

## 利用 MODIS 数据对北极夏季卷云特性的研究

杨亦萍<sup>1,2</sup>, 董晓刚<sup>3</sup>, 戴聪明<sup>1</sup>, 徐青山<sup>1</sup>

(1. 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, 安徽 合肥 230031;

2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 光学辐射重点实验室, 北京 100854)

**摘要:** 利用 2011~2014 年 MODIS 云产品数据对北极地区夏季卷云的出现概率、云顶温度、云顶高度、光学厚度、有效粒径大小进行统计分析, 并讨论了北极地区夏季卷云有效粒径大小和卷云高度的关系。结果表明, 北极地区上空夏季卷云出现概率最高, 水云较少。卷云云顶温度主要分布在 230~272 K (即 -43~-5 °C), 其云顶高度主要在 2~8 km, 4.5~6 km 出现概率最大。卷云的光学厚度主要在小 10 范围内。卷云的有效粒径在 5~40 μm 之间, 10~20 μm 出现概率最大。卷云的有效粒径和高度的关系与中纬度地区相反, 北极地区卷云高度越高, 卷云有效粒径越大。北极地区卷云随着纬度增大, 卷云出现概率增加, 卷云云顶温度降低, 卷云高度增加, 卷云有效粒径增大, 卷云光学厚度增大。

**关键词:** 卷云; 北极地区; 光学厚度; 有效尺度

**中图分类号:** P401 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.0432002

## Cirrus clouds properties in the Arctic in summer based on MODIS data

Yang Yiping<sup>1,2</sup>, Dong Xiaogang<sup>3</sup>, Dai Congming<sup>1</sup>, Xu Qingshan<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Atmospheric Composition and Optical Radiation, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. Science and Technology on Optical Radiation Laboratory, Beijing 100854, China)

**Abstract:** The Arctic probability distribution of cloud phase, cirrus clouds top temperature, cirrus clouds top height, cirrus clouds optical thickness and effective radius in summer were presented based on Moderate resolution Imaging Spectrometer (MODIS) cloud product data (MOD06) of 2011–2014 in July, and the relationship between effective radius and cirrus clouds top height was discussed. Results show that in summer the occurrence frequencies of cirrus clouds become higher while the occurrence frequencies of water clouds become lower in the Arctic. Cirrus clouds top temperatures mainly distribute in the 230–272 K (that is -43°C to -5 °C). The cirrus clouds top height distribute from 2 to 8 km, and has a highest occurrence frequency in the range of 4.5–6 km. The cirrus clouds optical thickness is less than 10. The

收稿日期: 2015-08-20; 修订日期: 2015-09-11

基金项目: 气象专项(GYHY-201106002-03)

作者简介: 杨亦萍(1990-), 女, 硕士生, 主要从事大气探测和大气遥感方面的研究。Email: ciel516@mail.ustc.edu.cn

导师简介: 徐青山(1965-), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事大气探测和传输, 卫星遥感反演和图像大气订正方面的研究。

Email: qshxu@aiofm.ac.cn

cirrus clouds effective radius distribute from 5–40  $\mu\text{m}$  and most probable appear in the range of 10–20  $\mu\text{m}$ . The relationship of cirrus clouds effective radius and cirrus clouds top height has a positive correlation in the Arctic, while in mid-latitude this relationship is opposite. The higher the cirrus clouds top height, the greater the cirrus clouds effective radius is. In the Arctic, with the increase of the latitude, the cirrus clouds occurrence frequency, cirrus clouds top height, cirrus clouds effective radius and cirrus clouds optical thickness increase, while the cirrus clouds temperature decreases.

**Key words:** cirrus clouds; Arctic; optical thickness; effective radius

## 0 引言

卷云主要是指是由冰晶组成的层状、钩状、带状或者纤维状的高云, 它们是全球范围内最常出现的云型之一。全球平均卷云覆盖率在 20%~30% 之间<sup>[1]</sup>, 与季节和地理位置有关。卷云在大气辐射中扮演重要角色, 对全球大气有加热和冷却双重效应<sup>[2]</sup>, 在大气气候模式研究中需要知道它的物理特性和参数等。

