

# 净全辐射表两种校准方法比较

杨 云 吕文华 付锡贵 王 冬 丁 蕾

(中国气象局气象探测中心,北京 100081)

## 摘 要

该文介绍了净全辐射表的两种校准方法。使用长短波辐射表组成的净全辐射标准器组,在不同环境条件下对现用标准净全辐射表和 6 台气象台站用工作级净全辐射表的灵敏度进行了测试,通过试验了解检定环境条件下新的标准器组与现用标准器之间的关系,分析了通过不同标准器组得到的工作级净全辐射表的测量结果,得到了新的标准器组使用后检定结果的随机误差。通过数据对比分析,得出使用新的标准组检定的净全辐射表,其不确定度白天降低 9.2%,夜间降低 5.2%。

关键词: 净全辐射; 标准器组; 灵敏度; 不确定度

## 引 言

由天空(包括太阳和大气)向下投射的和由地表(包括土壤、植物、水面)向上投射的全波段辐射量之差称为净全辐射<sup>[1]</sup>,它是研究地球热量收支状况的重要能量参数。20 世纪 90 年代前我国气象部门几乎没有净全辐射观测,90 年代后的遥测辐射测量填补了该项观测空白,但没有正式的净全辐射表标准。为解决量值统一,1980 年从日本进口的 3 台 EKO 生产的 CN-11 型净全辐射表,20 多年来一直作为临时标准器检定气象台站观测用的净全辐射表。CN-11 型净全辐射表和我国气象台站现用的净全辐射表结构相同,有上下两个感应件,感应件均由涂黑的感应面与热电堆组成,均能吸收波长为 0.3~100  $\mu\text{m}$  的全波段辐射<sup>[2-3]</sup>。上感应面接收天空投射的全辐射,下感应面接收地表辐射。由于净全辐射表有两个感应面,且测量的辐射频谱范围宽,这样与其他辐射表相比就更加复杂<sup>[4]</sup>,加之防风和保护感应面用的是聚乙烯薄膜罩,难以清洁,容易变形<sup>[5]</sup>、老化,密封性差,更增加了测量的不确定性。净全辐射表是全天候使用的仪器,白天测量全波辐射,夜间测量长波辐射<sup>[6-7]</sup>。每台仪器白天与夜间的灵敏度值不相同,日本净全辐射表白天与夜间给出同一个灵敏度值,这样标准器本身的灵敏度就存在误差。

1993 年 WMO 建议使用地球辐射表进行长波辐射观测<sup>[8]</sup>。世界气候研究计划——地面辐射基准

站网(BSRN)规定使用长短波辐射表进行净全辐射的观测<sup>[9]</sup>。目前世界上绝大多数国家不使用净全辐射表。为解决标准器的问题,2003 年底中国气象局气象探测中心进口了两台荷兰 Kipp & Zonen 生产的 CG4 型地球辐射表<sup>[10]</sup>,利用这两台表和美国 Eppley 的两台 PSP 型总辐射表<sup>[11]</sup>(短波辐射表)组成新的净全辐射标准器组(四成分法)。在不同的环境条件下对现用标准净全辐射表(CN-11)和 6 台台站用净全辐射表的灵敏度进行测试。通过使用两种校准方法,即 CN-11 型净全辐射表作为标准器和四成分法,对这 6 台净全辐射表进行同步校准,以了解检定环境条件下新的标准器组与现用标准器之间的量值关系。通过两种标准器获得的测量结果,得出使用新的标准器组后,检定结果随机误差以及对台站用净全辐射表测量结果的分析。

2005 年 9 月,两台 CG4 型地球辐射表与世界红外辐射标准组(WISG)进行比对。比对结果证明这两台仪器性能良好,与世界标准非常接近。2006 年制定了新的净全辐射表检定规程<sup>[12]</sup>,用长、短波辐射表作为净全辐射表的标准,替换净全辐射表的临时标准,大大降低了校准结果的不确定度。

