

王瑾,薛卫东,左爱文,等. 陕西飞机增雨作业航线优化技术研究[J]. 陕西气象,2024(5):57-63.

文章编号:1006-4354(2024)05-0057-07

陕西飞机增雨作业航线优化技术研究

王瑾^{1,2},薛卫东¹,左爱文¹,李燕¹,郑绥翔¹,岳治国^{1,2}

(1. 陕西省人工影响天气中心,西安 710016;

2. 中国气象局秦岭和黄土高原生态环境气象重点开放实验室,西安 710016)

摘要:为使陕西飞机增雨作业实现充分播撒,分析满足充分播撒要求的飞机航线设计需考虑的因素(包括作业区、作业层温度和风向风速),结合充分播撒的要求,对陕西以往的航线设计进行了优化,提出了“8字型”和“几字型”航线设计;针对“8字型”和“几字型”航线,分析了从相同航线的不同起点播撒催化剂后影响区域的异同,结果表明两种航线设计均可实现充分均匀播撒,可用于固定目标区增雨作业或对作业对象的追踪播撒;利用两种航线设计的实际业务个例也证实了两种航线设计均能使作业影响区内催化剂浓度在一定时段内保持稳定,实现充分播撒。

关键词:飞机增雨;充分播撒;航线优化;“8字型”;“几字型”

中图分类号:P481

文献标识码:A

近年来,陕西省人工影响天气中心常年使用2架飞机在全省范围开展增雨作业,在缓解干旱、水库增蓄、生态环境改善方面做出了重要贡献。设计并实施科学的飞机作业方案对增雨效果至关重要。为了科学有效地开展飞机增雨作业,陕西气象科技工作者在飞机作业航线设计上做了很多研究。余兴等^[1]利用数值模式模拟了1996年3月31日关中地区飞机增雨作业,结果表明不同的大气层结和扩散参数对催化剂扩散影响显著;徐小红等^[2]、余兴等^[3]研究发现扩散系数对催化剂在云中的扩散非常敏感,建议慎重设计催化作业方案;余兴等^[4]给出了适宜增雨作业的条件,并指出飞机增雨技术除了必须考虑催化剂在云中的输送与扩散,及慎重选择催化对象、催化时机和催化部位等客观条件外,还必须科学设计作业航线;余兴等^[5]利用数值试验方法,设计了4 km、8 km和20 km三种飞机作业间距,研究了不同间距对作

业有效区域的影响,针对交叉和平行航线,设计提出了最佳作业间距的数学表达式;陈保国等^[6]根据云系降水特征和高空风分布状况,利用GPS定位技术设计飞行探测和催化作业航线,通过获取航线空间定位的具体坐标,设计出探测区、作业区和粒子增长区,以提高云物理综合探测的科学性和人工增雨催化作业的有效性;周毓荃等^[7]研究指出在一个区域内播撒的催化剂均匀连续扩散,且在一定时段内能够维持有效催化的阈值浓度(10^4 个/ m^3),即认为对该区域实现了充分播撒。

在2018年以前,陕西的飞机增雨作业航线设计一般只考虑降水云系和作业航线覆盖区域,未充分考虑高空风的风向和风速对催化剂扩散轨迹和移动方向等的影响。随着观测手段的进步和多源化,对飞机增雨及影响区有了新的认识。2017年陕西省一次飞机冷云增雨作业后的物理响应特征被卫星、雷达和地面雨滴谱仪同时捕捉到,进一

收稿日期:2023-10-31

作者简介:王瑾(1988—),女,汉族,陕西咸阳人,博士,高工,从事人工影响天气研究。

通信作者:薛卫东(1969—),男,汉族,陕西吴堡人,大专,工程师,从事人工影响天气研究。

基金项目:秦岭和黄土高原生态环境气象重点实验室开放基金课题(2020G-12;2022G-9;2023G-2);国家自然科学基金项目(42275085)

步回答了作业后增雨覆盖区域、增雨起止时间和持续影响时间等问题^[8-9]。通过对2017年3月19日的飞机增雨个例的研究发现,飞机作业影响面积并不是航线覆盖区域的面积总和,增雨面积的大小受作业天气背景、风场、扩散和湍流等因素的综合影响。

