

杨云, 丁蕾, 程兴宏, 等. PSP 总日射表灵敏度系数的热偏移订正方法. 应用气象学报, 2012, 23(5): 585-592.

# PSP 总日射表灵敏度系数的热偏移订正方法

杨云<sup>1)\*</sup> 丁蕾<sup>1)</sup> 程兴宏<sup>2)</sup> 权继梅<sup>1)</sup> 彭继达<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup>(中国气象局气象探测中心, 北京 100081) <sup>2)</sup>(中国气象局公共气象服务中心, 北京 100081)

<sup>3)</sup>(南京信息工程大学, 南京 210044)

## 摘 要

PSP 总日射表在我国一直作为标准总日射表和质量优良的辐射仪器在使用, 2006 年以前还曾作为国家散射标准, 在太阳辐射量值传递中测量标准散射辐射, 通过成分和法计算标准总日射辐照度。总日射表的校准在晴天条件下进行, 此时天空无云, 由于热偏移为负值, 导致对短波灵敏度系数被低估。2011 年 10 月 14 日—11 月 15 日在北京密云上甸子大气本底站进行了对比观测试验, 通过对不同总日射表热偏移订正方法的试验与研究, 进行了 5 种热偏移订正方法的比较。通过订正, 在用于室外成分和法校准时, PSP 表的灵敏度系数的准确度可提高 1%, 进而提高总辐射的测量准确度。

**关键词:** 总日射表; 热偏移; 订正方法

## 引 言

太阳辐射是地球最基本、最重要的能量来源<sup>[1-4]</sup>。观测到达地球表面的太阳总辐射, 是地球-大气系统能量收支的重要项目之一<sup>[5]</sup>。太阳总辐射由总日射表测量, 它的热偏移是指在无辐射照射情况下, 由环境热辐射引起的辐射仪器的零点为负的现象。其中, 因外玻璃罩受“冷天空”影响所引起的, 称为 A 类; 纯粹由于环境温度所引起的, 称为 B 类。在 WMO(世界气象组织)和 ISO9060 对各种等级总日射表的性能特征中对总日射表的热偏移进行了说明, A 类为对  $200 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$  净热辐射的响应(通风); B 类为对环境温度发生  $5 \text{ K} \cdot \text{h}^{-1}$  变化时的响应<sup>[6-7]</sup>。国外大量试验研究得出的结论是总辐射表的零点偏移系由“冷天空”所形成, 日间也存在, 比夜间还要大, 且为负值, 这直接导致了对短波辐射的低估<sup>[8-9]</sup>。但由于热偏移的量值与总辐射比相对较小, 一直未受到重视, 甚至被忽视。随着基准辐射站对太阳辐射测量准确度的要求不断提高, 国外科学家加强了对热偏移的研究。在总日射表的校准中, 使

用“遮/不遮”法对总日射表进行校准, 可得到更准确的灵敏度系数, 因为此种情况下所产生的热偏移可以相互抵消<sup>[10-12]</sup>, 但受自动跟踪遮光装置的限制, 运用该方法 1 次只能校准 2~3 台总日射表。当使用成分和法校准总日射表时, 由于 1 次可以校准多台仪器, 因而被广泛使用, 但同时也导致了对短波灵敏度系数的低估<sup>[13]</sup>。

PSP 总日射表的热偏移是标准总日射表中最大的<sup>[9, 14]</sup>。由于历史原因, 国内不少单位一直用它作为标准表使用<sup>[15]</sup>, 2006 年以前还曾经作为我国的国家散射标准, 在太阳辐射量值传递中测量标准散射辐照度<sup>[16]</sup>。散射辐照度在总日射表的校准中通过成分和法计算标准总辐照度, 可以使余弦响应误差的影响最小化<sup>[17]</sup>。PSP 总日射表的热偏移呈现正态分布特征<sup>[18]</sup>, 平均值为  $-8.8 \pm 2.7 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ , 是太阳散射辐照度测量不准的重要原因之一, 通过了解各类型总日射表热偏移的特征并对其进行订正, 可以提高测量散射辐照度的准确度。本文采用了如下 5 种方法对总日射表的热偏移进行试验研究: ①“净”长波灵敏度系数法(仅对 PSP 表), 即方法 1; ②与标准总日射的差值法, 即方法 2; ③“净”长波方

2012-01-25 收到, 2012-06-21 收到再改稿。

资助项目: 国家自然科学基金青年基金项目(40905071)

