
1 一种基于深度学习的相似天气形势预报方法:Synoptic 2 Similarity Net

3 谭江红^{1,2} 袁凯^{3*} 周悦⁴

4 1 全国暴雨研究中心, 武汉 430040

5 2 襄阳市气象台, 襄阳 441021

6 3 武汉市气象台, 武汉 430040

7 4 中国气象局武汉暴雨研究所湖北省重点实验室/中国气象局流域强降水重点开放实验室, 武汉 430205

8 **摘要:** 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
9 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
10 形势识别与预报中的可行性, 本文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
11 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编码器模型,
12 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
13 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
14 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
15 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,
16 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
17 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,
18 展现出良好的应用前景。

19 **关键词:** 天气形势; 相似预报; 深度学习; 相似判据; 检验评估

21 引言

22 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定量化表达。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)。

33 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
34 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
35 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,
36 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,
37 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
38 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),
39 均取得了一定业务应用成果。需要注意的是, 上述研究绝大多数基于单一气象要素和固定高

* 全国暴雨研究开放基金 (BYKJ2025M11)、广西重点研发计划项目 (桂科 AB25069132)、中国气象局

公共服务中心面上项目 (M2024011)、武汉市气象科技联合项目 (2023020201010574) 共同资助

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

通讯作者: 袁凯, 高级工程师, 主要从事天气预报和 AI 技术结合研究.E-mail:yuankai2009@126.com

40 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，
41 这种单一场景的要素数据集根本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
42 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）。
43 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
44 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，
45 2011；朱海峰等，2013）。

46 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
47 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
48 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；
49 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
50 的“人脸识别”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
51 （Krizhevsky et al, 2012）和 Transformer 结构（Vaswani et al, 2017）为主要内核，构建了
52 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
53 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
54 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，
55 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，
56 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。

57 1 资料和方法

58 1.1 资料

59 本文主要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
60 分辨率数值预报资料，起止时间为 1994 年 1 月 1 日—2024 年 9 月 30 日，空间分辨率为 0.25°
61 $\times 0.25^\circ$ ，时间分辨率为 6h，其中 1994 年 1 月 1 日—2020 年 12 月 31 日为训练数据集，2021
62 年 1 月 1 日—2022 年 12 月 31 日为测试数据集，2023 年 1 月 1 日—2024 年 9 月 30 日 ECMWF
63 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
64 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新方法 SSN 的预报能力。

65 1.2 检验方法

66 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
67 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
68 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
69 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
70 化处理。

71 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
72 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
73 构三个不同因素的组合，并通过对上述三个因素的综合相似性来判断两张图像的最终相似
74 程度（Wang et al, 2004），SSIM 介于-1 和 1 之间，当两张图片一模一样时 SSIM 的值等于
75 1，反之则为-1（Yang et al, 2014）。MSE 和 SSIM 的详细计算公式如下：

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (observed_i - predicted_i)^2 \quad (1)$$

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

76 式（2）中， μ_x 和 μ_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

77 场的空间平均值；而 σ_x^2 和 σ_y^2 则是它们的空间方差，通常表示两张图像各自的对比度，在
 78 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）；
 79 σ_{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
 80 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
 81 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
 82 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
 83 由各单通道的 MSE 和 SSIM 平均得到。

84 2 模型的构建

85 2.1 特征量的选取

86 根据前人对华中地区暴雨、大雪和强对流等灾害性天气的研究结果（徐海明等，2001；
 87 许爱华等，2014；张萍萍等，2015；钟敏等，2020；王孝慈等，2021），本文选取 200 hPa
 88 风场，500 hPa 高度场和风场，700 hPa、850 hPa、925 hPa 风场，地面 10 米风场和海平面气
 89 压场等 14 个要素为天气形势的特征量，此外，为了使模型更具有针对性，本文选取范围为
 90 以湖北省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
 91 部和江西中北部的华中地区，经纬度范围为 107~117° E，28~35° N。

92 表 1 14 种特征量列表

93 Table 1 List of 14 predictor variables

94 层次	200 hPa	500 hPa	700 hPa	850 hPa	925 hPa	地面
95 特征量	$u;v$	$u;v;h$	$u;v$	$u;v$	$u;v$	$u;v;msl$

96 2.2 模型的结构与设计原理

97 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
 98 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
 99 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
 100 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
 101 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。

101 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
 102 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
 103 制与输入特征逐通道叠加，位置编码方法如下：

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

104 式（3）中， X 为原始输入特征， P_{lat} 和 P_{lon} 分别是纬度和经度的标准化位置编码。编
 105 码器接收输入张量 $X \in \mathbf{R}^{C \times H \times W}$ ，再通过多层卷积和池化操作，逐步提取特征。其中， \mathbf{R} 表
 106 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

107 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
 108 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
 109 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
 110 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),
 111 其具体实现如下:

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

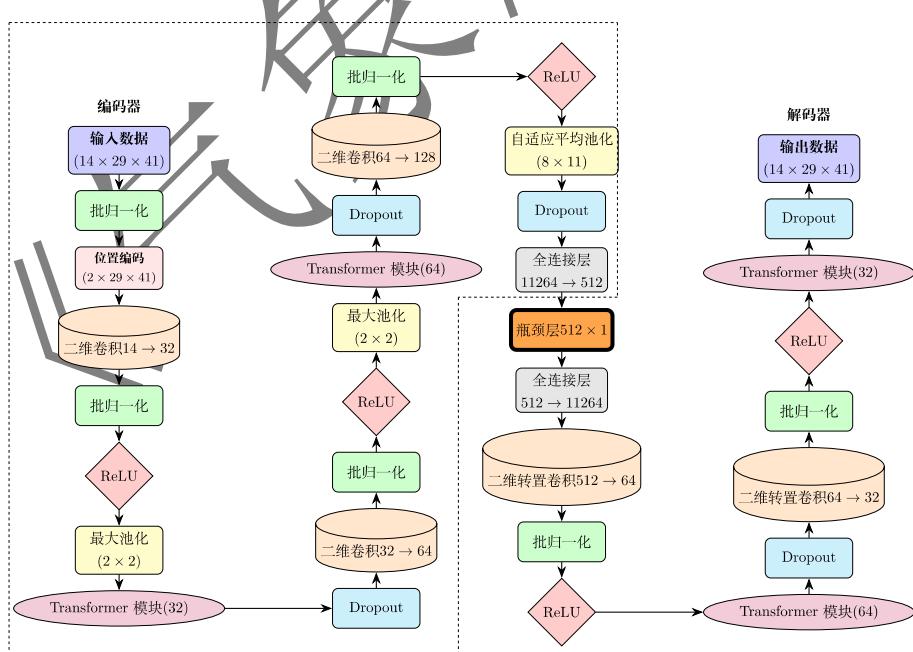
113 式 (4) 中, Q 、 K 、 V 分别表示查询 (Query)、键 (Key) 和值 (Value) 矩阵, d_k 为
 114 键的维度。该机制用于计算输入特征的自注意力, 捕获全局依赖关系。

115 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
 116 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
 117 征图尺寸固定, 最终得到一维的瓶颈层向量。

118 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
 119 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
 120 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。

121 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
 122 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
 123 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,
 124 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。

125 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
 126 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
 127 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。



128
 129 图 1 模型结构图 (虚线框内为编码器, 加粗框内为瓶颈层, 其他部分为解码器)

130 Fig.1 Model architecture (the encoder is in the dashed box, the bottleneck layer is in the bold box, and the remaining parts form the
 131 decoder)

2.3 模型的训练和部分超参数

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, 有效的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

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	$10^{-3} \sim 10^{-4}$	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, 下面给出了 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 上位势高度和地面上的海平面气压的梯度, 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 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。不过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, 700~925 hPa 风场的 SSIM 均在 0.8 以上; 而从 MSE 来看, 925 hPa 上的 MSE 最高也仅为 0.03, 200 和 500 hPa 上 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, 模型的反演与实况均非常吻合, 尤其是对于 700~925 hPa, 模型的效果更佳, 表明模型的构建较为成功, 训练后的模型能准确提取各层特征量的空间信息。

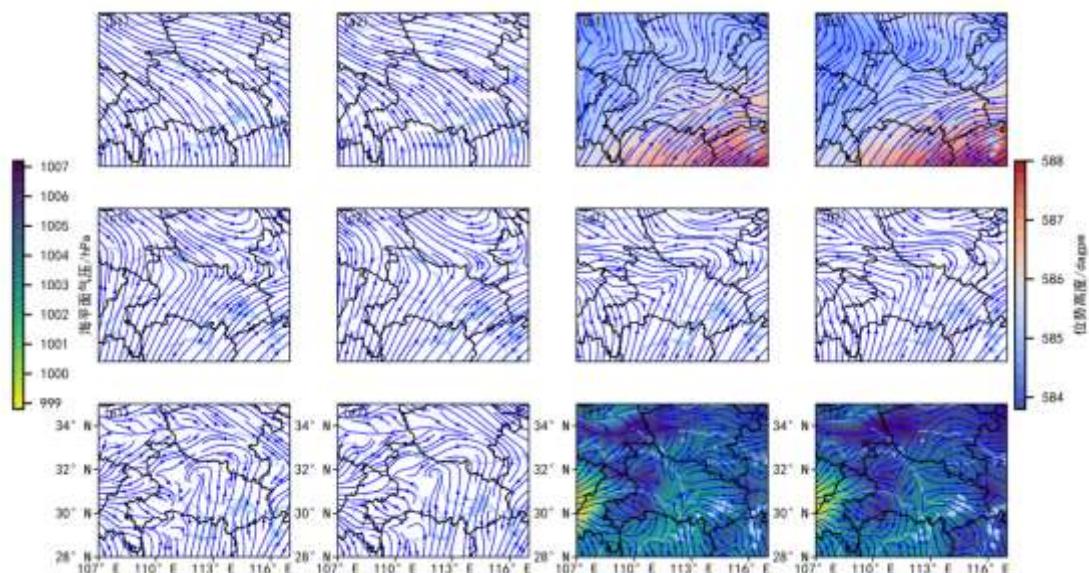


图 2 2024 年 7 月 14 日 02 时 (北京时) 原始形势场和模型提取特征所重建的形势场对比 (其中 a1、b1、c1、d1、e1、f1 分别为 200、500、700、850、925 hPa 和地面风场实况, b1 和 f1 中填色分别为 500 hPa 位势高度和海平面气压, a2~f2

