

基于自组织映射神经网络的双流机场强对流特征分析

胡耀月, 徐俊杰, 陈志航

民航西南空管气象中心, 四川 成都

收稿日期: 2025年10月17日; 录用日期: 2025年11月17日; 发布日期: 2025年11月21日

摘要

本文利用2019~2023年双流机场的机场METAR报和SPECI报, 统计影响飞机起降的重要强对流天气(雷暴、中降水、大降水), 基于ERA5 0.25 * 0.25再分析资料利用SOM方法对筛选出的强对流天气形势进行聚类分型。结果表明: 影响双流机场的强对流天气形势主要有4类, 各类在发生季节、强对流频率及日变化上存在明显差异, 以强降水为主的华南前汛期形势, 主要出现在5月; 以中阵雨伴雷暴为主的长江中下游梅雨形势, 主要出现在6~7月; 第三、四类为盛夏副高不同位相形势, 主要出现在7~8月, 其中第三类副高偏弱偏东, 第四类副高偏强偏西以强降水为主。

关键词

双流机场, 强对流, SOM算法, 聚类分析

Synoptic Pattern Analysis of Severe Convective Weather at Shuangliu Airport Based on Self-Organizing Map (SOM) Neural Network

Yaoyue Hu, Junjie Xu, Zhihang Chen

Meteorological Center of Southwest Regional Air Traffic Management Bureau, CAAC, Chengdu Sichuan

Received: October 17, 2025; accepted: November 17, 2025; published: November 21, 2025

Abstract

Using routine and special meteorological reports from Shuangliu International Airport during

文章引用: 胡耀月, 徐俊杰, 陈志航. 基于自组织映射神经网络的双流机场强对流特征分析[J]. 气候变化研究快报, 2025, 14(6): 1394-1402. DOI: 10.12677/ccrl.2025.146139

2019~2023, this study statistically analyzes major types of severe convective weather affecting aircraft takeoff and landing, including thunderstorms, moderate precipitation, and heavy precipitation. The Self-Organizing Map (SOM) method is applied to ERA5 reanalysis data ($0.25^\circ \times 0.25^\circ$) to classify the synoptic patterns associated with these severe convective events. The results show that severe convective weather affecting Shuangliu International Airport can be categorized into four main synoptic types, each exhibiting distinct seasonal occurrences, convective frequencies, and diurnal variations. The first type, dominated by heavy precipitation, corresponds to the pre-flood season pattern in South China and mainly occurs in May. The second type, characterized by thunderstorms with moderate rainfall, is associated with the Meiyu pattern over the middle and lower reaches of the Yangtze River and occurs primarily from June to July. The third and fourth types represent different phases of the western Pacific subtropical high during midsummer (July~August): the third type features a weaker and more eastward-positioned subtropical high, while the fourth type is marked by a stronger and more westward-positioned high accompanied by heavy precipitation.

Keywords

Shuangliu Airport, Severe Convection, SOM Algorithm, Cluster Analysis

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

双流机场作为西南地区重要的航空枢纽,其航班准点率和安全水平不仅影响经济效益,也对社会生产和旅客出行有显著影响。因此,精准识别影响双流机场强对流天气,是提升航空精细化气象保障的迫切需求。强对流天气的发生总是在特定的大尺度环流背景和物理条件配置下孕育和发展。

传统强对流天气形势的分类多依赖于主观经验划分,存在标准不统一、人为主观性强等局限性。而针对天气形势的客观分类,国内外学者已进行了广泛探索。自组织映射(Self-Organizing Map, SOM)拥有强大的高维降维和拓扑保持特性,已成为气象学进行环流分型和天气过程识别的有力工具。国内外学者已广泛应用自组织映射(SOM)方法开展天气环流分型研究。Cassano, *et al.* [1]和 Lynch, *et al.* [1]将 SOM 方法应用于高纬度极区的大气环流的分类,揭示出温度和降水的变化对天气尺度环流模态的依赖性。近期国内也涌现出大量相关研究成果。张伟勇等[2]基于 SOM 将大别山地区极端降水的背景环流归纳为西南强气流型、副高西北侧气流型与偏南强气流型三类。杨雅涵等[3]则借助无监督 SOM 方法,对长江流域夏季持续性强降水对应的大尺度环流实现了四种典型环流型的客观划分。在天气系统演变方面,吴胜男等[4]通过对长江中下游地区夏季海平面气压距平场实施 SOM 分型,提取出 25 类地面天气型,从气候态角度捕捉了与降水相关天气系统的移动规律,并发现系统强弱变化对天气型稳定与转换具有显著影响,直观地展示不同天气型之间的连续演变关系。吴香华[5]等结合地面观测数据与神经网络方法,构建了站点逐日降水预测模型,进一步探讨了天气模态与降水过程之间的内在关联。针对区域性天气特征,闵晶晶等[6]基于 NCEP 再分析资料不同高度的要素场和同期 175 个危险气象报,利用自组织映射方法对京津冀地区的天气形势进行聚类,共分为四类:暖湿切变型、西北气流型、冷涡型、西风槽型,系统分析了各类型的强对流天气表现特征。罗未萌等[7]的研究则进一步表明,在描述我国东部夏季降水空间分布方面, SOM 方法相较于传统经验正交函数 EOF 展现出更优的性能。胡春梅等[8],利用 NCEP 再分析资料对污染天气过程的地面气压场应用 SOM 算法进行天气分型,并总结出 3 大类重庆冬季污染天气型:均压型、

