

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第32卷 第12期 Vol.32 No.12 **2012**

中国生态学学会
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 32 卷 第 12 期

2012 年 6 月 (半月刊)

目 次

河口湿地人为干扰度时空动态及景观响应——以大洋河口为例·····	孙永光,赵冬至,吴涛,等 (3645)
鄱阳湖南矶湿地优势植物群落及土壤有机质和营养元素分布特征·····	张全军,于秀波,钱建鑫,等 (3656)
青岛市湿地生态网络评价与构建·····	傅强,宋军,毛锋,等 (3670)
大堤型湖滨带生态系统健康状态驱动因子——以太湖为例·····	叶春,李春华,王秋光,等 (3681)
绿色屋顶径流氮磷浓度分布及赋存形态·····	王书敏,何强,张峻华,等 (3691)
坡度对农田土壤动物群落结构及多样性的影响·····	何先进,吴鹏飞,崔丽巍,等 (3701)
枣园桃蛀果蛾寄生蜂种类及其与寄主的关系·····	姚艳霞,赵文霞,常聚普,等 (3714)
基于逻辑斯蒂回归模型的鹭科水鸟栖息地适宜性评价·····	邹丽丽,陈晓翔,何莹,等 (3722)
温度、盐度和 pH 对马氏珠母贝稚贝清滤率的联合效应·····	朱晓闻,王辉,刘进,等 (3729)
鸡桑药共生模式库区土壤养分变化及流失风险·····	赵丽平,杨贵明,赵同科,等 (3737)
黑河中游典型土地利用方式下土壤粒径分布及与有机碳的关系·····	张俊华,李国栋,南忠仁 (3745)
DEM 栅格分辨率和子流域划分对杏子河流域水文模拟的影响·····	邱临静,郑粉莉,Yin Runsheng (3754)
粒度变化对城市热岛空间格局分析的影响·····	郭冠华,陈颖彪,魏建兵,等 (3764)
基于景观连接度的森林景观恢复研究——以巩义市为例·····	陈杰,梁国付,丁圣彦 (3773)
城市能源利用碳足迹分析——以厦门市为例·····	林剑艺,孟凡鑫,崔胜辉,等 (3782)
高寒牧区村域生态足迹——以甘南州合作市为例·····	王录仓,高静 (3795)
太湖湖滨带生态系统健康评价·····	李春华,叶春,赵晓峰,等 (3806)
秦岭大熊猫栖息地巴山木竹生物量·····	党坤良,陈俊娴,孙飞翔,等 (3816)
盐胁迫对盐生植物黄花补血草种子萌发和幼苗生长的影响·····	尤佳,王文瑞,卢金,等 (3825)
海南霸王岭山地原始林与伐后林中木质藤本对支持木的选择·····	刘晋仙,陶建平,何泽,等 (3834)
闽楠幼树光合特性及生物量分配对光环境的响应·····	王振兴,朱锦懋,王健,等 (3841)
基于形态及分子标记的濒危植物夏蜡梅自然居群的遗传变异研究·····	金则新,顾婧婧,李钧敏 (3849)
不同径级油松径向生长对气候的响应·····	姜庆彪,赵秀海,高露双,等 (3859)
珍稀濒危植物长蕊木兰种群的年龄结构与空间分布·····	袁春明,孟广涛,方向京,等 (3866)
巨桉与 5 种木本植物幼树的耗水特性及水分利用效率的比较·····	胡红玲,张健,万雪琴,等 (3873)
银木凋落叶腐解过程对小白菜生长和抗性生理的影响·····	黄澈澈,胡庭兴,张念念,等 (3883)
基于氡示踪剂和热扩散技术的栓皮栎水分运输速率与效率研究·····	孙守家,孟平,张劲松,等 (3892)
石漠化干旱环境中石生藓类水分吸收特征及其结构适应性·····	张显强,曾建军,湛金吾,等 (3902)
含铜有机肥对土壤酶活性和微生物群落代谢的影响·····	陈琳,谷洁,高华,等 (3912)
钝叶枥不同性别花的花部形态与传粉特征比较·····	王茜,邓洪平,丁博,等 (3921)
我国春玉米潜在种植分布区的气候适宜性·····	何奇瑾,周广胜 (3931)
烯效唑干拌种对小麦氮素积累和运转及籽粒蛋白质品质的影响·····	樊高琼,杨恩年,郑亭,等 (3940)

专论与综述

中国产业共生发展模式的国际比较及对策·····	石磊,刘果果,郭思平 (3950)
-------------------------	-------------------

研究简报

吉林省镇赉县近 10 年景观格局变化·····	张国坤,卢京花,宋开山,等 (3958)
杨树人工林生态系统通量贡献区分析·····	金莹,张志强,方显瑞,等 (3966)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 330 * zh * P * ¥ 70.00 * 1510 * 35 * 2012-06



封面图说: 鸳鸯——在分类上属雁形目,鸭科。英文名为 Mandarin Duck(即“中国官鸭”)。鸳指雄鸟,鸯指雌鸟,故鸳鸯属合成词。常常栖息于山地河谷、溪流、湖泊、水田等处,雌雄偶居,以植物性食物为主,也食昆虫等小动物。繁殖期 4—9 月间,雌雄配对后迁至营巢区。巢往往置于树洞中,用干草和绒羽铺垫,每窝产卵 7—12 枚。江西省婺源鸳鸯湖是亚洲最大的野生鸳鸯越冬栖息地。鸳鸯是一种美丽的禽鸟,中国传统文化又赋予它很多美好的寓意,因此,在许多文学艺术作品中经常用以表达爱情。

彩图提供:陈建伟教授 北京林业大学 E-mail: cites.chenjw@163.com

DOI: 10.5846/stxb201107241090

金莹, 张志强, 方显瑞, 康满春, 查同刚, 王小平, 陈俊崎. 杨树人工林生态系统通量贡献区分析. 生态学报, 2012, 32(12): 3966-3974.

Jin Y, Zhang Z Q, Fang X R, Kang M C, Zha T G, Wang X P, Chen J Q. Footprint analysis of turbulent flux over a poplar plantation in Northern China. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(12): 3966-3974.

杨树人工林生态系统通量贡献区分析

金 莹¹, 张志强^{1,*}, 方显瑞¹, 康满春¹, 查同刚¹, 王小平², 陈俊崎²

(1. 北京林业大学水土保持与荒漠化防治教育部重点实验室, 北京 100083;

2. 北京市林业碳汇工作办公室, 北京 100085)

摘要:采取通量源区模型 FSAM(Flux Source Area Model)利用 2009 年北京大兴区杨树人工林生态系统碳水通量涡度相关观测资料,分析了不同大气条件下生态系统的通量贡献区分布特征。研究结果表明:(1)该站通量贡献区随大气稳定条件增强而增大。除 326.25°—3.75°方向生长季不稳定条件下外,生长季的通量贡献区范围普遍大于非生长季的贡献区范围;(2)通量贡献区与观测高度、冠层高度、地表粗糙度、风向以及大气稳定度有关,当风速风频较大,大气不稳定时,湍流扩散作用强烈,贡献区范围较小;(3)该观测场在 2009 年以不稳定大气条件为主,通量信息主要来源于距离观测塔 50—400 m 范围,且 69.3% 的信息来源于通量塔偏北风与偏南风方向,其中 42.56% 的信息来自于偏南风方向;(4)随着大气稳定程度加强,通量来源最少区从塔偏西方转为偏东方,在大气稳定度条件和风向的共同作用下,生长季时主要通量贡献区在塔偏南方向,而非生长季时主要通量贡献区在塔偏北方向。