北极地区常年低温, 北极洋面上气温低、水汽少, 在夏季平均相对湿度可以达到 85% 以上。北极地区上空的云量呈现冬季少, 夏季多的分布, 大多数为笼罩海面的层云和层积云。极地云对臭氧空洞的影响近年来受到广泛关注。北极是北半球的冷空气源地, 其对北半球乃至全球热量收支和气候变化都有巨大影响, 而北极卷云的辐射特性对北极地区的能量收支有直接作用, 所以研究北极地区的卷云辐射特性对于对全球辐射收支和能量传递都有重要意义。

许多学者对卷云物理特性进行了统计分析。Wylie 等<sup>[3]</sup>运用 NOAA 的 HIRS(高分辨率红外辐射探测器)分析了四年全球卷云发生频率、高度等, 发现卷云发生频率有 8% 增长。Nazaryan 等<sup>[4]</sup>运用 CALIPSO 数据分析统计了全球卷云分布, 发现卷云水平分布随季节变化, 发现热带地区和中纬度地区卷云发生概率为 11% 和 5.1%。Sassen 和 Liu 等<sup>[5]</sup>运用 CALIPSO 和 CloudSat 数据发现卷云全球发生概率为 16.7%。Chen 等已经通过利用 MODIS 的 1.375  $\mu\text{m}$  通道的卷云反射率数据分析了东亚地区卷云的时空变化特征。闵敏等<sup>[6]</sup>利用 CALIOP 数据对中国地区卷云的水平分布和垂直分布变化特征进行了研究分析。曹亚楠等<sup>[7-8]</sup>利用 MODIS 数据统计了北京地区卷云辐射特性。近年来对北极地区卷云特性研究开展得较少, 文中针对北极地区云量最多的夏季的卷云展开研究。

## 1 数据和方法

MODIS 是搭载在 NASA1999 年发射的 Terra 卫星和 2002 年发射的 Aqua 卫星上的重要传感器, 具有多光谱成像、高探测灵敏度和高空间分辨率的特点, 能够实现每天两次覆盖全球观测, 获取地气系统多通道遥感数据, 对大气、陆地、海洋等要素定量反演和观测。

文中运用 Terra 卫星上搭载的 MODIS 提供的 2011~2014 年 7 月的 MODIS 二级产品数据 MOD06, 其数据空间分辨率为 5 km $\times$ 5 km, 选择了图像的像素为 270 $\times$ 406。文中以 MODIS 中云相态为冰云(即为卷云)作为研究对象, 由于其特殊地理位置, 北极地区的夏季只有两个月: 7 月和 8 月, 故选取 2011~2014 年 7 月新地岛以西 45~55 $^{\circ}$ E, 75~80 $^{\circ}$ N 地区(后文简称北极低纬区, the lower latitude area in Arctic, LA) 和 45~55 $^{\circ}$ E, 85~87 $^{\circ}$ N 地区(后文中简称北极高纬区, the higher latitude area in Arctic, HA) 进行研究。由于北极特地理位置和气候的特殊性, 北极地区夏季都是处于极昼, 其大气状况比较稳定, 风速较小, 不同时间段的卷云物理特性差异较小, 忽略不计。统计分析了北极低纬区和北极高纬区夏季卷云的平均物理特性、结构特性以及光学参数特性, 包括卷云出现概率、卷云云顶高、卷云光学厚度、卷云有效粒径等, 并对比北极这些卷云参数在夏季随纬度分布的变化情况, 这些参数可用于模拟计算北极地区卷云辐射特性, 加深对北极地区卷云参数特性的了解。

从 MODIS 二级云产品 MOD06 数据中获取经纬度、云相态、云顶温度、云顶压强、云光学厚度、云有效粒径。对 5 km $\times$ 5 km 分辨率的经纬度进行插值, 获得 1 km $\times$ 1 km 分辨率的经纬度。选出所研究区域对应的经纬度和对应的云参数数据。根据云相态数

据统计各种云相态出现的次数,统计卷云出现的概率。在所研究区域内,判断为卷云的数据点计算卷云顶高度,并统计分析卷云的光学厚度、有效粒径。将统计得到的北极地区云参数特性在北极低纬区和北极高纬区进行对比,最后分析北极地区夏季卷云参数之间的关系。

## 2 北极地区卷云特性统计结果和分析

### 2.1 北极地区云相态分布统计分析

云的水平分布对于地气系统的辐射具有很大的影响,分析北极地区的各种云相态出现概率有重要意义。云相态出现概率计算利用公式:

$$f_{\text{occu}} = \frac{N_M}{N_T} \times 100\% \quad (1)$$

式中: $N_M$ 为观测的某一相态的云的数量; $N_T$ 为观测的所有相态云的数量。图 1 为 2011~2014 年夏季北极地区高纬区(a)和低纬区(b)云相态出现概率分布(云相态:0 表示晴空,1 表示水云,2 表示冰云,3 表示混合相态云,6 表示不确定的)。表 1 为北极地区高纬区和低纬区的卷云出现平均概率值。

