

孙鸿娉, 李培仁, 王功娃, 等. 2012. 山西省人工增雨天气条件研究 [J]. 气候与环境研究, 17 (6): 903–910, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2012.06.27. Sun Hongping, Li Peiren, Wang Gongwa, et al. 2012. Precipitation enhancement weather condition research in Shanxi Province [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 17 (6): 903–910.

山西省人工增雨天气条件研究

孙鸿娉 李培仁 王功娃 申东东 封秋娟 李义宇

山西省人工降雨防雹办公室, 太原 030002

摘 要 为了使人工增雨更有针对性, 需要在作业方案制定阶段就对未来影响天气系统有一个明确的判断, 需要总结出一套适合山西省进行人工增雨作业的天气概念模型。为此, 普查了 1991~2000 年欧亚范围高空及地面天气图, 筛选出影响山西省并产生降水的天气系统, 加以分析归纳, 建立了 4 种有利于山西省人工增雨作业的天气概念模型, 即西风槽型、华北冷涡型、切变线型及副热带高压型, 并分别给出了未来 12~24 h 影响山西省的警戒区及最佳人工增雨作业区。

关键词 天气概念模型 人工增雨 山西

文章编号 1006-9585 (2012) 06-0903-08

中图分类号 P401

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2012.06.27

Precipitation Enhancement Weather Condition Research in Shanxi Province

SUN Hongping, LI Peiren, WANG Gongwa, SHEN Dongdong, FENG Qiujuan, and LI Yiyu

Weather Modification Office of Shanxi Province, Taiyuan 030002

Abstract To enhance the effectiveness of artificial precipitation operation in Shanxi Province, it is necessary to estimate the influencing weather systems accurately when operation begins and develop conceptual synoptic models of precipitation enhancement operation. Four types of synoptic models (westerly trough, north cold cyclone, shear linear, and subtropical high) were established on the basis of an analysis of the characteristics of atmospheric circulation affecting precipitation over Shanxi Province and a survey of the upper-level and ground weather charts of the Eurasian region from 1991 to 2000. The precautionary areas for the next 12 h to 24 h and the optimized seeding areas for precipitation enhancement in Shanxi Province can be obtained.

Keywords Influencing weather systems, Precipitation enhancement operation, Shanxi Province

1 引言

山西省十年九旱, 多年平均降水量 476.8 mm, 比全国多年平均降水量 628 mm 偏少 24%, 比华北地区多年平均降水量 547 mm 偏少 12.8%; 人均水

资源量, 相当于全国人均水资源的 20%, 为世界人均占有量的 3.8%, 水资源严重匮乏, 水的问题已成为严重制约山西省国民经济健康发展的主要因素之一。为解决山西省水资源紧缺问题, 多年来在山西省委、省政府的大力支持山西省人影办力争抓住每一次作业机会进行人工增雨外场作业, 积累了

收稿日期 2012-08-15 收到, 2012-09-31 收到修定稿

资助项目 山西省科技攻关项目 2007031106-2, 中国气象局云雾物理环境重点开放实验室重点开放科研项目 2009Z0033, 公益性行业 (气象) 科研专项 GYHY201206025, 中国气象局小型业务项目 1220200108

作者简介 孙鸿娉, 女, 1977 年出生, 硕士, 高级工程师, 主要从事云降水物理与人工影响天气方面研究。E-mail: fengdichen@sohu.com。

丰富的资料。实施人工增雨作业就要人为地去竭力适应自然云中各种因子复杂多变、互相制约、极不确定的云水、冰水转化过程。这就需要依据多种实时有效的探测技术、多尺度实测资料和多学科的渗透、多方面的有机组合进行弥补等,而山西省的地形、天气气候情况较为复杂,以云与降水物理及多尺度探测信息与资料为基础,以天气概念模型、判据指标为作业条件的科学依据,信息化、自动化程度高、实时快捷地准确判断云系的可播性,才能适应人工增雨外场作业的要求,最大限度地开发利用云水资源。

国内外许多科研机构,气象部门都做了大量工作(雷恒池等,2001;姚展予,2001;黄美元,2011;李宏宇等,2011)。利用1993~2004年高空和地面资料,统计分析了祁连山降水环流特征,得出祁连山降水的主要形势为高空冷槽型、西南气流型、西北气流型(王学良和陶建红,2008)。通过对江西干旱期间的天气条件、气柱水汽量、对流云回波(云顶高度、回波强度等)特征、作业技术方法等进行分析与研究,得出江西省人工增雨作业的基本技术数据和指标,为江西省开展人工增雨抗旱作业提供科学依据(李玉林等,2003)。

