

# 川西亚高山针叶林土壤呼吸速率与不同土层温度的关系\*

陈宝玉<sup>1,2</sup> 刘世荣<sup>2\*\*</sup> 葛剑平<sup>1</sup> 王辉<sup>1</sup> 常建国<sup>2</sup> 孙甜甜<sup>1</sup> 马姜明<sup>2</sup> 施恭暾<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 北京师范大学生命科学学院, 北京 100875; <sup>2</sup> 中国林业科学研究院森林生态环境与保护研究所, 北京 100091)

**摘要** 采用密闭气室红外 CO<sub>2</sub> 分析法( IRGA ), 在野外连续定位测定了川西亚高山冷杉原始林的土壤呼吸, 并对其不同土层( 0、5、10、15 和 20 cm ) 的温度进行了同步测定. 在此基础上, 分析了土壤呼吸的日、季节动态变化, 及其与不同土层温度的关系和土壤呼吸 Q<sub>10</sub> 值变化. 结果表明: 冷杉原始林土壤呼吸呈现明显的日变化和季节变化. 土壤呼吸的日最高值出现在 12:00—14:00, 最低值出现在 8:00—10:00, 与土壤表面温度的日变化一致; 土壤呼吸的季节变化表明: 7—8 月的土壤呼吸高于 9—11 月, 与不同土层温度季节变化规律一致; 土壤呼吸与不同土层温度呈显著的指数增长关系, 土壤呼吸速率与土壤 15 cm 深处温度的相关性明显高于其它土层; 利用 Q<sub>10</sub> 模型计算 0~20 cm 各土层的 Q<sub>10</sub> 值分别为 2.36、4.75、4.90、6.27 和 5.46, 表明海拔高、温度低的环境条件下, 土壤呼吸的 Q<sub>10</sub> 值偏高.

**关键词** 亚高山针叶林 土壤温度 土壤呼吸速率 Q<sub>10</sub>

**文章编号** 1001-9332(2007)06-1219-06 **中图分类号** S714.2 **文献标识码** A

**The relationship between soil respiration and the temperature at different soil depths in sub-alpine coniferous forest of western Sichuan Province.** CHEN Bao-yu<sup>1</sup>, LIU Shi-rong<sup>2</sup>, GE Jian-ping<sup>1</sup>, WANG Hui<sup>1</sup>, CHANG Jian-guo<sup>2</sup>, SUN Tian-tian<sup>1</sup>, MA Jiang-ming<sup>2</sup>, SHI Gong-jian<sup>1</sup> (<sup>1</sup> College of Life Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; <sup>2</sup> Institute of Forest Ecology, Environment and Protection, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China). -Chin. J. Appl. Ecol., 2007, 18(6): 1219-1224.

**Abstract:** By using closed chamber IRGA technique, a continuous measurement of soil respiration rate was conducted in the subalpine natural coniferous forest mainly composed of *Abies faxoniana* in the eastern edge of Qinghai-Tibet Plateau, with the temperature at different soil depths (0, 5, 10, 15 and 20 cm) measured simultaneously. Base on the measurements, the quantitative relationships between soil respiration rate and the temperature at different soil depths were explored, and the results showed that the soil respiration rate in the forest had remarkable diurnal and seasonal changes, being the highest at 12:00-14:00 and in August, and the lowest at 8:00-10:00 and in November, which were accorded with the dynamics of soil temperature. Soil respiration rate had a significant exponential correlation with the temperature at different soil depths, and the highest correlation occurred at the soil depth of 15 cm ( $R^2=0.82$ ,  $P<0.01$ ). The Q<sub>10</sub> value at soil depths of 0, 5, 10, 15 and 20 cm was 2.36, 4.75, 4.90, 6.27 and 5.46, respectively, indicating that the Q<sub>10</sub> value of soil respiration tended to be larger at high elevation with low temperature.

**Key words:** subalpine coniferous forest; soil temperature; soil respiration rate; Q<sub>10</sub> value.

## 1 引言

大气中温室气体急剧增加而导致的全球气候变

化问题是当前最受关注的环境问题之一. 而温室气体中 CO<sub>2</sub> 浓度升高引起的温室效应是导致全球变暖的重要原因之一. 土壤碳库是陆地生态系统中最大的碳库, 其含量约为 1 500 Pg C, 约占碳总量的 67%<sup>[6-7]</sup>, 土壤碳库的微小变化可导致大气碳贮量的巨大变化<sup>[13]</sup>. 土壤呼吸是土壤碳输出的主要途径, 因此, 研究土壤呼吸作用及其影响因子, 以及其

\* 国家自然科学基金项目(30125036, 30590383)、国家重点基础研究发展规划项目(G2002CB111504)和“948”引进资助项目(2004-4-66, 2005-4-26).

