

范梦奇,王文彩,韩永清,等.基于 CloudSat 卫星资料的青岛地区云特征研究[J].海洋气象学报,2019,39(1):76-85.
FAN Mengqi, WANG Wencai, HAN Yongqing, et al. Study on cloud characteristics in Qingdao area based on CloudSat data[J].
Journal of Marine Meteorology, 2019,39(1):76-85. DOI:10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2019.01.008. (in Chinese)

基于 CloudSat 卫星资料的青岛地区云特征研究

范梦奇¹,王文彩¹,韩永清²,盛立芳¹,周杨¹

(1.中国海洋大学海洋与大气学院,山东 青岛 266100;2.山东省气象台,山东 济南 250031)

摘要: 利用 2007—2010 年 CloudSat 卫星资料,对青岛地区 (35.583°~37.150°N, 119.050°~121.000°E) 云特征参量进行了统计分析。结果表明:单层云出现频率为 39% 左右,多层云主要以 2 层云为主,出现频率均为 18% 左右;月平均云量在 64.1%~77.6% 之间,从 1 月至 12 月呈递减趋势;卷云、高层云、高积云和层积云平均频率之和为 86.5%,其他类型的云出现的频率均不高;云水路径在 4、5 月和 8、9 月较大,分别达到了 200 g·m⁻² 以上和 350 g·m⁻² 以上;云液态有效粒子半径在 6~16 μm 之间,春、夏、秋季高值区位于云体中部至上部;云冰晶有效粒子半径在 20~120 μm 之间,高值区位于云体中部至底部;青岛南部,即近海区域云有效粒子半径和云水含量大于北部。

关键词: CloudSat; 青岛; 云特征; 宏观; 微观

中图分类号: P412.27 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-3599(2019)01-0076-10

DOI: 10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2019.01.008

Study on cloud characteristics in Qingdao area based on CloudSat data

FAN Mengqi¹, WANG Wencai¹, HAN Yongqing², SHENG Lifang¹, ZHOU Yang¹

(1. College of Oceanic and Atmospheric Sciences, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 2. Shandong Meteorological Observatory, Jinan 250031, China)

Abstract The parameters of cloud characteristics in Qingdao area (35.583~37.150°N, 119.050~121.000°E) are analyzed using the CloudSat 2B dataset from 2007 to 2010. The results show that the frequency of single-layer cloud is about 39% and multilayer cloud is mainly double-layer cloud whose frequency is about 18%; the monthly mean cloud fraction is between 64.1% and 77.6%, which shows a declining trend from January to December; the total average frequency of cirrus, altostratus, altocumulus, and stratocumulus is 86.5%, while the frequencies of other types of cloud are all not high; the cloud water path is relatively large in April/May and August/September, reaching over 200 g·m⁻¹ and 350 g·m⁻¹, respectively; the effective particle radius of liquid cloud is between 6 and 16 μm and the high value area in spring, summer, and autumn is located from middle to upper part of the cloud; the effective particle radius of ice cloud is between 20 and 120 μm and the high value area is located from bottom to middle part of the cloud; furthermore, the cloud effective particle radius and cloud water content in the southern offshore areas are greater than those in the northern area of Qingdao.

Key words CloudSat; Qingdao; cloud characteristics; macrocosm; microcosm

收稿日期:2018-10-13; 修订日期:2018-12-18

基金项目:国家自然科学基金项目(41505013,41605114);山东省自然科学基金项目(ZR2016DB02)

作者简介:范梦奇,女,硕士研究生,主要从事人工影响天气和卫星资料应用方面的研究,15762254653@163.com。

通信作者:王文彩,女,博士,副教授,主要研究方向为大气辐射与遥感,wangwc@ouc.edu.cn。

引言

云是地球上庞大的水循环的产物,对天气、气候变化、辐射能量的平衡和人工影响天气具有非常重要的作用^[1-3],因此有必要充分认识当地云系垂直结构和宏、微观特征。随着航天技术的发展,观测范围广、时间连续性高的卫星遥感观测已成为研究云的重要依托手段,国内外学者运用卫星资料已经对云开展了许多工作。WEISZ et al.^[4]、KAHN et al.^[5] 和 STUBENRAUCH et al.^[6] 利用 AIRS、CALIPSO 和 CloudSat 资料对云顶高度、云类型等云特征参量进行了对比分析。基于国际卫星云气候计划 ISCCP D2 的月平均资料,李跃清和张琪^[7] 对西南地区雨层云、高层云、深对流云与地面降水量、雨日的关系进行了研究。陈勇航等^[8] 对西北不同区域不同类型云的云量和云水路径的时空分布及其与降水的关系进行了研究,发现云水路径值较大的层状云类的云量与降水量成正相关。李积明等^[9-10] 利用 CALIPSO 卫星激光雷达的云数据,研究了东亚地区云的垂直分布特征。CHEN et al.^[11] 利用 MODIS 和 CERES 资料研究中国西北四个敏感地区的云液态水路径的时空变化特征,发现即使是在同一气候地区,云液态水路径的季节和年变化都很显著。另外,有一些学者分别对西北的祁连山、新疆三大山区、黄土高原和宁夏地区的云水资源进行了更细致的研究。李兴宇等^[12] 利用 ISCCP 云水路径资料分析了中国地区空中云水资源的分布特征、变化趋势以及与大气环流和湿度场的关系,发现中国地区云水含量在 6 月最高,10 月最低,整体以增加为主。

国内外学者先后利用 CloudSat 卫星资料进行了相关研究^[13-15]。LI et al.^[16] 利用多模式模拟的 CMIP5 数据资料和 CloudSat 卫星资料进行对比,发现两者的云水分布具有一致性。SASSEN et al.^[17] 研究了全球范围卷云的高度、厚度和季节分布频率分布情况,发现全球平均卷云发生率为 16.7%。SASSEN and WANG^[18] 计算出全球不同类型云的平均云量分布,并对比了 CloudSat 卫星、地面观测和 ISCCP 的陆地和海洋的云分类频率差异。耿蓉等^[19] 利用目前几种较为常用的卫星观测资料 (ISCCP、MODIS 和 CloudSat) 和再分析资料 (CFSR 和 ERA-Interim),对中国及其周边地区的多种水凝物变量的气候态水平及垂直分布特征进行了比较研究,发现 MODIS 和再分析资料在总水凝物含量上

