

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第 32 卷 第 23 期 Vol.32 No.23 **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 23 期

2012 年 12 月 (半月刊)

目 次

中国石龙子母体孕期调温诱导幼体表型:母体操纵假说的实验检测	李 宏,周宗师,吴延庆,等 (7255)
同种或异种干扰对花鼠分散贮藏点选择的影响	申 圳,董 钟,曹令立,等 (7264)
曝气充氧条件下污染河道氨挥发特性模拟	刘 波,王文林,凌 芬,等 (7270)
贵州草海越冬斑头雁日间行为模式及环境因素对行为的影响	杨延峰,张国钢,陆 军,等 (7280)
青藏高原多年冻土区积雪对沼泽、草甸浅层土壤水热过程的影响	常 娟,王根绪,高永恒,等 (7289)
长沙城市斑块湿地资源的时空演变	恭映璧,靖 磊,彭 磊,等 (7302)
基于模型数据融合的干烟洲亚热带人工林碳水通量模拟	任小丽,何洪林,刘 敏,等 (7313)
农田氮素非点源污染控制的生态补偿标准——以江苏省宜兴市为例	张 印,周羽辰,孙 华 (7327)
用 PFU 微型生物群落监测技术评价化工废水的静态毒性	李朝霞,张玉国,梁慧星 (7336)
京郊农业生物循环系统生态经济能值评估——以密云尖岩村为例	周连第,胡艳霞,王亚芝,等 (7346)
基于遥感的夏季西安城市公园“冷效应”研究	冯晓刚,石 辉 (7355)
海南岛主要森林类型时空动态及关键驱动因子	王树东,欧阳志云,张翠萍,等 (7364)
不同播种时间对吉林省西部玉米绿水足迹的影响	秦丽杰,靳英华,段佩利 (7375)
黄土塬区不同品种玉米间作群体生长特征的动态变化	王小林,张岁岐,王淑庆,等 (7383)
密植条件下种植方式对夏玉米群体根冠特性及产量的影响	李宗新,陈源泉,王庆成,等 (7391)
沙地不同发育阶段的人工生物结皮对重金属的富集作用	徐 杰,敖艳青,张璟霞,等 (7402)
增强 UV-B 辐射和氮对谷子叶光合色素及非酶促保护物质的影响	方 兴,钟章成 (7411)
不同产地披针叶茴香光合特性对水分胁迫和复水的响应	曹永慧,周本智,陈双林,等 (7421)
芦芽山林线华北落叶松径向变化季节特征	董满宇,江 源,王明昌,等 (7430)
地形对植被生物量遥感反演的影响——以广州市为例	宋巍巍,管东生,王 刚 (7440)
指数施肥对楸树无性系生物量分配和根系形态的影响	王力朋,晏紫伊,李吉跃,等 (7452)
火烧伤害对兴安落叶松树干径向生长的影响	王晓春,鲁永现 (7463)
山地梨枣树耗水特征及模型	辛小桂,吴普特,汪有科,等 (7473)
两种常绿阔叶植物越冬光系统功能转变的特异性	钟传飞,张运涛,武晓颖,等 (7483)
干旱胁迫对银杏叶片光合系统 II 荧光特性的影响	魏晓东,陈国祥,施大伟,等 (7492)
神农架川金丝猴栖息地森林群落的数量分类与排序	李广良,丛 静,卢 慧,等 (7501)
碱性土壤盐化过程中阴离子对土壤中镉有效态和植物吸收镉的影响	王祖伟,弋良朋,高文燕,等 (7512)
两种绣线菊耐弱光能力的光合适应性	刘慧民,马艳丽,王柏臣,等 (7519)
闽楠人工林细根寿命及其影响因素	郑金兴,黄锦学,王珍珍,等 (7532)
旅游交通碳排放的空间结构与情景分析	肖 潇,张 捷,卢俊宇,等 (7540)
北京市妫水河流域人类活动的水文响应	刘玉明,张 静,武鹏飞,等 (7549)
膜下滴灌技术生态-经济与可持续性分析——以新疆玛纳斯河流域棉花为例	范文波,吴普特,马枫梅 (7559)
高温胁迫及其持续时间对棉蚜死亡和繁殖的影响	高桂珍,吕昭智,夏德萍,等 (7568)
桉树枝瘿姬小蜂虫瘿解剖特征与寄主叶片生理指标的变化	吴耀军,常明山,盛 双,等 (7576)
西南桦纯林与西南桦×红椎混交林碳贮量比较	何友均,覃 林,李智勇,等 (7586)
长沙城市森林土壤 7 种重金属含量特征及其潜在生态风险	方 晰,唐志娟,田大伦,等 (7595)
专论与综述	
城乡结合部人-环境系统关系研究综述	黄宝荣,张慧智 (7607)
陆地生态系统碳水通量贡献区评价综述	张 慧,申双和,温学发,等 (7622)



封面图说: 麋鹿群在过河——麋鹿属于鹿科,是中国的特有动物。历史上麋鹿曾经广布于东亚地区,到 19 世纪时,只剩下在北京南海子皇家猎苑内一群。1900 年,八国联军攻陷北京,麋鹿被抢劫一空。1901 年,英国的贝福特公爵用重金从法、德、荷、比四国收买了世界上仅有的 18 头麋鹿,以半野生的方式集中放养在乌邦寺庄园内,麋鹿这才免于绝灭。在世界动物保护组织的协调下,1985 年起麋鹿从英国分批回归家乡,放养到北京大兴南海子、江苏省大丰等地。这是在江苏省大丰麋鹿国家级自然保护区放养的麋鹿群正在过河。

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

DOI: 10.5846/stxb201111051673

张慧, 申双和, 温学发, 孙晓敏, 米娜. 陆地生态系统碳水通量贡献区评价综述. 生态学报, 2012, 32(23): 7622-7633.

Zhang H, Shen S H, Wen X F, Sun X M, Mi N. Flux footprint of carbon dioxide and vapor exchange over the terrestrial ecosystem: a review and perspective. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(23): 7622-7633.

陆地生态系统碳水通量贡献区评价综述

张 慧^{1,2}, 申双和¹, 温学发^{2,*}, 孙晓敏², 米 娜³

(1. 南京信息工程大学应用气象学院, 南京 210044; 2. 中国科学院地理科学与资源研究所生态系统网络观测与模拟重点实验室, 北京 100101

3. 中国气象局沈阳大气环境研究所, 沈阳 110016)

摘要:综述了通量贡献区研究的基本理论、最新进展、研究热点与难点,旨在促进中国区域碳水通量数据空间代表性的定量评价。通量贡献区是通量观测点上风向的空间代表区域,能够反映代表区域对应下垫面的源区内每一点对观测点的通量贡献权重影响,主要受观测高度、空气动力学粗糙度和大气稳定度等因素的影响。通量贡献区通常随着观测高度的增加、空气动力学粗糙度的降低和大气稳定度的增加而变大,反之则变小。通量贡献区的评价模型包括解析模型、拉格朗日随机模型、大涡模拟和闭合模型四类。通量贡献区的评价结果可以广泛应用于通量数据质量评价、实验设计的指导、与遥感技术结合的区域尺度的总初级生产力的估算、城市 CO₂ 通量变化的评估以及能量闭合的评价等研究。最新研究表明,对流边界层的通量贡献区存在负的通量贡献区域;有裸地存在的情况下解析模型通常会低估裸地对观测通量的贡献;与水平地面处的通量贡献区相比,山谷处通量贡献区变小而山脊处的通量贡献区变大。通量贡献区模型研究应进一步考虑大气中的平流效应、湍流的非高斯扩散以及建立冠层内部的通量贡献区模型。解决森林冠层内流场的不均匀性、冠层重叠问题、冠层湍流的不稳定性是建立适合冠层内部通量贡献区模型的前提条件。在理想条件的气体释放验证试验的基础上,需要开展复杂条件下的相关试验。

关键词:湍度协方差; 空间代表性; 通量贡献区; 源区

Flux footprint of carbon dioxide and vapor exchange over the terrestrial ecosystem: a review

ZHANG Hui^{1,2}, SHEN Shuanghe¹, WEN Xuefa^{2,*}, SUN Xiaomin², MI Na³

1 College of Applied Meteorology, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China

2 Key Laboratory of Ecosystem Network Observation and Modeling, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

3 Shenyang Institute of Atmospheric Environment, Chinese Meteorological Administration, Shenyang 110016, China

Abstract: The eddy covariance technique is a micrometeorological method to directly measure the exchanges of carbon, water and energy between the vegetation and atmosphere. The spatial resolution of meteorological observation of fluxes can expand from tens of meters to kilometers. The eddy covariance method is most accurate when the contributing area of the fluxes is topographically flat, and vegetation extends uniformly within the footprint area. Currently there are more than 100 eddy covariance flux observation sites in China. Most of them are established in non-ideal conditions such as forest, undulating surface, patchy canopy area. Therefore, it is important to accurately interpret the ecological representativeness of flux data by evaluation of the spatial representativeness of its footprint in China. This paper reviews basic theories of the footprint, along with progress and applications about footprint functions. It discusses the research focus and difficulties when

