

Henyey-Greenstein 近似对冰云短波辐射 计算的影响

陈琪^{1,2,3**}, 张华^{1,2,3*}

¹ 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室, 北京 100081

² 南京信息工程大学气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 江苏 南京 210044

³ 中国气象局气候研究开放实验室, 国家气候中心, 北京 100081

摘要 基于新的多形状冰云参数化方案和 BCC_RAD 辐射传输模式, 详细分析了在辐射传输算法中通常使用的 HG(Henyey-Greenstein)近似对冰云短波辐射传输过程的影响。对于单个冰晶粒子光学性质, HG 近似对相函数勒让德展开式第 3 和第 4 项系数计算造成了较大误差, 最大误差分别为 -0.28 和 -0.33 , 最大相对误差分别为 -55.7% 和 -73.8% 。第 4 项系数的误差绝对值和相对值均高于第 3 项系数。进一步分析发现, HG 近似在可见光区造成的误差高于近红外区。对于冰云体积光学性质, HG 近似同样对第 3 和第 4 项系数造成了较大的误差, 最大误差分别为 -0.18 和 -0.22 , 最大相对误差分别为 -27.9% 和 -37.1% 。第 4 项系数的误差高于第 3 项系数, 可见光区误差高于近红外区, 与对单个冰晶粒子光学性质的影响一致。HG 近似也对有云大气的辐射传输过程计算造成了较大的误差。对短波向下辐射通量造成的最大误差为 $-2.78 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, 对短波向上辐射通量造成的最大误差为 $-1.06 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, 对短波加热率造成的最大误差为 $0.27 \text{ K} \cdot \text{d}^{-1}$ 。HG 近似低估了短波辐射通量, 高估了云内加热率。因此, 在冰云辐射传输计算中需精确描述相函数。

关键词 大气光学; 大气散射; Henyey-Greenstein 近似; 辐射; 冰云

中图分类号 P422; P426.5; O435.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.0801001

Effects of Henyey-Greenstein Approximation on Shortwave Radiative Calculations in Ice clouds

Chen Qi^{1,2,3**}, Zhang Hua^{1,2,3*}

¹ State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China

² Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing, Jiangsu 210044, China

³ National Climate Center, Laboratory for Climate Studies, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China

Abstract Based on a new multi-shape ice cloud radiative parameterization scheme and the Beijing Climate Center radiative transfer mode (BCC_RAD), the effects of the Henyey-Greenstein (HG) approximation on the shortwave ice-cloud radiation are analyzed in details, in which the HG approximation is widely used in radiative calculations. To the optical properties of the single ice crystal, the HG approximation causes large errors on 3rd and 4th coefficients of the Legendre expansion of the phase function, and the maximum values of the errors are -0.28 and -0.33 , respectively, while the maximum values of the relative errors are -55.7% and -73.8% , respectively. The errors of 4th coefficients are higher than those of 3rd coefficients, and the errors in near-infrared waves are higher than those in visible waves. To the bulk optical properties of the ice clouds, the HG approximation causes large errors on 3rd and 4th coefficients, and the maximum values of the errors are -0.18 and -0.22 , respectively, while the maximum values of the relative errors are -27.9% and -37.1% , respectively. The errors of 4th coefficients are higher and so as in visible waves, which are same to the single ice crystal. The HG approximation also causes large errors on the radiative calculations. The maximum value of the errors on the shortwave downward fluxes is

收稿日期: 2017-12-05; 修回日期: 2018-04-02; 录用日期: 2018-04-09

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFA0603502)、国家自然科学基金(41375080, 91644211)、科技部公益性行业(气象)科研专项课题(GYHY201406023)

* E-mail: huazhang@cma.gov.cn; ** E-mail: chenqi1228@foxmail.com

$-2.78 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, and on the shortwave upward fluxes is $-1.06 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, while on the shortwave heating rates is $0.27 \text{ K} \cdot \text{d}^{-1}$. The HG approximation underestimates the shortwave downward fluxes and overestimates the shortwave heating rates. Therefore, phase function accurately describing on ice clouds radiation transfer is necessary.

Key words atmospheric optics; atmospheric scattering; Henyey-Greenstein approximation; radiation; ice cloud

OCIS codes 010.1615; 010.2940; 290.4020

1 引 言

冰云的短波辐射过程以反照率效应为主,在辐射模式中其描述精度对整个大气的辐射通量和加热率计算均有重要影响,并进而影响对天气和气候的模拟效果^[1-4]。由于冰晶粒子的多形状特性,其光学性质有别于一般球形粒子,不确定性较大,需要深入研究。单个粒子的光学性质可用消光效率、单次散射比和相函数进行描述。通常通过勒让德展开式来描述相函数,然后利用勒让德展开式各项的系数对相函数的性质进行简化,如不对称因子就是相函数勒让德展开式第1项的系数的1/3。

近年来,随着计算机能力的大幅提高和高精度计算对辐射传输精度的日益提高,四流近似的应用日益广泛^[3-6]。由于四流近似计算中使用了第3、4项相函数勒让德展开式系数,Henyey-Greenstein (HG)近似必然会对四流近似计算产生一定影响。在之前的许多研究中,四流近似中使用的3、4项勒让德展开式系数并非精确值,而是用HG近似值代替^[5-8]。HG近似由Henyey等^[9]提出,由于该近似方法算法简洁、相函数表达式简单,在辐射过程计算中应用广泛。由于HG近似对相函数勒让德展开式第2~ n 项均进行了近似(具体公式见章节2),进而改变了对单个冰晶粒子的相函数勒让德展开式系数的描述,冰云体积光学性质的描述也随之改变,最终必然会对有云大气辐射过程计算产生一定的影响。Hong^[10]使用该近似计算黄道尘云的散射相函数,取得了比较好的效果。Toublanc^[11]比较了蒙特卡罗方法中HG近似与米氏散射的区别,发现对比高精度的计算HG近似会导致一些误差。Boucher^[12]认为使用HG近似代替米氏散射将会影响气溶胶短波直接辐射强度的计算精度。Binzoni等^[13]发现,使用HG近似会对生物医学光学有一定的影响。Li等^[14]指出,在云和气溶胶辐射传输计算过程中,使用HG近似对四流球谐函数近似计算影响较大。与其他云和气溶胶粒子不同,冰云粒子具有明显的非球形特征,其相函数的计算方法也更复杂,因此HG近似对冰云辐射过程的影响值得进一步探究。

