

324-328

第19卷第3期  
1999年5月生态学报  
ACTA ECOLOGICA SINICAVol. 19, No. 3  
May, 1999

# 中亚热带东部三种主要木本群落 土壤呼吸的研究\*

S 714.3

黄承才\*\* 葛滢 常杰 卢蓉 徐青山  
(浙江大学生命科学学院 杭州 310012)

**摘要** 研究中亚热带东部青冈(*Quercus glauca*)常绿阔叶林、毛竹(*Phyllostachys pubescens*)林和茶(*Camellia sinensis*)园土壤呼吸与土壤温度、土壤含水率的关系,建立了土壤呼吸速率与地表温度的模型,根据气象资料估算得到青冈常绿阔叶林、毛竹林、茶园的年均土壤 CO<sub>2</sub> 呼吸量,3种群落依次为 24.12、30.77、28.55 t/hm<sup>2</sup>·a,进一步估算出浙江省常绿阔叶林、毛竹林和茶园每年土壤 CO<sub>2</sub> 排放量,分别为 9.27×10<sup>6</sup>、1.36×10<sup>7</sup>、7.16×10<sup>6</sup> t/a。

**关键词** 亚热带木本群落,土壤呼吸,CO<sub>2</sub>排放量。

## STUDIES ON THE SOIL RESPIRATION OF THREE WOODY PLANT COMMUNITIES IN THE EAST MID-SUBTROPICAL ZONE, CHINA

HUANG Cheng-Cai GE Ying CHANG Jie LU Rong XU Qing-Shan  
(College of Life Science, Zhejiang University, Hangzhou, 310012, China)

**Abstract** The relations among soil respiration, soil temperature and soil moisture of evergreen broad-leaved forest dominated by *Quercus glauca*, *Phyllostachys pubescens* plantation and *Camellia sinensis* garden in the east mid-subtropical zone were studied. The model of soil respiration rate and soil surface temperature was established. The soil respiration of evergreen broad-leaved forest, *P. pubescens* plantation and *C. sinensis* garden was estimated from the climatic data, which were 24.12, 30.77 and 28.55 t/hm<sup>2</sup>·a respectively, the total amount of CO<sub>2</sub> released from the soil of the above three communities were 9.27×10<sup>6</sup>, 1.36×10<sup>7</sup> and 7.16×10<sup>6</sup> t/a in Zhejiang Province respectively.

**Key words** subtropical woody community, soil respiration, CO<sub>2</sub> release.

土壤呼吸是指土壤释放 CO<sub>2</sub> 的过程,是陆地生态系统碳循环的一个重要组成部分,也是土壤碳库主要输出途径。全球土壤是一个巨大的碳库(1.394×10<sup>18</sup> g),是大气 CO<sub>2</sub> 重要的来源<sup>[1]</sup>。据估计,全球土壤每年排放 C 量高达 68×10<sup>15</sup> g/a,由于大气 CO<sub>2</sub> 是引起全球变化的重要温室气体<sup>[2-4]</sup>,因此,研究土壤呼吸对于

\* 国家自然科学基金资助项目(39270141),浙江省自然科学基金资助项目(396032)

\*\* 绍兴文理学院生化系,绍兴 312000

收稿日期:1998-03-30,修改稿收到日期:1998-11-17。

探讨全球变化及其影响,具有十分重要的意义。

国外土壤呼吸许多研究已证实土壤呼吸与土壤温度呈正相关<sup>[5-7]</sup>。国内土壤呼吸研究很少,仅在北京山地温带林区<sup>[8-10]</sup>、尖峰岭热带森林<sup>[11]</sup>及东北羊草草原<sup>[12]</sup>等地的土壤呼吸进行过研究,而我国中亚热带东部的土壤呼吸尚无报道。方精云等对中国土壤呼吸总C量作了估算( $4.2 \times 10^9$  t/a),但由于缺乏土壤呼吸的观测数据,只能依靠国外的数据类推<sup>[13]</sup>;而单正军等则是依据土壤有机质矿化速率估算土壤CO<sub>2</sub>释放量的,而不是土壤中净CO<sub>2</sub>的释放量<sup>[14]</sup>。因此,研究不同地区、不同植被类型的土壤呼吸已十分迫切。本文研究了3种主要木本植物群落的土壤呼吸与环境因子的关系,建立了土壤呼吸与环境因子的相关模型,从相关模型中推算出年均土壤CO<sub>2</sub>的呼吸量,为我国及全球土壤呼吸和碳平衡的估算提供基础资料。

