

山东沿海降雨云系宏观特征 及人工增雨潜力的估算

张连云 王以琳 龚佃利

(山东省气象科学研究所, 济南 250031)

提 要

针对山东飞机人工增雨作业的实际情况, 分析了山东沿海地区的降雨特征, 统计了沿海云层的宏观物理量, 分析了莱州湾、黄海北部和东南沿海 3 个地区云与降水的关系, 对主要降雨天气系统计算了其降雨效率及增雨潜力, 增雨潜力在 42.55%—68.79%。通过对天气系统中水汽垂直分布的分析, 为飞机在山东沿海地区增雨作业最佳催化层次的选择提供了依据。

关键词: 人工降雨 增雨潜力 云的宏观特征

1 山东沿海降雨特征

1.1 降雨量分布

1.1.1 山东降雨量分布受下垫面影响使得南北差异和海陆差异很大, 年平均降雨量在 543.1—915.7mm 之间(见图 1)。山东东南沿海降雨量最多, 半岛雨量自东向西减少, 莱州湾的雨量是山东沿海雨量最小的区域。山东较大降水主要受南方天气系统的影响产生。

生。

1.1.2 把山东沿海分为莱州湾、黄海北部和东南沿海 3 个地区, 取羊角沟、威海和青岛分别代表莱州湾、黄海北部和山东东南沿海。表 1 给出了 3 个地区的逐月平均降雨量。降雨主要集中在 6—9 月份, 在这期间, 东南沿海的月平均雨量明显多于莱州湾。

1.2 雨日概率

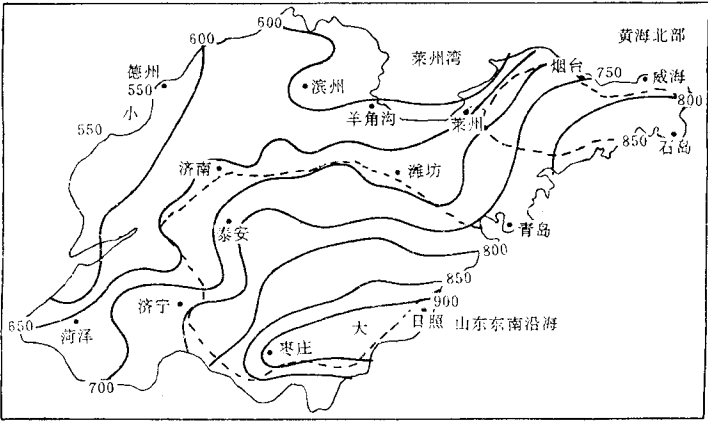


图 1 山东年平均降雨量/mm

虚线内是山区, 1951—1980 年

表 1 山东沿海月平均雨量/mm(1951—1980 年)

月份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	合计
莱州湾	6.5	8.8	10.3	34.7	33.6	71.8	184.5	143.5	63.3	32.9	20.7	8.6	619.2
黄海北部	11.4	12.4	18.3	43.1	45.2	74.7	192.2	178.7	96.8	42.5	32.1	17.8	765.2
东南沿海	11.5	13.2	22.1	52.7	51.4	103.6	205.8	190.8	105.1	45.4	30.9	12.2	844.7

雨日概率代表某一时期内降雨的气候概率。表2给出各区3—10月雨日概率。

$$\text{雨日概率} = \frac{\text{日降雨} \geq 0.1\text{mm 以上日数}}{\text{总日数}}$$

在这期间(除8月外),东南沿海平均雨日概率大于另外两个沿海地区,其中7月份的雨日概率最大,达0.4。莱州湾平均雨日概率最小。

表2 山东沿海雨日概率/%(1979—1988)

月份	3	4	5	6	7	8	9	10	平均
莱州湾	14	17	20	24	36	32	18	17	22
黄海北部	15	21	21	27	39	34	23	22	25
东南沿海	17	22	24	31	40	32	24	22	27

2 降雨云层的宏观特征

2.1 沿海阴天日数

分析1979—1988年3—10月逐日云量观测资料,以08、14、20时的平均云量大于8成作为阴天日。图2给出山东3个沿海地区阴天日数分布曲线。3条曲线的变化趋势基本相同。4、9、10月份阴天日数较少,4月份以后阴天日数逐渐增多,7月份达最大值,7月份以后阴天日数逐渐减少。除8月份外,东南沿海的阴天日数多于另外两个沿海地区,莱州湾的阴天日数最少。3—10月份黄海北部降雨日数(表略)占阴天日数的比例分布在38.8%—73.9%;东南沿海的比例在44.3%—72.8%,莱州湾阴天时降雨的机会相对最小。

