0254-6124/2017/37(1)-082–12 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

GAO Haiyang, ZHANG Zuyi, BU Lingbing, HUO Chaoyang, WANG Zhen, ZHU Hong. Statistical characteristics of albedo variation in noctilucent clouds induced by small-scale gravity waves (in Chinese). *Chin. J. Space Sci.*, 2017, **37**(1): 82-93. DOI:10.11728/cjss2017.01.082

# 小尺度重力波引起夜光云反照率变化的统计特征 *

郜海阳[1,2] 张祖熠[2] 卜令兵[1,2] 霍朝阳[2] 王 震[1,2] 朱 红[3]

1(南京信息工程大学 中国气象局气溶胶与云降水重点开放实验室 南京 210044)

2(南京信息工程大学大气物理学院 南京 210044)

3(南京信息工程大学大气科学学院 南京 210044)

**摘 要** 利用 AIM 卫星搭载的 CIPS 云成像探测器获得的云图数据, 提取 2008—2009 年南北半球共 6664 个小尺度重力波 (波长 10∼150 km) 个例, 通过重力波区域与背景云层反照率变化值的对比分析, 研究重力波引起云层反照率的变化特征. 结果表明, 重力波引起的反照率变化值以正值为主, 最大平均值 $4.48\times10^{-6}\,\mathrm{sr}^{-1}$ 出现在南半球降交轨道. 反照率变化值与 IWC 变化值正相关, 相关系数均在 0.85 以上. 重力波引起的反照率变化呈现出很强的纬度和时间依赖性, 且几乎均为正值. 反照率变化值在中期阶段 (冬/夏至日之后的 50 天) 的高纬地区 ($>70°$) 更大, 但在中期以外始末阶段的低纬地区 ($<70°$) 逐渐变小, 甚至开始出现负值. 随着背景云层的增强, 反照率平均值呈线性增大, 小尺度重力波能够引起背景云层反照率约 14.6%∼28.8% 的变化量. 当重力波引起的反照率周期性变化的振幅逐渐增大时, 反照率变化值也线性增大, 变化率约为 0.909%∼1.194%. 南半球的变化率整体比北半球稍小, 这与背景大气条件的差异有关

**关键词** 中高层大气, 夜光云, 重力波, 反照率

**中图分类号** P356

# Statistical Characteristics of Albedo Variation in Noctilucent Clouds Induced by Small-scale Gravity Waves

GAO Haiyang[1,2] ZHANG Zuyi[2] BU Lingbing[1,2]

HUO Chaoyang[2] WANG Zhen[1,2] ZHU Hong[3]

1(*Key Laboratory for Aerosol-Cloud-Precipitation of China Meteorological Administration, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing* 210044)

2(*School of Atmospheric Physics, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing* 210044)

3(*School of Atmospheric Science, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing* 210044)

**Abstract** The accurate assessment of albedo variations in Noctilucent Clouds (NLC) induced by

* 国家自然科学基金项目 (41304124, 41305032), 江苏省基础研究计划项目 (BK20141480) 和南京信息工程大学校科研启动费资助项目 (2013X027) 共同资助

2015-08-10 收到原稿, 2016-03-01 收到修定稿

E-mail: gaohy@nuist.edu.cn

Gravity Waves (GW) has shown an important significance in evaluating the trend of NLC brightness. This work focuses on the impact of small-scale GW with wavelength of 10∼150 km on the albedo of Polar Mesospheric Cloud (PMC). Using the Level 2 albedo images obtained by the Cloud Imaging and Particle Size (CIPS) experiment onboard Aeronomy of Ice in the Mesosphere mission (AIM) from 2008 to 2009, 6664 small-scale GW are extracted. The wavelength of those GW is from 10 to 150 kilometers. By comparing and analyzing the albedo in GW areas and in mean NLC areas, the characteristics of the albedo variations in NLC induced by small-scale GW are studied. Results show that the albedo variations are primarily positive, and the maximum average value, $4.48\times10^{-6}\,\mathrm{sr}^{-1}$, is found on the descending portion of South Hemisphere. The albedo and Ice and Water Contents (IWC) variations are positively correlated, and the correlation coefficients are greater than 0.85. The albedo variations largely rely on the location and time of the GW, and the mean albedo variations are almost positive. The albedo variations are larger in higher latitude during the core of the seasons, while they become smaller gradually in lower latitude during the beginning and ending period of the seasons, and even to be negative in some edges of the maps. The albedo average value increases linearly as the background atmosphere increases, and the albedo variations in percentage is from 14.6% to 28.8% induced by small-scale GW. When the albedo amplitude of GW increases, the albedo variations also show a linear increase with the changing rate from 0.909 to 1.194. The whole variation rate of south hemisphere is a little smaller than that of north hemisphere because of the difference of background atmospheric conditions.

**Key words** Middle and upper atmosphere, Noctilucent clouds, Gravity waves, Albedo

## 0 引言

夜光云一般形成于高纬度地区 (55°−90°) 的中高层大气 (高度约 83 km ), 当使用星载仪器观测时也称其为极区中间层云 (Polar Mesospheric Clouds, PMC), 厚度约 1∼3 km, 通常 5 月中旬至 8 月出现在北半球, 11 月至翌年 2 月出现在南半球, 在这两个时间段形成夜光云季 [1]. 在两极的夏季, 中间层顶附近的温度有时低于 145 K, 仅需很少的水气便可使大气处于过饱和状态, 从而借助异质凝华过程形成夜光云 [2]. 最近一些研究认为, 夜光云的出现频率呈逐渐增长趋势 [3−7], 分布的纬度范围也有所扩展, 甚至出现在中纬度 (41.7°N) 地区 [8], 但也有研究表明其出现频率和亮度并没有明显的增长趋势 [9,10].

在夜光云的地基遥感影像观测资料中, 重力波活动经常出现在云层中 [11,12], 这在一定程度上干扰了对云层亮度的观测, 从而影响对其长期变化趋势的判断. 目前, 借助地基影像、激光雷达、星载仪器以及模型的手段, 已开展重力波活动对夜光云亮度的影响规律及机制的研究. 在模拟分析方面, Jensen 等 [13] 利用模型提出, 冰晶粒径增长至 50 nm 可见尺寸所需的凝结时间要大于消融过程的时间, 而处于这两个时间段内的短周期重力波引起云层亮度减弱, 但是更长周期的重力波则使云亮度增强. Rapp 等 [14] 从观测和模拟中得出了类似的结果, 认为 6.5 h 是一个明显的周期分界点, 随后 Chandran 等 [15] 将重力波模式与二维 CARMA (Community Aerosol and Radiation Model for Atmospheres) 云模式耦合进行分析, 发现 6 h 更适合作为重力波减弱和增强云亮度的周期分界点. 在观测方面, Gerrard 等 [16,17] 和 Thayer等 [18] 利用格陵兰岛 Sondrestrom 站点 (67°N, 50.9°W) 的激光雷达数据, 证实短周期重力波出现频率与夜光云后向散射系数成反比. Chu 等 [19] 利用南极 Rothera 站点 (67.5°S, 68.0°W) 的激光雷达同样观测到这一反相关特性. 但是, 也有一些研究发现重力波活动与夜光云的变化并没有直接关系. Wilms 等 [20] 和 Schöch 等 [21] 利用挪威 Alomar 站 (69.3°N, 16.0°E) 的激光雷达数据, 发现重力波出现频率与夜光云出现频率和云层亮度没有直接关系, 类似结果也被 Innis 等 [22] 在南极 Davis 站 (68.6°S,

78°E) 发现. 另外, Chandran 等 [23] 利用 2007−2009 年 CIPS (Cloud Imaging and Particle Size experiment) 反照率图像进行统计分析发现, 有些季节里夜光云的出现频率与重力波活动的出现频率随经度的变化呈反相关趋势, 而与 SABER (Sounding of the Atmosphere using Broadband Emission Radiometry) 的温度扰动呈一定的正相关趋势, 但在其他季节这种关系并不明显. Liu 等 [24] 利用 SOFIE (Solar Occultation for Ice Experiment) 数据提取重力波的温度扰动, 发现重力波势能与夜光云的冰水混合质量 (Ice and Water Contents, IWC) 随经度的分布没有明显的单一相关性.

