

秦彦硕,段英,李二杰,等. 2015. 河北大茂山碘化银地面发生器增雪作业影响分析. 气象, 41(2):219-225.

# 河北大茂山碘化银地面发生器增雪作业影响分析<sup>\* 1</sup>

秦彦硕<sup>1</sup> 段 英<sup>1</sup> 李二杰<sup>2</sup> 刘世玺<sup>3</sup> 刘姝妹<sup>4</sup> 贾媛媛<sup>5</sup>

- 1 河北省人工影响天气办公室, 石家庄 050021
- 2 河北省气象服务中心, 石家庄 050021
- 3 中国气象局综合观测司, 北京 100081
- 4 吉林省辽源市气象局, 辽源 136200
- 5 河北省保定市唐县气象局, 保定 072351

**提 要:** 利用常规气象资料、MICAPS 资料和 NECP/NCAR 再分析资料, 结合高斯模拟, 分析了 2012 年 11 月 10 日唐县大茂山地基碘化银发生器增雪作业的作业条件。结果发现, 此次天气背景为自西南向东北移动的冷涡云系, 根据帕斯奎尔(Pasquill)稳定度分类法得出作业时间段大气处于中性层结状态; 高斯模式模拟得出, 有效的 AgI 浓度向上扩散范围高达 3.0 km; 作业点作业时段上空至 3.2 km 均处于上升气流区, 计算出作业点发生器出口温度 1.0℃。因冬季人工观测云底高度多为 2.5~3.0 km, 综合分析认为, 该作业点的选址是合适的, 此次作业条件较好, 可以将催化剂输送到云中, 起到催化作用。

**关键词:** 地基碘化银发生器, 高斯模拟, 作业条件

**中图分类号:** P481      **文献标志码:** A      **doi:** 10.7519/j.issn.1000-0526.2015.02.010

## Analysis on Effect of Snow Enhancement by Silver Iodide Generator on the Ground Surface over Mountain Damao of Hebei

QIN Yanshuo<sup>1</sup> DUAN Ying<sup>1</sup> LI Erjie<sup>2</sup> LIU Shixi<sup>3</sup> LIU Shumei<sup>4</sup> JIA Yuanyuan<sup>5</sup>

- 1 Weather Modification Office of Hebei Province, Shijiazhuang 050021
- 2 Meteorological Service Center of Hebei Province, Shijiazhuang 050021
- 3 Department of Integrated Observations of CMA, Beijing 100081
- 4 Liaoyuan Meteorological Office of Jilin Province, Liaoyuan 136200
- 5 Tangxian Meteorological Station of Hebei Province, Baoding 072351

**Abstract:** Based on conventional observational data, MICAPS data and NECP/NCAR Reanalysis data, together with the Gaussian simulation method, snow enhancement operation conditions on 10 November 2012 by the ground-based silver iodide (AgI) generator over Mountain Damao of Tangxian were analyzed. The result showed that the weather condition is cold vortex system moving from southwest to northeast. According to Pasquill stability classification, the atmospheric stratification is neutral during the operation process. The Gaussian simulation results showed that the effective concentration of AgI can diffuse up to 3.0 km. Moreover, the atmosphere is in the updraft from the surface to 3.2 km through the operation procedure. The atmospheric temperature at the height of the generator outlet is 1.0℃ by calculation. The cloud base height in winter by manual observation is between 2.5–3.0 km. Therefore, it is concluded that the position of operation site is appropriate and the operating conditions are suitable to deliver the AgI catalyst to the cloud as well.

**Key words:** ground-based AgI generator, Gaussian simulation, operating conditions

<sup>\*</sup> 河北省科学技术研究与发展计划项目(12220803D)和国家自然科学基金项目(40905058)共同资助  
2014 年 1 月 8 日收稿; 2014 年 9 月 3 日收修定稿  
第一作者: 秦彦硕, 主要从事大气物理与大气环境研究. Email: qys122006@126.com

引 言

在我国,采用飞机、高炮或火箭等作为运载工具,直接向云中某些部位播散催化剂进行人工增雨(雪)的技术已经持续了几十年(汪晓滨等,2005;吴万友等,2012;邹书平,2011;孙鸿聘等,2011;嵇磊等,2014),已成为我国各级政府防灾减灾、开发云水资源、保障农业丰收和国家粮食安全的重要措施之一。相对飞机(刘晴等,2013;王黎俊等,2013;陈小敏等,2014)、火箭等(李红斌等,2014)手段进行人工增雨(雪)作业而言,碘化银地基发生器具有作业成本低,指挥环节少,不受空域限制的优点(秦长学等,2003),但其安放位置和作业时机要求较高。申亿铭(1994)认为催化剂发生器的安放位置设计有两种方案,一是将其放置在距催化目标上风方十几千米到40千米左右的地方(视风速大小而定);二是放置在距影响区较近的山脊、山坡上或放置在催化剂目标周围,发生器放置的高度已接近云底或已在云中,这样产生的催化剂质点直接输送入云的过冷部位的可能性比较大。秦长学等(2003)认为把发生器设置在山体迎风坡可缩短催化剂入云输送距离,作业时机则是选择作业时段处于上升气流区。

