

利用全天空可见光图像反演天空辐亮度^{* 1}

霍娟 吕达仁

HUO Juan LÜ Daren

中国科学院大气物理研究所中层大气和全球环境探测重点实验室, 北京, 100029

Key Laboratory for Middle Atmosphere and Global Environment Observation, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

2008-11-03 收稿, 2008-12-19 改回.

Huo Juan, Lü Daren. 2010. A method to retrieve the radiance from all-sky visible images. *Acta Meteorologica Sinica*, 68(6): 800-807

Abstract The automatic ground-based all-sky imager developed by the Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences is able to obtain visible gray images of the sky radiance in red, green and blue channels. The paper introduces this all-sky imager system and its capabilities. Radiance, a key parameter for meteorological researches, is recorded as gray value by the all-sky imager and can not be used directly for meteorological study. In order to extract the radiance from all-sky images, this paper shows some necessary calibration experiments on the imager system. On the basis of the calibration results and the projection principles of the all-sky imager, an algorithm to retrieve the relative radiance from the all-sky images is then presented. Then using the images obtained from the all-sky imager and the radiance at 440 nm wavelength from the CIMEL instrument at Xianghe Observatory in Hebei province (39.75°N, 116.96°E), we make a intercomparison between the retrieval radiance and the measured one. The comparison results show that the retrieval algorithm is feasible. This work sets up a relationship between the radiance and the image data and it is useful for the image data to be made comparison with the numerical-simulation results and to be applied into numerical model simulation studies.

Key words All-sky, Visible imaging, Image, Radiance, Cloud

摘 要 由中国科学院大气物理研究所 LAGEO 实验室研制和开发的地基全天空成像仪, 可实现地基全天空自动化观测, 文中首先对全天空成像仪仪器及性能进行介绍。辐亮度是气象科学研究中基础而重要的气象要素, 而全天空成像仪记录的是可见光红、绿、蓝三波段辐射信息的灰度值图像, 因而无法直接应用到气象研究中。为能够从灰度值图像中获取天空辐亮度信息, 文中详细介绍了与亮度反演密切相关的几个重要标定实验, 包括几何标定、光学标定, 以标定参数为基础并结合全天空仪器成像原理提出了一个由可见光灰度图像反演相对天空辐亮度分布的算式算法。文中还利用大气物理研究所香河观测站 (39.75°N, 116.96°E) 同时观测的全天空成像仪以及 CIMEL 光度计所观测的天空辐亮度数据 (440 nm 波长), 对该反演算式进行检验和比对, 结果表明, 所提出的算法进行天空辐亮度分布反演可行, 该算法将灰度图像与天空辐亮度建立了联系, 有利于观测图像数据与数值模式模拟工作的相互对比和验证, 有利于观测图像数据在模式研究中的应用。

关键词 全天空, 可见光成像, 图像, 辐亮度, 云

中图法分类号 P412.14

1 引 言

大气辐射传输模式的研究是气象科学研究中的

重要方面。而对大气辐射传输模式的检验与验证工作需要实际天空状况辐射信息的测量 (Ellingson, et al, 1991; Knuteson, et al, 2004)。了解天空

* 资助课题: 国家自然科学基金项目 (40505006), 中国科学院知识创新工程领域前沿项目 (IAP07407)。

作者简介: 霍娟, 主要从事大气遥感与辐射研究。E-mail: huojuan@mail.iap.ac.cn

辐亮度分布信息是研究云在大气辐射传输中的作用(Frederick, et al, 1995), 了解气溶胶的辐射强迫效应(Kaufman, et al, 2002; 毛节泰等, 2005), 云与大气及气溶胶的相互作用(Albrecht, 1989), 以及进行卫星资料对比和验证(Chambers, et al, 2001; 赵凤生等, 2002)等方面的需要。目前天空辐亮度的测量技术已较高, 各类先进的观测仪器被应用于不同光谱范围的亮度测量(Knuteson, et al, 2004; Ellingson, et al, 1996), 但仅限于有限点或方向上的测量, 而完成全天空各方向的测量则较为困难。

世界气象组织最近一份报告中提到, 云在到达地球的紫外辐射影响中有非常重要的作用(Kerr, et al, 2003)。该报告亦指出, 全天空成像仪的出现为更好地了解这一特征, 即云对大气辐射的影响, 提供了潜在的可能方法。当前, 关于全天空成像仪的研制和开发工作在多个国家均有开展, 在过去近百年的试验和研究中取得了显著的成绩(McGuffie, et al, 1989)。目前比较典型的全天空 180° 视场的成像仪有美国加州大学圣狄亚分校研制的全天空成像仪(Whole Sky Imager, WSI)系列。它通过轮换使用滤光片直接测量多个窄波段的天空辐亮度信息, 并以此实现对天空云的检测以及云量估算等(Voss, et al, 1989; Kassianov, et al, 2005)。WSI 成像仪系列具有较好的环境控制装置以及良好的镜头滤光片组, 是一套性能较好但价格较昂贵的系统, 由此也限制了其商业推广和应用。现在应用较多且在大气科学界广为熟知的则是由 Yankee Environmental Systems, Inc(YES)研制和开发的全天空成像仪系统系列(Total Sky Images, TSI)(Pfister, et al, 2003)。该系统利用镜面反射原理, 结合 CCD 数字成像技术实现全天空 180° 视场的成像。TSI 系统实现了地基天空宏观自动化观测, 同时利用所获取的图像资料进行天空云的检测和识别, 分析云量, 并对云在大气辐射传输中的作用做了初步的分析工作(Long, et al, 2006)。

