

DOI: 10.5846/stxb201603080411

卫楠,张弥,王辉民,张雷明,温学发,刘寿东. 散射辐射对亚热带人工针叶林光能利用率的影响. 生态学报, 2017, 37(10): - .
作者. The impacts of changes in diffuse radiation on light use efficiency in a subtropical plantation coniferous forest. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(10):

散射辐射对亚热带人工针叶林光能利用率的影响

卫楠¹, 张弥^{1,*}, 王辉民², 张雷明², 温学发², 刘寿东¹

1 南京信息工程大学气象灾害教育部重点实验室, 气候与环境变化国际合作联合实验室, 气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 耶鲁-南京信息工程大学大气环境研究中心, 南京 210044

2 中国科学院地理科学与资源研究所, 生态系统网络观测与模拟重点实验室, 北京 100101

摘要: 地表接受的太阳辐射中散射辐射的改变是影响森林生态系统光能利用率 (Light Use Efficiency, LUE) 的重要因素。以千烟洲亚热带人工针叶林为研究对象, 利用 30 min 通量和常规气象观测数据, 以晴空指数 (k_t) 和地表接受的散射辐射 (S_f) 占太阳总辐射 (S_0) 的比值 (S_f/S_0) 为指标, 分析了 2003—2012 年生长旺季 (6—8 月) 散射辐射变化对千烟洲亚热带人工针叶林光能利用率的影响, 并利用改进的光响应曲线模型分析了散射辐射变化对植被光合特性的影响。研究结果表明: 2003—2012 年生长旺季中, k_t 在 0.6—0.7 范围内的 LUE 比 k_t 在 0.4—0.5 范围内的 LUE 平均减少了 44.66%; S_f/S_0 在 70%—85% 之间的 LUE 比 S_f/S_0 在 55%—70% 之间的 LUE 平均提高了 22.24%。由此可以看出, 与晴朗天空相比, 多云及气溶胶增加导致的散射辐射增加可使该生态系统的 LUE 提高。并且, 未受到高温干旱影响的 2005、2006、2008、2009、2010 及 2012 年散射辐射下该生态系统的初始量子效率 α_f 比直接辐射下的 α_t 平均增加了 0.63 gCO₂/mol; 而 10 年间所有年份散射辐射下的光饱和时的潜在最大光合速率比直接辐射下平均提高了 0.81 mgCO₂ m⁻² s⁻¹, 说明散射辐射可使该生态系统植被光合能力提高。

关键词: 光能利用率; 散射辐射; 晴空指数; 千烟洲亚热带人工针叶林

The impacts of changes in diffuse radiation on light use efficiency in a subtropical plantation coniferous forest

WEI Nan¹, ZHANG Mi^{1,*}, WANG Huimin², ZHANG Leiming², WEN Xuefa², LIU Shoudong¹

1 Key Laboratory of Meteorological Disaster, Ministry of Education, International Joint Laboratory on Climate and Environment Change, Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Yale-NUIST Center on Atmospheric Environment, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China

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

Abstract: Changes in diffuse radiation received at the ground surface impact light use efficiency (LUE) of the forest ecosystem. In this study, we focused on a subtropical plantation coniferous forest at Qianyanzhou. Based on 30 min flux data, routine meteorological data, and two indexes, clearness index (k_t) and the ratio (S_f/S_0) of diffuse radiation (S_f) to global solar radiation (S_0), we analyzed the impacts of changes in diffuse radiation on light use efficiency in this ecosystem during the mid-growing season (June to August) from 2003 to 2012. Moreover, applying the modified light response model, we investigated effects of changes in diffuse radiation on vegetation photosynthetic characteristics. The results indicated that the LUE decreased by a mean of 44.66% in k_t range of 0.6 to 0.7 during the mid-growing season from 2003 to 2012, compared that in k_t range of 0.4 to 0.5. In the same period, the LUE increased by a mean of 22.24% in S_f/S_0 range of 70%

基金项目: 国家自然科学基金青年基金 (31200377); 中国科学院战略性先导科技专项项目 (XDA05050208); 高等学校博士学科点专项科研基金新教师类课题 (20123228120003)

收稿日期: 2016-03-08; 网络出版日期: 2016-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhangm.80@nuist.edu.cn

to 85%, compared to that in S_f/S_0 range of 55% to 70%. These results indicated that LUE was higher under cloudy skies and aerosol loading increase conditions than that under clear sky conditions. Moreover, the initial quantum efficiency (α_f) increased by a mean of 0.63 gCO₂/mol under diffuse radiation, comparing with that (α_r) under direct radiation in 2005, 2006, 2008, 2009, 2010, and 2012 during the mid-growing season without drought stress. Regardless of where the water stress occurred, the capacity of a canopy to resist photosynthetic saturation at high levels of PAR (β_f) was greater under diffuse radiation than β_r under direct radiation by a mean of 0.81 mgCO₂ m⁻² s⁻¹. The results verified that diffuse radiation improved the photosynthetic capacity of the forest ecosystem.

Key Words: light use efficiency; diffuse radiation; clearness index; subtropical plantation coniferous forests at Qianyanzhou

太阳辐射是植被光合作用的能量来源,也是气候形成及变化的重要驱动因子^[1]。然而,当天空云量及大气气溶胶改变时,会影响到达地表的总太阳辐射强度及散射辐射与直接辐射之间的比例,从而影响陆地生态系统的光合生产力^[2]。研究发现,近 55 年来中国地面太阳辐射的变化特征与全球变化特征相一致,即经历了先逐渐降低变暗,而后逐渐升高变亮的变化过程^[3-6]。太阳辐射的变化尤其是散射辐射比例的改变势必会影响陆地生态系统对碳的固定及其光能利用率。

光能利用率(Light Use Efficiency, LUE)是表征植物利用太阳能通过光合作用转化有机物的效率^[7]。一个地区生态系统生产力的大小与该地区植被光能利用效率有直接关系^[8-9]。理论上植被叶片中的叶绿体对光的转化率最高可达 20%—25%,但是自然条件下生长的植被对光能的利用率却不到 1%^[10-11]。由此可以看出,找到提高光能利用率的途径成为提高植被生产力的关键问题。森林是重要的陆地生态系统,其光能利用率的变化得到很多学者的关注。大量研究表明,当天空云量及大气气溶胶含量增加导致地表接受的太阳辐射中散射辐射的比例增加时,会使得森林生态系统的光合作用较晴朗天气条件下高^[2,12-14],从而提高了森林生态系统的光能利用率及固碳能力。近年来,我国中东部地区常出现严重的雾霾天气^[15-17]。雾霾天气的出现会导致地表接受的太阳总辐射减少^[6],而散射辐射的比例增加。因此,在当前雾霾天气经常出现的条件下研究散射辐射变化对森林生态系统光能利用率的影响变得尤为重要。

人工林是我国森林生态系统的重要组成部分,面积比居世界首位,因此其对我国陆地生态系统的碳收支会产生巨大影响^[18-20]。我国南方林区以人工林为主,面积占全国人工林的 54.3%,故在当前人为气溶胶排放增加及气候变化条件下,研究散射辐射变化对南方人工林光能利用率的影响能够为更好地评价人工林生态系统在区域碳平衡中的作用提供科学依据。

地处江西省千烟洲的亚热带人工针叶林是我国南方亚热带地区典型的人工林生态系统,大量研究表明,该生态系统净 CO₂交换量(Net Ecosystem Exchange of CO₂, NEE)在 5—6 月出现最高值,而太阳辐射强烈少雨的 7 月份易受高温干旱影响^[18,20-21]。但是同期在散射辐射提高、气温及饱和水汽压差下降的条件下 NEE 会提高^[22]。由此可见,该生态系统生产力受光以及温度、水分等环境因子的影响。在不受干旱胁迫、温度适宜的条件下,植被光能利用率决定着该生态系统的生产力,但是目前该生态系统光能利用率对散射辐射变化的响应,特别是植被在散射辐射及直接辐射条件下光合特性的差异还不明确。本研究以千烟洲亚热带人工针叶林为研究对象,利用 2003—2012 年的 30 min CO₂通量及常规气象观测资料,分析太阳辐射中散射辐射的变化对千烟洲亚热带人工针叶林光能利用率的影响,以及光合有效辐射中散射部分和直接辐射部分对植被光合特性的影响,从而为准确地评价同区域人工林碳汇能力对气候变化的响应特征提供科学依据。

