林火蔓延模型及其适用性研究进展

王宇虹,杨晓丹*,任俐文,袁晓玉,梁莉,赵鲁强

中国气象局公共气象服务中心,北京 100081

摘要　了解林火蔓延特征是林火预防和扑救的重要参考依据之一。按照是否考虑林火与大气相互作用,将林火蔓延模拟模型分为非耦合模型和耦合模型,分析了目前8种重要林火蔓延模型研究现状,并从基于模型的原理和假设、模型特点适用条件和相关研究进展3方面对现有模型进行综述,表明非耦合模型主要通过能量平衡方程、燃烧分解假设等近似或点烧实验建立燃烧模型,将风等气象要素作为初始条件驱动林火模型;大部分耦合模型中天气模型与林火模型的各自相关要素在每一个时间步长上进行相互反馈,积分计算不断循环来实现大气和林火的相互耦合;相较于非耦合模型,耦合模型模拟相对更贴近实际林火蔓延情况,特别是较大范围林火蔓延过程。

关键词　森林火灾;林火蔓延模型;大气-林火耦合

森林火灾是一种失去人为控制在森林中自由蔓延和扩展的林火,给森林、生态环境及公共安全带来严重危害,引起社会各界的极大关注[1-3]。为更好预防、扑救森林火灾,就必须深入研究林火行为。林火蔓延是林火行为的主要表现形式,与火灾预防、扑救等工作密切相关。林火行为是指森林可燃物被点燃后所表现的各种现象和特征,即是林火发生、发展,直至熄灭的全过程中着火、蔓延、能量释放、火强度、火灾种类等特征的综合[4],其中,蔓延阶段对林火的预防和扑救的意义最大,因此,林火行为研究中对林火蔓延的研究最为深入[5]。林火蔓延模型是林火行为研究的一个主要方面,受可燃物、火环境(气象、地形和植被)和火源条件的制约和控制,在各种简化条件下推导出林火行为与各种参数(如可燃物的物理、化学性质,气象因子以及地形因子等)间的定量关系式[6]。自1946年Fons[7]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[8-9]。根据对于空间模拟信息处理能力,这些模型可以分为早期的一维传统蔓延模型和二维空间模拟模型。传统模型主要针对火头蔓延速度进行预报,不足以代表整个林火蔓延过程。空间模拟模

收稿日期:2023-06-11;修回日期:2023-08-31

基金项目:国家重点研发计划项目(2020YFC1511602,2022YFC3003004);中国气象局创新发展专项(CXFZ2023P066);中国气象局公共气象服务中心创新基金项目(Y2022007)

作者简介:王宇虹,工程师,研究方向为行业影响预报服务技术,电子信箱:gouwucheer@163.com;杨晓丹(通信作者),正研级高级工程师,研究方向为森林草原气象服务技术,电子信箱:yangxd@cma.gov.cn

引用格式: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; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2023.21.005

型在传统模型基础上,利用适当的传播方程,形成全向的林火蔓延速度和蔓延空间分布形状的时间序列数据,可以提供更详细的林火空间蔓延信息,还能借助地理信息系统对林火的发生发展过程进行模拟展示。因此,空间模拟模型从出现后就迅速发展并成为主流模型[5]。而在这些空间模型中,根据是否考虑林火与大气相互作用可分为大气林火耦合与非耦合模型,耦合模型即表征火场与大气环境场的相互反馈机制。相关研究表明将中尺度天气模型与火蔓延模型耦合,可捕捉到一些非常重要的林火行为[10-14]。本文主要对这些空间模拟模型根据耦合机制整理和分析。

1 非耦合模型

1.1 BEHAVE模型

BEHAVE模型最早由美国米苏拉火灾科学实验室开发,该模型将可燃物模型与火行为模型结合,基于一个简单的能量平衡方程,即位于火焰前缘的未燃烧可燃物所获取的能量与维持火灾传播所需的能量(汽化热量+热分解热量)之间的能量平衡。假设火焰前缘的蔓延速率是恒定的,能量平衡方程可以用火焰前缘做参考。为了使方程闭合,作为燃烧热值重要部分的可燃物释放能量通量及一些模型的常数通过在燃烧风洞中进行可燃物点烧实验评估确定[15]。在此基础上,耦合一个以景观尺度描述可燃物结构和地形坡度的地理信息系统,构成了BEHAVE火蔓延模型,该模型已在美国火行为模拟系统FARSITE中应用[16]。但由于火行为模型和可燃物模型过于简化,没有包括可燃物层次、载量和树冠火,所以该模型对林火行为的预测会出现偏差[17]。