## 1 两种校准方法试验

### 1.1 试验方法

灵敏度是净全辐射表最主要的技术指标之一,本文主要对净全辐射表的灵敏度进行测试。试验方

2008-12-30 收到,2009-07-22 收到再改稿。

法参照 WMO 《气象仪器与观测方法指南》、《净全辐射表检定规程》等。净全辐射表的灵敏度测试分全波和长波测试。全波测试在日间进行,长波测试在夜间。测试均采用室外平行对比法。

CG4 型地球辐射表 030665 号和 PSP 型总辐射表 20461 号向上水平安装,CG4 型地球辐射表 030666 号和 PSP 型总辐射表 20463 号朝下水平安装<sup>[13]</sup>。3 台日本 CN-11 型净全辐射表(84001 号,84002 号,81033 号)、3 台国产 DFY5 型(045 号,039 号,008 号)和 3 台国产 FNP-1 型(014 号,012 号,011 号)台站用净全辐射表,分别水平安装在楼顶的特制仪器支架上,与美国 KEITHLEY 2000 型 40 路高精度数据采集器连接。试验在不同天气条件下进行(如晴空无云、晴有薄云、多云、阴天、雾、霾等天气现象,风力 2~3 级,有时 4 级左右)。太阳高度角不低于 30°;采样间隔为 1~3 min;测试时间白天为 10:00(北京时,下同)—17:00,夜间为 20:00—次日 05:00。试验时段为 2004 年 4—8 月,共 5 个月。

## 1.2 试验数据处理

白天标准净全辐照度  $E^*$  计算公式<sup>[14]</sup>:

$$E^* = E_g \downarrow + E_l \downarrow - E_r \uparrow - E_i \uparrow. \quad (1)$$

式(1)中,  $E_g \downarrow$  为总辐射,  $E_l \downarrow$  为大气长波辐射,  $E_r \uparrow$  为短波反射辐射,  $E_i \uparrow$  为地面长波辐射。

夜间,由于短波辐射为零,标准净长波辐照度  $E^*$  的计算公式为:

$$E^* = E_l \downarrow - E_i \uparrow. \quad (2)$$

CN-11 净全辐射表和国产净全辐射表辐照度  $E$  计算公式如下:

$$E = \frac{V}{K}. \quad (3)$$

式(3)中,  $V$  为净全辐射表的电压输出值,  $K$  为净全辐射表的灵敏度。

根据瞬时同步测量方法,按净全辐射表检定规程规定计算被测净全辐射表每次测量的灵敏度值。

## 2 试验结果与分析

从 2004 年 4 月开始,用四成分法对 CN-11 型净全辐射表和国产净全辐射表的灵敏度进行了一系列试验。根据上述数据处理方法,将离散性较大的值去掉,计算出一天内 CN-11 型净全辐射表几个小时的灵敏度最大变化量,测试结果列于表 1。从表 1 可以看出,84001 号表白天灵敏度变化最大为

9.5%,夜间为 9.73%。81033 号表白天灵敏度变化最大为 16.97%,夜间为 9.86%。84002 号表白天灵敏度变化最大为 12.01%,夜间为 10.07%。其中 4 个最大值出现在 4 月 13 日,而其余 2 个出现在 4 月 16 日。从每天的灵敏度平均值可知,白天、夜间灵敏度值相差较大,白天的测量结果在不同的天气情况下获得,在天气晴朗时短波起主要作用,在阴天时,则长波起主要作用。