\*\* 通讯作者. E-mail: Liusr@caf.ac.cn

2006-08-15 收稿, 2007-03-14 接受.

对全球变化的响应是碳循环研究的关键科学问题。

土壤呼吸指土壤排放  $\text{CO}_2$  的过程,可以分为3类:生物学过程、非生物学过程和人为因素。影响生物学过程的因子包括植被类型<sup>[16]</sup>、土壤动物<sup>[9]</sup>和土壤微生物<sup>[12]</sup>等;影响非生物学过程的因子包括土壤湿度<sup>[11]</sup>、土壤温度<sup>[19]</sup>、pH值<sup>[24]</sup>和风速<sup>[26]</sup>等;人为因素包括土地利用<sup>[21]</sup>、森林采伐<sup>[29]</sup>和环境污染<sup>[9]</sup>等。土壤表面  $\text{CO}_2$  通量(RS)即土壤呼吸,是植物根系、枯枝落叶层和土壤层(包括土壤矿物质、土壤微生物和土壤动物)呼吸作用释放出的  $\text{CO}_2$  的总和,约占大气  $\text{CO}_2$  年输入量的20%~40%<sup>[7]</sup>。土壤呼吸是多因素影响的过程,表现出明显的昼夜、月份、年际和世纪变化,其变化格局强烈地影响着陆地生态系统碳“汇”强度和大气  $\text{CO}_2$  浓度。近10多年来,国内外对不同区域森林、农田、草地和湿地土壤呼吸的强度<sup>[1,3,5]</sup>、时间和空间变化格局<sup>[15]</sup>、影响因素<sup>[10,22]</sup>等进行了大量的研究,而有关青藏高原东南缘的典型亚高山森林过渡地带的土壤呼吸研究甚少。川西亚高山林区是我国最大的原始林和原始次生林区之一,研究这一区域的土壤碳呼吸,对于深入理解亚高山森林生态系统碳平衡及其与全球变化之间的相互作用关系具有重要意义。本文以川西米亚罗林区为研究区,对全球气候变化最敏感的亚高山森林土壤呼吸过程及其影响因子进行研究,为评估和预测其在全球碳平衡中的作用提供科学依据。

## 2 研究地区与研究方法

### 2.1 自然概况

研究地区位于四川省理县米亚罗林区,属于青藏高原向四川盆地过渡的高山峡谷区(30°20′—30°35′N,102°32′—103°30′E)。处于岷江水系一级支流—杂谷脑河汇水区,属典型高山峡谷地貌。海拔高差悬殊,山峰一般在4000 m以上,高差约在2000 m,坡度在35°以上,最高达60°—70°。土壤以山地棕色灰化土、山地棕色森林土和山地褐土为主,其石砾、石块含量高、孔隙大、渗透性能强,土层较厚,地表凋落物较多。该区属于青藏高原气候区,受太平洋、印度洋及青藏高原三大气团影响,年均温6℃~12℃,极端最高气温32℃,极端最低气温-16℃。夏季温凉多雨,冬季寒冷干燥,最冷月(1月)平均气温为-8℃,最热月(7月)均温为12.6℃,≥10℃积温为1200℃~1400℃,年蒸发量为1000~1900 mm,年无霜期200 d,年均降水量为600~1100 mm,具有降水次数多、强度小的特点。森林植被垂直

