

土壤呼吸的影响因素及全球尺度下温度的影响*

刘绍辉 方精云**

(中国科学院生态环境研究中心,北京,100085)

S154.1

A

摘要 土壤呼吸是指土壤释放 CO₂ 的过程,主要由土壤微生物和根系产生。作为一个复杂的生态学过程,土壤呼吸在受到植被、微生物等生物因素影响的同时,也受到了温度、湿度、pH 值等环境因素的作用,并且随着人类影响的增强,人为因素的作用也越来越大。根据已有工作,讨论了影响土壤呼吸的主要影响因素及其相互关系,分析了全球范围内湿润地区森林植被的土壤呼吸与纬度的关系以及土壤呼吸与年均温的关系,得出了全球范围的 Q₁₀ 值为 1.57。

关键词: 影响因素, Q₁₀ 值, 土壤呼吸, 纬度变化, 温度;

土壤生态学;

EFFECT FACTORS OF SOIL RESPIRATION AND THE TEMPERATURE'S EFFECTS ON SOIL RESPIRATION IN THE GLOBAL SCALE

Liu Shaohui Fang Jingyun

(Research Center for Eco-environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100085, China)

Abstract Soil respiration, mainly produced by soil microorganism and plant roots, is the CO₂ evolution process from soils. As a complicate ecological process, soil respiration is affected not only by biological factors (vegetation and microorganism, etc.) but also by environmental factors (temperature, moisture and pH, etc.). With the increasing humane impacts, it is influenced more and more strongly by man-made factors. Based on previous research, main effect factors of soil respiration and their interrelationships were discussed. The relationships of soil respiration to latitude and to mean annual temperature were analyzed in the humid regions of forest vegetation, and Q₁₀ value was obtained as 1.57 in the global scale.

Key words: effect factors, Q₁₀ value, soil respiration, variation, in latitude.

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,另有极少的部分来自于土壤动物的呼吸和化学氧化。土壤呼吸作为生态系统碳循环的一个重要组成部分,往往作为土壤生物

* 国家杰出青年科学基金部分资助。
** 现地址:刘绍辉 Shaohui Liu, Department of Biology, West Virginia University, USA.
方精云 北京大学城市环境资源系, 100871。
收稿日期:1995-09-04, 修改稿收到日期:1996-05-20。

活性和土壤肥力乃至透气性的指标受到重视^[1~4]。同时,作为土壤碳库的唯一输出途径和大气 CO₂重要的源,有关研究得以越来越深入和广泛的开展。

早在19世纪,土壤中 CO₂和 O₂在土壤生物活动中所起到的作用就已被人们所注意^[5]。在19世纪后半叶和本世纪初的几十年中,人们就开始了土壤呼吸的研究^[6~11]。但在随后的几十年中,土壤呼吸的研究报道很少。本世纪60年代后,有关研究再度兴起,不仅深度得以深化,而且由于测量方法的改进、测定器具的改善以及对相关因素的综合考虑,精度也得以提高。特别是近年来,随着全球气候变化研究成为公众和科学界关注的热点之一,CO₂作为一种最重要的温室气体,其源、汇及通量的精确测定格外得到重视。土壤作为一个巨大的碳库($1.394 \times 10^{18} \text{gC}^{[12]}$),是大气 CO₂的重要的源或汇,其通量(约 $68 \pm 4 \times 10^{15} \text{gC/a}^{[13]}$)如此巨大(燃料燃烧每年释放约 $5.2 \times 10^{15} \text{gC}^{[14]}$),使得即使轻微的变化也会引起大气中 CO₂浓度的明显改变。因此,在土壤呼吸的研究中,CO₂通量的精确测定已成为十分迫切的问题。

最近发表的土壤呼吸的报道已有许多,虽然每一作者的角度和目的可能不尽相同,但提供了很多有益的可供比较的结果。本文将对这些结果中土壤呼吸的主要影响因素予以阐述,并分析湿润地区森林植被的土壤呼吸量的全球变化趋势。

