

## 基于通量源区模型的雷竹林生态系统碳通量信息提取

陈丽萍<sup>1</sup>, 李平衡<sup>1</sup>, 莫路锋<sup>2</sup>, 周国模<sup>1</sup>, 李金荣<sup>2</sup>

(1. 浙江农林大学 环境与资源学院 浙江省森林生态系统碳循环与固碳减排重点实验室, 浙江 临安 311300; 2. 浙江农林大学 信息工程学院, 浙江 临安 311300)

**摘要:** 基于浙江省临安市太湖源雷竹 *Phyllostachys violascens* 林涡度相关通量观测塔 2013 年全年数据, 应用通量源区模型 (flux source area model, FSAM), 分析不同大气稳定度条件、不同风向和不同时间段该观测点通量信息的贡献区的分布, 并基于贡献区分析结果, 从通量观测值中分解出来自雷竹林生态系统的碳通量信息。结果表明: 90% 贡献水平的通量贡献区在观测塔为中心的 2.0 km × 2.0 km 范围内, 大气稳定度相同时, 4 个不同方向的通量贡献区范围差别不大。通量贡献区长度在稳定的大气条件下要显著大于在不稳定大气条件下, 前者为 96.19~941.63 m, 后者为 28.62~313.54 m。通过雷竹林和非雷竹林在通量贡献区所占面积和各自的贡献率, 从涡度相关所测通量数据中分解出雷竹林和非雷竹林的月平均碳通量。通量分解后的雷竹林生态系统年总净固碳量为 4.25 t·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>, 当下垫面全部为非雷竹林时年总净固碳量为 6.65 t·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>。如果不进行碳通量的分解, 把涡度相关所测通量值作为雷竹林的通量值, 则年总净固碳量为 5.46 t·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>。该研究对于正确评价雷竹林生态系统的固碳能力可提供一定理论依据。图 4 表 4 参 29

**关键词:** 森林生态学; 通量源区模型 (FSAM); 雷竹林; 涡度相关; 碳通量

**中图分类号:** S718.55      **文献标志码:** A      **文章编号:** 2095-0756(2016)01-0001-10

## Carbon flux extraction for a *Phyllostachys violascens* ecosystem based on the flux footprint analysis

CHEN Liping<sup>1</sup>, LI Pingheng<sup>1</sup>, MO Lufeng<sup>2</sup>, ZHOU Guomo<sup>1</sup>, LI Jinrong<sup>2</sup>

(1. Zhejiang Provincial Key Laboratory of Carbon Cycling in Forest Ecosystems and Carbon Sequestration, School of Environmental and Resource Sciences, Zhejiang A & F University, Lin'an 311300, Zhejiang, China; 2. School of Information Engineering, Zhejiang A & F University, Lin'an 311300, Zhejiang, China)

**Abstract:** This study was conducted to explain distribution of the flux source area and the spatial representation of flux measurements for mixed *Phyllostachys violascens* (Lei bamboo) and non-Lai bamboo stands in Taihuyuan. Based on the Flux Source Area Model (FSAM), footprint and source area functions were calculated using the continuous flux measurement with the open-path eddy covariance system for the full-year of 2013. Carbon fluxes, according to the area occupied and the contribution of Lei and non-Lai bamboo stands, were separated from the measured eddy covariance flux measurement values to determine the monthly average carbon fluxes using the flux footprint analysis. Results showed that the area responsible for 90% of the surface influence was about 2.0 km × 2.0 km and was centered at the flux observation tower. Few differences were noted in flux source area at the four cardinal directions; however, the flux source area was much greater in atmospheric conditions that were stable (having a range of 96.19–941.63 m) compared to unstable (with a range of 28.62–313.54 m). After separation of Lei and non-Lai bamboo stands, the total net carbon sequestration of the Lei

收稿日期: 2015-05-08; 修回日期: 2015-07-03

基金项目: 国家林业局引进国际先进农业科学技术计划(“948”计划)项目(2013-4-71); 国家自然科学基金资助项目(61190114, 61303236); 浙江省科技计划项目重大科技专项(2012C13011-1)

作者简介: 陈丽萍, 从事森林遥感与信息技术。E-mail: chenlp\_1990@foxmail.com。通信作者: 周国模, 教授, 博士, 博士生导师, 从事森林经理、全球气候变化与森林碳汇等研究。E-mail: zhougm@zafu.edu.cn

bamboo ecosystem was  $4.25 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ , and when the underlying surface consisted of non-*Ph. violascens* stands, it was  $6.65 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ . Without separation, using the eddy covariance measurements as the Lei bamboo ecosystem flux value, total net sequestration was  $5.46 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ . This research could help with more accurate evaluations of carbon sequestration capacity in a Lei bamboo ecosystem. [Ch, 4 fig. 4 tab. 29 ref.]

**Key words:** forest ecology; flux source area model(FSAM); Lei bamboo (*Phyllostachys violascens*) forest; eddy covariance; carbon flux

