

作用于水云粒子的太阳辐射压力

饶瑞中

(中国科学院安徽光学精密机械研究所, 中国科学院大气成分与光学重点实验室, 安徽 合肥 230031)

摘要 根据球形粒子的 Mie 散射理论和平行平面大气中的辐射传输理论分析了作用于水云粒子的太阳辐射压力。结果表明, 一般情况下当云滴半径不大于 $10 \mu\text{m}$ 时, 太阳辐射压力可达云滴重力的百分之几; 云滴半径在 $0.3 \mu\text{m}$ 附近时, 太阳辐射压力达到极大值, 约为云滴重力的百分之几十。因此在云物理研究中应考虑作用于云粒子的太阳辐射压力。

关键词 大气光学; 太阳辐射; 辐射压力; 光散射; 辐射传输; 云物理

中图分类号 O432.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.0101003

Solar Radiation Pressure on Water Cloud Particles

Rao Ruizhong

(Key Laboratory of Atmospheric Composition and Optical Radiation, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China)

Abstract The solar radiation pressure on water cloud particles is analyzed with Mie scattering theory and the two stream radiative transfer method. It is found that this pressure can generally be some percents of the gravity on the particle whose radius is less than $10 \mu\text{m}$, and that for a particle with radius about $0.3 \mu\text{m}$, the pressure reaches the maximum and can be some tens percents of the gravity. Therefore the solar radiation pressure must be taken into consideration in the studies in cloud physics.

Key words atmospheric optics; solar radiation; radiation pressure; light scattering; radiative transfer; cloud physics

OCIS codes 010.1615; 010.5620; 290.1090; 290.7050

1 引 言

在云物理研究中, 云粒子的各种运动过程受到许多作用因素的影响, 如流体动力作用、湍流作用、电场和云滴荷电的作用^[1]。尽管太阳辐射在大气中的各种作用效应都已被进行了广泛的研究^[2,3], 但太阳辐射压力对云粒子的运动过程的影响都未加以考虑。原因可能在于人们以为太阳辐射压力远小于其他种类的作用力。如果假定云粒子的辐射压力截面等于其几何截面, 而且太阳辐射无衰减地作用于该粒子, 则简单的数值分析表明, 对于微米量级的水云粒子, 作用其上的太阳辐射压力可与其重力相比拟。因此根据球形粒子的 Mie 散射理论和平行平面大气中的辐射传输理论详细研究了作用于水云粒

子的太阳辐射压力, 并分析了该压力与太阳倾角、云层光学厚度以及粒子尺寸的关系。为使太阳辐射压力与重力进行直接的比较, 所有的结果都是以二者之间的比值来表达的。

2 原 理

单色强度为 I_λ 的辐射作用于辐射压力截面为 C_{pr} 的粒子的单色辐射压力为^[4]

$$P_\lambda = I_\lambda C_{\text{pr}} / c, \quad (1)$$

式中 λ 为波长, c 为光速。在光谱范围 $(\lambda_1 \sim \lambda_2)$ 内的总辐射压力为

$$P = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} I_\lambda C_{\text{pr}} / c d\lambda. \quad (2)$$

收稿日期: 2012-08-23; 收到修改稿日期: 2012-09-14

作者简介: 饶瑞中(1963—), 男, 研究员, 主要从事大气光学方面的研究。E-mail: rao@aiofm.ac.cn

根据球形粒子的 Mie 散射理论^[4],对半径为 r 的球形粒子,辐射压力截面可表示为辐射压力效率 Q_{pr} 与其几何截面 πr^2 的乘积,即

$$C_{pr}(r, \lambda) = Q_{pr}(r, \lambda) \pi r^2 = \frac{[Q_{ext}(r, \lambda) - \overline{\cos \theta} \cdot Q_{sca}(r, \lambda)] \cdot \pi r^2}{\overline{\cos \theta} \cdot Q_{sca}(r, \lambda)}, \quad (3)$$

式中 $\overline{\cos \theta}$ 为散射角的余弦以散射强度为权重的加权平均值, Q_{sca} 和 Q_{ext} 分别为散射效率和消光效率。

