

胡波, 王跃思. 2014. 三江平原地区光合有效辐射观测研究 [J]. 气候与环境研究, 19 (3): 343–350, doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2013.12181. Hu Bo, Wang Yuesi. 2014. Observational study of variation of photosynthetically active radiation in the Sanjiang Plain [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 19 (3): 343–350.

三江平原地区光合有效辐射观测研究

胡波 王跃思

中国科学院大气物理研究所大气边界层物理和大气化学国家重点实验室, 北京 100029

摘 要 利用 2005~2011 年的太阳辐射观测资料分析三江平原地区光合有效辐射 (Q_p) 的时间变化特征及其与总辐射 (R_s) 比值 (Q_p/R_s) 的变化规律, 结果表明, Q_p 与 R_s 具有相同的季节变化特征; Q_p 日累计值的变化范围为 $60.47\sim 0.11\text{ mol m}^{-2}\text{ d}^{-1}$, 年均值为 $23.76\text{ mol m}^{-2}\text{ d}^{-1}$. Q_p/R_s 的变化范围为 $1.52\sim 2.07\text{ mol MJ}^{-1}$, 年均值为 1.91 mol MJ^{-1} . Q_p/R_s 和 Q_p 季节变化一致, 两者都是夏季最大, 春秋次之, 冬季最小。通过利用 2011 年的 Q_p 观测数据、大气质量数与晴空指数的相互关系, 建立了适合于估量三江地区 Q_p 的经验方程, 估算值与观测值的相对误差在 5.7% 以内。

关键词 光合有效辐射 估算方程 三江平原

文章编号 1006-9585 (2014) 03-0343-08

中图分类号 P422

文献标识码 A

doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2013.12181

Observational Study of Variation of Photosynthetically Active Radiation in the Sanjiang Plain

HU Bo and WANG Yuesi

State Key Laboratory of Atmospheric Boundary Layer Physics and Atmospheric Chemistry, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

Abstract The variation of photosynthetically active radiation (Q_p) and ratio of Q_p to broadband solar radiation (R_s) at Sanjiang in Northeast China were analyzed on the basis of in situ data measured during 2005–2011. The results indicate that the seasonal and diurnal variation of Q_p are similar to those of R_s . The daily values of Q_p range from 0.11 to 60.47 mol m^{-2} , with an average annual value of 23.76 mol m^{-2} . The daily values of Q_p/R_s range from 1.52–2.07 mol MJ^{-1} , with an average annual value of 1.91 mol MJ^{-1} . The seasonal variation of Q_p/R_s is similar to that of Q_p . Q_p and Q_p/R_s reach a maximum in summer and a minimum in winter. An estimation equation for Q_p was established on the basis of the optical air mass, clearness index, and Q_p data measured in 2011. Evaluation of the results shows that this estimation equation can be used to calculate historical Q_p data with a relative error within 5.7%.

Keywords Photosynthetically Active Radiation, Estimation equation, Sanjiang Plain

1 引言

波长在 $0.4\sim 0.7\text{ }\mu\text{m}$ 的太阳短波辐射称为光合有效辐射 (Q_p), 它是植物进行光合作用所利用的

太阳短波辐射。 Q_p 不仅是影响植物光合作用速率的关键要素之一, 而且还是影响陆气物质—能量交换的核心因子之一 (Ross and Sulev, 2000)。此外 Q_p 还是碳氮循环、水循环以及气候变化研究中的主要因子之一, 例如 Q_p 是生态模型和气候模型中不可