陕西省开展飞机增雨以来,在作业需求区域利用飞机播撒催化剂,设计的飞机作业航线主要是“环形线”和“一条线”,使得催化剂浓度无法在一定时段内、一定程度上保持稳定,不能达到充分播撒的要求。近年来,通过开展飞机增雨作业效果研究,发现飞机增雨作业受高空风影响,催化剂受风场作用向下风方移动和扩散^[7-9],飞机作业及影响区域包括航线覆盖面积及受催化影响的下风方区域,区域大小受风速、湍流、地形等多种因素的影响;因此,为使飞机增雨作业效益最大化,作业航线设计的优化对于实现催化剂充分播撒是非常必要的。科学设计飞机作业航线对充分播撒的实现、增雨影响区域的确定等具有重要意义。为提高飞机增雨作业有效性,本文讨论实现充分播撒的航线设计需考虑的因素,重点介绍基于充分播撒的“8字型”和“几字型”作业航线设计的优化及两种航线设计的应用实例。

1 航线优化设计研究

1.1 航线设计考虑因素

科学的飞机增雨作业,不是哪里有雨就去哪里作业,也不是对已经降雨的云作业,已经生成降水的云系已处于消散过程或本身没有增雨潜力^[10]。因此,在科学选择作业对象的基础上设计可实现充分播撒的航线才能有效作业。对于是否可实现充分播撒,一方面取决于催化剂的播撒剂量,另一方面取决于催化段的航线设计。由于目前的研究结果无法定量评价催化剂播撒剂量是否充分,因此,本文仅对可以实现充分播撒的航线设计进行优化。

航线设计需考虑的因素较多。首先,结合卫星云图和雷达回波等充分了解作业对象的移动方向和速度确定作业区域。其次,航线设计应充分考虑催化剂特性。当催化剂类型为成冰剂,其主要成分是碘化银(AgI),在 $-15\sim-4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的过冷云

中起到冰核作用,特别是在过冷云滴中能大量成冰^[11-12],因此预设催化温度应低于 $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$;当催化剂类型为致冷剂,预设催化温度应低于 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$;当催化剂类型为吸湿性粉剂,预设催化温度应高于 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。根据催化剂起作用的温度范围,结合大气垂直观测设置飞机作业高度,确保飞机在合适的温度层播撒催化剂。最后,需进行充分均匀播撒,预设催化航迹的走向和间隔应考虑催化层风向和风速,在具有增雨潜力区的上风方设置航线的催化段,可推测出飞机作业后催化剂扩散到下游地区的具体位置。

1.2 航线设计优化

不同地区的飞机增雨作业航线应根据该地区的地理位置和地形特征等进行本地化设计。陕西关中地区属长条状峪谷带,南靠海拔3767 m的秦岭山脉,西、北都是高达2000 m的高原,地形对云中的流场和湍流场均会产生较大的影响。飞机增雨作业受空域、航线设计和高空风等因素影响,使得作业后云中催化剂数浓度的时空分布变化较大^[1],因此,为确保催化剂的充分播撒,航线设计中应重点考虑催化剂扩散和航线形式等因素的影响。

在我国的飞机增雨作业或试验中,平行条航线、锯齿形航线、三角形航线和水平观测航线等基本航线已得到广泛应用^[6, 10, 13-16]。针对作业对象进行催化剂的充分播撒才能达到较好增雨效果^[7],因此,基于陕西以往的航线设计,结合充分播撒的考虑,对航线进行优化设计。按照周毓荃等^[7]提出的移动点源播撒扩散方案计算飞机播撒催化剂的扩散时间、浓度和范围进行航线设计时,需给定催化剂播撒时的风向和风速、初始催化剂量($1\ 013\ \text{个}/\text{m}^3$)、水平湍流交换系数($140\ \text{m}^2/\text{s}$)和垂直交换系数($70\ \text{m}^2/\text{s}$)。本节中设计“8字型”和“几字型”航线时均设置风向和风速分别为西风(270°)和 $12\ \text{m}/\text{s}$ 。

