

华南地区5种人工幼林的土壤呼吸及其季节性变化

余世钦^{1,2}, 王晓丽^{1,2}, 林永标¹, 饶兴权¹, 傅声雷¹, 周丽霞^{1*}

(1. 中国科学院华南植物园, 广州 510650; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 为了解华南人工林的碳固存机制, 对广东鹤山的尾叶桉(*Eucalyptus urophylla*)纯林、30种树种混交林、10种树种混交林、红椎(*Castanopsis hystrix*)纯林、厚荚相思(*Acacia crassicarpa*)纯林5种人工林(林龄2-5 a)的土壤总呼吸(R_s)和自养呼吸(R_a)的季节变化进行了研究。结果表明, 从2007年到2012年, 5种人工林的 R_s 为81.3~103.9 mg C m⁻²h⁻¹, R_a 为11.2~22.3 mg C m⁻²h⁻¹, 自养呼吸贡献率(RC)为12.4%~26.9%, 且5种人工林间的 R_s 、 R_a 及RC差异不显著。5种人工林湿季的 R_s 均显著大于干季的, 平均高出311.4%; R_a 、RC的季节性差异不显著。湿季土壤温度与 R_s 具有显著相关性, 土壤温度解释了90.2%的变异, 而两者关系在干季不显著。人工林间的微环境和土壤条件差异不明显, 可能是由于造林时间短, 土壤还处于干扰的恢复过程中, 导致人工林间土壤呼吸差异不显著。

关键词: 土壤呼吸; 自养呼吸; 人工林; 季节性差异

doi: 10.11926/j.issn.1005-3395.2015.02.009

Soil Respiration and Its Seasonal Variation among Five Young Plantations in South China

YU Shi-qin^{1,2}, WANG Xiao-li^{1,2}, LIN Yong-biao¹, RAO Xin-quan¹, FU Sheng-lei¹, ZHOU Li-xia^{1*}

(1. South China Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510650, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In order to understand the mechanisms of soil carbon sequestration of plantations in South China, the total soil respiration (R_s) and autotrophic respiration (R_a) and their seasonal dynamics of five plantations in Heshan, Guangdong at 2-5-year-old were studied from 2007 to 2012. The plantations include *Eucalyptus urophylla* plantation, 30 species mixed plantation, 10 species mixed plantation *Castanopsis hystrix* plantation, and *Acacia crassicarpa* plantation. The results showed that average R_s , R_a and contribution rate of R_a to R_s (RC) of these plantations ranged within 81.3-103.9 mg C m⁻²h⁻¹, 11.2-22.3 mg C m⁻²h⁻¹, and 12.4%-26.9%, respectively. The average R_s in wet season of these plantations were 311.4% higher than that in dry season; while R_a and RC had not significant difference between wet and dry seasons. The soil temperature in wet season had significant relation with R_s among five plantations, which explained the variation of R_s for 90.2%, but they had no relation in dry season. The difference of microenvironment and soil condition among these young plantations was no obvious, in which soil was still restoring from disturbance, so that soil respiration had no significant difference among five plantations.

Key words: Soil respiration; Autotrophic respiration; Plantation; Seasonal variation

收稿日期: 2014-04-28

接受日期: 2014-08-18

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项(XDA05070301); 国家自然科学基金项目(31210103920, 30925010)资助

作者简介: 余世钦(1987~), 男, 硕士研究生, 从事土壤生态学研究。E-mail: yushiqin@scbg.ac.cn

* 通信作者 Corresponding author. E-mail: zhlx@scbg.ac.cn

土壤呼吸是指土壤生态系统产生二氧化碳进入大气的一系列过程。土壤呼吸则是陆地生态系统仅次于光合作用的第二大碳流^[1]。影响土壤呼吸的直接因素包括土壤温度^[2]、土壤湿度^[3]及有机物的可利用性^[4]。这些因素是相互作用的,在时间、空间上的变化又形成了土壤呼吸的时间动态和空间格局^[5]。华南地区存在明显的干湿季交替现象。这种气候特点,造就了该地区湿季的土壤呼吸速率总比干季的高的特点^[6-7]。因为湿季温度高,降水丰富,既有利植物的生长,又利于凋落物及土壤有机质的分解^[8];也就是说自养呼吸速率及异养呼吸速率都比较高。但由于两者对于环境因子,如土壤温度,土壤含水量的响应的不同^[9-10],使得两者在季节间的变化程度不尽相同,因此自养呼吸与异养呼吸的比重在季节间也表现出差异性^[11]。