收稿日期 2012-11-06 收到, 2013-04-26 收到修定稿

资助项目 国家自然科学基金 41275165、41021004

作者简介 胡波, 男, 1974 年出生, 博士, 副研究员, 主要从事大气辐射研究。E-mail: hb@dq.cern.ac.cn

或缺的一个关键参数, Q_p 的精确度将直接影响模式的模拟精度。目前主要通过光学传感器直接测定到达地表的 Q_p (Ross and Sulev, 2000; Jacovides et al., 2004)。在 Q_p 的地基观测中采用计量单位有两种, 其一是能量单位, 测定到达地面的 Q_p 的照度 (单位: $W m^{-2}$), 能量计量数据在太阳辐射能利用中具有广泛的应用; 另一种则是光子量子单位, 它是测定到达地面的 Q_p 的光量子通量密度 (单位: $\mu mol m^{-2} s^{-1}$), 该数据广泛应用于生态过程的模拟研究中。这是由于光以量子的形态参与植物光合作用, 生态学过程模拟中与光合作用效率相关的参数化方案都是直接利用光子量子通量密度的, 因而以量子单位计量的 Q_p 能更好地应用于生态学过程的研究, 从而可直接用于生态系统的演替研究 (McCree, 1972)。国内外学者开展大量的 Q_p 地基观测研究 (McCree, 1966; Britton and Dodd, 1976; 周允华等, 1984; Udo and Aro, 1999), 但这些观测较零散、持续时间较短。迄今还没有建立全球范围的 Q_p 观测网络 (Gueymard, 1989; Hu et al., 2010), 因而开展基于直接观测的 Q_p , 进行气候学的研究较少。然而生态学、辐射学中的许多模式都需要高精度的长期数据开展模式验证与完善, 为了获得长期高精度的 Q_p , 许多学者采用同时开展总辐射 (R_s) 与 Q_p 观测的地基观测数据开展 R_s 与 Q_p 的定量关系研究, 利用获得定量关系通过观测时间序列较长而且容易获得的 R_s 来进行 Q_p 的估算 (Britton and Dodd, 1976; Alados et al., 1996; Udo and Aro, 1999; Dye, 2004; Jacovides et al., 2004), 但是推广该估算 Q_p 时需根据当地的气候特征进行参数的本地化校正 (Britton and Dodd, 1976; Udo and Aro, 1999; Jacovides et al., 2004)。为了获得更大空间尺度的 Q_p , 很多学者通过 R_s 观测数据、结合太阳天顶角建立参数较少, 而且应用范围较广的 Q_p 估算方程 (Udo and Aro, 1999; Hu et al., 2010)。

三江平原是我国最大的沼泽湿地集中分布地, 区域环境稳定、生物多样性完善, 被誉为自然之肾、生物基因库和人类摇篮, 是物种基因保护的重要区域之一。三江平原属温带湿润半湿润大陆性季风气候, 冬季严寒干燥, 夏季炎热潮湿, 该区域的年均温度在 $1.4 \sim 4.3^\circ C$ 之间; 年降雨量为 650 mm 左右, 集中在夏季 (刘兴土和马学慧, 2002)。但是随着人类活动的加剧使得三江平原的湿地生态环境不断恶化, 为了湿地的可持续发展, 国内外学

者在三江湿地开展了湿地的温室气体排放与全球环境变化为核心的观测研究, 在这些研究中 Q_p 的变化特征以及其长期历史数据是必不可少关键要素之一, 因此需要在三江平原不断深入开展 Q_p 的长期观测, 通过观测数据分析研究 Q_p 长期变化特征, 以满足环境和气候变化研究的需要。

本文利用三江生态实验站 2005~2011 年连续 7 年的辐射观测数据, 分析该区域的 Q_p 长期变化规律, 通过大气质量数和平均晴空指数与 Q_p 的关系建立 Q_p 估算方法, 为开展三江平原地区 Q_p 的气候学特征提供科学数据。

2 资料与方法

2.1 站点描述

三江观测站 ($47^\circ 35' N$, $133^\circ 31' E$) 位于别拉洪河与浓江河的河间地带, 该站隶属黑龙江省农垦建三江管理局红河农场。三江站的土壤、水分、植被的分布规律是三江平原土壤、植被分布的缩影, 具有典型的三江平原湿地代表性。观测站四周为平坦、开阔的平原, 观测仪器四周为低矮植被, 植被对观测仪器没有影响。

2.2 仪器介绍

采用 Milos520 自动气象站进行总辐射、反射辐射、净辐射、紫外辐射、光合有效辐射以及常规气象要素的连续观测。利用荷兰 Kipp&zionne 生产的辐射传感器进行总辐射、反射辐射、净辐射、紫外辐射观测, 而光合有效辐射则是用美国 Lincoln 生产的 Li-190SA 传感器来观测的。数据采集频率是 1 min 一次。

为了保证观测数据的可靠性, 每两年进行一次辐射传感器的集中标定, 其中总辐射、反射辐射传感器采用“交替法”进行标定, 其标定的不确定度小于 $\pm 3\%$; 光合有效辐射传感器利用辐射标准灯和光谱仪进行标定 (胡波等, 2010), 标定的不确定度小于 $\pm 5\%$ (见表 1)。所有辐射传感器的标定精度均满足 WMO 的精度要求。

表 1 总辐射和光合有效辐射传感器参数

Table 1 Parameters for broadband radiation and photosynthetically active radiation

测量参数	仪器型号	不确定度
总辐射	CM-11	$\pm 3\%$
光合有效辐射	Licor LI-190SA	$\pm 5\%$

2.3 观测数据质量控制

利用极值控制方案进行观测数据质量控制，具体方案如下：

总辐射观测值必须满足两个基本条件，首先总辐射的日（小时）值均小于该位置大气层顶的总辐射量（Rigollier et al., 2000）；其次白天总辐射的极小值应该大于连续阴天时总辐射的观测值（Elhadidy et al., 1990），即总辐射的最小值必须大于大气层顶总辐射的 0.03 倍；否则视为不合格的数据予以删除。光合有效辐射的质量控制方案与总辐射类似，即光合有效辐射应该小于大气层顶光合有效辐射辐射量，大气层顶的光合有效辐射量利用 Gueymard（2004）提出的计算方案获得；此外光合有效辐射与总辐射的比值应该在 $1.3 \sim 2.8 \mu\text{mol J}^{-1}$ ；若观测数据不满足上述控制标准，则认为是不合格数据，在分析时将其删除。大约有 5.5% 左右的观测数据在进行数据质量控制时予以删除。