本文介绍了辐射传输和HG近似相关理论和公式,以及辐射模式和实验设计。详细分析了HG近似对整个冰云辐射过程的影响。分析了其对单个冰晶粒子光学性质的影响;基于多形状冰云参数化方案分析了HG近似对冰云体积光学性质的影响;然后,通过BCC_RAD辐射传输模式,考察了使用四流离散纵标法时,HG近似对辐射通量和加热率的影响。

2 理论和实验方案

讨论太阳的短波辐射时,长波发射项可以被忽略,方位角平均的平面平行的辐射传输方程为^[8]

$$\mu \frac{dI(\tau, \mu)}{d\tau} = I(\tau, \mu) - \frac{\sigma}{2} \int_{-1}^1 I(\tau, \mu') P(\tau, \mu') d\mu' - \frac{\sigma}{4} F_0 \exp\left(-\frac{\tau}{\mu_0}\right) P(\mu, \mu_0), \quad (1)$$

$$I(0, \mu) = 0, \quad (2)$$

$$I(\tau_0, \mu) = 0, \quad (3)$$

式中: $I(\tau, \mu)$ 为介质中光学厚度为 τ 、天顶角的方向余弦为 μ 时的辐射强度; σ 为单次散射比; F_0 为大气顶垂直于太阳光方向的辐射通量; μ_0 为入射光的方向余弦值; P 为相函数; $P(\mu, \mu') = \sum_{n=0}^{\infty} \omega_n P_n(\mu) P_n(\mu')$,其中 $P_n(\mu)$ 为勒让德多项式, ω_n 为相函数勒让德展开式的系数,也称为相函数的 n 阶矩量。 ω_n 前两项 $\omega_0 = 1$ 、 $\omega_1 = 3g$,其中 g 为不对称因子;其 n 次项可表示为

$$\omega_n = \frac{2n+1}{2} \int_{-1}^1 P(\cos \Theta) P_n(\cos \Theta) d\cos \Theta, \quad (4)$$

式中: $P(\cos \Theta)$ 为散射相函数; $P_n(\cos \Theta)$ 为散射相函数的勒让德展开式 n 次项; Θ 为太阳天顶角。(1)式为大气辐射传输方程,(2)式和(3)式是辐射传输方程的边界条件,表示介质的上边界和下边界无漫射入射辐射。

在二流近似中,用不对称因子 g 代替相函数代入二流近似运算中,即可得到辐射通量结果。在四流近似中,使用的系数包括 $\omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4$ 。HG近似令 $\omega_n = (2n+1)g^n$,从而可由不对称因子 g 计算

得到 ω_1 和 ω_4 。此方法的优点是可以使用二流近似的相函数系数(不对称因子 g)直接计算四流近似的相函数系数,从而使四流近似的使用更加广泛;缺点则是会带来一些计算误差。

对于单个冰晶的光学性质计算,本文使用了 Zhang 等^[15]的方案,该方案综合考虑了多种形状冰晶的光学性质。按照 Yang 等^[16]和 Hong 等^[17]的方法将冰晶粒子分为滴晶、聚集体、子弹束、实心柱、空心柱和平板六类形状,分别计算了各类冰晶粒子在不同波长、不同最大尺度的几何性质和光学性质。几何性质包括 38 个尺度区间上的等效截面积和等效体积。光学性质包括 38 个尺度区间和 65 个波长的消光效率、单次散射比、不对称因子和前向峰因子。

本文使用的大气辐射传输模式为 BCC_RAD^[18-21]。该模式将整个长波和短波区间 $10 \sim 49000 \text{ cm}^{-1}$ 划分为 17 个波带(包括 8 个长波波带和 9 个短波波带)。气溶胶辐射方案由卫晓东等^[22]、Zhang 等^[23]和周晨等^[24]的方法给出。该模式曾参与了全球气溶胶辐射强迫模拟中的短波辐射传输方案的比较^[25]。短波辐射计算采用四流离散纵标算法^[26-27],累加法也选择了相应的四流累加法^[27]。假定冰水含量和有效半径分别为 0.0048 g/m^3 和 $20 \text{ }\mu\text{m}$,太阳天顶角余弦值设为 0.5,短波地表反射率取 0.3,代表典型冰云状况^[15]。热带大气的冰云顶和云底分别设为典型值 14 km 和 12 km,中纬度夏季大气的冰云顶和云底分别设为典型值 12 km 和 10 km,中纬度冬季大气的冰云顶和云底分别设为 11 km 和 9 km^[28]。

3 结果分析

3.1 HG 近似对单个冰晶粒子短波光学性质的影响

HG 近似首先会对单个冰晶粒子相函数展开式系数的计算造成误差。选取 $\lambda = 0.46 \text{ }\mu\text{m}$ 和 $\lambda = 1.23 \text{ }\mu\text{m}$ 两个波长分别代表太阳辐射能量最集中的可见光区和近红外区。图 1 给出了 4 种形状冰晶相函数勒让德展开式第 3 项系数随着粒子尺度的变化,4 种形状冰晶的第 3 项系数随粒子尺度增大主要呈增大趋势。如图 1(a)所示,对于聚集体冰晶, $\lambda = 0.46 \text{ }\mu\text{m}$ (可见光区)时最大误差为 -0.27 ,相对误差可达 -55.7% ; $\lambda = 1.23 \text{ }\mu\text{m}$ (近红外区)时最大误差为 -0.19 。如图 1(b)所示,对于子弹束冰晶, $\lambda = 0.46 \text{ }\mu\text{m}$ 时最大误差为 -0.22 ; $\lambda = 1.23 \text{ }\mu\text{m}$ 时最大误差为 -0.20 。如图 1(c)所示,对于滴晶, $\lambda =$

