arXiv:2601.03856v1 [physics.geo-ph] 7 Jan 2026

评估 Meteo-HySEA 对亚得里亚海气象海啸事件的模拟性能

Alejandro Gonz´alez[1*]、Cl´ea Denamiel[2,3†] 和Jorge Mac´ıas[1†]

[1*]马拉加大学数学分析、统计学与运筹学系及应用数学系，特阿蒂诺斯校区，M´alaga，29071，西班牙。[2]鲁杰尔·博什科维奇研究所海洋与环境研究部，Bijeni˘ckacesta 54，萨格勒布，10000，克罗地亚。[3]亚得里亚海作物与喀斯特土地改良研究所，Put Duilova 11，斯普利特，21000，克罗地亚。

通讯作者。电子邮箱：alexgp@uma.es；其他作者：clea.lumina.denamiel@irb.hr；jmacias@uma.es；

†所有作者对本研究的贡献相同。

摘要

气象海啸是由大气驱动的海平面振荡，可能引发危险的沿海洪水，在共振海湾中尤为如此。本研究评估了基于图形处理器的 Meteo-HySEA 模型在亚得里亚海气象海啸模拟中的表现，并以基于中央处理器的 AdriSC-ADCIRC 系统为基准进行比较。研究使用 WRF 对 ERA再分析资料进行降尺度，模拟了三个有记录的事件（2014年、2017年和2020年），并利用潮位计和微气压计观测结果进行验证。两种模型均受到大气强迫中中尺度气压扰动低估的限制。Meteo-HySEA 通常能够再现海平面振荡的发生时间和空间变化，且所得振幅往往大于 ADCIRC；但它倾向于高估主导波周期，在封闭海盆中尤为明显。振荡持续性方面的差异凸显了进一步使用高分辨率潮位计数据开展验证的必要性，以评估 Meteo-HySEA 是否能更真实地捕捉港口塞什，或 ADCIRC 是否能更好地呈现物理能量耗散。尤为重要的是，图形处理器加速使计算效率提升了一个数量级，从而能够快速开展包括淹没模拟在内的高分辨率多网格模拟，为业务化预警带来了巨大潜力。

关键词：Meteo-HySEA，图形处理器，气象海啸，亚得里亚海，AdriSC，ADCIRC

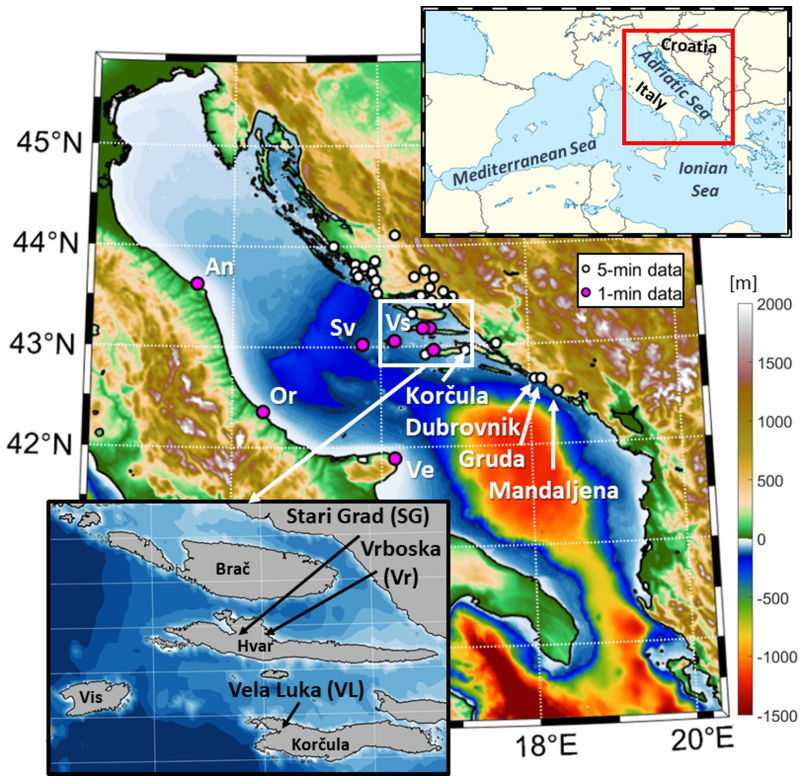


图 1 亚得里亚海盆地的位置及地形—水深地形，并放大显示研究区域，包括维拉卢卡、斯塔里格勒和弗尔博斯卡港口。观测网络采用微气压计位置（粉色圆圈）和维拉卢卡、斯塔里格勒港口潮位计位置的 1 分钟数据，以及来自各类压力传感器（白点）的 5 分钟数据。

1 引言

气象海啸——由大气扰动产生的类海啸海平面振荡（Monserrat 等，2006）是世界多个地区有充分记录的灾害（例如，Zemunik 等，2022）。这类高频海平面事件可能对沿海基础设施和人身安全造成毁灭性后果，尤其是在狭窄的海湾和港口，共振效应会显著放大波高（Salaree 等，2018）。与科学界和公众普遍较为熟悉的地震海啸不同，气象海啸往往在几乎没有预警的情况下发生，并且在风险评估中经常被低估（Lewis 等，2024）。然而，近期发生在地中海（Orli´c 等，2010）、五大湖（Bechle 等，2016）及其他地区的破坏性事件表明，气象海啸的影响可与“经典”海啸相当，尤其是在其与高潮或风暴潮同时出现时（Toj˘ci´c 等，2021）。因此，准确模拟和预报气象海啸，对于业务化预警系统以及对其动力学的基础研究都至关重要（例如，Renault 等，2011；Angove 等，2021；Anderson 和 Mann，2021；Sun 和 Niu，2021；Rahimian 等，2022；Kim 等，2022）。

在亚得里亚海（图 1）中，亚得里亚海与海岸（AdriSC）建模套件已成功采用基于中央处理器（CPU）的高分辨率大气和海洋模型来模拟气象海啸，尤其是在维拉卢卡、斯塔里格勒和弗尔博斯卡等易受影响的海湾和港口。AdriSC系统展现出重建历史气象海啸事件的强大能力，既为预警策略提供了支持，也促进了对该区域特有的大气—海洋相互作用的理解（Denamiel等（2018）、2019、b、2022；Toj˘ci´c等（2021））。这些成果凸显了亚得里亚海作为研究气象海啸物理学以及测试可进一步推广至其他地区的预报策略的天然实验室价值。

然而，AdriSC中此类基于CPU的模拟所需的计算成本仍是一个关键瓶颈，尤其是在集合预报、概率性危害评估或实时预警方面。业务中心需要近实时结果，而模拟耗时数小时与仅需数分钟之间的差异，可能决定预警系统的有效性（例如，一次6小时的海啸预报在GPU上仅需1.5分钟）。除了速度之外，GPU并行处理还能同时运行多次模拟，使敏感性和不确定性分析更加可行。例如，采用GPU增强的GeoClaw模型相较于16核CPU实现了3.6–6.4× 倍的加速（Qin等（2019））。Volna-OP2模型进一步展现了这一能力：一次6小时的高分辨率淹没模拟在单个Nvidia Tesla V100 GPU上仅用2.25分钟便完成（Giles等（2021））。总体而言，GPU架构的计算效率和能源性能推动了其在全球业务化海洋预报系统（Porter和Heimbach（2025））以及海啸模拟（例如，Mac´ıas等（2020b））中的应用。

本研究介绍并评估了新型 HySEA 模型在模拟气象海啸方面的最新进展（以下简称 Meteo-HySEA）。Meteo-HySEA 属于 HySEA 模型系列，由西班牙马˙拉加大学的 EDANYA研究组开发。该系列包括用于海啸传播和淹没的数值模型。这些模型采用先进的有限体积法，并在基于图形处理器的框架中兼顾稳健性、可靠性和精度，从而实现快于实时的模拟。Tsunami-HySEA 经历了广泛测试（Castro等 2005年、2006年、2008年；de laAsunci´on等 2013年；Lynett等 2017年），并按照美国国家海啸灾害减灾计划（NTHMP）的标准进行了验证和核验（Mac´ıas等 2017年、2020年，b）。Tsunami-HySEA 和用于模拟滑坡引发海啸的代码 Landslide-HySEA 均被认定为 ChEESE、ChEESE-2P、DT-GEO、Geo-INQUIRE 和 eFlows4HPC 等重大项目中的欧洲旗舰代码。Tsunami-HySEA 还应用于多个海啸预警系统，包括西班牙国家地理研究所（IGN）、智利海军水文与海洋局（SHOA）、美国国家海洋和大气管理局下属的太平洋海洋环境实验室（PMEL-NOAA，美国）以及国家地球物理与火山学研究所（INGV，意大利）的预警系统。

Meteo-HySEA 是一个全新的基于图形处理器的框架，可将高分辨率大气压力场作为强迫，并能够以计算效率

高效的方式模拟气象海啸的生成、传播、沿岸放大和淹没。通过集成淹没模拟能力，Meteo-HySEA 不再局限于开阔水域中的传播，还能应对备灾工作中最关键的问题之一：气象海啸对社区和基础设施造成的陆上影响。Meteo-HySEA 的早期功能已在 ChEESE-2P (2025) 中展示。该软件还通过实验室实验验证了其再现普劳德曼共振的能力（例如，Vilibi´c 2008；Beisiegel 和 Behrens 2022），并通过 2010 年墨西哥湾的真实案例进行了验证（Horrillo 等，2022），采用实际水深数据和合成大气压力强迫（Gonzalez-Pino 等，2024）。此外，Gonzalez-Pino 等(2025) 详细介绍了数值格式，并展示了其中一些结果。

鉴于 AdriSC 在亚得里亚海展现出的优势，我们拟通过将 Meteo-HySEA 应用于该地区一系列记录详尽的历史气象海啸事件，检验其性能，具体包括2014年6月、2017年6月至7月以及2020年5月的事件。这些事件具有高质量的观测数据集，和/或已有成功的 AdriSC 模拟结果，因此是验证这一新建模系统的理想案例。

通过这种模型比较方法，我们旨在评估 Meteo-HySEA 模型捕捉观测到的气象海啸关键特征的能力，并找出相较于传统基于中央处理器的建模框架可能具有的优势与局限。除了学术意义之外，我们的研究结果还将为基于图形处理器的模型如何应用于预警系统提供见解；在预警系统中，计算速度、可靠性和淹没细节对于及时降低风险至关重要。

本文结构如下。第2 节介绍本研究使用的模型、数据集和方法。第3 节比较 AdriSC 和 Meteo-HySEA 对三个记录详尽的亚得里亚海气象海啸事件（2014年6月、2017年6月至7月以及2020年5月）的模拟结果。第4节进一步分析 Meteo-HySEA 在重现亚得里亚海气象海啸方面的性能，随后在第5节给出主要结论。

2 模型、数据与方法

2.1 亚得里亚海与海岸（AdriSC）建模套件

在本研究背景下，AdriSC建模框架由两个相互连接的组成部分构成：一个基础模块，用于模拟整个亚得里亚海地区公里尺度的大气和海洋动力学（Denamiel 等，2021、2022；Prani´c 等，2021）；以及一个专用的气象海啸模块，用于开展高分辨率灾害评估（Denamiel 等，2019）。

其核心基础模块基于对海洋–大气–波浪–沉积物–输运耦合（COAWST）建模系统的增强实现（Warner 等，2010）。该系统利用模型耦合工具包（MCT），实现天气研究与预报（WRF；Skamarock，2004）大气模型与区域海洋建模系统（ROMS；Shchep- etkin 和 McWilliams，2009）之间的动态耦合。在此配置中，WRF 在两个嵌套区域运行，分辨率分别为 15 km 和 3 km，覆盖地中海中部

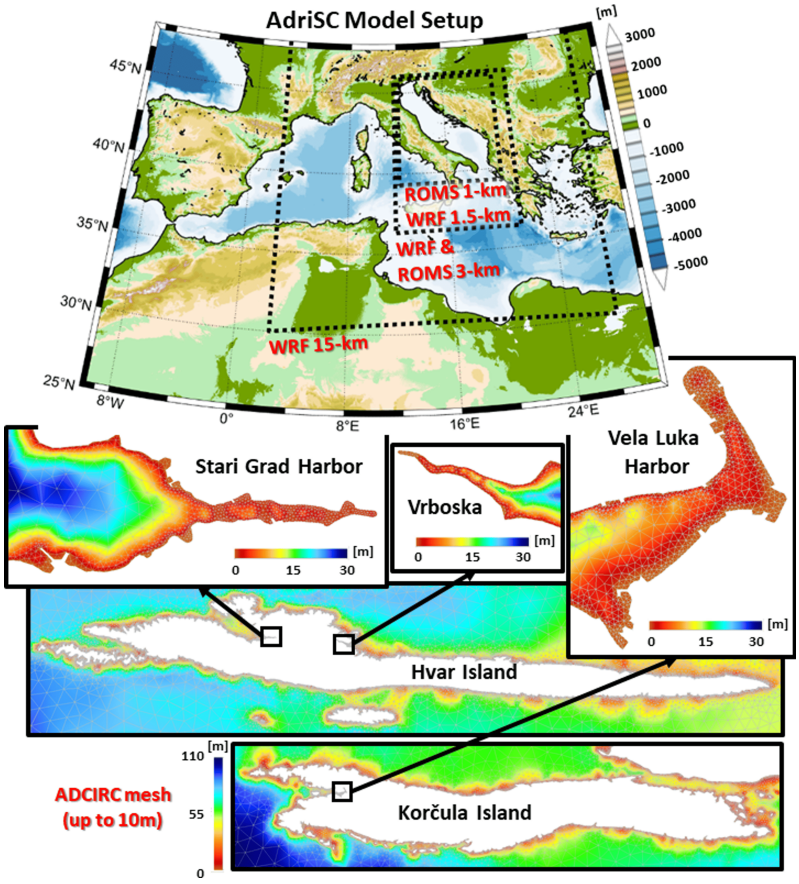


图 2 亚得里亚海与海岸（AdriSC）建模套件的设置，包括所用不同模型（WRF、ROMS 和 ADCIRC）的计算域，并放大显示 ADCIRC 模型网格在关注位置（维拉卢卡、斯塔里格勒和弗尔博斯卡港口）处的细节。

和亚得里亚—爱奥尼亚地区（图2），相应地，ROMS 在分辨率为 3 km 和 1 km 的网格上运行，分别覆盖亚得里亚—爱奥尼亚域和亚得里亚海盆地（图2）。

另一方面，专用的气象海啸组件采用离线耦合策略：将降尺度至亚得里亚海上空1.5 km空间分辨率的WRF模型，驱动二维深度积分（2DDI）ADvanced CIRCu-lation（以下简称AdriSC-ADCIRC）模型。该模型采用非结构网格，在特别易受气象海啸影响的区域（例如维拉卢卡、StariGrad和弗尔博斯卡；见图2）将空间分辨率细化至10 m。耦合流程首先从3 km WRF域获取逐小时大气输出，随后将其进一步降尺度至1.5 km域，并按分钟保存。接着，这些WRF输出与来自1 km ROMS网格的逐小时海面高度结合，用于强迫AdriSC-ADCIRC模型。在此配置下，ADCIRC模型接收来自1.5 km WRF网格的分钟级风和气压强迫，以及逐小时的海洋

