

宋磊, Min Qilong, 吕达仁. 2012. 云三维结构对加热率廓线及通量影响的模拟 [J]. 气候与环境研究, 17 (2): 160–170, doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2011.10021. Song Lei, Min Qilong, Lü Daren. 2012. A simulation of effects of cloud 3D structures on heating rate profiles and fluxes [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 17 (2): 160–170.

云三维结构对加热率廓线及通量影响的模拟

宋磊^{1,2,3} MIN Qilong² 吕达仁¹

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

2 Atmospheric Sciences Research Center, State University of New York, Albany, New York 12203, USA

3 中国科学院研究生院, 北京 100049

摘 要 大气加热率强度与结构是驱动全球大气环流的关键因素, 实际加热率分布与云三维结构密切相关。作者使用三维蒙特卡洛辐射传输模式, 模拟计算了云分辨模式所得3个典型三维云场的加热率廓线及通量; 定义了两个参数来同时描述加热率廓线的垂直分布和强度, 通过与独立像素近似算法对比, 定量统计分析了高分辨率下云三维结构对辐射的影响。结果表明, 在高分辨率条件下云三维结构对加热率廓线和通量影响十分显著, 且不同结构云场所体现的影响各具特点, 提出需要考察现有大气模式中云三维结构对当前所用加热率计算方案的订正方向。

关键词 云三维结构 加热率廓线 辐射传输

文章编号 1006-9585 (2012) 02-0160-11 **中图分类号** P422.3+1 **文献标识码** A
doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2011.10021

A Simulation of Effects of Cloud 3D Structures on Heating Rate Profiles and Fluxes

SONG Lei^{1,2,3}, MIN Qilong², and LÜ Daren¹

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

2 Atmospheric Sciences Research Center, State University of New York, Albany, New York 12203, USA

3 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

Abstract The strength and structure of broadband heating rate directly drives the global atmospheric circulations and is largely determined by cloud three-dimensional (3D) structures. Heating rate profiles and fluxes of three cloud fields resolved by Cloud Resolving Models (CRM) are simulated by a broadband 3D Monte Carlo radiative transfer model, which gives a quantitative and statistical estimate about the effects of cloud 3D structures on radiation in high resolution by comparing with Independent Pixel/Column Approximation (IPA/ICA). Two parameters are defined to describe the vertical distribution and strength simultaneously. The results show that the impacts of cloud 3D structures on radiation are very significant under high resolution conditions and different kinds of cloud fields have various characteristics. A direction of the revising on current heating rate calculation scheme in existing atmospheric models due to cloud 3D structures is raised.

Key words cloud three-dimensional structure, heating rate profile, radiative transfer

收稿日期 2010-02-15 收到, 2011-11-14 收到修定稿

资助项目 国家自然科学基金青年科学基金 41105015

作者简介 宋磊, 男, 1981年出生, 博士, 主要从事云辐射传输与遥感研究。E-mail: nedvedrock@gmail.com

1 引言

云在地球辐射收支及水循环中具有关键作用，在地气系统中扮演着十分重要的角色 (Min et al., 2004b; Barker, 2005; Stephens, 2005; Wang et al., 2007)。由于对云、辐射和动力反馈之间相互作用缺乏足够全面和细致的了解，限制着我们进一步认识天气及气候变化的内在机制 (IPCC, 2007)。气候系统将太阳辐射转化为热量并驱动全球大气与海洋循环，而大气加热率廓线的分布与云三维结构密切相关。因此，研究云三维结构与大气加热率廓线之间的关系，对了解云对气候系统的反馈具有重要意义。

大量观测和研究证明，将云作为一维还是三维对待，结果差异很大。Marshak et al. (2006) 将云的三维影响分为可分辨的 (resolved variability) 邻近像元变化和不可分辨的 (unresolved variability) 亚像元变化。大气环流模式 (General Circulation Model, GCM) 目前对云的处理基于平面平行假定，事实上对这两种变化均不考虑，许多研究讨论了这种假定所带来的偏差 (Barker, 1994; Loeb and Davies, 1996, Barker et al., 1998; Loeb and Coakley, 1998; 张凤, 2005)。独立像素近似算法 (Independent Pixel/Column Approximation, IPA/ICA) 忽略了像素间的水平传输，在较低分辨率云场中，这类水平传输被作为不可分辨的三维影响处理。这种方法在处理低分辨率、区域平均辐射时是对实际三维状况的很好近似。但如果云场结构相对复杂，这种方法也会导致明显地误差 (Cahalan et al., 1994; Marshak et al., 1995; Davis et al., 1997; von Savigny et al., 2002)。一些改进可以一定程度上提高其精度 (Marshak et al., 1998; Várnai and Davies, 1999)，但由于本质上依然是基于像素尺度的平面平行假设，因此只能改善结果而难以完全消除误差。此外，IPA 算法在高分辨率云场中的精度也需要重新被评估。

目前关于云三维结构与大气加热率或大气吸收的研究，主要关注大尺度下的区域平均结果 (Barker et al., 1999, 2003; Chen et al., 2000; Gu and Liou, 2001; O'Hirok and Gautier, 2003;

Raschke et al., 2005; Hinkelman et al., 2007)。一般认为，在 GCM 尺度下，云三维结构对大气加热率廓线的影响可以忽略。Barker et al. (1998) 认为较大尺度区域平均加热率廓线与云几何结构联系并不明显。Fu et al. (2000) 给出了类似结论，认为云三维结构对区域平均大气吸收和加热影响微弱；但他们同时指出，对强对流云，三维模拟得到的平均吸收比 IPA 得到的高出 $20 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。Zhang et al. (2004) 从全球角度讨论了大气吸收的垂直分布，发现由于云的阻挡，到达地表附近水汽的短波辐射减少，短波辐射所致加热向较高高度转移，且总的大气加热减少。Di Giuseppe and Tompkins (2003) 说明了强对流云的几何不均匀比云内光学特性不均匀更加重要，且忽略水平传输造成的局地加热率差异约为 $1 \text{ K} \cdot \text{d}^{-1}$ 以上。O'Hirok and Gautier (2005) 认为当分辨率小于 2 km 时，云三维作用不应该被忽略，对于复杂云场，这一范围可能达到 $5 \sim 10 \text{ km}$ 。尽管关于三维云和辐射的研究众多，但总体而言，关注高分辨率条件下垂直结构的研究尚不充分。随着大气环流模式以及云分辨模式向高精度和高分辨率发展，云三维效应对加热率廓线的影响有必要被进一步评估，加热率垂直分布导致的局地加热差异也变得更加重要 (Khairoutdinov and Randall, 2001; Vogelmann et al., 2001; Davis and Polonsky, 2005; Marshak and Davis, 2005; Davis and Marshak, 2010)。同时，吸收和散射的空间分布决定了光子路径分布，基于这个原理，高分辨率氧气 A 波段光谱辐射计为反演云三维结构提供了一种可行的新观测手段 (Min and Harrison, 1999; Min and Clothiaux, 2003; Min et al., 2004a)。

