云的非均匀性对双向反射率的影响

王 越 吕达仁 霍 娟

(中国科学院大气物理研究所中层大气与全球环境探测实验室(LAGEO), 北京 100029. E-mail: wangyue@mail.iap.ac.cn)

摘要 应用SHDOM模式对选自供国际比对的I3RC Phase II 的积云场与层积云场计算了其 0.67 及 2.13 μm的天底方向的双向反射率, 探讨了云的非均匀性对双向反射率(BRDF)的影响. 数值模拟结果表明, 随着太阳天顶角的增大, 积云场有约6%的格点的0.67 μm的BRDF值出现>1 的异常值. 进一步分析表明, BRDF值异常聚集出现于云顶的局地低谷. 这些区域既可以受到太阳的直射, 也可以接收到邻近较高的云的散射辐射, 从而造成该区域的散射辐射增强. 这说明云的非均匀性有可能造成卫星的观测值出现与平面平行辐射传输理论不相符的状况, 提示高分辨率的卫星资料的像素点的辐射值可能会因云非均匀性的影响而被增强, 对应用其反演的产品要有清醒的认识. 中高纬度地区的优势太阳天顶角均较大, 云非均匀性对于这些区域的反演结果的影响更大.

关键词 云非均匀性 双向反射率 卫星反演

云在地球的辐射收支及水循环中具有关键作用, 因而在地球的气候系统中扮演着很重要的角色. 为了研究云-辐射-气候之间的相互关系, 确定云在气候系统中的反馈机制及作用, 必须了解云的物理属性与云的辐射属性之间的关系. 云光学属性参数化方案中需要用到云的光学厚度与有效粒子半径等云特性参数, 而通过卫星测量的云的反射辐射来反演, 是目前获取云特性参数的主要手段. 平面平行理论是卫星反演的理论基础, 该理论假定云在水平方向上没有变化, 是水平均匀的. 但是, 从日常生活的常识中我们即可知道, 云在水平与垂直方向上通常都有剧烈变化, 很难满足水平均匀的假定. 因此, 在认识反演产品时, 我们有必要考虑云的非均匀性对反演的影响.

云非均匀性产生的原因可分为如下两个方面: (1) 云液态水路径的变化: 包括云内变化(尺度小于或等于独立云块内的液水的变化)和云破碎(由于晴空所造成的边界的不连续). (2) 云几何形态的变化: 包括云顶起伏和云侧形状变化.

云的非均匀性对于卫星观测到的辐射的影响程度则取决于: (1) 观测仪器的空间分辨率(卫星视场或观测像素的大小). (2) 太阳-地球-卫星之间的几何位置关系. (3) 分析尺度(以观测像素的尺度来分析, 还是将一定区域内的像素值平均后再进行分析)[1].

应用卫星资料进行产品反演时, 需要用到反射函数 $R_\lambda(\mu,\mu_0,\phi)$, 即双向反射率 BRDF(Bidirectional Reflectance Distribution Function), 其定义为

$$R_\lambda(\mu,\mu_0,\phi)=\frac{\pi I_\lambda(\mu,\mu_0,\phi)}{\mu_0 F_{0\lambda}}, \quad (1)$$

式中, $I_\lambda(\mu,\mu_0,\phi)$为云顶处波长为$\lambda$的反射强度, 可为卫星上所搭载的辐射计观测到. μ 为观测天顶角的余弦, μ_0 为太阳天顶角的余弦, ϕ 为观测方位角与太阳方位角之间的夹角, $F_{0\lambda}$为入射到大气层顶的波长为λ的太阳辐射通量密度.

过去几十年中的大量理论和观测研究表明, 将云当作三维还是当作一维来对待, 所计算出的反射辐射差别很大 [2~7], 这表明云的非均匀性对于卫星观测到的辐射有着显著影响. 因此, 若将卫星观测的三维的云辐射值用平面平行理论来反演各参数, 这显然会带来误差. 即使对于最接近平面平行近似的海上层云而言, 平面平行假设所带来的误差依然十分显著 [8,9].