基于地基云宏观自动化观测的必要性, 中国科学院大气物理研究所 LAGEO 实验室自 2001 年起开展了地基全天空自动化观测系统的研制和开发工作。经过近 6 年的研究, 成功研制出一套可见光全天空成像仪自动化观测系统(All Sky Imager, ASI)。如前所述 WSI 能够提供较为精确的窄波段天空辐亮度数据, 而 TSI 以及 ASI 给出的是相对较

宽波段的彩色图像数据, 无法将该数据直接应用于大气辐射的相关研究中, 存在一定局限性。但相比 WSI 高昂的价格而言, ASI 成本较低, 同时具有相对 TSI 更高的图像分辨率(ASI 图像分辨率为 2272×1704 , TSI 图像分辨率为 352×288)。本文对 ASI 系统进行了简单介绍, 而后阐述了对该系统进行的系列光学及几何标定试验工作。利用标定结果并根据成像原理, 尝试在天空图像灰度值与天空辐亮度之间建立关系, 由图像灰度值反演天空亮度信息, 以改善 ASI 无法直接提供天空辐亮度的状况。相比当前国际上应用较多的 TSI 系统, 所做相关研究工作是一个进步。TSI 相关研究工作依然限于利用图像灰度值数据本身, 不利于数据资料的进一步利用以及模式模拟结果的对比工作。本文所做建立辐亮度反演算法的工作一方面可以利用所反演的全天空辐亮度数据进行辐射传输模式的检验, 另一方面辐射传输模式对各类大气状况的模拟结果, 可作为指导或参考被直接应用于所反演的全天空辐射场及相关研究中, 从而有利于充分利用图像数据进行更多的气象科学研究, 如进行反演辐射通量与云参数的关系研究; 同时由于全天空成像系统具有超广视角特征, 所获得的全天空各方向辐亮度信息是对当前辐亮度观测仪器只进行有限方向观测, 缺乏全天空范围观测数据的补充。

2 全天空成像仪

全天空成像仪(ASI)在功能上主要分两个部分:一是成像控制部分, 实现对天空状况的拍摄和图像数据获取;另一部分为遮挡太阳控制部分, 实现对太阳直射入射光的遮挡, 保护 CCD 不被灼伤。

全天空成像仪(图 1a)中成像部分采用的是带有鱼镜头的商用数字相机, 鱼镜头型号为 Nikon FC-E8; $f/2.6$, 镜头视场约 183° , 将仪器对准天顶拍摄将获得整个半球天空的信息(图 1b)。这套系统图像拍摄频次最高为每 30 秒 1 张, 提供分辨率 2272×1704 的 24 bit 彩色图像。全天空成像仪的太阳跟踪和遮挡部分, 采用了一个圆形中密度滤光片作为遮挡片, 带有遮挡片的半圆杆由程序控制随着机身转动(上半部分)以及遮挡杆的上下移动, 实现跟踪和遮挡太阳。整套系统完全由程序控制, 每日日出时刻开始观测, 日落时刻停止。为适用于野外观测, 系统内还装有一套热敏元件, 将仪器内部环

境温度控制在 0—40 ℃。表 1 中列出了全天空成像

仪的主要产品性能。

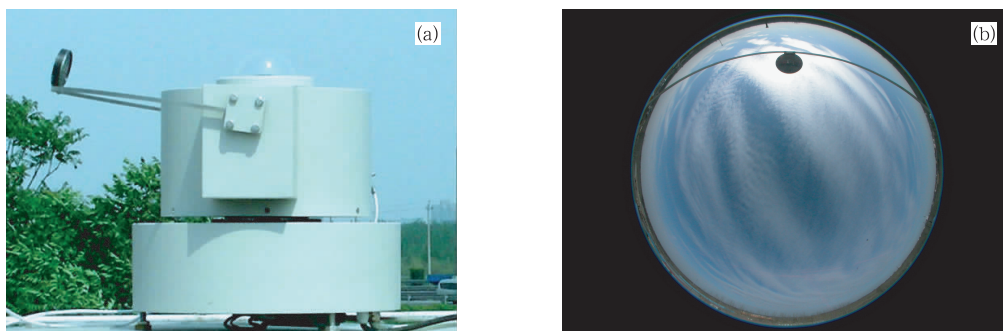


图 1 (a) 可见光全天空成像仪, (b) 全天空可见光图像

Fig. 1 (a) Visible all-sky imager system and (b) visible all-sky image

表 1 全天空成像仪主要性能参数

Table 1 Capabilities of the all-sky imager

性能	规格
图像分辨率	2272 × 1704, 24 bit JPG 彩色图像
图像采样频次	可调, 最高每 30 s 1 张
环境温度	0—40 ℃, 温度调节装置
重量及电源	约 25 kg; 220 V

