第 21 卷第 12 期
2001 年 12 月

生 态 学 报
ACTA ECOLOGICA SINICA

Vol. 21, No. 12
Dec., 2001

海南岛尖峰岭热带山地雨林土壤和凋落物呼吸研究

骆土寿，陈步峰，李意德，林明献，周光益，陈德祥，邱坚锐

（中国林业科学研究院热带林业研究所，广州 510520）

摘要：采用 CI-301 PS 红外 CO_2 测定系统对海南岛尖峰岭热带山地雨林土壤和凋落物的呼吸进行测定结果表明，原始林土壤呼吸速率昼夜变化表现为多峰曲线，最高峰在 20:00，在 12:00 和 4:00～6:00 出现 2 个次高峰，平均呼吸速率为 10.6853 μmol·m^{-2}·s^{-1}；更新林土壤呼吸速率变化大，平均为 14.7536 μmol·m^{-2}·s^{-1}，高峰主要在 13:00 和 2:00；凋落物分解过程在林地 CO_2 排放总量中贡献很少，仅占 1.741%～2.831%；原始林凋落物 CO_2 排放量明显比更新林大，而各层的排放比例不一样，原始林是 b 层（半分解凋落物及腐殖质层）>a 层（未分解凋落物层），更新林是 b 层<a 层；森林凋落物覆盖层对林地土壤 CO_2 排放起到减缓的屏蔽作用；林地土壤呼吸与环境因子的关系较复杂，原始林土壤呼吸速率除与大气 CO_2 浓度有关外，主要是时间节律影响，以及与气温变化有关，与大气湿度关系不明显；更新林地除与大气 CO_2 浓度和时间节律有关外，气温、湿度影响力增大。

关键词：热带山地雨林；土壤呼吸；凋落物 CO_2 排放速率；CO_2 排放节律

Litter and soil respiration in a tropical mountain rain forest in Jianfengling, Hainan Island

LUO Tu-Shou, CHEN Bu-Feng, LI Yi-De, LIN Ming-Xian, ZHOU Guang-Yi, CHEN De-Xiang, QIU Jian-Rui (*The Research Institute of Tropical Forestry, CAF, Guangzhou, 510520, China*). *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21(12): 2013～2017.

Abstract: Litter respiration and soil respiration were measured in a tropical mountain rain forest in Jianfengling, Hainan Island. The results were as follows: diurnal changes in soil respiration in virgin forest showed multi-peaks and the highest peak appeared at 8:00. Respiration and temperature of soil both reached lower peaks at 12:00 and during 4:00～6:00 respectively, with a mean respiratory rate of 10.7μmol·m^{-2}·s^{-1}. In regeneration forest, respiratory rates of soil reached peaks with a mean value of 14.8μmol·m^{-2}·s^{-1}, during 1 to 3 PM and varied significantly. Litter decomposing contributed only 1.7%～2.8% of the total CO_2-release in forestland and it differed in the different forests and soil layers: Virgin forest had a higher CO_2 releasing capacity than regeneration forest. Litter-fall reduced CO_2-release as a shield. Soil respiration in forestland was highly correlated with the environmental factors such as atmospheric CO_2, air temperature. But in the virgin forest, it was influenced mainly by time-course. In the regeneration forest, the air temperature and humidity had a greater effect on respiration.

Key words: tropical mountain rain forest; soil respiration; CO_2-release rate

文章编号：1000-0933(2001)12 2013-05 **中图分类号**：Q143 **文献标识码**：A

森林土壤及其凋落物作为大气 CO_2 循环的源和汇，在贮存 C 素的同时，由于凋落物的分解和土壤动物、微生物的活动而向大气中释放 CO_2 也备受关注。国内外对热带森林土壤 C 循环的研究主要集中在森林采伐、垦殖、炼山、整地和造林对土壤 C 循环的影响方面，或不同的学者采用各自的假设和观测资料对森林

基金项目：国家自然科学基金(39870618)和国家林业局重点项目(2001-08)、国际合作(热带原始林保护示范区 ITTO PD 14/92 Rev. 2)资助项目。