综上所述, 目前关于重力波扰动对夜光云的影响趋势和作用机理的研究结果并不完全一致. 因此, 本文以小尺度重力波对夜光云反照率变化的影响规律为出发点, 利用 AIM 卫星搭载的 CIPS 仪器获取的云图数据, 从中提取小尺度重力波活动个例, 检验重力波活动区域反照率与背景云层反照率之间的分布规律, 为重力波扰动引起夜光云短期和长期变化的研究提供理论支撑.

# 1 数据及处理过程

## 1.1 CIPS 数据

2007 年 NASA 发射的 AIM 卫星是第一台专门用来研究夜光云物理特性的卫星. CIPS 是 AIM 卫星上用于冰晶粒子实验的云成像探测器, 由 4 台带有紫外滤光片同时具有宽视场角的 CCD 紫外相机组成, 透过紫外光的谱段在 258~274 nm 区间, 中心波长为 265 nm, 通过获取夜光云的前向散射光信号来反演云图, 能够提供夜光云季每日 50°−85° 纬度的紫外波段全景反照率和冰晶粒径云图. 每台相机像素均为 2048×2048, 并运用 4×8 的 bin 来提高信噪比 [26]. 这里使用 2009 年南北两个半球所有 Level 2 以及 Level 3c 的数据. 其中 Level 2 数据已将每条轨道的 26 张原始图像进行融合, 具备统一的 5 km×5 km 空间分辨率, 并可提供反照率及 IWC 和粒子等效半径云图, 这里使用的是反照率图像和 IWC 数据 [27]. Level 3c 数据集成度更高, 对每条轨道的云图按照 1° 的纬度间隔求取平均值, 并给出不同的阈值数据, 分别为 1.0 (01 G), 2.0 (02 G), 5.0 (05 G) $\times 10^{-6}\mathrm{sr}^{-1}$. 为与 Level 2 数据匹配, 使用了 01 G 的 Level 3c 数据.

CIPS 的数据报告和一些文献中都提到了升交点与降交点轨道数据之间的差异问题. 该差异可能来自于地方时的差异及云的日变化特征, 但也很有可能来自于反演算法 [28]. 云粒子半径的反演仍然有一定的不确定性, 但 IWC 的反演依赖于半径参数, 因此 IWC 也有一定的不确定性 [27]. 到目前为止这一问题仍没有得到很好地解决, 本文将升交和降交部分分开处理, 对其各自趋势分别进行研究, 但对二者之间的差异不进行深入探讨.

## 1.2 重力波扰动个例的提取过程及方法

对重力波扰动个例的提取需要使用 Level 2 轨道反照率云图数据. 这里认为一个重力波个例至少要有四个或更多波峰结构的条纹序列出现, 如果水平波长大于 100 km, 那么只有三个波峰也可被认为是一个重力波个例. 单次拍摄图像中 5 km×5 km 的空间分辨率和有限视场角限制了水平波长的范围为 10~150 km, 属于小尺度重力波的范畴. 此外, 每条轨道时间间隔约为 90 min, 且仅在 80° 以上区域有非常有限的重叠面积, 因此无法求得与相速度等有关的参数, 这是与全天空气辉成像仪提取重力波最大的不同之处.

具体提取过程与文献 [29−31] 类似. 图 1 给出了 2009 年北半球第 12 014 条轨道反照率图像中一个重力波扰动个例的辨识过程. 图 1(a) 中较为明亮的部分为较强云, 而较暗和黑色的区域为较弱的云或为无云. 通过对图像的对比度进行调节, 可以发现一组重力波结构, 如图 1(a) 蓝色方框和图 1(b) 所示. 在发现的重力波结构垂直方向, 即重力波的传播方向上截取一条反照率廓线, 得到如图 1(c) 蓝色曲线部分的数值. 对这些截取的反照率廓线值采取二维小波分析, 可以得到反照率廓线的二维功率谱, 从而将空域信息转化为频域信息, 同时获取波长的信息, 包括主波长在整个波列中的位置. 进行小波分析需要对截取的廓线数据进行一次平滑处理, 平滑宽度为数据量的 1/3, 如图 1(c) 上部的红色曲线所示, 用原数据减掉平滑数据, 剩余值即为高频部分, 也即进行了一定程度的高通滤波, 图 1(c) 下部的绿色曲线为滤波结果. 图 1(c) 中红色曲线为一些较大尺度的波动信息, 通常认为这些波动是大尺度缓变的背景云层特性, 必须通过滤波处理将缓变的云背景剔除, 留下仅由于重力波扰动所引起的反照率变化值. 因此, 最终获取的

个例绝大多数为单色波或准单色波. 图 1(d) 为二维小波分析的功率谱, 红色区域为主波的特征. 以上是一个重力波的完整识别过程.

### 1.3 重力波的波长分布特征

利用 1.2 节的方法, 从 2009 年南北半球观测数据中共提取 6664 个重力波. 按南北半球以及不同升降交轨道进行统计, 绘制个例数量随水平波长变化的柱状图 (见图 2), 并使用对数正态分布的谱形对图 2 进行拟合, 获取的谱参数列于表 1. 从图 2 可以看出, 重力波的波长主要分布在 20~60 km 之间. 在这个波长范围内, 北半球升交点的重力波数量 (2480 个) 比降交点的重力波数量 (1301 个) 多, 南半球总体的升交点数量 (1604 个) 比降交点数量 (1279 个) 多, 即北半球升交点部分的重力波数量多于南半球. 北半球升交点峰值波长出现在 30~35 km, 降交点峰值波长出现在 25~30 km; 而南半球升交点峰值波长出现在 35~40 km, 降交点峰值波长出现在 30~35 km. 从表 2 中的谱参数来看, 2009 年北南半球升 (降) 交点处的重力波峰值波长分别为 30.7577 km (31.514 km) 和 32.1588 km (33.3357 km), 同时南半球平均波长比北半球的大, 分别为 51.37 km 和 45.99 km.

实际上重力波个例的辨识与云量多少和云层的覆盖面积有直接关系. 总体而言, 北半球的云层覆盖面积、云量和持续时间明显大于南半球, 且升交轨道大于降交轨道, 具体见图 2 和表 1 中的结果. 这里只关注有云区域的重力波对云层亮度的影响, 不讨论无云区域重力波出现与否, 因此与文献 [23] 不同的是, 未使用归一化的方法获取重力波出现频率.

