## 1 2021-06-17T15:00

2

# 文章创新点和重要意义

3 云中动力和微物理参数是描述中小尺度大气状态的关键要素之一,主要包括
4 空气垂直速度、雨滴下落末速度、云水混合比、雨水混合比、水汽混合比等等,
5 这些重要参量由传统的探测手段无法直接探测获得,一般都是通过对遥感资料进
6 行反演或者通过数值模式模拟获得。通过反演或模式模拟获得的云动力和云水、
7 雨水等参数可对降水云体的宏、微观物理特征有更丰富的理解,对降水的发生发
8 展机制有更深入的认识,为我们进一步开展临近预报和人工影响天气作业提供很
9 好的基础。

目前国内气象业务上一般只使用了风廓线雷达(WPR)的水平风速、风向数 10 据,使用范围窄,其实风廓线雷达也可用于单点降水云的分析研究,对比常规天 11 气雷达,经过质量控制和数据处理过后的风廓线雷达数据精度高、时空分辨率好, 12 可以获得云体精细的垂直结构和详细的演变特征,在一定假设情况下可进一步反 13 演获得降水云体的雨滴下落末速度、大气垂直速度等云体动力参数和云水混合 14 比、雨水混合比等云微物理参数。本文计划运用风廓线雷达反演结果结合天气雷 15 达、L波段探空雷达、自动站、雨滴谱仪和微波辐射计等综合垂直观测数据,从 16 多个方面获得北京夏季降水云宏、微观物理特征和动力结构,并分阶段对各参数 17 进行了平均和分档统计,为了解北京夏季降水机制和人工增雨催化作业提供科学 18 证据。这是本文的方法创新。 19

北京北部环山,东南为平原,其降水具有典型的北方夏季降水特征,利用风 20 廓线雷达、自动站、L 波段探空雷达、雨滴谱仪和微波辐射计对其进行综合观测, 21 有助于认识我国北方地区夏季降水云的主要形成机制、影响因素,利于科学设计 22 增水作业方案,这对于增加地表水,缓解北京日益严重的缺水问题,具有比较重 23 要的意义。本论文的进行,将有利于研究北京夏季典型降水的垂直动力场和微物 24 理特征,为夏季人工增雨催化作业提供技术支持,利于更加合理科学的进行人工 25 增雨方案设计和作业效果评估,缓解水资源短缺,具有重要的社会意义和经济价 26 值。 27

28

| 29 | 一次基于风廓线雷达的北京夏季降水的垂直观测研究   |
|----|---|
| 30 | 黄钰 1.2.3 郭学良 4 罗秀明 5 陈羿辰 1.2.3 刘海龙 6  |
| 31 | HUANG Yu <sup>1,2,3</sup> GUO Xueliang <sup>4</sup> LUO Xiuming <sup>5</sup> CHENG Yichen <sup>1,2,3</sup> LIU Hailong <sup>6</sup> |
| 32 | 1 北京市人工影响天气办公室,北京,100089  |
| 33 | 2 云降水物理研究与云水资源开发北京市重点实验室,北京, 100089   |
| 34 | 3 中国气象局华北云降水野外科学试验基地,北京, 100089   |
| 35 | 4 中国科学院大气物理研究所,北京,100029  |
| 36 | 5 安徽省广德气象局,安徽,242200  |
| 37 | 695820部队飞行管制室,北京,102211   |

38

39 摘 要:本文利用风廓线雷达数据反演了降水云体的大气垂直速度、雨滴下落末速度等云动 40 力特征和云水混合比、雨水混合比等云微物理参数,并结合天气雷达、探空、自动站、雨滴 谱仪和微波辐射计等数据对 2020 年 5 月 7 日-8 日发生在北京海淀的一次夏季降水过程进行 41 42 垂直综合观测,结果表明:垂直探测仪器观测及其反演的数据可以获得降水云体的详细动力 43 参数和微物理特征。站点位于主体降水回波边缘,降水为层状云类型,整体回波较弱(主要 在 0-20dBZ), 4km 高度的水平风垂直切变贯穿整个降水过程, 降水分为两个阶段:前期 7 44 日 20 时-8 日 02 时低层存在浅对流结构,云顶较高(平均高度 8207m),低层水平风切变 45 促进了对流发展,10-20dBZ 的比重较大,粒子谱较窄,直径<1mm,雨强较弱,但粒子数 46 浓度值大,最大值 26305 m<sup>-3</sup>,2-3km 处存在暖平流,水汽和液水值大,雨水混合比 47 48 0.02-0.15g/kg, 云水混合比 0.5-2g/kg, 且强值区域大, 雨滴下落末速度 3.2-4.2m/s, 大气 垂直速度在±0.6m/s之间,上升气流和下沉气流变换明显;后期8日02时-10时转为典型 49 层状云降水,云顶较低(平均高度7831m),<10dBZ的比重较大,3100m处形成亮带的强 50 值中心,粒子谱展宽,最大直径接近 1.5mm,粒子数浓度值减小,最大值<3000 m-3,雨水 51 52 和云水值比对流期小了一个量级,且强值范围变窄,雨滴下落末速度减小为 2.8-3.6m/s,大 气垂直速度也比对流时期小了一个量级,并且在亮带高度以下(2.5-2.8km)范围内出现明 53

