

许志丽,徐亮亮,毕力格,等.内蒙古中部地区层状云微物理特征及可播度分析[J].干旱气象,2025,43(1):126-132, [XU Zhili, XU Liangliang, BI Lige, et al. Analysis on microphysical characteristics and seedability of stratiform clouds in middle region of Inner Mongolia [J]. Journal of Arid Meteorology, 2025, 43(1):126-132], DOI:10.11755/j.issn.1006-7639(2025)-01-0126

内蒙古中部地区层状云微物理特征及可播度分析

许志丽¹,徐亮亮²,毕力格¹,史金丽¹,辛悦¹,刘沫彤³

(1. 内蒙古自治区人工影响天气中心,内蒙古 呼和浩特 010051;2. 内蒙古自治区气象数据中心,内蒙古 呼和浩特 010051;
3. 内蒙古自治区赤峰市气象局,内蒙古 赤峰 024000)

摘要:对层状云降水云系开展云微物理特征及可播性实时识别研究,有利于提高对层状云降水云系增雨催化潜力的认识,为人工增雨作业实时识别提供技术支撑。利用内蒙古中部地区2018—2019年8架次层状云飞机作业机载探测资料,研究该地区层状云微物理特征及人工增雨可播度特征。结果表明:层状云中云水、液态水、过冷水出现频率分别为59.97%、82.99%、70.84%;液态水含量主要集中在0.001~0.100 g·m⁻³,过冷水含量主要分布在0.010~0.100 g·m⁻³,具有较好的引晶催化潜力。大云粒子数浓度平均为8个·cm⁻³,数浓度大于20个·cm⁻³的占比14.10%;小云粒子数浓度平均为20个·cm⁻³,数浓度大于20个·cm⁻³的占比28.54%。云粒子数浓度总体上较小,70%以上的云粒子位于负温区。层状云中小云粒子数浓度达到15个·cm⁻³时,云区具有可播度;当可播云区中大云粒子数浓度小于10个·cm⁻³时,云区具有强可播度。

关键词:层状云;人工增雨;云微物理特征;可播度

文章编号:1006-7639(2025)01-0126-07 DOI:10.11755/j.issn.1006-7639(2025)-01-0126

中图分类号:P481

文献标志码:A

0 引言

水资源短缺是影响我国北方地区农业发展的重要因素,在我国干旱半干旱地区更甚(杨春荣等,2011)。近年来,随着全球气候变暖,干旱区面积加速扩张,干旱发生频率增多,水土流失、植被破坏及自然灾害频发使得生态环境更加脆弱,生态环境的恢复和可持续发展一直是科学研究的热点(赵雪雁等,2015),而开展人工增雨作业,有效开发空中云水资源,是维持生态环境可持续发展、缓解水资源短缺的有效手段之一(陈乾和田清鉴,2013;许志丽等,2022)。内蒙古自治区属于干旱半干旱气候区,干旱发生较为频繁,严重影响农牧业生产(杨阳等,2022;李慧等,2023)。内蒙古自治区是最早开展人工增雨作业的省区之一,且常年开展人工增雨作业,飞机作业规模居全国之首,科学、高效地实施人

工增雨作业对当地抗旱增雨、气象防灾减灾、生态修复等方面都具有重要的现实意义。

飞机人工增雨作业的主要云系为降水性层状冷云。大量观测和分析(Rangno and Hobbs, 2001)表明,层状云结构和降水过程不仅与云中冰晶浓度、云的厚度和过冷水含量有关,也与暖层特性有关,还与云内的微物理过程和动力过程有关(Orville et al., 1984)。早在20世纪60年代初,我国就开始利用铝箔取样技术对降水性层状云中的冰晶、雪晶进行飞机观测(游来光等,1965),发现在我国北方层状冷云中冰晶浓度很高,过冷水较少且通常只在-20~0℃的云层中存在。在20世纪80年代初,我国开始引进国际先进的机载云物理探测系统,并结合卫星、雷达、探空、地面降水观测等手段,对北方地区云、降水物理、人工增雨资源及其自然背景等问题开展外场考察和人工增雨试验研究,建立了北方

收稿日期:2023-07-10;改回日期:2023-11-14

基金项目:内蒙古自治区重点研发和成果转化项目(2022YFSH0132)、内蒙古自治区自然科学基金项目(2022LHMS04003、2020MS04015)及内蒙古气象局科技创新项目(nmqxkjc202014)共同资助