低压型、高压底部型，为当地的空气污染预报提供有效参考依据。刘南希等[9]利用广州市地面观测资料和 ERA5 再分析数据集，利用 SOM 方法分析了高浓度臭氧和 PM2.5 对应的客观天气型。

上述研究部分是针对气候特征的天气环流分析，着重反映大尺度区域天气系统的演变特征。部分是针对某一地区的强对流天气环流背景分析，着重讨论该地区的对流天气与环境场的配置关系。现有研究或侧重于区域性强对流，或关注于大尺度环流，缺乏直接与机场天气影响相耦合的特定分析。具体到双流机场，虽有针对其气候特征或个别强对流过程的统计分析[10]-[13]，但尚缺乏基于客观算法的强对流天气形势分类体系，因此本文拟利用 SOM 方法对影响双流机场的强对流天气背景进行分型研究。

2. 资料与方法

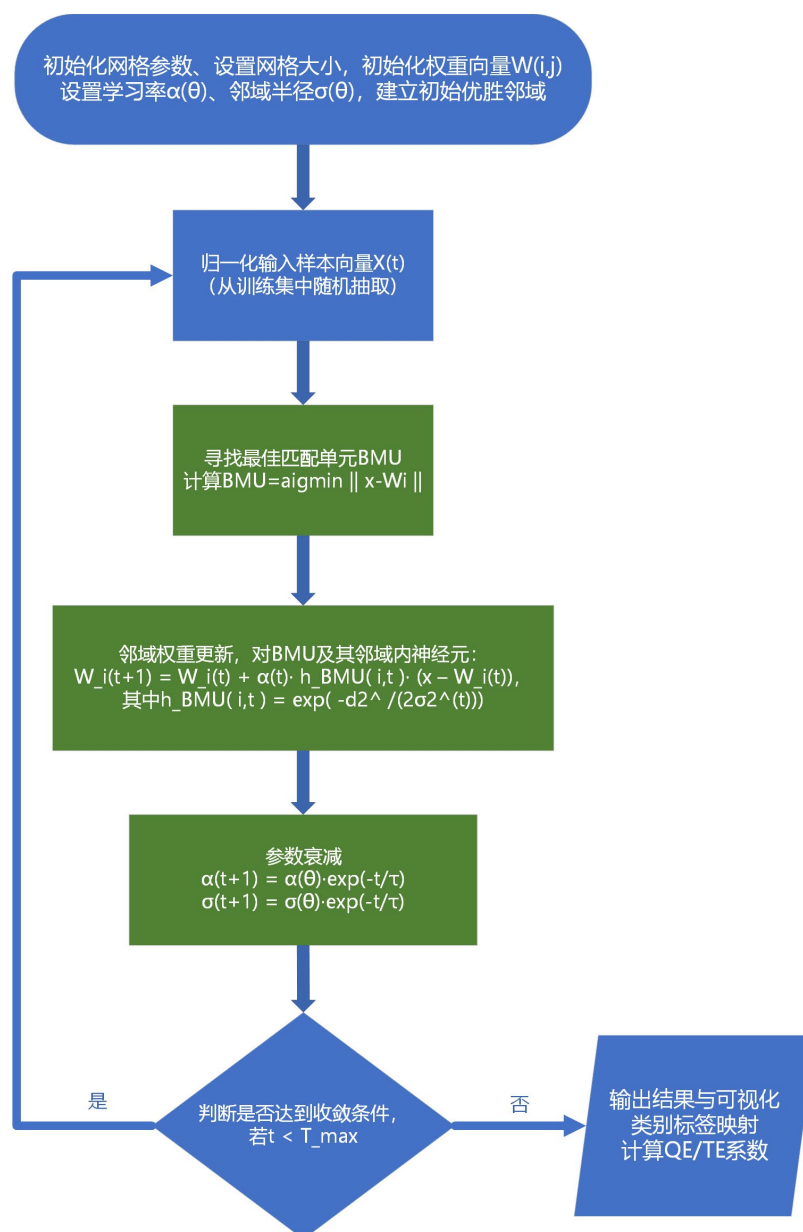


Figure 1. SOM self-organizing map neural network algorithm flow
图 1. SOM 自组织映射神经网络算法流程