54 显横向带状的上升和下沉气流区。



**作者简介** 黄钰,女,1985 年生,博士,高工,主要从事雷达和人工影响天气研究. Email: <u>yhuang1128@163.com</u> 资助项目 国家重点研发计划 2017YFC1501405 国家自然科学青年基金 41805112 Funded by National Key Research and Development Program of China(Grants 2017YFC1501405) National Natural Science Foundation of China(Grants 41805112)

| 55 | 关键词: 风廓线雷达 云微物理场 云垂直动力场 夏季降水 垂直综合观测   |
|----|---|
| 56 | 文章编号 2020245A 中图分类号: P458.3   |
| 57 | doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2106.20245   |
| 58 | A Study of Vertical Observation of Summer Rainfall in Beijing                                     |
| 59 | Based on Wind Profiler Radar  |
| 60 |   |
| 61 | 1. Beijing Weather Modification Office, Beijing 100089, China;                                    |
| 62 | 2. Beijing Key Laboratory of Cloud, Precipitation and Water Resources, Beijing (Municipal)        |
| 63 | Meteorological Service, Beijing 100089, China   |
| 64 | 3. Field Experiment Base of Cloud and Precipitation Research in North China, China                |
| 65 | Meteorological Administration, Beijing 100089, China  |
| 66 | 4. Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China           |
| 67 | 5. Guangde Meteorology Bureau, Anhui 242200, China  |
| 68 | 6. 95820 Force ,Beijing 102211, China   |
| 69 |   |
| 70 | Abstract Wind profiler radar data was used to retrieve cloud dynamic characteristics such as      |
| 71 | vertical velocity, droplet terminal velocity, and microphysical parameters such as cloud water    |
| 72 | mixing ratio, rain water mixing ratio. A summer precipitation was observed and analyzed by        |
| 73 | retrieval results on 7-8 May 2020 in Beijing Haidian, combined with weather radar, sounding,      |
| 74 | automated meteorological readings, disdrometer and microwave radiometer. Results                  |
| 75 | indicated that the vertically-scanning instruments as well as retrieval results obtained          |
| 76 | precipitation dynamic and microphysical information that can be applied to further studies.       |
| 77 | The station was located at the edge of the main precipitation reflectivity factor, was stratiform |
| 78 | cloud precipitation type, and the overall precipitation reflectivity factor was weak (mainly at   |
| 79 | 0-20dBZ), vertical shear of horizontal wind at 4km ran through the entire precipitation. The      |
| 80 | precipitation was divided into two stages: the earlier stage (7th 20:00-8th 02:00)                |
| 81 | existed shallow convective structures at lower height; the convective precipitation cloud top     |
| 82 | was relatively high (average height 8207m), horizontal wind shear at low-level promoted the       |
| 83 | development of convection, the proportion of 10-20dBZ was large, particle spectrum was $^{\rm 3}$ |

84 narrow, diameter <1mm, the rain rate was weak, but number concentration was large, the maximum value was 26305 m<sup>-3</sup>, there existed warm advection at 2-3km, and the value of 85 water vapor and liquid water was large, rain water mixing ratio range was 0.02-0.15g/kg, 86 cloud water mixing ratio range was 0.5-2g/kg, and large value had a wide distribution, droplet 87 terminal velocity was 3.2-4.2m/s, vertical velocity was in range of  $\pm$  0.6m/s, updraft and 88 downdraft alternated obviously; the later stage (8<sup>th</sup> 02:00-10:00) turn into typical stratiform 89 cloud precipitation, cloud top was relatively low (average height 7831m), the proportion of 90 91 <10dBZ was large, the strong value center of bright band was formed at 3100m, the particle spectrum broadened, and the maximum diameter was close to 1.5mm, but number 92 93 concentration decreased, the maximum value  $<3000 \text{ m}^{-3}$ , the rain water and cloud water value was one order of magnitude smaller than convective stage, and the intensity range was 94 narrowed, droplet terminal velocity reduced to 2.8-3.6m/s, the vertical velocity was also an 95 order of magnitude smaller than that in convective stage, and appeared obvious horizontal 96 orientation upward and downward areas below the height of the bright band (2.5-2.8km). 97

98

99 Keywords Wind profiler radar, Cloud micro-physical field, Cloud vertical dynamic field,
100 Summer rainfall, Vertical comprehensive observation

101

102 1 引言

103 云中动力和微物理参数是描述中小尺度大气状态的关键要素之一,主要包括
104 空气垂直速度、雨滴下落末速度、云液态水含量、云水混合比、雨水混合比、水
105 汽混合比等,这些重要参量由传统的探测手段无法直接探测获得,一般都是通过
106 对遥感资料进行反演(傅云飞,2014)或者通过数值模式模拟(黄钰等,2020)
107 获得。

108 随着雷达探测技术的发展,国内外学者开展了大量云参数反演的研究(Shupe
et al,2008;Remillard et al,2013; Frisch et al,1995)。Gossard et al,(1994,1997)用多
110 普勒雷达提取了降水云滴谱的分布形式,进行了 GAMMA 拟合,并进一步获得了
111 下落速度、液水含量、中值半径等云微物理结构信息,针对一次夏季较强降水个
112 例,用一系列敏感性试验证明了反演的正确性,但没获得更多的云结构信息;

