

Primary Study on Calculating Method of Photosynthetically Radiation at Shenzhen

Jianhui Bai^{1*}, Nan Li²

¹Laboratory for Middle Atmosphere Layer and Globe Environment Observation, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing

²Shenzhen Fairy Garden, Shenzhen Guangdong
Email: *bjh@mail.iap.ac.cn

Received: Jul. 24th, 2018; accepted: Aug. 10th, 2018; published: Aug. 17th, 2018

Abstract

Integrated observations were made of solar radiation (including photosynthetically active radiation (PAR), visible radiation (VIS), global radiation (Q), etc.), and meteorological parameters at Shenzhen during May 29 to June 7, 2005. The ratios of hourly sums of PAR to Q, VIS to Q and PAR to VIS were relatively stable, and their averages were 2.28 (2.61 - 1.88), 0.46 (0.57 - 0.38) and 4.95 (5.23 - 4.47), respectively. They displayed evident diurnal and daily variations and were influenced by water vapor, aerosol and clouds. Empirical models for calculating hourly sums of PAR and VIS, as well as relationship between PAR and VIS were developed. The calculated PAR and VIS were in good agreement with measured, and their relative biases were less than 3.0% and 4.0%, respectively. The applications of these empirical models under different conditions were studied. The absorbing factor plays more important role than scattering factor in atmospheric radiative transfer and calculation of PAR and visible radiation. When considering both absorbing and scattering factors, the better estimations of hourly sums of PAR and visible radiation under all sky conditions were obtained.

Keywords

Solar Radiation, Photosynthetically Active Radiation, Visible Radiation, Cloud, Absorbing and Scattering Factors

深圳光合有效辐射计算方法的初探

白建辉^{1*}, 李楠²

¹中国科学院大气物理研究所中层大气与全球环境探测开放实验室, 北京

²深圳仙湖植物园, 广东 深圳
Email: *bjh@mail.iap.ac.cn

*通讯作者。

摘要

2005年夏季在深圳对太阳辐射(包括光合有效辐射PAR、可见光辐射VIS、总辐射Q等)、气象参数等进行了综合观测, 初步得到了PAR、VIS等的变化特征。观测表明, 小时累计之比PAR/Q、VIS/Q、PAR/VIS相对稳定, 其平均值分别为2.28 (2.61~1.88)、0.46 (0.57~0.38)、4.95 (5.23~4.47), 但它们均有明显的日变化和逐日变化, 并受水汽、气溶胶、云等因素的影响。建立了计算PAR、VIS的经验公式以及PAR与VIS转换关系式, 计算值与观测值符合较好, PAR、VIS计算值与观测值的相对偏差分别小于3.0%、4.0%。对于经验公式在不同情况下的使用做了研究。吸收因子比散射因子对PAR、VIS的传输和计算起着更重要的作用。当同时考虑这两个因子时, 可以得到实际天气较好的PAR和VIS小时累计值。

关键词

太阳辐射, 光合有效辐射, 可见光辐射, 云, 吸收和散射因子

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

太阳辐射为地球上的植物生长提供了能量来源, 光合有效辐射(PAR)作为一种气候资源, 在评价作物光合潜力、潜在产量方面被作为重要的科学依据[1]。波段在 400~700 nm 的 PAR 是影响和控制植物光合过程的关键因子[2]。PAR 还是控制植物挥发性有机物(BVOC)排放的关键因子[3] [4]。因此, PAR 在林学、生态学、大气化学等多领域具有重要作用。PAR 计量方法主要有两种, 1) 辐照度(单位 $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$), 多用于气象、辐射、气候等领域; 2) 量子通量密度(单位 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$), 多用在生态学、农学、大气化学等领域。两种计量系统在使用上各有优缺点。多数情况下, 研究者只有一定时间段测量结果, 而实际研究中还需更长时间序列的数据; 另外, 不同专业领域科研人员需要从一种计量单位的 PAR 得到另一计量单位下的 PAR, 即不同计量系统下 PAR 数据的互换。国内外在 PAR 实验和计算方法方面之前的研究结果大多集中于气候学方面[1] [5] [6] [7] [8] [9], 在实际应用中, 对 PAR 小时累计值(及日总量)的需求则越来越迫切, 例如计算一些地区 BVOC 的排放量。由于 PAR 与总辐射的比例 η_Q 在世界各地相对稳定, 因而一些科学家将 η_Q 取为常数。然而, 大量观测事实表明, η_Q 受多种因素影响、且有时空变化。因此, 考虑到不同领域对准确 PAR 数据的需求, 以实测数据和一定的物理原理为基础, 建立适合某一地区 PAR 的实用计算方法以及两种计量系统下的转换关系将具有重要科学意义和实用价值。本文初步探讨我国深圳地区的 PAR 及计算方法。

