

王以琳, 余康元, 姚展予. 2010. 高炮人工增雨催化区的探讨 [J]. 气候与环境研究, 15 (1): 45–52. Wang Yilin, Yu Kangyuan, Yao Zhanyu. 2010. Discussion on catalysis areas of precipitation enhancement with artillery shells [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 15 (1): 45–52.

高炮人工增雨催化区的探讨

王以琳¹ 余康元² 姚展予³

1 山东省气象科学研究所, 济南 250031

2 中国气象局培训中心, 北京 100081

3 中国气象科学研究院, 北京 100081

摘要 在高炮人工增雨作业中, 作业参数的选择和催化区的分布是一个重要问题。根据梯度输送理论, 计算了人工增雨作业中单发和多发炮弹 AgI 最大扩散半径和时间。以不同 AgI 浓度阈值模拟分析了湍流扩散系数、方位角、仰角和风速对人工增雨炮弹催化区的影响, 依据等角度作业思路, 提出了高炮人工增雨迎风半圆多轮作业方案。

关键词 人工增雨 高炮催化 方案设计 扩散

文章编号 1006-9585 (2010) 01-0045-08 **中图分类号** P481 **文献标识码** A

Discussion on Catalysis Areas of Precipitation Enhancement with Artillery Shells

WANG Yilin¹, YU Kangyuan², and YAO Zhanyu³

1 Shandong Research Institute of Meteorological Science, Jinan 250031

2 China Meteorological Administration Training Centre, Beijing 100081

3 Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

Abstract One of the important problems in precipitation enhancement with artillery shells is to confirm the parameters of operation and the distribution of catalysis areas. According to the theory of grades transportation, the maximum diffuseness radius and its time are calculated for the single and many artillery shells. The catalysis areas are simulated by using different eddy diffusivity coefficients, azimuths, elevation angles, and wind speed with different AgI concentration thresholds. According to the idea of equality angle, an operation method that cannonballs are shot by repetitious operations within 180° against the wind is proposed.

Key words precipitation enhancement, seeding with artillery shells, project design, diffusion

1 引言

2006 年我国人工增雨作业高炮达 7071 门, 高

炮作业已在我国人工影响天气中发挥重要作用。人工增雨作业成功的关键之一是对作业方案进行科学设计。在方案设计中除作业条件选择、作业区确定、作业时机掌握等问题外, 作业方式和用

收稿日期 2007-12-14 收到, 2009-12-14 收到修定稿

资助项目 “十一五”国家科技支撑计划课题“混合云人工增雨技术研究”2006BAC12B02、山东省科技厅科技攻关计划项目 2005GG3208054 和山东省气象局科研项目 2004SDQXZ34

作者简介 王以琳, 男, 1956 年出生, 学士, 正研级高工, 主要从事人工影响天气作业研究。E-mail: qxwyl@sohu.com

弹量等的确定也非常重要。有学者利用三维冰雹云数值催化模式对高炮作业时间、部位和催化方式及增雨效果进行了数值试验(李宏宇等, 2003; 王宏等, 2004)。王斌等(1999)提出在人工影响天气中用雷达、炮点和目标云三角形法确定作业方位角和仰角。在以往其他研究中, 根据作业云体的大小和走向, 人工增雨多参考人工防雹采用的“前倾梯度射击组合式”等7种射击组合方式进行作业(中国气象局科技发展司, 2003)。这些作业方法没有考虑炮弹爆炸后的扩散问题。在子弹量的设计中则多以实际经验和历史资料统计为主(康绍钧, 1995; 王莉萍和罗德建, 2002)。申亿铭(1994)考虑了炮弹作为点源爆炸后的催化剂扩散问题, 汪宏宇和刘万军(1997)用三维平流扩散方程和余兴等(2002)用烟云模式对人工增雨催化剂扩散进行过数值模拟。为了把扩散理论应用到高炮作业中, 在数值模拟后我们提出了具有可操作性的高炮人工增雨作业方案。该方案在考虑点源扩散和输送问题的同时, 综合考虑不同方位角和仰角在多发炮弹组合发射后的扩散和输送问题。

2 模拟方案

在层状冷云高炮催化剂点源扩散中(申亿铭等, 1983)假定大气是各向同性, 忽略质点之间的相互并合, 不考虑云滴对催化剂质点的捕获效应。假定风速与 x 轴平行, 且爆炸初始分散均匀, 则扩散方程为

$$\frac{\partial q}{\partial t} + u \frac{\partial q}{\partial x} - w \frac{\partial q}{\partial z} = k \left(\frac{\partial^2 q}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 q}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 q}{\partial z^2} \right),$$