$0.46 \text{ }\mu\text{m}$ 时最大误差为 -0.28 ; $\lambda = 1.23 \text{ }\mu\text{m}$ 时最大误差为 -0.18 。如图 1(d)所示,对于空心柱冰晶, $\lambda = 0.46 \text{ }\mu\text{m}$ 时最大误差为 -0.14 ; $\lambda = 1.23 \text{ }\mu\text{m}$ 时最大误差为 -0.12 。

HG 近似对各形状冰晶的相函数勒让德展开式第 3 项系数计算均造成了较大的负误差,所有形状均存在误差绝对值大于 0.10 的情况。不同形状和不同波长下,出现最大误差时的粒子尺度不同。对于聚集体和滴晶, $\lambda = 0.46 \text{ }\mu\text{m}$ 时,粒子尺度 $1000 \text{ }\mu\text{m}$ 以上时误差较大; $\lambda = 1.23 \text{ }\mu\text{m}$ 时,粒子尺度 $10 \sim 100 \text{ }\mu\text{m}$ 时误差较大。对于子弹束和空心柱,两种波长时均为粒子尺度 $10 \sim 100 \text{ }\mu\text{m}$ 时误差较大。虽然在单个冰晶粒子光学性质的模拟上确实存在较大的误差,但使用 HG 近似对其变化趋势影响很小。即使对较为复杂的情况(如滴晶),HG 近似也能很好地反映出冰晶粒子光学性质随有效半径的趋势变化。另外,HG 近似在可见光区造成的误差稍高于近红外区。

图 2 给出了 4 种形状冰晶相函数勒让德展开式第 4 项系数随着粒子尺度的变化,与第 3 项系数相同,4 种形状冰晶的第 4 项系数随粒子尺度增大也主要呈增大趋势。如图 2(a)所示,对于聚集体冰晶, $\lambda = 0.46 \text{ }\mu\text{m}$ 时(可见光区)最大误差为 -0.33 ,相对误差可达 -72.1% ; $\lambda = 1.23 \text{ }\mu\text{m}$ 时(近红外区)最大误差为 -0.27 。如图 2(b)所示,对于子弹束冰晶, $\lambda = 0.46 \text{ }\mu\text{m}$ 时最大误差为 -0.27 ; $\lambda = 1.23 \text{ }\mu\text{m}$ 时最大误差为 -0.25 ,相对误差甚至可达 51.3% 。如图 2(c)所示,对于滴晶, $\lambda = 0.46 \text{ }\mu\text{m}$ 时最大误差为 -0.30 ,相对误差可达 -73.8% ; $\lambda = 1.23 \text{ }\mu\text{m}$ 时最大误差为 -0.21 。如图 2(d)所示,对于空心柱冰晶, $\lambda = 0.46 \text{ }\mu\text{m}$ 时最大误差为 -0.20 ; $\lambda = 1.23 \text{ }\mu\text{m}$ 时最大误差为 -0.18 。HG 近似对冰晶粒子相函数展开式第 4 项系数的影响比第 3 项系数更大,多次出现相对误差绝对值超过 50% 的情况,平均负误差也更大。最大误差所在粒子尺度与第 3 项系数基本相同,此处不再赘述。同样地,HG 近似也能很好地模拟相函数展开式第 4 项系数随粒子尺度的趋势变化。

3.2 HG 近似对冰云体积光学性质的影响

HG 近似对单个冰晶光学性质计算造成的误差会进一步影响冰云体积光学性质的计算。图 3 给出了由 Zhang 方案计算得到的冰云第 10、11 波带展开式系数及其随有效半径的变化。如图 3(a)所示,对于相函数展开式第 3 项系数,在第 10 带(近红外区)HG 近似造成的误差为 $-0.17 \sim -0.10$,相对误

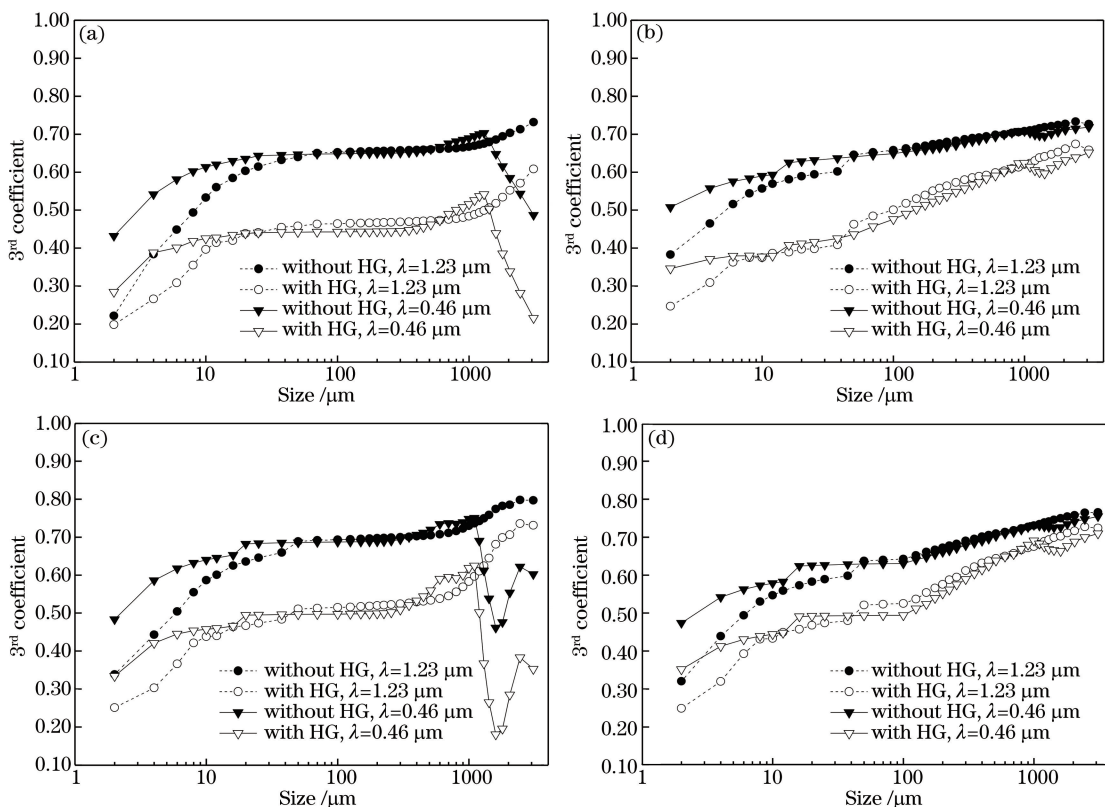


图 1 相函数第 3 项展开式系数随粒子尺度的变化。(a) 聚集体; (b) 子弹束; (c) 滴晶; (d) 空心柱

Fig. 1 Changes of 3rd coefficients of phase function expansion with crystal size.

