

Study on Solar Spectral Radiation and Calculating Method of Photosynthetically Active Radiation at Baikal Lake

Jianhui Bai

Laboratory for Middle Atmosphere Layer and Globe Environment Observation, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing
Email: bjh@mail.iap.ac.cn

Received: Mar. 17th, 2015; accepted: Apr. 3rd, 2015; published: Apr. 10th, 2015

Copyright © 2015 by author 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

Abstract

Integrated observations were made of solar radiation (including global radiation (Q), UV, visible radiation (VIS), near infrared radiation (NIR)), photosynthetically active radiation (PAR), and meteorological parameters at Baikal Lake in August 2005. The characteristics of Q, UV, VIS, NIR, PAR were obtained. The results show that the ratios of hourly sum UV/Q, VIS/Q, NIR/Q, PAR/Q, PAR/VIS were relatively stable and displayed evident diurnal and daily variations. Their averages were 0.054, 0.435, 0.513, 2.118 and 4.874, respectively. Based on analyzing observational data and utilizing routine observational data at solar radiation and meteorological stations, the empirical formulas for calculating hourly sums of PAR and VIS, and relationship between PAR and VIS were developed under all sky conditions. The calculated PAR and VIS were in good agreement with measured, and their relative biases were less than 4.5%. Considering the availability of different solar radiation data, the empirical formulas using different parameters were developed, and the option of selecting different parameters was also discussed.

Keywords

Solar Radiation, Photosynthetically Active Radiation, Solar Visible Radiation, Scattering Factor, Baikal Lake

贝加尔湖地区太阳分光辐射和PAR算法的研究

白建辉

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
Email: bjh@mail.iap.ac.cn

收稿日期: 2015年3月17日; 录用日期: 2015年4月3日; 发布日期: 2015年4月10日

摘要

2005年8月对贝加尔湖地区的太阳分光辐射(总辐射Q、紫外辐射UV、可见光辐射VIS、近红外辐射NIR)、光合有效辐射PAR、气象参数等做了短期测量, 初步得到了Q、UV、VIS、NIR、PAR等的变化特征。观测表明, 小时累计值之比UV/Q、VIS/Q、NIR/Q、PAR/Q、PAR/VIS等相对稳定, 并表现出明显的日变化和逐日变化, 它们的平均值分别为0.054、0.435、0.513、2.118、4.874。基于对测量数据的分析, 利用辐射和气象台站常规的测量数据, 建立了计算实际天气PAR、VIS小时值的经验公式以及PAR与VIS转换关系式, 计算值与观测值符合得较好。PAR、VIS计算值与观测值的相对偏差小于4.5%。考虑到辐射资料的可用性, 建立了使用不同参数情形下的经验公式, 并讨论了有关参数的使用。

关键词

太阳分光辐射, 光合有效辐射, 可见光辐射, 散射因子, 贝加尔湖

1. 引言

太阳辐射为地球上动植物的生长提供了重要的能量源泉。到达地表的太阳辐射如紫外辐射(UV)、光合有效辐射(PAR)等由于波段的差别, 它们对动植物、大气环境等方面产生的作用和效果也存在明显差别。PAR 做为一种气候资源, 在评价作物光合潜力、潜在产量研究中被作为重要的科学依据[1]。PAR(波段一般取 400~700 nm)是植物光合作用中重要的关键性因子[2], PAR 还是控制植物挥发性有机物(BVOC)排放的主要影响因子[3] [4], PAR 在农学、林学、生态学、大气科学等众多领域都具有重要作用; UV 在动植物生长、人类健康、臭氧光化学污染、BVOC 光氧化形成有机气溶胶(如霾的产生)等方面具有重要作用, 这些作用已被大众广泛认识到。因此, 除了研究我国华北地区不同波段太阳辐射的状况、时空分布特征和变化规律外[5]-[7], 研究世界不同地区太阳辐射的状况、特征、变化规律等, 将有助于我们全面了解地球上接收到的太阳辐射能量、太阳辐射在区域气候形成及其变化过程中的作用。对于广泛地了解太阳辐射能量(紫外和可见光波段的能量)在大气化学和光化学中的作用也将有重要的意义和参考价值[8] [9]。

