

谭江红,袁凯,周悦,2026.一种基于深度学习的相似天气形势预报方法:Synoptic Similarity Net[J].气象,52(3):312-324. Tan J H, Yuan K, Zhou Y, 2026. A deep learning-based method for synoptic situation similarity forecasting: Synoptic Similarity Net [J]. Meteor Mon, 52(3): 312-324 (in Chinese).

# 一种基于深度学习的相似天气形势预报方法： Synoptic Similarity Net<sup>\*</sup>

谭江红<sup>1,2</sup> 袁 凯<sup>3</sup> 周 悦<sup>1,4</sup>

1 全国暴雨研究中心,武汉 430040

2 湖北省襄阳市气象台,襄阳 441021

3 武汉市气象台,武汉 430040

4 中国气象局武汉暴雨研究所暴雨监测预警湖北省重点实验室/中国气象局流域强降水重点开放实验室,武汉 430205

**提 要:** 传统相似预报方法存在一些不足:单一层次的相似缺乏三维空间信息,预报效果较差;单一相似判据性能不稳定;天气系统“形”和“值”之间相互干扰较多。为克服上述问题并探究深度学习模型在天气形势识别与预报中的可行性,首先利用欧洲中期天气预报中心(ECMWF)第五代全球大气再分析资料(ERA5),基于卷积神经网络和 Transformer 模块构建了一种包含自注意力机制的深度学习自编码器模型,并对该模型进行训练和优化,检验结果表明,该模型能有效准确地提取天气形势的三维空间信息,然后利用特征向量,结合偏重“形”的皮尔逊相关、侧重“值”的欧氏距离和综合考虑了“形和值”的切比雪夫相似判据,设计出一种新的相似天气形势预报方法:Synoptic Similarity Net,最后对其实际业务效果进行了详细的检验评估,结果表明:该方法平均的结构相似指数(SSIM)最高,同时均方误差(MSE)最低,且相较于传统方法 SSIM 提升、MSE 降低的幅度明显;不同季节的灾害性天气个例分析结果显示,该方法所找到的历史最佳相似个例在绝大多数情况下,不仅数值上更加接近原始场,而且空间分布也最为吻合,展现出良好的应用前景。

**关键词:** 天气形势,相似预报,深度学习,相似判据,检验评估

中图分类号: P456, P457

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2025.122501

## A Deep Learning-Based Method for Synoptic Situation Similarity Forecasting: Synoptic Similarity Net

TAN Jianghong<sup>1,2</sup> YUAN Kai<sup>3</sup> ZHOU Yue<sup>1,4</sup>

1 Heavy Rainfall Research Center of China, Wuhan 430040

2 Xiangyang Meteorological Office of Hubei Province, Xiangyang 441021

3 Wuhan Meteorological Observatory of Hubei Province, Wuhan 430040

4 Hubei Key Laboratory for Heavy Rain Monitoring and Warning Research/CMA Basin

Heavy Rainfall Key Laboratory, Institute of Heavy Rain, CMA, Wuhan 430205

**Abstract:** Analog forecasting is a widely adopted statistical method in operational meteorological services. Traditional single-layer similarity approaches have such limitations as the lack of three-dimensional spatial information, the unstable performance of single similarity criteria, and the frequent interference from synoptic system pattern and intensity (magnitude). To address these challenges and explore the feasibility of

\* 全国暴雨研究开放基金(BYKJ2025M11)、广西重点研发计划(桂科 AB25069132)、湖北省气象局面上项目(2025Y04)、中国气象局公共服务中心面上项目(M2024011)和武汉市气象科技联合项目(2023020201010574)共同资助

2025 年 2 月 24 日收稿; 2025 年 12 月 25 日收修定稿

第一作者:谭江红,主要从事天气预报研究和预报方法开发. E-mail:lzzhzw@163.com

通讯作者:袁凯,主要从事天气预报和人工智能技术结合研究. E-mail:yuankai2009@126.com

deep learning models in synoptic situation recognition and forecasting, in this study we develop a novel approach using the ECMWF fifth-generation reanalysis (ERA5) dataset. We construct a deep learning architecture that integrates convolutional neural networks (CNN) with Transformer modules, incorporating self-attention mechanisms. Verification shows that this model can effectively capture three-dimensional spatial features of synoptic situation. Then, utilizing the extracted feature vectors, we design a comprehensive similarity framework that combines three complementary metrics: Pearson correlation (emphasizing pattern shape), Euclidean distance (emphasizing magnitude), and Chebyshev distance (considering both shape and magnitude). This integration forms our proposed method: Synoptic Similarity Net. Finally, the operational application effect of this method is tested and evaluated in detail. The results indicate that this method can achieve the highest average structural similarity index (SSIM) and lowest mean squared error (MSE) relative to the traditional methods, demonstrating significant improvements in both metrics. Case studies across seasons confirm that the historical analogs identified by Synoptic Similarity Net exhibit both greater numerical accuracy and superior spatial pattern consistency compared to the original synoptic fields. These results demonstrate the promising potential of this method for meteorological operational applications.

**Key words:** synoptic situation, analog forecast, deep learning, similarity criterion, evaluation and verification

## 引言

相似预报方法是将当前大气的物理状态及其演变过程,与历史同期(或相近气候背景)中出现过的天气过程进行对比,从中找出涵盖静态和动态两方面均相似的个例,并按照历史上出现的一个或几个最相似的个例,预测即将出现的天气(张延亭和单九生,2000),本质上是对预报员根据经验预报天气过程的客观量化表达。近年来随着全球气候变暖加剧,各类极端天气多发频发重发(刘吉峰等,2007; Easterling et al,2000; Meehl et al,2000),同时,这些局地性的极端天气往往与其特定的地形、地貌和地理位置等对中小尺度天气系统的生消发展影响有关,而目前数值预报模式对其尚难以充分反映(刘还珠等,2004),但相似预报能够考虑天气发展过程的三维结构特征,且兼顾大气本身的线性和非线性变化规律,对小概率和离散事件具有较强的处理能力(阎惠芳等,2003),因此在历史过程中寻找最相似的天气形势个例,分析其可能造成的影响和程度,是重大天气过程服务中的一种必然选择(李宇中等,2024; Hu et al,2023)。

相关研究表明,相似预报效果的好坏关键在于相似性判据的选择与计算方案的实现,自李开乐(1986)提出相似密度以来,众多专家学者以相关系

数、距离系数和综合相似系数等为判据,将相似预报引入到气温、降水、风速、云量等气象要素(杨杰等,2012;陈录元等,2012;黄海亮等,2018;李琴等,2023),短期、台风路径和延伸期等天气趋势(刘勇等,2006;白玲等,2009;鲁小琴等,2013;唐红玉等,2017),甚至应用于闪电潜势(纪晓玲等,2012)、冰雹(许炳南和周颖,2003)的预报和雷达回波的识别中(邹书平等,2021),均取得了一定业务应用成果。需要注意的是,上述研究大多数基于单一气象要素或固定高度层的“切片式”特征场景,而天气系统是一个高、中、低层相互发展和耦合的三维综合体,这种单一场景的要素数据集无法完整准确地描述复杂的天气形势,其相似分析结果往往差异较大,后期仍需要预报员进行主观筛选辨别,存在较大的不确定性(李宇中等,2024)。此外,相似性判据中相关系数注重于“形”相似,而距离系数更加侧重于要素的“值”,综合相似判据则经常存在高平均值系数掩盖低形状系数的情况,导致形状误差较大(罗阳等,2011;朱海峰等,2013)。

近年来以机器学习为代表的人工智能技术方兴未艾,尤其是在图像识别和自动驾驶等领域大量成熟的应用早已走入日常生活,由于其挖掘海量数据和非线性建模的优秀能力,众多学者将其引入到天气预报业务中,并取得了良好的成果(宋文彬等,2020;周必高等,2022;张鑫宇等,2023)。笔者从业

务实践受到启发:能否构建类似人脸识别、关注中小范围区域的“天脸识别”系统,用于辅助预报员检索相似历史个例呢?因此,本文以卷积神经网络(Krizhevsky et al,2012)和 Transformer 结构(Vaswani et al,2017)为主要内核,构建了一种具有注意力机制的深度学习模型,再利用该模型多通道提取高、中、低各个层次的形势场特征量,并充分考虑各相似判据的优缺点,建立了一种新的三维天气形势相似预报方法(Synoptic Similarity Net,SSN),最后将计算机视觉领域中广泛使用的结构相似性指数引入,客观检验其实际业务应用水平,旨在为湖北地区短期天气预报提供最准确的历史相似个例,进而为后期的暴雨、大雪和强对流等灾害性天气的预报提供客观参考。

