北京林业大学学报
JOURNAL OF BEIJING FORESTRY UNIVERSITY

Meso-NH/ForeFire耦合在复杂山地林火蔓延模拟中的验证

史凯璇 刘鹏举 孙永明 康安峰 刘桂汝 龙璋

Validation of the Meso-NH/ForeFire coupled model for wildfire spread simulation in complex terrain: a case study of the wildfire in Anze

Shi Kaixuan, Liu Pengju, Sun Yongming, Kang Anfeng, Liu Guiru, Long Zhang

引用本文:
史凯璇, 刘鹏举, 孙永明, 康安峰, 刘桂汝, 龙璋. Meso-NH/ForeFire耦合在复杂山地林火蔓延模拟中的验证[J]. 北京林业大学学报, 2026, 48(4):92-102. doi: 10.12171/j.1000-1522.20250517
Shi Kaixuan, Liu Pengju, Sun Yongming, Kang Anfeng, Liu Guiru, Long Zhang. Validation of the Meso-NH/ForeFire coupled model for wildfire spread simulation in complex terrain: a case study of the wildfire in Anze[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2026, 48(4):92-102. doi: 10.12171/j.1000-1522.20250517

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12171/j.1000-1522.20250517

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于火模拟的森林火灾风险定量评估

Quantitative assessment for forest fire risk based on fire simulation: taking the Subtropical Forest Experimental Center of Chinese Academy of Forestry as an example

北京林业大学学报, 2022, 44(9): 83-90. https://doi.org/10.12171/j.1000-1522.20210328

FireLight-YOLO：面向森林火灾实时监测的轻量化模型

FireLight-YOLO: a lightweight model for real-time forest fire detection

北京林业大学学报, 2026, 48(1): 12-25. https://doi.org/10.12171/j.1000-1522.20250219

贵州喀斯特生态系统典型针叶林地表火蔓延速度影响因子及预测模型

Influencing factors and prediction models of surface fire spreading rate of typical coniferous forest in karst ecosystem of Guizhou Province, southwestern China

北京林业大学学报, 2024, 46(5): 37-45. https://doi.org/10.12171/j.1000-1522.20220348

内蒙古大兴安岭林火驱动因素识别及预测模型

Identification and prediction models of driving factors for forest fires in Daxing’an Mountains of Inner Mongolia, northern China

北京林业大学学报, 2024, 46(12): 114-125. https://doi.org/10.12171/j.1000-1522.20230161

北京门头沟区主要林分类型地表火行为模拟研究

Simulation study on surface fire behavior of main forest types in Mentougou District, Beijing

北京林业大学学报, 2022, 44(6): 96-105. https://doi.org/10.12171/j.1000-1522.20210204

基于贝叶斯模型平均法的森林火灾预测模型构建研究

Construction of forest fire prediction model based on Bayesian model averaging method: taking Dali Prefecture, Yunnan Province of southwestern China as an example

北京林业大学学报, 2021, 43(5): 44-52. https://doi.org/10.12171/j.1000-1522.20200173

DOI:10.12171/j.1000−1522.20250517

Meso-NH/ForeFire 耦合在复杂山地林火蔓延模拟中的验证
——以安泽火灾为例

史凯璇[1]　刘鹏举[1]　孙永明[2]　康安峰[3]　刘桂汝[1]　龙　璋[1]
（1. 中国林业科学研究院资源信息研究所，北京 100091；2. 山西省林业和草原科学研究院，山西 太原 030012；
3. 山西省临汾市安泽县国有林场，山西 临汾 042500）

摘要:【目的】在森林火灾中，气象条件是影响林火蔓延的核心因子，风与林火之间的相互作用机制是研究森林火灾的重要内容。Meso-NH/ForeFire 林火–大气耦合模式能够通过双向反馈机制刻画火–气相互作用过程，但其在我国复杂地形条件下的适用性仍有待验证。**【方法】**以山西省安泽县“4・13”森林火灾为研究对象，基于 ERA5 再分析数据，应用 Meso-NH/ForeFire 耦合模式对林火蔓延过程进行数值模拟，并结合气象站观测数据和实际过火区分布，对模拟风场和林火蔓延结果进行评估，同时与非耦合模拟结果进行对比分析。**【结果】**(1)Meso-NH 能够较好地模拟近地面风场的变化趋势，其模拟风场结果与气象站点模拟风场整体一致性较好。(2)耦合模式模拟结果显示火场在东南风控制下主要向西北方向扩展，与实际调查基本一致。(3)相比非耦合模拟，耦合模式在主导蔓延方向和火头迁移路径的刻画上更为准确。精度评价结果表明，耦合模式 SC(Sørensen's coefficient)值为 0.59，基于平均距离值的豪斯多夫距离(MHD)为 306.3 m，虽在局部区域存在过模拟现象，但总体能够反映林火蔓延的主控机制和空间格局。**【结论】**Meso-NH/ForeFire 林火–大气耦合模式在复杂山地条件下能够较好地刻画林火蔓延的总体趋势和阶段性特征，适用于我国复杂山地林区的林火行为分析，并可支撑火情情景的推演。

关键词：林火蔓延模拟；模型验证；Meso-NH/ForeFire；林火–大气耦合；火–气相互作用；复杂地形；安泽火灾
中图分类号：S762　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1000−1522(2026)04−0092−11
引文格式：史凯璇，刘鹏举，孙永明，等. Meso-NH/ForeFire 耦合在复杂山地林火蔓延模拟中的验证——以安泽火灾为例[J]. 北京林业大学学报，2026，48(4)：92−102. Shi Kaixuan, Liu Pengju, Sun Yongming, et al. Validation of the Meso-NH/ForeFire coupled model for wildfire spread simulation in complex terrain: a case study of the wildfire in Anze[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2026, 48(4): 92−102.

Validation of the Meso-NH/ForeFire coupled model for wildfire spread simulation in complex terrain: a case study of the wildfire in Anze

Shi Kaixuan[1]　Liu Pengju[1]　Sun Yongming[2]　Kang Anfeng[3]　Liu Guiru[1]　Long Zhang[1]
(1. Institute of Forest Resource Information Techniques, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China;
2. Shanxi Academy of Forestry and Grassland Sciences, Taiyuan 030012, Shanxi, China;
3. State-Owned Forest Farm of Anze County, Linfen 042500, Shanxi, China)

Abstract: [**Objective**] Meteorological conditions are among the dominant factors controlling wildfire spread, and the interaction between wind and fire behavior constitutes a key issue in forest fire research. The coupled wildfire-atmosphere model Meso-NH/ForeFire is capable of representing fire-atmosphere

收稿日期: 2025−12−24　**修回日期:** 2026−03−12
基金项目: 国家重点研发计划(2021YFD220040401)，山西省林草重点研发项目(JLYF-2025-22)。
第一作者: 史凯璇。主要研究方向：林火蔓延模拟与碳损失评估。Email: skxjdnby@163.com　地址：100091 北京市海淀区香山路东小府 1 号中国林科院资源信息研究所。
责任作者: 刘鹏举，研究员。主要研究方向：地理信息系统技术与应用。Email: liupengju@ifrit.ac.cn　地址：同上。
本刊网址: https://j.bjfu.edu.cn; https://journal.bjfu.edu.cn

interactions through a two-way feedback mechanism. However, its applicability under the complex topographic conditions of China has not yet been fully evaluated. [**Method**] The "4 · 13" forest fire in Anze County, Shanxi Province, was selected as the case study. Driven by ERA5 reanalysis data, the Meso-NH/ForeFire coupled model was applied to simulate the wildfire spread process. Simulated near-surface wind fields and fire spread results were evaluated using meteorological station observations and the observed burned area, and comparative analyses were conducted against simulations without fire-atmosphere coupling. [**Result**] (1) Meso-NH effectively captures the trends in near-surface wind variations, and the simulated wind fields show good overall consistency with observations from meteorological stations. (2) The coupled model simulations indicate that the fire spread is predominantly northwestward under the influence of southeast winds, which is consistent with field observations. (3) Compared to uncoupled simulations, the coupled model provides a more accurate depiction of the dominant fire spread direction and fire head migration paths. Accuracy evaluation results show that the coupled model achieves a Sørensen's coefficient (SC) of 0.59 and a modified Hausdorff distance (MHD) of 306.3 m. Although some localized overestimation is observed, the model generally captures the primary controlling mechanisms and spatial patterns of forest fire spread. [**Conclusion**] The Meso-NH/ForeFire wildfire-atmosphere coupled model is capable of effectively representing the overall fire spread pattern and its stage-dependent characteristics under complex mountainous terrain. It is suitable for forest fire behavior analysis in China's complex mountainous forest regions and can support the simulation of fire scenario evolution.