边界条件——其中包含潮汐影响——这些条件来自南部边界、奥特朗托海峡附近的ROMS模拟。

所有 AdriSC 模拟的持续时间各不相同，并根据每次气象海啸多日事件的发展情况进行调整——2014年6月事件为4天，2017年6月至7月事件为6天，2020年5月事件为11天。不过，每次模拟的前两天均视为启动期，以便模型达到稳定状态，分析仅使用剩余时段。此外，用于驱动 AdriSC WRF 和 ROMS 模型的大气和海洋强迫场基于最先进的再分析产品。具体而言，AdriSC WRF 15 km 域使用 ERA-Interim（ERAI；Dee等，2011年）和 ERA5（Hersbach等，2020年）再分析资料进行初始化和强迫。然而，ERAI 于2019年8月停用，因此无法用于该日期之后的模拟。因此，2020年气象海啸事件模拟仅使用 ERA5 再分析资料进行强迫。下文中，WRF-ERAI 和 WRF-ERA5 分别指 AdriSC WRF 1.5 km 模拟的 1 分钟输出；这些模拟由 AdriSC WRF 3 km 模型降尺度而来，后者嵌套在由 ERAI 和 ERA5 再分析资料强迫的 15 km 域中。对于海洋部分，ROMS 3 km 域使用哥白尼地中海再分析（MEDSEA；Escudier等，2021年）在开放边界处进行初始化和强迫。

2.2 Meteo-HySEA 模型

Meteo-HySEA是HySEA模型系列的成员，旨在为气象海啸研究界提供先进的工具和专业知识，使其达到其他海啸研究领域所具备的相当水平，并利用以往开发的技术，准确模拟由各种源产生的海啸，例如地震（Mac´ıas等，2017年、2020年、b）和滑坡（de la Asunci´on等，2013年；Mac´ıas等，2015年、2017年；Gonz´alez-Vida等，2019年；Esposti Ongaro等，2025年）。Meteo-HySEA继承了HySEA模型系列的两项关键特性：（i）双向嵌套网格算法；（ii）多GPU并行化。嵌套网格系统支持高分辨率淹没建模，并能准确模拟沿海地区的类海啸波；多GPU方法则利用多张显卡的计算能力，大幅缩短模拟时间。

Meteo-HySEA 读取定义在结构化网格上的时变压力场；在嵌套模拟中，其空间坐标必须与零高程地形水深网格的空间坐标严格一致。在时间维度上，模型会对压力强迫进行插值。由于海啸求解器的时间步长（通常为 $\Delta t = 10^{-1}, 10^{-2}, 10^{-3}$ .. .秒）与大气模型的时间分辨率（ Δt分钟量级）相差很大，因此这种插值至关重要。为兼顾准确性与效率，Meteo-HySEA 仅将连续的两个大气压力快照载入内存，即夹住当前模拟时间的两个快照，并根据局部海啸时间步长进行凸线性插值。

Meteo-HySEA 模型依赖 WRF-ERAI 和 WRF-ERA5 模型提供的压力强迫，并采用源自 AdriSC ROMS 1 千米模拟的初始海平面条件，但不包括潮汐或大尺度海平面边界

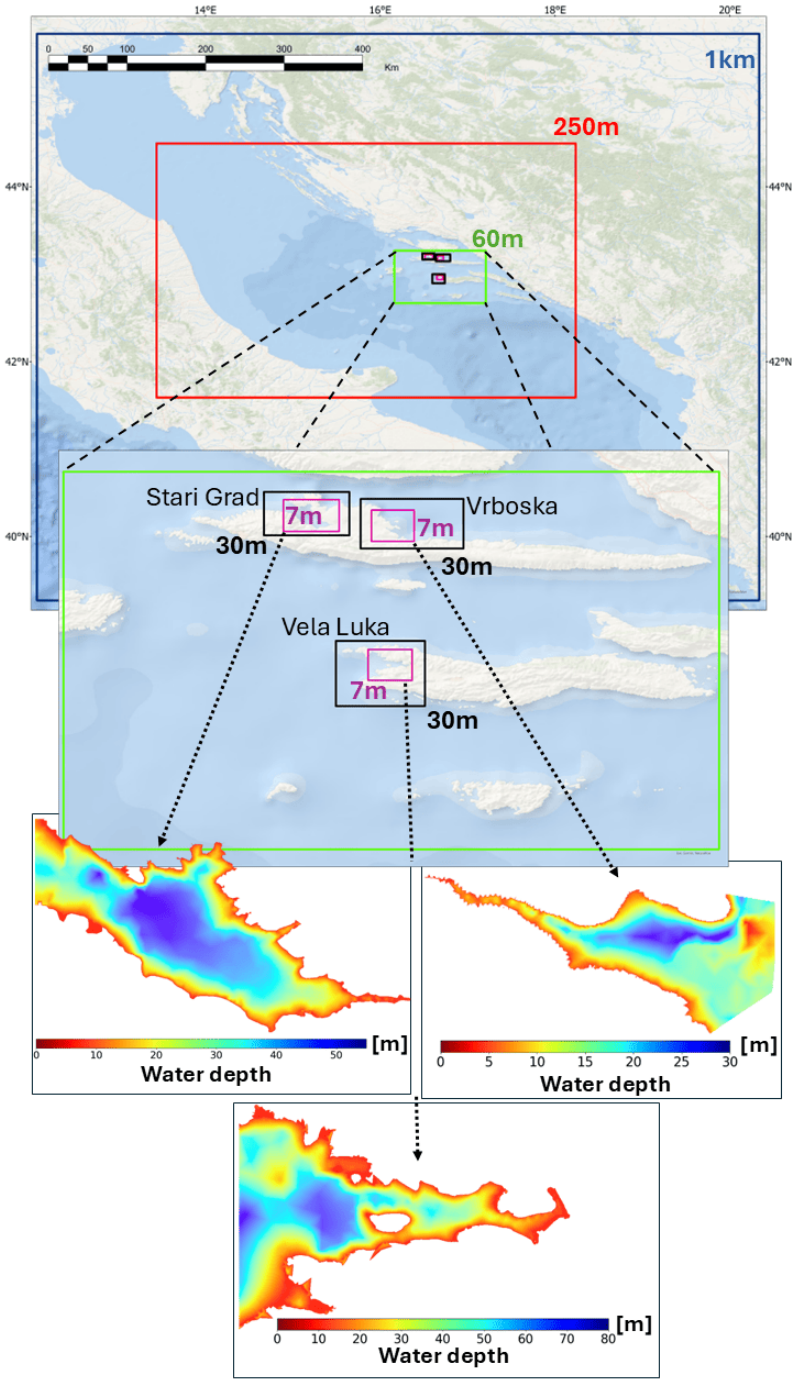


图 3 Meteo-HySEA 嵌套网格系统设置。图中展示了一个五级嵌套网格系统，轮廓线表示各网格的范围。空间分辨率依次为 1 km（蓝色）、250 m（红色）、60 m（绿色）、30 m（黑色）和 7 m（洋红色）。底部图像展示了覆盖斯塔里格勒、弗尔博斯卡和维拉卢卡区域的最高分辨率网格的放大视图。

表 1 亚得里亚海 Meteo-HySEA 嵌套网格的设置。每个条目包含网格覆盖的范围和网格单元数量。

分辨率	网格范围	网格单元数量
1km	$[12.07°, 20.34°] \times [39.26°, 45.75°]$	893×701
250m	$[13.44°, 18.24°] \times [41.59°, 44.5°]$	2072×1256
60m	$[16.16°, 17.21°] \times [42.67°, 43.27°]$	1808×1040
维拉卢卡		
30m	$[16.6°, 16.74°] \times [42.9°, 43°]$	492×360
7m	$[16.65°, 16.72°] \times [42.94°, 42.99°]$	972×680
斯塔里格勒		
30m	$[16.48°, 16.61°] \times [43.17°, 43.24°]$	472×240
7m	$[16.51°, 16.6°] \times [43.17°, 43.22°]$	1228×700
弗尔博斯卡		
30m	$[16.64°, 16.8°] \times [43.15°, 43.23°]$	568×274
7m	$[16.65°, 16.72°] \times [43.16°, 43.21°]$	944×688

开放边界处的强迫，纯粹聚焦于由大气扰动驱动的动力学过程。因此，AdriSC-ADCIRC 和 Meteo-HySEA 模型均由 WRF-ERAI 和 WRF-ERA5 模拟持续提供强迫，从而能够比较评估不同大气再分析条件下的模型性能，正如 Denamiel 等人 (2019，b) 中所示。

本研究所分析气象海啸事件的 Meteo-HySEA 模拟设置如图 3 所示。采用五级嵌套网格系统，以实现目标位置的高空间分辨率。该配置首先使用覆盖整个亚得里亚海的 1 km 网格，并嵌套至 250 m 网格中。随后，在该网格内设置覆盖赫瓦尔岛和科尔丘拉岛的 62.5 m 网格（约 60 m）。对于每个具体位置（斯塔里格勒、维拉卢卡和弗尔博斯卡），在 60 m 网格内进一步生成 31.25 m 网格（约 30 m），最后采用 7 m 网格对海湾和港口进行详细解析。由于零级网格的空间分辨率为 1 km，因此将 1.5 km WRF-ERAI 和 WRF-ERA5 模型的大气压力场重采样至该分辨率。Meteo-HySEA 模拟中所使用的各网格的空间范围和单元数量汇总于表 1。

2.3 气象海啸事件

本研究重点详细分析了三次重大事件期间气象海啸对维拉卢卡港（科尔丘拉岛；图 1）、斯塔里格勒港和弗尔博斯卡港（均位于赫瓦尔岛；图1）造成的影响：2014年6月25日至26日、2017年6月30日至7月1日，以及2020年5月11日至19日。选择这些地点，是因为它们是克罗地亚海岸线上最易发生气象海啸的地区之一（ˇSepi´candOrli´c2022），其狭长的地形常导致强烈的共振放大，

半封闭地貌及其相对于典型大气扰动路径的朝向（图 2）。此外，所选事件是亚得里亚海观测到的能量最强、持续时间最长的气象海啸之一，对沿海基础设施、航行和港口安全造成了可测量的影响。值得注意的是，这些事件均由 MESSI 项目（东亚得里亚海气象海啸——破解高频海平面振荡之谜）期间部署的观测网络全部或部分记录；该网络详见 Denamiel et al. (2019,b)，由此得以高时空分辨率观测海平面振荡和大气压力扰动。尽管2014年6月事件发生在 MESSI 仪器全部部署完成之前，但由于 AdriSC大气—海洋模式套件成功再现了该事件的关键特征，它仍是一个参考案例，也由此证明了这一建模框架在气象海啸研究中的稳健性和可靠性。

2014年6月25日至26日，一场罕见的多重气象海啸事件影响了克罗地亚海岸的多个地点。维拉卢卡和斯塔里格勒记录到大幅振荡，港口内海平面最高达到1.5米。此次事件由一列从第勒尼安海横越亚得里亚海传播而来的大气重力波触发，在5分钟内产生了高达2.4 hPa的快速压力扰动。这些大气扰动的传播速度接近当地的浅水波波速，形成了有利于普劳德曼共振的条件（例如，Denamielet al. 2019，b）。

2017年6月28日至7月1日还发生了其他强烈的气象海啸事件，尤其影响了赫瓦尔岛上的斯塔里格勒湾和弗尔博斯卡湾。振荡持续近24小时，潮位计记录到的最大振幅高达0.69米，而弗尔博斯卡港的视频观测显示振幅超过1米。这些波浪造成海水交替退落和突发洪水，损坏了小型船只和沿海基础设施。这些气象海啸与地中海中部天气尺度气旋引发的大气扰动有关；该气旋在500 hPa高度产生了风速超过55 m/s的高空急流风。海平面异常开始时，近乎同时出现了约1–1.3 hPa的地表压力扰动，这支持了大气共振理论。天气尺度分析和压力记录证实，存在符合赫瓦尔半封闭海湾气象海啸生成共振判据的大气重力波（例如，Denamiel et al. 2019，b）。

最后，在2020年5月11日至19日期间，亚得里亚海东岸发生了一系列显著的气象海啸事件，维拉卢卡、斯塔里格勒和弗尔博斯卡海湾尤其受到影响。这些海平面振荡幅度为0.6至0.8米，由反复出现的高频大气压力扰动（5至15分钟内变化2至4百帕）以及半封闭海湾中的共振响应共同引发（Tojˇci´等，2021年）。5月11日，维拉卢卡和弗尔博斯卡发生了一次显著事件，潮位计记录显示，峰谷波高达0.81米，周期约为16分钟。与此同时，清晨时分，微气压计记录到强烈的气压振荡：维拉卢卡最高达3.9百帕，弗尔博斯卡达2.5百帕。当地目击者描述了港口洪水、船只被冲上岸，以及持续多日的显著潮汐变化。5月14日至16日发生的后续事件产生了反复出现的波浪，波高达0.8米，

维拉卢卡、斯塔里格勒和弗尔博斯卡港口的波浪周期为12至18分钟，气压下降幅度略小（约1.4百帕）。媒体报道指出，港口水位退落后又连续多日发生洪水，这与潮位计测量结果相互印证。5月16日之后，间歇性的气压波持续至5月19日，但海平面波动仍低于0.3米，且未观测到进一步的洪水。

2.4 观测

本研究使用的第一组观测数据来自 MESSI观测网络（海洋与渔业研究所 2025），该网络专门用于监测亚得里亚海的气象海啸相关大气和海平面扰动。该网络包括八台高频微气压计，使用 V¨ais¨al¨a PTB330 传感器以 1 分钟间隔测量大气压，精度为 ± 0 0.01 hPa。此外，两台高分辨率潮位计使用 OTT 雷达水位传感器（RLS）以 1 分钟采样间隔记录海平面变化，精度为 ± 1 mm。观测数据的详细列表见表 2。

表2 MESSI观测网络。AP 表示配备气压记录仪，SL 表示配备海平面潮位计。

位置	坐标	观测
安科纳 (An)	(13.506°E, 43.625°N)	AP
奥尔托纳 (Or)	(14.415°E, 42.356°N)	AP
维埃斯特 (Ve)	(16.177°E, 41.888°N)	AP
圣瓦茨岛 (Sv)	（15.757°E，43.024°N）	AP
维斯岛 (Vs)	(16.192°E, 43.057°N)	AP
维拉卢卡 (VL)	（16.703°E，42.962°N）	AP，SL
斯塔里格勒（SG）	（16.576°E，43.181°N）	AP，SL
弗尔博斯卡（Vr）	（16.671°E，43.182°N）	AP

这些微气压计经过战略性部署，位于已知会产生并放大气象海啸的区域（图 1 中以粉色圆圈标示），包括亚得里亚海西岸的安科纳（An）、奥尔托纳（Or）和维埃斯特（Ve）；亚得里亚海中部岛屿上的维斯岛（Vs）和圣瓦茨岛（Sv）；以及亚得里亚海东岸的维拉卢卡（VL）、斯塔里格勒（SG）和弗尔博斯卡（Vr）。潮位计安装在维拉卢卡和斯塔里格勒，这两处港口均曾在历史上受到气象海啸事件的影响。然而，需要注意的是，这些潮位计并未安装在海湾最内侧的位置——通常那里观测到的海平面振荡最强——而是位于向海一侧约 2 千米处。因此，记录到的高频海平面信号通常会有所衰减，其幅度可能仅为海湾尽头附近目击者报告值的三分之一至二分之一。

