

# 城市绿地生态系统多角度高光谱光化学反射植被指数与光能利用率的关系

杨志青<sup>1</sup> 陈报章<sup>1,2\*</sup> 查天山<sup>1</sup> 贾 昕<sup>1</sup>

<sup>1</sup>北京林业大学水土保持学院, 北京 100083; <sup>2</sup>中国科学院地理科学与资源研究所, 资源与环境信息系统国家重点实验室, 北京 100101

**摘 要** 光能利用率(*LUE*)是陆地生态系统总初级生产力(*GPP*)估算的一个重要参数。*LUE*的准确估算对于在区域甚至全球尺度上使用*LUE*模型估算*GPP*是非常重要的。一个基于通量塔的观测视场与通量观测足迹在时空上相匹配的自动多角度遥感平台为*LUE*在站点尺度上的准确估算提供了一个好方法。该文基于通量塔涡度相关(*EC*)和自动多角度高光谱连续观测获取的连续30 min的数据,在站点空间尺度和0.5 h与日时间尺度上,探讨了城市绿地生态系统秋季光化学反射植被指数(*PRI*)与*LUE*之间的关系。研究发现,反映植被叶面积和色素变化的植被绿度指数在秋季呈现逐渐下降的趋势,表征了植被冠层的状态与结构变化,叶片从绿色逐渐变黄凋落,植被冠层叶片的叶绿素逐渐减少,裸露的枝干增多;用空气温度和代表物候过程的绝对绿度指数(2*G\_RB*)做线性回归分析,得到回归系数( $R^2$ )为0.60 ( $p < 0.001$ )。说明在城市绿地生态系统中,空气温度是决定植被物候过程的主要驱动因素,随着植被物候变化,叶片的凋落导致的裸露土壤的增多以及随时间变化的色素含量和其比例的变化将影响*PRI*和*LUE*的关系;采用植被生长模型(logistic曲线),拟合时间与2*G\_RB*,得到曲率变化最快的点,确定为秋季植被落叶期的初日,即第290天。在0.5 h和日时间尺度上,*PRI*都可以捕捉*LUE*的变化。但是日尺度上不同物候期,*PRI*和*LUE*的关系发生了急剧的变化。在秋季植被正常生长期,*PRI*和*LUE*之间的关系最密切( $R^2 = 0.70$ ,  $p < 0.001$ )。当土壤温度大于15 °C、光合有效辐射(*PAR*)大于300  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 以及饱和水汽压差(*VPD*)大于700 Pa的情况下,*PRI*能够更好地预测*LUE*。基于通量塔尺度上时空尺度相匹配,利用半经验的核驱动二向反射分布函数模型得到的高光谱*PRI*和通量观测得到的*LUE*在不同环境条件下的关系以及考虑到在植被的不同物候期对*PRI*和*LUE*的关系的优化,将会更加准确地估算城市绿地生态系统的*LUE*。

**关键词** 光能利用率; 光化学植被指数; 绝对绿度指数; 城市绿地生态系统; 核驱动二向反射分布函数模型

**引用格式:** 杨志青, 陈报章, 查天山, 贾昕 (2016). 城市绿地生态系统多角度高光谱光化学反射植被指数与光能利用率的关系. 植物生态学报, 40, 1077–1089. doi: 10.17521/cjpe.2015.0451

## Relationship between photochemical reflectance index with multi-angle hyper-spectrum and light use efficiency in urban green-land ecosystems

YANG Zhi-Qing<sup>1</sup>, CHEN Bao-Zhang<sup>1,2\*</sup>, ZHA Tian-Shan<sup>1</sup>, and JIA Xin<sup>1</sup>

<sup>1</sup>College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; and <sup>2</sup>Institute of Geographical Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, State Key Laboratory of Resources and Environmental Information System, Beijing 100101, China

### Abstract

**Aims** Light-use efficiency (*LUE*) is one of critical parameters in the terrestrial ecosystem production studies. Accurate determination of *LUE* is very important for *LUE* models to simulate gross primary productivity (*GPP*) at regional and global scales. We used eddy covariance technique measurement and tower-based, multi-angular spectro-radiometer observations in autumn 2012 to explore the relationship between bidirectional reflectance distribution function (BRDF) corrected photochemical reflectance index (*PRI*) and *LUE* in different phenology and environment conditions in urban green-land ecosystems.

**Methods** Using the eddy covariance technique, we estimated the temporal changes in *GPP* during the autumn 2012 over Beijing Olympic Forest Park. *LUE* was calculated as the ratio of *GPP* to the difference between incoming photosynthetically active radiation (*PAR*) and *PAR* reflected from the canopy. Daily *PRI* values were averaged from the BRDF using semi-empirical kernel driven models. The absolute greenness index (2*G\_RB*) was made by webcam at a constant view zenith and view azimuth angle at solar noon. The logistic function was used

收稿日期Received: 2015-12-08 接受日期Accepted: 2016-07-23

\* 通信作者Author for correspondence (E-mail: baozhang.chen@igsrr.ac.cn)

to fit the time series of the greenness index. The onset of phenological stages was defined as the point when the curvature reached its maximum value.

**Important findings** Webcamera-observed greenness index (2G\_RB) showed a decreasing trend. There was a highly significant relationship between 2G\_RB and air temperature ( $R^2 = 0.60$ ,  $p < 0.001$ ). This demonstrates that air temperature is the main driving factor to determine the phenology. *PRI* estimated from multi-angle hyper-spectrum can estimate *LUE* in urban green-land ecosystems in vigorous photosynthetic period. The correlation was the strongest ( $R^2 = 0.70$ ,  $p < 0.001$ ) in the peak photosynthetic period. *PRI* relates better to *LUE* under high temperature ( $>15\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) with high vapour pressure deficit (*VPD*) ( $>700\text{ Pa}$ ) and high *PAR* ( $>300\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ). The *LUE* was up-scaled to landscape/regional scales based on these relationships and phenology. It can also be used for the estimation of *GPP* of urban green-land with high accuracy.

**Key words** light use efficiency; photochemical reflectance index; absolute greenness index; urban green-land ecosystems; bi-directional reflectance distribution

**Citation:** Yang ZQ, Chen BZ, Zha TS, Jia X (2016). Relationship between photochemical reflectance index with multi-angle hyper-spectrum and light use efficiency in urban green-land ecosystems. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 40, 1077–1089. doi: 10.17521/cjpe.2015.0451

在全球气候变化的研究中,生态系统尺度上的碳收支动态的评估是一个重要的研究课题。为了减少在全球碳循环中陆地生态系统分量估算的不确定性,需要对全球陆地生态系统的生产力进行持续观测(Nightingale *et al.*, 2007)。为了寻找适用于多种生态系统和植被类型的模拟方法,达到全球气候变化研究的最终目标,需要准确监测和预测总初级生产力(*GPP*)变化基本决定因素的光能利用率(*LUE*)的变化(王莉雯和卫亚星, 2015)。

许多研究发现在过度光照条件下,叶黄素(xanthophyll)循环中的色素紫黄质(violaxanthin)将快速地脱环氧化,然后通过中间物质花药黄质(antheraxanthin)转变为玉米黄质(zeaxanthin),两个转化过程都会将辐射能量以热量耗散,当处于有限的辐射条件下,此反应相反(Gamon *et al.*, 1992)。这些色素的变化在以531 nm为中心的窄波段吸收特性上有对应的反馈变化(Penuelas *et al.*, 1993),这一变化特性被定量地以光化学反射植被指数(*PRI*)的形式,用在叶片、冠层和林分水平上的研究(Gamon *et al.*, 1992, 1997; Penuelas *et al.*, 2011b)。

*PRI*指数和*LUE*的关系最早用于向日葵(*Helianthus annuus*)叶片的研究,后来有其他研究发现这种经验性的关系也适用于其他植被类型(Barton & North, 2001; Penuelas *et al.*, 2011b; Porcar-Castell *et al.*, 2012)。但是这种关系的一般化应用到林分水平或者更高尺度水平还存在一些问题(Rahman *et al.*, 2004),因为*PRI*对观测角度、土壤背景反射率、叶倾角和叶面积非常敏感(Barton & North, 2001;

Hilker *et al.*, 2008)。在不断地研究中发现*PRI*与*LUE*的相关关系会受到环境因子变化和尺度效应的影响,这就说明*PRI-LUE*关系受非生理因素和冠层叶片生理因素的影响(Nakaji *et al.*, 2006)。*PRI*不仅与叶片内部环氧化状态的叶黄素有关,还和叶绿素含量以及叶绿素含量与类胡萝卜素的比值大小有关(Nichol *et al.*, 2002)。