本文使用从 2005~2011 年连续 7 年的观测数据，其中缺日数为 77 d。另外由于在太阳高度角较小时，辐射传感器的余弦效应会引起较大的观测误

差（Geger et al., 2002），因此只对太阳高度角大于 10° 的辐射观测数据进行分析。

3 三江地区光合有效辐射变化规律

3.1 Q_p 的时间变化特征

从 2005~2011 年三江站 Q_p 与 R_s 的逐日变化（图 1）可以看出， Q_p 的季节变化规律与 R_s 相同，均呈现为夏高冬低的季节变化特征。冬季是太阳高度角最小的时段，由于太阳辐射的光学路径长导致太阳辐射在传输过程中被衰减，因此到达地面的辐射量也最小。在夏季，太阳高度角达到一年中的最大，辐射量随之增大。 Q_p 和 R_s 日累积值最大值出现在夏季，最大值分别是： 60.47 mol m^{-2} 和 30.83 MJ m^{-2} ；而最小值则出现在冬季，最小值分别为 0.11 mol m^{-2} 和 0.08 MJ m^{-2} 。太阳高度角、气溶胶、云、水汽含量等诸多因素是影响 Q_p 与 R_s 的主要因子，而气溶胶、云、水汽含量都具有剧烈的日变化，从而导致 Q_p 与 R_s 也存在较明显日变化。

三江地区 Q_p 年均值为 23.76 mol m^{-2} ， R_s 年均

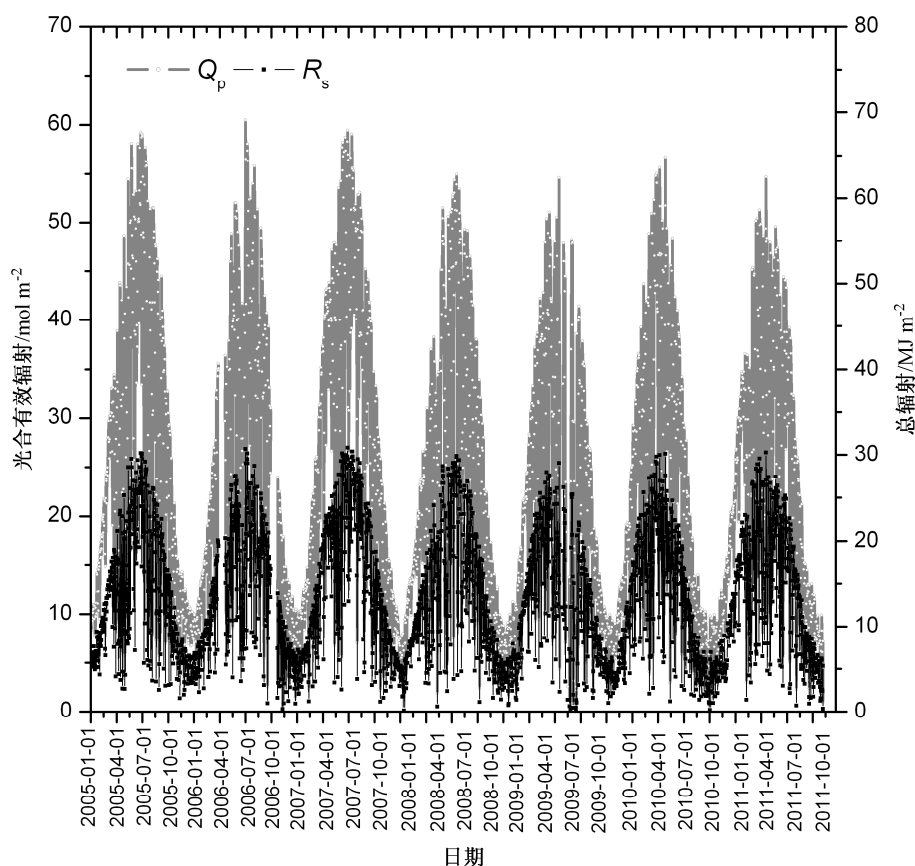


图 1 2005~2011 年三江地区 Q_p 和 R_s 逐日累积值变化趋势

Fig. 1 Long term variations of daily photosynthetically active radiation (Q_p) and broadband solar radiation (R_s) in the Sanjiang area during 2005–2011

