

A Calibration Method of Solar Global Radiation Sensor

Jianhui Bai

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

Received: Nov. 15th, 2017; accepted: Nov. 30th, 2017; published: Dec. 7th, 2017

Abstract

Based on analysis of solar global radiation, biogenic organic compounds (BVOCs) in Changbai Mountain temperate forest in 2011 summer and principle of solar global radiation balance, empirical models of solar global radiation under all sky conditions have been developed, when the attenuation of solar global radiation caused by BVOCs, water vapor and scattering factors were considered. Good agreements between simulated and observed values were obtained at the ground and the top of atmosphere (TOA). On the basis of this, a calibration method for solar global and direct sensors was put forward. The sensitivity test of solar global radiation to the change of BVOCs, water vapor and scattering factors were investigated. Under realistic atmospheric conditions, the solar global radiation was more sensitive to changes in scattering factor than to changes in water vapor or BVOCs. This new calibration method has some advantages and potential applications.

Keywords

Solar Radiation, Biogenic Volatile Organic Compounds, Water Vapor and Scattering Factors, Energy, Top of Atmosphere

太阳总辐射表的标定方法

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重点实验室, 北京
Email: bjh@mail.iap.ac.cn

收稿日期: 2017年11月15日; 录用日期: 2017年11月30日; 发布日期: 2017年12月7日

摘要

根据对长白山温带森林2011年夏季太阳辐射、植物挥发性有机物(BVOCs)观测数据的分析, 基于总辐射

能量平衡原理, 考虑BVOCs、水汽、散射等因子对于总辐射的衰减作用, 发展了实际天气太阳总辐射的经验计算模型。经验模型对地面和大气顶处的太阳总辐射有较好的模拟。以此为基础, 提出太阳总辐射和直接辐射表的标定方法。利用该经验模型, 计算了总辐射对于BVOCs、水汽、散射等因子变化的敏感性。敏感性试验表明, 实际当前条件下, 总辐射对散射因子的变化最敏感, 然后是水汽和BVOCs因子。新的标定方法比目前标定的方法有显著优势, 具有潜在的应用价值。

关键词

太阳辐射, 生物挥发性有机物, 水汽和散射因子, 能量, 大气顶

Copyright © 2017 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

1. 引言

太阳是地球系统唯一的能量来源, 准确测量和获取太阳辐射数据是一项基本且重要的工作。太阳辐射数据是气象、农业、林业、建筑、工业等行业所需重要的基本参数, 也是研究自然界中各种过程(包括物理、化学、生物等)及其相互作用最基本的参数之一[1] [2] [3] [4]。只有在准确测量的基础上, 我们才有可能研究太阳辐射能量在大气中传输、利用、分配及其在地表的分布特征, 它们的时空演变规律, 包括研究其长期变化。

我国于 1957 年建立太阳辐射观测网后, 便开展了太阳辐射标准及量值传递工作。辐射标准分为国家标准和工作标准。我国太阳辐射标准器组每 5 年到世界辐射中心或亚洲区域中心进行比对, 每 2 年在我国进行辐射标准比对和量值传递, 再用工作级标准校准日常工作用辐射表[5] [6] [7]。总辐射表标定方法主要有: 1) 以直接辐射表为标准, 2) 以一台直接辐射表和一台配有遮蔽总辐射表为标准, 3) 将工作级标准总辐射表与被校准好的总辐射表进行校准[7] [8]。近年来, 也有采用世界辐射基准和辐射传输理论开展总辐射标定工作的研究[9]。

已有华北地区紫外(UV)和可见光(VIS)辐射的统一算法以及其算法可以计算大气顶(TOA)的 UV 和 VIS[2], 为开展太阳总辐射表的标定工作提供了思路, 也奠定了良好基础。结合在我国长白山森林地区已开展的太阳辐射和植物挥发性有机物(BVOCs)的研究[10] [11], 本文探讨太阳总辐射表的标定方法。

