大气科学
CHINESE JOURNAL OF ATMOSPHERIC SCIENCES

基于探空云识别方法的云垂直结构分布特征

李琦 蔡淼 周毓荃 唐雅慧 欧建军

Characteristics of Cloud Vertical Distribution Based on Cloud Identification by Radiosonde

LI Qi CAI Miao ZHOU Yuquan TANG Yahui OU Jianjun

在线阅读 View online: https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.2105.19246

您可能感兴趣的其他文章 Articles you may be interested in

基于偏振雷达的积层混合云降水增雨潜力识别方法研究

A Study to Determine Enhancement Potential for Convective-Stratiform Mixed Precipitation Based on Polarimetric Radar

大气科学. 2017, 41(3): 578 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.1611.16171

夏季白天中国中东部不同类型云分布特征及其对近地表气温的影响

Distribution of Different Cloud Types and Their Effects on Near-Surface Air Temperature during Summer Daytime in Central Eastern China

大气科学. 2020, 44(4): 835 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.1909.19160

Ka/Ku双波段云雷达反演空气垂直运动速度和雨滴谱方法研究及初步应用

Vertical Air Motion and Raindrop Size Distribution Retrieval Using a Ka/Ku Dual-Wavelength Cloud Radar and Its Preliminary Application

大气科学. 2021, 45(5): 1099 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.2104.20200

基于火箭探空资料的冰雹云内部结构个例分析

Case Study of Hail Cloud Internal Structure Based on Rocket Sounding Data

大气科学. 2020, 44(4): 748 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.1907.19118

机载云降水粒子成像仪所测数据中伪粒子的识别

Pseudo Particle Identification in the Image Data from the Airborne Cloud and Precipitation Particle Image Probe

大气科学. 2017, 41(5): 1113 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.1703.16259

利用微雨雷达研究一次冷锋云系降水的垂直结构分布及演变特征

Vertical Structure and Evolution of Precipitation Associated with Clouds along a Cold Front Based on Micro Rain Radar Observations

大气科学. 2019, 43(3): 618 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.1804.17307

关注微信公众号，获得更多资讯信息

李琦, 蔡淼, 周毓荃, 等. 2021. 基于探空云识别方法的云垂直结构分布特征 [J]. 大气科学, 45(6): 1161−1172. LI Qi, CAI Miao, ZHOU Yuquan, et al. 2021. Characteristics of Cloud Vertical Distribution Based on Cloud Identification by Radiosonde [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 45(6): 1161−1172. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2105.19246

基于探空云识别方法的云垂直结构分布特征

李琦[1, 2] 蔡淼[1, 2] 周毓荃[1, 2] 唐雅慧[1, 2] 欧建军[3]

1 中国气象局云雾物理环境重点开放实验室, 北京 100081
2 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室, 北京 100081
3 上海辈友气象科技有限公司, 上海 201306

摘 要 云的垂直结构特征作为云重要的宏观特征之一，直接决定了云的类型，进而通过发射和吸收辐射的方式影响着地气系统的能量收支平衡，因此对云垂直结构特征的研究一直都是云物理研究的一个重要方向。作为观测云垂直结构特征的一种方式，探空气球通过获取沿路径方向高分辨率的廓线信息，采用一定反演方法从而能够较为准确的识别云的垂直结构。本文即利用我国业务布网探空站的观测资料，采用相对湿度阈值法识别云垂直结构，并同激光云高仪、“风云四号”静止卫星和毫米波云雷达对识别的云结构特征量进行了一致性检验。在此基础上，统计分析了 2015～2017 年单层、两层和三层云的垂直结构分布特征、日变化和季节变化特征以及全国区域分布特征，结果表明：（1）整体分布上，单层云在垂直方向上出现的高度范围介于多层云的高度范围内，并且随着云层数的增加，云在垂直方向上更为伸展，即高层云越高，低层云越低；（2）在日变化中，中午单层和多层云中最低层云的云底高度均高于早晨，而夜间单层和多层云中最高层云的云顶高度则高于早晨和中午，同时中间层云厚的变化要小于最上层和最下层云厚的变化；（3）在季节变化中，夏季云量较其他季节更多，云体发展也更为深厚，表明温暖的大气条件更有利于云的形成和发展；（4）我国云垂直结构分布特征具有明显的纬向变化趋势，从以青藏高原为中心的西南地区的云底较高云体较薄的云，逐步过渡到以东南沿海地区为中心的云底较低云体较为深厚的云，表明不同地形和气候带的差异与不同云类型的分布直接相关。

关键词 探空云识别 对比检验 垂直分布特征
文章编号 1006-9895(2021)06-1161-12 **中图分类号** P41, P426.5 **文献标识码** A
doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2105.19246

Characteristics of Cloud Vertical Distribution Based on Cloud Identification by Radiosonde

LI Qi[1, 2], CAI Miao[1, 2], ZHOU Yuquan[1, 2], TANG Yahui[1, 2], and OU Jianjun[3]

1 *Key Laboratory for Cloud Physics of China Meteorological Administration*, *Beijing* 100081
2 *State Key Laboratory of Disaster Weather*, *Chinese Academy of Meteorological Sciences*, *Beijing* 100081
3 *Shanghai ByWeather Technology Co., Ltd.*, *Shanghai* 201306

Abstract As an important feature in the macroscopic characteristics of clouds, the vertical structure characteristics of clouds determine different types of clouds and affect the energy budget balance of the earth’s atmosphere system through absorbing and emitting radiation. Therefore, research about the vertical structure characteristics of clouds is always an

收稿日期 2019-12-09；**网络预出版日期** 2021-06-03
作者简介 李琦，男，1990 年出生，硕士研究生，主要从事云降水物理与人工影响天气的研究。E-mail: airforce1_q@163.com
通讯作者 周毓荃，E-mail: zhouyq05@163.com
资助项目 国家重点研发计划项目 2016YFA0601701
Funded by National Key Research and Development Program of China (Grant 2016YFA0601701)

important subject of cloud physics. As an instrument for observing the vertical structure characteristics of clouds, a sounding balloon can penetrate clouds to achieve temperature and humidity profiles in high resolution. Based on this information, the vertical structure of the clouds can be precisely identified using some methods. This paper uses the observation data of national operational radiosonde sites to identify the vertical structure of the clouds by the relative humidity threshold method, and tests the cloud boundary by comparing it with the data from the ceilometer and "FengYun-4" satellite. Based on this, the mean vertical distribution of one-, two-, and three-layer clouds is obtained from 2015 to 2017 and analyzed in daily, seasonal, and regional variations. The results indicate that (1) one-layer clouds are generally located at altitudes between the altitudes of the two- and three-layer cloud configurations. With the increase of the number of cloud layers, the uppermost layer becomes higher and the lowest layer becomes lower. (2) In the diurnal variation, the lowest cloud base height of single and multilayer clouds at noon is higher than those in the morning, and the uppermost cloud top height of single and multilayer clouds in the evening is higher than those in the morning and at noon. The variation of the mid layer in multilayer clouds is less than that in the uppermost and lowest layers. (3) In the seasonal variation, there are more clouds that are more vertically developed during summer than other seasons, suggesting that the development of clouds is favorable under warm atmospheric conditions. (4) The regional variation of the vertical cloud distribution in China shows an obvious latitudinal variation trend. Thin clouds with a higher cloud base centered on the Tibetan Plateau in the southwest gradually transform to thick clouds but with a lower cloud base in the coastal area of the southeast. This indicates that different cloud types are directly affected by different geographical conditions and climate zones.