分布明显:海拔2100 m以下为干旱河谷灌草植被,海拔2100~2500 m为落叶阔叶林带,海拔2500~3000 m为针阔混交林带,海拔3000~4000 m为亚高山暗针叶林带,海拔4100 m以上为高山灌木及草丛带。该地区原生植被为冷杉林,20世纪后半叶,由于大规模的人为采伐,原生植被几乎破坏殆尽,现存主要为天然次生林和云杉人工林,乔木主要有川西云杉(*Picea likiangensis*)、鳞皮冷杉(*Abies squamaria*)、岷江冷杉(*Abies faxoneana*)和红桦(*Betula albo-sinensis*)等;灌木主要有红刺悬钩子(*Rubus aurantiacus*)、红毛五加(*Acanthopanax gracilithlus*)、扁刺蔷薇(*Rosa sweginzowii*)、箭竹(*Sinarundinaria* spp.)、小蘗(*Berberis* spp.)等;草本主要有柳叶菜(*Epilobium laetum*)、卵叶葱(*Allium ovalifolium*)、蕨类(*Adiantum* spp.)等。川西亚高山原始暗针叶林中乔木以岷江冷杉为主,混有少量的川西云杉和红桦;灌木主要有红刺悬钩子、红毛五加、扁刺蔷薇、野樱桃(*Prunus tatsienensis*)、红脉忍冬(*Lonicera nervosa*)等;草本主要有蛛毛蟹甲草(*Cacalia roborowskii*)、山角叶假冷蕨(*Pseudocystopteris subtriangulare*)、苔藓(*Bardella* spp.)和蕨类等<sup>[18]</sup>。

### 2.2 研究方法

**2.2.1 试验设计** 试验地设在四川理县米亚罗地区的冷杉原始林,海拔3242 m,坡度18°,坡向SW30°,平均树高38.15 m,平均胸径46.2 cm,林分密度587株·hm<sup>-2</sup>,郁闭度为0.7。其建群种为岷江冷杉,单林层结构,灌草稀少。在林内地内设置1个100 m×50 m的标准地,再在标准地内设置3块20 m×10 m的样地,成品字形排列。在各样地中随机设置3个2 m×2 m的样方,样方内植被保持无干扰状态。由于研究区域处于川西亚高山地带,海拔较高,冬、夏季较长,春、秋季较短,冷杉原始林区在5月底和6月初还被积雪覆盖,因此,测定时间从2005年7月份开始到11月份结束。

**2.2.2 测定方法** 土壤呼吸速率测定采用动态密闭气室红外  $\text{CO}_2$  分析法(IRGA),测定仪器为LI-6400便携式  $\text{CO}_2$  分析仪(LI-COR, Lincoln, Nebraska USA)配LI-6400-09土壤呼吸室(soil chamber)。每次测定时,提前24 h将测定基座嵌入土壤中,每块样方安放5个,共计15个重复。基座为直径10 cm、高10 cm的聚氯乙烯圆筒,嵌入地表平均深度约8 cm。同时,将基座内的绿色植物齐地剪掉,尽可能不扰动地表的凋落物。经过24 h平衡后,土壤呼吸速率会恢复到基座放置前的水平,从而避免了由于安

置气室对土壤扰动造成的短期内呼吸速率的波动。测量时土壤呼吸室需要尽量接近土壤表面,以使土壤呼吸室内的气流能够充分与表面的气体混和。测定期间(2005年7—11月),每月测定2次,每个测定日6:00—18:00,每隔2h测定1次。

测定土壤呼吸速率的同时,用LI-6400便携式CO<sub>2</sub>分析仪同步测定10cm地温和地表气温。

在样地中插入一套曲管地温计(5cm、10cm、15cm和20cm),测定土壤呼吸时同步测定不同深度土壤的温度变化。

利用Excel(Microsoft Corp., USA)和SigmaPlot 9.0(Systat Software Inc., USA)软件对数据进行统计分析和图形处理。

### 3 结果与分析

#### 3.1 川西亚高山冷杉原始林不同层次土壤温度的变化

由图1可以看出,2005年7—11月,川西亚高山冷杉原始林的平均土壤温度差值由土壤表层的13.58℃骤降到土壤20cm层的8.9℃左右,随土壤深度增加呈明显的递减趋势。表明由于冷杉原始林所处海拔较高,导致土壤层的温度在持续5个月观测期间变化差值很大,因此,势必对土壤碳的释放造成较大的影响。

#### 3.2 川西亚高山冷杉原始林土壤呼吸速率和地表温度的日变化

由图2可以看出,原始冷杉林土壤呼吸与土壤表面温度呈不规则的单峰曲线,土壤呼吸的最高值发生在地表温度最高时刻(12:00—14:00),其最低点也是地表温度最低的时刻(8:00—10:00),表明土壤呼吸日变化与地表温度的变化一致。由于林内

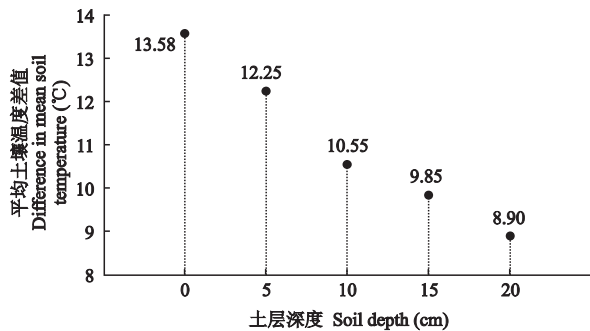


图1 不同土层平均温度差异变化

Fig. 1 Variation of difference in mean soil temperature at different soil depths.

