

黔中喀斯特地区 5 种林型冬季土壤呼吸研究

丁访军¹, 聂洋², 高艳平¹, 吴鹏¹, 胡藻¹

(1. 贵州省林业科学研究院, 贵州 贵阳 550005; 2. 南京林业大学, 江苏 南京 210037)

摘要: 以黔中喀斯特地区的柏木林、灌木林、阔叶混交林、针阔混交林和马尾松林 5 种林型为对象, 采用 LF6400-09 便携式土壤呼吸叶室对其冬季土壤呼吸速率进行了测定和分析。结果表明, 土壤呼吸速率的日变化幅度大小因林型和月份而存在差异, 以灌木林 2 月份的土壤呼吸日变幅最大 $1.65 \sim 2.37 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 以柏木林 12 月的土壤呼吸日变幅最小 $0.41 \sim 0.53 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 大部分林地不同月份最大土壤呼吸速率是最小土壤呼吸速率的 1.2~1.5 倍; 5 种林型的土壤呼吸速率基本表现为 1 月 < 12 月 < 2 月, 最大土壤呼吸速率是最小土壤呼吸速率的 1.46~2.85 倍, 且同一林型不同月份间和不同林型同一月份间的土壤呼吸速率差异显著; 几种林型的冬季土壤呼吸速率均与 5、10 和 15 cm 处土温都呈较高的指数正相关; 各林型的土壤呼吸速率与各土层的土壤体积含水率的关系较复杂; 凋落物层对土壤呼吸的贡献率均表现为 1 月 < 2 月 < 12 月, 占土壤总呼吸速率的比重为 6%~36%。

关键词: 土壤呼吸; 土壤温度; 土壤水分; 喀斯特; 林型

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2010)01-0011-06

中图分类号: S718.51

Winter Soil Respiration of 5 Forest Types in the Karst Areas of Central Guizhou Province

DING Fang-jun¹, NIE Yang², GAO Yan-ping¹, WU Peng¹, HU Qu¹

(1. Guizhou Academy of Forestry, Guiyang, Guizhou 550005, China; 2. Nanjing Forestry University, Nanjing, Jiangsu 210037, China)

Abstract: LF6400 portable photosynthesis measurement system and its soil respiration fitting 6400-09 are employed to measure and analyze the soil respiration rate of the *Cupressus funebris* forests, shrubs, mixed broadleaf, mixed conifer and broadleaf, and *Pinus massoniana* forests in the karst areas of central Guizhou in winter. Results indicate that there are differences in the diurnal change range among the different forest types and different months. The diurnal change range of shrubs in February is the highest, from 1.65 to $2.37 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, and that of the *Cupressus funebris* forests in December is the lowest, from 0.41 to $0.53 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$. The maximum soil respiration rate is 1.2 to 1.5 times as much as the minimum respiration rate of most of the forest types in different months. The general features of soil respiration of the 5 forest types are that the soil respiration rate of the 5 forest types is the smallest in January, the middle in December, and the biggest in February; the maximum soil respiration rate is 1.46 to 2.85 times as much as the minimum respiration rate; and there is a great difference in soil respiration rate among different months of the same forest type and among different forest types in the same month. There are significant positive exponential correlations between soil respiration rate and the soil temperature at the 5, 10, and 15 cm depths. Relations between soil respiration rate and soil volumetric moisture at different soil depths for all the forest types are considerably complex. The contribution percentages of litter to the total soil respiration rate are from 6% to 36%, with that of January being the smallest, February, the middle, and December, the biggest.