式中, q 为催化剂浓度, k 为湍流扩散系数, u 、 w 分别为 x 、 z 方向的风速, t 为从爆炸开始计算的时间。给定初始和边界条件:

$$q = \begin{cases} Q\delta(x)\delta(y)\delta(z-h), & t = 0 \\ 0, & z = 0 \\ 0, & \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \rightarrow \infty \end{cases}$$

式中, Q 为点源单位时间的核生成率 ($3.3 \times 10^{11} \text{ g}^{-1}$), $\delta(x)$ 、 $\delta(y)$ 、 $\delta(z-h)$ 为丢脱函数, h 为点源爆炸高度, 其解为

$$q = \frac{Q}{8\sqrt{(\pi kt)^3}} \exp \left[-\frac{(x-ut)^2}{4kt} - \frac{y^2}{4kt} - \right.$$

$$\left. \frac{w_m^2 t}{4k} + \frac{w_m(z-h)}{2k} \right] \times \left\{ \exp \left[-\frac{(z-h)^2}{4kt} \right] - \exp \left[-\frac{(z+h)^2}{4kt} \right] \right\}.$$

忽略式中最大上升速度 w_m , 依据上式在给定的核生成率 Q 、湍流扩散系数 k 和风速的情况下可以模拟出点源某时刻、某确定浓度的扩散区域范围。

考虑点源群情况, 设第 i 个点源坐标为 (x_i, y_i, h) , 上式改写为:

$$q_i = \frac{Q}{8\sqrt{(\pi kt)^3}} \exp \left[-\frac{(x-x_i-ut)^2}{4kt} - \frac{(y-y_i)^2}{4kt} \right] \times \left\{ \exp \left[-\frac{(z-h)^2}{4kt} \right] - \exp \left[-\frac{(z+h)^2}{4kt} \right] \right\}.$$

在点源高度的水平面上, 坐标点 (x, y, h) 的浓度为 $q = \sum_i q_i$ 。

近年来我国北方一些省份(如河北、河南、山东和青海等)利用粒子探测系统(PMS)对人工增雨作业云系进行了大量的探测, 结果表明: 云中冰晶数多为 $10^0 \sim 10^1 \text{ L}^{-1}$ 的数量级(胡志晋, 2001)。根据已有研究对云要进行有效地人工催化, 人工增雨时增加的人工冰晶数与云中自然存在的冰晶数应大体相当。为此, 分别模拟单发和组合炮弹爆炸, 其 AgI 扩散后浓度 $q \geq 1 \text{ L}^{-1}$ 和 10 L^{-1} 为阈值的区域, 并分析它们的形态和位置变化。

3 扩散半径和扩散时间

湍流扩散系数 k 是对云中湍流的度量, 申亿铭等(1996)计算了我国北方不同云系湍流扩散系数后指出: 冬半年层状云湍流扩散系数小于夏半年, 夏半年湍流扩散系数多分布在 $10 \sim 40 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ 之间, 积状云湍流扩散系数的最大值在 $82.67 \sim 124.86 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ 之间。为表示不同云中的湍流情况, 依次取 $k=20$ 、 40 、 80 和 $100 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, 对炮弹爆炸后 AgI 粒子扩散的区域进行模拟, 分别讨论浓度 $q \geq 1 \text{ L}^{-1}$ 和 10 L^{-1} 的两种情况, 图1给出扩散区域半径随扩散时间的变化曲线, 可以看出, 虽然 k 的取值不同, 其扩散曲线的形态相同, 都为一条非对称单峰型曲线。扩散半径随时间的增加而增大, 当其达到最大值后随时间的增加而减少。对于不同的 k 值, 相同阈值 AgI 粒子的最大扩散半径相同, 达到最大扩散半径的时间不同。

当 AgI 粒子浓度 $q \geq 1 \text{ L}^{-1}$ ，取 $k=20$ 、40、80 和 $100 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ 时，其最大扩散半径值均为 289.6 m，达到最大值的时间分别是 699.0、349.5、174.8 和 139.8 s。浓度趋于 0 值的时间分别是 1901.8、976.9、75.5 和 406.7 s（图 1a）。