\* E-mail: yyaoc@ema.gov.cn

程法,即方法 3;④日间加盖测量法,即方法 4;⑤以夜间电压输出计算热偏移法,即方法 5。较多的研究工作表明:不同方法得到总日射表的热偏移,PSP 表最大;8-48 表、CMP22 表最小,甚至可以忽略。而在用于室外成分和法校准时,“净”长波灵敏度系数法和加盖测量法,对 PSP 表灵敏度的准确度可提高 1%。

## 1 各种热偏移订正方法简介

### 1.1 “净”长波灵敏度系数法

辐射仪器的“净”长波灵敏度这一问题源自地球辐射表。原则上讲,由于所有温度在 0 K 以上的物体均会向外发射辐射,所以,水平向上放置的地球辐射表所测得的直接结果,并不就是大气的向下辐射,其输出是大气向下辐射与仪器自身向上发射辐射之差,所以是“净”长波辐射。同理,利用黑体校准地球辐射表时,所得到的结果也并非仪器的长波灵敏度,而是其“净”长波灵敏度。1.3 节中所谓的“净”长波方程,也是这个含义,它有别于大气物理中所定义的净长波辐射,以此方式表达,以示区别。

Reda 等<sup>[13]</sup>使用常温黑体对总日射表进行长波校准发现,总日射表对长波竟然也有响应,并且同类型的仪器的“净”长波灵敏度系数相当接近;而不同类型的仪器则数值不同。从而进一步证明了测量短波的总日射表的热偏移确系由长波热辐射引起。用于室外成分和法校准中订正总日射表的热偏移,以充分减少热偏移对最终灵敏度的影响。本文取 Reda 等<sup>[13]</sup>研究得到的新型 PSP 总日射表的“净”长波灵敏度系数的平均值(即 30000 系列 PSP 总日射表的长波灵敏度系数的平均值为 0.56,20000 系列为 0.64)。首先利用上述“净”长波灵敏度系数( $R_{NET}$ )和用地球辐射表观测得到的“净”长波辐照度( $E_{NIR}$ )计算得到总日射表的热偏移误差电压值( $\Delta U$ );其次利用  $\Delta U$  及其同期观测的总日射辐照度数据,计算得到成分和法校准的总日射表短波灵敏度( $R_{SW}$ );再采用“遮/不遮”法对该总日射表进行校准,得出该总日射表的另一短波灵敏度系数( $R'_{SW}$ ),进而对比研究热偏移误差对总日射表灵敏度的影响。

$$\Delta U = E_{NIR} R_{NET}, \quad (1)$$

$$R_{SW} = \frac{U - \Delta U}{S \cos z + E_d}, \quad (2)$$

$$R'_{SW} = \frac{U - U_s}{S \cos z}. \quad (3)$$

其中, $U$  为被校准总日射表输出的电压值(不遮光); $S$  为腔体直接日射表测量的标准直射日射值; $Z$  为太阳天顶角; $E_d$  为标准总日射表遮光测量的标准散射日射值; $U_s$  为“遮/不遮”法测量的遮光总日射输出电压值。

### 1.2 与标准总日射比较法

首先采用“遮/不遮”法校准的 PSP 总日射表的灵敏度系数  $R'_{SW}$  和总日射表输出电压值  $U$ , 计算试验期间日间总辐照度(式(4)中的  $E_g$ );再用标准直射日射表和标准散射日射表同步观测值采用成分和法计算标准总辐照度(式(5)中的  $E_{ref}$ ),两者之差即日间 PSP 总日射表的热偏移误差(式(6)中的  $\Delta E$ ),采用该方法对总日射表的日间热偏移误差进行估算。

$$E_g = \frac{U}{R'_{SW}}, \quad (4)$$

$$E_{ref} = S \cos z + E_d, \quad (5)$$

$$\Delta E = E_{ref} - E_g. \quad (6)$$

### 1.3 “净”长波方程法

Dutton 等<sup>[17]</sup>对夜间总日射表的输出和 PIR 地球辐射表的测量数据进行过分析,并得出有关热偏移的订正方法。但该订正方法仅限于遮光总日射表对散射辐照度的测量,因为夜间的情况与日间遮光的情况仅具有一定的相似;对于未遮光的总日射表,由于存在着直接日射的影响,尚无较好的订正方法。具体方法是,利用夜间总日射表的热偏移与 PIR 地球辐射表热电堆测量的“净”长波辐射值,使用线性最小二乘法求取夜间总日射表热偏移( $o_s$ )与“净”长波辐照度( $E_{NIR}$ )之间的相关关系,用作日间遮光总日射表的热偏移订正:

$$o_s = b_0 + b_1 E_{NIR} + b_2 \sigma (T_{仪器罩}^4 - T_{仪器体}^4). \quad (7)$$

式(7)中, $b_0 \sim b_2$  为拟合系数; $T$  为绝对温度,由仪器罩和体内的热敏电阻直接测量。

当使用 CGR4 地球辐射表时,由于该仪器罩具有极好的热传导性,所吸收的太阳辐射热由一种特殊结构有效地传导出,甚至在阳光直射下,窗口与传感器之间的温差也仅有 0.3℃,而其他同类产品同样情况下的温差却可达 2~3℃,这样就基本上排除了罩温的影响<sup>[14]</sup>。式(7)中等号右侧第 3 项近似为零,因此,可写作

$$o_s = b_0 + b_1 E_{NIR}. \quad (8)$$

将日间经遮光和通风的地球辐射表热电堆测量的“净”长波辐射  $E_{NIR}$ ,代入式(7)或式(8)即可计算

出日间总日射表的热偏移输出( $o_s$ )。最终,经过订正的散射辐照度可写作:

$$E_{d订正} = E_{d未订正} - o_s \quad (9)$$

### 1.4 加盖测量法

日间对总日射表加盖,直接测量仪器的零点。在太阳辐照条件下,进行 3 min 照射和 3 min 加盖试验。取仪器加盖并输出稳定后的值作为仪器的热偏移。

### 1.5 以夜间电压输出计算热偏移法

计算太阳低于地平线  $7^\circ$  以下时仪器输出(夜间零点)的电压平均值<sup>[12]</sup>,转换为辐照度作为热偏移平均值。

## 2 试验结果

2011 年 10 月 14 日—11 月 15 日在北京密云上甸子大气本底站进行了为期 1 个月的对比观测试验,期间挑选晴天采用腔体直接日射表 AHF (No. 36011)(该标准直接溯源到世界辐射测量基准(WRR))<sup>[19]</sup>和标准总日射表 CMP22 (No. 100180)(该表可以忽略热偏移误差,并使用“遮/不遮”校准方法溯源到 WRR)加遮光作为标准散射表,分别使用成分和法与“遮/不遮”法对上甸子站和国家气象计量站的总日射表进行了现场校准,并以校准后的总日射表灵敏度研究 PSP 等总日射表热偏移误差的订正方法。为避免余弦误差的影响,仅选取了太

阳天顶角小于  $60^\circ$  的灵敏度值进行分析。

### 2.1 “净”长波灵敏度系数法

本研究仅限于对 PSP 表。Reda 等<sup>[13]</sup>用黑体对总日射表进行其长波灵敏度校准,得到 30000 系列 PSP 总日射表的“净”长波灵敏度系数为 0.56,20000 系列的为 0.64。根据式(1)计算 2011 年 10 月 16 日 3 台 PSP 总日射表的热偏移电压  $\Delta U$ ,并换算为辐照度,结果见表 1。

利用热偏移电压  $\Delta U$ ,用式(2)对 3 台 PSP 总日射表使用成分和法校准的灵敏度进行订正。成分和法、订正后的成分和法以及“遮/不遮”等 3 种校准方法所得到的总日射表灵敏度平均值见表 2。成分和法校准时,标准器的不确定度系腔体直接日射表和二等标准总日射表不确定度的合成,且灵敏度值包括了热偏移误差;而“遮/不遮”法仅涉及 1 台腔体直接日射表,并且校准过程中几乎不受热偏移的影响,所以其测量不确定度最小;以“遮/不遮”法的灵敏度为标准进行比较,表 2 中成分和法使用方法 1 订正后的 PSP 总日射表灵敏度的准确度提高了 1.1%。2011 年 11 月 13 日,PSP No. 33734 总日射表在 11:27—12:33(北京时,下同)的灵敏度瞬时值见表 3,成分和法订正后的灵敏度提高了 1.7%。对应时刻的太阳天顶角计算值以及“净”长波辐照度也列入表中。经过热偏移订正后的成分和法得到的灵敏度更接近“遮/不遮”法。

表 1 各方法得到的总日射表热偏移误差比较(单位: $W \cdot m^{-2}$ )

Table 1 Thermal offset comparison of pyranometer from various methods(unit: $W \cdot m^{-2}$ )

表号	型号	方法 1	方法 2	方法 3	方法 4	方法 5
20462F3	PSP	-7.4	-10.5	-4.8		-3.3
20463F3	PSP	-7.8	-14.3	-4.3		-3.0
33734F3	PSP	-5.4	-11.6	-6.7	-8.1	-2.7
33779	8-48			-1.4	3.3	-0.3
060016	CMP22		-0.2	-2.2		-1.2
100180	CMP22			-2.1	-1.0	-1.0