该套系统从 2003 年起曾先后在中国内蒙古、新疆、西藏、北京、河北香河等地投入野外观测, 并在河北香河站国际辐射基准站 (39. 75°N, 116. 96°E)、北京大气物理所科研楼楼顶 (39. 97°N, 116. 37°E) 保持长期观测。

3 标定实验

全天空成像仪成像部分采用的是数字相机结合鱼镜头实现 180° 宽视场的信息获取。利用全天空数字图像进行应用于气象科学研究的工作, 如云与大气参数信息的提取等, 需要知道系统成像特征及其基本参数, 即需要对所选成像系统完成必要的标定工作, 包括几何标定、光学标定和辐射标定。几何标定是将目标物的实际空间位置与成像后像素位置之间建立联系; 光学标定主要是针对鱼镜头及所用数字相机的成像特征进行的标定工作。本工作目的是建立由图像灰度值反演辐亮度值的算式算法, 因此标定工作是基础, 文中将由相对亮度到绝对亮度的标定工作称为辐射标定。

3.1 几何标定

鱼镜头的投影原理为等角度投影, 用关系式可以表达为:

$$r = f\theta \quad (1)$$

其中, r 为图像上像素点到图像中心点的距离 (像素数), f 为镜头系统的焦距, θ 为实际目标点相对镜头的视角。几何标定主要是确定所选鱼镜头型号的 f 值, 从而在 r 及 θ 之间建立联系, 根据距离 r 获得实际目标点的观测视角 θ 。实验时通过拍摄已知观测视角 θ 的参考点, 而后分析成像后该点到图像中心的距离 (像素数), 多点结合获取 f 值。实验中选用一个圆环 (半径 40 cm), 在圆环上每 10 度做一个标记作为参考点, 将带有鱼镜头的相机放置于圆环中心对准圆环拍摄, 可获得多个具有不同视角参考点的 r 值, 旋转相机拍摄可获得不同方位上 (角度) 参考点的成像。

图 2 是任意选择的一组标定结果, 其他方位上均有如此特征不再给出。图 2 中横坐标为参考点相对拍摄轴的视角 θ , 纵坐标为成像后到图像中心的距离 r , 从图上看距离 r 与视角 θ 之间具有较好的线性关系。实验结果说明所选型号鱼镜头其等角度投影性能理想, 像素位置相对图像中心距离 r 与视

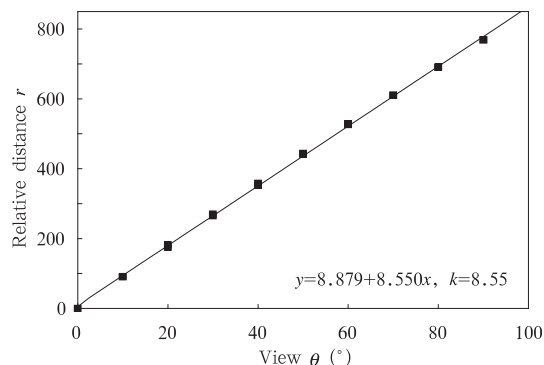


图 2 全天空成像仪几何标定

Fig. 2 Geometrical calibration for the all-sky imager

角之间线性情况较好。本实验中所选鱼眼镜头系统 f 值为 8.55, 表示所获得的“圆形”图像直径上平均每 8.55 个像素代表约 1 度视角的变化。从而利用式(1)可以根据图像像素位置获取实际目标物的视角大小, 结合像素点的方位信息即可了解目标物相对观测点的位置。

3.2 光学标定

数字相机的成像过程可以简单描述如下: 入射光从镜头组进入, 经过红、绿、蓝三组滤光片分组滤光后到达 CCD 矩阵, 完成将光信号转换为电信号, 再对电信号进行模/数转换并实现量化, 经过一定的压缩编码等图像处理技术, 最后存为灰度图像文件。在相机曝光参数不变条件下入射光越强记录下的图像灰度值越大, 直至光强增大到灰度值饱和(本系统单通道用 8 bit 记录, 最大灰度值为 255)。当入射光强过小或过大时, 通过控制相机的光圈大小或快门速度可将曝光光强控制在合适范围内以获得适合于人眼观看的图像。为了解入射光强与成像灰度之间的关系, 我们在试验中借助积分球进行了分析。积分球是一种具有良好的朗伯性和面均匀性的、由可见光到短波红外波段均近似为灰体的辐射面源。因此, 通过控制积分球内所开灯的数目, 即可获得不同级别的光强, 从而得到不同级别光强下的图像灰度值, 以了解全天空成像仪所选数字相机的光学及成像特征。