收稿日期：2001-04-03；**修订日期**：2001-08-25

作者简介：骆土寿(1963～)，男，汉族，广东吴川市人，高级工程师。主要从事热带林生态系统定位研究。

万方数据

土壤C储量进行了估测[1,2]，但对土壤、凋落物的呼吸及CO_2排放节律的研究较少。吴仲民等对尖峰岭热带森林土壤C储量和CO_2排放量进行了初步的研究[3]；李意德等用密闭吸收法每月一天对热带山地雨林土壤和凋落物的呼吸量进行测定，并初步拟合估测林地月均和年均CO_2排放量[4]；刘其汉等用马卡洛大暗箱法和埋管抽气法对海南岛尖峰岭半落叶季雨林土壤CO_2排放的月变化、季节动态，以及土壤间隙空气CO_2浓度的月变化等土壤CO_2特征进行过研究[5]。本文主要报道海南尖峰岭热带林生态系统定位站采用红外CO_2气体分析仪测定法对热带山地雨林土壤及凋落物的呼吸昼夜变化节律及其与森林环境因子相互关系的测定结果，为进一步构建热带森林土壤碳循环及群落呼吸量估测模型提供科学依据。

1 研究点概况

试验地选择在全国重点野外台站的海南尖峰岭热带林生态系统定位研究站的热带山地雨林实验区内。尖峰岭位于海南岛的西南部(18°40′N，108°49′E)，属热带季风气候，5～10月份为雨季，11月份～翌年4月份为旱季，海拔800～1100m，年均气温19.7℃，1月份平均气温15.1℃，7月份平均气温22.9℃，年均降水量2651.6mm，年均相对湿度88%。土壤为热带砖黄壤，凋落物储存量多，微生物丰富，总数达28230.2万个/g干土[6]。原始林样地植被群落结构复杂，乔木种类在100种/hm^2以上，没有明显的优势种；更新林样地为1964年原始林皆伐迹地上发育的天然更新林，优势种以黎蒴栲(*Castanopsis fissa*)、尖峰栲(*Castanopsis jianfenglingensis*)、山乌桕(*Sapium discolor*)、黄桐(*Endospermum chinense*)等种类[7,8]。

2 研究方法

2.1 样点设置及林地分层

在热带山地雨林原始林、更新林林地上，每轮分别设置4个测点作对比观测，随机选点。实验地凋落物层较厚，为了测定林地各层的呼吸量，每测点的林地划分为3层测定：A. 自然林地层——保持林地自然状况，不动凋落物；B. 带半分解凋落物林地层　　林地上捡出未分解和已分解≤1/3体积的凋落物，保留其余凋落物及腐殖质的土壤层；C. 土壤层——清除表土以上的凋落物及可见的腐殖质碎片，仅保留土壤层。

2.2 呼吸速率测定

在1999年8～9月份的雨季选择晴朗天气，采用CI-301-PS红外CO_2测定系统、闭式通道测土壤呼吸方式对热带山地雨林土壤及凋落物的呼吸速率及环境的气温、湿度、土温、大气CO_2浓度等因子进行测定。24h内从8:00开始每隔2h测定一轮，并在7:00、13:00各增加一轮，每昼夜共14轮；每轮4个测点，仪器分别记录各测点每一层的6次观测值。

2.3 凋落物贮量及其CO_2排放速率测定

在原始林地和更新林地分别随机设置3个样方(大小为50cm×50cm)，每样方的凋落物按a层(未分解及已分解≤1/3体积的凋落物)和b层(分解＞1/3体积的凋落物及腐殖质)共2层取样，记录各层厚度，用塑料袋装回室内测定其湿重、呼吸速率、烘干重(70～80℃烘恒重)，并采用重铬酸钾氧化——外加热法测定有机碳含量。

