

赵增亮,毛节泰,魏强,等. 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,2010,36(5):71-77.

西北地区春季云系的垂直结构 特征飞机观测统计分析^{*1}

赵增亮^{1,2} 毛节泰¹ 魏 强² 应亚江²

王 磊^{1,2} 韩志刚² 李成才¹

1 北京大学物理学院, 北京 100871

2 北京应用气象研究所, 北京 100029

提 要: 根据2001年5—6月8架次的飞机探测资料,配合地面观测和卫星资料综合分析得出了西北地区春季云系的垂直结构宏微观特征,包括云厚、云底高度、云粒子浓度、含水量、有效半径、粒子谱分布函数等。降水性层状云厚平均约2000 m,低云含水量垂直方向上平均为 $0.07 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$,中云含水量垂直方向上平均为 $0.03 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。对比分析降水云和非降水云系的微物理特征量,两者存在显著的差异,降水性层状云有效半径要达到 $10 \sim 16 \mu\text{m}$ 。

关键词: 云物理, 飞机探测, 宏微观特征

A Study of Vertical Structure of Spring Stratiform Clouds in Northwest China

ZHAO Zengliang^{1,2} MAO Jietai¹ WEI Qiang² YING Yajiang²

WANG Lei^{1,2} HAN Zhigang² LI Chengcai¹

1 School of Physics, Peking University, Beijing 100871

2 Beijing Institute of Applied Meteorology, Beijing 100029

Abstract: Observations from aircraft equipped with Particle Measuring System in May—June 2001, surface observations and satellite data have been analyzed to get macro and micro structures of cloud system over Northwest China, including cloud base height, cloud thickness, cloud particle concentration, liquid water content, effective cloud particle radius, and cloud particle spectrum function. The depth of stratiform clouds with precipitation is about 2000 m, The mean value of liquid water content of low clouds with precipitation is about $0.07 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$, The mean value of liquid water content of middle clouds with precipitation is about $0.03 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$. It is found that there are distinct differences between stratiform clouds with and without precipitation, by comparing their macro- and microphysics. The effective radius of stratiform cloud with precipitation needs to be as large as $10 \sim 16 \mu\text{m}$.

Key words: cloud physics, aircraft measurement, macro and micro structures

引 言

云的宏微观结构特征是云物理学研究中的重要

问题。云物理学与大气科学中的很多分支学科有密切联系,是人工影响天气的科学基础,因此云物理学的研究日益受到人们的重视。云在地气系统的辐射平衡中起着重要的作用^[1],云的辐射特性与云的微

* 国家自然科学基金项目(40575001,40775002)

2009年3月24日收稿; 2009年12月6日收修定稿

第一作者:赵增亮,从事大气辐射、遥感和云物理研究. Email: zzl@pku.org.cn

物理特征是紧密相连的^[2]。飞机探测可直接获取云的宏微观结构,是云和降水物理研究的一项基础工作。飞机的穿云探测是确定云中水凝物含量、粒子浓度和粒子谱分布等特性的一种基本方法^[3-6],通过对这些测量数据的统计分析,可以了解云系的宏微观特征。飞机实测数据还可用于:研究气溶胶-云-降水的相互作用^[7-8],验证采用卫星数据或地基云雷达数据定量反演云参数的精度^[9-10];有云大气的辐射传输和云辐射参数化的研究^[11-12],进而研究云内辐射传输过程对云和降水的影响以及研究全球气候变化中云的辐射强迫问题。

目前国内的飞机探测多是结合人工影响天气作业开展的,对云的探测主要是在作业区的平飞探测,本场起降时有一些垂直探测,2001年春季在西北地区进行了云参数飞机探测,除本场起降外,在飞行过程中还进行了云系的垂直探测,本文对这些垂直探测结果进行了统计分析,包括云厚、云底高、在垂直方向上平均含水量、有效直径、粒子谱分布特征等。了解云微物理特征的垂直分布有助于更好地设计卫星云遥感算法,Xiong等^[13]研究表明利用AVHRR资料反演水云的光学厚度和有效半径,不考虑云的垂直不均一性,云光学厚度的反演误差约20%,有效半径的反演误差约10%~20%,当卷云覆盖在低层水云上空时,误差会更大。利用云雷达反射率廓线反演云中含水量随高度的垂直分布时需要有一个云中粒子谱分布、含水量的先验值^[14],合适的先验值有助于反演精度的提高,基于此,本文对飞机穿云探测垂直分布结果进行了统计分析;另外云生成后,能否产生降水,从宏微观特征上看有没有一个门坎,Rosenfeld^[15]利用卫星反演云顶附近的云粒子有效半径 $14\ \mu\text{m}$ 为阈值来判断降水区,本文按降水云和非降水云将飞机穿云的垂直探测进行分类,并进行对比分析。