无论是人工林还是自然林,土壤呼吸速率都受林型影响。据 Wang 等^[12]报道,东北自然林 6 种林型土壤有机质及地下细根生物量的不同造成了林型间土壤呼吸年通量有所差异。种植了不同树种的人工林土壤呼吸速率的平均值以及动态都存在差异^[13-14]。除土壤呼吸速率外,土壤的自养呼吸所占比例在林型间也可能存在明显差异^[15]。这与林型间植物群落的生产力,土壤有机质等有关。在自然林的不同演替时期,土壤呼吸是不同的。例如鼎湖山自然保护区土壤呼吸的年通量随演替的进行而增加^[7]。对于华南地区的人工经济林来说,其林龄一般较小。但即使是在 15 年间,土壤呼吸的速率,自养呼吸所占的比例也会随林龄产生变化。总的来说,林型与林龄影响土壤呼吸是通过影响生态系统生产力^[16-17]、有机物的地上、地下分配^[15,18-19]、凋落物的质与量^[20]以及群落小气候^[21-22],从而影响土壤呼吸的速率、季节动态及温度敏感性的^[14,23-24]。

本研究以 5 种幼年人工林作为研究对象,通过监测人工林土壤呼吸的季节动态,探讨华南地区人工幼林土壤呼吸分异的原因,以及土壤呼吸的干湿季的差异及其影响因素,为华南地区人工幼林的土壤呼吸研究提供科学参考。

1 材料和方法

1.1 试验地概况

研究在中国科学院鹤山丘陵综合开放试验站进行,位于广东省鹤山市共和镇(112°50' E, 22°34' N)。

样地于 2005 年营建,海拔 10~60 m,该区属南亚热带季风气候,年均温为 22.6℃,夏季湿热,冬季干冷;年均降雨量为 1700 mm,年蒸发量为 1600 mm,年辐射量为 4350.5 MJ m⁻²,有明显的干湿季交替现象,干季一般从 10 月至次年 2 月,湿季一般从 3 月到 9 月。土壤类型为赤红壤。

1.2 方法

研究样地总面积 50 hm²,有 13 种林型,每种林型设 3 个随机重复样地,每个样地面积约 1 hm²,种植时间为 2005 年 4-6 月。本文以同期种植的尾叶桉(*Eucalyptus urophylla*)纯林(EU)、30 种树种混交林(30MS)、10 种树种混交林(10MS)、红椎(*Castanopsis hystrix*)纯林(CH)和厚荚相思(*Acacia crassicarpa*)纯林(AC)等 5 种人工林作为研究对象。30 种树种混交林(30MS)中有华润楠(*Machilus chinensis*)、火力楠(*Michelia macclurei*)、深山含笑(*M. maudiae*)、乐昌含笑(*M. chapensis*)、阴香(*Cinnamomum burmannii*)、黄樟(*C. parthenoxylon*)、灰木莲(*Manglietia glanca*)、黎蒴(*Castanopsis fissa*)、红椎、秋枫(*Bischofia javanica*)、观光木(*Tsoongiodendron odorum*)、枫香(*Liquidambar formosana*)、五桠果(*Dillenia indica*)、蓝花楹(*Jacaranda acutifolia*)、山杜英(*Elaeocarpus sylvestris*)、尖叶杜英(*E. apiculatus*)、日本杜英(*E. japonicus*)、海南红豆(*Ormosia pinnata*)、人面子(*Dracontomelon duperreanum*)、凤凰木(*Delonix regia*)、假苹婆(*Sterculia lanceolata*)、海南菜豆树(*Radermachera hainanensis*)、海南蒲桃(*Syzygium hainanense*)、厚荚相思、尾叶桉、山桂花(*Bennettiodendron leprosipes*)、猫尾木(*Markhamia stipulata*)、云树(*Garcinia cowa*)、岭南山竹子(*G. oblongifolia*)和印度紫檀(*Pterocarpus indicus*)。10 种树种混交林(10MS)中有华润楠、火力楠、阴香、灰木莲、黎蒴、秋枫、观光木(*Tsoongiodendron odorum*)、枫香、五桠果和蓝花楹。