1 研究地概况及研究方法

1.1 研究地概况

千烟洲亚热带人工针叶林位于江西省泰和县,其通量观测塔(26°44′29.1″N, 115°03′29.2″E)位于中国生

态研究网络的千烟洲红壤丘陵农业综合开发实验站内。千烟洲地处亚热带大陆性季风气候区, 海拔高度为 60—120 m, 年平均气温约为 17.8 °C, 年平均降水量为 1360 mm, 年平均太阳总辐射量为 4349 MJ/m²[23]。林内主要植被为马尾松(*Pinus Massoniana*)、湿地松(*P. elliottii*)、杉木(*Cunninghamia lanceolata*)等, 冠层平均高度为 12 m, 覆盖率在 90% 以上。

1.2 研究方法

1.2.1 数据获取

本研究获取 2003—2012 年千烟洲站实时的 30 min CO₂ 通量数据及常规气象数据, 包括太阳总辐射数据(S_0)、光合有效辐射数据(PAR)、温度(气温 T_a 及土壤 5 cm 处的温度 T_s)、饱和水汽压差(VPD)、降水量(P)及土壤表层 5 cm 处的含水量(SWC)。CO₂ 通量数据是由安装在观测塔 39 m 高度处的涡度相关系统观测得到, 该观测系统包括三维超声风速仪(Model CSAT-3, Campbell Scientific)和红外气体分析仪(Model Li-7500, Licor Inc)。仪器原始采样频率为 10 Hz, 数据采集器(CR10XTD, CR23XTD, CR5000)在采集实时数据的同时计算通量数据 30 min 的平均值并进行存储。辐射数据来自 42 m, 气温、水汽压来自 23.5 m 的观测, 详细的站点及数据材料描述见宋霞等[21]的研究。

1.2.2 数据处理

在 CO₂ 通量观测过程中, 由于仪器响应误差、下垫面起伏条件、天气状况等因素的影响, 会造成观测数据出现缺失或异常, 因此需要对获取的 30 min 的 CO₂ 通量数据进行处理。具体操作步骤包括: (1) CO₂ 气体浓度的密度校正; (2) 倾斜校正, 即坐标轴旋转; (3) 储存项校正; (4) 数据筛选和插补, 剔除由于仪器故障、天气以及不符合通量观测条件等导致的无效通量数据, CO₂ 通量数据采用查表法进行插补, 常规气象数据采用滑动平均法进行缺失数据插补[14, 18-19, 24], 最终得到连续半小时的净 CO₂ 交换量, 即 NEE 的数据。

1.2.3 NEE 组分拆分

由于涡度相关法只能直接获取净生态系统 CO₂ 交换量(NEE, 单位: mgCO₂ m⁻² s⁻¹), 该量值为正代表生态系统为碳源, 即释放 CO₂; 该量值为负代表生态系统为碳汇, 即吸收 CO₂。生态系统水平上总初级生产力(GPP, 单位: mgCO₂ m⁻² s⁻¹)无法直接观测, 因此, 需对 NEE 进行组分拆分[25], 计算得到 GPP, 即使用下式:

$$GPP = -NEE + R_e \quad (1)$$

式中, R_e (Ecosystem Respiration)表示生态系统呼吸, 单位: mgCO₂ m⁻² s⁻¹; R_e 是利用 Lloyd-Taylor 方程[26], 使用筛选后的全年夜间有效 NEE 数据与对应有有效的土壤 5 cm 处温度数据对式 2 进行拟合, 并将拟合的方程外推至白天, 从而计算白天的生态系统呼吸, 最终利用式 1 计算出 GPP。

$$R_e = R_{ref} e^{E_0(1/(T_{ref}-T_0) - 1/(T_s-T_0))} \quad (2)$$

式中, T_s 为土壤 5 cm 处温度, 单位: K; R_{ref} 为生态系统在参考温度 T_{ref} (283.1 K) 下的呼吸值, 单位: mgCO₂ m⁻² s⁻¹; E_0 为活化能; T_0 为常数 (-46.02 °C, 即 227.13 K)。

1.2.4 光能利用率(LUE)

生态系统水平的光能利用率为生态系统总初级生产力与植被上方接受的光合有效辐射的比值[27-29]:

$$LUE = \frac{GPP}{PAR} \quad (3)$$

式中, PAR(photosynthetic active radiation)表示相应时间段生态系统接受的光合有效辐射量(μmol m⁻² s⁻¹), 因此 LUE 的单位为(mgCO₂/μmol), 本文进行单位转换, 转换为(gCO₂/mol)。

1.2.5 晴空指数(k_t)

晴空指数(Clearness index, k_t)是指一定太阳高度角下地表接受的总太阳辐射 S_0 (W/m²) 与地球大气层上方平行于地表面上接受的总太阳辐射 S_e (W/m²) 的比值[12]:

$$k_t = \frac{S_0}{S_e} \quad (4)$$

$$S_e = S_{sc} [1 + 0.033 \cos(360t_d/365)] \sinh \quad (5)$$

式中, S_{sc} 为太阳常数 (1370 W/m^2), t_d 为日序数, h 为太阳高度角。晴空指数是天空晴朗程度的判定指标, 当 k_t 接近于 0 时, 天空完全被云层覆盖, 到达地面的太阳辐射非常小; 当 $k_t = 0.5$ 左右时, 为多云天空中等辐射条件, 太阳总辐射下降而散射辐射增加; 当 k_t 接近于 1 时, 天空晴朗无云^[14]。

1.2.6 散射辐射

本文使用散射辐射分割模型简化后的形式对千烟洲人工针叶林接受的散射辐射进行估算^[2,30-31], 方法如下:

$$0 \leq k_t \leq 0.3; S_f/S_e \leq k_t \quad (6)$$

$$S_f/S_e = k_t(1.020 - 0.254k_t + 0.0123\sinh) \quad (7)$$

$$0.3 < k_t < 0.78; 0.1k_t \leq S_f/S_e \leq 0.97k_t \quad (8)$$

$$S_f/S_e = k_t(1.400 - 1.749k_t + 0.177\sinh) \quad (9)$$

$$k_t \geq 0.78; S_f/S_e \geq 0.1k_t \quad (10)$$

$$S_f/S_e = k_t(0.486k_t - 0.182\sinh) \quad (11)$$

式中, S_f 为地表水平面上接受的散射辐射 (W/m^2)。

光合有效辐射的散射辐射部分利用 *Spitters et al.*^[32-33] 提出的经验公式计算。

1.2.7 NEE 对光的响应

本文用 Michaelis-Menten 方程(式 12)对多云及晴朗天空条件下千烟洲人工林生态系统的光响应曲线进行拟合^[13-14,34-35]:

$$\text{NEE} = \frac{\alpha \text{PAR} \beta}{\alpha \text{PAR} + \beta} - R_e \quad (12)$$

式中, α 为生态系统的初始量子效率, 表示弱光条件下植被对光的利用能力 ($\text{mgCO}_2/\mu\text{mol}$), 本文进行单位转换, 转换为 (gCO_2/mol); β 表示生态系统潜在最大光合作用速率 ($\text{mgCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$); 由于 NEE 为负值表示 CO_2 的吸收, 故 α 和 β 都为负值, 所以 α 值的绝对值越大表明植被弱光下对光的利用能力越强, β 值的绝对值越大表明光饱和时的潜在最大光合作用速率越大^[2]。