2. 观测简介

实验地点设在深圳仙湖植物园(22.57 N, 114.17 E)。太阳辐射仪器包括[10] [11]: 国产直接辐射表(TBS-2型), 感应波段为 270~3200 nm; 3个国产分光辐射表(TBQ-4-1型), 感应波段分别为 270~3200 nm、400~3200 nm、700~3200 nm, 灵敏度为 5~10 mV/($\text{kW}\cdot\text{m}^{-2}$), 时间响应均 $\leq 1\text{S}(1/e)$, 稳定性均 $\leq \pm 2\%$; 新买的 PAR 表, LI-190SA Quantum Sensor (LI-COR 公司, Lincoln, NE, 美国), 相对误差小于 $\pm 5\%$ 。辐

射数据由专用数据采集器和计算机自动采集和存储, 采样频率为 1 Hz。辐射表头安放在办公楼的楼顶, 以避免周围高大遮蔽物对辐射表的影响。太阳辐射观测为每日日出到日落, 每日对辐射表进行巡视和维护, 包括各个辐射表表头日出前的清洁和水平调整、直接辐射表的跟踪等。每日对云、天气状况等进行观测和记录。温湿度测量为每 5 分钟自动记录一次。可见光辐射为 400~3200 nm 和 700~3200 nm 两个分光表测量值之差。国产辐射表在使用前均做了标定。

3. 实验结果

2005 年 5 月 29 日~6 月 7 日在仙湖植物园开展了对太阳辐射、温湿度、云等参数的综合测量, 获得 7:00~19:00 各辐射量小时累计值(简称时累)112 组。由于 19:00 各辐射量时累都较低, 为减小计算误差, 本文中可不考虑, 这样得到 7:00~18:00 时累数据 105 组, 时累的取法为该时刻前 1 小时的累计值。考虑到习惯用法和为方便计, 将以辐照度为单位的可见光辐射表示为 VIS。本文主要介绍 PAR、VIS、太阳总辐射(Q)、水平面太阳直接辐射(S)和散射辐射(D)等的测量结果。图 1、图 2 分别给出观测期间 PAR、VIS、Q、S 的时累和时累比值 PAR/Q、VIS/Q、PAR/VIS、D/Q。