一致性很高。周毓荃和赵姝慧^[20] 探讨了 CloudSat 卫星在天气和云观测分析中的应用。基于 CloudSat 卫星产品针对各地云特征参量的研究也十分丰富。尚博等^[21] 结合地面常规观测资料,研究了华北和江淮区域云的垂直结构和降水云识别方法。陈超等^[22] 利用 2B-CLDCLASS-LIDAR 云分类资料,对华北地区各类云的宏观特征进行了统计分析。赵阳等^[23] 对全球顶层云云参量出现的频率分别进行了统计,并对比分析了 FY-2D 和 CloudSat 的云分类资料,发现两者对于卷云的识别一致性良好。王帅辉等^[24] 分析了中国及周边地区的云垂直结构分布特征,并根据气候特征的地域差异从该区域选出 8 个子区域,逐区统计了云的垂直结构特征。杨大生和王普才^[25] 分析了中国地区夏季云水含量的垂直分布特征,为天气和气候模式改进、人工影响天气及云-辐射相互作用提供了重要的基础信息。杨冰韵等^[26] 对全球的云微物理和云光学参数特征分布进行了统计分析,并研究了云微物理性质对光学性质的影响。霍娟^[27] 结合 CALIPSO 对比了陆地区、近海区和远海区中云的云特征差异,发现海洋地区平均冰晶有效粒子半径值高于陆地,总体呈现随高度增加而减少的特征。

以上研究所用的 ISCCP 数据集由于白天和夜间采用的观测通道不同,使用其得到的云量日变化特征的准确性可能会受到一定程度的影响^[28],晴空辐射的误差也使云检测的正确性存在极大的不确定性^[29]。CALIPSO 极轨卫星上搭载的双波段云一气溶胶正交偏振激光雷达 CALIOP 的探测波(如绿波段,532 nm)对云粒子包括气溶胶粒子非常敏感,但是由于波长短,导致其穿不透比较深厚的云层,并且对于低云的探测不够准确^[10]。而且研究区域多集中在我国西北、华北地区等地。青岛市由于海陆分布和地形等原因,降水量少且不易蓄水,特别是近 30 年来,青岛市城市化进程不断加快,对水的需求量越来越大,而针对半岛城市群云水资源分布特征的研究却非常少。本文利用 2007—2010 年 CloudSat 卫星产品 2B 数据集,对青岛地区 (35°~37°N, 119°~121°E) 云的宏、微观和垂直结构特征以及云水资源分布特点进行分析,对进一步开发空中云水资源具有一定的科学指导意义。

1 资料介绍

研究区域为青岛地区 (35.583°~37.150°N, 119.050°~121.000°E)。所用数据为美国国家宇航

局(NASA)于2006年发射的CloudSat极轨卫星观测资料,时间范围为2007年1月—2010年12月共4 a,3—5月为春季,6—8月为夏季,9—11月为秋季,12月—次年2月为冬季。

CloudSat卫星作为“下午系列星群”(“A-Train”)的一员,对全球气象、气候的观测起着非常重要的作用。卫星位于高度为705 km的太阳同步轨道上,每天绕地球14~15个轨道。一个轨道的扫描长度大约是40 022 km,每轨有36 383个星下像素点,每个像素点的星下点波束覆盖宽度(footprint)的沿轨分辨率是2.5 km,横轨分辨率是1.4 km,垂直分辨率是500 m。CloudSat卫星上的主要有效载荷只有一个94 GHz,即3 mm波云剖面雷达(cloud profiling radar, CPR),可以准确探测到云层内部的垂直结构信息。2级云产品包含云分类,雷达剖面上水凝物水含量、数浓度、有效半径,辐射通量,云量,观测和反演的云光学厚度等。本文分析的云参量包括云层数、云量、云类型(包括卷云、高层云、高积云、层云、层积云、积云、深对流云和雨层云)、云高度、液/冰态水含量(LWC/IWC)、液/冰水路径(LWP/IWP)和液态/冰晶有效粒子半径(LER/IER)。

2 云宏观特征

2.1 云层数

云垂直层数是云宏观结构特征的基本参数,也是大气环流模式中的重要参数,对地气系统的辐射有重要影响。2B-CLDCLASS-LIDAR产品中提供云层数(Cloudlayer)数据,表示每条垂直廓线探测的云层数,选出时间范围内经过研究区域的所有轨道中的全部廓线,定义总廓线数为 N_{all} ,然后根据Cloudlayer数据中各云层数廓线出现的总数,定义为 $N_i(i=1,2,3,4)$,则频率定义为 $N_i/N_{all}(i=1,2,3,4)$ 。

图1给出了青岛地区4个季节1~4层云的发生频率,由于超过4层的频率仅为2%左右,因此图中只给出1~4层云系统出现的频率。可以看出,青岛地区云层数的季节变化不显著,各季节主要以单层云为主,4季出现频率分别为39.72%、39.82%、39.62%和37.93%。2层云次之,4季出现频率分别为18.66%、18.80%、18.59%和18.13%。3层云4季出现频率依次为5.53%、5.46%、5.56%和5.95%。多层云系统(2层及以上)4季出现频率之和分别为25.42%、25.48%、25.42%和25.59%。这

与陈超等^[30]对华北地区单层云和多层云的统计结果基本一致,差别在于青岛地区单层云出现频率较华北地区略低,三层云及以上出现频率略高。

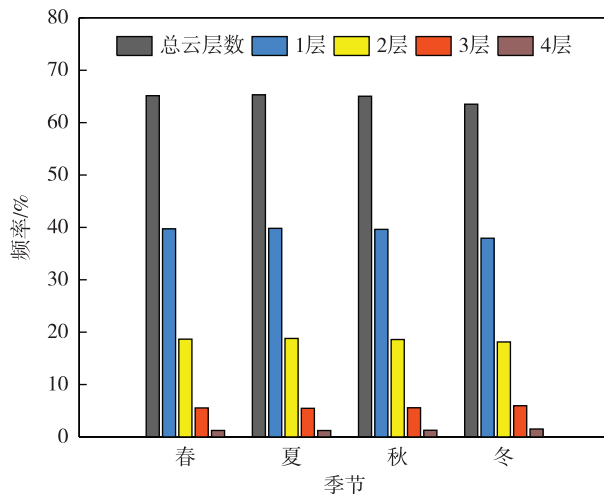


图1 青岛地区四季云层数出现频率

Fig. 1 Frequency of number of total layers, single-layer cloud, double-layer cloud, three-layer cloud, and four-layer cloud in 4 seasons in Qingdao area