159 则分别为相对应层次的实况经深度学习模型提取重建后的特征量)

160 Fig.2 Comparison of original field and the field extracted by deep learning mode at 0200BT 14 Jul 2024(a1、b1、c1、
161 d1、f1 are 200、500、700、850、925 hPa and surface wind field respectively, the colors in b1 and f1 are geopotential height at 500 hPa
162 and sea level pressure, a2 to f2 are characteristic field extracted by deep learning mode correspondence level respectively)

163 表 3 2024 年 7 月 14 日 02 时 (北京时) 深度学习模型重建形势各层的 MSE 和 SSIM

164 **Table 3 SSIM and MSE of different levels extracted by deep learning mode at 0200BT 14 Jul 2024**

指标\层次	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

165

166

167 **2.5 相似判据的选择**

168 将应用数据集输入训练好的模型, 便得到了对应时段经过模型提取的三维特征量 (一维
169 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
170 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
171 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
172 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 45d
173 (董良淼等, 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
174 出现次数最多的时间点作为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
175 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
176 的“值”相近 (罗阳等, 2011; 朱海峰等, 2013)。

177 **3 相似结果检验**

178 **3.1 整体检验评分**

179 表 4 是应用数据时段内基于深度学习模型 SSN 和 3 种常规相似判据方法各自寻找的历
180 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,
181 为 0.5, 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
182 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% 之间。此外 SSN
183 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,
184 达 0.3, 相较于传统方法, SSN 的 MSE 同样降低明显, 降低幅度在 19.2%~30% 之间。上述
185 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
186 场, 而且空间分布也与原始形势更加吻合。

187 表 4 应用数据时段 SSN 和 3 种常规相似方法在各层平均的 MSE 和 SSIM

188 **Table 4 Mean SSIM and MSE of SSN and three traditional similar methods during the application period**

