

净辐射表的设计与评价

L. J. Fritschen C. L. Fritschen

1 引言

在用鲍恩比能量平衡法计算显热和潜热通量中以及其它应用中,净辐射是一个重要数据。许多研究人员对各种不同类型的净辐射表测得的净辐射进行比较,得出了不同的结果(Kanemasu等,1990)。最引人注目的是夜间值的差异。单层薄的半球罩辐射表往往显示出相当其它类型辐射表大约两倍的向外发射的辐射。然而比较显著的差异发生在白天。单层薄罩辐射表的信号与其它类型辐射表信号给出不同的曲线,曲线变化与每天的风速和温度有关。

这些观察结果促使人们进行更多的室内外试验,以及对各种类型的净辐射表进行校准。本文将讨论:(1)校准程序;(2)各种类型净辐射表在长、短波范围内的校准结果;(3)在恒定的辐射环境中净辐射表的风速效应;(4)净辐射表的数学模式。

2 必要性及理想的特性

净辐射表有两种主要类型,即通风与不通风型。我们的讨论仅限于不通风型。现在有两种可用的不通风型净辐射表,即需要加压的薄半球罩辐射表和厚的或叫做自成形成半球罩辐射表。为了免去薄膜罩辐射表用泵加压和用带气流调节阀的气缸加压,首次采用了自成形成半球罩辐射表。这就促使了远距离使用净辐射表,并减少对仪器的要求。

净辐射表必须具备的性能包括:长、短波灵敏度相等;长期稳定的校准系数;温度系数小;风速效应小。涉及到使用方便的理想特性包括:半球罩更换;加压要求;干燥剂维护;仪

器水平调节;信号大小;电力消耗以及半球罩上露水或凝结的发生。

3 校准程序

3.1 短波校准

这里将阐述两种短波校准方法。第一种是使用标准总辐射表或直接日射表的遮光法,推荐使用直接辐射表,因为它总是暴露在太阳光下。总辐射表则必须交替被遮光和不遮光。这一遮光周期应足够长,以便使仪器达到平衡(约15分钟)。净辐射表(高于地面至少1米)则应在相同的时间被遮光与不遮光。必须确保天空只有一小部分被遮光板遮住,并且遮光板不会在净辐射表的下面遮出一大块阴影。距仪器1.5米远的一个14厘米圆盘通常可遮住仪器15分钟。从仪器有影子的一侧调整阴影。另外,操作人员不要在仪器有太阳光的一面走动,因为仪器对操作人员的影子有响应。

应对总辐射表与净辐射表的信号进行频繁的采样(10—20秒),并把信号做1分钟平均。为了确定仪器是否达到平衡,影子的位置是否合适,计算1分钟内的标准偏差是合理的。应取得几次遮光周期的数据。

图1给出由遮光法校准得到的数据和校准因子。这些信号采样为10秒间隔,取1分钟平均值。净辐射表的校准因子是总辐射表(遮光与不遮光)通量密度的变化除以净辐射表(遮光与不遮光)mV信号的变化,或直接辐射表(订正到水平面)的通量密度除以净辐射表(遮光与不遮光)mV信号的变化。两个净辐射表校准因子的每分钟计算结果(图1上部)说明由于仪器的时间常数、变化的辐射

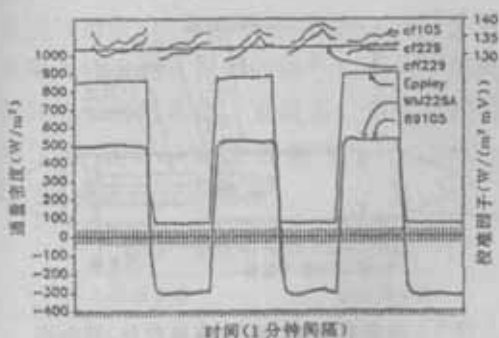


图1 遮光法校准净辐射表。左标尺是仪器的通量密度,右标尺是校准因子

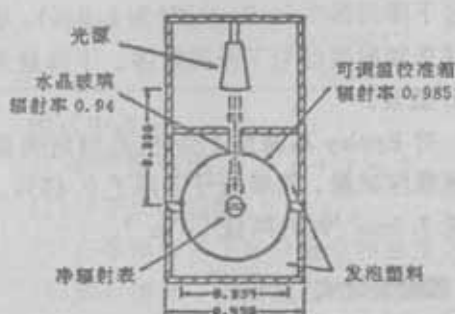


图2 长、短波校准箱剖面图。以米为单位

量以及风速引起的变率。对这些校准因子做5或10分钟平均不能消除全部变率。然而,调整每个信号(总辐射、散射辐射和净辐射表的遮光与不遮光信号)的时间函数可减小这种变率。为了求出差异,在给定的时间段上求解这些函数可得到一致的校准因子(平均值的 $\pm 0.2\%$)(图1 cff229的直线段)。

