

# 东北东部森林生态系统土壤碳贮量和碳通量

杨金艳, 王传宽\*

(东北林业大学生态学科, 哈尔滨 150040)

**摘要:** 土壤碳是高纬度地区森林生态系统最大的碳库, 是森林生态系统碳循环的极其重要组分。研究了东北东部典型的 6 种次生林生态系统(天然蒙古栎林、杨桦林、杂木林、硬阔叶林、红松人工林和落叶松人工林)的土壤碳动态, 包括(1) 量化土壤有机碳(SOC) 含量、碳密度及周转时间, (2) 比较不同森林生态系统的土壤表面  $\text{CO}_2$  通量( $R_s$ ) 年通量差异, (3) 建立  $R_s$  年通量及其分量与 SOC 的量化关系。研究结果表明: 阔叶天然次生林和针叶人工林的 SOC 含量变化范围分别为  $52.63 \sim 66.29 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$  和  $42.15 \sim 49.15 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ; 平均 SOC 密度分别为  $15.57$  和  $17.16 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ ; 平均 SOC 周转时间分别为 32a 和 48a。各个生态系统的  $R_s$  依次为杂木林  $951 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 、硬阔叶林  $892 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 、杨桦林  $812 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 、蒙古栎林  $678 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 、红松林  $596 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$  和落叶松林  $451 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。 $R_s$  年通量及其分量(土壤异养呼吸和自养呼吸)与 SOC 含量呈显著的正相关, 但其相关程度因土层不同而异( $R^2 = 0.747 \sim 0.933$ )。同一生态系统中, SOC 含量随土深增加而降低, 而 SOC 密度和 SOC 周转时间随深度增加而增大。采用统一规范的研究方法, 获取大量有代表性的森林生态系统土壤碳贮量和  $R_s$  的实测数据, 是减少区域尺度碳平衡研究中不确定性的不可缺少的研究内容。

**关键词:** 土壤有机碳; 土壤呼吸; 周转时间; 温带森林

文章编号: 1000-0933(2005)11-2875-08 中图分类号: Q 143, S157 文献标识码: A

## Soil carbon storage and flux of temperate forest ecosystems in northeastern China

YANG Jin-Yan, WANG Chuan-Kuan\* (Ecology Program, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China). Acta Ecologica Sinica, 2005, 25(11): 2875~ 2882

**Abstract:** Soil carbon, a key component of ecosystem carbon budgets, is the largest carbon pool of forest ecosystems in high latitude regions. Temperate forests occupy a large area in northeastern China where effects of projected climatic warming on terrestrial ecosystems are significant. However, few data on soil carbon budgets are available for these forests. In this paper, we studied the soil carbon dynamics of six representative types of temperate secondary forest ecosystems in northeast China, which were oak forest dominated by *Quercus mongolica*, poplar-birch forest dominated by *Populus davidiana* and *Betula platyphylla*, mixed forest without dominant tree species, hardwood forest dominated by *Fraxinus mandshurica*, *Juglans mandshurica*, and *Phellodendron amurense*, Korean pine plantation dominated by *Pinus koraiensis*, and Dahurian larch plantation dominated by *Larix gmelinii*. Our specific objectives were to (1) quantify soil organic carbon (SOC) contents and turnover time for the six forest ecosystems, and (2) compare the annual flux of soil surface  $\text{CO}_2$  flux ( $R_s$ ) for the ecosystems, and (3) establish quantitative relationship between  $R_s$  and SOC. The experimental design included six forest ecosystem types, three random replicate plots each ecosystem type. In each plot, we dug three soil pits and measured SOC content and density. We measured  $R_s$  with a LI-6400 infrared gas analyzer, and partitioned autotrophic and heterotrophic respiration in the  $R_s$  using a trenched-plot approach. The SOC content for the broadleaved secondary forests and coniferous plantations was  $52.63 \sim 66.29$

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(30470304); 教育部重点基金资助项目(105062); 东北林业大学人才引进基金资助项目(2004-07)

**收稿日期:** 2005-03-22; **修订日期:** 2005-09-29

**作者简介:** 杨金艳(1975~), 女, 吉林桦甸人, 博士, 主要从事森林生态系统和碳循环研究。E-mail: yang-jinyancn@yahoo.com.cn

\* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: wangck-cf@nefu.edu.cn

**Foundation item:** National Natural Science Foundation of China (No. 30470304), Department of Education Fund (No. 105062), and Innovated Talent Program of NEFU (No. 2004-07)

**Received date:** 2005-03-22; **Accepted date:** 2005-09-29

**Biography:** YANG Jin-Yan, Ph.D., mainly engaged in forest ecosystem and carbon cycling. E-mail: yang-jinyancn@yahoo.com.cn

$\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$  and  $42.15 \sim 49.15 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ , respectively; the mean SOC density was  $15.57$  and  $17.16 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ , respectively; and the mean SOC turnover time was  $32$  and  $48$  years, respectively. The  $R_s$  for the mixed stand, hardwood stand, poplar-birch stand, Mongolian oak stand, Korean pine plantation, and Dahurian larch plantation was  $951 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ,  $892 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ,  $812 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ,  $678 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ,  $596 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ , and  $451 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ , respectively. The  $R_s$  and its components (soil autotrophic and heterotrophic respiration) were positively correlated to SOC content, and the significance level of the correlation depended on soil horizons ( $R^2 = 0.747 \sim 0.933$ ). The SOC content decreased with soil depth in a specific forest ecosystem, whereas the SOC density and turnover time increased with soil depth. The large spatial variation in SOC and  $R_s$  among forest ecosystems and soil profile horizons within a specific ecosystem suggested that measurements of forest soil carbon storage and flux using standardized approaches be critical for reducing uncertainties in regional-scale carbon budget studies.

