© 2026 IEEE。本文为作者版本，已发表于 IEEE可视化与计算机图形学汇刊。本文最终版本可在此处获取：
xx.xxxx/TVCG.201x.xxxxxxx/

大气阻塞事件的时空检测与不确定性可视化

Mingzhe Li PeerNowack 和 Bei Wang

摘要——大气阻塞事件是准定常高压系统，会扰乱极地和副热带气流的典型路径，常导致持续时间较长的极端天气事件，例如夏季热浪或冬季寒潮。尽管大气阻塞事件在塑造中纬度天气方面至关重要，但要在长期气象记录中准确模拟和分析此类事件，仍是一项重大挑战。为应对这一挑战，我们提出了一个用于检测和表征大气阻塞事件的不确定性可视化框架。首先，我们介绍了一种基于几何的检测与追踪方法，并在工业化前气候模型模拟（UKESM）和再分析数据（ERA5）上进行了评估。后者是利用天气模型将卫星观测和站点测量同化到规则数值网格中而得到的历史地球观测数据。其次，我们提出了一套考虑不确定性的摘要方法：用于捕捉代表性边界及其变异性的等值线箱线图、用于编码发生情况的频率热力图，以及用于呈现这些模式随时间变化的三维时间堆叠图。第三，我们通过一项关于2003年欧洲热浪的案例研究展示该框架，利用这些摘要方法描绘大气阻塞事件的时空发生情况。总体而言，这些不确定性可视化揭示了大气阻塞事件最可能发生的位置，以及其空间足迹如何随时间演变。我们认为，该框架可为气候科学家和气象学家提供有价值的工具：通过分析不同区域和气候情景下阻塞频率、持续时间及强度的变化，它既支持对历史大气阻塞事件的研究，也有助于评估与阻塞相关的极端天气变化所带来的情景依赖型气候风险。

索引词——不确定性可视化、大气阻塞事件、特征检测、特征跟踪、天气科学、气候科学、气象学、可视化应用。

arXiv:2601.00775v1 [cs.GR] 2 Jan 2026

1 引言

大气阻塞事件是发生在中纬度地区的大尺度、持久性天气模式。其显著特征是准静止的高压系统在某个地理区域停留数日（通常为五天或更久），扰乱极地急流的常规路径 [26,36]。阻塞事件常与极端天气有关，尤其是夏季热浪和冬季寒潮 [20,55]。它们通过改变周围的大气环流，也与上游和下游的极端天气有关，例如2023年9月利比亚和希腊中部发生的毁灭性洪灾，其成因是中欧上空的欧米伽型阻塞事件 [37]。因此，分析阻塞事件发生情况的趋势——无论是跨洲际的趋势，还是气候变化模拟中的趋势——对科学界乃至整个社会都至关重要。

然而，要在长期大气时间序列中检测并描述阻塞事件，仍是一项艰巨的任务。阻塞事件的特征是准静止的高压异常，通常会在某个地理区域上空持续五天或更久。乍看之下，这似乎很容易定义和检测，但不同阻塞事件的特征差异很大 [20], , 因而其定义和检测存在歧义。阻塞指数通常根据关键动力变量（如位涡、位势高度、位温和海平面气压）的不同异常及梯度来定义阻塞。因此，采用不同的阻塞指数会导致阻塞事件的频率和空间分布出现显著差异 [46]。

另一项挑战在于如何在最先进的气候模型中表征阻塞。这些模型对于估算未来不同情景下气候和大气动力学的变化至关重要。尽管取得了显著进展，包括提高空间分辨率 [42], 与观测数据相比，气候模型中的阻塞频率仍存在系统性低估偏差 [56]。

总之，持续推进对情景依赖型未来阻塞事件频率及特征变化的建模与分析，对于理解极端天气事件可能发生的变化至关重要。这需要采用稳健的方法，自动检测从数十年到数百年尺度的气候模拟中的阻塞事件。理想情况下，这类方法还应捕捉事件的详细特征，包括高压系统的大小、其水平和垂直结构、持续性，以及其发生可能性的季节性和区域变异性。

为应对这些挑战，Thomas 等人近期基于约 41 年的 ERA5 再分析观测数据 [16]和一项为期 101 年的气候模型模拟 [43], 构建了欧洲大气夏季阻塞事件的专家标注真实数据集 [46] 。借助该数据集，他们证明，基于自组织映射的机器学习方法优于主要的阻塞指数。然而，他们的方法无法提供阻塞事件时空特征的详细信息，而这些信息对于长期分析阻塞的气候变化至关重要。

在 Thomas 等人 [46], 的研究基础上，我们旨在改进相关方法，以刻画不同地区和气候情景下阻塞频率、持续时间和强度的变化，从而更全面地评估持续性极端事件的风险及其时空特征。为此，我们提出了一种不确定性可视化框架，用于检测和刻画多个时空尺度上的阻塞事件变化。我们的贡献如下：

- **基于几何的检测与追踪**。 我们提出了一种基于几何的流程，可从预处理后的位势高度场中识别并追踪高压系统，生成具有良好可解释性和可复现性的结果。
- **提升检测质量**。 与两个基准阻塞指数 SOM-BI [46]和 DG83 [8], 相比，我们的框架在再分析（ERA5）和气候模型（UKESM）数据集上均实现了更高的检测准确率和 F1 分数（以专家标注的真实标注为基准进行评估）。
- **以事件为中心的表示**。 与提供模式标签而非离散事件的 SOM-BI 不同，我们的方法会明确检测并追踪各个阻塞事件，并将其空间足迹（边界、面积、持续时间和轨迹）作为主要

• *Mingzhe Li* 任职于圣母大学；此项工作是在犹他大学任职期间完成的。电子邮箱：*mli33@nd.edu*
• *Peer Nowack* 任职于卡尔斯鲁厄理工学院。电子邮箱：*peer.nowack@kit.edu*
• *Bei Wang* 任职于犹他大学。电子邮箱：*beiwang@sci.utah.edu*

稿件收到日期：*xx xxx. 201x*；接受日期：*xx xxx. 201x*。出版日期：*xx xxx. 201x*；当前版本日期：*xx xxx. 201x*。如需获取本文的抽印本，请发送电子邮件至：*reprints@ieee.org*。数字对象标识符：*xx.xxxx/TVCG.201x.xxxxxxx*

表示形式和后续分析的基础。

• **不确定性感知摘要**。在事件表示的基础上，我们提出了不确定性感知可视化方法，包括等值线箱线图、频率热力图和三维时间堆叠图，可简洁地呈现阻塞事件的典型结构、离散度、位置和季节演变。据我们所知，这些事件级不确定性摘要是对阻塞研究的一项创新贡献，并补充了现有的阻塞指数。

2 相关工作

大气阻塞指数。大气阻塞与中纬度极端天气事件密切相关。每次阻塞事件的主要特征是准静止高压系统。虽然地面气压变化中可以观察到这一特征，但在用于表征大尺度天气系统的其他大气动力变量中，通常表现得更为明显，例如对流层中部位势高度异常。由于高压系统的性质及其带来的晴空条件，阻塞会导致局部地区夏季出现异常温暖的天气，也会使冬季寒冷的日子更加寒冷。此外，阻塞事件会影响周边的大气背景环流，从而导致异常的热输送模式。因此，阻塞相关热浪中的最热区域往往位于主要高压系统之外。由于会影响大尺度大气环流，阻塞还可能导致其他地区出现极端降雨。例如，9月，欧洲上空的一次欧米伽型阻塞事件将一场低压风暴困在希腊中部，造成持续数日的极端降雨，随后引发灾难性洪水 2023 [37]。

为了更好地理解阻塞，并研究气候变化下阻塞频率和持续时间等因素的变化所带来的影响，气象学家开发了多种方法，以便在较长的大气动力时间序列中自动检测阻塞。由于人工标注事件似乎难以实现，这些方法大多采用若干主要的阻塞指数（BIs），这些指数旨在客观识别事件 [8,23,31,46,47]。值得注意的是，尽管以往对阻塞指数的比较显示出相似的气候态（即某一空间区域内长期平均阻塞频率的分布图），研究也发现了显著差异。这些差异自然引出了一个问题：如何客观衡量阻塞检测的效果，以及这种衡量是否应考虑气象季节 [3,7,32,46]。因此，Thomas 等人 [46] 为欧洲夏季阻塞事件推出了一个由专家标注的真实标注数据集。在对三种广泛使用的阻塞指数进行比较时，Dole 和 Gordon 开发的指数（本文称之为 DG83 ） [8] 表现最佳；他们还证明，另一种基于自组织映射 [21] 对天气状态进行分类的机器学习方法，进一步提升了阻塞检测的性能。他们将该指数称为 SOM-BI。下文将使用 [46], 中开发的真实标注数据集，并以 DG83 和 SOM-BI 方法作为基线。

研究阻塞气候学特征的其他常用方法包括通过 K-means 聚类分析研究天气型 [6,10,27,45,49,50]。此外，近期也有一些利用深度学习检测和分析阻塞的研究，包括一种两阶段卷积神经网络方法，该方法使用 BI 作为真实标注，检测并定位全球气候模式输出中的阻塞型态 [29]；以及一种基于 UNet 的模型，旨在根据基于树轮的温度场重建过去一千年的夏季阻塞频率 [19]。另一类相关研究则侧重于利用深度学习模型预报阻塞的维持情况。例如，Zhang 等人 [60] 采用迁移学习训练了一个网络，该网络以 DG83 指数作为真实标注，预测初生的大西洋阻塞在发生数日后是否仍会持续。这一预报目标不同于分析完整时间序列、检测并总结完整阻塞过程的方法。

大气特征追踪。许多大气特征都可以通过特征提取和追踪来检测和分析。除了对阻塞事件有贡献的高压系统，近期研究还使用拓扑感知分割追踪气旋和气压扰动，并在不同阈值和分辨率下分析其稳健性 [54,58,59]。相关流程通过阈值处理提取云对象/云系，并将其在不同时间的轨迹串联起来，以追踪低层云系 [12,24,44],；还通过识别细长的水汽羽流并追踪其在连续时间步中的变化，来追踪大气河 [35,39]。早期研究也利用拓扑学和计算机视觉技术，直接从卫星图像中追踪深对流云 [9,11]。这些研究的共同要素包括：区域/特征提取、匹配连续时刻的特征、处理合并/分裂，以及明确的持续时间和尺寸判据。本着这一思路，我们的阻塞检测方法采用简单的区域重叠判据，以确保高压系统具有准定常性，同时易于复现和比较。

大气事件的不确定性可视化。集合可视化方法可以概括大气事件在不同成员、时间或模式之间的变化。Wang 等人 [51] 根据数据类型、视觉编码和分析任务对这些方法进行了分类，并指出集合通过同一数量的多个实现自然地表达了不确定性；另请参阅其他不确定性可视化综述 [18,30,33]。

在气象学和气候学中，不确定性可视化长期以来一直为集合分析提供支持：Ensemble-Vis 提供交互式概览和统计摘要，以揭示预报和气候应用中的概率特征 [34]；研究人员已分析时变天气集合中的参数敏感性和分辨率效应 [4]；并使用渐变符号和带状图展示基于点或曲线的不确定性（Noodles） [40]；此外，结合拓扑工具对大气河进行不确定性感知可视分析，可概括集合中的变异性和发生情况 [22]。对于以特征为中心的事件摘要，边界或轨迹是主要对象，等值线箱线图通过计算等值线集合的次序统计量，展示代表性边界（中位数）以及中央和外层包络；该方法还扩展至流线、迹线和曲线箱线图，并已用于飓风路径和天气预报集合 [28,53]。这些技术通过揭示大气事件的典型几何形态、离散度和离群值，共同支持对其进行简明概括，并补充了 第 5 节中介绍的频率热力图。