1.2 FIRETEC模型

FIRETEC由美国新墨西哥州洛斯·阿拉莫斯国家实验室开发,是基于质量、动量和能量守恒原理的多相传输林火模型,该模型将林火燃烧的复杂反应简化为热解、煤焦燃烧、碳氢化合物燃烧和有氧烟尘燃烧模式[18],在其最新版本中增加了辐射传输模块并改进了化学模块[19]。FIRETEC是一个半耦合的林火模型,在小涡尺度(空间积分约1 m)进行燃烧模拟,燃烧过程中的化学热释放仅发生在小于火焰长度的计算网格单元中[19],因此模型在小尺度上与大气相互作用(例如对流热输送等),但不完全与大尺度或中尺度大气相互作用。火物理过程是通过HIGRAD[20-21]在火模型尺度(微尺度)上与大气耦合的集合平均值;其中,HIGRAD是一种流体力学模型,它根据地形调整气流,但不更新边界条件。FIRETEC的输入条件是通过HIGRAD更新的,仅反馈到HIGRAD的模拟,因此火反馈不会传递到整个大气层。该模型由于仅限于小的涡流时空尺度,计算成本高,且由于缺乏与大尺度大气运动的相互作用,因此无法将该模型应用于时间超过1 h或范围超过1 km ×1 km的模拟区域。目前已有一些研究利用FIRETEC对不同种类的火灾蔓延进行模拟,对于地形平坦、下垫面可燃物类型分布均匀的地表火,FIRETEC模拟的火蔓延速度和其他模型(如WFDS模型)结果几乎相同[22];而对于树冠火,存在高估火蔓延速度的情况[23]。

1.3 WFDS模型

WFDS由美国国家标准与技术研究所开发,基于流体力学和燃烧控制方程、可燃物热降解近似的三维物理机理半耦合林火-大气模型[24]。WFDS采用低马赫数近似从动力学角度完全消除声波传播,通过快速直接的压力求解器和多网格解析来缩短计算时间,提高计算效率。但多网格不具有多层嵌套功能[25],这表明虽然模式可以在大涡尺度进行平滑地模拟,但内部细网格既不能与重叠的粗网格相互反馈,也不能更新边界条件。WFDS和FIRETEC都是适用于短时间内小型林火的研究,且均不具备林火预测能力。此前的研究将WFDS模拟应用于单个燃烧树木火[26]、海滨松树地表火[27]以及澳大利亚草原火[24],与现场测量值进行比较,WFDS模拟的趋势比较合理和一致[28]。

1.4 王正非林火蔓延模型

王正非林火蔓延模型是基于林火燃烧实验建立的火蔓延统计模型。该模型主要考虑可燃物类型、风速、坡度作为主要影响因子,对林火蔓延情况进行预测[29]。模型中初始蔓延速度是在室内燃烧

(或无风)的条件下,由火强度公式反演获得,没有考虑可燃物与蔓延速度的关系。模型在考虑坡度影响因子方面,正切函数在计算一些随机地形坡度角时,会出现计算不准确问题[30]。毛贤敏等[31]考虑风向和地形的组合,对王正非林火蔓延模型坡度影响因子进行改进,考虑了上坡、下坡、左平坡、右平坡和风方向的影响,使该模型更适用于实际。

2　大气-林火耦合模式

2.1　CAWFE模式

CAWFE由美国国家大气研究中心开发[10-11,32-33],是首次尝试将大气模式和林火模式耦合。CAWFE由中尺度大气模式Clark-Hall[10-11]和基于前向追踪的火蔓延模块相耦合而成。Clark-Hall是一个三维非静力的数值天气预报模式,垂直方向上使用地形追随S坐标系,能够模拟复杂地形气流变化[34-38];双向嵌套的网格可以解析中尺度的外部强迫,同时通过水平和垂直网格细化向下延伸到火线附近数十米[37],因此,Clark-Hall可以在坡度超过30°非常陡峭的地形上模拟精细尺度的大气运动(水平分辨率为几十到几百米)[39]。

