

河套低压降水性层状云的云雨特征

汪学林 陆煜钧 李占柱

李云得 李永振 于勇

(吉林省气象科学研究所)

提 要

1963—1978年,使用飞机,对河套低压的降水性层状云作了21架次的云雾物理探测,结合天气分析与统计计算发现:

1. 系统各部位层状云云状不一,对应云层的宏观特征及降水强度也有差别。
2. 系统的平均冰质点浓度在 10^{-4} 个/升— 10^0 个/升之间,其各部位浓度、浓度的垂直分布及晶形出现频数都不一样,液态含水量在 $0-0.77$ 克/米³之间,平均为 0.122 克/米³,各部位液态含水量虽有差别,但都是正温层较大,负温层较小,到 -10°C 层以上已很少见液态水存在。
3. 系统层状云的降水强度和系统部位、云厚、正温层厚度、云底温度以及平均液态水含量相关较好,而和云顶温度、冰云厚度及冰质点平均浓度相关不好,可用一多元回归方程来拟合。

一、引 言

自1963年开始,使用飞机对吉林省层状冷云的宏、微观结构作了一系列的探测研究,得出了微物理特征的一般结果^[1-3]。

云的宏观物理学、微观物理学与天气学是紧密相关,不可分割的。不同的天气系统,不同部位,云雨结构各异,人工影响方法也应有别。近些年来, Hobbs 和 Heymsfield 等,使用飞机和多普勒雷达探测了有关天气系统的云雾特征,研究了人工播种的效果^{[4][5]}。作者也曾对一次暖锋雨系进行了飞机探测,分析了锋面前后云雨特征,计算了人工影响潜力,探求了人工影响途径^[6]。

河套低压是影响我省春季降水的主要天气系统,也是人工影响的主要对象。本文以云雾探测资料为基础,结合天气分析、统计计算,研究了河套低压各部位层状云的云雨特征,以便为今后建立云雾降水模式,寻求更确切的人工影响方法奠定基础。

二、资料的搜集

在21次探测个例中,大都有云滴谱、液态含水量、冰雪晶、飞机气象计和机上宏观资料。

探测中所用机型有:伊尔-12,伊尔-14,C-46,里-2。使用仪器有:TPM-1云滴

谱仪, TPZ-2 含水量仪, 铝箔冰雪晶取样器, CM-43 和 MOS 单结管飞机气象计。

天气系统及其部位, 按天气分析方法确定, 雷达、云雾探测资料作参考。文中所设过冷云上限, 主要用含水量资料确定, 云滴谱资料作参考。云顶温度、云顶高度均以飞机、雷达或探空实测资料为准。

降水强度都用气象站降水自记资料, 并以探测区几个气象站逐时平均资料作为此区的平均强度。

三、一般天气条件和云雨特征

河套低压, 原是河套倒槽, 在东移的过程中不断加深、发展, 形成完整的气旋影响我省, 我们称为河套低压。

哈罗德和奥斯汀指出: 任何一种降水系统的形成、尺度、强度和生命史主要受产生降水的气流运动所支配^[7]。对河套低压起主导作用的有三支气流(如图 1 所示)。第一支是以实线表示的, 它从冷锋前的地面爬升到系统前方 4—6 公里的高空, 这支气流来自海上, 又很强盛, 因此低层水汽供应充足, 暖层较厚、含水量大, 它向系统输送水汽、热量和动量, 国外称输送带。第二支气流从系统后方流向输送带上, 它来自我国西北的黄土高原和蒙古高原一带, 带来了大量冰核^[8], 它是冷性, 和输送带在地面附近交汇抬升, 常产生冷锋不稳定天气。第三支气流是在系统前方, 从输送带下方对流层中部下沉到对流层下部, 它只在暖锋面和靠近暖锋前, 再度变湿被迫上升, 形成云雨, 并使地面降水向气旋中心北部延伸。

