

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

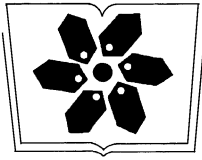
Acta Ecologica Sinica



第32卷 第7期 Vol.32 No.7 **2012**

中国生态学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 32 卷 第 7 期

2012 年 4 月 (半月刊)

目次

城市生态景观研究的基础理论框架与技术构架	孙然好, 许忠良, 陈利顶, 等 (1979)
拟南芥芥子酸酯对 UV-B 辐射的响应	李 敏, 王 垠, 牟晓飞, 等 (1987)
蛋白核小球藻对 Pb(II) 和 Cd(II) 的生物吸附及其影响因素	姜 晶, 李 亮, 李海鹏, 等 (1995)
梨枣在果实生长期对土壤水势的响应	韩立新, 汪有科, 张琳琳 (2004)
产业生态系统资源代谢分析方法	施晓清, 杨建新, 王如松, 等 (2012)
基于物质流和生态足迹的可持续发展指标体系构建——以安徽省铜陵市为例	 赵卉卉, 王 远, 谷学明, 等 (2025)
河北省县域农田生态系统供给功能的健康评价	白琳红, 王 卫, 张 玉 (2033)
温郁金内生真菌 <i>Chaetomium globosum</i> L18 对植物病原菌的抑菌谱及拮抗机理	 王艳红, 吴晓民, 朱艳萍, 等 (2040)
基于稳定碳同位素技术的华北低丘山区核桃-小麦复合系统种间水分利用研究	 何春霞, 孟 平, 张劲松, 等 (2047)
云贵高原喀斯特坡耕地土壤微生物量 C、N、P 空间分布	张利青, 彭晚霞, 宋同清, 等 (2056)
水稻根系通气组织与根系泌氧及根际硝化作用的关系	李奕林 (2066)
苹果绵蚜对不同苹果品种春梢生长期生理指标的影响	王西存, 于 毅, 周洪旭, 等 (2075)
磷高效转基因大豆对根际微生物群落的影响	金凌波, 周 峰, 姚 涓, 等 (2082)
基于 MODIS-EVI 数据和 Symlet11 小波识别东北地区水稻主要物候期	 徐岩岩, 张佳华, YANG Limin (2091)
基于降水利用比较分析的四川省种植制度优化	王明田, 曲辉辉, 杨晓光, 等 (2099)
气候变暖对东北玉米低温冷害分布规律的影响	高晓容, 王春乙, 张继权 (2110)
施肥对巢湖流域稻季氨挥发损失的影响	朱小红, 马中文, 马友华, 等 (2119)
丛枝菌根真菌对枳根净离子流及锌污染下枳苗矿质营养的影响	肖家欣, 杨 慧, 张绍铃 (2127)
不同 R:FR 值对菊花叶片气孔特征和气孔导度的影响	杨再强, 张 静, 江晓东, 等 (2135)
神农架海拔梯度上 4 种典型森林凋落物现存量及其养分循环动态	刘 蕾, 申国珍, 陈芳清, 等 (2142)
黄土高原刺槐人工林地表凋落物对土壤呼吸的贡献	周小刚, 郭胜利, 车升国, 等 (2150)
贵州雷公山秃杉种群生活史特征与空间分布格局	陈志阳, 杨 宁, 姚先铭, 等 (2158)
LAS 测算森林冠层上方温度结构参数的可行性	郑 宁, 张劲松, 孟 平, 等 (2166)
基于 RS/GIS 的重庆缙云山自然保护区植被及碳储量密度空间分布研究	 徐少君, 曾 波, 苏晓磊, 等 (2174)

模拟氮沉降增加对寒温带针叶林土壤 CO₂ 排放的初期影响 温都如娜,方华军,于贵瑞,等 (2185)

桂江流域附生硅藻群落特征及影响因素..... 邓培雁,雷远达,刘 威,等 (2196)

小浪底水库排沙对黄河鲤鱼的急性胁迫..... 孙麓垠,白音包力皋,牛翠娟,等 (2204)

上海池塘养殖环境成本——基于双边界二分式 CVM 法的实证研究 唐克勇,杨正勇,杨怀宇,等 (2212)

稻纵卷叶螟绒茧蜂对寄主的搜索行为 周 慧,张 扬,吴伟坚 (2223)

农林复合系统中灌木篱墙对异色瓢虫种群分布的影响..... 严 飞,周在豹,王 朔,等 (2230)

苹果脱乙酰几丁质发酵液诱导苹果叶片对斑点落叶病的早期抗性反应.....
..... 王荣娟,姚允聪,戚亚平,等 (2239)

专论与综述

气候变化影响下海岸带脆弱性评估研究进展..... 王 宁,张利权,袁 琳,等 (2248)

外来红树植物无瓣海桑引种及其生态影响 彭友贵,徐正春,刘敏超 (2259)

问题讨论

城市污泥生物好氧发酵对有机污染物的降解及其影响因素..... 余 杰,郑国砥,高 定,等 (2271)

4 种绿化树种盆栽土壤微生物对柴油污染响应及对 PAHs 的修复 闫文德,梁小翠,郑 威,等 (2279)

研究简报

云南会泽铅锌矿废弃矿渣堆常见植物内生真菌多样性..... 李东伟,徐红梅,梅 涛,等 (2288)

南方根结线虫对不同砧木嫁接番茄苗活性氧清除系统的影响 梁 朋,陈振德,罗庆熙 (2294)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 322 * zh * P * ¥ 70.00 * 1510 * 37 * 2012-04



封面图说: 站立的仓鼠——仓鼠为小型啮齿类动物,栖息于荒漠、荒漠草原等地带的洞穴之中。白天他们往往会躲在洞穴中睡觉和休息,以避开天敌的攻击,偶尔也会出来走动,站立起来警惕地四处张望。喜欢把食物藏在腮的两边,然后再走到安全的地方吐出来,由此得仓鼠之名。它们的门齿会不停的生长,所以它们的上下门齿必须不断啃食硬东西来磨牙,一方面避免门齿长得太长,妨碍咀嚼,一方面保持门牙的锐利。仓鼠以杂草种子、昆虫等为食。

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

DOI: 10.5846/stxb201108221226

郑宁, 张劲松, 孟平, 魏丹丹, 黄辉, 高峻, 贾长荣, 任迎丰. LAS 测算森林冠层上方温度结构参数的可行性. 生态学报, 2012, 32(7): 2166-2173.