作者简介:许志丽(1987—),女,内蒙古呼和浩特市人,高级工程师,主要从事大气物理与人工影响天气研究。E-mail:184893995@qq.com。

通信作者:毕力格(1984—),男,内蒙古鄂尔多斯市人,正高级工程师,主要从事大气物理与大气环境、人工影响天气研究。

E-mail:54551072@qq.com。

地区几种降水系统的云物理概念模型。随后很多科研及业务工作者利用增雨机载气象和云物理探测仪器对不同区域的云降水物理结构和人工增雨条件进行了研究(张连云和冯桂利,1997;李淑日等,2001;秦彦硕等,2015;周黎明等,2016;付娇等,2023),并根据云系的宏微观特征识别人工催化作业云系,用于判别增雨潜力区、作业时机、催化手段和方法等(胡志晋,2001;陈文选和王俊,2001;孙玉稳等,2015)。如针对河南春季 16 个层状云个例模拟发现,不同类型层状云降水微物理过程各有不同,普遍存在“播种—供应”机制(周毓荃,1997);在青藏高原东部春季降水云层中,云滴尺度宽、冰晶浓度较低,降水云层中增雨潜力较大(李仑格和德力格尔,2001);河北地区层状云人工增雨潜力区一般只占云区的 1/2 左右,有时存在大片的强可播区(杨文霞等,2005);吉林省春季降水性层状云的可播度可达 86%,其中雨层云云型的人工降水潜力最大,避光层雨云云型次之,潜力最小的是透光高层云(刘健等,2005);陕西延安地区降水性层状云中过冷水滴和冰晶共存层可能是发生降水的关键(王扬锋等,2007)。

人工增雨作业可播度,是一种判断即将作业的云系是否具备作业可能性的指标。研究表明,云中过冷水含量和云滴数浓度是云中重要的微物理要素之一,在系统性层状冷云人工增雨工作中,云中的过冷水含量、云滴数浓度也是判断人工增雨作业潜力条件、作业可播度的最重要参数之一(周德平等,2004)。从理论上讲,用过冷水含量和冰晶数浓度识别增雨潜力区最适当,但实际开展工作时,由于不能直接测量过冷水含量,用过冷水含量作为判据识别增雨潜力、作业可播度不可靠(陈保国等,2010)。在北方层状云人工增雨试验研究中,游来光(1994)指出在掌握宏观天气系统、云系结构的基

础上,利用机载粒子测量系统(Particle Measuring System, PMS)实时探测资料研究云系的云粒子浓度、尺度的水平和垂直分布特征,可提高对云降水形成机理的认识。陶树旺等(2001)结合雷达回波、粒子测量系统探测资料以及 GPS 定位资料,得到了云中可播性判别指标。

由于自然云雨的复杂多变以及对云的催化技术掌握不足,在实际人工增雨作业中,难以把握适当时机、适当部位,判断人工增雨潜力仍是一个非常复杂的科学问题。因此在实施人工增雨作业前,对作业云系的宏微观特征进行预判,提前确定合适的作业区域,科学地实施人工增雨十分必要。本文利用 2018—2019 年内蒙古中部地区人工增雨机载云粒子探测资料,研究层状云微物理及可播度特征,提高对云物理特征的认识,以期对飞机人工增雨作业选择作业时机、作业部位提供科学依据。

1 资料与方法

1.1 资料及处理

主要使用内蒙古中部地区 2018—2019 年机载云粒子探测数据。探测仪器为机载大气粒子测量系统,该系统包括降水粒子图像探头(Precipitation Imaging Probe, PIP)(100~6 200 μm)、云粒子图像探头(Cloud Imaging Probe, CIP)(25~1 550 μm)、云和气溶胶探头(Cloud and Aerosol Spectrometer, CAS)(0.54~50.00 μm)、热线含水量仪(Liquid Water Content Sensor)(0~3 g·m⁻³)、云凝结核计数器(Cloud Condensation Nuclei Counter, CCN)(0.5~10.0 μm)、大气温湿探测系统及露点温度计等。