## 1 资料和方法

### 1.1 资料

本文使用了欧洲中期天气预报中心(ECMWF)第五代再分析资料(ERA5)和高分辨率数值预报资料,起止时间为 1994 年 1 月 1 日至 2024 年 9 月 30 日,空间分辨率为  $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ ,时间分辨率为 6 h,其中 1994 年 1 月 1 日至 2020 年 12 月 31 日为训练数据集,2021 年 1 月 1 日至 2022 年 12 月 31 日为测试数据集,2023 年 1 月 1 日至 2024 年 9 月 30 日 ECMWF 模式数据则为应用数据集,测试和应用数据集均没有参与模型的训练和超参数调整,因此其结果可以客观地反映模型提取天气形势三维空间信息以及 SSN 的预报能力。

### 1.2 检验方法

为统一有效地评估各方法寻找相似个例的能力,本文以各要素场实况为基础,逐个格点检验其准确率,用均方误差(mean squared error,MSE)表征相似个例与实况场在强度上的误差,用结构相似性指数(structural similarity index,SSIM)衡量相似个例与实况场空间上的相似度。考虑到各特征量在数值上的差异,在计算 MSE 之前,所有要素均进行了标准化处理。

SSIM 则是一种用于评估两张图片视觉相似度

的指标,其在图像压缩、图像去噪、图像分割、图像增强、医学成像等领域广泛应用,其核心思想为将图像视为由亮度、对比度和结构三个不同因素的组合,并通过对比上述三个因素的综合相似性来判断两张图像的最终相似程度(Wang et al,2004),SSIM 介于  $-1 \sim 1$ ,当两张图片一模一样时 SSIM 的值等于 1,反之则为  $-1$ (Yang et al,2014)。MSE 和 SSIM 的详细计算公式如下:

$$\text{MSE} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (O_i - P_i)^2 \quad (1)$$

$$\text{SSIM}(x, y) = \frac{(2\mu_x\mu_y + c_1)(2\sigma_{xy} + c_2)}{(\mu_x^2 + \mu_y^2 + c_1)(\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + c_2)} \quad (2)$$

式中: $O_i$  为观测值, $P_i$  为预报值; $\mu_x$  和  $\mu_y$  分别表示  $x$  和  $y$  两张图像各自的亮度水平,这里是指两个标准化场的空间平均值;而  $\sigma_x^2$  和  $\sigma_y^2$  是它们的空间方差,通常表示两张图像各自的对比度,在气象场中,对比度指的是场中数值的起伏、变率的大小(如梯度强弱、高度波动幅度等); $\sigma_{xy}$  则是两个图像之间的空间协方差,通常表示两张图像之间的结构相似性,这里代表气象场在空间结构上的相似性(如相似的波动形态、槽脊位置是否对应等)。 $c_1$  和  $c_2$  都是防止分母为零的系数,其中  $c_1 = (K_1 L)^2$ ,  $c_2 = (K_2 L)^2$ ,  $L$  为气象要素归一化后的数据动态范围,而  $K_1$  和  $K_2$  为常数项,一般情况下  $K_1 = 0.01$ ,  $K_2 = 0.03$ 。此外,多通道的 MSE 和 SSIM 由各单通道的 MSE 和 SSIM 平均得到。

## 2 模型构建

### 2.1 特征量选取

根据徐海明等(2001)、许爱华等(2014)、张萍萍等(2015)、钟敏等(2020)、王孝慈等(2021)华中地区暴雨、大雪和强对流等灾害性天气的研究结果,本文选取 200 hPa 风场,500 hPa 位势高度场和风场,700、850、925 hPa 风场,地面 10 m 风场和海平面气压场等 14 个要素为天气形势的特征量(表 1),此外,为了使模型更具有针对性,本文选取范围以湖北为中心,包括河南中南部、湖北全部、湖南中北部、重庆中东部、陕西南部、安徽西部和江西中北部的华中地区,范围为  $28^\circ \sim 35^\circ \text{N}$ 、 $107^\circ \sim 117^\circ \text{E}$ 。

表 1 14 种特征量  
Table 1 List of 14 variables

| 层次  | 200 hPa | 500 hPa  | 700 hPa | 850 hPa | 925 hPa | 地面     |
|-----|---------|----------|---------|---------|---------|--------|
| 特征量 | 风场      | 风场、位势高度场 | 风场      | 风场      | 风场      | 风场、气压场 |

注:风场包括经向风和纬向风。

### 2.2 模型结构与原理

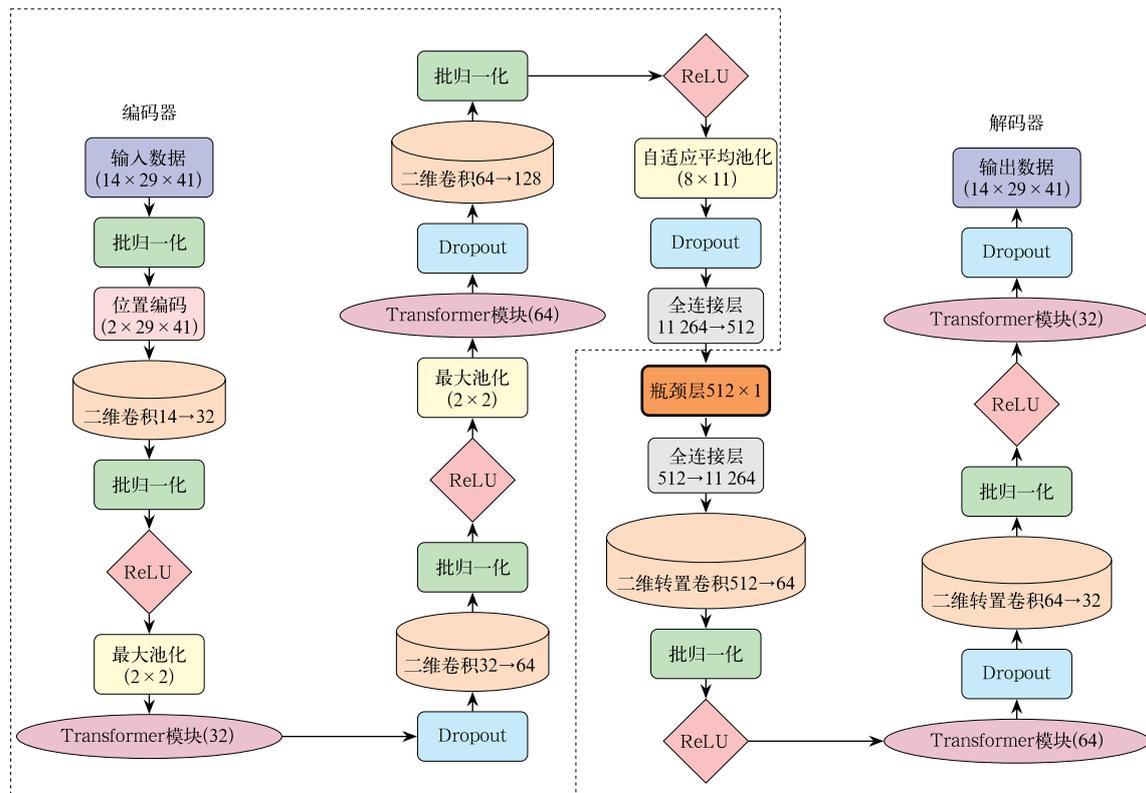
自编码器(Autoencoder)是一种基于神经网络的无监督学习模型,主要用于数据的降维、特征提取和数据压缩(Hinton and Salakhutdinov, 2006),其核心思想是通过一个编码器(Encoder)将输入数据压缩成一个低维的特征表示,然后通过一个解码器(Decoder)将这个低维特征重构回原始输入数据。自编码器在数据降维与可视化、特征提取与降噪、图像处理、异常检测等领域有广泛的应用,本文应用于天气形势特征量的提取与相似检索。

深度学习自编码器模型由编码器、瓶颈层和解码器三部分组成(图 1)。为了增强模型对空间位置信息的提取能力,首先生成了基于纬度和经度的标准化位置编码,并通过广播机制与输入特征逐通道叠加,位置编码方法如下:

$$X' = X + P_{lat} + P_{lon} \quad (3)$$

式中: $X$  为原始输入特征, $P_{lat}$  和  $P_{lon}$  分别为纬度和经度的标准化位置编码。编码器接收输入张量  $X \in R^{C \times H \times W}$ , 再通过多层卷积和池化操作,逐步提取特征。其中, $R$  表示实数集合; $C$  表示通道数; $H$  和  $W$  分别表示纬度方向和经度方向的网格点数。第一层卷积和池化输入通道数 14(即 14 个特征量),输出通道数 32。卷积核大小为 3,池化核大小为 2。对输入特征  $X$  进行卷积操作,提取局部特征,通过批量归一化对输出进行标准化处理,并使用 ReLU 激活函数引入非线性,得到卷积后的特征图。再进行最大池化操作,减小特征图的空间分辨率,同时保留主要特征,然后引入多头自注意力机制(Vaswani et al, 2017),其具体实现如下:

$$\text{Attention}(Q, K, V) = \text{softmax}\left(\frac{QK^T}{\sqrt{d_k}}\right)V \quad (4)$$



