

丁蕾, 杨云, 边泽强, 等. 5 种光合有效辐射表性能测试. 应用气象学报, 2013, 24(5): 617-624.

## 5 种光合有效辐射表性能测试

丁蕾\* 杨云 边泽强 权继梅 王冬

(中国气象局气象探测中心, 北京 100081)

### 摘 要

为认识和提高光合有效辐射(波长为 400~700 nm)的测量精度,对国内外 5 种常用的光合有效辐射表的灵敏度、余弦响应、非线性、温度依赖性、光谱响应等性能进行了测试和分析。结果表明:5 种光合有效辐射表(简称光合表)的非线性误差均在 1% 以内;3 种光合表(PAR LITE, LI-190 和 FS-PR)的余弦误差均小于 10%,温度系数均小于 0.3%/C,2 种光合表(TRT-5 和 HSC-FPH-1)的余弦误差明显偏大,温度系数小于 0.5%/C。2 种光合表(PAR LITE 和 LI-190)的光谱响应曲线接近于理想光谱,而其余 3 种光合表与理想光谱曲线偏离较大。在自然光下的一致性比对测量结果显示,5 种光合表测量的辐射量与标准值的误差均在 5% 以内,但综合评价后认为,3 种光合表(PAR LITE, LI-190 和 FS-PR)的性能明显优于其他 2 种光合表(TRT-5 和 HSC-FPH-1)。该结果可为气象观测业务选型提供参考。

**关键词:** 光合有效辐射表; 余弦响应; 光谱响应; 性能测试

### 引 言

太阳辐射是植物生长发育的主要生态因子之一,也是植被微气候形成的主导因素<sup>[1]</sup>。光合有效辐射作为一种气候资源,在评价植物光合潜力、潜在产量研究中被作为主要的科学依据<sup>[2-6]</sup>。光合有效辐射(PAR)对于光生物、植物生理、生态、农业、林业、园艺等学科是十分重要的环境因素。光合有效辐射影响生态系统对碳的吸收;光合有效辐射散射成分增强时,植物对碳的吸收也增强;光合有效辐射范围内的光谱辐射分布对于了解光合作用十分重要,因为作物的光合作用在光合有效辐射范围内不均匀。目前,国际上通用的光合有效辐射波长范围是 400~700 nm。过去较长一段时间内,曾要求以能量单位测量光合有效辐照度,后来随着科学技术的发展,转而要求以光量子为单位表达光合有效辐射<sup>[7]</sup>。光合有效辐射表(以下简称光合表)均为测量半球向光合有效辐照度,也可将仪器翻转 180°朝下安装,测量下垫面反射光合有效辐照度。WMO 的地面辐射基本站网(BSRN)已将光合有效辐射的测

量纳入其测量范围,由承担扩展测量任务的 BSRN 站进行<sup>[8]</sup>。我国的锡林浩特基准辐射站从 2007 年已开展水平面光合有效辐射的观测;新增千亿斤粮食农业气象保障工程和太阳能资源观测站网即将开展全国范围内的光合有效辐射观测;而在中国生态系统研究网络(CERN)40 个站上普遍配有美国 LI-COR190 型光合表进行观测<sup>[9]</sup>。目前国内对光合表的测量精度和性能的研究报道较少。本文针对国内常用的 5 种光电探测器型光合有效辐射表的性能指标测试和研究,对光合有效辐射表的余弦响应、非线性、温度依赖性、光谱响应以及稳定性等各项指标进行对比分析,评价辐射表的性能,为国内辐射表生产商提高和改进光合有效辐射表的精度及气象观测业务选型提供依据,以满足气象观测业务发展的需求。

### 1 仪器及其测量原理

测试中所用的光合表型号如在表 1 所示。标准仪器包括:光谱辐射计 DMc150 及配套设备,高精度 6 位半数据采集器,可见光双光源,室内测试用电动旋转台等。

2013-01-18 收到, 2013-05-31 收到再改稿。

\* email: dlaoc@cma.gov.cn

表1 光合有效辐射表型号

Table 1 Photosynthetic active radiometers of test		
型号	产地	用户
LI-190	美国	国家气象计量站
PAR LITE	荷兰	锡林浩特国家气候观测台
TRT-5	中国	国家气象计量站
FS-PR	中国	国家气象计量站
HSC-FPH-1	中国	国家气象计量站

光合表均为测量辐照度而设计,结构比较简单,如图1所示。仪器的关键元件是滤光片,它直接关系到传感器的光谱响应能否达到接近无选择性的程度,这里无选择性指的是仪器在相关波段内的光谱响应曲线应尽可能平直。光合表由感应件和附件组成。感应件由光电器件、滤光片与余弦散射器组成,在光电器件前面加装了相应的滤光片,滤除光合有效波段以外的杂光,保证在400~700 nm光谱范围内的光谱灵敏度一致。在仪器的顶部进光部位的乳白色圆片,是为改善入射光余弦特性的装置,也称余弦散射器。