2014年和2017年的气象海啸事件发生时，MESSI观测设备尚未全面部署。因此，为补充这一观测网络，我们还从Crometeo 2025获取了另一组数据。Crometeo 是一个由克罗地亚业余气象学家组成的非营利协会。该数据集提供气压记录

记录覆盖克罗地亚海岸及岛屿的39个位置，时间间隔为5分钟（图1中的白点所示）。尽管该数据的分辨率较低，但它提供了宝贵的空间覆盖范围和历史信息，有助于了解早期事件期间的天气尺度和中尺度条件。

2.5 方法

本研究采用 2 小时 Kaiser–Bessel 高通滤波器处理 AdriSC 模型套件和 Meteo-HySEA 模型生成的模拟气压与海平面数据，以及 MESSI 和 Crometeo 台站记录的观测气压与海平面数据，以分离气象海啸的特征性高频振荡。首先，通过直接比较经高通滤波的模拟值与观测值的气压和海平面时间序列，进行初步验证。此方法用于评估确定性 AdriSC 模型和 Meteo-HySEA 模型在三个选定事件期间捕捉所选位置气象海啸信号的能力：2014年6月25日至26日、2017年6月28日至7月1日，以及2020年5月11日至19日。此外，在 AdriSC WRF 1.5 千米模型中，最大压力扰动以经高通滤波的气压随时间变化率最大值表征，该变化率通过计算 5 分钟间隔内的气压差得出。研究表明，这种方法能够有效识别致气象海啸扰动（Denamiel 等，2019b）。

为刻画 Crometeo 台站记录和模拟的大气压力扰动的主要特征，我们对经过 5 分钟滤波的气压时间序列应用零上穿越法。该方法常用于波浪分析，通过检测气压信号连续向上穿越零基线的位置，识别单个类波事件。根据这些穿越点，波高定义为每个波周期内气压最大值与最小值之差，而波周期则对应于两次连续零上穿越之间的时间间隔。该分析可系统地估算气压扰动幅度和时间尺度，这些都是评估此类扰动引发气象海啸潜力的关键参数。将该方法应用于 Crometeo 网络以及 WRF-ERAI 和 WRF-ERA5 的结果（重采样至 5 分钟时间分辨率），可进一步比较 2014年和 2017 年气象海啸事件期间的大气扰动（尽管其时间分辨率低于 MESSI 台站）。此外，我们还将零上穿越法应用于经过 1 分钟滤波的海平面序列，以比较潮位计观测到的气象海啸波浪特征与 AdriSC-ADCIRC 和 Meteo-HySEA 模型的结果。

3 结果

3.1 大气强迫

为评估 AdriSC 模型重现亚得里亚海气象海啸事件相关大气扰动的能力，我们首先分析最大大气压力扰动的空间分布，以及多个微气压计台站（维斯岛、

维拉卢卡、斯塔里格勒和弗尔博斯卡）处高通滤波气压信号的时间演变。具体而言，我们将现有观测与分辨率为 1 km、分别由 ERA-Interim（ERAI）和 ERA5 再分析资料驱动的 WRF 模拟输出进行比较，涵盖以下事件：2014年6月25日至26日（图 4）、2017年6月28日至7月2日（图 5）以及2020年5月11日至19日（图 6）。附录A（图 A1–A3）还提供了观测与模拟气压扰动的其他比较结果。

对于2014年6月的事件（图 4a、b），WRF-ERA5 模拟产生的气压扰动较弱，且空间分布更局限，大多数最大值低于 0.5 hPa/5 min。相比之下，WRF-ERAI 模拟产生的扰动更强、分布更广，在亚得里亚海盆地的大部分区域超过 0.8 hPa/5 min。时间序列对比（图 4c）显示，WRF-ERA5 捕捉到了维斯岛和维拉卢卡观测到的若干气压波动，尽管其振幅较低、时间变化结构也比观测值更宽缓。相反，WRF-ERAI 往往高估扰动的频率和强度，尤其是在维斯岛，该模拟产生了许多观测中不存在的虚假事件，这表明由 ERAI 驱动的模拟有过度放大中尺度气压特征的倾向。

对于2017年6月至7月的事件（图 5a、b），WRF-ERAI 模拟再次产生了分布更广、强度更大的气压扰动，异常值最高达到 0.8 hPa/5 min。相比之下，WRF-ERA5 模拟产生的气压波动较弱且分布更局限，通常低于 0.5 hPa/5 min。气压时间序列对比（图 5c）表明，在捕捉6月28日观测到的最强大气扰动方面，WRF-ERA5 的表现显著优于 WRF-ERAI；该扰动峰值接近 2.5 hPa。然而，WRF-ERA5 和 WRF-ERAI 均未能再现斯塔里格勒微气压计在6月29日至7月1日期间记录到的持续高振幅波动（范围为 0.5 至 0.75 hPa），这表明两种模拟在事件最后阶段均存在局限。

对于2020年5月的事件（图 6a），WRF-ERA5 模拟显示，最大气压扰动约为 0.5 hPa/5 min，主要集中在意大利海岸线与达尔马提亚中部海岸之间。与 2014年和 2017年事件中采用 WRF-ERAI 模拟的结果相比，这些特征分布更局部，振幅也较低。相应的时间序列（图 6b）显示，5月14日至5月17日期间，WRF-ERA5 捕捉到了维拉卢卡、斯塔里格勒和弗尔博斯卡观测到的几次关键气压波动的发生时间和幅度。然而，模型未能再现这一时期观测到的持续振荡（范围为 0.5 至 1 hPa），更为关键的是，完全漏掉了5月11日记录到的最强扰动——一次高达 2.5 hPa 的急剧气压跃变。这表明，该模型在捕捉与这一特定事件相关的大气扰动的全部强度方面存在明显局限。

总而言之，对采用 ERAI 和 ERA5 再分析资料驱动的 WRF-1公里模拟进行比较后发现，两者在再现导致亚得里亚海气象海啸生成的大气扰动方面存在显著差异。WRF-ERAI 会系统性地产生强度更高、范围更广的气压异常，有时甚至超过观测振幅；它可能过度放大中尺度特征，并产生虚假波动。相比之下，WRF-ERA5 通常产生范围更局部、振幅更低的扰动，在发生时间和结构方面与观测值更加吻合。然而，由 ERA5 驱动的模拟

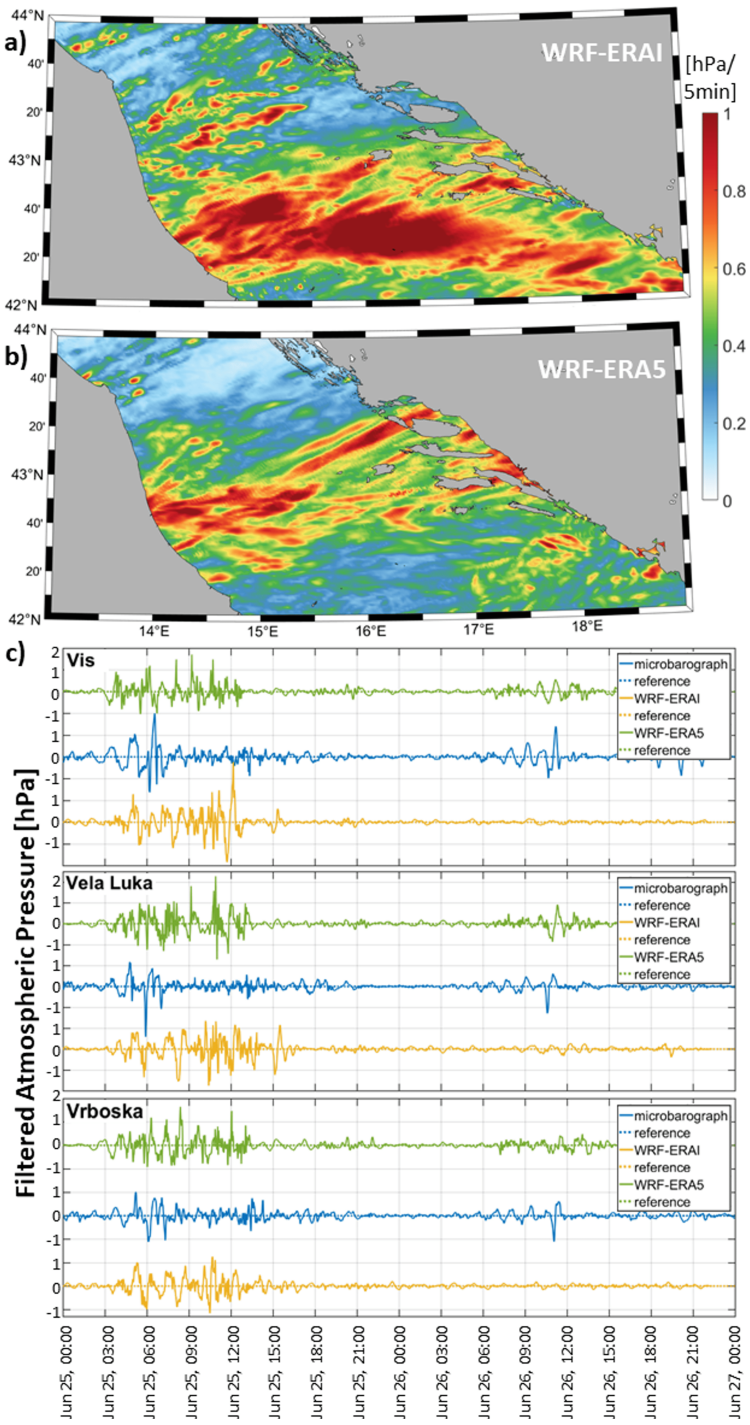


图4 2014年6月25日和26日的气象海啸事件。(a) WRF-ERAI和(b) WRF-ERA5模拟的最大压力扰动空间分布。(c) 维斯岛、维拉卢卡和弗尔博斯卡 MESSI微气压计位置处观测和模拟的滤波大气压力。

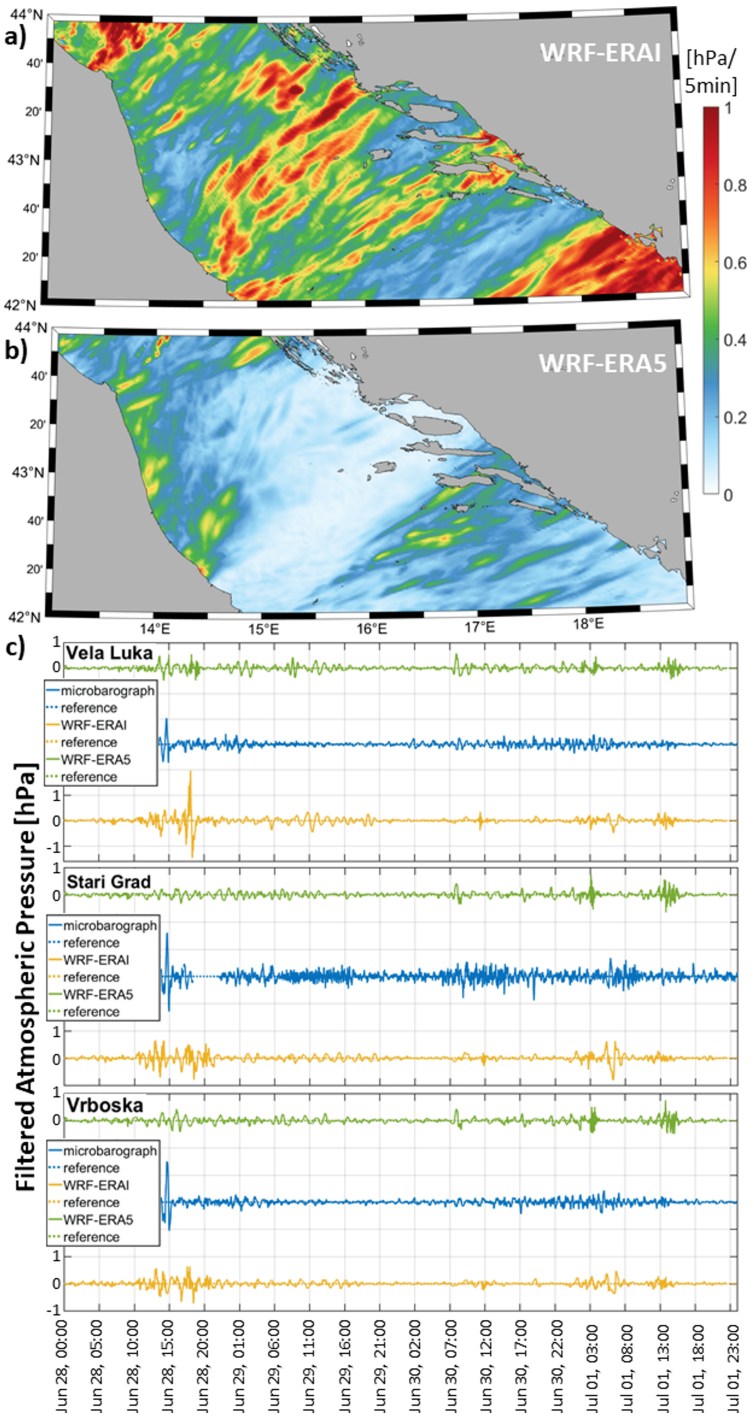


图 5 2017年6月28日至7月2日的气象海啸事件。(a) WRF-ERAI 和 (b) WRF-ERA5 模拟的最大压力扰动空间分布。(c) 对比了维拉卢卡、斯塔里格勒和弗尔博斯卡 MESSI 微气压计位置处观测值与模拟值的滤波后大气压力。

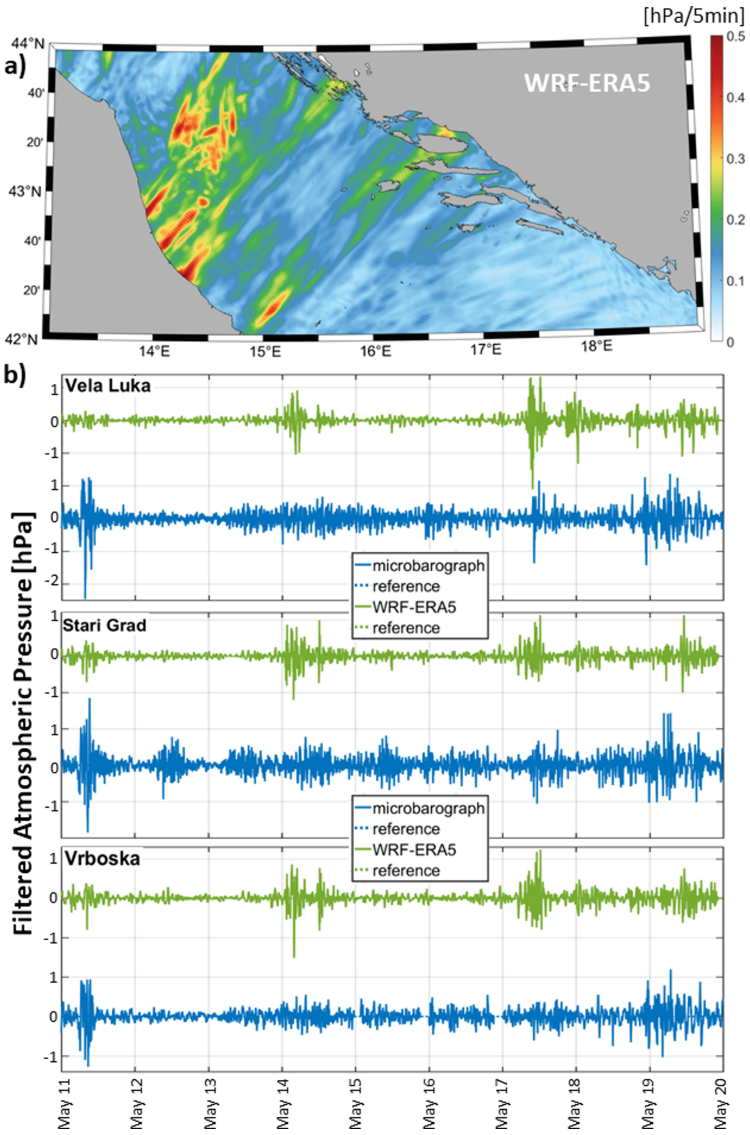


图 6 2020年5月11日至19日的气象海啸事件。(a) WRF-ERA5 模拟的最大压力扰动空间分布。(b) 维拉卢卡、斯塔里格勒和弗尔博斯卡 MESSI微气压计位置处观测和模拟的滤波大气压力。