PAR 的计量方法主要有两种, 1) 辐照度(单位 $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$), 多应用在辐射、气象、气候等领域; 2) 量子通量密度(单位 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$), 多应用于农学、生态学、大气化学等领域。在使用上它们各有特点。过去国内外在 PAR 实验和计算方法方面的研究结果大多集中于气候学方面[1] [10]-[15], 但目前对于 PAR 小时累计值(及日总量)的需求则越来越迫切。由于 PAR 与总辐射的比值 η_Q (无量纲)在世界各地相对稳定, 因而一些科学家多将 η_Q 取为常数。但大量观测表明, η_Q 受多种因素影响(如水汽含量、雨、雪、雾、霾和沙尘等)、并且有时空变化[5]-[7]。因此, 1) 测量并获取各地的太阳辐射数据; 2) 在此基础上, 充分利用各个辐射和气象台站已有的常规太阳辐射和气象数据, 建立某一地区 PAR 和 VIS(可见光辐射)实际天气(包括晴天和云天)的实用算法、以及 PAR 在两种计量系统下的转换关系, 以通过不同手段获得地球上不同地区太阳分光辐射的准确值, 它将具有重要的科学意义和实用价值。本文主要探讨贝加尔湖地区的太阳辐射、PAR 及其算法。

2. 观测简介

2005年8月9日~30日,参加了中国科学院组织的贝加尔湖的科学考察,期间对于2个实验地点的太阳辐射、气象参数、大气臭氧、气溶胶光学厚度等进行了短期测量,初步得到了有限但非常宝贵的观测数据。贝加尔湖是欧亚大陆最大的淡水湖,湖型如月牙狭长弯曲,长度636 km,平均宽48 km,面积31,500 km²。贝加尔湖两岸是针叶林覆盖的群山,山地草原植被主要有杨树、杉树、落叶松、西伯利亚松、桦树等。2个实验地点分别为:1) 贝加尔湖南岸的 Istomino, International ECO Educational Center (52.13 N, 106.30 E, 430 m); 2) 贝加尔湖北岸的 Olkhon 岛(53.20 N, 107.34 E, 476 m), 观测时间分别为8月17~19和23~24日。本文主要介绍太阳辐射方面的结果。

太阳辐射仪器包括:国产直接辐射表,TBS-2型,感应波段为270~3200 nm;国产分光辐射表,TBQ-4-1型,其感应波段分别为270~3200 nm、400~3200 nm、700~3200 nm,它们的灵敏度为5~10 mV/(kW·m⁻²),时间响应均为≤1S (1/e),稳定性均为≤±2%;进口 PAR 表,LI-190SA Quantum Sensor,相对误差小于±5%。辐射数据由专用数据采集器和计算机自动采集并存储,采样频率为1Hz。根据当地条件,辐射表头安放在空旷场地或房顶,以避免周围遮蔽物的影响。太阳辐射观测为每日的日出到日落,且每日对温湿度、云、天气状况等进行观测和记录。温湿度的测量为每5分钟自动记录一次。紫外辐射(UV)由290~3200 nm和400~3200 nm两个分光表测量值之差得到,可见光辐射(VIS)的测量值由400~3200 nm和700~3200 nm两个分光表测量值之差得到,太阳总辐射(Q)和近红外辐射(NIR)分别为270~3200 nm、700~3200 nm两块辐射表的测量值。国产辐射表在使用前均做了标定。多年的使用表明,该套太阳辐射系统可以较好地测量各个波段的太阳辐射量、并可以由经验模式得到比较准确的大气顶的紫外辐射和可见光辐射[9],辐射系统的详细介绍可参考文献[5][9]。

3. 实验结果

对实验数据处理后,得到考察期间7:00~20:00各辐射量小时累计值(时累)70组,时累的取法为该时刻前1小时的累计值。为方便,将以辐照度为单位的可见光辐射表示为VIS。本文主要介绍UV、VIS、NIR、PAR、太阳总辐射Q、水平面太阳直接辐射S和散射辐射D等的观测结果。图1、图2分别给出观测期间UV、VIS、NIR、PAR、Q、S(水平面直接辐射)等时累和时累比值UV/Q、VIS/Q、NIR/Q、PAR/Q、PAR/VIS、D/Q等的变化。

各辐射量在比较好的晴天,比较有规律,早晚比较低,中午最高。如8月19日。有云或多云天气,它们均有不同程度的减少和不同的变化形态,与晴天相比要复杂、多变,如其他的4日。各辐射量时累比值-UV/Q、VIS/Q、NIR/Q、PAR/Q、PAR/VIS等的变化相对辐射量来说比较平稳,日变化幅度不大,D/Q的日变化和逐日变化比较大,其原因主要是受到了云的影响。一般来讲,PAR/Q、VIS/Q早晚较大,它们基本同位相变化。我国华北地区的4站也有类似特征[5]-[7][9]。PAR/VIS的值一般早晚较小、中午较大。

