

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第 33 卷 第 17 期 Vol.33 No.17 **2013**

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 33 卷 第 17 期 2013 年 9 月 (半月刊)

目 次

前沿理论与学科综述

- 植物角质层蜡质的化学组成研究综述 曾 琼, 刘德春, 刘 勇 (5133)
- 中国滨海盐沼湿地碳收支与碳循环过程研究进展 曹 磊, 宋金明, 李学刚, 等 (5141)

个体与基础生态

- 秸秆隔层对盐碱土水盐运移及食葵光合特性的影响 赵永敢, 逢焕成, 李玉义, 等 (5153)
- 盐地碱蓬二型性种子及其幼苗对盐渍环境的适应性 刘 艳, 周家超, 张晓东, 等 (5162)
- 不同抗旱性花生品种的根系形态发育及其对干旱胁迫的响应 丁 红, 张智猛, 戴良香, 等 (5169)
- 夏季苹果新梢生理指标与抗苹果绵蚜的关系 王西存, 周洪旭, 于 毅, 等 (5177)
- 花期海蓬子对盐胁迫的生理响应 刘伟成, 郑春芳, 陈 琛, 等 (5184)
- 白蜡多年卧孔菌生物学特性及驯化栽培 鲁 铁, 图力古尔 (5194)
- 重度火烧迹地微地形对土壤微生物特性的影响——以坡度和坡向为例
..... 白爱芹, 傅伯杰, 曲来叶, 等 (5201)
- 秸秆还田与施肥对稻田土壤微生物生物量及固氮菌群落结构的影响 刘骁蓓, 涂仕华, 孙锡发, 等 (5210)
- 大穗型小麦叶片性状、养分含量及氮素分配特征 王丽芳, 王德轩, 上官周平 (5219)
- 复合不育剂 EP-1 对小鼠空间记忆与焦虑行为的影响 王晓佳, 秦婷婷, 胡 霞, 等 (5228)

种群、群落和生态系统

- 小兴安岭阔叶红松混交林林隙特征 刘少冲, 王敬华, 段文标, 等 (5234)
- 高寒矮嵩草群落退化演替系列氮、磷生态化学计量学特征 林 丽, 李以康, 张法伟, 等 (5245)
- 中亚热带人工针叶林生态系统碳通量拆分差异分析 黄 昆, 王绍强, 王辉民, 等 (5252)
- 高寒山区一年生混播牧草生态位对密度的响应 赵成章, 张 静, 盛亚萍 (5266)
- 乳山近海大型底栖动物功能摄食类群 彭松耀, 李新正 (5274)

景观、区域和全球生态

- 采伐干扰对大兴安岭落叶松-苔草沼泽植被碳储量的影响 牟长城, 卢慧翠, 包 旭, 等 (5286)
- 西南喀斯特地区轮作旱地土壤 CO₂ 通量 房 彬, 李心清, 程建中, 等 (5299)
- 干湿季节下基于遥感和电磁感应技术的塔里木盆地北缘绿洲土壤盐分的空间变异性
..... 姚 远, 丁建丽, 雷 磊, 等 (5308)
- 东北温带次生林和落叶松人工林土壤 CH₄ 吸收和 N₂O 排放通量 孙海龙, 张彦东, 吴世义 (5320)
- 新疆东部天山蝶类多样性及其垂直分布 张 鑫, 胡红英, 吕昭智 (5329)
- 玉米农田空气动力学参数动态及其与影响因子的关系 蔡 福, 周广胜, 明惠青, 等 (5339)

天山北坡家庭牧场复合系统对极端气候的响应过程..... 李西良,侯向阳,丁 勇,等 (5353)

大城市边缘区景观破碎化空间异质性——以北京市顺义区为例..... 李 灿,张凤荣,朱泰峰,等 (5363)

资源与产业生态

基于 GLBM 模型的中国大陆阿根廷滑柔鱼鱿钓渔业 CPUE 标准化 陆化杰,陈新军,曹 杰 (5375)

三峡库区古夫河水质时空分异特征..... 冉桂花,葛继稳,苗文杰,等 (5385)

城乡与社会生态

汉、藏、回族地区农户的环境影响——以甘肃省张掖市、甘南藏族自治州、临夏回族自治州为例.....

..... 赵雪雁,毛笑文 (5397)

研究简报

中国近海浮游动物群落结构及季节变化..... 杜明敏,刘镇盛,王春生,等 (5407)

海洋污染物对菲律宾蛤仔的免疫毒性..... 丁鉴锋,闫喜武,赵力强,等 (5419)

衰亡期沉水植物对水和沉积物磷迁移的影响..... 王立志,王国祥 (5426)

伊洛河流域外来草本植物分布格局..... 郭屹立,丁圣彦,苏 思,等 (5438)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 316 * zh * P * ¥90.00 * 1510 * 32 * 2013-09



封面图说: 帽儿山次生林林相——帽儿山属于长白山山脉的张广才岭西坡,松花江南岸支流阿什河的上游,最高海拔 805m,由侏罗纪中酸性火山岩构成,是哈尔滨市附近的最高峰,因其貌似冠状而得名。东北林业大学于 1958 年在此建立了实验林场。山上生长着松树、榆树、杨树及各种灌木等,栖息着山鸡、野兔等野生动物,在茂密的草地上还生长有各种蘑菇。其地带性植被为温带针阔混交林,目前状况为天然次生林。部分地方次生林转变为落叶松人工林后,落叶松林地的凋落物层影响了林地土壤水分的格局。

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

DOI: 10.5846/stxb201205310793

黄昆, 王绍强, 王辉民, 仪垂祥, 周蕾, 刘允芬, 石浩. 中亚热带人工针叶林生态系统碳通量拆分差异分析. 生态学报, 2013, 33(17): 5252-5265.

作者: An analysis of carbon flux partition differences of a mid-subtropical planted coniferous forest in southeastern China. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(17): 5252-5265.

中亚热带人工针叶林生态系统碳通量拆分差异分析

黄 昆^{1,2}, 王绍强^{1,*}, 王辉民^{1,3}, 仪垂祥⁴, 周 蕾^{1,2}, 刘允芬^{1,3}, 石 浩^{1,2}

(1. 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;

2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 中国科学院千烟洲红壤丘陵综合开发试验站, 泰和 343700;

4. 美国纽约城市大学皇后学院, 纽约 11367 美国)

摘要: 涡度通量观测可直接获取陆地生态系统与大气之间 CO_2 净交换量 (NEE), 但深入认识碳循环过程和校验生态系统模型需要不同时间尺度总初级生产力 (GPP) 和生态系统呼吸 (Re) 等碳通量数据。利用中国陆地生态系统通量观测与研究网络 (ChinaFLUX) 中亚热带人工针叶林生态系统 2003—2009 年的涡度通量和气象观测数据, 分析了两种 NEE 拆分方法对不同时间尺度 GPP 和 Re 评估的影响, 结果表明: (1) 两种拆分方法得到的生态系统碳通量组分 (GPP 和 Re) 的季节动态变化一致, 都在生长季 7、8 月份达到峰值; (2) 非线性回归模型拆分得到的全年 Re 和 GPP 相较于光响应曲线模型分别高出 2%—28.6% 和 1.6%—23%, 最大高出 $317.6 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ (2006 年), 逐月最大差值主要发生在 8、9 月份; (3) 不同时间尺度上, 两种方法拆分得到的 GPP 和 Re 之间差值的环境响应因子不同。在广泛采用非线性回归模型进行拆分时, 如果当月光合有效辐射接近到 $905 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{月}^{-1}$, 月平均空气饱和水汽压差接近 1.18 kPa 时, 需要考虑使用光响应曲线模型拆分该月通量, 结合两种拆分方法以减小全年的误差。

关键词: 中亚热带人工针叶林; 碳通量; 拆分; 光响应曲线

An analysis of carbon flux partition differences of a mid-subtropical planted coniferous forest in southeastern China

HUANG Kun^{1,2}, WANG Shaoqiang^{1,*}, WANG Huimin^{1,3}, YI Chuixiang⁴, ZHOU Lei^{1,2}, LIU Yunfen^{1,3}, SHI Hao^{1,2}

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

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3 Qianyanzhou Integrated Ecological Station of Red Soil Hilly Land, Chinese Academy of Sciences, Taihe 343700, China

4 Queens College, City University of New York, New York 11367, USA

Abstract: Net ecosystem exchange (NEE) between terrestrial ecosystem and atmosphere can be directly observed by eddy covariance flux observation system, but we need to get accurately ecosystem gross primary productivity (GPP) and respiration (Re) under different time scales in order to get insights into carbon cycle process. This paper analyzed the eddy carbon flux and meteorology measurement data of a mid-subtropical planted coniferous forest at Qianyanzhou station from 2003 to 2009, and explored the impacts of two different NEE partition methods on estimation of ecosystem GPP and Re under different time scales. Results indicated that ecosystem Re and GPP estimated by different eddy flux partition methods showed similar seasonal dynamics, both of which reached the peaks in July or August of growing season. However, the annual Re and GPP estimated by nonlinear regression model were 2%—28.6% and 1.6%—23% higher than those

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (31070438); 中国科学院战略先导专项子课题资助项目 (XDA05050602-1); 中国科学院青年人才计划资助项目 (KZCX2-YW-QN301)

收稿日期: 2012-05-31; 修订日期: 2012-10-16

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

estimated by light response curve model, respectively. The maximum annual ecosystem respiration difference between two methods existed in 2006 ($317.6 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$), and the maximum monthly ecosystem respiration difference mostly appeared in August or September. Also, we found that environmental factors significantly affect differences between two derived Re (or GPP) with various time scales. For example, the vapor pressure deficit and photosynthetic active radiation were found to explain 63% and 60% of the ecosystem respiration difference between two methods at daily time scale, respectively. Moreover, precipitation, vapor pressure deficit and photosynthetic active radiation could explain 48%, 85% and 89% of the ecosystem respiration difference between two methods at monthly time scale. Third, 78% of the ecosystem respiration difference between two methods could be explained by the photosynthetic active radiation at yearly time scale. It means that the photosynthetic active radiation could explain the most of Re difference between two methods under three time scales. In spite of the wide application of the nonlinear regression model, it was necessary to allow for the light response curve model to partition the carbon flux of that month whose monthly PAR is about $905 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{mon}^{-1}$ and the vapor pressure deficit is around 1.18 KPa as a reference, compared with those partitioned by the nonlinear regression model. Furthermore, the research got access to improvements on the partition results of ecosystem carbon flux and reduced the partition uncertainty.

