

层状云中飞机人工增雨作业间距的研究

余 兴 戴 进

陕西省气象科学研究所, 西安 710015

摘 要 利用数值试验方法, 设计了 4 km, 8 km 和 20 km 三种飞机增雨播云间距方案, 研究了不同间距对有效区域的影响。从结果分析发现, 实际形成的播云线受水平风场输送作用, 与设计的航线产生了偏离; 不同播云间距形成的投影有效面积、有效作用时段不同, 其时空分布及投影有效面积所对应的地面位置也不尽相同。另外, 提出了增雨效益的数学表达式。效益分析表明, 在相同作业条件下, 8 km 间距的增雨效益比 20 km 间距提高 31%, 比 4 km 间距提高了 23%, 4 km 间距比 20 km 间距提高 6%, 其物理原因主要是并合作用。最后, 针对交叉和平行播云方案, 提出了设计最佳播云间距的数学表达式。

关键词 数值模拟 播云间距 增雨效益 并合作用 飞机人工增雨

文章编号 1006-9895(2005)03-0465-10

中图分类号 P426

文献标识码 A

Investigation of Cloud Seeding Interval for Precipitation Enhancement by Aircraft within Stratiform Clouds

YU Xing and DAI Jin

Meteorological Institute of Shaanxi Province, Xi'an 710015

Abstract Three cloud seeding intervals frequently used in precipitation enhancement by aircraft within stratiform clouds are designed to investigate their effects on effective range by using numerical simulation. The simulated seeding lines deviate from the designed line due to transport by horizontal wind fields. The different seeding interval leads to diversified projective effective area and duration, whose tempo-spatial distribution and corresponding surface position are variable. Enlargement or reduction of seeding interval does not mean to simply and synchronously amplify the effective area and duration, but amalgamation of seeding lines can extend the effective duration. Also a mathematical formula of benefit for precipitation enhancement is developed. Under the same operational conditions, the benefit of 8 km interval is 31 percent higher than that of the 20 km, and 23 percent higher than that of the 4 km. Finally, a set of mathematical expression of seeding interval is formulated for cross and parallel seeding schemes from the view of physical cause.

Key words numerical simulation, seeding interval, benefit for precipitation enhancement, amalgamation, precipitation enhancement by aircraft

1 引言

近年来, 我国人工增雨作业范围、次数、投入经费有了很大的提高, 为了确定适宜的作业云体和天

气背景, 开展了相应的研究^[1], 建立了一系列作业指标与判据, 以提高选择作业云体、部位、时机的准确性, 然而, 在此基础上, 采用不同的播云方法将产生不同的增雨效果。因此, 研究播云方法也是提高

人工增雨作业效果的需要。对于积云增雨,使用地面 AgI 燃烧炉或飞机 AgI 燃烧筒,主要是在云底附近播撒催化剂,依靠上升气流携带催化剂入云,使其到达云中液水含量的高值区和催化剂所需核化温度对应的高度上^[2~5]。因此,这类播云方法研究的重点是:催化剂能否进入作业云体,入云的催化剂成数有多少,能否到达云体的适宜部位。层状冷云是我国北方春秋旱季的主要人工增雨云系,大多使用飞机 AgI 燃烧筒作业,能够直接进入云体,到达适宜作业的部位播撒催化剂。所以,研究侧重于:催化剂在云内的输送扩散状况^[6, 7],播云产生的有效区域和有效作用时段^[8]如何变化,不同播云方案对有效区域的影响等。

目前,我国的层状云增雨在播云间距和播云剂量上存在着较为混乱的现象,一直未能引起足够重视。例如,播云间距有取 4 km、5 km、8 km 和 10 km,还有取十几甚至几十公里的,播云剂量和播云方向的确定也存在着较大的随意性等等。主要原因一是理论研究滞后,缺乏理论对实际的指导;二是云生成、发展、消亡过程中的复杂、多变、不确定性,使外场研究目前还很难获得完整的有说服力的客观依据,缺乏对播云方法影响的足够认识。

本文利用数值试验方法,结合有效区域模拟研究工作基础^[8],从模式理论研究播云间距对飞机增雨有效区域的影响,揭示播云间距在增雨中的作用,从理论上提出了增雨效益的计算公式和播云间距的数学表达式。

2 基本概念和数值模式

2.1 基本概念

这里讨论的增雨有效性是指:在适宜增雨作业的层状云中,对适宜部位进行播云,在云中形成了有明显作用的区域,称有效区域,有明显作用的时间称有效时间,以及有效区域所覆盖的宽度厚度为有效扩展宽度厚度等。有效区域之外,也有作用,而不是没有作用,只不过作用不如有效区域内明显。同样,有效时间之外也有作用。在人工增雨中,关键的作用因子是人工播撒入云的人工冰晶,其在云中的输送位置和扩散范围决定着增雨的落区和范围,也决定着有效区域的位置和范围。有效区域是对人工冰晶输送扩散状况某种程度的反映,两者存在一定的响应关系。有效性不是对某一高度上人工冰晶浓度的直观反映,很多高度的人工冰晶都

会参与云的作用,对增雨有效性有贡献,是对播云效应的反映。另外,由于人工冰晶参与了云的物理过程,引起云宏观与微观结构的变化,这种变化反映到降水产生了增雨现象。因此,增雨作用又是多种因素共同作用的结果,只不过人工冰晶起了决定性作用。分析时应抓住关键因子突出主要矛盾,即:抓住人工冰晶地面投影浓度关键因子,忽略一些过程(避免掩盖主要因子作用),分析探讨增雨有效性问题是合理的。理论上讲,要取得明显作用,人工冰晶的浓度至少要与云体本底冰晶浓度相当,一般要大 1 个数量级。国内外对降水层状云冰晶浓度探测结果大多集中在 $10^0 \sim 10^1 \text{ L}^{-1}$ 范围内,本文取有效区域对应的人工冰晶浓度大于 10^1 L^{-1} 范围。