表 2 成分和法用“净”长波灵敏度系数订正前后与“遮/不遮”法比较

Table 2 Comparison of shade/unshade method to sum composition method corrected by  $R_{NET}$

表号	型号	$R_{UCS}/(\mu V \cdot W^{-1} \cdot m^2)$	$R_{CCS}/(\mu V \cdot W^{-1} \cdot m^2)$	$R_{SU}/(\mu V \cdot W^{-1} \cdot m^2)$	百分比误差/%	
					$R_{UCS}$	$R_{CCS}$
20462	PSP	10.07	10.15	10.21	-1.4	-0.6
20463	PSP	9.50	9.58	9.68	-1.9	-1.0
33734	PSP	7.89	7.98	8.07	-2.2	-1.1

注: $R_{UCS}$ 为未修正的成分和法得到的灵敏度; $R_{CCS}$ 为热偏移修正后的成分和法得到的灵敏度; $R_{SU}$ 为“遮/不遮”法得到的灵敏度。下同。

表 3 使用 3 种方法计算 33734F3 灵敏度的比较

Table 3 Comparison of 33734F3 sensitivity using three methods

时间	太阳天 顶角/(°)	净热辐射 /(W·m <sup>-2</sup> )	灵敏度			百分比误差/%	
			R <sub>UCS</sub> / (μV·W <sup>-1</sup> ·m <sup>2</sup> )	R <sub>CCS</sub> / (μV·W <sup>-1</sup> ·m <sup>2</sup> )	R <sub>SU</sub> / (μV·W <sup>-1</sup> ·m <sup>2</sup> )	R <sub>UCS</sub>	R <sub>CCS</sub>
11:27:32	58.6	-137.8	7.77	7.91	7.97	-2.5	-0.8
11:33:32	58.5	-134.5	7.78	7.91	7.97	-2.4	-0.7
11:39:32	58.4	-135.2	7.79	7.92	7.98	-2.3	-0.7
11:45:32	58.3	-135.3	7.79	7.92	7.98	-2.4	-0.7
11:51:32	58.3	-136.5	7.79	7.92	7.98	-2.4	-0.7
11:57:32	58.3	-135.6	7.77	7.91	7.98	-2.6	-0.9
12:03:32	58.3	-136.2	7.78	7.92	8.00	-2.7	-1.0
12:09:32	58.3	-137.0	7.77	7.90	7.98	-2.7	-1.0
12:15:32	58.4	-136.2	7.76	7.90	8.00	-2.9	-1.2
12:21:32	58.6	-136.0	7.76	7.89	7.99	-2.9	-1.2
12:27:32	58.7	-136.2	7.76	7.89	8.00	-3.0	-1.3
12:33:32	58.9	-139.3	7.77	7.91	8.00	-2.8	-1.1

2.2 与标准总日射比较法

通过式(4)对 2011 年 11 月 14 日的观测数据,采用“遮/不遮”法校准的总日射表灵敏度系数  $R'_{sw}$  和总日射表输出电压值  $U$  计算试验期间日间总日射值  $E_g$  (式(4)),使用腔体直接日射表测量的标准直接辐照度  $S$  和二等标准总日射表遮光测量的标准散射辐照度  $E_d$ ,利用式(5)计算同一时刻的标准总辐照度  $E_{ref}$ 。再利用式(6)计算各表辐照度与对应标准总辐照度的差值  $\Delta E$ ,即为该表日间的热偏移(结果见表 1)。图 1 为 PSP 和 CMP22 总日射表与标准总辐照度的差值。从图 1 中可看出,CMP22 表与标准的差值很小,且变化比较平稳;而 PSP 表差值较大,同时变化也较大,在  $-22 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$  到  $5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$  之间,由于日间受太阳光的影响,热偏移要大于夜间。

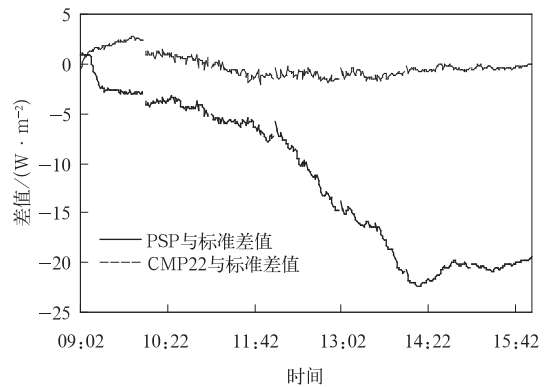


图 1 总日射表测量值与标准总辐照度的差值  
Fig. 1 Difference between measurement of pyranometer and reference global irradiance