表 1 还给出了 2009 年南北半球夜光云季和重力波相对于冬至日和夏至日所覆盖的时段范围, 其中

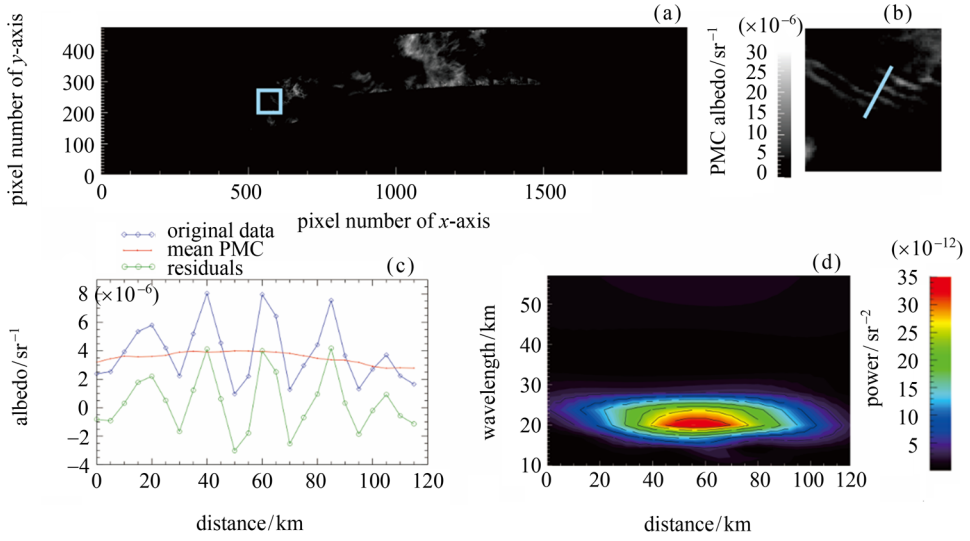



图 1 从 CIPS 反照率图像数据中分辨和提取重力波活动个例的过程

Fig. 1 Identification process of gravity wave event from CIPS Level 2 albedo image

**表 1 南北半球夜光云季覆盖的时间范围 (相对于至点前后天数) 及重力波特征参数**

**Table 1 Durations of NLC seasons for both hemispheres (Days from Solstice, DFS) and parameters of GW distributions**

| 夜光云季 | 夜光云季时段/d | 重力波覆盖时段/d | 天数总和 | 升降交轨道 | 个例数量 | 峰值波长/km | 平均波长/km | 谱宽 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 2009 (北半球) | −41 ~69 | −24 ~63 | 88 | 升交 | 2480 | 30.7577 | 45.9937 | 18.4703 |
| | | | | 降交 | 1301 | 31.514 | 45.9937 | 22.0173 |
| 2008—2009 (南半球) | −49 ~69 | −17 ~59 | 77 | 升交 | 1604 | 32.1588 | 51.3602 | 25.4582 |
| | | | | 降交 | 1279 | 33.3357 | 51.3602 | 26.5764 |

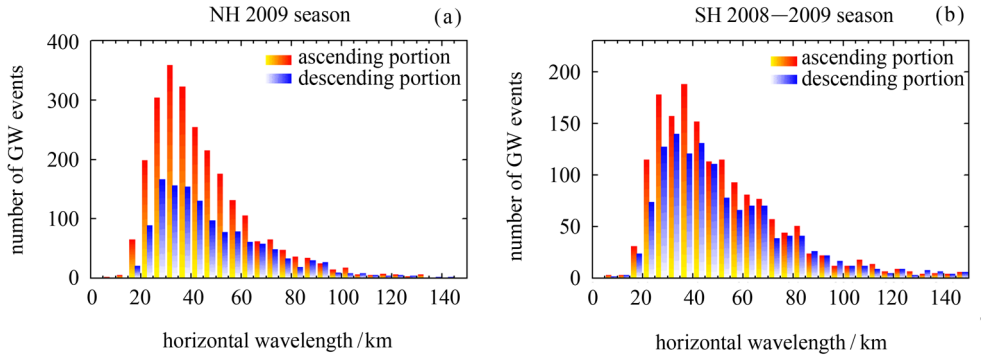



图 2 南北半球重力波水平波长分布

Fig. 2 Horizontal wavelength distributions of GW in Northern Hemisphere (NH) and Southern Hemisphere (SH) respectively

2009 年北半球夜光云季的时间长度为夏至日前的 41 天到夏至日后的 69 天, 而南半球夜光云季的时间长度为冬至日前的 49 天到冬至日后的 69 天. 有重力波出现的时段分别为: 北半球从夏至日前 24 天至夏至日后的 63 天, 南半球从冬至日前 17 天至冬至日后的 59 天. 由于需要比较重力波区域的亮度及背景云区域的亮度, 因此需根据时间进行匹配, 最终选取重力波所覆盖的时间段进行研究, 即北半球共 88 天, 南半球共 77 天.

## 2 重力波引起云反照率变化的统计特征

### 2.1 重力波区域反照率变化的计算

重力波引起的反照率变化需要计算两部分差值, 一是重力波活动区域的平均反照率, 二是背景云层的平均反照率. 其中, 重力波活动区域可以用一个狭长的矩形来代表, 以图 1(b) 为例, 蓝色直线为矩形的长中轴, 以该直线的 1/5 长度为宽, 截取一个矩形, 由于重力波活动的区域通常没有规则的边界, 所以用这一矩形来代表重力波的活动区域, 保证这一区域完全被波状条纹占据. 背景云层需要对较大范围内有云区域的反照率求取平均值, 当确定某一个重力波活动的矩形边界经纬度后, 在 Level 3 数据中找到相应经纬度的像素, 一个像素覆盖 1° 纬度, 这些像素所包含的范围在经向上跨过约 430 km, 纬向上跨过所涉及的像素个数的度数. 对这些像素求取平均值能够代表背景云层的平均反照率, 既包含重力波影响的区域, 也包含相当大的背景云层区域. 因此, 每一个重力波活动区域都对应一个背景云层的区域, 最后用这两个区域的平均反照率做差值, 从而求得重力波引起的反照率变化值.

### 2.2 总体分布特征

图 3 给出了所有重力波个例活动引起的反照率和 IWC 的变化值. 为叙述简洁, 这里利用反照率变化值和 IWC 变化值来代替重力波个例活动引起的反照率和 IWC 的变化值. 表 2 给出了具体的数量分布及平均值.

从图 3 可以看出, 反照率变化值和 IWC 变化值有正也有负, 但正值数量远远大于负值数量. 从表 2 也可以看出, 正值的平均值大于负值的平均值, 因此重力波的正扰动作用占据主导地位. 具体来说, 北半球升交部分反照率变化值的平均值大于南半球升交部分, 而降交部分情况正好相反. 最大变化值出现在南半球的降交部分, 反照率和 IWC 的变化值分别达到了 $4.48\times10^{-6}\,\mathrm{sr}^{-1}$ 和 $33.51\,\mu\mathrm{g\cdot m}^{-2}$. 在正负值的数量分布上, IWC 变化值的正值数量要比反照率的大一些, 这意味着在有些局部区域, 虽然 IWC 已经出现增加的情况, 但反照率相对于背景云层是减小的. 这有可能是真实的现象, 但更可能是 IWC 反演过程中不确定性的体现, 因为 IWC 反演更加困难, 依赖的参量更多 [27], 所以不确定性更强. 后续研究将深入探讨这一问题.