关键词: 杨树人工林;通量贡献区分析;通量贡献区模型

Footprint analysis of turbulent flux over a poplar plantation in Northern China

JIN Ying¹, ZHANG Zhiqiang^{1,*}, FANG Xianrui¹, KANG Manchun¹, ZHA Tonggang¹, WANG Xiaoping², CHEN Junqi²

1 Key Laboratory of Soil and Water Conservation and Desertification Combating, Ministry of Education, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

2 Beijing Forestry Carbon Administration, Beijing 100085, China

Abstract: Footprint source area analysis is an important approach to study qualitatively and quantitatively the relationship between the flux information and the surface condition. Fluxes measured with eddy covariance system over a heterogeneous surface are usually of uncertainty, hard to control and difficult to interpret. As a result, the credibility of energy and mass exchanges between the atmosphere and the land surface could be questionable. Therefore, it is critically important to identify the fluxes measurement by improved understanding the footprint source area. We calculated the footprint source area from continuous flux measurement by an eddy covariance system from Jan 1, 2009 to Dec 31, 2009 using FSAM(Footprint Source Area Model) model over a poplar plantation in the southern part of Beijing (DanXing; 39°31'50"N, 116°15'07"E). Our objectives are to analyze the spatiotemporal distribution of footprint source area and to interpret the representativeness of the flux measurement data. Changing with the seasons, the prevailing wind directions were 146.25°—213.7° and 326.25°—33.75° and non-prevailing wind directions remained 33.75°—146.25° and 213.75°—326.25°, respectively. On the spatial variation, stable stratification inhibits turbulence diffusion and contributes to the downwind flux information. Our results indicated that the more stable the atmosphere stability conditions were, the larger the source areas were. During

基金项目:国家林业行业专项(201204102);北京市教育委员会共建项目“北京地区人工林碳平衡与碳汇功能环境响应机理”;北京市林业碳汇工作办公室观测运行基金;教育部重点项目(105027);高等学校博士专项科研基金(20040022013);中美碳联盟 USCCC 国际合作项目资助

收稿日期:2011-07-24; 修订日期:2012-05-02

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhqzhang@bjfu.edu.cn

the study period, the source areas in the dormant season were larger than those in the growing season, except for the wind direction between 326.25° to 33.75° . According to our result, the source area became smaller while the wind frequents and strength became higher. Based on computing the one year measurement data, the upwind ranges were about 50—400 m mainly characterized with unstable stratification around the measurement site. Moreover, our results indicated that 69.3% of the flux information came from northwest and southwest, and approximately, 42.56% of which came from the southwest. According to the combined action of atmosphere conditions and wind directions, the footprint that measured in the growing season was from the southern part of the tower. In addition, with the stronger of the atmosphere conditions, the smallest region of source area changed from west to east. On the time scale, unstable stratification dominated the measurement site during almost all wind directions, only when the winds blew from the east did it switch to stable stratification. In particular, during the growing season when the winds came from the north, the source regions were mostly affected by atmospheric conditions. Generally speaking, the source area is related to the measurement height, canopy height, roughness length, wind direction and atmospheric conditions and the source areas enlarge with the stability of atmospheric stratification.

Key Words: poplar plantation; footprint model; footprint analysis

随着涡度相关法被广泛用来测定地表与大气间物质和能量交换,通量贡献区分析的概念和方法也应运而生。在地气交换研究中,基本方法都是基于单个空间点的连续观测,并以此来获得感兴趣区域的湍流参数的定量描述^[1]。对于面积足够大、下垫面均一的生态系统而言,来自各方向的通量是相同的,因此通过测定冠层上方的湍流通量可以很好地反映真实的地气交换情况,其涡度相关的观测值可以反映生态系统真实的净生态系统交换量。然而由于实际观测中并不能保证观测区域的均质性,不可避免会有下垫面不均一、地形相对复杂等情况,这就增加了观测难度和不确定性,给湍流数据分析、数据质量控制以及数据信息解读等带来困难。通量贡献区函数恰好反映了地表通量来源,即“源强”与观测点之间的函数关系,因此,可以利用通量贡献区分析定性或定量研究通量信息与地面状况之间的关系。

通量贡献区分析首要是求解通量贡献函数,目前适合不同大气条件和地表植被状况的通量贡献区模型主要包括解析模型、拉格朗日随机模型、大涡模拟模型^[2-3]。其中 FSAM (Flux Source Area Model) 是由 Schmid^[4]提出的欧拉解析模型,该模型通过平流扩散的解析解建立起来,依据大气扩散学中的倒置烟羽扩散理论,假设风向沿 X 轴负方向、侧风向的扩散遵从高斯分布,不考虑垂直方向的通量扩散,同时忽略沿风向的扩散,各风向上的扩散相互独立,该模型假设通量观测位于常通量层并且通量均来自地面,且气流水平均匀^[5]。由于该模型原理简单并考虑下垫面的不均匀性,因而得到了广泛的应用^[6]。

本文利用 FSAM 模型^[4,7]对位于北京市大兴区永定河沿河沙地的杨树人工林生态系统的涡度相关观测数据进行通量贡献区分析,其目的包括:(1)确定观测塔周围通量贡献区的时空分布特点;(2)分析和解释观测数据的空间代表性。

1 研究区概况

研究区位于北京市大兴区榆垓镇林场($39^{\circ}31'50''\text{N}$, $116^{\circ}15'07''\text{E}$)。该地区是海河水系永定河洪积冲积平原,海拔 30 m,地势平坦。研究区为杨树人工林,主要营造于 1998、2001、2003 年,总面积为 0.8 km^2 ,平均胸径为 14.5 cm,平均树高为 16.2 m,平均栽植密度为 $3\text{ m}\times 2\text{ m}$ 。林下植被种类较少,主要为紫苜蓿(*Medicago sativa* Linn),尖头叶藜(*Chenopodium acuminatum* Willd),黄花蒿(*Artemisia annua* L.)等。每年 4—10 月为生长季。

2 研究方法

2.1 通量与小气候测定系统

研究区观测仪器包括涡度相关观测系统和微气象梯度观测系统,观测塔高 37 m,主要观测仪器包括:开路式 $\text{H}_2\text{O}/\text{CO}_2$ 红外气体分析仪(LI-7500, Li-Cor, NE),三维超声风速仪(CSAT3, CS),净辐射仪(Q7.1,

REBS), 安装高度均为 20 m; 气压计 (CS105, CS, USA), 翻斗式自动雨量计 (TE525-L, CS, USA), 安装高度分别为 21 m 和 22.5 m; 4 层空气温湿度传感器 (HMP45Cprobe, CS, USA), 安装高度为 5、10、15 m 和 20 m; 3 个土壤温度传感器 (TCAV107, CS, USA) 和 3 个土壤热通量板 (HFT3, Seattle, WA), 均置于地表以下 5 cm、10 cm 和 20 cm 处; 两个土壤水分观测仪 TDR (CS616, CS, USA) 置于地表以下 5 cm 和 20 cm 处。

