

徐小红, 余兴, 朱延年, 等. 2012. 卫星遥感人工增雨作业条件 I: 对流云 [J]. 气候与环境研究, 17 (6): 747–757, doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2012.06.12. Xu Xiaohong, Yu Xing, Zhu Yannian, et al. 2012. Seeding condition of precipitation enhancement revealed by multiple spectral data of satellite. I: Convective clouds [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 17 (6): 747–757.

卫星遥感人工增雨作业条件 I: 对流云

徐小红¹ 余兴¹ 朱延年¹ 刘贵华¹ 戴进¹ 岳治国²

¹ 陕西省气象科学研究所, 西安 710014

² 陕西省人工影响天气中心, 西安 710014

摘 要 利用卫星反演技术和云微物理分析方法, 针对云微物理结构和降水形成过程探讨可播性、播撒方式, 通过对不同类型对流云分析, 归纳出 4 类可播云系, 分析表明: 1) 重污染深厚对流云, 当云底粒子有效半径小于 $7\ \mu\text{m}$ 、凝结增长带深厚、降水启动厚度大于 $20\ ^\circ\text{C}$ 、碰并增长带薄、无雨胚带、晶化温度低于 $-30\ ^\circ\text{C}$ 时, 可播撒吸湿性核或播撒 AgI。2) 强上升冰雹云, 若云外型强对流特征明显、各增长带增长缓慢、无雨胚带、晶化温度低于 $-30\ ^\circ\text{C}$, 且云顶附近存在明显的有效半径减小带, 可播撒吸湿性核或播撒 AgI。3) 强上升强降水对流云, 云底滴较大, 通常大于 $10\ \mu\text{m}$, 碰并增长较为充分, 晶化温度低, 一般低于 $-30\ ^\circ\text{C}$, 冰晶化延迟明显, 冷云降水发展不充分, 通过在 $0\ ^\circ\text{C}$ 层附近播撒 AgI 促进冷云降水。4) 污染性浅薄对流云, 当云底有效半径小于 $10\ \mu\text{m}$ 、凝结增长带深厚、碰并增长带薄、无雨胚带、云顶有效半径小于 $14\ \mu\text{m}$ 、云厚 $3\sim 6\ \text{km}$, 可播撒吸湿性核。

关键词 对流云 云微物理结构 降水形成过程 人工影响天气条件 播撒方式 卫星反演

文章编号 1006-9585 (2012) 06-0747-11

中图分类号 P462

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2012.06.12

Seeding Condition of Precipitation Enhancement Revealed by Multiple Spectral Data of Satellite. I: Convective Clouds

XU Xiaohong¹, YU Xing¹, ZHU Yannian¹, LIU Guihua¹, DAI Jin¹, and YUE Zhiguo²

¹ Meteorological Institute of Shaanxi Province, Xi'an 710014

² Weather Modification Center of Shaanxi Province, Xi'an 710014

Abstract Based on the technology of the satellite retrieval and comprehensive analysis methodology of cloud micro-physical properties, different microstructure and precipitation formation processes for convective clouds were analysed so as to investigate their seeding ability and seeding mode. Four kinds of convective clouds were summarized as seedable convective cloud systems. The first is the deep heavily polluted convective clouds, the hygroscopic nuclei or AgI can be seeded when the particle effective radius at the cloud base is less than $7\ \mu\text{m}$, and the zones of diffusional growth and coalescence growth are rather deep and thin, separately, there exists no zone of rainout, the glaciation temperature is below than $-30\ ^\circ\text{C}$, the temperature corresponding the depth of precipitation initiation covers $20\ ^\circ\text{C}$ which extends from the base to the level of precipitation formation. The second is the hailstorm clouds with strong updraft, also the hygroscopic nuclei or AgI can be seeded when the strong convective characteristic can be seen in the appearance, the growth rate for different growth zones are rather low, there is no zone of rainout, the glaciation temperature is below than $-30\ ^\circ\text{C}$, and there exists an obvious declining zone of the particle effective radius around the cloud tops. The third is convective clouds with the strong updraft and heavy precipitation; AgI can be seeded near the isotherm of $0\ ^\circ\text{C}$ so as to prompt the

收稿日期 2012-08-30 收到, 2012-09-29 收到修定稿

资助项目 国家自然科学基金 40975087, 陕西省科技厅社发攻关项目 2012K12-01-03, 干旱气象科学研究基金项目 IAM201106

作者简介 徐小红, 女, 1971 年出生, 主要从事云降水及人工影响天气研究。E-mail: xuxiaohongxh@gmail.com

通讯作者 余兴, E-mail: yuxing23@163.com

cold cloud precipitation when the drop near the cloud base is larger, usually than $10\text{ }\mu\text{m}$, and the calescence growth is fully developed; the glaciation temperature is below than $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$; the delay of the glaciation is obvious; the cold cloud precipitation does not fully develop. The last is the shallow polluted convective clouds; the hygroscopic nucelli can be seeded when the drop near the cloud base is less than $10\text{ }\mu\text{m}$, and the zone of diffusional growth is deep; the zone of calescence growth is rather thin; there is no zone of rainout; the particle effective radius on the cloud top is less than $14\text{ }\mu\text{m}$; the cloud depth ranges between 3 km and 6 km.

Keywords Convective cloud, Cloud microstructure, Precipitation formation process, Seeding condition, Seeding mode, Satellite retrieval

1 引言

对流云是夏季的主要降水云系,也是旱区人工增雨的主要对象,强对流还是引发冰雹、暴雨的主要云系,是我国人工增雨防雹重点作业云体。通常,对流云人工影响包括冷云催化和暖云催化,即对具备影响潜力的云体播撒成冰剂或吸湿性核加快云水向雨水转化达到影响目的。因此,对流云人工影响的关键是要识别云的可播性,有针对性的进行作业。那么,通过探测了解云的宏微观结构、降水形成过程,分析自然云系在降水发展过程中是否存在一定的不足,以及有无人工干预的可能性就显得至关重要。

多年来,对流云人工影响天气主要利用数值模拟技术研究播撒时机、颗粒大小,以及播撒部位、方式等。Tzivion et al. (1994) 模拟表明暖云降水中碰并过程起主导作用,播撒的关键为吸湿性核的大小和播撒时间。Yin et al. (2000) 运用包含详细微物理过程的云模式研究吸湿性烟弹对对流云降水发展的影响,指出播撒粒子半径大于 $1\text{ }\mu\text{m}$ (特别是大于 $10\text{ }\mu\text{m}$),促进了碰并过程,拓宽了粒子谱,有利于降水的发展。Guo et al. (2007) 用云模式模拟研究了对流云播撒碘化银的最佳催化方式,结果表明在最大上升气流和过冷水含量区播撒能获得最好的增雨效果。胡志晋 (2001) 指出根据云降水宏观特征(云顶、云底高度和温度、过冷层厚度、云中上升速度)和云微物理特征(冰面过饱和水汽差、过冷水、冰晶浓度)来识别人工增雨作业云体。Rosenfeld and Woodley (1993) 在对德克萨斯州过冷对流云的随机动力播撒试验研究中,修订了动力播撒概念模型,模型中更多的考虑了云微物理过程。这些工作有力促进了人工影响天气发展,但对流云微物理结构和降水形成过程的探测一直制约学科发展。鉴于我国目前还没有云雷达投入业务应用及对流云入