为区分该森林生态系统光合作用对直接辐射、散射辐射的响应特征, 本文使用 Gu 等^[2] 提出的植被光响应模型, 分析千烟洲人工林生态系统 NEE 对散射辐射与直接辐射的光响应特征:

$$\text{NEE} = \frac{(\alpha_f I_f + \alpha_r I_r)(\beta_f I_f + \beta_r I_r)}{(\beta_f I_f + \beta_r I_r) + (\alpha_f I_f + \alpha_r I_r) I_i} - R_e \quad (13)$$

式中, I_f 和 I_r 分别表示光合有效辐射中散射辐射部分与直接辐射部分, 单位: $\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$; α_f 与 α_r 分别表示生态系统在 I_f 和 I_r 下的光量子初始量子效率 ($\text{mgCO}_2/\mu\text{mol}$), 本文进行单位转换, 转换为 (gCO_2/mol); β_f 与 β_r 分别表示生态系统在 I_f 和 I_r 下的潜在最大光合作用速率 ($\text{mgCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), 由于本模型中采用 NEE 为正值表示 CO_2 吸收, 故 α 、 β 均为正值。

本研究采用 11 天滑动法^[2] 对生长旺盛季节不同时段的光响应曲线进行拟合, 以得到生长旺季内不同时段的光合参数, 即从 6 月 1 日开始到 8 月 30 日, 每 11 天为一组数据进行拟合, 后一个 11 天的开头从前一个 11 天的中间开始, 共拟合 17 次得出 17 组不同参数。

2 结果与讨论

2.1 千烟洲亚热带人工针叶林环境因子的季节变化

千烟洲亚热带人工针叶林气温和降水季节变化如图 1(a) 所示, 气温变化呈单峰型, 多年月平均气温在 7 月份达到最高值, 为 $29.1 \text{ }^\circ\text{C}$, 冬季平均最低气温出现在 1 月份, 为 $4.9 \text{ }^\circ\text{C}$ 。该生态系统总体夏季降水多, 冬季降水少, 总体可以看出 4—6 月气候湿润, 其降水量约占全年降水的 33.6%, 而 7—9 月相对干旱, 这也与王萌

萌等^[22]对 2003—2010 年以及孙晓敏等^[20]对 2003、2004 年千烟洲人工林气温和降水季节动态的研究相一致。饱和水汽压差 (VPD) 表征环境大气的水分亏缺状况, 从图 1(b) 可以看出: 全年中 VPD 在 7、8 月份相对较高, 7 月达到峰值, 说明在 7、8 月份, 空气中水分含量相对较少, 比较干旱; 土壤表层 5 cm 处的含水量在 1—6 月份较多, 平均值为 $0.21 \text{ m}^3/\text{m}^3$, 7—12 月份较少, 平均值为 $0.14 \text{ m}^3/\text{m}^3$, 这与 7—12 月份降水量较前半年降水量少相一致。

2003—2012 年太阳总辐射以及散射辐射季节变化特征如图 1(c) 所示: 二者都是夏季大于冬季, 在 1 月份出现最低值, 在 7 月份达到最大值, 太阳总辐射最大值为 $633.8 \text{ MJ}/\text{m}^2$, 散射辐射最大值为 $318.7 \text{ MJ}/\text{m}^2$ 。6 月份太阳总辐射相比 5 月份减少而散射辐射却上升, 这是由于当月降水增多, 多云天空会导致散射辐射增加。

综上所述, 该生态系统光、水、热资源比较丰富, 但是在生长旺盛季节, 即 6—8 月, 受副热带高压控制, 7 月会出现高温少雨的现象, 易出现季节性干旱, 对植被生长会造成一定影响。

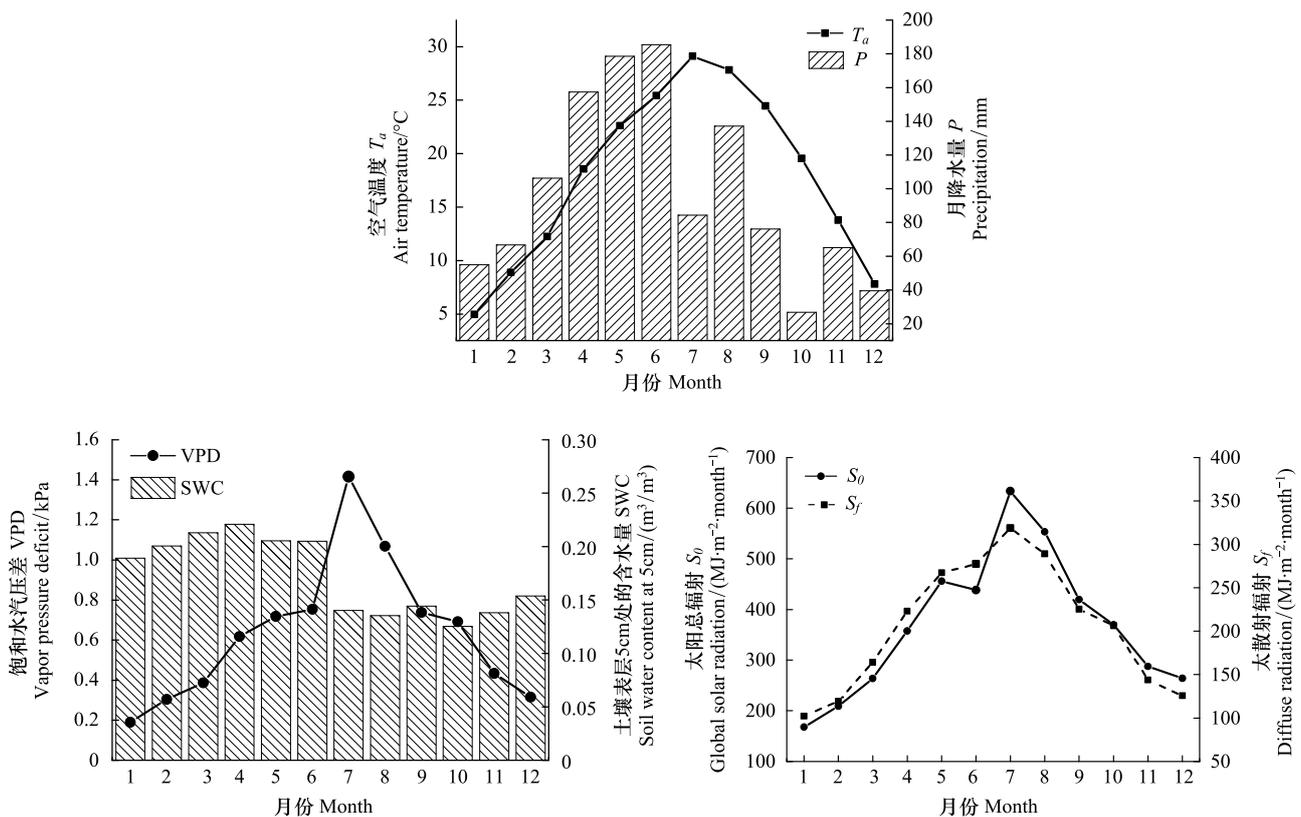


图 1 千烟洲亚热带人工针叶林 2003—2012 年气温 (T_a) 与降水 (P) (a)、饱和水汽压差 (VPD) 与土壤表层 5 cm 处的含水量 (SWC) (b)、太阳总辐射 (S_0) 与散射辐射 (S_f) (c) 的平均季节变化

Fig.1 Averaged seasonal variation of air temperature (T_a) and precipitation (P) (a), vapor pressure deficit (VPD) and soil water content at 5 cm (SWC) (b), global solar radiation (S_0) and diffuse radiation (S_f) (c) in Qianyanzhou subtropical plantation coniferous forests from 2003 to 2012

2.2 千烟洲亚热带人工针叶林 LUE 的季节变化

从图 2 可以看出, 2003—2012 年生长旺盛季节内, GPP 和 LUE 都有略微上升的趋势, 但是从 P 值得出二者都没有通过 F 检验, 这说明十年间植被本身生长变化对 LUE 的影响较小, 可以忽略。