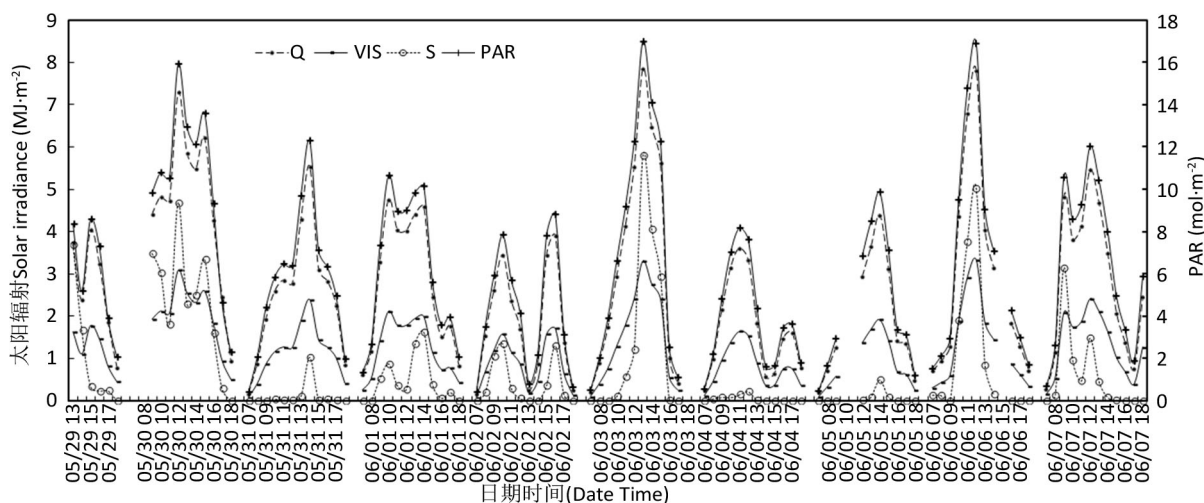


Figure 1. Hourly sums of solar radiation at Shenzhen

图 1. 深圳太阳辐射的时累计

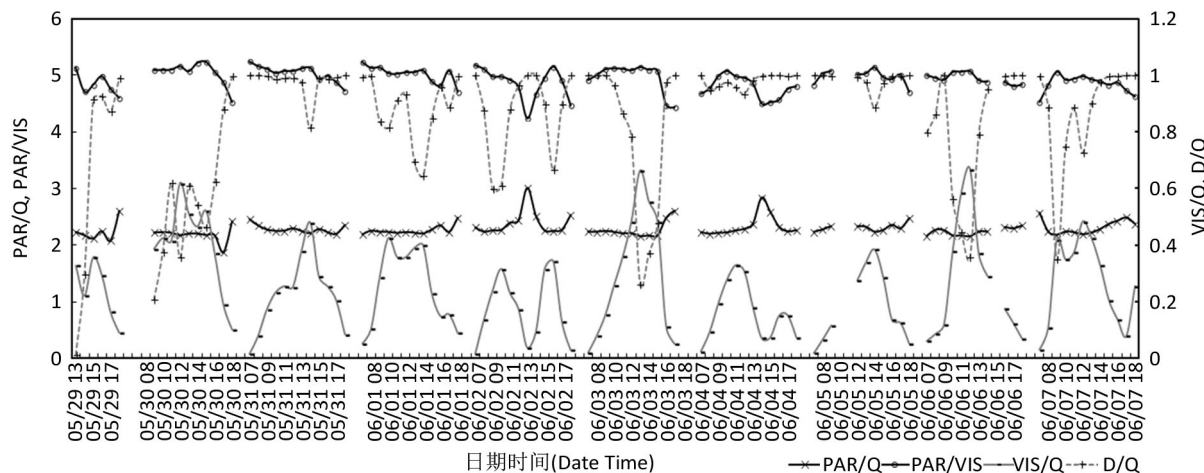


Figure 2. Ratios of solar irradiance at Shenzhen

图 2. 深圳太阳辐射各量的比值

在晴天(云量较少)天气, PAR、VIS、Q、S 日变化比较有规律, 一般中午最大、早晚最小, 如 6 月 3、6 日; 在多云天气, 各个辐射值都受到不同程度的衰减(如以上 2 天之外的其他天气), 日变化比晴天复杂、多变。云量较大以及有降雨的时段或日期, 各辐射量均大幅度下降、变化更加无规律: 例如 6 月 2 日 11:00~14:00 (云量为 9、10, 直接辐射基本为零)、6 月 3 日 16:00~17:00 (小雨)、4 日 12:00~15:00 (小雨)。观测期间每日各时段云量大多在 8、9 以上, 而且云的厚度、空间分布、高度等都在不断变化, 因此, 每日各辐射量的变化规律不尽相同。这些观测数据表明, 如采用云量定量描述云对太阳辐射的衰减在准确性、客观性等方面都有欠缺。大多情况下, PAR、VIS、Q、S 等随天气变化而变化的规律基本相似, 即同步增长或同步下降, 但在变化幅度上存在明显差异。

辐射量时累比值 PAR/Q、VIS/Q、PAR/VIS 的变化幅度相对辐射量来说比较小。概括来讲, PAR/Q 早晚较大、中午较小, 云和降雨可造成它们的增大(如 6 月 2、3、4 日)。PAR/Q 随散射因子 D/Q 大致呈同相变化。