指标\方法	SSN 方法	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

189

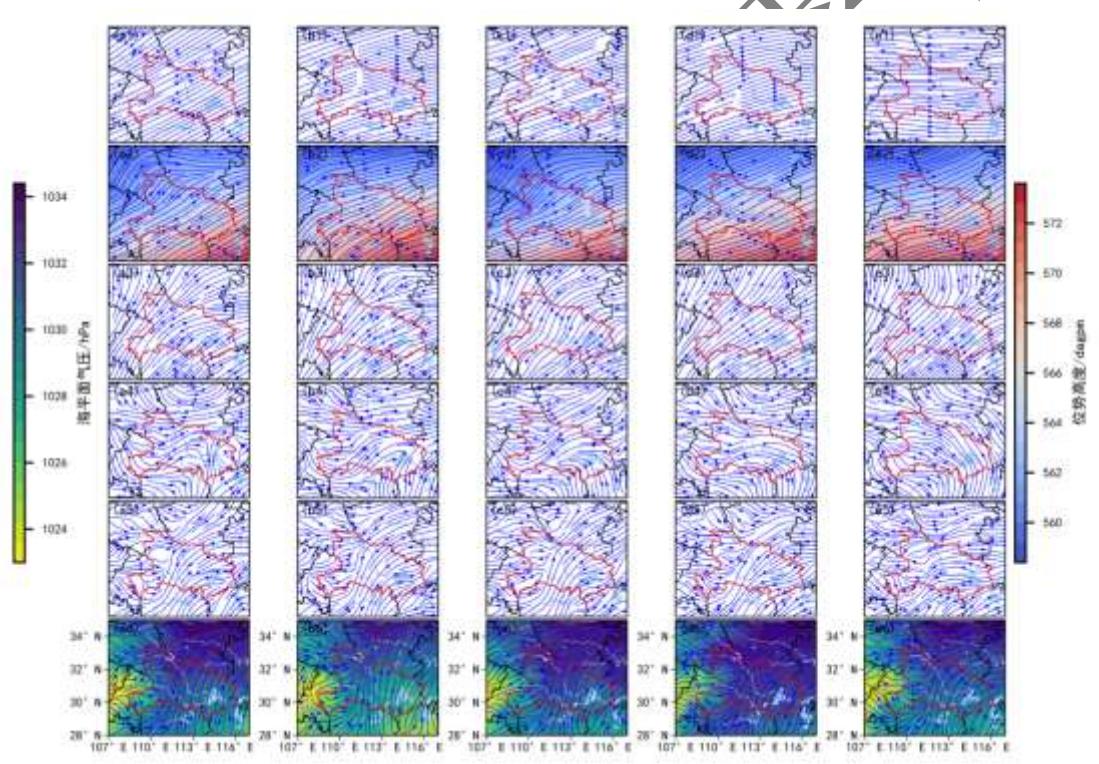
190 **3.2 应用时段个例分析**

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

194 3.2.1 2024年2月2日02时相似检索示例与评估

195 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
196 中部中到大雪，局部暴雪，江汉平原还伴有明显的雨凇，中东部地区普遍降水10~30mm，
197 其中2日01—04时降水呈东北—西南向带状分布，位于荆州东部至黄冈北部一带。此次过
198 程环流形势表现为：500hPa上南支槽和副热带高压共同影响，对流层低层西南气流和偏东
199 路冷空气在湖北中部交汇（陈璇等，2024；王珊珊等，2023）。实况2日01—04时降水主
200 要发生在700hPa西南气流左侧和850hPa切变线南侧，较强降水则主要位于850hPa切变
201 线的南侧。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合，
202 尤其是700hPa上急流的形态以及850hPa上切变线的位置与实况非常接近，而欧氏距离、
203 皮尔逊和切比雪夫3种方法其850hPa上的切变线较实况均明显偏东偏南，且切变线两侧风
204 向的辐合强度也偏弱，此外，切比雪夫200hPa上气流过于平直，925hPa上偏东风反映过度。
205 各种方法寻找得到的相似个例时间及天气见表5。

206 从客观指标来看（表6），200hPa和500hPa上皮尔逊相关的SSIM最高，SSN排第二，
207 SSN的SSIM在700hPa及以下层次均最高，而MSE除200hPa和地面外亦均最低，但也为
208 仅次于最优方法的第二方法。



210
211 图3 2024年2月2日02时（北京时）原始形势场和各方法寻找到的历史最佳相似形势场（a~e依次为实
212 况环流场和经过SSN、皮尔逊相关、欧氏距离和切比雪夫得到的历史最佳相似个例，1~6分别为200、500、700、850、925hPa
213 和地面风场，2和6中填色要素同图2）

214 Fig. 3. The original synoptic fields at 0200BT on 2 Feb 2024 and the corresponding best historical analogs
215 retrieved by different methods. Panels a-e show the observed fields and the best analogs obtained by SSN, Pearson
216 correlation, Euclidean distance, and Chebyshev distance, respectively. Panels 1~6 correspond to the wind fields at
217 200, 500, 700, 850, and 925 hPa and at the surface, respectively. Shading in panels 2 and 6 represents the same
218 variables as in Fig. 2

219 表5 SSN和3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

220 **Table 5 Best historical analogs and its weather in Hubei Province retrieved by SSN and three traditional**
 221 **similar methods at 0200BT on 2 Feb 2024**

日期\方法	SSN 方法	皮尔逊相关	欧氏距离	切比雪夫
日期	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

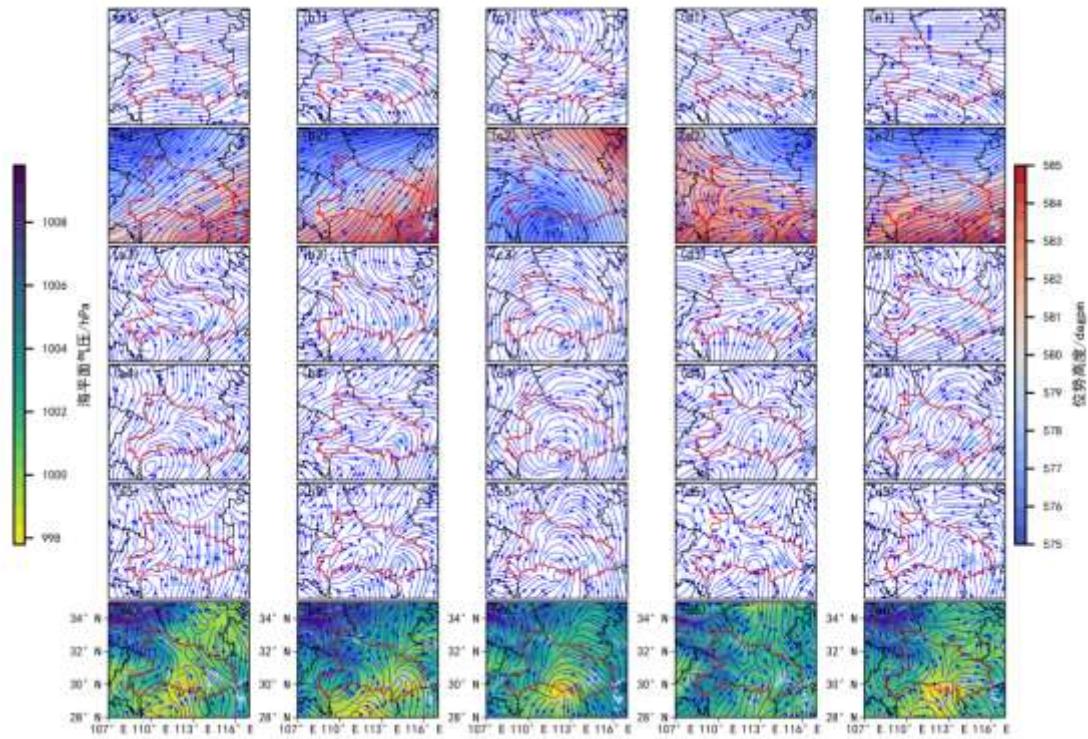
222
 223 **表 6 2024 年 2 月 2 日 02 时 (北京时) SSN 和 3 种常规相似方法在各层的 MSE 和 SSIM**
 224 **Table 6 SSIM and MSE of different levels retrieved by SSN and three traditional similar methods at 0200BT**
 225 **on 2 Feb 2024**