光能利用率的季节变化特征呈双峰型 (图 3), 生长较旺盛季节, 两个高值分别出现在 6 月和 9 月, 谷值出现在 7 月份, 这是由于 6 月份平均 GPP 为 $739.4 \text{ gCO}_2/\text{m}^2$, 平均 PAR 为 $874.3 \text{ mol}/\text{m}^2$, 7 月份平均 GPP 为 $855.4 \text{ gCO}_2/\text{m}^2$, 平均 PAR 为 $1257.8 \text{ mol}/\text{m}^2$, 虽然 7 月份的 GPP 较高, 但 7 月份 PAR 相比 6 月份却猛增, 二者比值减小, 故光能利用率低。

由此可以看出, PAR 最高的月份并非 LUE 最高的季节,而在云雨相对较多的 6 月、9 月, LUE 较高,因此,太阳辐射变化尤其是散射辐射比例的改变会对 LUE 产生重要影响。

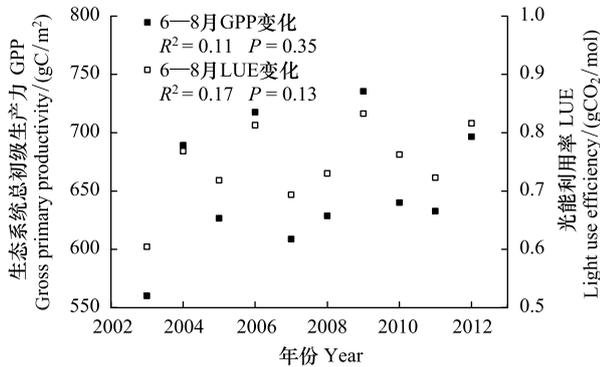


图 2 千烟洲亚热带人工针叶林 2003—2012 年 6—8 月生态系统总初级生产力 (GPP) 与光能利用率 (LUE) 年动态

Fig. 2 Inter-annual variation of gross primary productivity (GPP) and light use efficiency (LUE) in Qianyanzhou subtropical plantation coniferous forests from 2003 to 2012 in June to August

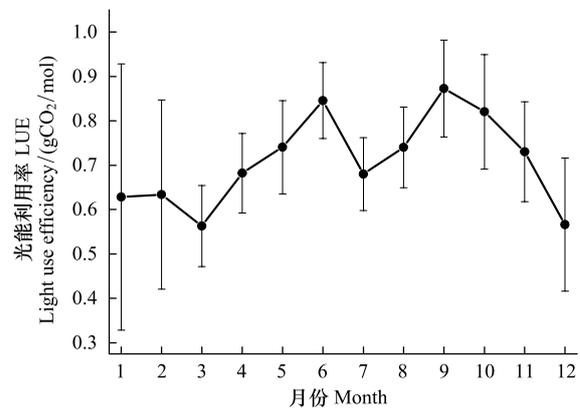


图 3 千烟洲亚热带人工针叶林 2003—2012 年光能利用率 (LUE) 的平均季节变化

Fig. 3 Averaged seasonal variation of light use efficiency (LUE) in Qianyanzhou subtropical plantation coniferous forests from 2003 to 2012

2.3 散射辐射变化对千烟洲亚热带人工针叶林 LUE 的影响

为去除叶面积指数变化与太阳高度角的改变对林冠接受太阳辐射的影响,本文选择在该区域生长旺盛季节(6—8 月)的最大太阳高度角范围内(76.7° — 86.7°)分析散射辐射的改变对 LUE 的影响,该太阳高度角范围对应的时段也是一天中植被生理活动较为旺盛的时段。由于各年份变化趋势一致,图 4—图 8 皆以 2011 年、2012 年为例。

2.3.1 生长旺盛季节 LUE 随 k_t 的变化

如图 4 所示,光能利用率随晴空指数的变化呈递减趋势, k_t 值越高,天空越晴朗,太阳辐射越强,LUE 越小。2011、2012 年 k_t 在 0.6—0.7 范围内的晴朗天气条件下平均光能利用率比 k_t 在 0.4—0.5 范围内的多云条件下光能利用率减小了 46.55%、42.95%,其它年份如表 1 所示,10 年中晴朗天空下的 LUE 较多云天空下平均减小了 44.66%。以往研究发现,长白山阔叶红松林、鼎湖山亚热带常绿阔叶林、西双版纳热带雨林森林生态系统中, k_t 在 0.4—0.6 范围内的中等辐射条件下,各生态系统的光能利用率都会相应的提高^[36-37],本文研究结果与其一致。

2.3.2 生长旺盛季节(6—8 月) LUE 随散射辐射占总辐射比例的变化

千烟洲亚热带人工针叶林在生长旺季太阳高度角 76.7° — 86.7° 范围内,到达地面的散射辐射(S_f) 在太阳总辐射中(S_0) 所占的比例 S_f/S_0 随 k_t 的增加而减小(图 5)。该结果表明天空越晴朗,散射辐射占总辐射的比例越小。

而千烟洲亚热带人工针叶林,LUE 随 S_f/S_0 的增大而增大(图 6)。10 年间, S_f/S_0 在 70%—85% 之间的 LUE 比 S_f/S_0 在 55%—70% 之间的平均提高了 22.24%(表 1)。由此可以看出,在多云及气溶胶一定程度增多导致总太阳辐射减小而散射辐射增加的天气条件下,LUE 增加。

光能利用率的增加与散射辐射促使植被光合作用的增加有关。从图 7 中可以看出,2003—2012 年 GPP 随 S_f/S_0 的增加先增加后减小,最大值出现在 60%—70% 附近,这是由于散射辐射在林冠中具有更强的透射性^[38-39],易入射至林冠下方,因此,散射辐射占太阳总辐射增加时,更多的辐射入射到冠层底部的叶片上,使林冠中占比例较大只能接受散射辐射进行光合作用的阴生叶的光合作用增加,从而使整个冠层的光合作用提

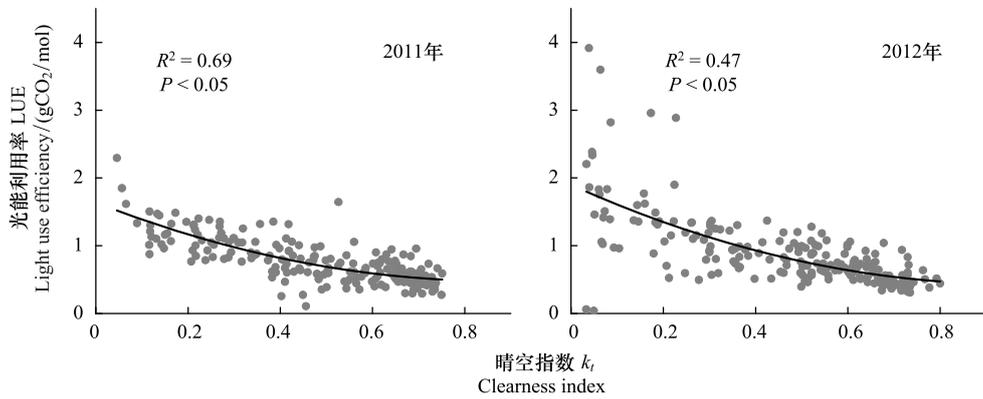


图 4 千烟洲亚热带人工针叶林 2011、2012 年 6—8 月太阳高度角在 76.7°—86.7° 范围内 LUE 与 k_t 的关系

Fig.4 Relationship between LUE and k_t for solar elevation angle 76.7°—86.7° in Qianyanzhou subtropical plantation coniferous forests from June to August in 2011 and 2012