(a) Aggregates; (b) bullet rosettes; (c) droxtals; (d) hollow columns

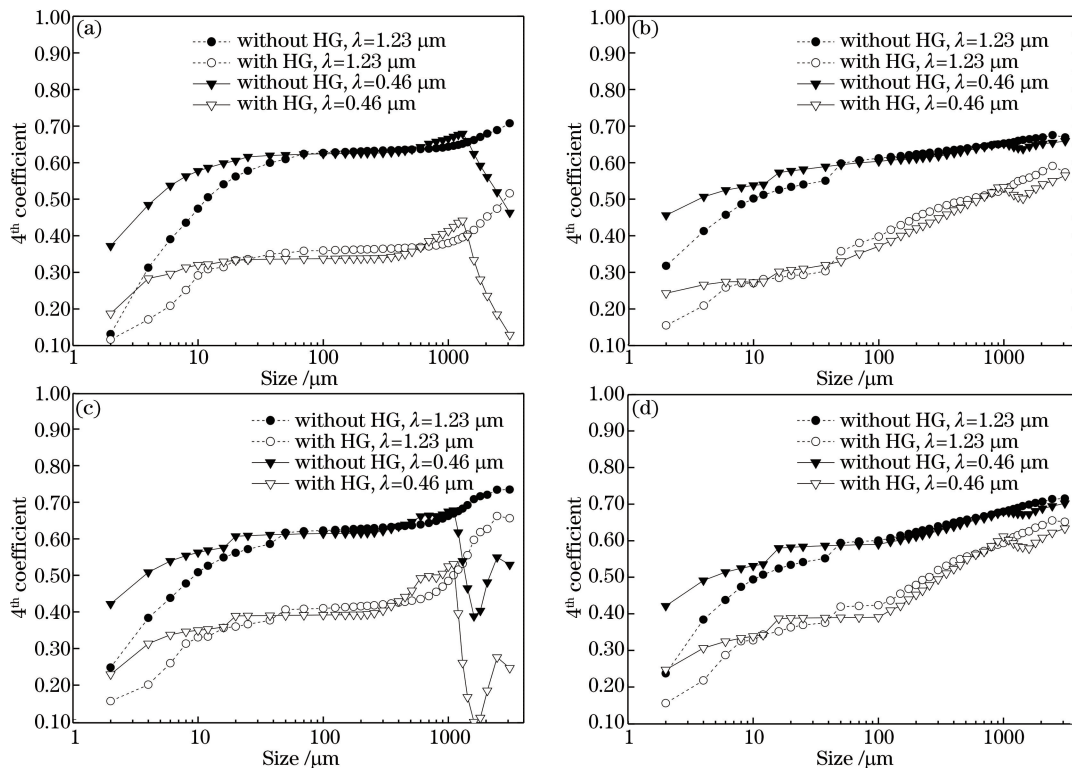


图 2 相函数第 4 项展开式系数随粒子尺度的变化。(a) 聚集体; (b) 子弹束; (c) 滴晶; (d) 空心柱

Fig. 2 Changes of 4th coefficients of phase function expansion with crystal size.

(a) Aggregates; (b) bullet rosettes; (c) droxtals; (d) hollow columns

差可达-26.3%；在第11带(可见光区)HG近似造成的误差为-0.18~-0.09,相对误差可达-27.9%。如图3(b)所示,对于相函数展开式第4项系数,在第10带HG近似造成的误差为-0.21~-0.15,相对误差可达-36.3%；在第11带HG近似造成的误差为-0.22~-0.14,相对误差可达-37.1%。HG近似对冰云相函数展开式第4项系数造成的误差更大,这与单个冰晶粒子光学性质误差情况吻合。可见光区的误差稍大,这也与单个冰晶粒子光学性质误差情况一致。同样,虽然HG近似带来了较大的误差,但依然可以较好地反映冰云光学性质随有

效半径的变化趋势。HG近似对相函数的表达会产生一定误差,对相函数展开式第3项系数和第4项系数的误差正是来源于相函数本身的误差。图4给出了HG近似对冰云体积相函数的影响。在第10带和第11带中,在散射角接近0°时,HG近似造成了很大的正误差；在散射角10°~20°、30°~40°和50°~70°时,HG近似造成了较大的负误差；在散射角140°~180°时,HG近似造成了较大的正误差。总而言之,HG近似在很大一部分散射角范围内都无法准确地反映冰晶粒子的相函数,也无法有效体现冰晶粒子独有的前向散射峰。

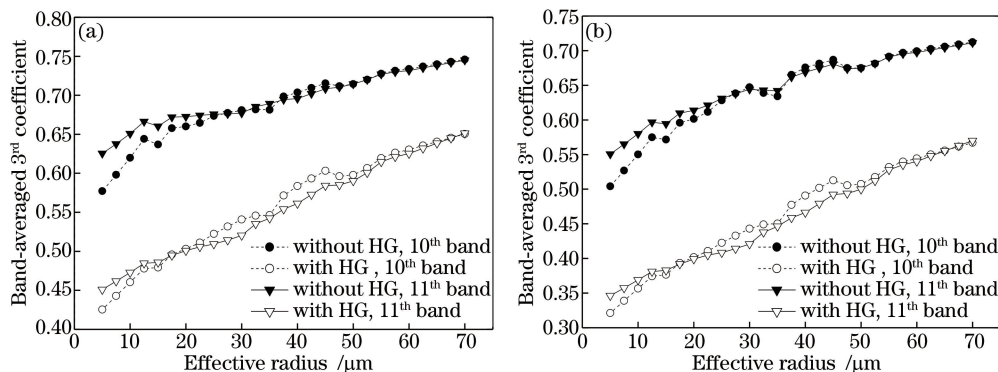


图3 冰云体积相函数展开式系数随有效半径的变化。(a)第3项系数；(b)第4项系数

Fig. 3 Changes of the ice cloud bulk optical properties with effective radius. (a) 3rd coefficient; (b) 4th coefficient

