

三维有云大气辐射变温率数值模拟研究——邻云辐射效应^{*1}

章超¹ 王震¹ 杨军¹ 孙继明² 郜海阳¹ 崔生成³

ZHANG Chao¹ WANG Zhen¹ YANG Jun¹ SUN Jiming² GAO Haiyang¹ CUI Shengcheng³

1. 中国气象局气溶胶-云-降水重点开放实验室, 南京信息工程大学大气物理学院, 南京, 210044
2. 中国科学院大气物理研究所, 北京, 100029
3. 中国科学院安徽光学精密机械研究所大气成分与光学重点实验室, 合肥, 230031

1. *Key Laboratory for Aerosol-Cloud-Precipitation of China Meteorological Administration, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China*
2. *Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China*
3. *Key Laboratory of Atmospheric Composition and Optical Radiation, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China*

2016-03-03 收稿, 2016-04-16 改回.

章超, 王震, 杨军, 孙继明, 郜海阳, 崔生成. 2016. 三维有云大气辐射变温率数值模拟研究——邻云辐射效应. 气象学报, 74(4):598-612

Zhang Chao, Wang Zhen, Yang Jun, Sun Jiming, Gao Haiyang, Cui Shengcheng. 2016. A numerical study of radiative heating rate in the three-dimensional cloudy atmosphere: Adjacent-cloud-induced radiative effects. *Acta Meteorologica Sinica*, 74(4):598-612

Abstract One-dimensional radiative transfer model has been widely used in atmospheric numerical studies. However, the one-dimensional model neglects the radiation transport process in the three-dimensional cloudy atmosphere and thus produces inaccurate numerical simulations and weather forecasts. In order to address uncertainties in the one-dimensional radiative transfer model and optimize the radiation parameterization in numerical weather forecast system, effects of three-dimensional radiation interaction among clouds and their impacts on the thermodynamic structure of clouds are studied. I3RC II cumulus and stratocumulus fields are selected for the present study, and their central areas are taken as the target domain while the surrounding areas are treated as the adjacent domain. Spatial distributions of shortwave and longwave radiative heating rates are simulated by the broadband three-dimensional radiative transfer model SHDOM to illustrate the impact of the adjacent-cloud on the thermodynamic structure of the target-cloud. Simulation results show that the adjacent-cloud imposes longwave radiative warming effects on the entire target domain. The warming zone is mainly located in the surface layer of the cloud, the depth of which is negatively correlated with the liquid water content; the warming rate is proportional to cloud coverage and the reciprocal of the distance between the target and adjacent clouds, and its maximum value is 3.08 K/h. For shortwave bands, the adjacent-cloud has both scattering-induced warming effects and shadowing-induced cooling effects for the target-cloud. With a small solar zenith angle, warming effects are dominant although they are quite weak with a small spatial inhomogeneity. As the solar zenith angle increases, cooling effects become more important and cause significant temperature reductions (the maximum reduction is 1.72 K/h) in the surface layer of the target-cloud on the side sheltered by the adjacent-cloud. The shading effects may even exceed the longwave radiative warming effects. In conclusion, the adjacent-clouds could greatly change the local heating rate of the target-clouds. Therefore, it is crucial to consider the three-dimensional radiative effects in the numerical weather forecast system to im-

* 资助课题: 国家自然科学基金青年科学基金项目(41305032, 41304124)。

作者简介: 章超, 主要从事云雾物理与大气辐射传输研究. E-mail: czhangnuist@163.com

通讯作者: 杨军, 主要从事云雾降水物理与大气辐射研究. E-mail: jyang@nuist.edu.cn

prove the radiation parameterization.

Key words Three-dimensional cloudy atmosphere, Radiative heating rate, Longwave radiative warming, Scattering-induced warming, Shadowing-induced cooling

摘 要 大气数值模式普遍采用一维辐射传输模型,无法表征有云大气中的三维辐射传输过程,从而影响数值模拟乃至数值天气预报的准确性。为评估这种不确定性,研究了水平云体间的三维辐射相互作用及其改变云体热力结构的规律,力求为改进数值模式辐射计算方案提供理论依据。选取 I3RC Phase II 的典型积云场和层积云场作为试验对象,将云场中心区域云体视为目标云体,周围云体为邻近云体,采用宽带三维辐射传输模式 SHDOM 模拟长波和短波辐射变温率的空间分布,定量阐明邻近云体对目标云体热力结构的影响。结果表明,邻云在长波区域对目标云体主要起辐射保温的作用,目标云体增温区域集中于邻云一侧的云体表面层,增温强度与云覆盖率和云间距离倒数成正比,最高可达 3.08 K/h,云体增温的厚度与目标云体液态水含量成反比;在短波区域,邻云同时起散射增温和遮蔽降温的作用,太阳垂直入射时,散射增温效应较弱,变温率空间差异小;当太阳天顶角增大后,遮蔽降温效应逐步起主导作用,造成目标云体被邻云遮挡一侧的表面层明显降温,峰值可达 -1.72 K/h,数值上甚至超过邻云长波增温效应。总之,邻近云体可以明显改变目标云体的变温率空间分布,引入三维邻云辐射效应对改进大气数值模式辐射计算方案具有重要意义。

关键词 三维云场,辐射变温率,长波辐射保温,散射增温,遮蔽降温

中图法分类号 P422.3

1 引 言

云通过三维辐射传输过程,影响地-气系统的能量收支,改变热力和动力过程,并对云自身的形成、发展和消亡产生循环反馈,推动天气与气候系统演变(Jonas, 1989; Guan, et al, 1997; Marshak, et al, 2005; Frame, et al, 2010)。近年来不断丰富的计算资源和不断提高的遥感探测技术使云分辨率模式和遥感探测数据的分辨率日益提高,但在云分辨率模式中仍然普遍采用基于一维平面平行大气辐射传输理论的辐射参数化方案,假设云水平均匀分布,忽略了水平辐射传输产生的三维辐射效应,或者采用独立像元近似算法 IPA/ICA(Independent Pixel Approximation/Independent Column Approximation),考虑云体内部的非均质性,但依然忽略了各个云柱之间的水平辐射传输,无法得到准确的有云大气辐射变温率空间分布,必然影响天气预报与气候预测的准确性(Welch, et al, 1984; Cahalan, et al, 1994a, 1994b; Gu, et al, 2001; Marshak, et al, 2005; Hinkelman, et al, 2007; Mayer, 2009)。为此,已开发了一系列基于数值解析与蒙特卡罗方法的三维有云大气辐射传输模式,定量模拟非均匀云场条件下地-气系统的辐射场,评估平面平行近似和独立像元近似的准确程度,可望提高天气与气候模式的可靠性(O'Hirok, et al, 1998a, 1998b; Evans, 1998; Chen, et al, 2006; Iwabuchi, 2006;

Mayer, 2009; Wang, et al, 2011, 2012; Wissmeier, et al, 2013; Jakub, et al, 2015; Klinger, et al, 2016)。

大量关于三维云场数值模拟的试验研究指出,三维云辐射场空间分布与云体三维空间结构、水成物含量、粒子尺度谱及其相态空间分布密切相关,忽略水平辐射传输的平面平行和独立像元近似可造成较大偏差。例如 Mayer(2009)利用简单的理想空间网格云阵计算三维有云大气透过率时发现,平面平行近似可以造成透过率偏差约为 10%;Cahalan 等(1994a)通过三维辐射传输模拟得出海洋层积云反照率低于一维辐射传输结果 15%。更为重要的是,三维云辐射场具有高度的局域性,即空间分布不均匀,空间分辨率越高,三维辐射效应越明显(Di Giuseppe, et al, 2003; Davis, et al, 2010; 宋磊等, 2012; Wang, et al, 2014)。O'Hirok 等(2005)指出当空间分辨率在 2—5 km 时,独立像元近似计算的地面短波辐射通量最大偏差为 $\pm 100 \text{ W/m}^2$,变温率偏差为 $\pm 0.1 \text{ K/h}$,而空间分辨率为 0.20 km 时,辐射通量偏差最大可达 500 W/m^2 ,变温率差值可达 $\pm 1.2 \text{ K/h}$;Zhong 等(2008)模拟中纬度卷云辐射场时发现局地云体加热率偏差高达 10 K/d ,局地反射率和透射率的均方根误差高达 50%,吸收率甚至超高 200%。

然而,绝大多数研究局限于评估一维平面平行大气辐射传输偏差,没有直接阐述和评估复杂的三

维云辐射效应。为此,已有学者开始从云-辐射-邻云相互作用角度讨论三维云辐射效应的形成机制。O'Hirok 等(1998a)利用光子射线跟踪方法定性分析三维云吸收率的分布特征;Várnai 等(2003)通过引入三维云辐射效应构建新的辐射传输模式,计算周围云体三维辐射效应如何改变云体亮温的空间分布,该方法已在遥感反演中应用,但计算量巨大;其他相关研究则讨论邻云辐射逃逸效应对邻云之间晴空反射率的增强作用,指出增强效应与邻云之间的距离成反比,但是该分析主要讨论云-辐射-晴空的相互作用,同时只限于遥感目的(Kobayashi, et al, 2000; Nikolaeva, et al, 2005; 霍娟等, 2009); Sakurai 等(2005)构建了两个相同的理想积云半球体,模拟云体之间三维辐射效应产生的长、短波加热率改变,认为邻近云体之间的热辐射反馈影响辐射能量平衡。由此可知,有关三维云体之间的辐射相互作用研究主要集中于遥感领域对单波长辐射的讨论,鲜有学者利用真实的高分辨率云场分析邻云对有云大气辐射变温率空间分布的影响,以及可能导致的云动力过程改变。