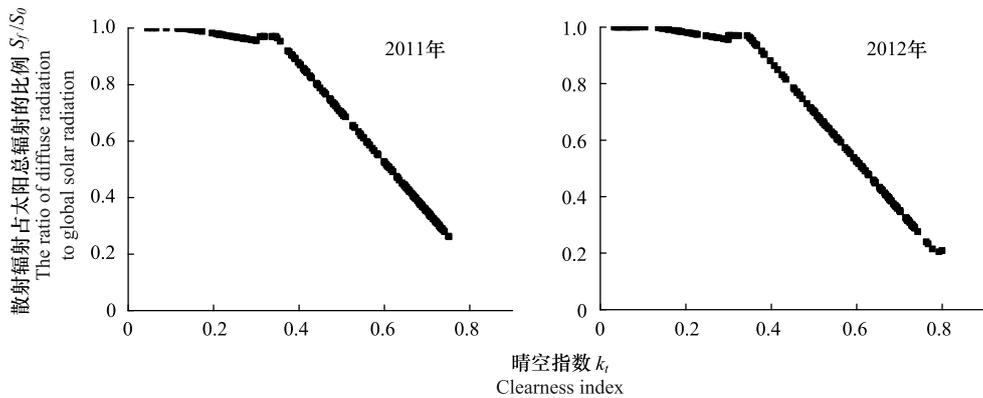


图 5 千烟洲人工针叶林 2011、2012 年 6—8 月太阳高度角在 76.7°—86.7° 范围内 S_f/S_0 与 k_t 的关系

Fig.5 Relationship between S_f/S_0 and k_t for solar elevation angle 76.7°—86.7° in Qianyanzhou subtropical plantation coniferous forests from June to August in 2011 and 2012

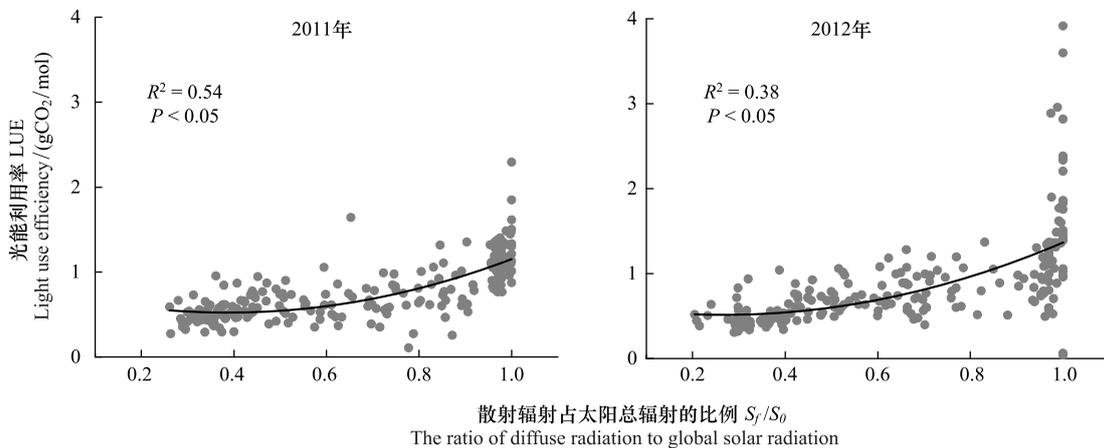


图 6 千烟洲亚热带人工针叶林 2011、2012 年 6—8 月太阳高度角在 76.7°—86.7° 范围内 LUE 与 S_f/S_0 的关系

Fig.6 Relationship between LUE and S_f/S_0 (solar elevation 76.7°—86.7°) in Qianyanzhou subtropical plantation coniferous forests from June to August in 2011 and 2012

高^[40]。因此,多云天空或气溶胶一定程度的增加导致散射辐射增加时,会使植被的光合作用增强。

表 1 2003—2012 年千烟洲亚热带人工针叶林 6—8 月太阳高度角在 76.7°—86.7° 范围内 LUE 与 k_t 以及 S_f/S_0 的定量关系

Table 1 Quantitative relationship between LUE and k_t , LUE and S_f/S_0 (solar elevation 76.7°—86.7°) in Qianyanzhou subtropical plantation coniferous forests from June to August from 2003 to 2012

年份 Year	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
a	46.27%	45.98%	48.48%	46.68%	30.24%	46.28%	46.60%	46.57%	46.55%	42.95%
b	21.49%	23.56%	21.61%	19.11%	23.27%	38.02%	25.71%	16.80%	22.10%	10.76%

a 表示 k_t 在 0.6—0.7 范围内的 LUE 比 k_t 在 0.4—0.5 范围内的 LUE 平均减少的百分比; b 表示 S_f/S_0 在 70%—85% 之间的 LUE 比 S_f/S_0 在 55%—70% 之间的 LUE 平均提高的百分比

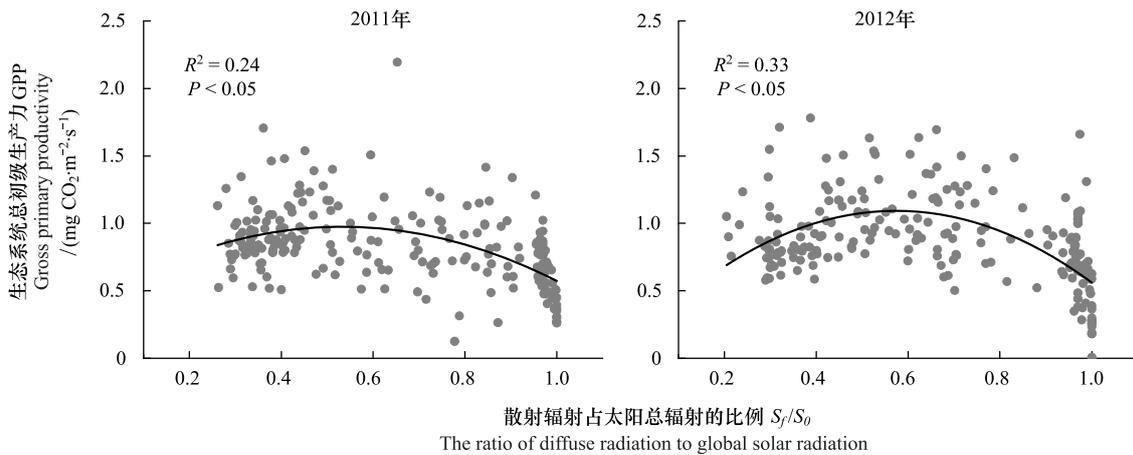


图 7 千烟洲亚热带人工针叶林 2011、2012 年 6—8 月太阳高度角在 76.7°—86.7° 范围内 GPP 与 S_f/S_0 的关系

Fig.7 Relationship between GPP and S_f/S_0 (solar elevation 76.7°—86.7°) in Qianyanzhou subtropical plantation coniferous forests from June to August in 2011 and 2012

2.4 千烟洲亚热带人工针叶林光合作用对光的响应

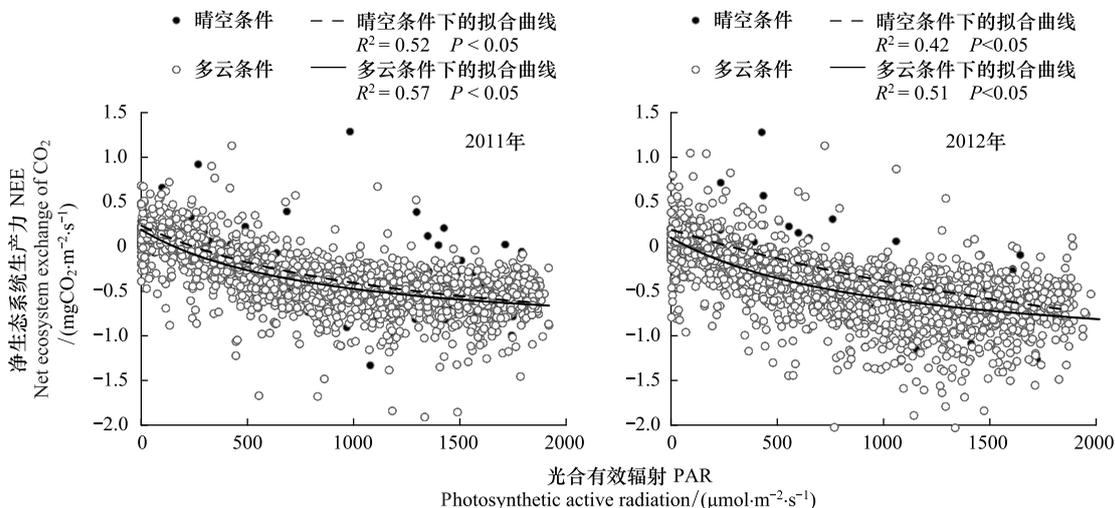


图 8 千烟洲亚热带人工针叶林 2011、2012 年不同天空条件下的光响应曲线

Fig.8 Light response curves in Qianyanzhou subtropical plantation coniferous forests under clear sky condition and cloudy sky condition in 2011 and 2012