涡度相关(eddy covariance)法是一种以站点观测代表区域的平均的森林碳通量计算方法,作为一种直接观测植被与大气间二氧化碳和水汽通量的微气象学技术,涡度相关法应用最为广泛<sup>[1]</sup>。受涡度相关法原理的限制,其通量观测值通常只能代表观测区域下垫面一定区域的通量变化过程。在复杂地形、不同大气稳定度、不同风向及不同的观测仪器高度风条件下,通量测量值的空间代表性差异很大<sup>[2-4]</sup>。因此,关于涡度相关通量测定值的空间代表性理论研究逐渐成为相关研究领域的热点问题之一<sup>[5]</sup>,研究者提出了通量贡献区(footprint)的概念。通量贡献区是指观测区域下垫面对传感器接收到的通量信息有贡献的区域<sup>[2,6]</sup>,表达的是通量观测点的观测值所能代表的空间区域,即其空间代表性,是一个具有数值与方向的矢量数据。目前,通量贡献区分析模型主要有4类:拉格朗日随机模型<sup>[7-8]</sup>、大涡模拟<sup>[9-10]</sup>、闭合模型<sup>[11-12]</sup>和解析模型<sup>[13-15]</sup>。其中,SCHIMD<sup>[13]</sup>提出的基于K理论和假设的扩散指数廓线法来求解二维平流扩散方程的通量源区模型(FSAM, flux source area model)解析模型因其运行输入参数少、物理机制明确、数学形式简单等特点得到了广泛的应用。如顾永剑等<sup>[4]</sup>应用FSAM模型对崇明东滩湿地生态系统通量观测站点通量观测数据做了碳通量贡献区分析,结果是该观测点所测的碳通量数据可以较好地反映对应下垫面的通量信息;周琪等<sup>[16]</sup>利用FSAM模型分析了古尔班通古特沙漠试验场通量观测资料的空间代表性,结果显示,由模型计算的贡献区可以反映该下垫面的通量信息;徐小军等<sup>[17]</sup>在使用FSAM模型估算其贡献区的条件下模拟出一种估算不均一下垫面森林碳通量的监测方法。雷竹*Phyllostachys violascens*原产于浙江临安、安吉、余杭等地,具有全年光合能力强、采伐期短等特点,是一种高经济效益的笋用竹<sup>[18]</sup>。目前有较多学者对雷竹林生态系统的土壤养分、矿质元素以及土壤酶等方面作了研究<sup>[19-22]</sup>,也有学者对其水汽通量<sup>[18]</sup>、土壤呼吸<sup>[23]</sup>等作了分析,但还没有关于其通量贡献区的研究。太湖源雷竹林通量观测塔周围的下垫面存在一定的空间异质性,因此,明确通量数据的空间代表性对分析观测结果的生态学意义至关重要。本研究利用FSAM模型,对该通量塔2013年全年观测数据做分析,试图确定该雷竹林区域不同大气条件下各风向通量源区的变化特征,不同时间各风向在不同大气条件下的源区变化情况,以及通量测量的主要源区的空间代表性,并通过雷竹林和非雷竹林在通量贡献区所占面积和各自的贡献率,从涡度相关所测通量数据中计算出每月雷竹林及当下垫面均为非雷竹林时的平均碳通量,从而正确评价该雷竹林生态系统的固碳能力。

## 1 研究区域概况

研究区位于浙江省临安市现代雷竹林示范园区,区内建有碳通量观测塔,  $30^{\circ}18'169''\text{N}$ ,  $119^{\circ}34'104''\text{E}$ 。研究区处于亚热带季风气候区,四季气候分明,每年6月中旬至7月中旬为梅雨期<sup>[18]</sup>。研究区雷竹林为人工覆盖经营的经济林,钩梢理枝  $2 \text{ 次} \cdot \text{a}^{-1}$ :第1次钩梢在6-7月,主要是为新发的竹笋留出成竹的空间;第2次为9-10月,主要是为了防治枝病危害及防止冬天风雪压枝。钩梢前雷竹林群落平均高度为5.00~6.00 m,钩梢后为4.50 m。

该雷竹林主要由原先的针叶林、阔叶林或针阔混交林改造而来,一般分布于村落附近,研究区内并非均一的雷竹纯林。本研究以1:10 000的等高线地形图与分辨率为0.25 m的遥感影像为底图,经过实地调查,勾绘出以观测塔为中心的  $2.0 \text{ km} \times 2.0 \text{ km}$  范围内(通量贡献区的范围)土地分类情况并进行矢量化后得到通量塔下垫面区域土地利用分类图。根据实际情况结合研究需求,本研究将下垫面分为雷竹,非雷竹林(针叶林、阔叶林、针阔混交林),其他用地(村落和农田),水体和道路(图1)。由图1可见:通量塔下垫面的非雷竹林主要分布在通量塔以东区域,而通量塔以西主要以雷竹林为主,其中雷竹面积占研究区总面积的67.28%,非雷竹林占研究区总面积的17.33%,其他用地占11.97%,水体占

2.40%，道路占 1.00%，因此，在分析和应用通量塔上的涡度相关观测的通量数据之前，需要对通量的贡献区进行分析，并基于贡献区的分析结果计算出雷竹林的通量相对贡献值，从而有效提取雷竹的通量数据，正确评价该人工林的固碳能力。

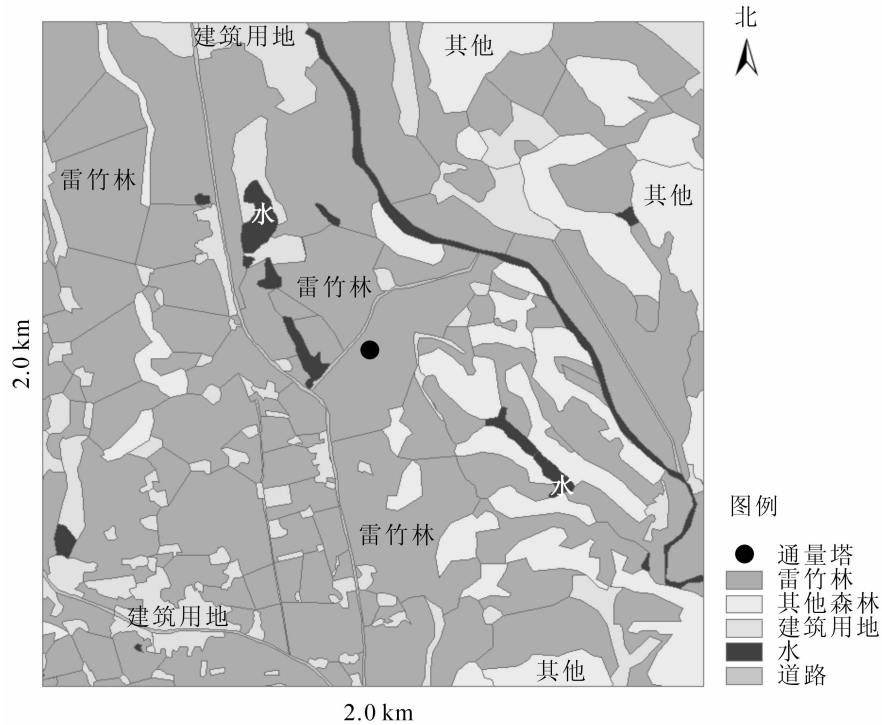


图 1 通量贡献区内土地利用分类图

Figure 1 Land use classification image in flux source area

## 2 研究方法

### 2.1 观测方法与数据获取

研究区通量观测塔高 20.00 m，在 17.00 m 高度处安装有涡度相关观测系统和微气象梯度观测系统。涡度相关系统由三维超声风速仪(CAST3, CampbellInc)，开路快速响应的红外 CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O 分析仪(Li-7500, LiCorInc)及数据采集器组成，系统的采样频率为 10.0 Hz。微气象梯度观测系统的观测数据主要包括 3 层风速、大气温度与湿度。风速仪分别安装在通量塔 1.00 m，5.00 m 和 17.00 m 处；SI-111 红外温度计分别安装在 1.50 m 和 5.00 m 处，用于采集地表和冠层的温度。净辐射仪(CNR4, Kipp & Zonen)传感器安装在 17.00 m 处，用于采集辐射数据。常规气象观测系统数据采样频率为 0.5 Hz，通过数据采集器(CR1000, CampbellInc)30 min 自动记录平均风速、温度、气压、净辐射等常规气象信息。

