

成都积雨云形成的层结条件分析

尹舒悦¹, 周筠璐^{1,2}, 高志博¹, 于 灏¹, 白 舸¹, 胡 丹¹

(1. 成都信息工程大学 高原大气与环境四川省重点实验室, 四川 成都 610225; 2. 南京信息工程大学 气象灾害预警预报与评估协同创新中心, 江苏 南京 210044)

摘要:为了研究成都积雨云发生时的层结条件,采用中国气象局的探空资料和地面观测资料统计了成都地区2009–2013年积雨云出现时的对流指数和500 hPa、700 hPa、850 hPa 3个层次的物理量,分析了西南涡、低空切变线、低空急流4个影响系统下积雨云产生时的各指数演变图,得出以下结论:(1)春季,K指数在22℃~34℃,SI在1℃~8℃,对流稳定指数在-1℃~12℃,抬升指数在0℃~7℃,A指数在0℃~14℃,成都易有积雨云产生。(2)夏季,K指数在33℃~41℃,SI在-2℃~3℃,对流稳定指数在-15℃~2℃,抬升指数在-3℃~1℃,A指数在2℃~15℃,成都易有积雨云产生。(3)秋季,K指数在29℃~39℃,SI在-2℃~5℃,对流稳定指数在-13℃~5℃,抬升指数在-2℃~4℃,A指数在3℃~15℃,成都易有积雨云发生。

关键词:大气物理;积雨云;大气层结;对流指数;西南涡;切变线

中图分类号:P426.5⁺1

文献标志码:A

doi:10.16836/j.cnki.jcui.2019.02.009

0 引言

成都坐落于四川盆地的西部,属亚热带湿润季风气候,成都每年发生雷暴的时候较多,年际变化较大,并且有很强的季节性,雷暴多发生在4~9月,而夏季6、7、8月占7成以上^[1]。

目前,大多学者都是研究的强对流天气过程,重在分析环流形势和卫星、雷达图,而专门针对积雨云的研究微乎其微。因此专门针对成都地区的积雨云进行较为深度的研究。立平良三^[2]在之前的研究中已经明确指出掌握积雨云实况的最为实用的手段是雷达和卫星。但是雷达只能对积雨云进行短时预报,卫星对积雨云的观测也会因为高层云的影响而产生误差。将根据人工对云的观测数据找出成都5年来的积雨云产生的时间,对其进行具体的分析。Rohit Chakraborty^[3]利用加尔各答多频辐射观测预报对流事件,指出亮度温度(BT)标准差和抬升指数(LI)、K指数(KI)和湿度指数(HI)等不稳定指标均有一定的变化。M. Kunz^[4]在对德国西南地区常见、广泛、强雷暴天气的对流前环境的研究中指出沙氏指数和修正K指数的预测结果最佳。P. R. Jayakrishnan^[5]曾指出当印度的南部出现对流系统,该地区的LI值小于-4,而LI高于2的区域则层结比较稳定,没有任何对流。M. Korologou^[6]根据对当地对流活动的研究制定了一个新的指数,它纳入了当地天气的正式经验中。钟晓平^[7]、郁淑华^[8-9]、肖

递祥^[10-14]等研究了四川盆地的暴雨过程的层结分析,主要是温湿场和层结稳定度的分析,指出川西地区暴雨发生在大气层结不稳定条件下,西南低涡或较强西南低空急流是造成暴雨的重要因素,青藏高原地形有利于高原东麓暴雨区扩大与强度加大,低层 θ_{se} 锋区和水汽辐合对强降水具有指示意义。统计5年来成都地区积雨云发生时的不稳定指数的具体数据,综合应用沙氏指数、K指数、抬升指数、对流稳定指数、A指数、风暴强度指数、湿对流有效位能这7个对流指数来判定成都积雨云形成时的层结条件,通过大气层结的变化规律来对积雨云进行预报。

1 资料概括和研究方法

1.1 资料概括

利用2009–2013年的常规地面观测资料和探空资料。对于层结的研究,主要运用了层结稳定类指数:沙氏指数SI、K指数、抬升指数LI、对流稳定指数IC;大气温湿类指数:A指数;热动力综合类指数:风暴强度指数SSI;能量类指数:湿对流有效位能CAPE;并且运用了积雨云发生时的500 hPa、700 hPa、850 hPa 3个层次上物理量:温度、风速、比湿、饱和比湿、相对湿度、水汽压、假相当位温以及饱和假相当位温。

1.2 研究方法

(1)根据人工对云的观测找出成都市2009–2013

年所有积雨云出现的具体时间点,主要是每日的 08 时和 20 时的数据。找出每个时间点对应的各层结指数,24 h 降水量和 500 hPa、700 hPa、850 hPa 3 个层次上的温度,风速,比湿,饱和比湿,相对湿度,水汽压,假相当位温以及饱和假相当位温。

(2) 根据每次积雨云发生时对其影响系统主要分为西南涡、切变线、低空急流 3 类。

(3) 将 3、4、5 月为春季,6、7、8 月为夏季、9、10、11 月为秋季,12 月于次年的 1、2 月为冬季。根据 2009–2013 年积雨云发生时各影响系统下春夏秋冬四季进行分类,对每类条件下的 K 指数、SI 指数、对流稳定指

数 IC,湿对流有效位能 CAPE,风暴强度指数,抬升指数 LI,A 指数进行统计。做出各季节、各影响系统下积雨云发生时候的各指数的箱型图。再对每类条件下的 500 hPa、700 hPa、850 hPa 3 个层次上的温度,风速,比湿,饱和比湿,相对湿度,水汽压,假相当位温以及饱和假相当位温进行统计,每个物理量对应一个阈值。最后做出预报流程图。

1.3 各指数的定义与计算公式说明

各指数的定义与计算公式见表 1。

表 1 各指数的定义与公式说明表	
对流指数	定义
K 指数	$(T_{850}-T_{500})$ 为 850 ~ 500 hPa 的平均温度递减率
	T_{d850} 为 850 hPa 露点温度
	$(T-T_d)_{700}$ 为 700 hPa 空气饱和程度。
SI 指数	指气块从 850 hPa 开始,干绝热上升至抬升凝结高度,然后按湿绝热递减率上升至 500 hPa,在 500 hPa 上的环境温度 (T_{500}) 与该上升气块到达 500 hPa 的温度 (T_s) 的差值
对流稳定指数	见公式
湿对流有效位能	它表示在浮力作用下,对单位质量气块从自由对流高度上升到平衡高度所做的功。
风暴强度指数	Shr 为气层内密度加权平均垂直风切变。Eh 为气块浮力能。
抬升指数	指气块从自由对流高度出发,湿绝热上升至 500 hPa 处的温度 T'_{500} 与 500 hPa 环境温度 T_{500} 之差
A 指数	见公式

2 2009–2013 年成都地区积雨云出现时层结条件

2.1 积雨云出现的频数

图 1 是 2009–2013 年成都积雨云逐年出现频数的演变图,从图 1 看到,2010 年积雨云出现的次数最多,从 2010 年开始成都地区积雨云出现的次数逐年降低,到了 2013 年只出现 75 次积雨云天气。冯新灵等^[15]提到今后成都将继续变暖,并且成都未来降水量将继续减少,未来 10 年的年降水量将减少 45.2 mm,并且这种减少趋势具有很强的持续性强度。从图 2 看到,2009–2013 年成都积雨云多在每年的 7、8 月出现,其次是 5 月。可能是 7、8 月西太平洋副热带高压对四川盆地产生影响,南支槽前多暖湿气流的输送,因此提供积雨云形成的水汽条件。

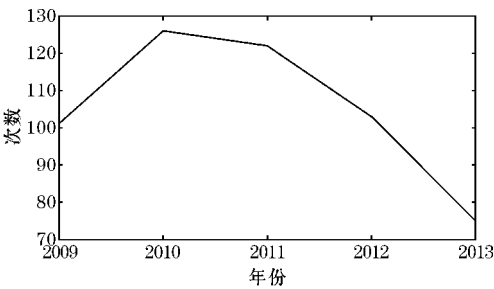


图 1 2009–2013 年成都积雨云逐年出现的频数演变图

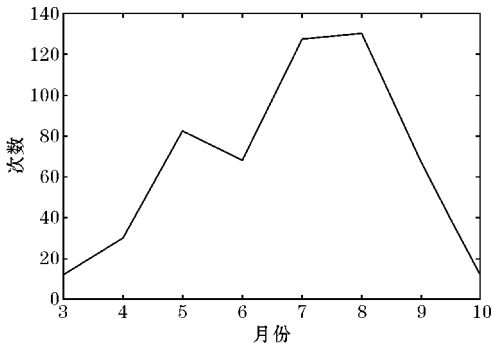


图 2 2009–2013 年成都积雨云逐月出现的次数演变图

2.2 3、4、5 月积雨云出现时的层结分析

2.2.1 3、4、5 月各影响系统下积雨云出现的频数

从图 3 看到,3、4、5 月,受到切变线影响下出现的积雨云次数最多,其次是受到低空急流影响的情况,受到低空急流、切变线共同影响,西南涡、切变线和低空急流共同作用这两种情况下出现积雨云的可能性较小。