本工作重点关注高分辨率条件下的加热率垂直分布。通过比较 3 个不同特点和分辨率云场中三维 (3D) 算法和 IPA 的计算结果，试图对高分辨率云场中，云三维结构对加热率垂直分布和通量的影响给出统计性的定量分析，并总结不同特点云场中这种影响的异同。

2 云场与模式

2.1 三维云场

对云分辨模式 (Cloud Resolving Model, CRM)

所得 3 个典型三维云场进行了模拟, 分别命名为 ATEX、GATE-A 和 Open-cells。值得说明的是, 每层的水汽被平均分布到晴空和有云格点。尽管这种做法对局地加热率有一定影响, 但更能突出本文研究目的, 即三维云场结构对加热率的作用。此外, 对于较高的混合相云, 都按照水云处理, 并将有效粒子半径统一设为 $10\ \mu\text{m}$ 。这样的近似对中下部大气加热率廓线不会产生重大影响。

ATEX 是一个海上边界层云, 由 Stevens (Barker et al., 2003) 在大西洋信风实验 (Atlantic Trade Wind Experiment, ATEX) 中所采用。它的水平分辨率为 $0.1\ \text{km}$, 有云区域垂直分辨率为 $0.02\sim 0.04\ \text{km}$, 区域面积为 $6.8\ \text{km}\times 6.8\ \text{km}$ 。这个云场主要集中在近海面 $0.7\sim 1.6\ \text{km}$ 高度内, 在 $1.5\ \text{km}$ 附近云量 (cloud fraction) 最多, 平均可见光消光系数 β 约为 $100\ \text{km}^{-1}$ 。此高度以下云量减少, 但 β 增大为约 $200\ \text{km}^{-1}$ 。该云场位置较低, 光学厚度较小, 云场结构相对简单 (见图 1a1 和 a2)。

GATE-A 云场取自全球大气研究计划大西洋热带实验 (Global Atmospheric Research Programme Atlantic Tropical Experiment, GATE)。该云场模拟发展中的热带深对流云团 (Grabowski et al., 1998) 水平分辨率为 $2\ \text{km}$, 垂直分辨率由 $0.2\ \text{km}$ 至几千米变化, 区域面积约为 $400\ \text{km}\times 400\ \text{km}$ 。这个云场几何厚度较大, 典型 β 约为 $60\ \text{km}^{-1}$ (见图 1 中 b1 和 b2), 云型相对简单, 以高耸的单层云为主。

Open-cells 是暖水面上冷空气剧烈垂直运动所造成的开口胞状对流云场 (Anderson et al., 1997)。水平分辨率为 $0.39\ \text{km}$, 有云区域垂直分辨率为 $0.15\ \text{km}$, 区域面积约为 $50\ \text{km}\times 50\ \text{km}$ 。这个云场主要集中在对流层中部 $4\sim 7\ \text{km}$ 高度, 但位于约 $2\ \text{km}$ 的低云具有更大的 β 。该云场光学厚度较大, 破碎明显, 具有高云、低云、多层云等云型同时存在的复杂结构。

2.2 三维辐射传输模式

使用一个宽带三维蒙特卡罗辐射传输模式来计算太阳短波波段的辐射场分布 (Barker et al., 1998, 1999)。对吸收气体采用基于相关 K 分布法的参数化处理 (Fu and Liou, 1992), 考虑了 H_2O 、 CO_2 、 O_3 、 CH_4 及 N_2O 等成分, 没有加入

气溶胶廓线, 共计算了 6 个短波波段 54 组有效光学特性。太阳天顶角为 45° , 方位角为 0° 。将计算结果 (以 Open-cells 为例) 与气候模式中的辐射程序综合比较计划 (InterComparison of Radiation Codes in Climate Models program, ICRCCM) Phase III 的基准结果 (Barker et al., 2003) 进行了验证, 结果表明其一致性很好 (如图 2 所示)。

IPA 与上述 3D 算法基本一致, 唯一区别在于将模式的水平分辨率设为无穷大。这种方法保持了每个格点内的垂直变化, 但不考虑光子水平传输。

3 统计方法与参数

3.1 统计方法

对云场中每个格点 (column/pixel), 以该格点为圆心, 半径从 $1\sim 20$ 格变化, 获得 20 个圆形统计区域。在每个区域内分别计算 3D 和 IPA 的平均加热率廓线和平均通量, 并进行对比分析。这种统计方法能够体现 3D 与 IPA 算法在不同分辨率下的主要统计特点及差异。需要注意的是, 下文提到的分辨率 (resolution) 是对应半径 (radius) 的两倍。

3.2 统计参数

为了同时比较加热率廓线的线型和强度, 我们定义了相关系数 (correlation coefficient) 和标准差 (standard deviation) 两个统计参数。

相关系数描述了一组廓线之间垂直分布的相似性。对给定的一组廓线, 用向量 $\mathbf{H}_1(n)$ 和 $\mathbf{H}_2(n)$ 表示, 我们首先由下式计算协方差矩阵

$$\mathbf{C} = \text{Cov}(\mathbf{H}_1, \mathbf{H}_2) = \mathbf{E}[(\mathbf{H}_1 - \boldsymbol{\mu}_1)(\mathbf{H}_2 - \boldsymbol{\mu}_2)], \quad (1)$$

其中 $\mathbf{E}$ 是数学期望, 且 $\boldsymbol{\mu}_i = \mathbf{E}(\mathbf{H}_i)$ 为第 i 个元素的数学期望。

相关系数 R 由下式计算:

$$R = \frac{\text{Cov}(\mathbf{H}_1, \mathbf{H}_2)}{\sqrt{\sigma_1 \sigma_2}}, \quad (2)$$

其中 σ_i 为方差, 且 $\sigma_i = \mathbf{E}[\mathbf{H}_i - \mathbf{E}(\mathbf{H}_i)]^2$ 。

标准差 ϵ 描述了一组廓线之间强度的差异, 定义如下:

$$\epsilon = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [\mathbf{H}_1(i) - \mathbf{H}_2(i)]^2}{n}}, \quad (3)$$