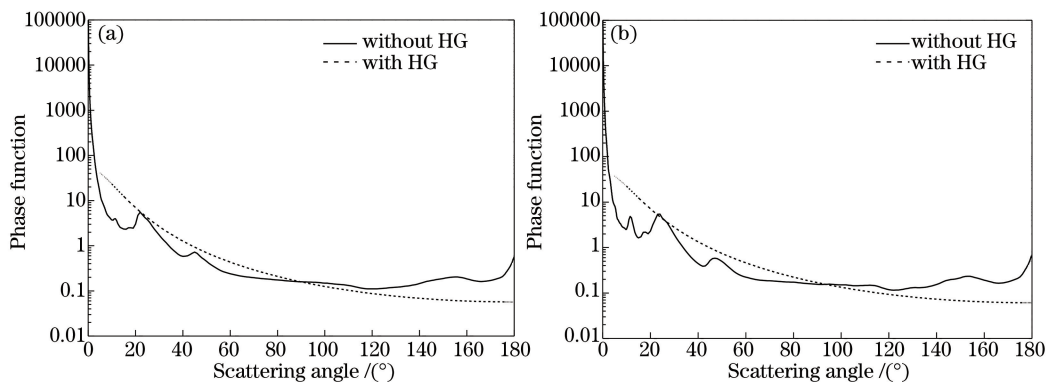


图4 冰云体积相函数。(a)第10带；(b)第11带

Fig. 4 Bulk phase functions of ice clouds. (a) 10th band; (b) 11th band

3.3 HG近似对有云大气短波辐射通量的影响

冰云体积光学性质描述的改变会影响有云大气辐射计算过程,进而影响辐射通量和加热率。图5给出了HG近似对热带有云大气辐射通量和加热率的影响。对于短波向下辐射通量,云顶以上高度误差很小,从云顶开始随高度下降误差绝对值逐渐增大,在云底以下高度辐射通量的误差可达-1.53 W·m⁻²,云底以下高度,误差绝对值开始逐渐减小。对于短波向上辐射通量,云顶处的误差为-0.37 W·m⁻²,云底处的误差为-0.47 W·m⁻²,

云层以内误差更小一些;误差在云底以下、云内和云顶以上高度的辐射通量均表现为被低估。对于短波净辐射通量,云层以外高度误差很小,云顶处的误差为0.12 W·m⁻²,云底处的误差为0.16 W·m⁻²,如表1所示。对于短波加热率,云层以外高度同样误差很小,云顶处的误差为0.21 K·d⁻¹,云底处的误差为0.18 K·d⁻¹,云顶处的误差即为云层内部的最大误差。

图6给出了HG近似对中纬度夏季有云大气辐射通量和加热率的影响。对于短波向下辐射通量,

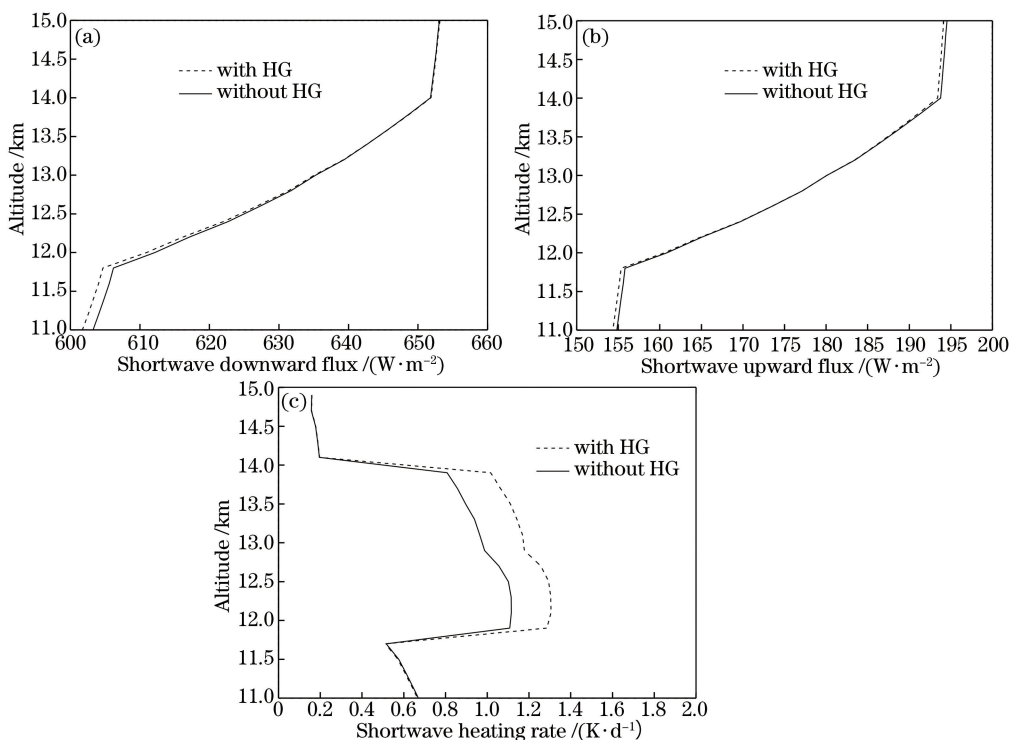


图 5 热带有云大气短波辐射通量和加热率廓线。(a)向下辐射通量;(b)向上辐射通量;(c)加热率
Fig. 5 Vertical profiles of the shortwave fluxes and the heating rates in tropical cloudy atmosphere.

