壤呼吸及其组分的温度敏感性系数(Q_{10})的季节变化

项目	季节	模型参数		R^2	Q_{10}	季节平均土壤温度 /(°C)	季节平均土壤体积分含水量 /($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$)
		R_0	b				
土壤总呼吸(R_S)	春	0.147	0.109	0.629	2.986	11.54	23.44
	夏	0.146	0.102	0.141	2.768	23.38	21.42*
	秋	0.255	0.090	0.550	2.455	19.76	20.92*
	冬	0.184	0.119	0.976	3.274	5.36	13.78
异养呼吸(R_H)	春	0.144	0.099	0.566	2.694	10.97	24.03
	夏	0.213	0.086	0.084	2.373	23.04	28.08*
	秋	0.197	0.093	0.384	2.537	19.48	24.54*
	冬	0.143	0.106	0.660	2.872	4.18	14.46
自养呼吸(R_A)	春	0.028	0.105	0.599	2.861	11.54	23.44
	夏	0.018	0.109	0.040	2.983	23.38	21.42
	秋	0.033	0.102	0.288	2.782	19.76	20.92
	冬	0.076	0.076	0.665	2.138	5.36	13.78

注: * 表示同一季节对照样方与断根样方内温、湿度间的差异性 ($P < 0.05$)

3.3 栓皮栎人工林内土壤总呼吸及其各呼吸组分的温度敏感性 Q_{10} 的季节变化

根据栓皮栎人工林土壤总呼吸、自养及异养呼吸在春(2012年4月、2013年2月和3月)、夏(2012年5—8月)、秋(2012年9—10月)、冬(2012年11月—2013年1月)4个季节的数据,根据公式(1)~(3),计算得到土壤呼吸及其各组分呼吸速率的温度敏感性系数(Q_{10})的季节变化值(表1)。土壤总呼吸和异养呼吸速率的温度敏感性系数 Q_{10} 值均在冬季最大,分别在秋季和夏季最小;而自养呼吸速率的温度敏感性系数 Q_{10} 值则在夏季最大,冬季最小;同时观测到,在植被的生长旺季(5—10月),栓皮栎自养呼吸的 Q_{10} 值高于土壤总呼吸及异养呼吸;而在非生长季(4月、11月—翌年3月),土壤总呼吸的 Q_{10} 值则高于异养呼吸,且自养呼吸的温度敏感性最低。

3.4 栓皮栎人工林土壤自养、异养呼吸贡献比率的季节变化

图4表明:栓皮栎人工林自养呼吸对土壤总呼吸的贡献率呈明显的季节变化;不同月份土壤异养呼吸对土壤总呼吸的贡献率最高(62.67%~86.76%),而自养呼吸对土壤总呼吸的贡献率较小,仅为13.23%~37.33%。树木从生长展叶开始(3或4月),栓皮栎自养呼吸的贡献比重逐渐增加,直至2012年8月达到最大后又逐渐下滑,在2013年1月达到最低后又逐渐回升,这一趋势与土壤温度的季节变化一致(图2a);而异养呼吸与自养呼吸贡献率的季节变化趋势正好相反。

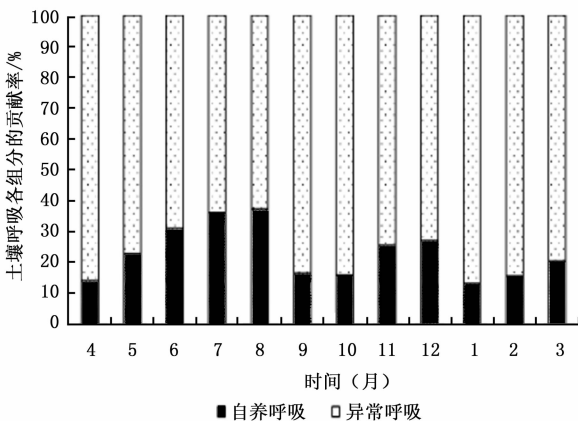
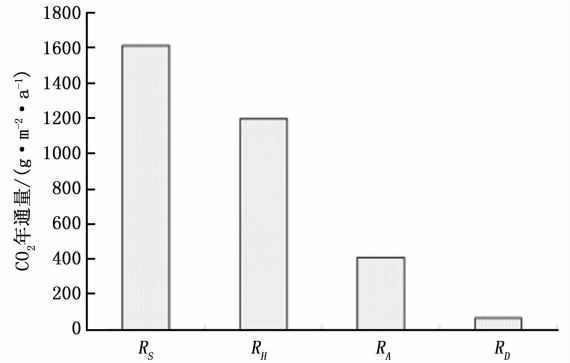


