

# 青藏高原东北部祁连山一次降水性层状云微物理特征的飞机观测研究

黄颖<sup>1,2</sup>, 付丹红<sup>2</sup>, 郭学良<sup>2</sup>, 张文煜<sup>3</sup>

1 兰州大学大气科学学院, 兰州 730000

2 中国科学院大气物理研究所云降水物理与强风暴重点实验室, 北京 100029

3 郑州大学地球科学与技术学院, 郑州 450001

**摘要** 位于青藏高原东北部的祁连山是石羊河、黑河和疏勒河等多条重要河流的发源地, 云微物理特征对于了解该区域大气降水形成过程具有重要作用, 但关于祁连山地形云的飞机观测研究很少。本文利用青海省人工影响天气办公室空中国王飞机观测数据, 分析研究了祁连山 2020 年 8 月 16 日的一次降水性层状云的微物理特征。研究表明: 祁连山地区此次降水性层状云的形成, 与偏南气流由低海拔河湟谷地区向高海拔山区运动过程中受地形强迫抬升过程密切相关, 云中过冷液态水含量最大值为  $1.13 \text{ g m}^{-3}$ 。低海拔山区和高海拔山区的云物理特征有明显差别, 低海拔山区由于水汽相对丰富, 地形抬升形成的过冷液态水含量较高。山区不同高度粒子形成机制存在显著差异:  $5600 \text{ m}$  ( $-5.1 \text{ }^\circ\text{C}$ ) 层过冷液态水含量较高, 冰粒子主要通过凝华、聚并生长, 也存在弱淞附过程;  $6560 \text{ m}$  ( $-9.9 \text{ }^\circ\text{C}$ ) 层存在大量聚合状冰粒子, 粒子谱拓宽明显, 凝华和聚并过程起主导作用;  $7850 \text{ m}$  ( $-17.0 \text{ }^\circ\text{C}$ ) 层基本为冰粒子, 存在大量枝状冰粒子聚合物, 说明冰粒子以凝华和聚并生长为主。

**关键词** 云微物理结构特征 飞机观测 祁连山 青藏高原东北部

文章编号 2022019A 中图分类号 P426 文献标识码 A

doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2000.19000

## Aircraft Measurement on the Microphysical Properties of a

收稿日期 2022-01-27 网络预出版日期

作者简介 黄颖, 女, 1996 年出生, 博士研究生, 主要从事云和降水物理研究。E-mail: huangy20@lzu.edu.cn

通讯作者 付丹红, E-mail: fudanhong@mail.iap.ac.cn

资助项目 第二次青藏高原综合科学考察-极端天气气候事件与灾害风险 (2019QZKK0104), 西北区域人工影响天气能力建设项目 (ZQC-R18208-1)

Funded by The Second Tibetan Plateau Scientific Expedition (Grant 2019QZKK0104), Northwestern Weather Modification Engineering Project (Grant ZQC-R18208-1)

25 **Precipitating Stratiform Cloud Event in the Qilian Mountains of**  
26 **the Northeastern Tibetan Plateau**

27  
28 HUANG Ying<sup>1,2</sup>, FU Danhong<sup>2</sup>, GUO Xueliang<sup>2</sup>, ZHANG Wenyu<sup>3</sup>

29 1 College of Atmospheric Sciences, Lanzhou university, Lanzhou 730000

30 2 Key Laboratory of Cloud-Precipitation Physics and Severe Storms, Institute of Atmospheric  
31 Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

32 3 School of Geoscience and Technology, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001  
33

34 **Abstract:** Located in the northeastern Tibetan Plateau, the Qilian Mountains (QM) are the main  
35 source of several important rivers including the Shiyang, Heihe and Shule rivers. The cloud  
36 microphysical properties have a critical role in understanding the precipitation formation.  
37 However, the aircraft measurements on the cloud microphysical properties over the QM are few.  
38 By using the aircraft measurement data of KingAir-350 of the Weather Modification Office of  
39 Qinghai Province, the cloud microphysical properties of a precipitating stratiform cloud event  
40 over the QM was investigated. The results show that the formation of the precipitating stratiform  
41 event was primarily produced by the terrain lifting of nearly southerly airflow from the low  
42 topographic valley area to high mountain area. The maximum supercooled liquid water content in  
43 the orographic precipitating stratiform cloud was  $1.13 \text{ g m}^{-3}$ . The liquid water content was  
44 relatively high in low-altitude areas due to the existence of more water vapor. The formation and  
45 growth processes of ice particles varied at different altitudes in mountainous areas. At the level of  
46 5600 m ( $-5.1 \text{ }^\circ\text{C}$ ), the formation and growth processes of ice particles primarily depended on  
47 deposition and aggregation processes with weak riming process; at the level of 6560 m ( $-9.9 \text{ }^\circ\text{C}$ ),  
48 a large number of aggregated ice particles were observed and the spectrum broadening was  
49 obvious, indicating that the dominant formation and growth process for ice particles were  
50 deposition and aggregation processes; at 7850 m ( $-17.0 \text{ }^\circ\text{C}$ ), there were almost ice phase particles  
51 with abundant aggregated dendritic ice particles, indicating that the deposition and aggregation  
52 processes were dominant at this high altitude.

53 **Keywords:** cloud microphysical properties, aircraft measurements, the Qilian Mountains, the

54 northeastern Tibetan Plateau

55

## 56 1 引言

57 云在地气系统辐射收支,水循环和气候变化过程中有十分重要的作用,且云  
58 是气候变化研究中最不确定的因素之一 (Rangno and Hobbs, 2010; 傅云飞,  
59 2018)。云在形成和发展过程中会受到诸多因素的影响,不同云中的微物理特征  
60 和降水形成过程往往存在明显差异。云中降水粒子的形成过程非常复杂,包括聚  
61 合、淞附、冻结等过程 (Lawson and Blyth, 1999; Korolev et al., 2004; French et  
62 al., 2018)。云中冰晶粒子形状不仅受其形成所处温度的影响 (常祎, 2019), 也  
63 受所处位置的影响。云中对流区和层云区 (McFarquhar and Black, 2004), 云带  
64 前沿和中后部 (Stark et al., 2013) 的冰晶形状、浓度、粒子谱都存在较大差异。  
65 雷达、卫星观测和数值模式在云物理过程研究中具有重要作用,但飞机穿云探测  
66 仍然是目前直接的云物理过程探测手段 (Miles et al., 2000)。因此,利用机载云  
67 粒子测量系统获得云粒子形状、谱分布和图像等特征,是研究云物理结构和降水  
68 形成机理的重要途径之一。

69 近年来,许多学者从不同角度对我国不同地区的云物理过程开展了大量的飞  
70 机探测研究 (Guo et al., 2015)。张佃国等 (2011) 统计分析了山东省 23 架次飞  
71 机云物理探测数据,结果表明山东省降水云系中存在较为丰富的过冷水,冰晶浓  
72 度偏低,具有较强的可播性。云粒子分布呈负指数单峰谱型,峰值位于小云粒子  
73 端。对河北张家口地区 3 架飞机联合云探测试验数据分析发现,云顶温度会对云  
74 中低层的冰晶形状产生影响,同时,在积层混合云的对流区和层云区冰晶的生长  
75 过程、粒子谱下落拓宽速率均有明显差别 (Zhu et al., 2014)。亓鹏等 (2019)  
76 对太行山东麓一次稳定性积层混合云进行分析发现,在云高层存在高浓度的大冰  
77 粒子,冰粒子在过冷水含量较高的对流泡中主要通过聚并和淞附增长,而在过冷  
78 水含量较低的云区以聚并增长为主。杨洁帆等 (2021) 对太行山地区西风槽影响  
79 下层状云微物理特征分析发现,冰晶数浓度高值区的冰晶形状以针状和柱状冰晶  
80 为主,而低值区以片状或枝状为主;零度层主要为聚合状、淞附状冰晶及霰粒子,  
81 液水层则以球形液滴及半融化状态的冰粒子为主。

82 彭冲等 (2016) 对山西省一次低槽冷锋云系的微物理结构的分析发现,该云

83 系的冷云区存在大量固态冰粒子，云粒子主要通过凝华增长，小云粒子谱、大云  
84 粒子谱和降水粒子谱分别呈指数型、双峰型和三峰型，而在暖云区，大云粒子和  
85 降水粒子谱宽较冷云区变窄，谱型呈现单峰型。蔡兆鑫等（2019）对山西省忻州  
86 地区积云不同发展阶段的物理特性的研究表明，在积云的初生阶段，云中以小云  
87 粒子凝结增长为主，粒子谱符合伽马分布，而成熟阶段，粒子谱随高度增加拓宽，  
88 呈多峰型，暖区符合伽马分布，冷区为伽马分布和 M-P 分布相结合。

89 吕玉环等（2021）对内蒙古通辽地区 41 架次穿云飞机探测结果进行统计分  
90 析发现，降水云的云滴粒子数浓度和平均液态水含量比非降水云大，且云粒子数  
91 浓度较小时，各类云滴谱的相对离散度更大。马新成等（2017）对广西南宁地区  
92 的层状暖云探测资料进行统计分析，发现该地区的降水云的云顶附近多会出现逆  
93 温层，且降水云的云滴平均浓度略小于无降水云，平均有效直径略大于无降水云。  
94 郝国等（2019）研究表明，安徽省层积云和雨层云的云滴数浓度在云底最高，随  
95 高度上升浓度下降，液态含水量在云中部最高，而高层云云滴数浓度和液态含水  
96 量峰值均出现在云中上部。

97 从以上的研究可以看到，我国大部分飞机云物理观测研究主要集中在华北地  
98 区，而在西北地区的研究相对偏少，特别是祁连山地区。王黎俊等（2013）对三  
99 江源地区秋季的层状云进行了研究，发现该云系上层 Cs（卷层云）和 As（高层  
100 云）为冰云，下层 As 和 Sc（层积云）为过冷混合态云，云系下层 As 中云粒子  
101 浓度和过冷水含量最大，Sc 中云粒子尺度和谱宽最大。

102 祁连山位于青藏高原东北边缘，山脉呈西北-东南走向，平均海拔 4000 m 以  
103 上，是河西走廊等地区的重要水源区。本文利用青海省人工影响天气办公室空  
104 中国王 350 飞机在祁连山的一次降水层状云探测数据，结合雷达等其他观测数据，  
105 分析研究了祁连山层状云的微物理结构特征，对了解该地区云中降水粒子形成过  
106 程具有重要科学意义。

107

## 108 2 观测数据与处理方法

109 本文使用的飞机观测数据时间为 2020 年 8 月 16 日 08:50~12:00（北京时，  
110 下同），该数据是由青海省人工影响天气办公室空中国王 350 飞机探测得到，探  
111 测区域为西宁机场到祁连山东麓门源县一带，探测期间飞机平均真空速为 127.9

112 m/s。飞机上搭载了美国 DMT 公司 (Droplet Measurement Technologies Inc.) 的  
113 云粒子图像探头 (Cloud Imaging Probe, CIP), 降水粒子图像探头 (Precipitation  
114 Imaging Probe, PIP), 云和气溶胶粒子谱仪 (Cloud and Aerosol Spectrometer,  
115 CAS), King 热线含水量仪 (Hot-Wire LWC) 和飞机综合气象要素测量系统  
116 (Aircraft-Integrated Meteorological Measurement System, AIMMS-20), 各仪器设  
117 备参数见表 1。