2. 资料和方法

为了解长白山温带森林地区太阳辐射、BVOCs 排放的基本特征和变化规律, 在中国科学院长白山森林生态系统定位站开展了太阳辐射、BVOCs 排放综合测量。太阳辐射测量包括总辐射、直接辐射、可见光辐射、光合有效辐射(PAR)等, 该系统多年来在一些台站使用, 性能良好[2] [10] [11]。辐射仪器包括: 国产分光辐射表(TBQ-4-1 型), 波段分别为 270~3200、400~3200、700~3200 nm, 年稳定性均 $\leq \pm 2\%$, 时间响应 < 35 s (99%), 余弦响应 $\leq \pm 7\%$ (太阳高度角 $h 10^\circ$ 时), 方位 $\leq \pm 5\%$ (10° 时); 国产直接辐射表(TBS-2 型), 波段为 270~3200 nm。温湿度测量仪器安放于气象观测场, 温湿度测量为 5 分钟一次。太阳辐射传感器安放在站内楼顶, 周围无遮蔽。日出前清洁所有表头、调整水平等, 每日每小时巡视仪器(包括雷雨过后表头及时清洁等), 并记录天气状况、云量等[10]。

BVOCs 排放通量测量设在定位站阔叶红松林($42^\circ 24'N$, $128^\circ 6'E$, 海拔 738 m)内, 测量仪器松弛涡度

积累(REA)系统由采样器、三维超声风速仪及其数据采集器等部件组成。该系统安装于观测塔的 32 m 平台, 超声风速仪探头和气体进气口高出周围冠层 9 m 左右。气体由数据采集器和采样泵控制自动采入上下两个不锈钢采样管内, 采样时间为半小时。采样一般选择在晴好、无雨天气。有关 REA 系统、采样等详细介绍可参见文献[10]。采集的气体样品由美国国家大气研究中心分析, 气体样品进样、气相色谱和质谱的分析条件与分析方法等可参见文献[10]及其引文。BVOCs 某一成分的排放通量为: $F_i = b\sigma_w(C_{up} - C_{down})$, σ_w 为垂直风速标准偏差, b 为经验系数, C_{up} 和 C_{down} 分别为上下两个采样管中某一成分的浓度。

本文使用 2011 年 6 月 19 日至 9 月 8 日的实验数据。

3. 结果

3.1. 实际天气地面太阳总辐射小时累计值的计算方法

紫外辐射(UV)和可见光辐射(VIS)在大气传播过程中, 均要受到水汽(或光化学)、散射、BVOCs 等因子不同程度的衰减。太阳总辐射包括紫外辐射、可见光辐射、近红外辐射(NIR)。基于总辐射在大气传输中与 UV、VIS 传输的类似性, 太阳总辐射在大气传输中同样考虑如下因子的衰减作用[12] [13] [14]: 1) 水汽或光化学项, 即各种物质(含气、液、固相)通过 OH(主要在 UV 波段)和 NO_2^* (主要在 VIS 波段)自由基、 H_2O 等在化学和光化学反应中对太阳辐射的吸收与利用(BVOCs 除外, 因单独考虑)、水汽在近红外波段总的吸收, 用 Ae^{-kwm} 表示, 系数 A 根据对实验数据的分析确定, $e^{-kwm} = 1 - \Delta S / (I_0 \cos Z)$, 其中, 太阳常数 $I_0 = 1367 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$, Z 为太阳天顶角(度), 整层大气吸收太阳辐射通量密度 $\Delta S = 0.172(\text{mW} \times 0.1 \times 30)^{0.303} (\text{cal}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{min}^{-1}, 1 \text{ cal}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{min}^{-1} = 696.7 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2})$, k 为水汽平均吸收系数(m^{-1}), W 为整层大气水汽含量($W = 0.21ev$), ev 为地面水汽压(10^2 Pa), 30 为采样时间(min), 0.1 为经验系数, 大气质量 m 取采样时段中间时刻之值(无量纲, 下同)。此项的意义和作用可参见文献[12] [13] [14]和后面讨论部分。2) 散射项, 大气中各种物质(包含气溶胶、云等)对总辐射的散射衰减、大气中物质和地表对总辐射的多次反射和散射作用, 用 e^{-S_D/S_Q} 表示, 其中, S_D 、 S_Q 分别为散射辐射和总辐射($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$)。3) BVOCs 项, 异戊二烯或单萜烯对总辐射的利用或衰减, 采用 e^{-k_1Em} 表达, 其中, k_1 是衰减系数, 假定为单位 1; E 为异戊二烯或单萜烯的排放通量($\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$); t 为采样时间, 取值为 30 min; m 为大气质量。异戊二烯和单萜烯在总辐射波段没有直接吸收, 但它们与 OH 自由基及其他 VOC 成分、 O_3 等在化学和光化学过程对于总辐射能量(包括 UV、VIS、NIR)有利用[11] [12] [13] [14] [15]。为描述异戊二烯或单萜烯通过化学和光化学过程对总辐射能量的利用或衰减, 参照比尔定律来客观表达。其他气体(如 O_3 等)的能量作用均通过 OH 自由基的桥梁作用考虑于光化学项之中[11] [12] [13] [14] [15]。本文此小节经验模式中的辐射量、BVOCs 排放通量以及其他各量均取半小时的累计值。

