

霍娟, 吕达仁. 2009. 三维辐射传输模式分析非均匀云对天空辐射场影响 [J]. 大气科学, 33 (1): 168-178. Huo Juan, Lü Daren. 2009. Simulations of inhomogeneous cloud and its effects on radiative distribution of atmosphere with a 3D radiative transfer model [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 33 (1): 168-178.

三维辐射传输模式分析非均匀云对天空辐射场影响

霍娟 吕达仁

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

摘要 为了解非均匀分立云体分布状况下的天空辐射场与无云晴空辐射场的差异, 本文借助一个三维辐射传输数值模式 SHDOM 模拟了离散云块分布条件下的天空辐射场分布, 重点分析不同云况分布情况下“非云”大气的辐射分布特征, 并将该区域与无云晴空大气辐射场的相同区域进行了比对。工作主要从辐亮度以及 450 nm/650 nm 的辐射比两参数入手进行讨论。研究发现, 相对无云晴空大气, 云的存在会对周围“非云”大气散射辐射产生影响, 影响程度与云量、云及气溶胶光学厚度等参数相关。数值模拟结果表明, 在云量不太大的条件下, 无云视场空间的大部分辐射值与无云晴空相比变化很小, 集中在 $\pm 2\%$ 之间。这一结果表明, 已有的一维均匀大气辐射传输模式运算结果所得云与非云判据基本适用于非均匀分布的有云大气。另一方面, 模拟结果表明我们也完全可以利用非均匀有云大气中的无云视场观测结果进行大气气溶胶等晴空大气光学特征的探测研究。

关键词 三维辐射传输数值模式 非均匀云 辐射传输 辐亮度 全天空 云检测

文章编号 1006-9895(2009)01-0168-11 **中图分类号** P422 **文献标识码** A

Simulations of Inhomogeneous Cloud and Its Effects on Radiative Distribution of Atmosphere with a 3D Radiative Transfer Model

HUO Juan and LÜ Daren

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

Abstract The goal of this paper is to analyze the differences of atmospheric radiative distributions between the scattered-cloud sky and the clear sky by simulations of a 3D radiative transfer model. The two parameters, radiance and radiative ratio of 450-nm to 650-nm radiance, are used to express the differences. Analysis results show that the radiative value of atmosphere will suffer the effect of surrounding cloud and the degree will depend on the parameters like cloud cover, cloud optical thickness as well as aerosol optical depth (AOD). It is found that radiance in most regions varies between $\pm 2\%$ in the cloudy sky when the cloud cover is small, in comparison with the same fields in the clear sky. It indicates that the threshold value obtained from the 1D radiative transfer model, used to recognize cloud from sky in the all-sky image, is applicable for the inhomogeneous cloudy sky. Moreover, the “non-cloud” radiance in the cloudy sky can be used to make other retrieving researches like the AOD retrieval.

Key words 3D radiative transfer model, inhomogeneous cloud, radiative transfer, radiance, all sky, cloud detection

1 引言

云通过吸收、辐射、微物理与化学过程对地气系统辐射收支、气候与环境变化起着复杂而重要的作用,是影响天气、气候变化的重要因子,亦是全球与区域气候变化研究中最不确定的因子之一(Houghton et al., 2001)。众多研究结果表明,云的存在一般情况下会降低到达地面的太阳辐射,但在特定条件下则会有不同程度的增加(Pfister, 2003)。Mims et al. (1994)利用高时间分辨率的UV-B太阳辐射计数据研究发现,到达地面的辐射值增加情况中有30%源自太阳附近积云侧面对太阳散射辐射的增加。同样,Estupiñán et al. (1996)亦发现在太阳直接辐射未被云挡住情况下,在近1小时的观测时段内分立云块的存在使得当地UV-B的辐射值增加到27%左右。吕达仁等(2007)在西藏羊八井地区从2005年11月1日到2006年10月31日约1年的观测时间里发现辐射值增加1%的天数占总观测天数的90%以上。利用观测资料并结合辐射传输模式模拟分析云场对太阳辐射传输影响的工作亦有进行,如Segal et al. (1992)运用一个Monte-Carlo模式模拟了多种条件下云(云的大小不同,云与太阳的相对位置关系、观测点位置不同等)对直接辐射的影响,分析表明其中引起辐射值增加的主要原因是云对太阳辐射的反射。由此可见云特征,特别是其宏观特征的正确描述,对云的辐射参数化十分重要。

虽然云在大气科学研究中作用十分重要,各类先进技术已被应用到云的遥感与探测研究中(邱金桓等, 2005),但地基云观测至今仍处于困难阶段。已有的目视观测信息量少、主观性强,观测员耗时费力,因此,先进国家积极推进云的自动化观测(Sabburg et al., 2004),使其实现客观准确,且信息能够定量进入模式研究和预报系统。对于长时期的气候研究而言,还需要自动观测与以往目视观测历史记录能够衔接,云量观测的连续性则是关键环节之一,而这一问题在美国已进行的工作中并不尽人意(Dai et al., 2006)。这里牵涉到观测数据中云像元的自动识别或判据的确定。目视对云的判别基于可见光波段不同波长云和无云晴空对太阳光散射强度及其差异,即无云天空方向呈偏蓝色而云呈现白色或灰色(随波长变化不大),这里没有涉及

曙暮光期间云与天空的色彩。由于近地气溶胶霾层的存在以及近太阳方向和近地平方向晴空色彩比偏弱,使在这些方向上云与晴空的识别比其他方向要复杂一些,对此我们已有一些讨论(霍娟等, 2006)。问题的另一个复杂性是云的三维几何非均匀分布(以及云中相态和粒谱变化),使辐射场变化更为复杂(张风等, 2005),使云与晴空的判别增加了新的困难。从物理原理上讲由于有云大气中的多次散射完全可能使云附近方向晴空大气的辐射与色彩比发生变化。所有这些问题都需要逐步解决,以获得云自动观测信息的客观可靠,与目视历史记录平稳过渡,并提供更高级的应用。与国际上可见光全天空云自动观测工作同步,由中科院大气所中层开放实验室成功开发的全天空成像仪目前已投入野外实验场观测中,获得了大量的全天空图像资料(吕达仁等, 2001; 霍娟等, 2002)。

本文工作的目的是利用一个三维辐射传输算法SHDOM(Spherical Harmonic Discrete Ordinate Method)模式(Evans, 1998),模拟三维非均匀云及其所在大气场的散射辐射场分布,分析有云状态下云对大气散射辐射场的影响,了解有云和无云状况下的散射辐射分布变化与差异。该项工作是对云在太阳辐射传输影响相关研究工作的补充,能够对有云状况下的大气散射辐射场分布特征获得更多信息。所开展的研究工作还将着重分析有云天空中那些“非云”方向或云隙空间的散射辐射特征,并将其与无云晴空时的散射辐射特征进行比对,了解其异同点,一方面正确区分云与晴空(“非云”),另一方面为利用无云空间进行其他相关大气科学研究提供分析依据,为全天空图像中利用“非云”空间开展大气参数信息提取获得一定的判断经验。另外,通过比对有云大气散射辐射场分布以及无云大气场的散射辐射分布,亦为一维均匀辐射传输模式运算结果的适用性,尤其是对非均匀云况分布的天空其适用范围提供参考。