虽然这一校准程序被称为短波校准,但从图1可明显看出,净辐射表也受到一个大的反向净长波辐射,视下垫面情况,其变化范围从50到 150Wm^{-2} 。如果仪器长波和短波的灵敏度不同,校准因子将是无效的。

因为遮光法利用了自然阳光和自然对流,所以这种校准方法比较好,但该方法需要在完全晴朗的天空条件下,取太阳正午前后大约三小时的数据。有些地方很少有这种晴朗的天空条件,因而还要使用其它校准方法。

第二种校准方法是将被校准仪器与一个传递标准净辐射表放在一起,高于均匀表面约1米,比较周期为24小时。传递标准应该用遮光法校准。校准因子由线性回归法导出。

第二种方法的一种改进可以在实验室的校准箱(图2)里完成,用一个灯泡作为短波辐射源和稳定的净长波辐射场。这种方法可在30分钟内得到可靠的及可重复的校准系数,但传递标准与被校准仪器必须结构相同。

3.2 长波校准

净辐射表的长波校准比短波校准更困难。净辐射表必须放在两个具有稳定的、已知辐射量的大平面之间,大平面则需大的空间。半球不需要这么大的空间,从视角因子考虑,也接近大平面。已使用的校准箱有两种构造:(1)如图2所示;(2)用恒温中心板分隔恒温半球,中心板上有足够大的中心孔,以便能把净辐射表的挡风罩伸进半球。中心板减小腔内的对流,尤其是热半球在上面时。

长波校准因子因腔体的构造和热表面位置而不同。与热半球在上面的情况比较,热半球在下面时长波校准系数增加了7.5%。另外,将没有中心板和热半球在上面的情况与有中心板和热半球在下面的情况比较,后者的长波校准系数平均增加60%。事实上,地球通常要比天空暖和。此外,若有点风,净辐射表的两个半球罩也有基本相同的温度。因此我们得出结论,合理的长波校准程序是用没有中心板的校准箱,而且热表面在下面。具有这种结构的箱体中有对流存在。

水槽达到平衡后,校准需要30—60分钟。为得到可重复的校准因子,应在水槽的至少一个冷热循环上对信号求平均(大约10分钟)。

4 辐射表设计试验

4.1 长、短波校准

用上面的校准程序,通过在传感器的接收面上放一个白片,就能把净辐射表设计成长、短波辐射具有相等的灵敏度,为确定合适

的白片尺寸,至少需要反复三次长、短波校准(用遮光法)。

我们对几种结构的净辐射表进行了长、短波辐射校准。A, B, D, E 和 F 型(表 1)使用相同的框架、传感器和半球罩。试验结果表明 A, B 型(没有白片)的长、短波灵敏度相差最大。虽然 D, E 和 F 型有相等的长、短波辐射,还是选择了 F 型,这是因为室外实验表明 F 型表对变化的辐射量响应较快,且夜间有一个较大的负值净辐射。

表 1 各种仪器在长、短波辐射下的校准系数和风速效应

类型	A	B	C*	D	E	F
外层罩	厚	厚	薄	厚	厚	厚
内层罩	薄	无	无	无	无	无
接收器直径(mm)	25	25	50	29	39	29
外环表面	黑	黑	无	黑	白	白
短波辐射 $W_{m^{-2}} \cdot V^{-1}$	11.5	10.6	23.6	10.2	10.8	13.0
长波辐射 $W_{m^{-2}} \cdot V^{-1}$	15.8	14.4	19.9	13.2	10.8	13.0
长、短波校准因子的平均差值	31.1	31.3	17.0	0.0	0.0	0.0
风速 ms^{-1}	信号减少%					
1.5	1.9	2.5	3.0			2.4
4.6	2.7	3.8	2.8			3.7
7.5	2.9	4.2	2.9	4.3	4.3	4.0