CAWFE的林火模块是半物理模块,由于火灾过程在尺度上比大气网格小几个量级,因此,CAWFE林火模块没有模拟燃烧化学或氧气消耗等过程;而是模拟火头位置[32]、蔓延速度[39]、火头热量释放[32-33]以及地表火和树冠火释放的感热通量和潜热通量[32]。对于小型林火,该模式通过驱动高分辨率大涡模拟来表示林火与大气边界层中涡旋的相互作用;对于大型林火,该模式通过多重嵌套模拟大气与林火行为的相互作用。

许多研究表明CAWFE模拟森林火灾效果较好,并且可模拟出不同气象条件下的火行为特征,比如没有大尺度天气系统影响,风主要由地形热力不均所驱动的情况[33]、受圣安娜风影响的情况[40]、由雷击引起且受下坡风暴影响的情况[14]、受严重干旱影响的情况[41],受极端大风影响的情况[42]等。

2.2　WRF-FIRE(SFIRE)模式

WRF模式是由美国国家大气研究中心、美国国家海洋与大气管理局(美国国家环境预报中心和美国地球系统研究实验室为代表)、美国空军、美国海军研究实验室、俄克拉荷马大学和美国联邦航空管理局共同开发的中尺度数值天气模型[43]。WRF模式是完全非静力可压缩模型,采用Arakawa C网格,整合大气模拟、数据同化和数值天气预报于一体,能有效改善中尺度天气模拟和预报,被广泛用于区域天气模拟和业务预报。该模式的ARW版本具有方便的预处理模块,后处理模块和同化观测数据模块,适合于空间尺度从数十米到几千千米的实时预测。WRF模式是模块化结构,包含多个物理过程如微物理、陆面、边界层、辐射、积云对流等,每个物理模块可使用不同的方案。WRF模块化结构可方便研究者选择不同尺度相关物理模块,或添加一个全新的模块,如林火蔓延模块[13,44-45]。

FIRE(SFIRE)模块在WRF模式中作为一个附加的物理选项,该模块的灵感来自CAWFE模型,是针对地表火(如草地、灌木、枯枝落叶产生火灾)的二维模型,不包含树冠火。该模块通过水平集方法实现了火线发展蔓延,WRF自4.0版本之后采用了新的水平集方法使得火线传播几乎与网格无关,很大程度减少了求解水平集方程误差[46]。模块中火线蔓延速度与CAWFE一样采用Rothermel半物理方法[47]。SFIRE模块与FIRE模块基本类似,是另外一个版本,SFIRE通过指数衰减函数确定热通量并考虑辐射对垂直方向上感热通量的作用[45],在WRF不同版本耦合的模块有所差异。

WRF气象模式从模式最底层将风速风向等向林火模块传递,FIRE(SFIRE)林火模块通过这些气象要素结合可燃物、地形等要素预测林火蔓延,计算蔓延速率、火焰高度、燃烧释放的热量和水汽通量等,热量和水汽通量以垂直分布的形式[44]又将会反馈到WRF大气模式中更新大气模式感热和潜热通量倾向,这就是WRF-FIRE(SFIRE)的耦合机制。Coen[33]通过该耦合方法模拟2002年科罗拉多一次森林火灾,揭示了林火如何改变局部风场以及过火区域的形状。Peace等[48-50]采用该方法对澳大利亚2007年和2010年两次森林火灾模拟研究表明林火在蔓延时能够显著改变周围的大气环境,因此

使用恒定气象输入林火蔓延模拟方法有很大局限性。采用该模型对2007年2次受圣安娜风影响的大型火灾[51]、2009年保加利亚哈尔曼利火灾[52]、2010年罗拉多州梅多溪火灾[53]的模拟表明,高分辨率耦合模型计算运行速度在实时预测中是可行的。

2.3 ARPS/DEVS-FIRE模式

ARPS是由俄克拉荷马大学风暴分析与预测中心开发的一个三维数值天气预报模型[54-55],主要是为了对强对流天气进行模拟研究和预测,这个特点也使得ARPS很适合模拟林火引发的局部风场变化。DEVS-FIRE[56-57]是一种基于栅格的火灾蔓延模型,即将火头视为一系列网格单元交互,而不是连续面的传播。当确定着火点后,采用Rothermel[47]蔓延公式计算火点所在栅格向相邻8个方向的蔓延速度,判断周围栅格是否被点燃,从而模拟林火蔓延过程。