2.4.1 不同天空条件下光合作用的光响应特征

利用 Michaelis-Menten 方程对 2003—2012 年生长旺季(6—8 月)多云天气和晴朗天气下该生态系统的光响应曲线进行拟合发现(图 8):10 年中除 2008、2009、2010 年之外其他年份多云天气条件下的初始量子效率 α 比晴朗天气条件下平均提高了 29.3%(表 2)。这说明在弱光下多云天气条件更有利于千烟洲人工针叶林对光的利用。对 2003—2012 年多云天气条件下和晴朗天气条件下拟合潜在光合速率参数进行比较发现:除了 2008、2009 年,其他年份潜在最大光合速率在多云天气条件下低于晴朗天气条件下的拟合值(表 2)。

张弥等^[14]及 Law 等^[13]的研究发现,光饱和时潜在最大光合作用速率在多云天空条件下大于晴朗天空条件下的值,与本研究的结果不一致。这与千烟洲亚热带人工针叶林的植被类型对环境的适应性有关。千烟洲人工林植被类型为马尾松、湿地松、杉木等,梁春等^[41]对马尾松光响应曲线研究表明:1500 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 光合有效辐射条件下,马尾松的光合速率达到最高值,比光合有效辐射在 2000 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 条件下的光合速率高,即强光下,该树种会产生光抑制现象。本文对光响应曲线比较发现,无论是多云天气条件还是晴朗天气条件下,其 PAR 都会超过 1500 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$,即都会对植被的光合作用产生抑制作用,故与晴朗天空相比较,千烟洲亚热带人工林光饱和时的潜在光合速率在多云天空条件下并没有明显的增加。

虽然将多云天气条件与晴朗天气条件进行区分,可以得出两种辐射条件下植被的光合特性,但是该方法并不能完全将散射辐射与直接辐射分开,为了进一步探索散射辐射与直接辐射对植被光合的影响,将光合有效辐射分为散射有效辐射和直接有效辐射进行研究。

表 2 千烟洲亚热带人工针叶林 2003—2012 年 6—8 月多云天气条件下与晴朗天气下的光响应曲线参数

Table 2 Parameters value of light response curve in Qianyanzhou subtropical plantation coniferous forests under clear sky condition and cloudy sky condition from June to August in the years from 2003 to 2012

参数 Parameters	α (gCO_2/mol)			β ($\text{mgCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)			R_e ($\text{mgCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)		相关性系数 R^2	
	晴空条件 Clear sky condition	多云条件 Cloudy sky condition	c	晴空条件 Clear sky condition	多云条件 Cloudy sky condition	d	晴空条件 Clear sky condition	多云条件 Cloudy sky condition	晴空条件 Clear sky condition	多云条件 Cloudy sky condition
2003	-1.07	-1.31	18.32%	-1.00	-0.85	-17.83%	0.18	0.14	0.66	0.63
2004	-0.95	-1.36	30.30%	-1.74	-1.20	-44.57%	0.15	0.15	0.61	0.7
2005	-1.04	-1.20	13.33%	-1.88	-1.18	-59.59%	0.25	0.12	0.7	0.74
2006	-0.77	-1.47	47.70%	-1.48	-1.33	-11.03%	0.10	0.17	0.67	0.78
2007	-0.89	-1.31	31.94%	-1.31	-1.22	-7.22%	0.17	0.17	0.77	0.68
2008	-1.59	-1.54	-3.25%	-0.88	-1.14	23.00%	0.11	0.17	0.63	0.73
2009	-1.47	-1.35	-8.89%	-1.13	-1.16	2.85%	0.11	0.14	0.64	0.69
2010	-1.37	-1.30	-5.38%	-1.30	-1.18	-9.88%	0.21	0.15	0.72	0.72
2011	-1.16	-1.44	19.44%	-1.45	-1.23	-17.69%	0.24	0.19	0.72	0.76
2012	-0.74	-1.34	44.42%	-2.55	-1.37	-86.19%	0.19	0.10	0.66	0.71

注: α 表示生态系统的初始量子效率, The initial quantum efficiency of ecosystem; β 表示生态系统潜在最大光合作用速率, The capacity of a canopy to resist photosynthetic saturation at high levels of PAR; R_e 表示生态系统呼吸, Ecosystem respiration; c 表示多云天空条件 α 比晴朗条件下的 α 增加的百分比; d 表示多云天空条件 β 比晴朗条件下的 β 增加的百分比

2.4.2 植被的光合作用对散射辐射与直接辐射变化的响应特征

利用公式(13)给出的模型拟合分析了 2003—2012 年间生长旺盛季节光合作用对散射辐射与直接辐射的响应特征。从散射辐射与直接辐射条件下的初始量子效率 α_f 、 α_r 的变化看出(图 9),2005、2006、2008、2009、2010、2012 年相类似,以 2012 年为例说明,这些年份中 70% 以上的数据点 $\alpha_f > \alpha_r$,6 年中生长旺盛季节 α_f 比 α_r 平均高 0.63 gCO_2/mol ,由此说明,气温降水适宜时,弱光条件下散射辐射比直接辐射更有利于植被对光的利用。而 2003、2004、2007、2011 年相类似,以 2003 年为例可以看出 6 月份以及 8 月份 $\alpha_f > \alpha_r$,而在 7 月份 $\alpha_f < \alpha_r$,该现象表明,在降水较少的 7 月,即易发生高温干旱的时期,散射辐射条件下的初始量子效率并未表现出显著的增加。

2003—2012 年间(图 10,以 2011、2012 年为例)拟合所得散射辐射与直接辐射条件下最大潜在光合速率 β_f 和 β_r 相比,10 年间生长旺季散射辐射下的 β_f 比直接辐射下的 β_r 平均提高了 $0.81 \text{ mgCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$,这说明散射辐射条件下该人工林生态系统光合潜力比直接辐射条件下大,即散射辐射条件下,植被的光合潜力增加,这将有利于提高植被的光能利用率。

本研究中 α_f 和 α_r , β_f 和 β_r 的结果与 Gu 等在 2002 年对欧洲赤松林、白杨林、混合落叶林、草地和冬小麦作物的研究结果基本一致。但本研究中初始量子效率在一些年份中出现散射辐射条件下小于直接辐射条件下的现象,而出现较多 $\alpha_f < \alpha_r$ 的年份在生长旺季都出现不同程度的干旱天气。以 2003 年为例,如图 11 所示,与 2012 年相比,2003 年的 7 月份土壤含水量偏少,且气温高,导致较严重的季节性伏旱,植被在受到干旱胁迫时,散射辐射条件下,初始量子效率并未表现出显著的提高。

10 年间生长旺季 β_f 的平均值比 β_r 的平均值均有所提高(图 10),这是由于散射辐射在林冠中具有更强的透射性^[37-38],易入射至林冠下方。因此,在散射辐射增加时,冠层中占比例较大的阴生叶的光合作用增加,同时也可避免直射辐射过多导致林冠上部叶片出现光饱和的现象,因此,散射辐射的增加会使林冠整体上具有更高的光合潜力^[42]。