但是由于地理位置及局地气候特点的较大差异,许多气象参数和催化指标作业判据的不同,建立一整套概念模型、判据、指标库应是改善现有人工影响天气作业技术的主要途径。本文全面、系统地分析山西省地理情况、天气气候特点以及多年来实施人工增雨作业的天气条件选择和实际增雨效果,以人工增雨科学实施外场作业为主要目标,建立山西省人工增雨天气概念模型作为作业条件及科学依据。

2 雨潜力日的确定及气候特征分析

2.1 增雨潜力日的确定

根据山西省多年飞机人工增雨的实际观测结果,结合降水实况和目前人工增雨作业的适宜条件和初步的增雨效率评估,山西省降雨期(3~11月)24 h降水量 $R \geq 0.1$ mm,或降雪期(11月至次年2月) $R \geq 0.1$ mm时,定义为人工增雨潜力日满足的必要条件。附加条件为层状云的云底高度低于1000 m,云层厚度大于1700 m,同时人工增雨作业温度在 -4 ℃以下,温度露点差($T -$

T_d) 在 4 ℃以下,此时云中的水汽及液态水含量较充沛。

降水区域的确定:根据山西省的气候特征,确定大同、朔州、忻州、太原、离石、临汾、运城等7个测站为降水区域的代表站。

资料选取:根据上述人工增雨潜力日的标准,从1971~2000年有降水日的资料中进行筛选。

经过筛选确定出年均具有人工增雨潜力的降水日数,结果见图1;阴天日数结果见图2。

从图1、2中均可以明显看出有两个峰值,第1个峰值是主峰,在每年5~10月,是人工增雨的主要阶段;第2个峰值是次峰,在每年2~4月,虽然峰值不是很大,但正是每年的春播时期,非常宝贵。

2.2 增雨潜力日的降水稳定性分析

按云结构和降水产生的性质将云分为3类:

(1)层状云(S):均匀布满天空,产生稳定连续性降水,主要有层云(Fs)、雨层云(Ns)、高层云(As)独立存在或其中的任意两种或3种云并存。

(2)积状云(C):云顶强烈发展,产生阵性对流降水。包括积雨云(Cb)或浓积云(Cu con)。

(3)积层混合云,大片层状云中嵌有对流云的云或云系,这里又分两种情况:层状云伴有弱积状云(S+Cu),以稳定降水为主,或降水由不稳定转为稳定;层状云伴有强盛的积状云(S+Cb),以不稳定降水为主,或降水由稳定转为不稳定。

稳定性降水的定义:在降水过程中无积雨云(Cb)出现。不稳定性降水的定义:在降水过程中有积雨云(Cb)出现。在实际普查降水性质的过程中有一部分降水天气既有积状云降水,同时又有层状云降水,这种混合云降水在6~9月出现的较多,降水量也较大。对有增雨潜力的降水天气进行稳定性统计(表1)。可以看出:在1~3月和12月是稳定的层状云降水,在4和10月两个月中大多数是稳定性层状云降水,少数出现层积混合云降水。在5~9月期间天气较多,层积混合云增多,不稳定性的积状云约占总次数的1/3左右。这期间人工增雨作业的有利时机明显增加。在这里,稳定性降水的定义主要以是否有Cb出现判断,但在混合云降水中也考虑了实际的对流强度、降水强度。

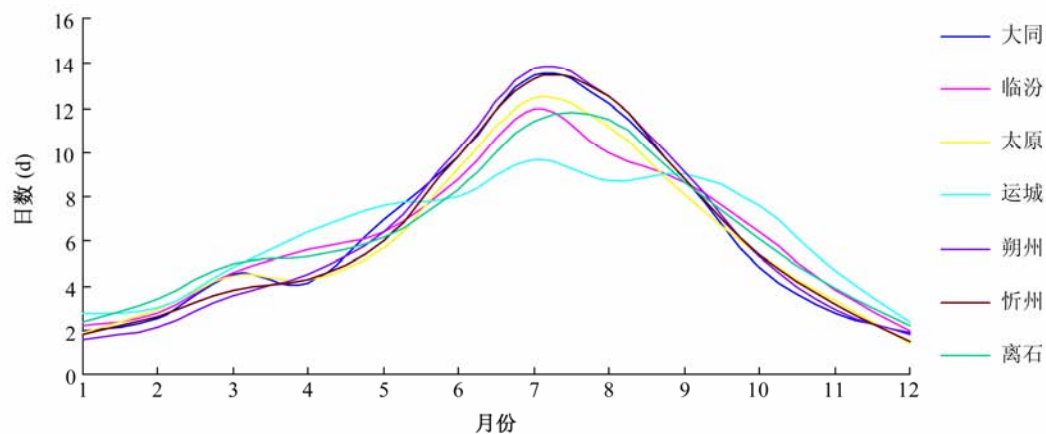


图 1 各区域年均具有人工增雨潜力的日数逐月分布
Fig. 1 Distribution of monthly precipitation enhancement potential days