当 AgI 粒子浓度 $q \geq 10 \text{ L}^{-1}$ ，取 $k=20$ 、40、80 和 $100 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ 时，其扩散半径最大值均为 134.4 m，达到最大值的时间分别是 150.6、75.3、37.7 和 30.1 s。浓度趋于 0 值时间分别是 411.3、205.7、102.8 和 83.5 s（图 1b）。

4 催化区域的分布

单枚作业炮弹作为点源爆炸后，AgI 扩散区

的分布是由两个因素确定的。它既在湍流的作用下向四周扩散，在空间形成一个球形扩散区域；又在环境风场的输送下作平行风向的位移。为了叙述方便，在省略云粒子在云中经历的物理过程后，我们把炮弹爆炸后 AgI 经扩散在某一时刻形成的球形区域称作瞬时影响区域，瞬时影响区域平移过的区域称为被该炮弹催化剂影响过的区域或简称催化过的区域。由于不同湍流扩散系数的最大扩散半径相同，当湍流扩散系数一定时每发炮弹催化过的区域面积与时间有关，其位置与风速有关。图 2 给出 AgI 粒子浓度阈值分别为 1 L^{-1} 和 10 L^{-1} 时，不同时刻炮弹瞬时影响区域的形态和空间位置。由于图 2 的坐标轴标度的比例不同，导致该图在水平面上为圆形的投影显示为椭圆形。

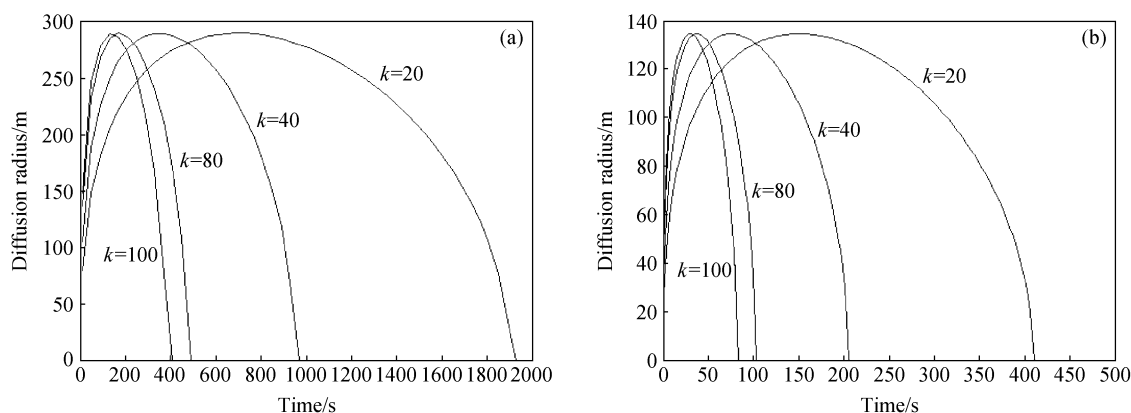


图 1 不同湍流扩散系数 k 值对应点源扩散半径随时间的变化：(a) $q=1 \text{ L}^{-1}$ ；(b) $q=10 \text{ L}^{-1}$

Fig. 1 Changes of point source diffusion radius with different k values; (a) $q=1 \text{ L}^{-1}$; (b) $q=10 \text{ L}^{-1}$