图中数值表示7月土壤平均最高温度与对应土层11月平均最低温度的差值 Mean soil temperature difference:  $\bar{T}_{7-\max} - \bar{T}_{11-\min}$ .

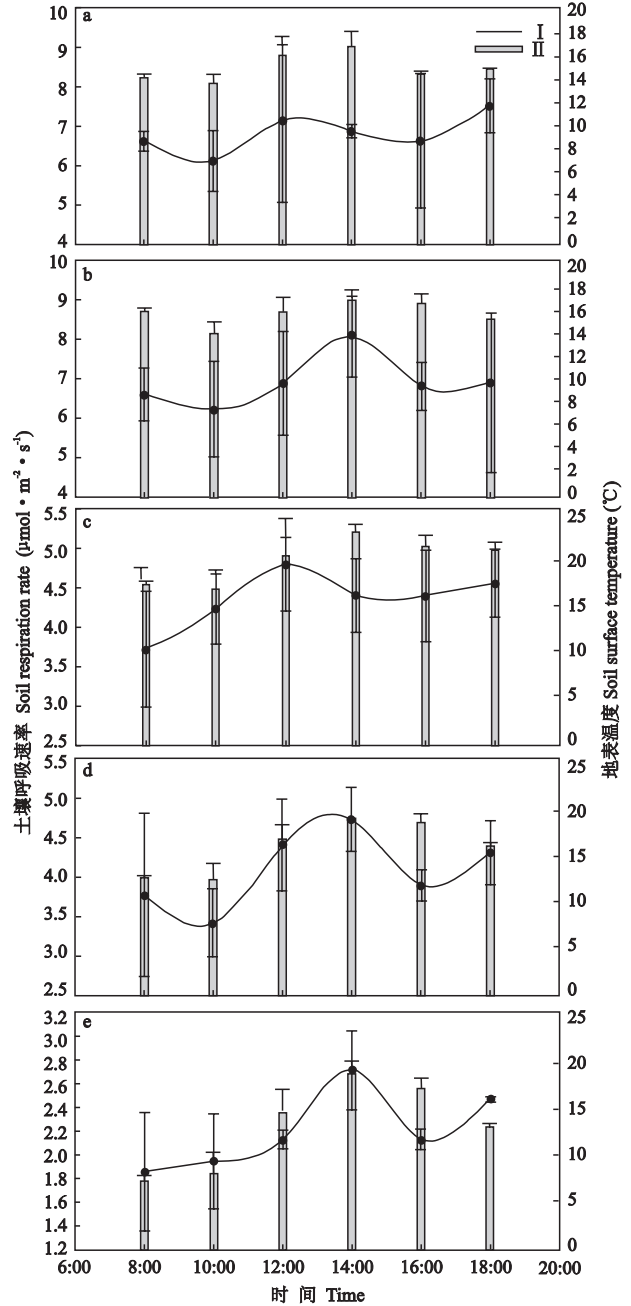


图2 土壤呼吸速率(I)和地表温度(II)的日变化

Fig. 2 Diurnal variation of soil respiration rate (I) and soil surface temperature (II).

a) 2005.07.18; b) 2005.08.05; c) 2005.09.06; d) 2005.10.11; e) 2005.11.03.

接受阳光直射的时间不同,所以温度的最大值与土壤呼吸速率的最大值发生时刻略有差异。

#### 3.3 川西亚高山冷杉原始林不同土层温度和土壤呼吸速率的季节变化

由图3可以看出,在整个观测期间,冷杉原始林不同土层温度和土壤呼吸速率均为春秋低、夏季高;且均从7月到11月呈降低趋势。土壤温度从5cm到20cm土层的变化不大,而0cm的土壤温度相对

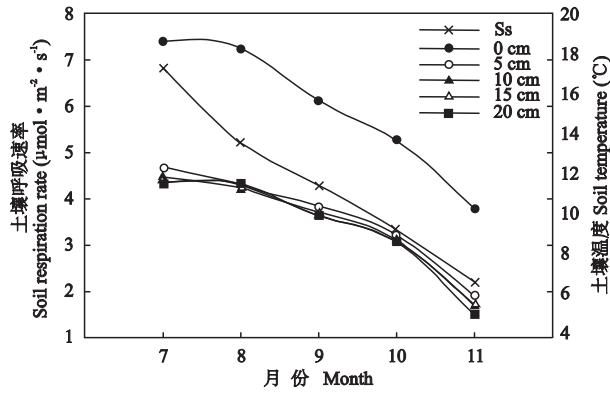


图3 土壤温度和土壤呼吸速率的季节变化

Fig. 3 Seasonal variation of soil temperature and soil respiration rate.