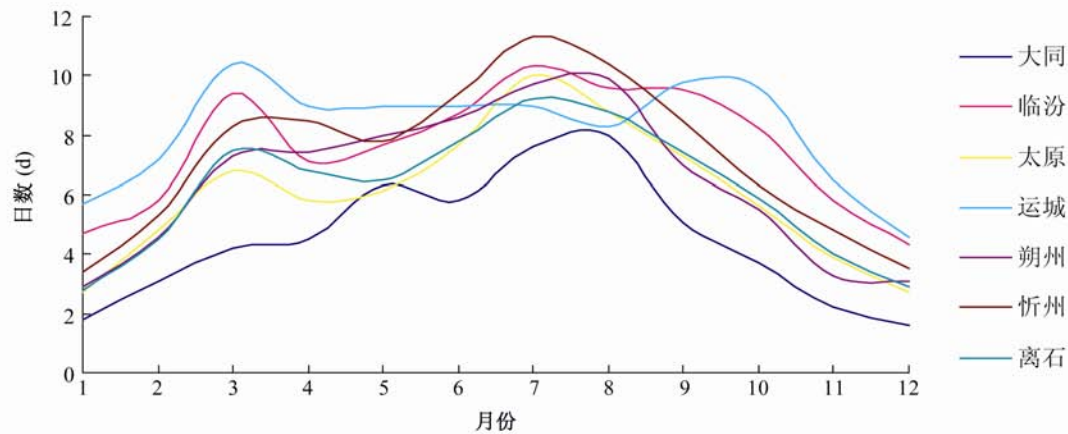


图 2 各区域年均阴天日数逐月分布
Fig. 2 Distribution of monthly cloudy days

表 1 山西省有增雨潜力的各类降水日数统计

Table 1 Statistics of precipitation days		
月份	稳定性降水日数 (d)	不稳定性降水日数 (d)
1 月	12	0
2 月	9	0
3 月	19	0
4 月	22	2
5 月	22	7
6 月	32	16
7 月	25	15
8 月	21	9
9 月	25	13
10 月	16	6
11 月	8	3
12 月	6	0

3 大气环流和气压场普查分析、分型

对 1991~2000 年历史天气图（高空、地面）进行普查分析，确定出增雨潜力日后，再对其天气系统以 500 hPa 为主、700、850 hPa 为辅的高度场和地面气压场进行普查，筛选出个例 263 例，并对其进行分类，确定出适合人工增雨作业的天气系统类型，并给出每种类型的警戒区和作业区。从高空天气形势来划分，可以分成 15 种影响系统，见表 2。

3.1 不同类型天气系统自然降水的年平均特征

山西省的年平均降雨量 476.8 mm，年平均降雨日数为 86.3 d，夏季最多，春秋接近，冬季最少。受 15 种降水天气系统影响，年平均降雨量为 471.15 mm，年平均降雨日数为 83.75 d。各种类型的年平均特征和各季度特征分别见表 3 和表 4。自

表 2 影响系统分类表

Table 2 The classification of system affecting precipitation

编号	系统类型
1	西来槽
2	冷锋
3	东蒙冷涡
4	华北低涡
5	河套低涡
6	西南涡
7	切变线
8	副热带高压（简称副高）后部
9	回流
10	江淮气旋
11	黄河气旋
12	蒙古气旋
13	倒槽
14	台风低压
15	冷空气

然降水资料取自山西省境内 109 个气象台站 1991～2000 年的逐日观测资料。

从表 3 可以看出对年降水量贡献最大的 6 种天气系统分别为西来槽、华北低涡、冷锋、切变线、东蒙冷涡、副高后部，占全年降水量的 90%；出现降水日数最多的 6 种天气系统分别为西来槽、冷锋、切变线、华北低涡、东蒙冷涡、副热带高压（简称副高）后部，占全年降水日数的 92%。副高后部、倒槽、台风低压、黄河气旋、西南涡日平均降水量均 5 mm 以上，但其降水日数都很少；年降水量较多的几种系统，日平均降水量一般偏小，在 2.18～4.74 mm。

