

野火蔓延灾害风险评估研究进展

国志兴^{1,2,3}, 钟兴春^{1,2,3}, 方伟华^{1,2,3}, 曹 鑫^{1,2,3}, 林伟⁴

(1. 北京师范大学地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京 100875; 2. 北京师范大学环境演变与自然灾害教育部重点实验室, 北京 100875; 3. 民政部/教育部减灾与应急管理研究院, 北京 100875; 4. 北京师范大学资源学院, 北京 100875)

摘 要:野火灾害对区域生态系统和全球气候系统造成了严重影响,野火灾害风险评估和火蔓延研究对防火、灭火具有重要意义。本文对国内外可燃物模型、可燃物类型图的制作方法,野火蔓延模型、蔓延的计算机模拟技术和火灾风险评估的最新研究状况和发展趋势进行了综述,并提出对野火灾害风险评价的理论框架。综述分析表明:①基于遥感信息和地面调查数据,建立较完善的可燃物模型,为全球或区域火灾风险评估、火蔓延研究提供有效数据信息成为必然趋势;②利用地球空间信息技术,计算机技术和数学方法解决火灾模拟海量数据问题,实现火行为的实时、动态模拟仿真的监测系统和网络信息发布系统;③结合可燃物模型,蔓延模型评价火灾区域的脆弱性和致灾因子,利用“灾害风险评估”的理论和方法对野火灾害风险进行综合评估。④我国应建立集成化、实用化、多维化、标准化的野火蔓延的模型体系、决策支持系统和国家火险等级系统,为我国野火火灾的预测与防御提供科学依据。

关 键 词:野火;蔓延模型;可燃物;模拟技术;风险评估

1 引言

野火(Wildfire)是生态系统演替过程的自然现象,但对区域生态系统和全球气候系统造成了严重影响^[1]。作为野火行为的主要表现形式,野火蔓延是一种复杂的燃烧现象,要准确预测火行为,需要有科学的野火蔓延模型。自从1946年Fons首次尝试利用数学模型描述火蔓延行为^[2-3],野火蔓延的定量分析和建模便成为许多国家和机构的研究方向。地表火是一种最常见的火灾,约占森林火灾的90%以上,因此目前所讨论的最多是针对地表火的蔓延模型^[4]。在研究野火的蔓延研究中,可燃物是野火燃烧的基础物质,不同的可燃物其燃烧性质不同,可燃物的不同对野火燃烧和蔓延具有重要影响,因此可燃物模型的建立有利于对野火蔓延的研究和野火灾害风险评估。野火蔓延的可视化表达技术已日趋成熟,借助计算机图形处理能力和地球空间信息技术实现野火蔓延的可视化表达,能够更加深入研究野火的蔓延机理,监测与模拟野火蔓延,从而为灭火提供科学依据。

野火灾害作为自然灾害灾种之一,火灾风险评估是火灾预防的重要组成部分,利用灾害风险评价

原理对火灾风险评估的研究很少。本文将对国内外可燃物模型、可燃物类型图的制作方法,野火蔓延模型、野火蔓延的计算机模拟技术和火灾风险评估的最新研究状况和发展趋势进行综述。

2 可燃物模型

可燃物的燃烧除取决于火源和氧气的必要条件外,还取决于本身的尺寸大小、结构状态、理化性质和数量分布。因此,对可燃物及其燃烧性进行研究,是现代火管理中最重要、最基础的工作,它在火蔓延研究、火发生预报、火行为预报、灭火指挥等方面都具有重大的现实意义。

2.1 美国可燃物模型

(1)NFDRS (National Fire Danger Rating System)可燃物模型^[5]。国家火危险等级系统(NFDRS)是美国农业部森林服务机构1968年建立的监测野外火潜在危险的系统。在系统中建立了适应于美国地区的可燃物模型。可燃物类型由最初的9种更新到20种,主要包括草地、灌丛、阔叶林、采伐迹地、浅沼泽地、苔原和针叶林等植被。可燃物模型主要由鲜可燃物模型和枯死可燃物模型组成。鲜可燃物包括草

收稿日期:2010-01; 修订日期:2010-05。

基金项目:国家自然科学基金项目(40601002),科技部国家十一五科技支撑计划项目(2006BAD20B03)。

作者简介:国志兴(1982-),男,博士研究生,主要从事自然灾害风险评估研究。E-mail:guozhixing@ires.cn。

通讯作者:方伟华(1973-),男,副教授,博士生导师。主要从事自然灾害风险模拟和风险管理研究。E-mail:fang@ires.cn。

本植物和木质灌丛,枯死可燃物包括 1 小时时滞、10 小时时滞、100 小时时滞和 1000 小时时滞枯死可燃物类型。同时模型给出了不同可燃物类型的可燃物载量、可燃物深度及枯死可燃物的极限湿度(大于这一湿度,火将不能够蔓延)。

(2)NFFL (Northern Forest Fire Laboratory) 可燃物模型^[6-7]。Rothermel 模型为了适用于异质可燃物,根据不同类型和同种类型其相似的属性划分为不同的种类对可燃物进行分类,建立了可燃物模型。最初 Rothermel 模型引用 NFDRS 的可燃物模型,森林服务机构 (Forest Service) 的 NFFL 研究者将 Rothermel 模型的可燃物基于地表可燃物特性分为 13 种,该可燃物模型主要有 4 种植被类型组成:草本可燃物、灌丛可燃物、森林灌丛下的枯死落叶可燃物和采伐地的残留、堆积可燃物。模型给出了不同可燃物类型的可燃物载量、可燃物深度及枯死可燃物的极限湿度。NFFL 可燃物模型的分类方法已被广泛应用到不同生态系统的火蔓延的研究中。美国农业部建立的火蔓延决策支持系统的 BEHAVE 火行为预测系统^[8-9]和 FARSITE 火区域模拟器^[10]都是利用 NFFL 可燃物模型对野火蔓延进行模拟。

