

# 河南春季一次层状云降水云物理结构分析

金 华 王广河 游来光 鄢大雄

(中国气象科学研究院中国气象局云雾物理重点开放实验室, 北京 100081)

**提 要:** 河南2000年4月14日的降水由冷锋和西南涡产生, 降水云系分布不均匀, 云图上云区间有带状云隙, 雷达回波图上出现两条带状回波, 云带内部分布也不均匀, 垂直方向上降水云系有分层现象。分析了降水云系的微物理特征, 根据可播度的PMS指标确定了航线上过冷水丰富的区域, 结合卫星、雷达资料讨论了过冷水丰富区域的分布特征, 还讨论了降水云系内部存在的对流不稳定。

**关键词:** 冷锋 西南涡 云降水过程

## On Physical Structure of Stratiform Cloud During a Precipitation Process in Henan Province

Jin Hua Wang Guanghe You Laiguang Feng Daxiong

(Key Laboratory for Cloud Physics and Weather Modification of CMA,  
Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081)

**Abstract:** A precipitation process caused by a cold front and a southwest vortex occurred on April 14, 2000 in Henan province. The cloud system distributed unevenly. There was a band-shaped gap between two clouds and two band-echoes appearing on radar echo images. Non-uniformity also appeared inside the cloud bands and the cloud system was layered vertically. The microphysical characteristics of the precipitable cloud system were analyzed. The areas with plenty of supercooled liquid water (SLW) were determined according to the PMS indices. Distributing characteristics of the areas with plenty of SLW were analyzed by using satellite and radar data. Evidence of convective unstability of the precipitable cloud system

资助项目: 国家科技攻关计划“层状云人工增雨催化作业技术研究”(2001BA610A-06-11) 资助

收稿日期: 2005年12月28日; 修定稿日期: 2006年4月21日

was also observed.

**Key Words:** cold front southwest vortex cloud and precipitation process

## 引言

研究发现,层状云具有非均匀性的带状结构,云带内外液态水含量和云粒子浓度差异甚大,高空云带中某些区域云水多而降水粒子少(以下简称丰水区),丰水区的分布是人工增雨催化作业关注的云微观特征之一,雷恒池等研究微波辐射计的探测结果后发现在降水云系前部存在丰水区<sup>[1]</sup>。

过冷水含量是人工增雨催化作业关心的云微观特征。云和降水由不同大小的粒子组成,探测云微物理结构,需采用云微物理观测仪器机载PMS(粒子测量系统)。游来光曾利用PMS资料研究云物理过程和人工增雨条件<sup>[2]</sup>;"九五"期间,陶树旺等用PMS观测资料研究了云、降水微物理特征,提出用PMS观测资料确定人工增雨可播度的指标<sup>[3]</sup>。

河南春季常因干旱使农业生产遭受损失,综合分析层状冷云物理结构特征,对了解中原地区降水特征及有效地开展人工增雨作业,缓解当地旱情有重要的意义。2000年4月14日河南省人影办开展飞机人工增雨作业,同时进行了云、降水微物理结构探测。本文以PMS观测资料为主,并结合天气、卫星及雷达等资料从多个尺度了解此次过程中降水的宏微观结构特征;重点寻找云中过冷水含量大的时段,以了解丰水区在云中的分布。

## 1 天气背景

2000年4月13日08时(北京时,下同),地面冷锋位于黄河以西内蒙古—青海

一线;红外云图上,与冷锋对应的逗点状云区(以下简称冷锋云系)前部到达豫西北;西南涡在地面图上表现为东北西南向倒槽,倒槽顶部位于豫西南。14日08时,地面冷锋东移到黄河以东山西—陕西一线,500hPa温度槽与高度槽基本重合,冷锋发展成熟;地面倒槽位于长江中下游安徽—江西一线。云图上,冷锋云系东移中面积减小;西南涡对应的大面积云区位于冷锋云系东南(以下简称西南涡云系);冷锋和西南涡云系之间是狭窄带状的少云甚至无云区(以下简称带状云隙)。两云系在东移中逐渐消散,14时,冷锋云系北部的东西向云区消失,南部南北向云区移出河南;西南涡云系也移出河南。