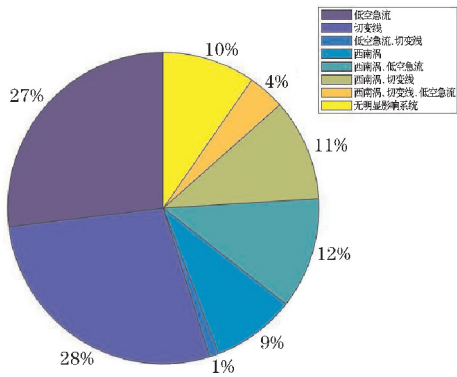


图 3 3、4、5 月各影响系统下
积雨云出现的频数饼图

2.2.2 3、4、5 月积雨云出现时对流指数分析

(1)大气温湿类指数分析

箱型图中的上下边缘为参数最大和最小值;方箱内为 50% 统计样本分布;方箱中粗黑实线为统计值的中位数,分布的散点代表该类型下指数的异常值,箱内的叉值为平均值。

$A \geq 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,有利于暴雨的产生,A 值越大,代表层结越不稳定。从图 4 看到,各类型中 A 的平均值都在 $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右波动,代表层结多处不稳定状态。在受到西南涡、切变线、低空急流共同影响的情况中,A 的值最大。在仅受低空急流影响,切变线和低空急流共同作用的两个类型中,A 指数的阈值宽度最大。

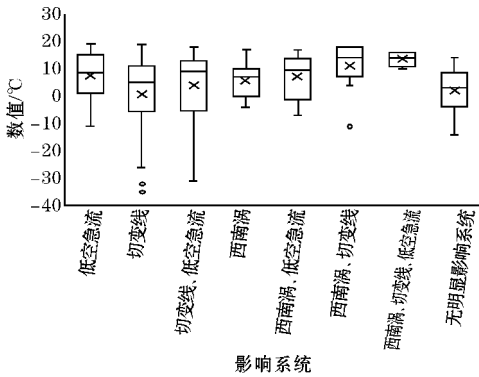


图 4 春季各影响系统下积雨云
产生时的 A 指数箱型图

(2)层结稳定指数分析

文献中指出沙氏指数 $SI < 0\text{ }^{\circ}\text{C}$,表示有发生对流

天气的可能,负值越大,发生对流天气的可能性越大。从图 5(a) 看到,沙氏指数的值都大于 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$,各类型的情况下,其平均值在 $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 上下波动,且每类情况 SI 指数的波动幅度较大。

K 指数是考虑气层水汽条件的一种不稳定指数,一般来说,K 指数越大,越有利于降水。根据已有文献指出: $K < 20\text{ }^{\circ}\text{C}$,无雷雨; $20\text{ }^{\circ}\text{C} \leq K < 35\text{ }^{\circ}\text{C}$,有局部雷雨; $K \geq 35\text{ }^{\circ}\text{C}$,有成片雷雨。K 指数在各类型的平均值多在 $27\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右波动,各类型下数值波动不大。但是在西南涡和切变线共同作用以及西南涡、低空急流、切变线共同作用这两种情况下其值在 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右波动。

对流稳定指数 $IC > 0\text{ }^{\circ}\text{C}$,代表对流性稳定, $IC < 0\text{ }^{\circ}\text{C}$,代表对流性不稳定。从图 5(c) 看到,在各类情况下,IC 的数值多大于 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$,其平均值在 $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右波动。在只受切变线影响的情况下,IC 小于 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的可能性最大;在仅受西南涡影响或者无明显影响系统的情况下,IC 的值波动幅度大。

抬升指数 LI 为正值的时候,表示气块为稳定状态,LI 为负值时气层多为不稳定状态,其负值越大,越不稳定。 $LI < -7\text{ }^{\circ}\text{C}$ 是,大气易出现强对流天气。从图 5(d) 看到,各类型中该指数的数值都大于 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$,各类型下该指数的平均值在 $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右波动,每类型下该指数阈值区间不大。

分析 3、4、5 月积雨云发生时的 24 h 降雨量看到,这 124 次积雨云过程中,发生暴雨的次数只有 1 次,发生大雨的次数只有 4 次,多为小雨和没有降水的情况。从层结稳定指数类中的这 4 个指数分析看到,春季积雨云发生时层结处于稳定的状态。

(3)热动力综合类指数分析

风暴强度指数常常用来预报强对流天气。从图 6 看到,各类型下该指数的平均值在 250 左右波动,在受到西南涡和低空急流共同影响的情况中,该指数的阈值区间最大。

(4)能量指数分析

湿对流有效位能是强对流天气分析的一个重要的参数。湿对流有效位能越大,代表大气层结越不稳定。从图 7 看到,在春季,这几类影响系统下,湿对流有效位能的值很低,除了在仅受切变线影响的情况,其他情况下该指数平均值都在 100 以下。而在只有切变线影响的类型中,湿对流有效位能最大值达到了 900 J/kg ,并且异常值达到了 1200 J/kg ,而平均值只有不到 100 J/kg ,证明在这种情况下的积雨云发生的条件比较复杂,应该结合其他信息分析。

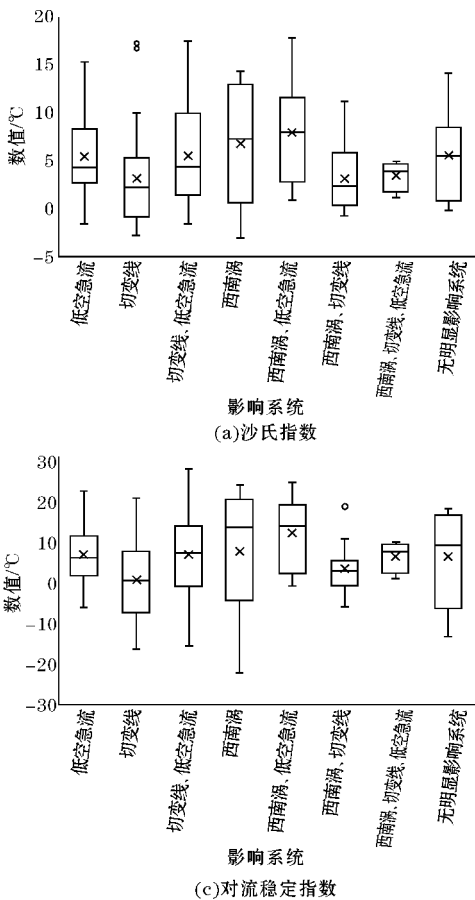


图5 春季各影响系统下积雨云产生时的沙氏指数、K指数、对流稳定指数、抬升指数箱型图

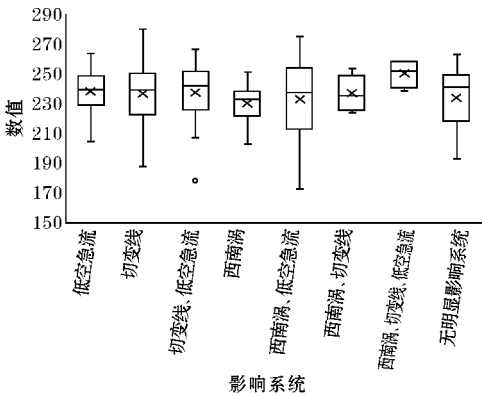


图6 春季各影响系统下积雨云产生时的风暴强度指数箱型图

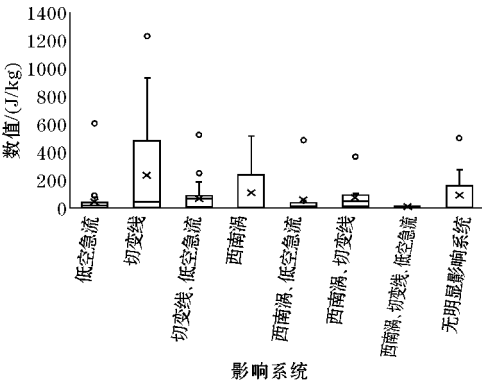


图7 春季各影响系统下积雨云产生时的湿对流有效位能箱型图

2.3 6、7、8月积雨云出现时的层结分析

2.3.1 6、7、8月各影响系统下积雨云出现的频数

从图8看到,在6、7、8月中,在仅受到切变线的影响下,出现积雨云的可能性最大,可能是因为切变线上的气流呈气旋环流,水平辐合明显,有利于上升运动,易产生云雨天气。其次是低空急流和切变线共同影响的情况,可能是因为低空急流通过底层暖湿平流的输送产生位势不稳定层结,并且在急流最大风速中心的前方有明显的水汽辐合和质量辐合或强的上升运动,有利于强对流活动连续发展。据统计发现,积雨云发生时,低空急流主要是在700 hPa或者850 hPa上出现在成都东部或者重庆的东北-西南向的急流,急流中心风速一般为12 m/s,或者是出现贵阳附近的东北-西南向急流,急流中心往往达到20 m/s。

