

文章编号: 1008-2786-(2009)3-270-08

川中丘陵区人工桉柏混交林根呼吸对 土壤总呼吸的贡献

王小国¹, 朱波¹, 高美荣¹, 郑循华²

(1. 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所, 四川 成都 610041; 2. 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029)

摘要: 采用挖壕沟法和根系生物量外推法对桉柏混交林地根呼吸在土壤总呼吸的贡献进行了为期 1 a 的对比研究。研究表明, 两种方法测得的根呼吸平均速率分别为 $0.64 \mu\text{mol CO}_2 / (\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 和 $0.54 \mu\text{mol CO}_2 / (\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 挖壕沟法高于根系生物量外推法的测定结果。两种方法计算的根呼吸占土壤呼吸的比例具有明显的季节变化, 均表现为夏季(5~6月)较高而冬季(1~2月)较低, 变化范围分别为 13%~51%、11%~56%, 平均分别为 34% 和 31%; 林木生长季节根呼吸比例均高于非生长季, 两种方法测定的林木生长季根呼吸比例分别为 41% 和 38%。方差分析表明两种方法测定根呼吸比例之间差异不显著 ($p > 0.05$)。

关键词: 土壤呼吸; 根呼吸; 挖壕沟法; 根系生物量外推法

中图分类号: S152.4

文献标识码: A

森林土壤呼吸主要由异养呼吸和自养呼吸(根呼吸)组成, 林木根呼吸每年所消耗的呼吸底物占林木总光合作用产物的 50% 左右, 是森林生态系统碳循环的重要组成部分^[1]。有关林木根呼吸的数据是构建和完善各种尺度森林生态系统碳动态模型所缺乏和必需的^[2,3]。与森林土壤呼吸研究相比, 国内外有关林木根呼吸研究目前仍较少, 且大多集中在温带森林, 对热带和亚热带森林研究不多^[3]。由于林木根呼吸包含在土壤呼吸中, 分离林木根呼吸和微生物呼吸存在较大技术困难^[2,4-6], 因而根呼吸占土壤总呼吸的比例很难确定, 反映在文献报道的这个比例在一个很宽的范围内变化(10%~90%)^[2-8]。尽管这种变化可能是由生态系统之间的差异造成, 但很大部分变化亦有可能来自于测定方法、技术的差异^[2]。目前, 林木根呼吸的测定方法主要有根系移除(Root removal)法、挖壕沟法

(Trenching)、离体根法(In vitro root method)、树干环割(Tree girdling)、同位素示踪法(Isotopic methods)和根系生物量外推法(Regression technique)等几种方法^[2,3]。但大多数研究均是采用某一种方法对根呼吸进行测定, 在同一生态类型中采用不同方法进行对比研究的极少^[2]。

我国亚热带地区存在的森林类型是全球同纬度特有的重要森林生态系统, 对全球陆地生态系统碳贮存发挥着重要贡献^[9]。长期以来, 天然林转换为人工林是亚热带山区普遍的土地利用变化形式。川中丘陵区在 20 世纪 60~80 年代, 陆续营造了大面积桉柏混交林。桉柏混交林已成为长江上游防护林的主体模式。本文采用挖壕沟法和根系生物量外推法对比研究了桉柏混交林根呼吸对土壤总呼吸的贡献, 以为全球碳循环研究提供中国亚热带针叶人工林生态系统方面的基础试验数据。

收稿日期(Received date): 2008-06-06; 改回日期(Accepted): 2008-10-27.

基金项目(Foundation item): 国家自然科学基金重点项目(40331014), 国家重点基础研究发展计划项目(2005CB415202)和中国科学院成都山地所人才基金项目。[Supported by the Project of Natural Science Foundation of China(40331014) and National Key & Basic Research Development Planning(2003CB415202) and the Special Support for the Young Scientist of Institute of Mountain Hazards and Environment CAS]

作者简介(Biography): 王小国(1977-), 男, 湖北红安人, 博士, 助理研究员, 主要从事森林土壤环境研究。[Wang Xiaoguo(1977-), male born in Hongan Country, Hubei Province, Ph.D. Major in soil environment research.] E-mail: xgwang@imde.ac.cn

1 试验区概况

本研究在中国科学院盐亭紫色土农业生态试验站桉柏混交林试验地进行, 位于 $105^{\circ}27'E$, $31^{\circ}16'N$, 海拔约为 420 m。本区气候具有四川盆地典型亚热带湿润季风气候特征。该区地处盆地西部春夏旱区与东部伏旱区的交错地带, 有春旱、夏旱、伏旱、秋淋的威胁, 年均温度 $17^{\circ}C$, 极端最高气温 $40^{\circ}C$, 极端最低气温 $-5^{\circ}C$; 多年平均降雨量 825 mm, 分布不均, 春季占 6%, 夏季 66%, 秋季 20%, 冬季 8%, 无霜期 294 d。