云探测很困难的现状,作业中主要依据天气分析和测雨雷达指导,而测雨雷达对云探测存在一定的局限性(主要是大粒子),很难准确获取云的微观结构和云中降水形成过程等,导致作业时并不清楚云微物理结构到底如何?降水发展过程是否存在不足?有无人工干预的必要?因此,利用探测回答这些问题,对提高作业的科学性迫在眉睫。

卫星功能越来越强大,反演技术越来越成熟,应用领域越来越广。如,在人工影响天气中利用卫星技术研究云特征、影响效应和作业条件等,取得了一些有意义的结果。Woodley et al. (2000) 利用极轨卫星多光谱图像研究了对流云播撒的云微物理特征,指出播撒 AgI 使冷云的晶化温度变暖,甚至高于 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。刘文 (2005) 利用 NOAA 资料给出了飞机增雨作业云层的判据。余兴等 (2005) 利用 NOAA 卫星探测到对深厚层状云飞机人工增雨后的物理效应,发现在 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 层播撒 AgI 使过冷云产生大量冰晶,以及降水形成的云沟。利用卫星反演云光学厚度、有效半径、云顶温度等分析云微物理特征(Nakajim and King, 1990; Pavolonis et al., 2005; 戴进等, 2006)。Rosenfeld and Lensky (1998) 利用云顶温度 (T) 和有效半径 (R_e) 分析云垂直结构及降水形成过程, Rosenfeld (1999, 2000) 研究了气溶胶对降水的影响,戴进等 (2010, 2011) 研究了陕北暴雨过程和高原雷暴的云物理特征,刘贵华等 (2009, 2011a, 2011b) 分析了不同纬度陆地和海洋上典型积云的微物理特征,以及地形云人工增雨条件、陕西春季层状云增雨条件及作业效果。因此,发挥卫星对云探测的优势,利用反演技术和云微物理分析方法,了解云的宏、微观结构及降水形成过程,有利于准确分析可播性,指导人工影响天气作业。

本文采用卫星反演技术和云微物理分析方法,通过对大量对流云的 MODIS 卫星探测,针对微物理结构和降水形成过程,分析降水发展过程中的不

足, 如: 碰并增长过程欠缺、暖雨形成延迟、云内冰晶化延迟等, 探讨可播性。通过与自然界降水发展过程较理想的相似云系比较, 探讨人工干预的可能性。将可播云系归类, 总结总体特征, 针对可播云系微物理结构和降水形成过程特点, 讨论播撒方式, 为实际作业提供参考。

2 卫星反演云微物理分析方法

2.1 多光谱云微物理分析方法

一是利用反演值(可见光反射率、 T 、 R_e 等物理量)定量分析云特征。二是利用红、绿、蓝(RGB)合成图可视化分析云特征。即: 可见光反射率反映了云的密实程度, $3.7\text{ }\mu\text{m}$ 反射率反映云顶 R_e 大小, $11\text{ }\mu\text{m}$ 亮温反映云顶温度(高度), 将可见光反射率赋予红色(R, 色调越红云越厚), $3.7\text{ }\mu\text{m}$ 反射率赋予绿色(G, 色调越绿 R_e 越小), $11\text{ }\mu\text{m}$ 通道亮温赋予蓝色(B, 色调越蓝温度越高), 生成三基色组合的真彩图(RGB合成图)。那么, RGB合成图就包含了云厚、云粒子大小、顶高三重信息, 云的宏、微观特征差异就能在 RGB图上反映出来。三是利用时空转换假定分析云的垂直结构。

2.2 云垂直结构和降水形成过程分析方法

众所周知, 卫星探测只能获取云顶的信息, 为了解云内状况, 通过各态历经假定进行时空转换, 即用不同顶高的云近似云中不同高度的云。各态历经假定的云物理学理解: 在一定区域内(小于两个探空站间距离)存在各种不同顶高的云, 假定区域内的大气温湿(温度、露点)状况和云凝结核(cloud condensation nuclei, CCN)状况相近, 那么, 空气上升冷却饱和凝结形成这些云, 则它们的云底高度、云滴的数浓度、粒子大小相近; 如果上升同样高度, 那么供云滴群(相同数目)增长的水量相近, 则粒子群增长大小相近(很可能)。因此, 用不同高度云的粒子 R_e 来近似云内不同高度上的 R_e , 在云物理学上是合理的。考虑到云的水平不均匀性和大气状况不完全相同, 对每一个高度都须选取尽可能多的云像元, 用整体状况近似云内该高度上状况。由于 R_e 表征粒子谱特征, 无法进行统计意义上的平均, 宜采用排序取中的办法来解决, 具体做法如下: 将区域内同一温度上所有的云像元按 R_e 从小到大排序, 对样本数进行归一化处理(不同高度的样本数不一样), 以 5% 为样本间隔单元(即: 5%

对应第 5% 样本的 R_e , 10% 对应第 10% 样本的 R_e , ..., 95% 对应第 95% 样本的 R_e , 100% 时对应最大的 R_e), 用 50% 表示该高度的总体状况, 每隔 $1\text{ }^\circ\text{C}$ 统计, 得到 $T-R_e$ 图, 分析云的垂直结构。

在各态历经的假定下, Rosenfeld and Lensky (1998) 提出了利用卫星反演的云微物理参数(如 T 、 R_e) 分析云垂直结构和降水形成过程的方法。将云中降水形成过程划分为 5 个主要增长带, 在 $T-R_e$ 中具体特征如下(见图 1):

(1) 凝结增长带: 云底以上, 随高度增加, 云滴大小增长缓慢, 即存在较小的一 dR_e/dT 值, 通常 $-dR_e/dT < 0.4$ 。

(2) 碰并增长带: 因碰并作用, 随高度增加, 滴快速长大, 即在 $T > -5\text{ }^\circ\text{C}$ 时, 表现出大的一 dR_e/dT 值, 通常 $-dR_e/dT \geq 0.4$ 。

(3) 雨胚形成带: 随高度增加 R_e 保持不变, 一般约为 $20\text{ }\mu\text{m}$ 。因云滴的大小正好与上升气流平衡, 一旦云滴长大就会下降, 所以在 $T-R_e$ 图上表现为 $-dR_e/dT \approx 0$ 。

(4) 混合相增长带: 温度小于 $-5\text{ }^\circ\text{C}$, 冰水共存时, 随高度增加, 云粒子表现出快速增长, 通常 $-dR_e/dT \geq 0.4$ 。

(5) 晶化增长带: 云粒子基本完全冰化, R_e 达到较大值(比雨胚增长带和混合相增长带的 R_e 大), 粒子主要靠凝华缓慢增长, 在 $T-R_e$ 图上表现为