3 研究结果与分析

3.1 林地呼吸速率的昼夜变化

3.1.1 原始林地呼吸速率的昼夜变化　在雨季对热带山地雨林原始林地的呼吸进行24h的连续测定，结果见图1。从图中看出，林地呼吸速率的最高峰值出现在20:00，在12:00和4:00～6:00出现2个次高峰值。图1中还可看出，清除凋落物及可见腐殖质后的土壤(C层)其呼吸速率比保持自然地表的林地(A层)和带有部分半分解凋落物及腐殖质的林地(B层)均要高，这与国内对内蒙古锡林河流域大针茅草原除掉凋落物的土壤呼吸的CO_2排放量大于带有凋落物的土壤呼吸的CO_2排放量的研究结果具有相似之处[9]。实验中同步测得各层近地表空气CO_2浓度大小也呈相同的规律。造成这些现象的原因有三：一是原始林凋落物覆盖层厚，在林地呼吸过程中扮演屏障角色，物理减慢土壤中CO_2外逸过程(见下面3.3论述)；二是土壤中占微生物大部分的好气性细菌在撕开凋落物层后，活动异常旺盛所致[9]；三是凋落物以CO_2形式直接释放的C量相当低(见下面3.2论述)，主要以别的形式转化和迁移。

3.1.2 更新林地呼吸速率的昼夜变化　皆伐迹地天然更新30多年的更新林地呼吸速率的昼夜变化见图

万方数据

2。从图中看到更新林地呼吸峰主要在 13:00 和凌晨 2:00，林地 A、B、C 三层均在 16:00 和 6:00 出现数值较为接近的呼吸峰，表明更新林地呼吸速率变化大，这与更新林凋落物覆盖层薄、干燥松散、保温效应低有关。而三层中也是 C、B 层呼吸量较大，与原始林地具有相同的表现。

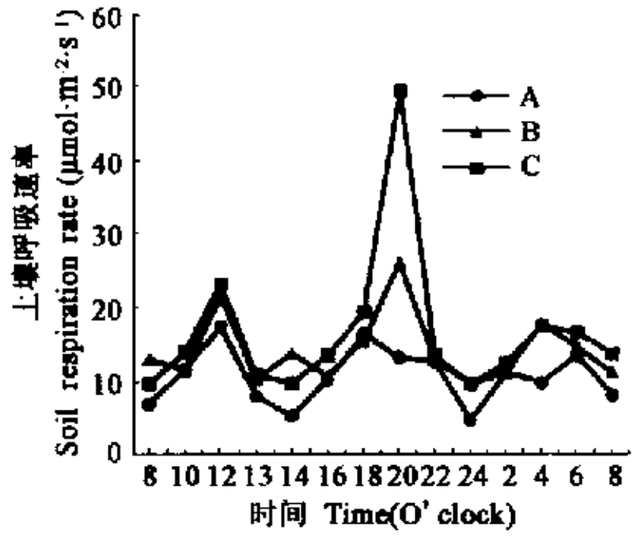

图 1　热带山地雨林原始林林地呼吸速率的昼夜变化
Fig. 1　Circadian changes of forestland respiration in tropical mountain virgin rain forest
A：自然地表林地，B：有部分半分解凋落物及腐殖质林地，C：清除凋落物及可见腐殖质上壤

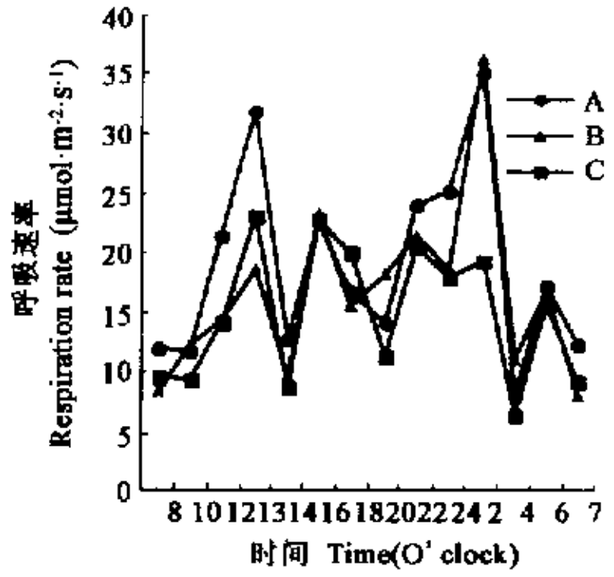

图 2　热带山地雨林更新林地呼吸速率昼夜变化
Fig. 2　Circadian changes of forestland respiration in tropical mountain regeneration forest
A、B、C are same as Fig. 1