为了确保总辐射经验模型的可靠性和实用性, 而且兼顾获取一定量的数据用于模型建立, 所用实验数据采用如下标准。对于考虑异戊二烯作用的经验模型: 1) 剔除总辐射半小时累计值小于 $0.55 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ (辐照度为 $300 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$)的数据, 以减小较低辐射和低排放通量测量中实验误差对所建模型的影响; 2) 太阳高度角 $h < 39^\circ$ 之测量值; 3) 剔除排放通量异常高和异常低值。最后得到样本数(n)为 16 组的实验数据。对于考虑单萜烯作用的经验模型, 相应的值和标准分别为: a) $0.44 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ (辐照度 $245 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$), b) $h < 39^\circ$, c) 剔除排放通量异常值。最后得到 22 组实验数据。

基于华北实际天气地面 UV 和 VIS 小时累计值经验模型[12] [13] [14]、长白山森林地区 BVOCs 排放经验模式[11] [15], 发展和建立了长白山森林地区实际天气太阳总辐射(S_Q)半小时累计值的计算方法:

$$S_Q = \left(A_1 e^{-kwm} + A_2 e^{-S_D/S_Q} + A_3 e^{-k_1Em} + A_0 \right) \cos Z \quad (1)$$

式中, 系数 A_i ($i = 1, 2, 3$)、常数 A_0 根据对实验数据的分析确定, 它们分别表达了吸收或光化学因

子($e^{-k_{wm}}$)、散射因子(e^{-S_D/S_0})、异戊二烯或单萜烯、 $\cos Z$ (Z 为太阳天顶角)对于总辐射的作用或贡献。

根据对实测数据的统计分析,确定了总辐射经验模型中的系数和常数、总辐射与3个因子的可决系数(R^2)、相对偏差的平均值和最大值($\bar{\delta}$ 、 δ_{\max})(表1)。对于总辐射与异戊二烯关系的经验模型,总辐射的计算值与观测值大多比较接近(图1),二者相对偏差($\bar{\delta}$)的平均值为7.71%,图1中的总辐射为表达时刻之前半小时累计值。类似地,对于总辐射与单萜烯关系的经验模型,计算值与测量值同样比较接近,但相对偏差平均值略大。根据相关系数检验,总辐射与异戊二烯、总辐射与单萜烯关系的经验模型,总辐射与3个因子均在置信度 $\alpha = 0.001$ 水平高度相关;水汽项与散射项没有显著相关(仅在 $\alpha = 0.5$ 水平相关)。

3.2. 总辐射表标定: 3 因子标定方法

总辐射与异戊二烯关系经验模型中各系数之和 $A_1 + A_2 + A_3 - A_0$ 为5.59,与大气顶(TOA)处辐照度 $1367 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 的误差为13.56%,即总辐射模式计算值与TOA处测量值之比为1.1356。因而,此值也是总辐射表灵敏度的修正值,即将总辐射表的灵敏度除此值便是新的灵敏度。该值表明,总辐射表的灵敏度在下降。同理,得到总辐射与单萜烯关系经验模型中各系数之和(5.78),与大气顶(TOA)处辐照度的误差为17.42%,即总辐射计算值与TOA处测量值之比为1.1742。两个标定系数的相对偏差为3.40%。因此,依据此法可以很方便地标定总辐射表。

3.3. 总辐射表标定: 2 因子标定方法

为了推广和简化此标定方法,也考虑到很多台站没有BVOCs测量数据,尝试将3因子经验公式(1)