林地为桉木 (*Alder crumastogyne*) 和柏木 (*Cyprresses fineries*) 混交林, 1972 年种植, 其间经过间伐。混交林生态系统经过长时间演替, 大部分桉木已死亡, 现已逐渐演化为纯柏林。林分平均胸径 (平均胸径 > 3 cm) 为 10.8 cm, 平均树高 (平均胸径 > 3 cm) 为 11.9 m, 保留密度 (平均胸径 > 3 cm) 为 1 595 株 / hm^2 。林下灌木主要有黄荆 (*Vitex negundo*)、马桑 (*Coriaria sinica*)、刺梨 (*Rosa roxburghii*)、栓皮栎 (*Quercus variabilis*) 等, 草本多为禾本科 (*Gramineae*)、莎草科 (*Cyperaceae*)、菊科 (*Compositae*)、唇形科 (*Labiatae*) 和豆科 (*Leguminosae*) 等植物。林地土壤基本性质如表 1。

表 1 林地土壤基本性质 (0~10 cm)

Table 1 Some physical and chemical properties of topsoil (0~10 cm)

土壤有机质 Soil organic content g/kg (±SE)	总氮 Total soil N g/kg (±SE)	总磷 Total P g/kg (±SE)	容重 Bulk density (g/cm ³)	pH 值 pH value	粘粒含量 (%) Clay	砂粒含量 (%) Silt
21.03±1.82	1.43±0.34	0.69±0.04	1.42	8.4	17.56	42.24

2 研究方法

2.1 挖壕沟法

在试验站桉柏混交林内设置两块标准样地 (iv 和 ⑤) 样地大小均为 25 m × 25 m, 在标准样地 (iv) 内设置以下两种处理: 保留根系 (对照处理) 和切断根系 (挖壕沟处理) 两种处理, 两种处理相隔约 8 m, 每种处理小区大小为 50 cm × 50 cm, 各处理小区按随机布置原则重复 4 个。2005-04 在挖壕沟处理小区四周挖掘 50 cm 深 (挖至根区底部) 壕沟后, 用 0.3 cm 厚的聚乙烯塑料板贴在壕沟周围, 连接处用胶带密封, 然后将土按顺序回填, 以阻止根系向小区内生长。所有小区处理定期清除地面植被 (主要是杂草和小灌木)。

2.2 土壤地表 CO₂ 释放速率的测定

采用密闭箱-动态气室法 (LI-6400-09 LI-COR Inc., Lincoln, NE, USA) 测定各处理小区土壤表面 CO₂ 释放速率。土壤呼吸圈 (PVC 材料制成, 高 5 cm, 直径为 10 cm) 在试验开始前至少 2 d 插入土壤约 2 cm。试验观测从 2006-01 初开始到 2006-12 底结束, 每周观测 2~3 次, 采样在 9:00~11:00 时间进行。在观测的同时采用 TDR 测定地

表 0~10 cm 含水量, 地表 5 cm 处地温由 LI-6400-09 系统自带温度传感器测定。

2.3 根系生物量测定

在标准样地 (⑤) 内, 从 2006-01~12 每月随机选择 10~12 个样点测定土壤呼吸, 每月测定 3~4 次。在每次土壤呼吸测定完成后, 测定土壤呼吸圈对应区域 0~40 cm 土层中所有根系 (<10 mm) 生物量。将挖取的土层用塑料袋封好编号后带回实验室, 清除石块等杂物, 先挑出容易辨认的根系, 然后使用 0.5 mm 土壤筛在流水下冲洗土块, 分选出所有林木根系。取样在 80°C 条件下烘干计算含水量, 最后将样品全部换算成干重。

2.4 根呼吸速率计算

在挖壕沟法中, 根呼吸速率采用下式计算: $R_r = R_c - R_t$ 式中, R_r 为根呼吸速率; R_c 为对照处理小区单位面积 CO₂ 释放速率; R_t 为挖壕沟处理小区单位面积 CO₂ 释放速率。

在根系生物量外推法中, 将每次测定的土壤呼吸速率 ($\mu\text{molCO}_2 / (\text{m}^2 \cdot \text{s})$) 与根系生物量 (x , g / m^2) 采用线性关系式 $y = ax + b$ 进行回归分析, a , b 为待定参数^[10]。在建立的回归关系式中, 将根系生物量外推到零, 此时的土壤呼吸速率认为是土壤异养呼吸速率, 土壤呼吸速率和土壤异养呼吸速率

