

一个三维 Monte-Carlo 地气 耦合辐射传输模式^{*}

刘广员 邱金桓

(中国科学院大气物理研究所, 北京 100029)

摘 要 建立了一个可靠和较高计算效率的三维 Monte-Carlo 地气耦合辐射传输模式 (3DMC)。该模式在光子释放和定位、地气耦合、辐射率高分辨模拟计算和计算效率等方面有所发展。

关键词: 地气耦合模式; 辐射传输

文章编号 1006-9895 (2004) 01-0069-09 **中图分类号** P422 **文献标识码** A

1 引言

三维空间大气辐射传输问题 (包括非均一地表和含云大气) 是当今国际上大气辐射问题研究的重点之一^[1]。主要是出于卫星光学量化遥感应用和气候模拟研究等问题的需要, 近年来国际上涌现出众多的三维辐射传输模式, 而其主流是近似的三维辐射传输模式。由于实际水平非均一反射地表和云天大气的复杂性, 这些模式大都处于发展阶段, 还不成熟, 尤其在耦合非均一反射地表和辐射率的精确计算方面等。而在研究诸如卫星对地遥感中的邻近效应^[2] (adjacency effect) 等重要问题中面临的一大困难, 正是对卫星信号 (视场角分辨率很高) 的模拟要求所用模式既适用于水平非均一反射地表又具有很高的性能, 包括计算精度和计算效率两方面。上述近似模式难以满足这种需求。

MC (Monte-Carlo) 是非均一地表和大气状态下常用的有效模式。这类模式通过对随机变量的统计试验求解数学物理问题的近似数值解^[3], 广泛应用于大气辐射传输模拟和大气遥感等问题研究。1964~1965 年, 美国的 Collins 等^[4]首先使用 MC 方法研究大气辐射传输问题。1989 年, 国内的吴北婴等^[5]发展了后向球面大气矢量 MC 辐射传输模式, 用来模拟火山爆发后的曙暮光特征。而发展一个可靠的和较高计算效率的三维 MC 地气耦合辐射传输模式, 对于研究非均一地表和含云大气等复杂条件下的三维空间辐射传输问题 (如邻近效应等) 十分有用。

本文结合水平非均一反射地表上地气耦合辐射传输物理机制与卫星遥感的特点, 利用 FORTRAN 90 语言, 建立起一个三维 MC 地气耦合辐射传输模式: 3DMC。可用于模拟水平均一或非均一反射地表情形下地气耦合辐射传输系统中不同天顶角和方位角的辐射率和反射率。下面叙述模式及其主要特点, 以及模式的可靠性检验。

2002-03-04 收到, 2002-08-21 收到修改稿

^{*} 国家自然科学基金资助项目 40175009.

2 模式及其主要特点

三维情况,尤其是水平非均一反射地表的引入,导致相应的 MC 模式与均一反射地表情况下的 MC 模式有诸多不同之处。本文重点介绍 3DMC 模式在光子释放、定位、接收、地气耦合、辐射率高分辨模拟计算和计算效率等方面的特点。

2.1 3DMC 对太阳光子随机运动过程的模拟

模式中,太阳光子从大气上界进入后,可直接到达地表;也可与大气中的分子或粒子发生一次或多次碰撞,然后能量完全消失或向上逸出大气层或到达地表;到达地表的光子可被地表完全吸收,也可被反射;经地表反射后的光子可直接逸出大气层;也可与大气中的分子或粒子发生一次或多次碰撞,然后能量完全消失或逸出大气层或重新到达地表。

判断光子在地气系统中传输时是发生散射、地表反射或逸出大气,要看光子前进一个随机位移后的位置。光子前进一个随机位移后,可能逸出大气层;如果仍在大气层内,则发生散射,此时是否存在吸收要看单次散射反照率是否为 1;如果光子到达地表,当所在位置的反射率不为 0 时发生反射,否则被地表完全吸收。

2.2 3DMC 设计了均匀分布太阳入射能量的模拟方案

在水平非均一反射地表情况下,大气上界的视反射率 (apparent reflectance) 表现为水平位置的函数,故模拟太阳光子入射时不能与均一地表 (平面平行大气状态假设) 情况下一样采用等效的定点入射方式,而必须模拟光子的随机水平位置入射方式。