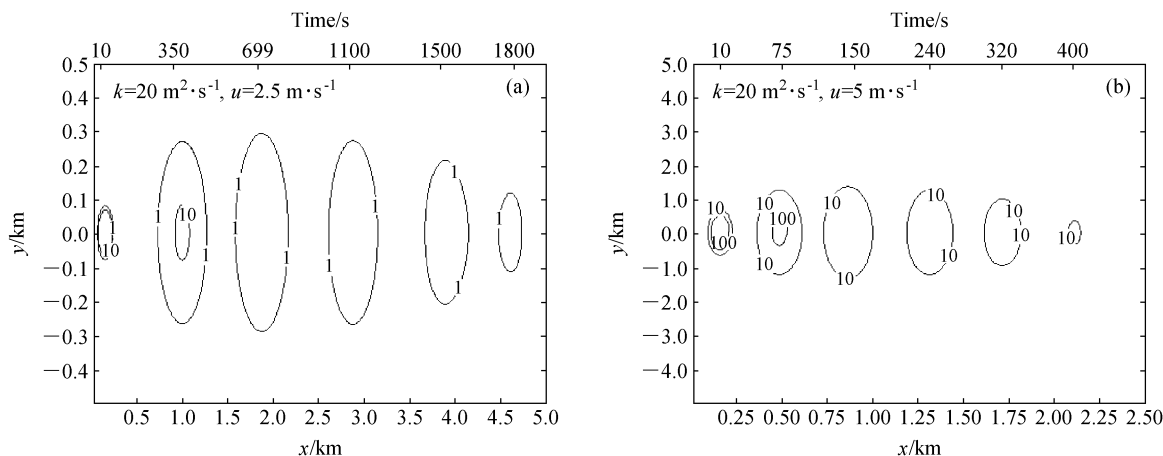


图 2 不同时刻点源扩散区分布：(a) $q \geq 1 \text{ L}^{-1}$ ；(b) $q \geq 10 \text{ L}^{-1}$

Fig. 2 Distribution of point source diffusion areas; (a) $q \geq 1 \text{ L}^{-1}$; (b) $q \geq 10 \text{ L}^{-1}$

当 AgI 粒子浓度阈值为 1 L^{-1} 时, 如 $k=20 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ 、西风风速 $u=2.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 图 2a 给出了单发炮弹爆炸后 10、350、699、1100、1500 和 1800 s 炮弹瞬时影响区域的形态和空间位置。由于扩散半径具有单峰型特征, 瞬时影响区域随时间经历了由小到大然后变小直至消失的过程。图 2a 中 $t=699 \text{ s}$ 是扩散半径最大时刻, 也即瞬时影响区域面积最大的时刻。瞬时影响区域消失的时间为 1901.8 s。当 AgI 粒子浓度阈值为 10 L^{-1} 时, 如 $k=20 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, $u=5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 图 2b 显示了单发炮弹爆炸后 10、75、150.6、240、320 和 400 s 炮弹瞬时影响区域的形态和空间位置。150.6 s 是扩散半径最大时刻, 也即瞬时影响区域面积最大的时刻。瞬时影响区域消失的时间为 411.3 s。

5 作业方案

5.1 作业方位角

在高炮人工增雨作业中, 要取得最大催化效果, 又要节省炮弹。考虑到作业时易于操作, 设计了如图 3 所示的等角度作业方案。该方案在炮点迎风的半圆内发射炮弹, 各发炮弹之间间隔的角度相等。由于炮弹爆炸后催化剂会扩散并向下风方向平移, 这样就不必在炮点顺风向的半圆内发射炮弹。作业应采用一定时间间隔多轮作业方式进行, 以求各轮作业产生的瞬时影响区域之间的间隙小或相连。炮弹之间角度间隔的确定, 依照各发炮弹扩散后浓度阈值为 1 L^{-1} 或 10 L^{-1} 的最大瞬时影响区域能够相联结的思路经数值模拟得

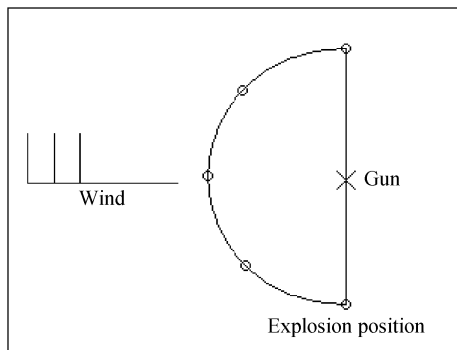


图 3 迎风半圆多轮作业方案示意图 (x: 炮位, o: 炮弹爆炸点)
Fig. 3 Project pattern against the wind within 180° with repeated rounds of operations (x: gun site, o: explosion position)

出。我们将这种作业方案命名为“迎风半圆多轮作业方案”, 它简便易行, 也利于作业后对其进行作业效果检验。

5.2 作业仰角和用弹量

在高炮增雨作业中, 可以由 $-5 \sim -10^\circ \text{C}$ 云层高度或雷达高显回波 (RHI) 确定作业高度。作业高度确定后, 根据不同型号炮弹的参数, 确定作业仰角, 继而由最大瞬时影响区域相连的思路算出用弹量。