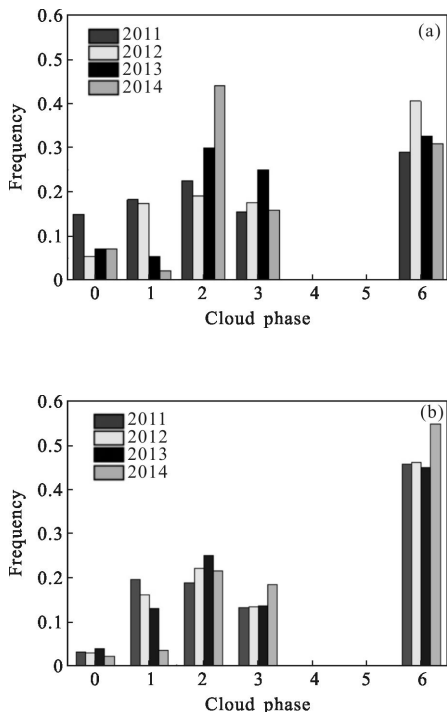


图 1 北极地区夏季云相态出现概率分布

Fig.1 Probability distribution of cloud phase in the Arctic in summer

表 1 北极高纬区和低纬区云相态分布概率

Tab.1 Frequency of cloud phase in higher and in lower latitude area in Arctic

	Higher latitude area				
	2011	2012	2013	2014	Average
Clear sky	21%	9%	10.7%	10.3%	12.7%
Water cloud	25.7%	29.4%	7.9%	3.2%	16.5%
Ice cloud	31.7%	32.1%	44.4%	63.7%	43%
Mixed cloud	21.6%	29.6%	37.1%	22.8%	27.8%
	Lower latitude area				
	2011	2012	2013	2014	Average
Clear sky	5.7%	5.3%	6.8%	4.7%	5.6%
Water cloud	35.8%	29.5%	23.4%	7.6%	24.1%
Ice cloud	34.4%	40.7%	45.2%	47.3%	41.9%
Mixed cloud	24.1%	24.6%	24.6%	40.4%	28.4%

由图 1 和表 1 可知:北极地区上空出现的云主要是冰云(即卷云)和混合云为主,其概率平均值均大于 70%,冰云出现概率较高,高纬区和低纬区的平均概率分别为 43%和 41.9%,而水云和晴空的概率都相对较低,水云出现概率较低,晴空出现概率最低。对比北极低纬区和高纬区统计结果,云相态出现概率差异不大,均是冰云出现概率最大,其次为混合云,水云和晴空较少,北极高纬区卷云出现的概率大。不同于热带和中纬度地区,夏季有较强的天气扰动和充沛水汽,水云较多;北极地区夏季温度仍然很低,7 月份平均温度在 $-10 \sim 10^\circ\text{C}$ ,气温分布均匀,无强的扰动和对流,水汽很少,不利于水云的形成,可能是水云较少而冰云较多的原因之一。

### 2.2 北极地区卷云结构特性分析

#### 2.2.1 北极地区卷云云顶温度

利用 MOD06 数据获取云的结构特性参数,包括云顶温度、云顶压强和地表压强。MODIS 云产品中,云顶温度是从云顶压强、格点化气象产品温度廓线和  $11 \mu\text{m}$  通道数据计算得到,其云顶压强的反演是采用  $\text{CO}_2$  切片法,在反演高层云的云顶特性有很好的效果和精度<sup>[9]</sup>。对获取的云顶温度根据云相态进行筛选得到卷云的云顶温度,进行统计得到结果如

下:图 2 为卷云云顶温度的概率分布图,由图可知:北极地区夏季卷云云顶温度分布主要集中在 230~272 K(即-43~-5℃)区间内,对比北极低纬区和高纬区发现高纬区的云顶温度分布更集中。表 2 为北极地区云顶温度 2011~2014 年 7 月的平均统计值,可知北极高纬区的卷云云顶温度基本都比低纬区的要低,四年平均卷云云顶温度在北极低纬区为 249.40 K,北极高纬区为 247.03 K,北极高纬区卷云顶温度更低。