3 技术背景：轮廓箱线图

给定一组等值线，Whitaker 等人 [53] 提出了等值线箱线图，以提供具有统计依据且能体现形状特征的摘要。等值线箱线图包含一条代表性边界、中心离散度以及离群值，类似于经典箱线图，但专为等值线设计。

我们首先回顾经典箱线图及其在概括数据方面的用法。箱线图是对一组数值的简洁概括：它显示中位数，并通过不同百分位数的范围指标来呈现这组数据的离散度。构建箱线图的关键步骤之一是选择合理的中心值（即中位数）。一种方法是根据某个值位于其他数值所构成的数对之间的频率来定义中位数，我们称之为该值在一组数据中的*带深度* 。对于一维数据，一个数值的带深度是包含该数值的所有成对区间所占的比例；深度最高的数值即为中位数。例如，对于一组数值$\{2,4,5,7,12\}$，共有 10 个成对区间。数值 5 位于其中 4 个区间内，分别是 $\{2,7\}$、 $\{2,12\}$、 $\{4,7\}$和 $\{4,12\}$。与此同时，4 和 7 分别位于 3 个区间内，而 2 和 12 则不在任何区间内。因此，数值 5 的深度最高，是这组数据的中位数。

等值线箱线图将箱线图的概念从数值扩展到等值线。给定一个等值线集合，我们为每条等值线分配一个带区深度分数：对于每一对等值线，取它们之间的区域（即它们的*带区*）；某条等值线的深度，就是包含它的成对带区所占的比例。位于许多其他等值线对之间 的等值线被认为更居中；很少落在其他等值线之间的则被视为离群值。等值线箱线图通过按带区深度对等值线排序，来编码等值线形状的分布：中位数等值线是深度最高（最居中）的等值线；中心包络（例如 50%）显示等值线中间部分通常所在的位置；外层包络（例如 100%）则显示所有等值线的完整离散度，并可选择标记深度极低的离群值。这样，一张图便能直接通过等值线的形状展示其典型位置及其周围的变异性。

© 2026 IEEE。本文为作者版本，已发表于 IEEE可视化与计算机图形学汇刊。本文记录的最终版本可在以下网址获取：
xx.xxxx/TVCG.201x.xxxxxxx/

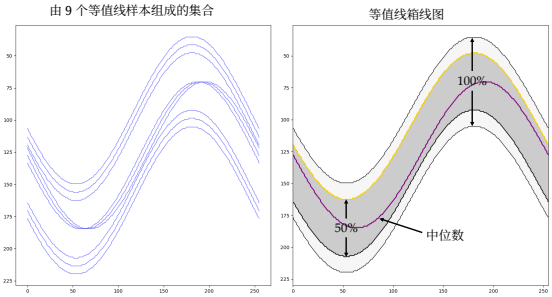

图 1：等值线箱线图示例。左图：由水平和垂直方向上发生偏移的正弦波生成的九条等值线组成的集合。右图：等值线箱线图，显示中位数等值线（紫色）、50%中心包络（灰色内带）和100%包络（浅灰色外带）。

我们通过图 1中的简单等值线集合来阐释这一概念。左图展示了由水平和垂直方向上发生偏移的正弦波生成的等值线，右图则用等值线箱线图概括该集合。紫色中位数曲线（即带深度最高、最居中的等值线）刻画了中心趋势。灰色内带表示50%中心包络，其中包含最居中的五条等值线；外带表示100%包络，涵盖全部九条等值线的完整离散度，并凸显峰值和谷值处的分歧。简言之，中位数提供了集合的代表性形状，而包络则呈现其变异性。

4 数据集与预处理

本节介绍在检测和特征刻画阻塞事件之前所进行的数据准备步骤。

4.1 数据集

我们的实验使用两个数据集。第一个是**ERA5**，由欧洲中期天气预报中心（ECMWF）制作的第五代全球再分析数据 [16], , 可作为观测数据的替代。ERA5 提供多种大气状态变量的逐小时估计值，包括位势、海平面气压和风速，原始空间分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$。在分析中，我们通过对每个 4×4 网格单元块取平均，将数据降采样至 $1^\circ \times 1^\circ$ 分辨率。

第二个数据集源自一项工业化前气候模拟 [43], , 该模拟使用 UK 地球系统模式（**UKESM**）开展，属于第六阶段耦合模式比较计划（CMIP6）的一部分。UKESM 输出（版本 UKESM1-0-LL）的空间分辨率为 $1.25^\circ \times 1.875^\circ$，对应一个包含 144×192 个网格单元的全球网格。

典型的大气阻塞事件会持续数天；因此，我们会连续多日追踪高压系统。为提高对微小大气扰动的稳健性，我们对两个数据集均计算日平均值。ERA5 使用 1979 至 2019 年的数据，而 UKESM 则取自前工业模拟中任意定义的时间线[1]，该模拟涵盖 1960 至 2060 年，并采用恒定的气候强迫条件。

真实值数据集。 Thomas 等人 [46] 针对 ERA5 和 UKESM 构建了欧洲阻塞事件的专家标注数据集。在本文中，我们将其视为真实值数据集（GTD）。这些数据集提供二元标签，标示在6月至8月（JJA）期间，欧洲某区域（$30-75^\circ$N，10°W-40°E）是否发生阻塞事件；其定义遵循 IPCC 第六次评估报告 [17]。GTD 的构建遵循阻塞事件至少持续五天的定义。ERA5 GTD 涵盖 1979 至 2019 年每年的 5月28日 至 9月4日；UKESM GTD 则涵盖 1960 至 2060 年每年的 5月27日 至 9月4日，且 UKESM 对每个月均采用标准化的30天日历。

[1]在模拟中，时间线并非真实时间，而是模拟时间索引。

4.2 数据预处理

位势高度。 对于 UKESM 和 ERA5 数据集，我们使用 500百帕处的位势高度（Z_{500}）作为表征大气环流状态的标准变量。位势高度通过将 ERA5 的位势场除以标准引力常数（≈ 9.80665，$\mathrm{m/s^2}$）得到。我们聚焦于 500百帕层，这是诊断阻塞事件时广泛使用的层次 [32, 46], , 因为它距地表足够高，能尽量减少地形效应和边界层噪声的影响，从而凸显大尺度环流型。

位势高度距平。 为更好地表征相对于一年中任意时段预期大气背景场的天气异常，我们遵循先前研究 [15, 32, 46]，分析位势高度异常。首先，我们计算每个网格点处 Z_{500} 场的长期日平均值（LTDM）。具体而言，对于每个位置（纬度$_i$，经度$_i$），我们计算整个数据集时段内每个日历日的 Z_{500} 平均值——UKESM 为 101 年，ERA5 为 41 年——并将其称为日平均值。该过程为每个位置生成一个 365 天的季节循环。

为平滑长期日平均场，我们使用前六个傅里叶谐波近似这一季节循环，从而减少由样本量有限（例如 ERA5 中的 41 年）造成的噪声。所得结果是一个平滑的
气候背景场，我们从每日值中减去该背景场，以获得每日 Z_{500} 异常（示例见 图 2 ）。

形式上，我们将所得每日异常场 定义为 $Z'_{500} = Z_{500} - \hat{Z}^{\mathrm{LTDM}}_{500}$，其中 $\hat{Z}^{\mathrm{LTDM}}_{500}$为平滑后的长期日平均场。此外，我们按照 [46], 对异常场进行线性去趋势处理，以去除 ERA5 中背景变暖的影响，以及 UKESM 中因模式未能充分自旋至工业化前条件而残留的模式漂移。

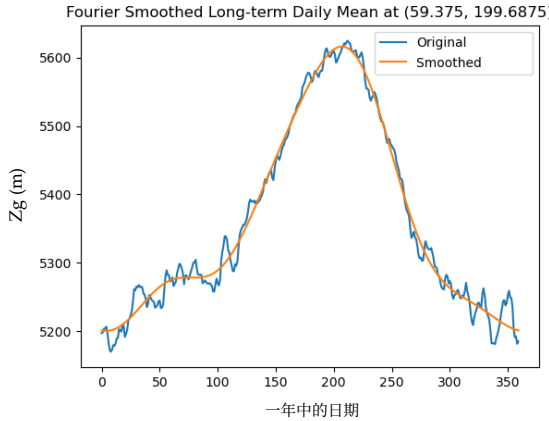

图 2：ERA5数据集：59.375°N、160.3125°W 处位势高度（Zg，单位：米或 m）的长期日平均值（蓝色）及其平滑曲线（黄色）；平滑曲线由保留前六个傅里叶谐波得到。

位势高度异常的标准化。 为了使不同区域和季节的日异常值具有可比性，我们对其进行重新缩放，使较大的数值是相对于当地季节变异性而非单一固定阈值来判定的 [32]。基于上述异常场 Z'_{500}，我们在每个网格单元上计算原始 Z_{500} 场的长期日标准差，记为 $\hat{\sigma}_L$：对每个日历日，计算所有年份的标准差，然后使用前六个傅里叶谐波对所得的 365 天周期进行平滑处理，这与 LTDM 流程一致。

随后，我们将其归一化为 $Z^{\mathrm{norm}}_{500} = \frac{Z'_{500}}{\max(100, \hat{\sigma}_L)}$，其中，100 米的下限可防止背景变率极小的区域或季节出现人为偏大的比值（否则，除以接近零的标准差会放大噪声并导致虚假超阈值）。经过这一步重新缩放后，Z^{norm}_{500} 的值表示某地某个时节的一天有多么异常。随后，将满足 $Z^{\mathrm{norm}}_{500} \geq \lambda$ 的任意连续区域定义为候选高压系统，从而能够在不同区域和季节一致地应用单一阈值 λ。

5 方法

本节概述我们的流程。首先，我们依据基于几何的判据追踪连通高压系统（第 5.1 节）。接着，我们将持续至少五天的系统识别为阻塞事件（第 5.2 节），并在 第 6 节介绍参数调优。最后，我们介绍本文的主要贡献：用于表征阻塞事件时空模式的不确定性可视化框架（第 5.3 节）。

5.1 追踪高压系统

提取高压系统。中纬度阻塞通常与归一化500百帕位势高度异常场中的准定常高压系统有关 Z_{500}^{norm}。对于每一天 t （限于欧洲区域），我们构建超水平集 $S_\lambda(t) = \{x \mid Z_{500}^{\text{norm}}(x,\ t) \geq \lambda\}$.。超水平集分量 定义为该集合中的一个连续区域，表示候选高压系统在当天的覆盖范围。

基于几何的追踪。设 $A \subseteq S_\lambda(t)$ 和 $B \subseteq S_\lambda(t+1)$ 分别为连续两天的分量。我们通过 $\Omega(A,B) = \sum_{x\in A\cap B} w(x)$ 衡量它们经纬度加权的面积重叠，其中 $w(x) = \cos(\text{lat}(x))$。若对于某个阈值 C，$\Omega(A,B) \geq C$，则连接 A 与 B。按天依次处理，可得到捕捉准定常演变的轨迹，同时允许日与日之间存在适度位移。参数的默认值见第 6 节。

系统对应关系的模糊性。由于系统可能出现、消失、合并或分裂，对应关系不一定是唯一的。我们保留所有满足 $\Omega \geq C$ 的轨迹；这些合理的延续关系将用于下文的持续性检验。

5.2 检测阻塞事件

持续性检验与标签。根据 Thomas 等人 [46], ，当一个被追踪的系统持续至少五个连续日时，即存在一个阻塞事件。令 $\mathcal{T}$ 为上述构建的轨迹集合，并令 $D(\tau)$ 表示轨迹 $\tau \in \mathcal{T}$ 覆盖的日历日集合。若某一天 t 满足以下条件，则将其标记为正

$$\exists \tau \in \mathcal{T} \text{ such that } \big|D(\tau)\big| \geq 5 \quad \text{and} \quad t \in D(\tau).$$

也就是说，所有持续时间至少为五个连续日的轨迹所覆盖的日子，都会被赋予正标签。等价地，只要一条轨迹包含任意连续的5日时段，该轨迹上的每一天都会被标记为正；例如，一个持续时间为7月1日至8日的系统，其7月1日至8日均标记为正。