Zheng N, Zhang J S, Meng P, Wei D D, Huang H, Gao J, Jia C R, Ren Y F. The feasibility of using LAS measurements of the turbulence structure parameters of temperature above a forest canopy. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(7): 2166-2173.

LAS 测算森林冠层上方温度结构参数的可行性

郑 宁¹, 张劲松^{1,*}, 孟 平¹, 魏丹丹¹, 黄 辉¹, 高 峻¹, 贾长荣², 任迎丰²

(1. 中国林业科学研究院林业研究所 国家林业局林木培育重点实验室; 北京 100091;

2. 济源市国有大沟河林场, 河南 济源 454650)

摘要: 利用位于河南省济源市的华北低丘山地 30 年生栓皮栎-侧柏-刺槐人工混交林 2010 年 4 月至 8 月每月连续 7d, LAS 直接测算的森林冠层上方湍流结构参数, 与经过湍流谱方法计算处理的三维超声风速/温度仪的观测数据比较, 分析 LAS 测算低丘山地森林冠层温度湍流结构的可行性。结果表明: 水平风速和温度湍流谱都有明显的惯性区出现(斜率-2/3); LAS 直接测算的湍流温度结构参数与利用该惯性区的数据计算的结果具有较好的一致性, 说明在起伏非均匀下垫面上, 采用 LAS 观测湍流结构的变化情况具有较好的可行性。

关键词: 大孔径闪烁仪; 人工混交林; 湍流谱计算; 湍流温度结构参数

The feasibility of using LAS measurements of the turbulence structure parameters of temperature above a forest canopy

ZHENG Ning¹, ZHANG Jinsong^{1,*}, MENG Ping¹, WEI Dandan¹, HUANG Hui¹, GAO Jun¹, JIA Changrong², REN Yingfeng²

1 Key Laboratory of Tree Breeding and Cultivation, State Forestry Administration, Research Institute of Forestry, CAF, Beijing 100091, China

2 DA gou-he National Forest Farm, Jiyuan, Henan 454650, China

Abstract: The atmospheric boundary layer is the transport pathway of energy, momentum and material and directly influenced by the surface and forced on a timescale of about one hour or less. It is one of the major determining factors in material and energy exchange between forest ecosystems and internal boundary layers. The refractive index structure parameter (C_n^2) is used to indicate the turbulence intensity. C_n^2 is determined by structure parameters of temperature (C_T^2) and momentum (C_v^2).

The eddy-covariance (EC) method is considered as one of standard tools estimating surface fluxes because it can directly measure the energy transporting eddies and no similarity theory must be applied. Although the EC method is straightforward conceptually, there are many shortages and additional corrections that need to be applied.

In the late 1970s, the assumption of using the scintillator to measure water and heat fluxes was first proposed. A scintillometer consists of a transmitter and a receiver. The receiver measures intensity fluctuations in the radiation emitted by the transmitter caused by refractive scattering of turbulent eddies in the scintillometer path. The measurement spatial scale of the scintillometer is larger than that of the EC method, making the mean time of fluxes less than one minute. In addition, the scintillometer is sensible to one dominant eddy size and interpolate the rest of the turbulent scales by using a theoretical form of the spectrum, rather than integrating over all measured eddy scales.

基金项目: 公益性行业(气象)科研专项(GYHY200706046); 公益性行业(林业)科研专项(201104009-04)

收稿日期: 2011-08-22; 修订日期: 2012-01-10

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhangjs@caf.ac.cn

Raw data was processed as follows: a) the de-spike criterion set to remove signals that were more than twice the standard deviation at half-hour time scale; b) the instantaneous flow was averaged to define a set of mean streamlines, which was set as the x coordinate line, then the fluctuation components of wind and temperature (u' , v' , w' and T') were calculated; c) spectrum of turbulences was computed by using Fast Fourier transform and Hanning filtering methods; d) the running mean was used to normalize spectrum density and the values of corresponding normalized frequency adopt the middle frequency of this waveband; e) the inertial region was defined inside which the slope of the spectrum curve was $-2/3$.

Based on the turbulent data measured above a 30-year aged mixed plantation canopy in the hilly zone of the North China in the daytime (9:00—15:00) from April to August in 2010, C_T^2 was measured and calculated using the large aperture scintillometer(LAS) method and compared with the results obtained using three-dimensional sonic anemometers/thermometers. The objective was to investigate the feasibility of using LAS to measure the turbulence structure parameters of temperature above the forest canopy. The results showed that the inertial range could be observed in the spectra of temperature and horizontal component of high-frequency part of wind speed. It was consistent with the $-2/3$ power law. The C_T^2 calculated using the LAS method had a high agreement with the results given by the turbulence spectral method, indicating that it was feasible to use the LAS method to measure turbulence fluxes over the heterogeneous surface. As the LAS measurement has the spatial scale from a few hundred meters up to several kilometers which match relatively well with the scale of satellite remote sensing pixel, it is widely used to validate the results obtained by satellite remote sensing technology.

Key Words: large aperture scintillometer; mixed plantation ecosystem; turbulence spectral structure; C_T^2

森林是陆地生态系统的主体,了解森林生态系统与近地层大气之间物质、能量的交换,在地-气相互作用及全球气候变化的研究中具有重要意义^[1-3]。地-气之间物质、能量的输送,直接与大气湍流结构、空气动力学特征等有关。大气折射指数的结构参数(C_n^2)定量描述湍流强度,波在湍流大气中传输,波动强度的对数变化与 C_n^2 有关, C_n^2 是由湍流动力结构参数(C_v^2)和温度结构参数(C_T^2)的共同影响,其中 C_T^2 是反映地气之间能量交换过程强度的最重要参数之一^[4]。认识森林生态系统在能量输送和气候变化中的作用,就需要进一步了解森林冠层温度结构参数等湍流参数的变化特征。