有时无法捕捉最强的气压异常或准确确定其空间位置。由于意大利海岸与克罗地亚海岸之间的亚得里亚海中部观测数据稀缺，而关键的大气特征可能在此形成，因此，对 WRF-ERAI 和 WRF-ERA5 生成结果的评估仍很不完整，无法提供足够的信息来恰当地评估模型的性能。因此，鉴于 ERAI 已停止使用，不再是未来研究的可行选择，

以下分析主要关注由 ERA5 驱动的模拟。尽管 ERA5 存在局限性，但它仍能为亚得里亚海地区的大气状况提供目前最佳的表征。

3.2 Meteo-HySEA模型的性能

本节将对新开发的 Meteo-HySEA 模型与广泛使用的 AdriSC-ADCIRC 进行性能比较，并使用维拉卢卡和斯塔里格勒的潮位计观测数据，对这两个模型在所研究的三个气象海啸事件中的表现进行评估：2014年6月25日至26日、2017年6月28日至7月1日，以及2020年5月11日至19日。评估内容包括滤波后的海平面时间序列，以及波高和波周期的分布（图 7–9）。此外，附录 B 中还提供了使用 WRF-ERAI 强迫得到的滤波后海平面时间序列对比（图 B4、B5）。

2014年6月的事件（图 7a, 仅采用 WRF-ERA5 强迫）表现为维拉卢卡、斯塔里格勒和弗尔博斯卡港内出现明显的振荡。6月25日，与 AdriSC-ADCIRC 相比，Meteo-HySEA 在维拉卢卡模拟出的峰值振幅更大（约 1 米，对比 0.6 米），但在斯塔里格勒（0.5 米，对比 0.6 米）和弗尔博斯卡（0.4 米，对比 0.5 米）的振幅较小。对于6月26日的事件，Meteo-HySEA 略微低估了维拉卢卡（0.3 米，对比 0.4 米）和弗尔博斯卡（0.15 米，对比 0.2 米）的振荡，而在斯塔里格勒，两个模型模拟出的振荡相近，约为 0.19 米。波高的累积分布函数（CDF）（图7b）证实了这些结果，显示无论采用 WRF-ERAI 还是 WRF-ERA5 强迫，Meteo-HySEA 在维拉卢卡产生的振荡始终强于 AdriSC-ADCIRC，而在弗尔博斯卡则较弱。在斯塔里格勒，与 AdriSC-ADCIRC 相比，Meteo-HySEA 模拟出的振幅低于 0.2 米的振荡数量往往更多。最后，无论采用 ERAI 还是 ERA5 强迫，Meteo-HySEA 模拟的气象海啸振荡周期始终长于 AdriSC-ADCIRC（图 7c）。例如，采用 WRF-ERA5 强迫时，Meteo-HySEA 在维拉卢卡、斯塔里格勒和弗尔博斯卡模拟出的周期中位数分别为18分钟（对比17分钟）、37分钟（对比27分钟）和16分钟（对比10分钟）。

对于2017年6月至7月的事件（图8a，仅采用WRF-ERA5强迫），Meteo-HySEA和AdriSC-ADCIRC均未能再现6月28日、6月30日和7月1日期间在维拉卢卡和斯塔里格勒观测到的、超过0.15米且最高达0.7米的持续振荡。在弗尔博斯卡，两种模型产生的振荡大多低于0.15米。模拟振荡的最高值出现在7月1日结束时，在维拉卢卡约为0.6米（观测值为0.7米）、斯塔里格勒为0.3米（观测值为0.25米），弗尔博斯卡为0.2米（观测值为0.15米）。累积分布函数（图8b）证实了这些结果：在维拉卢卡和斯塔里格勒，超过20%的观测振荡高于0.2米，而由Meteo-HySEA或AdriSC-ADCIRC模拟的波高（分别采用WRF-ERAI或WRF-ERA5强迫）中，不到5%超过这一阈值。与2014年6月的事件类似，与AdriSC-ADCIRC相比，Meteo-HySEA高估了气象海啸的波周期中位数（图8c）：维拉卢卡为19分钟（对比17分钟），斯塔里格勒为36分钟（对比29分钟），弗尔博斯卡为15分钟（对比14分钟）。然而，维拉卢卡和斯塔里格勒观测到的波周期中位数分别为14分钟和16分钟，这表明两种模型对港口地貌的刻画可能都不够准确，尤其是在斯塔里格勒。

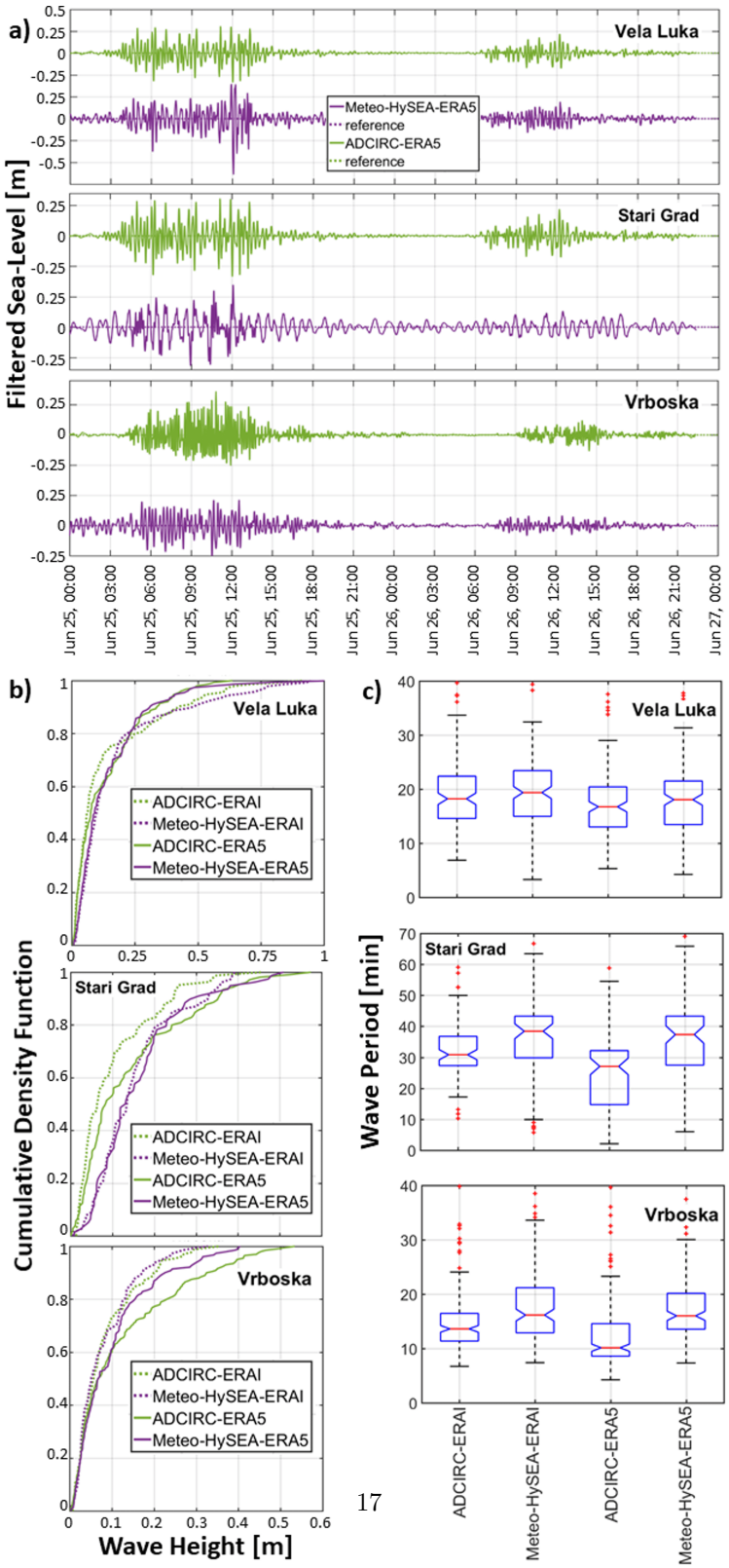


图7 2014年6月25日和26日维拉卢卡、斯塔里格勒和弗尔博斯卡位置的气象海啸事件。(a) 模拟滤波海平面的时间序列。(b) 波高的累积分布函数（CDF）；(c) 从时间序列中提取的波周期箱线图。

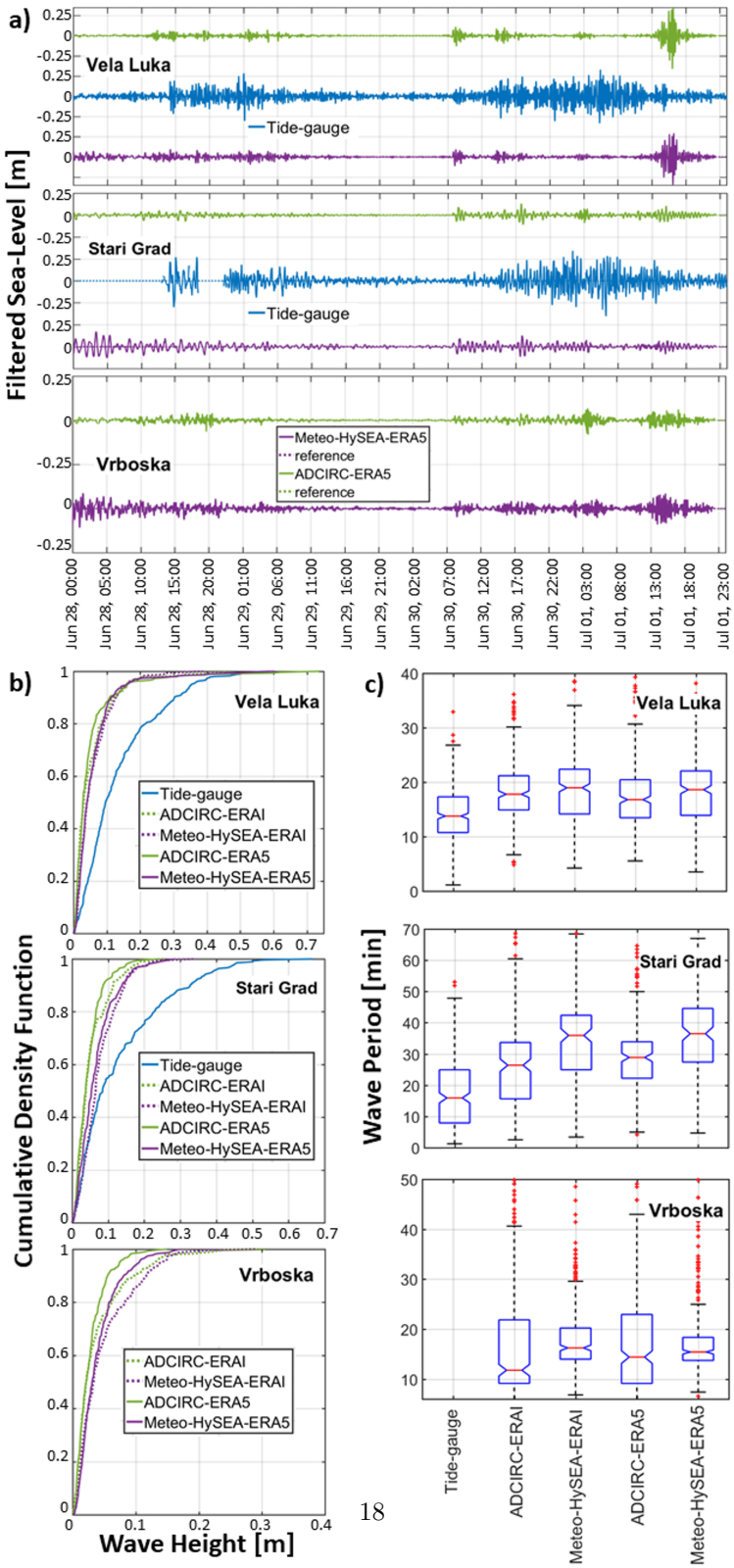


图 8 2017年6月28日至7月1日维拉卢卡、斯塔里格勒和弗尔博斯卡各位置发生的气象海啸事件。(a) 模拟滤波海平面时间序列。(b) 波高的累积分布函数（CDF），以及 (c) 从时间序列中提取的波周期箱线图。

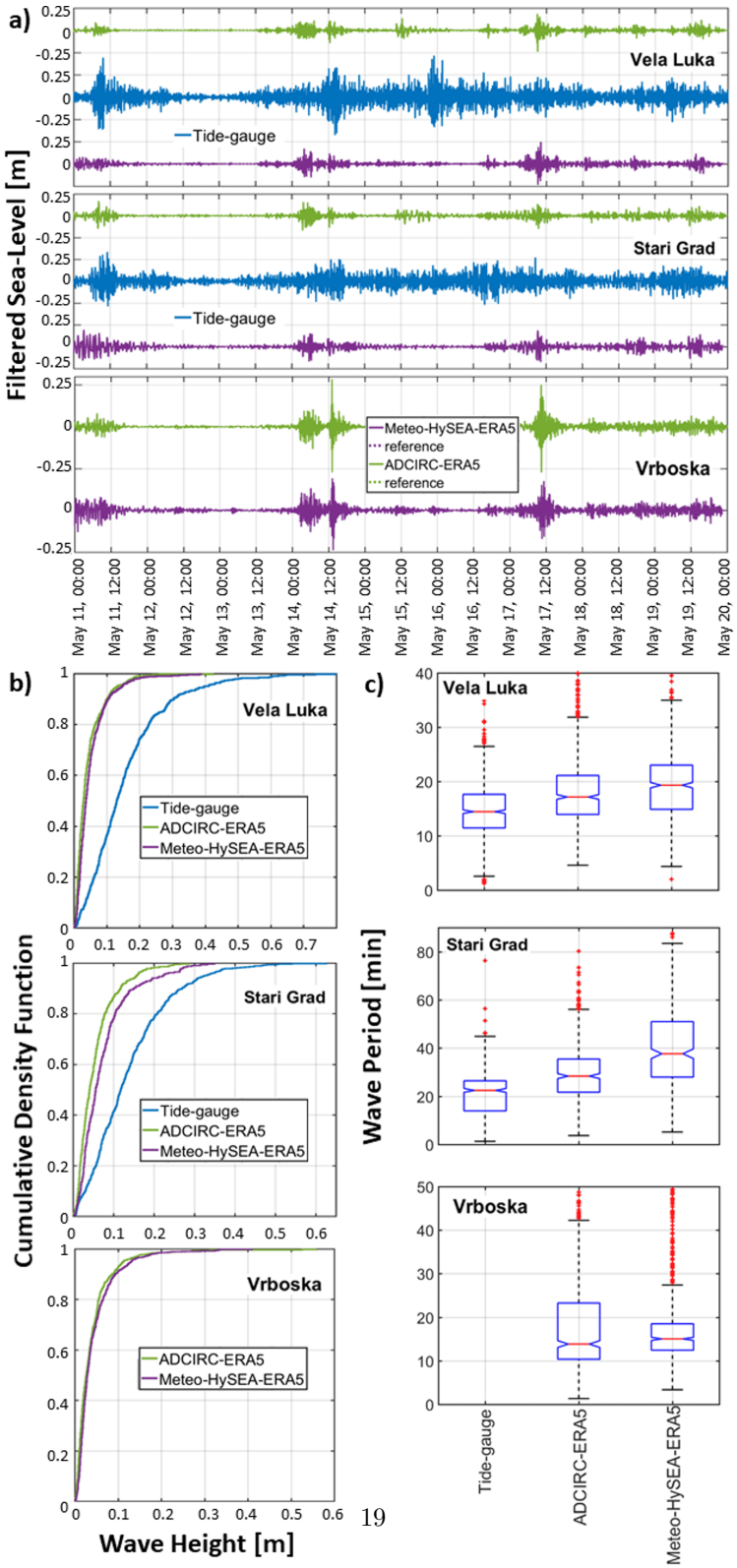


图9 2020年5月11日至19日维拉卢卡、斯塔里格勒和弗尔博斯卡位置的气象海啸事件。（a）模拟滤波海平面的时间序列。（b）波高的累积分布函数（CDF）；（c）从时间序列中提取的波周期箱线图。