注:虚线框内为编码器,加粗框内为瓶颈层,其他部分为解码器。

图 1 模型结构图

Fig. 1 Diagram of model architecture

式中:  $Q$ 、 $K$ 、 $V$  分别表示查询(Query)、键(Key)和值(Value)矩阵,  $d_k$  为键的维度, softmax 为归一化函数。该机制用于计算输入特征的自注意力, 捕获全局依赖关系。

计算自注意力后, 将自注意力的输出重新转置并重塑为原始的二维形状。第二层卷积和池化通道数从 32 增加到 64, 第三层特征通道数增加到 128, 并通过自适应平均池化层将特征图尺寸固定, 最终得到一维的瓶颈层向量。

此外, 在 Transformer 模块中, 引入残差连接(He et al, 2016), 有效缓解了梯度消失问题, 提高了训练的稳定性, 此外, 在模型的卷积层和 Transformer 模块中使用了批量归一化, 缓解了神经网络训练中的内部协变量偏移问题, 加速了模型的收敛。

解码器的结构与编码器对称, 通过反卷积层和 Transformer 模块逐步恢复特征图的空间尺寸和通道数。第一层反卷积和 Transformer 模块通道数从 128 减少到 64, 第二层通道数从 64 减少到 32, 第三层反卷积将通道数恢复到输入的 14。如果输出尺

寸与输入尺寸不匹配, 使用双线性插值对输出尺寸进行对齐, 以保证重建结果与输入网格一致。

综上所述, 模型将卷积操作与自注意力机制结合, 实现局部和全局特征的联合建模。卷积操作提取局部空间特征, 自注意力机制捕捉长距离依赖, 通过残差连接增强模型训练稳定性。层次化结构逐步提取高层次特征, 结合解码器恢复输入分辨率。

### 2.3 模型训练和部分超参数

本文以模型输出的全局特征量场和实况特征量场之间的 MSE 为损失函数, 采用 Adam 优化器, 对模型参数进行更新。训练过程中根据验证集的损失, 并使用 ReduceLROnPlateau 策略动态调整学习率, 当验证集的损失在指定的轮次内没有有效降低时, 提前停止训练, 防止过拟合。激活函数则采用计算简单, 收敛速度快的 GELU 函数, 同时使用贝叶斯优化算法, 有效地探索了超参数的变化空间, 降低了计算成本并缩短了优化时间, 实现了超参数优化的高效化和自动化, 部分超参数搜索空间见表 2。

表 2 模型部分超参数搜索区间

Table 2 Search ranges of partial hyperparameters of model

| 参数 | 学习率                    | 批量大小   | 训练轮数   | 前馈层维度        | 瓶颈层维度             | 权重衰减                   |
|----|------------------------|--------|--------|--------------|-------------------|------------------------|
| 区间 | $10^{-4} \sim 10^{-3}$ | 32, 64 | 20, 50 | 64, 128, 256 | 64, 128, 256, 512 | $10^{-5} \sim 10^{-4}$ |

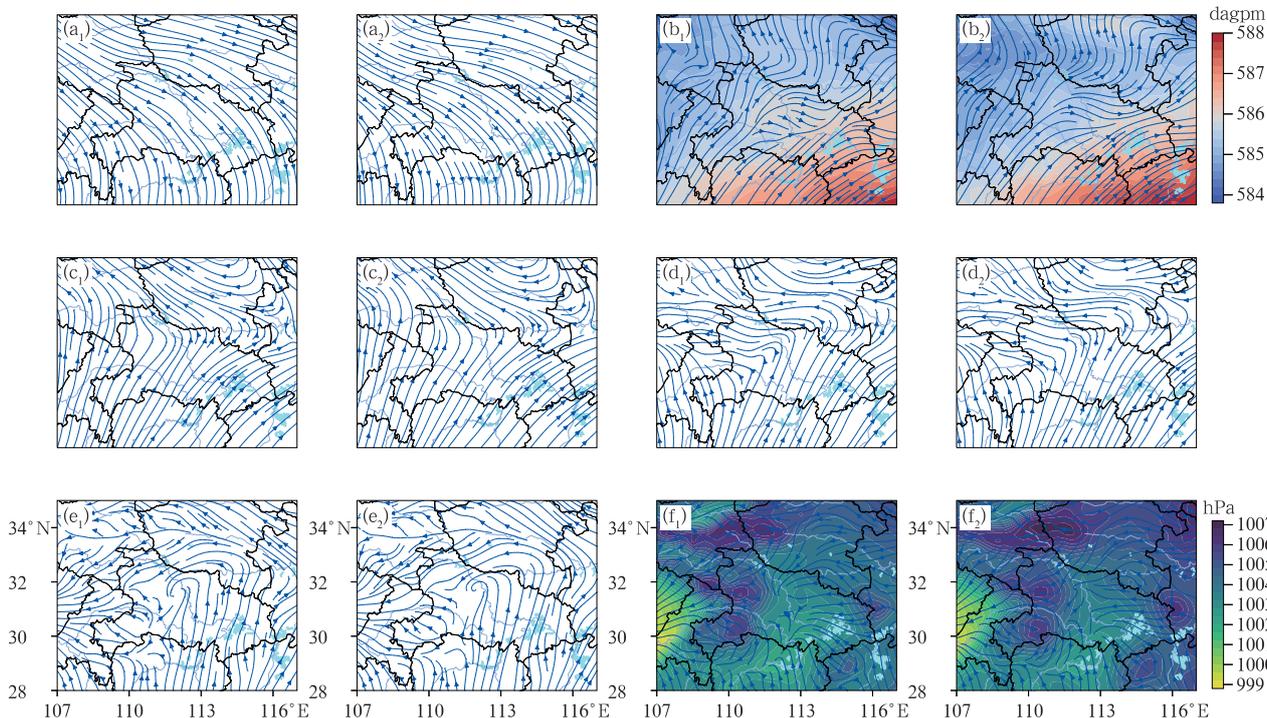
### 2.4 模型效果检验

为检验模型提取的特征向量还原原始三维空间特征量的能力, 给出了 2024 年 7 月 14 日 02 时(北京时, 下同)各特征量场(图 2), 可以看到深度学习模型重建的特征量场与原始场, 无论是各层风的流型、流向和流速, 还是 500 hPa 位势高度和海平面气压梯度, 在空间位置上和形状上, 与实况非常接近, 均表现为: 200 hPa 上为湘赣至陕南的反气旋性环流, 500 hPa 上则为东南高、西北低的位势梯度, 700 hPa 上暖式切变线自陕渝交界经湖北北部一直延伸至豫东南, 850 hPa 和 925 hPa 上暖式切变线则呈西南—东北走向, 位于鄂西南至豫东南一带, 地面上则为偏南气流和偏东气流在湖北中部的汇合。但模型提取和重建的特征量场在流型角度转变、分叉和汇合的地方, 更加平滑。检验指标显示(表 3): 850 hPa 风场的 SSIM 值最高, 达 0.89, 200 hPa 风场则最低, 为 0.59, 925~700 hPa 风场的 SSIM 均在 0.8 以上; 而从 MSE 来看, 925 hPa 的 MSE 最高也仅为

0.03, 200 hPa 和 500 hPa 的 MSE 最低, 为 0.01。综上所述, 无论是特征量的数值, 还是天气系统的结构形态, 模型结果与实况均非常吻合, 尤其是对于 925~700 hPa, 模型的效果更佳, 表明模型构建较为成功, 训练后的模型能准确提取各层特征量的空间信息。

### 2.5 相似判据选择

将应用数据集输入训练好的模型, 得到对应时段经过模型提取的三维特征量(一维特征向量), 然后根据该特征量, 分别以偏重“形”的皮尔逊相关、侧重“值”的欧氏距离和综合考虑了“形和值”的切比雪夫为相似判据各自寻找其历史相似个例, 对于每一个相似判据, 将其寻找到的结果进行排序, 选出与原始时间最相似的前 5 个历史时间点, 为保证寻找到的个例与原始个例具有相近的气候背景, 搜寻的时间范围设置为原始时间日前后 45 d(董良森等, 2008), 再将 3 个判据各自的前 5 名时间点汇总(共计 15 个时间点), 选取出现次数最多的时间点作为



