

# 长白山阔叶红松林生态系统光能利用率的动态变化及其主控因子

张雷明<sup>1\*</sup> 曹沛雨<sup>1,2</sup> 朱亚平<sup>3</sup> 李庆康<sup>1</sup> 张军辉<sup>4</sup> 王晓凌<sup>3</sup> 戴冠华<sup>4</sup> 李金功<sup>5</sup>

<sup>1</sup>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; <sup>2</sup>中国科学院大学, 北京 100049; <sup>3</sup>河南科技大学农学院, 河南洛阳 471003; <sup>4</sup>中国科学院沈阳应用生态研究所, 沈阳 110016; <sup>5</sup>长白山自然保护管理中心, 吉林延边 133613

**摘要** 生态系统光能利用率(*LUE*)反映了植被通过光合作用利用光能吸收和固定大气中CO<sub>2</sub>的能力, 是表征生态系统生产力的重要指标。选取长白山温带阔叶红松(*Pinus koraiensis*)林生态系统为研究对象, 利用涡度相关通量观测数据, 采用直角双曲线方程获取了生态系统光合作用的表观量子效率( $\epsilon$ ); 基于总生态系统初级生产力(*GEP*)与下垫面入射光合有效辐射(*Q*)的比值得到生态光能利用率(*LUE<sub>eco</sub>*)。研究表明: 在季节尺度上,  $\epsilon$ 与*LUE<sub>eco</sub>*均表现出显著的单峰变化特征, 并主要受到土壤温度和归一化植被指数(*NDVI*)的调控, 同时,  $\epsilon$ 和*LUE<sub>eco</sub>*都受到*GEP*的显著影响, 而与*Q*的相关性较弱或无显著相关关系, 但散射辐射的增加在一定程度上有助于提高生态系统的*LUE*。 $\epsilon$ 与*LUE<sub>eco</sub>*存在显著的线性正相关关系, 但 $\epsilon$ 明显高于*LUE<sub>eco</sub>*。2003–2005年,  $\epsilon$ 与*LUE<sub>eco</sub>*每年最大值的平均值分别为(0.087 ± 0.003)和(0.040 ± 0.002) μmol CO<sub>2</sub>·μmol photon<sup>-1</sup>, 年际间变异度分别为4.17%和4.25%, 而不同年份之间最大差异均达到8%或8%以上, 从而对模型模拟结果产生明显影响。因此, 在基于光能利用率模型的模拟研究中, 最大*LUE*的年际变异需要在参数反演和优化中给予重要考虑。

**关键词** 生态系统碳交换, 光能利用率, 最大光能利用率, 年际变异, 植被指数

**引用格式:** 张雷明, 曹沛雨, 朱亚平, 李庆康, 张军辉, 王晓凌, 戴冠华, 李金功 (2015). 长白山阔叶红松林生态系统光能利用率的动态变化及其主控因子. 植物生态学报, 39, 1156–1165. doi: 10.17521/cjpe.2015.0112

## Dynamics and regulations of ecosystem light use efficiency in a broad-leaved Korean pine mixed forest, Changbai Mountain

ZHANG Lei-Ming<sup>1\*</sup>, CAO Pei-Yu<sup>1,2</sup>, ZHU Ya-Ping<sup>3</sup>, LI Qing-Kang<sup>1</sup>, ZHANG Jun-Hui<sup>4</sup>, WANG Xiao-Ling<sup>3</sup>, DAI Guan-Hua<sup>4</sup>, and LI Jin-Gong<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of Ecosystem Network Observation and Modeling, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; <sup>2</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; <sup>3</sup>College of Agricultural, Henan University of Science and Technology, Luoyang, Henan 471003, China; <sup>4</sup>Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China; and <sup>5</sup>The Administration Center of Changbai Mountain National Nature Reserve, Yanbian, Jilin 133613, China

### Abstract

**Aims** Ecosystem light use efficiency (*LUE*) reflects the ability of CO<sub>2</sub> uptake and light utilization via photosynthesis, which is a key parameter in ecosystem models to evaluate ecosystem productivity. The objectives of this study were to: (1) compare the differences of *LUE* derived from different methods; (2) elucidate the seasonal dynamics of *LUE* and its regulatory factors; and (3) evaluate the maximum *LUE* (*LUE<sub>max</sub>*) and its variability based on eddy-covariance (EC) flux.

**Methods** Using the flux data from an EC tower during 2003–2005 at a broad-leaved Korean pine (*Pinus koraiensis*) mixed forest, Changbai Mountain, two types of *LUE* indicators were generated from: 1) the apparent quantum yield ( $\epsilon$ ) estimated with rectangular hyperbolic curve, and 2) the ecological light use efficiency (*LUE<sub>eco</sub>*) calculated as the ratio between gross ecosystem productivity (*GEP*) and photosynthetically-active radiation (*Q*).

**Important findings** The seasonal variation of  $\epsilon$  and *LUE<sub>eco</sub>* appeared a unimodal pattern within a year, with the variations significantly dominated by soil surface temperature and Normalized Difference Vegetation Index (*NDVI*). A positive correlation between *GEP* and *LUE* was found for both  $\epsilon$  and *LUE<sub>eco</sub>*, with the effect of *Q* on *LUE* relatively weak. The increase in diffusion radiation appeared favorable for enhanced *LUE*. Generally, there was a significant positive relationship between  $\epsilon$  and *LUE<sub>eco</sub>*, while  $\epsilon$  was higher than *LUE<sub>eco</sub>*, especially during

the mid-season. The annual maximum value of  $\varepsilon$  and  $LUE_{eco}$  was  $(0.087 \pm 0.003)$  and  $(0.040 \pm 0.002) \mu\text{mol CO}_2 \cdot \mu\text{mol photon}^{-1}$  over the three years, respectively. The interannual variability of  $LUE_{max}$  for  $\varepsilon$  and  $LUE_{eco}$  was 4.17% and 4.25%, respectively, with a maximum difference of >8%, likely resulted from considerable uncertainty in model simulations. Our results indicated that the inversion and optimization of maximum  $LUE$  should be taken seriously in the application of  $LUE$  models.

**Key words** ecosystem carbon exchange, light use efficiency, ecosystem maximum light use efficiency, interannual variability, vegetation index

**Citation:** Zhang LM, Cao PY, Zhu YP, Li QK, Zhang JH, Wang XL, Dai GH, Li JG (2015). Dynamics and regulations of ecosystem light use efficiency in a broad-leaved Korean pine mixed forest, Changbai Mountain. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 39, 1156–1165. doi: 10.17521/cjpe.2015.0112

生态系统光能利用率(light use efficiency,  $LUE$ )反映了植被通过光合作用利用光能吸收和固定大气中 $\text{CO}_2$ 的能力,表征了植被通过光合作用将所截获、吸收的能量转化为有机物的效率,是表征生态系统生产力的重要指标(Ruimy *et al.*, 1995)。由于 $LUE$ 直接将辐射条件和生态系统生产力水平联系起来,为直接利用辐射估算生态系统生产力提供了可能的途径(Jenkins *et al.*, 2007; Yuan *et al.*, 2007; Garbulsky *et al.*, 2010),因此, $LUE$ 成为遥感参数模型中的关键参数,并在评价生态系统和区域尺度植被生产力及其对全球变化的响应中得到广泛应用(Yuan *et al.*, 2014)。