观测期间,时累之比UV/Q、VIS/Q、NIR/Q、PAR/Q、PAR/VIS等的平均值见表1,其中,贝加尔湖的值为2个实验地点所有测量值的平均。为便于比较不同地点各辐射分量比值的特征,表中也给出利用同一套仪器在我国深圳(2005年5月29~6月7日)、山东禹城(2005年7月8~17日)、河北栾城(2005年7月19~28日)测量的相应值。

虽然各个辐射量值随地点、时间的不同而不同,但根据不同地点的观测结果可以发现,各辐射量与总辐射的比值以及PAR/VIS变化差别不是很大,或大致稳定在一个值附近。贝加尔湖地区的分光辐射占总辐射的比例UV/Q、VIS/Q、NIR/Q分别为5.4%、43.5%、51.2%,PAR/Q、PAR/VIS的平均值分别为2.12、4.87。准确而言,这些比值虽然差别不显著,但它们都随时间和空间的不同而不同,且都有明显的

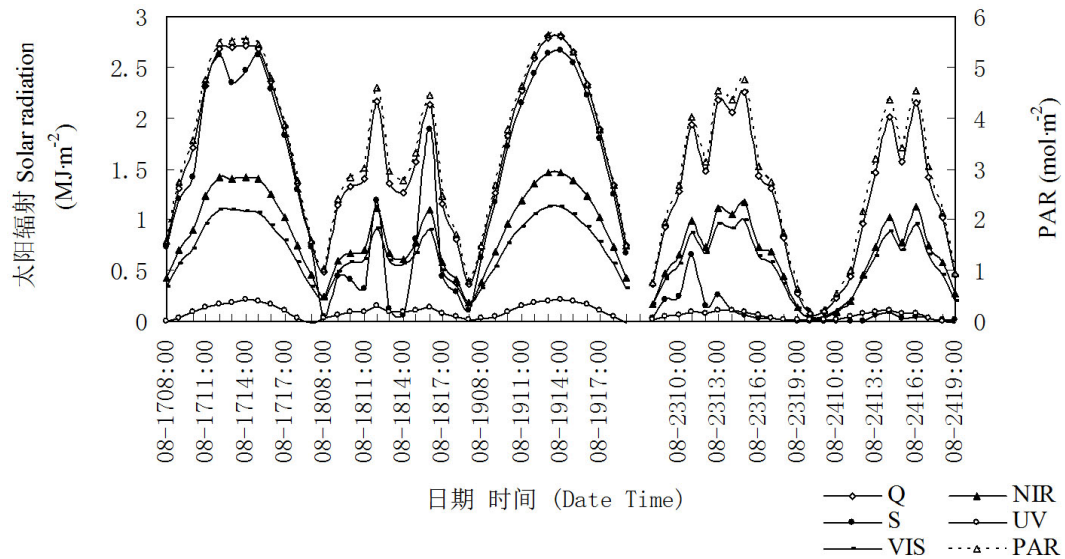


Figure 1. Hourly sums of solar radiation at Baikal Lake in August, 2005

图 1. 2005 年 8 月贝加尔湖太阳辐射的时累计

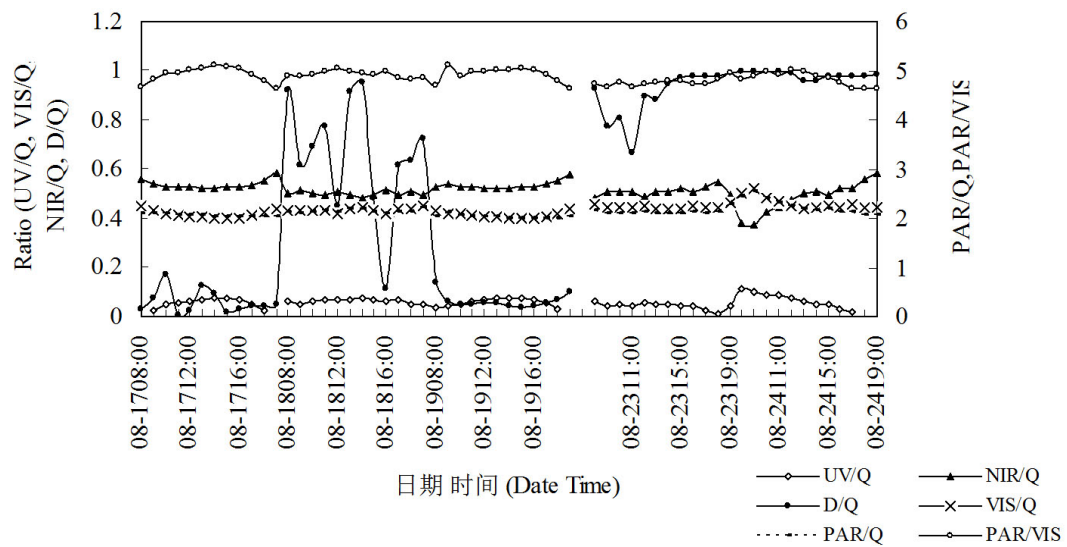


Figure 2. The ratios of solar radiations at Baikal Lake

图 2. 贝加尔湖太阳辐射各量的比值

Table 1. The ratios of different solar spectral radiations

表 1. 太阳分光辐射各量的比值

地点	UV/Q	VIS/Q	NIR/Q	PAR/Q	PAR/VIS
深圳	0.0691	0.4624	0.4684	2.2813	4.9454
禹城	0.0532	0.4259	0.5208	2.0827	4.8953
栾城	0.0563	0.4366	0.5070	2.0677	4.7528
Istomino	0.0602	0.4215	0.5245	2.0743	4.9239
Oikhon 岛	0.0454	0.4539	0.4997	2.1757	4.7913
贝加尔湖	0.0542	0.4348	0.5132	2.1175	4.8736

日变化和逐日变化特征,这一特性在晴天更加显著[5]-[7] [9]。从各地每 5 分钟平均值的变化情况也能清楚地说明此特征,由于篇幅所限,5 分钟的资料略。

由于大气中的各种成分水汽、云、自然和人为源排放的气体、气溶胶等对不同波段太阳辐射的衰减,造成了地表各波段辐射不同程度的减弱(图 1),因而,这些因素同样也带来了地面各辐射量比值的不同变化特征(图 2)。从 D/Q (散射因子)的变化也可以清楚地了解云、气溶胶等的实际变化情况。

4. PAR 算法和计算结果

由于 PAR、VIS、Q 及其它们的比值等受多种因素包括云(云量、云状、云厚、云的空间分布)、降雨、雾、霾、气溶胶等不同程度的影响,因此,建立 PAR、VIS 比较准确的计算方法应该从它们遵从的基本物理、化学规律入手,而不是从表象入手。