在 2018—2019 年飞机冷云增雨催化个例中,作业效果较好且对探测数据质量控制分析后,各探头数据能保持时间一致的个例为 8 架次(表 1)。数据质量控制参考刘晓璐等(2021)的探测数据校对方

表 1 2018—2019 年层状冷云作业个例统计
Tab. 1 Statistics of stratiform cold cloud operation cases during 2018–2019

作业日期	天气系统	飞行时间	催化时间	探测时间
2018-04-04	高空槽	10:50—12:58	11:20—12:28	10:52:17—12:40:05
2018-04-13	高空槽	07:40—10:10	08:01—09:30	07:35:19—09:50:14
2018-04-20	高空槽	14:13—17:23	14:40—16:28	14:16:05—17:10:16
2018-05-10	高空槽	15:16—18:02	15:36—17:28	15:21:12—16:03:55
2018-09-10	高空槽	08:53—12:18	09:30—10:30	08:56:29—12:07:22
2019-04-10	高空槽	09:45—12:45	10:30—11:25	09:35:48—12:29:32
2019-04-24	高空槽	10:30—03:15	10:48—12:20	10:35:39—12:53:34
2019-04-27	切变线	10:02—13:23	10:30—11:05	10:03:53—13:15:52

注:表中时间均为北京时。

法,结合各探头的探测原理,提取和分析影响各探头工作状态的指标项共 19 项,当探测数据符合各指标项指标范围,即认为数据可信。

1.2 方 法

聚类分析方法是把一个没有类别标记的样本集按某种相似性划分为若干类,将相似的样本尽可能地归为一类,不相似的样本尽量划分到不同的类中,类内样本距离尽量小,而不同类之间的距离尽可能大。该方法已广泛应用于气候区划、模式识别、数据分析和图像处理等方面。

文中利用聚类分析方法,将层状云可播度划分为 2 个类别,即可播与不可播。依据人工引晶催化增雨原理,参照陶树旺等(2001)研究成果,选取 CAS 云滴数浓度以及 CIP 粒子数浓度作为聚类样本特征。

2 结果与分析

2.1 层状云微物理特征

2.1.1 云水分布

云水含量是反映层状云云水资源和人工增雨潜力的重要标志,对不同区间云水含量累积频率分布特征的分析,对把握云水资源背景具有重要意义(陈保国等,2010)。参考 Hobbs(1991)提出的将云中探测到的直径大于 2 μm 的小云粒子数浓度超过 10 个 $\cdot\text{cm}^{-3}$ 作为云水区的判定标准,统计 8 架次层状云云水出现频率,在 73 931 组资料中有 44 340 组记录探测到云水,云水出现频率为 59.97%,在 44 340 组云水记录中探测到液态水不为 0 的记录为 36 798 组,因此液态水出现的频率为 82.99%,探测到云层温度低于 0 $^{\circ}\text{C}$ 的液态水记录为 26 067 组,因此云中过冷水(温度低于 0 $^{\circ}\text{C}$ 的液态水)出现频率为 70.84%。

2.1.2 液态水分布

云中液态水含量(Liquid Water Content, LWC)是指高空单位体积的云中所含水的含量,在冷云人工增雨作业过程中,云中的液态水含量可以表征过冷水含量,可作为衡量人工增雨潜力和增雨作业条件的重要指标。统计不同区间液态水含量累积频率的分布(表 2)发现,99.62% 的液态水含量大于 0.001 $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,85.09% 的液态水含量大于 0.010 $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,47.81% 的液态水含量大于 0.100 $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,大于 1.000 $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 的液态水含量累积频率为 14.04%,总平均液态水含量为 0.087 $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。内蒙古中部地区层状云中液态水含量较小,可能是由于飞行作业过程中作业温度较

高,水蒸气密度较大,水分子容易保持气态而不容易凝结成水滴或冰晶,所以探测到云中的液态水或固态水含量就比较低。

表 2 不同区间液态水含量累积频率分布

Tab. 2 Cumulative frequency distribution of liquid water content in different sections

液态水含量/($\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)	频率/%
LWC>0. 001	99. 62
LWC>0. 005	88. 73
LWC>0. 010	85. 09
LWC>0. 050	68. 92
LWC>0. 100	47. 81
LWC>0. 250	16. 26
LWC>0. 500	14. 31
LWC>1. 000	14. 04