**Key words:** soil organic carbon; soil respiration; turnover time; temperate forest

全球约有  $1400 \sim 1500 \text{ Gt}$  碳以有机态形式储存于土壤中,是陆地植被碳库( $500 \sim 600 \text{ Gt}$ )的  $2 \sim 3$  倍,是全球大气碳库( $750 \text{ Gt}$ )的  $2$  倍多<sup>[1]</sup>。每年土壤呼吸释放到大气中的  $\text{CO}_2$  是化石燃料燃烧释放的  $\text{CO}_2$  的  $10$  倍以上<sup>[2]</sup>。由于土壤有机碳贮量的巨大库容,因此,即便土壤碳贮量和土壤呼吸发生较小的变化,也会显著地影响大气中的  $\text{CO}_2$  浓度,进而影响陆地生态系统的分布、组成、结构和功能。森林生态系统作为陆地生物圈的主体,不仅本身维持着大量的碳库(约占全球植被碳库的  $86\%$  以上),同时也维持着巨大的土壤碳库(约占全球土壤碳库的  $73\%$ )<sup>[3]</sup>。因而,森林生态系统土壤碳平衡是全球碳循环中极为重要的组分,在全球碳平衡中起着不可替代的作用。处于全球暖化敏感的中高纬度地区的东北森林是中国的主要林区,其林地面积占全国的  $31.4\%$ ,在我国碳汇管理和生态环境建设中起着举足轻重的作用。为此,东北森林生态系统的土壤碳贮量研究引起了人们的关注<sup>[4~12]</sup>。然而,绝大多数现有研究是利用土壤普查数据和剖面分布图进行的区域尺度的土壤碳估算。至于基于生态系统功能过程的土壤碳贮量和碳通量研究很少<sup>[13,14]</sup>。关于东北东部的天然次生林生态系统的土壤碳贮量和土壤表面  $\text{CO}_2$  年通量的研究尚未见报道。因此,对东北典型森林生态系统的土壤碳贮量和土壤表面  $\text{CO}_2$  年通量的研究,不仅对于评估东北森林生态系统碳收支非常关键,而且对于评测中国温带森林生态系统在全球碳循环中的功能和地位也有着重要的意义。

本研究以东北东部  $6$  种典型次生林生态系统类型(天然蒙古栎林、杨桦林、硬阔叶林、杂木林、人工红松林和落叶松林)为研究对象,比较研究了各种森林生态系统的土壤碳动态。具体的研究目标包括:(1)量化  $6$  种森林生态系统的土壤有机碳含量(SOC)、碳密度及 SOC 周转时间;(2)比较  $6$  种森林生态系统的  $R_s$  年通量;(3)建立  $R_s$  年通量及其分量与 SOC 的量化关系。

## 1 研究地区自然概况

本研究地位于黑龙江省尚志市境内东北林业大学帽儿山森林生态系统定位研究站内( $45^{\circ}24' \text{N}$ ,  $127^{\circ}40' \text{E}$ )。平均海拔  $300 \text{ m}$ ,平均坡度  $10 \sim 15^{\circ}$ ;地带性土壤为暗棕色森林土。该地区气候属于大陆性季风气候,年降水量  $600 \sim 800 \text{ mm}$ ,雨量集中于  $7、8$  月份,年蒸发量  $1093 \text{ mm}$ ,年平均相对湿度  $70\%$ ;年平均温度  $2.7^{\circ}\text{C}$ ,全年  $\geq 10^{\circ}\text{C}$  的积温为  $2638^{\circ}\text{C}$ ,年平均总日照时数  $1856.8 \text{ h}$ ,平均日照率为  $43\%$ ,年均风速  $1.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。早霜一般出现在  $8$  月末,晚霜一般在  $5$  月末,无霜期约为  $120 \sim 140 \text{ d}$ 。

该地区植被属于长白植被区系。现有植被是原地地带性植被-阔叶红松林屡遭人为干扰后经过次生演替而形成的天然次生林相,代表着东北东部山区天然次生林的典型生态系统类型。本研究选取了该地区不同立地条件下经过不同干扰而形成的  $6$  种典型森林生态系统类型为研究对象,在每种生态系统类型中随机设置了  $3$  个  $20 \text{ m} \times 30 \text{ m}$  的固定样地进行土壤表面  $\text{CO}_2$  通量和有机碳贮量测定。表 1 列出这些固定样地的立地状况和植被组成。

## 2 研究方法

### 2.1 土壤有机碳含量和碳密度的测定

2004 年 8 月,在  $6$  个典型森林生态系统的  $18$  块样地周围,在距每个样地边界  $2 \sim 3 \text{ m}$  处随机挖取  $3$  个土壤剖面,剖面深度视土壤发生层次而定(深至 C 层为止)。确定土壤剖面发生层次后,用土壤环刀( $100 \text{ cm}^3$ ) 在每一土层取土样测定土壤容重;同时取约  $500 \text{ g}$  土样装入样品袋,用于土壤有机碳(SOC)测定。仔细去除环刀内土样的植物根系和石砾,在  $105^{\circ}\text{C}$  烘干  $24 \text{ h}$  后,称重并计算土壤容重。样品袋内的土样自然风干后,取一部分土样过  $2 \text{ mm}$  土壤筛,同时用  $1 \text{ N HCl}$  处理  $16 \sim 24 \text{ h}$  后,在  $105^{\circ}\text{C}$  烘  $3 \text{ h}$  除去无机碳<sup>[15,16]</sup>;再用分析天平( $0.1 \text{ mg}$ )准确称量约  $0.5000 \text{ g}$  土样,利用 multi N/C 3000 分析仪和 HT1500 Solids Module (A nalytik Jena A G, Gem any)测定土壤总碳和 SOC。

土壤有机碳密度是指单位面积一定深度的土层中 SOC 的贮量,一般用  $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$  或  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$  表示。由于它以土体体积为基础作计算,排除了面积和土壤深度的影响,因此土壤碳密度已成为评价和衡量土壤有机碳贮量的一个极其重要的指标。某一土层  $i$  的有机碳密度( $\text{SOC}_i$ ,  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$ )的计算公式为:

$$\text{SOC}_i = C_i \times D_i \times E_i \times (1 - G_i) / 100 \quad (1)$$

式中,  $C_i$  为土壤有机碳含量( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ),  $D_i$  为容重( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ),  $E_i$  为土层厚度( $\text{cm}$ ),  $G_i$  为直径大于 2 mm 的石砾所占的体积百分比(%).