值为 13.05 MJ m^{-2} 。三江地区的 Q_p 明显低于青藏高原拉萨的 37.2 mol m^{-2} (王文玲等, 2013), 三江地区的 Q_p 是青藏高原的 58% 左右; 这主要是由于三江位于高纬度地区, 该地区的太阳高度角较青藏高原小造成的; 另外青藏高原拉萨与三江地区气溶胶含量差异造成晴天光合有效辐射的平均衰减率分别是 9.2% 和 13.1%; 此外由于青藏高原的大气密度比平原地区小 1/3 以上, 其大气中辐射吸收成分含量很低也是造成青藏高原地区光合有效辐射大的原因。三江地区的 Q_p 与华北平原地区的 $23 \sim 29 \text{ mol m}^{-2}$ 相当 (朱旭东等, 2010), 这是由于华北地区的气溶胶含量较高造成。华北平原的气溶胶光学厚度在 0.5 以上 (胶州湾站气溶胶光学厚度为 0.67、封丘站气溶胶光学厚度为 0.59), 而三江平原的气溶胶光学厚度仅是 0.19。晴天时封丘站气溶胶的光合有效辐射衰减率为 27.6%, 是三江站的 2 倍左右。虽然华北平原纬度较三江低 (太阳高度角较大), 但由于华北地区气溶胶的散射作用衰减了大量的 Q_p , 而且华北地区水汽柱含量 (封丘站水汽柱含量年均值为 2.3 cm) 较三江 (年均值为 1.5 cm) 地区高出 50% 左右, 从而衰减了到达地面的 Q_p ; 气溶胶和水汽的共同作用导致三江平原地区 Q_p 与华北平原的 Q_p 大小相当。

图 2 给出三江地区的 Q_p 与 R_s 月变化趋势, Q_p 在 6 月达到最大, 最低值出现在 1 月, 最大与最小值分别为 44.12 MJ m^{-2} 和 6.62 MJ m^{-2} 。在夏季 Q_p

与 R_s 的变化幅度明显大于冬季, 这可能是由于夏季云量的逐日变化剧烈, 而冬季变化较平稳造成的。

3.2 Q_p/R_s 的时间变化特征

随着生态学研究的深入使得对高精度的长期光合有效辐射数据的需求日益急迫, 但是由于地基辐射观测系统中很少开展光合有效辐射观测, 而对总辐射的观测研究则较完善, 因而需要在三江平原地区开展 Q_p/R_s 的变化特征观测研究, 通过光合有效辐射与总辐射的关系建立光合有效辐射历史数据的重构方法。通过历史的总辐射观测数据获得高精度的光合有效辐射用于生态学研究。总辐射是以能量单位计量, 而 Q_p 则是以光子单位计量的, 因而 Q_p 与 R_s 的比值是一个有量纲的参数, 其中瞬时值的量纲是 $\mu\text{mol J}^{-1}$, 累计值的量纲单位 mol MJ^{-1} 。

三江地区 Q_p/R_s 月均值的变化范围是 $1.52 \sim 2.07 \text{ mol MJ}^{-1}$, 年平均值为 1.91 mol MJ^{-1} 。 Q_p/R_s 的季节变化规律与 Q_p 的季节变化规律一致, 也是夏季最大, 春秋季次之, 冬季最小。大气中水汽含量季节变化是影响 Q_p/R_s 季节变化的主要因子。夏季云、雨过程增多, 从而导致大气水汽含量增加, 水汽对太阳辐射中近红外波段具有很好的吸收作用, 而对波长较短的 Q_p 吸收较小, 从而导致 Q_p/R_s 随着水汽含量的增加而增大。

由于云和气溶胶的直接观测数据较少, 为了研究其对 Q_p/R_s 的影响采用晴空指数 (K_s) 作为云和气溶胶的综合影响指示因子来研究其对 Q_p/R_s 的作

