

王宇虹, 赵鲁强, 杨晓丹, 等. 大气与地形环境对林火蔓延的影响研究——以山西一次森林火灾为例[J]. 灾害学, 2023, 38(3): 118–125. [WANG Yuhong, ZHAO Luqiang, YANG Xiaodan, et al. Study on the Influence of Atmosphere and Topographic on Wildfire Spread—A Wildfire in Shanxi Province as a Case Study[J]. Journal of Catastrophology, 2023, 38(3): 118–125. doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2023.03.019.]

大气与地形环境对林火蔓延的影响研究*

——以山西一次森林火灾为例

王宇虹, 赵鲁强, 杨晓丹, 梁莉, 袁晓玉, 任俐文, 张辉

(中国气象局公共气象服务中心, 北京 100081)

摘要: 为了深入认识林火蔓延特征及大气、地形等对林火行为的影响, 选取2020年“3·17”山西晋中森林火灾, 利用高分辨率地理信息、卫星遥感林火监测数据和气象观测对此次林火行为进行分析研究, 同时运用林火—大气耦合 WRF–Fire 模式进行数值模拟。研究发现: ①在可燃物载量相对稳定情况下, 林火蔓延与地形和大气环境(大尺度天气系统和小尺度局地小气候)密切相关, 尤其是风的变化; ②数值模拟过火区范围和形状、火线蔓延方向和速度以及风向风速变化与实况较为一致, 表明 WRF–Fire 模式可以较准确再现真实火场蔓延情况。分析蔓延速率、蔓延方向、火焰高度、释放热量和水汽等蔓延特征变量和过火区分布情况, 该次模拟时效内的林火发展可分为5个阶段, 不同阶段蔓延特征显著不同。

关键词: 林火—大气耦合模式; 林火蔓延; 森林火灾; 数值模拟

中图分类号: X43; X915.5; X954; S76 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000–811X(2023)03–0118–08

doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2023.03.019

近年来, 林火对生态系统和公共安全构成严重威胁, 引起了社会各界的极大关注, 如2019年“3·30”四川木里森林火灾、2020年“3·30”四川西昌森林火灾^[1–4]。林火蔓延的预报对林火扑救、人力和物力配备等具有非常重要的意义^[5]。

多年来国内外对林火蔓延进行了大量研究, 自1946年 FONS^[6] 首先提出林火蔓延的数学建模以来, 目前有许多模型用于预测林火在不同时空尺度和环境中蔓延行为^[7], 根据是否考虑传热导机制可分为物理机理模型、统计经验模型、半机理半统计模型, 主要包括 ROTHERMEL 模型^[8]、MCARTHUR^[9] 模型、加拿大林火蔓延模型^[10]、王正非林火蔓延模型^[11] 等以及这些模型基础上的修正模型, 早期的这些模型主要针对火头蔓延速度测算为一维模型, 不足以代表整个林火蔓延过程。因此, 随后又基于以上传统一维模型基础上建立了多种二维或三维的空间模拟模型如 Behave-Plus^[12]、FARSITE^[13]、FIRETEC^[14]、WFDS^[15]、CAWFE^[16]、WRF–FIRE^[17] 等。每种模式都有其

优缺点, 主要取决于计算成本、数据要求、准确性和可移植性^[18–20]。

国内在林火—大气耦合方面的模拟研究较为缺乏, 目前大多数研究主要集中在对传统林火蔓延模型及算法的改进^[21–25] 以及三维林火蔓延模拟可视化^[26–29] 两个研究热点上。WRF–Fire 是国外在林火—大气耦合模拟研究方面一个重要手段, 是中尺度数值天气模式与火场蔓延模型相耦合的一种模式, 近地面风场、可燃物特性和地形条件决定火线的传播速度和方向; 同时可燃物燃烧释放的潜热和感热反馈给气象模式, 实现燃烧与气象环境的双向反馈。基于该模式一系列研究成果表明对林火实况模拟有较好效果^[30–37]。

林火蔓延特征很难实现实时观测, 数值模拟是很好的手段。国内目前关于林火燃烧和蔓延模拟研究很少, 已有的模拟研究多为大气单向驱动林火, 很少考虑大气和林火相互耦合作用, 而且对林火蔓延特征分析研究十分缺乏。本文选取“3·17”山西晋中森林火灾为个例进行模拟, 首先

* 收稿日期: 2022–10–31 修回日期: 2023–02–08

基金项目: 国家重点研发计划(2020YFC1511602); 国家重点研发计划(2022YFC3003004); 中国气象局公共气象服务中心创新基金项目(Y2022007)

第一作者简介: 王宇虹(1990–), 女, 蒙古族, 内蒙古包头人, 工程师, 主要从事森林草原气象服务和技术研究。

E-mail: wangyhcam@163.com

通信作者: 赵鲁强(1965–), 男, 汉族, 山东省济宁人, 正研级高级工程师, 主要从事气象预报和专业气象应用研究工作。

E-mail: zhaolq@ema.gov.cn

通信作者: 杨晓丹(1979–), 女, 汉族, 河北省秦皇岛人, 正研级高级工程师, 主要从事森林草原气象服务和技术研究。

E-mail: yangxd@ema.gov.cn

检验模式模拟能力, 基于模拟结果对燃烧过程中气象和火蔓延行为特征进行分析。2020 年 3 月 17 日 03:00 左右(世界时, 下同), 山西省晋中市榆社县社城镇焦红寺村发生森林火灾, 火势迅速蔓延, 经过 7 d 紧张扑救, 3 月 24 日 23:00 火灾 4 个火场明火才全部扑灭。本文在利用高分辨率地表覆盖资料确定可燃物分类的基础上, 采用 WRF-Fire 数值模式结合大涡模拟研究燃烧过程中火行为特征变量的变化, 再现林火发展过程, 对林火蔓延特征的研究有助于为我国林火-大气双向耦合机理研究提供理论参考依据, 并为扑灭火工作提供决策辅助。