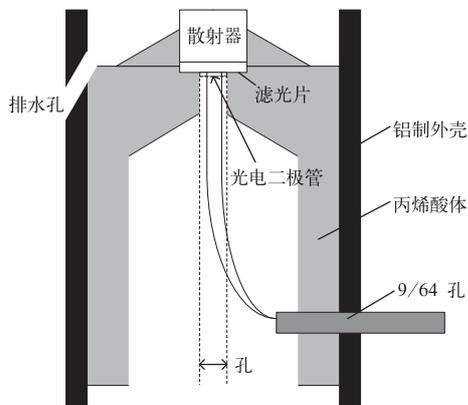


图1 光合有效辐射表内部结构

Fig. 1 The structure of photosynthetic active radiometer

光电器件的特性是辐照度的大小与其感应出来的短路电流成正比。由于电流测量比较难,通常在电流回路中串联一个固定电阻,从电阻的两端测量电压。串接电阻后偏离了短路电流的理论要求,会给测量结果增加一定的误差。

## 2 性能测试

### 2.1 灵敏度

光合表是一种相对仪器,用标准仪器校准后,得出仪器的灵敏度。灵敏度的测试在室外自然光下进

行,测试时要求天空晴朗,太阳辐射稳定,太阳高度角大于30°,四周空旷,仪器感应面以上没有任何障碍物。空气温度为20±10℃,风速小于5 m/s,相对湿度不大于80%<sup>[10-11]</sup>。将带余弦散射器的光学输入传感器和被检仪器同时放在室外。感应面与被检仪器感应面置于同一高度。通过光纤将余弦散射器的光学输入传感器与光谱辐射计相连接。被检仪器与多路辐射数据采集器连接。预热半小时后,光谱辐射计与被检仪器同步连续采集数据。光谱辐射计在整个测试过程中均保持恒温状态,为保证数据质量,测试前后用便携式标准灯对光谱辐射计在现场进行校准,以提高光谱辐射计的测量准确度。由于光谱辐射计一次测量需要较长时间,要求记录每次开始和结束的时间,并按此时段分别统计被检仪器的采样平均值。测量系列不少于10次/h,测量时间为3~4 h(一般在地方时10:00—14:00之间进行),同时记录下测量期间的平均气温。

根据式(1)计算第*i*次测量系列采样时间内,光谱辐射计在400~700 nm波长范围内的标准辐照度

$$E_i = \int_{400 \text{ nm}}^{700 \text{ nm}} E_{S,\lambda} d\lambda. \quad (1)$$

式(1)中, $E_{S,\lambda}$ 为光谱辐射计在波长 $\lambda$ 处测量的标准光谱辐照度,单位: $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{nm})$ 。也可表达为光量子出射度,即

$$E_i = \int_{400 \text{ nm}}^{700 \text{ nm}} K_{\lambda}^q E_{S,\lambda} d\lambda. \quad (2)$$

式(2)中,

$$K_{\lambda}^q = \lambda/119.7, \quad (3)$$

式(3)中, $K_{\lambda}^q$ 为以量子为单位的光谱灵敏度,单位: $\mu\text{mol}/(\text{s} \cdot \text{W})$ 。

计算光谱辐射计每一段采样积分时间内对应的被检仪器电压或电流输出的平均值 $V_i$ 或 $I_i$ 。将被检光合表的电压或电流输出平均值与光谱辐射计在400~700 nm测得的标准辐照度积分值(式(1)或式(2)计算结果)相比较,即可得到被检表的能量灵敏度(单位: $\mu\text{V}/(\text{W} \cdot \text{m}^{-2})$ 或 $\mu\text{A}/(\text{W} \cdot \text{m}^{-2})$ )或量子灵敏度(单位: $\mu\text{V}/(\mu\text{mol} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2})$ 或 $\mu\text{A}/(\mu\text{mol} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2})$ )。

灵敏度计算如式(4)所示,

$$K_i = V_i/E_i, \text{ 或 } K_i = I_i/E_i. \quad (4)$$

2008年7月—2012年9月对光合表的灵敏度进行了多次测量,结果见表2。测试数据显示,光合

表年稳定性基本在 ±3% 以内;其中 LI-190 型和 PAR LITE 型光合表的年稳定性优于 TRT-5 型和 HSC-FPH-1 型光合表,由于 FS-PR 型光合表只在 2012 年 9 月进行了灵敏度测试,无历史灵敏度记录,无法给出其年稳定性。