根据多年的实际应用, 散射因子 D/Q 可以客观地描述气溶胶、云等对辐射的散射作用, 并适合应用于各种天气[10] [11]。PAR/VIS、VIS/Q 一般早晚小、中午大, 基本上同位相变化; 云和降雨可造成它们的减小(如 6 月 2、3、4 日)。PAR/VIS、VIS/Q 随 D/Q 大致呈反相变化。平均而言, 观测期间时累之比 PAR/Q、VIS/Q、PAR/VIS 的变化幅度分别为 2.61~1.88、0.57~0.38、5.23~4.47, 它们的平均值分别为 2.28、0.46、4.95。2005 年 7 月 8~17 日, 山东禹城农业综合试验站 PAR/Q、VIS/Q、PAR/VIS 的变化范围分别为 2.65~1.92、0.59~0.39、5.09~3.62, 其平均值分别为 2.11、0.44、4.85。2005 年 7 月 19~28 日期间, 石家庄栾城农业生态系统试验研究站 PAR/Q、VIS/Q、PAR/VIS 的变化范围分别为 2.58~1.83、0.58~0.38、5.16~3.86, 其平均值分别为 2.07、0.44、4.73。可见, 3 个实验点各比值的平均值和变化范围都比较接近; 相比之下, 它们的平均值以栾城最低, 深圳最高。实验表明, PAR/Q、VIS/Q、PAR/VIS 平均值随着纬度的降低而增加。观测期间深圳 D/Q 变化幅度为 1~0.01, 平均值为 0.85。禹城站 7 月 8~17 日的相应值分别为 1~0.53, 0.87, 栾城站 7 月 19~28 日的相应值分别为 1~0.02, 0.76。虽然 PAR/Q、VIS/Q、PAR/VIS 等相对稳定, 但深圳、禹城、栾城等地时累及每 5 分钟平均(因数据量太大, 略)的观测数据表明, 它们都有不同形式的日变化、逐日变化特征, 同时还受多种因素云(包括云量、云状、云厚、云的空间分布)、降水、气溶胶不同程度的影响。而且, PAR/Q、VIS/Q、PAR/VIS 还有明显的空间变化特征。因此, 为找到 PAR、VIS 的计算方法以及它们之间的转换关系, 应该从它们所遵从的物理规律中寻求。

4. PAR 与 VIS 的计算方法和计算结果

大气中物质成分(气、液、固相)、气象参数(温湿度)等对 PAR、VIS 的影响可归纳为吸收和散射作用。太阳的运行规律控制着各辐射量 PAR、VIS、Q 的变化, 是最主要的控制因子, 因而也是控制比值 PAR/Q、VIS/Q 的重要因子, 并用天顶角 Z 的余弦来表达。大气中各种成分对太阳辐射的吸收和散射起着调制作用。这样, 计算 PAR、VIS 的经验模型表达为:

$$\text{PAR}/Q = (A_1 e^{-kwm} + A_2 e^{-D/Q} + A_0) \cos Z \quad (1)$$

$$\text{VIS}/Q = (B_1 e^{-kwm} + B_2 e^{-D/Q} + B_0) \cos Z \quad (2)$$

其中, e^{-kwm} 表示物质的吸收作用, 具体计算为[11]: $e^{-kwm} = 1 - \Delta S / (I_0 \cos Z)$ 。 $\Delta S = 0.172(\text{mW})^{0.303}$, ΔS 为整层大气吸收太阳辐射通量密度值, $W = 0.21e$, e 为地面水汽压(hPa), m 为大气质量, 取某一时段半点之值(无量纲)。太阳常数 $I_0 = 1367 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 。 $e^{-D/Q}$ 表示大气中各种物质(包括云、气溶胶等)的散射作用。式(1)、(2)中各物理量均取某一时段的累计值。

与 PAR/Q、VIS/Q 类似, PAR/VIS 遵从同样的规律:

$$\text{PAR}/\text{VIS} = (C_1 e^{-kwm} + C_2 e^{-D/Q} + C_0) \cos Z \quad (3)$$

由于早晨 7:00、傍晚 18:00 各种因素引起的观测误差(如辐射表余弦误差)较大, 建立算法时剔除这些数据。参照以前经验[12], 为排除其他不利因素干扰并得到对 PAR 和 VIS 变化规律更准确、真实的描述, 统一取 9:00~17:00 的实验数据来分析, 同时剔除总辐射小于 $1.5 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ 的数据, 其中包括某些降雨时段(如 6 月 3、4 日)的数据, 共得到 49 组数据。对这些数据进行分析, 得到了比值 $\text{PAR}/\text{Q}/\text{CosZ}$ 、 $\text{VIS}/\text{Q}/\text{CosZ}$ 、 $\text{PAR}/\text{VIS}/\text{CosZ}$ 与吸收和散射因子的相关系数(R)、式(1)、(2)、(3)中的系数和常数。然后利用它们计算了每日各时段的 PAR、VIS, 计算结果见表 1。其中, PAR、PAR' 分别为利用式(1)、(3)计算的 PAR, $\bar{\delta}$ 、 δ_{\max} 、 δ_{\min} 分别为计算值与观测值相对偏差的平均值、最大值、最小值。