于其它土层变化剧烈,可能是土壤表层接受太阳直射较多的缘故。各层土壤温度和土壤呼吸速率均在7月份达到最大值,土壤总呼吸速率为  $6.81 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ,整个生长季的平均值为  $4.36 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ; 0~20 cm 土层的土壤温度依次为 18.59、12.4、11.92、11.67 和 11.55 °C; 7月份以后土壤温度降低,土壤微生物和土壤动物的活性也随之降低,枯枝落叶分解的速度缓慢,直接导致了土壤呼吸速率的下降;到11月份时,原始冷杉林区开始降雪,土壤温度降低到 5~6 °C 左右,土壤呼吸速率也降至最低,只有  $2.2 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

### 3.4 川西亚高山冷杉原始林土壤呼吸速率与各层土壤温度的关系

由图4可以看出,冷杉原始林各层土壤温度与土壤呼吸速率均呈显著的指数关系。林地内土壤呼吸速率与地表温度显著相关 ( $P < 0.05, R^2 = 0.399$ ),与其它土层温度极显著相关 ( $P < 0.01, R^2 > 0.7$ )。其中,15 cm 土层土壤温度相关系数达到 0.821,说明土壤呼吸作用随土壤温度的升高而增强。

$Q_{10}$  是反映土壤呼吸对温度变化敏感性的指标,指温度每升高 10 °C 时土壤呼吸速率增加的倍数<sup>[4,20]</sup>。由于不同环境对土壤呼吸速率影响的因子不同,计算  $Q_{10}$  值的数学模型也不尽相同。本研究采用目前较常用的模型:  $Q_{10} = e^{10b}$ 。式中,  $b$  为土壤呼吸与温度指数模型  $f = ae^{bx}$  ( $f$  为呼吸速率,  $a$  为基础呼吸速率,  $b$  为温度反应系数) 中的温度反应系数。根据土壤呼吸速率与土壤各层温度的指数回归方程(图4)可以算出土壤各层温度的  $Q_{10}$  值(表1)。土壤温度从 0 cm 到 20 cm 呈递减趋势,而  $Q_{10}$  值的变化幅度依次为 2.36、4.75、4.90、6.27 和 5.46。