118 本文使用的液态水含量 (liquid water content, LWC) 数据, 是由 King LWC  
119 热线含水量仪测量, 并经过了干功率计算值的校正。已有的研究表明, King 热  
120 线含水量仪对测量粒径小于  $5\ \mu\text{m}$  的小滴存在较大误差, 也存在对大云滴端测量  
121 不完全, 以及在冰云或混合相态云中测量结果失真等问题 (Lance et al., 2010;  
122 Wang et al., 2015; Hou et al., 2021)。考虑到以上原因, 本文在分析液态水含量  
123 时加入 CAS 测量的计算值作为参考。由于 CAS 不能区分云中粒子相态, 所计算  
124 的液态水含量会受到小冰粒子的影响, 在使用时应考虑由此带来的偏差。为减小  
125 计算误差, 参考 Lance et al (2010) 的处理方法, 通过 CAS 计算液态水含量需满  
126 足条件: CAS 粒子数浓度大于  $10\ \text{cm}^{-3}$  且 King 热线含水量仪测量值大于  $0.1\ \text{g m}^{-3}$ 。  
127 因此, 文中使用的 King-LWC 值是指经过干功率校正的热线含水量仪测量值, 而  
128 CAS-LWC 是指符合以上条件的通过 CAS 数据计算的液态水含量。

129 CIP 和 PIP 探头是光学阵列成像探头, 由于激光束误差等原因, 其对较小粒  
130 子的探测存在较大偏差 (Korolev et al., 2007; 王黎俊, 2013; 封秋娟, 2021),  
131 参考杨洁帆 (2021)、封秋娟 (2021)、元鹏 (2019) 的处理方法, 并结合此次  
132 CIP、PIP 探测资料的实际情况, 在资料处理时将前 2 档数据剔除, 因此文中所  
133 分析的 CIP、PIP 粒子数浓度对应的直径为  $75\sim 1550\ \mu\text{m}$ 、 $300\sim 6200\ \mu\text{m}$ 。对云微  
134 物理量的处理方法同张佃国 (2011)。此次探测过程中 CIP 图像数据缺失较多,  
135 文中的粒子图像数据是 PIP 测量的。

136 AIMMS 测量的温度在飞机下降时间段内会出现较大的波动, 可能是由于飞  
137 机在下降过程中失重、颠簸导致探测设备抖动造成的, 并非真实情况, 因此利用  
138 CIP 测量的温度对 AIMMS 温度异常值进行了修正。

139 所使用地基观测资料包括西宁 CINRAD/CD 型天气雷达 ( $36.60^\circ\text{N}, 101.78^\circ\text{E}$ )  
140 和西宁站探空资料, 利用雷达探测数据, 结合飞行轨迹, 可以比较直观地显示出

141 飞机在云中的探测位置。但由于西宁雷达受祁连山地形遮挡影响较为严重，飞机  
 142 探测的部分区域为雷达探测盲区，雷达回波垂直剖面部分数据只能由插值得到，  
 143 具有较大的误差。本文雷达观测数据仅用于显示飞机是否在云中及云中所处位  
 144 置，主要用于飞机云微物理数据分析的参考，对雷达数据并不做定量分析。天气  
 145 背景场使用欧洲中期数值预报中心 ERA5 再分析数据，空间分辨率为  $0.25^\circ \times$   
 146  $0.25^\circ$ 。另外，本文也使用了 FY-2G IR1 通道相当黑体温度 (TBB) 数据产品。

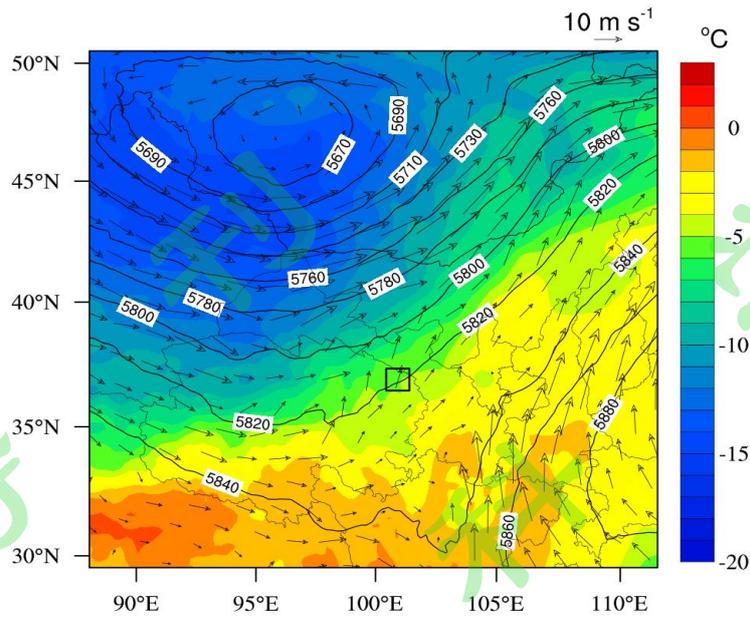
147  
 148 表 1 机载仪器主要性能参数

149 Table1 Main specifications of airborne instruments

仪器名称	测量对象	测量范围	分辨率
CIP	云和降水粒子谱分 布、浓度、二维图像	25~1550 $\mu\text{m}$	25 $\mu\text{m}$
PIP	降水粒子谱分布、浓 度、二维图像	100~6200 $\mu\text{m}$	100 $\mu\text{m}$
CAS	气溶胶和小云粒子谱 及浓度	0.54~50 $\mu\text{m}$	最小 0.07 $\mu\text{m}$
Hot-Wire LWC	液态水含量	0~3 $\text{g m}^{-3}$	-
AIMMS-20	温度、气压、湿度、 风、经纬度、高度	-	-

150  
 151 **3 天气背景及飞机探测试验**

152 图 1 为飞机探测时段对应的 2020 年 8 月 16 日 11 时 500 hPa 温度、位势高  
 153 度和风矢量分布。可见，在飞机探测时段，受中高纬度低涡系统的影响，我国西  
 154 北地区处于高空西风槽前部，槽内温度场落后于高度场，槽后有较强的冷空气输  
 155 送，槽前有暖气流流入。飞机探测区域位于槽前脊后的冷暖气流交汇处，盛行西  
 156 南气流。由 8 月 16 日 08 时西宁探空 (图 2) 可见，500 hPa 以下为东南风，500  
 157 hPa 以上为偏西风，对流有效位能仅为 54 J/kg，大气处于弱不稳定的状态，适合  
 158 层积混合云发展，但飞机探测区域基本为层状云分布区域。由 FY-2G 卫星的 TBB  
 159 分布 (图 3) 可见，观测期间云系主体位于观测区以北，呈西南-东北向分布，飞  
 160 机探测期间，云带自西南向东北方向移动，探测区域云顶亮温 -25~-10  $^\circ\text{C}$ 。



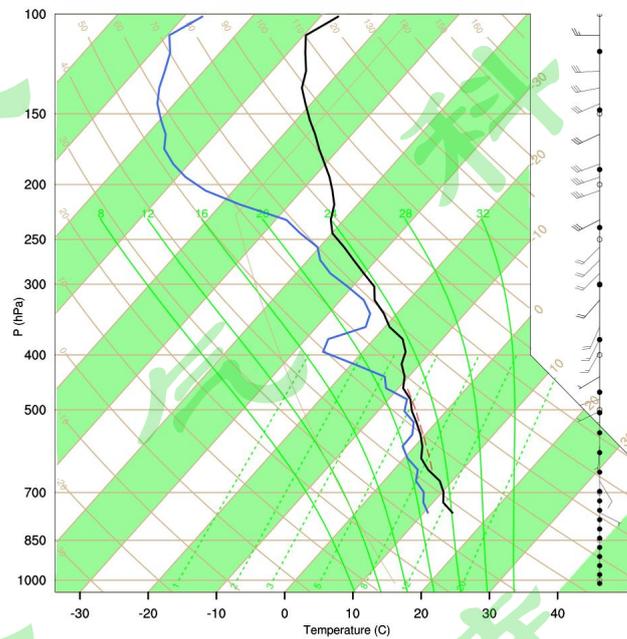
162

163 图1 2020年8月16日11:00 500 hPa 温度(填色图)、位势高度(黑色等值线)和风矢量(箭  
164 头)分布。黑色框为观测区域

165 Fig. 1 Distribution of temperature (shaded), geopotential height (black contour line), and wind

166 vector at 500 hPa at 11:00, on 21 August 2020. The black box shows the observation area.

167

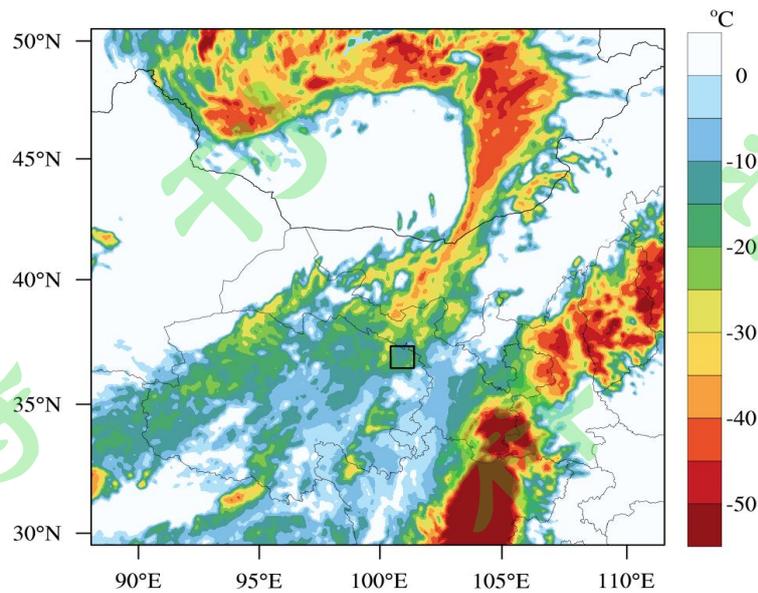


168

169 图2 2020年8月16日08:00 西宁站探空曲线。蓝色实线代表露点,黑色实线代表温度,红  
170 色虚线代表状态曲线

171 Fig. 2 Sounding at Xi'ning station at 08:00 on 16 August 2020. Blue solid line is dewpoint

172 temperature, black solid line is temperature, and red dashed line represents state curve.