2.2 涡度相关通量观测数据处理

本文选取大兴观测站 2009 年 1—12 月连续的涡度相关观测数据和气象观测数据。塔上数据为 10 Hz 实时数据和 30 min 在线平均数据, 利用数据采集器 (产自美国, 型号为 CRR5000) 采集, 塔下常规气象数据为 30 min 平均数据, 用数据采集器 (产自美国, 型号为 CR23X) 进行采集。

采集到的数据利用 SAS 软件进行后处理, 处理方法包括: 野点剔除、趋势去除、平面坐标拟合^[8]、空气密度效应修正^[9]、湍流脉动数据的稳态测试^[10]和缺失数据插补, 最后得到完整的通量序列。

根据本文研究需要, 在数据统计分析之前, 还要进行如下的数据剔除: 1) 由于降雨时仪器响应问题会出现测量值的不准确或不合理现象, 所以剔除降雨量不为零的数据; 2) 由于风速较小时湍流混合发展不充分, 因此剔除风速小于 1 m/s 的数据; 3) 由于摩擦风速小于临界值时大气湍流混合程度弱, 湍流发展不充分, 因此剔除 $u_* < 0.15$ m/s 的数据; 4) 根据模型适用范围要求, 剔除强稳定条件 ($\xi > 1$) 和强不稳定条件 ($\xi < -1$) 下的数据。基于本文剔除数据的原则, 约保留了 60% 的数据用于通量贡献区分析, 一般情况下 50% 以上数据就很有代表性。

2.3 通量贡献区模型

通量贡献区 (footprint) 是指对近地面层某一点所观测到的对湍流交换过程有贡献的有效源 (汇) 区域或者说对观测点的通量大小产生主要影响的表面区域^[11]。通量贡献函数或源权重函数是描述表面源或汇空间分布与观测高度 z_m 处观测到的通量信息之间关系的函数, 其函数值可以解释为表面区域某一点对观测值的相对权重^[7]。

本文利用 Schmid^[4]提出的 FSAM 解析模型来计算涡度相关观测的通量贡献区分布。模型中源权重函数表达式为^[12]:

$$f(x, y, z_m - z_0) = \frac{F(x, y, z_m)}{F_u} = \frac{1}{F_u} \cdot [\overline{F^y}(x, z_0) + \overline{F^y}(x > 0, z_m)] \cdot D_y(x, y) \quad (1)$$

式中, F_u 为表面源 (汇) 强度, $F(x, y, z_m)$ 为 z_m 高度的垂直通量, F^y 为横向 (即 y 方向) 的积分通量, $D_y(x, y)$ 为横向的浓度分布函数。

为了方便获得某一观测点测定的某一特定源权重的通量来源的最小可能范围, 模型引入 P 水平概念, 它表示在通量贡献达到 P 时的最小区域上的源权重函数的积分相对于整体的比值。表达式为^[4]:

$$P = \frac{\varphi_p}{\varphi_{tot}} = \frac{\int_{\Omega_p} \int F(x, y, z_m) \cdot dx \cdot dy}{\int_{-\infty}^{\infty} \int_0^{\infty} F(x, y, z_m) \cdot dx \cdot dy} \quad (2)$$

式中, Ω_p 代表 P 水平源区域, 即权重函数等值线 $f(x, y, z_m - z_0) = f_p$ 所包围的面积。

对于任意 P , 但 $P \neq 1$, 且积分区域限制在 $x > 0$ 的范围内时, P 的表达式为^[4]:

$$P = \frac{1}{F_u} \cdot \int_{\Omega_p} \left[- \int_{z_m}^{z_0} \bar{u}(z) \cdot \frac{\partial}{\partial x} \bar{C}^y(x, z) \cdot dz \cdot D_y(x, y) \right] \cdot dx \cdot dy \quad (3)$$

FSAM 模型输入参数为 z_m/z_0 、 z_m/L 、 σ_v/u_* , 其中 z_0 为粗糙度, z_m/L 为稳定度参数, L 为 Monin-Obukhov 长度, σ_v 为横向风脉动标准差, u_* 为摩擦风速, 其中 z_m/z_0 反映了粗糙元以上的观测高度, z_m/L 反映了参考高度处的浮力强度, σ_v/u_* 反映了横向风脉动强度。Schmid^[4]对模型的敏感性测验给出模型输入参数的变化范围为: 稳定条件下, $2.0 \cdot 10^1 \leq z_m/z_0 \leq 5.0 \cdot 10^2$, $2.0 \cdot 10^{-4} \leq z_m/L \leq 1.0 \cdot 10^{-1}$, $1.0 \leq \sigma_v/u_* \leq 6.0$; 不稳定条件下, $4.0 \cdot 10^{-1} \leq z_m/z_0 \leq 1.0 \cdot 10^3$, $4.0 \cdot 10^{-4} \leq -z_m/L \leq 1.0$, $1.0 \leq \sigma_v/u_* \leq 6.0$ 。此外, 模型的输出参数为通量

贡献区的特征尺度 a 、 e 、 d 、 X_d 和 X_m , 分别表示源区的近地点、远地点、侧向距离最大点及其对应的横坐标和通量最大值所在点的来流方向距离(图 1)。所有输出参数都依赖于 z_m/z_0 和 z_m/L , 只有侧向距离最大点和通量贡献区面积同时依赖于 σ_v/u_* 。

本文根据 Yang 等^[13] 提出的最小化成本函数的计算公式, 利用单层三维超声风速计测定数据和湍流相似性理论求解动力学粗糙度 z_0 。随着涡度相关技术的发展, 该方法已经为许多微气象学者所应用^[14]。成本函数表达式为^[13]:

$$J = \sum_t \sum_{i=1}^n \left\{ u_*^t - \kappa U_i^t / \left[\ln \frac{z_{mi}}{z_0} - \Psi_m(z_0/L^t, z_{mi}/L^t) \right] \right\}^2 \quad (4)$$

式中, n 表示观测高度的数量, t 表示时间序列, u_* 表示摩擦风速, κ 为卡曼常数, 通常取 $\kappa=0.4$ 。 z_m 取 $z_m=z-d$, d 为零平面位移, z 为观测高度, z_0 为粗糙长度, Ψ_m 为稳定度修正函数, L 表示 Monin-Obukhov 长度。本研究中, $n=1$, t 为半小时时间序列, 零平面位移 d 取经验值, $d=2/3h$ ^[15], h 为平均树高。

将稳定度修正函数 Ψ_m 在不稳定条件($\frac{z}{L} < 0$)和稳定条件($\frac{z}{L} > 0$)下的表达式:

$$\begin{cases} \Psi_m(\frac{z}{L}) = 2\ln(\frac{1+x}{2}) + \ln(\frac{1+x^2}{2}) - \arctan(x + \frac{\pi}{2}) \\ x = (1 - 16\frac{z}{L})^{1/4} \end{cases} \quad \frac{z}{L} < 0 \quad (5)$$

$$\Psi_m(\frac{z}{L}) = -5\zeta \quad \frac{z}{L} > 0 \quad (6)$$

代入(4)式, 分别求出稳定条件和不稳定条件下的最小二乘近似。由于 d 取经验值, 只要选取一个较小的 z_0 初始值, 然后按一定步长(本文取 0.0005 ^[13], 步长远远小于 d 的原则)进行数值迭代计算, 当 $\frac{\partial J}{\partial z_0} \approx 0$ 时的 z_0 值即为所求。