$LUE$ 作为生态系统光能利用率模型中的核心参数,其不确定性是影响模型估算精度的重要因素(Turner *et al.*, 2003; Yuan *et al.*, 2007; Garbulsky *et al.*, 2010)。在光能利用率模型中, $LUE$ 一般表达为最大光能利用率( $LUE_{max}$ )与温度、水分和植被要素的约束性函数,而如何合理确定 $LUE_{max}$ 是光能利用率模型构建和优化过程需要考虑的首要问题(Xiao *et al.*, 2004)。在MODIS的生态系统生产力数据产品(MOD17A2/A3)中,将陆地生态系统划分为12类,每类生态系统分别设定了不同的 $LUE_{max}$ 。虽然这种方式在区域或全球尺度生态系统生产力评估中得到了广泛应用,但是在特定生态系统上往往需要根据实际观测数据进行调整(Xiao *et al.*, 2004; Yuan *et al.*, 2014)。

$LUE$ 的测定方法主要包括传统的生物量收获法(Monteith, 1977)、模型反演法(Wang *et al.*, 2010; Chen *et al.*, 2011)和通量测定法(Ruimy *et al.*, 1995)。虽然生物量收获法理论可靠、方法可行,但该方法工作量大、具有一定的破坏性,并且仅能获得年以上时间尺度的 $LUE$ 数据,无法提供更为精细的 $LUE$

变化信息。模型反演法是通过实测生物量或碳通量数据优化模型,然后利用模型反演 $LUE$ ,该方法获取的 $LUE$ 与模型结构有关,不同模型之间的反演结果可能存在明显差异(张强等, 2014)。在生态系统通量观测研究中,作为目前唯一直接测定植被冠层与大气之间 $\text{CO}_2$ 通量的方法,涡度相关技术为研究生态系统尺度植被的光合特征参数提供了重要的途径,为在生态系统尺度上揭示 $LUE$ 的时空变化特征提供了重要的基础数据,也为估算不同类型生态系统 $LUE_{max}$ 提供了有效途径(Garbulsky *et al.*, 2010; Gilmanov *et al.*, 2010; Wang *et al.*, 2010; Chen *et al.*, 2011; Barr *et al.*, 2013)。

目前,利用通量观测数据开展 $LUE$ 的研究主要集中在两个方面:一是利用通量观测获取的总生态系统初级生产力与总辐射(或植被吸收的辐射)的比例直接分析 $LUE$ 的时空变化(Turner *et al.*, 2003; Schwalm *et al.*, 2006; Chen *et al.*, 2009; Polley *et al.*, 2011);二是基于光响应方程进行拟合,以获取的表观量子效率( $\varepsilon$ )表征 $LUE$ 的动态变化(Garbulsky *et al.*, 2010; Gilmanov *et al.*, 2010; Clement *et al.*, 2012; Li *et al.*, 2014),特别是将植被生长旺季的 $\varepsilon$ 作为模型中的 $LUE_{max}$ (Xiao *et al.*, 2004; Wu *et al.*, 2009; Wang *et al.*, 2010; Yuan *et al.*, 2014)。但在实际应用中,一方面对不同提取方式获取的 $LUE$ 及其之间的关系缺乏明确认识,导致不同研究结果之间难以相互比较;另一方面,大部分的研究往往选择一个生长旺季的通量观测数据进行估算,而忽略了生态系统通量的年际变异,从而可能对 $LUE_{max}$ 的准确评价产生影响。

长白山阔叶红松林是亚洲东部地带性山地森林植被,也是温带针阔混交林的典型代表(郝占庆等, 2008),与全球同纬度地区的森林相比,具有建群种独特、物种多样性丰富的特点。另一方面,基于通

量观测结果的研究表明, 长白山温带阔叶红松林作为老龄林仍然具备较强的碳吸收能力(Guan *et al.*, 2006; Zhang *et al.*, 2006)。本研究拟选择我国长白山温带阔叶红松林为研究对象, 基于2003–2005年的通量观测数据, 开展生态系统光能利用率的季节和年际变化研究, 主要的研究目的是: (1)评价不同方法获取的 $LUE$ 的差异及其相互关系; (2)揭示 $LUE$ 的动态变化特征及其影响因子; (3)利用多年观测资料, 揭示 $LUE_{max}$ 的变异特征, 以期为深入理解该生态系统光能利用特征的动态变化和合理确定生态系统 $LUE_{max}$ 提供科学依据。

## 1 材料和方法

### 1.1 研究站点

长白山位于中国东北地区吉林省东南部, 这一地区也是我国重要的森林分布区域和自然生态系统保存相对最为完整的一个地区。本文作者以长白山阔叶红松林生态系统为研究对象, 该生态系统的主要建群树种包括红松(*Pinus koraiensis*)、蒙古栎(*Quercus mongolica*)、色木槭(*Acer mono*)、水曲柳(*Fraxinus mandshurica*)和紫椴(*Tilia amurensis*)等。冠层最大叶面积指数为6.0。土壤类型为山地黑棕林土。受温带大陆性季风气候影响, 年平均气温3.6℃, 年降水量713 mm, 降水和气温均在夏季(6–8月)达到最高, 呈现出明显的水热同期特征。全年日照时数为2 271–2 503 h, 无霜期109–141天。

### 1.2 数据获取

#### 1.2.1 通量和常规气象观测数据

作为中国陆地生态系统通量观测网络(China-FLUX)的首批观测站点, 从2002年开始, 基于涡度相关技术对长白山阔叶红松林生态系统的碳水通量开展了长期、连续的观测。通量观测塔位于阔叶红松林的1号样地内, 地理坐标为42.40° N, 128.10° E, 海拔738 m。基于2013年10月ChinaFLUX发布的共享数据集(<http://159.226.111.42/pingtai/-LoginRe/opendata.jsp>), 获取了2003–2005年长白山阔叶红松林 $CO_2$ 通量和常规气象要素的观测数据。

采用的开路涡度相关系统包括 $CO_2/H_2O$ 分析仪(Model LI-7500, LI-COR, Lincoln, USA), 三维超声风速仪(Model CSAT3, Campbell Scientific, Logan, USA), 测定频率均为10 Hz, 利用数据采集器(Model CR5000, Campbell Scientific, Logan, USA)自

动采集和储存测定数据, 通量观测高度为41.8 m。

常规气象要素观测系统主要包括空气温湿度(Model HMP45C, Vaisala, Helsinki, Finland), 光合有效辐射(Model LI190SB, LI-COR, Lincoln, USA), 降水量(Model 52203, RM Young, Michigan, USA), 土壤温度(Model 107, Campbell Scientific, Logan, USA)和土壤湿度(Model CS616, Campbell Scientific, Logan, USA)。其中, 土壤温度测量深度分别为5 cm、10 cm、20 cm、50 cm和100 cm。土壤含水量测量深度分别为5 cm、20 cm和50 cm。

#### 1.2.2 遥感植被指数数据

从Oak Ridge National Laboratory Distributed Active Archive Center (ORNLDAAC, <http://www.daac.ornl.gov>)下载获取中分辨率成像光谱仪(MODIS)的MOD13Q1植被指数数据产品中的归一化植被指数( $NDVI$ )数据, 时间步长为16天, 空间分辨率为250 m。每个图层一共包含7 km × 7 km个栅格(784个像元)。其中图层中心点与研究站点的通量塔位置对应。每个像元 $NDVI$ 由16天中 $NDVI$ 最大值得到。

