

自然表面比辐射率测定方法的 理论分析和实验*

江 灏 钟 强

(中国科学院兰州高原大气物理研究所, 兰州 730000)

提 要

本文对野外现场测定自然表面比辐射率的方法进行了理论分析和观测实验. 结果表明: 文献[1]的测量方法在估计比辐射率时偏高而使表面温度估计偏低, 对原方法改进后可得到很好的改善; 实验结果与理论计算值有很好的-致性, 以部分计算值代替实测值, 可减少实测项目, 使观测方案进一步简化且仍保持良好的精度. 应用改进后的方法, 我们在“黑河试验”现场测定了几种不同下垫面的比辐射率.

关键词: 自然表面; 比辐射率; 红外辐射表.

一、引 言

地表比辐射率是地表辐射物理特性的一个重要参数, 在以辐射方法测量地表温度中起重要作用. 由于各种自然表面比辐射率变化较大^[2], 因此对各种不同自然表面必须分别测定其比辐射率, 方能保证温度计算的精度. 所以, 野外现场测定表面比辐射率, 有重要的实用意义. 文献[1]提出了一种以常用的精密红外辐射表(PIR)现场测定地表比辐射率的简单方法, 为野外现场测定工作进行了有益的探索, 本文将对此作进一步的分析和探讨.

二、关于方法的理论分析

关于文献[1]的测量方法(以下简称“原方法”)如图1所示. 方法的要点在于测量地表向上辐射时考虑环境辐射在地表的反射, 测量中改变环境辐射, 在表面温度不变的假设下根据辐射测量值的变化计算表面比辐射率. 其计算方法如下:

$$R_1 = \varepsilon \sigma T^4 + (1 - \varepsilon)W_1, \quad (1)$$

$$R_2 = \varepsilon \sigma T^4 + (1 - \varepsilon)W_2, \quad (2)$$

由(1)、(2)式可得

$$\varepsilon = 1 - \frac{R_2 - R_1}{W_2 - W_1}. \quad (3)$$

1991年1月22日收到, 5月18日收到修改稿.

* 本文是国家自然科学基金重大项目“黑河地区地气相互作用观测实验研究”的成果之一.

由(1)式可得表面温度的计算式

$$T = \left(\frac{R_1 - (1 - \varepsilon)W_1}{\varepsilon \sigma} \right)^{\frac{1}{4}}, \quad (4)$$

其中 T 为表面温度, ε 为表面比辐射率, R_1 为环境辐射 W_1 时的表面向上辐射, R_2 为环境辐射 W_2 时的表面向上辐射, σ 为斯蒂芬 — 玻尔兹曼常数. 由于测量在夜间进行, 这里所讨论的辐射都只限于红外热辐射的范围. (3) 式成立的条件是 ε 与波长无关, 即灰体假设^[3, 4]. 依照文献[1], 本文亦采用这一假设.

现在就图 1 对原方法进行定性分析. 为简明起见, 以下讨论均以地面为例, 也可以推广到其它自然表面.

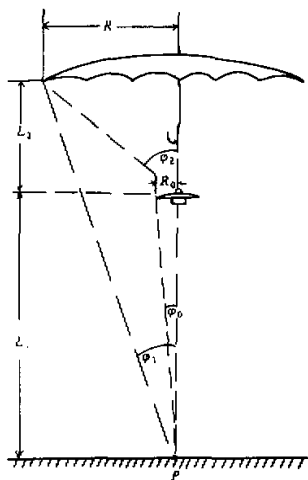


图 1 地表比辐射率测量方法示意图

由图 1 可见, 仪器架设在 L_1 高度, 在测 W_1 时, 无伞遮挡. 对于天空辐射, 在 L_1 高度和在地面测量无多大差别. 但是考虑到在测量 R_1 时, 地面所对的不仅是天空, 仪器外壳的热辐射也构成了环境辐射的一部分. 因此, 地面 P 点所受的环境辐射 W_1' 与在 L_1 高度所测的 W_1 有所不同. 在大多数情况下, 仪器的热辐射大于天空辐射, 因此 $W_1' > W_1$. 这是第一个误差源.