之差即为根呼吸速率^[8]。

2.5 数据处理

采用双因素关系模型分析土壤温度和土壤含水量对根呼吸速率的共同影响, 关系式为 $R = a e^{bt} W^c$, 其中, R 为根呼吸速率, t 为土壤 5 cm 温度, w 为土壤 0~10 cm 含水量, a , b , c 为待定参数。

所有数据处理均在 SPSS13.0 上完成。样本间的比较采用单因素方差分析 (one-way ANOVA), 显著差异水平为 $\alpha = 0.05$ 。

3 结果与分析

3.1 对照与挖壕沟处理地表 CO₂ 释放速率季节变化

如图 1 所示, 对照处理小区地表 CO₂ 释放速率季节变化与土壤 (5 cm) 温度的季节变化基本一致。对照小区地表 CO₂ 释放速率 (R_c) 在 3 月底缓慢升高, 在 6 月下旬到 7 月上旬之间出现最大值 (3.26 $\mu\text{mol CO}_2 / (\text{m}^2 \cdot \text{s})$); 尔后随着温度的降低, 地表 CO₂ 释放速率逐渐减少, 最小值出现在 1 月下旬到

2 月上旬之间 (0.72 $\mu\text{mol CO}_2 / (\text{m}^2 \cdot \text{s})$)。挖壕沟处理小区地表 CO₂ 释放速率 (R_t) 季节变化与此相似。试验期间, 对照和挖壕沟处理小区地表 CO₂ 释放速率的变化范围分别为 0.72~3.26 $\mu\text{mol CO}_2 / (\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 和 0.58~1.74 $\mu\text{mol CO}_2 / (\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 地表 CO₂ 平均释放速率分别为 1.76 $\mu\text{mol CO}_2 / (\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 和 1.04 $\mu\text{mol CO}_2 / (\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。对照和挖壕沟处理小区土壤 (5 cm) 温度范围为分别为 4.3°~27.6°C 和 3.9°~26.7°C, 土壤 (0~10 cm) 含水量范围分别为 14.74%~41.38% 和 15.43%~38.95%, 方差分析表明两种处理小区土壤温度、土壤含水量之间差异均不显著。表明在挖壕沟 8 个月后, 挖壕沟对小区土壤温度和土壤含水量的影响极小。根据公式 ($R_r = R_c - R_t$) 计算出林地根呼吸速率。结果表明根呼吸速率具有明显的季节变化, 表现为夏秋季较高, 而春冬季较低。在测定期间, 根呼吸速率变化范围为 0.13~1.62 $\mu\text{mol CO}_2 / (\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 平均呼吸速率为 0.64 $\mu\text{mol CO}_2 / (\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。

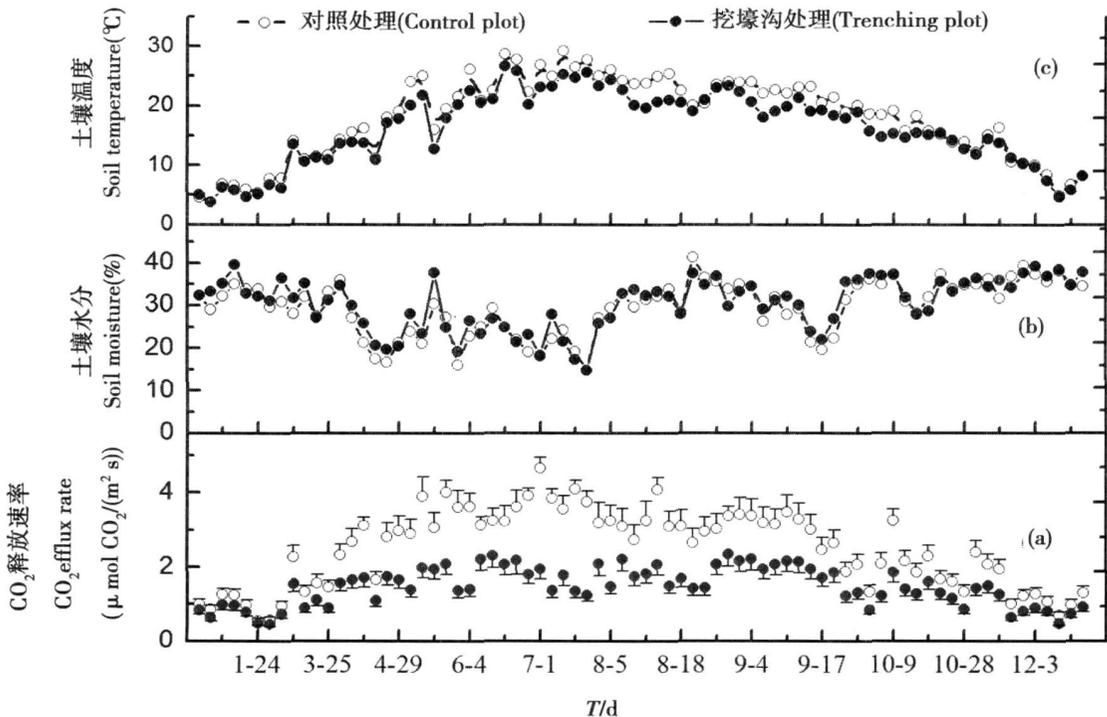


图 1 对照和挖壕沟处理土壤地表 CO₂ 释放与土壤 (0~10 cm) 含水量、土壤 (5 cm) 温度季节变化

Fig 1 Seasonal changes of soil CO₂ emission rate (a), soil water content of the top 10 cm layer (b) and soil temperature at 5 cm depth (c) in control and trenched plot during experiment period