简言之,太阳的运行规律(可用天顶角 Z 的余弦来表达)是控制各辐射量 PAR、VIS、Q 及其比值 PAR/Q、VIS/Q、PAR/VIS 的最主要和最重要的因子;大气中各种物质(即固、液、气相成分)对各辐射量(PAR、VIS、Q)的影响可归纳为吸收和散射作用,并且对各个辐射量及其比值起着调制作用。参照华北地区以及禹城和栾城 PAR、VIS 的计算方法[5]-[7],因而提出计算贝加尔湖地区 PAR、VIS 的经验公式:

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

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

其中, e^{-kwm} 表示物质的吸收作用,具体计算为[16]: $e^{-kwm} = 1 - \Delta S / (I_0 \cos Z)$ 。 $\Delta S = 0.172 (\text{mW})^{0.303}$, 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, m 为大气质量。 I_0 (太阳常数) = $1367 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。 $e^{-D/Q}$ 表示物质的散射作用。式(1)、(2)中的各物理量均取某一时段的累计值, m 取某一时段半点之值。

PAR/VIS 同 PAR/Q、VIS/Q 一样也是变化的,也应同样遵从:

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

式(1)中的常数 A_0 表示比值 PAR/Q/CosZ 处于一个相对稳定的状态,而系数 A_1 、 A_2 则分别表示了吸收项和散射项对于比值 PAR/Q/CosZ 的调制作用。式(2)、(3)中的常数和系数所代表的意义与此类同。

考虑到早晨 7:00、傍晚 20:00 太阳高度角较低,各种因素引起的观测误差(如仪器余弦误差)较大,因而在建立计算方法的过程中剔除了这些数据。参照以前经验[17],为了获得对 PAR、VIS 物理规律更加准确的描述,在计算方法建立过程中,统一取 9:00~17:00 的资料(45 组)做分析。由于实验分别在 2 个地点进行,因此,对 2 个点的资料分别进行处理。实验点 2 由于 24 日云比较多,故只考虑 23 日资料。对实验点 1 (27 组)和实验点 2 (9 组)数据的统计分析,可以分别得到比值 PAR/Q/CosZ、VIS/Q/CosZ、PAR/VIS/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。然后利用它们分别计算了每日各时段的 PAR、VIS,计算结果见表 2、表 3。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。计算中,同时考虑了 3 种情况: 1) 全部因子、2) 吸收因子(和常数项)、3) 散射因子(和常数项)。