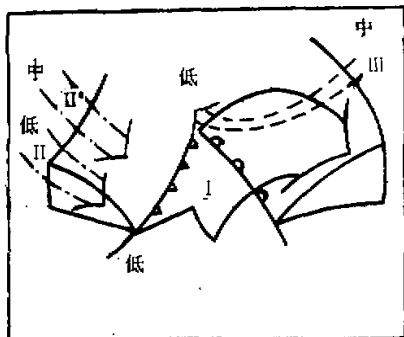


图 1 河套低压流场模式图。I 表示第一支气流, II 表示第二支气流, III 表示第三支气流。低、中表示层次。

在这些气流的作用下, 就形成了暖锋前、暖锋面和气旋中心各部位特有的降水性层状云云雨结构。

1. 暖锋前: 随着离开锋面的远近, 一般由高到低依次出现 Ci, Cs, As, As 和 Sc, 有时, 也出现 Ns。在锋前降水性层状云中, 大部分是 As op 和 As tra, 间或下层还有 Sc 或 Fc。这类云层沿着锋面呈条状云区, 长度较长, 宽度较狭。一般云中较稳定, 颠簸起伏较小, 较少见到大的“对流单体”群。As 和 Sc 间间隙较大, Sc 大都很薄。

如表 1 所示, 相对于暖锋面和气旋中心北部, 这里平均云底高度最高, 云顶最低, 云层最薄, 过冷层也薄。

这里降水一般均匀, 降水强度一般不超过 1.0 毫米/小时, 平均约 0.59 毫米/小时。

2. 暖锋面: 这里离“输送带”源头较近, 又是冷暖空气交汇抬升区, 当条件适宜时会出现 Cb 或 Cu cong, 但在对流不太旺盛的日子里, 大部分出现层状云, 一般 As 都伴随有 Sc op 同时存在, 很多机会出现 Ns。有一点值得注意, 这些云中经常夹有比较显著的小“对

表 1 暖锋前云性宏观特征

日 期	云 状	云 厚 (KM)	云底高度 (KM)	云底温度 (°C)	正温层厚度 (KM)	过冷层厚度 (KM)	云顶高度 (KM)	云顶温度 (°C)	降水强度 毫米/小时
66.4.28	As tra Sc op	2.1	1.0	-2.0	0.0	0.3	3.1	-20.0	0.50
69.6.2(1)	As op	1.4	2.4	-3.0	0.0	1.2	3.8	-11.0	0.82
69.6.2(2)	As op Sc tra	1.7	2.7	-3.0	0.0	1.5	4.4	-11.0	0.68
71.8.17(1)	As op	3.1	3.4	3.0	0.3	1.3	6.5	-17.0	0.40
71.8.17(2)	As op	3.5	3.0	3.0	0.8	1.7	6.5	-10.0	0.70
72.5.13	As tra	1.0	3.1	5.0	0.5	0.5	4.1	-1.5	0.26
74.5.30(1)	Ac op Sc op	1.8	2.2	3.0	0.6	0.6	4.0	-15.0	0.62
75.7.2	Ac op Sc tra	2.7	1.9	3.0	1.2	0.5	4.6	-16.0	0.83

流单体”，其直径约几百米到1—2公里，常在3千米以上表现较明显，其中颠簸起伏较大，含水量和降水都较大。

表 2 暖锋面云性宏观特征

日 期	云 状	云厚 (KM)	云底高度 (KM)	云底温度 (°C)	正温层厚度 (KM)	过冷层厚度 (KM)	云顶高度 (KM)	云顶温度 (°C)	降水强度 毫米/小时
74.5.30(2)	Ns	2.4	1.8	8.0	1.0	1.1	4.2	-10.0	1.25
74.5.30(3)	Ns	3.1	1.5	10.0	1.8	0.5	4.6	-8.9	1.12
74.5.31(2)	As op, Sc op, Cu	3.4	1.5	10.0	1.8	0.6	4.9	-11.0	1.39
77.6.28	As op Sc op, cu	2.7	1.0	8.0	1.2	0.7	3.7	-8.0	2.37
78.6.30(1)	As op Sc op	4.7	1.5	7.5	2.1	0.9	6.2	-15.0	1.03
78.6.30(2)	As op Sc op, Cu	4.0	1.2	7.0	1.9	0.8	5.2	-19.0	1.00

比较表 2 和表 1、表 3，这里正温层最厚，过冷层较薄，云厚较厚，云底平均温度最高。

锋面附近降水强度，一般平均都超过 1 毫米/小时，个别站最大可达 10.0 毫米/小时，平均约 1.36 毫米/小时，由于这些单体的存在，使雨量表现出时间、空间上的不均匀，这些单体就是产生雨量中心的源地。如 77 年 6 月 28 日暖锋“雨带”中，原有四个雨量中心，08 点消失了两个，结合中尺度天气分析，雨带就是锋面上四个中尺度系统（即 θ_{se} 中心）垂