根据炮弹射程与射高的关系, 随着仰角的减小, 炮弹的水平射程增大, 在这种情况下要得到较大的影响区, 就要增加发弹量。根据 1 L^{-1} 或 10 L^{-1} 的 AgI 最大瞬时影响区域相连的思路, 按等角作业方案模拟后, 表 1 给出不同仰角下的用弹量。如取浓度阈值为 1 L^{-1} , 当仰角为 65° 时, 在半圆内发射 13 发炮弹可达到作业目的。如取浓度阈值为 10 L^{-1} , 当仰角为 75° 时, 在半圆内需要射击 18 发炮弹。

5.3 作业间隔时间

炮弹在云中爆炸后, 催化过的云在风的作用下向下风方向移动, 一般环境风使瞬时影响区域向下风方平移的速度大于其本身的扩散速度。瞬时影响区域移过空间某一点的时间非常短暂。如选 AgI 阈值为 1 L^{-1} , 取环境风速 $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 即使在扩散半径最大时, 瞬时影响区域移过某点的最大时间仅为 57.9 s, 也即对该点最长进行了 57.9 s 的影响。如选 AgI 浓度阈值为 10 L^{-1} , 也取 $u=10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 扩散半径最大的瞬时影响区域移过该点的时间不超过 26.9 s, 即对该点最长进行

表 1 不同仰角用弹量

Table 1 Number of shots under different elevation angles

仰角	用弹量/发	
	浓度阈值 1 L^{-1}	浓度阈值 10 L^{-1}
45°	21	45
50°	19	41
55°	17	37
60°	15	33
65°	13	28
70°	11	23
75°	8	18
80°	6	12
85°	4	7

了 26.9 s 的影响。环境风速加大，催化剂瞬时影响区域对空间某一固定点的影响时间减少。表 2 给出了在不同风速和 AgI 浓度阈值时，对应某一点的最长影响时间。由此看来，要想使某地得到较长时间的催化影响，用表 2 给出的时间作为两轮作业时间间隔的上限，其作业强度是相当大的。

在实际作业中，一般批准的空域时间较短（如约 5 min），建议在有限的空域时间里进行多轮作业，或采用多次申请作业空域的方法完成多轮作业任务，以达到对某区域进行多次催化的目的，从而得到较好的催化效果。

表 2 不同风速和浓度对应的催化时间
Table 2 Catalyzing time under different wind speed and concentrations

风速/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	AgI 浓度/ L^{-1}	催化时间/s
5	≥ 1	115.8
	≥ 10	53.8
10	≥ 1	57.9
	≥ 10	26.9
15	≥ 1	38.6
	≥ 10	17.9
20	≥ 1	29.0
	≥ 10	13.4
25	≥ 1	23.2
	≥ 10	10.8
30	≥ 1	19.3
	≥ 10	9.0

6 组合炮弹瞬时催化区

按照迎风半圆多轮作业方案，每轮作业由多枚炮弹组成。若取 $k=20 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $u=10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、仰角 65° ，取 AgI 浓度阈值为 1 L^{-1} ，一轮组合应发射 13 发炮弹。图 4a 给出组合炮弹在 10、350、699、1100、1500、1800 和 2100 s 7 个不同时刻瞬时影响区域的位置和形态。在 10 s 时，由于点源爆炸时间短，扩散面积小，中心浓度高，炮弹之间播撒的 AgI 粒子不相连。在其后的时间里，浓度 1 L^{-1} 的区域连成一片，在风的作用下向下游方向移动。当扩散时间为 699 s 时，瞬时影响区域的面积最大。由于各炮弹之间 AgI 粒子有叠加，组合炮弹 AgI 浓度 1 L^{-1} 扩散区消失的时间比单发炮弹该浓度瞬时影响区域消失的时间长，这一点从图 4a 可以清楚看到，在 2100 s 时仍有较小的瞬时影响区域存在。

若取 $k=20 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $u=25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ，仰角 65° ，以 AgI 浓度阈值为 10 L^{-1} ，一轮组合发射 28 发炮弹。图 4b 给出组合炮弹 10 s、75 s、150 s、240 s、320 s、400 s、500 s 7 个不同时刻 AgI 扩散瞬时影响区域的位置和形态。由图 4 可见，迎风半圆多轮作业方法产生的瞬时影响区域在时间和环境风场的作用下 AgI 浓度由浓到淡；面积从小到大，达到最大值后又逐渐缩小，直至消失。