1 数值模拟方案

1.1 WRF-Fire 模式简介

WRF(Weather Research and Forecasting Model) 是美国国家大气研究中心和美国环境预报中心以及多个大学、研究所和业务部门联合研发的新一代非静力平衡、高分辨率的中尺度数值天气模式系统, 在区域和全球天气、气候模拟研究和业务预报中广泛应用^[38]。WRF 自 3.2 版耦合了野火蔓延模型, 即 WRF-Fire, 通过高分辨率、大涡模拟的方法多层嵌套实现了火场与气象场的双向耦合反馈, 即大气模式低层的近地面风以及火点地表可燃物的属性和地势高度决定了火的蔓延速度和方向, 而燃烧过程中释放热量和水汽又反过来影响近地层气象要素的变化, 使火场与气象场之间形成一个不断反馈的循环^[17,30]。自 WRF4.0 版本开始, 一套更加准确的水平集算法的应用可使火灾周长蔓延与网格大小几乎无关, 大大减少了求解水平集方程时的误差^[39]。

WRF-Fire 可分辨的大气运动尺度从几十米到数百公里, 而林火的物理过程尺度较大气运动要

小几个量级, 因此 WRF-Fire 模式并没有模拟刻画火燃烧的物理化学过程, 而是采用适用范围较广的 Rothermel 模型来进行参数化^[8]。Rothermel 模型基于能量守恒定律的模型, 基本包括了能影响火行为的所有因子, 并考虑了林火蔓延的各种物理、化学等细节; 其基本思想是林火蔓延过程主要是火焰前方还未被点燃的可燃物连续被点燃的过程, 当未被引燃的可燃物吸收热量升温达到可燃物的燃点时, 这些可燃物就被引燃, 火焰前锋也就蔓延到此处^[8]。

1.2 可燃物分类

可燃物类别不同, 燃烧特性差异很大。我国目前尚缺少可燃物分类基础数据库。本文首先根据 FROM-GLC(2015_v1)(Finer Resolution Observation and Monitoring of Global Land Cover)^[40]地表覆盖数据确定火点附近的植被类型, 可以发现主要为草地和针、阔叶混合林(图 1a), 然后与 ANDERSON^[41]13 种可燃物类型进行映射, 将草地对应 ANDERSON 分类中的种类 1(低草), 将林区对应为种类 8(密林), 将硬化地对应种类 14(不可燃物), 具体物理参数如表 1。

1.3 数值模拟方案

本文使用 WRF4.3 版本, 采用 NCEP/NCAR 每日 4 次 $1^\circ \times 1^\circ$ 的 FNL 分析资料作为初始场和边界条件, 设置四层网格嵌套, 格距分别为 27 km、9 km、3 km 和 30 m。对应的地形资料分辨率为 $5'$ 、 $2'$ 、 $30''$ 和 $1''$ 。第四层研究区域地形数据采用 ASTER GDEM(Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer Global Digital Elevation Model)^[42], 栅格分辨率约 30 m。研究区域地形如图 1b, 模拟物理过程如表 2。模拟时间段为 2020 年 3 月 16 日 18:00—19 日 18:00, 共 72 h, 为“3·17”森林火灾点燃和发展蔓延的一段过程。

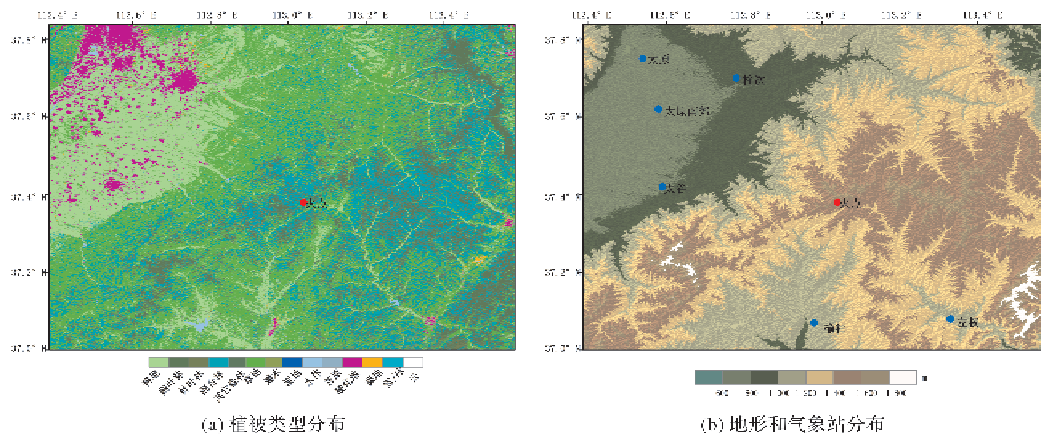


图 1 研究区域植被类型和地形分布图

表 1 研究区域可燃物类型^[41]

类别	典型植被	负载量/(t/hm ²)				可燃物层厚度/cm	引燃临界含水量/%
		1 h	10 h	100 h	活可燃物		
1	低草	1.83	0.00	0.00	0.00	30.48	12
8	密林	3.71	2.47	3.38	0.00	6.10	30
14	不可燃物	10^{-7}	10^{-7}	10^{-7}	10^{-7}	30.48	12

表 2 模式物理过程

物理过程	方案
微物理过程	WSM3 类方案
长波辐射	RRTM 方案
短波辐射	Dudhia 方案
近地面层	Monon - Obukhov 方案
陆面过程	Noah - MP 陆面过程方案
行星边界层	YSU 方案
积云参数化	第一、二层 Kain - Fritsch 方案; 第三、四层关闭积云参数化

2 林火实况变化与模拟检验

2.1 过火区变化与模拟检验

基于 Sentinel - 2 和 Himawari - 8 卫星数据作为监测实况, 验证过火区形态和发展趋势模拟效果。Sentinel - 2 是太阳同步轨道卫星, 重访周期为 5 d; 卫星携带一枚多光谱仪器, 可覆盖 13 个光谱波段, 地面分辨率分别有 10 m、20 m 和 60 m; 本文过火区提取采用可见光通道(红绿蓝, 分辨率 10 m)数据合成彩色图像。Himawari - 8 是地球同步轨道卫星, 搭载有 AHI 成像仪, 该传感器共有 3 个可见光通道和 13 个近红外及红外通道, 最高分辨率可达 500 m; 采用红外波段(分辨率 1 000 m)数据绘制过火区矢量范围。Sentinel - 2 空间分辨率高, 但监测频次低; Himawari - 8 监测频次高, 但分辨率较 Sentinel - 2 相对低; 本文将 Sentinel - 2 经过火区上空的影像(2020 年 3 月 18 日 03: 17: 37)与 Himawari - 8 卫星同时刻数据进行几何配准, 在模拟时段内以配准后的 Himawari - 8 卫星数据作为描述本次林火演变趋势实况, 但由于分辨率为 1 000 m, 作为评估过火面积误差较大, 因此主要用于过火区形态变化分析和模拟验证对比。