利用地面发生器进行催化作业,主要研究其对地形云,特别是冬季地形云的影响(Geerts et al, 2010;Huggins et al,2007)。美国犹他州(Solak et al,2003)利用地面发生器采用历史目标和控制回归方法研究催化对下风向降水影响发现,影响范围可达150 km,目标区12月至次年3月降水量超出整个季度平均值的14%。受需求推动,近几年国内多个省区布设的地基碘化银发生器多达1000台,但基本上多没有开展前期有关问题的研究,有关作业技术的研究几乎是空白,导致安放位置及作业技术可能存在着随意性和不确定性。

本文结合业务需求,选择河北省特色农业代表性好的保定唐县大茂山作业点的地基碘化银发生器,针对主要降水天气条件下(以地形云为主)人工增雨的作业条件、作业技术进行综合性分析研究,在

论证该作业点选址是否科学的基础上,对作业时机、作业条件及其综合判别技术进行研究,以提高地基催化剂发生器增雨作业技术的科学性。本文重点介绍了研究地基碘化银发生器2012年11月10日增雪作业情况,对该个例的催化剂扩散进行了模拟研究,并对其作业条件进行了初步分析。

1 地基发生器简介及资料来源

保定唐县使用的是江西新余 BDCW40-1 型号的地基碘化银发生器(具体性能参数见表1)。此次作业过程作业时间段为2012年11月10日08:10—11:30,总共燃烧9根烟条,有效催化时间累计1.8 h,但由于点燃每根烟条之间的间隔时间不固定,并不一定在前一根燃烧12 min后后立即点燃下一根,所以此次作业过程共耗时为3小时20分。作业人员使用中心计算机或手机采用无线通讯方法,远程控制终端,根据对当时的云况及移动方向设定烟管点火时间、点火数量,燃烧催化剂,通过烟炉将催化剂释放在空中,并在上升气流的作用下抬升到云中,达到增雨(雪)的作用。发生器安装位置及作业情况如图1所示。根据发生器工作原理,地基碘化银发生器在作业过程中,可将催化剂焰剂从一定口径在一定时间内连续释放,符合点源排放规律。

在影响河北省自然降水特征的不同类型天气系统研究(游景炎等,1994;吴志会等,2005)中发现,冬季对降水量贡献较大且适宜进行人工增雨催化的主要天气系统为西风槽、冷锋及回流天气。保定市及其周边县位于河北省中部,西邻太行山地,其中大茂山位于唐县、阜平及涞源三县交界处,离唐县西北75 km处,最高海拔1898 m,作业点(39.033°N、114.483°E)设置在大茂山区东部的一个迎风坡上,海拔962 m。受西风槽天气系统的影响,作业点地区的主导风为偏西方向,使得保定市及其周边县市处于作业点的下风向。冬季冷锋过境时,往往伴随偏北风,温度下降,阜平唐县等地处于作业点下风向。回流天气下作业区域受到东北平原南下的冷空气影响,经渤海以偏东路径侵入华北平原,冬季往往

表 1 地基碘化银发生器性能参数表

Table 1 Main operating specifications of the ground-based AgI generator

烟炉地点	烟炉型号	最大 装载数	实际 装载数	每根烟条 重量/g	每根烟条 AgI 含量/g	烟条燃烧 时间/min	烟囱高度 /m	海拔高度 /m
唐县大茂山	江西新余 BDCW40-1	40	40	3200	40	12	6	962