2.2 云量

云量是影响气候的重要因子之一。2B-GEOPROF-LIDAR产品提供云量(Cloud Fraction)数据,表示垂直方向上每层的云量。根据青岛地区2007—2010年逐月平均云量统计结果(图2a)可知,从1月至12月,平均云量整体呈递减趋势,2月最高(77.6%),11月最低(64.1%)。由图2b可以看出,7月,云发展最为旺盛,高度最高,可达11 km,云量高值区位于6.5~8 km处,低值区位于1~3 km处;12月,云发展程度最弱,高度在6 km左右,云量高值区位于2~5 km处。夏、秋季节,尽管云的高度较高,但是所占比例较少,所以总体的云量平均值不高;而1—4月,云量高值区较厚,在3.5~6.5 km处,厚度达3 km,高于夏季云量高值区的厚度,所以总体的云量平均值较高。青岛南邻黄海,水汽充沛,所以总云量远高于同纬度内陆地区。前人研究^[31-32]表明,平均气温和太阳辐射是影响总云量的重要因素,与总云量呈负相关关系。冬季相对夏季来说,气温低、太阳辐射小,故冬季总云量高于夏季。

2.3 不同云类月变化

不同种类的云对降水产生的贡献不同。利用云类型(Cloud Layer Type)数据,定义所有有云出现的廓线总数为 N_{all} ,然后根据 N_{all} 中各类云出现的总数,定义为 $N_i(i=1,2,\dots,8)$,不同的数字代表不同

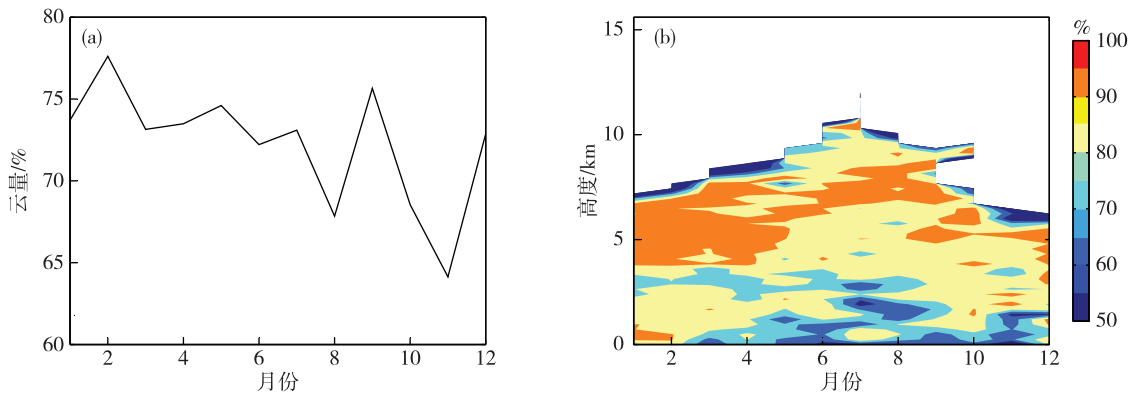


图 2 青岛地区月平均云量(a)和逐层月平均云量(b)
Fig.2 Monthly mean cloud fraction (a) and monthly mean layer-by-layer cloud fraction in Qingdao area (b)

种类的云,每类云出现的频率定义为 $N_i / N_{all} (i=1, 2, \dots, 8)$ 。卷云属于高云,形成于对流层较冷的部分;高层云,高积云属于中云,形成于 2.5~6 km 的高空;层云,层积云,积云,雨层云属于低云,在 2.5 km 以下的大气中形成,多产生降水。深对流云是由于热力原因或动力原因在不稳定的大气层内产生对流所形成的积状云。由图 3 可以看出,卷云频率在 5、6 月间最高,达到 50% 以上;冬季频率较低,降至 20% 以下;高层云频率在 1 月达到 60% 以上,夏季频率较低,在 10% 以下,秋、冬季频率逐渐增大;高积云的频率变化与高层云相反,春、夏季频率较高,在 20%~30% 之间,秋、冬季频率较低,在 20% 以下;层云频率很低,仅在 11 月达到 10% 左右;层积云峰值在 3 月达到 50%,7 月和 11 月也分别达到 20% 和 32% 左右,其他月份频率不高;积云的变化较为平缓,峰值出现在 10 月,达到 26%,其他月份基本在 10% 以下;雨层云在 1 月、2 月、4 月和 8 月出现,频率均在 20% 以下;对流云仅在 6 月和 7 月出现,频率在 6% 以下。

2.4 云类型季节统计

图 4 和表 1 是不同云类型在青岛地区出现的全年和不同季节的频率统计情况,频率的定义同 2.3 节。可以看出,卷云出现的年平均频率最高,约 34%,春季到冬季呈递减趋势,其次为高层云和高积云,出现的年平均频率均为 20% 左右,冬季高层云出现频率高,达 47.7%,再次为层积云,年平均频率为 12%,层积云各季节占比远大于层云,春、夏季达到 15.7%。4 种类型的云,年平均频率之和为 86.5%。层云是在大气稳定的条件下,因夜间强辐射冷却或乱流混合作用,水汽凝结或由雾抬升而形成,厚度很薄,由水滴组成,太阳升起之后,气温逐

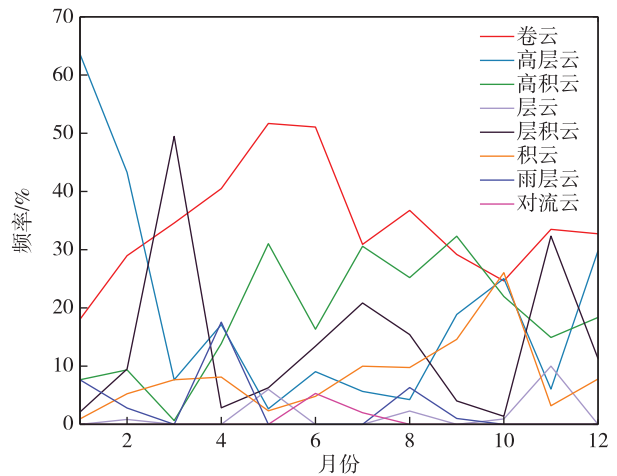


图 3 青岛地区不同云类频率月际变化
Fig.3 Monthly variation of frequency of different types of cloud in Qingdao area

渐升高,稳定层被破坏,层云也逐渐消散。所以卫星探测到的层云出现频率较低,在春季和秋季占比约为 2%,夏季和冬季仅占 0.8% 和 0.3%;积云年平均出现频率为 8.6%,秋季占比大于其他各季节,达到 16.1%,其转化为积雨云后,有利于降水的产生。雨层云春季出现频率为 6%,远高于其他三个季节,秋季出现频率很低,仅为 0.6%。深对流云基本仅出现在对流活动强的夏季,频率为 2.5%。