图4 土壤自养呼吸和异养呼吸对土壤总呼吸的贡献率

土壤总呼吸、异养呼吸、自养呼吸及断根样方内残存的腐烂根在相应时间内释放的 CO_2 年通量分别为 $1\ 616.41$ 、 $1\ 199.39$ 、 417.02 及 $73.88\ \text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$

(图5),异养呼吸年通量占全年总呼吸通量的74.2%,比自养呼吸多 $782.37\ \text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。异养呼吸年通量为土壤表层 CO_2 年通量的主要贡献者。



R_s : 土壤总呼吸; R_H : 异养呼吸; R_A : 自养呼吸;

R_D : 断根样方内残存的腐烂根在相应时间内释放的 CO_2 速率

图5 土壤呼吸各组分 CO_2 年通量

4 讨论

4.1 栓皮栎人工林土壤呼吸及其组分呼吸速率的季节变化

由于不同季节内土壤温度、湿度、光合产物的合成等因子及其相互作用共同影响,土壤表层 CO_2 通量表现出随季节变化波动是其最主要的时空变异特征之一^[3]。栓皮栎人工林全年土壤总呼吸、自养呼吸和异养呼吸速率随季节均表现为夏季排放速率最大(8月),而在冬季则最小(1月),且这三者与5 cm 土壤温度及0~10 cm 体积含水量)的季节变化规律均具有同步性。这是由于土壤温度不仅直接影响呼吸速率^[17],也间接作用于生物因子如光合过程、根系代谢、微生物活动等^[18]。本研究结果说明,华北低丘山地不同季节的土壤水热条件共同驱动土壤总呼吸、自养呼吸及异养呼吸的产生与季节变化相呼应的单峰趋势。

本研究栓皮栎人工林的土壤总呼吸月均速率与异养呼吸速率的差异不显著($P > 0.05$),但异养呼吸月均速率却显著高于自养呼吸($P < 0.05$),表明该林分内异养呼吸月排放量为土壤总呼吸的主要贡献者(74.2%),这一结论与杉木和油松人工林异养呼吸所占比重相似^[19];而本研究推算出断根样方内根分解排放 CO_2 的月均速率占异养呼吸的1.77%~19.34%(年通量比重6.16%),其占土壤总呼吸的1.74%~16.54%(年通量比重4.57%)。由于受不同地域、植被类型等影响,不同环境作用下的根分解 CO_2 月均速率和年释放总量比重均有所不同,如罗璐等^[18]在神农架海拔梯度上4种典型森林土壤呼

吸及组分研究发现,断根样方内残存根分解所产生的 CO_2 占断根样方表层 CO_2 通量的 14.59%~25.39%, 占土壤总呼吸比率的 10.98%~21.90%。