Key words: wildfire spread simulation; model validation; Meso-NH/ForeFire; wildfire-atmosphere coupling; fire-atmosphere interaction; complex terrain; Anze fire

森林火灾是全球重要的自然灾害之一，不仅对森林生态系统和生物多样性造成严重威胁[1]，还会通过碳排放和气溶胶释放影响区域乃至全球气候[2−3]，给生态安全与社会经济发展带来严峻挑战[4]。中国森林资源分布广泛，受季风气候和复杂地形影响，森林火灾时有发生。研究表明，中国北方野火过火面积和强度在每年 3—4 月达到峰值，山西、河北西部和北部是火灾高发区[5]。气象条件是影响火灾蔓延的核心因子，风向控制着火灾蔓延的方向，而风速决定了火灾蔓延速度[6]。在森林火灾中，风与林火相互作用，风能补充火场的氧气，加速林火燃烧进程；林火在蔓延过程中也会对低层的局部风场产生影响，通过热对流的方式改变火燃烧周围的风场[7]。因此，探索林火–大气相互作用机制并建立高精度模拟方法，对提升森林火灾预测与防控能力具有重要意义。

近年来，国外学者已开发并应用多种火灾–大气耦合模式，如 WRF-Fire[8]、DEVS-FIRE 和 ARPS[9]以及 Meso-NH/ForeFire[10]。相较于以经验参数化为主的林火蔓延模拟方法，这类模式在刻画火场风场扰动、热力反馈及其对火蔓延行为的影响方面具有显著优势，但不同耦合模式在物理机制表达和数值实现路径上存在明显差异。其中，Meso-NH/ForeFire 模式基于非静力中尺度动力框架与火线追踪方法，实现了火场热释放对局地风场和边界层结构的在线双向反馈，在复杂地形条件下具备更强的物理一致性和尺度适应能力。Filippi 等[11]应用 Meso-NH/ForeFire 模式成功模拟了法国 Aullene 特大野火，模拟的火羽形态与 MODIS 卫星观测一致，火锋位置与实地记录吻合；Couto 等[12]应用 Meso-NH/ForeFire 模式对葡萄牙一场特大火灾中火积雨云（pyroCb）进行了模拟，成功再现了其烟羽垂直结构。然而，该模式在我国复杂地形与典型植被森林火灾情景下，对近地风场模拟精度、火线蔓延动态特征及响应机制仍缺乏系统验证。

本文选择山西省安泽县发生的一场典型森林火灾作为研究对象，采用 Meso-NH/ForeFire 耦合模式开展林火模拟研究，重点分析复杂地形条件下的林火蔓延特征及林火–大气相互作用机制。本研究首次将 Meso-NH/ForeFire 林火–大气耦合模式应用于中国森林火灾模拟，旨在为我国森林火灾数值模拟方法的拓展提供参考，并为区域火险预报与防控决策提供科学支撑。

1　研究区概况与数据来源

1.1　研究区概况

本研究以山西省安泽县"4 · 13"森林火灾为研究对象，其具体位置见图 1。山西省临汾市安泽县（35°53′20″ ~ 36°30′18″N，112°05′01″ ~ 112°34′05″E），地处太岳山腹地。区域地形以中低山为主，海拔高度约为 750 ~ 1 500 m，地势起伏较大，沟谷纵横。安

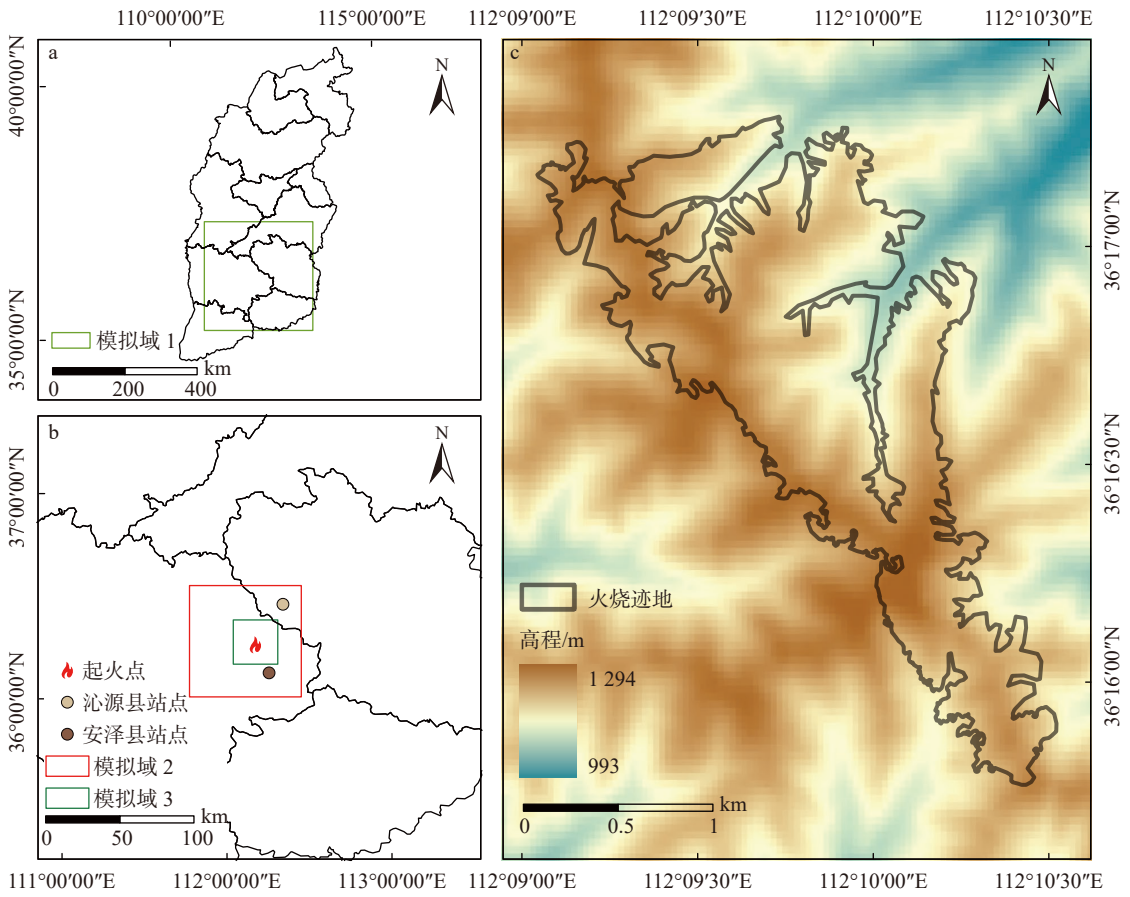


图 1 模拟域 1(a)、模拟域 2、3 与气象站点(b)及火烧迹地(c)区位图

Fig. 1 Simulation domains (a), meteorological stations (b), and burned area (c) maps

泽县属温带大陆性季风气候，四季分明。年均气温约为 9.4 ℃，年降水量约 539.1 mm，降水主要集中在 6—9 月。冬春季节气候干燥，风力较强，是森林火灾的高发时段。