表 4 给出了不同季节、不同类型天气系统降水量分布特征。从表 4 可以看出：四季降水量分别为春季 70.8 mm、夏季 317.83 mm、秋季 75.55 mm、冬季 7.95 mm，分别占全年降水量的 14.87%、67.46%、16.03%、1.69%，夏季最多，春、秋接近冬季最少。

从月份分布来看，其中 7、8 月降水最多，分别为 142.0 mm 和 113.79 mm，合计占全年的 55%，其次 6 月份为 62.05 mm，冬季 3 个月降水量最少。3、4、5 月分别和 9、10、11 月接近。

3.2 西来槽型

在普查的影响山西省有增雨潜力的降水天气系统中，西来槽系统（有温度槽配合）的个例有 104 例，占总影响系统的 39.5%。西来槽型年均降水量 223.62 mm，占总降水量的 44.46%。西来槽系统又

表 3 不同天气系统自然降水的年平均特征

Table 3 The annual average precipitation characteristics of different weather systems

	降雨量 (mm)	占总降水 量百分比	占总降		
			降水日数 (d)	水日数 百分比	日雨量 (mm)
西来槽	223.62	47.46%	37.6	44.9%	3.18
冷锋	56.03	11.89%	15.08	18%	2.18
东蒙冷涡	26.7	5.67%	5.31	6.34%	3.13
华北低涡	62.66	13.3%	7.01	8.38%	4.74
河套低涡	9.95	2.11%	1.41	1.68%	3.36
西南涡	1.54	0.33%	0.2	0.24%	5.26
切变线	36.76	7.8%	9.1	10.87%	2.38
副高后部	27.71	5.88%	2.04	2.44%	7.44
回流	3.51	0.75%	1.52	1.82%	1.57
江淮气旋	1.65	0.35%	0.48	0.57%	3.66
黄河气旋	1.12	0.24%	0.14	0.17%	5.69
蒙古气旋	1.52	0.32%	0.34	0.4%	2.71
倒槽	9.04	1.92%	0.82	0.98%	6.97
台风低压	3.94	0.84%	0.37	0.44%	6.76
冷空气	5.43	1.15%	2.34	2.79%	1.89
合计	471.16	100%	83.75	100%	

可细分为以下 2 种类型。

（1）独立竖槽型：即南北走向或者东北—西南走向的槽。这类槽有 68 例，占西来槽型的 65.4%。将这类槽按槽线位置绘于天气图上，如图 3 示意。

从图中可以看出它们都是在 1 个区域中，确定此区域为警戒区，用框图表示。这类槽多出现在冬季的 11、12、1、2 月 4 个月当中。槽后冷空气多来自西伯利亚、贝加尔湖和蒙古国中部地区，进入我国内蒙古东部和黄河河套地区后东移，影响山西省。这类槽多配合地面冷锋或东蒙低压产生降水天气，多数降小雨，但是有少数时候配合黄河气旋和渤海气旋也能产生较大强度的降水。当槽线进入警戒区后在地面系统配合下，未来 12～24 h 可以确定为有增雨潜力的天气形势。这一类型槽多数是稳定的层状云降水。按我们的经验这一类型适合开展飞机人工增雨作业，作业位置是地面冷锋后部和高空槽前区域，如图 4 所示。如果是前倾槽（高层槽线在底层槽线前方）有不稳定的积状云生成，可以开展火箭人工增雨。