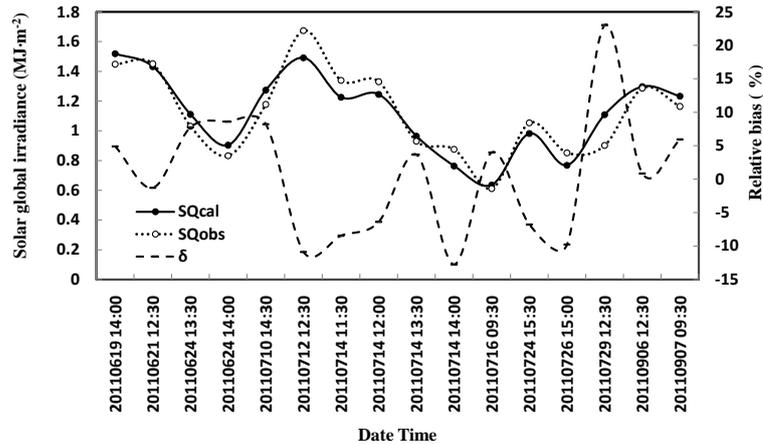


Figure 1. Calculated and observed half-hour solar global irradiance (S_{Qcal} and S_{Qobs} , respectively) and its relative bias (δ) under all sky conditions

图1. 实际天气总辐射半小时累计值的计算值(S_{Qcal})与测量值(S_{Qobs})以及相对偏差(δ)

Table 1. Calculated results of half-hour solar global irradiance under all sky conditions: coefficient of determination (R^2), coefficients and constant (A_1, A_2, A_3, A_0) and average and maximum of the absolute relative bias ($\bar{\delta}, \delta_{\max}$ (%))

表1. 实际天气总辐射半小时累计值的计算结果: 可决系数(R^2)、系数和常数(A_1, A_2, A_3, A_0)、相对偏差的平均值和最大值($\bar{\delta}, \delta_{\max}$ (%))

Situation	R^2	A_1, A_2, A_3, A_0	$\bar{\delta}$	δ_{\max}
water vapor + scattering + Isoprene factors	0.874	4.61, 1.76, -2.00, -1.37	7.71	23.0
water vapor + scattering + monoterpenes factors	0.827	3.70, 2.17, -1.60, -1.50	10.7	48.8

简化为 2 因子经验公式，即分别剔除异戊二烯和单萜烯之项，两种情况下所用样本数均同前。从而得到了新的系数和常数以及计算结果(表 2)。

此种情况下，采用建立总辐射与异戊二烯关系模型所用数据，得到总辐射模式计算值与 TOA 处测量值之比(1.1035)，该值与 3 因子的相应值差别不大。采用建立总辐射与单萜烯关系模型所用数据，确定总辐射模式计算值与 TOA 处测量值之比为 0.9982，该值与 3 因子的相应值差别较大，其原因主要是建立单萜烯排放经验模型较异戊二烯的放宽了数据筛选标准[11]。鉴于此，使用比以前更为严格的数据筛选标准，即将 2011 年散射因子最大值由 1 降为 0.9，从而获得 15 组实验数据。为了统一研究和比较总辐射和异戊二烯关系经验模型的计算结果，也将异戊二烯的数据标准略微严格一些，删去其计算偏差最大的一组数据，同样得到 15 组实验数据。基于同样的计算，得到新的计算结果(表 3)。

此种情形下，利用总辐射与异戊二烯经验模型确定的总辐射计算值与 TOA 处测量值之比为 1.1339；利用总辐射与单萜烯经验模型确定的总辐射计算值与 TOA 处测量值之比为 1.1369。此时的两种情形下，二者使用的数据不完全相同，得到的系数、相对偏差平均值、计算值和测量值之比均比较接近。

3.4. 总辐射表标定：总辐射经验模式和 2 因子标定方法的推广

鉴于我国辐射测量时间分辨率一般为小时，为了标定方法的方便使用及其验证，特将半小时的计算方法推广到小时值：将计算中的各个参数全部由半小时值替换为为小时值，公式中的系数和常数不变。此种情形使用 2010 年夏季的实验数据，数据筛选标准为：总辐射时累 $>2.5 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ ， $h > 50^\circ$ ，散射因子 <0.7 ，得到 69 组数据。基于相同的计算，得到 2 因子标定方法的系数和常数分别为：3.79、1.18、-0.53， $R^2 = 0.588$ ，相对偏差的平均值和最大值分别为 4.01%、11.70%。总辐射计算值与 TOA 处测量值之比为 1.1169。该计算结果与 3 因子半小时的计算结果比较相近，较为合理。

3.5. 敏感性试验

首先，利用总辐射与异戊二烯关系经验模型，计算了实际天气某一因子变化(其他因子保持原值)情形总辐射的变化率(%) (表 4)。

敏感性试验表明，总辐射对各个因子变化的响应都是非线性的；同等变化率情形下，异戊二烯和散

Table 2. Calculated results of half-hour solar global irradiance under all sky conditions: coefficient of determination (R^2), coefficients and constant (A_1, A_2, A_3, A_0) and average and maximum of the absolute relative bias ($\bar{\delta}, \delta_{\max}$ (%))