如果某一土壤剖面由  $k$  层组成, 那么该剖面的有机碳密度( $\text{SOC}_i, \text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$ )为:

$$\text{SOC}_i = \sum_{i=1}^k \text{SOC}_i = \sum_{i=1}^k C_i \times D_i \times E_i \times (1 - G_i)/100$$

(2)

表 1 样地的立地状况和植被组成

| 生态系统类型 Ecosystem type                                           | 林龄 Stand age (a) | 坡度 Slope | 坡向 Aspect    | 胸径 DBH (cm) | 林分密度 Stand density ( $\text{tree} \cdot \text{hm}^{-2}$ ) | 植被组成 Vegetation composition           |                    |
|-----------------------------------------------------------------|------------------|----------|--------------|-------------|-----------------------------------------------------------|---------------------------------------|--------------------|
|                                                                 |                  |          |              |             |                                                           | 乔木层(优势种) Overstory (Dominant species) | 下木层 Understory     |
|                                                                 |                  |          |              |             |                                                           |                                       |                    |
| 蒙古栎林 <i>Quercus mongolica</i> forest                            | 56               | 23 °     | 南 South      | 21.4        | 2495                                                      | (1)、2、3、4、5、6                         | 7、8、9、10           |
| 杨桦林 <i>Populus davidiana</i> - <i>Betula platyphylla</i> forest | 55               | 16 °     | 西南 Southwest | 8.42        | 2817                                                      | (6)、(5)、11、4、3、2                      | 7、8、9、12、10、13、14  |
| 硬阔叶林 Hardwood forest                                            | 52               | 7 °      | 北 North      | 12.8        | 2300                                                      | 4、3、2、11                              | 7、9、13、15、16、17    |
| 杂木林 Mixed forest                                                | 61               | 15 °     | 西南 Southwest | 11.2        | 2816                                                      | 2、11、4、3、5、6                          | 7、9、15、13、18、19    |
| 落叶松人工林 <i>Larix gmelinii</i> plantation                         | 46               | 2 °      | 西南 Southwest | 15.1        | 1823                                                      | (20)、3、21                             | 15、22、16、10、9、7、23 |
| 红松人工林 <i>Pinus koraiensis</i> plantation                        | 51               | 12 °     | 西北 Northwest | 12.0        | 3145                                                      | (24)、6、3、25、5、11、6                    | 9、19               |

1. 蒙古栎 *Quercus mongolica* 2. 紫椴 *Tilia amurensis* 3. 水曲柳 *Fraxinus mandshurica* 4. 黄菠萝 *Phellodendron amurense* 5. 山杨 *Populus davidiana* 6. 白桦 *Betula platyphylla* 7. 暴马丁香 *Syringa amurensis* 8. 色木槭 *Acer mono* 9. 春榆 *Ulmus propinqua* 10. 鼠李 *Rhamnus davuricus* 11. 胡桃楸 *Juglans mandshurica* 12. 接骨木 *Sambucus buergeriana* 13. 榛子 *Corylus heterophylla* 14. 翅卫茅 *Kalonymus macroptera* 15. 稠李 *Padus asiatica* 16. 早花忍冬 *Lonicera praeflorens* 17. 卫矛 *Eonymus sacrosancta* 18. 佛头花 *Viburnum sargentii* 19. 山梨 *Pyrus ussuriensis* 20. 落叶松 *Larix gmelinii* 21. 茶条槭 *Acer ginnala* 22. 胡枝子 *Lespedeza bicolor* 23. 山丁子 *Malus pallasiana* 24. 红松 *Pinus koraiensis* 25. 枫桦 *Betula costata*

2.2 土壤表面 CO<sub>2</sub> 通量及其组分的测定

土壤表面 CO<sub>2</sub> 通量( $R_s$ )采用 LI-6400-09 同化室连接到 LI-6400 便携式 CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O 分析仪(LiCor Inc., Lincoln, NE, USA)直接测定。2004 年 4 月中旬在每个固定样地内随机布置 8 个内径为 10 cm, 高为 8 cm 的 PVC 土壤环, 并保持土壤环在整个测定期间位置不变。在 2004 年 5~10 月期间, 每两星期用 LI-6400 分析仪测定一次  $R_s$ , 共测定 12 次。与此同时, 用数字式瞬时温度计分别测定 2 cm 和 10 cm 的土壤温度( $T_2$  和  $T_{10}$ ); 用烘干法测定 2 cm 和 10 cm 的土壤湿度( $W_2$  和  $W_{10}$ )。

土壤异养呼吸( $R_H$ )和根系自养呼吸( $R_A$ )采用挖壕法<sup>[17]</sup>间接测定。2004 年 4 月中旬在每块固定样地的外围距样地边界 2~3 m 处随机选择 4 个 50 cm × 50 cm 小样方, 在小样方四周挖壕深至 55~75 cm (植物根系分布层以下), 壕内用双层厚塑料布隔离小样方周围的根系; 再除去小样方内所有活体植物, 并在随后的测定中始终保持小样方内没有活体植物; 最后每个小样方内安置一个 PVC 土壤环, 安置方法前同。挖好后 2 个月(2004 年 6 月上旬), 与常规的  $R_s$  测定同步, 每两周测定一次挖壕样方内的 CO<sub>2</sub> 通量及其相关的环境因子, 共测定 10 次。测定方法与前同。这样, 挖壕样方内的 CO<sub>2</sub> 通量即为  $R_H$ ; 挖壕样方与非挖壕样方的 CO<sub>2</sub> 通量之差即为  $R_A$ 。上述测定基本涵盖了本地区的土壤温度和含水量的季节变化范围。

$R_s$  年通量及其组分采用基于实测数据建立的  $R_s$  统计模型与连续环境因子监测数据相结合的方法估测。从大量的前期研究中, 发现  $R_s$  及其组分总体上与  $T_{10}$  和  $W_{10}$  的相关更为紧密, 所以我们选用  $T_{10}$  和  $W_{10}$  为自变量建立起来的  $R_s$  统计模型来估测 CO<sub>2</sub> 年通量。  $R_s$  统计模型所需要的输入参数来自于在研究样地邻近安装的自动数据采集器(Campbell Scientific, Inc., Utah, USA)。数据采集器长期连续测定 2 cm 和 10 cm 土深处的土壤温度和含水量(每 15 min 记录一次)。生长季期间(2004. 5. 1~2004. 10. 31, 10 cm 的土壤温度 > 0 °C 时)的 CO<sub>2</sub> 通量根据上述模型以天为步长累加而成。因为 LI-6400 分析仪在低温下难以运行, 因此, 在土温低于 0 °C 的非生长季中, 未能测定  $R_s$  和  $R_H$ 。根据以前的研究假定非生长季的  $R_s$  占全年  $R_s$  总量的 20%<sup>[17]</sup>。

2.3 土壤有机碳的周转时间

土壤呼吸严格地说是指未扰动土壤中产生 CO<sub>2</sub> 的所有代谢作用, 包括 3 个生物学过程(土壤微生物呼吸、根系呼吸、土壤动物呼吸作用)和一个非生物学过程(含碳矿物质的化学氧化作用), 其中生物学过程占主导地位<sup>[18]</sup>。假定土壤呼吸完全由根系自养呼吸和主要是有机质分解的异养呼吸组成, 则土壤碳的周转时间可用下式计算<sup>[19]</sup>:

土壤碳周转时间 =  $D_C/R_H$

(4)