为此,本研究选择 I3RC(International Intercomparison of 3D Radiation Codes) Phase II 的三维高分辨率积云和层积云云场作为试验云场,利用三维宽带有云大气辐射传输模式模拟了长、短波辐射变温率的空间分布,分析邻近空间分别为有云大气和晴空两种情况时变温率差值场的空间分布特征,定量阐明邻近云体影响目标云体热力结构的规律,为开发和优化天气预报模式辐射模块奠定理论基础。

2 三维云辐射传输模式简介

由美国科罗拉多大学 Evans 开发的三维有云大气辐射传输模式 SHDOM(Spherical Harmonics Discrete Ordinate Method)是目前唯一的且使用最广泛的三维辐射传输显式解析模式,它结合了球谐函数和离散纵坐标两种方法,前者主要计算散射积分源函数,可以减少内存消耗并缩短计算时间,后者采用自适应网格积分算法,提高空间辐射流运算精度,在整个求解过程中采用 Picard 迭代实现数值计算收敛(Evans, 1998)。SHDOM 可以处理太阳源与热辐射源,可以设置开放或周期性边界条件,输出单色或宽带辐射量。其中宽带辐射量计算采用快速辐射传输模型(RRTM)和 Fu-Liou 辐射传输模型提

供的 K 分布计算程序,RRTM 将长波波段(3.33—1000 μm)和短波波段(0.20—12.20 μm)分别划为 16 和 14 个波带(Fu, et al, 1992; Mlawer, et al, 1997)。对比蒙特卡罗辐射传输模式,SHDOM 数值效率高,适于宽波段辐射量计算。在此基础上,辐射变温率(Marshak, et al, 2005)为

$$\frac{dT}{dt} = \frac{1}{\rho c_p} (-\nabla \cdot F) \quad (1)$$

式中, ρ 为环境空气质量密度, c_p 为定压比热, $\nabla \cdot F$ 为净辐射通量散度。

3 三维云场与试验方案

模拟采用的水云云场选自 I3RC Phase II 的两个由大涡云模式生成的积云(Cu)和层积云场(Sc)(http://i3rc.gsfc.nasa.gov/cases_new.html)。积云场源自 GEWEX(The Global Energy and Water Cycle Experiment)的云系研究项目(GCSS, GEWEX Cloud System Study)(Stevens, et al, 1999; Hinkelman, et al, 2005),其 $X \times Y \times Z$ 空间范围为 6.7 km $\times$ 6.7 km $\times$ 1.4 km,格点数目为 100 $\times$ 100 $\times$ 36,空间分辨率为 66.7 m $\times$ 66.7 m $\times$ 40 m。云体液态水含量(Liquid water content, LWC)空间分布如图 1a 所示,液态水含量和云覆盖率(Cloud coverage, CC;各高度层有云范围与整个云场水平面积之比)的垂直分布如图 1c 所示,液态水含量峰值位于 1.82 km(云顶附近),约为 1.82 g/m³,而云覆盖率峰值位于 1.14 km(云底附近),约为 0.11。层积云场(图 1b)源自 FIRE-I 层积云试验(Moeng, et al, 1996),其 $X \times Y \times Z$ 空间体积为 3.5 km $\times$ 3.5 km $\times$ 0.4 km,格点数目为 64 $\times$ 64 $\times$ 16,空间分辨率为 55 m $\times$ 55 m $\times$ 25 m。液态水含量和云覆盖率的垂直分布如图 1d,两者峰值高度均在 0.70 km 附近,分别为 4.26 g/m³ 和 0.85,云体垂直伸展约为 0.35 km。此外,文中数值试验中考虑了水汽和臭氧等吸收气体,地表反照率设为 0.2,长波地表发射率为 0.98,地表温度为 290.6 K。

为研究邻近云体三维辐射效应的规律和产生机制,将云场的中心区域作为目标区域,积云场目标区域 X 、 Y 和 Z 方向的范围分别为 1.93—4.07、2.94—4.94 和 1.02—2.42 km,层积云场目标区域 X 、 Y 和 Z 方向的范围分别为 1.49—2.53、1.49—2.53 和 0.44—0.81 km(图 1a、b 中地表矩形区域所

示)。由图 1c、d 可知,目标区域的液态水含量和云覆盖率的垂直分布与总的云场保持一致。目标区域之外的其他云体视为邻近云体,或将目标区域之外的模式区域设置为无云晴空大气,进而模拟有云和晴空时目标云体辐射变温率的三维空间分布差异,

评估邻近云体对目标云体辐射变温场的影响程度,探讨云体相互作用引起的变温率变化规律。短波辐射计算中太阳天顶角分别取 0° 和 60° , SHDOM 计算流数为 8, 存在邻云时采用周期性边界, 目标区域周边为晴空条件时采用开放性边界。

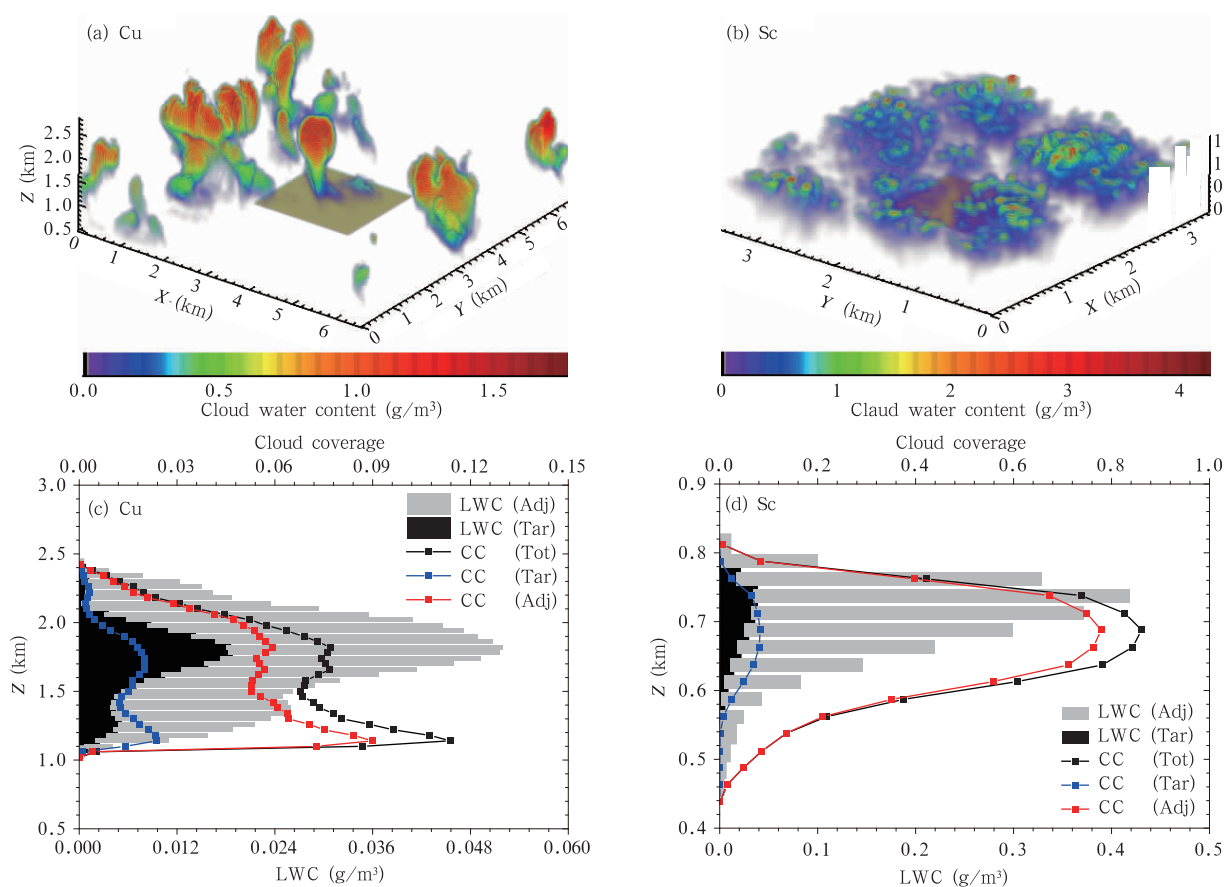


图 1 I3RC Phase II 积云(a、c)和层积云(b、d)的液态水含量(LWC)空间分布(a、b,矩形区域表示目标云体在地面的投影)、水平平均液态水含量(LWC)和水平云覆盖率(CC: Cloud Coverage)垂直廓线(c、d, Tar、Adj 和 Tot 分别表示目标区域、邻近区域和整个云场区域,例如 CC (Tar) 表示目标区域水平平均云覆盖率)

Fig. 1 Three-dimensional liquid water content (LWC) distributions (the rectangular areas in panels (a, b) denote the vertical projection of target domain on the ground surface) of cumulus (a, c) and stratocumulus (b, d) as well as their vertical profiles of horizontally averaged LWC and cloud coverage (CC) (Tar, Adj and Tot in panels (c, d) denote target, adjacent and total domains of cloud fields respectively, for example, CC (Tar) represents the cloud coverage in the targeted domain)