注:图 b 和 f 中填色分别为 500 hPa 位势高度和海平面气压。

图 2 2024 年 7 月 14 日 02 时(a<sub>1</sub>~f<sub>1</sub>)原始形势场和(a<sub>2</sub>~f<sub>2</sub>)深度学习模型提取特征所重建的形势场对比  
(a)200 hPa,(b)500 hPa,(c)700 hPa,(d)850 hPa,(e)925 hPa,(f)地面

Fig. 2 Comparison of (a<sub>1</sub>—f<sub>1</sub>) the original synoptic field and (a<sub>2</sub>—f<sub>2</sub>) the reconstructed synoptic field with the features extracted by deep learning model at 02:00 BT 14 July 2024  
(a) 200 hPa, (b) 500 hPa, (c) 700 hPa, (d) 850 hPa, (e) 925 hPa, (f) surface

表 3 2024 年 7 月 14 日 02 时深度学习模型重建形势各层的 SSIM 和 MSE

| Table 3 The SSIM and MSE of different levels extracted by deep learning model at 02:00 BT 14 July 2024 |         |         |         |         |         |      |
|--|---------|---------|---------|---------|---------|------|
| 指标   | 200 hPa | 500 hPa | 700 hPa | 850 hPa | 925 hPa | 地面   |
| SSIM   | 0.59    | 0.63    | 0.81    | 0.89    | 0.85    | 0.76 |
| MSE  | 0.01    | 0.01    | 0.02    | 0.02    | 0.03    | 0.02 |

该个例的历史最佳相似时间点。上述相似判据的设置,有利于降低单一相似判据性能不稳定带来的偏差,既考虑到了天气形势的“形”相似,还兼顾了要素的“值”相近(罗阳等,2011;朱海峰等,2013)。

### 3 相似结果检验

#### 3.1 整体检验评分

表 4 是应用数据时段内基于深度学习模型 SSN 和三种常规相似判据方法,各自寻找的历史最佳相似个例与实况天气形势之间的平均 SSIM 和 MSE。可以看到,SSN 的 SSIM 最高,为 0.50,传统方法中切比雪夫判据和欧氏距离的 SSIM 最低,为 0.28,皮尔逊相关的 SSIM 则为 0.32,SSN 相对于

传统方法 SSIM 提高显著,提高幅度在 56.3%~78.6%。此外 SSN 的 MSE 最低,仅为 0.21,而皮尔逊相关和欧氏距离的 MSE 为 0.26,切比雪夫 MSE 最高,达 0.30,相较于传统方法,SSN 的 MSE 同样降低明显,降低幅度在 19.2%~30.0%。上述结果表明,相较于传统方法,按照 SSN 所找到的历史相似个例,不仅数值上更加接近原始场,而且空间分布也与原始形势更加吻合。

#### 3.2 应用时段个例分析

整体检验结果表明,SSN 方法在检验时段内较传统方法改进明显,下文将结合湖北地区冬季和夏季三次典型的灾害性天气过程,探讨 SSN 和传统方法的实际业务表现,即相似检索的能力和和应用效果。

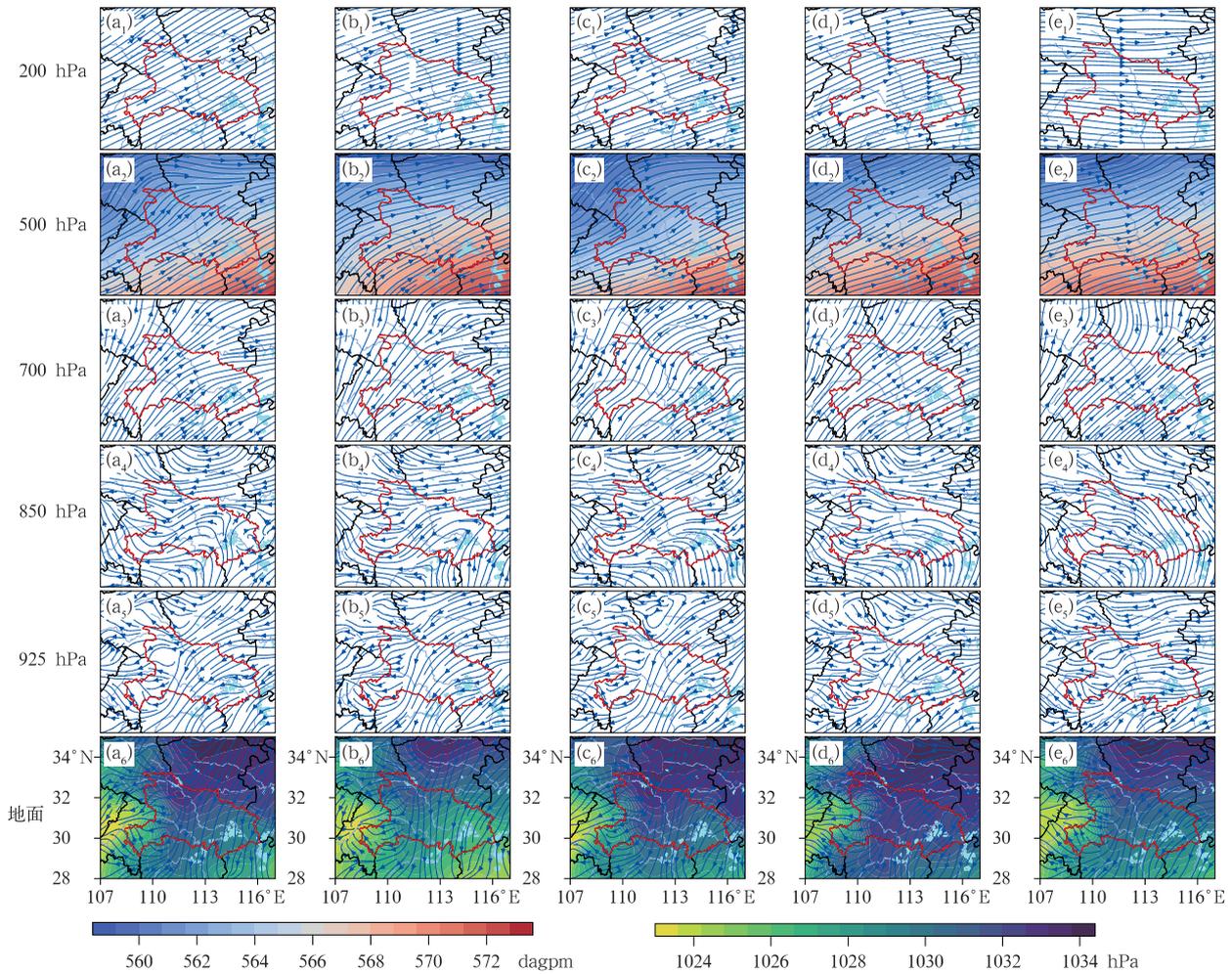
表 4 应用数据时段 SSN 和三种常规相似方法在各层平均的 SSIM 和 MSE  
Table 4 The averaged SSIM and MSE of different levels by SSN and three traditional similar methods during the data application period

| 指标   | SSN  | 皮尔逊相关 | 欧氏距离 | 切比雪夫 |
|------|------|-------|------|------|
| SSIM | 0.50 | 0.32  | 0.28 | 0.28 |
| MSE  | 0.21 | 0.26  | 0.26 | 0.30 |

### 3.2.1 2024 年 2 月 2 日 02 时相似检索示例与评估

2024 年 2 月 1—2 日湖北出现了冬季典型的低温雨雪冰冻天气过程,其中鄂西北、湖北中部出现中到大雪,局部暴雪,江汉平原还伴有明显的雨淞,中东部地区普遍降水量在 10~30 mm,其中 2 日 01—04 时降水呈东北—西南向带状分布,位于荆州东部—黄冈北部一带。此次过程环流形势表现为:受

500 hPa 南支槽和副热带高压(以下简称副高)共同影响,对流层低层西南气流和偏东路冷空气在湖北中部交汇(陈璇等,2024;王珊珊等,2023)。实况显示 2 日 01—04 时降水主要发生在 700 hPa 西南气流左侧和 850 hPa 切变线南侧,较强降水则主要位于 850 hPa 切变线南侧。对比 SSN 和传统方法的结果(图 3),SSN 方法中各层风向与实况均较为吻



注:下角 2 和 6 中填色分别为 500 hPa 位势高度和海平面气压。

图 3 2024 年 2 月 2 日 02 时原始形势场和各方法寻找到的历史最佳相似形势场  
(a) 实况环流场; (b~e) 经过 (b) SSN, (c) 皮尔逊相关, (d) 欧氏距离和 (e) 切比雪夫得到的历史最佳相似个例