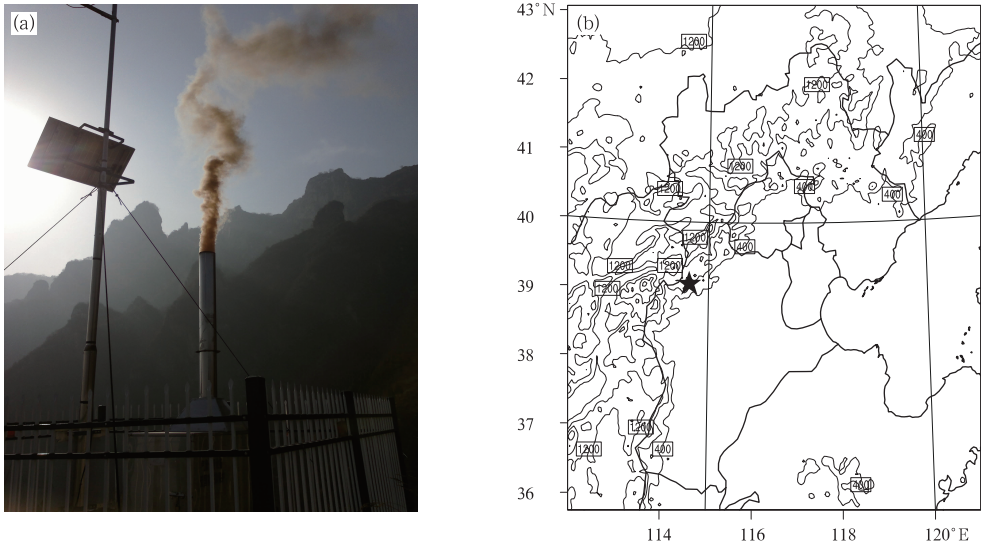


图 1 碘化银发生器示意图(a),地形高度图(b,单位:m,五角星为作业点地理位置)  
Fig. 1 Schematic of AgI generator (a), terrain height  
(b, unit: m, ★: the location of the operation site)

造成暴雪,但该地区主要受到偏东大风影响,此时东部县市处于作业点上方向,涞源等地处于下风向。此外,选择大茂山区的一个迎风坡架设,有利于借助地形对气流的抬升而形成上升气流(秦长学等, 2003)。

本文研究所采用的是大茂山地基碘化银发生器进行作业的资料,所需气象资料(如风、温等)取距离作业点最近的四要素自动气象站(大约 13 km,海拔 703 m)观测值,云量资料来自唐县气象站 6 h 一次的人工观测,海拔 73.4 m。探空资料来自美国国家环境预报中心(NCEP)和国家大气中心(NCAR)的全球再分析资料(赵天保等,2004)。

2 研究方法

本文研究思路:先将地面气象及对应探空资料输入 Aermოდ 软件(杨多兴等,2005),对作业时间的气象条件进行统计分析,同时采用帕斯奎尔(Pasquill)稳定度分类法得出不同时间段的大气稳定度状况;再利用高斯公式(申亿铭,1994)及 P-G 经验式(蒋维楣等,2004)计算扩散曲线。

2.1 Aermოდ 软件简介

Aermოდ 模型是以扩散统计理论为出发点,假设污染物的浓度分布在一定范围内符合正态分布,采用高斯扩散公式建立起来的稳定状态烟羽模型

(杨多兴等,2005)。没有涉及干、湿沉降方面的影响,但引入行星边界层等最新的大气边界层和大气扩散理论。该模型可用于多种排放源(包括点源、面源和体源)的排放,也可对乡村环境和城市环境、平坦地形和复杂地形、地面源和高架源等多种排放扩散情形进行模拟(Perry,1998;王伟平等,2002)。

2.2 计算方法

2.2.1 高斯公式

$$q = \frac{Q}{2\pi\sigma_y\sigma_zu} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) \times \left\{ \exp\left[-\frac{(z-H)^2}{2\sigma_z^2}\right] + \exp\left[-\frac{(z+H)^2}{2\sigma_z^2}\right] \right\} \quad (1)$$

式中, $q$  为实际催化剂扩散浓度(单位: $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ), $Q$  为排放源核生成率(个 $\cdot \text{s}^{-1}$ ), $\sigma_y$  和  $\sigma_z$  分别为  $y$  和  $z$  轴方向上催化剂质点浓度分布的均方差,即扩散参数, $u$  为  $x$  轴上的分风速, $H$  为源高。

2.2.2 发生器排放出口风速计算

由于地基发生器所在站点没有风速的实际测量值,所以采用最近的自动站对应时间观测的风速,推算到发生器所在高度的风速。实际工作中用的较多的方法是指数律和对数律公式(李宗凯等,1985),而对数律只适用于大气中性平衡或接近中性平衡及高度较低的情况下;指数律公式中幂指数  $m$  的变化反映大气层结的变化,可以推广到非中性大气中(植石群等,2001),适用的高度范围更高。因此本文研究

采用指数律(蒋维楣等,2004)进行计算。

作业时段大气稳定度扩散级别的判定方法:首先根据当地经纬度和作业时间计算出太阳高度角,再结合观测云量和地面风速确定太阳辐射等级(具体计算公式见蒋维楣等,2004),最后根据帕斯奎尔(Pasquill)稳定度分类法,判定出本次作业时间段 10 日 08:10—11:30 内的大气层结处于中性稳定度  $D$ 。根据附近自动站观测的风速,采用风速幂指数法计算烟囱口风速值(图 2),幂指数  $m$  取值 0.15,作业时间段烟囱口风速大部分时间维持在  $0.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  范围,其中 11:00 风速增大为  $1.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  左右;温度波动较小,约为  $1^\circ\text{C}$ 。进一步根据大气温度递减率计算出  $0^\circ\text{C}$  层高度为 1122 m。