20 世纪 90 年代之前,气象动力学梯度观测仪器的精度限制了湍流结构的精确测量。直到能够快速响应的三维超声风速/温度仪的出现,为探测研究森林冠层上方湍流结构奠定了实验基础,因此一直被作为测算森林冠层湍流特征的精确方法。70 年代末,美国 NOAA 波传播实验室的 Wang^[5]等提出的利用光闪烁法测量水、热通量等的设想,由发射端发射一定波长和直径的波束(可见光、红外光和微波^[6-7]),经过大气中的传播,由接收端接收到光程路径上受到温度、湿度和气压波动影响的波束。此后的十几年时间里,各种光闪烁通量观测仪器纷纷出现,并在 20 世纪 90 年中后期实际应用于外场陆面通量实验研究中^[8]。近几年出现的大孔径闪烁仪(Large Aperture Scintillometer, LAS)不仅可以测算 500—5000m 范围内光线路径上的湍流通量,还可以反映该区域的大气湍流强度或是横向风速等重要信息^[9]。目前,有关闪烁仪的应用研究主要集中于根据 Monin-Obukhov 相似理论,结合气象数据,计算观测区域显热通量及其影响因子与可行性分析等方面内容^[10-20],一般情况下,由闪烁仪直接观测得到的 C_n^2 推算出 C_T^2 , 需要根据实际湍流结构和空气动力学特征考虑相似理论的适用情况,除 Nakaya 等^[21-24]、Randow 等^[25]曾分别分析了闪烁仪测算显热通量值与湍流动能耗散率、低频湍流等因素的关系等问题之外,基于大气湍流与空气动力学特征,分析闪烁仪在地形起伏非均匀的森林冠层上方湍流温度结构参数等的研究,未见详尽文献报道。

本研究以华北南部低丘山地栓皮栎-侧柏-刺槐人工混交林为例,分析 2010 年 4 月至 8 月每月连续 7d LAS 直接观测的湍流结构参数,并与经过湍流谱方法处理的三维超声风速/温度仪的观测结果比较,分析

LAS 测算低丘山地森林冠层上方湍流温度结构的可行性,从而基于实际湍流结构情况,提高非均匀下垫面条件下闪烁仪观测数据的处理、质量控制,同时为进一步开展大孔径闪烁仪在森林近地面层的湍流运动及扩散理论的应用研究,提供科学依据。

1 实验设计

1.1 试验区概况及观测点设置

本研究观测对象为华北低丘山地人工林。所选区域为位于河南省济源市的黄河小浪底森林生态系统定位研究站的人工混交林观测区。主要树种为栓皮栎 (*Quercus variabilis*)、侧柏 (*Platycladus orientalis*)、刺槐 (*Robinia pseudoacacia*)。定位站站区中心地理坐标为 35°01'N、112°28'E,平均海拔高度为 410m,面积约 7210hm²。属暖温带亚湿润季风气候,年平均气温 12.4℃,全年日照时数为 2367.7h,年平均降水量 641.7mm。受季风气候的影响,降水季节性分配不均匀。5—9 月平均降水量为 438.0mm,占全年的 68.3%。5—9 月风向东北偏东、西南为主。

在观测区中心偏西南方向 200m 和东北方向 300m 各安装 1 套涡动相关系统 (Eddy-covariance system, EC),分别简称 EC₁、EC₂,海拔高度分别为 412m 和 408m,安装高度均为距地面 30m。在距离 1 号涡动相关系统偏西南方向约 620m,海拔高度 420m 处安装大孔径闪烁仪发射端,东北面放置接收端,相距 1640m (图 1)。观测区中心周围 1.8km² 范围内林木覆盖率为 96.0% 左右,其中栓皮栎、侧柏和刺槐所占比例分别约 81.6%、7.4% 和 11.0%,平均株高分别为 10.1、8.0m 和 9.4m。

1.2 主要观测内容及设备

1.2.1 大孔径闪烁仪 (LAS) 系统

本研究采用的 LAS 系统为 BLS 450 型 (Scintec, Inc., Germany) 安装高度距地面为 30m,发射装置与接收装置间距为 2km 左右。C_n² 取样频率为 1Hz,每 1min 输出一组平均值。

1.2.2 涡度相关 (EC) 系统

涡度相关系统主要由 CSAT3 型三维超声风速/温度仪 (Campbell Sci. Inc., USA) 和快速响应的 LI-7500 型开路红外 CO₂/H₂O 分析仪 (Li-Cor. Inc., USA) 组成,安装高度为距地面 30m。上述仪器均与 CR5000 型数据采集器 (Campbell Sci. Inc., USA) 相连,昼夜连续自动采集,原始数据采样频率为 10 Hz,每 30 min 输出一组平均值。

1.3 计算方法及数据处理

1.3.1 湍流谱的计算方法

由各种湍流叠加而成的湍流广泛存在于大气中,在大气边界层中观测到的湍流是时间和空间上的广阔结构,统计学方法通过把一系列观测资料分解成频率或波长与能谱的关系,就可发现不同时间和空间尺度的湍流在整个湍流状态中所起的作用。Kolmogorov 关于湍流具有两条假设^[26]: (1) 在 Reynold 数足够大时,存在一个高波数区,其中湍流处于平衡状态,小尺度的湍流统计特征由尺度 γ 、湍流动量耗散率 ε 和分子运动学黏性系数 ν 决定; (2) 当 Reynold 数足够大时,在上述局地均匀各向同性的平衡区中,又有一个仅由参数 ε 决定的子区域,称为惯性区。

根据 Kolmogorov 关于湍流具有普遍的统计规律的第一条假设,可建立起^[26]:

$$E(k) = f(\kappa, \varepsilon, \nu) \quad (1)$$

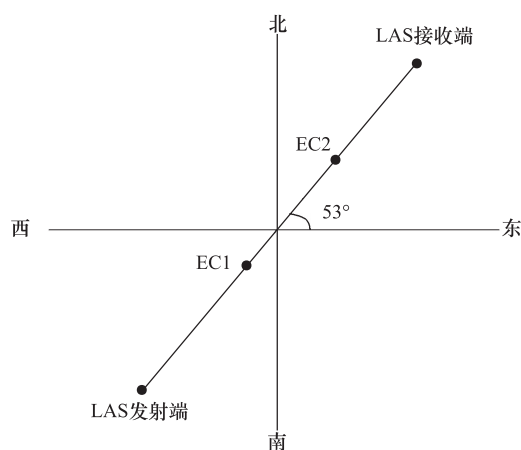


图 1 观测仪器分布示意图

Fig. 1 Map of the observation station

这里有 4 个相关物理量, 具有 2 个独立的量纲, 根据 II 定理, 形成 2 个无因次量, 因而得到湍流平衡区 (惯性区和耗散区) 的能谱为^[26]:

$$E(k) = \varepsilon^{\frac{2}{3}} \kappa^{-\frac{5}{3}} F(k\eta) \quad (2)$$

式中, $F(k\eta)$ 是 $k\eta$ 的待定函数。

根据 Kolmogorov 的第二条假设, 同时应用 Taylor 冻结湍流假设, 将微气象在空间一点上的观测数据由时间序列转换成空间分布, 则一维湍流谱可以用下式描述:

$$E_{u,v,w}(\kappa) = \alpha \varepsilon^{\frac{2}{3}} \kappa^{-\frac{5}{3}} \quad (3)$$

$$E_T(\kappa) = \alpha_T \varepsilon^{-\frac{1}{3}} N \kappa^{-\frac{5}{3}} \quad (4)$$