1 土壤呼吸的影响因素

为了估算土壤呼吸量的大小必须了解 CO₂释放量与环境因素的关系,所以,阐明影响土壤呼吸的因素是十分重要的。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,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,显示了相当的复杂性。图1综合了前人的研究结果,给出了土壤呼吸的主要影响因素。

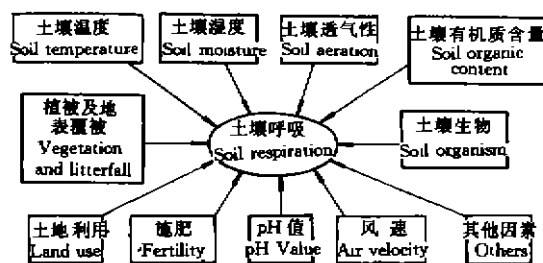


图1 土壤呼吸的影响因素

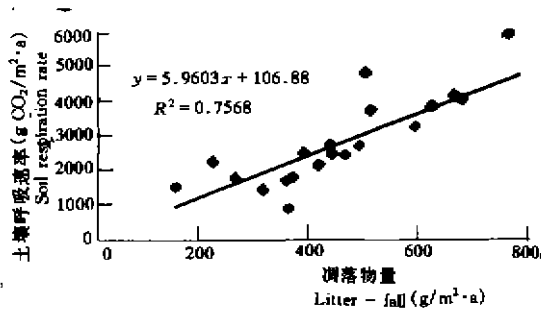
Fig. 1 Effect factors of soil respiration

1.1 有关生物过程的影响

虽然土壤中物理和化学过程,如有机质的氧化、溶解态 CO₂的释放等也可以产生少量的 CO₂,但绝大部分的 CO₂是由于土壤中的生物过程产生的。土壤呼吸的实质是土壤微生物、土壤无脊椎动物和植物根系呼吸的总和。土壤无脊椎动物的呼吸往往可以忽略,其他两者的贡献所占的比例实际上很难精确测定。这主要由于土壤中植物根系与根系微生物之间关系密切,难以分开。根系呼吸所占比重随环境的不同而有很大的差异(从不明显到占1/3,有时甚至超过60%^[15~20])。

由于土壤微生物的活动依赖于植物地上部分和根系输入的有机物,并且植物根系也是土壤呼吸的重要组成部分,因此植被及地表覆被的凋落物的影响是十分重要的^[21]。此外,不同的植被使土壤有机质含量、pH值、温度、湿度等直接影响因子也大不相同,从而土壤呼吸也随着发生变化。地表凋落物作为土壤有机质的主要来源以及作为影响地表环境条件——如温度、湿度等因子对土壤呼吸也产生显著作用。图2反映出凋落物量与土壤呼吸速率之间的对应关系。

虽然土壤动物本身的呼吸量微乎其微,但它们作为土壤生态系统的重要成员,间接发挥着巨大的作用^[22,23]。目前,土壤动物对土壤呼吸影响的研究进行得相当少,具体的影响机理了解得还不清楚,尚需进一

图2 土壤呼吸与凋落物量的关系^[24]Fig. 2 The relationship between soil respiration and litter-fall^[24]

步的研究。

1.2 土壤呼吸与土壤温度、水分含量之间的关系

早期的研究者就已发现土壤呼吸与温度、含水量之间有一定的相关关系,这主要因为土壤中的生物活动不可避免地受到环境因子的影响。有关研究已发现了土壤呼吸与土壤温度之间的较为清楚的相关关系;而且土壤含水量在一定的条件下也参与作用。很多研究者的工作证实,在土壤水分含量充足、不成为限制因素的条件下土壤呼吸与土壤温度呈正相关(表1)^[4,15,19,21,25~32]。而在水分含量成为限制因子的干旱、半干旱地区,水分含量和温度共同起作用^[18,33]。