本研究选取太湖源 2013 年 1-12 月的连续通量观测数据，首先对采集到的数据利用 EdiRe 软件进行处理。处理流程包括：异常值剔除、趋势去除、平面坐标拟合、WPL 校正，最后经过缺失数据插补，得到完整 30 min 通量序列。根据本研究需要，在数据统计分析之前，还要进行如下的数据剔除：①仪器响应受降水影响，会出现测量值的不准确或不合理现象，所以剔除降水量不为 0 对应的数据；②当摩擦风速小于临界值时，大气湍流不充分，本研究摩擦风速阈值设定为 0.15 m·s<sup>-1</sup>，因此剔除风速小于阈值所对应的数据；③根据 FSAM 模型的使用条件，剔除强稳定条件(稳定度 > 1)和强不稳定条件(稳定度 < -1)下的数据。根据最终的日通量数据计算出每月累积二氧化碳通量。

### 2.2 FSAM 模型简述

FSAM 模型具有简单的数学形式，使用较少的输入参数可高精度地估算研究区通量贡献区。模型的运行需要 3 个复合参数： $z_m/z_0$ ， $z_m/L$ ， $\sigma_v/lu^*$ 。其中  $z_m$  为观测仪器高度与 0 平面位移之差， $z_0$  为空气动力学粗糙度， $z_m/L$  为稳定度参数( $L$  为莫宁奥布霍夫长度)， $\sigma_v$  为横向风速脉动标准差， $u^*$  为摩擦风速，



$\sigma_v / u^*$  反映了横向风脉动强度<sup>[5]</sup>。关于模型输入参数的计算,模型的5个输出参数的含义及FSAM模型的原理等详参文献[5]。

根据SCHMID<sup>[13]</sup>对FSAM模型敏感性测验的描述,模型输入参数的约束条件为:大气稳定时( $z_m / L > 0$ ):

$$\begin{aligned} 2.0 \times 10^1 &\leq z_m / z_0 \leq 5.0 \times 10^2 \\ 2.0 \times 10^{-4} &\leq z_m / L \leq 1.0 \times 10^{-1} \\ 1.0 &\leq \sigma_v / u^* \leq 6.0 \end{aligned} \quad (1)$$

大气不稳定时( $z_m / L < 0$ ):

$$\begin{aligned} 4.0 \times 10^1 &\leq z_m / z_0 \leq 1.0 \times 10^3 \\ 4.0 \times 10^{-4} &\leq -z_m / L \leq 1.0 \\ 1.0 &\leq \sigma_v / u^* \leq 6.0 \end{aligned} \quad (2)$$

本研究 $z_m$ 取 $z_m = z - p$ , $z$ 为观测高度17.00 m, $p$ 为零平面位移, $p$ 取经验值 $0.670 h$ , $h$ 为平均树高<sup>[1]</sup>; $z_0$ 取经验值 $0.075 h$ <sup>[24]</sup>;Obukhov长度 $L$ 计算方法参考赵晓松等<sup>[5]</sup>; $\sigma_v$ 和 $u^*$ 由涡度相关数据计算得到。

本研究根据约束条件将不满足要求的数据剔除,分不同大气条件不同风向分别计算输入参数值。最后将参数输入模型,运行得到 $P$ 贡献水平为10.00%~90.00%下对应的输出参数。本研究主要讨论该地区通量贡献水平 $P$ 为90.00%的不同大气条件各风向通量源区变化的特征。

### 2.3 基于贡献区分析的通量信息分解方法

本研究使用ArcGIS 10.1中的椭圆工具,根据FSAM模型计算出的不同贡献率的通量贡献区输出参数画出不同时间不同方向的通量贡献区椭圆,椭圆的长轴长度为 $e - a$ ( $a$ 为等值线上最近点到传感器的距离, $e$ 为等值线上最远点距传感器的距离),短轴长为 $2d$ ( $d$ 为等值线上横向最大宽度值的一半)。基于图1使用裁剪工具裁剪出相应贡献区域内的土地后统计出不同地类的面积。根据面积计算出相应通量贡献率,结合通量信息提取方法提取出不同地类通量值。

裁剪后的图像分类图结果表明:水域和其他用地及道路对通量贡献区内通量的贡献很小。通量塔东边通量贡献区内雷竹林地的比例为48.85%,非雷竹林地的比例为44.45%,其他用地的平均比例为3.73%,水域的平均比例为2.62%,道路的平均比例为0.35%;而在通量塔西边,通量贡献区内雷竹林地的比例为76.77%,非雷竹林地的比例为3.88%,其他用地的平均比例为6.07%,水域的平均比例为9.99%,道路的平均比例为3.29%。本研究只对雷竹林与非雷竹林的通量做分析。

从图1可以看出:通量塔下垫面基本为雷竹林,但在其东北和东南方向占有部分非雷竹林(主要是阔叶林、针叶林和针阔混交林)。本研究根据风向将数据分类,其中东北和东南方向为第1组,风向为 $0^\circ \sim 180^\circ$ ;西南和西北方向数据为第2组,风向为 $180^\circ \sim 360^\circ$ 。利用这2组数据可得到如下2个方程:

$$F_c(1) = f_{\text{雷}}^{(0^\circ-180^\circ)} F_{\text{雷}} + f_{\text{非}}^{(0^\circ-180^\circ)} F_{\text{非}}, \quad (3)$$

$$F_c(2) = f_{\text{雷}}^{(180^\circ-360^\circ)} F_{\text{雷}} + f_{\text{非}}^{(180^\circ-360^\circ)} F_{\text{非}}. \quad (4)$$

其中: $F_c(1)$ 和 $F_c(2)$ 分别为涡度相关所测碳通量在 $0^\circ \sim 180^\circ$ 和 $180^\circ \sim 360^\circ$ 的2个方向的碳通量值; $f_{\text{雷}}^{(0^\circ-180^\circ)}$ , $f_{\text{非}}^{(0^\circ-180^\circ)}$ 为 $0^\circ \sim 180^\circ$ 方向雷竹林与非雷竹林的通量贡献率值, $f_{\text{雷}}^{(180^\circ-360^\circ)}$ , $f_{\text{非}}^{(180^\circ-360^\circ)}$ 为 $180^\circ \sim 360^\circ$ 方向雷竹林与非雷竹林的通量贡献率值,贡献率值由相应方向下对应通量贡献区内目标地类所占的面积计算得到; $f_{\text{雷}}$ 为纯雷竹林碳通量值, $f_{\text{非}}$ 为当下垫面全部为非雷竹林时碳通量值。联合式(3)和式(4)可计算出 $f_{\text{雷}}$ 和 $f_{\text{非}}$ ,实现对涡度相关法所测通量信息的分离。