表 3 气旋中心北部云性宏观特征

日 期	云 状	云厚 (KM)	云底高度 (KM)	云底温度 (°C)	正温层厚度 (KM)	过冷层厚度 (KM)	云顶高度 (KM)	云顶温度 (°C)	降水强度 毫米/小时
63.5.19	Ns	3.2	2.8	2.5	0.2	0.2	6.0	-14.5	0.67
70.5.9	Ns	5.1	1.8	7.0	1.2	3.0	6.9	-24.0	1.75
74.5.31(1)	Ns	4.2	0.8	14.0	1.8	0.4	5.0	-11.0	1.01
78.6.9	As op Ac tra	4.0	3.0	5.0	0.6	2.4	7.0	-15.0	1.60

直锋面移动所致,其雨量中心就是对流单体的产物。

3. 气旋中心区北侧: 云层多为 As op 和 Sc, 或 Ns。相对于其他两个部位,这里云层最厚,过冷层最厚,云顶最高(表 3)。云层中稳定性大都介于暖锋面与暖锋前之间,层状云中,有时也夹有一些对流小单体,但强度和大小都不及锋面附近。

这里降水强度大都大于 1.0 毫米/小时,平均为 1.25 毫米/小时。

总之,系统三个部位云层宏观特征各有所异,云的微物理特征必然也不一样。

四、云的微物理特征

1. 系统的平均特征

a. 冰质点浓度*。21 架次探测中共取得冰雪晶资料 469 份。冰晶浓度在 10^{-2} 个/升到 10^2 个/升之间,平均 12.3 个/升。这与 Hobbs 在卡斯克特山测得的浓度相近^[4]。

雪晶浓度一般集中在 10^{-2} 个/升— 10^1 个/升范围内,平均为 4.04 个/升。

冰质点浓度各次飞行差别较大,有时,在水平相近两点测得浓度相差也较大,这也反映层状云中冰质点分布的不均一性。

图 2 给出了河套低压层状云冰质点浓度随温度的分布。其浓度在 0°C — -3°C 间向上增加,到 -3°C — -6°C 之间达到极大,为 32.8 个/升,往上又单调减少。

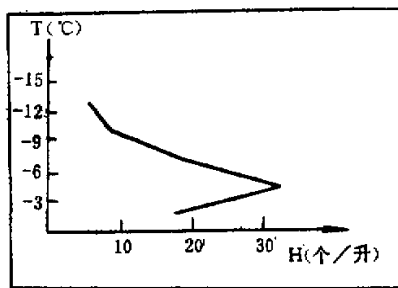


图 2 冰质点浓度的垂直分布

b. 雪晶形状。为了比较雪晶形状,我们作了表 4。由表可见,片状占的比例最多,柱状次之,针状第三,霰最少。

晶形随高度的分布规律,一般云顶大都由柱状、薄片板状组成。中上部大都由薄片板状、带核心圆盘板状和柱状组成,夹有少量枝星状。云的中下部大都由板状、破碎板状、枝状、破碎枝状、针状等组成。云底大都由针、枝、少量霰及雨滴组成。

* 冰质点指冰雪晶的总称。

表 4 系统晶形统计比较

形 状	枝 状	针 状	霰	片 状	柱 状	合 计
次 数	42	48	12	136	122	360
占总次数百分比 (%)	12	13	3	38	34	100

c. 平均液态含水量的分布。21 架次飞行中,共取得含水量资料 582 份。平均液态含水量为 0.122 克/米^3 ,一般在 $0-0.77 \text{ 克/米}^3$ 之间。

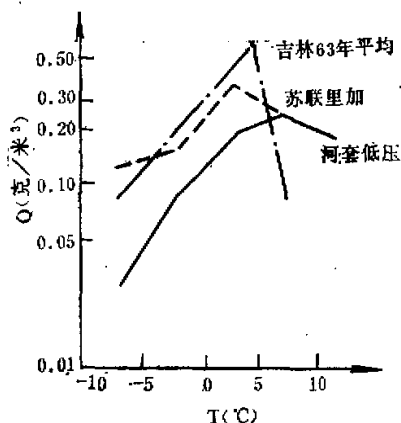


图 3 液态含水量随温度分布

图 3 是 74 年 5 月 30 日,在 4000 米高度连续三次飞行测得的冰质点浓度。由图清楚表明,中心北侧比暖锋面和暖锋前明显较高。

表 6 系统各部位冰质点浓度比较

暖 锋 面		暖 锋 前		气旋中心北部		气旋暖区	
范 围	平 均	范 围	平 均	范 围	平 均	范 围	平 均
0.02/升 到 45.07/升	9.25/升	0.047/升 到 79.0/升	16.74/升	0.125/升 到 409.6/升	80.02/升	2.1/升 到 12.3/升	6.76/升