(a) Downward fluxes; (b) upward fluxes; (c) heating rates

表 1 不同大气条件下有云大气云顶和云底处的短波净辐射通量

Table 1 Shortwave net fluxes at cloud top and cloud base in different atmospheres

Different atmosphere	Different position	Shortwave net flux / (W · m ⁻²)		
		With HG	Without HG	Error
Tropical atmosphere	Cloud top	0.61	0.49	0.12
	Cloud base	1.09	0.93	0.16
Summer mid-latitude atmosphere	Cloud top	1.44	1.22	0.22
	Cloud base	2.08	1.91	0.17
Winter mid-latitude atmosphere	Cloud top	1.28	1.05	0.23
	Cloud base	1.37	1.21	0.16

云顶以上高度误差很小,从云顶开始随高度下降误差绝对值逐渐增大,在云底处高度辐射通量的误差可达 $-2.43 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。对于短波向上辐射通量,云顶处的误差为 $-0.52 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$,云底处的误差为 $-0.87 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$,云层以内同样误差更小一些。对于短波净辐射通量,云层以外高度误差很小,云顶处的误差为 $0.22 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$,云底处的误差为 $0.17 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ (表 1)。对于短波加热率,云层以外高度同样误差很小,云顶处的误差为 $0.26 \text{ K} \cdot \text{d}^{-1}$,云底处的误差为 $0.16 \text{ K} \cdot \text{d}^{-1}$,云内最大误差为 $0.27 \text{ K} \cdot \text{d}^{-1}$ 。

图 7 给出了 HG 近似对中纬度冬季有云大气辐射通量和加热率的影响。对于短波向下辐射通量,云顶以上高度误差很小,从云顶开始随高度下降误差逐渐增大,在云底以下高度辐射通量的误差可达

$-2.78 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。对于短波向上辐射通量,云顶处的误差为 $-0.63 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$,云底处的误差为 $-1.06 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$,云层以内误差同样更小一些。对于短波净辐射通量,云层以外高度误差很小,云顶处的误差为 $0.23 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$,云底处的误差为 $0.16 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ (表 1)。对于短波加热率,云层以外高度同样误差很小,云顶处的误差为 $0.27 \text{ K} \cdot \text{d}^{-1}$,云底处的误差为 $0.16 \text{ K} \cdot \text{d}^{-1}$,云顶处的误差即为云层内部的最大误差。

不同纬度、不同季节下云高不同,导致云层区域的气压和温度不同,进而影响冰云光学性质。云层高度越高,大气压越低,云层越稀薄。因此在热带大气条件下,HG 近似对辐射通量和加热率的影响较小。同样的,温度越高,云层也越稀薄。中纬度夏季

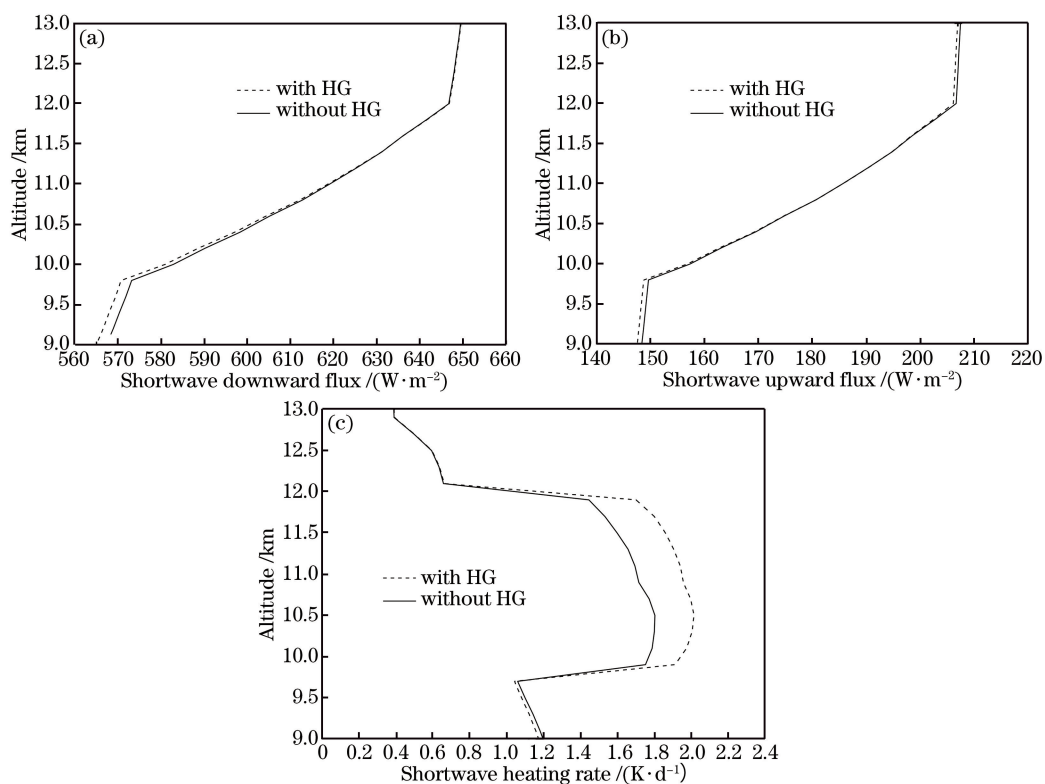


图 6 中纬度夏季有云大气短波辐射通量和加热率廓线。(a)向下辐射通量；(b)向上辐射通量；(c)加热率
 Fig. 6 Vertical profiles of the shortwave fluxes and heating rates in mid-latitude summer cloudy atmosphere.