2.3 “净”长波方程法

2011 年 10 月 16 日夜间,总日射表的热偏移与 CGR 4 地球辐射表热电堆测量的“净”长波辐照度之

间的关系见图 2,分别为 PSP No. 20462F3 和 CMP22 No. 100180 总日射表,图 2 方程中  $x$  为“净”长波辐照度  $E_{NIR}$ ,  $y$  为热偏移。使用线性最小二乘法拟合的夜间 5 台总日射表的“净”长波方程,用于计算 2011 年 10 月 16 日日间的遮光总日射表的热偏移

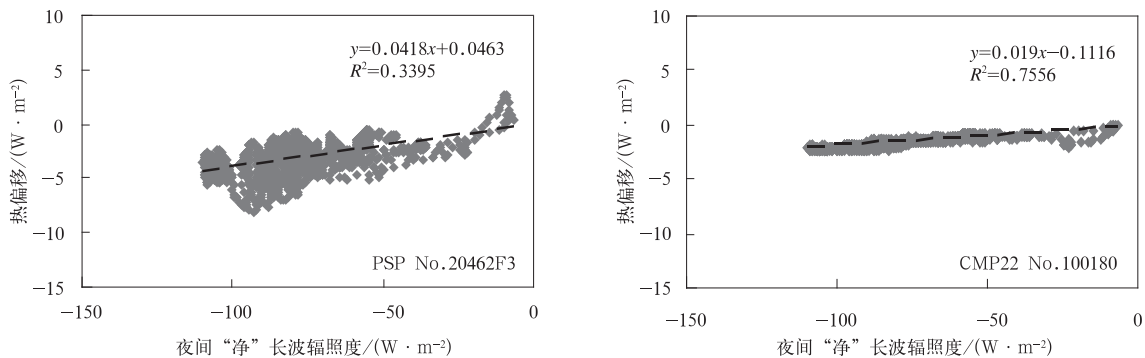


图 2 2011 年 10 月 16 日夜间热偏移方程

Fig. 2 Thermal offset equation at night on 16 Oct 2011

(结果见表 1), 5 台总日射表日间热偏移变化曲线见图 3。图 3 中 8-48 No. 36176 表热偏移最小, CMP22 表其次, PSP 表的变化较大。用该方法对成分和法校准的灵敏度进行订正, PSP 表提高了 0.6%~0.7%, 8-48 表提高约 0.2%, CMP22 表提高了 0.3%, 结果见表 4。

试验结果表明, 总日射表的输出与入射的“净”长波(红外)辐射呈线性关系, 直线的斜率就是总日射表对“净”长波的灵敏度。

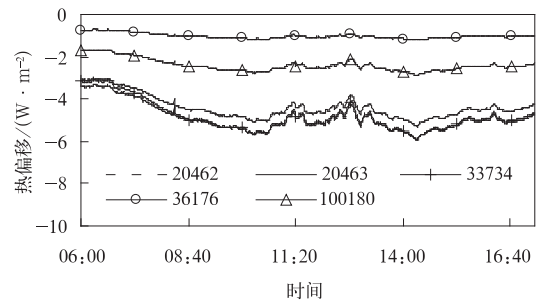


图 3 用夜间热偏移方程计算的日间热偏移曲线  
Fig. 3 Daytime thermal offset curves calculating from thermal offset equation at night

表 4 成分和法用“净”长波方程订正前后与“遮/不遮”法比较

Table 4 Comparison of shade/unshade method to sum composition method corrected by  $E_{NIR}$  equation

表号	型号	$R_{UCS}/(\mu V \cdot W^{-1} \cdot m^2)$	$R_{CCS}/(\mu V \cdot W^{-1} \cdot m^2)$	$R_{SU}/(\mu V \cdot W^{-1} \cdot m^2)$	百分比误差/%	
					$R_{UCS}$	$R_{CCS}$
20462	PSP	10.07	10.14	10.21	-1.4	-0.7
20463	PSP	9.50	9.56	9.68	-1.9	-1.3
33734	PSP	7.89	7.94	8.07	-2.2	-1.6
36176	8-48	9.54	9.55	9.58	-0.5	-0.3
100180	CMP22	9.34	9.37	9.38	-0.4	-0.1

### 2.4 加盖测量法

2011 年 11 月 15 日 14:00—14:30, 对 3 台总日射表(PSP, CMP22, 8-48)进行了加盖试验。4 组热偏移平均值见表 1。利用加盖零点订正 2011 年

10 月 16—18 日成分和法灵敏度, 并与“遮/不遮”法比较(表 5), PSP 表订正后的灵敏度提高了 1.2%, CMP22 表提高了 0.2%。

表 5 成分和法用加盖法订正前后与“遮/不遮”法比较

Table 5 Comparison of shade/unshade method to sum composition method corrected by cap-offset