Min Deng and Mace(2006)根据毫米波云雷达的一阶矩反演云参数和大气垂直速 113 度等云宏观结构特征,并进一步反演了卷云中的冰水含量等一系列参数,利用机 114 载探测数据验证了结果的正确性,在强对流天气中,云雷达衰减明显,反演存在 115 局限性;李永平等(2004)基于天气雷达的反射率因子进行反演获得云微物理 116 结构变化特征,并用梅雨期一次降水个例进行验证,结果证明反演合理;刘红亚 117 等(2007a, 2007b)利用雷达反射率因子反演得到一系列云水结构参数和云动 118 力结构特征,应用于典型夏季强对流天气实例中,应用模式证明了反演的参数能 119 有效提高模式效率。天气雷达数据垂直精度较低,无法反演获得云体精细结构。 120 刘黎平等(2012)在验证了云雷达数据可靠的基础上针对夏季弱降水过程反演 121 了液水含量和雨滴谱等云微物理结构特征,进一步用机载探测的滴谱数据验证了 122 反演结果的正确性,云雷达由于自身特点,适用于弱降水条件下,在对夏季较强 123 降水进行反演时, 需考虑其局限性。 124

随着技术的进一步发展,许多学者基于风廓线雷达(WPR)数据高精度、高 125 分辨率、低衰减的特点对降水云进行研究。何平等(2009)认为从风廓线雷达 126 信噪比数据能反映出降水特征,并能进一步研究降水特征; 阮征等(2002)对 127 风廓线雷达数据进行相对定标,获得降水反射率因子、含水量等云体参数,并获 128 取三维风场随高度的分布;黄钰等(2011)通过风廓线雷达功率谱数据对层状 129 云降水的融化过程进行了研究,详细分析了融化层亮带的形成和演变机理; 王晓 130 蕾等(2010)对风廓线雷达探测降水获得的信号进行剥离,获得降水云体的滴 131 谱随高度分布信息; Williams (2016)在美国俄克拉荷马开展的中纬度大陆性对流 132 云试验(MC3E)中用两部不同波段的风廓线雷达反演空气垂直速度和雨滴谱参 133 数,并进一步分析了降水的微物理过程,研究了层状云的降水机制; Ruan et 134 al(2014)利用剔除了大气垂直速度的 L 波段风廓线雷达数据反演雨滴谱分布,并 135 一步拟合了反演经验公式。 136

137 北京北部环山,东南为平原,其降水具有典型的北方夏季降水特征,对北京
138 夏季降水过程进行垂直综合观测对于了解北方夏季降水特征进而提高预报准确
139 率和提供人工影响天气作业决策具有深刻的意义。目前业务上多仅使用风廓线雷
140 达的水平风速、风向数据,利用风廓线雷达获得降水谱参数并深入分析的研究较
141 少,运用多种垂直探测的仪器对夏季降水进行综合观测并进行反演的研究更少,

42 本文利用风廓线雷达数据反演了降水云体的大气垂直速度、雨滴下落末速度等云
动力特征和云水混合比、雨水混合比等云微物理参数,并结合天气雷达、L 波段
44 秒探空资料、自动站、雨滴谱仪和微波辐射计等多种数据对 2020 年 5 月 7 日-8
145 日发生在北京海淀的一次夏季降水过程进行垂直综合观测,获得降水云精细垂直
146 结构和详细演变形势,分析了北京夏季降水微物理和垂直动力场的主要特征,可
147 用于对夏季降水的深入研究。

148

149 2 数据与方法

150 本文所用风廓线雷达资料取自北京海淀,雷达站址: 116.28°E, 39.98°N,
151 海拔高度 20.40m。探测高度 150m-10110m,采用 5 波束模式进行探测。表 1
152 为风廓线雷达参数表。由于不涉及水平方向,并且根据反演算法所针对数据的高
153 度和分辨率,本文只取中模式垂直波束数据进行分析。

154 155 表1 风廓线雷达参数表



156

157 与常规天气雷达类似,风廓线雷达采用相控阵脉冲多普勒技术,虽然其波长

158 比天气雷达长,但是经过对信号的相干积累以及谱变换、谱平均等等处理后,雷  
159 达返回信号的信噪比提高了约 40dB,很大程度地提高了雷达探测能力(阮征等,  
160 2002)。利用风廓线雷达的垂直探测波束数据可以获得降水云体的垂直结构精细  
161 信息。由于风廓线雷达的波长远远长于降水粒子直径,适用璃利散射条件,可根  
据雷达气象方程获得降水云体的反射率因子、径向速度、谱宽等谱参数信息,具  
162 标如下:  
164 根据(黄钰等,2011)的方法,对质量控制后的雷达数据进行傅里叶变换,  
165 可以得到信号功率谱密度信息*S*<sub>1</sub>(*v*),*i*=0,1,2...*n*,*n* 为变化取样数。功率谱密度  
166 的零阶矩可获得平均功率*P*;  
167 
$$P_{c} = \sum_{i=256}^{255} S_{i}(v)\Delta v$$
 (2.1)  
168  $\Delta v$ 为单位速度问隔。  
169 反射率因子 Z 通过利用 *P*,从雷达计算方程计算得到:  
170  $Z = CR^{2} \sum_{i=256}^{255} S_{i}(v)\Delta v$  (2.2)  
171 式中 *C* 为雷达常数,根据雷达的参数可以计算获得,R 是降水粒子距离雷达的高  
172 度。  
173 信号功率谱密度的一阶矩可以计算获得,R 是降水粒子距离雷达的高  
174 直速度和静止大气的降水粒子速度,计算公式为;  
175  $v = \sum_{i=256}^{255} S_{i}(v)\Delta v$  (2.3)  
176 信号功率诽密度的二阶中心矩速度可以计算获得谱宽*σ*,它在一定程度上反  
177 映了采样体积卤降水粒子的变化范围,计算公式为;  
178  $\sigma_{v} = 2 \times \sqrt{\sum_{i=256}^{255} S_{i}(v)\Delta v}$  (2.4)