基金项目:国家自然科学基金项目(31070408, 91125002, 31000230); 中国科学院知识创新工程重要方向项目青年人才项目(KZCX2-EW-QN305)

收稿日期:2011-11-05; **修订日期:**2012-08-22

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wenxf@igsrr.ac.cn

considering the development of footprint. The footprint of a measurement point is the influence of the properties of the upwind source area weighted by the footprint function. The major effects on the dimensions of the flux footprint are measurement height, surface roughness length, and atmospheric stability. Increase in measurement height, decrease in surface roughness, and change in atmospheric stability from unstable to stable would enlarge the footprint size and move the peak contribution away from the instrument point. The opposite is also true. Footprint functions can be classified into four categories: Analytical model, Lagrangian stochastic model, Large eddy simulation, and Closure model. The footprint result can be applied to experimental design and to evaluate the quality of CO_2 flux data, the variation of CO_2 flux in urban areas, surface energy balance closure and gross primary productivity of landscape scales or regional scales combined with remote sensing. The latest research shows that there is a negative footprint zone in the convective boundary layer and that the location of the footprint peak is closer to the tower for convergent surface flow than for horizontally homogeneous flow. This is reversed for divergent surface flow. Atmospheric advection and non-Gaussian diffusion should be taken into account when building footprint functions. It is necessary for footprint functions within forested areas to consider spatial heterogeneity, clumpiness of vegetation, and instationarity of canopy layer turbulence. Analogical experiments should be implemented in complex terrain, based on the tracer release experiment in ideal conditions.

Key Words: eddy covariance; spatial representativeness; flux footprint; source area

涡度协方差技术是直接观测植被与大气间 CO_2 和水汽通量的微气象学技术^[1-2]。生态系统碳水通量数据的空间代表性沿上风方向可达几十米到几千米^[3],时间代表性从小时、天到年或数年^[1]。涡度协方差技术以点的观测值代表一个区域的平均状况。从微气象学的角度而言,在地势平坦冠层均质且广阔的通量观测点所获得的碳水通量观测数据是最值得信赖的。对于下垫面地表水平均匀且大气条件(风、温度、湿度、 CO_2)稳定,在观测期间没有平流且观测区域的湍流得到充分发展的情况,来自个方向的通量是相同的,其涡度协方差仪器测定的冠层上方湍流通量可以真实的反映生态系统平均的净生态系统碳交换量^[2,4]。但是绝大部分通量观测站点设置在高大森林、非平坦地形、斑块状冠层等非理想条件下^[5-7]。通量贡献区随观测高度的增加、大气稳定度逐渐变稳定和空气动力学粗糙度的减小而变大^[3,8]。Wang 和 Rotach^[9]指出辐合气流的地形导致通量贡献区缩小,而辅散气流的地形导致通量贡献区扩大。定量评价生态系统碳水通量数据的空间代表性即通量贡献区是正确理解碳水通量观测数据生态学意义的基础。

自 2002 年中国陆地生态系统观测研究网络建立以来,中国区域基于涡度协方差技术的碳水通量观测点已经至少超过 100 个^[10-11]。同样,大部分设置在高大森林、非平坦地形、斑块状冠层等非理想或更现实条件下,但是关于通量贡献区的定量评价研究还不够系统深入^[12-13]。主要是应用简单的解析模型进行的通量贡献区评价,例如 FSAM(Flux Source Area Model)模型^[12,14-15],KM(Kormann & Meixner)模型^[16]。蔡旭辉等^[17]基于 FLEM(Footprint for LAS and EC Measurement)模型进行大孔径闪烁仪与涡度协方差通量贡献区对比研究,其中也采用的 KM 解析模型。解析模型要求湍流在水平方向上是均匀的^[18],因此还不能完全准确的反映真实地表情况。Leclerc 和 Thurtell^[8]开始了拉格朗日随机模型的通量贡献区研究。Hadfield^[19]开始将大涡模拟应用于通量贡献区研究。Sogachev 等^[20]提出用集合平均的方法求解通量贡献区的闭合模型。以上这些数值计算的方法使得通量贡献区的求解更适用于复杂的地形。目前,国外已有大量关于通量贡献区评价的应用研究^[21-23]。例如,Göckede 等^[23]对欧洲碳通量网的 25 个森林站点进行涡度协方差数据的空间代表性评价,已经形成了一套系统的数据质量控制标准,可以对不同站点的数据质量进行评价。

本文系统阐述了通量贡献区的基本定义、数学表达式含义、相应的物理量定义及其与风浪区的联系与区别;阐述了通量贡献区的解析模型、拉格朗日模型、大涡模拟和闭合模型四种评价方法的优缺点;阐述了通量贡献区评价模型间的比对研究;阐述了观测高度、空气动力学粗糙度和大气稳定度等对通量贡献区的影响;阐述了通量贡献区在通量数据质量评价、实验设计的指导、与遥感技术结合的区域尺度的总初级生产力的估算、

城市 CO_2 通量变化的评估以及能量闭合的评价等研究中的广泛应用;最后,概述了通量贡献区的验证实验以及冠层内部的通量贡献区研究等重要研究方向。

1 基本概念

目前,国内研究人员通常将 Footprint 直接引用为“Footprint”^[15]或者翻译为“贡献区”^[12]、“印痕”^[13]。本文将 Footprint 翻译为“贡献区”。贡献区可以分为浓度贡献区和通量贡献区。浓度贡献区是标量的计算,而通量贡献区是矢量的计算,本文以讨论通量贡献区为主。

通量贡献区是指通量观测点上风向上的空间代表区域,能够反映空间代表区域对应的下垫面源区内每一点对观测点的通量贡献的权重大小^[24]。源区是指对观测点有通量贡献的下垫面区域^[25]。风浪区是指研究区域沿上风方向的距离^[26]。通量贡献区描述了一个观测点的空间代表性大小,而源区描述的是真实下垫面的大小,风浪区是定量描述要研究区域在上风向距离的大小。通量贡献区大小与方向是变化的,某一时刻的通量贡献区可以小于或者超过所要研究下垫面区域。当基于涡度协方差技术的碳水通量贡献区与所要研究的下垫面区域重合时即所要研究的下垫面区域是主要源区时,涡度协方差碳水通量观测是具有代表性的。在实验设计中为确保涡度协方差的空间代表性,通常运用观测高度与风浪区的比是 1:100 来确定观测点的高度,以保证通量贡献区上风方向距离小于风浪区。

图 1 是某时刻的通量贡献区的示意图,阴影部分表示均一下垫面植被。图中左侧是一个涡度协方差通量观测塔, z_m 表示通量观测塔的垂直观测高度。 x 轴的正方向与水平风向平行且逆风方向,表示对观测点有通量贡献的下垫面点源到观测点的上风方向距离(m)。在 x 轴上, a 表示对观测点有贡献且距离观测点最近的点, $x_{\max}$ 表示对观测点贡献最大的点,而 e 表示对观测点有贡献且距离观测点最远的点。 x' 表示在上风方向上下垫面植被覆盖的距离即风浪区。与 x 轴垂直的 y 轴表示对观测点有通量贡献的下垫面点源在侧风方向上的距离(m)。在 y 轴上, d 点表示对观测点有贡献且侧风方向距离观测点最远的点。图中右侧 f 轴虽然与通量观测塔平行但物理含义不同, f 轴表示对观测点有通量贡献的下垫面点源的通量贡献权重,单位是 $1/\text{m}^2$ 。随着 x 增加 f 有一个增加的趋势,在到达 $f_{\max}$ 之后再向各个方向减小^[3]。连接对观测点贡献权重相同的 f 形成闭合曲线即 f_p 等值线。 f 在 xy 平面上投影区域就是通量贡献区。这一投影区域对应的下垫面则是这一时刻对观测点有通量贡献的源区。若源区是所要研究的区域(即通量贡献区的上风方向距离小于风浪区)就表明这一时刻的通量观测是有代表性的。因为这是某一时刻通量贡献区的示意图,所以风向单一,但实际情况风向