表号	型号	$R_{UCS}/(\mu V \cdot W^{-1} \cdot m^2)$	$R_{CCS}/(\mu V \cdot W^{-1} \cdot m^2)$	$R_{SU}/(\mu V \cdot W^{-1} \cdot m^2)$	百分比误差/%	
					$R_{UCS}$	$R_{CCS}$
33734	PSP	7.89	7.98	8.07	-2.2	-1.2
100180	CMP22	9.34	9.36	9.38	-0.4	-0.2

### 2.5 以夜间电压输出计算热偏移法

选取 2011 年 10 月 16 日和 18 日夜间的观测数据, 计算太阳低于地平线  $7^\circ$  以下时仪器输出(夜间零点)的电压平均值<sup>[12]</sup>, 转换为辐照度的平均值, 作为该仪器的热偏移误差(见表 1)。由于 8-48 型和 CMP22 型总日射表的热偏移都很小( $-1.2 \sim 0 W \cdot m^{-2}$ )<sup>[9]</sup>, 这里只对 PSP 表进行分析(见图 4)。图 4 中 PSP 表夜间热偏移介于( $-10 \sim 2 W \cdot m^{-2}$ )之间(与文献[8]的研究结果一致), 而在用于日间热偏移订正时, 取平均值为  $-2.7 W \cdot m^{-2}$ , 将导致对热偏移的实际修正偏小。利用该方法对成分和法校准的总日射表的灵敏度进行订正后, 与“遮/不遮”法得到的灵敏度比较, PSP 表订正后灵敏度只提高了 0.2%~0.3%, 而对 8-48 和 CMP22 这种本

身零点就很小的日射表, 几乎没有变化, 见表 6。

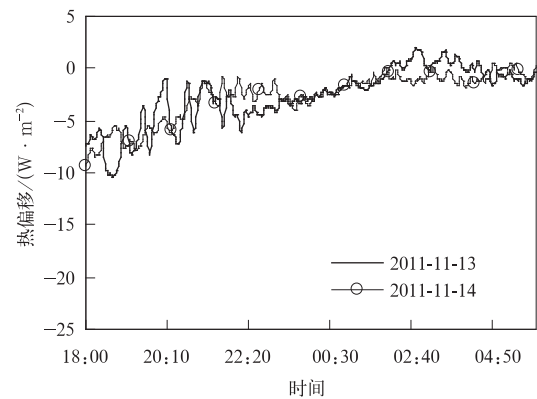


图 4 PSP 表夜间零点变化曲线  
Fig. 4 PSP pyranometer zero offset curve at night

表 6 成分和法用夜间零点均值法订正前后与“遮/不遮”法的比较

表号	型号	$R_{UCS}/(\mu V \cdot W^{-1} \cdot m^2)$	$R_{CCS}/(\mu V \cdot W^{-1} \cdot m^2)$	$R_{SU}/(\mu V \cdot W^{-1} \cdot m^2)$	百分比误差/%	
					$R_{UCS}$	$R_{CCS}$
20462	PSP	10.07	10.10	10.21	-1.4	-1.1
20463	PSP	9.50	9.52	9.68	-1.9	-1.7
33734	PSP	7.89	7.91	8.07	-2.2	-2.0
36176	8-48	9.54	9.53	9.58	-0.5	-0.5
100180	CMP22	9.34	9.35	9.38	-0.4	-0.3

### 3 讨论

#### 3.1 PSP 表

用以上 5 种方法计算同一未遮光 PSP 总日射表的日间热偏移变化曲线如图 5 所示,将其中与标准总辐照度的差值曲线(方法 2)作为最优(标准)的热偏移曲线,与其他 4 条热偏移曲线比较,发现上午“净”长波方程(方法 3)得出的热偏移最接近标准值,而下午 4 条热偏移曲线与标准总辐射差值曲线都相差较大。

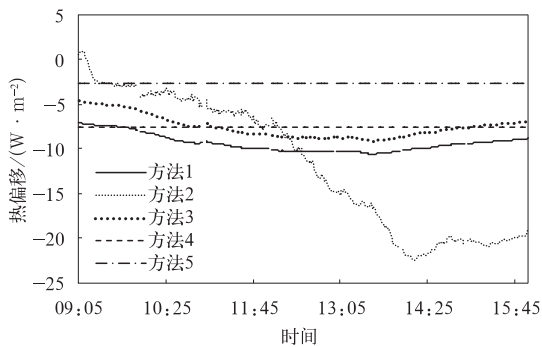


图 5 5 种订正方法计算未遮光 PSP 表日间热偏移曲线

Fig. 5 Daytime thermal offset curves of unshaded PSP pyranometer using five methods