每个样地内分别设置 3 个对照及断根处理的小样方,即每种林型有 9 个不同处理的重复样方。断根处理采用挖壕沟法,即在尽量减少土壤扰动的前提下,挖 1 m×1 m、80 cm 深的壕沟,切断根系,并插入 PVC 板防止根系进入,再将挖出的土填入壕沟,样方内清除地上部分的全部植被并在整个实验过程中保持无植被状态。对照不做任何处理。样地布设于 2007 年初完成,为了让样方内的根完

全分解,断根后放置超过3个月才开始测定,具体时间为2007年5月、11月,2008年6月、9月、12月;2009年3月、6月、9月、12月;2011年7月、12月和2012年7月。

1.2 土壤呼吸的测定

土壤呼吸测定采用静态箱/气相色谱法^[25]。箱体由PVC管制成,内径20 cm,高20 cm,顶部接抽气管,底部削尖,测定时,将箱底插入地面2 cm深处静置一段时间,然后用100 mL塑料注射器于0、10、20和30 min时分别抽取箱内气体,采集的气样带回实验室,用气相色谱仪分析,并计算土壤呼吸速率: $R=\Delta m/\Delta t \cdot D \cdot V/A=h \cdot D \cdot \Delta m/\Delta t$,其中, R 指土壤呼吸速率; h 指PVC箱体的高度; D 为PVC箱体内部的气体密度; $\Delta m/\Delta t$ 指CO₂浓度随时间的变化速率。对照中的土壤呼吸即为总呼吸(R_s),挖壕沟样方中的土壤呼吸即为异养呼吸(R_h),两者之间的差为自养呼吸(R_a)。

1.3 土壤环境因子的测定

土壤温度采用i-Button土壤温度计测定。在2007年11月(干季)、2008年6月(湿季)和2012年7月(湿季)进行了3次土壤采样,用内径为2.5 cm的土钻钻取0~10 cm土壤样品,进行土壤有机碳(SOC)、土壤总氮(TN)、土壤微生物量碳(MBC)的测定。SOC测定采用重铬酸钾氧化-外加热法, TN采用凯氏定氮仪进行测定^[26]。MBC测定采用氯仿熏蒸提取法^[27-28]。细根生物量(FRM)在2007年11

月进行测定,收集直径小于2 mm的活根,洗净并烘干,然后称量。

1.4 数据处理

用重复测量方差分析不同人工林对土壤呼吸及环境因子的影响。人工林类型对 R_s 年通量、 R_a 年通量及自养呼吸的贡献率(RC)的影响采用单因素方差分析检验。5种人工林干、湿季间土壤呼吸的差异分别用重复测量方差分析检验。人工林土壤呼吸在干、湿季间的差异则用独立样本 t 检验分析。干、湿季土壤温度与土壤呼吸的关系用指数回归方程拟合。所有统计分析均在SPSS 16.0上进行(SPSS Inc., 2007),显著性水平设定为 $\alpha=0.05$ 。

2 结果和分析

2.1 人工林的土壤性质

从表1可见,5种人工林的SOC为10.83~19.42 g kg⁻¹,以厚荚相思纯林的最大,最小的为红椎纯林。TN的变化趋势与SOC相似,为0.78~1.14 g kg⁻¹,最大的为厚荚相思纯林,最小为红椎纯林。MBC为157.09~262.98 mg kg⁻¹,最大的为30种树种混交林,最小的尾叶桉纯林。pH为3.93~4.12,最大的是红椎纯林,最小的是尾叶桉纯林及厚荚相思纯林。FRM为190.6~533.5 g m⁻²。最大的是10种树种混交林,最小的厚荚相思纯林。各种环境因子在人工林间的差异都不显著。