1.2.1 “8字型”航线设计 催化剂在云中的扩散受天气条件、气流、风切变、大气热力和动力状况等的影响,不同的云体其扩散状况也不同^[17]。受水平风场输送、云内湍流等影响,在不同航线形式中,播撒后催化剂有效作用时段和形成的有效

面积投影,以及对应的地面位置和播云线的重叠及并合等情况也会不同。

近年来,飞机增雨多采用“8 字型”或“1 字型”作业航线设计,即垂直于风向在固定 4 个点绕 8 字(图 1)或是在固定的 2 个点(图略)之间往返作业。飞机虽然按照固定航线在固定区域作业,但作业云系是移动的,催化后的云系会随高空风向下风方移动,离开原来的催化位置,这样就可以对移动到飞机作业区域的云系实现均匀催化。图 1 为飞机分别从不同的播撒起点 A 点(a)和 B 点(b)绕“8 字型”播撒 180 min(2 圈半)后催化剂的扩散形状和影响区域。图 1a 中飞机从 A 点进入作业区域,按照“A—B—C—D—A—B—C”的方

式绕“8 字型”飞行,飞机播撒结束后从 C 点离开作业区域。飞机在作业区域播撒催化剂后,催化剂在空中风场作用下,逐渐向下风方移动。飞机播撒时机不同,扩散后影响区域及范围也不同。图 1b 中飞机进入作业区域后,从 A 点到 B 点不播撒,而是从 B 点开始按照“B—C—D—A—B—C”的方式绕“8 字型”播撒催化剂后的扩散分布,与从 A 点开始播撒的催化剂扩散分布不同。从图 1 中可以看出催化剂在风场作用下,其自身宽度逐渐扩展,且先播撒的催化剂数浓度比后播撒的小。飞机采用绕“8 字型”航线设计播撒催化剂,可实现对作业云系的充分均匀播撒和扩散。

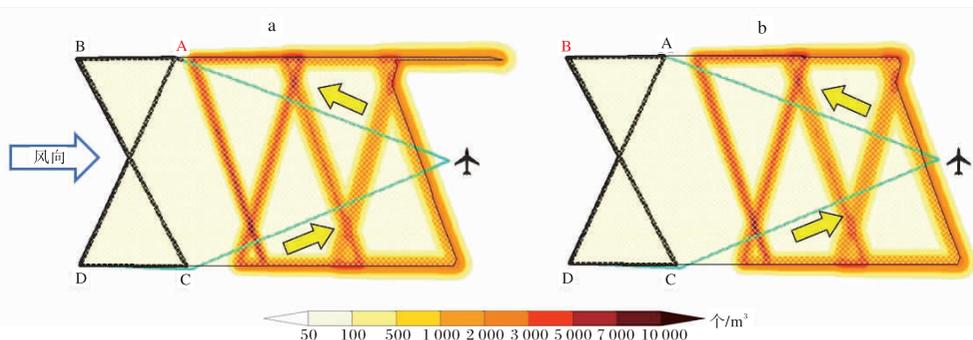


图 1 飞机绕“8 字型”从播撒起点(红色字母)分别为 A 点(a)和 B 点(b)开始催化的航线(黑色折线)和催化开始 180 min 后的扩散分布区域(黄色网格折线)(飞机标志为机场位置;绿色直线为飞机从机场出发到达催化区域之前和催化完成之后返回机场的飞机航线;黄色箭头为飞机飞行方向;色标为催化剂播撒后的扩散数浓度;黄色区域为扩散影响范围)

1.2.2 “几字型”航线设计 对于固定目标区或移动的作业对象进行飞机播撒时,除了采用绕“8 字型”的播撒方式,“几字型”的飞机播撒方式也在业务中广泛应用。图 2 为飞机绕“几字型”从 A 点(a)和 D 点(b)进入作业区域开始催化和 180 min 后催化剂的扩散分布。从图 2 可看出,采用“几字型”航线设计,从不同起点开始播撒催化剂,180 min 后的扩散形状和影响面积均不同。图 2a 显示飞机从 A 点进入作业区域开始催化,按照“A—C—B—D”的方式播撒催化剂,结束后从 D 点离开作业区域。“几字型”的飞行播撒方式可追踪移动的作业对象,并对其进行充分催化,180 min 扩散后的影响面积也较大。余兴等^[18]研究发现在飞机增雨作业时播云间距设为 4 km 较