表 2. 实际天气总辐射半小时累计值的计算结果：可决系数(R^2)、系数和常数(A_1, A_2, A_3, A_0)、相对偏差的平均值和最大值($\bar{\delta}, \delta_{\max}$ (%))

Situation	R^2	A_1, A_2, A_0	$\bar{\delta}$	δ_{\max}
water vapor + scattering factors	0.837	2.26, 1.75, -1.42	8.98	26.82
water vapor + scattering factors	0.802	1.68, 2.01, -1.22	11.66	38.23

Table 3. Calculated results of half-hour solar global irradiance under all sky conditions: coefficient of determination (R^2), coefficients and constant (A_1, A_2, A_3, A_0) and average and maximum of the absolute relative bias ($\bar{\delta}, \delta_{\max}$ (%)). Sampling points = 15

表 3. 实际天气总辐射半小时累计值的计算结果：可决系数(R^2)、系数和常数(A_1, A_2, A_3, A_0)、相对偏差的平均值和最大值($\bar{\delta}, \delta_{\max}$ (%))，样本数 = 15

Situation	R^2	A_1, A_2, A_0	$\bar{\delta}$	δ_{\max}
water vapor + scattering factors	0.885	2.39, 1.72, -1.48	7.87	20.91
water vapor + scattering factors	0.896	2.33, 1.78, -1.48	5.65	10.38

Table 4. Solar global radiation changing rates (%) caused by the changes of one factor (%), and other factors keep at their original levels under realistic atmospheric conditions (Factors: isoprene, water vapor and scattering)**表 4.** 实际天气条件某一因子变化(%)而其他因子保持原值时总辐射的变化率(%) (因子: 异戊二烯、水汽、散射因子)

isoprene			water vapor			scattering factor											
+20	+40	+80	-20	-40	-80	+20	+40	+80	-20	-40	-80						
2.2	4.3	8.5	-2.2	-4.5	-9.2	-4.3	-9.0	-20.8	4.1	8.1	15.9	-9.8	-18.4	-32.5	11.2	24.1	56.0

射因子减少比其增加将带来总辐射的变化略大(水汽因子相反),并以散射因子变化引起总辐射变化的差别最大;总辐射对于散射因子的变化最敏感,其次是水汽因子,最后是异戊二烯因子;平均而言,总辐射对水汽因子的敏感性是总辐射对异戊二烯敏感性的 2.0 倍(范围为 1.7~2.5),总辐射对散射因子的敏感性是总辐射对异戊二烯敏感性的 4.8 倍(范围为 3.8~6.1)。敏感性试验所反映的物理、化学、生物机制为:异戊二烯增/减表象上“引起”总辐射的增/减,其揭示的实际机制为太阳辐射(如光合有效辐射 PAR、UV)增/减导致异戊二烯排放的增/减 [11] [16];水汽增/减引起地面总辐射的减小/增加,揭示了大气中气液固相物质在与 OH、NO₂*、H₂O 等的化学和光化学反应中对太阳总辐射(如紫外和可见光辐射等)能量利用的增大/减小 [2] [3] [11] [12] [13] [14];散射因子的增/减引起地面总辐射的减小/增加,揭示了在较低散射因子条件下(平均值 = 0.59),经化学和光化学过程产生气液固相物质增加/减少对应的损失于大气中总辐射能量的增加/减少(即这些能量被直接和间接用于参与反应中的各种物质),因而导致地面总辐射的减小/增加。

其次,利用总辐射与单萜烯关系经验模型,计算了实际天气某一因子变化(其他因子保持原值)时总辐射的变化率(表 5)。

同样,总辐射对各个因子变化的响应也是非线性的;同等变化率情形下,单萜烯和散射因子减少比其增加带来总辐射的变化略大(水汽因子也相反),也以散射因子变化引起总辐射变化的差别最大;总辐射对散射因子的变化最敏感,其次是水汽因子,最后是单萜烯因子;平均而言,总辐射对水汽因子的敏感性是总辐射对单萜烯敏感性的 1.3 倍(范围为 1.0~1.7),总辐射对散射因子的敏感性是总辐射对单萜烯敏感性的 4.7 倍(范围为 3.8~5.7),这两个值与总辐射对异戊二烯敏感性的对应值均比较相近。敏感性试验所反映的机制为:单萜烯增/减表象上“引起”总辐射的增/减,同样揭示了太阳辐射(如 PAR)增减导致单萜烯排放的增/减[2] [3] [11] [12] [13] [14];水汽增/减和散射因子增/减与地面总辐射的响应机制与异戊二烯的相似,即它们之间的能量关系类似。