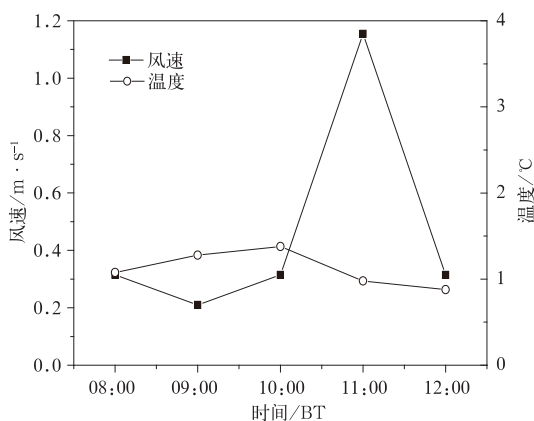


图 2 2012 年 11 月 10 日作业时间段内烟囱口处的风速及温度演变

Fig. 2 Evolution of wind speed and temperature of the generator outlet during the operation process on 10 November 2012

### 2.2.3 抬升高度

源高  $H$  为有效源高,包含排放源一如烟囱的自然高度  $h$  和烟流的抬升高度  $\Delta h$ ,即有

$$H = h + \Delta h \quad (2)$$

式中抬升高度  $\Delta h$  采用国家标准抬升公式(蒋维楣等,2004)。根据图 2 中实测风速值判断,符合静风和小风( $U_{10} < 1.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ )类别,计算此时烟气抬升高度  $\Delta h(\text{m})$ 。

碘化银发生器烟筒几何高度约为 6 m,出口直径 0.5 m,参照国家烟囱设计规范中确定的典型烟源数据(谷清等,2002),假设出口烟速  $5.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。根据国家标准公式计算出烟气热释放率为  $57.2 \text{ kJ} \cdot \text{s}^{-1}$ ,抬升高度为 65.8 m,即烟气的有效高度为 71.8 m。

## 3 结果分析

### 3.1 催化剂扩散模拟分析

选取 2012 年 11 月 10 日利用唐县大茂山碘化银发生器进行增雪作业的个例进行模拟研究。在研究大气扩散时,大气层级的稳定度是很重要的因素。不同的稳定度条件,对作业发生器气流中碘化银的扩散能否进入云中有显著的影响。依据修订帕斯奎尔分类法(简记 P·S)判断出此次作业大气处于中性层结状态。

根据  $2 \text{ m}^3$  云室(酆大雄,1995)对 BR-91-Y 型碘化银高效焰条进行成核率实验的结果,  $-5^\circ\text{C}$  时成核率达到  $10^{13} \text{ 个} \cdot \text{g}^{-1}$ ,  $-10^\circ\text{C}$  达到  $10^{15} \text{ 个} \cdot \text{g}^{-1}$ ;利用 CAMS1 $\text{m}^3$  等温云室对 5 种不同含 AgI 配方的烟条检测结果表明,一般  $-5^\circ\text{C}$  时成核率达到  $10^{11} \text{ 个} \cdot \text{g}^{-1}$ ,  $-10^\circ\text{C}$  达到  $10^{14} \text{ 个} \cdot \text{g}^{-1}$ (苏正军,2008)。此次作业碘化银排放量为  $0.056 \text{ g} \cdot \text{s}^{-1}$ ,本文按 AgI 成核率  $10^{14} \text{ 个} \cdot \text{g}^{-1}$  进行模拟计算,那么该发生器可产生人工冰核  $5.6 \times 10^{12} \text{ 个} \cdot \text{s}^{-1}$ ,作业燃烧 9 根碘化银焰条,可产生人工冰核约  $3.6 \times 10^{16}$  个。

图 3 为 10 日作业催化剂垂直及水平扩散图。该作业点位于大茂山上,海拔 962 m,作业时烟气有效高度为 71.8 m,从而得出模拟时点源高度为 1033.8 m。图中催化剂的分布以相对浓度  $Q^*$  表示:

$$Q^* = Q/Q_0 \quad (3)$$

式中  $Q_0 = 10^3 \text{ 个} \cdot \text{m}^{-3}$ ,为云中冰核最佳浓度。其中相对浓度 1.0 代表催化剂浓度  $10^3 \text{ 个} \cdot \text{m}^{-3}$  的分布。