式中, $E_{u,v,w}(\kappa)$ 为风速分量谱; $E_T(\kappa)$ 为温度谱; κ 为波数; α 和 α_T 在惯性区为普适常数 (Kolmogorov 常数)。因此在惯性区内, 由湍流各向同性理论预测, 相应的 Kolmogorov 常数也应有相同的比值, 取 $\alpha_u = 0.151$ ^[27], $\alpha_v = \alpha_w = \frac{4}{3} \alpha_u$ ^[28], $\alpha_T = 0.8$ ^[29], ε 为湍流动量耗散率 (m^2/s^3); N 为湍流热量耗散率 (K^2/s)。

1.3.2 湍流结构参数的计算方法

在惯性区, 大气要素的结构函数可由大气要素的单点时间序列求得。对于风速 u 分量和温度 T 的小湍涡特征的结构函数可分别写成如下形式^[30]:

$$D_T(r) = \overline{[T(x) - T(x-r)]^2} = C_T^2 r^{\frac{2}{3}} \quad (5)$$

$$D_u(r) = \overline{[u(x) - u(x-r)]^2} = C_v^2 r^{\frac{2}{3}} \quad (6)$$

由近地边界层内小尺度湍流各向同性理论, 由相关函数的 Fourier 变换得到一维温度谱和结构函数参数 C_T^2 的关系式为:

$$E_T(\kappa) = 0.25 C_T^2(\kappa)^{-\frac{5}{3}} \quad (7)$$

与(4)式相比, 取 $\alpha_T = 0.8$, 得:

$$C_T^2 = 3.2 N \varepsilon^{-\frac{1}{3}} \quad (8)$$

同样风速 u 分量谱和结构参数 C_v^2 关系式为:

$$E_u(\kappa) = 0.25 C_v^2(\kappa)^{-\frac{5}{3}} \quad (9)$$

与(3)式比较, 取 $\alpha_u = 0.151$, 得:

$$C_v^2 = 2 \varepsilon^{\frac{2}{3}} \quad (10)$$

1.3.3 LAS 观测的结构参数的计算方法

光波在大气中传播时, 由于大气温度、湿度和气压波动引起大气折射系数的波动导致波束的无规则折射 (和吸收), 从而影响接收波束的强度。接收到的光强 (I) 自然对数的方差, 可由公式计算出大气折射指数的结构参数:

$$C_n^2 = 1.12 \sigma_{\text{ln}}^2 D^{7/3} L_1^{-3} \quad (11)$$

式中, D 为光学孔径, L_1 为发射仪与接收仪之间的距离。在湍流大气中, 温度、湿度、和气压的波动都会引起密度的波动, 由此导致 C_n^2 的变化。所以 C_n^2 温度、湿度的结构参数以及二者的相关项有关, 其同时还与气压结构参数有关, 但后者所占的比重很小, 一般不考虑, 所以有:

$$C_n^2 = \frac{A_T^2}{T^2} C_T^2 + \frac{A_T A_q}{T q} C_{Tq} + \frac{A_q^2}{q^2} C_q^2 \quad (12)$$

式中, A_T 和 A_q 分别代表 C_T^2 和 C_q^2 的相对贡献量。

Wesley 认为^[31], 假如温度和湿度的脉动强度相关, 利用波文比系数 β 的定义, 则可由大气折射指数的结构参数计算大气的温度结构参数:

$$C_T^2 = C_n^2 \left(\frac{T^2}{-0.78 \times 10^{-6} P} \right) \left(1 + \frac{0.03}{\beta} \right)^{-2} \quad (13)$$

本研究采用的是 BLS 450 型 LAS 系统的生产商德国 Scintec 公司给出的计算公式:

$$C_T^2 = C_n^2 \frac{T^4}{\alpha_1^2 P^2} \quad (14)$$

式中, $\alpha_1 = \alpha_2 \left(1 + \frac{\lambda_0^2}{\lambda^2} \right)$, $\alpha_2 = 77.6 \times 10^{-6} K/hPa$, $\lambda_0^2 = 7.53 \times 10^{-3} \mu m^2$, λ 为观测所采用的红外波长 880nm, 则 $\lambda^2 = 7.74 \times 10^{-1} \mu m^2$ 。

1.3.4 观测数据处理

本次实验采集了 2010 年 4 月至 8 月每月连续 7d, 每天 9:00—15:00 时森林冠层上方约 20m 处的湍流数据, 每半小时为一组, 原始数据按下列步骤进行处理:

(1) 两倍标准差法剔除野点, 用相邻两点内插补充, 如果序列中野点数大于总数的 5%, 此组数据不再采用;

(2) 取 X 轴为平均风速方向(旋转水平轴使得 u 分量与流线方向一致), 计算风速分量和温度的脉动值 u' , v' , w' 和 T' ;

(3) 用快速 Fourier 变换(FFT)和哈明窗(Hanning)滤波方法计算各脉动量湍流谱, 考虑到快速 Fourier 变换的实际计算需要和采样频率, 每次使用的数据点为 $2^{14} = 16384$, 取样时间约为 27 min 31s;

(4) 用滑动平均来平滑归一化谱密度, 相应的归一化频率采用该波带的中间频率;

(5) 确定谱曲线呈现 -2/3 斜率部分的惯性区, 并利用该惯性区的数据和(3)、(4)式计算湍流动量耗散率 ε 和湍流热量耗散率 N , 并计算温度结构参数 C_T^2 ;

(6) 利用 LAS 观测得到的 C_n^2 , 结合相关气象参数, 在进行数据质量控制后, 根据公式(12)计算出温度结构参数 C_T^2 ;

(7) 检验由湍流谱方法和由 LAS 实际测算出的温度结构参数 C_T^2 的一致性。

2 结果分析

2.1 湍流谱结构的确定

图 2 和图 3 给出本次实验中每月当中大气稳定度($-10 < z/L < 0$)时, 观测时段的水平速度谱和温度谱。图中的纵坐标分别为 $E_u(\kappa)/\sigma_u^2$ 和 $E_T(\kappa)/\sigma_T^2$, 即将谱 $E(\kappa)$ 用相应的方差标准化; 横坐标为 $f = nz/U$ 为习惯采用的无量纲频率。其中, n 为自然频率, $U = (u^2 + v^2 + w^2)^{1/2}$ 是平均风速。