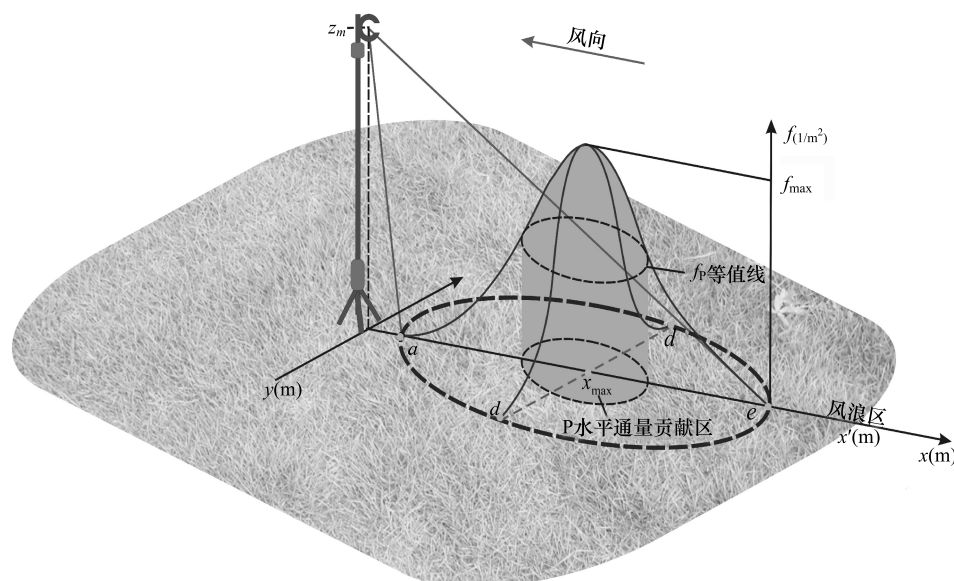


图 1 某时刻的通量贡献区的示意图(改自^[18, 27])

Fig. 1 Schematic picture of the flux footprint at the moment (according to^[18, 27])

是变化的,为了保证通量观测的代表性,在各个上风方向都应有足够大且均一的风浪区即足够大的均一下垫面。因为在实际计算中研究者更关注对观测值影响最大的区域的具体大小,所以根据研究要求计算累积贡献 P 水平(如 95%)的通量贡献区。通量贡献区的大小随着空气动力学粗糙度 z_0 的变化而变化,图 1 表示的只是空气动力学粗糙度为 z_0 时的通量贡献区。

通量贡献区函数是用来描述观测点与源(汇)空间分布关系的方程^[25]。其函数值就是图 1 中的 f ,所以也将其叫做源权重方程^[3]。具体的扩散积分表达式为

$$\eta(x_m, y_m, z_m) = \int_{y_1}^{y_2} \int_{x_1}^{x_2} Q_\eta(x', y', z' = z_0) f(x_m - x', y_m - y', z_m - z_0) dx' dy' \quad (1)$$

式中, $\eta(x_m, y_m, z_m)$ 是在观测点 (x_m, y_m, z_m) 的观测值(图 1 中左侧观测塔的通量观测值)。 $Q_\eta(x', y', z' = z_0)$ 是地面点 $(x', y', z' = z_0)$ 处的点源释放的通量的大小(图 1 中通量贡献区对应的下垫面区域内的单位源强度),需要考虑地面的空气动力学粗糙度 z_0 。 x_m, y_m, z_m 是观测塔的坐标, z_m 是观测塔的观测高度。 $f(x_m - x', y_m - y', z_m - z_0)$ 是相应的贡献区函数,是观测点与地面点源的距离 $x_m - x', y_m - y', z_m - z_0$ 的函数^[18]。当 η 表示通量时, $f(x_m - x', y_m - y', z_m - z_0)$ 就是通量贡献区函数;当 η 表示浓度时, $f(x_m - x', y_m - y', z_m - z_0)$ 就是浓度贡献区函数。根据方程(1)沿 x_1 到 x_2 和 y_1 到 y_2 进行积分计算就可以获得累积贡献 P 水平(如 95%)的通量贡献区。

2 通量贡献区模型评价及验证

2.1 通量贡献区模型评价

根据求解通量贡献区函数方法的不同可将通量贡献区模型分为:解析模型^[3, 28-32]、拉格朗日随机模型^[8, 33-35]、大涡模拟^[19, 36-37]和闭合模型^[20, 38]。

2.1.1 解析模型

解析模型定义为在倒置烟羽假设前提下运用梯度扩散理论、二维平流扩散方程和相似理论计算通量贡献区^[3, 28-32]。解析模型虽然计算简便但是以倒置烟羽假设为前提,因此必须要求湍流在水平方向上是均匀的^[18],这就限制了解析模型的使用范围。

Schuepp 等^[28]建立了适用于中性大气条件下的解析模型,但该模型要求 U/u_* 是常数(U 是烟羽的水平速度, u_* 是摩擦速度)。Horst 和 Weil^[29]以 K 理论、二维平流扩散方程和相似理论为基础建立了一个包含大气层结变化和风速垂直梯度变化的解析模型,但中间一些参数要用数值的方法求解。后为简化该模型运算,模型中的一些微分表达式用近似的解析式表示^[30, 39]。Schimd^[3]建立了 FSAM 解析模型。赵晓松等^[15]运用 FSAM 解析模型研究长白山阔叶红松林的通量贡献区,结果指出在 2003 年 76% 的通量信息来自感兴趣研究的区域。米娜等^[12]运用 FSAM 解析模型评价 ChinaFLUX 的 8 个通量观测点的空间代表性,得各观测点 70% 以上的通量来源于研究者所关注的生态系统。顾永剑等^[14]运用 FSAM 解析模型对崇明东滩湿地生态系统碳通量贡献区进行了分析,指出在稳定的大气条件下,非主风方向上的通量贡献区显著大于主风方向上的通量贡献区,但在非稳定大气条件下两者相差不大。FSAM 解析模型可应用于研究城市 CO_2 通量交换^[40-41],但运用 FSAM 解析模型研究地表变化对城市冠层动量通量影响的结果偏低^[42]。Haenel 和 Grunhage^[43]简化模型运算,用幂次律廓线(Power Law Profile)代替莫宁-奥布霍夫(Monin-Obukhov, M-O)相似廓线求风速和湍流扩散率。Kormann 和 Meixner^[32]仍然运用幂次律廓线给出了一个完全解析解的 KM 通量贡献区模型。这一模型被宫丽娟等^[16]应用于对比涡度协方差和大孔径闪烁仪(Large Aperture Scintillometer, LAS)的通量贡献区,指出涡度协方差的月通量贡献区的季节性变化比 LAS 的月通量贡献区的季节性变化明显。Hsieh 等^[44]提出以拉格朗日随机扩散模型为基础的解析模型。

2.1.2 拉格朗日随机模型

拉格朗日随机模型(Lagrangian Stochastic Model, LS)定义为用有限个粒子的运动轨迹代替气体的扩散过程,且这些粒子之间是完全相互独立的,通过一个随机扩散微分方程描述一种标量的扩散^[8, 33, 36, 45]。虽然 LS

模型比解析模型更适用于非均匀地表,但是 LS 模型需要预先定义一个风场来建立正确的流结构和风速统计^[46]。可是,目前因为对冠层流稳定性的影响机制和拉格朗日时间的了解还不够深入,所以无法准确描述冠层内部风速统计^[47]。

Leclerc 和 Thurtell^[8]最先提出 LS 模型,并将 LS 模型应用于矮小植被的通量贡献区评估中。该模型是一种前向 LS 模型,要求湍流水平均匀且稳定^[48]。Flesch 等^[49]首次提出了后向 LS 模型。后向 LS 模型因为不再有湍流水平均匀稳定条件的限制,所以更适用于非均匀的地表。Baldocchi^[33]和 Rannik 等^[48]将 LS 模型应用于森林冠层中并考虑到了源垂直分布的不均匀性。Kljun 等^[25, 45]建立了一个适用于大范围边界层条件下的三维后向 LS 模型,这一模型被应用于涡度协方差的能量闭合研究^[50]。Lee^[51]以拉格朗日参数化为基础,考虑了森林冠层的垂直分布不均匀及近场效应提出一种表示从森林底部到森林顶部纵向通量贡献变化的通量贡献区模型。Cai 和 Leclerc^[36]将 LS 模型的应用范围扩展到对流边界层通量贡献区研究中。

2.1.3 大涡模拟

大涡模拟(Large Eddy Simulation, LES)是通过解纳维-斯托克斯(Navier-Stokes, N-S)方程及质量守恒方程计算任意源的标量扩散和通量贡献区。当在森林等不均匀区域以及对流条件下自相似廓线不再能很好的描述湍流区域时,基于湍流统计的 LES 就发挥作用^[18]。