在着火初期, 由于火区较小, 卫星不能准确反演出过火区, 因此选取卫星反演较稳定时段内(18 日 12: 00—19 日 18: 00)逐 3 h 对过火区位置、形态、趋势进行分析和定性检验(图 2)。图 2 中黑点表示初始着火点位置, 彩色折线表示逐 3 h Himawari - 8 卫星反演过火区, 数字表示逐 3 h 各时段顺序, 灰线表示模拟该时段最后时刻的过火区, 阴影图表示地形高度。18 日 12: 00—18: 00, 火区迅速向东向南发展, 主要原因在于①这一阶段环境风(图 3 蓝色折线和风向标)主要为较强的西北风; ②这一阶段为夜间时段, 山坡比山谷降温快, 气流下沉形成下坡风和山风, 局地地形形成的下坡风加速了火区向东侧山脊 a 向山谷 a 扩张、形成的山风加速山脊 a 向东南扩张。18 日 18: 00—19 日 00: 00, 火区主要向东发展, 主要原因在于: ①环境风主要为偏西风; ②这一阶段为日出时段, 山坡比山谷升温快, 气流上升形成上坡风和谷风, 局地地形形成的上坡风加速了火区从山谷 a 向山脊 b 扩张、形成的谷风加速山谷向东南扩张。19 日 00: 00—09: 00, 火区变化不大, 主要原因在于: ①环境风风速明显减弱; ②白天逐渐升温时上坡风和谷风抑制火区发展。19 日 09: 00—18: 00, 火区向北有所发展, 主要在于这一时段环境风转为偏南风。

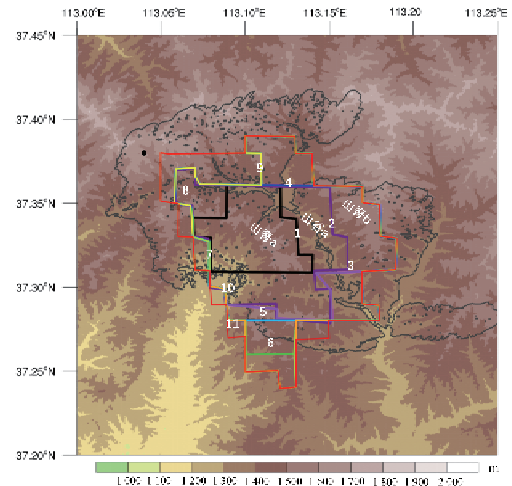


图 2 逐 3 h 过火区监测实况(彩色)与 19 日 18: 00 模拟过火区(灰色)

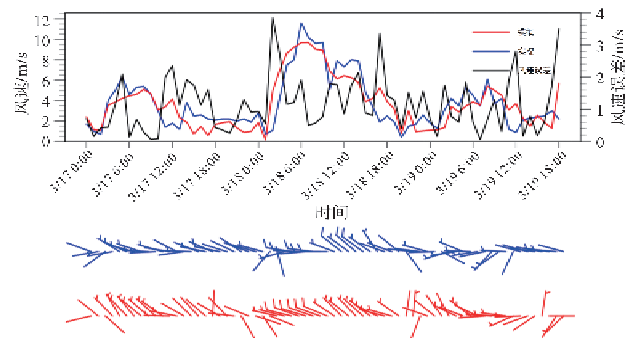


图 3 17 日 00: 00—19 日 18: 00 左权站实况(蓝色)与模拟(红色)10 m 风速风向对比及风速误差(黑色)

从过火区模拟与监测实况对比来看, 模式模拟的过火区位置、形态与监测实况较为吻合, 基本模拟出了过火区向东南 - 东 - 北方向依次扩张的态势。

2.2 风场变化与模拟检验

近地面风是影响火蔓延发展的重要因素, 因此对了解火场风向风速变化非常重要, 由于第四层模拟区域较小, 且实况观测数据较少, 因此本文对位于第四层模拟区域内的 6 个气象观测站(左权、榆社、太谷、榆次、太原南和太原, 站点位置见图 1b)进行 10 m 风场检验, 检验时间去除模式 spin - up 时间, 即从 17 日 00: 00—19 日 18: 00。在扑灭火作业中, 了解风向和风速突变非常重要, 因此重点对左权站进行风向风速突变分析及模拟检验, 左权站距离火点直线距离约 53 km, 与火点同处于山地地形中, 海拔较火点低约 0.4 km, 因此对于火点蔓延有可代表性。

从风速检验来看, 模式模拟的近地面风速与 6 个站点实况风速变化趋势基本一致, 均模拟出了该地区 00: 00—07: 00 风速增大、07: 00—00: 00 风速减小的风速日变化, 以及 18 日 02: 00—15: 00 持续风力较强时段(图 3 为左权站, 其他站图略), 模拟时段内各站风速误差均小于 1.3 m/s, 最小误差均不超过 0.2 m/s(表 3)。从风向检验来看, 模拟时段内各站模拟风向与实况基本一致(图 3), 对于各站逐小时模拟与实况八方位方向检验正确率(即, 模拟与实况风向相差小于 45°)来看, 各站风向检验正确率均超过 50%, 其中对于太谷、太原和左权站均超过了 70%(表 3)。

表 3 模拟区域内各气象站点模拟与实况 10m 风速风向检验对比

检验类别	气象观测站					
	左权	榆社	太谷	榆次	太原南	太原
模拟时间段内误差平均值/(m/s)	1.15	1.16	1.25	1.09	1.28	1.30
模拟时间段内误差最小值/(m/s)	0.06	0.01	0.03	0.002	0.16	0.03
模拟时间段内风向正确率/%	70.1	62.7	83.6	68.7	55.2	71.6

从风向突变检验来看(图 3), 17 日 00:00—19 日 18:00, 有 2 次非常显著的风向突变, 模式模拟出了这 2 次突变, 且风向与实况变化基本一致。①实况为偏西风(18 日 00:00)转偏南风(18 日 01:00—02:00)转偏西风(18 日 03:00), 模拟也体现出了这次风向突变, 但变化较实况提前约 2 h, 模拟为偏西风(17 日 22:00)转偏南风(17 日 23:00—18 日 01:00)转偏西风(18 日 02:00); ②实况为西北风(18 日 11:00—16:00)转偏西风(18 日 17:00—18:00)转西北风(18 日 19:00), 模拟与实况风向一致, 且各小时风向角度差异多在 10°以内。