179 根据上述方法获得反射率因子、垂直径向速度和谱宽等风廓线雷达谱参数,180 可以初步描述测站上空降水云体的宏观结构和动力特征。

图 1 为 2020 年 5 月 7 日 20 时至 8 日 14 时(本文所有涉及时间均为北京时)
在北京海淀风廓线雷达站点分别用 SA 雷达和 WPR 观测的反射率因子图。目前
北京地区常规天气雷达垂直方向采样范围内共取 9 层探测数据,低层高度间隔约
500m,中、高层间隔 2000-3000m,其余高度进行回波插值平滑,由于分辨率
太低,雷达显示图形经过多次插值平滑处理,易出现虚假回波,无法体现真实细
致的云体垂直结构(苏德斌等, 2010)。

187 对比图 1a、图 1b 可以看出 WPR 与 SA 雷达观测的降水反射率因子强度大小、
位置、演变形势对应的很好。SA 雷达的垂直分辨率低,插值平滑严重,无法显
示真实云体的细致结构;风廓线雷达数据分辨率比天气雷达高得多,从图 1b 看
出,在 3.3km 高度处有一明显的、天气雷达没有观测到的亮带结构,各个时刻
云体演变信息表现也明显,可用于降水云的深入观测研究。



198 基于风廓线雷达获得的反射率因子,根据(刘红亚等,2007)方案,进一步199 反演降水云参数,本文中垂直速度向下为正、向上为负。

200 根据 Marshal-Palmer 雨滴尺度分布关系(Sun and Crook,1997)、一维定常假
 201 设(胡志晋等,1996)和暖云方案(Kessler,1969; Miller and Pearce,1974; 陶祖
 202 钰和谢安,1989; 胡志晋和严采繁,1987),通过下列公式可获得雨水混合比q<sub>r</sub>:

$$q_r = 10^{(Z-43.1)/17.5} / \rho \tag{2.5}$$

204 雨滴下落末速度*v<sub>r</sub>*:

205 
$$v_r = 5.40 (p_0 / p)^{0.4} (\rho q_r)^{0.125}$$
(2.6)

206 水汽混合比*q<sub>v</sub>*:

207 
$$q_{\nu} = \frac{380000}{p} \exp\left(\frac{17.27(T - 273.16)}{T - 35.86}\right)$$
(2.7)

208 云水混合比*q*<sub>c</sub>和空气垂直速度*w*,则由方程迭代算出:

209 
$$w = \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial z} (\rho v_r q_r) \setminus \left( \frac{\partial q_r}{\partial z} + \frac{\partial q_c}{\partial z} - 9.81 \rho \frac{q_v T}{p} \left( \frac{2.5 \times 10^6 \times 287.05 - 1005 \times 461.51 \times T}{1005 \times 461.51 \times T^2 + (q_v / 1000)(2.5 \times 10^6)^2} \right) \right)$$

210

203

211 
$$q_{c} = \begin{cases} -\left[\frac{1}{\rho}\frac{\partial}{\partial z}(\rho V_{r}q_{r}) - w\frac{\partial q_{r}}{\partial z}\right] \cdot \left(0.002q_{r}^{0.875}\right)^{-1} \qquad q_{c} \le 1.5 \\ -\left[\frac{1}{\rho}\frac{\partial}{\partial z}(\rho V_{r}q_{r}) - w\frac{\partial q_{r}}{\partial z} - 0.001 \times 1.5\right] \cdot \left(0.002q_{r}^{0.875} + 0.001\right)^{-1} q_{c} > 1.5 \end{cases}$$
(2.9)

212 式中气压 *P*(单位 hpa)、地面气压 
$$p_0$$
(单位 hpa)、温度 *T*(单位 K)来自于  
213 L波段探空资料,空气密度  $\rho$ 单位为 kg/m<sup>3</sup>, Z单位 dBZ,  $q_r \land q_v \land q_c$ 单位都  
214 为 $g/kg$ , w、 $v_r$ 的单位为 m/s。 $q_{crit} = 1.5g/kg$ 

215

## 216 3 降水结果分析



(2.8)

217 受东移高空槽的影响,2020年5月7日20时至8日13时北京上空出现一
218 次降水天气,图2为SA天气雷达观测到的组合反射率因子 PPI 演变图,图中箭
219 头指示位置为风廓线雷达站点。7日20时站点位于主体回波边缘,降水开始,8

220 日 01 时-03 时站点位于稳定回波强值区内,为降水较强时段,8 日 06 时以后主
221 体回波逐渐移出站点,10 时以后降水逐渐停止。此次过程北京北部降水整体较
222 弱,随时间变化不剧烈,风廓线雷达站点虽位于回波边缘,基本能代表此次降水
223 天气过程特征,如图所示,风廓线雷达处于较弱回波之中,最强回波<25dBZ。</li>

224



226 图 2 2020 年 5 月 7 日 20 时至 8 日 13 时 SA 雷达观测北京降水组合反射率因子 PPI 时间
 227 演变图(箭头位置为风廓线雷达)

Fig2 Precipitation reflectivity factor PPI time-variation observed by SA radar from 2000BJT

229 7 May 2020 to 1300 BJT 8 May 2020 (the position arrow point to is wind profile radar fix)

