

ISSN 1000-0933

CN 11-2031/Q

# 生态学报

## Acta Ecologica Sinica

中国生态学会2011年学术年会专辑



第31卷 第19期 Vol.31 No.19 **2011**

中国生态学会  
中国科学院生态环境研究中心  
科学出版社

主办  
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

# 生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 31 卷 第 19 期

2011 年 10 月 (半月刊)

## 目 次

|                                           |                      |
|-------------------------------------------|----------------------|
| 卷首语 .....                                 | 本刊编辑部 ( I )          |
| 我国生态学研究及其对社会发展的贡献 .....                   | 李文华 (5421)           |
| 生态学的现任务——要在混乱和创新中前进 .....                 | 蒋有绪 (5429)           |
| 发展的生态观:弹性思维 .....                         | 彭少麟 (5433)           |
| 中国森林土壤碳储量与土壤碳过程研究进展 .....                 | 刘世荣,王 晖,栾军伟 (5437)   |
| 区域尺度陆地生态系统碳收支及其循环过程研究进展 .....             | 于贵瑞,方华军,伏玉玲,等 (5449) |
| 流域尺度上的景观格局与河流水质关系研究进展 .....               | 刘丽娟,李小玉,何兴元 (5460)   |
| 中国珍稀濒危孑遗植物珙桐种群的保护 .....                   | 陈 艳,苏智先 (5466)       |
| 水资源投入产出方法研究进展 .....                       | 肖 强,胡 聃,郭 振,等 (5475) |
| 我国害鼠不育控制研究进展 .....                        | 刘汉武,王荣欣,张凤琴,等 (5484) |
| 基于 NDVI 的三江源地区植被生长对气候变化和人类活动的响应研究 .....   | 李辉霞,刘国华,傅伯杰 (5495)   |
| 毛乌素沙地克隆植物对风蚀坑的修复 .....                    | 叶学华,董 鸣 (5505)       |
| 近 50 年黄土高原地区降水时空变化特征 .....                | 王麒麟,范晓辉,王孟本 (5512)   |
| 森林资源可持续状况评价方法 .....                       | 崔国发,邢韶华,姬文元,等 (5524) |
| 黄土丘陵区景观格局对水土流失过程的影响——景观水平与多尺度比较 .....     | 王计平,杨 磊,卫 伟,等 (5531) |
| 未来 10 年黄土高原气候变化对农业和生态环境的影响 .....          | 俄有浩,施 茜,马玉平,等 (5542) |
| 山东近海生态资本价值评估——近海生物资源现存量价值 .....           | 杜国英,陈 尚,夏 涛,等 (5553) |
| 山东近海生态资本价值评估——供给服务价值 .....                | 王 敏,陈 尚,夏 涛,等 (5561) |
| 特大冰冻灾害后大明山常绿阔叶林结构及物种多样性动态 .....           | 朱宏光,李燕群,温远光,等 (5571) |
| 低磷和干旱胁迫对大豆植株干物质积累及磷效率的影响 .....            | 乔振江,蔡昆争,骆世明 (5578)   |
| 中国环保模范城市生态效率评价 .....                      | 尹 科,王如松,姚 亮,等 (5588) |
| 污染足迹及其在区域水污染压力评估中的应用——以太湖流域上游湖州市为例 .....  | 焦雯珺,闵庆文,成升魁,等 (5599) |
| 近二十年来上海不同城市空间尺度绿地的生态效益 .....              | 凌焕然,王 伟,樊正球,等 (5607) |
| 城市社区尺度的生态交通评价指标 .....                     | 戴 欣,周传斌,王如松,等 (5616) |
| 城市生态用地的空间结构及其生态系统服务动态演变——以常州市为例 .....     | 李 锋,叶亚平,宋博文,等 (5623) |
| 中国居民消费隐含的碳排放量变化的驱动因素 .....                | 姚 亮,刘晶茹,王如松 (5632)   |
| 煤矿固废资源化利用的生态效率与碳减排——以淮北市为例 .....          | 张海涛,王如松,胡 聃,等 (5638) |
| 城市遮阴环境变化对大叶黄杨光合过程的影响 .....                | 于盈盈,胡 聃,郭二辉,等 (5646) |
| 广东永汉传统农村的聚落生态观 .....                      | 姜雪婷,严力蛟,后德仟 (5654)   |
| 长江三峡库区昆虫丰富度的海拔梯度格局——气候、土地覆盖及采样效应的影响 ..... | 刘 晔,沈泽昊 (5663)       |
| 东南太平洋智利竹筴鱼资源和渔场的时空变化 .....                | 化成君,张 衡,樊 伟 (5676)   |
| 豚草入侵对中小型土壤动物群落结构特征的影响 .....               | 谢俊芳,全国明,章家恩,等 (5682) |

|                                                                                     |                         |
|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|
| 我国烟粉虱早春发生与秋季消退·····                                                                 | 陈春丽, 鄧军锐, 戈 峰, 等 (5691) |
| 变叶海棠及其伴生植物峨眉小檗的水分利用策略 ·····                                                         | 徐 庆, 王海英, 刘世荣 (5702)    |
| 杉木人工林不同深度土壤 CO <sub>2</sub> 通量·····                                                 | 王 超, 黄群斌, 杨智杰, 等 (5711) |
| 不同浓度下四种除草剂对福寿螺和坑螺的生态毒理效应·····                                                       | 赵 兰, 骆世明, 黎华寿, 等 (5720) |
| 短期寒潮天气对福州市绿地土壤呼吸及组分的影响·····                                                         | 李熙波, 曾文静, 李金全, 等 (5728) |
| 黄土丘陵沟壑区景观格局对流域侵蚀产沙过程的影响——斑块类型水平·····                                                | 王计平, 杨 磊, 卫 伟, 等 (5739) |
| 气候变化对物种分布影响模拟中的不确定性组分分割与制图——以油松为例·····                                              | 张 雷, 刘世荣, 孙鹏森, 等 (5749) |
| 北亚热带马尾松年轮宽度与 NDVI 的关系 ·····                                                         | 王瑞丽, 程瑞梅, 肖文发, 等 (5762) |
| 物种组成对高寒草甸植被冠层降雨截留容量的影响·····                                                         | 余开亮, 陈 宁, 余四胜, 等 (5771) |
| 若尔盖湿地退化过程中土壤水源涵养功能 ·····                                                            | 熊远清, 吴鹏飞, 张洪芝, 等 (5780) |
| 桂西北喀斯特峰丛洼地不同植被演替阶段的土壤脲酶活性·····                                                      | 刘淑娟, 张 伟, 王克林, 等 (5789) |
| 利用混合模型分析地域对国内马尾松生物量的影响 ·····                                                        | 符利勇, 曾伟生, 唐守正 (5797)    |
| 火烧对黔中喀斯特山地马尾松林土壤理化性质的影响·····                                                        | 张 喜, 朱 军, 崔迎春, 等 (5809) |
| 不同培育时间侧柏种基盘苗根系生长和分布·····                                                            | 杨喜田, 董娜琳, 闫东锋, 等 (5818) |
| Cd <sup>2+</sup> 与 CTAB 复合污染对枫香幼苗生长与生理生化特征的影响 ·····                                 | 章 芹, 薛建辉, 刘成刚 (5824)    |
| 3 种入侵植物叶片挥发物对早稻幼苗根的影响 ·····                                                         | 张凤娟, 徐兴友, 郭艾英, 等 (5832) |
| 米槠-木荷林优势种群的年龄结构及其更新策略 ·····                                                         | 宋 坤, 孙 文, 达良俊 (5839)    |
| 褐菖鲉肝 CYP 1A 作为生物标志物监测厦门海域石油污染状况 ·····                                               | 张玉生, 郑榕辉, 陈清福 (5851)    |
| 基于输入-输出流分析的生态网络 $\varphi$ 模式能流 $\rho$ 模式能流测度方法 ·····                                | 李中才, 席旭东, 高 勤, 等 (5860) |
| 期刊基本参数: CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 444 * zh * P * ¥ 70.00 * 1510 * 50 * 2011-10 |                         |



**封面图说:** 胡杨是我国西北干旱沙漠地区原生的极其难得的高大乔木, 树高 15—30 米, 能忍受荒漠中的干旱环境, 对盐碱有极强的忍耐力。为适应干旱气候一树多态叶, 因此胡杨又称“异叶杨”。它对于稳定荒漠河流地带的生态平衡, 防风固沙, 调节绿洲气候和形成肥沃的森林土壤具有十分重要的作用。秋天的胡杨林一片金光灿烂。

**彩图提供:** 陈建伟教授 国家林业局 E-mail: cites.chenjw@163.com

王超, 黄群斌, 杨智杰, 黄蓉, 陈光水. 杉木人工林不同深度土壤 CO<sub>2</sub> 通量. 生态学报, 2011, 31(19): 5711-5719.