1 探测概况

2001年5月上旬至6月上旬,在西北地区进行了为期1个月的探测,机载仪器有粒子测量系统、热线含水量仪、高度空速传感仪、温度露点仪、GPS全球定位系统等,其中机载粒子测量系统有六个探头,可测量大气中尺寸为 $0.1\sim 9300\ \mu\text{m}$ 粒子的数密度、谱分布,尺寸为 $30\sim 9300\ \mu\text{m}$ 粒子的二维图像资料,前向散射探头量程设置在 $2\sim 32\ \mu\text{m}$ 档。用

于云微物理探测的仪器:PCASP-100X用于观测气溶胶粒子,测量粒子直径范围 $0.1\sim 3.0\ \mu\text{m}$,分辨率可达 $0.02\ \mu\text{m}$ 。FSSP-100用于观测云滴粒子谱,测量范围 $1.0\sim 95\ \mu\text{m}$,设有四档,分别测量粒子直径在 $1.0\sim 95\ \mu\text{m}$ 、 $2.0\sim 47\ \mu\text{m}$ 、 $2.0\sim 32\ \mu\text{m}$ 、 $1.0\sim 16\ \mu\text{m}$ 的云滴,分辨率可达 $1.0\ \mu\text{m}$ 。OAP-260X(260Y)用于测量云(雨)滴和冰雪晶粒子谱,测量范围分别为 $30.0\sim 1860\ \mu\text{m}$ 、 $150.0\sim 9300\ \mu\text{m}$,分辨率分别为 30.0 、 $150.0\ \mu\text{m}$ 。OAP-2D-GA2(GB2)用于测量云(雨)滴和冰雪晶粒子二维图像及粒子谱,测量粒子直径范围和分辨率同OAP-260X(260Y)。在探测过程中,数据采样频率为1秒1次。

在这一个月的探测期间,云和降水多为冷锋天气过程所致。2001年5月上旬后期,亚洲中高纬度西风带环流经向度较大,为两槽一脊型,东亚地区被东亚大槽控制,我国北方高空盛行西北气流,地面被冷高压占据,天气晴好。进入5月中旬,环流形势由经向向纬向环流调整,中高纬度环流平直。10日,极锋锋区在欧洲东北部分裂出一小槽东移发展,到5月中旬后期,这个槽已替代原来的东亚大槽,成为一新的东亚大槽。在槽东移过程中,5月13日携带冷空气沿西北路径,影响我国西北地区,给该地区造成一次冷锋天气过程。5月15日开始,500 hPa中高纬度环流开始调整,乌拉尔山东部槽发展,同时东亚大槽减弱,亚洲中高纬度西风带环流由经向又向平直的纬向气流转换。22日,从西西伯利亚大槽分裂的低槽发展东移,23—25日,又给我国西北地区东部带来一次冷锋天气过程。到28日,整个500 hPa中高纬度环流又回到了两槽(欧洲槽/东亚大槽)一脊(贝加尔湖脊)的经向环流。6月上旬开始,亚洲中高纬度高空环流又开始了经向向平直的纬向环流的转变。欧洲大槽分裂的低槽东移发展,分别在6日和9日,给我国西北地区带来两次冷锋天气过程。

飞机起降机场为甘肃临洮,海拔高度约2000 m,飞行探测空域: $32^{\circ}\sim 40^{\circ}\text{N}$ 、 $90^{\circ}\sim 106^{\circ}\text{E}$,跨越甘肃、宁夏和青海三省(自治区)。探测日期、时间、云型、垂直探测时间位置等见表1。