在灵敏度的重复性试验中,检定条件按照原 JJ G925-97 净全辐射表检定规程规定,选取晴天,风速小于 5 m/s,环境稳定,太阳高度角大于 30°,白天时间为 10:00—14:00,夜间时间为日落后 2 h 至日出前 2 h。测试结果列于表 2。从表 2 计算出,84001 号表灵敏度平均值白天与原值(日本校准的灵敏度值)差 9.2%,夜间差 5.2%;81033 号表白天差 9.6%,夜间差 3.3%;84002 号表白天差 0.3%,夜间差 8.2%。需要指出的是,由于试验时室外的环境条件不可能保持不变,这样就存在着余弦、方位响应<sup>[15]</sup>、光谱响应、非线性、热漂移<sup>[16]</sup>、温度响应等误差的综合影响。由于仪器灵敏度大小不同,如 CN-11 净全辐射表灵敏度超过  $40 \mu\text{V W}^{-1} \text{m}^2$ ,而国产表较小,在  $7 \sim 14 \mu\text{V W}^{-1} \text{m}^2$  之间,为了进行比较,扣除灵敏度值大小因数,表 2 中  $s/K$  为随机误差(也称变异系数)表达式,这里

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (K_i - \bar{K})^2} \quad (4)$$

为重复性标准偏差,  $\bar{K}$  为灵敏度  $K_i$  (灵敏度的重复性测量值)的平均值。  $i$  为测量次数。用四成分法校准 CN-11 净全辐射表灵敏度检定结果的随机误差的平均值(表 2 中 3 台表  $s/K$  的平均)为  $3.1 \times 10^{-2}$ , FNP-1 型净全辐射表随机误差为  $2.0 \times 10^{-2}$ , DFY5 型净全辐射表随机误差为  $1.6 \times 10^{-2}$ 。原 JJ G925-97 净全辐射表检定规程试验报告中用 CN-11 校准 FNP-1 型净全辐射表灵敏度检定结果的随机误差的平均值为  $4.8 \times 10^{-2}$ , DFY5 型净全辐射表随机误差平均值为  $2.6 \times 10^{-2}$ 。可见新的标准使用后,检定结果的离散性将更小。

用新的标准器组和现用标准 84001 号表(灵敏度用原值  $44.7 \mu\text{V W}^{-1} \text{m}^2$ )为标准,分别对 8 月 18 日测试的 6 台工作级净全辐射表的灵敏度进行计算,结果见表 3。从表 3 中可知,白天两种标准计算结果最大相差 8.2%,夜间最大相差 4.5%。现用标准计算结果有 3 台表全波与长波灵敏度误差大于

表 1 CN-11 型净全辐射表一天内灵敏度最大变化量 (单位: %)

Table 1 Max value of CN-11 type net pyrradiometers sensitivity in one day (unit: %)

测试日期	84001 号		81033 号		84002 号	
	白天	夜间	白天	夜间	白天	夜间
2004-04-13	9.32	9.73	13.97	9.86	12.01	10.07
2004-04-14	3.42	4.34	5.97	4.11	4.10	4.59
2004-04-15	0.54	7.53	4.10	7.64	2.68	8.56
2004-04-16	9.50	1.65	16.97	2.42	11.83	2.30
2004-04-17	2.77	7.43	5.52	8.68	4.23	6.07
2004-04-19	7.62	6.13	13.15	5.43	8.87	4.24
2004-05-18	2.63	2.73	4.29	3.05	4.99	2.04
2004-05-19	3.22		5.93		11.23	
2004-05-20	3.37	5.38	3.31	5.38	9.55	5.80
2004-05-21	4.13	5.30	7.00	5.57	6.00	5.44
2004-05-22	3.08	6.61	5.65	7.12	4.81	6.31
2004-05-24	3.33	2.64	5.59	2.34	6.53	2.76
2004-06-01	3.17	0.80	5.26	0.76	6.37	0.69
2004-06-02	2.42	5.48	3.58	5.61	4.14	4.62
2004-06-03	3.82		5.78		6.41	
最大值	9.50	9.73	16.97	9.86	12.01	10.07

表 2 CN-11 型净全辐射表灵敏度重复性测试(单位:  $\mu\text{V W}^{-1} \text{m}^2$ )Table 2 Repeatability tests of CN-11 type net pyrradiometers sensitivity (unit:  $\mu\text{V W}^{-1} \text{m}^2$ )