对合并与分裂的稳健性。由于高压系统可能出现、消失、合并或分裂，多条轨迹可能相互作用。我们将阻塞事件定义为在五日时间窗口内保持连续的任意轨迹，而不强制要求系统之间存在唯一对应关系。这种方法能够确保对细微边界变化的稳健性，同时，重叠阈值 C 确保了逐日准定常性。所有标记为正的组成部分构成了我们的阻塞范围集合；其边界即为阻塞边界，用于第5.3节。

5.3 不确定性可视化

虽然高压系统的追踪相对成熟，通常依赖区域重叠判据，但阻塞事件的检测需要仔细进行参数调优（详见第 6 节）。我们的主要贡献是提出一种不确定性可视化框架，用于刻画阻塞事件的时空模式。

阻塞范围在不同日、月和年之间可能有所变化，即使是在同一个日历日期也是如此。为呈现其典型位置及随时间的变化，我们使用三种不确定性感知视觉编码来汇总阻塞事件集合：

- **等值线箱线图**，用于捕捉阻塞边界变化；
- **频率热图**编码了发生情况；
- **3D 时间堆叠图**则将这些模式置于时间脉络中。

为了捕捉不同时时空尺度下阻塞事件的频率、持续时间和强度，我们针对每个数据集构建了多种类型的集合。例如，在涵盖41年的ERA5数据集中，固定的某个日历日（如7月4日）定义了一个日集合，汇集这41年间在该日检测到的所有阻塞事件。同样，固定的某个日历月（如7月）定义了一个月度集合，汇集这41年间该月检测到的所有阻塞事件。类似地，一个夏季（如6月、7月和八月）构成一个季节集合，其中包含这41年间整个夏季检测到的所有阻塞事件。

等值线箱线图。给定一个阻塞事件集合，我们将所有阻塞边界收集为一个等值线集 $\mathcal{G} = \{\gamma_1, \ldots, \gamma_n\}$。随后计算：

1. **成对带区**。对于每条等值线 γ_i，遍历所有无序对 $(\gamma_j,\ \gamma_k)$（对所有 $j < k$），并构造 γ_j 与 γ_k 之间的带区，也就是区域内两条阻塞边界之间的区域。2. **失配矩阵**。对于每个带区，测量 γ_i 中位于该带区之外的比例，并将此信息存入失配矩阵 M（其元素取值范围为 $[0,1]$）。3. **宽松深度，参数为** ε。如果 γ_i 对某个成对带区的失配值为 $\leq \varepsilon$，则将其视为位于带区内部。宽松带深度分数 $D_\varepsilon(\gamma_i)$ 定义为所有成对带区中 γ_i 被标记为内部的比例。随后，我们在一个由 ε 个值构成的小网格上进行扫描，并选取能够稳定最中心等值线的排名且产生明确中心区域的最小 ε ；中心区域是否明确由 D_ε 的值决定。4. **等值线箱线图**。我们展示的等值线箱线图由以下三个元素构成：

- **中位数**是松弛带深度 D_ε 最大的等值线。
- **50%包络**是由 D_ε 量化的最深一半等值线的并集减去交集所得。
- **100%包络** 是所有等值线的并集减去交集所得。

有关等值线箱线图的实现细节（包括参数 ε 的调整），请参阅 [53]。

频率热力图。对于给定的阻塞事件集合，我们通过统计每个网格单元位于检测到的阻塞范围内的天数，构建频率热力图。所得热力图编码了集合中阻塞事件的发生频率，突出显示阻塞事件在日度或月度集合中最可能出现的位置。

频率图突出显示阻塞事件反复发生的位置及其集中程度，而等值线箱线图则概括了代表性边界（中位数）和边界的离散度（50%和100%包络）。综合来看，中位数提供了代表性范围，50%包络标示出共同核心区域，100%包络涵盖集合中观测到的完整空间范围，而频率热力图则表示阻塞事件发生的可能性。

作为一个具体示例，图3总结了ERA5数据集（1979–2019年）中6月5日的日集合。在41年中，有23年的6月5日被判定为（正）阻塞日。频率热力图显示，在这23年中，各位置落入检测到的阻塞覆盖范围的频率。左图叠加了提取出的23条阻塞边界，右图则通过等值线箱线图对其进行总结。在该箱线图中，中位数等值线是集合中最居中的成员，可作为代表。50%等值线包围了所有边界的中央一半，而100%等值线则描绘了所有边界的并集。对于6月5日的日集合，100%等值线勾勒出检测到的阻塞事件的完整空间范围，其南侧边缘标示了6月5日阻塞事件所能到达的最南端。

三**维时间堆叠图**。如图 3所示，等值线箱线图与频率热力图相结合，可概括 41 年间某一日历日阻塞事件的变异性，但无法呈现其形状和发生情况在整个季节中的演变。为明确纳入时间信息，我们针对给定集合沿时间维度构建了两个互补的三维时间堆叠图：三维

© 2026 IEEE。本文为作者版本，已发表于《IEEE可视化与计算机图形学汇刊》。该记录的最终版本可在以下地址获取：
xx.xxxx/TVCG.201x.xxxxxxx/

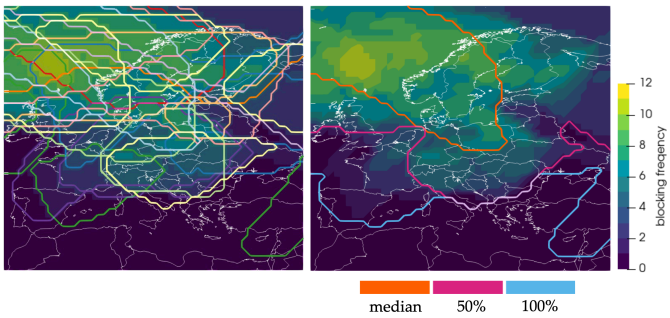

图3：ERA5数据集（1979–2019），6月5日日集合。左：23个集合成员的边界，这些阻塞事件是在41年间检测到的。右：该集合的等值线箱线图，包括阻塞中位边界（橙色）、第50百分位中心包络（洋红色）和第100百分位包络（蓝色）。背景频率热力图展示了阻塞频率。

中位数堆叠和三维频率堆叠。

要构建三维中位数堆叠，我们从每天的等值线箱线图中提取中位数等值线（即代表性边界），并将其置于三维场景中，其中水平轴为纬度和经度，垂直轴为日历时间。将这些每日中位数堆叠起来，便能勾勒出代表性覆盖范围如何随时间移动并持续存在。为减少视觉杂乱，我们仅堆叠中位数等值线，不包含包络。

要构建三维频率堆叠，我们计算每天的频率热力图，并沿同一时间轴将其堆叠起来，形成一个三维体，其中较高的值表示阻塞事件更频繁发生的日期和位置。

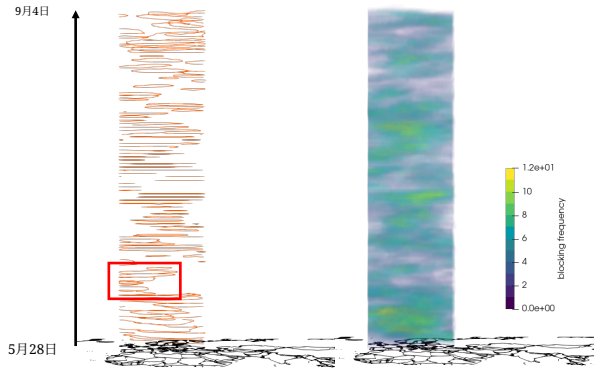

图4：季节集合的三维时间堆叠图（ERA5数据集，1979–2019年5月28日至9月4日）。左：三维中位数堆叠图，按日期沿 z轴堆叠每日中位数等值线（较早的日期位于底部）。右：三维频率堆叠图，将每日频率热力图沿同一 z轴堆叠成三维体，并以颜色表示频率。红框标出了6月中旬的一段时间，在此期间，中位数等值线聚集在欧洲西部。这些三维时间堆叠图共同概括了整个季节中阻塞事件的演变及其空间持续性。

这两种三维时间堆叠图提供了时空概览，补充了二维等值线图和频率热力图。在三维中位数堆叠图中，垂直对齐的中位数等值线簇表明阻塞事件在多日内集中出现。在三维频率堆叠图中，明亮区域凸显了阻塞事件频繁发生的时段和地点。这些三维时间堆叠图见图4。

6 实现

我们的实现可在 https://github.com/tdavislab/atmos-blocking-uncertainty 获取。

配置。 所有实验均在一台笔记本电脑上进行，该电脑配备第 12 代 Intel(R) Core(TM) i9-12900H 2.50 GHz CPU 和 32 GB 内存。数据处理、追踪、评估和可视化均使用 Python 实现。我们使用 *ParaView 5.13。3* [1] 来绘制三维频率堆叠的频率热力图并进行体绘制。

流程概述。 根据 第 5 节，我们首先直接在每日归一化 500 百帕位势高度异常场中追踪高压系统，$Z_{500}^{\mathrm{norm}}(x,\ t)$。对于每个 6月至8月的日期 t，我们在水平 λ处设定阈值，并将超水平集的连通分量 $\{Z_{500}^{\mathrm{norm}} \geq \lambda\}$ 作为系统候选。为跨时间追踪系统，我们采用区域重叠策略：统计按其纬度加权的相交像素 $w = \cos(\text{纬度}(x))$，其中 $\mathrm{lat}(x)$ 是像素 x的纬度。加权重叠超过阈值 C的系统对会被连接，因此随着日期依次处理，形成按时间排序的轨迹。如果某天属于持续至少连续五天的任一轨迹，则将该天标记为 阻塞 。

参数调优。 我们调优两个超参数：超水平集阈值 λ和重叠阈值 C。遵循将 $\lambda = 1.5$ 设为归一化 Z_{500}的 DG83 [8],，我们使用 $\lambda \in \{1.0, 1.1, \ldots, 2.0\}$ 和 $C \in \{5, 6, \ldots, 40\}$进行穷举网格搜索。对于每个数据集，前半部分年份用于五折交叉验证的调优集：将年份划分为五折，每个参数对（λ，C）通过在四折上训练并在留出折上验证进行评分，然后选择在各折上平均 F1分数最高的参数对。选定的（λ，C）随后固定用于所有后续分析。由于我们的检测器是一个透明的阈值与追踪流程（即白盒指数），我们遵循阻塞指数文献中的惯例，在完整数据集上报告结果，而不是限制于单独的测试集 [46]。两个数据集的最优参数集为

- ERA5: $\lambda = 1.2, C = 31$
- UKESM: $\lambda = 1.0, C = 31$

7 实验结果

为展示我们框架的实用性，我们首先评估其检测阻塞事件的性能，并与两种基线方法进行比较：SOM-BI [46] 和 DG83 [8, 32]。基线方法详见 第 7.1 节，评估结果见 第 7.2 节。随后，我们在 第 7.3 节中以 2003年欧洲热浪为案例进行研究，展示我们的不确定性可视化结果。最后，在 第 7.4 节中，我们总结阻塞事件的时空模式，并对其变化进行可视化分析。

7.1 基线检测方法

DG83 [8, 32] 和 SOM-BI [46] 均通过 500 百帕位势高度场（Z_{500}）中的持续性异常来检测阻塞事件。

DG83。 在 Dole 和 Gordon [8], Z_{500} 的原始研究中，异常被计算为相对于长期季节平均值的偏差，并通过纬度因子（$\sin 45^\circ / \sin \phi$）（$\phi$：纬度）进行缩放，以考虑行星涡度的经向变化。如果缩放后的异常超过固定阈值（原为 ≥ 100 米）并持续一段时间（原为 ≥ 10 天），则该网格点被视为阻塞（即属于阻塞范围）。