174

175 图 3 2020 年 8 月 16 日 09:00 FY-2G 卫星观测的黑体亮温 (TBB, 单位:  $^{\circ}\text{C}$ ) 分布, 黑色框  
176 为观测区域。

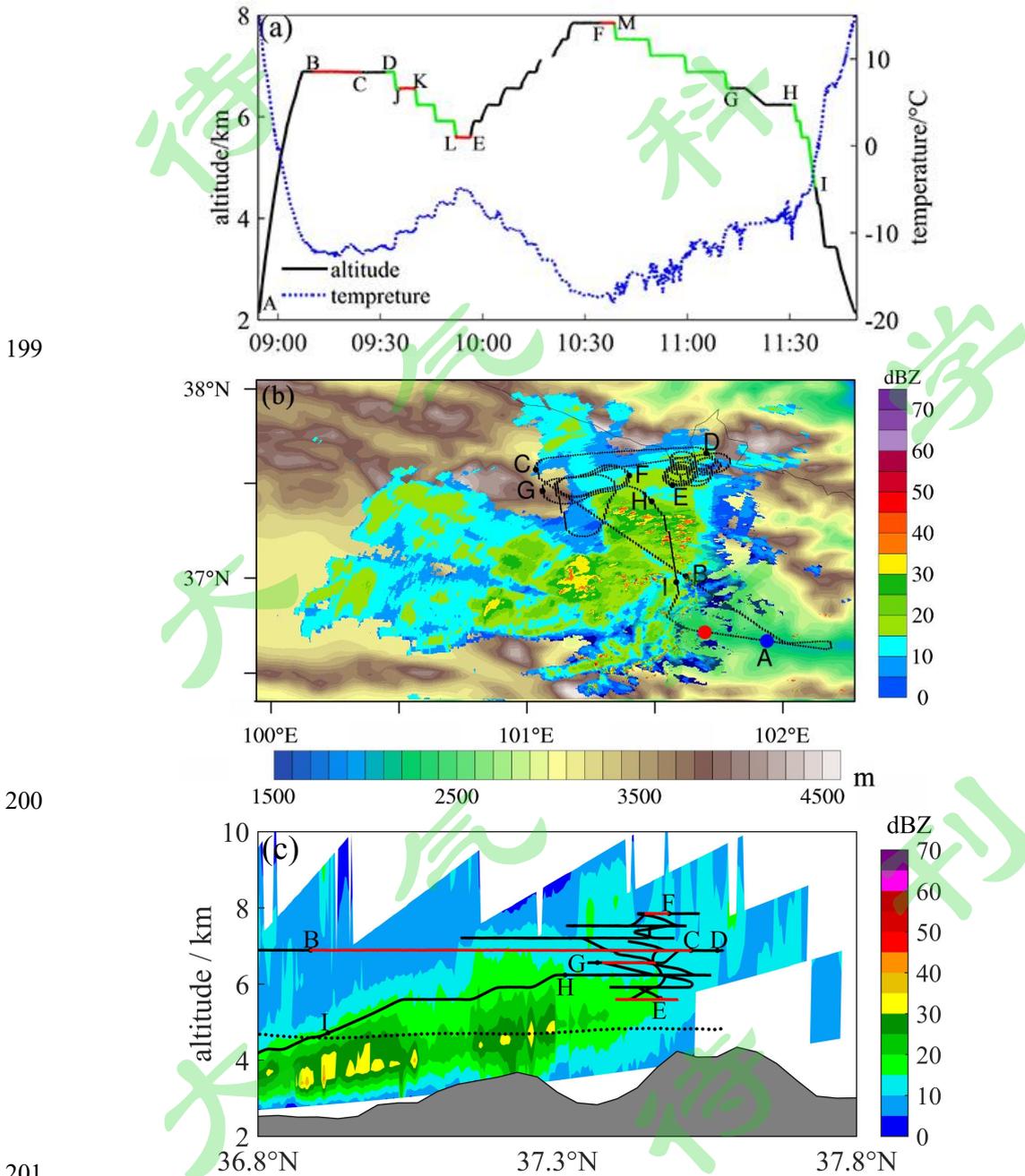
177 Fig. 3 Black body temperature (TBB, unit:  $^{\circ}\text{C}$ ) retrieved by the FY2G satellite at 09:00 on 16  
178 August 2020. The black box is the observation area.

179

180 图 4a 为飞机飞行高度和对应环境空气温度随时间的变化。飞机于 08:54 从  
181 西宁机场 (A 点) 起飞, 上升至 6.9 km 高度后从 B 点进入层状云上部, 在 BC  
182 区域保持 6.9 km 的飞行高度向西北方向的高海拔地区飞行, 地形高度逐渐增加。  
183 09:32~09:54 飞机位于祁连山山脊上空 (DE 区) 进行探测, 下垫面平均海拔高度  
184 为 3.7 km, 飞机由 6.9 km 开始分层下降探测至 5.6 km, 再由 5.6 km 盘旋上升飞  
185 行探测至 7.8 km, 水平探测高度层为 6.9、6.6、6.2、5.9、5.6 km。飞机在山脊上  
186 空探测结束后向西飞行至祁连山南坡门源县上空 (FG 区) 进行探测, 下垫面平  
187 均海拔高度为 3.1 km, 10:35~11:14 由 7.8 km 分层下降探测至 6.6 km, 温度范围  
188 为  $-18\sim-8.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 水平探测高度为 7.9、7.5、7.2、6.9、6.6 km。FG 区探测结束之  
189 后飞机返回西宁机场, 飞行高度逐渐降低。本文选取 4 段水平探测过程 (BC、  
190 JK、LE、FM) 以及三段垂直探测过程 (DE、FG、HI) 进行分析, 其中 HI 的水  
191 平探测距离跨度大, 代表飞机从高海拔山脉到低海拔山脉的探测结果。

192 由西宁雷达组合反射率 (图 4b) 可见, 雷达观测区域的回波强度在 0~40 dBZ

193 之间。由雷达反射率剖面图（图 4c）可见，探测区域云顶高度在 9~10 km，云体  
 194 无分层，云中存在弱对流泡，强回波区随着地形升高而抬升，表明云的形成过程  
 195 受地形影响明显。飞机探测区域反射率变化范围为 5~20 dBZ，是较为稳定的层  
 196 状云区。而且从飞机飞行轨迹与云雷达回波分布可以看到，此次飞行探测的区域  
 197 主要位于弱层状云区。  
 198



201 图 4 (a) 飞机飞行高度（实线）及对应的环境大气温度（点线）随时间的变化。DE、FG、  
 202 HI 段为垂直探测，BC、JK、LE、FM 段分别为不同高度层的水平探测；(b) 飞机水平探测  
 203

204 轨迹（黑色实线）与对应的雷达组合反射率（彩色阴影）和地形分布（背景彩色阴影）。DE、  
205 FG 和 HI 代表垂直探测区域，BC 代表水平探测区域。红色圆点表示西宁雷达站位置，蓝色  
206 圆点为机场位置；（c）飞机探测轨迹（黑色实线）与对应的雷达反射率剖面（彩色阴影）和  
207 地形分布（灰色阴影）。红色实线为与图 4a 对应的水平探测区域，黑色点线为 0 °C 线。

208 Fig. 4 (a) Time evolution of aircraft flight altitude (solid line) and corresponding air temperature  
209 (blue dashed line). DE, FG and HI represent vertical observations; BC, JK, LE, and FM represent  
210 horizontal observations at different heights; (b) Horizontal flight path (black lines) and  
211 corresponding radar composite reflectivity (color shaded) and terrain height distribution  
212 (background color shaded). DE, FG and HI are areas for vertical observations, and BC is  
213 horizontal observation. Red dot is the location of Xi'ning C-band radar and blue dot is the location  
214 of airport; (c) Vertical aircraft flight path (black line) and corresponding radar reflectivity (color  
215 shaded) and terrain height distribution (gray shaded). Red lines are horizontal observations in Fig.  
216 4a, and black dotted line is the level of 0 °C.

217

## 218 4 云微物理量的水平和垂直分布特征

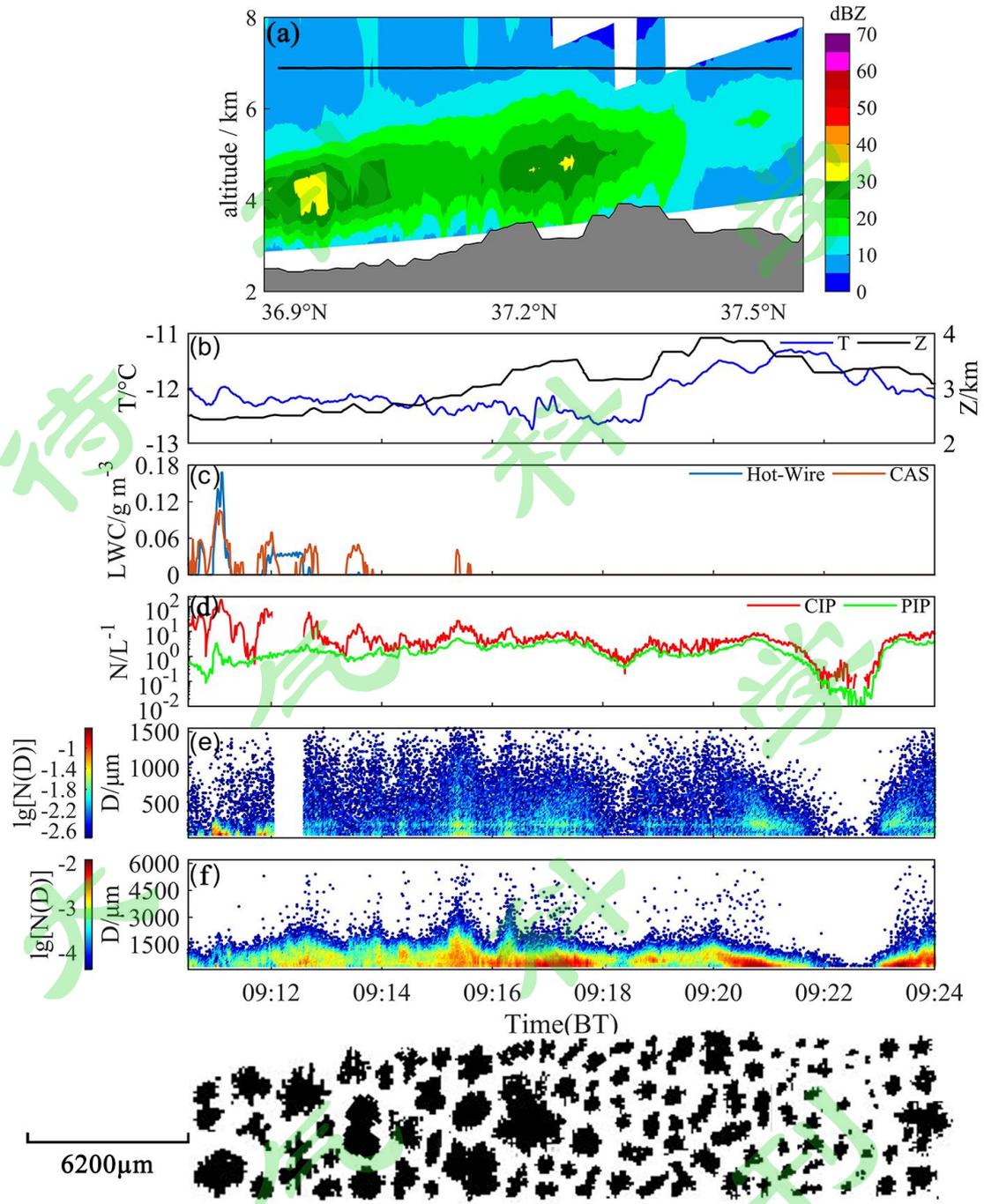
### 219 4.1 云微物理量的水平分布特征

220 为了解祁连山层状云微物理量的水平分布特征，选取由低海拔至高海拔山区  
221 水平飞行的探测结果，以及层状云中中部、中上部、上部探测高度分别为 5600 m  
222 (-5.1 °C)、6560 m (-9.9 °C) 和 7850 m (-17.6 °C) 的三段水平探测过程云微  
223 物理量进行分析。

224 为了解同一高度上云物理量随地形的分布，选取由河湟谷地向西北方向的祁  
225 连山山区水平飞行探测（图 4 的 BC 区）结果进行分析。图 5 为 BC 区探测过程  
226 的飞机飞行轨迹与对应的雷达回波剖面图和各物理量的时间变化，云中存在弱对  
227 流区，对流区的雷达反射率超过 30 dBZ，飞机在强回波区上部水平探测，飞行  
228 高度为 6890 m，探测区域反射率变化范围为 5~15 dBZ（图 5a）。由图 5b 可见，  
229 同一海拔高度的温度分布并不均匀，变化范围为-13~-11 °C，山区上空的气温明  
230 显高于谷地，这应该是白天地形受太阳辐射加热作用造成的。该高度层的液态水  
231 分布也不均匀，过冷水区位于探测区域东南部的河湟谷地上空，对应雷达剖面在  
232 3.5~4.5 km 高度上存在反射率大于 30 dBZ 的弱对流区，King-LWC 最大值为 0.17