结合全天空可见光图像分析与研究工作,本文工作主要在三个波长450 nm/550 nm/650 nm分别代表蓝、绿、红三个通道进行,同时结合450/650 nm辐亮度比值(简称辐射比)参数,研究可见光条件下云与大气不同的散射特征。

2 SHDOM 辐射传输模式简介

三维非均匀介质场中的辐射传输方程一般不存在解析解。Monte-Carlo 算法可以处理任意复杂介质场中的辐射传输问题,但其耗时之多难以处理大量不同情况。在平面分层大气辐射传输的离散纵标算法基础上,Evans (1998) 发展了结合球谐函数空间格点算法和离散纵标法优点,通过迭代求解的方式来计算三维空间辐射传输方程的算法(球谐离散纵标算法、SHDOM 算法)。SHDOM 模式能够计算非极化的单谱和宽谱的一维、二维、三维介质中的太阳以及热辐射传输。与 Monte Carlo 方法相比较,由于其能运算更多的大气参数,提供多种运算结果,同时运行效率亦有提高,运算结果准确性有保证,从而成为人们进行三维辐射传输模拟的有力工具之一(胡丽琴, 2005)。考虑到它的高计算效率和一定的准确性,本文采用这个算法。

与众多三维模式一样,SHDOM 模式中参数输入亦是采用格点描述方法,通过将模式空间划分成多个格点,输入格点上的光学参数,如消光系数、单次散射反照率、勒让德系数、高度层温度等。SHDOM 模式对于模式空间场的构建,如尺度范围、大气气体分子以及大气气溶胶的散射和吸收等光学属性,需要用户自己设定,这与一般的平面平行模式只需要设定气溶胶类型、大气类型和光学厚度等参数要复杂一些。

由于缺乏完整的实测资料,我们对模式运行所需要的初始化参数采用了近似,对缺乏实测资料的参数以标准大气参数为参考,并适当进行调整以满

足实测数据。运用这种方法我们首先对无云大气散射辐亮度进行了初步的模式模拟,并将结果与实测资料进行比对(如图 1)。这里实测资料采用的是 AERONET (AErosol RObotic NETwork) 大气物理研究所香河野外观测站一个 Cimel 太阳光度计辐亮度观测数据。以全天空图像资料为参考选择了一个无云晴空天气个例:2006 年 4 月 22 日北京时间上午 10 时 18 分。由 CIMEL 观测仪提供 670 nm 波长观测的辐亮度值(主平面上多个散射角的辐亮度值),该时刻气溶胶 670 nm 光学厚度为 0.197。图 1 分别是 SHDOM 与 MODTRAN (MODerate spectral resolution atmospheric TRANsmittance algorithm and computer model) 两种模式主平面辐亮度值与实测资料的比较图。由于太阳直射方向附近的辐亮度观测值很大,为能清楚地比较除太阳直射方向外其他方向大气的辐亮度值,我们在图 1 中只给出了 0~500 之间的值,略去了太阳方向即散射角 0°左右方向的辐亮度值。从图 1a 和 1b 的比较不难看出,在反日点低值区域两模式模拟的值都比较相近;在近地平区域,SHDOM 的模拟能力相比较 MODTRAN 更贴近观测值。

实测资料的缺乏,主要是全天空所有方向的辐亮度值观测资料缺乏,使得模式运算结果与观测资料的比较有限。从上面的对比中不难看出,以气溶胶光学厚度为主要约束参数进行其他参数的适当调整,并结合标准大气进行其他相关参数的近似,所获得的天空辐亮度值与观测值比较接近,因此这一近似方法是可行的。以此为基础,进行的研究亦具有一定的意义。

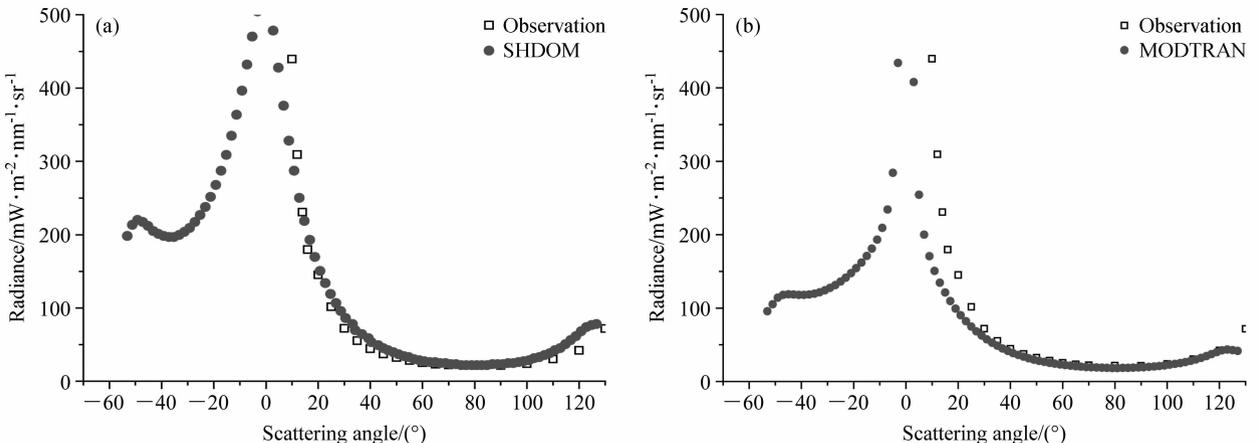


图 1 (a) SHDOM 和 (b) MODTRAN 模式主平面辐亮度值与实测资料的比较

Fig. 1 Comparison of radiances between observations and simulations from (a) SHDOM and (b) MODTRAN

3 有云大气辐亮度场的计算

自然界中云的分布、云形态、云粒子千变万化, 因此分析有云条件下的各类云所产生的大气辐亮度场分布是一个比较复杂的工作。简化云型和云场数据, 逐步进行云中各参数变化下的辐亮度场计算, 对于研究有云条件下的辐亮度场变化是一个比较可行的方法, 研究结果亦具有一定的定量价值。遵循由简单到复杂的途径, 本文对有云大气采取从单块云、二块云直到多块云逐步复杂的天空进行模拟分析, 分析中着重注意云的宏观、微观特征, 云块与太阳的相对位置等几方面因素对天空辐射场的影响。

3.1 一块云的天空辐亮度场个例分析

首先建立一个单体云场, 研究独立云块所引起的辐亮度场变化情况, 以波长 550 nm 为代表。模式中简化云型为扁方体, 云内各格点上含水量、有效粒子半径分布相同, 所设定云场主要参数为: 云底高 1.8 km, 云层厚 1.2 km, 云底宽、长均为 8 km。云内粒子呈 Γ 分布, 有效粒子半径 10 μm , 含水量 0.1 g/m^3 , 垂直高度上云的光学厚度为 24.9。这是近似于晴天层积云云块状况。