2.3.2 6、7、8月积雨云出现时对流指数分析

(1) 大气温湿类指数分析

从图9看到,在各类系统影响下,发生积雨云的时候A指数都在8℃左右波动,各类情况中的A指数变化无较大的波动。只有在受到切变线影响和无明显影响系统的情况下,A指数的波动幅度较大。

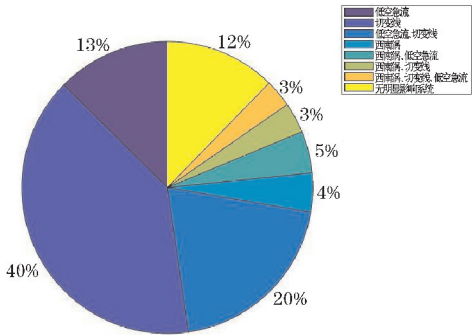


图 8 2009-2013 年 6、7、8 月成都积雨云出现时各影响系统下积雨云出现的次数演变图

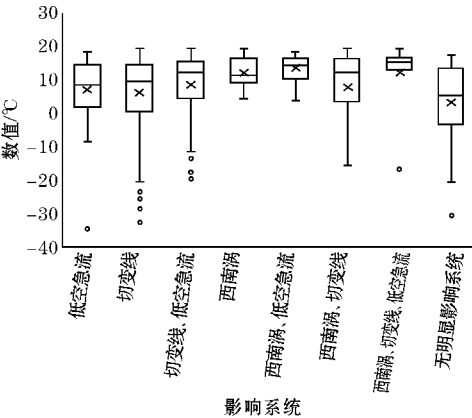


图 9 夏季各影响系统下积雨云产生时的 A 指数箱型图

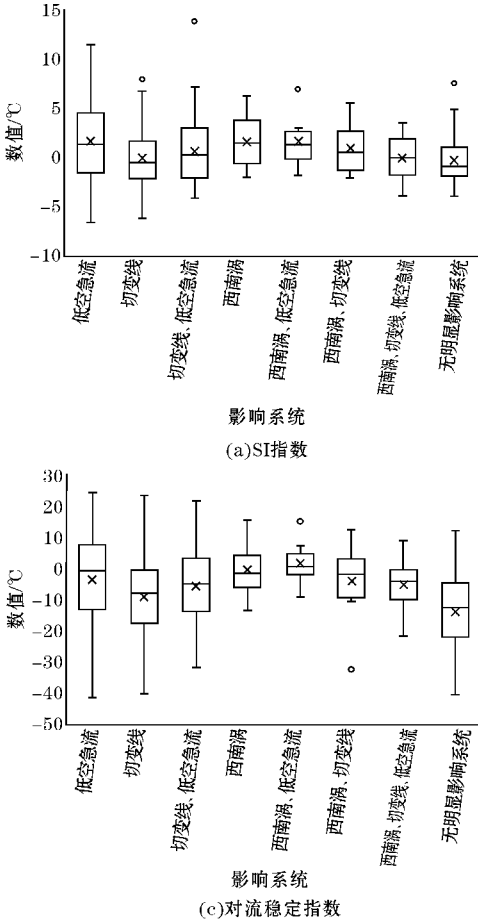


图 10 夏季各影响系统下积雨云产生时的 SI 指数、K 指数、对流稳定指数、抬升指数箱型图

(2)层结稳定类指数分析

从图 10(a)看到,各影响系统下积雨云发生时 SI 指数平均值在 1℃上下波动,波动幅度不大,数值多处于 0℃以上,表明出现对流的可能性较小,也有可能是因为积雨云发生过程中大气层出现了逆温层或者锋面,使得 SI 指数的意义消失。

从图 10(b)看到,各影响系统下积雨云产生时,K 指数都大于 30℃,各类情况该值的平均值在 36℃上下波动。在受到切变线和低空急流共同影响的情况下该指数的异常值最多,其他情况下该指数表明夏季成都出现成片雷雨的可能性较大。

从图 10(c)看到,各类情况中 I_c 的平均值在 -7℃上下小波动。在仅受低空急流影响的情况和西南涡、低空急流共同影响的情况中, I_c 在正负值中波动且正负值的可能性相近,而在其他情况下,该指数的值多处于负值。

从图 10(d)看到,各类型情况下 LI 指数的平均值在 -1℃上下波动。在仅受低空急流影响和仅受西南涡影响,以及西南涡、低空急流共同影响的情况中,LI 指数在正负值中波动且正负值的可能性相近,而在其他情况下为负值。

从 24 h 降水看到,在夏季成都地区积雨云出现的时候多有降水发生,而出现小雨的可能性和出现中到暴雨的可能性时一样的。总的分析层结稳定类这 4 个指数看到,在仅受低空急流影响的情况中,各指数的阈值都比较大。在仅受低空急流影响和仅受西南涡影响,以及西南涡、低空急流共同影响的情况中,成都积雨云形成时大气层结的稳定度较难判断,而在其他情况中这 4 个指数表明层结多为不稳定的状态,出现雷雨的可能性较大。

(3)热动力综合类指数分析

从图 11 看到,6、7、8 月积雨云发生的时候,风暴强度指数的数值在 250 左右,并且各类系统下,风暴强度指数的数值波动幅度不大,各类系统的指数数值没有太大的区别,分布都比较均匀。

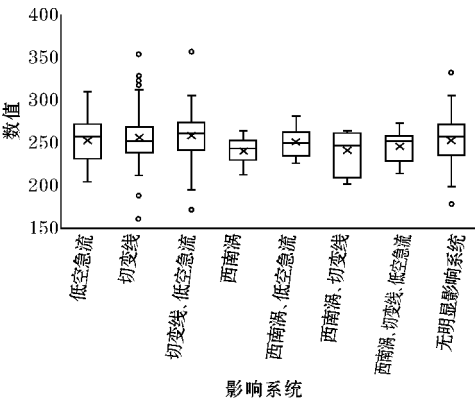


图 11 夏季各影响系统下积雨云产生时的风暴强度指数箱型图

(4)能量类指数分析

从图 12 看到,在每一类影响系统下产生积雨云的过程中,湿对流有效位能的数值波动很大,一般从 0 J/kg到1500 J/kg左右。在仅受到西南涡影响和西南涡、低空急流共同影响的两种情况中,CAPE 值较小,表明这两种情况下层结较为稳定,在仅受切变线影响的情况中 CAPE 的异常值很多,在其他情况下层结的稳定度波动较大,需结合其他情况进行分析。张建新^[16]等指出CAPE均值对于区分无雷雨、一般雷雨、

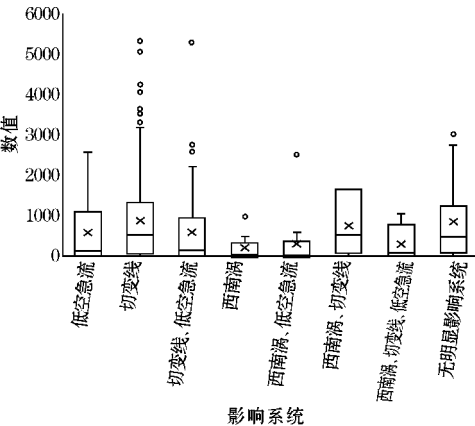


图 12 6、7、8 月各影响系统下积雨云产生时的湿对流有效位能箱型图

雷雨大风的可信度达 99%。而从文中分析看,CAPE 对成都积雨云是否发生的可信度目前看不是特别大,还有待进一步的研究。

2.4 9、10 月积雨云出现时的层结分析

2.4.1 9、10 月各影响系统下积雨云出现的频数

从图 13 看到,9、10 月的时候,积雨云多在切变线的影响下出现,其次是切变线、低空急流的共同作用下出现。相对来说,在仅受西南涡影响和西南涡、低空急流共同影响的情况中,积雨云出现的可能性较低。