Wang C, Huang Q B, Yang Z J, Huang R, Chen G S. Analysis of vertical profiles of soil CO<sub>2</sub> efflux in Chinese fir plantation. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(19): 5711-5719.

## 杉木人工林不同深度土壤 CO<sub>2</sub> 通量

王 超<sup>1,2</sup>, 黄群斌<sup>1,2</sup>, 杨智杰<sup>1,3,\*</sup>, 黄 蓉<sup>1,2</sup>, 陈光水<sup>1,3</sup>

(1. 湿润亚热带山地生态国家重点实验室培育基地, 福州 350007; 2. 福建师范大学地理科学学院, 福州 350007;

3. 福建师范大学地理研究所, 福州 350007)

**摘要:** 土壤 CO<sub>2</sub> 通量具有明显的时间和空间变异性。土壤温度和含水量是影响土壤 CO<sub>2</sub> 通量的重要因素, 同时, 不同深度的土壤 CO<sub>2</sub> 通量对温度和含水量变化的响应差异较大, 因此, 研究土壤 CO<sub>2</sub> 通量和影响因素随土壤深度的变化, 对于准确评估土壤碳排放具有重要意义。选择福建三明杉木人工林 (*Cunninghamia lanceolata*) 作为研究对象, 利用非散射红外 CO<sub>2</sub> 浓度探头和 Li-8100 开路式土壤碳通量系统, 并使用 Fick 扩散法计算了 0—60 cm 深度土壤 CO<sub>2</sub> 的通量, 结果表明: (1) 5 种扩散模型计算的表层 (5 cm) CO<sub>2</sub> 通量与 Li-8100 测量结果均具有显著相关性 ( $P < 0.01$ ), Moldrup 气体扩散模型计算结果较好。(2) 土壤 CO<sub>2</sub> 浓度随深度的增加而升高, 但 60 cm 深度以下土壤 CO<sub>2</sub> 浓度开始降低; 不同深度土壤 CO<sub>2</sub> 浓度的日变化均呈现单峰型; 0—60 cm 土壤 CO<sub>2</sub> 通量日通量均值变化范围为 0.54—2.17  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ; (3) 指数拟合分析显示, 5、10 cm 和 60 cm 深度处土壤 CO<sub>2</sub> 通量与温度具有显著相关性,  $Q_{10}$  值分别为 1.35、2.01 和 4.95。不同深度土壤含水量与 CO<sub>2</sub> 通量的相关性不显著。

**关键词:** 土壤 CO<sub>2</sub> 通量; 扩散; 土壤 CO<sub>2</sub> 浓度; 垂直分布

## Analysis of vertical profiles of soil CO<sub>2</sub> efflux in Chinese fir plantation

WANG Chao<sup>1,2</sup>, HUANG Qunbin<sup>1,2</sup>, YANG Zhijie<sup>1,3,\*</sup>, HUANG Rong<sup>1,2</sup>, CHEN Guangshui<sup>1,3</sup>

1 Cultivation Base of State Key Laboratory of Humid Subtropical Mountain Ecology, Fuzhou 350007, China

2 School of Geographical Science, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China

3 Institute of Geography, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China

**Abstract:** CO<sub>2</sub> flux from the soil to the atmosphere represents a major flux in the global carbon cycle. But there remains some limitations on predicting this flux because of multiple control mechanisms that interact at temporal and spatial scales. Soil can be described in successive layers and the processes and soil properties were described separately for each layers. The CO<sub>2</sub> flux between the layers was driven by diffusion, which depended on CO<sub>2</sub> concentration, porosity, soil temperature and moisture content. Soil CO<sub>2</sub> flux and its major driving factors, especially in vertical profile, may change with great temporal and spatial variability. Compared to deep soil, soil surface have great difference in temperature and moisture content. Therefore, investigation of the differences and influencing factors of soil CO<sub>2</sub> flux changed with soil depth could be essential for accurate evaluation of soil carbon emission. At present, the soil CO<sub>2</sub> vertical gradient measurement method is rapidly gaining popularity because it allows to continuously and automatically measure soil CO<sub>2</sub> flux at different temporal scales with minimal disturbance to the natural soil structure. It is also comparable with other methods. The soil CO<sub>2</sub> gradient method uses Fick's first law to calculate soil CO<sub>2</sub> efflux, relying on both measurements of soil CO<sub>2</sub> profile and on the CO<sub>2</sub> diffusion coefficient in the soil ( $D_s$ ). Determining the latter with confidence is a challenge. Modelling as an approach can potentially be used to determine  $D_s$ . It is possible if the detailed information on some important soil properties (i. e. total soil porosity and air-filled porosity) are available.

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目 (40901126); 教育部创新团队项目 (IRT0960)

**收稿日期:** 2011-06-20; **修订日期:** 2011-07-11

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: daoyang9@163.com

In this study, Fick's diffusion method and five kinds of diffusion coefficient models, including Penman, Marshall, Quirk, and Moldrup, were used to estimate soil CO<sub>2</sub> flux at different depth of the Chinese fir Plantation (*Cunninghamia lanceolata*) in a Base of Forest Management and Technology in Sanming (26°19', 117°36'), Fujian Province, China. The modeling soil CO<sub>2</sub> flux were also compared with the results measured by Li-8100 automated soil CO<sub>2</sub> flux system. The results were as follows: (1) Calculation of surface (at 5cm) CO<sub>2</sub> flux estimated by 5 kinds of diffusion models had significant correlation with Li-8100 measurement result ( $P < 0.01$ ). Among the models obtaining diffusion coefficient, soil CO<sub>2</sub> efflux measured by Moldrup model were the closest to the results of the soil chamber; (2) CO<sub>2</sub> flux in soil different depths had obvious daily variation patterns, and the mean flux were  $(2.17 \pm 0.06)$ ,  $(2.18 \pm 0.13)$ ,  $0.54 \pm 0.04$ ,  $(1.65 \pm 0.20)$  and  $(1.74 \pm 0.04)$   $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  at 5, 10, 20, 40, and 60cm depth respectively (mean $\pm$ SD); And (3) by plotting CO<sub>2</sub> efflux vs. soil temperature, we found that CO<sub>2</sub> efflux correlated exponentially with soil temperature at the depth of 5cm, 10cm, 60cm, with  $Q_{10}$  of 1.35, 2.01, 4.95, respectively. But soil water content was not significant correlation with soil CO<sub>2</sub> efflux. Using CO<sub>2</sub> solid concentration detector can automatically and continuously monitor CO<sub>2</sub> concentration in soil of different depth soil. The estimated CO<sub>2</sub> efflux using this method was close to chamber measurements, suggesting that this method can be use for long-term continuous measurements of soil CO<sub>2</sub> efflux.

**Key Words:** soil CO<sub>2</sub> efflux; diffusion; soil CO<sub>2</sub> concentration; vertical distribution

土壤产生的 CO<sub>2</sub> 是土壤不同深度根系呼吸和微生物分解有机物的共同作用结果。然而,大量的研究只关注土壤表层 CO<sub>2</sub> 通量的年、季变化及其与生物、非生物因子等之间的关系,而对土壤垂直方向上 CO<sub>2</sub> 通量变化的研究关注很少<sup>[1]</sup>。传统测量土壤 CO<sub>2</sub> 通量的方法都只是从土壤表面对通量进行测量,不能够提供 CO<sub>2</sub> 垂直产生的源头以及不同深度土壤 CO<sub>2</sub> 通量的季节动态<sup>[2]</sup>。同时也忽略了影响土壤 CO<sub>2</sub> 通量因子随着深度的变化,如土壤温度,夏季表层土壤温度会比深层高出几个等级;冬季时表层土壤可能结冰数月,而深层土壤温度却可能高于零度。因此,评价不同深度土壤的 CO<sub>2</sub> 通量变化情况以及对不同环境条件的反应十分重要<sup>[3]</sup>。全球变暖的效应也许会随土壤深度增加而出现不同的现象。因此,研究土壤碳对气候变化的反馈时必须考虑其垂直分布特征。