有效面积:某一高度上人工冰核大于 10^1 L^{-1} 的面积,它的大小表示云中此高度有效增雨作用区的大小。

投影有效面积(S):某一时刻负温区各高度层上有效面积在地面上的垂直投影,其大小表示此刻增雨作业在地面上形成的有效面积。是计算增雨量和效益时需要的一个关键物理量。

有效体积(V):某一时刻人工冰核大于 10^1 L^{-1} 的体积,它的大小表示此刻云中有效区域的体积。

有效扩展宽度(W_{eff}):某一时刻投影有效面积与其贡献线长的比,它的大小表示此刻有效区在水平面上的平均扩展宽度,它对于播云间距有指导意义。

有效作用时段(T_{eff}):产生有效增雨作用的主要时段,是根据 S , V 和 W_{eff} 等的大值时段综合分析得出。

2.2 烟团轨迹模式

模拟系统由一个三维时变烟团轨迹模式和一个三维细网格非静力模式组成。

烟团轨迹模式是用一系列分离的烟团来表征播云线上的催化剂。为了进一步考虑垂直风切变对扩散的影响,每个烟团又在垂直方向上分成七个子烟团。假定各子烟团内部的浓度分布为高斯型。

t 时刻任一子烟团中心的风场分量分别为 $u(t, x', y', z')$, $v(t, x', y', z')$, $w(t, x', y', z')$, 则在 $t + \delta t$ 时刻,此子烟团的位置为

$$x_s(t + \delta t) = x'(t) + u(t, x', y', z')\delta t, \quad (1)$$

$$y_s(t + \delta t) = y'(t) + v(t, x', y', z')\delta t, \quad (2)$$

$$z_s(t + \delta t) = z'(t) + w(t, x', y', z')\delta t, \quad (3)$$

式中, δt 为计算时步。 $t + \delta t$ 时刻水平扩散参数 σ_y 和垂直扩散参数 σ_z (单位: m) 为

$$\sigma_y^2(t + \delta t) = \sigma_y^2(t) + 2K_y(t, x_s, y_s, z_s)\delta t, \quad (4)$$

$$\sigma_z^2(t + \delta t) = \sigma_z^2(t) + 2K_z(t, x_s, y_s, z_s)\delta t, \quad (5)$$

式中 K_y , K_z 分别为水平和垂直的湍流扩散系数。

t 时刻 m 烟团 $n(1, 2 \cdots 7)$ 子烟团浓度分布为

$$C(t, x, y, z)_{n_m} = \frac{Q_n}{(2\pi)^{3/2} \sigma_x^2 \sigma_y^2 \sigma_z^2} \cdot \exp\left[-\frac{(x-x_s)^2}{2\sigma_x^2} - \frac{(y-y_s)^2}{2\sigma_y^2} - \frac{(z-z_s)^2}{2\sigma_z^2}\right], \quad (6)$$

其中, x_s, y_s, z_s 为子烟团的位置, H 为云顶高度(单位: m), x, y, z 为网格坐标, Q_n 为 n 子烟团含 AgI 粒子个数。在实际处理过程中是将变形的烟团理想化为一个大的椭球体, 把椭球体在垂直方向上分离成 7 个大小不等的子烟团, 由椭球积分得到 7 个子烟团的粒子数为

$$Q_1 = Q_7 = 0.020Q_T,$$

$$Q_2 = Q_6 = 0.136Q_T,$$

$$Q_3 = Q_5 = 0.220Q_T,$$

$$Q_4 = 0.248Q_T,$$

其中, Q_T 为烟团含 AgI 粒子个数。

某一时刻浓度的计算为: 首先, 确定该时刻在模拟域内每一个子烟团的位置, 其次, 根据(6)式计算其浓度空间分布, 最后叠加得到该时刻浓度的空间分布。

2.3 三维非静力模式

为了引进下边界的地形作用, 对垂直坐标做如下变换,

$$z^* = h_d \frac{z - z_g}{h_d - z_g},$$

其中, z^* 为变换后的垂直坐标, z 为笛卡尔坐标系中的垂直坐标, h_d 为模式顶高, z_g 为地形高度。经坐标变换后, 模式由包含速度分量、位温、水汽、湍能、耗散率的预报方程和滞弹性连续方程的三维非静力控制方程组构成, 详细的方程组和计算方法见参考文献[6, 7]。

3 播云试验

3.1 播云试验方案

以有效区域模拟研究^[8]个例(1998 年 4 月 11 日飞机增雨作业)为试验背景场, 利用 4 月 11 日 08 时(北京时, 下同)高空和地面资料输入到三维非静力模式中, 预报出各时刻的风场和湍流场, 再输入到烟团模式中, 作为烟团模式的背景场, 计算催化剂浓度的分布与演变。

考虑到催化剂输送扩散需要很细网格才能分辨

出其主要特征, 取模式的水平范围为(33°24'N~36°06'N, 107°25'E~110°41'E), 即 300 km×300 km。水平格距 1 km, 垂直格距 0.2 km, 积分时步 10 s。为了保持与 1 次飞机增雨的一致性, 试验中取: An-26 飞机的飞行速度为 420 km·h⁻¹, AgI 催化剂的撒播速率为 900 g·h⁻¹, 播云线简单地取为 6 条与 y 轴(南北向)平行、每条线长 84 km(播云 12 min)的直线(见图 1), 即 AB, CD, EF, GH, IJ, MN 6 段, 总线长为 504 km, 共 72 min, 耗 AgI 1080 g, 催化剂源强为 0.25×10¹³ s⁻¹(取-6℃时 AgI 的核化率为 10¹³ g⁻¹)。播云从 14 时、A 点($x=20$ km, $y=80$ km)开始, 15 时 12 分、N 点结束, 播云高度为 4.5 km, 08 时相应的 u, v 分别为 17.2 m·s⁻¹和 6.2 m·s⁻¹, 温度-6℃。选取 4 km, 8 km 和 20 km 3 种播云间距, 分别简称为方案 1, 2 和 3。