从风速突变检验来看(图 3), 17 日 00:00—19 日 18:00, 共有 6 次明显的变化, 模式模拟出了这 6 次变化, 且变化趋势与实况基本一致。①17 日 00:00—07:00, 模拟与实况变化趋势一致, 风速增幅较实况略偏小, 该时段内风速误差平均为 0.72 m/s; ②17 日 08:00—12:00, 模拟较实况变化趋势基本一致, 但在 11:00—13:00 模拟较实况较大 2 m/s, 该时段内风速误差平均为 0.96 m/s, 最小为 0.06 m/s(17 日 9:00); ③17 日 13:00—18 日 01:00, 实况风速平稳, 变化较小, 模拟与实况趋势一致, 该时段内风速误差平均为 0.99 m/s; ④18 日 01:00—06:00, 实况风速迅速增强, 从 0.7 m/s 增加到 11.6 m/s, 模拟与实况趋势一致, 但较实况提前 1 h 开始变化, 滞后 1 h 结束, 风速从 1 m/s 增加到 9.7 m/s, 该时段内风速误差平均为 1.89 m/s; ⑤18 日 07:00—19 日 01:00, 实况风速在波动中逐渐减弱, 模拟与实况比较吻合, 该时段内风速误差平均为 1.21 m/s; ⑥19 日 02:00—18:00, 实况风速先增后减, 模拟趋势与实况接近, 该时段内风速误差平均为 1.15 m/s, 最小为 0.06 m/s(19 日 07:00)。

从过火区和风场模拟与实况检验来看, 模式较好地模拟出了本次火灾的发生特点, 因此可以基于模拟结果对本次森林火灾的蔓延特征进行研究。

3 蔓延特征模拟和分析

3.1 林火蔓延不同阶段蔓延特征分析

通过分析林火火头蔓延速率、方向和过火区分布情况, 可将本次模拟时段内林火的发展分为 5 个阶段, 本研究中将蔓延速率最大、火焰高度最大的火线位置作为火头位置。

阶段 I(17 日 03:00—18 日 04:00): 该阶段林火蔓延开始, 蔓延速率整体呈逐渐增加的态势。其中 17 日 03:00—15:00, 蔓延速率缓慢增加, 火头最大蔓延速率增长到 2.04 m/s, 火头火焰最高高度发展为 0.48 m(图 4a), 其间释放的热量和水汽通量很少(图 4b), 过火面积缓慢增加了 4.71 km²(图 4c); 17 日 16:00—18 日 04:00, 蔓延速率快速增加, 火头最大蔓延速率增长到 5.29 m/s, 火头火焰最高高度快速发展为 0.74 m(图 4a), 其

间火头释放的热量通量和水汽通量也明显增多, 火头热量通量最大为 266 843.22, 水汽通量最大为 24 490.86 (17 日 22:00)(图 4b); 过火面积明显增加, 截至 18 日 04:00 达到 24.25 km²(图 4c)。

阶段 II(18 日 05:00—19:00): 这是林火蔓延最旺盛的阶段, 也是过火面积扩张最迅速的阶段。这个阶段火头蔓延速率几乎都维持在 6 m/s 左右, 火头火焰高度也达到了 0.78 m(图 4a); 这一阶段也维持着较大的热量和水汽通量释放, 火头释放的热量通量最大可达 199 959.67 W/m², 释放的水汽通量最大可达 18 352.29 W/m²(18 日 19:00)(图 4b); 过火面积迅速增加, 新增过火面积 61.14 km², 截至 18 日 15:00 过火面积达到了 85.40 km²(图 4c)。

阶段 III(18 日 20:00—19 日 01:00): 该阶段林火蔓延显著减缓, 火头蔓延速率从 5.99 m/s 下降到 0.71 m/s, 火头火焰高度也降低到 0.29 m(图 4a)。在该阶段, 燃烧依然释放大量热量和水汽, 火头释放的热量通量都在 100 000 W/m²以上, 释放的水汽通量都在 9 200 W/m²以上(图 4b); 新增过火面积 19.87 km², 截至 19 日 01:00, 过火面积达 105.26 km²(图 4c)。

阶段 V(19 日 02:00—09:00): 该阶段林火再次蔓延发展, 火头蔓延速率从 0.71 m/s 增加到 4.04 m/s, 火头火焰高度从 0.29 m 增加到 0.65 m(图 4a); 火头释放的热量通量最大可达 293 941.34 W/m², 释放的水汽通量最大可达 26 977.92 W/m²(19 日 06:00)(图 4b); 过火面积增加到 134.42 km²(图 4c)。

阶段 IV(19 日 10:00—18:00): 该阶段林火处于维持阶段, 火头蔓延速率维持在 2.2~3.5 m/s, 火头火焰高度也维持在 0.6 m 左右(图 4a); 火头释放的热量通量最大可达 256 300.39 W/m², 释放的水汽通量最大可达 23 523.24 W/m²(19 日 17:00)(图 4b); 新增过火面积 59.95 km², 截至 19 日 18:00 过火面积达到 194.37 km²(图 4c)。

从图 4b 还可以发现, 热量和水汽通量变化趋势一致, 但燃烧过程中热量通量比水汽通量大一个量级, 说明燃烧时热量释放是更显著的。对比图 4a 和 4b 发现热量和水汽释放最多的时刻并不是完全对应燃烧最强烈的时刻, 有时会存在一些滞后, 且热量和水汽通量变化波动性更强, 这也反映了模式耦合特性, 即林火燃烧释放的热量和水汽进入模式动力和热力场, 影响大气场, 大气场进而又对火场产生影响。

了解林火蔓延不同阶段特征对于林火扑灭作业非常重要, 确定林火蔓延火线位置也非常重要, 因此对此次林火发展最旺盛阶段进一步分析各蔓延变量水平分布特征(图 5)。从 18 日 12:00 各蔓延变量分布可以明显看出此时火线位置, 此刻南侧火线火势最为旺盛, 火线蔓延速率大、火焰高度高, 火线前锋释放大量热量和水汽, 且刚燃烧完的林火仍在释放大量热量和水汽。