2 个地点 3 种形式下的计算结果均比较好。仔细对比表 2、表 3 中的结果后,2 个地点都有如下结论: 1) 吸收因子比散射因子重要得多,是计算中必不可少的选项;情形(3)比情形(2)的计算精度相差非常明显,这表明在计算 PAR、VIS、PAR'时,不能仅仅考虑散射因子而忽略吸收因子,因此,不建议仅仅使用散射项来计算 PAR、VIS、PAR'。这也说明 PAR 和 VIS 在大气传输过程中,各种物质的吸收作用远比散射作用重要; 2) 散射因子的作用在绝大多数情况下也很重要,不能忽略。即当考虑散射因子后,计算偏差明显减小; 3) 当考虑全部因子后,绝大多数情况下计算偏差最小,即计算结果最好。因此,考虑吸收和

Table 2. The calculated results of PAR and VIS by 3 formulas (Site 1, Istomino) (considering absorbing and scattering factors)
表 2. 3 种方法计算 PAR、VIS 的结果(实验点 1, Istomino) (考虑吸收因子和散射因子)

项目	PAR			VIS			PAR'		
<i>R</i>	0.974			0.970			0.979		
系数、常数	-6.56, -0.29, 7.62			-1.36, -0.07, 1.57			-14.74, 0.27, 16.85		
	1)	2)	3)	1)	2)	3)	1)	2)	3)
$\bar{\delta}$ (%)	3.8	8.1	139.5	4.1	10.2	48.7	3.5	3.8	130.1
δ_{\max} (%)	8.7	18.7	189.1	9.9	22.0	87.8	8.1	10.7	173.1
δ_{\min} (%)	0.1	0.9	49.7	0.2	0.5	8.6	0.2	0.1	45.9

Table 3. The calculated results of PAR and VIS by 3 formulas (Site 2, Olkhon island) (considering absorbing and scattering factors)
表 3. 3 种方法计算 PAR、VIS 的结果(实验点 2, Olkhon 岛) (考虑吸收因子和散射因子)

项目	PAR			VIS			PAR'		
<i>R</i>	0.998			0.998			0.999		
系数、常数	-6.28, -0.11, 7.13			-1.36, 0.07, 1.49			-13.96, -0.53, 16.07		
	1)	2)	3)	1)	2)	3)	1)	2)	3)
$\bar{\delta}$ (%)	3.5	3.5	110.6	3.0	5.9	116.7	1.5	2.6	112.2
δ_{\max} (%)	17.9	17.2	160.3	15.1	17.2	165.6	6.0	4.1	155.9
δ_{\min} (%)	0.1	0.1	18.3	0.0	1.4	23.2	0.1	1.0	38.2

散射因子后, 2 个地点 PAR、VIS、PAR' 计算值的 $\bar{\delta}$ 可小于 5%。

对比 2 地点对应的计算结果还发现, 实验点 2 的 $\bar{\delta}$ 比实验点 1 要小一些, 总体而言 2 个地点的计算结果大致在同一水平。因此, 在使用实验数据、特别是有限的实验数据时, 可以考虑利用晴好天气、长度较短一些的观测资料来建立方法、寻求规律, 以获得对实验数据最佳、最有效的利用, 这一方法在其他地点以及建立挥发性有机物排放模型时也有较好的应用[17]-[19]。

以考虑全部因子情形为例, 比较一下实际大气条件下经验公式的计算效果。此种条件下, 利用经验公式计算 PAR、VIS 的计算偏差 $\bar{\delta}$: 我国华北的禹城站分别为 11.1%、10.6%, 栾城站分别为 14.4%、13.9%, 华北地区(4 个站)分别为 13.0%、12.4% [5]-[7], 贝加尔湖均小于 5%。贝加尔湖地区 PAR、VIS 计算偏差明显偏小的原因主要是实验时间跨度较短(主要在夏季), 没有涵盖一年四季实际大气的复杂变化(包括云、雨、雪、污染(霾)、沙尘等的影响), 因此, 计算结果明显好于华北站点的。为获得更具代表性的计算方法, 未来应该开展较为长期的测量工作。

为了检验公式的适用性, 利用得到的公式, 分别计算了 2 地点 8:00~19:00 的 PAR、VIS、PAR' (60 组), 同样讨论 3 种情况, 计算结果见表 4、表 5。