Key Words: mid-subtropical planted coniferous forest; eddy carbon flux; partition; light response curve line

作为目前唯一的直接测定陆地生态系统与大气之间 CO_2 净交换量的方法, 涡度协方差通量观测已经成为监测和理解陆地生态系统碳循环不可或缺的工具。据全球碳通量观测研究网络 (FLUXNET) 统计, 截至 2010 年全球已经建立起超过 500 多个通量观测站点对不同生态系统类型进行长期的 CO_2 和水热通量的观测研究^[1]。通量观测主要目标在于采用可靠的拆分方法将直接观测获得的净生态系统交换 (NEE) 数据分离为生态系统与大气之间的主要通量: 总初级生产力 (GPP) 和生态系统总呼吸 (Re), 用以深入研究生态系统碳循环过程以及校验生态系统模型^[2-3]。NEE 拆分的方法主要包括以下三类: (1) 基于同步观测的气象数据的方法^[3-4]; (2) 基于稳定同位素观测的方法^[5-6]; (3) 基于箱式法为主的呼吸观测方法等等^[7-8]。

基于 NEE 和常规气象数据的方法作为最常用的拆分方法, 又可以根据使用函数或模型的不同分为几个小类, 包括: 平均日变化法、查表法、非线性回归模型、人工神经网络以及遗传算法等等^[9-10]。广泛采用的“非线性回归模型”拆分方法 (Method 1) 利用 NEE 和气象要素数据之间具备生理生态学意义的非线性关系, 构建 NEE 和气象要素的回归模型, 并利用完整时间序列的气象要素数据对缺失 NEE 数据进行插补, 同时实现对于 NEE 的拆分。其基本原理是: 植被在夜间不进行光合作用, 因此涡度相关通量观测的夜间 NEE 数据等同于夜间总生态系统呼吸 (Re), 利用有效的夜间 NEE 数据和空气温度或表层土壤温度建立非线性模型^[10], 可获得针对特定生态系统的 Re 对温度的响应函数, 再结合白天观测的相应气象数据即可估算出白天的 Re^[11-12]。最后, 根据 NEE、Re 以及 GPP 之间的代数关系可推出 GPP。但是, 涡度相关通量数据质量控制、质量保证过程往往使得夜间有效 NEE 比例较低, 进而导致采用非线性回归的方法估算白天 Re 可能存在较大误差。因此, 利用白天 NEE 对光合有效辐射 (PAR) 的光响应曲线函数关系 (Method 2) 进行白天生态系统呼吸直接估算的方法得到了发展^[13-15], 并以该模型的截距作为白天生态系统呼吸量的均值, 据此以拆分 NEE^[15-16]。

Reichstein 等^[3]认为利用夜间 NEE 与气象要素之间的非线性关系外推至白天呼吸的方法进行 Re 估算的方法亦存在显著的缺点, 包括: (1) 全年有效数据的夜间观测数据可能不足 50%, 进而显著影响对 Re 的准确估算^[10, 16]; (2) 利用全年的有效夜间数据进行非线性拟合获得的相应参数可能无法反映短时间尺度 Re 对环境变量的响应特征, 而如果利用短时间尺度的少量有效夜间数据进行相应拟合又可能无法获得可靠的模型参数^[3]; (3) 在白天光照情况下, 植物叶片暗呼吸受到抑制 (即“kok 效应”), 其呼吸速率可能低于夜间, 进而导致利用夜间 Re 与温度的关系外推白天 Re 时存在高估可能接近 15%^[16-17]。另外, 白天的生态系统呼吸值 (Re) 可能并不满足与温度有关的经验关系^[18-19]。

国外已有研究指出: 利用上述两种非线性回归方法获得的年尺度生态系统碳通量 (GPP 和 Re) 在大多数

通量站点存在较好的一致性^[20-21]。尽管目前国内多数研究普遍采用非线性回归(Method 1)方法进行 NEE 的拆分,依然有必要分析不同拆分方法对生态系统碳通量(GPP 和 Re)评估的影响^[4]。

我国南方人工林占全国人工林面积的一半以上,深入研究我国中亚热带地区人工针叶林碳源汇时空特征及其气候异常的响应,有助于准确评价气候变化对我国人工林碳汇的影响。本研究利用中国陆地生态系统通量观测研究网络(ChinaFLUX)江西泰和县千烟洲生态试验站^[22]的 2003—2009 年的半小时涡度通量和气象观测数据,分析上述不同 NEE 拆分方法下生态系统碳通量(GPP 和 Re)拆分结果的差异,了解造成这种差异的环境影响机制,探讨如何提高中亚热带人工针叶林生态系统 NEE 拆分的准确性。

1 材料和方法

1.1 研究站点简介

千烟洲生态试验站(QYZ)地处江西省泰和县,属亚热带季风气候。通量观测塔位于试验站西南部上松塘、西角塘和平坑垅等小流域的交汇点(26°44′48″N,115°04′13″E,110.8m),塔周围大约 1 km² 范围内森林覆盖度高达 90%,近 100 km² 范围内森林覆盖近 70%,林分为 1985 年前后营造的人工林^[23-24]。多年平均气温为 17.9 °C,多年平均降水 1542.4 mm,土壤类型为红壤,主要植物种为马尾松(*Pinus massoniana*)、湿地松(*Pinus elliotii Engelm*)和杉木(*Cunninghamia lanceolata*),生态系统类型为人工针叶林,通量观测从 2002 年 10 月至今。

1.2 通量和气象数据的获取与处理方法

1.2.1 通量和气象数据的获取方法

千烟洲站(QYZ)的通量观测主要以开路涡度相关系统为主,辅以常规气象要素和植物生理生态要素以及植被清查等。开路涡度相关系统由三维超声风速仪(CAST3, Campbell, USA)和开路式 CO₂/H₂O 红外气体分析仪(Li-7500, LiCor Inc., USA)组成,原始采样频率为 10 Hz,由数据采集器(CR5000, Campbell Scientific, USA)进行数据采集和在线计算,并储存平均周期为 30 min 的 CO₂ 通量数据。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。通量和其他常规观测数据均通过数据传输系统下载到计算机,以进行数据的存储和后续的处理及分析^[24]。

1.2.2 通量和气象数据的处理方法

利用非线性回归模型拆分 NEE 需要用到完整时间序列的气象要素数据,因此有必要对常规观测的半小时气象数据缺失值进行插补,同时基于该站点太阳高度角的日变化确定白天和黑夜,将观测获得的 NEE 数据集划分为 NEE_{night}(夜间)和 NEE_{daytime}(白天)两个数据子集,并且对 NEE 数据进行坐标轴旋转、WPL 校正和储存项校正以消除地形、空气水热传输和观测高度对于 NEE 观测数据的影响^[12]。由于夜间大气层结稳定情况下,观测 CO₂ 交换通量可能并不能反应真实的交换通量,对夜间湍流较弱情况下的数据进行 U* 剔除,剔除方法参考朱治林所使用的方法^[25-26]。同时,对于由于天气异常、电力不稳定以及虫禽干扰等造成的错误数据也一并进行剔除。经过上述校正及剔除过程后,2003—2009 年各年缺失数据统计情况见表 1。

剔除后的 NEE_{night} 和 NEE_{daytime} 数据子集,有效数据量介于 20%—84% 之间。其中夜间有效数据的比例在 20% 左右(各年夜间剔除数据量明显高于白天),白天有效数据比例大约 70%—80%,各年白天有效数据比例明显高于夜间(表 1)。为了进一步获得完整时间序列的 NEE 数据,采用查表法(Look-up Table)对缺失 NEE 数据进行插补,因为在利用查表法进行数据插补时,不会限定 NEE 与环境因子的关系,从而避免了在后续的分析中产生偏移误差^[19]。数据表的具体编辑如下,查表法插补 NEE 缺失数据^[10]:将有效数据按 2 个月一组分为 6 组,再将每组内有效数据 NEE 按照观测高度处空气温度分为 50 组(−50—50 °C, 2 °C 的间隔),利用每组内有效 NEE 数据的平均值插补相应组别夜间缺失数据;在空气温度分组的基础上,再将每组有效 NEE 数据按照入射的光合有效辐射(PAR)分为 20 组(0—2000 μmol·m^{−2}·s^{−1}, 100 μmol·m^{−2}·s^{−1} 的间隔),利用每组有效 NEE 平均值插补相应组别白天缺失数据。限于缺失数据的比例比较大(表 1),利用上述方法对缺失数据进行插补后可能依然存在少量数据没有被插补完整,最后采用 MDV 方法以 7d 为窗口大小对这部分数据进行

再次插补,以获得完整时间序列的 NEE 数据集。

表 1 2003—2009 年千烟洲人工林试验站碳通量观测数据缺失情况统计
Table 1 Carbon flux observation data missing of QYZ station from 2003 to 2009

年份 Year	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
夜间缺失数据量 Nighttime missing	863	652	588	910	432	1062	878
夜间剔除数据量 Nighttime deletion	6227	7172	7003	6470	7149	6399	6541
夜间总缺失数据量 All the nighttime missing	7090	7824	7591	7380	7581	7461	7419
夜间总数据量 All the nighttime data	8760	8787	8760	8760	8760	8787	8760
夜间缺失数据百分比 Percent of nighttime missing/%	80	88	86.7	84.2	86	84.9	84.6
白天缺失数据量 Daytime missing	758	568	518	1009	439	1015	759
白天剔除数据量 Daytime deletion	802	916	1305	1007	955	905	807
白天总缺失数据量 All the daytime missing	1560	1484	1823	2016	1394	1920	1566
白天总数据量 All the daytime data	8760	8781	8760	8760	8760	8781	8760
白天缺失数据百分比 Percent of daytime missing/%	17.8	16.8	20.8	23	15.9	21.8	17.8
总缺失数据量 All the missing data	8650	9308	9414	9396	8975	9381	8985
总数据量 All the data	17520	17568	17520	17520	17520	17568	17520
总缺失数据百分比 Percent of all the missing/%	49.3	52.9	53.7	53.6	51.2	53.4	51.2

1.3 NEE 拆分方法

采用“非线性回归模型”(Method 1)和“光响应曲线模型”(Method 2)两种方法对经过插补后的 2003—2009 年的半小时 NEE 数据进行拆分。对通量数据的谱分析表明在 15d 时间尺度上存在一个谱隙,说明该时间尺度通量数据受环境要素的影响较小^[27],故选择 15d 滑动窗口。通过编写 MATLAB 程序进行计算,然后用 ORIGIN 8.5 和 SPSS 17.0 分析作图。

1.3.1 非线性回归模型(Method 1)拆分方法

利用全年插补后的夜间 NEE 数据(NEE_{night})和 5 cm 土壤温度(T_s)对非线性模型(Lloyd-Taylor 方程(1))进行拟合,得到方程中相应的参数值。结合白天的土壤温度(T_s)将该方程直接外推至白天,则可估算白天半小时生态系统呼吸 Re ,结合已经插补完的夜间的 Re (NEE_{night})采用 15d 的滑动窗口的方法^[26],拆分得到的碳通量分别表示为 Re_1 和 GPP_1 。

$$Re = Re_{Tref} \times e^{E_0 \times \left(\frac{1}{T_{ref} - T_0} - \frac{1}{T_k - T_0} \right)} \quad (1)$$