图 2a~d (见文后彩图) 均为等角度投影图, 图像中心点为天顶即观测点正上方天顶角为 0° 的点, 其余各点到中心的距离长短代表该点天顶角大小。图 2a 模拟的是地面观测点所看到的位于左侧上空该方体云所呈现的形状, 除云体底面被看到外, 云的侧面亦能被部分看到, 此时云体底面与侧面将共同作用影响大气散射辐射 (云体上两个不同颜色分别表示云底和云侧面投影)。图 2b 为无云晴空散射辐亮度场等值线分布, 太阳直射方向辐亮度值最高, 反日点周围有最小值。图 2c 为单块云况条件下的全天空辐亮度场等值线分布, 可明显看出来自云的方向的辐亮度值增加明显。图 2d 则为图 2b 与图 2c 二者之间的比值情况: 面向太阳一侧的云体附近方向辐亮度有显著改变 (远小于 1), 距离云体越近大气辐亮度改变越大, 越远改变越小。相比无云大气, 来自云的方向辐亮度值明显增强, 这是由云粒子对太阳光的散射作用导致; 云体面向太阳一侧的邻近无云大气方向辐亮度值亦略有增加, 背对太阳一侧的邻近大气空间内辐亮度值有所减小, 前者的形成原因是云体向阳面产生的较强散射

引起邻近方向晴空大气柱途径的多次散射增大。而后者是由于云体对太阳入射光的遮挡衰减作用使入射于云体背阴面附近晴空大气柱主入射光的减弱。

由此可见, 云的存在除自身大小引起所在方向上的辐射变化外, 还对其相邻空间晴空大气的辐射产生影响。我们对图 2d 中各比值分布情况进行了统计, 由于所得比值为连续分布, 做统计分析时是统计位于某一区间内的点占所有点的比例。结果见图 3, 以比值 0.995 为例, 其所得的百分比实际是指 ≥ 0.99 且 < 1.0 的点占所有点数的百分比, 从图 3 上可见绝大多数的点是介于 0.99~1.0 之间的。另外, 我们还对比值 > 1.02 和 < 0.98 的所有数目进行统计, 占有数目的 9%, 即有其余 91% 的方向辐射值几乎没有变化。该例在除云体之外的绝大多数无云空间范围内, 辐亮度的变化情况并不明显, 受云的存在影响不大。

3.2 云量改变情况下天空辐亮度分析

在 3.1 节中详细分析了特定条件下有云大气与无云大气所有方向上散射辐射的改变情况。本节通过在模式中改变云体大小, 获得有云天空中不同云量情况下非云空间的辐亮度变化。简单起见, 以一块云为代表进行讨论。所选云块光学厚度为 24.9, 云底高 1.8 km, 云厚 1.2 km, 云体形状为长方体位于天顶, 太阳天顶角 45° , 方位角 180° [见图 4 (见文后彩图), 太阳位于下方, 光线由下向上呈 45° 入射]。模式中通过改变云体面积大小来获得不同的云量, 图 4a 和 4b 云量分别为 1 和 4。

由于格点较多, 分析时以图 4 中 AB 线和 CD 线上各点为代表进行讨论, 该选择是考虑到大气、云与太阳的相对位置关系, 同时为便于表述结果,

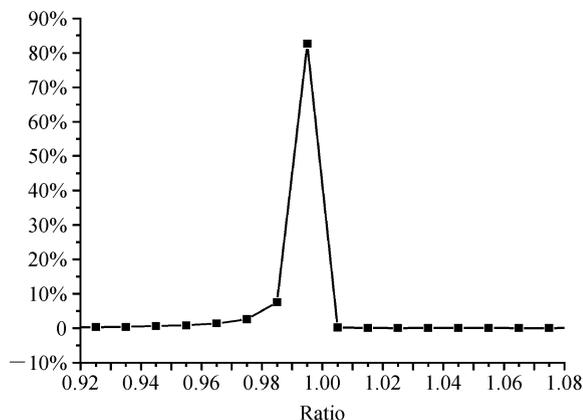


图 3 不同比值上的数目占总数目的百分比

Fig. 3 Percentage of individual ratio number to total number

以期在分析过程中能够对多种分布情况进行比对和了解。

图 5 上不同的“点型”代表不同云量,从图中不难看出:(1) AB 线上云体中心点辐亮度值最大,随向边缘而降低,反映出云内多次散射对辐射场的重要贡献。对 AB 线上的无云处天顶辐射而言均比晴空无云(云量为 0)时的辐射值增加,即云的多次散射总使侧向无云天空向下辐射增加。(2) 处于沿太阳射线方向(CD 线)上的向下辐射而言,云顶下方的辐射从向阳点到背阳点产生剧烈的变化,有的达 5 倍之多,这是由云体对太阳入射光的散射和衰减的总程度来决定的。“非云”向下方向辐射总体而言也有一定的增加,其增加值随从向阳到背阳而逐步变小,说明在这样的云况下,云对晴空大气的多次散射还有一定的贡献。

3.3 两块云的天空辐射特征分析

3.3.1 辐亮度的分析

选择 3 种不同的云分布:(1) 两块云云体底面积均为 $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$,云光学厚度 18.9,简称为云况一;(2) 两块云底面大小不同,一块 $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$,另一块为 $1 \text{ km} \times 2 \text{ km}$,云光学厚度均为 18.9,简称为云况二;(3) 两块云底面大小相同,均为 $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$,而光学厚度不同,分别为 18.9 以及 36.1,简称为云况三。需要特别说明的是,模式中设定除所讨论的空间场之外的空间其云和大气是以该场为周期分布的,而不全是大气。由于运算结果较多,本文仅挑选几个例为代表进行表述。图 6 中各分图太阳位置不变,均为天顶角 45° ,方位

180° 。其中图 6a 为无云天空 450 nm 的辐亮度等值线图,气溶胶光学厚度为 0.25。图 6b 为云况一的天空辐亮度等值线图,气溶胶光学厚度 0.25。为了更为清楚地了解有云天空辐射场相对无云晴空辐射场的变化情况,我们采用如下关系式以获得相对变化程度:

$$K = (R_{\text{cloud}} - R_{\text{clear}}) / R_{\text{clear}},$$

其中, R_{cloud} 代表有云天空的辐射参数分布,如辐亮度值或辐射比; R_{clear} 代表无云天空的辐射参数分布;辐亮度的变化用 K_{rad} 表示,辐射比的变化则表示为 K_{rat} 。