2.1. 选用资料

航空运行中的飞机起降决策,核心依据是机场终端区的实况天气,该实况信息源于机场气象部门的实时观测与机场天气报告(包括例行天气报告 METAR 和特殊天气报告 SPECI)。区别于气象学上基于物理量阈值的强对流定义,航空气象业务中更关注天气对跑道、空中飞行姿态和驾驶员视程的影响。因此,在航空气象保障中,对起降阶段构成主要威胁的天气主要有三类:雷暴(TS)、中阵雨(SHRA)与大阵雨(+SHRA),它们都直接关联到放行标准、流量管理等飞行运行决策。本文主要分析这三类强对流天气,利用 2019~2023 年双流机场的例行天气报告 METAR 和特殊天气报告 SPECI,筛选统计了双流机场雷暴、中阵雨、大阵雨的发生特征。本研究基于 2019~2023 年 5~9 月 ERA5 再分析资料,采用自组织映射(SOM)方法对强对流天气发生的大气环流形势进行客观聚类分型,并结合典型天气个例对分型结果加以验证。所使用的 ERA5 数据来自于欧洲中期天气预报中心(ECMWF),时间分辨率为逐小时,空间水平分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$,SOM 聚类所采用的关键物理量场包括 500 hPa 位势高度场、700 hPa 水平风场以及 850 hPa 温度与湿度场。

2.2. 方法介绍

SOM (Self-Organizing Map, SOM)是一种无监督机器学习方法,它能够将高维气象场(如位势高度场、风场、湿度场)非线性映射到低维(通常是二维)的离散网格上,同时保持原始数据空间的拓扑结构,目前已在多个领域的多变量空间分析中广泛应用。图 1 展示了 SOM 算法的工作原理。SOM 的核心结构为规则排列的二维神经元网格,每个节点 i 对应一个权重向量 $W_i = [w_{i1} \cdots w_{id}]^T$,其中 d 为特征维度。SOM 方法在训练过程中能持续保持空间的拓扑结构,特征相似的样本在映射后位于相邻神经元区域。首先以随机方式或根据主成分分析(PCA)进行初始化输入数据空间,基于竞争学习机制对于每个输入样本,计算其与所有神经元权重向量的差异,距离最小的神经元即为 BMU 获胜神经元,同时对获胜神经元及其邻近节点的权重向量进行迭代调整与优化,直至神经网络最终收敛。

3. 双流机场强对流天气的聚类分型

强对流天气过程其影响系统具有多样性,不同的天气形势背景下,影响强对流天气发生与发展的主导因子及其作用机制也存在差异。通过客观分型将天气形势进行分类,可以将复杂的环流型划分为若干具有代表性的类型,针对不同类型采用相应的分析,从而提高模型对强对流发生条件的客观性。

强对流天气的触发通常具备三个基本条件:充足的水汽、不稳定层结以及动力抬升机制。为表征上述条件对强对流天气的影响,本文选取 500 hPa 高度场、700 hPa 风场和 850 hPa 假相当位温场作为天气分型的核心判别要素。这种选取具有明确的物理依据:500 hPa 高度场作为对流层中层大气环流的代表指标,能够反映大气动力背景;700 hPa 的风场处于中低层过渡带,可以有效刻画气流辐合、切变及扰动传播等动力过程;850 hPa 的假相当位温场可以表现低层大气的热力属性和水汽条件,用于识别不稳定层结。结合以上三者可以较为全面反映强对流天气发生前的热力和动力环境,为客观分型及其物理机制研究提供科学依据。本文以双流机场天气报文(METAR/SPECI)记录的强对流天气(雷暴、中阵雨、大阵雨)发生时间作为基准时刻,提取再分析资料中提前 3 小时的环境物理量场作为聚类分型的要素场,通过对前期环境场的聚类,识别出强对流发生的关键天气形势,从而为短时监测和告警提供一定依据。在应用 SOM 方法进行聚类时,将上述 3 个要素场在研究区域($0^\circ \sim 80^\circ \text{N}$, $60^\circ \sim 150^\circ \text{E}$)内的所有格点均作为模型的输入因子,经过网格训练后,得到若干类型的输出。经过多次试验,结合平均量化误差(Quantization error, QE)、拓扑误差(Topographic Error, TE)、U-Matrix (Unified Distance Matrix, 统一距离矩阵)这三个指标,最终选取了