本文依据全年风向风速分布状况确定该年的主风方向, 再计算不同风向和大气稳定度情况下的地表粗糙度。通常假设连续 10 d 的 z_0 值是常数, 每 10 d 算 1 个 z_0 值, 取连续 3 个 z_0 的算术平均值作为该月的 z_0 值, 再根据需要将结果按生长季和非生长季计算出 z_0 多月平均值。

3 结果与分析

3.1 风场分析及模型输入参数

2009 年全年 39.6% 的风来自 146.25° — 213.75° 方向, 24.55% 的风来自 326.25° — 33.75° 风向(图 2), 可视这两个方向为该年的主风方向, 这主要是因为样地所在地区处于温带季风气候区, 盛行风向随季节变化而变化, 冬季主要受到来自高纬度内陆极地大陆气团影响, 盛行偏北风, 而夏季主要是受到变性热带海洋气团的影响, 盛行偏南风。此外, 19.06% 和 16.79% 的风分别来自 33.75° — 146.25° 和 213.75° — 326.25° 两个方向, 相对很小。全年 1 m/s 附近的风速最多, 其次是 2 m/s 附近, 个别时间风速较大, 大约在 11 m/s, 较大风速发生在偏北风方向上(图 3)。年平均风速是 1.86 m/s。

模型输入参数均在模型要求的变化范围之内(表 1)。生长季时的 z_m/z_0 略小于非生长季, 说明在生长季粗糙元以上的测量高度较小, 即动力学粗糙度较大, 虽然粗糙元高度和动力学粗糙度不完全相等, 但是高大粗糙元和单位面积粗糙元数量多时, 对应的动力学粗糙度就大^[16]。在生长季, 植物正处于生长阶段植物叶片茂盛, 粗糙元平均垂直范围较高, 而且单位面积上粗糙元的数量较多, 导致动力学粗糙度较大。此外稳定条件下

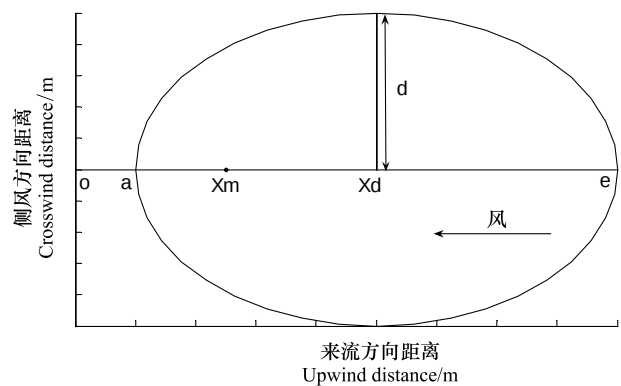


图 1 通量源区特征尺度示意图^[4]

Fig. 1 Characteristic dimensions of source area^[4]

的 z_m/z_0 小于不稳定条件下,这可能是因为不稳定条件下风速较大,而一般而言,随着风速的增大, z_0 增大^[16]。比较不同稳定度条件下的 z_m/L 的绝对值可知,不稳定条件时其值较小,而 L 可视作湍流混合的垂直尺度,因此可见不稳定条件下湍流混合的垂直尺度较大。此外,146.25°—213.75° 风向非生长季时和 213.75°—326.25° 风向时的 σ_v/u_* 值较大,说明在这两种情况下横向风湍流对通量贡献区的影响比较大。

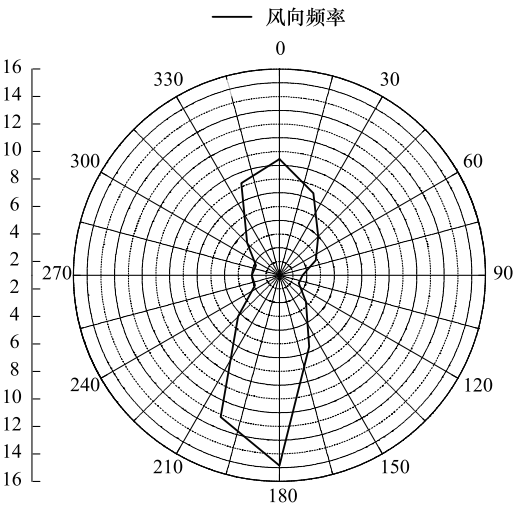


图2 风向分布图

Fig. 2 Distribution of wind direction frequency

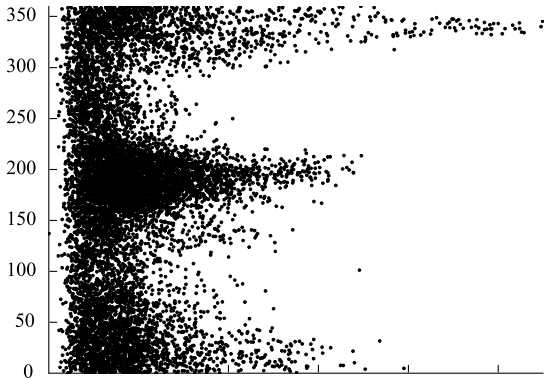


图3 风速分布图

Fig. 3 Distribution of wind velocity

表 1 不同风向上不同季节和大气状况下的输入参数

	146.25°—213.75°				326.25°—33.75°				33.75°—146.25°		213.75°—326.25°	
	生长季		非生长季		生长季		非生长季		全年		全年	
	Growth season		Dormant season		Growth season		Dormant season		Year		Year	
	稳定	不稳定	稳定	不稳定	稳定	不稳定	稳定	不稳定	稳定	不稳定	稳定	不稳定
z_m/z_0	26.3	38.1	50.8	65.1	32.1	49.0	33.5	24.3	25.6	44.0	20.8	28.5
z_m/L	0.033	-0.019	0.026	-0.024	0.030	-0.020	0.015	-0.006	0.022	-0.019	0.032	-0.016
σ_v/u_*	1.783	1.836	2.105	2.183	2.013	1.944	1.966	1.934	1.963	1.972	2.255	2.124

z_m/z_0 代表观测高度; z_m/L 代表稳定度参数; σ_v/u_* 代表横向风脉动标准差

3.2 通量贡献区空间分布

3.2.1 主风方向上的分布

应用 FSAM 模型,按不同风向输入参数,再根据模型输出参数绘制 P 等值线分布图,其中等值线 P 由内向外依次为 0.2、0.4、0.6 和 0.8。主风方向 146.25°—213.75° 上相同 P 水平下,非生长季贡献区空间范围整体上略小于生长季时的空间范围。稳定条件下迎风方向上各 P 水平贡献区的范围大于不稳定条件下的范围,生长季时尤其突出。例如 80% 通量贡献区,即 $P=0.8$ 时, $e_a=333.18\text{ m}$, $e_b=429.28\text{ m}$, $e_c=343.14\text{ m}$, $e_d=488.74\text{ m}$, $a_a=58.85\text{ m}$, $a_b=68.83\text{ m}$, $a_c=55.05\text{ m}$, $a_d=64.93\text{ m}$, 生长季稳定条件下的来流方向范围比不稳定条件下大 135 m 左右,非生长季稳定条件下的来流方向范围比不稳定条件下大 80 m 左右。此外,通量最大值所在位置依次为 118.70、144.33、113.06 m 和 141.98 m。最大值位置随稳定条件增强而远离观测位置,非生长季比生长季离观测点更远(图 4)。

在 326.25°—33.75° 方向上,最大通量值依次位于来流方向 115.80、133.1、116.76 m 和 141.95 m,距观测点的距离随稳定度增加而变大,且非生长季略小于生长季(图 5)。在不稳定条件下,非生长季源区范围显著大于生长季的源区范围;稳定条件下,非生长季源区范围小于生长季源区范围。不稳定条件下的各 P 水平等