利用垂直扩散法计算土壤 CO<sub>2</sub> 通量对土壤的破坏性小,能够连续自动测量不同时空尺度下的土壤通量变化<sup>[4-7]</sup>。同时,扩散法可以解决腔室法测量时造成土壤表层 CO<sub>2</sub> 浓度升高、压力变大和湿度相关法低估土壤通量的缺陷,能够更准确的计算生态系统的碳通量<sup>[8-9]</sup>。在使用扩散法计算 CO<sub>2</sub> 通量时,土壤 CO<sub>2</sub> 垂直浓度的测量和扩散系数模型的选择十分重要<sup>[10]</sup>,不同的扩散系数模型计算结果可能存在一定的差异。为此,本研究使用新型固体 CO<sub>2</sub> 检测器(GMT220 系列,Vaisala 公司,芬兰)测量土壤 CO<sub>2</sub> 浓度,并结合气体扩散模型对杉木人工林不同深度土壤的 CO<sub>2</sub> 通量进行估算,同时与 Li-8100 动态腔室测量的结果进行比较。本研究的目的是:(1)比较不同扩散模型计算的 CO<sub>2</sub> 通量与 Li-8100 动态腔室法测量值两者的差别;(2)分析不同深度土壤 CO<sub>2</sub> 通量的日变化模式和各深度通量值;(3)初步探讨不同深度土壤 CO<sub>2</sub> 通量与土壤温度、含水量间的关系。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

本实验样地设在福建省三明市陈大镇森林经营科技示范基地(26°19'N, 117°36'E),东南面和西北面分别与戴云山脉和武夷山脉相连;平均海拔 300m,平均坡度 25—35°,属中亚热带季风气候,年均气温 19.1℃,年均降水量 1749mm(主要集中于 3—8 月份),年均蒸发量 1585mm,相对湿度 81%。土壤为沙质页岩发育的红壤,土壤厚度超过 1m。

研究选取本区典型的人工林杉木作为研究对象。杉木林由天然次生林经过皆伐、火烧、挖穴造林形成,造林密度为 1800 株/hm<sup>2</sup>。目前林龄约为 40a,平均树高 18.2m,胸径 15.6cm。杉木林为西北坡向,坡度 30°。林

冠单层,林下植被主要以狗骨柴(*Tricalysia dubia*)、毛冬青(*Ilex pubescens*)、芒萁(*Dicranopteris dichotoma*)为主。2010年12月,分别在杉木林上、中、下布设3块20m×20m的标准样地,每个标准地内挖取1个深度1m的土壤剖面,用来布设测量不同深度土壤CO<sub>2</sub>浓度的装置,同时使用环刀测量各层土壤容重和土壤总孔隙度,并挖取土壤样品测量土壤理化性质,见表1。

表1 杉木林土壤基本理化性质(0—80cm)

Table 1 Basic physical and chemical properties of soil in Chinese fir forest

| 深度<br>Depth<br>/cm | 有机碳<br>Organic C<br>/(g/kg) | 全氮<br>Total N<br>/(g/kg) | 水解氮<br>Hydrolyzable N<br>/(mg/kg) | 全磷<br>Total P<br>/(g/kg) | 有效磷<br>Available P<br>/(mg/kg) | 容重<br>Bulk density<br>/(g/cm <sup>3</sup> ) | 总孔隙度<br>Total porosity<br>/% |
|--------------------|-----------------------------|--------------------------|-----------------------------------|--------------------------|--------------------------------|---------------------------------------------|------------------------------|
| 0—5                | 23.89±3.30                  | 1.03 ± 0.25              | 100.62 ±10.72                     | 0.45 ±0.10               | 6.82 ±1.23                     | 1.37 ±0.15                                  | 51.698±6.58                  |
| 5—10               | 13.85±4.45                  | 0.54 ± 0.02              | 66.43 ±10.29                      | 0.41 ±0.12               | 6.76 ±1.20                     | 1.44 ±0.13                                  | 54.340 ±6.56                 |
| 10—20              | 9.91±2.69                   | 0.21 ± 0.01              | 39.80 ±8.51                       | 0.40 ±0.13               | 6.55 ±1.42                     | 1.40 ±0.05                                  | 52.830±5.35                  |
| 20—40              | 6.68±2.49                   | 0.16 ± 0.01              | 30.45 ±6.86                       | 0.39 ±0.09               | 6.49 ±1.36                     | 1.47 ±0.11                                  | 55.472 ±6.67                 |
| 40—60              | 4.26±0.82                   | 0.17 ± 0.03              | 26.76 ±9.78                       | 0.40 ±0.12               | 6.44 ±2.10                     | 1.54 ±0.07                                  | 58.113±4.38                  |
| 60—80              | 4.02±1.62                   | 0.13 ± 0.01              | 22.60 ±3.12                       | 0.40 ±0.12               | 6.45 ±2.01                     | 1.55 ±0.06                                  | 58.491±5.70                  |

均值±标准差(Mean±SD)

## 1.2 土壤 CO<sub>2</sub> 扩散法

### 1.2.1 土壤 CO<sub>2</sub> 浓度的测量

使用固体 CO<sub>2</sub> 检测器(GMT220 系列, Vaisala 公司, 芬兰)测量不同深度土壤 CO<sub>2</sub> 浓度。这种检测器由探头、传输器和传输线3部分组成,其中探头是以 CARBOCAP® 技术为基础研发的新型硅基非散射红外检测器(NDIR),呈圆柱形,外部被热压的 PTFE 过滤器包裹,既允 CO<sub>2</sub> 气体与检测器自由接触,又能防止水分进入。PTFE 过滤器外部由 POM 材料做成的外壳保护。GMT221 型号检测器长 100mm,直径为 18.5mm,测量范围为 0—2%,精度为±1.5% 量程;GMT222 型号检测器长 145mm,直径为 18.5mm,测量范围为 0—10000ppm,精度为±1.5% 量程(<http://www.vaisala.com>)。

为了测定特定深度的土壤 CO<sub>2</sub> 浓度,在土壤剖面 5、10、20、40、60、80cm 处分别插入 3 根 PVC 管(长 80cm×直径 2.0cm),插入土壤 60cm,外部露出 20cm。然后使用三通接头将每层的 3 根 PVC 管连接起来,测量时将 CO<sub>2</sub> 检测器插入连接管即可。每层的 3 根 PVC 管可以起到混合特定深度 CO<sub>2</sub> 浓度、减小土壤空间异质性的作用。布设 CO<sub>2</sub> 浓度检测器的同时,在土壤剖面的 5、10、20、40、60cm 深度处分别布设 ECH<sub>2</sub>O(Em 50, Decagon 公司,美国)温度和水分探头各 2 个,探头垂直土壤剖面插入土壤 20cm 深。

### 1.2.2 扩散法计算 CO<sub>2</sub> 通量

使用 Fick 扩散法则计算各深度土壤通量( $F_s$ ,  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ):

$$F_s = -D_s \frac{\Delta C(z)}{\Delta z} \quad (1)$$

式中, $D_s$ 为土壤中 CO<sub>2</sub> 的扩散系数( $\text{m}^2/\text{s}$ ); $C$ 为深度  $z$ (m) 土壤 CO<sub>2</sub> 浓度( $\mu\text{mol}/\text{m}^3$ ); $D_s$ 使用公式(2)计算:

$$D_s = \varepsilon D_a \quad (2)$$

式中, $\varepsilon$ 为相对气体扩散系数; $D_a$ 为自由大气 CO<sub>2</sub> 扩散系数( $T=20^\circ\text{C}$  或 293.15K、 $P=1.013\times 10^5 \text{Pa}$  时,  $D_a=1.47\times 10^{-5} \text{m}^2 \text{s}^{-1}$ )<sup>[11]</sup>。

已有许多计算  $\varepsilon$  相对气体扩散的经验模型,本研究选用以下 5 种常见的  $\varepsilon$  模型对土壤 CO<sub>2</sub> 通量进行计算<sup>[12-16]</sup>:

$$\varepsilon = 0.66(\phi - \theta) \quad (3)$$

$$\varepsilon = (\phi - \theta)^{1.5} \quad (4)$$

$$\varepsilon = \frac{(\phi - \theta)^{10/3}}{\phi^2} \quad (5)$$

$$\varepsilon = 0.66(\phi - \theta) \left( \frac{\phi - \theta}{\phi} \right)^{\frac{12-m}{3}} \quad (6)$$

$$\varepsilon = \frac{(\phi - \theta)^{2.5}}{\phi} \quad (7)$$

式中,  $\theta$  为土壤体积含水量 ( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ );  $\phi$  为土壤孔隙度 ( $\phi = \rho_b/\rho_m$ ,  $\rho_b$  为土壤容重 ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ),  $\rho_m$  为土壤比重, 矿质土壤  $\rho_m = 2.65 \text{ g}/\text{cm}^3$ );  $m$  为常数 3。

### 1.3 土壤表层通量测量

为检验扩散法计算土壤  $\text{CO}_2$  通量的准确性, 使用 Li-8100 开路式土壤碳通量系统 (Li-8100, Li-COR 公司, 美国) 连接 20 cm 短期腔室对土壤表层通量进行测量。在每个剖面上部土壤布设 5 个 PVC 呼吸圈 (内径 20 cm × 高 10 cm), 将 PVC 一端削尖, 插入土壤 3—5 cm。土壤表层通量于测量日的 9:00—16:00 进行, 每小时测量 1 次。