表 2 光合有效辐射表灵敏度测试  
(单位:μV/(μmol·s<sup>-1</sup>·m<sup>-2</sup>))

Table 2 Sensitivity tests of photosynthetic active radiometers  
(unit:μV/(μmol·s<sup>-1</sup>·m<sup>-2</sup>))

型号	表号	2008-07-12	2010-09-13	2012-09-17
LI-190	39909	4.02	3.90	4.09
LI-190	39911	4.13	4.23	4.44
LI-190	40067	4.02	4.18	4.37
PAR LITE	060884		7.00	7.33
HSC-FPH-1	024		5.42	5.72
HSC-FPH-1	025		5.00	5.23
FS-PR	15102			9.42
FS-PR	15103			9.51
TRT-5	710022		7.47	7.98
TRT-5	710024		7.06	7.45

### 2.2 非线性误差

光合表非线性误差的测试采用双光源叠加法<sup>[12]</sup>,双光源叠加法具有可靠性好和精度高的优点;对光源到测量点距离没有限制,解决了单纯利用平方反比定律时探测器上的光照度变化范围过小的限制,因为叠加法只要求倍率关系,并不要求知道光源在各点时的精确照度,光源在各点时与探测器之间的偏差并不影响测量结果;不受杂散光的影响,实际测量时只要能保证光源 A、B 间不互相干扰及外界杂散光的干扰就能保证测量的角度,对各自光通道自身的杂散光不作要求<sup>[13]</sup>。

光合有效辐射仪器室内测试设备由 2 台可见光光源 A 和 B,光纤合束器,复眼透镜、光阑和电动旋转台组成。安装顺序如图 2 所示,光源、光阑安装在光学平台的同一光轨上,与电动旋转台中轴线安装在同一条直线上。光源安装在光学平台的一端,被

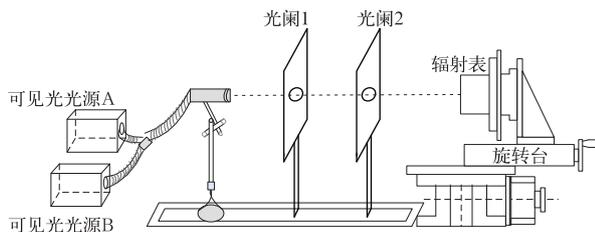


图 2 光合有效辐射表室内试验设备  
Fig. 2 Test equipments indoors for photosynthetic active radiometers

测仪器安装在光学平台另一端的电动旋转台上,光阑放置在被测表与光源的中间,以减少杂散光的影响,该旋转台垂直轴通过被测表的接收面。光源均匀,被测辐射表安装在正对着光束的平面上,光束与旋转轴垂直。电动旋转台角度转动误差 ±0.1°。

打开可见光源 A 和 B,保持光谱不变,调节光源,使两光源同时照射到被测仪器接收面上的辐照度分别为 125 W·m<sup>-2</sup>, 250 W·m<sup>-2</sup>, 375 W·m<sup>-2</sup>, 500 W·m<sup>-2</sup>。在每个测试点上光源稳定后,读数 10 次,读数时间间隔 10 s,取被测仪器读数的平均值为 V<sub>(A+B)<sub>i</sub></sub>;将光源 B 遮住,记录被测仪器的输出值,取被测仪器读数的平均值为 V<sub>A<sub>i</sub></sub>;将光源 A 遮住,打开可见光源 B,记录被测仪器的输出值,取被测仪器读数的平均值为 V<sub>B<sub>i</sub></sub>。按式(5)计算该测定点上的非线性误差:

$$\delta_{Li} = \left| 1 - \frac{V_{A_i} + V_{B_i}}{V_{(A+B)_i}} \right| \times 100\% \quad (5)$$

重复上述各步骤,进行各点测试,取各测定点非线性误差的最大值为该被测仪器的非线性误差:

$$\delta_L = \max(\delta_{Li}) \quad (6)$$

式(6)中, L<sub>i</sub> 分别为 125 W·m<sup>-2</sup>, 250 W·m<sup>-2</sup>, 375 W·m<sup>-2</sup>, 500 W·m<sup>-2</sup>。

图 3 给出了光合表非线性误差的测试结果。由图 3 可知,无论是进口还是国产光合表,虽然非线性误差均在 1% 以内,但各种光合表的辐照度小于 250 W·m<sup>-2</sup> 非线性误差的差异明显。

