利用单站探空资料分析太原机场强雷暴天气特征

郑延才[1]，管翔[2]
民航山西空管分局，太原市，山西省 030031

摘要：本文根据2003-2012年十年间探空观测资料，统计并分析太原机场雷暴当天00Z、12Z（UTC）两个时次共12个物理参量值，试图找出大风、大雨、冰雹等不同类型强雷暴的物理参量特征。

关键词：探空资料，统计分析，强雷暴

引言

强雷暴是指发生突然、天气剧烈、破坏力大，常伴有雷雨大风、冰雹、龙卷风、局部强降雨等强烈对流性的灾害性天气，具有生命史短，强度大，局地性强的特点[1]。就太原机场而言，在每年5月-10月的雷暴期，预报员对于雷暴的强度（一般雷暴还是强雷暴？）、分类（伴大风？伴大雨？还是伴冰雹？）的把握多基于多普勒雷达、卫星云图、天气图分析等途径，手段相对单一，预报精度不高，预见时恶劣天气也将马上到来，往往不能满足用户的要求。

雷暴天气的发生需要有利的环境条件，而探空资料的引入提供了大气环境场温压湿物理量，从而我们可以根据不同高度层的温压湿分布来分析对流天气的特征[2]。在雷暴活动中，层结的热力不稳定决定了对流发展的强度，动力因子及大气中的水汽含量对于触发对流及决定对流类型起着关键作用[3]。

本文选取代表热力、动力、水汽等层结条件的12种探空物理参量，对2003至2012年十年间太原机场雷暴天气当天00Z、12Z（UTC）时次的探空资料进行统计分析。旨在通过比较各探空物理参量在不同强天气下的表现，探讨使用探空物理参量区分强对流天气类型的可行性，为夏季雷雨预报提供可靠的依据。

1 资料和方法

根据相随天气现象把强雷暴天气分为以下3类（同时发生的按就重原则归类）：雷暴伴冰雹、雷暴伴大雨、雷暴伴大风（风速12m/s以上）。依据实况观测资料，太原机场10年间共发生雷暴伴冰雹8日，雷暴伴大雨23日，雷暴伴大风52日。平均下来强雷暴每年出现8天，一般雷暴每年出现24天。

依据天气学原理，我们选取能代表雷暴天气的12种物理参量。其中表示热力稳定度的

[1]郑延才，1989年6月，男，助理工程师，从事航空气象预报工作
[2] 管翔，男，工程师，从事航空气象预报工作

物理参量有：SI 指数、K 指数、举升指数（LI）、对流稳定度指数[3]（IC=$\Theta_{se850}-\Theta_{se500}$）、0℃层高度、-20℃层高度、850—500hpa 温度差；表示水汽条件的物理参量有：850hpa 温度露点差、500hpa 温度露点差、探测到全部可降水（PW）；表示动力不稳定的物理参量有：500hpa—850hpa 风速差、低空风（925hpa 与 700hpa）随高度转动角（顺转为+，逆转为-）。

为了能够最大程度反映雷暴当日的大气层结情况，我们计算太原机场 2003 至 2010 年雷暴发生日 00、12 点（UTC）各物理参量的最大/最小值的平均值（SI、LI、$(T-Td)_{850}$/℃为日最小值，其余物理量均为日最大值）和离散度（标准差）[4]，同时对偏差大的物理参量做与其它物理参量的相关性分析，最终来判定各物理参量区分强雷暴类型的能力。