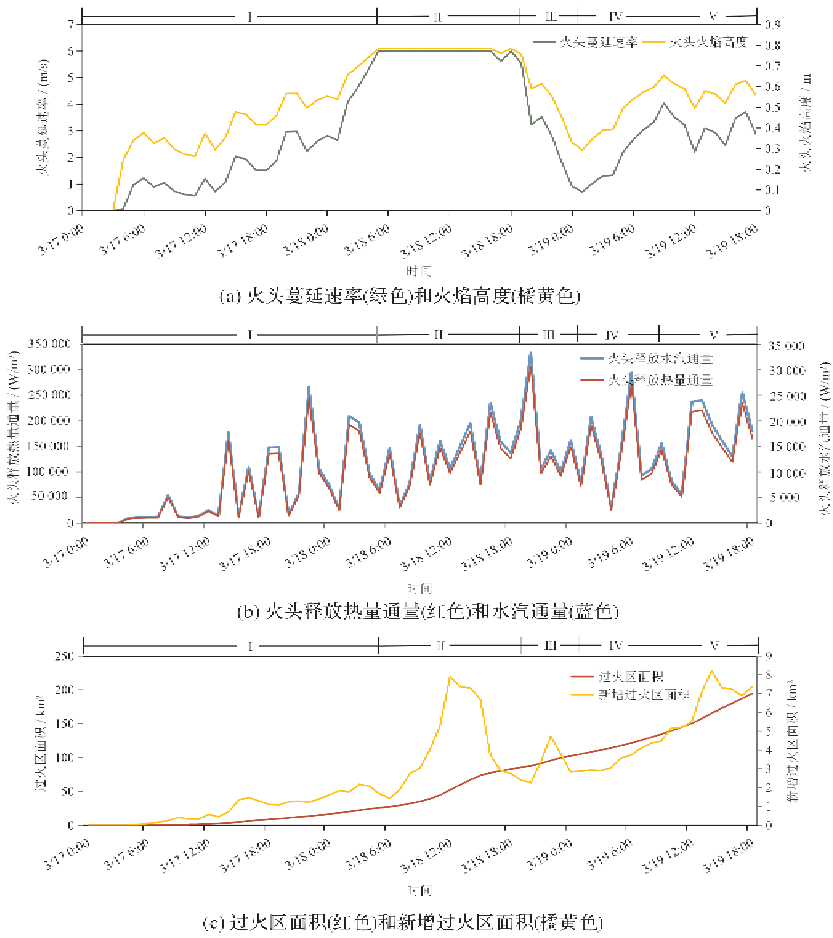


图 4 林火蔓延特征变量时间变化图

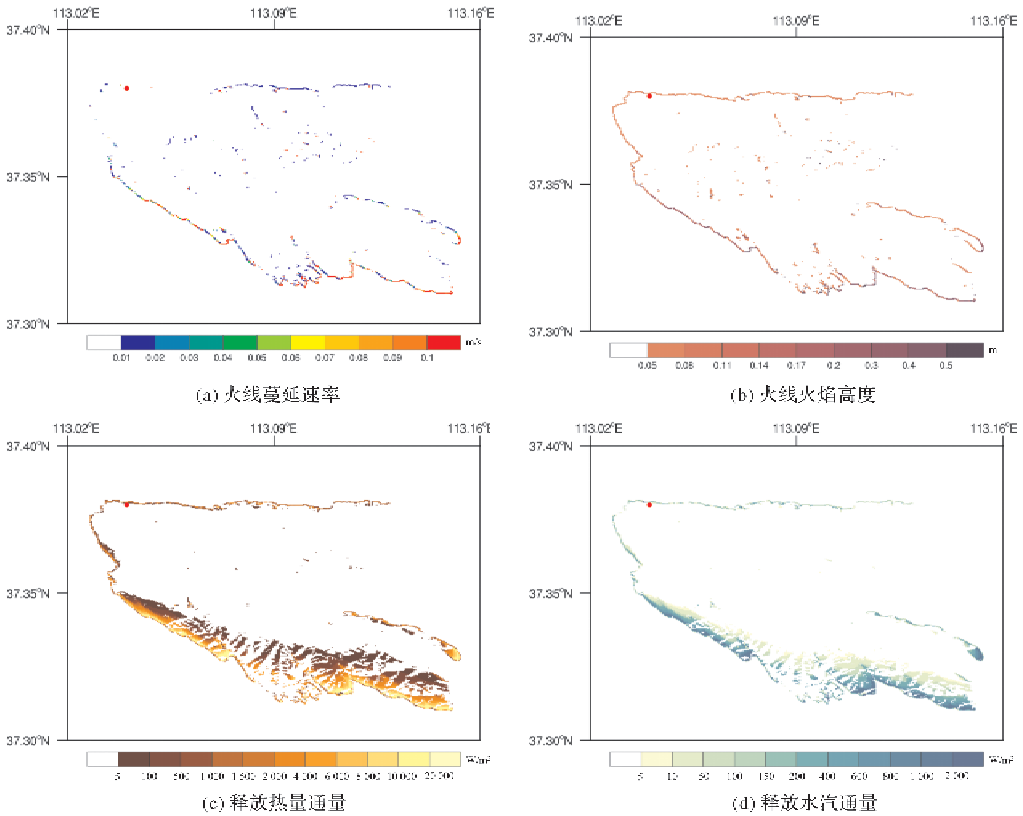


图 5 18 日 12: 00 林火蔓延特征变量水平分布图

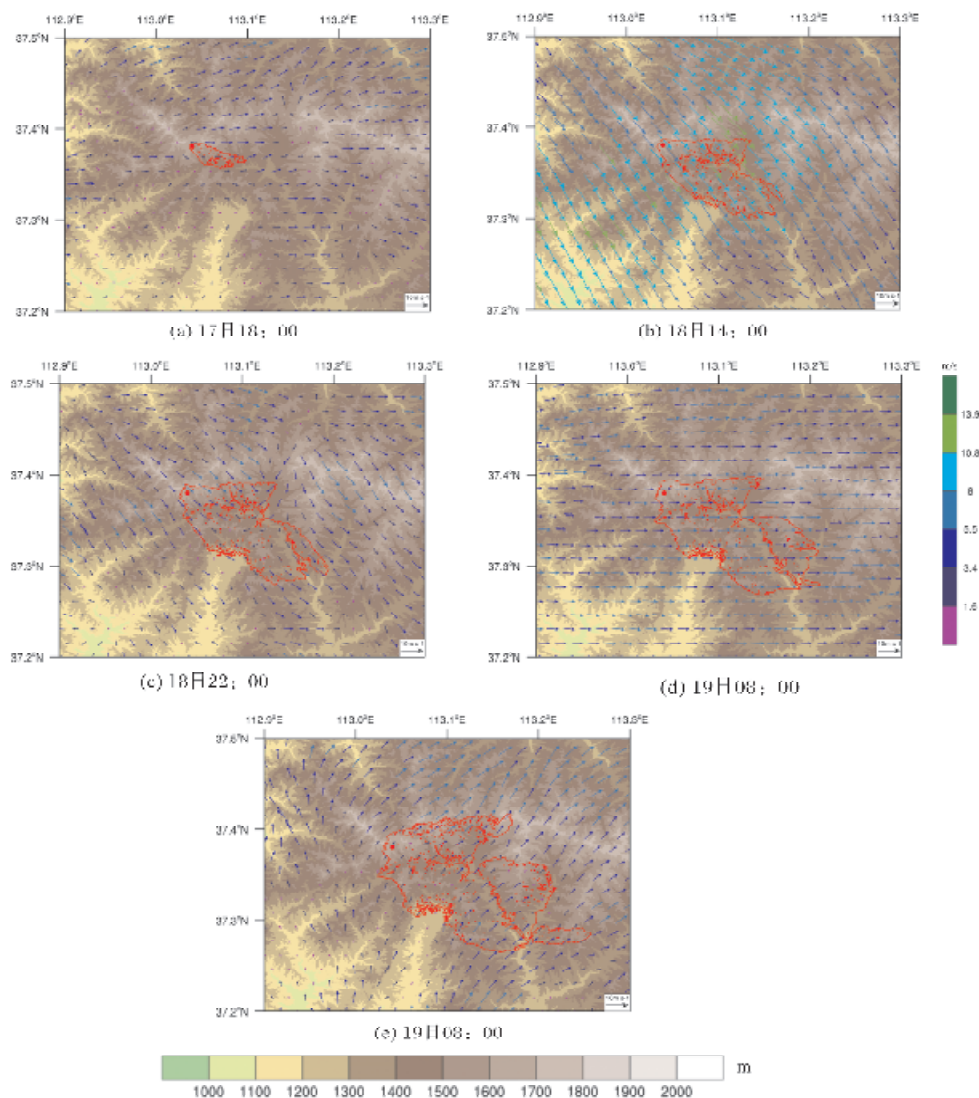


图6 模拟5个阶段典型时刻风场和过火区

(注: 填色为地形高度, 红线范围为过火区范围, 红点为起始火点, 箭头方向代表风向, 箭头长短和颜色代表风速)

3.2 林火蔓延不同阶段风场特征分析

阶段Ⅰ(17日03:00—18日04:00)林火蔓延开始, 风速呈逐渐增加的态势。其中, 17日03:00—16:00, 火点附近以2~3级西北风为主, 过火区逐渐向东南发展; 17:00—22:00, 火场以西风为主, 风力不变仍为2~3级, 过火区向东发展; 23:00—24:00, 火场南侧有2级偏南风, 东侧有3级东南风, 因此过火区略向东北方向发展; 18日01:00开始, 火场又转为西风控制, 02:00—04:00风速增大为4级, 火场向东快速发展(图6a)。

阶段Ⅱ(18日05:00—19:00)林火蔓延快速发展主要在于该阶段一直维持很强的风力。18日05:00—08:00, 火场以5级偏西风为主, 过火区向东扩张; 09:00起火场再度转为西北风控制, 09:00—12:00, 风力一直维持在5级, 13:00—14:00火场东部风力进一步增大到6级, 15:00—19:00火场风力有所减弱, 但仍维持在4~5级, 因此在这一阶段过火区向东南方向显著扩张(图6b)。

阶段Ⅲ(18日20:00—19日01:00)林火蔓延明显减缓的主要原因是火场风力明显减弱, 从3~4级减弱为1~2级, 且风向多变, 并在21:00—22:00火场中部风向出现对峙, 因此该阶段内过

火区变化不大(图6c)。