对比表 2~5 中的数据, 新结果的计算偏差均比以前同种情形下略有增大, 但大致在同一水平。因此, 建立的计算方法是可以采用的。实验点 2 的计算偏差 $\bar{\delta}$ 比实验点 1 略好一些, 表明以有限的资料来做统计分析是可行的。当考虑全部因子时, 2 个地点 PAR、VIS、PAR' 计算值的 $\bar{\delta}$ 仍然小于 5%。目前来看, 对于贝加尔湖实验区域以及华北地区而言, 比值方法可以用来获得所有天气 PAR、VIS 较为准确的小时值[5]-[7]。如未来有更多的测量数据, 此种方法还应该做进一步的研究和发展, 以获得较大区域普适的计算方法。

图 3、图 4 给出 2 个地点 PAR、VIS、PAR' 计算值和观测值, 可以看到, PAR、VIS、PAR' 等的计算

Table 4. The calculated results of PAR and VIS by 3 formulas (Site 1, Istomino) (applicability test)
表 4.3 种方法计算 PAR、VIS 的结果(实验点 1, Istomino) (适用性检验)

项目	PAR			VIS			PAR'		
	1)	2)	3)	1)	2)	3)	1)	2)	3)
$\bar{\delta}$ (%)	4.2	8.1	110.0	4.2	9.2	113.4	4.0	4.0	102.8
δ_{\max} (%)	13.0	18.7	189.1	9.9	22.0	201.4	13.0	11.6	173.1
δ_{\min} (%)	0.1	0.9	2.4	0.2	0.5	0.5	0.2	0.1	0.5

Table 5. The calculated results of PAR and VIS by 3 formulas (Site 2, Olkhon island) (applicability test)
表 5.3 种方法计算 PAR、VIS 的结果(实验点 2, Olkhon 岛) (适用性检验)

项目	PAR			VIS			PAR'		
	1)	2)	3)	1)	2)	3)	1)	2)	3)
$\bar{\delta}$ (%)	3.6	3.7	88.4	3.3	5.4	92.8	1.8	3.0	88.9
δ_{\max} (%)	17.9	17.2	160.3	15.1	17.2	165.6	8.2	9.2	155.9
δ_{\min} (%)	0.1	0.1	7.0	0.0	0.3	5.6	0.0	1.0	5.5

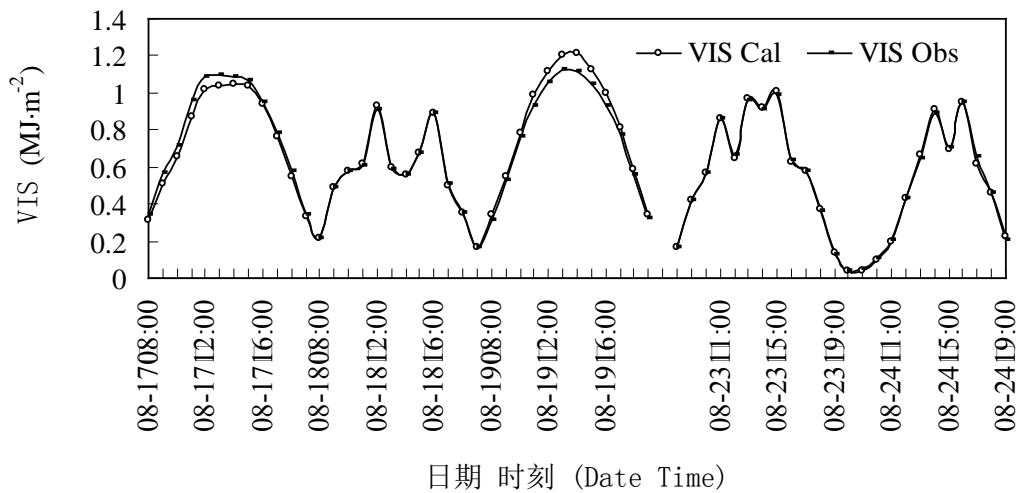


Figure 3. The calculated and measured solar visible radiation (VIS)
图 3. 太阳可见光辐射 VIS 的计算值和观测值

值与观测值均比较接近，并与观测值表现出一致的变化规律。因而，初步建立的经验算法是可用的。文中 3 种形式的计算公式在深圳、禹城、栾城等地均取得了类似的结果[6] [7]。

实际应用中，有时可能没有直接或散射辐射资料，为了提高计算的准确度，在考虑计算公式时，可否考虑仅利用吸收因子的情况?因此，采用类似方法处理 2 个实验点的数据，分别得到了 2 个实验点 9:00-17:00 PAR/Q/CosZ、VIS/Q/CosZ、PAR/VIS/CosZ 等与吸收因子的 R 值、系数、每日各时段 PAR、VIS、PAR' 等的计算值和计算偏差(表 6、表 7)。