IWC 是描述云量最重要的参数之一, 而反照率的变化能够反应云层的强弱. 图 4 给出了反照率变化值与 IWC 变化值的相互关系. 从图 4 可以发现,

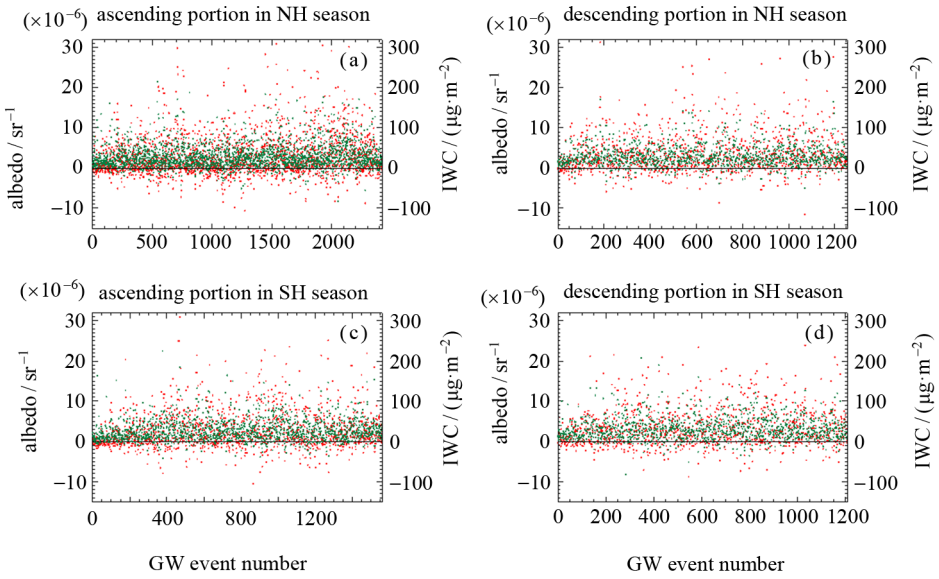



图 3 南北半球反照率差值和 IWC 差值的分布 (红色和绿色点分别表示反照率差值和 IWC 差值, 黑色直线为零值参考线)

Fig. 3 Distributions of albedo and IWC variations for all GW events (Red stars and green dots denote albedo and IWC respectively, while the black dash lines represent the zero reference lines)

**表 2 南北半球升降交区域反照率和 IWC 变化值分布**

**Table 2 Albedo and IWC variations of Ascending (AS) and Descending (DS) portions for both hemispheres induced by GW**

| 夜光云季 | 升降交部分 | 正负情况 | 反照率 ($\times10^{-6}$)/sr$^{-1}$ 数量 | 反照率 ($\times10^{-6}$)/sr$^{-1}$ 平均值 | IWC/($\mu$g·m$^{-2}$) 数量 | IWC/($\mu$g·m$^{-2}$) 平均值 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 2009 (北半球) | 升交 | 正值 | 1828 | 4.229 47 | 2228 | 31.9529 |
| | | 负值 | 597 | −1.430 01 | 197 | −10.6175 |
| | 降交 | 正值 | 1050 | 4.331 38 | 1162 | 32.7737 |
| | | 负值 | 207 | −1.438 84 | 95 | −10.5368 |
| 2008—2009 (南北球) | 升交 | 正值 | 1153 | 4.093 20 | 1418 | 31.3363 |
| | | 负值 | 412 | −1.379 93 | 145 | −8.572 77 |
| | 降交 | 正值 | 960 | 4.482 32 | 1122 | 33.5148 |
| | | 负值 | 249 | −1.459 25 | 87 | −10.6308 |

反照率变化值与 IWC 变化值呈正相关, 其相关系数均达到 0.85 以上, 即 IWC 的变化越大, 反照率的变化也越大. 南北半球降交部分的相关系数比升交部分的相关系数稍大, 降交部分系数大于 0.9, 且其线性拟合的斜率及截距基本一致. 与表 2 中结果类似, 截距均为正值, 即当 IWC 的变化刚刚转为正值时, 反照率仍然为负, 这一差异或许可以用于 IWC 反演方法的改进.

### 2.3 反照率变化值随纬度和时间的分布特征

很多研究表明夜光云在季节内有很强的纬度和时间的依赖性, 重力波也有一定的季节和纬度分布特征 [1,15,31]. 这里将反照率和 IWC 扰动数据规整为 1° 纬度和 1 天间隔的网格图, 对每一网格求取变化值的平均值, 并采用两个像素的平滑, 结果如图 5 和图 6 所示. 图 5(a) 为 2009 年北半球的升交部分, 图 5(b) 为北半球的降交部分, 其中第一、三列均为反照率变

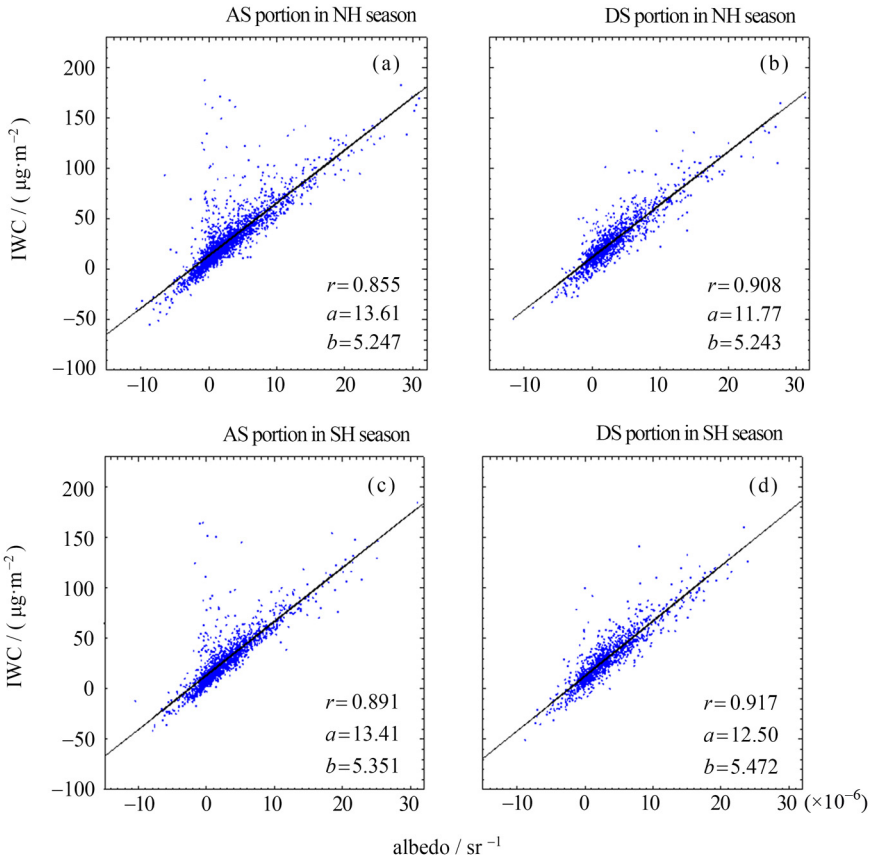



图 4 南北半球反照率差值和 IWC 差值的相关性. 北半球 (NH) 与南半球 (SH) 升降交 (AS, DS) 部分两个差值的关系. 蓝点为二者之间散点, 黑色直线为基于 $f(x) = a + bx$ 方程的线性拟合