### 1.3 数据处理

#### 1.3.1 通量数据处理

涡度相关技术是通过测定大气中湍流运动所产生的风速脉动和物理量脉动直接求算植被与大气间净 $CO_2$ 、水汽和能量通量的方法(Baldocchi, 2014)。基于ChinaFLUX共享数据平台获取了长白山生态系统2003–2005年的通量观测数据, 采用ChinaFLUX技术体系对观测数据进行了质量控制, 包括异常值剔除、时滞校正、平面拟合、高频和低频通量损失修正、超声虚温校正、水热脉动(WPL)校正等, 并考虑了冠层中 $CO_2$ 的储存效应(Yu *et al.*, 2006, 2008; Zhang *et al.*, 2006)。

在获取30 min的 $CO_2$ 通量数据后, 为了减少噪音数据的干扰, 进行了以下几个方面的数据筛选: (1)剔除同期有降水的通量数据; (2)设通量数据的阈值为 $[-3, 3]$ , 以剔除明显的异常数据; (3)根据夜间数据和摩擦风速的关系确定了各年份的摩擦风速阈值(Reichstein *et al.*, 2005), 并剔除了低于该阈值的夜间通量数据; (4)利用数据前后差值的比较剔除了异常数据(Papale *et al.*, 2006)。获得了经过质量控制后的净生态系统生产力( $NEP$ )的观测数据。

由于数据的质量控制和异常值剔除导致数据的

缺失, 长白山阔叶红松林白天和夜间的有效数据量平均分别为83%和34%。为了获得连续的通量数据, 采用非线性回归法进行缺失数据的插补(Falge *et al.*, 2001)。对于短时间(< 2 h)的缺失数据, 采用线性内插; 对于生长季内较长时间的白天缺失数据, 采用Michaelis-Menten方程进行插补。时间窗口为10天。夜间缺失数据利用CO<sub>2</sub>通量和温度的Lloyd & Taylor方程进行插补, 具体插补方法参见文献(Zhang *et al.*, 2006; Yu *et al.*, 2008)。

基于涡度相关技术观测获得的NEP是总生态系统生产力(GEP)和生态系统呼吸(R<sub>eco</sub>)之间的差值。为了估算GEP和R<sub>eco</sub>, 在数据插补完成后, 首先基于前文所构建的CO<sub>2</sub>通量和温度的Lloyd & Taylor方程, 利用白天观测的温度数据计算得到白天的R<sub>eco</sub>, 并结合夜间NEP数据获得全天完整的R<sub>eco</sub>。在此基础上, 采用下式计算得到GEP:

$$GEP = NEP + R_{eco} \quad (1)$$

### 1.3.2 遥感植被指数数据处理

采用最大值合成法(MVC), 以减少云层覆盖和大气微粒对地表光谱测定的影响。由于在长白山阔叶红松林北部有城镇的干扰, 因此以通量塔为中心点, 周围750 m × 1 km (12像素)栅格数据的平均值作为研究区域的平均NDVI, 最后参照Xiao等(2002)的方法对NDVI进行去噪处理。

### 1.4 光能利用率的计算

根据定义和计算方法的不同, 基于通量观测数据提取的光能利用率有多种表达方式, 但大致可以分为两类: 一是基于光响应方程估算得到的光能利用率; 二是由生态系统生产力和辐射条件计算得到的光能利用率。实际上, 前者为生态系统光合作用的表观量子效率(ε), 反映了在特定条件下生态系统光合作用过程中潜在的光能利用能力, 也往往被视为潜在光能利用率, 或者生理光能利用率(Garbulsky *et al.*, 2010; Gilmanov *et al.*, 2010; Clement *et al.*, 2012); 后者反映了生态系统光合作用的实际光能吸收和利用能力, 一般被称为生态光能利用率(Turner *et al.*, 2003; Gilmanov *et al.*, 2010; Polley *et al.*, 2011)。二者都被作为光能利用率而出现在以往的相关研究中。考虑到后续论述的表达, 本文中也统称其为光能利用率(LUE), 但根据不同的计算方法将两类LUE予以标注说明。

#### 1.4.1 生态系统表观量子效率(ε)

基于白天的CO<sub>2</sub>通量观测数据, 采用非直角双曲线方程(公式(2))提取了生态系统的表观量子效率:

$$NEP = \frac{\varepsilon P_{\max} Q}{P_{\max} + \varepsilon Q} - R_d \quad (2)$$

式中, NEP为净生态系统生产力, ε为生态系统表观量子效率(μmol CO<sub>2</sub>·μmol photon<sup>-1</sup>), Q为光合有效辐射(μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>), P<sub>max</sub>为光强饱和时的最大CO<sub>2</sub>吸收强度(μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>), R<sub>d</sub>为平均暗呼吸速率(μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>)。

以1天为时间窗口利用公式(2)拟合得到光响应方程参数, 并且设定了参数的变异范围: 0 < ε < 0.15, 0 < P<sub>max</sub> < 120 μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>和0 < R<sub>d</sub> < 30 μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>, 同时, 剔除了当拟合参数的相对标准差(标准差/拟合值)大于1.96和显著性低于0.05水平的参数值。为减少噪声数据对研究结果的影响, 对已获取的日尺度ε按8天间隔进行平均。

#### 1.4.2 生态光能利用率(LUE<sub>eco</sub>)

将基于通量观测获取的GEP除以冠层上方观测的入射光合有效辐射(Q)计算得到LUE<sub>eco</sub>:

$$LUE_{eco} = GEP/Q \quad (3)$$

### 1.5 晴空指数的计算

为了探讨散射辐射对LUE的影响, 本文采用了Reindl等(1990)建立的经验模型对研究时段内的散射辐射进行了估算。

$$\begin{aligned} k_d &= 1.02 - 0.254k_t + 0.0123\sin\beta & k_t \leq 0.3 \\ k_d &= 1.4 - 1.749k_t + 0.177\sin\beta & 0.3 < k_t < 0.78 \\ k_d &= 0.486k_t - 0.182\sin\beta & k_t \geq 0.78 \end{aligned} \quad (4)$$

式中, k<sub>d</sub>为散射辐射; k<sub>t</sub>为晴空指数, 指一定太阳高度角下地表接受的总太阳辐射与地球大气层上方平行于地表面上接受的总太阳辐射的比值(Gu *et al.*, 1999)。一般情况下, k<sub>t</sub>值接近于0表示天空被云层覆盖, 太阳辐射小; k<sub>t</sub>值接近于1表示天空晴朗无云; β为太阳高度角。k<sub>t</sub>的计算方法如下:

$$k_t = S/S_e \quad (5)$$

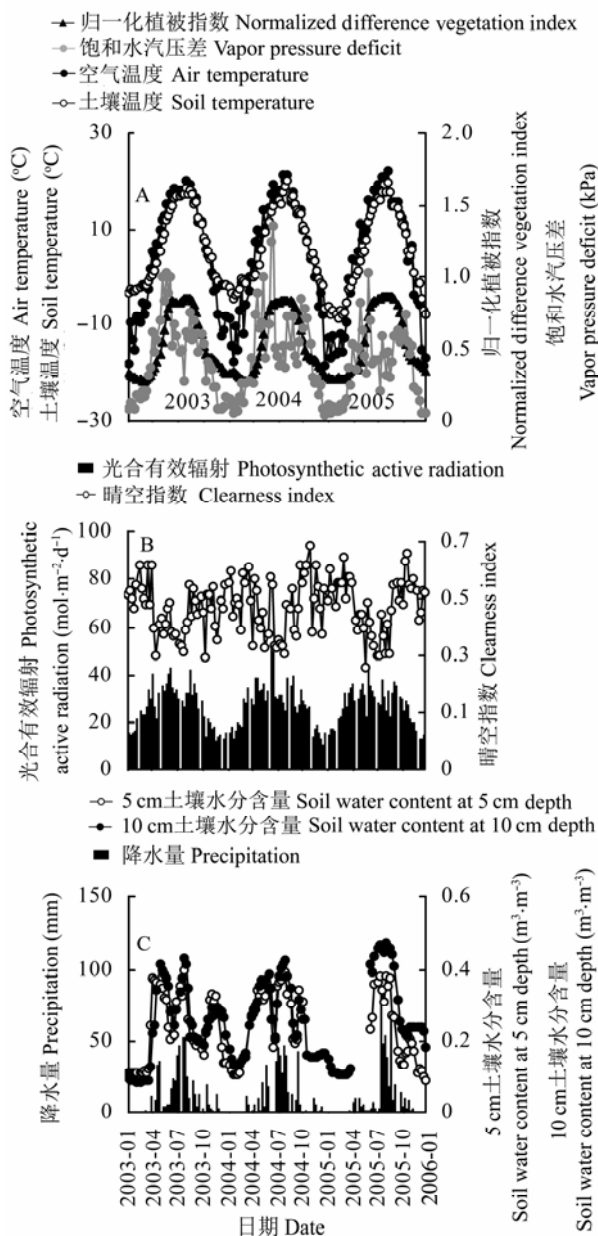
$$S_e = S_{sc}[1 + 0.033\cos(360DOY/365)]\sin\beta \quad (6)$$

式中, S为观测得到的地表接受的总太阳辐射(W·m<sup>-2</sup>); S<sub>e</sub>为地球大气层上方平行于地表面上接受的总太阳辐射(W·m<sup>-2</sup>); S<sub>sc</sub>为太阳常数(1 370 W·m<sup>-2</sup>), DOY为日序数(Julian day), β为太阳高度角。

## 2 结果

### 2.1 环境条件和植被生长的动态变化

利用2003–2005年的常规观测数据和遥感植被指数数据,分析了长白山阔叶红松林生态系统的环境条件和植被生长的季节和年际变化特征(图1)。从

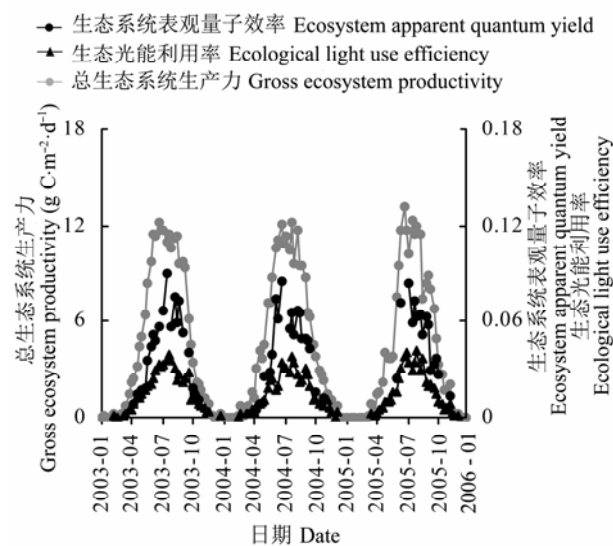


**图1** 2003–2005年8天尺度长白山阔叶红松林环境条件和植被生长的季节和年际变化。**A**, 气温、5 cm土壤温度、归一化植被指数和空气饱和水汽压差。**B**, 光合有效辐射和晴空指数。**C**, 降水量、5 cm土壤水分含量和10 cm土壤水分含量。  
**Fig. 1** Seasonal and interannual variations of environmental factors and canopy dynamics at 8-days interval in a broad-leaved Korean pine mixed forest, Changbai Mountain. **A**, Air temperature, soil temperature at 5 cm depth, normalized difference vegetation index and atmospheric vapor pressure deficit. **B**, Photosynthetically-active radiation and clearness index. **C**, Precipitation, soil volume water content at 5 cm and 10 cm depth.

图1可以看出,降水量和气温呈现同步变化的特征,均在夏季(6–8月)达到最高,表现为明显的水热同期特征。2003–2005年的年平均气温为4.67、4.88和3.34 °C,降水量分别为496.2、453.0和448.5 mm,与常年平均温度和降水量基本相当,未出现明显的异常天气或环境胁迫现象。受水热条件的共同作用,冠层的NDVI也在夏季达到最高。虽然夏季的辐射量也高于其他季节,但由于受同期降水较为频繁的影响,夏季的光合有效辐射( $Q$ )表现出明显的波动。与之相对应,由于晴空指数( $k_t$ )表示地表接受的太阳总辐射与大气上界辐射的比值,受夏季降水引起的辐射降低的影响出现了显著的降低。夏季由于降水较多,在温度较高的情况下,相对于春季和秋季而言,空气饱和水汽压差(VPD)在夏季反而出现了下降。

### 2.2 LUE的动态变化

基于不同方法计算得到的生态系统光能利用率指标的季节和年际变化特征如图2所示。从图2可以明显看出:首先,在数值大小方面,利用直角双曲线(公式(2))拟合得到的 $\varepsilon$ 显著高于下垫面入射辐射计算的 $LUE_{eco}$ 。其次,在时间的动态变化上, $\varepsilon$ 和 $LUE_{eco}$ 均表现出与温度和植被指数(NDVI)相似的单峰变化规律,在每年的夏季达到最大值。第三,受环境条件和植被生长变化等因素的影响,在不同的年份之间, $LUE$ 的季节变化存在一定差异。2003–2005年, $\varepsilon$ 的最大值分别为0.090、0.088和0.084  $\mu\text{mol}$



**图2** 总生态系统生产力和光能利用率的季节和年际变化。  
**Fig. 2** Seasonal and interannual variations of gross ecosystem productivity and light use efficiency.

$\text{CO}_2 \cdot \mu\text{mol photon}^{-1}$ 。  $LUE_{\text{eco}}$  的最大值分别为 0.039、0.038 和 0.042  $\mu\text{mol CO}_2 \cdot \mu\text{mol photon}^{-1}$ , 平均分别为  $(0.087 \pm 0.003)$  和  $(0.040 \pm 0.002)$   $\mu\text{mol CO}_2 \cdot \mu\text{mol photon}^{-1}$ , 年际间变异度(标准差/平均值)分别为 4.17% 和 4.25%。但需要指出的是, 不同年份之间的差异更为明显, 2003–2005 年  $\epsilon$  和  $LUE_{\text{eco}}$  每年最大值之间的差异分别达到 8% 或 8% 以上。这表明在模型参数反演中, 参数的年际变化需要给予重要考虑。

### 2.3 $LUE$ 动态变化的影响因素

通过对环境要素的相关分析发现, 不同  $LUE$  均可以用土壤温度( $T_s$ )和  $NDVI$  两个指标进行很好地解释(图 3), 其中  $T_s$  对  $\epsilon$  和  $LUE_{\text{eco}}$  的解释水平平均达到 85%