Keywords Cloud identification by radiosonde, Contrast test, Vertical distribution

1 引言

云是地气系统的重要组成部分，云的水平和垂直分布特征不仅影响大气动力和热力过程，而且还通过同大气辐射的相互作用对全球大气环流及气候变化产生重要的影响（Dong et al., 2005, 2006）。当前遥感科学的发展使得对云信息的挖掘更加全面，来自星、空、地不同观测设备的协同观测已能够较为充分的描述云的水平和垂直结构特征，星基观测如通过搭载多通道、高时空分辨率辐射成像仪的静止和极轨气象卫星，能够获得大范围的云的水平分布特征（周毓荃等, 2008; Delanoë and Hogan, 2010），空基观测则是通过装备着云粒子探测设备的飞机对飞行沿线的云进行直接观测，其特点是可针对目标云区进行有设计的观测，充分获取目标云区的云特征参数（Vaillancourt et al., 2003; 赵增亮等, 2010），地基观测的设备则更为多样，如毫米波云雷达、激光云高仪、红外测云仪、全天空成像仪等，通常能提供观测设备上方云的连续观测信息（Clothiaux et al., 2000; Xi et al., 2010）。本研究采用的探空气球作为地基观测方式的一种，其特点在于能够穿透云层并提供高垂直分辨率的大气特征量，即温、压、湿、风等基本气象要素信息，基于该数据采用不同方法则能够有效识别云，从而得到云的垂直结构信息。

目前对于探空识别云边界方法的研究主要包括，Poore et al.（1995）采用温度露点差阈值法来确定云区，其中对于不同温度区间采用不同的阈值，该方法称为 PWR95 法。Wang and Rossow（1995）采用相对湿度阈值法来获取云的垂直结构信息，在计算相对湿度时，0°C 以上使用水面饱和水汽压，0°C 以下使用冰面饱和水汽压，该方法称为 WR95 法。Wang et al.（1999）将探空识别的云区同 8 mm 多普勒云雷达的测云结果进行比较，为了进一步区分湿层和云层，特别是将近地面湿层误判为云层的情况，进而调整了 WR95 法判别云区的阈值范围。Chernykh and Eskridge（1996）通过温度和湿度二阶导数随高度的变化判定云边界，其方法为当温度二阶导数≥0，同时湿度二阶导数≤0 时认为到达云边界，该方法称为 CE96 法。Chernykh et al.（2001）采用 CE96 法分析了 1964～1998 年全球 795 个探空站数据低云和高云边界的变化趋势和误差，其变化趋势具有季节性差异和空间分布不一致等特点，并且同云覆盖率相关，误差则来源于温湿传感器的响应时间同气球漂移速度的时间差。Naud et al.（2003）通过比较云雷达和探空识别云边界来检验 WR95 和 CE96 两种算法，结果显示云雷达和探空在识别云底高度上的一致性要好于云顶高度，因为随着探空升高漂移导致两者观测到的可能不是同一块云，并且两种算法识别的云顶高度均

高于云雷达识别的结果。周毓荃和欧建军（2010）采用 WR95 法，利用我国业务布网的 L 波段探空资料，分析得到云垂直结构同 CloudSat 卫星实测云垂直结构进行多个例的对比分析，验证了相对湿度阈值判断云垂直结构方法的可行性，及利用我国业务探空资料分析云垂直结构的可用性。蔡淼等（2014）利用我国 L 波段探空资料和与之时空匹配的 CloudSat 云观测资料，统计识别云区的相对湿度阈值及其随高度的变化，提高了对云底高度识别的准确率。

综上所述，目前已有多种利用探空资料识别云的方法，同时基于探空云识别对云垂直结构分布和变化特征也开展了一些研究，但这些研究大多针对我国某个区域（周毓荃和欧建军, 2010; Zhang et al., 2010; 黄萍等, 2014; 李绍辉等, 2017; 孙丽等, 2017; 苏立娟等, 2017），对于全国范围云垂直结构分布特征的研究则较少。因此本研究的主要目的是基于蔡淼等（2014）研究的改进的相对湿度阈值法，使用全国近三年（2015～2017 年）的业务探空资料对云垂直结构的总体分布特征、日变化和季节变化特征以及全国区域分布特征进行分析，旨在为中国复杂的三维云场特征分析提供参考。

2　资料和方法

2.1　所用资料

（1）L 波段探空秒数据。本文采用的探空数据来自我国业务布网的 L 波段高空气象探测系统，该系统由我国自主研发的 GFE(L)1 型二次测风雷达和 GTS1 型数字探空仪组成，采用二次测风雷达测距体制，能够连续自动测定高空温、压、湿、风等基本气象要素（李伟等, 2010）。其数据的采样周期为 1.2 s，垂直分辨率约为 8 m，具有高分辨率和实时采集的能力。业务探空站常规观测的起始时间为每日 07:15 和 19:15（北京时，下同；部分测站会在每年汛期期间于中午 13:15 进行加密观测）。图 1 为我国探空站分布，目前全国共计约 120 个探空站，在西部地区分布较为稀疏，其他区域相邻探空站间隔约 200 km。

（2）激光云高仪和毫米波云雷达观测数据。本研究使用的激光云高仪为 CL51 型云高仪，其通过发出沿垂直方向的功率强大的短脉冲，在穿过天空时测量由云层引起的后向散射，并根据激光脉冲发出和接收到后向散射信号之间的时间差计算出云底高度，其云检测范围为 0～13 km，观测的时间分辨率为 6 s，垂直分辨率为 10 m。本研究使用的毫米波云雷达为 HT101 型 Ka 波段测云仪，其采用全固态、准连续波体制和脉冲压缩的信号形式，以顶空垂直固定扫描的方式工作，最大探测高度大于 15 km，具有−40～+40 dBZ 的探测能力，测量并输出云回波的反射强度、垂直速度、速度谱宽等一次产品，并在此基础上反演获得云顶高、云底高、云厚等二次产品，其观测的时间分辨率为 1 min，垂直分辨率为 30 m。

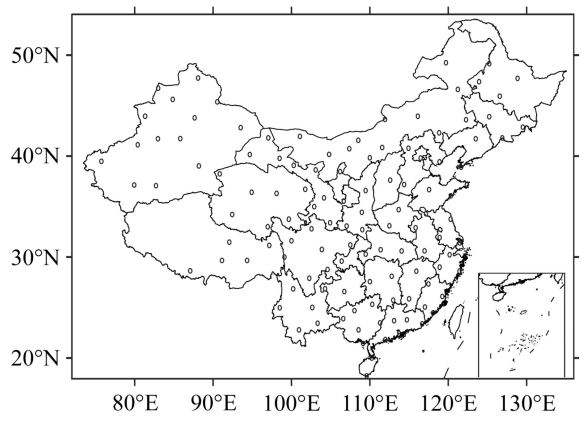

图 1　全国 L 波段业务探空站布网情况

Fig. 1　Distribution of L-band operational radiosonde sites in China

（3）“风云四号”卫星云产品。新一代“风云四号”静止气象卫星——A 星（以下简称 FY-4A）在搭载的仪器数量和性能、观测的精度和时空分辨率等多个方面已较上一代“风云二号”有了不小的进步。其中，搭载的多通道辐射扫描成像仪（AGRI）覆盖可见光、近红外、短波、中波和长波红外共计 14 个通道，通道的水平空间分辨率最高在可见光可达到 500 m，长波红外则为 4 km；观测的时间分辨率为每整点时刻完成一次为期 15 min 的全圆盘扫描，其余时间约每 5 min 完成一次包含中国范围的区域扫描，这已与现今欧美和日本等国的新一代静止气象卫星辐射成像仪的观测水平相当，仪器观测精度的提升势必为反演技术的提高奠定了更好的基础（Yang et al., 2017）。目前，国家卫星气象中心已发布了包括云检测、云相态、云顶温度/气压/高度及云微物理参量等云顶特征量反演产品。