研究区森林覆盖率约 45.44%，主要森林类型为针阔混交林，以油松(*Pinus tabuliformis*)、华北落叶松(*Larix principis-rupprechtii*)和栎类(*Quercus* spp.)等为主，可燃物丰富且空间分布不均。林下植被以灌木和草本为主，在干旱季节易形成连续可燃层。安泽县是山西省森林火灾的重点防控区之一。研究区内由于地形复杂、林分结构密集以及气候干燥，森林火险等级较高，近年来多次发生森林火灾。

2024 年 4 月 13 日，位于安泽县城区西北 18 km 处的红叶岭发生重大森林火灾，火场过火面积约 200 hm^2。林火起于当日下午 14：15(06：15 UTC)左右，最早由未熄灭的烟头引燃地表植被引起地表火，随后火势借助东南风迅速扩大并发展成为树冠火，消防人员到达现场后采取了以工具扑打灭火和开设隔离带等措施，但收效甚微。22：45(14：45 UTC)火场上方下起大雨，降雨有效遏制了森林火灾的蔓延，使得火势逐渐减小并在次日凌晨 1：00(17：00 UTC)左右成功扑灭明火。本研究选择该火灾作为模拟案例，以验证 Meso-NH/ForeFire 耦合模式在复杂地形下的适用性与模拟精度。

1.2 数据来源

Meso-NH 模型所需的土地利用数据采用 ECOCLIMAP 数据库；土壤和沙地数据来源于世界土壤数据库(Harmonized World Soil Database，HWSD)[13]；大气初始场和边界条件数据来自 ECMWF(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts，ECWMF)中心的 ERA5 再分析数据集。

ForeFire 模型所需的 30 m 分辨率数字高程模型(Digital Elevation Model，DEM)数据来源于美国航空航天局的 SRTM DEM 产品(https://www.nasa.gov/)；可燃物分布数据来源于 GLAD2020 土地利用类型数据集[14]，空间分辨率为 30 m。

气象站点数据来源于国家气象科学数据中心(https://data.cma.cn/)，选取距火场最近的 53875 号(沁源县)和 53877 号(安泽县)气象站台的实测气象信息。

“4·13”森林火灾的有关数据来源于山西省安泽县国有林场实地调研，包括起火时间、持续燃烧时间以及研究区可燃物类型等，火场边界基于林场提供的火场无人机航摄影像提取，起火点具体位置在林场工作人员指导下采用手持 RTK 设备收集。

2　林火蔓延数值模拟

2.1　Meso-NH/ForeFire 林火–大气耦合模式

Meso-NH 是一种基于滞弹性假设的非静力中尺度模型[15]。该模式采用可变分辨率嵌套网格设计，能够在从数百公里到几十米的多尺度空间范围内，对大气边界层过程、对流活动以及湍流结构进行精细刻画。相较于传统的大气环流模式，Meso-NH 在复杂地形和强对流天气条件下表现出更好的适应性和精度，广泛应用于对流尺度天气预报、空气质量研究以及林火–大气相互作用模拟等领域。

ForeFire 是一种基于前沿传播（front-tracking）方法的森林火灾蔓延数值模拟模型[16]。该模型通过离散化前沿火线来记录火场边界的时空演化，从而实现对火焰蔓延过程的精细刻画。与经验公式驱动的火蔓延模型相比，ForeFire 不仅具备更高的物理一致性和可扩展性，还能够与大气模式 Meso-NH 耦合，实现林火–大气相互作用的双向模拟。

Meso-NH 与 ForeFire 的耦合通过双向交换关键变量来实现林火–大气相互作用的动态模拟[11]。一方面，Meso-NH 提供高分辨率的气象场，包括风速、风向、温湿度和湍流参数等，为 ForeFire 计算火蔓延速度和火场前沿演化提供外部驱动；另一方面，ForeFire 根据可燃物特性和燃烧过程，计算火焰释放的热量通量和潜热通量，并将其反馈至 Meso-NH 的大气能量方程中，从而改变局地边界层结构和小尺度环流特征。通过这种在线双向耦合，Meso-NH 能够模拟火灾对近地层气象条件的扰动，而 ForeFire 则能够在更真实的风场和热动力条件下刻画火灾蔓延过程。该耦合机制为研究复杂地形条件下的林火–大气相互作用提供了重要技术支撑，并在大尺度森林火灾模拟与火险预报中具有重要应用价值。

2.2　数值模拟方案

本文使用 Meso-NH 5.7.2 版本，采用分辨率为 0.09° × 0.09°的 ERA5 再分析数据作为初始场和边界条件，时间间隔为 3 h。实验设置 3 层网格嵌套，其位置见图 1。网格分辨率分别为 2 000、400 和 80 m，格点数分别为 122、152、302。垂直网格点数设置为 52。模拟使用的辐射参数化方案基于快速辐射传输模型；湍流方案基于 1.5 阶闭合[17]，在第一层模拟域中只计算垂直湍流通量，而在第二、三层模拟域中则计算完整的 3D 湍流方案[18]；云微物理过程选择 ICE3 方案。除了由 ForeFire 计算的不断变化的火线外，其他涉及地表–大气相互作用的过程都是由地表模型 SURFEX[19]计算的。

与 Meso-NH 耦合的 ForeFire 版本为 2.1，其模拟的区域范围与 Meso-NH 第三层模拟域相同。本文应用 Rothermol 模型[20]计算森林火灾蔓延速度。在模拟域中输入 30 m 分辨率的高程数据与 30 m 分辨率可燃物数据（见图 2），热通量与水汽通量的计算网格设置为 20 m。

耦合模拟的最外层起始时间设置为 13 日 02：00 UTC，第二、三层模拟域起始自 05：00 UTC，ForeFire 点火时间为 06：15 UTC，至 17：00 UTC 结束。

为了对比观察 Meso-NH/ForeFire 耦合模式的适用性，本文也设置了在不使用耦合功能的情况下的模拟实验，即在模拟参数不变的情况下，单独运行 Meso-NH 并将其输出的每小时风场直接输入至 ForeFire 中进行模拟。不耦合模拟的起始时间设置为 13 日 06：15 UTC，至 15：00 UTC 结束。

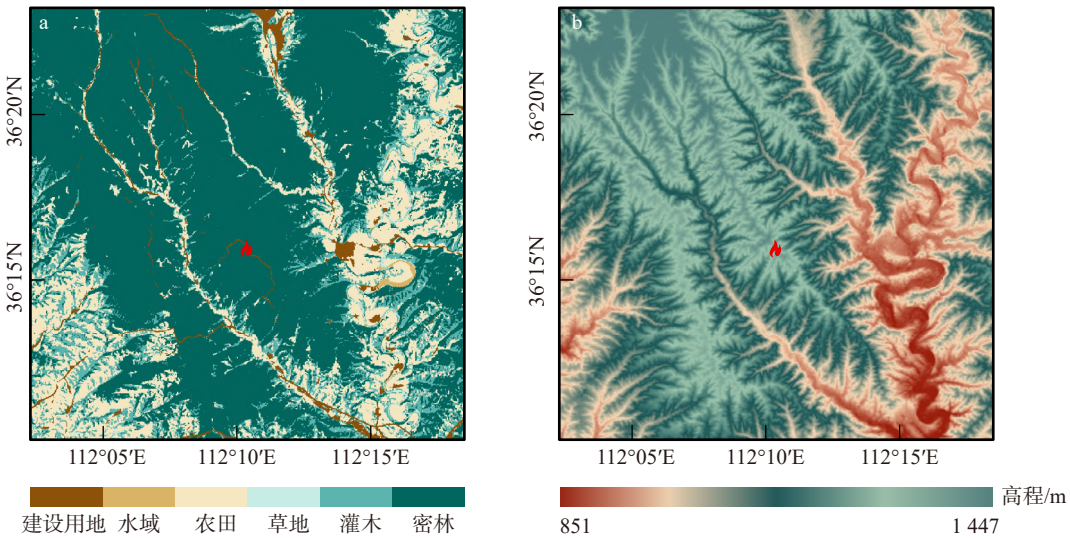


图 2　研究区域植被类型（a）与地形分布（b）

Fig. 2　Regional vegetation types (a) and terrain distribution (b)