4.2 土壤呼吸的各组分速率与环境因子的关系

王鹤松等^[13]比较土壤呼吸与 5、10、15、20 cm 土壤温度间的指数相关性发现,5 cm 深土温与 R_s 的相关性最好。本文的研究结果与其一致,栓皮栎人工林土壤总呼吸及其各组分呼吸速率与 5 cm 土壤温度的季节变化值均呈极显著指数相关,这与土壤温度对植物根系代谢、微生物活性以及植物生长阶段等的影响作用密切相关^[20]。在本研究中,土壤呼吸各组分对温度的敏感性有所不同,土壤自养呼吸的温度敏感性系数 Q_{10} (3.40)与 Burton 等^[21]在北美温带森林的研究结果较接近(2.4~3.1),且其温度敏感性数值高于异养呼吸(2.90)及土壤总呼吸(2.45),这表明该地区栓皮栎的自养呼吸与异养呼吸相比,更易受土壤温度变化的影响,地温的增加可显著促进根系的生长,这与 Lee 等^[22]对 Q_{10} 的研究结果一致。

在本研究中,在高于 15℃ 的土壤温度下,若土壤体积分含水量持续低于 $0.20 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ 时,土壤总呼吸和异养呼吸速率受到土壤干旱的抑制作用而明显降低(图 1、2),一般在北方初夏(6 月)易出现此类现象^[23]。

土壤电导率影响土壤微生物代谢过程,导致 CO_2 排放速率的差异^[24]。本研究中,栓皮栎林土壤总呼吸、自养呼吸速率均与土壤电导率呈显著相关,但仅能解释各自变异的 3.03%、4.56%;而异养呼吸速率与土壤电导率的相关不显著。可见,土壤电导率对栓皮栎林土壤呼吸的影响作用不明显。

4.3 土壤呼吸各组分温度敏感性系数 Q_{10} 的季节变化

陈光水等^[25]分析我国大部分森林土壤呼吸,发现 Q_{10} 值为 1.33~5.33;而本研究栓皮栎土壤呼吸及其各分组的 Q_{10} 值(2.138~3.274)正好处于该范围内。 Q_{10} 不仅受空气和土壤温度的影响,并且还随着土壤湿度、根系生物量、枯落物的输入、微生物群落及其他季节性波动的条件和过程的变化而发生改变^[26]。在本研究中,土壤总呼吸和异养呼吸的 Q_{10} 值与温度的季节变化趋势相反,而这种现象在 Jassens 等^[27]的研究中也曾出现并得以证实,即 Q_{10} 与土壤温度的季节变化趋势相反;而自养呼吸 Q_{10} 值在夏季达到最大,冬季最低,这是由于在夏季根系代谢

活动及其土壤呼吸活跃,而冬季则反之,即其与植被根系的生长发育节律相关。本研究发现,栓皮栎自养呼吸在生长季(5—10 月)内的 Q_{10} 值均高于土壤总呼吸及异养呼吸;但在非生长季,土壤总呼吸的 Q_{10} 值却高于异养呼吸,而自养呼吸的温度敏感性最低,这表明在地温较低的冬季,栓皮栎根系的活动很弱。

4.4 栓皮栎人工林土壤呼吸各组分对土壤总呼吸的贡献率

栓皮栎人工林自养呼吸和异养呼吸速率所占土壤总呼吸速率的比率分别为 13.23%~37.33% 和 62.67%~86.76%, Tomotsune 等^[28]也得到相似的研究结果,这与植被类型和土壤水热等环境因子密切相关。除 9、10 月外,栓皮栎人工林自养呼吸对土壤总呼吸的贡献率与温度的变化一致,呈显著地季节波动。造成 9 月与 10 月自养呼吸贡献率偏低的原因是,壕沟效应使断根样方内蒸腾减弱,水分循环减弱,加之 2012 年 9—10 月华北南部低丘山区降雨频次和降雨量较往年同期均增多,造成断根小区土壤水分大量堆积;同时,增加的土壤湿度增加了微生物对可溶性碳的利用率^[29],最终导致断根小区土壤异养比重增加,自养呼吸比率显著下降,Ngao 等^[30]也发现个别月份自养呼吸比重减少的现象。因此,在利用壕沟法区分并定量化自养呼吸和异养呼吸时,需尽量减少断根小区与对照样地间有关环境因子间的差异(如土壤水分),尽早设置壕沟样方以平衡土壤扰动,尽量采用透水热的纱网作为阻挡物,以避免试验估算方面的系统偏差。