从图中看到水平风速和温度湍流谱分布特征基本相似, 符合小尺度湍流均匀各向同性的规律。在对数—对数坐标条件下, 低频区有明显的峰值, 高频区有较清楚的惯性区, 基本符合 -2/3 斜率。由于观测区域位于华北低丘山地, 下垫面非均一旦地形起伏, 因此湍流谱的分布并不完全等同于理想条件下的情况。

2.2 湍流谱方法和 LAS 实际测算的温度结构参数 C_T^2 的一致性检验

在确定湍流谱的结构之后, 根据不同时段温度谱惯性区所存在的频率分布, 结合公式(4)、(5)、(7)、(8)计算出温度结构参数 C_T^2 。图 4 是利用湍流谱方法计算得到的 C_T^2 与 LAS 直接测算结果的一致性检验, 如图所示 4 月到 8 月各月的检验结果, 两者计算结果具有相当好的一致性, 大部分情况相关系数都达到了 0.9 以上。可以认为: 在 9:00—15:00 时这段湍流运动较强的时间段内, LAS 可以较好地观测到起伏非均匀下垫面上湍流交换运动以及湍流结构的变化情况。

3 结论与讨论

本研究通过对 2010 年 4 月至 8 月每月连续 7d, 特定观测时段内水平风速和温度湍流谱的结构分析, 确定在低丘山地人工林冠层上大气要素的湍流谱符合小尺度湍流均匀各向同性的规律, 高频部分有明显惯性区出现, 基本遵循 -2/3 斜率, 与国外研究者在典型平坦草原和牧场下垫面所观测到的结果基本一致, 但并不完全

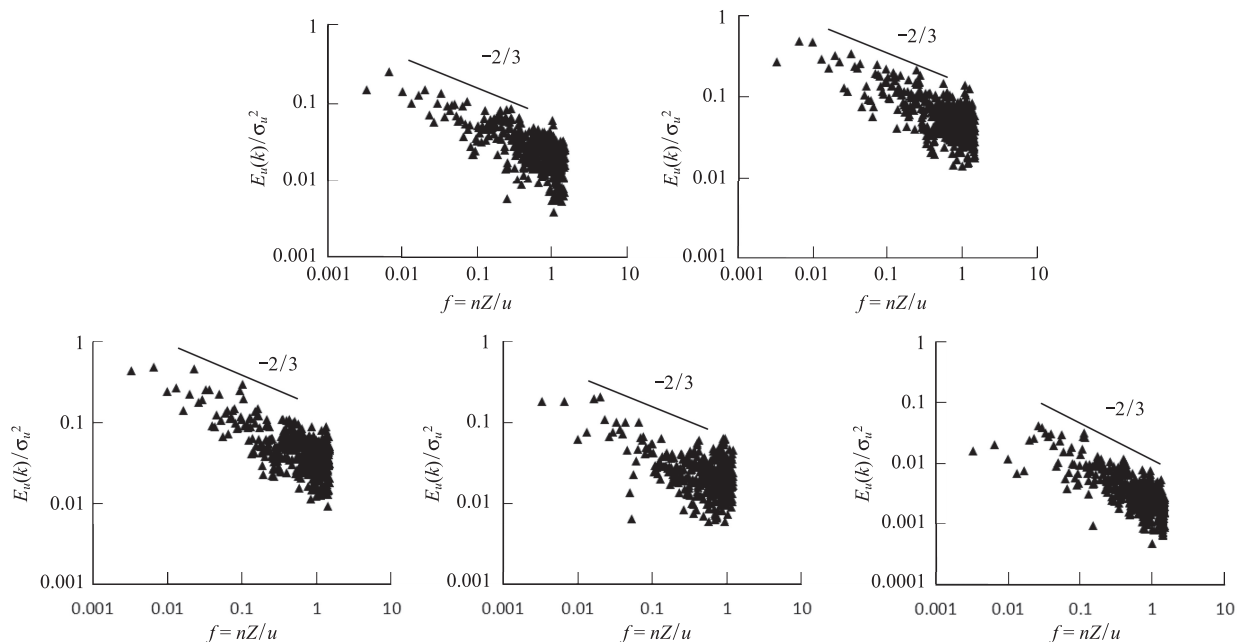
图2 4至8月各月冠层上风速 u 分量的归一化湍流谱

Fig. 2 Normalized spectra of horizontal components above the forest canopy from April to August

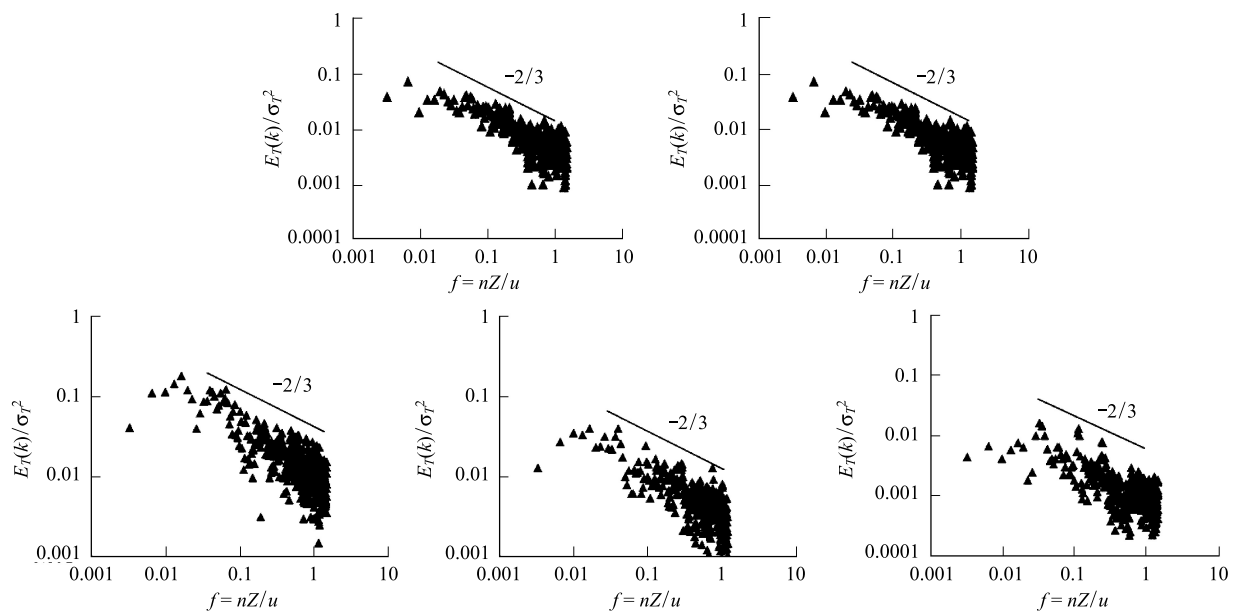
图3 4至8月各月冠层上温度 T 的归一化湍流谱

Fig. 3 Normalized spectra of temperature above the forest canopy from April to August