林火模型DEVS-FIRE将天气条件作为外部输入,大气模式ARPS模拟出近地面风将其输入到林火模式DEVS-FIRE中,根据设定好的可燃物类型,DEVS-FIRE计算出热通量,再将其反馈输入ARPS,从而实现大气-林火耦合。Xue等[58-60]基于ARPS和DEVS-FIRE耦合模型,采用了动态数据同化方法,显著改善了DEVS-FIRE模拟结果,相较于无耦合方法,耦合方法更加准确、符合实际林火发生情况。

2.4 ForeFire/Meso-NH模式

Meso-NH是由法国国家气象研究中心和气候学实验室研发的滞弹性假设的非静力中尺度模型,可在微尺度(10 m)到中伽马尺度(1 km)进行模拟[61]。在其与林火耦合时,Meso-NH一般在大涡模式下模拟,湍流参数为1.5阶闭合,并设置为开放边界条件。

林火传播解算器ForeFire采用了一种基于拉格朗日方法离散化的前向追踪法来模拟林火蔓延[62-63],火线传播基于准物理的Balbi模型[63],预测火头以辐射板形式在垂直于火线的方向上的传播。通过80起林火案例对比Rothermel和Balbi方案的燃烧面积概率(模型正确模拟燃烧面积的概率)和燃烧位置概率(模型正确模拟着火位置的概率),Rothermel在燃烧面积概率技能得分方面稍好一些,Balbi在燃烧位置概率技能得分方面表现更好一些[62]。

大气模式Meso-NH将模拟的风场数据在空间和时间上双线性插值于林火模型ForeFire,ForeFire将计算得到的辐射温度、热通量和水汽通量传递给大气模式,从而实现大气与林火的耦合。Filippi等[64-66]采用该耦合方法进行了较多研究,验证了该耦合模型的有效性,相较于无耦合模拟,该耦合模拟中火线的蔓延速度明显提升,表明由林火产生的局地风对环境风影响显著;并在一次实验中设置不同地形条件(山底、山谷、山脊等),探究了不同地形条件下耦合作用对风场的影响。通过实验室点烧实验对ForeFire/Meso-NH模式进行评估发现,不同分辨率下模式耦合效应都能很好地再现,在更高分辨率(水平10 m,垂直3 m)条件下,温度和垂直风速的振幅非常接近实验中观察到的振幅[67-68]。

3 不同模型设计适用性对比

林火蔓延模式的发展与林火机理方法发展、计算机科学及数值天气预报的进步密切相关。在目前更通用、模拟效果更好的大气-林火耦合模型中都体现了建模、数值方法和遥感方面的改进,这些模型系统已成为林火管理的有用工具[9]。这些模型的性能因数字处理器、尺度依赖性及其计算平台而异,尽管根据实验点燃的经验数据对模型进行评估可以提供一些参数化和物理方面的参考,但由于目前缺乏详细的大气和可燃物数据,这种对比容易受到限制。因此,根据模型的设计而非性能,对不同模型特点及适用性进行了比较。

3.1 不同非耦合模型设计及适用性对比

对比以上4种非耦合模型(表1),BEHAVE模型优势在于计算简单,可以快速进行林火蔓延再现和预测。BEHAVE模型需要使用可燃物模型的有限集来定义植被结构,由于难以确定更接近真实情况的可燃物类型,这种方法在准确再现林火行为方面表现欠佳,特别是可燃物类型分布非常不均匀的情况。另一个不确定性的来源是为闭合模型而引

表1　不同非耦合模型设计和适应性对比

非耦合模型名称	特点	基本机制
BEHAVE	1. 计算简单,林火蔓延模拟再现和预测均适用 2. 需要使用可燃物模型的有限集来定义植被结构 3. 大尺度林火可能不适用	通过能量平衡方程构建燃烧模型
FIRETEC	1. 模型对物理过程的综合描述,适合用于开展火灾动力学等研究 2. 适用于时间小于1 h或范围小于 1 km ×1 km的模拟区域 3. 适用于林火蔓延再现,不适用林火蔓延预测	包含燃烧模型、湍流模型
WFDS	1. 适用于短时间内小型林火的研究 2. 适用于林火蔓延再现,不适用林火蔓延预测	包含燃烧模型、湍流模型、辐射模型
王正非	1. 基于燃烧实验的统计模型,计算简单快速 2. 未考虑不同可燃物类型与蔓延速度的关系	燃烧实验构建燃烧模型,配备有相应的修正系数表