2.5 云顶高度、云底高度和云厚

图 5 是青岛地区不同季节不同类型云的云顶高度、云底高度以及云厚度平均值的统计情况。可以看出,各个类型云的季节变化较显著,除低云(层云、层积云、积云)外,均为夏季发展旺盛,云顶高度高,云厚度大。对流云云顶高度和云厚度最大,平均云顶高度和平均厚度分别达 11.2 km 和 9.6 km,雨层云发展强度略低于深对流云,分别是 9.5 km 和

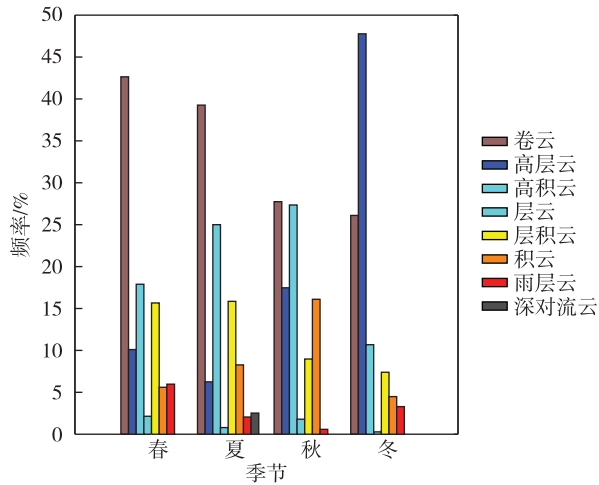


图4 青岛地区不同类型云频率季节变化

Fig.4 Seasonal variation of frequency of different types of cloud in 4 seasons in Qingdao area

7.9 km,二者明显高于其他类型云。对于其他类型云而言,卷云的平均高度最高,达10.6 km,高层云的平均云厚度最大,达4.3 km。层云、层积云和积云平均高度差异不大,云体均在2 km左右,且云厚在0.7~1.2 km之间。其中,春、秋季积云明显高于其他季节。这与赵阳等^[23]对全球顶层云各季节不同类型云的云层高度统计结果基本一致,差别在于青岛地区春季暖空气含有较多水汽,易形成暖锋,高层云和雨层云多为暖锋锋面云系的组成成分^[33],所以两类云发展较为旺盛。

表1 青岛地区不同类型云出现频率季节统计

Table 1 Seasonal and annual statistics of frequency of different types of cloud in 4 seasons in Qingdao area %

云类型	春季	夏季	秋季	冬季	全年
卷云	42.6	39.2	27.7	26.1	33.9
高层云	10.1	6.2	17.5	47.7	20.4
高积云	17.9	25.0	27.3	10.7	20.2
层云	2.1	0.8	1.8	0.3	1.3
层积云	15.7	15.9	9.0	7.4	12.0
积云	5.6	8.3	16.1	4.5	8.6
雨层云	6.0	2.1	0.6	3.3	3.0
对流云	0	2.5	0	0	0.6

3 云微观特征

3.1 云水路径

云中水凝物含量(CWC,单位为 $g \cdot m^{-3}$)描述云内液相或固相的各种粒子水含量的总和。从积分

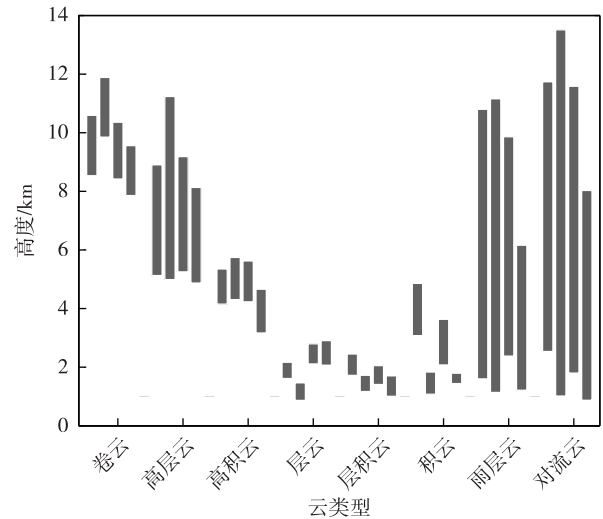


图5 青岛地区不同类型云云高度和厚度季节平均(每种云类型的条形统计从左到右依次为春、夏、秋、冬)

Fig.5 Seasonal mean height and thickness of different types of cloud in Qingdao area (the bars of each type of cloud refer to statistics in spring, summer, autumn, and winter from left to right)

的角度看,云水路径(CWP,单位为 $g \cdot m^{-2}$)表示单位面积垂直空气柱中所有水凝物的总量,为液态水路径(LWP,单位为 $g \cdot m^{-2}$)和冰水路径(IWP,单位为 $g \cdot m^{-2}$)之和。图6给出了青岛地区云水路径、液态水路径和冰水路径2007—2010年逐月4年平均的时间变化序列。可以看出,云水路径月变化显著,呈现明显的双峰结构,在4、5月和8、9月分别达到了 $200 g \cdot m^{-2}$ 和 $350 g \cdot m^{-2}$ 以上,而在10—12月间却小于 $100 g \cdot m^{-2}$ 。冰水路径月变化不明显,除10—12月偏低,其他月份均在 $50 g \cdot m^{-2}$ 左右;液态水路径在两峰值时明显大于冰水路径,其他月份则相差不大。

洪光等^[34]对青岛地区大气中水汽含量及输送进行了研究。青岛处于东亚季风气候带中,3—4月,大气环流由冬季向夏季转换,暖湿空气开始活跃,400 hPa以下风向由北风转为南风,暖湿空气不断地从海上吹往青岛。中国东部地区,特别是沿海地区4月平均风速较大,青岛4月平均风速为全年之冠,青岛上空平均年水汽净输入量在4月增大,云水含量和降水逐渐增多,但此时副热带高压脊线仍在 $20^{\circ}N$ 以南,水汽输送偏南。7—8月为盛夏季节,气温高,湿度大,水汽充足,西太平洋副热带高压继续北抬,8月中下旬到达最北的位置,更有利于西南暖湿气流向北方输送,此时青岛上空平均年水汽净