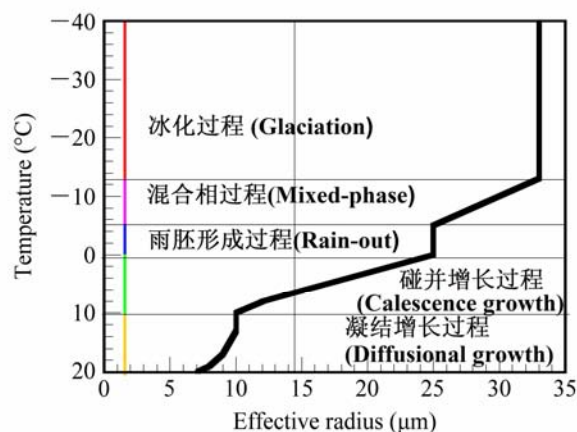


图1 $T-R_e$ 图上的5个主要增长带(黄色竖线表示凝结增长带, 绿色竖线碰并增长带, 蓝色竖线雨胚形成带, 粉红色竖线混合相增长带, 红色竖线表示冰化带)

Fig. 1 Classification scheme of convective clouds into microphysical zones according to the shape of the temperature (T)-effective radius (R_e) (yellow, green, blue, pink, and red lines parallel to the vertical axis represent the zones of diffusional growth, calescence growth, rainout, mixed-phase, and glaciation)

$-dR_e/dT \geq 0$ 。当强上升气流将小粒子带到云顶时, 在 $T-R_e$ 图上表现为 $-dR_e/dT < 0$ 。

图 1 给出了在 $T-R_e$ 图上 5 个主要增长带的示意图 (Rosenfeld and Woodley, 2003; Rosenfeld et al., 2008)。通常, 不同的对流云体其云中结构不尽相同, 并不是每个增长过程都必须出现。

3 对流云人工作业的可播性分析

首先需要解决的问题是: 什么样的对流云具备人工影响的潜力? 根据云降水物理理论, 本文判定原则为: 一是对流云系发生发展过程中自然降水形成过程存在一定不足, 如受重污染或强上升影响, 云中碰并过程欠缺、暖雨形成延迟、云内冰晶化延迟等, 延迟了云水向雨水转化, 使降水减少, 或因延迟效应使云内能量不断聚集可能产生更大更集中的降水, 甚至是强风暴; 二是云厚满足成雨条件, 即在干净地区或海洋上这类云能够形成降水; 三是用现有的人工作业方法能够改变云降水微物理过程, 一定程度上弥补自然降水形成过程的不足。将同时满足 3 个条件的对流云归为可播性云系。然后才是如何利用卫星识别可播性云系, 通过对大量对流云卫星观测分析, 将可播对流云系归纳为 4 类, 每类选取 3 个典型个例, 对照上述 3 个条件进行分析, 归纳总体特征, 便于指导作业。

3.1 重污染深厚对流云可播性分析

重污染个例选取 2005 年 5 月 31 日 13:26 (北京时间, 下同, 图 2a1) 北京 (个例 1) 和 2008 年 6 月 22 日 12:10 (图 2b1) 西伯利亚森林大火 (个例 2), 较干净个例选取 2008 年 6 月 29 日 13:55 (图 2c1) 西伯利亚 (个例 3)。每类选取原则为云系外型相似大小相近, 云底高度、云厚相当, 这样重污染与较干净的比较才有意义。图 2 为 MODIS 卫星反演的 3 个个例 RGB 合成图和 $T-R_e$, 图 2a1、b1、c1 左下角位置分别为 (38.81°N, 113.29°E)、(53.61°N, 126.75°E)、(56.23°N, 99.38°E), 覆盖范围 5° (纬度) × 5° (经度)。由图 2a2、b2、c2 可以看出, 白色方框中云区的云系外型相似大小相近, 云底高度、云厚相当, 满足分类原则, MODIS 卫星反演气溶胶光学厚度 (AOD) 分别为 1.53、1.54 和 0.23, 与重污染和较干净特征吻合。

从图 2 中 $T-R_e$ 图分析云微物理结构, 用第 50%

线 (绿线) 分析可见, 个例 1 和个例 2 的 T 、 R_e 分别为 8 °C、6 μm 和 3 °C、6 μm, 粒子较小; 达到形成雨滴温度 (也称启动降水高度, 阈值为 $R_e=14$ μm) 和厚度 (ΔT , 下同) 分别为 -24 °C、-26 °C 和 32 °C、29 °C, 厚度较厚, 与海洋对流云小于 10 °C, 即 1 km (Andreae et al., 2004) 相比明显偏厚, 存在形成降水延迟效应; 晶化温度分别在 -36 °C 和 -33 °C, 与海洋对流云平均 -16 °C (Rosenfeld et al., 2011) 相比晶化温度偏低, 接近同质冻结温度, 高度较高, 冰晶化延迟效应明显; 云顶 T 分别为 -59 °C 和 -50 °C, 属深厚对流云。

进一步分析降水形成过程, 由图 2a2 和 2b2 可见, 重污染个例 1 和个例 2 的凝结增长带分别为 8 ~ -14 °C 和 3 ~ -20 °C, 无碰并增长和雨胚形成带, 混合相增长带分别为 -14 ~ -36 °C 和 -20 ~ -33 °C。这表明凝结增长带深厚, 粒子随高度增长缓慢, 碰并增长过程欠缺, 无雨胚形成带, 成雨过程明显延迟, 又因 -5 °C 的 R_e 均小于 12 μm, 不利于冰晶繁生机制发生, 进一步延迟了冷云成雨过程, 这些特征与许多研究一致 (Rosenfeld and Lensky, 1998; Rosenfeld et al., 2011)。

较干净个例 3 的云底温度、 R_e 分别为 6 °C、7 μm, 达到形成雨滴温度 (高度)、厚度分别为 -12 °C、18 °C, 与个例 1 和个例 2 相比成雨明显加快, 晶化温度为 -26 °C; 碰并和混合相增长带分别为 6 ~ -10 °C 和 -10 ~ -26 °C, 无凝结增长带, 与个例 1 和个例 2 相比碰并增长过程充分, 晶化温度更暖高度更低, 且 -5 °C 的 R_e 为 13 μm, 利于启动冰晶繁生机制, 冷云降水发展充分。

从云微物理结构和降水形成过程的分析说明: 重污染云的降水发展明显不足, 云中低层粒子随高度增长缓慢, 凝结增长带深厚, 碰并增长过程欠缺, 晶化温度低, 暖云与冷云成雨过程明显延迟, 符合可播性标准, 属可作业云系。对比分析说明: 相似云在较干净环境中, 降水的发展较为充分, 因此, 对重污染云进行针对性播撒, 可望改变云微物理结构和降水形成过程, 使延迟效应得到一定程度的恢复, 降水发展过程得以改善, 通过人工方式使云降水特征从重污染向较干净方向转变。例如, 在云底附近播撒吸湿性核, 增加大滴促进碰并增长, 加快云水向雨水转化, 还利于启动冰晶繁生, 形成大量冰晶降低晶化高度, 加快冷云降水。另外, 在 0 °C 层附近播撒 AgI, 通过上升气流在云内 -10 °C 层产

