

桫欂生态系统的土壤呼吸特征

原焕英¹, 江 洪^{1,2,*}, 余树全¹

(1. 浙江林学院国际生态研究中心, 杭州 311300; 2. 南京大学国际地球系统科学研究所, 南京 210093)

摘要:桫欂植物最早出现于中生代的晚三叠纪或早侏罗纪, 现存的桫欂林是一种非常典型的孑遗陆地生态系统。对桫欂生态系统土壤呼吸特征研究表明, 6 月份桫欂纯林的土壤呼吸速率很小, 去除凋落物和保留凋落物的土壤呼吸速率分别为 0.87 、 $0.89 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 两种处理无显著差异 ($P > 0.05$)。由于其它生物的入侵, 在保护区桫欂林中出现了多种混交的森林类型, 比较典型的是毛竹、落叶阔叶林、常绿阔叶林作为桫欂纯林的入侵种与其形成的 3 种生态系统类型, 根据测定的结果, 表明这 3 种生态系统类型的林地土壤呼吸速率均大于桫欂纯林, 平均值分别为 2.95 、 2.06 、 $1.33 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 经统计分析, 发现它们与桫欂纯林有显著的差异 ($P < 0.001$)。凋落物对这 3 种类型的影响表现为, 毛竹桫欂混交林、常绿阔叶桫欂混交林差异显著 ($P < 0.001$), 落叶阔叶和桫欂混交林差异不明显 ($P > 0.05$); 在较短时间尺度上对 4 种森林类型的日动态分析, 均表现为一致的平稳状态。在土壤温度和湿度变化较小的情况下, 两种处理 5cm 土壤温度和湿度均与土壤呼吸无明显相关性。

关键词:桫欂; 生态系统; 土壤呼吸; 凋落物

文章编号: 1000-0933 (2009)06-3316-06 中图分类号: Q143, Q145, Q948, S154.1, S178.5 文献标识码: A

The soil respiration of *Alsophila spinulosa* ecosystems

YUAN Huan-Ying¹, JIANG Hong^{1,2,*}, YU Shu-Quan¹

1 International Research Center of Spatial Ecology and Ecosystem Ecology, Zhejiang Forestry University, Hangzhou 311300, China

2 International Institute for Earth System Science, Nanjing University, Nanjing 210093, China

Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(6): 3316 ~ 3321.

Abstract: *Alsophila spinulosa* appeared mostly in the early Lias or late Trias of the Mesozoic period. The soil respiration characteristics of *Alsophila spinulosa* forest as a typical living fossil terrestrial ecosystem, was studied. The result indicated that the soil respiration rate of *Alsophila spinulosa* forest is very low in June, the soil respiration rate with litter and without litter are $0.87 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ and $0.89 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, respectively, the two processes have not difference significantly ($P > 0.05$). As a result of invasion by other species, include bamboo, deciduous broad-leaf tree and evergreen broad-leaf tree, *Alsophila spinulosa* with them formed other three mixed forests. Based on the results, we found that the soil respiration rates of the three mixed forests are higher than the *Alsophila spinulosa* forest. The mean soil respiration rate are 2.95 , $2.06 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, and $1.33 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, respectively. It were found that they have significantly difference with *Alsophila spinulosa* forests ($P < 0.001$) after a statistical analysis. The influence of litter for three forests are that the bamboo-*Alsophila spinulosa* mixed forest (MF) and evergreen broadleaf-*Alsophila spinulosa* mixed forest (CF) both have significant differences ($P < 0.001$), however, the deciduous broadleaf-*Alsophila spinulosa* mixed forest (LF) has no significant difference ($P > 0.05$). In a short time period, analyzing the daily dynamic soil respiration rates of the four forests, they display a consistent steady process. The variation of soil temperature and humidity are not closely relative with the soil respiration of four *Alsophila spinulosa* forests.