2.2　探空云识别方法

由于云形成的重要条件是湿度趋于饱和，所以通过设定相对湿度阈值来判别云的出现是合理的，本文采用了蔡淼等（2014）优化建立的相对湿度阈

值法进行云区的识别。该方法通过同时空匹配的CloudSat云资料进行对比，建立随高度增加而递减的相对湿度阈值函数，并且为了更好的区分云层和湿层，设定相对湿度在云边界的变化率（云顶负变化率和云底正变化率）均应超过3%，并规定云夹层小于300 m时视为云层，云层厚度小于80 m时视为湿层。利用该阈值法识别云区时，总的TS评分（Threat Score）高于0.6，准确率达到84%以上（蔡淼等, 2014）。

因为L波段探空系统是采用高分子热敏电阻传感器直接测量相对湿度，相较于区分水（冰）面饱和水汽压计算的相对湿度更为准确，因此本文直接使用探空探测的相对湿度数据并基于上述方法识别云结构。本文基于探空资料对单层、两层和三层云的云顶高度（Cloud Top Height，H_{CT}）、云底高度（Cloud Base Height，简称H_{CB}）、云体厚度（Cloud Thickness）等云垂直结构参量的分布和变化特征进行了分析。

3 探空识别云结构特征量检验

3.1 云底高度检验

本研究对探空识别的云底高度同激光云高仪观测的进行了一致性检验，对比数据选取2015年全年北京南郊观测站的探空数据及CL51型激光云高仪数据。获取两者相匹配样本的方式是以探空的观测时间为准，当探空识别到云底时，选取同时刻的激光云高仪观测数据，并且考虑激光云高仪探测的云底应为真实云底，即云底被连续探测且排除其变化波动大的情况，因此选取该时刻前后5 min激光云高仪探测云底高度的中值，并且有效数据应多于半数，若少于半数则记为无云；当探空观测无云时，查看整个观测时段内激光云高仪的数据，无云则记为一致，有云则记为不同。同时考虑探空漂移可能造成的误差，因此仅选取探空探测10 km以下的结果进行统计。据此共获得800个样本，所有样本按照不同的分类标准，统计得到表1。

其中，对探空和激光云高仪均识别有云的NORM样本进行相关性分析，结果表明：当探空和云高仪均识别有云时，两者识别云底高度的相关系数为0.73（图2）。其中，相关性较差的点大多为探空识别的云底高度低于激光云高仪探测的云底高度（探空高于云高仪2 km的样本为5个，探空低于云高仪2 km的样本为29个），通过查询探空低于云高仪的29个样本出现时的天气资料，发现其中12个样本出现时的天气为阵雨，12个为多云，4个为雾霾，1个为晴天，因此认为在利用探空识别云区时，由于采用相对湿度阈值作为判断云出现的依据，当低层相对湿度较大时（如低层有雾或刚下完雨近地层湿度很大），探空容易将其误判为云，从而低估真实的云底高度。

通过分析两者识别云底高度之差（激光云高仪减去探空数据）的频数分布可得（图3），云高仪同探空识别的云底高度偏差主要分布在−5～5 km之间，总体呈正态分布。其中，探空识别云底高度低于云高仪探测的样本比例为75.28%，高于的比例为24.72%。由此可见，相较于云高仪的探测结果，探空识别的云底高度略偏低，这可能是由于采用相对湿度阈值法判定云边界时，探空仪并不一定真正入云，而云高仪对云的识别则需要激光完全入云后捕获云粒子产生的后向散射信号，并且对于散射信号较弱的云边界上的较小粒子则难以捕获，由此造成两者在识别云底高度上的误差。但总体来说，两者相差小于1 km的样本数占总样本数的73.06%，说明本研究中探空识别的云底高度同激光云高仪的探测结果具有较好的一致性，即探空识别云底高度还是较为准确的。

3.2 云顶高度检验

本研究使用国家卫星气象中心发布的FY-4A卫星云顶高度反演产品，同探空识别的云顶高度进行一致性检验。样本选取2018年春、夏两季两者

表1 云底高度检验的样本分类标准及其统计结果

Table 1 Sample classification standards of cloud base heights and statistical results

简称	定义	样本数	占总样本比例
NORM	探空和激光云高仪均识别有云	271	33.9%
NONE	探空和激光云高仪均识别无云	300	37.5%
DIFF	探空和激光云高仪中一方识别有云，另一方识别无云	180	22.5%
RAIN	探空识别云边界为探测起始高度，且地面统计有降水	49	6.1%

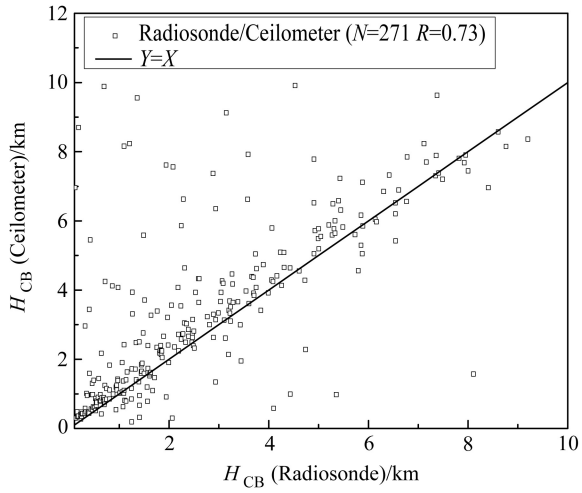

图 2　激光云高仪同探空识别云底高度（H_{CB}，单位：km）散点图（N 为样本数，R 为相关系数）

Fig. 2　Comparison of radiosonde and ceilometer cloud base heights (H_{CB}, units: km; N: samples, R: correlation)

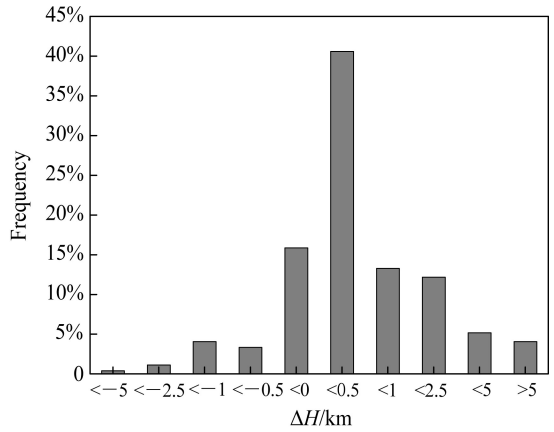

图 3　激光云高仪同探空识别云底高度之差（ΔH）频数分布图

Fig. 3　Frequency distribution of cloud base height differences [$\Delta H = H_{CB}$(ceilometer)− H_{CB}(radiosonde)]