(a) Downward fluxes; (b) upward fluxes; (c) heating rates

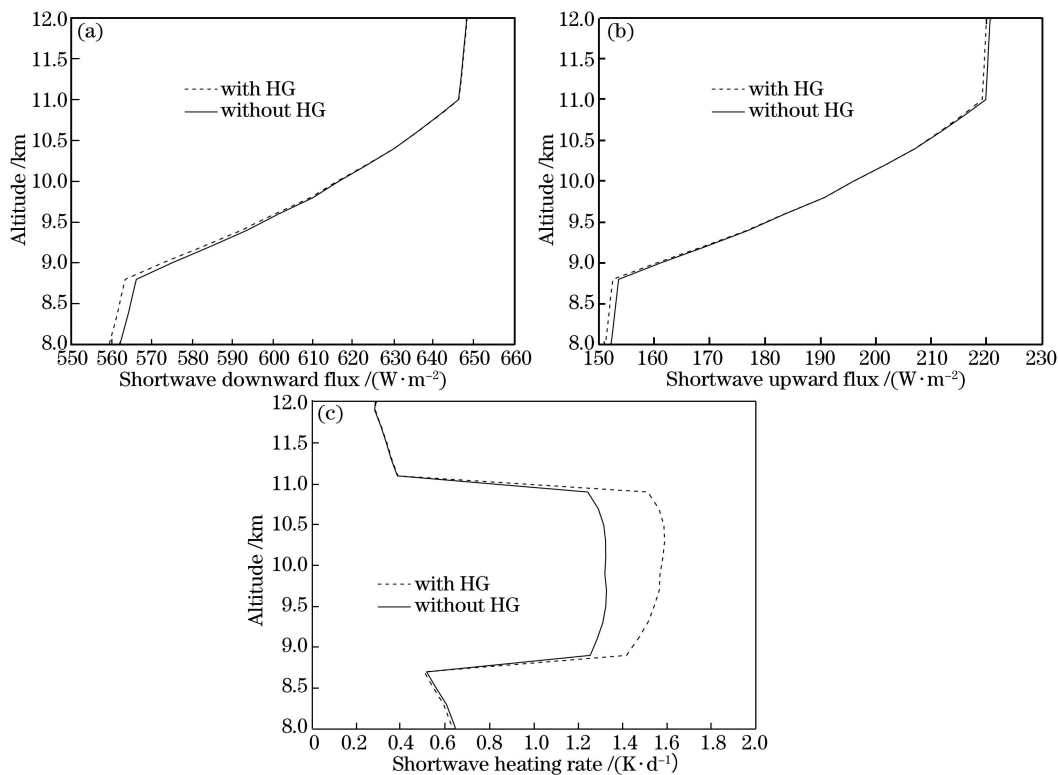


图 7 中纬度冬季有云大气短波辐射通量和加热率廓线。(a)向下辐射通量；(b)向上辐射通量；(c)加热率
 Fig. 7 Vertical profiles of the shortwave fluxes and the heating rates in mid-latitude winter cloudy atmosphere.

(a) Downward fluxes; (b) upward fluxes; (c) heating rates

大气云层高度更高,但大气温度也更高一些,两者相互抵消,因此中纬度夏季大气和中纬度冬季大气条件下,HG 近似对辐射和加热率的影响相差不大。一定程度上而言,纬度不同对HG近似的影响比季节不同更大。

总体上,使用HG近似低估了热带和中纬度有云大气云底处及云底以下高度的短波向下辐射通量,低估了包含云层在内的整层大气的短波向上辐射通量,同时高估了云内加热情况,导致了较大的误差。

4 结 论

基于多形状冰晶的新冰云参数化方案,结合BCC_RAD辐射传输模式,详细分析了HG近似对冰云短波辐射传输过程的影响。包括对单个冰晶粒子和冰云体积光学性质的影响,以及对后续的有云大气辐射通量和加热率的影响。

对于单个冰晶粒子,HG近似对相函数勒让德展开式第3项系数造成了较大的负误差。波长为 $0.46\ \mu\text{m}$ 时,最大误差为 -0.28 ,最大相对误差为 -55.7% ;波长为 $1.23\ \mu\text{m}$ 时,最大误差为 -0.18 。HG近似对第4项系数造成的负误差更大。波长为 $0.46\ \mu\text{m}$ 时,最大误差为 -0.33 ,最大相对误差为 -73.8% ;波长为 $1.23\ \mu\text{m}$ 时,最大误差为 -0.27 ,最大相对误差为 -51.3% 。第4项系数的相对误差绝对值频繁出现大于 50% 的情况,明显高于第3项系数的相对误差。此外,HG近似在可见光区的误差高于近红外区。

对于冰云体积光学性质,HG近似对相函数勒让德展开式第3项造成了较大的负误差,在近红外区,最大误差为 -0.17 ,最大相对误差为 -26.3% ;在可见光区,最大误差为 -0.18 ,最大相对误差为 -27.9% 。HG近似对第4项系数造成的负误差同样更大一些。在近红外区,最大误差为 -0.21 ,最大相对误差为 -36.3% ;在可见光区,最大误差为 -0.22 ,最大相对误差为 -37.1% 。HG近似在可见光区的误差更高,与单个冰晶粒子光学性质误差情况一致。另外,HG近似几乎无法反映冰云体积相函数前向峰,在散射角为 0° 产生了大量误差。

HG近似对有云大气短波辐射通量的计算也产生了一定的影响。热带大气条件下,对短波向下辐射通量造成的最大误差为 $-1.53\ \text{W}\cdot\text{m}^{-2}$,对短波向上辐射通量造成的最大误差为 $-0.47\ \text{W}\cdot\text{m}^{-2}$,对短波加热率造成的最大误差为 $0.21\ \text{K}\cdot\text{d}^{-1}$ 。中

纬度夏季大气条件下,对短波向下辐射通量造成的最大误差为 $-2.43\ \text{W}\cdot\text{m}^{-2}$,对短波向上辐射通量造成的最大误差为 $-0.87\ \text{W}\cdot\text{m}^{-2}$,对短波加热率造成的最大误差为 $0.27\ \text{K}\cdot\text{d}^{-1}$ 。中纬度冬季大气条件下,对短波向下辐射通量造成的最大误差为 $-2.78\ \text{W}\cdot\text{m}^{-2}$,对短波向上辐射通量造成的最大误差为 $-1.06\ \text{W}\cdot\text{m}^{-2}$,对短波加热率造成的最大误差为 $0.27\ \text{K}\cdot\text{d}^{-1}$ 。其中,HG近似对中纬度冬季大气短波向下、向上辐射通量和加热率造成的误差最大。总体上,HG近似低估了部分高度短波向下辐射通量和整层大气的短波向上辐射通量,高估了云内加热率。