## 1 自然概况

样地设在杭州西湖山区(120°10'E,30°31'N),地处我国东部湿润亚热带季风气候区的北部,年均温16.7℃,年均降水1410 mm,蒸发1253 mm,降水天数为154.3d,≥10℃的积温为5101.9℃,无霜期246d。本区是地带性常绿阔叶林分布区,也适宜毛竹及茶等的生长。本研究选择了3个主要群落:青冈(*Quercus glauca*)常绿阔叶林、毛竹(*Phyllostachys pubescens*)林和茶(*Camellia sinensis*)园。

青冈常绿阔叶林有青冈、苦槠(*Castanopsis sclerophylla*),石栎(*Lithocarpus glaber*)等,郁闭度0.8~0.9,凋落物厚约1.0cm,土层厚>30cm,土壤为红壤,pH5.0~5.4。

毛竹林伴生少量草本植物,郁闭度0.7~0.8,凋落物厚约0.3cm,土层厚>50cm,土壤为红壤,pH5.0~5.4。

茶园伴生少量草本植物,土层厚>50cm,土壤为红壤,pH5.0~5.4。

## 2 研究方法

### 2.1 土壤呼吸的测定

本研究采用便携式红外线气体分析仪(GXH-305),配合气室(18.8 cm × 29.7 cm × 12 cm),分不同月份,测定土壤呼吸。测定时先剪去少量的绿色草本植物,再将气室压在地面上,外加足量粘土砸实外圈,以防漏气,测定CO<sub>2</sub>浓度(ml/m<sup>3</sup>)的变化,为减小误差,每次测3个数据,计算平均值。

### 2.2 试验处理

**2.2.1 土壤呼吸与温度关系处理** 在1997-06~1998-03间,每月雨后约3~4d,测土壤呼吸日变化(多云或晴天),每次测定重复3次,在不同天气下再测2~4次土壤呼吸强度。这样,既有日变化数据,又有季节变化(包括最热和最冷)数据,从中分析土壤呼吸与温度的关系。

**2.2.2 土壤呼吸与含水率关系处理** 在10月中旬(土壤较干燥),每样地选择4个样点,人工均匀加水,使每样点具不同含水率,2次重复。每隔2~3d进行土壤呼吸的测定,连续测定两周,其间无雨。

**2.2.3 环境因子的测定** 在测定土壤呼吸的同时,测定地表温度、地中5cm温度、空气的温湿度,测定后需取土样2份(0~5.0cm

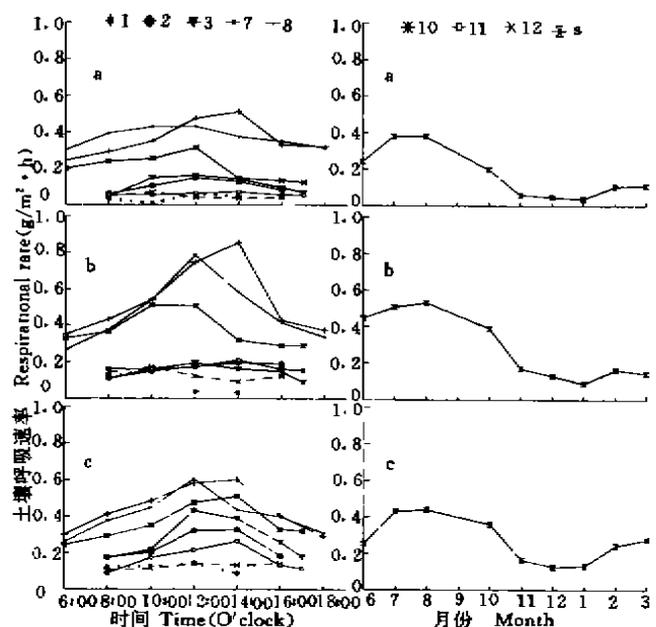


图1 青冈常绿阔叶林(a)、毛竹林(b)及茶园(c)土壤CO<sub>2</sub>呼吸速率的日变化和季节变化

Fig. 1 Diurnal and seasonal changes of soil respiration of evergreen broad-leaved forest dominated by *Q. glauca*(a), *P. pubescens* plantation (b) and *C. sinensis* garden (c)