233  $\text{g m}^{-3}$ , 说明河谷地区水汽较多, 导致液态水含量较高。CIP 粒子数浓度在  $10^{-1}\sim 10^2$   
234  $\text{L}^{-1}$  之间, 粒子谱宽达  $1550 \mu\text{m}$ , 主要为粒径在  $500 \mu\text{m}$  以下的粒子。PIP 粒子数  
235 浓度低于  $10 \text{L}^{-1}$ , 大部分降水粒子粒径小于  $1000 \mu\text{m}$ 。过冷水区 CIP 粒子数浓度  
236 较高, CIP 粒子谱较窄, 粒径的分布更集中于  $75\sim 300 \mu\text{m}$ 。在混合相态云内 CIP  
237 和 PIP 粒子数浓度相差较大, 而在 09:16 之后的冰相云内两者变化较为一致。由  
238 图 5 下部的 PIP 图像可见, 该高度层的冰粒子差别较大, 在液态水较为丰富区,  
239 存在大量雪团、霰的凇附体和聚合体, 冰粒子的形成和增长主要通过凝华、凇附  
240 和聚并过程。随着飞机接近高海拔的山区, 09:16 之后, 冰粒子之间的聚并减弱,  
241 大粒径的雪团数量减少, PIP 谱宽缩窄, 降水粒子粒径主要在  $300\sim 900 \mu\text{m}$ , 观测  
242 到不规则状、枝状和针柱状冰粒子, 冰粒子主要通过凝华和聚并增长。

243



244

245 图 5 2020 年 8 月 16 日 09:11~09:24 时 (a) 飞机在 6890 m (图 4 的 BC 段, 平均温度  $-12.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ )

246 高度层水平飞行轨迹 (黑色实线) 与对应的雷达回波分布 (下部的灰色阴影为地形) 和各物

247 理量的时间变化: (b) 温度 (T) 和地形高度 (Z) (蓝色线为温度, 黑色线为地形高度); (c)

248 液态水含量 (蓝色线为 Hot-Wire 含水量仪观测的 LWC, 橙色线为 CAS 计算的 LWC); (d)

249 粒子数浓度 (N) (红色线为 CIP 观测的粒子浓度, 绿色线为 PIP 观测的粒子浓度); (e) CIP

250 观测的粒子谱 (去除前两个通道, 即直径为  $75\sim 1550\ \mu\text{m}$  的粒子谱); (f) PIP 观测的粒子谱

251 (去除前两个通道, 即直径为  $300\sim 6200\ \mu\text{m}$  的粒子谱)。图片下方为对应时刻的 PIP 测量的

252 冰粒子图像。

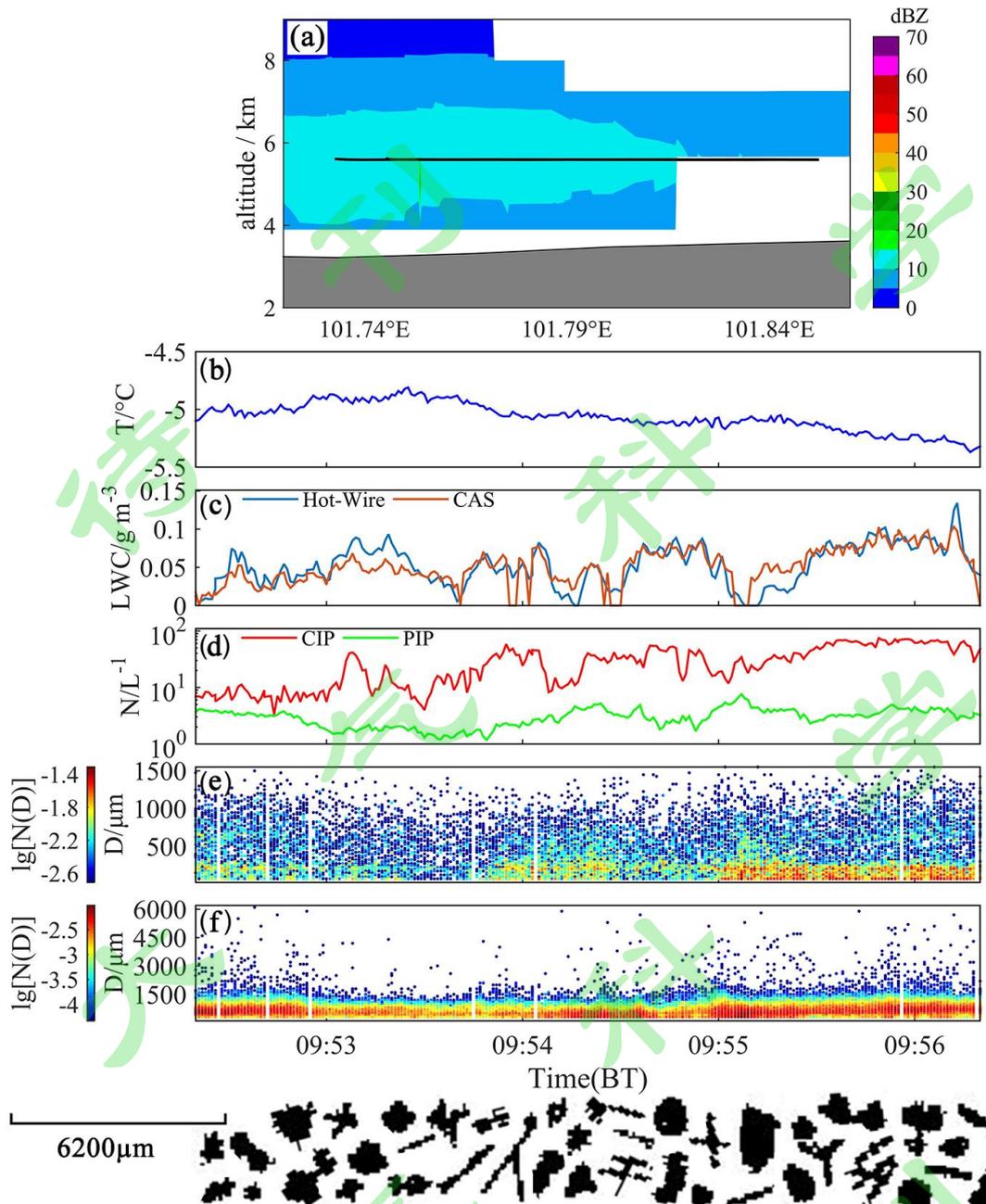
253 Fig. 5 (a) Aircraft flight path and cross section of radar reflectivity during the horizontal  
254 observation at the altitude of 6890 m (BC segment in Fig.4) and time series of (b) Temperature  
255 (blue line) and terrain (black line); (c) liquid water content (LWC) observed by King Hot-Wire  
256 probe (Blue line) and calculated by CAS (orange line); (d) particle number concentration (N) from  
257 CIP (red line) and from PIP (green line); (e) CIP instantaneous spectrum (the first two bins  
258 removed, i.e., spectrum of particles diameter from 75  $\mu\text{m}$  to 1550  $\mu\text{m}$ ); (f) PIP instantaneous  
259 spectrum (the first two bins removed, i.e., spectrum of particles diameter from 300  $\mu\text{m}$  to 6200  $\mu\text{m}$ )  
260 at the height of 6890 m (the BC segment in Fig.4) from 0911-0924 on 16 August 2020. The  
261 corresponding ice particles images from PIP probe are listed on the bottom of the figure. from  
262 0911-0924 on 16 August 2020. The low-level gray shadow is terrain distribution.

263

264 09:53~09:56 飞机在层状云中上部进行水平探测(图 6), 探测高度为 5600 m(图  
265 4 的 LE 段), 平均温度为 $-5.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 但在水平飞行过程中温度略有下降(图 6b),  
266 说明飞机飞行高度略有上升。雷达反射率范围为 10~15 dBZ。该高度层过冷液态  
267 水含量值基本低于  $0.1\text{ g m}^{-3}$ (图 6c), 而且热线含水量仪测量值与 CAS 计算值比  
268 较一致。由于云水平分布不完全均匀, 液态水含量存在多个峰值。图 6d 显示,  
269 CIP 粒子数浓度与 LWC 的水平变化较为一致, 在  $10^0\sim 10^2\text{ L}^{-1}$  之间, 变化幅度较  
270 大, 但主要为粒径小于 300  $\mu\text{m}$  粒子(图 6e)。而 PIP 粒子浓度变化范围为  $10^0\sim 10^1$   
271  $\text{L}^{-1}$ , 变化幅度较小, 粒子多集中于 1000  $\mu\text{m}$  以下(图 6f)。

272 对比分析发现, CIP 粒子数浓度与 LWC 的变化比较一致, 但 PIP 粒子数浓  
273 度与 LWC 的变化几乎相反, 且 PIP 粒子谱宽的峰值区对应 LWC 的谷值区, 造  
274 成该现象的原因应该是凇附过程, 冰粒子撞冻过冷水增长, 冰粒子粒径增大, 过  
275 冷水消耗降低。由图 6 下部显示的冰粒子图像可见, 该层粒子形状有比较简单的  
276 针柱状, 也有不规则形状的霰粒子和雪团。边缘较为规整、密实的冰粒子应与弱  
277 凇附过程有关, 而聚合体的存在说明云中也发生了冰粒子之间的聚并过程。对比  
278 冰晶生成的一般温度范围可知(Bailey and Hallett, 2009), 该高度层符合针柱状  
279 冰晶形成的温度区间, 说明针柱状冰晶是局地形成的, 而不规则形状的冰粒子是  
280 经过凇附和聚并过程形成的。