运用模式计算模拟域内 3 种播云间距条件下的

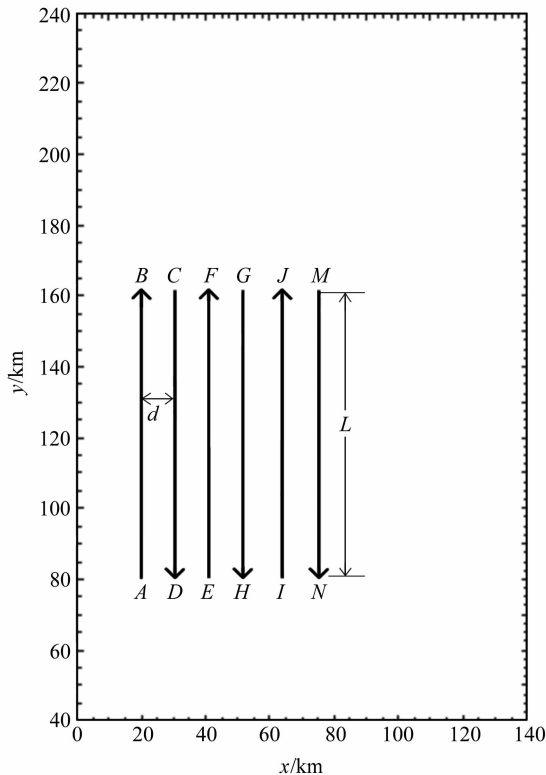


图 1 播云试验方案示意图。播云路线: AB, CD, EF, GH, IJ, MN; 播云线长: $L=84$ km; 总线长: 504 km; 播云总时间: 72 min; 播云间距: d

Fig. 1 Illustration of seeding interval scheme, the seeding starts from A to B straightly, and passes to C, D, E, F, G, H, I, J, and M, finishes at N. The total seeding length is 504 km in 72 minutes with each line length 84 km, and the seeding interval is d km between two seeding lines

催化剂输送扩散状况。模式中假定：(1)AgI 活化率为 100%，瞬间活化，即入云后立即活化成人工冰晶；(2)人工冰晶粒子为惰性粒子，即不考虑其与云中粒子的微物理过程。

3.2 试验结果分析

图 2、3、4 给出了方案 1、2、3 计算得到的 AgI 地面投影浓度分布部分结果，阴影区为有效区域。结果分析表明：

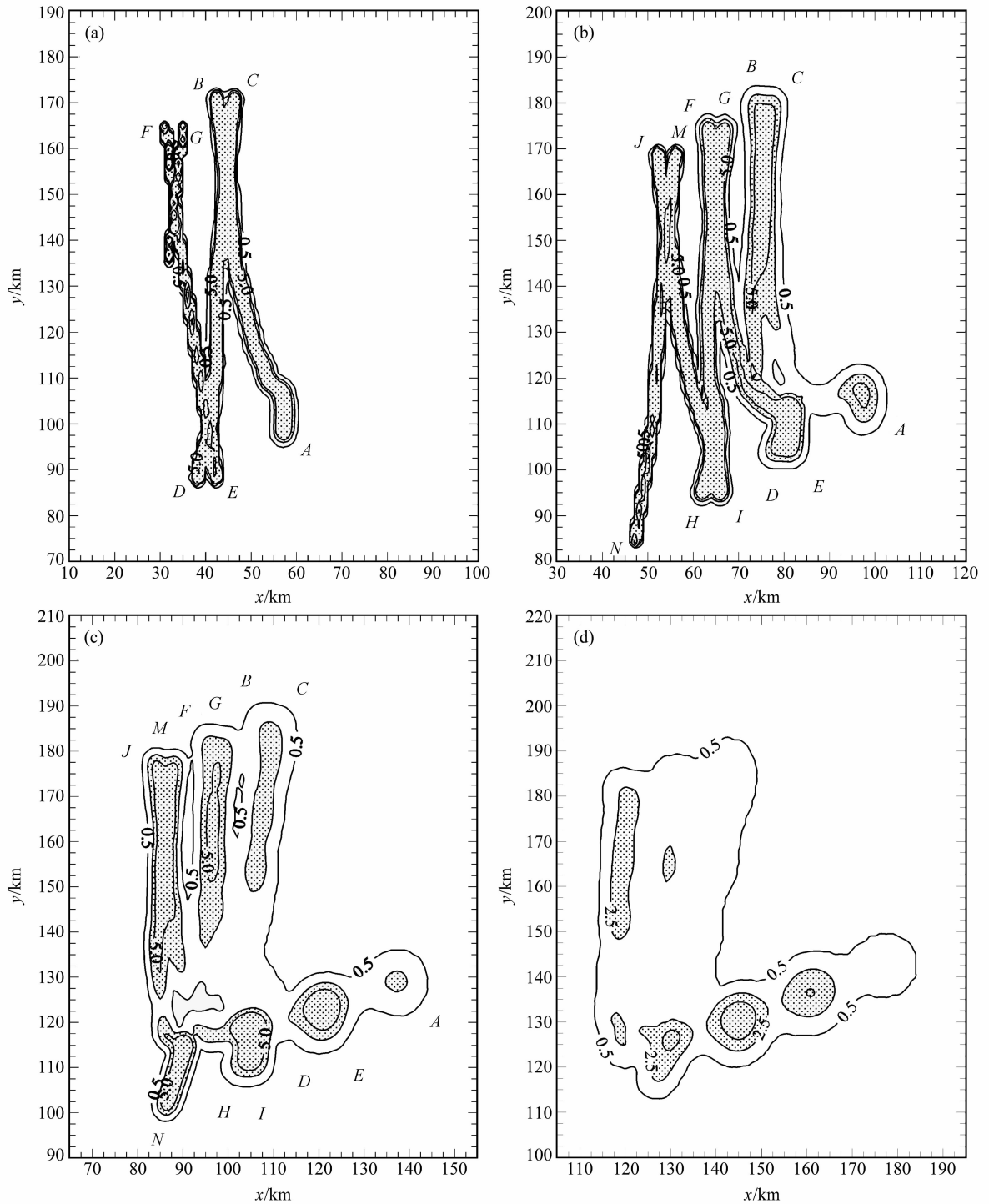


图 2 方案 1 计算得到的 AgI 地面投影浓度(单位: L^{-1})分布部分结果: (a) 40 min; (b) 80 min; (c) 120 min; (d) 160 min. 等值线间隔(单位: L^{-1})为 0.5, 2.5, 5, 50, 100 和 500