4 结果与讨论

4.1 邻云长波辐射保温效应

为了定量评估三维邻云辐射效应,将邻近空间分别为有云和晴空时目标云体区域辐射变温率进行差值处理(表 1),若差值大于 0 表示邻云对目标云体起到辐射保温作用,否则邻云为辐射冷却作用。

对于长波辐射,无论周围是否存在邻云的影响,目标区域云体通过发射长波辐射使得自身整体平均辐射变温率均低于 0,直接作用为辐射冷却,并且在垂直方向上随高度升高而不断增强。在云顶附近,积云和层积云水平长波辐射平均变温率分别达到 -3.96 和 -6.04 K/h(图 2)。

表1 邻近空间为晴空和邻云时目标区域平均长波辐射变温率 H_{clr} 和 H_{cld} 及其差值 $\Delta H = H_{\text{cld}} - H_{\text{clr}}$ (K/h)

Table 1 For cumulus and stratocumulus fields, the average longwave radiative heating rates H_{clr} and H_{cld} of the entire target domain from simulations with the adjacent domain being clear sky and cloudy atmosphere respectively, and the corresponding difference $\Delta H = H_{\text{cld}} - H_{\text{clr}}$ (K/h)			
云状	H_{cld}	H_{clr}	ΔH
积云	-0.53	-0.54	0.01
层积云	-1.41	-1.56	0.15

然而,邻近云体通过吸收目标区域发射的长波辐射能量,并将其重新发射回目标区域,导致辐射能量在云体之间相互传输而减缓目标区域的整体冷却速率(例如,积云和层积云目标区域整体平均辐射增温 0.01 和 0.15 K/h,表 1),形成邻云长波辐射保温效应。与此同时,目标云体也会引起邻云辐射增温。不仅如此,目标区域保温在空间上具有高度的局域性特征,积云和层积云水平平均辐射变温率最大差

值分别出现在 1.18 km (0.03 K/h) 和 0.66 km (0.34 K/h) (图 2c,d)。图 3 为邻近空间分别为有云和晴空时目标区域的变温率散点分布。可以看到,目标区域绝大多数格点几乎不增温,而少数格点增温幅度则较大,积云和层积云最大增温率分别达到 2.17 和 3.08 K/h,进一步显示了长波保温效应的空间局域性。

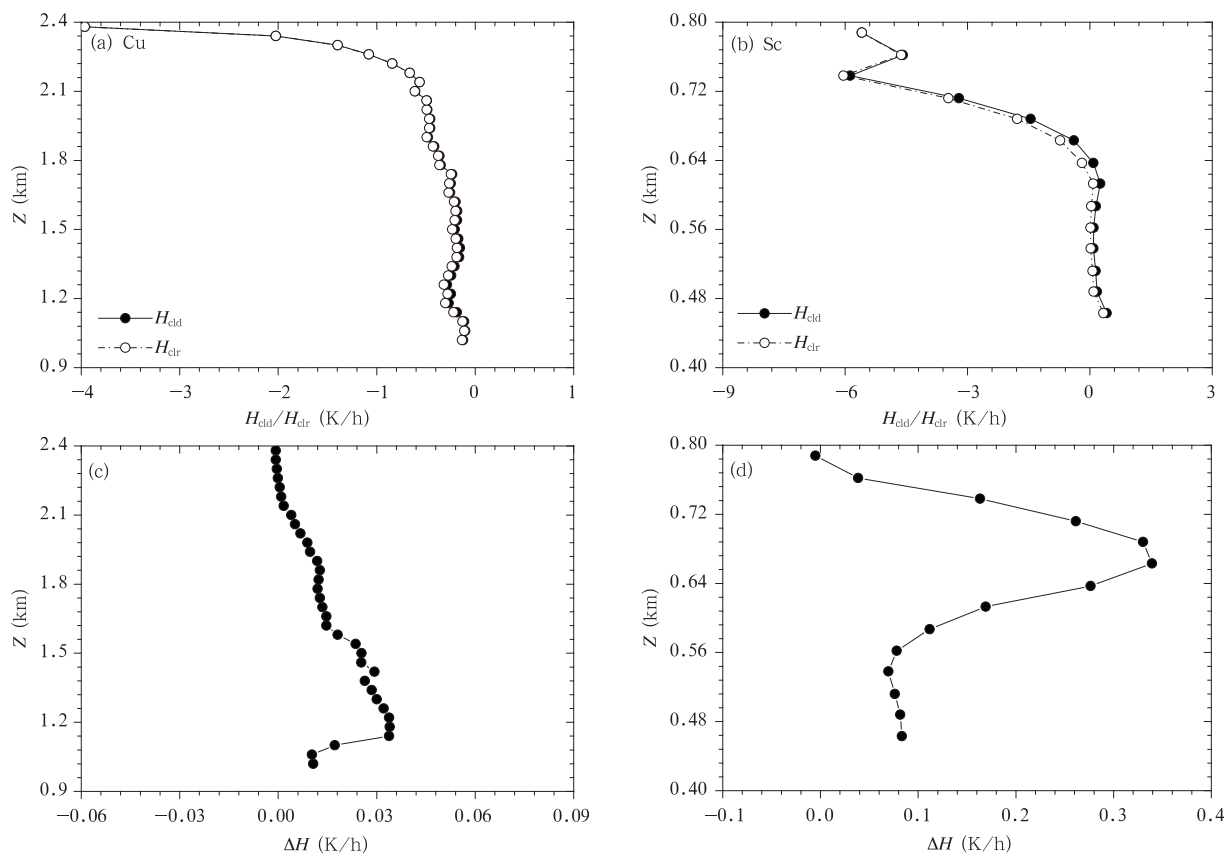


图2 邻近空间为晴空和邻云时目标区域水平平均长波辐射变温率(a,b)及其差值(c,d)随高度的分布

Fig. 2 Vertical profiles of horizontally averaged longwave radiative heating rates for cumulus and stratocumulus fields (a, b) over the entire targeted domain for simulations with the adjacent domain being clear sky and cloudy atmosphere respectively, and the corresponding difference (c, d) between results with two different adjacent domains

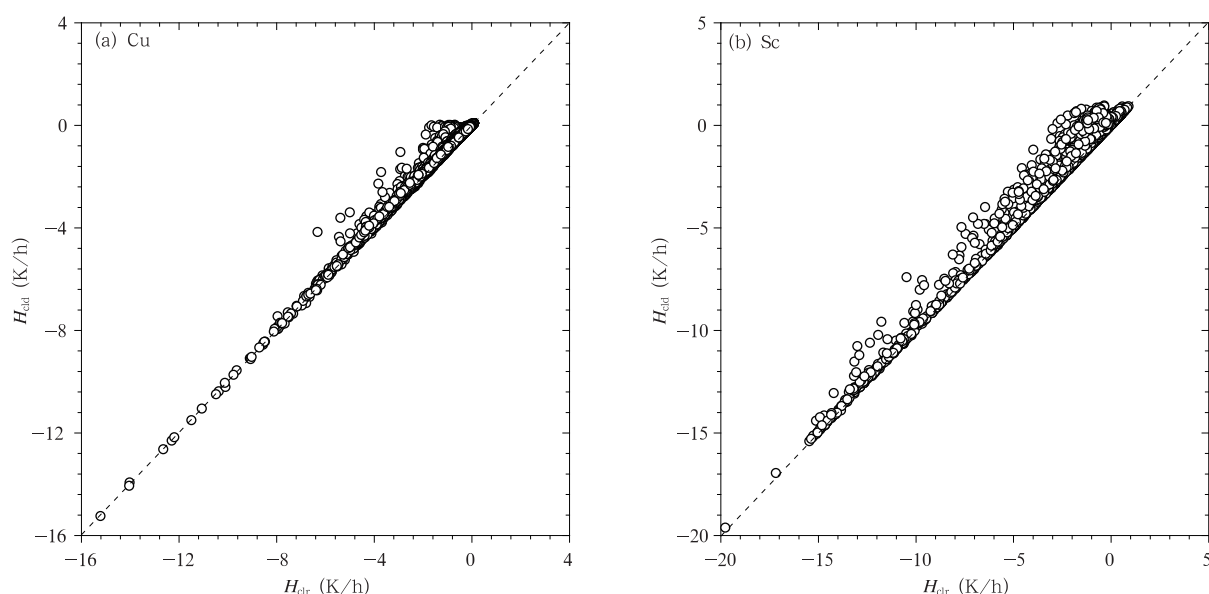


图3 积云(a)和层积云(b)邻近空间分别为邻云和晴空时目标区域长波变温率散点分布
Fig. 3 Comparison of longwave radiative heating rates over the entire target domain for cumulus (a) and stratocumulus (b) fields between simulations with the adjacent domains being clear sky and cloudy atmosphere respectively

邻云对目标云体产生的较大局域保温效应可通过热力不平衡进而影响云体的演变过程,因此,可通过积云和层积云各个高度上液态水含量和变温率差值水平分布场及其直方图,逐层分析变温率差值与液态水含量的关系,进一步讨论邻云的辐射保温效应空间分布特征及产生机制。为清晰起见,从目标云体顶部、中部和底部各挑选了一个高度层(具体高度参见图4说明),相应的水平分布如图4和5。对于积云,各层云体分布均较为稀疏,大多数格点属于晴空区域,云覆盖率随高度升高而不断减小,但是云内(即液态水含量大于0的区域)的液态水含量随高度升高而不断增大。目标区域各层变温率增值分布与三维云体边界结构基本吻合,即在云体表面层保温效应最强,而在云体内部或晴空区域增温甚小,约为0—0.10 K/h。增温数值和区域随高度升高而不断减小,与云覆盖率近似成正相关,与云场液态水含量无明显相关,即在云覆盖率较高的云底增温较大,最高可达1.65 K/h,受热云体边界厚度最大,而在云覆盖率较低的云顶则较低,受热云体边界厚度相对较薄,范围不足100 m。总之,邻云发射的长波辐射对目标云体的增温范围有限,主要集中于距离邻云最近的云体表面边界附近,而不是云体内部,影响的云体边界厚度与液态水含量成反比,因为液态水