日期	84001 号		81033 号		84002 号	
	灵敏度原值 44.7		灵敏度原值 45.14		灵敏度原值 43.42	
	白天	夜间	白天	夜间	白天	夜间
2004-04-13	39.955	46.349	38.769	45.252	41.437	45.509
2004-04-16	41.060	49.336	39.490	48.234	42.860	47.802
2004-04-17	40.643	45.308	39.260	45.957	41.445	46.561
2004-04-19	40.245	47.992	38.063	48.027	39.989	48.713
2004-05-18	40.681	46.060	41.950	45.703	44.716	46.265
2004-05-21	40.489		41.648		44.848	
2004-05-22	40.723		42.974		45.970	
2004-05-24	40.578		41.986		44.407	
2004-06-01	40.197		41.064		44.363	
2004-06-02	40.688		41.806		44.834	
2004-06-03	40.971		42.088		45.246	
灵敏度平均( $\bar{K}$ )	40.566	47.009	40.827	46.635	43.556	46.970
$s$	0.329	1.629	1.631	1.391	1.981	1.278
$\sqrt{K}$	0.008	0.035	0.040	0.030	0.045	0.027

表 3 两种校准方法的灵敏度试验结果

Table 3 Sensitivity experiment results of two calibration methods

表号	现用标准			新标准器组			两种校准方法的灵敏度误差	
	白天/ ( $\mu\text{V W}^{-1} \text{m}^2$ )	夜间/ ( $\mu\text{V W}^{-1} \text{m}^2$ )	全波和长波 灵敏度差/ %	白天/ ( $\mu\text{V W}^{-1} \text{m}^2$ )	夜间/ ( $\mu\text{V W}^{-1} \text{m}^2$ )	全波和长波 灵敏度差/ %	白天差 / %	夜间差 / %
014	10.41	9.78	6.24	9.56	10.21	- 6.58	8.2	- 4.4
012	12.35	10.49	16.29	11.35	10.94	3.68	8.1	- 4.3
011	13.14	10.45	22.81	12.07	10.90	10.19	8.1	- 4.3
045	12.86	10.96	15.95	11.81	11.45	3.10	8.2	- 4.5
039	12.40	11.54	7.18	11.39	12.05	- 5.63	8.1	- 4.4
008	13.59	12.45	8.76	12.49	12.99	- 3.92	8.1	- 4.3

15%, 不满足 JJG925-97 净全辐射表检定规程要求, 而新标准器组计算结果全部小于 15%, 满足规程要求。从表 2 还可看出, 用两种校准方法对台站观测用的净全辐射表进行灵敏度检定, 其中白天灵敏度的检定结果中, CN-11 法比四成分法一致偏大, 平均偏大 8.1%; 而夜间, 灵敏度的检定结果中, CN-11 法比四成分法一致偏小, 平均偏小 4.4%。

为了分析不同标准引起的净全辐射变化, 用表 3 中的 6 台净全辐射表用两种标准得到的灵敏度对 8 月 13 日和 17 日两天的测试数据进行计算。8 月 13 日, 白天多云转晴、最高气温 28 °C, 夜间多云转阴、最低气温 18 °C。采样间隔为 2 min, 测试时间白天 11:59—17:19, 夜间 21:01—次日 05:55。

FPN-1 型净全辐射表 014 号表白天、夜间的辐照度变化见图 1, 图中黑色曲线为现用标准检定的辐射表测量的辐照度, 而灰色曲线为新标准器组检定的辐射表测量的辐照度。DFY5 型净全辐射表 045 号表白天、夜间的辐照度变化见图 2。计算结果白天辐照度, 新标准器组检定的辐射表的测量值比现用标准检定的辐射表测量值大, 最大偏差为 8.2%, 夜间净全辐照度为负值, 新标准器组检定的辐射表的测量值比现用标准检定的辐射表测量值的绝对值小, 最小偏差为 4.5%, 这与表 3 中结果一致。其余 4 台表辐照度与上述 2 台表变化相同, 不一一列举。6 台表日总量变化见图 3, 其结果最大偏差为 11.8%。17 日白天晴, 最高气温 29 °C, 夜间晴见多云、最低