在碳循环与气候变化研究中,以人工林植被为主要存在形态的城市绿地作为重要的碳平衡组分,对减轻气候变化的影响发挥着重要作用,其潜在的碳汇功能(或碳固持)不可低估(陈文婧等, 2013)。为了在城市绿地生态系统中大尺度更加准确地估算碳通量,我们就需要研究*PRI*和*LUE*之间的关系。虽然已有多角度的*PRI*的观测数据和*PRI-LUE*关系的研究(Hall *et al.*, 2008, 2011, 2012; Hilker *et al.*, 2008, 2011, 2012a, 2012b),但只是应用到了北方针叶林,而对于城市绿地生态系统的*PRI*和*LUE*两者之间的关系仍然不清楚。在本文中,我们分析研究了城市绿地生态系统秋季在塔尺度上通过自动多角度连续原位光谱观测的*PRI*和基于涡度相关测得的*LUE*之间的关系。研究的主要目标是分析研究(1)环境因子, *PRI*和*LUE*在秋季的变化;(2)划分不同的物候期,在不同的环境因子下分析*PRI*和*LUE*之间的关系;(3)在不同的环境下,分析影响*PRI-LUE*的主要因素。

## 1 研究区和研究方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于北京奥林匹克森林公园北园

(40.02° N, 116.38° E), 相对海拔高度48 m, 占地680 hm<sup>2</sup>, 绿化覆盖率95.61%。奥林匹克森林公园属于温带大陆性半湿润季风气候, 四季分明, 降水集中, 年降水量600 mm。年平均气温14 °C, 7月份最热, 平均气温27.5 °C, 风向有明显的季节变化, 地质构造为河流冲积平原。

土壤类型主要为潮褐土, 土壤容重为1.62 g·cm<sup>-3</sup>, 土壤孔隙度约为40.30%。在2012年的调查中通量塔和光谱仪足迹内主要植被为人工营造的乔灌木复层景观林, 乔木主要为油松(*Pinus tabulaeformis*)、侧柏(*Platycladus orientalis*)、国槐(*Sophora japonica*)、白蜡(*Fraxinus chinensis*)和银杏(*Ginkgo biloba*), 林分密度约为210株·hm<sup>-2</sup>, 平均树高7.7 m, 胸径20.6 cm; 灌木树种主要为山桃(*Prunus davidiana*)和榆叶梅(*Amygdalus triloba*), 丛生灌木主要为红瑞木(*Swida alba*)、丁香(*Syzygium aromaticum*), 林分密度约为351株·hm<sup>-2</sup>, 平均树高2.8 m, 平均基径72.0 cm; 地被植物主要为鸢尾(*Iris tectorum*)和石竹(*Dianthus chinensis*) (陈文婧等, 2013)。

奥林匹克森林公园中物种丰富, 按照生物多样性组成天然林系统。其中常绿树和落叶树种种类之比约为1:10, 乔木与灌木种类之比约为1:1.1; 乔木与灌木数量之比约为1:5.1; 常绿乔木与落叶乔木之比约为1:2.5; 而常绿植物与落叶植物的总数量之比约为1:2 (胡淼淼, 2009), 植被类型的空间异质性较大。

## 1.2 研究方法

### 1.2.1 通量数据观测与处理方法

通量塔架设在奥林匹克森林公园北园的混交林中, 采用Eddypro软件对数据进行处理。采用的涡度相关数据的时间序列是从2012年8月8日到2012年10月31日。涡度通量观测仪器安装高度为11.5 m, 为开路式涡度相关系统。包括三维超声风速仪(CSAT3, Campbell Scientific, Utah, USA)和CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O红外气体分析仪(EC155, Campbell Scientific, Utah, USA), 用来监测生态系统CO<sub>2</sub>的净交换量(NEE)的变化, 采样频率为10 Hz。同时, 2个光量子传感器(PAR-LITE, Kipp & Zonen, Delft, The Netherlands)均安装在12 m处, 在冠层的上方, 向上和向下的光量子传感器测量太阳入射的光合有效辐射和冠层反射的光合有效辐射。

通过对10 Hz的数据进行校正和质量控制, 用校正过的数据计算0.5 h的通量数据。

$$NEE = F_c + F_s + V_c \quad (1)$$

式中,  $F_c$ 是通量观测塔在植被上部所观测到的CO<sub>2</sub>通量,  $F_s$ 是涡度相关系统安装高度下冠层内储存通量,  $V_c$ 是垂直和水平平流效应。

在插补夜间数据时全年采用单一函数对夜间日平均空气温度 $T_a$ 与 $NEE_{\text{night}}$ 进行拟合。

$$NEE_{\text{night}} = R_0 \cdot Q_{10}^{T_a/10} \quad (2)$$

式中,  $R_0$ 为当 $T_a$ 为0 °C时的呼吸速率;  $Q_{10}$ 为温度增加10 °C时呼吸速率的相对增加量。再将获得的呼吸参数( $Q_{10}$ ,  $R_0$ )外推到白天获得白天生态系统呼吸 $R_e$ 的日变化。

$$NEP = -NEE = GPP - R_e \quad (3)$$

因为不研究辐射混合植被类型的树冠的辐射的收支平衡, 因此使用GPP和入射光合有效辐射( $PAR_i$ )-冠层反射的光合有效辐射( $PAR_r$ )来估算整个冠层的光能转换效率。 $LUE$ 是GPP和 $PAR_i$ 和 $PAR_r$ 差的比值(Nakaji *et al.*, 2008), 即

$$LUE = GPP / (PAR_i - PAR_r) \quad (4)$$

式中 $PAR_i$ 和 $PAR_r$ 是由向上和向下的光量子传感器测得的入射光合有效辐射和冠层反射的光合有效辐射。

### 1.2.2 多角度光谱系统数据观测与处理方法

多角度光谱数据的采集时间是从2012年8月8日到2012年10月31日, 由于仪器维修等原因, 2012年8月22日到2012年8月30日9天的数据有所缺失。冠层反射率的获取是来自一个安装在15 m的自动多角度光谱仪原位连续观测平台系统。使用Unispec-DC双通道光谱分析仪(PPSYSTEMS)测定植物冠层水平的光谱反射率, 分辨率为3 nm, 波长范围为300–1100 nm。这个系统安装了一个可以精确转动的云台(D46), 允许在塔周围360°的区域, 每30 s旋转11.5°, 完成完整的旋转需要15 min, 为了方便测量光纤探头的位置, 一个光纤探头被安装在云台上, 随云台旋转。为了在变化的天气条件下保证数据的准确性, 冠层的反射率获得来自太阳入射和冠层反射的同时测量, 并且是每5 s采集一条光谱。双通道光谱仪同时使用两根光纤, 向上的探针安装在余弦接收器上, 测量植被上方光强的变化。向下的探针安装在云台上, 观测视角(IFOV)约20°, 观测垂直角度是在43°和78°之间, 随云台旋转测量



植被冠层的反射光谱。无论光强如何变化, 光谱仪均能自动将任何时刻的植被反射光谱转换成当时实际光强的反射率, 确保了测定数据的准确性(彭涛等, 2009)。同时一个网络摄像头安装在云台上, 每5 s采集一条光谱曲线, 就会采集一幅相对应地物的 $200 \times 200$ 的RGB图像。

通过对所测量的光谱反射率进行剔除异常点, 暗电流校正, 白板校正以及二向反射分布函数模型(BRDF)校正等措施保证数据的准确性。由于Unispec-DC仪器本身不能进行暗电流校正, 需要通过后期的数据处理。经研究, 暗电流的大小只与仪器本身的温度有关, 因此我们使用完全黑暗下的午夜的数据, 进行暗电流的校正。白板是反射率为99%的朗伯体白板。由于在观测方位角 $0^\circ$ – $10^\circ$ ,  $305^\circ$ – $360^\circ$ 的观测数据被通量塔所挡住, 是异常数据, 数据处理时, 予以剔除。针对城市绿地生态系统的特性, BRDF选择的是应用广泛的RossThick-LiSparse模型(Lucht *et al.*, 2000), 其具体公式为:

$$\rho(\theta_v, \theta_s, \phi) = f_{iso} + f_{vol} K_{vol}(\theta_v, \theta_s, \phi) + f_{geo} K_{geo}(\theta_v, \theta_s, \phi) \quad (5)$$

其中,  $\theta_v$ 是观测天顶角,  $\theta_s$ 为观测方位角,  $\phi$ 是相对方位角,  $K_{vol}$ 为体散射核即RossThick核,  $K_{geo}$ 为几何散射核即LiSparse核,  $f_{iso}$ 、 $f_{vol}$ 和 $f_{geo}$ 为核相关参数。