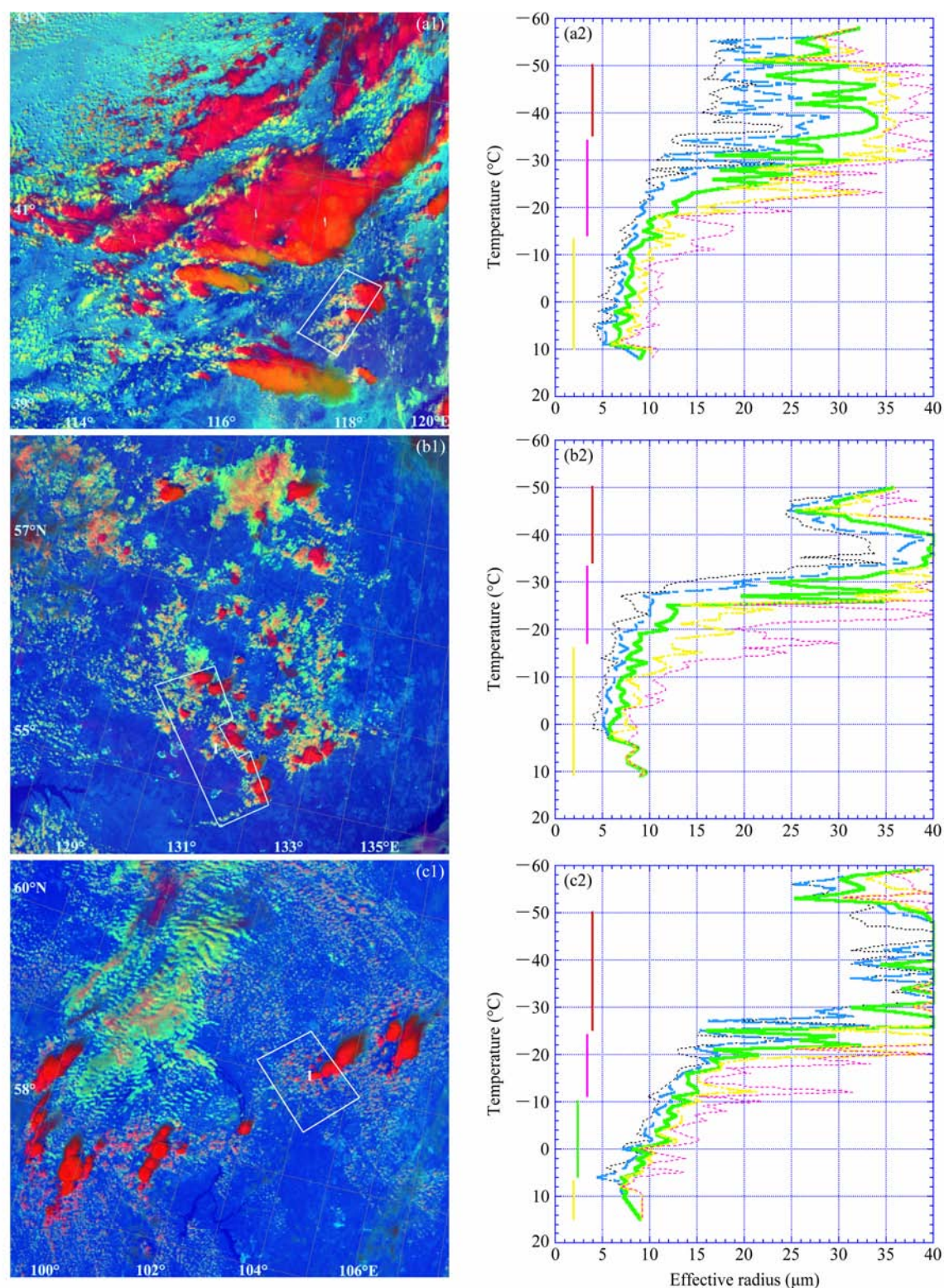


图2 (a1、a2) 2005年5月31日13:26、(b1、b2) 2008年6月22日12:10、(c1、c2) 2008年6月29日13:55 MODIS 卫星 RGB 合成图(左列, 白色方框为 $T-R_e$ 图所选的云区)和对应的 $T-R_e$ 图(右列, 左至右黑色、蓝色、绿色、黄色、粉色曲线分别表示第10%、25%、50%、75%、90%样本的 R_e 随 T 的变化曲线, 其它同图1)

Fig. 2 (a1, b1, c1) RGB composite images of MODIS (the areas marked by white line stand for the cloud with satellite retrieval) and (a2, b2, c2) corresponding $T-R_e$ for convective cloud (the curves of black, blue, green, yellow, and pink indicate variations of R_e with temperature for 10%, 25%, 50%, 75%, and 90% available samples. The other is same as Fig. 1) at (a1, a2) 1326 LST 31 May 2005, (b1, b2) 1210 LST 22 Jun 2008, and (c1, c2) 1355 LST 29 Jun 2008

生大量冰晶(余兴等, 2005)消耗云中的过冷水, 降低晶化高度, 加快冷云降水。而且, 从图 2b2 分析可见, 森林大火的确抑制了降水形成过程, 实施人工增雨作业既有科学依据又有现实意义。

综上所述, 归纳重污染可播性对流云大体特征为: 云底 R_e 小于 $7\ \mu\text{m}$, 凝结增长带深厚, 一般 ΔT 大于 $20\ ^\circ\text{C}$, 无雨胚形成带, 碰并增长带薄, 晶化温度低(高度高), 通常低于 $-30\ ^\circ\text{C}$ 高。这类云可以通过播撒吸湿性核和 AgI 进行作业。

3.2 强上升对流云可播性分析

根据云微物理结构分为两类, 一是中高纬地区常引发冰雹等天气的强风暴云系, 也是我国人工增雨防雹常见类型; 二是低纬地区常引发暴雨等天气的强对流云系。

第一类强上升为 2005 年 5 月 30 日 14:19 (图 3a1) 青海(个例 4)和 2006 年 8 月 2 日 13:53 (图 3b1) 陕西(个例 5)的冰雹天气个例, 弱上升为 2010 年 6 月 4 日 14:27 (图 3c1) 低纬降水个例(个例 6)。图 3 为 MODIS 卫星反演的 3 个个例 RGB 合成图和 $T-R_e$ 图, 图 3a1、b1、c1 左下角位置分别为 (35.23°N , 102.11°E)、(32.23°N , 108.04°E)、(13.02°N , 101.04°E)。同理, 图 3a1、3b1、3c1 所选云团满足分类原则, MODIS 卫星反演的 AOD 分别为 0.65、0.31 和 0.54, 大小相近。