从表 6 也可以看出,随着温度降低,暖锋前除 $-3.0- -0.1^{\circ}\text{C}$ 外是单调减少型;暖区是单调增加型。气旋中心北侧和暖锋面附近都在 $-3^{\circ}\text{C}- -6^{\circ}\text{C}$ 之间浓度最大,这可能反映了不同的成冰和积累机制。

b. 雪晶形状。表 7 对系统各部位晶形出现频次作了统计。由表可见,气旋中心北侧枝、针、霰三种饱和型比例总和最高,暖锋前次之。这两处枝状比例相等,但霰出现比例前处高于后处。

c. 液态含水量。液态含水量在系统各部位分布特点不一。表 8 表明,平均含水量暖锋面是 0.166 克/米^3 ,比暖锋前和气旋中心北侧都大。暖锋面附近层状云中正温层含水量

为了说明液态含水量随温度的分布,我们绘制了图 3,(同图给出了吉林 63 年及苏联里加的资料)。图上表明,河套低压层状云最大含水量出现在 $5^{\circ}\text{C}-10^{\circ}\text{C}$ 层中,比吉林 63 年平均大一倍以上,但在 0°C 层以上,含水量都小于 0.1 克/米^3 ,比吉林 63 年和里加都小。这说明河套低压低层水汽充沛。

2. 系统各部位的微物理特征

a. 冰质点浓度。表 5 给出了暖锋前、暖锋面、暖区及气旋中心北侧的平均冰质点浓度。由表可见,气旋中心北侧最高,暖区最低。

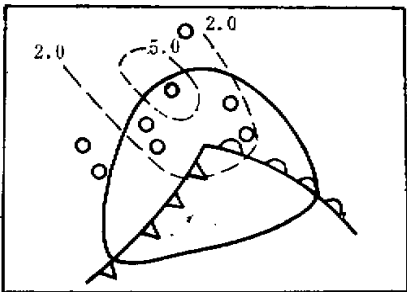


图4 74年5月30日4000米高度冰质点浓度水平分布。

表6 不同温度区间系统各部位冰质点浓度分布

温度范围 (℃)	暖 锋 前 (个/升)	暖 锋 面 (个/升)	暖 区 (个/升)	气旋中心北部 (个/升)
-15.0—-12.1	4.67			
-12.0—-9.1	8.82			
-9.0—-6.1	9.98	10.8	10.99	58.2
-6.0—-3.1	17.40	13.5	6.54	106.4
-3.0—-0.1	17.29	7.84	2.25	41.68

表7 系统各部位晶形统计比较

数 量 部 位	形 状	形 状	枝	针	霰	片	柱	合 计
	次 数	次 数	次 数	次 数	次 数	次 数	次 数	次 数
暖 锋 前	次 数	29	40	2	77	60	208	
	占百分比	14	19	1	39	29	100	
暖 锋 面	次 数	2	7	8	31	28	76	
	占百分比	3	9	11	40	37	100	
中 心 北 侧	次 数	13	15	5	28	34	95	
	占百分比	14	16	5	30	35	100	

最大,负温层最小;气旋中心北侧负温层最大;暖锋前正温层最小。Hobbs等在卡斯克特山对太平洋风暴观测发现,锋前液态含水量是0—0.5克/米³,锋面是0.5—2.0克/米³,锋后0.1—1.0克/米³。虽然大小比河套低压高一个量级左右,但总的趋势相似。

表 8 系统各部位液态含水量

暖锋前(克/米 ³)			暖锋面(克/米 ³)			气旋中心北侧(克/米 ³)		
平 均	正温层	负温层	平 均	正温层	负温层	平 均	正温层	负温层
0.091	0.104	0.049	0.166	0.226	0.021	0.143	0.158	0.092