为防止挖取土壤剖面对实验的影响, 实验设备于 2010 年 12 月安装完成, 测量于 2011 年 3 月 3—5, 14—17 和 25—27 日进行。土壤  $\text{CO}_2$  浓度 2 s 检测 1 次, 10 s 记录 1 次平均值; 土壤水分和温度每半小时记录 1 次, 所有数据均由自动数据记录器记录。

### 1.4 数据分析

所有统计分析均基于 SPSS 13.0 软件进行, 由 Origin 8.0 软件绘图。以土壤剖面 5 cm 计算的每小时通量作为表层通量与 Li-8100 腔室法测量的通量进行线性拟合。采用指数回归模型分析土壤  $\text{CO}_2$  通量与土壤温度的相关性; 采用一般线性模型分析土壤  $\text{CO}_2$  通量与土壤含水量的相关关系; 采用指数关系模型计算  $Q_{10}$  值<sup>[17]</sup>。显著性水平设定为  $\alpha = 0.05$ 。

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤不同深度 $\text{CO}_2$ 浓度日变化

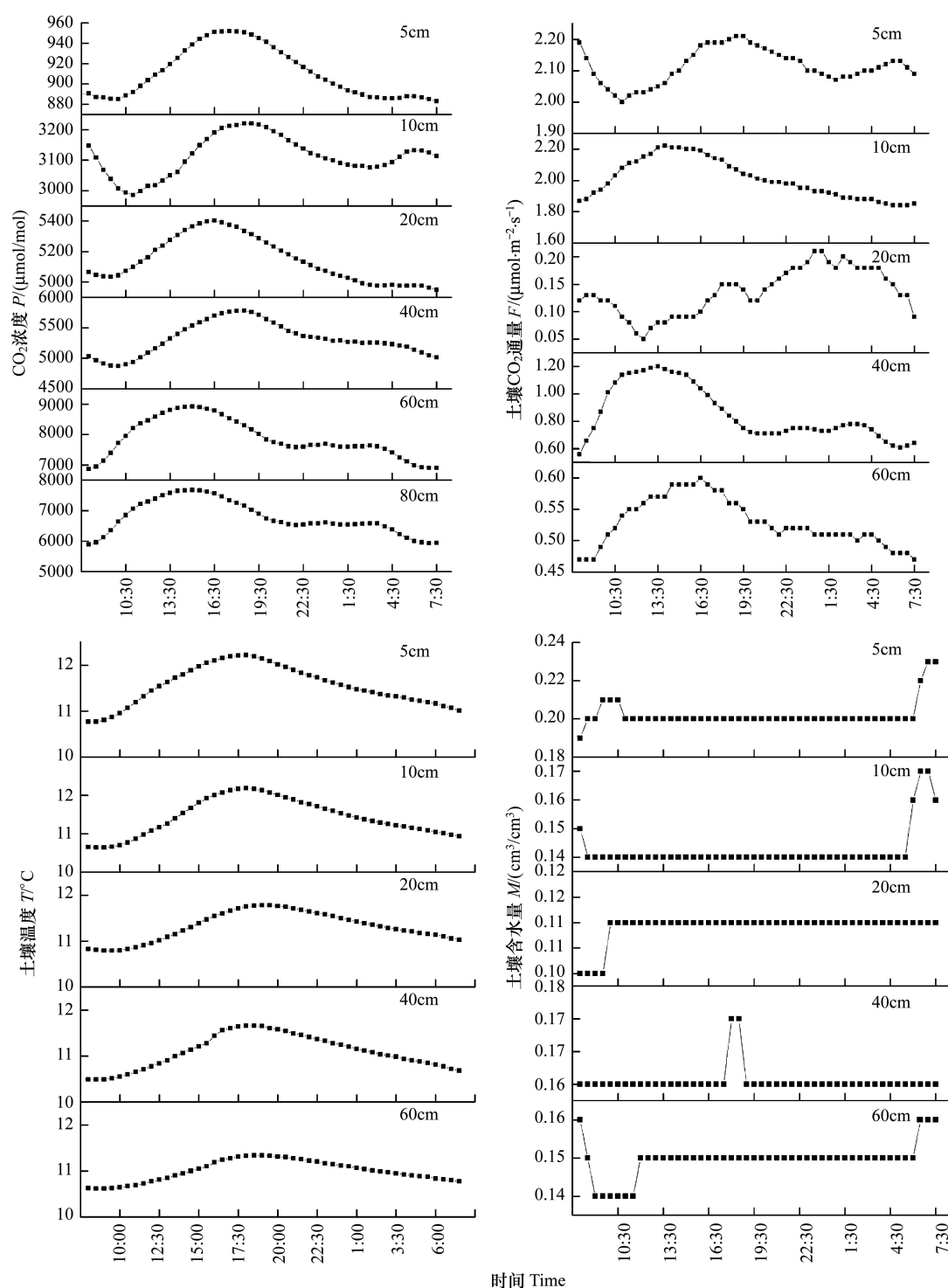
观测期间半小时间隔的土壤  $\text{CO}_2$  浓度的日变化见图 1。5—80 cm 各深度土壤  $\text{CO}_2$  浓度日变化模式相近, 均呈现单峰变化曲线。但峰值出现的时间略有差异。随着深度的增加, 浓度逐渐升高。5、10、20、40、60 和 80 cm 深度土壤  $\text{CO}_2$  浓度日均值分别为 892.6、3049.8、5041.3、5210.8、7714.8 和 6644.2  $\mu\text{mol}/\text{mol}$ 。不同深度土壤温度和含水量的变化趋势基本一致, 一天之内的变化不大 (图 1), 且随着深度增加温度和含水量都有所降低。

### 2.2 扩散法与腔室法结果对比

使用 GMT220 系列  $\text{CO}_2$  浓度检测器原位连续测量了土壤不同深度的  $\text{CO}_2$  浓度变化, 并利用 Fick 第一扩散法则计算通量。本研究选择 5 种广泛使用的气体扩散系数计算模型计算的表层 (5 cm) 通量与 Li-8100 腔室法测量的结果进行对比, 结果见表 2; 扩散法计算的通量值均大于 Li-8100 腔室法实测结果。在 5 种扩散系数模型中, Penman 模型的计算结果的平均值最高, Moldrup 模型计算的结果与实测值最接近。线性回归分析结果显示, 扩散法计算的通量与 Li-8100 腔室法实测值都达到了及显著正相关关系 ( $P < 0.001$ ), 其中 Moldrup 扩散系数模型计算的结果与 Li-8100 腔室法实测值决定性系数 ( $R^2$ ) 最大, 但由于平均值相差较多, 在下面的计算中均选用 Moldrup 系数扩散模型计算的通量分析土壤不同深度  $\text{CO}_2$  通量的变化。

### 2.2 土壤不同深度 $\text{CO}_2$ 通量日变化

使用 Moldrup 气体扩散系数模型计算的各层  $\text{CO}_2$  通量日变化曲线 (图 1)。不同深度土壤  $\text{CO}_2$  的通量日变化模式差异较大; 5 cm 处土壤  $\text{CO}_2$  通量变化曲线呈 “W” 型, 分别在 8:00 和 17:00 左右出现两个峰值, 其中 17:00 的峰值与 5 cm 深度土壤温度峰值出现的时间相近; 10 cm 处土壤  $\text{CO}_2$  通量变化与 10 cm 土壤温度变化模式一致, 随温度的升高, 土壤  $\text{CO}_2$  通量逐渐增加, 而后降低; 与 5 和 10 cm 通量变化不同, 20 cm 深度处土壤  $\text{CO}_2$  通量日变化曲线波动性大, 12:00 左右出现最低值, 最高值出现在凌晨 1:00。造成这种现象可能是因为 20—40 cm 土层是有机层和矿质层的分界区, 土壤  $\text{CO}_2$  在这个区域产生和传输强烈, 气体向上和向下交换的频繁,

图1 土壤不同深度 CO<sub>2</sub> 浓度、通量、土壤温度和含水量的日变化Fig. 1 The daily variations of CO<sub>2</sub> concentration, flux, soil temperature, moisture in depth

使得 CO<sub>2</sub> 日通量没有明显的变化趋势;深层土壤 40 和 60cm 的 CO<sub>2</sub> 通量日变化曲线相近,呈单峰值型,最大值出现在 12:00—14:00 之间。土壤 5—80cm 各深度 CO<sub>2</sub> 通量日均值分别为  $(2.17 \pm 0.06)$ 、 $(2.18 \pm 0.13)$ 、 $(0.54 \pm 0.04)$ 、 $(1.65 \pm 0.20)$  和  $(1.74 \pm 0.04)$   $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  (均值 $\pm$ 标准差)。

