

北京山地温带森林的土壤呼吸

刘绍辉 方精云*

清田 信

(中国科学院生态环境研究中心,北京 100085) (大阪府立大学区域环境科学系,大阪,日本)

摘要 本文通过在北京山地3种温带森林中为期一年的观测,得到了土壤呼吸速率与地下5cm 土壤温度之间的函数关系。据此并根据气象资料推算得到了白桦林、辽东栎林和油松林的年土壤呼吸量分别为 $1132\text{gCO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$, $143\text{gCO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 和 $866\text{gCO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 。与国外同纬度地区相比,该地年土壤呼吸量偏低。结果还显示,土壤呼吸与地下5cm 土壤温度的相关性好于与地表温度的相关性,并且水分含量对土壤呼吸也有影响。1994年秋季进行的昼夜连续观测表明,日土壤呼吸速率最高的时刻在中午12:00~下午4:00,最低的时刻在黎明前5:00~6:00。

关键词 北京 温带森林 地下5cm 温度 土壤呼吸速率 年土壤呼吸量

SOIL RESPIRATION OF MOUNTAINOUS TEMPERATE FORESTS IN BEIJING, CHINA

Liu Shaohui and Fang Jingyun

(Research Center for Eco-environmental Sciences, Academia Sinica, Beijing 100085)

Makoto Kiyota

(Department of Regional Environmental Study, Faculty of Agriculture, Osaka

Prefectural University, Sakai, Osaka, Japan 593)

Abstract One-year measurement of soil respiration rate was carried out in three mountainous temperate forests in Beijing, *Betula platyphylla*, *Quercus liaotungensis* and *Pinus tabulaeformis* forests. The relationships between the soil respiration rates (SRR) and soil temperature at 5 cm depth (ST-5cm) were obtained. The rates were used to estimate annual soil respiration amount of these three forests. As a result, the annual soil respiration amount was estimated as $1132\text{ g CO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ for *B. platyphylla* forest, $1431\text{ g CO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ for *Q. liaotungensis* forest, and $866\text{ g CO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ for *P. tabulaeformis* forest, showing smaller values than those obtained from other regions with similar other latitudes in the world. Whole day's measurements in fall of 1994 show that the daily highest SRR values were at 12:00 am~4:00 pm, and the lowest at 5:00~6:00am.

本文于1996-03-29收稿,1997-06-12收到修改稿。

国家八五科技攻关课题,并得到国家杰出青年科学基金资助。野外工作受到中国科学院北京森林生态定位站茅世森、宋风山等先生的大力支持。茅世森先生提供气象资料。在此深表谢意。

* 现工作单位和地址:北京大学城市与环境学系,北京 100871。

Key words Annual soil respiration amount, Beijing, Soil respiration rate, Soil temperature at 5 cm depth, Temperate forest

土壤呼吸是指土壤释放 CO₂ 的过程, 主要是由微生物氧化有机物和根系呼吸产生, 另有极少的部分是由土壤动物和化学氧化释放。作为生态系统功能的一个重要过程, 土壤呼吸往往作为土壤生物活性和土壤肥力乃至透气性的指标而受到重视 (Macfadyen, 1970; Reiners, 1968; Neilson *et al.*, 1990)。在全球气候变化成为公众关心的科学和社会热点问题的今天, 土壤呼吸作为土壤碳的主要输出途径和大气 CO₂ 重要的源, 其精确测定已成为全球变化研究中的关键问题之一。

土壤呼吸作为一个复杂的生物学过程, 受到多种因素的作用。这使得土壤呼吸一方面具有某种规律性, 另一方面又表现出不规则的变化。土壤呼吸不仅受到温度 (Buyanovsky, 1986)、湿度 (Schlentner & Cleve, 1985)、pH 值 (Baath & Arnebrant, 1994) 和风速 (Farrell *et al.*, 1966) 等环境条件的影响, 而且受到有关生物过程如植被、土壤动物 (Kretzschmar & Ladd, 1993; Bohlen & Edwards, 1995) 等以及人为因素, 如土地利用 (Chagas *et al.*, 1995)、森林砍伐 (Fernandez *et al.*, 1993) 和环境污染 (Komulainen & Mikola, 1995) 等因素的影响。