281

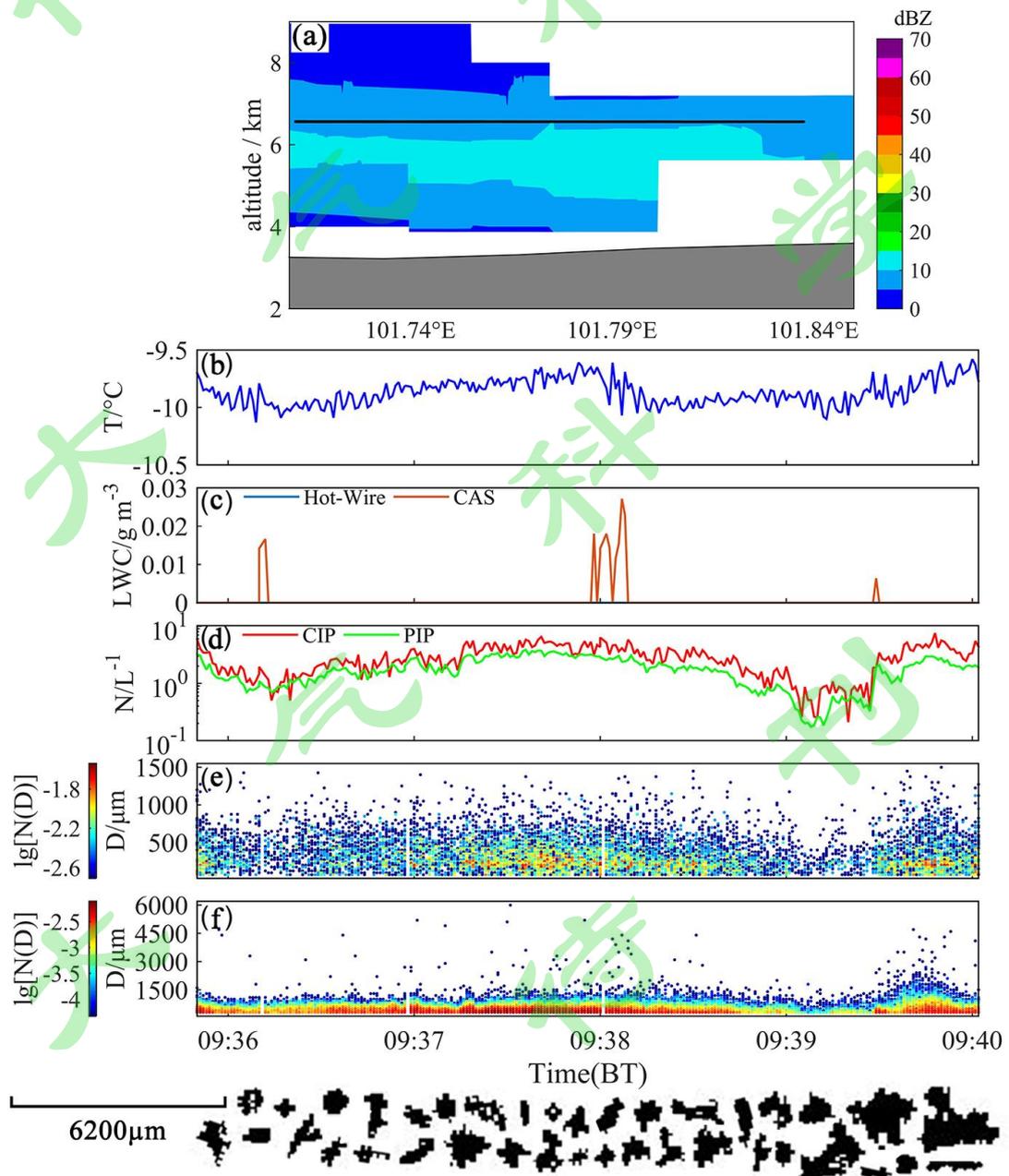


282  
 283 图 6 同图 5，但飞行高度为 5600 m（平均温度为 -5.1 °C，图 4 中的 LE 段），飞行时段为  
 284 09:53~09:56。

285 Fig. 6 Same as in Fig. 5, but for the flight height of 5600 m (mean temperature is -5.1 °C, and the  
 286 LE segment in Fig. 4) and flight time is 0953-0956.

287  
 288 图 7 为层状云中上部（图 4 的 JK 段）水平探测的物理量以及冰粒子形状随  
 289 时间的变化，该段水平探测的平均高度为 6560 m，平均温度为 -9.9 °C，温度起  
 290 伏变化相对较小（图 7b）。飞机探测区的雷达反射率范围为 5~10 dBZ（图 7a），

291 为弱层云区。该区域的 King-LWC 几乎为 0，而 CAS-LWC 最大值约  $0.03 \text{ g m}^{-3}$   
 292 (图 7c)，说明过冷液态水含量很低，远低于 GB 区。由于冰粒子浓度很低，CIP  
 293 和 PIP 粒子数浓度、谱宽变化都较为一致 (图 7d)。CIP 谱宽随时间的变化在  
 294  $300\sim 1000 \mu\text{m}$ ，但粒径在  $300\sim 400 \mu\text{m}$  的粒子占多数 (图 7e)，这应该是 CIP 与  
 295 PIP 测量浓度比较一致的原因。PIP 谱宽在  $1000\sim 2000 \mu\text{m}$ ，粒径集中在  $600 \mu\text{m}$   
 296 以下。从图 7 下部显示的图像看，存在大量不规则形状聚合冰粒子，说明冰粒子  
 297 主要通过水汽凝华和聚并过程增长。09:39 开始出现大量冰雪晶聚合体，通过聚  
 298 并过程形成尺度较大的雪团，直径可超过  $3 \text{ mm}$ 。大量聚合状冰粒子的出现，引  
 299 起 09:40 分左右冰粒子谱拓宽明显。



300

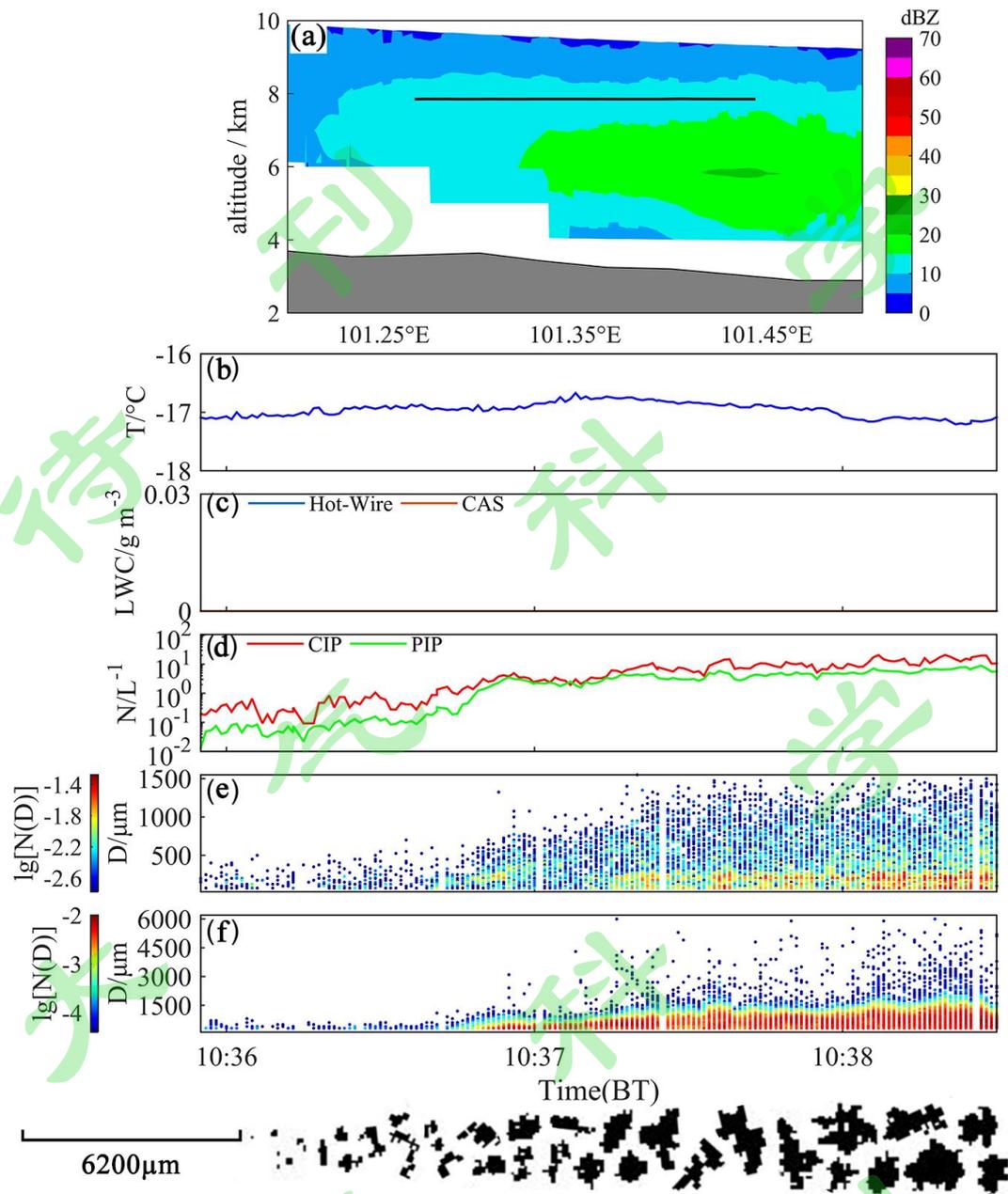
301 图 7 同图 5，但飞行高度为 6560 m（平均温度为-9.9 °C，图 4 中的 JK 段），飞行时段为  
302 09:36~09:40。

303 Fig. 7 Same as in Fig. 5, but for the flight height of 6560m (mean temperature is -9.9 °C, and the  
304 JK segment in Fig. 4) and flight time is 0936-0940.

305

306 图 8 为 FM 区的水平飞行探测及其结果。飞机在 FM 区的飞行高度为 7850 m，  
307 平均温度为-17.0 °C，雷达反射率范围为 10~15 dBZ，探测区域为层状云上层（图  
308 8a）。该高度层 CIP 和 PIP 粒子浓度水平变化趋势相似，CIP 变化范围为  $10^{-2}$ ~ $10^1$   
309  $L^{-1}$ ，PIP 粒子数浓度稍低于 CIP。FM 区 King-LWC 和 CAS-LWC 均为 0，表明探  
310 测区域完全为冰云，云内不含液态水。10:37 左右观测到 CIP、PIP 粒子数浓度显  
311 著升高，同时，观测到的降水粒子尺度增大，大量冰雪晶聚合体的出现，使 CIP、  
312 PIP 粒子谱明显拓宽，CIP 谱宽约为 1500  $\mu m$ ，粒径小于 500  $\mu m$  的粒子较多，PIP  
313 粒径集中在 1500  $\mu m$  以下。由图 8 下方的粒子图像可见，7850 m 高度层的冰粒  
314 子多为聚合状，结构松散，表明冰粒子主要通过凝华和聚并过程形成和增长。所  
315 观测到的雪团多由枝状体组成。

316



317

318 图 8 同图 5，但飞行高度为 7850 m（平均温度为  $-17.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，图 4 中 FM 段），飞行时段为

319 10:36~10:38 的情况。

320 Fig. 8 Same as in Fig. 5, but for the flight height at 7850 m (mean temperature is  $-17.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ , and the

321 FM segment in Fig.4) and flight time is from 1036-1038.

322

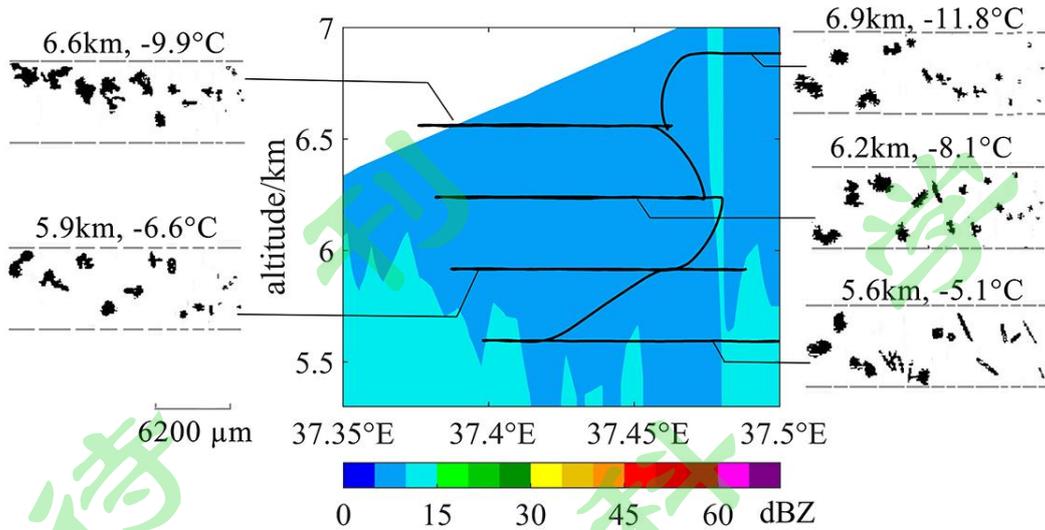
#### 323 4.2 云微物理量的垂直分布特征

324 为了解祁连山层状云微物理量的垂直分布特征以及地形对云物理量分布的  
 325 影响，分别选取山脊上空、南坡上空的分层巡回垂直探测，以及由高海拔山区至  
 326 低海拔谷地的下降探测过程进行分析。

