

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第 31 卷 第 11 期 Vol.31 No.11 **2011**

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 31 卷 第 11 期

2011 年 6 月 (半月刊)

目 次

微生物介导的碳氮循环过程对全球气候变化的响应·····	沈菊培, 贺纪正 (2957)
巢湖蓝藻水华形成原因探索及“优势种光合假说”·····	贾晓会, 施定基, 史绵红, 等 (2968)
我国甜菜夜蛾间歇性暴发的非均衡性循环波动·····	文礼章, 张友军, 朱 亮, 等 (2978)
庞泉沟自然保护区华北落叶松林的自组织特征映射网络分类与排序·····	张钦弟, 张金屯, 苏日古嘎, 等 (2990)
上海大莲湖湖滨带湿地的生态修复·····	吴 迪, 岳 峰, 罗祖奎, 等 (2999)
芦芽山典型植被土壤有机碳剖面分布特征及碳储量·····	武小钢, 郭晋平, 杨秀云, 等 (3009)
土壤微生物群落结构对中亚热带三种典型阔叶树种凋落物分解过程的响应·····	张圣喜, 陈法霖, 郑 华 (3020)
中亚热带几种针、阔叶树种凋落物混合分解对土壤微生物群落碳代谢多样性的影响·····	陈法霖, 郑 华, 阳柏苏, 等 (3027)
桂西北喀斯特峰丛洼地表层土壤养分时空分异特征·····	刘淑娟, 张 伟, 王克林, 等 (3036)
重金属 Cd 胁迫对红树蚬的抗氧化酶、消化酶活性和 MDA 含量的影响·····	赖廷和, 何斌源, 范航清, 等 (3044)
海南霸王岭天然次生林边缘效应下木质藤本与树木的关系·····	乌玉娜, 陶建平, 奚为民, 等 (3054)
半干旱黄土丘陵区不同人工植被恢复土壤水分的相对亏缺·····	杨 磊, 卫 伟, 莫保儒, 等 (3060)
季节性干旱对中亚热带人工林显热和潜热通量日变化的影响·····	贺有为, 王秋兵, 温学发, 等 (3069)
新疆古尔班通古特沙漠南缘多枝桉柳光合作用及水分利用的生态适应性·····	王珊珊, 陈 曦, 王 权, 等 (3082)
利用数字图像估测棉花叶面积指数·····	王方永, 王克如, 李少昆, 等 (3090)
野生大豆和栽培大豆光合机构对 NaCl 胁迫的不同响应·····	薛忠财, 高辉远, 柳 洁 (3101)
水磷耦合对小麦次生根特殊根毛形态与结构的影响·····	张 均, 贺德先, 段增强 (3110)
应用物种指示值法解析昆崙山植物群落类型和植物多样性·····	孙志强, 张星耀, 朱彦鹏, 等 (3120)
基于 MSIASM 方法的中国省级行政区体外能代谢分析·····	刘 晔, 耿 涌, 赵恒心 (3133)
不同生态区烟草的叶面腺毛基因表达·····	崔 红, 冀 浩, 杨惠娟, 等 (3143)
B 型烟粉虱对 23 种寄主植物适应度的评估和聚类分析·····	安新城, 郭 强, 胡琼波 (3150)
杀虫剂啶虫脒和毒死蜱对捕食蜘蛛血细胞 DNA 的损伤作用·····	李 锐, 李生才, 刘 佳 (3156)
杀真菌剂咪鲜安对蓼花臂尾轮虫的影响·····	李大命, 陆正和, 封 琦, 等 (3163)
长、短期连续孤雌生殖对蓼花臂尾轮虫生活史和遗传特征的影响·····	葛雅丽, 席貽龙 (3170)
专论与综述	
区域景观格局与地表水环境质量关系研究进展·····	赵 军, 杨 凯, 邵 俊, 等 (3180)
露水对植物的作用效应研究进展·····	叶有华, 彭少麟 (3190)
葡萄座腔菌科研究进展——鉴定, 系统发育学和分子生态学·····	程燕林, 梁 军, 吕 全, 等 (3197)
人工林生产力年龄效应及衰退机理研究进展·····	毛培利, 曹帮华, 田文侠, 等 (3208)
树木年轮在干扰历史重建中的应用·····	封晓辉, 程瑞梅, 肖文发, 等 (3215)
植物中逆境反应相关的 WRKY 转录因子研究进展·····	李 冉, 娄永根 (3223)
研究简报	
三江源地区高寒草原土壤微生物活性和微生物量·····	任佐华, 张于光, 李迪强, 等 (3232)
3 种黑杨无性系水分利用效率差异性分析及相关 <i>ERECTA</i> 基因的克隆与表达·····	郭 鹏, 夏新莉, 尹伟伦 (3239)
猕猴桃园节肢动物群落重建及主要类群的生态位·····	杜 超, 赵惠燕, 高欢欢, 等 (3246)

期刊基本参数: CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 298 * zh * P * ¥ 70.00 * 1510 * 33 * 2011-06



封面图说: 盘锦市盘山县水稻田——盘锦市位于辽宁省西南部, 自古就有“鱼米之乡”的美称。这里地处温带大陆半湿润季风气候, 有适宜的温度条件和较长的生长期以供水稻生长发育, 农业以种植水稻为主, 年出口大米达 1 亿多公斤, 是国家级水稻高产创建示范区和重要的水稻产区。

彩图提供: 沈菊培博士 中国科学院生态环境研究中心 E-mail: jpshe@reccs.ac.cn

季节性干旱对中亚热带人工林显热和 潜热通量日变化的影响

贺有为^{1,2}, 王秋兵¹, 温学发^{2,*}, 王建林^{2,3}, 孙晓敏², 王辉民²

(1. 沈阳农业大学, 沈阳 110866; 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. 青岛农业大学, 青岛 266109)

摘要: 植被与大气间的显热和潜热通量的日变化是大气过程和植被生理过程的显著标志。本研究利用 ChinaFLUX 千烟洲站典型的夏季雨热不同季的季节性干旱的试验条件, 探讨了 2003 年季节性干旱对该生态系统显热和潜热通量日变化变异幅度和峰值时间的影响。研究表明: 显热通量的日变化变异幅度年平均值为 176 W/m^2 。潜热通量的日变化变异幅度年平均值为 171 W/m^2 。显热通量到达日变化峰值的时间平均为 11:57。全年潜热通量的日变化都在午后达到峰值, 平均值为 12:33。季节性干旱造成显热通量的日变异幅度明显增大, 从 144 W/m^2 增加到 321 W/m^2 。而潜热通量的日变异幅度明显降低, 从 324 W/m^2 减小到 198 W/m^2 。显热和潜热通量日变异幅度的相对变化明显增大, 从 -165 W/m^2 增加到 76 W/m^2 , 气温和饱和水汽压差是影响显热和显热日变异幅度及其相对变化的主要控制因素。干旱胁迫期, 深层水对显热通量日变化变异幅度及其与潜热通量日变化变异幅度的相对变化的作用更显著, 而潜热通量日变化变异幅度与气象要素关系不显著。季节性干旱造成显热通量日变化的峰值时间和显热和潜热通量日变化峰值时间的相对变化明显向下午偏移, 显热通量日变化的峰值从 11:31 到 12:17, 相对变化从 1 小时到 1 小时 20 分钟。季节性干旱对潜热通量日变化峰值时间没有显著的影响。非干旱胁迫期, 显热通量日变化峰值时间和显热及潜热通量日变化峰值时间的相对变化均与气温负相关, 而干旱胁迫期, 则与气温正相关。潜热通量日变化峰值时间与气象要素关系均不显著。该生态系统显热和潜热通量日变化峰值的相对变化主要受降水量的季节分配控制, 在干旱胁迫期降水的作用更加明显。潜热和显热通量日变化峰值时间的相对变化总体上受植被与大气间的耦合程度控制。

关键词: 涡度相关; 季节性干旱; 显热通量; 潜热通量; 日变异幅度; 峰值时间

The diurnal trends of sensible and latent heat fluxes of a subtropical evergreen coniferous plantation subjected to seasonal drought

HE Youwei^{1,2}, WANG Qiubing¹, WEN Xuefa^{2,*}, WANG Jianlin^{2,3}, SUN Xiaomin², WANG Huimin²

1 Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China

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

3 Qingdao Agricultural University, Qingdao 266109, China

Abstract: Evidence of global climate change is well-documented, with long-term increases observed in average global surface temperature, the atmosphere's carbon dioxide (CO_2) concentration, precipitation, and runoff. SPAC system is the strongest active layer in surface energy and mass exchanges. The diurnal trends of sensible and latent heat fluxes are signatures of atmospheric and physiological processes that control biophysical fluxes at the surface. The diurnal trends of sensible and latent heat fluxes depends on temporally evolving interactions between atmospheric demand, the net radiation, temperature, and atmospheric vapor pressure deficit, and the ability of the vegetation to supply available water. Drought can

基金项目: 公益性行业(气象)科研专项(GYHY200706046); 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); 国家自然科学基金项目(31070408, 31000230); 国家重点基础研究发展计划(2010CB833501); 中国科学院知识创新工程青年人才领域前沿项目共同资助