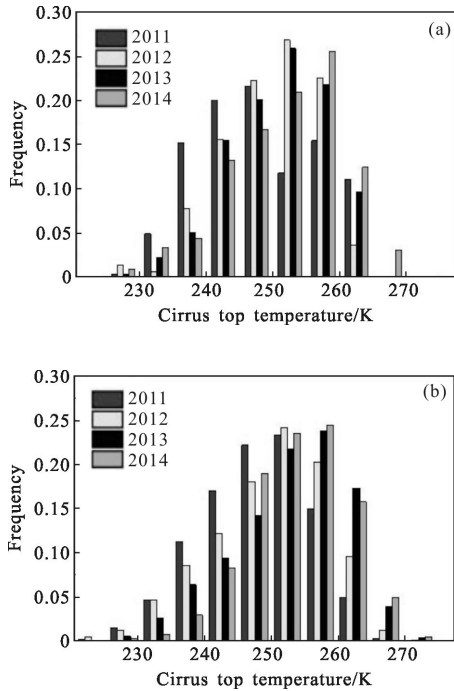


图 2 北极地区夏季卷云云顶温度概率分布

Fig.2 Probability distribution of cirrus clouds top temperature in the Arctic in summer

表 2 卷云云顶温度平均值(单位:K)

Tab.2 Average of cirrus clouds top temperatures

(Unit: K)

	2011	2012	2013	2014	Average
LA	246.36	247.68	250.57	253.02	249.4
HA	244.29	247.91	246.9	249.03	247.03

2.2.2 北极地区卷云云顶高度

由 Stratospheric Aerosol and Gas Experiment Program(SAGE)给出的按经纬度分布的云高度可知:纬度越高,卷云高度越低。之前研究认为,典型卷云中心高度在当地对流层顶高度 3/4 左右。利用所研究的

北极地区附近的探空站点探测值可得到夏季温度垂直廓线图,可知该地区对流层顶高度在 10 km 左右,则可以理论估计该地的卷云中心高度约为 7.5 km。

假设卷云温度等于卷云云层所在高度处大气的温度<sup>[10]</sup>,由大气压强随高度的变化关系可以粗略地得到卷云云顶高度。由大气压强随高度变化

$$\frac{dp(z)}{dz} = -\rho(z)g \tag{2}$$

按理想气体定律:

$$\rho(z) = \frac{Mp(z)}{PT(z)} \tag{3}$$

由公式(2)、(3)可以得到:

$$\frac{dp(z)}{dz} = -\frac{Mgp(z)}{RT(z)} \tag{4}$$

对公式(4)积分可得到卷云云顶高度为:

$$Z-Z_0 = -\frac{RT(z)}{Mg} \ln \left[ \frac{P(z)}{P_0} \right] \tag{5}$$

式中: $T(z)$ 为几何高度  $z$  处大气温度; $R$ 为克分子气体常数; $M$ 为空气平均分子量(28.97 g/mol); $\rho(z)$ 为几何高度  $z$  处空气质量密度。

对 2011~2014 年的 7 月每天的卷云高度进行统计和日平均分析,图 3 为卷云云顶高度的分布概率,表 3 为四年的北极高纬区和低纬区的卷云云顶高度

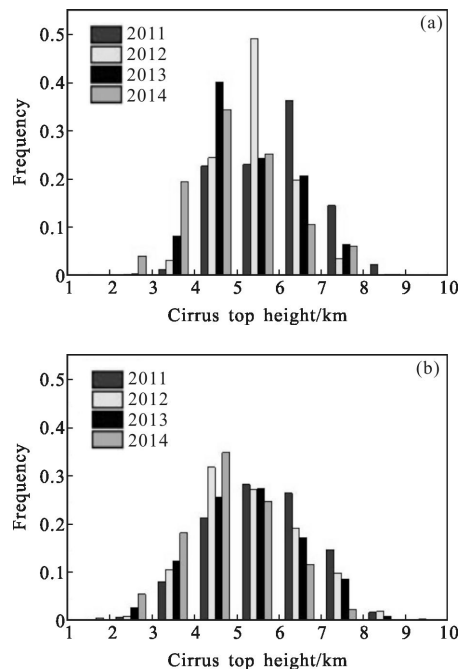


图 3 北极地区夏季卷云高度概率分布

Fig.3 Probability distribution of cirrus clouds top height in the Arctic in summer