2.1.3 过冷水分布

表 3 为不同区间过冷水含量(Supercooled Water Content, SCWC)累积频率分布。可见,80.15% 的过冷水含量大于 0.010 $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,37.73% 的过冷水含量大于 0.100 $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,过冷水含量大于 0.250 $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 的累积频率为 2.70%,过冷水含量大于 0.500 $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 的频率较小为 1.28%,总平均过冷水含量为 0.077 $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。

表 3 不同区间过冷水含量累积频率分布

Tab. 3 Cumulative frequency distribution of supercooled water content in different sections

过冷水含量/($\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)	频率/%
SCWC>0. 001	99. 41
SCWC>0. 010	80. 15
SCWC>0. 050	58. 45
SCWC>0. 100	37. 73
SCWC>0. 250	2. 70
SCWC>0. 500	1. 28
SCWC>1. 000	0. 91

统计发现,春季,高度位于 3 600~4 000 m,温度小于 -6 $^{\circ}\text{C}$ 的区域,过冷水含量均值为 0.124 $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,最大值可达 0.794 $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$;秋季,高度位于 3 600~3 800 m,温度小于 -6 $^{\circ}\text{C}$ 的区域,过冷水含量均值为 0.084 $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,最大值可达 0.973 $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。表明在层状云温度较低的区域,存在过冷水含量大值区,具有引晶催化的潜力。

2.1.4 粒子数浓度统计特征

CIP 大云粒子数浓度反映的是自然云中降水(或其胚胎)粒子的多少。统计不同区间云粒子数浓度累积频率(表 4)发现,内蒙古中部地区 CIP 大云

粒子数浓度大于 10、20、50、100 个·cm⁻³ 的累积频率分别为 19.06%、14.10%、6.72%、2.39%，大云粒子数浓度平均为 8 个·cm⁻³。CAS 小云粒子数浓度大于 10、20、50、100 个·cm⁻³ 的累积频率分别为 43.94%、28.54%、9.54%、1.57%，小云粒子数浓度平均为 20 个·cm⁻³。

表 4 不同区间粒子数浓度累积频率分布

Tab. 4 Cumulative frequency distribution of particle number concentration in different intervals

粒子数浓度/ (个·cm ⁻³)	CIP 粒子 数浓度累 积频率/%	CAS 粒子 数浓度累 积频率/%	冷云区 CIP 粒子数浓度 累积频率/%	冷云区 CAS 粒子数浓度 累积频率/%
>5	23.60	59.76	26.40	52.53
>10	19.06	43.94	23.02	33.47
>20	14.10	28.54	16.01	16.51
>50	6.72	9.54	7.29	3.93
>100	2.39	1.57	1.94	0.63

进一步统计分析不同温度区间云中粒子数浓度特征发现,70% 以上的云粒子位于负温区。在温度 $T>0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的暖云区(表略),CIP 大云粒子数浓度大多小于 50 个·cm⁻³,大于 50 个·cm⁻³ 的频率不到 6.00%,其中有 89.00% 的云粒子数浓度小于 20 个·cm⁻³。CAS 小云粒子数浓度在 3 个·cm⁻³ 以下的频率为 15.85%,在 5~10、>10~50、>50~200 个·cm⁻³ 的频率分别为 7.45%、48.21%、24.19%,可见暖云区小云粒子数浓度主要分布在 10~50 个·cm⁻³。

在 $T<0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的冷云区,83.99% 的大云粒子数浓度小于 20 个·cm⁻³,冷云区平均粒子数浓度为 9 个·cm⁻³。小云粒子数浓度位于 >5~50 个·cm⁻³ 的频率达 48.60%,位于 >50~100 个·cm⁻³ 的频率为 3.30%,超过 100 个·cm⁻³ 的频率不到 1.00%(表 4)。可见,云粒子数浓度不论在暖云区还是冷云区,数浓度越大,占比越小,且云粒子数浓度总体上较小,这可能与增雨作业飞机在层状云中下部进行作业探测有关。