含量越高,吸收邻近云体辐射越强,其传输的路程越短。从图6给出的 $Y=4.00$ km变温差值的垂直剖面,可以清晰体现该规律。另外,需要说明的是,在云中层目标云体的东部边界增温不明显,云体轮廓不清晰,原因是其东边的邻近云体高度相对较低,发射长波辐射能量较低(图2a),而且距离较远,另外,目标云体的东北部存在零散云体,邻云发射的主要辐射能量被就近的零散云体吸收,使得零散云体边界增温。

对于层积云,云体分布更加密集,云覆盖率较大,云内液态水含量分布较积云均匀。云顶层的云覆盖率最低,但云内液态水含量最高,云中层的云覆盖率最高,云内液态水含量次之,云底层的云覆盖率高于云顶,但与云中层接近,液态水含量最低。各层目标区域内格点增温幅度明显高于积云,变温率差值分布特征与目标区域内少量云体边界保持一致,主要与目标区域矩形边界吻合,其原因是层积云云覆盖率高,使得目标和邻近区域云体连成一体,目标区域边界即为目标云体边界。尽管层积云增温效果明显强于积云,但是增温分布特征本质上与积云类似。同时,在云量较低而液态水含量较高的云顶邻云辐射加热甚微,变温率差值的范围为-0.05—0.34 K/h,而在云覆盖率较高而液态水含量较低的

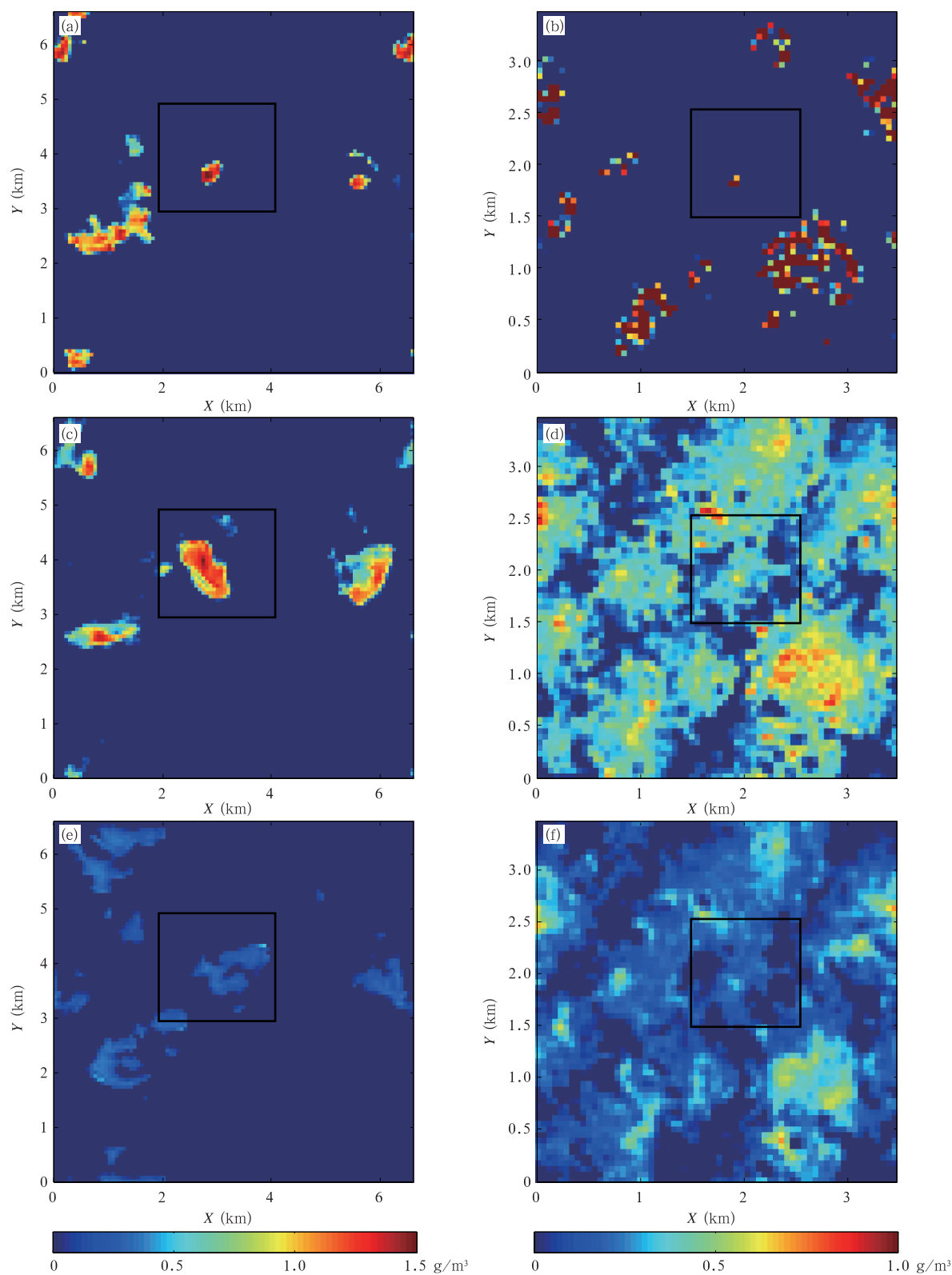


图4 云顶(a,b)、云中(c,d)和云底(e,f)液态水含量水平分布
(a,c,e. 积云, 高度分别为 2.06、1.74、1.22 km; b,d,f. 层积云, 高度分别为 0.79、0.69、0.64 km; 矩形表示目标区域)

Fig. 4 Horizontal LWC distributions at three different altitudes approximately located at the top, middle and bottom of the cloud fields(a, c, e. the altitudes of top, middle, and bottom of the cloud are 2.06, 1.74, 1.22 km for cumulus; b, d, f. the altitudes of top, middle, and bottom of the cloud are 0.79, 0.69, 0.64 km for stratocumulus; the rectangular area in each panel denotes the targeted area)

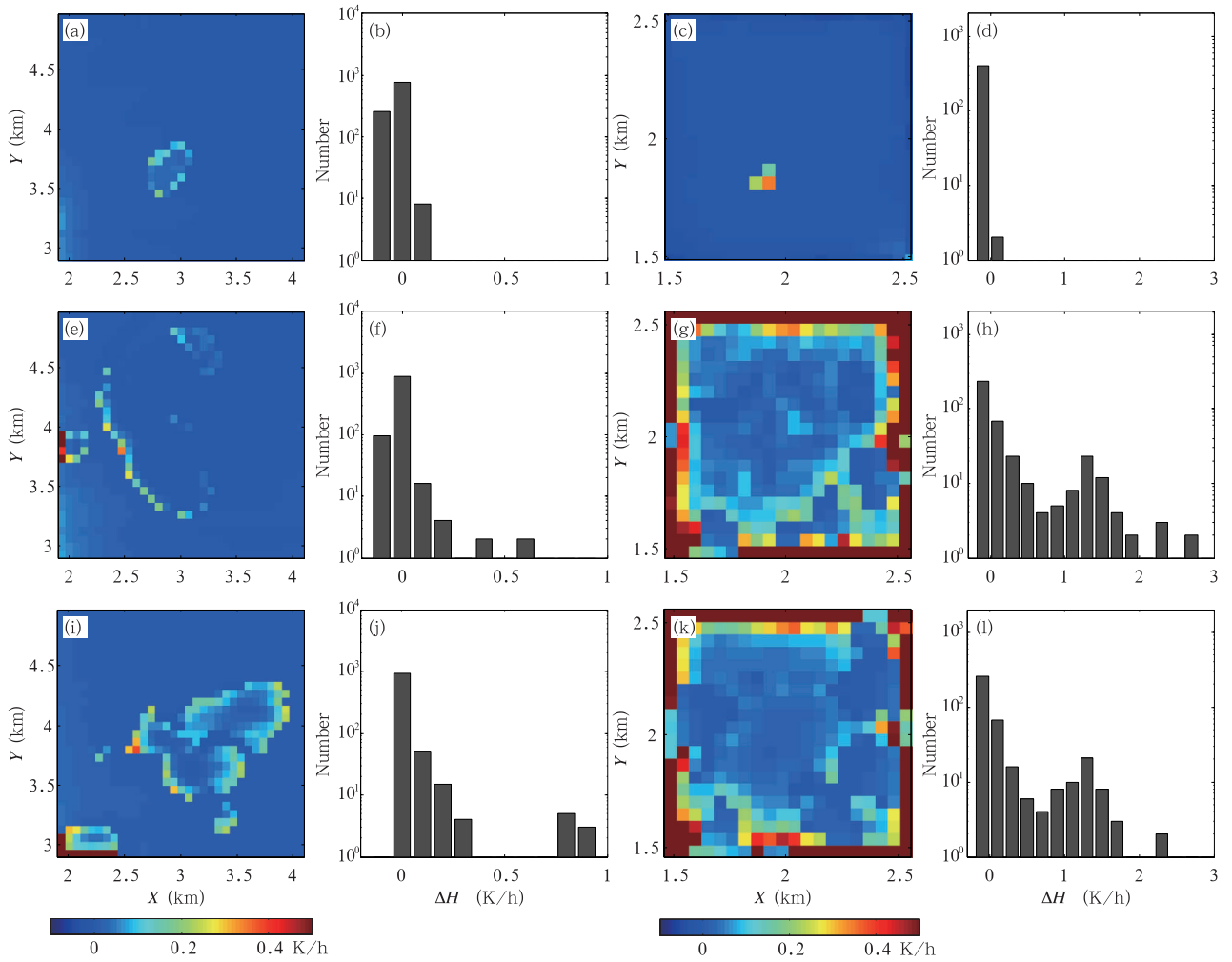


图5 云顶(a,b,c,d)、云中(e,f,g,h)和云底(i,j,k,l)目标区域长波变温率差值水平分布

(a,e,i. 积云;c,g,k. 层积云)及不同变温率差值格点数(b,f,j. 积云;d,h,l. 层积云)