入参数其阈值的有效性,特别是代表未燃烧植被获得能量与林火释放能量比值的系数,该参数主要是通过小尺度的点烧实验进行经验评估得到,在缺乏真正相似性分析的情况下,将这些结果推广到大尺度林火是不具代表性的[15]。FIRETEC模式虽然计算成本较高,且仅限于小的涡流时空尺度,但其对于树冠火蔓延速度的模拟为林火模拟提供了重要价值[23]。WFDS适用于短时间内小型林火的研究,对于某些单个燃烧树木火、地表火及草原火表现出较为合理的再现能力[28],但不具备林火预测能力。王正非林火蔓延模型是基于点烧实验考虑可燃物类型、风速、坡度的统计模型,通过较少参数实现林火蔓延计算。

3.2　不同耦合模型设计及适用性对比

对比以上4种耦合模型(表2),耦合方式都是双向耦合的,即在每一个时间步长下,气象模式输入气象条件到林火模式,林火模式根据接收的气象条件计算并将相关林火条件反馈到大气模式中。

从可解析的空间和时间尺度看,CAWFE可解析空间尺度为10~30 m, ForeFire/Meso-NH 和ARPS/DEVS-FIRE为10 m~1 km,以上3种模型可解析时间尺度为1 s至数小时,均可以模拟火焰和燃烧细节;WRF-FIRE(SFIRE)涵盖了微尺度、中尺度和大尺度,可解析10 m~10 km空间尺度、1 s至数天时间尺度。虽然这4类耦合模式都可解析微尺度过程,但由于CAWFE、ForeFire/Meso-NH和ARPS/DEVS-FIRE大气和林火模式是分别运行,且在模式外部同时进行交换反馈,这样在高性能计算机集群的外部输入输出端无法确定适当的挂钟比率(挂钟时间是执行作业所需的实际时间)[9];而WRF-FIRE(SFIRE)在框架和算法上进行了充分优化,可以在10 min内模拟10000 km^2范围内任意数量的林火,6 h可以进行24 h预报,因此WRF-FIRE(SFIRE)可用于实时预报,而其他几种方法还不能实现实时预报[9]。从对于蔓延传播处理方面,CAWFE、WRF-FIRE(SFIRE)和ARPS/DEVS-FIRE传播速度采用半物理关系Rothermel方案[47],ForeFire/Meso-NH采用准物理Balbi方案[63]。对于火线传播来说,WRF-FIRE(SFIRE)采用水平集方法在多个子网格单元中插值,用于评估燃烧区域内每个网格的火线位置、燃烧时间和可燃物消耗;ARPS/DEVS-FIRE基于栅格的方法将火蔓延视为一系列

表2　不同耦合模型设计和适应性对比

耦合模型名称	耦合方式	可解析空间尺度	可解析时间尺度	实时预报	蔓延速度方案
CAWFE	双向	10~30 m	1 s~hours	否	Rothermel方案
WRF-FIRE(SFIRE)	双向	10 m~10 km	1 s~days	是	Rothermel方案
ARPS/DEVS-FIRE	双向	10 m~1 km	1 s~hours	否	Rothermel方案
ForeFire/Meso-NH	双向	10 m~1 km	1 s~hours	否	Balbi方案

网格的相互作用,而不是连续面的传播。除此之外,相较于其他几种耦合模型,CAWFE更适合模拟复杂地形特别是陡峭地形的林火,这主要取决于其大气模式Clark-Hall可在非常陡峭的地形上实现精细化模拟。WRF-FIRE(SFIRE)是开源的,WRF模式由来自世界各地的大量研究人员积极开发,模型不断改进;而且模块化结构让它成为增加一个复杂物理过程非常合适的平台。

4 结论

根据是否考虑林火与大气相互作用,将林火模型分为耦合模型与非耦合模型,分析了国内外8种重要的林火蔓延模型依据的理论基础及其适用性。研究表明,非耦合模型主要思路是通过能量平衡方程、燃烧分解假设等近似或点烧实验建立燃烧模型,将风等气象要素作为初始条件驱动林火模型,或考虑湍流条件、辐射条件等。耦合模型多为大尺度天气模型与小尺度林火模型耦合,其主要思路是在天气模型每一个离散化时间步长下,天气模型与林火模型各自相关要素进行相互反馈,进而积分运算,在每个时间步长上不断循环来实现大气和林火的相互作用。根据现有研究,相较于非耦合模型,耦合模型模拟更贴近实际林火蔓延情况,特别是较大范围林火蔓延过程。另外,受模型设计和计算算法要求,目前耦合模型WRF-FIRE(SFIRE)可实现实时预报预测,其他模型更侧重对林火过程再现。