327 飞机于 09:32~09:56 对祁连山山脊上空（图 4 中 DE 区域）层状云区进行了  
328 巡回垂直下降探测，探测高度范围为 6.9~5.6 km。由垂直探测时段飞行轨迹对应的  
329 雷达回波图（图 9）可见，垂直探测区域的雷达回波分布较为均匀，变化范围  
330 为 5~15 dBZ。由 DE 区温度随高度的分布（图 10a）可见，在 5.6 km~6.9 km 高  
331 度范围内，云内温度随高度递减，变化范围为 -11.9~-4.9 °C，递减率为 0.54 °C  
332 /100m。LWC 随高度分布不均匀（图 10b），主要集中于 6.2 km 以下，LWC 随高  
333 度的升高而减小，变化范围为 0~0.06 g m<sup>-3</sup>。液态水主要位于 5.7~6.2 km（-9~-6°C）  
334 高度层，5.6 km（-5°C）层 King-LWC 最大值为 0.06 g m<sup>-3</sup>。粒子总浓度随高度的  
335 变化（图 10c）表明，CIP 粒子浓度在过冷水区附近最高，超过 10 L<sup>-1</sup>，在 6 km  
336 以上的云层中，CIP 粒子总浓度降低至 10<sup>0</sup>~10<sup>1</sup> L<sup>-1</sup> 之间。对应 CIP 粒子谱（图  
337 10d）可见，CIP 谱宽达 1550 μm，但粒子谱不连续，对大部分高度而言，700 μm  
338 以上的多数通道未观测到粒子，且随着高度的升高，CIP 所观测到粒径大于 700  
339 μm 粒子的明显减少。CIP 粒子谱显示，在 6.2 km 以上 CIP 粒径多集中于 100~500  
340 μm；而在 6.2 km 以下，CIP 粒子谱变宽，但粒子直径更多集中于 300 μm 以下。  
341 PIP 粒子总浓度随高度的变化较小，在 10<sup>0</sup>~10<sup>1</sup> L<sup>-1</sup> 之间。PIP 观测到的降水粒子  
342 最大可达 6200 μm，粒子谱不连续，大部分高度 PIP 谱宽小于 2000 μm，降水粒  
343 子的粒径多集中于 1000 μm 以下。CIP 与 PIP 粒子数浓度的垂直分布存在一定的  
344 差异，但在 5.9 km 处差异较明显，5.9 km 处 CIP 粒径多集中于 300 μm 以下。  
345 CIP 和 PIP 在小粒子端的测量范围不同，应该是造成其粒子数浓度存在较大差别  
346 的主要原因。

347 对比图 10 液态水含量和 CIP 粒子浓度、粒子谱以及典型冰粒子图像的垂直  
348 分布发现，6.3 km 以上过冷水含量较低，对应 CIP 和 PIP 粒子浓度较低，粒子谱  
349 较窄，冰粒子主要通过凝华和聚并方式形成和增长。6.3 km 以下 CIP 粒子谱拓宽，  
350 一方面是由于冰粒子之间聚并过程使其粒径增大；另一方面，过冷水的存在使冰  
351 粒子通过淞附增长，从而造成粒子谱拓宽。DE 区液态水的垂直分布不均匀，造  
352 成不同高度上冰粒子增长机制不同，大量淞附体、聚合体的出现，使该区域粒子  
353 形状较为复杂。

354



355

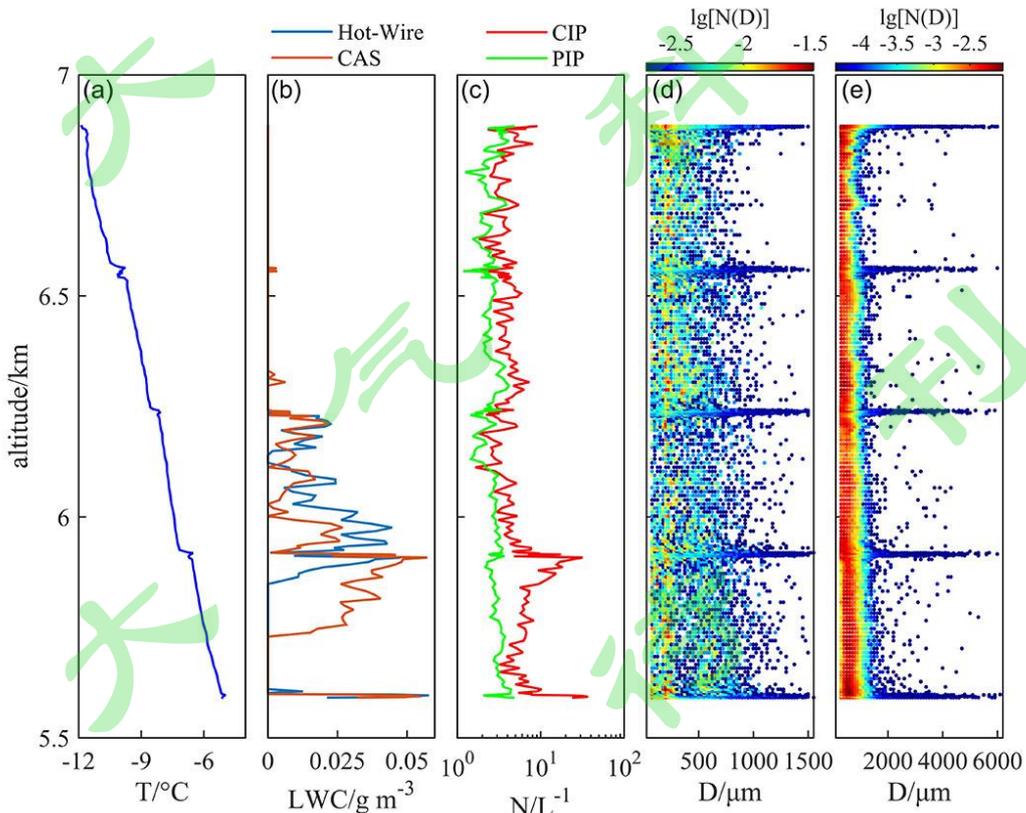
356 图9 2020年8月16日09:32~09:56飞机在DE区(图4中DE段)垂直探测飞行轨迹(黑色  
357 实线)与雷达回波分布(填色)以及典型冰晶粒子图像

358 Fig. 9 Vertical flight path (black thick line) of the aircraft in DE segment (Fig. 4) and cross section

359 of radar reflectivity along the flight path and typical particle images during 0932-0956 on 16

360 August 2020

361



362

363 图10 2020年8月16日09:32~09:56飞机在DE区探测云物理量随高度的平均分布:(a)温

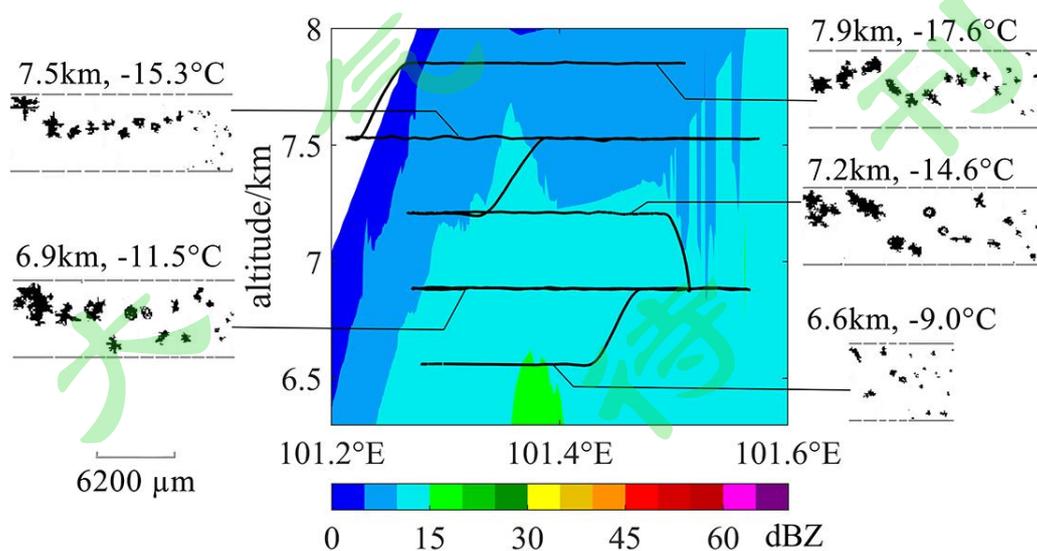
364 度 ( $^{\circ}\text{C}$ ), (b) 液态水含量 ( $\text{g m}^{-3}$ ), (c) 粒子数浓度 ( $\text{L}^{-1}$ ), (d) CIP 粒子谱 ( $\text{L}^{-1}\mu\text{m}^{-1}$ ), (e)  
 365 PIP 粒子谱 ( $\text{L}^{-1}\mu\text{m}^{-1}$ ).

366 Fig. 10 Cloud physical quantities distribute with height during vertical detection in DE area from  
 367 0932 - 0956 on 16 August 2020: (a) temperature ( $^{\circ}\text{C}$ ), (b) liquid water content ( $\text{g m}^{-3}$ ), (c) particle  
 368 number concentrations ( $\text{L}^{-1}$ ), (d) size distributions of particles ( $\text{L}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$ ) measured by CIP, and (e)  
 369 size distributions of particles ( $\text{L}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$ ) measured by PIP.

370

371 10:35~11:14 期间, 飞机在祁连山南坡的层状云中 (FG 区) 进行下降探测,  
 372 垂直探测高度为 7.9~6.5 km, 在垂直探测过程中先后对 7.8、7.2、7.5、6.9、6.6 km  
 373 高度层进行了水平探测, 探测区域的雷达回波小于 20 dBZ (图 11)。由图 12a 可  
 374 见, 在该垂直探测过程中, 云内温度变化范围为  $-17.2^{\circ}\text{C} \sim -9.1^{\circ}\text{C}$ , 递减率为  
 375  $0.62^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ 。该区域大部分高度液态水含量为 0, 热线含水量仪和 CAS 分别在  
 376 6.9 和 7.2 km 附近探测到很少量的过冷水。该探测区域内, CIP 粒子多集中于  
 377  $200\sim 700 \mu\text{m}$ , PIP 粒径多集中于  $1550 \mu\text{m}$  以下, 因此 CIP 和 PIP 粒子数浓度变化  
 378 和粒子谱宽变化都较为一致。6.9 km 以上 CIP、PIP 粒子浓度、粒子谱宽随高度  
 379 增加而增大, CIP、PIP 粒子数浓度分别由 6.6 km 高度的  $10^0$ 、 $10^{-1} \text{L}^{-1}$  量级增大  
 380 到 7.9 km 高度处超过  $10^0$ 、 $10^1 \text{L}^{-1}$ 。由 PIP 图像 (图 11) 可见, 冰粒子结构较为  
 381 疏松, 所观测到的冰粒子有单个存在的, 也有聚合体, 表明该区域冰粒子主要通  
 382 过水汽凝华和冰粒子间的聚并过程形成。