对于2020年5月的事件（图9a，仅采用WRF-ERA5强迫），与2017年6月至7月的事件类似，Meteo-HySEA和AdriSC-ADCIRC均未能再现维拉卢卡和斯塔里格勒观测到的持续性、幅度超过0.5 m的振荡。Meteo-HySEA和AdriSC-ADCIRC模拟的海平面振荡最大值在维拉卢卡约为0.4 m，在斯塔里格勒则分别约为0.35 m和0.3 m；而观测值在维拉卢卡达到0.8 m，在斯塔里格勒达到0.6 m。此外，累积分布函数（图9b）表明，维拉卢卡和斯塔里格勒观测波高中有20%超过0.2 m，而Meteo-HySEA模拟的波高中，维拉卢卡和斯塔里格勒分别不到1%和10%超过这一阈值。在斯塔里格勒，AdriSC-ADCIRC的表现甚至不如Meteo-HySEA，波高中超过0.2 m阈值的不到5%。与其他事件一样，Meteo-HySEA对气象海啸周期的估计高于AdriSC-ADCIRC（图9c）：维拉卢卡为19 min（相比之下为17 min），斯塔里格勒为37 min（相比之下为28 min），弗尔博斯卡为15 min（相比之下为14 min）。然而，观测到的波周期中位数在维拉卢卡为14 min，在斯塔里格勒为22 min。

总之，对 Meteo-HySEA 海平面的分析总体表明，该模型能够再现 AdriSC-ADCIRC 模型所模拟的气象海啸引发的振荡在时间上的演变及其振幅。然而，与 2017年和 2020年事件的潮位计观测值相比，Meteo-HySEA 和 AdriSC-ADCIRC 模型在维拉卢卡和斯塔里格勒的观测振幅均存在明显低估，偏差超过 50%。这种低估与 WRF-ERA5 和 WRF-ERAI 模拟为这些事件生成的较低大气压力扰动振幅一致（图 5、6）。此外，在所有事件和位置，Meteo-HySEA 产生的海平面振荡通常比 AdriSC-ADCIRC 持续更久。这可能表明 Meteo-HySEA 对现有大气强迫的响应更有效；也可能说明大尺度环流、潮汐和风强迫——这些因素包含在 AdriSC-ADCIRC 中，但未纳入 Meteo-HySEA 模拟——对小振幅气象海啸波的传播和放大具有不可忽视的作用。对于通过零交叉分析得出的波周期，结果显示 Meteo-HySEA 模拟的波周期通常长于 AdriSC-ADCIRC，且两个模型均系统性地高估了观测值。尤其是，Meteo-HySEA 在斯塔里格勒的偏差更大，其中位波周期比观测值最多高出 50%。这表明，流域特定的共振特性以及气象海啸波传播的时机，可能受到 AdriSC-ADCIRC 中大尺度环流、潮汐和风强迫的影响；也可能是相较于 AdriSC-ADCIRC，Meteo-HySEA 对这些因素的表征不够准确。

4 讨论

除了结果中展示的与观测值进行直接比较外，还需要对 Meteo-HySEA 的性能进行更深入的评估。因此，本节将通过对比 Meteo-HySEA 与 AdriSC-ADCIRC，进一步拓展分析范围，既考察前文介绍的真实事件，也分析一组三种合成气压扰动；这些扰动旨在引发研究区域内最强且合理的气象海啸

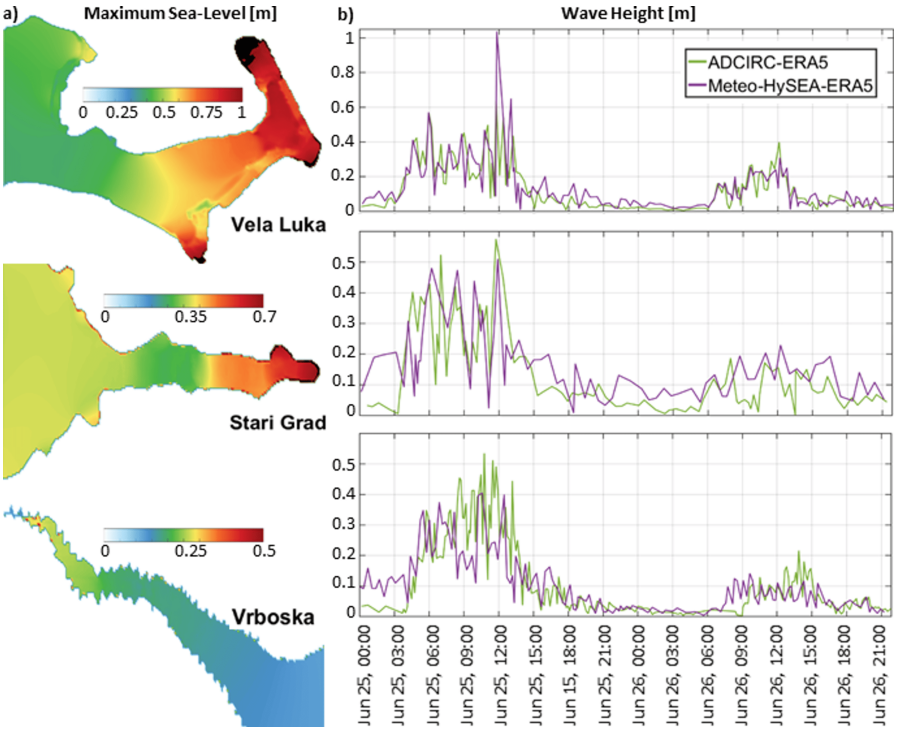


图 10 2014年6月25日和26日的气象海啸事件。(a) Meteo-HySEA 在 WRF-ERA5 驱动下，对维拉卢卡、斯塔里格勒和弗尔博斯卡三个 7 m 网格计算得到的最大海平面；(b) 从经过 1 分钟滤波的海平面结果中提取的波高时间序列。波高时间序列还与 WRF-ERA5 驱动下从 AdriSC-ADCIRC 结果中提取的时间序列进行了比较。

海湾。真实事件有助于突出模型在观测条件下的行为差异，而合成试验则能够在理想化但具有物理意义的强迫条件下，对模型性能进行可控评估。综合来看，这两种互补视角能够更全面地评估 Meteo-HySEA 重现亚得里亚海气象海啸的能力。

4.1 实际气象海啸事件

基于三个真实气象海啸事件，已证明 Meteo-HySEA 能够再现维拉卢卡、斯塔里格勒和弗尔博斯卡这三个亚得里亚海东部海湾中海平面振荡的时间演变和空间分布。尽管总体上与 AdriSC-ADCIRC 的结果吻合令人鼓舞，但仍存在系统性差异，尤其体现在模拟振荡的振幅和周期方面。为进一步讨论并评估这些差异在 WRF-ERA5 强迫条件下的表现，我们通过分析最大海平面的空间分布以及波高时间序列，并与 AdriSC-ADCIRC 的结果进行比较，考察 Meteo-HySEA 在这三个海湾中的表现，如图10–12所示。对这三个事件的比较既凸显了 Meteo-HySEA 相较于 AdriSC-ADCIRC 的优势，也揭示了其局限性。

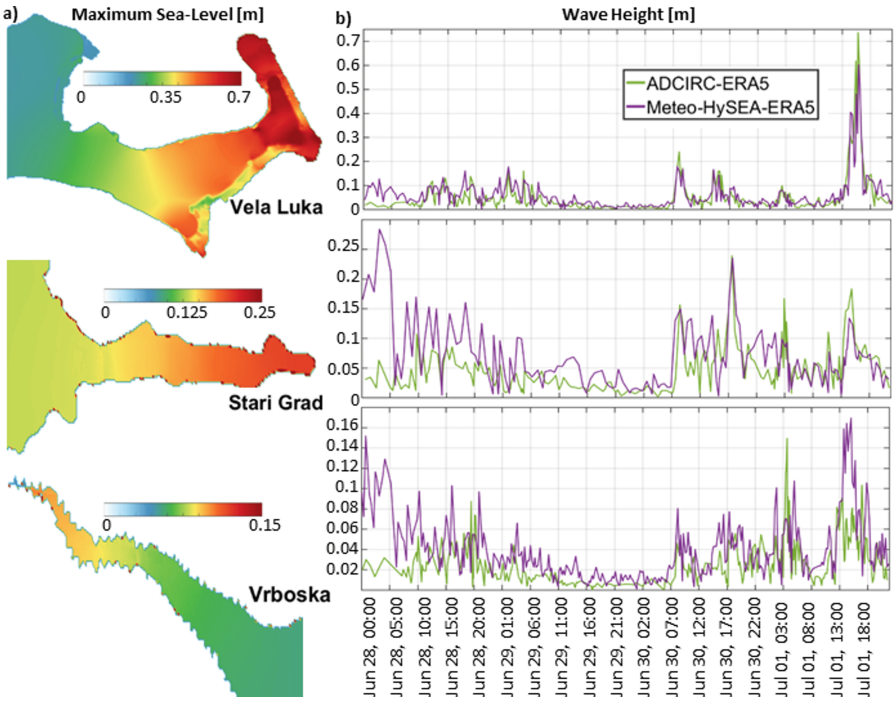


图 11 2017年6月28日至7月1日的气象海啸事件。(a) 最大海平面，以及 (b) 从 1 分钟滤波后的海平面结果中提取的波高时间序列；结果由 WRF-ERA5 强迫的 Meteo-HySEA 在维拉卢卡、斯塔里格勒和弗尔博斯卡的三个 7 米网格上计算得出。波高时间序列还与 WRF-ERA5 强迫的 AdriSC-ADCIRC 提取的结果进行了比较。

对于2014年6月25日至26日发生的强烈事件（图10），两种模型对最强扰动出现时间的模拟一致，证实它们能够捕捉维拉卢卡和斯塔里格勒的潜在共振过程。然而，AdriSC-ADCIRC 产生的信号略显扩散，而 Meteo-HySEA 往往会模拟出更高、变化更大的波高，尤其是在维拉卢卡和斯塔里格勒；在事件开始时，斯塔里格勒和弗尔博斯卡的波高明显被高估。AdriSC-ADCIRC 并未显示这种早期放大现象，这可能是因为 Meteo-HySEA 的模拟中没有风和潮汐更新，而 AdriSC-ADCIRC 则按小时纳入这些边界条件。图10b–12b所示时间序列从模拟开始十二小时后才开始，即启动期结束时。此时，AdriSC-ADCIRC 已同化了十二次潮汐和风更新，而 Meteo-HySEA 仍采用十二小时前设定的海况。

在较弱且持续时间更长的2017年6月28日–7月1日事件中，也出现了类似的模式（图11）。两种模型都再现了斯塔里格勒和弗尔博斯卡观测到的温和放大，以及维拉卢卡更强的振荡。然而，Meteo-HySEA 高估了最大的峰值，尤其是在事件后期的弗尔博斯卡。此外，2014年和2017年事件中主要峰值出现的时间在该位置均未能得到准确再现。这种差异可能与近岸分辨率有关，因为弗尔博斯卡狭窄的海湾未能在

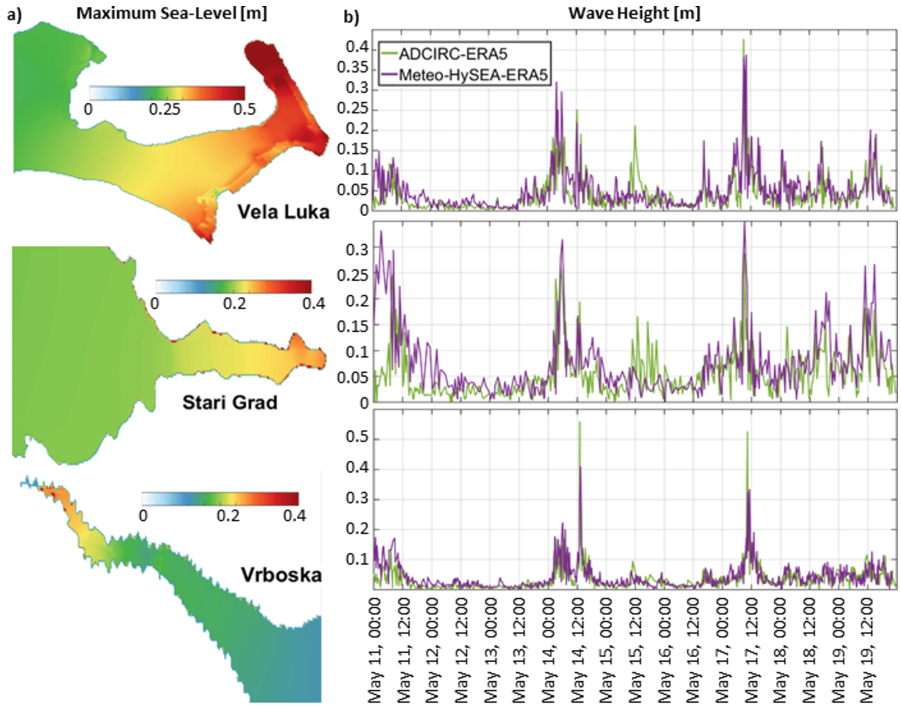


图 12 2020年5月11日至19日的气象海啸事件。(a) 最大海平面，以及 (b) 从经 1 分钟滤波的海平面结果中提取的波高时间序列；这些结果由 WRF-ERA5 强迫的 Meteo-HySEA 在维拉卢卡、斯塔里格勒和弗尔博斯卡的三个 7 米网格上计算得出。波高时间序列还与 WRF-ERA5 强迫的 AdriSC-ADCIRC 所得结果进行了比较。