11 月 10 日作业过程中大气稳定度处于中性层结状态,从垂直扩散图中看出,有效的 AgI 浓度( $10^3 \text{ 个} \cdot \text{m}^{-3}$ )向上扩散范围高达 3.0 km,浓度为  $10^5 \text{ 个} \cdot \text{m}^{-3}$  的 AgI 可垂直扩散到高 2.3 km,水平影响范围达 100 km。在垂直 800~1500 m、水平 25 km 范围有  $10^7 \text{ 个} \cdot \text{m}^{-3}$  催化剂高浓度分布区。水平扩散图表明催化剂扩散到地面的高浓度  $10^4 \text{ 个} \cdot \text{m}^{-3}$  可扩散到水平 40~100 km 范围。北京市 10 月至次年 4 月  $0^\circ\text{C}$  层高度月平均值低于 2560 m(秦长学等,2003),10 日大茂山作业点上空  $0^\circ\text{C}$  层位于 1122 m 处,唐县 11 月至次年 4 月产生降水(雪)的多为 2500~3000 m 的蔽光性层云,所以设置在大茂山上的碘化银发生器催化作业可扩散至云底,其选址是合适的,在冬季进行增雨(雪)作业是可行的。



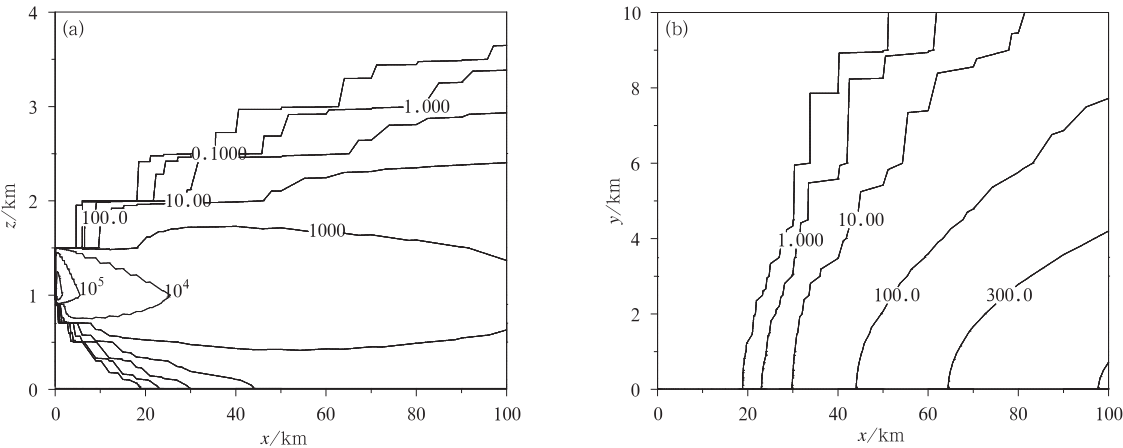


图 3 催化剂垂直(a)及水平扩散(b)图  
Fig. 3 Vertical (a) and horizontal (b) diffusions of AgI

3.2 作业条件分析

选取 2012 年 11 月 10 日利用唐县大茂山碘化银发生器进行增雪作业的个例进行模拟研究,天气背景为自西南向东北移动的冷涡云系,形成的稳定性降雪过程。降雪实况显示,唐县地区 24 h 降雪量达到 8 mm,为中到大雪;降雪最早出现在 10 日 01 时,持续至 16 时结束,增雪作业时间 08:10—11:30,处于降水云系的发展成熟期的中后期。

11 月 10 日 08 时 500 hPa 高空图看出这次天气过程为典型的西风槽形势,河套地区存在一低槽,伴随有-35℃的冷中心与之配合。温度槽落后于高度槽,低槽不断加强,并在东移的过程中与南支槽同位相叠加,贯穿中国内蒙古、陕西及湖南等地。此时山西、河北等地处于槽前正涡度平流区,有利于上升运动加强,为降雪的发生和维持提供了良好的动力条件。此次高空系统较为深厚,低槽从高层 500 hPa 一直延伸至 850 hPa,并且呈后倾形势。700 hPa 天气图上,11 月 10 日 08 时低压槽已压至河北上空,随系统东移,槽后强劲的西北风引导冷空气从蒙古地区南下,影响华北平原,中西部平原地区风速从  $8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  增加至  $14\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,温度场跃至-4℃线以北。从 850 hPa 位势高度与风场综合图上看,11 月 10 日偏南暖湿气流与西北向干燥冷空气流构成一条较强低空切变带,逐渐压至河北地区上空,此时温度已低于 0℃。冷暖空气强烈交绥,有利于云的生成发展和降雪的进一步加强。此外,水汽是形成降水的必要条件,大气中水汽含量越高,越有利于形成较大降水,一般水汽主要集中在低层。850 hPa 的水汽输送与降水有直接的关系。从 850 hPa MICAPS