(3)FCCS 可燃物模型^[11-12]。为了使可燃物分类更加精确的获取可燃物床的复杂结构和地理多样性,美国农业部森林服务机构的火与环境研究应用组 (Fire and Environmental Research Applications Team) 的太平洋西北研究站 (Pacific Northwest Research Station) 建立了一个新的可燃物分类系统,即可燃物特征分类系统 (Fuel Characteristics Classification System, FCCS)。FCCS 可燃物模型为火蔓延模型可燃物床的定量信息和有助于建立应用于美国地区的自定义的可燃物模型。模型将可燃物床划分为 6 个平行可燃物层(树冠层、灌丛、低矮植被、木质可燃物、枯枝落叶可燃物和地表可燃物),每一可燃物层根据燃烧特性进一步划分为两类或者更多的种类,使用者能够使用和修改模型的默认设置(如可燃物的结构信息和生物量等),从而得到每个可燃物床定量特性(物理、化学和结构特性)和可能的火参数。虽然 FCCS 建立在美国,适用于美国地区,但其理论框架也可在世界范围内进行应用^[12]。

2.2 其他可燃物模型

澳大利亚火危险等级系统是通过多次试验,统计分析建立起来的统计模型,在可燃物种类方面受到限制。为了使澳大利亚火危险等级系统能够广泛

应用到澳大利亚地区,建立 3 种不同可燃物类型:草地、干性桉树林和灌丛^[13]。但不适合应用到其他可燃物类型。

加拿大森林火行为预测系统(the Canadian Forest Fire Behavior Prediction System)的可燃物模型^[14]由 400 多个火观测实验获得,模型包括了 16 种离散的可燃物类型,主要由 5 部分组成:松类可燃物 (Coniferous)、落叶林可燃物 (Deciduous)、混交林可燃物 (Mixedwood)、采伐地可燃物 (Slash) 和草可燃物,覆盖了加拿大北方地区主要森林可燃物类型。

欧洲的研究者建立了普罗米修斯可燃物分类系统,系统是对 NFFL 可燃物模型简化和修改以适应地中海地区的生态系统,系统根据可燃物种类和蔓延要素划分为 3 组(草地、灌丛和地表枯枝落叶)7 类可燃物^[15]。

虽然很多国家建立了可燃物模型为已有火蔓延模型服务,但研究火蔓延的可燃物分类非常困难,且模型的建立也存在很多的局限性。①可燃物模型仅适应于相似的地理区域而不能适应环境不同的其他区域,如美国的 NFFL 可燃物模型;②可燃物模型仅适合于特定的蔓延模型中,用来研究火的蔓延率和火强度,而不能应用到其它研究(如火灾灾害损失的预测等);③不同蔓延模型的可燃物类型拥有不同的分类准则,可燃物模型之间可燃物类型容易混淆。

2.3 可燃物类型制图

在一定的空间和时间尺度上制作可燃物类型图对火蔓延和火强度的研究以及火灾害和风险研究都非常重要。但可燃物类型图的制作是极其困难和复杂的过程。Keane 等^[16]认为实现可燃物类型图的制作需要遥感影像分类、野火模型、可燃物建模、生态学、地理信息系统等专门技术和知识。同时 Keane 等总结了 4 种可燃物类型制图方法:野外调查、直接勾绘、间接制图和可燃物模型法,并提出了利用遥感技术和图像处理的方法制作可燃物图。

随着遥感技术的发展,卫星遥感传感器获取高空间和高时间分辨率的遥感影像,可为可燃物制图提供及时、有效的数据信息。遥感与地理信息系统的结合易于实现可燃物制图的空间分析。国外已有很多研究者利用遥感技术获取可燃物图。如 Giakoumakis^[15]分别利用 Landsat TM 影像和 IKONOS 影像制作了地中海地区可燃物类型图, Van 等^[17]使用 Landsat TM 影像计算 NDVI 数据制作约塞米蒂国

家公园可燃物类型图,Lanorte 等^[18]利用 MODIS 影像制作了意大利南部地区的可燃物类型图等。

然而上述遥感影像在获取地表可燃物信息时,无法穿透森林冠层获取冠层以下的信息,从而成为使用这些遥感影像的最大缺陷。为了弥补这一缺陷一些研究者利用微波遥感和 Lidar 技术探测森林冠层以下信息,以获取可燃物的参数信息^[19-21]。

3 野火蔓延模型

野火蔓延模型是指在各种简化条件下进行数学上的处理,导出火行为与各种参数(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^[3]。火的蔓延率、火线强度和可燃物燃烧的公式表达与可燃物、区域特性和天气条件有关。