1.3 抑制作用的影响

目前已有文献表明对根系和微生物呼吸的抑制作用在土壤空气 CO₂ 浓度较高时会发生。Macfadyen^[34] 和 Koizumi^[35] 的研究证实,在 CO₂ 浓度较高时,对土壤微生物的呼吸活动有抑制作用。Harris and Bavel^[36,37] 和 Qi^[38] 的工作表明,在较高的 CO₂ 浓度下,根系呼吸显著地受到抑制。这也就意味着在大气 CO₂ 浓度升高时,土壤呼吸也会受到抑制。

1.4 土地利用方式的影响

土地利用方式对于土壤呼吸的影响十分显著。不同的利用方式(如耕作、排灌条件的改变等)不仅改变了地表植被,而且改变了土壤透气性,从而使土壤有机质含量、微生物的组成和活性、根系生物量等发生改变,相应的土壤呼吸也大不相同^[39,40]。尤其在当前人类活动对自然界的越来越大的影响的情况下,土地利用方式的改变对全球土壤 CO₂ 通量的影响是十分巨大的。例如,温带地区的湿地在自然状况下,原本是大气 CO₂ 的汇,但由于人类的影响,主要是排灌条件的改变,土壤呼吸作用大大加强,导致大气和湿地间碳转移的改变,乃至影响了全球的碳平衡^[41]。又如,仅热带森林砍伐就导致 CO₂ 通量增加 0.4~1.6 × 10¹⁵ gC/a^[14]。

此外,风速^[42]、森林砍伐^[43~45]、施肥、排灌条件^[46]、土壤的化学成分^[47]、pH 值^[48] 等都对土壤呼吸有很明显的影响。

2 全球尺度温度对土壤呼吸的影响

为了消除土壤含水量的影响,选择湿润地区的自然植被类型-森林生态系统作为研究对象,分析全球尺度下温度与土壤呼吸的关系。由于多数作者未给出其样点的全年呼吸量,故采用 Schlesinger^[49] 和 Raich *et al.*^[13] 推算的全球森林生态系统的土壤呼吸量,其中包括北方森林、温带针叶阔叶林、地中海森林和热带亚热带雨林等不同植被类型的土壤呼吸量。在分析过程中笔者略去了两个来自热带地区的数据,一个明显偏低的数据(405~655 gC/m²·a)为旱季测定结果推算所得;另一数据给出的范围很大(890~6100 gC/m²·a),可信度低。

2.1 土壤呼吸随纬度的变化

从图3可知,土壤呼吸量随着纬度的增加而逐渐降低,可得到一拟合方程:

$$y = 1586e^{-0.0227x} \quad (R^2 = 0.47) \quad (1)$$

其中, y 为土壤呼吸量, x 为纬度。图3中,多数点位于拟合曲线附近,少数点离群较远,究其原因可能有多种因素在起作用。如样点海拔较高,温度较同纬度的地区低,从而使得土壤呼吸量较低;此外,还可能有测量技术的影响、推算的误差等种种原因。特别是低纬度地区的数据点离散度相当大,这可能是推算方法带来的误差。例如,很多热带地区的全年呼吸量,由于数据缺乏,推算过程中往往依据几天甚至几小时的测量数据,因此误差较大。

2.2 温度与土壤呼吸的关系

由于缺乏各个样点年均温的数据,故先建立纬度与同纬度地区年均温的关系,再将各样点的纬度数据换算成同纬度地区的年均温,最终得到全球尺度下温度对土壤呼吸的影响大小的尺度—— Q_{10} 值。