3.2.1 鱼眼镜头的衰减特征标定

鱼眼镜头是一种特殊的广视场光学镜头, 在利用全天空超广视场图像进行分析时其所引起的光学衰减效应不可忽略: 即通过镜头中心的光线与通过

镜头边缘的光线由于所经光学路程不同会对入射光产生不同程度的衰减。一般而言, 鱼眼镜头的余弦衰减系数与观测视角有关(Voss, et al, 1989; Slanter, 1980)

$$R(\theta) = \frac{\alpha(\cos^n \theta \sin \theta / \theta)}{f^2} \quad (2)$$

其中, α 为光圈, θ 为观测视角。鱼眼镜头余弦特征的标定实验, 借助于积分球(积分球内径 1.2 m, 开口直径 160 mm)来进行。由于鱼眼镜头具有超宽广角视场, 实验中将相机放入积分球内部即球心位置, 对后半球(即未安装灯的半球)进行拍摄获取广视场图像。严格意义上, 积分球在出口处光源是比较理想的均匀光源, 而将相机放入球内, 一方面内部光源的均匀性相比出口处的均匀性要差, 另一方面相机的放入会对光源造成遮挡, 因此积分球内部光源其均匀性稍差。即便如此, 相对其他的实验方法积分球实验相对容易实现且其均匀性能够满足余弦特征标定, 相对而言是比较好的选择。实验时将相机摆放于球心位置以尽可能减少相机遮挡所产生的影响。

与通用的鱼眼镜头衰减特征不同(式(2)), 经过对实验数据进行分析我们发现全天空成像仪所用鱼眼镜头其衰减系数 $R(\theta)$ 与 $(\sin \theta / \theta)$ 之间表现出良好的线性特征(图 3)。全天空成像仪所用数字相机共有 3 个宽谱通道: 红(中心波长 650 nm), 绿(中心波长 550 nm), 蓝(中心波长 450 nm)。图 3 中给出了所选鱼眼镜头蓝、绿通道的衰减系数 $R(\theta)$ 与 $(\sin \theta / \theta)$ 之间的关系, 根据图上线性拟合结果看其线性特征比较明显。

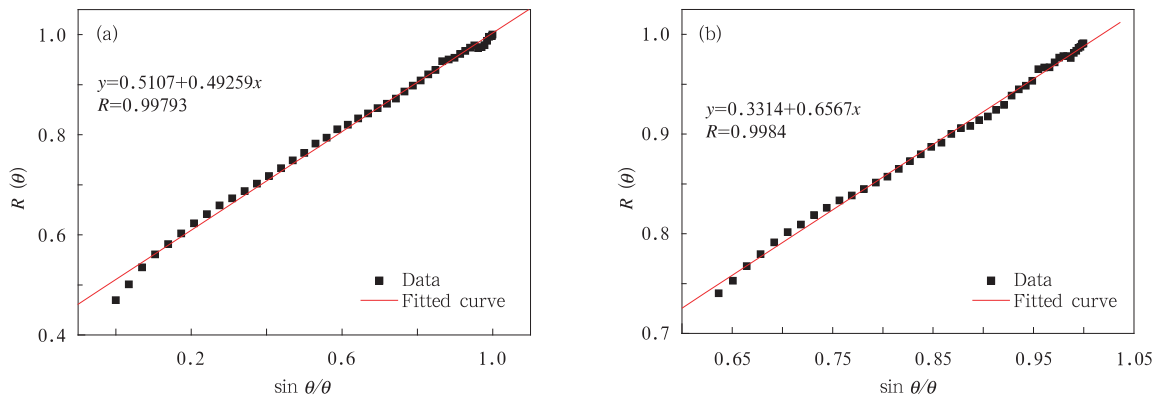


图3 鱼眼镜头的余弦衰减 (a. 蓝通道, b. 绿通道)

Fig. 3 Roll-off of the fish-eye len in the (a) blue channel and (b) green channel

因此,就已经选用的该型号鱼眼镜头来说 $R(\theta)$ 系数的计算仅用 $(\sin\theta/\theta)$ 参数来表示比较合适(图 3b)

$$R(\theta) = 0.3314 + 0.6567(\sin\theta/\theta) \quad (3)$$

其中 θ 为观测视角,这是绿通道的标定衰减系数,很显然鱼眼镜头对 3 个通道有不同的衰减特征。

3.2.2 入射光强与成像灰度之间的非线性关系

图 4 给出了两组按照等级别变化的入射光强下,图像灰度值随光强变化的情况。不难看到,图像灰度值与入射光强之间呈明显的单调非线性特征,即在不饱和条件下光强强所记录的灰度值大,反之光强弱灰度值小,但彼此呈非线性关系。因此,灰度值一定程度上反映出光源亮度的强与弱,但灰度值与亮度值之间不是简单的线性关系,在等亮度变化情况下所记录的灰度值并非呈等间距变化。这一特