图1是2000年4月14日08时红外云图及其后24h降水。图1a表明,豫西北位于冷锋云系南部,豫东南是西南涡云系;带状云隙位于新乡—开封—南阳上空。24h降水区主要分布在带状云隙两侧。利用文献[4]的方法反演云顶高度和亮温,结果表明(图1b和1c):亮温范围为260~280K;带状云隙两侧冷锋及西南涡云系的云顶高度超过8km(海拔高度,下同),云顶亮温低于270K。

受西南涡影响,13日23时豫西南出现降水;14日8时,受冷锋影响,降水区扩大;14时,降水区覆盖河南全境,降水强度增大;之后,西南涡和冷锋云系移出河南。飞机探测时间是4月14日07:06—09:37和10:49—13:01,处于降水区扩大、降水强度加强的时段。从天气图上分析(图略),河南以南中低空为西南气流,水汽不断向北输送,形成了西南涡云系及江南华南强降水区;河南位于500hPa槽前及700hPa槽后,

高空盛行偏西气流, 中低空为偏北气流, 此形势对降水不特别有利, 河南降水小于江南及华南地区。

### 2 雷达回波

图 2 (见彩页) 是探测期间 714 雷达回波及飞行航线。图 2a 中有两条东北西南向带状回波, 与图 1a 中冷锋及西南涡云系对应。由图 2a 中航线发现: 到达位置 3 之前, 飞机在西南涡云系中探测; 在位置 3 转向后探测的是冷锋云系。由 11 时地面天气图和红外云图发现 (图略), 冷锋云系和西南涡云系东移, 西南涡云系移出飞行探测区, 图 2b、2d 反映了雷达站以东的冷锋云系南部云区, 因此第二次飞行探测的是冷锋云系。对比云图发现, 图 2b 中 1 位于冷锋云系中部, 2、3 位于冷锋云系前部, 4 位于冷锋云系后部。图 2c、2d 表明回波顶高度大于 6km, 与图 1b 中云顶高度一致。

### 3 探 空

图 3 给出郑州、南阳 3 时次探空温度曲线, 由图 3 发现冷锋中前部 (郑州) 与冷锋外部边缘 (南阳) 大气层结不同。南阳站上部逆温层在 250hPa 以上, 为对流层顶部逆温; 低层逆温位于 850hPa 以下。郑州上空逆温出现在 700~900hPa 间。对比郑州站 14 日 08 时温度曲线同 13 日 20 时曲线可发现, 冷空气过境造成 500hPa 以下温度明显降低, 中低空逆温层附近降温尤其显著。

### 4 飞行探测云微物理结构特征

#### 4.1 探测设备

探测设备包括: GPS 全球定位系统, 温度探头及机载 PMS。PMS 各探头情况如下: 云粒子探头 FSSP-100, 可提供云粒子数浓度及谱资料, 还可反演液态云水含量,