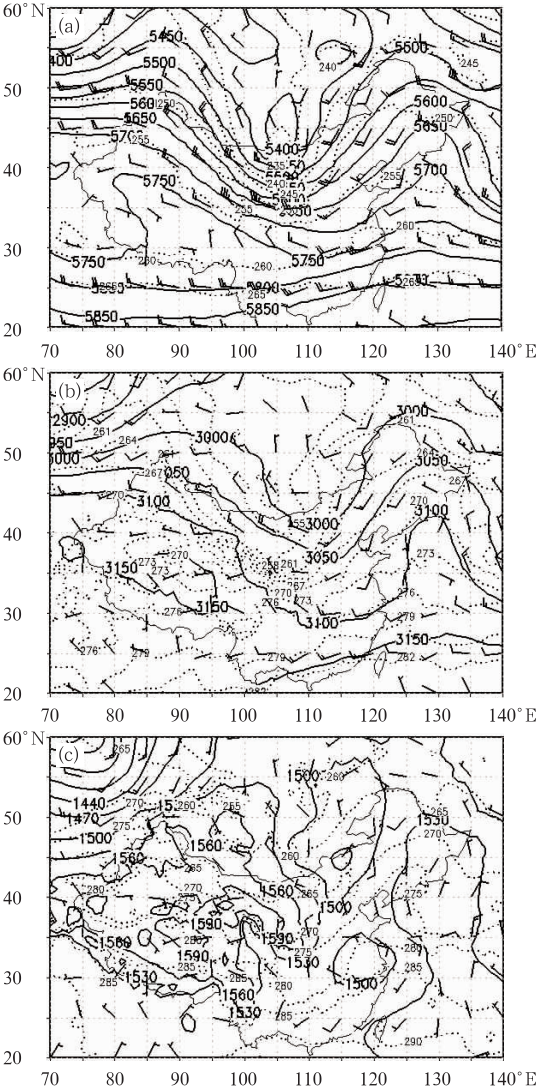


图 4 2012 年 11 月 10 日 08 时 500(a)、700(b)及 850 hPa(c)位势高度(单位:gpm)、温度及风场图  
Fig. 4 Geopotential height (unit: gpm), temperature and wind fields at 500 hPa (a), 700 hPa (b) and 850 hPa (c) respectively at 08:00 BT 10 November 2012

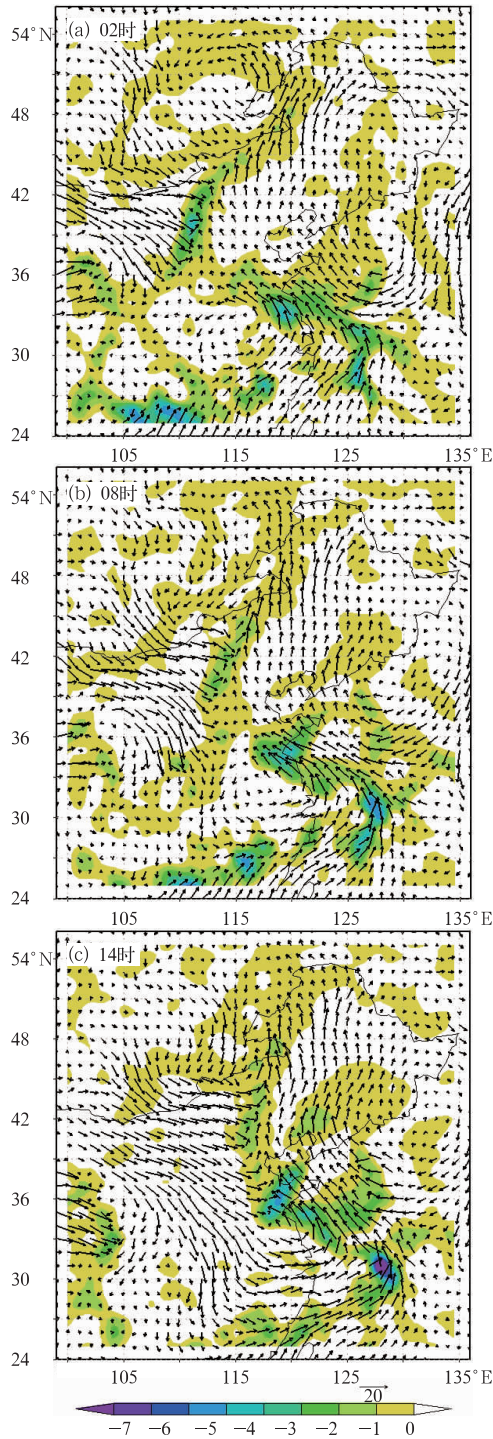


图 5 2012 年 11 月 10 日 02—14 时 850 hPa 水汽  
通量散度图(单位: $\text{g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1}$ )  
Fig. 5 Water vapor flux divergence field at 850 hPa  
from 02:00 to 14:00 BT 10 November 2012  
(unit:  $\text{g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1}$ )