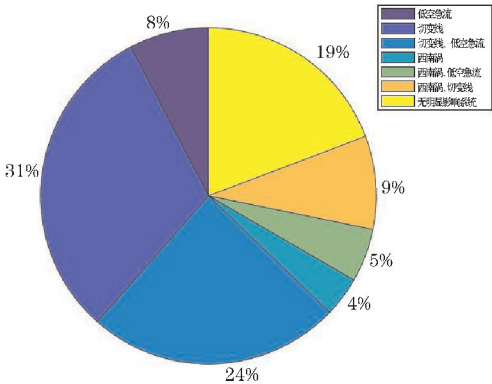


图 13 9、10 月各影响系统下积雨云出现的频数柱状图

2.4.2 9、10 月各影响系统下积雨云出现时对流指数分析

(1)大气温湿类指数分析

从图 14 看到,各类型下该指数的平均值在 7 ℃左右。在西南涡、低空急流共同作用的情况中,A 指数的上下波动幅度最大,最小值达到了 -30 ℃,而平均值是 -10 ℃。而在其他情况中,A 指数都为正值,表明大气层结有利于暴雨的发生。

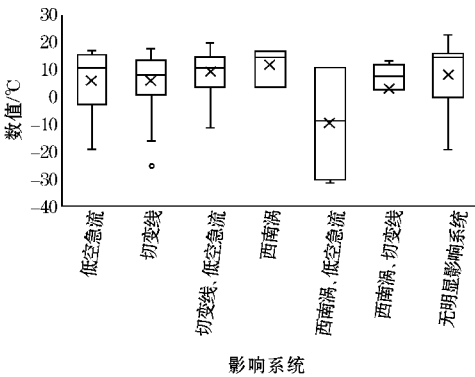


图 14 秋季各影响系统下积雨云产生时的 A 指数箱型图

(2)层结稳定类指数分析

从图 15 看到,沙氏指数只有在无明显影响系统的分类中,数值处于 0 ℃以下,而其他情况中该指数都出与 0 ℃以上。K 指数的值在 30 ℃~40 ℃波动,雷雨发生的可能性较大。对流稳定指数的平均值只有在受西南涡、低空急流共同影响的情况中是大于 0 ℃的,而其他情况下,该指数多为负值。分析抬升指数看到,各类型中其平均值为 0 ℃。这 4 种指数的分析表明在 9、10

月,无明显影响系统的情况中,成都地区出现积雨云时层结多为不稳定的状态,而其他情况下,SI 和抬升指数表明层结多处于稳定状态,而对流稳定指数表明层

结多处于不稳定的状态。而统计分析了每一天的 Tlogp 图看到,层结处于稳定和不稳定的次数各占一半,所以应该结合具体情况进行具体分析。

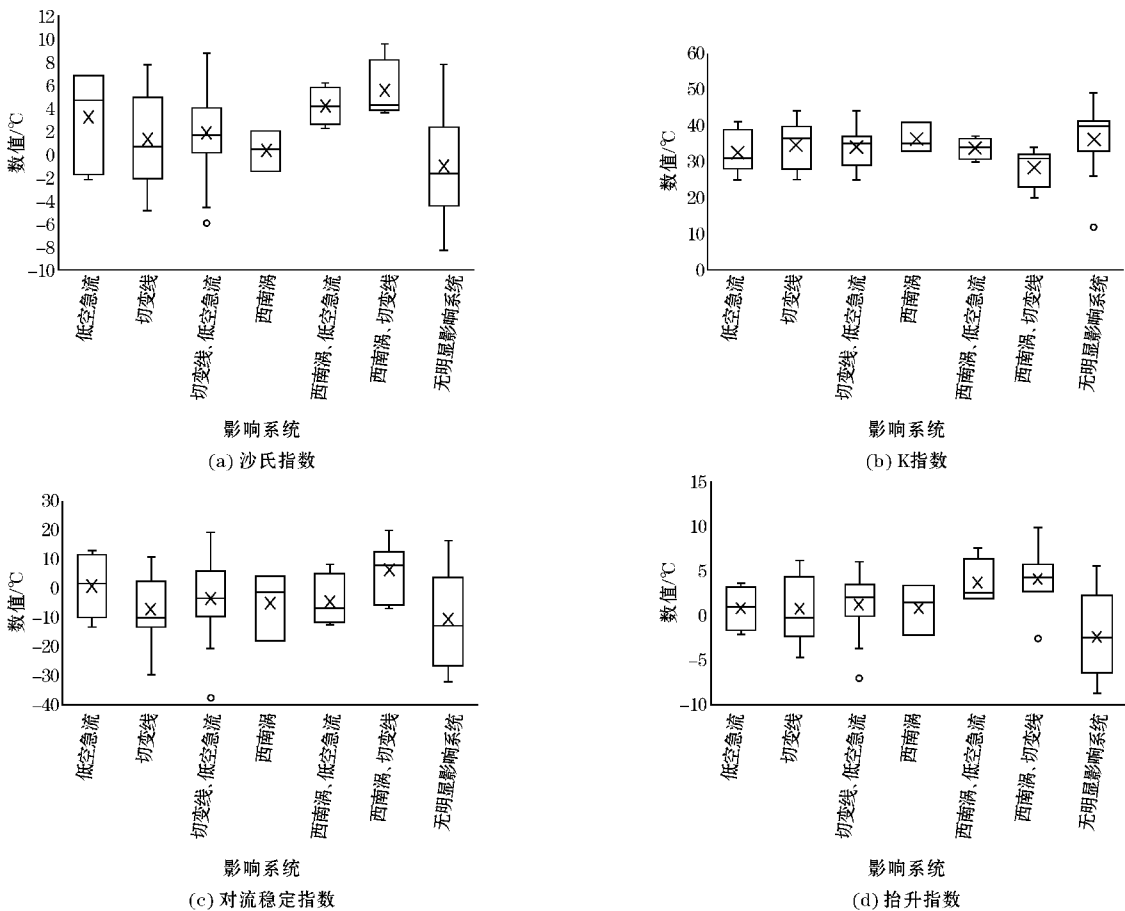


图 15 秋季各影响系统下积雨云产生时的沙氏指数、K 指数、对流稳定度指数、抬升指数箱型图

(3)热动力综合类指数分析
从图 16 看到,在西南涡、切变线共同影响的情况中,风暴强度指数的波动相对来说较大,其平均值为 220,而其他类型的风暴强度指数的平均值在 250 左右,上下波动较小。

数的波动非常大,低值达到 0 J/kg, 高值达到 2600 J/kg,这表明该类情况下该指数的数值是多变的。而在其他情况中,该指数波动很小,且数值非常低,平均值只达到 22 J/kg。