5 结 论

(1) 栓皮栎人工林土壤总呼吸、自养呼吸及异养呼吸速率的季节变化呈单峰趋势,最大值和最小值分别出现于夏季(7—9 月)和翌年 1 月。

(2) 土壤总呼吸、异养呼吸和自养呼吸速率与 5 cm 土壤温度极显著指数相关,土壤总呼吸、异养呼吸与 0~10 cm 土壤体积分含水量呈极显著线性相关,而三者与土壤电导率的相关性不显著。

(3) 土壤呼吸的年温度敏感性系数 Q_{10} 值排序为自养呼吸(3.40) > 异养呼吸(2.90) > 土壤总呼吸(2.45);土壤总呼吸、异养呼吸的 Q_{10} 值均在冬季最大,夏秋季最小;而自养呼吸的 Q_{10} 则呈相反的变化趋势。

(4) 自养呼吸和异养呼吸的月贡献比率为

13.23%~37.33%和62.67%~86.76%。土壤总呼吸、异养呼吸与自养呼吸的CO₂年通量分别为1 616.41、1 199.39、417.02 g·m⁻²·a⁻¹。异养呼吸为本研究区栓皮栎人工林土壤总呼吸的主要组分,作用于异养呼吸的生物与非生物因子均能显著影响整个森林生态系统表层CO₂总排放通量的大小。

参考文献:

- [1] Schlesinger W H, Andrews J A. Soil respiration and the global carbon cycle[J]. *Biogeochemistry*, 2000, 48(1): 7-20.
- [2] Bond-Lamberty B, Thomson A M. Temperature-associated increases in the global soil respiration record[J]. *Nature*, 2010, 464(7288): 579-582.
- [3] Luo Y Q, Zhou X H. *Soil Respiration and the Environment*[M]. New York: Academic Press, 2006: 17-28.
- [4] Harmon M E, Bond-Lamberty B, Tang J, *et al.* Heterotrophic respiration in disturbed forests: A review with examples from North America[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2011, 116(G4): 1296-1300.
- [5] Schindlbacher A, Zechmeister-Boltenstern S, Jandl R. Carbon losses due to soil warming: do autotrophic and heterotrophic soil respiration respond equally? [J]. *Global Change Biology*, 2009, 15(4): 901-913.
- [6] Maier M, Schack-Kirchner H, Hildebrand E E, *et al.* Pore-space CO₂ dynamics in a deep, well-aerated soil[J]. *European Journal of Soil Science*, 2010, 61: 877-887.
- [7] Kuzyakov Y. Sources of CO₂ from soil and review of partitioning methods[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2006, 38(3): 425-448.
- [8] Hanson P J, Edwards N T, Garten C T, *et al.* Separating root and soil microbial contributions to soil respiration: A review of methods and observations[J]. *Biogeochemistry*, 2000, 48(1): 115-146.
- [9] Subke J A, Inghima I, Francesca Cotrufo M F. Trends and methodological impacts in soil CO₂ efflux partitioning[J]. *Global Change Biology*, 2006, 12(6): 921-943.
- [10] Bond-Lamberty B, Wang C, Gower S T. Contribution of root respiration to soil surface CO₂ flux in a boreal black spruce chronosequence[J]. *Tree Physiology*, 2004, 24(12): 1387-1395.
- [11] Lee M S, Nakane K, Nakatsubo T, *et al.* Seasonal changes in the contribution of root respiration to total soil respiration in a cool-temperate deciduous forest[J]. *Plant and Soil*, 2003, 255: 311-318.
- [12] 王平, 张劲松, 孟平, 等. 华北低丘山地栓皮栎人工林土壤呼吸变化特征及其与撂荒地的差异[J]. *中国农业气象*, 2011, 32(3): 346-349.
- [13] 王鹤松, 张劲松, 孟平, 等. 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*, 2007, 20(6): 820-825.
- [14] Xu M, Qi Y. Soil-surface CO₂ 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.
- [15] Lloyd J, Taylor J A. On the temperature dependence of soil respiration[J]. *Functional Ecology*, 1994: 315-323.
- [16] Nakane K, Kohno T, Horikoshi T. Root respiration rate before and just after clear-felling in a mature, deciduous, broad-leaved forest[J]. *Ecological Research*, 1996, 11(2): 111-119.
- [17] Martin J G, Bolstad, P V. Annual soil respiration in broadleaf forests of northern Wisconsin: influence of moisture and site biological, chemical, and physical characteristics[J]. *Biogeochemistry*, 2005, 73(1): 149-182.
- [18] 罗璐, 申国珍, 谢宗强, 等. 神农架海拔梯度上4种典型森林的土壤呼吸组分及其对温度的敏感性[J]. *植物生态学报*, 2011, 35(7): 722-730.
- [19] 汪金松, 范娟, 赵秀海, 等. 米楮和杉木人工林土壤呼吸及其组分分析[J]. *林业科学*, 2013, 49(2): 1-7.
- [20] Kuzyakov Y, Gabrichkova O. Time lag between photosynthesis and carbon dioxide efflux from soil: a review of mechanisms and controls[J]. *Global Change Biology*, 2010, 16(12): 3386-3406.
- [21] Burton A, Pregitzer K, Ruess R, *et al.* Root respiration in North American forests: effects of nitrogen concentration and temperature across biomes[J]. *Oecologia*, 2002, 131(4): 559-568.
- [22] Lee N, Koo J W, Noh N J, *et al.* Autotrophic and heterotrophic respiration in needle fir and Quercus-dominated stands in a cool-temperate forest, central Korea[J]. *Journal of plant research*, 2010, 123(4): 485-495.
- [23] Xu M, Qi Y. Spatial and seasonal variations of Q₁₀ determined by soil respiration measurements at a Sierra Nevada forest[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2001, 15(3): 687-696.
- [24] Adviento-Borbe M A, Doran J W, Drijber R A, *et al.* Soil electrical conductivity and water content affect nitrous oxide and carbon dioxide emissions in intensively managed soils[J]. *Journal of environmental quality*, 2006, 35(6): 1999-2010.
- [25] 陈光水, 杨玉盛, 吕萍萍, 等. 中国森林土壤呼吸模式[J]. *生态学报*, 2008, 28(4): 1748-1761.
- [26] Curiel-Yuste J, Janssens I A, Carrara A, *et al.* Annual Q₁₀ of soil respiration reflects plant phenological patterns as well as temperature sensitivity[J]. *Global Change Biology*, 2004, 10(2): 161-169.
- [27] Janssens I A, Pilegaard K I M. Large seasonal changes in Q₁₀ of soil respiration in a beech forest[J]. *Global Change Biology*, 2003, 9(6): 911-918.
- [28] Tomotsune M, Yoshitake S, Watanabe S, *et al.* Separation of root and heterotrophic respiration within soil respiration by trenching, root biomass regression, and root excising methods in a cool-temperate deciduous forest in Japan cool-temperate deciduous forest in Japan[J]. *Ecological research*, 2013, 28(2): 259-269.
- [29] Feng W, Zou X, Schaefer D. Above-and belowground carbon inputs affect seasonal variations of soil microbial biomass in a subtropical monsoon forest of southwest China[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2009, 41(5): 978-983.
- [30] Ngao J, Longdoz B, Granier A, *et al.* Estimation of autotrophic and heterotrophic components of soil respiration by trenching is sensitive to corrections for root decomposition and changes in soil water content[J]. *Plant and Soil*, 2007, 301(1-2): 99-110.