PRI (Gamon *et al.*, 1990), 修正光化学植被指数PRIR2 (Wu *et al.*, 2010), 其定义如下:

$$PRI = \frac{R_{531} - R_{570}}{R_{531} + R_{570}} \quad (6)$$

$$PRIR2 = \frac{R_{531} - R_{570}}{2R_{550} - R_{531} - R_{570}} \quad (7)$$

公式(6)、(7)中的 $R_x$ 是X波段的反射率。所有反射率的值都来源于经BRDF模型校正后的自动多角度光谱仪原位观测系统的15 min的反射率值。

采用自动多角度原位观测系统中的网络摄像头拍摄的图像提取应用最广泛的绝对绿度指数(2G\_RB)(Richardson *et al.*, 2009)。其定义如下:

$$2G\_RB = 2DN_{green} - DN_{red} - DN_{blue} \quad (8)$$

式中 $DN_{green}$ 、 $DN_{red}$ 和 $DN_{blue}$ 分别表示在研究期内正午时分相同观测角和相同观测方位角的RGB图像( $200 \times 200$ )的绿、红、蓝通道的平均亮度值。

物候主要表现为群落结构和外貌随着季节的更迭发生的变化, 即所谓的季相变化。本研究利用

公式(9)、公式(10)拟合2G\_RB和时间的方程, 并计算曲率值。在秋天将曲率最大值点对应群落凋落期的初日, 主要是考虑到转折点应为状态变化最迅速的点, 即物候现象变化最迅速的点(Gu *et al.*, 2003)。

$$g(t) = a + \frac{b}{1 + \exp(c - dt)} \quad (9)$$

$$\rho = \left| \frac{g(t)''}{(1 + g(t)')^2} \right| \quad (10)$$

式中,  $t$ 为积日(day of year, DOY),  $g(t)$ 为绝对绿度指数值。 $a$ 、 $b$ 、 $c$ 、 $d$ 为拟合参数,  $a$ 表示 $g(t)$ 的最小值,  $b$ 表示 $g(t)$ 的振幅,  $c$ 、 $d$ 控制着植被生长阶段变化的时间和速率。 $\rho$ 为曲率值,  $g(t)'$ 为 $g(t)$ 的一阶导数,  $g(t)''$ 为 $g(t)$ 的二阶导数。

## 2 结果和分析

### 2.1 2G\_RB的时间变化以及物候变化

2012年8月8日至10月31日奥林匹克森林公园的日平均空气温度逐渐降低(图1), 在研究期内日平均空气温度最高为 $28.6^\circ\text{C}$ , 最低为 $8.5^\circ\text{C}$ , 呈现出了明显的时间变化, 并和图5C中LUE呈现出相似的下降趋势。说明空气温度是一个简单的并且持续的冠层物候过程的代表, 并且可以控制光合有效速率

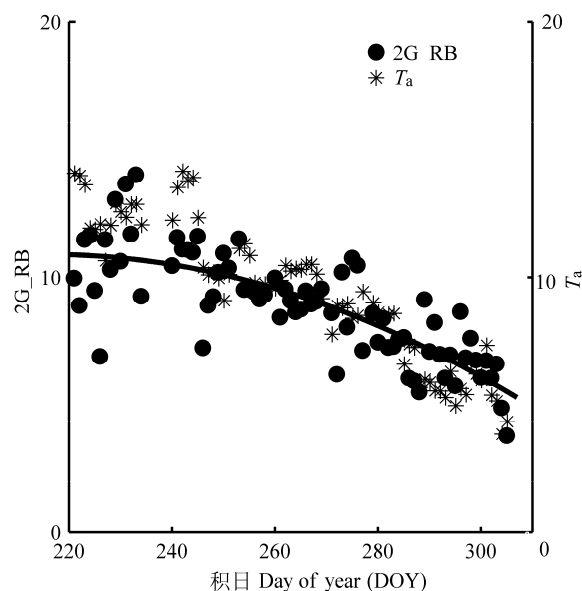


图1 2012年正午时分相同方位角( $225^\circ$ )和观测角度( $63^\circ$ )的绝对绿度指数(2G\_RB)与空气温度( $T_a$ )的时间变化。

Fig. 1 Changes of absolute greenness index (2G\_RB) of viewazimuth ( $225^\circ$ ) and viewzenith ( $63^\circ$ ) at noon as well as daily mean air temperature ( $T_a$ ).

的季节变化(Wu *et al.*, 2012)。在秋季时期, 因为温度变化剧烈, 逐渐下降到植被生长所需的极限温度, 所以在这个时期温度成为一个主要的限制因素。通过对空气温度和代表物候过程的2G\_RB做相关性分析, 得到显著性回归系数 $R^2 = 0.60$  ( $p < 0.001$ ,  $n = 76$ )。可以看出城市绿地生态系统在秋季空气温度和代表物候变化的2G\_RB具有很强的相关性, 说明空气温度是决定植被的物候过程的主要驱动因素。

落叶林的物候期对时间和空间的光合作用过程起到了主要的控制(Richardson *et al.*, 2007), 而绿度指数能够表征植被群落的季相变化(周磊等, 2012)。本研究在正午时分观测角度 $63^\circ$ , 方位角 $225^\circ$ 的RGB图像中提取了2G\_RB, 2G\_RB呈现出明显的时间变化, 最大值为14, 最小值为3.8。因为能描述植被生长过程中叶面积和色素的变化(Adamsen *et al.*, 1999), 2G\_RB与图5C中的光能利用率呈现出相似的下降趋势。通过植被生长模型(logistic曲线), 利用最大曲率的方法, 确定了秋季植被落叶期的初日是第290天。此时, 叶片开始迅速变黄凋落, 叶绿素开始分解降低。叶片的凋落导致的裸露土壤的增多以及随时间变化的叶绿素含量的降低以及色素比例的变化将会影响PRI-LUE关系。

## 2.2 暗电流校正

图2是暗电流与光谱仪传感器温度之间的线性关系, 横坐标表示传感器的温度, 纵坐标表示3个月中午夜所测得的256个波段的反射率的数量。因此,  $Y/256$ 为暗电流校正的数值。

午夜由于没有太阳照射, 余弦接收器和冠层传感器中进入的辐射亮度值(DN值)均为异常值, 并且同步的摄像头所拍摄的照片也是一片漆黑, 一般认为此时的反射信号与光谱仪的内部噪声有关, 并且与温度值呈现出正相关性。选择研究期内00:00–00:30的所有反射光谱数据, 建立午夜与相应传感器温度的回归方程(图2)。线性回归方程为 $Y = 1.8773T + 171.4565$  ( $R^2 = 0.99$ )。

## 2.3 光谱曲线的时间变化

图3是在2012年秋季研究期间, 植被光谱随时间的变化。所有的光谱曲线都呈现出植被的光谱特征, 在绿光波段(492–577 nm)有一个反射峰, 在红光波段(622–770 nm)从700 nm处反射率急剧上升, 形成反射高峰。在绿光波段反射峰的不同, 是因为

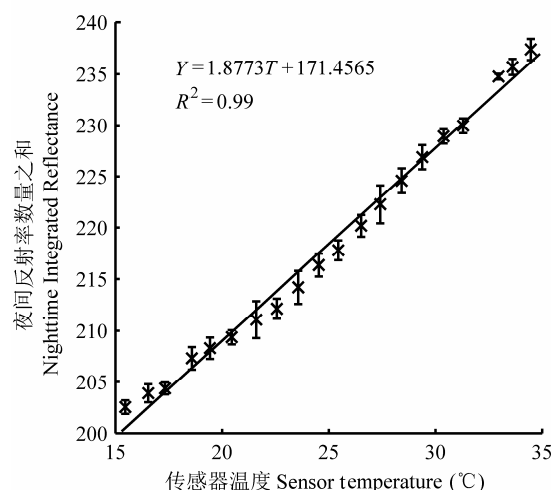


图2 暗电流拟合图。

Fig. 2 Dark current fitting figure.

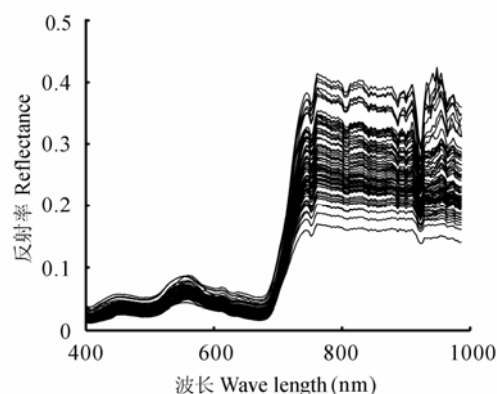


图3 正午时分相同方位角( $225^\circ$ )和观测角( $63^\circ$ )的光谱曲线随时间的变化。

Fig. 3 Spectral curves of viewazimuth (225 degrees) and viewzenith (63 degrees) are changed with time at noon.