表1 土壤呼吸与温度的关系式

Table 1 Relationship between soil respiration and temperature

地点 Site	植被类型 Vegetation	关系式 Relationship	文献 References
Sanborn Field at Columbia, MO, U. S. A 美国哥伦比亚	Winter wheat ecosystem 冬小麦生态系统	$\ln\text{CO}_2 = 7.0687 + 0.1329T - 0.00197T^2$ $R^2 = 0.66$ 式中 T 为地下 10 cm 的温度 Where T is soil temperature at 10 cm depth	28
The University of Missouri Prairie Station, Callaway Country, MO, U. S. A 美国密苏里大学	Tallgrass prairie 高草原	$\ln\text{CO}_2 = -1.66 + 2.20 \times \ln(T+10)$, $R^2 = 0.89$ 式中 T 为土壤温度 Where T is soil temperature	15
Western Maine, U. S. A 美国西海岸	Deciduous and conifer forest 落叶针叶混交林	$\text{CO}_2 = 0.1301 + 0.0064T$, $R^2 = 0.28$ 式中 T 为空气温度 Where T is air temperature	45
Southern England 南英格兰	Heathland	$\ln\text{CO}_2 = 0.0841T - 2.0745$, $R^2 = 0.8232$ 式中 T 为地下 3 cm 处温度 Where T is soil temperature at 3 cm	20
Alaska 阿拉斯加	Tundra 冻原	$\text{CO}_2 = 89.78 + 1.54T + 5T^2$ 式中 T 为日平均土壤温度 Where T is mean daily soil temperature	29
Mt. Takao in Fuchu-cho, west Japan (34°24'N, 132° 31'W) 日本西部府中町	Red pine forest 赤松林	$\text{CO}_2 = 147 \exp(0.097T_0)$ 式中 T_0 为地表温度 Where T_0 is soil surface temperature	27
Cedar Creek Natural History Area, Anoka Co., Minn., USA 美国密里苏达	Temperate forest 温带林	$\ln\text{CO}_2 = C + B_1T + B_2MI$ 式中 C, B_1, B_2 均为系数, MI 为湿度指数 Where C, B_1, B_2 are coefficient, MI is index of moisture	4
Blean Woods National Nature Reserve, north-east Kent, U. K. 英国国立 Blean Words 自然保护区	Temperate, deciduous Woodland 温带落叶疏林	Castanea site; $\log\text{CO}_2 = 1.9752 + 0.0425T$ Fagus site; $\log\text{CO}_2 = 1.9848 + 0.0400T$ 式中 T 为土壤温度 Where T is soil temperature	25
Aiken, SC, USA 美国爱肯	Pine forest 松林	$\text{CO}_2 = 0.715 + 0.210T_a + 0.285P_{3\sim 1} +$ $0.083P_{7\sim 4}$ 式中 $P_{3\sim 1}$ 为采样前 3 天的雨量, $P_{7\sim 4}$ 为采样前 7 ~4d 的雨量, T_a 为周围空气温度 Where $P_{3\sim 1}$ is the precipitation of 3 days before experiment, $P_{7\sim 4}$ is the precipitation of 7 ~ 4 days before experiment, T_a is ambient air tem- perature	21
Eastern Tennessee 美国田纳西	Mixed deciduous Forest 落叶混交林	$\text{CO}_2 = 0.044432T^2$ 式中 T 为枯枝落叶层温度 Where T is temperature of litterfall	19

注 Note: 对原方程中的系数大多用具体数字代替 Most coefficients in cited functions are substituted by numbers.

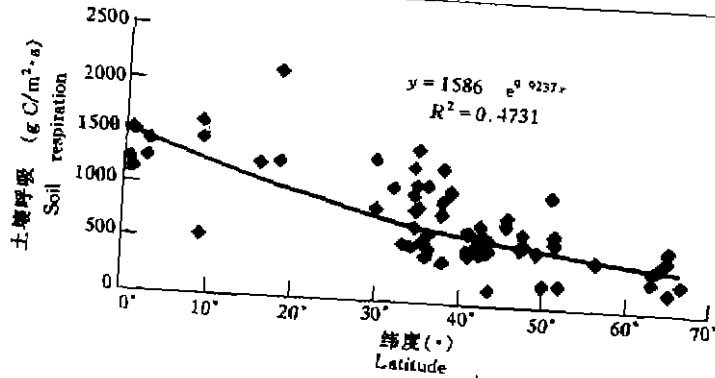


图3 土壤呼吸与纬度的关系

Fig. 3 The relationship between soil respiration and latitude

2.2.1 纬度与年均温的关系 纬度作为地理指标,不仅反映了地理位置,也反映了温度的变化。虽然存在局地小气候的差异,海拔高度也影响很大,但年均温的总体趋势是从赤道至两极逐渐降低。利用东京天文台编纂的《理科年表》^[30]的全球陆地气象资料,拟合了纬度与温度的关系。为了减少海拔高度的影响,去除了海拔500m以上的观测点,得到一拟合方程:

$$y = -0.0064x^2 - 0.0848x + 28.231 \quad (R^2 = 0.90) \quad (2)$$

其中, y 为温度(°C), x 为纬度(°)。

2.2.2 温度与土壤呼吸量的关系 根据公式(2),将图3中用到的纬度数据换算成年均温,从而得到图4。由于(2)式的只适用于纬度小于75度的地区,故推算过程中忽略了一纬度大于75度的数据。由此在不考虑湿度的影响下,得到了全球森林植被的土壤呼吸速率与年均温的关系,即:

$$y = 349.66e^{0.0449x} \quad (R^2 = 0.47) \quad (3)$$

其中, y 为呼吸速率, x 为年均温。

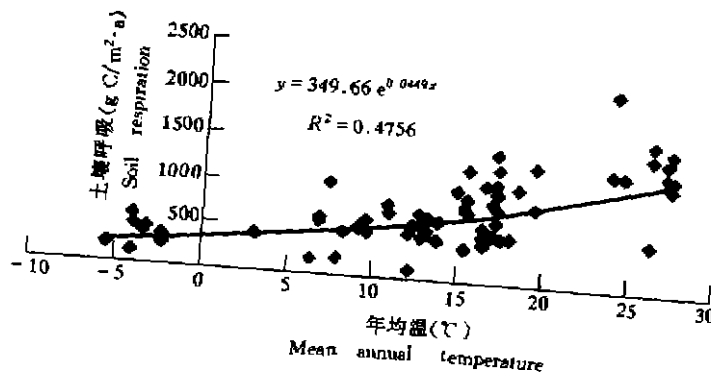


图4 土壤呼吸与年均温的关系

Fig. 4 The relationship between soil respiration and mean annual temperature

最后根据公式(3),得到了全球范围的 Q_{10} 值=1.57。与已报道的各样点的 Q_{10} 值相比全球尺度下的 Q_{10} 值较低,也就是就,随温度的上升,呼吸速率的增加较慢一些。由于单个样点内不存在凋落物量的差异,故推测可能是凋落物量的影响,从根本上看,或许是由生产力的差异造成的。

3 讨论和建议

3.1 土壤呼吸影响因素之间的关系

土壤呼吸的各项影响因素之间其实并不是孤立的,不仅同时对土壤呼吸产生影响,而且它们之间也有

相互影响。比如,植被不仅直接影响土壤有机质的含量,还同时对土壤温度、含水量有直接的影响。同样,风速不仅改变了CO₂的扩散系数,同时由于改变了表层土壤的蒸发速率使得土壤含水量发生变化,引起土壤呼吸的变化。因此,土壤呼吸是处在一个复杂系统中的复杂过程,虽然有一定的规律,但也同时表现出不规则性,其准确描述和完全了解还需做进一步的工作。

3.2 土壤呼吸的测量方法问题及其影响

从有关研究开始出现到现在的近百年中,土壤呼吸的测量方法和技术不断发生改变,可以说是千差万别。测量方法可以分为直接测量和间接测量法^[51]。直接测量法中又包括静态法和动态法^[52]。其中,由于实际工作中具体条件的限制,目前采用较为广泛的是静态法。CO₂的具体测量技术又有碱吸收法和红外吸收法,随着科学技术的发展,较为准确的红外吸收法已基本取代了早期工作常用的碱吸收法。以上方法中,每一种都有其不足^[53,54],但测量精度在逐渐提高。同时,测量方法之间的差异又导致各个研究工作之间的可比性较差,导致系统误差,从而对研究工作产生不利的影响,因此,在今后的研究中,采用标准方法是一重要的问题。