3.2 根系生物量与土壤呼吸的关系

根系生物量从 3 月开始显著增加, 至 6 月达到最大值, 随后开始下降, 最低值出现在 1 月。将每月测定的土壤呼吸速率 (y) 与相应根系生物量 (x) 数据采用线性关系式 $y = ax + b$ 进行拟合。关系式中, 参数 b 为根系生物量为零时的土壤异养呼吸速率, 参数 a 代表单位根系生物量的根呼吸速率, 称为根呼吸活力^[8]。

如表 2 所示, 土壤呼吸速率与根系生物量均呈现显著的正相关关系 ($p < 0.05$), 但各关系式相关系数普遍较低, 表明土壤呼吸速率除受根系生物量的影响外, 还受到其他因子如土壤温度、土壤含水量的影响^[8]。根呼吸活力与林木根系生长活动密切相关。从 3 月开始, 随着气温不断升高, 根呼吸活力逐渐增强, 尔后逐渐减少, 在冬季 (1~2 月) 降至最低。根据表 2 中建立的土壤呼吸速率与根系生物量关系式, 即可计算出每月根呼吸平均速率。由根系

生物量外推法计算的根呼吸速率季节变化与挖壕沟法计算的根呼吸速率季节变化模式相似, 其变化范围为 $0.05 \sim 1.38 \mu\text{mol CO}_2 / (\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 平均呼吸速率为 $0.54 \mu\text{mol CO}_2 / (\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 低于挖壕沟法计算的根呼吸平均速率。

3.3 土壤温度和湿度对根呼吸速率的影响

目前, 国内较多的是采用单因素关系模型分析土壤温度和土壤含水量各自对土壤呼吸的影响^[9]。为研究土壤温度和含水量对根呼吸速率的共同影响, 我们采用双因素关系模型 $R = a e^{bt} W^c$ 进行拟合, 根呼吸速率的 Q_{10} 值采用计算 $Q_{10} = e^{10b}$ 计算, 其结果如表 3。

从表 3 可知, 两种方法计算的根呼吸速率均与土壤温度和土壤含水量呈现极显著的相关关系。土壤温度和土壤含水量共同解释了两种方法计算的根呼吸速率季节变化的 83% 和 91%, 表明根呼吸速率受土壤温度和含水量的共同控制, 土壤温度和湿度

表 2 2006 年各月土壤呼吸速率与根系生物量关系

Table 2 Relationship between soil respiration and root biomass from January to December 2006

月 Month	回归关系式 Equation	样本数 (个) Sample	相关系数 R^2 Correlation coefficient	p 值 p value
1 Jan.	$y = 0.00086x + 0.70$	12	0.34	0.0309
2 Feb.	$y = 0.00071x + 0.42$	10	0.36	0.0431
3 Mar.	$y = 0.00109x + 0.51$	14	0.51	0.0082
4 April	$y = 0.00132x + 0.83$	15	0.72	0.0065
5 May	$y = 0.00219x + 0.72$	16	0.55	0.0083
6 June	$y = 0.00271x + 1.65$	13	0.67	0.0082
7 July	$y = 0.00236x + 2.14$	14	0.73	0.0079
8 Aug.	$y = 0.00172x + 1.33$	15	0.49	0.0178
9 Sep.	$y = 0.00161x + 1.40$	14	0.52	0.0314
10 Oct.	$y = 0.00143x + 1.04$	10	0.43	0.0405
11 Nov.	$y = 0.00115x + 0.72$	14	0.46	0.0075
12 Dec.	$y = 0.00109x + 0.66$	10	0.34	0.0262

表 3 根呼吸速率与土壤温度和土壤含水量关系模型参数

Table 3 Parameters of the relationship between root respiration with soil temperature and soil water content

方法 Method	关系式 Equation	参数 a Parameter a	参数 b Parameter b	参数 c Parameter c	相关系数 Correlation coefficient	Q_{10} 值 Q_{10} Value
挖壕沟法 Trenching	$R = a e^{bt} W^c$	3.187	0.1351	0.343	0.84**	3.86
外推法 Regression		2.365	0.1275	0.439	0.91**	3.58