2 × 2 的节点分型，并分别计算各类型中所有样本的平均要素场。

3.1. 四类天气形势场

图 2 是双流机场 5~9 月 4 类分型天气形势的平均要素场，图 3 是选取的对应典型个例的天气形势场。第一类为华南前汛期形势：一般发生在 4 月上旬到 5 月中旬，此时西北太平洋副高主体位于南海上，南海夏季风尚未爆发，属于华南前汛期第一阶段。此时四川盆地受西风带控制，降水过程主要是西风带的南支槽或高原槽造成。此阶段，成都双流机场多高架对流过程及稳定降水过程，低空暖湿气流阶段性增强或冷空气入侵盆地时，可产生较强地基对流性天气。第二类为长江中下游梅雨形势：一般发生在 6 月中旬到 7 月中旬，此时西北太平洋副高完成了第一次北跳，并控制了华南地区，长江中下游进入梅雨季。此时副热带西风急流已基本北收到青藏高原以北地区，四川盆地基本脱离西风带控制，但多高原波动东移。此阶段，影响成都的降水系统一般是高原槽/高原切变线等系统东移造成，适当条件下容易诱发低层的西南涡。而副高北侧的主雨带(梅雨锋)，对盆地东部的重庆影响较大，对盆地西部的成都影响通常不大。

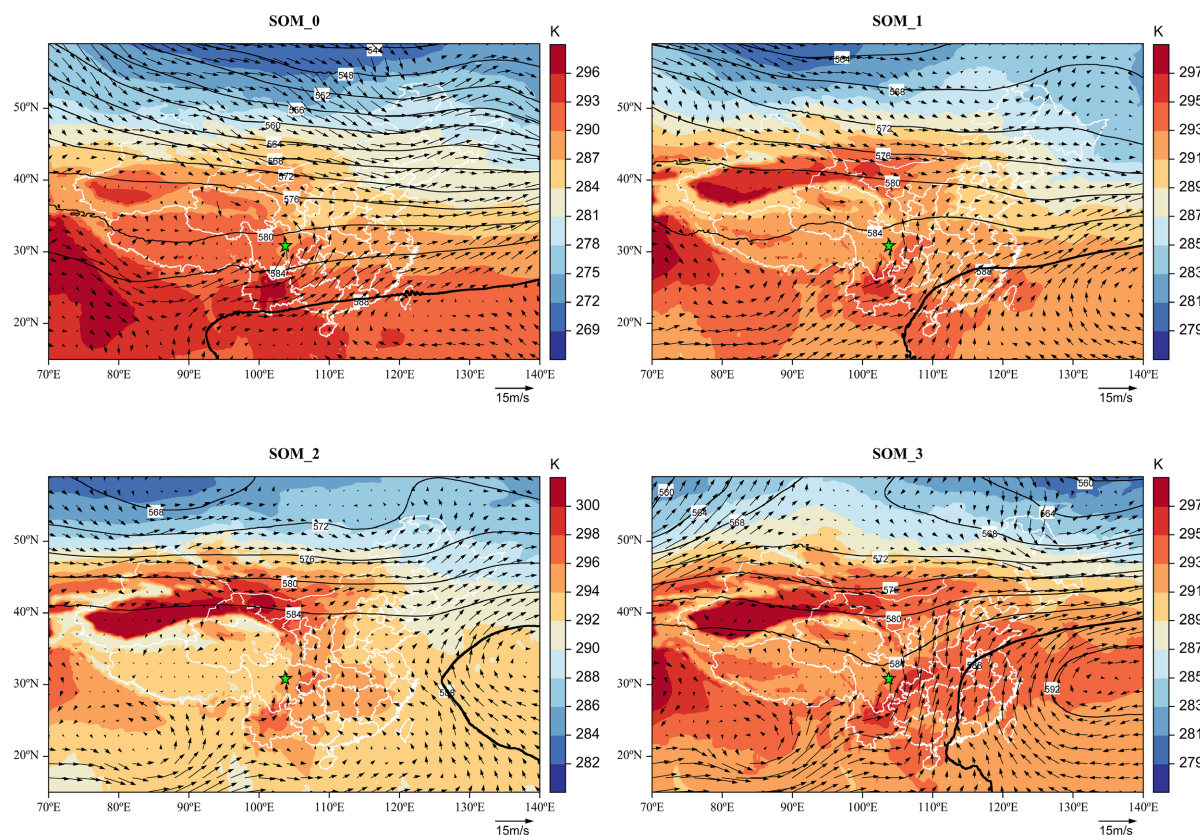


Figure 2. Average synoptic patterns of weather type clusters at Shuangliu Airport from May to September 2019–2023: top left shows the South China pre-flood season, top right shows the Meiyu season in the middle and lower reaches of the Yangtze River, bottom left shows midsummer with a weaker and more easterly subtropical high, bottom right shows midsummer with a stronger and more westerly subtropical high (solid lines represent 500 hPa geopotential height contours (gpm); arrow vectors indicate 700 hPa wind fields; color shading represents 850 hPa pseudo-equivalent potential temperature; the star marker indicates Shuangliu Airport)