Fig. 4 Correlations between the GW induced albedo and the IWC variations. Ascending portions (AS) and Descending portions (DS) in Northern Hemisphere (NH) and Southern Hemisphere (SH) seasons respectively. The blue dots are the scatter data, and the black lines are the linear fitting curves with the equation of $f(x) = a + bx$

化值, 第二、四列均为 IWC 变化值. 图 5 中第一行是重力波活动区域的平均反照率和 IWC, 第二行为背景云层的相应值, 第三行为重力波引起的变化, 即第一行与第二行的差值, 第四行则为重力波引起反照率和 IWC 周期性变化的平均振幅. 图 6 为 2008 年 9 月南半球的相应情况, 白色间隙表示当天缺少数据. 横坐标均使用以至点为零点的天数进行标记, 这是描述夜光云时间特性的常用手段.

从图 5 可以看出, 第一行重力波区域和第二行背景云层中的反照率都有很强的纬度和时间依赖性, 在季节中期阶段和高纬区域, 反照率都更大, 在季节始末阶段和较低纬度区域, 反照率减小. 第三行中重力波引起的反照率变化值也有相似趋势, 且几乎均为正值, 反映出重力波的作用会使云层增强, 在季节中期阶段的高纬地区更大, 季节始末阶段的低纬地区变小. 需要注意的是, 在第三行两幅等值线的边缘, 即红色曲线包罗的区域里, 反照率变化值变为负值, 反映出重力波的作用开始削弱云层, 这可能是过去许多文献不同纬度地基单站测量结论不一致的原因. 另外, 第四行重力波引起反照率周期性变化的振幅也具备相似特性. 这些振幅不能直接表征重力波本身的强度, 但可以表明重力波对夜光云的作用不仅仅与重力波本身特性有关, 也与夜光云自身的特性密切相关. IWC 的变化值分布趋势与反照率十分相似, 甚至在等值线边缘几乎看不到红色的零值参考线, 这也意味着重力波对云层云量均起到增加的作用, 但是 IWC 的振幅趋势不明显. 实际上在大部分 IWC 的原始云图中也发现了类似问题, 同样的重力波波状图案在反照率云图中可以清晰辨别, 但有时在相应的 IWC 云图中非常模糊, 甚至不能直接分辨出是重力波活动,

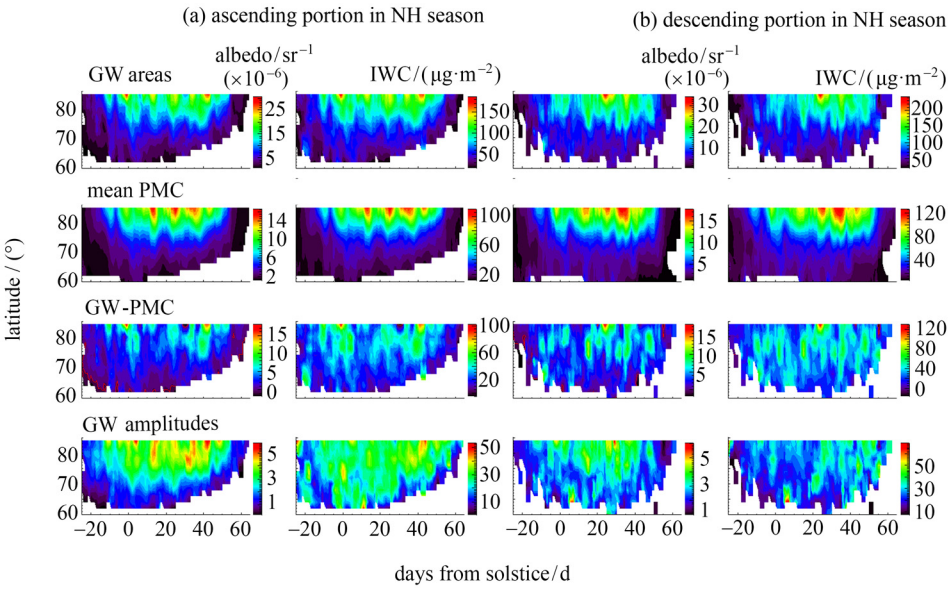



图 5 北半球夜光云季节分布特征. 第一行和第二行分别表示重力波区域和背景云区域中反照率与 IWC 的分布, 第三行为重力波引起的变化值, 即第一行与第二行的差值, 第四行为重力波对反照率和 IWC 扰动强度的分布

Fig. 5 Seasonal distribution of Noctilucent Clouds in Northern Hemisphere (NH). (a) and (b) are albedo and IWC variations of AS and DS portions respectively. The first row gives the mean albedo and IWC values in GW areas. The second row represents the mean albedo and IWC values in mean PMC. The third row gives the albedo and IWC differences between the GW areas and the mean PMC, and the fourth row shows the amplitudes of albedo and IWC induced by GW

因此 IWC 的振幅扰动并不完全适合分析重力波的扰动特征. 此外, 升交部分的趋势比降交部分更为明显, 图形也更平滑, 这与升交部分采样点更多有直接关系.

图 6 给出了南半球夜光云的季节分布特征. 与北半球类似, 其在季节的中期阶段和高纬地区较强, 在始末阶段和较低纬地区较弱. 由于背景大气条件的差异, 南半球夜光云季持续的时间和总云量比北半球小一些, 如图 6 中第一和第二行所示. 第三行的等值线边缘出现负值, 而且在云层较弱的前期 (至点前 5~20 天) 及 80° 以下区域出现了一个大的负值区, 即当云层很弱时, 重力波能够削弱云层. 第四行的反照率振幅与背景云层反照率有非常好的一致性. 另外, IWC 的趋势也与北半球相似, 而且 IWC 的振幅比反照率振幅的规律性差.

### 2.4 反照率变化值与背景云层及重力波振幅的关系

由 2.3 节的内容可以看出, 重力波引起的反照率变化值与背景云层的状态以及重力波活动强度 (引起的振幅变化) 有关. 这里对反照率变化值与两者的关系进行分析.

图 7 给出的是 2009 年南北半球夜光云反照率变化值与背景云层平均反照率的关系, 可以看出当背景云层平均反照率小于 $20\times10^{-6}\,\mathrm{sr}^{-1}$ 时, 数据点充足, 变化平缓, 当背景云层平均反照率大于 $20\times10^{-6}\,\mathrm{sr}^{-1}$ 时, 数据量变小, 出现了较大的抖动. 图 7 所示灰色的散点有正有负, 背景云层较弱时, 反照率变化值的变化范围相对较小, 且负值出现的次数较多, 随着背景云层的增强, 反照率变化值的变化范围逐渐增大, 且负值出现的次数变少.