以2001年5月15、16日四个探测飞行时间段为例,给出三维航迹图,见图1。

在进行的这些垂直探测中,一般水平偏斜较小,除了5月16日10:50以后的两次垂直探测,尤其是10:51:30—11:26:47的垂直探测,经度有 3.36° 的

表 1 探测概要

Table 1 Summary of aircraft measurements

日期	起降时间	探测云型	垂直探测时间段	地理位置	日期	起降时间	探测云型	垂直探测时间段	地理位置
2001-5-14	09:13-13:04	Sc	09:16:39-09:19:42,	35.18°~35.36°N 103.91°~103.40°E	2001-5-25	09:04-13:36	Sc As	09:07:35-09:10:40,	35.30°~35.32°N 103.83°~103.84°E
			11:20:52-11:30:58,	34.96°~35.72°N 105.67°~105.79°E				11:56:00-12:45:11,	35.02°~35.57°N 103.76°~104.14°E
			12:10:40-12:14:46,	34.36°~34.64°N 105.80°~105.86°E				13:19:49-13:27:33,	35.29°~35.50°N 103.83°~104.11°E
2001-5-15	09:14-12:51	Sc As	09:18:26-09:23:43,	35.26°~35.51°N 103.89°~104.01°E	2001-5-28	09:50-12:36	Sc As Ci	09:54:17-09:59:43,	35.18°~35.40°N 103.76°~103.97°E
			12:36:12-12:43:27,	35.26°~35.55°N 103.54°~103.90°E				10:04:09-10:20:39,	35.51°~36.01°N 101.78°~103.28°E
2001-5-16	09:23-13:30	Sc As Ci	09:27:39-09:28:09,	35.22°~35.25°N 103.95°~103.96°E	2001-5-31	09:02-13:13	Ac Ci	11:26:19-11:52:59,	35.01°~35.62°N 103.75°~104.08°E
			09:30:09-09:30:42,	35.36°~35.39°N 103.98°~104.00°E				12:20:20-12:28:26,	35.22°~35.51°N 103.84°~104.06°E
			10:51:30-11:26:47,	34.03°~34.70°N 102.51°~105.87°E				09:10:04-09:10:33,	35.42°~35.45°N 104.03°~104.04°E
			11:52:44-12:35:36,	34.19°~34.99°N 104.59°~105.93°E				12:40:48-12:41:50,	35.28°~35.36°N 103.88°~103.90°E
2001-5-23	08:54-11:18	Sc	08:55:33-09:13:13,	35.15°~35.52°N 103.80°~104.06°E	2001-6-06	13:30-14:18	Ac	14:01:22-14:02:16,	35.15°~35.19°N 103.47°~103.53°E