式中, $D_C$  为土壤有机碳密度( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$ ), $R_H$  为土壤异养呼吸年通量( $\text{gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ )。

#### 2 4 数据分析

采用ANOVA 比较不同生态系统间SOC 含量的总体平均值、各土层SOC 平均值、土壤碳总密度、各土层碳密度以及 $R_S$  年通量的差异。采用简单线性回归建立各个森林生态系统的SOC 平均值和 $R_S$ 、 $R_H$  及 $R_A$  年通量的关系。所有的统计分析均用SAS 统计软件完成。

#### 3 结果分析

##### 3 1 不同森林生态系统的土壤容重和有机碳含量

各森林生态系统的SOC 总体平均值( $F = 11.01, p < 0.001, N = 54$ )和各土层的SOC 平均值( $A_0: F = 5.45, p < 0.001, N = 54; A: F = 21.19, p < 0.001, N = 54; B: F = 6.79, p < 0.001, N = 54$ )之间均存在显著差异(表2)。天然阔叶次生林的SOC 含量均显著大于人工针叶林,前者平均比后者高33.62%。阔叶林的SOC 变化范围为52.63~66.29  $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,从大到小依次为硬阔叶林、杂木林、杨桦林和蒙古栎林;针叶林的SOC 变化范围为42.15~49.15  $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。就各土层的SOC 平均值而言, $A_0$ 、A 和B 层的SOC 最大值分别为硬阔叶林(113.47  $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )、杂木林(74.62  $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )和落叶松林(34.46  $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ),其最小值分别为落叶松林( $A_0$ : 51.05  $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ , A: 40.84  $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )和杨桦林(14.94  $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )。阔叶林 $A_0$ 和A 层的SOC 含量分别比针叶林高67.60%和36.96%;对于B 层的SOC 含量,除硬阔叶林外(28.63  $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ),针叶林比阔叶林高33.26%。

各森林生态系统的土层深度变化范围为38.44~46.56cm。土壤容重随土壤深度的增加而增大,其总体平均值变化范围为0.73~1.05  $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。然而,SOC 含量随土壤深度的增加而减小,且阔叶林减小的幅度显著高于针叶林,其中杨桦林减少的幅度最大,落叶松林减少的幅度最小。

表2 不同森林生态系统的土壤容重和有机碳(SOC)含量

| Table 2 Comparison of soil bulk density and soil organic carbon (SOC) content for the six forest ecosystems |                    |                    |                    |                                                          |                                                          |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|----------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|
| 生态系统类型<br>Ecosystem type                                                                                    | 土壤性质 Soil property |                    |                    |                                                          |                                                          |
|                                                                                                             | 土层<br>Horizon      | 样本数<br>Sample size | 土层厚度<br>Depth (cm) | 土壤容重 Bulk<br>density ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ) | 有机碳含量 SOC<br>content ( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) |
| 红松人工林 <i>Pinus koraiensis</i> plantation                                                                    | $A_0$              | 9                  | 5.89 ± 1.88        | 0.61 ± 0.15                                              | 70.91 ± 16.55                                            |
|                                                                                                             | A                  | 9                  | 11.89 ± 2.76       | 0.96 ± 0.10                                              | 49.41 ± 5.30                                             |
|                                                                                                             | B                  | 9                  | 24.33 ± 7.45       | 1.22 ± 0.13                                              | 27.11 ± 6.53                                             |
| 落叶松人工林 <i>Larix gmelinii</i> plantation                                                                     | $A_0$              | 9                  | 4.11 ± 1.60        | 0.87 ± 0.45                                              | 51.05 ± 12.28                                            |
|                                                                                                             | A                  | 9                  | 14.22 ± 8.47       | 1.10 ± 0.05                                              | 40.84 ± 9.32                                             |
|                                                                                                             | AB                 | 1                  | 12.00              | 1.14                                                     | 41.58                                                    |
|                                                                                                             | B                  | 9                  | 23.28 ± 15.68      | 1.20 ± 0.09                                              | 34.46 ± 8.96                                             |
| 蒙古栎林 <i>Quercus mongolica</i> forest                                                                        | $A_0$              | 9                  | 4.00 ± 1.00        | 0.36 ± 0.14                                              | 88.66 ± 17.75                                            |
|                                                                                                             | A                  | 9                  | 7.78 ± 4.29        | 0.73 ± 0.31                                              | 55.62 ± 12.25                                            |
|                                                                                                             | AB                 | 3                  | 9.67 ± 0.58        | 1.04 ± 0.09                                              | 31.79 ± 7.24                                             |
|                                                                                                             | B                  | 9                  | 28.44 ± 13.99      | 1.27 ± 0.12                                              | 18.21 ± 7.72                                             |
| 硬阔叶林 Hardwood forest                                                                                        | $A_0$              | 9                  | 11.56 ± 3.71       | 0.51 ± 0.14                                              | 113.47 ± 10.59                                           |
|                                                                                                             | A                  | 9                  | 15.11 ± 7.66       | 0.79 ± 0.14                                              | 63.79 ± 19.60                                            |
|                                                                                                             | B                  | 9                  | 19.89 ± 7.74       | 1.25 ± 0.25                                              | 28.63 ± 12.87                                            |
| 杨桦林 <i>Populus davidiana</i> - <i>Betula platyphylla</i> forest                                             | $A_0$              | 9                  | 5.00 ± 4.18        | 0.43 ± 0.08                                              | 101.20 ± 16.25                                           |
|                                                                                                             | A                  | 9                  | 7.89 ± 2.71        | 0.68 ± 0.21                                              | 53.20 ± 20.88                                            |
|                                                                                                             | B                  | 9                  | 25.56 ± 11.64      | 1.10 ± 0.09                                              | 14.94 ± 4.98                                             |
| 杂木林 Mixed forest                                                                                            | $A_0$              | 9                  | 6.56 ± 3.00        | 0.51 ± 0.34                                              | 105.51 ± 17.44                                           |
|                                                                                                             | A                  | 9                  | 9.78 ± 3.27        | 0.92 ± 0.48                                              | 74.62 ± 16.66                                            |
|                                                                                                             | AB                 | 1                  | 10.00              | 0.89                                                     | 44.46                                                    |
|                                                                                                             | B                  | 9                  | 21.33 ± 8.23       | 1.60 ± 0.60                                              | 20.41 ± 7.41                                             |