3.3 全球变化与土壤呼吸的关系

由上可知,低纬度地区温度变化较慢,高纬度地区则变化较快,同时表1则显示了温度与土壤呼吸速率之间相当明显的对应关系,而土壤呼吸则是在低纬度地区变化较快,高纬度地区则变化较慢,这种不一致可能是凋落物的生成量和分解速率共同作用造成的,凋落物量与纬度有很好的线性关系^[13,24],而分解速率则在温度较高时快,温度低时变化慢,从而使土壤呼吸速率与纬度关系形成指数式变化,这也是高纬度地区土壤有机碳得以积累的原因。

根据图4,土壤呼吸速率与同纬度温度之间有一定的相关性,也就是说,年土壤呼吸速率的差异,从全球范围上看,实质上主要是各地温度的变化造成的。那么,如果全球气温上升发生的话,至少可以肯定,森林土壤的CO₂通量将会增加。

3.4 今后工作的建议

全球CO₂年释放量的推算是根据已有样点的数据得到的。然而,目前这种方法的误差很大,因为:(1)很多工作的实验方法有缺陷,尤其是早期的工作,基本上采用碱吸收法,这些数据与随后的红外吸收法的测量结果有系统误差,并且其具体方法的不同又使其难以校正。(2)大多数的工作进行在温带地区,而热带和寒带的的数据很少,使得这些地区难以准确描述。为了说明已有样点在全球的分布,给出图5。此图清楚地表明,在低纬度地区几乎没有土壤呼吸工作的展开。(3)干旱地区工作极少,与其所占的陆地面积十分不称。(4)推算过程中,均没有考虑各地小气候的作用。

因此,今后土壤呼吸的研究,需要在弥补样点方面多下力气,应朝着建立全球系统观测的方向努力,从而为土壤CO₂通量的估算提供可靠的数据,进一步为全球气候变化预测提供支持。

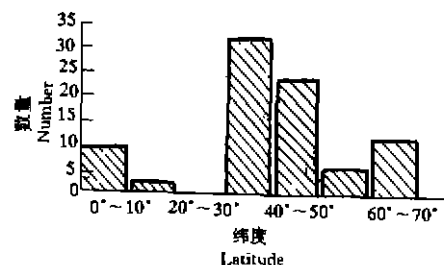


图5 部分土壤呼吸观测点的纬度分布

Fig. 5 The latitudinal distribution of parts of soil respiration's research spots

参 考 文 献

- 1 Anderson J O and Domsch K H. Measurement of bacterial and fungal contributions to respiration of selected agricultural and forest soils. *Can. J. Microbio*, 1975, 21: 314~322
- 2 Macfadyen A. Simple methods for measuring and maintaining the proportion of carbon dioxide in air, for use in ecological studies of soil respiration. *Soil Bro. Biochem*, 1970, 2: 9~18
- 3 Neilson J W and Pepper I L. Soil respiration as an index of soil aeration. *Soil Sci. Soc. AM J*, 1990, 54: 428~432
- 4 Reiners W A. Carbon dioxide evolution from the floor of three Minnesota forests. *Ecology*, 1968, 49: 47~483