Keywords: soil respiration; soil temperature; soil moisture; karst; forest type

作为最大的陆地生态系统, 森林土壤碳是全球碳库的重要组成部分, 占全球土壤碳的 73%^[1]。土壤呼吸是森林生态系统 CO₂ 返回大气的主要途径^[2-3]。大气中近 10% 的 CO₂ 由土壤产生, 其微小变化就有可能

对全球碳平衡产生重要的影响^[4-5]。土壤呼吸主要由气候条件决定^[6], 但同一气候区域土壤呼吸常因植被状况的不同而存在差异^[4, 7]。因此, 研究不同植被类型土壤呼吸速率及其时空波动特征, 阐明其影响因子和

调控机制是目前生态学研究的重点内容之一^[4]。

贵州省喀斯特地区位于世界三大岩溶集中分布区之一的东亚片区的核心地带,东亚片区是世界最大,最集中连片的喀斯特区,也是世界喀斯特发育最典型,最复杂,景观与生态类型最多的一个片区。喀斯特在世界上分布广泛,其演变发展与全球变化和碳循环关系密切,受到各国政府、组织和学术界的高度重视^[8-9]。目前国外对不同生态系统冬季土壤 CO₂ 释放已有较多地研究^[10-14],而国内关于森林土壤 CO₂ 释放的研究多集中在生长季节^[15-18],有关冬季森林土壤 CO₂ 释放的报道尚不多见^[19-21],从而使此阶段土壤碳释放量未得到有效估计。本研究前面已经对黔中地区几种具有代表性的森林类型的春季土壤呼吸进行了分析与探讨^[22],在此试图通过进一步探讨这几种不同森林类型冬季的土壤呼吸特征及其与土壤温度和土壤水分等环境因子的关系,旨在为该区不同森林土壤 CO₂ 释放的精确估计提供依据。

1 研究区自然条件与研究方法

1.1 研究区概况

本研究在贵州省喀斯特森林生态系统定位研究站开阳站区进行。开阳站区位于贵州省中部(26°53'—27°03' N, 106°51'—107°07' E),地处云贵高原的苗岭山脉中部,属长江上游流域喀斯特中山地貌,海拔多在 1 100~1 400 m,最高海拔 1 702 m,最低 506 m。该区年平均气温 12.8℃,年平均降雨量 1 258 mm,相对湿度 75%,年平均日照时数 1 084 h,无霜期 277 d,属北亚热带湿润性季风气候,四季分明。主要出露岩类为:石灰岩、白云质石灰岩和砂页岩。主要土壤种类:石灰土、黄棕壤、黄壤。地带性森林植被为亚热带湿润性常绿阔叶林,非地带性植被为喀斯特常绿阔叶林。本研究所选样地包括常绿落叶阔叶混交林、针阔混交林、灌木林、柏木林和马尾松林 5 种群落类型,各样地基本情况详见表 1。

表 1 试验地基本情况

森林类型	郁闭度/ %	优势种	土壤 类型	海拔/ m	基岩 类型	土壤 pH 值	全 N/ (mg·g ⁻¹)	全 C/ (mg·g ⁻¹)	C/N
阔叶混交林	0.70	栎类、枫香	黄壤	1 245	石灰岩	6.56	3.01	37.16	12.35
针阔混交林	0.85	马尾松、枫香	黄壤	1 245	石灰岩	5.00	1.29	12.55	9.07
灌木林	—	栎类	黄壤	1 225	石灰岩	5.57	2.14	24.07	11.23
柏木林	0.65	柏木	石灰土	1 100	白云岩	7.82	3.14	65.12	20.71
马尾松林	0.70	马尾松	石灰土	1 120	白云岩	7.16	3.97	52.64	13.26

1.2 研究方法

本研究采用了 Li-6400 便携式光合作用测量系统以及 6400-09 土壤呼吸叶室,于 2008 年 12 月 25—27 日,2009 年 1 月 14—16 日和 2 月 24—26 日在黔中喀斯特地区具有代表性的常绿落叶阔叶混交林、针阔混交林、灌木林、柏木林和马尾松林 5 种林型进行了土壤呼吸的测定。每种林型设置 1 个样地,在每个样地上分别随机设置保留与去除凋落物 2 个处理,每个处理各 3 个重复。将标准规格的 PVC 土壤隔离环于测定前 1 d 打入土中约 1~2 cm 深,以减少每次测量前安放呼吸室对土壤的扰动。土壤呼吸速率日变化的测定:于每日的 8:00—18:00 之间,对每种林型每 2 h 测定一次;同时采用便携式数字温度计对 5,10 和 15 cm 深度的土壤温度进行测定。采用 PRISM-CMP 土壤水分仪(美国生产)同步测定土壤体积含水率。