表中数值为均值 ± 标准差 The values in the table are given as Mean ± SD

##### 3 2 不同森林生态系统的土壤有机碳密度

不同生态系统之间的SOC 总密度存在着显著差异( $F = 3.22, p = 0.014, N = 54$ ),其变化范围为9.37~22.01  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$ (图1)。其中,杨桦林的SOC 总密度最低(9.37  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$ ),硬阔叶林最高(22.01  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$ )。天然阔叶次生林和人工针叶林SOC 总密度平均为15.57 和17.16  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 。不同生态系统之间的 $A_0$  层SOC 密度存在着显著差异( $F = 8.52, p < 0.001, N = 54$ ),而A ( $F = 1.34, p > 0.05, N = 54$ )和B 层( $F = 2.11, p > 0.05, N = 54$ )SOC 密度差异不显著。各生态系统的 $A_0$ 、A、

AB 和 B 层的 SOC 密度变化范围分别为  $1.29 \sim 6.80 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ ,  $3.05 \sim 8.04 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ ,  $3.25 \sim 5.69 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ ,  $4.15 \sim 9.46 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 。不同层次的 SOC 密度极值出现在不同生态系统内:  $A_0$  和 A 层的最大值出现在硬阔叶林内, AB 和 B 层的则为落叶松林; 而最小值均为蒙古栎和杨桦林。

当不考虑 AB 层时, 除硬阔叶林外, 其他森林生态系统的 SOC 密度随土壤深度的增加而增大, 且增加的幅度也随土壤深度而增大。

### 3.3 不同生态系统的土壤表面 $\text{CO}_2$ 通量

不同生态系统间的  $R_s$  年通量存在显著差异。天然阔叶次生林的  $R_s$  年通量均显著地高于人工针叶林 ( $\alpha = 0.05$ ), 前者平均比后者高 59.10% ( $833 \text{ vs. } 524 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ) (图 2)。不同生态系统的  $R_s$  年通量依次为杂木林  $951 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ , 硬阔叶林  $892 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ , 杨桦林  $812 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ , 蒙古栎林  $678 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ , 红松林  $596 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$  和落叶松林  $451 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。其中杂木林是落叶松林的 2.11 倍。

### 3.4 土壤有机碳密度和 $R_s$ 年通量及其分量之间的关系

6 个森林生态系统的土壤呼吸 ( $R_s$ )、异养呼吸 ( $R_H$ ) 和自养呼吸 ( $R_A$ ) 与土壤  $A_0$  和 A 层的 SOC 含量呈显著正相关, 但其相关程度因土层而异 (图 3)。其中,  $R_s$  与  $A_0$  层 SOC 含量的相关最密切 ( $R^2 = 0.933$ )。除  $R_H$  外,  $R_s$  和  $R_A$  与  $A_0$  层 SOC 含量的相关程度均大于与 A 层的。

### 3.5 土壤有机碳的周转时间

天然阔叶次生林和人工针叶林的 SOC 平均周转时间分别为 32a 和 48a。在所有的生态系统中, 除 AB 层外, SOC 周转时间随土壤深度的增加而增大 (图 4)。除硬阔叶林外, 其他阔叶林的 SOC 周转时间均小于针叶林。  $A_0$ 、A、AB 和 B 层的 SOC 平均周转时间分别为 7a (3~15a); 13a (7~19a); 5a (7~17a) 和 17a (9~28a)。SOC 周转时间的极值因生态系统不同而有差异。  $A_0$  层 SOC 的周转速度最快的是蒙古栎林, 最慢的是硬阔叶林; A 和 B 层 SOC 则以杨桦林周转最快, 落叶松林周转最慢。

## 4 讨论

### 4.1 不同森林生态系统的有机碳含量和土壤有机碳密度

土壤有机碳主要来源于动物、植物、微生物残体及其排泄物、分泌物、部分分解产物和土壤腐殖质。在特定生态系统中, SOC 是这些有机碳来源在分解与形成的过程中的动态平衡值。本研究中东北森林生态系统的 SOC 含量波动在  $42.15 \sim 66.29 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$  之间, 且天然阔叶次生林的 SOC 含量平均高于人工针叶林。在同一生态系统中, SOC 含量随土壤深度的增加而减小。这与以前的研究结果相符<sup>[8~10]</sup>。不同森林生态系统有机碳来源 (地表凋落物及其根的分泌物和细根周转产生的碎屑) 的数量与质量差异是影响 SOC 在土壤中分布的关键因子之一。不同植被组成可以形成特定的土壤表层气候, 影响凋落物的分解速率, 进而在某种程度上控制着 SOC 的分解速度<sup>[20]</sup>。这些均为造成森林生态系统之间及同一生态系统内各土层间 SOC 差异的可能原因<sup>[21]</sup>。

土壤是一个不均匀的三维结构体, 在空间上呈现复杂的镶嵌性, 且与气候以及陆地植被和生物发生复杂的相互作用, 从而使 SOC 密度具有极大的空间异质性。本研究的天然阔叶次生林和人工针叶林 SOC 密度总平均值为  $15.57 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$  和  $17.16 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ , 介于前人所报道的变化范围 ( $10.03 \sim 21.27 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ )<sup>[4~12]</sup>。然而, 纵观现有的 SOC 密度研究报道, 其变异非常大。造成这种变异的原因主要有两方面: (1) 土壤碳贮量受植被类型、气候 (温度和降水)、母岩、土壤理化生物学性质 (土壤结构、质地、

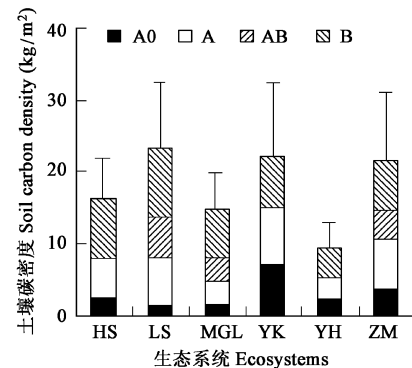


图 1 不同生态系统土壤碳密度比较

Fig. 1 Comparison of the soil carbon density for six forest ecosystems

HS, LS, MGL, YK, YH 和 ZM 依次代表红松人工林、落叶松人工林、蒙古栎林、硬阔叶林、杨桦林和杂木林; 误差线表示土壤碳总密度的标准差; 下同 The icons of HS, LS, MGL, YK, YH and ZM represent *Pinus koraiensis* plantation, *Larix gmelinii* plantation, *Quercus mongolica* forest, Hardwood forest, *Populus davidiana*-*Betula platyphylla* forest, and Mixed forest, respectively; The error bars stand for the standard deviation of total soil carbon density; the same below