为合理,较大间距不利于产生较好的增雨效果;因此,针对不同作业对象,合理设置“几字型”航线间距很有必要。

余兴等^[5]研究发现由于风场输送作用使播云线偏离了设计的每段航线的端点,造成交叉或重合。图 2b 中飞机从 D 点进入作业区域开始催化,按照“D—B—C—A”的方式播撒催化剂,播撒结束后从 A 点离开作业区域。为了使飞机催化实现充分播撒,在作业区域中采用“几字型”的长边(图 2b 中的 BD 段)垂直于风向且从上风方开始催化的方式,180 min 后催化剂扩散分布重叠集中,对作业对象可达到充分催化的效果。实际增雨作业中,根据作业目的和作业区域,结合当天的天气情况可以选择合适的航线设计和播撒起点。

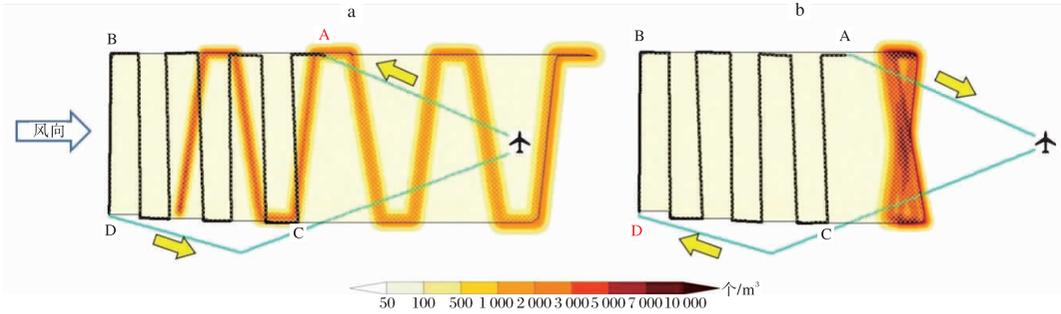


图2 飞机绕“几字型”从播撒起点(红色字母)分别为A点(a)和D点(b)开始催化的航线(黑色折线)和催化开始180 min的扩散分布区域(黄色网格折线)(飞机标志为机场位置;绿色线为飞机从机场出发到达催化区域之前和催化完成之后返回机场的飞机航线;黄色箭头为飞机飞行方向;色标为催化剂播撒后的扩散数浓度;黄色区域为扩散影响范围)

以上分析可以看出,相同航线的催化起点不同,飞机作业及影响面积也不完全相同。从“8字型”不同起点开始播撒催化剂,飞机作业影响区域基本相同。从“几字型”不同起点播撒催化剂,飞机作业影响区域相差较大。针对不同作业目的和作业对象,可以采取适合的航线设计和播撒起点。不论是“8字型”和“几字型”航线设计,都可用于固定目标区的增雨或作业对象的追踪播撒。

2 航线设计优化方案应用

近年来,根据不同的作业目的,多采用满足无缝隙催化要求的绕“8字型”^[7, 19]和“几字型”^[7]播撒方式在作业影响区内进行往复播撒,实现充分

催化以保证作业效果。下面分别介绍两种优化后的航线设计在实际增雨作业中的应用实例。

2.1 “8字型”航线设计应用个例

2021年9月5日,新舟60增雨飞机赴陕南进行一架次的增雨作业,起飞和降落时间分别为15:19和17:41(北京时,下同),播撒时间段为16:24—17:06,催化剂用量为3000g的AgI冷云焰条,播撒率为1.190g/s,播撒高度范围6000~6300m,平均播撒高度为6150m。图3为飞机飞行轨迹和汉中多普勒雷达回波的叠加图,飞机作业时绕“8字型”飞行,沿着与风向夹角接近90°的西北东南向绕“8字型”播撒。图4给出了飞机飞