表1 人工林土壤(0~10 cm)环境因子

Table 1 Soil environment factors at depth of 0~10 cm in plantations

人工林 Plantation	SOC (g kg ⁻¹)	TN (g kg ⁻¹)	pH	MBC (mg kg ⁻¹)	FRM (g m ⁻²)
EU	13.70±2.62	0.86±0.12	3.93±0.05	157.99±28.39	366.6±181.7
30MS	14.71±1.67	1.00±0.09	4.11±0.07	262.98±56.91	530.9±142.2
10MS	16.01±1.70	1.06±0.09	3.97±0.06	244.71±47.22	533.5±129.0
CH	10.83±1.61	0.78±0.09	4.12±0.04	165.05±25.61	414.1±114.2
AC	19.42±2.86	1.14±0.09	3.93±0.08	233.57±30.34	190.6±46.6
P	0.110	0.077	0.064	0.286	0.379

EU: 尾叶桉纯林; 30MS: 30种树种混交林; 10MS: 10种树种混交林; CH: 红椎纯林; AC: 厚荚相思林; SOC: 有机碳; TN: 总氮; MBC: 微生物量碳; FRM: 细根生物量; 以下图表同。

EU: *Eucalyptus urophylla* plantation; 30MS: 30 species mixed plantation; 10MS: 10 species mixed plantation; CH: *Castanopsis hystrix* plantation; AC: *Acacia crassicarpa* plantation; SOC: Soil organic carbon; TN: Total nitrogen; MBC: Microbial biomass carbon; FRM: Fine root biomass. The same is following Tables and Figures.

2.2 人工林的土壤呼吸

从表2可见,5种人工林的 R_s 为86.6~103.9 mg C m^{-2} ,其中10种树种混交林的最高,其他人工林间相差不大; R_a 为11.2~22.3 mg C m^{-2} 。重复测量方差分析表明,5种人工林间的 R_s 和 R_a 差异不显著。单因素方差分析表明,5种人工林间的 R_s 差异均不显著。 RC 为12.4%~26.9%,最大的是尾叶桉纯林,最小的是30种树种混交林,不同人工林间差异亦不显著。

2.3 土壤呼吸的干、湿季差异

从图1可以看出, R_s 在湿季比干季大311.4%; R_a 在湿季比干季的大122.5%; RC 在湿季比干季低49.2%。在湿季,5种人工林的 R_s 为123.8~176.0 $\text{mg C m}^{-2}\text{h}^{-1}$,以10种树种混交林的最高,其他人工林间的差异很小,但5种人工林间差异不显著($P=0.200$,单因素方差检验,下同); R_a 为14.0~

27.0 $\text{mg C m}^{-2}\text{h}^{-1}$ ($P=0.974$); RC 为5.4%~17.4%($P=0.940$),5种人工林间差异均不显著。在干季,5种人工林的 R_s 为30.2~41.9 $\text{mg C m}^{-2}\text{h}^{-1}$,以30种树种混交林的最高,其他差异不大($P=0.232$); R_a 为6.4~11.6 $\text{mg C m}^{-2}\text{h}^{-1}$ ($P=0.895$); RC 为16.2%~28.6%($P=0.922$),5种人工林间差异均不显著。对于同一种人工林, R_s 的干、湿季差异都达到显著水平;而 R_a 及 RC 的干、湿季差异则不显著(表3)。在湿季,5种人工林的 R_s 与土壤0~10 cm温度呈显著的指数相关;而在干季,两者的关系则不显著(图2)。

3 讨论

3.1 土壤呼吸的季节性差异

人工林土壤呼吸在干、湿季的差异主要体现在土壤呼吸速率、 RC 及与土壤温度的关系上。

5种人工林的 R_s 在湿季均显著大于干季(图1),

表2 人工林的 R_s 、 R_a 及 R_c 的贡献率(RC)

Table 2 Average R_s , R_a , and RC for each plantation

人工林 Plantation	R_s ($\text{mg C m}^{-2}\text{h}^{-1}$)	R_a ($\text{mg C m}^{-2}\text{h}^{-1}$)	RC (%)
EU	81.3±10.7	19.8±4.6	26.9±6.1
30MS	86.8±9.2	13.3±5.8	12.4±11.0
10MS	103.9±12.9	22.3±6.7	21.7±3.2
CH	87.6±9.7	11.2±4.2	14.8±5.7
AC	86.6±9.6	18.0±3.2	19.5±3.9
P	0.462	0.705	0.565