对比总辐射与异戊二烯关系和总辐射与单萜烯关系经验模型敏感性试验结果,总辐射对单萜烯、光化学、散射因子响应值和总辐射对异戊二烯、光化学、散射因子响应值之比的平均值分别为 1.43、0.91、1.35。

从本质上说,总辐射与异戊二烯或单萜烯关系经验模型表达了各物理量之间的相互关系,是一种双向的能量关系,而不是单一方向的关系。

3.6. 直接辐射表标定

为了获得总辐射比较可靠的标定结果,需要标定直接辐射表。鉴于直接辐射和总辐射在大气中传输的过程和规律基本相同,故采用相同的标定方法和经验模型(1)。首先,利用总辐射和异戊二烯关系的经验模型以及使用的数据(n = 16)计算直接辐射的系数和计算偏差,计算结果为:计算偏差的平均值和最大值分别为 40.9%、446.2%。仔细分析数据,发现计算偏差大者均为散射因子 > 0.85 者。即大气中较大的物质含量(主要为云、气溶胶等)给总辐射计算带来了较大的偏差。因此,剔除散射因子 > 0.85 的数据,

Table 5. Solar global radiation changing rates (%) caused by the changes of one factor (%), and other factors keep at their original levels under realistic atmospheric conditions (Factors: monoterpenes, water vapor and scattering)**表 5.** 实际天气条件某一因子变化(%)而其他因子保持原值时总辐射的变化率(%) (因子: 单萜烯、水汽、散射因子)

monoterpenes						water vapor						scattering factor					
+20	+40	+80	-20	-40	-80	+20	+40	+80	-20	-40	-80	+20	+40	+80	-20	-40	-80
3.0	6.0	11.6	-3.1	-6.4	-13.2	-3.4	-6.4	-11.5	3.9	8.5	22.8	-13.2	-24.8	-43.9	15.2	32.6	75.7

得到 12 组数据。对新的数据重新计算, 得到直接辐射和异戊二烯关系的经验模型的系数和常数分别为: -1.56 、 2.97 、 2.79 、 -1.91 。 $R^2 = 0.954$, 计算偏差的平均值和最大值分别为 9.26% 、 32.86% 。直接辐射计算值与 TOA 处测量值之比为 1.2426 。

考虑到总辐射表的标定会影响到直接辐射表的测量和模拟结果, 为进一步准确了解直接辐射表灵敏度的变化情况, 进而先将总辐射表进行标定, 即将其灵敏度除以新的标定系数 1.1356 (注: 其中也包括散射因子中的总辐射值。利用前面的 12 组数据和同样算法, 得到了新的计算结果: 直接辐射和异戊二烯关系的经验模型的系数和常数分别为: -1.59 、 3.02 、 2.29 、 -1.72 。 $R^2 = 0.954$, 计算偏差的平均值和最大值分别为 9.30% 、 31.82% 。直接辐射计算值与 TOA 处测量值之比为 1.1060 。可见, 总辐射表经过标定后, 直接辐射表的标定比值下降; 该值与总辐射表标定结果的变化规律比较一致、比较合理。这与它们相同的测量原理、相同的室外使用环境等有关。

4. 讨论

3 因子标定方法考虑影响总辐射传输的过程及其相互作用较多、较详细, 包括物理、化学、生物过程, 可以较好地研究各个因子对总辐射的衰减和各个过程之间的相互作用, 建议有条件的情况下尽量采用。2 因子标定方法, 考虑总辐射传输过程中的影响因子较少, 所用参数易于从常规测量站获得, 为开展标定工作提供了便利。