3.1.3　原始林与更新林林地呼吸速率的比较　从林地昼夜呼吸速率的曲线(图 3)和平均数计算及差异显著性分析(t 检验)结果看，原始林地呼吸速率平均数为 10.6853μmol·m^{-2}·s^{-1}，标准差为 14.5436，更新林地呼吸速率平均数为 14.7536μmol·m^{-2}·s^{-1}，标准差为 32.4919，t=2.4515 ($t_{0.05}$=2.1604)，表明原始林比更新林地呼吸速率小，两平均数差异达显著水平；更新林地呼吸速率变化幅度较大。

3.2　凋落物贮量及其 CO_2 排放速率

森林凋落物是森林生态系统物质循环的重要组成部分，是大气层和土壤 C 素交换的介层之一。尖峰岭热带山地雨林每年以凋落物形式归还林地的 C 素总量是原始林 4.8t·hm^{-2}·a^{-1}，更新林 4.499t·hm^{-2}·a^{-1}[3]，作者试验测得现存凋落物 C 量分别为 0.262t·hm^{-2} 和 0.159t·hm^{-2}。为了区分出森林凋落物在森林生态系统 CO_2 循环的贡献，在林地设置 50cm×50cm 的样方内分别检出 a 层和 b 层凋落物进行呼吸量测定，结果见图 4。热带山地雨林凋落物直接排放的 CO_2 相当少，排放率在 0.186～0.360μmol·m^{-2}·s^{-1}之间，是林地 CO_2 排放率的 1.741%～2.831%，在林地 CO_2 排放总量中贡献很少，这事实也证实了前述关于林地(A 层)CO_2 排放量少于土壤层(C 层)的推测原因之一，凋落物直接排放 CO_2 量相对于对林地来说是微乎其微的。

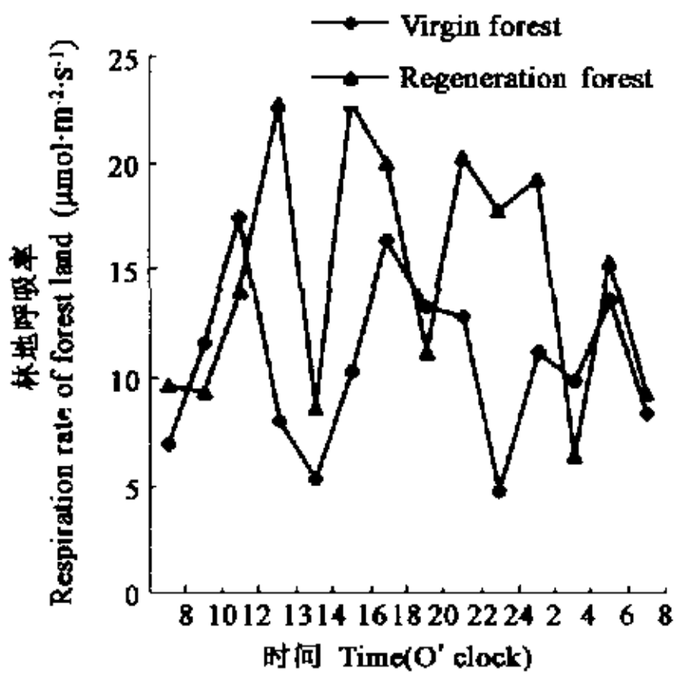

图 3　不同类型热带山地雨林林地呼吸速率昼夜变化
Fig. 3　Circadian changes in respiration of forestland in different forests in Tropical Mountain rain forest

从不同森林类型凋落物 CO_2 排放速率大小来看，原始林明显大于更新林。从凋落物各层的排放比例看，原始林是 b 层>a 层，更新林是 b 层<a 层，原因之一是林地凋落物多寡及各层所占比例不同所致(见图 5)。