2.3 可燃物模型

在森林火灾中，不同可燃物的燃烧特性差异巨大。本文以 GLAD2020 地表覆盖数据为基础，结合实地考察与当地林场提供的植被类型数据，将模拟域内植被分为密林、灌木、草地、建设用地、水域、农田六类，其中农田，密林、灌木、草地可燃物模型参数参考 Scott 和 Burgan 模型[21]，其映射结果如表 1。在实际模拟过程中，参与燃烧的植被类型只有密林，密林的可燃物含水率数值 23% 为实际测量值。

2.4 过火区模拟精度评价方法

林火蔓延模拟精度评价采用 SC（Sørensen's coefficient）值以及基于平均距离值的豪斯多夫距离（modified Hausdorff distance，MHD）进行综合评价。

SC 值是对蔓延模拟的范围与实际过火区范围的相关性进行表示[22]。SC 的取值范围为 0 ~ 1，值越接近 1，说明模拟蔓延范围和实际的符合程度越高。该系数的计算公式为

$$C_{SC} = \frac{2a}{2a+b+c}$$

式中：C_{SC} 为 SC 精度系数值；a 为重合区的面积，hm^2；b 为过模拟区的面积，hm^2；c 为未模拟区的面积，hm^2。

MHD 是两个非空集合之间距离度量的一种方式。通过考虑集合之间元素的距离来衡量集合之间的距离。应用于火场边缘轮廓空间相似性评价时，尽可能地消除实地量测或林火蔓延模型模拟过程中存在个别较大偏移的噪声点的影响，更注重于整体轮廓的相似程度[23]。其公式如下。

$$H(\boldsymbol{A},\boldsymbol{B}) = \max(h(\boldsymbol{A},\boldsymbol{B}),h(\boldsymbol{B},\boldsymbol{A}))$$

$$h(\boldsymbol{A},\boldsymbol{B}) = \frac{1}{m}\sum_{a\in\boldsymbol{A}}\{D(a,\boldsymbol{B})\}$$

$$h(\boldsymbol{B},\boldsymbol{A}) = \frac{1}{n}\sum_{b\in\boldsymbol{B}}\{D(b,\boldsymbol{A})\}$$

式中：$H(\boldsymbol{A}, \boldsymbol{B})$表示的是基于平均距离值的 MHD，$h(\boldsymbol{A}, \boldsymbol{B})$则是点集 $\boldsymbol{A}$ 和 $\boldsymbol{B}$ 之间的均值有向 MHD，$h(\boldsymbol{B}, \boldsymbol{A})$表示的是 $\boldsymbol{B}$ 和 $\boldsymbol{A}$ 之间的均值有向 MHD，$\boldsymbol{A}$、$\boldsymbol{B}$ 分别是实际过火区与模拟过火区的边界点集，m、n 分别表示点集 $\boldsymbol{A}$ 和点集 $\boldsymbol{B}$ 中所包含的点的个数。

3 模拟结果与分析

为验证 Meso-NH/ForeFire 耦合模式的可行性和准确性，研究对山西省安泽县“4·13”森林火灾进行模拟分析。首先将 Meso-NH/ForeFire 耦合模式下模拟得到风场与气象站实际观测风场进行比较验证，评估模拟风场的可靠性；随后分析耦合模式下的林火蔓延模拟结果；最后在不耦合 Meso-NH/ForeFire 的情况下对森林火灾进行模拟，分别将耦合与不耦合情况下的蔓延结果与实际火场进行比较，以分析耦合模式的实际应用效果。

3.1 耦合模式下风场模拟

近地面风是影响森林火灾行为最关键、最直接的因素之一，它直接决定了火灾蔓延的速度、方向和强度。风能补充火场的氧气，加速燃烧进程；同时，风能改变热对流，增加热平流，加速火的蔓延。而且，风向和风速突变在扑火作业中非常重要，影响扑灭工作人员生命安全。因此，对于 Meso-NH 模拟风场的检验非常重要。由于第三层模拟域较小，本研究将拥有实测风场数据的气象站点设置在了第二层模拟域。本研究选取距离起火点最近的安泽县与沁源县气象站点进行 10 m 风场对比检验，图 3 展示了两个站点位置的模拟与实测风速风向对比及误差风速。

从风速检验结果来看，两个气象站点的模拟风速均大于站点实测风速，但风速变化趋势趋于一致——均呈现先升高、后降低的趋势。其中，安泽县实测风速在 5：00—7：00 阶段处于上升趋势，并于 7：00 达到最大值，耦合模式模拟出了这一上升趋势，但是整体风速偏差也接近 2.0 m/s；在 7：00—15：00 阶段，安泽县实测风速稳步下降，整体降幅约 5.1 m/s，耦合模式同样模拟出了这一趋势，模拟风速的整体降幅达到了 6.0 m/s，在此阶段，模拟风速的平均误差降低到了 1.8 m/s；在 15：00—17：00 阶段，实测风速出现了大幅度的降低，从 15：00 的 5.3 m/s 降

表 1 研究区可燃物类型

Tab. 1 Fuel types in the study area

植被类型	可燃物载量/（$kg\cdot m^{-2}$）	表面积体积比/（$m^2\cdot m^{-3}$）	可燃物床深/m	可燃物热值/（$J\cdot kg^{-1}$）	可燃物含水率/%	颗粒密度值/（$kg\cdot m^{-3}$）
建设用地	0		0			
农田	2.47	5 289	1.5	1.86×10^7	20	500
密林	0.9	4 922	0.3	1.86×10^7	23	512
灌木	0.8	2 460	0.2	1.86×10^7	13	512
水域	0		0			
草地	0.2	6 739	0.12	1.86×10^7	12	512

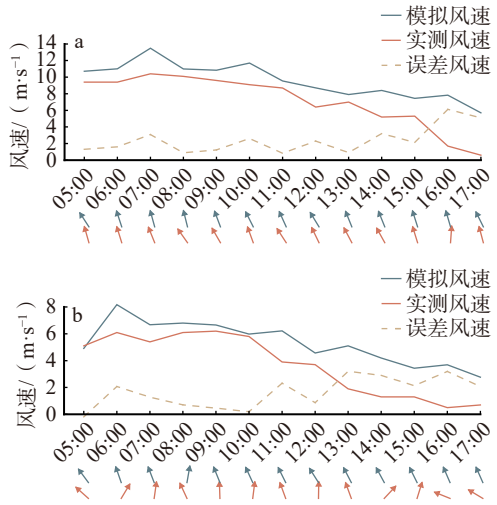


图 3　安泽县气象站点(a)与沁源县气象站点(b)模拟与实测风速、风向对比，以及误差风速

Fig. 3　Comparison of simulated and measured wind speed and direction at Anze County (a) and Qinyuan County (b) meteorological stations, and wind speed errors

低到了 17：00 的 0.6 m/s，整体降幅达到了 4.7 m/s，耦合模式显然没有对该阶段风速的大幅降低做出反应，反而出现了先升高再降低的情况，整体降幅仅有 1.7 m/s，而平均误差也随之增长到了 5.5 m/s（图 3a）。另一方面，沁源县实测风速在 5：00—10：00 阶段呈现了较为平稳的趋势，在此阶段最低风速 5.1 m/s，最高风速 6.2 m/s，平均风速约 5.8 m/s，模式对在 6：00 时出现的风速增长做出了过度反应，导致模拟风速误差达到了 2.0 m/s，不过在随后的时段中趋于平稳，误差也逐渐降至 0.2 m/s；在 10：00—13：00 阶段，实测风速出现了大幅度降低，由 5.8 m/s 下降到了 1.9 m/s，耦合模式对此阶段的风速模拟表现不佳，出现了两次增长的情况，该阶段平均误差达到了 2.7 m/s；在 13：00—17：00 阶段，实测风速自 1.9 m/s 稳步下降至 0.7 m/s，降幅 1.2 m/s，模拟风速在该阶段同样呈现了平稳下降的趋势，但是与实测风速之间同样保持了平均 2.6 m/s 的误差（图 3b）。