收稿日期: 2010-08-18; 修订日期: 2011-04-07

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

change the diurnal trends and the energy partitioning between sensible and latent heat fluxes. And that may affect the surface energy and water exchanges cycle. Continuous measurements of the influence on diurnal variation range and diurnal centroids for sensible and latent heat fluxes during seasonal drought were recorded at Qianyanzhou in 2003. The mean diurnal variation of sensible heat flux was 176 W/m^2 and that of latent heat flux was 171 W/m^2 . The mean diurnal centroid for sensible heat flux was 11:57 and that of latent heat flux was 12:33. Seasonal drought led to increases in the mean diurnal variation range of sensible heat flux from 144 W/m^2 to 321 W/m^2 , whereas the mean diurnal variation range of latent heat flux decreased from 324 W/m^2 to 198 W/m^2 . The relative change between sensible heat flux and latent heat flux increased from -165 W/m^2 to 76 W/m^2 . Temperature and water vapor pressure deficit were the major factors controlling the diurnal variation range of sensible heat flux and relative change between sensible heat flux and latent heat flux. During seasonal drought, the change in deep water content had a more significant effect on the diurnal variation range of sensible heat flux and relative change between sensible heat flux and latent heat flux, whereas the diurnal variation range of latent heat flux showed no relationship with meteorological factors. Seasonal drought weighted the diurnal centroid for sensible heat flux toward the afternoon, from 11:31 to 12:17. The relative change between sensible heat and latent heat flux changed from 1 h to 80 min. Seasonal drought had no impact on the diurnal centroid for latent heat flux. During the non-drought period, the diurnal centroid for sensible heat flux and relative change between sensible heat flux and latent heat were negatively correlated with air temperature, and positively correlated with air temperature during seasonal drought. Meteorological factors had no impact on the diurnal centroid for latent heat flux. The seasonal distribution of precipitation dominated the relative change between the diurnal centroids for sensible heat flux and latent heat flux. Precipitation may be more important during seasonal drought. It is suggested that relative change between the diurnal centroids for sensible heat and latent heat flux might be subject to the coupling between vegetation and the atmosphere. From this study, it was clear that these environmental variables, especially air temperature and water conditions regulated the diurnal trends of sensible and latent heat fluxes over the planted coniferous ecosystem.

Key Words: eddy-covariance; seasonal drought; latent heat flux; sensible heat flux; diurnal variation range; diurnal centroid

地球系统碳循环和碳平衡的变化所导致的全球气候变化已经成为公认的事实^[1-3]。由于降水、蒸发的空间格局和季节模式的改变导致了陆地生态系统水分平衡正在发生变化^[1-2]。全球温度升高、降水量减少以及降水季节模式的改变导致了季节性干旱的发生^[3]。全球气候变化所引起的干旱胁迫对生态系统影响的强度、持续期和频率都将大大增加^[4],这将直接影响并改变生态系统能量、水和碳平衡与分配状况。基于微气象学涡度相关技术的陆地生态系统碳和水热通量的直接观测为相关研究提供了可能^[5-8]。

土壤-植被-大气系统是地球表层能量循环和物质交换最强烈的活动层。植被与大气间的能量通量的日变化是大气过程和植被生理过程的显著标志,而大气过程和生理过程决定着地表的能量和物质通量的转化和分配。显热和潜热通量是近地层大气和下垫面能量和水分交换的表现形式,其日变化特征主要受大气湍流变化、净辐射、温度、饱和水汽压差以及植被吸水能力的相互作用影响。大气湍流的昼夜变化主要受太阳和大气边界层活动的影响^[9-11]。植被表面的显热和潜热通量日变化过程引起的能量交换对大气边界层的形成和夹卷层的能量交换也起着重要的作用^[12]。干旱可以改变显热和潜热通量的分配及日变化特征,进而影响生态系统能量和水分的循环过程。Wilson 等^[13]对欧洲和北美不同通量站的显热和潜热通量日变化峰值时间进行了对比研究。但对于干旱胁迫如何影响生态系统显热和潜热通量的日变化特征及其环境控制机制的综合研究还比较匮乏。

利用天然试验条件研究陆地生态系统对全球气候变化的响应是一种非常重要而有效的途径^[14]。我国南方中亚热带人工林生态系统(CERN/ChinaFLUX 千烟洲站)在正常年份干旱胁迫大约始于7月上旬,终于9月

中旬,但倘若开始期提早而终止期推迟,则干旱的程度加重。千烟洲典型的气候特征(夏季雨热不同季)为探讨季节性干旱如何改变生态系统能量、水和碳平衡与分配状况提供了天然试验条件^[15-18]。显热和潜热日变化的变异幅度和峰值达到时间可以很好地反映显热和潜热通量日变化的主要特征,从而间接地反映地气间的物质和能量的交换和分配。本研究以千烟洲人工林生态系统为试验研究平台,利用该生态系统夏季雨热不同步而造成季节性干旱的天然试验条件,基于微气象学涡度相关技术测定的显热和潜热通量数据,探讨了2003年季节性干旱对显热和潜热日变化变异幅度和峰值时间的季节变异及其环境控制机制的影响,为探讨未来气候变化条件下干旱胁迫如何影响生态系统能量平衡与分配提供了科学依据。

1 材料与方法

1.1 站点与仪器配置

中国陆地生态系统通量观测研究网络(ChinaFLUX)千烟洲通量站(26°44'N, 115°03'E, 110.8 m)站位于江西省泰和县的中国生态系统研究网络(CERN)千烟洲试验站内,海拔多在100 m左右,相对高差20—50 m,下垫面的坡度在2.8—13.5°之间,属中国南方典型红壤丘陵区。主要土壤类型有红壤、水稻土、潮土、草甸土等,成土母质多为红色砂岩、砂砾岩或泥岩,以及河流冲积物。根据1985—2007年千烟洲站地面气象观测数据统计,试验区年平均气温17.9℃,年平均降水量1485 mm,具有典型的亚热带季风气候特征^[19]。试验区主要树种有湿地松(*Pinus elliottii* Engelm)、柑桔(*Orange*)、马尾松(*Pinus massoniana*)、杉木(*Cunninghamia lanceolata*)、木荷(*Schima superba*)等。由于林分基本郁闭,林下植被很少,如山芝麻(*Camellia*)、算盘子(*Glochidion puberum*)、刺芒野古草(*Arundinella setosa* Trin)等,亦有少量的美丽胡枝子(*Thunberg lespedeza*)、映山红(*Azalea*)等小灌木在林间零星分布。

通量塔周围林分为1985年前后营造的人工林,主要树种有马尾松、湿地松、杉木等,森林覆盖率90%以上。通量观测系统以开路涡度相关(OPEC)系统为主并安装于大约3倍冠层高度(39.6 m)处,辅以常规气象要素和植物生理生态要素测定。OPEC系统主要由开路红外CO₂/H₂O气体分析仪(Model LI-7500, Licor Inc)、三维超声风速仪(Model CSAT3, Campbell Scientific Inc.)和数据采集器(Model CR5000, Campbell Scientific Inc.)构成。常规气象要素测定包括总辐射、净辐射、光合有效辐射、空气温度/湿度、风速/风向、降水量、土壤温度/湿度、土壤热通量等。详细站点与仪器配置信息参见文献^[15,18]。

1.2 数据处理

基于微气象学涡度相关技术测定生态系统显热和潜热通量可表示为:

$$H = \rho C_p \overline{w' T'_s(z_r)} + \rho C_p \int_{z_0}^{\bar{z}} \frac{\partial \bar{T}_s}{\partial t} dz \quad (1)$$

$$\lambda E = \lambda \overline{w' \rho'_w(z_r)} + \lambda \int_{z_0}^{\bar{z}} \frac{\partial \bar{\rho}_w}{\partial t} dz \quad (2)$$

方程(1)和(2)中,右边第一项分别为仪器高度z(m)处的显热和潜热湍流通量,第二项分别为测定高度下显热和潜热储存通量。式中 ρ 为干空气密度(kg/m³), C_p 为空气的定压比热(J kg⁻¹ K⁻¹), w' 为垂直湍流速度脉动(m/s), T'_s 为气温脉动(K), λ 为汽化潜热(J/kg), ρ'_w 为比湿脉动,上横线表示在某时间段内的时间平均,撇号表示瞬时值与平均值的偏差即脉动。显热和潜热通量数据经过数据质量控制剔除无效数据^[20]。

显热和潜热通量日变化特征可以用日变异幅度和到达峰值的时间来表示。为了更好的表征生态系统显热和潜热通量日变化特征的季节动态,本研究中各变量均采用30天滑动平均计算。显热和潜热通量的日变异幅度及其相对变化可以表示为:

$$A_{gt} = g(t_{\max}) - g(t_{\min}) \quad (3)$$

$$\Delta A_{gt} = A_{gH} - A_{gLE} \quad (4)$$

式中, A_{gt} 表示显热或潜热的日变异幅度, ΔA_{gt} 表示显热与潜热的日变异幅度的相对变化, $g(t_{\max})$ 和 $g(t_{\min})$ 分别为一天内显热或潜热的最大值和最小值。