为进行全球对比，Pinheiro 等人 [32] 对 DG83 进行了修改，将固定的 100 m 阈值替换为时空变化阈值 1.5σ （下限为 100 m），其中 σ 是各网格点位势高度长期标准差的平滑值。当阻塞事件至少在一个像素上重叠且满足 ≥ 5 天的持续时间约束时，即将其判定为跨日匹配；我们采用 Pinheiro 等人修改后的 DG83 作为比较基线。

SOM-BI. SOM-BI [46] 是一种基于位势高度的先进阻塞指数。它利用欧洲上空逐日Z_{500} 异常场图训练自组织映射（SOM），学习一组紧凑且具有代表性的环流型，称为SOM节点。在训练过程中，每一天都会分配给其最佳匹配节点，并根据衰减学习率和邻域大小，将该节点及其在SOM网格上的邻居向当天的场进行更新。重复这一过程，直至节点模式收敛；随后，将每一天映射到其最佳匹配节点。

随后，SOM-BI在数据集上应用5天滑动窗口，将每个最佳匹配节点序列视为候选阻塞特征。利用发生阻塞的5天时段的真实标签，对所有不同特征进行评分，并保留使F1分数最高的子集。如果包含某一天的任意一个5天窗口与保留的特征相匹配，则将该日标记为阻塞（即出现阻塞事件）。

与我们方法的比较。DG83 和我们的检测方法都对归一化的 Z_{500} 异常场应用超水平集阈值，而 SOM-BI 则采用基于自组织映射的无监督模式分类框架 [8, 46]。关键区别在于，我们的方法明确强制空间平稳性：相邻日的连通分量必须有超过C的面积重叠，从而确保只有缓慢演变、空间连贯的高压系统才会被连接成轨迹，并计入多日寿命要求。相比之下，DG83 只要求足迹在相邻日期之间有极小的重叠（甚至只需一个像素）。因此，快速移动且不构成阻塞事件的高压系统仍可能满足 DG83 的持续时间规则，而我们的面积阈值 C 则强制确保准定常性。

为了保持较高的精确率，DG83 通常采用相对较高的异常阈值（例如 1.5σ），这有助于减少假阳性，但也会降低该方法对中等强度事件的敏感度。相比之下，我们的重叠判据能够容忍适度的空间位移，同时仍强制确保准定常性，因此可以采用较低的 λ，而不会增加噪声。

另一方面，SOM-BI 的思路有所不同：它首先学习每日 Z_{500} 异常模式的代表模式，然后根据与真实标注 [46]最匹配的 5 日模式序列为各日贴上标签。这种方法能够适应天气尺度变率，但分类结果取决于 SOM 的设计和训练标签。此外，SOM-BI 仅输出二元标签，而不提供高压系统的明确边界。相比之下，我们的追踪方法每天都会直接生成连续空间范围，并在涉及等值线箱线图和频率热力图的案例研究中始终使用这些范围。

7.2 阻塞事件检测评估

基于真实标签的评估。 我们使用真实标签（GTD）评估所有阻塞事件检测方法。对于 DG83 和我们的方法，评分根据我们自己的实现计算。对于 SOM-BI，我们报告 Thomas 等人 [46], 在相同数据集和时间跨度上得到的已发表结果。

我们逐日使用 *准确率*、*精确率*、*召回率*和 *F1* 分数，根据真实标签进行评估。“正”标签表示阻塞，“负”标签表示未阻塞。如果输出标签和 GTD 均为正，则该日为真阳性（TP）；如果两者均为负，则为真阴性（TN）；如果工具将其标记为正而 GTD 为负，则为假阳性（FP）；如果工具将其标记为负而 GTD 为正，则为假阴性（FN）。

检测结果摘要。在整个评估期内计算标准混淆矩阵指标，包括准确率、精确率、召回率和 F1分数。这些指标报告于表 1 中，涵盖 ERA5（再分析）和 UKESM（模拟）数据集以及三种检测器（DG83、SOM-BI 和我们的方法）。对于**ERA5**，所有方法的准确率和精确率相近，但我们的方法召回率最高，因此 F1分数也最高。对于**UKESM**，我们的方法整体表现始终最强：其精确率与 DG83 相当，而召回率显著更高，因此 F1分数也更高。

这一结果体现了我们的设计选择：与依赖相对较高异常阈值以确保精确率的 DG83 不同，我们的方法通过区域重叠约束来实现准定常性，在快速移动的高压系统造成假阳性之前将其过滤掉。这项约束使我们能够采用更宽松的异常阈值而不牺牲精确率（ERA5：$\lambda = 1.2$，而 DG83 为 1.5；UKESM：$\lambda = 1.0$，而 DG83 为 1.5），同时检出更多较弱事件并提高召回率。

与 SOM-BI 相比，我们在两个数据集上都取得了相近或更高的 F1分数；此外，我们还能逐日生成高压系统的连续空间范围，直接用于后续分析。相比之下，SOM-BI 生成的是二元时间序列，通常还需要结合其他热力图（例如 Z_{500}，垂直积分位涡）来提供空间背景信息。

与 DG83 的分歧。由于 DG83 和我们的方法都会对归一化 Z_{500} 场应用阈值，我们考察两者基于GTD的标签不一致的情况（表 2）。采用较宽松的归一化异常阈值 λ后，我们的方法在 ERA5 中正确识别出 DG83 漏掉的另外 161 个阻塞日，在 UKESM 中则识别出 440 个，但代价是引入了更多假阳性（ERA5 中 161 个，UKESM 中 340 个）；这些情况被 DG83 正确标记为未阻塞。这体现了精确率与召回率之间常见的权衡：降低 λ 会提高灵敏度（召回率），但也可能将一些边缘情况纳入其中。

我们框架中的两项设计选择减轻了精确率下降的问题：区域重叠要求 C 以及轨迹构建，这两者会过滤掉快速移动的高压系统，并倾向于保留准定常系统。与此一致，DG83 标记为阻塞、但我们的方法未标记的阻塞日仅有 14 天（ERA5）和 109 天（UKESM）；这些系统可能是未能满足我们定常性和寿命判据的增强系统。相比之下，对于 DG83 标记为阻塞的日期，我们的方法正确地将其中 100 天（ERA5）和 305 天（UKESM）筛除为未阻塞。

总体而言，相较于 DG83，我们的方法将权衡重点转向提高对中等或轻微漂移事件的召回率，同时通过重叠阈值 C 保持了有竞争力的精确率。

流行率与偏差。 虽然我们的精确率与基准方法相当，但检测器标记为阻塞的天数略高于 ERA5 中的 GTD 基准发生率（37.3% 对 33.4%），表明检测存在轻微的正偏差。在 UKESM 中，我们的流行率与 GTD 非常接近（29.4% 对 29.0%），而 DG83 则检测不足（25.9%）。综合来看，这些结果表明，我们的方法以流行率小幅上升为代价，换取了召回率的显著提升，同时通过明确的、基于重叠的定常性检验维持了精确率。

潜在改进。 在这三种阻塞事件检测工具中，只有我们的方法在ERA5数据集上的精确率与召回率之间呈现出较大的差异，这表明它更倾向于过度检测，而非检测不足。这是因为我们的参数调优过程优先考虑在验证数据上最大化 F1分数，而较少考虑精确率与召回率之间的差异。我们可以改进参数调优过程，寻找能够最小化精确率与召回率之差的参数设置，从而更好地平衡检测出的阻塞日比例。

非季节内的一致性。尽管 λ 和 C 仅使用6月至8月（夏季）案例进行调优，我们还测试了其对一年中其余时间的泛化能力。为减轻季节性振幅差异的影响，我们使用 Pinheiro 等人提出的全球/季节归一化对 Z_{500} 异常值 [32], 进行预处理，并将每月输出与采用相同归一化方法实现的 DG83 进行比较；归一化详情见第4.2节。表3报告了这两种方法之间逐月一致性的精确率、召回率和 F1分数。

对于**ERA5**，在6月至8月（调优季节）期间，与 DG83 的 F1分数一致性分别为0.885（6月）、0.855（7月）和0.806（八月）。在6月至8月以外的月份中，最低的月度 F1分数为0.777（十一月），其次为0.840（1月）。所有数值均与季节内范围相当，表明各月之间总体上具有相似的一致性，其中十一月的差异最大。

对于 **UKESM**，也呈现出类似的模式：在6月至8月，F1 分数分别为0.756（6月）、0.812（7月）和0.802（八月）；在6月至8月以外，最低的F1 分数出现在十月（0.710），其次是五月（0.780）。除十月外，其他月份的F1分数均未出现明显的峰值或低谷。总体而言，月度F1分数没有明显的季节变化，这表明在采用相同归一化方法的情况下，我们的方法在用于调优的季节之外，仍能与DG83保持总体稳定的一致性。

7.3 案例研究：2003年欧洲热浪

2003年欧洲热浪是阻塞事件检测的典型基准案例：从7月下旬到8月中旬，一股持续、近乎静止的反气旋环流盘踞在西欧上空，将北大西洋急流推向极地方向，抑制降水，并

© 2026 IEEE。本文为作者版本，已发表于 IEEE可视化与计算机图形学汇刊。本记录的最终版本见：xx.xxxx/TVCG.201x.xxxxxxx/

表1：6月至8月时段内，ERA5和UKESM数据集相对于真实标签的三种检测方法的检测统计数据。每项指标的最佳表现以粗体标出。在真实标签中，ERA5数据集（1979—2019年）有33.4%的天数为阻塞，UKESM数据集（1960—2060年）有29.0%的天数为阻塞。

方法	ERA5					UKESM				
	阻塞天数	准确率	精确率	召回率	F1分数	阻塞天数	准确率	精确率	召回率	F1分数
DG83	32.3%	0.82	0.72	0.72	0.72	25.9%	0.87	0.80	0.72	0.75
SOM-BI	34.6%	0.82	**0.73**	0.75	0.74	29.6%	0.83	0.70	0.72	0.71
ours	37.3%	**0.84**	0.72	**0.83**	**0.77**	29.4%	**0.90**	**0.81**	**0.83**	**0.82**

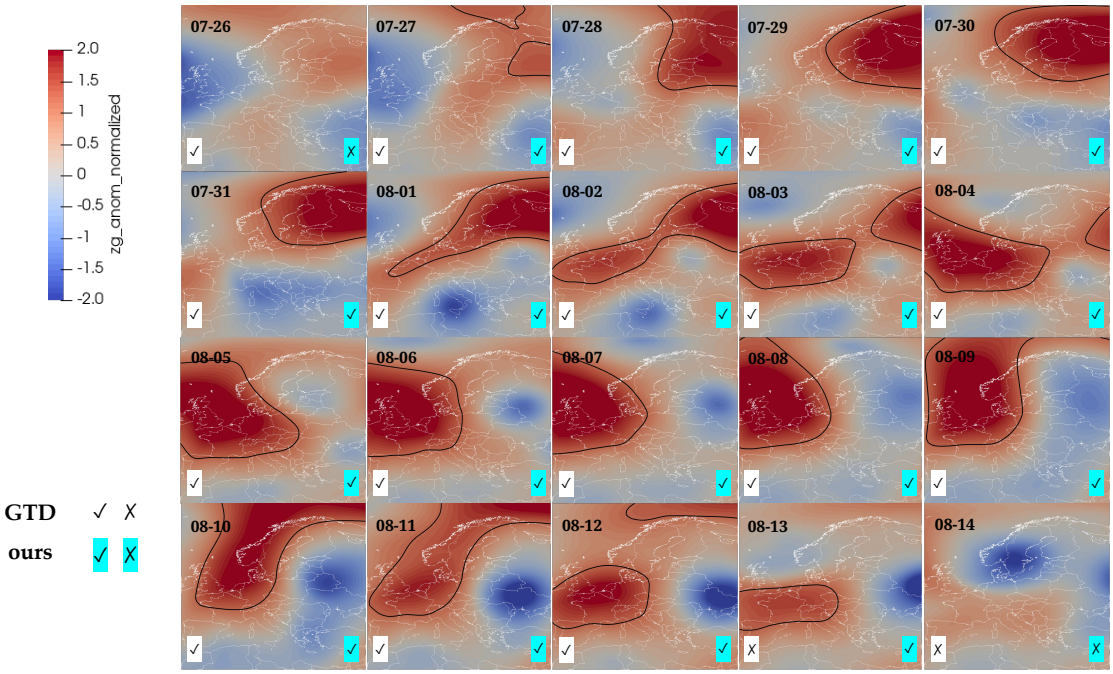

图5：ERA5数据集：2003年7月26日至8月14日期间，欧洲归一化 Z_{500} 异常的频率热力图。白线表示国界和海岸线。黑色等值线（等值=1.2）勾勒出由我们的检测方法定义的高压边界。每幅地图底部的注释报告了我们对各日期的检测结果和真实标签（GTD）；勾号 = 阻塞，叉号 = 未阻塞。