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

226
 227 **3. 2. 2 2024 年 7 月 1 日 08 时相似检索示例与评估**
 228 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
 229 暴雨, 暴雨以上站点 21 个, 大暴雨以上站点 12 个, 其中 1 日 07—10 时降水呈东北—西南
 230 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 上
 231 西风槽逼近副高, 700 hPa 上急流发展, 并形成湘西北—湖北中部—豫南的呈东北—西南走
 232 向的暖式切变线, 850 hPa 上切变线走向与 700 hPa 近乎平行, 其位置偏东偏南约 50~100km。
 233 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
 234 线附近。

235 对比 SSN 和传统方法的结果来看 (图 4), SSN 方法对 500 hPa 位势梯度以及对流层中
 236 低层的风向反映良好, 其对 700 hPa 和 850 hPa 切变线的形态和位置的把握最接近实况, 而
 237 欧氏距离不仅错误反映了 500 hPa 上的位势梯度和风向以及 700 hPa 上湖北中部的低涡, 而
 238 且其 850 hPa 上切变线的走向较实况更陡峭, 其位置也更加偏西; 皮尔逊各层风场均出现较
 239 大误差, 其主要表现为 500 hPa 及以下为位于湘鄂交界的强的低涡; 切比雪夫则对 700 hPa
 240 切变线没有反映, 此外其 850 hPa 上也有位于湖北中部的低涡。其降水分布和强度不仅取决
 241 于系统, 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)。

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



245

246 图 4 2024 年 7 月 1 日 08 时 (北京时) 原始形势场和各方法寻找的历史最佳相似形势场 (a-e 依次为实况环
 247 流场和经过 SSN、皮尔逊相关、欧氏距离和切比雪夫得到的历史最佳相似个例, 1~6 分别为 200、500、700、850、925hPa 和地
 248 面风场, 2 和 6 中填色要素同图 2)

249 Fig. 4. The original synoptic fields at 0800BT on 1 Jul 2024 and the corresponding best historical analogs retrieved
 250 by different methods. Panels a-e show the observed fields and the best analogs obtained by SSN, Pearson
 251 correlation, Euclidean distance, and Chebyshev distance, respectively. Panels 1~6 correspond to the wind fields at
 252 200, 500, 700, 850, and 925 hPa and at the surface, respectively. Shading in panels 2 and 6 represents the same
 253 variables as in Fig. 2

254 表 7 SSN 和 3 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

255 **Table 7 Best historical analogs and its weather in Hubei Province retrieved by SSN and three traditional
 256 similar methods at 0800BT on 1 Jul 2024**

日期\方法	SSN 方法	皮尔逊相关	欧氏距离	切比雪夫
日期	2021-7-2	1997-7-6	1996-6-23	2011-6-9
天气	中到大雨, 鄂东暴雨 雨到大暴雨	小到中雨, 南部中到大雨	小到中雨, 江汉平原南部—鄂东北大到 暴雨	中到大雨, 江汉平原中部 —鄂东北暴雨到大暴雨