土壤呼吸的研究可以追溯到十九世纪末 (de Saussure, 1804), 但它主要针对于耕作土壤, 且集中于欧洲和北美。土壤呼吸的系统测定在我国尚属空白。本文在为期一年的工作中, 通过温度对土壤呼吸影响的研究, 推算全年土壤呼吸量。

1 试验地及森林类型

试验地点位于北京市西北的门头沟区小龙门林场 (39°58'N, 115°26'E)。我们从山中部至山顶选择了3种不同植被的样地: 油松 (*Pinus tabulaeformis*) 林、辽东栎 (*Quercus liaotungensis*) 林和白桦 (*Betula platyphylla*) 林。

1.1 油松林

油松林位于山脚东南向的山坡、海拔约1050m, 为30年左右的人工林, 林下基本无灌木, 草本植物也十分稀少, 地表为落叶所覆盖。土层厚约100~110cm、分化不明显、表层土呈暗褐色, 有机质含量较低 (约4.86%~5.81%)。

1.2 辽东栎林

辽东栎林位于山腰西南向的山坡上、海拔约1150m 的次生林。主要乔木为辽东栎, 混生有少量的棘皮桦 (*Betula utilis*)。林下灌木茂盛, 有绣线菊 (*Spiraea sargentiana*)、五角枫 (*Acer mono*)、胡枝子 (*Lespedeza bicolor*)、忍冬 (*Lonicera japonica*)、毛榛子 (*Corylus mandshurica*)、溲疏 (*Deutzia scabra*) 等, 草本植物十分繁盛。土层厚约90~120cm, 表层土呈深棕色, 有机质含量中等 (约8.25%~11.53%)。

1.3 白桦林

白桦林位于接近山顶的西北向山坳处, 海拔约1350m, 气温较低, 由于三面为山环绕, 较为荫暗、潮湿。乔木层主要为白桦, 混生有棘皮桦和白杨 (*Populus alba*)。林下灌木众多, 有花楸 (*Sorbus pohuashanensis*)、忍冬、山杏 (*Prunus armeniaca*)、毛榛子、五角枫、六道木

(*Abelia biflora*)、薄皮木(*Leptodermis oblonga*)、绣线菊、山茱萸(*Macrocarpium officinalis*)等,草本植物亦颇为茂密。土层厚约90~100cm,表层土呈黑色,有机质含量高(约17.05%~36.23%)。

2 试验方法及数据处理

2.1 试验方法

本试验从1994年9月至1995年8月,分秋、冬、春、夏4个季节分别对土壤呼吸进行测定,3个样地每次分别连续测定2~3天。除秋季昼夜连续测定外,其余从早7~8点左右至晚6~7点,每间隔2~3小时测定一次,每次做3个重复。测定方法为静态测定法。 CO_2 浓度测定仪采用日本帝人株式会社生产的PDA-100型便携式NDIR测定仪(测定范围:0~5000 $\times 10^{-6}$)。试验容器为3个铁制圆柱形容器,高26~28cm,直径27~28cm。容器外涂白色油漆,以防吸收阳光导致容器内温度上升。为消除测定位置可能会造成的差异,每次测定时容器放置在相同的位置上。

试验时,首先剪去林床草本植物的地上部分,再将容器插入土层5cm左右,砸实外圈土壤以防漏气。测定容器刚盖上时和一段时间后的 CO_2 浓度,同时测定地表温度和地下5cm处的土壤温度。

2.2 数据处理

根据理想气体状态方程: $PV=nRT$,设大气压 P 为1atm,地表温度 T' 为空气温度 T (选择3个重复数据中的最低值),换算后得到土壤呼吸速率 $V(\text{gCO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1})$:

$$V = \frac{(h - h') \times (c_2 - c_1) \times 44 \times 100}{0.082 \times (273 + T') \times t}$$

式中, h 和 h' 分别为容器高和插入土层的深度(dm), c_1 和 c_2 分别为测量时间前后的 CO_2 浓度($\times 10^{-6}\text{v}$), T' 为地表温度($^{\circ}\text{C}$), t 为测量时间(min)。