可见, 3 种情况下的计算结果都比较好, 相对偏差的平均值均小于 3.0%。

作为检验, 利用建立的 3 个经验公式计算了观测期间 5 月 31 日~6 月 7 日 8:00~18:00 的 PAR、VIS、PAR'(共 79 组), 并与观测值进行了对比(图 3、图 4)。需要说明的是, 5 月 29 日~31 日 13:00 之间, 由于缺少水汽资料, 没有给出此段的计算值和观测值。考虑到早晨 7:00 和傍晚 19:00 PAR、VIS 时累值比较低(如 VIS 都小于 $0.30 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$), 早晚二者之和占日总量的比例在 0.9%~2.8% (PAR)、1.0%~3.0% (VIS), 它们的平均值均分别为 1.9%、2.0%。另外, 实际应用中, 它们所起的作用也比较小。有研究表明 VIS (PAR) 是影响草地异戊二烯的排放的主要因子, 当 VIS 时累小于 $0.4 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ 时, 草地异戊二烯的排放通量一般为零[13]。所以, 在下面的分析中, 将不考虑 7:00 和 19:00 的辐射情况。实验期间, VIS 18:00 的时累大多小于 $0.30 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$, 个别时段略高, 但也都小于 $0.45 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$, 所以下面分析中不考虑 18:00 的情况。

Table 1. Calculated results of PAR and VIS using 3 empirical formulas when considering absorbing and scattering factors
表 1. 考虑吸收和散射因子时, 3 种方法计算 PAR、VIS 的结果

项目	PAR	VIS	PAR'
R	0.995	0.986	0.995
系数、常数	-23.19, 0.39, 23.43	-4.68, -0.12, 4.75	-52.13, 0.50, 51.95
$\bar{\delta}$ (%)	1.6	2.6	1.5
δ_{\max} (%)	6.2	9.5	4.2
δ_{\min} (%)	0.0	0.2	0.0