Hadfield^[19]第一次应用 LES 模拟通量贡献区,运用对流条件下一个水平均匀的 LES 生成的速度场来驱动一个前向的 LS 模型。Leclerc 等^[52]将一个稳定标量方程与 LES 结合,首次建立了不带有扩散的旋转式模型。此模型是在欧拉框架下模拟标量扩散,不需要插入 LS 模型。Su 和 Leclerc^[53]利用 LES 模型估算了森林冠层及地表 3 个不同高度的标量扩散。Patton 等^[54]对 LES 模型进行了次网格尺度参数化,使其适用于植被冠层和边界层。Steinfeld 等^[37]第一次实现了 LES 与 LS 的在线耦合,指出 LS 中引入次网格尺度湍流能反演浓度模式,同时发现在对流边界层(CBL)中存在负的通量贡献区。负通量贡献区指在通量贡献区内的点源对通量观测点的贡献为负。因为对流边界层上部的浓度大于下部,形成向下扩散的浓度梯度,所以在对流边界层的下部形成负的通量贡献区^[55]。Cai 等^[55]通过结合 LES 的湍流场与前向 LS 模型,研究对流边界层中不同观测高度下的通量贡献区,结论为在 CBL 不同观测高度传感器的上风方向靠近传感器处都有一个主要的正通量贡献区,远处伴随一个负通量贡献区。

2.1.4 闭合模型

闭合模型是应用集合平均的方法解纳维-斯托克斯(Navier-Stokes, N-S)方程。这种方法是对由点源湍流连续活动形成的垂直通量区域进行比较分析,之后这个区域被标准化得到每一点源对观测通量的贡献^[56]。闭合模型是计算非均匀或丘陵表面通量贡献区的有效模型^[46, 47]。

Sogachev 等^[20]首次提出了基于 1.5 阶的大气边界层标量扩散模型(Scalar Distribution, SCADIS)。Sogachev 等^[57]将这一模型应用于芬兰一地形起伏地区,研究表明观测点设置在脊点时远处点源对观测点的贡献会增大。Sogachev 等^[38]运用此模型研究森林中裸地对通量贡献区影响时指出 CO₂ 通量对裸地的敏感性大于动量通量,因为裸地的大小影响空气动力学粗糙度 z_0 。

2.2 通量贡献区模型的验证

因为气体释放验证实验很少,所以通量贡献区模型间的比较是一种验证模型准确性的方法^[47]。Kljun 等^[58]指出在一定稳定性范围内,观测高度小于边界层高度的十分之一时解析模型和 LS 模型有很好的一致性;但大气稳定性达到自由对流高度或观测高度超过近地面层时,解析模型结果偏大。Sogachev 和 Lloyd^[56]在地表均匀的条件下比较了闭合模型^[20]、解析模型^[28, 32]和 LS 模型^[8]模拟的通量贡献区,得出在中性条件下三类模型有很好的一致性。Sogachev 等^[38]将闭合模型计算的通量贡献区结果与两个不同的 LS 模型结果进行比较得到很好的一致性。Wang 和 Davis^[59]使用 LES 研究了森林中裸地对 CO₂ 通量观测的影响,结果表明在有裸地存在的条件下运用解析模型会低估裸地对观测点的贡献。Markkanen 等^[60]提出了一种模型间比较的方法,并根据源区尺度匹配情况进行了等级划分。文中进行了前向 LS、后向 LS 和 LES 间的相互比较,提出

在模型的比较时应该考虑通量贡献区侧风方向上的大小(即图 1 中通量贡献区 y 方向上的大小)。

3 通量贡献区的影响因素分析

通量贡献区的影响因素有仪器设置、观测点的地形条件以及当地气象条件等^[23]。其中主要的影响因素是:仪器观测高度、空气动力学粗糙度和大气稳定度^[61]。

通量贡献区随观测高度的增加而变大^[8]。米娜等^[12]在研究千烟洲中亚热带人工林通量贡献区时将观测高度从 23.6 m 增加到 39.6 m,90% 水平的通量贡献区上风方向的水平距离即贡献最远点 e 与最近点 a 的差值由 1100 m 增加到 1915 m。Burba^[27]在观测高度对庞卡市(Ponca City)附近草原蒸散的通量贡献区影响研究中,将观测高度从 1.5 m 上升到 4.5 m,80% 水平的蒸散通量贡献区上风方向的水平范围由 5—80 m(图 1 中 $a=5, e=80$)变为 32 m—450 m($a=32, e=450$),对观测点贡献最大点距观测塔的水平距离增加即 $x_{\max}$ 变大,但是相对应的最大贡献权重 $f_{\max}$ 减少。粗糙度大的下垫面对观测高度变化对通量贡献区的影响更为敏感。相同的高度变化(4.5 m 减小到 1.5 m),粗糙的下垫面最大通量贡献权重 $f_{\max}$ 增加 4 倍,而光滑条件下 $f_{\max}$ 增加 2 倍^[27]。

通量贡献区随着空气动力学粗糙度的增加而变小^[8]。Burba^[27]在空气动力学粗糙度对庞卡市附近草原的蒸散通量贡献区影响研究中,将空气动力学粗糙度由 0.005 m 变为 0.06 m,80% 水平的蒸散通量贡献区上风方向的水平范围由 10—300 m 变为 5—80 m。随着粗糙度的增加,对观测点贡献最大点距观测塔的水平距离 $x_{\max}$ 减小,同时峰值 $f_{\max}$ 增大。作物的生长改变空气动力学粗糙度进而会影响通量贡献区的大小,长白山阔叶红松林非生长季时的通量贡献区比生长季时的通量贡献区大^[15]。当观测高度较低时,粗糙度的变化主要影响最大通量贡献权重 $f_{\max}$,而当观测高度较高时,粗糙度的变化主要影响对观测点贡献最大点距观测塔的水平距离增加即 $x_{\max}$ ^[27]。

在相同的观测高度和粗糙度下,随着大气稳定性的增加通量贡献区变大^[8]。米娜等^[12]研究表明内蒙古站大气条件由不稳定($\zeta=-1.0$)到中性($\zeta=0$)再到稳定($\zeta=0.1$)通量贡献区上风方向水平范围由 3—19 m 增加为 14—114 m、19—195 m。Kljun 等^[25]利用三维拉格朗日模型深入研究了大气稳定性对通量贡献区的影响,得出对观测点通量贡献最大的点 $x_{\max}$ 从不稳定条件的 200 多米增加到稳定条件下 800 多米。因为不稳定的大气条件有利于湍流运动的发展,通量贡献区会变小^[62]。在非常稳定的条件下,通量贡献区变大甚至可能超过想要研究的区域,这时获得的数据就需要校正或丢弃^[27]。地形条件影响大气的稳定度,山谷中的辐合上升气流增加大气的不稳定。Wang 和 Rotach^[9]运用 LES 和后向 LS 模型结合的方法研究起伏地面下的通量贡献区变化。与气流水平均匀条件下的结果相比,当水平气流辐合时,通量贡献区的侧向积分的峰值位置 $x_{\max}$ 更靠近观测塔并且峰值 $f_{\max}$ 更大;当水平气流辅散时,则结论相反。在日和季时间尺度上,大气稳定度是影响通量贡献区大小的重要因素^[63]。

冠层结构影响冠层上部与下部的湍流交换过程,因此冠层上部与下部的通量贡献区特点也会不同。Baldocchi^[33]利用 LS 量化了森林冠层内部通量贡献区的空间分布,研究表明森林内部通量贡献区的空间分布比近地层的通量贡献区空间分布要小而且侧风向通量贡献区积分的形状不是单一的一个极值点,还有一个额外的弯曲,这是因为在冠层内部与冠层上部湍流气团的移动不同。Lee^[51]指出在冠层内部靠近观测点的地面源是非扩散的,相似理论不再适用。冠层高度和植被结构都会影响森林内部的通量贡献区。在冠层内部水平风速扰动和垂直风速扰动都考虑得到的通量贡献区比单一考虑垂直风速的扰动的通量贡献区要窄,但峰值位置没有发生变化^[33]。

4 通量贡献区的实际应用

通量贡献区有着广泛的应用领域。可用于评价通量数据质量和指导实验设计^[23];通量贡献区与遥感技术结合可以提高估算区域尺度的总初级生产力的准确性^[62],此外通量贡献区在评价非惰性痕量气体空间分布^[64]、城市 CO_2 通量变化^[65]以及能量闭合^[50]等研究中也有广泛应用。

4.1 评价涡度协方差数据质量

进行通量贡献区研究的一个主要目的就是确定涡度协方差观测数据能否代表所研究区域。Göckede 等^[23]认为当所研究区域对观测点的贡献大于 80% 时,观测数据就具有代表性。故评估所研究区域的通量相对贡献可以作为一种数据质量评估方法^[66],进而确定得到有效的涡度协方差数据的大气条件^[23]。