识别的云顶高度数据进行统计，为了尽可能使两者在观测的空间和时间上相互匹配，选择了四个同 FY-4A 卫星 AGRI 成像仪扫描格点经纬度相同的探空站，分别为河源（23.78°N，114.72°E）、西昌（27.90°N，102.27°E）、阿克苏（41.12°N，80.38°E）和南阳（33.10°N 112.48°E），并对该站探空识别的云顶高度（多层云时指最高层云顶高度）与同时刻 FY-4A 卫星反演的云顶高度进行统计。采用 3.1 节的样本分类方法，得到观测时段内各类样本数（总计 1219）及所占比例见表 2。

根据国际卫星云气候学计划（International Satellite Cloud Climatology Project，简称 ISCCP）中定义的云类型——云顶高度小于约 3.5 km 为低云，介于约 3.5～6.5 km 间为中云，大于约 6.5 km 为高云，对探空识别云顶高度有效样本（NORM 和 RAIN 两类）共 618 个进行统计得到，样本为低云、中云和高云分别占总数的 2.91%、17.96% 和 79.13%，即高云出现的次数最多。同 FY-4A 卫星反演的云顶高度进行相关性统计得到，两者在识别云顶高度上表现出较好的一致性，相关系数为 0.67（图 4）。

进一步统计不同层云时探空识别云顶高度同卫星反演云顶高度的关系（图 5）。可以看出，无论是单层、两层、三层及以上或是降水云，探空和卫星识别的云顶高度平均值都比较接近，并且随着云层数的增加，两者识别的云顶高度平均值也逐渐升高，但降水云云顶高度的最小值最低，这可能是由于云顶冰晶化、冰粒子增长成降水造成的云顶下沉（戴进等, 2006）。

3.3　云层数检验

本研究使用河北邢台观测站的 Ka 波段云雷达的云结构反演结果来检验探空识别的云层数，云雷达数据为 2016 年 6～11 月，通过匹配相同时刻的探空观测，统计得到云雷达反演为无云、单层、两层和三层云时探空对应的识别结果如表 3。结果表明采用该方法能够较为准确地识别明显的多层云结构，存在的不一致主要来源于探空识别中对云层数的高估，原因可能为探空容易将湿层误判为云层，同时将整层云中出现的狭窄空隙识别为云夹层从而将整层云误判为多层云。

3.4　探空漂移对云区识别的误差分析

关于探空气球漂移对探空识别云层结构产生的

表 2　云顶高度检验的样本分类标准和统计结果

Table 2　Sample classification standards of cloud top heights and statistical results

简称	定义	样本数	占总样本比率
NORM	探空和FY-4A卫星云顶高度均识别有云	517	42.4%
NONE	探空和FY-4A卫星云顶高度中一类识别有云，另一类识别无云	434	35.6%
DIFF	探空和FY-4A卫星云顶高度均识别无云	167	13.7%
RAIN	探空识别云边界为探测起始高度，且地面统计有降水	101	8.3%

表 3 Ka 波段云雷达识别不同云层数时对应的探空识别结果

Table 3 Corresponding results identified by the radiosonde when different cloud layers were retrieved by the Ka-band cloud radar

云层数	云雷达反演样本数	探空识别样本数	探空识别正确率
无云	71	60	85%
单层云	107	66	62%
两层云	65	40	62%
三层云	22	18	82%

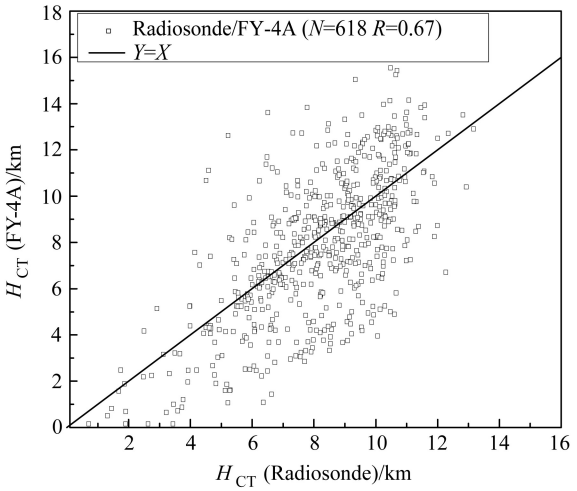

图 4 FY-4A 卫星同探空识别云顶高度（H_{CT}，单位：km）散点图（N 为样本数，R 为相关系数）

Fig. 4 Comparison of FY-4A satellite and ceilometer cloud top heights (H_{CT}, units: km; N: samples, R: correlation)

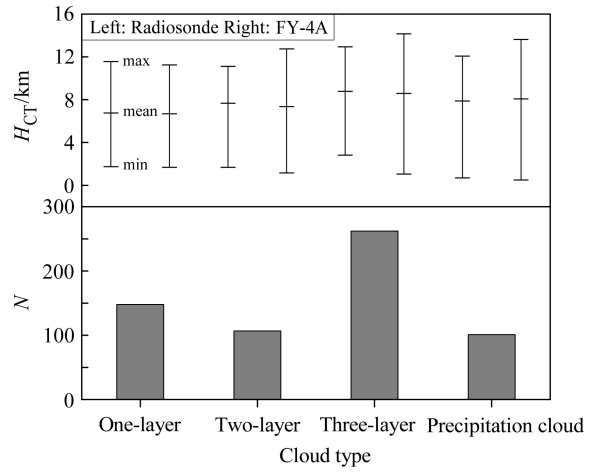

图 5 不同类型云 FY-4A 卫星同探空识别云顶高度（H_{CT}，单位：km）比较（N 为样本数）

Fig. 5 Comparison of FY-4A and radiosonde cloud top heights in different cloud types (H_{CT}, units: km; N: samples)

误差，假设距离发射时间越长，探空气球的漂移距离就越远，对探空站所在位置的云层判断准确度就越低。本文利用 3.1 节的云底高度观测样本，通过分析不同高度的探空与激光云高仪观测的云底高度差（图 6），研究探空漂移对云区识别带来的误差。由图 6 可得，两者的差值随着高度增加而增加，这反应了探空气球随着高度增加漂移距离更远，造成的两者探测位置更加偏离。但从统计结果的趋势线（图 6 中虚线）可以看出，对于中低云，两者识别的云底高度的偏差在 1～2 km，表明探空对中低云的观测和云结构分析受气球漂移误差的影响较小。同时对于云底较高的中高云也存在着探空和云高仪识别云底高度偏差很小的情况，这可能是由于观测时段内云系结构相对较为均匀（如大范围的层状云），即便探空气球发生漂移，两者观测的仍是同一云系，因此识别的云底高度差别不是很大。

4 探空识别云垂直结构特征的统计分析

上述分析表明，本研究所采用的相对湿度阈值法能够较好地识别明显的云区。因此，本节将应用探空识别云结构的结果，以单层、两层和三层云为例，分析单层和多层云的垂直分布和变化特征，并利用全国业务探空站资料分析我国云垂直结构的区域变化特征。

4.1 探空识别云垂直结构的空间分布特征

探空识别云垂直结构的特点在于可以有效识别多层云结构，从而对云层结构在垂直方向上的分布

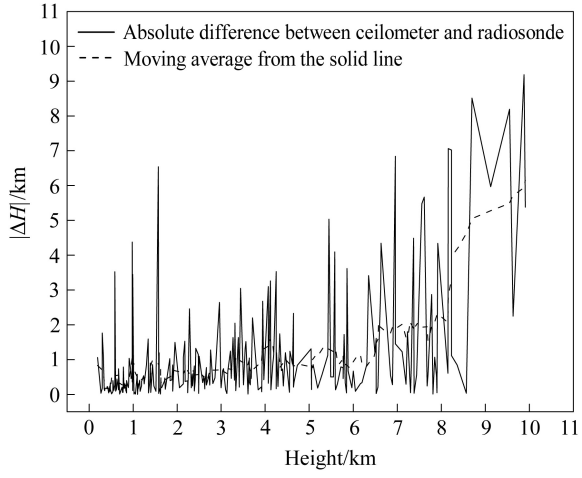

图 6 激光云高仪同探空识别云底高度之差绝对值随高度变化结果

Fig. 6 Absolute difference in cloud base height between ceilometer and radiosonde with heights