显热和潜热通量日变化到达峰值的时间和峰值时间的相对变化^[13]可以表示为:

$$C_{gt} = \frac{\int_{t_1}^{t_2} g(t) \cdot t dt}{\int_{t_1}^{t_2} g(t) dt} \quad (5)$$

$$\Delta C_{gt} = C_{gH} - C_{gLE} \quad (6)$$

式中,日变化到达峰值的时间 C_{gt} 表示变量 $g(t)$ 在一天内平均时间的权重,如变量 $g(t)$ 在正午时刻达到峰值,则 C_{gt} 等于 12h;如变量 $g(t)$ 在上午具有较大值,则 C_{gt} 小于 12 h;如变量 $g(t)$ 在下午具有较大值,则 C_{gt} 大于 12h。 ΔC_{gt} 表示显热和潜热的日变化峰值时间的相对变化。

植被与大气之间的耦合程度可以用解耦因子 Ω 表示^[21-22]:

$$\Omega = \frac{\varepsilon + 1}{\varepsilon + 1 + \frac{R_c}{R_a}} \quad (7)$$

式中 ε 为水汽和空气分子量的比值, R_c 为冠层阻力即冠层导度 g_c 的倒数, R_a 为空气动力学阻力 (s/m)。

冠层导度 g_c (m/s) 可以通过下式计算得到:

$$g_c = \left[r_a \left(\frac{\Delta}{\gamma} \left(\frac{A}{LE} - 1 \right) - 1 \right) + \frac{\rho_a D_a \varepsilon}{\lambda LE} \right]^{-1} \quad (8)$$

式中, Δ 为饱和水汽压-温度曲线的斜率 (Pa/K), ρ_a 为空气密度 (kg/m^3), D_a 为参考高度的饱和水汽差 (mmol/mol), λ 为气化潜热 (2440J/g), γ 为干湿球常数 (Pa/K)。

空气动力学阻力 (R_a) 可以表示为:

$$R_a = \frac{u}{u^{*2}} + 6.2u^{*-2/3} \quad (9)$$

式中, u 为平均风速 (m/s), u^* 为摩擦风速。

2 结果与分析

2.1 气象要素的季节变异特征

千烟洲人工林生态系统 2003 年气温、饱和水汽压差、降水量以及 5 cm、20 cm 和 50 cm 土壤含水量的季节变异如图 1 所示。该生态系统气温和饱和水汽压差的季节变异呈现单峰曲线变化,均在夏季达到一年中的最大值,在冬季达到一年中的最小值。该生态系统降水量的季节变异则呈现双峰曲线,季节性干旱期和冬季低。降水量明显集中在上半年,以 4、5 月份较大,而 7 月份仅为 3.2 mm,全年降水量比历年大约减少 40%^[23]。远小于 1985—2007 年历史平均降水量 1485 mm (图 1)。

2003 年土壤体积含水量的季节变化与降水量的季节变化过程密切相关 (图 1)。年平均 5cm 土壤含水量为 $0.179 \text{ m}^3/\text{m}^3$,变化范围从 $0.09—0.39 \text{ m}^3/\text{m}^3$;20cm 土壤含水量为 $0.297 \text{ m}^3/\text{m}^3$,变化范围从 $0.226—0.424 \text{ m}^3/\text{m}^3$;50cm 土壤含水量为 $0.342 \text{ m}^3/\text{m}^3$,变化范围从 $0.274—0.447 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 。7—9 月降水量与土壤含水量都处于一年中较低水平。

综上所述,2003 年该生态系统可以明显地划分为干旱胁迫期 (日序 DOY 166—255) 和非干旱胁迫期 (DOY 1—165; DOY 265—365),而干旱胁迫期又可以划分为干旱胁迫期前期 (DOY 166—220) 和干旱胁迫期后期 (DOY 221—255)。

2.2 变异幅度和峰值时间的季节变异

千烟洲人工林生态系统 2003 年显热和潜热通量日变化变异幅度的季节变异特征如图 2 所示。显热通量的日变化变异幅度表现为主次峰型曲线。其年平均值为 176 W/m^2 ,变化范围在 $115—321 \text{ W/m}^2$ 之间。在生态系统经历夏季季节性干旱胁迫期间该值迅速增大,并在 DOY 225 左右时达到一年中的最大值,在干旱胁迫

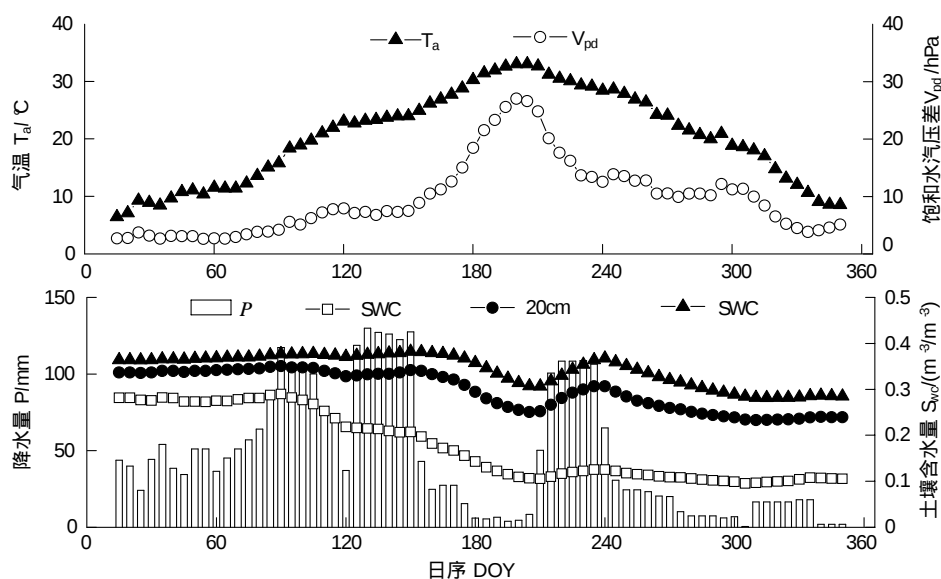


图1 2003年千烟洲人工林生态系统的季节变异

Fig. 1 Seasonal dynamics of environmental factors at Qianyanzhou in 2003

前期则迅速减小。而在 DOY 320 左右出现了次高峰。潜热通量的日变化变异幅度表现为明显的双峰型曲线,分别在 DOY 200 和 DOY 250 左右达到峰值。它的年平均值为 171 W/m^2 ,变化范围在 $55\text{—}325 \text{ W/m}^2$ 。在干旱胁迫后期潜热通量的日变化变异幅度明显降低,在干旱胁迫前期则显著增加。显热和潜热通量日变化变异幅度的相对变化可以更好的反映生态系统显热和潜热通量的日变化特征,其年平均值为 6 W/m^2 ,变化范围从 $-165\text{—}158 \text{ W/m}^2$ 。随时间逐渐降低,但受到季节性干旱胁迫的影响后迅速增加,在干旱胁迫前期显著降低,最后又随时间逐渐升高。

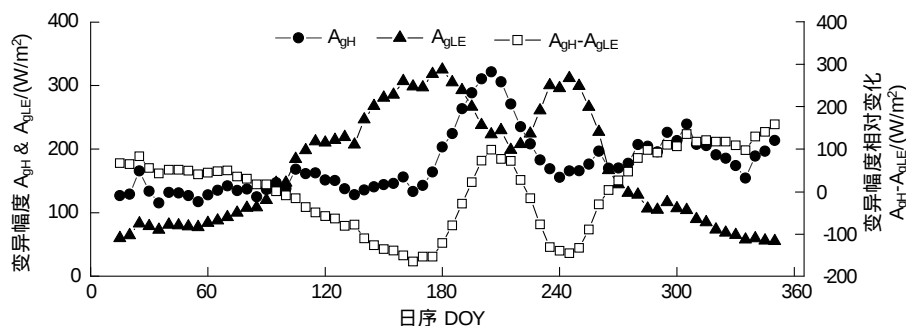
图2 2003年千烟洲人工林生态系统显热(A_{gh})和潜热(A_{gle})通量的日变化变异幅度及其相对变化($A_{gh}-A_{gle}$)的季节变异Fig. 2 Seasonal dynamics of diurnal variation range of sensible heat flux (A_{gh}), latent heat flux (A_{gle}) and relative change between sensible heat flux and latent heat flux ($A_{gh}-A_{gle}$) at Qianyanzhou in 2003

图3展示了千烟洲人工林生态系统2003年显热和潜热通量的日变化峰值时间及其相对变化的季节变异特征。显热通量到达日变化峰值的时间平均为11:57,变化范围从11:18—12:33。在上半年到达峰值的时间逐渐提前,即向上午偏移。但在生态系统经历干旱胁迫时到达日变化峰值的时间明显向下午偏移。在干旱胁迫前期显热通量到达日变化峰值的时间又向上午偏移。2003年全年潜热通量的日变化都在午后达到峰值,平均值为12:33,变化范围从12:14—12:50。夏季的季节性干旱胁迫对潜热通量的日变化到达峰值的时间没有非常显著的影响,但表现出一定的滞后性(图3)。显热和潜热通量的日变化峰值时间的相对变化的季节变异趋势与显热通量日变化峰值时间的季节变异趋势相似,但它受干旱胁迫的影响更加明显。显热和潜热通量的日变化峰值时间的相对变化在上半年缓慢降低并向上午偏移,在生态系统经历干旱胁迫时开始增大并向下午