这里特别需要注意的是,由于实际太阳能量是水平均匀分布的 (通常情况下可以这样假定),模拟试验证明,如果想当然地用两个随机数简单地分别定出入射光子的 x 坐标和 y 坐标,就不能保证能量分布的均匀性,会得到错误的模拟结果。

本文在 3DMC 中根据概率分布原理设计了有效的随机入射方案。假设已知光子入射范围的大小,这是一个大气上界以接收点为圆心的水平圆形区域,圆半径为 R_0 ,由于光子落在该圆内的概率为 1,则落在圆内部任意半径 R 的同心圆中的概率 P_{R_1} 与 R 和 R_0 之间有如下关系:

$$\frac{R^2}{R_0^2} = P_{R_1}, \quad (1)$$

$$R = R_0 P_{R_1}^{\frac{1}{2}}, \quad (2)$$

其中, P_{R_1} 为 0~1 之间的随机数。光子的方位角为

$$\phi = 2\pi P_{R_2}, \quad (3)$$

其中, P_{R_2} 为 0~1 之间的随机数。转化为直角坐标系后,光子释放位置 (z 取模拟大气上界高度) 为

$$x = R \cos \phi = R_0 P_{R_1}^{\frac{1}{2}} \cos(2\pi P_{R_2}), \quad (4)$$

$$y = R \sin \phi = R_0 P_{R_1}^{\frac{1}{2}} \sin(2\pi P_{R_2}). \quad (5)$$

该方案保证了水平入射区域内辐射能量的均匀分布,符合实际物理机制。

2.3 3DMC 对卫星小区域接收的模拟方案

在水平非均一反射地表条件下,同一观测高度上的视反射率相应地表现为水平位

置的函数，为了模拟不同位置的视反射率，必须考察特定的小范围接收区域内的视反射率，而不能象水平均一地表情况下（平面平行大气假设）那样不需要考虑接收范围问题。

论文在 3DMC 中研究出同时增大接收面半径和目标物半径的小区域接收方法。其好处有三个：比如在研究卫星遥感中的邻近效应时，在节省模拟计算时间的同时，既保证模拟研究的卫星视场角大小不变，原则上又利用目标物面积增大引起的邻近效应偏低，消除了接收面积增大引起的邻近效应偏高造成的误差。

相比之下，如果把卫星看作一个点来模拟，则在非均一地表条件下，大量的计算时间会使模拟研究变得根本不可能；如果仅仅把接收范围增大，由于大气对地表特征有模糊效应^[6]，则会高估邻近效应。

2.4 3DMC 中便捷的光子三维空间定位方案

采用直角坐标系绝对位置定位方式，方便模拟各种真实大气状况，比如垂直分层大气和水平非均一大气。模式中地表目标物、太阳和探测器的位置关系见图 1，图中地表目标物中心位置为 A (0, 0, 0)； θ_s 为太阳天顶角，太阳方位角取 0， θ_v 为探测器观测天顶角， ϕ 为探测器与太阳的相对方位角。

3DMC 对光子的定位方法是在模式的初始化部分，即读入大气消光系数的垂直分布廓线后，将其转换为大气光学厚度的垂直分布廓线，同时采用光学厚度来度量光子运动步长。设 $\Delta\tau$ 为斜程光学厚度步长， $\Delta\tau_z$ 为垂直方向光学厚度步长， P_R 为 0~1 之间的随机数， θ 为光子发生位移之前在前进方向的天顶角。则： $\Delta\tau = -\ln P_R$ ； $\Delta\tau_z = \Delta\tau \cos \theta$ 。这样可以便捷地随时定出光子在地气系统中的空间位置。