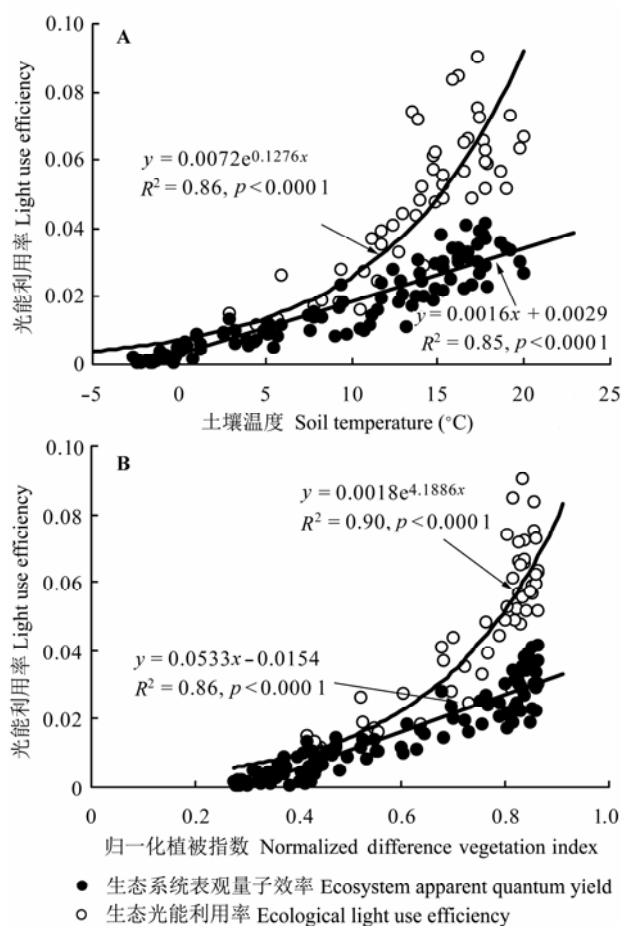


图3 光能利用率与土壤温度和归一化植被指数的关系。A, 生态系统表观量子效率和生态光能利用率与土壤温度的关系。B, 生态系统表观量子效率和生态光能利用率与归一化植被指数的关系。

Fig. 3 Relationships between soil temperature, normalized difference vegetation index and light use efficiency. A, Ecosystem apparent quantum yield and ecological light use efficiency vs soil temperature. B, Ecosystem apparent quantum yield and ecological light use efficiency vs normalized difference vegetation index.

以上。  $NDVI$  对  $\epsilon$  和  $LUE_{\text{eco}}$  变异的解释能力均略高于  $T_s$ 。进一步的残差分析结果显示  $T_s$  和  $NDVI$  对  $LUE$  的解释能力相当, 这表明无论是  $T_s$  还是  $NDVI$  都可以很好地解释该生态系统  $LUE$  的动态变化。同时, 从图 3 可以看出,  $LUE_{\text{eco}}$  与  $T_s$  和  $NDVI$  的关系更趋向于线性关系。

### 2.4 不同类型 $LUE$ 的相互关系

在很多的研究中,  $\epsilon$  和  $LUE_{\text{eco}}$  均被作为光能利用率并探讨其动态变化, 但对两者之间的关系关注不多。一方面,  $\epsilon$  和  $LUE_{\text{eco}}$  均表现出单峰变化(图 2), 并且与温度和植被生长密切相关(图 3); 另一方面,  $\epsilon$  和  $LUE_{\text{eco}}$  之间存在显著的线性关系(图 4), 即随着  $\epsilon$  的增大,  $LUE_{\text{eco}}$  也逐渐增加。同时, 如果将图中的直线强制通过零点, 则二者的线性关系为:  $LUE_{\text{eco}} = 0.4789\epsilon$  ( $R^2 = 0.52, p < 0.0001$ ),  $LUE_{\text{eco}}$  接近于  $\epsilon$  的 1/2。

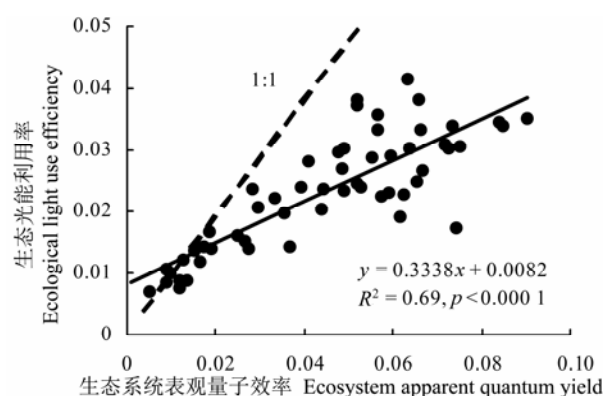


图4 生态系统表观量子效率和生态光能利用率之间的相关关系。

Fig. 4 Relationships between ecosystem apparent quantum yield and ecological light use efficiency.

## 3 讨论

### 3.1 $LUE$ 的不同计算方法之间的差异

$LUE$  计算方法的不同会对  $LUE$  的结果产生影响, 甚至出现显著差异。一般认为,  $\epsilon$  代表了研究时段内生态系统尺度潜在的最大光能利用能力。很多模型研究也将植被生长旺季获取的  $\epsilon$  作为模型中的最大光能利用率(Xiao *et al.*, 2004; Wu *et al.*, 2009; Wang *et al.*, 2010; Yuan *et al.*, 2014)。目前, 基于通量观测数据提取  $\epsilon$  时, 直角双曲线方程和非直角双曲线方程是常用的两种估算方法, 同时, 两种方程也常常用于通量观测中缺失数据的插补(Fagle *et al.*, 2001;

Losslop *et al.*, 2010)。有研究表明, 直角双曲线方程在弱光下( $Q < 500 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )表现为高估, 而在中等光强下( $500 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1} < Q < 1200 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )表现为低估, 在高光强下表现出比非直角双曲线方程更为明显的高估(Clement *et al.*, 2012)。但由于直角双曲线方程估算中需要拟合的参数相对非直角双曲线方程要少, 拟合过程较为简单, 其在生态系统尺度上的应用相应较多(Xiao *et al.*, 2004; Garbulsky *et al.*, 2010; Clement *et al.*, 2012; Li *et al.*, 2014)。

在生态系统光能利用率模型中,  $LUE$ 是通过温度、水分和植被条件等要素对 $LUE_{\max}$ 的约束函数而估算得到的, 因此,  $LUE$ 与 $LUE_{\max}$ 表现为非线性的变化关系。本研究表明: 一方面,  $\varepsilon$ 和 $LUE_{\text{eco}}$ 与温度和植被生长( $NDVI$ )密切相关, 并且温度和 $NDVI$ 的作用基本相当, 可以很好地解释 $\varepsilon$ 和 $LUE_{\text{eco}}$ 的季节和年际变化(图3); 与此同时,  $\varepsilon$ 和 $LUE_{\text{eco}}$ 之间表现为显著的线性关系(图4), 生长旺季的 $\varepsilon$ 显著高于 $LUE_{\text{eco}}$ , 这在一定程度上反映了冠层光合过程中实际的有机物生产效率和潜在效率的差异。另一方面, 很多 $LUE$ 模型是将某一年份获取的最大 $\varepsilon$ 作为模型中 $LUE_{\max}$ 的定值, 并由此估算其他年份的生态系统生产力。但本研究结果表明,  $\varepsilon$ 在不同的年份之间也存在一定的变异性, 2003–2005年3年中 $\varepsilon$ 的年际间变异度(标准差/平均值)为4.17%。最大相对偏差(最大差值/平均值)达到7.7%, 表明在不同年份利用 $NEP$ 与 $Q$ 的关系确定的 $LUE_{\max}$ 存在一定的差异。