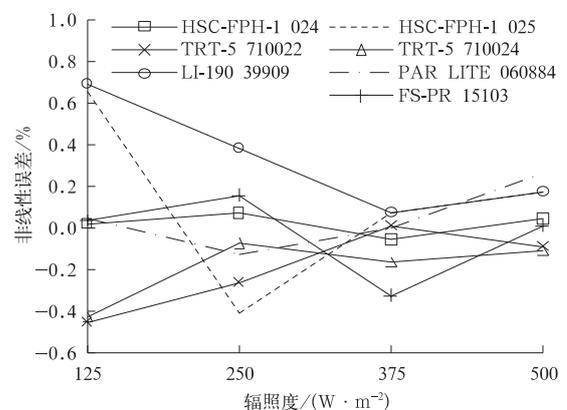


图 3 光合有效辐射表非线性误差  
Fig. 3 Non-linearity error of photosynthetic active radiometers

### 2.3 余弦响应误差

余弦响应误差测试在室内进行,测试设备同第 1 章。将仪器垂直安装在电动旋转台上,仪器接线

柱朝上(相当于室外方向朝北)。打开可见光源,使入射光线与仪器感应面垂直(天顶角为 $0^\circ$ )。调节光源,使光源照射到被测仪器接收面上的辐照度为 $500 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。光源稳定后,转动旋转台,以 $5^\circ$ 为间隔,依次测量天顶角在 $-80^\circ \sim +80^\circ$ 间的测定点,记录仪器的输出值(数据读取的方法与非线性误差相同)。

余弦响应误差按式(7)计算:

$$\delta_\theta = |1 - \bar{V}_\theta / (\bar{V}_0 \cos\theta)| \times 100\% \quad (7)$$

图4给出各类型光合表在不同天顶角时的余弦响应误差。由图4可以看出,余弦响应误差一般随天顶角的增加而增大,且不同仪器在不同天顶角时的余弦响应特性差异较大。当天顶角为 $-80^\circ \sim +80^\circ$ 范围内时,3种光合表(PAR LITE, LI-190,

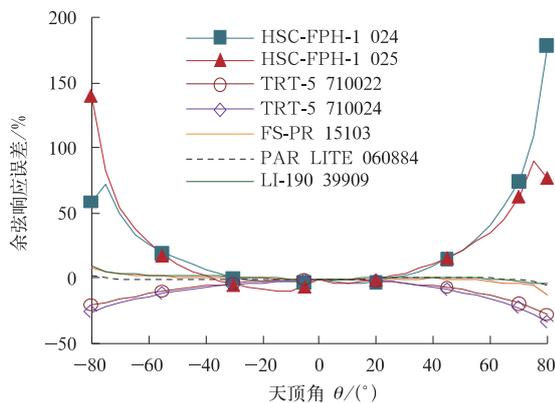


图4 光合有效辐射表余弦响应

Fig. 4 Cosine response error of photosynthetic active radiometers

FS-PR)的余弦响应误差均在 $10\%$ 以内;而TRT-5型表仅在天底角为 $-55^\circ \sim +55^\circ$ 、HSC-FPH-1型表仅在天底角为 $-45^\circ \sim +40^\circ$ 时,余弦响应误差小于 $10\%$ ;其余天顶角误差偏大。

## 2.4 温度系数

温度变化对光合表测量结果的影响用温度系数表示。温度系数主要测试设备为辐射仪器温度测试箱,其顶部装有镀导电膜的玻璃窗口,既不改变光源光谱又可防止结霜,温度场均匀性和稳定性为 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 。其他检定设备同2.3节。

被测仪器水平放在辐射仪器温度测试箱内,光源垂直照射在被测仪器的感应面上,辐照度为 $500 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ ,监测仪器放在辐射仪器温度测试箱外入射光斑的边缘处,对光源辐照度的稳定性进行测量,减小因光源变化对测量结果引入的误差。温度测试点分别为 $-40^\circ\text{C}$ ,  $-20^\circ\text{C}$ ,  $0^\circ\text{C}$ ,  $+10^\circ\text{C}$ ,  $+30^\circ\text{C}$ ,  $+50^\circ\text{C}$ 。被测仪器的温度系数按式(8)计算:

$$C_t = (R_{T_2}/R_{T_1} - 1)/(T_2 - T_1) \quad (8)$$

式(8)中, $R_{T_1}$ ,  $R_{T_2}$ 分别为减去相应零点后的相邻两测定点10个被测仪器与监测仪器输出值之比。 $T_1$ ,  $T_2$ 分别为相邻两测定点的温度。

表3给出不同类型光合表的温度系数测试结果。由表3可知,LI-190, PAR LITE型和FS-PR型光合表的温度系数均小于 $0.3\%/^\circ\text{C}$ , TRT-5型和HSC-FPH-1型光合表的温度系数稍大,小于 $0.5\%/^\circ\text{C}$ 。