2 数据和图表分析

计算出的各探空物理参量的均值及标准差如表 1 所示：

表 1 强对流天气各物理量最大/最小值的均值和标准差

类别 / 参数	冰雹		暴雨		雷暴大风	
	均值	标准差	均值	标准差	均值	标准差
SI/℃	-0.81	1.51	-0.26	2.11	-0.14	2.42
LI/℃	-0.69	0.76	-0.26	2.61	-0.16	2.63
K 指数/℃	34.8	2.99	33.7	3.92	30.4	7.14
PW/mm	33.7	9.75	36.0	9.88	28.3	8.81
0 度层高度/m	4369.6	976.8	4713.9	765.2	4301.2	695.2
-20 度层高度/m	7734.9	1308.5	7952.8	788.8	7427.3	788.6
$\triangle T_{850-500}$/℃	29.0	1.63	27.0	3.69	30.2	3.75
$\triangle \Theta se_{500-850}$/℃	-17.7	2.3	-18.52	3.14	-15.9	4.12
$(T-T_d)_{500}$/℃	16.4	10.29	18.3	11.65	16.85	10.34
$(T-T_d)_{850}$/℃	3.1	1.73	4.02	3.33	7.6	5.14
$\triangle V_{500-850}$/(m/s)	18.1	8.61	18.4	12.7	17.3	13.4
925-700 风向差（+顺转，-逆转）	+73.7	65.83	+56.7	90.4	+74.8	78.4

注：SI、LI 为日最小值，其余物理量均为日最大值

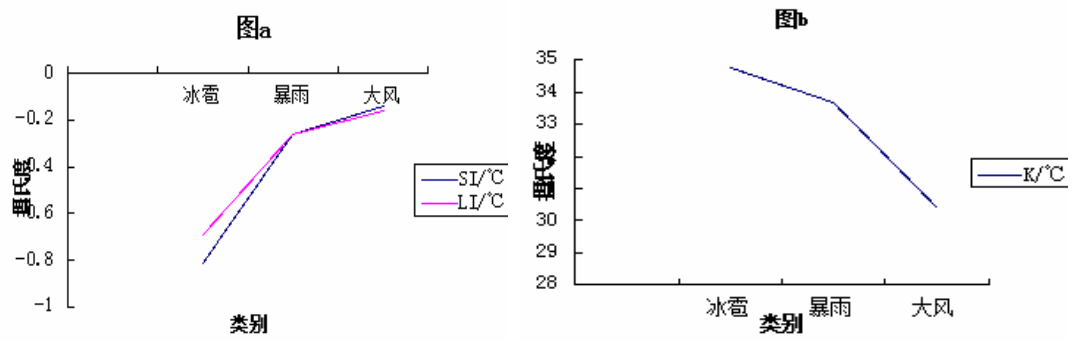
2.1 热力参量的分析

2.1.1 SI、LI、 K 指数

从统计结果来看，SI、LI指数介于0℃至-1℃之间，对冰雹的区分效果较好，而大雨和大风则在稳定度相对较小时就可发生。

K指数对气团的潮湿度、稳定度有一定判别能力，K值越大潜能越大，表示大气愈温暖，低空水汽愈充沛，层结愈不稳定。从K指数分布（图b）可以看到发生强对流天气时其值都在

30℃以上，对冰雹、暴雨有较为明显的辨别能力（≥34）。



由于 SI、LI 指数产生了偏差（如表 2 中易笑园给出华北地区部分强对流天气物理量的参考指标[3]中 SI≤-1，LI≤-3）。究其原因主要有几点:1、探空站的时间分辨率较低，时间间隔为 12 小时，尤其缺乏 06 点（UTC）的探空；2、SI、LI 指数在求解的过程自身的误差也会对数值有影响；3、样本数量少。

表 2 发生强对流天气部分物理量的参考指标[5]（易笑园等，2010）

单站探空物理特征量	临界值
K 指数	≥30
SI	≤-1
LI	≤-3
T_{850}-T_{500}	≥25
Ic	≥0
垂直风切变 V_{500}-V_{850}	≥5
低空风随高度转动角	≥20

就偏差物理量我们通过计算其与其他物理量的相关系数（见表 3），可以看出 SI、LI 指数在四种对流天气形势下与 K 指数负相关性比较大，所以我们可以通过 K 指数间接反应出太原机场的 SI、LI 指数。