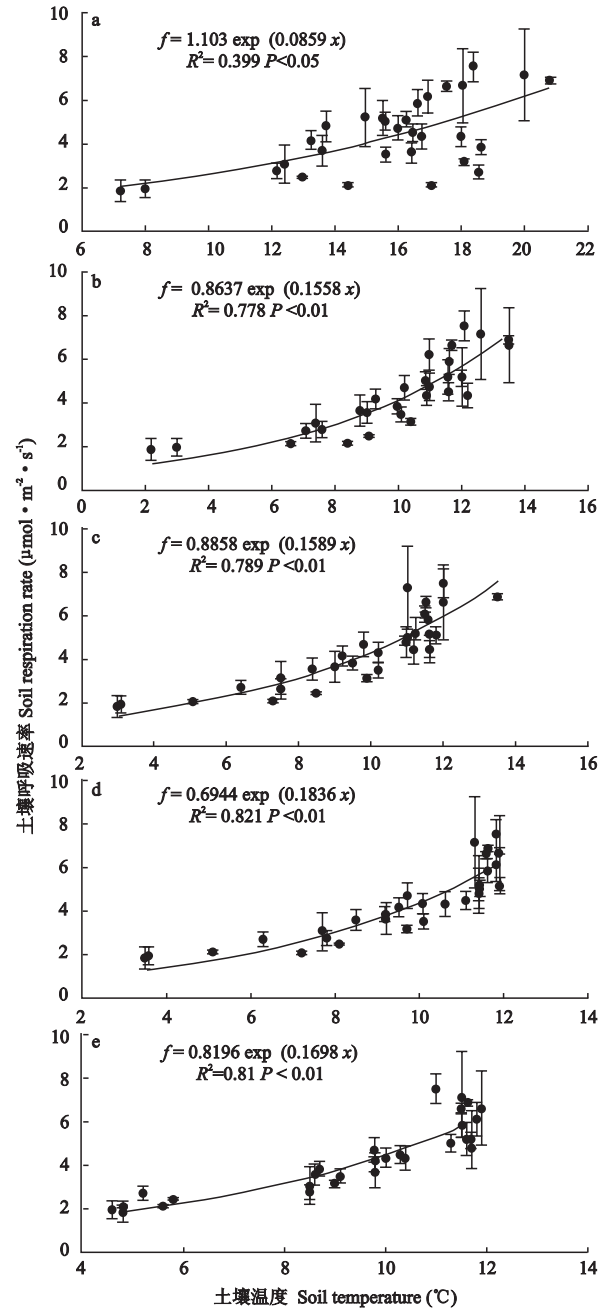


图4 土壤呼吸速率与各土层土壤温度的关系( $n = 360$ )

Fig. 4 Relationships of soil respiration rate and soil temperature at different depths.

a) 0 cm; b) 5 cm; c) 10 cm; d) 15 cm; e) 20 cm.

表1 不同层次土壤温度的  $Q_{10}$  值

Tab. 1  $Q_{10}$  value of temperature at different soil depths

土层深度 Soil depth (cm)	$a$	$b$	$Q_{10}$
0	1.103	0.0859	2.36
5	0.8637	0.1558	4.75
10	0.8858	0.1589	4.90
15	0.6944	0.1836	6.27
20	0.8196	0.1698	5.46

## 4 讨 论

土壤呼吸是一个十分复杂的土壤生态学过程,受多种因素的影响,而温度和土壤水分是土壤呼吸的主要限制因子<sup>[2,10,22]</sup>。在土壤水分充足的地区,土壤含水量不是土壤呼吸的主要限制因子;只有在干旱或半干旱地区和土壤含水量过饱和的情况下,温度和土壤水分才对土壤呼吸共同起作用<sup>[28]</sup>。2005年米亚罗地区降水充足,因此,本文只将温度作为本地区土壤呼吸的主要限制因子。米亚罗冷杉原始林所处海拔3 242 m,各层土壤温度变化差值很大(从0 cm 土层的13.58 °C降至20 cm 土层的8.90 °C),对土壤碳的释放造成较大的影响。

米亚罗冷杉原始林区土壤呼吸有明显的日变化(多峰曲线)和季节变化(单峰曲线),土壤呼吸的日最高值出现在12:00—14:00,土壤呼吸月最高值出现在7月,与地表温度的变化趋势一致。这主要是因为米亚罗林区属于青藏高原气候区,受印度洋、太平洋、青藏高原三大气团影响,夏季温凉多雨,冬季寒冷干燥<sup>[18]</sup>。从6月中旬开始,该区积雪开始融化,温度上升,水分增加,土壤微生物活动和枯枝落叶分解速度也开始加快,因此,土壤呼吸速率随之增加<sup>[8]</sup>。这与国内外相关研究所得规律基本一致<sup>[4,8,27,29]</sup>。土壤呼吸的这种变化规律主要受土壤温度的影响。但在不同的月份,地表温度的变化比土壤呼吸作用滞后,可能是由于某个月份地表温度过高抑制了微生物和动物活动造成的<sup>[23]</sup>。

回归分析结果表明,该森林类型各层土壤温度与土壤呼吸均呈指数相关关系,除土壤呼吸与地表温度达到5%显著水平外,与5~20 cm 各层土壤温度均达到1%显著水平。其中,土壤呼吸与15 cm 土层温度的 $R^2$ 值最高,达到0.821。这与一些研究者得出的土壤呼吸与土壤5 cm<sup>[4,14]</sup>或者10 cm<sup>[30]</sup>温度关系最显著有一定差异。究其原因,可能是原始冷杉林枯枝落叶和腐殖质层较厚,而对土壤呼吸贡献最大的土壤微生物主要分布在这一层,对温度的变化比较敏感。周存宇等<sup>[30]</sup>在研究鼎湖山针阔混交林土壤呼吸作用时指出,土壤呼吸速率与气温和土壤温度均呈显著指数相关,但与5~10 cm 土壤温度相关性最好,也与本研究结果有一些差异。这可能归因于本研究区位于亚高山带,气温相对较低、土壤温度变化较慢。陈全胜等<sup>[2]</sup>在内蒙古草原的研究结果表明,土壤呼吸与气温相关性最好,其次是地表温度,主要原因是草原的枯落物和腐殖质层薄且附着在地