等同于理想条件下的分别情况;由 LAS 实际观测和湍流谱方法计算的温度结构参数的一致性比较表明:两种方法计算温度结构参数的相关性较好,由此可知在起伏非均匀下垫面上,采用 LAS 观测湍流结构的变化情况具有较好的可行性,说明大孔径闪烁仪在非均匀地表几百米至几公里范围内的观测方面具有较高的应用潜力。

本文仅研究了水平风速和温度的湍流谱,对于其他两个风速分量的湍流谱以及不同分量间的协谱,特别是垂直风速风量与温度等要素的协谱没有分析,需要在今后森林近地面层的湍流运动及扩散理论的应用研究

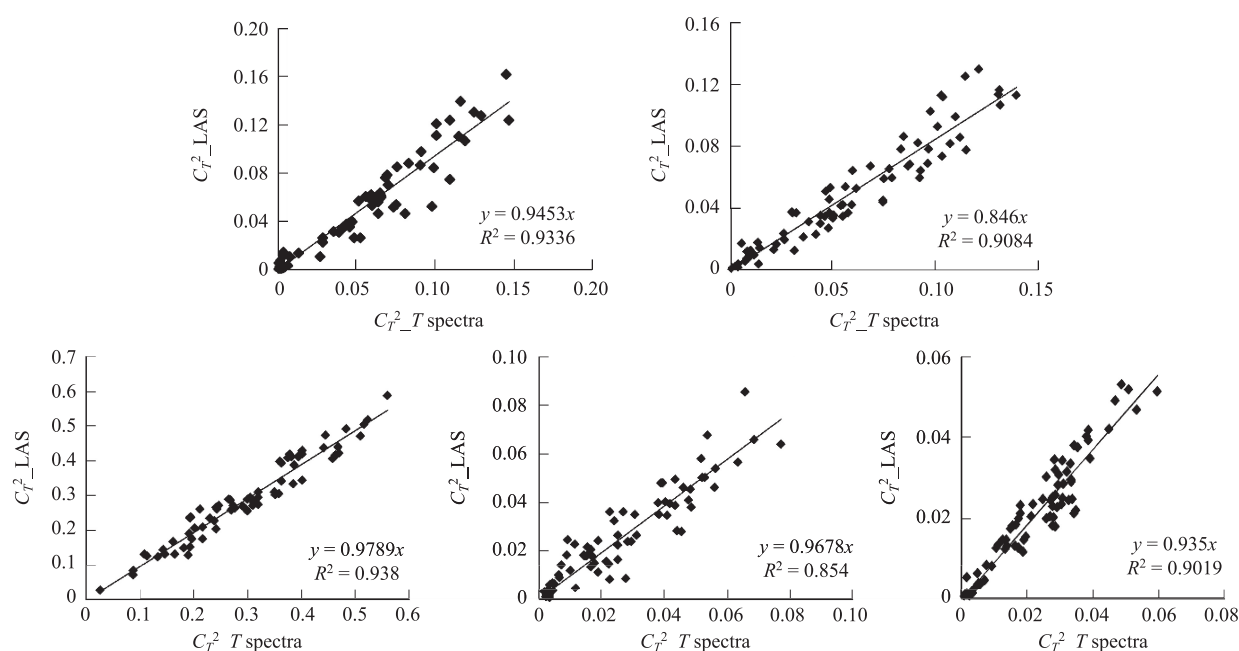


图4 4至8月各月湍流谱方法与LAS测量的 C_T^2 一致性比较

Fig. 4 Comparison between C_T^2 from T spectra and LAS from April to August

中将继续深入研究。同时本次研究采用的都是9:00—15:00时强湍流发生时段内的数据,下一步将对于中等湍流和弱湍流时段内的数据进行分析,全面掌握LAS在不同湍流运动状态下观测湍流结构的情况。同时结合其他观测设备和多套闪烁仪,进一步获得观测横向风速或区域湍流内尺度等大气湍流结构其他的重要信息。

References:

- [1] Kaimal J C, Wyngaard J C, Izumi Y, Coté O R. Spectral characteristics of surface-layer turbulence. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1972, 98(417): 563-589.
- [2] Anderson D E, Verma S B, Clement R J, Baldocchi D D, Matt D R. Turbulence spectra of CO_2 , water vapor, temperature and velocity over a deciduous forest. Agricultural and Forest Meteorology, 1986, 38(1/3): 81-99.
- [3] Amiro B D. Drag coefficients and turbulence spectra within three boreal forest canopies. Boundary-Layer Meteorology, 1990, 52(3): 227-246.
- [4] Chen Y, Hu Y. Effect of turbulent atmosphere on quantum key distribution systems. Acta Optica Sinica, 2007, 27(1): 21-25.
- [5] Wang T, Ochs G R, Clifford, S F. A saturation-resistant optical scintillometer to measure C_n^2 . Journal of Optical Society of America, 1978, 68(3): 334-338.
- [6] Kohsiek W, Meijninger W W M, Moene A F, Heusinkveld B G, Hartogensis O K, Hillen W C A M, De Bruin H A R. An extra large aperture scintillometer for long range applications. Boundary-Layer Meteorology, 2002, 105(1): 119-127.
- [7] Hartogensis O K, De Bruin H A R, van De Wiel B J H. Displaced-beam small aperture scintillometer test. Part II: cases-99 stable boundary-layer experiment. Boundary-Layer Meteorology, 2002, 105(1): 149-176.
- [8] de Bruin H. Introduction: renaissance of scintillometry. Boundary-Layer Meteorology, 2002, 105(1): 1-4.
- [9] Hutt D L, Trepanier F. Surface-layer turbulence measured with the Scintec SLS-20 scintillometer. SPIE, 1995, 2471: 461-470.
- [10] Meijninger W M L, De Bruin H A R. The sensible heat fluxes over irrigated areas in western Turkey determined with a large aperture scintillometer. Journal of Hydrology, 2000, 229(1/2): 42-49.
- [11] Ezzahar J, Chehbouni A, Hoedjes J C B, Er-Raki S, Chehbouni Ah, Boulet G, Bonnefond J M, De Bruin H A R. The use of the scintillation technique for monitoring seasonal water consumption of olive orchards in a semi-arid region. Agriculture Water Management, 2007, 89(3): 173-184.
- [12] Hoedjes J C B, Chehbouni A, Ezzahar J, Escadafal R, De Bruin H A R. Comparison of large aperture scintillometer and eddy covariance