## 3 结果与分析

### 3.1 风向与输入参数

表1为基于研究区通量塔2013年观测数据计算的不同大气条件下风向与风速统计表,表2为不同大气条件下各风向的输入参数。大气稳定条件下,各方向风频数大小为 $90^\circ \sim 180^\circ > 0^\circ \sim 90^\circ > 180^\circ \sim 270^\circ > 270^\circ \sim 360^\circ$ 。大气不稳定条件下,各方向风频数大小为 $180^\circ \sim 270^\circ > 90^\circ \sim 180^\circ > 0^\circ \sim 90^\circ > 270^\circ \sim 360^\circ$ 。其他2个方向差别不大;最大风速在 $180^\circ \sim 270^\circ$ 风向上。2种大气条件下平均风速最大值均来源于 $0^\circ \sim 90^\circ$ 方向。

表 1 不同大气层结条件下风速风向分布

Table 1 Wind speed and direction distribution under different atmospheric conditions

大气层结	平均风速/(m·s <sup>-1</sup> )	最大风速/(m·s <sup>-1</sup> )	最小风速/(m·s <sup>-1</sup> )	对应风向频数比例/%
稳定(0°~90°)	2.04	6.24	0.04	29.85
稳定(91°~180°)	1.22	3.55	0.07	46.69
稳定(181°~270°)	1.26	5.26	0.04	14.90
稳定(271°~360°)	1.49	4.59	0.06	8.56
不稳定(0°~90°)	1.48	5.44	0.03	20.69
不稳定(91°~180°)	1.27	4.46	0.04	29.35
不稳定(181°~270°)	1.18	5.94	0.02	38.58
不稳定(271°~360°)	1.47	5.79	0.02	11.38

说明：0°方向为正北。

区别大气层结稳定度的参数为  $z_m/L$ ， $z_m/L > 0$  时大气层结稳定，反之大气层结不稳定。根据定义， $z_m$  恒大于 0，因此， $z_m/L$  的符号，即大气稳定度取决于莫宁奥布霍夫长度值  $L$ 。将表 2 输入参数输入 FSAM 模型即可计算出各风向在不同大气条件下的通量贡献区范围的参数。

### 3.2 不同大气条件下各风向的通量贡献区分析

将表 2 参数逐条输入 FSAM 模型，运行模型后得到  $P$  水平为 10.00%~90.00% 时的输出参数。本研究选取  $P$  水平为 90.00% 的数据作为研究对象，表 3 为通量贡献区结果参数表。结合表 3 与输出参数定义做出不同大气条件各风向的源区分布图(图 2)。当大气层结稳定( $L > 0$ )时，其等值线上距传感器最近点与最远点距离、贡献函数最大值时对应的位置，即  $a$ ， $e$ ， $x_{\max}$  (为 footprint 值函数最大的位置)的最大值均在 180°~270° 风向，其次是 270°~360° 方向，在 0°~90° 与 90°~180° 方向无明显差异；不同风向下贡献区迎风方向范围为 96.19~941.63 m。贡献区侧风向最大宽度为  $2d$ ，按风向从大到小依次为 0°~90° > 270°~360° > 180°~270° > 90°~180°，相应值分别为 445.50，384.76，380.02 与 334.12 m。在大气层结不稳定( $L < 0$ )时， $a$ ， $e$ ， $x_{\max}$  最大值在 90°~180° 风向，其次是 270°~360° 方向，在 0°~90° 与 180°~270° 方向无明显差异；不同风向下贡献区迎风方向范围 28.62~313.54 m。贡献区侧风向最大宽度值  $2d$  按风向从大到小依次为 0°~90° > 270°~360° > 90°~180° > 180°~270°，相应数值依次为 176.18，157.28，149.18 与 128.26 m。总体来说，涡度相关所测通量来自于研究区下垫面的 2.0 km × 2.0 km 范围内(图 2)。

结合表 3 与图 2，在同一风向，相应的通量贡献区参数值  $a$ ， $e$ ， $d$ ， $x_{\max}$  均为稳定大气条件大于不稳定

表 2 不同大气层结条件下各风向的 FSAM 模型的输入参数

Table 2 Input parameters of FSAM in each direction under different atmospheric conditions

大气层结	$z_m/z_0$	$z_m/L$	$\sigma_r/u_*^*$
稳定(0°~90°)	41.44	0.04	2.70
稳定(91°~180°)	41.44	0.04	2.02
稳定(181°~270°)	41.44	0.04	2.28
稳定(271°~360°)	41.44	0.04	2.34
不稳定(0°~90°)	41.44	-0.27	2.76
不稳定(91°~180°)	41.44	-0.19	2.02
不稳定(181°~270°)	41.44	-0.38	2.35
不稳定(271°~360°)	41.44	-0.24	0.02

说明：0°方向为正北。

表 3 不同大气层结条件下各风向 FSAM 模型的输出参数

Table 3 Output parameters of FSAM in each direction under different atmospheric conditions

大气层结	$a/m$	$e/m$	$d/m$	$x_{\max}/m$
稳定(0°~90°)	96.19	921.38	222.75	526.50
稳定(91°~180°)	96.86	931.50	167.06	533.25
稳定(181°~270°)	97.54	941.63	190.01	536.63
稳定(271°~360°)	96.19	924.75	192.38	529.88
不稳定(0°~90°)	34.43	261.56	88.09	147.15
不稳定(91°~180°)	40.84	313.54	74.59	175.50
不稳定(181°~270°)	28.62	213.64	64.13	120.83
不稳定(271°~360°)	39.15	295.99	78.64	167.06