Rebmann 等^[21]将涡度协方差数据质量评估工具^[67]、通量贡献区模型^[68]、土地利用图结合,形成评估感热通量、潜热通量和 CO₂ 通量数据质量等级的主要指标。Göckede 等^[66]运用 Rebmann 等^[21]提出的方法评估针叶林的相对通量贡献是 86.4%。根据目标地面类型对观测点的贡献多少可将观测分为均匀观测、代表性观测、可接受观测和受干扰观测 4 类。根据观测分类标准 Göckede 等^[23]对欧洲碳通量网 (CarboEurope-IP network) 的 25 个森林站点的通量数据进行了空间代表性分析。通量贡献区模型、土地分类图与 MODIS 遥感数据结合的方法可以用来评估冬季和夏季作物具体 CO₂ 交换时间序列。Barcza 等^[69]就是运用遥感技术与通量贡献区结合的方法确定观测地区多年来主要通量贡献区没有发生改变,但是由于冬季和夏季作物的空间分布不同使得观测信息出现时间差异。运用通量贡献区对机载观测到的混合通量进行分解,可获得每种地面类型的通量大小^[70]。

传感器位置偏差 (Sensor Location Bias, SLB) 是另一种确定通量数据空间代表性的方法,其表示观测点的通量贡献区与所研究区域的不匹配程度^[61]。具体表达式为

$$\Delta = \frac{(\eta - \bar{\eta})^2}{(\bar{\eta})^2} \quad (2)$$

式中, η 为所研究区域观测通量值。 $\bar{\eta}$ 为所研究区域真实的通量值,通过方程 (1) 且假设 $f(x_m - x', y_m - y', z_m - z_0) = 1$ 求得。 Δ 为传感器位置偏差,当 $(\eta - \bar{\eta}) = 0$ 时表示没有偏差,小于 10% 为可接受范围,表示有很好的空间代表性^[61]。

Schimdt 和 Lloyd^[61]运用 SLB 检验了尼日尔荒漠草原的通量观测空间代表性,指出 SLB 在中性条件下为 0.14,在不稳定条件下为 0.99。中性条件下的空间代表性优于不稳定条件是因为不稳定条件下的通量贡献区较小 (草丛占 99.8%,沙地占 0.2%),不能代表荒漠草原的平均状况。Chen 等^[22]指出 2004 年千烟洲通量观测的 SLB 为 5%。

4.2 指导实验设计

在设计通量观测实验、优化观测塔和涡度协方差设备的位置时,考虑观测高度,空气动力学粗糙度等对通量贡献区的影响,使观测点有最佳的空间代表性。当较低观测点的观测值能够代表所要研究的区域,而较高的观测点观测值包含非研究区域的信息时,梯度通量观测就无法说明通量的垂直变化,因为引起通量值变化的主要原因是湍流的水平变化^[68]。Göckede 等^[23]对 25 个森林站点进行了空间代表性分析,有 2 个森林站点的观测值无法代表所研究区域,通量实验设计存在问题。

4.3 通量贡献气候区

通量贡献区与涡度协方差数据是时时对应的,可以通过对通量贡献区在时间上累加得通量贡献气候区^[71]。可应用通量贡献气候区确定通量观测代表区域每天、每个季度甚至每年的大小和变化^[21]。

Amiro^[71]在研究加拿大曼尼托巴一个寒带森林蒸散时指出随着时间的增加 (天、月到年),蒸散通量贡献气候区在明显扩大。研究区域的植被通量贡献气候区存在季节变化^[71]。Chen 等^[22]指出 2004 年千烟洲 90% 水平的月通量贡献区冬季小于 1 km² 而夏季为 2.5 km²。Chen 等^[72]对加拿大 12 个站点的通量贡献气候区进行了评价,其大小及方向都有差异,90% 水平的月通量贡献气候区从 1.14 km² 到 5.04 km²,通量贡献气候区的变化量从 0.69 km² 到 2.84 km²。将通量贡献气候区模型^[62]与用遥感数据计算的归一化植被指数 (NDVI)、增强植被指数 (EVI) 结合,通过方程 (2) 可求得 SLB 也存在季节性变化,但变化原因无法单用通量贡献气候区的季节性变化或单用地表植被覆盖情况的变化进行解释^[72]。

4.4 提高计算区域尺度 GPP 的准确性

遥感技术将观测扩展到区域尺度 (10³—10⁶ km²)、全球范围^[73]。将通量贡献区模型应用于遥感领域,可

以提高计算区域尺度总初级生产力(GPP)的准确性^[74]。

Chen 等^[62]运用通量贡献气候区模型结合激光雷达数据反演的 GPP 结果求得最终的 GPP 比单用激光雷达数据求得的 GPP 更接近涡度协方差的 GPP 结果。Chen 等^[22]将 Landsat 卫星数据与通量贡献气候区模型结合求得千烟洲的 2004 年平均 GPP ($5.06 \text{ gCm}^{-2}\text{s}^{-1}$)与涡度协方差的 GPP 观测量($5.15 \text{ gCm}^{-2}\text{s}^{-1}$)很接近。

4.5 确定非惰性痕量气体的空间分布

通量贡献区也可以应用到非惰性痕量气体(Non-Passive Trace Gas)通量研究中,是了解化学气体分布状况的有效方法^[41, 64]。

用通量贡献区做为检验标准,可确定梯度扩散法和空气动力学质量平衡方法获得的连续总碳氢化合物(TCH)的可信性^[75]。运用通量贡献区模型观测混合落叶林落叶期源的分布大小,可以了解在叶子衰老凋落时期的异戊二烯通量贡献区及植被垂直分布的变化。Strong 等^[64]认为通量贡献区方程中应该加入化学反应项。Leigh 等^[41]在研究碘分子的排放、传输、光化裂解特征时用到了通量贡献区模型。

4.6 研究城市 CO₂ 的交换

人类活动增加了城市生态系统 CO₂ 通量变化的复杂性^[65]。近年来城市 CO₂ 交换过程受到广泛关注,运用通量贡献区可以了解绿化对城市 CO₂ 交换过程的影响^[40]。虽然城市中因湍流的相似性多点的通量观测都有共同的特征,但是观测值还是受通量贡献区对应的地表情况影响^[65]。Kordowski 和 Kuttler^[40]在城市 CO₂ 通量随时间变化的研究中指出当观测的通量贡献区包含公园植被时观测值可能为负,说明公园的植被在某一时刻是一个碳汇。

4.7 研究能量闭合问题

运用涡度协方差技术观测湍流通量时,能量收支不平衡仍然是一个待解决的问题,而通量贡献区是影响能量平衡的一个因素^[50]。Sánchez 等^[76]在分析一个位于芬兰索丹屈莱寒带森林的能量闭合问题时指出能量闭合与通量贡献区内湍流通量的均匀性有关,在研究中上风风向从直接经过一块裸露的地表变成其西北方向时,能量闭合程度增加 5%。运用涡度协方差技术在两块不同地表面上研究能量闭合问题时净辐射的通量贡献区不能代表涡度协方差的通量贡献区^[50]。

5 通量贡献区研究的瓶颈问题

近年来关于通量贡献区的研究虽然取得了进展但在运用实验的方法验证模型准确性、建立满足森林内非均匀湍流特征的通量贡献区模型等方面仍然存在难点。运用通量贡献区分析方法进行大气环境监测是通量贡献区应用的一个方面^[77]。

5.1 通过气体释放实验验证通量贡献区模型的准确性

虽然各类通量贡献区模型被广泛的应用,但是验证模型有效性的气体释放实验还很缺乏^[78]。因为模型经常被应用在不能完全满足模型假设的环境中,所以气体释放验证试验仍然是必要的^[24]。Finn 等^[78]在水平均匀且有矮小作物生长的地表进行粒子追踪试验,结果表明解析模型^[29]和 LS 模型^[8]的预测结果与追踪气体的通量结果有很好的 consistency。Foken 和 Leclerc^[67]的气体释放实验指出可以通过整体湍流特征的变化检验通量贡献区内障碍物的影响。在理想条件的气体释放验证试验基础上,开展复杂地形条件下的气体释放验证实验将是通量区模型验证的一项挑战。

5.2 建立满足森林内部非均匀湍流特征的通量贡献区模型

应用通量贡献区模型准确评价涡度协方差空间代表性的前提条件是通量贡献区模型结果能真实的反映生态系统中的空间非均匀湍流、植被冠层的影响和大气稳定性从稳定条件变化到非稳定条件等情况。Vesala 等^[47]指出通量贡献区的评价模型越来越接近实际的观测情况。Sogachev 等^[38]指出完整的通量贡献区模型应该由大气的平流项和源表面之间湍流交换项共同组成。除了 Lee^[51]提出了一个带有平流项的通量贡献区模型,现有模型都忽略平流作用。考虑湍流的非高斯扩散和水平流的非均匀性将是进一步完善通量贡献区模型的热点问题^[9]。此外流场的不均匀性,冠层的重叠、冠层湍流的不稳定都是建立满足高大冠层内部的通量