其中,Pinus 代表马尾松林(*Pinus massoniana* forest),Mixed Broadleaf 代表阔叶混交林,Cupressus 代表柏木林(*Cupressus funebris* forest),Mixed

C/B 代表针阔混交林(Mixed Conifer and Broadleaf),Shrub 代表灌木林;文中除特殊注明外,土壤呼吸速率单位均为 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。

1.3 数据分析

采用 Microsoft Excel 以及 SPSS 统计分析软件包对数据进行相关分析、回归分析和方差分析。

2 结果与分析

2.1 5 种林型土壤呼吸速率日动态

本研究中,不同林型土壤呼吸速率的日变化曲线存在差异,日变化幅度大小因林型和月份而存在差异(图 1)。5 种森林类型土壤呼吸速率的日变化表现为:柏木林在 1 月份和 2 月份于 14:00 点达到一天内土壤呼吸速率的峰值,而 12 月份于 10:00 点达到一天内土壤呼吸速率的峰值;灌木林在 12 月份和 1 月份于 14:00 点达到一天内呼吸值的峰值,而 2 月份于 12:00 点达到一天内呼吸值的峰值;马尾松林在 12 月份和 1 月份于 12:00 点达到一天内呼吸值的峰值,而在 2 月份于 10:00 点达到峰值;阔叶混交林在 12

月,1 月和 2 月的土壤呼吸速率峰值依次出现在 14:00 点、12:00 点和 10:00 点。针阔混交林在 12 月、1 月和 2 月的土壤呼吸速率峰值均出现在 14:00 点。在这 5 种森林类型中,以灌木林 2 月份的土壤呼吸日变幅最大 1.65~2.37 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,以柏木林

12 月的土壤呼吸日变幅最小 0.41~0.53 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。大部分林地不同月份最大土壤呼吸速率是最小土壤呼吸速率的 1.2~1.5 倍,表现出比较平缓的日变化,且这 5 种森林类型的土壤呼吸日变化表现出的差异不大。