Fig. 5 Horizontal longwave radiative heating rate difference distributions (a, e, i. Cu; c, g, k. Sc) in the target areas at three different altitudes (see Fig. 4) as well as the number of grids of heating rate difference (b, f, j. cumulus; d, h, l. stratocumulus)

云底邻云加热明显较强,最高可达 2.85 K/h,云覆盖率最高的云中层邻云增温最强,最高可达 2.79 K/h。因此,同样表明变温率增值与云覆盖率的相关性较强,与液态水含量的相关性较弱。图 6 给出的 $Y=1.82$ km 变温差值垂直剖面,也可进一步验证该结论。此外,在与邻云水平距离更近的云体表面边界增温幅度最大,也符合“就近”原则,但增温厚度不足 150 m。

综上所述,虽然邻云的长波辐射增温效应体现于整个目标区域,但是目标云体边界附近的增温值明显高于水平区域平均值,具有明显的局域分布特征,其增值范围与云覆盖率和云间距离倒数成正比,满足“就近”原则,且云体增温厚度与云体液态水含

量成反比。

4.2 短波散射增温效应与遮蔽降温效应

对于短波情况,太阳入射方向决定了三维云场与太阳直接辐射的几何关系,进而影响邻云辐射效应。为此,模拟了太阳天顶角分别为 0° 和 60° 时 I3RC Phase II 积云和层积云的短波辐射变温率。总体来说,无论天顶角大小,太阳作为主要的辐射源对云体均起辐射增温的作用(见表 2 中目标区域整体平均短波辐射变温率),在垂直方向上目标区域水平平均辐射变温率均随高度升高而增大,仅在局部高度存在一定波动(如积云中层和层积云顶层),且都在云顶附近变温率达到最大值,积云和层积云分别为 1.76 和 3.20 K/h(图 8a,b)。

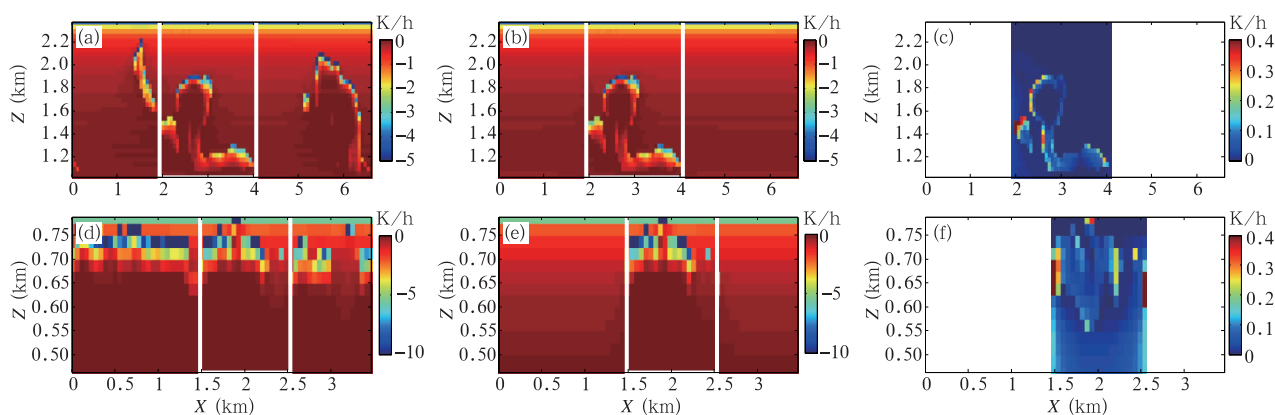


图6 在邻近空间分别为邻云(a,d)或晴空(b,e)时积云(a,b,剖面Y值为4.00 km)和层积云(d,e,Y值为1.82 km)长波辐射变温率及其差值的垂直剖面(c,f)(图中矩形为目标区域)

Fig. 6 Vertical longwave radiative heating rate cross-sections over the cloud fields for simulations with the adjacent domain being clear sky (b, e) and cloudy atmosphere (a, d) respectively, and cross-sections of the corresponding difference (c, f) where $Y = 4.00$ km and 1.82 km for cumulus (a, b) and stratocumulus (d, e) respectively (the rectangular area in each panel denotes the target area)

表2 与表1类似,但为太阳天顶角分别为 0° 和 60° 时短波辐射变温率

Table 2 Same as Table 1 but for shortwave radiative heating rate with solar zenith angles of 0° and 60°

云状	太阳天顶角($^\circ$)	H_{clr} (K/h)	H_{clr} (K/h)	ΔH (K/h)
积云	0	0.48	0.47	0.01
	60	0.25	0.27	-0.02
层积云	0	1.28	1.23	0.05
	60	0.66	0.67	-0.01

然而,对于不同的太阳天顶角,目标云体在其周围为晴空和存在邻云时变温率差值存在正负差异,即可表现为完全不同的三维邻云辐射效应。当太阳天顶角为 0° 时,邻近云体造成积云和层积云目标区域整体平均辐射变温率增大 0.01 和 0.05 K/h(表2),使得目标区域水平平均辐射变温率差值随高度降低而不同程度地增大,其中积云增温幅度不显著,稳定在 0.01 K/h左右,层积云在云底附近(0.44 km)达到最大值 0.08 K/h,同时在云覆盖率最大的高度附近(0.69 km)有一个次大值 0.06 K/h(图7c,d)。由此可知,当太阳天顶角较小时,邻近云体将传输至邻近区域的太阳辐射散射至目标区域云体内,使其发生散射辐射增温。但是相对长波辐射保温效应,短波散射辐射需要经历多次散射过程(即辐射扩散过程),同时单次散射反照率很大,吸收能量较小,因此,短波散射增温效应明显偏弱(见图8中邻近空间分别为有云和晴空时区域空间格点辐

射变温率散点分布)。当太阳天顶角为 60° 时,情况则相反,积云和层积云目标区域整体平均辐射变温率降低 0.02 K/h和 0.01 K/h,积云降温数值已经超过其长波增温数值(表1、2),目标区域水平平均辐射变温率差值在垂直方向表现为非单调分布,积云和层积云分别在高度为 1.42 和 0.64 km时达到冷却峰值 -0.04 和 -0.06 K/h(图7)。因此,当太阳倾斜入射时,邻近云体通过遮挡原本入射至目标区域的短波辐射,造成目标区域变温率降低,形成邻云辐射遮蔽降温效应(图8)。值得注意的是,邻云遮蔽降温与散射增温是同时存在的,例如在云顶附近邻近云体由于无法直接遮挡目标云体仍然表现为散射增温的作用(图7)。

与长波辐射增温的局域性分析类似,通过积云和层积云格点变温率差值的水平和垂直剖面分布(图9—11,其中选择的垂直高度和水平Y值与长波情况完全相同),分析邻云的短波散射增温和遮蔽降