1946 年 Fons 尝试利用数学模型描述火蔓延行为。他主要开展对火头的研究。在火头,细碎的可燃物能够传递火,同时具有充足的氧气支持燃烧。他指出引起相邻可燃物达到火点温度需要充足的热量^[2]。因此,Fons 认为在可燃物床上的火蔓延是通过一系列连续点燃过程的可视化。Fons 模型在本质上是第一次以理论的方法对火蔓延模型研究。随着野火蔓延的研究深入,不同国家野火研究机构建立了很多火蔓延模型,研究火行为机理和为火管理提供科学依据。据 Pastor^[3]总结,1946–2000 年美国、澳大利亚、加拿大、俄罗斯、法国、葡萄牙等国家出现了 42 个地表火的蔓延模型。下文将详细叙述典型且应用广泛的野火蔓延模型。

3.1 美国野火蔓延模型

1972 年美国农业部 Forest Service 机构的 Rothermel 在火蔓延早期研究工作的基础上建立了 Rothermel 模型^[2],它是基于能量守恒定律,在大区域地表可燃物下预测火蔓延率和强度的数学模型。火蔓延的主要思想是把火看作是一系列点燃现象,热量从燃烧的火传递到潜在的可燃物,可燃物表面脱水,进一步加热升高可燃物表面的温度,直到可燃物开始热解,释放可燃烧的气体。当来自潜在可燃物的气体达到充分支持燃烧,气体被火焰点燃。火进行到新的位置。最终,获得一个恒定的蔓延率,这被叫做“似稳态”。其中火前进的速率是所有元素速率的平均值,模型如下:

$$R=\frac{I_R\times\xi(1+\Phi_w+\Phi_s)}{\rho_b\times\varepsilon\times Q_{ig}}\quad(1)$$

式中: R 为林火蔓延速度 (m/min); I_R 为火焰区反应强度 (kJ/(min.m²)); ξ 为林火蔓延率(无因次变量); Φ_w 为风速修正系数; Φ_s 为坡度修正系数; ρ_b 为可燃物密度(kg/m³); ε 为有效热系数(无因次变量); Q_{ig} 为点燃单位质量的可燃物所需的热量(kJ/kg)。

从模型初建至今,Rothermel 模型得到广泛的应用,成为很多国家建立野火蔓延模拟和野火管理信息系统的蔓延模型。美国农业部建立的火蔓延决策支持系统的 BEHAVE 火行为预测系统^[8-9],联邦和各州的土地管理机构使用的景观火蔓延预测软件 FARSITE 火区域模拟器^[10]都是利用 Rothermel 模型建立起来的。Kalabokidis 等^[22]和 Vasconcelos^[23]等基于栅格数据的 GIS 平台实现 Rothermel 模型火蔓延空间模拟。Vasconcelos^[23]使用 Rothermel 模型建立了在离散时间上模拟非恒定空间环境的火蔓延软件——FIREMAP 火蔓延模拟系统。在美国境外,葡萄牙科英布拉大学建立的 FireStation 软件^[24]和新西兰坎特伯雷大学建立的 PYROCART 软件^[25]都是基于 Rothermel 火蔓延模型建立的。FireStation 软件主要是在复杂的地形条件下模拟火的蔓延。PYROCART 软件基于 GIS 技术在空间异质景观中模拟野火蔓延行为,同时验证 Rothermel 火蔓延模型适宜在新西兰生态系统中应用。

虽然 Rothermel 模型已被广泛的应用,但也有许多不足之处。当可燃物的含水量超过 35%时,Rothermel 模型将不再进行野火蔓延^[26],所以不宜应用到湿度较大的植被区进行野火蔓延的模拟。同时模型是半经验模型,参数较多,对实验数据的依赖性较大。

3.2 澳大利亚野火蔓延模型

澳大利亚的火蔓延模型以统计模型为主,使用最广泛的火蔓延模型是 McArther 森林火危险等级系统 (McArther Forest Fire Danger Rating System)和 McArther 草地火危险等级系统 (McArther grassland Fire Danger Rating System)^[13],此模型主要用于预测火点起燃的可能性和火扩展率以及灭火的困难程度。模型主要依赖温度、相对湿度和风速。草原火危险等级系统模型如下^[27]:

$$R=0.13F\quad(2)$$

式中: R 为较为平坦地面上的火蔓延速度(km/h), F 在草原火危险计的 Mark3 版本中具有如下形式:

$$F=2.0\exp[-23.6+5.01\ln C+0.028T-0.226H^{0.5}+0.633U^{0.5}]\quad(3)$$

式中: F 为火险指数(无因次量); C 为可燃物的固化程度(%); T 为气温($^{\circ}\text{C}$); H 为相对湿度(%); U 为在10m高处测得的平均风速(km/h)。此后 F 被草原火危险计的 Mark5 版本取代,公式如下:

$$F=3.35 \times W \times \exp(-0.0897M+0.0403U) \text{ for } M < 18.8\% \quad (4)$$

$$F=0.299 \times W \times \exp(-1.686+0.0403U) \times (30-M)$$

$$\text{for } 18.8\% \leq M < 30.0\% \quad (5)$$

$$M=(97.7+4.06H)/(T+6.0)-0.00854H+3000.0/C-30.0 \quad (6)$$

式中: W 为可燃物载量(t/ha); M 为可燃湿度含水量(%);其他参数意义同上。森林火危险等级系统模型如下^[27]:

$$R=0.0012 \times F \times W \quad (7)$$

$$F=2.0 \times \exp(-0.450+0.987 \ln D-0.0345H+0.0338T+0.0234U) \quad (8)$$

式中: D 为干旱指数(无因次量),其他参数同上。

模型描述了每天相对危险和在火区域指示火灾发生的危险程度,为降低火灾灾害程度,实施有效的灭火决策,对野火蔓延的科学预测是非常重要的。然而 McArthur 火危险等级系统分析影响火蔓延的因素,如地形因子等都是使用传统的方法。随着计算机技术和空间技术的发展,澳大利亚联邦科学与工业研究组织(CSIRO, the Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation)的野火行为与管理研究组开发了 SiroFire 软件^[28]。SiroFire 软件是根据草地和森林 McArthur 火危险等级系统建立的,是基于 PC 机的决策支持系统,具有在景观尺度上进行火行为和火蔓延模拟的能力。