图 6c 为气溶胶光学厚度 0.25 时,云况一情况下的变化情况,图 6d、e、f 为气溶胶光学厚度 0.36 时云况一、云况二、云况三的变化情况。从图 6c、d、e、f 看,背向太阳入射方向的云体阴影区中的大气辐亮度值有降低,降低程度随气溶胶光学厚度增加、云量增加以及云光学厚度增加而有所加深,其中在多数“非云”空间方向降低程度在 5% 之内(其中在 $\pm 2\%$ 之间的点占主要部分),少部分则在 5%~10% 之内。除此区域之外,其他大气空间的辐亮度值则有不同程度的增加,迎向太阳一侧的云体方向附近增加最为明显,有的甚至有 10%~20% 的变化,而在距离云体相对较远的空间方向上辐亮度增加集中在 5% 之内。对于云隙空间的辐亮度情况来说,亦与太阳位置有关,迎向太阳一侧增加,而背向太阳则减小。由此可见,云体与太阳入射方向之间的相互关系对于分析天空辐亮度值变化情况较为重要。比较特别的是,与图 6a、b 中辐亮度的

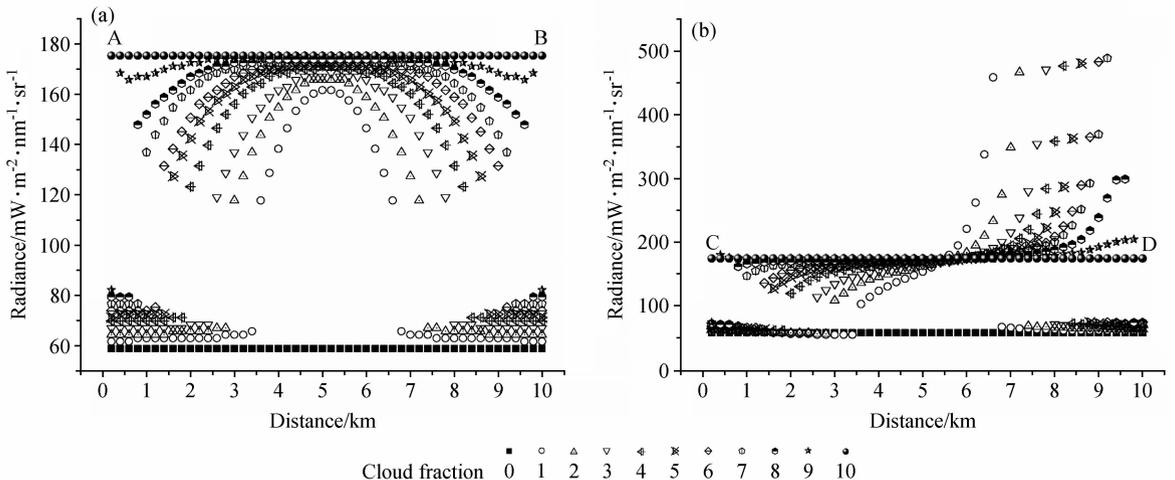


图 5 波长 450 nm 不同云量两线段上各点的辐亮度值:(a) AB 线;(b) CD 线

Fig. 5 Radiance of pixels at (a) line AB and (b) line CD for different cloud fractions at 450-nm wavelength

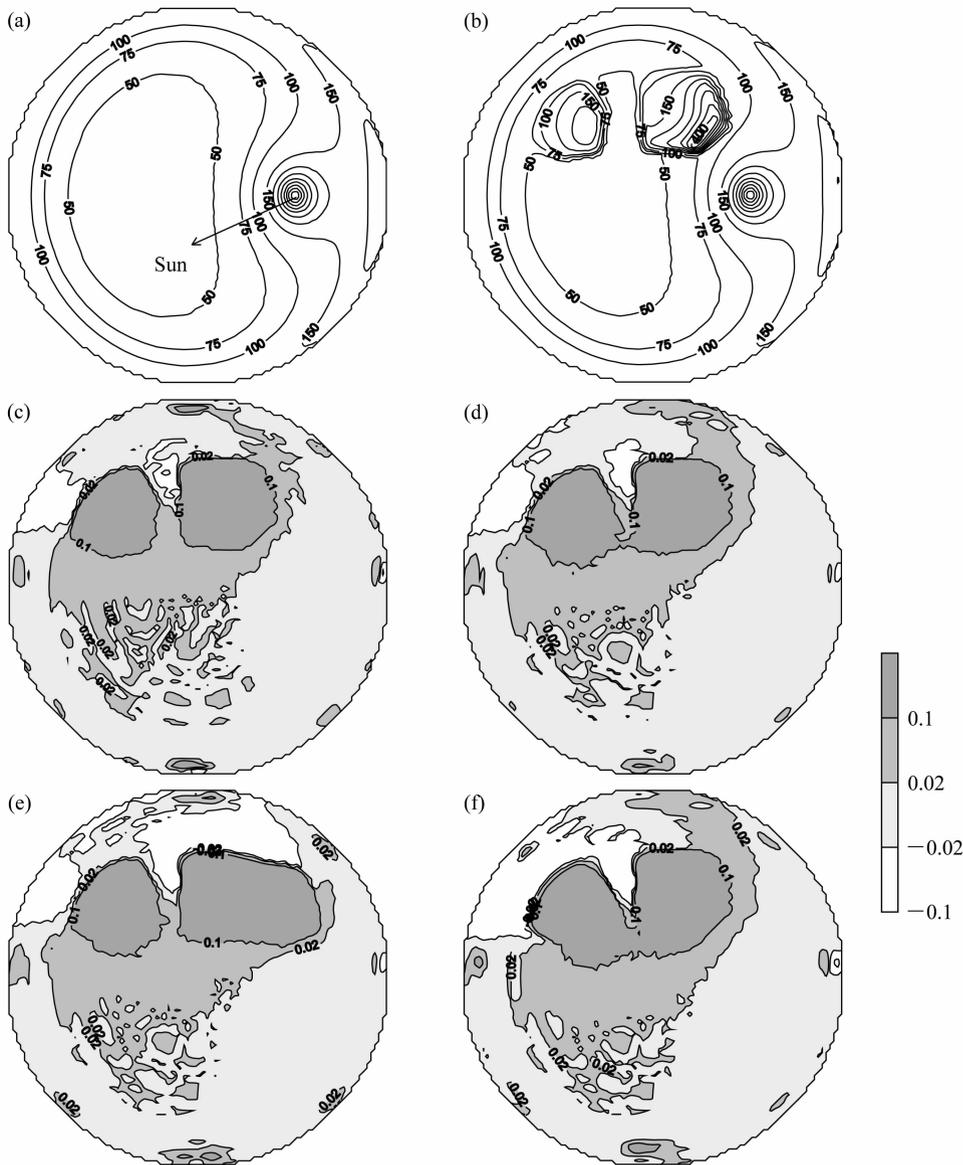


图 6 (a) 无云大气辐亮度; (b) 两块单体云的天空辐亮度; (c) 气溶胶光学厚度 0.25 时云况一的 K_{rad} ; 气溶胶光学厚度 0.36 时 (d) 云况一、(e) 云况二、(f) 云况三的 K_{rad} 。辐亮度和 K_{rad} 的单位为 $mW \cdot m^{-2} \cdot nm^{-1} \cdot sr^{-1}$ ，下同