表3 温度系数测试结果(单位: $\%/^\circ\text{C}$ )

Table 3 The results of temperature response test(unit: $\%/^\circ\text{C}$ )

型号	表号	温度范围/ $^\circ\text{C}$				
		$[-40.0, -20.0)$	$[-20.0, 0.0)$	$[0.0, 10.0)$	$[10.0, 30.0)$	$[30.0, 50.0]$
HSC-FPH-1	024	-0.3	-0.4	-0.4	-0.1	-0.5
HSC-FPH-1	025	-0.1	-0.1	-0.1	-0.2	-0.3
TRT-5	710022	-0.2	-0.2	-0.1	0.01	-0.5
TRT-5	710024	-0.2	-0.3	-0.3	-0.3	-0.2
FS-PR	15102	0.04	0.02	0.1	0.1	-0.2
FS-PR	15103	0.2	0.1	0.3	0.1	-0.2
LI-190	39909	0.1	-0.1	-0.02	-0.2	-0.2
PAR LITE	060884	-0.01	-0.1	-0.2	-0.2	-0.2

## 2.5 夜间零偏移

2012年11月14日在河北固城辐射观测基地,对光合表进行了夜间零偏移的测试。采集设备为已校准的高精度6位半数据采集器,采集器零点均在 $10^{-6}$ 量级,对零偏移影响基本可忽略。选取14日夜间至15日凌晨,太阳高度角低于地平线以下 $7^\circ$ 时数

据进行分析,采样间隔为30s,共有8台光合表参加测试。表4给出了测试结果。由表4可知,6台光合表的零点漂移量很小,均小于 $\pm 0.05 \mu\text{mol} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ ;另外2台光合表的零偏移稍大,为 $0.13 \mu\text{mol} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ 。

为了更直观了解光合表夜间零偏移的变化情况,

表 4 光合有效辐射表夜间零偏移的平均值及其标准偏差  
Table 4 The average of night zero offset and its standard deviation of photosynthetic active radiometers

型号	表号	平均值/ ( $\mu\text{mol} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ )	标准偏差
LI-190	39911	0.13	0.13
LI-190	39909	0.11	0.13
PAR LITE	090361	0.01	0.09
HSC-FPH-1	024	0.01	0.09
FS-PR	15103	0.02	0.05
FS-PR	15102	0.01	0.05
TRT-5	710024	-0.04	0.06
TRT-5	710022	0.01	0.06

图 5 分别给出了其中两个具有代表性光合表的夜间零偏移时间序列及其趋势线,图 5a 为试验中零偏移

稍大的光合表(LI-190 39911)的变化曲线,图 5b 为任选一个零偏移较小的光合表(TRT-5 710024)的零偏移曲线。光合表的夜间零偏移相对热电型总辐射表来说,其测量值中所占比例很小。其原因可能是热电型总辐射表外层的半球玻璃罩暴露于较冷的天空,相对于传感器的表面产生了辐射冷却,为了维持热量平衡,热电堆传感器需向外发射热辐射,从而热电堆产生了负值电压信号,即所谓的热偏移<sup>[14-15]</sup>。而光合有效辐射测量的物理机制与热电型总辐射表不同,导致其零偏移的主要原因是由于其自身的仪器噪声影响,而不是冷天空。测试数据表明,光合表的零点偏移基本可以忽略。