同样,用 5 种方法计算同一遮光 PSP 总日射表的日间热偏移曲线,如图 6 所示。将其中与标准散射(CMP22 No. 100180 加遮光测量的散射辐照度)的差值曲线(方法 2)作为标准热偏移曲线,图 6 中除了夜间电压均值(方法 5)得到的热偏移与标准相差较远外,其他 3 种方法均接近标准曲线,且“净”长波方程订正方法(方法 3)对遮光总日射表更有效。比较图 5 和图 6,遮光总日射表订正效果明显优于未遮光总日射表,这与 Dutton 等<sup>[17]</sup>的研究结果一致。

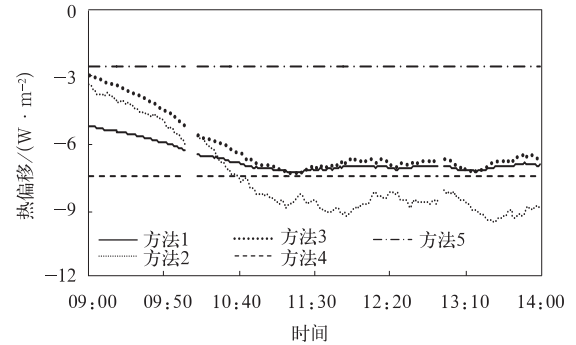


图 6 5 种订正方法计算遮光 PSP 表日间热偏移曲线

Fig. 6 Daytime thermal offset curves of shaded PSP pyranometer using five methods

#### 3.2 CMP22 表

用 3 种方法(方法 2、方法 3 和方法 5)计算得到的日间未遮光 CMP22 总日射表的热偏移曲线均非常小,其中夜间电压平均值计算的热偏移更接近标准线。

### 4 小结

1) 在 PSP 总日射表的校准中,用“净”长波灵敏度系数法订正后的成分和法稍优于其他方法,加盖测量法订正结果与“净”长波灵敏度系数法接近,以夜间电压输出计算热偏移法(取夜间零点均值)的修正效果最差。

2) 采用 5 种热偏移方法订正 PSP 表日间热偏移时,“净”长波方程和“净”长波灵敏度订正方法更接近标准值。但该订正方法还仅限于遮光总日射表,因为夜间的情况与日间遮光的情况有一定的相似;对于未加遮光的总日射表,由于存在着直接日射的影响,5 种热偏移订正方法都与标准值相差较大。

3) CMP22 和 8-48 总日射表在成分和法中测量标准散射辐照度时,热偏移可以忽略,但应使用“遮/不遮”法校准,以消除热偏移对灵敏度的影响。需要

指出的是,虽然这两种表在热偏移方面的都有优良的表现,但 CMP22 总日射表在方向响应、响应时间等其他性能上要远优于 8-48 型总日射表。

在以往国产表的校准中,并没有考虑热偏移对灵敏度的影响,但已通过大量试验得出国产总日射表的热偏移大于 PSP 表<sup>[9]</sup>,如果通过以上对各种热偏移订正方法的研究,可以探索出一种较为简便的订正方法,应用到气象部门业务观测使用的辐射表校准之中,对提高辐射测量的准确性将具有重要意义。