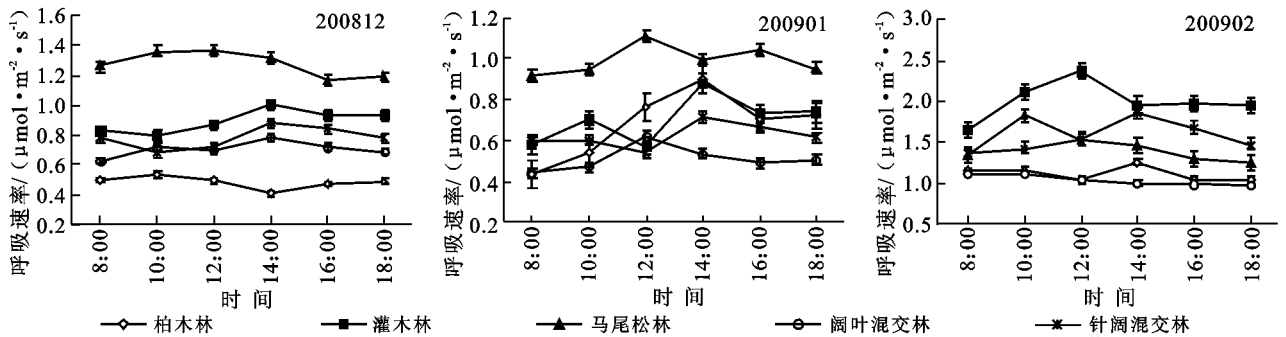


图 1 5 种林型土壤呼吸速率的日变化动态

2.2 5 种林型土壤呼吸速率冬季变化动态

除柏木林外,其它林型的土壤呼吸速率均表现为 1 月 < 12 月 < 2 月(图 2),最大土壤呼吸速率是最小土壤呼吸速率的 1.46~2.85 倍。同一林型不同月份之间土壤呼吸速率的差异较大。马尾松林 3 个月之间的土壤呼吸速率的差异极显著 ($P = 0.000 < 0.001$),其土壤呼吸速率变幅为 0.99~1.45 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$;柏木林 3 个月之间的土壤呼吸速率的差异极显著 ($P = 0.000 < 0.001$),其土壤呼吸速率变幅为 0.48~1.11 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$;灌木林 3 个月之间的土壤呼吸速率的差异极显著 ($P = 0.000 < 0.001$),其土壤呼吸速率变幅为 0.70~2.00 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$;阔叶混交林 3 个月之间的土壤呼吸速率的差异极显著 ($P = 0.000 < 0.001$),其土壤呼吸速率变幅为 0.51~1.04 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$;针阔混交林 3 个月之间的土壤呼吸速率的差异极显著 ($P = 0.000 < 0.001$),其土壤呼吸速率变幅 0.62~1.56 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。

不同林型在同一月份之间的土壤呼吸速率的差异亦很明显。12 月份表现为:马尾松林 (1.28) > 灌木林 (0.89) > 针阔混交林 (0.78) > 阔叶混交林 (0.71) > 柏木林 (0.48),不同林型之间差异极显著 ($P = 0.000 < 0.001$);1 月份表现为马尾松林 (0.99) > 灌木林 (0.70) > 柏木林 (0.68) > 针阔混交林 (0.62) > 阔叶混交林 (0.51),不同林型之间差异极显著 ($P = 0.000 < 0.001$);2 月份表现为灌木林 (2.00) > 针阔混交林 (1.56) > 马尾松林 (1.45) > 柏木林 (1.11) > 阔叶混交林 (1.04),不同林型之间差异极显著 ($P = 0.000 < 0.001$)。

由于本文研究地区冬季经常是细雨连绵,因此在研究期间很难找到连续测定土壤呼吸的天气,特别是在林内更难达到,因此本文测定次数未能达到足够多。以一天的平均值来进行比较,虽准确性不高,但在冬季土壤呼吸很低的情况下,不会影响其土壤呼吸特征的初步评价。

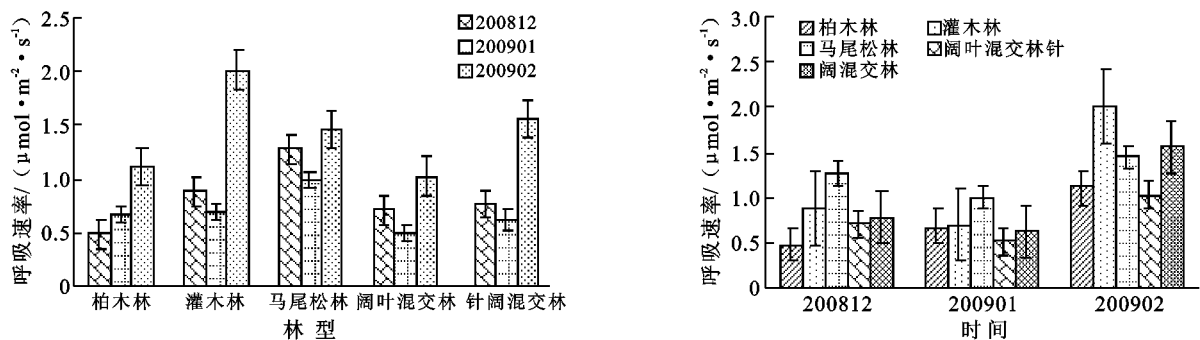


图 2 5 种林型冬季土壤呼吸速率变化动态

2.3 土壤温度对土壤呼吸速率的影响

通过土壤呼吸速率与 5,10 和 15 cm 处土温的相关分析发现,5 种林型的冬季土壤呼吸速率均与 5,10

和 15 cm 处土温有很强的相关关系。只有马尾松林的土壤呼吸与 5 cm 土温表现为相关关系 ($P < 0.05$),与 10 cm 和 15 cm 处土温均表现为极相关关