230

225

如图 3 海淀自动站(位于风廓线雷达站内)小时累积降水量和气温变化图所
示,海淀站点的地面降水从 7 日 20 时开始,刚开始降水量较小,小时平均降水
量均<0.5mm/h,8 日 02 时降水量达到最大值,为 1.4mm/h,之后降水量基本</li>
维持稳定,平均降水量为 0.8mm/h,8 日 10 时以后降水结束。降水开始后气温
由 17℃降低,降水较强时段气温降到最低为 13.5℃,降水减弱、结束后,温度
逐渐回升至 15℃以上。



从风廓线雷达水平风图(图4)上可以看出,整个降水时期低层基本为偏东 242 风,高层偏西风,4300m高度存在一个水平风的垂直切变,8日09时以后水平 243 风的垂直切变消失,降水逐渐停止。7日20时至22时,低层(3000m以下) 244 由西南风转为偏东风,7日22:30 左右 3000m 高度以下存在水平风切变,降水 245 8 日 01 时-02 时,中层(1000-2500m)水平风较小,风向逐渐转为偏 发展: 246 东风,降水达到最大值:03时以后中低层高度(4000m以下)水平风速逐渐加 247 大,降水维持稳定并逐渐减小。总体来说,4km 高度附近的水平风垂直切变贯 248 穿整个降水过程,低层水平风切变是前期对流发展的原因,后期偏东风加强且 249 4km 高度的水平风垂直切变消失后,降水逐渐减弱并趋于结束。 250



图 4 2020 年 5 月 7 日 20 时至 8 日 14 时风廓线雷达观测水平风矢量图

251

Fig.4 Wind vectors by wind profiler radar from 2000 BJT 7 May to 1400 BJT 8 May 2020

254

272

273

274

275

276

277

278

255 图 5 为风廓线雷达反射率因子图。与降水量变化相对应,回波显示降水从 7
256 日 20 时开始,随后发展,较强回波(10 dBZ)顶高从 2.7km 升到 3.3km,01
257 时-03 时回波最强,3.3km 高度开始出现零度层亮带,回波最强核 25dBZ,较强
258 回波顶高>4.5km,8 日 10 时降水结束。

根据(黄钰等,2015)夏季降水分类方案,首先确定雨顶高度(>20 dBZ) 259 及其与0℃高度对比将降水分为冷雨或暖雨,然后基于融化层附近的反射率因子 260 (是否>38dBZ)和垂直速度值(是否>1m/s)及其梯度变化情况(反射率梯度 261 <-1 dBZ/120m, 速度梯度>0.2m/s/120m) 判断是否存在对流或零度层亮带等等 262 来对降水进行分类,此次降水反射率因子<38 dBZ,融化层附近反射率因子梯度 263 5 dBZ/120m, 速度梯度 0.2 m/s/120m, 存在零度层亮带, 考虑持续时间等因素, 264 总体过程主要为层状云降水类型,可分为两个阶段,前期(7日20时-8日02 265 时)低层存在浅对流结构,后文暂且称为前期对流阶段,5dBZ 回波高度接近 266 7.5km, 较强回波(最大值 25dBZ)位于较低高度(2.7km 以下)且分布范围较 267 广,02时3.3km高度出现对流核(最大值30dBZ)后,后期(8日02时-10时) 268 转为典型层状云型降水,后文简称为后期层状云阶段,回波强值高度(20 dBZ) 269 由于亮带出现在较高高度(3km以上),随着降水减弱其回波强值减弱(20 dBZ 270 减小为 10 dBZ), 高度也从 3.3km 降到 3km。 271



279 -10时)整体云顶高度较低,其中前期对流核阶段(01时-03时)云顶高度平均
280 值为7343m,随后逐渐上升,09时接近9km,整个层状云降水阶段的平均云顶
281 高度为7831m。

对几个典型阶段的降水回波进行平均和分档统计,整个阶段平均回波趋势如
图 6c 黑线所示,整体回波平均值呈现层状云特点,最大值(12.8dBZ)出现在
3150m 高度处(亮带),1.5-2.7km 随高度变化不大,维持 12dBZ,3.1km 以上
随着高度升高,回波值变小,4.5km 处回波值降到 5 dBZ。主要回波在 0-10 和
10-20 dBZ,分别占 47%和 46%;其余的分布在 20-30 和-10-0 dBZ,分别仅占
4%和 3%。

288 前期低层弱对流降水阶段(7日20时-8日02时),回波的平均廓线(图6c
289 橙线)显示较强回波出现在2km左右的较低高度,最大值16dBZ,2.2km高度
290 以上随高度升高回波值减小,4.5km高度降为8dBZ。回波主要为10-20dBZ,

占 52%, 其次为 0-10 dBZ, 占 38%, >20dBZ 的占 9%。后期层状云降水时期(8 291 日 02 时-10 时)平均值(图 6c 蓝线)在 2500-3500m 高度处出现由于亮带形成 292 的回波增大,最大值(12dBZ)位于 3030m 高度上,整体平均回波较前期的弱, 293 0-10dBZ 的回波占 58%, 10-20dBZ 的回波占 39%, -10-0dBZ 占 5%, >20dBZ 294 的回波几乎没有。这种平均回波趋势在前期低层弱对流降水转化为后期典型层状 295 云降水的初期对流核阶段(8日01-03时图6c红线)就显现出,不过对流核阶 296 段平均值整体较强,最大值 22dBZ, 10-20dBZ 的回波比例较高,占 75%,这是 297 由于这时期还有对流降水特性导致的。 298

299 此次个例为层状云降水,主要回波 0-20dBZ,前期降水低层存在弱对流结构,
300 云顶较高(平均高度 8207m),较强回波 10-20dBZ 的比重较大,回波强值出现
301 在 2km 左右的较低高度,随高度上升逐渐减小;后期转为典型层状云降水,云
302 顶较低(平均高度 7831m),较弱回波<10dBZ 的比重较大,且在 3100m 高度附</li>
303 近出现亮带形成的强值中心。