对3个重复结果中取相近的两个数据,得到一平均土壤呼吸速率。土壤温度(地下5cm处温度)取3个重复数据的平均值。最后,建立土壤呼吸速率与地表温度、土壤温度的关系,得到图1。

3 结果与讨论

3.1 土壤呼吸速率与土壤温度的关系

3个样地中,温度与土壤呼吸速率的相关性按白桦林、辽东栎林和油松林的顺序依次降低(图1)。在白桦林样地,无论是地表温度还是土壤温度(地下5cm的温度)都与土壤呼吸速率有较高的相关性。

土壤呼吸速率与地表温度的关系: $y=1.06e^{0.141x}$, $r^2=0.87$;式中 y 为土壤呼吸速率($\text{gCO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{min}^{-1}$), x 为地表温度($^{\circ}\text{C}$),下同。

土壤呼吸速率与土壤温度的关系: $y=0.5498x+0.5128$, $r^2=0.89$,式中 y 为土壤呼吸速率($\text{gCO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{min}^{-1}$), x 为土壤温度($^{\circ}\text{C}$),下同。

辽东栎林的土壤呼吸速率与土壤温度的相关性较高($y=1.38e^{0.0939x}$, $r^2=0.81$),但与地表温度的相关性较低($y=2.55e^{0.435x}$, $r^2=0.37$)。油松林样地中这两类相关性则都很差。