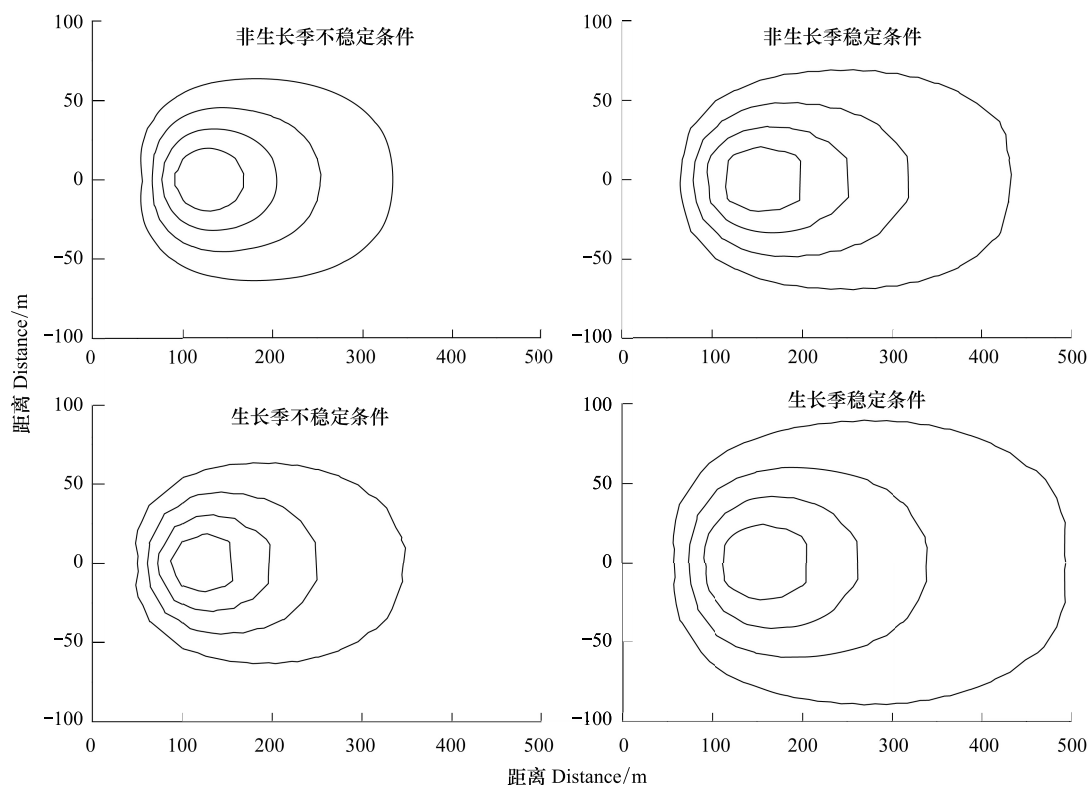


图4 主风方向 146.25° — 213.75° 上不同大气条件下的源区空间分布情况,观测塔位于原点

Fig. 4 The distributions of source areas in prevailing wind direction 146.25° — 213.75° under different atmospheric stabilities

值线包围的面积明显小于稳定条件下,而且生长季不稳定条件下的通量源区明显小于其他情况下通量源区,这可能是因为此时湍流扩散较快,涡度相关观测仪器捕捉不到较远处的湍流通量信息。可见,此时大气条件的变化对通量源区的影响较大。

此外,两个方向上通量贡献区在稳定条件下均大于不稳定条件下。这主要是因为稳定条件下大气垂直运动弱,湍流扩散速度较慢,通量塔能观测到距离观测点较远位置的通量信息,所以源区面积较大。相比较而言, 326.25° — 33.75° 方向上的源区面积略大于 146.25° — 213.75° 方向上的源区面积。

3.2.2 非主风方向上的分布

风向在 33.75° — 146.25° 、 213.75° — 326.25° 之间时,最大通量值依次位于来流方向110.89 m、139.76 m、121.82 m和134.23 m。稳定条件下的源区范围均大于不稳定条件下的源区范围,这与主风方向时的情况一致,主要是不同大气稳定度条件下湍流扩散强度不同造成的。当 $P=0.8$ 时,风向在 33.75° — 146.25° 时,横向范围分别为50—350 m和50—450 m,垂直方向分别为-75—75 m和-100—100 m;风向在 213.75° — 326.25° 时,横向范围约为50—400 m和50—550 m,而垂直于风向的范围为-100—100 m和-125—125 m。此外,在各 P 水平上,风向 213.75° — 326.25° 的通量源区范围大于 33.75° — 146.25° 风向的通量源区范围(图6)。

3.3 通量贡献区的时间分布

在 146.25° — 213.75° 、 213.75° — 326.25° 和 326.25° — 33.75° 三个方向上,大气稳定条件出现的频率多于不稳定条件,在 33.75° — 146.25° 方向上大气稳定条件出现的频率少于不稳定条件(图7)。结合风向风速在一年中出现的频率(图1、图2),可以计算得到通量贡献区在时间尺度上的分布情况:在2009年1月—12月的1a里,主风方向 146.25° — 213.75° 和 326.25° — 33.75° 上,生长季和非生长季在稳定和不稳定条件下的贡献区分布比例为15.7%、10.64%、7.64%、8.58%和6.94%、4.37%、9.49%、5.94%,而在 213.75° — 326.25° 、 33.75° — 146.25° 方向上稳定和不利条件下的贡献区分布比例分别为7.59%、8.00%和8.32%、

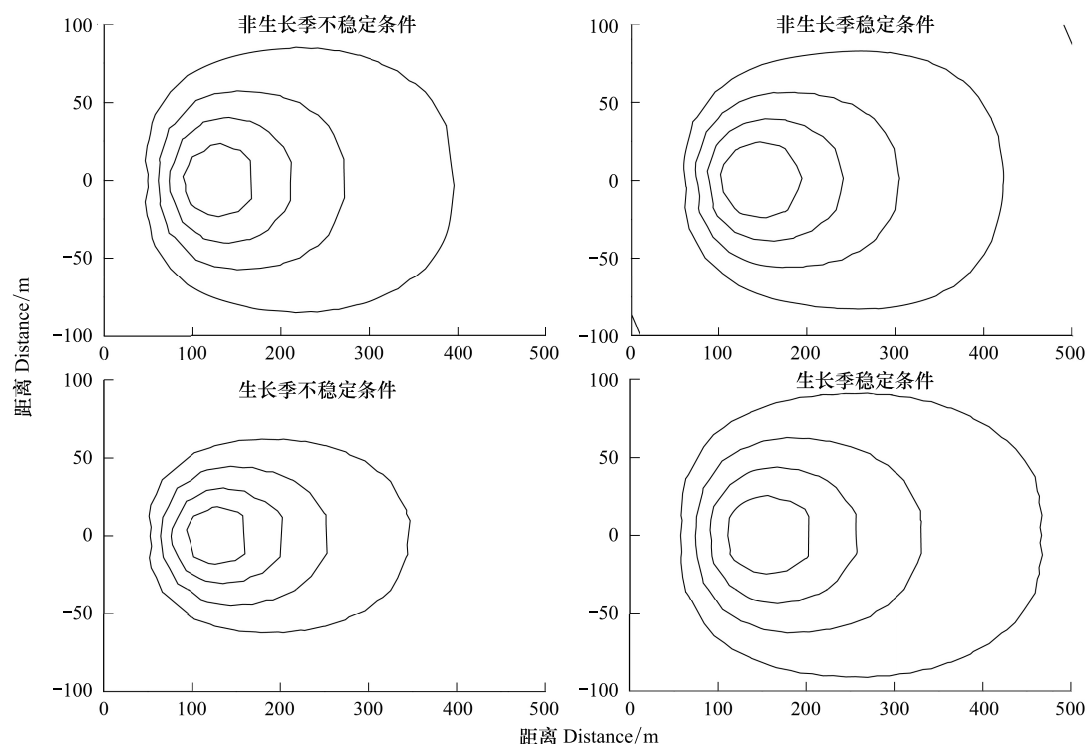


图5 主风方向 326.25° — 33.75° 上的不同大气条件下源区分布情况,观测塔位于原点

Fig. 5 The distributions of source areas in prevailing wind direction 326.25° — 33.75° under different atmospheric stabilities