深),带回实验,1份测定含水率,另1份风干保存,待以后进行有机物含量分析。

试验数据用单元、多元回归及方差分析的方法进行。

### 3 结果与分析

#### 3.1 3种群落土壤呼吸的特点及异同

3种群落土壤呼吸速率的日变化曲线(图1)较一致,呼吸速率多在12:00~14:00为最高,在早晨和傍晚时较低,日变化幅度夏季最高,冬季最低,这些特点均与温度的日变化相一致。

从土壤呼吸速率的季节变化(图1)看,毛竹林和茶园的土壤呼吸速率均为7、8、10月>11、12、1、2、3月( $P<0.05$ );青冈常绿阔叶林为7、8月>10月>11、12、1、2、3月份( $P<0.05$ ),与地表温度、地中5cm温度的季节变化(图2)相一致,当地表温度<10℃时,呼吸速率变化较小,但即使在土表冰冻时,青冈常绿阔叶林、毛竹林和茶园(此时的地中5cm温度均为3℃)的 $\text{CO}_2$ 呼吸速率仍分别为0.03、0.13、0.13 $\text{g}/\text{m}^2\cdot\text{h}$ ,表明亚热带地区土壤微生物常年有活动。

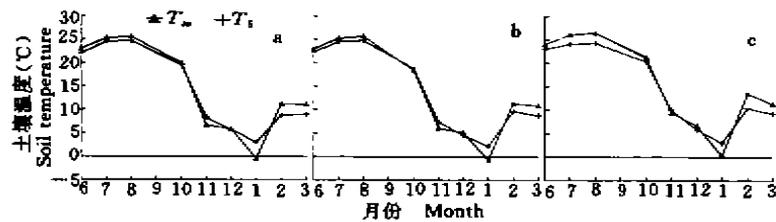


图2 青冈常绿阔叶林(a)、毛竹林(b)及茶园(c)地表温度( $T_s$ )与地中5cm温度( $T_5$ )的季节变化

Fig. 2 Seasonal changes of soil surface temperature ( $T_s$ ) and soil temperature at 5cm depth in three communities, evergreen broad-leaved forest dominated by *Q. glauca* (a), *P. pubescens* plantation (b) and *C. sinensis* garden (c).

从3种群落土壤呼吸速率及各环境因子(表1)比较看,土壤呼吸速率为毛竹林、茶园>青冈常绿阔叶林( $P<0.05$ ),地表温度、地中5cm温度均无显著差异,而有机物的含量为青冈常绿阔叶林>毛竹林、茶园( $P<0.01$ ),说明不同群落间土壤呼吸速率除与温度、有机物含量有关外,还与其它因子有关,如土壤含水率、土壤的容重等。

表1 青冈常绿阔叶林、毛竹林及茶园的土壤 $\text{CO}_2$ 呼吸速率及相应环境因子均值的比较(1997-06~1998-03)

Table 1 Comparison of the mean values of soil respiration rate and the environment factors of evergreen broad-leaved forest dominated by *Q. glauca*, *P. pubescens* plantation and *C. sinensis* garden

群落 Community	呼吸速率 ( $\text{g}/\text{m}^2\cdot\text{h}$ ) Respiration rate	地表温度(°C) Surface temperature	地中5cm 温度(°C) Temperature at 5cm depth	土壤含水率(%) Soil water content	土壤有机质 含量(%) O. M content	土壤容重( $\text{g}/\text{cm}^3$ ) Soil bulk density
青冈常绿阔叶林 <sup>①</sup>	0.1798	14.4	14.1	24.9	9.72	1.08
毛竹林 <sup>②</sup>	0.2661	14.0	13.7	30.6	3.74	1.18
茶园 <sup>③</sup>	0.2862	15.7	14.6	27.1	3.61	1.31

①Evergreen broad-leaved forest dominated by *Q. glauca*; ②*P. pubescens* plantation; ③*C. sinensis* garden.