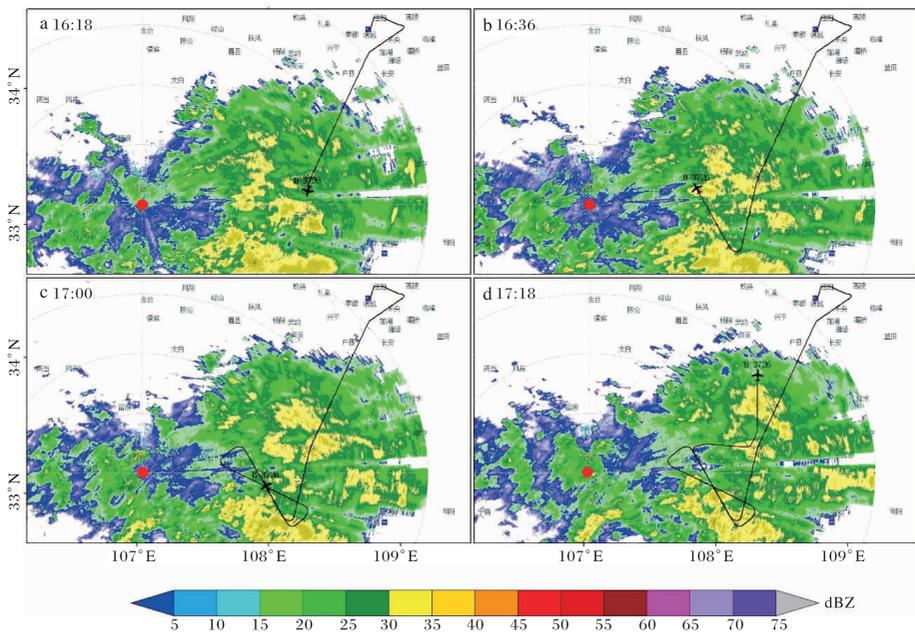


图3 2021-09-05 汉中多普勒雷达(红色圆点)的组合反射率因子和增雨飞机作业航线(黑色曲线)叠加图

行高度变化和汉中多普勒雷达回波垂直剖面的叠加图。多普勒天气雷达显示的降水回波顶高一般低于云顶高度。从图 4 可见,飞机在雷达降水回波顶高度附近播撒催化剂。

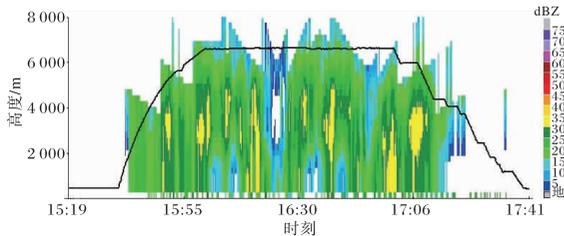


图 4 2021-09-05 汉中多普勒雷达回波垂直剖面
增雨飞机飞行高度变化(黑色曲线)叠加图

2021 年 9 月 5 日汉中气象站 08 时探空图(图略)显示云层为多层云,最深厚的云层厚度为 8 km,云底和云顶高度分别为 1.5 km 和 9.6 km,

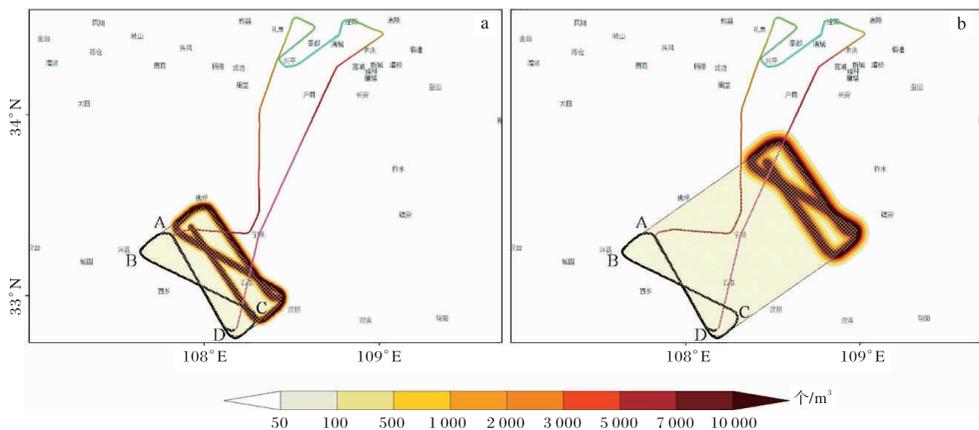


图 5 2021-09-05 飞机“8 字型”播撒后 60 min(a)和 180 min(b)的催化剂数浓度分布和扩散
传输范围(黑色曲线为作业航线;黄色网格折线为扩散分布区域;黄色区域为扩散影响范围)