图 2. 2019~2023 年 5~9 月双流机场天气形势聚类类型的平均形势场：左上为华南前汛期，右上为长江中下游梅雨，左下为盛夏副高偏弱偏东，右下为盛夏副高偏强偏西(实线为 500 hPa 等高线(gpm)；箭头矢量为 700 hPa 风场；色标为 850 hPa 假相当位温；星标代表双流机场)

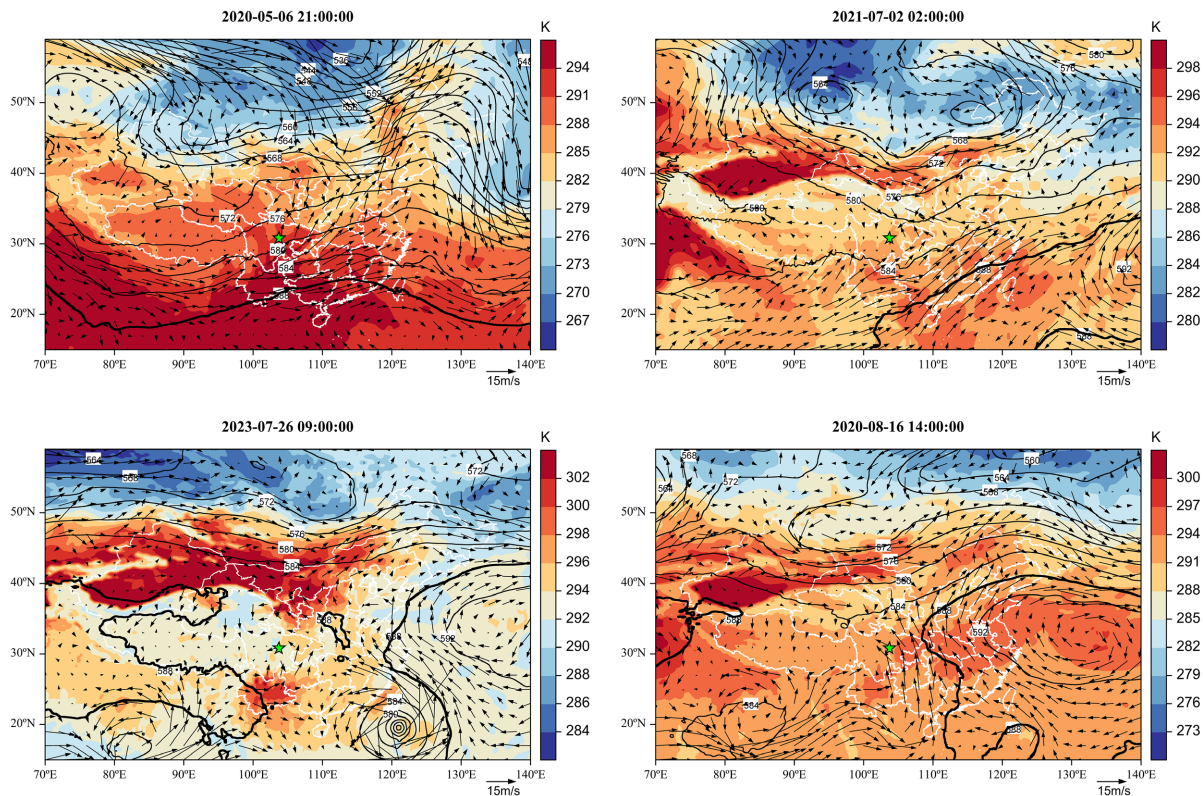


Figure 3. As in Figure 2, but for typical individual cases of each weather type cluster at Shuangliu Airport (May~Sep 2019~2023)