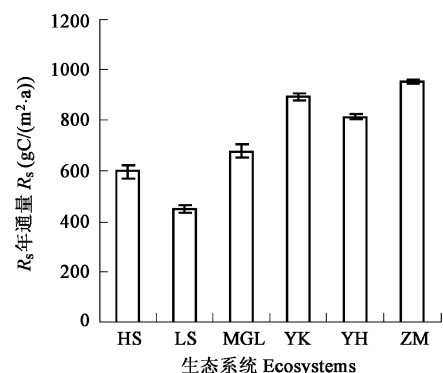


图 2 不同生态系统土壤表面  $\text{CO}_2$  年通量比较

Fig. 2 The annual soil surface  $\text{CO}_2$  flux ( $R_s$ ) for the six forest ecosystems

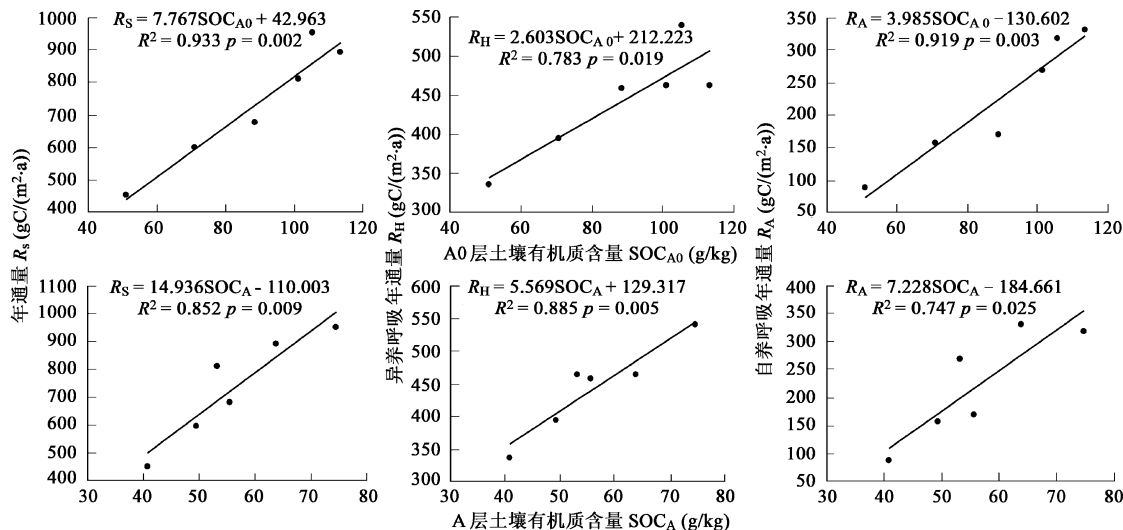


图3 不同土层有机碳(SOC)含量和土壤表面 $CO_2$ 年通量( $R_s$ )、异养呼吸( $R_H$ )年通量和自养呼吸( $R_A$ )年通量之间的关系

Fig. 3 Relationships between annual fluxes of  $R_s$ ,  $R_H$ , and  $R_A$  and soil organic carbon (SOC) content

温度、湿度)等的综合影响。这些因子的差异势必影响到土壤碳的形成和分解过程<sup>[22]</sup>。(2)研究方法的不统一是导致土壤碳库估测不确定性的一个不容忽视的因子。研究方法上的差异主要来源于土壤分类、取样数量与质量、剖面分析、土壤参数估计、土壤厚度估算、不同研究者所采用的资料来源、土壤实测调查数据多少等等<sup>[23]</sup>。例如,目前大多数SOC估算是以土深1m来计算的<sup>[8-10]</sup>。然而本研究中的森林生态系统的土壤厚度仅波动在38.44~46.56 cm之间。另外,剔除土壤剖面中的石砾含量也使SOC密度估测值略有下降。这些也可能是造成本研究结果低于孙维侠等<sup>[10]</sup>报道的黑龙江暗棕壤的土壤碳密度( $21.24 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ )的主要原因。因此,采用大量的实测数据、统一研究方法,是减少碳平衡研究中不确定性的极为重要的一步。

#### 4.2 不同森林生态系统的土壤表面 $CO_2$ 年通量及其影响因子

本研究中的温带次生林生态系统的 $R_s$ 年通量波动在 $451$ 和 $951 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 之间。这与大多数温带森林的研究结果相符,其变化范围为阔叶林 $122 \sim 1754 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 、针叶林 $511 \sim 1300 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ <sup>[19, 24]</sup>。另外,发现阔叶林 $R_s$ 年通量高于针叶林,与Raich等<sup>[25]</sup>的结论相似。这可能是由于生态系统的碳分配格局、凋落物产量、凋落物养分的差异而引起的<sup>[25, 26]</sup>。

此外,土壤物理和化学性质是影响 $R_s$ 的重要因素<sup>[27]</sup>。在温度和土壤水分相对稳定的情况下,SOC含量是决定 $R_s$ 的重要因子<sup>[28, 29]</sup>。本研究 $R_s$ 年通量与土壤A<sub>0</sub>和A层SOC密度有显著正相关关系(图3)。这与耿远波等<sup>[30]</sup>和李明峰等<sup>[31]</sup>对内蒙古草原的研究结论相似。在其他森林生态系统的研究中,也间接发现土壤呼吸速率与SOC呈一定程度的相关关系<sup>[32-35]</sup>。导致 $R_s$ 年通量与A<sub>0</sub>和A层SOC密度相关紧密的可能原因包括:与其他土层相比,(1)A<sub>0</sub>和A层的SOC含量最高,而SOC分解产物的绝大部分为 $CO_2$ <sup>[36]</sup>;(2)此层具有较高土壤温度,尤其是A<sub>0</sub>层,因而土壤生物和微生物活动比较活跃;(3)植物根系尤其是生理活动最旺盛的植物细根集中分布在这个层次<sup>[37-40]</sup>。

#### 4.3 不同森林生态系统的土壤有机碳周转时间

土壤是生态系统生物地球化学碳循环中周转最慢的碳库。由于受气候、植被、土壤结构、土地利用方式和强度以及地形的影响,其周转时间从10a(热带草原土壤)到520a(泥炭沼泽土壤)不等<sup>[19]</sup>,其中温带森林为29a,全球平均为32a。Post<sup>[41]</sup>根据土壤碳库量和每年植被的凋落物量粗略估算得出全球平均SOC周转时间为22a,而进入地质碳循环的土壤碳的周转时间则可达几百万年甚至更长。本研究发现天然阔叶林和人工针叶林的SOC平均周转时间分别为32a和48a(平均为37a),其中的阔叶林SOC周转时间接近温带森林水平,但是针叶林要高出这一水平。可能原因包括:(1)计算SOC贮量时所采用的土壤深度不同(前