当测量改变了的环境辐射及由此而改变了的表面向上辐射时, 通常采用遮挡的办法, 在大部分情况下, 遮挡物的热辐射大于天空辐射, 因而遮挡产生的环境辐射的改变总是正的, 即遮挡后环境辐射增加. 由图 1 可见, 当遮挡物(以下均以伞为例)遮挡后, 原方法是在 L_1 高度测出改变后的环境辐射 W_2 , 而地面 P 点所受的环境辐射 W_2' 则与此不同. 伞对 L_1 高度的辐射表的遮挡天顶角 φ_2 和对地面 P 点的遮挡天顶角 φ_1 是不同的, 而它的辐射作用同遮挡立体角有关, 因而也同天顶角有关. 由图 1 可以看出, $\varphi_1 < \varphi_2$, 所以 P 点所受环境辐射将小于 L_1 高度的测值, 即 $W_2' < W_2$. 这是第二个误差源.

另外由于测量现场的选择、时间和天气条件、操作的差异等还会引起一些误差. 它们有的量级较小可以不考虑, 有些有很大的不确定性, 无法仔细讨论, 只能靠仔细制定观测方案和精心操作来避免. 根据(3)式和上述分析, 二项主要误差对 ε 产生的影响是使对 ε 的估计偏大. 对于 P 点以外的地面各点, 随着距 P 点的距离变大, 伞面所张的立体角减小, 地面所受的影响亦减小, 其环境辐射将比 W_2' 更小, 因此实际上地面各点的积分的环境辐射也比 W_2' 更小些. 本文仅以 P 点讨论, 不考虑上述积分差异.

现在对上述二项主要误差作定量分析.

对第一项误差, 设仪器外圆半径为 R_0 , 它的热辐射为 W_3 , 且分布均匀. 天空背景辐射为 W_1 , 仪器对 P 点的遮挡天顶角为 φ_0 , 立体角为 ω_0 . 根据辐射传输理论^[5], 仪器壳的辐亮度为

$$I_3 = \frac{W_3}{\pi}. \quad (5)$$

天空的辐亮度为

$$I_1 = \frac{W_1}{\pi}. \quad (6)$$

P 点所受辐射 W_1' 为仪器和天空的辐亮度垂直分量在各自的辐射立体角内的积分之和:

$$W_1' = \int_0^{\omega_0} I_3 \cos \varphi d\omega + \int_{\omega_0}^{2\pi} I_1 \cos \varphi d\omega, \quad (7)$$

式中 φ 为辐射方向与接受面垂直方向的夹角, 在这里就是天顶角. 由于仪器的中心垂线通过 P 点, 所以其辐射立体角可由天顶角定义

$$\omega = 2\pi(1 - \cos \varphi), \quad (8)$$

$$d\omega = 2\pi \sin \varphi d\varphi. \quad (9)$$

以(9)式代入(7)式可得

$$W_1' = 2\pi \int_0^{\varphi_0} I_3 \cos \varphi \sin \varphi d\varphi + 2\pi \int_{\varphi_0}^{\frac{\pi}{2}} I_1 \cos \varphi \sin \varphi d\varphi. \quad (10)$$

由于辐亮度与积分无关可从积分内提出, 再以(5)、(6)式代入, 则(10)式变为

$$W_1' = 2W_3 \int_0^{\varphi_0} \cos \varphi \sin \varphi d\varphi + 2W_1 \int_{\varphi_0}^{\frac{\pi}{2}} \cos \varphi \sin \varphi d\varphi. \quad (11)$$