- 5 Saussure Tb. DE. *Recherches chimiques sur la Vegetation*. GauthierVillars. Paris. (引自 Magnusson, 1992), 1804
- 6 Albert R. Bodenuntersuchungen im Gebiete der Luneburger Heide. *Zeitschrift fur Forst- and Jagdwesen* 1912, **44**: 655~671
- 7 Clements F. E. *Aeration and Air-Contents. Publication* 315. Carnegie Institution of Washington. DC. (引自 Magnusson, 1992), 1921
- 8 Ebermayer E. UNtersuchungen uber die Bedeutung des Humus als Bodenbestandtei und uber den Einfluss des Wildes. verschiedener setzung der Bodenluft. *Allgemein fersi und Jagdzettung*. 1890, **36**, 161~175
- 9 Fodor J Von. Experimentelle Untersuchungen uber Boden und Bodengase. *Deutsche Viertelsjahrscritte fur offentlicher Gesundheitslege* 1875, **7**, 205~213
- 10 Romell L G. Luftvlingen i marken som ekologisk factor. *Die Bodenventilation fran Statens Skogsforsok sanstalt* 1992, **19**, 125~359
- 11 Russel E J & Appleyard A. The atmosphere of the soil, its composition and the causes of variation. *J. Agri. Sci.*, 1915, **7**, 1~48
- 12 Jenkinson D S, Adams D E and Wild A. Model estimates of CO₂ emissions from soil in response to global warming. *Nature*. 1991, **351**, 304~306
- 13 Raich J W and Schelesinger W H. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate. *Tellu*, 1992, **44B**, 81~99
- 14 Detwiler R P and Hall C A S. Tropical forest and the global carbon cycle. *Science*, 1988, **239**, 42~47
- 15 Kucera C L and Kirkham D R. Soil respiration studies in tallgrass prairie in Missouri. *Ecology*, 1971, **52**(5), 912~915
- 16 Turpin H W. The carbon dioxide of the soil air. Cornell University Agri. Expt. Sta. *Memoir*, 1920, **32**, 315~362. (引自 Witkamp and Frank, 1969)
- 17 Wiant H Jr V. Influence of temperature on the rate of soil respiration. *J. Forest*. 1967, **65**, 489~490
- 18 Wildung R E *et al.* The interdependent effects of soil temperature and water content on soil respiration rate and plant root decomposition in arid grassland soils. *Soil Biol. Biochem*, 1975, **7**, 373~378
- 19 Edwards N T. Division S-7—Forest and range soils, Effects of temperature and moisture on carbon dioxide evolution in a mixed deciduous forest floor. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 1975, 361~365
- 20 Chapman S B. Some interrelationships between soil and root respiration in lowland calluna heathland in southern England. *J. Ecol.*, 1979, **67**, 1~20
- 21 Reinke J J, Adriano D C and Mcleod K W. Effects of litter alteration on carbon dioxide from a South Carolina pine forest floor. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1981, **45**: 620~623
- 22 Kretzschmar A and Ladd J M. Decomposition of carbon-14 labelled plant material in soil; The influence of substrate location, soil compaction and earthworm numbers. *Soil Biol. Biochem*, 1993, **25**(6), 803~809
- 23 Bohlen P J and Edwards C A. Earthworm effects of N dynamics and soil respiration in microcosms receiving organic and inorganic nutrients. *Soil Bio Biochem*, 1995, **27**(3), 341~348
- 24 Raich J W and Nadelhoffer K J. Belowground carbon allocation in forest ecosystems; Global Trends. *Ecology*, 1989, **70**(5), 1346~1354
- 25 Anderson J M. Carbon dioxide evolution from two temperate, deciduous woodland soils. *J. Appl. Ecol.*, 1973, **10**, 361~378
- 26 Mathes K and Schriefer Th. Soil respiration during secondary succession influence of temperature and moisture. *Soil Biol. Biochem*, 1985, **17**(2), 205~211
- 27 Nakane K, Tsubota H and Yamamoto M. Cycling of soil carbon in a Japanese Red Pine Forest I. Before a clear-felling. *Bot. Mag*, 1984, **97**, 39~60
- 28 Buyanovsky G A. *et al.* Soil respiration in a winter wheat ecosystem. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1986, **50**, 338~344
- 29 Peterson K M and Billings W D. Carbon dioxide flux from tundra soils and vegetation as related to temperature at Barrow, Alaska. *Am. Mid. Nat.*, 1975, **94**(10): 88~94
- 30 Schlentner R E and Cleve K V. Relationships between CO₂ evolution from soil, substrate temperature and substrate