（2）组合槽型（也称“丁”字槽，即横槽与竖槽结合型）：这类槽有 29 例，占西来槽型的 27.9%，一年中各月均有出现，但 7 月出现较多，11、12 月

表 4 各种降水天气系统降雨量的季节分布特征

	Table 4 Season distribution characteristics of precipitation															mm
	12 月	1 月	2 月	冬季	3 月	4 月	5 月	春季	6 月	7 月	8 月	夏季	9 月	10 月	11 月	秋季
西来槽	1.4	1.01	2.13	4.54	3.77	13.94	19.3	36.96	23.8	65	56	145.24	19.2	10	7.6	36.86
冷锋	0.22	0.7	0.65	1.57	1.79	2.42	9.65	13.86	8.34	9.1	8.9	26.34	8.75	4.8	0.73	14.25
东蒙冷涡	0	0	0.01	0.01	0.09	1.2	3.16	4.45	5.96	7.1	4.4	17.46	3.42	1.4	0	4.84
华北低涡	0.27	0.03	0.09	0.38	0.11	0.53	4.15	4.79	15.7	26	8.2	49.69	5.4	2.2	0.39	7.97
河套低涡	0	0	0.22	0.22	0.14	0.35	0.32	0.8	1.08	4.4	3.1	8.56	0.23	0.1	0	0.37
西南涡	0	0	0	0	0	0	0.02	0.02	0.08	1.4	0	1.52	0	0	0	0
切变线	0.18	0.2	0.03	0.4	1.11	0.61	2.18	3.9	3.9	13	9.8	26.33	4.14	1.9	0.11	6.12
副高后部	0	0	0	0	0	0	0	0	1.24	11	14	26.38	1.34	0	0	1.34
回流	0.12	0.12	0.21	0.44	0.79	0.92	0.12	1.83	0	0.4	0.5	0.91	0.13	0	0.21	0.34
江淮气旋	0	0	0.2	0.2	0.16	0.02	0.25	0.43	1.03	0	0	1.03	0	0	0	0
黄河气旋	0	0	0	0	0.12	0	0	0.12	0	0	0	0	0.91	0	0.09	1
蒙古气旋	0	0	0	0	0.01	0.68	0.55	1.23	0.11	0.1	0.1	0.28	0	0	0	0
倒槽	0	0.09	0	0.09	0.85	0	0	0.85	0	2.7	4.6	7.34	0.18	0	0.56	0.76
台风低压	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.8	3.1	3.94	0	0	0	0
冷空气	0.02	0.06	0.02	0.1	0.04	0.62	0.16	0.82	0.75	1.1	1	2.81	0.99	0.6	0.15	1.71
合计	2.2	2.2	3.55	7.95	8.99	21.27	39.8	70.08	62.1	142	114	317.83	44.7	21	9.85	75.55

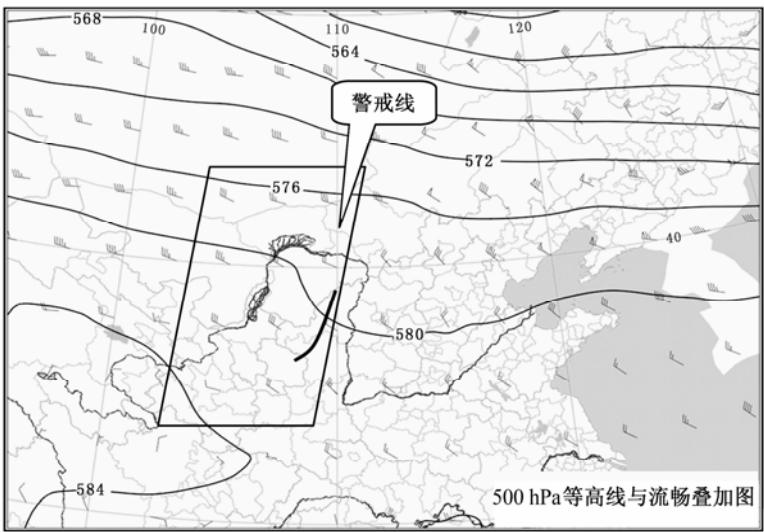


图 3 影响山西省的独立竖槽及警戒区
Fig. 3 The independent vertical slot and the warning area in Shanxi Province

最少、或者没有。这类槽的形成是由 2 条路径（或以上）冷空气汇合而成，其一是由西北路径经由贝加尔湖地区，或者是北路径经雅库次克地区移来的冷空气形成横槽；另一条路径是西路径，由巴尔喀什湖地区经新疆到达河套地区。这两路径冷空气在向下游移动中汇合，汇合点一般在东北、华北或内蒙古东部地区，形成组合槽。将横、竖槽按槽线位置绘于天气图上，如图 5 示意。从图中可以看出横、竖槽均集中在各自的一个区域内，此组合槽进入该

区域后 12~24 h 将影响山西省并产生降水。将此区域确定为影响山西省的组合槽警戒区，如图 5 中框图所示。槽的下游日本海或黄海北部区域有阻塞高压（副高、西风带高压或混体高压）存在，在阻塞高压的后部或槽前部往往有西南急流（大于 15~20 m s⁻¹）配合向东北方向输送暖湿空气，与横槽带来的冷空气交汇。这类槽与地面气旋（多数是黄河气旋、江淮气旋和渤海气旋）配合，生成稳定的层状云，云层较厚（有时云中产生对流泡），含水量大，