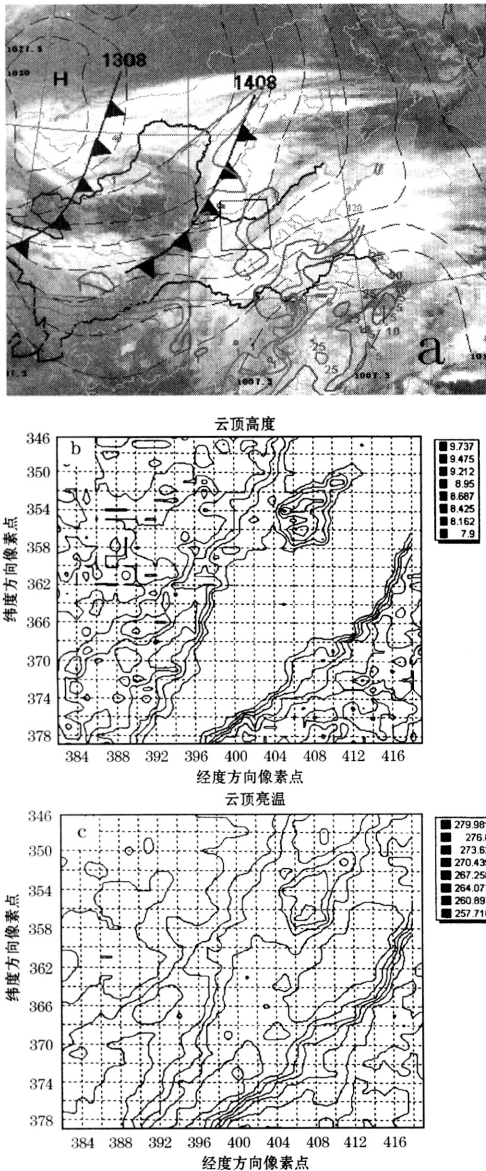


图 1 2000 年 4 月 14 日 08 时红外云图 (a) 和云图资料反演的探测区云顶高度 (b) 及亮温 (c)

a 图中粗线为 15 日 08 时 24h 降水量, 断线是地面等压线, 112°E、35°N 处的矩形是飞行探测区

量程为  $2\sim 47\mu\text{m}$ ; 冰粒子探头 OAP-2D-C, 可观测冰粒子图像及数浓度, 量程为  $25\sim 800\mu\text{m}$ 。

#### 4.2 两次飞行探测的总体特征

图 4、图 5 是两次飞行探测时各微物理

量沿航线的时间分布。横坐标为时间, 纵坐标中:  $N$  为云粒子数浓度,  $2D-C$  为冰粒子数浓度,  $LWC$  是液态云水含量,  $T$  为温度,  $H$  是高度。PMS 采样频率是每秒 1 次, GPS 采样频率是 10 秒 1 次, 为便于定量分析, 对 PMS 资料进行了时间平均, 图 4a 曲