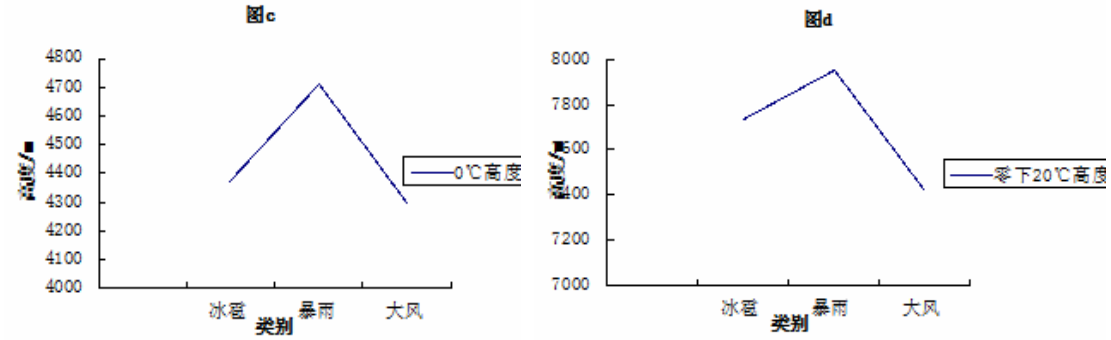
表 3 SI、LI 与其余物理量分别在四种对流天气下的相关系数

相关系数 / 物理量	SI/℃			LI/℃		
	冰雹	大雨	大风	冰雹	大雨	大风
K/℃	-0.7	-0.5	-0.7	-0.9	-0.5	-0.7
PW/cm	-0.5	-0.2	-0.4	-0.7	-0.3	-0.3
0 度层高度/m	-0.4	-0.1	-0.4	-0.6	-0.1	-0.4
-20 度层高度/m	-0.5	-0.1	-0.3	-0.6	-0.2	-0.3
$\triangle T_{850-500}$/℃	0.7	-0.5	-0.3	0.5	-0.4	-0.4
$\triangle \Theta se_{500-850}$/℃	-0.1	-0.5	-0.4	0.3	-0.3	-0.4
$(T-T_d)_{500}$/℃	0.6	0.2	0.2	0.6	0.2	0.2

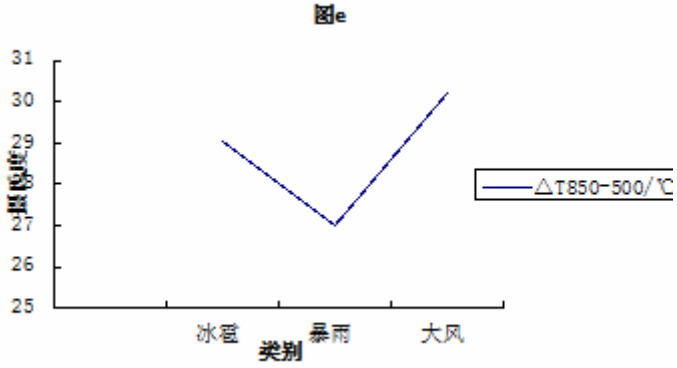
$(T-T_d)_{850}$/℃	-0.6	-0.3	0.1	-0.7	-0.3	0.1
$\triangle V_{500-850}$/(m/s)	0	0.4	0.5	0.4	0.4	0.5
925-700 风向差	0	0	0	-0.4	-0.1	0

2.1.2　0℃层、-20℃层高度、850hpa—500hpa 温差

云中水分达到 0℃层高度就会冻结，而-20℃高度是大水滴自然结冰的高度，因此这两层的高度一直被认为是判断冰雹的重要物理量。表 1 中冰雹的 0℃层（图 c）在 4300m 左右，-20℃层（图 d）在 7700m，比暴雨的明显要低 300m 左右。因为要形成冰雹，就要有合适的 0℃高度，0℃层高度太低一般产生不了较大的冰雹，0℃层高度太高冰雹在进入 0℃层以下的空气中就会融化，降到地面时就融化为水滴了。而暴雨在这两个温度层明显高于冰雹，较高的 0℃高度可以使固态降水融化为液态，但是就个例而言不确定性较大。在大风天气的情况下，高层强冷空气使得 0℃层高度与-20℃层高度相对较低。