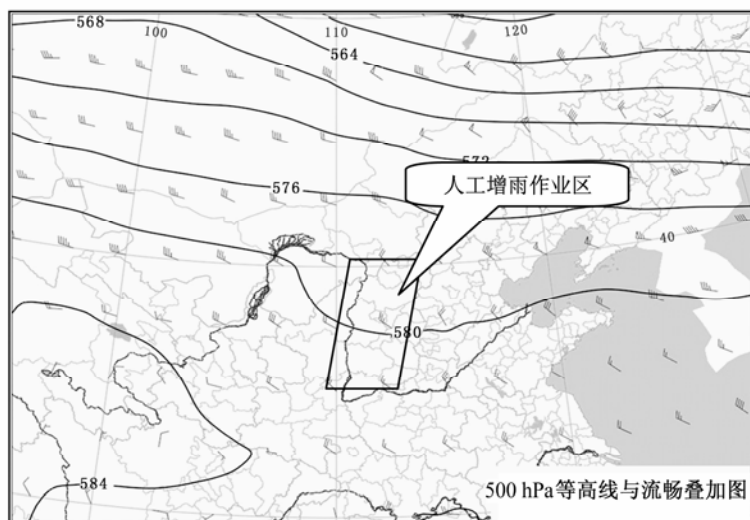


图4 独立竖槽型人工增雨作业区

Fig. 4 The precipitation enhancement operations area of independent vertical groove

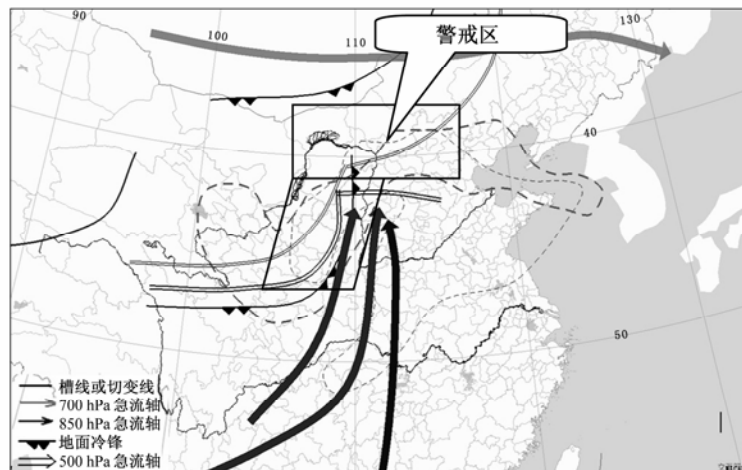


图5 影响山西省的组合槽及其警戒区

Fig. 5 The combination slot and warning area in Shanxi Province

产生较大的降水。按我们的经验组合槽适合开展飞机人工增雨作业，作业区应该选择在横、竖槽线（“丁”字槽）的结合部和地面气旋的顶部，如图6示意。

3.3 华北低涡型

华北低涡，即活动在华北地区，在500 hPa（以500 hPa为主）天气图上有一条以上闭合的等高线，同时有一条以上闭合的等温线与之相配合的冷性涡旋。普查时，冷涡中心位置以环流中心来确定。冷空气中心位置以温度最低值处来确定。

华北低涡多生成在不断加深东移槽的槽线附近负变高最大处，该处24 h变高约在-60 gpm以上；在冷平流最强区域的前部，有时也有冷涡生成。

普查影响山西省有增雨潜力的降水天气系统

表明，华北低涡类型有58例，占总影响天气系统的22.3%。年均冷涡降水量为62.66 mm，占总降水量的13.3%，多出现在4~10月，有51例，其中7、8月最多有42例，将冷涡中心位置标注于一张天气图中，可以看出冷涡集中在一个椭圆形区域中，即警戒区，进入警戒区的冷涡未来24 h将影响山西地区（图7）。华北低涡型天气系统一般维持3 d左右，有时可达6、7 d。在4~10月的51例冷涡型天气系统中，有46例在山西地区产生雷阵雨天气，甚至伴有短时大风、冰雹。有13例在山西地区产生中到大雨（或大雪），但是没有产生雷阵雨天气，原因有两点：其一是低涡中心位置偏北（50°N以北）；其二是地面与其配合的天气系统是含有充沛水汽的江淮气旋、黄河气旋或渤海气旋北上影响山西

