

中国森林生态系统土壤 CO₂ 释放 分布规律及其影响因素

吴雅琼¹, 刘国华^{1,*}, 傅伯杰¹, 郭玉华²

(1. 中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室 北京 100085 ;

2. 内蒙古巴彦淖尔市环境监测站 (环境科学研究所) 内蒙古巴彦淖尔市 015000)

摘要 联合国气候框架公约的签署提升了人们对全球变暖、碳循环变化的关注。陆地生态系统在全球变暖格局下的地位与作用,尤其是土壤碳库对全球变暖格局的响应是全球变化研究的焦点。土壤 CO₂ 释放作为土壤-大气 CO₂ 交换的主要途径之一,也就成为各国生态学家研究的重点内容。在对我国森林生态系统 CO₂ 释放通量以及相关气候、生物等因子的资料进行收集、整理和分析的基础上,探讨了我国森林生态系统土壤 CO₂ 释放的分布规律,以及这种规律性分布的气候、生物影响因素。对于我国这样一个南北跨度大的国家,不同区域的森林生态系统土壤 CO₂ 释放通量间存在较大的差异,在全国尺度上,森林生态系统土壤 CO₂ 释放通量平均值为 $(1.79 \pm 0.86) \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$,而且土壤 CO₂ 释放通量随着纬度增加逐渐降低。作为一个复杂的生态过程,土壤 CO₂ 释放受到生物、非生物因子或独立、或综合的影响。通过分析指出,在全国尺度上,年均温、降雨量、群落净生产力及凋落物量显著地影响森林土壤 CO₂ 释放通量。同时,也正是这些影响因子的纬度分布,导致了我国森林生态系统土壤 CO₂ 释放通量的纬度分布规律。作为衡量土壤 CO₂ 释放对温度敏感性的重要指标,计算了我国森林生态系统土壤 CO₂ 释放温度敏感性系数 -Q₁₀ 值,约为 1.5,该值显著低于全球平均水平 2.0。

关键词 土壤 CO₂ 释放 森林生态系统 气候因子 年生产力 凋落物量

文章编号 1000-0933 (2007) 05-2126-10 中图分类号 Q948.5718.5 文献标识码 A

Soil CO₂ efflux of forest ecosystem in China : distribution and controlling factors

WU Ya-Qiong¹, LIU Guo-Hua^{1,*}, FU Bo-Jie¹, GUO Yu-Hua²

1 State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, CAS, Beijing 100085, China

2 Environmental Monitoring Station (Research Institute for Environmental Sciences), Bayannaer, Inner Mongolia 015000, China

Acta Ecologica Sinica 2007 27 (5) 2126 ~ 2135.

Abstract : The observed increase in levels of atmospheric CO₂ and the signing of the UN Framework Convention on Climate Change have increased interest in the global warming and the global carbon cycle. What the role of terrestrial ecosystems plays in the pattern of the global change is one of studied hotspots. As one of the key components in the global carbon cycle, released CO₂ from soil is one of the major pathways to exchange CO₂ between soil and atmosphere, which is second only to gross primary productivity. Therefore, the response of soil carbon pool to the global warming is another studied focus issue in the recent years. In this paper, relative information of soil CO₂ efflux and climatic, biotic factors of forest ecosystem in China were collated from published studies, then the distribution of soil CO₂ efflux of forest ecosystems and its

基金项目 国家自然科学基金委创新研究群体科学基金资助项目 (40321101); 国家重点基础发展研究规划资助项目 (2002CB412503)

收稿日期 2006-02-13; 修订日期 2007-02-10

作者简介 吴雅琼 (1979 ~) 女, 博士生, 主要从事景观生态学和土壤碳释放研究. E-mail : cinderella0816@163.com

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail : ghliu@cees.ac.cn

Foundation item : The project was financially supported by National Natural Science Foundation of China (No. 40321101) and the State Key Basic Research and Development Program Plan (No. 2002CB412503)

Received date 2006-02-13 ; **Accepted date** 2007-02-10

Biography : WU Ya-Qiong, Ph. D. candidate, mainly engaged in on landscape ecology and the carbon cycle. E-mail : cinderella0816@163.com

correlations to these factors were identified. Not only the studied forest ecosystems varied in composition and function, but also soil CO₂ efflux of these forest ecosystems differed significantly. On national scale, the averaged soil CO₂ efflux of forest ecosystems was $(1.79 \pm 0.86) \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, and declined gradually from the lower latitude to higher latitude. As a complex ecological process, many biotic and abiotic factors could influence soil CO₂ efflux independently or interactively. By the means of distinguishing the responses of soil CO₂ efflux to temperature, precipitation, productivity and litterfall, this paper suggested these factors affected soil CO₂ efflux positively on national scale. Furthermore, the distribution of soil CO₂ efflux on national scale was due to the distribution of climatic and biotic factors just about. The temperature sensitivity of soil CO₂ efflux in forest ecosystem in China, Q_{10} value, was estimated. It was 1.5 and much lower than the global averaged value, 2.0.

Key Words: soil CO₂ efflux; forest ecosystem; climate; plant productivity; litterfall

陆地土壤是地球表面最大的碳库,其有机碳贮量在 1400 ~ 1500 P g C 之间^[1~3],其中森林生态系统为陆地生态系统中最大的碳储库,地上部分碳库约为 359 P g C,土壤碳库为 787 P g C^[4]。全球土壤每年排放 CO₂ 约为 $(68 \pm 4) \text{ P g C}$,仅次于全球生态系统 NPP 通量^[5],这使得土壤即使发生轻微的变化也会引起大气中 CO₂ 浓度的明显改变。全球变暖会显著加速土壤有机碳的分解,加大对大气的 CO₂ 释放,而这将进一步加强全球变暖的趋势^[6~9]。由此可见,土壤 CO₂ 释放作为陆地生态系统碳循环中一个重要组成部分,在全球碳循环及全球变化的研究中均具有极其重要的作用,也是人们关注的重点。

目前,国内外学者对森林生态系统土壤 CO₂ 释放的研究主要在样地和群落等较小的尺度上进行,研究内容也主要是探讨土壤 CO₂ 释放的机理,及其与生物、非生物因子,如土壤生物、植被、气候、土壤性质、土地利用及人为干扰等的关系,而针对区域尺度上土壤 CO₂ 释放特征的研究比较少^[5,10]。2000 年, Raich & Tufekcioglu 讨论了全球尺度上植被类型与土壤 CO₂ 释放间的关系,结果表明,在全球尺度上,土壤 CO₂ 释放通量与森林的凋落物、草地地上部分净初级生产力呈正相关关系。植被类型是影响土壤 CO₂ 释放通量变化的重要因子之一,显著的影响土壤对环境变化的响应机制^[10]。