图 3. 同上，2019~2023 年 5~9 月双流机场天气形势聚类分型的典型个例

第三类为盛夏副高偏弱偏东形势：一般发生在 7 月下旬到 8 月下旬，此时西北太平洋副高完成第二次北跳，副高脊线北跳至 30°N 左右。四川盆地东部及长江中下游、江南大部分地区进入高温伏旱期，华北和四川盆地西部进入主雨季。此阶段，副高有阶段性增强、西伸和减弱、东退的周期现象，成为副高准十四天震荡，其与对流层高层的南亚高压配合，深远影响盛夏时期我国中东部地区的天气格局。该形势中副高处于较弱东退周期，西风带平直，此时我国中东部多热力性雷雨，基本无大范围系统性天气，经常有台风影响我国华东沿海。成都此形势下多热力性雷雨，基本无明显系统性强天气。第四类为盛夏副高偏强偏西形势：第四类和第三类类似，主要发生在 7 月中旬至 8 月下旬的西太副高完成第二次北跳之后的时期，但该形势处于副高强势西伸的周期，此阶段华中、华东地区受副高控制，为高温伏旱天气，华南地区常受西行台风影响，四川盆地则在副高西部水汽输送和辐合最强的区域，多系统性强天气，成都夏季主汛期的持续暴雨常发生在该形势下。

3.2. 分型结果统计

在对双流机场强对流天气进行分析时，本文规定雷暴、中阵雨、大阵雨 3 类天气出现任意一类时，为一个强对流天气发生日。2019~2023 年 5~9 月共有 765 天，其中强对流天气发生总天数共计 245 天。其中第二类 and 第三类出现强对流天气的频率分别达 33% 和 34% 以上，第四类和第一类的发生频率为 16%。**表 1** 为双流机场 2019~2023 年 5~9 月 4 类天气型的样本统计表，**图 4** 为同期 4 类天气型下各类强对流天气的日数年际分布图，**表 2** 为 4 类天气型下各类强对流天气发生日数统计。分析结果表明，第一类主要出现在 5 月，以强降水天气为主，发生总天数为 42 天；第二类主要出现在 6~7 月，以中阵雨天气为主，

发生日数为 77 天，多伴随有雷暴天气或大阵雨天气；第三类主要出现在 7~8 月，以中阵雨伴随雷暴天气为主，发生天数高达 81 天，且近年来发生频率明显增加；第四类主要出现在 8 月份，以中阵雨天气为主，少量伴随有雷暴和大阵雨天气，近年来发生频率有所降低。

Table 1. Sample statistics of the four weather types at Shuangliu Airport from May to September, 2019~2023
表 1. 双流机场 2019~2023 年 5~9 月 4 类天气样本统计表

发生月份	第一类	第二类	第三类	第四类
5 月	25	2	0	0
6 月	0	19	2	3
7 月	0	30	50	4
8 月	0	22	33	30
9 月	9	9	0	3

Table 2. Statistics on the number of days with various types of severe convective weather
表 2. 各类不同强对流天气发生日数统计表