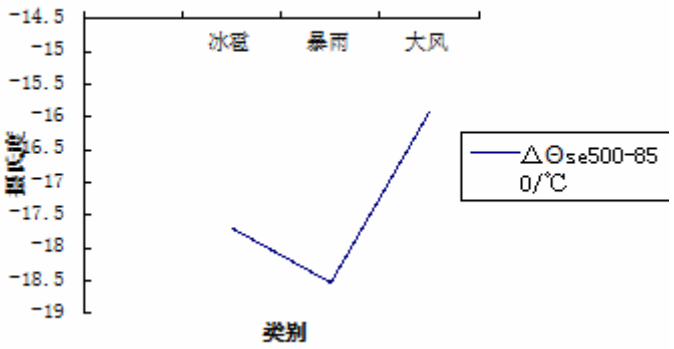
850hpa 与 500hpa 的温差（图 e）对于华北地区的强对流天气具有指示意义易笑园等认为其临界值为 25℃，从统计结果来看，四类对流天气情况下 850hpa 与 500hpa 的温差都在 26℃以上，雷暴大风更达到了 30℃以上，暴雨在 26℃左右，这就是说雷暴大风在较大的温差条件下才能出现，而暴雨在不太大的温差条件下就能发生。温差越大，越有利于对流的发展，对流强度达到一定高度会引起高空动量下传，使地面风速增大。



2.1.3　对流稳定度指数（$IC=\Theta_{se850}-\Theta_{se500}$）

高低空假相当位温差反映了大气层结潜在不稳定。在不同的强对流过程中，暖湿空气可以在 700hpa 以下任何一层或几层出现，干冷空气也可能在 700-400hpa 中任何一层或几层出现。在分析不同类型的强对流天气过程中，最好选择暖湿空气和干冷空气最明显的层次来计算假相当位温差。本文采用 500hpa 与 850hpa 两层（图 f）来计算，从统计的结果可以看到暴雨的达到了-18.52℃，而雷暴大风为-15.9℃，高低空差值越大层结俞不稳定，因此暴雨的发生需要更强的不稳定性，对流稳定度指数更能指示暴雨的发生。

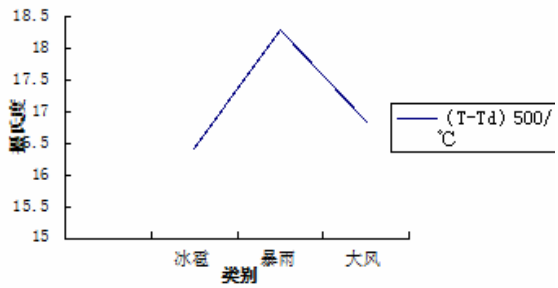
图f



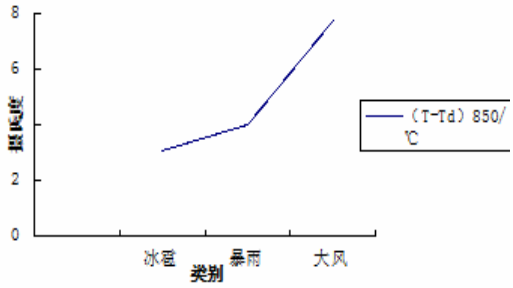
2.2 水汽条件分析

水汽是雷暴发生发展的必要条件之一，大气环境中水汽含量的多少决定了对流天气的类型。对流云内含有大量的水分，水分是由上升气流从大气低层向上输送，因此要求低层有足够的水汽供应。所以对流天气常形成于低层有湿舌或强水汽辐合的地区。 一般来说冰雹和雷暴大风具有上干下湿的特点，从统计的结果来看，冰雹和暴雨的低层湿度大，而暴雨高层的湿度相对较小，跟我们认为的在发生暴雨时整层都是湿层有稍微偏差，主要是因为就个例而言，暴雨高层的温度露点差不确定性大，离散度高。雷暴大风低层的湿度较小，如果低层的水汽含量过大，在对流云发展早期，云内就会有大量的水汽凝聚，形成雨滴而降落，阻碍了上升运动进一步发展，这种情况下有利于暴雨的产生，但是不利于雷暴大风的发生，这与我们统计的结果是一致。