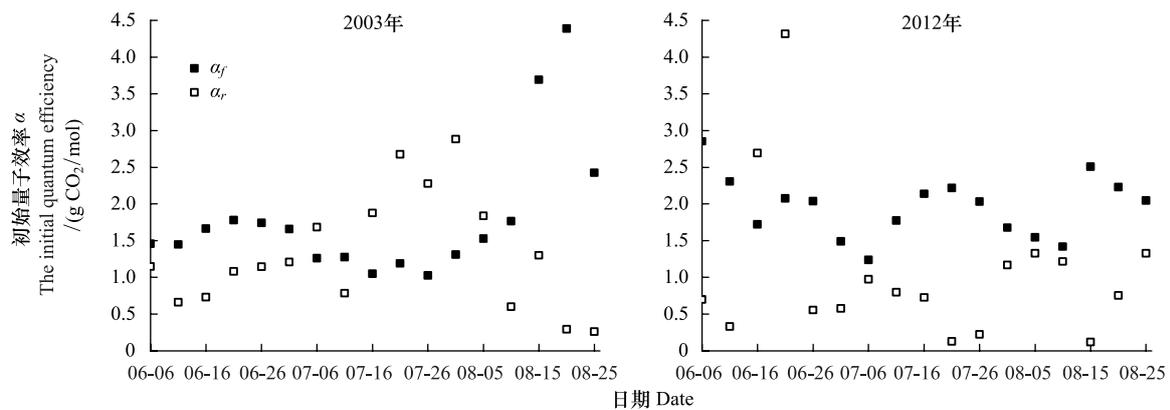


图 9 千烟洲亚热带人工针叶林 2003、2012 年 6—8 月散射辐射与直接辐射条件下对应的初始量子效率(α_f 与 α_r)的对比

Fig.9 The initial quantum efficiency under diffuse radiation condition (α_f) and under direct radiation condition (α_r) in Qianyanzhou subtropical plantation coniferous forests from June to August in 2003 and 2012

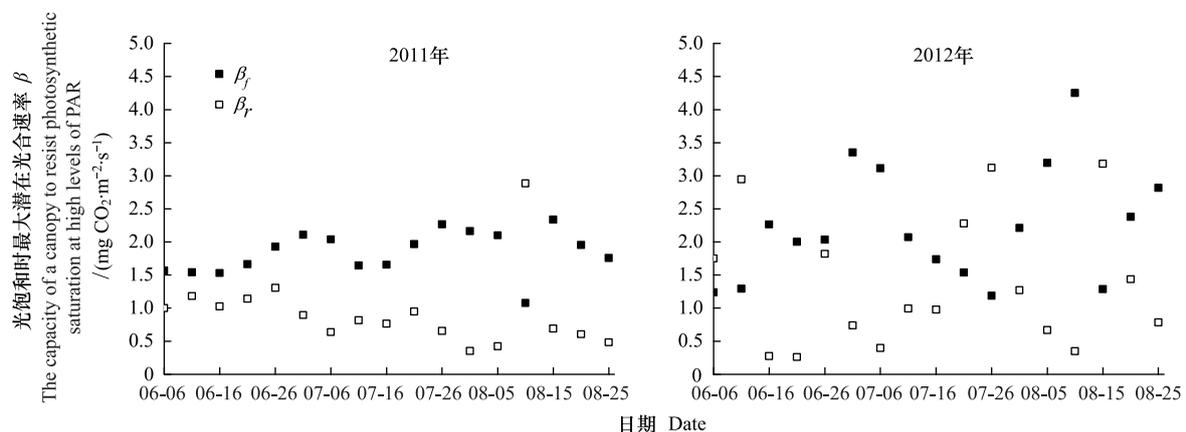


图 10 千烟洲亚热带人工针叶林 2011、2012 年 6—8 月散射辐射与直接辐射条件下对应的最大潜在光合速率(β_f 与 β_r)的对比

Fig.10 The capacity of a canopy to resist photosynthetic saturation at high levels of PAR under diffuse radiation condition (β_f) and under direct radiation condition (β_r) in Qianyanzhou subtropical plantation coniferous forests from June to August in 2011 and 2012

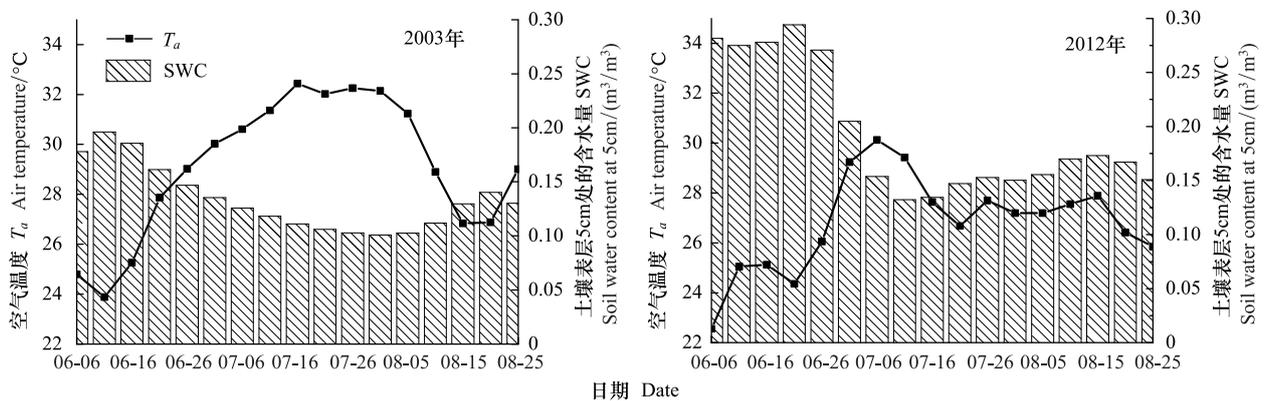


图 11 千烟洲亚热带人工针叶林 2003、2012 年 6—8 月气温与土壤表层 5 cm 处的含水量配置图

Fig.11 The dynamic of air temperature and soil water content at 5 cm in Qianyanzhou subtropical plantation coniferous forests from June to August in 2003 and 2012

3 结论

通过对千烟洲亚热带人工针叶林光能利用率随散射辐射的变化,以及散射辐射与直接辐射条件下植被光合作用光响应参数的特征进行分析,并与同类型研究的比较讨论发现:

散射辐射更有利于提高该生态系统的光能利用率。与多云及气溶胶一定程度增加的中等辐射条件下 ($0.4 < k_t < 0.5$) 相比,天空较晴朗的强太阳辐射条件下 ($0.6 < k_t < 0.7$) 的 LUE 平均减少了 44.66%; 散射辐射与直接辐射的比例 S_f/S_0 在 70%—85% 之间的 LUE 比 S_f/S_0 在 55%—70% 之间的 LUE 平均提高了 22.24%。即散射辐射占太阳总辐射比例增加的情况下,光能利用率增加。

不受干旱胁迫影响的条件下,植被光合作用对光的响应表现为散射辐射条件下的初始量子效率 α_f 比直接辐射条件下的 α_r 平均提高 $0.63 \text{ gCO}_2/\text{mol}$, 即弱光条件下散射辐射比直接辐射更有利于植被对光的利用。在强光下,散射辐射增加更有利于植被光合潜力的增加,从而提高植被的光能利用率。

太阳散射辐射比例改变时,温度、水分等环境因子也会随之改变,因此要量化太阳辐射改变对植被光能利用率的影响还需借助过程模型来加以分析。这也将有助于分析环境因子胁迫发生时直接辐射与散射辐射对植被光能利用率的影响及其机制。

参考文献 (References):