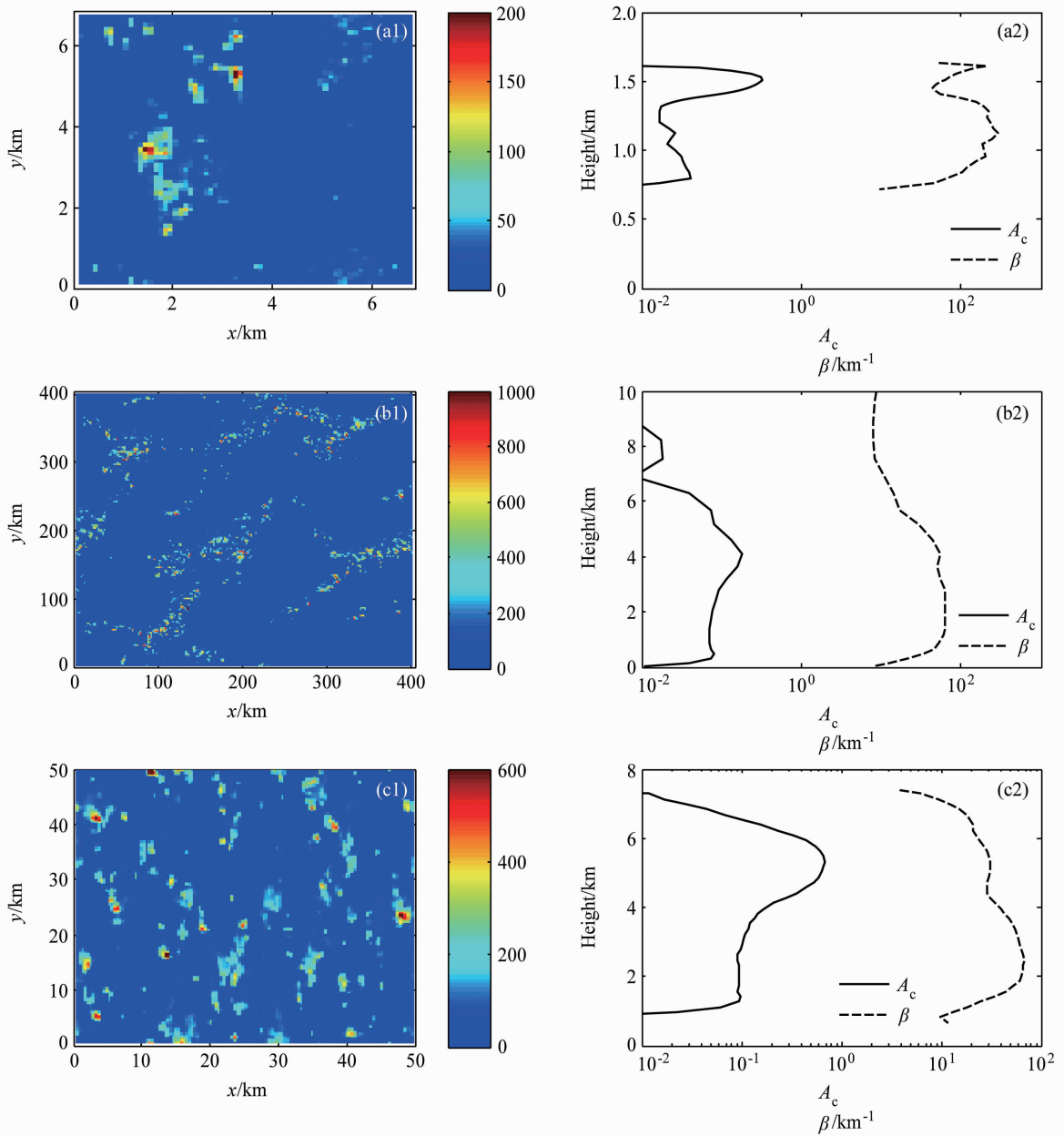


图1 (a1、a2) ATEX 云场、(b1、b2) GATE-A 云场、(c1、c2) Open-cells 云场的可见光垂直总光学厚度(左列)和云量 A_c 及消光系数 β (右列)

Fig. 1 Vertically integrated visible optical depth (left panel) and cloud fraction A_c and extinction coefficient β (right panel) of (a1, a2) ATEX cloud field, (b1, b2) GATE-A cloud field, and (c1, c2) Open-cells cloud field

其中 n 为向量长度, i 为向量中元素的序号。由其定义可知, 标准差的量纲为 $\text{K} \cdot \text{d}^{-1}$ 。

这两个参数不仅描述了强度, 还能够同时描述加热率的垂直分布信息, 这有助于更全面地了解加热率廓线的特性, 特别是高分辨率局地加热率分布情况。

对于通量, 由于不涉及垂直分布, 直接使用

统计范围内 3D 和 IPA 各自的平均结果进行对比分析。

4 结果与讨论

4.1 加热率廓线的分析结果

当半径从 1~20 格变化时, 分别计算每个半

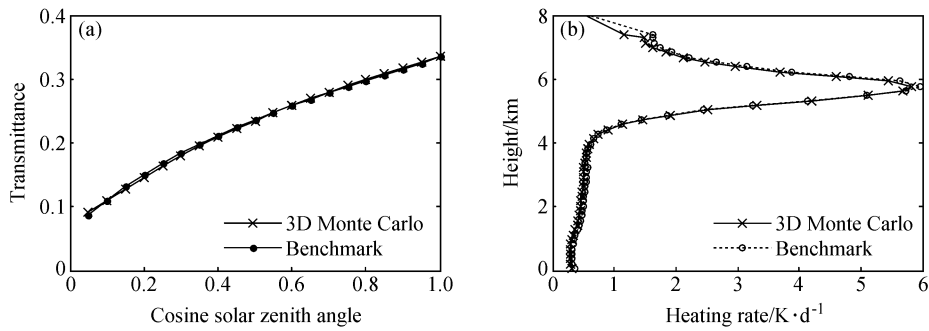


图2 Open-cells 云场中三维辐射传输模式与 ICRCCM 基准结果的对比验证: (a) 区域平均透射率随天顶角余弦的变化; (b) 平均加热率廓线

Fig. 2 The validation between 3D Monte Carlo model simulation and InterComparison of Radiation Codes in Climate Models program (ICRCCM) benchmark in Open-cells cloud field: (a) Domain averaged transmittance changing with the cosine of solar zenith angle; (b) average heating rate profile

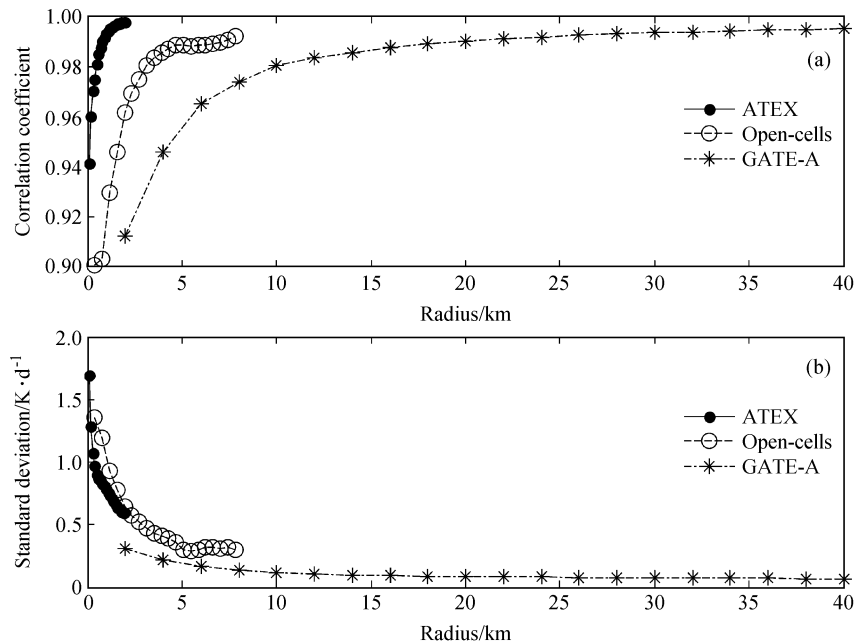


图3 ATEX 云场、Open-cells 云场和 GATE-A 云场的 (a) 平均相关系数和 (b) 平均标准差随统计半径的变化

Fig. 3 (a) Average correlation coefficients and (b) average standard deviations of ATEX cloud field, Open-cells cloud field, and GATE-A cloud field VS. the statistical radius