Fig. 3 The original synoptic fields at 02:00 BT 2 February 2024 and the corresponding best historical analogs retrieved by different methods

(a) the observed synoptic fields; (b~e) the best analogs obtained by (b) SSN, (c) Pearson correlation, (d) Euclidean distance and (e) Chebyshev distance

合,尤其是 700 hPa 急流的形态以及 850 hPa 切变线的位置与实况非常接近,而欧氏距离、皮尔逊相关和切比雪夫三种方法其 850 hPa 上的切变线较实况均明显偏东、偏南,且切变线两侧风向的辐合强度也偏弱,此外,切比雪夫 200 hPa 气流过于平直,925 hPa 偏东风分量明显偏强。各种方法寻找到的相似个例

时间及天气见表 5。

从客观指标来看(表 6),200 hPa 和 500 hPa 皮尔逊相关的 SSIM 最高,SSN 排第二,SSN 的 SSIM 在 700 hPa 及以下层次均最高;而 MSE 除 200 hPa 和地面外亦最低,但也为仅次于最优方法的第二种方法。

表 5 SSN 和三种常规相似方法基于 2024 年 2 月 2 日 02 时检索到的历史最佳相似个例及湖北对应的天气  
Table 5 The best historical analogs and the corresponding synoptic conditions in Hubei Province retrieved by SSN and three traditional similar methods at 02:00 BT 2 February 2024

| 日期        | SSN               | 皮尔逊相关               | 欧氏距离             | 切比雪夫             |
|-----------|-------------------|---------------------|------------------|------------------|
| 日期(年-月-日) | 2018-1-4          | 1996-1-16           | 1995-12-27       | 2015-1-28        |
| 天气        | 雨夹雪转雪,鄂西南—鄂东北中到大雪 | 鄂东南以外雨夹雪转雪,鄂西、鄂东北中雪 | 鄂西小雨或雨夹雪,高海拔山区小雪 | 小到中雪,鄂西南—鄂东北中到大雪 |

表 6 2024 年 2 月 2 日 02 时 SSN 和三种常规相似方法在各层的 SSIM 和 MSE  
Table 6 The SSIM and MSE of different levels retrieved by SSN and three traditional similar methods at 02:00 BT on 2 February 2024

| 指标   |         | SSN  | 皮尔逊相关 | 欧氏距离 | 切比雪夫  |
|------|---------|------|-------|------|-------|
| SSIM | 200 hPa | 0.13 | 0.15  | 0.11 | -0.01 |
|      | 500 hPa | 0.81 | 0.91  | 0.73 | 0.64  |
|      | 700 hPa | 0.35 | 0.31  | 0.31 | 0.21  |
|      | 850 hPa | 0.43 | 0.40  | 0.37 | 0.20  |
|      | 925 hPa | 0.54 | 0.50  | 0.37 | 0.36  |
|      | 地面      | 0.78 | 0.71  | 0.58 | 0.56  |
| MSE  | 200 hPa | 1.68 | 1.74  | 1.19 | 2.10  |
|      | 500 hPa | 0.08 | 0.11  | 0.14 | 0.12  |
|      | 700 hPa | 0.35 | 0.41  | 0.38 | 0.50  |
|      | 850 hPa | 0.34 | 0.38  | 0.43 | 0.83  |
|      | 925 hPa | 0.28 | 0.30  | 0.39 | 0.36  |
|      | 地面      | 0.14 | 0.15  | 0.11 | 0.15  |

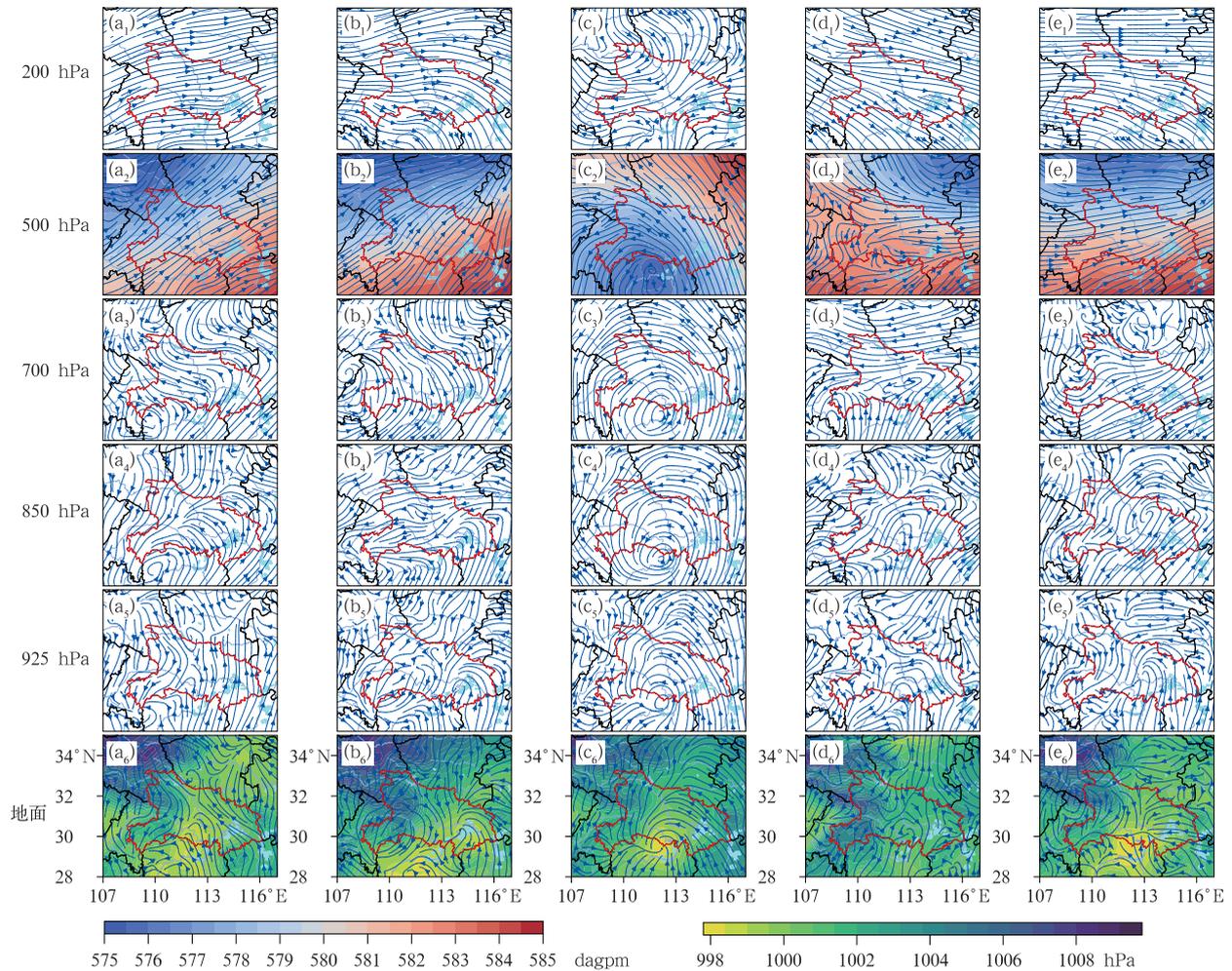
### 3.2.2 2024 年 7 月 1 日 08 时相似检索示例与评估

2024 年 7 月 1 日湖北出现典型的梅雨期暴雨天气过程,中东部大部地区普降暴雨到大暴雨,暴雨以上站点为 21 个,大暴雨以上站点为 12 个,其中 1 日 07—10 时降水呈东北—西南带状分布,位于恩施南部—荆州—黄冈北部一带。此次暴雨过程的环流系统为:500 hPa 西风槽逼近副高,700 hPa 急流发展,并形成湘西北—湖北中部—豫南的呈东北—西南走向的暖式切变线,850 hPa 切变线走向与 700 hPa 近乎平行,其位置偏东偏南约 50~100 km。从实况来看,07—10 时降水主要位于 700 hPa 切变线以南,强降水则主要位于 850 hPa 切变线附近。

对比 SSN 和传统方法的结果(图 4),SSN 方法对 500 hPa 位势梯度以及对流层中低层的风向反映

较好,对 700 hPa 和 850 hPa 切变线的形态和位置的把握最接近实况,而欧氏距离不仅错误反映了 500 hPa 位势梯度和风向以及 700 hPa 湖北中部的低涡,而且 850 hPa 切变线走向较实况更陡峭,其位置也更加偏西;皮尔逊相关各层风场均出现较大误差,主要表现为 500 hPa 及以下为位于湘鄂交界的强低涡;切比雪夫则对 700 hPa 切变线没有反映,此外 850 hPa 上也有位于湖北中部的低涡。降水分布和强度不仅取决于天气系统,还与环境参量、持续时间、中小尺度过程等有关,表现出了更强的复杂性(表 7)。