Meteo-HySEA 模拟所采用的网格中得到充分解析。与2014年一样，较狭窄海湾中的初始响应强得不切实际，这表明这可能是一个系统性问题，而非事件特异性行为。

2020年5月11日至19日的事件（图 12）展现了模型性能的另一个方面。这场持续时间较长的事件以中等强度但反复出现的活动爆发为特征，在三个海湾中的分布更加均匀。两个模型都再现了振荡的持续性和总体振幅；然而，Meteo-HySEA 生成的信号能量系统性偏高，在斯塔里格勒尤为明显。在弗尔博斯卡，Meteo-HySEA 模拟的最大峰值低于 AdriSC-ADCIRC 得出的结果，这再次表明该区域水深地形分辨率不足可能造成局限。在斯塔里格勒，初始振荡被夸大的程度甚至超过此前的事件，进一步凸显了 Meteo-HySEA 在处理较狭窄半封闭海盆内扰动起始阶段时的局限。

综合来看，这些比较表明，Meteo-HySEA再现峰值振荡时的强度高于 AdriSC-ADCIRC，因此可能更好地捕捉气象海啸事件的潜在极端情况。然而，其较高的短期变异以及在某些海湾中高估早期响应的倾向仍然是

反复出现的缺陷。夸大的初始振荡表明，淹没和干湿方案可能需要更长的启动期来稳定下来，之后主要振荡才会形成。或者，这些现象可能反映了其对以下因素的敏感性：(1) 大尺度环流、潮汐和风强迫；(2) 小尺度大气强迫波动；或(3) 海湾内的数值反射或摩擦参数化。认识并解决这些问题将提高Meteo-HySEA的可靠性和稳健性，尤其是在准确预警至关重要的业务预报应用中。

图 7c–9c 中观测到的波周期普遍被高估，这可能归因于多种因素。首先，这在很大程度上受当地地貌影响。在 Meteo-HySEA 中，用于模拟干单元淹没的干湿技术会导致有效地貌随时间演变，从而可能造成共振周期估算不准确。其次，海岸水深覆盖范围相当有限，这进一步影响干湿技术，进而影响波周期的计算。

4.2 合成气象海啸事件

鉴于重现现实中的大气扰动及其他导致亚得里亚海气象海啸的外部强迫（例如大尺度环流、潮汐和风）存在困难——如前文所述——我们进一步使用基于 AdriSC 气象海啸代理模型解析表达式构建的合成气压强迫，评估 Meteo-HySEA 的性能（Denamiel等（2018），2019b，2020年）。该合成框架通过多项式混沌展开进行不确定性量化，并应用于超过 10,600 个模拟气压扰动，从而严谨地建立了大气压参数（起点、传播方向、振幅、速度、周期和大气扰动宽度）与极端海平面响应之间的映射关系。随机代理建模还展现出卓越的计算效率——其运行速度比确定性海洋模型快三个数量级以上——同时提高了亚得里亚海气象海啸灾害评估的可靠性（Denamiel 等，2019b；Tojčić 等（2021））。

本研究选取了三种不同的合成气压强迫情景，这些情景在维拉卢卡、斯塔里格勒和弗尔博斯卡港口产生了最大的海平面影响。这些情景的物理参数汇总于表3中。需要指出的是，在 Meteo-HySEA 和 AdriSC-ADCIRC模拟中，除气压扰动外未使用其他强迫。

对这三种极端合成强迫情景下 Meteo-HySEA 与 AdriSC-ADCIRC 的比较（图13）揭示了两者在所选三个港口模拟气象海啸动力学时既存在一致的模式，也存在系统性差异。在最大海平面分布图中，Meteo-HySEA 的振幅通常高于 AdriSC-ADCIRC，尤其是在海盆最内侧区域；斯塔里格勒湾内则是例外。这一差异在维拉卢卡最为显著：Meteo-HySEA 预测的极端水位超过 5 米，而 AdriSC-ADCIRC 的峰值则接近 4 米（图 13a）。这些空间差异表明，在维拉卢卡和弗尔博斯卡的海湾中，Meteo-HySEA 可能比 ADCIRC 更明显地增强共振效应

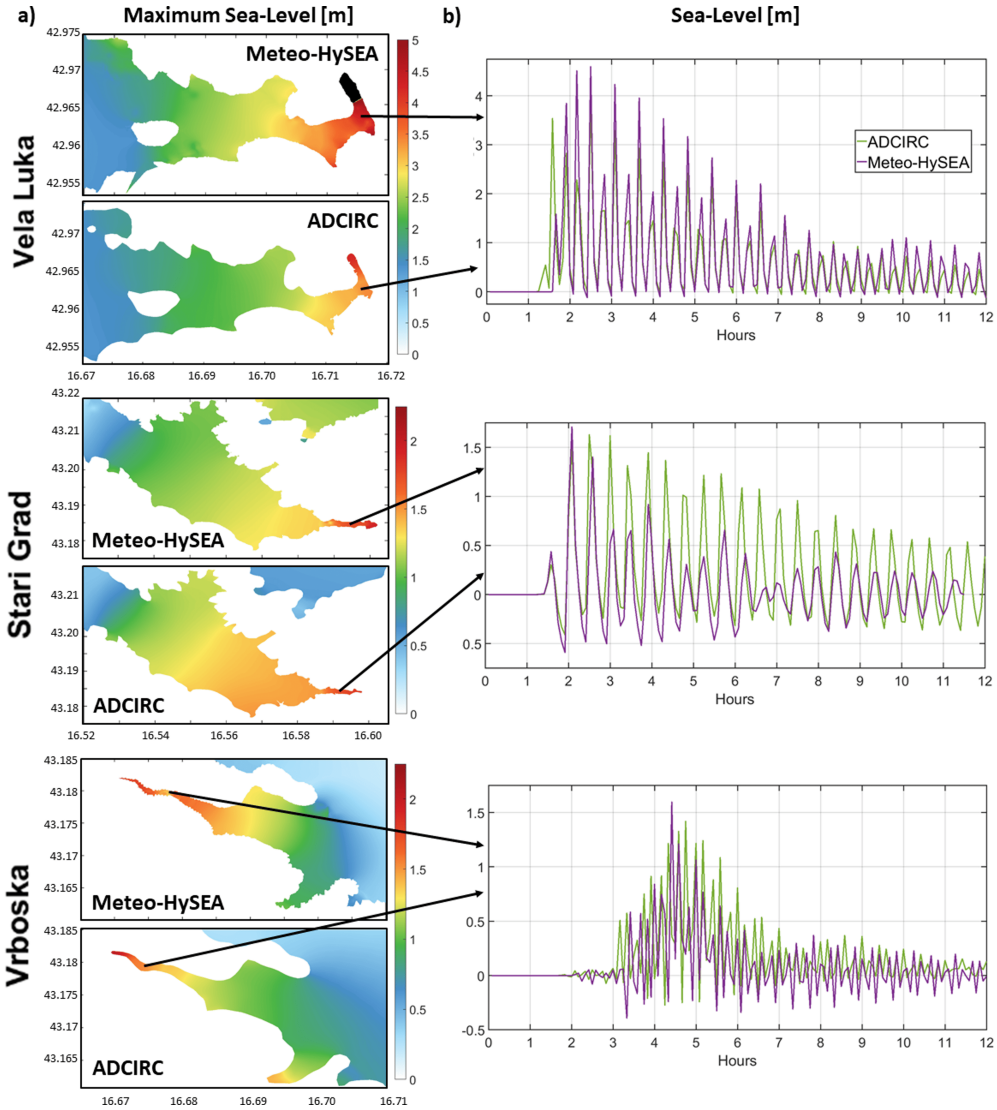


图13 （a）最大海平面的空间分布；（b）在对维拉卢卡、斯塔里格勒和弗尔博斯卡港口影响最大的三个合成气象海啸事件期间的海平面时间序列。

。时间序列证实了这些趋势。在维拉卢卡，两种模型都能捕捉到起始时间和整体振荡行为，但与更快地使信号衰减的 AdriSC-ADCIRC 相比，Meteo-HySEA 得出的峰值振幅更高，振荡衰减也更慢。在斯塔里格勒，观测到的情况有所不同：Meteo-HySEA 再现了持续的低振幅类驻波振荡，而 AdriSC-ADCIRC 的能量耗散较低。在弗尔博斯卡，两种模型在

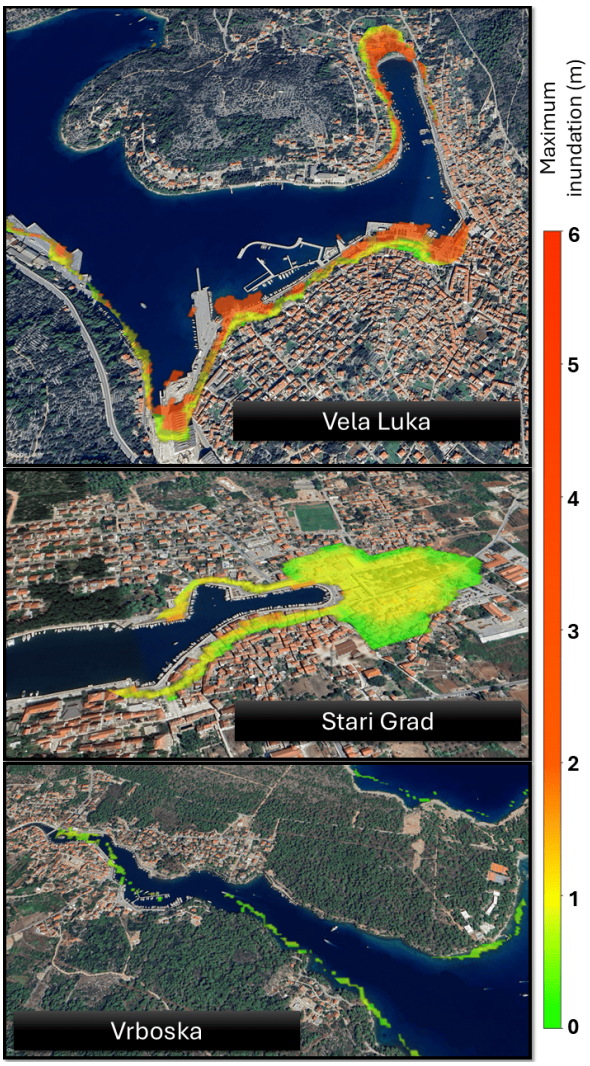


图 14 对维拉卢卡、斯塔里格勒和弗尔博斯卡港口影响最大的三次合成气象海啸事件期间最大淹没范围的空间分布。

初始峰值的吻合度更高，但振荡持续时间方面仍存在差异。这些结果表明，尽管两个模型都成功再现了气象海啸共振发生的时间和频率，但它们保留能量的能力有所不同。这表明，Meteo-HySEA 对淹没过程的处理更为完善，也可能影响海湾内的结果。此外，两个模型对近岸地貌的表示存在差异，这很可能会影响关注点记录到的振荡。AdriSC-ADCIRC 采用具有高分辨率和精确数据的非结构网格，而 Meteo-HySEA 则需要将这些数值多次重新插值到 7米网格上，导致部分海湾的覆盖精度较低

表3 用于产生合成气象海啸事件的大气扰动参数。

位置	起源 (°N, °E)	方向 (度)	振幅 (hPa)	速度 (m/s)	周期 (分钟)	宽度 (km)
维拉卢卡	41.30, 15.98	73	3.6	37.2	17.5	90.0
斯塔里格勒	41.52, 15.43	73	3.6	37.2	27.2	136.5
弗尔博斯卡	42.45, 14.10	15	3.9	27.5	12.0	136.5

对部分海湾的覆盖不足，这一点从弗尔博斯卡的空间表示中可以看出（图13a，底部）。

总体而言，对比结果表明，Meteo-HySEA 与 AdriSC-ADCIRC 结果之间的主要差异与半封闭海盆内的能量俘获有关。这种现象可能反映了耗散方案、摩擦参数化、数值方法或水平分辨率的差异，同时也体现出 Meteo-HySEA 捕捉淹没及其对海湾内共振放大的影响的能力。具体而言，图 14 展示了使用 Meteo-HySEA 计算的三个主要位置的最大淹没范围。观测值显示，维拉卢卡和斯塔里格勒发生了显著洪水。相比之下，弗尔博斯卡的淹没情况更难以捕捉，因为 7 米空间分辨率以及低分辨率地形—水深数据均不足以分辨该区域特有的狭窄水道。

5 结论

本研究评估了基于图形处理器的 *Meteo-HySEA* 模型作为亚得里亚海气象海啸模拟新工具的性能，并将其与基于中央处理器的 AdriSC-ADCIRC 系统进行比较，同时利用三次记录详实的历史事件（2014年、2017年和2020年）验证模拟结果。主要发现如下：

- 气象海啸模拟的准确性从根本上受大气强迫质量的限制。即使采用高分辨率 WRF 降尺度，中尺度气压扰动的强度和空间变化也常被低估，从而限制了模拟振荡的真实性。改进再分析资料、集合预报以及针对易发生气象海啸地区的数据同化，仍至关重要。
- Meteo-HySEA 通常能够再现观测事件的发生时间、空间分布和整体结构；在相同强迫条件下，某些情况下产生的响应甚至强于 AdriSC-ADCIRC。然而，该模型倾向于高估主导振荡周期，尤其是在半封闭海盆中，这表明港口共振和耗散过程仍需改进。这一问题可能源于干湿技术：随着湿润区域不断更新，海盆和港口的地貌也会随时间演变。

- Meteo-HySEA 的一大优势在于计算效率：图形处理器加速使高分辨率多网格模拟的运行速度比传统的基于CPU的模型快几个数量级。这一能力支持实时

业务应用、集合预报，以及对大气和边界条件不确定性的明确处理。

• Meteo-HySEA 还可以直接模拟淹没过程，将建模链条从离岸振荡延伸至陆上洪水。这一功能对于风险评估和民事保护尤为重要，因为它能够估算对脆弱港口和城市滨水区的直接影响。在这方面，显然需要在近岸区域获取高质量、高分辨率的地形水深数据，才能充分发挥这一核心功能。

总体而言，结果表明，Meteo-HySEA 等基于GPU的求解器代表了迈向下一代气象海啸预报和灾害评估系统的一条有前景的途径。目前，大气强迫仍是预报不确定性的主要来源，但高分辨率天气预报领域的持续进步——包括对流可分辨集合预报和基于机器学习的临近预报——有望提高强迫的准确性。

未来的工作应聚焦于两个相互补充的方向。首先，需要利用密集的观测网络（潮位计、压力传感器、高频雷达）开展系统验证，以确定 Meteo-HySEA 中振荡持续时间较长究竟反映了更为真实的港口塞什，还是 ADCIRC 更强的阻尼更能代表实际的能量耗散。其次，应通过与实时大气预报和预警协议相结合来测试 Meteo-HySEA 的业务应用潜力，理想情况下还应与水文气象服务和民事保护机构合作。

从更广泛的角度来看，针对气象海啸的 GPU 加速淹没建模具有直接的社会意义。通过降低计算门槛，Meteo-HySEA 能够近乎实时地快速生成集合预报、概率性灾害评估和高分辨率淹没情景。这些能力代表着在预判气象海啸影响、向决策者提供可行动信息方面迈出了一步，最终增强亚得里亚海沿岸的海岸韧性