的月平均值,可以得知:北极地区上空夏季卷云云顶高度主要分布在2~8.5 km,在4~6 km 左右卷云发生概率最大。北极地区高纬区和低纬区的卷云云顶高度平均值分别为:5.81 km 和 5.54 km,北极地区卷云云顶高度随纬度变化不大,高纬区稍高,但二者均低于理论值 7.5km。不同于中纬度的卷云高度 6~9 km 和热带地区的卷云高度 11~13 km,高纬度的北极地区夏季卷云高度明显低于中低纬度地区,这也与卷云平均高度随纬度增大而降低相符。

表 3 卷云云顶高度平均值(单位:km)

Tab.3 Average of cirrus clouds top height (Unit:km)

	2011	2012	2013	2014	Average
LA	5.99	5.76	5.54	4.87	5.54
HA	6.49	5.78	5.77	5.20	5.81

2.3 北极地区卷云光学参数统计

MODIS 云参数反演算法是基于 Nakajima 和 King 提出用可见光和近红外数据反演云光学厚度和有效粒径的算法得到。对 MODIS 云产品 MOD06 数据读取,并根据所研究区域内的云相态判断得到对应的卷云光学参数,包括卷云光学厚度、有效粒径等。

卷云对大气辐射的影响主要是两方面:一方面卷云反射少量太阳短波,造成大气降温;另一方面卷云阻止地球长波对外辐射,加热大气,因而产生了温度反馈效应。而卷云光学厚度则直接影响卷云对大气辐射的反射、透射和热辐射。卷云光学厚度大,对太阳短波反射强,对长波吸收也强,向外的辐射也强;相反卷云光学厚度小,对短波反射弱,对长波吸收也弱,向外的辐射也弱。卷云的净辐射强迫的正负性还有很多不确定性,取决于卷云的微物理特性和宏观物理特性,如有效粒径、光学厚度等,因此对卷云光学厚度的分布研究有很大意义。

图 4 为 2011~2014 年 7 月北极高纬区和低纬区卷云光学厚度的概率分布图,从图 4 可知:这四年北极高纬区夏季卷云光学厚度分布在 0~20 的范围,最可几值的范围在小于 10 的概率大。大于 20 的卷云光学厚度出现的概率很小,而北极低纬区的卷云光学厚度主要分布在 0~40,而集中出现在 0~20。对比北极低纬区和高纬区,高纬度的光学厚度较小的卷云出现概

率比低纬区大。

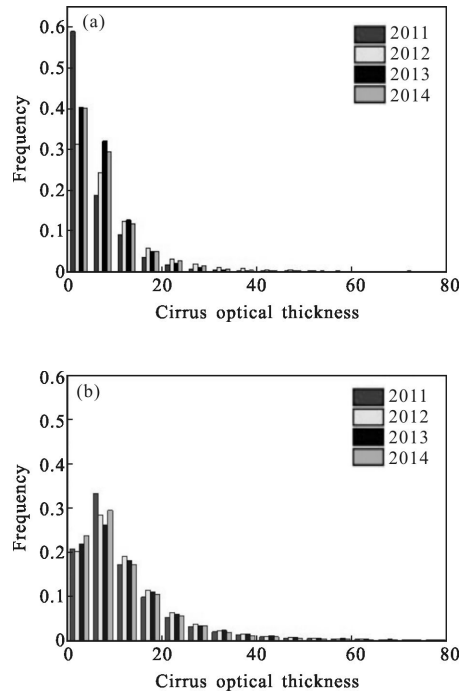
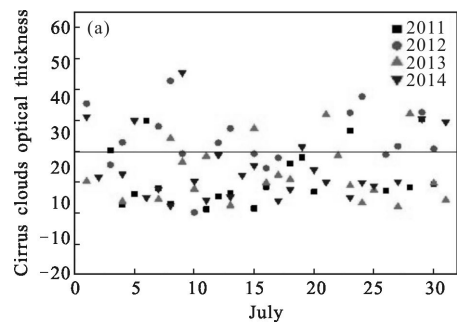


图 4 北极地区夏季卷云光学厚度概率分布

Fig.4 Probability distribution of cirrus clouds optical thickness in the Arctic in summer