基金项目: 国家科技部 973 资助项目 (2005CB42207; 2005CB422208); 国家自然科学基金资助项目 (40671132); 国家科技部数据共享平台建设资助项目 (2006DKA32300-08)

收稿日期: 2008-07-31; **修订日期:** 2008-12-19

致谢: 感谢金静和郝云庆在野外工作给予的帮助。

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: Hongjiang.China@gmail.com

Key Words: *Alsophila spinulosa*; ecosystems; soil respiration; litter

桫欏(*Alsophila spinulosa*)又名树蕨、刺桫欏,属真蕨纲桫欏科桫欏属桫欏亚属,是一种高大的树形蕨类植物^[1]。根据化石资料,桫欏科植物最早出现于中生代的早侏罗纪或晚三叠纪,在中生代中期曾广泛分布,极为繁盛。由于地质变迁和气候变化的影响,特别是第四纪冰期的影响,大量物种灭绝,分布范围也大幅变小。目前桫欏科在全世界共有6属500余种,分布于热带亚热带温暖湿润的地区。我国有2属、14种和2变种,分布于西南和华南地区^[2]。目前我国有关桫欏的研究报道主要集中在桫欏特征特性、群落学、生态学、人工繁殖、引种栽培、生理、生化和组织化学等方面^[3~6],关于桫欏生态系统碳循环方面的研究少有报道。

土壤呼吸是指未经扰动的土壤中产生和释放 CO₂的所有代谢过程^[7],土壤呼吸是陆地生态系统碳循环的重要组成部分,是陆地生态系统碳支出的主要途径,是生态系统平衡中重要的组成部分^[8],在全球碳循环中具有重要的意义,其变化对全球碳平衡产生重大影响^[9]。

本文对四川南部乐山市五通桥区的新春桫欏沟自然保护区桫欏不同生态系统土壤呼吸速率进行测定,对桫欏林作为一种孑遗植物所形成的生态系统的土壤碳释放动态,及不同树种入侵后的其他植被类型的土壤碳释放动态进行了解,揭示不同森林类型的土壤呼吸速率对土壤碳库碳输出过程的影响,并为从进化生态的角度理解生态系统功能进化提供一些信息和依据。

1 研究方法

1.1 研究地概况

研究区位于中国四川省南部乐山市五通桥区的新春桫欏沟自然保护区(北纬 29°20′~29°21′,东经 103°47′~103°48′,海拔 360~450m)。保护区面积约为 2300hm²,约有桫欏 2 万余株。该区属中亚热带季风性湿润气候,年均温 17.8℃,1 月份均温 7.3℃,7 月份均温 28℃。年降水量 1106 mm,年平均日照率约 10%~12%,年日照约 650h。土层较厚,质地为砂壤至中壤,土壤 pH 值在 4.5~5.5 之间,为酸性紫色土。

该实验分 4 个林型,分别为桫欏纯林(SF)、桫欏毛竹混交林(MF)、桫欏常绿阔叶林混交林(CF)、桫欏落叶阔叶混交林(LF),不同森林类型的土壤基本概况如表 1。

表 1 不同林型土壤基本特性(平均值)

Table 1 Basic characteristics of the soil in different forest types (mean)

林型 Forest type	pH	全氮(g·kg ⁻¹) Total nitrogen	有机质(g·g ⁻¹) Organic matter	有机碳含量(g·g ⁻¹) Organic carbon	凋落物厚度(cm) Litter thickness
SF	4.88	1.744	21.24	12.32	1.3
MF	4.73	1.003	26.62	15.44	3.8
CF	4.47	1.026	24.93	14.31	3.2
LF	5.06	0.907	23.88	9.23	1.8

1.2 研究方法

土壤呼吸的测定用 LI-Cor8100 土壤碳通量测定仪测定。在 2007 年 6 月,每个林型设有两个 5m×20m 的样地,在每个样地内设有两个处理,①去除凋落物(S);②保留凋落物(S+L),每个处理随机布置 6 个重复。土壤呼吸测定尽量选择晴天或是雨后两天测定,测量前一天在样地内随机选取 2m×3m 的样方 6 个,根据距离树木的远近,土壤 PVC 环的放置有两种位置,距离树基 100cm 内放置 3 个,距离树基 100cm 外放置 3 个,把 PVC 环嵌入表层土壤中,深度约 3~5cm,尽量不破坏原来土壤物理结构,并分别剪除掉地表以上的植物活体部分。每个样地选一天,时间从 8:00~16:00,每 2h 观测 1 次,测定土壤呼吸日动态变化。土壤温度和湿度由 LI-Cor8100 土壤碳通量测定仪携带的探针进行同步测定,大气温度和湿度由 Testo 175-H2 便携式温湿度记录仪测定。测定日大气及土壤状况如表 2。