草原火蔓延统计模型。Cheney 等^[29]在 1993 年野外草原火蔓延实验结果表明:可燃物载量对火蔓延速度影响不显著,基于物种类型或表面积体积比进行分类的植被类型对草原火蔓延影响亦都不显著。草原火蔓延速度与风速的相关性最大,其次为预测可燃物含水量。根据 121 个的野外草原火蔓延实验数据,利用多元回归技术建立的草原火蔓延的统计模型,其公式如下:

$$R=0.4539U_2^{0.951} \exp(-0.0966M_{fi}) \quad (9)$$

式中: R 为蔓延速度, U_2 为 2m 高处的风速, M_{fi} 为预测枯死可燃物含水率。在此基础上,Cheney 等^[29]在 1998 年通过草原火蔓延实验认为风速小于 5km/h 的火蔓延速度与风速呈现线性变化,当风速大于 5km/h 时,火蔓延速度与风速呈现小于 1 的幂函数变化,具体公式如下:

当风速 $U_{10} < U_c$ 时,

$$R=[R_0+a_i U_{10}] \cdot \Phi M \cdot \Phi C \quad (10)$$

当风速 $U_{10} > U_c$ 时,

$$R=[R_0+A_i(U_{10}-U_c)^b] \cdot \Phi M \cdot \Phi C \quad (11)$$

式中: R 为草原火蔓延速度(km/h); R_0 为零风速、零可燃物含水量的初始蔓延速度(km/h); U_{10} 为 10m 高处的风速(km/h); U_c 为临界风速(5km/h);是 ΦM 可燃物湿度指数(无因次量), ΦC 为可燃物固化程度指数(%), i 为不同类型可燃物, a_i 、 A_i 和 b 为参数。

该模型是根据草原火蔓延实验建立的,充分揭示了草原火蔓延速度与风速、可燃物湿度等的定量关系,对其他地区草原火行为、火蔓延等研究提供了很好的借鉴。但模型为统计模型,没有考虑热传机制、可燃物燃烧物理特性等,模型应用到其他地区还需进一步验证。

3.3 加拿大野火蔓延模型

加拿大火蔓延模型比澳大利亚 McArthur 模型更加复杂,并应用到所有植被的火蔓延预测。CFFDRS(the Canadian Forest Fire Danger Rating System)是加拿大森林火灾危险等级的国家系统,自 1968 年被联邦森林服务机构(the Federal Forestry Service)开发,主要用于对森林火灾危险的评价,火灾发生的实时监测以及火行为的预测。CFFDRS 有 2 个主要子系统:一是加拿大森林火气候指数系统^[14](the Canadian Forest Fire Weather Index System),系统是基于 3 种森林可燃物类型湿度和风对火行为的影响建立的,系统由 6 部分组成:3 个子指数代表可燃物湿度,2 个子指数代表火的蔓延率和可燃物的燃烧,最后一个指数代表火强度(火头单位长度能量的输出率)。森林火气候指数主要是对松树可燃物类型火进行监测,但对加拿大森林火灾危险度的一般监测是有价值的;二是加拿大森林火行为预测系统^[30](the Canadian Forest Fire Behavior Prediction System),主要对火头的蔓延速率、可燃物的燃烧,火强度等进行定量评估。借助椭圆火生长模型,估算了火面积周长、周长生长率以及火形侧面和后面的火蔓延速率。模型的蔓延速率是从 400 多个野外火观测实验中获得的,具体公式如下:

$$ROS=a(1-e^{-b \times ISI^c}) \quad (12)$$

式中: ROS 为可燃物蔓延速度(m/min); a 、 b 、 c 分别为不同可燃物的模型参数; ISI 为初始蔓延系数,是风速和可燃物含水量的函数。对于在斜坡上的火蔓延速度只需要乘以一个适宜的蔓延因子即可,蔓延因

子可用下式表示: $S_f = e^{3.533(tg\Phi) \times 1.2}$ (13)

式中: S_f 为蔓延因子(无因次量); Φ 为地面坡度。

加拿大林火蔓延模型属于统计模型,其优点是能够预测与测试火参数相似情况下的火行为,较充分地揭示林火复杂现象的作用规律;缺点是基于统计模型不考虑任何热传机制,缺乏物理基础,当实际火情与试验条件不符时,使用统计模型的精度将会降低^[4]。

3.4 野火蔓延模拟方法研究

初期对野火行为的研究主要集中在自然因素与火行为关系模型的建立,但野火蔓延具有时间和空间特征。由于不同时间尺度野火燃烧的物理和化学过程有很大的差别及其影响因素和可燃物类型的多样性和复杂性,使得野火燃烧空间模型化是非常困难的。控制火蔓延的机理还尚未理解,所有的模型主要是基于实验数据、基本燃烧理论和常识来建立^[31]的。模型主要分为 2 类:一是栅格模型;二是矢量模型。