径下所有格点 3D 与 IPA 算法所得加热率廓线的平均相关系数和平均标准差。尽管由于水平分辨率和区域面积不同, 3 个云场的统计范围有差异, 但仍能得出一些共同特点。总体而言, 随统计半径增大, 相关系数增大 (如图 3a 所示), 标准差减小 (如图 3b 所示), 但增大 (或减小) 的速度也显著变慢。当统计半径达 40 km (GATE-A) 时, 依然有约 $0.1 K \cdot d^{-1}$ 左右的平均标准差。这说明分辨率降低, 使云三维效应能够在一定程度

上被削弱, 但并不能完全被消除。在低分辨率情况下, 是否考虑云三维作用应取决于计算所要求的精度。

对不同云场, 云三维作用对加热率廓线的影响各具特点。与其他两个云场相比, ATEX 云场结构相对简单, 其光学厚度与物理厚度均较小, 云类型单一, 因而相关系数在统计半径 1 km 左右即迅速达到 0.99, 这表明 IPA 算法所得平均加热率廓线的垂直分布与 3D 算法结果具有很高相关

性。平均标准差在统计半径为 2 km 时依然大于 $0.5 \text{ K} \cdot \text{d}^{-1}$, 这与该云场分辨率高、统计区域还不够大有关。

对 Open-cells 云场来说, 其平均相关系数随统计半径提高的速度略慢, 在 5 km 左右达到 0.99, 此时平均标准差约为 $0.3 \text{ K} \cdot \text{d}^{-1}$ 。值得注意的是, 在统计半径大于 5 km 之后, 无论是平均相关系数还是平均标准差, 变化都十分缓慢, 即使统计半径达到 7.8 km (分辨率 15.6 km), 平均标准差依然在 $0.3 \text{ K} \cdot \text{d}^{-1}$ 左右。考虑到该云场平均加热率为 $1.48 \text{ K} \cdot \text{d}^{-1}$ (峰值 $5.8 \text{ K} \cdot \text{d}^{-1}$), 这样大的平均标准差表明了云三维结构的显著影响。对于这种破碎的、云类型丰富的开口胞状云场, 在分辨率低于 10 km 时, 其加热率垂直分布受影响明显减少, 但强度差异依然显著, 且继续降低分辨率对提高精度的作用十分有限。

GATE-A 云场平均相关系数提高得最为缓慢, 在统计半径为 20 km 时才达到 0.99, 此范围远大于另外的两个云场。但其平均标准差较小, 最大值仅为 $0.3 \text{ K} \cdot \text{d}^{-1}$ 左右, 且随统计半径增大而迅速减少, 在 20 km 之后小于 $0.1 \text{ K} \cdot \text{d}^{-1}$ 。与

Open-cells 云场相比, 这种发展中深对流云团的加热率廓线受三维结构影响主要体现在垂直分布上, 其强度所受影响相对而言比较小。

这 3 个云场的不同统计特点, 充分体现了云三维结构对加热率廓线的显著影响。图 4 给出了各云场平均可见光云光学厚度廓线和平均加热率廓线。在第 2 节中已经提到, Open-cells 云场主要由集中在 4~7 km 高度的中高云组成, 低云通常由于被遮挡, 对加热率贡献很小。当统计半径增大时, 更多高云加入统计范围, 使 IPA 得到的加热率廓线形状能够较快与 3D 结果趋于一致。同时, 由于该云场破碎严重, 晴空与云交界处很多, 使光子水平传输造成的“阴影”和“加亮”效果非常明显; 另一方面, 该云场的低云具有较大的消光系数, 由晴空透射而来的辐射能够形成较大加热率贡献, 这种低层加热率峰值较难被附近高云形成的高层加热率峰值所平滑, 因而造成较大标准差。GATE-A 云场主要是单层云, 但几何厚度很大。对大多数有云格点来说, 这种云场结构使加热率在很长范围内都有贡献, 每一层的差值相对较小, 因而 IPA 与 3D 结果的平均标准差很

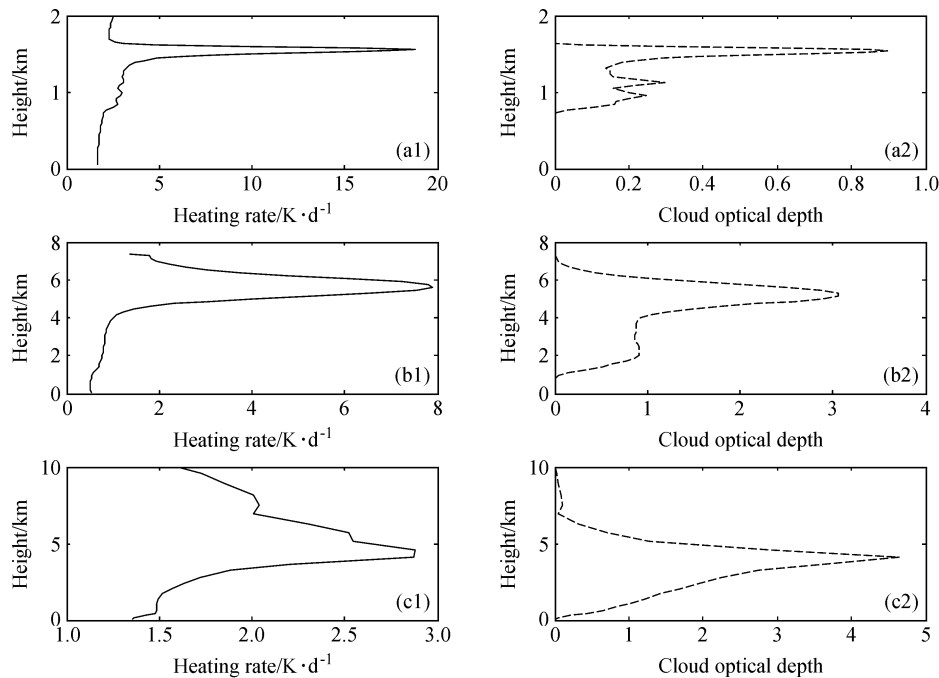


图 4 (a1、a2) ATEX 云场、(b1、b2) Open-cells 云场、(c1、c2) GATE-A 云场的平均加热率廓线 (左列) 和平均云可见光光学厚度廓线 (右列)