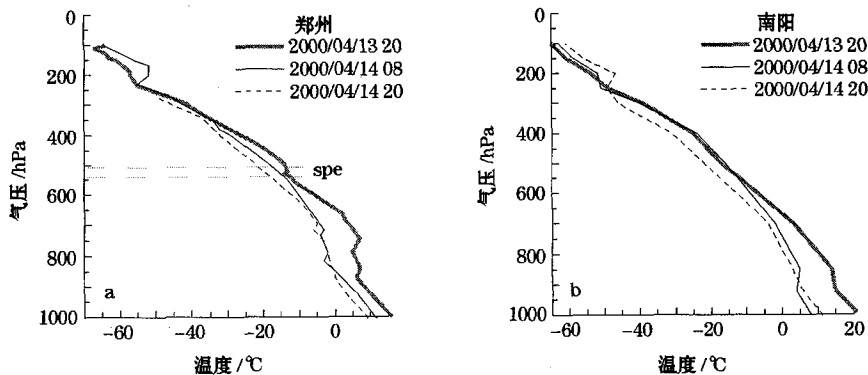


图 3 郑州、南阳两站三时次探空温度曲线

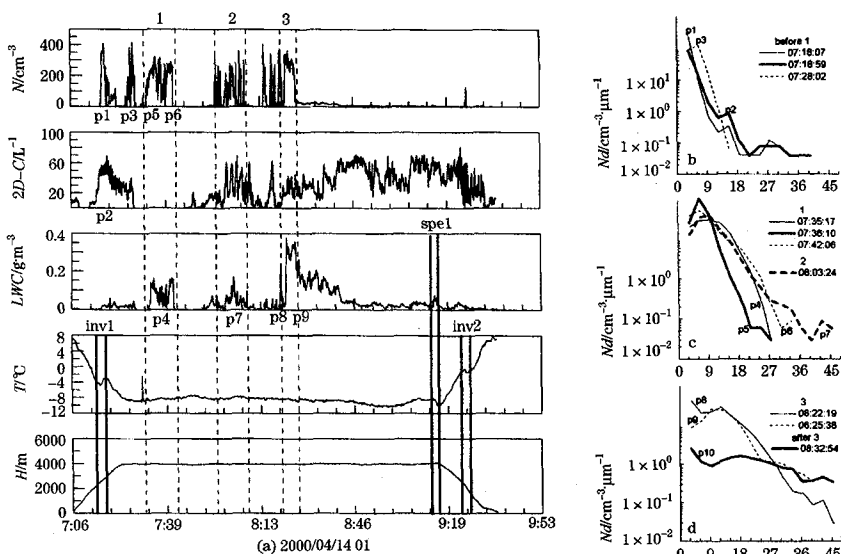


图 4 第一次探测时云中微物理量沿航线的变化及某些区段的云粒子谱

图 a 为微物理量曲线, 特定区段以数字标出, 图 b: 1 之前的谱, 其中  $p_1, p_3$  是  $N$  (云粒子数浓度, 下同) 两次出现极大值时的谱,  $p_2$  是  $2D-C$  (冰粒子浓度, 下同) 最大时的谱; 图 c: 区段 1 内的粒子谱, 其中,  $p_4$  是  $LWC$  (液态云水, 下同) 最多时的谱,  $p_5, p_6$  是  $N$  出现极大值时的谱,  $p_7$  是区段 2 内  $LWC$  最大时的谱; 图 d:  $LWC$  出现极大值时的谱,  $p_8, p_9$  位于区段 3 内,  $p_{10}$  在 3 之后

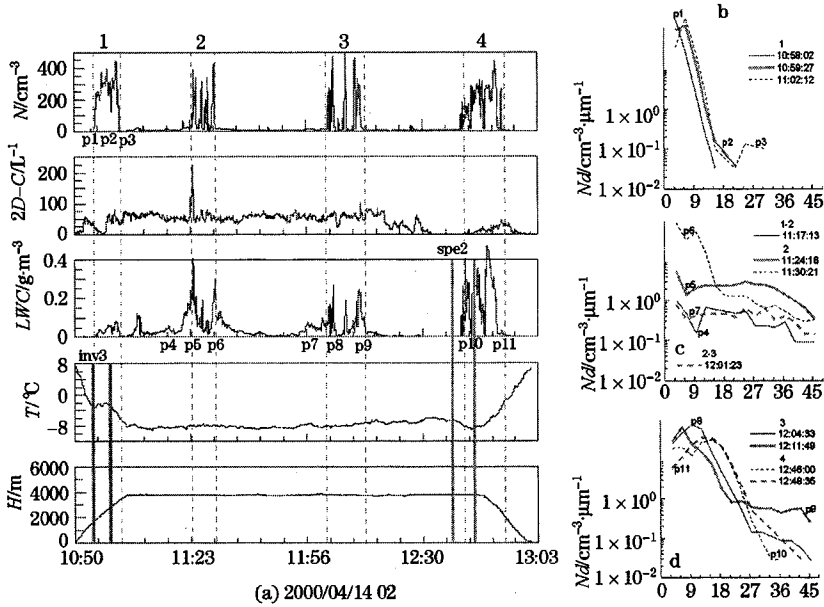


图 5 第二次探测时云中微物理量沿航线的变化及某些区段的云粒子谱

图 a 为物理量的空间变化, 特定区段以数字标出; 图 b: 曲线 p1~p3 是区段 1 内 N 出现三次极大值时的谱; 图 c: p4 是区段 1 和 2 间液态水较多时的谱, p5、p6 是区段 2 内液态水出现两次极大值时的谱, 区段 2 和区段 3 间液态水最多时谱为 p7; 图 d: p8、p9 和 p10、p11 分别是区段 3、4 内 LWC 出现极大值时的曲线