总而言之,虽然HG近似具有计算简单和便于应用的优点,但在冰云短波辐射计算过程中会造成明显的系统误差,并不适合高精度有云大气辐射传输计算。精确计算第3、4项相函数展开式系数可以提高大气辐射传输的整体计算精度,进而提高大气遥感与探测的精度;并可以减少天气预报模式和气候预测模式中物理过程描述中的不确定性。

参 考 文 献

- [1] Baran A J. From the single-scattering properties of ice crystals to climate prediction: a way forward[J]. Atmospheric Research, 2012, 112: 45-69.
- [2] Yang P, Liou K N, Bi L, *et al.* On the radiative properties of ice clouds: light scattering, remote sensing, and radiation parameterization[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2015, 32(1): 32-63.
- [3] Cai Y, Liu Y L, Dai C M, *et al.* Simulation analysis of target and background contrast in condition of cirrus atmosphere[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(8): 0801001.
蔡熠, 刘延利, 戴聪明, 等. 卷云大气条件下目标与背景对比度模拟分析[J]. 光学学报, 2017, 37(8): 0801001.
- [4] Cao Y N, Wei H L, Bian J. Study of atmospheric radiative properties at infrared bands under ice clouds based on atmospheric infrared sounder and moderate resolution imaging spectroradiometer observation[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(9): 0901003.
曹亚楠, 魏合理, 边建. 基于大气红外探空仪和中分辨率成像光谱仪观测的冰云大气红外辐射特性研究[J]. 光学学报, 2014, 34(9): 0901003.
- [5] Liou K N, Fu Q, Ackerman T P. A simple formulation of the delta-four-stream approximation for radiative transfer parameterizations[J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 1988, 45(13): 1940-1948.

- [6] Chou M D. A solar radiation model for use in climate studies [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1992, 49(9): 762-772.
- [7] Li J, Ramaswamy V. Four-stream spherical harmonic expansion approximation for solar radiative transfer [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1996, 53(8): 1174-1186.
- [8] Zdunkowski W, Bott A. *Radiation in the atmosphere: a course in theoretical meteorology*[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- [9] Henyey L G, Greenstein J L. Diffuse radiation in the galaxy[J]. *The Astrophysical Journal*, 1941, 93: 70-83.
- [10] Hong S S. Henyey-Greenstein representation of the mean volume scattering phase function for zodiacal dust [J]. *Astronomy and Astrophysics*, 1985, 146 (1): 67-75.
- [11] Toubanc D. Henyey-Greenstein and Mie phase functions in Monte Carlo radiative transfer computations [J]. *Applied Optics*, 1996, 35 (18): 3270-3274.
- [12] Boucher O. On aerosol direct shortwave forcing and the Henyey-Greenstein phase function [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1998, 55(1): 128-134.
- [13] Binzoni T, Leung T S, Gandjbakhche A H, *et al.* The use of the Henyey-Greenstein phase function in Monte Carlo simulations in biomedical optics [J]. *Physics in Medicine and Biology*, 2006, 51 (17): N313-N322.
- [14] Li J, Barker H, Yang P, *et al.* On the aerosol and cloud phase function expansion moments for radiative transfer simulations [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2015, 120 (23): 12128-12142.
- [15] Zhang H, Chen Q, Xie B. A new parameterization for ice cloud optical properties used in BCC_RAD and its radiative impact [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2015, 150: 76-86.
- [16] Yang P, Liou K N, Wyser K, *et al.* Parameterization of the scattering and absorption properties of individual ice crystals [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2000, 105 (D4): 4699-4718.
- [17] Hong G, Yang P, Baum B A, *et al.* Scattering database in the millimeter and submillimeter wave range of 100-1000 GHz for nonspherical ice particles [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2009, 114: D06201.
- [18] Zhang H, Nakajima T, Shi G Y, *et al.* An optimal approach to overlapping bands with correlated k -distribution method and its application to radiative calculations [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2003, 108(D20): 4641.
- [19] Zhang H, Shi G Y, Nakajima T, *et al.* The effects of the choice of the k -interval number on radiative calculations [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2006, 98(1): 31-43.
- [20] Zhang H, Suzuki T, Nakajima T, *et al.* Effects of band division on radiative calculations [J]. *Optical Engineering*, 2006, 45(1): 016002.
- [21] Zhang H. BCC_RAD atmosphere radiation transfer model [M]. Beijing: Meteorological Press, 2016. 张华. BCC_RAD 大气辐射传输模式 [M]. 北京: 气象出版社, 2016.
- [22] Wei X D, Zhang H. Analysis of optical properties of nonspherical dust aerosols [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(5): 0501002. 卫晓东, 张华. 非球形沙尘气溶胶光学特性的分析 [J]. *光学学报*, 2011, 31(5): 0501002.
- [23] Zhang H, Shen Z, Wei X, *et al.* Comparison of optical properties of nitrate and sulfate aerosol and the direct radiative forcing due to nitrate in China [J]. *Atmospheric Research*, 2012, 113: 113-125.
- [24] Zhou C, Zhang H, Wang Z L. Impact of different mixing ways of black carbon and non-absorbing aerosols on the optical properties [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(8): 0829001. 周晨, 张华, 王志立. 黑碳与非吸收性气溶胶的不同混合方式对其光学性质的影响 [J]. *光学学报*, 2013, 33(8): 0829001.
- [25] Randles C A, Kinne S, Myhre G, *et al.* Intercomparison of shortwave radiative transfer schemes in global aerosol modeling: results from the AeroCom Radiative Transfer Experiment [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2013, 13(5): 2347-2379.
- [26] Stamnes K, Tsay S C, Wiscombe W, *et al.* Numerically stable algorithm for discrete-ordinate-method radiative transfer in multiple scattering and emitting layered media [J]. *Applied Optics*, 1988, 27 (12): 2502-2509.
- [27] Zhang F, Li J N. Doubling-adding method for delta-four-stream spherical harmonic expansion approximation in radiative transfer parameterization [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2013, 70 (10): 3084-3101.
- [28] Sassen K, Wang Z, Liu D. Global distribution of cirrus clouds from CloudSat/Cloud-aerosol lidar and infrared pathfinder satellite observations (CALIPSO) measurements [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2008, 113: D00A12.