从风向检验结果来看，安泽县风向模拟结果明显优于沁源县。除 16：00 外，安泽县实测风向均为东南风，模拟风向的结果也全部为东南风，平均模拟误差仅为 9.3°。对于 16：00 的实测西北风向，模式并没有能够有效预测，风向误差达到了 20°。沁源县的风向模拟结果较差。总体来看，沁源县实测风向复杂多变，在 6：00—13：00 为偏北风，东西风向呈现小幅度摇摆，在 14：00—15：00 为西南风，而在 16：00—17：00 则转为偏东风向。耦合模式对沁源县风向的模拟反应较差，除 8：00 之外，其他时段的模拟风向均为东南风，全部时段的平均模拟误差达到了 32.2°，误差在 14：00 达到最大值 71.5°。

3.2　耦合模式下林火蔓延速度模拟

从过火区面积增长情况（图 4）来看，本场火灾自点火后面积稳步增长，并未见明显的过快与迟滞现象。综合各时段增加面积、火头蔓延速度、风场变化（图 5）以及火线蔓延速度空间分布（图 6），可以将火势蔓延分为 3 个阶段。

阶段 Ⅰ（6：15—11：00）林火开始蔓延，火头蔓延速度处于较高水平，基本维持在 0.1 m/s 以上，在 7：30—8：00 时段内出现了 0.25 m/s 的最大蔓延速度，10：00—11：00 时段内也出现了较小的峰值，蔓延速度达到了 0.16 ~ 0.17 m/s。在该阶段，过火区总体面积达到了 150 hm^2 左右，单位时间（6 min）内过火区增加面积从 0.16 hm^2 持续增加至 6.00 hm^2。由图 5 可知，在该阶段模拟中，林火持续向西北方向蔓延，在各时段的林火蔓延边界点中，火蔓延速度较高的点位全部分布在正北、西北、正西方向，其中最高的点位均位于西北方，这也与林火在西北方向的扩张相对应。该阶段火场处的风向在 7：00 时主要为东风，其余时段则以东南风为主，火场周围风速整体处于 5.0 ~ 12.0 m/s 之间。从图中可以看出，风速大小与地形起伏状况密切相关，迎风坡的风速明显高于背风坡。

阶段 Ⅱ（11：00—13：00）林火持续蔓延，火头蔓延速度较阶段 Ⅰ 出现了降低，自 0.14 m/s 缓慢降至 0.08 m/s。在该阶段，过火区总体面积增加至 257.2 hm^2，单位时间（6 min）内，过火区增加面积稳定在 5 ~ 7 hm^2 之间。在阶段 Ⅱ 模拟中，林火持续向西北

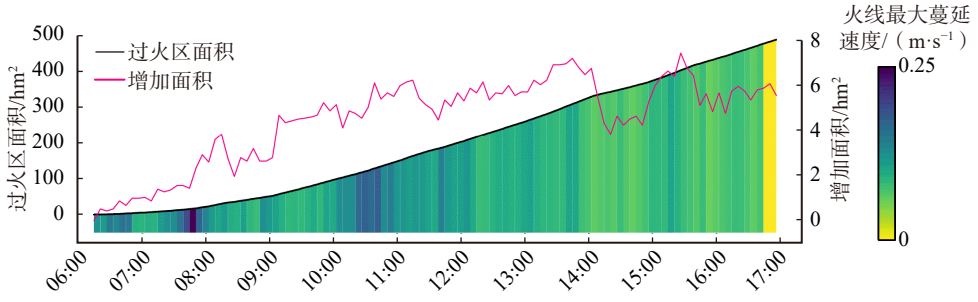


图 4　各时段过火区面积和过火区增加面积，以及火线最大蔓延速度

Fig. 4　The burned area, the increment of burned area, and the maximum fire spread rate for each time period

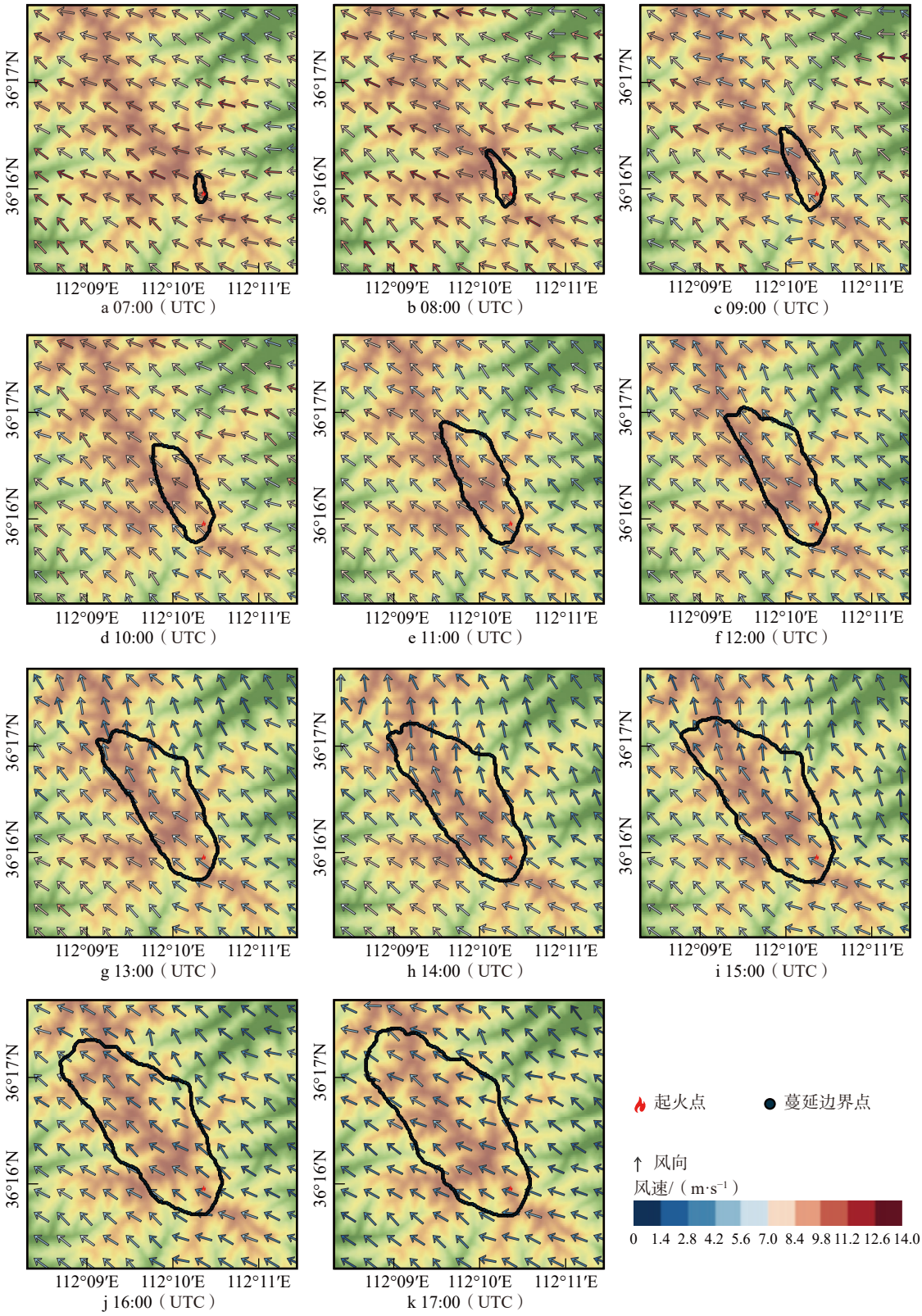


图 5 各时段蔓延边界与风场模拟结果

Fig. 5 Spread boundaries and wind field simulation results at different time periods