- measurements; can thermal infrared data be used to capture footprint induced differences. *Journal of Hydrometeorology*, 2007, 8(3): 144-159.
- [13] Kleissl J, Gomez J, Hong S H, Hendrickx J M H, Rahn T, Defoor W L. Large aperture scintillometer intercomparison study. *Boundary-Layer Meteorology*, 2006, 128(1): 133-150.
- [14] Lagouarde J P, Bonnefond J M, Kerr Y H, McAneney K J, Irvine M. Integrated sensible heat flux measurements of a two-surface composite landscape using scintillometry. *Boundary-Layer Meteorology*, 2002, 105(1): 5-35.
- [15] Zhang J S, Meng P, Zheng N, Huang H, Gao J. The feasibility of using LAS measurements of the sensible heat flux from a mixed plantation in the hilly zone of the North China. *Advances in Earth Science*, 2010, 25(11): 1283-1291.
- [16] Beyrich F, De Bruin H A R, Meijninger W M L, Schipper J W, Lohse H. Results from one-year continuous operation of a large aperture scintillometer over a heterogeneous land surface. *Boundary-Layer Meteorology*, 2002, 105(1): 85-97.
- [17] Ezzahar J, Chehbouni A, Hoedjes J, Ramier D, Boulain N, Boubkraoui S, Cappelaere B, Descroix L, Mougenot B, Timouk F. Combining scintillometer measurements and an aggregation scheme to estimate area-averaged latent heat flux during the AMMA experiment. *Journal of Hydrology*, 2009, 375(1/2): 217-226.
- [18] Ochs G R, Wilson J J. A second-generation large aperture scintillometer//NOAA Technical Memorandum ERL WPL; 232. Boulder: NOAA Environmental Research Laboratories, 1993: 24-24.
- [19] Hemakumara H, Chandrapala L, Moene A F. Evapotranspiration fluxes over mixed vegetation areas measured from large aperture scintillometer. *Agriculture Water Management*, 2003, 58(2): 109-122.
- [20] Solignac P A, Brut A, Selves J L, Bêteille J P, Gastellu-Etcheberry J P, Keravec P, Béziat P, Ceschia E. Uncertainty analysis of computational methods for deriving sensible heat flux values from scintillometer measurements. *Atmospheric Measurement Techniques Discussions*, 2009, 2(3): 1383-1417.
- [21] Nakaya K, Suzuki C, Kobayashi T, Ikeda H, Yasuie S. Application of a displaced-beam small aperture scintillometer to a deciduous forest under unstable atmospheric conditions. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2006, 136(1/2): 45-55.
- [22] Meijninger W M L, Hartogensis O K, Kohsiek W, Hoedjes J C B, Zuurbier R M, De Bruin H A R. Determination of area-averaged sensible heat fluxes with a large aperture scintillometer over a heterogeneous surface-Flevoland field experiment. *Boundary-Layer Meteorology*, 2002, 105(1): 37-62.
- [23] Chehbouni A, Watts C, Lagouarde J P, Kerr Y H, Rodriguez J C, Bonnefond J M, Santiago F, Dedieu G, Goodrich D C, Unkrich C. Estimation of heat and momentum fluxes over complex terrain using a large aperture scintillometer. *Agriculture and Forest Meteorology*, 2000, 105(1/3): 215-226.
- [24] Peng G L, Liu S M, Cai X H, Lu L, Xu Z W. Footprint analysis of turbulent flux measurement over heterogeneous surface. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2008, 32(5): 1064-1070.
- [25] Von Randow C, Kruijt B, Holtlag A A M, de Oliveira M B L. Exploring eddy-covariance and large-aperture scintillometer measurements in an Amazonian rain forest. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2008, 148(4): 680-690.
- [26] Liu S D, Liang F M, Liu S S, Xin G J. *Atmospheric Turbulence*. Beijing: Peking University Press, 2008: 50-56.
- [27] Högström U. Analysis of turbulence structure in the surface layer with a modified similarity formulation for near neutral conditions. *Journal of Atmospheric Sciences*, 1990, 47(16): 1949-1972.
- [28] Garratt J R. *The Atmospheric Boundary Layer*. Cambridge: Cambridge University Press, 1992.
- [29] Kaimal J C, Finnigan J J. *The Atmospheric Boundary Layer: Its Structure and Measurement*. New York: Oxford University Press, 1994.
- [30] Andreas E L. Estimating C_n^2 over snow and sea ice from meteorological data. *Journal of Optical Society of America*, 1988, 5(4): 481-495.
- [31] Wesely M L. The combined effect of temperature and humidity fluctuations on refractive index. *Journal of Applied Meteorology*, 1976, 15(1): 43-49.

参考文献:

- [15] 张劲松, 孟平, 郑宁, 黄辉, 高峻. 大孔径闪烁仪法测算低丘山地人工混交林显热通量的可行性分析. *地球科学进展*, 2010, 25(11): 1283-1291.
- [24] 彭谷亮, 刘绍民, 蔡旭晖, 卢俐, 徐自为. 非均匀下垫面湍流量观测的印痕分析. *大气科学*, 2008, 32(5): 1064-1070.
- [26] 刘式达, 梁福明, 刘式适, 辛国君 主编. *大气湍流*. 北京: 北京大学出版社, 2008, 50-56.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 32, No. 7 April, 2012 (Semimonthly)