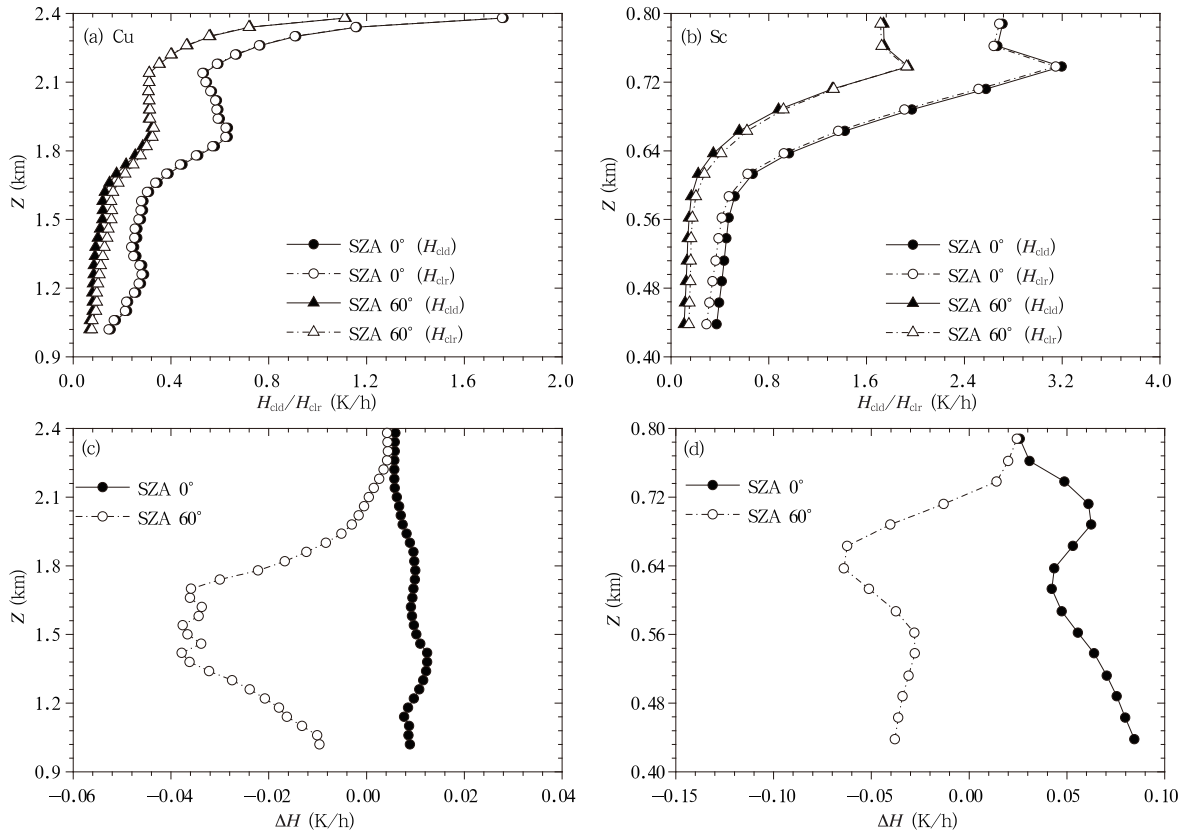


图7 同图2,但为太阳天顶角为 0° 和 60° 时短波辐射变温率
Fig. 7 Same as Fig. 2 but for shortwave radiative heating rate
with the solar zenith angles 0° and 60°

温空间分布特征及产生机制。当太阳天顶角为 0° 时(图9),无论积云和层积云,散射增温均不明显,当邻近云体与目标云体距离较远时,目标云体的增温范围虽然很大,几乎涵盖整个云体,且分布平滑,但是强度非常弱,只有当邻近云体与目标云体靠近时,云体边界变温率才有明显增大(例如层积云边界增温数值最高可达 0.56 K/h),类似于长波保温分布特征。不仅如此,图11给出的辐射增温的垂直分布还清晰地表明辐射增温范围与云体垂直高度的关系。当太阳垂直入射云顶时,光粒子方向性非常强,邻近区域内光粒子被散射至目标云体的概率极低,因此云顶增温极低;而当光粒子通过多次散射不断向下深入云体内部,方向性逐步减弱,导致其水平穿透目标云体的可能性增大,进而增温范围随高度降低而不断向下向内扩展,同时增温数值也逐步趋于均匀。总体来说,邻云散射增温效应来源于邻云的多次太阳短波散射辐射,因其短波辐射吸收明显弱

于长波辐射,传输的路程更长,云体增温范围更大,变温率空间差异小于长波保温效应。增温强度随高度降低而不断减弱,与目标云与邻云之间的距离成反比,与邻云覆盖率成正比。

当太阳天顶角为 60° 时,邻近云体主要起遮蔽降温作用,并伴随非常弱的散射增温,积云和层积云目标云体变温率差值具有显著的空间局域性特征(图10、11),其分布与云体三维空间结构和太阳入射方向相关。在该数值试验中太阳从西向东(图中从左至右)倾斜入射大气,积云目标云体由于垂直发展,顶部增温较强而底部增温较弱,其西边的邻近云体遮挡了太阳直射辐射,造成被遮挡目标区域表现为沿入射方向不同程度的冷却降温,离邻近云体最近且中间没有其他云体遮挡的一侧目标云体降温幅度最大,即目标区域云顶左侧附近降温最强,高达 1.72 K/h ,降温云体边界厚度约为 200 m ,降温程度总体上超过了长波增温数值。层积云也存在类似效

应,局部格点最大降温 1.52 K/h,但是其遮蔽降温效应要明显弱于长波保温效应,主要原因是层积云空间分布较积云均匀,目标和邻近区域的云体云顶高度基本一致,邻近云体不能直接遮挡目标云体的云顶部分,但是当周围无云时云顶液态水含量高,受太阳加热明显高于云底,因此遮蔽云顶比云底降温幅度要大。另外,在背向太阳一侧的目标云体存在弱的散射增温(图 11)。从以上分析可得,当太阳倾

斜入射大气系统时,邻云产生短波遮蔽降温效应,该效应与云体三维空间结构和太阳入射方向有关,具体表现为邻云在太阳辐射传输路径上投影一侧的目标云体存在明显的辐射遮蔽降温效应,且主要集中于云体表面边界附近,具有高度的局域性,此外,背向太阳一侧的目标云体存在微弱的邻云散射增温效应。

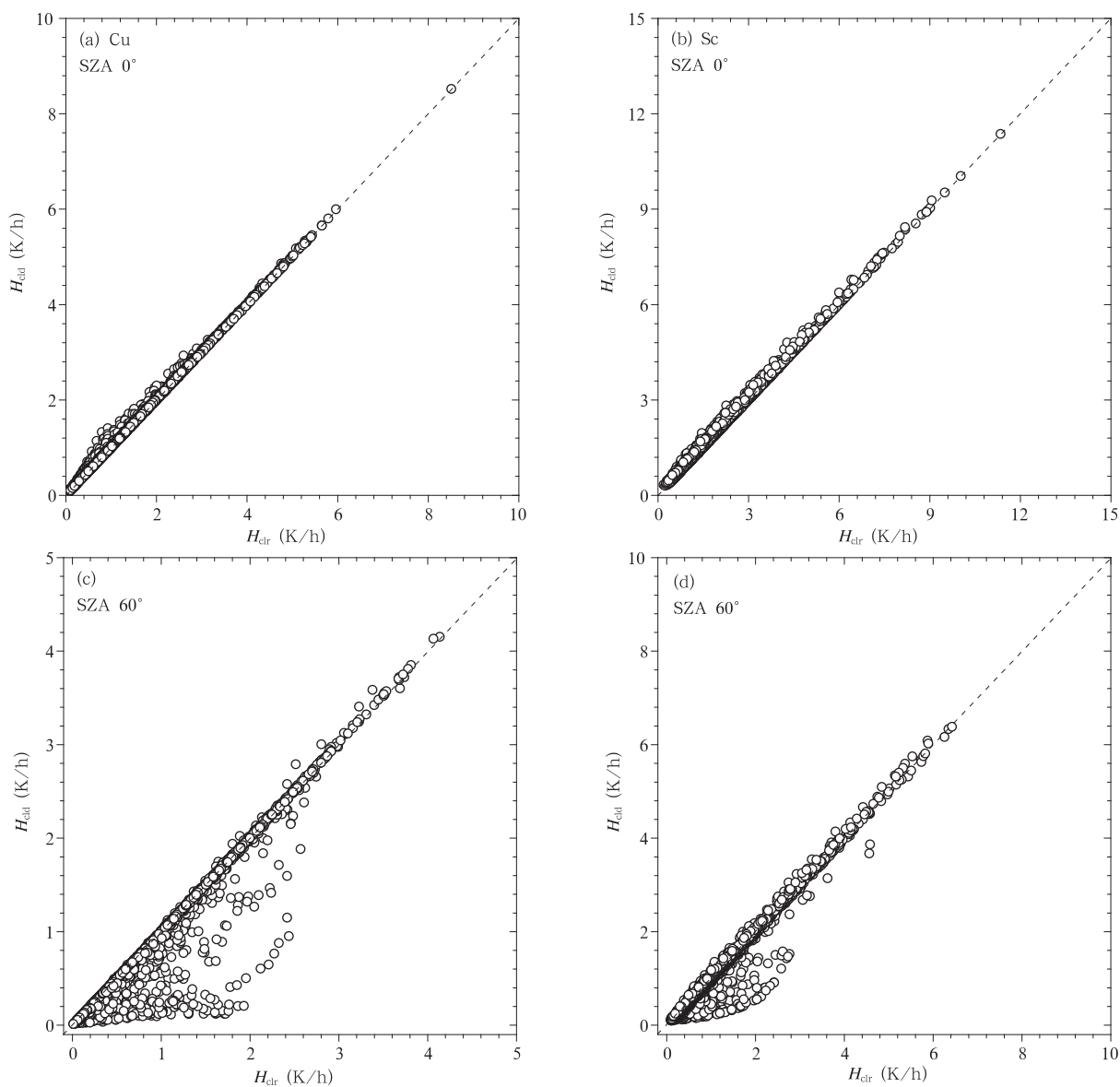
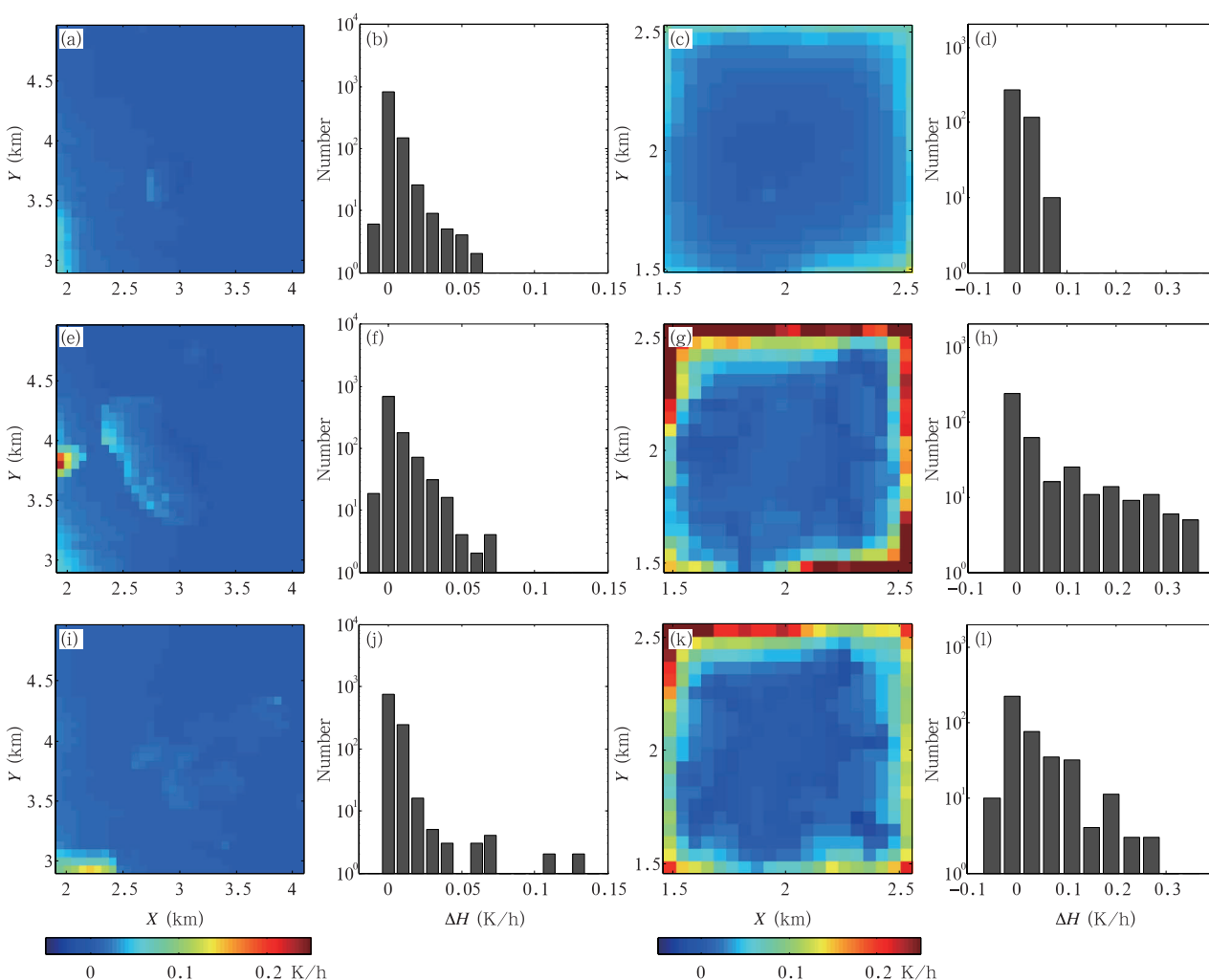