Fig. 6 (a) Radiance in the clear sky; (b) radiance in the cloudy sky including two blocks of cloud; (c) K_{rad} in the cloudy sky with AOD (aerosol optical depth) 0.25 and cloud type 1; K_{rad} in the cloudy sky with AOD 0.36 and (d) cloud type 1, (e) cloud type 2, (f) cloud type 3. Units of radiance and K_{rad} are $mW \cdot m^{-2} \cdot nm^{-1} \cdot sr^{-1}$ (the same below)

变化情况不同，图 6c~f 四幅比值图中，在某些散射方向上的差异变化呈现比较“零碎”的跳跃，说明云与气溶胶的共同作用使得不同方向上的辐亮度变化程度变得更为复杂。需要特别说明的是，由于本文采用了等值线插值画图方法，人为地将比值分成了 4 个区间，从而可能造成非常相近的两个数值被分到不同的区间里，因此图 6c~f 中的“零碎”点比实际情况略有夸大（这一情况同样出现在图 7~10

中）。鉴于本文主要研究目的是了解云的存在对无云天空散射辐射场的影响程度，因此这一状况并不影响主要研究结论的得到，总体而言在多数空间范围内辐亮度变化程度集中在 $\pm 2\%$ 以内。

与上节关于单个云块的分析结果相比，两个独立云块对天空散射辐射的影响情况总体而言大致与其具有相同的特征，在对“非云”格点的辐亮度值影响参数上云体与太阳的相对位置关系最为重要，而

云隙间的“非云”格点的辐亮度变化亦同样受太阳入射方向影响而呈现不同的特征。

3.3.2 辐射比的分析

与 3.3.1 节中的表示方法相似, 本节选出 4 个个例分析有云辐射比分布与无云辐射比分布的变化情况。图 7a 为气溶胶光学厚度 0.25, 云况一时的辐射比, 图 7b 为气溶胶光学厚度 0.36, 云况一的辐射比变化, 图 7c 为气溶胶光学厚度 0.36, 云况二的辐射比变化, 图 7d 为气溶胶光学厚度 0.36, 云况三的辐射比变化。

从图 7 的各分图上看, 辐射比的变化在多数空间范围内集中在 $\pm 5\%$ 以内 ($\pm 2\%$ 的情况占多数), 与辐亮度值多数偏大的变化有所不同的是, 辐射比值则有增有减。此外, “反日点”附近范围内有小范围的变化程度加深区间, 而且与云体和太阳入射方向相关。同样, 我们发现云隙中的辐射比增加或减少亦与太阳入射方向相关。当云体靠近太阳入射方向时 (如图 7a、b 所示), 云隙中的辐射比值有增加情况, 而当云体远离太阳入射方向时, 云隙中的辐射比值则是降低的。为了更为明显地说明这一

点, 我们特意设计了一组试验利用模式模拟云场从远离太阳到接近太阳和遮挡太阳的系列天空辐射特征变化情况。结果在图 8 看到, 随着云块逐步靠近太阳入射方向 (由左向右), 辐射比值先是降低而后逐步增加, 而当云体遮挡太阳入射方向时, 辐射比值有明显增加, 且云隙间的辐射比值增加到 10% 以上, 其中图 8c 上云体完全遮挡住了太阳直射方向。由此可见, 云体与太阳的位置关系亦很重要, 当云体遮挡太阳入射方向时所产生的影响最大。

3.4 条状云的天空辐射变化情况

以上工作, 我们对块状云的天空辐亮度以及辐射比分布状况进行了分析。由于大气中经常存在长宽比很大的长条状云, 例如某一类高积云等, 对这样云的天空辐射场情况也值得研究。本节中将分析条状云的天空中, “非云”空间辐亮度以及辐射比的分布情况。模式中条状云具有有限的宽度为 1 km, 无限长, 云光学厚度为 18.9。

3.4.1 天空辐亮度分布情况

从前面的分析中已经知道, 太阳入射方向对于有云天空的散射辐射变化所产生的影响最大, 当云

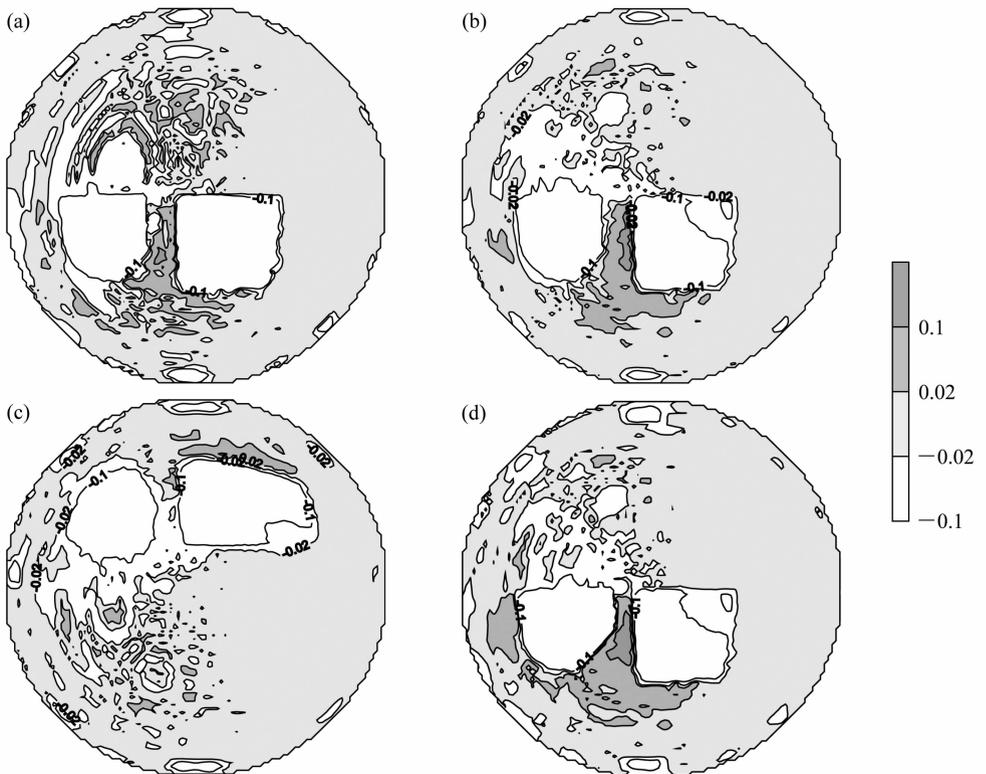


图 7 (a) 气溶胶光学厚度 0.25 时云况一的辐射比变化; 气溶胶光学厚度 0.36 时 (b) 云况一、(c) 云况二、(d) 云况三的辐射比变化
Fig. 7 (a) K_{rad} (variation of radiative ratio of the cloudy sky to cloud free sky) for cloud type 1 when AOD is 0.25; K_{rad} for (b) cloud type 1, (c) cloud type 2 and (d) cloud type 3 when AOD is 0.36