卫星反演云特性参数, 如光学厚度与有效粒子半径, 需要用到可见光及太阳近红外波段. 美国 EOS 计划中的 Terra 及 Aqua 卫星上所搭载的中分辨率成像光谱仪 MODIS(moderate resolution imaging spectrometer)就设置了 0.67 及 2.13 μm(同时还有 3.75 μm)通道, 并利用所测量的云在这两个波段的反射辐射值, 采用平面平行理论来反演云光学厚度及有效粒子半径. 因此, 研究云的非均匀性对这两个波段双向反射率

2007-03-28 收稿, 2007-06-15 接受
国家自然科学基金资助项目(批准号: 40333034, 40505006)

的影响, 有助于提高我们对卫星反演产品的认识.

本文的研究目的是将云当作三维辐射传输介质对待, 采用三维辐射传输模式来计算三维云场在 0.67 及 2.13 μm 波段的反射辐射, 探讨云的非均匀性对这两个波段的双向反射率的影响.

1 三维辐射传输模式与云场

1.1 三维辐射传输模式 SHDOM

球谐函数离散纵坐标法SHDOM(Spherical Harmonics Discrete Ordinate Method)由Evans[10]所开发, 是目前使用最广泛的以显式求解辐射传输方程的途径来解决非均匀介质中的辐射传输问题的方法. 该方法效率高, 使用方便灵活, 并且代码公开. SHODM 可以计算一维、二维、三维非均匀介质中非极化的单色或波段(采用K分布方法)辐射传输问题(太阳源或热发射源), 可以输出任意角度的辐射强度、半球通量、净通量、平均辐射强度等参数.

SHDOM 由离散空间格点算法 SHSG(Spherical Harmonic Spatial Grid)派生而来 [11]. 它以球谐函数来计算包含散射积分的源函数, 以离散纵坐标来进行辐射传输方程的空间积分, 并采用Picard迭代的方法来求解. 每步迭代由下面 4 个步骤组成: (1) 将球谐函数形式的源函数转换成离散纵坐标形式. (2) 积分源函数以获得辐射场. (3) 将辐射场转换为球谐函数形式. (4) 由以球谐函数表达的辐射场计算源函数.

同时为了进一步提高计算效率及节省内存空间, SHDOM 算法采用自调节的离散格点来表达辐射场的变化, 可根据计算精度的需要自动分裂格点, 以取得较高的计算精度. 在计算开始时, 只需要先给定基格点. 在迭代进行的过程中, 若需要, 刚对格点进行分裂, 形成不规则的自调网格, 以获取较高的空间分辨率. 这种处理方法极大地提高了计算效率, 也减少了对内存空间的需求.

与 Monte Carlo 方法相比, SHDOM 更适用于三维辐射传输模拟中要求输出变量较多的情况, 其精度和速度都能达用户的需求. 因此, 本文选取 SHDOM 作为研究所用的三维辐射传输模式.

1.2 三维云场

研究云的三维辐射传输问题, 离不开对三维云场的刻画. 三维云场的生成方法多种多样, 如规则几何体法、地基资料法、随机模式法、卫星资料法、动力学云模式法等. 本文的三维云场选自供国际比对的I3RC(International Intercomparison of 3D Radiation Codes)Phase Ⅱ(http://i3rc.gsfc.nasa.gov/cases_new.html)中的两个云场: 积云场(Cumulus field/cu)和层积云场(Stratocumulus field/stcu). 两个云场都给出了内部各个格点处的有效粒子半径r_e和含水量LWC等详细描述. 这两个云场分别取自GEWEX和FIRE-I中的实验结果, 有很好的代表性, 为一些研究所采用. Marshak 等人 [12]曾利用这两个云场研究云的非均匀性对反演云光学厚度及有效粒子半径的影响, 但他们在研究中没有讨论云的非均匀性对双向反射率的影响.

(ⅰ) 积云场(cu). 积云场取自在GEWEX(The Global Energy and Water Cycle Experiment)的云系研究项目(GCSS, GEWEX Cloud System Study)的陆上浅积云边界层实验中的大涡模拟结果 [13](Large Eddy Simulation, LES).

云场的总格点数为 100×100×36($x\times y\times z$), 每个格点的尺寸为 66.7 m×66.7 m×40 m, 故云场的体积为 6.7 km×6.7 km×1.4 km.

图 1 给出了该云场的云顶、云侧的视图.

(ⅱ) 层积云场(stcu). 层积云场取自在FIRE-I层积云实验中的LES模拟结果 [14].