表2：6月至8月时段内的数据中，DG83与我们的方法在检测结果上的分歧。

数据集	GTD 标签	仅我们的正确	仅 DG83 正确	两者均正确	两者均不正确
ERA5	阻塞	161	14	935	213
	未阻塞	100	161	2204	312
UKESM	阻塞	440	109	1939	361
	未阻塞	305	340	6124	280

表 3：我们的检测结果与 DG83 检测结果在不同月份的吻合程度。

月份	ERA5			UKESM		
	精确率	召回率	F1分数	精确率	召回率	F1分数
01	0.741	0.968	0.840	0.675	0.936	0.784
02	0.746	0.970	0.843	0.686	0.943	0.794
03	0.804	0.963	0.876	0.690	0.927	0.791
04	0.800	0.931	0.860	0.705	0.954	0.811
05	0.773	0.932	0.845	0.693	0.893	0.780
06	0.823	0.958	0.885	0.695	0.828	0.756
07	0.807	0.911	0.855	0.779	0.849	0.812
08	0.740	0.886	0.806	0.754	0.856	0.802
09	0.797	0.896	0.844	0.700	0.845	0.766
10	0.777	0.959	0.858	0.587	0.897	0.710
11	0.669	0.925	0.777	0.660	0.956	0.781
12	0.778	0.977	0.866	0.689	0.948	0.798

促成晴空下沉和极端近地表增暖 [5]。根据记录，最强阶段出现在8月6日至12日前后，当时反气旋阻塞以法国附近为中心，Z_{500} 异常和滞留气流使热量持续积聚在该地区 [14,25,48]。夏季平均温度异常在大片区域超过3°C，局部则达到高于1961—1990年基准期数个标准差的水平 [13,41]。其社会代价极为惨重：欧洲有超过7万人死亡，其中法国受影响尤为严重 [38]。作为案例研究，这场热浪提供了一个记录详尽的过程，展现了一个高影响阻塞事件的发生、维持和消退，可据此评估阻塞事件的检测能力以及对持续性极端高温的归因。

案例检测。图5显示了归一化后的 Z_{500} ERA5观测数据中的异常（等值线值为1.2的黑色等值线标示出从7月26日至2003年8月14日诊断出的高压区域。7月27日至8月13日期间，每一天都被我们的方法检测为“阻塞”日。检测到的高压系统从7月27日至28日在欧洲东北部上空形成的初始峰值，演变为向西扩展的高压脊；到8月4日至12日，该高压脊覆盖了法国、德国、英国及邻近的北大西洋区域。随后，该系统于8月13日减弱，并于8月14日消散。

这种逐日演变与针对2003年欧洲热浪的独立分析相吻合；相关分析记录了八月上中旬西欧出现异常强烈的正Z_{500} 异常，随后则逐渐减弱 [5,48]。重要的是，我们通过等值线突出显示的信号（异常偏高的 Z_{500}）捕捉到了同一种大范围、近乎静止的高压型，这种高压型在实际中构成了阻塞事件。当这种正异常扩展至广阔区域并持续数日时，风会减弱，气团停滞，使热量不断积聚。在2003年热浪案例中，我们连续检测到的阻塞日与八月上中旬法国及邻近地区极端高温的增强过程和持续时间相吻合 [5,48]。

评估。我们将阻塞事件检测结果与真实标签进行比较。只有两个日期存在分歧：7月26日和8月13日。7月26日，我们的方法未发现任何超过标量阈值的网格单元，而GTD将这一天标记为阻塞；8月13日，西欧上空仍存在显著的高压异常，但GTD却将这一天标记为未阻塞。考虑到专家进行真实标签标注时需要作出判断，出现细微差异并不意外。例如，在7月26日（图5，左上图）中，归一化异常略低于我们的阈值，

然而，一个初现的正信号已经显现，并随后增强为次日观测到的高压系统。

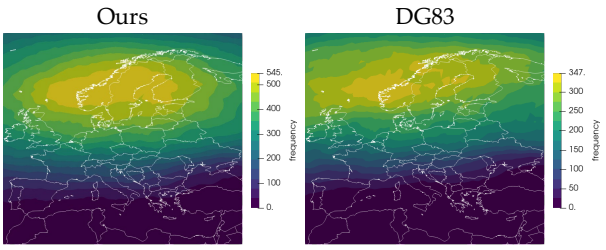

图6：ERA5数据集（5月28日至9月4日，1979—2019年）。欧洲阻塞事件频率的空间分布。

7.4 不确定性分析与可视化

我们的检测方法不仅能识别发生阻塞事件的日期，还能描绘与之相关的高压系统边界。根据检测结果，我们对欧洲阻塞事件的时空分布进行了广泛分析。我们重点分析ERA5数据集，因为它反映了真实世界的观测数据；不过，将可视化扩展到UKESM或其他数据集并无特别限制。

总体空间分布。正如先前研究所强调的，阻塞事件频率的空间模式是阻塞气候学和模型评估的基础 [32, 46]。受此启发，我们在集合的分析时段内对每一天运行检测方法，从而构建了频率热力图。在每个网格点处，我们计算被检测为阻塞的天数频率，该计算基于归一化的Z_{500}异常场，并使用与案例研究相同的阈值和区域。所得频率热力图突出了连贯的区域组织特征，以紧凑的形式概括了阻塞事件倾向于发生的位置。

显示阻塞事件空间分布的频率热力图见 图6。总体而言，阻塞频率的空间分布与纬度有关。高纬度区域，尤其是斯堪的纳维亚和北大西洋，阻塞事件频率较高。随着纬度降低，阻塞频率也随之降低。这与 图6右侧DG83频率热图所呈现的总体观测结果一致。然而，我们注意到，使用我们的检测方法得到的总体频率高于DG83。这是预期之中的，因为在检测阻塞事件时，我们的方法采用了低于DG83的标量阈值，通常会得到面积更大的高压系统。

日阻塞分布的等值线箱线图。除了总体概述之外，我们还关注一年中不同日期的空间分布变化，这种变化可能因季节变化而呈现不同模式。为了更好地分析这种变化，我们针对 ERA5 数据集中 41 年间的每个特定日期，计算阻塞事件的等值线箱线图和频率热力图。

图7 展示了6月9日至20日的一系列日等值线箱线图，这些图由多个日集合计算得出。对于每个日历日，面板将频率热力图与检测到的阻塞边界等值线箱线图配对展示，两者均基于41年数据集计算。请注意，各日期所包含的年份可能不同，因为并非每一年在每个日期都会出现阻塞事件。

我们观察到图7中的中位数等值线随日期发生变化。6月9日至11日，它位于较高纬度，主要分布在斯堪的纳维亚、北大西洋和北极上空。6月12日，它向南移动，横跨西欧、中欧及东欧部分地区。6月13日至17日，它停留在西欧上空，尤其是英国和法国。随后在6月18日至20日，它向东移动，中心位于法国和德国上空。

随附的频率热图显示了阻塞频率的相关演变。6月9日至13日，频率分布较为分散，未呈现出6月12日向南偏移的明显特征。6月14日至17日，较高频率集中在西欧，与中位数等值线的位置一致。6月18日至20日，中欧和东欧的频率上升，追踪了中位数等值线向东移动的趋势。

综合来看，这些可视化结果揭示了这份多年代际档案中6月中旬可能存在的演变趋势：早期阻塞分布于中高纬度地区，月中集中在西欧，后期则在中欧和东欧增多。考虑到数据涵盖约四十年，且各日期纳入的年份数量不尽相同，我们将这些结果视为指示性模式，而非确定的气候特征。

使用三维时间堆叠图进行时空概述。除了每日二维可视化（等值线箱线图和频率热图）之外，我们还使用两种互补的三维时间堆叠图来总结阻塞行为（图4）。时间映射到垂直轴（5月28日至9月4日）。左侧的三维中位数堆叠图展示了沿时间轴堆叠的每日中位数等值线（阻塞边界），这些等值线来自等值线箱线图；橙色线条表示每日中位数等值线。右侧的三维频率堆叠图将每日频率热图整合为一个三维体，其中强度表示阻塞事件在一段时间内于各位置发生的频率。

这些三维时间堆叠图揭示了阻塞事件在时空上的总体分布。例如，图4左侧的红框突出显示了6月13日至20日，此时中位数等值线聚集在西欧上空，这与图7中的每日面板相符。这类聚合视图简洁地呈现了阻塞事件在整个季节中集中出现的时间和地点，并提供定性的概览。

按日期观察，中位数堆叠图展示的是阻塞范围中心趋势的变化，而非单个事件的连续移动。因此，中位数堆叠图中垂直方向上连贯的部分表明典型阻塞位置在多日间具有一致性，而逐日横向偏移则反映了阻塞最常发生位置的季节性变化。频率堆叠图则通过揭示随时间变化的高占据频率带，为这一视角提供补充：较薄、较淡的层表示零散、短暂的事件，而较厚、较亮的层则标示阻塞反复出现在相似区域的时段。

这些可视化也有局限：将三维对象投影到二维可能会遮蔽其结构。尤其是，三维频率堆叠可能因遮挡而隐藏内部特征。实际应用中，通过交互式探索（旋转视图，并针对选定日期或经纬度平面进行切片），再将堆叠图与相应的二维可视化关联起来，最有助于解读。GitHub代码库中提供了演示如何探索三维时间堆叠图的视频。

月度阻塞事件频率。除了逐日变异性之外，按月查看能更稳健地呈现阻塞事件的季节性特征。尽管我们的参数是使用夏季月份（即包含真实标签的JJA时段）的数据进行调优的，但在JJA时段之外，与DG83的一致性仍然相当（表3），因此我们将分析扩展到月度尺度。

图 8展示了采用月度集合得到的频率热力图：冬季月份的阻塞频率显著高于夏季月份；12月至1月的峰值集中在北欧及邻近的北大西洋地区，而到2月至3月，随着环流向春季过渡，分布变得更加分散。这与天气变率预计会高于12月和1月的情况相符，例如平流层极涡减弱以及相关的平流层突然增温（SSWs）频率变化（重大事件通常定义为60° N、10 hPa处的纬向平均纬向风发生反转）。已知平流层突然增温与对流层西风变化及阻塞发生情况有关 [2]。更一般而言，阻塞与北大西洋急流密切相关：急流纬度的偏移和急流强度的变化，通常伴随着阻塞发生位置及发生频率的变化 [20, 52, 57]。夏季，检测到的阻塞事件集中在较高纬度（尤其是欧洲以北），地中海沿岸的阻塞频率相对较低，这反映了阻塞事件随季节发生的变化。

8 结论与讨论

我们提出了一种用于检测和表征大气阻塞事件的不确定性可视化框架。我们将该方法与两个基准阻塞指数进行比较，结果总结于表 4。我们

© *2026 IEEE*。本文为作者版本，已发表于 *IEEE*可视化与计算机图形学汇刊。本文记录的最终版本可在以下网址获取：
xx.xxxx/TVCG.201x.xxxxxxx/