线是经 10 秒平均后得到的。

两次飞行高度都是 4km。探测、增雨作业同时进行, 故探测的是自然云特征。7: 17 (首次探测) 云粒子、冰粒子浓度出现第一次跃增, 表明飞机入云, 高度 2.7km。云粒子浓度平均为  $44 \text{ 个} \cdot \text{cm}^{-3}$ , 最大达到  $516 \text{ 个} \cdot \text{cm}^{-3}$ ; 冰粒子浓度平均为  $26 \text{ 个} \cdot \text{L}^{-1}$ , 最长达  $142 \text{ 个} \cdot \text{L}^{-1}$ ; 云水含量平均为  $0.043 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ , 最大值为  $0.467 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ , 对应温度是  $-8.9^\circ C$ 。第二次探测时, 入云高度为 1.8km; 云粒子浓度平均值为  $49 \text{ 个} \cdot \text{cm}^{-3}$ , 最大达到  $578 \text{ 个} \cdot \text{cm}^{-3}$ ; 冰粒子浓度平均值为  $40 \text{ 个} \cdot \text{L}^{-1}$ , 最长达  $393 \text{ 个} \cdot \text{L}^{-1}$ ; 云水含量平均为  $0.046 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ , 最大值为  $0.527 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ , 对应温度是  $-7.9^\circ C$ 。云中含水量略大于河北及青海春季的观测平均结果<sup>[5,6]</sup>。

两次飞行的上升阶段, 从最初入云到平飞, 云粒子和冰粒子浓度均迅速减小, 待升至探测高度后两种粒子浓度出现跃增, 说明飞机在垂直方向上经历两次入云过程。表明冷锋云系和西南涡云系在垂直方向上可能有两层云存在, 两层云间有干层存在; 这与地面观测一致 (14 日 08 时地面观测到低云和中云); 分析相应温度发现, 低云温度为  $-4 \sim 0^\circ C$ , 而中云的温度则低于  $-5^\circ C$ 。这一特征同青海春季及吉林春夏季降水云系的特征相同<sup>[7,8]</sup>。

陶树旺等<sup>[3]</sup>提出判别增雨可播度的两项指标是: FSSP-100 探测的粒子浓度不小于  $20 \text{ 个} \cdot \text{cm}^{-3}$  的云区才有一定的可播度, 其中 2D-C 探测的大粒子浓度小于  $20 \text{ 个} \cdot \text{L}^{-1}$  时, 可确定为强可播区, 否则为可播区。可认为强可播区及可播区云水资源较丰富, 从

而可参考该指标分析云中丰水区沿航线的分布。

### 4.3 第一次飞行探测结果分析

第一次探测云粒子浓度前两个峰值过程位于上升阶段(图4a),冰粒子浓度首个峰值同时出现,液态云水很少;p3是单峰谱,p1和p2有第二峰值,多数云粒子的直径小于 $15\mu\text{m}$ ,说明上升阶段云粒子直径偏小,大云粒子少,云水不丰富。图4a中区段1是云粒子浓度第三次峰值过程(谱为图4c中的p5、p6),冰粒子浓度几乎为零,液态云水含量出现了峰值(谱为图4c中的p4);粒子谱的谱宽较窄,谱p4的粒子直径多为 $6\sim 18\mu\text{m}$ ,p5、p6与p4谱形不同,p4对应时刻粒子较大;可见该时段云中云粒子增多,是丰水区。第四个云粒子浓度和冰粒子浓度峰值过程出现在07:58(图4a中2),液态云水含量同时出现峰值过程(谱为图4c中p7),p7为多峰谱,可见尚有较大云粒子未能转化,因此该区段是丰水区。最后一个云粒子浓度峰值区(图中4a中3)出现于08:14后,同区段1不同,区段3的液态云水较多,到08:24液态云水含量超过了 $0.4\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,粒子谱p8出现第二峰值,由于这一区段云粒子浓度和2DC浓度都超过了 $20\text{个}\cdot\text{L}^{-1}$ ,因而认为该区段是丰水区。图4a中1、2间云粒子、冰粒子浓度低于20,且液态云水极少;2、3间虽然有时云粒子或冰粒子浓度超过20,但液态云水很少;3之后的云粒子浓度很小,虽然有时液态云水含量较大,但相应的粒子谱(图4d中曲线p10)有第二峰值,2DC图像中观测到冰晶(图略),据此认定探测到的粒子以冰相为主,反演的含水量失真;因此上述区段不是丰水区。