6.79%。综合以上数据分析可见,69.3%的通量信息来源于通量塔的偏北风与偏南风方向,其中42.56%的信息来自于偏南风方向上。因此,2009年通量贡献区主要变化发生在塔偏南方50—450 m范围内,通量贡献区主要在偏南方80—170 m的范围内。一般来说,在大气处于不稳定条件时,观测塔较少测到来自塔偏西方方向的通量;而在稳定条件时,观测塔较少测到来自塔偏东方方向的通量。另外,生长季时主风 146.25° — 213.75° 方向稳定条件出现的概率最大,非生长季时 326.25° — 33.75° 方向稳定条件出现的概率最大。因此,生长季时,通量数据主要来源于偏南方向50—500 m,非生长季时,通量数据主要来源于偏北方向50—400 m。

4 讨论和结论

本文利用FSAM模型分析了2009年通量贡献区时空分布特点,从而确定观测塔测得的数据的空间代表性。从通量贡献区时空分布来看,本文中生长季的源区面积普遍大于非生长季,与赵晓松等^[17]应用FSAM模型对长白山阔叶红松林进行通量贡献区分析的结果不同,而且,最大贡献区在塔偏南方80—170 m范围,比赵晓松等的研究结果100—400 m范围要小。这可能是因为本文林分高度和观测高度都比较小,而且 z_0 的确定方法不同,赵晓松等^[17]采用多层风速数据利用空气动力学方法计算出 z_0 ,本文采用的是单层风速数据和最小化成本函数法计算出 z_0 。此外也可以用生态学方法^[16]确定 z_0 ,但是这些方法都是非常简单的经验公式,多适用于静态研究,而且气象学意义也不明确。不同的确定方法可得到不同的 z_0 值,因此得到的通量贡献区分布也有一定差异。此外,本文研究显示通量贡献区随大气稳定度的增强而增大,贡献区沿来流方向逐渐远离观测点,这与很多学者^[17-18]的研究结果相同。观测的范围越远,观测值越有可能受到远处非林区的下垫面的影响,从而造成观测值与实际值的差异。

从通量贡献区模型来看,FSAM欧拉解析模型的算法简化了气流流动的物理过程,使得数学上很简单,减少了数值计算量。最终得到简化的二维通量贡献区,且有较好的准确定^[19]。但是该模型没有考虑冠层内部的气流运动和沿气流方向的扩散,使得该模型在应用于高大的植被贡献区研究时会产生一定的误差。Göckede等^[20]研究表明向前拉格朗日随机模型更适用于高大植被观测区研究,但是并不能证明哪种模型的模

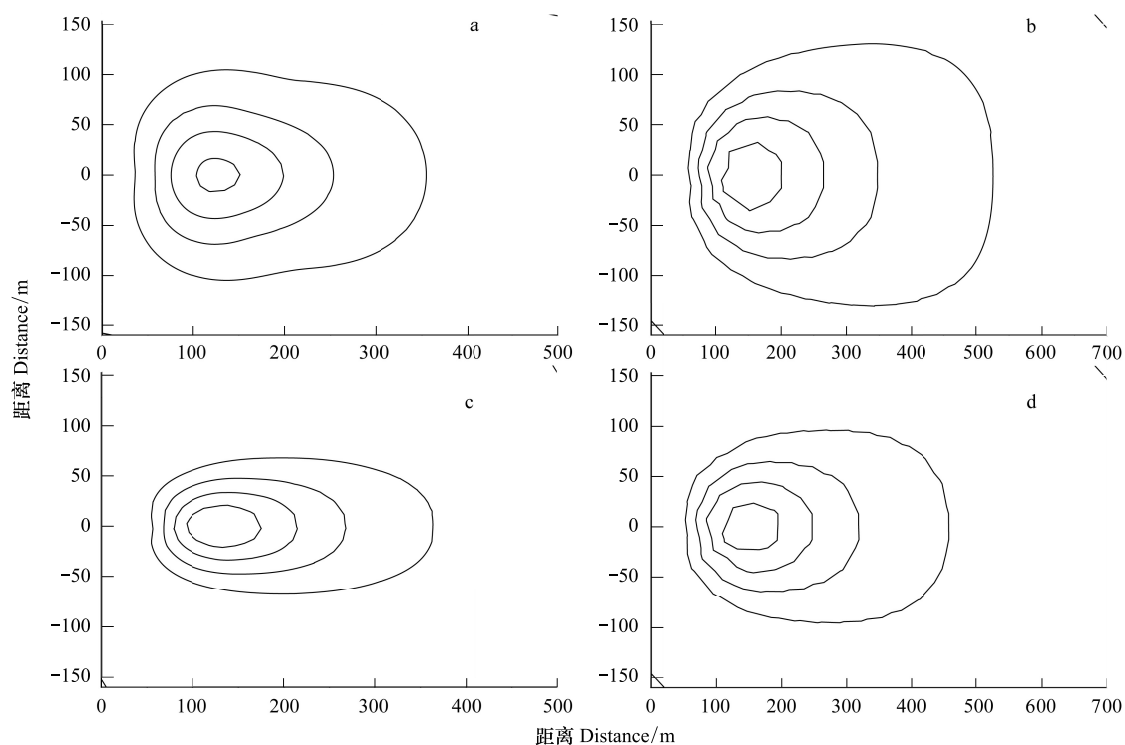


图6 非主风方向 33.75° — 146.25° 、 213.75° — 326.25° 在不稳定大气条件(a, c)和稳定大气条件(b, d)下的源区分布,观测塔位于原点
Fig. 6 The distributions of source areas in non-prevailing wind direction 33.75° — 146.25° and 213.75° — 326.25° under unstable conditions (a, c) and stable conditions (b, d), respectively, with the tower position located at (0,0)

拟结果更准确,这主要是因为没有参考值,而且研究区复杂性使得模型无法进行验证。此外两种模型都能很好的描述基本的湍流情况^[20]。Foken and Leclerc^[21]研究也指出尽管 FSAM 模型较简化而且有一定的局限性,但是依然能够提供有价值的通量信息。