$n=12$

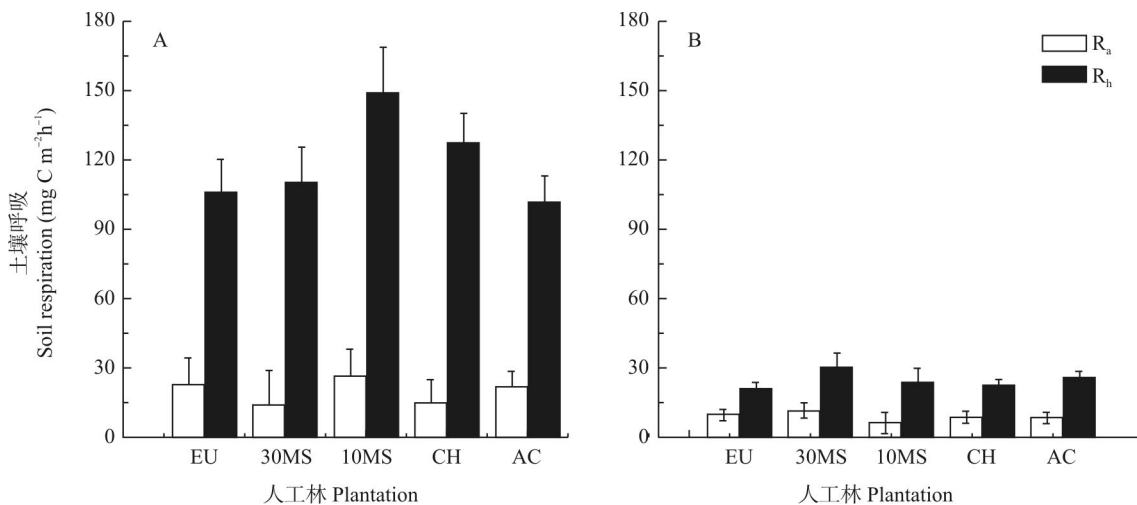
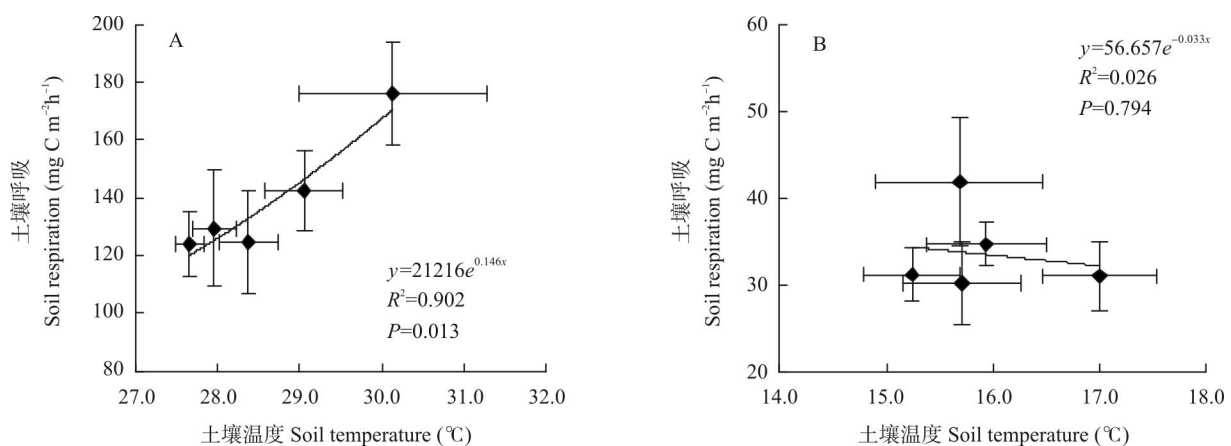


图1 5种人工林湿季(A)与干季(B)土壤的 R_a 与 R_h
Fig. 1 R_a and R_h of five plantations in wet season (A) and dry season (B)

表3 人工林 R_s 、 R_a 及 RC 干湿季比较的独立样本 t -检验Table 3 Independent-samples t -test between wet and dry season for R_s , R_a and RC in five plantations