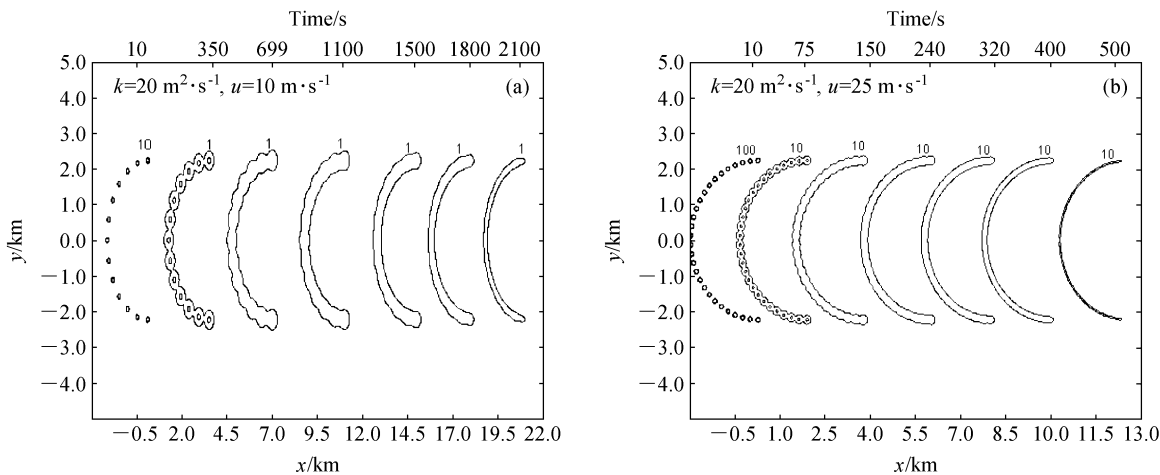


图 4 组合炮弹瞬时水平催化区模拟（图中数值为催化剂最大浓度）：(a) $q \geq 1 \text{ L}^{-1}$ ；(b) $q \geq 10 \text{ L}^{-1}$
Fig. 4 Simulated horizontal catalysis areas of many shells (the values in the figure indicate the maximum concentration of catalyst): (a) $q \geq 1 \text{ L}^{-1}$; (b) $q \geq 10 \text{ L}^{-1}$

7 瞬时影响区域的累计面积

为了对瞬时影响区域的累计面积有一个整体了解,图 5 给出了水平面上 AgI 粒子浓度阈值为 1 L^{-1} 和 10 L^{-1} 时,瞬时影响区域累计面积的边界。当 AgI 粒子浓度阈值为 1 L^{-1} 时,瞬时影响区域累计面积大,其模拟值为 98.6 km^2 (图 5a)。当 AgI 粒子浓度阈值为 10 L^{-1} 时,瞬时影

响区域累计面积小,其模拟值为 46.7 km^2 (图 5b)。如图 4 所示,由于瞬时影响区域随风平移,它在不同的时间有不同的位置。图 5 给出的区域为瞬时影响区域的面积和,实际上组合炮弹对图中的某片区域只进行了很短时间的催化。表 3 给出不同湍流扩散系数、不同风速情况下,应用迎风半圆多轮作业方案得到的 $q\geq 10\text{ L}^{-1}$ 瞬时影响区域累计面积,供高炮人工增雨作业效果检验参考。

表 3 湍流扩散系数、风速与影响区面积对照表
Table 3 Comparison of the eddy diffusive coefficients, wind speed, and affected areas

湍流扩散系数 / $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	u / $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	不同仰角时的影响面积/ km^2								
		45°	50°	55°	60°	65°	70°	75°	80°	85°
20	10	32.2	28.4	25.6	22.9	19.2	15.9	12.3	8.6	4.6
	15	45.1	41.8	38.0	33.5	28.7	23.7	18.1	12.6	6.7
	20	59.5	55.3	50.2	44.3	37.6	31.2	23.8	16.6	8.9
	25	74.2	69.0	62.5	54.9	46.7	38.8	30.0	20.7	11.1
40	10	15.0	14.8	13.3	11.9	10.1	8.4	6.5	4.4	2.4
	15	22.5	21.4	19.4	17.2	14.6	12.0	9.4	6.4	3.4
	20	29.9	28.0	25.3	22.5	19.1	15.8	12.0	8.5	4.6
	25	37.2	34.6	31.6	27.2	23.6	19.5	15.1	10.4	5.5
80	10	7.4	7.7	7.2	6.4	5.4	4.4	3.5	2.4	1.3
	15	11.0	11.0	10.0	8.8	7.5	6.1	4.8	3.3	1.8
	20	14.5	14.0	12.9	11.2	9.7	8.0	6.1	4.2	2.4
	25	18.1	17.3	15.8	13.7	11.7	9.7	7.5	5.1	2.8
100	10	5.9	6.3	6.0	5.5	4.9	3.9	3.0	2.0	1.0
	15	8.6	8.7	8.3	7.3	6.2	4.9	3.9	2.7	1.4
	20	11.7	11.5	10.4	9.2	7.9	6.4	5.0	3.6	1.9
	25	14.4	13.9	12.7	11.0	9.5	7.9	6.0	4.2	2.3