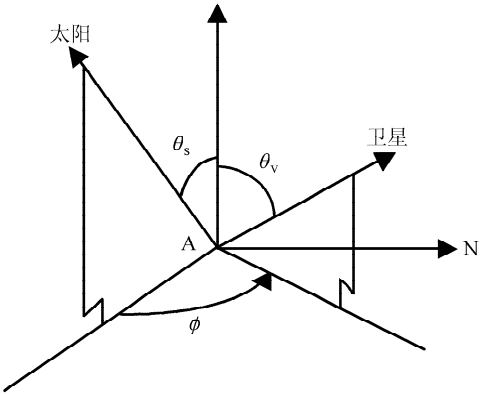


图 1 3DMC 中太阳、探测器和地表目标物的几何方位示意图

其中，光子散射方向模拟方法如下：光子散射后的方位角是随机的，而散射角与相函数有关。设相函数为 $P(\theta)$ ， P_R 为随机数，则散射角 θ 由下式确定：

$$P_R = \frac{\int_0^\theta P(\cos\theta') d(\cos\theta')}{\int_0^\pi P(\cos\theta') d(\cos\theta')} \tag{6}$$

相比之下，国外一个 RAINIER 模式^[7]则是不断累计网格步长与局地大气消光系数的乘积，将累计值与光子前进的光学厚度相比较，显然多费时间。

2.5 3DMC 对 MC 方法中正确地气耦合过程的揭示

上述三维空间定位方法使 3DMC 可以将地表反射率设置为水平位置的任意函数，方便模拟水平非均一反射地表与大气的耦合辐射传输过程。

3DMC 是依据反射能量分布规律揭示的地表耦合的 Monte-Carlo 模拟方法。假设到达地表的光子能量为 e_1 ，地表为 Lambert 反射体，且反射率为 R 。在此假设下，地面上亮度应为 Re_1/π ，与方位无关，于是反射能量应为

$$e_2(\mu) = 2\pi \int_0^1 \frac{e_1 R}{\pi} \mu d\mu = e_1 R \mu^2. \tag{7}$$

依据（7）式，在 Monte-Carlo 模拟中，随机数 P_R 与反射天顶角余弦 μ 的关系应为

$$P_R = e_2(\mu) / (2\pi \int_0^1 \frac{e_1 R}{\pi} \mu d\mu) = \mu^2, \tag{8}$$

$$\mu = \sqrt{P_R}. \tag{9}$$

3DMC 纠正了国外 FAUTMC 模式^[8]中错误的地气耦合过程。在 FAUTMC 中，随机数 P_R 与反射天顶角余弦 μ 的关系为

$$\mu = P_R. \tag{10}$$

下面通过对比分析来说明（9）式是正确的，而（10）式是错误的。

对比采用四个模式：DISORT、3DMC、FAUTMC 和 RE-FAUTMC。其中 RE-FAUTMC 是本文为清楚说明问题而构造的一个中间模式，RE-FAUTMC 利用（7）式修正了 FAUTMC 中的（8）式。所用散射相函数见图 2，对比结果见图 3。

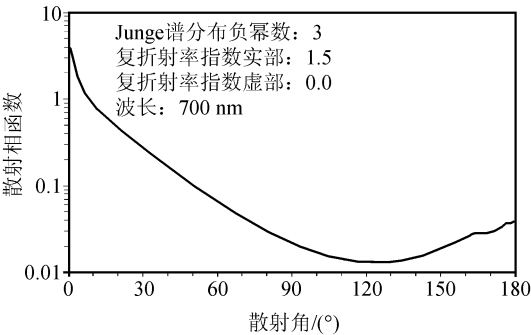


图 2 对比模拟用气溶胶散射相函数

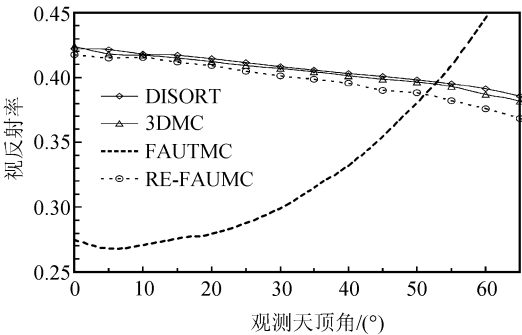


图 3 四种模式的模拟结果

从图 3 可见，3DMC 和 DISORT 的结果一致；在修正地气辐射耦合方法前，FAUTMC 与 3DMC 和 DISORT 的计算结果完全不同。修正后，RE-FAUTMC 的计算结果又与 3DMC 和 DISORT 的计算结果有了较好的可比性。在天顶方向，即 0°观测天顶角时，与 3DMC 和 DISORT 的偏差小于 2%。从而可知：FAUTMC 中对地气耦合过程的模拟方法是错误的，本文给出的（7）式是正确的。