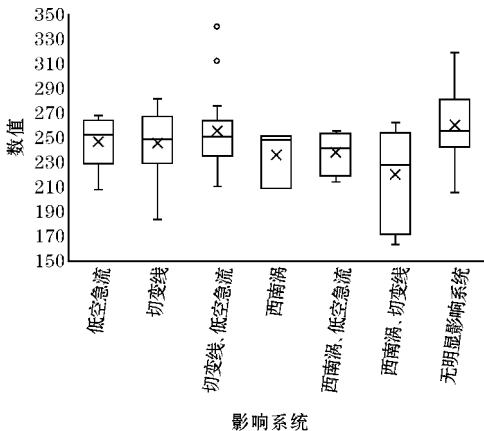


图 16 秋季各影响系统下积雨云产生时风暴强度指数箱型图

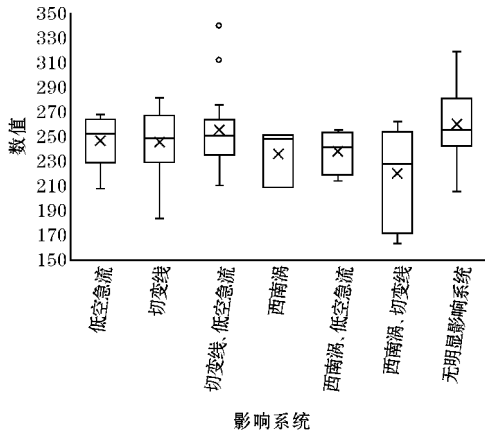


图 17 秋季各影响系统下积雨云产生时湿对流有效位能箱型图

(4)能量类指数分析
从图 17 看到,在无明显影响系统的情况下,该指

2.5 春夏秋冬成都积雨云的预报流程图

春夏秋冬成都积雨云的预报流程图见图 18、19、20。

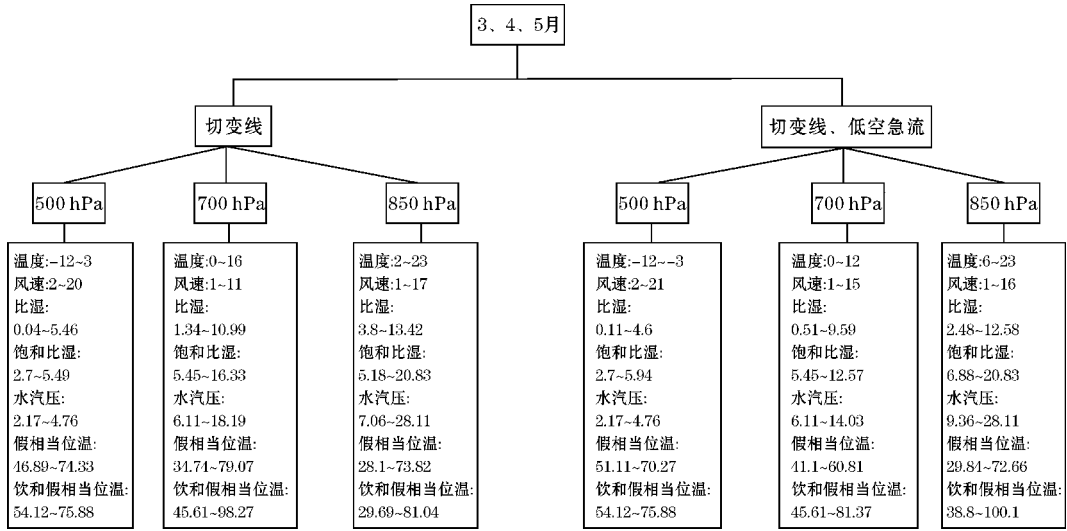


图 18 3、4、5月成都积雨云的预报流程图

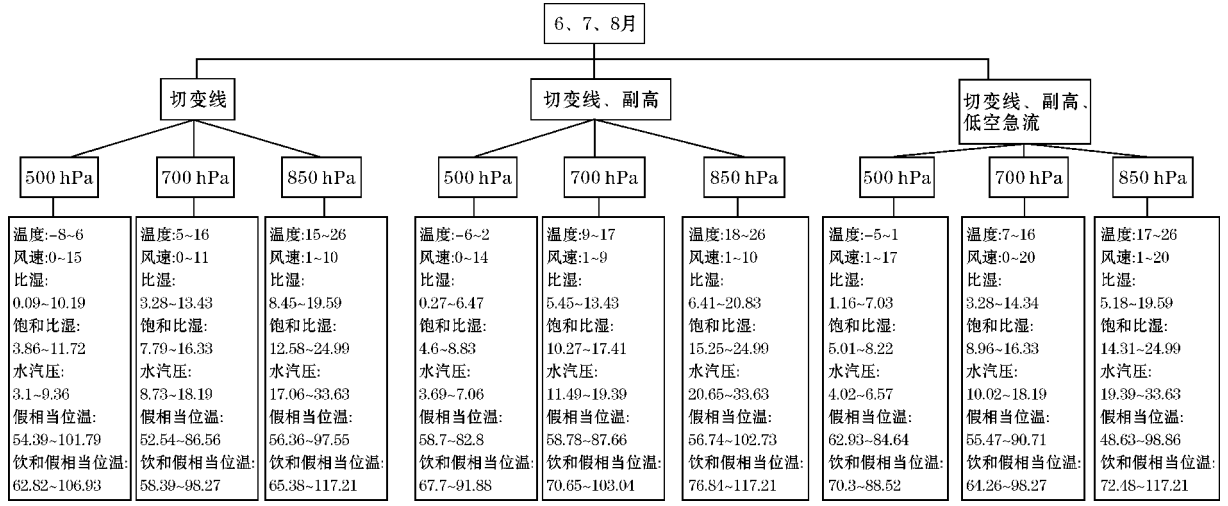


图 19 6、7、8月成都积雨云的预报流程图

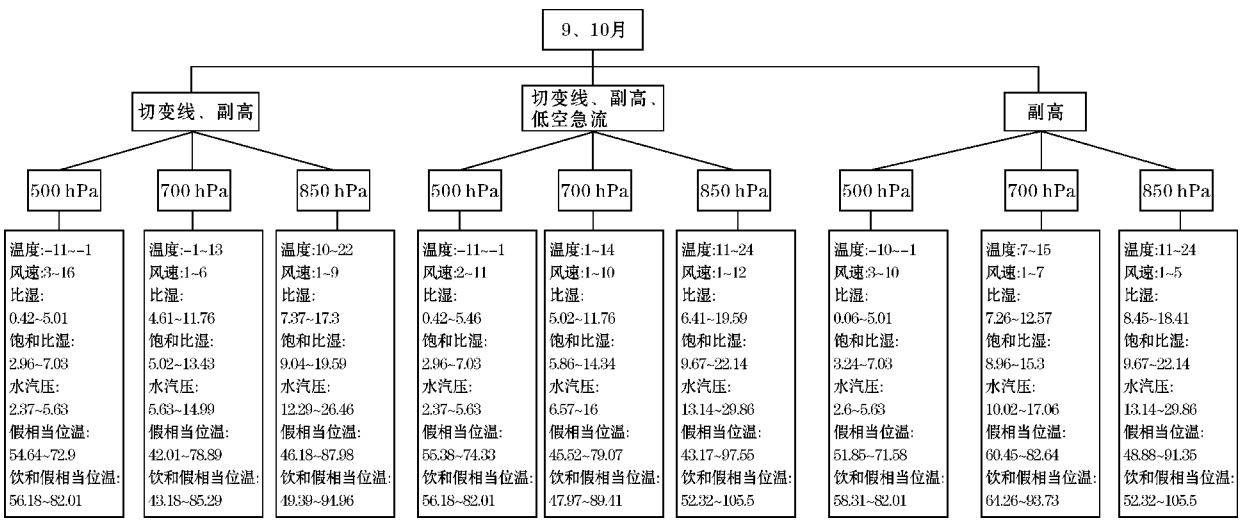


图 20 9、10月成都积雨云的预报流程图

根据春夏秋冬季节中积雨云产生时的影响系统分类,找出每类对应的500 hPa、700 hPa、850 hPa 3个层次中的温度、风速、比湿、饱和比湿、水汽压、假相当位

温、饱和假相当位温 7 个物理量的阈值,做出春夏秋冬季节成都积雨云的预报图。

根据季节找到对应的成都积雨云的预报,在当天

的 Tlogp 资料找出 500 hPa、700 hPa、850 hPa 3 个层次里的温度、风速、比湿、饱和比湿、水汽压、假相当位温、饱和假相当位温,对应层结高度看到各物理量是否符合预报图中的阈值范围,如果都符合,则成都地区极有可能发生积雨云。若不符合,则需要结合其他资料进行判断。

根据统计出的 2009–2013 年的成都地区出现的 527 次积雨云发生时的各指数的值,画出对应季节下各指数的箱型图(图略),统计出含有 50% 样本量的各指数的阈值,从表 2 发现:(1)春季,K 指数在 22 ℃ ~ 34 ℃,沙氏指数 SI 在 1 ℃ ~ 8 ℃,对流稳定指数在 -1 ℃ ~ 12 ℃,抬升指数在 0 ℃ ~ 7 ℃, A 指数在 0 ℃ ~ 14 ℃,成都易有积雨云产生。(2)夏季,K 指数在 33 ℃ ~ 41 ℃,沙氏指数 SI 在 -2 ℃ ~ 3 ℃,对流稳定指数在 -15 ℃ ~ 2 ℃,抬升指数在 -3 ℃ ~ 1 ℃, A 指数在 2 ℃ ~ 15 ℃,成都易有积雨云产生。(3)秋季,K 指数在 29 ℃ ~ 39 ℃,SI 指数在 -2 ℃ ~ 5 ℃,对流稳定指数在 -13 ℃ ~ 5 ℃,抬升指数在 -2 ℃ ~ 4 ℃, A 指数在 3 ℃ ~ 15 ℃,成都易有积雨云发生。