表 2 测定日天气状况及大气、土壤温湿度变化

Table 2 The weather conditions, temperature and humidity of soil and atmosphere in measured day

样地 Plot	日期 Date	天气状况 Weather conditions	平均大气温度 Atmosphere temperature(°C)	平均大气湿度 Atmosphere humidity(°C)	平均土壤温度 Soil temperature (°C)	平均土壤湿度 Soil humidity (%)
桫欏林 1	6 月 1 号	晴转阵雨	27.40	69.13	20.52 ± 1.07	37.06 ± 2.40
油桐林 1	6 月 3 号	阴	26.76	79.43	20.29 ± 0.33	38.63 ± 4.03
常绿阔叶林 1	6 月 5 号	阴	25.22	80.78	20.58 ± 0.37	39.68 ± 5.08
毛竹林 1	6 月 7 号	阴	24.32	88.46	20.14 ± 0.43	40.29 ± 5.69
桫欏林 2	6 月 10 号	阴转晴	26.36	69.39	20.31 ± 0.95	37.83 ± 3.22
毛竹林 2	6 月 16 号	阴转雨	22.84	90.40	20.22 ± 0.50	41.03 ± 6.43
常绿阔叶林 2	6 月 19 号	阴	23.04	86.13	21.43 ± 0.55	39.48 ± 4.88
毛竹林 2*	6 月 20 号	阴	22.18	90.74	20.63 ± 0.42	40.56 ± 6.05
油桐 2	6 月 21 号	阴转晴	22.58	86.73	20.76 ± 0.49	37.60 ± 4.89
桫欏林 1*	6 月 24 号	阴	25.06	72.53	20.56 ± 1.17	37.88 ± 2.13

* 毛竹样地 2 和桫欏样地 1 由于天气原因进行了重复测定, ± 表示土壤温湿度的变化范围

2 结果与分析

2.1 桫欏生态系统土壤呼吸的特征

由表 3 可以看出,无论是保留凋落物的处理还是去除凋落物的处理,6 月份桫欏林地的土壤呼吸速率值都比较小,其变动范围在 $0.46 \sim 1.22 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $0.45 \sim 1.49 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 平均值分别为 0.89 、 $0.87 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 经 t 检验,保留和去除凋落物两种处理间土壤呼吸无显著差异 ($P > 0.05$),说明桫欏凋落物对林地土壤呼吸的贡献很小。

表 3 桫欏林地土壤呼吸速率

Table 3 Soil respiration rate of *Alsophila spinulosa*

林型 Forest type	处理 Processing	土壤呼吸速率 ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) Soil respiration rate		标准差 S. D	变异系数 (%) CV	样本数 Sample numbers
		平均值 Mean	变化范围 Range			
SF	S	0.87	0.46 ~ 1.22	0.2498	28.77	35
	S + L	0.89	0.45 ~ 1.49	0.2788	31.49	34

在较短时间尺度上,桫欏土壤呼吸动态变化如图 1 所示,两种处理其土壤呼吸变化趋势基本一致,在所测时间内均表现平稳,只有在 8:00 ~ 10:00 的时候有稍微的波动。

2.2 不同桫欏生态系统类型土壤呼吸的特点

对 3 种不同桫欏生态系统的土壤呼吸进行测定,由表 4 可以看出,其他植物入侵以后对桫欏纯林地土壤呼吸有很大的影响,不论去除凋落物还是保留凋落物,都加快了林地土壤呼吸,加强了土壤碳的流失。

方差分析表明,保留凋落物林地土壤呼吸,3 种林型土壤呼吸平均值均和桫欏纯林有极显著差异 ($P < 0.001$),特别是毛竹桫欏混交林表现的更为突出。这主要和毛竹独特的生长型相关,毛竹具有发达的地下根鞭系统,其根系自养呼吸对土壤呼吸有较大的贡献,同时由表 1 的调查可知,毛竹林凋落物层比较厚,所处的

环境湿度较大也会加速其分解。常绿阔叶林桫欏混交林分,物种丰富、土壤中存在更多的微生物,可以促进凋落物更好的分解,也会加快根部分泌物的分解速度。落叶阔叶林桫欏混交林物种比较少,主要是油桐和一些