式中, T_{ref} 表示参考温度,设为 283.15 K; T_0 为常数,设为 227.13 K; Re_{Tref} 和 E_0 分别为非线性拟合的参考温度下生态系统呼吸速率($mgCO_2 m^{-2} s^{-1}$)和温度敏感性参数(K); T_k 为 5 cm 土壤温度(K)。

GPP 由方程(2)计算,NEE 为负表示生态系统从大气中吸收 CO_2 。

$$GPP = NEE - Re \quad (2)$$

1.3.2 光响应曲线模型(Method 2)拆分方法

采用插补后 15d 滑动窗口内(前后各 7d)的白天半小时 NEE 和光合有效辐射(PAR)数据构建非线性模型(Michaelis-Menten 方程,方程(3))^[28-31],估算生态系统白天的平均呼吸速率,拆分得到的碳通量分别表示为 Re_2 和 GPP_2 。

$$NEE = \frac{\alpha \times Q \times P_{max}}{\alpha \times Q + P_{max}} - Re_{day} \quad (3)$$

式中, α 为表观量子效率($mgCO_2/\mu mol$ 光子); Q 为光合有效辐射(μmol 光子 $m^{-2} s^{-1}$); P_{max} 为饱和光强下生态系统的光合速率($mgCO_2 m^{-2} s^{-1}$); Re_{day} 为拟合时间段的白天的平均生态系统呼吸值($mgCO_2 m^{-2} s^{-1}$)。当对不同时间段内的光响应曲线进行拟合,得到不同拟合时间段内的 Re 值。由此可以利用不同时间段内的 Re

与相应时间段内的平均温度对指数方程(1)进行拟合得到参数值,利用拟合得到的方程可对白天的 Re 进行估算^[21]。实现对生态系统白天 Re 的估算,结合夜间呼吸(NEE_{night})即可用方程(2)求解生态系统 GPP 。

2 结果与讨论

本部分将主要比较千烟洲站(QYZ)不同时间尺度两种方法拆分的生态系统碳通量(Re 和 GPP)异同,并分析造成这种差异可能的原因。

2.1 不同拆分方法下生态系统呼吸(Re)的估算异同

2.1.1 不同拆分方法下逐日生态系统呼吸的估算异同

从图1可以看出,不同拆分方法得到的生态系统呼吸(Re_1 和 Re_2)的季节动态变化一致:都在生长季的7月、8月份达到顶峰;2003至2007年共有7组 Re_1 与 Re_2 数据对应,经过双样本 t 检验,在5%的置信区间内,差异显著($n=365$ 或 $366, P<0.01$)。 Re_1 与 Re_2 的差值(Re_1-Re_2)的最大值出现时的日序数(DOY)主要落在

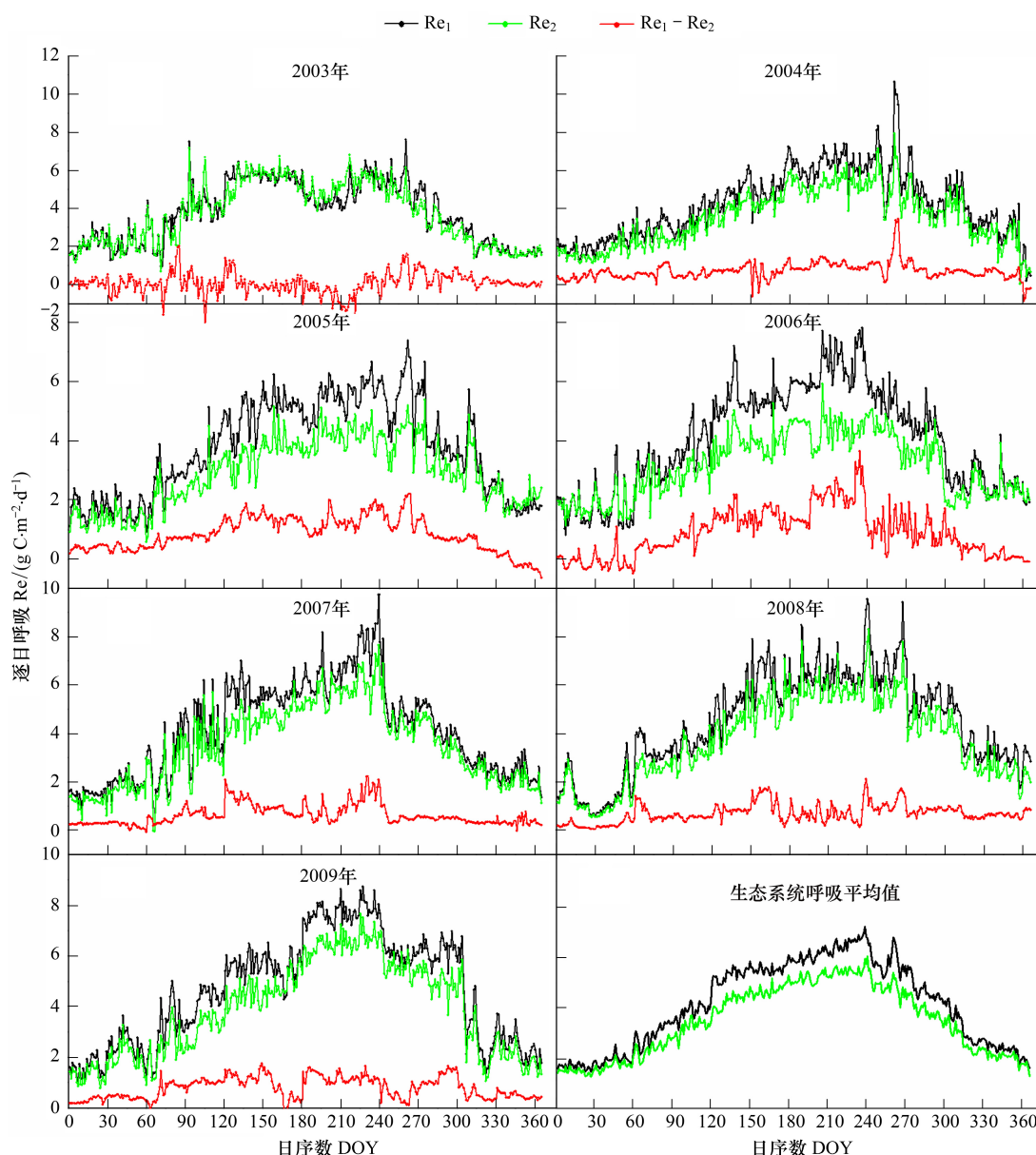


图1 逐日生态系统呼吸(Re)

Fig. 1 Daily ecosystem respiration (Re) partitioned by different methods

Re_1 : 由非线性回归方法(Method 1)拆分得到的 Re ; Re_2 : 由光响应曲线模型(Method 2)拆分得到的 Re ; Re_1-Re_2 : 二者的差值

240—290 之间(2003 年的第二最大值也发生在第 265 天),二者差值的最小值发生在温度较低的 12 月,1 月和 2 月(2003 年除外)。由于千烟洲人工针叶林在 2003 年和 2007 年的 7 月份分别发生了极度干旱和中度干旱^[32],如图 1 所示两种拆分方法所得 2003 年生态系统呼吸值(Re_1 和 Re_2) 在 180—210 天之间突然下降,随后随着 8 月降水量增加又继续上升;如图 1 所示 2007 年生态系统呼吸值(Re_1 和 Re_2) 都在 180—210d 之间小幅波动以后又继续上升。2003—2004 年两种不同拆分方法估算的逐日生态系统呼吸差值(Re_1-Re_2) 的平均值小于 $1\text{ gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$,介于 $0.07-0.87\text{ gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ 之间。全年逐日生态系统呼吸值中, Re_1 大于 Re_2 的占多数,介于 58%—100% 之间。2003—2009 年全年生态系统平均逐日 Re_1 介于 $0.45-7.28\text{ gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$,平均逐日 Re_2 介于 $0.67-6.15\text{ gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ (图 1), Re_1-Re_2 结果见表 2。

表 2 (Re_1-Re_2) 值的逐日统计分析

Table 2 Statistical analysis of daily (Re_1-Re_2)

项目 Item	年份 Year						
	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
最大值(日序数) Max(DOY)/($\text{gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$)	2.04(85)	3.42(264)	2.22(263)	3.64(244)	2.23(241)	2.12(239)	1.73(291)
最小值(日序数) Min(DOY)/($\text{gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$)	-2.1(105)	-0.65(361)	-0.62(365)	-0.47(56)	-0.07(58)	0.05(30)	-0.32(60)
方差 SD/($\text{gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$)	0.54	0.45	0.57	0.81	0.42	0.38	0.42
平均值 Mean/($\text{gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$)	0.07	0.7	0.84	0.87	0.62	0.69	0.79
$Re_1 > Re_2$ 所占百分比 Percentage/%	58	97	93	85	99	100	98

2.1.2 不同拆分方法下逐月生态系统呼吸估算异同

如图 2 所示,两种拆分方法估算的逐月生态系统呼吸(Re_1 和 Re_2) 的季节变化动态表现一致,除了 2003 年以外都在 8 月份达到最大值,2003 年因为发生极端干旱,8 月份生态系统呼吸较 7 月份显著降低。图 2h 所表示的两种拆分方法所得的平均逐月生态系统呼吸值也表现出相同的季节动态特征,从非生长季开始逐渐升高在 8 月份达到峰值; Re_1 和 Re_2 的平均逐月生态系统呼吸值的标准差第一最大值和第二最大值都发生在 7、8 月份,两种方法都体现了生长季的 7、8 月份生态系统呼吸的年际波动变化最大。连续 7 年逐月 Re_1 与逐月 Re_2 之间差值(Re_1-Re_2) 的最大值主要集中在生长季的 8、9 月份(2008 年出现在 6 月份),最小值主要发生在冬季(除 2003 年发生在 7 月份),且有些年份(2003、2005 和 2006)的冬季出现了逐月 Re_1 小于逐月 Re_2 ,而其