2.2 层状云可播度

2.2.1 层状云可播度特征

图 1 为云粒子数浓度聚类结果,第 1 类表征为不可播,第 2 类表征为可播。从整体数据分布来看,第 1 类结果 CAS 小云滴数浓度范围为 0~77 个·cm⁻³,中心点值为 11 个·cm⁻³,CIP 大云粒子数浓度范围为 39~183 个·cm⁻³,中心点值为 73 个·cm⁻³;第 2 类结果 CAS 小云滴数浓度范围为 0~102 个·cm⁻³,中心点值为 15 个·cm⁻³,CIP 大云粒子数浓度为 0~37 个·cm⁻³,中心点值为 4 个·cm⁻³。聚类结果与游来光(1994)

的研究结果相近,即只有当小云粒子数浓度大于 10 个·cm⁻³ 时,相应云区才具有一定的可播度。

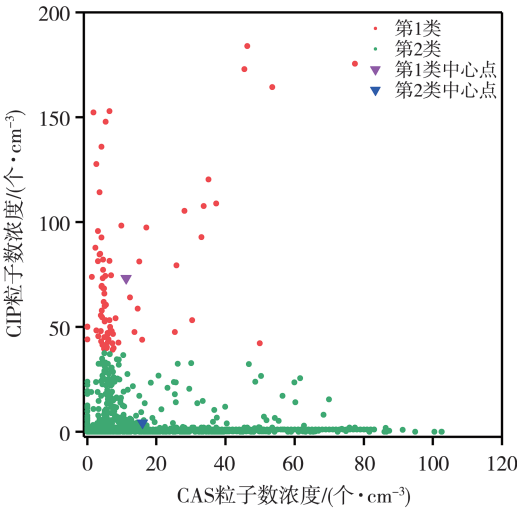


图 1 云粒子数浓度聚类分析结果

Fig. 1 Cloud particle number concentration cluster analysis results

图 2、图 3 分别为云区 CAS 小云粒子数浓度、CIP 大云粒子数浓度箱线图。不可播区 CAS 小云粒子数浓度最大值为 15.87 个·cm⁻³;可播区 CAS 小云粒子数浓度有 50% 以上超过 7.42 个·cm⁻³,均值也达 15.93 个·cm⁻³。从 CAS 小云粒子数浓度分布来看,云区的 CAS 粒子数浓度达到 15 个·cm⁻³ 时,可认为云区具有可播度。

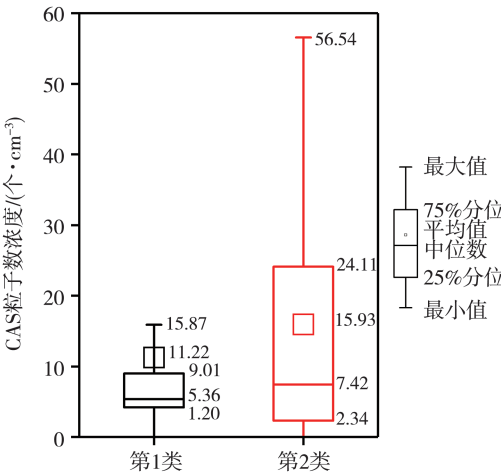


图 2 CAS 小云粒子数浓度聚类分布

Fig. 2 The cluster distribution of the CAS small cloud particles number concentration