Fig.8 Time evolution of (a)liquid water content (units: g m-3), (b)vapor density (units: g m-3),

(c)temperature(units: ℃),(d)relative humidity (units: %)

342

337

338

339

340

341

根据第二节描述方法对风廓线雷达数据进行反演,获得云参数时序图 9,分 343 别为雨水混合比、云水混合比、雨滴下落末速度和垂直速度。对比图 5 可以看出, 344 图 9 雨水、云水、雨滴末速度和垂直速度时空分布趋势与反射率因子变化正相关, 345 随着反射率因子的增长,各物理量值迅速增大。强度 10dBZ 的回波对应的雨水 346 混合比约为 0.015g/kg, 云水混合比约为 0.1g/kg, 雨滴下落末速度在 3.2m/s 左 347 右,垂直速度±0.1m/s;强度 20dBZ 的回波对应的雨水混合比约为 0.15g/kg, 348 云水含混合比约为1.8g/kg,雨滴下落末速度在3.6m/s左右,垂直速度±0.8m/s。 349 在前期对流和后期层状云降水的两个阶段,各参数分布也呈现出了明显的区 350 别,前期各个参量值较大,且大值区的高度分布范围较广,在 1-3km 高度上都 351 有体现,雨水混合比 gr 在 0.02-0.15g/kg,最大值约 0.2g/kg,位于 1.5-2.4km 高 352 度; 云水混合比 qc 主要范围 0.3-1.8g/kg, 最大值约 2g/kg, 位置比雨水混合比 353 高,位于 2-3km 高度;雨滴下落末速度 Vr 主要在 3.2-4.2m/s,最大值 4.4m/s; 354 大气垂直速度主要在±0.7m/s 之间,上升和下沉气流变换明显,补充降水所需 355 的水汽和动力条件,维持降水发展。云水含量比雨水高一至两个数量级,且强值 356 高度在雨水强值高度之上,表明了此次过程雨水很大程度来源于云水。 357

<sup>358</sup> 后期各参量值变小,且强值范围分布变窄。雨水混合比在 0.01-0.04g/kg,最
<sup>359</sup> 大值约 0.05g/kg,比对流性降水时期小了一个量级;云水混合比主要范围
<sup>360</sup> 0.05-0.5g/kg,最大值约 0.8g/kg,由于降水的消耗,云水混合比减少明显,比对
<sup>361</sup> 流性降水时期也小了一个量级,雨水和云水量级的变化与图 8 微波辐射计观测的
<sup>362</sup> 液水含量量级变化吻合;雨滴下落末速度主要在 2.8-3.6m/s,最大值 3.8m/s;
<sup>363</sup> 大气垂直速度也变小,主要在±0.05m/s之间,也比前期小了一个量级,并且在
<sup>364</sup> 亮带高度以下(2.5-2.8km)范围内出现明显横向带状上升和下沉气流区。

365 8日11时以后降水结束,雨水混合 qr 比接近 0,而云水消耗停止,云水混
366 合比逐渐增大恢复,最大值约 1.6g/kg,这说明了此次降水形成可能一大部分来
367 自于云水转化为雨水。



376 (units: g/kg), (c) droplet terminal velocity (units: m/s), (d) vertical velocity (units: m/s)

377

from WPR at Haidian from 2000 BJT 7 May to 1400 BJT 8 May 2020

378

393

将降水前后两个阶段的反演参数进行平均,如图 10 所示,后期典型层状云 379 阶段云水混合比 qc 和雨水混合比 qr 平均值随高度变化趋势相近, 2.7km 以下随 380 高度变化不大, qc 值 0.3-0.6 g/kg, qr 值 0.007-0.012 g/kg; 2.7km 以上随高度 381 增大迅速增大, qc 值 0.6-1 g/kg, qr 值 0.012-0.02 g/kg, 同一高度上 qc 平均值 382 比gr大一个量级。前期gc和gr的平均值明显比后期的大,gc大值区出现在2.6km 383 以上, qc 值 1.1-1.4 g/kg, 2.6km 以下随高度变化不明显, qc 值 1.1 g/kg 左右, 384 qr 大值区出现在 2-2.3km 较低高度范围内, qr 最大值 0.037 g/kg, 同一高度 qc 385 平均值也比 qr 大一个量级。 386

387 两个阶段雨滴下落末速度 Vr 平均值高度廓线变化形式与 qc 和 qr 类似,前
期 Vr 平均值在 2km 以下增大明显,范围 3.2-3.6m/s, 2km 以上保持在 3.6m/s
389 左右波动;后期 Vr 平均值随高度逐步增大明显,范围 3.0-3.6m/s。空气垂直速
390 度 w 平均值在两个阶段区别同样明显,层状云阶段 2.6km 以下垂直速度平均值
基本在 0m/s,变化不大,而对流性阶段 w 值变化明显,w 范围-0.08—0.06m/s,
392 上升和下沉气流变换明显。



394 图 10 2020 年 5 月 7 日 20 时-8 日 14 时海淀风廓线雷达反演的(a) 云水混合比,(b) 雨水
395 混合比,(c) 雨滴下落末速度,(d) 垂直速度的分时段平均值(橙:前期;蓝:后期)

Fig.10 Average of (a)qc, (b)qr, (c)Vr, (d)w at each stage(orange: earlier stage; blue: later stage)