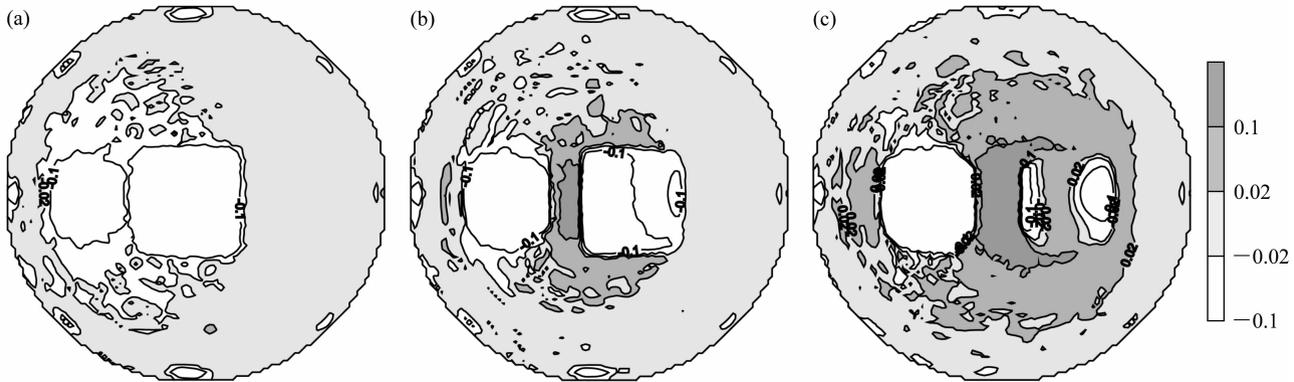


图 8 辐亮度分布随云体方向与太阳入射方向的相对位置的变化：(a) 远离太阳直射；(b) 靠近太阳直射；(c) 遮挡太阳直射

Fig. 8 Radiance distributions for different relative locations of the cloud and the sun: (a) Far from the solar incident light; (b) near the solar incident light; (c) blocking the solar incident light

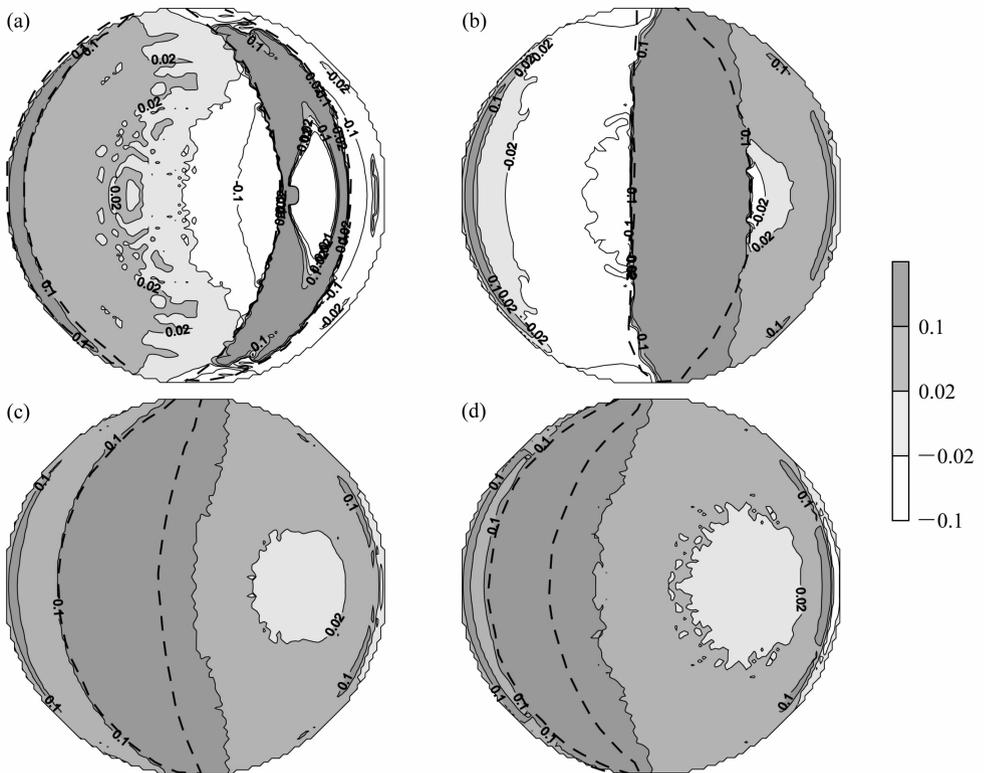


图 9 不同位置条状云的天空辐亮度变化：(a) 云体完全遮挡太阳入射方向；(b) 云体边缘略有遮挡；(c) 云体未遮挡太阳入射方向；(d) 云体面积相对稍小的未遮挡太阳的情况

Fig. 9 Radiance variations in the sky with “strip” clouds: (a) Clouds block the solar incident light entirely; (b) clouds block the solar incident light partly; (c) clouds do not block the solar incident light; (d) clouds with smaller cover do not block solar incident light

体较太阳入射方向较近或遮挡住时，天空散射辐射变化最为强烈。因此，本小节中分别挑选出 4 个运算个例分别描述条状云块对天空“非云”空间所产生的影响或是改变，所选个例中太阳位置为天顶角 45°，方位角 180°。图 9 均为 K_{rad} 值的等值线图，描

述方法与图 6 类似。

图 9a~d 中黑色虚线所勾范围为实际云块，各图均是相对无云天空的 K_{rad} 值等值线分布情况。比较遮挡与未遮挡的情况看，很明显，当云体遮挡太阳入射方向时的变化要较未遮挡的变化大，图 9b