方向蔓延，但结合各时段林火蔓延边界点可以看出，在过火区边界蔓延速度整体呈现缓慢降低的趋势，其中火场北部边界的蔓延速度降低极为明显，从 0.06 m/s 降低到不足 0.01 m/s。与此相反的是，过火区正西方向的蔓延速度出现了小幅度的增长，由 0.04 m/s 增长到 0.07 m/s 左右；在 14：00 时，部分地区甚至出现了 0.11 m/s 的峰值，此时火头位置也从火场的西北方向短暂地转变为了正西方向。结合阶段Ⅱ的风场和地形情况，可以看出该阶段火场地区风速相比于阶段Ⅰ有了明显的下降，整体风速维持

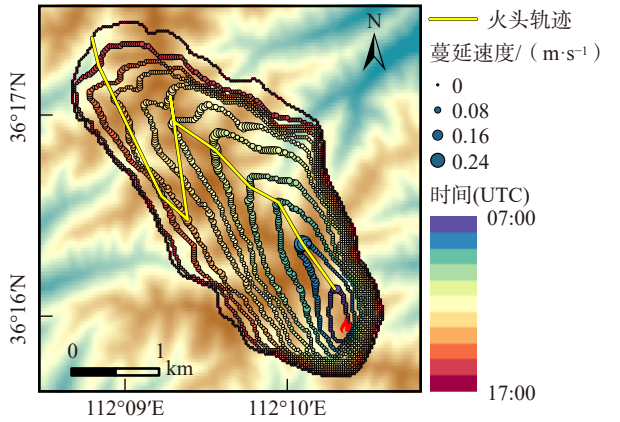


图 6　各时段火场边界点蔓延速度与火头轨迹

Fig. 6　Spread rate of fire boundary points and fire front trajectory at each time period

在 3.5 ~ 6.0 m/s 之间，风速较快的地区集中在火场西部，达到了 7.8 m/s；就风场风向来看，火场北部近地面风向从东南风转为南风，其余地区维持东南风向状态。

阶段III（13：00—17：00）林火蔓延速度持续降低，火头蔓延速度维持在 0.6 ~ 0.9 m/s 之间。在该阶段，过火区面积增加至 488 hm^2，单位时间（6 min）内，过火区增加面积在 3.5 ~ 7.5 hm^2 之间呈现了波动。该时期，火线以较低的蔓延速度向前推进，过火区在正西、西北和正北方向持续扩张，火线蔓延速度在过火区西部略有下降，但是在西北部和北部地区有小幅度的提升。此时火头位置也从 14：00 的正西方向回到了西北方向。结合阶段III风场和地形情况，可以看出该阶段火场地区风速相比阶段 II 有了明显的下降，整体风速维持在 1.5 ~ 5.0 m/s 之间，风速较快的地区集中在火场西北部和西部，达到了 7.0 m/s；就风场风向来看，阶段III末期火场北部的南风逐渐转变为东南风，而火场东部的东南风转变为东风，其余地区维持东南风向状态。

3.3　过火区模拟

得益于火场上方自 14：45 UTC（北京时间当日 22：45）左右下起的大雨，林火的蔓延态势得到遏制，因此 15：00 UTC 的火场范围与最终火场范围基本一致。考虑到 Meso-NH/ForeFire 耦合模式尚无法预测降雨在林火蔓延中的作用，本文选取在 15：00 UTC 时耦合与非耦合两种情况下的林火模拟结果进行过火区模拟精度评价，其结果见表 2。

从模拟精度评价结果来看，耦合情况下，模拟结果的 SC 值达到了 0.59，总体模拟精度不高，MHD 为 306.3 m，这说明模拟结果在边缘轮廓方面的模拟情况与实际差异较大。出现这种情况的主要原因可能是耦合模式对火场的过度模拟。模拟过火区面积达到了 372.64 hm^2，这远远超过了实际过火区的面积，其中，过模拟区域面积 203.63 hm^2，这同样大于重合区域面积。在非耦合情况下，模拟结果的 SC 值达到了 0.58，与耦合情况下的模拟精度十分接近，MHD 为 250.3 m，这说明非耦合情况下模拟结果在边缘轮廓方面的模拟情况优于耦合模式，但与实际差异仍然较大。与耦合模式模拟结果不同，非耦合模式的过火区面积小于实际过火区面积，仅达到了 180.26 hm^2。同时，非耦合模式拥有更少的重合区域面积与更多的未模拟面积，其对实际过火区的准确模拟不足。

从蔓延模拟的范围（图 7）来看，现实中的森林火灾主要向西北方向蔓延，耦合与非耦合模式都准确地模拟出了这一趋势，两种模式模拟的过火区也都覆盖了大部分的实际过火区，但是两种模拟结果与实际火场在轮廓形状上偏差较大。在现实中，火场在林火蔓延初期仅是沿西北方向的山脊蔓延，而在东、西方向上的蔓延较少；在林火蔓延的中后期，火线逐渐向火场北部山脊蔓延；在林火蔓延过程中，火线在山谷地区蔓延受阻，在自高海拔地区向低海拔地区蔓延的情况下前进速度迟缓。在耦合模式下的数值模拟中，过火区在蔓延初期向东、西方向的蔓延速度明显高于实际情况，直接导致了模拟过火区在火场东南部与实际轮廓相差较大，这也是使得模拟结果偏差较大的主要原因；而在林火蔓延后期，火场北部地区的林火蔓延速度迟缓，导致在该地区出现了部分未模拟地区；另外，耦合模式对于火场中部和北部山谷地区的模拟明显多于实际情况。相比之下，非耦合模式对于动态风场的反应强度要明显低于耦合模式，其模拟过火区的范围过小，且准确模拟出的过火区不多，在火场北部拥有大量未模拟地区。非耦合模式同样在火场的东、西方向上存在过模拟区域，但由于整体模拟范围较小，非耦合模式的过模拟区域远低于耦合模式。值得注意的是，非耦合模式下地形对林火蔓延的影响被放大，过火区在火场东部山脊位置存在数个明显的凸出部分，这表明林

表 2　林火蔓延模拟结果分析

Tab. 2　Simulation results of forest fire spread

模式	模拟过火区面积/hm^2	实际过火区面积/hm^2	重合区域面积/hm^2	过模拟区域面积/hm^2	未模拟区域面积/hm^2	SC值	MHD/m
耦合	372.64	200.65	169.01	203.63	31.64	0.59	306.3
非耦合	180.26	200.65	111.24	68.02	89.41	0.58	250.5

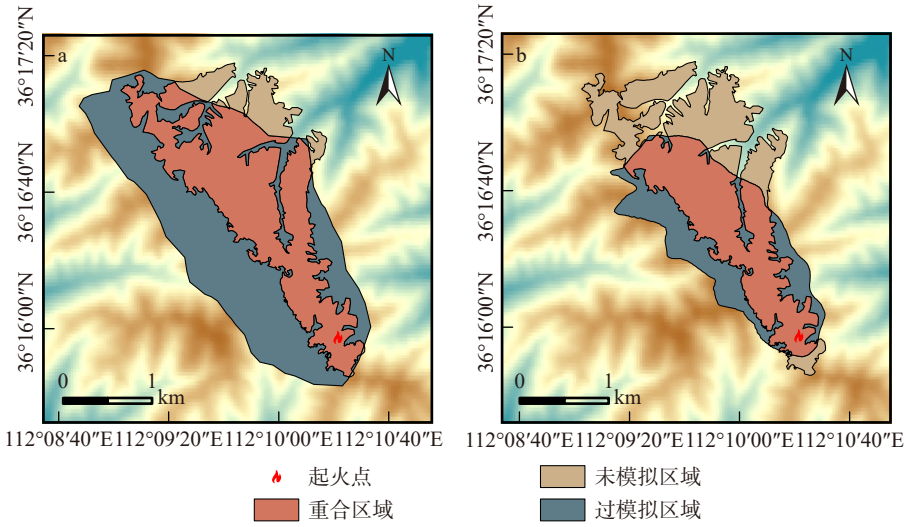


图 7 林火蔓延结果对比图：耦合模式(a)和非耦合模式(b)