特征进行分析。本节基于北京南郊探空站 2015～2017 年的观测数据，分析了探空识别单层、两层和三层云结构的垂直分布特征。经统计共获得 2313 个探空观测样本，其中无云样本为 1032 个（占总样本数的 44.6%），有云样本为 1281 个（55.4%）。在有云样本中，单层云样本最多为 420 个（占有云样本的 37.4%），其余多层云样本中，样本数随着云层数的增加而减少，四层及其以上多层云仅占有云样本的 24.2%（表 4）。因此本文以单层、两层和三层云为例，分析单层和多层云的垂直结构分布特征。

图 7 为单层、两层和三层云的平均云底、云顶高度和云层厚度的垂直空间分布（此处分析的多层云的云底、云顶高度和云层厚度是指多层云中每层云的云底、云顶高度和云层厚度），多年平均结果可以反映出单层云和多层云在云层垂直空间分布上的差异。由图可得，垂直方向上，单层云出现的高度范围介于多层云的高度范围内，并且平均厚度大于多层云的任何一层。这是由于被分离后的多层云中每层云内的湍流交换作用较单层云内较弱，而湍流交换作用越强表现为云层越深厚（Hanson, 1987）。同时随着云层数的增加，云底高度出现的位置逐渐降低，云顶高度出现的位置逐渐升高，这可能是因为多层云中被分离的上层和下层云受到浮力和云层间的相互作用而上升和下沉，使得最高层的云更高，最低层的云更低，也可能是由于云层间相互的长波辐射作用要小于最低层云和地面间的相互作用，因此会导致随着云层数的增加，最低层云的高度降低（Zhang et al., 2010）。

表 4　北京南郊站 2015～2017 年探空识别不同层云样本分布

Table 4　Statistics of different cloud layers identified by radiosonde at the Beijing Meteorological Observatory (2015–2017)

云层数	无云	单层云	两层云	三层云	四层云	五层云	六层及以上云
样本数	1032	420	272	158	129	67	76

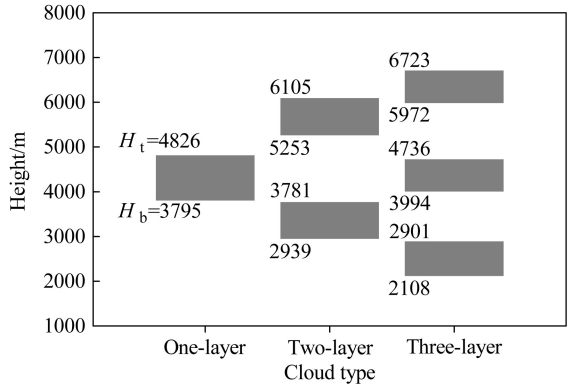

图 7　2015～2017 年单层、两层和三层云垂直方向的平均分布特征（H_t 和 H_b 是指平均云顶高度和云底高度）

Fig. 7　Mean locations of one-, two-, and three-layer clouds from 2015 to 2017 (H_t and H_b represent the mean cloud top height and cloud base height)

4.2　探空识别云垂直结构的日变化和季节变化特征

云层的发展演变同云内动力和热力状态的变化密切相关，而大气辐射作用是影响云内动力和热力状态的主要因素之一，即来自太阳短波辐射和地表长波辐射的共同作用影响着云层的变化（Guan et al., 2010）。图 8 给出了北京南郊探空站 2015～2017 年统计的单层、两层和三层云日变化的平均分布特征。分析可见，在每日约 08:00（代表早晨）、14:00（代表中午）和 20:00（代表夜间）的 3 个观测时次里，无论是单层云还是多层云，均表现为早晨云底高度最低，中午云底高度抬升，晚间维持的现象。这是由于随着太阳的升起，地面开始吸收更多的太阳辐射，进而通过释放更多的长波辐射能量使最低层云底获得更多抬升的能量，同时由于最低层云底所处边界层高度在中午时刻升高也促进了云的发展，综合表现为在中午单层和多层云中最低层云底高度升高。晚间云底高度仍维持较高，这和地面释放潜热较慢有一定的关系。另一方面，中午太阳辐射的增加使得云顶粒子蒸发，并且使大气稳定度增加，从而抑制了云体的发展，表现为云

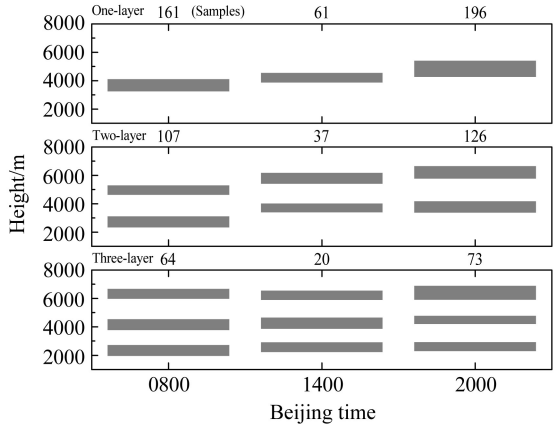

图 8　2015～2017 年单层、两层和三层云垂直结构的日变化特征

Fig. 8　Diurnal variations of one-, two-, and three-layer clouds from 2015 to 2017

体垂直厚度较早晨和夜间更小（Zhang et al., 2010）。夜间随着太阳落下，云体自身释放长波辐射的作用逐渐大于太阳短波辐射的作用，大气不稳定度增加，长波冷却效应使得云顶温度降低且饱和水汽压降低，使得水汽更易于凝结促进云的发展，同时冷却降温加速了云端的下沉气流，推动了低层气流的聚合上升，进一步促进了云体的发展，因此表现为单层云和多层云中最上层云的云厚明显增加，云体的累积垂直厚度也相应增加，但同时随着地面和多层云中下层云顶的逐渐冷却，单层和多层云中上层云底所接收的长波辐射能量也逐渐减少，进而云体的发展也将减缓。

此外，对于多层云，中间层云厚的变化要小于最上层和最下层云厚的变化，即云层间的相互辐射作用要小于云顶和云底同太阳和地面辐射的直接作用。

图 9 为单层、两层和三层云最高层云顶高度和最低层云底高度在不同季节的变化特征。总体来说，夏季（6～8 月）云量最多，冬季（12 月至次年 2 月）最少，表明温暖的大气条件更有利于云的形成和发展。单层云在不同季节云顶高度和云底高度的变化趋势较为一致，其中春季（3～5 月）云体的空间位置最高，秋季（9～11 月）最低，而多层云在夏季和秋季云顶发展较高，云体较为深厚，春季和冬季云体则较为浅薄。

4.3 探空识别云垂直结构的全国区域分布特征

云体的空间分布特征对地气系统的辐射能量收支起着重要的调节作用。本节即利用 2015～2017 年我国业务布网的探空站观测数据，识别得到全国不同地区、不同站点的单层、两层和三层云云底高度和云体厚度（此处分析的多层云的云体厚度是指多层云中从最高层云的云顶高度至最低层云的云底高度所占据的整个垂直空间的厚度），从而对云结构随季节变化的空间分布特征进行分析，补充对我国云垂直结构区域变化特征的认识。