从已有林火模型研究看,目前要建立一个理想的林火蔓延模型比较困难,不管是耦合还是非耦合模型,都要综合考虑可燃物、气象条件和地形等因子的作用[69]。而这些因子随地域的不同而存在多样性和不确定性。中国对林火蔓延的研究多是建立在Rothermel方案[47]和王正非模型[29]的基础上,并对其进行不断的改进,对其存在的局限性仍未有实质性的突破。结合中国森林生态系统的实际情况和自然特点,通过大量的实地观察与建模,获取更全面真实的参数信息,构建适合中国的林火蔓延模型,将是今后研究的重要方向。

参考文献(References)

[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, Silva F R Y. 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] 赵凤君, 舒立福. 林火气象与预测预警[M]. 北京: 中国林业出版社, 2014: 1.

[5] 赵璠, 舒立福, 周汝良, 等. 林火行为蔓延模型研究进展[J]. 世界林业研究, 2017, 30(2): 5.

[6] 唐晓燕, 孟宪宇, 易浩若. 林火蔓延模型及蔓延模拟的研究进展[J]. 北京林业大学学报,2002, 24(1): 87-91.

[7] Fons W L. Analysis of fire spread in light forest fuels[J]. Journal of Agricultural Research, 1946, 72(3): 92-121.

[8] Pastor E, L Zárate, Planas E, et al. Mathematical models and calculation systems for the study of wildland fire behaviour[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2003, 29(2): 139-153.

[9] Bakhshaii 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.

[10] Clark T L, Jenkins M A, Coen J, et al. A coupled atmosphere fire model: Convective feedback on fire-line dynamics[J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 1996, 35(6): 875-901.

[11] Clark T L, Jenkins M A, Coen J L, et al. A coupled atmosphere-fire model: Role of the convective Froude number and dynamic fingering at the fireline[J]. International Journal of Wildland Fire, 1996, 6(4): 177-190.

[12] Fox-Hughes P. Springtime fire weather in Tasmania, Australia: Two case studies[J]. Weather and Forecasting, 2012, 27(2): 379-395.

[13] 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.

[14] 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.

[15] Burgan R E. Behave: Fire behavior prediction and fuel modeling system, fuel subsystem[M]. US Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station, 1984: 1.

[16] Andrews P L, Bevins C D. BEHAVE fire modeling system: Redesign and expansion[J]. Fire Management Notes, 1999, 59(2): 16-19.

[17] 贺红士, 常禹, 胡远满, 等. 森林可燃物及其管理的研究进展与展望[J]. 植物生态学报, 2010, 34(6): 741-752.

[18] Linn R R. A Transport model for prediction of wildfire behaviour[D]. Las Cruces: Department of Mechanical Engineering New Mexico State University, 1997.

[19] Linn R R, Harlow F H. Use of transport models for wildfire behavior simulations[R]. Las Cruces: Los Alamos National Lab(LANL), 1998.

[20] Reisner J M, Bossert J, Winterkamp J. Numerical simulations of two wildfire events using a combined modeling system (HIGRAD/BEHAVE)[R]. Las Cruces: Los Alamos National Lab(LANL), 1997.

[21] Reisner J M, Knoll D A, Mousseau V A, et al. New numerical approaches for coupled atmosphere-fire models [C]//Third symposium on fire and forest meteorology. Long Beach, CA, USA, 2000: 11-13.

[22] Bova A S, Mell W E, Hoffman C M. A comparison of level set and marker methods for the simulation of wildland fire front propagation[J]. International Journal of Wildland Fire, 2015, 25(2): 229-241.

[23] Hoffman C M, Canfield J, Linn R R, et al. Evaluating crown fire rate of spread predictions from physics-based models[J]. Fire Technology, 2016, 52(1): 221-237.

[24] 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.

[25] McGrattan K, Hostikka S, McDermott R, et al. Fire dynamics simulator user's guide[J]. NIST Special Publication, 2013, 1019(6): 1-339.

[26] Mell M E, Jenkins M A, Gould J, et al. A physics based approach to modeling grassland fires[J]. International Journal of Wildland Fire, 2007, 16: 1-22.

[27] Menage D, Chetehouna D, Mell W. Numerical simulations of fire spread in Pinus pinaster needles fuel bed[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2012, 395(1): 12011.