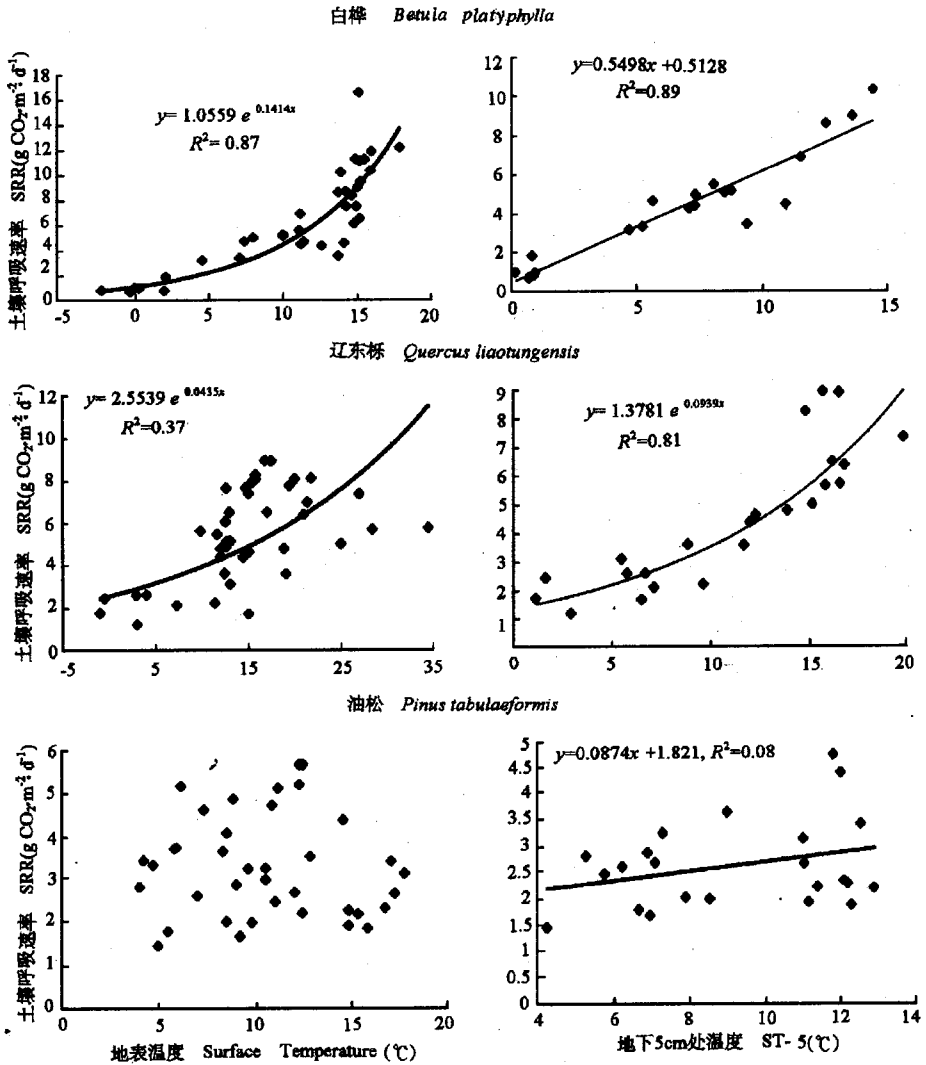


图1 3种林分的土壤呼吸速率分别与地表温度和地下5cm温度之间的关系

Fig. 1 Relationships between soil respiration rate (SRR) and soil surface temperature (SUT) and between soil respiration rate and soil temperature at 5 cm depth (ST-5) in three forest types, *B. platyphylla*, *Q. liaotungensis* and *P. tabulaeformis* forests

形成上述相关性强弱的主要原因可能是来自地形的影响。由于白桦林处于三面环山的山坳中,土壤终年潮湿,水份含量充足,主要的影响因素为温度。辽东栎林也显示出温度为主要影响。而油松林则不然。油松林处于东南向的山坡上,阳光充足,林下几乎无灌木和草本植物,保水性能很差。又由于北京地区冬春干旱少雨,特别是春季气温较高,蒸发量较大,土壤含水量可降至很低。这可能导致土壤含水量成为影响土壤呼吸的主要限制因素。Wildung(1975)和Schlentner(1985)的工作也证实在含水量很低的情况下,土壤温度与含水量共同起作用。

从图1看出,3个样点均显示了土壤呼吸速率与土壤温度的相关性好于与地表温度的

相关性。这是因为,一方面地表的土壤微生物活动最旺盛、对总的土壤呼吸速率的贡献最大,地下5cm 的温度能较准确地反映温度对土壤微生物的影响;另一方面,地表温度的变化大,特别是在林下,光斑可使得地表温度迅速上升。例如5月24日12点到下午2点,辽东栎林样地的地表温度从15℃上升到35~40.5℃,而地下5cm 温度仅从12.3℃升至16.7℃。也就是说,地表温度不能很好地反映温度对土壤生物的影响。

上述3个样地中,仅白桦林,其地表温度与土壤呼吸速率的相关性较好。这是由于地形因素的作用。由于该地三面环山,再加上林冠茂密,故阳光直射的影响很小。辽东栎林则显示了地表温度与土壤温度的显著差异(图1)。

3.2 土壤呼吸的日变化

图2显示1994年秋季测得的土壤呼吸速率与地表温度的日变化。结果显示了土壤呼吸与温度变化的一致性。即:土壤呼吸的最高峰大致发生在地表温度最高的时刻,其最低点也是地表温度的最低点(早晨5点左右)。由于地形对最低温基本没有影响,故3个样地的最低温与土壤呼吸最低的时刻基本相同。而地表温度的最高点受到地形的影响较大。阳光照射时间的不同导致各个样地的地表最高温度与最强土壤呼吸的时刻有相当大的差别,如西南向的辽东栎林样地在下午4:00左右,东南向的油松林样地在中午12:00左右。此外,测定时的天气也影响很大。如测定白桦林样地时为阴雨天气,故我们看到的的数据变化幅度不大。又如测定辽东栎林样地的最后一天的下午,即9月8日下午天气由晴转为阴雨天气,导致测得的地表温度和土壤呼吸速率均较前一天低。

3.3 年土壤呼吸量

根据位于海拔1050m 处的北京森林生态定位站的资料(油松林样地附近,1992~1995年4年观测资料平均值),我们采用地下5cm 处的旬均温,拟合了全年天数(从每年7月1日至翌年6月30日,以365天计)与地下5cm 温度的关系(图3):