但对于中国这样一个森林生态系统类型多样的国家,还没有在全国尺度上对土壤 CO₂ 释放通量进行过详细的研究。方精云等曾利用 Raich & Schlesinger, Raich & Nadelhoffer 的研究结果及我国各个植被类型的面积,对中国土壤 CO₂ 释放总量进行了估计,其值约为 $4.2 \times 10^9 \text{ t C a}^{-1}$ ^[11]。事实上,不同森林生态系统由于其植被及土壤基质的空间差异,土壤 CO₂ 释放通量间存在极大差别^[12~14]。虽然对土壤 CO₂ 释放研究的关注已久,但是对于大尺度上土壤 CO₂ 释放规模及其控制因子的认识仍然十分有限^[15]。因此,对于我国而言,在全国尺度上,揭示导致土壤 CO₂ 释放通量地带性分布的规律及影响因素,对于深刻认识我国土壤 CO₂ 释放的格局,及其对全球变暖趋势的响应是十分必要的。

本文整理分析了我国森林生态系统土壤 CO₂ 释放的相关研究结果,探讨了全国尺度上森林生态系统土壤 CO₂ 释放的分布特征,并且进一步讨论了其与气候、生物等环境因子的相互关系。从而揭示中国森林生态系统土壤 CO₂ 释放特征及其影响因素,为正确认识中国森林生态系统在全球碳循环中的地位与作用提供基础信息。

1 研究数据

一般的,测定土壤 CO₂ 释放通量的直接测量技术主要有 3 种,即:(1)静态箱式法,包括碱吸收法,以及利用土壤气室采集土壤气样,用红外气体分析仪或气相色谱等测量 CO₂ 浓度的测量方法;(2)动态箱式法,用红外气体分析仪直接测量输入与输出土壤气室的 CO₂ 的浓度。目前这是国际上,在样地和群落尺度上研究土壤 CO₂ 释放流行的测量技术,如 LI-COR 6200、6400 系统;(3)微气象法,也称涡流联测方法,主要用于长期生态系统碳动态监测。

在我国,土壤 CO₂ 释放的测定方法主要以静态箱法为主,但近几年,我国学者也逐渐引入了动态箱式法,进行土壤 CO₂ 释放的研究^[16,17]。为了减少研究方法导致的误差,本文收集了我国学者利用静态箱法进行土壤 CO₂ 释放测定的研究结果,以及相关文章中,关于这些森林生态系统年生产力、凋落物量的研究数据,整理结果如表 1。

我国地域范围广,南北跨度大。受水热条件的影响,森林生态系统类型多样,由南向北分布着热带雨林、亚热带常绿阔叶林、暖温带落叶阔叶林、针阔混交林以及寒温带针叶林等典型森林生态系统。不同的地带性森林植被,其结构、功能都存在着较大的差异。从现有资料来看,不同地区森林土壤 CO₂ 释放变化明显:海南岛尖峰岭热带山地雨林土壤 CO₂ 释放通量最高,为 4.7 g C m⁻² d⁻¹,而秦岭及北京地区油松林地土壤 CO₂ 释放通量较低,仅为 1.0 g C m⁻² d⁻¹左右,二者相差近 5 倍。全国尺度上,我国森林生态系统土壤 CO₂ 释放通量均值为 (1.79 ± 0.86) g C m⁻² d⁻¹ (表 1)。

2 森林生态系统 CO₂ 释放分布规律

土壤 CO₂ 释放的空间变化一直是生态学家关注的焦点之一,但事实证明这是一件很困难的事情,首先土壤是个复杂的聚合体,包括各种类型的有机矿物颗粒、团聚体、成千上万的生物,而且土壤性质的空间变化非常明显^[51]。其次,在全国尺度上,水热条件差异导致的气候、生物因子之间的巨大差异,也导致了土壤 CO₂ 释放的空间变化。对于我国森林生态系统而言,不仅各个森林生态系统类型土壤 CO₂ 释放差异明显,而且总体上,随着纬度增加土壤 CO₂ 释放通量显著降低(图 1)。但长白山地区云冷杉林及黑龙江帽儿山的次生针叶林土壤 CO₂ 释放通量接近或略高于中纬度地区森林生态系统土壤 CO₂ 释放通量。

3 影响土壤 CO₂ 释放的因素

3.1 气候对土壤 CO₂ 释放的影响

许多野外实验表明,土壤温度和土壤水分是影响土壤 CO₂ 释放的重要非生物因素。在水分含量充足、不成为限制因子的条件下,土壤温度是控制土壤 CO₂ 释放的主要因子^[52~54],然而对于极端类型土壤,如极湿或极干燥的土壤而言,土壤水分含量和温度共同影响土壤 CO₂ 释放^[55~58]。

不同的研究者、不同实验方法、不同研究地点所得到的温度与土壤 CO₂ 释放通量之间的具体关系可能各不相同,但在生态学上一般用指数方程对二者关系进行模拟,而温度敏感性系数 - Q₁₀,是衡量温度每升高 10℃,土壤 CO₂ 释放通量的增长:

$$R = \alpha e^{\beta T} \quad (1)$$

$$Q_{10} = e^{10 \cdot \beta} \quad (2)$$

式中 R 为土壤 CO₂ 释放通量 (g C m⁻² d⁻¹), T 为温度 (℃), α 及 β 是常数^[59]。

图 2 分析了我国森林生态系统土壤 CO₂ 释放通量与年均温间的关系,结果表明:森林生态系统土壤 CO₂ 释放通量随着分布区年均温的增加而增加 (R² = 0.45, P < 0.01)。根据图 2 中的指数关系式,可以计算我国森林土壤 CO₂ 释放的温度敏感性系数 - Q₁₀,其值为 1.5,低于全球土壤 CO₂ 释放温度敏感平均水平,2.0^[60~63]。这意味着,全球变暖对我国森林生态系统的影响将小于全球平均水平,同时也强调了我国森林生态系统在全球陆地生态系统中的重要地位与作用。