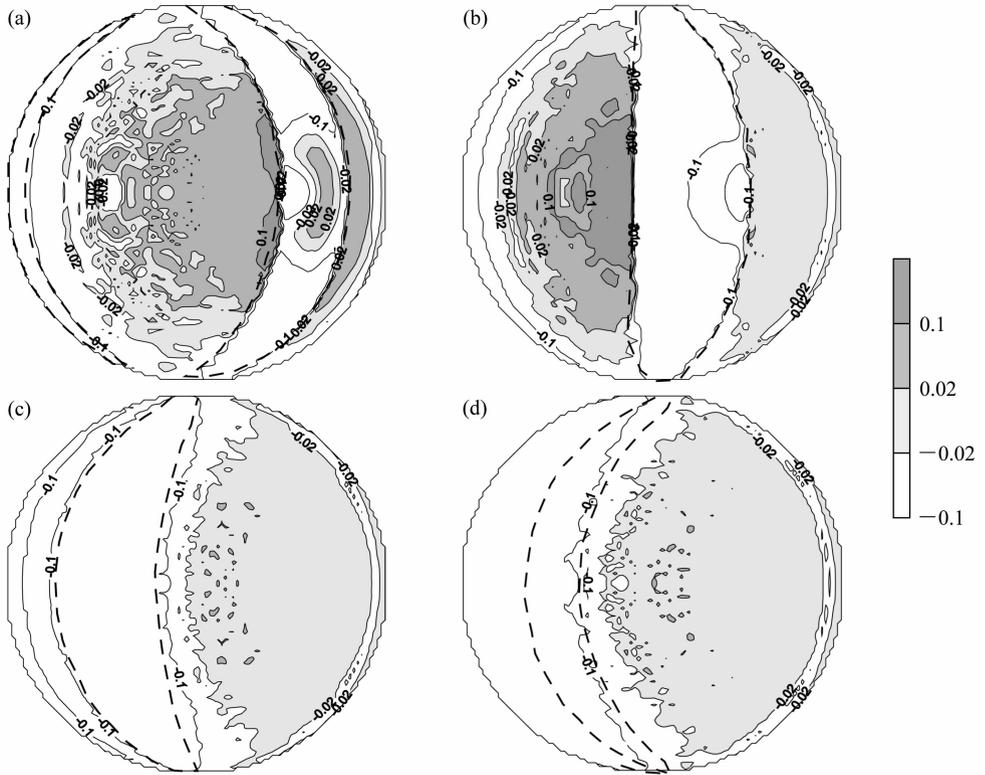


图 10 同图 9, 但为辐射比变化

Fig. 10 Same as Fig. 9, but for the radiative ratio variations

上在云体后侧产生了较大范围的辐亮度值降低区间, 有的点变化程度甚至超过 20%。与离散单体云不同, 由于条状云块长度无限扩展从而面积较大, 对“非云”空间的影响范围亦较大, 在云体周围较大范围内“非云”空间的辐亮度值变化在 10% 以上, 变化在 $\pm 5\%$ 以内的点主要集中在远离云体的空间中, 且由于条状云体面积较大, 这些点离云体的距离亦相对单体云的距离远。此外, 在图 9c、d 中发现, 在背对太阳的“非云”空间内辐亮度亦是有所增加的, 这一情况与单体云时的情况则有所不同, 说明条状云块分布时, 当云体距离太阳入射方向相对较远时, 天空辐亮度整体呈现出增加趋势。

3.4.2 辐射比分布

本小节讨论条状云的天空辐射比相对无云空间的变化情况。相对上节中的辐亮度变化情况, 我们给出了相应的辐射比变化, 结果在图 10 中所示。

整体上辐射比的变化程度相对辐亮度的变化程度要小, 变化范围在 $\pm 5\%$ 的“非云”格点所占范围较大, 尤其在图 10c、d 中除靠近云体周围的那些点外, 其他多数点的变化程度均在 $\pm 5\%$ 之间。当然,

当云体遮挡太阳直射时, 天空辐射比的变化亦是呈现范围加大、程度加深的状况。即便如此我们仍可以看到, 条状云的天空, 虽然具有相对较大云量, 但依然存在着较大范围的“非云”格点其辐射比变化很小。因此, 结合上节中的结果我们可以得到, 在条状云分布条件下, 同样存在某些区域其辐亮度值或辐射比的变化程度几乎不大的区间, 这一区间主要集中在远离云体的范围内, 从而使得对于那些需要利用无云大气辐射特征进行大气科学研究的工作来说, 有云大气条件下的这些区域是可以作为参考来进行利用的。

4 结论

本文利用 SHDOM 三维辐射传输模式, 模拟分析了非均匀云况条件下的天空辐亮度以及辐射比的分布特征, 特别地、详细地分析了非云空间上的辐射特征相对无云晴空天空时的变化情况。

以上分析结果表明, 相对无云晴空辐射场来说, 有云天空辐亮度分布情况与大气气溶胶光学厚度、云量、云光学厚度, 太阳入射方向等参数密切

相关。气溶胶光学厚度越大, 相同云体分布条件下所引起的“非云”视场变化越大; 云量越大, 变化越大; 而当云体遮挡太阳入射方向时所产生的影响亦较大。就云体对周围空间的影响范围而言, 近云体周围的“非云”方向上的变化较远离云体的那些方向大; 位于迎向太阳一侧的“非云”点上辐亮度值明显增加, 背向太阳一侧的辐亮度值则有所降低。总体而言, 对于那些远离云体的“非云”空间中辐亮度的变化程度主要集中在 $\pm 5\%$ 之间。从辐射比的结果分析来看, 相同状况下辐射比的变化程度较辐亮度的变化程度轻。同样地, 除靠近云体的那些“非云点”外, 辐射比的变化亦是主要集中在 $\pm 5\%$ 之间。云体周围的天空辐射比随云体与太阳的相对位置关系而有增加或有减少。辐射比变化程度与散射角相关, 其中散射角在 $90^\circ \sim 105^\circ$ 或左右的方向上(即所谓的太阳反日点方向)有相对最大的变化峰值。

以上工作具体分析了离散不均匀云体分布状况下的天空辐射场特征。纵观已获取的对比结果表明, 在离散云体分布的天空中存在着一些相对无云视场辐射特征变化不明显的点, 因而在这些点上, 一维模式已有的运算结果特别是所获得的关于晴空大气辐射等特性信息亦是能够参照和使用的, 从而扩展了一维均匀辐射传输模式运算结果的适用性。本文工作还对辐射比进行了较为详细的研究和分析, 该项工作作为全天空云检测阈值选取亦提供了较好的依据和判断经验。

参考文献 (References)

Dai A, Karl T R, Sun B, et al. 2006. Recent trends in cloudiness over the United States: A tale of monitoring inadequacies [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 87 (5): 597–606.

Estupiñán J G, Raman S, Crescent G H, et al. 1996. Effects of clouds and haze on UV-B radiation [J]. *Journal of Geophysical Research*, 101 (11): 16807–16816.

Evans K F. 1998. The spherical harmonics discrete ordinate method for three-dimensional atmospheric radiative transfer [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 55: 429–446.

Houghton J T, Ding Y, Griggs D J, et al. 2001. *Climate Change 2001: The Scientific Basis* [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 944 pp.

胡丽琴. 2005. 云的水平非均匀性对云特征参数反演结果的影响 [D]. 中国气象科学研究院博士学位论文, 110. Hu L. 2005. Effects of inhomogeneous cloud in retrieving cloud parameters [D]. Ph. D. dissertation (in Chinese), Chinese Academy of Meteorological Sciences, 110pp.

霍娟, 吕达仁. 2002. 全天空数字相机观测云量的初步研究 [J]. *南京气象学院学报*, 25 (2): 242–246. Huo J, Lu D. 2002. A primary study on cloud-cover using all-sky digital camera [J]. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese)*, 25 (2): 242–246.