云场的总格点数为 64×64×16($x\times y\times z$), 每个格点的尺寸为 55 m×55 m×25 m, 故云场的体积为 3.5 km×3.5 km×0.4 km.

图 2 给出了该云场的云顶、云侧的视图.

2 计算方案设计

云在三维介质中的辐射传输本质上是五维(5D)边界值问题 [10], 包括三个空间方向(x, y, z)和两个角度(辐射入射角度θ_0, φ_0和出射角度θ, φ). 因此, 研究卫星反演问题, 需要先明确太阳-地球-卫星这三者之间的位置关系.

我们知道, 绝大部分云的云顶是起伏的, 有很多的“隆起”, 特别对于积云或对流云, 起伏更为强烈. 因此, 较高的云顶会对入射的太阳光产生遮挡, 从而在其背侧形成阴影. 这是云的非均匀性会对辐射传输造成影响的明确可辨的证据之一. 同时, 不同的太阳天顶角(θ_0)下, 阴影的面积不同, 其影响也可能不同. 因此, 本文选择 30°和 60°这两个太阳天顶角, 以了解中低太阳天顶角下, 阴影作用对反射辐射影响. 另外, 云顶的几何结构千变万化, 同一太阳天顶角下, 太阳光从不同的方位入射, 其影响也可能不同. 因此, 本文选择了 0°, 90°, 180°, 270°四个太阳方位角(φ_0).

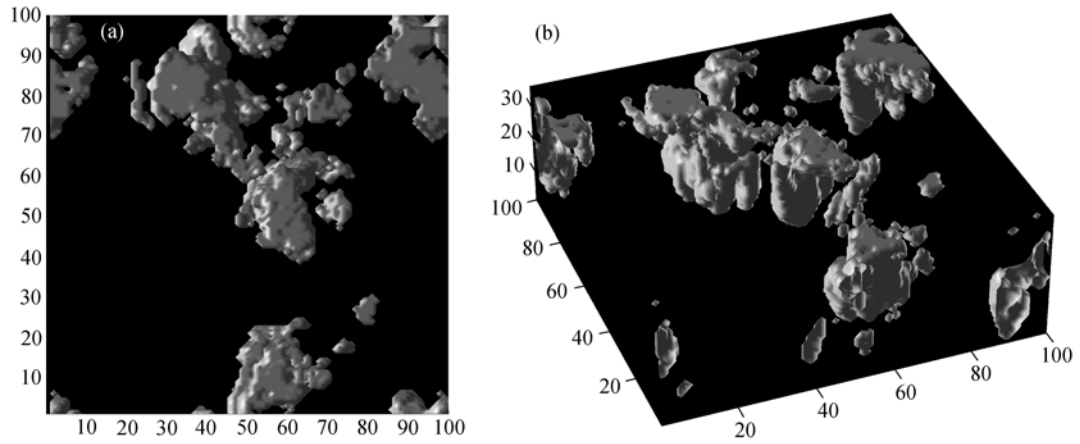

图 1 积云场的几何结构

(a) 顶视图; (b) 侧视图

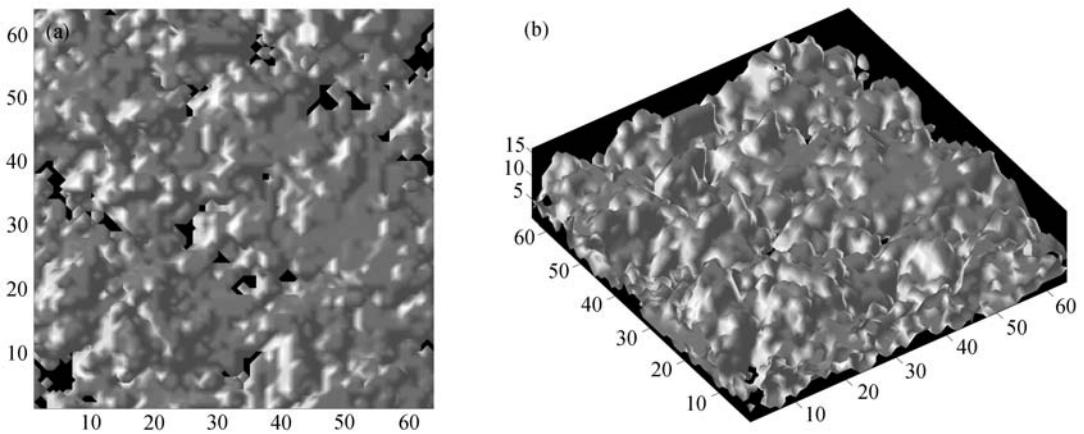

图 2 层积云场的几何结构

(a) 顶视图; (b) 侧视图

天底方向的反射辐射是卫星对地观测的常规方式. 因此本文设置 SHDOM 输出云顶在天底方向 0.67 及 2.13 μm 的反射辐射, 以模拟卫星所观测到的辐射值.