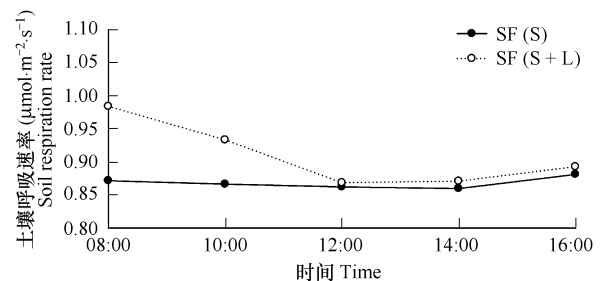


图 1 不同处理桫欏林地土壤呼吸动态变化

Fig. 1 Variation in soil respiration rate of *Alsophila spinulosa* under two treatments

小灌木,其凋落物少,微生物活动也会减少,因而降低其土壤呼吸速率。去除凋落物林地的土壤呼吸表现为, MF、CF 和 SF 达及显著差异($P < 0.001$),可见林分植被类型的改变对土壤内部环境的改变十分明显。LF 和 SF 差异不显著($P > 0.05$),其呼吸速率平均值接近于桫欏去除凋落物的呼吸值,主要是该林分物种单一,凋落物量少,对林地土壤质地、微生物环境等改变较小有关。

表 4 不同桫欏生态系统林地土壤呼吸速率比较

Table 4 Comparison of soil respiration rate in different ecosystems of *Alsophila spinulosa*

林型 Forest type	处理 Processing	土壤呼吸速率($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) Soil respiration rate		标准差 S. D	变异系数 CV	样本数 Sample numbers
		平均值 Mean	变化范围 Range			
MF	S	1.63	0.63 ~ 3.18	0.7031	43.11	40
	S+L	2.95	1.55 ~ 4.31	0.9643	32.68	32
CF	S	1.51	1.04 ~ 2.26	0.2727	18.06	29
	S+L	2.06	1.65 ~ 2.69	0.3131	15.18	26
LF	S	1.11	0.55 ~ 2.06	0.4465	40.24	27
	S+L	1.33	0.91 ~ 2.00	0.3617	27.19	21

对桫欏其他生态系统的土壤呼吸日变化进行测定,可以看出各生态系统不论是哪个处理,土壤呼吸的变化趋势均表现为一致的稳定性。由表 2 的数据可以知道在各林型各个测定日的全天测定期间内土壤温度和湿度的变化较小,特别是土壤温度变化微弱,均小于 2°C ,所以对土壤呼吸的影响也比较微弱。

各生态类型均表现为处理 1 比处理 2 大的趋势,凋落物覆盖对林地土壤呼吸的影响表现的十分明显, MF、CF 两种处理的差异均达极显著水平($P < 0.001$),特别是毛竹桫欏混交林,凋落物对土壤呼吸的贡献率达到 $(47.20 \pm 18.25)\%$ 、常绿阔叶桫欏混交林达到 $(28.95 \pm 16.20)\%$, CF 差异不显著($P > 0.05$),凋落物的贡献率为 $(11.83 \pm 4.85)\%$,可见森林生态系统凋落物分解是地表 CO_2 排放的一个重要来源。

3 讨论

野外实际测定的结果表明,桫欏纯林土壤呼吸值较小,不论是去除凋落物还是保留凋落物,6 月份平均值分别为 $0.87\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $0.89\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,可见桫欏凋落物对土壤呼吸的贡献很小。土壤呼吸主要由 3 个生物学过程(根系呼吸、土壤微生物呼吸、土壤动物呼吸)和一个非生物学(含碳物质的化学氧化作用)过程组成。其中根系呼吸达到占土壤呼吸的 $40\% \sim 70\%$ ^[10],是土壤呼吸的一个重要组成部分,而桫欏植物的根系主要是不定根,所以其地下根系对自养呼吸的贡献较少,且桫欏林林分单一,凋落物和林地微生物的数量和种类都相对较少,一定程度上会影响凋落物的分解,所以凋落物对土壤呼吸的贡献较弱,有关这方面的结论需要更深入的调查和研究。