### 2.3 土壤 CO<sub>2</sub> 通量与温度、水分的关系

运用指数和线性模型分别对不同深度土壤 CO<sub>2</sub> 通量和土壤温度、水分进行拟合,结果如表 3:5、10 和

60cm 处土壤 CO<sub>2</sub> 通量和土壤温度拟合效果较好, 均达到极显著关系 ( $P < 0.001$ ), 决定系数  $R^2$  分别为 0.293、0.297 和 0.273。而 20、40cm 深度土壤 CO<sub>2</sub> 通量和温度拟合关系不显著, 可能与通量和土壤温度的日变化模式有关(图 1)。土壤 5、10、60cm 处  $Q_{10}$  分别为 1.35、2.01 和 4.95, 即随土壤测量深度的增加,  $Q_{10}$  值也有逐渐变大的趋势。土壤含水量与各深度 CO<sub>2</sub> 通量关系较弱, 主要是因为一天之内土壤含水量的变化不大(图 1)。

表 2 扩散法计算的表层(5cm)通量和 Li-8100 方法测量值的对比

Table 2 Compare soil CO<sub>2</sub> efflux determined by the gradient method with obtained using the Li-8100 soil chamber on days march 3—5, 14—17 and 25—27 in 2011

| 扩散模型<br>Gas diffusivity models | 计算 CO <sub>2</sub> 通量<br>Estimated soil CO <sub>2</sub> flux ( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) |         |         | 方程系数<br>Parameter |          |          |
|--------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------|---------|-------------------|----------|----------|
|                                | Maximum                                                                                               | Minimum | Average | Slope             | Inercept | $R^2$    |
| [12]                           | 5.06                                                                                                  | 3.16    | 4.43    | 1.624             | 1.332    | 0.432 ** |
| [13]                           | 4.86                                                                                                  | 3.11    | 4.27    | 1.589             | 1.239    | 0.517 ** |
| [14]                           | 3.44                                                                                                  | 2.40    | 3.03    | 1.184             | 0.775    | 0.621 ** |
| [15]                           | 2.43                                                                                                  | 1.72    | 2.12    | 0.835             | 0.525    | 0.538 ** |
| [16]                           | 3.79                                                                                                  | 2.54    | 3.34    | 1.276             | 0.903    | 0.640 ** |
| Li-8100 方法                     | 2.05                                                                                                  | 1.58    | 1.82    |                   |          |          |

\* 表示显著性水平为 5%, \*\* 表示显著性水平为 1%

### 3 讨论

#### 3.1 土壤 CO<sub>2</sub> 通量扩散法和腔室法对比

目前对土壤 CO<sub>2</sub> 通量的研究一般采取零散的人工测量方法, 测量频率通常为每月 1—2 次<sup>[18]</sup>, 因此缺失了一年中大部分时间土壤 CO<sub>2</sub> 通量的变化情况, 特别是夜间、极端天气(高温、强降水等)状况下土壤 CO<sub>2</sub> 通量的变化响应, 从而不能准确描绘土壤 CO<sub>2</sub> 通量的日、季节动态及排放量的计算<sup>[19]</sup>。

已有两种自动、连续测量土壤 CO<sub>2</sub> 通量的方法产生, 一种是自动开/闭腔室测量法<sup>[20-21]</sup>, 它可以在土壤表面连续测量土壤 CO<sub>2</sub> 通量, 因此能够整合所有影响土壤 CO<sub>2</sub> 通量变化的因素, 但对深层土壤碳排放及来源的情况不清楚<sup>[22-23]</sup>; 另一种是气体井法和固体 CO<sub>2</sub> 检测器连续测量土壤剖面的 CO<sub>2</sub> 浓度法<sup>[1,4]</sup>。这种方法需要同时测量土壤含水量、总孔隙度、土壤容重和土壤饱和含水量等物理参数来计算 CO<sub>2</sub> 通量<sup>[2]</sup>。尽管这两种方法各有优缺点, 但在实际使用中发现两者具有较好的相关性<sup>[25-26]</sup>。

表 3 不同深度土壤 CO<sub>2</sub> 通量( $F$ )与土壤温( $T$ )、含水量( $M$ )的关系

Table 3 Relationship between soil CO<sub>2</sub> flux ( $F$ ) with soil temperature( $T$ ) and soil moisture( $M$ ) in depth

| 深度<br>Depth/cm | 土壤温度 Soil temperature/( $T/^{\circ}\text{C}$ ) |       |          |          | 土壤含水量 Soil moisture( $M/(\text{cm}^3/\text{cm}^3)$ ) |       |       |
|----------------|------------------------------------------------|-------|----------|----------|------------------------------------------------------|-------|-------|
|                | 参数 Parameter                                   |       |          |          | 参数 Parameter                                         |       |       |
|                | $a$                                            | $b$   | $Q_{10}$ | $R^2$    | $a$                                                  | $b$   | $R^2$ |
| 5              | 1.436                                          | 0.033 | 1.35     | 0.293 ** | -1.444                                               | 2.405 | 0.033 |
| 10             | 0.900                                          | 0.070 | 2.01     | 0.297 ** | -7.351                                               | 3.054 | 0.179 |
| 20             | 0.002                                          | 0.377 | —        | 0.122    | 1.159                                                | 0.009 | 0.006 |
| 40             | 0.631                                          | 0.025 | 1.28     | 0.002    | 0.522                                                | 0.776 | 0.000 |
| 60             | 0.090                                          | 0.161 | 4.95     | 0.273 ** | -1.227                                               | 0.713 | 0.022 |

\* 表示显著性水平为 5%, \*\* 表示显著性水平为 1%

在使用扩散法计算 CO<sub>2</sub> 量时, 土壤气体的扩散系数是一个重要的参数<sup>[27]</sup>。许多学者通过野外实验和室内模拟的方法总结出一些计算气体扩散系数的经验模型, 并使用这些模型对土壤不同深度的 CO<sub>2</sub> 通量计算, 同时与实测结果进行比较<sup>[5,26]</sup>。Jassal 等<sup>[24]</sup>研究发现, 在土壤气体孔隙度较低时, Penman 和 Marshall 的模型计算的结果比实际偏高, 而 Millington 和 Moldrup 模型的结果又偏低。Iyamada 等<sup>[28]</sup>研究也表明, Millington 模型在土壤气体孔隙度偏低和偏高时, 分别低估和高估了土壤实际的碳通量; Pingintha 等<sup>[26]</sup>使用 6 种扩散模型

计算结果与 Li-8100 腔室法进行对比发现,扩散法计算结果均大于腔室法,其中 Penman 模型的结果显著高于腔室法,而 Moldrup 模型的模拟情况最好。但线性回归分析显示,所有的扩散模型计算结果与腔室法均存在极显著正相关性。本研究结果与 Pingintha 等<sup>[26]</sup>结果类似,腔室法实际测量的结果都小于扩散法计算的结果(表 2),Penman、Marshall、Quirk、Moldrup 和 Moldrup 模型的结果分别比腔室法测量数值高 58.9%、57.4%、10.0%、14.2% 和 45%,其中 Moldrup 的模拟结果最接近实测值,这可能是因为 Moldrup 模型是对 Penman 和 Quirk 2 个模型的整合,能够更好的模拟土壤中 CO<sub>2</sub> 的扩散过程<sup>[26]</sup>。

### 3.2 土壤不同深度 CO<sub>2</sub> 通量的变化规律

土壤 CO<sub>2</sub> 释放可以简单的划分为 2 个生物过程:异氧呼吸(土壤微生物和土壤动物)和自养呼吸(植物根系)<sup>[29-30]</sup>。不同深度的土壤中植物的根系分布和有机质含量的差异导致 CO<sub>2</sub> 的浓度和通量具有明显的差异。本研究中,杉木林不同深度土壤 CO<sub>2</sub> 浓度具变化明显,随深度的增加土壤 CO<sub>2</sub> 浓度逐渐升高(图 1),但在 60cm 下土壤 CO<sub>2</sub> 浓度开始下降,主要是因为深层土壤有机碳含量低所致(表 1)。各深度 CO<sub>2</sub> 浓度日变化均表现为明显的单峰型,峰值出现在 15:00—17:00 之间。土壤 CO<sub>2</sub> 通量在不同深度的变化也较明显,表层 5、10cm 通量的均值分别为 2.17、2.18  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ,其一天内的排放量占总排放量的 52.4%,这与一些报道的结果类似,Davidson 等<sup>[10]</sup>对亚马逊森林和耕地的研究发现,1m 深度内土壤 CO<sub>2</sub> 排放占总土壤(3m 深度)总排放量的 70%—80%;Gaudinski 等<sup>[31]</sup>研究表明,温带森林土壤表层 15cm 内土壤 CO<sub>2</sub> 通量占总呼吸的 63%;Davidson 等<sup>[32]</sup>在 Massachusetts 阔叶混交林研究得出,0 层土壤对总呼吸的贡献率在 40%—48% 左右。但本研究同时发现,深层次(40cm 以下)土壤 CO<sub>2</sub> 通量在总排放量中占有较大的比重(41%),这可能因为深层次土壤容重较大,土壤孔隙度低,CO<sub>2</sub> 长期存留在底层不能释放出来,导致计算通量较大。Pumpanen 等<sup>[33]</sup>研究发现,冬季底层土壤 CO<sub>2</sub> 通量对总通量的贡献率大于夏季;而 Risk 等<sup>[34]</sup>的研究则证明深层土壤在生长季节的后期对土壤总通量的贡献率较大。