从图4中inv1和inv2两时段内温度和高度曲线可看出,这两段为逆温现象,inv1

高度是 $2.5\sim 3\text{km}$ ,inv2高度为 $1.5\sim 2\text{km}$ ,inv1段出现在起飞后不久,降落前出现了inv2段,二者距郑州很近,高度与郑州探空一致。

### 4.4 第二次飞行探测结果分析

图5a中曲线由第二次探测得到。云粒子浓度出现4次峰值过程,中间两次(2和3)出现在平飞时,另两次(1和4)则在起降时出现。起飞后不久,冰粒子浓度增大到 $50\text{个}\cdot\text{L}^{-1}$ ,此后稳定在这一水平,到12:15才开始减少,冰粒子浓度峰值比第一次探测时小。

图5a中1处于飞行上升阶段,云粒子浓度超过 $200\text{个}\cdot\text{L}^{-1}$ ,液态云水不多,从粒子谱(图5b)来看,3个时段谱宽都较窄,p1、p2粒子直径小于 $24\mu\text{m}$ ,表明小粒子居多,p1单调减小说明多为小粒子,曲线p3有第二峰值,气温在 $-4^{\circ}\text{C}$ 以下,2DC图像中有冰粒子,此一区段的云处于发展阶段;此一时段降水粒子的浓度超过了 $50\text{个}\cdot\text{L}^{-1}$ ,可见该区段是丰水区。

区段2和3中云粒子浓度多次超过 $300\text{个}\cdot\text{cm}^{-3}$ ,甚至达 $400\text{个}\cdot\text{cm}^{-3}$ ,而液态云水含量则数次超过 $0.2\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,因此为丰水区。区段2内液态云水含量出现两次极大值时粒子谱是p5、p6,有第二峰值,p6时刻2DC图像中有大冰粒子,因而p6时刻实际含水量小于图中的值;图5d中曲线p8、p9是区段3内液态云水最多时的粒子谱:浓度随粒子直径的增加而减小,减小过程前快后慢,甚至出现缓慢增加,估计由云粒子间碰并所致。

图5a中的其他区段中,1、2和2、3之间区段的冰粒子浓度稳定在 $50\text{个}\cdot\text{L}^{-1}$ ,液态云水虽然有时也较多,但粒子谱p4和p7有第二峰值,2DC图像中有大冰粒子,且云粒子的浓度低于 $20\text{个}\cdot\text{L}^{-1}$ ,因此这

两个区段不是丰水区。

图 5a 中 4 处于飞行下降阶段, 云粒子浓度超过  $250 \text{ 个} \cdot \text{cm}^{-3}$ , 冰粒子浓度达到  $20 \text{ 个} \cdot \text{L}^{-1}$ , 液态云水含量甚至超过  $0.4 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ ; 从粒子谱 (图 5d 中 p10、p11) 来看, 谱 10 有第二峰值, 但云粒子浓度大于  $250 \text{ 个} \cdot \text{cm}^{-3}$ , 而 p11 为单峰型粒子谱, 2D-C 图像中未见冰粒子, 对应的液态云水含量可信, 因此该区段为丰水区。

## 5 讨 论

### 5.1 云中的对流

郑州站 13 日 20 时的探空曲线上有较小的逆温现象出现 (图 3a 中 spe); 500hPa 天气图表明, 此时温度槽落后于高度槽, 郑州位于高空槽前, 该逆温可能因冷平流活动形成。图 4a 中 spe1 与图 5a 中 spe2 段, 水平飞行时, 温度却出现了明显的下降, 这一现象是值得探讨的。同一高度 (4km) 的不同地方温度相差几度, 表明这里有冷平流活动, 在每股冷平流的前部, 可能出现 spe1 及 spe2 处的现象。这些地方就表现为  $\frac{\partial \theta_x}{\partial z} < 0$ , 满足位势不稳定的条件, 因此其附近容易发生对流。而 spe2 所在位置及其后 4 对应的很大的液态云水含量和云粒子浓度值, 正好符合对流云的特征, 这与前述探空特征一致。两张 RHI 回波图上均有垂直方向呈条带状的强回波中心 (图 2c、2d), 强度大于 35dBz, 高度低于 2km, 表明冷锋云系前部云区中存在某种程度的对流。综合分析发现此次冷锋云系内确有对流发生。