257

258 表 8 2024 年 7 月 1 日 08 时 (北京时) SSN 和 3 种常规相似方法在各层的 MSE 和 SSIM

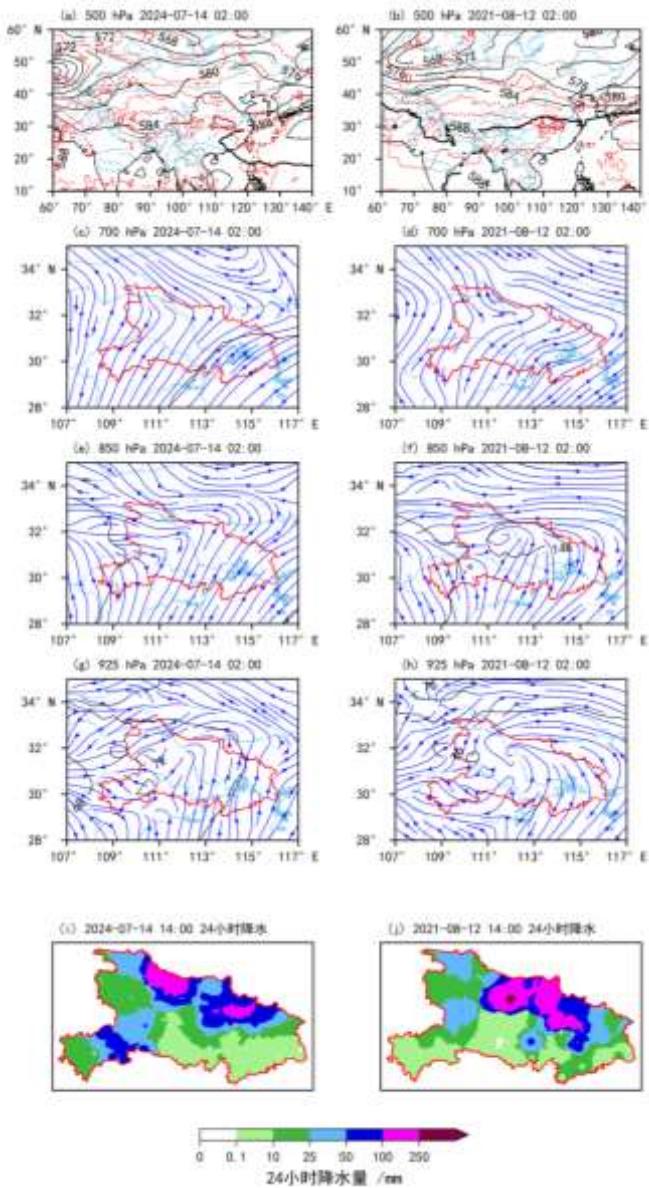
259 **Table 8 SSIM and MSE of different levels retrieved by SSN and three traditional similar methods at 0800BT
 260 on 1 Jul 2024**

指标\方法	SSN 方法	皮尔逊相关	欧氏距离	切比雪夫
200 hPa	0.20	0.09	0.18	0.19
500 hPa	0.70	-0.22	0.05	0.39

SSIM	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
	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
MSE	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

261 3.2.3 天气会商预报应用典例

262 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
 263 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
 264 报同样落区范围、强度偏小, 可能原因在于一般认为脊区无法强迫出太强的低值或辐合系统。
 265 在 7 月 13 日应急会商中, 襄阳本地预报员利用 SSN 模型提取欧洲中心 24 小时形势场预报
 266 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
 267 700、850 hPa)较为相似, 考虑到 8-12 过程数值模型同样低估, 果断将数值预报降水量级向
 268 上调整, 给出“预计当夜过程与 2021 年 8-12 过程系统类似, 襄阳中东部会出现 200 毫米以
 269 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
 270 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
 271 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
 272 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
 273 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
 274 和 850 hPa 暖切变形势基本类似, 只是 850~925 hPa 低涡流场后者相比前者更加闭合, 同时
 275 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撑了预报结论: 如果没有模型
 276 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
 277 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
 278 降水分布为相似环流时间前后 12 小时), 强降水主落区位于襄阳、随州、孝感北部、黄冈西
 279 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
 280 非槽前有关, 也与 700 hPa 低涡切变走向有关。



281
282 图 5 2024 年 7 月 13 日应急会商中的历史相似个例检索 (a, b 为 500 hPa 位势高度场, 单位: 10 位势米; c~h 为 700、
283 850、925 hPa 流场, i, j 为降水量统计, 单位: 毫米, 左为 2024 年 7 月 14 日, 右为 2021 年 8 月 12 日)
284

285 Fig.5 Retrieval of a historical analog during the emergency forecast consultation on 13 Jul 2024. Panels a-b show
286 500 hPa geopotential height (dagpm); panels c-h show wind fields at 700, 850, and 925 hPa; panels i-j show
287 accumulated precipitation (mm). The left column corresponds to 14 Jul 2024, and the right column corresponds to
288 12 Aug 2021

289 4 结论与讨论

290 4.1 结论

291 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
292 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
293 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,

294 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
295 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
296 对应用时段该方法的效果进行了详细检验和评估,得到以下主要结论:

297 (1) SSN 的 SSIM 最高,较三种传统方法 SSIM 提高幅度在 56.3%~78.6% 之间;此外,
298 SSN 的 MSE 最低,较传统方法 MSE 的降低幅度在 19.2%~30% 之间。SSN 所找到的最佳历
299 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。

300 (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
301 流实况相比在绝大多数情况下均最相近,尤其是 500~925 hPa 层次,效果尤为明显;检验指
302 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
303 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
304 可发挥重要作用。

305 4.2 讨论

306 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
307 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
308 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
309 天气过程来对各层形势的权重进行调整,是我们后期研究的重要方向。另外扩展样本后,
310 找到最佳历史相似的概率将会进一步增大。

311 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
312 汽、热力、动力和不稳定等条件的有利配合,因此,后期我们将引入各类环境要素,并结合
313 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。