同理, 由图 3a2、3b2、3c2 的 $T-R_e$ 分析云微物理结构和降水形成过程。冰雹个例 4 和个例 5 云底 R_e 分别为 $3\ \mu\text{m}$ 和 $6\ \mu\text{m}$, 粒子小, 形成雨滴厚度分别为 $31\ ^\circ\text{C}$ 和 $40\ ^\circ\text{C}$, 厚度厚, 晶化温度分别为 $-40\ ^\circ\text{C}$ 和 $-37\ ^\circ\text{C}$, 与同质冻结温度相当, 晶化温度低、高度高。个例 4: 凝结、碰并和混合相增长带分别为 $15\sim 8\ ^\circ\text{C}$ 、 $8\sim -8\ ^\circ\text{C}$ 和 $-8\sim -40\ ^\circ\text{C}$, 无雨胚形成带; 个例 5: 凝结增长带为 $11\sim -25\ ^\circ\text{C}$, 无碰并增长带和雨胚形成带, 混合相增长带为 $-25\sim -37\ ^\circ\text{C}$ 。对照可播性条件, 两个个例都存在降水形成延迟和冰晶化延迟, 属可作业对象。而降水个例 6 的云底 R_e 为 $5\ \mu\text{m}$, 与个例 4 和个例 5 相当, 达到形成雨滴厚度为 $24\ ^\circ\text{C}$, 晶化温度为 $-23\ ^\circ\text{C}$, 成雨明显加快, 碰并和混合相增长带分别为 $14\sim -8\ ^\circ\text{C}$ 和 $-8\sim -23\ ^\circ\text{C}$, 凝结增长带薄, 比个例 4 和个例 5 的碰并增长过程充分, 晶化温度更暖高度更低。这说明冰雹云具有人工干预潜力, 通过对云系进行提前、针对性的播撒, 改变云微物理结构和降水形成过程, 在云中弱上升气流区(通常云的中低层)尽早形

成大滴、产生降水, 释放能量减缓上升, 防止因延迟效应导致云内能量不断累积可能造成的冰雹等灾害, 起到防灾减灾目的。

进一步分析最大 R_e , 冰雹个例 4 和个例 5 分别为 $25\ \mu\text{m}$ 和 $33\ \mu\text{m}$, 均未达到反演饱和值 $40\ \mu\text{m}$, 而降水个例 6 在 $-23\ ^\circ\text{C}$ 就达到饱和值 $40\ \mu\text{m}$, 进而说明冰雹云内强上升明显。因为, 在强上升气流作用下, 云粒子从云底到云顶增长时间短, 导致每个增长带的增长缓慢(图 3a2 和 b2), 而弱上升时, 云粒子才有时间长, 表现为很快达到饱和(图 3c2)。如果在云中强上升区播撒催化剂, 催化粒子很可能来不及长大就被带出云顶, 所以, 合理播撒方式应在云底附近播撒吸湿性核或在 $0\ ^\circ\text{C}$ 层附近播撒 AgI。

综合以上分析, 强上升冰雹云的大体特征为: 云外型强对流特征明显, 各增长带的增长缓慢, 无雨胚形成带, 晶化温度低(高度高), 通常低于 $-30\ ^\circ\text{C}$, 云顶附近存在明显 R_e 减小带。同时, 应结合天气分析和雷达观测, 确定为冰雹等强风暴对流云。这类云合理播撒方式为在云底附近播撒吸湿性核或在 $0\ ^\circ\text{C}$ 层附近播撒 AgI。

第二类强上升个例 7 和个例 8 分别为 2010 年 8 月 9 日 14:14 (图 4a1) 和 2010 年 8 月 20 日 13:55 (图 4b1) 低纬强降水, 弱上升个例 9 为 2010 年 8 月 24 日 13:30 (图 4c1) 海洋上降水。图 4a1、4b1、4c1 左下角位置分别为 (14.03°N , 102.60°E)、(20.33°N , 106.28°E)、(8.76°N , 116.25°E)。

由图 4a2、4b2、4c2 可见, 个例 7、个例 8 和个例 9 云底 R_e 分别为 $11\ \mu\text{m}$ 、 $10\ \mu\text{m}$ 和 $10\ \mu\text{m}$, 云滴较大、大小相当, 形成雨滴厚度分别为 $9\ ^\circ\text{C}$ 、 $9\ ^\circ\text{C}$ 和 $7\ ^\circ\text{C}$, 厚度薄, 碰并增长带分别为 $8\sim -10\ ^\circ\text{C}$ 、 $8\sim -8\ ^\circ\text{C}$ 和 $14\sim -7\ ^\circ\text{C}$, 说明碰并过程与暖雨发展较为充分, 不需要播撒吸湿性核改变微物理结构。而个例 7 和个例 8 晶化温度均在 $-32\ ^\circ\text{C}$, 个例 9 为 $-22\ ^\circ\text{C}$, 个例 7 和个例 8 晶化温度偏冷, 冰晶化延迟作用明显, 冷云降水发展不充分, 通过在 $0\ ^\circ\text{C}$ 层附近播撒 AgI 促进冷云降水, 减缓冰晶化延迟作用, 延长降水过程减弱降水强度, 起到防灾减灾目的。

强上升强降水对流云的大体特征为: 云底滴较大, 通常大于 $10\ \mu\text{m}$, 碰并增长较为充分, 晶化温度低, 一般低于 $-30\ ^\circ\text{C}$, 冰晶化延迟明显, 冷云降水发展不充分, 通过在 $0\ ^\circ\text{C}$ 层附近播撒 AgI 促进冷云降水。