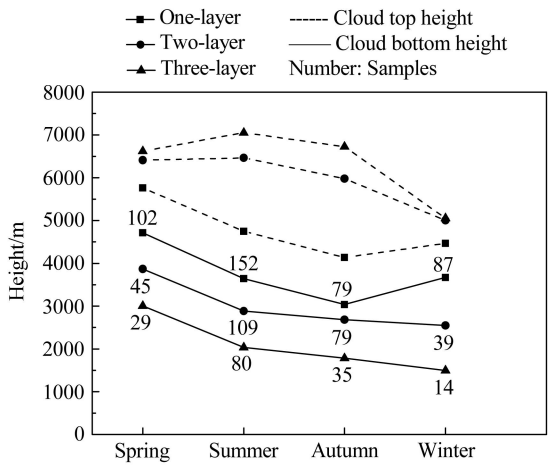

图 9 2015～2017 年单层、两层和三层云最高层云顶高度和最低层云底高度的季节变化特征

Fig. 9 Seasonal variations of the uppermost layer of the cloud top height and the lowest layer of the cloud base height in one-, two-, and three-layer clouds from 2015 to 2017

季节差异下大气中的水汽含量和太阳辐射量不同，因此，云的垂直结构在不同季节的区域分布特征也会有所差异。图 10 为 2015～2017 年全国范围探空识别的单层、两层和三层云的云底高度在不同季节的空间分布。总体来说，不同季节、不同云层数的云底高度均呈现西高东低的空间分布特征，并且单层云的云底高度在不同季节均高于多层云。青藏高原地区云底高度最高，冬季可达 8 km，东南和东北地区的云底高度最低，全年均普遍低于 3 km。同时随着季节变化，以青藏高原为中心的云底高度大值区范围从春季到冬季逐渐缩小。

图 11 为不同季节探空识别云体厚度的空间分布。分析可见，随着云层数的增加，云体厚度也逐渐增加，单层云的平均云体厚度在 1～2 km，而三层云云体厚度的最大值约 7 km。并且随着云层数的增加，多层云的云体厚度在空间上呈现出自东南沿海向西北内陆逐渐减小的分布特征。同时，多层云的云体厚度随季节变化也十分明显，表现为夏季>秋季和春季>冬季的特征，表明更好的温湿条件更加有利于多层云在垂直方向上的发展。单层云由于云体厚度普遍较薄，其时间和空间变化均不如多层云显著。

综上所述，基于三年全国探空站观测数据识别的单层、两层和三层云云底高度和云体厚度，得到我国云垂直结构分布特征具有明显的纬向变化趋势，以青藏高原为中心的西南地区，云底较高而云体较薄，而东南沿海地区，云底较低且云体更加深厚。同时，云垂直结构的区域分布也表现出明显的季节差异，相较于冬季的寒冷干燥，夏季温暖湿润的大气条件更有利于云的形成和发展。

5 结论

本文基于我国业务探空观测资料，采用相对湿度阈值法识别云垂直结构，首先对识别的云结构特征量进行了一致性检验，其次应用 2015～2017 年

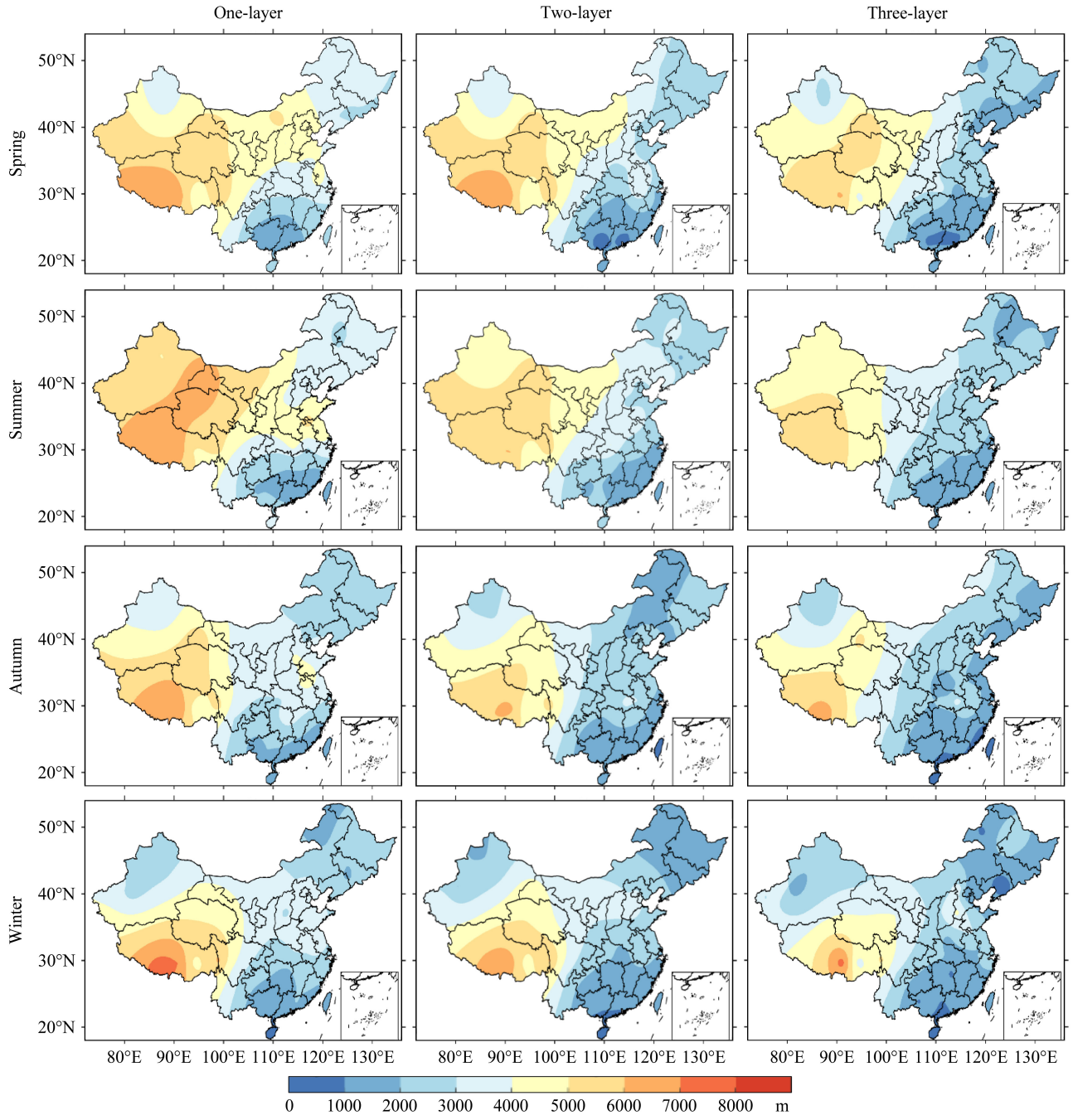

图 10　2015～2017 年单层、两层和三层云最低层云底高度的区域分布特征

Fig. 10　Spatial distribution of the lowest layer of the cloud base height in one-, two-, and three-layer clouds in China from 2015 to 2017