仅考虑吸收因子作用时，3 种情况下的计算结果也都比较好，2 个实验地点的 $\bar{\delta}$ 分别小于 5.0%、4.0%。其主要原因是吸收因子的系数和常数均没有太大变化。利用表 6、表 7 的系数，分别计算了 2 个实验地点 8:00~19:00 的 PAR、VIS、PAR'，它们的 $\bar{\delta}$ 、 δ_{\max} 、 δ_{\min} 分别为，实验点 1: 4.5%、13.3%、0.1%；4.7%、10.1%、0.2%；4.2%、12.8%、0.4%；实验点 2: 3.6%、18.0%、0.1%；3.4%、14.6%、0.1%；1.9%、7.7%、

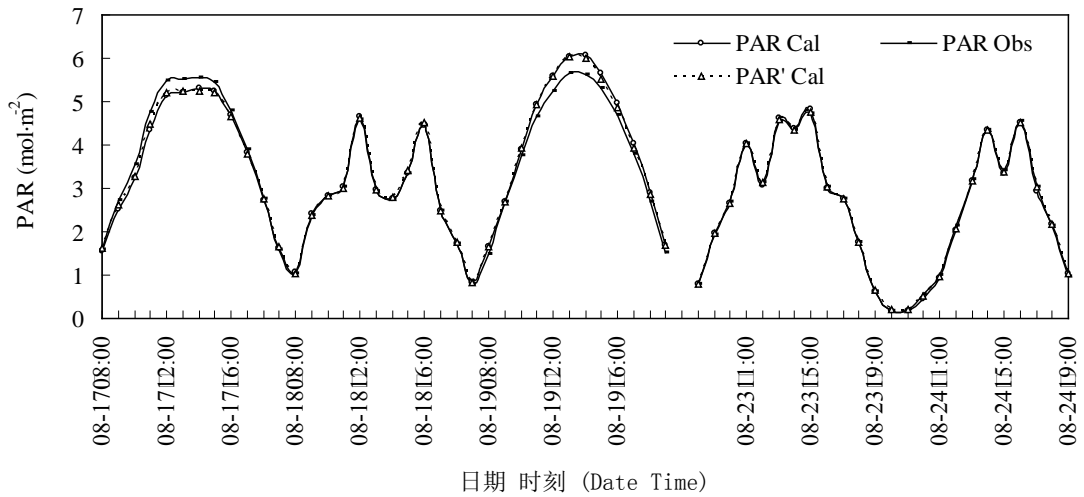


Figure 4. The calculated and measured photosynthetically active radiation (PAR)
图 4. 光合有效辐射 PAR 的计算值与观测值

Table 6. The calculated results of PAR and VIS by 3 formulas (Site 1, Istomino) (considering absorbing factor, only)
表 6. 3 种方法计算 PAR、VIS 的结果(实验点 1, Istomino) (仅考虑吸收因子)

项目	PAR	VIS	PAR'
<i>R</i>	0.970	0.965	0.978
系数、常数	-6.57, 7.39	-1.37, 1.51	-14.72, 17.06
$\bar{\delta}$ (%)	4.4	4.9	3.7
δ_{\max} (%)	9.4	10.1	8.1
δ_{\min} (%)	0.3	0.2	0.4

Table 7. The calculated results of PAR and VIS by 3 formulas (Site 2, Olkhon island) (considering absorbing factor, only)
表 7. 3 种方法计算 PAR、VIS 的结果(实验点 2, Olkhon 岛) (仅考虑吸收因子)

项目	PAR	VIS	PAR'
<i>R</i>	0.998	0.998	0.999
系数、常数	-6.27, 7.08	-1.37, 1.52	-13.90, 15.81
$\bar{\delta}$ (%)	3.6	3.0	1.6
δ_{\max} (%)	18.0	14.6	6.3
δ_{\min} (%)	0.1	0.1	0.1

0.1%。计算结果与 9:00~17:00 的同样没有显著差别。

对比分析考虑全部因子和只考虑吸收因子情形，计算结果略有差别。综合考虑，以采用全部因子的计算结果略好，即应该全面考虑大气中各种物质的吸收和散射过程；但限于实际情况——散射辐射数据缺乏之时，可以采用单一的吸收因子来计算 PAR、VIS、PAR'。

本文的比值方法虽然得到了 PAR、VIS 较好的计算结果，但对于吸收和散射因子在 PAR、VIS 传输过程中的物理化学意义表达欠缺，未来应研究采用直接方法(即不使用总辐射)来计算 PAR、VIS [9]，以期得到与华北地区类似的关于贝加尔湖地区 PAR、VIS 能量在大气中的分配、利用等全面的了解。