贡献区的难点。

5.3 运用通量贡献区分析方法进行大气环境监测

环境污染日益加剧使得大气环境问题倍受重视。运用通量贡献区分析方法分析污染物的来源,监测工厂排放气体的扩散范围,是监测大气环境质量的有效方法。蔡旭晖等^[77]已展开初步工作,分析了北京地区的大气环境监测数据,找到造成大气环境污染的潜在排放源区,但分析方法还有待完善。运用通量贡献区进行大气环境监测应有很好的实用价值。

References:

- [1] Baldocchi D, Falge E, Gu L H, Olson R, Hollinger D, Running S, Anthoni P, Bernhofer C, Davis K, Evans R, Fuentes J, Goldstein A, Katul G, Law B, Lee X H, Malhi Y, Meyers T, Munger W, Oechel W, U K T P, Pilegaard K, Schmid H P, Valentini R, Verma S, Vesala T, Wilson K, Wofsy S. FLUXNET: A new tool to study the temporal and spatial variability of ecosystem-scale carbon dioxide, water vapor, and energy flux densities. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2001, 82(11): 2415-2434.
- [2] Baldocchi D D. Assessing the eddy covariance technique for evaluating carbon dioxide exchange rates of ecosystems: past, present and future. *Global Change Biology*, 2003, 9(4): 479-492.
- [3] Schmid H P. Source areas for scalars and scalar fluxes. *Boundary-Layer Meteorology*, 1994, 67(3): 293-318.
- [4] 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.
- [5] Sun X M, Zhu Z L, Wen X F, Yuan G F, Yu G R. The impact of averaging period on eddy fluxes observed at ChinaFLUX sites. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2006, 137(3/4): 188-193.
- [6] Wen X F, Yu G R, Sun X M, Liu Y F. Turbulence flux measurement above the overstory of a subtropical Pinus plantation over the hilly region in southeastern China. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2005, 48(Supp I): 63-73.
- [7] Wen X F, Yu G R, Sun X M. Uncertainties in long-term studies of net ecosystem CO₂ exchange with the atmosphere based on eddy covariance technique. *Advances in Earth Science*, 2004, 19(4): 658-663.
- [8] Leclerc M Y, Thurtell G W. Footprint prediction of scalar fluxes using a markovian analysis. *Boundary-Layer Meteorology*, 1990, 52(3): 247-258.
- [9] Wang W G, Rotach M W. Flux footprints over an undulating surface. *Boundary-Layer Meteorology*, 2010, 136(2): 325-340.
- [10] Chen S P, Chen J Q, Lin G H, Zhang W L, Miao H X, Huang J H, Han X G. Energy balance and partition in Inner Mongolia steppe ecosystems with different land use types. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2009, 149(11): 1800-1809.
- [11] Yu G R, Wen X F, Sun X M, Tanner B D, Lee X H, Chen J Y. Overview of ChinaFLUX and evaluation of its eddy covariance measurement. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2006, 137(3/4): 125-137.
- [12] Mi N, Yu G R, Wen X F, Sun X M. A preliminary study for spatial representiveness of flux observation at ChinaFLUX sites. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2006, 49(SuppIII): 24-35.
- [13] Cai X H. Footprint analysis in micrometeorology and its extended applications. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2008, 32(1): 123-132.
- [14] 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, 386-386.
- [15] 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.
- [16] Gong L J, Li S M, Shuang X, Cai X H, Xu Z W. Investigation of spatial representiveness for surface flux measurements with eddy covariance system and large aperture scintillometer. *Plateau Meteorology*, 2009, 28(2): 246-257.
- [17] Cai X H, Zhu M J, Liu S M, Xu Z W. Flux footprint analysis and application for the large aperture scintillometer. *Advances in Earth Science*, 2010, 25(11): 1166-1174.
- [18] Schmid H P. Footprint modeling for vegetation atmosphere exchange studies: a review and perspective. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2002, 113(1/4): 159-183.
- [19] Hadfield M G. Passive scalar diffusion from surface sources in the convective boundary-layer. *Boundary-Layer Meteorology*, 1994, 69(4): 417-448.
- [20] Sogachev A, Menzhulin G V, Heimann M, Lloyd J. A simple three-dimensional canopy - planetary boundary layer simulation model for scalar concentrations and fluxes. *Tellus Series B-Chemical and Physical Meteorology*, 2002, 54(5): 784-819.

- [21] Rebmann C, Göckede M, Foken T, Aubinet M, Aurela M, Berbigier P, Bernhofer C, Buchmann N, Carrara A, Cescatti A, Ceulemans R, Clement R, Elbers J A, Granier A, Grünwald T, Guyon D, Havránková K, Heinesch B, Knohl A, Laurila T, Longdoz B, Marcolla B, Markkanen T, Miglietta F, Moncrieff J, Montagnani L, Moors E, Nardino M, Ourcival J M, Rambal S, Rannik Ü, Rotenberg E, Sedlak P, Unterhuber G, Vesala T, Yakir D. Quality analysis applied on eddy covariance measurements at complex forest sites using footprint modelling. *Theoretical and Applied Climatology*, 2005, 80(2/4): 121-141.
- [22] Chen B, Ge Q, Fu D, Yu G, Sun X, Wang S, Wang H. A data-model fusion approach for upscaling gross ecosystem productivity to the landscape scale based on remote sensing and flux footprint modelling. *Biogeosciences*, 2010, 7(9): 2943-2958.
- [23] 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, Koeble 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.
- [24] Foken T. *Micrometeorology*. Germany: Springer-Verlag, 2009: 82-87.
- [25] Kljun N, Rotach M W, Schmid H P. A three-dimensional backward lagrangian footprint model for a wide range of boundary-layer stratifications. *Boundary-Layer Meteorology*, 2002, 103(2): 205-226.
- [26] Gaylon S C, John M N. *An Introduction to Environmental Biophysics*. American: Springer-Verlag, 1998: 97-97.
- [27] Burba G G. Illustration of flux footprint estimates affected by measurement height, surface roughness and thermal stability // Hubbard K, Sivakumar M, eds. *Automated Weather Stations for Applications in Agriculture and Water Resources Management: Current Use and Future Perspectives*. No. 1074. HPCS Lincoln, Nebraska- WMO Geneva. Switzerland: World Meteorological Organization Press, 2001
- [28] Schuepp P H, Leclerc M Y, Macpherson J I, Desjardins R L. Footprint prediction of scalar fluxes from analytical solutions of the diffusion equation. *Boundary-Layer Meteorology*, 1990, 50(1/4): 353-373.
- [29] 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.
- [30] Horst T W, Weil J C. How far is far enough? The fetch requirements for micrometeorological measurement of surface fluxes. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 1994, 11(4): 1018-1025.
- [31] Haenel H D, Grünhage L. Footprint analysis: a closed analytical solution based on height-dependent profiles of wind speed and eddy viscosity. *Boundary-Layer Meteorology*, 1999, 93(3): 395-409.
- [32] Kormann R, Meixner F X. An analytical footprint model for non-neutral stratification. *Boundary-Layer Meteorology*, 2001, 99(2): 207-224.
- [33] Baldocchi D. Flux footprints within and over forest canopies. *Boundary-Layer Meteorology*, 1997, 85(2): 273-292.
- [34] Cai X, Peng G, Guo X, Leclerc M Y. Evaluation of backward and forward Lagrangian footprint models in the surface layer. *Theoretical and Applied Climatology*, 2008, 93(3/4): 207-223.
- [35] Göckede M, Thomas C, Markkanen T, Mauder M, Ruppert J, Foken T. Sensitivity of Lagrangian Stochastic footprints to turbulence statistics. *Tellus Series B-Chemical and Physical Meteorology*, 2007, 59(3): 577-586.
- [36] Cai X H, Leclerc M Y. Forward-in-time and backward-in-time dispersion in the convective boundary layer: the concentration footprint. *Boundary-Layer Meteorology*, 2007, 123(2): 201-218.
- [37] Steinfeld G, Raasch S, Markkanen T. Footprints in homogeneously and heterogeneously driven boundary layers derived from a Lagrangian stochastic particle model embedded into large-eddy simulation. *Boundary-Layer Meteorology*, 2008, 129(2): 225-248.
- [38] Sogachev A, Leclerc M Y, Karipot A, Zhang G, Vesala T. Effect of clearcuts on footprints and flux measurements above a forest canopy. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2005b, 133(1/4): 182-196.
- [39] Horst T W. The footprint for estimation of atmosphere-surface exchange fluxes by profile techniques. *Boundary-Layer Meteorology*, 1999, 90(2): 171-188.
- [40] Kordowski K, Kuttler W. Carbon dioxide fluxes over an urban park area. *Atmospheric Environment*, 2010, 44(23): 2722-2730.
- [41] Leigh R J, Ball S M, Whitehead J, Leblanc C, Shillings A J L, Mahajan A S, Oetjen H, Lee J D, Jones C E, Dorsey J R, Gallagher M, Jones R L, Plane J M C, Potin P, McFiggans G. Measurements and modelling of molecular iodine emissions, transport and photodestruction in the coastal region around Roscoff. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2010, 10(23): 11823-11838.
- [42] Liu G, Sun J N. Impact of surface variations on the momentum flux above the urban canopy. *Theoretical and Applied Climatology*, 2010, 101(3/4): 411-419.
- [43] Haenel H D, Grünhage L. Reply to the comment on 'Footprint analysis: a closed analytical solution based on height-dependent profiles of wind