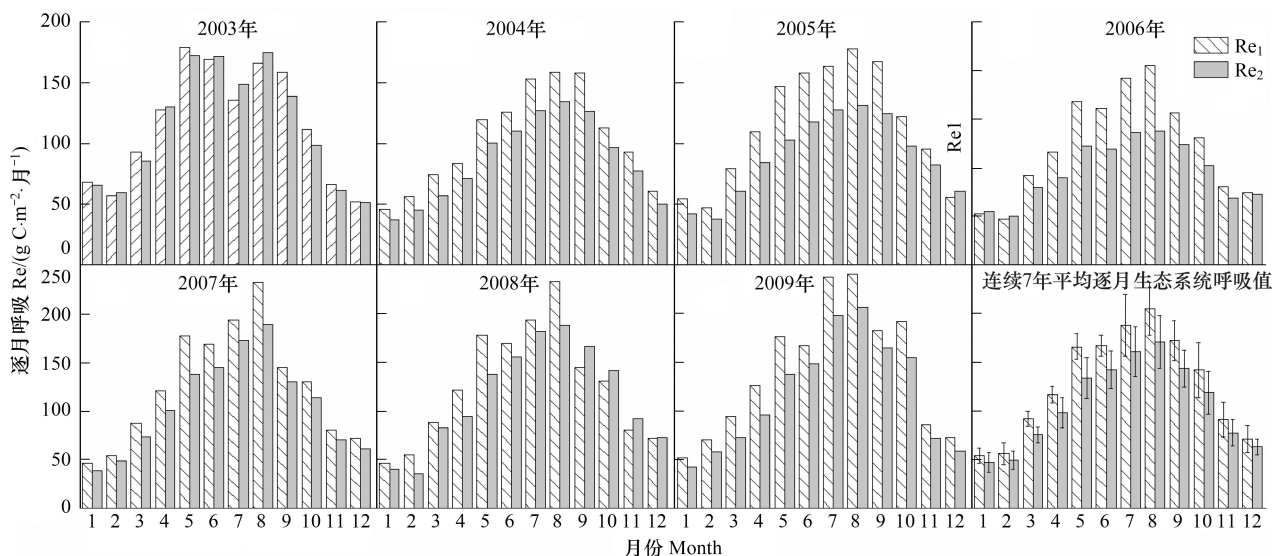


图 2 2003—2009 年逐月生态系统呼吸

Fig. 2 Monthly ecosystem respiration from 2003 to 2009

误差线表示当月生态系统呼吸标准差

他年份的所有逐月 Re_1 都大于 Re_2 。平均逐月 Re_1 范围在 $53.7\text{--}204.7\text{ gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{mon}^{-1}$ 之间,平均逐月 Re_2 介于 $47.1\text{--}170.9\text{ gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{mon}^{-1}$; Re_1 和 Re_2 分别在 7 月和 8 月标准差最大。

表 3 2003—2009 年 (Re_1-Re_2) 值的逐月统计分析

Table 3 Statistical analysis of monthly (Re_1-Re_2)

项目 Item	$Re_1-Re_2/(\text{gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1})$						
	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
最大值(月份) Max(Mon)/($\text{gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{月}^{-1}$)	20(9)	40(9)	46.36(8)	67(8)	43.48(8)	32.82(6)	39.03(8)
最小值(月份) Min(Mon)/($\text{gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{月}^{-1}$)	-13.2(7)	11(1)	-5.35(12)	-3.32(2)	5.84(2)	5.2(1)	9.46(1)
方差 SD/($\text{gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{月}^{-1}$)	9.13	8.47	16.47	23.1	11.74	8.24	11.21
平均值 Mean/($\text{gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{月}^{-1}$)	2.17	21.83	25.53	26.5	18.95	21.04	23.92
$Re_1>Re_2$ 所占百分比 Percentage/%	58.3	58.3	91.7	83.3	100	100	100

2.1.3 不同拆分方法下逐年生态系统呼吸估算异同

如图 3 所示,不同年份的逐年 Re_1 均高于逐年 Re_2 ,且 2006 年差值幅度最大($317.6\text{ gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$),2003 年高出部分最少($30\text{ gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$),2003—2009 年不同拆分方法下逐年 Re_1 相对于逐年 Re_2 高出 2%—28.6%,且 2005 年 Re_1 高于 Re_2 的百分比最大。除了 2005 年生态系统呼吸下降以外,两种方法都表现出千烟洲人工针叶林的逐年生态系统呼吸是递增的。

由于 Method 1 和 Method 2 都采用了查表法来插补全天 NEE 缺失数据,夜间 NEE 数据即为晚间生态系统呼吸(Re_{night}),区别在于 Method 1 基于夜间呼吸数据来对 Lloyd-Taylor 方程进行拟合估算出白天生态系统呼吸,而 Method 2 基于白天呼吸数据对 Lloyd-Taylor 方程进行拟合估算白天生态系统呼吸。从图 4 可以看出,千烟洲人工针叶林生态系统基于夜间(Method 1)与白天数据(Method 2)得到的夜间与白天生态系统呼吸对温度的响应可以看出,夜间的 Re 对温度的响应与白天的 Re 对温度的响应存在差异,利用夜间呼吸(Method 1)与土壤表层温度拟合的 Lloyd-Taylor 方程对白天的 Re 估算时,会产生显著的高估现象。在千烟洲人工针叶林基于夜间数据得到的参考呼吸 $Re_{T_{\text{ref}}}$ 要大于基于白天数据的结果(表 4),证实了在千烟洲人工针叶林生态系统中植物叶片呼吸受到 Kok 效应的影响,即光对植物叶片暗呼吸的抑制作用^[16,21,33],致使植物叶片呼吸在白天要低于夜间,因此 2003—2009 年的逐年生态系统呼吸 Re_1 会高出 Re_2 (图 3)。

2.2 不同拆分方法下生态系统总初级生产力(GPP)的估算异同

由于使用相同的方法来插补缺失的 NEE 数据,故两种拆分方法得到的不同时间尺度生态系统呼吸之差(Re_1-Re_2)和总初级生产力 GPP 之差(GPP_1-GPP_2)是相等的,这里就不再讨论 GPP_1-GPP_2 。两种拆分方法得到的千烟洲人工针叶林生态系统总初级生产力(GPP_1 和 GPP_2)的季节动态变化一致,均在每年的 7,8 月份生长季达到最大值(图 5,图 6)。千烟洲人工针叶林生态系统 2003 和 2007 年夏季发生了伏旱,两种拆分方法估算的生态系统总初级生产力(GPP_1 和 GPP_2)在 7 月份开始下降之后随着降水的增加而上升,最终在进入非生长季后又逐渐降低(图 5,图 6)。对逐日、逐月 GPP_1 和 GPP_2 进行两独立样本 t 检验,差异显著($P<0.01$)。2003—2009 年全年生态系统平均逐日 GPP_1 介于 $1.3\text{--}8.1\text{ gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$,平均逐日 GPP_2 介于 $1.2\text{--}7.3\text{ gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ (图 5)。 GPP_1 和 GPP_2 分别在 7 月份和 6 月份达到标准差最大值,平均值的范围分别是 $58.3\text{--}224\text{ gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{月}^{-1}$ 和 $51.8\text{--}195.8\text{ gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{月}^{-1}$ (图 6)。

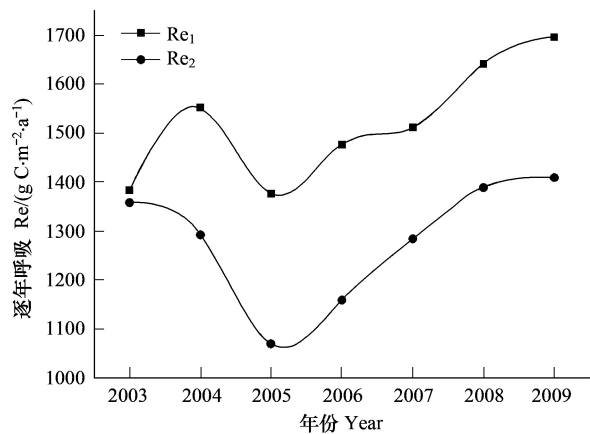


图 3 2003—2009 年逐年生态系统呼吸

Fig. 3 Annual ecosystem respiration from 2003 to 2009

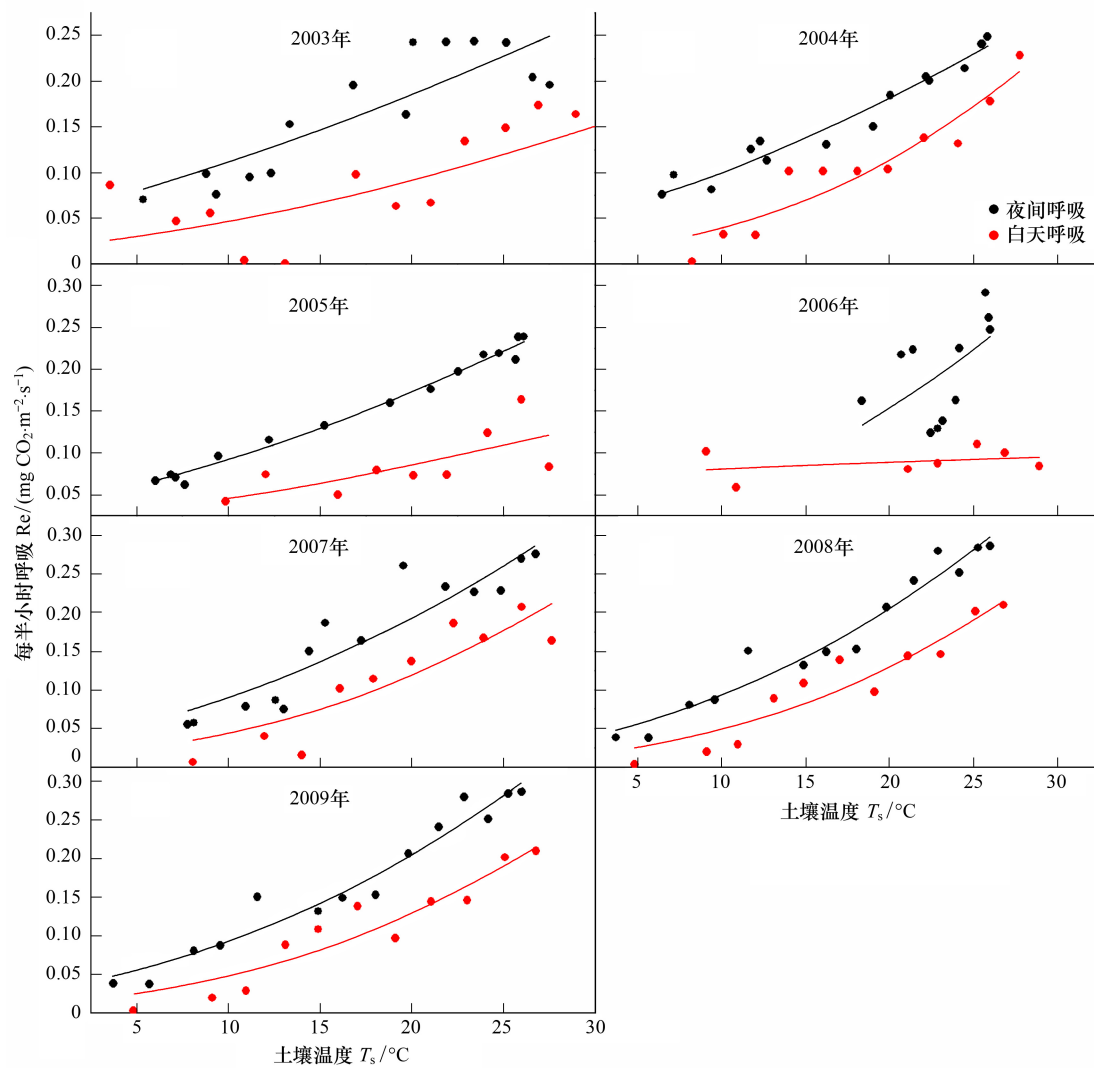


图4 2003—2009年千烟洲亚热带人工针叶林夜间及白天生态系统呼吸(Re)对土壤温度 T_s (5 cm)的响应

Fig. 4 Response of nighttime and daytime Re in QYZ plantation to soil temperature at 5 cm from 2003 to 2009