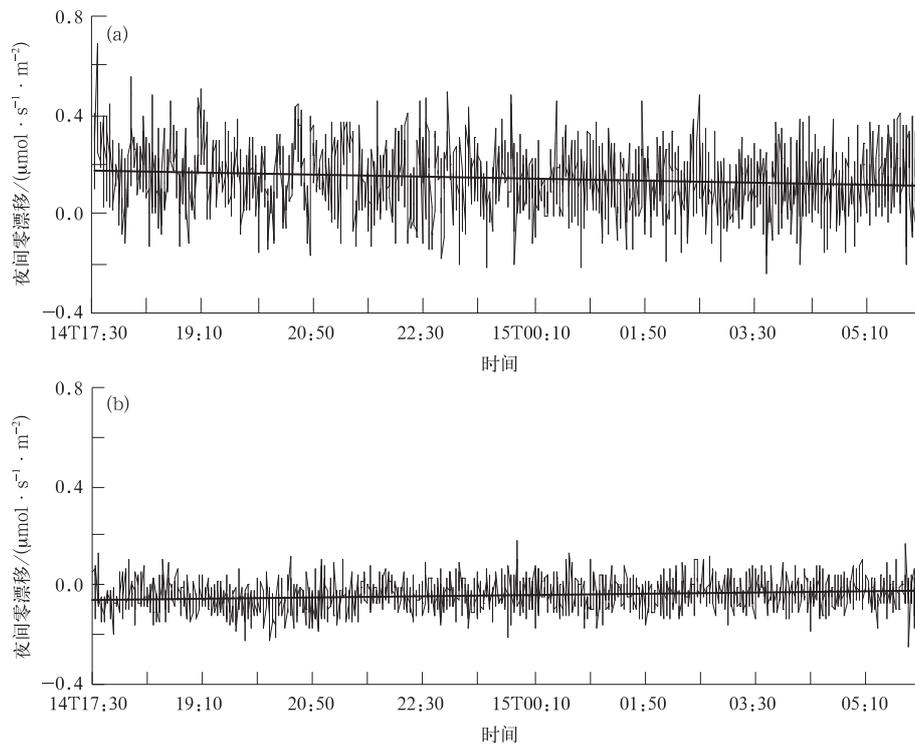


图 5 2012 年 11 月 14—15 日光合表夜间零偏移  
(a)LI-190 39911,(b)TRT-5 710024

Fig. 5 Zero offset of photosynthetic active radiometers from 14 Nov to 15 Nov in 2012  
(a)LI-190 39911,(b)TRT-5 710024

### 2.6 光谱响应

光合表可测量的波长范围为 400~700 nm,其理想的光谱响应曲线是在该波长范围内尽可能平直。由于各个厂家在拟合理想的光谱响应曲线的过程中采用的技术方案不同,结果各异,对不同类型光合表的光谱响应测试有利于深入了解光合表的特性。测试设备为氙灯光源,DTMc300 双单色仪和标

准硅光电二极管,图 6 给出各光合表在 550 nm 处归一化后的光谱响应曲线。

由图 6 可知,2 种光合表(LI-190 和 PAR LITE)与理想光谱很接近,仅在低光谱和高光谱有小的偏离。FS-PR 型光合表与理想光谱曲线相比,低光谱响应明显偏高,而高光谱响应又明显偏低。TRT-5 型和 HSC-FPH-1 型光合表的光谱响应整体偏低。

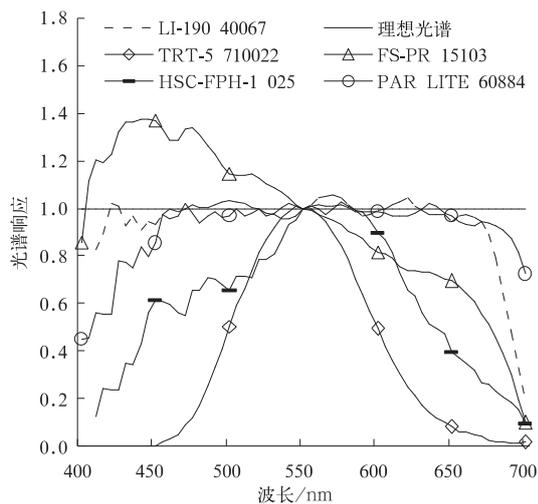


图6 光合表光谱响应曲线  
Fig. 6 Spectral responses of photosynthetic active radiometers

不同型光合表之间由于光谱响应函数存在差异,导致测量结果偏高或偏低。为减小这一问题带来的影响,计量站在进行灵敏度的校准时,使用DMc150光谱仪在400~700 nm范围内的积分值作为统一标准,即无论各厂家生产的光合表的光谱界限范围是多

少,均统一到400~700 nm范围内,这样得到的灵敏度值可以改进光谱段不匹配引起的误差。

### 3 一致性比对

一致性测试在室外自然光条件下进行<sup>[16]</sup>。在光合有效辐射仪器的国际比对中发现,同一厂家的仪器一致性较好,但不同厂家的仪器之间存在系统误差<sup>[17]</sup>。由于不同厂家光合表的光谱响应曲线不同,校准技术也不同,都会导致测量结果的差异。因此,建议WMO的气象相关部门尽快制定出光合有效辐射仪器生产的统一技术规范 and 性能指标。

2012年10月分别采用了标准光谱辐射计、光电探测器型的光合表(型号见表1)、热电型分光总辐射表3种方法对光合有效辐照度进行测量,并进行了一致性比对(表5)。

表5给出了根据不同计算方法得到的光合有效辐射的时段累计值。以光谱辐射计DMc150的测量结果为标准,光电型光合表测量的数据稍高于标准值,而热电型分光总辐射表相减的计算结果值稍低于标准值,但误差基本在5%以内。

表5 2012年10月18日3种方法测量光合有效辐射的一致性比对(单位:  $W \cdot m^{-2}$ )