#### 3.2 土壤呼吸与环境因子的关系

3.2.1 土壤呼吸与地表温度及土壤含水率的关系 尽管3种群落的土壤呼吸有一定差异,但它们对温度和土壤含水率的响应基本一致(图3),回归分析结果表明,各群落土壤 $\text{CO}_2$ 呼吸速率( $R, \text{g}/\text{m}^2\cdot\text{h}$ )与地表温度( $T, \text{°C}$ )有极显著( $P<0.01$ )的指数相关关系。

$$\text{青冈常绿阔叶林: } R = 0.03371e^{0.3336737T} \quad r^2 = 0.83, \quad n = 75 \quad (1)$$

$$\text{毛竹林: } R = 0.06988e^{0.0746157T} \quad r^2 = 0.69, \quad n = 77 \quad (2)$$

茶园:  $R = 0.10190e^{0.093662T}$   $r^2 = 0.79$ ,  $n = 80$  (3)

$Q_{10} = R_{T+10} / R_T$ , 故青冈常绿阔叶林的  $Q_{10} = e^{0.3557} = 2.55$ , 说明在  $-5 \sim 35^\circ\text{C}$  地表温度范围内, 当地表温度上升  $10^\circ\text{C}$  时, 土壤呼吸增加  $255\%$ ; 同样, 当地表温度上升  $10^\circ\text{C}$  时, 毛竹林 ( $Q_{10} = 2.11$ ) 和茶园 ( $Q_{10} = 1.75$ ) 的土壤呼吸可分别增加  $211\%$ 、 $175\%$ 。

在水分处理下, 3种群落的土壤呼吸速率与土壤含水率间进行回归分析(图3)表明, 常绿阔叶林的土壤呼吸速率与土壤含水率呈显著线性相关 ( $r = 0.46$ ,  $P < 0.05$ ), 茶园土壤呼吸速率与土壤含水率呈极显著的线性相关 ( $r = 0.54$ ,  $P < 0.01$ ), 而毛竹林的土壤呼吸速率与土壤含水率无明显关系。

**3.2.2 模型建立** 为说明土壤含水率对土壤呼吸的综合影响, 本文将土壤呼吸速率与土壤含水率及对应的地表温度进行综合分析, 结果表明, 3个样地土壤呼吸速率与土壤含水率、地表温度的复相关均达极显著水平 ( $R > 0.77^{**}$ )。经标准化后的通径分析表明, 3种群落的土壤呼吸速率与土壤含水率均呈显著相关, 但含水率所起的总效应和直接效应相对较小, 逐步回归结果为土壤呼吸速率与地表温度的关系, 表明地表温度是制约3种群落土壤呼吸速率主导性因子, 土壤含水率对土壤呼吸综合影响较小, 建模时可忽略。

很多研究者也证实, 在土壤水分含量充足、不成为限制因子的情况下土壤呼吸与土壤温度呈正相关, 而在水分含量成为限制因子的干旱、半干旱地区, 水分含量与土壤温度共同起作用<sup>[5-8]</sup>。本地区为湿润亚热带季风气候区, 雨水充足, 土壤含水量不是土壤呼吸的限制因子, 因此, 可以将土壤呼吸速率与地表温度的指数关系作为土壤呼吸的模型, 进行土壤呼吸的估算。

**3.3 土壤呼吸的估算**

根据杭州市气象资料(1993~1997年观测资料平均值), 采用刘绍辉等的方法<sup>[9]</sup>, 以地表温度的旬均值, 拟合了全年天数(从每年7月11日至翌年7月10日, 以365d计)与地表温度的关系(图4)为:

$$T = 33.52 + 0.111z - 4.549 \times 10^{-3}z^2 + 2.206 \times 10^{-5}z^3 - 2.751 \times 10^{-8}z^4 - 3.799 \times 10^{-12}z^5$$