在应用 SHDOM 进行计算时, 需要事先约定太阳入射方位与云场位置间的关系. 本文约定太阳方位为 0°, 意味着太阳辐射沿正 x 方向入射, 太阳方位为 90°, 意味着太阳辐射沿正 y 方向入射.

3 模拟结果与分析

在前面的计算方案及相关约定下, 我们计算了 cu 和 stcu 两云场在 0.67 及 2.13 μm 天底方向的反射辐射. 限于篇幅, 只在图 3 和 4 中分别给出了 cu 和 stcu 两云场在 $\theta_0 = 30°$和 60°, $\varphi_0 = 0°$时 0.67 及 2.13 μm 的 BRDF.

我们知道, 在平面平行理论下, $R_\lambda(\mu,\mu_0,\phi)$, 即 BRDF 的取值介于 0 与 1 之间, 不会有大于 1 的情况. 从图 3 可以看出, 在 $\theta_0 = 30°$时, 两云场所有格点处的 BRDF 均小于 1, 与平面平行理论相符. 事实上, 即使在这种情况下, 两个非均匀云场的 BRDF 值还是与理想的平面平行状况有明显差异.

从图 4 中我们发现, 在 $\theta_0 = 60°$时, cu 场有近 6% 的有云格点的 0.67 μm BRDF 出现了>1 的异常值, 出现了与平面平行理论相悖的情况. 在 $\varphi_0 = 90°$, 180°, 270°时, cu 场也有相同情况出现.

图 5 给出了 cu 场 BRDF 值异常的一个区域与相应高度场的放大对比图及该处云顶的几何结构. 从图 5 中可以看出, BRDF 值异常区域的云处于局地高度低谷区. 这些区域内的云, 既可以接受到太阳光的直射, 同时也能接受到邻近较高的云散射过来的辐射, 从而造成该低谷区域的反射辐射增强.