图 5 是各部位液态含水量随温度的分布。当温度高于 0°—5℃ 时,暖锋面平均液态含水量最大,在 -5°—0℃ 层中,暖锋前比其他两部位稍大,而在 -10°—-5℃ 的高层中,中心北侧最大。

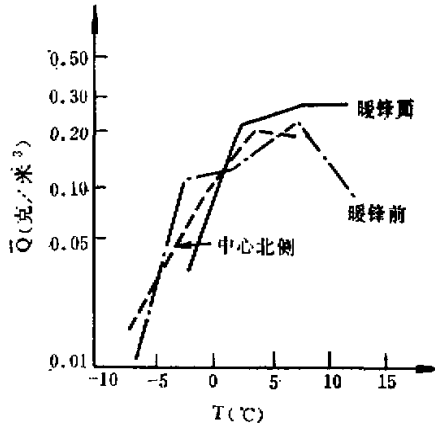


图 5 各部位液态含水量随温度的分布

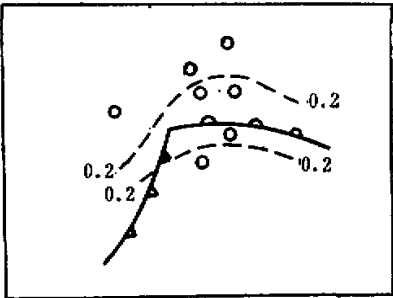


图 6 74 年 5 月 30 日 2700 米高度含水量的水平分布

图 6 是 74 年 5 月 30 日连续三次飞行测得暖锋面前后低层含水量的水平分布(飞行高度 2700 米—2800 米)。由图可见,也是暖锋面附近最大,往两侧减少。

五、降水和各种宏微观因子的关系

在云雾探测的基础上,进而对所有探测个例的降水与这些宏微观因子的关系进行了统计计算。

首先,分别求解了 12 个因子和降水强度的相关系数(表 9)。结果,降水强度与系统部位、云厚、正温层厚度及云底温度之间相关较好,相关系数都超过 0.5 以上。和液态含

表 9 降水强度和各种宏微观因子间的相关系数

R 与含水量	R 与正温层含水量	R 与冰质点浓度	R 与云厚	R 与系统部位	R 与正温层厚度	R 与过冷层厚度	R 与冰云厚度	R 与云底高度	R 与云底温度	R 与云顶温度	R 与 0℃层高度
r_{11}	r_{12}	r_{13}	r_{14}	r_{15}	r_{16}	r_{17}	r_{18}	r_{19}	r_{110}	r_{111}	r_{112}
0.45	0.37	0.09	0.51	0.71	0.52	0.32	0.05	0.43	0.58	0.12	0.34

水量、云底高度之间相关次之, r 超过 0.4。而和冰质点浓度、云顶温度及冰云厚度相关最差, r 只有 0.05—0.12。

用上述因子和降水强度共试建了八个预报方程, 在给定信度 0.01 的显著度水平上, 都能通过 F 检验。但拟合值和实测值间相关系数最好的只有 0.64—0.786, 其中以下述方程较好:

$$y = 0.347x_1 + 0.193x_2 + 0.159x_3 + 0.765x_4$$

其中, x_1 为系统部位距平值。在系统中令暖锋前为 0, 气旋中心为 1, 暖锋面为 2。

x_2 为云厚距平值。 x_3 为云层的正温层厚度距平值。 x_4 为平均含水量距平值。

并得: $r_{y1,2,3,4} = 0.786$ 。

表 10 回归拟合情况比较表

距平值 \ 变 量		预 报 值 $\hat{y}$	实 测 值 y
原 21 果 次 资 料 拟 合 情 况	1	0.37	0.36
	2	0.74	0.23
	3	0.69	0.50
	4	0.30	0.40
	5	1.04	1.48
	6	0.85	0.11
	7	-0.55	-0.39
	8	-0.70	-0.07
	9	-0.57	-0.21
	10	-0.31	-0.49
	11	-0.01	-0.19
	12	-0.71	-0.63
	13	-0.47	-0.07
	14	-0.26	-0.06
	15	-0.94	-0.89
	16	-1.01	-0.52
	17	0.06	-0.22
	18	0.55	0.86
	19	0.41	0.12
	20	0.64	0.71
	21	-0.34	-0.51
79 年拟 合预报	1	-0.20	-0.34
	2	-0.49	-0.63

由上述方程,利用原 21 架次云雾探测的 x_1, x_2, x_3, x_4 值,计算当时的估计值 $\hat{y}$,除一次外,总的趋势完全一致,量的差别也不大,计算 y 和 $\hat{y}$ 相关系数达 0.84. 同时,试报了 79 年两次(4 架次)的降水量(见表 10),趋势一致,但一次预报准确率为 51.6%,另一次为 76.7%.