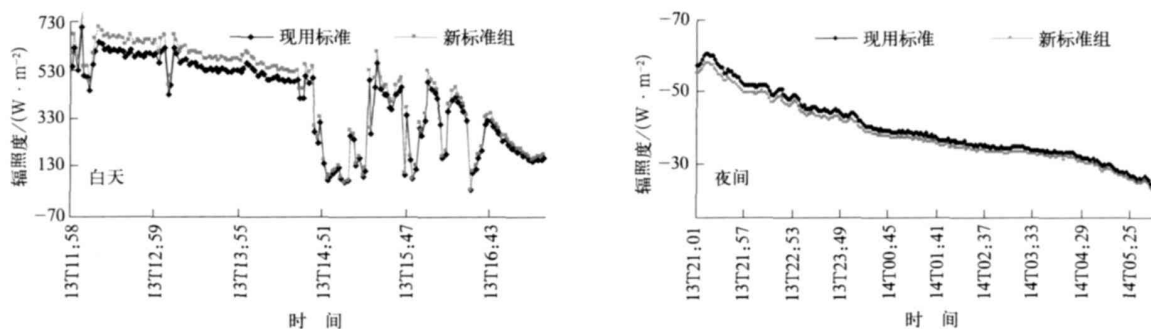


图 1 2004 年 8 月 13—14 日 014 号净全辐射表辐照度

Fig. 1 Irradiance of net pyrriadiometer No. 014 on 13—14 Aug 2004

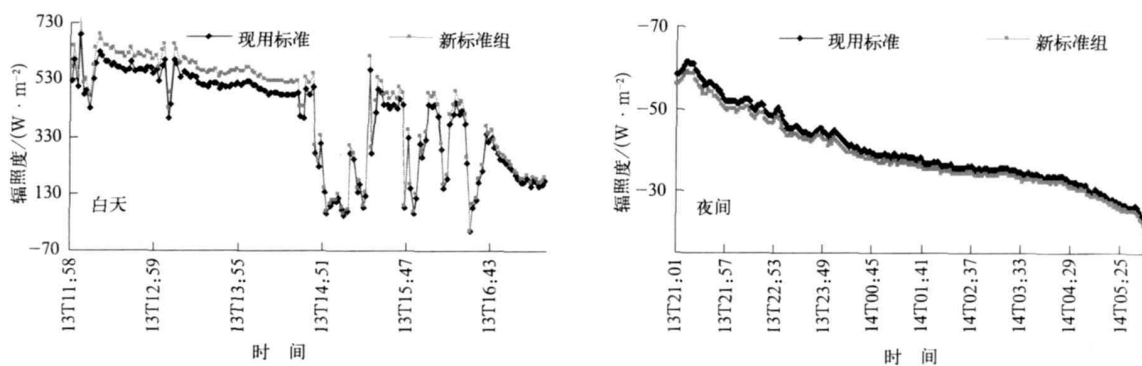


图 2 2004 年 8 月 13—14 日 045 号净全辐射表辐照度

Fig. 2 Irradiance of net pyrriadiometer No. 045 on 13—14 Aug 2004

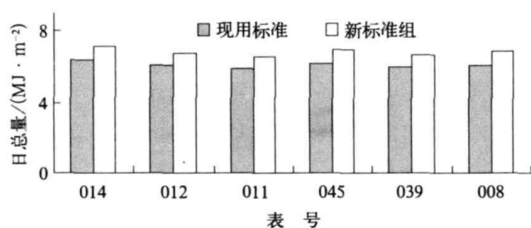


图 3 2004 年 8 月 13 日净全辐射日总量

Fig. 3 Total solar irradiance of net pyrriadiometers on 13 Aug 2004

气温 20 °C, 风力 1~2 级。采样间隔为 2 min, 测试时间为白天 10:01—17:35, 夜间 21:00—次日 05:00。014 号表白天、夜间的辐照度变化见图 4, 045 号表白天、夜间的辐照度变化与图 4 一致 (图略), 计算结果与图 1、图 2 相同, 与表 3 中结果一致。6 台表日总量变化见图 5, 其结果最大偏差为 12.2%。其他与图 3 相同。

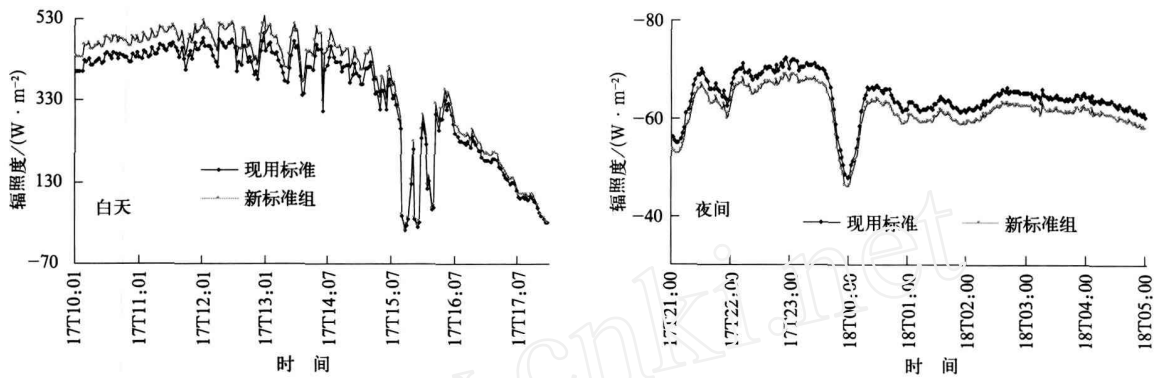


图4 2004年8月17—18日014号净全辐射表辐照度

Fig. 4 Irradiance of net pyrradiometer No. 014 on 17—18 Aug 2004

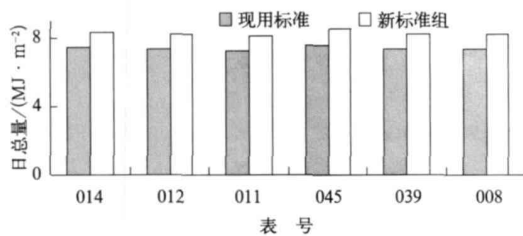


图5 2004年8月17日净全辐射日总量

Fig. 5 Total solar irradiance of net pyrradiometers on 17 Aug 2004

### 参考文献

- [1] 中国气象局. 气象辐射观测方法. 北京: 气象出版社, 1996.