人工林 Plantation	P		
	R_s	R_a	RC
EU	0.006	0.272	0.271
30MS	0.011	0.939	0.394
10MS	0.005	0.148	0.990
CH	<0.001	0.715	0.347
AC	<0.001	0.126	0.545

图2 5种人工林湿季(A)、干季(B)的 R_s 与土壤 0~10 cm 温度的关系Fig. 2 Relationship between R_s and soil temperature (0–10 cm) of five plantations in wet season (A) and dry season (B)

R_a 也表现出湿季大于干季的趋势,但差异不显著。一般认为, R_a 与细根生物量有较好的相关性^[13,29]。有研究表明本地区人工林活的细根生物量在干、湿季差异并不大^[30],这可能是本研究中 R_a 干、湿季差异不显著的原因之一。一方面, R_a 在干湿季变化不显著;另一方面,从湿季到干季, R_s 显著减少。这造成了 5 种人工林 RC 从湿季的 13.0% 上升到干季的 23.7% ($P=0.073$)。这种季节性变化不同于 Yi 等^[11]的研究结果,但与 Tian 等^[31]的相同。两种不同的变化趋势在其他研究中也有报道,可能说明了 RC 的影响因素较多。在特定的条件下,由于 R_s 与 R_a 的不同变化趋势及幅度,会造成 RC 的变化不同。 R_s 在湿季与土壤温度显著相关,而在干季两者关系不显著,意味着在湿季不同的土壤温度造成了人工林间 R_s 的差异,而在干季人工林间 R_s 的变异可能是土壤水分或底物的可利用性等因素造成的^[2-3]。这说明在不同季节,限制土壤呼吸的因子^[32-33]或者环境因子的相互作用^[34]也会有所差异。

3.2 人工林的土壤呼吸

本研究结果中的 R_s 与华南地区其他人工林中的测定结果相似^[35-36]。与早前同一样地的实验结果相比,尾叶桉纯林的 R_s 较高,厚荚相思纯林的差异小^[6]。这种结果可能是由于林龄或气候条件的年际差异与林型的相互作用造成的^[6,35]。

不同植物群落能够使土壤呼吸发生变异^[37]。在中国东北, Wang 等^[12,29]报道 6 种林型的土壤呼吸年通量有所差异,阔叶林的土壤呼吸年通量要比针叶林的高 72%,这可能是土壤有机质含量及根生物量在不同人工林间不同所导致的。本研究中, 5 种人工林的土壤呼吸年通量平均值差异不显著(表 2),通过分析群落尺度上影响土壤呼吸的多个因素,如 SOC、FRM 等,发现它们在人工林间没有显著差异(表 2)。植物对环境的影响需要时间上的积累,特别是不同的植物群落之间细小差异可能需要更长期的过程才能显现。黄宇等^[38]的研究表明,林龄为 20 年的几种人工林,其表层 0~10 cm 土壤有机质的差异是不显著的。本研究中 5 种人工林林

龄为 2~5 年,植物群落对于环境的影响时间较短,因此植物群落的差异不显著,因此人工林间的土壤呼吸差异也不明显。但分别对于干湿季进行分析发现,5 种人工林湿季 R_s 的差异可以通过土壤 0~10 cm 的温度来解释,这预示着植物对于林间小气候的改造已经能够在局部时间影响到土壤呼吸(图 1)。

全球范围内,RC 一般为 10%~90%,森林生态系统平均为 45.8%^[39]。据报道,福建 40 年林龄人工林的 RC 为 42.1%^[29],四川地区约 30 年林龄的人工林为 37.2%^[40],华北地区 5 年林龄杨树人工林 6~9 月的 RC 为 29.4%~46.7%^[41]。本研究的结果相对偏小(表 3),这可能与本研究的人工林林龄较小有关,因为在人工林生长早期,RC 会随着人工林林龄的增大而升高^[41]。这可能是由于根系生物量的增加或根系活性的增强与土壤有机质的积累的相对速度有关。随着林龄的增加,本研究地区的人工林的 RC 将逐渐增大。