[28] Castle D, Mell W E, Miller F J. Examination of the Wildland-urban interface Fire Dynamics Simulator in modeling of laboratory-scale surface-to-crown fire transition[C]//Proceedings of the 8th US National Combustion Meeting. Park City, UT, USA, 2013, 4: 3710-3722.

[29] 王正非. 山火初始蔓延速度测算法[J]. 山地研究, 1983 (2): 44-53.

[30] 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): 7.

[31] 毛贤敏, 徐文兴. 林火蔓延速度计算方法的研究[J]. 辽宁气象, 1991(1): 9-13.

[32] Clark T L, Coen J, Latham D. Description of a coupled atmosphere-fire model[J]. International Journal of Wildland Fire, 2004, 13(1): 49-64.

[33] Coen J L. Simulation of the Big Elk Fire using coupled atmosphere-fire modeling[J]. International Journal of Wildland Fire, 2005, 14(1): 49-59.

[34] Clark T L. A small-scale numerical model using a terrain following coordinate transformation[J]. Journal of Computational Physics, 1977, 24: 186-215.

[35] Clark T L. Numerical simulations with a three-dimensional cloud model: Lateral boundary condition experiments and multi-cellular severe storm simulations[J]. Journal of Atmospheric Sciences, 1976, 36: 2191-2215.

[36] Clark T L, Hall W D. Multi-domain simulations of the time dependent Navier Stokes equations: Benchmark error analyses of nesting procedures[J]. Journal of Computational Physics, 1991, 92: 456-481.

[37] Clark T L, Hall W D. On the design of smooth, conservative vertical grids for interactive grid nesting with stretching[J]. Journal of Applied Meteorology, 1996, 35: 1040-1046.

[38] Clark T L, Keller T, Coen J, et al. Terrain-induced Turbulence over Lantau Island: 7 June 1994 tropical storm russ case study[J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 1997, 54: 1795-1814.

[39] Coen J L. Modeling wildland fires: A description of the Coupled Atmosphere-Wildland Fire Environment model (CAWFE)[M]. Boulder, Colorado, USA: National Center for Atmospheric Research, 2013, 38.

[40] Coen J L, Riggan P J. Simulation and thermal imaging of the 2006 Esperanza wildfire in southern California: Application of a coupled weather-wildland fire model[J]. International Journal of Wildland Fire, 2014, 23: 755-770.

[41] Coen J L, Stavros E N, Fites-Kaufman J A. Deconstruct-

ing the King megafire[J]. Ecological Applications, 2018, 28(6): 1565-1580.

[42] Coen J L, Schroeder W, Quayle B. The generation and forecast of extreme winds during the origin and progression of the 2017 Tubbs Fire[J]. Atmosphere, 2018, 9 (12): 462.

[43] The Mesoscale and Microscale Meteorology Laboratory of NCAR. WRF general information[EB/OL]. [2023-06-01]. https://www.mmm.ucar.edu/wrf-model-general.

[44] Patton E G, Coen J L. WRF-Fire: A coupled atmosphere-fire module for WRF[C]//5th WRF/14th MM5 Users' Workshop. Boulder, CO, US: National Center for Atmospheric Research (NCAR), 2004: 221-223.

[45] Mandel J, Beezley J D, Kochanski A K. Coupled atmosphere-wildland fire modeling with WRF 3.3 and SFIRE 2011[J]. Geoscientific Model Development, 2011, 4(3): 591-610.

[46] Skamarock W C, Klemp J B, Dudhia J, et al. A description of the advanced research WRF model version 4[J]. NCAR Technical Note, 2019, 145: 145.

[47] Rothermel R C. A mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels[M]. Ogden, Utah, USA: Intermountain Forest and Range Experiment Station, Forest Service, US Department of Agriculture, 1972: 40.

[48] Peace M, Mattner T, Mills G, et al. Fire-modified meteorology in a coupled fire-atmosphere model[J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 2015, 54(3): 704-720.

[49] Peace M, McCaw L W, Kepert J D, et al. WRF and SFIRE simulations of the Layman fuel reduction burn[J]. Australian Meteorological and Oceanographic Journal, 2015, 65(3/4): 301-317.

[50] Peace M, Mattner T, Mills G, et al. Coupled fire-atmosphere simulations of the Rocky River fire using WRF-SFIRE[J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 2016, 55(5): 1151-1168.

[51] Kochanski A K, Jenkins M A, Mandel J, et al. Real time simulation of 2007 Santa Ana fires[J]. Forest Ecology & Management, 2013, 294: 136-149.