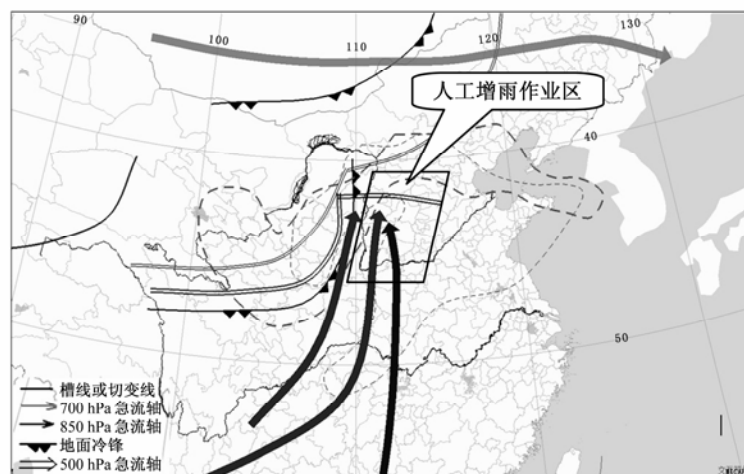


图6 组合槽型人工增雨作业区

Fig. 6 The precipitation enhancement operations area of the combination slot

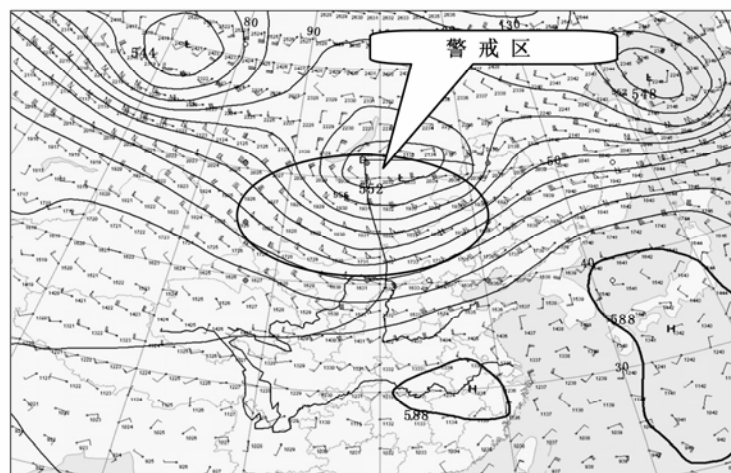


图7 华北低涡警戒区

Fig. 7 The warning area of North China cold vortex

省，产生较大降水。

高空冷涡多数和地面东北（内蒙古东部）低压冷锋结合影响山西省，有 39 例，多数降小到中雷阵雨，少数降大雨；和地面江淮气旋、黄河气旋（渤海气旋）结合的有 9 例，多数降中到大雨，少数降小雨。华北低涡型天气系统以积云和混合云为主，应采用火箭增雨作业，作业区应该选在冷涡的前部，当旱情严重须采用飞机增雨作业时要慎重，必须充分分析天气形势和大气层结的稳定性，在对流云生成之前完成作业。

3.4 副热带高压型

此类型 49 例，占总具增雨潜力降水系统的 18.6%。时间在 7、8 月，其中 8 月有 32 例，7 月只有 17 例。因其降水特点是稳定、持续时间长、降

水量大，所以也是影响山西省降水天气系统的重要类型。当副高西脊点（由 588 dagpm 线代表）到达我国沿海或陆地时，脊线在 30°N 附近，有时与西风带高压过渡形成阻塞高压（南北方向发展，有时呈块状），当西来槽移近时在槽前和副高后部西南风加强（常形成急流），大量暖湿气流北上，在气旋的配合下上升运动加强，形成降水。一般与来自西路径或西北路径的冷空气交汇形成辐合区。在普查的地面影响系统中，气旋占 27 例，静止锋占 9 例，台风占 7 例，地面切变线占 6 例。这一类型降水比较明显，往往先形成降水区后随着天气系统一起移动后影响山西省。副热带高压型形成的降水云系是稳定的层状云系（云中常含有对流泡），云内上升气流不均匀，云中含水量大，按我们的经验适

合飞机、火箭开展人工增雨作业, 降水区也是最佳作业区, 即在气旋顶部和静止锋、切变线南部。

3.5 切变线型

这一类型出现很少, 只有 21 例, 约占总具增雨潜力天气系统的 7.8%。切变线型一般是在 700 hPa 或 850 hPa 两层出现。这一类型一般有两种表现形式:

(1) 风向切变线型: 在高空环流比较平直, 西风带小股冷空气活动频繁, 在东移的过程中与原来在我国东南沿海一带的高压相遇, 形成西风与西南风的切变线或者是西南风与东南风的切变线。这既是风的切变同时又是冷空气与暖湿空气的交汇处, 一般情况与地面静止锋、河套倒槽等配合形成降水。