Fig. 2 Simulated distributions of AgI concentration (L^{-1}) projected on the surface after (a) 40 min, (b) 80 min, (c) 120 min, and (d) 160 min for seeding interval scheme 1, the intervals of concentration contour are 0.5, 2.5, 5, 50, 100, 500 L^{-1}

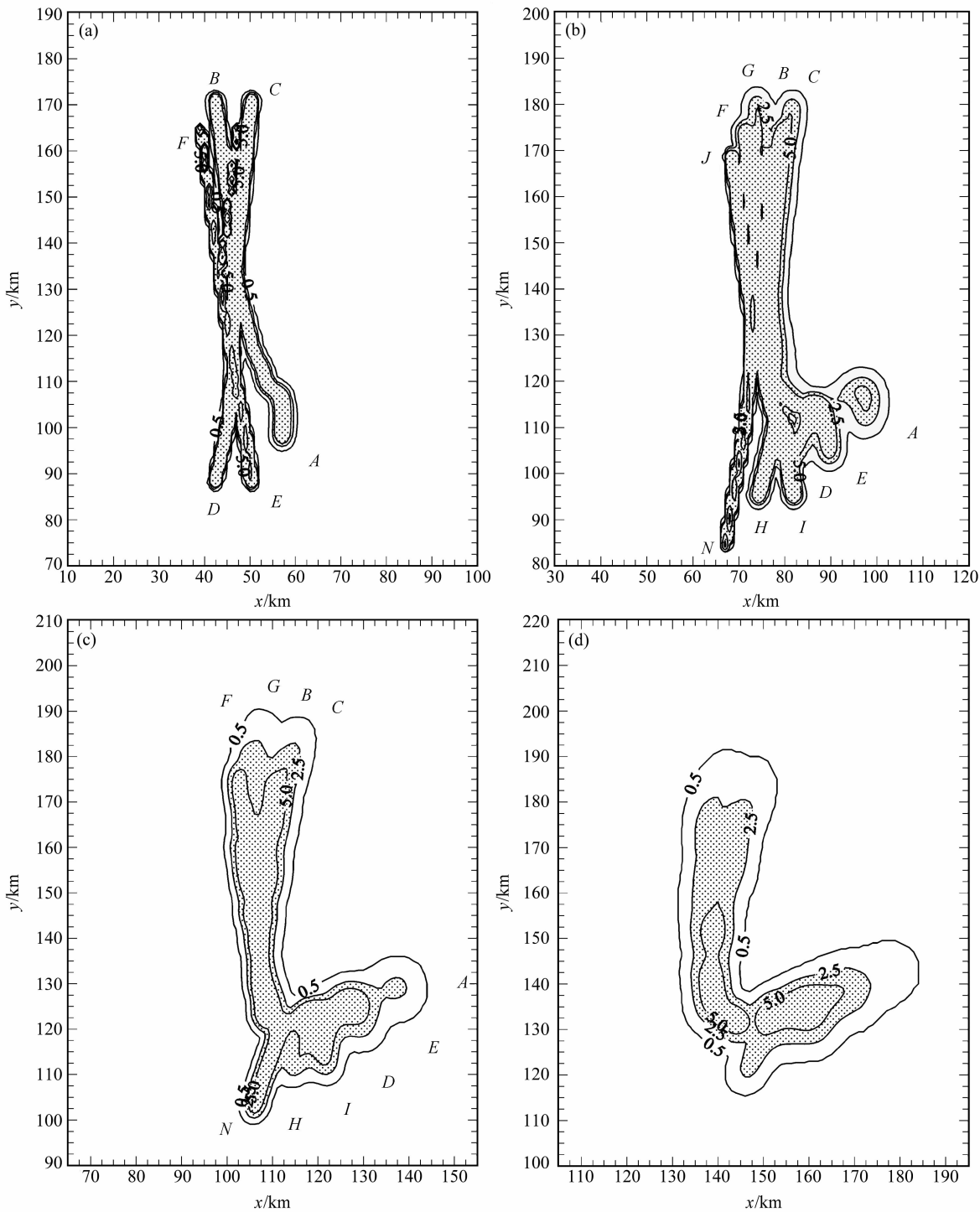


图 3 同图 2，但为方案 2 的结果

Fig. 3 The same as Fig. 2, but for seeding interval scheme 2

(1)每段播云线的模拟结果与设计的播云线一一对应，产生的投影有效面积也与之对应，但由于受水平风场输送作用的影响，每段播云线与设计的播云线都发生了偏离。例如，从南往北飞的播云线

向东南偏移，从北往南飞的播云线向东北偏移。同时，播云线端点间的连线(BM, AN)，并非如设计的那样呈东西向的水平线，而是斜线。这是因为播云期间，各点催化剂的入云时间不同，水平输送距