的探空资料统计并分析了单层、两层和三层云的垂直结构分布特征、日变化和季节变化特征以及全国区域分布特征，初步得到结论如下：

（1）使用激光云高仪的观测数据对探空识别的云底高度进行一致性检验，得到两者均识别有云的样本多集中在中低云，对于高云识别一致性较差的原因可能是由于探空气球在高空发生漂移所致，总的相关系数为 0.73。使用“风云四号”卫星的云顶高度产品同探空识别的云顶高度进行一致性检验，得到两者均识别有云样本多为中高云，总的相关系数为 0.67。对于不同层云，随着云层数的增加，两者识别的云顶高度也均随之升高。使用毫米波云雷达的观测数据对探空识别的云层数进行一致性检验，结果表明采用相对湿度阈值法的探空能够较为准确

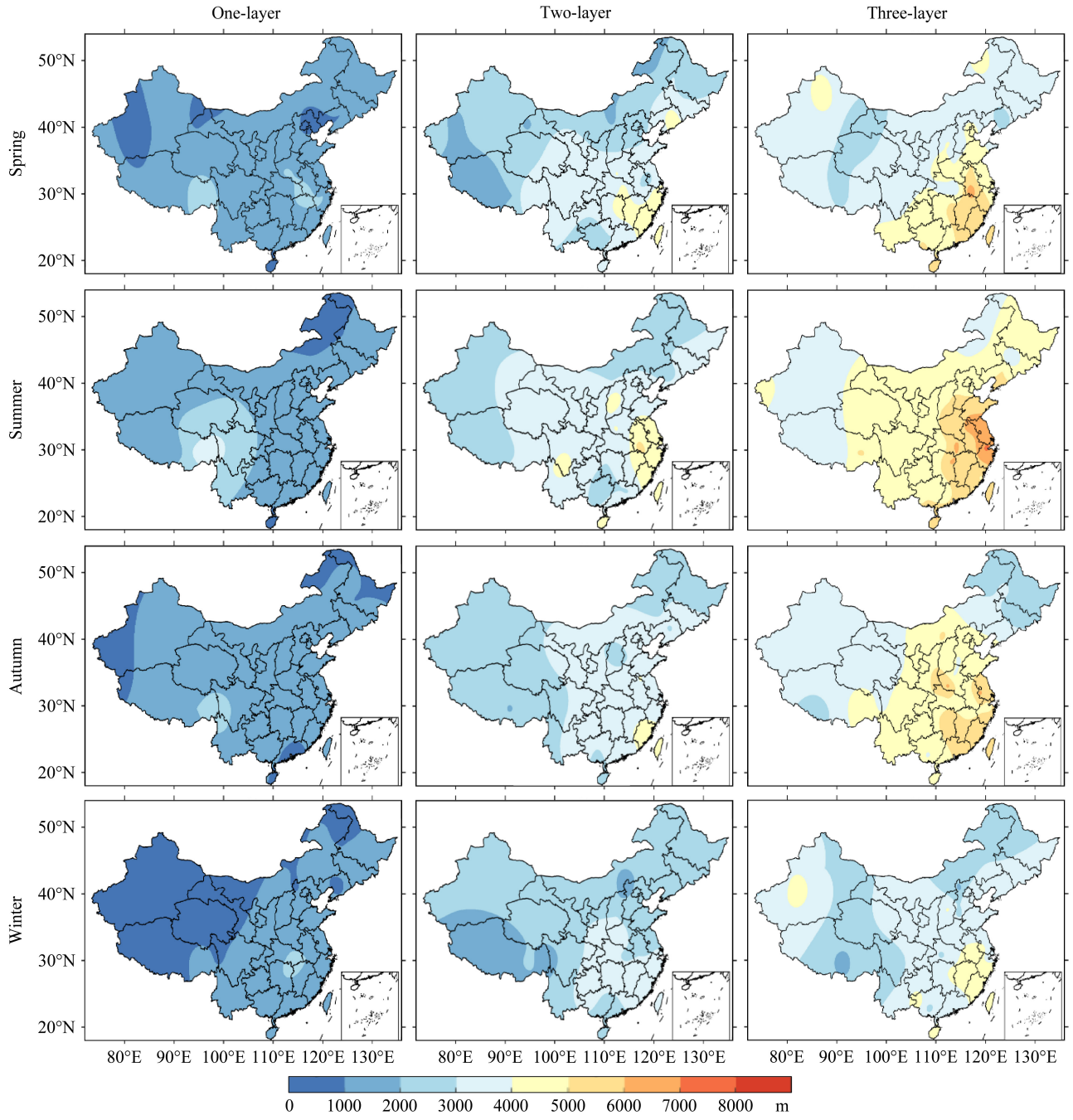

图 11 单层、两层和三层云累积云体厚度的区域分布特征

Fig. 11 Spatial distribution of the integral cloud thickness of one-, two-, and three-layer clouds in China

地识别明显的多层云结构。

（2）基于北京南郊探空站 2015～2017 年的观测数据，分别获得单层、两层和三层云样本 420、272 和 158 个，并基于该样本统计得到单层、两层和三层云的平均云底高度、云顶高度和云层厚度的垂直空间分布，具体表现为垂直方向上，单层云出现的高度范围介于多层云的高度范围内，同时随着云层数的增加，云在垂直方向上更为伸展，即高层云越高，低层云越低。

（3）对于云垂直结构的日变化特征，表现为中午单层和多层云中最低层云的云底高度均高于早晨，而夜间单层和多层云中最高层云的云顶高度则高于早晨和中午。同时多层云云层间的相互辐射作用要小于云顶和云底同太阳和地面辐射的直接作用，

因此中间层云厚的变化要小于最上层和最下层云厚的变化。季节变化对云的影响主要表现为温暖的大气条件更有利于云的形成和发展。

（4）对于云垂直结构的区域分布特征，之前的研究大多针对我国某个区域，而对全国范围云垂直结构分布特征的研究则较少。本文基于全国探空资料给出单层、两层和三层云云底高度和云体厚度的空间分布特征，表明不同地形和气候带的差异直接影响云形成的类型。其中，整体分布特征具有明显的纬向变化趋势，即以青藏高原为中心的西南地区通常为云底较高云体较薄的云，而以东南沿海地区为中心则为云底较低云体较厚的云。

参考文献（References）

蔡淼, 欧建军, 周毓荃, 等. 2014. L 波段探空判别云区方法的研究 [J]. 大气科学, 38(2): 213–222　Cai Miao, Ou Jianjun, Zhou Yuquan, et al. 2014. Discriminating cloud area by using L-band sounding data [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 38(2): 213–222. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2013.12193

Chernykh I V, Eskridge R E. 1996. Determination of cloud amount and level from radiosonde soundings [J]. J. Appl. Meteor. , 35(8): 1362–1369. doi:10.1175/1520-0450(1996)035<1362:DOCAAL>2.0.CO;2

Chernykh I V, Alduchov O A, Eskridge R E. 2001. Trends in low and high cloud boundaries and errors in height determination of cloud boundaries [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc. , 82(9): 1941–1948. doi:10.1175/1520-0477(2001)082<1941:TILAHC>2.3.CO;2

Clothiaux E E, Ackerman T P, Mace G G, et al. 2000. Objective determination of cloud heights and radar reflectivities using a combination of active remote sensors at the ARM CART sites [J]. J. Appl. Meteor. , 39(5): 645–665. doi:10.1175/1520-0450(2000)039<0645:ODOCHA>2.0.CO;2