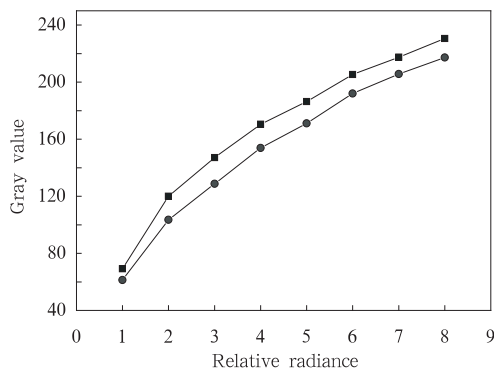
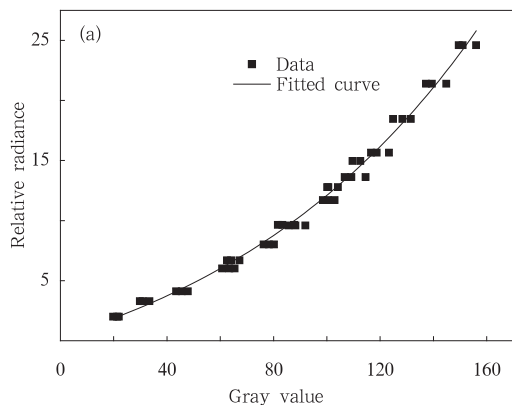


图 4 图像灰度值与入射光强之间的关系
Fig. 4 Relationship between the gray value and incident intensity



征与数字相机的“有限”量化过程有关:即对于数字相机而言,各通道均采用 8 bit 共 255 个级别实现对模拟信号到数字信号的转换和记录,对于连续变化的数据被量化后其连续性将被改变。

由此,灰度值与入射亮度之间的非线性特征使得由图像灰度反演亮度的工作增加了难度,但同时彼此间所呈现的单调性特征为这一反演工作提供了可能。

3.2.3 由图像灰度反演入射光亮度的反演算法

数字相机对目标物的成像灰度大小除与目标物自身亮度有关外,还与相机曝光时选取的光圈值和快门速度有关,其中进光量与光圈半径的平方成正比,与快门速度成反比(即与曝光时间成正比)。通过控制光圈大小以及快门速度,可人为控制进入相机的光强大小。因此,控制相机的曝光光圈值以及快门速度,可以获得在多个不同进光量条件下的灰度值图像,从而能够获得一组绝对亮度未知,但亮度相对变化已知的灰度数据,为由图像灰度值反推入射相对亮度值提供可能(绝对值还依赖于光圈大小和快门速度)。

该试验亦是依靠积分球来进行。由于积分球提供的光源级别有限,试验中通过同时调节积分球内部的开关灯数目以及相机曝光时间和曝光光圈,获得在多个不同曝光亮度级别上的图像灰度值。该实验针对 3 个不同波段分别进行分析。图 5 给出了特定相机绿及红通道不同进光量选取条件下的灰度变化情况。

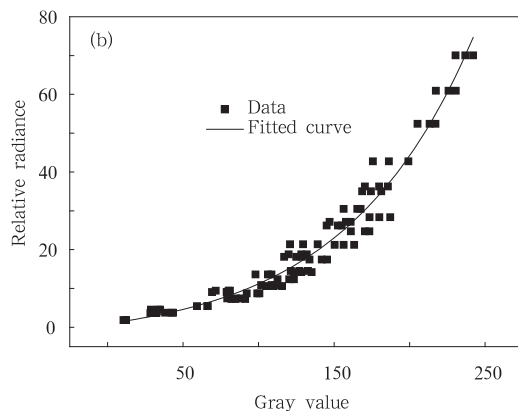


图 5 灰度值反演相对亮度值曲线拟合(a. 绿通道, b. 红通道)

Fig. 5 Fitting curves of the relative radiance vs. the gray value in the (a) green channel and (b) red channel

图 5 中横坐标为各曝光条件下的灰度值,纵坐标则为相对亮度值,其“相对性”是相对于绝对亮度的,如若以积分球中亮 1 盏灯,相机曝光时间设定为 1/1000 s,光圈为 F5.3 时定为有 1 个相对亮度,则亮 2 盏灯,曝光参数不变时的相对亮度为 2,而若为亮 1 盏灯,曝光时间为 1/500 s 光圈 F4.7 时的相对亮度则为 4。因此图 5 中所给的是一个相对亮度值,从拟合情况不难发现灰度值与相对亮度值之间具有较好的指数对数关系

$$y = y_0 + a \exp(-x/b) \quad (4)$$

其中, x 为灰度值, y 为相对亮度值。各拟合系数见表 2。

表 2 拟合系数
Table 2 Fitting parameters

参数	值(绿/红)	偏差(绿/红)
y_0	-6.90/-3.70257	$\pm 1.65/1.64392$
a	7.22/4.62249	$\pm 1.29/0.80571$
b	-103.36/-85.51315	$\pm 9.4/5.07823$
R^2	0.987/0.96226	