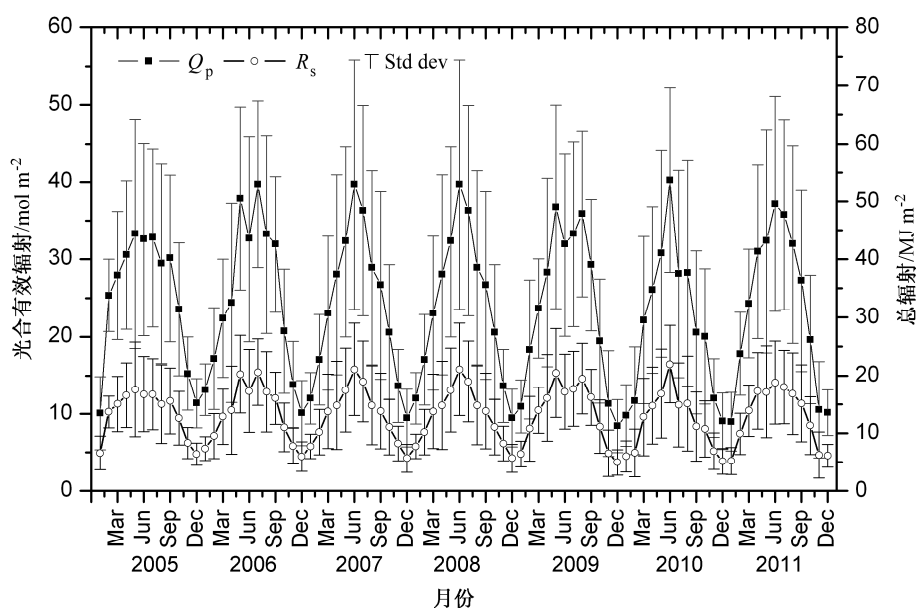


图 2 2005~2011 年三江地区 Q_p 和 R_s 月平均变化趋势

Fig. 2 Variations of monthly average values of Q_p and R_s in the Sanjiang area during 2005–2011

用。 K_s 是指地表接收总辐射与大气层顶总辐射的比值,从图3中可看出 Q_p/R_s 与 K_s 之间存在明显的负相关关系,这是由于 K_s 较小时所对应的天空状态是多云与阴天,而此时大气中的水汽含量相对较大,从而导致与之相对应的 Q_p/R_s 值较大;而在 K_s 较大时则对应晴空,此时水汽含量相对较小,从而出现较小的 Q_p/R_s 。

3.3 大气质量数对 Q_p 的影响

已有研究结果表明仅仅通过 Q_p 与 R_s 的关系进行 Q_p 的估算,需要进行参数的本地化,这限制了该方法的推广,因此需要建立通用性较强的估算方

法用于 Q_p 的估算。太阳高度角是影响 Q_p 的主要因子之一,为了定量研究太阳高度角对 Q_p 的影响,在估算方程中引入大气质量数作为太阳高度角的指示因子。大气质量数 m 是太阳自 θ 角倾斜入射时与自天顶角入射时的光学厚度之比,Kasten and Young (1989)等给出了的大气质量数经验计算公式:

$$m = 1/[\cos \theta + 0.1500(93.885 - \theta)^{-1.253}]. \quad (1)$$

利用2011年观测的瞬时 Q_p 和与之相对应的大气质量数瞬时值分析 m 与 Q_p 的相互关系,可以看出 Q_p 随着 m 增加而减小(见图4),而且离散度也随之变小,这也说明 m 是影响到达地面光合有效辐

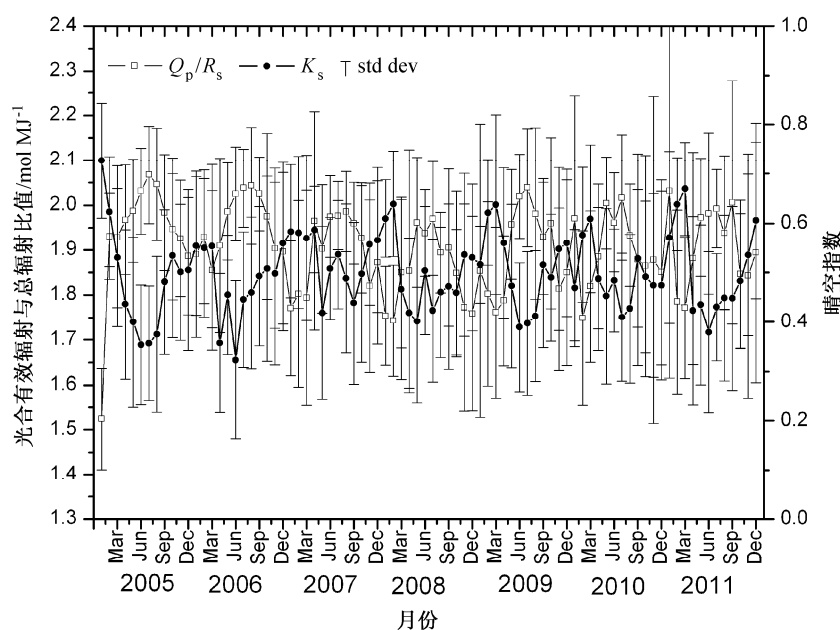


图3 2005~2011年三江地区 Q_p/R_s 及晴空指数月平均变化

Fig. 3 Variations of monthly average Q_p/R_s and clearness index in the Sanjiang area during 2005–2011