从图 7 中蓝色菱形的分布可以看出, 反照率变化值的平均值均为正, 即从统计角度分析, 重力波的作用为正扰动, 且正扰动的幅度随着背景云层的增强而逐渐增大. 绿色直线表明二者具有很好的线性正相关性, 斜率在 0.146~0.288 之间, 即反照率变化值的平均值与背景云层反照率之间具有恒定比率, 小尺度重力波能够引起背景云层反照率约 14.6%~28.8% 的变化量. 此外, 根据斜率的不同可以看出, 南北半球的升交部分比降交部分的变化率大, 南半球的变化率整体比北半球小, 这与南北半球各自的云层强度和背景大气条件有密切关系.

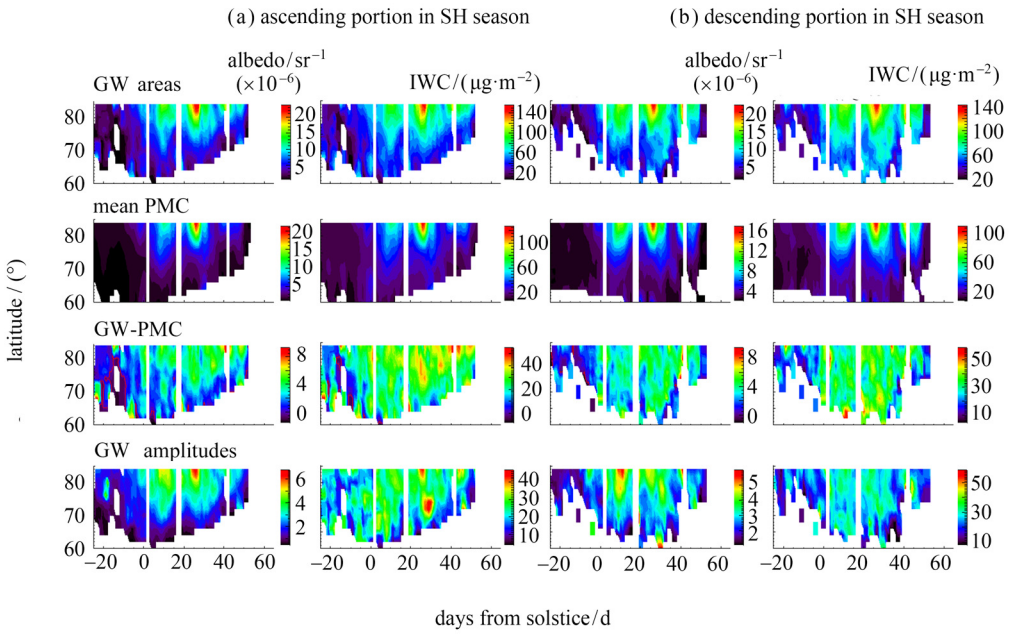



图 6 南半球夜光云在季节上的分布特征. 第一行和第二行分别表示重力波区域和背景云区域中反照率和 IWC 的分布, 第三行为重力波引起的变化值即第一行与第二行的差值, 第四行为重力波对反照率和 IWC 扰动强度的分布

Fig. 6 Seasonal distribution of noctilucent clouds in Southern Hemisphere (SH). The first row gives the mean albedo and IWC values in GW areas. The second row represents the mean albedo and IWC values in mean PMC. The third row gives the albedo and IWC differences between the GW areas and the mean PMC, and the fourth row shows the amplitudes of albedo and IWC induced by GW

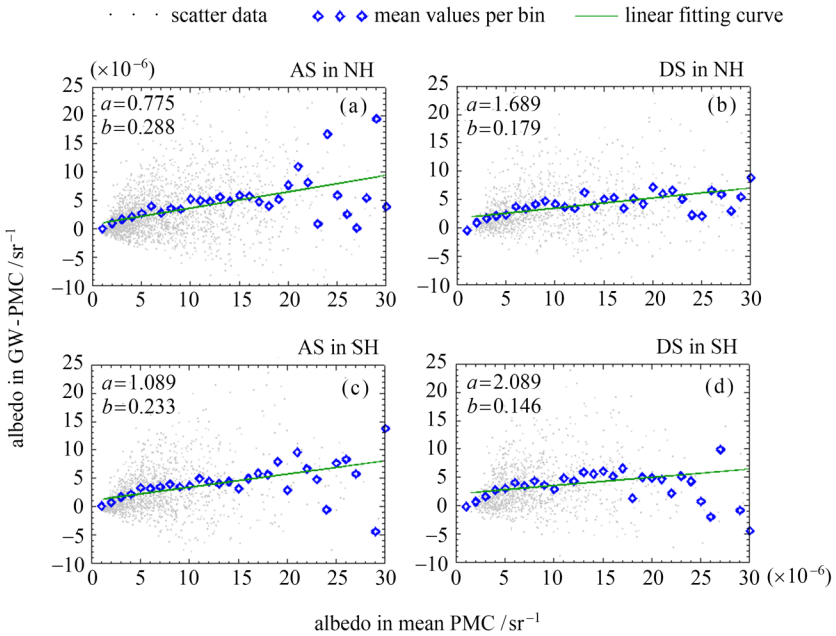



图 7 南北半球夜光云亮度变化与背景云层平均反照率之间的关系. 灰色点为散点, 蓝色菱形为由每间隔 $1\times10^{-6}\,\mathrm{sr}^{-1}$ 反照率区域内散点求得的平均值, 绿色直线是对灰色散点的线性拟合

Fig. 7 Albedo variations of noctilucent clouds with regard to the average albedo of background clouds. The grey dots denote the scatter data. The blue diamonds are the mean values of grey dots in the step of $1\times10^{-6}\,\mathrm{sr}^{-1}$ albedo, and the green solid lines is the linear fitting curves of the scatter data

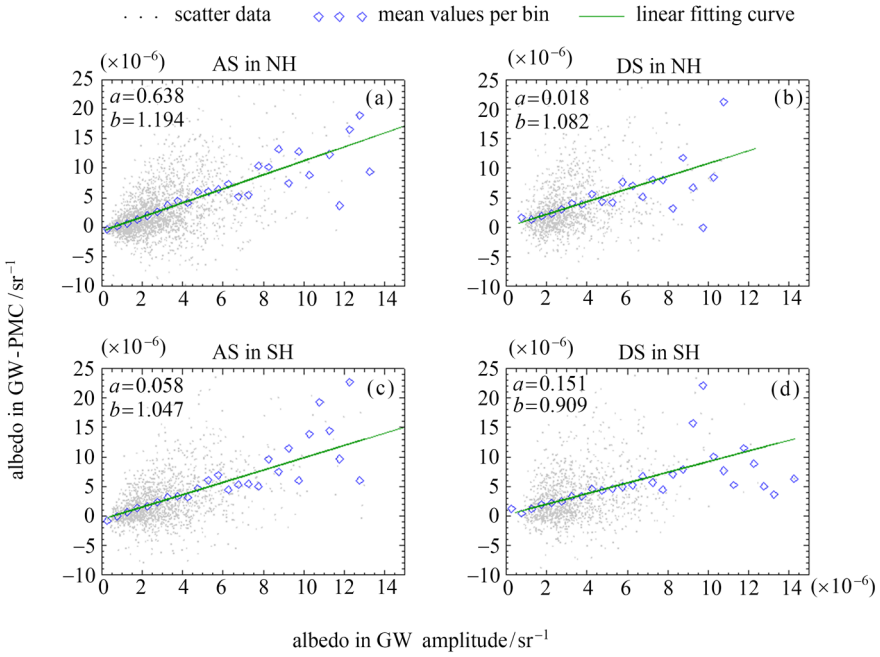



图 8 南北半球夜光云亮度变化与重力波对反照率扰动振幅之间的关系 (图例说明同图 7)