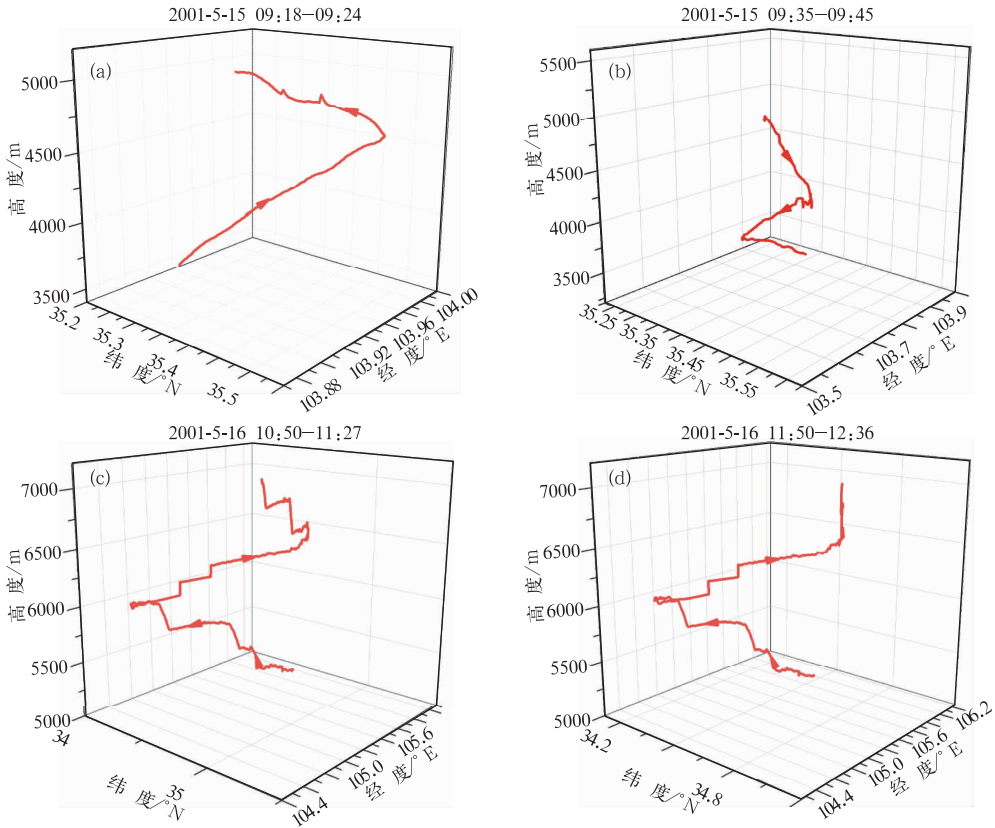


图 1 2001 年 5 月 15、16 日四个垂直探测段的三维航迹图

Fig. 1 The 3-D flight track of four legs of vertical profile on May 15 and 16, 2001

跨距, 仍将其纳入统计样本是考虑了此次垂直探测为降水性层状云, 云系水平尺度大, 相对均匀。NASA 发布的 MOD06 云顶高度产品显示沿飞行航线云顶高度约在 250~390 hPa 之间, EOS 卫星过境时间为

12 时 30 分(北京时), 航线下方的天水(57006 站)、岷县(56093 站) 11 时观测都为高层云、天空总云量不明, MOD06 云顶高度图结果图 2。

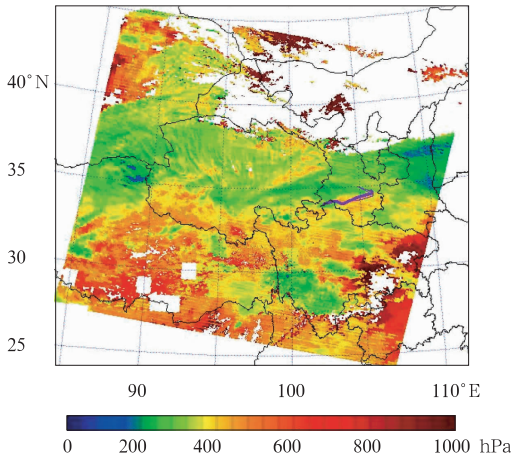


图 2 MODIS 云顶高度结果
(紫色线为飞行航迹)

Fig. 2 The cloud top height of MOD06
(the purple line is flight track)

2 粒子测量系统的误差估计

云是不同尺度不同相态水凝物的集结体,云中的粒子包括霾、云滴、雨滴、冰晶、雪晶、雪团、霰、冰粒和冰雹。其尺度大小从 10^{-7} m 到 10^{-1} m,相差 100 万倍;云滴数浓度可高达 1000 个 \cdot cm^{-3} ,冰雹的数浓度有时仅 1 个 \cdot m^{-3} ,相差 10^9 倍^[3]。粒子测量系统(PMS)采用不同的探头观测不同尺度范围内的粒子。

PMS 中的前向散射探头 FSSP,通过测量粒子经过聚焦的激光束时采样空间内散射光的大小,来度量粒子的尺寸,需要对信号强度与粒子尺度的关系进行标定。FSSP 测量粒子尺寸的精度受激光束的均一性、仪器响应时间、定标精度等的影响;FSSP 测量粒子浓度的精度受采样体积的计算和采样周期内粒子计数精度的影响^[16-19]。Mossop^[20]分析枪式滴谱仪与 FSSP 探头结果的差异,发现两者浓度比值 1.04 ± 0.16 ,含水量比值 0.92 ± 0.17 ;考虑到误差传递,利用 FSSP 测得的云粒子谱分布计算云水含量误差可达 30%;游来光^[3]总结 FSSP 探头测量的云滴浓度、平均直径和液态含水量与其他类型的仪器比较,一般相差不超过 20%。

对于 PMS 中的光阵探头,包括一维和二维,其测量误差也来自两个方面:粒子尺寸的测量误差和粒子计数的误差。Korolev 等^[21]利用菲涅尔衍射原理系统研究了二维光阵探头的测量精度,对于较小的粒子(比如粒子直径 $100 \mu\text{m}$)尺寸的测量有可能