图 8 同图 3, 但为太阳天顶角为 0° 和 60° 时短波辐射变温率
Fig. 8 Same as Fig. 3 but for shortwave radiative heating rate
with the solar zenith angles 0° and 60°

图9 同图5,但为短波太阳天顶角为 0° Fig. 9 Same as Fig. 5 but for shortwave radiative with the solar zenith angle 0°

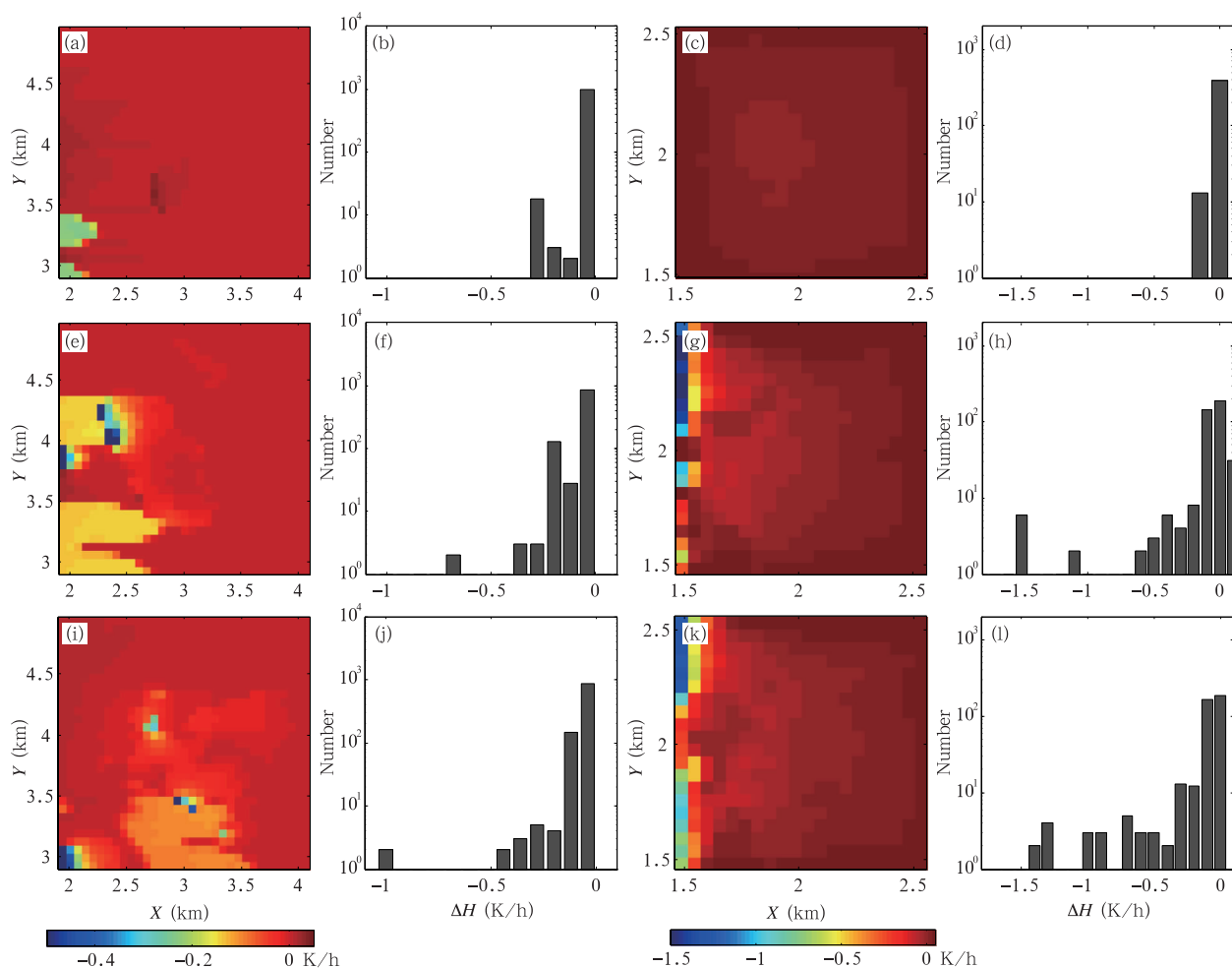
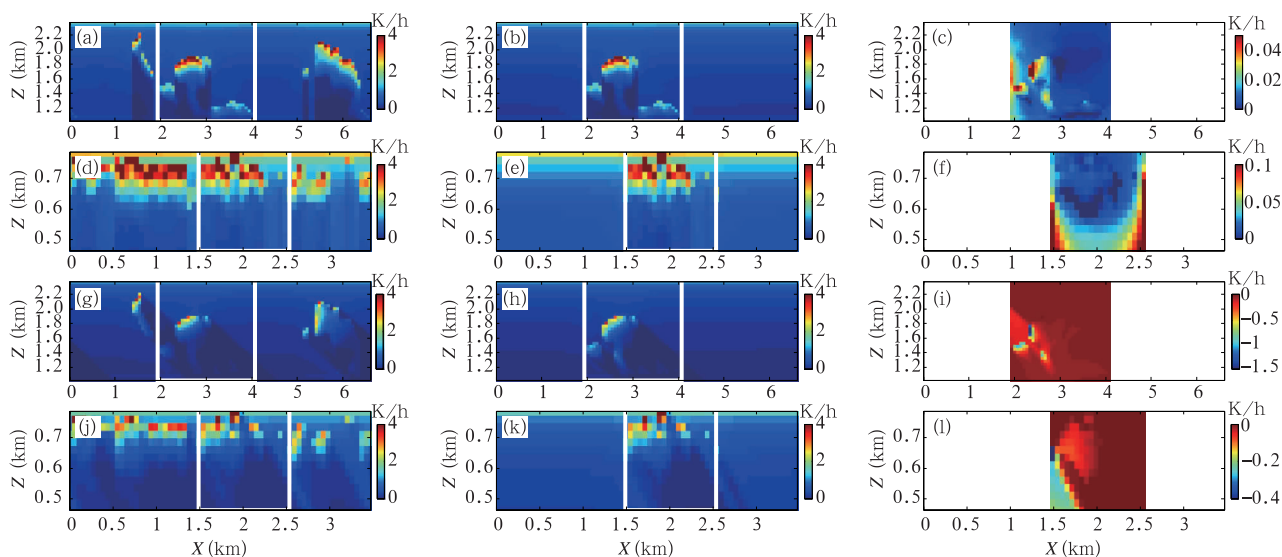
5 结 论