### 参 考 文 献

- [1] 郑有飞,关福来,蔡子颖,等. 我国南方中东部地区地面太阳总辐射变化规律. 应用气象学报,2011,22(3):312-320.
- [2] 李晓文,李维亮,周秀骥. 中国近 30 年太阳辐射状况研究. 应用气象学报,1998,9(1):24-31.
- [3] 杨羨敏,曾燕,邱新法,等. 1960—2000 年黄河流域太阳总辐射气候变化规律研究. 应用气象学报,2005,16(2):243-248.
- [4] 张家诚. 评《太阳辐射能的测量与标准》. 气象科学研究院院刊,1989,4(2):224.
- [5] 邱金桓,许潇锋,杨景梅. 北京等 7 个气象台站太阳总辐射观测资料的准确度评估. 应用气象学报,2008,19(3):287-296.
- [6] 世界气象组织. 气象仪器和观测方法指南(第 6 版). WMO-No. 8,1996.
- [7] ISO9060-1990. Solar Energy-Specification and Classification of Instrument for Measuring Hemispherical Solar and Direct Solar Radiation. 1990.
- [8] Rolf Philipona. Underestimation of solar global and diffuse radiation measured at Earth's surface. *J Geophys Res*,2002,107, D22,4654,doi:10.1029/2002JD002396,2002.
- [9] 杨云,丁蕾,王冬. 总日射表夜间零点偏移试验与分析. 气象,2010,36(11):100-103.
- [10] Standard Test Method for Calibration of a Pyranometer Using a Pyrheliometer. ASTM G167-05. 2010.
- [11] Ibrahim R, Stoffel T, Daryl M. A method to calibrate a solar pyranometer for measuring reference diffuse irradiance. *Solar Energy*,2003,74:103-112.
- [12] Michalsky J J, Gueymard C, Kiedron P, et al. A proposed working standard for the measurement of diffuse horizontal shortwave irradiance. *J Geophys Res*,2007, 112, D16112, doi:10.1029/2007JD008651.
- [13] Reda I, Hickey J, Long C, et al. Using a blackbody to calculate net longwave responsivity of shortwave solar pyranometers to correct for their thermal offset error during outdoor calibration using the component sun method. *American Meteorological Society*,2005,22(10):1531-1540.
- [14] 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.
- [15] 权维俊,陈洪滨,高燕虎,等. 上甸子大气本底站太阳辐射观测数据的质量评价. 高原气象,2009,28(1):136-142.
- [16] 杨云,王冬,吕文华. 我国太阳辐射标准与量值传递. 仪器仪表学报,2007,28(增刊IV):429-435.
- [17] Dutton E G, Michalsky J J, Stoffel T, et al. Measurement of broadband diffuse Solar irradiance using current commercial instrumentation with a correction for thermal offset errors. *J Atmos Ocean Technol*,2001,18(3):297-314.
- [18] 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.
- [19] 世界气象组织. International Pyrheliometer Comparison. IOM Report,WMO/TD,27, 2010.

## Thermal Offset Correction Methods for Sensitivity of PSP Pyranometer

Yang Yun<sup>1)</sup> Ding Lei<sup>1)</sup> Cheng Xinghong<sup>2)</sup> Quan Jimei<sup>1)</sup> Peng Jida<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup> (Meteorological Observation Center, CMA, Beijing 100081)

<sup>2)</sup> (Public Weather Service Center, CMA, Beijing 100081)

<sup>3)</sup> (Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044)

### Abstract

The PSP pyranometer is used as a reference pyranometer and a reliable instrument in China. Before 2006 it is once used as national diffused reference to measure the reference diffused irradiance, the value of which is used in the sum composition method to calculate the reference global irradiance. The probability distribution of the nighttime thermal offsets within the pyranometers demonstrates near normal distribution. The offset of PSP type pyranometers is larger than that of 8-48 and CMP22 type. Finding the characteristics of the offset within different types of pyranometers and doing the calibration will improve the accuracy of diffused irradiance. The pyranometer calibration is done under clear sky. The negative thermal offset of the pyranometer causes that the sensitivity is underestimated. By the experiment and study on the thermal offset correction method for different type pyranometer, five correction methods are compared. The net longwave sensitivity method: Calculating the net longwave sensitivity of the pyranometer using longwave blackbody radiation, which is used in the sum composition method outdoors to correct the thermal offset of the pyranometer to reduce the offset effects. The differential algorithm with the reference global irradiance: Comparing it with the reference value derived from the sum composition method using the absolute cavity radiometer and CMP22 type secondary standard pyranometer with shading. The net longwave equation method: Analyzing the data of pyranometers and PIR type pyrgeometers measured at night to correct thermal offset. The cover method: Covering the dome of pyranometers in daytime to measure the offset of pyranometer directly. Using the voltage output of pyranometer in the nighttime as the thermal offset: Calculating the average voltage (night) when solar is 7° lower than horizon and transform it to irradiance as the thermal offset. When using the sum composition method to calibrate PSP pyranometer, the correction results of the net longwave sensitivity method is better than other methods. The result of the cover method is more close to the net longwave sensitivity method, the correction effects using the night voltage output method is not good. Drawing the daytime offset curves separately using the five offset correction methods, the net longwave equation method and the net longwave sensitivity method is more close to the reference value. But these methods are only confined to the shaded pyranometers, because shading makes pyranometer performs more like in the night. For unshading pyranometers, because of the effects of direct irradiance, the five correction methods are distinctly different with the true value. When using CMP22 and 8-48 pyranometers with shading in the sum composition method to test the reference diffused irradiance, the thermal offset could be ignored. But the CMP22 or 8-48 pyranometer should be calibrated by “shade/unshade” method to reduce the effects of offset for sensitivity. When the net longwave sensitivity method or the cover method is used in the sum composition method, the accuracy of PSP’s sensitivity could be improved 1%.

**Key words:** pyranometer; thermal offset; correction method