致谢。 特别感谢欧洲中期天气预报中心（ECMWF）的工作人员提供支持，并感谢本研究使用的 ECMWF 计算和归档设施。

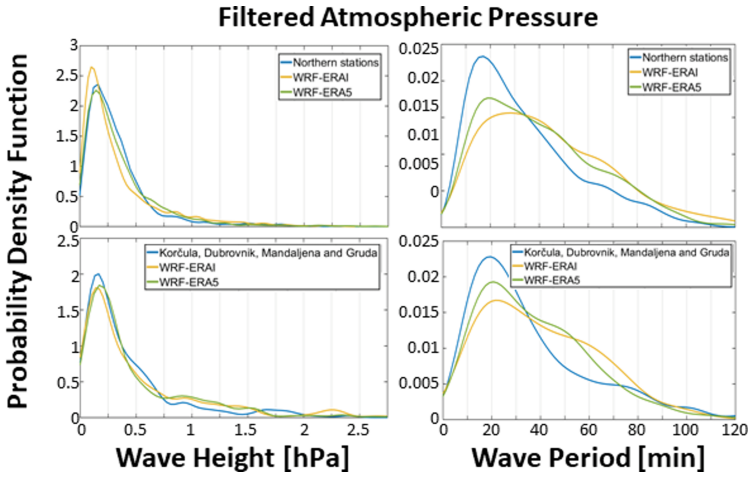
声明与披露

• **经费**。本研究由 ChEESE-2P（欧盟欧洲高性能计算联合计划-101093038）和 DT-GEO项目（HORIZON-INFRA-2021-TECH-01-01，编号 101058129）资助。本研究还获得了西班牙超级计算网络（RES）的资助，资助编号为 AECT-2023-2-0033。

• **利益冲突**。作者没有需要披露的相关财务或非财务利益。

•**作者贡献**。 所有作者均参与了本研究的构思与设计。Alejan- dro Gonz´alez del Pino 和 Clea Lumina Denamiel 负责材料准备、数据收集与分析。论文初稿由 Clea Lumina Denamiel 和 Alejandro Gonz´alez del Pino 撰写，且所有

作者均对论文的先前版本提出了意见。所有作者均阅读并批准了论文终稿。



图A1 2014年6月25日和26日的气象海啸事件。根据Crometeo 台站观测和模拟的滤波大气压力提取的波高和周期的概率密度函数，结果按科尔丘拉岛北部台站以及杜布罗夫尼克、格鲁达和曼达列纳南部台站划分。

附录A 大气强迫评估

在本附录中，我们提供了与所研究的2014年6月、2017年6月至7月和2020年5月气象海啸事件相关的大气压力扰动的补充分析。图 A1 展示了2014年6月25日至26日事件期间，根据Crometeo 台站观测和模拟的滤波大气压力得出的波高和周期的概率密度函数，结果分别针对科尔丘拉岛北部台站以及杜布罗夫尼克、格鲁达和曼达列纳南部台站进行展示。图 A2展示了对2017年6月28日至7月2日事件的类似分析：北部台站以及科尔丘拉岛、杜布罗夫尼克和格鲁达南部台站的波高和周期概率密度函数，并比较科尔丘拉岛、格鲁达和杜布罗夫尼克台站观测和模拟的滤波大气压力。最后，图 A3 通过比较在安科纳、奥尔托纳、维埃斯特、圣瓦茨岛和维斯岛的MESSI微气压计位置记录的观测和模拟的滤波大气压力，说明了2020年5月11日至20日的事件。

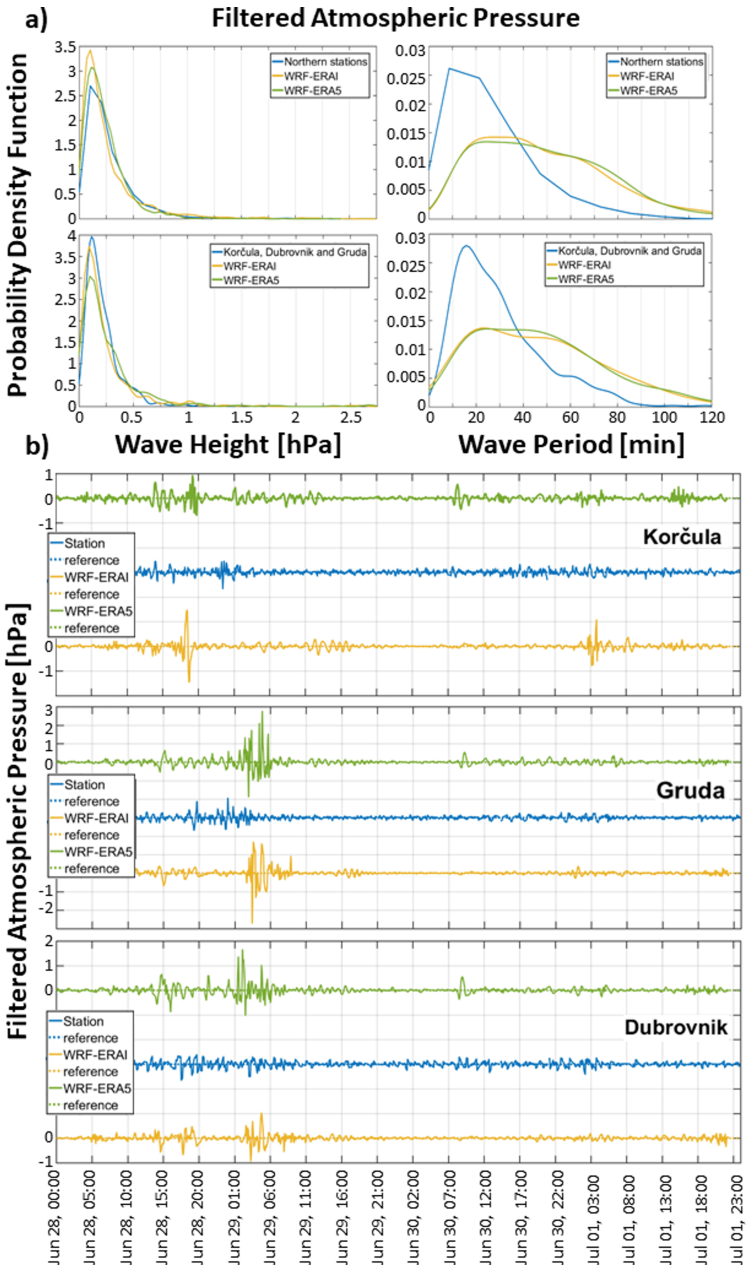


图 A2 2017年6月28日至7月2日的气象海啸事件。(a) 从 Crometeo 台站滤波后的大气压力中提取的波高和周期的概率密度函数，按科尔丘拉岛北部台站和南部的杜布罗夫尼克、格鲁达台站划分。(b) 科尔丘拉岛、格鲁达和 Dubrovnic Crometeo 台站观测和模拟的滤波大气压力。

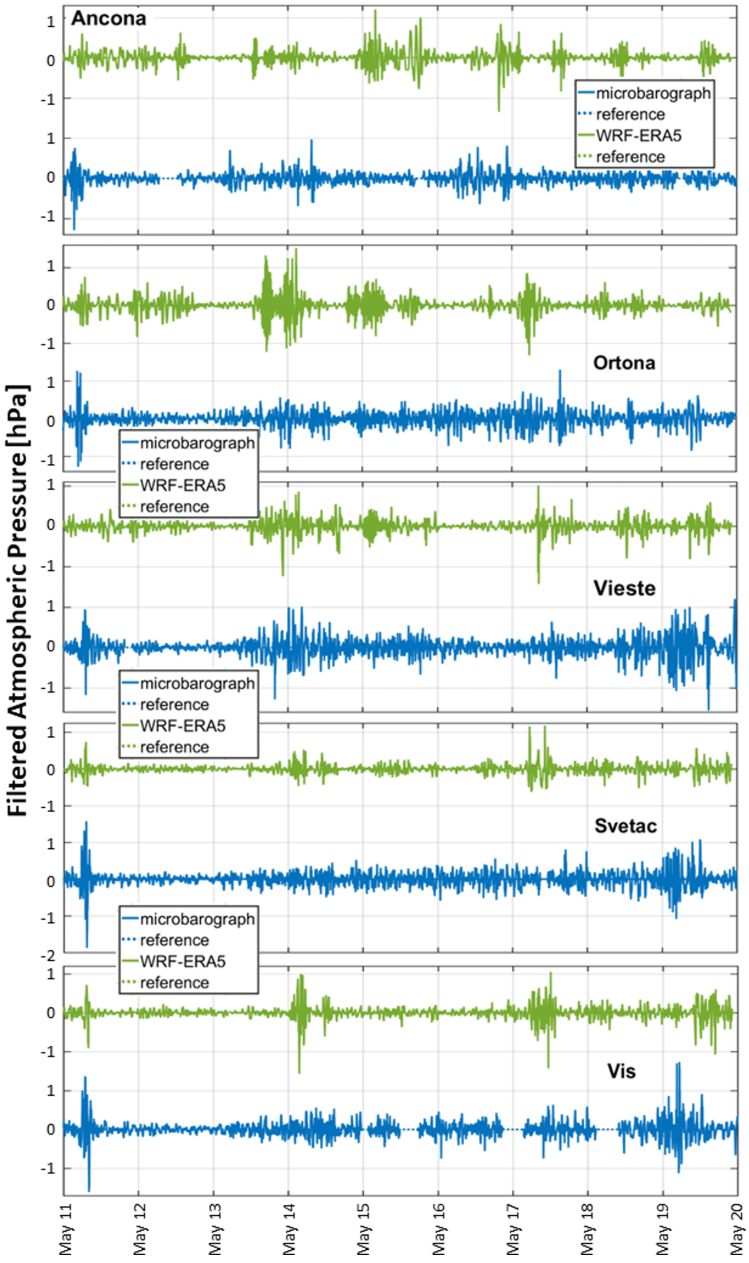


图 A3 2020年5月11日至5月20日的气象海啸事件。安科纳、奥尔托纳、维埃斯特、圣瓦茨岛和维斯岛 MESSI微气压计位置处观测和模拟的滤波大气压力。

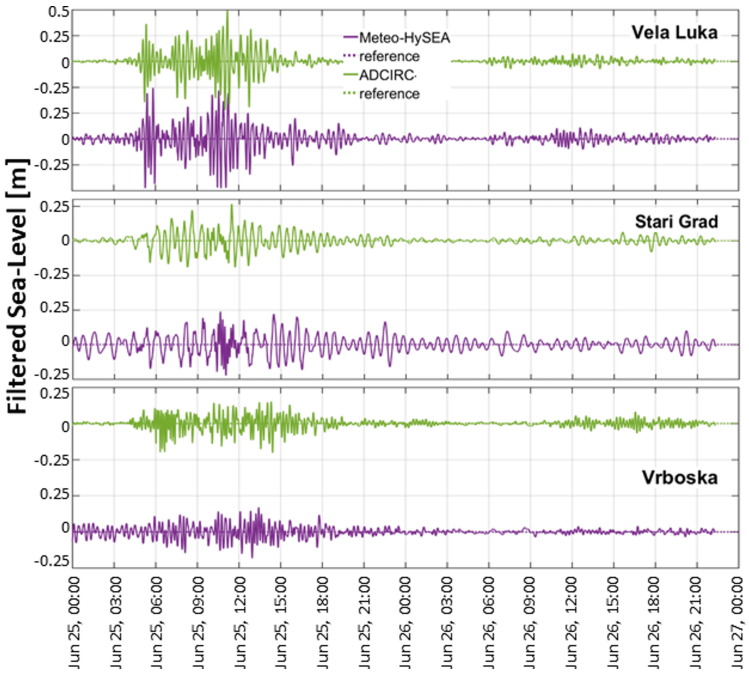


图 B4 2014年6月25日和26日发生于维拉卢卡、斯塔里格勒和弗尔博斯卡位置的气象海啸事件。

附录 B 使用 WRF-ERAI 强迫的 Meteo-HySEA 评估

在本附录中，我们展示了使用 WRF-ERAI 强迫时对 Meteo-HySEA 性能的补充评估。图 B4 展示了2014年6月25日至26日发生于维拉卢卡、斯塔里格勒和弗尔博斯卡位置的气象海啸事件，而图 B5 展示了2017年6月28日至7月1日在相同地点发生的事件。这些结果在替代性大气强迫条件下，对模型性能提供了补充评估。

与采用WRF-ERA5强迫（图7a和8a）得到的结果类似，与AdriSC-ADCIRC相比，在2014年6月的事件期间，Meteo-HySEA在维拉卢卡再现的峰值振幅更大，而在斯塔里格勒和弗尔博斯卡再现的振幅更小；对于2017年6月至7月的事件，尽管Meteo-HySEA和AdriSC-ADCIRC都捕捉到了6月28日和7月1日的一些振荡，但均未能再现维拉卢卡和斯塔里格勒观测到的持续振荡。

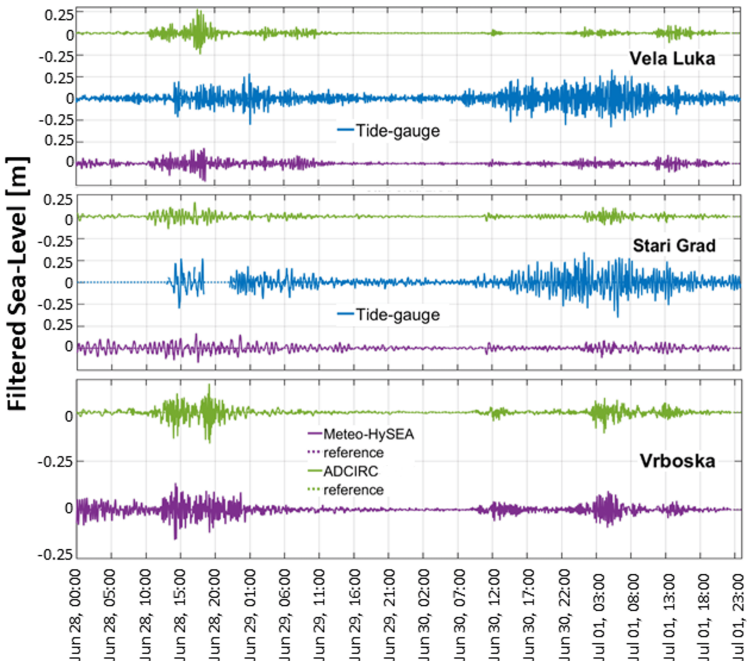


图 B5 2017年6月28日至7月1日维拉卢卡、斯塔里格勒和弗尔博斯卡位置的气象海啸事件。

参考文献

Angove, M., Kozlosky, L.,Chu, P., Dusek, G.,Mann, G., Anderson, E., 等：应对美国的气象海啸风险。Natural Hazards **106**, 1467–1487(2021) https://doi.org/10.1007/s11069-020-04499-3Anderson, E.J., Mann, G.E.：密歇根湖中由大振幅大气惯性重力波引发的气象海啸。Natural Hazards **106**, 1489–1501 (2021)https://doi.org/10.1007/s11069-020-04195-2Beisiegel, N., Behrens, J.：使用浅水模型研究普劳德曼共振的数值测试案例。（2022）。 https://doi.org/10.23967/eccomas.2022.205Bechle, A., Wu, C., Kristovich, D., Anderson, E., Schwab, D., Rabinovich, A.：劳伦琴五大湖的气象海啸。Sci. Rep. **6**, 37832(2016) https://doi.org/10.1038/srep37832Castro,M.J., Ferreiro Ferreiro, A.M., Garc´ıa-Rodr´ıguez, J.A., Gonz´alez-Vida, J.M.,Mac´ıas,J.,Par´es, C., Elena V´azquez-Cend´on, M.：浅水流中干湿锋的数值处理：在单层和双层系统中的应用。Mathematical and Computer Modelling **42**(3–4), 419–439 (2005)https://doi.org/10.1016/j.mcm.2004.01.016