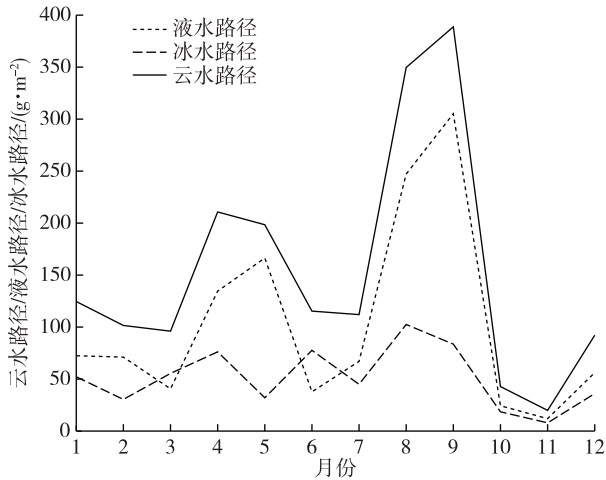


图 6 青岛地区云水路径、液水路径、冰水路径月平均
Fig.6 Monthly mean of cloud/liquid/ice water path in Qingdao area

输入量达到一年中的峰值,8—9月,云水含量达到 $350 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$,为一年中的峰值。10月和11月,400 hPa以下风向由南风转为北风^[33],水汽净输入量骤减,云水含量达到了低值。

3.2 云液态水含量

云中液态水是大气中水循环和地-气系统能量中的一个重要参量,它对辐射能量平衡、气候变化反馈和一些天气过程的发生发展,都起着十分重要

的作用。

图 7 给出了青岛地区 2007 年 1 月—2010 年 12 月的季节纬圈平均液态水含量的垂直分布。平均液态水含量高值区(大于 $200 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$)基本分布在液态水含量高度层的中部至底部。春季、夏季和秋季,平均液态水含量高值区(大于 $200 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$)分别在 $1 \sim 6 \text{ km}$ 、 $2 \sim 6 \text{ km}$ 和 $1 \sim 6 \text{ km}$ 之间,平均液态水含量值分别为 $170.07 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 、 $168.01 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $209.64 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。冬季,垂直方向上平均液态水含量分布在 $1 \sim 5 \text{ km}$ 之间,平均液态水含量值为 $162.03 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$,平均液态水含量高值区(大于 $200 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$)在 $1 \sim 3 \text{ km}$ 之间,且平均值远低于其他各季节。

3.3 云冰水含量

图 8 为纬圈平均冰水含量的垂直分布。由图可以看出,平均冰水含量在 $200 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 以下,具有明显的季节变化。春季,平均冰水含量高值区主要分布在 $3 \sim 7 \text{ km}$ 之间,平均值为 $41.28 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$;夏季平均冰水含量高值区主要分布在 $6 \sim 13 \text{ km}$ 之间,平均值为 $65.68 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$;秋季平均冰水含量高值区主要分布在 $6 \sim 10 \text{ km}$ 之间,平均值为 $33.64 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$;冬季平均冰水含量高值区主要分布在 $2 \sim 5 \text{ km}$ 之间,平均云冰水含量值为 $25.82 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

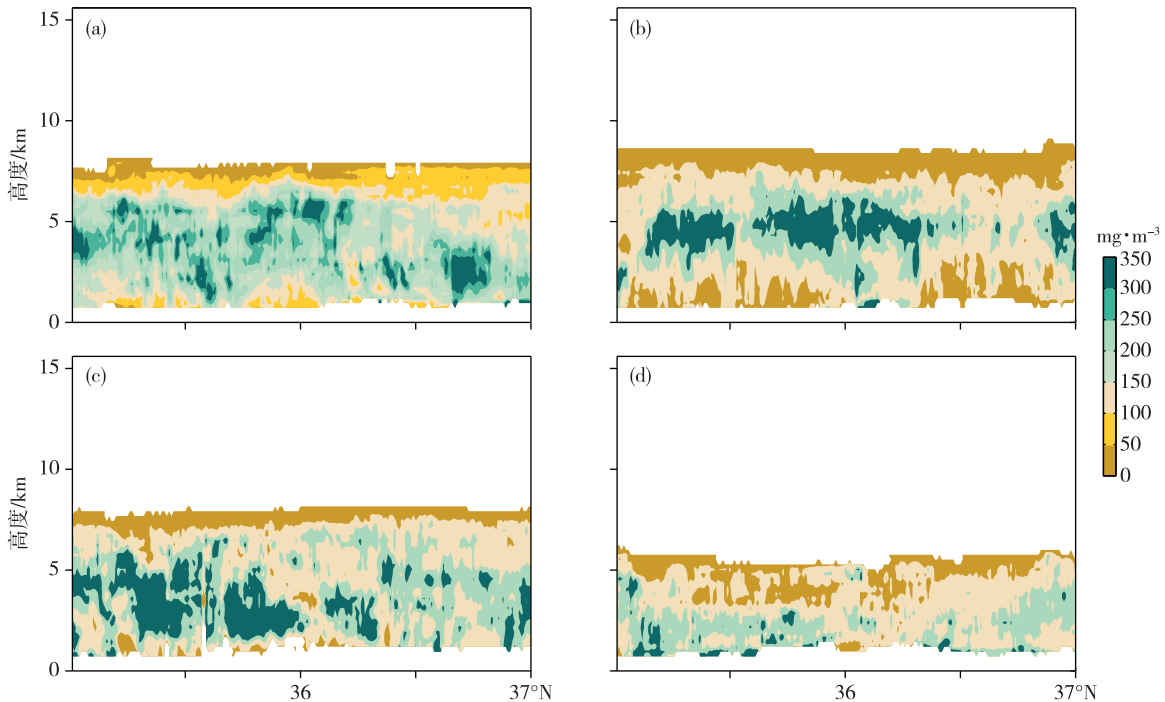


图 7 青岛四季纬圈平均云液态水含量垂直分布(单位: $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$; a. 春季, b. 夏季, c. 秋季, d. 冬季)

Fig.7 Vertical distribution of zonal mean liquid water content in Qingdao area (units: $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$; a. spring, b. summer, c. autumn, d. winter)