图 5 为北极地区 2011~2014 年夏季卷云光学厚度日平均值分布,可以看出卷云日平均光学厚度的波动范围在 0~40,对四年的 7 月份数据进行处理,剔除缺省值和无效值,得到这四年夏季 7 月份的月平均值,如表 4 所示。北极低纬区和高纬区的卷云光学厚度平均值分别为:17.37 和 19.76,高纬区光学厚度稍高于低纬区。根据已有的研究成果,卷云根据光学厚度可划分为:光学厚度  $\tau < 0.03$  为不可见薄卷云,  $0.03 < \tau < 0.3$  为薄卷云,  $0.3 < \tau < 3.0$  为不透明卷云<sup>[5]</sup>。相较于中纬度地区的卷云光学厚度而言,北极地区的卷云光学厚度较大,大部分为不透明的厚卷云。



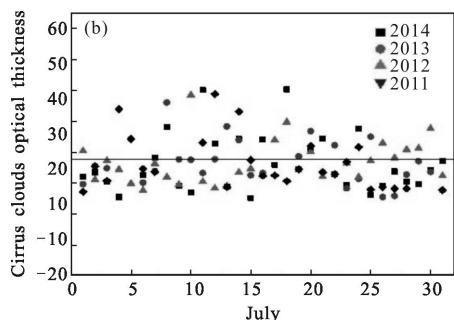


图 5 夏季卷云光学厚度日平均值分布

Fig.5 Daily average distribution of cirrus clouds optical thickness

表 4 卷云光学厚度平均值

Tab.4 Average of cirrus clouds optical thickness

	2011	2012	2013	2014	Average
LA	19.14	16.13	19.17	15.02	17.37
HA	16.16	24.13	21.01	17.75	19.76

### 2.4 北极地区卷云物理特性统计

图 6 为北极高纬区和低纬区的夏季卷云有效粒径大小的出现概率,可以看出:北极地区卷云在高纬区和低纬区其有效粒径主要分布都是在 5~40  $\mu\text{m}$ ,有效粒径在 10~20  $\mu\text{m}$  之间出现的概率最大,有效粒径大于 50  $\mu\text{m}$  的概率很小,小于 5  $\mu\text{m}$  的概率也很小。

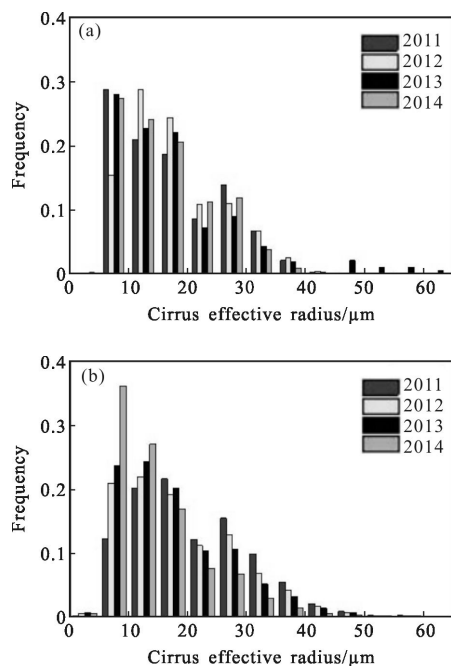


图 6 北极地区夏季卷云有效粒径大小概率分布

Fig.6 Probability distribution of cirrus clouds effective radius in Arctic in summer

图 7 为北极高纬区和低纬区 2011~2014 年夏季卷云有效粒径日平均值分布,可以看出:卷云日平均有效粒径的波动范围在 5~35  $\mu\text{m}$ , 北极高纬区和低纬区四年平均值分别为 20.09  $\mu\text{m}$  和 19.92  $\mu\text{m}$ ,高纬区略高于低纬区。中纬度地区卷云有效粒径出现概率在 40~50  $\mu\text{m}$  最大,北极地区相较于中纬度地区的卷云有效粒径,北极地区卷云有效粒径偏小,且北极地区卷云粒子大小变化较大。表 5 为卷云有效粒径大小。