图g

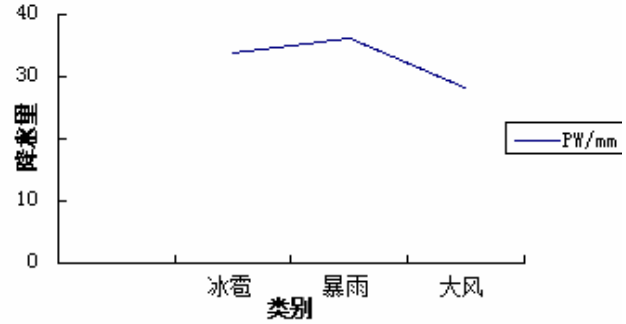


图h



从探测到全部可降水 PW 值（图 i）看，单位面积整层气柱中可降水量越多越容易产生暴雨，冰雹和一般雷暴的差值不大，雷暴大风的可降水量最小，因此由 PW 值可以区分暴雨和雷暴大风。

图i

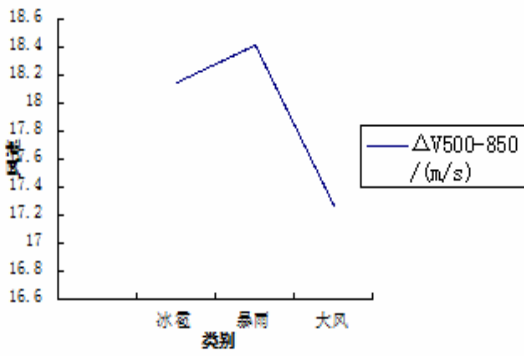


2.3 动力不稳定分析

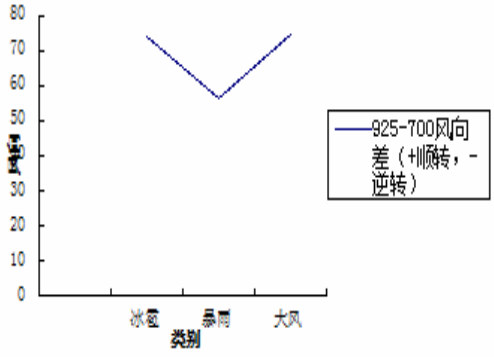
关于强对流天气形成的动力条件，低层辐合、高层辐散、高低空的风切变、低层的冷暖平流等都是普适指标。高低空的风垂直切变的大小（图 j）往往和形成风暴的强弱密切相关。在热力不稳定确定情况下，垂直风切变的增强将导致强对流天气进一步加强和发展。统计结果表明，冰雹暴雨需要更大的高低空风切变，使得水汽充分的输送到高空，而雷暴大风相对较小，这是因为雷暴大风时整层的风速大小差距不大，在风速切变较大时发生冰雹暴雨的概率较大。

低空风随高度转动角（图 k）可以用来判断低层的冷暖平流，风随高度顺转时表示该层有暖平流，反之有冷平流[8]。通常认为低层的暖平流是强对流发展的一个关键因子。从统计的结果可以看出，在对流天气发生时，低层都有暖平流，低空顺转角度都在 20 度以上，冰雹和雷暴大风的顺转角度都在 70 度以上，而暴雨的相对较小。因此根据低空的暖平流的强弱可以判别是否发生暴雨，但单个个例来说不确定性有点大。