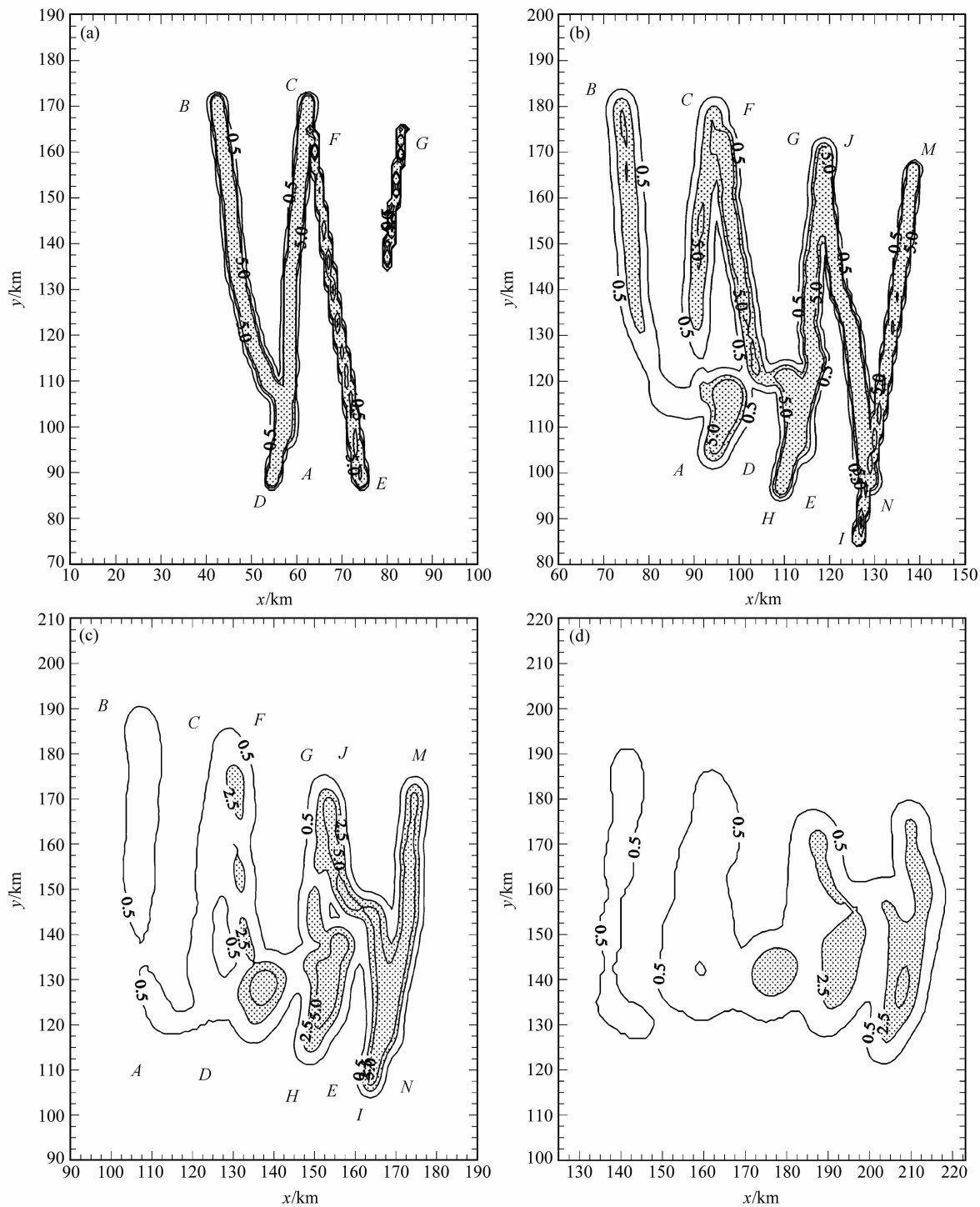


图 4 同图 2, 但为方案 3 的结果
Fig. 4 The same as Fig. 2, but for seeding interval scheme 3

离不同所致。这种偏离现象在设计播云航线时常被忽视, 实际工作中应予考虑, 特别是播云线较长时, 偏离会更大。

(2)播云线间呈相互交叉状, 播云间距不同,

交叉区域(播云线并合作用的中心位置)的位置不同。方案 1 的交叉区域位于播云线端点附近, 方案 2 的交叉区域位于播云线的中部区域, 方案 3 的交叉区域位于播云线端点。并合区越大, 有效面积的

重叠部分越大,致使投影有效面积早期(达到极值前)增长缓慢,后期减小也很缓慢,即并合区内投影有效面积的生命期明显大于非并合区。说明并合作用主要使有效作用时段增加。

(3)不同播云间距形成的投影有效面积、有效作用时段不同,时空分布不同,对应的地面位置不同。方案 1 没有形成连片的有效区域,但 100 min 后却存在连片的 10^0 L^{-1} 区域,有效作用时段为 20~140 min,其间的 S, V 的平均值为 573.2 km^2 和 341.2 km^3 。与文献[8]相比,虽然播云时间只增加了 27 min,但有效作用时段却延长了 60 min,主要原因是并合作用。方案 2 和方案 1 相比,由于并合作用增强,交叉区增大,在 40 min 形成连片的有效区域,50 min 后已很难区分开每段播云线对有效面积的贡献,有效作用时段为 20~180 min,其间的 S, V 的平均值为 539.0 km^2 和 371.7 km^3 。方案 3 的交叉区小于方案 1,没有形成连片的有效区域,150 min 形成连片的 10^0 L^{-1} 区,面积明显大于方案 1,有效作用时段为 20~130 min,其间的 S, V 的平均值为 583.8 km^2 和 340.5 km^3 。

(4)投影有效面积不会随着播云总线长的增加而无限增加。这是因为,虽然播云线增加,产生投影有效面积的源增多,但从某一时刻(例如方案 1 中 AB 播云线的 60 min)起,早期播撒的播云线产生的投影有效面积却开始消失,源的增加与面积的减小,这种相互作用不会使投影有效面积无限增加。

表 1 列举了 3 种方案下某一时刻 T 投影有效面积 S 和有效体积 V 。图 5 给出了 3 种方案下 S, V 和 R_a (投影有效面积与作业面积之比)随时间的变化。

由表 1 和图 5 得到,3 种播云间距下,投影有效面积的变化(见图 5a)为单峰型结构。40 min 以前, S_1, S_2, S_3 差异很小; 50~70 min 间, S_2 最小, S_1 与 S_3 相当; 80~90 min 间, S_3 最小, S_2 次之, S_1 最大; 100 min 后, S_3 最小, S_1 次之, S_2 最大; 140 min 后, S_2 比 S_1 大 2 倍以上。结合以上分析发现,并合作用为方案 2 最强、方案 1 次之、方案 3 最弱。投影有效面积的极值为 $S_1=899 \text{ km}^2$ (70 min), $S_3=889 \text{ km}^2$ (70 min), $S_2=855 \text{ km}^2$ (80 min), 3 种方案的极值和达到极值的时间大体相当。随后,投影有效面积逐渐减小,方案 2 减小得最缓慢,方案 1 次之,方案 3 最快。说明并合作用