Fig. 7 Comparison chart of wildfire spread outcomes: coupled mechanism (a), and uncoupled mechanism (b)

火沿山脊蔓延的速度明显高于其他地区，这可能也要归因于非耦合模式对动态风场的反应强度较低，从而弱化了风场对林火蔓延的影响。

4 讨 论

4.1 Meso-NH/ForeFire 林火–大气耦合模式适用性

本研究基于 Meso-NH/ForeFire 林火–大气耦合模式，对安泽县“4·13”森林火灾的蔓延过程进行了数值模拟，并结合气象观测资料与实际过火区分布，对该耦合模式在我国复杂山地森林火灾情景下的适用性进行了系统评估。综合风场模拟结果、林火蔓延特征及过火区空间匹配情况，可以认为该模式在刻画林火蔓延的主控机制和整体演化趋势方面具有较好的适用性，但在精细边界刻画和局地响应方面仍存在一定局限。

从林火蔓延方向和总体蔓延格局来看，Meso-NH/ForeFire 耦合模式能够较为准确地再现本次火灾以西北方向为主的蔓延特征。无论是在林火蔓延初期、中期还是后期，模拟结果均正确捕捉到了火头沿主要山脊向西北扩展的总体趋势，这与实际火场调查结果高度一致。

与非耦合模式相比，耦合模式对林火蔓延过程中风场时空变化的响应更为敏感。耦合模拟中，火场释放的潜热通量与水汽通量能够实时反馈至大气模式，使近地层风速和风向随火场发展发生动态调整，从而增强了风场对火线蔓延速度和火头迁移路径的调节作用。这一特征在林火蔓延初期表现尤为明显：耦合模式下火线在东南风控制下迅速向下风向扩展，火头蔓延速度整体高于非耦合模拟结果，且蔓延过程更为连续，反映出林火–大气双向耦合在刻画火灾快速发展阶段方面具有明显优势。

然而，结果同时表明，耦合模式在强化风场作用的同时，一定程度上削弱了地形和局地环境因子对林火蔓延的限制效应。在本次模拟中，耦合模式下过火区在火场东、西方向及部分山谷区域出现了明显的过度扩展，而这些区域在实际火灾中受地形阻隔、背风效应或可燃物条件限制，林火蔓延程度相对较弱。这说明，在复杂山地环境中，当风场模拟偏强或火–气反馈被放大时，耦合模式可能高估风对林火蔓延的推动作用，从而导致对地形约束和可燃物空间异质性响应不足。

4.2 复杂地形条件下风场模拟误差的成因分析

本研究结果表明，Meso-NH 模式在安泽县气象站点能够较好地再现近地面风向变化特征，而在沁源县站点的风向模拟误差相对较大，平均偏差达到 32.2°。这种空间差异性误差并非随机出现，而是与研究区复杂地形条件及大气动力过程的尺度特征密切相关。

首先，从站点所处地形环境来看，安泽县气象站位于相对开阔区域，近地面风场主要受大尺度背景风控制，其风向变化相对稳定，呈现出明显的东南风主导特征；而沁源县站点位于山谷与丘陵交错区域，地形起伏显著，局地环流发育条件良好，实测风向在不同时段表现出明显的多向摆动特征。这类由地形强迫引发的山谷风、坡风及背风涡旋等局地环流，其空间尺度通常小于模式第二层模拟域的有效分辨能力，使得数值模式在刻画此类高频、小尺度风向变化时存在天然局限。

其次，从驱动数据和模式动力框架角度分析，本研究采用的 ERA5 再分析资料，在复杂山地地形区域主要反映的是区域尺度的背景风场，其对地形诱导的局地风向偏折和热力环流的刻画能力有限。当

该类数据作为初始场和边界条件输入 Meso-NH 后，模式更倾向于维持背景风向的一致性，从而在沁源县这类局地环流占主导的区域表现出风向响应不足的问题。这一现象在沁源县站点风向模拟结果中表现为长时间维持东南风向，而未能有效捕捉实测风向的频繁转变。

此外，边界层参数化方案在复杂地形条件下对近地风场的平滑效应也可能进一步放大风向误差。尽管本研究在高分辨率模拟域中启用了三维湍流方案，但在山谷等地形高度非均一的区域，湍流参数化仍可能削弱小尺度地形扰动对风向的即时调节作用，从而导致模拟风向相较实测结果更为稳定。综合来看，沁源县风向模拟误差的增大，是驱动数据的代表性、地形尺度效应与模式物理参数设置三者共同作用的结果，而非由单一因素造成。

4.3　耦合模式下过模拟与未模拟区域形成的物理机制

过火区模拟结果显示，Meso-NH/ForeFire 耦合模式在整体蔓延方向上能够较好地再现实际火灾过程，但在空间形态上表现出过模拟区域偏多、局部未模拟区域并存的特征。这种偏差并非随机误差，而是林火–大气耦合机制、地形约束效应以及风场响应特性共同作用的结果。

一方面，耦合模式通过将林火释放的显热和潜热通量实时反馈至大气模式，显著增强了近地层的不稳定度和下风向平流输送能力。在火场背景风速较低或中等的条件下，这种热力反馈可能相对放大风场对火线蔓延的推动作用，从而导致火线在部分方向上的扩展强度高于实际情况。本研究中，耦合模式在火场东、西方向及部分山谷区域出现明显过模拟现象，表明火–气反馈机制在一定程度上削弱了地形阻隔对林火蔓延的抑制效应。

另一方面，复杂地形条件下实际林火蔓延过程受到多重约束，包括坡向差异、下坡火蔓延效率降低、背风坡风速衰减以及阴坡植被含水率偏高等因素。这些因素在实际火场中显著抑制了山谷及部分低洼区域的林火扩展。然而，在数值模拟中，可燃物参数采用类别平均值进行描述，含水率和微地形尺度差异未被显式引入，使得耦合模式对山谷区域的蔓延抑制作用响应不足，从而在部分地形受限区域产生过模拟现象。

与此同时，耦合模式在火场北部出现的小范围未模拟区域，则可能与低风速条件下风向变化响应不足有关。尽管模拟结果显示该区域在火灾中后期出现了风向转变，但较低的风速限制了林火–大气反馈对风场结构的进一步调整，使得火线在该方向上的推进能力被低估。这一特征表明，在低风速背景下，耦合模式对风向变化的敏感性仍存在一定不足。

值得注意的是，非耦合模式与耦合模式在过火区模拟特征上呈现出明显差异。非耦合模式由于缺乏火–气双向反馈，其风场驱动相对静态，导致整体蔓延范围偏小，未模拟区域较多；而耦合模式则通过强化风场响应提高了蔓延连续性，但同时更易产生过模拟区域。这表明，两种模拟方式分别代表了对火–气相互作用过程的不同简化路径，其模拟偏差在一定程度上反映了同一物理过程在不同参数化假设下的表现差异。

4.4　数据与模型配置的不确定性对模拟结果的影响

除物理机制本身外，数据和模型配置的不确定性同样对模拟结果产生重要影响。本研究采用 ERA5 再分析数据驱动 Meso-NH 模式，其在区域尺度风场模拟中表现稳定，但在复杂山地环境下对近地风向和风速的刻画能力仍存在局限。风场模拟结果在安泽县站点与实测数据保持较好一致，而在沁源县站点出现明显偏差，进一步说明驱动数据在复杂地形条件下的代表性问题可能通过耦合机制传导并放大至林火蔓延模拟结果中。

此外，本研究所采用的 Scott 和 Burgan 可燃物模型基于北美地区典型燃料特征构建，其燃烧参数与我国森林生态系统在可燃物结构、含水率及燃烧行为方面可能存在差异。这种参数层面的不匹配在一定程度上增加了蔓延速度和过火区边界模拟的不确定性，尤其在地形和植被高度异质的区域更为明显。