2.6 3DMC 对 MC 方法进行辐射率高分辨率计算时可靠性的改进

本文研究发现，国外 FAUTMC 在进行高分辨率计算时会产生波动现象。经分析找到问题的根源：由于 FAUTMC 中计算散射概率分布函数的方法不正确，使得后向散射时的概率分布函数值分辨率不够高，在进行高分辨率计算时（比如观测天顶角离散度为 1°），由随机数确定散射角时不够准确，使模式将一个角度的光子能量误判给另一相邻角度，引起两相邻角度上一处能量变大而另一处能量变小，产生波动现象（从后文模式可靠性检验部分可见当观测天顶角离散度为 5°时，该模式与 DISORT 对比结果是可靠的）。本文在 3DMC 中根据（6）式提出了一个高精度计算散射概率分布函数的方法，消除了波动现象，保证了模式在进行辐射率高分辨率模拟计算时的可靠性，为正确模拟研究邻近效应等问题提供了保证。有关论证见下面两组模拟结果。

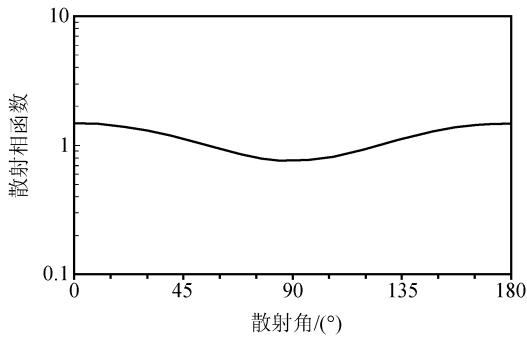


图 4 分子 Rayleigh 散射相函数

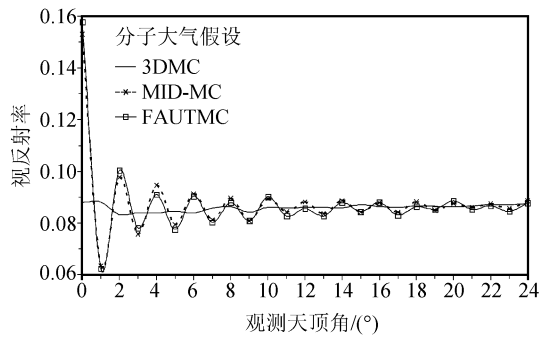


图 5 在分子大气条件下三种模式的模拟结果

第 1 组采用图 4 所示的分子相函数^[9]，地表反射率取 0，分子光学厚度取 0.237，太阳天顶角取 0°，观测天顶角离散度为 1°（即在每 1°的天顶角范围内计算一个卫星视反射率）。对比结果见图 5。图 5 中的 MID-MC 模式是本文为清楚说明问题而构造的一个中间模式，采用 FAUTMC 中计算散射概率分布函数的方法外，其他部分与 3DMC 完全相同。从图 5 可见：第一，FAUTMC 和 MID-MC 的模拟结果相吻合，但都存在明显波动，在小观测天顶角时尤其明显，天顶方向和天顶角为 1°处的视反射率之差接近 0.1。由于分子相函数是很平滑的，这一结果显然不合理。第二，3DMC 中，由于改正了计算散射概率分布函数的方法，消除了上面两个模式的波动现象。第三，由于 MID-MC 和 3DMC 的差异仅在于计算散射概率分布函数方法的不同上，故可知 MID-MC 和 FAUTMC 的波动现象正是由计算散射概率分布函数的方法错误引起的。

第二组采用图 2 所示的气溶胶相函数。地表反射率为 0，气溶胶光学厚度为 0.33，太阳天顶角取 0°，观测天顶角离散度为 1°。对比结果见图 6。从图 6 可以看到：第一点，采用气溶胶散射相函数时，在图中所给出的观测天顶角范围内 FAUTMC 的结果也存在明显的波动。天顶方向（天顶角为 0°）和天顶角 1°处的计算等效反射率差别接近 0.035，而天顶角为 1°处的计算等效反射率数值本身的大小还不到 0.03，可见差别之大；第二点，3DMC 中，由于改正了计算散射概率分布函数的方法，没有出现类似 FAUTMC 中的波动现象。