### 3.2 $LUE$ 动态变化的影响因素

图3表明, 温度和 $NDVI$ 对长白山阔叶红松林的光能利用率的动态变化产生了重要的控制作用, 并且二者的贡献基本相近, 这与之之前仅利用1年观测数据指出的叶面积指数( $LAI$ )对 $\varepsilon$ 季节变化的贡献高于温度的研究结果有所不同(Zhang *et al.*, 2006), 也与青藏高原高寒灌丛的研究结果存在差异(Li *et al.*, 2014)。由于温度和植被指数之间密切相关性, 长白山阔叶红松林光能利用率的动态变化反映了温度和 $NDVI$ 的协同作用: 一方面, 温度的升高有利于光合作用的进行和植被冠层生长, 从而可提高对光能的利用能力; 另一方面, 作为生物指标的 $NDVI$ 的增大表示植被光合面积的增多, 也促进了光合作用的提高。虽然图1和图2表明,  $LUE_{\text{eco}}$ 和 $\varepsilon$ 的季节变化与 $GEP$ 和 $Q$ 相似, 均是在夏季达到峰值, 但进一步的

分析显示, 长白山阔叶红松林光能利用能力的动态变化与 $GEP$ 也存在显著的相关性, 但是与 $Q$ 的变化相关性较弱或无显著相关关系(图5), 这从另外一个方面表明了长白山阔叶红松林植被对 $LUE$ 动态变化的生物控制作用。

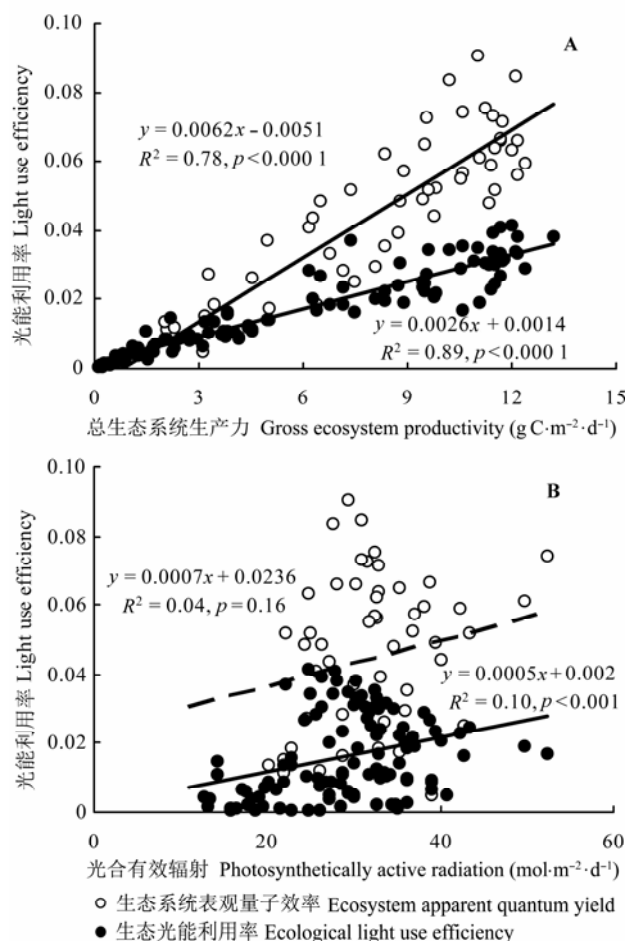


图5 光能利用率( $LUE$ )与总生态系统生产力( $GEP$ )和光合有效辐射( $Q$ )的关系。A, 生态系统表观量子效率( $\varepsilon$ )和生态光能利用率( $LUE_{\text{eco}}$ )与 $GEP$ 。B,  $\varepsilon$ 和 $LUE_{\text{eco}}$ 与 $Q$ 。

**Fig. 5** Relationships between gross ecosystem productivity ( $GEP$ ), photosynthetically-active radiation ( $Q$ ), and light use efficiency ( $LUE$ ). A, Ecosystem apparent quantum yield ( $\varepsilon$ ) and ecological light use efficiency ( $LUE_{\text{eco}}$ ) v.s.  $GEP$ . B,  $\varepsilon$  and  $LUE_{\text{eco}}$  v.s.  $Q$ .

此外, 很多研究表明, 散射辐射对生态系统的光能利用产生了显著影响(Mercado *et al.*, 2009; Dengel & Grace, 2010; Kanniah *et al.*, 2012), 一般认为散射辐射的增加一方面有助于增加冠层下方植被的入射辐射, 从而提高其光合能力, 促进群落尺度光合能力的增强, 另一方面有助于减少冠层上方叶

片的光抑制, 或降低空气温度和减少水分耗散, 缓解温度与水分胁迫, 从而促进冠层的光合作用和光能利用(张弥等, 2009; Dengel & Grace, 2010; Zhang *et al.*, 2010; Kanniah *et al.*, 2012)。图6显示, 长白山阔叶红松林的光能利用能力随着散射辐射的增加而显著提高, 表明散射辐射增多将有助于增强生态系统的光合能力(Schwalm *et al.*, 2006; Zhang *et al.*, 2010)。

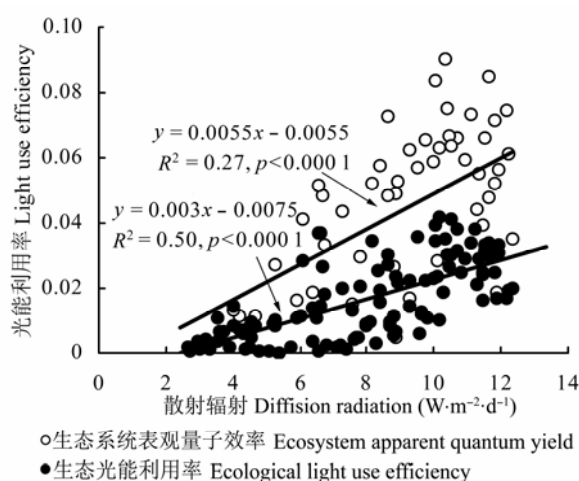


图6 散射辐射与生态系统表观量子效率和生态光能利用率。

Fig. 6 Relationship between diffusion radiation and ecosystem apparent quantum yield and ecological light use efficiency.