- speed and eddy viscosity', by T. W. Horst. *Boundary-Layer Meteorology*, 2001, 101(3): 449-458.
- [44] Hsieh C I, Katul G, Chi T W. An approximate analytical model for footprint estimation of scalar fluxes in thermally stratified atmospheric flows. *Advances in Water Resources*, 2000, 23(7): 765-772.
- [45] Kljun N, Kastner-Klein P, Fedorovich E, Rotach M W. Evaluation of Lagrangian footprint model using data from wind tunnel convective boundary layer. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2004a, 127(3/4): 189-201.
- [46] Vesala T, Rannik Ü, Leclerc M, Foken T, Sabelfeld K. Flux and concentration footprints. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2004, 127(3/4): 111-116.
- [47] Vesala T, Kljun N, Rannik Ü, Rinne J, Sogachev A, Markkanen T, Sabelfeld K, Foken T, Leclerc M Y. Flux and concentration footprint modelling: state of the art. *Environmental Pollution*, 2008, 152(3): 653-666.
- [48] Rannik Ü, Aubinet M, Kurbanmuradov O, Sabelfeld K K, Markkanen T, Vesala T. Footprint analysis for measurements over a heterogeneous forest. *Boundary-Layer Meteorology*, 2000, 97(1): 137-166.
- [49] Flesch T K, Wilson J D, Yee E. Backward-time lagrangian stochastic dispersion models and their application to estimate gaseous emissions. *Journal of Applied Meteorology*, 1995, 34(6): 1320-1332.
- [50] Kidston J, Brummer C, Black T A, Morgenstern K, Nesic Z, McCaughey J H, Barr A G. Energy balance closure using eddy covariance above two different land surfaces and implications for CO₂ flux measurements. *Boundary-Layer Meteorology*, 2010, 136(2): 193-218.
- [51] Lee X H. A model for scalar advection inside canopies and application to footprint investigation. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2004, 127(3/4): 131-141.
- [52] 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-Atmospheres*, 1997, 102(D8): 9323-9334.
- [53] Su H B, Leclerc M Y. Large-eddy simulation of trace gas footprints from infinite crosswind line sources inside a forest canopy // *Proceedings of the 23rd Conference on Agricultural and Forest Meteorology*. Boston: American Meteorological Society Press, 1998
- [54] Patton E G, Davis K J, Barth M C, Sullivan P P. Decaying scalars emitted by a forest canopy: A numerical study. *Boundary-Layer Meteorology*, 2001, 100(1): 91-129.
- [55] Cai X H, Chen J Y, Desjardins R L. Flux footprints in the convective boundary layer: large-eddy simulation and lagrangian stochastic modelling. *Boundary-Layer Meteorology*, 2010, 137(1): 31-47.
- [56] Sogachev A, Lloyd J. Using a one-and-a-half order closure model of the atmospheric boundary layer for surface flux footprint estimation. *Boundary-Layer Meteorology*, 2004, 112(3): 467-502.
- [57] Sogachev A, Rannik U, Vesala T. Flux footprints over complex terrain covered by heterogeneous forest. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2004b, 127(3/4): 143-158.
- [58] Kljun N, Kormann R, Rotach M W, Meixner F X. Comparison of the Lagrangian footprint model LPDM-B with an analytical footprint model. *Boundary-Layer Meteorology*, 2003, 106(2): 349-355.
- [59] Wang W G, Davis K J. A numerical study of the influence of a clearcut on eddy-covariance fluxes of CO₂ measured above a forest. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2008, 148(10): 1488-1500.
- [60] Markkanen T, Steinfeld G, Kljun N, Raasch S, Foken T. Comparison of conventional Lagrangian stochastic footprint models against LES driven footprint estimates. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2009, 9(15): 5575-5586.
- [61] Schmid H P, Lloyd C R. Spatial representativeness and the location bias of flux footprints over inhomogeneous areas. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1999, 93(3): 195-209.
- [62] Chen B Z, Black T A, Coops N C, Hilker T, Trofymow J A, Morgenstern K. Assessing tower flux footprint climatology and scaling between remotely sensed and eddy covariance measurements. *Boundary-Layer Meteorology*, 2009, 130(2): 137-167.
- [63] Chu L H, Liu W Z, Zhu Y J, Li S J. Spatial representation of flux data in gully region on the Loess Plateau. *Advances in Earth Science*, 2009, 24(2): 211-218.
- [64] Strong C, Fuentes J D, Baldocchi D. Reactive hydrocarbon flux footprints during canopy senescence. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2004, 127(3/4): 159-173.
- [65] Weber S, Kordowski K. Comparison of atmospheric turbulence characteristics and turbulent fluxes from two urban sites in Essen, Germany. *Theoretical and Applied Climatology*, 2010, 102(1/2): 61-74.
- [66] 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*, 2005, 118(3): 635-655.
- [67] Foken T, Leclerc M Y. Methods and limitations in validation of footprint models. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2004, 127(3/4): 223-234.

- [68] Schmid H P. Experimental design for flux measurements: matching scales of observations and fluxes. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1997, 87(2/3): 179-200.
- [69] Barcza Z, Kern A, Haszpra L, Kljun N. Spatial representativeness of tall tower eddy covariance measurements using remote sensing and footprint analysis. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2009, 149(5): 795-807.
- [70] Hutjes R W A, Vellinga U S, Gioli B, Miglietta F. Dis-aggregation of airborne flux measurements using footprint analysis. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2010, 150(7/8): 966-983.
- [71] Amiro B D. Footprint climatologies for evapotranspiration in a boreal catchment. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1998, 90(3): 195-201.
- [72] Chen B Z, Coops N C, Fu D J, Margolis H A, Amiro B D, Barr A G, Black T A, Arain M A, Bourque C P A, Flanagan L B, Lafleur P M, McCaughey J H, Wofsy S C. Assessing eddy-covariance flux tower location bias across the Fluxnet-Canada Research Network based on remote sensing and footprint modelling. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2011, 151(1): 87-100.
- [73] Xiao J F, Zhuang Q L, Law B E, Chen J Q, Baldocchi D D, Cook D R, Oren R, Richardson A D, Wharton S, Ma S Y, Martin T A, Verma S B, Suyker A E, Scott R L, Monson R K, Litvak M, Hollinger D Y, Sun G, Davis K J, Bolstad P V, Burns S P, Curtis P S, Drake B G, Falk M, Fischer M L, Foster D R, Gu L H, Hadley J L, Katul G G, Roser Y, McNulty S, Meyers T P, Munger J W, Noormets A, Oechel W C, Paw K T, Schmid H P, Starr G, Torn M S, Wofsy S C. A continuous measure of gross primary production for the conterminous United States derived from MODIS and AmeriFlux data. *Remote Sensing of Environment*, 2010, 114(3): 576-591.
- [74] Kim J, Guo Q, Baldocchi D D, Leclerc M Y, Xu L, Schmid H P. Upscaling fluxes from tower to landscape: overlaying flux footprints on high resolution (IKONOS) images of vegetation cover. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2006, 136(3/4): 132-146.
- [75] Ausma S, Edwards G C, Gillespie T J. Fetch and footprint considerations during measurement of trace gas emissions: a refinery landfarm case study // 15th Symposium on Boundary Layers and Turbulence. 2002: 163-166.
- [76] Sánchez J M, Caselles V, Rubio E M. Analysis of the energy balance closure over a FLUXNET boreal forest in Finland. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2010, 14(8): 1487-1497.
- [77] Cai X H, Chou J Y, Song Y, You C H. Footprint analysis for a stagnant air pollution episode in Beijing. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis; Natural Science*, 2008, 44(1): 135-141.
- [78] Finn D, Lamb B, Leclerc M Y, Horst T W. Experimental evaluation of analytical and Lagrangian surface-layer flux footprint models. *Boundary-Layer Meteorology*, 1996, 80(3): 283-308.