从 3 因子到 2 因子的标定, 减少了某一参数测量和研究工作, 方便了标定。为了获得较准确的标定结果, 它以牺牲或减少样本数为条件, 因而需要采用更严格的数据筛选标准(例如单萜烯)。另外, 它也缺少了对于某一相关过程及其规律的详细了解。水汽或光化学项的意义: 在考虑 3 因子时, 它表达除 BVOCs 外其他气液固相成分对总辐射的直接吸收和间接利用; 在考虑 2 因子情形, 则包含了 BVOCs 的气液固相成分对总辐射的直接吸收和间接利用。不同因子情形各因子实际的作用由对实测数据的统计分析来客观确定和定量表达。这一处理方法的可行性从以前关于 UV 辐射的研究中得到支持和验证: 在计算 UV 时考虑 3 因子“ O_3 、光化学、散射因子”与考虑 2 因子“光化学、散射因子”之情形, 利用 3 因子计算的“ O_3 +光化学因子”和利用 2 因子的光化学因子的计算结果非常接近[17]。

从 3 因子到 2 因子、2 因子从半小时到 1 小时标定方法的推广, 虽然样本数不同, 但都得到了总辐射与相关物理化学生物过程的相互作用规律、相近的标定结果。因此, 建立总辐射经验计算方法, 样本数量不是决定性的, 关键是数据质量。本文采用长白山温带森林建立 BVOCs 排放模型时较为严格的数据筛选标准 [11], 虽然建立经验模型时使用数据相对较少, 但涉及异戊二烯和单萜烯有关的经验模型均得到了较好的计算结果。所以, 数据质量远重于数据数量的原则在以后研究中应备受重视[3] [15], 以准确捕捉和深入理解自然界中的物理、化学、生物过程, 特别是这些过程之间的相互作用规律, 包括物质变化与能量变化之间的规律性。

对于总辐射与异戊二烯和总辐射与单萜烯关系的两种标定情形而言, 不论 3 因子还是 2 因子的标定, 通过对实验数据的严格筛选, 均可以获得较好且一致的标定结果(TOA 处计算值与测量值之比)。它表明太阳总辐射与影响总辐射的物理化学生物过程及其相互作用之间的能量关系存在于自然之中, 但是其基

本且内在规律——“能量基本态”需要全面、细致地分析和寻找才能确定。标定工作可以在实际天气条件进行，但需要较为严格的标定标准。

实验室的研究表明,单萜烯的氧化产率为2%~23% [18]远大于异戊二烯的氧化产率(为0.9%~3%)[19]。本文实际大气条件敏感性试验结果:对于单萜烯和异戊二烯而言,总辐射对散射因子变化的响应(平均值)分别为4.85、4.67,比较接近。它可能反映了较低散射因子条件下(空气污染不太严重),与单萜烯或异戊二烯氧化形成小颗粒气溶胶中利用总辐射能量变化有相近的能量关系。

对比总辐射与异戊二烯关系和总辐射与单萜烯关系的敏感性结果,总辐射对单萜烯及散射因子响应值和总辐射对异戊二烯及散射因子响应值的对应值之比(平均值)都很接近,分别为1.40、1.35,它们可能揭示了:异戊二烯或单萜烯变化与对应的总辐射能量变化规律的一致性;与异戊二烯或单萜烯相关的大气中物质含量(主要为小颗粒气溶胶,较低的散射因子值)的变化(散射因子)与对应的总辐射能量变化规律的一致性。另外,上述两个规律也存在一致性(两个比值比较接近),即异戊二烯或单萜烯变化与对应小颗粒气溶胶变化以及这些物质变化所对应的总辐射能量变化之间有着密切联系,而这一联系通过“总辐射能量变化/物质变化”清晰地表现了出来。因此,涉及异戊二烯或单萜烯的物理、化学、生物过程,表现出物质变化和能量变化之间一致的规律性。

总辐射对散射因子的变化最为敏感。因而辐射表的标定条件,选择晴天、洁净大气之时段,具备可靠的物理基础;同时,也侧面反映了辐射经验模型的可靠性。

本文提出的标定方法与目前使用的标定方法相比具有明显优势:节省大量的人力物力、节省标定仪器和设备(如标准辐射表及其标定系统)。标定工作在当地日常观测中即可开展,实验站不必准备其他备用辐射表;但需要准确的太阳常数数据。虽然太阳常数比较稳定,但仍有微小变化,如能获得实时更新的太阳常数数据,则可获得更为准确的标定结果。

5. 结论

基于辐射能量平衡原理,考虑BVOCs、水汽(或光化学)和散射因子对总辐射的作用,建立和发展了实际天气总辐射经验计算方法。该方法可以较好地获得地面和大气顶的总辐射。利用总辐射在TOA处的计算值和测量值,可以标定辐射表。敏感性计算表明,总辐射对各因子变化的响应都是非线性的,总辐射对于散射因子的变化最敏感,然后是水汽、BVOCs因子。为详细研究物理化学生物过程及其相互作用,建议采用3因子标定方法。在无BVOCs排放参数的情况下,可以采用2因子标定方法。