表 1 3 种方案(以下标表示)下计算得到投影有效面积 S (单位: km^2)和有效体积 V (单位: km^3)

Tabel 1 Simulated effective areas S (km^2) and volumes V (km^3) projected on the surface for the three interval seeding schemes (denoted by the corresponding subscripts) at different seeding time (min)

时间 Time/min	S_1	S_2	S_3	V_1	V_2	V_3
10	89	89	89	24.0	24.0	24.0
20	213	214	220	72.4	73.2	75.8
30	373	366	383	159.0	158.8	168.2
40	532	520	548	261.6	261.6	275.4
50	697	675	731	357.4	367.4	375.2
60	818	755	831	440.0	447.2	443.4
70	899	827	889	519.0	536.2	483.6
80	899	855	822	539.8	583.4	486.4
90	845	824	719	533.4	610.4	487.4
100	707	757	625	476.2	590.2	445.8
110	557	708	543	391.0	556.0	386.8
120	421	631	431	304.6	493.6	285.2
130	293	552	264	225.0	415.6	172.6
140	198	413	130	155.8	326.4	89.0
150	114	355	66	94.6	291.6	40.6
160	64	283	21	59.4	254.4	10.8
170	44	243	0	38.4	208.4	0.0
180	24	185	0	19.4	144.2	0.0

并不能使投影有效面积的极值增大(因为并合作用越强,投影有效面积重叠区域越大),而主要是使有效作用时段延长。投影有效面积对时间的积分为方案 2 最大,方案 1 次之,方案 3 最小。

3 种播云间距下,有效体积的变化(图 5b)也为单峰型结构。60 min 以前, V_1, V_2, V_3 相当, 70 min 时, V_2 最大、 V_1 次之、 V_3 最大, 140 min 后, V_2 比 V_1 大 2 倍以上。有效体积越大,作业云体内有效影响的范围越大,可能会增大增雨率,但这一点仍需进一步验证。从投影有效面积和有效体积来看,8 km 间距优于 4 km 和 20 km 间距。

目前,实际工作中常用作业面积与影响面积之和估算增雨效益,而不是用有效面积。作业面积(S_{scd})为播云线长(L)乘以播云间距(d)、乘以播云线段数(n)减 1,即 $S_{\text{scd}}=Ld(n-1)$ 。从投影有效面积与作业面积之比(R_a)可以看出两者的差异。由图 5c 可知, R_a 随时间变化为单峰型。方案 3 的 R_a 值最小,始终在 10% 以下,表明大间距播云,会造成作业云体中存在较大的无效区域。方案 2 的 R_a 值在 0~30% 变化,在 30~140 min 期间 R_a 值达 10% 以上。方案 1 的 R_a 值在 0~60% 变化,在 20~

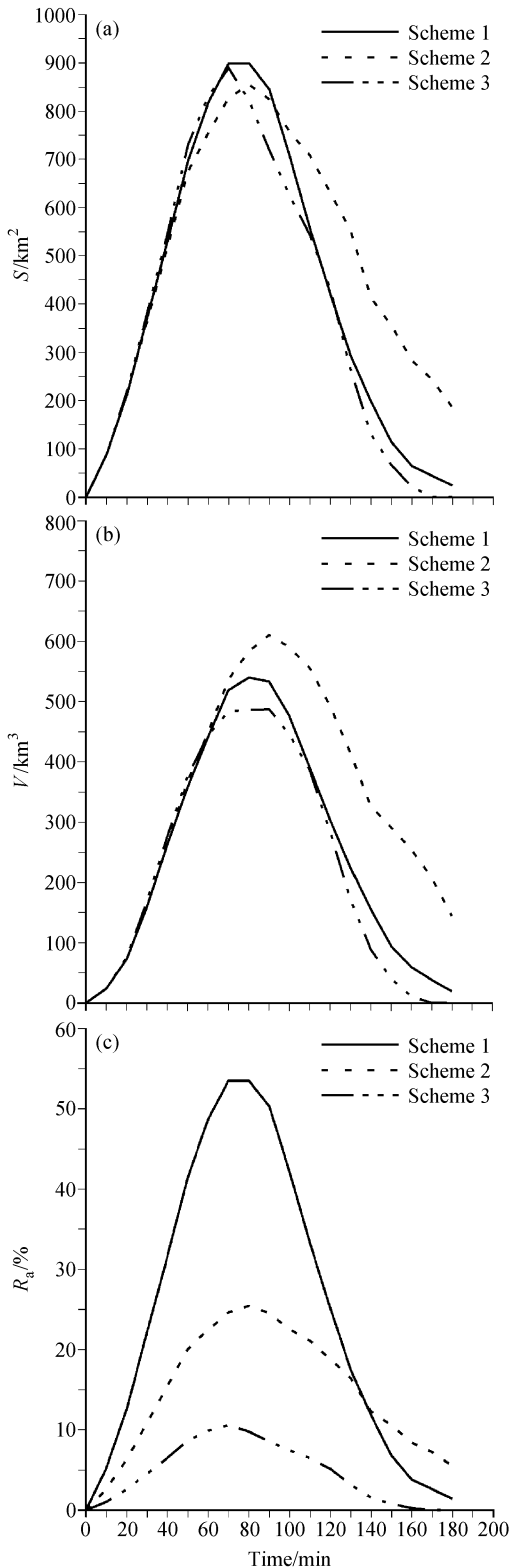


图5 3种方案下 S (a), V (b)和 R_a (c)随时间的变化

Fig. 5 Temporal variations of (a) effective areas (S), (b) effective volumes (V), and (c) ratio of effective area to the operational area (R_a) for the three seeding interval schemes