戴进, 余兴, Rosenfeld D, 等. 2006. 一次过冷层状云催化云迹微物理特征的卫星遥感分析 [J]. 气象学报, 64(5): 622–630　Dai Jin, Yu Xing, Rosenfeld D, et al. 2006. Analysis of satellite observed microphysical signatures of cloud seeding tracks in supercooled layer clouds [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 64(5): 622–630. doi:10.3321/j.issn:0577-6619.2006.05.009

Delanoë J, Hogan R J. 2010. Combined CloudSat-CALIPSO-MODIS retrievals of the properties of ice clouds [J]. J. Geophys. Res., 115(D4): D00H29. doi:10.1029/2009JD012346

Dong X Q, Minnis P, Xi B K. 2005. A climatology of midlatitude continental clouds from the ARM SGP central facility. Part I: Low‐level cloud macrophysical, microphysical, and radiative properties [J]. J. Climate, 18(9): 1391–1410. doi:10.1175/JCLI3342.1

Dong X Q, Xi B K, Minnis P. 2006. A climatology of midlatitude continental clouds from the ARM SGP central facility. Part II: Cloud fraction and surface radiative forcing [J]. J. Climate, 19(9): 1765–1783. doi:10.1175/JCLI3710.1

Guan H, Yau M K, Davies R. 2010. The effects of longwave radiation in a small cumulus cloud [J]. J. Atmos. Sci. , 54(17): 2201–2214. doi:10.1175/1520-0469(1997)054<2201:TEOLRI>2.0.CO;2

Hanson H P. 1987. Radiative/turbulent transfer interactions in layer clouds [J]. J. Atmos. Sci. , 44(9): 1287–1295. doi:10.1175/1520-0469(1987)044<1287:RTIILC>2.0.CO;2

黄萍, 李刚, 韩迁立. 2014. 探空测云垂直结构方法研究及应用 [J]. 贵州气象, 38(4): 13–16　Huang Ping, Li Gang, Han Qianli. 2014. The research and application of cloud vertical structure retrieved by radiosonde [J]. J. Guizhou Meteor. (in Chinese), 38(4): 13–16. doi:10.3969/j.issn.1003-6598.2014.04.003

李伟, 张春晖, 孟昭林, 等. 2010. L 波段气象探测网运行监控系统设计 [J]. 应用气象学报, 21(1): 115–120　Li Wei, Zhang Chunhui, Meng Zhaolin, et al. 2010. The design of operation monitoring system for L-band upper-air meteorological sounding network [J]. J. Appl. Meteor. Sci. (in Chinese), 21(1): 115–120. doi:10.3969/j.issn.1001-7313.2010.01.016

李绍辉, 孙学金, 张日伟, 等. 2017. 探空资料云检测及其统计研究 [J]. 气象科学, 37(3): 403–408　Li Shaohui, Sun Xuejin, Zhang Riwei, et al. 2017. Cloud determination of radiosonde data and its statistical study [J]. J. Meteor. Sci. (in Chinese), 37(3): 403–408. doi:10.3969/2016jms.0043

Naud C M, Muller J P, Clothiaux E E. 2003. Comparison between active sensor and radiosonde cloud boundaries over the ARM Southern Great Plains site [J]. J. Geophys. Res., 108(D4): 4140. doi:10.1029/2002JD002887

Poore K D, Wang J H, Rossow W B. 1995. Cloud layer thicknesses from a combination of surface and upper-air observations [J]. J. Climate, 8(3): 550–568. doi:10.1175/1520-0442(1995)008<0550:CLTFAC>2.0.CO;2

苏立娟, 郑旭程, 王凯, 等. 2017. 内蒙古中部地区云气候学特征及降水云垂直结构特征分析 [J]. 内蒙古气象, (2): 3–8　Su Lijuan, Zheng Xucheng, Wang Kai, et al. 2017. Analysis on climatological characteristics of cloud and vertical structure characteristics of rain cloud in Inner Mongolia [J]. Meteor. J. Inner Mongolia (in Chinese), (2): 3–8. doi:10.14174/j.cnki.nmqx.2017.02.001

孙丽, 赵姝慧, 张晋广, 等. 2017. 基于相对湿度阈值法的沈阳地区云垂直分布特征 [J]. 干旱气象, 35(4): 619–625　Sun Li, Zhao Shuhui, Zhang Jinguang, et al. 2017. Characteristics of cloud vertical structure based on threshold method of relative humidity in Shenyang [J]. J. Arid Meteor. (in Chinese), 35(4): 619–625. doi:10.11755/j.issn.1006-7639(2017)-04-0619

Vaillancourt P A, Tremblay A, Cober S G, et al. 2003. Comparison of aircraft observations with mixed-phase cloud simulations [J]. Mon. Wea. Rev., 131(4): 656–671. doi:10.1175/1520-0493(2003)131<0656:COAOWM>2.0.CO;2

Wang J H, Rossow W B. 1995. Determination of cloud vertical structure from upper-air observations [J]. J. Appl. Meteor. , 34(10): 2243–2258. doi:10.1175/1520-0450(1995)034<2243:DOCVSF>2.0.CO;2

Wang J H, Rossow W B, Uttal T, et al. 1999. Variability of cloud vertical structure during ASTEX observed from a combination of

rawinsonde, radar, ceilometer, and satellite [J]. Mon. Wea. Rev. , 127(10): 2484–2502. doi:10.1175/1520-0493(1999)127<2484: VOCVSD>2.0.CO;2

Xi B K, Dong X Q, Minnis P, et al. 2010. Correction to “A 10 year climatology of cloud fraction and vertical distribution derived from both surface and GOES observations over the DOE ARM SPG site” [J]. J. Geophys. Res., 115(D19): D19199. doi:10.1029/2010JD 014851

Yang J, Zhang Z, Wei C, et al. 2017. Introducing the new generation of Chinese geostationary weather satellites, Fengyun-4 [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc. , 98(8): 1637–1658. doi:10.1175/BAMS-D-16-0065.1

Zhang J Q, Chen H B, Li Z Q, et al. 2010. Analysis of cloud layer structure in Shouxian, China using RS92 radiosonde aided by 95 GHz cloud radar [J]. J. Geophys. Res., 115(D7): D00K30. doi:10. 1029/2010jd014030

赵增亮, 毛节泰, 魏强, 等. 2010. 西北地区春季云系的垂直结构特征飞机观测统计分析 [J]. 气象, 36(5): 71–77 Zhao Zengliang, Mao Jietai, Wei Qiang, et al. 2010. A study of vertical structure of spring stratiform clouds in Northwest China [J]. Meteor. Mon. (in Chinese), 36(5): 71–77. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2010.5.010

周毓荃, 欧建军. 2010. 利用探空数据分析云垂直结构的方法及其应用研究 [J]. 气象, 36(11): 50–58 Zhou Yuquan, Ou Jianjun. 2010. The method of cloud vertical structure analysis using rawinsonde observation and its applied research [J]. Meteor. Mon. (in Chinese), 36(11): 50–58. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2010.11.008

周毓荃, 陈英英, 李娟, 等. 2008. 用 FY-2C/D 卫星等综合观测资料反演云物理特性产品及检验 [J]. 气象, 34(12): 27–35 Zhou Yuquan, Chen Yingying, Li Juan, et al. 2008. Retrieval and preliminary test of cloud physical parameters from combination of FY-2C/D geostationary satellite data and other observation data [J]. Meteor. Mon. (in Chinese), 34(12): 27–35. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2008.12.004