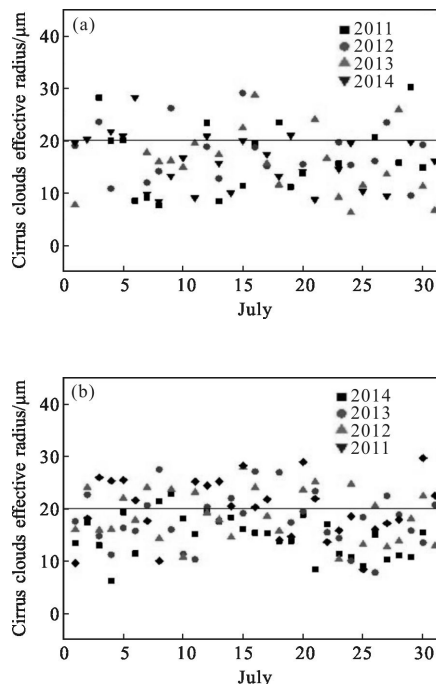


图 7 夏季卷云有效粒径日平均值分布

Fig.7 Daily average distribution of cirrus clouds effective radius

表 5 卷云有效粒径大小(单位:  $\mu\text{m}$ )

Tab.5 Average of cirrus clouds effective radius

(Unit:  $\mu\text{m}$ )

	2011	2012	2013	2014	Average
LA	22.69	20.98	20.35	15.68	19.92
HA	24.07	18.21	20.32	17.74	20.09

### 2.5 北极地区卷云有效粒径与云高关系初探

前人研究成果表明:中纬度地区,卷云的有效粒径和卷云高度有关,卷云云顶高度越高,卷云有效粒径越小,云顶高度越低,卷云有效粒径越大。由于冰晶尺度分布和温度的关系:温度越低,冰晶越小,温度越高,冰晶越大<sup>[2]</sup>。对中低纬度地区,卷云云顶高

度越高,温度越低,卷云有效粒子越小;卷云云顶高度越低,温度越高,卷云有效粒子越大<sup>[7]</sup>。而该研究对象为北极地区,北极地区与中纬度地区相比,温度更低,卷云云顶高度更低,天气特征和扰动也有很大差异,因此中纬度地区卷云特性与北极地区有很大的差异。

分别对这四年的 7 月北极低纬区和高纬区的卷云有效粒径和卷云云顶高度进行线性拟合,结果如图 8 所示。从拟合结果可以看出:北极高纬区和低纬区的卷云高度与卷云有效粒径大小均呈正相关,且北极高纬区的拟合相关系数较低纬区更大,其相关性更显著。对比分析北极高纬区和低纬区的统计结果发现:卷云云顶高度越高,而卷云有效粒径越大,云顶高度越低,卷云有效粒径越小,卷云云顶高度和有效粒径呈正相关,且这种相关性随纬度增大更加显著。

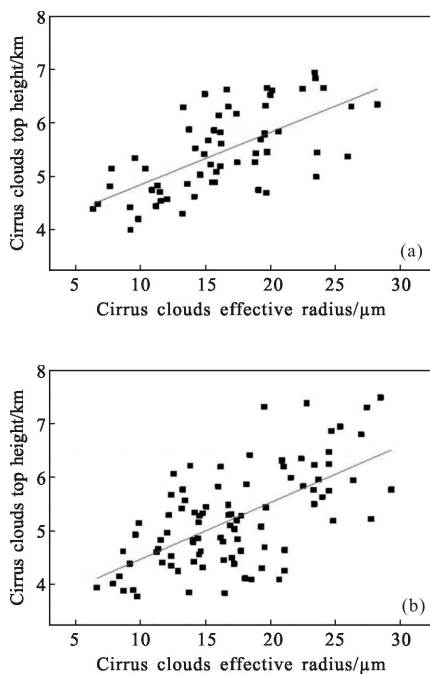


图 8 北极夏季卷云有效粒径和卷云高度相关性

Fig.8 Correlation between cirrus clouds effective radius and cirrus top height

相对于中纬度地区的随卷云云顶高度增大,卷云有效粒径减小的情况不同,在北极地区卷云云顶高度高时,卷云有效粒径大;卷云云顶高度低时,卷云有效粒径小。其可能原因为以下两种:一是中纬度地区的云形成多是由于较强的对流上升运动,在

上升过程中,大的粒子沉下去,小的粒子被抬升较高。而北极地区的无强对流运动,上升运动较弱,就没有使得卷云大粒子下沉,小粒子的抬升过程。二是北极地区对流层温度低,形成卷云冰晶粒子除了在 $-36\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上的异质核化粒子外,还有一部分海盐溶液、硫酸等粒子在极低温条件下同质核化呈冰晶粒子,而这些高空小的冰晶粒子继续充当凝结核作用,使得上空的卷云粒子不断凝结增长。在北极地区随纬度越高,这种区域特性越显著,卷云粒径随云顶高度增加情况越显著。