说明：0°方向为正北。

定大气条件。通量贡献区迎风方向与侧风方向范围具有明显的拉伸，迎风方向拉伸程度大于侧风方向。

### 3.3 雷竹林和非雷竹林的通量贡献率

结合 FSAM 模型计算出的不同通量贡献率下的通量贡献区参数和通量贡献区内的土地利用类型分类结果，计算出不同地类(主要考虑雷竹林和非雷竹林)的每月平均通量贡献率，并分为 2 个方向分别计算，以便应用式(3)和式(4)来对通量信息作分解。结果如表 4 所示，在 90.00% 贡献率条件下，通量塔东面(0°~180°)非雷竹林的贡献率略小于雷竹林的贡献率；雷竹林平均贡献率为 47.00%，非雷竹林平均贡献率为 43.00%。通量塔西面(180°~360°)雷竹林贡献率大于非雷竹林，在该方向上雷竹林平均贡献率为 86.13%，非雷竹林平均贡献率只有 3.87%。根据表 4 中数据可以看出 2 个方向上雷竹林与非雷竹林的贡献率每个月差异并不明显。

从月份间的动态变化来看，2 个方向上的 2 个地类的通量贡献率都只有较小的波动。在东面，雷竹林最大和最小贡献率分别为 47.45% 和 46.28%，分别出现在 12 月和 3 月；非雷竹林的最大和最小贡献率分别为 43.72% 和 42.55%，分别出现在 3 月和 12 月。在西面，雷竹林最大和最小贡献率分别为 86.59% 和 85.51%，分别出现在 6 月和 12 月；非雷竹林的最大和最小贡献率分别只有 4.49% 和 3.41%，分别出现在 12 月和 6 月。

表 4 雷竹林与非雷竹林每月平均通量贡献率

Table 4 Monthly average flux contribution rate of Lei bamboo forest and non-Lai bamboo forest

月份	东面(0°~180°)		西面(180°~360°)	
	雷竹林贡献率/%	非雷竹林贡献率/%	雷竹林贡献率/%	非雷竹林贡献率/%
1	46.70	43.30	86.06	3.94
2	47.39	42.61	85.92	4.08
3	46.28	43.72	85.65	4.35
4	47.09	42.91	86.44	3.56
5	46.43	43.57	86.47	3.53
6	46.44	43.56	86.59	3.41
7	47.36	42.64	86.27	3.73
8	47.10	42.90	86.12	3.88
9	47.13	42.87	85.94	4.06
10	47.29	42.71	86.54	3.46
11	47.35	42.65	86.07	3.93
12	47.45	42.55	85.51	4.49
平均值	47.00	43.00	86.13	3.87

### 3.4 涡度相关所测通量信息的分解

根据通量观测塔数据计算得到研究区年总净固碳量为  $5.46 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ，与陈云飞等<sup>[25]</sup>2010 年 9 月—2011 年 8 月的研究结果相比较，变化趋势相同。结合式(3)和式(4)计算出每月的  $f_{\text{雷}}$  和  $f_{\text{非}}$ ，从而得到观测区域内纯雷竹林和当下垫面全部为非雷竹林时的每月累积净二氧化碳交换量(NEE)，结果如图 3 所示。由图 3 可见：观测通量、雷竹通量均在 1—2 月为正，生态系统为碳源；其他月份通量均为负值，生态系统为碳汇。通过分解得出纯雷竹林生态系统年总净固碳量为  $4.25 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ，当下垫面全部为非雷竹林时(针叶林、阔叶林和针阔混交林)年总净固碳量为  $6.65 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。

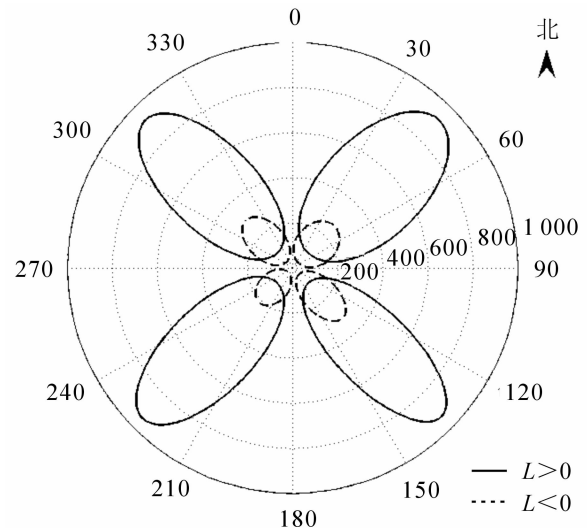


图 2 不同大气条件下通量贡献区分布图  
Figure 2 Footprint source area distribution under different atmospheric conditions

观测通量 NEE 整体呈双峰曲线，变化趋势与陈云飞等<sup>[25]</sup>的研究较为一致。1-2 月通量均为正，分别为 29.53 和 11.97  $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{月}^{-1}$ 。该值相比于陈云飞的结果更大，根据其历史气象(图 4)因素，2013 年 1-2 月气温与降水均较大，雷竹林生物活性增加，因此 NEE 值较高。3 月出现了第 1 个高峰，值为  $-24.40 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{月}^{-1}$ 。3 月竹笋采挖完毕，新竹开始成长。根据郑炳松等<sup>[26]</sup>的研究，幼叶光合速率及相关影响因子都比二龄竹要高；图 4D 显示 3 月降水量(119.10 mm)出现 1 个小高峰，且其平均气温为  $11.0 \text{ }^\circ\text{C}$ ，雨热条件适宜，因此 NEE 通量较大。6 月 NEE 值最小，仅为  $-6.40 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{月}^{-1}$ 。6 月南方进入梅雨季节，降水量较大。根据统计结果，6 月降水量为 453.33 mm，占 2013 年全年降水量(1 366.3 mm)的 33.17%；2011 年与 2013 年 6 月的气温  $T$ (图 4B)，土壤湿度  $C_{\text{VWC}}$ (图 4C)，光合有效辐射  $R_{\text{PAR}}$ (图 4F)及空气相对湿度  $H_{\text{RH}}$ (图 4E)等气象因子均较为接近；夜间呼吸值 2011 年比 2013 年大较多。高翔等<sup>[27]</sup>研究表明：在土壤湿润情况下，降水对土壤呼吸具有抑制作用。冯道俊<sup>[28]</sup>研究表明：当水分过量时对植物存在水涝胁迫，植物光合速率会降低。说明由于降水原因，2013 年 6 月雷竹林的光合作用与呼吸作用均受较大影响，并且对光合作用影响大于呼吸作用，从而导致其 NEE 降低。8 月 NEE 值为  $21.33 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{月}^{-1}$ ，大于 2011 年。根据图 4，2011 年与 2013 年 8 月降水、光合有效辐射、空气相对湿度等差别不大，2011 年 8 月气温低于 2013 年 8 月，但土壤湿度 2013 年 8 月大于 2011 年 8 月；2011 年 8 月夜间呼吸大于 2013 年 8 月。根据实际情况，2013 年 8 月为极端干旱天气，为了保护雷竹林，在高温天气下竹农每天对雷竹林进行大量