午偏移达到最大值,在干旱胁迫前期开始又向上午偏移,下半年又逐渐向下午偏移最后又回到年初同一水平。

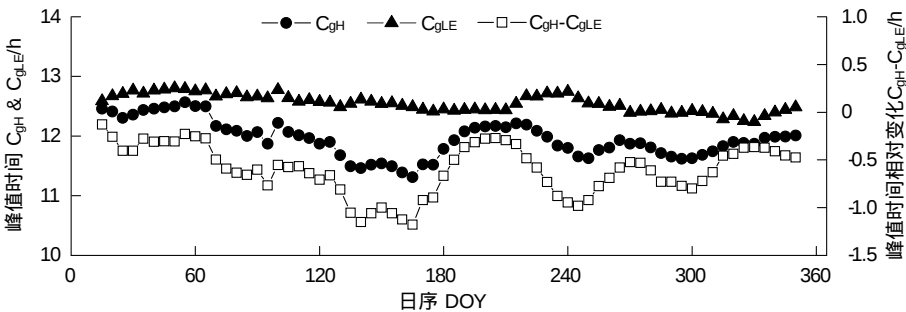


图3 2003年千烟洲人工林生态系统显热(C_{gH})和潜热(C_{gLE})日变化峰值时间及其相对变化($C_{gH}-C_{gLE}$)的季节变异

Fig. 3 Seasonal dynamics of diurnal centroid of sensible heat flux (A_{gH}), latent heat flux (A_{gLE}) and relative change between sensible heat flux and latent heat flux ($A_{gH}-A_{gLE}$) at Qianyanzhou in 2003

2.3 日变化变异幅度的环境控制

2003年千烟洲人工林生态系统显热和潜热通量日变化变异幅度与气象要素的关系如表1所示。2003年千烟洲人工林生态系统显热和潜热通量日变化变异幅度与气温的关系如图4所示。在非干旱胁迫期,显热通量的日变化变异幅度与饱和水汽压差呈正相关,即随饱和水汽压差的增大而增大。在干旱胁迫期,显热通量的日变化变异幅度与气温和饱和水汽压差呈正相关关系,而与5、20和50cm土壤含水量呈负相关(R^2 分别为0.62、0.94和0.95)。与深层土壤水相关性最大($R^2=0.95$),表明干旱胁迫期土壤深层含水量是显热通量日变化变异幅度的主要限制因子。由于大气的干燥度增加而抑制植被正常的生理活动,进而引起生态系统能量分配的改变。潜热通量日变化变异幅度在非干旱胁迫期与气温呈指数相关,且相关性较好(R^2 分别为0.98和0.97);在干旱胁迫期,由于生态系统水分亏缺,植被正常的生理过程受到抑制,其与各气象要素之间关系不显著。

表1 2003年千烟洲人工林生态系统显热和潜热通量日变化变异幅度与气象要素的关系

Table 1 The dependence of diurnal variation range of sensible heat flux and latent heat flux on meteorological factors at Qianyanzhou in 2003

气象要素 Meteorological factors	方程 Equation	R^2	P
饱和水汽压差	显热通量		
	非干旱胁迫期		
	$Y=6.03x+121.45$	0.42	<0.001
	干旱胁迫期		
	$Y=24.39x-514.69$	0.85	<0.001
	$Y=10.35x+31.86$	0.92	<0.001
气温	$Y=-1974.53x+457.28$	0.62	<0.001
土壤含水量(5cm)	$Y=-265.9x+847.11$	0.94	<0.001
土壤含水量(20cm)	$Y=-2417.26x+1054.55$	0.95	<0.001
土壤含水量(50cm)			
潜热通量	非干旱胁迫期		
	$Y=52.9+1.17\times\exp0.19x$	0.98	<0.001

显热和潜热通量日变化的变异幅度与气温都具有循环滞后的模式,但它们的循环方向正好相反(图4)。即显热通量日变化变异幅度在年初缓慢增大,从126 W/m²到150 W/m²。在干旱胁迫后期迅速增大到321 W/m²,在干旱胁迫前期又迅速减小到155 W/m²,到年末又缓慢减小到年初水平。潜热通量的日变化变异幅度也存在类似的现象,但在干旱胁迫后期迅速减小,在干旱胁迫前期迅速增大。

2003年千烟洲人工林生态系统显热和潜热通量日变化变异幅度的相对变化与气象要素的关系如表2所示。在非干旱胁迫期,显热和潜热通量日变化变异幅度的相对变化与气温呈显著负相关($R^2=0.46$),与饱和

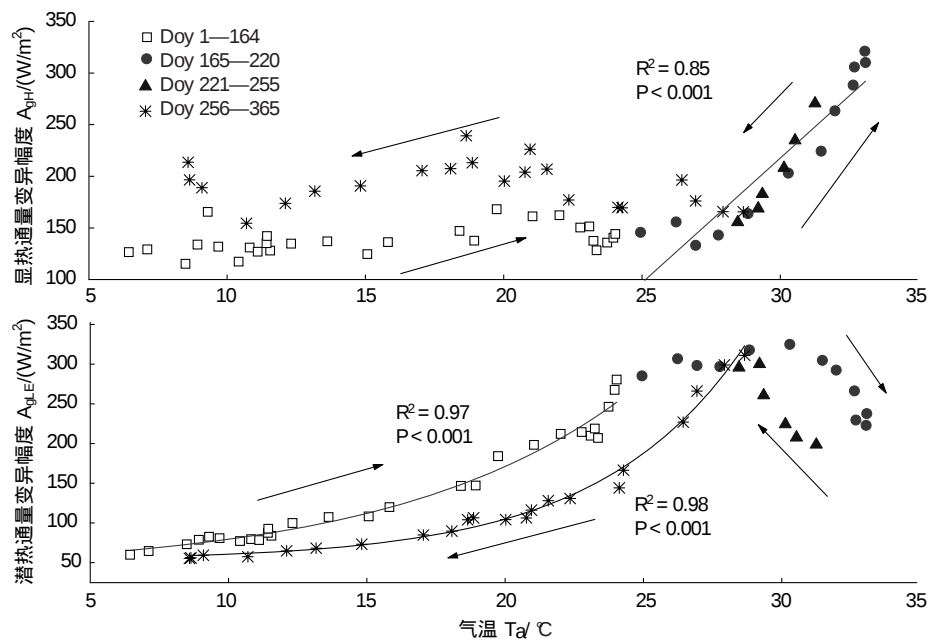


图 4 2003 年千烟洲人工林生态系统显热(A_{gH})和潜热(A_{gLE})通量日变化变异幅度与气温(T_a)的关系

Fig. 4 The dependence of diurnal variation range of sensible heat flux (A_{gH}) and latent heat flux (A_{gLE}) on air temperature (T_a) at Qianyanzhou in 2003

水汽压差呈弱的负相关($R^2=0.08$)。在生态系统水分条件良好时,随着气温的升高植被生长旺盛,显热和潜热通量均增加,其变异幅度的相对变化变异较小。但是在干旱胁迫期,显热和潜热变异幅度的相对变化与气温和饱和水汽压差均呈正相关(R^2 分别为 0.7 和 0.71),而与 5、20、50 cm 土壤含水量呈负相关(R^2 为 0.63、0.8 和 0.95)。当生态系统遭受干旱胁迫时,植被蒸腾作用受到抑制,能量分配以显热为主,导致显热和潜热通量日变化变异幅度的相对变化随着气温和饱和水汽压差的增大而增大。在干旱胁迫期,显热和潜热通量日变化变异幅度的相对变化与 5、20、50 cm 土壤含水量的相关系数逐渐增大(R^2 分别为 0.63、0.83 和 0.95),表明土壤深层水被植被利用,深层土壤含水量的控制作用趋于明显。

表 2 2003 年千烟洲人工林生态系统显热和潜热通量日变化变异幅度相对变化与气象要素的关系

Table 2 The dependence of relative change of sensible heat flux and latent heat flux on meteorological factors at Qianyanzhou in 2003			
气象要素 Meteorological factors	方程 Equation	R^2	P
非干旱胁迫期			
气温	$Y=-8.68x+175.36$	0.46	<0.001
饱和水汽压差	$Y=-6.748x+72.79$	0.08	0.04
干旱胁迫期			
气温	$Y=32.93x-1041.02$	0.7	<0.001
饱和水汽压差	$Y=13.53x-295.11$	0.71	<0.001
土壤含水量(5cm)	$Y=-2702.78x+309.13$	0.63	<0.001
土壤含水量(20cm)	$Y=-3043.58x+832.53$	0.83	<0.001
土壤含水量(50cm)	$Y=-3609.84x+1197.98$	0.95	<0.001

2.4 日变化峰值时间的环境控制

2003 年千烟洲人工林生态系统显热通量日变化峰值时间与气象要素的关系如表 3 所示。2003 年千烟洲人工林生态系统显热通量日变化峰值时间与气温的关系如图 5 所示。在非干旱胁迫期,显热通量日变化峰值时间与气温和饱和水汽压差呈负相关($R^2=0.58$),显热通量到达峰值的时间随气温和饱和水汽压差的增大向上午偏移,从 12:50 到 11:30。由于温度和饱和水汽压差的升高直接导致显热通量的迅速增大,从而使其峰