Fig. 4 The average heating rate profiles (left panel) and average cloud visible optical depth profiles (right panel) of (a1, a2) ATEX cloud field, (b1, b2) Open-cells cloud field, and (c1, c2) GATE-A cloud field

表 1 3 个云场云三维结构对加热率垂直分布影响的有效范围以及对应的平均标准差和样本数

Table 1 The effective range of the effect of cloud 3D structures on heating rate vertical distribution in three cloud fields and the corresponding average standard deviations and sample amounts

	ATEX			Open-cells			GATE-A		
	范围/km	标准差/ $K \cdot d^{-1}$	样本数	范围/km	标准差/ $K \cdot d^{-1}$	样本数	范围/km	标准差/ $K \cdot d^{-1}$	样本数
全部	0.60	1.09	784	2.20	0.61	3844	12.20	0.11	24952
有云	0.37	1.48	440	1.99	0.65	3404	11.30	0.16	11353
晴空	0.88	0.60	344	3.87	0.32	440	12.95	0.06	13599

小。同时，这个较宽的峰又由于云场伸展而存在垂直方向的明显变化，造成每组廓线相关性变差。可见，不同云场的统计特点，与该云场三维结构密切相关。

为了定量统计云三维结构对加热率垂直分布的有效影响范围，为相关系数设定了一个阈值 0.99，统计了当 IPA 与 3D 结果相关系数达到

0.99 时的平均统计半径。在这个有效范围内，可以认为云三维作用对加热率廓线垂直分布影响显著。表 1 列出了统计结果，以及该半径下的平均标准差和样本数。结果表明，不同类型云场其三维作用的有效半径具有明显区别。与前述结论一致，ATEX 的有效半径最小，仅为 0.60 km（分辨率 1.20 km）；其次是 Open-cells，有效半径为

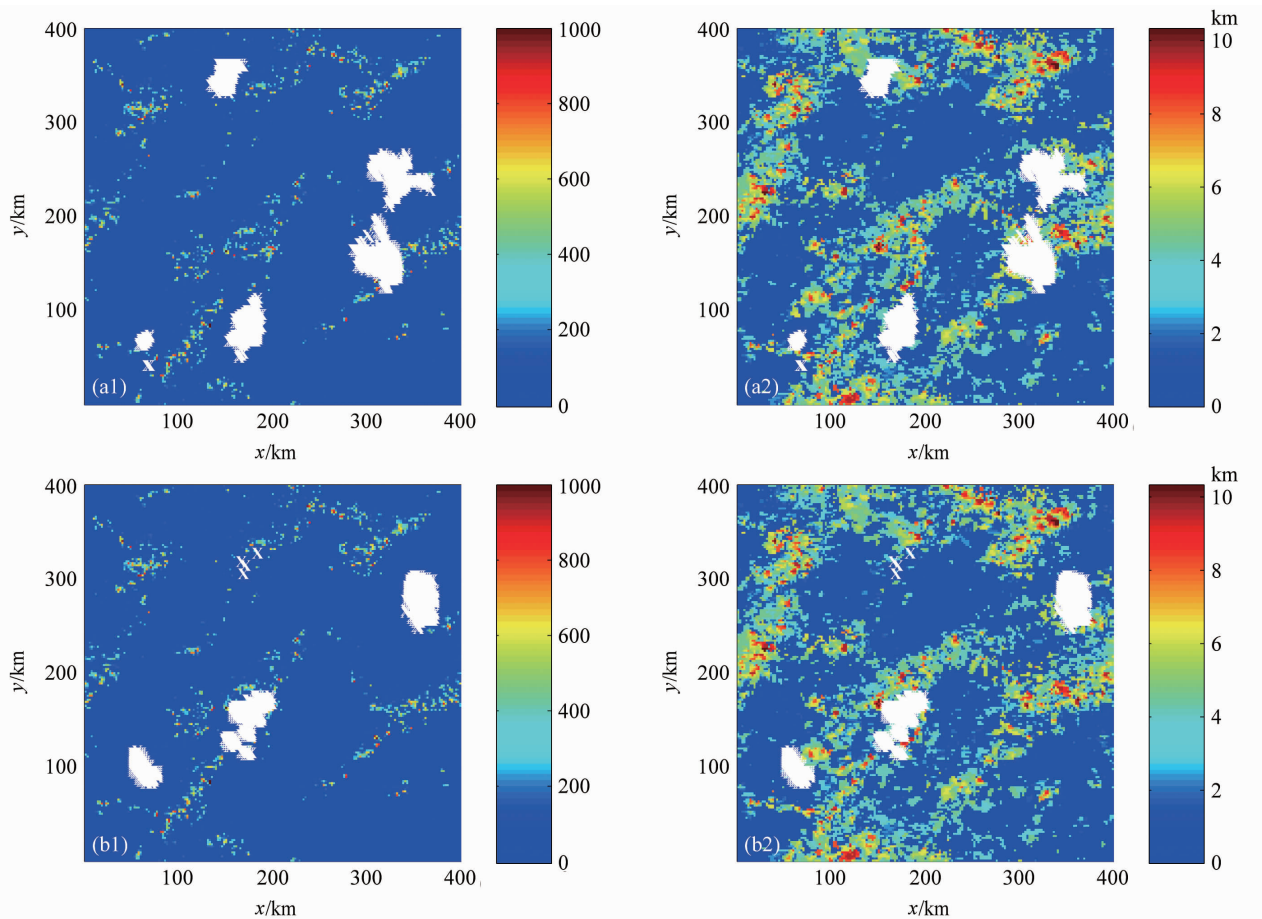


图 5 GATE-A 云场可见光垂直总光学厚度分布（左列）和云顶高度分布（右列）（a1、a2 中白色表示相关系数未达到 0.99 的格点，b1、b2 中白色表示标准差大于 $0.15 K \cdot d^{-1}$ 的格点）

Fig. 5 Distributions of vertically integrated visible cloud optical depth (left panel) and the cloud top height (right panel) of GATE-A cloud field (white areas in (a1) and (a2) denote the grids which the correlation coef cannot reach 0.99 and white areas in (b1) and (b2) denote the grids which the std dev cannot reach $0.15 K \cdot d^{-1}$)

2.2 km (分辨率 4.4 km); GATE-A 具有最大的有效半径, 达 12.2 km (分辨率 24.4 km)。此外, 在 3 个云场中, 晴空为中心的格点都比云为中心的格点具有更长的有效半径, 这说明晴空更易受到云三维作用的影响。

尤其值得指出的是, GATE-A 云场中共有 969 个样本在统计半径达到 40 km (分辨率 80 km) 时, 相关系数仍未达到 0.99, 约占所有样本数的 3.74%。我们同时统计了该云场中统计半径达到 40 km 时标准差大于 $0.15 \text{ K} \cdot \text{d}^{-1}$ 的格点, 共有 656 个, 约占总样本数的 2.53%。为便于描述, 将这些格点称为异常区域 (如图 5 所示), 其共同特点是主要分布在云与晴空交界的地带, 且附近云顶高度较高, 而异常区域中的光学厚度较小。相关系数与标准差各自的异常区域大体相邻又并不重合, 总体上说, 相关系数异常区域主要是晴空或低云区域, 标准差异常区域的云顶高度