表4 千烟洲针叶林(QYZ)基于夜间数据(ND)及白天数据(DD)对Lloyd-Taylor方程拟合得到方程参数

Table 4 Parameters of Lloyd-Taylor equation based on nighttime data (ND) and daytime data (DD) at QYZ

年份 Year	数据类型 Data type	参考呼吸 $Re_{Tref}/(mgCO_2 \cdot m^{-2} \cdot s^{-1})$	活化能 $E_0/(J/mol)$	相关性系数 R^2
2003	ND	0.112	189.13	0.73
	DD	0.046	251.82	0.51
2004	ND	0.099	221.52	0.95
	DD	0.039	390.11	0.88
2005	ND	0.092	233.26	0.98
	DD	0.046	229.28	0.42
2006	ND	0.059	354.29	0.71
	DD	0.081	314.38	0.31
2007	ND	0.091	281.45	0.84
	DD	0.044	369.17	0.78
2008	ND	0.092	293.46	0.95
	DD	0.048	361.14	0.88
2009	ND	0.093	293.46	0.95
	DD	0.049	361.14	0.87

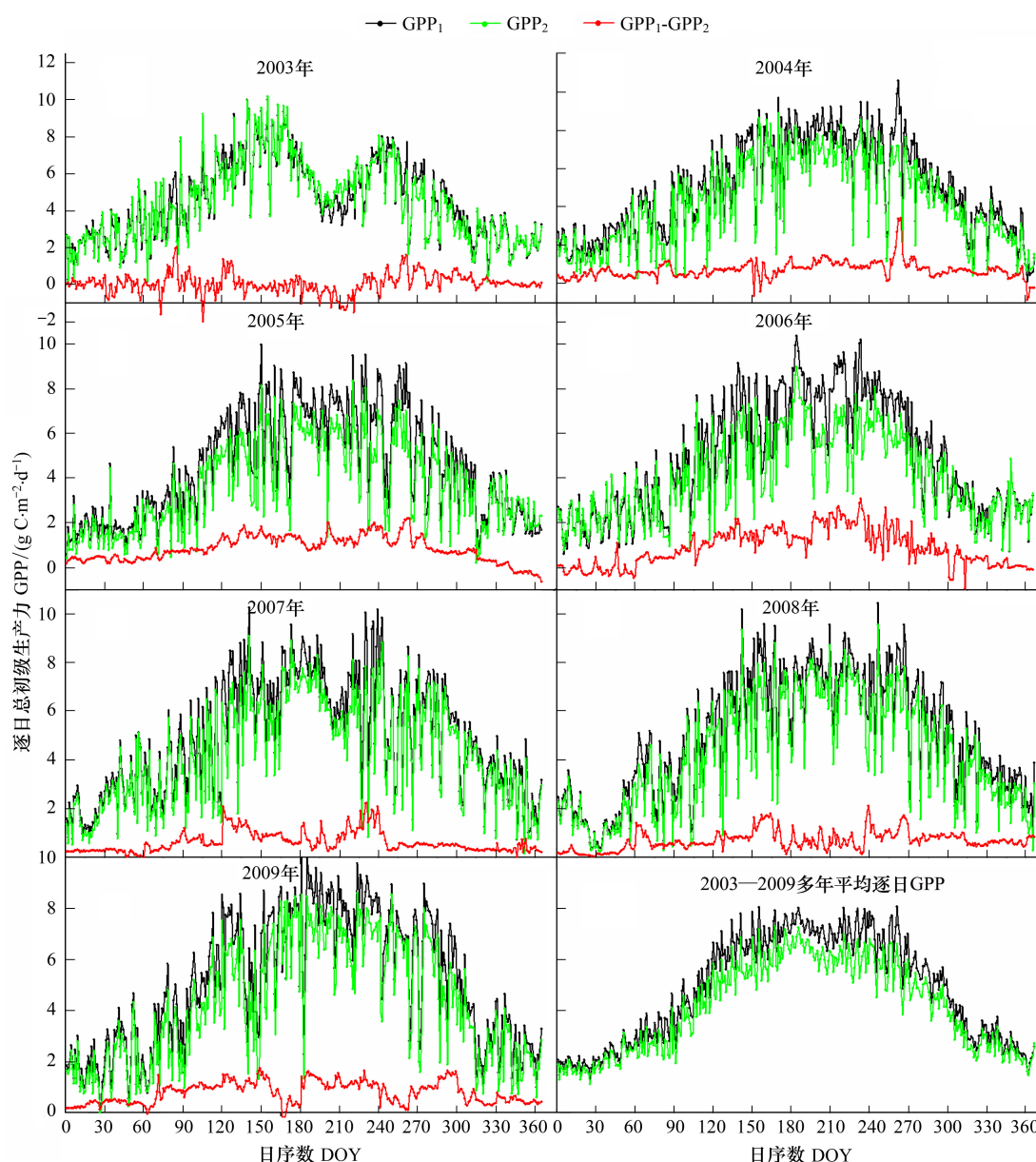


图5 2003—2009年千烟洲针叶林生态系统逐日GPP

Fig. 5 Daily ecosystem Gross Primary Productivity (GPP) at QYZ from 2003 to 2009

GPP₁ 表示由非线性回归模型 (Method 1) 拆分得到; GPP₂ 表示由光响应曲线 (Method 2) 拆分得到; GPP₁-GPP₂ 表示二者差值

如图7所示,2003—2009年的逐年生态系统总初级生产力, GPP₁ 分别高出 GPP₂ 为 26 (1.6%)、262 (17%)、306.3 (23%)、317.6 (21.3%)、227.4 (14.5%)、252.5 (16.4) 和 287 gC·m⁻²·a⁻¹ (18.5%), 这与 3.1 中 Re₁ 高于 Re₂ 是一致的。

2.3 不同拆分方法下生态系统碳通量组分 (Re 和 GPP) 之差及其环境响应机制

由于不同时间尺度的 Re₁-Re₂ 值与 GPP₁-GPP₂ 值相同, 这里只讨论生态系统呼吸差值的平均值 ((Re₁-Re₂)_{avg}) 变化 (图8)。2003—2009年, 千烟洲人工针叶林生态系统的不同方法拆分估算的平均呼吸之差 (Re₁-Re₂) 的最大值于最小值分别发生在 8 月份 (33.8 gC·m⁻²·月⁻¹) 和 2 月份 (6.3 gC·m⁻²·月⁻¹); 2006 年逐年生态系统呼吸值之差 (Re₁-Re₂) 达到最大值 (317.6 gC·m⁻²·a⁻¹), 其次为 2005 年 (306.3 gC·m⁻²·a⁻¹), 最小值发生在 2003 年 (30 gC·m⁻²·a⁻¹)。本文 3.1 中指出逐日和逐月的两种方法拆分所得呼吸的最小值都发生冬季 (1, 2, 12 月), 同时最小呼吸差值也主要发生在冬季, 这可能是由于冬季低温对呼吸的限制起主要作用, 所

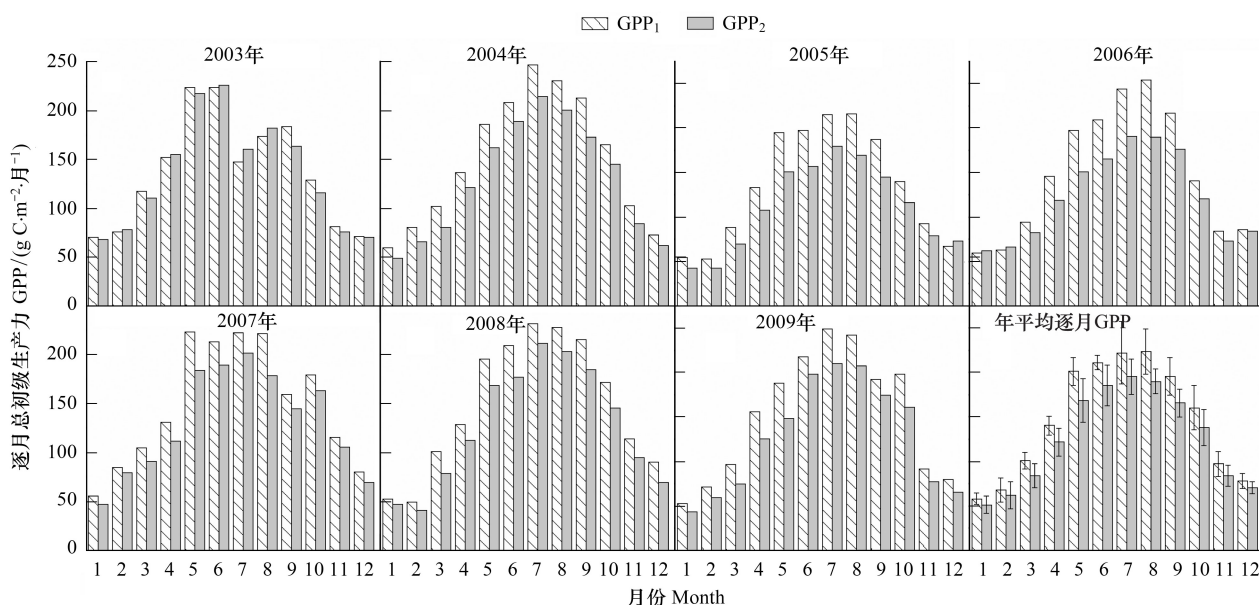


图 6 2003—2009 年千烟洲 (QYZ) 人工针叶林生态系统逐月 GPP

Fig. 6 Monthly ecosystem GPP at QYZ from 2003 to 2009

误差线表示多年该月 GPP 的标准差

以差值并不明显^[34]。

从图 9 中可以看出,不同拆分方法下所得到的千烟洲人工针叶林生态系统呼吸和总初级生产力的差值 ($Re_1 - Re_2$) 在不同时间尺度上受不同环境因子的影响限制。在日尺度上,影响因子依次为饱和水汽压差 ($R^2 = 0.63$)、光合有效辐射 ($R^2 = 0.6$);在月尺度上,影响因子依次为光合有效辐射 ($R^2 = 0.89$)、饱和水汽压差 ($R^2 = 0.85$) 和降水量 ($R^2 = 0.48$);在年尺度上,影响因子为光合有效辐射 ($R^2 = 0.78$)。PAR 是影响千烟洲中亚热带人工针叶林生态系统植被生长季碳吸收能力的主要因素之一^[35-37],每年的生长季 7—9 月份光合有效辐射 (PAR) 和饱和水汽压差 (VPD) 会达到峰值,呼吸差平均值主要出现在 8—9 月份 (图 2, 图 6, 图 8)。由于 2006 年的光合有效辐射 (PAR) 最高,所以差异值最大,随着光合有效辐射和空气饱和水汽压的逐渐升高,植物叶片呼吸受到的 Kok 效应的影响越来越大,差值不断升高;达到一个峰值以后, Kok 效应又逐渐减弱,呼吸差值又逐渐下降。当逐月光合有效辐射 (PAR) 接近 $905 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{月}^{-1}$,空气饱和水汽压差 (VPD) 接近 1.18 kPa 时,两种方法得到的逐月呼吸差值最大;当全年总的光合有效辐射 (PAR) 接近 $6323 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 时,两种拆分方法所得到的生态系统碳通量组分 (GPP 和 Re) 差别最大 (图 9)。