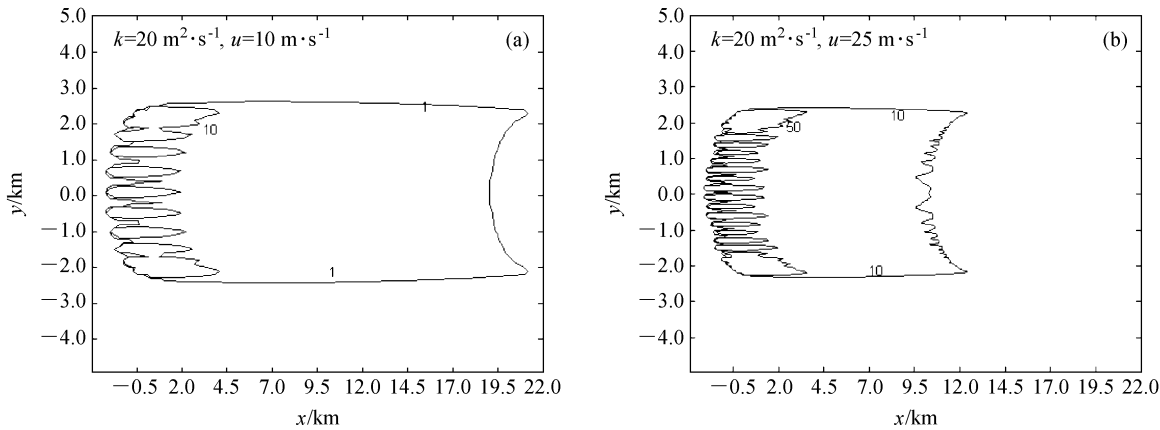


图 5 已催化过区域的总面积 (图中数值为催化剂最大浓度): (a) $q\geq 1\text{ L}^{-1}$; (b) $q\geq 10\text{ L}^{-1}$
Fig. 5 Total of the catalyzed areas (the values in the figure indicate the maximum concentration of catalyst): (a) $q\geq 1\text{ L}^{-1}$; (b) $q\geq 10\text{ L}^{-1}$

8 应用中应注意的问题

在以上讨论的高炮人工增雨作业方案中,除催化剂浓度阈值的影响外,湍流扩散系数和环境风场的变化对催化过的区域有较大的影响。实际作业时一般得不到作业区湍流扩散系数和环境风场的情况下,可以用作业点附近相邻高度层探空或数值预报的风场资料代替实际风场资料。

根据对河北省夏半年层积云湍流扩散系数的计算结果看(申亿铭等,1996),湍流扩散系数在 $10\text{ m}^2\cdot\text{s}^{-1}$ 以下的占40%, $10\sim 20\text{ m}^2\cdot\text{s}^{-1}$ 之间的占30%。因此,一般在层状云或层积云作业时湍流扩散系数可取 $20\text{ m}^2\cdot\text{s}^{-1}$ 或 $40\text{ m}^2\cdot\text{s}^{-1}$;对流云根据强度,湍流扩散系数可取 $80\text{ m}^2\cdot\text{s}^{-1}$ 或 $100\text{ m}^2\cdot\text{s}^{-1}$ 。

9 小结

(1) 在高炮人工增雨作业中,在人工增加的冰晶数与云中自然存在的冰晶数应相当的前提下,根据梯度理论,当湍流扩散系数 $k=20、40、80、100\text{ m}^2\cdot\text{s}^{-1}$ 时,若取AgI扩散后其浓度 $q\geq 1\text{ L}^{-1}$ 为阈值,它们的最大扩散半径都是289.6 m,达到最大扩散半径的时间分别是699.0、349.5、174.8和139.8 s。若取AgI扩散后其浓度 $q\geq 10\text{ L}^{-1}$ 为阈值,它们的最大扩散半径是134.4 m,达到最大扩散半径的时间分别是150.6、75.3、37.7和30.1 s。