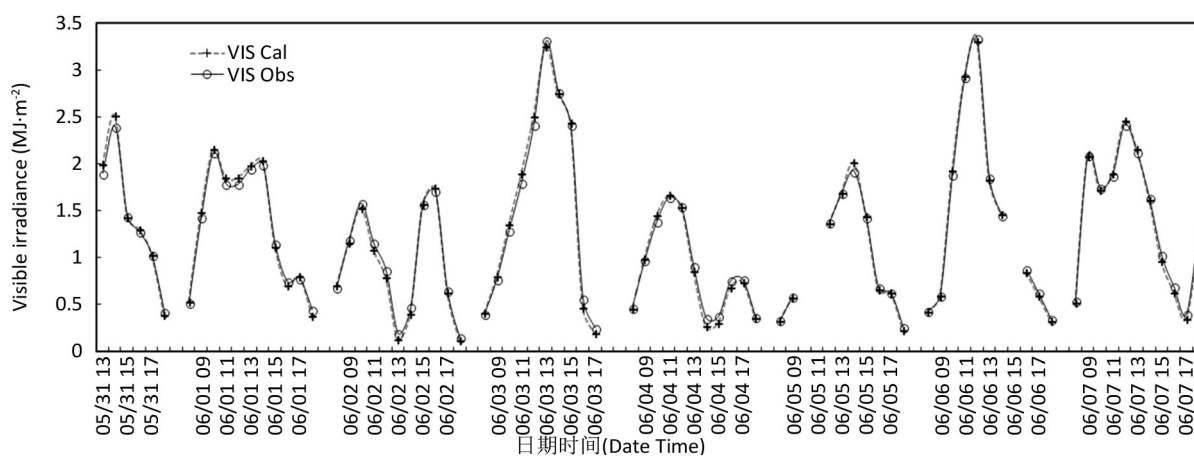


Figure 3. Calculated and measured solar visible irradiance

图 3. VIS 的计算值与观测值

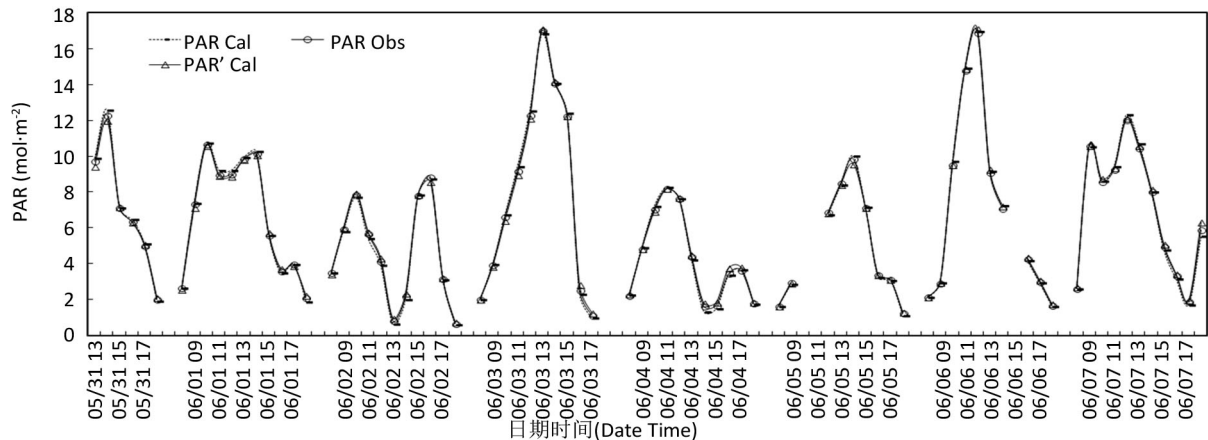


Figure 4. Calculated and measured PAR

图 4. PAR 的计算值与观测值

由图 3、图 4 可以看到, PAR、VIS、PAR' 的计算值与观测值均比较接近, 并与观测结果呈现一致的变化规律。具体而言, PAR、VIS、PAR' 等的 $\bar{\delta}$ 分别为: 3.2%、5.2%、2.8%。因而初步建立的计算方法可行。

表 2 给出上面 3 种情况下的相对偏差(8:00~18:00, 79 组数据)。实际应用中, 由于有些参数不易得到, 因此, 计算时考虑了 3 种选择: 1) 全部因子、2) 吸收因子(和常数项)、3) 散射因子(和常数项)。

对比选取不同因子时 PAR、VIS、PAR' 的计算结果, 可以发现: 1) 当考虑所有因子时, 计算值与观测值最为接近, $\bar{\delta}$ 均最小; PAR 和 VIS 计算值的 $\bar{\delta}$ 分别小于 4.0%、6.0%。2) 吸收项的作用远大于散射项的作用, 故吸收因子在实际计算中不可缺少; 3) 散射因子也不能忽略, 因为当考虑散射因子后, 将使 PAR 和 VIS 计算值的 $\bar{\delta}$ 明显降低。

降雨过程中, 不同粒径的雨滴在辐射表表面的停留、集结、流动等, 会对测量结果带来不同程度的影响, 从而在一定程度上也影响着计算结果与观测结果的对比。因此, 为比较客观地分析计算方法的效果, 将有降雨时段的资料做了剔除。这样, 得到了三种情况下 PAR、VIS、PAR' 的相对偏差($\bar{\delta}$ 、 δ_{\max} 、 δ_{\min}) (69 组数据) (见表 3)。

降雨对辐射传感器信号响应、辐射传输有不同程度的影响, 从而也影响地面 PAR、VIS 估算值的准确度。降雨过程中地面 PAR、VIS 都比较弱, 这也是造成计算结果相对偏差较大的主要原因之一。实际上, 此时计算值与观测值的绝对偏差都比较小。在降雨时段, 由于到达地面的各辐射量均比较小, 因此, 它们在大气化学、生态等领域产生的实际应用价值并不大。实际天气条件下(云量 0~10), 在剔除降雨的影响后, 可以使 PAR、VIS、PAR' 时累的计算偏差明显减小, 它们的 $\bar{\delta}$ 和 δ_{\max} 分别小于 3.0%、4.0%、3.0%; 12.0%、20.0%、11.0%。

实际应用中, 有时会缺少直接辐射或散射辐射的测量值, 造成散射项无法得到。为了提高计算的准确度和实用性, 在考虑计算公式时, 如果仅利用吸收因子, 情况将会如何? 采用类似方法, 再次分析了 9:00~17:00 的 49 组数据, 得到了 PAR/Q/CosZ、VIS/Q/CosZ、PAR/VIS/CosZ 与吸收因子的 R 值、系数以及 PAR、VIS、PAR' 的计算值和计算偏差(表 4)。

在只考虑吸收因子作用时, 3 种情况下的计算结果也都比较好, PAR 和 VIS 计算值 $\bar{\delta}$ 分别小于 2.0%、4.0%。对比考虑全部因子情型, 此种情况下吸收因子的系数和常数均没有太大变化, 因而计算结果没有显著差别。综合考虑, 以考虑全部因子的计算结果略好, 这主要是缘于考虑影响辐射传输的因子比较全面。出于实际需要, 在缺少散射因子时, 也可以考虑采用表 4 中的系数和常数计算 PAR、VIS、PAR'。