315 参考文献

- 316 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
317 K, Li S F, et al, 2009. Similar prediction method in Zhongwei city of Ningxia in the application of short-term weather forecasts[J].
318 Ningxia Eng Technol, 8(2): 101-104 (in Chinese).
- 319 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,
320 Shang K Z, Zhou H, et al, 2012. Application of analog forecast to 4-10 day wind forecasting around Bohai Sea[J]. Meteor Sci
321 Technol, 40(2): 219-225 (in Chinese).
- 322 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,
323 Chen S N, et al, 2024. Observational and causal analysis of the extreme freezing in Hubei Province in early February 2024[J]. Torr
324 Rain Disas, 43(6): 668-679 (in Chinese).
- 325 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.
326 Comparison of several analogue arithmetic for synoptic situation field[J]. J Meteor Res Appl, 29(3): 1-5 (in Chinese).
- 327 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,
328 Wang S G, et al, 2018. Application of analog forecast method in cloud cover prediction in Shanxi Province[J]. J Arid Meteor, 36(5):
329 845-851 (in Chinese).
- 330 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,
331 Mu J H, et al, 2012. Operational system of thunder/lightning potential forecasting based on similar deviation for Ningxia[J]. Meteor
332 Sci Technol, 40(2): 304-309 (in Chinese).
- 333 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].
334 Acta Meteor Sin, 44(2): 174-182 (in Chinese).

- 335 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,
336 Zhou G B, Deng C Z, et al, 2023. Hourly temperature forecast technology in Chongqing based on similar weather phenomena[J].
337 Desert Oasis Meteor, 17(2): 106-113 (in Chinese).
- 338 李宇中, 董良淼, 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
339 M, Liang C G, et al, 2024. A comprehensive weather similarity analysis method and its application in meteorological forecast
340 services[J]. Meteor Sci Technol, 52(4): 571-582 (in Chinese).
- 341 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,
342 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
343 Chinese).
- 344 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,
345 Jiang Z H, 2007. The influence of aggravated global warming on the probability of extreme climatic event[J]. Plateau Meteor, 26(4):
346 837-842 (in Chinese).
- 347 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.
348 Algorithm study on similarity retrieval of typhoon tracks[J]. Meteor Mon, 32(7): 18-24 (in Chinese).
- 349 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,
350 2013. Study on similarity retrieval method for ambient field of tropical cyclones[J]. Meteor Mon, 39(12): 1609-1615 (in Chinese).
- 351 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
352 exploration on the applicability of similarity parameter in similarity forecasting[J]. Meteor Mon, 37(11): 1443-1447 (in Chinese).
- 353 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,
354 2020. Research of intelligent retrieval and visualization of similar typhoons[J]. Meteor Mon, 46(10): 1330-1339 (in Chinese).
- 355 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,
356 Li Y H, He H G, et al, 2017. Application of analogous precursor circulation anomaly method to extended-range weather forecast in
357 Chongqing[J]. Meteor Sci Technol, 45(1): 72-78 (in Chinese).
- 358 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,
359 Chen X, et al, 2023. Comparison and forecast deviation analysis of two snow and rain events in Hubei Province in 2022[J]. Meteor
360 Mon, 49(7): 819-829 (in Chinese).
- 361 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.
362 Wang X C, Li S J, Meng Y J, 2021. Characteristics and difference analysis of main rainstorm processes in Yangtze River Basin from
363 June to July during 2016-2020[J]. J Arid Meteor, 39(6): 921-929 (in Chinese).
- 364 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,
365 Sun J S, Xu D B, et al, 2014. Basic synoptic situation classification and element character of severe convection in China[J]. Meteor
366 Mon, 40(4): 400-411 (in Chinese).
- 367 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
368 method of aerological temperature and pressure fields of spring hailfall's short-range forecast in Guizhou[J]. Plateau Meteor, 22(4):
369 426-430 (in Chinese).
- 370 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,
371 Zhou B, 2001. Common features of synoptic systems related to heavy rainstorms in the middle Changjiang river basin during
372 summer[J]. J Appl Meteor Sci, 12(3): 317-326 (in Chinese).
- 373 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,
374 Huang Y Q, et al, 2003. Tests for conventional similarity criterions and application of composite similar coefficient[J]. Meteor Sci
375 Technol, 31(4): 211-215 (in Chinese).
- 376 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,
377 Deng Z H, et al, 2012. Estimating the prediction errors of dynamical climate model on the basis of prophase key factors in North
378 China[J]. Chin J Atmos Sci, 36(1): 11-22 (in Chinese).