表面,而且土壤中有有机质含量也很少。王淼等<sup>[25]</sup>研究长白山阔叶红松林生态系统土壤呼吸时指出,土壤呼吸速率与土壤温度具有很好的指数曲线相关性,但在夏初和秋末,土壤呼吸受较低水分的抑制,而不是土壤温度。

全球土壤呼吸的 $Q_{10}$ 一般在2.0~2.4之间,平均值为2.0<sup>[4]</sup>,高纬度地区大于低纬度地区。本研究区各层土壤呼吸的 $Q_{10}$ 在2.36~6.27之间,比文献报道的热带森林(1.96)、温带森林(2.0~3.5)和草原的(2.0~3.0) $Q_{10}$ 值偏高<sup>[13,17]</sup>。本研究结果表明,在亚高山带地区,海拔较高,土壤温度变化缓慢, $Q_{10}$ 值偏高,与国外在低温研究区 $Q_{10}$ 值偏高的研究结果相一致<sup>[20]</sup>。

## 参考文献

- [1] Bochove EV, Jones HG, Bertrand N, et al. 2000. Winter fluxes of greenhouse gases from snow covered agricultural soil: Intra-annual and inter-annual variations. *Global Biogeochemical Cycles*, **14**: 113-125
- [2] Chen Q-S (陈全胜), Li L-H (李凌浩), Han X-G (韩兴国), et al. 2004. Temperature sensitivity of soil respiration in relation to soil moisture in 11 communities of typical temperate steppe in Inner Mongolia. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), **24**(4): 831-836 (in Chinese)
- [3] Fang C, Moncrieff JB. 2001. The dependence of soil CO<sub>2</sub> efflux on temperature. *Soil Biology and Biochemistry*, **33**: 155-165
- [4] Fang Q-L (房秋兰), Sha L-Q (沙丽清). 2006. Soil respiration in a tropical seasonal rain forest and rubber plantation in Xishuangbanna, Yunnan, SW China. *Acta Phytocologica Sinica* (植物生态学报), **30**(1): 97-103 (in Chinese)
- [5] Frank AB, Liebig MA, Hanson JD. 2002. Soil carbon dioxide fluxes in northern semiarid grassland. *Soil Biology & Biochemistry*, **34**: 1235-1241
- [6] Hashimoto S, Tanaka N, Suzuki M, et al. 2004. Soil respiration and soil CO<sub>2</sub> concentration in a tropical forest, Thailand. *Japanese Forestry Research*, **9**: 75-79
- [7] Jenkison DS, Adams DE, Wild A. 1991. Model estimates of CO<sub>2</sub> emissions from soil in response to global warming. *Nature*, **351**: 304-306
- [8] Jiang Y-L (蒋延玲), Zhou G-S (周广胜), Zhao M (赵敏), et al. 2005. Soil respiration in broad-leaved and Korean pine forest ecosystems, Changbai Mountain, China. *Acta Phytocologica Sinica* (植物生态学报), **29**(3): 411-414 (in Chinese)
- [9] Komulainen M, Mikola J. 1995. Soil processes as influenced by heavy metals and the composition of soil fauna. *Journal of Applied Ecology*, **32**: 234-241
- [10] Lavigne MB, Boutin R, Foster RJ. 2003. Soil respiration responses to temperature are controlled more by