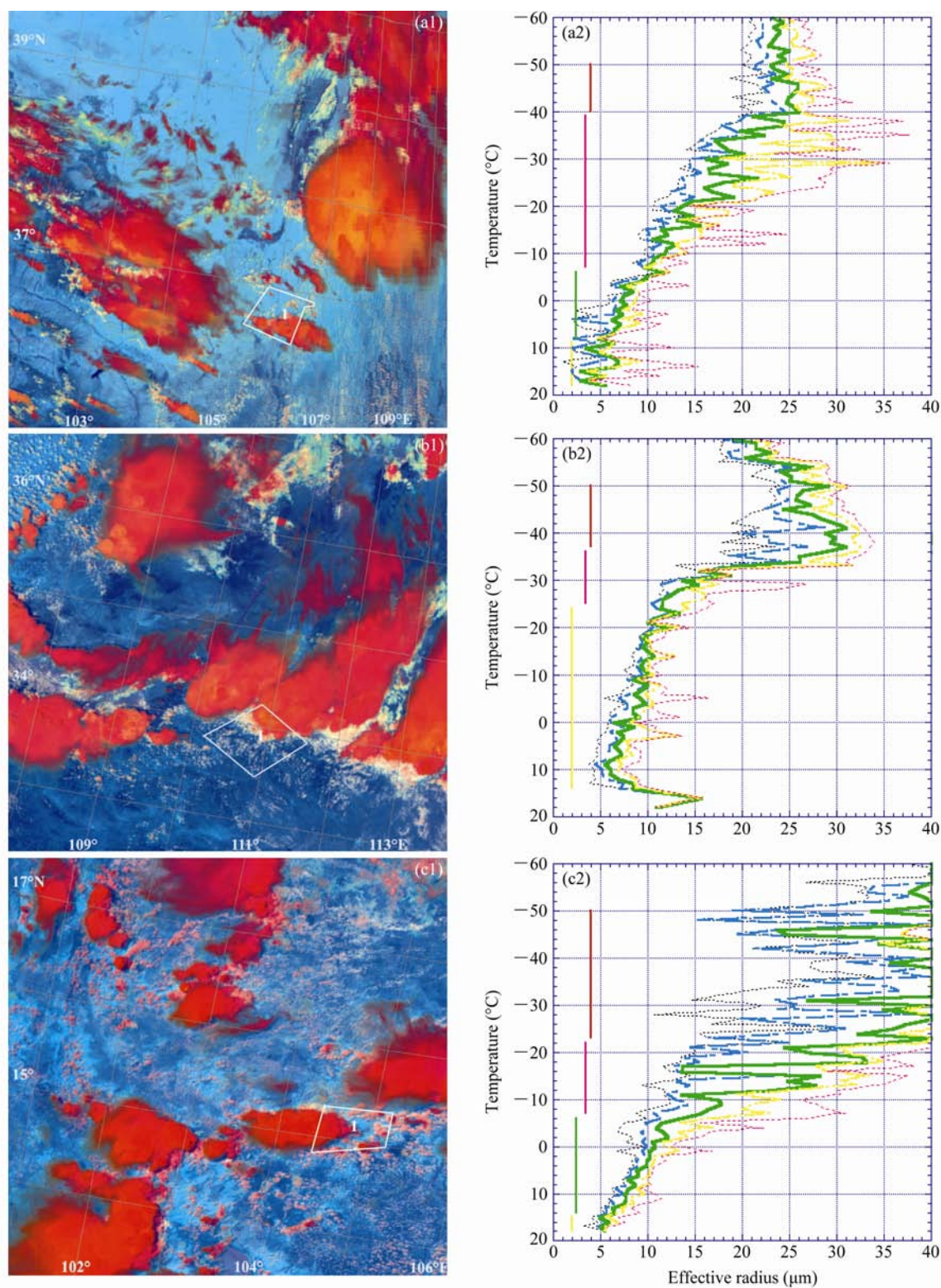


图3 同图2，但为 (a1、a2) 2005年5月30日14:19、(b1、b2) 2006年8月2日13:53、(c1、c2) 2010年6月4日14:27

Fig. 3 Same as Fig. 2, but for (a1, a2) 1419 LST 30 May 2005, (b1, b2) 1353 LST 2 Aug 2006, and (c1, c2) 1427 LST 4 Jun 2010

3.3 污染性浅薄对流云可播性分析

污染个例 10 和个例 11 分别为 2010 年 7 月 23 日 13:34 (图 5a1) 蒙古沙漠地区和 2010 年 7 月 31

日 14:19 (图 5b1) 云南山区，干净个例 12 为 2010 年 8 月 16 日 12:43 (图 5c1) 海洋对流云。图 5a1、5b1、5c1 左下角位置分别为 (45.04°N, 106.30°E)、

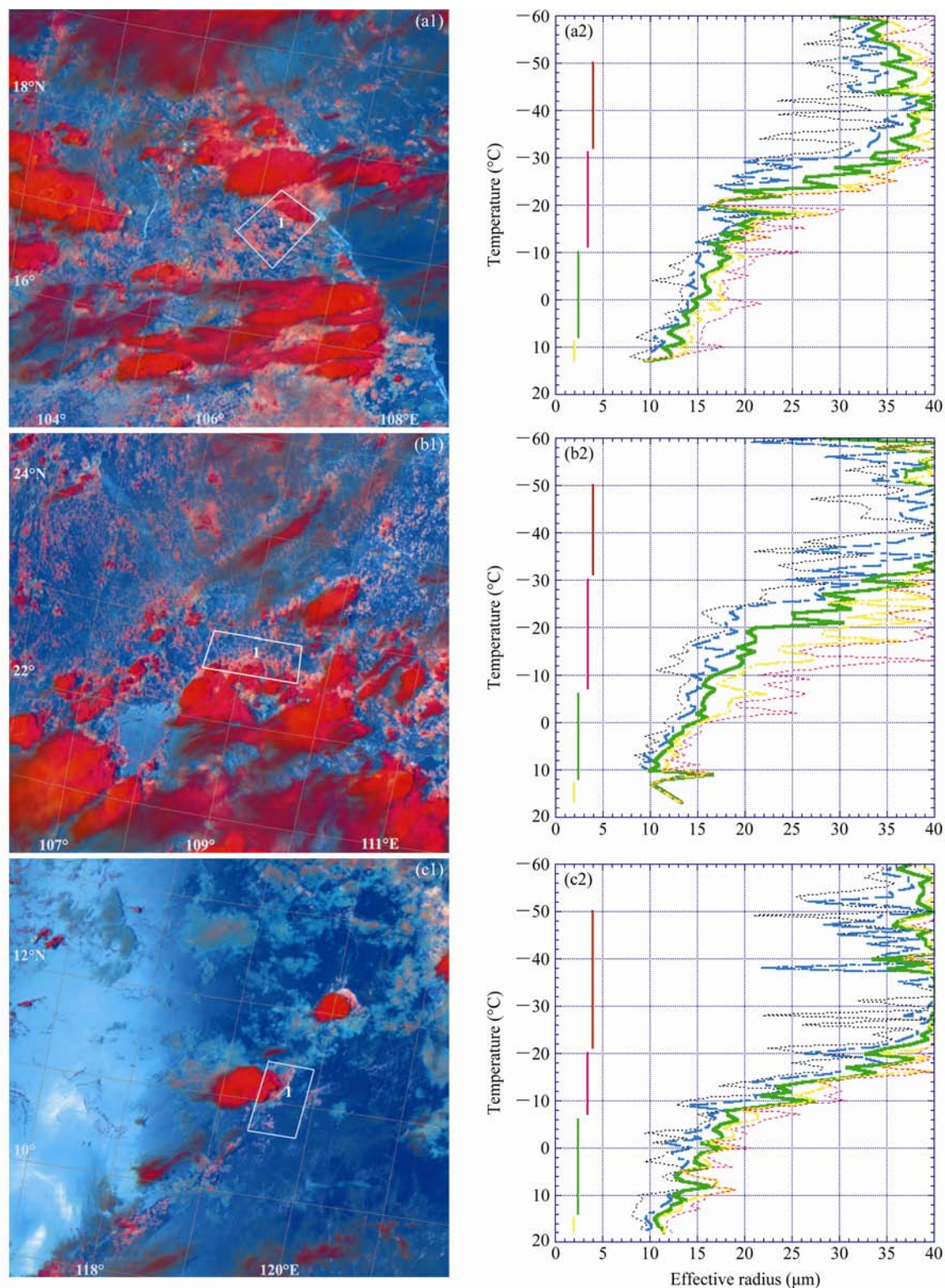


图4 同图2, 但为 (a1、a2) 2010年8月9日14:14、(b1、b2) 2010年8月20日13:55、(c1、c2) 2010年8月24日13:30