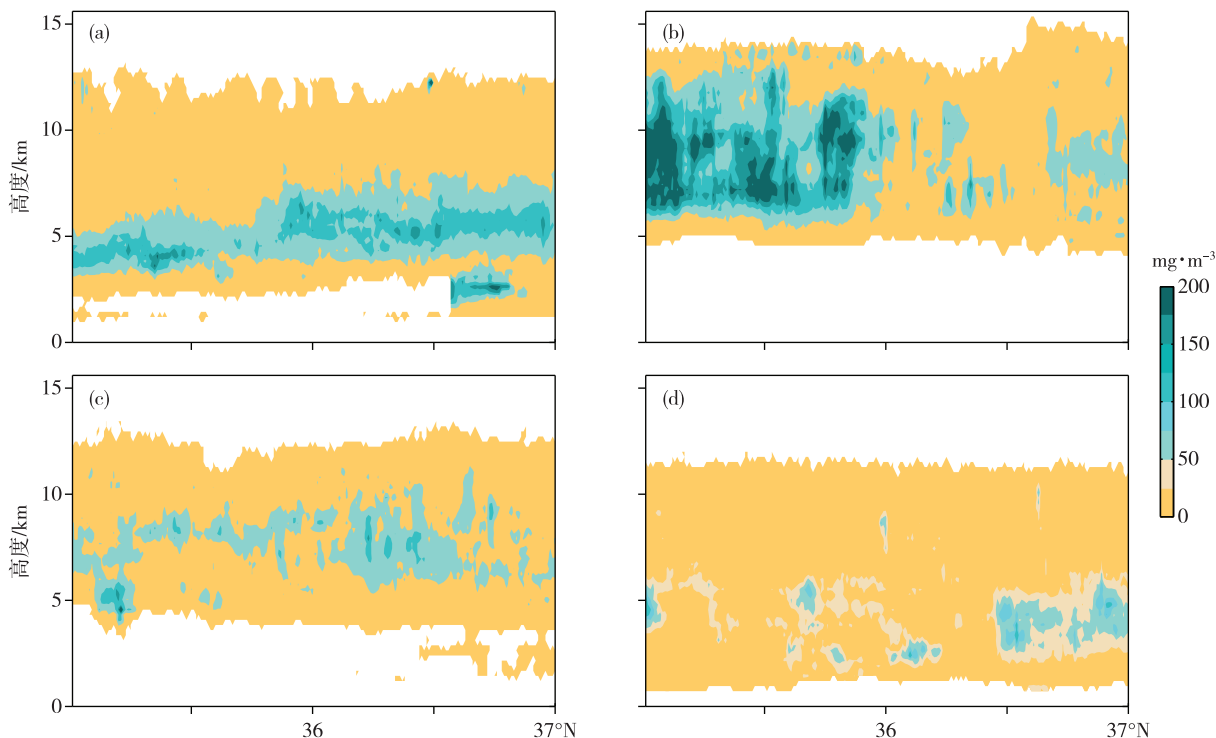


图8 青岛四季纬圈平均冰水含量垂直分布(单位: $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$; a.春季, b.夏季, c.秋季, d.冬季)

Fig.8 Vertical distribution of zonal mean ice water content in Qingdao area (units: $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$; a. spring, b. summer, c. autumn, d. winter)

3.4 云滴有效半径

云有效粒子半径是描述云滴尺度的重要物理特征参量,其分布对降水的形成有重要的指导意义。HALLETT and MOSSOP^[35]指出,研究云粒子有效半径对于云雾物理、大气物理过程的研究有重要意义。明显的暖云和冷云的云滴有效半径至少要达到 $12 \mu\text{m}$ 时,地面才会产生明显降水^[36]。由图9可知,春季、夏季和秋季平均液态有效粒子半径分别为 $11.61 \mu\text{m}$ 、 $10.37 \mu\text{m}$ 和 $11.58 \mu\text{m}$,能够产生有效降水的有效半径 ($>12 \mu\text{m}$) 高值区分别分布在 $4\sim 8 \text{ km}$ 、 $5\sim 8 \text{ km}$ 、 $2\sim 8 \text{ km}$ 的高度处;冬季平均液态有效粒子半径为 $12.13 \mu\text{m}$,基本分布在 5 km 及以下,且分布较均匀。四季平均冰晶有效粒子半径分别为 $65.76 \mu\text{m}$ 、 $68.61 \mu\text{m}$ 、 $63.22 \mu\text{m}$ 和 $63.55 \mu\text{m}$,远大于平均液态有效粒子半径。由图10可知,平均冰晶有效粒子半径垂直分布季节变化较明显,大值区 ($>80 \mu\text{m}$) 均出现在中下部。云水含量与云滴有效半径统计结果与邱玉珺和王宏奥^[37]对我国北方两个区域的研究结果较一致。其中,青岛地区 3 km 以下平均液态有效粒子半径较小,高值区高度偏高的原因可能与当地对流活动强弱、空气污染情况有

关。我国西部山区对流云活动旺盛,液态有效粒子半径均值高于东部地区^[38]。

4 结论

基于2007—2010年的CloudSat数据针对青岛地区的云特征进行了统计分析,所得结论如下:

1) 青岛地区的平均云量为 $64.1\% \sim 77.6\%$,从冬季至夏季呈递减趋势。单层云四季出现频率均在 39% 左右,多层云主要以2层云为主。卷云出现的年平均频率最高,其次为高层云和高积云,再次为层积云。对流云云顶高度和云厚度最大,其次为雨层云。

2) 对云微物理特性而言,云水路径在4、5月和8、9月较大,分别达到了 $200 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ 以上和 $350 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ 以上。冰水路径月变化不明显,液态水路径在春、秋季明显大于冰水路径。

3) 平均液态水含量和冰水含量高值区均位于整个水含量高度层的中部至底部;云液态有效粒子半径在 $6 \sim 16 \mu\text{m}$ 之间;云冰晶有效粒子半径在 $20 \sim 120 \mu\text{m}$ 之间。青岛南部,即近海区域的云有效粒子半径和云水含量大于北部。