CONTENTS

Theoretical framework and key techniques of urban ecological landscape research	SUN Ranhao, XU Zhongliang, CHEN Liding, et al (1979)
Response of sinapate esters in <i>Arabidopsis thaliana</i> to UV-B radiation	LI Min, WANG Yin, MU Xiaofei, et al (1987)
Biosorption of lead (II) and cadmium (II) from aqueous solution by <i>Chlorella pyrenoidsa</i> and its influential factors	JIANG Jing, LI Liang, LI Haipeng, et al (1995)
Response of pear jujube trees on fruit development period to different soil water potential levels	HAN Lixin, WANG Youke, ZHANG Linlin (2004)
An approach for analyzing resources metabolism of industrial ecosystems	SHI Xiaoqing, YANG Jianxin, WANG Rusong, et al (2012)
Establishment of environmental sustainability assessment indicators based on material flow and ecological footprint model in Tongling City of Anhui Province	ZHAO Huihui, WANG Yuan, GU Xueming, et al (2025)
Health status evaluation of the farmland supply function at county level in Hebei Province	BAI Linhong, WANG Wei, ZHANG Yu (2033)
Inhibition effects and mechanisms of the endophytic fungus <i>Chaetomium globosum</i> L18 from <i>Curcuma wenyujin</i>	WANG Yanhong, WU Xiaomin, ZHU Yanping, et al (2040)
Water use of walnut-wheat intercropping system based on stable carbon isotope technique in the low hilly area of North China	HE Chunxia, MENG Ping, ZHANG Jinsong, et al (2047)
Spatial heterogeneity of soil microbial biomass carbon, nitrogen, and phosphorus in sloping farmland in a karst region on the Yunnan-Guizhou Plateau	ZHANG Liqing, PENG Wanxia, SONG Tongqing, et al (2056)
Relationship among rice root aerenchyma, root radial oxygen loss and rhizosphere nitrification	LI Yilin (2066)
Effects of <i>Eriosoma lanigerum</i> (Hausmann) on physiological indices of different apple cultivars	WANG Xicun, YU Yi, ZHOU Hongxu, et al (2075)
Effects of P-efficient transgenic soybean on rhizosphere microbial community	JIN Lingbo, ZHOU Feng, YAO Juan, et al (2082)
Detecting major phenological stages of rice using MODIS-EVI data and Symlet11 wavelet in Northeast China	XU Yanyan, ZHANG Jiahua, YANG Limin (2091)
Cropping system optimization based on the comparative analysis of precipitation utilization in Sichuan Province	WANG Mingtian, QU Huihui, YANG Xiaoguang, et al (2099)
The impacts of global climatic change on chilling damage distributions of maize in Northeast China	GAO Xiaorong, WANG Chunyi, ZHANG Jiquan (2110)
Effect of fertilization on ammonia volatilization from paddy fields in Chao Lake Basin	ZHU Xiaohong, MA Zhongwen, MA Youhua, et al (2119)
Effects of arbuscular mycorrhizal fungus on net ion fluxes in the roots of trifoliate orange (<i>Poncirus trifoliata</i>) and mineral nutrition in seedlings under zinc contamination	XIAO Jiaxin, YANG Hui, ZHANG Shaoling (2127)
The effect of red:far red ratio on the stomata characters and stomata conductance of <i>Chrysanthemum</i> leaves	YANG Zaiqiang, ZHANG Jing, JIANG Xiaodong, et al (2135)
Dynamic characteristics of litterfall and nutrient return of four typical forests along the altitudinal gradients in Mt. Shennongjia, China	LIU Lei, SHEN Guozhen, CHEN Fangqing, et al (2142)
Aboveground litter contribution to soil respiration in a black locust plantation in the Loess Plateau	ZHOU Xiaogang, GUO Shenli, CHE Shengguo, et al (2150)
Life history and spatial distribution of a <i>Taiwania flousiana</i> population in Leigong Mountain, Guizhou Province, China	CHEN Zhiyang, YANG Ning, YAO Xianming, et al (2158)
The feasibility of using LAS measurements of the turbulence structure parameters of temperature above a forest canopy	ZHENG Ning, ZHANG Jinsong, MENG Ping, et al (2166)
Spatial distribution of vegetation and carbon density in Jinyun Mountain Nature Reserve based on RS/GIS	XU Shaojun, ZENG Bo, SU Xiaolei, et al (2174)
Early nitrogen deposition effects on CO ₂ efflux from a cold-temperate coniferous forest soil	WENDU Runa, FANG Huajun, YU Guirui, et al (2185)
Epilithic diatom assemblages distribution in Gui River basin, in relation to chemical and physiographical factors	DENG Peiyan, LEI Yuanda, LIU Wei, et al (2196)
Acute stress caused by sand discharging on Yellow River Carp (<i>Cyprinus carpio</i>) in Xiaolangdi Reservoir	SUN Luyin, Baiyinbaoligao, NIU Cuijuan, et al (2204)
Environmental cost of pond aquaculture in Shanghai: an empirical analysis based on double-bounded dichotomous CVM method	TANG Keyong, YANG Zhengyong, YANG Huaiyu, et al (2212)
Host searching behaviour of <i>Apanteles cypris</i> Nixon (Hymenoptera: Braconidae) ...	ZHOU Hui, ZHANG Yang, WU Weijian (2223)
The effect of hedgerows on the distribution of <i>Harmonia axyridis</i> Pallas in agroforestry systems	YAN Fei, ZHOU Zaibao, WANG Shuo, et al (2230)
Induction of early resistance response to <i>Alternaria alternata</i> f. sp. <i>mali</i> in apple leaves with apple and chitosan fermentation broth ...	WANG Rongjuan, YAO Yuncong, QI Yaping, et al (2239)
Review and Monograph	
Research into vulnerability assessment for coastal zones in the context of climate change	WANG Ning, ZHANG Liquan, YUAN Lin, et al (2248)
Introduction and ecological effects of an exotic mangrove species <i>Sonneratia apetala</i>	PENG Yougui, XU Zhengchun, LIU Minchao (2259)
Discussion	
Degradation of organic contaminants with biological aerobic fermentation in sewage sludge dewatering and its influencing factors	YU Jie, ZHENG Guodi, GAO Ding, et al (2271)
Remediation of soils contaminated with polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) using four greening tree species	YAN Wende, LIANG Xiaocui, ZHENG Wei, et al (2279)
Scientific Note	
Diversity of endophytic fungi from six dominant plant species in a Pb-Zn mine wasteland in China	LI Dongwei, XU Hongmei, MEI Tao, et al (2288)
Effects of <i>Meloidogyne incognita</i> on scavenging system of reactive oxygen species in tomato seedlings grafted with different rootstocks ...	LIANG Peng, CHEN Zhende, LUO Qingxi (2294)

《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 7 期 (2012 年 4 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 32 No. 7 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