目前大气数值模式普遍采用一维大气辐射传输模型,忽略有云大气三维辐射传输过程,可能造成数值模式的不确定性,影响天气、气候模拟和预报的准确性。为此,选取 I3RC Phase II 的典型积云和层积云场,利用基于相关 K 分布的三维宽带有云大气辐射传输模式 SHDOM,模拟三维水云大气的长短波辐射变温率空间分布,定量分析邻近云体对目标云体辐射变温率空间结构的影响规律,主要结论如下:

对于长波情况,邻云通过吸收目标区域发射的长波辐射并将其重新发射回目标区域,来减缓目标区域云体降温速率,表现为长波保温效应,但增温区域具有高度的局域性,近似满足“就近”原则,主要集

中于与邻云距离较近的云体表面层,云体内部几乎不增温,因此空间分布形状与云体几何边界十分类似,增温强度与云体覆盖率成正比,与云间距离成反比,最高可达 3.08 K/h ,增温的云体厚度与云体液态水含量近似成反比。

对于短波情况,一方面邻云将接收的太阳辐射散射至目标区域,使目标区域云体发生散射增温现象,而另一方面邻云通过遮挡入射至目标区域的太阳直接辐射,造成邻云遮蔽降温。当太阳天顶角较小时,邻云侧向遮挡目标云体的概率小,邻云散射增温效应起主导作用,但是总体增温偏弱,明显低于长波辐射保温效应,同时增温局域性不强,随高度降低,增温范围不断增大,强度不断减小;随着太阳天顶角不断增大,邻云遮蔽降温效应逐步增强,并占据

图 10 同图 5, 但为太阳天顶角为 60° Fig. 10 Same as Fig. 5 but for the solar zenith angle 60° 图 11 同图 6, 但太阳天顶角为 0° (a—f) 和 60° (g—l)Fig. 11 Same as Fig. 6 but for the solar zenith angle 0° (a—f) and 60° (g—l)

主导地位,目标云体被遮蔽一侧显著降温,数值甚至超过长波辐射保温效应,最大降温达到 -1.72 K/h ,同时降温 also 具有很强的局域性,主要集中在云体表面层。

邻云的三维长、短波辐射效应可以改变云体变温率的空间结构,进而可能影响云内水汽转换、液态水总量、垂直运动及云系发展演变过程等。本研究得出邻云影响云体辐射变温率空间结构的规律可为后续开发和改进在大气数值模式辐射计算方案提供理论依据。

致 谢:感谢 I3RC(International Intercomparison of 3D Radiation Codes)网站提供高分辨率 Phase II 云场数据。

参考文献

- 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. *大气科学*, 33(1): 168-178. Huo J, Lü D R. 2009. Simulations of inhomogeneous clouds and their effects on radiative distribution of atmosphere with a 3D radiative transfer model. *Chinese J Atmos Sci*, 33(1): 168-178 (in Chinese)
- 宋磊, Min Q L, 吕达仁. 2012. 云三维结构对加热率廓线及通量影响的模拟. *气候与环境研究*, 17(2): 160-170. Song L, Min Q L, Lü D R. 2012. A simulation of effects of cloud 3D structures on heating rate profiles and fluxes. *Climatic Environ Res*, 17(2): 160-170 (in Chinese)
- Cahalan R F, Ridgway W, Wiscombe W J, et al. 1994a. The albedo of fractal stratocumulus clouds. *J Atmos Sci*, 51(16): 2434-2455
- Cahalan R F, Ridgway W, Wiscombe W J, et al. 1994b. Independent pixel and Monte Carlo estimates of stratocumulus albedo. *J Atmos Sci*, 51(24): 3776-3790
- Chen Y, Liou K N. 2006. A Monte Carlo method for 3D thermal infrared radiative transfer. *J Quant Spectrosc Ra*, 101(1): 166-178
- Davis A B, Marshak A. 2010. Solar radiation transport in the cloudy atmosphere: A 3D perspective on observations and climate impacts. *Rep Prog Phys*, 73(2): 026801
- Di Giuseppe F, Tompkins A M. 2003. Three-dimensional radiative transfer in tropical deep convective clouds. *J Geophys Res*, 108(D23): 4741
- Evans K F. 1998. The spherical harmonics discrete ordinate method for three-dimensional atmospheric radiative transfer. *J Atmos Sci*, 55(3): 429-446
- Frame J, Markowski P. 2010. Numerical simulations of radiative cooling beneath the anvils of supercell thunderstorms. *Mon Wea Rev*, 138(8): 3024-3047
- Fu Q, Liou K N. 1992. On the correlated k -distribution method for radiative transfer in nonhomogeneous atmospheres. *J Atmos Sci*, 49(22): 2139-2156
- Gu Y, Liou K N. 2001. Radiation parameterization for three-dimensional inhomogeneous cirrus clouds: Application to climate models. *J Climate*, 14(11): 2443-2457
- Guan H, Yau M K, Davies R. 1997. The effects of longwave radiation in a small cumulus cloud. *J Atmos Sci*, 54(17): 2201-2214
- Hinkelman L M, Stevens B, Evans K F. 2005. A large-eddy simulation study of anisotropy in fair-weather cumulus cloud fields. *J Atmos Sci*, 62(7): 2155-2171
- 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 Atmos Sci*, 64(10): 3499-3520
- Iwabuchi H. 2006. Efficient Monte Carlo methods for radiative transfer modeling. *J Atmos Sci*, 63(9): 2324-2339
- Jakub F, Mayer B. 2015. A three-dimensional parallel radiative transfer model for atmospheric heating rates for use in cloud resolving models – The TenStream solver. *J Quant Spectrosc Ra*, 163: 63-71
- Jonas P R. 1989. Effects of radiation on clouds. *Atmos Res*, 23(3-4): 259-286
- Klinger C, Mayer B. 2016. The Neighboring Column Approximation (NCA) – A fast approach for the calculation of 3D thermal heating rates in cloud resolving models. *J Quant Spectrosc Ra*, 168: 17-28
- Kobayashi T, Masuda K, Sasaki M, et al. 2000. Monte Carlo simulations of enhanced visible radiance in clear-air satellite fields of view near clouds. *J Geophys Res*, 105(D21): 26569-26576
- Marshak A, Davis A. 2005. 3D Radiative Transfer in Cloudy Atmospheres. Berlin Heidelberg: Springer
- Mayer B. 2009. Radiative transfer in the cloudy atmosphere *Eur Phys J Conferences*, 1: 75-99
- Mlawer E J, Taubman S J, Brown P D, et al. 1997. Radiative transfer for inhomogeneous atmospheres: RRTM, a validated correlated- k model for the longwave. *J Geophys Res*, 102(D14): 16663-16682
- Moeng C H, Cotton W R, Bretherton C, et al. 1996. Simulation of a stratocumulus-topped planetary boundary layer: Intercomparison among different numerical codes. *Bull Amer Meteor Soc*, 77(2): 261-278
- Nikolaeva O V, Bass L P, Germogenova T A, et al. 2005. The influence of neighbouring clouds on the clear sky reflectance studied with the 3-D transport code RADUGA. *J Quant Spectrosc Ra*, 94(3-4): 405-424
- O'Hirok W, Gautier C. 1998a. A three-dimensional radiative transfer model to investigate the solar radiation within a cloudy atmosphere. Part I: Spatial effects. *J Atmos Sci*, 55(12): 2162-2179
- O'Hirok W, Gautier C. 1998b. A three-dimensional radiative transfer model to investigate the solar radiation within a cloudy atmosphere. Part II: Spectral effects. *J Atmos Sci*, 55: 3065-

3076

- 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 Atmos Sci*, 62(8): 2939-2951
- Sakurai A, Maruyama S, Sakai S, et al. 2005. The effect of three-dimensional radiative heat transfer in cloud fields using the radiation element method. *J Quant Spectrosc Ra*, 93(1-3): 79-87
- Stevens B, Moeng C H, Sullivan P P. 1999. Large-eddy simulations of radiatively driven convection: Sensitivities to the representation of small scales. *J Atmos Sci*, 56(23): 3963-3984
- Várnai T, Marshak A. 2003. A method for analyzing how various parts of clouds influence each other's brightness. *J Geophys Res*, 108(D22): 4706
- Wang L D, Lü D R, Huo J. 2014. Observation and simulation of abnormal transmittance over Yangbajing, Tibet. *Atmos Oceanic Sci Lett*, 7(3): 190-197
- Wang Z, Yang S Z, Qiao Y L, et al. 2011. Multiple-scaling methods for Monte Carlo simulations of radiative transfer in cloudy atmosphere. *J Quant Spectrosc Ra*, 112(16): 2619-2629
- Wang Z, Yang S Z, Qiao Y L, et al. 2012. Monte Carlo simulations of radiative transfer in cloudy atmosphere over sea surfaces. *Terr Atmos Ocean Sci*, 23(1): 59-70
- Welch R M, Wielicki B A. 1984. Stratocumulus cloud field reflected fluxes: The effect of cloud shape. *J Atmos Sci*, 41(21): 3085-3103
- Wissmeier U, Buras R, Mayer B, et al. 2013. paNTICA: A fast 3D radiative transfer scheme to calculate surface solar irradiance for NWP and LES models. *J Appl Meteorol Clim*, 52(8): 1698-1715
- Zhong W Y, Hogan R J, Haigh J D. 2008. Three-dimensional radiative transfer in midlatitude cirrus clouds. *Quart J Roy Meteor Soc*, 134(630): 199-215