### 3.3 不同深度土壤 CO<sub>2</sub> 通量对土壤温度和含水量的响应

温度和含水量是影响土壤 CO<sub>2</sub> 排放的两个重要因素,同时它们具有明显的空间变异性,尤其在土壤垂直方向<sup>[32]</sup>。春季土壤温度从表层向底部慢慢升高,而秋季土壤又从表层开始降温<sup>[35]</sup>;土壤表层的含水量变化一般比深度变化大<sup>[32]</sup>。因此,不同深度土壤碳排放会因为温度和含水量的波动而发生变化。本研究中,5、10 和 60cm 深度土壤 CO<sub>2</sub> 通量与温度具有显著性关系,计算的  $Q_{10}$  值分别为 1.35、2.01 和 4.95。随着土壤深度的增加,土壤 CO<sub>2</sub> 通量的温度敏感性( $Q_{10}$ )也逐渐增大,这主要与不同深度土壤有机碳对温度的敏感性有关。Goulden 等<sup>[36]</sup>对加拿大黑云杉林研究发现,深层次土壤有机碳对温度的敏感性比表层更高;Hirsch 等<sup>[27]</sup>研究得出,原始黑云杉深层土壤 CO<sub>2</sub> 通量与温度呈线性关系;Risk 等<sup>[1]</sup>在加拿大 Nova Scotia 森林的研究也证明了深层次土壤 CO<sub>2</sub> 通量与温度呈正相关性。但本研究中 20 和 40cm 处土壤 CO<sub>2</sub> 通量与温度间的相关性没有达到显著性,这主要因为:计算各深度土壤通量时,假定土壤是一个均质体,CO<sub>2</sub> 在土壤中主要以扩散形式运动<sup>[37]</sup>。而本研究中杉木林土壤在 20—40cm 深度处,土壤性质不均一,10—20、20—40 和 40—60cm 间土壤容重存在显著差异(表 1),导致土壤孔隙度变异较大,使用公式(1)计算一定深度的 CO<sub>2</sub> 通量的精度可能受到影响。

在本研究中,不同深度土壤含水量与土壤 CO<sub>2</sub> 通量的关系均不显著,这可能与观测的时间尺度有关,因为一天内土壤含水量的变化较小。同时,土壤垂直方向上 CO<sub>2</sub> 通量与含水量的关系还存在一定的争议,因此需要长时间的观测,以得出更一般的结论<sup>[32]</sup>。

### References:

- [1] Risk D, Kellman L, Beltrami H. Carbon dioxide in soil profiles: production and temperature dependence. *Geophysical Research Letters*, 2002, 29 (6): 11-14.
- [2] Pumpanen J, Ilvesniemi H, Kulmala L, Siivola E, Laakso H, Kolari P, Helenelund C, Laakso M, Uusimaa M, Hari P. Respiration in boreal

- forest soil as determined from carbon dioxide concentration profile. *Soil Science Society of America Journal*, 2008, 72(5): 1187-1196.
- [ 3 ] Hashimoto S, Tanaka N, Kume T, Yoshifuji N, Hotta N, Tanaka K, Suzuki M. Seasonality of vertically partitioned soil CO<sub>2</sub> production in temperate and tropical forest. *Journal of Forest Research*, 2007, 12(3): 209-221.
- [ 4 ] Liang N, Hirano T, Zheng Z M, Tang J, Fujinuma Y. Continuous measurement of soil CO<sub>2</sub> efflux in a larch forest by automated chamber and concentration gradient techniques. *Biogeosciences Discussions*, 2010, 7(1): 1345-1375.
- [ 5 ] Tang J W, Baldocchi D D, Qi Y, Xu L K. Assessing soil CO<sub>2</sub> efflux using continuous measurements of CO<sub>2</sub> profiles in soils with small solid-state sensors. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2003, 118(3): 207-220.
- [ 6 ] DeSutter T M, Sauer T J, Parkin T B, Heitman J L. A subsurface, closed-loop system for soil carbon dioxide and its application to the gradient efflux approach. *Soil Science Society of America Journal*, 2008, 72(1): 126-134.
- [ 7 ] Vargas R, Allen M F. Diel patterns of soil respiration in a tropical forest after Hurricane Wilma. *Journal Geophysical Research*, 2008, 113(G3): 1-10.
- [ 8 ] Baldocchi D, Tang J W, Xu L K. How switches and lags in biophysical regulators affect spatial-temporal variation of soil respiration in an oak-grass savanna. *Journal Geophysical Research*, 2006, 111(G2): 479-492.
- [ 9 ] Myklebust M C, Hipps L E, Ryel R J. Comparison of eddy covariance, chamber, and gradient methods of measuring soil CO<sub>2</sub> efflux in an annual semi-arid grass, *Bromus tectorum*. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2008, 148(11): 1894-1907.
- [ 10 ] Davidson E A, Trumbore S E. Gas diffusivity and production of CO<sub>2</sub> in deep soils of the eastern Amazon. *Tellus B*, 1995, 47(5): 550-565.
- [ 11 ] Jones H G. *Plants and Microclimate: A Quantitative Approach to Environmental Plant Physiology*. 2nd ed. New York: Cambridge University Press, 1992: 51-51.
- [ 12 ] Penman H L. Gas and vapour movements in the soil I. The diffusion of vapours through porous solids. *The Journal of Agricultural Science*, 1940, 30(3): 437-462.
- [ 13 ] Millington R J. Gas diffusion in porous media. *Science*, 1959, 130(3367): 100-102.
- [ 14 ] Millington R J, Quirk J P. Permeability of porous solids. *Transactions of the Faraday Society*, 1961, 57: 1200-1207.
- [ 15 ] Moldrup P, Olesen T, Rolston D E, Yamaguchi T. Modeling diffusion and reaction in soils: VII. Predicting gas and ion diffusivity in undisturbed and sieved soils. *Soil Science*, 1997, 162(9): 632-640.
- [ 16 ] Moldrup P, Olesen T, Gamst J, Schjønning P, Yamaguchi T, Rolston D E. Predicting the gas diffusion coefficient in repacked soil: water-induced linear reduction model. *Soil Science Society of America Journal*, 2000, 64(5): 1588-1594.
- [ 17 ] Sheng H, Yang Y S, Yang Z J, Chen G S, Xie J S, Guo J F, Zou S Q. The dynamic response of soil respiration to land-use changes in subtropical China. *Global Change Biology*, 2010, 16(3): 1107-1121.
- [ 18 ] Parkin T B, Kaspar T C. Temporal variability of soil carbon dioxide flux; effect of sampling frequency on cumulative carbon loss estimation. *Soil Science Society of America Journal*, 2004, 68(4): 1234-1241.
- [ 19 ] Bond-Lamberty B, Thomson A. Temperature-associated increases in the global soil respiration record. *Nature*, 2010, 464(7288): 579-582.
- [ 20 ] Irvine J, Law B E, Martin J G, Vickers D. Interannual variation in soil CO<sub>2</sub> efflux and the response of root respiration to climate and canopy gas exchange in mature ponderosa pine. *Global Change Biology*, 2008, 14(12): 2848-2859.
- [ 21 ] Pumpanen J, Kolari P, Ilvesniemi H, Minkinen K, Vesala T, Niinistö S, Lohila A, Larmola T, Morero M, Pihlatie M, Janssens I, Yuste J C, Grünzweig J M, Reth S, Subke J A, Savage K, Kutsch W, Østregren G, Ziegler W, Anthoni P, Lindroth A, Hari P. Comparison of different chamber techniques for measuring soil CO<sub>2</sub> efflux. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2004, 123(3/4): 159-176.
- [ 22 ] Hutchinson G L, Rochette P. Non-flow-through steady-state chambers for measuring soil respiration; numerical evaluation of their performance. *Soil Science Society of America Journal*, 2003, 67(1): 166-180.
- [ 23 ] Savage K E, Davidson E A. A comparison of manual and automated systems for soil CO<sub>2</sub> flux measurements; trade-offs between spatial and temporal resolution. *Journal of Experimental Botany*, 2003, 54(384): 891-899.
- [ 24 ] Jassal R, Black A, Novak M, Novak M, Morgenstern K, Nesci Z, Gaumont-Guay D. Relationship between soil CO<sub>2</sub> concentrations and forest floor CO<sub>2</sub> effluxes. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2005, 130(3): 176-192.
- [ 25 ] Tang J W, Laurent M, Alexander G, Cheng W X, Alien H G. Continuous measurements of soil respiration with and without roots in a ponderosa pine plantation in the Sierra Nevada Mountains. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2005, 132(3/4): 212-227.
- [ 26 ] Pingintha N, Leclerc M Y, Beasley J P Jr, Zhang G S, Senthong C. Assessment of the soil CO<sub>2</sub> gradient method for soil CO<sub>2</sub> efflux measurements; comparison of six models in the calculation of the relative gas diffusion coefficient. *Tellus B*, 2010, 62(1): 47-58.
- [ 27 ] Hirsch A I, Trumbore S E, Goulden M L. Direct measurement of the deep soil respiration accompanying seasonal thawing of a boreal forest soil. *Journal of Geophysical Research*, 2002, 107: 8221-8230.
- [ 28 ] Liyama I, Hasegawa S. Gas diffusion coefficient of undisturbed peat soils. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2005, 51(3): 431-435.