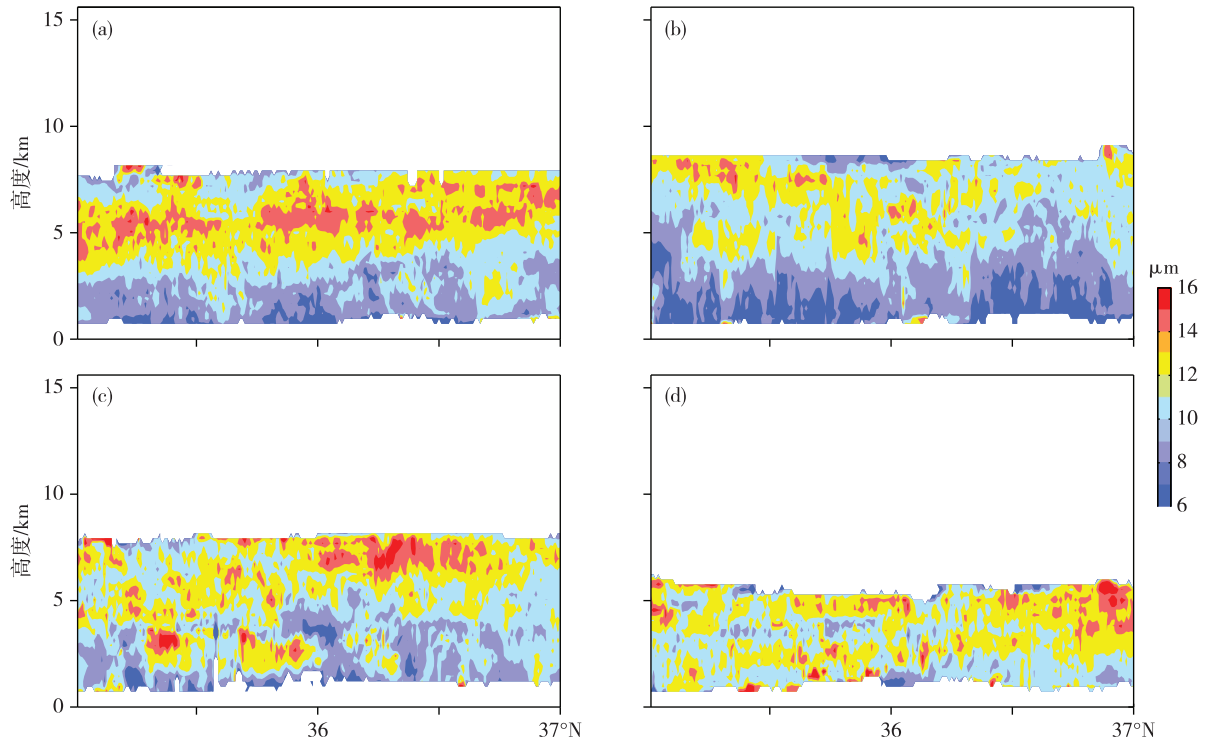


图 9 青岛四季纬圈平均云液态有效粒子半径垂直分布(单位: μm ; a. 春季, b. 夏季, c. 秋季, d. 冬季)
Fig.9 Vertical distribution of zonal mean effective particle radius of liquid cloud in Qingdao area (units: μm ; a. spring, b. summer, c. autumn, d. winter)

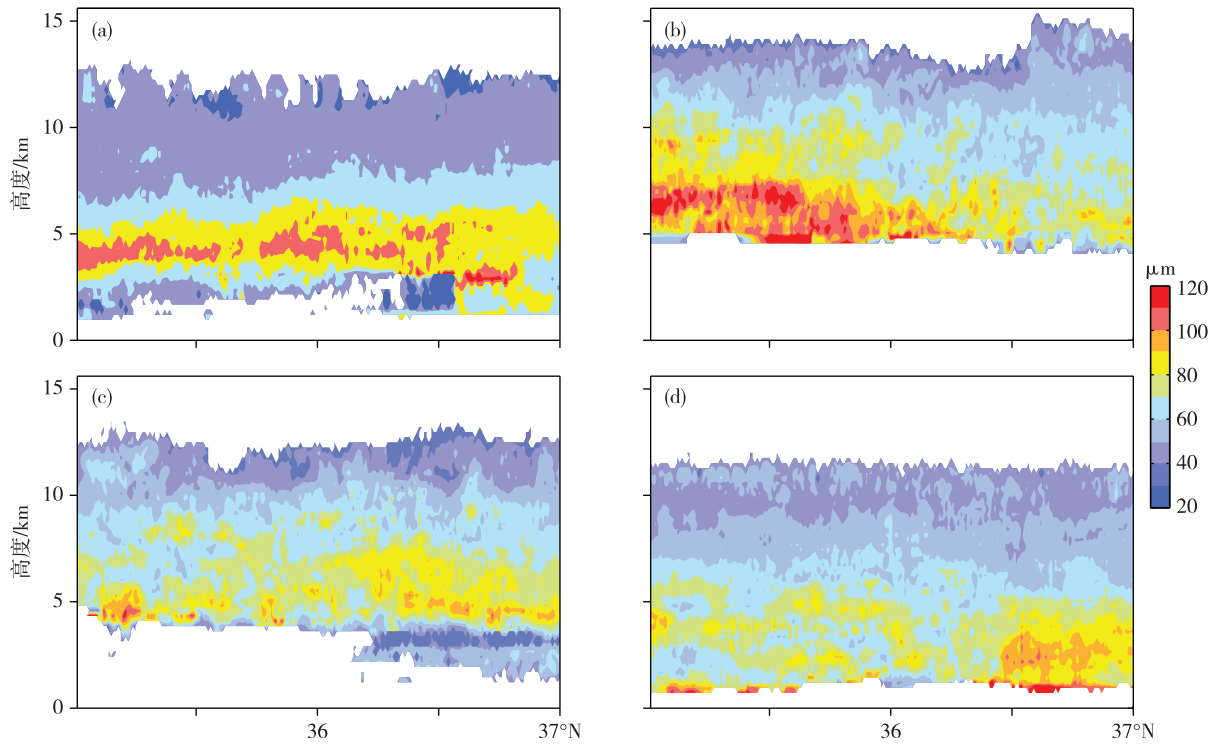


图 10 青岛四季纬圈平均云冰晶有效粒子半径垂直分布(单位: μm ; a. 春季, b. 夏季, c. 秋季, d. 冬季)
Fig.10 Vertical distribution of zonal mean effective particle radius of ice cloud in Qingdao area (units: μm ; a. spring, b. summer, c. autumn, d. winter)

参考文献:

- [1] STEPHENS G L, WEBSTER P J. Clouds and climate: Sensitivity of simple systems[J]. *J Atmos Sci*, 1981, 38(2): 235-247.
- [2] 高星星, 陈艳, 张武. 利用卫星资料对青藏高原地区空中云水资源的研究[J]. *兰州大学学报(自然科学版)*, 2016, 52(6): 756-763, 770.
- [3] 赵健. 山东人工影响天气工作发展回顾与思考[J]. *山东气象*, 2008, 28(4): 50-54.
- [4] WEISZ E, LI J, MENZEL W P, et al. Comparison of AIRS, MODIS, CloudSat and CALIPSO cloud top height retrievals [J]. *Geophys Res Lett*, 2007, 34(17): 251-270.
- [5] KAHN B H, CHAHINE M T, STEPHENS G L, et al. Cloud type comparisons of AIRS, CloudSat, and CALIPSO cloud height and amount [J]. *Atmos Chem Phys*, 2008, 8(5): 1231-1248.
- [6] STUBENRAUCH C J, CROS S, GUIGNARD A, et al. A 6-year global cloud climatology from the Atmospheric InfraRed Sounder AIRS and a statistical analysis in synergy with CALIPSO and CloudSat [J]. *Atmos Chem Phys*, 2010, 10(15): 7197-7214.
- [7] 李跃清, 张琪. 西南地区夏季云量与降水的关系特征分析[J]. *自然资源学报*, 2014, 29(3): 441-453.
- [8] 陈勇航, 黄建平, 陈长和, 等. 西北地区空中云水资源的时空分布特征 [J]. *高原气象*, 2005, 24(6): 905-912.
- [9] 李积明. 结合主动和被动卫星遥感资料研究云的垂直分布特征[D]. 兰州: 兰州大学, 2011.
- [10] 李积明, 黄建平, 衣育红, 等. 利用星载激光雷达资料研究东亚地区云垂直分布的统计特征[J]. *大气科学*, 2009, 33(4): 698-707.
- [11] CHEN Y H, PENG K J, HUANG J P, et al. Seasonal and regional variability of cloud liquid water path in northwestern China derived from MODIS/CERES observations [J]. *Int J Remote Sens*, 2010, 31(4): 1037-1042.
- [12] 李兴宇, 郭学良, 朱江. 中国地区空中云水资源气候分布特征及变化趋势[J]. *大气科学*, 2008, 32(5): 1094-1106.
- [13] LI J M, BI J R, HUANG J P, et al. Long-term variation of cloud droplet number concentrations from space-based Lidar [J]. *Remote Sens Environ*, 2018, 213: 144-161.
- [14] LI J M, HUANG J P, STAMNES K, et al. A global survey of cloud overlap based on CALIPSO and CloudSat measurements [J]. *Atmos Chem Phys*, 2015, 15(1): 519-536.
- [15] LI J M, YI Y H, MINNIS P, et al. Radiative effect differences between multi-layered and single-layer clouds derived from CERES, CALIPSO, and CloudSat data [J]. *J Quant Spectrosc Ra*, 2010, 112(2): 361-375.
- [16] LI J M, WALISER D E, CHEN W T, et al. An observationally based evaluation of cloud ice water in CMIP3 and CMIP5 GCMs and contemporary reanalyses using contemporary satellite data [J]. *J Geophys Res*, 2012, 117(D16): 16105-16130.
- [17] SASSEN K, WANG Z E, 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(D20): D00A12.
- [18] SASSEN K, WANG Z E. Classifying clouds around the globe with the CloudSat radar: 1-year of results [J]. *Geophys Res Lett*, 2008, 35(4): L04805.
- [19] 耿蓉, 王雨, 傅云飞, 等. 中国及其周边地区多种水凝物资料的气候态特征比较 [J]. *气象学报*, 2018, 76(1): 134-147.
- [20] 周毓荃, 赵妹慧. CloudSat 卫星及其在天气和云观测分析中的应用 [J]. *南京气象学院学报*, 2008(5): 603-614.
- [21] 尚博, 周毓荃, 刘建朝, 等. 基于 CloudSat 的降水云和非降水云垂直特征 [J]. *应用气象学报*, 2012, 23(1): 1-9.
- [22] 陈超, 孟辉, 靳瑞军, 等. 基于 CloudSat 云分类资料的华北地区云宏观特征分析 [J]. *气象科技*, 2014, 42(2): 294-301.
- [23] 赵阳, 赵增亮, 姚志刚, 等. 基于卫星云分类资料的顶层云宏观特征研究 [J]. *气象水文海洋仪器*, 2017, 34(1): 1-7.
- [24] 王帅辉, 韩志刚, 姚志刚. 基于 CloudSat 和 ISCCP 资料的中国及周边地区云量分布的对比分析 [J]. *大气科学*, 2010, 34(4): 767-779.
- [25] 杨大生, 王普才. 中国地区夏季 6~8 月云水含量的垂直分布特征 [J]. *大气科学*, 2012, 36(1): 89-101.
- [26] 杨冰韵, 张华, 彭杰, 等. 利用 CloudSat 卫星资料分析云微物理和光学性质的分布特征 [J]. *高原气象*, 2014, 33(4): 1105-1118.
- [27] 霍娟. 基于 CloudSat/CALIPSO 资料的海陆上空云的物理属性分析 [J]. *气候与环境研究*, 2015, 20(1): 30-40.
- [28] ROSSOW W B, WALKER A W, GARDER L C. Comparison of ISCCP and other cloud amounts [J]. *J Climate*, 1993, 6(12): 2394-2418.
- [29] ROSSOW W B, GARDER L C. Validation of ISCCP cloud detections [J]. *J Climate*, 1993, 6(12):

- 2370-2393.
- [30] 陈超, 郭晓军, 邱晓斌, 等. 中国华北地区云垂直结构及云水含量卫星遥感研究[J]. 气象与环境学报, 2015, 31(5): 159-164.
- [31] 曹越前, 张武, 药静宇, 等. 半干旱区云量变化特征及其与太阳辐射关系的研究[J]. 干旱气象, 2015, 33(4): 684-693.
- [32] 范娟, 朱泽伟, 蔡佳熙, 等. 1959—2005 年我国冬季和夏季区域气温与日照、云量的相关分析[J]. 气候变化研究进展, 2014, 10(3): 211-216.
- [33] 朱乾根, 林锦瑞, 寿绍文, 等. 天气学原理和方法[M]. 4 版. 北京: 气象出版社, 2007: 81, 575.
- [34] 洪光, 周庆满, 林滋新. 青岛地区大气中水汽含量及水汽输送的研究[J]. 海岸工程, 1990, 9(1): 76-79.
- [35] HALLETT J, MOSSOP S C. Production of secondary ice particles during the riming process[J]. Nature, 1974, 249(5452): 26-28.
- [36] PRUPPACHER H R, KLETT J D. Microphysics of clouds and precipitation[M]. D Reidel Publishing Company, 1978: 448-463.
- [37] 邱玉珺, 王宏奥. 基于 CloudSat/CALIPSO 资料的我国北方 2 个区域云垂直分布差异研究[J]. 大气科学学报, 2017, 40(4): 553-561.
- [38] 杨大生, 王普才. 中国地区夏季云粒子尺寸的时空分布特征[J]. 气候与环境研究, 2012, 17(4): 433-443.