则较高。可见, 云与晴空交界区域的三维作用非常显著, 且不同云结构所体现的影响方式并不相同: 当周围云的云顶高度较高、光学厚度较大时, 光学厚度较小的晴空与低云区域加热率廓线的垂直分布更容易受到影响, 而光学厚度同样较小的高云则强度更容易受到影响。这提醒我们在高分辨率条件下考虑云三维作用时, 不仅要注意区分云场的类型, 还要注意根据云场结构分别处理, 特别是晴空与云交界处, 这将有利于在算法复杂度和精度之间取得平衡。

4.2 通量的分析结果

分别用 3D 和 IPA 算法得到了 3 个云场的平均向下通量, 结果如图 6 所示。由于 IPA 算法并不考虑光子的水平传输, 3 个云场的 IPA 向下通量分布与云总光学厚度对应很好。但观察 3D 结果可以看到, 3 个云场都存在不同程度的“漂移”。分辨率最高的 ATEX 云场整体漂移最为显著, 沿

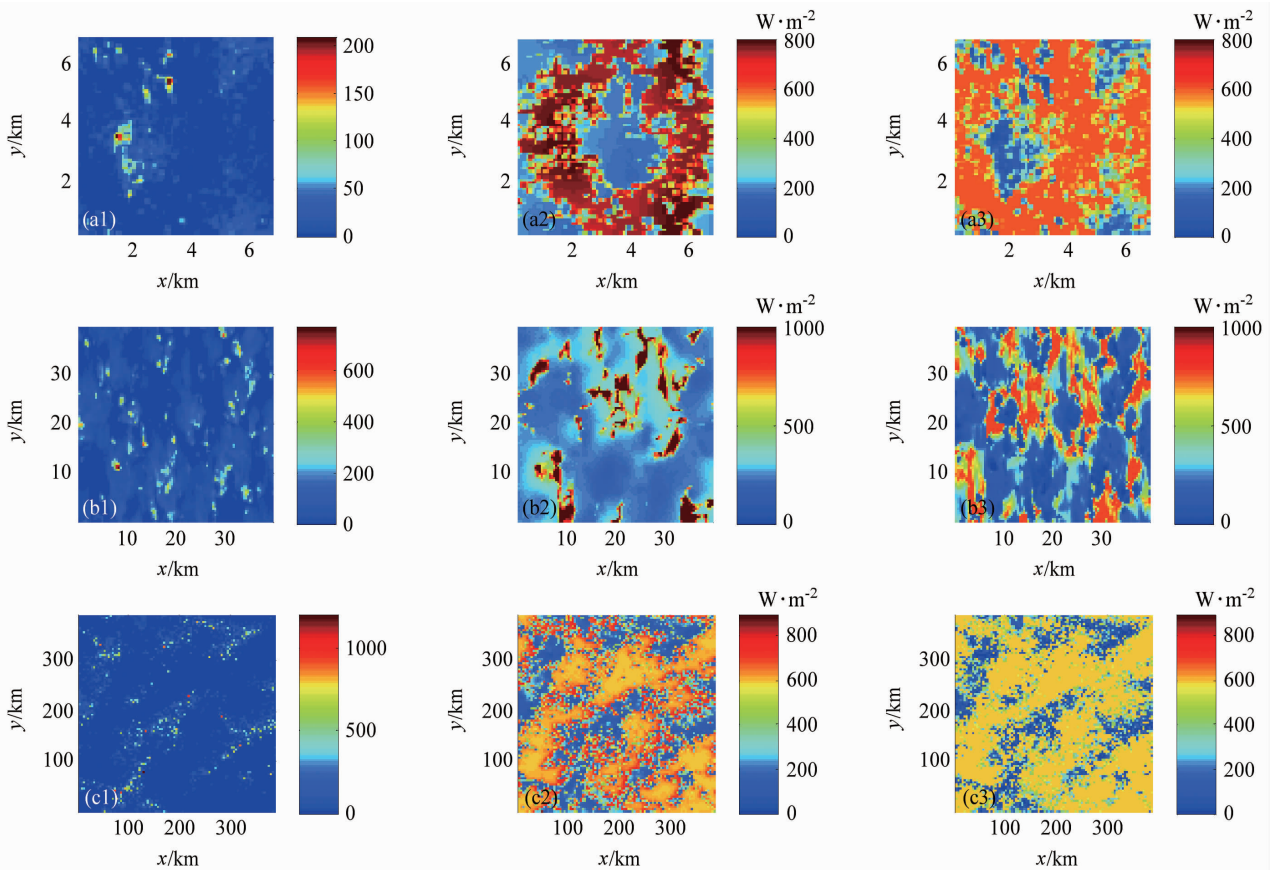


图6 (a1、a2、a3) ATEX 云场、(b1、b2、b3) Open-cells 云场、(c1、c2、c3) GATE-A 云场的可见光垂直总光学厚度 (左列)、3D算法向下通量 (中列) 和 IPA 算法向下通量 (右列)

Fig. 6 The vertically integrated visible cloud optical depth (left panel), 3D downward flux (middle panel), and IPA downward flux (right panel) of (a1, a2, a3) ATEX cloud field, (b1, b2, b3) Open-cells cloud field, and (c1, c2, c3) GATE-A cloud field

入射方向(图6中自左向右)向右平移。分辨率最低的 GATE-A 云场漂移程度最小,但云边缘有十分明显地“加亮”效果。Open-cells 云场不仅存在向右漂移,由于其破碎的云场结构,晴空部分向下通量的加强与有云部分向下通量的减弱都十分明显,使 3D 与 IPA 结果差异尤其显著。在高分辨率条件下,忽略云三维作用而造成的这种数千米尺度上的漂移现象,会对模式模拟或观测反演等结果的精度产生显著影响。

由图7可以发现,随统计半径增大,IPA 算法与 3D 算法差距减小;但在最初数千米范围内,由于 IPA 算法忽略了水平传输,与 3D 结果的差距可达数百 $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$,云三维作用十分显著。ATEX 云场在其区域内未能使两种算法的结果趋于稳定地一致;Open-cells 云场在 10 km 统计半径之后,两种算法结果接近,但并不稳定;GATE-A 云场在统计半径大于 30 km (分辨率 60 km) 之后才获得基本一致的结果。就这 3 个云场而言,尽管从大尺度区域平均的角度(数十千米)来看,可以认为 IPA 算法是 3D 算法的很好近似,

但是在高分辨率条件下,通量同样与云三维结构关系密切,是否考虑云三维作用得到的结果具有很大差异。

5 结论

与以往众多关注大尺度区域内平均辐射的研究不同,本工作重点关注高分辨率条件下加热率的垂直分布,使用相关系数和标准差两个参数同时描述加热率廓线的线型和强度,定量统计分析了不同三维云场结构对加热率廓线以及通量的影响。主要结论如下:

(1) 仅考虑加热率廓线的垂直分布,云三维作用的有效范围分别为 ATEX 云场 1.2 km、Open-cells 云场 4.4 km 以及 GATE-A 云场 24.2 km。分辨率粗于这个范围,可以认为云三维作用对加热率垂直分布的影响很弱,但对应的显著标准差依然表明 IPA 算法与 3D 算法的差异。此外,晴空和低云区域,特别是与大片云相邻区域更易受到云三维结构的影响。

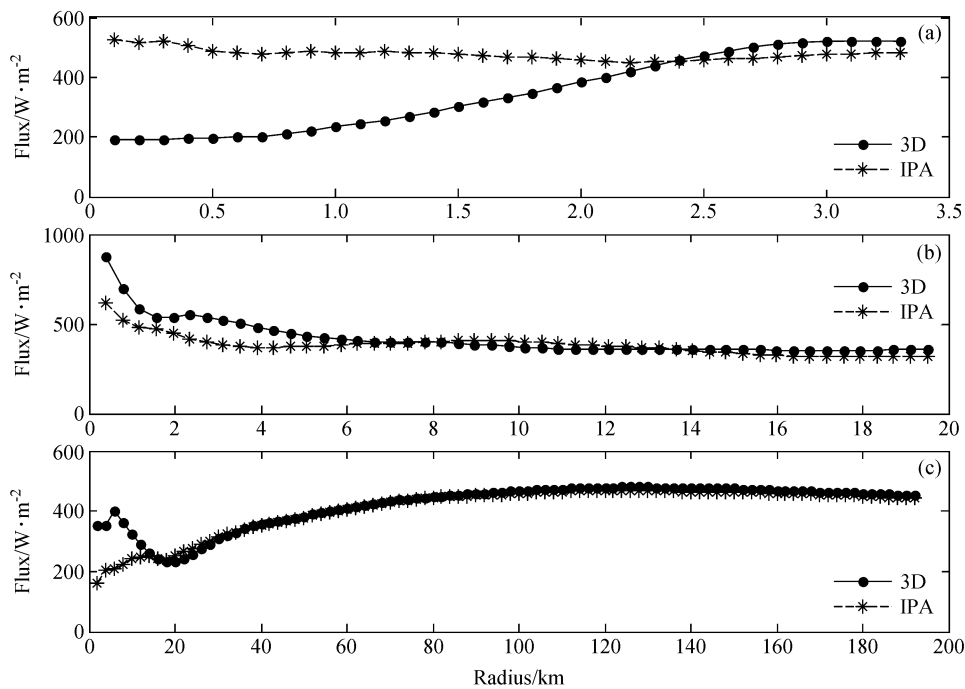


图7 (a) ATEX 云场、(b) Open-cells 云场、(c) GATE-A 云场在以各自云场中心格点为圆心,3D 和 IPA 算法的平均向下通量随统计半径的变化

Fig. 7 Variation of average 3D and IPA downward fluxes with the statistical radius for (a) ATEX cloud field, (b) Open-cells cloud field, and (c) GATE-A cloud field when the centre of statistical circle is the very central grid of each cloud field

(2) 同时考虑加热率强度和垂直分布, 不同结构云场所反映的三维作用各不相同。结构相对简单的 ATEX 云场所受三维影响随分辨率降低最快被平滑掉; 结构复杂的开口胞状破碎云场 Open-cells 具有很强的强度差异且不易通过降低分辨率而消除; 强对流云团 GATE-A 的垂直分布受三维影响很大, 而强度差异相对较小。

(3) 在高分辨率云场中, 辐射的“漂移”现象非常显著, 这会极大地影响 IPA 算法精度。就区域平均通量而言, 格点达到数十千米时, IPA 算法才能得到与 3D 算法基本吻合的平均结果。而小于该范围, 这两种算法的差异在 3 个云场中均可能达到数百 $W \cdot m^{-2}$ 。

(4) 无论是加热率垂直分布还是通量, 都体现出云三维结构在高分辨率云场中的显著作用, 且不同类型云场以及同一云场中不同类型区域所体现出的影响都有差异。在高分辨率情况下, 云三维结构不应该被轻易忽略, 需要进一步的定量研究来评估其重要作用并获得可信结果。

云三维效应对辐射传输的影响是一个十分复杂的问题。本文仅对 3 个模拟三维云场进行统计分析, 且并未涉及云内部微物理结构、云三维结构随时间序列变化等非均匀问题, 所得结果具有一定局限性。但文中所见云三维结构对加热率垂直分布和通量的显著影响, 特别是对高分辨率下加热率垂直廓线的分析, 对气候与环境的模拟及预测、地基或空基的观测与反演、三维云模式的格点设计等工作仍然具有实际意义。

致谢 感谢中国科学院大气物理研究所段民征研究员对本文工作的建议与帮助。

参考文献 (References)

Anderson W D, Grubišić V, Smolarkiewicz P K. 1997. Performance of a massively parallel 3D non-hydrostatic atmospheric fluid model [C] // Proceedings International Conferences on Parallel and Distributed Processing Techniques and Applications. Las Vegas, NV: Computer Science Research, Education, and Applications Tech, 645–651.

Barker H W. 1994. Solar radiative transfer for wind-sheared cumulus cloud fields [J]. *J. Atmos. Sci.*, 51: 1141–1156.

Barker H W. 2005. Broadband irradiances and heating rates for cloudy atmospheres [M] // Marshak A, Davis A B. 3D Radiative

Transfer in Cloudy Atmospheres. Berlin: Springer, 450–454.

Barker H W, Morcrette J J, Alexander G D. 1998. Broadband solar fluxes and heating rates for atmospheres with 3D broken clouds [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 124 (548): 1245–1271, doi: 10.1002/qj.49712454811.

Barker H W, Stephens G L, Fu Q. 1999. The sensitivity of domain-averaged solar fluxes to assumptions about cloud geometry [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 125 (558): 2127–2152, doi: 10.1002/qj.49712555810.

Barker H W, Stephens G L, Partain P T, et al. 2003. Assessing 1D atmospheric solar radiative transfer models: Interpretation and handling of unresolved clouds [J]. *J. Climate*, 16 (16): 2676–2699.

Cahalan R F, Ridgway W, Wiscombe W J, et al. 1994. Independent pixel and Monte Carlo estimates of stratocumulus albedo [J]. *J. Atmos. Sci.*, 51 (24): 3776–3390.

Chen T, Zhang Y C, Rossow W B. 2000. Sensitivity of atmospheric radiative heating rate profiles to variations of cloud layer overlap [J]. *J. Climate*, 13: 2941–2959.

Davis A, Marshak A, Cahalan R, et al. 1997. The landsat scale break in stratocumulus as a three-dimensional radiative transfer effect: Implications for cloud remote sensing [J]. *J. Atmos. Sci.*, 54 (2): 241–260.