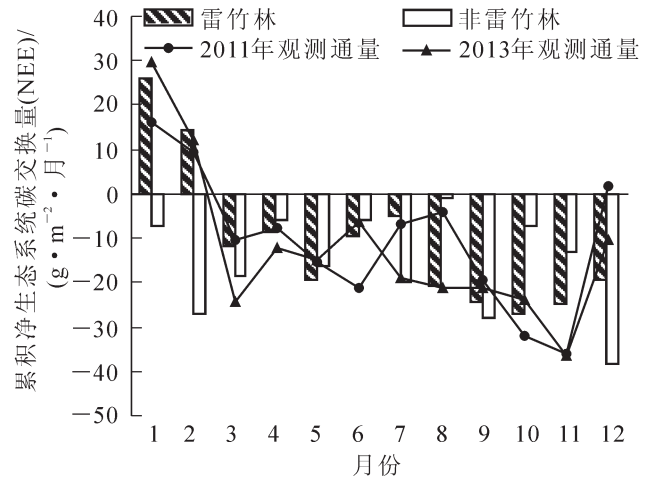


图 3 雷竹林、非雷竹林月通量与观测通量变化图  
Figure 3 Monthly flux change of Lei bamboo forest, non-Lai bamboo forest and total flux

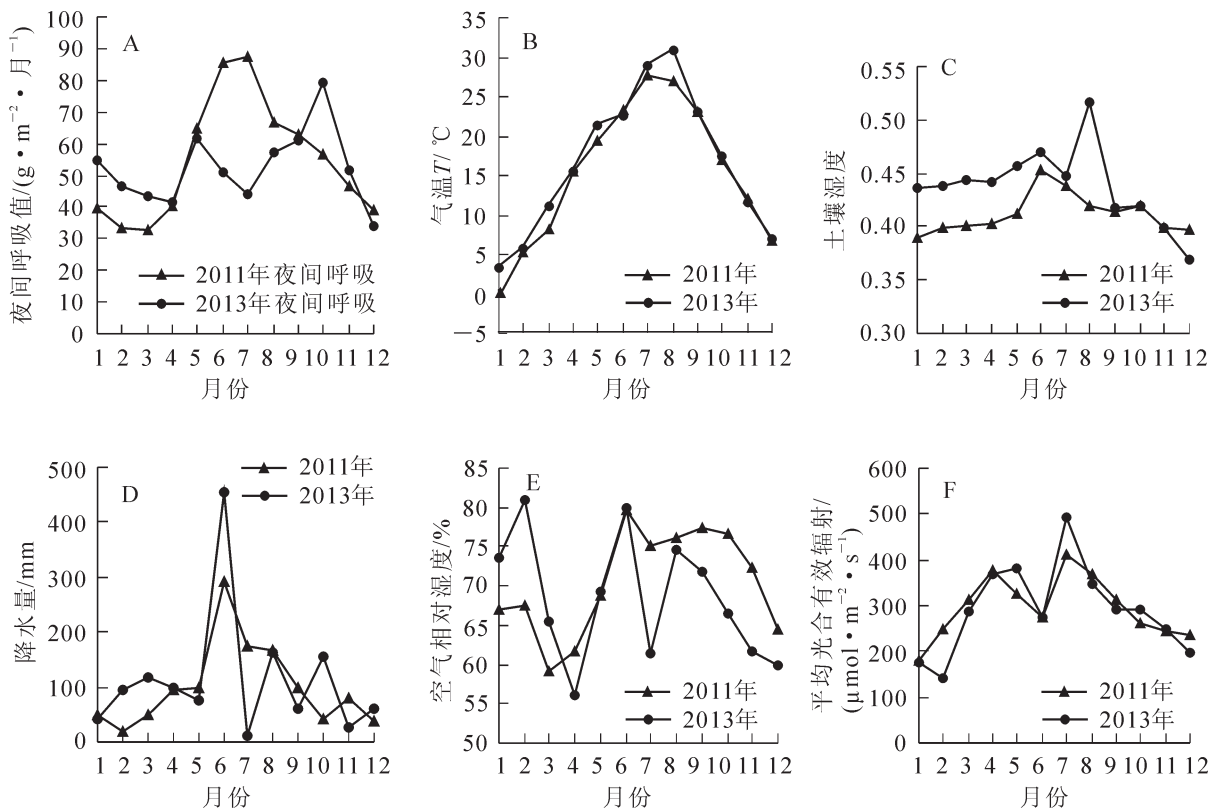


图 4 2011 年与 2013 年各月气象因子变化图

Figure 4 Monthly change of meteorological factors in 2011 and 2013



灌溉以保证其生长,充足的灌溉产生了适宜的生长条件,因此,2013年8月NEE增加。9-11月水热及辐射条件较为适宜,雷竹进入秋季碳吸收持续增加阶段,为出笋积累有机物。11月达到高峰,值为 $-36.40 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{月}^{-1}$ ,结果与陈云飞等( $-35.89 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{月}^{-1}$ )的差别不大,12月为 $-10.46 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{月}^{-1}$ 。根据图4,12月2a的土壤湿度、光合有效辐射、空气相对湿度均为2011年大于2013年,气温差别不大,降水量2011年略大于2013年,夜间呼吸值2011年大于2013年。根据调查,2013年12月没有对雷竹林进行覆盖经营,没有覆盖增温效应,雷竹林呼吸较小,因此成为一个碳汇。

根据通量分解结果,雷竹林NEE变化与观测通量类似,总体呈双峰曲线,平均月通量值为 $-9.67 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{月}^{-1}$ 。7月通量值为 $-5.17 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{月}^{-1}$ ,这与雷竹林钩梢时间相吻合,钩梢之后雷竹林叶面积指数略有下降导致其光合能力下降,9月的清理病枝等对雷竹林整体碳通量影响不大。非雷竹林碳通量月碳通量值均为负,是碳汇,这与刘允芬等<sup>[29]</sup>对千烟洲人工针叶林的碳通量研究一致,月平均值为 $-15.11 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{月}^{-1}$ 。从NEE月平均值来说,雷竹林 $<$ 观测通量 $<$ 下垫面全部为非雷竹林,但由于非雷竹林在研究区内所占比重较小,因此,对整体的通量贡献不大。