Table 2. The relative biases (%) between calculated and observed PAR and VIS using 3 empirical formulas
表 2. 3 种方法计算 PAR、VIS 的相对误差(%)

项目	PAR			VIS			PAR'		
	1)	2)	3)	1)	2)	3)	1)	2)	3)
不同情形	1)	2)	3)	1)	2)	3)	1)	2)	3)
$\bar{\delta}$	3.2	6.0	643.8	5.2	9.6	640.3	2.8	3.9	680.9
δ_{\max}	23.7	18.9	966.8	34.7	28.3	1002.7	17.0	10.8	1129.2
δ_{\min}	0.0	0.2	205.2	0.2	0.2	175.0	0.0	0.2	263.6

Table 3. The relative biases (%) between calculated and observed PAR and VIS using 3 formulas
表 3. 3 种方法计算 PAR、VIS 的相对误差(%)

项目	PAR			VIS			PAR'		
	1)	2)	3)	1)	2)	3)	1)	2)	3)
不同情形	1)	2)	3)	1)	2)	3)	1)	2)	3)
$\bar{\delta}$	2.1	5.6	689.2	3.6	9.2	690.3	2.1	3.7	713.1
δ_{\max}	11.7	12.8	966.8	19.5	20.9	1002.7	10.9	7.1	977.2
δ_{\min}	0.0	0.2	305.7	0.2	0.2	300.2	0.0	0.2	304.7

Table 4. Calculated results of PAR and VIS using 3 empirical formulas when considering only absorbing factor
表 4. 考虑吸收因子时 3 种方法计算 PAR、VIS 的结果

项目	PAR	VIS	PAR'
R	0.992	0.979	0.988
系数、常数	-23.29, 23.34	-4.71, 4.72	-52.01, 52.07
$\bar{\delta}$	2.0	3.4	1.8
δ_{\max}	7.4	11.3	4.6
δ_{\min}	0.0	0.0	0.1

作为检验, 利用表 4 的系数和常数计算了 8:00~18:00(79 组)的 PAR、VIS、PAR', 它们的 $\bar{\delta}$ 分别为: 3.7%、6.0%、2.9%。去掉降雨时间段后, 则 PAR、VIS、PAR' (69 组)的 $\bar{\delta}$ 分别为: 2.6%、4.3%、2.2%。与考虑全部因子相比, 只考虑吸收因子时, PAR、VIS 的计算偏差略大, 但没有显著差别。

5. 讨论

参考我国华北地区 PAR、VIS 的经验模型和 PAR/VIS 关系式, 客观考虑了影响 PAR、VIS 传输的主要因子, 发展了计算深圳地区 PAR、VIS 经验模型以及 PAR/VIS 关系式。计算表明, 经验模式可用。利用经验模型计算包含建立模型之外的 PAR、VIS 时累值时, 计算值的平均和最大偏差均略增大, 这是可以理解的。此次测量与华北 4 站太阳辐射测量[10]相比时间相对较短, 经验模型中 PAR、VIS、PAR/VIS 的系数与华北地区的存在差别。因此, 未来应该在深圳地区开展长期的太阳辐射观测实验, 以探索和发展我国北方和南方统一的 PAR、VIS 经验模型以及 PAR/VIS 关系式。

深圳位于我国亚热带地区, 植物种类较多, 其 BVOCs 排放也具有显著的地域特征[14]。由于较高的气温和 PAR, 使得深圳 BVOCs 排放相对较高。PAR 准确数据的获取是计算深圳 BVOCs 排放的一个重要和基本参数, 包括利用当地已有总辐射资料计算过去以及未来的 PAR 值。从而在此基础上, 为未来利用 BVOCs 排放模型估算深圳 BVOCs 排放量提供可靠的辐射数据[15] [16]。本文发展的 PAR、VIS 的经验模型以及二者之间的关系式可为计算深圳地区 PAR 提供方法, 也可为获得临近地区的 PAR 提供参考。