SSIM 和 MSE 也同样表现出与上一个个例类似的规律(表 8),SSN 的 SSIM 除 925 hPa 外均最高,MSE 则为除 200 hPa 和地面外最低。



注：下角 2 和 6 中填色要素同图 3。

图 4 2024 年 7 月 1 日 08 时原始形势场和各单位寻找到的历史最佳相似形势场  
(a) 实况环流场；(b~e) 经过 (b) SSN, (c) 皮尔逊相关, (d) 欧氏距离和 (e) 切比雪夫得到的历史最佳相似个例

Fig. 4 The original synoptic fields at 08:00 BT 1 July 2024 and the corresponding best historical analogs retrieved by different methods

(a) the observed synoptic fields; (b-e) the best analogs obtained by (b) SSN, (c) Pearson correlation, (d) Euclidean distance and (e) Chebyshev distance

表 7 SSN 和三种常规相似方法基于 2024 年 7 月 1 日 08 时检索到的历史最佳相似个例及湖北对应的天气

Table 7 The best historical analogs and the corresponding synoptic conditions in Hubei Province retrieved by SSN and three traditional similar methods at 08:00 BT 1 July 2024

| 日期        | SSN               | 皮尔逊相关           | 欧氏距离                    | 切比雪夫                      |
|-----------|-------------------|-----------------|-------------------------|---------------------------|
| 日期(年-月-日) | 2021-7-2          | 1997-7-6        | 1996-6-23               | 2011-6-9                  |
| 天气        | 中到大雨,鄂东<br>暴雨到大暴雨 | 小到中雨,南部<br>中到大雨 | 小到中雨,江汉平原<br>南部—鄂东北大到暴雨 | 中到大雨,江汉平原<br>中部—鄂东北暴雨到大暴雨 |

### 3.2.3 天气会商预报应用典例

2024 年 7 月 14 日,副高西伸北抬,但湖北 500 hPa 仍然位于脊区控制,此次过程所有 CMA 中尺度数值预报模式均没有在鄂北一带报出强降水,全球尺度模式和上级指导降水预报同样落区范围偏小、强

度偏小,可能原因一般认为脊区无法强迫出太强的低值或辐合系统。在 7 月 13 日应急会商中,襄阳本地预报员利用 SSN 模型提取 ECMWF 24 h 形势场预报的特征向量并进行历史相似检索,发现该过程与 2021 年 8 月 12 日中低层环流形势(特别是

表 8 2024 年 7 月 1 日 08 时 SSN 和三种常规相似方法在各层的 SSIM 和 MSE  
Table 8 The SSIM and MSE of different levels retrieved by SSN and three traditional similar methods at 08:00 BT 1 July 2024

| 指标   |         | SSN  | 皮尔逊相关 | 欧氏距离 | 切比雪夫 |
|------|---------|------|-------|------|------|
| SSIM | 200 hPa | 0.20 | 0.09  | 0.18 | 0.19 |
|      | 500 hPa | 0.70 | -0.22 | 0.05 | 0.39 |
|      | 700 hPa | 0.21 | 0.13  | 0.19 | 0.17 |
|      | 850 hPa | 0.30 | 0.18  | 0.26 | 0.25 |
|      | 925 hPa | 0.19 | 0.13  | 0.18 | 0.21 |
|      | 地面      | 0.50 | 0.40  | 0.36 | 0.38 |
| MSE  | 200 hPa | 0.93 | 1.46  | 1.66 | 0.86 |
|      | 500 hPa | 0.10 | 2.76  | 1.13 | 0.26 |
|      | 700 hPa | 0.66 | 0.74  | 0.76 | 0.79 |
|      | 850 hPa | 0.43 | 0.66  | 0.48 | 0.64 |
|      | 925 hPa | 0.92 | 1.26  | 1.10 | 1.11 |
|      | 地面      | 0.29 | 0.27  | 0.53 | 0.31 |

700 hPa、850 hPa)较为相似,考虑 8 月 12 日过程数值模式同样低估了降水量,果断将数值预报降水量级向上调整,给出“预计当夜过程与 2021 年 8 月 12 日过程系统类似,襄阳中东部会出现 200 mm 以上的极端降水”的结论。实况襄阳市区、老河口均出现了大暴雨到特大暴雨,襄阳住建部门根据预报提前准备沙袋、泵站等防汛排涝应急物资设备,有效应对,确保了此次过程无重大人员伤亡和财产损失。

如图 5 所示,两个时次副高均西伸北抬,2024 年 7 月 14 日湖北位于副高西侧边缘,2021 年 8 月 12 日副高与大陆高压打通呈带状分布,但模型成功捕捉到 500 hPa 自贝加尔湖到湖北地区总体上位于脊区的这一特点,即位势高度值有区别但“形似”,700 hPa 和 850 hPa 暖切变形势基本类似,只是 925~850 hPa 低涡流场后者相比前者更加闭合,同时切变线和暖湿气流强度略有差异,客观定量检索的论据有力支

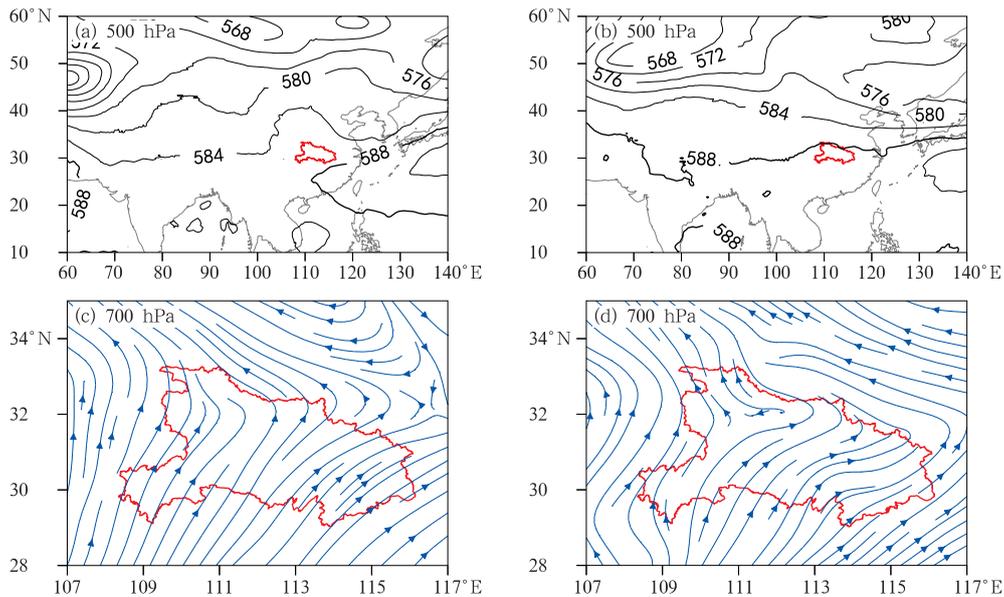
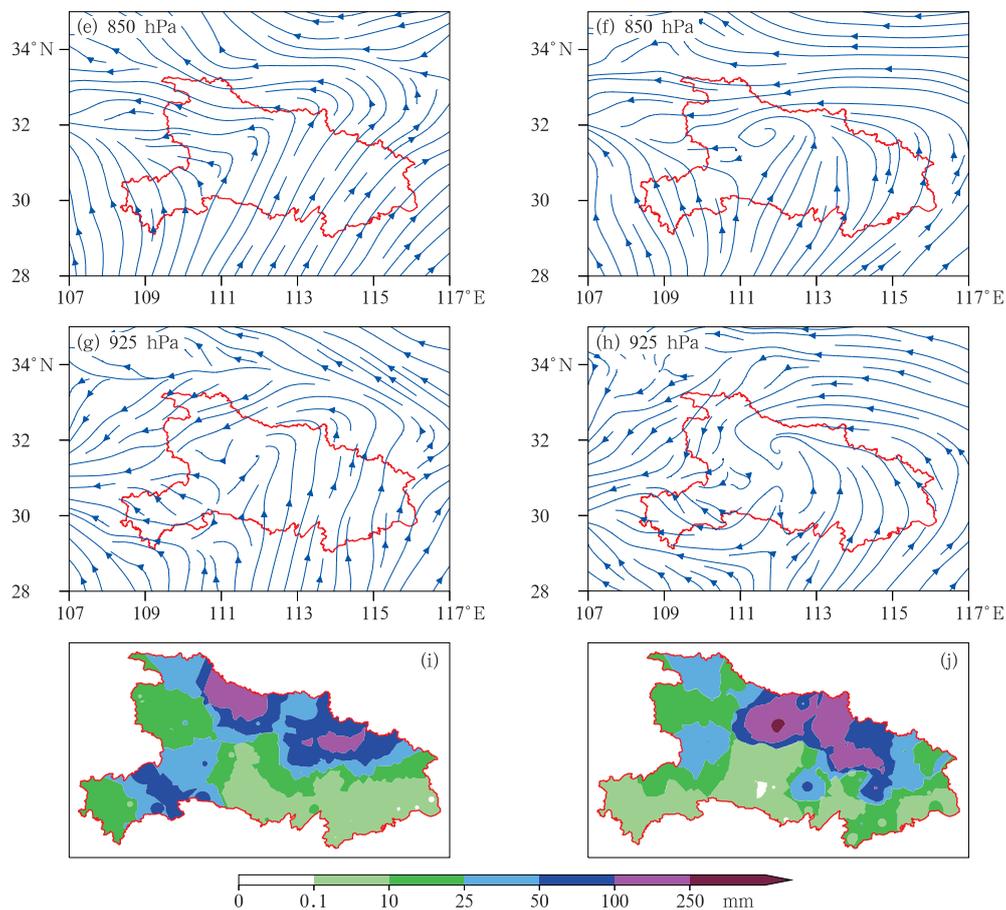