383

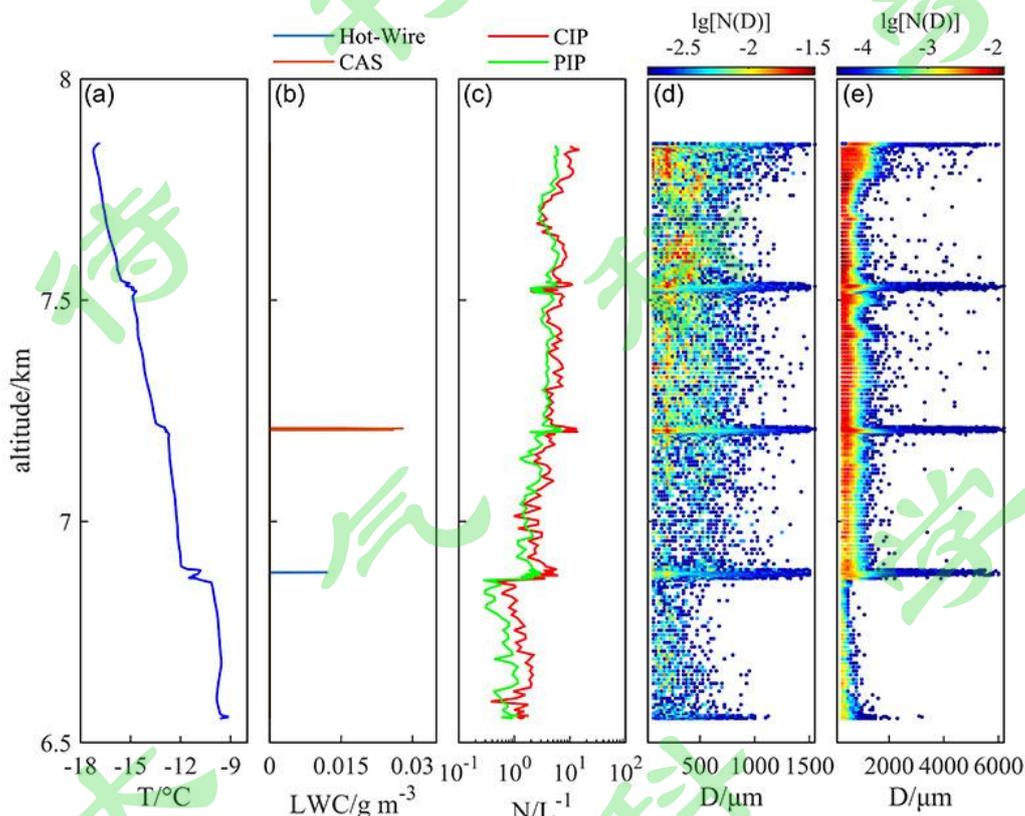


384

385 图 11 同图 9，但垂直探测时段为 10:35~11:14，探测为 FG 段（图 4 中 FG 段）

386 Fig. 11 Same as in Fig. 9, but for vertical flight at the time of 1035-1114 and FG segment (FG  
387 segment in Fig.4)

388



389

390 图 12 同图 10，但垂直探测时段为 10:35~11:14，探测为 FG 段。

391 Fig. 12 Same as in Fig. 10, but for vertical flight time of 1035-1114, and flight segment of FG

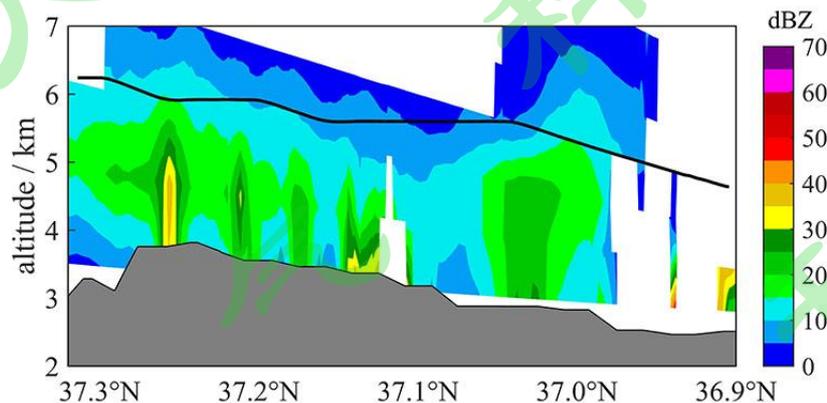
392

393 HI 段为由祁连山返回西宁机场途中的下降探测，由于冰粒子图像缺失，仅  
394 对该段其他云物理量进行了分析。由图 13 可见，该区域雷达回波变化范围为 0~40  
395 dBZ，云中存在弱对流区。低层偏南气流向山区移动过程中受地形抬升作用而形  
396 成云，因此云回波分布与地形分布较为一致。飞机探测区域为层状云中上部，飞  
397 行高度由 6.2 km 下降至 4.6 km，下垫面高度由 3.9 km 逐渐降低至 2.4 km，探测  
398 高度高于 5.9 km 的区域为山区。由图 14a 可见，HI 段温度变化范围为  
399 -8.1~-1.6 °C，云内温度随高度的降低而逐渐升高，递减率为 0.45 °C/100m。液  
400 态水含量随高度的降低而增大，山区上空（飞行高度 6.2~5.9 km）温度较低，液  
401 态水含量较少，King-LWC 最大值为 0.08 g m<sup>-3</sup>。低海拔上空云内液态水较为丰富，

402 存在多个液态水含量高值区,这应与暖湿气流受地形抬升凝结和高层下落的冰粒  
403 子融化有关。液态水含量高值区的 CIP、PIP 粒子浓度较低,说明小云滴对液态  
404 水的贡献较大。HI 段探测过程中 King-LWC 最大值为  $1.13 \text{ g m}^{-3}$ , 对应温度为  
405  $-2.7 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 。 $-5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 层附近 ( $5.2\sim 5 \text{ km}$ ) 存在大量液态水, King-LWC 最大值为  $0.78 \text{ g}$   
406  $\text{m}^{-3}$ 。对比低海拔谷区 (HI 段) 和高海拔山脊 (LE 段) 上空  $-5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 层的液态水含  
407 量发现,山脊上空的液态水含量远低于谷地上空,说明水汽是由低海拔向高海拔  
408 输送,海拔越高,水汽含量少,凝结产生的液态水含量减小。CIP、PIP 粒子数  
409 浓度变化范围分别为  $10^{-2}\sim 10^1 \text{ L}^{-1}$  和  $10^{-3}\sim 10^0 \text{ L}^{-1}$ ,两者都随着高度的降低而减小。  
410 CIP 粒子谱 (图 14d) 显示,  $5.9 \text{ km}$  以上主要为粒径小于  $400 \mu\text{m}$  的粒子,  $5.9 \text{ km}$   
411 以下 CIP 粒子谱分布较为均匀。PIP 粒子谱宽约为  $2000 \mu\text{m}$ , 随高度略有变化,  
412  $5.9 \text{ km}$  以上降水粒子粒径集中于  $600\sim 1500 \mu\text{m}$ ;  $5.9\sim 5.6 \text{ km}$  PIP 粒子谱宽缩小,  
413 降水粒子粒径多为  $300\sim 600 \mu\text{m}$ ;  $5.5\sim 5.2 \text{ km}$  降水粒的粒径多位于  $300\sim 700 \mu\text{m}$  和  
414  $1100\sim 1500 \mu\text{m}$  两个区间内。

415 综上所述,水汽由低海拔的河湟谷地向高海拔山区爬升过程中,云和降水粒  
416 子数浓度增加,粒子平均粒径增大;低海拔谷地上空层状云中上部的液态水含量  
417 较高,山区云的中上部液态水含量较低。

418

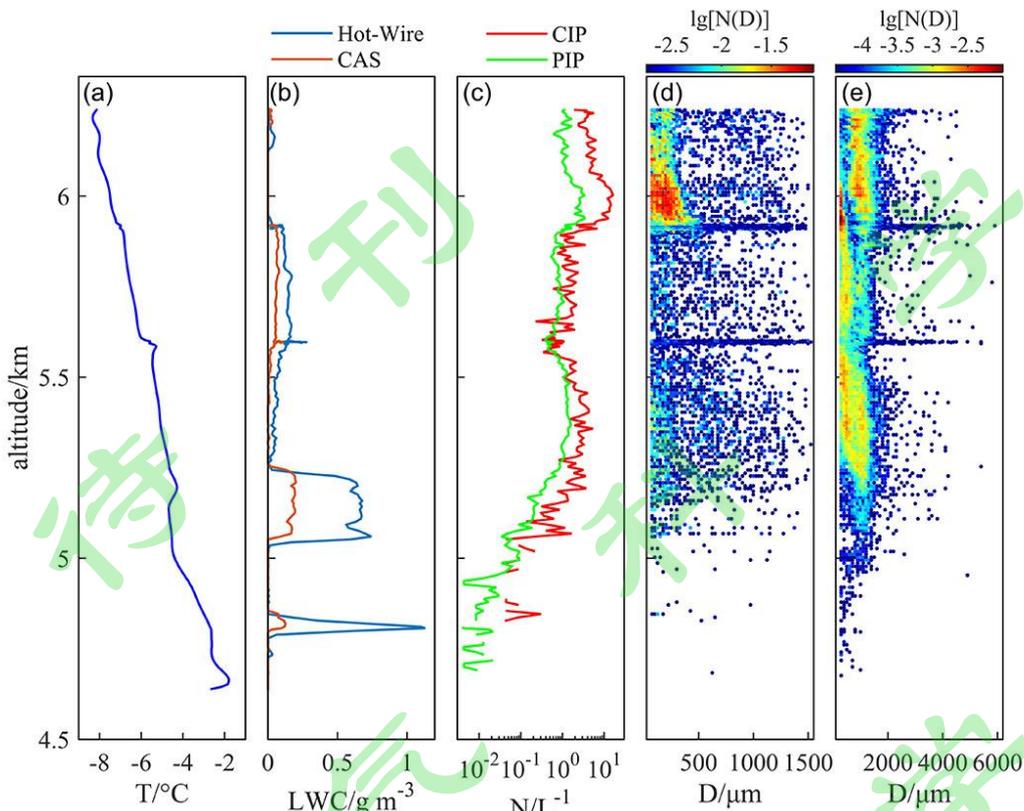


419

420 图 13 同图 5a, 但飞行高度为  $6.2\sim 4.6 \text{ km}$  (图 4 中的 HI 段)。

421 Fig. 13 Same as in Fig.5a, but for the flight height of  $6.2\sim 4.6 \text{ km}$  (the HI segment in Fig. 4).

422



423

424 图 14 同图 10，但垂直探测时段为 11:31~11:37，探测为 HI 段。

425 Fig. 14 Same as in Fig. 10, but for vertical flight time of 1131-1137, and flight segment of HI

426

## 427 5 结论

428 本文对 2020 年 8 月 16 日祁连山地区的一次降水性层状云的云微物理量的水  
429 平和垂直分布特征进行了分析，主要结论如下：

430 (1) 此次祁连山地形云的形成过程，与偏南气流由低海拔河湟谷地区向高  
431 海拔山区运动过程中受地形强迫抬升过程密切相关。液态水含量高值区位于低海  
432 拔谷地，随着海拔升高，水汽含量减小，液态水也相应减少。低海拔谷地降水粒  
433 子的粒径变化范围较大，而高海拔山区降水粒子的粒径更倾向于集中在某一范  
434 围。

435 (2) 对祁连山山区层状云中液态水含量、粒子浓度、粒子谱、粒子形状的水  
436 平分布不均匀，物理量的水平变化存在多个峰值，且不同高度层冰粒子增长机  
437 制存在差异。在 5600 m (-5.1 °C) 的低层，云中过冷液态水含量为 0.13 g m<sup>-3</sup>，  
438 除观测到大量雪团、霰粒子外，还出现形状清晰的针柱状冰粒子，冰粒子的形成  
439 主要通过水汽凝华和聚并增长，也存在弱淞附过程。在 6560 m (-9.9 °C) 中上

440 层, 液态水含量很少, 大量聚合状冰粒子的出现使粒子谱显著拓宽, 凝华和聚并  
441 是冰粒子的主要形成过程。在 7850 m (-17.0 °C) 层无过冷水, 冰粒子主要通过  
442 凝华和聚并过程形成。