Davis A B, Marshak A. 2010. Solar radiation transport in the cloudy atmosphere: A 3D perspective on observations and climate impacts [J]. *Reports on Progress in Physics*, 73 (2): 026801, doi: 10.1088/0034-4885/73/2/026801.

Davis A B, Polonsky I N. 2005. Approximation methods in atmospheric 3D radiative transfer, part I: Resolved variability and phenomenology [M] // Marshak A, Davis A B. 3D Radiative Transfer in Cloudy Atmospheres. Berlin: Springer, 283–343, doi: 10.1007/3-540-28519-9_5.

Di Giuseppe F, Tompkins A M. 2003. Three-dimensional radiative transfer in tropical deep convective clouds [J]. *J. Geophys. Res.*, 108 (D23): 4741, doi: 10.1029/2003JD003392.

Fu Q, Cribb M C, Barker H W, et al. 2000. Cloud geometry effects on atmospheric solar absorption [J]. *J. Atmos. Sci.*, 57 (8): 1156–1168.

Fu Q, Liou K N. 1992. On the correlated K-distribution method for radiative transfer in non-homogeneous atmospheres [J]. *J. Atmos. Sci.*, 49: 2139–2156.

Grabowski W W, Wu X Q, Moncrieff M W, et al. 1998. Cloud-resolving modeling of cloud systems during phase III of GATE. Part II: Effects of resolution and the third spatial dimension [J]. *J. Atmos. Sci.*, 55 (21): 3264–3282.

Gu Y, Liou K N. 2001. Radiation parameterization for 3D inhomogeneous cirrus clouds: Application to climate models [J]. *J. Climate*, 14: 2443–2457.

Hinkelman L M, Evans K F, Clothiaux E E, et al. 2007. The

- effect of cumulus cloud field anisotropy on domain-averaged solar fluxes and atmospheric heating rates [J]. *J. Atmos. Sci.*, 64: 3499–3520, doi: 10.1175/JAS4032.1.
- IPCC. 2007. *Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II, and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [R]. Geneva, Switzerland; IPCC, 104pp.
- Khairoutdinov M F, Randall D A. 2001. A cloud resolving model as a cloud parameterization in the NCAR Community Climate System Model: Preliminary results [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 28 (18): 3617–3620, doi: 10.1029/2001GL013552.
- Loeb N G, Coakley J A Jr. 1998. Inference of marine stratus cloud optical depths from satellite measurements: Does 1D theory apply? [J]. *J. Climate*, 11 (2): 215–233.
- Loeb N G, Davies R. 1996. Observational evidence of plane parallel model biases: Apparent dependence of cloud optical depth on solar zenith angle [J]. *J. Geophys. Res.*, 101 (D1): 1621–1634, doi: 10.1029/95JD03298.
- Marshak A, Davis A, Cahalan R F, et al. 1998. Nonlocal independent pixel approximation: Direct and inverse problems [J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 36 (1): 192–205, doi: 10.1109/36.655329.
- Marshak A, Davis A, Wiscombe W J, et al. 1995. The verisimilitude of the independent pixel approximation used in cloud remote sensing [J]. *Remote Sens. Environ.*, 52: 71–78.
- Marshak A, Davis A B. 2005. Horizontal fluxes and radiative smoothing [M] // Marshak A, Davis A B. *3D Radiative Transfer in Cloudy Atmospheres*. Berlin: Springer, 543–587, doi: 10.1007/3-540-28519-9_12.
- Marshak A, Platnick S, Várnai T, et al. 2006. Impact of three-dimensional radiative effects on satellite retrievals of cloud droplet sizes [J]. *J. Geophys. Res.*, 111: D09207, doi: 10.1029/2005JD006686.
- Min Q L, Harrison L. 1999. Joint statistics of photon pathlength and cloud optical depth [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 26 (10): 1425–1428, doi: 10.1029/1999GL900246.
- Min Q L, Clothiaux E E. 2003. Photon path length distributions inferred from rotating shadowband spectrometer measurements at the Atmospheric Radiation Measurements Program Southern Great Plains site [J]. *J. Geophys. Res.*, 108 (D15): 4465, doi: 10.1029/2002JD002963.
- Min Q L, Harrison L C, Kiedron P, et al. 2004a. A high-resolution oxygen A-band and water vapor band spectrometer [J]. *J. Geophys. Res.*, 109: D02202, doi: 10.1029/2003JD003540.
- Min Q L, Joseph E, Duan M Z. 2004b. Retrievals of thin cloud optical depth from a multifilter rotating shadowband radiometer [J]. *J. Geophys. Res.*, 109: D02201, doi: 10.1029/2003JD003964.
- O'Hirok W, Gautier C. 2003. Absorption of shortwave radiation in a cloudy atmosphere: Observed and theoretical estimates during the second Atmospheric Radiation Measurement Enhanced Shortwave Experiment (ARESE) [J]. *J. Geophys. Res.*, 108 (D14): 4412, doi: 10.1029/2002JD002818.
- O'Hirok W, Gautier C. 2005. The impact of model resolution on differences between independent column approximation and Monte Carlo estimates of shortwave surface irradiance and atmospheric heating rate [J]. *J. Atmos. Sci.*, 62 (8): 2939–2951, doi: 10.1175/JAS3519.1.
- Raschke E, Ohmura A, Rossow W B, et al. 2005. Cloud effects on the radiation budget based on ISCCP data (1991 to 1995) [J]. *Int. J. Climatol.*, 25 (8): 1103–1125.
- Stephens G L. 2005. Cloud feedbacks in the climate system: A critical review [J]. *J. Climate*, 18 (2): 237–273, doi: 10.1175/JCLI-3243.1.
- Várnai T, Davies R. 1999. Effects of cloud heterogeneities on shortwave radiation: Comparison of cloud-top variability and internal heterogeneity [J]. *J. Atmos. Sci.*, 56 (24): 4206–4224.
- Vogelmann A M, Ramanathan V, Podgorny I A. 2001. Scale dependence of solar heating rates in convective cloud systems with implications to General Circulation Models [J]. *J. Climate*, 14 (8): 1738–1752.
- Von Savigny C, Davis A B, Funk O, et al. 2002. Time-series of zenith radiance and surface flux under cloudy skies: Radiative smoothing, optical thickness retrievals and large-scale stationarity [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 29 (17): 1825, doi: 10.1029/2001GL014153.
- Wang Y, Lü D R, Huo J. 2007. Determination of the optical thickness and effective particle radius of clouds from transmitted solar radiation measurements [J]. *Progress in Natural Science*, 17 (10): 1119–1207.
- 张凤. 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 Feng. 2005. The study of the effect of cloud inhomogeneity in AGCM [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 10 (3): 574–587.
- Zhang Y C, Rossow W B, Lacis A A, et al. 2004. Calculation of radiative fluxes from the surface to top of atmosphere based on ISCCP and other global data sets: Refinements of the radiative transfer model and the input data [J]. *J. Geophys. Res.*, 109: D19105, doi: 10.1029/2003JD004457.