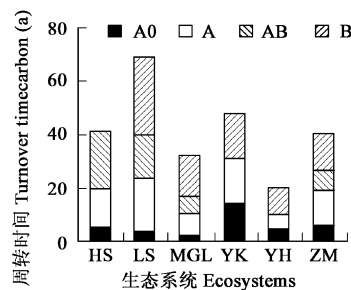


图4 不同生态系统土壤有机碳(SOC)周转时间比较

Fig. 4 Comparison of soil organic carbon (SOC) turnover time for the six forest ecosystems

述); (2) 不同研究所得出的根系自养呼吸在  $R_s$  中的贡献率有所不同, Raich<sup>[19]</sup> 假定根系贡献率为 30%, 而测得的根系贡献率平均为 29%; (3) 本研究区所处纬度偏高, 土壤温度偏低, 针叶林尤其如此, 因而土壤微生物活动和分解作用也偏低, 这可能是造成 SOC 周转时间随土深而增大的主要原因之一<sup>[19]</sup>; (4) 凋落物作为不同生态系统有机碳主要来源, 针叶林与阔叶林的凋落物数量和化学成分不同, 而且凋落物分解速率与土壤水分、地表温度正相关<sup>[26, 42]</sup> 也会造成土壤碳转化率的差异, 进而影响 SOC 周转时间。

总之, 东北东部森林土壤是我国重要的碳库, 其碳贮量与碳通量在不同的森林生态系统类型以及同一生态系统的不同土壤层次之间存在很大的空间异质性。采用统一规范的研究方法, 获取大量有代表性的森林生态系统土壤碳贮量和碳通量实测数据, 是减少区域尺度碳平衡研究中的不确定性、更精确地评价森林生态系统在全球变化和气候系统中作用的极为重要的研究内容。

## References

- [1] Schlesinger W H. Evidence from chronosequence studies for a low carbon-storage potential of soil *Nature*, 1990, **348**: 232~ 234
- [2] Raich J W and Potter C S. Global patterns of carbon dioxide emissions from soils *Global Biogeochemical Cycles*, 1995, **9**: 23~ 36
- [3] Post W M and Emanuel W R. Soil carbon pools and world life zones *Nature*, 1982, **298**: 156~ 159
- [4] Zhou Y R, Yu Z L, Zhao S D. Carbon storage and budget of major Chinese forest types *Acta Phytocologica Sinica*, 2000, **24**(5): 518~ 522
- [5] Li K R, Wang S Q, Cao M Q. Carbon storage of Chinese soil and vegetation *Science in China (Series D)*, 2003, **33**(1): 72~ 80
- [6] Wang S Q and Zhou C H. Estimating soil carbon reservoir of terrestrial ecosystem in China *Geographical Research*, 1999, **18**(4): 349~ 356
- [7] Wang S Q, Zhou C H, Li K R, et al. Analysis on spatial distribution characteristics of soil organic carbon reservoir in China *Acta Geographica Sinica*, 2000, **55**(5): 533~ 544
- [8] Wang S Q, Zhou C H, Liu J Y, et al. Simulation analysis of terrestrial carbon cycle balance model in Northeast China *Acta Geographica Sinica*, 2001, **56**(4): 390~ 400
- [9] Li Z, Sun B, Lin X X. Density of soil organic carbon and the factors controlling its turnover in east China *Scientia Geographica Sinica*, 2001, **21**(4): 301~ 307
- [10] Sun W X, Shi X Z, Yu D S, et al. Estimation of soil organic carbon density and storage of northeast China *Acta Pedologica Sinica*, 2004, **41**(2): 298~ 301
- [11] Sun W X, Shi X Z, Yu D S. Distribution pattern and density calculation of soil organic carbon in profile *Soil*, 2003, **35**(3): 236~ 241
- [12] Xie X L, Sun B, Zhou H Z, et al. Organic carbon density and storage in soils of China and Spatial analysis *Acta Pedologica Sinica*, 2004, **41**(1): 35~ 43
- [13] Wang M, Ji L Z, Li Q R, et al. Effects of soil temperature and moisture in different forest in Changbai Mountain *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, **14**(8): 1234~ 1238
- [14] Jiang L F, Shi F C, Wang H T, et al. Root respiration in *Larix gmelinii* plantations in Northeast China *Plant Physiology Communications*, 2004, **40**(2): 27~ 30
- [15] Tieszen L L and Pfau M W. Isotopic evidence for the replacement of prairie by forest in the Loess Hills of Eastern South Dakota In: Hartnett D. C. ed *Proceedings of the Fourteenth North American Prairie Conference: Prairie Biodiversity*. Kansas: Kansas State University, 1995. 153~ 165
- [16] Midwood A J and Boutton T W. Soil carbonate decomposition by acid has little effect on delta 13C of organic matter *Soil Biology and Biochemistry*, 1998, **30**: 1301~ 1307
- [17] Wang C, Bond-Lamberty B, Gower S T. Soil surface CO<sub>2</sub> flux in a boreal black spruce fire chronosequence *Journal of Geophysical Research*, 2002, **108**(D3): art. no. 8224
- [18] Singh J S and Gupta S R. Plant decomposition and soil respiration in terrestrial ecosystems *Botanical Review*, 1977, **43**: 449~ 529
- [19] Raich J W and Schlesinger W H. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate *Tellus*, 1992, **44B**: 81~ 99
- [20] Zhou L, Li B G, Zhou G S. Advances in controlling factors of soil organic carbon *Advances in Earth Science*, 2005, **20**(1): 99~ 105
- [21] Lavado R S and Sierra J O. Hashimoto P N. Impact of grazing on soil nutrients in a Pampean grassland *Journal of Range Management*, 1996, **49**(5): 452~ 457
- [22] Harden J W, Fries T L, Huntington T G. Mississippi basin carbon project—uplands oil database for site in Yazoo basin. Northwestern Mississippi, U. S. Geological Survey, 1999
- [23] Rozhkov V A and Wagner V. Soil carbon estimates and soil carbon map for Russia. IIA SA workpaper, 1996, WR96-60, 1~ 44
- [24] Bond-Lamberty B, Wang C, Gower S T. A global relationship between the heterotrophic and autotrophic components of soil respiration? *Global Change Biology*, 2004, **10**: 1756~ 1766
- [25] Raich J W and Tufekcioglu A. Vegetation and Soil Respiration: Correlations and Controls *Biogeochemistry*, 2000, **48**: 71~ 90