阶段Ⅳ(19日02:00—09:00)林火蔓延再度加强的原因是火场风力逐渐增大。该阶段, 火场以偏西风为主, 风力从2级逐渐增加到4级, 因此过火区向东有所发展(图6d)。

阶段Ⅴ(19日10:00—18:00)该阶段林火继续位置在于风力变化不大, 基本维持在2~3级, 风向由偏西风转为西南风, 因此过火区先向东有所发展, 又向东北方向发展(图6e)。

4 结论与讨论

通过利用高分辨率地理信息、卫星遥感监测和气象观测数据以及WRF-Fire模式对2020年“3·17”山西晋中森林火灾17日03:00—19日18:00期间的蔓延过程进行分析和模拟研究, 得出结论如下:

(1)在可燃物载量相对稳定情况下, 林火蔓延与地形和大气环境(大尺度天气系统和小尺度局地小气候)密切相关, 尤其是风的变化;

(2)与Sentinel-2、Himawari-8卫星遥感监测数据反演实况和站点风速风向实况对比检验, 模拟过火区形状和发展趋势、火线蔓延方向和速

度以及风向风速变化与实况较为一致,基本能体现出火场风向和风速突变,表明 WRF - Fire 模式可以较准确再现真实火场蔓延情况。

(3)根据林火蔓延速率、方向和火场分布情况,本次模拟的林火发展可分为5个阶段。第一阶段林火蔓延开始发展并逐步增强,持续时间为26 h,风力从2~3级逐渐增加到4级,火头蔓延速率和火焰高度逐渐增大增高,新增过火面积24.25 km²;第二阶段是林火蔓延最旺盛的阶段,也是过火面积扩展最迅速的阶段,持续15 h,大风维持,火头蔓延速率和火头火焰高度也达到最强阶段,过火面积迅速扩增,新增过火面积61.14 km²,释放大热量和水汽;第三阶段火场风力明显减弱,林火蔓延明显减缓,持续6 h,新增过火面积19.87 km²;第四阶段火场风力有所加强,林火再次蔓延发展,持续8 h,新增过火面积29.16 km²;第五阶段风力变化不大,蔓延维持9 h,新增过火面积59.95 km²。