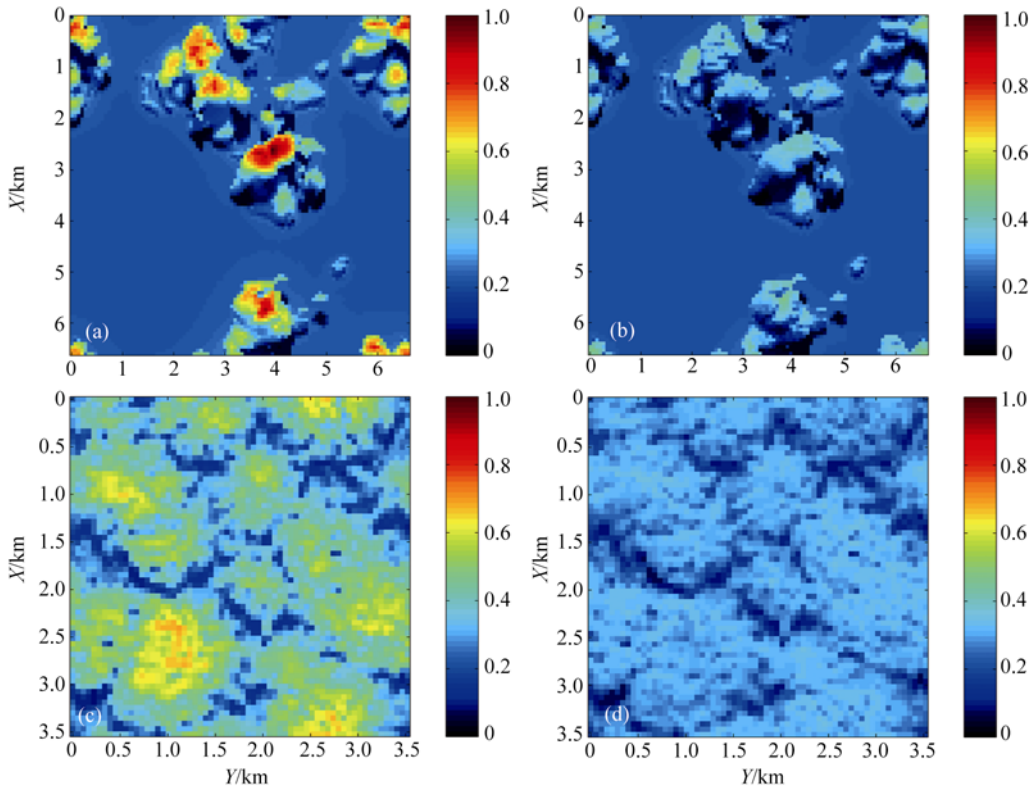

图 3 cu 与 stcu 场在 $\theta_0 = 30°$, $\varphi_0 = 0°$时天底 BRDF

(a) cu 场 0.67 μm; (b) cu 场 2.13 μm; (c) stcu 场 0.67 μm; (d) stcu 场 2.13 μm

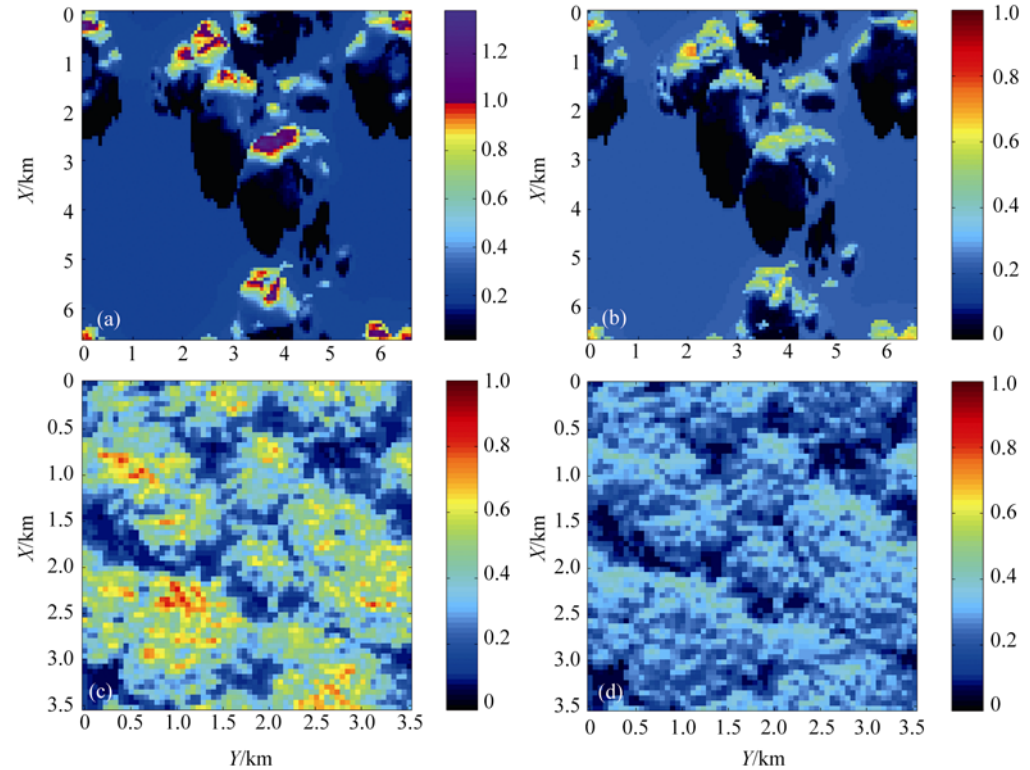

图 4 cu 与 stcu 场在 $\theta_0 = 60°$, $\varphi_0 = 0°$时天底 BRDF

(a) cu 场 0.67 μm; (b) cu 场 2.13 μm; (c) stcu 场 0.67 μm; (d) stcu 场 2.13 μm

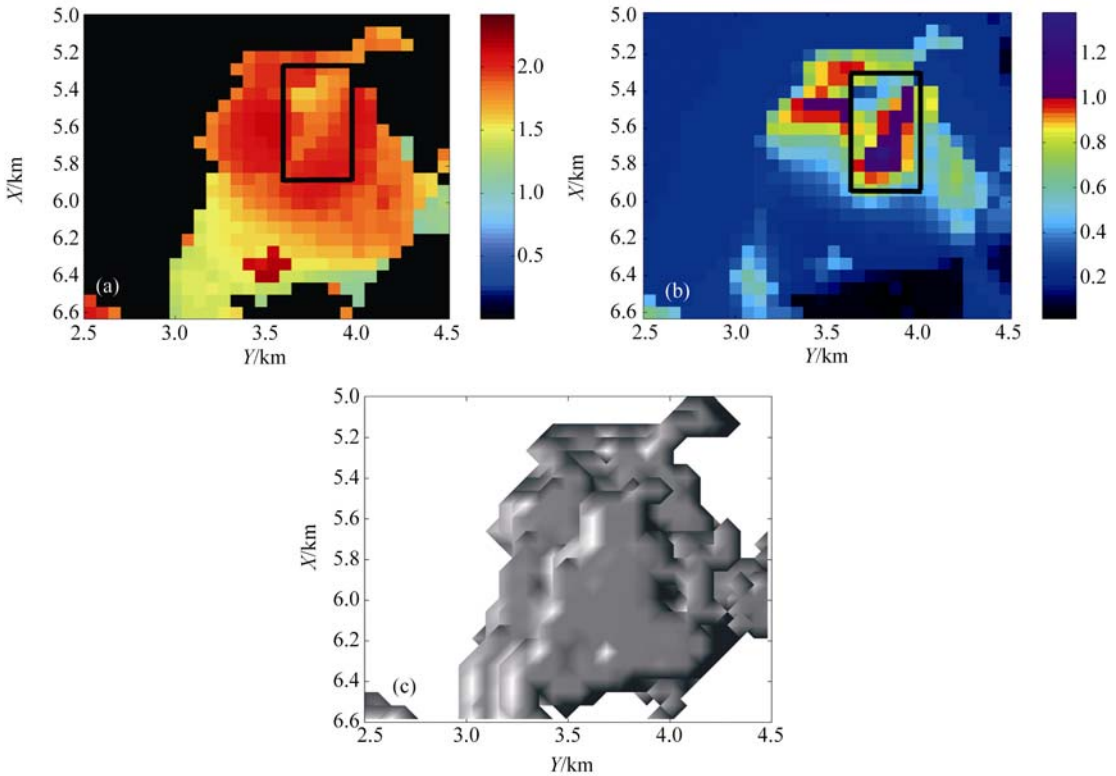

图 5 cu 场 $\theta_0 = 60°$, $\varphi_0 = 0°$时, 0.67 μm BRDF 异常值区域与相应高度场放大对比图

方框表明该处 BRDF 值异常的区域处于局地低谷区域. 详细说明见正文. (a) cu 场的 *X*: 5~6.6 km, *Y*: 2.5~4.5 km 的高度场; (b) cu 场与图(a)相应区域的 0.67 μm 的 BRDF; (c) cu 场与图(a)相应区域的云顶结构图

图 6 对此现象做了进一步的解释. 图 6 中 A 点处于云顶的局地低谷处, B 点处于云侧, 高于 A 点. A 点和 B 点都可以接受到太阳入射辐射的直射. 这两点处的云粒子会将入射辐射向各个方向散射. 由于 A 点处于局地低谷, 同时由于多次散射作用, 因此, 除了太阳直射辐射外, A 点还能接收到包括 B 点在内的邻近较高的云散射过来的辐射. 这些额外散射过来的辐射会被 A 点处的云粒子再次向各个方向散射, 当然也包括天底方向, 因此造成卫星观测到的 A 点的辐射增强. 反之, 在被遮挡的一侧, BRDF 值可能减小.