强对流类型	第一类	第二类	第三类	第四类
雷暴	5	16	28	10
中阵雨	37	77	81	38
大阵雨	5	13	11	8

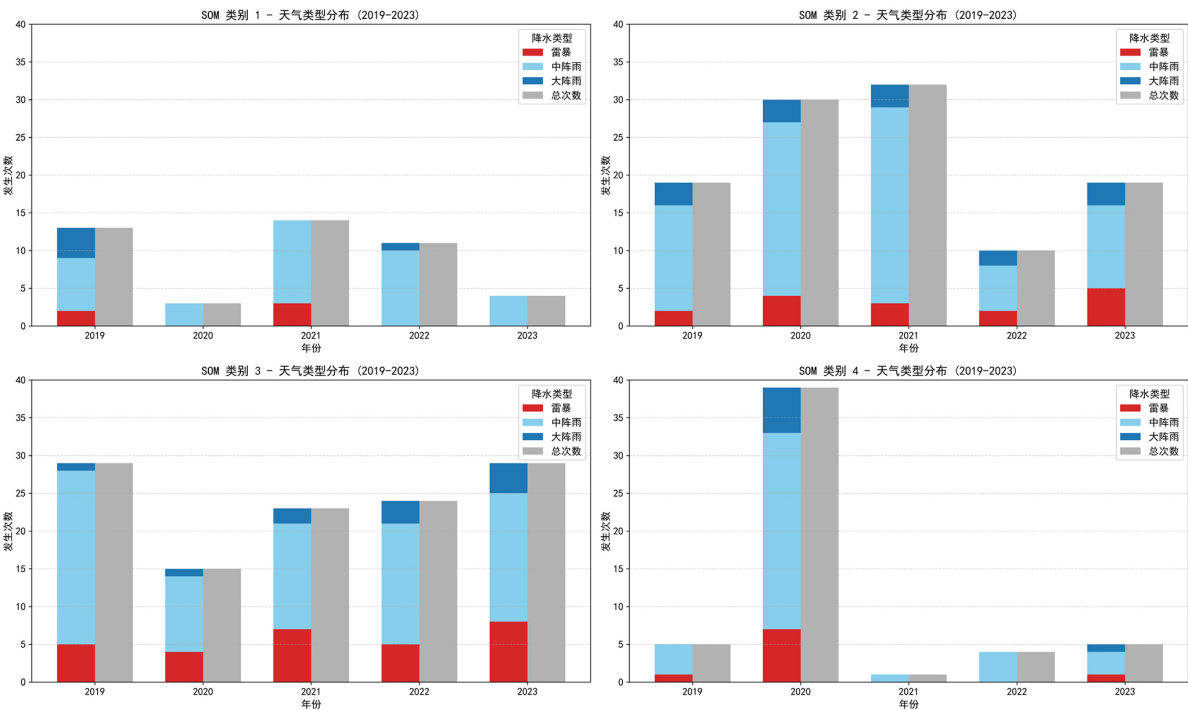


Figure 4. Interannual distribution of days with various types of severe convection under different weather patterns
图 4. 不同天气型下各类强对流发生日数年际分布

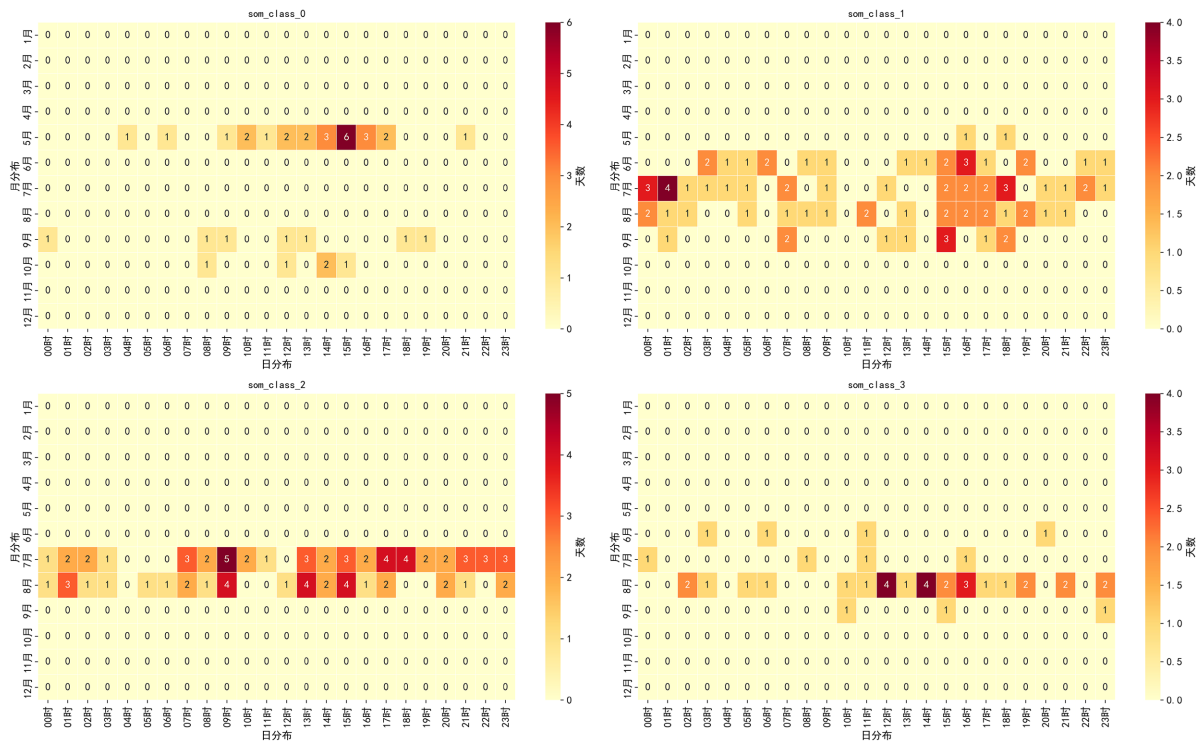


Figure 5. Heatmaps of the 4 types from the SOM classification
图 5. SOM 分型的 4 类热力图

而从图 5 可知, 四类在时间(小时, 世界时)和季节(月)上的分布差异明显, 不同天气形势影响着强对流发生的时空分布。第一类主要发生在 5 月的 10~16 时, 尤其在 15 时达到峰值, 此类天气形势多为傍晚和前夜的热力对流型, 受到地面加热和不稳定能量累积驱动。第二类在 5~9 月均有分布, 尤其分布在 7 月的 14~20 时和 00~01 时, 此时副高边缘的西南暖湿气流较为活跃; 第三类主要分布在 7~8 月的 07~09 时和 13~20 时, 此类多为午后热力对流和夜间对流; 第四类主要分布于 8 月, 峰值位于 12~16 时, 为傍晚-夜间型强对流。