(1) 栅格模型将可燃物视为规则栅格系统的一组已规划好的点或单元。通过定义模型中每个点随时间变化的活动(已燃烧、未燃烧和正在燃烧)规则来管理,以跟踪火的蔓延。许多模型和管理信息系统都是基于栅格模型实现火蔓延的二维模拟。如 Kalabokidis 等^[22]和 Vasconcelos 等^[23]均是基于栅格模型实现 Rothermel 模型火蔓延空间模拟,以及葡萄牙科英布拉大学建立的 FireStation 软件^[24]和新西兰坎特伯雷大学建立的 PYROCART 软件^[25]。

栅格模型的另一种方法是基于元胞自动机的模拟。元胞自动机(Cellular Automata,简称 CA)是离散动态系统概念和应用建模的一种方法,最早是由 John Von Neumann 在 20 世纪 40 年代提出来的。其原理是将复杂的自然现象或物理系统在时间方面分成几个独立的时间步长,在空间方面,将每个时间步长上的连续空间分割为规则的格网。每个格网的状态由前一时间步长与此格网相邻的格网状态所决定,网格状态通常由一定的状态方程(局部规则)计算所得。Karafyllidis 等^[32]利用正方形元胞自动机模型结合气候条件和地形因子首次对假设的恒定和非恒定条件下的森林火蔓延进行模拟。Berjak 等^[33]对 Karafyllidis 的元胞自动机模型进行了改进,风对火的蔓延率和蔓延格局的影响主要是通过火焰角度模型,及结合 Hluhluwe 和 Umfolozi 两个保

护区的火实验数据确定的,其中空间可燃物异质性主要是通过分析各自可燃物成分的热动态集成到元胞自动机模型中,最终模型实现对空间异质的非洲热带稀树大草原的火模拟和预测。Encinas 等^[34]使用正六边形元胞对 Karafyllidis 模型进行了改进,模拟恒定和非恒定条件下的森林火蔓延。Alexandridis 等^[35]利用元胞自动机模型结合植被类型和植被覆盖、风速和风向及测定的环境在 GIS 平台上对森林火蔓延动态进行模拟。在过去的十几年中,GIS 与环境模型的集成已得到了广泛的研究,但由于环境过程的实时变化和 GIS 的静态特性使得这种集成方法面临着挑战。Yassemi 等^[36]集成 GIS 和元胞自动机模型,建立了灵活的、对用户友好的最终用户界面的火行为模型,从而实现基于 GIS 界面的火蔓延的动态仿真。为了解决火蔓延模拟中较大数据量计算的问题。Karafyllidis 等^[37]使用遗传算法实现元胞自动机模型对林火蔓延模拟的并行计算,以提高模拟速度。Innocenti 等^[38]使用 OpenMP 建立了元胞自动机模型的精细度并行计算的软件框架,以实现在火蔓延模拟中的应用。

(2) 矢量模型是运行在连续平面上,将火的周边定义为随时间以某种形式变化的曲线,从而跟踪火的蔓延。惠更斯原理是用一个随时间变化的连续扩展的多边形来表示林火的蔓延区域。该多边形的形状由一系列蔓延周边上的二维顶点决定,并且这些顶点随着多边形的增大而增加(以保证一定的精度要求)。每个顶点被认为是一个独立的火点,其蔓延形状被认为是椭圆形,方向由风速矢量和坡度矢量叠加决定,椭圆的大小由蔓延率和时间步长的长度决定^[10]。最后,计算多边形上的每个节点在下一时间步长的节点位置求出过火面积,其形状在恒定流下通常呈椭圆。1982 年 Anderson^[10,31,39]首次在火蔓延研究中提出了惠更斯原理思想,建立蔓延模型,但模型对火头模拟时,假设火头是由连续的无限小椭圆组成,使得模型不适宜在非恒定的条件进行火蔓延模拟。Richards^[31]利用 Anderson 提出的惠更斯原理思想建立了一个微分方程系统的模型,同时对 Anderson 模型进行了改进,假设给定可燃物类型的椭圆偏心距与风速有关,从而模型可以适用在变化的天气和可燃物条件,以及更复杂的条件下。在 1995 年 Richards^[39]对模型进行简化,同时对火蔓延形状进行扩展(如双纽线和双椭圆形等),以研究平衡状态火蔓延率。Finney^[10]利用 Richards 的

微分方程^[31,39]实现了林火蔓延计算,建立了 FAR-SITE 火区域模拟器。栅格模型其概念简单,计算机编码容易,但其火蔓延模拟的精度较低;矢量模型技术性较强,模拟精度较高,但与栅格模型相比利用计算机编码实现困难。

4 中国野火蔓延研究进展

我国野火蔓延模型研究开始较晚。1983 年王正非在研究山火初始蔓延速度测算法时提出了林火蔓延的统计模型,由于该模型不能对下坡林火蔓延进行计算,因此毛贤敏^[40]结合加拿大 Lawson 提出的蔓延因子模型对其进行修正,修正后的模型在地形因子即坡度变化上弥补了林火蔓延模拟的缺陷,从而建立了我国比较实用、易实现的林火蔓延统计模型,即王正非—毛贤敏模型。

$$R=R_0K_sK_wK_\phi=R_0K_s e^{0.1783V} \times e^{3.533(\tan\Phi)^{1.2}} \quad (14)$$

式中: R 为火蔓延速率; R_0 为初始蔓延速率(无风时在水平面上的蔓延速度,取决于可燃物种类及其干燥程度); K_s 为可燃物配置格局系数; K_w 为风作用项; K_ϕ 为地形作用项。