** 表示相关关系极显著, $p < 0.01$ 。

的不同配置状况引起根呼吸速率的季节变化。两种方法计算的根呼吸速率温度敏感性指数大小 (Q_{10}) 分别为 3.86 和 3.58

3.4 两种方法测定的根呼吸对土壤呼吸的贡献

挖壕沟法和根系生物量外推法测定的根呼吸比例如表 4 所示。两种方法测得的根呼吸占土壤呼吸的比例均表现为夏季 (5~6 月) 较高, 而冬季 (1~2

月) 较低。由挖壕沟法和根系生物量外推法测得的根呼吸比例变化范围分别为 13% ~ 51%、11% ~ 56%, 平均分别为 34% 和 31%, 方差分析表明二者之间差异不显著 ($p > 0.05$)。在林木生长季节 (5~10 月) 挖壕沟法和根系生物量外推法计算的根呼吸对土壤呼吸的贡献分别为 41% 和 38%, 高于非生长季根呼吸占土壤呼吸的比例。

表 4 2006 年根呼吸占土壤呼吸比例

Table 4 Root contribution to total soil respiration from January to December 2006

月 Month	挖壕沟法 Trenching method			根系生物量外推法 Regression method		
	土壤呼吸 Soil respiration	根呼吸 Root respiration	比例 (%) Percentage	土壤呼吸 Soil respiration	根呼吸 Root respiration	比例 (%) Percentage
1 Jan.	0.75	0.13	17.3	0.82	0.12	14.6
2 Feb.	0.69	0.09	13.0	0.47	0.05	10.6
3 Mar.	0.92	0.29	31.5	0.7	0.19	27.1
4 April	1.46	0.63	43.2	1.35	0.52	38.5
5 May	2.65	1.32	49.8	1.64	0.92	56.1
6 June	3.16	1.62	51.3	3.03	1.38	45.5
7 July	2.7	1.21	44.8	3.24	1.10	34.0
8 Aug.	1.82	0.75	41.2	2.06	0.73	35.4
9 Sep.	1.71	0.55	32.2	1.89	0.59	31.2
10 Oct.	1.63	0.49	30.4	1.45	0.41	28.3
11 Nov.	1.19	0.31	26.1	1.01	0.29	28.7
12 Dec.	0.91	0.25	27.5	0.86	0.20	23.3

4 结论与讨论

4.1 根呼吸季节变化及土壤温度和含水量的影响

林木根呼吸有明显的季节变化, 一般生长季节较高, 休眠季节较低^[2, 5, 9, 11]。本研究中两种方法计算所得的根呼吸速率在春末夏初最高而在冬季最低, 这与 Ebert 和 Lenz (1991) 报道的苹果 (*Malus pumila*) 树根呼吸在 8 月最高, 2 月最低^[12]; Lee 等 (2003) 报道的寒温带混交林中 (*Quercus crispula* Blume-Betula emanii Cham) 根呼吸在早春最大, 7~9 月逐渐下降等结果基本相似^[13]。但与 Vose 和 Ryan (2002) 报道白松 (*Pinus strobes*) 细根呼吸除在秋初较大外 (1.64 $\mu\text{mol}/(\text{kg}\cdot\text{s})$), 一年中细根呼吸几乎保持恒定 (0.78~0.99 $\mu\text{mol}/(\text{kg}\cdot\text{s})$) 的结果则有一定差异^[16]。不同研究中根呼吸速率最大值出现的时间不尽相同, 这与各研究试验地气候状

况不同和植被生长节律差异等有关^[7]。本研究中 5 月或 6 月根呼吸速率最高, 与该期土壤温度和湿度条件适宜、林木地上部分生长和根系代谢活动旺盛有关; 而冬季根呼吸速率较低, 则与根系活动受低温限制有关。双因素关系模型分析表明, 土壤温度和土壤含水量是影响根呼吸速率季节变化的主要环境因子。土壤温度和含水量解释了绝大部分林木根呼吸速率季节变化, 这与陈光水等 (2005) 采用相同方法的研究结果相似^[7]。两种方法所得的根呼吸速率 Q_{10} 值较高, 分别为 3.86 和 3.58。根呼吸对温度的高敏感性可能与温度升高根系分泌物数量增加而促进根际微生物呼吸有关^[10, 14]。

4.2 根呼吸对土壤总呼吸的贡献

一般林木根呼吸可占土壤呼吸的 10% ~ 90% (主要集中在 30% ~ 60%)^[2]。根呼吸占土壤呼吸的比例在北方生物群落中较高, 其中北极冻原为 50% ~ 93%^[15]。北方森林为 62% ~ 89%^[16, 17]; 在温