值时间提前到 11:30。在干旱胁迫期,显热通量日变化峰值时间与气温和饱和水汽压差呈正相关(R^2 为 0.77 和 0.62),显热通量到达峰值的时间随气温和饱和水汽压差的增大向下午偏移,从 11:15 到 12:17。在干旱胁迫期显热通量日变化峰值时间与气温和饱和水汽压差的相关关系与非干旱胁迫期完全相反。当生态系统遭受干旱胁迫时,能量分配以显热为主,在一天中显热通量随气温和饱和水汽压差的增大而增大,从而使得显热通量日变化峰值时间延后。气温是该生态系统显热通量日变化峰值时间的主要限制因子。

潜热通量由于受多重环境因素综合作用的影响,其日变化峰值时间与气象要素的相关关系不显著。在刚开始遭遇干旱胁迫时,潜热通量日变化的峰值时间逐渐提前。但在 DOY 200—225 左右,该峰值时间几乎没有变化,这是由于尽管表层土壤含水量和深层土壤含水量都显著减小,但深层土壤含水量仍维持在一定水平,即深层水仍可被植被利用,这在一定程度上缓解了干旱对植被造成的伤害。

表 3 2003 年千烟洲人工林生态系统显热通量日变化峰值时间与气象要素的关系

Table 3 The dependence of diurnal centroid of sensible heat flux on meteorological factors at Qianyanzhou in 2003			
气象要素 Meteorological factors	方程 Equation	R^2	P
	显热通量		
	非干旱胁迫期		
气温 T_a	$Y = -0.04x - 12.61$	0.58	<0.001
饱和水汽压差 VPD	$Y = -0.07x + 12.44$	0.58	<0.001
	干旱胁迫期		
气温 T_a	$Y = 0.11x + 8.57$	0.77	<0.001
饱和水汽压差 VPD	$Y = 0.04x + 11.15$	0.62	<0.001

2003 年千烟洲人工林生态系统显热和潜热通量日变化峰值时间的相对变化与气象要素的关系如表 4 所示。2003 年千烟洲人工林生态系统显热和潜热通量日变化峰值时间的相对变化与气温的关系如图 6 所示。在非干旱胁迫期,显热和潜热通量日变化峰值时间的相对变化与气温和饱和水汽压差呈负相关(R^2 为 0.66 和 0.43)。相对于显热通量来说,潜热通量到达峰值的时间随着气温和饱和水汽压差的增大逐渐向下午偏移,峰值差值从 -1.1 到 0.1h。日变化峰值时间的相对变化主要受气温和饱和水汽压差的综合作用控制,但气温的作用更为明显($R^2 = 0.66$)。在干旱胁迫期,显热和潜热通量日变化峰值时间的相对变化与气温和饱和水汽压差的相关关系和非干旱胁迫期相反,即与气温和饱和水汽压差呈正相关(R^2 为 0.89 和 0.91),与土壤含水量呈负相关。相对于显热通量来说,潜热通量到达峰值的时间随气温和饱和水汽压差的增大向上午偏移到 12:40

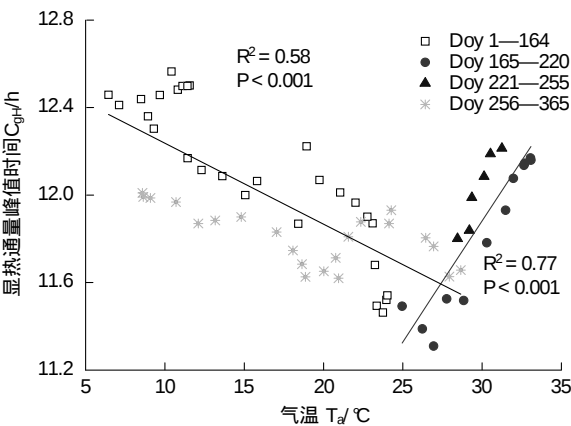


图 5 2003 年千烟洲人工林生态系统显热通量日变化峰值时间 (C_{gH}) 与气温 (T_a) 的关系

Fig.5 The dependence of diurnal centroid of sensible heat flux (C_{gH}) on air temperature (T_a) at Qianyanzhou in 2003

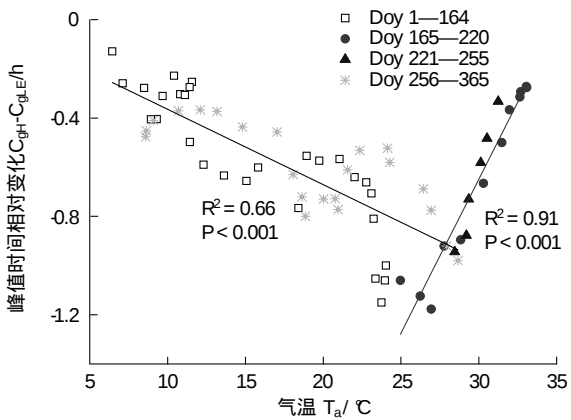


图 6 2003 年千烟洲人工林生态系统显热和潜热通量日变化峰值时间的相对变化 ($C_{gH} - C_{gLE}$) 与气温 (T_a) 的关系

Fig.6 The dependence of relative change of sensible heat flux and latent heat flux ($C_{gH} - C_{gLE}$) on air temperature (T_a) at Qianyanzhou in 2003

左右,随土壤含水量的增大而向下午偏移到 13:00 左右。气温和饱和水汽压差依旧是显热和潜热通量日变化峰值时间的相对变化的主要限制因子。同时土壤含水量的作用也不可忽视,此时 20 cm 土壤含水量 R^2 为 0.84,如果此时土壤含水量充足(尤其是 20 cm 土壤含水量),那么显热和潜热通量日变化峰值时间的相对变化较小,说明深层土壤含水量在一定程度上可以缓解干旱对生态系统的胁迫作用。

表 4 2003 年千烟洲人工林生态系统显热和潜热通量日变化峰值时间的相对变化与气象要素的关系

Table 4 The dependence of relative change of sensible heat flux and latent heat flux on meteorological factors at Qianyanzhou in 2003

气象要素 Meteorological factors	方程 Equation	R^2	P
非干旱胁迫期			
气温 T_a	$Y = -0.03x - 0.06$	0.66	<0.001
饱和水汽压差 (VPD)	$Y = -0.05x - 0.27$	0.43	<0.001
干旱胁迫期			
气温 T_a	$Y = 0.12x - 4.4$	0.91	<0.001
饱和水汽压差 VPD	$Y = 0.05x - 1.55$	0.89	<0.001
土壤含水量 5cm	$Y = -7.56x + 0.33$	0.55	<0.001
土壤含水量 20cm	$Y = -10.05x + 2.25$	0.84	<0.001
土壤含水量 50cm	$Y = -11.81x + 3.43$	0.55	<0.001

2.5 降水量和解耦因子对日变化峰值的相对变化的控制

生态系统显热和潜热通量峰值时间的相对变化是多种环境因子综合作用的结果。2003 年千烟洲人工林生态系统显热和潜热通量日变化峰值时间的相对变化与降水量的关系如图 7 所示。显热和潜热通量日变化峰值的相对变化时间受降水量的季节变异控制。总体来看,存在着负相关关系,即随着降水量的增加,相对于显热通量,潜热通量到达峰值的时间逐渐向下午偏移,在 13:15 左右达到极限值。但是不同阶段与降水量之间的负相关关系程度不同,在干旱胁迫期发生的降水事件作用更加明显($R^2 = 0.72$)。在 DOY 221—255 之间,该生态系统经历一次短暂的降水过程,干旱得到一定缓解,降水过后显热通量日变化到达峰值的时间明显向上午偏移(图 3),而连续降水对显热和潜热通量日变化峰值时间的相对变化的影响更加显著。冬季降水稀少,显热和潜热通量日变化峰值时间的相对变化也波动上升到相差 0.3h,但此时相关关系已不显著,降水量已不是显热和潜热日变化峰值时间的相对变化的主要控制因子。

2003 千烟洲人工林生态系统年显热和潜热通量日变化峰值时间的相对变化与解耦因子的关系如图 8 所示。在全年尺度上,显热和潜热通量日变化峰值时间的相对变化与解耦因子存在明显的负相关关系。相对于显热通量,潜热通量到达峰值的时间随着解耦因子的增大逐渐向下午偏移,即随着可用能量的增加潜热通量到达峰值的时间逐渐向下午偏移。当可用能量增加时,气温升高明显,能量分配以显热为主,引起潜热通量的峰值时间延后到 13:10。但是不同阶段与解耦因子之间的负相关关系不同,在非干旱胁迫期相关系数较小,在干旱胁迫期可用能量的作用更加明显($R^2 = 0.98$)。