## 4 结论与讨论

利用FSAM分析通量观测的空间代表性,已广泛地应用于森林、农田、湿地等生态系统,但对人工集约经营的雷竹林生态系统通量贡献分析则相对较少。本研究中雷竹林为人工经营的经济林,由原先的针叶或阔叶林改造而来,分布于村落附近,并非大范围的均一的雷竹纯林,通量观测塔周围的下垫面存在一定的空间异质性,因此明确通量数据的空间代表性,从涡度相关所测通量数据中成功分离出真正来自于雷竹林生态系统的通量信息,对于准确评价雷竹林的固碳能力至关重要。本研究通过处理太湖源雷竹林生态系统2013年全年的通量观测数据,利用FSAM模型对通量贡献区进行分析,并发展一种从涡度相关系统所测通量数据中分离不同地类通量信息的方法,成功提取来自于纯雷竹林的通量信息,从而正确评价该雷竹林生态系统的固碳能力及其季节变化特征。

在90.00%贡献率水平下,通量塔东面雷竹林的贡献率略大于非雷竹林的贡献率,而在西面雷竹林贡献率大于非雷竹林,主要是由其对应下垫面的土地利用类型决定的。土地利用分类图表明,研究区域内通量塔西面主要以雷竹林为主,而东面雷竹林所占面积略大于非雷竹林。2个方向上2种地类贡献率的月间动态变化较小。

目前,大部分文献对通量贡献区的分析都没有后续的应用,仅仅说明了通量观测结果所能代表仪器所在地的下垫面特征<sup>[5-6,16-17]</sup>。并没有进一步分析目标生态系统在通量贡献区所占比例,以及如何把目标生态系统的通量信息从涡度相关所测数据中提取出来。例如,袁庄鹏等<sup>[6]</sup>利用FSAM模型分析了位于上海师范大学的城市生态站通量贡献区,结果显示源区最大可达1 047.00 m,而该城市生态站的下垫面非常复杂,在1.0 km<sup>2</sup>范围内有多种不同地类类型,因此,该通量数据如果不进行不同地类的信息分解,将会降低该通量数据的实际应用价值。本研究结合FSAM模型的通量贡献区分析和源区内的土地利用类型分类结果,设计了式(3)和式(4),发展了一种分解不同地类通量信息的方法,最终可计算出不同地类的通量。结果表明:分解结果中纯雷竹林通量值变化总体呈双峰曲线。7月由于雷竹林钩梢,通量值下降,说明人工干预对雷竹林碳通量产生直接明显的效果。本研究的目标地类——纯雷竹林生态系统的年总净固碳量为 $4.25 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ ,如果不对涡度相关所测通量数据进行分离,将仪器所测通量值直接作为雷竹林的通量值,则雷竹林生态系统的年总净固碳量为 $5.46 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 。对比于当下垫面全部为非雷竹林时年总净固碳量 $6.65 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ ,纯雷竹林生态系统的年固碳量要低于当下垫面全部为非雷竹林时,但这也说明了雷竹林不仅具有可观的经济效益,其碳汇功能也不容忽视。本研究对于正确评价雷竹林生态系统的固碳能力可提供理论依据,并对其他下垫面不均一的通量观测数据的分析也有一定参考价值。

## 5 参考文献

- [1] 于贵瑞,孙晓敏,温学发,等. 陆地生态系统通量观测的原理与方法[M]. 北京:高等教育出版社,2006.
- [2] SCHMID H P. Experimental design for flux measurements: matching scales of observations and fluxes [J]. *Agric For Meteorol*, 1997, **87**(2): 179 - 200.



- [3] RANNIK Ü, AUBINET M, KURBANMURADOV O, *et al.* Footprint analysis for measurements over a heterogeneous forest [J]. *Bound-Lay Meteorol*, 2000, **97**(1): 137 – 166.
- [4] 顾永剑, 高宇, 郭海强, 等. 崇明东滩湿地生态系统碳通量贡献区分析[J]. 复旦学报: 自然科学版, 2008, **47**(3): 374 – 379.  
GU Yongjian, GAO Yu, GUO Haiqiang, *et al.* Footprint analysis for carbon flux in the wetland ecosystem of Chongming Dongtan [J]. *J Fudan Univ Nat Sci*, 2008, **47**(3): 374 – 379.
- [5] 赵晓松, 关德新, 吴家兵, 等. 长白山阔叶红松林通量观测的 footprint 及源区分布[J]. 北京林业大学学报, 2005, **27**(3): 17 – 23.  
ZHAO Xiaosong, GUAN Dexin, WU Jiabing, *et al.* Distribution of footprint and flux source area of the mixed forest of broad-leaved and Korean pine in Changbai Mountain [J]. *J Beijing For Univ*, 2005, **27**(3): 17 – 23.
- [6] 袁庄鹏, 赵敏. 基于 FSAM 模型的城市碳通量观测贡献区研究[J]. 上海师范大学学报: 自然科学版, 2012, **41**(5): 533 – 539.  
YUAN Zhuangpeng, ZHAO Min. Research of flux footprint of city based on the FSAM model [J]. *J Shanghai Norm Univ Nat Sci*, 2012, **41**(5): 533 – 539.
- [7] LECLERC M Y, THURTELL G W. Footprint prediction of scalar fluxes using a Markovian analysis [J]. *Bound-Lay Meteorol*, 1990, **52**(3): 247 – 258.
- [8] BALDOCCHI D. Flux footprints within and over forest canopies [J]. *Bound-Lay Meteorol*, 1997, **85**(2): 273 – 292.
- [9] SCHMID H P. Footprint modeling for vegetation atmosphere exchange studies: a review and perspective [J]. *Agric For Meteorol*, 2002, **113**(1): 159 – 183.
- [10] CAI Xuhui, LECLERC M Y. Forward-in-time and backward-in-time dispersion in the convective boundary layer: the concentration footprint [J]. *Bound-Lay Meteorol*, 2007, **123**(2): 201 – 218.
- [11] HADFIELD M G. Passive scalar diffusion from surface sources in the convective boundary layer [J]. *Bound-Lay Meteorol*, 1994, **69**(4): 417 – 448.
- [12] SOGACHEV A, LECLERC M Y, KARIPOT A, *et al.* Effect of clearcuts on footprints and flux measurements above a forest canopy [J]. *Agric For Meteorol*, 2005, **133**(1): 182 – 196.
- [13] SCHMID H P. Source areas for scalars and scalar fluxes [J]. *Bound-Lay Meteorol*, 1994, **67**(3): 293 – 318.
- [14] SCHUEPP P H, LECLERC M Y, MACPHERSON J I, *et al.* Footprint prediction of scalar fluxes from analytical solutions of the diffusion equation [J]. *Bound-Lay Meteorol*, 1990, **50**(1/4): 355 – 373.
- [15] HORST T W, WEIL J C. Footprint estimation for scalar flux measurements in the atmospheric surface layer [J]. *Bound-Lay Meteorol*, 1992, **59**(3): 279 – 296.
- [16] 周琪, 李平衡, 王权, 等. 西北干旱区荒漠生态系统通量贡献区模型研究[J]. 中国沙漠, 2014, **34**(1): 98 – 107.  
ZHOU Qi, LI Pingheng, WANG Quan, *et al.* A footprint analysis on a desert ecosystem in West China [J]. *J Desert Res*, 2014, **34**(1): 98 – 107.
- [17] 徐小军, 周国模, 莫路锋, 等. 一种面向下垫面不均一的森林碳通量监测方法[J]. 中国科学 F 辑: 信息科学, 2013, **43**(10): 1183 – 1382.  
XU Xiaojun, ZHOU Guomo, MO Lufeng, *et al.* Study on carbon flux measurement using wireless sensor network under inhomogeneous surface condition [J]. *Sci China Ser F Inf*, 2013, **43**(10): 1183 – 1382.
- [18] 蔺恩杰, 江洪, 陈云飞. 太湖源雷竹林水汽通量变化及其对净辐射的响应[J]. 浙江农林大学学报, 2013, **30**(3): 313 – 318.  
LIN Enjie, JIANG Hong, CHEN Yunfei. Water vapor flux variation and net radiation for a *Phyllostachys violascens* stand in Taihuyuan [J]. *J Zhejiang A & F Univ*, 2013, **30**(3): 313 – 318.
- [19] 徐祖祥, 陈丁红, 李良华, 等. 临安雷竹种植条件下土壤养分的变化[J]. 中国农学通报, 2010, **26**(13): 247 – 250.  
XU Zuxiang, CHEN Dinghong, LI Lianghua, *et al.* A study on the change in soil nutrients under the condition of bamboo shoot planting in Lin'an [J]. *Chin Agric Sci Bull*, 2010, **26**(13): 247 – 250.
- [20] 姜培坤, 徐秋芳, 储家森, 等. 雷竹早产高效栽培过程中土壤养分质量分数的变化[J]. 浙江林学院学报, 2006, **23**(3): 242 – 247.