在秋季叶片变色期, 叶绿素含量的变化以及叶片含水量的变化所导致的。在短波近红外波段(770–1100 nm)所呈现的不同很大程度上是因为在秋季叶片变色期细胞结构变化导致的。

## 2.4 PRI随观测角度的变化

北京奥林匹克森林公园是人工栽植的混合林, 植被异质性较大。在15 min的光谱观测中, PRI随观测角度急剧变化。由于在这15 min里太阳辐射几乎是不变的, PRI的变化在很大程度上是由于所观测到的植被不同, 以及在不同角度观测到的相同植被林冠层的不同部位造成的。图4中的两幅图的光谱数据是来自2012年8月31号晴朗天气条件下10:45–11:00的数据集。图4A是PRI随不同观测方位角和不同观测角度的变化。4个观测角度的PRI值变化值基本上表现出相似的变化趋势。图4B是PRI随

太阳方位角和观测方位角之间的角度的变化,大体上呈现出4个观测角的轨迹点。这是由于在每一个观测点所观测到的植被的不同和与太阳位置的不同所引起的。为了与半小时平均的 $LUE$ 相比较,在冠层水平上的 $PRI$ 的计算来自多角度的平均值,这样可以在某种程度上在几百个不同角度的采样点中减小由于观测角度或者是植被不同所带来的影响。

## 2.5 环境因子、 $GPP$ 、 $PRI$ 和 $LUE$ 随时间的变化

图5中说明了总初级生产力( $GPP$ )和环境影响因子、 $PRI$ 、 $LUE$ 的时间变化特征。由于仪器维修在235到243天没有数据,浅层土壤温度( $T_{soil}$ )、饱和水汽压差( $VPD$ )、 $PAR$ 、 $GPP$ 、 $LUE$ 大体上呈现出相似的时间变化,随时间而逐渐下降。 $GPP$ 和 $PAR$ 随时间的变化趋势尤其相似,决定系数 $R^2 = 0.30$  ( $p < 0.001$ ,  $n = 946$ )。说明 $PAR$ 与 $GPP$ 紧密相关,在一定程度上控制着植被光合速率的变化。 $PRI$ 大体上可以追踪 $LUE$ 的变化。虽然 $PRI$ 和 $LUE$ 是相互关联的,但是 $LUE$ 的时间变化特征更加明显,而 $PRI$ 变化相对分散。

如图6中所示, $PAR$ 解释了 $LUE$  21%的变化,其次是 $T_{soil}$ 和 $VPD$ 。其中 $LUE$ 随 $PAR$ 和 $VPD$ 的升高而降低,随 $T_{soil}$ 的升高而缓慢升高。 $PAR$ 解释了 $PRI$  64%的变化,其次是 $VPD$ 。 $T_{soil}$ 和 $PRI$ 之间的关系非常微弱。 $PRI$ 随 $PAR$ 的升高急剧下降。

## 2.6 $PRI$ 和 $LUE$ 关系的时间变化

选取研究期间一天中有多于5个观测质量良好、

太阳高度角较高的数据集的日期,在0.5 h平均时间尺度上做相关性分析,得到 $PRI$ 和 $LUE$ 的相关性系数 $r$ (图7A)。

$LUE$ - $PRI$ 的关系随着天气状况变化而改变。在雨天或者阴天的时候,一些没被预期的 $PRI$ - $LUE$ 负相关关系被观测到(图7)。这可能是由于奥林匹克森林公园的开路涡度相关系统传感器受到下雨或者阴天的影响,测量通量的准确性降低。在阴天或者雨天光照情况的改变以及水分在叶片上的积累,对光谱观测也造成一定的影响。另外散射辐射和直射辐射比例的变化也会影响 $PRI$ - $LUE$ 关系。因此,通量观测的 $LUE$ 估算和光谱测量上的不确定性导致了 $PRI$ - $LUE$ 的关系变化。

图8显示的是 $LUE$ - $PRI$ 在整个研究期内在0.5 h和日时间尺度上的相关性。在0.5 h和日时间尺度上 $LUE$ 和 $PRI$ 呈现显著的线性关系,决定系数分别为 $R^2 = 0.41$ ,  $R^2 = 0.55$ 。在整个研究期间0.5 h和日时间尺度的 $PRI$ - $LUE$ 决定系数的不同说明时间步长对 $PRI$ - $LUE$ 关系也有影响。这可能是由于 $PRI$ 和 $LUE$ 在不同时间步长的环境有所变化,主要环境控制因素不同所导致的。

通过确定植被物候期,发现在秋季植被正常生长期和植被落叶期的分界线即在第290天前,在日时间尺度上 $PRI$ 和 $LUE$ 的关系急剧变化,通过对两个物候期相关性分析得到显著性线性回归系数分别为 $R^2 = 0.70$  ( $p < 0.001$ ),  $R^2 = 0.21$  ( $p < 0.001$ )。

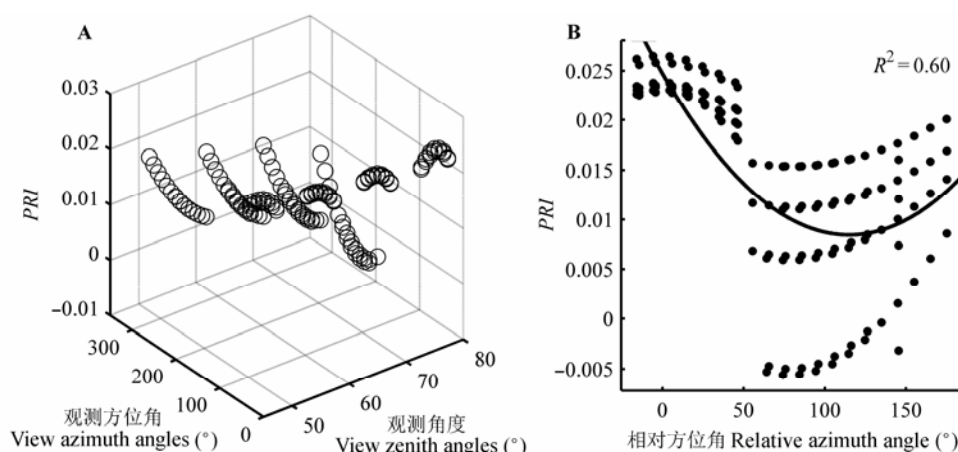


图4 光化学植被指数( $PRI$ )随不同观测角度的变化。A,  $PRI$ 随不同方位角和不同观测角度的变化。B,  $PRI$ 随观测方位角和太阳方位角之间的角度的变化。A和B的数据都来源于2012年8月31日10:45–11:00的数据。

Fig. 4 Variability of photochemical reflectance index ( $PRI$ ) with different view angles. A, variability of  $PRI$  with different view azimuth angles (VAA) and view zenith angles (VZA). B, Illustrated  $PRI$  variations in relation to the angle between sun and viewer. Data obtained from 10:45 to 11:00 on August 31, 2012.