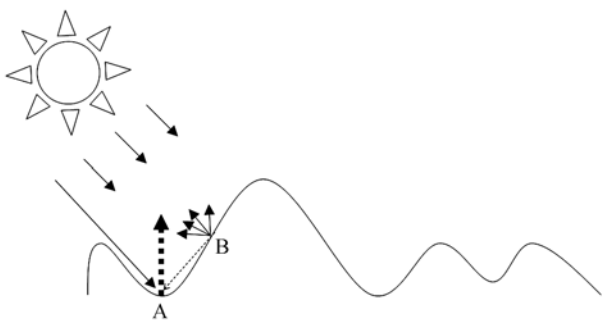

图 6 云侧造成的局地低谷区域的辐射增强示意图

A 点处于局地低谷, B 点处于云侧, 高于 A 点. A, B 两点均可以接收到太阳直射. A 点同时还能接收到来自 B 点的散射, 造成 A 点的反射辐射增强. 详细说明见正文

对比图 4(a)与(b)可以看到, 对于 0.67 μm 出现 BRDF 值异常的区域, 2.13 μm 的 BRDF 在对应区域的值也较高, 部分格点的值接近临界值 1. 这表明云的非均匀性对这两个波段均可造成其 BRDF 增强, 并且对非吸收波段(0.67 μm)的影响大于吸收波段(2.13 μm), 可能导致产生出现平面平行理论下不会出现的大于 1 的异常值.

需要指出的是被增强的像素点并不是孤立存在, 而是在一定区域内聚集出现, 其尺度约 300 m×300 m (图 5). 目前 MODIS 所提供的反演产品的尺度最小为 250 m×250 m, BRDF 异常值聚集出现的现象说明云非均匀性对中低分辨率的卫星反演也会有影响.

同一个太阳天顶角下, 从不同方位入射的太阳光会照到云体的不同部分. 因此, 对于我们的模拟计算来讲, 不同的太阳方位, 相当于对应着不同的云场. cu 场在太阳天顶角 60°时, 0°, 90°, 180°, 270°四个太阳方位角下均出现了部分格点上的 BRDF＞1 的情况,

这说明在太阳天顶角较大时，积云场出现 BRDF 异常并不是“偶然事件”. 积云云顶的非均匀性对其 BRDF 有显著影响. 原因是积云的云顶起伏很强烈，有很多的高峰与低谷. 大的太阳天顶角时，对于高度高的云来说，其侧面会接受到更多的太阳入射辐射，进而影响到其邻近较低处的云的反射辐射，造成那里的辐射增强.

将图 4(c)的 stcu 场 0.67 μm 的 BRDF 与其的云顶几何结构(图 2)进行对比，可以看到，stcu 场云顶的局地低谷处的 BRDF 也均较高，部分点的值也接近临界值 1. 事实上，对于 stcu 场，同样的太阳入射条件下，在其他卫星观测角度，也可以观测到 BRDF>1 的异常值(图 7). 这说明云的非均匀性对于云顶变化不强烈的层积云场也同样有显著影响.

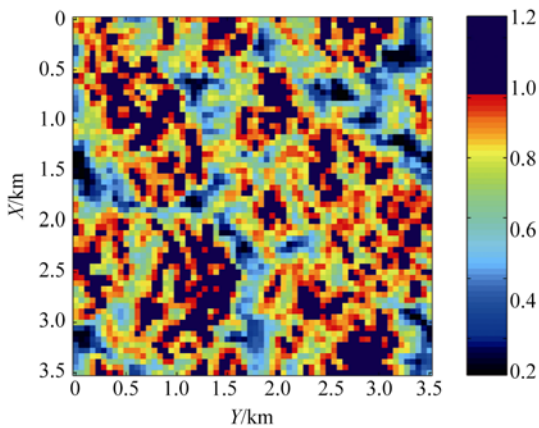

图 7 stcu 场 0.67 μm 的 BRDF 值

观测条件：太阳为 $\theta_0 = 60°$, $\varphi_0 = 270°$；卫星为 $\theta = 60°$, $\varphi = 90°$

以上的分析表明，云的非均性对双向反射率有重要影响，非均匀性越强对 BRDF 的影响越大，甚至导致 BRDF 异常，这种现象在一定的日-地-星条件下可以观测得到.

4 总结

关于云的非均匀性对双向反射率的影响曾有过一些研究，但对于云非均匀性所造成的 BRDF 异常问题鲜有讨论. 本文应用 SHDOM 模式对选自 I3RC Phase Ⅱ 的积云场与层积云场计算了其 0.67 及 2.13 μm 的天底方向的双向反射率. 数值模拟的结果表明，当太阳天顶角较大时，积云场中有近 6%的格点的 BRDF 值出现异常. 层积云场在特定的卫星观测角度也会出现此现象. BRDF 值异常的区域既可以受到太阳的直射，也可以接收到邻近较高的云的散射辐射，从而造成这些区域内散射辐射被增强，造成其 BRDF 值异常. 云的非均匀性对于非吸收波段的影响大于对吸收波段的影响.