图 5 天气会商中 2024 年 7 月 14 日对应的历史相似个例  
(a, b)500 hPa 位势高度场(单位: dagpm), (c~h)700、850、925 hPa 流场, (i, j)24 h 累计降水量  
(a, c, e, g, i)2024 年 7 月 14 日, (b, d, f, h, j)2021 年 8 月 12 日  
Fig. 5 The historical analog corresponding to the weather consultation on 14 July 2024  
(a, b) 500 hPa geopotential height (unit: dagpm), (c~h) flow fields at (c, d) 700 hPa,  
(e, f) 850 hPa, and (g, h) 925 hPa, (i, j) 24 h accumulated precipitation  
(a, c, e, g, i) 14 July 2024, (b, d, f, h, j) 12 August 2021



续图 5

Fig. 5 Continued

撑了预报结论:如果没有模型定量检索支撑,预报员限于记忆能力和经验的有限性,无法综合性地从海量历史中抓到相似过程;从降水分布看,两次相似的中尺度环流系统导致的实况分布和强度也是类似的(图 5 降水分布为相似环流时间前后 12 h),强降水主落区位于襄阳、随州、孝感北部、黄冈西部,雨带呈西北—东南走向,与一般的西南—东北走向不同,可能与 500 hPa 为西北引导气流而非槽前有关,也与 700 hPa 低涡切变走向有关。

## 4 结论与讨论

### 4.1 结论

本文利用 ERA5 再分析资料,基于卷积神经网络、Transformer 结构和包括高中低各层环流形势的 14 个天气特征量,构建了一种包含自注意力机制的深度学习模型,并使用训练样本对模型进行训练和优化,检验样本显示该模型能准确地提取天气形

势的三维空间信息,同时考虑到单一相似判据的偏差,结合偏重“形”的皮尔逊相关、侧重“值”的欧氏距离和综合考虑了“形和值”的切比雪夫方法,提出了一种新的相似天气形势预报方法 SSN,并在应用时段对该方法进行了详细检验和评估,得到以下主要结论:

(1)SSN 的 SSIM 最高,较三种传统方法 SSIM 的提高幅度在 56.3%~78.6%;SSN 的 MSE 最低,较传统方法 MSE 的降低幅度在 19.2%~30.0%。SSN 所找到的最佳历史相似个例,不仅数值上更加接近原始场,而且空间分布结构形态也与原始形势更加吻合。

(2)个例检验结果显示,相较于三种传统方法,SSN 所找到的最佳历史相似个例与环流实况相比在绝大多数情况下均最相近,尤其是 925~500 hPa 层次,效果尤为明显;检验指标也表明在绝大部分层次 SSN 的 SSIM 均最高,MSE 亦较低,即便不是最优方法,也为仅次于最优方法的第二方法。对于辅助预报员基于历史相似形势进行要素经验订正预

报,SSN可发挥重要作用。

## 4.2 讨论

文中所给出的评估方法对参与计算的每一个层次的每一个特征量均平等对待,但在实际业务工作中,针对不同的天气类型,不同层次形势的相对作用具有较大差异。比如降水过程中更多的受中低层环流影响,而高温、干旱过程则更多的受中高层环流作用。如何根据不同的天气过程来对各层形势的权重进行调整,是后期研究的重要方向。另外,扩展样本后,找到最佳历史相似的概率将会进一步增大。

各类天气现象,尤其是暴雨和各类强天气的产生不仅需要特定的环流背景场,还需要水汽、热力、动力和不稳定等条件的有利配合,因此,后期将引入各类环境要素,并结合各类天气标签进行聚类、分类、回归等下游任务,将相似预报进一步融入实际业务。

## 参考文献

- 白玲,陶林科,李胜发,等,2009.相似预报法在宁夏中卫市短期天气预报中的应用[J].宁夏工程技术,8(2):101-104. Bai L, Tao L K, Li S F, et al, 2009. Similar prediction method in Zhongwei City of Ningxia in the application of short-term weather forecasts[J]. Ningxia Eng Technol, 8(2):101-104(in Chinese).
- 陈录元,尚可政,周海,等,2012.环渤海地区4~10天风速预报中相似预报法的应用[J].气象科技,40(2):219-225. Chen L Y, Shang K Z, Zhou H, et al, 2012. Application of analog forecast to 4-10 day wind forecasting around Bohai Sea[J]. Meteor Sci Technol, 40(2):219-225(in Chinese).
- 陈璇,钟敏,陈赛男,等,2024.2024年2月初湖北极端冰冻过程的观测和成因分析[J].暴雨灾害,43(6):668-679. Chen X, Zhong M, Chen S N, et al, 2024. Observational and causal analysis of the extreme freezing in Hubei Province in early February 2024[J]. Torr Rain Disas, 43(6):668-679(in Chinese).
- 董良森,李宇中,魏利,2008.形势场相似计算方案的比较研究[J].气象研究与应用,29(3):1-5. Dong L M, Li Y Z, Wei L, 2008. Comparison of several analogue arithmetic for synoptic situation field[J]. J Meteor Res Appl, 29(3):1-5(in Chinese).
- 黄海亮,靳双龙,王式功,等,2018.相似预报方法在山西省云量预报中的应用[J].干旱气象,36(5):845-851. Huang H L, Jin S L, Wang S G, et al, 2018. Application of analog forecast method in cloud cover prediction in Shanxi Province[J]. J Arid Meteor, 36(5):845-851(in Chinese).
- 纪晓玲,胡文东,穆建华,等,2012.基于相似预报法的宁夏雷电潜势预报业务系统[J].气象科技,40(2):304-309. Ji X L, Hu W D, Mu J H, et al, 2012. Operational system of thunder/lightning potential forecasting based on similar deviation for Ningxia[J]. Meteor Sci Technol, 40(2):304-309(in Chinese).
- 李开乐,1986.相似密度及其使用技术[J].气象学报,44(2):174-182. Li K L, 1986. A new similarity parameter and its application[J]. Acta Meteor Sin, 44(2):174-182(in Chinese).
- 李琴,周国兵,邓承之,等,2023.基于相似天气现象的重庆市逐时气温预报技术研究[J].沙漠与绿洲气象,17(2):106-113. Li Q, Zhou G B, Deng C Z, et al, 2023. Hourly temperature forecast technology in Chongqing based on similar weather phenomena[J]. Desert Oasis Meteor, 17(2):106-113(in Chinese).
- 李宇中,董良森,梁存桂,等,2024.综合天气相似分析方法及其气象预报服务应用[J].气象科技,52(4):571-582. Li Y Z, Dong L M, Liang C G, et al, 2024. A comprehensive weather similarity analysis method and its application in meteorological forecast services[J]. Meteor Sci Technol, 52(4):571-582(in Chinese).
- 刘还珠,赵声荣,陆至善,等,2004.国家气象中心气象要素的客观预报-MOS系统[J].应用气象学报,15(2):181-191. Liu H Z, Zhao S R, Lu Z S, et al, 2004. Objective element forecasts at NMC—a MOS system[J]. J Appl Meteor Sci, 15(2):181-191(in Chinese).
- 刘吉峰,丁裕国,江志红,2007.全球变暖加剧对极端气候概率影响的初步探讨[J].高原气象,26(4):837-842. Liu J F, Ding Y G, Jiang Z H, 2007. The influence of aggravated global warming on the probability of extreme climatic event[J]. Plateau Meteor, 26(4):837-842(in Chinese).
- 刘勇,吴必文,王东勇,2006.一种台风路径相似检索的算法研究[J].气象,32(7):18-24. Liu Y, Wu B W, Wang D Y, 2006. Algorithm study on similarity retrieval of typhoon tracks[J]. Meteor Mon, 32(7):18-24(in Chinese).
- 鲁小琴,余晖,赵兵科,2013.热带气旋环境场相似检索方法的对比分析[J].气象,39(12):1609-1615. Lu X Q, Yu H, Zhao B K, 2013. Study on similarity retrieval method for ambient field of tropical cyclones[J]. Meteor Mon, 39(12):1609-1615(in Chinese).
- 罗阳,聂新旺,王广山,2011.几种统计相似方法的适用性比较[J].气象,37(11):1443-1447. Luo Y, Nie X W, Wang G S, 2011. An exploration on the applicability of similarity parameter in similarity forecasting[J]. Meteor Mon, 37(11):1443-1447(in Chinese).
- 宋文彬,郑卫江,薛峰,2020.相似台风智能检索与可视化分析研究[J].气象,46(10):1330-1339. Song W B, Zheng W J, Xue F, 2020. Research of intelligent retrieval and visualization of similar typhoons[J]. Meteor Mon, 46(10):1330-1339(in Chinese).
- 唐红玉,李永华,何慧根,等,2017.前期环流相似法在重庆延伸期天气过程预报中的应用[J].气象科技,45(1):72-78. Tang H Y, Li Y H, He H G, et al, 2017. Application of analogous precursor circulation anomaly method to extended-range weather forecast in Chongqing[J]. Meteor Sci Technol, 45(1):72-78(in Chinese).
- 王珊珊,钟敏,陈璇,等,2023.2022年湖北省两次雨雪过程对比及预报偏差分析[J].气象,49(7):819-829. Wang S S, Zhong M, Chen X, et al, 2023. Comparison and forecast deviation analysis of two snow and rain events in Hubei Province in 2022[J].