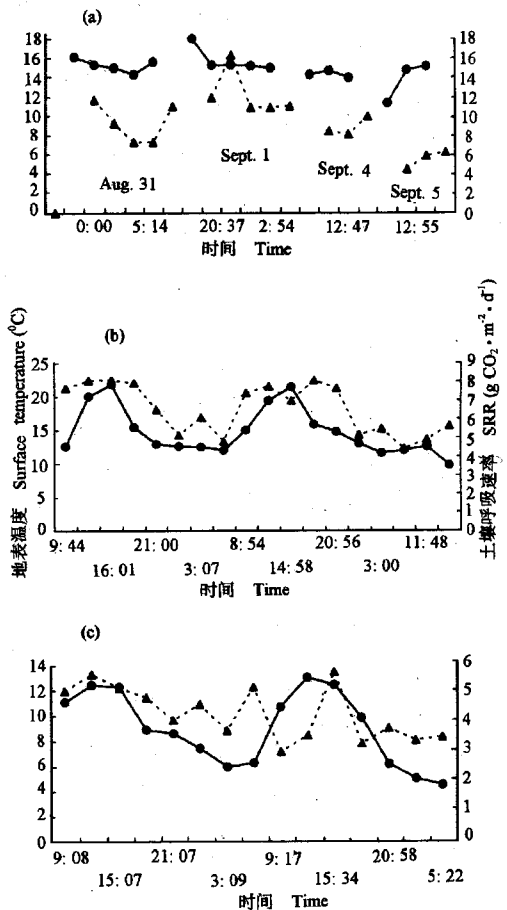


图2 3种温带林的土壤呼吸与地表温度的日夜变化
 Fig. 2 Daily changes in soil respiration rate (SRR) and soil surface temperature (SUT) in three forests
 (a) 白桦林(测定日期:8月31~9月5日) *B. platyphylla* (Date of measurement: August 31~September 5, 1994)
 (b) 辽东栎林(9月6日~8日) *Q. liaotungensis* (September 6~8, 1994)
 (c) 油松林(9月10日~12日) *P. tabulaeformis* forest (September 10~12, 1994)
 ●—● 地表温度 Surface temperature ▲...▲ 土壤呼吸速率 Soil respiration rate

$$T = 20.43 + 0.138z - 3.209 \times 10^{-3}z^2 + 4.034 \times 10^{-6}z^3 \\ + 4.070 \times 10^{-8}z^4 - 8.360 \times 10^{-11}z^5 \quad (r^2 = 0.993)$$

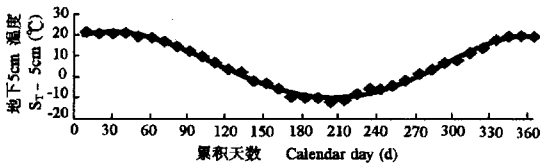


图3 旬平均地下5cm 温度与时间的关系

Fig. 3 Relationship between mean soil temperature at 5cm (S_T-5cm) each ten-day and calendar day.

式中 T 为地下5cm 温度($^{\circ}C$), z 为天数(天)。

考虑海拔高度的差异,以平均垂直递减率 $0.55^{\circ}C/100m$ 计,则白桦林样地地下5cm 温度为 $T-3 \times 0.55^{\circ}C$,辽东栎样地为 $T-1 \times 0.55^{\circ}C$,油松林样地为 T ,代入土壤呼吸与地下5cm 处土壤温度的关系(图1),得土壤呼吸速率 r :

白桦林样地:

$$r = 0.5128 + 0.5498 \times (20.43 + 0.138z - 3.209 \times 10^{-3}z^2 + 4.034 \\ \times 10^{-6}z^3 + 4.070 \times 10^{-8}z^4 - 8.360 \times 10^{-11}z^5 - 1.65)$$

又因为 $r = \frac{dR}{dz}$ (R =年呼吸量),故对上式积分,即:

$$R = \int_0^{365} [0.5128 + 0.5498 \times (20.43 + 0.138z - 3.209 \times 10^{-3}z^2 \\ + 4.034 \times 10^{-6}z^3 + 4.070 \times 10^{-8}z^4 - 8.360 \times 10^{-11}z^5 - 1.65) dz]$$

于是得到白桦林样地年均土壤呼吸量为 $1132gCO_2 \cdot m^{-2} \cdot a^{-1}$ 。同理,得到辽东栎林样地年均土壤呼吸量为 $1431gCO_2 \cdot m^{-2} \cdot a^{-1}$,油松林样地为 $866gCO_2 \cdot m^{-2} \cdot a^{-1}$ 。