3 讨论

3.1 影响显热和潜热通量日变异幅度的原因

显热和潜热通量日变化的变异幅度可以反映植被与大气间能量交换的速度和程度。在本研究中,影响千烟洲中亚热带人工林生态系统显热和潜热通量的日变化变异幅度的气象要素主要包括空气温度、饱和水汽压差和土壤含水量等(表 1 和 2)。李菊等^[24]指出不同天气条件下净辐射、气温、饱和水汽压差以及土壤含水量的变化是控制千烟洲中亚热带人工林生态系统水汽通量的季节变化的主要因素。非干旱胁迫期,显热通量的日变化变异幅度与饱和水汽压差正相关。潜热通量的日变化变异幅度与气温呈正指数相关(图 4)。显热和潜热通量日变化变异幅度的相对变化则与气温和饱和水汽压差呈负相关。千烟洲人工林的季节性干旱胁迫在很大程度上制约着显热和潜热通量的分配和日变化特征。干旱胁迫期,显热通量的日变化变异幅度和显热和潜热通量日变化变异幅度的相对变化均与气温和饱和水汽压差呈正相关,与土壤含水量呈负相关。潜热通量日变化变异幅度与气象要素关系不显著,受多种环境要素的综合控制。但是,深层水对显热和潜热通量

日变化变异幅度的相对变化的作用更显著。如果此时生态系统深层土壤含水量充足,显热和潜热通量日变化变异幅度的相对变化较小,可以在一定程度上缓解干旱对植被和大气边界层扰动作用的影响。

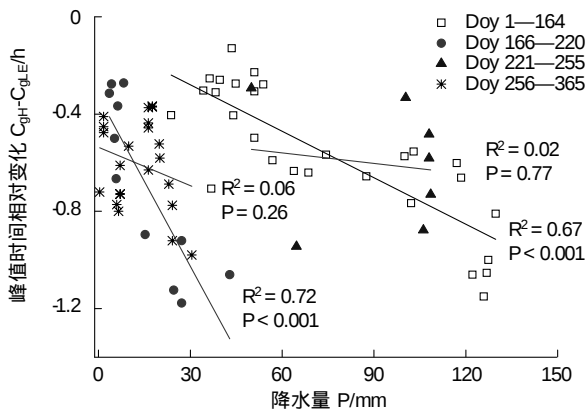


图7 2003年千烟洲人工林生态系统显热和潜热通量日变化峰值相对变化($C_{gH}-C_{gLE}$)与降水量(P)之间关系

Fig.7 The dependence of relative change of sensible heat flux and latent heat flux ($C_{gH}-C_{gLE}$) on precipitation (P) at Qianyanzhou in 2003

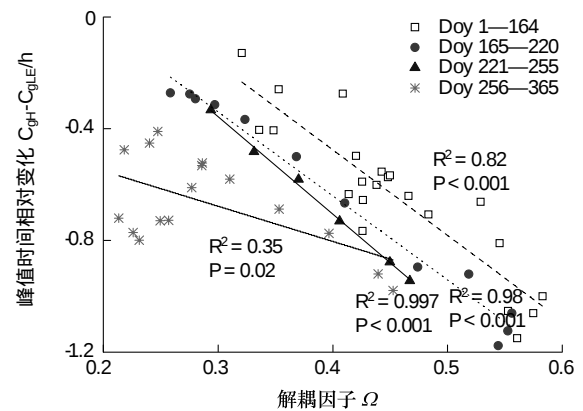


图8 2003年千烟洲人工林生态系统显热和潜热通量日变化峰值相对变化($C_{gH}-C_{gLE}$)与解耦因子(Ω)的关系

Fig.8 The dependence of relative change of sensible heat flux and latent heat flux ($C_{gH}-C_{gLE}$) on the decoupling factor (Ω) at Qianyanzhou in 2003

齐庆华等^[25]研究表明西太平洋显热和潜热通量具有较相似的空间分布以及显著的年际变化,但是潜热通量的变异幅度比显热通量大。在本研究中,显热通量的日变化变异幅度比潜热通量大,这是由于陆地生态系统和海洋生态系统的下垫面和环境条件不同决定的。海洋生态系统的下垫面是均一的海面,足够大的海水量及其比热产生的巨大热容足以削弱甚至消除能量变化造成的温度改变,从而降低显热通量的变异幅度。在陆地生态系统中,由于没有海洋那种大的比热容,能量的变化会直接反映在温度的变化上,特别是在干旱条件下,土壤的蒸发与植被的蒸腾作用被大大削弱,即用于潜热的能量减少,而用于显热的能量增加,从而使得干旱条件下显热通量的日变化变异幅度比潜热通量大。

3.2 影响显热和潜热通量日变化峰值出现时间的原因

总的来说,生态系统温度条件较好,则显热通量到达峰值的时间会提前;生态系统水分条件良好,则潜热通量到达峰值的时间提前,反之亦然。在本研究中,影响千烟洲中亚热带人工林生态系统显热和潜热通量的日变化峰值时间的气象要素也主要包括空气温度、饱和水汽压差和土壤含水量等(表3和表4)。非干旱胁迫期,显热通量日变化峰值的时间和显热和潜热通量日变化峰值时间的相对变化均与气温负相关(图5和图6)。季节性干旱造成显热通量日变化到达峰值的时间和显热和潜热通量日变化峰值时间的相对变化与气温正相关(图5)。生态系统潜热通量都在午后达到峰值,显热和潜热通量日变化峰值时间的相对变化范围在0.12—1.17h。季节性干旱造成生态系统潜热通量达到峰值时间略微提前。但干旱胁迫与非干旱胁迫期,潜热通量日变化峰值时间与气象要素关系均不显著。峰值出现时间的改变可能与两方面的原因有关。一方面,干旱胁迫导致了显热通量增大,而潜热通量减小,改变了生态系统的能量分配,甚至改变了显热和潜热通量与温度之间的相关关系(图5和图6),从而造成生态系统显热和潜热通量峰值出现时间的变化;即使太阳辐射刚好在正午时刻达到峰值,较大的午后饱和水汽压差也会导致能量分配给潜热而不是显热,这就引起了显热和潜热通量日变化峰值时间差异的减小,这种作用在与饱和水汽压差耦合作用明显的高大植被上表现得更加明显^[26]。另一方面,冠层导度在大气与生物圈之间物质和能量交换过程中也起着非常重要的作用,植被的生理过程也直接影响冠层尺度的显热和潜热通量的日变化^[27-30],土壤含水量降低或饱和水汽压差增大都会引起植物午后气孔关闭或者蒸腾作用减弱的本能生理反应^[31-32],而植被的下午气孔关闭现象^[33-36],导致了潜热通量到达峰值的时间提前^[27, 37-38]。

生态系统显热和潜热通量峰值时间的相对变化是多种环境因子综合作用的结果。显热和潜热通量的日变化峰值时间受大气导度、自由大气的稳定性、气孔导度对饱和水汽压差的响应以及平流作用等多种因素的影响。饱和水汽压差的日变化是植被表面通量和对流边界层耦合作用的结果。相对于显热通量来说,饱和水汽压差峰值时间的延后会引起潜热通量峰值时间的延后。Wilson 等^[13]对位于欧洲和北美的多站点显热和潜热通量日变化到达峰值的时间进行的研究表明:显热通量在 11:06 左右达到峰值,而潜热通量在 12:40 左右达到峰值,显热和潜热通量日变化峰值时间的相对变化为 1.6 h,而土壤含水量的降低也会引起显热和潜热日变化峰值时间的相对变化增大。同时冠层导度是冠层进行水汽交换和 CO₂ 同化作用的关键因子,同时也是直接决定潜热通量值大小的唯一的生物因子^[39]。干旱胁迫可以对植被的正常的生理活动造成影响,引起气孔活动的改变。而气孔又是植被与大气物质、能量循环与交换的主要媒介,进而可以影响到生态系统的能量分配与交换以及大气边界层的运动和形成。饱和水汽压差的大小和土壤含水量的多少是影响冠层导度大小的最常见的限制因子。但哪个是主要控制因子,或者是它们共同作用的结果目前尚不明确^[40-44]。

在本研究中,发现该生态系统显热和潜热通量日变化峰值的相对变化主要受降水量的季节分配的控制,特别是在干旱胁迫期降水的作用更加明显(图 7)。解耦因子表示植被与大气之间的耦合程度,范围从 0—1,当湍流通量完全受冠层导度和饱和水汽压差控制时为 0,完全受可用能量控制时为 1。显热和潜热通量日变化峰值时间的相对变化受植被与大气间的耦合程度控制(图 8)。总的来说,植被与大气间的耦合程度决定了显热和潜热通量的日变化峰值时间的相对变化。

4 结论

(1) 显热通量的日变异幅度的季节变异呈主次峰型曲线变化,干旱胁迫期日变异幅度明显增大,而潜热通量日变异幅度呈现明显的双峰型变化,干旱胁迫期和冬季均减小。显热和潜热通量日变异幅度的相对变化呈现先随时间逐渐降低,在干旱胁迫前期增加,在后期显著降低,最后又随时间逐渐升高。

(2) 非干旱胁迫期,显热通量的日变化变异幅度仅与饱和水汽压差正相关;潜热通量的日变化变异幅度仅与气温呈正指数相关。显热和潜热通量日变化变异幅度的相对变化则与气温和饱和水汽压差呈负相关。干旱胁迫期,显热通量的日变化变异幅度和显热和潜热通量日变化变异幅度的相对变化均与气温和饱和水汽压差呈正相关,与土壤含水量呈负相关,但深层水作用对显热和潜热通量日变化变异幅度的相对变化的作用更显著。潜热通量日变化变异幅度与气象要素关系不显著。