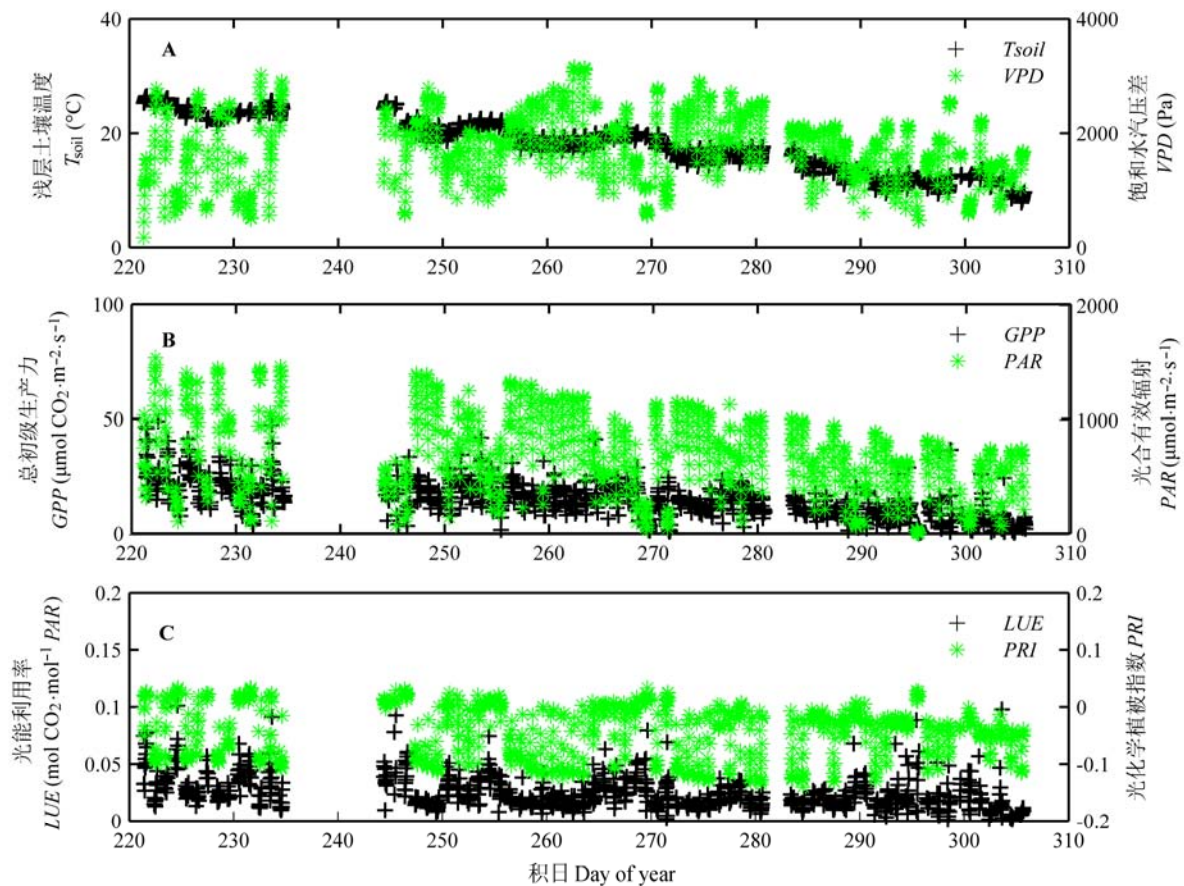


图5 浅层土壤温度 $T_{\text{soil}}$  (10 cm)、饱和水汽压差(VPD)、总初级生产力(GPP)、光合有效辐射(PAR)、光化学植被指数(PRI)和光能利用率(LUE)的时间变化。PRI和LUE的测量时间为9:00–16:00。

**Fig. 5** Time variations of soil temperature ( $T_{\text{soil}}$ ), vapour pressure deficit (VPD), gross primary productivity (GPP), photosynthetically active radiation (PAR), photochemical reflectance index (PRI) and light use efficiency (LUE). PRI and LUE are measured every half hour from 9:00 to 16:00.

说明在植被正常生长期,  $PRI$ 和 $LUE$ 之间存在着高度的线性正相关关系, 这和以往在冠层尺度上得到的二者之间的关系相类似,  $PRI$ 很好地响应了 $LUE$ 的变化, 尤其是在秋季正常生长期捕捉到了光能利用率的下降趋势。但是在植被落叶期,  $PRI$ 和 $LUE$ 之间的关系明显减弱( $R^2 = 0.21$ ), 这是由于叶片逐渐变黄, 叶绿素浓度降低, 暴露出来的土壤背景等所导致的。

### 2.7 环境因子对 $PRI$ - $LUE$ 关系的影响。

水分、光照、温度是控制光合作用的基本因素, 但是在不同的生态系统中不同的环境条件下每个环境因子所起的作用是不同的。我们现在研究这些环境因子对 $PRI$ - $LUE$ 的影响, 以及 $PRI$ 预测 $LUE$ 的能力。在土壤温度小于 $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的时候, 随着土壤温度的升高,  $PRI$ - $LUE$ 的相关系数逐渐升高, 大于 $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的时候,  $PRI$ - $LUE$ 之间的相关性基本保持一致。

$PRI$ - $LUE$ 的相关性随 $PAR$ 的升高先增加后减小。 $PRI$ - $LUE$ 的相关性随 $VPD$ 的增加在小于 $700\text{ Pa}$ 的时候迅速增加, 当大于 $700\text{ Pa}$ 的时候缓慢增加。说明只有在某种环境条件下,  $PRI$ - $LUE$ 才具有良好的相关性。

## 3 讨论

由于多变的环境因子与植被物候期的变化所带来的环境以及植被生理上的变化,  $PRI$ 与 $LUE$ 之间的关系呈现出复杂的时间变化。通过 $0.5\text{ h}$ 、日平均以及不同的物候期的研究, 在城市绿地生态系统中,  $PRI$ 展现出了作为 $LUE$ 预测者的潜力, 但是只有在某种环境因子和正常生长期相关性最好。

在长时间水平上,  $PRI$ 和 $LUE$ 之间的关系是显著的, 但是分散的。环境影响因子可能是造成这种分散关系最主要的因素。首先, 在不同的时间尺度

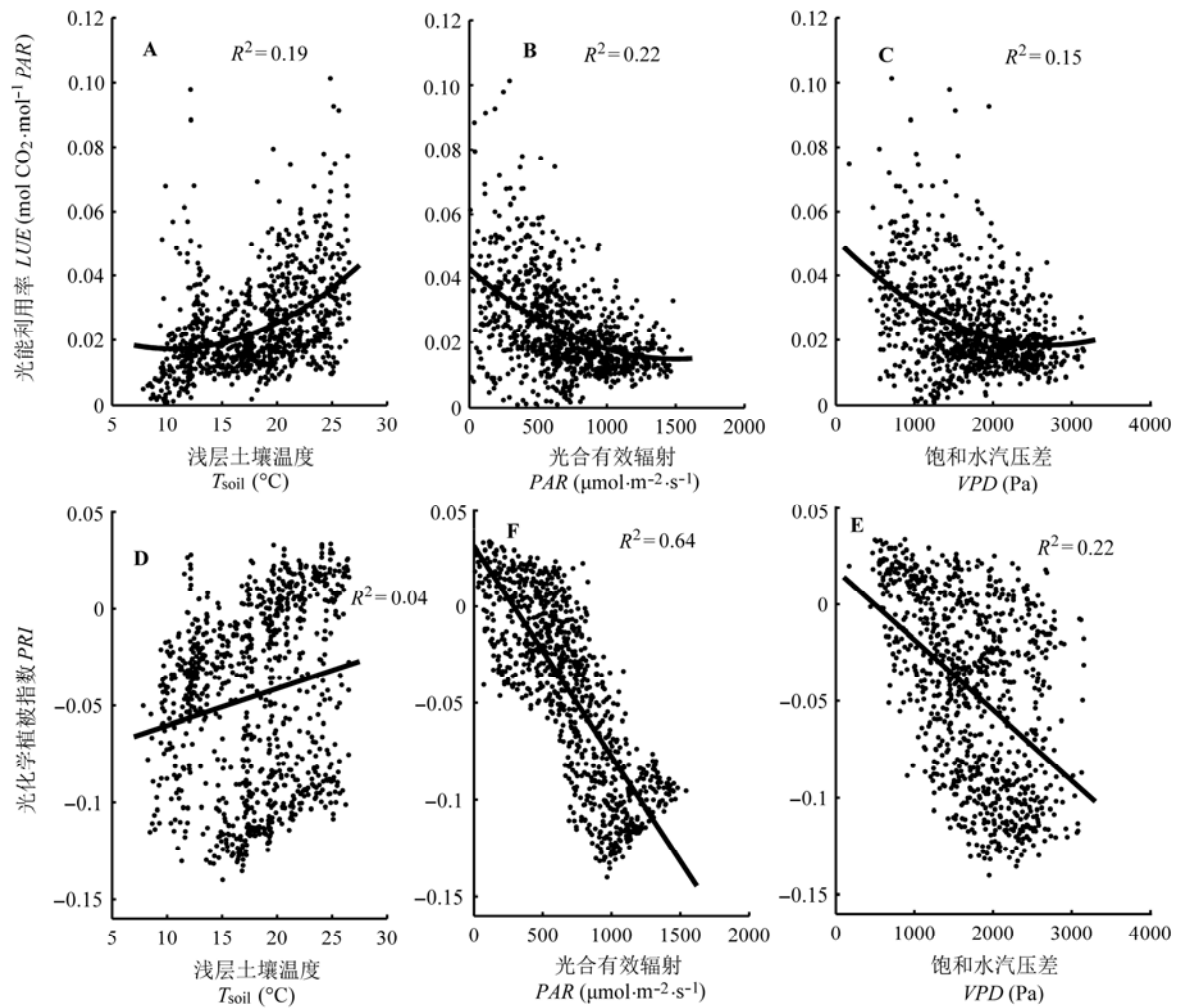


图6 研究期9:00–16:00的0.5 h的环境因子( $T_{\text{soil}}$ 、PAR、VPD)与光能利用率(LUE)的相关性(A–C)及与光化学植被指数(PRI)的相关性(D–F)。PAR, 光合有效辐射;  $T_{\text{soil}}$ , 浅层土壤温度; VPD, 饱和水汽压差。

**Fig. 6** Relationships of half-hour bioclimatic parameters ( $T_{\text{soil}}$ , PAR and VPD) with light use efficiency (LUE) (A–C) and with photochemical reflectance index (PRI) (D–F) observed 9:00–16:00 each day across the autumn. PAR, photosynthetically active radiation;  $T_{\text{soil}}$ , soil temperature; VPD, vapour pressure deficit.