3.4 呼吸速率的推算误差

上文推算过程中的误差可能存在于以下方面:

首先,地形对温度的影响。气象站位于较为开阔的山谷中,阳光充沛,与试验地有很大差异。尽管我们计算时考虑了温度的垂直递减率的影响,但推算温度可能较实际温度高。尤其是白桦林样地由于三面环山,最高温较低。例如我们实测时白桦林样地温度从未超过 $16^{\circ}C$,但换算得到的最高温度接近于 $20^{\circ}C$ 。这可能是白桦林样地的主要计算误差来源。其次,林冠的保温效应会有影响。由于气象站所在地为裸地,其温度变化幅度比林冠遮盖的样地要大,所以对推算结果也有影响。再者,测定时的温度范围也可能影响结果。这种影响主要来自于最低温度的不同。例如,我们测定时最低温度略低于 $0^{\circ}C$,而实际可达 $-10^{\circ}C$ 。不过,这种推算结果与实际呼吸速率的差异对数据的影响很小。此外,我们的试验结果也显示了这样一个问题,即:没有考虑水份含量的影响。由于我国华北地区虽然年降雨量在 $600mm$ 左右,但年内分配十分不均。在干燥的冬春季,降水稀少,尤其在气温较高的春季,水份含量成为生物活动的限制性因素。这可能是油松林样地的拟合方程相关性较差的主要原因。因此,今后在测定该地区土壤呼吸时,最好考虑温度和水份条件的共同作用。

3.5 北京山地森林的土壤呼吸速率与其他地区的比较

将本实验测得的数据与已发表的数据比较,发现我们的结果比较低。为便于比较,首先将我们的数据由 $gCO_2 \cdot m^{-2} \cdot a^{-1}$ 转换为 $gC \cdot m^{-2} \cdot a^{-1}$,那么,白桦林、辽东栎林和油松林样地的年土壤呼吸速率分别为 $309, 390$ 和 $237gC \cdot m^{-2} \cdot a^{-1}$ 。考虑到植被的影响,我们以针叶林和阔叶林分别进行比较。

温带阔叶林地区的工作为数众多,为消除纬度的影响,我们选择相近纬度地区的年土壤呼吸量进行比较。Toland and Zak(1994)报道在硬材林中,砍伐和未砍伐林地的年土壤呼吸量分别为478和470 $\text{gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 。从美国田纳西州栎树林进行的为数众多的工作得到的数据相差很大,从483~1065 $\text{gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ (Edward & Ross-Todd, 1979; Edward & Harris, 1977; Edward & Ross-Todd, 1983; Edward, 1989)。Raich & Schlesinger (1992)在 *Quercus-Pinus* 样地测得648 $\text{gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 。以上数据大都高于我们的结果,仅 Bowden (1993)在混合硬材林中测得的数据(371 $\text{gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)与我们的结果相近。

如果再将我们在油松林样地测得的数据与他人报道的温带针叶林进行比较,发现我们的数据仍然较低。Raich and Schlesinger (1992)列出的温带针叶林数据的平均值为695 $\text{gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$,其中仅 Weber (1985)的数据和我们的接近,其余均远大于我们的结果。

由上述可知,北京地区温带森林的年土壤呼吸量和同纬度地区的同类森林相比,处于比较低的水平。这可能有两个因素在起作用:1)我们的样地是人为破坏后恢复的较为年轻的天然次生林或人工林,而其它作者的样地多为成熟林。2)测量方法的影响。早期的工作多采用碱吸收法。已有研究显示碱吸收法测得的结果偏大(Nakadai, 1993; Koizumi, 1991)。基于本文的结果和我国森林中不成熟的次生林所占比重大的特点,利用国外的数据来推算中国森林土壤呼吸量,有可能导致估算结果偏大。同样,目前在估算全球年土壤呼吸量时,由于大都使用早期的碱吸收法测得的数据,因此目前推算的全球年土壤呼吸量的结果可能也偏大。