* C 是 Swisstecco S-1 型净辐射表

F 型仪器(REBS Q*6)的设计细节包括:(1)与框架绝热的热电堆;(2)白色保护环;(3)上下两半球间的通风孔;(4)自成形半球罩。

4.2 净辐射表的风速效应

对不同类型净辐射表在不同天气状况下进行的室外测量加以比较,结果表明灵敏度随风速和气温而变化。

这一效应是在风速实验箱内进行研究的(图 3)。

在稳定的辐射环境中,使各种净辐射表都处于同一风速范围内。列于表 1 下面部分的结果表明,相对于零风速来讲,随着风速的

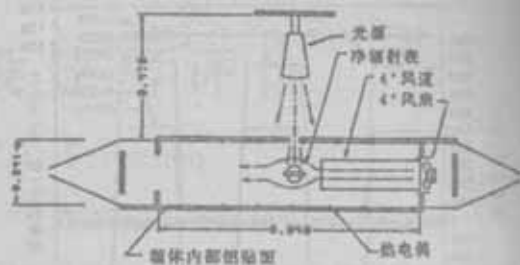


图 3 风速实验箱,除注有单位外,其余均以米为单位

增加,各种净辐射表的信号减小。信号减小被认为主要是由于对流热损失造成的。A 型表信号下降得最少($7.5ms^{-1}$ 时为 2.9%)。单层半球罩辐射表信号下降得较多。下降最多的是 B 型表。

对 Eppley 高精度 PSP 型总辐射表做了风速效应试验。结果信号下降了 0.45%。或者说 $7.5ms^{-1}$ 时约降低 $5Wm^{-2}$ 。

5 辐射表模式

建立了净辐射表传感器上、下表面的模式,它有助于设计和说明各分量的大小。净辐射表上、下感应面收入与支出的模式能量分量包括:

$\alpha_s^* \alpha_s^* \tau_s^* K \downarrow$ 通过黑色表面对短波辐射的吸收,

$\alpha_w^* \alpha_w^* \tau_s^* K \downarrow$ 通过白色表面对短波辐射的吸收,

$\alpha_s^* \tau_s^* \epsilon_s^* \sigma T_s^4$ 通过半球的长波辐射吸收,

$\alpha_s^* \epsilon_s^* \sigma T_s^4$ 通过半球罩的长波辐射吸收,

$\epsilon_s^* \sigma T_s^4$ 通过感应面发射的辐射,

$\alpha_s^* \rho_s^* \epsilon_s^* \sigma T_s^4$ 通过传感器对半球罩反射的辐射吸收,

$h^* (T_s - T_a), k^* (T_s - T_a) / l$ 通过传感器的对流热转换、热传导。

用于模式的参数值列于表 2。大部分数值是测出或计算出的。通过半球罩的长波透

射量由一个视为黑体腔的 Linke—Fuessner 直接日射表(没有滤光片)测出。透射是用半球罩遮住透光孔得到的信号与没有半球罩时得到的信号的比值。直接辐射表与半球罩都处于室温下。短波透射由一个 Beckman DK24 光谱光度计获得。

表 2 模式中使用的参数值

聚乙烯罩参数			传感器参数		
τ_s	短波透射	0.69	α_s	短波吸收白漆	0.20
τ_l	长波透射	0.90	α_l	长波吸收黑漆	0.96
ρ_s	反射率	0.03	ϵ	发射率	0.95
ϵ_s	发射率	0.07	K	热传导率 $W(mC)^{-1}$	0.928
			l	厚度, m	0.0091

模式中假定:

- (1)对于塑料膜, $\alpha + \rho + \tau = 1$ 。
- (2)对于长波辐射, $\alpha_l = \epsilon_s$ 。
- (3)在等温条件下各分量总和必须为零。
- (4)所有情况下各分量总和应为零。

用来评价模式的数据是用一个单层厚半球罩净辐射表(REBS Q*6)在校准箱内得到的,此净辐射表有 0.05 毫米的镍镭-康铜热电偶附于传感器每一表面、核心、半球罩、半球罩内空间和校准箱内。对辐射表的每一表面得到 8 组数据。表 3 第 1 列的一组数据是在没有短波辐射的等温条件下得到的。在计算中用到校准箱两半球、辐射表上、下接收面和半球罩的温度。

表 3 第 1 列中,调整了传感器的发射率,以便上、下表面的平衡近似为零。还调整了对流换热系数,以便传感器上、下表面各分量的平衡总和近似为零。考虑到所含分量的数目,分量的平衡相当好。最差的情况是第 2 列(37 和 $-29 Wm^{-2}$);所占比例小于所有分量的 2%。其余几列中的平衡小于该列分量的 1%。