140 min 期间 R_a 值达 10% 以上。

虽然还不能肯定 R_a 越大增雨率越大, 也无法确定 R_a 的最佳取值, 但从人工增雨的机制来看, 冷云催化是通过在云的过冷水区增加冰晶数, 加快冰水转换以达到增雨目的。在此前提下, 较为有效的增雨应该满足: 一是增加的冰晶浓度至少与云体的本底值相当, 即要满足达到一定量值的要求; 二是达到一定量值的面积应占作业云体的相当成数, 即要满足达到一定范围的要求。因此, R_a 太小, 可能不利于提高增雨率。从这个意义上说, 大间距播云可能不利于提高整体的增雨效果。

综合以上分析可以看出, 实际形成的播云线受水平风场的输送作用, 与设计的航线发生偏离; 不同播云间距不仅产生了不同的投影有效面积, 而且使得同一时刻投影有效面积所对应的地面位置也不相同, 不同播云间距导致有效区域时空分布的不同和并合作用的差异; 增大播云间距并不会导致投影有效面积和有效作用时段的同步放大, 并合作用的强弱才是真正的原因。因此, 增雨作业中设计播云方案时需要考虑并合作用的贡献。

3.3 播云间距对增雨效益的影响

为了定量分析播云间距对增雨效益的影响, 从增雨机理出发, 结合有效区域的基本概念, 提出了增雨效益(B)的计算公式如下:

$$B = S_{\text{eff}} T_{\text{eff}} E_r P_r U_p. \quad (7)$$

公式(7)的物理意义是: 在有效时段内有效面积上, 净增雨量所产生的直接经济效益(千元)。其中, S_{eff} 为 1 次增雨作业的有效面积(km^2); T_{eff} 为 1 次增雨作业的有效作用时段(min); E_r 为 1 次增雨作业的增雨率(%), 反映作业云体的增雨潜势, 影响因素较多且复杂, 总体上随作业云体、天气背景、播云方法、播云时间、播云催化剂等的变化而变化; P_r 为 1 次增雨作业有效作用时段内的雨强($\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$); U_p 为增加每吨降水的效益($\text{千元} \cdot \text{t}^{-1}$), 对某一时期的增雨而言, U_p 基本保持不变。从(7)式看出, 增雨效益的提高, 主要是增大 S_{eff} , T_{eff} , E_r , P_r 之积。播云方案确定后, S_{eff} , T_{eff} 两者之积基本为定值, 那么, 雨强和增雨潜势越大的过程效益越高, 即: 自然降水越好, 潜势越大的过程增雨效益越高, 丰雨季节比旱季增雨更有价值; 增雨过程确定后, P_r 为定值, 假定 E_r 也为定值, 要提高效益, 通过调整播云方法来提高

有效面积和有效时段。

在相同作业条件下, 播云时机、部位、剂量都一样, 仅播云间距(取 4 km, 8 km 和 20 km)不同, 假定 3 种间距的 E_r , P_r , U_p 也相同。把 3.2 节中模拟得到的 S_{eff} 和 T_{eff} 代入(7)式, 得到 3 种方案的增雨效益之比为:

$B_2/B_1=1.23$, 表明方案 2 的增雨效益比方案 1 提高 23%;

$B_2/B_3=1.31$, 表明方案 2 的增雨效益比方案 3 提高 31%;

$B_1/B_3=1.06$, 表明方案 1 的增雨效益比方案 3 提高 6%。

显然, 不同的播云间距, 产生了不同的增雨效益, 间距既不是越大越好, 也不是越小越好, 存在着较优取值, 其实间距还会对 E_r 产生影响。

4 播云间距的设计

通过以上分析知道, 不同播云间距会产生不同的有效面积和有效作用时段, 导致增雨效益的较大差异, 其真实的物理原因是多条播云线间并合作用的不同。由此可以看出, 在增雨作业中播云间距的设计不应该是随意的, 对某一具体的作业而言, 存在一个较好的值。

从有效面积和有效时段考虑, 在设计播云间距时, 应重视并合作用, 同时还须考虑风速 u 分量的输送和 v 分量的位移。本文根据并合作用的物理意义, 提出交叉方案中确定播云间距的数学表达式(以供参考)。

交叉方案(图 6)指实际形成的播云线是相互交叉的。为了形成较大的并合区域, 设计中使交叉点位于播云线的中点, 这样可得到以下数学表达式:

$$d = u(x, y, z, t) \frac{L}{C_{\text{fcs}}}, \quad (8)$$

$$\Delta L = v(x, y, z, t) \frac{L}{C_{\text{fcs}}}, \quad (9)$$

其中, d 为播云间距, ΔL 为 y 方向的位移, C_{fcs} 为播云飞机的飞行速度。间距 d 与风速 u 分量、线长 L 成正比, 与飞行速度 C_{fcs} 成反比。利用 08 时播云高度实测风, 计算得到 $d=12.4$ km, $\Delta L=4.5$ km, 显然, 播云试验方案 2 中 8 km 最接近计算值, 同时, 模拟结果也表明方案 2 的增雨效益最高。

依此思路, 可以得到平行方案播云间距的数学

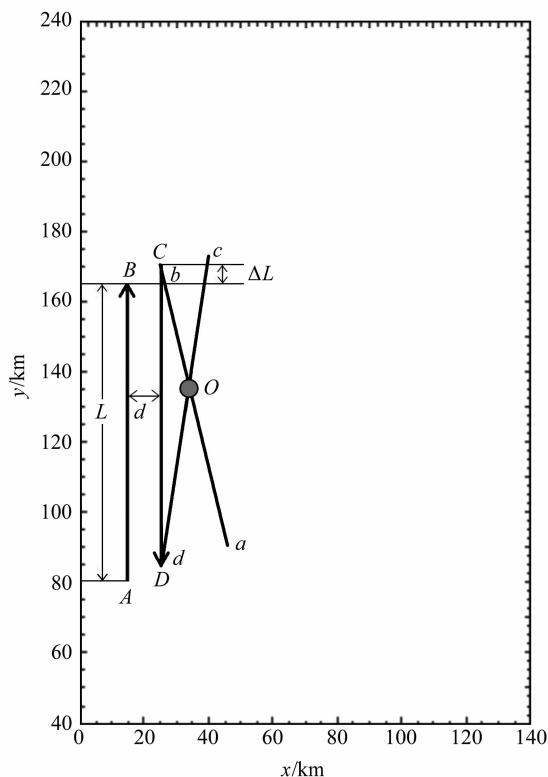


图 6 设计交叉播云方案示意图。播云路线: AB 和 CD , CD 刚播完时 AB 移至 ab , CD 移至 cd , O 点为 ab 和 cd 的交点。播云间距: d , 单位: km; y 方向的位移: ΔL

Fig. 6 Illustration of designing cross seeding scheme, the seeding lines AB and CD whose seeding interval is d km move to the positions of ab and cd just after the seeding finish of line CD . The point O is the cross point of ab and cd . The displacement of line AB in y direction is ΔL .