- [1] 杨胜朋, 王可丽, 吕世华. 近 40 年来中国大陆总辐射的演变特征. 太阳能学报, 2007, 28(3): 227-232.
- [2] Gu L H, Baldocchi D, Verma S B, Black T A, Vesala T, Falge E M, Dowty P R. Advantages of diffuse radiation for terrestrial ecosystem productivity. Journal of Geophysical Research, 2002, 107(D6): 4050.
- [3] 马金玉, 梁宏, 罗勇, 李世奎. 中国近 50 年太阳直接辐射和散射辐射变化趋势特征. 物理学报, 2011, 60(6): 853-866.
- [4] Wild M, Gilgen H, Roesch A, Ohmura A, Long C N, Dutton E G, Forgan B, Kallis A, Russak V, Tsvetkov A. From dimming to brightening: decadal changes in solar radiation at earth's surface. Science, 2005, 308(5723): 847-850.
- [5] Mercado L M, Bellouin N, Sitch S, Boucher O, Huntingford C, Wild M, Cox P M. Impact of changes in diffuse radiation on the global land carbon sink. Nature, 2009, 458(7241): 1014-1071.
- [6] 齐月, 房世波, 周文佐. 近 50 年来中国东、西部地面太阳辐射变化及其与大气环境变化的关系. 物理学报, 2015, 64(8): 089201-1-089201-10.
- [7] 卫亚星, 王莉雯. 青海省植被光能利用率模拟研究. 生态学报, 2010, 30(19): 5209-5216.
- [8] 李泽晖, 王云龙, 魏远, 马悦, 陈润芝. 湖南岳阳杨树人工林光能利用率动态特征分析. 资源科学, 2012, 34(10): 1832-1838.
- [9] 穆少杰, 李建龙, 周伟, 杨红飞, 章超斌, 居为民. 2001—2010 年内蒙古植被净初级生产力的时空格局及其与气候的关系. 生态学报, 2013, 33(12): 3752-3764.
- [10] 解锋. 论提高光能利用率的途径. 陕西农业科学, 2008, 54(1): 144-146.
- [11] 徐恒永, 赵君实, 徐茂臻. 高产冬小麦光能利用率的研究. 莱阳农学院学报, 1994, 11(1): 6-10.
- [12] Gu L H, Fuentes J D, Shugart H H, Staebler R M, Black T A. Responses of net ecosystem exchanges of carbon dioxide to changes in cloudiness:

- results from two North American deciduous forests. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1999, 104(D24): 31421-31434.
- [13] 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, 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 U 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.
- [14] 张弥, 于贵瑞, 张雷明, 孙晓敏, 温学发, 韩士杰. 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*, 2009, 33(2): 270-282.
- [15] 丁一汇, 柳艳菊. 近 50 年我国雾和霾的长期变化特征及其与大气湿度的关系. *中国科学: 地球科学*, 2014, 44(1): 37-48.
- [16] 张人禾, 李强, 张若楠. 2013 年 1 月中国东部持续性强雾霾天气产生的气象条件分析. *中国科学: 地球科学*, 2014, 44(1): 27-36.
- [17] 吴兑. 近十年中国灰霾天气研究综述. *环境科学学报*, 2012, 32(2): 257-269.
- [18] 刘允芬, 于贵瑞, 温学发, 王迎红, 宋霞, 李菊, 孙晓敏, 杨风亭, 陈永瑞, 刘琪珠. 千烟洲中亚热带人工林生态系统 CO₂ 通量的季节变异特征. *中国科学 D 辑 地球科学*, 2006, 34(S1): 91-102.
- [19] 刘允芬, 宋霞, 孙晓敏, 温学发, 陈永瑞. 千烟洲人工针叶林 CO₂ 通量季节变化及其环境因子的影响. *中国科学 D 辑 地球科学*, 2004, 34(S2): 109-117.
- [20] 孙晓敏, 温学发, 于贵瑞, 刘允芬, 刘琪璟. 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 地球科学*, 2006, 36(S1): 103-110.
- [21] 宋霞, 刘允芬, 徐小锋, 于贵瑞, 温学发. 红壤丘陵区人工林冬春时段碳、水、热通量的观测与分析. *资源科学*, 2004, 26(3): 96-104.
- [22] 王萌萌, 张弥, 王辉民, 张雷明, 杨沈斌. 太阳辐射变化对千烟洲亚热带人工针叶林净 CO₂ 交换量的影响. *生态学杂志*, 2015, 34(2): 303-311.
- [23] 韩佳音, 李胜功, 张雷明, 温学发, 李庆康, 王辉民. 江西千烟洲地区散射辐射的模拟与验证. *应用生态学报*, 2015, 26(10): 2991-2999.
- [24] 张雷明, 于贵瑞, 孙晓敏, 温学发, 任传友, 宋霞, 刘允芬, 关德新, 闰俊华, 张一平. 中国东部森林样带典型生态系统碳收支的季节变化. *中国科学 D 辑 地球科学*, 2006, 36(S1): 45-59.
- [25] 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.
- [26] Lloyd J, Taylor J A. On the temperature dependence of soil respiration. *Functional Ecology*, 1994, 8(3): 315-323.
- [27] Gilmanov T G, Tieszen L L, Wylie B K, Flanagan L B, Frank A B, Haferkamp M R, Meyers T P, Morgan J A. Integration of CO₂ flux and remotely-sensed data for primary production and ecosystem respiration analyses in the Northern Great Plains: potential for quantitative spatial extrapolation. *Global Ecology and Biogeography*, 2005, 14(3): 271-292.
- [28] 赵育民, 牛树奎, 王军邦, 李海涛, 李贵才. 植被光能利用率研究进展. *生态学杂志*, 2007, 26(9): 1471-1477.
- [29] Gilmanov T G, Soussana J F, 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 A F G, Jones M B, 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 & Environment*, 2007, 121(1/2): 93-120.
- [30] 孙敬松, 周广胜. 散射辐射测量及其对陆地生态系统生产力影响的研究进展. *植物生态学报*, 2010, 34(4): 452-461.
- [31] Reindl D T, Beckman W A, Duffie J A. Diffuse fraction correlations. *Solar Energy*, 1990, 45(1): 1-7.
- [32] Spitters C J T. Separating the diffuse and direct component of global radiation and its implications for modeling canopy photosynthesis part II. Calculation of canopy photosynthesis. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1986, 38(1/3): 231-242.
- [33] Spitters C J T, Toussaint H A J M, Goudriaan J. Separating the diffuse and direct component of global radiation and its implications for modeling canopy photosynthesis part I. Components of incoming radiation. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1986, 38(1/3): 217-229.
- [34] Goulden M L, Daube B C, Fan S M, Sutton D J, Bazzaz A, Munger J W, Wofsy S C. Physiological responses of a black spruce forest to weather. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1997, 102(D24): 28987-28996.
- [35] Aubinet M, Chermanne B, Vandenhaute 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.
- [36] 张弥, 吴家兵, 关德新, 施婷婷, 陈鹏狮, 纪瑞鹏. 长白山阔叶红松林主要树种光合作用的光响应曲线. *应用生态学报*, 2006, 17(9): 1575-1578.
- [37] Zhang M, Yu G R, Zhuang J, Gentry R, Fu Y L, Sun X M, Zhang L M, Wen X F, Wang Q F, Han S J, Yan J H, Zhang Y P, Wang Y F, Li Y N. Effects of cloudiness change on net ecosystem exchange, light use efficiency, and water use efficiency in typical ecosystems of China. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2011, 151(7): 803-816.
- [38] Roderick M L, Farquhar G D, Berry S L, Noble I R. On the direct effect of clouds and atmospheric particles on the productivity and structure of vegetation. *Oecologia*, 2001, 129(1): 21-30.
- [39] Yamasoe M A, von Randow C, Manzi A O, Schafer J S, Eck T F, Holben B N. Effect of smoke and clouds on the transmissivity of photosynthetically active radiation inside the canopy. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2006, (6): 1645-1656.
- [40] Williams M, Rastetter E B, van der Pol L, Shaver G R. Arctic canopy photosynthetic efficiency enhanced under diffuse light, linked to a reduction in the fraction of the canopy in deep shade. *New Phytologist*, 2014, 202(4): 1267-1276.
- [41] 梁春, 林植芳, 孔国辉. 不同光强下生长的亚热带树苗的光合-光响应特性的比较. *应用生态学报*, 1997, 8(1): 7-11.
- [42] 何学兆, 周涛, 贾根锁, 张自银, 李秀娟, 赵超, 冯胜辉. 光合有效辐射总量及其散射辐射比例变化对森林 GPP 影响的模拟. *自然资源学报*, 2011, 26(4): 619-634.