Table 5 Comparison results of photosynthetic active radiation using three methods on 18 Oct 2012 (unit:  $W \cdot m^{-2}$ )

时段	标准光谱辐射计 DMc150	LI-190 39911	TRT-5 710024	FS-PR 15102	PAR LITE 060884	HSC-FPH-1 024	分光总表 计算
11:25—12:20	887.7	885.0	884.7	884.8	884.9	884.9	869.2
12:25—13:20	772.1	783.2	779.9	784.6	783.8	786.6	763.1
13:25—14:20	680.7	695.5	684.6	698.1	697.8	715.4	671.2
14:25—15:20	381.7	386.9	382.4	389.8	390.4	400.4	373.2

图7给出了2012年10月19日各光合表与标

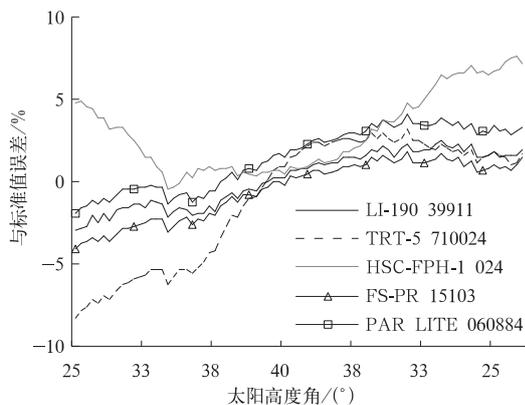


图7 2012年10月19日各光合表与标准DMc150的百分比误差  
Fig. 7 Error curves of photosynthetic active radiometer compared to DMc150 on 19 Oct 2012

准辐照度的误差百分比。由图7可见,中午时段太阳天顶角小时,误差小,而早、晚太阳天顶角大,受余弦响应误差的影响,误差有所增大。相比而言,FS-PR型、PAR LITE型和LI-190型光合表与标准值相比误差较小,而TRT-5型和HSC-FPH-1型光合表误差较大。

### 4 结论

本文对国内外的各种光合有效辐射表的性能和品质进行了对比,为用户选型及国内各生产商提高光合表的质量提供了参考。得到如下主要结论:

1) 5种类型的光合表的非线性误差均在1%以内。光合表的余弦响应误差随天顶角的增加而增大,不同型号光合表的余弦响应特性差异较大。

PAR LITE 型、LI-190 型及 FS-PR 型光合表的余弦响应误差小于 10%；TRT-5 型和 HSC-FPH-1 型光合表的余弦响应误差明显偏大远远偏离理想值。LI-190, PAR LITE 型和 FS-PR 型光合表的温度系数均小于 0.3%/°C, TRT-5 型和 HSC-FPH-1 型光合表的温度系数稍大, 小于 0.5%/°C。

2) PAR LITE 型和 LI-190 型光合表的光谱响应曲线与理想的光谱曲线接近, FS-PR 型光合表在低光谱明显偏高, 在高光谱偏低, 而 TRT-5 型和 HSC-FPH-1 型光合表的光谱响应曲线整体偏低。

3) 在自然光下的一致性比对测试中, 各光合表与标准值的误差随天顶角增加而增大。需要指出是 FS-PR 型、PAR LITE 型和 LI-190 型光合表优于 TRT-5 型和 HSC-FPH-1 型光合表。光合表年稳定性基本在 ±3% 以内, 但国产光合表仍有待提高性能和精度。光合表的零点偏移在其测量值中所占比例很小, 可以忽略不计。

光电型光合表是测量光合数据的有效手段, 当该类仪器长期在野外使用时, 环境条件对仪器的运行状况必然会造成一定影响。传感器需要定期进行校准, 减小由于仪器性能变化带来的误差。