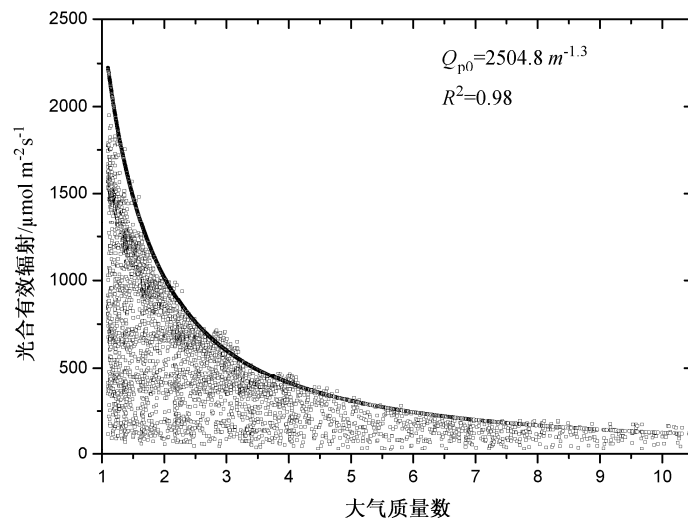


图4 Q_p 瞬时值和大气质量数的关系

Fig. 4 Relationship of hourly Q_p and optical air mass

射的主要因子之一,但并不是影响 Q_p 的全部因子。而 m 和与之对应的最大光合有效辐射 (Q_{p0}) 之间存在着明显的幂指数关系,通过拟合可以得到 Q_{p0} 的估算方程,拟合方程通过了显著性水平 $P \leq 0.01$ 的显著性检验。

$$Q_{p0} = 2504.8m^{-1.3} \quad (R^2=98\%). \quad (2)$$

3.4 估算方程的建立

参照 Foyo-Moreno et al. (1999) 提出的估算方案,利用 K_s 、 m 建立适合于估算三江地区地面的光合有效辐射 Q_p 的方程,具体如下:

$$Q_p = a + b(K_s \cdot Q_{p0}), \quad (3)$$

其中, Q_{p0} 是与大气质量数相对应的最大光合有效辐射, K_s 为晴空指数, a 、 b 为拟合参数。

通过三江 2011 年的 Q_p 观测建立了 Q_p 估算方程 (图 5), 拟合参数通过 $P \leq 0.01$ 的显著性检验。 Q_p 的估算方程如下:

$$Q_p = 74.86 + 1.0 \times (K_s \times Q_{p0}) = 74.86 + 1.0 \times (K_s \times 2504.8 \times m^{-1.3}) \quad (R^2=98\%). \quad (4)$$

利用 2005~2010 年 Q_p 的观测进行了估算方程的精度检验,建立的 Q_p 估算方程具有较高的精度 (见图 6), 估算方程对 Q_p 有很小的低估 (文中给出 2010 年的比对结果,其余 5 年的结果与 2010 年类似,故省略)。观测值与估算值对比统计参数见表 2,观测值与估算值的平均相对误差最大为 5.7%。通过观测数据与估算值的对比表明,建立的 Q_p 估算方程能够较好地应用三江平原地区光合有效辐