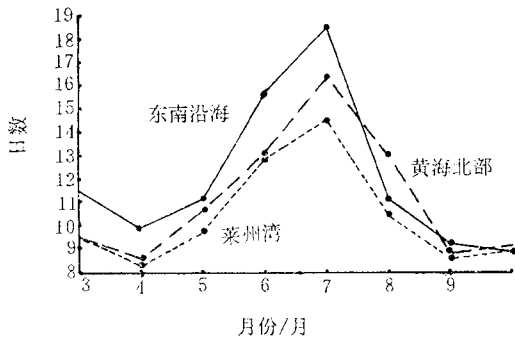


图2 山东沿海阴天日数分布

2.2 云层宏观特征

云的宏观特征量随季节变化而变化。分析青岛1979—1988年的探空曲线,以 $T-T_d \leq 4^\circ\text{C}$ 作为估算云底、云顶高度的判据^[1],可知:4—10月份降雨日的平均云底高度一般不高于230m,6月份平均云底高度只有86m(见表3)。这主要是青岛南临黄海,南方气旋等天气系统将海上的水汽吹向青岛,生

成低云或海雾,使得降雨时云底高度很低。云底高度低给小雨滴的碰并增长提供了有利的环境场。分析得出云顶高度均在5600m以上,9月份可达7251m。10月份云顶温度最低,平均在 -21°C 。除9月份外,云顶高度均高于 -10°C 层的高度。

表3 青岛雨日的云层宏观量(1979—1988年)

	4月	5月	6月	9月	10月
云底高度/m	226	220	86	157	209
云底温度/ $^\circ\text{C}$	9	15	18	21	15
云顶高度/m	5651	6044	6632	7251	6758
云顶温度/ $^\circ\text{C}$	-17	-14	-16	-18	-21
云层厚度/m	5425	5824	6546	7094	6549
0°层高度/m	2657	3714	4320	4395	3221
-5°层高度/m	3752	4685	5572	5479	4315
-10°层高度/m	4775	5714	6533	6893	5390

潍坊机场地处莱州湾南岸,是山东人工增雨作业基地。表4给出潍坊机场的云层特征量。潍坊机场降雨时,较少受海上气流的影响,云底高度约在550—730m之间,比青岛的云底高度高得多。该机场以云底高度80m作为起降条件之一,云底高度较高时对增雨作业飞机起降是有利的。表4还给出逐月 -5°C 层和 -10°C 层的高度,在实施飞机增雨作业时可作参考。

表4 潍坊机场云的宏观量(1979—1988)

月份	3	4	5	6	9	10
云底高度/m	551	659	686	559	755	731
-5°层高度/m	2321	3637	4553	5130	5100	3981
-10°层高度/m	3552	4543	5473	6076	6103	4917

2.3 沿海云状与雨日的关系

飞机增雨作业大多在As、Ns、St、Fn、Fs、Ac、Sc多种云状组合的层状云中飞行。表5给出不同云状不同降雨量等级的统计结果。黄海北部降雨日数最多,10年间4—6月、9—10月达923天。莱州湾、黄海北部和东南沿海出现的层状云降雨日分别占总雨日数的76.8%、80.0%和83.0%。具体分析层状云雨日发现,莱州湾和黄海北部雨日中层积云和高层云出现的几率较多,而东南沿海其它层状云的雨日较多。这主要是由于作为代表站的羊角沟和威海都位于海洋的南岸,

表5 山东沿海云状与雨日的关系(1979—1988年4—6、9—10月) 单位:天

地区	层状云雨日		积状云雨日	
	$<5.0\text{mm}$	$\geq 5.0\text{mm}$	$<5.0\text{mm}$	$\geq 5.0\text{mm}$
莱州湾	478	166	147	48
黄海北部	551	187	152	33
东南沿海	532	196	118	31

受西来天气系统影响较多,西来系统锋前多出现层积云;而作为东南沿海的代表站青岛,南面临海,受南方气旋影响的几率较大,这时山东东南沿海多位于系统的暖锋锋前,雨层云和高层云出现的机会较多。

3 天气系统水汽垂直分布特征

3.1 水汽含量的垂直分布特征

不同天气系统水汽含量的垂直分布各不相同,但各天气系统水汽含量随高度增加均呈递减趋势。各天气系统在地面与600hPa之间的水汽含量均可达到整层水汽含量的79%以上。蒙古气旋到800hPa层的水汽含量已达55%,而其它系统也可达47%以上。可见各天气系统低层水汽含量充沛,如有一定上升运动配合时,水汽容易上升凝结产生地面降水。