在不考虑观测高度对通量贡献区影响的条件下得出如下结论:(1)随大气稳定度的增强,通量贡献区增大,通量最大值距观测点的距离增大,通量贡献最少的源区从塔偏西方转为塔偏东方;(2)全年通量贡献区分布较离散,基本在距离观测点 500 m 以内,不稳定条件下较集中在 400 m 以内。此外,生长季的通量贡献区面积普遍大于非生长季;(2)通量观测塔测得的数据有 69.3% 来自观测塔的偏北方与偏南方,其中 42.56% 来自于观测塔的偏南方。对观测值产生主要影响的下垫面位于观测塔偏南方 80 m 到 170 m 范围内。生长季时,通量观测数据主要来源于偏南方向 50—500 m,而偏北方向对观测数据的贡献最少;非生长季时,通量观测数据主要来源于偏北方向 50—400 m。

致谢:感谢北京林业大学大兴课题组全体同学在数据采集和处理上的帮助,感谢北京林业大学同小娟老师、中国科学院地理科学与资源研究所郑宁博士在论文修改中给予的帮助。

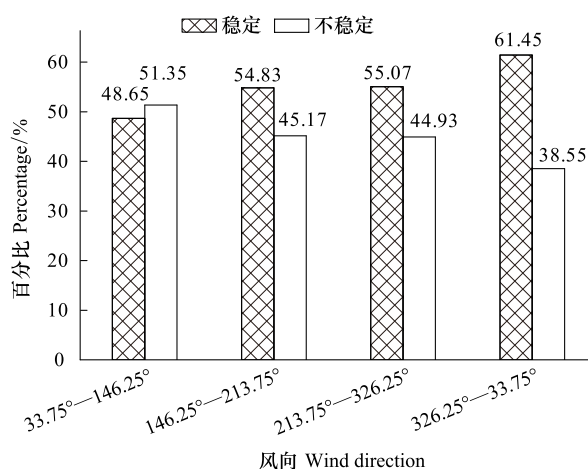


图7 大气稳定度条件在各个风向上的分布
Fig. 7 The distribution of atmospheric stability based on wind direction

References:

- [1] Cai X H. Footprint analysis in micrometeorology and its extended applications. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2008, 32(1): 123-132.
- [2] Göckede M, Foken T, Aubinet M, Aurela M, Banza J, Bernhofer C, Bonnefond J M, Brunet Y, Carrara A, Clement R, Dellwik E, Elbers J, Eugster W, Fuhrer J, Granier A, Grünwald T, Heinesch B, Janssens I A, Knohl A, Koebke R, Laurila T, Longdoz B, Manca G, Marek M, Markkanen T, Mateus J, Matteucci G, Mauder M, Migliavacca M, Minerbi S, Moncrieff J, Montagnani L, Moors E, Ourcival J M, Papale D, Pereira J, Pilegaard K, Pita G, Rambal S, Rebmann C, Rodrigues A, Rotenberg E, Sanz M J, Sedlak P, Seufert G, Siebicke L, Soussana J F, Valentini R, Vesala T, Verbeeck H, Yakir D. Quality control of CarboEurope flux data-Part 1: Coupling footprint analyses with flux data quality assessment to evaluate sites in forest ecosystems. *Biogeosciences*, 2008, 5(2): 433-450.
- [3] Leclerc M Y, Shen S H, Lamb B. Observations and large-eddy simulation modeling of footprints in the lower convective boundary layer. *Journal of Geophysical Research*, 1997, 102(D8): 9323-9334.
- [4] Schmid H P. Source areas for scalars and scalar fluxes. *Boundary-Layer Meteorology*, 1994, 67(3): 293-318.
- [5] Mi N, Yu G R, Wen X F, Sun X M. The primary study of space representation of flux measurement data from China FLUX. *Science in China (Series D): Earth Sciences*, 2006, 36(S1): 22-33.
- [6] Göckede M, Rebmann C, Foken T. A combination of quality assessment tools for eddy covariance measurements with footprint modelling for the characterisation of complex sites. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2004, 127(3/4): 175-188.
- [7] Schmid H P. Experimental design for flux measurements: matching scales of observations and fluxes. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1997, 87(2-3): 179-200.
- [8] Wilczark J M, Oncley S P, Stage S A. Sonic anemometer tilt correction algorithms. *Boundary Layer Meteorology*, 2001, 99(1): 127-150.
- [9] Webb E K, Pearman G I, Leuning R. Correction of flux measurements for density effects due to heat and water vapour transfer. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1980, 106(447): 85-100.
- [10] Foken T, Wichura B. Tools for quality assessment of surface-based flux measurements. *Agriculture and Forest Meteorology*, 1996, 78(1/2): 83-105.
- [11] Schmid H P, Oke T R. A model to estimate the source area contributing to turbulent exchange in the surface layer over patchy terrain. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1990, 116(494): 965-988.
- [12] Horst T W, Weil J C. Footprint estimation for scalar flux measurements in the atmospheric surface layer. *Boundary-Layer Meteorology*, 1992, 59(3): 279-296.
- [13] Yang K, Koike T, Yang D W. Surface flux parameterization in the Tibetan Plateau. *Boundary-Layer Meteorology*, 2003, 106(2): 245-262.
- [14] Lu L, Liu S M, Xu Z W, Yang K, Cai X H, Jia L, Wang J M. The characteristics and parameterization of aerodynamic roughness length over heterogeneous surfaces. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2009, 26(1): 180-190.
- [15] Brutsaert W. *Evaporation into the Atmosphere: Theory, History and Applications*. Boston: D. Reidel, 1982: 299.
- [16] Yu G R, Sun X M. *Principles of Flux Measurement in Terrestrial Ecosystems*. Beijing: Higher Education Press, 2006: 158-161.
- [17] Zhao X S, Guan D X, Wu J B, Jin C J, Han S J. Distribution of footprint and flux source area of the mixed forest of broad-leaved and Korean pine in Changbai Mountain. *Journal of Beijing Forestry University*, 2005, 27(3): 17-23.
- [18] Gu Y J, Gao Y, Guo H Q, Zhao B. Footprint analysis for carbon flux in the wetland ecosystem of Chongming Dongtan. *Journal of Fudan University: Natural Science*, 2008, 47(3): 374-379.
- [19] Schmid H P. Footprint modeling for vegetation atmosphere exchange studies: a review and perspective. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2002, 113(1/4): 159-183.
- [20] Göckede M, Markkanen T, Hasager C B, Foken T. Update of a footprint-based approach for the characterisation of complex measurement sites. *Boundary-Layer Meteorology*, 2006, 118(3): 635-655.
- [21] Foken T, Leclerc M Y. Methods and limitations in validation of footprint models. *Agriculture and Forest Meteorology*, 2004, 127(3/4): 223-234.

参考文献:

- [1] 蔡旭晖. 湍流微气象观测的印痕分析方法及其应用拓展. *大气科学*, 2008, 32(1): 123-132.
- [5] 米娜, 于贵瑞, 温学发, 孙晓敏. 中国通量观测网络 (ChinaFLUX) 通量观测空间代表性初步研究. *中国科学 (D 辑): 地球科学*, 2006, 36(S1): 22-33.
- [16] 于贵瑞, 孙晓敏. *陆地生态系统通量观测的原理与方法*. 北京: 高等教育出版社, 2006: 158-161.
- [17] 赵晓松, 关德新, 吴家兵, 金昌杰, 韩士杰. 长白山阔叶红松林通量观测的 footprint 及源区分布. *北京林业大学学报*, 2005, 27(3): 17-23.
- [18] 顾永剑, 高宇, 郭海强, 赵斌. 崇明东滩湿地生态系统碳通量贡献区分析. *复旦学报: 自然科学版*, 2008, 47(3): 374-379.