积分后可得

$$W_1' = \sin^2 \varphi_0 (W_3 - W_1) + W_1. \quad (12)$$

这就是天顶有遮挡时的环境辐射的计算公式. 由图 1 可知 φ 的计算公式为

$$\varphi_0 = \arctg \frac{R_0}{L_1}. \quad (13)$$

这样, 考虑这一项后同原方法在 L_1 高度所测的 W_1 之差为

$$E_1 = W_1' - W_1 = \sin^2 \varphi_0 (W_3 - W_1). \quad (14)$$

对于第二项误差, 据图 1 可设: 伞距仪器高度为 L_2 , 伞的遮挡半径为 R , 伞面热辐射为 W_3 . 由于伞和仪器在空气中暴露时间足够长, 可以足够精确地认为两者表面为具有相同的温度进而具有相同的热辐射, 所以这里伞面热辐射使用与前面仪器热辐射相同的符号. 遮挡后环境辐射在 L_1 高度为 W_2 , 在 P 点为 W_2' . 伞的遮挡天顶角对仪器为 φ_2 , 对 P 点为 φ_1 . 类似对第一项的分析, 将对应参数代入(12)式可得

$$W_2 = \sin^2 \varphi_2 (W_3 - W_1) + W_1, \quad (15)$$

$$\varphi_2 = \arctg \frac{R}{L_2}, \quad (16)$$

$$W_2' = \sin^2 \varphi_1 (W_3 - W_1) + W_1, \quad (17)$$

$$\varphi_1 = \arctg \left(\frac{R}{L_1 + L_2} \right). \quad (18)$$

两者之差为

$$E_2 = W_2 - W_2' = (\sin^2 \varphi_2 - \sin^2 \varphi_1)(W_3 - W_1). \quad (19)$$

由(14)、(19)式可得上述二项误差之比

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{\sin^2 \varphi_0}{\sin^2 \varphi_2 - \sin^2 \varphi_1}. \quad (20)$$

由于 $\sin^2 \varphi_0 \ll \sin^2 \varphi_2 - \sin^2 \varphi_1$, 所以有 $E_1/E_2 \ll 1$, 或 $E_1 \ll E_2$, 即第一项误差远小于第二项误差.

现在分析上述二项误差对 ε 的影响. 将不同的环境辐射值代入(3)式, 可得到不同的 ε 值. 对于第一项误差, 以 W_1 和 W_1' 分别代入(3)式, 其差值为

$$\Delta \varepsilon_1 = \frac{R_2 - R_1}{W_2' - W_1'} - \frac{R_2 - R_1}{W_2' - W_1}, \quad (21)$$

对于第二项误差, 以 W_2 和 W_2' 分别代入(3)式, 其差值为

$$\Delta \varepsilon_2 = \frac{R_2 - R_1}{W_2' - W_1'} - \frac{R_2 - R_1}{W_2 - W_1}, \quad (22)$$

由于 $W_1' > W_1$, 所以(21)式右边第一项大于第二项, $\Delta \varepsilon_1$ 为正值, 表明由于第一项误差使对 ε 的估计偏大. 同理, 对于(22)式, 由于 $W_2 > W_2'$, $\Delta \varepsilon_2$ 为正值, 表明第二项误差对 ε 的影响也可使估计值偏大. 因此, 两者共同作用将使对 ε 的估计有明显偏大.

现在分析一下观测条件对结果的影响. 在 $\varepsilon = 0.95$ 的情况下, 若要求 $R_2 - R_1 \geq 1.0W/m^2$, 根据(3)式必须有 $W_2' - W_1 > 20W/m^2$, 在 $W_3 - W_1 = 300W/m^2$, $L_1 = 1.5m$, $L_2 = 0.4m$ 条件下根据(17)、(18)式必须满足 $R > 0.51m$. 当要求 $R_2 - R_1 > 5W/m^2$ 时则要求 $W_2' - W_1 > 100W/m^2$, $R > 1.34m$; 一般雨伞无法满足要求.