Fig. 4 Same as Fig. 2, but for (a1, a2) 1414 LST 9 Aug 2010, (b1, b2) 1355 LST 20 Aug 2010, and (c1, c2) 1330 LST 24 Aug 2010

(28.11°N, 99.83°E)、(31.22°N, 126.28°E)。个例 10、个例 11 和个例 12 的 AOD 分别为 0.31、0.87 和 0.14, 云底 R_e 分别为 3 μm 、7 μm 和 11 μm , 反映出个例 10、个例 11 污染而个例 12 干净的特征。

由图 5a1、5b1、5c1 可见, 个例 10、个例 11 和个例 12 云底温度分别为 15 °C、16 °C 和 20 °C, 云顶温度分别为 -18 °C、-20 °C 和 -15 °C, 云厚相当, 为 4~5 km。个例 10、个例 11 增长带均为

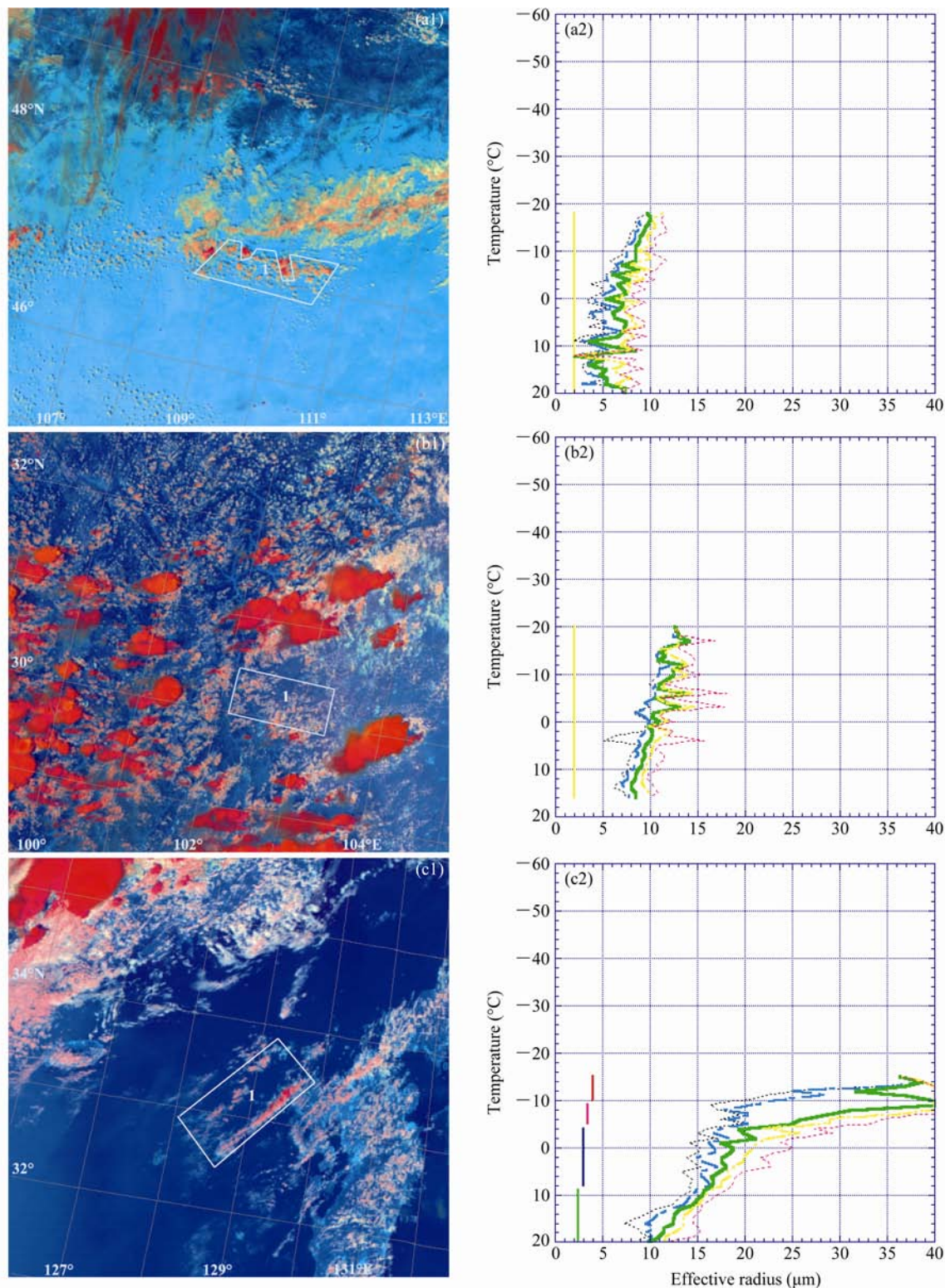


图5 同图2, 但为 (a1、a2) 2010年7月23日13:34、(b1、b2) 2010年7月31日14:19、(c1、c2) 2010年8月16日12:43

Fig. 5 Same as Fig. 2, but for (a1, a2) 1334 LST 23 Jul 2010, (b1, b2) 1419 LST 31 Jul 2010, and (c1, c2) 1243 LST 16 Aug 2010

凝结增长, 最大 R_e 分别为 $10 \mu\text{m}$ 和 $13 \mu\text{m}$, 没有达到雨滴大小, 说明碰并增长欠缺导致粒子增长缓慢, 抑制了暖云降水, 属可播云系。而海洋上个例 12, 形成雨滴厚度为 $10 \mu\text{m}$, 碰并增长充分 (图 5

中绿竖线) 形成雨胚, 形成带为 $9 \sim -1 \text{ } ^\circ\text{C}$ (图 5 中蓝竖线), 暖云降水发展充分。混合相增长带为 $-1 \sim -9 \text{ } ^\circ\text{C}$, 晶化温度为 $-9 \text{ } ^\circ\text{C}$, 最大 R_e 达到饱和值 $40 \mu\text{m}$, 冷云降水发展充分。这说明相似云系在

海洋环境中,形成降水过程可以得到较好的发展,而污染云具备人工干扰的可能性。因此,对这类污染性的浅薄对流云进行针对性播撒,在云底附近播撒吸湿性核,增加大滴促进碰并增长,加快云水向雨水转化,同时还利于启动冰晶繁生,形成大量冰晶降低晶化高度,加快冷云降水。因冷层较薄,播撒成冰剂可能效果不好。

综上所述,浅薄的污染性可播对流云大体特征为:云底 R_e 小于 $8\ \mu\text{m}$, 凝结增长带深厚,碰并增长明显欠缺,无雨胚形成带,云顶 R_e 小于 $14\ \mu\text{m}$, 没有达到形成雨滴大小,云厚在 $3\sim 6\ \text{km}$ 。这类云是内陆地区夏季常出现云系,如果能量不足,最终只能完成云的自然生消,难以产生降水,是具有较好增雨效益的云系,通过播撒吸湿性核使不能产生降水的云水转化为雨水,达到增雨目的。