系 ($P < 0.01$), 其余林型的冬季土壤呼吸速率与 5, 10 和 15 cm 处土温均表现为极相关关系 ($P < 0.01$)。通过回归分析发现, 5 种林型的冬季土壤呼吸速率与 5, 10 和 15 cm 处土温都呈较高的指数正相关(表 2)。从表 2 中看出, 灌木林和柏木林的土壤呼吸速率与 5 cm 处的土温关系最显著, 而其它林型土壤呼吸速率

均表现为与 15 cm 处土温关系最显著。判定系数 (R^2) 越大表明模型的拟合程度越好。为了便于比较, 本研究统一选用土壤呼吸速率与 15 cm 处土温的拟合模型(图 3)。这些回归方程的显著性检验和回归系数显著性检验均通过检验(均表现为 $P < 0.01$), 均达极显著水平。

表 2 土壤呼吸与各土层温度回归关系

林型	土层	相关系数 R	判定系数 R^2	调整判定系数 R^2	估计值的标准误
马尾松林	5	0.516	0.266	0.221	0.162
	10	0.595	0.354	0.313	0.152
	15	0.653	0.427*	0.391	0.143
灌木林	5	0.962	0.926*	0.921	0.134
	10	0.960	0.922	0.917	0.138
	15	0.959	0.920	0.915	0.139
阔叶混交林	5	0.823	0.677	0.657	0.183
	10	0.852	0.726	0.709	0.169
	15	0.880	0.775*	0.761	0.153
针阔混交林	5	0.979	0.958	0.955	0.087
	10	0.981	0.962	0.960	0.082
	15	0.981	0.962*	0.960	0.083
柏木林	5	0.925	0.879*	0.846	0.186
	10	0.926	0.865	0.848	0.184
	15	0.942	0.831	0.881	0.163