- roots than by decomposition in balsam fir ecosystems. *Canadian Journal of Forest Research*, **33**: 1744–1753
- [ 11 ] Lawrence BF, Johnson BG. 2005. Interacting effects of temperature, soil moisture and plant biomass production on ecosystem respiration in a northern temperate grassland. *Agricultural and Forest Meteorology*, **130**: 237–253
- [ 12 ] Lee KH, Jose S. 2003. Soil respiration, fine root production, and microbial biomass in cottonwood and loblolly pine plantations along a nitrogen fertilization gradient. *Forest Ecology and Management*, **185**: 263–273
- [ 13 ] Liu S-H (刘绍辉), Fang J-Y (方精云). 1997. Effect factors of soil respiration and the temperature's effect on soil respiration in the global scale. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), **17**(5): 469–476 (in Chinese)
- [ 14 ] Liu Y (刘颖), Han S-J (韩士杰), Hu Y-L (胡艳玲), et al. 2005. Effects of soil temperature and humidity on soil respiration rate under *Pinus sylvestris* forest. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), **16**(9): 1581–1585 (in Chinese)
- [ 15 ] Luan J-W (栾军伟), Xiang C-H (向成华), Luo Z-S (骆宗诗), et al. 2006. Research advances in forest soil respiration. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), **17**(12): 2451–2456 (in Chinese)
- [ 16 ] Menyailo OV, Hungate BA, Zech W. 2002. The effect of single tree species on soil microbial activities related to C and N cycling in the Siberian artificial afforestation experiment. *Plant and Soil*, **242**: 183–196
- [ 17 ] Mou S-G (牟守国). 2004. Respiration of soils under temperate deciduous, coniferous and mixed forests. *Acta Pedologica Sinica* (土壤学报), **41**(4): 564–570 (in Chinese)
- [ 18 ] Pang X-Y (庞学勇), Liu S-Q (刘世全), Liu Q (刘庆), et al. 2003. Influence of plant community succession on soil physical properties during coniferous plantation rehabilitation in western Sichuan. *Journal of Soil Water Conservation* (水土保持学报), **12**(17): 42–50 (in Chinese)
- [ 19 ] Pietikäinen J, Pettersson M, Bååth E. 2005. Comparison of temperature effects on soil respiration and bacterial and fungal growth rates. *FEMS Microbiology Ecology*, **52**: 49–58
- [ 20 ] Qi Y, Xu M, Wu JG. 2002. Temperature sensitivity of soil respiration and its effects on ecosystem carbon budget: Nonlinearity begets surprises. *Ecological Modelling*, **153**: 131–142
- [ 21 ] Sánchez ML, Ozores MI, Colle R, et al. 2002. Soil CO<sub>2</sub> fluxes in cereal land use of the Spanish plateau: Influence of conventional and reduced tillage practices. *Chemosphere*, **47**: 837–844
- [ 22 ] Smith VR. 2003. Soil respiration and its determinants on a sub-Antarctic island. *Soil Biology & Biochemistry*, **35**: 77–91
- [ 23 ] Vanessa T, Ana R, Giovanni M, et al. 2006. Soil respiration in a Mediterranean oak forest at different developmental stages after coppicing. *Global Change Biology*, **12**: 110–121
- [ 24 ] Vanhala P. 2002. Seasonal variation in the soil respiration rate in coniferous forest soils. *Soil Biology & Biochemistry*, **34**: 1375–1379
- [ 25 ] Wang M (王森), Liu Y-Q (刘亚琴), Hao Z-Q (郝占庆), et al. 2006. Respiration rate of broadleaved Korean pine forest ecosystem in Changbai Mountains. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), **17**(10): 1789–1795 (in Chinese)
- [ 26 ] William GB, Hutrya L, Patterson DC, et al. 2005. Wind-induced error in the measurement of soil respiration using closed dynamic chambers. *Agricultural and Forest Meteorology*, **131**: 225–232
- [ 27 ] Xu M, Qi Y. 2001. Soil surface CO<sub>2</sub> efflux and its spatial and temporal variations in a young ponderosa pine plantation in northern California. *Global Change Biology*, **7**: 667–677
- [ 28 ] Yang J (杨晶), Huang J-H (黄建辉), Zhan X-M (詹学明), et al. 2004. The diurnal dynamic patterns of soil respiration for different plant communities in the agro-pastoral ecotone with reference to different measuring methods. *Acta Phytocologica Sinica* (植物生态学报), **28**(3): 318–325 (in Chinese)
- [ 29 ] Zhang QF, Justice CO, Desanker PV. 2002. Impacts of simulated shifting cultivation on deforestation and the carbon stocks of the forests of central Africa. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, **90**: 203–209
- [ 30 ] Zhou C-Y (周存宇), Zhou G-Y (周国逸), Wang Y-H (王迎红), et al. 2005. Soil respiration of a coniferous and broad-leaved mixed forest in Dinghushan Mountain, Guangdong Province. *Journal of Beijing Forest University* (北京林业大学学报), **27**(4): 23–27 (in Chinese)

---

作者简介 陈宝玉,男,1976年生,博士.从事全球变化、土壤碳循环和作物节水抗旱研究,发表论文4篇. Tel: 010-58805082; E-mail: bych76@126.com

责任编辑 李凤琴

---