4 讨论

利用卫星反演技术和云微物理分析方法,通过对大量对流云个例分析,归纳出 4 类可播云系,范围涵盖了大城市、森林大火、沙漠、山区、内陆、海岛、海洋等对流云,具有较好的代表性。针对云微物理结构和降水过程,探讨可播性和播撒方式,通过与自然界降水发展过程较理想的相似云系的对比分析,探讨人工干预可能性。

卫星能够多时次大范围地对云进行探测,资料获取便捷,在人工影响天气中,发挥卫星优势特长,利用反演技术和分析方法,分析可播云系,把握播撒时机、部位,采用合理的播撒方式进行作业,是一种值得尝试的方法。通过可播云系归类分析得到的总体特征,便于指导实际,因云发展复杂多变,仍需要在实践加以完善,灵活应用,同时结合天气分析、雷达观测等,才能更好地为实际作业提供参考。

参考文献 (References)

Andreae M O, Rosenfeld D, Artaxo A A, et al. 2004. Smoking rain clouds over the Amazon [J]. *Science*, 303: 1337–1342.

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 Meteorologica Sinica* (in Chinese), 64 (5): 622–630.

戴进, 余兴, 刘贵华, 等. 2010. 一次暴雨过程中云微物理特征的卫星反

演分析 [J]. *气象学报*, 68 (3): 387–397. Dai Jin, Yu Xing, Liu Guihua, et al. 2010. Analyses of satellite retrieval microphysical properties of a rainstorm in the northern part of Shaanxi [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 68 (3): 387–397.

戴进, 余兴, 刘贵华, 等. 2011. 青藏高原雷暴弱降水云微物理特征的卫星反演分析 [J]. *高原气象*, 30 (2): 288–298. Dai Jin, Yu Xing, Liu Guihua, et al. 2011. Satellite retrieval analysis on microphysical property of thunderstorm with light precipitation over the Qinghai–Xizang Plateau [J]. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 30 (2): 288–298.

Guo X L, Fu D H, Zheng G G. 2007. Modeling study on optimal convective cloud seeding in rain augmentation [J]. *J. Korean Meteor. Soc.*, 43 (3): 273–284.

胡志晋. 2001. 层状云人工增雨机制条件和方法的探讨 [J]. *应用气象学报*, 12 (增刊): 10–13. Hu Zhijin. 2001. Discussion on mechanisms, conditions and methods of precipitation enhancement in stratiform clouds [J]. *Quarterly Journal of Applied Meteorology* (in Chinese), 12 (Suppl.): 10–13.

刘贵华, 余兴, 戴进. 2009. 不同积云微物理特征的卫星反演分析 [J]. *南京气象学院学报*, 32 (1): 17–23. Liu Gui Hua, Yu Xing, Dai Jin. 2009. Satellite retrieval of microphysical characters for different cumuli [J]. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology* (in Chinese), 32 (1): 17–23.

刘贵华, 余兴, 戴进, 等. 2011a. 地形云人工增雨条件卫星探测反演个例分析 [J]. *气象学报*, 69 (2): 363–369. Liu Guihua, Yu Xing, Dai Jin, et al. 2011a. A case study of the conditions for topographic cloud seeding based on the retrieval of satellite measurements [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 69 (2): 363–369.

刘贵华, 余兴, 贾玲, 等. 2011b. 2009年陕西春季层状云增雨卫星观测分析 [J]. *干旱区研究*, 28 (4): 699–704. Liu Guihua, Yu Xing, Jia Ling, et al. 2011b. Satellite observation on rainfall enhancement in stratiform clouds over Shaanxi Province in spring 2009 [J]. *Arid Zone Research* (in Chinese), 28 (4): 699–704.

刘文. 2005. 用极轨气象卫星资料分析飞机增雨云层条件 [J]. *气象科技*, 33 (1): 81–86. Liu Wen. 2005. Analysis of cloud conditions for aircraft precipitation enhancement using polar orbiting meteorological satellite data [J]. *Meteorological Science and Technology* (in Chinese), 33 (1): 81–86.

Nakajim T, King M D. 1990. Determination of the optical thickness and effective particle radius of clouds from reflected solar radiation measurements. Part I: Theory [J]. *J. Atmos. Sci.*, 47: 1878–1893.

Pavolonis M J, Heidinger A K, Uttal T. 2005. Daytime global cloud typing from AVHRR and VIIRS: Algorithm description, validation, and comparisons [J]. *J. Appl. Meteor.*, 44: 804–826.

Rosenfeld D. 1999. TRMM observed first direct evidence of smoke from forest fires inhibiting rainfall [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 26: 3105–3108.

Rosenfeld D. 2000. Suppression of rain and snow by urban and industrial air pollution [J]. *Science*, 287: 1793–1796.

Rosenfeld D, Woodley W L. 1993. Effects of cloud seeding in west Texas: Additional results and new insights [J]. *J. Appl. Meteor.*, 32: 1848–1866.

Rosenfeld D, Lensky I M. 1998. Satellite-based insights into precipitation formation processes in continental and maritime clouds [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 79: 2457–2476.

- Rosenfeld D, Woodley W L. 2003. Closing the 50-year circle: From cloud seeding to space and back to climate change through precipitation physics [A]. Cloud Systems, Hurricanes, and the Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) [C]. Meteorol. Monogr, 51: 59–80.
- Rosenfeld D, Woodley W L, Lemer A, et al. 2008. Satellite detection of severe convective storms by their retrieved vertical profiles of cloud particle effective radius and thermodynamic phase [J]. J. Geophys. Res., 113: D04208, doi:10.1029/2007JD008600.
- Rosenfeld D, Yu X, Liu G H, et al. 2011. Glaciation temperatures of convective clouds ingesting desert dust, air pollution and smoke from forest fires [J]. Geophys. Res. Lett., 38: L21804, doi:10.1029/2011GL049423.
- Tzivion S, Reisin T, Levin Z. 1994. Numerical simulation of hygroscopic seeding in a convective cloud [J]. J. Appl. Meteor., 33: 252–267.
- Woodley W L, Rosenfeld D, Strautins A. 2000. Identification of a seeding signature in Texas using multi-spectral satellite imagery [J]. Journal of Weather Modification, 32: 37–52.
- Yin Y, Levin Z, Reisin T, et al. 2000. Seeding convective clouds with hygroscopic flares: Numerical simulations [J]. J. Appl. Meteor., 39: 1460–1472.
- 余兴, 戴进, 雷恒池, 等. 2005. NOAA 卫星云图反映的播云物理效应 [J]. 科学通报, 50 (1): 77–83. Yu Xing, Dai Jin, Lei Hengchi, et al. 2005. Physical effect of cloud seeding revealed by NOAA satellite imagery [J]. Chinese Science Bulletin (in Chinese), 50 (1): 77–83.