3.3　凋落物覆盖层对土壤 CO_2 排放的屏障作用探释

为了检验前述关于凋落物覆盖层对土壤 CO_2 排放的屏障作用，设计了分层、固定测点、连续 24h 的土壤呼吸测定，即在热带山地原始林地上选取 4 个 A 层(自然林地层)测点，另在相隔 2～4m 地方选取 4 个 C 层(土壤层)测点，对这 8 个固定测点进行每 2h 一次的 CO_2 排放速率测定，这样可以排除 C 层测点由于不

万方数据

固定而每次测定均需取掉凋落物覆盖层造成土壤中高浓度 CO_2 瞬间外溢，引致观测值增加的误差。测定结果显示 A 层 CO_2 排放量均大于 C 层，即凋落物覆盖层有一定量的 CO_2 排放，但林地 CO_2 排放总量中凋落物贡献低(见前述)，而上述每轮随机测点刚揭去凋落物层后立即测定 C 层排放到大气 CO_2 浓度均大于 A 层，说明其 CO_2 排放量较大，这些结果可以说明凋落物覆盖层是减慢土壤向大气直接排放 CO_2 的屏障。这点与方晰等对已郁闭杉木人工林地凋落物覆盖地面，在一定程度上减缓 CO_2 释放扩散的研究结果相一致[13]。

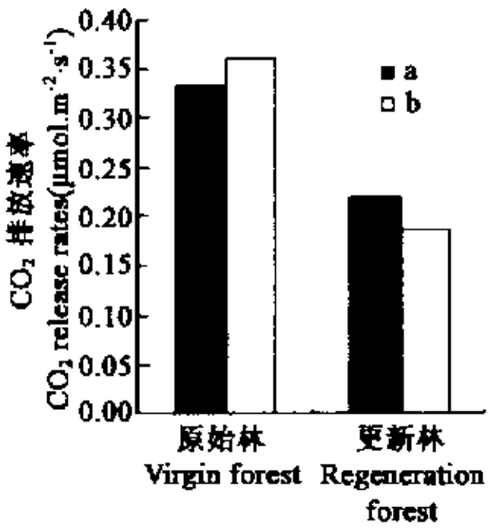

图 4 热带山地雨林凋落物 CO_2 排放速率

Fig. 4 CO_2-release rates of litter in tropical mountain rain forest

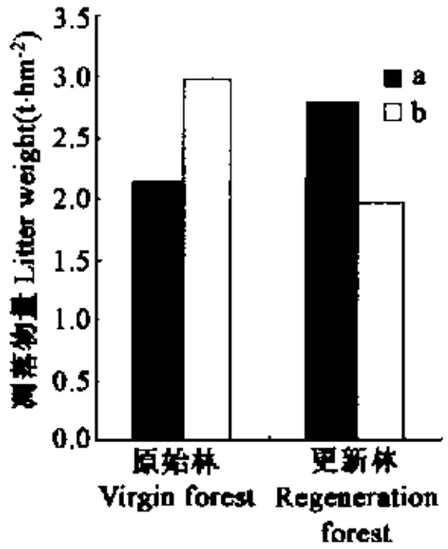

图 5 热带山地雨林凋落物现存量

Fig. 5 Existing amounts of litter-fall in tropical mountain rain forest

3.4 林地土壤呼吸与环境因子的相互关系

用 Pearson 偏相关方法分析热带山地雨原始林和更新林林地呼吸速率与时间、气温、湿度、CO_2 浓度等环境因子的相互关系。

(1) 原始林地 Pearson 偏相关阵

变量名	时间	气温	进气湿度	进气 CO_2	呼吸速率
时间	1.00000	0.43361	0.34415	0.48158	−0.28469
气温	0.12140	1.00000	−0.92331	0.01646	0.11292
进气湿度	0.22825	0.00000	1.00000	0.12755	0.07540
进 CO_2	0.08123	0.95547	0.66390	1.00000	0.47993
呼吸速率	0.32388	0.70073	0.79782	0.08243	1.00000