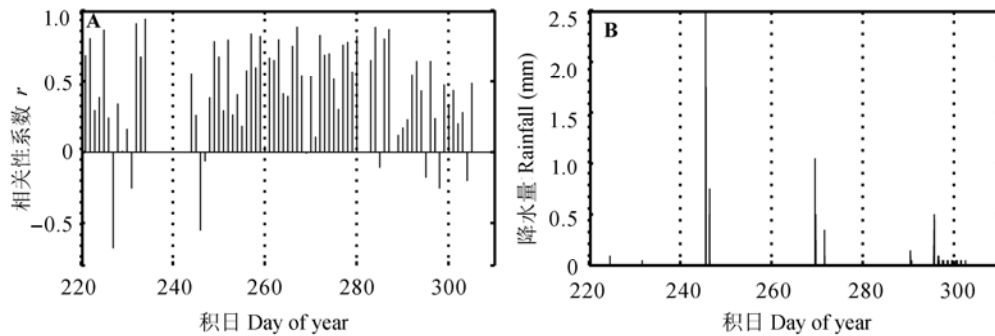


图7 每天9:00–16:00的0.5 h的光化学植被指数(PRI)与光能利用率(LUE)之间的相关系数( $r$ )(A)及研究期内0.5 h的降水量(B)。图A中正数代表正相关, 负值代表负相关。

**Fig. 7** Correlation coefficients ( $r$ ) of half-hour photochemical reflectance index (PRI) with light use efficiency (LUE) on individual days, with data acquired 9:00–16:00 (A) and half hour rainfall during the study period (B). The length of error-bars represents the  $p$  value of each linear regression. Positive indicate positive correlation, and negative indicate negative correlation in Fig. 7A.



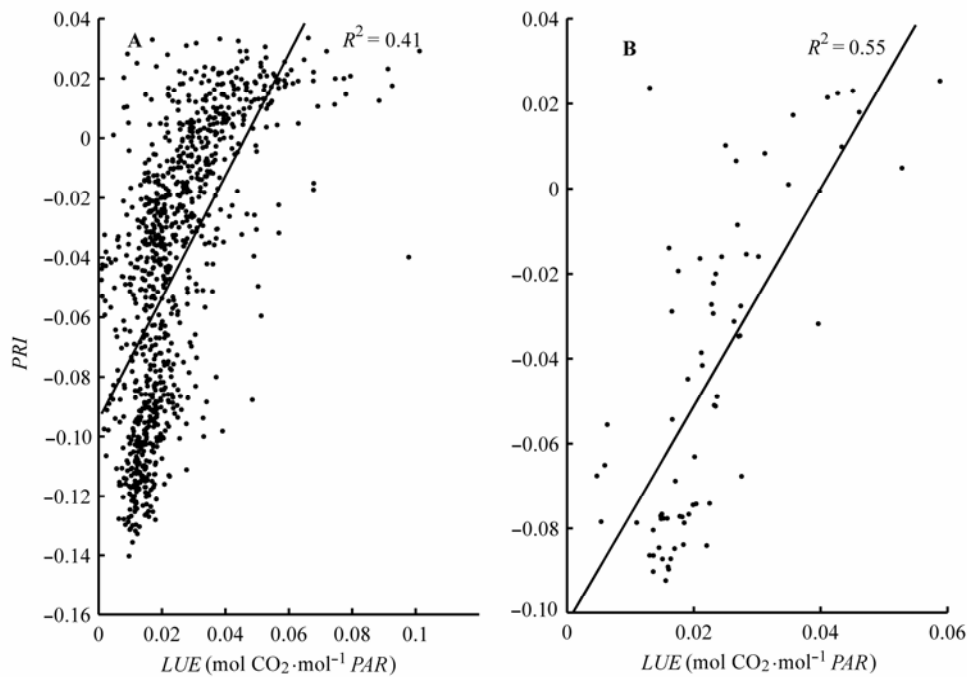


图8 研究期9:00–16:00的数据计算的0.5 h (A)和日平均(B)的光化学植被指数(PRI)与光能利用率(LUE)之间的相关性。  
**Fig. 8** Relationships between half-hour (A) and daily (B) average photochemical reflectance index (PRI) and light use efficiency (LUE), calculated using data observed 9:00–16:00 each day throughout the study period.

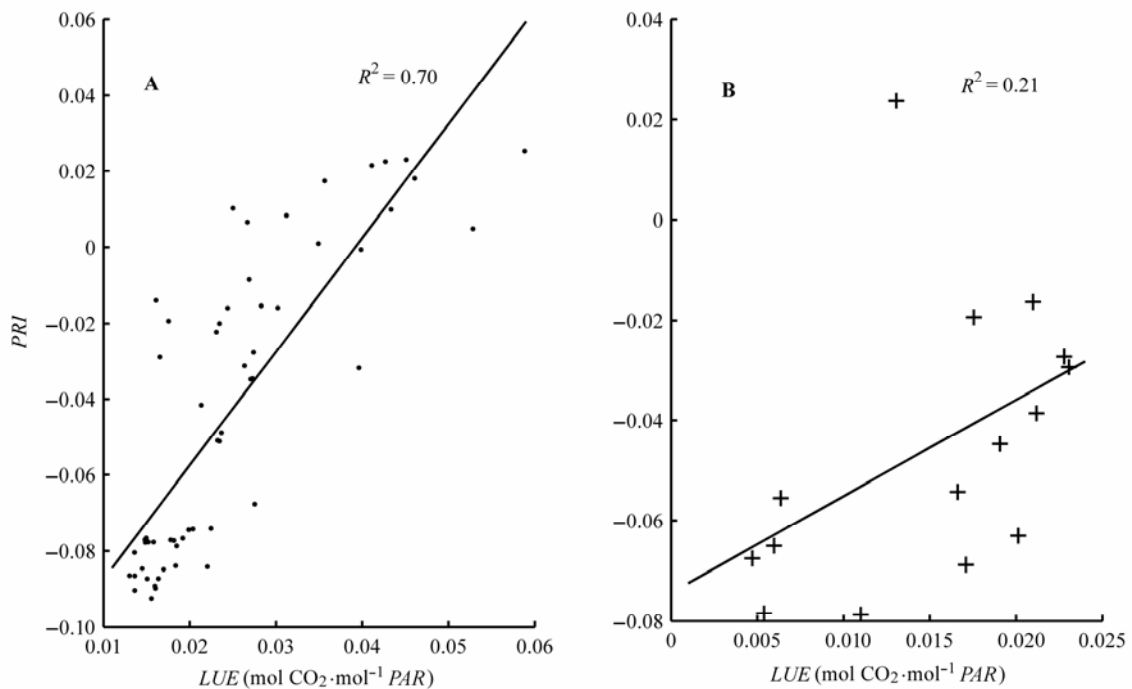


图9 秋季植被正常生长期(A)和植被落叶期(B) 9:00–16:00的日平均光化学植被指数(PRI)与光能利用率(LUE)的线性相关性。  
**Fig. 9** Linear relationships between daily average photochemical reflectance index (PRI) and light use efficiency (LUE), calculated using data observed 9:00–16:00 each day in the regular growth period (A) and leaf fall period (B).