本文主要对 WRF - Fire 模拟山西太行山一次林火进行检验及蔓延特征分析,对于该耦合模型在太行山地形下森林火灾适用性还需要进一步研究。火灾实况数据较少,目前采用的卫星反演数据中已经有人为扑灭火的一定影响,在下一步的研究中需将人为因素也考虑在内。此外,利用 FROM - GLC 地表覆盖数据映射 ANDERSON^[41] 的13种可燃物类别对模拟准确性可能有一定影响,如果能基于针对我国植被特点发展我国可燃物分类基础数据库,对于火场蔓延模拟研究及业务预报将具有重大的推动作用。

参考文献:

- [1] BOND W J, WOODWARD F I, MIDGLEY G F. The global distribution of ecosystems in a world without fire[J]. *New Phytologist*, 2005, 165(2): 525 - 538.
- [2] JOHNSTONE J F, ALLEN C D, FRANKLIN J F, et al. Changing disturbance regimes, ecological memory, and forest resilience[J]. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2016, 14(7): 369 - 378.
- [3] MOLINA J R, HERRERA M A, RODRIGUEZ Y S F. Wildfire - induced reduction in the carbon storage of Mediterranean ecosystems: an application to brush and forest fires impacts assessment[J]. *Environmental Impact Assessment Review*, 2019, 76: 88 - 97.
- [4] ZHONG M, FAN W, LIU T, et al. Statistical analysis on current status of China forest fire safety[J]. *Fire Safety Journal*, 2003, 38(3): 257 - 269.
- [5] LARSEN J C, DENNISON P E, COVA T J, et al. Evaluating dynamic wildfire evacuation trigger buffers using the 2003 Cedar Fire[J]. *Applied Geography*, 2011, 31(1): 12 - 19.
- [6] FONS W. Analysis of fire spread in light forest fuels[J]. *Journal of Agricultural Research*, 1946, 72(3): 93 - 121.
- [7] PASTOR E, ZARATE L, PLANAS E, et al. Mathematical models and calculation systems for the study of wildland fire behavior[J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2003, 29(2): 139 - 153.
- [8] ROTHERMEL R C. A mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels[M]. Ogden, Utah: Intermountain Forest & Range Experiment Station, Forest Service, U. S. Dept. of Agriculture, 1972: 1 - 40.
- [9] NOBLE I R, GILL A M, BARY G A V. McArthur's fire - danger meters expressed as equations[J]. *Australian Journal of Ecology*, 1980, 5(2): 201 - 203.
- [10] Forestry Canada Fire Danger Group. Development and structure of the Canadian Forest Fire Behavior Prediction System, Information Report ST - X - 3[R]. Ottawa, Forestry Canada, 1992: 1 - 63.
- [11] 王正非. 山火初始蔓延速度测算法[J]. *山地研究*, 1983, 1(2): 42 - 51.
- [12] ANDREWS P L. BehavePlus fire modeling system: past, present, and future[C]// *Proceedings of 7th Symposium on Fire and Forest Meteorology*; Bar Harbor, Maine. Boston, MA: American Meteorological Society, 2007: 13.
- [13] FINNEY M A. FARSITE: Fire Area Simulator: model development and evaluation[R]. USDA Forest Service - Research Papers RMRS (RP - 4), 1998.
- [14] LINN R, REISNER J, COLMAN J J, et al. Studying wildfire behavior using FIRETEC[J]. *International Journal of Wildland Fire*, 2002, 11(4): 233 - 246.
- [15] MELL W, JENKINS M A, GOULD J, et al. A physics - based approach to modelling grassland fires[J]. *International Journal of Wildland Fire*, 2007, 16(1): 1 - 22.
- [16] CLARK T L, COEN J L, LATHAM D. Description of a coupled atmosphere - fire model[J]. *International Journal of Wildland Fire*, 2004, 13: 49 - 64.
- [17] COEN J L, CAMERON M, MICHALAKES J, et al. WRF - fire: coupled weather - wildland fire modeling with the weather research and forecasting model[J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2013, 52(1): 16 - 38.
- [18] SULLIVAN A. Wildland surface fire spread modelling, 1990 - 2007. 1: physical and quasi - physical models[J]. *International Journal of Wildland Fire*, 2009, 18(4): 349 - 368.
- [19] PAPADOPOULOS G D, PAVLIDOU F N. A comparative review on wildfire simulators[J]. *IEEE systems Journal*, 2011, 5(2): 233 - 243.
- [20] BAKHSHAI A, JOHNSON E A. A review of a new generation of wildfire - atmosphere modeling[J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 2019, 49(6): 565 - 574.
- [21] 苗双喜, 黄杨, 张波, 等. 基于 Rothermel 模型的森林火灾模拟算法的改进[J]. *地理信息世界*, 2012, 10(6): 14 - 21.
- [22] 李艳杰, 解新路, 张菲菲. 基于改进的元胞自动机林火蔓延模拟研究与实现[J]. *绿色科技*, 2012(8): 109 - 112.
- [23] 惠珊, 芮小平, 李尧. 一种耦合元胞自动机的改进林火蔓延仿真算法[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2016, 41(10): 1326 - 1332.
- [24] 周国雄, 吴淇, 陈爱斌. 林火蔓延模拟元胞自动机算法研究[J]. *仪器仪表学报*, 2017, 38(2): 288 - 294.
- [25] 张晓婷, 刘培顺, 王学芳. 王正非林火蔓延模型改进研究[J]. *山东林业科技*, 2020, 50(1): 1 - 6, 40.
- [26] 李建微, 陈崇成, 於其之, 等. 虚拟森林景观中林火蔓延模型及三维可视化表达[J]. *应用生态学报*, 2005, 16(5): 838 - 842.
- [27] 柳生吉. 大兴安岭呼中林区林火蔓延三维模拟[J]. *安徽农业科学*, 2015, 43(14): 306 - 310, 331.
- [28] 唐丽玉, 毛行辉, 陈崇成, 等. 基于 FARSITE 的林火蔓延三维可视化模拟[J]. *自然灾害学报*, 2015, 24(2): 221 - 227.
- [29] 黄诗物. 基于 FARSITE 的林火蔓延三维模拟系统研究[D]. 福州: 福州大学, 2014.
- [30] COEN J L, SCHROEDER W. The High Park fire: coupled weather - wildland fire model simulation of a windstorm - driven wildfire in Colorado's Front Range[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2015, 120(1): 131 - 146.
- [31] MANDEL J, BEEZLEY J D, KONDRATENKO V Y. Fast Fourier transform ensemble Kalman filter with application to a coupled atmosphere - wildland fire model[C]// *Computational Intelligence in Business and Economics*. Barcelona, Spain. WORLD SCIENTIFIC, 2010: 777 - 784.
- [32] SUN R Y, KRUEGER S K, JENKINS M A, et al. The importance of fire - atmosphere coupling and boundary - layer turbulence to wildfire spread[J]. *International Journal of Wildland Fire*, 2009, 18(1): 50. DOI: 10.1071/wf07072. [LinkOut]
- [33] BEEZLEY J D, KOCHANSKI A, KONDRATENKO V Y, et al. Simulation of the Meadow Creek fire using WRF - Fire[M]. AGU fall meeting abstracts. 2010.
- [34] DOBRINKOVA N, JORDANOV G, MANDEL J. WRF - fire applied in Bulgaria[M]// *Numerical Methods and Applications*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2011: 133 - 140.
- [35] JORDANOV G, BEEZLEY J D, DOBRINKOVA N, et al. Simulation of the 2009 harmanli fire (Bulgaria)[M]// *Large - Scale Scientific Computing*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2012: 291 - 298.
- [36] KOCHANSKI A K, JENKINS M A, MANDEL J, et al. Real time simulation of 2007 Santa Ana fires[J]. *Forest Ecology and Management*, 2013, 294(S1): 136 - 149.
- [37] MANDEL J, AMRAM S, BEEZLEY J D, et al. Recent advances and applications of WRF - SFIRE[J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2014, 14(10): 2829 - 2845.
- [38] SKAMAROCK W C, KLEMP J B, DUDHIA J, et al. A description of the advanced research WRF model version 4[J]. *National Center for Atmospheric Research: Boulder, CO, USA*, 2019, 145: 145.
- [39] MUÑOZ - ESPARZA D, KOSOVIC B, JIMÉNEZ P A, et al. An accurate fire - spread algorithm in the weather research and forecasting model using the level - set method[J]. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 2018, 10(4): 908 - 926.
- [40] GONG P, WANG J, YU L, et al. Finer resolution observation and monitoring of global land cover: first mapping results with Landsat TM and ETM+ data[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2013, 34(7): 2607 - 2654.