此后国内学者利用王正非—毛贤敏模型对林火蔓延进行了大量的研究。温广玉等^[41]以王正非—毛贤敏模型为基础提出了一个林火蔓延的数学模型—抛物线—半圆形模型。该模型以林火火头的蔓延速度为参数,可以预测火场面积、周边长度以及面积、周长的增长速度。唐晓燕等^[42]基于栅格结构使用王正非—毛贤敏模型对云南省玉溪市林区进行林火蔓延进行模拟研究。黄作维等^[43]以广州市森林区为研究区,基于 GIS 方法对王正非—毛贤敏模型进行理论方法实现的阐述。宋丽艳等^[44]和毛学刚等^[45]基于 GIS 方法使用王正非—毛贤敏模型实现林火蔓延的可视化研究,但两人对该模型的应用都局限于小区域典型森林火蔓延模拟研究。

中国在可燃物模型建立方面研究甚少,目前还没有建立一个比较成熟的可燃物模型。国内对可燃物模型的研究主要有两方面:①对单一森林可燃物载量与其林分因子进行研究,建立单一可燃物模型,估算可燃物载量。如单延龙等^[46]对樟子松林的林分因子和各类地表可燃物载量进行后向逐步线性回归分析,建立大兴安岭地区樟子松林地表可燃物模型。郭利峰等^[47]用线性相关分析法对林分因子

与地表枯死可燃物负荷量进行分析,建立了北京八达岭人工油松林地表枯死可燃物模型。②基于遥感影像,利用图像分类方法对可燃物进行分类,制作可燃物分类图。如田晓瑞等^[48]利用北京市土地利用图和 Landsat TM 影像,采用监督分类方法将北京市森林可燃物分为 6 类,并指出这一分类结果可以满足森林火险等级预报的需要,但对于火行为预报,还需根据林分燃烧性、林分垂直结构及可燃物分布状况进一步分类。覃先林等^[49]以黑龙江省为实验区,利用多时相的 MODIS 数据将实验区内的森林可燃物分为 5 类,即针叶林、阔叶林、针阔叶混交林、灌木和草以及农作物。田晓瑞等^[50]在 2005 年总结国外可燃物制图的方法,讨论利用卫星遥感与地理信息系统结合制作可燃物图的方法,并建议中国在发展国家火险等级系统前要进行可燃物分类,促进林火管理技术的发展。

此外,国内许多学者利用不同方法对林火蔓延进行了相关研究。黄华国等^[51]基于三维曲面元胞自动机模型对林火蔓延进行了模拟。王长缨等^[52]实现了二维基于规则学习的林火蔓延元胞自动机模型,认为对构造和实现复杂环境变化下的具有规则学习的 CA 模型有待进一步研究。王惠等^[53]利用惠更斯原理进行林火蔓延模拟,结合国际上成熟的林火行为模型,建立了适合云南省特殊地形的林火蔓延动态模型。

综上所述,我国野火蔓延研究还有很多不足:①我国虽然建立了王正非—毛贤敏模型,但模型为统计模型,实验数据来自我国北方地区,而将其应用到我国其他地区,特别是南方森林区,由于气候条件的不同,使得模型模拟精度有待进一步验证。②国内研究者在可燃物分类和模型建立方面仅选择某一地区或者某单一可燃物建立可燃物模型,还没有建立一个比较完善和系统的适合整个中国的可燃物模型,为我国野火蔓延研究、火危险等级评估服务。③在国内现有的研究中,可燃物分类结果对火风险等级和野火蔓延模拟的服务价值还没有得到充分的体现。

5 野火灾害风险评估研究进展

综上所述,不同国家和地区根据可燃物、区域特性和天气条件建立了相应的野火蔓延模型,主要是为了火灾危险的评价、火灾发生的实时监测以及

火行为的预测,为火管理部门指挥灭火、灾情评估等提供科学决策和依据。而利用野火可燃物模型、蔓延模型对野火蔓延的模拟,同时结合火灾发生区域的脆弱性的评价实现野火风险评估,制作野火灾害风险图的研究很少。随着人类对野火灾害风险研究的重视,野火灾害风险评估的方法和理论将日益系统和完善。

早在 20 世纪 70 年代,国外一些发达国家就开始针对“灾害风险评价”及其相关理论和方法进行了比较系统的研究^[54]。但迄今为止国内外专家对风险评估的表示和定义都不尽相同,仁者见仁,智者见智。中国学者史培军教授认为^[55]:灾害风险评估一般可划分为广义与狭义两种理解。广义的灾害风险评估,是对灾害系统进行风险评估,即在对孕灾环境、致灾因子、承灾体分别进行风险评估的基础上,对灾害系统进行风险评估;狭义的风险评估则主要是针对致灾因子进行风险评估,即从对危险(Danger)的识辨,到对危险性(Hazard)的认识,进而开展风险(Risk)评估,通常是对致灾因子及其可能造成的灾情之超越概率的估算。

野火灾害作为自然灾害之一,利用灾害风险评估原理对火灾风险评估的研究很少。火灾风险评估是火灾预防的重要组成部分。在国内外已有的研究中火灾风险的评估主要注重火灾点燃和蔓延潜在风险评估研究。主要基于以下 5 种方法:

(1) 建立风险指数评估野火风险。如 Gonzalez-alonso 等^[56]利用 NOAA/AVHRR 的 1B 数据使用 MVC 法合成每周最大 NDVI 数据,根据西班牙的 Castile-La Mancha AC 地区的干燥气候影响植被的生长状况的 NDVI 值的变化特征(5 月最后一周 NDVI 最大合成数据比 6 月最后一周 NDVI 最大合成数据降低 10%)作为森林火灾风险识别阈值,监测该地区的火灾风险。Burgan 等^[57]基于遥感数据和地面观测数据创建一个国家到区域尺度评估潜在火的方法,即火潜在指数(Fire Potential Index)模型,对美国的内华达州和加州林区潜在火进行评估。FPI 模型的输入变量有可燃物模型数据,相对绿度数据,10h 时滞枯死可燃物湿度。Ana 等^[58]使用气象数据、遥感数据和可燃物图,利用 FPI 模型,对欧洲的森林火险进行评估。Peng 等^[59]利用基于火点燃烧前热能的物理概念创建一个新指数,即火敏感指数(Fire Susceptibility Index, FSI),利用 ASTER 数据使用 FSI 对马来西亚半岛的森林火灾风险进行评估,

FSI 的输入变量主要是可燃物的温度和可燃物含水量,此类方法适于对宏观区域火灾风险进行评估。

(2) 基于野火发生的影响因素评估野火风险。预测野火事件的影响因素和理解火动态行为是野火管理至关重要的方面。Jaiswal 等^[60]选择火发生的主要影响因素(植被类型、坡度、居民点分布、距道路的距离),利用 GIS 空间分析功能为不同的影响因素的不同种类赋权值,探索森林火风险图的制作方法。Xu 等^[61]基于遥感和 GIS 技术选择影响火灾发生的因子(地形、植被、土地利用、人口和居民点信息)对其主观赋值来评价森林火险。此类方法因对不同的影响因素的不同种类赋权值来评定等级,故其评估结果主观性较强。

(3) 基于历史火灾起火点数据和起火影响因素评估火灾风险。火点起火概率的评估方法主要是建立响应变量和解释变量的指标体系,使用多元 Logistic 回归或人工神经网络的方法模拟火点起火概率。Kalabokidis 等^[62]使用多元 Logistic 回归,将历年火点数据(燃烧,其值为 1)和在研究区域内为避免与历年火点重合或在其附近按一定规则随机产生控制点(未燃烧,其值设为 0)建立多元 Logistic 回归模型的响应变量。解释变量主要选取影响火点引燃的自然因素(气温、相对湿度、年降水量、高程、坡度、坡向、地质和植被类型)和人为因素(距道路的距离和牲畜密度),从而评估了希腊北部地区的 Sithonia 半岛地区生态系统的火灾起火概率,认为土地覆盖类型、地形和放牧等是影响野火动态变化的主要因素。Martinez 等^[63]利用 13 年历年火发生数据,使用多元 Logistic 回归分析模型评估了西班牙人为引起野火的风险等级,为火灾预警提供空间决策。Vasconcelos 等^[64]利用历年火点数据,基于多元 Logistic 回归模型和人工神经网络两种方法对比模拟了葡萄牙中部 5 市地区的火点起火概率的空间特征,认为人工神经网络方法的模拟精度较高,但不能解释每个影响因素对起火的贡献水平,而 Logistic 回归模型可以清晰地获得每个影响因素对起火的贡献水平。

(4) 基于历史火灾起火点数据利用蔓延模型评估火蔓延风险。此方法主要根据历年火灾起火点的空间分布特征随机产生火源,利用野火蔓延模型模拟火迹,产生潜在过火区域(Potential Burned Area)进行火灾风险评估。如, Mbow 等^[65]在非洲西部的尼奥科洛科巴国家公园随机产生起火点,利用 FAR-

SITE 软件模拟火蔓延,得到潜在火蔓延区域,分析该地区的火灾风险。Carmel 等^[66]根据以色列卡梅尔山区 1983–2003 年历年火灾发生的火点数据的空间分布特征使用蒙特卡洛技术随机模拟 500 个火点,利用 FARSITE 软件对 500 个火点进行火蔓延模拟,制定了潜在火蔓延频率分布图,对该地区火灾风险进行评估。此类研究目前很少,主要是在小尺度范围进行火灾风险评估。

(5) 综合野火灾害风险评估。野火风险评估不仅简单的对火灾起火或者蔓延潜在风险评估研究,应对火灾潜在危害的综合评估。Tong 等^[67]基于自然灾害风险模型建立草原火灾综合风险评估模型,模型主要有致灾因子、承灾体、脆弱性和应急反应和恢复能力 4 部分组成,根据以上 4 部分建立草原火灾风险评估指标体系利用加权综合评分法和层次分析法对中国吉林西部草原火灾风险进行评估。Chuviecoa 等^[68]基于 RS 和 GIS 技术提出森林火灾风险综合评估框架(图 1)。火灾风险评估模型包括火灾的综合危险和脆弱性两部分。综合危险主要由蔓延危险和火点燃危险构成,火点燃的危险是由人为因素和自然因素以及可燃物的湿度引起。脆弱性的评价主要由社会经济指标,潜在退化指标和景观指标构成。