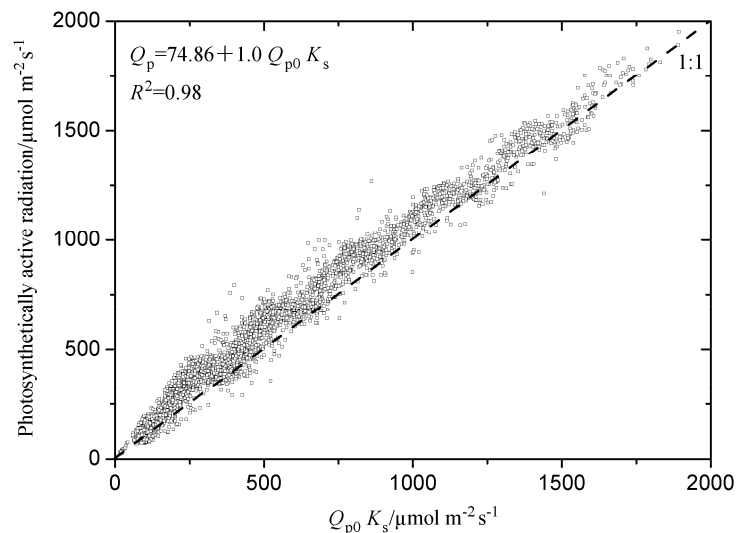


图 5 光合有效辐射的估算方程

Fig. 5 Estimating equation for Q_p

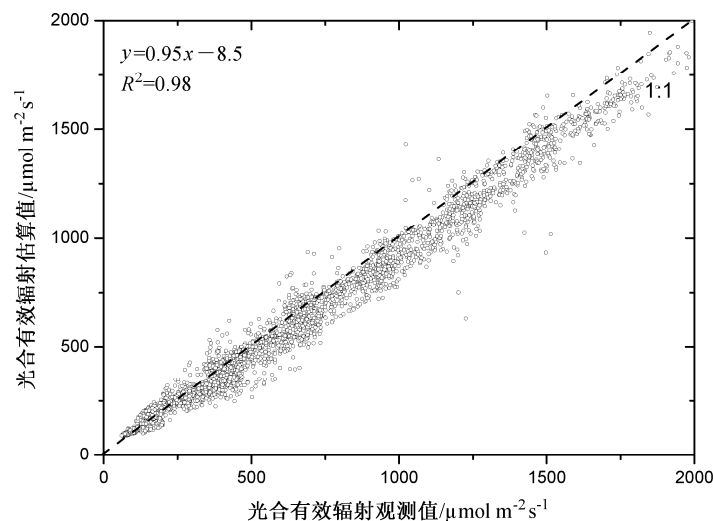


图 6 2010 年 Q_p 估算值与观测值的比对

Fig. 6 Linear regression between observed and modeled Q_p in 2010

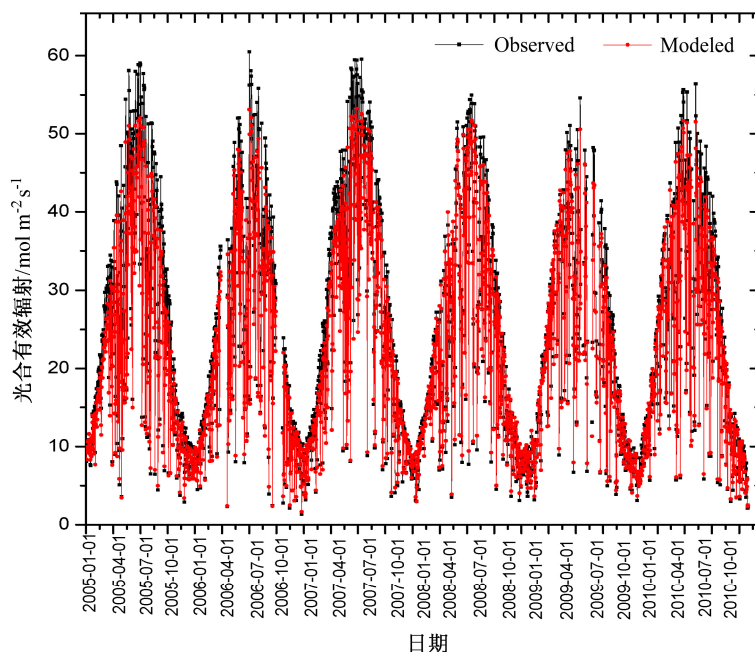


图7 三江地区 2005~2010 年重构与观测的光合有效辐射对比

Fig. 7 Comparison of modeled and observed daily Q_p from 2005 to 2010 in the Sanjiang area

射的估算。

表 2 2005~2010 年 Q_p 估算值与观测值比对统计结果

Table 2 Statistical parameters of linear regression of observed and modeled Q_p during 2005–2010

年份	斜率	截距	相关系数	相对误差
2005	1.09	18.5	98%	5.70%
2006	0.93	-15.2	99%	2.40%
2007	1.08	1.2	98%	3.90%
2008	0.97	-5.1	98%	3.90%
2009	0.96	5.9	98%	4.80%
2010	0.95	-8.5	98%	2.90%

利用建立的 Q_p 估算方程和三江地区 2005~2010 年 R_s 进行了 Q_p 重构, 从重构与观测 Q_p 的逐日变化 (如图 7 所示) 可以看出, 估算值与观测值的变化趋势一致, 两者的年平均相对误差为 5%, 这表明本文所建立的 Q_p 估算方程能够很好地应用于三江平原地区历史光合有效辐射的估算。

4 结论

利用三江站 2005~2011 年连续 7 年的辐射观测数据进行了该地区光合有效辐射变化特征的分析, 并建立了 Q_p 估算方程, 主要结论如下:

(1) 光合有效辐射与总辐射季变化规律基本一致, 都呈现为“夏季大、冬季小”。 Q_p 日累计值

的变化范围为 $0.11 \sim 60.47 \text{ mol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, 年均值为 $23.76 \text{ mol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 。光合有效辐射与总辐射比值 (Q_p/R_s) 的季节变化与 Q_p 一致。 Q_p/R_s 的变化范围在 $1.52 \sim 2.07 \text{ mol MJ}^{-1}$ 之间, 年均值为 1.91 mol MJ^{-1} 。 Q_p/R_s 与晴空指数存在着较好的负相关性。

(2) 利用大气质量数和晴空指数与 Q_p 关系, 建立了适合于三江地区的 Q_p 估算方程, 估算方程略微低估了 Q_p , 估算瞬时值与观测瞬时值的平均相对误差最大为 5.7%。

由于影响到达地面光合有效辐射量的其它因子还有很多, 利用大气质量数和晴空指数建立的三江地面光合有效辐射估算方程具有一定的地域局限性, 今后还将进行辐射传输模式方面的分析研究, 以期能更深入的了解光合有效辐射的变化规律和机理。

参考文献 (References)

- Alados I, Foyo-Moreno I, Alados-Arboledas L. 1996. Photosynthetically active radiation: Measurements and modelling [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 78 (1-2): 121-131.
- Britton C M, Dodd J D. 1976. Relationships of photosynthetic active radiation and shortwave irradiation [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 17: 1-17.
- Dye D G. 2004. Spectral composition and quanta-to-energy ratio of diffuse photosynthetically active radiation under diverse cloud conditions [J]. J.