- [26] Landsberg J J and Waring R H. A Generalised Model of Forest Productivity Using Simplified Concepts of Radiation-Use Efficiency, Carbon Balance and Partitioning *Forest Ecology and Management*, 1997, **95**: 209~ 228
- [27] Boudot J P, Bel Hadj B A, Chone T. Carbon mineralization in andosols and aluminum rich highland soils *Soil Biology and Biochemistry*, 1986, **18**: 457~ 461
- [28] Fang C and Moncrieff J B. A Model for soil CO<sub>2</sub> production and transport1: Model development *Agricultural and Forest Meteorology*, 1999, **95**: 225~ 236
- [29] Priess J A. and Koning G H, Veldkamp A. Assessment of interactions between land use change and carbon and nutrient fluxes in Ecuador *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2001, **85**: 269~ 279
- [30] Geng Y B, Zhang S, Dong Y S, *et al*. The content of soil organic carbon and total nitrogen and correlation activity between their content and fluxes of CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O and CH<sub>4</sub> in Xilin River Basin Steppe *Acta Geographica Sinica*, 2001, **56**(1): 44~ 53
- [31] Li M F, Dong Y S, Geng Y B, *et al*. Analyses of the correlation between the fluxes of CO<sub>2</sub> and the distribution of C & N in Grassland Soils *Environmental Science*, 2004, **25**(2): 7~ 11
- [32] Xu M and Qi Y. 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*, 2001, **7**: 667~ 677
- [33] Frank A B, Liebig M A, and Hanson J D. Soil Carbon Dioxide Fluxes in Northern Semiarid Grasslands *Soil Biology and Biochemistry*, 2002, **34**: 1235~ 1241
- [34] Kang S Y, Doh S, Lee D, *et al*. Topographic and Climatic Controls on Soil Respiration in Six Temperate Mixed-Hardwood Forest Slopes, Korea *Global Change Biology*, 2003, **9**: 1427~ 1437
- [35] Scott-Denton L E, Sparks K L, Monson R K. Spatial and Temporal Controls of Soil Respiration Rate in a High-Elevation, Subalpine Forest *Soil Biology and Biochemistry*, 2003, **35**: 525~ 534
- [36] Chapman S J and Thurlow M. The influence of climate on CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> emission from organic soils *Agricultural and Forest Meteorology*, 1996, **79**: 205~ 217
- [37] Burke M K and Raynald D J. Fine root growth phenology, production, and turnover in northern hardwood forest ecosystems *Plant and Soil*, 1994, **162**: 135~ 146
- [38] Li L H, Lin P, Xing X R. Fine root biomass and production of *Castanopsis eyrei* forests in Wuyi Mountains *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1998, **9**(4): 337~ 340
- [39] Wen D Z, Wei P, Kong G H, *et al*. Production and turnover rate of fine roots in two lower subtropical forest sites at Dinghushan *Acta Phytocologica Sinica*, 1999, **23**(4): 361~ 369
- [40] Zhang X Q and Wu K H. Fine root production and turnover for forest ecosystems *Scientia Silvae Sinica*, 2001, **37**(3): 126~ 138
- [41] Post W M. Organic carbon in soil and the global carbon cycle In: Heimann M ed *The Global carbon cycle* Berlin: Springer-verlag Heidelberg, 1993 277~ 302
- [42] Lin B, Liu Q, Wu Y, *et al*. Advances in the studies of forest litter. *Chinese Journal of Ecology*, 2004, **23**(1): 60~ 64

#### 参考文献:

- [4] 周玉荣, 于振良, 赵士洞. 我国主要森林生态系统碳贮量和碳平衡. *植物生态学报*, 2000, **24**(5): 518~ 522
- [5] 李克让, 王绍强, 曹明奎. 中国植被和土壤碳贮量. *中国科学(D 辑)*, 2003, **33**(1): 72~ 80
- [6] 王绍强, 周成虎. 中国陆地土壤有机碳库的估算. *地理研究*, 1999, **18**(4): 349~ 356
- [7] 王绍强, 周成虎, 李克让, 等. 中国土壤有机碳库及空间分布特征分析. *地理学报*, 2000, **55**(5): 533~ 544
- [8] 王绍强, 周成虎, 刘纪远, 等. 东北地区陆地碳循环平衡模拟分析. *地理学报*, 2001, **56**(4): 390~ 400
- [9] 李忠, 孙波, 林心雄. 我国东部土壤有机碳的密度及转化的控制因素. *地理科学*, 2001, **21**(4): 301~ 307
- [10] 孙维侠, 史学正, 于东升, 等. 我国东北地区土壤有机碳密度和储量的估算研究. *土壤学报*, 2004, **41**(2): 298~ 301
- [11] 孙维侠, 史学正, 于东升. 土壤有机碳的剖面分布特征及其密度的估算方法研究——以我国东北地区为例. *土壤*, 2003, **35**(3): 236~ 241
- [12] 解宪丽, 孙波, 周慧珍, 等. 中国土壤有机碳密度和储量的估算与空间分布分析. *土壤学报*, 2004, **41**(1): 35~ 43
- [13] 王森, 姬兰柱, 李秋荣, 等. 土壤温度和水分对长白山不同森林类型土壤呼吸的影响. *应用生态学报*, 2003, **14**(8): 1234~ 1238
- [14] 姜丽芬, 石福臣, 王化田, 等. 东北地区落叶松人工林的根系呼吸. *植物生理学通讯*, 2004, **40**(2): 27~ 30
- [20] 周莉, 李保国, 周广胜. 土壤有机碳的主导影响因子及其研究进展. *地球科学进展*, 2005, **20**(1): 99~ 105
- [30] 耿远波, 章申, 董云社, 等. 草原土壤的碳氮含量及其与温室气体通量的相关性. *地理学报*, 2001, **56**(1): 44~ 53
- [31] 李明峰, 董云社, 耿元波, 等. 草原土壤的碳氮分布与 CO<sub>2</sub> 排放通量的相关性分析. *环境科学*, 2004, **25**(2): 7~ 11
- [38] 李凌浩, 林鹏, 邢雪荣. 武夷山甜槠林细根生物量和生长量研究. *应用生态学报*, 1998, **9**(4): 337~ 340
- [39] 温达志, 魏平, 孔国辉, 等. 鼎湖山亚热带森林细根生产力与周转. *植物生态学报*, 1999, **23**(4): 361~ 369
- [40] 张小全, 吴可红. 森林细根生产和周转研究. *林业科学*, 2001, **37**(3): 126~ 138
- [42] 林波, 刘庆, 吴彦, 等. 森林凋落物研究进展. *生态学杂志*, 2004, **23**(1): 60~ 64