当太阳辐射在云中传播时,云中的辐射可分为直接太阳辐射和漫射辐射,直接太阳辐射可用比尔定律描述,而漫射辐射由辐射传输方程求得。如果将云看作是平行平面介质,如图 1 所示,当太阳倾角为 θ_0 , $\mu_0 = \cos \theta_0$, 云层在 $0.5 \mu\text{m}$ 处的总光学厚度为 τ_1 , 在光学厚度 τ 处倾角为 θ ($\mu = \cos \theta$) 的向上和向下的漫射辐射单色强度为 $I_\lambda(\tau, -\mu)$ 和 $I_\lambda(\tau, \mu)$, 与方位角 φ 无关。此处的直射太阳单色辐照度为

$$F_{dir}^\lambda = F_0^\lambda \exp[-\tau(\lambda)/\mu_0], \quad (4)$$

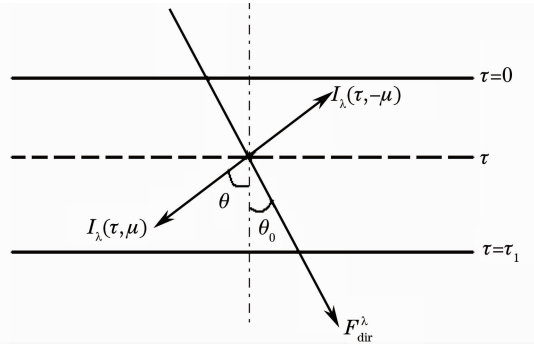


图 1 平行平面云层中向上和向下的漫射辐射强度以及直射太阳辐照度

Fig. 1 Upward, downward intensities of the diffuse radiation and the directly-transferred solar irradiance in a plane-parallel cloud

式中 F_0^λ 为大气层顶的直射太阳单色辐照度。

作用在半径为 r 的粒子上的太阳辐射压力的水平分量为

$$P_H(r) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} Q_{pr}(r, \lambda) \pi r^2 / c F_{dir}^\lambda \sin \theta d\lambda = \pi r^2 \sqrt{1 - \mu^2} / c \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} Q_{pr}(r, \lambda) F_{dir}^\lambda d\lambda. \quad (5)$$

作用在半径为 r 的粒子上的太阳辐射压力的垂直分量为(向下为正)

$$P_V(r) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} Q_{pr}(r, \lambda) \pi r^2 / c \left\{ F_{dir}^\lambda \cos \theta + \int_0^{2\pi} [I_\lambda(\tau, -\mu) - I_\lambda(\tau, \mu)] \cos \theta \sin \theta d\theta d\varphi \right\} d\lambda = \pi r^2 / c \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} Q_{pr}(r, \lambda) (F_{dir}^\lambda \mu + F_{dif}^{\lambda \downarrow} - F_{dif}^{\lambda \uparrow}) d\lambda. \quad (6)$$

式中 $F_{dif}^{\lambda \downarrow}$ 和 $F_{dif}^{\lambda \uparrow}$ 分别为向下和向上的入射单色辐照度。

根据平行平面介质中辐射传输方程的二流近似方法可求得 $F_{dif}^{\lambda \downarrow}$ 和 $F_{dif}^{\lambda \uparrow}$ ^[2]。应用此方法时须知介质的非对称因子 g 和单次散射反照率 ω 。对于尺度谱分布为 $n(r)$ 的多分散粒子系统, 此二参数可为

$$\omega = C_{sca}(\lambda) / C_{ext}(\lambda) = \int_{r_{min}}^{r_{max}} Q_{sca}(r, \lambda) n(r) \pi r^2 dr / \int_{r_{min}}^{r_{max}} Q_{ext}(r, \lambda) n(r) \pi r^2 dr, \quad (7)$$

$$g = \int_{r_{min}}^{r_{max}} \overline{\cos \theta} Q_{sca}(r, \lambda) n(r) \pi r^2 dr / C_{sca}(\lambda) \quad (8)$$

式中 $C_{sca}(\lambda)$ 和 $C_{ext}(\lambda)$ 分别为系统的总散射截面和总消光截面, r_{min} 和 r_{max} 为云滴的最小和最大半径。

为将太阳辐射压力与云滴的重力进行比较, 将太阳辐射压力与云滴的重力之比表示为

$$f_H = \frac{P_H(r)}{mg'} = \frac{\pi r^2 (\sqrt{1 - \mu^2} / c) \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} Q_{pr}(r, \lambda) F_{dir}^\lambda d\lambda}{(4\pi r^3 / 3) \rho g'} = \frac{(\sqrt{1 - \mu^2} / c) \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} Q_{pr}(r, \lambda) F_{dir}^\lambda d\lambda}{(4r/3) \rho g'}, \quad (9)$$

$$f_V = \frac{P_V(r)}{mg'} = \frac{(\pi r^2 / c) \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} Q_{pr}(r, \lambda) (F_{dir}^\lambda \mu + F_{dif}^{\lambda \downarrow} - F_{dif}^{\lambda \uparrow}) d\lambda}{(4\pi r^3 / 3) \rho g'} = \frac{(1/c) \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} Q_{pr}(r, \lambda) (F_{dir}^\lambda \mu + F_{dif}^{\lambda \downarrow} - F_{dif}^{\lambda \uparrow}) d\lambda}{(4r/3) \rho g'}, \quad (10)$$