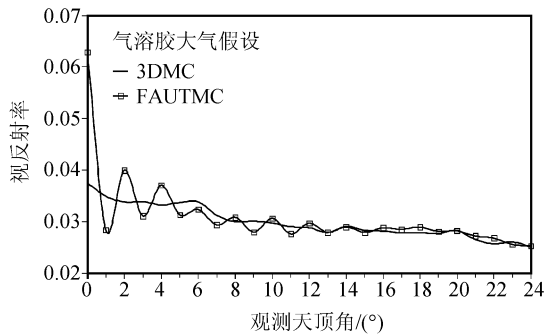


图 6 在气溶胶大气条件下两种模式的模拟结果

通过上述验证可见：本文 3DMC 提出一个高精度计算散射概率分布函数的方法，消除了 FAUTMC 中的波动现象，保证了高分辨率模拟计算时的可靠性能。

2.7 3DMC 计算效率的改进

在水平非均一反射地表状况下，利用 MC 方法模拟地气耦合辐射传输过程，尤其是在研究卫星遥感当中的邻近效应等复杂问题时，相对于水平均一反射地表情况而言，需要的时间多得多，给研究工作带来巨大困难。

论文设计出事先对散射角和方位角随机定位的加速方法，使 3DMC 的计算效率在

保证可靠性的前提下提高为原来的 5 倍。原理如下：在 MC 方法中，通常是在每次散射发生时计算一次散射角和方位角，这样，对庞大次数的散射角和方位角定位会花费大量计算时间，影响模式的计算效率。而本文设计了事先对散射角和方位角随机定位的方法，即在进行光子释放和追踪前进时，而不是等到每次散射发生时再临时计算。

表 1 对比测试用 PC 运行环境典型配置

配置项	配置指标
CPU	Intel PIV 1.3G (Hz)
内存	128 MB
操作系统	Windows Me
FORTTRAN 编译器	DVF 6.0

下面是加速前后模式可靠性和计算时间的对比。利用 3DMC 模拟了水平均一 Lambert 反射地表上的卫星视反射率，采用上文图 2 所示的相函数，表 1 是所用的计算机运行环境。对比结果见图 7，其中，EFF-3DMC 是加速后的模式。

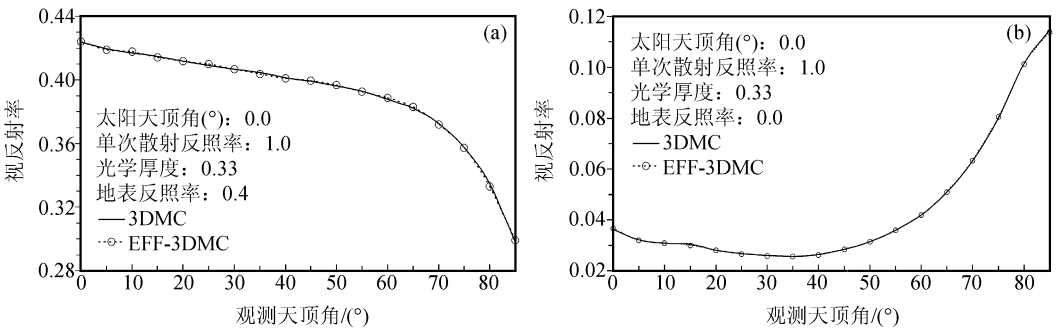


图 7 提高 3DMC 计算效率前后的模拟结果对比

图 7a 中，释放 3000 万个光子，3DMC 用时约 25 分钟，EFF-3DMC 用时约 5 分钟，图 7b 中，也释放 3000 万个光子，3DMC 用时约 14 分钟，EFF-3DMC 用时约 3 分钟。两图中模拟结果吻合都很好，而 EFF-3DMC 用时都约为 3DMC 的 1/5。