如是针对一个相机给出的绿通道及红通道灰度值与相对亮度之间建立的关系,不同的相机其反演关系略有不同,严格意义上针对不同的相机均需建立不同的反演算式,但考虑到实际标定实验的复杂性和大工作量,对所有成像系统都进行光学标定具有一定的难度,一般情况下由于同一型号商用相机制作工艺相同、量化模式(3 通道的数字化模式)相同,我们采用了平均化处理,即选择 3 个相机分别进行标定试验并分析后对反演系数取平均值作为代表。

4 反演算式的检验及绝对值的标定(辐射标定)

以上工作在图像灰度值与入射光相对强度(相对辐亮度)之间建立了联系,本节工作即对该反演算式进行检验,所用方法即是利用图像反演的相对辐亮度与实测的绝对辐亮度值进行比对。比对工作需要合适的观测资料,原则上需要时间相同且波段近似。

中国科学院大气物理研究所河北香河野外观测站(39.75°N, 116.96°E)有一台 CIMEL318 型太阳

光度计,它是 AERONET 气溶胶监测网的监测站点之一,除进行气溶胶相关光学参数反演外,还在天空大气辐射探测方面提供太阳主平面上多个散射角(如 -3.5°、-3.0°、-2.5°、4.0°、35.0°、40.0°、45.0°、100.0°、150.0°等)以及太阳等高圈上多个不同方位角方向(-180°—180°共约 60 个角度)的绝对辐亮度数据,所观测的光谱波段有 1.0203、1.6393、0.8699、0.4397、0.5001、0.6748 μm 等,白天(晴空无云状况下)平均每 1 h 进行一次主平面和等高圈的观测。在距离该仪器约 4 m 远的地方放置了一台全天空成像仪以每 1 min 1 张的采样频率工作。同地点两观测仪器提供的数据为反演算式的比对和检验提供了可能。

对比时选取相同时刻或时间最为接近的全天空图像和 CIMEL 辐亮度数据,利用式(3)及式(4)由图像灰度值反演出相对亮度值,再与 CIMEL 观测的绝对亮度值进行比对。考虑到全天空成像仪蓝通道中心波长(0.45 μm)与 CIMEL 仪的 0.4397 μm 波段比较接近,我们主要以该通道为代表进行比较。

图 6 中运用 CIMEL 的 0.4397 μm 辐亮度值与图像“蓝通道”反演的相对亮度值进行了比对,并给出了相对辐亮度与绝对辐亮度值之间的比值。其中黑色实方点代表相对辐亮度值(左纵坐标);灰色空心方点代表绝对辐亮度值(右纵坐标),相对亮度与绝对亮度的比值为灰色实圆点表示(右纵坐标)。从对比结果看,反演算式的运用很好地将图像灰度与天空亮度间建立了联系,绝对辐亮度值与相对辐亮度值之间保持了相对较稳定的比值关系,均集中在 3.0 左右,即辐射标定系数为 3.0。从而借助 CIMEL 上几个观测点的辐亮度数据,得到一个相对辐亮度到绝对辐亮度的订正系数,同时亦说明利用全天空图像获得一个全天空的辐亮度分布是可行的,图 7 给出了一个利用全天空图像获得天空辐亮度分布(蓝通道)的情况示例,从辐亮度等值线分布情况看(图 7b),明显地,在天空“反日点”附近方向辐亮度值有小值,而在近太阳附近方向辐亮度值较大,与实际天空辐亮度分布情况特征较为符合。

如前所述,地基全天空成像仪在气象研究上主要用于云的检测,即对所获得的全天空图像需要建

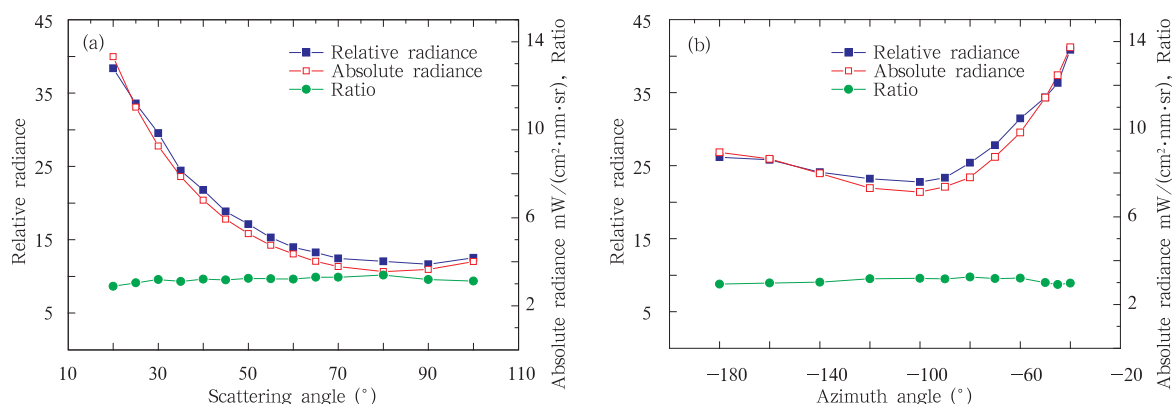


图6 相对亮度与绝对亮度的对比 (a. 太阳主平面上, b. 太阳等高线上)
Fig. 6 Intercomparison of the relative radiance with the absolute radiance
(a. from solar principal plane, b. from solar almucantar)