在土壤 CO₂ 释放的研究中,并没有一个具体的关系式来描述水分与土壤 CO₂ 释放通量之间的关系。但本

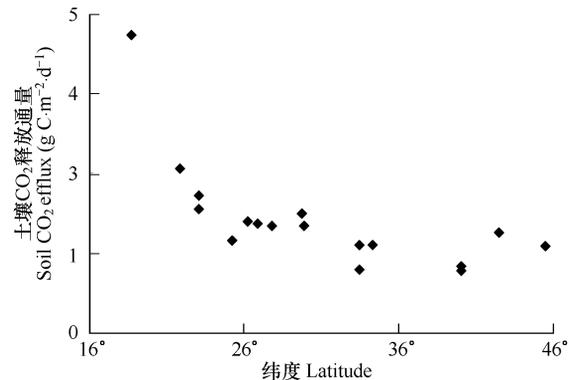


图 1 森林生态系统土壤 CO₂ 释放通量沿纬度的分布

Fig. 1 The distribution of soil CO₂ efflux of forest ecosystem

接卧表 1

研究表明,在全国尺度上,可以用一个指数关系式来模拟森林生态系统土壤 CO_2 释放通量与年均降雨量间的变化关系 ($R^2 = 0.54$, $P < 0.01$) (图 3)。

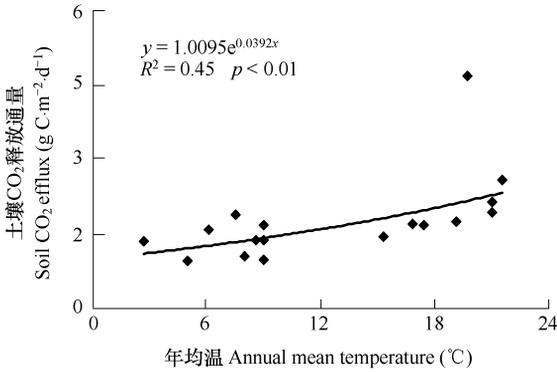


图 2 森林土壤 CO_2 释放通量与年均温的关系

Fig. 2 The relationship between soil CO_2 efflux and annual mean temperature in forest ecosystem

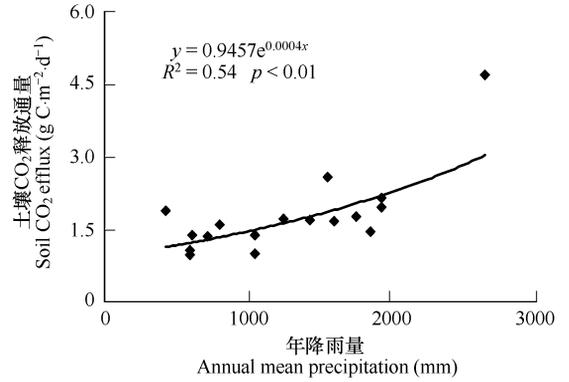


图 3 森林土壤 CO_2 释放通量与年均降雨量的关系

Fig. 3 The relationship between soil CO_2 efflux and annual mean precipitation in forest ecosystem

3.2 群落生产力、凋落物量对土壤 CO_2 释放通量的影响

大量观测结果表明,土壤 CO_2 释放通量的季节变化与地上生物量,尤其是地上绿色部分活体重量的季节动态呈极显著正相关^[64-66]。Raich & Tufekcioglu^[10]的研究中指出草地土壤 CO_2 释放通量与地上净初级生产力呈显著的正相关 $r = 0.90$, $P < 0.01$ 。而图 4 表示,森林净初级生产力与土壤 CO_2 释放通量 ($\text{t C hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$) 之间也表现出正相关关系 ($R^2 = 0.61$, $P < 0.01$)。

植被影响土壤 CO_2 释放通量的机制之一是植物凋落物,凋落物是土壤生物的食物源。Raich & Nadelhoffer^[67]发现在成熟的森林生态系统中,土壤 CO_2 释放通量随着凋落物量的增加而增加,土壤 CO_2 释放通量中的 33% 来自于凋落物,而 Bowden 等指出,对于温带混交硬叶林,该比例约为 30% 左右,这些研究结果也是本文数据整理的重要依据之一。本文的研究结果表明,在全国尺度上,森林生态系统年凋落物量与土壤 CO_2 释放通量之间存在正相关关系,其 $R^2 = 0.32$, $P < 0.05$ (图 5)。

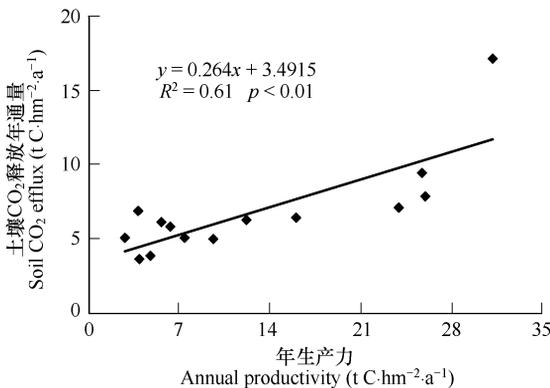


图 4 森林年生产力与土壤 CO_2 释放年通量的关系

Fig. 4 The relationship between soil CO_2 efflux and annual productivity in forest ecosystem

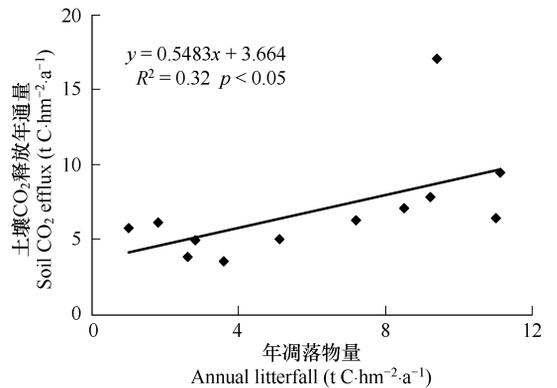


图 5 森林年凋落物量与土壤 CO_2 释放年通量的关系

Fig. 5 The relationship between soil CO_2 efflux and annual litterfall in forest ecosystem

4 讨论

我国森林生态系统类型多种多样,在全国尺度上森林土壤 CO_2 释放通量的平均值为 (1.79 ± 0.86)

g C m⁻² d⁻¹ ,而且不同森林生态系统土壤 CO₂ 释放通量随着纬度增加呈逐渐降低的趋势。进一步的分析指出 ,在全国尺度上 ,年均温、年降雨量、植物群落净生产力、凋落物量与土壤 CO₂ 释放通量之间表现出显著的正相关关系 ,是影响森林生态系统土壤 CO₂ 释放通量的重要因子。