可见，在保持模式的可靠程度前提下，本文设计的加速方法使 3DMC 的计算效率提高 5 倍左右。此外，我们通过模拟试验证实了 3DMC 和 FAUTMC 的计算效率基本相同，这说明 EFF-3DMC 的计算效率也是 FAUTMC 的 5 倍。由于研究水平非均一反射地表上诸如邻近效应等复杂问题时，所需计算时间成百倍甚至上千倍地增加，此时把 3DMC 的计算效率提高 5 倍，作用非常显著。

3 模式可靠性检验

可靠性是对数值模式的基本要求。本文通过模式间的对比，分两步分别检验了 3DMC 在水平均一反射地表和水平非均一反射地表情况下的可靠性。

3.1 水平均一反射地表上 3DMC 的可靠性检验

目的主要是检验 3DMC 对地气系统中光子传输过程模拟的可靠性。方法是与其他模式做比较。采用三个对比模式：DISORT、RAINIER 和 FAUTMC。计算中假设大气平面平行，均一反射地表，计算中采用的天顶角间隔（离散度）均为 5°，所用的相函数如图 2 所示。对比验证结果见图 8。

综合图 8 的对比情况可见，水平均一反射地表情况下，与三个所用对比模式相比，

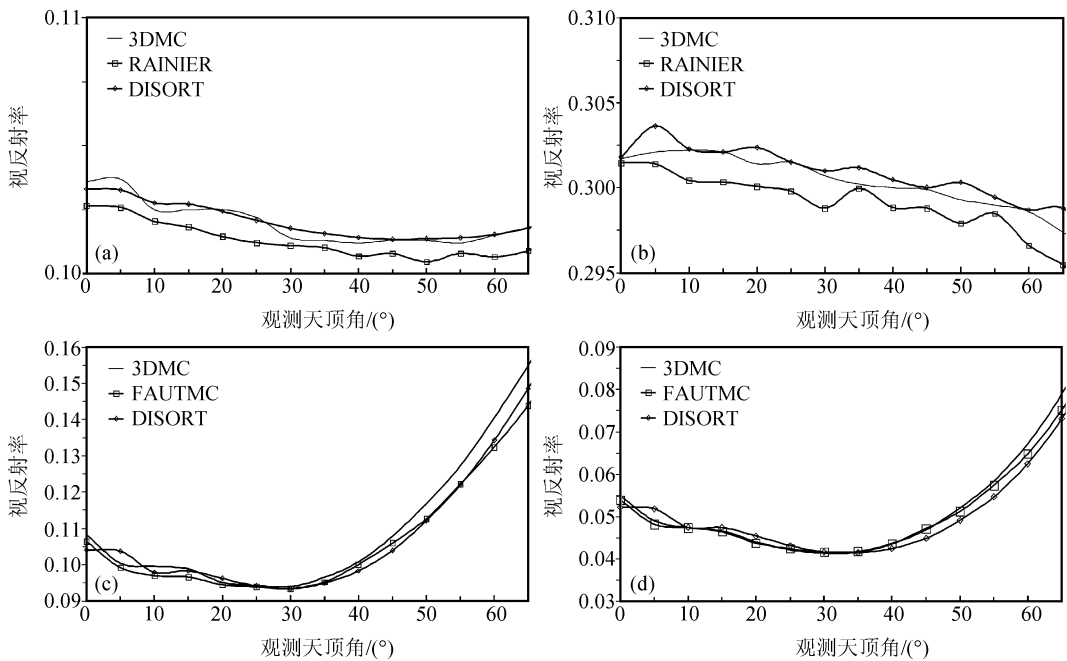


图 8 模拟结果对比图

- (a) 波长：700 nm，太阳天顶角：0.0°，单次散射反照率：1.0，光学厚度：0.0363，地表反照率：0.1；
- (b) 波长：700 nm，太阳天顶角：0.0°，单次散射反照率：1.0，光学厚度：0.0363，地表反照率：0.3；
- (c) 波长：700 nm，太阳天顶角：0.0°，单次散射反照率：1.0，光学厚度：1.0，地表反照率：0.0；
- (d) 波长：700 nm，太阳天顶角：0.0°，单次散射反照率：1.0，光学厚度：0.5，地表反照率：0.0