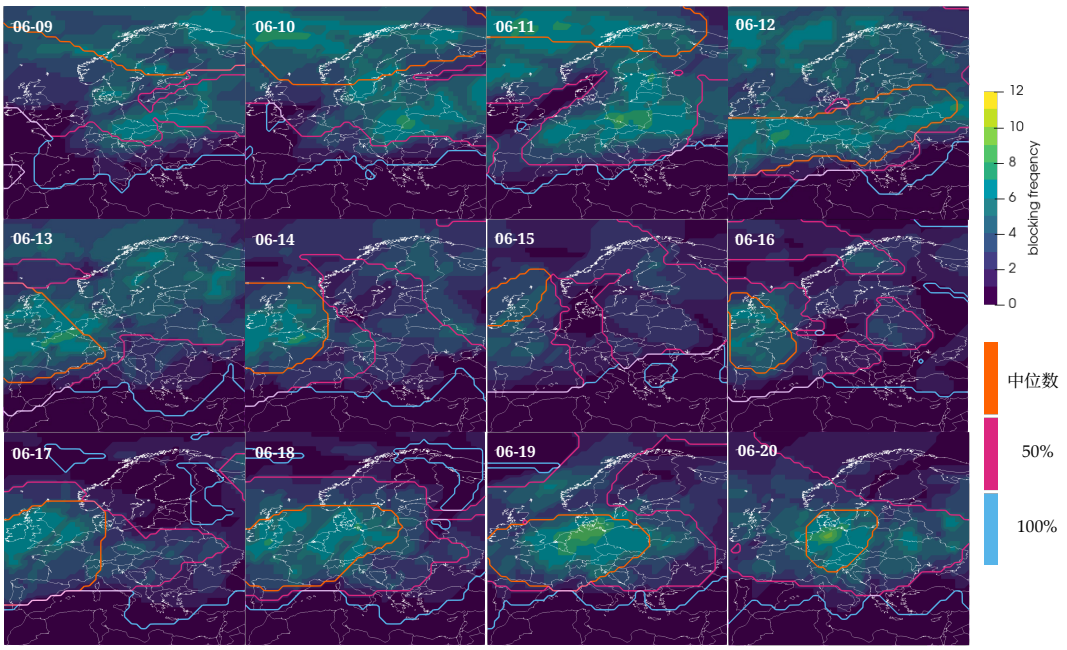

图7：6月9日至20日的每日等值线箱线图（ERA5，1979—2019年）。每个面板的背景频率热力图显示了分析期间的阻塞频率；叠加的等值线箱线图汇总了该日期检测到的阻塞边界集合：中位数边界、第50百分位包络和第100百分位包络。各日所涉及的年份有所不同，因为并非每一年在每个日期都有阻塞事件。

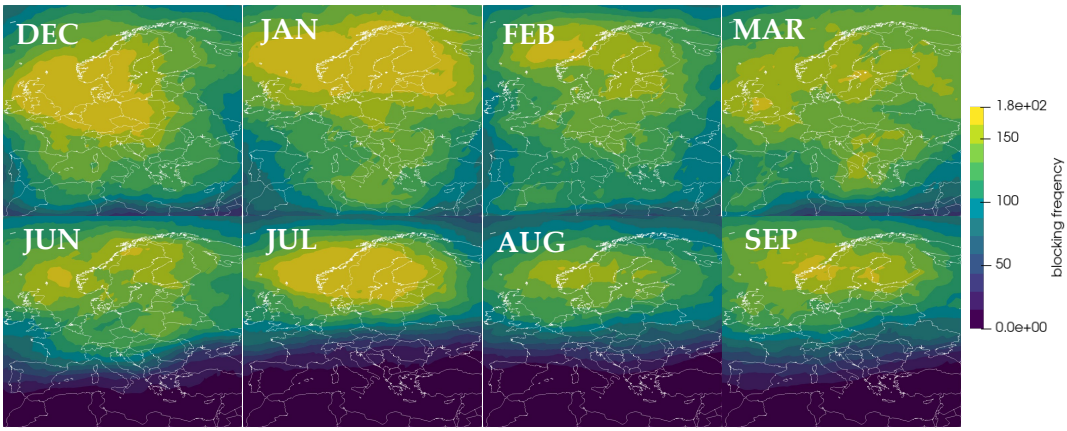

图8：月度集合频率热力图（ERA5，1979—2019年）。一个 2×4 网格的热力图：上排包含冬季月份（12月、1月、2月和3月）；下排包含夏季月份（6月、7月、8月和9月）。每个月的热力图显示了在41年数据集范围内汇总的阻塞日频率（使用与案例研究相同的阈值和区域）。此处省略等值线箱线图：月度集合包含的事件远多于单日集合，因此计算成本较高。

表4：DG83、SOM-BI与我们的方法在大气阻塞事件检测和特征刻画方面的比较概述。

方法	事件几何结构 & 轨迹	不确定性概述	F1分数 (ERA5)	F1分数 (UKESM)
DG83	Yes*	频率热力图	0.72	0.75
SOM-BI	No	None	0.74	0.71
ours	Yes	等值线箱线图；频率热力图；三维时间堆叠图	**0.77**	**0.82**

* DG83需要对目标检测和追踪进行额外的后处理。

介绍一种基于几何的检测与追踪方法，将其应用于归一化的 Z_{500} 异常场，并通过强制准定常性，为阻塞事件提供明确的空间足迹。我们在前工业气候模拟（UKESM）和再分析数据（ERA5）上评估了该方法。与两个强基线方法——DG83 和 SOM-BI——相比，我们的方法取得了更高的 F1 分数，相较于专家标注的真实数据，检测性能有所提升。除调优季节（6月至8月）外，与 DG83 的月度比较显示一致性没有明显下降，表明该方法在各季节中表现稳定。我们还展示了该方法在广为研究的 2003年欧洲热浪中的结果：诊断出的阻塞日和空间足迹与针对该事件演变过程的独立分析高度吻合。

我们工作的另一项主要贡献是提供一套具有不确定性感知能力的摘要方法，用于可视化阻塞事件。对于一组检测结果，我们采用等值线箱线图表示典型边界及其离散度，采用频率热力图揭示空间和时间上的发生模式，并采用三维时间堆叠图一目了然地呈现季节演变。这些可视化方法共同呈现了阻塞事件在时空维度上的特征，且不会增加模型复杂度。

我们的框架存在若干局限性。三维时间堆叠图在交互式探索或通过切片查看时效果最佳，因为静态体绘制可能会遮蔽内部结构。此外，我们的检测方法在ERA5数据集上呈现轻微的正偏差，表现为精确率与召回率之间的不平衡；在保持透明度和可复现性的同时，可通过进一步的参数调优或增加准定常性约束来减轻这一偏差。

我们设想，该框架将成为气候科学家和气象学家的宝贵工具：通过量化不同区域和气候情景下阻塞频率、持续时间和强度的变化，它有助于更准确地评估与持续性极端天气事件相关的当前及未来风险。

致谢

ML 和 BW 的部分研究经费由美国国家科学基金会（NSF）资助，项目编号为 IIS-1910733 和 IIS-2145499；另获美国能源部（DOE）资助，项目编号为 DE-SC0021015。PN 获得英国自然环境研究委员会（NERC）资助，项目编号为 NE/V012045/1。作者感谢 Dagstuhl研讨会23342（地球系统分析计算几何）促成了此次合作。