全国尺度上 ,我国森林生态系统土壤 CO₂ 释放格局的形成 ,是由温度、降雨、群落生产力及凋落物量这几个控制因子的纬度分布特征决定的。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。去除海拔、局地小气候的影响后 ,年均温的总体趋势是从赤道至两极逐渐降低的 ,而且可以用一个一元二次方程来拟合二者之间的关系 ,相关系数达到了 0.90^[65]。而且 ,利用表 1 中的数据分析降雨量与纬度间的关系 ,表明降雨量随着纬度由南向北升高 ,呈显著的下降趋势 :

$$Y_p = - 104.45 X + 2222.8 \quad (R^2 = 0.72, P < 0.01) \quad (3)$$

式中 , Y_p 为年降雨量 (mm) , X 为纬度 (°)。

不仅如此 ,我国热带林平均净生产力为 24.5 t hm⁻² a⁻¹ ,亚热带常绿阔叶林为 14.5 t hm⁻² a⁻¹ ,亚寒带针叶林约为 11.8 t hm⁻² a⁻¹ ,总体上也呈现出从南至北递减的规律^[68]。作为影响土壤 CO₂ 释放通量因子之一的凋落物量 ,随着纬度升高 ,也是显著降低的^[5, 67, 69] :

$$Y_L = - 0.3609 X + 17.063 \quad (R^2 = 0.71, P < 0.01) \quad (4)$$

式中 , Y_L 为年凋落物量 (t C hm⁻² a⁻¹) , X 为纬度 (°)。

土壤 CO₂ 释放是一个复杂的生态过程 ,其各项影响因素之间并不是孤立的 ,不仅同时对土壤 CO₂ 释放产生影响 ,而且各个因子之间也有相互影响。气候因素不仅决定了植被类型的分布 ,而且影响其生物量、净生产力 ,植被类型为土壤微生物提供碳源 ,微生物又把这些有机物质分解为植物生长必须的营养元素 ,而这种分解速度又受到温度、水分的影响^[10, 65, 70, 71]。本研究表明 ,在全国尺度上 ,由于温度、降雨量、群落生产力、凋落物量随纬度增加而逐渐下降 ,导致了受这些因子影响的土壤 CO₂ 释放通量也表现出随纬度上升而逐渐降低的分布规律。为了深刻揭示各个因子对土壤 CO₂ 释放通量的影响 ,本研究对表 1 中土壤 CO₂ 释放通量及各个影响因子数据进行标准化处理 ,之后利用 SPSS 10.0 统计软件 ,建立了温度、降雨量、生产力、凋落物量与土壤 CO₂ 释放通量之间的多元线性回归模型 :

$$Y_{\text{Soil}} = 0.550 X_{p_{ro}} + 0.382 X_p - 0.239 X_L - 0.106 X_T + 0.155 \quad (R^2 = 0.73, P < 0.01) \quad (5)$$

式中 , Y_{Soil} 为土壤 CO₂ 释放通量 , $X_{p_{ro}}$ 为群落生产力 , X_p 为降雨量 , X_L 为凋落物量 , X_T 为温度。式 (5) 表明 ,本研究中的 4 个因子对土壤 CO₂ 释放通量的影响权重是不同的 ,以群落生产力的影响权重最大 ,其次为降雨量、凋落物量 ,温度的影响为最小。在一定程度上 ,多元回归统计可以反映自变量对变量的影响权重 ,但值得注意的是 ,森林生态系统生产力受温度、降雨量等气候因子的影响 ,其分布反映了气候条件的地带性分布。因此 ,群落生产力作为影响土壤 CO₂ 释放通量中的主要因子 ,是因为该因子体现了气候的综合影响。

东北地区森林生态系统土壤 CO₂ 释放通量接近或高于中纬度地区 ,原因之一就是群落生产力的差异 ,如长白山地区云冷杉林生产力为 6.3 t C hm⁻² a⁻¹ ,而黑龙江落叶松林地的生产力达 9.6 t C hm⁻² a⁻¹ ,均高于暖温带地区典型森林生态系统的年生产力 (如北京地区辽东栎林年生产力为 4.8 t C hm⁻² a⁻¹ ,秦岭油松林生产力为 3.6 t C hm⁻² a⁻¹) ;另一个原因是这一地区土壤基质的性质与温带地区差别极大。微生物分解土壤有机质产生的 CO₂ ,是土壤 CO₂ 释放通量的组分之一 ,因此 ,土壤有机质含量显著影响土壤 CO₂ 释放通量^[72, 73] ,研究表明 ,土壤 C 含量越高 ,土壤微生物碳含量越高 ,土壤 CO₂ 释放通量也越高^[74~76]。中国东北地区土壤有机质含量约为 8.6%^[77, 78] ,而中纬度地区的有机质含量仅为 2.0% 左右^[79, 80] ,也是这一地区土壤 CO₂ 释放通量较高的原因之一。

References :

- [1] Schlesinger W H. Carbon balance in terrestrial detritus. *Annua Review of Ecology and Systematics* , 1977 , 8 : 51 - 81.
 [2] Post W M , Emanuel W R , Zinke P J , *et al.* Soil carbon pools and world life zones. *Nature* , 1982 , 298 : 156 - 159.