- [2] 中国气象局. 地面气象观测规范. 北京: 气象出版社, 2003.
- [3] 世界气象组织. 气象仪器和观测方法指南(第6版). WMO-No. 8, 1996.
- [4] 王炳忠. 太阳辐射能的测量与标准. 北京: 科学出版社, 1993.
- [5] 莫月琴, 杨云. 净全辐射表性能的测试研究. 太阳能学报, 1998, 19(4): 453-456.
- [6] 王炳忠. 关于净全辐射表的长波灵敏度检定方法. 太阳能学报, 1995, 16(4): 432-437.
- [7] 王炳忠, 杨云. 净全辐射表全波灵敏度的校准. 太阳能学报, 1996, 17(4): 396-399.
- [8] WMO CIMO. Abridged Final Report of the Eleventh Session, WMO-No. 807, 1994.
- [9] McArthur L J B. World Climate Research Programme Baseline Surface Radiation Network, Version 2. 1. 2004.
- [10] 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.
- [11] 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(8): 429-435.
- [12] 杨云, 吕文华, 王冬. 净全辐射表检定规程(JJG 925-97). 北京: 中国计量出版社, 1998.
- [13] Lu W H, Yang Y. Study on the Calibration of Net Pyrradiometer. WMO/ TD No. 1123 CIMO (TECO-2002), 2002.
- [14] 弗勒利希 C, 伦敦 J. 世界气候研究计划-辐射仪器和测量指导手册. 北京: 气象出版社, 1991.
- [15] 吕文华, 莫月琴, 杨云. 太阳模拟器在辐射仪器检测中的应用. 应用气象学报, 2001, 12(2): 196-201.
- [16] 王炳忠. 总日射表的热稳定时间. 应用气象学报, 1992, 3(增刊): 124-128.