397

observed by WPR at Haidian from 2000 BJT 7 May to 1400 BJT 8 May 2020

398

## 399 4 结论与讨论

400 本文利用风廓线雷达数据反演了降水云体的垂直速度、雨滴下落末速度等云
401 动力场特征和云水混合比、雨水混合比等云微物理参数,并结合天气雷达、L波
402 段秒探空资料、自动站、雨滴谱仪和微波辐射计等多种数据对 2020 年 5 月 7 日
403 -8 日发生在北京海淀的一次夏季层状云降水过程进行垂直综合观测,获得以下
404 结论:

405 (1)风廓线雷达反演云微物理信息和动力参数结果合理,配合其他垂直综
406 合探测数据揭示了一定动力条件下北京平原地区夏季降水不同阶段云的垂直演
407 变特征,可用于降水的深入研究。

(2) 站点位于降水边缘,主要为层状云降水,降水滴谱分布整体粒径较小, 408 基本<2mm,4km 高度的水平风垂直切变贯穿整个降水过程,低层(2km)水平 409 风切变是前期对流发展的原因,后期偏东风加强且 4km 高度的水平风垂直切变 410 消失后,降水逐渐减弱并趋于结束。整体回波不强,云顶高度 7-9km, 93%的回 411 波值在 0-20 dBZ, >20 dBZ 约 4%; 2-3 km 高度出现持续稳定的暖平流, 云水混 412 合比 0.1-2 g/kg,雨水混合比 0.01-0.2 g/kg,云水含量比雨水高一个数量级,且 413 强值高度在雨水强值高度之上,表明了此次降水过程雨水很大程度来源于云水。 414 雨滴下落末速度 2.8-4.2m/s, 大气垂直速度在±0.7m/s之间。 415

416 (3)降水前后两个阶段特征区别明显。前期低层存在浅对流结构,云顶较
高,低层水平风切变促进了对流发展,10-20dBZ的比重较大,粒子谱较窄但数
418 浓度值大,雨强较弱,液水和水汽含量高,雨水、云水值较高且强值分布范围广,
419 空气垂直速度比层状云阶段值大了一个量级以上,上升、下沉气流交替明显,补
420 充降水所需的水汽和动力条件,维持降水发展;后期转为典型层状云降水,云顶
421 高度下落,<10dBZ的比重较大,3100m处形成亮带的强值中心,风切变和暖平</li>
422 流消失,粒子谱展宽但数密度值减小,雨强较强,雨水和云水值比对流期小了一

423 个量级,且强值范围变窄,垂直速度减小明显,并且在亮带附近出现明显横向带424 状上升、下沉气流区。

425 (4)本文仅针对一次夏季降水过程进行分析,下一步计划针对更多典型降426 水个例进行研究,获得北京平原夏季降水结构的特征。

427

# 428 参考文献

429 傅云飞. 2014. 利用卫星双光谱反射率算法反演的云参数及其应用.气象学报,

430 72(5):1039-1053. Fu Y F. 2014. Cloud parameters retrieved by the bispectral
431 reflectance algorithm and associated applications. Acta Meteorologica Sinica, 72
432 (5):1039-1053(in Chinese)

- 433 Frisch A S, Fairall C W, Snider J B. 1995. Measurement of stratus cloud and drizzle parameters
- 434 in ASTEX with a Ka-band Doppler radar and a microwave radiometer. J.Atmos.Sci.,
  435 52(16):2788-2799
- Gossard E E. 1994.Measurement of cloud droplet size spectra by doppler radar. Journal of
  atmospheric and oceanic technology, 11:712-726
- Gossard E E, Sinder J B, Clothiaux E E, et al. 1997. The potential of 8mm radars for remotely
  sensing cloud drop size distributions. Journal of atmospheric and oceanic technology,
  14:76-87
- 441 何平,朱小燕,阮征,等. 2009.风廓线雷达探测降水过程的初步研究. 应用气象学报,
- 442 20(4):465-470. He P, Zhu X Y, Ruan z, et al. 2009. Preliminary study on precipitation
- process detection using wind profiler radar. Journal of applied meteorological science,
  20(4):465-470 (in Chinese)
- 445 黄钰, 阮征, 葛润生.2011.风廓线雷达探测零度层亮带的试验研究. 高原气象,
- 30(5):1376-1383. Huang Y, Ruan Z, Ge R S.2011. A Study on bright band detection using
  Wind Profile Radar. Plateau meteorology, 30(5):1376-1383 (in Chinese)
- 448 黄钰,阮征,罗秀明,等.2015. 垂直探测雷达的降水云分类方法在北京地区的应用. 高原气
  449 象,34(3):815-824. Huang Y, Ruan Z, LUO Xiuming, et al.2015. Application in Classification
  450 of Precipitation Clouds Using Vertical Sounding radar in Beijing. Plateau meteorology,
  451 34(3):815-824(in Chinese)