- JIANG Peikun, XU Qiufang, CHU Jiamiao, *et al.* Soil nutrients in response to intensive management of *Phyllostachys praecox* [J]. *J Zhejiang For Coll*, 2006, **23**(3): 242 – 247.
- [21] 杨芳, 徐秋芳. 不同栽培历史雷竹林土壤养分与重金属含量的变化[J]. 浙江林学院学报, 2003, **20**(2): 111 – 114.
- YANG Fang, XU Qiufang. Changes in nutrients and heavy metal contents in soils under *Phyllostachys praecox* stands with different cultivation histories [J]. *J Zhejiang For Coll*, 2003, **20**(2): 111 – 114.
- [22] 姜培坤, 许小婉. 雷竹林地土壤酶活性研究[J]. 浙江林学院学报, 2000, **17**(2): 132 – 136.
- JIANG Peikun, XU Xiaowan. Study on enzyme activities of soil under *Phyllostachys praecox* f. *prevelnalis* forest [J]. *J Zhejiang For Coll*, 2000, **17**(2): 132 – 136.
- [23] 陈云飞, 江洪, 周国模, 等. 覆盖经营雷竹林的土壤热通量季节变化特征[J]. 浙江农林大学学报, 2013, **30**(2): 165 – 171.
- CHEN Yunfei, JIANG Hong, ZHOU Guomo, *et al.* Seasonal changes in soil heat flux for a Lei bamboo forest with straw mulching [J]. *J Zhejiang A & F Univ*, 2013, **30**(2): 165 – 171.
- [24] 杨阿强, 孙国清, 卢立新, 等. 基于 MODIS 资料的中国东部时间序列空气动力学粗糙度和零平面位移高度估算[J]. 气象科学, 2011, **31**(4): 516 – 524.
- YANG Aqiang, SUN Guoqing, LU Lixin, *et al.* Deriving aerodynamic roughness length and zero-plane displacement height from MODIS product for Eastern China [J]. *J Meteorol Sci*, 2011, **31**(4): 516 – 524.
- [25] 陈云飞, 江洪, 周国模, 等. 人工高效经营雷竹林 CO<sub>2</sub> 通量估算及季节变化特征[J]. 生态学报, **33**(11): 3434 – 3444.
- CHEN Yunfei, JIANG Hong, ZHOU Guomo, *et al.* Estimation of CO<sub>2</sub> fluxes and its seasonal variations from the effective management Lei bamboo (*Phyllostachys violascens*) [J]. *Acta Ecol Sin*, 2013, **33**(11): 3434 – 3444.
- [26] 郑炳松, 卢庭高, 程晓建, 等. 雷竹光合特性的研究[J]. 福建林学院学报, 2001, **21**(4): 359 – 362.
- ZHENG Bingsong, LU Tinggao, CHENG Xiaojian, *et al.* Study on the photosynthetic characteristics of Lei bamboo leaves [J]. *J Fujian Coll For*, 2001, **21**(4): 359 – 362.
- [27] 高翔, 郝卫平, 顾峰雪, 等. 降雨对旱作春玉米农田土壤呼吸动态的影响[J]. 生态学报, 2012, **32**(24): 7883 – 7893.
- GAO Xiang, HAO Weiping, GU Fengxue, *et al.* The impact of rainfall on soil respiration in a rain-fed maize cropland [J]. *Acta Ecol Sin*, 2012, **32**(24): 7883 – 7893.
- [28] 冯道俊. 植物水涝胁迫研究进展[J]. 中国水运, 2006, **6**(10): 253 – 255.
- FENG Daojun. The research progress of plant waterlogging stress [J]. *China Water Transport*, 2006, **6**(10): 253 – 255.
- [29] 刘允芬, 宋霞, 孙晓敏, 等. 千烟洲人工针叶林 CO<sub>2</sub> 通量季节变化及其环境因子的影响[J]. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2004, **34**(增刊 II): 109 – 117.
- LIU Yunfen, SONG Xia, SUN Xiaomin, *et al.* The seasonal changes of CO<sub>2</sub> flux and the influence of environmental factors in Qianyanzhou coniferous forest [J]. *Sci China Ser D Earth Sci*, 2004, **34**(supp II): 109 – 117.