CIP 大云粒子数浓度反映云中冰晶浓度即冰晶的多少,当自然云中冰晶浓度较大时,人工引晶催化作用就较小,增雨作业所起的作用也较小,云的

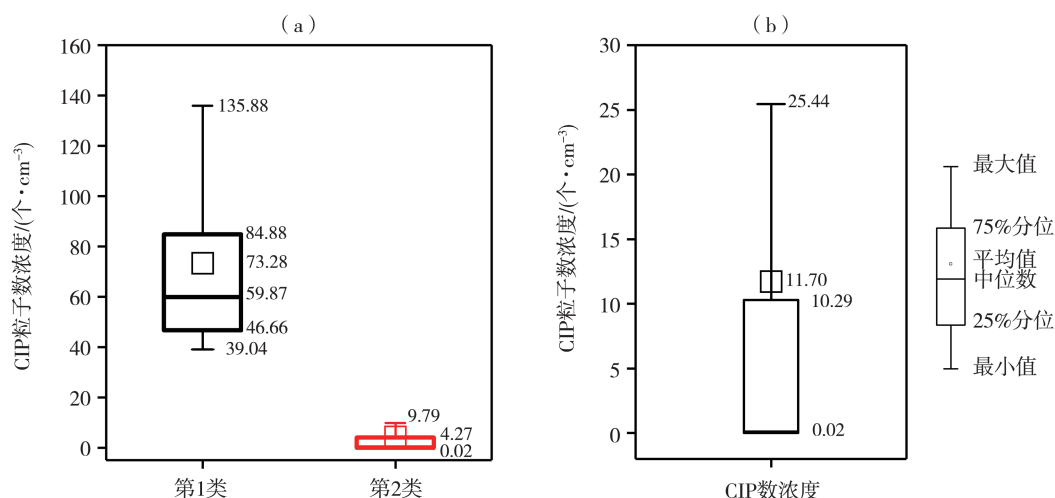


图3 CIP大云粒子数浓度聚类分布(a)及其总体分布(b)

Fig. 3 Cluster distribution (a) and the overall distribution (b) of the CIP big cloud particles number concentration

可播度就较小;反之,当云中冰晶浓度较低时,通过人工引晶手段增加云中冰晶含量,使云中水汽和过冷却水滴在冰晶表面迅速凝华从而降落,此时增雨作业所起的作用就较大,云的可播度也大。所以,CIP大云粒子数浓度较大时,云的可播度较小,反之云的可播度会较大。根据CIP大云粒子数浓度分布,可播区CIP大云粒子数浓度最大值为 $9.79 \text{ 个} \cdot \text{cm}^{-3}$,CIP大云粒子数浓度总体的75%不超过 $10.29 \text{ 个} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。综合以上分析,当云区CAS小云粒子数浓度达到 $15 \text{ 个} \cdot \text{cm}^{-3}$ 、CIP大云粒子数浓度小于 $10 \text{ 个} \cdot \text{cm}^{-3}$ 可作为内蒙古中部地区层状云人工增雨可播度的微物理判据。

2.2.2 层状云可播度判别指标

根据上节内蒙古中部地区层状云可播度特征分析,内蒙古中部地区层状云人工增雨可播度微物理判别指标为:当CAS小云滴数浓度小于 $15 \text{ 个} \cdot \text{cm}^{-3}$,则认为该云系不可播;若CAS小云滴数浓度大于等于 $15 \text{ 个} \cdot \text{cm}^{-3}$,当CIP粒子数浓度大于等于 $10 \text{ 个} \cdot \text{cm}^{-3}$ 时,认为该云系可播,当CIP粒子数浓度小于 $10 \text{ 个} \cdot \text{cm}^{-3}$ 时,认为该云系为强可播。

《人工影响天气岗位培训教材》(中国气象局科技发展司,2003)中,北方层状云人工增雨可播度判别指标为小云粒子数浓度大于 $20 \text{ 个} \cdot \text{cm}^{-3}$ 、大云粒子数浓度小于 $20 \text{ 个} \cdot \text{cm}^{-3}$,与其相比上述的可播度判别指标总体上偏小,这可能与内蒙古中部地区层状云中CAS、CIP粒子数浓度的总体分布有关。从飞机作业高度看,飞机飞行高度多位于层状云的中下部,探测的云中粒子数浓度偏小,因此根据内蒙古中部地区层状云的实际情况,结合飞机催化作业的个

例分析,将CAS粒子数浓度大于等于 $15 \text{ 个} \cdot \text{cm}^{-3}$ 、CIP大云粒子数浓度大于等于 $10 \text{ 个} \cdot \text{cm}^{-3}$ 作为可播度判别指标是较为合适的。

3 结论与讨论

本文利用内蒙古中部地区层状云飞机作业机载探测资料,分析层状云微物理特征,用聚类分析方法对人工增雨可播度特征进行研究,得到如下结论。

(1)通过统计层状云各微物理量分布特征发现,8架次层状云飞机飞行作业过程中,云水、液态水、过冷水出现的频率分别为59.97%、82.99%、70.84%。飞行过程中总平均液态水含量为 $0.087 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$,过冷水含量主要分布在 $0.010 \sim 0.100 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$,总平均过冷水含量为 $0.077 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$;在层状云温度较低的区域,存在过冷水含量大值区,人工引晶催化的潜力较好。层状云中下部云粒子数浓度较小,70%以上的云粒子(大云粒子、小云粒子)位于负温区;在 $T < 0^\circ \text{C}$ 的冷云区,83.99%的CIP粒子数浓度小于 $20 \text{ 个} \cdot \text{cm}^{-3}$,96.07%的CAS粒子数浓度小于 $50 \text{ 个} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。