- [3] Eswaran H, Van den Berg E, Reich P. Organic carbon in soils of the world. *Soil Science Society of America Journal*, 1993, 57: 192–194.
- [4] Dixon R K, Brown S, Houghton R A, *et al.* Carbon pools and flux of global forest ecosystems. *Science*, 1994, 263: 185–190.
- [5] Raich J W, Schlesinger W H. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate. *Tellus*, 1992, 44B: 81–89.
- [6] Fang C, Moncrieff J B. The dependence of soil CO₂ efflux on temperature. *Soil Biology & Biochemistry*, 2001, 33: 155–165.
- [7] Jenkinson D S, Adams D E, Wild A. Model estimates of CO₂ emissions from soil in response to global warming. *Nature*, 1991, 351: 304–306.
- [8] Kirschbaum M U F. The temperature dependence of soil organic matter decomposition, and the effect of global warming on soil organic C storage. *Soil Biology & Biochemistry*, 1995, 27 (6): 753–760.
- [9] Elberling B, Brandt K K. Uncoupling of microbial CO₂ production and release in frozen soil and its implications for field studies of arctic C cycling. *Soil Biology & Biochemistry*, 2003, 35: 263–272.
- [10] Raich J W, Tufekcioglu A. Vegetation and soil respiration: correlation and controls. *Biogeochemistry*, 2000, 48: 71–90.
- [11] Fang J Y, Liu G H, Xu S L. The carbon cycle of terrestrial ecosystems in China and its global significance in china. In: Monitoring and relevant process of greenhouse gas concentration and emission. eds. In: Wang G C, Wen P Y eds. Beijing: Chinese Environmental Science Publishing House, 1996, 129–139.
- [12] Li Y Q, Xu M, Zou X M, *et al.* Comparing soil organic carbon dynamics in plantation and secondary forest in wet tropics in Puerto Rico. *Global Change Biology*, 2005, 11: 239–248.
- [13] Conant R T, Klopatek J M, Klopatek C C. Environmental factors controlling soil respiration in three semiarid ecosystems. *Soil Science Society of America Journal*, 2000, 64: 383–390.
- [14] Maestre F T, Cortina J. Small-scale spatial variation in soil CO₂ efflux in a Mediterranean semiarid steppe. *Applied Soil Ecology*, 2003, 23: 199–209.
- [15] Rustad L E, Huntington T G, Boone R D. Controls on soil respiration: implications for climate change. *Biogeochemistry*, 2000, 48: 1–6.
- [16] Zhang Z S, Tan H J, Wang X P, *et al.* Primary discussion on soil respiration in artificially re-vegetated desert area. *Journal of Desert Research*, 2005, 25 (4): 521–528.
- [17] Zhang X Q, Wang W J, Zu Y G, *et al.* The difference between components of soil respiration in several types of forests in northeastern China. *Journal of Northeast Forestry University*, 2005, 33 (2): 46–47.
- [18] Luo T S, Chen B F, Li Y D, *et al.* Litter and soil respiration in a tropical mountain rain forest in Jianfengling, Hainan Island. *Ecologica Sinica*, 2001, 21 (22): 2013–2017.
- [19] Li Y D, Wu Z M, Zeng Q B, *et al.* Carbon pool and carbon dioxide dynamics of tropical mountain rain forest ecosystem at Jianfengling, Hainan Island. *Acta Ecologica Sinica*, 1998, 18 (40): 371–378.
- [20] Wu Z M, Zeng Q B, Li Y D, *et al.* A preliminary research on the carbon storage and CO₂ release of the tropical forest soils in Jianfengling, Hainan Island, China. *Acta Phytocologica Sinica*, 1997, 21 (5): 416–423.
- [21] Sha L Q, Zheng Z, Tang J W, *et al.* Study on soil respiration in a tropical seasonal rain forest in Xishuangbanna. *Science in China (Ser. D)*, *Earth Science*, 2004, 34: 167–174.
- [22] Zheng Z, Feng Z L, Cao M, *et al.* Biomass and net primary production of primary tropical wet seasonal rainforest in Xishuangbanna. *Acta Phytocologica Sinica*, 2000, 24 (2): 197–203.
- [23] Yi Z G, Yi W M, Zhou G Y, *et al.* Soil carbon effluxes of three major vegetation types in Dinghushan Biosphere Reserve. *Ecologica Sinica*, 2003, 23 (8): 1673–1678.
- [24] Ren H, Peng S L. The characteristics of ecological energetics of the forest ecosystem in the successional process in Dinghushan, Guangdong, China. *Acta Ecologica Sinica*, 1999, 19 (6): 817–822.
- [25] Weng H, Li Z A, Tu M Z, *et al.* The production and nutrient contents of litter in forests of Dinghushan Mountain. *Acta Phytocologica et Geobotanica Sinica*, 1993, 17 (4): 299–304.
- [26] Mo J M, Peng S L, Brown S, *et al.* Response of biomass production to human impacts in a pine forest in subtropical China. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24 (2): 193–200.
- [27] Ran J C, He S Y, Cao J H. Preliminary study on soil CO₂ transfer in subtropical forest karst areas. *Guizhou Geology*, 2001, 18 (4): 247–252.
- [28] Yang Y S, Chen G S, Dong B, *et al.* Responses of soil respiration to soil rewetting in a natural forest and two monoculture plantations in subtropical China. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24 (5): 953–958.
- [29] Yang Y S, Chen G S, Lin P, *et al.* Fine root distribution, seasonal pattern and production in a native forest and monoculture plantations in subtropical China. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23 (9): 1719–1730.
- [30] Yang Y S, Guo J F, Lin P, *et al.* Carbon and nutrient pools of forest floor in native forest and monoculture plantations in subtropical China. *Acta*

Ecologica Sinica ,2004 ,24 (2) :359 — 367.