卫星的对地观测是在真实的三维环境中进行的. BRDF 值异常这种“平面平行理论中不会出现，但现实中真实存在”的现象，说明云的非均匀性有可能造成卫星的观测值出现与平面平行辐射传输理论不相符的状况. 如果我们应用这些观测结果，并且采用平面平行理论进行后续的反演工作，必然会得到错误的反演产品，这也是云的非均匀性会影响卫星反演结果的证据之一.

我们的模拟计算所选择的三维云场的水平分辨率较高，分别是 66.7 和 55 m. 这提醒我们在应用高分辨率的卫星观测资料时，要意识到有的像素可能会受到云非均匀的影响，其反射辐射值可能会被增强. 因此，对应用其反演的产品也要有清醒的认识. 由于被增强的像素点是在一定区域内聚集出现的，所以，云非均匀性对中低分辨率的卫星反演也同样有影响.

云的非均匀性对双向反射率的影响与太阳天顶角有密切关系. 随着太阳天顶角的增大，云的非均匀性对反演结果的影响加大，BRDF 异常值出现的概率也会增加. 在中高纬度地区，即使在中午，太阳天顶角也经常很大. 因此，在中高纬度地区进行高分辨率卫星云产品的反演与应用时更要充分考虑到云的非均匀性的影响. 同一非均匀云场由于所处纬度、季节和地方时的不同，云非均匀性对反演结果的影响也会不同. 这种系统偏离的差异值得进一步重视.

参 考 文 献

1 Loeb N G, Várnai T, Winker D M. Influence of subpixel-scale cloud-top structure on reflectances from overcast stratiform cloud layers. J Atmos Sci, 1998, 55: 2960—2973[DOI]
2 Davies R. The effect of finite geometry on the three-dimensional transfer of solar irradiance in clouds. J Atmos Sci, 1978, 35: 1712—1725
3 Loeb N G. In-flight calibration of NOAA AVHRR visible and near-IR bands over Greenland and Antarctica. Int J Remote Sens, 1997, 18: 477—490[DOI]
4 Barker H W. Solar radiative transfer for wind-sheared cumulus cloud fields. J Atmos Sci, 1994, 51: 1141—1156[DOI]
5 Coakley Jr J A. Reflectivities of uniform and broken layered clouds. Tellus, 1991, 43B: 420—433
6 Davies R. Spatial autocorrelation of radiation measured by the Earth Radiation Budget Experiment: Scene inhomogeneity and reciprocity violation. J Geophys Res, 1994, 99: 20879—20887[DOI]
7 Loeb N G, Davies R. Observational evidence of plane parallel model biases: Apparent dependence of cloud optical depth on solar

zenith angle. J Geophys Res, 1996, 101: 1621—1634[DOI]
8 Davis A, Marshak A, Wiscombe W, et al. Scale invariance of liquid water distributions in marine stratocumulus. Part I: Spectral properties and stationarity issues. J Atmos Sci, 1996, 53(11): 1538—1558[DOI]
9 Loeb N G, Coakley J A. Inference of marine stratus cloud optical depths from satellite measurements: Does 1D theory apply? J Clim, 1998, 11: 215—233[DOI]
10 Evans K F. The spherical harmonics discrete ordinate method for three-dimensional atmospheric radiative transfer. J Atmos Sci, 1998, 55: 429—446[DOI]
11 Evans K F. Two-dimensional radiative transfer in cloudy atmospheres: The spherical harmonic spatial grid method. J Atmos Sci, 1993, 50(18): 3111—3124[DOI]
12 Marshak A, Platnick S, Várnai T, et al. Impact of three-dimensional radiative effects on satellite retrievals of cloud droplet sizes. J Geophys Res, 2006, 111(D9): 1—12[DOI]
13 Stevens B, Moeng C H, Sullivan P P. Large eddy simulation for radiatively driven convection: Sensitivities to the representation of small scales. J Atmos Sci, 1999, 56: 3963—3984[DOI]
14 Moeng C H, Cotton W R, Stevens B, et al. Simulation of a stratocumulus-topped planetary boundary layer: Intercomparison among different numerical codes. Bull Amer Meteor Soc, 1996, 77(2): 261—278[DOI]