4. 结论与讨论

(1) 通过自组织映射神经网络将 2019~2023 年 5~9 月双流机场强对流天气形势分为四类, 对应不同的环流形势: 第一类为华南前汛期形势, 主要分布于 5 月; 第二类为长江中下游梅雨形势, 主要分布于 6~7 月; 第三、四类为盛夏副高不同位相, 主要出现在 7~8 月, 其中第三类副高偏弱偏东, 第四类副高偏强偏西。

(2) 不同类型降水特征与强对流频率差异显著, 强对流天气(雷暴、中阵雨、大阵雨)在四类天气型中的发生频率不同: 第二类(33%)和第三类(34%)是强对流高发类型; 第一类和第四类分别占 16%左右。其中, 第一类以强降水为主, 第二类以中阵雨为主并常伴雷暴, 第三类以中阵雨伴随雷暴为主且近年频率上升, 第四类以中阵雨为主且近年频率下降。

(3) 不同类的发生峰值时段也不同: 第一类峰值在 15 时(傍晚和前夜的热力对流); 第二类在 14~20 时及 00~01 时(副高边缘暖湿气流活动); 第三类在 07~09 时和 13~20 时(午后与夜间对流); 第四类在 12~16 时(傍晚至夜间的对流)。

本研究基于自组织映射神经网络方法对 2019~2023 年 5~9 月影响双流机场的强对流天气形势进行客

观分类,研究了四类典型环流背景下强对流天气的时空分布特征。然而,本文仅从天气形势角度分析强对流发生条件,还未充分考虑周边地形条件、水汽输送及触发机制的配置关系。后续研究还可结合中尺度数值模拟以及机场的观测数据,进一步探究机场局地强对流的发生机制,从而为航空气象的预报预警提供更多依据。

基金项目

西南空管局科技项目《双流机场强对流天气观测模型的研究》。

参考文献

- [1] Lynch, A., Uotila, P. and Cassano, J.J. (2006) Changes in Synoptic Weather Patterns in the Polar Regions in the Twentieth and Twenty-First Centuries, Part 2: Antarctic. *International Journal of Climatology*, **26**, 1181-1199.
<https://doi.org/10.1002/joc.1305>
- [2] 张伟勇, 王其伟. 大别山地区极端降水天气事件的天气背景分型研究[J]. 气象科学, 2021, 41(4): 441-451.
- [3] 杨雅涵, 翟盘茂, 周佰铨. 基于 SOM 的长江流域持续性强降水过程典型环流的客观分型[J]. 气象学报, 2024, 82(5): 632-644.
- [4] 吴胜男, 江志红. 基于自组织映射的长江中下游夏季天气分型及其降水特征[J]. 气象科学, 2019, 39(5): 588-598.
- [5] 吴香华, 蒙芳秀, 熊萍萍, 等. 基于自组织映射神经网络的吉林省春夏期降水统计模拟研究[J]. 大气科学学报, 2018, 41(6): 829-837.
- [6] 闵晶晶, 邓长菊, 曹晓钟, 等. 强对流天气形势聚类分析中 SOM 方法应用[J]. 气象科技, 2015, 43(2): 244-249.
- [7] 罗未萌, 钱维宏, 蒋宁, 等. SOM 方法在中国东部夏季降水分型中的应用[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2018, 54(5): 970-982.
- [8] 胡春梅, 陈道劲, 周国兵, 等. 基于自组织神经网络算法的重庆秋冬季空气污染与天气分型的关系[J]. 气象, 2020, 46(9): 1222-1234.
- [9] 刘南希, 何成, 刘晨曦, 等. 2015-2021 年广州市臭氧和 PM_{2.5} 复合污染特征及天气分型研究[J]. 环境科学学报, 2023, 43(1): 42-53.
- [10] 赵润华. 2020 年成都双流机场系统性雷暴天气特征[J]. 高原山地气象研究, 2022, 42(4): 82-87.
- [11] 李典南, 许东蓓. 双流机场雷暴天气特征及天气形势分类研究[J]. 高原气象, 2021, 40(5): 1164-1176.
- [12] 王凌云, 刘辉权, 宋静. 应用微波辐射计资料对双流机场两次雷雨天气的特征分析[J]. 科技与创新, 2020(5): 10-13+18.
- [13] 李典南, 徐海, 许东蓓. 双流机场雷暴天气预报方法研究[J]. 中低纬山地气象, 2021, 45(6): 17-25.