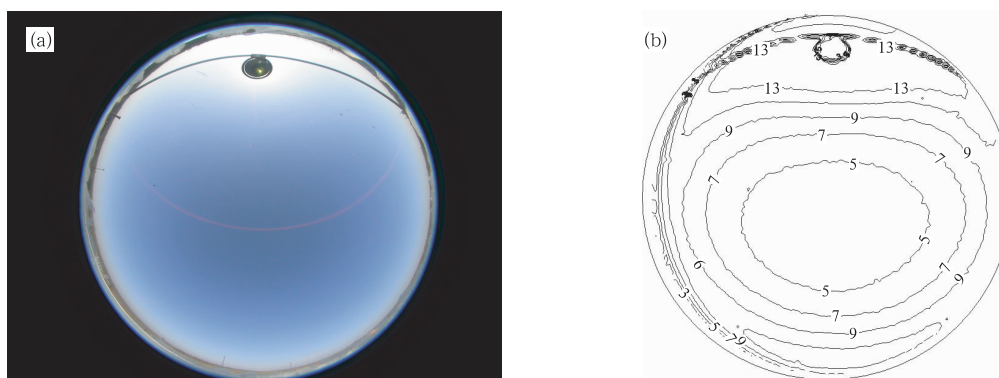


图7 全天空图像(a)和反演的辐亮度等值线分布(b)
Fig. 7 (a) All-sky image, (b) Isoline distribution of the all-sky radiance retrieved from all-sky images

立一个将“云”从图像中分辨出来的算法,分析结果表明,以蓝、红通道的比值选择合适的阈值来区分云或是大气具有较好的效果(霍娟等,2006a,2006b)。由于同一时刻可比较点较少,一方面为更好地了解辐亮度反演算法的可靠性,同时结合开发全天空成像仪进行“云”识别的主要研究目标,我们又选择更多的个例利用相对亮度反演算法,分别对蓝、红通道进行亮度反演并计算比值,同时将该值与 CIMEL 仪器所观测的 440、675 nm 两波段辐亮度之间的比值进行比对。图 8 中选用香河观测站 2005 年 1 月 15 日—2007 年 1 月 13 日无云天气 236 个观测个例共约 4400 个点的图像蓝、红比与 CIMEL 440/675 nm 比值的对比情况。从图上看,由灰度值反演天空亮度进而分析蓝红之间的比值与实际观测的蓝红比值二者之间较接近,说明由图像灰度反演天空辐亮度的方法可行。因而对于无法将图像灰度值与辐射传输模式模拟值直接进行比对的情况下,该反演算法的建立为利用模拟运算结果进行相关的全天空

图像对比研究以及模拟运算结果的直接利用提供了方便。

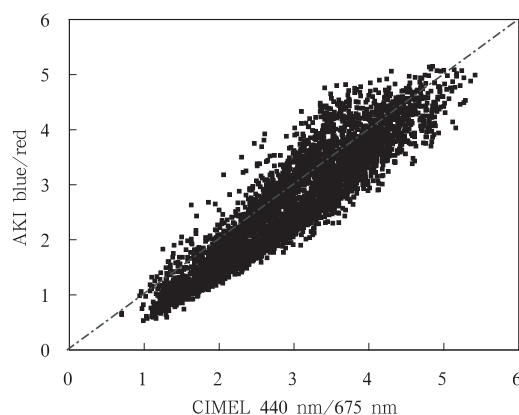


图8 全天空图像蓝、红通道亮度比值与 CIMEL 440 nm/675 nm 的亮度比值相互比较

Fig. 8 Intercomparison of radiance ratio between all-sky images and CIMEL data;
x-coordinate is for the radiance ratio of 440 nm/675 nm from the CIMEL, y-coordinate is for the blue/red ratio from the all-sky imager

需要特别指出的是,由于全天空成像系统实现的宽波段探测,实际上与 CIMEL 窄波段的辐亮度数据之间还存在一定的差距,但从对比效果看本文所提方法还是可行的,在辐亮度探测仪器无法完成所有方向辐亮度测量时,以所获绝对数据为标准,利用全天空成像仪的反演数据进行补充也不失为一个办法。