高估或低估达 $100 \mu\text{m}$,对于较大的粒子(比如粒子直径 $500 \mu\text{m}$)尺寸的测量有可能高估达 $100 \mu\text{m}$;对粒子直径小于 $100 \mu\text{m}$ 的粒子会产生漏测,在仪器响应时间为 0 的理想状态下,PMS OAP-2D-C 探头对直径在 $25 \mu\text{m}$ 的粒子漏计比例达 70%。Gordon 等^[22]对光阵探头进行了同机观测对比分析,光阵探头包括一维雨探头(OAP-260Y)、二维云探头(OAP-2D-C)、二维雨探头(OAP-2D-P),结果表明当云中水成物粒子尺寸大于 $1 \mu\text{m}$ 时,三个探头取样一致性非常好;在温度大于 $3 \text{ }^\circ\text{C}$ 时,雨滴取样测量结果一致性较好,2D-C 测量浓度最高;当温度在 $0 \text{ }^\circ\text{C}$ 以下时,三种探头测量结果差异加大,2D-C 与 2D-P 的浓度差异可达 7:1,这些差异估计来自于探头分辨率以及部分冰晶粒子大的纵横比造成的。

粒子测量系统虽然有其固有的缺陷,但是对于云的微物理参数来说,机载粒子测量系统的结果仍被认为是最准确的^[23]。

3 数据处理

原始探测数据经预处理后,按探头生成结果文件^[24];利用前向散射探头、一维云粒子探头、二维云粒子探头三个探头的数据进行统计分析,对于由液滴构成的低云采用前向散射探头和一维云粒子两个探头,对于含有冰晶粒子的中云采用前向散射探头和二维云粒子探头。云中的粒子按尺度大小可分为云粒子和雨粒子,通常以粒子直径 $D=200 \mu\text{m}$ 为界^[25],粒子直径在 $2 \sim 200 \mu\text{m}$ 为云粒子,粒子直径大于 $200 \mu\text{m}$ 的为雨粒子。对于固态粒子按尺度可分为冰晶和雪晶,为了准确得到云中的含水量,在预处理时利用二维灰度探头的资料,根据固态粒子面积与周长的关系,已将其等效为球形粒子,故为了方便,云中的粒子统一以粒子直径 $D=200 \mu\text{m}$ 为界分为云粒子和雨粒子,不再单独考虑冰晶和雪晶之分。以 FSSP 探头全部 15 档的数据和 260X(GA2)探头的前六档数据合并为粒子直径在 $2 \sim 200 \mu\text{m}$ 的云粒子谱资料。

将探测结果按降水云和非降水云分为两类,每类再分为低云(Sc)、中云(As、Ac),进行云的宏微观结构特征统计分析,以一次垂直探测的平均为一个观测样本,云的宏观特征包括云厚和云底高度,云的微观特征包括云粒子浓度、含水量、有效半径、谱分布。降水云和非降水云的区分主要是依据地面观测

资料,尤其是本场的起降探测,在航线上的垂直探测同时参考了地面观测资料中的现在天气现象和机上人员的观测。为了考察降水云与非降水云微物理特征的差异,云生成后,云粒子谱拓展到有效半径达到多大才能形成降水,文中对降水云的含水量、云粒子浓度、有效半径、谱分布参数的统计限定在云粒子直径小于 200 μm 段。

云厚根据云粒子浓度数值和飞机上观测人员的出、入云宏观记录共同分析得到,云中含水量计算如下式所示^[3]:

液态粒子含水量

$$LWC = \sum_1^n \frac{\pi}{6} D_i^3 N_i \rho$$

固态粒子含水量

$$IWC = \sum_1^n AD_i^b N_i$$

其中 ρ 为水的密度,AD_i^b 为固态粒子质量。粒子有效直径的计算公式:

$$D_e = \frac{\sum_1^n n_i D_i^3 \Delta D_i}{\sum_1^n n_i D_i^2 \Delta D_i}$$

云粒子谱型分布采用 Khrigian-Mazin 谱分布^[26]:

$$N(D)dD = AD^2 e^{-BD} dD$$

式中 A、B 为待定系数。

4 探测结果统计分析

降水云的宏微观统计特征见表 2,非降水云的宏微观统计特征见表 3。表中所列高度为海拔高度。

表 2 西北地区春季降水云的宏微观特征

Table 2 The macro- and microstructure characteristics of precipitation cloud in spring in Northwest China

参数名称	低云			中云		
	平均值	标准偏差	样本数	平均值	标准偏差	样本数
云底高度/m	3230	370	6	4920	370	5
云厚/m	1990	610	6	1810	580	5
浓度/cm ⁻³	86.4	43	6	22.4	17	5
含水量/g·m ⁻³	0.07	0.05	6	0.03	0.02	5
有效直径/μm	19.2	4.8	6	31.8	1.6	5
谱型 A 值	1.93E-4	5.2E-5	6	3.44E-4	5.0E-5	5
谱型 B 值	0.111	0.007	6	0.09837	0.001	5
相关系数	0.87	0.01	6	0.88	0.01	5