总体而言，上述不确定性并未改变耦合模式对林火蔓延主控方向和阶段性演化特征的合理刻画，但在精细尺度上仍对模拟结果的空间一致性产生影响。未来研究可通过引入更高分辨率的驱动数据、开展边界层方案敏感性试验以及构建适用于我国森林类型的本地化可燃物参数体系，进一步降低复杂地形条件下林火蔓延模拟的不确定性。

5　结　　论

本研究以山西省安泽县“4·13”森林火灾为研究对象，开展了林火蔓延过程的数值模拟研究，首次将 Meso-NH/ForeFire 林火–大气耦合模式应用于国内林火蔓延研究，并与非耦合模式下的模拟结果进行对比，以探究该模式对于我国林火蔓延的适用性。研究结果表明，相比于非耦合模式，耦合模式能更好地反映林火蔓延过程中风场与火行为之间的相互作用，在林火主要蔓延方向和整体蔓延趋势的刻画方面表现出较好的模拟能力。总体来看，Meso-NH/ForeFire 耦合模式能够较为合理地再现林火蔓延的阶段性变化特征和空间扩展趋势，因此该模式在我

国北方复杂山地林火蔓延趋势模拟中拥有较大的应用潜力，可为区域火险情景推演与应急决策提供技术参考。

但研究结果同时表明，在复杂地形条件下，该模式在近地面风场模拟和局地林火蔓延响应方面仍存在一定局限。一方面，大尺度的大气驱动数据与模拟网格设置使得模式对山谷风、坡风等小尺度局地环流的刻画能力有限；另一方面，受风场模拟误差和可燃物参数简化的影响，模拟结果在部分过火区边界的空间一致性方面仍有待提升。未来研究可通过引入更高分辨率的大气驱动数据，构建适用于我国森林类型的本地化可燃物参数体系等手段，进一步提升复杂地形条件下林火–大气耦合模拟的精度与稳定性。另外，本研究主要关注自然条件下林火蔓延特征，未来研究可进一步考虑人为扑救措施对林火的影响，以提升林火蔓延预测的综合性与现实适用性。

参 考 文 献

[1] Walker X J, Mack M C, Black B, et al. Increasing wildfire frequency decreases carbon storage and leads to regeneration failure in Alaskan boreal forests [J]. Fire Ecology, 2025, 21(1): 57.

[2] 胡海清, 罗碧珍, 罗斯生, 等. 林火干扰对森林生态系统碳库的影响研究进展 [J]. 林业科学, 2020, 56(4): 160−169.
Hu H Q, Luo B Z, Luo S S, et al. Research progress on effects of forest fire disturbance on carbon pool of forest ecosystem [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2020, 56(4): 160−169.

[3] Xu H, Chen H W, Chen D, et al. Global patterns and drivers of post-fire vegetation productivity recovery [J]. Nature Geoscience, 2024, 17(9): 874−881.

[4] Couto F T, Campos C, Purificação C, et al. Synoptic and regional meteorological drivers of a wildfire in the wildland–urban interface of faro (Portugal) [J]. Fire, 2025, 8(9): 362.

[5] Bai M, Zhang P, Xing P, et al. Spatiotemporal characteristics, causes, and prediction of wildfires in North China: a study using satellite, reanalysis, and climate model datasets [J]. Remote Sensing, 2025, 17(6): 1038.

[6] Abouali A, Viegas D X, Raposo J R. Analysis of the wind flow and fire spread dynamics over a sloped-ridgeline hill [J]. Combustion and Flame, 2021, 234: 111724.

[7] 王宇虹, 杨晓丹, 任俐文, 等. 林火蔓延模型及其适用性研究进展 [J]. 科技导报, 2023, 41(21): 49−57.
Wang Y H, Yang X D, Ren L W, et al. Research progress of wildfire spread model and its applicability [J]. Science & Technology Review, 2023, 41(21): 49−57.

[8] Shamsaei K, Juliano T W, Roberts M, et al. Coupled fire-atmosphere simulation of the 2018 Camp Fire using WRF-Fire [J]. International Journal of Wildland Fire, 2023, 32(2): 195−221.

[9] Dahl N, Xue H, Hu X, et al. Coupled fire–atmosphere modeling of wildland fire spread using DEVS-FIRE and ARPS [J]. Natural Hazards, 2015, 77(2): 1013−1035.

[10] Filippi J B, Pialat X, Clements C B. Assessment of ForeFire/Meso-NH for wildland fire/atmosphere coupled simulation of the FireFlux experiment [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2013, 34(2): 2633−2640.

[11] Filippi J B, Bosseur F, Mari C, et al. Simulation of a large wildfire in a coupled fire-atmosphere model [J]. Atmosphere, 2018, 9(6): 218.

[12] Couto F T, Filippi J B, Baggio R, et al. Numerical investigation of the Pedrógão Grande pyrocumulonimbus using a fire to atmosphere coupled model [J]. Atmospheric Research, 2024, 299: 107223.

[13] Champeaux J L, Han K S, Arcos D, et al. Ecoclimap2: a new approach at global and European scale for ecosystems mapping and associated surface parameters database using SPOT/VEGETATION data: first results [J]. IGARSS 2004, 2004, 3: 2046−2049.

[14] Potapov P, Hansen M C, Pickens A, et al. The global 2000-2020 land cover and land use change dataset derived from the landsat archive: first results [J]. Frontiers in Remote Sensing, 2022, 3: 856903.

[15] Lac C, Chaboureau J P, Masson V, et al. Overview of the Meso-NH model version 5.4 and its applications [J]. Geoscientific Model Development, 2018, 11(5): 1929−1969.

[16] Campos C, Couto F T, Filippi J B, et al. Modelling pyro-convection phenomenon during a mega-fire event in Portugal [J]. Atmospheric Research, 2023, 290: 106776.

[17] Cuxart J, Bougeault P, Redelsperger J L. A turbulence scheme allowing for mesoscale and large-eddy simulations [J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 2000, 126(562): 1−30.

[18] Verrelle A, Ricard D, Lac C. Sensitivity of high-resolution idealized simulations of thunderstorms to horizontal resolution and turbulence parametrization [J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 2015, 141(687): 433−448.

[19] Nogueira M, Hurduc A, Ermida S, et al. Assessment of the Paris urban heat island in ERA5 and offline SURFEX-TEB (v8.1) simulations using the METEOSAT land surface temperature product [J]. Geoscientific Model Development, 2022, 15(14): 5949−5965.

[20] 任孟林, 郭妍, 陈伯轩, 等. 红松人工林地表可燃物火蔓延速率预测模型 [J]. 应用生态学报, 2023, 34(8): 2091−2100.
Ren M L, Guo Y, Chen B X, et al. Prediction models of fire spread rate of *Pinus koraiensis* plantation's surface fuel [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2023, 34(8): 2091−2100.

[21] Scott J H, Burgan R E. Standard fire behavior fuel models: a comprehensive set for use with Rothermel's surface fire spread model[R]. Ogden: Rocky Mountain Research Station, 2005.

[22] 徐奔奔, 王炜烨, 陈良富, 等. 基于 VIIRS 火点数据和 FARSITE 系统的森林火灾蔓延模拟 [J]. 遥感学报, 2022, 26(8): 1575−1588.
Xu B B, Wang W Y, Chen L F, et al. Forest fire spread simulation based on VIIRS active fire data and FARSITE model [J]. National Remote Sensing Bulletin, 2022, 26(8): 1575−1588.

[23] 周宇飞, 刘鹏举, 唐小明. 林火蔓延模型模拟空间精度评价研究 [J]. 北京林业大学学报, 2010, 32(2): 21−26.
Zhou Y F, Liu P J, Tang X M. Space accuracy evaluation of forest fire spreading model [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2010, 32(2): 21−26.

（责任编辑 吴 娟
责任编委 李文彬）