Fig. 8 Albedo variations of noctilucent Clouds with regard to the albedo amplitudes induced by GW (Legend as in Fig. 7)

图 8 给出的是 2009 年南北半球夜光云反照率变化与重力波引起反照率周期性变化的振幅关系. 反照率振幅一定程度上代表重力波的扰动强度, 进而反映重力波的特性. 因此图 8 的目的是检验反照率变化与重力波本身扰动强度的关系. 从图 8 可以看出, 当背景云层平均反照率小于 $8\times10^{-6}\,\mathrm{sr}^{-1}$ 时, 数据点充足, 线性变化规律非常清晰且平滑, 当背景云层平均反照率大于 $8\times10^{-6}\,\mathrm{sr}^{-1}$ 时, 数据量变小, 出现了一定程度的抖动. 从图 8 可以发现, 灰色散点和蓝色菱形的分布以及绿色拟合直线的趋势与图 7 十分相似, 当反照率振幅较小时, 反照率变化值的范围相对较小, 且负值出现的次数较多. 结合图 5 和图 6, 扰动强度较弱的重力波多发生在季节的始末阶段和较低纬度区域, 此时弱云中的饱和度处于临界状态, 重力波对温度的正扰动作用大于对水气向上的输送作用. 随着反照率振幅的增强, 反照率变化值的范围逐渐增大, 且负值出现的次数变少, 即扰动较强的重力波在过饱和状态下, 对水气向上的输运作用要大于对温度的正扰动. 拟合的绿色直线表明二者之间具有很好的线性正相关性, 直线斜率在 0.909~1.194 之间. 根据其斜率的不同可以看出, 南北半球的升交部分均比降交部分变化率大, 南半球的变化率整体比北半球稍小, 与图 7 类似, 这与背景大气条件的差异有关.

## 3 讨论

CIPS 图像为夜光云物理特性的研究提供了基础, 也为这一高度区域重力波活动的研究提供了条件. Chandran 等 [29] 和 Taylor 等 [30] 给出了从 CIPS 中提取的重力波水平波长谱的分布, 虽然样本较少, 但其谱形与图 2 近乎相同. 另外, 利用气辉 (如 OH) 成像仪观测小尺度重力波的结果 [32−34] 也与本文获得的谱形相似.

文献 [13−15] 从数值模拟的角度给出了重力波可能对夜光云亮度变化造成的影响, 认为短周期重力波会减弱云的亮度, 但目前并没有相关观测能够直接证明这一观点. 本文分析发现, 小尺度重力波对云的影响尽管有正有负, 但从统计平均的角度来讲均为正扰动, 而且有很强的纬度和时间的依赖性. 这与文献 [13−15] 模拟的结果有差异, 其原因可能是模拟研究中未考虑纬度和时间分布上的特征. 文献 [16−19] 分析了观测到的重力波出现频率与夜光云亮度、中

心高度等特性的反相关关系, 在量化影响程度的结果上存在一定差异. 文献 [20−22] 的观测结果认为, 重力波与云层亮度没有明显相关性. 这些观测均是在南北半球 67°−70° 纬度范围内开展的, 本文的反照率变化结果在这一纬度范围内的平均值与时间有关, 季节的始末阶段以负值为主, 中期阶段以正值为主. 另外, 文献 [23] 和 [24] 借助 CIPS 和 SOFIE 的数据, 发现重力波出现频率与夜光云出现频率以及重力波势能和 IWC 含量在某些经度范围内正相关, 在其他经度范围内反相关, 这表明两者关系取决于所处的具体局地和经度. 因此正确判断重力波与夜光云之间的关系, 需要考虑时间、纬度和经度等多个因素.

## 4 结论

利用 AIM 卫星搭载的 CIPS 云图数据, 提取 2008−2009 年南北半球共 6664 个小尺度重力波活动 (波长 10∼150 km) 个例, 通过重力波区域与背景云层反照率和 IWC 变化值的对比分析, 研究重力波引起云层反照率的变化特征和规律, 结论如下.

(1) 重力波引起的反照率变化值有正有负. 分析反照率变化值的正负数量和平均值发现, 正扰动作用占主导地位, 其最大平均值 $4.48\times10^{-6}\,\mathrm{sr}^{-1}$ 出现在南半球降交轨道. IWC 值的变化趋势类似.

(2) 反照率变化值与 IWC 变化值正相关, 其相关系数大于 0.85, 即云层中 IWC 变化是引起反照率变化的重要原因.

(3) 重力波引起的反照率变化值呈现很强的纬度和时间依赖性, 且几乎均为正值. 在中期阶段 (冬/夏至日之后的 50 天) 的高纬地区 ($>70°$), 反照率变化值更大, 即当夜光云较强时, 重力波会使云层增强; 在中期以外始末阶段的低纬地区 ($<70°$), 反照率变化值逐渐变小, 甚至开始出现负值, 即当夜光云较弱时, 重力波会使云层削弱.

(4) 随着背景云层的增强, 反照率平均值线性增大, 小尺度重力波导致的背景云层反照率变化约为 14.6%∼28.8%. 重力波引起的反照率周期性变化的振幅逐渐增大时, 反照率变化值也线性增大, 变化率在 0.909∼1.194 之间. 南半球的变化率整体比北半球稍小, 这与背景大气条件的差异有关.

因此, 重力波对夜光云的扰动水平与背景大气的温度和水气条件以及重力波自身强度有关, 正确判断重力波与夜光云之间的关系, 需要综合考虑时间、纬度和经度等多方面因素.

## 参考文献


[1] GADSDEN M, SCHRODER W. Noctilucent Clouds [M]. Berlin: Springer-Verlag Press, 1989

[2] THOMAS G E. Mesospheric clouds and the physics of the mesopause region [J]. *Rev. Geophys.*, 1991, **29**(4): 553-575

[3] GADSDEN M. The North-West Europe data on noctilucent clouds: a survey [J]. *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.*, 1998, **60**(12): 1163-1174

[4] THOMAS G E, OLIVERO J J, JENSEN E J, *et al.* Relation between increasing methane and the presence of ice clouds at the mesopause [J]. *Nature*, 1989, **338**: 490-492. DOI: 10.1038/338490a0

[5] THOMAS G E. Are noctilucent clouds harbingers of global change in the middle atmosphere [J]. *Adv. Space. Res.*, 2003, **32**(9): 1737-1746

[6] DELAND M T, SHETTLE E P, THOMAS G E. A quarter-century of satellite polar mesospheric cloud observations [J]. *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.*, 2006, **68**(1): 9-29