6. 结论

2005年夏季在深圳对太阳辐射、气象参数等进行了观测, 观测期间 PAR/Q、VIS/Q、PAR/VIS 的平均值分别为 2.28、0.46、4.95, 它们的变化范围分别为 2.61~1.88、0.57~0.38、5.23~4.47。建立和发展了 PAR、VIS 时累值的经验模型和 PAR/VIS 之间的转换关系。实际天气条件下, PAR 和 VIS 时累的计算值与观测值均比较一致, 它们相对偏差的平均值分别小于 3.0%、4.0%。影响比值 PAR/Q、VIS/Q、PAR/VIS 的主要因子是天顶角, 吸收和散射因子具有调制作用。吸收因子对 PAR/Q、VIS/Q、PAR/VIS 都是必不可少的关键因子; 在考虑散射因子后, PAR、VIS 的计算偏差明显减小, 因而散射因子对 PAR、VIS 传输和计算也起着重要作用。当考虑吸收和散射因子后, 得到了最佳的 PAR 和 VIS 计算结果以及 PAR/VIS 转换关系。在缺少散射辐射数据之时, 可以只考虑吸收因子的作用, 其计算偏差与考虑全部因子时没有显著差别。

致谢

感谢深圳仙湖植物园黄爱葵、廖芬、罗宾等同仁提供的大力帮助, 感谢美国加州大学 Alex Guenther、美国加利福尼亚大学 Bradly Baker 和 Michael Grassli 所做的工作。

基金项目

国家自然科学基金(40175031)、中国科学院野外台站研究基金资助项目。

参考文献

- [1] 周允华, 项月琴, 栾禄凯. 光合有效通量密度的气候学计算[J]. 气象学报, 1996, 54(4): 447-455.
- [2] 刘荣高, 刘纪远, 庄大方. 基于 MODIS 数据估算晴空陆地光合有效辐射[J]. 地理学报, 2004, 59(1): 64-73.
- [3] Guenther, A., Hewitt, C.N., Erickson, D., Fall, R., Geron, C., *et al.* (1995) A Global Model of Natural Volatile Organic Compound Emissions. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, **100**, 8873-8892. <https://doi.org/10.1029/94JD02950>
- [4] 白建辉, 王明星, J. Graham, R.G. Prinn, 黄忠良. 森林排放非甲烷碳氢化合物的初步研究[J]. 大气科学, 1998, 12(2): 247-251.
- [5] 季国良, 等. 张掖地区的光合有效辐射特征[J]. 高原气象, 1993, 12(2): 141-146.
- [6] 田国良. 呼伦贝尔草原的太阳分光辐射能和光合潜力[J]. 地理学报, 1980, 35(1): 76-82.
- [7] 谢贤群. 黄淮海平原冬小麦生育期的光合有效辐射分布特征, 中国科学院“六五”黄淮海平原科技攻关文集, 黄淮海平原治理和开发, 第一集[M]. 北京: 科学出版社, 1985: 139-148.
- [8] 赵名茶. 用量子测定分析黄淮海平原冬小麦的光能利用率, 黄淮海平原治理和开发, 第一集[M]. 北京: 科学出版社, 1985: 149-161.
- [9] Zhang, X.Z., Zhang, Y.G. and Zhou, Y.H. (2000) Measuring and Modeling Photosynthetically Active Radiation in Tibet Plateau during April-October. *Agricultural and Forest Meteorology*, **102**, 207-212.
- [10] Bai, J.H. (2012) Observations and Estimations of PAR and Solar Visible Radiation in North China. *Journal of Atmospheric Chemistry*, **69**, 231-252. <https://doi.org/10.1007/s10874-012-9239-0>
- [11] 白建辉, 王庚辰. 内蒙古草原光合有效辐射的计算方法[J]. 环境科学研究, 2004, 17(6): 15-18.
- [12] 白建辉, Bradly Baker. 热带人工橡胶林异戊二烯排放通量的模式研究[J]. 环境科学学报, 2004, 24(2): 197-203.
- [13] 白建辉, Brad Baker. 内蒙古草原典型草地异戊二烯的排放特征[J]. 环境科学学报, 2005, 25(3): 285-292.
- [14] 黄爱葵, 李楠, A. Guenther, J. Greenberg, B. Baker, M. Graessli, 白建辉. 深圳市显著排放 VOCs 的园林植物调查与分析[J]. 环境科学, 2011, 32(12): 3555-3559.
- [15] Bai, J.H., Duhl, T. and Hao, N. (2016) Biogenic Volatile Compound Emissions from a Temperate Forest, China: Model Simulation. *Journal of Atmospheric Chemistry*, **73**, 29-59. <https://doi.org/10.1007/s10874-015-9315-3>
- [16] 白建辉, 郝楠. 亚热带森林植物挥发性有机物(BVOCs)排放通量与大气甲醛之间的关系[J]. 生态环境学报, 2018, 27(6): 991-999.

知网检索的两种方式：

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择：[ISSN]，输入期刊 ISSN：2163-3967，即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入，输入文章标题，即可查询

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：ag@hanspub.org