(2) 风速切变线型: 一般是我国东部海上高压加强时, 在高压后部的南风或西南风加强, 风速不均匀产生的切变线。随着暖湿气团北上在切变线周围产生降水。一般情况与地面江淮气旋、河套气旋等配合形成降水, 多数影响山西省中部地区。切变线型一般情况与地面静止锋、河套倒槽、地面江淮气旋等配合形成降水, 大部分影响山西省中南部地区, 适合飞机人工增雨作业, 可以加大播撒催化剂量。作业区应该选在切变线南侧和河套倒槽、地面江淮气旋的顶部和静止锋上。

此外冷锋云系也是影响山西省较多的天气系统, 但由于其单独出现的概率较小, 且经常与上述几种主要系统合并出现, 在这里不在进行单独描述。

4 小结

不同的天气系统有不同的环流背景及天气特点, 在实施人工增雨作业时可以根据不同类来选择作业区并且采取相应的作业方法。

(1) 从有增雨潜力日数和频数统计可以看出: 山西省每年利于增雨作业时段主要集中在 4~9 月, 这一时期也是农作物生长期和主要的蓄水期; 晋南地区比晋北地区要多出 10 d 左右; 从降水性质分析可以看出在 4~5 月降水云系比较稳定, 按我们的经验是飞机增雨作业的最佳时段, 而 6~9 月积状云增多, 人工增雨应采用飞机和火箭交叉作业的方式。

(2) 根据各天气概念模型警戒区, 可以提前 24

h 捕捉到有增雨潜力的天气系统。这些模型也概括了增雨作业日的天气形势。其中西来槽型、东蒙冷涡型、副高型和切变线型占有增雨潜力日的 90%, 是主要的增雨作业类型。副高后部型、切变线型常常引起降水天气, 在夏季出现的较多。还有少数有增雨潜力日没有包括进来, 原因是天气形势不具代表性或不集中, 例如台风外围云系降水, 倒暖锋回流云降水等

(3) 不同的天气概念模型对应不同的增雨作业方法和作业区。例如: 西来槽型作业区选在槽前和锋后; 槽的结合部和气旋顶部, 多加强飞机增雨作业。冷涡型作业区选在冷涡的前部, 采用飞机和火箭交叉作业。副高和切变线型作业区选在副高后部和切变线南侧。

参考文献 (References)

- 黄美元. 2011. 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, 16 (5): 543-550. Huang Meiyuan. 2011. Urgent problems and thinking of development for precipitation enhancement in China [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 16 (5): 543-550.
- 雷恒池, 曾庆存, 李仑格, 等. 2001. 从自然控制论看黄河上游人工增雨 [J]. 气候与环境研究, 6 (4): 391-399. Lei Hengchi, Zeng Qingcun, Li Lunge, et al. 2001. Investigation of artificial precipitation augmentation at the upper reaches of the Yellow River based on natural cybernetics [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 6 (4): 391-399.
- 李宏宇, 马建立, 马永林, 等. 2011. 北京 2008 年奥运会开幕日云、降水特征及人工影响天气作业分析 [J]. 气候与环境研究, 16 (2): 175-187. Li Hongyu, Ma Jianli, Ma Yonglin, et al. 2011. Characteristics of cloud-precipitation and the impact of weather modification activities on the opening day of the Beijing 2008 Olympics [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 16 (2): 175-187.
- 李玉林, 杨梅, 曾光平, 等. 2003. 江西干旱期间人工增雨天气条件与潜力区分析 [J]. 应用气象学报, 14 (S1): 170-179. Li Yulin, Yang Mei, Zeng Guangping, et al. 2003. Precipitation enhancement weather conditions and potential area analysis during the drought in Jiangxi [J]. Journal of Applied Meteorology (in Chinese), 14 (S1): 170-179.
- 王学良, 陶健红. 2008. 祁连山人工增雨天气模型与预报方法研究 [J]. 干旱区资源与环境, 22 (12): 118-121. Wang Xueliang, Tao Jianhong. 2008. Weather model and the forecast method research for precipitation enhancement in Qilian Mountain [J]. Journal of Arid land Resources and Environment (in Chinese), 22 (12): 118-121.
- 姚展予, 袁健, 李万彪, 等. 2001. 用 GMS-5 卫星资料结合地面资料联合估算水汽分布 [J]. 气候与环境研究, 6 (2): 197-202. Yao Zhanyu, Yuan Jian, Li Wanbiao, et al. 2001. Estimation of water vapor distribution using combined data from GMS-5 and ground stations [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 6 (2): 197-202.