CONTENTS

Temporal and spatial dynamic changes and landscape pattern response of Hemeroby in Dayang estuary of Liaoning Province, China	SUN Yongguang, ZHAO Dongzhi, WU Tao, et al (3645)
Distribution characteristics of plant communities and soil organic matter and main nutrients in the Poyang Lake Nanji Wetland	ZHANG Qunjun, YU Xiubo, QIAN Jianxin, et al (3656)
Evaluation and construction of wetland ecological network in Qingdao City	FU Qiang, SONG Jun, MAO Feng, et al (3670)
Driving forces analysis for ecosystem health status of littoral zone with dikes: a case study of Lake Taihu	YE Chun, LI Chunhua, WANG Qiuguang, et al (3681)
The concentrations distribution and composition of nitrogen and phosphorus in stormwater runoff from green roofs	WANG Shumin, HE Qiang, ZHANG Junhua, et al (3691)
Effects of slope gradient on the community structures and diversities of soil fauna	HE Xianjin, WU Pengfei, CUI Liwei, et al (3701)
Investigation of populations of parasitic wasps parasitizing <i>Carposina sasakii</i> Matsumura (Lepidoptera: Carposinidae) in jujube orchards in China, with respect to the wasp-host relationship	YAO Yanxia, ZHAO Wenxia, CHANG Jupu, et al (3714)
Assessment of ardeidae waterfowl habitat suitability based on a binary logistic regression model	ZOU Lili, CHEN Xiaoxiang, HE Ying, et al (3722)
Combined effects of temperature, salinity and pH on the clearance rate of juveniles of <i>Pinctada martensii</i> (Dunker)	ZHU Xiaowen, WANG Hui, LIU Jin, et al (3729)
Soil nutrient dynamics and loss risks in a chicken-forage mulberry-medicinal plant intercropping system	ZHAO Liping, YANG Guiming, ZHAO Tongke, et al (3737)
Soil particle size distribution and its relationship with soil organic carbons under different land uses in the middle of Heihe river	ZHANG Junhua, LI Guodong, NAN Zhongren (3745)
Effects of DEM resolution and watershed subdivision on hydrological simulation in the Xingzihe watershed	QIU Linjing, ZHENG Fenli, YIN Runsheng (3754)
Impacts of grid sizes on urban heat island pattern analysis	GUO Guanhua, CHEN Yingbiao, WEI Jianbing, et al (3764)
Landscape connectivity analysis for the forest landscape restoration: a case study of Gongyi City	CHEN Jie, LIANG Guofu, DING Shengyan (3773)
Carbon footprint analysis on urban energy use: a case study of Xiamen, China	LIN Jianyi, MENG Fanxin, CUI Shenghui, et al (3782)
The ecological footprint of alpine pastures at the village-level: a case study of Hezuo in Gannan Autonomous Prefecture, China	WANG Lucang, GAO Jing (3795)
The ecosystem health assessment of the littoral zone of Lake Taihu	LI Chunhua, YE Chun, ZHAO Xiaofeng, et al (3806)
The biomass of <i>Bashania fargesii</i> in giant pandas habitat in Qinling Mountains	DANG Kunliang, CHEN Junxian, SUN Feixiang, et al (3816)
Effects of salinity on seed germination and seedling growth in halophyte <i>Limonium aureum</i> (L.) Hill	YOU Jia, WANG Wenrui, LU Jin, et al (3825)
Liana-host tree associations in the tropical montane primary forest and post-harvest forest of Bawangling, Hainan Island, China	LIU Jinxian, TAO Jianping, HE Zeet al (3834)
The response of photosynthetic characters and biomass allocation of <i>P. bournei</i> young trees to different light regimes	WANG Zhenxing, ZHU Jinmao, WANG Jian, et al (3841)
Genetic variation among populations of the endangered <i>Sinocalycanthus chinensis</i> based on morphological traits and ISSR profiles	JIN Zexin, GU Jingjing, LI Junmin (3849)
Growth response to climate in Chinese pine as a function of tree diameter	JIANG Qingbiao, ZHAO Xiuhai, GAO Lushuang, et al (3859)
Age structure and spatial distribution of the rare and endangered plant <i>Alcimandra cathartii</i>	YUAN Chunming, MENG Guangtao, FANG Xiangjing, et al (3866)
The water consumption and water use efficiency of the seedlings of <i>Eucalyptus grandis</i> and other five tree species in Sichuan Province	HU Hongling, ZHANG Jian, WAN Xueqin, et al (3873)
Effects of leaf litter of <i>Cinnamomum septentrionale</i> on growth and resistance physiology of <i>Brassica rapa</i> in the decomposition process of litter	HUANG Weiwei, HU Tingxing, ZHANG Niannian, et al (3883)
Water transport velocity and efficiency in <i>Quercus variabilis</i> detected with deuterium tracer and thermal dissipation technique	SUN Shoujia, MENG Ping, ZHANG Jinsong, et al (3892)
The saxicolous moss's features of absorbing water and its structural adaptability in the heterogeneous environment with rock desertification	ZHANG Xianqiang, ZENG Jianjun, CHEN Jinwu, et al (3902)
Effects of organic materials containing copper on soil enzyme activity and microbial community	CHEN Lin, GU Jie, GAO Hua, et al (3912)
Comparison of floral morphology and pollination characteristics between the sexes in <i>Eurya obtusifolia</i>	WANG Qian, DENG Hongping, DING Bo, et al (3921)
Climatic suitability of potential spring maize cultivation distribution in China	HE Qijin, ZHOU Guangsheng (3931)
Effects of uniconazole dry seed dressing on nitrogen accumulation and translocation and kernel protein quality in wheat	FAN Gaoqiong, YANG Ennian, ZHENG Ting, et al (3940)
Review and Monograph	
International comparison and policy recommendation on the development model of industrial symbiosis in China	SHI Lei, LIU Guoguo, GUO Siping (3950)
Scientific Note	
The Change of landscape pattern in Zhenlai Xian, Jilin Province in recent ten years	ZHANG Guokun, LU Jinghua, SONG Kaishan, et al (3958)
Footprint analysis of turbulent flux over a poplar plantation in Northern China	JIN Ying, ZHANG Zhiqiang, FANG Xianrui, et al (3966)

《生态学报》2012 年征订启事

《生态学报》是中国生态学学会主办的自然科学高级学术期刊,创刊于 1981 年。主要报道生态学研究原始创新性科研成果,特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评介和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,280 页,国内定价 70 元/册,全年定价 1680 元。

国内邮发代号:82-7 国外邮发代号:M670 标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路 18 号 电 话:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@rcees.ac.cn 网 址: www.ecologica.cn

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 32 卷 第 12 期 (2012 年 6 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 32 No. 12 (June, 2012)

编 辑	《生态学报》编辑部 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085 电话:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn	Edited by	Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA Add: 18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China Tel: (010)62941099 www.ecologica.cn 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	中国生态学学会 中国科学院生态环境研究中心 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add: 18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出 版	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:1000717	Published by	Science Press Add: 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
发 行	科 学 出 版 社 地址:东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717 电话:(010)64034563 E-mail: journal@cspg.net	Distributed by	Science Press Add: 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel: (010)64034563 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 地址:北京 399 信箱 邮政编码:100044	Foreign	China International Book Trading Corporation Add: P. O. Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 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