[7] LUBKEN F J, BERGER U. Latitudinal and inter hemispheric variation of stratospheric effects on mesospheric ice layer trends [J]. *J. Geophys. Res.*, 2011, **116**: D00P03. DOI: 10.1029/2010jd015258

[8] TAYLOR M J, GADSDEN M, LOWE R P, *et al.* Mesospheric cloud observations at unusually low latitudes [J]. *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.*, 2002, **64**(8/9/10/11): 991-999

[9] KIRKWOOD S, DALIN P, and RECHOU A. Noctilucent clouds observed from the UK and Denmark-trends and variations over 43 years [J]. *Ann. Geophys.*, 2008, **26**(5): 1243-1254

[10] DUBIETIS A, DALIN P, BALCIUNAS R, *et al.* Observations of noctilucent clouds from Lithuania [J]. *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.*, 2010, **72**: 1090-1099

[11] PAUTET P D, STEGMAN J, WRASSE C M, *et al.* Analysis of gravity waves structures visible in noctilucent cloud images [J]. *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.*, 2011, **73**(14/15): 2082-2090

[12] DUBIETIS A, DALIN P, BALCIUNAS R, *et al.* Noctilucent clouds: modern ground-based photographic observations by a digital camera network [J]. *Appl. Opt.*, 2011, **50**(28): 72-79

[13] JENSEN E J and THOMAS G E. Numerical simulations of the effects of gravity waves on noctilucent clouds [J]. *J. Geophys. Res.*, 1994, **99**: 3421-3430

[14] RAPP M, LUBKEN F J, MULLEMANN, *et al.* Small-scale temperature variations in the vicinity of PMC: experimental and model results [J]. *J. Geophys. Res.*, 2002, **107**(D19): 4392. DOI:10.1029/2001JD001241

[15] CHANDRAN A, RUSCH D W, THOMAS G E, *et al.* Atmospheric gravity wave effects on polar mesospheric clouds: a comparison of numerical simulations from CARMA 2D with AIM observations [J]. *J. Geophys. Res.*, 2012, **117**: D20104. DOI:10.1029/2012JD017794

[16] GERRARD A J, KANE T J, ECKERMANN S D, *et al.* Gravity waves and mesospheric clouds in the summer middle atmosphere: a comparison of lidar measurements and ray modeling of gravity waves over Sondrestrom, Greenland [J]. *J. Geophys. Res.*, 2004, **109**: D10103. DOI: 10.1029/2002JD002783

[17] GERRARD A J, KANE T J, THAYER J P. Noctilucent clouds and wave dynamics: observations at Sondrestrom, Greenland [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 1998, **25**(15): 2817-2820

[18] THAYER J P, RAPP M, GERRARD A J, *et al.* Gravity wave influences on Arctic mesospheric clouds as determined by a Rayleigh lidar at Sondrestrom, Greenland [J]. *J. Geophys. Res.*, 2003, **108**(D8): 8449. DOI: 10.1029/2002JD002363

[19] CHU X, YAMASHITA C, ESPY P J, *et al.* Responses of polar mesospheric cloud brightness to stratospheric gravity waves at the South Pole and Rothera, Antarctica [J]. *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.*, 2009, **71**: 434-445

[20] WILMS H, RAPP M, HOFFMANN P, *et al.* Gravity wave influence on PMC: experimental results from ALOMAR, 69°N [J]. *Atmos. Chem. Phys.*, 2013, **13**: 11951-11963

[21] SCHOCH A. Thermal Structure and Gravity Waves in the Arctic Middle Atmosphere above ALOMAR (69.3N, 16.0 E) [D]. Leibniz-Institut für Atmosphärenphysik: Universität Rostock, 2007

[22] INNIS J L, KLEKOCIUK A R, MORRIS R J, *et al.* A study of the relationship between stratospheric gravity waves and polar mesospheric clouds at Davis Antarctica [J]. *J. Geophys. Res.*, 2008, **113**: D14102. DOI: 10.1029/2007JD009031

[23] CHANDRAN A, RUSCH D W, MERKEL A W. *et al.* Polar mesospheric cloud structures observed from the cloud imaging and particle size experiment on the Aeronomy of Ice in the Mesosphere spacecraft: atmospheric gravity waves as drivers for longitudinal variability in polar mesospheric cloud occurrence [J]. *J. Geophys. Res.*, 2010, **115**: D13102. DOI: 10.1029/2009jd013185

[24] LIU X, YUE J, XU J Y, *et al.* Gravity wave variations in the polar stratosphere and mesosphere from SOFIE/AIM temperature observations [J]. *J. Geophys. Res.*, 2014, **119**: 7368-7381

[25] RUSSELL J M, BAILEY S M, GORDLEY L L, *et al.* The Aeronomy of Ice in the Mesosphere (AIM) mission: overview and early science results [J]. *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.*, 2009, **71**(3/4): 289-299

[26] RUSCH D W, THOMAS G E, MCCLINTOCK W, *et al.* The cloud imaging and particle size experiment on the aeronomy of ice in the mesosphere mission: cloud morphology for the northern 2007 season [J]. *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.*, 2009, **71**(3/4): 356-364

[27] LUMPE J D, BAILEY S M, CARSTENS J N, *et al.* Retrieval of polar mesospheric cloud properties from CIPS: algorithm description, error analysis and cloud detection sensitivity [J]. *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.*, 2013, **104**(2): 167-196

[28] CARSTENS J N, BAILEY S M, LUMPE J D, *et al.* Understanding uncertainties in the retrieval of polar mesospheric clouds from the cloud imaging and particle size experiment in the presence of a bright Rayleigh background [J]. *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.*, 2013, **104**(2): 197-212

[29] CHANDRAN A, RUSCH D W, PALO S E, *et al.* Gravity wave observations in the summertime polar mesosphere from the Cloud Imaging and Particle Size (CIPS) experiment on the AIM spacecraft [J]. *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.*, 2009, **71**(3/4): 392-400

[30] TAYLOR M J, PAUTET P D, ZHAO Y, *et al.* High-latitude gravity wave measurements in noctilucent clouds and polar mesospheric clouds [M]//Mangalathayil Ali Abdu, Dora Pancheva (Eds.), Aeronomy of the Earth's Atmosphere and Ionosphere, IAGA Special Sopron Book Series, 2011, 2 (Part1): 13. DOI: 10.1007/978-94-007-0326-1_7

[31] ZHAO Y, TAYLOR M J, RANDALL C E, *et al.* Investigating seasonal gravity wave activity in the summer polar mesosphere [J]. *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.*, 2015, **127**: 8-20

[32] LI Q, XU J Y, YUE J, *et al.* Statistical characteristics of gravity wave activities observed by an OH airglow imager at Xinglong, in northern China [J]. *Ann. Geophys.*, 2011, **29**: 1401-1410

[33] SUZUKI S, TSUTSUMI M, PALO S E, *et al.* Short-period gravity waves and ripples in the South Pole mesosphere [J]. *J. Geophys. Res.*, 2011, **116**(D19): D19109. DOI: 10.1029/2011jd015882

[34] JIANG G Y, XU J Y, YUAN W, *et al.* A comparison of mesospheric winds measured by FPI and meteor radar located at 40N [J]. *Sci. China.: Tech. Sci.*, 2012, **55**: 1245-1250