图j



图k



4 结论

通过上述对 3 种物理参量在不同类型强雷暴天气下的统计分析，根据各物理参量在不同对流天气条件下的特有表现，我们可以大致甄别太原机场的强对流天气（表 3）：

表 3 三种对流天气下各参数的特征

类别	结论
冰雹	SI≤-0.8；K≥34；0 度层高度 4300m 左右、-20 度层高度 7700m 左右；低层的湿度、风切变比较大；暖平流也较强。
暴雨	K≥33；PW 值最大达到了 36mm；0 度层高度、-20 度层高度高度相对较高（4700m、7900m）；$\triangle T_{850-500}$ 最小 27℃；$\triangle \Theta se_{500-850}$ 最小-18.52℃；低层风切变大，暖平流是最弱的。
大风	K 指数、PW 值最小；0 度层高度、-20 度层高度高度最低；$\triangle T_{850-500}$ 最大达到 30℃；$\triangle \Theta se_{500-850}$ 最大-15.9；低层湿度要求最小；低空的暖平流最强。

就太原机场而言：

1） SI、LI 指数可以较好地甄别冰雹天气（SI≤-0.8，LI≤-0.69），K 指数可以较好地甄别冰雹、大雨天气（K≥34、K≥33）。而雷暴大风天气则对 SI、K 指数要求最低。一定程度上，可以用 K 指数代替 SI、LI 指数来判断；

2） 三类强天气中，冰雹天气发生时 0℃层特征高度在 4300m 左右，-20℃层特征高度在 7700m 左右；大雨时 0℃层、-20℃层高度最高，而大风拥有最低的 0℃层、-20℃层高度。

3） 雷暴大风、冰雹对上下层温度差异要求很高（850hpa 与 500hpa 的温差达到 30℃左右），而暴雨仅在 27℃左右，也就是说冰雹、雷暴大风天气需要更大的不稳定能量。

4） 500hpa 与 850hpa 的假相当位温差在暴雨时达到了-18.52，雷暴大风为-15.9，因此假相当位温差对于暴雨的发生具有更好的指示意义。

5） 暴雨发生时低层的湿度最大，低层水汽的供应是发生暴雨的必要条件，而雷暴大风低层湿度最小，因此从低层的温度露点差大小可以判别暴雨和雷暴大风。

6） 大气中的可降水量在区分暴雨和雷暴大风时比较明显，PW 值越大发生暴雨的概率越大，雷暴大风时 PW 值最小。对于冰雹和一般性的雷暴没有明显的区分作用。

7） 冰雹和暴雨天气发生时需要比较大的低层风切变，雷暴大风天气时低层的风切变相对较小。

8） 强对流天气发生时低层都是暖平流。其中冰雹和雷暴大风的低层暖平流强，暴雨时暖平

流最弱。

9） 根据以上分析：冰雹天气宜用 SI、K 指数以及 0 度层、-20 度层特征高度来判断判断；雷暴大雨天气宜用 K 指数、PW、最小的上下层能量差（$\triangle T_{850-500}$、$\triangle \Theta se_{500-850}$）以及最弱的暖平流来判断；雷暴大风天气宜用最大的上下层能量差（$\triangle T_{850-500}$、$\triangle \Theta se_{500-850}$）、最小的低层湿度以及最强的低空暖平流来判断。(具体取值见表 1)

参考文献

[1]章国材.强对流天气分析与预报.北京：气象出版社.2011:58-119.

[2]于连庆，李月安等.中央气象台探空资料客观分析业务系统的研究与实现.气象科技.2012,40(2)

[3]姚学祥.天气预报技术与方法.北京：气象出版社.2011:139-146.

[4]魏东，孙继松等.三种探空资料在各类强对流天气中的应用对比分析.气象.2011,37(4):412-422

[5]易笑园，李泽椿等.长生命史冷涡背景下持续强对流天气的环境条件.气象.2010,38(1):17-25

[6]李文娟，郦敏杰.基于探空资料的雷暴潜势预报方法.广东气象.2011,33(3):27-30

[7]闵利平，张海等.探空资料在人工增雨防雹作业中的应用.贵州气象.2010,4(34):26-27

[8]张慧婵.单站探空物理量在雷雨大风预报中的应用.空中交通管理.2008,11:30-33