带, 根呼吸占土壤呼吸的比例阔叶林为 33% ~ 50%^[18, 19], 针叶林为 30% ~ 62%^[20, 21]。本研究中由挖壕沟法和根系生物量外推法计算的桉柏混交林根呼吸占土壤呼吸比例(平均分别为 33.19% 和 30.31%)均在此范围内。

两种方法计算的根呼吸对土壤呼吸的贡献在 5 月最高, 在 2 月最低。根呼吸占土壤总呼吸的比例在生长季(分别为 39.94% 和 37.36%)均明显高于非生长季。在本地区, 5 月温度较高、降水量充沛、根系生物量最大且根系活动最为旺盛; 而 2 月由于温度较低, 林木地上和地下部分生长缓慢, 根系代谢活动降低, 根呼吸对土壤呼吸的贡献减少。此结果与国外相关研究结果相似, 如 Wil n 和 Maji 等 (2001)^[22]采用离体根法发现松树 - 云杉 (*Pinus sylvestris*-*Picea abies*) 混交林中 5 月根呼吸对土壤呼吸贡献最高达 33% ~ 62%, 在 10 月下降到 12% ~ 16%; DL n 和 M nm ich 等 (1986)^[23]采用同位素示踪法 (¹⁴C) 研究表明水青冈 / 云杉 (*Fagus*-*Picea*) 混交林根呼吸在夏季占土壤呼吸的 73%, 在冬季为 25%。

4.3 根呼吸测定方法的比较

在测定期间, 除 5 月外, 由挖壕沟法测定的根呼吸占土壤呼吸的比例均高于根系生物量外推法的测定结果(图 2)。这可能与两种方法间的测定差异有关。在采用挖壕沟法测定根呼吸时, 由于无根小区在排除根系的同时亦排除了根际土呼吸和细根枯落物呼吸, 由扣除法(不挖壕沟小区 CO₂ 释放量减去挖壕沟小区 CO₂ 释放量)所得的根呼吸并非全是根系自养呼吸, 而实际上亦包含了根际土呼吸和细根枯落物呼吸而可能使该法测定的根呼吸结果偏高^[7]。

挖壕沟法是一种间接的测定根呼吸的方法, 在很多森林类型的根呼吸测定中均有应用^[2, 3, 7]。它基于以下几个假设: 首先认为挖壕沟小区中残留的根系对该小区地表 CO₂ 释放的影响较小。很多研究均表明根系切断后由于根系切断后仍会存活一段时间, 且非正常死亡的根系亦会发生分解, 直至其腐殖化到一定的程度后才会达到一个稳定的状态^[2, 13]。在本研究中, 我们在挖壕沟约 8 个月开始测定小区内土壤 CO₂ 释放速率, 前期预试验研究表明挖壕沟 3~4 个月后根呼吸(含死亡根系分解)基本消失。并且由于定期清除挖壕沟小区地表植被, 因而基本可做到排除存活根系呼吸和新死根系

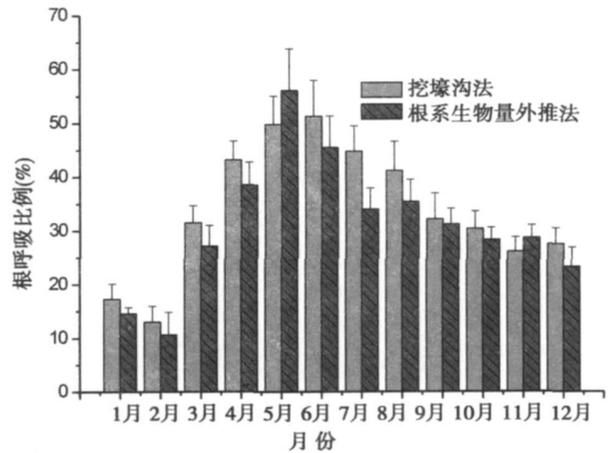


图 2 两种方法计算的根呼吸占土壤总呼吸比例月变化
Fig. 2 Monthly contributions of root respiration to total soil respiration by trenching and root biomass regression methods

分解的影响。这与 Fahey 等 (1988)^[24] 和 Ewel 等 (1987)^[20] 的研究结果相似。其次认为挖壕沟后小区内土壤温度和土壤含水量与对照处理小区差异很小。在本研究中, 土壤 5 cm 温度和 0~10 cm 含水量是在挖壕沟 8 个月开始测定, 方差分析表明与对照处理小区的土壤 5 cm 温度和 0~10 cm 含水量之间差异均不显著, 这与 Lee 等 (2003) 的研究结果相似^[13]。另外, 我们认为在挖壕沟后壕沟底部没有根系向壕沟内生长。本研究中, 壕沟挖掘的深度为 50 cm。尽管我们并没有在试验前后进行取样对比分析, 但前人研究表明, 在本研究区桉柏混交林中超过 92% 的根系分布在 0~40 cm 的土层中, 只有极少量的根系分布在 40 cm 以下^[25], 所以我们排除新生根系的影响。