- [31] Xiao F M , Wang S L , Du T Z , *et al.* A study on forest soil respiration in Chinese fir plantation. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis , 2005 , 27 (4) :580 — 584.
- [32] Fang X , Tian D L , Xiang W H , *et al.* Soil CO₂ release rate and its effect factors in Chinese fir plantation. Scientia Silvae Sinicae , 2005 , 41 (2) : 1 — 7.
- [33] Fang X , Tian D L , Xiang W H , *et al.* Carbon dynamics and balance in the ecosystem of the young and middle-aged second-generation Chinese fir plantation. Journal of Central South Forestry University , 2002 , 22 (1) : 1 — 6.
- [34] Fang X , Tian S L , Zhang S J. A study of forest soil CO₂ release rates in the artificial forests of *Cinnamomum camphora* (L.) Presl. Journal of Central South Forestry University , 2002 , 22 (1) : 11 — 16.
- [35] Liu Y F. A tentative study of CO₂ emission from farmland soil in Tibetan Plateau. Journal of Natural Resources , 1998 , 13 (2) : 181 — 185.
- [36] Guan H S , Liu Y L. A study of biomass in the artificial forests of poplar in the middle of the Brahmaputra valley , in Tibet. Forestry Science and Technology Communication , 1993 , 32 (9) : 20 — 22.
- [37] Luo J , Yang Z , Yang Q W. CO₂ emissions from soils in Abies Fabri Forest region on the east slope of Gongga Mountain. Acta Pedologica Sinica , 2000 , 37 (3) : 402 — 409.
- [38] Liu J J , Wang D X , Lei R D , *et al.* Soil respiration and release of carbon dioxide from natural forest of *Pinus tabulaeformis* and *Quercus Aliena* var. *Acuteserrata* in Qinling Mountains. Scientia Silvae Sinicae , 2003 , 39 (2) : 8 — 13.
- [39] Liu G Q , Tu X N , Zhao S D , *et al.* Distributional characteristics on biomass and nutrient elements of pine-oak forest belt in Mt. Qinling. Scientia Silvae Sinicae , 2001 , 37 (1) : 28 — 36.
- [40] Zhao J B , Zhang X L , Yue Y L , *et al.* Study on release of CO₂ from soils in spring in southern suburbs of Xi'an. Arid Land Geography , 2002 , 25 (3) : 208 — 213.
- [41] Xiao Y. Comparative studies on biomass and productivity of *Pinus tabulaeformis* plantations in different climatic zones , in Shanxi Province. Acta Phytocologica et Geobotanica Sinica , 1990 , 14 (3) : 237 — 248.
- [42] Liu S H , Fang J Y , Kiyota M. Soil respiration of mountainous temperate forests in Beijing , China. Acta Phytocologica Sinica , 1998 , 22 (2) : 119 — 126
- [43] Sang W G , Ma K P , Chen L Z. Primary study on carbon cycling in warm temperate deciduous broad-leaved forest. Acta Phytocologica Sinica , 2002 , 26 (5) : 543 — 548.
- [44] Du R , Huang J H , Wan X W , *et al.* The research on the law of greenhouse gases emission from warm temperate forest soils in Beijing region. Environmental Science , 2004 , 25 (2) : 12 — 16.
- [45] Wang M , Li Q R , Xiao D M , *et al.* Effects of soil temperature and soil water content on soil respiration in three forest types in Changbai Mountain. Journal of Forestry Research , 2004 , 15 (2) : 113 — 118.
- [46] Zhang N , Yu G R , Zhao S D , *et al.* Carbon budget of ecosystem in Changbai Mountain natural reserve. Environmental Science , 2003 , 24 (1) : 24 — 32.
- [47] Ding B Y , Liu S R , Cai T J. Studies on biological productivity of artificial forests of Dahurian Larches. Acta Phytocologica et Geobotanica Sinica , 1990 , 14 (3) : 226 — 236.
- [48] Yang J Y , Wang C K. Soil carbon storage and flux of temperate forest ecosystems in northeastern China. Acta Ecologica Sinica , 2005 , 25 (11) : 2875 — 2882.
- [49] Li Y Q , Xu M , Sun O J , *et al.* Effects of root and litter exclusion on soil CO₂ efflux and microbial biomass in wet tropical forests. Soil Biology & Biochemistry , 2004 , 36 : 2111 — 2114.
- [50] Bowden R D , Nadelhoffer K J , Boone R D , *et al.* Contribution of above-ground litter , belowground litter , and root respiration to total respiration in a temperate mixed hardwood forest. Canadian Journal of Forest Research , 1993 , 23 : : 61 — 71.
- [51] Davidson E A , Trumbore S E. Gas diffusivity and production of CO₂ in deep soils of the eastern Amazon. Tellus , 1995 , 47B : 550 — 565.
- [52] Cui X Y , Chen S Q , Chen Z Z. CO₂ release from typical *Stipa grandis* grassland soil. Chinese Journal of Applied Ecology , 2000 , 11 (3) : 390 — 394.
- [53] Chen Q S , Li L H , Han X G , *et al.* Effects of water content on soil respiration and the mechanisms. Acta Ecologica Sinica , 2003 , 23 (5) : 972 — 978.
- [54] Zheng D L , Chen J Q , LeMoine J M , *et al.* Influence of land-use change and edges on soil respiration in a managed forest landscape , WI , USA. Forest Ecology and Management , 2005 , 215 : 169 — 182.
- [55] Kichlighter D W , Melillo J M , Peterjohn W T , *et al.* Aspects of spatial and temporal aggregation in estimating regional carbon dioxide fluxes from temperate forest soils. Journal of Geophysical Research , 1994 , 99 : 1301 — 1315.

- [56] Sjögersten S, Wookey P A. Climatic and resource quality controls on soil respiration across a forest-tundra ecotone in Swedish Lapland. *Soil Biology & Biochemistry*, 2002, 34 :1633 – 1646.
- [57] Conant R T, Dalla-Betta P, Klopatek C C, *et al.* Controls on soil respiration in semiarid soils. *Soil Biology & Biochemistry*, 2004, 36 :945 – 951.
- [58] Moncrieff J B, Fang C. A model for soil CO₂ production and transport 2 : Application to a florida *Pinus elliotte* plantation. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1999, 95 :237 – 256.
- [59] Buchmann N. Biotic and abiotic factors controlling soil respiration rates in *Picea abies* stands. *Soil Biology & Biochemistry* 2000, 32 :1625 – 1635
- [60] Curiel Yuste J, Janssens I A, Carrara A, *et al.* Annual Q₁₀ of soil respiration reflects plant phenological patterns as well as temperature sensitivity. *Global Change Biology*, 2004, 10 :161 – 169
- [61] Winkler J P, Cherry R S, Schlesinger W H. The Q₁₀ relationship of microbial respiration in a temperature forest soil. *Soil Biology & Biochemistry*, 1996, 28 :1067 – 1072.
- [62] Kätterer T, Reichstein M, Andren O, *et al.* Temperature dependence of organic matter decomposition : A critical review using literature data analyzed with different models. *Biology and Fertility of Soils*, 1998, 27 :258 – 262.
- [63] Schlesinger W H, Andrews J A. Soil respiration and the global carbon cycle. *Biogeochemistry*, 2000, 48 :7 – 20.
- [64] Chapin F S III, Ruess R W. The roots of the matter. *Nature*, 2001, 411 (14) :749 – 752.
- [65] Zhang J X, Cao G M, Zhou D W, *et al.* Diel and seasonal changes of carbon dioxide emission from mollic-cryic cambisols on degraded grassland. *Acta Pedologica Sinica*, 2001, 38 (1) :32 – 40.
- [66] Chen S Q, Cui X Y, Zhou G S, *et al.* Study on the CO₂-release rate of soil respiration and litter decomposition in *Stipa grandis* steppe in Xilin River basin, Inner Mongolia. *Acta Botanica Sinica*, 1999, 41 (6) :645 – 650.
- [67] Raich J W, Nadelhoffer K L. Belowground carbon allocation in forest ecosystems : Global trends. *Ecology*, 1989, 70 :1346 – 1354.
- [68] Fang J Y, Liu G H, Xu S L. Biomass and net production of forest vegetation in China. *Acta Ecologica Sinica*, 1996, 16 (5) :497 – 508.
- [69] Starr M, Saarsalmi A, Hokkanen T, *et al.* Models of litterfall production for Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) in Finland using stand, site and climate factors. *Forest Ecology and Management*. , 2005, 205 :215 – 225.
- [70] Esser G. Sensitivity of global carbon pools and fluxes to human and potential impacts. *Tellus*, 1987, 39B :245 – 260.
- [71] Nalder I A, Wein R W. A model for the investigation of long-term carbon dynamics in boreal forests of western Canada I. Model development and validation. *Ecological Modelling*, 2006, 192 :37 – 66
- [72] Liu S H, Fang J Y. Effect factors of soil respiration and the temperature's effects on soil respiration in the global scale. *Acta Ecologica Sinica*, 1997, 17 (5) :469 – 476.
- [73] Akinremi O O, McGinn S M, Mclean H D J. Effects of soil temperature and moisture on soil respiration in barley and fallow plots. *Canadian Journal of Soil Science*, 1999, 79 (1) :5 – 13.
- [74] Carpenter-Boggs L, Stahl P D, Lindstrom M J, *et al.* Soil microbial properties under permanent grass, conventional tillage, and no-till management in South Dakota. *Soil & Tillage Research*, 2003, 71 :15 – 23.
- [75] Lohila A, Aurela M, Regina K, *et al.* Soil and total ecosystem respiration in agricultural fields : effect of soil and crop type. *Plant Soil*, 2003, 251 :303 – 317.
- [76] Frank A B, Liebig M A, Tanaka D L. Management effects on soil CO₂ efflux in northern semiarid grassland and cropland. *Soil & Tillage Research*, 2005, 82 :1 – 8.
- [77] Zhou C P, Ou Y H. Effect of temperature on nitrogen mineralization at optimum and saturated soil water content in two types of forest in Changbai Mountain. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21 (9) :1469 – 1473.
- [78] Dong Z J, Zhao Y. Studies on the relationship between content of organic matter and water evaporation of black soil. *System Sciences and Comprehensive Studies in Agriculture*, 2000, 16 (2) :145 – 148.
- [79] Ma J H, Ma X Z. A study on the migration and accumulation laws of soil materials in the juncture of Qinling-Huanghuai. *Mountain Research*, 1997, 15 (1) :36 – 41.
- [80] Sheng X B, Sun J Z, Liu Y X. Effect of land use and land cover on soil nutrients. *Rural Eco-Environment*, 2002, 18 (4) :10 – 14.