霍娟, 吕达仁, 王越. 2006. 全天空云识别阈值法的数值模拟初步研究 [J]. *自然科学进展*, 16 (4): 480–484. Huo J, Lu D, Wang Y. 2006. Simulation of cloud detection threshold in all-sky images [J]. *Progress in Natural Sciences (in Chinese)*, 16 (4): 480–484.

刘玉芝, 石广玉, 赵剑琦. 2007. 一维辐射对流模式对云-辐射强迫的数值模拟研究 [J]. *大气科学*, 31 (3): 486–494. Liu Y, Shi G, Zhao J. 2007. A study of the radiative forcing of clouds by using a one-dimensional radiative-convective model [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 31 (3): 486–494.

吕达仁, 霍娟, 吕曜, 等. 2001. 地基全天空成像仪遥感的科学、技术问题和初步试验. *中国遥感——奋进创新 20 年* [M]. 北京: 气象出版社, 114–120. Lu D, Huo J, Lu Y, et al. 2001. The scientific technologic problems and primitive test of ground-based all-sky imager remote sensing. *Chinese Remote Sensing-20 Years* [M], Beijing: China Meteorological Press, 114–120.

Lu D, Zhang W, Chang Y, et al. 2007. Possible abnormal SW flux observation over Yangbajing, Tibet and its cloud-radiation effect [C]. IUGG 24th Conference Presentation.

Mims F M, Frederick J E. 1994. Cumulus clouds and UV-B [J]. *Nature*, 371: 291.

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]. *Journal of Applied Meteorology*, 42 (10): 1421–1434.

邱金桓, 陈洪滨, 王普才, 等. 2005. 大气遥感研究展望 [J]. *大气科学*, 29 (1): 131–136. Qiu J, Chen H, Wang P, et al. 2005. A prospect on future atmospheric remote sensing [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 29 (1): 131–136.

Sabburg J, Long C. 2004. Improved sky imaging for studies of enhanced UV irradiance [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*, 4: 2543–2552.

Segal M, Davis J. 1992. The impact of deep cumulus reflection on the ground-level global irradiance [J]. *Journal of Applied Meteorology*, 31: 217–222.

张风. 2005. AGCM 中云的不均匀性作用的初步研究 [J]. *气候与环境研究*, 10 (3): 574–587. Zhang F. 2005. The study of the effect of cloud inhomogeneity in AGCM [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 10 (3): 574–587.

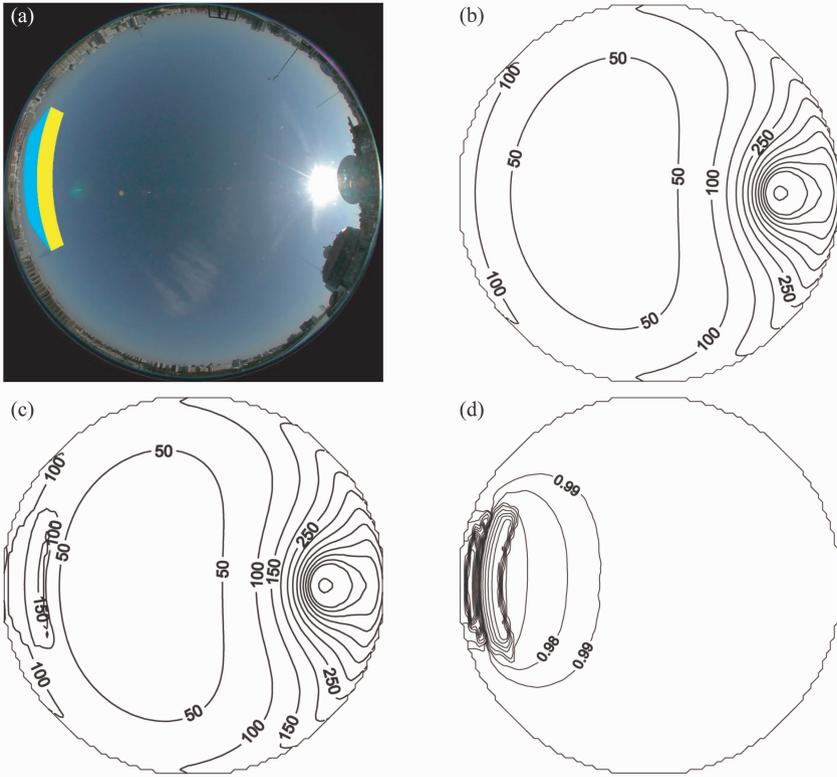


图 2 (a) 天空中有一块云的图像; (b) 无云和 (c) 有云大气辐亮度 (单位: $\text{mW} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{nm}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$) 场分布图; (d) 无云和有云大气辐亮度比值

Fig. 2 (a) Image of all sky with “a” block of cloud; radiance ($\text{mW} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{nm}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$) distributions in (b) the clear sky and (c) the cloudy sky; (d) ratio of the radiance in (b) to that in (c)

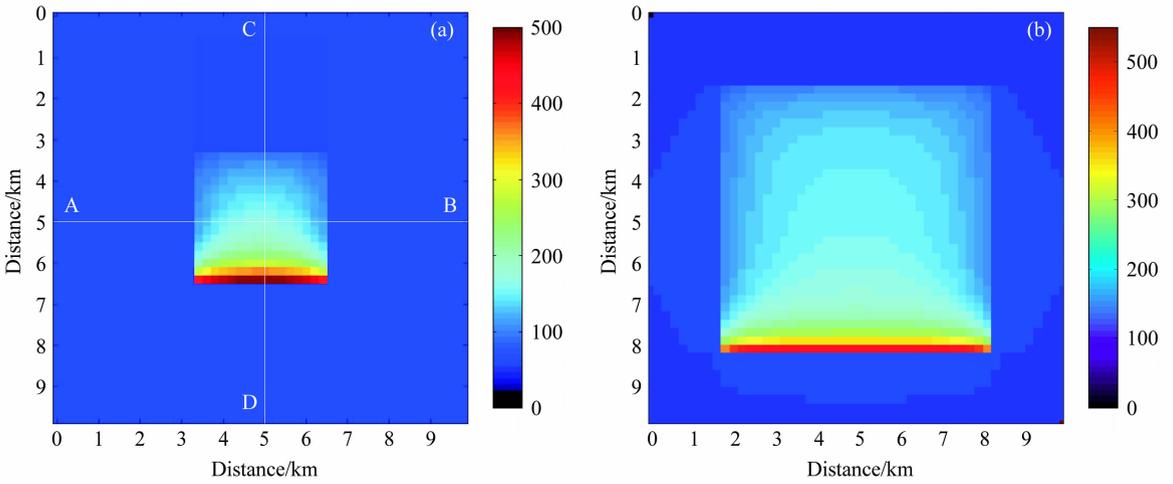


图 4 450 nm 波长云量 1 (a) 和云量 4 (b) 的辐亮度值分布 (单位: $\text{mW} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{nm}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$)

Fig. 4 Radiance ($\text{mW} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{nm}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$) for (a) cloud fraction 1 and (b) cloud fraction 4 at 450-nm wavelength