(2) 迎风半圆多轮作业方案指出,在多发炮弹组合作业的情况下,根据作业高度确定作业仰角,根据组合炮弹作业后AgI最大瞬时影响区域相连的思路确定用弹量,在迎风半圆内由等角的原则确定各发炮弹的方位角。在有限的空域时间里进行多轮作业,或采用多次申请作业空域的方法进行多轮作业,以达到对某地区进行多次催化的目的。

(3) 本文基于催化剂扩散对催化方案进行了初步的探讨,今后还应就高炮作业目标区时间和空间上的全覆盖催化方案进行研究。

参考文献 (References)

- 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.
- 康绍钧. 1995. 高炮增雨作业云层部位及用弹量的分析 [J]. 河南气象, (1): 35. Kang Shaojun. 1995. The analysis of position and bomb number in precipitation enhancement with artillery shells [J]. Meteorology Journal of Henan (in Chinese), (1): 35.
- 李宏宇, 胡朝霞, 肖辉, 等. 2003. 人工防雹实用催化方法数值研究 [J]. 大气科学, 27 (2): 212-222. Li Hongyu, Hu Zhaoxia, Xiao Hui, et al. 2003. Numerical studies of the practical seeding methods in hail suppression [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 27 (2): 212-222.
- 申亿铭, 刘桂馥, 许焕斌, 等. 1983. 对流云中点源爆炸催化剂的扩散问题 [J]. 气象学报, 41 (4): 415-425. Shen Yiming, Liu Guifu, Xu Huanbin, et al. 1983. The problem of diffusion of point source in the convective clouds [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 41 (4): 415-425.
- 申亿铭. 1994. 云中催化剂的扩散 [M]. 北京: 气象出版社, 48-51. Shen Yiming. 1994. Diffusion of Catalyzer in Cloud [M] (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 48-51.
- 申亿铭, 周林, 银燕. 1996. 层状云中的湍流扩散系数 [J]. 南京气象学院学报, (2): 1-6. Shen Yiming, Zhou Lin, Yin Yan. 1996. Turbulet diffusion coefficient in stratiform clouds [J]. Journal of Nanjing Meteorological College (in Chinese), (2): 1-6.
- 王斌, 杨维军, 唐仁茂. 1999. 雷达在确定火箭高炮发射角中的应用 [J]. 气象, 25 (6): 39-41. Wang Bin, Yang Weijun, Tang Renmao. 1999. Radar application in determining launch parameters of rockets or anti-aircraft guns for seed clouds [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 25 (6): 39-41.
- 王宏, 雷恒池, 李书严, 等. 2004. 黄河上游河曲地区对流云催化增雨的数值模拟研究 [J]. 气候与环境研究, 9 (2): 619-630. Wang Hong, Lei Hengchi, Li Shuyan, et al. 2004. The seeding experiments of severe convective clouds occurred in the Tibetan Plateau [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 9 (2): 619-630.
- 汪宏宇, 刘万军. 1997. 人工增雨催化剂扩散数值模拟 [J]. 辽宁气象, (2): 31-32. Wang Hongyu, Liu Wanjuan. 1997. Numerical simulate of diffusion of catalyzer in precipitation enhancement [J]. Meteorology Journal of Liaoning (in Chinese), (2): 31-32.
- 王莉萍, 罗德建. 2002. 高炮人工增雨(消雹)作业参数的设计 [J]. 湖北气象, (2): 7-9. Wang Liping, Luo Dejian. 2002.

- Design of parameter in precipitation enhancement with artillery shells [J]. Meteorology Journal of Hubei (in Chinese), (2): 7 - 9.
- 余兴, 王晓玲, 戴进. 2002. 过冷层状云中飞机播云有效区域的模拟研究 [J]. 气象学报, 60 (2): 205 - 214. Yu Xing, Wang Xiaoling, Dai Jin. 2002. Research on simulation of effective range for cloud seeding by aircraft within super-cooled stratus [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 60 (2): 205 - 214.
- 中国气象局科技发展司. 2003. 人工影响天气岗位培训教材 [M]. 北京: 气象出版社, 198 - 201. CMA Department of Scientific and Technological Development. 2003. Post Teaching Material of Weather Modification [M] (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 198 - 201.