以具体数值代入上述各式, 可以求出各项误差值以及对 ε 的影响. 设观测的典型条件为: $R_2 - R_1 = 2W/m^2$, $W_1 = 200W/m^2$, $W_3 = 500W/m^2$, $L_1 = 1.5m$, $L_2 = 0.4m$, $R = 0.5m$, $R_0 = 0.1m$, 代入(14)、(19)式可得 $E_1 = 1.3W/m^2$, $E_2 = 163.5W/m^2$, 代入(21)、(22)式可得 $\Delta \varepsilon_1 = 0.007$, $\Delta \varepsilon_2 = 0.099$. 可见由于辐射表观测位置的差别可使 W_1 偏大而使 ε 的估计偏大近 0.01, 使 W_2 偏大而使 ε 的估计偏大近 0.10. 在 ε 为 0.90 时由(4)式估计的表面温度偏低约 $5.0^\circ C$.

三、实际观测试验

为验证上述理论分析的结果, 进行了一次观测实验. 实验的条件为春季夜晚, 楼顶平台, $L_1 = 1.0m$, $L_2 = 0.4m$, $R = 0.46m$, $R_0 = 0.1m$. 实验中除按图(1)在 L_1 高度安置了一台 PIR 表外, 还在图中 P 点放置了一台 PIR 表, 用以实测 W_1' , W_2' 的情况. 实测结果 $W_1 = 310.4W/m^2$, $W_1' = 310.5W/m^2$, $W_3 = 400.1W/m^2$, $W_2 = 361.8W/m^2$, $W_2' = 326.9W/m^2$, $R_1 = 398.6W/m^2$, $R_2 = 399.8W/m^2$. 表 1 为各项实

验及计算结果的比较。表中“改进方法”一栏为考虑了二项主要误差后在 P 点实测的 W_1' 、 W_2' 值以及据此而计算出的 ε 值。“计算值”一栏为根据实验条件由(12)、(13)式和 (17)、(18)式计算得到的 W_1' 和 W_2' 以及由此计算的 ε 和 T 。

表 1 实验及计算结果比较

	$W_1(W/m^2)$	$W_2(W/m^2)$	ε	$T(^{\circ}C)$
原方法	310.4	361.8	0.977	16.8
改进方法	310.5	326.9	0.927	17.7
误差	-0.1	34.9	0.050	0.9
计算值	310.9	326.4	0.923	17.7
等效黑体			1.000	16.4

由表中可以看出，对第一项误差，实测的结果很小，远小于第二项误差，这与理论分析中 $E_1 \ll E_2$ 一致，表明这一项误差的确是不明显的，但却是可以分辨的，因此在更高精度的测量时应该考虑。对于第二项误差，观测反映得很清楚。表中看出 W_2 的误差可近 $35W/m^2$ ，引起 ε 的误差为 0.050，造成温度估计的误差可近 $1^{\circ}C$ 。由于实验在春季进行，气温低，低空有逆温，所以 W_1 不是很小， W_3 也不是很大，它们的差值尚不足 $100W/m^2$ ，而上节中典型条件值可达 $300W/m^2$ ，所以本次实验给出的误差也比上节典型条件下的误差的理论估算值要小些。

由表中还可以看出，由(17)、(18)式计算得到的 W_2' 与实测的 W_2' 非常接近，只差 $0.5W/m^2$ ，由此引起的 ε 的偏差仅为 0.004，而表面温度的偏差则小于 $0.1^{\circ}C$ 。这表明理论分析的结果与实际过程是很一致的。同时表明，以 W_2' 的计算值代替实测，对计算 ε 的影响较小，对表面温度的影响更小，结果仍可保持较好的精度。