在对 2009–2013 年成都地区 527 次积雨云过程进行统计后,选出最为典型的一次切变线影响过程进行分析,从降水概况、影响系统、层结和水汽通量散度 4 个方面分析此次积雨云过程,印证前面所得出的结论同时浅分析出积雨云在发生降水和无降水时的大气层

结情况。

表 2 春夏秋季积雨云出现时的各指数的阈值统计表

指数	春季	夏季	秋季
K 指数	22 ℃ ~ 34 ℃	33 ℃ ~ 41 ℃	29 ℃ ~ 39 ℃
沙氏指数 SI	1 ℃ ~ 8 ℃	-2 ℃ ~ 3 ℃	-2 ℃ ~ 5 ℃
对流稳定指数 I _c	-1 ℃ ~ 12 ℃	-15 ℃ ~ 2 ℃	-13 ℃ ~ 5 ℃
抬升指数 LI	0 ℃ ~ 7 ℃	-3 ℃ ~ 1 ℃	-2 ℃ ~ 4 ℃
A 指数	0 ℃ ~ 14 ℃	2 ℃ ~ 15 ℃	3 ℃ ~ 15 ℃

3 切变线的抬升作用影响的典型个例分析

3.1 降水概况

从主要受切变线影响产生积雨云的个例中找到一个降雨量从暴雨到小雨的典型个例,即 2011 年 5 月 8 日 08 时到 5 月 12 日 20 时这次积雨云过程。从图 21 看到,9 日降水区出现在了盆地东北部,随着时间向东北方向移出后。结合 26 图中的成都降水量看,在 9 日 08 时达到暴雨级别,之后雨量减小,到 10 日 08 时的时候为小雨级别。大降水去从湖南向西北方向移动,经过成都后向四川省北部移动,降水量随着时间减少。

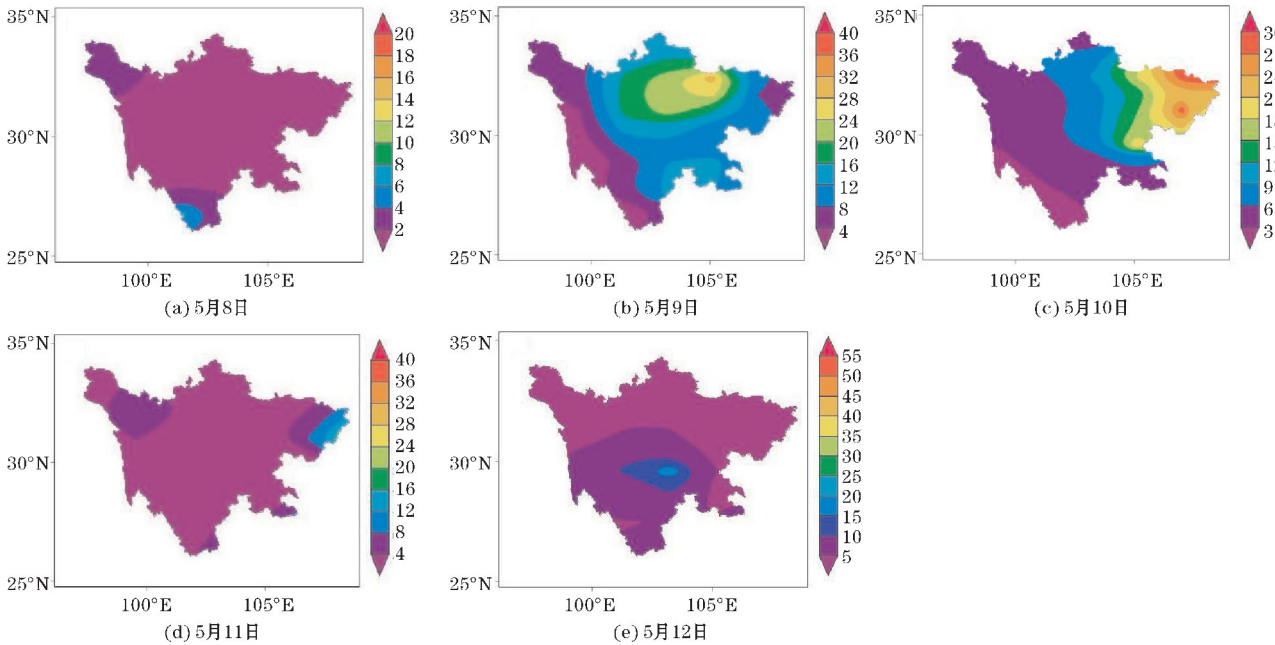


图 21 2011 年 5 月 8 日到 12 日积雨云过程四川盆地的 24 h 降水分布图

3.2 影响系统分析

从 5 月 8 日 08 时到 11 日 20 时的天气图(图 22)

看到,中高纬度以纬向型环流为主,8 日西西伯利亚有一个低值中心随着时间东移,到了 10 日 20 时,东移到了贝湖附近,8 日巴湖附近有一槽,随着时间东移,到

了 11 日 08 时,东移到了贝湖东侧,且加深。南支槽上多波动且东移,到了 11 日 08 时,成都受到脊前西北气流影响,天气转好。

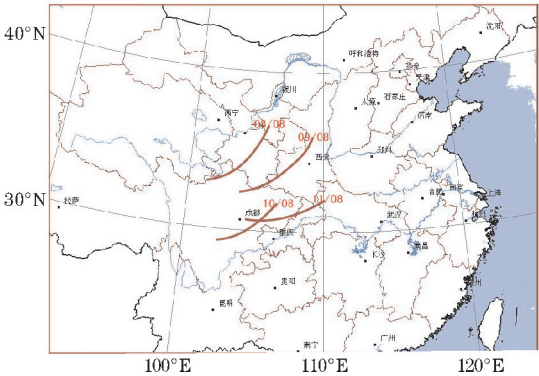


图 22 2011 年 5 月 8 日到 5 月 11 日成都附近低空切变线变化图

从 8 日 08 时开始,700 hPa 上看到,兰州南部有一条偏北风和偏南风之间的冷锋式切变线,随着时间南移,到了 10 日 08 时的时候,切变线移到了成都的南侧,到了 11 日 08 时,冷锋式切变线消失,在成都东部出现一条偏东风和偏南风之间的暖锋式切变线,到了 12 日 08 时的时候切变线消失。

3.3 层结分析

从图 23 分析几个指数的在积雨云过程的演变图看到,暴雨前,K 指数在 40℃ 左右波动,抬升指数和沙氏指数在 0℃ 左右波动,对流稳定指数在 -18℃ 左右波动,而 A 指数在暴雨前 12 h 有个骤降的过程。暴雨后 12 h,从 9 日 20 时开始,K 指数数值下降到 33℃,雨量减小,K 指数的值也随之减小。A 指数在 10℃ 左右波动,对流稳定指数上升到 0℃ 以上,在 5℃ 左右波动。抬升指数和沙氏指数的值和波动相近,暴雨前后无大变化。并且在暴雨发生前后,K 指数和 A 指数的演变趋势几乎是一样的。然而对流稳定指数、抬升指数、沙氏指数的演变趋势没有太大变化,基本上变化趋势和 K 指数和 A 指数相反。

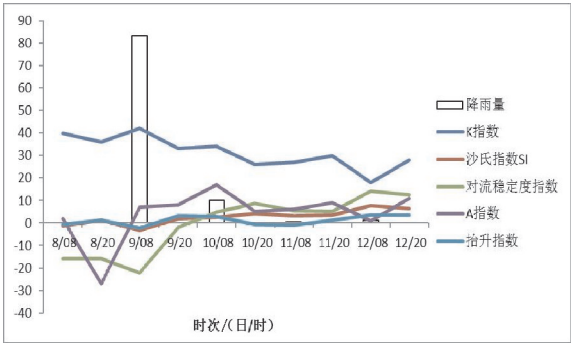
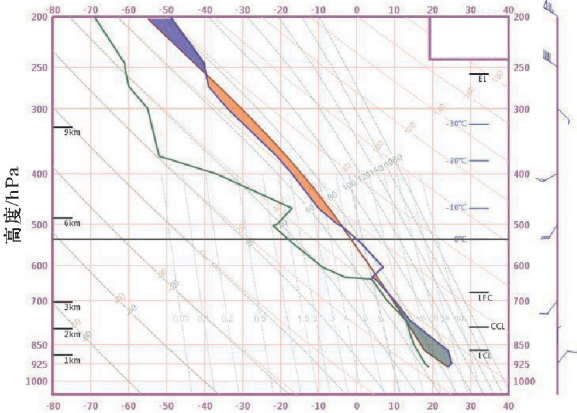
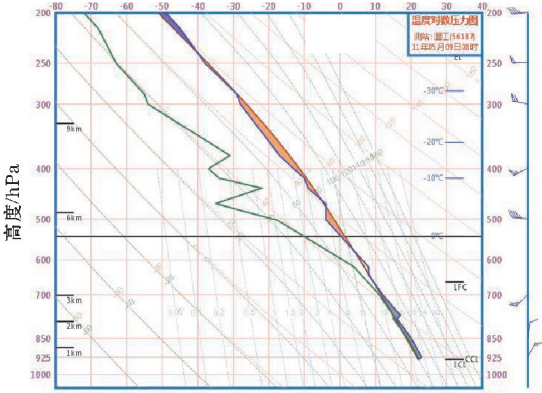