水汽输送场图(图略)来看,低空存在一致的偏南气流,携带水汽从东海、黄海上空源源不断输送至河北平原地区,水汽通量场上对应一条纵贯南北的水汽

输送带。并受西部切变线的作用,水汽在华北平原上空积聚,为降雪的发生和维持提供有利的水汽条件。

在分析降水成因时,不仅需要分析水汽的来源,还要进一步考虑不同方向输送的水汽集中程度,即水汽通量散度  $A$ 。图 5 为 NCEP 实测的 11 月 10 日 02—14 时 850 hPa 水汽通量散度变化图。通过分析可看出,850 hPa 低空东南气流带来了充沛的水汽,西北气流和东南气流交汇处对应一带状水汽通量辐合区。08 时辐合区东移,正好处于大茂山区域,继而产生降雪。14 时水汽辐合带继续向东,移出大茂山地带。可见 08 时作业时水汽条件比较好,此时作业,受到西北气流影响,有利于催化作业后的云系向东发展移动,对东部保定地区的降水产生影响。

当碘化银地面发生器将催化剂释放到大气中,影响催化剂进入云内的关键是作业时间段作业点是否处于上升气流区(秦长学等,2003),即大气运动状态直接影响催化剂垂直输送能力。利用 NCEP 资料,图 6 给出了 11 月 10 日 02—14 时大茂山作业点( $39.033^\circ\text{N}$ 、 $114.483^\circ\text{E}$ )大气的垂直速度廓线图,其中  $W < 0$  时表示大气具有辐合上升气流, $W > 0$  表大气辐散下降。10 日作业点 02 时从地面到 2.2 km

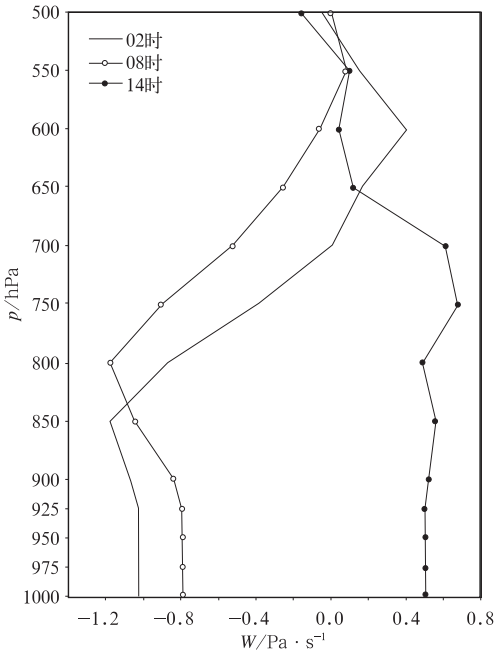


图 6 2012 年 11 月 10 日大茂山作业点  
垂直速度廓线图  
Fig. 6 Vertical velocity profiles at Mountain  
Damao on 10 November

(700 hPa)范围内大气辐合上升,最大上升气流位于850 hPa,为 $-1.2 \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$ ;到了08时大气对流加强,上升气流区增大至海拔高度3.2 km(600 hPa),最大上升气流位于800 hPa,为 $-1.2 \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$ ,海拔高度位于作业点烟囱口高度附近,相比02时,800 hPa以上同一气压高度具有的大气垂直速度增强;而到了14时大气低空主要处于下沉气流区。根据唐县气象站人工观测冬季蔽光性层云云底高度大多处于2700~3000 m。综合分析可见,当日选择08:10—11:30时开始作业,作业时机较好。

## 4 结 论

本文首先介绍了研究地基碘化银发生器增雪过程的处理方法,并选取2012年11月10日唐县大茂山增雪作业的个例进行模拟研究,分析其作业条件。

(1) 先利用Aermod软件对作业时间段的气象条件进行统计分析,采用帕斯奎尔(Pasquill)稳定度分类法得出该时间段的大气稳定度状况;再利用高斯公式及P-G经验式计算扩散曲线,其中风速采用指数律公式,抬升高度根据国家标准抬升公式。

(2) 通过对2012年11月10日唐县大茂山碘化银发生器进行增雪作业的个例进行模拟研究发现,此次天气背景为自西南向东北移动的冷涡云系,作业时间段大气处于中性层结状态,利用高斯模式模拟得出,有效的AgI浓度为 $10^3 \text{ 个} \cdot \text{m}^{-3}$ 向上扩散范围高达3.0 km,水平影响范围达100 km。