- 379 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
380 al, 2015. Contrast analysis of two snowfall events in Hubei 2013[J]. Meteor Mon, 41(4): 418-426 (in Chinese).
- 381 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,
382 Chen M, Fan S Y, 2023. Correction of wind speed forecast deviations at ground stations based on Monin-Obukhov similarity
383 theory[J]. Meteor Mon, 49(5): 624-632 (in Chinese).
- 384 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
385 step recommanding factor field[J]. Meteor Mon, 26(3): 22-27 (in Chinese).
- 386 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
387 M M, et al, 2020. Characteristics of extreme precipitation weather situation and physical quantity anomaly in central China[J].
388 Meteor Mon, 46(4): 503-516 (in Chinese).
- 389 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
390 G, Lu X Q, Zheng F, et al, 2022. Research on the similarity recognition and application evaluation of subtropical high based on
391 modified VGG16 model[J]. Meteor Mon, 48(12): 1608-1616 (in Chinese).
- 392 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,
393 Shang K Z, et al, 2013. Comparison of Chebyshev polynomials with conventional similarity criteria in the proximity filtering and its
394 application[J]. Plateau Meteor, 32(3): 848-855 (in Chinese).
- 395 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,
396 Zeng Y, et al, 2021. Similarity characteristics analysis of radar echo of a typical strong convection monomer pair[J]. J Arid Meteor,
397 39(6): 974-983 (in Chinese).
- 398 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
399 Amer Meteor Soc, 81(3): 417-426.
- 400 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
401 on Computer Vision and Pattern Recognition. Las Vegas: IEEE: 770-778.
- 402 Hinton G E, Salakhutdinov R R, 2006. Reducing the dimensionality of data with neural networks[J]. Science, 313(5786): 504-507.
- 403 Hu W, Cervone G, Young G, et al, 2023. Machine learning weather analogs for near-surface variables[J]. Boundary-Layer Meteorology,
404 186(3): 711-735.
- 405 Krizhevsky A, Sutskever I, Hinton G E, 2012. ImageNet classification with deep convolutional neural networks[C]//Proceedings of the
406 26th International Conference on Neural Information Processing Systems - Volume 1. Lake Tahoe: Curran Associates Inc.:
407 1097-1105.
- 408 Meehl G A, Karl T, Easterling D R, et al, 2000. An introduction to trends in extreme weather and climate events: Observations,
409 socioeconomic impacts, terrestrial ecological impacts, and model projections[J]. Bull Amer Meteor Soc, 81(3): 413-416.
- 410 Vaswani A, Shazeer N, Parmar N, et al, 2017. Attention is all you need[C]//Proceedings of the 31st International Conference on Neural
411 Information Processing Systems. Long Beach: Curran Associates Inc.: 6000-6010.
- 412 Wang Z, Bovik A C, Sheikh H R, et al, 2004. Image quality assessment: From error visibility to structural similarity[J]. IEEE Trans Image
413 Process, 13(4): 600-612.
- 414 Yang C Y, Ma C, Yang M H, 2014. Single-image super-resolution: a benchmark[C]//Proceedings of 13th European Conference on
415 Computer Vision -- ECCV 2014. Zurich: Springer: 372-386.
- 416

417 A Deep Learning-Based Method for Weather Situation Similarity

418 Forecasting: Synoptic Similarity Net

419 Tan Jianghong^{1,2} Yuan Kai^{3*} Zhou Yue⁴

420 1 Heavy Rainfall Research Center of China, Wuhan 430040

421 2 Xiangyang Meteorological Observatory of Hubei Province, Xiangyang 441021
422 3 Wuhan Meteorological Observatory of Hubei Province, Wuhan 430040
423 4 Hubei Key Laboratory for Heavy Rain Monitoring and Warning Research/China Meteorological Administration Basin Heavy Rainfall
424 Key Laboratory, Institute of Heavy Rain, China Meteorological Administration, Wuhan 430205

425 **Abstract:** Analog forecasting is a widely adopted statistical method in operational meteorological
426 services. However, traditional single-layer similarity approaches suffer from several limitations:
427 lack of three-dimensional spatial information, unstable performance of single similarity criteria,
428 and frequent interference from weather system pattern and intensity (magnitude). To address these
429 challenges and explore the feasibility of deep learning models in weather pattern recognition and
430 forecasting, this study develops a novel approach using the ECMWF fifth-generation reanalysis
431 (ERA5) dataset. We construct a deep learning architecture that integrates Convolutional Neural
432 Networks (CNN) with Transformer modules, incorporating self-attention mechanisms, which
433 effectively capture three-dimensional spatial features of weather patterns. Building upon the
434 extracted feature vectors, we design a comprehensive similarity framework that combines three
435 complementary metrics: Pearson correlation (emphasizing pattern shape), Euclidean distance
436 (emphasizing magnitude), and Chebyshev distance (considering both shape and magnitude). This
437 integration forms our proposed method: Synoptic Similarity Net. Comprehensive evaluation
438 demonstrates superior performance of our approach. The method achieves the highest average
439 Structural Similarity Index (SSIM) and lowest Mean Squared Error (MSE) compared to
440 conventional methods, demonstrating significant improvements in both metrics. Case studies
441 across seasons confirm that the historical analogs identified by Synoptic Similarity Net exhibit
442 both greater numerical accuracy and superior spatial pattern consistency compared to the original
443 fields. These results demonstrate the promising potential of this method for operational
444 meteorological applications.

445
446 **Key words:** weather situation; analog forecast; deep learning; similarity criterion; evaluation and
447 verification