式中 m 为水的质量, ρ 为水的密度, g' 为重力加速度。

从(9)、(10)式可知太阳辐射压力与云滴半径成反比,但由于辐射压力截面与云滴半径有着复杂的关系,只能从数值分析研究太阳辐射压力与云滴半径的关系。

3 数值分析

各种水云是具有不同的浓度和尺度谱分布的多分散粒子系统,粒子众数半径大都在 $3.5 \mu\text{m}$ 附近^[5],以常用的广义伽马分布的 Cloud-C1 模型来进行分析^[6],根据此模型云滴的尺度谱分布可表示为

$$n(r) = 2.373r^6 \exp(-1.5r). \quad (11)$$

在 $0.28 \sim 3.8 \mu\text{m}$ 的太阳光谱内水的折射率有很大的变化,因此消光截面 C_{ext} 、介质的非对称因子 g 和单次散射反照率 ω 将随波长变化。图 2 为这些参量随波长变化的关系。图 2(a) 表示各波长处的消光截面 $C_{\text{ext}}(\lambda)$ 与 $0.5 \mu\text{m}$ 处的消光截面 $C_{\text{ext}}(0.5 \mu\text{m})$ 的相对比值。云层光学厚度 $\tau(\lambda)$ 随波长变化的关系和消光截面 $C_{\text{ext}}(\lambda)$ 随波长变化的关系相同。

从(9)和(10)式可知,太阳辐射压力的水平分量只与直射太阳辐射有关,水平分量随太阳倾角的余弦和光学厚度的增大而减小,而垂直分量既依赖于直射太阳辐射也依赖于漫射太阳辐射。显然可以推

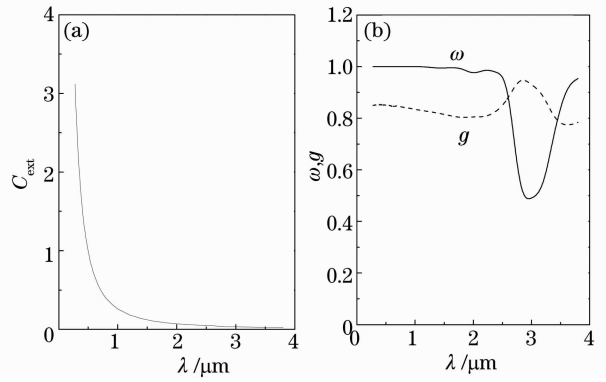


图 2 Cloud-C1 水云的 C_{ext} 、 g 和 ω 随 λ 的变化关系。(a) C_{ext} ; (b) ω 和 g

Fig. 2 C_{ext} , factor g and ω as functions of λ for Cloud-C1. (a) C_{ext} ; (b) ω and g

断,太阳辐射压力的水平分量只与太阳倾角和介质的光学厚度有关,而垂直分量还与云层的总光学厚度、介质的非对称因子和单次散射反照率有关。

下面对各种太阳倾角、各种光学厚度的云层、半径为 $3.5 \mu\text{m}$ 的云滴粒子所受的太阳辐射压力进行数值分析。由于太阳辐射压力的水平分量与各有关因素的关系已知,着重讨论了太阳辐射压力的垂直分量与各有关因素的关系。图 3 和图 4 分别为太阳辐射压力的垂直分量与重力的比值和粒子半径、太阳倾角的余弦,粒子所在的云的光学厚度以及云层的总光学厚度的关系。