图 23 2011 年 5 月 8 日到 12 日积雨云过程 K 指数、沙氏指数、对流稳定指数、抬升指数、A 指数演变图

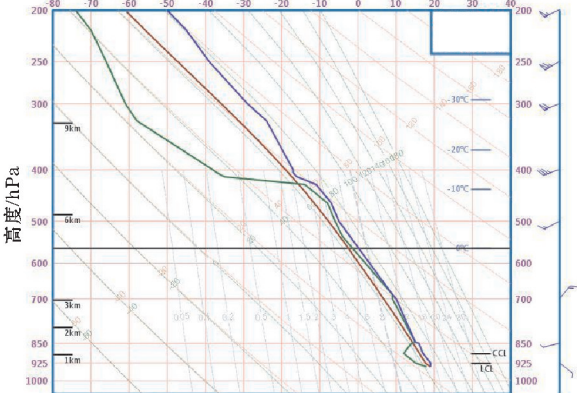
分析 500 hPa、700 hPa、850 hPa 的假相当位温看到,在整个过程中 500 hPa 与 850 hPa 的假相当位温都为负值,5 月 8 日 08 时,两个层结之间的假相当位温差达到 -15.85℃,随着时间负的差值逐渐减小,到了 10 日 08 时,差值变为了正值。同时结合图 24 的温度对数压力图看到,在 5 月 8 日到 9 日之间大气层结是不稳定的,相对应的这段时间降水量大,在 10 d 之后大气层结各指数发生变化,大气层结变稳定,降水量接近 0 mm。



(a) 5 月 8 日 08 时



(b) 5 月 9 日 08 时



(c) 5 月 10 日 08 时

图 24 2011 年 5 月 8 日 08 时、5 月 9 日 08 时、5 月 10 日 08 时的温江站的温度对数压力图

分析各指数的数值,与前文得出的结论相比较,发现是符合前文所得出的结论。并且,分析发现积雨云发生降水时,大气层结是不稳定的,而积雨云不带来降水的时候,大气层结是稳定的。

3.4 水汽通量散度分析

从图 25 看到,在 850 hPa,从 8 日水汽通量散度图看到,水汽辐合区位于青海,到了 9 日,辐合区在盆地的东北部,11 日的时候辐合区经向度拉长,中心位于盆地的中部,成都地区上空为弱的水汽通量辐合区,到了 12 日辐合区消失。从图 26 此次过程 500 hPa 的水汽通量散