### 参 考 文 献

- [1] 王信理, 李相玺. 植物群体结构与太阳辐射的垂直分布及其变化. 应用气象学报, 1992, 3(4): 424-430.
- [2] 吴其重, 王自发, 崔应杰. 我国近 20 年太阳辐射时空分布状况模式评估. 应用气象学报, 2012, 21(3): 343-351.
- [3] 白建辉, 庚辰. 兴隆地区光合有效辐射计算方法. 气象科技, 2009, 37(4): 472-477.
- [4] 刘建栋, 周秀骥, 于强. 中国黄淮海地区冬小麦光合作用特征参数. 应用气象学报, 2003, 14(3): 257-265.
- [5] 田育红, 刘鸿雁, 陆佩玲. 山东禹城地区夏玉米生产与环境因子关系的初步分析. 应用气象学报, 2003, 14(4): 509-512.
- [6] 王炳忠, 申彦波. 自然环境条件对我国太阳能资源计算影响的再思考. 应用气象学报, 2012, 23(4): 505-512.
- [7] 王炳忠, 莫月琴, 杨云. 现代气象辐射测量技术. 北京: 气象出版社, 2008.
- [8] MacArthur L J B. 地面辐射基准站网操作手册(第 2.1 版). 中国气象局监测网络司, 编译. 2004.
- [9] 王炳忠, 胡波, 刘广仁. 光合量子传感器校准的一些问题. 太阳能学报, 2008, 1(1): 1-5.
- [10] JJG458-96 总辐射表检定规程. 北京: 中国计量出版社, 1996.
- [11] 杨云, 王冬, 吕文华, 等. 我国太阳辐射标准与量值传递. 仪器仪表学报, 2007, 28(8): 429-435.
- [12] 杨云, 权继梅, 丁蕾. 光合有效辐射和紫外辐射测量标准的性能验证. 气象科技, 2012, 40(5): 707-712.
- [13] 谢印忠, 张保洲. 智能光电探测器线性测量系统的研究. 传感器与微系统, 2010, 29(2): 48-53.
- [14] 杨云, 丁蕾, 王冬. 总辐射表夜间零点偏移试验与分析. 气象, 2010, 36(11): 100-103.
- [15] 程兴宏, 张小玲, 郑向东, 等. PSP 总日射表热偏移特征及其测量总辐射误差分析. 太阳能学报, 2009, 30(1): 19-26.
- [16] ISO 9060—1990. 太阳能-半球面总日射表和太阳直射表的规范与分类. 1990.
- [17] McArthur L J B, Halliwell D H, Wu E A I. BSRN PAR Sensor Comparison; Bratt's Lake, Saskatchewan. The 8th session of BSRN, 2002.

## Performance Test of Five-type Photosynthetic Active Radiometers

Ding Lei Yang Yun Bian Zeqiang Quan Jimei Wang Dong

(*Meteorological Observation Center of CMA, Beijing 100081*)

### Abstract

Photosynthetic active radiometers are used to measure the solar photosynthetic active radiation. Also, it can be turned  $180^\circ$ , facing down to measure the photosynthetic active radiation of the ground. When it is used outdoors, the environmental condition has impacts on the performance, which may increase the measurement error. The performances of five different types of photosynthetic active radiometers are tested, such as sensitivity, cosine response, linearity, temperature dependence, spectral sensitivity and non-stability.

The non-linearity errors of five photosynthetic active radiometers are all within 1%. When the irradiance is less than  $250 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ , the differences of the non-linearity errors for different-type radiometers are significant. Cosine response errors gets bigger with the increase of the zenith angle ( $\theta$ ). When the zenith angle changes from  $-80^\circ$  to  $+80^\circ$ , cosine response errors of PAR LITE, LI-190 and FS-PR type radiometers are within 10%; the error of TRT-5 radiometer is within 10% just in the range of  $-55^\circ$  to  $+55^\circ$ ; and HSC-FPH-1 is within 10% when  $\theta$  is  $-45^\circ$  to  $+40^\circ$ . When testing the effects of temperature on photosynthetic active radiometer, the temperature coefficients of PAR LITE, LI-190 and FS-PR type radiometers are within  $0.3\%/^\circ\text{C}$ , TRT-5 and HSC-FPH-1 type photosynthetic active radiometers are within  $0.5\%/^\circ\text{C}$ . The wavelength range of photosynthetic active radiometer is from 400 nm to 700 nm. The ideal sensor should have clear cutoffs to light below 400 nm and above 700 nm. The spectral response of PAR LITE, LI-190 type radiometers is approximated to a horizontal line, which is closer to the ideal spectral curve. The response of FS-PR is overestimated within 400—550 nm and underestimated after that. The response of TRT-5 and HSC-FPH-1 photosynthetic active radiometers is lower than the ideal curve in the whole visible waveband. The consistency of five-type photosynthetic active radiometers with the standard value are all within 5% which is tested under solar light outside. At noon, the error is smaller as the zenith angle is small; but when the zenith angle grows bigger, the error is bigger due to the increase of cosine error. The stability for photosynthetic active radiometer in the experiment are within  $\pm 3\%$ . Due to the limited time and samples, the stability of homemade radiometer need further test. Zero offset of photosynthetic active radiometer is very small, which could be ignored. Therefore, it is necessary to calibrate the radiometer periodically to minimize the error. The analysis and comparisons of the experiment results provide scientific basis for controlling the radiometer quality, improving the measurement accuracy and selecting instrument for meteorological observations.

**Key words:** photosynthetic active radiometer; cosine response; spectral sensitivity; performance test