5. 结论

2005 年 8 月在贝加尔湖地区对太阳辐射、气象参数等进行了综合观测, 观测期间太阳辐射各个分量及时累比值 UV/Q、VIS/Q、NIR/Q、PAR/Q、PAR/VIS 等表现出明显的日变化和逐日变化特征, 而且与我国其他地区的相应值比较接近。贝加尔湖地区的 UV/Q、VIS/Q、NIR/Q 分别为 5.4%、43.5%、51.2%, PAR/Q、PAR/VIS 的平均值分别为 2.12、4.87。以 PAR、VIS 等遵从的物理规律和辐射台站易得的观测资料为基础, 建立了实际天气条件 PAR、VIS 时累的经验算法和 PAR/VIS 的转换关系。计算表明, 所有天气条件, 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 4.5% 和 4.0%。吸收因子和散射因子对 PAR/Q、VIS/Q、PAR/VIS 而言都是需要考虑的, 但二者相比, 吸收因子更重要。当考虑全部因子时, 2 个地点 PAR、VIS 计算值的 $\bar{\delta}$ 小于 4.5%。缺少散射因子资料时, 可以只考虑吸收因子的作用, 其计算偏差与考虑全部因子没有显著差别。未来应该开展贝加尔湖地区长时间的测量实验以及相应算法的研究, 以得到代表性更强的实用算法; 同时, 发展 PAR、VIS 的直接算法, 以全面、深入理解和获得 PAR、VIS 在大气中传输的物理化学意义。

致 谢

感谢中国科学院、中新药业、俄罗斯科学院西伯利亚分院等单位对此次考察提供的大力支持, 对考察和实验工作过程中曾经给予过热情帮助的中俄双方考察队员表示衷心感谢。

基金项目

中国科学院野外台站研究基金项目, 国家自然科学基金资助项目(41275137)、中华人民共和国科技部-欧洲空间局合作“龙计划”3 期项目(ID10663)、欧盟第七框架计划(FP7) MarcoPolo 项目(Grant NO. 606953)。

参考文献 (References)

- [1] 周允华, 项月琴, 栾禄凯 (1996) 光合有效通量密度的气候学计算. *气象学报*, **54**, 447-455.
- [2] 刘荣高, 刘纪远, 庄大方 (2004) 基于 MODIS 数据估算晴空陆地光合有效辐射. *地理学报*, **59**, 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*, **100**, 8873-8892.
- [4] 白建辉, 王明星, Graham, J., Prinn, R.G., 黄忠良 (1998) 森林排放非甲烷碳氢化合物的初步研究. *大气科学*, **12**, 247-251.
- [5] Bai, J.H. (2012) Observations and estimations of PAR and solar visible radiation in North China. *Journal of Atmospheric Chemistry*, **69**, 231-252.
- [6] 白建辉 (2010) 栾城地区光合有效辐射的测量与计算. *中国农业气象*, **31**, 211-218.
- [7] 白建辉, 王庚辰, 刘恩民, 刘振民 (2009) 禹城地区光合有效辐射的计算方法. *山东气象*, **29**, 1-7.
- [8] Bai, J.H. (2009) UV attenuation in the cloudy atmosphere. *Journal of Atmospheric Chemistry*. **62**, 211-228.
- [9] 白建辉 (2010) 华北地区紫外与可见光辐射在大气中的传输. *环境科学学报*, **30**, 915-925.
- [10] 季国良, 等 (1993) 张掖地区的光合有效辐射特征. *高原气象*, **12**, 141-146.
- [11] 田国良 (1980) 呼伦贝尔草原的太阳分光辐射能和光合潜力. *地理学报*, **35**, 76-82.
- [12] 谢贤群 (1985) 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. 科学出版社, 北京, 139-148.
- [13] 董振国, 于沪宁 (1983) 农田光合有效辐射观测和分析. *气象*, **7**, 23-25.
- [14] 赵名茶 (1985) 用光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. 科学出版社, 北京, 149-161.

- [15] 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.
- [16] 白建辉, 王庚辰 (2004) 内蒙古草原光合有效辐射的计算方法. *环境科学研究*, **17**, 15-18.
- [17] 白建辉, Baker, B. (2004) 热带人工橡胶林异戊二烯排放通量的模式研究. *环境科学学报*, **24**, 197-203.
- [18] 白建辉, Baker, B. (2005) 内蒙古草原典型草地异戊二烯的排放特征. *环境科学学报*, **25**, 285-292.
- [19] 白建辉, Guenther, A., Turnipseed, A. (2012) 长白山温带森林单萜烯排放模拟. *环境科学学报*, **32**, 2236-2244.