注: *表示此回归分析判定系数 R^2 最大。

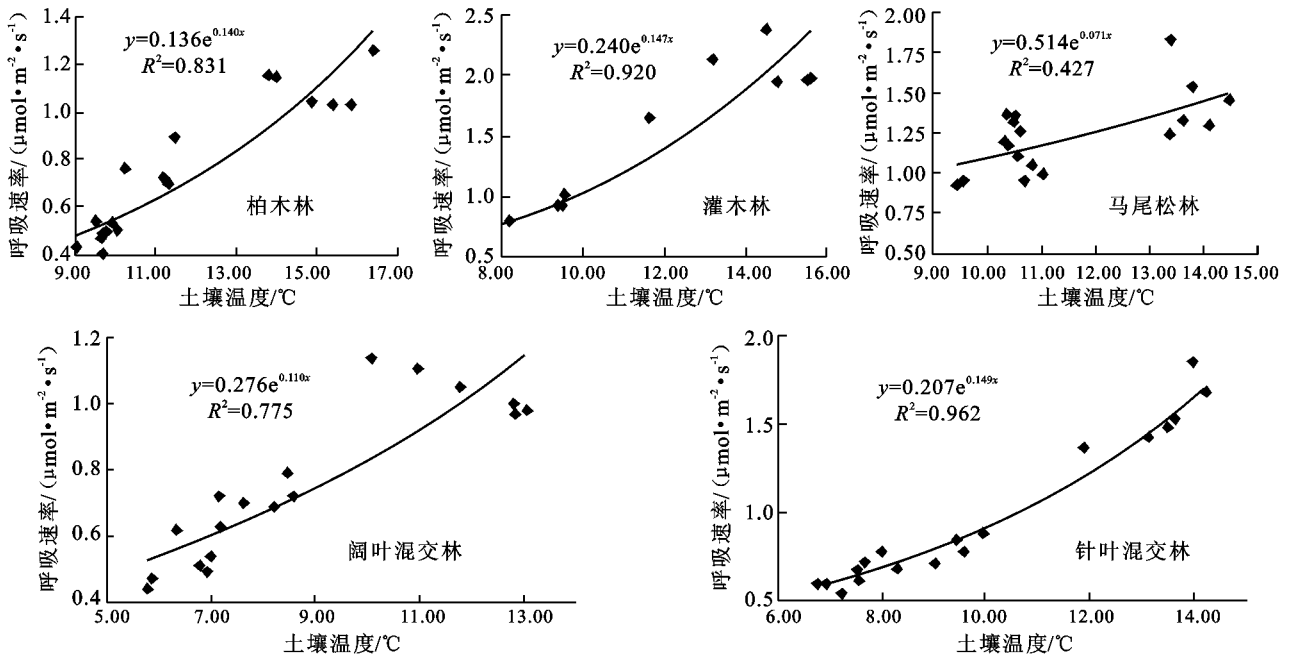


图 3 土壤呼吸对土壤温度的响应曲线

2.4 土壤水分对土壤呼吸速率的影响

5 种林型在冬季各月的土壤体积含水率见表 3。5 种林型中, 阔叶混交林和柏木林土壤体积含水率的

日变化幅度均表现为: 12 月 > 2 月 > 1 月; 而灌木林、针阔混交林和马尾松林表现为: 2 月 > 1 月 > 12 月。12 月份土壤体积含水率的日变化幅度表现为: 柏木

林 > 阔叶混交林 > 马尾松林 > 针阔混交林 > 灌木林;
1 月份表现为:马尾松林 > 柏木林 > 灌木林 > 阔叶混

交林 > 针阔混交林; 2 月份表现为:针阔混交林 > 阔
叶混交林 > 柏木林 > 灌木林 > 马尾松林。

表 3 各林型冬季土壤体积含水率

林型	12 月			1 月			2 月		
	5 cm	10 cm	15 cm	5 cm	10 cm	15 cm	5 cm	10 cm	15 cm
阔叶混交林	17.05	14.63	15.43	20.23	16.7	17.92	22.67	18.95	19.15
灌木林	15.73	16.73	13.12	16.57	18.5	14.28	15.37	17.85	14.28
针阔混交林	12.88	12.7	15.37	15.37	14.5	16.72	19.02	18.40	16.72
马尾松林	9.40	10.78	13.18	12.82	15.8	18.50	9.13	10.85	13.02
柏木林	17.85	15.15	14.05	17.90	16.5	15.50	16.55	16.51	15.79

通过对土壤呼吸速率与冬季 5 个林型的 0—5, 5—10, 10—15 cm 的土壤体积含水率进行的相关性分析发现, 5 个林型的土壤呼吸速率与各土层的土壤体积含水率之间的关系较复杂。对于柏木林, 只有 5—10 cm 的土壤体积含水率与土壤呼吸速率呈负相关关系 ($R = -0.515, P = 0.029 < 0.05$); 对于马尾松林, 0—5, 5—10, 10—15 cm 的土壤体积含水率与土壤呼吸速率都呈极显著负相关关系 ($R = -0.770, P = 0.000 < 0.01$; $R = -0.754, P = 0.000 < 0.01$ 和 $R = -0.755, P = 0.000 < 0.01$); 对于灌木林, 只有 0—5 cm 的土壤体积含水率与土壤呼吸速率呈负相关关系 ($R = -0.518, P = 0.028 < 0.05$); 对于阔叶混交林, 只有 5—10 cm 的土壤体积含水率与土壤呼吸速率呈负相关关系 ($R = -0.523, P = 0.026 < 0.05$); 对于针阔混交林, 只有 10—15 cm 的土壤体积含水率与土壤呼吸速率呈负相关关系 ($R = -0.657, P = 0.003 < 0.01$)。