2.2 “几字型”航线设计应用个案

2022 年 8 月 30 日,新舟 60 增雨飞机赴陕南进行一架次增雨作业,起飞和降落时间分别为 11:31 和 14:34,播撒时段为 11:56—13:52,播撒催化剂为 20 根暖云焰条,播撒率为 1.724 g/s,播撒高度范围 4 300~4 800 m,平均播撒高度为 4 550 m。图 6 为飞机轨迹和安康多普勒雷达回波叠加图,飞机作业时绕“几字型”飞行播撒。图 7 给出了飞机飞行高度和安康多普勒雷达垂直剖面的叠加图,从图 7 可见,飞机在云中飞行,播撒高度为雷达降水回波垂直剖面的中部所在高度。

风向为西南风,风速为 10 m/s。平均播撒高度为 $-10\sim-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 所在的高度层,在适宜的播云温度范围内实施催化剂播撒。

图 5 为飞机绕“8 字型”飞行作业后 60 min 和 180 min 的催化剂数浓度分布和扩散传输范围。飞机按照“A—D—C—B—A—D”的方式在作业区域上风方从 A 点开始播撒,绕“8 字型”1 圈后从 D 点退出作业区。本次作业风向为 235° ,风速为 10 m/s,按照移动单点播撒扩散方案计算得出 60 min 后催化剂中的 AgI 数浓度为 5 000~10 000 个/ m^3 ,作业及影响面积约 4 000 m^2 。180 min 后催化剂中的 AgI 数浓度为 500~10 000 个/ m^3 ,作业及影响面积约 8 100 m^2 。“8 字型”航线设计充分考虑了播撒方向和风向的相互关系,该设计满足充分播撒的要求。

从 2022 年 8 月 30 日 08 时安康气象站的垂直探空图(图略)可看出,单层云的厚度接近 13 km。播撒高度层的平均温度为 $3.5\text{ }^{\circ}\text{C}$,风向为西南风(239°),风速为 15 m/s。飞机的平均播撒高度均低于 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 所在高度层,符合暖云播撒的温度要求。

图 8 为飞机绕“几字型”飞行作业后 60 min 和 180 min 的催化剂数浓度和扩散传输范围。飞机按照“A—C—B—D”的路线在作业区域上风方从 A 点开始播撒,共飞行 5 个“几字型”后从 D 点退出作业区。本次作业风向为 239° ,风速为 15 m/s,