3 结论

本研究基于 2003—2009 年的千烟洲人工针叶林生态系统的涡度通量观测数据和气象数据分析了两种不同方法在拆分中亚热带人工针叶林生态系统碳通量的差异及其环境响应机制,结果表明:(1) 两种不同拆分方法得到的生态系统碳通量组分 (GPP 和 Re) 季节变化动态一致,在生长季达到峰值;2003 和 2007 年伏旱的影响使得 Re_1 和 Re_2 、 GPP_1 和 GPP_2 均在 8 月份出现了下降随后又逐渐升高。(2) 两种拆分方法所得生态系统呼吸差值 ($Re_1 - Re_2$) 的最大值发生在生长季的 8,9 月份,而最小值主要发生在冬季;逐年 Re_1 相比于 Re_2

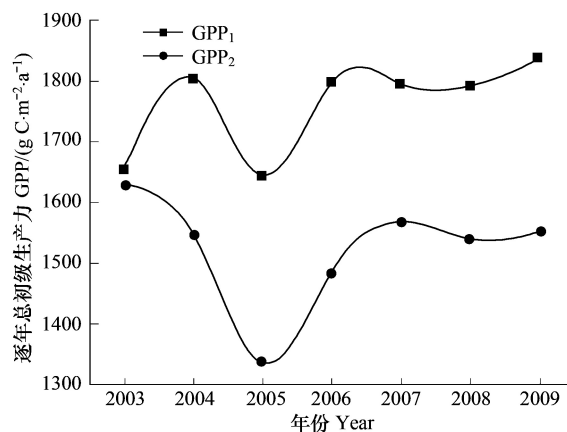


图 7 2003—2009 年千烟洲 (QYZ) 人工针叶林生态系统逐年 GPP

Fig. 7 Annual ecosystem GPP at QYZ from 2003 to 2009

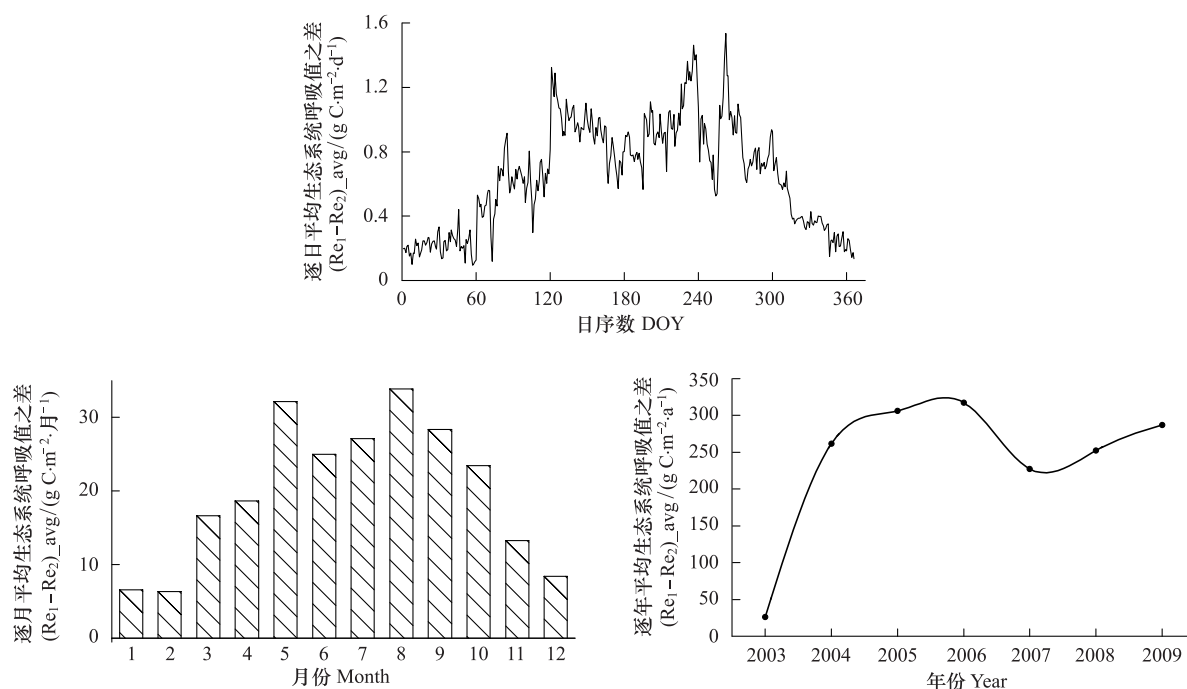


图8 2003—2009年千烟洲人工针叶林两种拆分方法下平均生态系统呼吸值差时间序列图

Fig. 8 Time series of average $(Re_1 - Re_2)$ at QYZ from 2003 to 2009

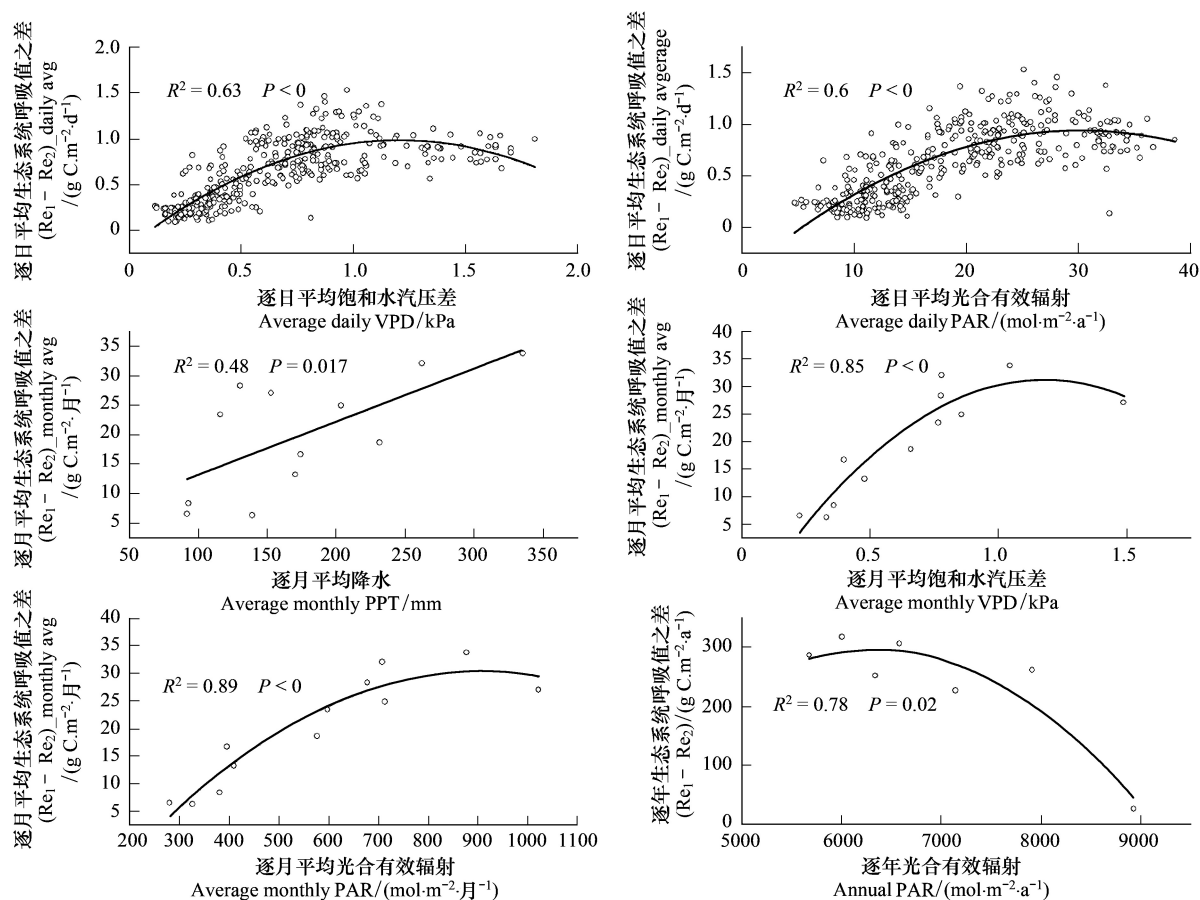


图9 千烟洲人工针叶林不同拆分方法生态系统呼吸平均差值 $(Re_1 - Re_2)$ _avg 的环境响应机制

Fig. 9 Environmental response mechanism of $(Re_1 - Re_2)$ _avg at QYZ

高出 2%—28.6%, 逐年 GPP_1 相比于 GPP_2 高出 1.6%—23%; 最大值发生在 2006 年 ($317.6 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$), 最小值发生 2003 年 ($30 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)。 (3) 利用晚间数据 (Method 1) 对 Lloyd-Taylor 方程拟合得到的参数显著高于基于白天呼吸数据 (Method 2) 拟合该方程得到的参数, Kok 效应确实抑制植物白天叶片的呼吸使得利用非线性回归模型在拆分 NEE 数据时存在高估生态系统呼吸和总初级生产力 (GPP 和 Re)。 (4) 两种不同拆分方法得到的对应碳通量组分差值 ($Re_1 - Re_2$) 在不同时间尺度上受不同环境因子影响: 在日尺度上, 影响因子依次为空气饱和水汽压差 ($R^2 = 0.63$) 和光合有效辐射 ($R^2 = 0.6$); 在月尺度上, 影响因子依次为光合有效辐射 ($R^2 = 0.89$)、饱和水汽压差 ($R^2 = 0.85$) 和降水量 ($R^2 = 0.48$); 在年尺度上, 主要影响因子为光合有效辐射 ($R^2 = 0.78$)。月光合有效辐射最能解释“Kok 效应”对叶片白天呼吸的抑制。