- Geophys. Res., 109, doi:10.1029/2003JD004251.
- Elhadidy M A, Abdel-Nabi D Y, Kruss P D. 1990. Ultraviolet solar radiation at Dhahran, Saudi Arabia [J]. *Solar Energy*, 44 (6): 315–319.
- Foyo-Moreno I, Vida J, Alados-arboledas L. 1999. A simple all weather model to estimate ultraviolet solar radiation (290–385 nm) [J]. *J. Appl. Meteor.*, 38 (7): 1020–1026.
- Geger M, Diabaté L, Ménard L, et al. 2002. A web service for controlling the quality of measurements of global solar irradiation [J]. *Solar Energy*, 73 (6): 475–480.
- Gueymard C. 1989. A two-band model for the calculation of clear sky solar irradiance, illuminance, and photosynthetically active radiation at the earth's surface [J]. *Solar Energy*, 43 (5): 253–265.
- Gueymard C A. 2004. The Sun's total and spectral irradiance for solar energy applications and solar radiation models [J]. *Solar Energy*, 76: 423–453.
- Hu B, Wang Y S, Liu G R. 2010. Long-term trends in photosynthetically active radiation in Beijing [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 27 (6): 1380–1388.
- 胡波, 王跃思, 刘广仁. 2010. 太阳紫外/光合有效辐射表标定方法探讨 [J]. *气候与环境研究*, 15 (2): 210–216. Hu Bo, Wang Yuesi, Liu Guangren. 2010. A study of ultraviolet and photosynthetically active radiation pyranometer calibration method [J]. *Climatic and Environment Research* (in Chinese), 15 (2): 210–216.
- Jacovides C P, Timvios F S, Papaioannou G, et al. 2004. Ratio of PAR to broadband solar radiation measured in Cyprus [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 121 (3–4): 135–140.
- Kasten F, Young A T. 1989. Revised optical air mass tables and approximation formula [J]. *Appl. Opt.*, 28: 4735–4738.
- 刘兴士, 马学慧. 2002. 三江平原自然环境变化与生态保育 [M]. 北京: 北京大学出版社, 1–36. Liu Xingtu, Ma Xuehui. 2002. Sanjiang Plain Natural Environmental Changes and Ecological Conservation (in Chinese) [M]. Beijing: Peking University Press, 1–36.
- McCree K J. 1966. A solarimeter for measuring photosynthetic active radiation [J]. *Agricultural Meteorology*, 3 (5–6): 353–366.
- McCree K J. 1972. Test of current definitions of photosynthetically active radiation against leaf photosynthesis data [J]. *Agricultural Meteorology*, 10: 443–453.
- Rigollier C, Bauer O, Wald L. 2000. On the clear sky model of the 4th European Solar Radiation Atlas with respect to the Heliosat method [J]. *Solar Energy*, 68 (1): 33–48.
- Ross J, Sulev M. 2000. Sources of errors in measurements of PAR [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 100 (2–3): 103–125.
- Udo S O, Aro T O. 1999. Global PAR related to global solar radiation for central Nigeria [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 97 (1): 21–31.
- 王文玲, 胡波, 安俊琳, 等. 2013. 拉萨光合有效辐射的变化趋势及其估算方程的建立 [J]. *高原气象*, 32 (2): 888–892. Wang Wenling, Hu Bo, An Junlin, et al. 2013. Trend and estimation of photo-synthetically active radiation at Lhasa station [J]. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 32 (2): 888–892.
- 周允华, 项月琴, 单福芝. 1984. 光合有效辐射 (PAR) 的气候学研究 [J]. *气象学报*, 42 (4): 387–397. Zhou Yunhua, Xiang Yueqin, Shan Fuzhi. 1984. A climatological study on the photosynthetically active radiation [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 42 (4): 387–397.
- 朱旭东, 何洪林, 刘敏, 等. 2010. 近 50 年中国光合有效辐射的时空变化特征 [J]. *地理学报*, 65 (3): 270–280. Zhu Xudong, He Honglin, Liu Min, et al. 2010. Spatio-temporal variation characteristics of photosynthetically active radiation in China in recent 50 years [J]. *Acta Geographica Sinica* (in Chinese), 65 (3): 270–280.