(2)8架次探测资料综合分析得出内蒙古中部地区层状云可播度微物理判别指标为:层状云中CAS小云粒子数浓度大于等于 $15 \text{ 个} \cdot \text{cm}^{-3}$ 时,云区具有可播度;当可播云区中CIP大云粒子数浓度小于 $10 \text{ 个} \cdot \text{cm}^{-3}$ 时,云区具有强可播度。

利用机载探测资料开展层状云微物理及可播度特征研究时,增雨作业飞机搭载的机载探测设备由于受到自身探测原理、观测环境、人为操作及飞机姿态等因素的影响,探测数据可能存在一定的系

统或者观测误差,此外由于探测系统内部结构主要由螺钉进行精确定位,有较多的易损耗元器件,随着工作总时间延长,各探头的工作性能逐渐降低也会带来一定的误差。尽管本文已经对探测数据进行了质量控制,但仍然不能保证数据的全部精准,这有可能给文中的结果分析带来一定的不确定性。在后续工作中,需要针对更多的层状云增雨作业飞行探测过程进行分析,对判别指标进行检验与订正。

参考文献:

- 陈保国,栗珂,刘跃峰,等,2010.层状云人工增雨可播性实时识别微物理判据研究[C]//中国气象学会.第27届中国气象学会年会大气物理学与大气环境分会场论文集.北京:气象出版社.
- 陈乾,田清鉴,2013.开发长江上游空中云水资源增加南水北调中线的水量[J].干旱气象,31(1):163-173.
- 陈文选,王俊,2001.黄淮气旋降水性层状云系微物理特征的综合分析[J].气象,27(10):13-16.
- 付娇,王姝怡,董晓波,等,2023.基于飞机探测的华北南部低槽冷锋云系宏微物理结构特征[J].干旱气象,41(3):450-462.
- 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1):10-13.
- 李慧,郑旭程,苏立娟,等,2023.基于毫米波云雷达的黄河流域内蒙古段云宏观特征分析[J].干旱气象,41(3):434-441.
- 李仑格,德力格尔,2001.高原东部春季降水云层的微物理特征分析[J].高原气象,20(2):191-196.
- 李淑日,王广河,刘卫国,2001.降水性层状云微物理结构个例分析[J].气象,27(11):17-21.
- 刘健,李茂仑,蒋彤,等,2005.吉林省春季降水性层状云基本结构及降水潜力的初步研究[J].气象科学,25(6):609-616.
- 刘晓璐,张元,刘东升,2021.机载热线含水量仪探测数据校验方法[J].应用气象学报,32(6):748-758.
- 秦彦硕,刘世玺,范根昌,等,2015.华北地区春季一次层状云的微物理特征及可播性分析[J].干旱气象,33(3):481-489.
- 孙玉稳,李宝东,刘伟,等,2015.河北秋季层状云物理结构及适播性分析[J].高原气象,34(1):237-250.
- 陶树旺,刘卫国,李念童,等,2001.层状冷云人工增雨可播性实时识别技术研究[J].应用气象学报,12(增刊1):14-22.
- 王扬锋,雷恒池,樊鹏,等,2007.一次延安层状云微物理结构特征及降水机制研究[J].高原气象,26(2):388-395.
- 许志丽,衣娜娜,毕立格,等,2022.内蒙古中部一次春季透雨过程的云微物理特征分析[J].干旱气象,40(4):632-639.
- 杨春荣,王洪丽,王爱军,2011.阿荣旗2008年春季第一场透雨天气分析[J].内蒙古气象(1):25-26.
- 杨文霞,牛生杰,魏俊国,等,2005.河北省层状云降水系统微物理结构的飞机观测研究[J].高原气象,24(1):84-90.
- 杨阳,齐月,赵鸿,等,2022.水分胁迫对干旱半干旱区玉米关键生育期生长发育及产量的影响及评价[J].干旱气象,40(6):1059-1067.
- 游来光,1994.利用粒子测量系统研究云物理过程和人工增雨条件[M].北京:气象出版社.
- 游来光,熊光莹,高明忍,等,1965.春季吉林地区层状冷云中冰晶的形成与雪晶增长特点[J].气象学报,23(4):423-433.
- 张连云,冯桂利,1997.降水性层状云的微物理特征及人工增雨催化条件的研究[J].气象,23(5):4-8.
- 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.
- 周德平,宫福久,高建春,等,2004.一次飞机播云的微物理效应分析[J].气象科学,24(4):405-412.
- 周黎明,王庆,龚佃利,等,2016.2015年春季山东一场转折性降水微物理特征分析[J].干旱气象,34(4):678-684.
- 周毓荃,1997.河南春季降水性层状云微物理特征及催化潜力分析[J].河南气象,20(3):37-38.
- 赵雪雁,王亚茹,张钦,等,2015.近50a青藏高原东部夏半年强降水事件的气候特征[J].干旱区地理,38(4):675-683.
- HOBBS P V, 1991. Twenty years of airborne research at the University of Washington[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 72(11): 1707-1716.
- ORVILLE H D, FARLEY R D, HIRSCH J H, 1984. Some surprising results from simulated seeding of stratiform-type clouds[J]. Journal of Climate and Applied Meteorology, 23(12): 1585-1600.
- RANGNO A L, HOBBS P V, 2001. Ice particles in stratiform clouds in the Arctic and possible mechanisms for the production of high ice concentrations[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 106(D14): 15065-15075.