参考文献 :

- [11] 方精云, 刘国华, 徐嵩龄. 中国陆地生态系统的碳循环及其全球意义. 见:王庚辰, 温璞玉. 温室气体浓度和排放监测及相关过程. 北京:中国环境科学出版社, 1996. 129 ~ 139.
- [16] 张志山, 谭会娟, 王新平, 等. 沙漠人工植被区土壤呼吸初探. *中国沙漠*, 2005, 25 (4) 521 ~ 528.
- [17] 张宪权, 王文杰, 祖元刚, 等. 东北地区几种不同林分土壤呼吸组分的差异性. *东北林业大学学报*, 2005, 33 (2) #6 ~ 47.

- [18] 骆士寿, 陈步峰, 李意德, 等. 海南岛尖峰岭热带山地雨林土壤和凋落物呼吸研究. 生态学报, 2001, 21 (2): 2013 ~ 2017.
- [19] 李意德, 吴仲民, 曾庆波, 等. 尖峰岭热带山地雨林生态系统碳平衡的初步研究. 生态学报, 1998, 18 (4): 371 ~ 378.
- [20] 吴仲民, 曾庆波, 李意德, 等. 尖峰岭热带森林土壤 C 储量和 CO₂ 排放量的初步研究. 植物生态学报, 1997, 21 (5): 416 ~ 423.
- [21] 沙丽清, 郑征, 唐建维, 等. 西双版纳热带季节雨林的土壤呼吸研究. 中国科学 (D 辑), 地球科学, 2004, 34: 167 ~ 174.
- [22] 郑征, 冯志力, 曹敏, 等. 西双版纳原始热带湿性季节雨林生物量及净初级生产. 植物生态学报, 2000, 24 (2): 197 ~ 203.
- [23] 易志刚, 蚁伟民, 周国逸, 等. 鼎湖山三种主要植被类型土壤碳释放研究. 生态学报, 2003, 23 (8): 1673 ~ 1678.
- [24] 任海, 彭少麟. 鼎湖山森林生态系统演替过程中的能量生态特征. 生态学报, 1999, 19 (6): 817 ~ 822.
- [25] 翁轰, 李志安, 屠梦照, 等. 鼎湖山森林凋落物及营养元素含量研究. 植物生态学与地植物学报, 1993, 17 (4): 299 ~ 304.
- [26] 莫江明, 彭少麟, Sandra Brown, 等. 鼎湖山马尾松林群落生物量生产对人为干扰的响应. 生态学报, 2004, 24 (2): 193 ~ 200.
- [27] 冉景丞, 何师意, 曹建华. 亚热带森林岩溶区土壤 CO₂ 迁移动态初步研究. 贵州地质, 2001, 18 (4): 247 ~ 252.
- [28] 杨玉盛, 陈光水, 董彬, 等. 格氏栲天然林和人工林土壤呼吸对干湿交替的响应. 生态学报, 2004, 24 (5): 953 ~ 958.
- [29] 杨玉盛, 陈光水, 林鹏, 等. 格氏栲天然林与人工林细根生物量、季节动态及净生产力. 生态学报, 2003, 23 (9): 1719 ~ 1730.
- [30] 杨玉盛, 郭剑芬, 林鹏, 等. 格氏栲天然林与人工林枯枝落叶层碳库及养分库. 生态学报, 2004, 24 (2): 359 ~ 367.
- [31] 肖复明, 汪思龙, 杜天真, 等. 杉木人工林林地土壤呼吸研究. 江西农业大学学报, 2005, 27 (4): 580 ~ 584.
- [32] 方晰, 田大伦, 项文化, 等. 杉木人工林林地土壤 CO₂ 释放量及其影响因子的研究. 林业科学, 2005, 41 (2): 1 ~ 7.
- [33] 方晰, 田大伦, 项文化, 等. 第二代杉木中幼林生态系统碳动态与平衡. 中南林学院学报, 2002, 22 (1): 1 ~ 6.
- [34] 方晰, 田大伦, 张仕吉. 樟树人工林林地 CO₂ 释放量的研究. 中南林学院学报, 2002, 22 (1): 11 ~ 16.
- [35] 刘允芬. 西藏高原农田土壤 CO₂ 排放研究初报. 自然资源学报, 1998, 13 (2): 181 ~ 185.
- [36] 关洪书, 刘玉林. 西藏一江两河中部流域杨树人工林生物量的研究. 林业科技通讯, 1993, 32 (9): 20 ~ 22.
- [37] 罗辑, 杨忠, 杨清伟. 贡嘎山东坡峨眉冷杉林区土壤 CO₂ 排放. 土壤学报, 2000, 37 (3): 402 ~ 409.
- [38] 刘建军, 王德祥, 雷瑞德, 等. 秦岭天然油松林、锐齿栎林地土壤呼吸与 CO₂ 释放. 林业科学, 2003, 39 (2): 8 ~ 13.
- [39] 刘广全, 土小宁, 赵士洞, 等. 秦岭松栎林带生物量及其营养元素分布特征. 林业科学, 2001, 37 (1): 28 ~ 36.
- [40] 赵景波, 张晓龙, 岳应利, 等. 西安南郊春季土壤碳释放研究. 干旱区地理, 2002, 25 (3): 208 ~ 213.
- [41] 肖瑜. 陕西省不同气候区域油松人工林生物量和生产力的比较研究. 植物生态学与地植物学学报, 1990, 14 (3): 237 ~ 248.
- [42] 刘绍辉, 方精云, 清田信. 北京山地温带森林土壤呼吸. 植物生态学报, 1998, 22 (2): 119 ~ 126.
- [43] 桑卫国, 马克平, 陈灵芝. 暖温带落叶阔叶林碳循环的初步估算. 植物生态学报, 2002, 26 (5): 543 ~ 548.
- [44] 杜睿, 黄建辉, 万小伟, 等. 北京地区暖温带森林土壤温室气体排放规律. 环境科学, 2004, 25 (2): 12 ~ 16.
- [45] 王淼, 李秋荣, 肖冬梅, 等. 土壤温度和水分对长白山 3 种温带森林土壤呼吸的影响. Journal of Forestry Research, 2004, 15 (2): 113 ~ 118.
- [46] 张娜, 于贵瑞, 赵士洞, 等. 长白山自然保护区生态系统碳平衡研究. 环境科学, 2003, 24 (1): 24 ~ 32.
- [47] 丁宝永, 刘世荣, 蔡体久. 落叶松人工林群落生物生产力的研究. 植物生态学与地植物学学报, 1990, 14 (3): 226 ~ 236.
- [48] 杨金艳, 王传宽. 东北东部森林生态系统土壤碳贮量和碳通量. 生态学报, 2005, 25 (11): 2875 ~ 2882.
- [51] 崔晓勇, 陈四清, 陈佐忠. 大针茅典型草原土壤 CO₂ 排放规律的研究. 应用生态学报, 2000, 11 (3): 390 ~ 394.
- [52] 陈全胜, 李凌浩, 韩兴国, 等. 水分对土壤呼吸的影响及机理. 生态学报, 2003, 23 (5): 972 ~ 978.
- [65] 张金霞, 曹广民, 周党卫, 等. 退化草地暗沃寒冻锥形土 CO₂ 释放的日变化和季节变化. 土壤学报, 2001, 38 (1): 32 ~ 40.
- [66] 陈四清, 崔晓勇, 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 CO₂ 排放速率研究. 植物学报, 1999, 41 (6): 645 ~ 650.
- [68] 方精云, 刘国华, 徐嵩龄. 我国森林植被的生物量和净生产量. 生态学报, 1996, 16 (5): 497 ~ 508.
- [72] 刘绍辉, 方精云. 土壤呼吸的影响因素及全球尺度下温度的影响. 生态学报, 1997, 17 (5): 469 ~ 476.