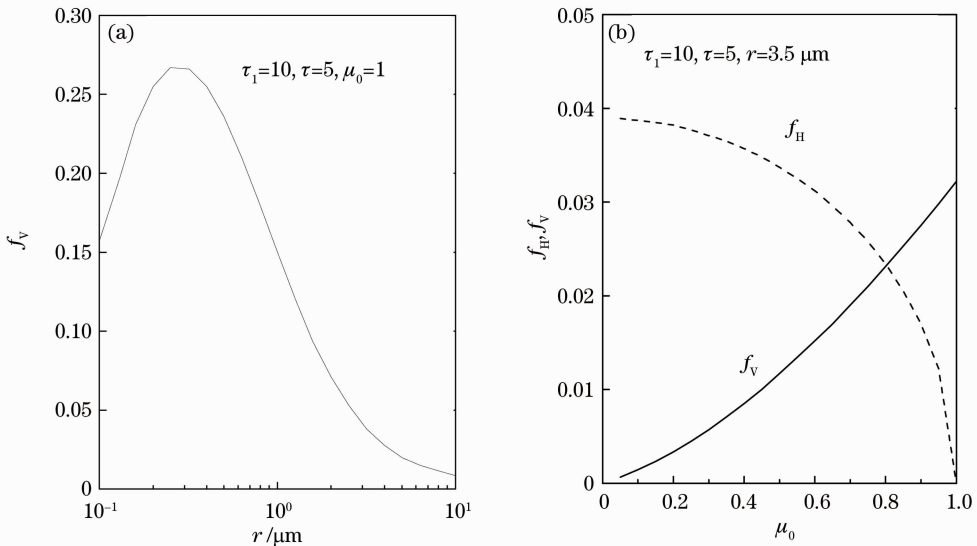


图 3 太阳辐射压力的垂直分量与重力的比值随云滴半径和太阳倾角的余弦的变化关系。(a) r ; (b) μ_0

Fig. 3 Ratio of the vertical component of solar radiation pressure and gravity as functions of the cloud particle radius and the cosine of the solar zenith angle. (a) r ; (b) μ_0

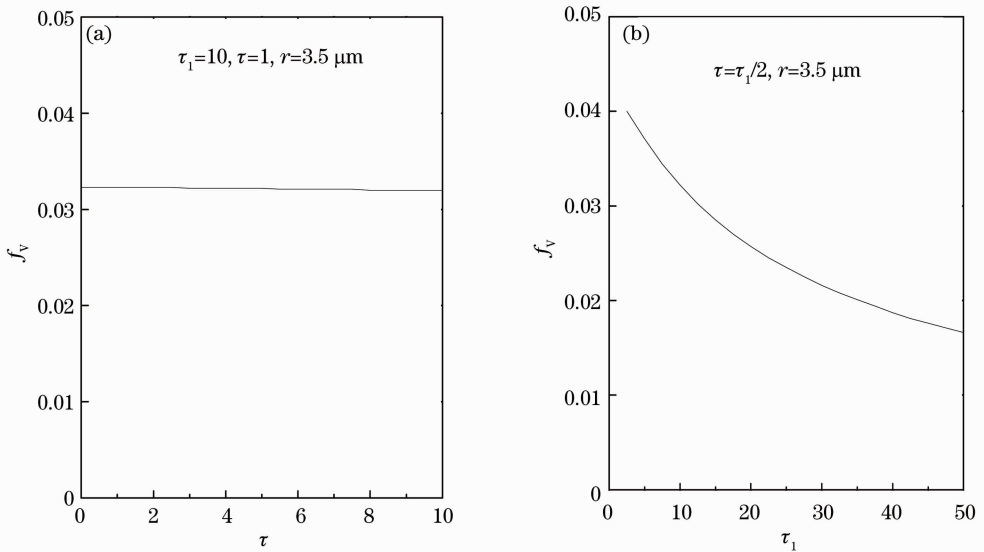


图 4 太阳辐射压力的垂直分量与重力的比值随粒子位置处光学厚度 $\tau(0.5 \mu\text{m})$ 和云层总光学厚度 $\tau_1(0.5 \mu\text{m})$ 的变化关系。(a) τ ; (b) τ_1

Fig. 4 Ratio of the vertical component of solar radiation pressure to gravity as functions of the optical thickness $\tau(0.5 \mu\text{m})$ and the total optical thickness $\tau_1(0.5 \mu\text{m})$. (a) τ ; (b) τ_1

图 3(a)为在总光学厚度 $\tau_1(0.5 \mu\text{m})=10$ 的云层中,水滴在光学厚度 $\tau(0.5 \mu\text{m})=5$ 处当太阳倾角的余弦 $\mu_0=1$ 时太阳辐射压力的垂直分量与水滴半径 r 的关系。由图 3(a)可知辐射压力在水滴半径在 $0.3 \mu\text{m}$ 处时存在着极大值,而大于 $0.3 \mu\text{m}$ 则随水滴半径的增加而减小。值得注意的是,在水滴半径小于 $1 \mu\text{m}$ 时,太阳辐射压力的垂直分量可达重力的百分之几十,而在水滴半径不大于 $10 \mu\text{m}$ 时,太阳辐射压力的垂直分量一般都达重力的百分之几。因此作用于小粒子的太阳辐射压力可同重力相比拟。