参考文献

[1] J. Ahrens、B. Geveci 和 C. Law。ParaView：面向终端用户的大规模数据可视化工具。《可视化手册》，第717页，2005年。doi：10.1016/B978-012387582-2/50038-1 5[2] M. P. Baldwin、B. Ayarzagüena、T. Birner、N. Butchart、A. H. Butler、A. J. Charlton-Perez、D. I. V. Domeisen、C. I. Garfinkel、H. Garny、E. P. Gerber、M. I. Hegglin、U. Langematz 和 N. M. Pedatella。平流层突然增温。《地球物理学评论》，59(1)：e2020RG000708，2021年。doi：10. 1029/2020RG000708 8[3] D. Barriopedro、R. García-Herrera、J. F. González-Rouco 和 R. M. Trigo。大气阻塞诊断方法在大气环流模式中的应用。第二部分：模式模拟。《气候动力学》，35(7)：1393–1409，2010年。doi：10.1007/s00382-010-0766-6 2[4] A. Biswas、G. Lin、X. Liu 和 H.-W. Shen。跨多种分辨率的时变天气集合可视化。《IEEE可视化与计算机图形学汇刊》，23(1)：841–850，2017年。doi：10.1109/TVCG.2016.2598869 2[5] E. Black、M. Blackburn、G. Harrison、B. Hoskins 和 J. Methven。导致2003年欧洲热浪的因素。《天气》，59(8)：217–223，2004年。doi：10.1256/wea.74.04 7[6] C. Cassou。Madden–Julian振荡与北大西洋涛动之间的季节内相互作用。《自然》，455：523–527，2008年。doi：10.1038/nature07286 2[7] M. Croci-Maspoli、C. Schwierz 和 H. C. Davies。大气阻塞：与北大西洋涛动和太平洋–北美型的时空联系。《气候动力学》，29(7-8)：713–725，2007年。doi：10.1007/s00382-007-0259-4 2[8] R. M. Dole 和 N. D. Gordon。北半球中纬度地区冬季环流的持续性异常：地理分布与区域持续性特征。《月刊天气评论》，111(8)：1567–1586，1983年。doi：10.1175/1520-0493(1983)111<1567: PAOTEN >2 0 2 1, 2, 5, 6, 12 . .CO；H. Doraiswamy、V. Natarajan 和 R. S. Nanjundiah。用于识别和追踪云系移动的探索框架。《IEEE可视化与计算机图形学汇刊》，19(12)：2896–2905，2013年。doi：10.1109/TVCG.2013.131 2[10] F. Fabiano、V. L. Meccia、P. Davini、P. Ghinassi 和 S. Corti。北半球中纬度地区未来大气环流变化的环流型视角。《天气与气候动力学》，2(1)：163–180，2021年。doi：10.5194/wcd-2 - 163-2021 2[11] G. Farnebäck。基于多项式展开的双帧运动估计。载于 J. Bigun 和 T. Gustavsson 编，《图像分析》，第363–370页。施普林格，柏林、海德堡, 2003 10 1007 3 540 45103 _50 2 。doi：. / - - -X Z. Feng、J. Hardin、H. C. Barnes、J. Li、L. R. Leung、A. Varble 和 Z. Zhang。PyFLEXTRKR：用于对流云分析的灵活特征跟踪 Python 软件。《地球科学模型开发》，16(10)：2753–2776, 2023 10 5194 16 2753 2023 2 。doi：. /gmd- - - E. Fischer、S. I. Seneviratne、P. L. Vidale、D. Lüthi 和 C. Schär。2003年欧洲夏季热浪期间的土壤湿度–大气相互作用。《气候杂志》，20(20)：5081–5099，2007年。doi：10.1175/ JCLI4288.1 7[14] R. García-Herrera、J. Díaz、R. M. Trigo 和 E. Hernández。伊比利亚的极端夏季气温：健康影响及相关天气尺度条件。《地球物理学年鉴》，23(2)：239–251，2005年。doi：10.5194/ angeo- 23 239 2005 7 - - R. Grotjahn 和 R. Zhang。加利福尼亚中央谷地冷空气爆发的天气尺度分析。《气候杂志》，30(23)：9417–9433，2017年。doi：10.1175/JCLI-D-17-0167.1 3[16] H. Hersbach、B. Bell、P. Berrisford、S. Hirahara、A. Horányi、J. Muñoz-Sabater、J. Nicolas、C. Peubey、R. Radu、D. Schepers、A. Simmons、C. Soci、S. Abdalla、X. Abellan、G. Balsamo、P. Bechtold、G. Biavati、J. Bidlot、M. Bonavita、G. De Chiara、P. Dahlgren、D. Dee、M. Diamantakis、R. Dragani、J. Flemming、R. Forbes、M. Fuentes、A. Geer、L. Haimberger、S. Healy , R. J. Hogan , E. Hólm , M. Janisková , S. Keeley , P. Laloyaux , P. Lopez、C. Lupu、G. Radnoti、P. de Rosnay、I. Rozum、F. Vamborg、S. Villaume 和 J.-N. Thépaut。《ERA5全球再分析》。《英国皇家气象学会季刊》，146(730):1999–2049，2020年。doi：10 1002 3803 1, 3 。/qj。 M. Iturbide、J. M. Gutiérrez、L. M. Alves、J. Bedia、R. Cerezo-Mota、E. Cimadevilla、A. S. Cofiño、A. Di Luca、S. H. Faria、I. V. Gorodet- skaya、M. Hauser、S. Herrera、K. Hennessy、H. T. Hewitt、R. G. Jones、S. Krakovska、R. Manzanas、D. Martínez-Castro、G. T. Narisma、I. S. Nurhati、I. Pinto、S. I. Seneviratne、B. van den Hurk 和 C. S. Vera。《IPCC气候参考区域的更新：气候模型数据次大陆尺度分析的定义与聚合数据集》。地球系统科学数据, 12 4 2959 2970, 2020 10 5194 12 2959 2020 3 ( ): – 。doi：。/essd- - - A. Kamal 、 P. Dhakal 、 A. Y. Javaid 、 V. K. Devabhaktuni、D. Kaur、J. Zaientz 和 R. Marinier。《不确定性可视化的近期进展与挑战：综述》。可视化学报，24(5):861–890，2021年。doi：10.1007/s12650-021-00755-1 2[19] C. Karamperidou。《通过深度学习重建从古气候中提取古气象：过去一千年的大气阻塞》。《地球与环境通讯》，5(1):535，2024年。doi：10.1038/s 43247 024 01687 2 - - -y L.-A. Kautz、O. Martius、S. Pfahl、J. G. Pinto、A. M. Ramos、P. M. Sousa 和 T. Woollings。《欧洲 — 大西洋区域的大气阻塞与极端天气 —— 综述》。《天气与气候动力学》，3(1):305–336, 2022 10 5194 3 305 2022 1, 8 。doi：。/wcd- - - T. Kohonen。《自组织映射》，施普林格信息科学系列第{ }卷。施普林格，第3版，2001年。doi：10.1007/978-3-642-56927-2 2[22] F. Lan、B. Gamelin、L. Yan、J. Wang、B. Wang 和 H. Guo。《大气河的拓扑特征刻画与不确定性可视化》。《计算机图形学论坛》，43(3):e15084，2024年。doi：10.1111/cgf.15084 2[23] H. Lejenas 和 H. Okland。《根据长期观测数据序列确定的北半球阻塞特征》。《Tellus》A辑, 35 5 350 362, 1983 10 3402 35 5 11446 2 A( ): – 。doi：。/tellusa.v i。 M. Li、D. Chatterjee、F. Glassmeier、F. Senf 和 B. Wang。《利用拓扑学追踪低层云系》。载于2025年IEEE拓扑数据分析与可视化研讨会（TopoInVis），第89–99页，2025年。doi：10.1109 68599 2025 00013 2 /TopoInVis。。 X. Liu、B. He、L. Guo、L. Huang 和 D. Chen。《导致欧洲夏季热浪的机制之异同：2003年、2010年、2018年8月4日、2019年10月及其他时期》。《地球的未来》，( ): e EF 。doi：. 1029/2019EF001386 7[26] A. R. Lupo。《大气阻塞事件：综述》。《纽约科学院年鉴》，1504(1):5–24，2021年。doi：10.1111/nyas.14557 1[27] P.-A. Michelangeli、R. Vautard 和 B. Legras。《天气型：重复性与准定常性》。大气科学杂志，52(8):1237–1256，1995年。doi：10.1175/1520-0469(1995)052<1237:WRRAQS>2.0。CO;2 2[28] M. Mirzargar、R. T. Whitaker 和 R. M. Kirby。《曲线箱线图：曲线集合箱线图的推广》。IEEE可视化与计算机图形学汇刊，20(12):2654–2663，2014年。doi：10.1109/TVCG.2014.2346455 2[29] G. Muszynski、Prabhat、J. Balewski、K. Kashinath、M. Wehner 和 V. Kurlin。《全球气候模式模拟数据中的大气阻塞模式识别》。载于2020年第25届国际模式识别会议（ICPR），第677–684页，2021年。doi：10.1109/ICPR48806.2021.9412736 2[30] A. T. Pang、C. M. Wittenbrink 和 S. K. Lodha。《不确定性可视化方法》。《可视化计算机》，13(8):370–390，1997年。doi：10.1007/s003710050111 2[31] J. L. Pelly 和 B. J. Hoskins。《关于阻塞的新视角》。大气科学杂志，60(5):743–755，2003年。doi：10.1175/1520-0469(2003 060<0743 >2 0 2 2):ANPOB ..CO；M. C. Pinheiro、P. A. Ullrich 和 R. Grotjahn。《大气阻塞与客观检测方法比较：流场特征》。《气候动力学》，53(7–8):4189–4216，2019 年 4 月。doi：10.1007/s00382-019-04782-5 2、3、5、6、8、12[33] K. Potter、P. Rosen 和 C. R. Johnson。《从量化到可视化：不确定性可视化方法分类》。载于 A. M. Dienstfrey 和 R. F. Boisvert 编，《科学计算中的不确定性量化》，第226–249页。施普林格·柏林·海德堡，柏林、海德堡，2012年。2

© *2026 IEEE*。本文为作者版本，已发表于 *IEEE*可视化与计算机图形学汇刊。本文的最终版本可在以下网址获取：
xx.xxxx/TVCG.201x.xxxxxxx/

[34] K. Potter、A. Wilson、P.-T. Bremer、D. Williams、C. Doutriaux、V. Pascucci 和 C. R. Johnson。《Ensemble-Vis：集合数据统计可视化框架》。载于2009年IEEE国际数据挖掘研讨会，第
233 240, 2009 10 1109 2009 55 2 –页。doi：。/
[35] ICDMW。。 F. M. Ralph、J. J. Rutz、J. M. Cordeira、M. Dettinger、M. Anderson、D. Reynolds、L. J. Schick 和 C. Smallcomb。《用于刻画大气河强度及其影响的尺度》。美国气象学会通报，100(2):269–289，2019年。doi: 10.1175/BAMS-D-18-0023.1 2[36] D. F. Rex。《对流层中部的阻塞作用及其对区域气候的影响》。Tellus，2(3):137–236，1950年。doi: 10.1111/j.2153-3490.1950.tb00331.x 1[37] N. Roberto、A. Toniazzo、S. Puca、G. Panegrossi、L. P. D'adderio、M. Petracca、L. Ciabatta、L. Brocca、D. Gencic、I. Smiljanic 和 N. S. Mahovic。《利比亚和希腊中部的洪水灾害》。欧洲气象卫星开发组织（欧洲气象卫星开发组织），2023年。欧洲气象卫星开发组织，案例研究。[38] J.-M. Robine、S. L. K. Cheung、S. L. Roy、H. V. Oyen、C. Griffiths、J.-P. Michel 和 F. R. Herrmann。《2003年夏季欧洲死亡人数超过7万》。Comptes Rendus Biologies，331(2):171–178，2008年。doi: 10 1016 2007 12 001 7 。/j.crvi。。 J. J. Rutz、C. A. Shields、J. M. [39] Lora、A. E. Payne、B. Guan、P. Ullrich、T. O'Brien、L. R. Leung、F. M. Ralph、M. Wehner、S. Brands、A. Collow、N. Goldenson、I. Gorodetskaya、H. Griffith、K. Kashinath、B. Kawzenuk、H. Krishnan、V. Kurlin、D. Lavers、G. Magnusdottir、K. Mahoney、E. McClenny、G. Muszynski、P. D. Nguyen、M. Prabhat、Y. Qian、A. M. Ramos、C. Sarangi、S. Sellars、T. Shulgina、R. Tome、D. Waliser、D. Walton、G. Wick、A. M. Wilson 和 M. Viale。《大气河追踪方法比对项目（ARTMIP）：量化大气河气候学中的不确定性》。《地球物理研究杂志：大气》，124(24):13777–13802，2019年。doi：10.1029/2019JD030936 2[40] J. Sanyal、S. Zhang、J. Dyer、A. Mercer、P. Amburn 和 R. Moorhead。《Noodles：数值天气模型集合不确定性的可视化工具》。IEEE可视化与计算机图形学汇刊，16 6 1421 1430, 2010 10 1109 2010 181 2 ( ): – 。doi：。/ [41] TVCG。。 C. Schär、P. L. Vidale、D. Lüthi、C. Frei、C. Häberli、M. A. Liniger 和 C. Appenzeller。《温度变异性增加在欧洲夏季热浪中的作用》。《自然》，427:332–336，2004年。doi：10.1038/nature02300 7[42] R. Schiemann、M.-E. Demory、L. C. Shaffrey、J. Strachan、P. L. Vidale、M. S. Mizielinski、M. J. Roberts、M. Matsueda、M. F. Wehner 和 T. Jung。《四个25千米大气全球环流模型中北半球阻塞的分辨率灵敏度》。《气候杂志》，30(1):337–
358, 2017 10 1175 16 0100 1 1 。doi：。/JCLI-D- - 。 A. A. Sellar、 [43] C. G. Jones、J. P. Mulcahy、Y. Tang、A. Yool、A. Wiltshire、F. M. O'Connor、M. Stringer、R. Hill、J. Palmieri、S. Woodward、L. de Mora、T. Kuhlbrodt、S. T. Rumbold、D. I. Kelley、R. Ellis、C. E. Johnson、J. Walton、N. L. Abraham、M. B. Andrews、T. Andrews、A. T. Archibald、S. Berthou、E. Burke、E. Blockley、K. Carslaw、M. Dalvi、E. Edwards、G. A. Folberth、N. Gedney、P. T. Griffiths、A. B. Harper、M. A. Hendry、A. J. Hewitt、B. Johnson、A. Jones、C. D. Jones、J. Keeble、S. Liddicoat、O. Morgenstern、R. J. Parker、V. Predoi、E. Robertson、A. Siahaan、R. S. Smith、R. Swaminathan、M. T. Woodhouse、G. Zeng 和 M. Zerroukat。《UKESM1：英国地球系统模型的描述与评估》。《地球系统建模进展杂志》，11(12):4513–
4558, 2019 10 1029 2019 001739 1, 3 。doi：。/ MS G. A. Sokolowsky、 [44] S. W. Freeman、W. K. Jones、J. Kukulies、F. Senf、P. J. Marinescu、M. Heikenfeld、K. N. Brunner、E. C. Bruning、S. M. Collis、R. C. Jackson、G. R. Leung、N. Pfeifer、B. A. Raut、S. M. Saleeby、P. Stier、，和 S. C. van den Heever。《tobac v1.5：引入快速三维追踪、分裂与合并，以及用于识别和分析气象现象的其他增强功能》。《地球科学模型开发》，
17 13 5309 5330, 2024 10 5194 17 5309 2024 2 ( ): – 。doi：。/gmd- - - [45] K. Strommen 、 I. Mavilia 、 S. Corti 、 M. Matsueda 、 P. Davini 、 J. von Hardenberg、P.-L. Vidale 和 R. Mizuta。《欧洲—大西洋环流型对模型水平分辨率的灵敏度》。《地球物理研究快报》，
46 13 7810 7818, 2019 10 1029 2019 082843 2 ( ): – 。doi：。/ GL C. [46] Thomas、A. Voulgarakis、G. Lim、J. Haigh 和 P. Nowack。《识别阻塞事件的无监督学习方法：以欧洲夏季为例》。《天气与气候动力学》，2(3):581–608，2021年。doi: 10 5194 2 581 2021 1, 2, 3, 4, 5, 6, 8 。/wcd- - - S. Tibaldi 和 F. Molteni。[47] 《阻塞的业务预报可预测性》。
Tellus A, 42(3):343 – 365, 1990. doi: 10.1034/j.1600-0870.1990.t01-2 -00003.x 2[48] R. M. Trigo, R. García-Herrera, J. Díaz, I. F. Trigo, and M. A. Valente. 法国2003年8月初的热浪有多么异常？Geo- physical Research Letters, 32(10), 2005. doi: 10.1029/2005GL022410 7[49] A. Ullmann, B. Fontaine, and P. Roucou. 欧大西洋天气型与地中海降雨模式：当前变异性及CMIP5预测下的预期变化。《国际气候学杂志》，34 8 2634 2650, 2014 10 1002 3864 2 ( ): – . doi: . /joc. R. Vautard. [50] 北大西洋的多种天气型：前兆与后续特征分析。《月度天气评论》, 118(10):2056 – 2081, 1990. doi: 10.1175/1520-0493(1990)118<2056:MWROTN>2.0. CO;2 2[51] J. Wang, S. Hazarika, C. Li, and H.-W. Shen. 集合数据的可视化与视觉分析：综述。IEEE可视化与计算机图形学汇刊, 25(9):2853–2872, 2019. doi: 10.1109/TVCG. 2018.2853721 2[52] H. Wazneh, P. Gachon, R. Laprise, A. de Vernal, and B. Tremblay. 北大西洋大气阻塞事件：趋势及其与气候异常和遥相关的联系。《气候动力学》, 56 2221, 2021 7 2199 10 1007 00382 020 05583 8 ( ): – . doi: . /s - - -x [53] R. T. Whitaker, M. Mirzargar, and R. M. Kirby. 等值线箱线图：一种用于表征模拟集合中特征集不确定性的方法。IEEE可视化与计算机图形学汇刊,
19 12 2713 2722, 2013 10 1109 2013 143 2, 4 ( ): – . doi: . / [54] TVCG. . W. Widanagamaachchi, A. Jacques, B. Wang, E. Crosman, P.-T. Bremer, V. Pascucci, and J. Horel. 探索气压扰动的演变以理解大气现象。IEEE第十届太平洋可视化研讨会（PacificVis），2017. doi: 10.1109/PACIFICVIS.2017.8031584 2[55] S. Wilkinson, P. Nowack, and M. Joshi. 基于过程的机器学习利用观测数据约束未来区域变暖预测。《地球物理研究杂志：机器学习与计算》，
2 2 2025 000698, 2025 10 1029 2025 000698 1 ( ):e JH . doi: . / [56] JH T. Woollings, D. Barriopedro, J. Methven, S.-W. Son, O. Martius, B. Harvey, J. Sillmann, A. R. Lupo, and S. Seneviratne. 阻塞及其对气候变化的响应。《当代气候变化报告》, 4:287–300, 2018. doi: 10.1007/s40641-018-0108-z 1[57] T. Woollings, A. Hannachi, and B. Hoskins. 北大西洋涡旋驱动急流的变异性。Quarterly Journal of the Royal Meteoro- logical Society,
136 649 856 868, 2010 10 1002 625 8 ( ): – . doi: . [58] /qj. L. Yan, H. Guo, T. Peterka, B. Wang, and J. Wang. TROPHY：一种用于热带气旋的拓扑鲁棒、物理信息追踪框架。IEEE可视化与计算机图形学汇刊, 30(1):1249– 1259, 2024. doi: 10.1109/TVCG.2023.3326905 2[59] L. Yan, P. A. Ullrich, L. P. Van Roekel, B. Wang, and H. Guo. 二维向量场特征追踪、筛选与比较的多层级鲁棒性。《计算机图形学论坛》，42(6):e14799, 2023. doi: 10.1111/cgf.14799 2[60] H. Zhang, J. Finkel, D. S. Abbot, E. P. Gerber, and J. Weare. 利用可解释人工智能和迁移学习，在观测数据有限的情况下理解并预测大西洋阻塞的维持。《地球物理研究杂志：机器学习与计算》, 1 000243, 2024 4 2024 10 1029 2024 000243 2 ( ):e J H . doi: . / JH