根系生物量外推法最早是由 Kucera 等 (1971)^[26] 提出并使用。它基于的假设是根系生物量与测定的土壤呼吸速率之间存在线性关系。这种方法由于相对简单而在以后的研究中经常用到。如 Behera 等 (1990) 在印度一个混交林中的测定结果为 50.5%^[10]; Xu 等 (2001) 在美国加利福尼亚州黄松林中测定的根呼吸比例为 46.7%^[27]。根系生物量回归法存在的不足是由于林木根系生物量存在较大的变异, 而导致土壤呼吸与根系生物量之间相关系数较低。Kucera 等认为在采用此方法时需要较多的重复来减少根系生物量变异造成的影响^[26]。在本研究中, 我们每次测定重复 10~12 次以减少根系生物量变异的影响。根系生物量外推法的另外一个缺点是测定的根系生物量大小与根、

老根数量密切相关,而粗根、老根的代谢活动(分泌物)和呼吸远不及细根,从而使测定结果相对其他方法偏小^[7,9,22]。尽管如此,根系生物量外推法与其他方法比较还是有其优势,它的优点是对土壤不造成扰动,是一种间接的测定方法^[25,28]。Baggs (2006)认为利用同位素示踪法来修正根系生物量回归法中的参数,将二者结合使用将是一种较为理想的根呼吸测定方法^[28]。

参考文献 (References)

- [1] Lambers H, Stulek I, Weir A. Carbon use in root respiration as affected by elevated atmospheric CO₂ [J]. *Plant and Soil*, 1996, 187: 251~263
- [2] Hanson P J, Edwards N T, Garten C T, et al. Separating root and microbial contributions to soil respiration: a review of methods and observations [J]. *Biogeochemistry*, 2000, 48: 115~146
- [3] Yang Y S, Dong B, Xie J S, et al. A review of tree root respiration: significance and methodologies [J]. *Acta Phytocologica Sinica*, 2004, 28(3): 426~434 [杨玉盛, 董彬, 谢锦升, 等. 林木根系呼吸测定方法进展 [J]. 植物生态学报, 2004, 28(3): 426~434]
- [4] Kuzyakov Y V. Sources of CO₂ efflux from soil and review of partitioning methods [J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2006, 38: 425~448
- [5] Edwards N T. Root and soil respiration responses to ozone in *Pinus taeda* L seedlings [J]. *New Phytologist*, 1991, 118: 315~321
- [6] Li L H, Han X G, Wang Q B, et al. Separation root and soil microbial contributions to total soil respiration in a grazed grassland in the Xilin River Basin [J]. *Acta Phytocologica Sinica* [J], 2002, 26(1): 29~32 [李凌浩, 韩兴国, 王其兵, 等. 锡林河流域一个放牧草原群落中根系呼吸占土壤总呼吸比例的初步估计 [J]. 植物生态学报, 2002, 26(1): 29~32]
- [7] Chen G S, Yang Y S, Wang X G, et al. Root respiration in a natural forest and two plantations in subtropical China: seasonal dynamics and controlling factors [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(8): 1941~1947 [陈光水, 杨玉盛, 王小国, 等. 格氏栲天然林与人工林根系呼吸季节动态与影响因素 [J]. 生态学报, 2005, 25(8): 1941~1947]
- [8] Wang W, Guo J X. The contribution of root respiration to soil CO₂ efflux in *Puccinellia tenuiflora* dominated community in a semi-arid meadow steppe [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2006, 51(6): 697~703 [王妮, 郭继勋. 松嫩草甸草地碱茅群落根呼吸对土壤呼吸的贡献 [J]. 科学通报, 2006, 51(6): 697~703]
- [9] Yang Y S, Chen G S, Wang X G, et al. Response of soil CO₂ efflux to forest conversion in subtropical zone of China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(7): 1684~1690 [杨玉盛, 陈光水, 王小国, 等. 中国亚热带森林转换对土壤呼吸动态及通量的影响 [J]. 生态学报, 2005, 25(7): 1684~1690]
- [10] Behera N, Joshi S K, Pati D P. Root contribution to total soil metabolism in a tropical forest soil from Orissa, India [J]. *Forest Ecology and Management*, 1990, 36: 125~134
- [11] Liu J J, Wang D X, Lei R D, et al. Soil respiration and release of carbon dioxide from natural forest of *pinus tabulaeformis* and *quercus aliena* var. *acuteserrata* in Qinling Mountains [J]. *Scientia Silvae Sinica*, 2003, 39(2): 8~3 [刘建军, 王得祥, 雷瑞德, 等. 秦岭天然油松、锐齿栎林地土壤呼吸与 CO₂ 释放 [J]. 林业科学, 2003, 39(2): 8~3]
- [12] Ebert G, Lenz F. Annual course of root respiration of apple trees and its contribution to the CO₂ balance [J]. *Gartenbauwissenschaft*, 1991, 56: 130~133
- [13] Lee M S, Nakane K, Nakatsubo T and Koizumi H. Seasonal changes in the contribution of root respiration to total soil respiration in a cool-temperate deciduous forest [J]. *Plant Soil*, 2003, 255: 311~318
- [14] Vose J M, Ryan M G. Seasonal respiration of foliage, fine roots and woody tissues in relation to growth, tissue N, and photosynthesis [J]. *Global Change Biology*, 2002, 8: 164~175
- [15] Raich J W, Tufekcioglu A. Vegetation and soil respiration: Correlations and controls [J]. *Biogeochemistry*, 2000, 48: 71~90
- [16] Bonan G B. Physiological controls of the carbon balance of boreal forest ecosystems [J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 1993, 23: 1453~1471
- [17] Ryan M G, Lavigne M G, Gower S T. Annual carbon cost of autotrophic respiration in boreal forest ecosystems in relation to species and climate [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1997, 102: 871~883
- [18] Bowden R D, Nadelhoffer K J, Boone R D, Melillo J M, Garrison J B. Contribution of aboveground litter, belowground litter and root respiration to total soil respiration in a temperate mixed hardwood forest [J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 1993, 23: 1402~1407
- [19] Nakanishi K, Kohono T, Horikoshi T. Root respiration before and just after clear-felling in a mature deciduous broad-leaved forest [J]. *Ecological Research*, 1996, 11: 111~119
- [20] Ewel K C, Cropper W P J, Gholz H L. Soil CO₂ evolution in Florida slash pine plantations II. Importance of root respiration [J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 1987, 17: 330~333
- [21] Strigler G, Wickland K P. Effects of a clear-cut harvest on soil respiration in a jack pine - lichen woodland [J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 1998, 28: 534~539
- [22] Wild N, Majidi H. Soil CO₂ efflux and root respiration at three sites in a mixed pine and spruce forest: seasonal and diurnal variation [J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 2001, 31: 786~796
- [23] Dorr H, Munnich K O. Annual variations in the ¹⁴C content of soil CO₂ [J]. *Radiocarbon*, 1986, 28: 338~345
- [24] Fahey T J, Hughes J W, Pu M, et al. Root decomposition and nutrient flux following whole-tree harvest in northern hardwood forest [J]. *Forest Science*, 1988, 34: 744~768
- [25] Shi P L, Zhong Z C, Li X G. A study on root system of a kler and cypress mixed plantation [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 1996, 16(6): 623~631 [石培礼, 钟章成, 李旭光. 桧柏混交林根系的研