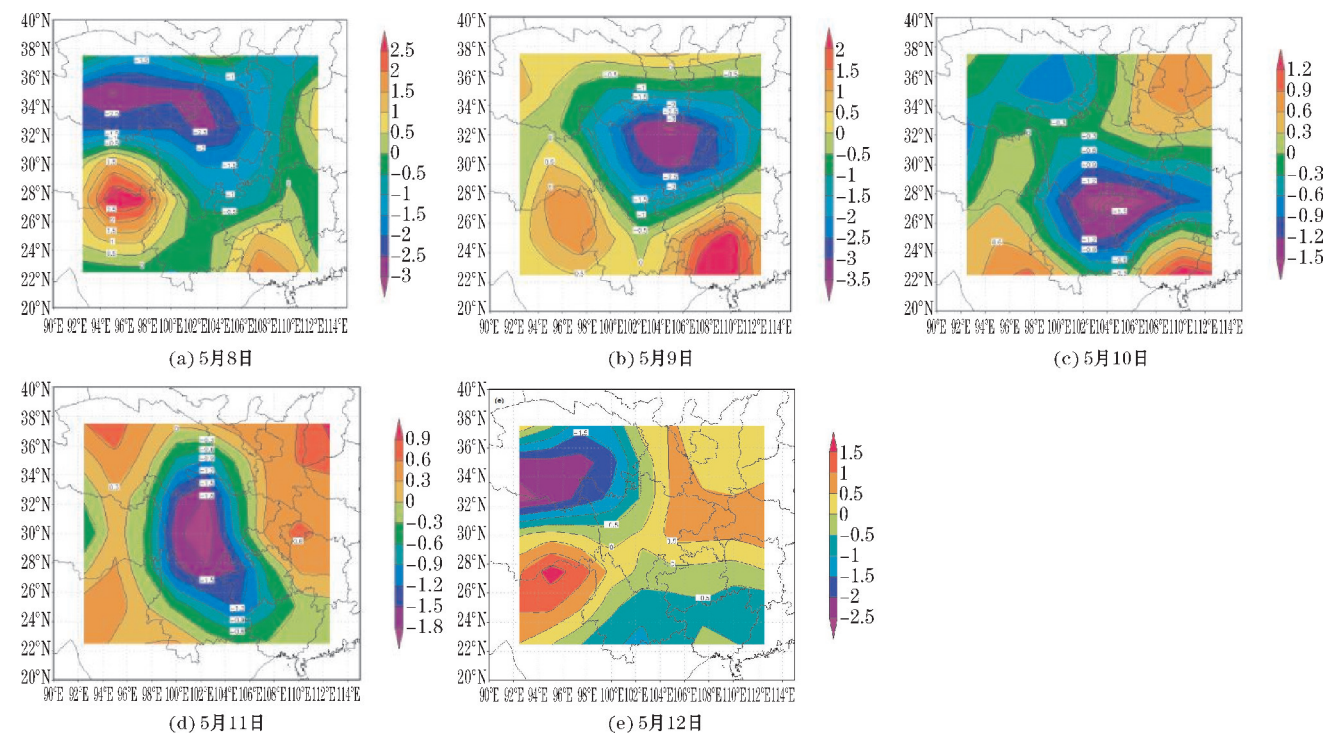


图 25 850 hPa 上 2011 年 5 月 8-12 日水汽通量散度图

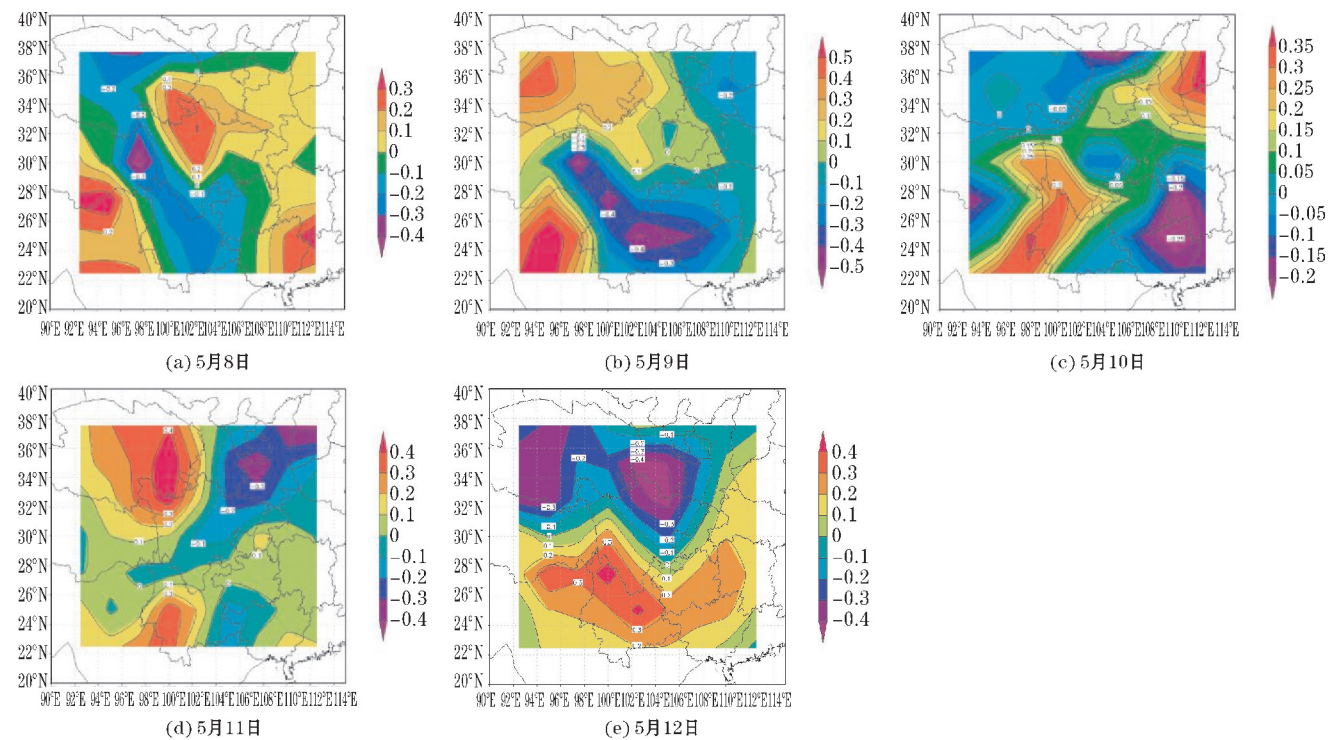


图 26 500 hPa 上 2011 年 5 月 8-12 日水汽通量散度图

度看,8日和9日成都上空都是水汽辐散区,因此8日的时候成都有暴雨,10至12日为较弱的水汽辐散区,雨量减少。此次过程可能是因为切变线的存在,使水汽产生了辐合,从而导致上升运动形成了云雨。

4 结论

统计了2009–2013年中成都地区发生积雨云时各层结的物理量以及7个对流指数,总共发生积雨云527次,在对各环流影响系统下各指数的变化研究中发现:春季,积雨云发生时大气层结多为稳定状态,多为小雨和无雨的情况。夏季,仅受低空急流影响和仅西南涡影响,以及西南涡、低空急流共同影响的情况下,成都积雨云出现时,大气层结有时表现为稳定,有时表现为不稳定,在其他情况下层结多为不稳定状态。秋季,根据7个对流指数和结合温度对数压力图看,各影响系统的情况中大气层结的稳定度波动大,需结合具体情况具体分析。

春季,K指数在 $22\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 34\text{ }^{\circ}\text{C}$,沙氏指数SI在 $1\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 8\text{ }^{\circ}\text{C}$,对流稳定指数在 $-1\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 12\text{ }^{\circ}\text{C}$,抬升指数在 $0\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 7\text{ }^{\circ}\text{C}$,A指数在 $0\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 14\text{ }^{\circ}\text{C}$,成都易有积雨云产生。夏季,K指数在 $33\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 41\text{ }^{\circ}\text{C}$,沙氏指数SI在 $-2\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 3\text{ }^{\circ}\text{C}$,对流稳定指数在 $-15\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 2\text{ }^{\circ}\text{C}$,抬升指数在 $-3\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 1\text{ }^{\circ}\text{C}$,A指数在 $2\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 15\text{ }^{\circ}\text{C}$,成都易有积雨云产生。秋季,K指数在 $29\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 39\text{ }^{\circ}\text{C}$,SI指数在 $-2\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 5\text{ }^{\circ}\text{C}$,对流稳定指数在 $-13\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 5\text{ }^{\circ}\text{C}$,抬升指数在 $-2\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 4\text{ }^{\circ}\text{C}$,A指数在 $3\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 15\text{ }^{\circ}\text{C}$,成都易有积雨云发生。春夏秋冬,所有影响系统下发生的积雨云过程中,每一类型风暴强度指数都是在250左右波动,波动幅度很小。只有在秋季,西南涡、切变线共同影响的情况下,风暴强度指数在220左右波动。

致谢:感谢成都市科技惠民技术研发项目(2016-HM01-00038-SF)、成都市科技专项(2018-ZM01-00038-SW)对本文的资助

参考文献:

- [1] 段炼,陈章.近42年成都地区雷暴的气候统计特征[J].自然灾害学报,2006(4):59–64.
- [2] 立平良三,胡圣昌.积雨云的预报[J].气象科技,1982(1):62–64.
- [3] Rohit Chakraborty, Saurabh Das, Animesh Maitra. Prediction of convective events using multi-frequency radiometric observations at Kolkata [J]. Atmospheric Research, 2016, 169.
- [4] Kunz M.. The skill of convective parameters and indices to predict isolated and severe thunderstorms [J]. Natural Hazards and Earth System Science, 2007, 7(62).
- [5] P R Jayakrishnan, C A Babu. Assessment of Convective Activity Using Stability Indices as Inferred from Radiosonde and MODIS Data [J]. Atmospheric and Climate Sciences, 2014, 4(1).
- [6] M. Korologou, H. Flocas, H. Michalopoulou. Developing an index for heavy convective rainfall forecasting over a Mediterranean coastal area [J]. Natural Hazards and Earth System Science, 2014, 14(8).
- [7] 钟晓平. 强对流降水前大气层结因子的分析 [J]. 应用气象学报, 1993(4): 408–414.
- [8] 郁淑华. 四川盆地大范围强暴雨过程的合成分析 [J]. 高原气象, 1984(3): 58–67.
- [9] 郁淑华. 四川盆地大范围强暴雨的合成分析——(二) 温湿场和层结稳定度 [J]. 高原气象, 1986(1): 62–70.
- [10] 肖递祥, 杨康权, 徐栋夫, 等. 副高西侧四川盆地两次极端暴雨过程分析 [J]. 高原山地气象研究, 2015, 35(4): 10–18.
- [11] 肖递祥, 杨康权, 俞小鼎, 等. 四川盆地极端暴雨过程基本特征分析 [J]. 气象, 2017, 43(10): 1165–1175.
- [12] 王佳津, 肖递祥, 王春学. 四川盆地极端暴雨水汽输送特征分析 [J]. 自然资源学报, 2017, 32(10): 1768–1783.
- [13] 肖递祥, 顾清源, 祁生秀. 2008年7月14—15日川西暴雨过程的温度层结变化分析 [J]. 暴雨灾害, 2009, 28(1): 8–13.
- [14] 唐钱奎, 鲁燕, 黄先伦. “8.26”成都区域性短时暴雨天气过程的对流指数分析 [J]. 成都信息工程学院学报, 2010, 25(5): 518–523.
- [15] 冯新灵, 罗隆诚, 邱丽丽. 成都未来气候变化趋势的R/S分析 [J]. 长江流域资源与环境, 2008(1): 83–87.
- [16] 张建春, 王海霞, 陶祖钰. 对流有效位能预报能力的统计分析 [J]. 暴雨灾害, 2014, 33(3): 290–296.

Analysis of Stratification Conditions for Formation of Cumulonimbus Clouds in Chengdu

YIN Shuyue¹, ZHOU Yunjun^{1,2}, GAO Zhibo¹, YU Hao¹, BAI Ge¹, HU Dan¹

(1. The Plateau Atmosphere and Environment Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu University of Information Technology Chengdu 610225, China; 2. Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: In order to study the stratification conditions of cumulonimbus clouds in Chengdu, the convection index of cumulonimbus clouds in Chengdu from 2009 to 2013 and the physical quantities at three levels of 500 hPa, 700 hPa and 850 hPa were calculated by using the sounding data and ground observation data from China Meteorological Administration. The exponential evolution diagrams of cumulonimbus clouds under the four influence systems of southwest vortex, low-altitude shear line and low-altitude jet are analyzed, and the following conclusions are obtained: (1) In spring, the K index is between 22 °C and 34 °C, SI is between 1 °C and 8 °C, convection stability index is between 1 °C and 12 °C, uplift index is between 0 °C and 7 °C and A index is between 0 °C and 14 °C. (2) In summer, K index is between 33 °C and 41 °C, SI is between -2 °C and 3 °C, convection stability index is between -15 °C and 2 °C, uplift index is between -3 °C and 1 °C, A index is between 2 °C to 15 °C. It is easy to produce cumulonimbus clouds in Chengdu. (3) In autumn, the K index is between 29 °C and 39 °C, the SI index is between -2 °C and 5 °C, the convection stability index is between -13 °C and 5 °C, and the uplift index is between -2 °C and 4 °C, A index between 3 °C and 15 °C and the cumulonimbus is easy to occur in Chengdu.

Keywords: atmospheric physics; cumulonimbus cloud; atmospheric stratification; convection index; southwest vortex; shear line