### 3 试验结论

1) 确定了CN-11型净全辐射表的灵敏度值,即全波灵敏度(白天)与长波灵敏度值(夜间)。原CN-11的灵敏度值是日间和夜间的平均值,这是不科学的,给测量结果带来了较大误差。

2) 利用两台标准长波辐射表和两台标准短波辐射表作为净全辐射标准器组检定的净全辐射表,其灵敏度检定结果的随机误差平均值大大减小。

3) 通过上述数据对比分析,使用新的标准器组检定的辐射表,其不确定度大大降低,白天降低9.2%,夜间降低5.2%。

经试验证明,新标准器组检定辐射表观测的净全辐射资料更接近真值。中国气象局于2007年1月1日正式使用两台长波辐射表和两台短波辐射表作为净全辐射标准器组。

## Comparisons of Two Calibration Methods for the Net Pyrradiometer

Yang Yun Lü Wenhua Fu Xigui Wang Dong Ding Lei

(*Atmospheric Observation Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081*)

### Abstract

China doesn't conduct operational observations of net radiation until the 1990s, when the remote detection for radiation is applied. Temporary reference standard for the net pyrradiometers is based on 3 CN-11 type net pyrradiometers which are imported from Japan in 1980. The structures of CN-11 net pyrradiometers and homemade pyrradiometers are of the same. The inductive parts consist of the thermopile and two black inductive surfaces. The black inductive surface can receive the whole wave-band radiation with the wavelength 0.3—100  $\mu\text{m}$ . The upper inductive surface receives the whole radiation from the sky and the lower surface receives the radiation from the earth surface. The net pyrradiometer is more complex than other radiometers because of two inductive surfaces and the broad range of received radiation. To stop wind and protect the inductive surface, a polyvinyl film cover is installed. But the measuring uncertainty is increased by it because the film cover is difficult to clean and keep sealed, while it gets distorted and aging easily.

According to the suggestions of WMO, two pyrgeometers (CG4) and two pyranometers (PSP) are used together as the new standard group. Under different environment conditions, six working net pyrradiometers are calibrated using four components method as well as the CN-11 type pyrradiometer standard group and the results are analyzed. Experiments are conducted to provide scientific basis for the updating of standard group, through which the relationship between the new standard group and the old standard group in the calibration environment are found out. The random error of the results using the new standard group is calculated. Analysis suggests the measuring accuracy can be improved 9.2% than before in daytime and 5.2% at night after using the new standard group. The data of the net pyrradiometers calibrated by the new standard group prove to be closer to the true value.

In September 2005, two CG4 type pyrgeometers are traced to the infrared radiation standard of World Radiation Center (WRC). The new net pyrradiometer calibration regulation is established in 2006. China Meteorological Administration has taken the combination of the two pyrgeometers (CG4) and two pyranometers (PSP) as the formal standard group of net pyrradiometers since 1 January 2007. It is proved that using the new standard group could ensure the transfer of the radiation value reliable and raise the measuring accuracy for net radiation in China.

**Key words:** net radiation; standard group; sensitivity; uncertainty