Castro, M.J.,Gonz´alez-Vida, J.M., Par´es, C.：浅水流中干湿锋的数值处理：采用修正的 Roe 格式。数学模型与方法应用科学 **16**(06), 897–931(2006) https://doi.org/10.1142/s021820250600139x

ChEESE-2P：Meteo-HySEA 课程：图形处理器代码功能简介。在线课程，属于 ChEESE-2P 倡议的一部分。最后访问日期：2025年9月29日（2025）。 https://cheese2.eu/news/online-tsunami-meteo-tsunami-modelling-training/

Castro, M.J., Rebollo, T.C., Fern´andez-Nieto, E.D., Vida, J.M.G., Par´es, C.: 二维非齐次双曲系统的平衡型有限体积格式。应用于 Aznalc´ollar 溃坝。《应用力学与工程中的计算方法》197(45–48), 3932–3950 (2008) https://doi.org/10.1016/j.cma.2008.03.026 Crometeo：克罗地亚自动气象站网络。在线平台，由克罗地亚业余气象学家组成的非营利协会。最后访问日期：2025年9月29日（2025）。 https://pljusak.com/karta.php de la Asunci´on, M., Castro, M.J., Fern´andez-Nieto, E.D., Mantas, J.M., Acosta, S.O., Gonz´alez-Vida, J.M.: 面向结构网格上二维单层浅水系统的双波 TVD-WAF 方法的高效图形处理器实现。《计算机与流体》80, 441–452 (2013) https://doi.org/10.1016/j. compfluid.2012.01.012 de la Asunci´on, M., Castro, M.J., Gonz´alez-Vida, J.M., Mac´ıas, J., Ortega, S., S´anchez-Linares, C.: 东海岸非地震海啸：首次滑坡研究。未发表（2013）。 https://doi.org/10.13140/2.1.4645.1520 ˇ Denamiel, C., Huan, X., Sepi´c, J., Vilibi´c, I.: 利用多项式混沌展开进行不确定性传播，以评估极端海平面灾害：以亚得里亚海东部气象海啸为例。《物理海洋学杂志》50, 1005–1021 (2020) https://doi.org/10.1175/JPO-D-19-0147.1 Denamiel, C., Prani´c, P., Ivankovi´c, D., Toj˘ci´c, I., Vilibi´c, I.: 亚得里亚海与海岸（AdriSC）气候组件的性能——基于 COAWST V3.3 的大气-海洋耦合模拟套件：大气数据集。《地球系统建模开发》14, 3995–4017 (2021) https://doi.org/10.5194/gmd-14-3995-2021 Denamiel, C., Toj˘ci´c, I., Prani´c, P., Vilibi´c, I.: BiOS 驱动的亚得里亚海温盐变化模态。《气候动力学》59, 1097–1113 (2022) https://doi.org/ 10.1007/s00382-022-06178-4 Denamiel, C., Toj˘ci´c, I., Vilibi´c, I.: 无地形起伏、平坦水深及气候变暖条件下的气象海啸。《地球物理研究杂志：海洋》127, 2021–017386 (2022) https://doi.org/10.1029/2021JC017386

Dee, D.P., Uppala, S.M.,Simmons, A.J., Berrisford, P., Poli, P., Kobayashi, S., Andrae, U., Balmaseda, M.A., Balsamo, G., Bauer, P., Bechtold, P., Beljaars, A.C.M., Berg, L., Bidlot, J., Bormann, N., Delsol, C., Dragani, R., Fuentes, M., Geer, A.J., Haimberger, L., Healy, S.B., Hersbach, H´olm, E.V., Isaksen,L., K˚allberg, P.,K¨ohler,M., Matricardi,M., McNally, A.P.,Monge-Sanz,B.M.,Morcrette, J.-J.,Park, B.-K., Peubey, C., Rosnay, P., Tavolato, C., Th´epaut, J.-N., Vitart, F.: ERA-Interim 再分析：数据同化系统的配置与性能。《英国皇家气象学会季刊》**137**(656), 553–597(2011) https://doi.org/10.1002/qj.828

ˇDenamiel, C., Sepi´c, J., Huan,X., Bolzer, C., Vilibi´c, I.: 亚得里亚海东部气象海啸预警系统的随机替代模型。《地球物理研究：海洋》**124**, 8485–8499 (2019) https://doi.org/10.1029/2019JC015574

ˇDenamiel, C.、Sepi´c, J.、Ivankovi´c, D.、Vilibi´c, I.：《亚得里亚海及海岸建模套件：气象海啸预报组件评估》。《海洋建模》135，71–93（2019年） https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2019.02.003 ˇDenamiel, C.、Sepi´c, J.、Vilibi´c, I.：《地貌变化对气象海啸期间港湾共振的影响：维拉卢卡湾案例研究》。《纯粹与应用地球物理学》175，3839–3859（2018年） https://doi.org/10.1007/S00024-018-1862-5 Escudier, R.、Clementi, E.、Cipollone, A.、Pistoia, J.、Drudi, M.、Grandi, A.、Lyubart- sev, V.、Lecci, R.、Aydogdu, A.、Delrosso, D.、Omar, M.、Masina, S.、Coppini, G.、Pinardi, N.：《地中海高分辨率再分析》。Front. Earth Sci. 9，702285（2021年） https://doi.org/10.3389/feart.2021.702285 Esposti Ongaro, T.、Cerminara, M.、Michieli Vitturi, M.、Tadini, A.、Trolese, M.、Fornaciai, A.、Nannipieri, L.、Calusi, B.、Mac´ıas, J.、Castro, M.J.、Escalante, C.、Ortega, S.、Gonz´alez-Vida, J.M.、Rodr´ıguez-G´alvez, J.F.：《斯特龙博利火山（埃奥利群岛、第勒尼安海、意大利）的火山物质运动及其诱发海啸的建模与模拟》。Frontiers in Earth Science 13（2025年） https: //doi.org/10.3389/feart.2025.1548961 Gonzalez-Pino, A.、Castro, M.J.、Macias, J.：《球面坐标下二维旋转非线性浅水方程的渐近良平衡地转重构有限体积数值格式》。已投稿至《应用数学学会数学杂志》（2025年） Giles, D.、Gopinathan, D.、Guillas, S.、Dias, F.：《快于实时的海啸预警及相关灾害不确定性》。Front. Earth Sci. 8，597865（2021年） https://doi.org/10.3389/feart.2020.597865 Gonzalez-Pino, A.、Mac´ıas S´anchez, J.、Castro D´ıaz, M.、Lumina Denamiel, C.：《Meteo-HySEA：一种用于在真实水深地形上模拟大气驱动海啸的图形处理器加速代码。基准测试》。载于：2024年欧洲地球科学联盟大会（EGU24）。EGU大会会议摘要，第8317页

(2024)。 https://doi.org/10.5194/egusphere-egu24-8317

Gonz´alez-Vida, J.M., Mac´ıas, J., Castro, M.J., S´anchez-Linares, C., Asunci´on, M., Ortega-Acosta, S., Arcas, D.：利图亚湾滑坡引发的巨型海啸——数值模拟与敏感性分析。《自然灾害与地球系统科学》**19**(2),369–388 (2019)https://doi.org/10.5194/nhess-19-369-2019

Hersbach, H.,Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Hor´anyi, A., Mu˜noz-Sabater, J., *etal.*：ERA5全球再分析。《皇家气象学会季刊》**146**,1999–2049(2020)https://doi.org/10.1002/qj.3803

Horrillo, J.J., Cheng, W., Jose, A.,Shang, Y.：海啸淹没图的开发与气象海啸特征分析的延续。技术报告，海洋工程，德克萨斯农工大学加尔维斯顿分校（2022）

海洋与渔业研究所：MESSI观测网络：实时测量站。在线平台，海洋与渔业研究所，克罗地亚。最后访问日期：2025年9月29日（2025年）。 http://faust.izor.hr/autodatapub/postajeKim, M.-S., S.-B., W., Eom, H., You, S.H., Lee, H.M.：面向气象海啸减灾的基于观测和大气模型的预警系统：韩国案例研究。《天气与气候极端事件》**37**，100463（2022） https://doi.org/10.1016/j.wace.2022.100463Lynett,P.J.,Gately,K., Wilson,R., Montoya, L., Arcas, D., Aytore, B., Bai, Y.,Bricker, J.D.,Castro, M.J.,Cheung, K.F., David, C.G., Dogan, G.G., Escalante,C., Gonz´alez-Vida,J.M., Grilli, S.T., Heitmann, T.W., Horrillo, J., Kˆano˘glu, U.,Kian, R.,Kirby, J.T.,Li, W., Mac´ıas, J., Nicolsky, D.J., Ortega, S., Pampell-Manis, A., Park,Y.S., Roeber, V., Sharghivand, N., Shelby, M., Shi, F., Tehranirad,B., Tolkova, E., Thio,H.K., Velio˘glu, D., Yal.cıner, A.C., Yamazaki, Y., Zaytsev, A., Zhang, Y.J.：海啸诱发的沿岸流的模型间分析。《海洋建模》**114**，14–32（2017年） https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2017.04.003Lewis, C., Smyth, T., Neumann, J., Cloke, H.：一种新型气象海啸强度指数的提案。《自然灾害与地球系统科学》**24**，121–131（2024年）https://doi.org/10.5194/nhess-24-121-2024Mac´ıas, J., Castro, M.J., Escalante, C.：Tsunami-HySEA模型在NTHMP海啸流基准测试中的性能评估。实验室数据。《海岸工程》**158**，103667（2020年） https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2020.103667Mac´ıas,J.,Castro, M.J., Ortega, S., Escalante, C., Gonz´alez-Vida, J.M.：Tsunami-HySEA模型在NTHMP淹没制图工作中的性能基准测试。《纯粹与应用地球物理学》**174(8)**, 3147–3183（2017年） https://doi.org/10.1007/s00024-017-1583-1

Mac´ıas, J., Castro, M.J., Ortega, S., Gonz´alez-Vida, J.M.：Tsunami-HySEA模型在NTHMP海啸流基准测试中的性能评估。实地案例。《海洋建模》152，101645（2020年）https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2020. 101645 Mac´ıas, J., S´anchez, C.E., Castro, M.J., Vida, J.M.G., Ortega, S.：HySEA模型。NTHMP滑坡基准测试结果（2017年）https://doi.org/10.13140/RG.2. 2.27081.60002 Mac´ıas, J., V´azquez, J.T., Fern´andez-Salas, L.M., Gonz´alez-Vida, J.M., B´arcenas, P., Castro, M.J., D´ıaz-del-R´ıo, V., Alonso, B.：Al-Borani海底滑坡及其引发的海啸：一种建模方法。《海洋地质》361，79–95（2015年）https://doi.org/10.1016/j.margeo.2014.12.006 Monserrat, S., Vilibi´c, I., Rabinovich, A.B.：气象海啸：海啸频率带内由大气诱发的破坏性海浪。《自然灾害与地球系统科学》6，1035–1051（2006年）https://doi.org/10.5194/nhess-6-1035-2006 Orli´c, M., Belu˘si´c, D., Janekovi´c, I., Pasari´c, M.：关于1978年6月21日亚得里亚海大风暴潮与中尺度大气强迫相关性的最新证据。《地球物理研究杂志：海洋》115，06011（2010年）https://doi.org/10.1029/2009JC005777 Prani´c, P., Denamiel, C., Vilibi´c, I.：亚得里亚海与海岸（AdriSC）气候组件的性能：基于COAWST V3.3的单向耦合大气—海洋建模套件：海洋结果。《地球科学模型开发》14，5927–5955（2021年）https://doi.org/10.5194/gmd-14-5927-2021P Porter, A.R., Heimbach, P.：释放并行计算的力量：用于海洋预报的图形处理器技术，载于：《海洋预报：现状与最新进展》（OPSR），编者： ´Alvarez fanjul, e., ciliberti, s. a., pearlman, j., wilmer- becker, k., and behera, s.，哥白尼出版公司。State Planet，23（2025年）https://doi.org/10.5194/sp-5-opsr-23-2025 Qin, X., LeVeque, R.J., Motley, M.R.：使用图形处理器加速深度平均流的自适应网格加密代码。《地球系统建模进展杂志》11，2606–2628（2019年）https://doi.org/10.1029/2019MS001635 Rahimian, M., Beyramzadeh, M., Siadatmousavi, S.M.：近期波斯湾气象海啸事件期间天气研究与预报模型和WAVEWATCH-III模型的技巧评估。《海洋科学前沿》9，834151（2022年）https://doi.org/10.3389/fmars.2022.834151 Renault, L., Vizoso, G., Jans`a, A., Wilkin, J., Tintor´e, J.：利用区域嵌套大气和海洋模型提高巴利阿里海气象海啸的可预测性。《地球物理研究快报》38，10601（2011年）https://doi.org/10.1029/ 2011gl047361

Skamarock, W.C.：使用动能谱评估中尺度数值天气预报模型。《月刊天气评论》132，3019–3032（2004）https://doi.org/10.1175/MWR2830.1 Shchepetkin, A., McWilliams, J.：针对 Haidvogel 等人所著《采用地形跟随坐标的海洋预报：区域海洋建模系统的公式与技能评估》的勘误与评论。《计算物理学杂志》- J COMPUT PHYS 228，8985–9000（2009）https://doi.org/10.1016/j.jcp.2009.09.002 Salaree, A., Mansouri, R., Okal, E.A.：2017年3月19日伊朗代耶尔港发生的引人关注的海啸：现场调查与模拟。Natural Hazards 90，1277–1307（2018）https://doi.org/10.1007/s11069-017-3119-5 Sun, Q., Niu, X.：大气驱动的边缘波触发的港湾共振。《海洋工程》224，108735（2021）https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.108735 Tojˇci´c, I., Denamiel, C., Vilibi´c, I.：2020年5月11日至19日多重气象海啸事件期间亚得里亚海预警系统的性能：基于能量条幅的评估。《自然灾害与地球系统科学》21，2427–2446（2021）https://doi.org/10.5194/nhess-21-2427-2021 Vilibi´c, I.：普劳德曼共振的数值模拟。《大陆架研究》28，574–581（2008）https://doi.org/10.1016/j.csr.2007.11.005 Warner, J.C., Armstrong, B., He, R., Zambon, J.B.：耦合海洋—大气—波浪—沉积物输运（COAWST）建模系统的开发。OceanModelling 35，230–244（2010）https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2010.07.010 Zemunik, P., Denamiel, C., Williams, J., Vilibi´c, I.：高频海平面极值：与天气尺度大气形势的全球相关性。《天气与气候极端事件》38，100516（2022）https://doi.org/10.1016/j.wace.2022.100516 ˇSepi´c, J., Orli´c, M.：亚得里亚海气象海啸目录。在线目录，斯普利特大学理学院。最后访问日期：2025年9月29日（2022）。https: //projekti.pmfst.unist.hr/floods/meteotsunamis/