2.5 凋落物对 5 种林型土壤呼吸的贡献

12 月, 1 月和 2 月柏木林凋落物去除处理样地的日均土壤呼吸速率分别为 0.48, 0.68 和 1.11 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 未去除凋落物的日均土壤呼吸速率分别为 0.97, 0.81 和 1.35 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。由此估算出, 柏木林地表凋落物层对土壤呼吸的贡献率为 16%~50%, 平均为 28%。依此方法计算得到, 灌木林凋落物层对土壤呼吸的贡献率为 9%~40%, 平均为 20%。马尾松林凋落物层对土壤呼吸的贡献率 3%~12%, 平均为 6%; 阔叶混交林的凋落物层对土壤呼吸的贡献率为 19%~53%, 平均为 36%; 针阔混交林凋落物层对土壤呼吸的贡献率为 14%~47%, 平均为 25%。此 5 种林型凋落物层对土壤呼吸的贡献率均表现为 1 月 < 2 月 < 12 月。

凋落物在整个冬季占土壤呼吸速率的比重在阔叶混交林、柏木林、针阔混交林、灌木林、马尾松林林中分别达到 36%, 28%, 25%, 20% 和 6%。其中, 5

种林型都表现为凋落物在 12 月份占土壤呼吸速率的比重最大, 按比重大小排列分别为: 阔叶混交林, 柏木林, 针阔混交林, 灌木林和马尾松林。凋落物占土壤呼吸速率的比重变幅按从大到小的顺序表现为: 针阔混交林, 柏木林, 阔叶混交林, 灌木林和马尾松林。

3 结论

(1) 不同林型土壤呼吸速率的日变化曲线存在差异, 日变化幅度大小因林型和月份而存在差异。其中, 以灌木林 2 月份的土壤呼吸日变幅最大 1.65~2.37 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 以柏木林 12 月的土壤呼吸日变幅最小 0.41~0.53 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。大部分林地不同月份最大土壤呼吸是最小土壤呼吸的 1.2~1.5 倍, 表现出比较平缓的日变化, 表明对同一气候区不同季节相似的环境条件的反应, 这几种森林类型的土壤呼吸日变化表现出的差异不大。

(2) 几种林型的土壤呼吸速率表现为 1 月 < 12 月 < 2 月, 最大土壤呼吸速率是最小土壤呼吸速率的 1.46~2.85 倍。同一林型不同月份之间土壤呼吸速率的差异变化较大, 不同林型同一月份之间的土壤呼吸速率的差异亦很明显。

(3) 几种林型的冬季土壤呼吸速率均与 5, 10, 15 cm 处土温有很强的相关关系, 且都呈较高的指数正相关。

(4) 几种林型的土壤呼吸速率与各土层的土壤体积含水率之间的关系较复杂。除了马尾松林土壤呼吸与 0—5, 5—10, 10—15 cm 的土壤体积含水率均表现出极显著的负相关关系外, 柏木林和阔叶混交林都只有 5—10 cm 的土壤体积含水率与土壤呼吸速率呈负相关关系, 灌木林只有 0—5 cm 的土壤体积含水率与土壤呼吸速率呈负相关关系, 针阔混交林, 只有 10—15 cm 的土壤体积含水率与土壤呼吸速率呈负相关关系。

(5) 5 种林型凋落物层对土壤呼吸的贡献率均

表现为 1 月 < 2 月 < 12 月。凋落物在整个冬季占土壤呼吸速率的比重在阔叶混交林、柏木林、针阔混交林、灌木林、马尾松林林分中分别达到 36%、28%、25%、20% 和 6%。凋落物占土壤呼吸速率的比重变幅按从大到小的顺序表现为: 针阔混交林, 柏木林, 阔叶混交林, 灌木林和马尾松林。