### 5.2 丰水区的分布

将丰水区在对应时段雷达回波图上标出, 分析其空间分布。首次飞行中的 3 个丰

水区中, 1、2 和雷达回波的时间基本一致, 3 晚间不同 (图 2a); 第二次飞行中的 4 个丰水区中, 1、2 和雷达回波的时间相同, 3、4 时间不同 (图 2c)。第一次飞行中的丰水区 1、2 对应位置无雷达回波; 第二次飞行中丰水区 1 对应位置的回波较强 (20dBz), 2 对应位置无回波。

由于所用的是 714 雷达探测资料, 其回波无法全面正确地反映云粒子的分布和云中丰水区的位置, 因此难以仅仅依靠雷达回波了解云水资源状况, 必须综合分析飞机、卫星、雷达探测资料来研究云中丰水区的分布。

综合分析卫星和雷达资料发现: 前一次飞行中的丰水区 1、2 和 3 位于冷锋云系前部及西南涡云系后部的云区中; 后一次飞行时冷锋处于消散阶段, 丰水区 1 位于冷锋云系中部, 2、3 位于冷锋云系的前部, 4 位于冷锋云系的后部。冷锋云系中丰水区的这种分布与文献 [1] 研究结果比较一致。

## 6 结 语

(1) 此次降水过程降水由冷锋和西南涡两系统共同产生, 云系在不同尺度上呈不均匀分布; 云图上云区呈条带状, 云带间有带状云隙存在; 雷达回波图上可看到两条带状回波。垂直方向上降水云系也有分层现象出现, 这与青海春季及吉林春夏季降水云系的特征相似; 在云带内部干区湿区分布不均匀, 表现为云粒子和冰粒子多次出现起伏。

(2) 综合分析探空、雷达和 PMS 资料后发现冷锋云系内部有对流活动, 这与吉林等地观测发现层状云内有对流泡存在的结果较一致<sup>[7]</sup>。

(3) 云粒子浓度最高达到  $578 \text{ 个} \cdot \text{cm}^{-3}$ ; 冰粒子浓度最多达  $393 \text{ 个} \cdot \text{L}^{-1}$ ; 液态云水含量平均值为  $0.05 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ , 最大

值为  $0.527\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ；云中含水量略大于河北省和青海春季的观测平均结果。

(4) 降水过程中过冷水分布很不均匀，冷锋云系前部丰水区较多（5 个），冷锋云系中部及后部也有丰水区存在（各 1 个），这与文献 [1] 关于降水云系丰水区分布的研究结果一致。

### 参考文献

- 1 雷恒池, 魏重, 沈志来等. 微波辐射计探测降雨前水汽和云液水 [J]. 应用气象学报, 2001, 12 (增刊): 73-79.
- 2 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 [M]. 云降水物理和人工增雨技术研究. 北京: 气象出版社, 1994: 236-249.
- 3 陶树旺, 刘卫国, 李念童等. 层状冷云人工增雨可播性实时识别技术研究 [J]. 应用气象学报, 2001, 12 (增刊): 14-22.
- 4 李娟, 毛节泰, 姚展予等. GMS-5 卫星资料反演云的物理特性及其在人工影响天气中的应用 [J]. 气象学报, 待发表.
- 5 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研究 [M]. 云降水物理和人工增雨技术研究. 北京: 气象出版社, 1994: 83-88.
- 6 苏正军, 王广河, 刘卫国等. 青海省春季降水云的微物理特征分析. 应用气象学报, 2003, 14 (增刊): 36-40.
- 7 苏正军, 刘卫国, 王广河等. 青海一次春季透雨降水过程的云物理结构分析 [J]. 应用气象学报, 2003, 14 (增刊): 27-35.
- 8 李大山主编. 人工影响天气现状与展望 [M]. 北京: 气象出版社, 2002: 85.