- 452 黄钰,郭学良,毕凯,等.2020. 北京延庆山区降雪云物理特征的垂直观测和数值模拟研究. 大
- 453 气科学, 44(2):356-370. Huang Y, GUO X L, Bi K, et al. 2020. Vertical Observation and
- 454 Numerical Simulation of the Clouds Physical Characteristics of Snow-Producing over
  455 Yanqing Mountain Area in Beijing. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 44(2):
- 456 356–370 (in Chinese)
- 457 胡志晋,刘公波,朱彤. 1996.暴雨数值预报中云降水方案的研究.北京气象出版社,593-602.
  458 Hu Z J, Liu G B, Zhu T. 1996. Study of cloud precipitation scheme in storm numerical
  459 forecast. Beijing meteorological press.pp: 593-602(in Chinese)
- 460 胡志晋, 严采繁. 1987. 层状云微物理过程的数值模拟 (二): 中纬度气旋云系的微物理过程.
  461 气象科学研究院院刊, 2(2):133-142. Hu Z J, Yan C F. 1987. Numerical simulation of
  462 microphysical processes of stratiform clouds (II) microphysical processes in
  463 middle-latitude cyclone cloud systems. Journal of academy of meteorological science,
- 464 2(2):133-142(in Chinese)
- 465 李永平,袁招洪,王晓峰.2004. 用多普勒雷达反射率调整模式大气的云微物理变量. 应用
- 466 气象学报, 15(6):658-664.Li Y P, Yuan Z H, Wang X F. 2004. Microphysical adjustments
  467 using reflectivity of Doppler radar for meso-scale model. Journal of applied meteorological
  468 science, 15(6):658-664(in Chinese)
- 469 刘红亚,徐海明,胡志晋等.2007. 雷达反射率因子在中尺度云分辨模式初始化中的应用 I:
  470 云微物理量和垂直速度的反演. 气象学报, 65(6):896-905. Liu H Y, Xu H M, Hu Z J, et al.
  471 2007. Application of radar reflectivity to initialization of cloud resolving meso-scale
  472 model part I: retrieval of microphysical parameters and vertical velocity. Acta
  473 meteorological sinica, 65(6):896-905(in Chinese)
- 474 刘红亚,徐海明,薛纪善等.2007. 雷达反射率因子在中尺度云分辨模式初始化中的应用 II:
  475 数值模拟试验. 气象学报, 65(6):906-918. Liu H Y, Xu H M, Xue J S, et al2007.
  476 Application of radar reflectivity to initialization of cloud resolving meso-scale model part
  477 II: numerical simulation experiments. Acta meteorological sinica, 65(6):906-918(in
  478 Chinese)
- 479 刘黎平,宗蓉,齐彦斌等.2012.云雷达反演层状云微物理参数及其与飞机观测数据的对比.
  480 中国工程科学. 14(9):64-71. Liu L P, Zong R, Qi Y B, et al.2012. Microphysical parameters
  481 retrieval by cloud radar and comparing with aircraft observation in stratiform cloud.

- 482 Engineering sciences, 14(9):64-71(in Chinese)
- Kessler E.1969.On the distribution and continuity of water substance in atmospheric
  circulation. Meteor Monogs, Amer Meteor Soc, 32:1-84.
- 485 Min Deng and Mace G G. 2006. Cirrus Microphysical Properties and Air Motion Statistics Using
- 486 Cloud Radar Doppler Moments. Part I: Algorithm Description. Journal of applied
  487 meteorology and climatology, 45:1690-1709
- 488 Miller M J, Pearce R P.1974. A three-dimensional primitive equation model of cumulonimbus
  489 convection. Quart J Roy Meteor Soc, 100:133-154
- 490 Remillard J, Kollias P, Szyrmer W. 2013. Radar-radiometer retrievals of cloud number
  491 concentration and dispersion parameter in non-drizzling marine
  492 stratocumulus.Atmos.Meas.Techn., 6(7):1817-1828
- Ruan Z, Ming H, Ma J L, et al. 2014. Analysis of the microphysical properties of a stratiform
  rain event using an L-Band profiler radar. Journal of meteorological research, 28:268-280
- 495 阮征, 葛润生, 吴志根.2002. 风廓线仪探测降水云体结构方法的研究. 应用气象学报, 13(3):
- 496 330-338.Ruan Z, Ge R S, Wu Z G, et al.2002.Method for detecting rain cloud structure with
- 497 wind profilers. Journal of applied meteorological science, 13(3): 330-338(in Chinese)
- 498 Shupe M D, Pavlos Kollias, Michael Poellot, et al. 2008. On deriving vertical air motion from
- 499 cloud radar Doppler spectra. Journal of atmospheric and oceanic technology, 25:547-556
- 500 苏德斌,孙成云,余东昌等.2010. 短临交互预报系统 VIPS 设计开发与应用.气候与环境研究,
- 501 15(5):571-578. Su D B, Sun C Y, Yu D C, et al.2010. The development and application of a
  502 very-short-range interactive prediction system. Climatic and environmental research,
  503 15(5):571-578(in Chinese)
- Sun J, Crook N A. 1997.Dynamical and microphysical retrieval from Doppler radar
  observation using a cloud model and its adjoint. Part I: Model development and simulated
  data experiments. J Atmos Sci., 54:1642-1661
- 507 陶祖钰,谢安.1989. 天气过程诊断分析原理和实践.北京大学出版社,pp:215. Tao Z Y, Xie A.
  508 The weather process diagnosis analysis theory and practice. Peking university press,
  509 pp:215(in Chinese)
- 510 王晓蕾, 阮征, 葛润生.2010. 风廓线雷达探测降水云体中雨滴谱的试验研究. 高原气象,
- 511 29(2):498-505.Wang X L, Ruan Z, Ge R S, et al.2010. A study of drop-size distribution in

- 512 precipitation cloud from wind profiler radar. Plateau meteorology, 29(2):498-505(in
  513 Chinese)
- Williams C R. 2016.Reflectivity and liquid water content vertical decomposition diagrams to
  diagnose dertical evolution of raindrop size distributions. Journal of atmospheric and
  oceanic technology, 33:579-595