## 4 结论

为了客观地评价生态系统光能利用率( $LUE$ )的动态变化特征及其主控因子, 特别是 $LUE_{\max}$ 的年际变异性, 本研究选取我国东北地区长白山温带阔叶红松林生态系统为研究对象, 基于2003–2005年生态系统涡度相关通量观测数据, 采用直角双曲线光响应方程获取了生态系统的表观量子效率( $\epsilon$ ), 根据总生态系统生产力( $GEP$ )与光合有效辐射( $Q$ )计算得到生态光能利用率( $LUE_{\text{eco}}$ ), 通过对 $\epsilon$ 和 $LUE_{\text{eco}}$ 两类 $LUE$ 的综合分析, 主要获得了以下4个方面的认识:

(1)  $\epsilon$ 和 $LUE_{\text{eco}}$ 表现出与温度和 $NDVI$ 相似的单峰变化规律, 在每年夏季达到峰值。相关分析结果显示, 土壤温度和 $NDVI$ 与 $LUE$ 存在极显著的相关关系, 对 $\epsilon$ 和 $LUE_{\text{eco}}$ 动态变化的解释能力均达到85%以上。

(2)  $GEP$ 对 $\epsilon$ 和 $LUE_{\text{eco}}$ 都表现出显著的调控作用, 而 $LUE_{\text{eco}}$ 与 $Q$ 的相关性较弱,  $\epsilon$ 与 $Q$ 之间则无显著相关性, 表明了该生态系统生物因子对 $LUE$ 具有相对

更为重要的影响。与此同时, 研究发现散射辐射在一定程度上也有助于 $\epsilon$ 和 $LUE_{\text{eco}}$ 的提高。

(3)  $\epsilon$ 和 $LUE_{\text{eco}}$ 之间存在显著线性正相关关系, 但 $\epsilon$ 明显高于 $LUE_{\text{eco}}$ , 线性分析结果表明, 总体上 $\epsilon$ 达到了 $LUE_{\text{eco}}$ 的1倍以上。这反映了植被冠层光合过程中实际的有机物生产效率和潜在效率的差异。同时, 这也表明开展不同 $LUE$ 研究结果的比较时, 应充分考虑不同计算方法带来的差异。

(4) 2003–2005年,  $\epsilon$ 的最大值分别为0.090、0.088和0.084  $\mu\text{mol CO}_2 \cdot \mu\text{mol photon}^{-1}$ 。 $LUE_{\text{eco}}$ 的最大值分别为0.039、0.038和0.042  $\mu\text{mol CO}_2 \cdot \mu\text{mol photon}^{-1}$ , 平均分别为 $(0.087 \pm 0.003)$ 和 $(0.040 \pm 0.002)$   $\mu\text{mol CO}_2 \cdot \mu\text{mol photon}^{-1}$ , 年际间变异度(标准差/平均值)分别为4.17%和4.25%, 最大值与最小值的相对差异达到8%或8%以上。这意味着在模型模拟中, 基于不同年份获取的 $LUE_{\max}$ 很可能对模拟结果产生明显的影响。因此, 基于更多年份观测数据开展 $LUE_{\max}$ 年际变异性研究以合理确定 $LUE_{\max}$ 需要在模型参数反演和优化中给予重要考虑。

基金项目 中国科学院战略性先导科技专项项目(XDA05050208和XDA05050602)和国家自然科学基金(31170422和31570446)。

## 参考文献

- Baldocchi D (2014). Measuring fluxes of trace gases and energy between ecosystems and the atmosphere—The state and future of the eddy covariance method. *Global Change Biology*, 20, 3600–3609.
- Barr JG, Engel V, Fuentes JD, Fuller DO, Kwon H (2013). Modeling light use efficiency in a subtropical mangrove forest equipped with  $\text{CO}_2$  eddy covariance. *Biogeosciences*, 10, 2145–2158.
- Chen J, Shen MG, Kato T (2009). Diurnal and seasonal variations in light-use efficiency in an alpine meadow ecosystem: Causes and implications for remote sensing. *Journal of Plant Ecology*, 2, 173–185.
- Chen TX, van der Werf GR, Dolman AJ, Groenendijk M (2011). Evaluation of cropland maximum light use efficiency using eddy flux measurements in North America and Europe. *Geophysical Research Letters*, 38, doi: 10.1029/2011GL047533.
- Clement RJ, Jarvis PG, Moncrieff JB (2012). Carbon dioxide exchange of a Sitka spruce plantation in Scotland over five years. *Agricultural and Forest Meteorology*, 153, 106–123.
- Dengel S, Grace J (2010). Carbon dioxide exchange and canopy conductance of two coniferous forests under various sky



- conditions. *Oecologia*, 164, 797–808.
- 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 NO, Katul G, Keronen P, Kowalski A, Lai CT, Law BE, Meyers T, Moncrieff J, Moors E, Munger JW, Pilegaard K, Rannik Ü, Rebmann C, Suyker A, Tenhunen J, Tu K, Verma S, Vesala T (2001). Gap filling strategies for defensible annual sums of net ecosystem exchange. *Agricultural and Forest Meteorology*, 107, 43–69.
- Garbulsky MF, Peñuelas J, Papale D, Ardö J, Goulden ML, Kiely G, Richardson AD, Rotenberg E, Veenendaal EM, Filella I (2010). Patterns and controls of the variability of radiation use efficiency and primary productivity across terrestrial ecosystems. *Global Ecology and Biogeography*, 19, 253–267.
- Gilmanov TG, Aires L, Barcza Z, Baron VS, Beletti L, Beringer J, Billesbach D, Bonal D, Bradford J, Ceschia E, Cook D, Corradi C, Frank A, Gianelle D, Gimeno C, Gruenwald T, Guo HQ, Hanan N, Haszpra L, Heilman J, Jacobs A, Jones MB, Johnson DA, Kiely G, Li SG, Magliulo V, Moors E, Nagy Z, Nasyrov M, Owensby C, Pinter K, Pio C, Reichstein M, Sanz MJ, Scott R, Soussana JF, Stoy PC, Svejcar T, Tuba Z, Zhou GS (2010). Productivity, respiration, and light-response parameters of world grassland and agroecosystems derived from flux-tower measurements. *Rangeland Ecology & Management*, 63, 16–39.
- Gu LH, Fuentes JD, Shugart HH, Staebler RM, Black TA (1999). Responses of net ecosystem exchanges of carbon dioxide to changes in cloudiness: Results from two North American deciduous forests. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 104, 31421–31434.
- Guan DX, Wu JB, Zhao XS, Han SJ, Yu GR, Sun XM, Jin CJ (2006). CO<sub>2</sub> fluxes over an old, temperate mixed forest in northeastern China. *Agricultural and Forest Meteorology*, 137, 138–149.
- Hao ZQ, Li BH, Zhang J, Wang XG, Ye J, Yao XL (2008). Broad-leaved Korean pine (*Pinus koraiensis*) mixed forest plot in Changbaishan (CBS) of China: Community composition and structure. *Journal of Plant Ecology (Chinese Version)*, 32, 238–250. (in Chinese with English abstract) [郝占庆, 李步杭, 张健, 王绪高, 叶吉, 姚晓琳 (2008). 长白山阔叶红松林样地(CBS): 群落组成与结构. 植物生态学报, 32, 238–250.]
- Jenkins JP, Richardson AD, Braswell BH, Ollinger SV, Hollinger DY, Smith ML (2007). Refining light-use efficiency calculations for a deciduous forest canopy using simultaneous tower-based carbon flux and radiometric measurements. *Agricultural and Forest Meteorology*, 143, 64–79.
- Kanniah KD, Beringer J, North P, Hutley L (2012). Control of atmospheric particles on diffuse radiation and terrestrial plant productivity: A review. *Progress in Physical Geography*, 36, 209–237.
- Li HQ, Zhang FW, Li YN, Cao GM, Zhao L, Zhao XQ (2014). Seasonal and interannual variations of ecosystem photosynthetic features in an alpine dwarf shrubland on the Qinghai-Tibetan Plateau, China. *Photosynthetica*, 52, 321–331.
- Lasslop G, Reichstein M, Papale D, Richardson AD, Arneth A, Barr A, Stoy P, Wohlfahrt G. (2010). Separation of net ecosystem exchange into assimilation and respiration using a light response curve approach: Critical issues and global evaluation. *Global Change Biology*, 16, 187–208.
- Mercado LM, Bellouin N, Sitch S, Boucher O, Huntingford C, Wild M, Cox PM (2009). Impact of changes in diffuse radiation on the global land carbon sink. *Nature*, 458, 1014–1017.
- Monteith JL (1977). Climate and the efficiency of crop production in Britain. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences*, 281, 277–294.
- Papale D, Reichstein M, Aubinet M, Canfora E, Bernhofer C, Kutsch W, Longdoz B, Rambal S, Valentini R, Vesala T, Yakir D (2006). Towards a standardized processing of net ecosystem exchange measured with eddy covariance technique: Algorithms and uncertainty estimation. *Biogeosciences*, 3, 571–583.
- Polley HW, Phillips RL, Frank AB, Bradford JA, Sims PL, Morgan JA, Kiniry JR (2011). Variability in light-use efficiency for gross primary productivity on Great Plains grasslands. *Ecosystems*, 14, 15–27.
- Reichstein M, Fagle E, Baldocchi D, Papale D, Aubinet M, Berbigier P, Bernhofer C, Buchmann N, Gilmanov T, Granier A, Grünwald T, Havráňková K, Ilvesniemi H, Janous D, Knohl A, Laurila T, Lohila A, Loustau D, Matteucci G, Meyers T, Miglietta F, Ourcival JM, Pumpanen J, Rambal S, Rotenberg E, Sanz M, Tenhunen J, Seufert G, Vaccari F, Vesala T, Yakir D, Valentini R (2005). On the separation of net ecosystem exchange into assimilation and ecosystem respiration: Review and improved algorithm. *Global Change Biology*, 11, 1424–1439.
- Reindl DT, Beckman WA, Duffie JA (1990). Diffuse fraction correlations. *Solar Energy*, 45, 1–7.
- Ruimy A, Jarvis PG, Baldocchi DD, Saugier B (1995). CO<sub>2</sub> fluxes over plant canopies and solar radiation: A review. *Advances in Ecological Research*, 26, 1–68.
- Schwalm CR, Black TA, Amiro BD, Arain MA, Barr AG, Bourque CPA, Dunn AL, Flanagan LB, Giasson MA, Lafleur PM, Margolis HA, McCaughey JH, Orchansky AL, Wofsy SC (2006). Photosynthetic light use efficiency of three biomes across an eastwest continental-scale transect in Canada. *Agricultural and Forest Meteorology*, 140, 269–286.
- Turner DP, Urbanski S, Bremer D, Wofsy SC, Meyers T, Gower ST, Gregory M (2003). A cross-biome comparison