(3) 从天气图及流场图看出,此次作业过程中作业点主要受到槽前西北气流控制,有利于催化作业后的云系向东发展移动,同时受南部切变线影响,水汽源源不断地输送到本地,形成水汽辐合区,对降水产生和维持提供了动力及水汽条件。计算作业点作业时段上空至3200 m均处于上升气流区,并计算出作业点实时温度 $1.0^\circ\text{C}$ ,冬季人工观测云底高度多为2500~3000 m,综合分析此次作业条件较好,可以将催化剂输送到云中,起到催化作用。

(4) 分析结果表明,设置在大茂山上的碘化银发生器,其选址是合适的,对此次冬季降雪进行增雪作业是可行的。实际业务中,为了有效地催化作业,每个地区应根据当地地形及盛行风特点进行地基催化选址作业;在充分研究多年不同类型天气形势基础上,选择最佳作业时机。

## 参考文献

陈小敏,邹倩,廖向花. 2014. 两次飞机增雨作业过程数值模拟分析.

- 气象,40(3):313-326.
- 鄧大雄. 1995. 高效碘化银焰火剂及其成冰性能的研究. 气象学报,53(1):82-90.
- 嵇磊,周珺,李宏宇,等. 2014. 基于BJ RUC系统的人影冷云催化潜力识别模式平台设计. 气象,40(8):981-991.
- 蒋维楣,孙鉴宇,曹文俊,等. 2004. 空气污染气象学教程(第二版). 北京:气象出版社. 302.
- 谷清,李云生. 2002. 大气环境模式计算方法. 北京:气象出版社. 188.
- 李红斌,张殿刚,张靖萱,等. 2014. 大连市火箭人工增雨流动作业技术与业务流程. 气象,40(10):1271-1278.
- 李宗凯,潘云仙,孙润桥,等. 1985. 空气污染气象学原理及应用. 北京:气象出版社. 82-105.
- 刘晴,姚展予. 2013. 飞机增雨作业物理检验方法探究及个例分析. 气象,39(10):1359-1368.
- 秦长学,杨道侠,金永利. 2003. 碘化银地面发生器增雨(雪)作业可行性及作业时机选择. 气象科技,31(03):174-178.
- 申亿铭. 1994. 云中催化剂的扩散. 北京:气象出版社. 359.
- 苏正军. 2008. 含AgI焰剂成冰特性的实验研究. 南京信息工程大学博士研究生学位论文. 124.
- 孙鸿娉,李培仁,闫世明. 2011. 华北层状冷云降水微物理特征及人工增雨可播性研究. 气象,37(10):1252-1261.
- 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分析. 大气科学. 37(5):1038-1058.
- 汪晓滨,张蕾,陈跃,等. 2005. 新型AgI末端燃烧器在北京飞机增雨作业中的使用分析. 气象,31(07):54-58.
- 王伟平,苏高利,杨海鹏. 2002. 城北高架点源对西湖风景区影响的研究. 气象,28(1):13-17.
- 吴万友,黄芬根,宾振. 2012. 移动式人工增雨作业技术支撑系统的设计与实现. 气象,38(10):1288-1294.
- 吴志会,段英,张晶,等. 2005. 不同降水天气系统自然降水特征及火箭人工增雨潜力分析. 气象科技,33(S1):14-20.
- 杨多兴,杨木水,赵晓宏,等. 2005. AERMOD模式系统理论. 化学工业与工程,22(2):130-135.
- 游景炎,段英. 1994. 云降水物理与人工增雨技术研究. 北京:气象出版社. 295.
- 赵天保,艾丽坤,冯锦明. 2004. NCEP再分析资料和中国站点观测资料的分析与比较. 气候与环境研究,9(2):278-294.
- 植石群,钱光明. 2001. 广东省沿海风能的分析及计算. 气象,27(5):43-46.
- 邹韦平. 2011. 地面人工增雨防雹作业信息采集系统. 气象,37(3):369-372.
- Geerts B, Miao Q, Yang Y, et al. 2010. An airborne profiling radar study of the impact of glaciogenic cloud seeding on snowfall from winter orographic clouds. J Atmos Sci,67(10):3286-3302.
- Huggins A W. 2007. Another wintertime cloud seeding case study with strong evidence of seeding effects. J Wea Modif,39:9-36.
- Solak M E, Yorty D P, Griffith D A. 2003. Estimations of downwind cloud seeding effects in Utah. J Wea Modif,35(1):1-7.
- Perry S. 1998. AERMOD description of model formulation. AMS/EPA Regulatory Model Improvement Committee.