图 3(b)为半径 $r=3.5 \mu\text{m}$ 的云滴在总光学厚度 $\tau_1(0.5 \mu\text{m})=10$ 的云层中在光学厚度 $\tau(0.5 \mu\text{m})=5$ 处太阳辐射压力的垂直和水平分量与太阳倾角的余弦 μ_0 的关系。由图 3(b)可知,水平分量随太阳倾角的余弦的增大而减小,而垂直分量随太阳倾角的余弦的增大而增加,一方面是由于直射太阳光的因素所造成,另一方面则与漫射太阳辐射有关。

图 4(a)为半径 $r=3.5 \mu\text{m}$ 的云滴在总光学厚度 $\tau_1(0.5 \mu\text{m})=10$ 的云层中当太阳倾角的余弦 $\mu_0=1$ 时太阳辐射压力的垂直分量与光学厚度 $\tau(0.5 \mu\text{m})$ 的关系。由图 4(a)可知,太阳辐射压力的垂直分量基本与光学厚度无关。这是由于垂直分量中直射太阳辐射的因素虽然随光学厚度的增加而减小,而漫射太阳辐射的因素应随光学厚度的增加而增加。

图 4(b)为半径 $r=3.5 \mu\text{m}$ 的云滴在云层中光学厚度 $\tau(0.5 \mu\text{m})$ 为其总光学厚度 $\tau_1(0.5 \mu\text{m})$ 一半

处当太阳倾角的余弦 $\mu_0=1$ 时太阳辐射压力的垂直分量与总光学厚 $\tau_1(0.5 \mu\text{m})$ 度的关系。由图 4(b)可知,它随总光学厚度的增加而减小,当总光学厚度不大于 50 时,太阳辐射压力的垂直分量一般可达重力的百分之几。

4 结 论

根据球形粒子的 Mie 散射理论和平行平面大气中的辐射传输理论分析了作用于水云粒子的太阳辐射压力。结果表明,太阳辐射压力的水平分量只与直射太阳辐射有关,随太阳倾角的余弦和光学厚度的增大而减小;而垂直分量既依赖于直射太阳辐射也依赖于漫射太阳辐射,还与云层的总光学厚度介质的非对称因子和单次散射反照率有关。太阳辐射压力与水滴半径有着密切的关系,一般情况下当水滴半径不大于 $10 \mu\text{m}$ 时,太阳辐射压力可达水滴重力的百分之几,而当水滴半径位于 $0.3 \mu\text{m}$ 附近时,太阳辐射压力达到极大值,约为水滴重力的百分之几十。因此在云物理研究中应考虑作用于云粒子的太阳辐射压力。

本文的分析方法显然可以推广应用于太阳辐射压力对气溶胶粒子的影响分析。由于太阳辐射压力对小粒子的影响更大、气溶胶粒子一般小于云雾粒子,可以推测,太阳辐射压力对气溶胶粒子的影响更明显。但由于气溶胶粒子的种类繁多,其光学性质(如折射率随波长的变化等)与其种类、化学成分等

密切相关^[7,8],太阳辐射压力对各种气溶胶粒子的影响要具体分析。

参 考 文 献

- 1 Zhou Xiuji, Tao Shanchang, Yao Keya. *Advanced Atmospheric Physics* [M]. Beijing: Meteorology Press, 1991
周秀骥, 陶善昌, 姚克亚. *高等大气物理学* [M]. 北京: 气象出版社, 1991
- 2 K. N. Liou. *An Introduction to Atmospheric Radiation* [M]. New York: Academic Press, 1980
- 3 Shi Guangyu. *Atmospheric Radiation* [M]. Beijing: Science Press, 2007
石广玉. *大气辐射学* [M]. 北京: 科学出版社, 2007
- 4 H. C. van de Hulst. *Light Sacttering by Small Particles* [M].

- New York: John Wiley & Sons, 1957
- 5 G. L. Stephens. Radiation profiles on extended water cloud. I. Theory [J]. *J. Atmos. Sci.*, 1978, **35**(11): 2112~2122
- 6 D. Deirmendijian. *Electromagnetic Scattering on Spherical Polydispersions* [M]. New York: American Elsevier, 1969
- 7 Rao Ruizhong. General characteristics of modulation transfer function of turbid atmosphere [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(9): 0900125
饶瑞中. 混浊大气介质调制传递函数的一般特征[J]. *光学学报*, 2011, **31**(9): 0900125
- 8 Zhang Xiaolin, Huang Yinbo, Rao Ruizhong. Equivalence of light scattering by one internal-mixed model for aerosol particles [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(6): 0629001
张小林, 黄印博, 饶瑞中. 一种内混合气溶胶粒子模型光散射的等效性[J]. *光学学报*, 2012, **32**(6): 0629001

栏目编辑: 王晓球