不同拆分方法下千烟洲人工针叶林生态系统呼吸差值 ($Re_1 - Re_2$) 季节差异性明显 (8, 9 月份达到峰值), 且月尺度上环境因子最能解释差异性。在利用非线性回归的方法 (Method 1) 处理千烟洲人工针叶林生态系统全年涡度 NEE 观测数据时, 如果当月总光合有效辐射 (PAR) 接近 $905 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{月}^{-1}$ 、空气饱和水汽压差接近 1.18 kPa 时, 此时由于温度升高降水增多, “Kok 效应”对呼吸的抑制作用最为强烈, 应该考虑使用光响应曲线模型 (Method 2) 来拆分该月涡度 NEE 观测数据, 两种方法结合使用以减小全年 NEE 的拆分误差。

由于碳通量的拆分方法与摩擦风速、NEE 有效数据量、气象数据等密切相关, 不同时间尺度上呼吸差值与环境因子响应程度的大小也对计算方法也有一定依赖性, 而且不同生态系统的气候条件和碳通量季节变化趋势也有很大不同, 本研究只分析了两种方法在中亚热带人工针叶林生态系统的应用, 为了进一步分析和了解碳通量拆分结果的差异和不确定性, 还需要将这 3 种方法在中国其他不同的生态系统中加以深入分析和讨论, 从而为确定适合中国通量网的碳通量拆分方法提供比较和参考。

References:

- [1] Sulkava M, Luyssaert S, Zaehle S, Papale D. Assessing and improving the representativeness of monitoring networks: the European flux tower network example. *Journal of Geophysical Research*, 2011, 116: G00J04, doi:10.1029/2010JG001562.
- [2] Baldocchi D. Breathing of the terrestrial biosphere: lessons learned from a global network of carbon dioxide flux measurement systems. *Australian Journal of Botany*, 2008, 56(1): 1-26.
- [3] Reichstein M, Falge E, Baldocchi D, Aubinet M, Berbigier P, Bernhofer C, Buchmann N, Gilmanov T, Granier A, Grünwald T, Havrůnková K, Ilvesniemi H, Janous D, Knohl A, Laurila T, Lohila A, Loustau D, Matteucci G, Meyers T, Miglietta F, Ourcival J M, Pumpanen J, Rambal S, Rotenberg E, Sanz M, Tenhunen J, Seufert G, Vaccari F, Vesala T, Yakir D, Valentini R. On the separation of net ecosystem exchange into assimilation and ecosystem respiration: review and improved algorithm. *Global Change Biology*, 2005, 11(9): 1424-1439.
- [4] Desai A R, Richardson A D, Moffat A M, Kattge J, Hollinger D Y, Barr A, Falge E, Noormets A, Papale D, Reichstein M, Stauch V. Cross-site evaluation of eddy covariance GPP and RE decomposition techniques. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2008, 148(6/7): 821-838.
- [5] Bowling D R, Tans P P, Monson R K. Partitioning net ecosystem carbon exchange with isotopic fluxes of CO_2 . *Global Change Biology*, 2001, 7(2): 127-145.
- [6] Zobitz J M, Burns S P, Ogee J, Reichstein M, Bowling R. Partitioning net ecosystem exchange of CO_2 : a comparison of a Bayesian/isotope approach to environmental regression methods. *Journal of Geophysical Research*, 2007, 112: G03013, doi: 10.1029/2006JG000282.
- [7] Griffis T J, Black T A, Gaumont-Guay D, Drewitt G B, Nesic Z, Barr A G, Morgenstern K, Kljun N. Seasonal variation and partitioning of ecosystem respiration in a southern boreal aspen forest. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2004, 125(3/4): 207-223.
- [8] Law B E, Falge E, Gu L, Baldocchi D D, Bakwin P, Berbigier P, Davis K, Dolman A J, Falk M, Fuentes J D, Goldstein A, Granier A, Grelle A, Hollinger D Y, Janssens I A, Jarvis P, Jensen N O, Katul G, Mahli Y, Matteucci G, Meyers T, Monson R, Munger W, Oechel W, Olson R, Pilegaard K, Paw K T, Thorgeirsson H, Valentini R, Verma S, Vesala T, Wilson K, Wofsy S. Environmental controls over carbon dioxide and water vapor exchange of terrestrial vegetation. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2002, 113(1/4): 97-120.
- [9] Unger S, Maguas C, Pereira J S, Aires L M, David T S, Werner C. Partition carbon fluxes in a Mediterranean oak forest to disentangle change in ecosystem sink strength during drought. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2009, 149(6/7): 949-961.
- [10] Falge E, Baldocchi D, Olson R, Anthoni P, Aubinet M, Bernhofer C, Burba G, Ceulemans R, Clement R, Dolman H, Granier A, Gross P, Grünwald T, Hollinger D, Jensen N O, Katul G, Keronen P, Kowalski A, Lai C T, Law B E, Meyers T, Moncrieff H, Moors E, Munger J W, Pilegaard K, Rannik U, Rebmann C, Suyker A, Tenhunen J, Tu K, Verma S, Vesala T, Wilson K, Wofsy S. Gap filling strategies for defensible

- annual sums of net ecosystem exchange. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2001, 107(1): 43-69.
- [11] Moffat A M, Papale D, Reichstein M, Hollinger D Y, Richardson A D, Barr A G, Beckstein C, Braswell B H, Churkina G, Desai A R, Falge E, Gove J H, Heimann M, Hui D F, Jarvis A J, Kattge J, Noormets A, Stauch, V J. Comprehensive comparison of gap-filling techniques for eddy covariance net carbon fluxes. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2007, 147(3/4): 209-232.
- [12] Fu Y L, Yu G R, Sun X M, Li Y N, Wen X F, Zhang L M, Li Z Q, Zhao L, Hao Y B. Depression of net ecosystem CO₂ exchange in semi-arid *Leymus chinensis* steppe and alpine shrub. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2006, 137(3/4): 234-244.
- [13] Suyker A E, Verma S B. Year-round observations of the net ecosystem exchange of carbon dioxide in a native tallgrass prairie. *Global Change Biology*, 2001, 7(3): 279-289.
- [14] Griffis T J, Black T A, Morgenstern K, Barr A G, Nesic Z, Drewitt G B, Gaumont-Guay D, McCaughey J H. Ecophysiological controls on the carbon balances of three southern boreal forests. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2003, 117(1/2): 53-71.
- [15] Gilmanov T G, Soussana J E, Aires L, Allard V, Ammann C, Balzarolo M, Barcza Z, Bernhofer C, Campbell C L, Cernusca A, Cescatti A, Clifton-Brown J, Dirks B O M, Dore S, Eugster W, Fuhrer J, Gimeno C, Gruenwald T, Haszpra L, Hensen A, Ibrom A, Jacobs AFG, Jones MB, Lanigan G, Laurila T, Lohila A, Manca G, Marcolla B, Nagy Z, Pilegaard K, Pinter K, Pio C, Raschi A, Rogiers N, Sanz M J, Stefani P, Sutton M, Tuba Z, Valentini R, Williams M L, Wohlfahrt G. Partitioning European grassland net ecosystem CO₂ exchange into gross primary productivity and ecosystem respiration using light response function analysis. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 2007, 121(1/2): 93-120.
- [16] Janssens I A, Lankreijer H, Matteucci G, Kowalski A S, Buchmann N, Epron D, Pilegaard K, Kutsch W, Longdoz B, Grunwald T, Montagnani L, Dore S, Rebmann C, Moors E J, Grelle A, Rannik U, Morgenstern K, Oltchev S, Clement R, Gudmundsson J, Minerbi S, Berbigier P, Ibrom A, Moncrieff J, Aubinet M, Bernhofer C, Jensen N O, Vesala T, Granier A, Schulze E D, Lindroth A, Dolman A J, Jarvis P G, Ceulemans R, Valentini R. Productivity overshadows temperature in determining soil and ecosystem respiration across European forests. *Global Change Biology*, 2001, 7(3): 269-278.
- [17] Sharp R E, Matthews M A, Boyer J S. Kok Effect and the quantum yield of photosynthesis-light partially inhibits dark respiration. *Plant Physiology*, 1984, 75(1): 95-101.
- [18] Tjoelker M G, Oleksyn J, Reich P B. Modelling respiration of vegetation: evidence for a general temperature-dependent Q_{10} . *Global Change Biology*, 2001, 7(2): 223-230.
- [19] 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, 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.
- [20] Falge E, Baldocchi D, Tenhunen J, Aubinet M, Bakwin P, Berbigier P, Bernhofer C, Burba G, Clement R, Davis K J, Elbers J A, Goldstein A H, Grelle A, Granier A, Guomundsson J, Hollinger D, Kowalski A S, Katul G, Law B E, Malhi Y, Meyers T, Monson R K, Munger J W, Oechel W, Paw K T, Pilegaard K, Rannik U, Rebmann C, Suyker A, Valentini R, Wilson K, Wofsy S. Seasonality of ecosystem respiration and gross primary production as derived from FLUXNET measurements. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2002, 113(1/4): 53-74.
- [21] Stoy P C, Katul G G, Siqueira M B S, Juang J Y, Novick K A, Uebelherr J M, Oren R. An evaluation of models for partitioning eddy covariance-measured net ecosystem exchange into photosynthesis and respiration. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2006, 141(1): 2-18.
- [22] Yu G R, Wen X F, Sun X M, Tanner B D, Lee X H, Chen J Y. Overview of China FLUX and evaluation of its eddy covariance measurement. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2006, 137(3/4): 125-137.
- [23] Liu Y F, Yu G R, Wen X F, Wang Y H, 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*, 2006, 36(Supp I): 91-102.
- [24] Mi N, Yu G E, Wen X F, Sun X M, Wang S S. Responses of subtropical conifer plantation to future climate change: a simulation study. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(9): 1877-1883.
- [25] Zhu Z L, Sun X M, Wen X F, Zhou Y L, Tian J, Yuan G F. Study on the processing method of nighttime CO₂ eddy covariance flux data in ChinaFLUX. *Science in China, Series D*, 2006, 36(S1): 34-44.
- [26] Sun X M, Wen X F, Yu G R, Liu Y F, Liu Q J. Seasonal drought effects on carbon sequestration of a mid-subtropical planted forest of southern China. *Science in China, Series D*, 2006, 36(Supp I): 103-110.
- [27] Baldocchi D, Falge E, Wilson K. A spectral analysis of biosphere-atmosphere traces gas flux densities and meteorological variables across hour to multi-year time scales. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2001, 107(1): 1-27.
- [28] Zhang L M. Ecophysiological controls on seasonal variations of ecosystem carbon exchange of typical Ecosystems along NSTEC [D]. Beijing: 2006.
- [29] Goulden M L, Munger J W, 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(24): 28987-28996.