在有地表反射率、不同大气光学厚度和单次散射反照率的情况下，3DMC 都表现出稳定的可靠性。

3.2 水平非均一反射地表上 3DMC 的可靠性检验

在水平非均一反射地表条件下，3DMC 在光子释放方式和接收方式上与均一反射地表条件下存在着重大差别，所以还要继续检验 3DMC 在采用一定水平区域随机位置光子释放和小区域接收方式时的可靠性。

由于没有其他性能良好的三维地气耦合辐射传输模式，本文在相同地气条件下，利用 3DMC 本身进行两次计算，分别采用不同的光子入射和接收方式。方式 1：采用一定水平区域范围的光子随机释放和小区域接收方式；方式 2：采用光子定点释放和不考虑接收范围的方式（这种情况下 3DMC 的可靠性本章上文已经验证）。然后对比两种情况下的模拟结果是否一致。

对比验证之一假设大气平面平行，采用图 2 所示的相函数，地表反射率取 0.4，气溶胶光学厚度取 0.33，太阳天顶角取 0°，观测天顶角离散度 5°。结果如图 9 所示。

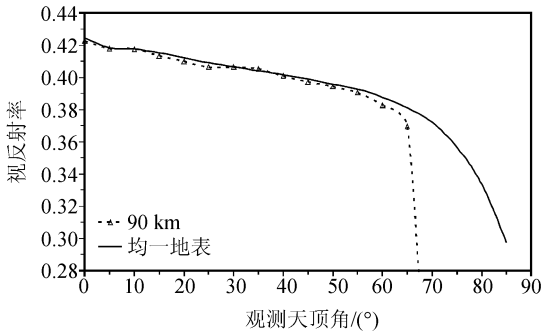


图 9 模拟结果对比图之一

图 9 中实线是 3DMC 采用方式 2 模拟计算的结果；另一条是采用方式 1 模拟计算的结果，模拟中取模式区域上边界高度 30 km（计算中读入的消光系数廓线高度为 30 km）；光子随机释放水平圆形区域半径为 90 km；水平圆形小区域接收，与光子释放圆形区域为同心圆，接收区域半径为 1 km。

从图 9 可以看出，当观测天顶角小于 65°时，两种方式模拟计算的结果吻合很好。其中采用方式 1 模拟计算的结果中出现的突然下降的现象，是由入射范围有限引起的。

对比验证之二改用前向散射更强的相函数（图 10），通过 Mie 散射程序算出。地表反射率取 0.2，气溶胶光学厚度取 0.33，太阳天顶角 0°，观测天顶角离散度 5°。结果如图 11 所示。

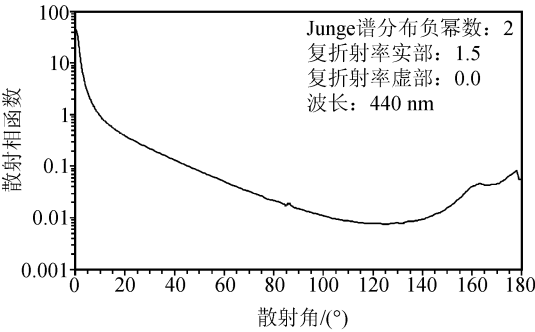


图 10 对比用气溶胶散射相函数

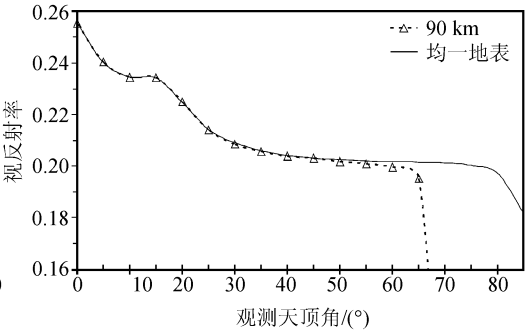


图 11 模拟结果对比图之二

从图 11 可以看出，当观测天顶角小于 65°时，两种方式模拟计算的结果吻合很好。其中采用方式 1 模拟计算的结果中出现的突然下降现象，也是因入射范围有限引起的。