半球罩内对流换热的量非常大,大约等于通过传感器的热传导。在高的净辐射条件下,两分量都在 100 和 $200 Wm^{-2}$ 之间。但与

以前的实验相比,内部通风孔降低了两半球罩间温度的差异。上、下表面对流热损失的差值仅为平均值的 22%。对流热损失的大小将随着外界风速而变化(见表 1)。

塑料半球罩发射和反射的辐射很小。塑料半球罩反射辐射的吸收约为传感器发射辐射的 2%,半球罩的发射大约为入射长波辐射的 10%。

6 概括与结论

根据长、短波灵敏度,及环境风对信号的影响,对净辐射表的设计进行了评估。在实验的各设计方案中,仪器具有最佳整体性能的设计特点包括:(1)长、短波辐射的灵敏度相等;(2)与框架绝热的热电堆;(3)白色保护环;(4)用于上、下两半球间内部循环的通气孔;(5)自成形半球罩。另外,半球罩有 O 形密封环,为便于调水平,采用球形连接。在表的支架管里装入足够的干燥剂。通过在接收表面加以白片使长、短波灵敏度相等。用于两半球间内部循环的通风孔减小了两半球间的温度差异。白色保护环用于减小内部热负荷。在高辐射量情况下,净辐射表信号在风速为 $1.5, 4.6$ 和 $7.5 ms^{-1}$ 时下降 2.5, 3.7 和 4.3%。

净辐射表的评价在一定程度上依赖于校准程序,错误的校准程序将导致错误的结果。如果遮光循环时间能够使仪器达到平衡,用遮光法进行短波校准是有效的。校准因子的计算要求调整四个信号(总辐射、散射辐射、遮光与不遮光的净辐射表信号)中每一个的时间函数,使它们一致。这一点是必要的,因为一种趋势可能存在于一个或者更多的信号中。应用这些函数计算的校准因子与平均值的一致程度在 $\pm 0.2\%$ 之内。遮光法要求在非常晴朗的天空条件下,太阳正午前后大约 3 小时内进行。

用遮光法校准的标准净辐射表可用于在实验室校准箱里校准其它同类型仪器。实验室校准能用较少的时间得到高精度的校准因

表3 厚半球罩净辐射表上、下传感器模式能量的平衡分量, 单位 Wm^{-2}

上腔体	406	403	402	404	403	405	405	404
下腔体	407	518	402	403	515	514	519	403
光源			579	720	578	720	715	587
下传感器								
$a_1^* \tau_1^* \epsilon_1^* \sigma T_1^4$	359	457	354	356	454	453	458	356
$a_1^* \epsilon_1^* \sigma T_1^4$	29	33	30	30	35	35	35	30
$\epsilon_1^* \sigma T_1^4$	-395	-444	-471	-491	-535	-551	-555	-476
$a_1^* \rho_1^* \epsilon_1^* \sigma T_1^4$	10	11	12	12	13	14	14	12
$h^* (T_1 - T_d)$	-1	17	-123	-149	-108	-128	-128	-127
$k^* (T_1 - T_d) / l$	0	-37	180	224	149	183	182	183
平衡	1	37	-17	-18	8	6	6	-23
上传感器								
$a_2^* a_2^* \tau_2^* K \downarrow$	0	0	437	544	437	544	540	444
$a_2^* a_2^* \tau_2^* K \downarrow$	0	0	14	17	14	17	17	14
$a_2^* \tau_2^* \epsilon_2^* \sigma T_2^4$	359	344	344	346	345	347	346	345
$a_2^* \epsilon_2^* \sigma T_2^4$	29	31	32	33	35	36	36	32
$\epsilon_2^* \sigma T_2^4$	-395	-437	-507	-538	-568	-593	-597	-513
$a_2^* \rho_2^* \epsilon_2^* \sigma T_2^4$	10	11	13	13	14	15	15	13
$h^* (T_2 - T_d)$	-1	-16	-131	-162	-162	-177	-180	-138
$k^* (T_2 - T_d) / l$	0	37	-180	-224	-149	-183	-182	-183
平衡	1	-29	21	28	-34	6	-5	13

子。

长波校准更困难,我们介绍了一种使用相当简便的校准箱,水槽温度达到平衡后,长波校准需要 30—60 分钟。

建立了传感器上、下表面能量收入与支出的模式,它有助于净辐射表的设计和说明各分量的大小。用 8 组数据对该模式进行了试验。

对流换热的量值与通过传感器的热传导的量值大致相等,在高的净辐射条件下,两分

量在 $100-200Wm^{-2}$ 之间。与以前的实验比较,内部通风孔减小了两半球之间的温度差异。对流热损失的量值将随着环境风速而变化。塑料半球罩发射和反射的辐射很小。塑料半球罩反射辐射的吸收是传感器发射辐射的 2%,塑料半球罩的发射约为入射长波辐射的 10%。

莫月琴译自《The Symposium on Meteorological Observations and Instrumentation》p. 113—117, 1991. 吕文华校