[52] Jordanov G, Beezley J, Dobrinkova N, et al. Simulation of the 2009 Harmanli fire (Bulgaria)[C]//Large-Scale Scientific Computing: 8th International Conference. Sozopol, Bulgaria: Lecture Notes in Computer Science, 2012: 291-298.

[53] Beezley J D, Kochanski A, Kondratenko V Y, et al. Simulation of the Meadow Creek fire using WRF-Fire[J]. Environmental Science, 2010, 1: 1478.

[54] Xue M, Droegemeier K K, Wong V. The Advanced Regional Prediction System (ARPS)-a multiscale nonhydrostatic atmospheric simulation and prediction tool. Part I: Model dynamics and verification[J]. Meteorology and Atmospheric Physics, 2000, 75(3/4): 161-193.

[55] Xue M, Droegemeier K K, Wong V, et al. The Advanced Regional Prediction System (ARPS)—a multiscale nonhydrostatic atmospheric simulation and prediction tool. Part II: Model physics and applications[J]. Meteorology and Atmospheric Physics, 2001, 76(3/4): 143-165.

[56] Ntaimo L, Zeigler B P, Vasconcelos M J, et al. Forest fire spread and suppression in DEVS[J]. Simulation, 2004, 80(10): 479-500.

[57] Hu X, Sun Y, Ntaimo L. DEVS-FIRE: Design and application of formal discrete event wildfire spread and suppression models[J]. Simulation, 2012, 88(3): 259-279.

[58] Xue H, Gu F, Hu X. Data assimilation using sequential Monte Carlo methods in wildfire spread simulation[J]. ACM Transactions on Modeling and Computer Simulation (TOMACS), 2012, 22(4): 1-25.

[59] Xue H, Hu X, Dahl N, et al. Post-frontal combustion heat modeling in DEVS-FIRE for coupled atmosphere-fire simulation[J]. Procedia Computer Science, 2012, 9: 302-311.

[60] 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.

[61] Lafore J P, Stein J, Asencio N, et al. The Meso-NH atmospheric simulation system. Part I: Adiabatic formulation and control simulations[J]. Annales Geophysicae, 1998, 16: 90-109.

[62] Filippi J B, Mallet V, Nader B. Evaluation of forest fire models on a large observation database[J]. Natural Hazards & Earth System Sciences, 2014, 14: 3077-3091.

[63] Balbi J H, Morandini F, Silvani X, et al. A physical model for wildland fires[J]. Combustion and Flame, 2009, 156(12): 2217-2230.

[64] Filippi J, Bosseur F, Mari C, et al. Coupled atmosphere-wildland fifire modelling[J]. Journal of Advances in Modeling Earth Systems, 2009, 1(4): 1-11.

[65] 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.

[66] 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.

[67] Clements C B, Zhong S, Goodrick S, et al. Observing the dynamics of wildland grass fires: FireFlux-a field validation experiment[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2007, 88(9): 1369-1382.

[68] Clements C B, Zhong S, Bian X, et al. First observations of turbulence generated by grass fires[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2008, 113: D22102.

[69] 田晓瑞, 舒立福, 王明玉. 林火增长模型及应用软件[J]. 世界林业研究, 2012, 25(1): 25-29.

Research progress of wildfire spread model and its applicability

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

Public Meteorological Service Center of China Meteorological Administration, Beijing 100081, China

Abstract Understanding the characteristics of wildfire spread is one of the important reference bases for wildfire prevention and fighting. According to whether the interaction between wildfire and atmosphere is considered, the simulation models of wildfire spread are divided into uncoupled models and coupled models. In this paper the current research status is analyzed, and the existing models are summarized in terms of the principles and assumptions on which the model is based, the model's characteristics and applicable conditions, and the relevant research progress. It shows that uncoupled models mainly establish combustion models through approximations such as energy balance equations, combustion decomposition assumptions, or ignition experiments, using meteorological factors such as wind as initial conditions to drive fire models. Whereas in most coupled models, the relevant elements of the weather model and the fire model are fed back to their models at each time step, and the integration calculation is continuously cycled to achieve mutual coupling between the atmosphere and wildfire. Compared to uncoupled models, coupled models simulate wildfire spread more closely to the actual situation, especially for large wildfires.

Keywords wildfire; wildfire spread model; atmosphere-wildfire coupling

（责任编辑　傅雪）