作为“黑河地区地—气相互作用观测试验研究”(HEIFE)的一部分，我们于 1990 年 12 月在临泽、一工程、化音三个观测子站进行了地表比辐射率的野外现场实测。观测在各子站观测场附近同类下垫面上进行，采用双 PIR 表测量方法，仪器架设高度为 $1.06 \sim 1.23m$ 。每个点测 4 ~ 6 次，取平均值。结果见表 2。与有关的工作结果^[2,6]相比，同类型下垫面的测量结果是很接近的。

表 2 HEIFE 各子站的实测结果

站 名	临 泽	临 泽	化 音	一工程
下垫面类型	裸露农田	水泥地	戈壁	沙漠
比辐射率	0.930	0.906	0.920	0.921

四、有关改进观测方案的讨论

- 1. 由上述理论分析和实试验证，对原观测方案可作进一步改进，例如可在图 1 中 P

点设第二台 PIR 辐射表, 实际观测环境辐射, 我们在实验和野外实测中就是采取这一方案. 这样, 再配合仔细的操作, 就可以取得较好的结果.

2. 由上述实验结果可知, W_2' 实测结果与理论计算很接近, 表明理论计算是有一定精度的. 因此可以简化观测方案, 而代之以部分的计算值. 例如在图1所示的观测中, 在保证操作准确的条件下, 可只在 L_1 高度设一台仪器, 测 R_1 和 R_2 . 另外再测 W_1 和 W_3 , 这些测量要求不是很高, 也很简单, 测 W_1 只需将仪器向上放在地上即可; 测 W_3 可将伞面降低至伞边低于仪器感应表面即可. 由(17)式计算 W_2' , 仍可获得一定的精度.

3. 在观测熟练, 操作快速准确的基础上, 观测方案还可以进一步简化. PIR 辐射表的观测方法是先测出表体与被测体之间的相对辐射, 再测出表体的热辐射, 两者相加便是被测体的热辐射. 当时间间隔很短时, 由于表体被设计成具有很大的热容量, 可以认为表体热辐射不变. 这样在观测时, 尤其在观测 R_1 , R_2 时, 只需测出其相对辐射值, 即测出遮挡前后的输出电压值, 取其差值经仪器常数换算后即为 $R_2 - R_1$ 值. 这样, 由于操作简单可进一步缩短操作时间, 提高精度.

五、小 结

1. 在测量环境辐射时, 仪器放置观测高度和放置在地面是不同的, 其差值较小, 但可以分辨, 在高精度测量时应考虑.

2. 在测量遮挡后的环境辐射时, 仪器位置的正确与否差别较大, 用原方法会产生较大的误差, 在典型条件下对 W_2 的估计偏大 160 W/m^2 以上, 对 ε 的估计偏大约 0.10, 对表面温度的估计偏低约 5°C .

3. 实验表明 W_2' 的理论计算值与实测值非常接近, 由计算值代替实测值对计算 ε 的影响很小, 对表面温度的影响更小. 实验中各项误差值也与理论计算值很接近, 比典型条件下要小.

4. 为了改进观测方案提高观测质量, 应在地面测点进行环境辐射的观测, 或根据观测条件以理论方法计算环境辐射, 实验表明两者都具有较好的效果.

致谢: 本所周晓平、左勇前、李新成、文军、吕兰芝、邹基玲等同志参加观测工作, 特此致谢.

参 考 文 献

- [1] 金一鐸, 1989, 自然表面比辐射率与表面温度, 气象学报, 第47卷, 第1期, 92—96.
- [2] Oke, T. R., 1978, *Boundary Layer Climates*, Halsted Press, 245—251.
- [3] Fuchs, M. and C. B. Tanner, 1968, Surface temperature measurements of bare soils, *J. Appl. Meteor.*, 7, 303—305.
- [4] Fuchs, M. and C. B. Tanner, 1966, Infrared thermometer of vegetation, *Agron. J.*, 58, 597—601.
- [5] Wallace, J. M., 1977, *Atmospheric Science*, Academic Press, 284—286.
- [6] Sellers, W. D., 1965, *Physical Climatology*, University of Chicago Press, 41—42.