新的标定方法以太阳常数为标准,在原地和实际天气条件下,利用辐射表日常测量数据开展标定工作,可节省目前辐射表标定过程中的标定仪器、仪器运输、专业人员等资源,是一种值得深入研究和广泛推广的方法。

致 谢

感谢中国科学院长白山森林生态系统定位站韩士杰、张军辉、林凤友、徐浩、李东、宋国正、闫伟等同仁给予的帮助。

基金项目

国家自然科学基金资助项目(40975082, 41275137)、中华人民共和国科技部-欧洲空间局合作“龙计划”4期项目(ID32771)、欧盟第七框架计划(FP7) MarcoPolo 项目(Grant NO. 606953)。

参考文献 (References)

- [1] 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.

- [2] 白建辉. 华北地区紫外与可见光辐射在大气中的传输[J]. 环境科学学报, 2010, 30(5): 915-925.
- [3] 白建辉. 异戊二烯在大气光化学过程中的能量作用[J]. 地球科学前沿, 2014, 4(5): 319-334.
- [4] 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>
- [5] WMO. (2000) WMO Instruments and Observing Methods. Report NO. 74. WMO/TD NO. 1028.
- [6] 杨云, 王冬, 吕文华, 莫月琴, 丁蕾. 我国太阳辐射标准与量值传递[J]. 仪器仪表学报, 2007, 28(8): 429-435.
- [7] 权继梅, 丁蕾, 郑向东, 杨云, 王冬. 总辐射表两种现场校准方法的比较[J]. 气象, 2010, 36(9): 116-119.
- [8] 杨云, 丁蕾, 权继梅, 边则强. 太阳总辐射表校准方法比较[J]. 气象科技, 2015, 43(2): 175-180.
- [9] Qiu, J., Xia, X. and Bai, J., et al. (2014) A New Method to Calibrate Shortwave Solar Radiation Measurements. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, **31**, 1321-1329. <https://doi.org/10.1175/JTECH-D-13-00114.1>
- [10] 白建辉, 林凤友, 万晓伟, 等. 长白山温带森林挥发性有机物的排放通量[J]. 环境科学学报, 2012, 32(3): 545-554.
- [11] Bani, J.H., Guenther, A., Turnipseed, A., Duhl, T. and Greenberg J. (2017) Seasonal and Interannual Variations in Whole-Ecosystem BVOC Emissions from a Subtropical Plantation in China. *Atmospheric Environment*, **161**, 176-190. <http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosenv.2017.05.002>.
- [12] 白建辉. 以能量方法研究紫外辐射在大气中的传输[J]. 环境科学学报, 2010, 30(4): 702-713.
- [13] 白建辉. 以能量观点研究可见光辐射在大气中的衰减[J]. 气候与环境研究, 2010, 15(6): 765-777.
- [14] Bai, J.H., (2017) UV Extinction in the Atmosphere and Its Spatial Variation in North China. *Atmospheric Environment*, **154**, 318-330. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2017.02.002>
- [15] 白建辉, Guenther, A. and Turnipseed, A. 长白山温带森林单萜烯排放模拟[J]. 环境科学学报, 2012, 32(9): 2236-2244.
- [16] Harley, P., Deem, G., Flint, S. and Caldwell, M. (1996) Effects of Growth under Elevated UV-B on Photosynthesis and Isoprene Emission in *Quercus Gambelii* and *Mucuna Pruriens*. *Global Change in Biosphere*, **2**, 101-106. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.1996.tb00060.x>
- [17] 白建辉. 北京晴天紫外辐射的传输、损失及其长期变化[J]. 环境科学学报, 2013, 33(5): 1347-1354.
- [18] Griffin, R.J., Cocker, D.R., Flagan, R.C., et al. (1999) Organic Aerosol Formation from the Oxidation of Biogenic Hydrocarbons. *Journal of Geophysical Research*, **104**, 3555-3567. <https://doi.org/10.1029/1998JD100049>
- [19] Kroll, J.H., Ng, N.L., Murphy, S.M., et al. (2005) Secondary Organic Aerosol Formation from Isoprene Photooxidation under High-NO_x Conditions. *Geophysical Research Letter*, **32**, L18808. <https://doi.org/10.1029/2005GL023637>

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