由表 2、表 3 可见,降水云同非降水云系相比,一个明显的特征为中云的含水量,降水云的大于非降水云的;而云粒子浓度,降水性中云的又明显小于

表 3 西北地区春季非降水云的宏微观特征

Table 3 The macro- and microstructure characteristics of non-precipitation cloud in spring in Northwest China

参数名称	低云			中云		
	平均值	标准偏差	样本数	平均值	标准偏差	样本数
云底高度/m	3600	440	5	4690	350	4
云厚/m	730	350	5	230	100	4
浓度/cm ⁻³	62.6	43	5	114.42	50	4
含水量/g·m ⁻³	0.02	0.01	5	0.02	0.01	4
有效直径/μm	13.4	8.7	5	7.51	1.6	4
谱型 A 值	2.11E-4	1.8E-4	5	7.15E-5	2.0E-5	4
谱型 B 值	0.1192	0.015	5	0.1241	0.007	4
相关系数	0.88	0.04	5	0.87	0.01	4

非降水性中云的,这说明降水性中云的云粒子谱分布中大粒子含量要明显高于非降水性中云的。这说明在降水形成的过程中,中云起到了云粒子向降水粒子转化的比较关键的作用,赵仕雄等^[27]分析 1977—1979 年 5—6 月青海东北部系统性降水高层云的云滴谱飞机观测资料也发现在海拔 5 km 高度存在一活跃增长层,温度探测显示,西北地区春季中云所处的温度范围在 -17~-2 ℃,属混合相态,贝吉龙过程就发生在这一层。6 次降水云垂直探测,2 次为单层云(Sc)降水,4 次为多层云降水,单层云降水时云厚分别为 1860、3200 m。

西北地区春季降水性层状云,中云(As、Ac)和低云(Sc)含水量的平均值分别为 0.03 g·m⁻³、0.07 g·m⁻³,平均含水量约为 0.05 g·m⁻³,同国内其他地区、时间的机载粒子测量系统观测结果相近,青海东部 1995—1997 年的飞机探测结果表明作业云层的平均液水含量为 0.05 g·m⁻³^[28];河北省 1990—1993 年的观测结果平均为 0.04 g·m⁻³^[29];山东省 1989、1990、1992 年的观测结果平均为 0.06 g·m⁻³^[30];河南省 2000 年的一次冷锋和西南涡产生降水的个例探测结果为 0.05 g·m⁻³^[31];西北地区春季层状云系 2001 年的一次探测表明云中平均含水量为 0.036 g·m⁻³^[32]。低云含水量同国外的机载粒子测量系统观测结果相比,稍微偏低,Yum 等^[33]分析 ASTEX(Atlantic Stratocumulus Transition Experiment)计划中 6 个架次的大陆层状云平均含水量为 0.098 g·m⁻³,这可能是统计分析的方案不同造成的,本文只对飞行过程中垂直探测区进行了统计平均,而 Yum 等对整个飞行过程进行了统计平均。Fouquart 等^[34]统计了世界上多个地方的云物理观测结果,低云(层云和层积云)的柱含水量大都在 10~200 g·m⁻²之间,最大的为 450 g·

m^{-2} , 本文所提供的我国西北地区的观测结果表明, 降水性低云的柱含水量平均为 $139 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$, 非降水性低云的柱含水量平均为 $15 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$, 在其结果范围之内。

降水性层状云的厚度接近 2000 m, 低云和中云连接起来形成的雨云层厚度近 4000 m, 与其他观测结果也比较接近。华北地区一次冷涡云系的飞机探测^[35]低云厚 1300 m; 吉林的两次江淮气旋的飞机探测^[36]表明, 层积云厚约 1000 m, 高层云厚约 2000 m, 一次过程低云与中云中间有干层, 另一次过程低云与中云衔接云厚约 4000 m; 文献[28]统计的结果按云顶高度平均结果减去云底高度平均结果得到的云厚平均为 3910 m; 一次延安层状云微物理结构飞机探测结果^[37]表明云厚约 4050 m。