其相关阵的上三角系偏相关系数，下三角系 t 检验的 p 值(下同)。

(2) 更新林地 Pearson 偏相关阵

变量名	时间	气温	进气湿度	进气 CO_2	呼吸速率
时间	1.00000	0.78731	0.73615	−0.72491	0.56101
气温	0.00083	1.00000	−0.97037	0.81894	−0.41549
进气湿度	0.00268	0.00000	1.00000	0.79417	0.42603
进气 CO_2	0.00335	0.00034	0.00069	1.00000	0.58739
呼吸速率	0.03687	0.13956	0.12879	0.02720	1.00000

从偏相关系数看，原始林林地(带凋落物层)呼吸速率与大气 CO_2 浓度相关较好，偏相关系数达 0.47993，与大气相对湿度关系较低，系数仅 0.07540，与时间、气温关系较相对湿度为高。而更新林林地(带凋落物层)呼吸速率与时间、气温和大气相对湿度、CO_2 浓度的偏相关系数均较高，分别为 0.56101、−0.41549、−0.42603 和 0.58739。

从 t 检验的 p 值看，原始林地的呼吸速率与进气 CO_2 浓度的偏相关达显著水平($p \leqslant 0.1000$ 为显著水平)，更新林地呼吸速率与时间、进气 CO_2 浓度的偏相关也达显著水平，呼吸速率与其他因子的偏相关不显著。这些数据表明热带山地雨林林地土壤呼吸速率是由多种环境因子综合作用的结果。原始热带山地雨林林地土壤呼吸速率除与大气 CO_2 浓度有关外，主要是时间节律影响，以及与气温变化有关，与大气湿度关系不明显，原因是原始林内观测期间大气湿度平均在 86.03%～88.25%，平均土温在 21.53～22.01℃，变

万方数据

化幅度很小所致(见图 6)；更新林林地除与大气 CO_2 浓度和时间节律有关外，气温、湿度影响力增大，这是由于地被物较少，群落物种及结构较简单[2]，林内气温和湿度受阳光、风等因子影响较大，进而影响林地呼吸所致。

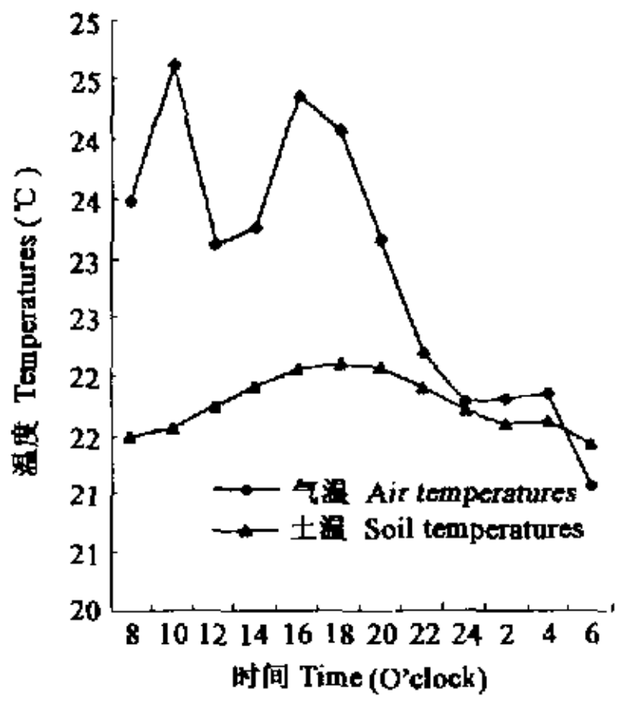

图 6　热带山地雨林林内气温和土温变化

Fig. 6　Circadian changes in air and soil temperatures in tropical mountain rain forest