参考文献

- [1] Schlesinger W H, Andrews J A. Soil respiration and the global carbon cycle [J]. *Biogeochemistry*, 2000, 48(1): 7–20.
- [2] Lloyd J, Taylor J A. On the temperature dependence of soil respiration [J]. *Funct Ecol*, 1994, 8(3): 315–323.
- [3] Orchard V A, Cook F J. Relationship between soil respiration and soil moisture [J]. *Soil Biol Biochem*, 1983, 15(4): 447–453.
- [4] Högberg P, Nordgren A, Buchmann N, et al. Large-scale forest girdling shows that current photosynthesis drives soil respiration [J]. *Nature*, 2001, 411(6839): 789–792.
- [5] Luo Y, Zhou X. *Soil Respiration and the Environment* [M]. California: Academic Press, 2006: 110–112.
- [6] Chen D M, Zhang C L, Wu J P, et al. Subtropical plantations are large carbon sinks: Evidence from two monoculture plantations in south China [J]. *Agri For Meteorol*, 2011, 151(9): 1214–1225.
- [7] Yan J, Zhang D, Zhou G, et al. Soil respiration associated with forest succession in subtropical forests in Dinghushan Biosphere Reserve [J]. *Soil Biol Biochem*, 2009, 41(5): 991–999.
- [8] Chapin III F S, Matson P A, Vitousek P M. *Principles of Terrestrial Ecosystem* [M]. New York: Springer, 2011: 194–204.
- [9] Kuzyakov Y. Sources of CO₂ efflux from soil and review of partitioning methods [J]. *Soil Biol Biochem*, 2006, 38(3): 425–448.
- [10] Wang W, Zeng W, Chen W, et al. Effects of forest age on soil autotrophic and heterotrophic respiration differ between evergreen and deciduous forests [J]. *PLoS One*, 2013, 8(11): e80937.
- [11] Yi Z, Fu S, Yi W, et al. Partitioning soil respiration of subtropical forests with different successional stages in south China [J]. *For Ecol Manage*, 2007, 243(2/3): 178–186.
- [12] Wang C K, Yang J Y, Zhang Q Z. Soil respiration in six temperate forests in China [J]. *Glob Change Biol*, 2006, 12(11): 2103–2114.
- [13] Wang H, Liu S, Wang J, et al. Effects of tree species mixture on soil organic carbon stocks and greenhouse gas fluxes in subtropical plantations in China [J]. *For Ecol Manage*, 2013, 300(1): 4–13.
- [14] Akburak S, Makineci E. Temporal changes of soil respiration under different tree species [J]. *Environ Monit Assess*, 2013, 185(4): 3349–3358.
- [15] Chen G S, Yang Y S, Guo J F, et al. Relationships between carbon allocation and partitioning of soil respiration across world mature forests [J]. *Plant Ecol*, 2010, 212(2): 195–206.
- [16] Raich J W, Schlesinger W H. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate [J]. *Tellus B*, 1992, 44(2): 81–99.
- [17] Hopkins F, Gonzalez-Meler M A, Flower C E, et al. Ecosystem-level controls on root-rhizosphere respiration [J]. *New Phytol*, 2013, 199(2): 339–351.
- [18] Litton C M, Raich J W, Ryan M G. Carbon allocation in forest ecosystems [J]. *Glob Change Biol*, 2007, 13(10): 2089–2109.
- [19] Chen G, Yang Y, Robinson D. Allometric constraints on, and trade-offs in, belowground carbon allocation and their control of soil respiration across global forest ecosystems [J]. *Glob Change Biol*, 2014, 20(5): 1674–1684.
- [20] Cornwell W K, Cornelissen J H, Amatangelo K, et al. Plant species traits are the predominant control on litter decomposition rates within biomes worldwide [J]. *Ecol Lett*, 2008, 11(10): 1065–1071.
- [21] Chapin III F S. Effects of plant traits on ecosystem and regional processes: A conceptual framework for predicting the consequences of global change [J]. *Ann Bot*, 2003, 91(4): 455–463.
- [22] Davidson E A, Janssens I A. Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change [J]. *Nature*, 2006, 440(7081): 165–173.
- [23] Song X, Yuan H, Kimberley M O, et al. Soil CO₂ flux dynamics in the two main plantation forest types in subtropical China [J]. *Sci Total Environ*, 2013, 444(2): 363–368.
- [24] Zeng X H, Zhang W J, Shen H T, et al. Soil respiration response in different vegetation types at Mount Taihang, China [J]. *Catena*, 2014, 116(4): 78–85.
- [25] Wang Y S, Wang Y H. Quick measurement of CH₄, CO₂, and N₂O emission from a short-plant ecosystem [J]. *Adv Atmos Sci*, 2003, 20(5): 842–844.
- [26] Liu G S. *Soil Physical and Chemical Analysis & Description of Soil Profiles* [M]. Beijing: China Standard Publishing House, 1996: 1–33.
- [27] 刘光崧. 土壤理化分析与剖面描述 [M]. 北京: 中国标准出版社, 1996: 1–33.
- [27] Vance E D, Brookes P C, Jenkinson D S. An extraction method