$$R^2 = 0.9875$$

式中  $T$  为地表温度( $^\circ\text{C}$ ),  $z$  为天数(d)。

由于  $R = dRa/dz \cdot 1/24$  ( $Ra$  = 年呼吸量,  $R$  = 呼吸速率), 故  $Ra = \int_0^{365} (24 \cdot Rdz)$ , 将  $T$  代入呼吸速率模型(1), 则青冈常绿阔叶林年均  $\text{CO}_2$  的呼吸量为:

$$Ra = \int_0^{365} \{0.03371 \times 24 \cdot \text{EXP}[0.093673 \cdot (33.52 + 0.111z - 4.549 \times 10^{-3}z^2 + 2.206 \times 10^{-5}z^3 - 2.751 \times 10^{-8}z^4 - 3.799 \times 10^{-12}z^5)]\} dz$$

于是得到青冈常绿阔叶林的年均  $\text{CO}_2$  呼吸量为  $2412\text{g}/\text{m}^2 \cdot \text{a}$ 。同理, 将  $T$  代入到呼吸模型(2)、(3)可得

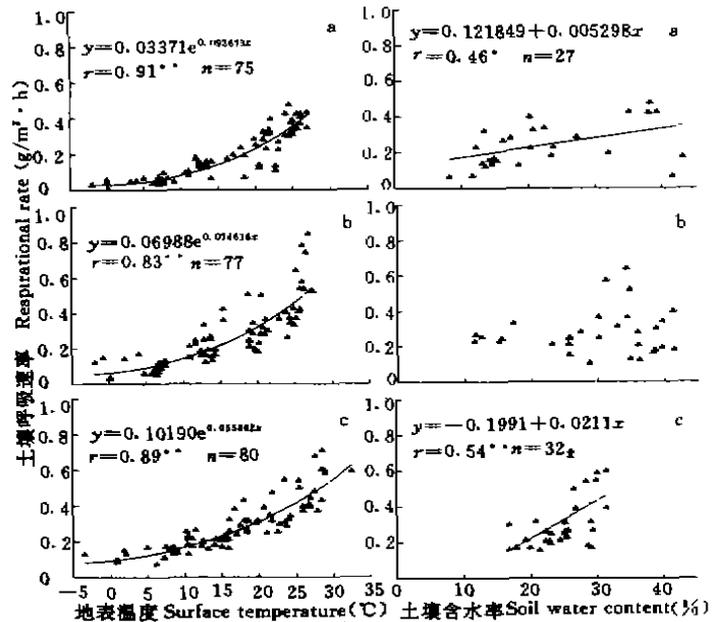


图3 青冈常绿阔叶林(a)、毛竹林(b)及茶园(c)土壤  $\text{CO}_2$  呼吸速率与地表温度、土壤含水率的关系

Fig. 3 Relationship among the soil respiration of evergreen broad-leaved forest dominated by *Q. glauca*(a), *P. pubescens* plantation(b), *C. sinensis* garden(c) and soil surface temperature, soil moisture

到毛竹林、茶园的年均  $\text{CO}_2$  呼吸量依次为  $3077$ 、 $2855 \text{g}/\text{m}^2 \cdot \text{a}$ 。

经单位换算,可知杭州地区青冈常绿阔叶林、毛竹林、茶园的土壤年均  $\text{CO}_2$  呼吸量分别为  $24.12$ 、 $30.77$ 、 $28.55 \text{t}/\text{hm}^2 \cdot \text{a}$ 。北京山地温带林的白桦林、辽东栎林、油松林的土壤年均  $\text{CO}_2$  呼吸量分别为  $11.32$ 、 $14.31$ 、 $8.66 \text{t}/\text{hm}^2 \cdot \text{a}$ <sup>[9]</sup>,尖峰岭热带山地雨林林地的年均  $\text{CO}_2$  呼吸量为  $33.16 \text{t}/\text{hm}^2 \cdot \text{a}$ <sup>[10]</sup>,因此,中亚热带林的土壤年均  $\text{CO}_2$  呼吸量介于温带林与热带林之间,说明土壤  $\text{CO}_2$  呼吸量与纬度地带性的温度变化一致。