六、讨 论

1. 统计结果发现,在河套低压中冰质点浓度和降水强度相关较差,可能是在这样过冷水条件下,冰质点浓度平均较高,较高的主要原因又可能是:(1)河套低压来源于黄土高原及蒙古高原一带,相对于其他系统,地面实测冰核浓度最高^[8]. (2)河套低压是基于河套倒槽基础上发展,成熟后移来我省的,大多是老化系统,所以冰质点较多.

2. Heymsfield 用飞机、多普勒雷达等多种手段探测研究得到,层状冷云中过冷水含量、降水和上升气流速度关系最密切^[9]. 河套低压层状云过冷水少、过冷层薄,主要可能是动力因子不足.

3. 暖锋面的层状云中,经常夹有“对流单体”,形成雨带中的“雨核”,说明“对流单体”在降水中起到了重要作用.

4. 春季,吉林河套低压降水性层状云降水较大,主要是过冷层有足够多的冰质点播种,700 毫巴以下低层水汽输送较大,造成暖层厚,含水量大,有较多可供降水质点增长的液态水.

致谢:游来光同志对本文提出了指导和修改意见,特表感谢.

参 考 文 献

- [1] 吉林省气象科学研究所, 降水性层状云微物理特征的初步探讨, 1973 年, “全国人工降水、防雹科技座谈会报告选编”。
- [2] 游来光等, 春季吉林地区层状冷云中冰晶的形成与雪晶的增长特点, 气象学报, Vol 35, No. 4, p. 423, 1965.
- [3] 吉林省气象科学研究所, 降水性层状云的性质及其人工影响, 1977 年, “科研报告”。
- [4] Hobbs, P. V., The nature of winter clouds and precipitation in the Cascade Mountains and their Modification Artificial Seeding. Part I: Nature conditions, *J. of Appl. Meteor.*, Vol 14 p. 783, 1975.
- [5] Heymsfield, A. J., Precipitation development in stratiform ice clouds: A microphysical and dynamical study, *J. Atmos. Sci.*, Vol 34 p. 367, 1977.
- [6] 吉林省气象科学研究所, 暖锋雨系的飞机探测及其人工影响问题探讨, 1977 年, “科研报告” No. 7.
- [7] 降水系统结构的评述, Harrold, T.W. and Austin, P. M. 1977 年, 中央气象局情报所编印的“国外暴雨专题参考资料”, 附集, p. 21.
- [8] 汪学林等, 白城地区春季的大气冰核, 气象学报, Vol 35 No. 3, p. 273, 1965.

THE CHARACTERISTICS OF CLOUD AND PRECIPITATION FOR PRECIPITUS STRATIFORM CLOUD IN HE-TAO CYCLONE

Wang Xue-lin Lu Yu-jun Li Zhan-zhu et al.

(Jilin Meteorology Institute)

Abstract

From 1963 to 1978, the characteristics of cloud and precipitation for precipitus stratiform cloud in He-Tao cyclone had been explored by aircraft measurements for 21 times. Statistical calculation and weather analysis have shown that:

1. The cloud differs in form in different ranges of weather system, and the corresponding macroscopic characteristics and precipitation intensity are also different.
2. The averaged concentrations of ice particles are in the range of $10^{-2}L^{-1}$ to 10^4L^{-1} . The vertical distribution, concentrations in different ranges, and crystal form are all different. The liquid water contents are in the range of 0 to $0.77 gm^{-3}$ with an averaged value of $0.122 gm^{-3}$. Different ranges have quite different liquid water content. It is larger in ranges with positive temperature than in ranges with negative temperature, and there is no liquid water in ranges with a temperature below $-10^{\circ}C$.
3. In stratiform clouds of a weather system, the precipitation intensity is well correlated to the location, cloud depth, depth of positive temperature layer, temperature of cloud base, and the mean liquid water content, but not to the temperature of cloud top, depth of ice cloud and average concentrations of ice particles. It can be expressed by a regression equation.