- [30] Aubinet M, Chermance B, Vabderhaute M, Longdoz B, Yernaux M, Laitat E. Long term carbon dioxide exchange above a mixed forest in the Belgian Ardennes. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2001, 108(4): 293-315.
- [31] Law B E, Falge E, Gu L H, Baldocchi D D, Bakwin P, Berbigier P, Davis K, Dolman A J, Falk M, Fuentes J D, Goldstein A, Granier A, Grelle A, Hollinger D, Janssens I A, Jarvis P, Jensen N O, Katul G, Mahli Y, Matteucci G, Meyers T, Monson R, Munger W, Oechel W, Olson R, Pilegaard K, Paw K T, Thorgeirsson H, Valentini R, Verma S, Vesala T, Wilson K, Wofsy S. Environmental controls over carbon dioxide and water vapor exchange of terrestrial vegetation. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2002, 113(1/4): 97-120.
- [32] 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(1): 357-369.
- [33] Brooks A, Farquhar G D. Effect of Temperature on the CO_2/O_2 specificity of ribulose-1, 5-bisphosphate carboxylase/oxygenase and the rate of respiration in the light. *Planta*, 1985, 165(3): 397-406.
- [34] Zhang W J, Wang H M, Yang F T, Yi Y H, Wen X F, Sun X M, Yu G R, Wang Y D, Ning J C. Underestimated effects of low temperature during early growing season on carbon sequestration of a subtropical coniferous plantation. *Biogeosciences*, 2011, 8(6): 1667-1678.
- [35] Liu Y F, Song X, Sun X M, Wen X F, Chen Y R. CO_2 flux seasonal variations of coniferous forest in Qianyanzhou and its affection on environmental factors. *Science in China, Series D: Earth Sciences*, 2004, 34(Supp II): 109-117.
- [36] Yu G R, Wen X F, Li Q K, Zhang L M, Ren C Y, Liu Y F, Guan D X. Seasonal patterns and environmental control of ecosystem respiration in subtropical and temperate forests in China. 2004, *Science in China, Series D: Earth Sciences*, 2004, 34(Supp II): 84-94.
- [37] Gu X F, Yu G R, Wen X F, Tao B, Li K R, Liu Y F. Drought effects on carbon exchange in a subtropical coniferous plantation in China. *Journal of Plant Ecology*, 2008, 32(5): 1041-1051.

参考文献:

- [23] 刘允芬, 于贵瑞, 温学发, 王迎红, 宋霞, 李菊, 孙晓敏, 杨凤亭, 陈永瑞, 刘琪璟. 千烟洲中亚热带人工林生态系统 CO_2 通量的季节变异特征. *中国科学(D 辑)*, 2006, 36(增刊 I): 91-102.
- [24] 米娜, 于贵瑞, 温学发, 孙晓敏, 王树森. 中亚热带人工针叶林对未来气候变化的响应. *应用生态学报*, 2008, 19(9): 1877-1883.
- [25] 朱治林, 孙晓敏, 温学发, 周艳莲, 田静, 袁国富. 中国通量网 (ChinaFLUX) 夜间 CO_2 涡度相关通量数据处理方法研究. *中国科学(D 辑)*, 2006, 36(增刊 I): 34-44.
- [26] 孙晓敏, 温学发, 于贵瑞. 中亚热带季节性干旱对千烟洲人工林生态系统碳吸收的影响. *中国科学(D 辑)*, 2006, 36(增刊 2): 103-110.
- [28] 张雷明. 中国东部南北森林样带典型生态系统碳收支特征及其生理生态学机制 [D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2006.
- [35] 刘允芬, 宋霞, 孙晓敏, 温学发, 陈永瑞. 千烟洲人工针叶林 CO_2 不同高度碳通量季节变化及环境因子的影响. *中国科学(D 辑)*, 2004, 34(增刊 2): 109-117.
- [36] 于贵瑞, 温学发, 李庆康, 张雷明, 任传友, 刘允芬, 关德新. 中国亚热带和温带典型森林生态系统呼吸的季节模式及环境响应特征. *中国科学 D 辑*, 2004, 34(增刊 2): 84-94.
- [37] 顾峰雪, 于贵瑞, 温学发, 陶波, 李克让, 刘允芬. 干旱对亚热带人工针叶林碳交换的影响. *植物生态学报*, 2008, 32(5): 1041-1051.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 33, No. 17 Sep. ,2013 (Semimonthly)

CONTENTS

Frontiers and Comprehensive Review

- The overview and prospect of chemical composition of plant cuticular wax ZENG Qiong, LIU Dechun, LIU Yong (5133)
- Research progresses in carbon budget and carbon cycle of the coastal salt marshes in China
..... CAO Lei, SONG Jinming, LI Xuegang, et al (5141)

Autecology & Fundamentals

- Effects of straw interlayer on soil water and salt movement and sunflower photosynthetic characteristics in saline-alkali soils
..... ZHAO Yonggan, PANG Huancheng, LI Yuyi, et al (5153)
- Adaptations of dimorphic seeds and seedlings of *Suaeda salsa* to saline environments
..... LIU Yan, ZHOU Jiachao, ZHANG Xiaodong, et al (5162)
- Responses of root morphology of peanut varieties differing in drought tolerance to water-deficient stress
..... DING Hong, ZHANG Zhimeng, DAI Liangxiang, et al (5169)
- The relationship between physiological indexes of apple cultivars and resistance to *Eriosoma lanigerum* in summer
..... WANG Xicun, ZHOU Hongxu, YU Yi, et al (5177)
- Physiological responses of *Salicornia bigelovii* to salt stress during the flowering stage
..... LIU Weicheng, ZHENG Chunfang, CHEN Chen, et al (5184)
- Biological characteristics and cultivation of fruit body of wild medicinal mushroom *Perenniporia fraxinea*
..... LU Tie, BAU Tolgor (5194)
- The study of characteristics of soil microbial communities at high severity burned forest sites for the Great Xingan Mountains: an
example of slope and aspect BAI Aiqin, FU Bojie, QU Laiye, et al (5201)
- Effect of different fertilizer combinations and straw return on microbial biomass and nitrogen-fixing bacteria community in a paddy
soil LIU Xiaoqian, TU Shihua, SUN Xifa, et al (5210)
- Structural characters and nutrient contents of leaves as well as nitrogen distribution among different organs of big-headed wheat
..... WANG Lifang, WANG Dexuan, SHANGGUAN Zhouping (5219)
- Effects of EP-1 on spatial memory and anxiety in *Mus musculus* WANG Xiaojia, QIN Tingting, HU Xia, et al (5228)

Population, Community and Ecosystem

- Gap characteristics in the mixed broad-leaved Korean pine forest in Xiaoxing'an Mountains
..... LIU Shaochong, WANG Jinghua, DUAN Wenbiao, et al (5234)
- Soil nitrogen and phosphorus stoichiometry in a degradation series of *Kobresia humilis* meadows in the Tibetan Plateau
..... LIN Li, LI Yikang, ZHANG Fawei, DU Yangong, et al (5245)
- An analysis of carbon flux partition differences of a mid-subtropical planted coniferous forest in southeastern China
..... HUANG Kun, WANG Shaoqiang, WANG Huimin, et al (5252)
- The niche of annual mixed-seeding meadow in response to density in alpine region of the Qilian Mountain, China
..... ZHAO Chengzhang, ZHANG Jing, SHENG Yaping (5266)
- Functional feeding groups of macrozoobenthos from coastal water off Rushan PENG Songyao, LI Xinzhen (5274)

Landscape, Regional and Global Ecology

- Effects of selective cutting on vegetation carbon storage of boreal *Larix gmelinii*-*Carex schmidtii* forested wetlands in Daxing'anling,
China MU Changcheng, LU Huicui, BAO Xu, et al (5286)
- CO₂ flux in the upland field with corn-rape seed rotation in the karst area of southwest China
..... FANG Bin, LI Xinqing, CHENG Jianzhong, et al (5299)
- Monitoring spatial variability of soil salinity in dry and wet seasons in the North Tarim Basin using remote sensing and electromagn-
etic induction instruments YAO Yuan, DING Jianli, LEI Lei, et al (5308)
- Methane and nitrous oxide fluxes in temperate secondary forest and larch plantation in Northeastern China
..... SUN Hailong, ZHANG Yandong, WU Shiyi (5320)
- Butterfly diversity and vertical distribution in eastern Tianshan Mountain in Xinjiang
..... ZHANG Xin, HU Hongying, LÜ Zhaozhi (5329)

- Dynamics of aerodynamic parameters over a rainfed maize agroecosystem and their relationships with controlling factors CAI Fu, ZHOU Guangsheng, MING Huiqing, et al (5339)
- The response process to extreme climate events of the household compound system in the northern slope of Tianshan Mountain LI Xiliang, HOU Xiangyang, DING Yong, et al (5353)
- Analysis on spatial-temporal heterogeneities of landscape fragmentation in urban fringe area; a case study in Shunyi district of Beijing LI Can, ZHANG Fengrong, ZHU Taifeng, et al (5363)
- Resource and Industrial Ecology**
- CPUE Standardization of *Illex argentinus* for Chinese Mainland squid-jigging fishery based on generalized linear Bayesian models LU Huajie, CHEN Xinjun, CAO Jie (5375)
- Spatial-temporal differentiation of water quality in Gufu River of Three Gorges Reservoir RAN Guihua, GE Jiwen, MIAO Wenjie, et al (5385)
- Urban, Rural and Social Ecology**
- Comparison environmental impact of the peasant household in han, zang and hui nationality region; case of zhangye, Gannan and Linxia in Gansu Province ZHAO Xueyan, MAO Xiaowen (5397)
- Research Notes**
- The seasonal variation and community structure of zooplankton in China sea DU Mingmin, LIU Zhensheng, WANG Chunsheng, et al (5407)
- Immunotoxicity of marine pollutants on the clam *Ruditapes philippinarum* DING Jianfeng, YAN Xiwu, ZHAO Liqiang, et al (5419)
- Influence of submerged macrophytes on phosphorus transference between sediment and overlying water in decomposition period WANG Lizhi, WANG Guoxiang (5426)
- Distribution patterns of alien herbs in the Yiluo River basin GUO Yili, DING Shengyan, SU Si, et al (5438)

《生态学报》2013 年征订启事

《生态学报》是由中国科学技术协会主管,中国生态学学会、中国科学院生态环境研究中心主办的生态学高级专业学术期刊,创刊于 1981 年,报道生态学领域前沿理论和原始创新性研究成果。坚持“百花齐放,百家争鸣”的方针,依靠和团结广大生态学科工作者,探索生态学奥秘,为生态学基础理论研究搭建交流平台,促进生态学研究深入发展,为我国培养和造就生态学科人才和知识创新服务、为国民经济建设和发展服务。

《生态学报》主要报道生态学及各分支学科的重要基础理论和应用研究的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;新书评价和学术、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

本期责任副主编 张利权

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)

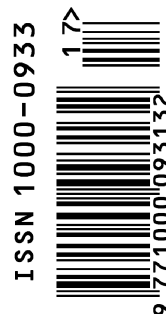
第 33 卷 第 17 期 (2013 年 9 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 33 No. 17 (September, 2013)

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	王如松	Editor-in-chief	WANG Rusong
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: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 90.00 元