4　小结及讨论

(1) 热带山地雨林原始林林地土壤呼吸速率昼夜变化表现为多峰曲线，最高峰在 20:00，在 12:00 和 4:00～6:00 出现 2 个次高峰，这可能反映出林地的土壤呼吸与地下生物的活动和气温有关系，形成相应的生物呼吸峰和温度效应峰。平均呼吸速率为 10.6853μmol·m^{-2}·s^{-1}，变化幅度小，系统代谢处于相对平稳的状态。

(2) 热带山地雨林天然更新林林地土壤呼吸速率昼夜变化也表现为多峰曲线，高峰主要在 13:00 和 2:00，在 16:00 和 6:00 出现 2 个呼吸峰，平均呼吸速率 14.7536μmol·m^{-2}·s^{-1}，呼吸速率变化大，这结果与方晰对杉木人工林未成林造林地 CO_2 释放量的昼夜变化比较复杂的研究结果相一致[10]。原因是更新林群落结构较原始林简单，系统代谢旺盛，凋落物覆盖层薄、干燥松散、保温效应低，较易受外界因子的影响所致。

(3) 热带山地雨林凋落物直接排放的 CO_2 相当少，排放速率在 0.186～0.360μmol·m^{-2}·s^{-1}之间，是林地 CO_2 排放速率的 1.741%～2.831%，在林地 CO_2 排放总量中贡献很少。原始林凋落物 CO_2 排放量明显比更新林大。凋落物不同层次的 CO_2 排放速率不一样，原始林是 b 层(半分解凋落物及腐殖质)>a 层(未分解凋落物)，更新林是 b 层<a 层，原因之一是林地凋落物多寡及各层凋落物所占比例不同所致。而森林凋落物覆盖层对林地土壤 CO_2 排放起到减缓的屏障作用。

(4) 林地土壤呼吸与环境因子的关系较复杂，原始雨林林地土壤呼吸速率除与大气 CO_2 浓度有关外，主要是时间节律影响，以及与气温变化有关，与大气湿度关系不明显；次生林林地除与大气 CO_2 浓度和时间节律有关外，气温、湿度影响力增大，这是由于地被物较少，群落结构较简单，林内气温和湿度受阳光、风等因子影响较大，进而影响林地呼吸所致。

参考文献

[1] 徐德应. 人类经营活动对森林土壤碳的影响. 世界林业研究，1994，(5)：26～32.
[2] 李意德，吴仲民，周铁烽. 中国热带天然林变迁对大气 CO_2 的影响及经济损益评估. 生态科学，1999，**18**(2)：1～7.
[3] 吴仲民，曾庆波，李意德，等. 尖峰岭热带森林土壤 C 储量和 CO_2 排放量的初步研究. 植物生态学报，1997，**21**(5)：416～423.
[4] 李意德. 林木土壤和凋落物呼吸测定. 见：曾庆波，等主编. 热带森林生态系统研究与管理. 北京：中国林业出版社，1997，173～186.
[5] 刘其汉，李艳敏. 海南岛尖峰岭半落叶季雨林生态效应的研究 Ⅱ. 土壤二氧化碳的特征. 热带林业科技，1987(5)：53～58.
[6] 康丽华. 土壤微生物. 见：蒋有绪，等著. 中国海南岛尖峰岭热带林生态系统. 北京：科学出版社，1991. 165～170.
[7] 黄　全，李意德. 海南岛尖峰岭热带山地雨林采伐迹地更新群落的初步分析. 植物生态学与地植物学学报，1988，**12**(10)：12～22.
[8] Li Yede, J. Comiskey and F. Dallmeier. Structure and composition of tropical mountain rain forest at Jianfengling Nature Reserve, Hainan Island, P. R. China. In: F. Dallmeier Eds. *Forest biodiversity in Europe, Australia and Africa: Research, Monitoring and Modeling*. The Parthenon Press, USA, 1997.
[9] 陈四清，崔骁勇，周广胜，等. 内蒙古锡林河流域大针茅草原土壤呼吸和凋落物分解的 CO_2 排放速率研究. 植物学报，1999，**41**(6)：645～650.
[10] 方　晰，田大伦. 杉木人工林林地 CO_2 释放量的研究. 林业科学，1997，**33**(Sp. 2)：94～103.

万方数据