### 3 结 论

文中选取北极同一经度不同纬度两块区域(即北极高纬区和北极低纬区)为研究对象,运用 MODIS 探测器二级云产品 MOD06 数据,获得卷云各项特性参数,并从中得到了卷云出现概率分布、卷云云顶高度、卷云云顶高度、卷云有效粒径、卷云光学厚度的概率分布和统计平均特性值,探究了北极地区卷云云顶高度与卷云有效粒径的关系。

研究结果发现:北极地区夏季上空主要是卷云和混合云,水云和晴空状况比较少,卷云出现的概率最高。夏季卷云的云顶温度主要分布在 $230\sim 272\text{ K}$ ,夏季卷云云顶高度分布在 $2\sim 8\text{ km}$ ,典型高度在 $4.5\sim 6\text{ km}$ 左右。卷云光学厚度主要分布在小于 $7.5$ 范围,大于 $20$ 出现的概率较低;卷云有效粒径主要分布在 $5\sim 40\text{ }\mu\text{m}$ ,其中在 $10\sim 20\text{ }\mu\text{m}$ 的有效粒径大小出现的概率最大。对比北极高纬区和低纬区的结果,随着纬度增大,卷云出现概率增加,卷云云顶温度降低,卷云高度增加,卷云有效粒径增大,卷云光学厚度增大。北极地区卷云云顶高度与卷云有效粒径的关系:卷云云顶高度高时,卷云有效粒径大,云顶高度低时,有效粒径小,卷云云顶高度与卷云有效粒径呈一个正相关关系。这与中纬度地区卷云有效粒径和云顶高度的负相关关系正好相反,相关工作将进一步累计数据,分析更多卷云参数,并结合 FY-3、MERSI 等同类产品深入剖析其原因。

### 参 考 文 献:

[1] Liou K N. Influence of clouds and climate processes: A global perspective [J]. *Mon Weather Rev*, 1986, 114: 1167-1198.

- [2] Liou K N. An Introduction To Atmospheric Radiation(Second Edition) [M]. Guo Caili, Zhou Shijian Translated. Beijing: China Meteorological Press, 2004: 174–181.
- [3] Wylie D P, Menzel W P, Woolf H M, et al. Four years of global cirrus cloud statistics using HIRS [J]. *Climate*, 1994, 7(12): 1972–1986.
- [4] Nazaryan H, McCormick M P, Menzel W P. Global characterization of cirrus clouds using CALIPSO data [J]. *J Geophys Res*, 2008, 113(D16): 1–11.
- [5] Sassen K, Wang Z, Liu D. Global distribution of cirrus clouds from CloudSat/Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observations(CALIPSO) measurements[J]. *J Geophys Res*, 2008, 113: D00A12.
- [6] Min Min, Wang Pucui, Zong Xuemei. Cirrus cloud distribution over China from spaceborne lidar observations[J]. *Climatic and Environment Research*, 2008, 16(3): 301–309. (in Chinese)  
闵敏, 王普才, 宗雪梅. 中国地区卷云分布特征的星载激光雷达遥感[J]. *气候与环境研究*, 2008, 16(3): 301–309.
- [7] Cao Yanan, Wei Heli, Xu Qingshan. Statistical analysis of cirrus properties in Beijing region based on MODIS cloud products [J]. *Journal of Atmosphere and Environmental Optics*, 2013, 8(4): 271–281. (in Chinese)  
曹亚楠, 魏合理, 徐青山. 基于 MODIS 云产品的北京地区卷云特性统计分析 [J]. *大气与环境光学学报*, 2013, 8(4): 271–281.
- [8] Cao Yanan, Chen Xiuhong, Wei Heli. Study of the effects of cirrus altitude on the atmospheric infrared spectral radiation [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41 (8): 1965–1970. (in Chinese)  
曹亚楠, 陈秀红, 魏合理. 卷云高度对大气的红外光谱辐射影响的研究[J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(8): 1965–1970.
- [9] Menzel W P, Frey R A, Zhang H, et al. 2008: MODIS global cloud-top pressure and amount estimation: algorithm description and results [J]. *Jour of App Meteor and Clim*, 2008, 47(4): 1175–1198.
- [10] Shi Guangyu. Atmospheric Radiance [M]. Beijing: Science Press, 2007: 6–7. (in Chinese)  
石广玉. 大气辐射学[M]. 北京: 科学出版社, 2007: 6–7.