表 1 整理数据

Table 1 Data for research

森林类型 Forest types	地理位置 Position		土壤 CO ₂ 释放通量	气候因子 Climatic factors		年生产力 (t hm ⁻² a ⁻¹) Productivity	凋落物量 (t hm ⁻² a ⁻¹) Litterfall	文献 References
	纬度 (°) Latitude	经度 (°) Longitude	(g C m ⁻² d ⁻¹) Soil CO ₂ efflux	年均温 (°C) Temperature	降雨量 (mm) Precipitation			
热带山地雨林 Tropical montane rain forest	18.70	108.80	4.70	19.7	2651	31.2	9.4	[18,19,20]
原始热带湿性季节雨林 Primary tropical wet seasonal rainforest	21.88	101.07	2.60	21.5	1557	25.8	11.1	[21,22]
季风常绿阔叶林 Monsoon evergreen broad-leaved forest	23.10	112.60	2.17*	21.0	1927	26.0	9.2	[23,24,25]
针阔混交林 Mixed coniferous and broad-leaf forest	23.10	112.60	1.96*	21.0	1927	23.9	8.5	[23,24,26]
常绿落叶阔叶混交林 Mixed defoliation and evergreen broadleaved forest	25.24	107.98	1.46	15.3	1850			[27]
格氏栲林 Castanopsis kawakamii forest	26.20	117.40	1.77*	19.1	1749	16.0	11.0	[28,29,30]
杉木人工林 Chinese fir plantation	26.83	109.75	1.73	16.8	1250	12.2		[31,32,33]
樟树林 Cinnamomum camphora forest	27.80	112.90	1.70	17.4	1431			[34]
杨树林 Poplar forest	29.68	91.33	1.90	7.5	430	3.8		[35,36]
峨眉冷杉林 Abies fabric forest	29.83	101.88	1.69*	5.9	1600	5.6	1.8	[37]
锐齿栎林 Quercus aliena var. acuteserrata forest	33.40	108.50	1.40	7.3	1050	7.4	5.1	[38,39]
油松林 Pinus tabulaeformis forest	33.40	108.50	1.00	7.3	1050	3.9	3.6	[38,39]
杂木林地 Mixed forest	34.30	108.90	1.40	7.3	614	2.8		[40,41]
辽东栎林 Quercus liaotungensis forest	39.97	115.43	1.07	8.0	630	4.8	2.6	[42,43]
油松林 Pinus tabulaeformis forest	40.03	115.50	0.98	8.0	600			[44]
云冷杉林 Korean pine-spruce-fir forest	42.40	128.10	1.60	2.8	800	6.3	1.0	[45,46]
次生针叶林 Secondary coniferous forest	45.40	127.67	1.37*	2.7	720	9.6	2.8	[47,48]

格氏栲林年生产力 16.0 是利用该林地细根年净生产力约占总净生产力 55% 计算得出,见文献 [29];*: 该数据在原文献中,土壤 CO₂ 释放通量中包括地表凋落物排放的 CO₂ 通量部分,本文中,为了与其他数据有可比性,排除了这一部分通量,方法为原土壤 CO₂ 释放通量 × 0.69。据 Raich & Nadelhoffer 的研究发现,地表凋落物释放的 CO₂ 通量约占土壤 CO₂ 释放的 33% 左右,而 Bowden 等指出,对于温带混交硬叶林,该比例约为 30% 左右,本文取中间值 31% [49,50]