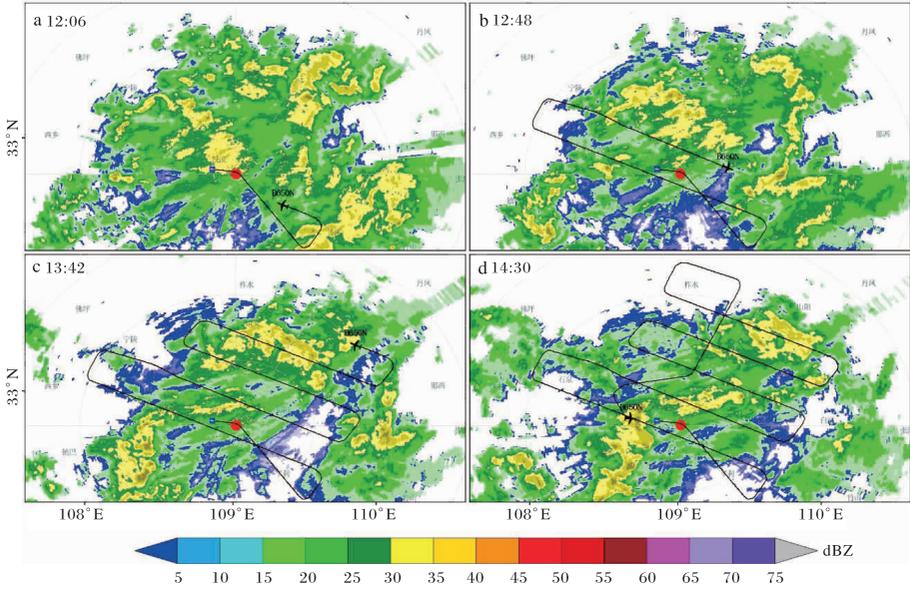


图6 2022-08-30 安康多普勒雷达(红色圆点)的组合反射率因子和增雨飞机作业航线(黑色曲线)叠加图

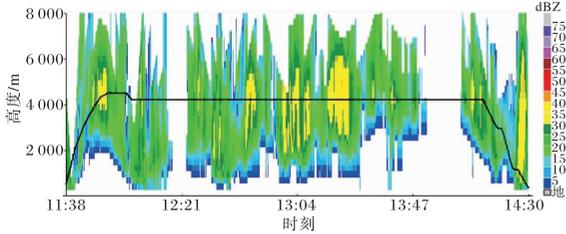


图7 2022-08-30 安康多普勒雷达回波垂直剖面
和增雨飞机飞行高度变化(黑色曲线)叠加图

按照移动单点播撒扩散方案计算 60 min 后催化剂浓度为 5 000~10 000 个/m³,作业及影响面积约 9 000 m²。180 min 后催化剂浓度为 2 000~70 000 个/m³,作业及影响面积约 2.2 万 m²。在“几字型”的 A 点播撒催化剂,催化剂扩散时出现了交叉重叠,催化剂数浓度处于较高的水平,达到了充分播撒的效果。

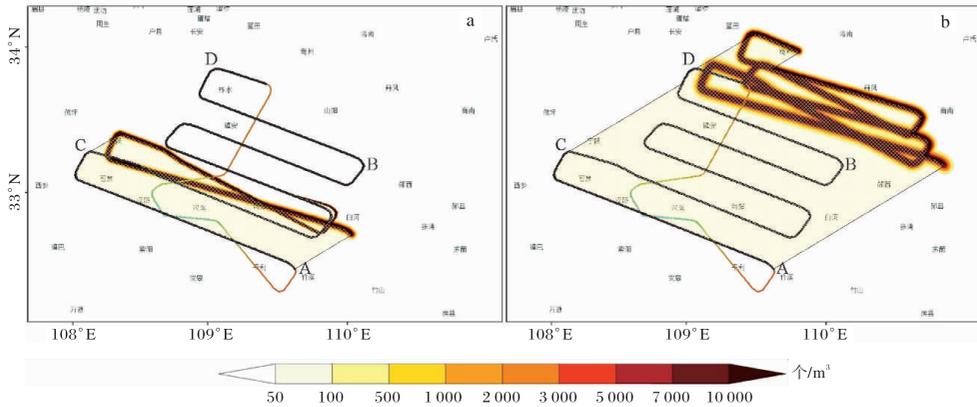


图8 2022-08-30 飞机“几字型”播撒后 60 min(a)和 180 min(b)的催化剂数浓度分布和扩散
传输范围(黑色曲线为作业航线;黄色网格折线为扩散分布区域;黄色区域为扩散影响范围)

3 结论

针对飞机增雨作业中充分播撒的航线设计要求,提出了“8 字型”和“几字型”两种优化后的航线设计,解决陕西以往作业航线设计无法满足充分播撒的问题,得到以下结论。

(1)为使飞机增雨作业达到充分播撒的要求,在作业航线设计时应考虑以下影响因素:①确定作业区域时,需在雷达和卫星监测获取的潜力区中作业;②根据催化剂类型选择适合的作业层温度,冷云催化剂的平均作业高度需在-5℃温度

层高度以上,采用暖云催化剂的平均作业高度需在 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度层高度以下;③航线设计时应考虑催化层的风向和风速以计算催化扩散时段、范围和数浓度;④采用绕“8字型”或“几字型”航线作业时需采用往复播撒的方式以获得成片的催化区,保证催化剂数浓度在一定程度上保持稳定,达到充分播撒的要求。