3.2 水汽通量散度的垂直分布特征

图3是四种天气系统水汽通量散度的垂直分布情况。可以看出,黄河气旋、西北冷锋和黄淮气旋在中低层有较强的水汽辐合,800—900hPa附近水汽辐合达到最强,为 $-24.02 \times 10^{-8} \text{g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{hPa} \cdot \text{s})$ 。黄淮气旋低层水汽辐合虽弱于黄河气旋和西北冷锋,但辐合层次深厚,从地面可达500hPa以上。黄淮气旋是在副热带锋区上发展起来的南方气旋,云内水汽含量大,水汽输送充沛,具有较强的上升运动,这为小云滴的增长提供了有利的环境场。西北冷锋低层辐合、高层辐散的特征很明显。而蒙古气旋不同于其它系统,它的低层以水汽辐散为主,900hPa附近水汽通量散度为 $6.10 \times 10^{-8} \text{g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{hPa} \cdot \text{s})$ 。而中层有较强的水汽辐合,700hPa附近达到最强,为 $-22.51 \times 10^{-8} \text{g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{hPa} \cdot \text{s})$ 。各

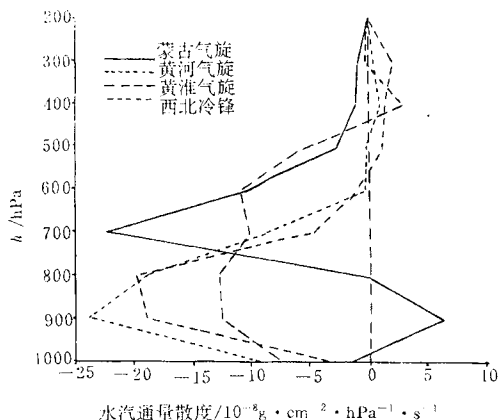


图3 各类天气系统水汽通量散度垂直分布

天气系统在500hPa以上水汽的辐合、辐散数值都较小。

3.3 凝结率的垂直分布特征

根据王鹏飞^[2]提出的计算单位截面积云柱总凝结率公式,进行坐标变换后可得:

$$C = - \int_{P_0}^{P_T} \frac{\omega}{\rho g} \left[\frac{\frac{7R^*}{2M_w} T - L_c}{L_c^2 + \frac{7R^{*2} T^2 P}{2M_w^2 e_s}} \right] dP$$

对饱和湿空气有:

$$\rho = \frac{(P - e_s)M_d + e_s M_w}{R^* T}$$

式中 ω 为 P 坐标系中的上升气流速度, R^* 是通用气体常数, T 是绝对温度, L_c 是凝结潜热, e_s 是饱和水汽压, P 是气压, M_d 是干空气的摩尔质量, M_w 是水的摩尔质量。上式中 w 采用积分连续方程法计算,并用丁士晟^[3]计算上升气流速度的修正方案对各层数值进行修正。修正后的逐层上升气流速度 w'_k 为:

$$w'_k = w_k - \frac{k(k+1)}{N(N+1)} \times h \times w_N$$

$$k = 1, 2, 3, \dots, N$$

w_N 是第 N 层的上升速度,计算时最高层取200hPa;则 $N=8$,修正系数 $h=0.78$ 。

图4是各天气系统水汽凝结率的垂直分布情况。横坐标表示各层间凝结水汽所相当的地面降水强度。可以看出,各天气系统的水汽凝结主要集中在400—700hPa的中层,而低层和高层的数值较小。黄河气旋、西北冷锋在600—700hPa层的凝结率最大,黄河气旋最大凝结率相当于地面 $0.38 \text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 的雨强;黄淮气旋最大凝结高度在400—500hPa之间,最大凝结率相当于地面 $0.31 \text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$

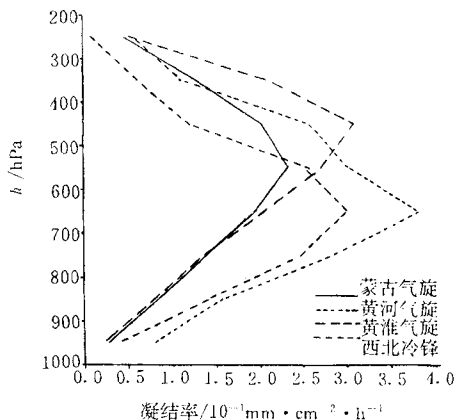


图4 各类天气系统凝结率的垂直分布

的雨强。在这一层次中,过冷却水含量丰富,引入人工冰核后,冰核活化产生的冰晶通过Bergeron过程实现冰水转化,促进冷云降水。因而,黄淮气旋是实施飞机人工降雨作业最好的天气系统。