Analysis on microphysical characteristics and seedability of stratiform clouds
in middle region of Inner Mongolia

XU Zhili¹, XU Liangliang², BI Lige¹, SHI Jinli¹, XIN Yue¹, LIU Motong³

- (1. Inner Mongolia Weather Modification, Hohhot 010051, China;
2. Inner Mongolia Autonomous Region Meteorological Data Center, Hohhot 010051, China;
3. Chifeng Meteorological Bureau of Inner Mongolia, Chifeng 024000, Inner Mongolia, China)

Abstract: Real-time identification of cloud microphysical characteristics and seeding ability of stratiform cloud precipitation system is beneficial for improving the understanding of the catalytic potential of stratiform cloud precipitation system, and providing technical support for real-time identification of artificial rainfall enhancement. The microphysical characteristics and the seeding ability of stratiform cloud in the middle of Inner Mongolia were analyzed by using airborne detection data of 8 stratiform cloud aircraft operations from 2018 to 2019. The results show that the occurring frequencies of cloud water, liquid water, and supercooled water in stratiform clouds are 59.97%, 82.99% and 70.84%, respectively. The liquid water content is mainly concentrated between 0.001 and 0.100 g·m⁻³, while the supercooled water content is mainly distributed between 0.010 and 0.100 g·m⁻³, which indicates good potential for crystal seeding catalysis. The average number concentration of large cloud particles is 8 cm⁻³, and the number concentration more than 20 cm⁻³ accounted for 14.10%. The small cloud particle number concentration is 20 cm⁻³ on average, and the number concentration greater than 20 cm⁻³ accounted for 28.54%. More than 70% cloud particles are located in the negative temperature region, and the particle number concentration is generally small. When the number concentration of small cloud particle reaches 15 cm⁻³, the cloud region has certain seeding ability, while when the number concentration of large cloud particle is less than 10 cm⁻³, the cloud region has highly seeding ability.

Key words: stratiform cloud; artificial precipitation enhancement; microphysical characteristics; seeding ability

(责任编辑:王涓力;校对:黄小燕)

《干旱气象》2024 年度优秀论文

题名	作者	卷(期)
2022 年 7 月内蒙古干旱半干旱区涝—旱转折事件的成因分析	刘 炜,赵艳丽,高 晶,等	42(1)
近 60 a 中国极端天气气候事件变化趋势及 2023 年特征分析	张存杰,张思齐,宁惠芳	42(4)
贵州省两次气象干旱对比分析及基于机器学习的干旱预测模型建立	王玥彤,何东坡,李忠燕,等	42(5)
石羊河流域复合高温干旱事件的识别及其演变特征	杨晓玲,孙旭映,杨金虎,等	42(6)
湖北省区域性高温、干旱及其复合事件变化特征及危险性评估	张玉翠,谭江红,闫彩霞	42(6)
基于温度植被干旱指数(TVDI)的甘肃省农业干旱监测方法研究	沙 莎,王丽娟,王小平,等	42(1)