[参 考 文 献]

- [1] Post W M, Emanuel W R, Ainke P J, et al. Soil pool and world life zones[J]. *Nature*, 1982, 298:156-159.
- [2] 易志刚, 蚁伟民. 森林生态系统中土壤呼吸研究进展[J]. *生态环境*, 2003, 12(3): 361-365.
- [3] William H. Schlesinger, Jeffrey A. Andrews. Soil respiration and the global carbon cycle[J]. *Biogeochemistry*, 2000, 48:7-20.
- [4] Raich, Tufekcioglu. Vegetation and soil respiration: correlations and controls[J]. *Biogeochemistry*, 2000, 48: 71-90.
- [5] Risk Dave, Lisa Kellman, Hugo Beltrami. Are soil respiration processes geographically invariant? [C]// Canadian Geophysical Union Meeting, Banff, Canada, 2002, May 18-21.
- [6] Eric A D, Louis V V, Henrique I, et al. Effects of soil water content on soil respiration in forests and cattle pastures of eastern Amazonia [J]. *Biogeochemistry*, 2000, 48: 53-69.
- [7] Chen Q S, Li L H, Han X G, et al. Responses of soil respiration to temperature in eleven communities in Xilingol grassland, Inner Mongolia[J]. *Acta Phytocologica Sinica*, 2003, 27(4): 441-447.
- [8] 万军. 贵州省喀斯特地区土地退化与生态重建研究进展[J]. *地球科学进展*, 2003, 18(3): 447-453.
- [9] 袁道先. 岩溶作用与碳循环研究进展[J]. *地球科学进展*, 1999, 14(5): 425-432.
- [10] Andreas S, Sophie Z B, Gerhard G, et al. Winter soil respiration from an Austrian mountain forest[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2007, 146: 205-215.
- [11] Elberling B. Annual soil CO₂ effluxes in the high Arctic: The role of snow thickness and vegetation type [J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2007, 39: 646-654.
- [12] Myroslava K M, Altaf Arain J H, McCaughey. Temporal and spatial variability of soil respiration in a boreal mixed wood forest[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2006, 140: 244-256.
- [13] Monson R K, Lipson D I, Bums S P, et al. Winter forest soil respiration controlled by climate and microbial community composition [J]. *Nature*, 2006, 439(7077): 711-714.
- [14] Hubbard R M, Ryan M G, Kelly E, et al. Seasonal patterns in soil surface CO₂ flux under snow cover in 50 and 300 year old subalpine forests[J]. *Biogeochemistry*, 2005, 73: 93-107.
- [15] 王旭, 周广胜, 蒋延玲, 等. 长白山阔叶红松林皆伐迹地土壤呼吸作用[J]. *植物生态学报*, 2007, 31(3): 355-362.
- [16] 罗龙发, 牛赧, 王艺林, 等. 祁连山青海云杉林温度变化对土壤呼吸的影响[J]. *林业科学*, 2007, 43(10): 117-121.
- [17] 王光军, 田大伦, 朱凡, 等. 长沙樟树人工林生长季土壤呼吸特征[J]. *林业科学*, 2008, 44(10): 20-24.
- [18] 李红生, 刘广全, 王鸿喆, 等. 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*, 2008, 28(9): 4099-4106.
- [19] 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.
- [20] 王小国, 朱波, 王艳强, 等. 不同土地利用方式下土壤呼吸及其温度敏感性[J]. *生态学报*, 2007, 27(5): 1960-1968.
- [21] 侯琳, 雷瑞德, 刘建军, 等. 秦岭火地塘林区油松 (*Pinus tabulaeformis*) 林休眠期的土壤呼吸[J]. *生态学报*, 2008, 28(9): 4070-4077.
- [22] 高艳平, 丁访军, 崔迎春, 等. 黔中喀斯特地区不同林型春季土壤呼吸研究[J]. *水土保持学报*, 2009, 23(3): 163-167.