- [29] Hanson P J, Edwards N T, Garten C T, Andrews J A. Separating root and soil microbial contributions to soil respiration: a review of methods and observations. *Biogeochemistry*, 2000, 48(1): 115-146.
- [30] Ryan M G, Law B E. Interpreting, measuring, and modeling soil respiration. *Biogeochemistry*, 2005, 73(1): 3-27.
- [31] Gaudinski J B, Trumbore S E, Davidson E A, Zheng S H. Soil carbon cycling in a temperate forest: radiocarbon based estimates of residence times, sequestration rates and partitioning of fluxes. *Biogeochemistry*, 2000, 51(1): 33-69.
- [32] Davidson E A, Savage K E, Trumbore S E, Borken W. Vertical partitioning of CO<sub>2</sub> production within a temperate forest soil. *Global Change Biology*, 2006, 12(6): 944-956.
- [33] Pumpanen J, Ilvesniemi H, Hari P. A process-based model for predicting soil carbon dioxide efflux and concentration. *Soil Science Society of America Journal*, 2003, 67(2): 402-413.
- [34] Risk D, Kellman L, Beltrami H. A new method for in situ soil gas diffusivity measurement and applications in the monitoring of subsurface CO<sub>2</sub> production. *Journal of Geophysical Research*, 2008, 113(G2): 1-9.
- [35] Subke J A, Reichstein M, Tenhunen J D. Explaining temporal variation in soil CO<sub>2</sub> efflux in a mature spruce forest in Southern Germany. *Soil Biology and Biochemistry*, 2003, 35(11): 1467-1483.
- [36] Goulden M L, Wofsy S C, Harden J W, Trumbore S E, Crill P M, Gower S T, Fries T, Daube B C, Fan S M, Sutton D J, Bazzaz A, Munger J W. Sensitivity of boreal forest carbon balance to soil thaw. *Science*, 1998, 279(5348): 214-217.
- [37] Koehler B, Zehe E, Corre M D, Veldkamp E. An inverse analysis reveals limitations of the soil-CO<sub>2</sub> profile method to calculate CO<sub>2</sub> production and efflux for well-structured soils. *Biogeosciences*, 2010, 7(8): 2311-2325.

# ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 31, No. 19 October, 2011 (Semimonthly)

## CONTENTS

|                                                                                                                                                                                       |                                                        |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|
| Ecology research and its effects on social development in China .....                                                                                                                 | LI Wenhua (5421)                                       |
| The current mission of ecology-advancing under the situation of chaos and innovation .....                                                                                            | JIANG Youxu (5429)                                     |
| Resilience thinking: development of ecological concept .....                                                                                                                          | PENG Shaolin (5433)                                    |
| A review of research progress and future prospective of forest soil carbon stock and soil carbon process in China .....                                                               | LIU Shirong, WANG Hui, LUAN Junwei (5437)              |
| Research on carbon budget and carbon cycle of terrestrial ecosystems in regional scale: a review .....                                                                                | YU Guirui, FANG Huajun, FU Yuling, et al (5449)        |
| Advances in the studying of the relationship between landscape pattern and river water quality at the watershed scale .....                                                           | LIU Lijuan, LI Xiaoyu, HE Xingyuan (5460)              |
| Research on the protection of <i>Davidia involucrata</i> populations, a rare and endangered plant endemic to China .....                                                              | CHEN Yan, SU Zhixian (5466)                            |
| Progress on water resources input-output analysis .....                                                                                                                               | XIAO Qiang, HU Dan, GUO Zhen, et al (5475)             |
| Research advances of contraception control of rodent pest in China ...                                                                                                                | LIU Hanwu, WANG Rongxin, ZHANG Fengqin, et al (5484)   |
| Response of vegetation to climate change and human activity based on NDVI in the Three-River Headwaters region .....                                                                  | LI Huixia, LIU Guohua, FU Bojie (5495)                 |
| Remediation of blowout pits by clonal plants in Mu Us Sandland .....                                                                                                                  | YE Xuehua, DONG Ming (5505)                            |
| Precipitation trends during 1961—2010 in the Loess Plateau region of China .....                                                                                                      | WANG Qixiang, FAN Xiaohui, WANG Mengben (5512)         |
| An evaluation method for forest resources sustainability .....                                                                                                                        | CUI Guofa, XING Shaohua, JI Wenyuan, et al (5524)      |
| Effects of landscape patterns on soil and water loss in the hilly area of loess plateau in China: landscape-level and comparison at multiscale .....                                  | WANG Jiping, YANG Lei, WEI Wei, et al (5531)           |
| The impacts of future climatic change on agricultures and eco-environment of Loess Plateau in next decade .....                                                                       | E Youhao, SHI Qian, MA Yuping, et al (5542)            |
| Valuation of ecological capital in Shandong coastal waters: standing stock value of biological resources .....                                                                        | DU Guoying, CHEN Shang, XIA Tao, et al (5553)          |
| Valuation of ecological capital in Shandong coastal waters: provisioning service value .....                                                                                          | WANG Min, CHEN Shang, XIA Tao, et al (5561)            |
| The dynamics of the structure and plant species diversity of evergreen broadleaved forests in Damingshan National Nature Reserve after a severe ice storm damage in 2008, China ..... | ZHU Hongguang, LI Yanqun, WEN Yuanguang, et al (5571)  |
| Interactive effects of low phosphorus and drought stress on dry matter accumulation and phosphorus efficiency of soybean plants .....                                                 | QIAO Zhenjiang, CAI Kunzheng, LUO Shiming (5578)       |
| The eco-efficiency evaluation of the model city for environmental protection in China .....                                                                                           | YIN Ke, WANG Rusong, YAO Liang, et al (5588)           |
| Pollution footprint and its application in regional water pollution pressure assessment: a case study of Huzhou City in the upstream of Taihu Lake Watershed .....                    | JIAO Wenjun, MIN Qingwen, CHENG Shengkui, et al (5599) |
| Ecological effect of green space of Shanghai in different spatial scales in past 20 years .....                                                                                       | LING Huanran, WANG Wei, FAN Zhengqiu, et al (5607)     |
| Assessing indicators of eco-mobility in the scale of urban communities ...                                                                                                            | DAI Xin, ZHOU Chuanbin, WANG Rusong, et al (5616)      |
| Spatial structure of urban ecological land and its dynamic development of ecosystem services: a case study in Changzhou City, China .....                                             | LI Feng, YE Yaping, SONG Bowen, et al (5623)           |
| The carbon emissions embodied in Chinese household consumption by the driving factors .....                                                                                           | YAO Liang, LIU Jingru, WANG Rusong (5632)              |
| The research on eco-efficiency and carbon reduction of recycling coal mining solid wastes: a case study of Huabei City, China .....                                                   | ZHANG Haitao, WANG Rusong, HU Dan, et al (5638)        |
| Effects of urban shading on photosynthesis of <i>Euonymus japonicas</i> .....                                                                                                         | YU Yingying, HU Dan, GUO Erhui, et al (5646)           |