4 主要天气系统的降水效率及人工增雨潜力

降水效率可表示为自然降水量与绝热上升凝结的水量之比。如果以 ϵ 表示降水效率, γ 表示地面总降水率, C 表示总凝结率, η 表示增雨潜力,则:

$$\epsilon = \frac{\gamma}{C} \quad \eta = 1 - \epsilon$$

表6列出了四种天气系统16个个例的计算结果。黄河气旋的地面降水率和凝结率都很大,这可能是因为黄河气旋中心穿过山东,锋前的上升运动较强,水汽辐合量较大所致。蒙古气旋主要以其冷锋影响山东造成降水,与西北冷锋降水性质相似,两者平均降水效率也相近。比较各个例的计算结果可以看出,即使是同类天气系统,由于过程出现的时间、强弱、移动路径、水汽条件及垂直运动等众多因素的差异,它们之间降水效率差别也较大,但就各系统的平均结果来看,仍能反映出系统之间固有的差异。

表6中四类天气系统的增雨潜力以黄淮气旋最大,为68.79%,黄河气旋的增雨潜力最小,为42.55%,其它两类天气系统的增雨潜力介于以上两者之间。可见,各系统均有较大的增雨潜力用于人工增雨。

5 小结

5.1 山东沿海雨量分布和雨日概率的分布为东南沿海大于黄海北部和莱州湾,东南沿海的雨水资源最丰富。

表6 山东沿海天气系统的降雨效率及增雨潜力

系统名称	个例日期	降水率 /mm·h ⁻¹	凝结率 /mm·h ⁻¹	平均降水 效率(%)	平均增雨 潜力(%)
蒙古气旋	81.6.20	0.169	0.388	40.68	59.32
	86.9.1	0.335	2.755		
	81.6.21	0.853	1.286		
黄河气旋	85.4.3	0.903	1.359	57.45	42.55
	85.9.9	0.894	1.208		
	87.9.3	0.302	6.264		
	80.10.24	1.245	1.473		
黄淮气旋	80.10.9	1.110	3.320	31.21	68.79
	83.9.22	0.460	1.496		
	84.9.8	0.345	1.449		
	85.5.17	0.790	2.143		
	82.9.1	0.432	0.947		
西北冷锋	84.4.2	0.291	1.537	41.09	58.91
	84.9.23	0.915	1.284		
	85.9.15	0.160	0.501		
	82.9.2	1.122	2.975		

5.2 在可进行人工增雨的作业雨日中,莱州湾和黄海北部雨日中层积云和高层云出现几率较多,而东南沿海其它层状云的雨日较多。

5.3 黄淮气旋、黄河气旋和西北冷锋在中低层有较强的水汽辐合,蒙古气旋则表现为低层水汽辐散,中高层水汽辐合的特征。

5.4 各天气系统水汽含量随高度增高而递减,水汽凝结集中在中层,黄河气旋水汽凝结和降水率都较大。黄淮气旋水汽凝结最大值的层次位于400—500hPa之间,它们都符合实施人工增雨作业对温度的要求。

5.5 山东沿海降水系统的平均增雨潜力在42.55%—68.79%之间。综合考虑水汽分布等条件,认为黄淮气旋、黄河气旋是山东沿海地区实施人工增雨作业的最佳天气系统。

参考文献

- 1 朱乾根等. 天气学原理和方法. 北京:气象出版社,1981:454.
- 2 王鹏飞,李子华. 微观云物理学. 北京:气象出版社,1989:417—421.
- 3 丁士晟,吕志远. 连续方程修正方案计算垂直速度的探讨. 北方天气文集(4). 北京:北京大学出版社,1983:109—110.

The Characteristics of Rainfall Clouds and the Evaluation of Artificial Precipitation Enhancement Potency in the Coastland of Shandong Province

Zhang Lianyun Wang Yilin Gong Dianli

(Shandong Institute of Meteorological Science, Jinan 250031)

Abstract

The characteristics of rainfall, macro-physical parameters of cloud and the relations of cloud and rainfall are studied. The precipitation enhancement potencies of main weather systems range from 42.55% to 68.79%. Elaborated, also is the possibility of exploiting cloud-water resources by rain-making with aircraft. The scientific verification for cloud seeding in the coastland of Shandong province are provided by the analysis of water vapor vertical distribution.

Key Words: artificial precipitation enhancement potency macro-physical parameters of cloud