由上述两组对比可见：3DMC 在水平非均一地表情况下也是一个可靠的模式。

两步对比检验表明 3DMC 是一个可靠的三维 MC 地气耦合辐射传输模式。

4 结论

从上文论述可以看到，本文建立了一个可靠和较高计算效率的 3DMC 模式。有六个方面的主要特点：

- (1) 根据概率分布原理设计了水平圆形区域入射光子能量均匀分布，即辐射能量在水平圆形区域内处处相等的光子随机入射方案。
- (2) 为了更好地模拟卫星接收方式，本文研究出同时增大接收面和目标物（像元）半径的小区域接收方法。
- (3) 发展了较便捷的三维空间光子定位方法，除了有利于模拟任意类型反射地表外，方便扩展应用于水平非均一大气情形。
- (4) 发现并纠正了 FAUTMC 模式中错误的地气耦合过程，依据反射能量（而非亮度）分布，揭示出正确的地气辐射耦合过程的模拟方法。
- (5) 发现并纠正了 FAUTMC 在进行辐射率高分辨率计算时存在波动现象的错误，提出了一个高精度计算散射概率分布函数的方法，保证了 3DMC 进行高分辨率计算时的可靠性。

(6) 设计出事先对散射角和方位角随机定位的方法(查表法),使 3DMC 在保证可靠性前提下计算效率提高约 5 倍,可以推广到其他 MC 模式当中去,在一定程度上有利于克服 MC 方法的普遍费时的缺点。

上述这些特点可供其他 MC 模式注意和借鉴。

本文 3DMC 模式适用于模拟“太阳—目标—卫星”这样一个复杂的大气和地表耦合辐射传输系统中的三维辐射传输过程和模拟探测器视反射率。模式对于研究非均一地表和含云大气等复杂条件下的三维空间大气辐射传输问题,比如水平非均一地表上卫星遥感的邻近效应和晴空含云大气条件下晴空区卫星观测时周围云的辐射影响等,十分有用。

参 考 文 献

- 1 Sushkevich T. A. , Multidimensional plane-parallel and spherical problems of the radiative transfer theory, In: *IRS2000: Current Problems in Atmospheric Radiation*, Edited by William L. Smith and Yuriy M. Timofeyev, A. Deepak Publishing, 2000, 261~264.
- 2 Otterman, J. , and R. S. , Fraser Adjacency effects on imaging by surface reflection and atmospheric scattering; Cross radiance to zenith, *Appl. Opt.* , 1979, **18**, 2852~2860.
- 3 Jacqueline Lenoble, *Radiative Transfer in Scattering and Absorbing Atmospheres: Standard Computational Procedures*, A. Deepak Publishing, Hampton, Virginia, USA, 1985, 300pp.
- 4 Collins, D. G. , and M. B. W. Ells, Computer procedure for calculation time dependent light scattering in spherical-shell atmosphere, *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 1979, **21**, 35~39.
- 5 吴北婴、吕达仁,用 Monte-Carlo 方法模拟火山爆发后的曙暮光特征, *大气科学*, 1989, **13**, 204~213.
- 6 Dacid, J. D. , and J. V. Martonchik, Influence of Aerosol Scattering on Atmospheric Blurring of Surface Features, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* , 1985, **GE-23**(5), 628~624.
- 7 ftp. ifm. uni-kiel. de
- 8 Macke, A. , R. Dlhopsky, J. Mueller et al. , A study of bi-directional reflectance functions for broken cloud fields over ocean, *Adv. Space Res.* , 1995, **16**(10), 55~58.
- 9 Young, A. T. , Revised depolarization corrections for atmospheric extinction, *Appl. Opt.* , 1980, **19**, 3427~3428.

A Three-Dimensional Monte-Carlo Model of Surface-Atmosphere Coupled Radiation

Liu Guangyuan, and Qiu Jinhuan

(Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029)

Abstract A reliable 3D Monte-Carlo model(3DMC) of surface-atmosphere coupled radiation is developed with higher computing efficiency. Its characteristics is showed in six aspects of release and finding the location of photons, receiving fashion of sensor, coupling of surface and atmosphere, computing radiance in high resolution with high accuracy and computing efficiency, respectively.

Key words: surface-atmosphere coupled model; radiative transfer