其他植物入侵桫欏纯林(毛竹、常绿阔叶林、落叶阔叶林),其形成不同森林类型所测的土壤呼吸值均有很大的改变,明显的高于桫欏纯林的土壤呼吸速率,和桫欏纯林的差异均达到极显著水平($P < 0.001$)。不同物种的入侵后其物种组成、冠层结构、生物量、凋落物现存量以及土壤微生物方面均存在差异,同时植被又可以通过影响土壤微生物、土壤结构、土壤有机质的数量、质量以及根系速率等影响了林地的土壤环境^[8,11,12],这些差异和影响变化都会直接或间接影响到土壤呼吸,可见森林类型的改变对土壤呼吸速率有重要的影响。

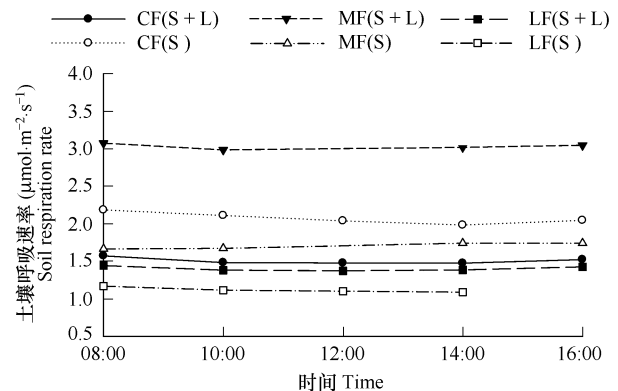


图 2 两种处理不同桫欏生态系统林地土壤呼吸动态变化
Fig. 2 Variation in soil respiration rate in different ecosystems of *Alsophila spinulosa* under two treatments

不同植被类型其凋落物对林地土壤呼吸的贡献率不同,是由于不同林分凋落物的组成、厚度、及林地内湿度不同^[13],凋落物对土壤呼吸的贡献量与森林的群落结构、凋落物的输入量、现存量,凋落物的性质密切相关^[14]。在本次研究中,凋落物对土壤呼吸的贡献率是 MF > CF > LF > SF,其中以 MF 林分凋落物数量多且湿度较大、CF 林凋落物组成种类多,LF 林凋落物组成种类较少,SF 凋落物物种组成及数量最少。一方面林内湿度较高,加快了微生物对凋落物的分解。另一方面不同的凋落物性质和数量也会影响到土壤呼吸的速率。

将土壤呼吸速率和 5cm 土壤温度及土壤湿度回归分析表明,均没有明显的相关性。许多研究认为土壤温度和湿度对土壤呼吸有一定的影响^[15-17],由表 2 的测定知,在整个测定期间,各林型的土壤温度、湿度变幅较小,且平均土壤温度的变幅不超过 2℃,土壤水分的变幅不超过 7%,土壤湿度达到 37% 以上。在一定温度和湿度范围内,土壤温湿度对土壤呼吸的作用很微弱,因而对土壤呼吸的影响没有充分的表现出来,所以有关桫欏不同林生态系统土壤温湿度对土壤呼吸的影响需要长时间多季节的测定。

森林作为陆地系统的主体,也是陆地生态系统中碳的主要储存库,桫欏子遗陆地生态系统曾经繁盛于地球进化的特定时期,为当时的碳循环和植物与土壤的进化做出了重要贡献。利用了遗生态系统的活化石特点,从进化生态的观点开展有关生态系统结构和功能进化的研究,对于了解不同生态系统功能进化对陆地碳循环的贡献具有一定的理论和实践指导意义。

References:

- [1] Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences. *Iconographia Cormophytorum Sinicorum*. Beijing: Science Press, 1982.
- [2] Ao-GH. Research advance in *Cyatheaceae*. *Journal of Neijiang Teachers College*, 2004, 19(6): 79-82.
- [3] Chen F Z, Li S H, Xiang Q X. Comparison of chemical components in the stem, leaf and cortex of *Alsophila spinulosa*. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2006, 34(15): 3710-3711.
- [4] Zhang S Y. Structure features of *Alsophila spinulosa* community in Yongding, Fujian Province. *Journal of Plant Resources and Environment*, 2002, 20(4): 275-279.
- [5] Zhou Z Q, Su Z X, Liao Y M, et al. Advance of biological study on *Alsophila spinulosa*. *Journal of Guizhou Normal University (Natural Sciences)*, 2004, 22(3): 100-103.
- [6] Yuan S L, Liang S. A study of optimum growth factor on *Alsophila spinulosa*. *Guizhou Environmental Protection Science and Technology*, 2002, 8(4): 46-48.
- [7] Singh J S, Gupta S A. Plant decomposition and soil respiration in terrestrial ecosystems. *The Botanical Review*, 1977, 43: 449-528.
- [8] Raich J W, Schlesinger W H. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relation to vegetation and climates. *Tellus*, 1992, 44B: 81-99.
- [9] Schlesinger W H, Andrews J A. Soil respiration and the global carbon cycle. *Biogeochemistry*, 2000, 48: 7-20.
- [10] Wang W J. Methods for the determination of CO₂ flux from non-photosynthetic organs of Tree sand their influences on the results. *Journal of Ecology*, 2004, 24(9): 2056-2067.
- [11] Zhang L J, Wang B, Liu Y Q, et al. A study on the soil respiration under four forest types in Dagangshan in summer and autumn. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*, 2007, 29(1): 72-84.
- [12] Feng C Y, Lu S H, Gao J X, et al. Soil respiration characteristics of different vegetation types in the mountain areas of north China. *Journal of Beijing Forestry University*, 2008, 30(2): 20-26.
- [13] Lin L S, Han S J, Wang Y S, et al. Soil CO₂ flux in several typical forests of Mt. Changbai. *Journal of Beijing Forestry University*, 2004, 23(5): 42-45.
- [14] Deng Q, Liu S Z, Liu J X, et al. Contributions of litter-fall to soil respiration and its affecting factors in southern subtropical forests of China. *Advances in Earth Science*, 2007, (2): 976-986.
- [15] Rayment M B, Jarvis P G. Temporal and spatial variation of soil CO₂ efflux in a Canadian boreal forest. *Soil Biology and Biochemistry*, 2000, 32: 35-45.
- [16] Widea B. Seasonal variation in forest-floor CO₂ exchange in a Swedish coniferous forest. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2002, 111: 283

— 297.

- [17] Zhang D Q, Shi P L, Zhang X Z. Some advance in the main factors controlling soil respiration. *Advance in Earth Sciences*, 2005, 20(7): 778 — 785.

参考文献:

- [1] 中国科学院植物研究所. 中国高等植物图鉴. 北京: 科学出版社, 1982.
- [2] 敖光辉. 我国桫欏研究进展. *内江师范学院学报*, 2004, 19(6): 79 ~ 82.
- [3] 陈封政, 李书华, 向清祥. 濒危植物桫欏不同部位化学组分的比较研究. *安徽农业科学*, 2006, 34(15): 3710 ~ 3711.
- [4] 张思玉. 福建永定县笔架山桫欏群落物种多样性研究. *武汉植物学研究*, 2002, 20(4): 275 ~ 279.
- [5] 周志琼, 苏智先, 廖永梅, 等. 桫欏的生物学研究进展. *贵州师范大学学报(自然科学版)*, 2004, 22(3): 100 ~ 103.
- [6] 袁守良, 梁盛. 桫欏最适宜生长因子初探. *贵州环保科技*, 2002, 8(4): 46 ~ 48.
- [10] 王文杰. 林木非同化器官 CO₂ 通量的测定方法及对结果的影响. *生态学报*, 2004, 24(9): 2056 ~ 2067.
- [11] 张连举, 王兵, 刘苑秋, 等. 大岗山四种林型夏秋季土壤呼吸研究. *江西农业大学学报*, 2007, 29(1): 72 ~ 84.
- [12] 冯朝阳, 吕世海, 高吉喜, 等. 华北山地不同植被类型土壤呼吸特征研究. *北京林业大学学报*, 2008, 30(2): 20 ~ 26.
- [13] 林丽莎, 韩士杰, 王跃思, 等. 长白山四种林分土壤 CO₂ 释放通量的研究. *生态学杂志*, 2004, 23(5): 42 ~ 45.
- [14] 邓琦, 刘世忠, 刘菊秀, 等. 南亚热带森林凋落物对土壤呼吸的贡献及其影响. *地球科学进展*, 2007, (22): 976 ~ 986.
- [17] 张东秋, 石培礼, 张宪洲. 土壤呼吸主要影响因素的研究进展. *地球科学进展*, 2005, 20(7): 778 ~ 785.