|                                                                                                                                                                               |                                                         |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|
| Ecological view of traditional rural settlements: a case study in Yongnan of Guangdong Province .....                                                                         | JIANG Xueting, YAN Lijiao, HOU Deqian (5654)            |
| The altitudinal pattern of insect species richness in the Three Gorge Reservoir Region of the Yangtze River: effects of land cover, climate and sampling effort .....         | LIU Ye, SHEN Zehao (5663)                               |
| Spatial-temporal patterns of fishing grounds and resource of Chilean jack mackerel ( <i>Trachurus murphyi</i> ) in the Southeast Pacific Ocean .....                          | HUA Chengjun, ZHANG Heng, FAN Wei (5676)                |
| Impacts of <i>Ambrosia artemisiifolia</i> invasion on community structure of soil meso- and micro- fauna .....                                                                | XIE Junfang, QUAN Guoming, ZHANG Jiaen, et al (5682)    |
| Appearance in spring and disappearance in autumn of <i>Bemisia tabaci</i> in China .....                                                                                      | CHEN Chunli, ZHI Junrui, GE Feng, et al (5691)          |
| Water use strategies of <i>Malus toringoides</i> and its accompanying plant species <i>Berberis aemulans</i> .....                                                            | XU Qing, WANG Haiying, LIU Shirong (5702)               |
| Analysis of vertical profiles of soil CO <sub>2</sub> efflux in Chinese fir plantation .....                                                                                  | WANG Chao, HUANG Qunbin, YANG Zhijie, et al (5711)      |
| Eco-toxicological effects of four herbicides on typical aquatic snail <i>Pomacea canaliculata</i> and <i>Crown conchs</i> .....                                               | ZHAO Lan, LUO Shiming, LI Huashou, et al (5720)         |
| Effects of short-term cold-air outbreak on soil respiration and its components of subtropical urban green spaces .....                                                        | LI Xibo, ZENG Wenjing, LI Jinqian, et al (5728)         |
| Effects of landscape pattern on watershed soil erosion and sediment delivery in hilly and gully region of the Loess Plateau of China: patch class-level .....                 | WANG Jiping, YANG Lei, WEI Wei, et al (5739)            |
| Partitioning and mapping the sources of variations in the ensemble forecasting of species distribution under climate change: a case study of <i>Pinus tabulaeformis</i> ..... | ZHANG Lei, LIU Shirong, SUN Pengsen, et al (5749)       |
| Relationship between masson pine tree-ring width and NDVI in North Subtropical Region .....                                                                                   | WANG Ruili, CHENG Ruimei, XIAO Wenfa, et al (5762)      |
| Effects of species composition on canopy rainfall storage capacity in an alpine meadow, China .....                                                                           | YU Kailiang, CHEN Ning, YU Sisheng, et al (5771)        |
| Dynamics of soil water conservation during the degradation process of the Zoigê Alpine Wetland .....                                                                          | XIONG Yuanqing, WU Pengfei, ZHANG Hongzhi, et al (5780) |
| Soil urease activity during different vegetation successions in karst peak-cluster depression area of northwest Guangxi, China .....                                          | LIU Shujuan, ZHANG Wei, WANG Kelin, et al (5789)        |
| Analysis the effect of region impacting on the biomass of domestic Masson pine using mixed model .....                                                                        | FU Liyong, ZENG Weisheng, TANG Shouzheng (5797)         |
| Influence of fire on a <i>Pinus massoniana</i> soil in a karst mountain area at the center of Guizhou Province, China .....                                                   | ZHANG Xi, ZHU Jun, CUI Yingchun, et al (5809)           |
| The growth and distribution of <i>Platykladus orientalis</i> Seed-base seedling root in different culture periods .....                                                       | YANG Xitian, DONG Nalin, YAN Dongfeng, et al (5818)     |
| Effects of complex pollution of CTAB and Cd <sup>2+</sup> on the growth of Chinese sweetgum seedlings .....                                                                   | ZHANG Qin, XUE Jianhui, LIU Chenggang (5824)            |
| The influence of volatiles of three invasive plants on the roots of upland rice seedlings .....                                                                               | ZHANG Fengjuan, XU Xingyou, GUO Aiying, et al (5832)    |
| Age structure and regeneration strategy of the dominant species in a <i>Castanopsis carlesii</i> - <i>Schima superba</i> forest .....                                         | SONG Kun, SUN Wen, DA Liangjun (5839)                   |
| A study on application of hepatic microsomal CYP1A biomarkers from <i>Sebastiscus marmoratus</i> to monitoring oil pollution in Xiamen waters .....                           | ZHANG Yusheng, ZHENG Ronghui, CHEN Qingfu (5851)        |
| The method of measuring energy flow $\phi$ and $p$ in ecological networks by input-output flow analysis .....                                                                 | LI Zhongcai, XI Xudong, GAO Qin, et al (5860)           |

# 2009 年度生物学科总被引频次和影响因子前 10 名期刊★

(源于 2010 年版 CSTPCD 数据库)

| 排序<br>Order | 期刊<br>Journal                           | 总被引频次<br>Total citation | 排序<br>Order | 期刊<br>Journal | 影响因子<br>Impact factor |
|-------------|-----------------------------------------|-------------------------|-------------|---------------|-----------------------|
| 1           | 生态学报                                    | 11764                   | 1           | 生态学报          | 1.812                 |
| 2           | 应用生态学报                                  | 9430                    | 2           | 植物生态学报        | 1.771                 |
| 3           | 植物生态学报                                  | 4384                    | 3           | 应用生态学报        | 1.733                 |
| 4           | 西北植物学报                                  | 4177                    | 4           | 生物多样性         | 1.553                 |
| 5           | 生态学杂志                                   | 4048                    | 5           | 生态学杂志         | 1.396                 |
| 6           | 植物生理学通讯                                 | 3362                    | 6           | 西北植物学报        | 0.986                 |
| 7           | JOURNAL OF INTEGRATIVE<br>PLANT BIOLOGY | 3327                    | 7           | 兽类学报          | 0.894                 |
| 8           | MOLECULAR PLANT                         | 1788                    | 8           | CELL RESEARCH | 0.873                 |
| 9           | 水生生物学报                                  | 1773                    | 9           | 植物学报          | 0.841                 |
| 10          | 遗传学报                                    | 1667                    | 10          | 植物研究          | 0.809                 |

★《生态学报》2009 年在核心版的 1964 种科技期刊排序中总被引频次 11764 次,全国排名第 1;影响因子 1.812,全国排名第 14;第 1—9 届连续 9 年入围中国百种杰出学术期刊;中国精品科技期刊

编辑部主任 孔红梅

执行编辑 刘天星 段 靖

生 态 学 报  
(SHENGTAI XUEBAO)  
(半月刊 1981 年 3 月创刊)  
第 31 卷 第 19 期 (2011 年 10 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA  
(Semimonthly, Started in 1981)  
Vol. 31 No. 19 2011

|               |                                                                                                                    |                 |                                                                                                                                                                                 |
|---------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 编 辑           | 《生态学报》编辑部<br>地址:北京海淀区双清路 18 号<br>邮政编码:100085<br>电话:(010)62941099<br>www.ecologica.cn<br>shengtaixuebao@rcees.ac.cn | Edited by       | Editorial board of<br>ACTA ECOLOGICA SINICA<br>Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China<br>Tel:(010)62941099<br>www.ecologica.cn<br>Shengtaixuebao@rcees.ac.cn |
| 主 编           | 冯宗炜                                                                                                                | Editor-in-chief | FENG Zong-Wei                                                                                                                                                                   |
| 主 管           | 中国科学技术协会                                                                                                           | Supervised by   | China Association for Science and Technology                                                                                                                                    |
| 主 办           | 中国生态学会<br>中国科学院生态环境研究中心<br>地址:北京海淀区双清路 18 号<br>邮政编码:100085                                                         | Sponsored by    | Ecological Society of China<br>Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS<br>Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China                                 |
| 出 版           | 科 学 出 版 社<br>地址:北京东黄城根北街 16 号<br>邮政编码:100717                                                                       | Published by    | Science Press<br>Add:16 Donghuangchenggen North Street,<br>Beijing 100717, China                                                                                                |
| 印 刷           | 北京北林印刷厂                                                                                                            | Printed by      | Beijing Bei Lin Printing House,<br>Beijing 100083, China                                                                                                                        |
| 发 行           | 科 学 出 版 社<br>地址:东黄城根北街 16 号<br>邮政编码:100717<br>电话:(010)64034563<br>E-mail:journal@cspg.net                          | Distributed by  | Science Press<br>Add:16 Donghuangchenggen North<br>Street, Beijing 100717, China<br>Tel:(010)64034563<br>E-mail:journal@cspg.net                                                |
| 订 购           | 全国各地邮局                                                                                                             | Domestic        | All Local Post Offices in China                                                                                                                                                 |
| 国外发行          | 中国国际图书贸易总公司<br>地址:北京 399 信箱<br>邮政编码:100044                                                                         | Foreign         | China International Book Trading<br>Corporation<br>Add:P. O. Box 399 Beijing 100044, China                                                                                      |
| 广告经营<br>许 可 证 | 京海工商广字第 8013 号                                                                                                     |                 |                                                                                                                                                                                 |



ISSN 1000-0933  
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 70.00 元