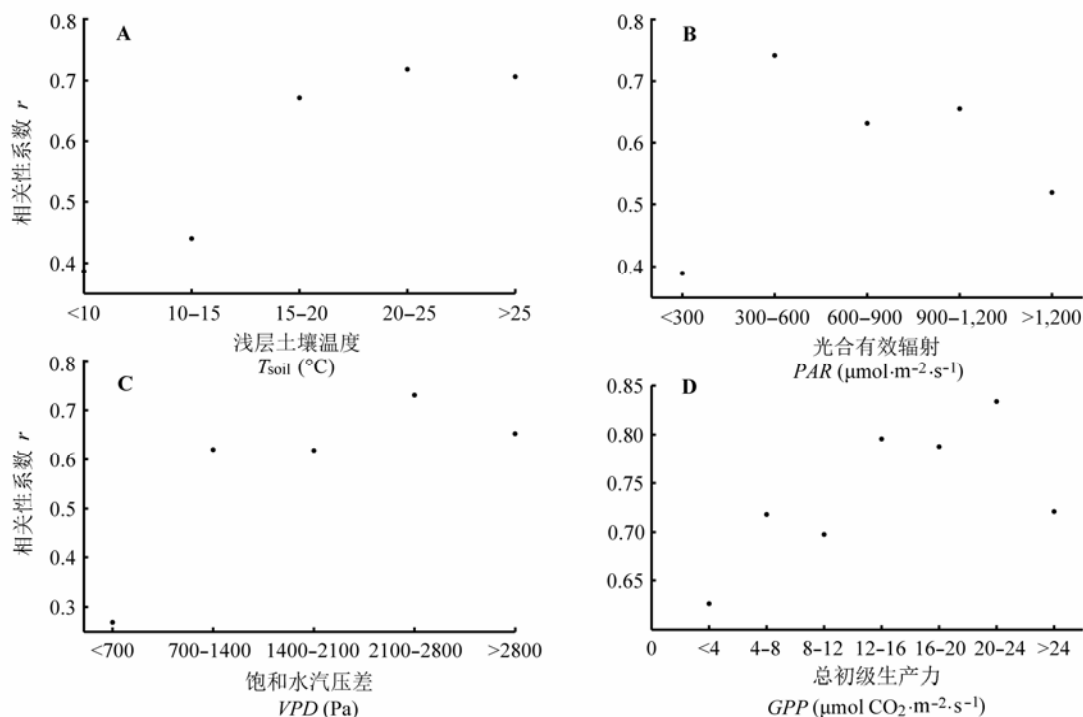


图10 在特定环境因子下光化学植被指数(PRI)与光能利用率(LUE)之间的相关性系数。

**Fig. 10** Average diurnal correlation coefficients ( $r$ ) of half-hourly photochemical reflectance index (PRI) with light use efficiency (LUE) in relation to individual bioclimatic factors or gross primary productivity (GPP) throughout the whole season.

上, 太阳辐射影响PRI-LUE关系。随着太阳辐射的增加, PRI和LUE之间的相关性是先增大后减小。PAR与PRI和LUE之间的关系最密切, 在阴天和雨天时, 所出现的PRI-LUE之间的负相关关系除了观测所带来的误差, 还可能由于光照情况的不同引起。因此, 影响PRI-LUE关系的最重要的因素是PRI和PAR之间的关系。太阳角度和观测角度对PRI的影响已经有许多方法讨论过, 但是多角度观测是解决这个问题的最好的方法。

Wong和Gamon (2015)及Filella等(2009)研究发现, 长期的PRI的变化, 主要由色素含量或者是胡萝卜素和叶绿素的比率所导致。在城市陆地生态系统, 秋季植被落叶期大量的老叶开始凋落, 这就意味着冠层胡萝卜素和叶绿素的比率发生很大的时间变化。另外, 胡萝卜素和叶绿素的比率在垂直方向上也发生变化。然而, 影响PRI-LUE关系的这些变化的方式和内在机制可能有所不同或者是在不同的时间尺度上有很大的不同, 这样引起了PRI-LUE在整个秋季期间关系的分散。

在本研究中我们使用绿度指数划分不同的物候时期, 来减小色素含量比例变化所带来的影响。

在秋季植被正常生长期时多角度高光谱连续观测的日平均PRI在塔尺度上可以成功地估算LUE。这个结果也进一步表明了虽然多物种对PRI和LUE的变化具有不同的响应, 但是由于塔尺度上多角度高光谱观测的足迹和通量观测足迹的相近, 可以观测到多种植被的多角度高光谱特性以及相似足迹的通量观测的多种植被的光合作用, 克服了在冠层尺度上只在一定角度观测某种或几种植被光谱与通量估算的LUE之间在空间和时间上差异的影响, 以及利用BRDF模型把观测角度和光照条件统一, 消除由于观测角度和光照情况引起的差异, 从而可以用PRI成功地估算LUE。由于在植被落叶期, PRI和LUE之间的关系明显减弱( $R^2 = 0.21$ ), 为了提高LUE在低叶绿素浓度时的估算精度, 选用了叶绿素含量更加敏感的550 nm波段的PRI<sub>R2</sub>探讨在植被落叶期估算LUE的精度。经分析, PRI<sub>R2</sub>-LUE之间的决定系数为0.51 (图11)。结果说明在低叶绿素的情况下PRI<sub>R2</sub>相对于PRI能够更准确地预测LUE。这和Wu等(2010)在研究小麦的PRI-LUE关系时的结果相似。

PRI-LUE关系在各个生态系统中不断地被研

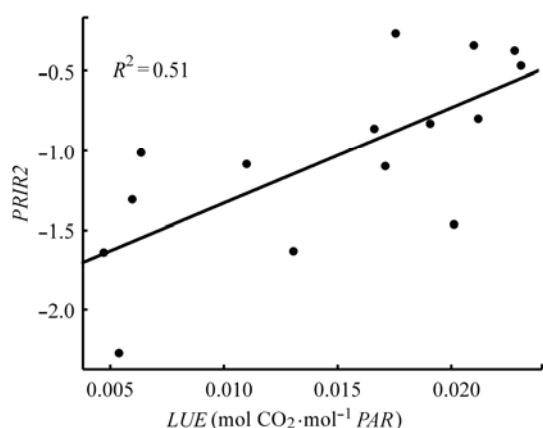


图11 植被落叶期修正光化学植被指数( $PRIR2$ )随光能利用率( $LUE$ )的变化。

Fig. 11 Revised photochemical reflectance index ( $PRIR2$ ) changes with light use efficiency ( $LUE$ ) in the senescence stage.

究, 但是一个普遍适用的 $PRI$ - $LUE$ 关系还没有被发现, 这是由于在不同的环境条件下植被光合作用对太阳辐射的复杂响应以及 $PRI$ - $LUE$ 关系对于环境因子的敏感性在不同的生态系统中具有不同的变化。

#### 4 结论

城市绿地生态系统物种较多, 植被类型较多, 空间异质性较大, 形成了一个独特的生态系统。因此, 以前在单一植被冠层的 $PRI$ - $LUE$ 经验关系, 在城市绿地生态系统中并不适用。自动多角度光谱仪连续观测平台系统可以和通量观测在时空上相匹配, 有利于 $LUE$ 更加精准地估算。

2012年8月8日到2012年10月31日在奥林匹克森林公园, 我们获取了多角度的光谱数据和通量数据, 用以研究 $PRI$ 和 $LUE$ 之间的关系以及 $PRI$ 预测 $LUE$ 的能力。研究发现: (1)在秋季落叶期, 植被反射率在近红外波段发生了很大的变化, 很可能是由于植被内部结构的变化, 这可以为植被季节变化起到指示作用。植被的物候期影响着植被生理生化过程。秋季落叶期植被绿度指数呈现逐渐下降的趋势, 与光能利用率的变化趋势相似, 通过和空气温度作回归分析, 决定系数为 $R^2 = 0.60$  ( $p < 0.001$ ), 说明绿度指数可以反映植被的物候变化和光合作用过程, 空气温度是决定植被的物候过程的主要驱动因素。(2)在0.5 h时间尺度上,  $LUE$ 随土壤温度的增加而增加, 随 $PAR$ 和 $VPD$ 的增加而减小。 $PRI$ 随 $PAR$ 和 $VPD$ 的增加而减小, 与土壤温度的关系比较微弱。

在日时间尺度上, 在晴天 $PRI$ - $LUE$ 之间显著正相关。在雨天或者阴天, 一些不被预期的负相关关系被发现。(3)在整个研究期间, 在0.5 h和日时间尺度上,  $PRI$ 和 $LUE$ 之间线性关系显著。在秋季不同的物候期 $PRI$ 和 $LUE$ 的关系发生了显著变化。在秋季正常生长期,  $PRI$ - $LUE$ 之间的关系最紧密, 决定系数为0.70。(4)  $PRI$ 预测 $LUE$ 的能力随环境因子的变化而发生改变。大体上来说,  $PRI$ 在日时间尺度上比0.5 h时间尺度上能够更好地预测 $LUE$ 的变化。当土壤温度大于 $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $PAR$ 大于 $300\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 以及 $VPD$ 大于 $700\text{ Pa}$ 的情况下,  $PRI$ 和 $LUE$ 的相关性最强。