- moisture in four mature forest types in interior Alaska. *Can. J. For. Res.*, 1985, **15**:97~106
- 31 Witkamp M. Cycles of temperature and carbon dioxide evolution from litter and soil. *Ecology*, 1969, **50**:922~924
- 32 Edwards N T and Harris W F. Carbon cycling in a mixed deciduous forest floor. *Ecology*, 1977, **58**:431~437
- 33 Garrett H E and Cox G S. Carbon dioxide evolution from the floor of an oak-hickory forest. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 1973, **37**:641~644
- 34 Macfadyen A. Inhibitory effects of carbon dioxide on microbial activity in soil. *Pedobiologia*, 1973, **13**:140~149
- 35 Kouzumi H, *et al.* Effect of carbon dioxide concentration on microbial respiration in soil. *Ecol. Res.*, 1991, **6**(3):227~232
- 36 Harris D G and van Bavel C G M. Growth yield and water absorption of tobacco plants as affected by the composition of the root atmosphere. *Agron. J.*, 1957a, **49**:182~184
- 37 Harris D G and van Bavel C G M. Root respiration of tobacco, corn and cotton plants. *Agron. J.*, 1957b, **49**:182~184
- 38 Qi J, Marshall J D and Mattson K G. High soil carbon dioxide concentrations inhibit root respiration of Douglas fir. *New Phytol.*, 1994, **128**:435~422
- 39 Badia D V and Alcaniz J M. Basal and specific microbial respiration in semiarid agricultural soils; Organic amendment and irrigation management effects. *Geomicrobiology Journal*, 1993, **11**(3):261~274
- 40 Chagas C I, *et al.* Tillage and cropping effects on selected properties of an argudoll in Argentina. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 1995, **26**(5-6):643~655
- 41 Armentano T V and Menges E S. Patterns of change in the carbon balance of organic soil-wetlands of the temperate zone. *J. Ecol.*, 1986, **74**:755~774
- 42 Farrell D A, *et al.* Vapor transfer in soil due to air turbulence. *Soil Sci.*, 1996, **102**(5):305~313
- 43 Nakane K, *et al.* Cycling of soil carbon in a Japanese red pine forest. I. Changes occurring in the first year after a clear-felling. *Ecol. Res.*, 1986, **1**:47~18
- 44 Edwards N T and Ross-todd B M. Soil carbon dynamics in a mixed deciduous forest following clear-cutting with and without residua removal. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1983, **47**:1014~1021
- 45 Fernandez I J, *et al.* Soil carbon dioxide characteristics under different forest types and harvest. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1993, **57**:1115~1121
- 46 Silvola J, *et al.* Effect of draining and fertilization on soil respiration at three ameliorated peatland sites. *Acta For. Fenn.*, 1985, **191**:1~32
- 47 Bunnell F L, *et al.* Microbial respiration and substrate weight loss- I. A model of influences of chemical composition. *Soil Biol. Biochem.*, 1977b, **9**:41~47
- 48 Baath E and Arnebrant K. Growth rate and response of bacterial communities to pH in limed and ash rested forest soils. *Soil Biol. Biochem.*, 1994, **26**(8):995~1001
- 49 Schlesinger W H. Carbon balance in terrestrial detritus. *Ann. Rev. Ecol. Syst.*, 1977, **8**:51~81
- 50 东京天文台, 理科年表, 日本: 丸善株式会社, 1985. 193~321
- 51 Singh J S and Gupta S R. Plant decomposition and soil respiration in terrestrial ecosystems. *Bot. Rev.*, 1977, **43**:449~528
- 52 Witkamp M and Frank M L. Evolution of CO₂ from litter, humus and subsoil of a pine stand. *Pedobiologia*, 1969, **9**:358~365
- 53 Nakada I, *et al.* Examination of the method for measuring soil respiration in cultivated land; Effect of carbon dioxide concentration on soil respiration. *Ecol. Res.*, 1933, **8**(1):65~71
- 54 Pajari B. Soil respiration in a poor upland site of Scots pine stand subjected to elevated temperatures and atmospheric carbon concentration. *Plant and soil* 1995, 168~169, STBZ **1**(10):563~570
- 55 Magnusson T. Studies of the soil atmosphere and related physical site characteristics in mineral forest soils. *J. Soil Sci.*, 1992, **43**:767~790