4 结论

(1) 白桦、辽东栎和油松林3个样地中,土壤呼吸速率与地下5cm 土壤温度的相关性均好于土壤呼吸速率与地表温度的相关性。

(2) 土壤呼吸的日变化与土壤温度的变化趋势基本一致,即:在中午12点至下午4点为最高值(因样地而异),黎明前为最低值。

(3) 样地的年土壤呼吸量分别为:白桦林1132 $\text{gCO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$,辽东栎林1431 $\text{gCO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$,油松林866 $\text{gCO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 。这些结果与在相似纬度地区测定的数值相比,显得较低。

参 考 文 献

- Baath, E. and K. Arnebrant, 1994; Growth rate and response of bacterial communities to pH in limed and ash treated forest soils. *Soil Biol. Biochem.*, **26**(8) 995~1001.
- Bohlen, P. J. and C. A. Edwards, 1995; Earthworm effects of N dynamics and soil respiration in microcosms receiving organic and inorganic nutrients. *Soil Biol. Biochem.*, **27**(3) 341~348.
- Buyanovsky, G. A. et al., 1986; Soil respiration in a winter wheat ecosystem. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **50**:338~344.
- Chagas, C. I. et al., 1995; Tillage and cropping effects on selected properties of an argiudoll in Argentina. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, **26**(5~6) 643~655.
- Edwards, N. T. and W. F. Harris, 1977; Carbon cycling in a mixed deciduous forest floor. *Ecology* **58** 431~437.
- Edwards, N. T. and B. M. Ross-Todd, 1979; The effects of stem girdling on biogeochemical cycles within a mixed deciduous forest in Eastern Tennessee. *Oecologia* **40** 247~257.
- Edwards, N. T. and B. M. Ross-Todd, 1983; Soil carbon in a mixed deciduous forest following clear-cutting with and

- without residue removal. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **47**:1014~1021.
- Edwards, N. T. *et al.*, 1989; Carbon dynamics and productivity. In: *Analysis of biogeochemical cycling processes in Walker Branch Watershed*. New York; Springer-Verlag:197~232.
- Farrell, D. A. *et al.*, 1966; Vapor transfer in soil due to air turbulence. *Soil Sci.* **102**(5):305~313.
- Fernandez, I. J. *et al.*, 1993; Soil carbon dioxide characteristics under different forest types and harvest. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **57**:1115~1121.
- Koizumi, H. *et al.*, 1991; Effect of carbon dioxide concentration on microbial respiration in soil. *Ecol. Res.*, **6**(3):227~232.
- Komulainen, M. and J. Mikola, 1995; Soil processes as influenced by heavy metals and the composition of soil fauna. *J. Appl. Ecol.*, **32**(1):234~241.
- Kretzschmar, A. and J. M. Ladd, 1993; Decomposition of carbon-14 labeled plant material in soil; The influence of substrate location, soil compaction and earthworm numbers. *Soil Biol. Biochem.*, **25**(6):803~809.
- Macfadyen, A., 1970; Simple methods for measuring and maintaining the proportion of carbon dioxide in air, for use in ecological studies of soil respiration. *Soil Biol. Biochem.*, **2**:9~18.
- Nakadai, T. *et al.*, 1993; Examination of the method for measuring soil respiration in cultivated land; Effect of carbon dioxide concentration on soil respiration. *Ecol. Res.*, **8**(1):65~71.
- Neilson, J. W. and I. L. Pepper, 1990; Soil respiration as an index of soil aeration. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **54**:428~432.
- Raich, J. W. and W. H. Schelesinger, 1992; The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate. *Tellus* **44B**(2):81~99.
- Reiners, W. A., 1968; Carbon dioxide evolution from the floor of three Minnesota forests. *Ecology* **49**:471~483.
- Saussure, T. D. E., 1804; *Recherches chimiques sur la Vegetation*. Paris; Gauthier-Villars.
- Schlentner, R. E. and K. V. Cleve, 1985; Relationships between CO₂ evolution from soil, substrate temperature, and substrate moisture in four mature forest types in interior Alaska. *Can. J. For. Res.*, **15**:97~106.
- Toland, D. E. and Zak, D. R., 1994; Seasonal pattern of soil respiration in intact and clear-cut northern hardwood forests. *Can. J. For. Res.* **24**(8):1711~1716.
- Weber, M. G., 1985; Forest soil respiration in eastern Ontario jack pine ecosystem. *Can. J. For. Res.* **15**:1069~1073.