- 究 [J]. 生态学报, 1996, 16(6): 623~631]
- [26] Kucera C L, Kirkham D R. Soil respiration studies in tall-grass prairie in Missouri [J]. *Ecology*, 1971, 52: 912~915
- [27] Xu M, Ta D B, Qi Y, Goldstein A, Liu Z. Ecosystem respiration in a young ponderosa pine plantation in the Sierra Nevada Mountains California [J]. *Tree Physiology*, 2001, 21: 309~318
- [28] Baggs E M. Partitioning the components of soil respiration: a research challenge [J]. *Plant and Soil*, 2006, 284: 1~5

Contribution of Root Respiration to Soil Respiration in a Alder and Cypress Mixed Plantation in Hilly Areas of Sichuan Basin

WANG Xiaoguo¹, ZHU Bo¹, GAO Meirong¹, ZHENG Xunhua²

(1. Institute of Mountain Hazards and Environment Research, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China;

2. Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

Abstract The contribution of root respiration to total soil respiration is one of the most interesting important and methodologically complicated problems in the study of the carbon budget in soils and the subdivision of the CO₂ emission from soils into separate fluxes. Many researches showed that the methods themselves may be an important source of great differences between the contributions of root respiration to total soil respiration. But the comparison of methods under similar or same experimental conditions is relatively rare. A trenching method and root biomass regression method were used to determine the contribution of root respiration to total soil respiration in a subtropical forest ecosystem. The contributions of root respiration to total soil respiration estimated by trenching method and root biomass regression method in the growing season were 41% and 38%, and the average of root respiration contributions were 34% with the range of 13% ~ 51%, and 31% with the range of 11% ~ 56% over the observation period respectively. There was no significant difference between the monthly attributions of root respiration to total soil respiration estimated by two methods ($p > 0.05$).

Key words soil respiration; root respiration; trenching method; root biomass regression method