(3) 显热通量日变化的峰值时间和显热和潜热通量日变化峰值时间的相对变化的季节变异均呈现先随时间逐渐向上午偏移,在干旱胁迫前期明显向下午偏移,在干旱胁迫后期又向上午偏移。潜热通量日变化峰值时间均在午后达到峰值,季节性干旱对其没有非常显著的影响。

(4) 非干旱胁迫期,显热通量日变化峰值的时间和显热和潜热通量日变化峰值时间的相对变化均与气温负相关。干旱胁迫期,显热通量日变化到达峰值的时间和显热和潜热通量日变化峰值时间的相对变化则与气温正相关。干旱胁迫与非干旱胁迫期,潜热通量日变化峰值时间与气象要素关系均不显著。

(5) 该生态系统显热和潜热通量日变化峰值的相对变化主要受降水量的季节分配控制,在干旱胁迫期降水的作用更加明显。潜热和显热通量日变化峰值时间的相对变化总体上受植被与大气间的耦合程度控制。

References:

- [1] Karl T R, Trenberth K E. Modern global climate change. *Science*, 2003, 302(5651): 1719-1723.
- [2] Easterling D R, Evans J L, Groisman P Y, Karl T R, Kunkel K E, Ambenje P. Observed variability and trends in extreme climate events: a brief review. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2000, 81(3): 417-425.
- [3] Rambal S, Debussche G. Water balance of Mediterranean ecosystems under a changing climate // Oechel W C, Moreno J M eds. *Global Change and Mediterranean-type Ccosystems*. New York: Springer-Verlag, 1995: 386-407.
- [4] Meehl G A, Tebaldi C. More intense, more frequent, and longer lasting heat waves in the 21st century. *Science*, 2004, 305(5686): 994-997.
- [5] Schimel D S, House J I, Hibbard K A, Bousquet P, Ciais P, Peylin P, Braswell B H, Apps M J, Baker D, Bondeau A, Canadell J, Churkina G,

- Cramer W, Denning A S, Field C B, Friedlingstein P, Goodale c, Heimann M, Houghton R A, Melillo J M, Moore B III, Murdiyarso D, Noble I, Pacala S W, Prentice I C, Raupach M R, Rayner P J, Scholes R J, Steffen W L, Wirth C. Recent patterns and mechanisms of carbon exchange by terrestrial ecosystems. *Nature*, 2001, 414(6860): 169-172.
- [6] Adams J M, Faure H, Faure-Denard L, McGlade J M, Woodward F I. Increases in terrestrial carbon storage from the last glacial maximum to the present. *Nature*, 1990, 348(6360): 711-714.
- [7] Baldocchi D, Falge E, Lianhong G, Olson R, Hollinger D, Running S, Anthoni P, Bernhofer C, Davis K, Evans R, Fuentes J, Goldstein A, Katul G, Law B, Lee X, Malhi Y, Meyers T, Munger W, Oechel W, Paw K T, 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.
- [8] Wever L A, Flanagan L B, Carlson P J. Seasonal and interannual variation in evapotranspiration, energy balance and surface conductance in a northern temperate grassland. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2002, 112(1): 31-49.
- [9] McNaughton K G, Spriggs T W. A mixed-layer model for regional evaporation. *Boundary-Layer Meteorology*, 1986, 34(3): 243-262.
- [10] Betts A K. Relation between equilibrium evaporation and the saturation pressure budget. *Boundary-Layer Meteorology*, 1994, 71(3): 235-245.
- [11] Lhomme J P. An examination of the Priestley-Taylor equation using a convective boundary layer model. *Water Resources Research*, 1997, 33(11): 2571-2578.
- [12] Davis K J, Lenschow D H, Oncley S P, Kiemle C, Ehret G, Giez A, Mann J. Role of entrainment in surface-atmosphere interactions over the boreal forest. *Journal of Geophysical Research*, 1997, 102(29): 219-229.
- [13] Wilson K B, Baldocchi D, Falge E, Aubinet M, Berbigier P, Bernhofer C, Dolman H, Field C, Goldstein A, Granier A, Hollinger D, Katul G, Law B E, Meyers T, Moncrieff J, Moncrieff J, Monson R, Tenhunen J, Valentini R, Verma S, Wofsy S. Diurnal centroid of ecosystem energy and carbon fluxes at FLUXNET sites. *Journal of Geophysical Research*, 2003, 108(D21): 4664-4664.
- [14] Baldocchi D. The carbon cycle under stress. *Nature*, 2005, 437(7058): 483-484.
- [15] Wen X F, Wang H M, Wang J L, Yu G R, Sun X M. Ecosystem carbon exchanges of a subtropical evergreen coniferous plantation subjected to seasonal drought, 2003—2007. *Biogeosciences*, 2010, 7: 357-369.
- [16] Liu Y F, Yu G R, Wen X F, Wang Y H, Song X, Li J, Sun X M, Yang F T, Chen Y R, Liu Q J. Seasonal dynamics of CO₂ fluxes from subtropical plantation coniferous ecosystem. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2006, 49(S2): 99-109.
- [17] Sun X M, Wen X F, Yu G R, Liu Y F, Liu Q M. Seasonal drought effects on carbon sequestration of a mid-subtropical planted forest of southeastern China. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2006, 49(S2): 110-118.
- [18] Wen X F, Yu G R, Sun X M, Li Q K, Liu Y F, Zhang L M, Ren C Y, Fu Y L, Li Z Q. Soil moisture effect on the temperature dependence of ecosystem respiration in a subtropical *Pinus* plantation of southeastern China. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2006, 137(3/4): 166-175.
- [19] Wen X F, Wang H M, Yu G R, Sun X M. Ecosystem carbon exchange of a subtropical evergreen coniferous plantation subjected to seasonal drought, 2003—2007. *Biogeosciences Discussions*, 2009, 6(5): 8691-8723.
- [20] 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(S1): 63-73.
- [21] Wilson K B, Baldocchi D. Seasonal and interannual variability of energy fluxes over a broadleaved temperate deciduous forest in North America. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2000, 100(1): 1-18.
- [22] Ryu Y, Baldocchi D, Ma S, Hehn T. Interannual variability of evapotranspiration and energy exchange over an annual grassland in California. *Journal of Geophysical Research*, 2008, 113(D9): D09104.
- [23] Liu Y F, Song X, Yu G R, Sun X M, Wen X F, Chen Y R. Seasonal variation of CO₂ flux and its environmental factors in evergreen coniferous plantation. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2005, 48(S1): 123-132.
- [24] Li J, Liu Y F, Yang X G, Li J. Studies on water vapor flux characteristic and the relationship with environment factors over a planted coniferous forest in Qianyanzhou station. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(08): 34-41.
- [25] Qi Q H, Cha R S, Zhang Q L, Li C H. Variation in heat flux in the Western Pacific and its relation to the summer rainfall anomaly in China. *Journal of Oceanography in Taiwan Strait*, 2010, v. 29; No. 108(02): 159-166.
- [26] Jarvis P G, McNaughton K G. Stomatal control of transpiration: scaling up from leaf to region. *Advances in Ecological Research*, 1986, 15: 1-49.
- [27] Loustau D, Berbigier P, Roumagnac P, Arruda-Pacheco C, David J S, Ferreira M I, Pereira J S, Tavares R. Transpiration of a 64-year-old maritime pine stand in Portugal. *Oecologia*, 1996, 107(1): 33-42.
- [28] Baldocchi D. Measuring and modelling carbon dioxide and water vapour exchange over a temperate broad-leaved forest during the 1995 summer drought. *Plant Cell and Environment*, 1997, 20(9): 1108-1122.
- [29] Anthoni P M, Law B E, Unsworth M H. Carbon and water vapor exchange of an open-canopied ponderosa pine ecosystem. *Agricultural and Forest*