基金项目 国家自然科学基金项目(41571504)和国家科技支撑项目(2013BAC03B04)。

#### 参考文献

- Adamsen FG, Pinter PJ, Barnes EM, LaMorte RL, Wall GW, Leavitt SW, Kimball BA (1999). Measuring wheat senescence with a digital camera. *Crop Science*, 39, 719–724.
- Barton C, North P (2001). Remote sensing of canopy light use efficiency using the photochemical reflectance index: Model and sensitivity analysis. *Remote Sensing of Environment*, 78, 264–273.
- Chen WJ, Li CY, He GM, Wang XP, Zha TS, Jia X (2013). Dynamics of  $\text{CO}_2$  exchange and its environmental controls in an urban green-land ecosystem in Beijing Olympic Forest Park. *Acta Ecologica Sinica*, 33, 6712–6720. (in Chinese with English abstract) [陈文婧, 李春义, 何桂梅, 王小平, 查天山, 贾昕 (2013). 北京奥林匹克森林公园绿地碳交换动态及其环境控制因子. 生态学报, 2013, 33, 6712–6720.]
- Filella I, Porcar-Castell A, Munné-Bosch S, Bäck J, Garbulsky M, Peñuelas J (2009). PRI assessment of long-term changes in carotenoids/chlorophyll ratio and short-term changes in de-epoxidation state of the xanthophyll cycle. *International Journal of Remote Sensing*, 30, 4443–4455.
- Gamon J, Serrano L, Surfus J (1997). The photochemical reflectance index: An optical indicator of photosynthetic radiation use efficiency across species, functional types, and nutrient levels. *Oecologia*, 112, 492–501.
- Gamon JA, Field CB, Bilger W, Björkman O, Fredeen AL, Peñuelas J (1990). Remote sensing of the xanthophyll cycle and chlorophyll fluorescence in sunflower leaves and canopies. *Oecologia*, 85, 1–7.
- Gamon JA, Penuelas J, Field CB (1992). A narrow-waveband spectral index that tracks diurnal changes in photosynthetic efficiency. *Remote Sensing of Environment*, 41, 35–44.
- Gu LH, Wilfred MP, Dennis DB, Andy BT, Shashi BV, Timo V, Steve CW (2003). Phenology of vegetation photosystem. In: Schwartz MD ed. *Phenology: An Integrative*



- Environmental Science*. Springer, New York.
- Hall FG, Hilker T, Coops NC (2011). PHOTOSYNSTAT, photosynthesis from space: Theoretical foundations of a satellite concept and validation from tower and spaceborne data. *Remote Sensing of Environment*, 115, 1918–1925.
- Hall FG, Hilker T, Coops NC (2012). Data assimilation of photosynthetic light-use efficiency using multi-angular satellite data: I. Model formulation. *Remote Sensing of Environment*, 121, 301–308.
- Hall FG, Hilker T, Coops NC, Lyapustin A, Huemmrich KF, Middleton E, Margolis H, Drolet G, Black TA (2008). Multi-angle remote sensing of forest light use efficiency by observing PRI variation with canopy shadow fraction. *Remote Sensing of Environment*, 112, 3201–3211.
- Hilker T, Coops NC, Hall FG, Black TA, Wulder MA, Nesic Z, Krishnan P (2008). Separating physiologically and directionally induced changes in PRI using BRDF models. *Remote Sensing of Environment*, 112, 2777–2788.
- Hilker T, Gitelson A, Coops N, Hall F, Black T (2011). Tracking plant physiological properties from multi-angular tower-based remote sensing. *Oecologia*, 165, 865–876.
- Hilker T, Hall FG, Tucker CJ, Coops NC, Black TA, Nichol CJ, Sellers PJ, Barr A, Hollinger DY, Munger JW (2012a). Data assimilation of photosynthetic light-use efficiency using multi-angular satellite data: II Model implementation and validation. *Remote Sensing of Environment*, 121, 287–300.
- Hilker T, Lyapustin AI, Tucker CJ, Sellers PJ, Hall FG, Wang Y (2012b). Remote sensing of tropical ecosystems: Atmospheric correction and cloud masking matter. *Remote Sensing of Environment*, 127, 370–384.
- Hu MM (2009). *Preliminary Study on Plant Landscape and Eco-efficiency of Beijing Olympic Forest Park*. Master degree dissertation, Beijing Forestry University, Beijing. (in Chinese). [胡淼淼 (2009). 北京奥林匹克森林公园植物景观与生态效益初探. 硕士学位论文, 北京林业大学, 北京.]
- Lucht W, Schaaf CB, Strahler AH (2000). An algorithm for the retrieval of albedo from space using semiempirical BRDF models. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 38, 977–998.
- Millward AA, Sabir S (2011). Benefits of a forested urban park: What is the value of Allan Gardens to the city of Toronto, Canada? *Landscape and Urban Planning*, 100(3), 177–188.
- Nakaji T, Oguma H, Fujinuma Y (2006). Seasonal changes in the relationship between photochemical reflectance index and photosynthetic light use efficiency of Japanese larch needles. *International Journal of Remote Sensing*, 27, 493–509.
- Nakaji T, Reiko I, Kentaro T, Yoshiko K, Shinjiro O, Kenlo NN, Nobuko S, Hiroyuki O (2008). Utility of spectral vegetation indices for estimation of light conversion efficiency in coniferous forests in Japan. *Agricultural and Forest Meteorology*, 148, 776–787.
- Nichol CJ, Lloyd J, Shibistova O (2002). Remote sensing of photosynthetic-light-use efficiency of a Siberian boreal forest. *Tellus*, 54B, 677–687.
- Nightingale JM, Coops NC, Waring RH, Hargrove WW (2007). Comparison of MODIS gross primary production estimates for forests across the U.S.A. with those generated by a simple process model, 3-PGS. *Remote Sensing of Environment*, 109, 500–509.
- Peng T, Yao G, Gao HY, Li PM, Wang WW, Sun S, Zhao SJ (2009). Relationship between xanthophyll cycle and photochemical reflectance index measured at leaf or canopy level in two field-grown plant species. *Acta Ecologica Sinica*, 29, 1987–1993. (in Chinese with English abstract) [彭涛, 姚广, 高辉远, 李鹏民, 王未未, 孙山, 赵世杰 (2009). 植物叶片和冠层光化学反射指数与叶黄素循环的关系. 生态学报, 29, 1987–1993.]
- Penuelas J, Gamon JA, Griffin KL, Field CB (1993). Assessing community type, plant biomass, pigment composition, and photosynthetic efficiency of aquatic vegetation from spectral reflectance. *Remote Sensing of Environment*, 46, 110–118.
- Penuelas J, Garbulsky MF, Gamon J, Inoue Y, Filella I (2011b). The photochemical reflectance index (PRI) and the remote sensing of leaf, canopy and ecosystem radiation use efficiencies: A review and meta-analysis. *Remote Sensing of Environment*, 115, 281–297.
- Porcar-Castell A, Garcia-Plazaola JJ, Nichol CJ, Kolari P, Olascoaga B, Kuusinen N, Fernández-Marín B, Pulkkinen M, Juurola E, Nikinmaa E (2012). Physiology of the seasonal relationship between the photochemical reflectance index and photosynthetic light use efficiency. *Oecologia*, 1–11.
- Rahman A, Cordova V, Gamon J, Schmid H, Sims D (2004). Potential of MODIS ocean bands for estimating CO<sub>2</sub> flux from terrestrial vegetation: A novel approach. *Geophysical Research Letters*, 31, L10503.
- Richardson AD, Braswell BH, Hollinger DY, Jenkins JP, Ollinger SV (2009). Near-surface remote sensing of spatial and temporal variation in canopy phenology. *Ecological Applications*, 19, 1417–1428.
- Richardson AD, Jenkins JP, Braswell BH, Hollinger DY, Ollinger SV, Smith ML (2007). Use of digital webcam images to track spring green-up in a deciduous broadleaf forest. *Oecologia*, 152, 323–334.
- Wang LW, Wei YX (2015). A review on inversion of vegetation light use efficiency by hyper spectral remote sensing. *Geomatics & Spatial Information Technology*, 38(6), 15–22, 38. (in Chinese with English abstract) [王莉雯, 卫亚星 (2015). 植被光能利用率高光谱遥感反演研究进

展. 测绘与空间地理信息, 38(6), 15–22, 38.]

Wong CY, Gamon JA (2015). Three causes of variation in the photochemical reflectance index (PRI) in evergreen conifers. *The New Phytologist*, 206, 187–195.

Wu CY, Chen JM, Ankur RD, David YH, Altaf M, Hank AM, Christopher MG, Ralf MS (2012). Remote sensing of canopy light use efficiency in temperate and boreal forests of North America using MODIS imagery. *Remote Sensing of Environment*, 118, 60–72.

Wu CY, Niu Z, Tang Q, Huang WJ (2010). Revised photochemical reflectance index (PRI) for predicting light use efficiency of wheat in a growth cycle: Validation and comparison. *International Journal of Remote Sensing*, 31,

2911–2924.

Zhou L, He HL, Zhang L, Sun XM, Shi PL, Ren XL, Yu GR (2012). Simulations of phenology in alpine grassland communities in Damxung, Xizang, based on digital camera images. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 36, 1125–1135. (in Chinese with English abstract) [周磊, 何洪林, 张黎, 孙晓敏, 石培礼, 任小丽, 于贵瑞 (2012). 基于数字相机图像的西藏当雄高寒草地群落物候模拟. 植物生态学报, 36, 1125–1135.]

责任编辑: 张扬建 责任编辑: 李 敏



植物生态学报官网



微信订阅号  
期刊及学科  
相关信息发布



微信服务号  
稿件状态查询  
全文检索浏览