# 金华等：河南春季一次层状云降水云物理结构分析

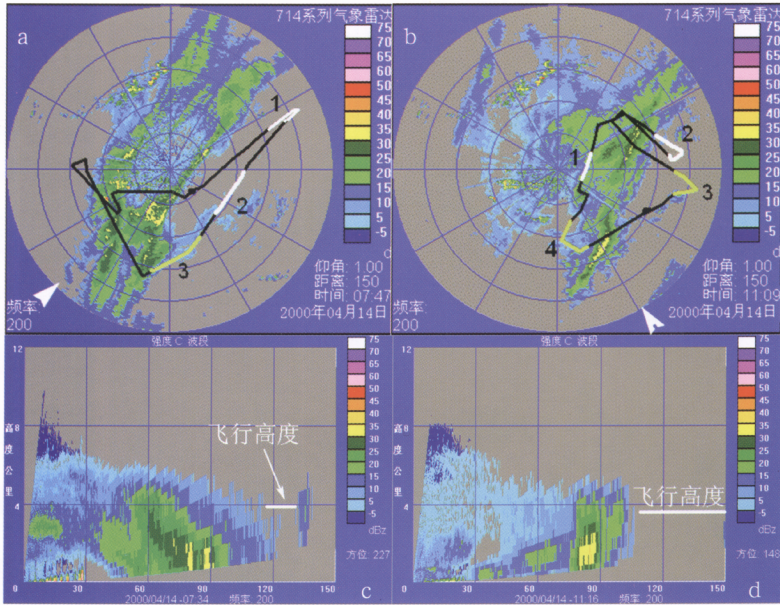


图2 雷达回波及飞行探测的航线

a、b图是PPI回波，时间分别是7:47和11:09，黑色曲线是航线，白色箭头为对应RHI回波的方向；c、d图是RHI回波，白线为飞行高度；c图时间7:34，方位227；d图时间11:16，方位148

# 张春桂等：用MODIS植被指数研究福州城区空间扩展变化

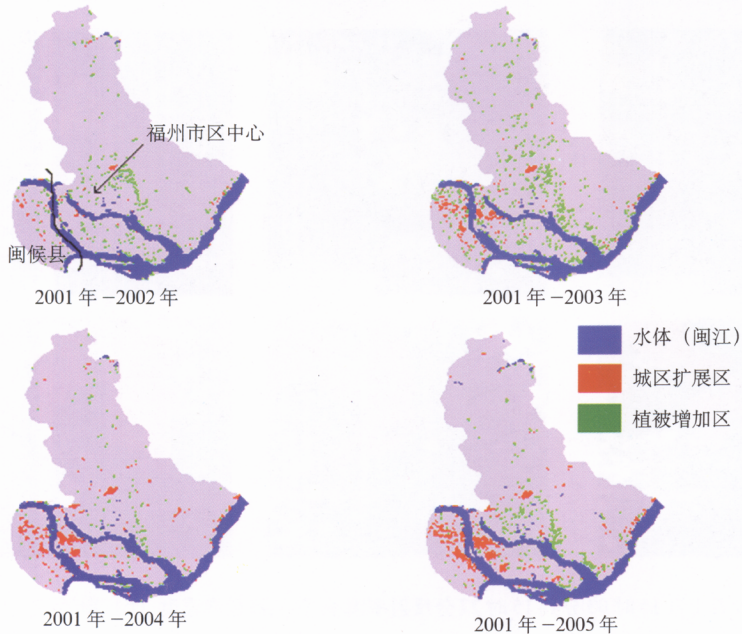


图3 福州市2001年~2005年城区空间扩展变化图