443 (3) 通过分析山区两段垂直探测结果进一步说明, 垂直探测区域温度范围  
444 为-11.8~-5.1 °C的低层, 存在少量过冷液态水, 水汽凝华、冰粒子聚并过程为主,  
445 也存在弱的淞附过程。而在-17.2~-9.1 °C的更高范围内, 液态水含量几乎为 0,  
446 冰粒子主要通过凝华、聚并形成, 说明祁连山地区云中雪团粒子的形成是降水产  
447 生的主要过程。

448  
449 致谢: 本文飞机观测数据由青海省人工影响天气办公室提供, 借此机会对青海空  
450 中国王飞行团队表示衷心感谢。

451

#### 452 参考文献 (References)

453 Bailey M P, Hallett J. 2009. A comprehensive habit diagram for atmospheric ice  
454 crystals: confirmation from the laboratory, AIRS II, and other field studies [J]. *J.*  
455 *Atmos. Sci.*, 66(9): 2888-2899. doi: 10.1175/2009JAS2883.1

456 蔡兆鑫, 蔡淼, 李培仁, 等. 2019. 大陆性积云不同发展阶段宏观和微观物理特性  
457 的飞机观测研究 [J]. *大气科学*, 43(6): 1191-1203. Cai Zhaoxin, Cai Miao, Li  
458 Peiren, et al. 2019. Aircraft observation research on macro and microphysics  
459 characteristics of continental cumulus cloud at different development stages [J].  
460 *Chinese J. Atmos. Sci. (in Chinese)*, 43(6): 1191-1203. doi: 10.3878/j.issn.  
461 1006-9895.1903.19113

462 常祎. 2019. 青藏高原那曲地区夏季云微物理特征和降水形成机制的飞机观测研  
463 究 [D]. 中国气象科学研究院博士学位论文. Chang Yi. 2019. The summer  
464 cloud microphysical characteristics and precipitation formation processes  
465 derived from aircraft observation in the Naqu Region over the Tibetan Plateau  
466 [D]. Ph. D. dissertation (in Chinese), Chinese Academy of Meteorological  
467 Sciences.

468 Fan J W, Ghan S, Ovchinnikov M, et al. 2011. Representation of Arctic mixed-phase  
469 clouds and the Wegener-Bergeron-Findeisen process in climate models:

- 470 Perspectives from a cloud-resolving study [J]. *J. Geophys. Res.*, 116(D1). doi:  
471 10.1029/2010JD015375
- 472 封秋娟, 牛生杰, 侯团结, 等. 2021. 山西一次降雪云物理特征的飞机观测研究  
473 [J]. *大气科学*, 45(5): 1146-1160. Feng Qiujuan, Niu Shengjie, Hou Tuanjie, et  
474 al. 2021. Aircraft-based observation of the physical characteristics of snowfall  
475 cloud in Shanxi Province [J]. *Chinese J. Atmos. Sci. (in Chinese)*, 45(5): 1146-  
476 1160. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2106.21004
- 477 French J R, Friedrich K, Tessendorf S A, et al. 2018. Precipitation formation from  
478 orographic cloud seeding [J]. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 115(6):1168-1173. doi:  
479 10.1073/pnas.1716995115
- 480 傅云飞. 2018. 云-降水遥感研究现状及夏季东亚云-降水研究思考 [J]. *暴雨灾害*,  
481 37(06): 493-501. Fu Yunfei. 2018. Research actuality of remote sensing on cloud  
482 precipitation and reflections on summer East Asian cloud precipitation [J]. *Torr.*  
483 *Rain. Dis. (in Chinese)*, 37(6): 493-501. doi:  
484 10.3969/j.issn.1004-9045.2018.06.001
- 485 Guo X L, Fu D H, Li X Y, et al. 2015. Advances in cloud physics and weather  
486 modification in China [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 32(2): 230-249. doi:  
487 10.1007/s00376-014-0006-9
- 488 郝国, 陈景华, 濮梅娟, 等. 2019. 华东地区夏季云微物理结构的飞机观测分析  
489 [J]. *气象科学*, 39(4): 524-531. Hao Jian, Chen Jinghua, Pu Meijuan, et al. 2019.  
490 Aircraft measurements of microphysical properties of clouds over eastern China  
491 in summer [J]. *J. Meteor. Sci. (in Chinese)*, 39(4): 524-531. doi:  
492 10.3969/2018jms.0024
- 493 Hou T, Lei H, He Y, et al. 2021. Aircraft measurements of the microphysical  
494 properties of stratiform clouds with embedded convection [J]. *Adv. Atmos. Sci.*,  
495 38(6): 996-982. doi: 10.1007/s00376-021-0287-8
- 496 Korolev A V, Bailey M P, Hallett J, et al. 2004. Laboratory and in situ observation of  
497 deposition growth of frozen drops [J]. *J. Appl. Meteor.*, 43(4): 612-622. doi:  
498 10.1175/1520-0450(2004)043<0612:LAISOO>2.0.CO;2
- 499 Korolev A V. 2007. Reconstruction of the sizes of spherical particles from their

500 shadow images. Part I: Theoretical considerations [J]. *J. Atmos. Oceanic*  
501 *Technol.*, 24(3):376-389. doi: 10.1175/JTECH1980.1

502 Lance S, Brock C A, Rogers D, et al. 2010. Water droplet calibration of the Cloud  
503 Droplet Probe (CDP) and in-flight performance in liquid, ice and mixed-phase  
504 clouds during ARCPAC [J]. *Atmos. Meas. Tech.*, 3(6): 1683-1706. doi:  
505 10.5194/amt-3-1683-2010

506 Lawson R P, Blyth A M. 1999. A comparison of optical measurements of liquid water  
507 content and drop size distribution in adiabatic regions of Florida cumuli [J].  
508 *Atmos. Res.*, 47(12): 671-690. doi: 10.1016/S0169-8095(98)00091-X

509 吕玉环, 雷恒池, 魏蕾. 2021. 中国北方典型地区不同类型云微物理特征分析 [J].  
510 *气象科技*, 49(03): 455-463. Lyu Yuhuan, Lei Hengchi, Wei Lei. 2021. Analysis  
511 of vari-type cloud microphysical properties in typical areas of northern Chian [J].  
512 *Meteor. Sci. Technol.* (in Chinese) , 49(03): 455-463. doi:  
513 10.19517/j.1671-6345.20200218

514 McFarquhar G M, Black R A. 2004. Observations of particle size and phase in  
515 tropical cyclones: Implications for mesoscale modeling of microphysical  
516 processes [J]. *J. Atmos. Sci.*, 61(4): 422-439. doi:  
517 10.1175/1520-0469(2004)061<0422:OOPSAP>2.0.CO;2

518 Miles N L, Verlinde J, Clothiaux E E. 2000. Cloud droplet size distributions in  
519 low-level stratiform clouds [J]. *J. Atmos. Sci.*, 57(2): 295-311. doi:  
520 10.1175/1520-0469(2000)057<0295:CSDIL>2.0.CO;2

521 马新成, 程鹏, 毕凯, 等. 2017. 广西南宁冬季层状暖云微物理特征的飞机观测分  
522 析 [J]. *热带气象学报*, 33(6): 922-932. Ma Xincheng, Cheng Peng, Bi Kai, et al.  
523 2017. Airborne measurements of microphysical characteristics of warm stratus  
524 clouds in winter NanNing, GuangXi [J]. *J. Trop. Meteor.* (in Chinese), 33(6):  
525 922-932. doi: 10.16032/j.issn.1004-4965.2017.06.013

526 彭冲, 周毓荃, 蔡兆鑫, 等. 2016. 一次基于飞机观测的低槽冷锋云系微物理结构  
527 的综合分析 [J]. *大气科学学报*, 39(005): 620-632. Peng Chong, Zhou Yuquan,  
528 Cai Zhaoxin, et al. 2016. A comprehensive analysis of the physical structure of a  
529 low trough cold front cloud system based on aerial observation [J]. *Trans. Atmos.*

530 Sci. (in Chinese), 39(5): 620-632. doi: 10.13878/j.cnki.dqkxxb.20141231001.

531 亓鹏, 郭学良, 卢广献, 等. 2019. 华北太行山东麓一次稳定性积层混合云飞机观  
532 测研究: 对流云/对流泡和融化层结构特征 [J]. 大气科学, 43(06): 1365-1384.

533 Qi Peng, Guo Xueliang, Lu Guangxian, et al. 2019. Aircraft measurements of a  
534 stable stratiform cloud with embedded convection in eastern Taihang Mountain  
535 of north China: characteristics of embedded convection and melting layer  
536 structure [J]. Chinese J. Atmos. Sci. (in Chinese), 43(6): 1365-1384. doi:  
537 10.3878/j.issn.1006-9895.1901.18220

538 Rangno A L, Hobbs P V. 2010. Microstructures and precipitation development in  
539 cumulus and small cumulonimbus clouds over the warm pool of the tropical  
540 Pacific Ocean [J]. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 131(606): 639-673. doi:  
541 10.1256/qj.04.13

542 Stark D, Colle B A, Yuter S E. 2013. Observed microphysical evolution for two east  
543 coast winter storms and the associated snow bands [J]. Mon. Wea. Rev., 141(6):  
544 2037-2057. doi: 10.1175/MWR-D-12-00276.1

545 Wang J, Dong X, Xi B. 2015. Investigation of ice cloud microphysical properties of  
546 DCSs using aircraft in situ measurements during MC3E over the ARM SGP site  
547 [J] J. Geophys. Res., 120(8): 3533-3552. doi: 10.1002/2014JD022795

548 王黎俊, 银燕, 李仑格, 等. 2013. 三江源地区秋季典型多层层状云系的飞机观测  
549 分析 [J]. 大气科学, 37(5): 1038 - 1058. Wang Lijun, Yin Yan, Li Lunge, et al.  
550 2013. Analyses on typical autumn multi-layer stratiform clouds over the  
551 Sanjiangyuan National Nature Reserve with airborne observations [J]. Chinese J.  
552 Atmos. Sci. (in Chinese), 37(5): 1038-1058. doi:  
553 10.3878/j.issn.1006-9895.2012.12172.

554 杨洁帆, 胡向峰, 雷恒池, 等. 2021. 太行山东麓层状云微物理特征的飞机观测研  
555 究 [J]. 大气科学, 45(1): 88-106. Yang Jiefan, Hu Xiangfeng, Lei Hengchi, et al.  
556 2021. Airborne observations of microphysical characteristics of stratiform cloud  
557 over eastern side of Taihang Mountains [J]. Chinese J. Atmos. Sci. (in Chinese),  
558 45(1): 88-106. doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2004.19202

- 559 张佃国, 郭学良, 龚佃利, 等. 2011. 山东省 1989-2008 年 23 架次飞机云微物理结  
560 构观测试验结果 [J]. 气象学报, 69(01): 195-207. Zhang Dianguo, Guo  
561 Xueliang, Gong Dianli, et al. 2011. The observational results of the clouds  
562 microphysical structure based on the data obtained by 23 sorties between 1989  
563 and 2008 in Shandong Province [J]. Acta. Meteor. Sin. (in Chinese), 69(1):  
564 195-207. doi: 10.11676/qxxb2011.017
- 565 Zhu S C, Guo X L, Lu G X, et al. 2014. Ice crystal habits and growth processes in  
566 stratiform clouds with embedded convection examined through aircraft  
567 observation in northern China [J]. J. Atmos. Sci., 72(5): 2011-2032. doi:  
568 10.1175/JAS-D-14-0194.1
- 569
- 570