- Meteorology, 1999, 95(3): 151-168.
- [30] Goulden M L, Daube B C, Fan S M, Sutton D J, Bazzaz A, Munger J W, Wofsy S C. Physiological responses of a black spruce forest to weather. *Journal of Geophysical Research*, 1997, 102(D24): 28987-28996.
- [31] Cowan I R. Regulation of water use in relation to carbon gain in higher plants. *Physiological Plant Ecology II*, 1982, 12: 589-613.
- [32] Mäkelä A, Berninger F, Hari P. Optimal control of gas exchange during drought: theoretical analysis. *Annals of Botany*, 1996, 77(5): 461-467.
- [33] Downton W J S, Grant W J R, Loveys B R. Diurnal changes in the photosynthesis of field-grown grape vines. *New Phytologist*, 1987, 105(1): 71-80.
- [34] Weber J A, Gates D M. Gas exchange in *Quercus rubra* (northern red oak) during a drought: analysis of relations among photosynthesis, transpiration, and leaf conductance. *Tree Physiology*, 1990, 7(1/2/3/4): 215-225.
- [35] Whitehead D. Regulation of stomatal conductance and transpiration in forest canopies. *Tree Physiology*, 1998, 18(8/9): 633-644.
- [36] Goldstein A H, Hultman N E, Fracheboud J M, Bauer M R, Panek J A, Xu M, Qi Y, Guenther A B, Baugh W. Effects of climate variability on the carbon dioxide, water, and sensible heat fluxes above a ponderosa pine plantation in the Sierra Nevada (CA). *Agricultural and Forest Meteorology*, 2000, 101(2/3): 113-129.
- [37] Lynn B H, Carlson T N. A stomatal resistance model illustrating plant vs. external control of transpiration. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1990, 52(1/2): 5-43.
- [38] Valentini R, Gamon J A, Field C B. Ecosystem gas exchange in a California grassland: seasonal patterns and implications for scaling. *Ecology*, 1995, 76(6): 1940-1952.
- [39] Carswell F E, Costa A L, Palheta M, Malhi Y, Meir P, de Pr Costa J, Ruivo M L, do Sm Leal L, Costa J M N, Clement R J, Grace J. Seasonality in CO₂ and H₂O flux at an eastern Amazonian rain forest. *Journal of Geophysical Research*, 2002, 107(D20): 8076, doi:10.1029/2000JD000284.
- [40] Malhi Y, Pegoraro E, Nobre A D, Pereira M G P, Grace J, Culf A D, Clement R. Energy and water dynamics of a central Amazonian rain forest. *Journal of Geophysical Research*, 2002, 107(D20): 8061, doi: 10.1029/2001JD000623.
- [41] Williams M, Malhi Y, Nobre A D, Rastetter E D, Grace J, Pereira M G P. Seasonal variation in net carbon exchange and evapotranspiration in a Brazilian rain forest: a modelling analysis. *Plant, Cell and Environment*, 1998, 21(10): 953-968.
- [42] Kelliher F M, Lloyd J, Arneth A, Byers J N, McSeveny T M, Milukova I, Grigoriev S, Panfyorov M, Sogatchev A, Varlargin A, Ziegler W, Bauer G, Schulze E D. Evaporation from a central Siberian pine forest. *Journal of Hydrology*, 1998, 205(3/4): 279-296.
- [43] Tchebakova N M, Kolle O, Zolotoukhine D, Arneth A, Styles J M, Vygodskaya N N, Schulze E D, Shibistova O, Lloyd J. Inter-annual and seasonal variations of energy and water vapour fluxes above a *Pinus sylvestris* forest in the Siberian middle taiga. *Tellus B*, 2002, 54(5): 537-551.
- [44] Valentini R, Dore S, Marchi G, Mollicone D, Panfyorov M, Rebmann C, Kolle O, Schulze E D. Carbon and water exchanges of two contrasting central Siberian landscape types: regenerating forest and bog. *Functional Ecology*, 2000, 14(1): 87-96.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 31, No. 11 June, 2011 (Semimonthly)

CONTENTS

Responses of microbes-mediated carbon and nitrogen cycles to global climate change	SHEN Jupei, HE Jizheng (2957)
Formation of cyanobacterial blooms in Lake Chaohu and the photosynthesis of dominant species hypothesis	JIA Xiaohui, SHI Dingji, SHI Mianhong, et al (2968)
Unbalanced cyclical fluctuation pattern of intermittent outbreaks of beet armyworm <i>Spodoptera exigua</i> (Hübner) in China	WEN Lizhang, ZHANG Youjun, ZHU Liang, et al (2978)
Self-organizing feature map classification and ordination of <i>Larix principis-rupprechtii</i> forest in Pangquangou Nature Reserve	ZHANG Qindi, ZHANG Jintun, Suriguga, et al (2990)
Ecological effects of lakeside wetlands restoration in Dalian Lake, Shanghai	WU Di, YUE Feng, LUO Zukui, et al (2999)
Soil organic carbon storage and profile inventory in the different vegetation types of Luya Mountain	WU Xiaogang, GUO Jinping, YANG Xiuyun, et al (3009)
Response of soil microbial community structure to the leaf litter decomposition of three typical broadleaf species in mid-subtropical area, southern China	ZHANG Shengxi, CHEN Falin, ZHENG Hua (3020)
The decomposition of coniferous and broadleaf mixed litters significantly changes the carbon metabolism diversity of soil microbial communities in subtropical area, southern China	CHEN Falin, ZHENG Hua, YANG Bosu, et al (3027)
Spatiotemporal heterogeneity of topsoil nutrients in Karst Peak-Cluster depression area of Northwest Guangxi, China	LIU Shujuan, ZHANG Wei, WANG Kelin, et al (3036)
Effects of cadmium stress on the activities of antioxidant enzymes, digestive enzymes and the membrane lipid peroxidation of the mangrove mud clam <i>Geloina coaxans</i> (Gmelin)	LAI Tinghe, HE Binyuan, FAN Hangqing, et al (3044)
The edge effects on tree-liana relationship in a secondary natural forest in Bawangling Nature Reserve, Hainan Island, China	WU Yuna, TAO Jianping, XI Weimin, et al (3054)
Soilwater deficit under different artificial vegetation restoration in the semi-arid hilly region of the Loess Plateau	YANG Lei, WEI Wei, MO Baoru, et al (3060)
The diurnal trends of sensible and latent heat fluxes of a subtropical evergreen coniferous plantation subjected to seasonal drought	HE Youwei, WANG Qiubing, WEN Xuefa, et al (3069)
Ecological adaptability of photosynthesis and water use for <i>Tamarix ramosissima</i> in the southern periphery of Gurbantungut Desert, Xinjiang	WANG Shanshan, CHEN Xi, WANG Quan, et al (3082)
Estimation of leaf area index of cotton using digital Imaging	WANG Fangyong, WANG Keru, LI Shaokun, et al (3090)
Different response of photosynthetic apparatus between wild soybean (<i>Glycine soja</i>) and cultivated soybean (<i>Glycine max</i>) to NaCl stress	XUE Zhongcai, GAO Huiyuan, LIU Jie (3101)
Effects of water and phosphorus supply on morphology and structure of special root hairs on nodal roots of wheat (<i>Triticum aestivum</i> L.)	ZHANG Jun, HE Dexian, DUAN Zengqiang (3110)
Applications of species indicator for analyzing plant community types and their biodiversity at Kunyushan National Forest Reserve	SUN Zhiqiang, ZHANG Xingyao, ZHU Yanpeng, et al (3120)
Societal metabolism for chinese provinces based on multi-scale integrated analysis of societal metabolism (MSIASM)	LIU Ye, GENG Yong, ZHAO Hengxin (3133)
Comparative gene expression analysis for leaf trichomes of tobacco grown in two different regions in China	CUI Hong, JI Hao, YANG Huijuan, et al (3143)
Performance evaluation of B biotype whitefly, <i>Bemisia tabaci</i> on 23 host plants	AN Xincheng, GUO Qiang, HU Qiongbo (3150)
Studies of hemocytes DNA damage by two pesticides acetamiprid and chlorpyrifos in predaceous spiders of <i>Pardosa astrigera</i> Koch	LI Rui, LI Shengcai, LIU Jia, (3156)
Effects of the fungicide prochloraz on the rotifer <i>Brachionus calyciflorus</i>	LI Daming, LU Zhenghe, FENG Qi, et al (3163)
Effects of long- and short-term successive parthenogenesis on life history and genetics characteristics of <i>Brachionus calyciflorus</i>	GE Yali, XI Yilong (3170)
Review and Monograph	
Review of the relationship between regional landscape pattern and surface water quality	ZHAO Jun, YANG Kai, TAI Jun, et al (3180)
Review of dew action effect on plants	YE Youhua, PENG Shaolin (3190)
Advances in Botryosphaeriaceae: identification, phylogeny and molecular ecology	CHENG Yanlin, LIANG Jun, LÜ Quan, et al (3197)
Advances in research on the mechanisms of age-related productivity decline of planted forests	MAO Peili, CAO Banghua, TIAN Wenxia, et al (3208)
The application of tree-ring on forest disturbance history reconstruction	FENG Xiaohui, CHENG Ruimei, XIAO Wenfa, et al (3215)
Research advances on stress responsive WRKY transcription factors in plants	LI Ran, LOU Yonggen (3223)
Scientific Note	
The soil microbial activities and microbial biomass in Sanjiangyuan Alpine grassland	REN Zuohua, ZHANG Yuguang, LI Diqiang, et al (3232)
The differences of water use efficiency (WUE) among three <i>Populus deltoids</i> clones, and the cloning and characterization of related gene, <i>PdERECTA</i>	GUO Peng, XIA Xinli, YIN Weilun (3239)
Arthropod community reestablishment and niche of the main groups in kiwifruit orchards	DU Chao, ZHAO Huiyan, GAO Huanhuan, et al (3246)

2009 年度生物学科总被引频次和影响因子前 10 名期刊★

(源于 2010 年版 CSTPCD 数据库)

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

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

编辑部主任 孔红梅

执行编辑 刘天星 段 靖

生 态 学 报
(SHENGTAI XUEBAO)
(半月刊 1981 年 3 月创刊)
第 31 卷 第 11 期 (2011 年 6 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA
(Semimonthly, Started in 1981)
Vol. 31 No. 11 2011

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:100717	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