[41] ANDERSON H E. Aids to determining fuel models for estimating fire behavior[M]. Ogden, Utah: U. S. Dept. of Agriculture, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station, 1981[LinkOut]

[42] TACHIKAWA T, HATO M, KAKU M, et al. Characteristics of ASTER GDEM version 2 [C]//2011 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. July 24 – 29, 2011, Vancouver, BC, Canada. IEEE, 2011: 3657 – 3660.

Study on the Influence of Atmosphere and Topographic on Wildfire Spread ——A Wildfire in Shanxi Province as a Case Study

WANG Yuhong, ZHAO Luqiang, YANG Xiaodan, LIANG Li, YUAN Xiaoyu,
REN Liwen, ZHANG Hui

(CMA Public Meteorological Service Center, Beijing 100081, China)

Abstract: In order to deeply understand the characteristics of wildfire spread and the impact of atmosphere and terrain on wildfire behavior, the “3 · 17” wildfire in Jinzhong, Shanxi Province in 2020 is selected, and the wildfire behavior is analyzed and studied by using high – resolution geographic information, satellite remote sensing wildfire monitoring data and meteorological observation. At the same time, the wildfire – atmosphere coupling WRF – Fire model is used for numerical simulation. The results of this study brought about the following conclusions: 1) When the fuel load is relatively stable, the forest fire spread is closely related to the terrain and atmospheric environment (large – scale weather system and small – scale local microclimate), especially the change of wind. 2) The range and shape of the simulated fire area, the spread direction and speed of the fire line, and the change of wind direction and speed are relatively consistent with the actual situation. It shows that WRF – Fire model can comparatively correctly reproduce the real fire spread. Based on the analysis of spreading characteristic variables such as spreading rate, spreading direction, flame height, released heat and water vapor flux and the distribution of fire area, the wildfire development can be divided into five phases in the simulation period, and the spreading characteristics of different stages are significantly different.

Keywords: coupled wildfire – atmosphere model; wildfire spread; forest fire; numerical simulation

(上接第 110 页)

Spatial Ripple Effect of Disaster Loss Based on Complex Network Model ——Taking the Flood Disaster Scenario in Hubei Province for Example

JIANG Xinyu^{1,2}, FANG Yuan¹, YANG Lijiao³

(1. School of Management, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China;

2. Research Institute of Digital Governance and Management Decision Innovation, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China; 3. School of Management, Harbin Institute of Technology,

Harbin 150001, China)

Abstract: With the deepening of regional economic integration, a certain area or sector shocked by disasters would easily cause serious ripple effects on external regions through industrial correlation. It is necessary to capture the spatial ripple effect of disaster loss for integrated disaster risk management. Based on China’s inter – regional input – output data in 2012, this paper constructs an inter – regional industrial network, and takes the flood disaster scenario in Hubei Province as an example, using the correlation analysis method of the complex network model to explore the spatial ripple effect of disaster losses. The research results show that: in the case of serious flood disaster scenario in Hubei Province, except for agriculture and chemical industry, which caused serious ripple effects on downstream industries, the overall ripple intensity of flood disaster in Hubei Province on upstream industries is about 1.6 times of that on downstream industries. Comparing the first – order and second – order ripple effects, the second – order ripple on upstream industries such as chemical industry has increased significantly. From a regional point of view, Shanxi, Shaanxi, Jiangsu were more severely affected by the flood disaster in Hubei Province. From the perspective of the overall industrial network, the flood disaster in Hubei Province will cause systemic risks, which caused the overall network circulation efficiency to drop by 1.2%. This study can provide a reference for the government and local industries to better manage disaster risk.

Keywords: flood disaster; complex network; industry linkage; loss spatial ripple; Hubei Province