飞机探测数据表明低云的有效半径平均值为 $7.5 \mu\text{m}$ 、 $9.6 \mu\text{m}$; 云粒子谱分布可用 Khrigian-Mazin 谱较好地拟合, 相关系数在 $0.87 \sim 0.89$ 之间; 中低云粒子浓度平均值在 $20 \sim 120 \text{ 个} \cdot \text{cm}^{-3}$ 之间, 东北地区一次降水性层状云系飞机探测结果显示云粒子浓度平均值在 $10 \text{ 个} \cdot \text{cm}^{-3}$ 量级^[38]。

5 结论

(1) 西北地区春季降水云系低、中云的厚度分别为 1990、1810 m, 平均云水含量分别为 0.07 、 $0.03 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$; 非降水云系低、中云的厚度分别为 730、230 m, 平均云水含量分别为 0.02 、 $0.02 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$, 降水云与国内其他地区的观测结果相近。采用 Khrigian-Mazin 谱可较好地对中低云云粒子谱分布进行拟合, 相关系数在 $0.87 \sim 0.89$ 。

(2) 对比分析降水云和非降水云系的微物理特征量, 表明在降水形成的过程中, 中云起到了云粒子向降水粒子转化的比较关键的作用, 该层为混合相态云, 贝吉龙过程发生在这一层。

(3) 从这一个月有限的资料看, 6 次降水云的垂直探测, 其中 4 次为多层云降水。层状云要达到降水, 从宏观特征上看, 云的厚度要达到近 2000 m; 从微观特征上看, 粒子尺度分布云粒子有效半径要达到 $10 \sim 16 \mu\text{m}$, 这个结果是否具有普适性以及如何应用于由卫星资料反演的云参数来判断潜在降水区, 有待于今后更多资料的分析。

参考文献

- [1] Ramamathan V, Cess R D, Harrison E F, et al. Cloud radiative forcing and climate: Results from the earth radiation budget experiment[J]. *Science*, 1988, 243: 57-63.
- [2] 盛裴宣, 毛节泰, 李建国, 等. 大气物理学[M]. 北京: 气象出版社, 2002: 455-458.
- [3] 游来光. 利用粒子测量系统研究云物理过程和人工增雨条件[G]. 游景炎, 段英, 游来光主编, 云降水物理和人工增雨技术研究. 北京: 气象出版社, 1994: 236-249.
- [4] You Laiguang, Liu Yangang. Some microphysical characteristics of cloud and precipitation over China[J]. *Atmos Res*, 1995, 35: 271-281.
- [5] 党娟, 王广河, 刘卫国. 甘肃省夏季层状云微物理特征个例分析[J]. *气象*, 2009, 35(1): 24-36.
- [6] 于丽娟, 姚展予. 一次层状云飞机播云试验的云微物理特征及响应分析[J]. *气象*, 2009, 35(10): 8-24.
- [7] Albrecht B A. Aerosols, cloud microphysics and fractional cloudiness[J]. *Science*, 1989, 245: 1227-1230.
- [8] Ramanathan V, Crutzen P J, Kiehl J T, et al. Aerosols, climate and the hydrological cycle[J]. *Science*, 2001, 294: 2119-2124.
- [9] Takashi Y N and Teruyuki N. Wide-area determination of cloud microphysical properties from NOAA AVHRR measurements for FIRE and ASTEX regions[J]. *J Atmos Sci*, 1995, 52(23): 4043-4059.
- [10] Dong X, and Mace G G. Profiles of low-level stratus cloud microphysics deduced from ground-based measurements[J]. *J Atmos Oceanic Technol*, 2003, 20: 42-53.
- [11] 刘香娥, 王广河. FX-2C 静止气象卫星红外通道辐射特性研究[J]. *气象*, 2010, 36(2): 39-47.
- [12] 王宏七, 赵高祥. 云微物理特性对云光学和云辐射性质的影响[J]. *应用气象学报*, 1996, 7(1): 36-44.
- [13] Xiong X, Lubin D, Li W et al. A critical examination of satellite cloud retrievals from AVHRR in the Arctic using SHEBA data[J]. *J Appl Meteorol*, 2002, 41: 1195-1209.
- [14] Austin R T and Stephens G L. Retrieval of stratus cloud microphysical parameters using millimeter-wave radar and visible optical depth in preparation for CloudSat: 1. Algorithm formulation[J]. *J Geophys Res*, 2001, 106: 1195-1209.
- [15] Rosenfeld D and Gutman G. Retrieving microphysical properties near the tops of potential rain clouds by multi spectral analysis of AVHRR data[J]. *Atmos Res*, 1994, 34: 259-283.
- [16] Baumgardner D. An analysis and comparison of five water drop measuring instruments[J]. *J Climate Appl Meteor*, 1983, 22: 891-910.
- [17] Dye J E and Baumgardner D. Evaluation of the forward scattering spectrometer probe. Part I: Electronic and optical studies[J]. *J Atmos Oceanic Technol*, 1984, 1: 329-344.
- [18] Baumgardner D, Strapp W and Dye J E. Evaluation of the forward scattering spectrometer probe. Part II: Corrections for coincidence and dead-time losses[J]. *J Atmos Oceanic Technol*, 1985, 2: 626-632.