5 结 论

本文介绍了一套由中国科学院大气物理研究所研制的全天空成像仪,并对仪器主要的几何标定、光学标定和辐射标定工作做了介绍。文中利用积分球进行了多组实验,提出了一个由图像灰度值反演天空亮度的算式。该算式将所获得的灰度图像与实际天空亮度信息建立了联系,所得数据可靠,所提方法可行。从而为了解天空气溶胶光学厚度信息,进行云阈值的自适应选取提供了可能。由于观测资料的缺乏或观测时大气环境观测条件的不可重复,利用辐射传输模式对特定天气现象或气候状况进行有针对性的模拟和分析,是气象科学研究的重要手段之一,反演算法的建立为模拟结果在全天空成像系统数据研究中的应用提供可能。当前地基全天空成像仪,主要还是应用于云的观测。以 TSI 为例,则直接利用图像灰度值进行云的检测工作,阈值选择需要结合观测地区的天空状况和特征,再经过长期的观测才能获得一个合理有效的判断阈值(Sabburg, et al,1999)。由于是以图像灰度值为处理基础,因此难以借助模式进行直接模拟和结果的借鉴。相对辐亮度关系式建立之后,能够获得全天空更多角度或方向上的天空辐亮度分布情况,使得利用模式进行模拟和分析成为可能,同时对于未来利用辐射通量信息分析云对大气辐射的影响工作亦建立基础。此外,对于云检测阈值法而言,则可依据天空的辐亮度分布情况,初步了解气溶胶的分布状况,从而为选择一个较合适阈值提供方便。这对于中国部分城市地区气溶胶光学厚度相对较大、时空变化明显而言,非常必要,因为这些地区的阈值选择尤其需要依据不同的气溶胶状况给出合适的阈值(霍娟等,2006a,2006b)。

致谢:感谢中国科学院大气物理研究所香河观测站南卫东、吴庆红对全天空成像仪的日常维护,感谢 AERONET 监测网香河站技术负责人章文星提供 CIMEL 观测数据。

参考文献

霍娟,吕达仁. 2006a. 晴空与有云大气辐射分布的数值模拟及其对

- 全天空图像云识别的应用. 气象学报, 64(1):31-38
- 霍娟, 吕达仁, 王越. 2006b. 全天空云识别阈值法的数值模拟初步研究. 自然科学进展, 16(4): 480-484
- 毛节泰, 李成才. 2005. 气溶胶辐射特性的观测研究. 气象学报, 63(5):622-634
- 赵凤生, 丁强, 孙同明等. 2002. 利用 NOAA-AVHRR 观测数据反演云辐射特性的一种迭代方法. 气象学报, 60(5): 594-601
- Albrecht A B. 1989. Aerosols, cloud microphysics, and fractional cloudiness. *Science*, 245(4923):1227-1230
- Chambers L H, Wielicki B A, Loeb N G. 2001. Shortwave flux from satellite-measured radiance: A theoretical study over marine boundary layer clouds. *J Appl Meteor*, 40(12): 2144-2161
- Ellingson R E, Fouquart Y. 1991. The intercomparison of radiation codes in climate models and overview. *J Geophys Res*, 96:8925-8927
- Ellingson R G, Wiscombe W J. 1996. The Spectral Radiance Experiment (SPECTRE): Project description and sample results. *Bull Amer Meteor Soc*, 77:1967-1985
- Frederick J E, Steele H D. 1995. The transmission of sunlight through cloudy skies: An analysis based on standard meteorological information. *J Appl Meteor*, 34(12):2755-2761
- Kassianov E, Long C N, Ovtchinnikov M. 2005. Cloud sky cover versus cloud fraction: Whole-sky simulations and observations. *J Appl Meteor*, 44(1):86-98
- Kaufman Y J, Tanré D, Holben B N, et al. 2002. Aerosol radiative impact on spectral solar flux at the surface, derived from principal-plane sky measurements. *J Atmos Sci*, 59(3):635-646
- Kerr J B, Seckmeyer G, Bais A F, et al. 2003. Surface ultraviolet radiation: Past and future. *Global Ozone Research and Monitoring Project-Report No. 47*
- Knuteson R O, Revercomb H E, Best F A, et al. 2004. Atmospheric emitted radiance interferometer. part I: Instrument design. *J Atmos Oce Tech*, 21:1763-1776
- Long C N, Sabburg J M, Calbó J, et al. 2006. Retrieving cloud characteristics from ground-based daytime color all-sky images. *J Atmos Ocea Tech*, 23: 633-652
- McGuffie K, Henderson S A. 1989. Almost a Century of "Imaging" clouds over the whole-sky dome. *Bull Amer Meteor Soc*, 70: 1243-1253
- Pfister, G, McKenzie R L, Liley J B, et al. 2003. Cloud coverage based on all-sky imaging and its impact on surface solar irradiance. *J Appl Meteor*, 42(10):1421-1434
- Sabburg J, Wong J. 1999. Evaluation of a ground-based sky camera system for use in surface irradiance measurement. *J Atmos Oce Tech*, 16(6): 752-759
- Slanter P. 1980. Remote sensing, optics and optical aspects. *Addison-Wesley*, 116-119
- Voss J K, Zibordi G. 1989. Radiometric and geometric calibration of a visible spectral electro-optic "Fisheye" camera radiance distribution system. *Amer Meteor Soc*, 6:652-662