(2)针对两种充分播撒的航线设计,分析了在相同航线不同起点播撒催化剂后形成的催化影响区域。从“8字型”不同起点播撒,飞机作业影响形状和区域基本相同,从“几字型”不同起点播撒,影响区域相差较大,两种航线设计均可实现充分均匀播撒,用于固定目标区增雨作业或对作业对象追踪播撒。在业务应用中,针对不同作业目的和对象,可选取适合的航线设计和播撒起点。

(3)通过“8字型”和“几字型”航线设计的应用实例分析发现,在实际作业中两种航线设计均能使作业影响区内催化剂数浓度在一定时段内保持稳定,实现飞机作业的充分播撒。在实际飞机作业中要实现充分播撒,除了科学的飞机航线设计外,飞机作业时还需在作业潜力区内充分播撒。

致谢:本文特别感谢罗俊颀、李金辉正研级高工的精心指导,高星星高工和田显工程师的细心帮助。

参考文献:

- [1] 余兴,王晓玲. 层状云中非垂直多条撒播线源催化剂扩散的数值模拟[J]. 气象学报,1998,56(6):708-723.
- [2] 徐小红,余兴. 飞机增雨催化剂水平输送与扩散速率的研究[J]. 陕西气象,2002(6):11-13.
- [3] 余兴. 层状云人工增雨撒播方法的有效性初探[J]. 陕西气象,2000(1):1-5.
- [4] 余兴,戴进,郭建侠. 层状云播云线源非均匀、非定常输送扩散数值模拟[J]. 高原气象,2002,21(3):288-295.
- [5] 余兴,戴进. 层状云中飞机人工增雨作业间距的研究[J]. 大气科学,2005(3):465-474.
- [6] 陈保国,雷恒池,郭强,等. 基于GPS技术的云物理综合探测航线设计[J]. 西北大学学报(自然科学版),2008,38(5):842-844.
- [7] 周毓荃,朱冰. 高炮、火箭和飞机催化扩散规律和作业设计的研究[J]. 气象,2014,40(8):965-980.
- [8] WANG J, YUE Z G, ROSENFELD D, et al. The evolution of an AgI cloud-seeding track in central China as seen by a combination of radar, satellite, and disdrometer observations [J/OL]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2021, 126(11) [2023-10-15]. <https://doi.org/10.1029/2020JD033914>.
- [9] 岳治国,余兴,刘贵华,等. 一次飞机冷云增雨作业效果检验[J]. 气象学报,2021,79(5):853-863.
- [10] 黄美元. 我国人工降水亟待解决的问题和发展思路[J]. 气候与环境研究,2011(5):3-10.
- [11] 苏正军. 含AgI焰剂成冰特性的实验研究[D]. 南京:南京信息工程大学,2008.
- [12] 李艳伟. 冷云催化剂及其在层状云催化增雨中的应用研究[D]. 南京:南京气象学院,2004.
- [13] 金凤岭,张晰莹,张云峰,等. 新一代飞机人工增雨作业指挥系统研制与应用[J]. 气象科技,2006(4):470-473.
- [14] 黄毅梅,周毓荃,刘金华,等. 人工增雨可播区域自动选择方法研究[J]. 气象,2008,34(7):110-115.
- [15] 张瑞波,刘丽君,钟小英,等. 利用新一代天气雷达资料分析飞机人工增雨作业效果[J]. 气象,2010,36(2):70-75.
- [16] 黄彦彬,姚展予,游积平,等. 基于“.NET”的华南区域人工增雨效果统计检验共享平台的设计与实现[J]. 气象,2011,37(6):727-734.
- [17] 余兴. 层状云增雨催化剂用量的估算[J]. 陕西气象,2004(1):1-4.
- [18] 余兴,王晓玲,戴进. 过冷层状云中飞机播云有效区域的模拟研究[J]. 气象学报,2002,60(2):205-214.
- [19] 王俊,王庆,龚佃利. 飞机增雨作业“8”字型航线设计探讨[J]. 干旱气象,2018,36(1):136-140.