浙江省常绿阔叶林、毛竹林和茶园面积分别为  $3.8453 \times 10^7$ 、 $4.4260 \times 10^6$ 、 $2.5067 \times 10^7 \text{hm}^2$ <sup>[16]</sup>,用青冈常绿阔叶林的年均呼吸速率来替代常绿阔叶林的呼吸速率,这样就可估算出浙江省的常绿阔叶林、毛竹林和茶园每年土壤  $\text{CO}_2$  排放量,分别为  $9.27 \times 10^5$ 、 $1.36 \times 10^7$ 、 $7.16 \times 10^6 \text{t}/\text{a}$ 。

#### 4 结论

4.1 青冈常绿阔叶林、茶园的土壤呼吸速率与土壤含水率正相关,毛竹林的土壤呼吸速率与土壤含水率无明显关系,综合分析结果表明,土壤含水率对3种群落土壤呼吸影响均较小,在模型中可忽略。土壤呼吸速率与地表温度均有极显著的指数相关,可作为土壤呼吸的模型,进行土壤呼吸速率和呼吸量的估算。

4.2 中亚热带东部青冈常绿阔叶林、毛竹林、茶园年均土壤  $\text{CO}_2$  呼吸量分别为  $24.12$ 、 $30.77$ 、 $28.55 \text{t}/\text{hm}^2 \cdot \text{a}$ 。

4.3 浙江省常绿阔叶林、毛竹林和茶园每年土壤  $\text{CO}_2$  排放量分别为  $9.27 \times 10^5$ 、 $1.36 \times 10^7$ 、 $7.16 \times 10^6 \text{t}/\text{a}$ 。

#### 参 考 文 献

- 1 Jenkinson D S, Adams D E and wild A. Model estimates of  $\text{CO}_2$  emissions from soil in response to global warming. *Nature*, 1991, **351**: 304 ~ 306
- 2 Raich J W and Schelesinger W H. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate. *Tellus*, 1992, **44B**: 81 ~ 99
- 3 Pieter P T and Peter S B. 气候变化与二氧化碳永恒. *Ambio*, 1995, **24**(6): 375 ~ 377
- 4 Henning Rodhe *et al.* Svante Arrhenius 和温室效应. *Ambio*, 1997, **26**(1): 2 ~ 5
- 5 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
- 6 Mathes K and Schriefer Th. Soil respiration during secondary succession influences of temperature and moisture. *Soil Biol. Biochem.*, 1985, **17**(2): 205 ~ 211
- 7 Buyanovsky G A. *et al.* Soil respiration in a winter wheat ecosystem. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1986, **50**: 338 ~ 334
- 8 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
- 9 刘绍辉,等.北京山地温带森林的土壤呼吸. *植物生态学报*, 1998, **22**(2): 119 ~ 126
- 10 蒋高明,等.北京山区辽东栎林土壤释放  $\text{CO}_2$  的模拟实验研究. *生态学报*, 1997, **17**(5): 477 ~ 482
- 11 吴仲民,等.尖峰岭热带森林土壤 C 储量和  $\text{CO}_2$  排放量的初步研究. *植物生态学报*, 1997, **21**(5): 416 ~ 423
- 12 杨靖春,等.东北羊草草原土壤微生物呼吸速率的研究. *生态学报*, 1989, **9**(2): 139 ~ 142
- 13 方精云,等.中国陆地生态系统的碳循环及其全球意义.见:王如松,方精云等编,现代生态学的热点问题研究.北京:中国科学技术出版社,1996. 240 ~ 250
- 14 单正军,等.土壤有机质矿化与温室气体释放初探. *环境科学学报*, 1996, **16**(2): 150 ~ 154
- 15 王景祥,等.浙江森林.北京:中国林业出版社,1993. 40 ~ 43

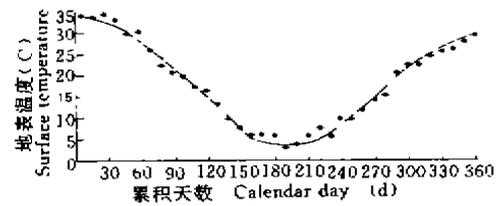


图4 旬平均地表温度与时间的关系

Fig. 4 Relationship between the mean soil surface temperature each ten-day and calendar day