- Meteor Mon, 49(7):819-829(in Chinese).
- 王孝慈,李双君,孟英杰,2021. 2016—2020年6—7月长江流域主要暴雨过程特征及差异性分析[J]. 干旱气象, 39(6):921-929.
- Wang X C, Li S J, Meng Y J, 2021. Characteristics and difference analysis of main rainstorm processes in Yangtze River Basin from June to July during 2016—2020[J]. J Arid Meteor, 39(6): 921-929(in Chinese).
- 许爱华,孙继松,许东蓓,等,2014. 中国中东部强对流天气的天气形势分类和基本要素配置特征[J]. 气象, 40(4):400-411.
- Xu A H, Sun J S, Xu D B, et al, 2014. Basic synoptic situation classification and element character of severe convection in China[J]. Meteor Mon, 40(4):400-411(in Chinese).
- 许炳南,周颖,2003. 贵州春季冰雹短期预报的高空温压场相似法[J]. 高原气象, 22(4):426-430.
- Xu B N, Zhou Y, 2003. Analogue method of aerological temperature and pressure fields of spring hailfall's short-range forecast in Guizhou[J]. Plateau Meteor, 22(4):426-430(in Chinese).
- 徐海明,何金海,周兵,2001. 夏季长江中游大暴雨过程中天气系统的共同特征[J]. 应用气象学报, 12(3):317-326.
- Xu H M, He J H, Zhou B, 2001. Common features of synoptic systems related to heavy rainstorms in the middle Changjiang River Basin during summer[J]. J Appl Meteor Sci, 12(3):317-326(in Chinese).
- 阎惠芳,李社宗,黄跃青,等,2003. 常用相似性判据的检验和综合相似系数的使用[J]. 气象科技, 31(4):211-215.
- Yan H F, Li S Z, Huang Y Q, et al, 2003. Tests for conventional similarity criterions and application of composite similar coefficient[J]. Meteor Sci Technol, 31(4):211-215(in Chinese).
- 杨杰,赵俊虎,郑志海,等,2012. 华北汛期降水多因子相似订正方案与预报试验[J]. 大气科学, 36(1):11-22.
- Yang J, Zhao J H, Deng Z H, et al, 2012. Estimating the prediction errors of dynamical climate model on the basis of prophase key factors in North China[J]. Chin J Atmos Sci, 36(1):11-22(in Chinese).
- 张萍萍,吴翠红,祁海霞,等,2015. 2013年湖北省两次降雪过程对比分析[J]. 气象, 41(4):418-426.
- Zhang P P, Wu C H, Qi H X, et al, 2015. Contrast analysis of two snowfall events in Hubei 2013[J]. Meteor Mon, 41(4):418-426(in Chinese).
- 张鑫宇,陈敏,范水勇,2023. 基于莫宁-奥布霍夫相似理论的地面站点风速预报偏差订正[J]. 气象, 49(5):624-632.
- Zhang X Y, Chen M, Fan S Y, 2023. Correction of wind speed forecast deviations at ground stations based on Monin-Obukhov similarity theory[J]. Meteor Mon, 49(5):624-632(in Chinese).
- 张延亭,单九生,2000. 逐步引进因子场作相似预报[J]. 气象, 26(3):22-27.
- Zhang Y T, Shan J S, 2000. Similar forecast with step by step recommending factor field[J]. Meteor Mon, 26(3):22-27(in Chinese).
- 钟敏,车钦,张蒙蒙,等,2020. 华中区域极端降水天气形势及物理量异常度特征[J]. 气象, 46(4):503-516.
- Zhong M, Che Q, Zhang M M, et al, 2020. Characteristics of extreme precipitation weather situation and physical quantity anomaly in Central China[J]. Meteor Mon, 46(4):503-516(in Chinese).
- 周必高,鲁小琴,郑峰,等,2022. 基于改进的VGG16模型的副热带高压相似识别及应用评估[J]. 气象, 48(12):1608-1616.
- Zhou B G, Lu X Q, Zheng F, et al, 2022. Research on the similarity recognition and application evaluation of subtropical high based on modified VGG16 model[J]. Meteor Mon, 48(12):1608-1616(in Chinese).
- 朱海峰,王式功,尚可政,等,2013. 切比雪夫判据与常用相似判据的比较及应用[J]. 高原气象, 32(3):848-855.
- Zhu H F, Wang S G, Shang K Z, et al, 2013. Comparison of Chebyshev polynomials with conventional similarity criteria in the proximity filtering and its application[J]. Plateau Meteor, 32(3):848-855(in Chinese).
- 邹书平,黄珏,曾勇,等,2021. 一次典型强对流单体对的雷达回波相似性特征分析[J]. 干旱气象, 39(6):974-983.
- Zou S P, Huang J, Zeng Y, et al, 2021. Similarity characteristics analysis of radar echo of a typical strong convection monomer pair[J]. J Arid Meteor, 39(6):974-983(in Chinese).
- Easterling D R, Evans J L, Groisman P Y, et al, 2000. Observed variability and trends in extreme climate events: a brief review[J]. Bull Amer Meteor Soc, 81(3):417-426.
- He K M, Zhang X Y, Ren S Q, et al, 2016. Deep residual learning for image recognition[C]// Proceedings of the 2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Las Vegas: IEEE:770-778.
- Hinton G E, Salakhutdinov R R, 2006. Reducing the dimensionality of data with neural networks[J]. Science, 313(5786):504-507.
- Hu W, Cervone G, Young G, et al, 2023. Machine learning weather analogs for near-surface variables[J]. Boundary-Layer Meteor, 186(3):711-735.
- Krizhevsky A, Sutskever I, Hinton G E, 2012. ImageNet classification with deep convolutional neural networks[C]// Proceedings of the 26th International Conference on Neural Information Processing Systems - Volume 1. Lake Tahoe: Curran Associates Inc.:1097-1105.
- Meehl G A, Karl T, Easterling D R, et al, 2000. An introduction to trends in extreme weather and climate events; observations, socioeconomic impacts, terrestrial ecological impacts, and model projections[J]. Bull Amer Meteor Soc, 81(3):413-416.
- Vaswani A, Shazeer N, Parmar N, et al, 2017. Attention is all you need[C]// Proceedings of the 31st International Conference on Neural Information Processing Systems. Long Beach: Curran Associates Inc.:6000-6010.
- Wang Z, Bovik A C, Sheikh H R, et al, 2004. Image quality assessment; from error visibility to structural similarity[J]. IEEE Trans Image Process, 13(4):600-612.
- Yang C Y, Ma C, Yang M H, 2014. Single-image super-resolution: a benchmark[C]// Proceedings of 13th European Conference on Computer Vision—ECCV 2014. Zurich: Springer:372-386.