- for measuring soil microbial biomass C [J]. *Soil Biol Biochem*, 1987, 19(6): 703–707.
- [28] Wu J, Joergensen R G, Pommerening B, et al. Measurement of soil microbial biomass C by fumigation-extraction: An automated procedure [J]. *Soil Biol Biochem*, 1990, 22(8): 1167–1169.
- [29] Wang C K, Yang J Y. Rhizospheric and heterotrophic components of soil respiration in six Chinese temperate forests [J]. *Glob Change Biol*, 2007, 13(1): 123–131.
- [30] Xu W Q, Liu J X, Liu X Z, et al. Fine root production, turnover, and decomposition in a fast-growth *Eucalyptus urophylla* plantation in southern China [J]. *J Soil Sed*, 2013, 13(7): 1150–1160.
- [31] Tian D L, Wang G J, Peng Y Y, et al. Contribution of autotrophic and heterotrophic respiration to soil CO₂ efflux in Chinese fir plantation [J]. *Aust J Bot*, 2011, 59(1): 26–31.
- [32] Suseela V, Dukes J S. The responses of soil and rhizosphere respiration to simulated climatic changes vary by season [J]. *Ecology*, 2013, 94(2): 403–413.
- [33] Jia X, Zha T S, Wu B, et al. Temperature response of soil respiration in a Chinese pine plantation: Hysteresis and seasonal vs. Diel Q10 [J]. *PLoS One*, 2013, 8(2): e57858.
- [34] Almagro M, López J, Querejeta J I, et al. Temperature dependence of soil CO₂ efflux is strongly modulated by seasonal patterns of moisture availability in a Mediterranean ecosystem [J]. *Soil Biol Biochem*, 2009, 41(3): 594–605.
- [35] Yang Y S, Chen G S, Guo J F, et al. Soil respiration and carbon balance in a subtropical native forest and two managed plantations [J]. *Plant Ecol*, 2007, 193(1): 71–84.
- [36] Wang Q K, Liu S P, Wang S L. Debris manipulation alters soil CO₂ efflux in a subtropical plantation forest [J]. *Geoderma*, 2013, 192(1): 316–322.
- [37] Metcalfe D B, Fisher R A, Wardle D A. Plant communities as drivers of soil respiration: Pathways, mechanisms, and significance for global change [J]. *Biogeosciences*, 2011, 8(8): 2047–2061.
- [38] Huang Y, Wang S L, Feng Z W, et al. Soil quality assessment of forest stand in different plantation ecosystems [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2004, 15(12): 2199–2205.
黄宇, 汪思龙, 冯宗炜, 等. 不同人工林生态系统林地土壤质量评价 [J]. *应用生态学报*, 2004, 15(12): 2199–2205.
- [39] Hanson P J, Edwards N T, Garten C T, et al. Separating root and soil microbial contributions to soil respiration: A review of methods and observations [J]. *Biogeochemistry*, 2000, 48(1): 115–146.
- [40] Wang X G, Zhu B, Wang Y Q, et al. Field measures of the contribution of root respiration to soil respiration in an alder and cypress mixed plantation by two methods: Trenching method and root biomass regression method [J]. *Eur J For Res*, 2008, 127(4): 285–291.
- [41] Gong J R, Ge Z W, An R, et al. Soil respiration in poplar plantations in northern China at different forest ages [J]. *Plant Soil*, 2012, 360(1/2): 109–122.