表达式。假设播云线 AB 与 CD 的坐标为: $A(x_0, y_0)$, $B(x_1, y_1)$, $C(x_2, y_2)$, $D(x_3, y_3)$, 为了使播云线 CD 与 AB 保持平行, 并且 CD 与 AB 的有效区域连接成片, 则 x_2, y_2, x_3, y_3 取为

$$x_2 = x_1 \pm W_{\text{eff}}, \quad (10)$$

$$y_2 = y_1, \quad (11)$$

$$x_3 = x_0 + 2u(x, y, z, t) \frac{L}{C_{\text{fcs}}} \pm W_{\text{eff}}, \quad (12)$$

$$y_3 = y_0 \mp 2v(x, y, z, t) \frac{L}{C_{\text{fcs}}}, \quad (13)$$

其中, W_{eff} 为有效扩展宽度, (10)、(12)式中“ $\pm$ ”表示 CD 在 AB 的前或后, (13)式中“ $\mp$ ”表示 CD 从北往南或从南往北播云。在实际作业中, 利用飞机探测或探空资料, 计算得出作业的播云间距, 用于指导实践, 提高增雨效益。

5 结 论

通过对播云间距的数值试验研究, 得到以下结论:

由于播云线上各点催化剂入云时间不同, 受水平风场作用, 实际形成的播云线偏离设计的播云航线; 不同播云间距所产生的投影有效面积、有效作用时段不同, 并且其时空分布及投影有效面积所对应的地面位置也不尽相同。

增大播云间距并不会导致投影有效面积和有效作用时段的同步放大, 并合作用的强弱才是真正的原因。

在相同作业条件下, 8 km 间距的增雨效益比 20 km 间距提高 31%, 比 4 km 间距提高了 23%; 4 km 间距比 20 km 间距提高 6%。

播云间距不仅取决于湍流扩散的强弱, 还取决于可供催化区域的大小、催化剂源强等。合理确定播云间距, 主要问题是在催化条件较好的部位中使催化影响区集中分布, 既有利于发挥出催化的优势, 又容易被空中和地面仪器探测。针对交叉方案和平行方案, 提出了播云间距的数学表达式。在实际作业中, 可以用飞机探测或探空资料来估算播云间距。

垂直、45°交角、顺风、逆风 4 种播云方向的数值试验结果表明, 逆风播撒不能产生线源间的并合作用, 其有效面积、有效时段均最小, 效益最低, 实际作业时应尽量避免; 顺风也不利于提高增雨效益; 垂直和 45°角产生的增雨效益相当, 但对应的地面增雨区域不同, 说明播云线并不一定要与风向很垂直, 在 45°~90°间都可以。

播云温度的数值试验表明, 使用 AgI 作为冷云催化剂, 理想的播云温度应保持在 -10℃ 以下, 高于 -10℃ 时, 增雨效果明显降低, 最好选用致冷剂。

模式中假定 AgI 活化率为 100%, 没有考虑人工冰晶粒子与云中粒子的微物理作用, 与真实的云降水过程有差异。这是本文的不足之处, 也是以后需改进的地方。

值得注意的是, 随着云中水汽、液水、冰晶的不同, 风和湍流的不同, 有效性对应的人工冰晶浓度标准就不同, 输送扩散状况不同, 有效面积、体积、扩展宽度、厚度也不同, 要具体问题具体分析, 才能有益于实际工作。

参考文献

- [1] 王广河, 胡志晋, 陈万奎. 人工增雨农业减灾技术研究. 应用气象学报, 2001, **12**(增刊): 1~9
Wang Guanghe, Hu Zhijin, Chen Wankui. Study of techniques for precipitation enhancement and agricultural damage mitigation. *Quarterly Journal of applied Meteorology* (in Chinese), 2001, **12** (Suppl.): 1~9
- [2] Gagin A, Aroyo M. Quantitative diffusion estimates of cloud seeding nuclei released from airborne generators. *J. Wea. Mod.*, 1985, **17**: 59~70
- [3] Stith J L, Griffith D A, Rose R L, et al. Aircraft observations of transport and diffusion in cumulus clouds. *J. Climate Appl. Meteor.*, 1986, **25**: 1959~1970
- [4] Weil J C, Lawson R P. Relative dispersion of ice crystals in seeded cumuli. *J. Appl. Meteor.*, 1993, **32**: 1055~1073
- [5] Levin Z, Krichak S O, Reisin T. Numerical simulation of disposal of inert seeding material in Israel using a three-dimensional mesoscale model. *J. Appl. Meteor.* 1997, **36**: 474~484
- [6] 余兴, 樊鹏, 王晓玲, 等. 层状云中非垂直多条撒播线源催化剂扩散的数值模拟. 气象学报, 1998, **56**: 708~723
Yu Xing, Fan Peng, Wang Xiaoling, et al. Numerical simulation of multiple line source diffusion of seeding agent within stratus. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 1998, **56**: 708~723
- [7] Yu Xing, Dai Jin, Jiang Weimei, et al. A three-dimensional model of transport and diffusion of seeding agents within stratus. *Advances in Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2000, **17**: 617~635
- [8] 余兴, 王晓玲, 戴进. 冷层状云中飞机增雨播云有效区域的模拟研究. 气象学报, 2002, **60**: 205~214
Yu Xing, Wang Xiaoling, Dai Jin. Research on simulation of effective range for cloud seeding by aircraft within supercooled stratus. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 2002, **60**: 205~214