运行时性能与分析

本节报告框架中阻塞检测和不确定性可视化组件的运行性能。基准测试硬件配置详见第6节。

阻塞检测。我们报告了在 ERA5 和 UKESM 数据集上进行阻塞检测的运行时间，见 表 5。为便于比较，我们还列出了采用 Pinheiro 等人修改方案的 DG83 流程的运行时间。 [8, 32]；详情请参见 第 7.1 节。

表 5 显示，DG83 和我们的方法在两个数据集上检测 6月至8月期间各日的阻塞事件，耗时均不到一分钟。两种方法都非常高效，因为它们无需通过训练过程来学习阻塞型态。与 DG83 相比，我们的实现额外增加了 43.1%–46.7%的运行时间，主要是因为增加了搜索大区域重叠的步骤。

表 5：使用 DG83 和我们的方法在 6月至8月时段进行阻塞检测的运行时间（秒）。

数据集	年份	方法	总运行时间（秒）	每年平均运行时间（秒）
ERA5	41	DG83	31.02	0.757
		Ours	45.51	1.110
UKESM	101	DG83	18.17	0.180
		Ours	26.00	0.257

不确定性可视化。回顾一下，我们使用阻塞频率热图、等值线箱线图和三维时间堆叠图来可视化不确定性。频率图和时间堆叠图的计算只需进行简单累加，而等值线箱线图的计算量则更大：对于给定的日历日期 i，若所有年份中共有 d_i 个阻塞日，构建等值线箱线图需要 $O(d_i^2)$ 次运算。

对于6月至8月时段的所有数据，我们的实现在 ERA5（41 年）和 UKESM（101 年）上完成所有不确定性可视化计算分别耗时 35.18 秒和 140.31 秒。UKESM 的计算成本更高是预期之中的，因为其典型的 d_i 大于 ERA5。在这两个数据集中，运行时间都足够短，适合实际应用和后续分析。

潜在改进。尽管我们的实现已经很高效，仍可通过并行化进一步提升性能。在阻塞检测中，区域重叠测试和轨迹连接在不同时间步之间相互独立，因此非常适合并行执行。对于不确定性可视化，尤其是等值线箱线图，成对带状区域计算也可以并行化。这些机会使我们的框架能够轻松扩展到更大的数据集。

B 扩展评估

在本节中，我们将阻塞检测评估扩展至整个 JJA 季节，以评估时间稳定性。如第 7.2 节所述，我们以专家GTD标签为基准评估性能。由于当前环境无法获取逐日输出，因此此处不纳入 SOM-BI。

每日结果的季节性模式。图 9汇总了每个日历日期对应的 ERA5 中 41 个 JJA 样本；所有柱形高度相同，颜色组成表示**真阴性**、**真阳性**、**假阳性**和**假阴性**（分别为真阴性、真阳性、假阳性和假阴性）的占比。

初夏（5月28日至6月24日），我们的方法（下图）中**假阳性** 占比高于**假阴性**，反映出这一时期的判定倾向更为宽松。夏季中期至夏末（6月25日至9月4日），**假阳性**明显减少，而从7月中旬至8月下旬，**假阴性** 的数量虽不多，却持续出现。由于这一时段**假阳性** 和**假阴性** 数量相近，因此整体表现较为均衡，并未明显偏向漏检或虚警。相比之下，DG83（上图）在季初记录到的**假阳性** 较少，但总体**假阴性**明显更多，尤其是在夏季中期和夏末，与其检测器判定更为保守的特点一致。两种方法在6月至8月均呈现季节性变化：**假阳性** 通常从初夏到夏末逐渐减少，而**假阴性** 则有所增加。这些是在41年汇总尺度上观察到的持续数周的变化模式；我们不对逐日波动进行解读。

图10 展示了UKESM（101个JJA季节）按日期汇总的相应结果。与ERA5不同，TN/TP/FP/FN的组成在整个季节中相对稳定，几乎没有系统性的季节内变化，这与工业化前模拟的设置相符，因为该设置中季节变化并不显著。我们的方法（下图）在不同日期均保持假阳性 和**假阴性** 数量均衡，表明其并未明显偏向虚警或漏检。与 DG83（上图）相比，我们的检测器产生的假阳性数量相近，但**假阴性**明显更少，这与其在UKESM上的整体检测表现更佳相符。

采用单一参数配置时，我们的检测器在两个 JJA 季节和不同数据集上均表现稳定，同时能够适应轻微的季节变化。在 ERA5 中，初夏的**假阳性**占比更高，这一包容性阶段与我们此前观察到的偏向较高召回率的偏差一致；随后在夏季中后期，
其中**假阳性**和**假阴性**总体上保持均衡。在 UKESM 中，各日期的组成几乎没有变化，整个季节**假阳性**和**假阴性**之间始终保持一致的平衡。总体而言，这些结果表明，我们的检测器在季节尺度上运行稳定，在 JJA 初期略微偏向包容性，此后则实现均衡的性能，同时维持主评估中报告的精确率水平。

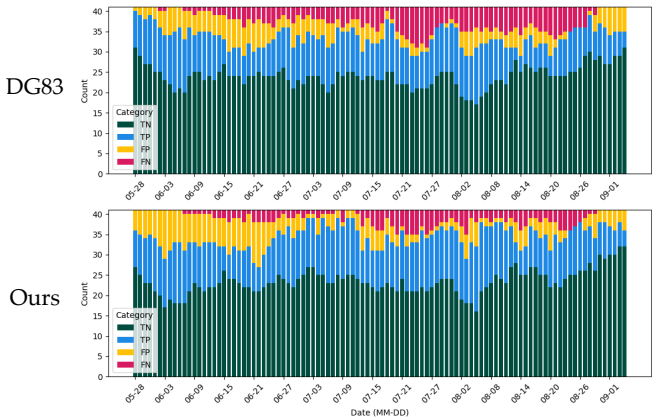

图9：ERA5中6月至8月时段（41年）每日检测结果的时间分布。上：DG83；下：我们的方法。对于每个日历日期（x轴），堆叠柱汇总了41个每日样本（每年一个），因此所有柱子的高度相同。颜色表示真阴性（深绿）、真阳性（蓝）、假阳性（黄）和假阴性（洋红）的数量。该可视化比较了两种方法在整个季节中正确结果和错误结果的构成如何变化。

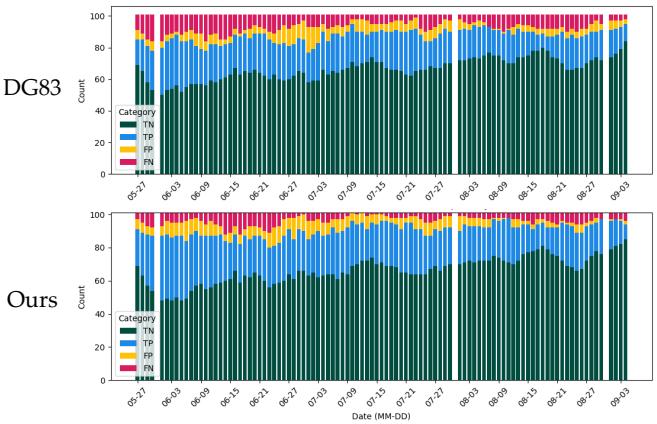

图10：UKESM中6月至8月时段（101年）每日检测结果的时间分布。上：DG83；下：我们的方法。对于每个日历日期（x轴），堆叠柱汇总了101个每日样本（每年一个），因此所有柱子的高度相同。颜色表示真阴性（深绿）、真阳性（蓝）、假阳性（黄）和假阴性（洋红）的数量。5月31日、7月31日和8月31日对应的列为空白，因为UKESM模拟的日历中不包含这些日期。