- of daily light use efficiency for gross primary production. *Global Change Biology*, 9, 383–395.
- Wang HS, Jia GS, Fu CB, Feng JM, Zhao TB, Ma ZG (2010). Deriving maximal light use efficiency from coordinated flux measurements and satellite data for regional gross primary production modeling. *Remote Sensing of Environment*, 114, 2248–2258.
- Wu JB, Xiao XM, Guan DX, Shi TT, Jin CJ, Han SJ (2009). Estimation of the gross primary production of an old-growth temperate mixed forest using eddy covariance and remote sensing. *International Journal of Remote Sensing*, 30, 463–479.
- Xiao XM, Boles S, Liu JY, Zhuang DF, Liu ML (2002). Characterization of forest types in Northeastern China, using multi-temporal SPOT-4 VEGETATION sensor data. *Remote Sensing of Environment*, 82, 335–348.
- Xiao XM, Hollinger D, Aber J, Goltz M, Davidson EA, Zhang QY, Moore III B (2004). Satellite-based modeling of gross primary production in an evergreen needleleaf forest. *Remote Sensing of Environment*, 89, 519–534.
- Yu GR, Wen XF, Sun XM, Tanner BD, Lee X, Chen JY (2006). Overview of ChinaFLUX and evaluation of its eddy covariance measurement. *Agricultural and Forest Meteorology*, 137, 125–137.
- Yu GR, Zhang LM, Sun XM, Fu YL, Wen XF, Wang QF, Li SG, Ren CY, Song X, Liu YF, Han SJ, Yan JH (2008). Environmental controls over carbon exchange of three forest ecosystems in eastern China. *Global Change Biology*, 14, 2555–2571.
- Yuan WP, Cai WW, Xia JZ, Chen JQ, Liu SG, Dong WJ, Merbold L, Law B, Arain A, Beringer J, Bernhofer C, Black A, Blanken PD, Cescatti A, Chen Y, Francois L, Gianelle D, Janssens IA, Jung M, Kato T, Kiely G, Liu D, Marcolla B, Montagnani L, Raschi A, Rouspard O, Varlagin A, Wohlfahrt G (2014). Global comparison of light use efficiency models for simulating terrestrial vegetation gross primary production based on the LaThuile database. *Agricultural and Forest Meteorology*, 192–193, 108–120.
- Yuan WP, Liu SG, Zhou GS, Zhou GY, Tieszen LL, Baldocchi D, Bernhofer C, Gholz H, Goldstein AH, Goulden ML, Hollinger DY, Hu YM, Law BE, Stoy PC, Vesala T, Wofsy SC (2007). Deriving a light use efficiency model from eddy covariance flux data for predicting daily gross primary production across biomes. *Agricultural and Forest Meteorology*, 143, 189–207.
- Zhang LM, Yu GR, Sun XM, Wen XF, Ren CY, Fu YL, Li QK, Li ZQ, Liu YF, Guan DX, Yan JH (2006). Seasonal variations of ecosystem apparent quantum yield ( $\alpha$ ) and maximum photosynthesis rate ( $P_{\max}$ ) of different forest ecosystems in China. *Agricultural and Forest Meteorology*, 137, 176–187.
- Zhang M, Yu GR, Zhang LM, Sun XM, Wen XF, Han SJ (2009). Effects of solar radiation on net ecosystem exchange of broadleaved-Korean pine mixed forest in Changbai Mountain, China. *Journal of Plant Ecology (Chinese Version)*, 33, 270–282. (in Chinese with English abstract) [张弥, 于贵瑞, 张雷明, 孙晓敏, 温学发, 韩士杰 (2009). 太阳辐射对长白山阔叶红松林净生态系统碳交换的影响. *植物生态学报*, 33, 270–282.]
- Zhang M, Yu GR, Zhang LM, Sun XM, Wen XF, Han SJ, Yan JH (2010). Impact of cloudiness on net ecosystem exchange of carbon dioxide in different types of forest ecosystems in China. *Biogeosciences*, 7, 711–722.
- Zhang Q, Zhang L, He HL, Han SJ, Li YN, Ouyang Z, Shi PL, Wang HM, Hao YB, Zhang YP, Yan JH (2014). Inversion of the maximum light use efficiency using eddy covariance flux observations. *Quaternary Science*, 34, 743–751. (in Chinese with English abstract) [张强, 张黎, 何洪林, 韩士杰, 李英年, 欧阳竹, 石培礼, 王辉民, 郝彦宾, 张一平, 闫俊华 (2014). 基于涡度相关通量数据的植被最大光能利用率反演研究. *第四纪研究*, 34, 743–751.]

责任编委: 陈世苹 责任编辑: 王 葳