- [19] Baumgardner D and Spowart M. Evaluation of the forward scattering spectrometer probe. Part III: Time response and laser inhomogeneity limitations[J]. *J Atmos Oceanic Technol*, 1990, 7: 666-672.
- [20] Mossop S C. Intercomparison of instrument used for measurement of cloud drop concentration and size distribution[J]. *J Appl Meteor*, 1983, 22:419-429.
- [21] Korolev A V, Strapp J W and Isaac G A. Evaluation of the accuracy of PMS optical array probes[J]. *J Atmos Oceanic Technol*, 1998, 15: 514-522.
- [22] Gordon G L and Marwitz J D. An airborne comparison of three PMS probes[J]. *J Atmos Oceanic Technol*, 1984, 1: 22-27.
- [23] Miles N Verlinde L, and Clothiaux E E. Cloud droplet size distributions in low-level stratiform clouds[J]. *J Atmos Sci*, 2000, 57(2): 295-311.
- [24] 魏强, 高建春, 钱越英. 机载粒子测量系统及资料处理[J]. *气象*, 1997, 23(5): 37-40.
- [25] 大百科编写组. 中国大百科全书—大气、海洋、水文科学卷[M]. 北京:中国大百科全书出版社, 1987:819-825.
- [26] 王鹏飞, 李于华. 微观云物理学[M]. 北京:气象出版社, 1989: 414.
- [27] 赵仕雄, 陈文辉, 杭洪宗. 青海东北部春季系统性降水高层云系微物理结构分析[J]. *高原气象*, 2002, 21(3): 281-287.
- [28] 李仑格, 德力格尔. 高原东部春季降水云层的微物理特征分析[J]. *高原气象*, 2001, 20(2):191-196.
- [29] 吴志会. 河北省春夏季层状云微物理结构及人工增雨潜力的初步分析[G]. 游景炎, 段英, 游来光主编, 云降水物理和人工增雨技术研究, 北京, 气象出版社, 1994:83-88.
- [30] 张连云, 冯桂利. 降水性层状云的微物理特征及人工增雨催化条件的研究[J]. *气象*, 1997, 23(5):3-7.
- [31] 金华, 王广河, 游来光, 等. 河南春季一次层状云降水云物理结构分析[J]. *气象*, 2006, 32(10):3-10.
- [32] 李淑日. 西北地区云和降水微物理特征个例分析[J]. *气象*, 2006, 32(8):59-63.
- [33] Yum S S, Hudson J G. Maritime/continental microphysical contrasts in stratus[J]. *Tellus series, B-Chemical and Physical Meteorology*, 2002, 54 (1): 61-73.
- [34] Forquart Y, Buriez J C, Herman M, et al. The influence of clouds on radiation: A climate-modelling perspective[J]. *Rev Geophys*, 1990, 28(2): 145-166.
- [35] 苏正军, 黄世鸿, 刘正军. 一次华北冷涡降水的云物理飞机探测特征[J]. *气象*, 2000, 26(6):16-20.
- [36] 汪学林, 谷淑芳, 于勇, 等. 两次江淮气旋的云雨特征及其人工播云效果的综合分析[J]. *应用气象学报*, 2001, 12(suppl.): 48-57.
- [37] 王扬锋, 雷恒池, 樊鹏, 等. 一次延安层状云微物理结构特征及降水机制研究[J]. *高原气象*, 2007, 26(2):388-395.
- [38] 胡朝霞, 雷恒池, 郭学良, 等. 降水性层状云系结构和降水过程的观测个例与模拟研究[J]. *大气科学*, 2007, 31(5): 425-439.