参考文献:

- [7] 温学发, 于贵瑞, 孙晓敏. 基于涡度相关技术估算植被/大气间净 CO₂ 交换量中的不确定性. *地球科学进展*, 2004, 19(4): 658-663.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 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, 386-386.
- [15] 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.
- [16] 宫丽娟, 刘绍民, 双喜, 蔡旭晖, 徐自为. 涡动相关仪和大孔径闪烁仪观测通量的空间代表性. *高原气象*, 2009, 28(2): 246-257.
- [17] 蔡旭晖, 朱明佳, 刘绍民, 徐自为. 大孔径闪烁仪的通量印痕分析与应用. *地球科学进展*, 2010, 25(11): 1166-1174.
- [63] 楚良海, 刘文兆, 朱元骏, 李双江. 黄土高原沟壑区通量数据空间代表性研究. *地球科学进展*, 2009, 24(2): 211-218.
- [77] 蔡旭晖, 丑景奎, 宋宇, 游春华. 北京市大气静稳型重污染的印痕分析. *北京大学学报: 自然科学版*, 2008, 44(1): 135-141.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 32, No. 23 December, 2012 (Semimonthly)

CONTENTS

Maternal thermoregulation during gestation affects the phenotype of hatchling Chinese skinks (<i>Eumeces chinensis</i>): testing the maternal manipulation hypothesis	LI Hong, ZHOU Zongshi, WU Yanqing, et al (7255)
Effects of conspecific and interspecific interference competitions on cache site selection of Siberian chipmunks (<i>Tamias sibiricus</i>)	SHEN Zhen, DONG Zhong, CAO Lingli, et al (7264)
Characterization of ammonia volatilization from polluted river under aeration conditions: a simulation study	LIU Bo, WANG Wenlin, LING Fen, et al (7270)
Diurnal activity patterns and environmental factors on behaviors of Bar-headed Geese <i>Anser indicus</i> wintering at Caohai Lake of Guizhou, China	YANG Yanfeng, ZHANG Guogang, LU Jun, et al (7280)
Impacts of snow cover change on soil water-heat processes of swamp and meadow in Permafrost Region, Qinghai-Tibetan Plateau	CHANG Juan, WANG Gengxu, GAO Yongheng, et al (7289)
Spatial-temporal changes of urban patch wetlands in Changsha, China	GONG Yingbi, JING Lei, PENG Lei, et al (7302)
Modeling of carbon and water fluxes of Qianyanzhou subtropical coniferous plantation using model-data fusion approach	REN Xiaoli, HE Honglin, LIU Min, et al (7313)
Ecological compensation standard for controlling nitrogen non-point pollution from farmland: a case study of Yixing City in Jiang Su Province	ZHANG Yin, ZHOU Yuchen, SUN Hua (7327)
Static toxicity evaluation of chemical wastewater by PFU microbial communities method	LI Zhaoxia, ZHANG Yuguo, LIANG Huixing (7336)
Emergy evaluation of an agro-circulation system in Beijing suburb: take Jianyan village as a case study	ZHOU Liandi, HU Yanxia, WANG Yazhi, et al (7346)
Research on the cooling effect of Xi'an parks in summer based on remote sensing	FENG Xiaogang, SHI Hui (7355)
The dynamics of spatial and temporal changes to forested land and key factors driving change on Hainan Island	WANG Shudong, OUYANG Zhiyun, ZHANG Cuiping, et al (7364)
Impact of different sowing dates on green water footprint of maize in western Jilin Province	QIN Lijie, JIN Yinghua, DUAN Peili (7375)
The dynamic variation of maize (<i>Setaria italica</i> L.) population growth characteristics under cultivars-intercropped on the Loess Plateau	WANG Xiaolin, ZHANG Suiqi, WANG Shuqing, et al (7383)
Effect of different planting methods on root-shoot characteristics and grain yield of summer maize under high densities	LI Zongxin, CHEN Yuanquan, WANG Qingcheng, et al (7391)
Heavy metal contaminant in development process of artificial biological Soil Crusts in sand-land	XU Jie, AO Yanqing, ZHANG Jingxia, et al (7402)
Effects of enhanced UV-B radiation and nitrogen on photosynthetic pigments and non-enzymatic protection system in leaves of foxtail millet (<i>Setaria italica</i> (L.) Beauv.)	FANG Xing, ZHONG Zhangcheng (7411)
Photosynthetic response of different ecotype of <i>Illicium lanceolatum</i> seedlings to drought stress and rewating	CAO Yonghui, ZHOU Benzhi, CHEN Shuanglin, et al (7421)
Seasonal variations in the stems of <i>Larix principis-rupprechtii</i> at the treeline of the Luya Mountains	DONG Manyu, JIANG Yuan, WANG Mingchang, et al (7430)
Influence of terrain on plant biomass estimates by remote sensing: a case study of Guangzhou City, China	SONG Weiwei, GUAN Dongsheng, WANG Gang (7440)
Effects of exponential fertilization on biomass allocation and root morphology of <i>Catalpa bungei</i> clones	WANG Lipeng, YAN Ziyi, LI Jiyue, et al (7452)
Effects of fire damages on <i>Larix gmelinii</i> radial growth at Tahe in Daxing'an Mountains, China	WANG Xiaochun, LU Yongxian (7463)
A model for water consumption by mountain jujube pear-like	XIN Xiaogui, WU Pute, WANG Youke, et al (7473)
Specificity of photosystems function change of two kinds of overwintering broadleaf evergreen plants	ZHONG Chuanfei, ZHANG Yuntao, WU Xiaoying, et al (7483)

- Effects of drought on fluorescence characteristics of photosystem II in leaves of *Ginkgo biloba* WEI Xiaodong, CHEN Guoxiang, SHI Dawei, et al (7492)
- Numerical classification and ordination of forest communities in habitat of Sichuan Snub-nosed Monkey in Hubei Shennongjia National Nature Reserve LI Guangliang, CONG Jing, LU Hui, et al (7501)
- Impact of inorganic anions on the cadmium effective fraction in soil and its phytoavailability during salinization in alkaline soils WANG Zuwei, YI Liangpeng, GAO Wenyan, et al (7512)
- Photosynthetic adaptability of the resistance ability to weak light of 2 species *Spiraea* L. LIU Huimin, MA Yanli, WANG Baichen, et al (7519)
- Fine root longevity and controlling factors in a *Phoebe Bournei* plantation ZHENG Jinxing, HUANG Jinxue, WANG Zhenzhen, et al (7532)
- Analysis on spatial structure and scenarios of carbon dioxide emissions from tourism transportation XIAO Xiao, ZHANG Jie, LU Junyu, et al (7540)
- The hydrological response to human activities in Guishui River Basin, Beijing LIU Yuming, ZHANG Jing, WU Pengfei, et al (7549)
- Socio-economic impacts of under-film drip irrigation technology and sustainable assessment: a case in the Manas River Basin, Xinjiang, China FAN Wenbo, WU Pute, MA Fengmei (7559)
- Effects of pattern and timing of high temperature exposure on the mortality and fecundity of *Aphis gossypii* Glover on cotton GAO Guizhen, LÜ Zhaozhi, XIA Deping, et al (7568)
- Physiological responses of *Eucalyptus* trees to infestation of *Leptocybe invasa* Fisher & La Salle WU Yaojun, CHANG Mingshan, SHENG Shuang, et al (7576)
- Carbon storage capacity of a *Betula alnoides* stand and a mixed *Betula alnoides* × *Castanopsis hystrix* stand in Southern Subtropical China: a comparison study HE Youjun, QIN Lin, LI Zhiyong, et al (7586)
- Distribution and ecological risk assessment of 7 heavy metals in urban forest soils in Changsha City FANG Xi, TANG Zhijuan, TIAN Dalun, et al (7595)
- Review and Monograph**
- The relationship between humans and the environment at the urban-rural interface: research progress and prospects HUANG Baorong, ZHANG Huizhi (7607)
- Flux footprint of carbon dioxide and vapor exchange over the terrestrial ecosystem: a review ZHANG Hui, SHEN Shuanghe, WEN Xuefa, et al (7622)

《生态学报》2013 年征订启事

《生态学报》是中国生态学学会主办的生态学专业性高级学术期刊,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,300 页,国内定价 90 元/册,全年定价 2160 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 23 期 (2012 年 12 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 32 No. 23 (December, 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