总结前人的火灾风险评估方法和原理,本文提出了火灾风险评估的理论框架(图 2),作者认为火灾风险评估是对致灾风险、脆弱性和承灾体的综合评估。致灾风险评价主要是分析火灾发生的起因,根据孕灾环境建立自然、人为和境外入侵的评价因素,结合历年火灾统计数据利用统计概率模型获得火灾的起火频率,即火灾致灾风险。脆弱性评价对于火灾发生区域不是简单的对承灾体进行评价,而是对承灾体以及其周围的孕灾环境进行综合评价。本文作者将可能发生火灾区域的生态系统看为一个整体对脆弱性进行评价。利用历年火灾数据分布规律使用蒙特卡罗方法预测模拟火灾易发生的地点,结合孕灾环境选择火蔓延模型评价火灾发生区域生态系统的脆弱性,即火灾蔓延的可能性。承

灾体分为自然承灾体和社会承灾体。自然承灾体评价主要是对可能发生火灾区域的植被生物量进行评估,作者选择植被的生长模型对植被生物量进行评估。

6 结论与展望

本文总结了火蔓延模型采用的可燃物模型以及可燃物制图卫星遥感的方法,分析了当今国内外应用比较广泛的野火蔓延模型的特点、功能、应用状况和发展趋势,及其基于栅格模型、元胞自动机和惠更斯原理的二维火蔓延模拟技术。同时总结了我国野火蔓延的研究进展,分析了国内外野火风险评估的研究近况,提出野火风险评估的框架。本文提出以下火灾蔓延、风险评估的研究方向有着重要的发展前景:

- (1) 制订全球、区域可燃物分类标准,基于遥感技术探测和获取植被可燃物复杂的结构和地理多样性,建立较完善的可燃物模型,为全球或区域火灾风险评估、火蔓延研究、火发生预报、火行为预报等方面提供科学信息和依据。
- (2) 火灾预防和扑救的时效性很强,同时影响

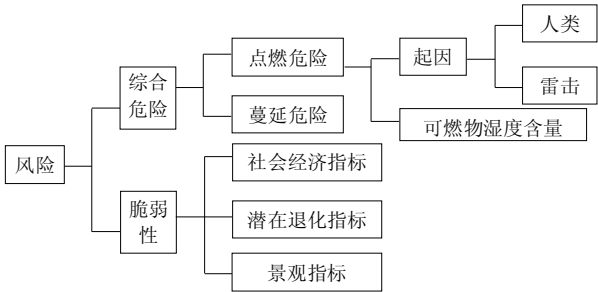


图 1 Chuviecoa 等^[67]提出的森林火灾风险评估框架
Fig.1 Forest fire risk assessment framework presented by Chuviecoa

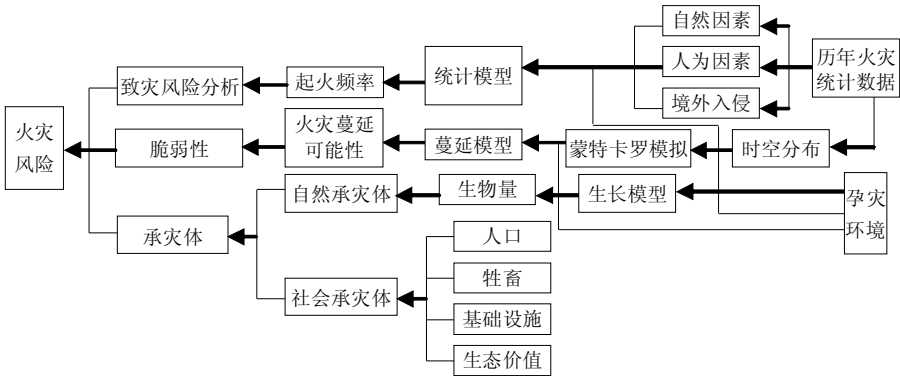


图 2 野火灾害风险评价框架
Fig.2 Framework for wildfire risk assessment

火行为的因素较多,各种参数复杂、数学模型的运算复杂繁琐。利用地球空间信息技术、计算机技术和数学方法解决火灾模拟海量数据问题,对火行为进行实时、动态模拟仿真,建立火灾蔓延模拟的实时监测系统和网络信息发布系统。

(3) 野火灾害作为自然灾害之一,利用“灾害风险评估”原理对火灾风险评估的研究很少。近期野火灾害风险评估的研究文献表明:结合现有可燃物模型、蔓延模型评价野火灾害区域的脆弱性和致灾因子,利用“灾害风险评估”的理论和方法对野火灾害风险进行综合评估的趋势明显。

(4) 中国是野火多发地区,应建立一个集成化、实用化、多维化、标准化的野火蔓延模型体系、决策支持系统和国家火险等级系统,为我国野火火灾的预测与防御提供科学依据。

参考文献

- [1] 谭明艳, 陈仲新, 曹鑫, 等. 利用 MODIS 识别草原火灾迹地方法的研究. 遥感学报, 2007, 11(3): 340-349.
- [2] Rothmel R C. A mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels. USDA, Forest Service. Rep. No. RP INT-115, 1972.
- [3] Pastor E, Zarate L, Planas E, et al. Mathematical models and calculation systems for the study of wildland fire behaviour. Progress in Energy and Combustion Science, 2003, 29(2): 139-153.
- [4] 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. 北京林业大学学报, 2002, 24(1): 87-91.
- [5] Cohen J D, Deeming J E. The National Fire Danger Rating System: Basic equations. Pacific Southwest Forest and Range Experiment Station. Rep. No. PSW-82, 1982.
- [6] Albini F A. Estimating wildfire behavior and effects. USDA, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station. Rep. No. GTR INT-30, 1976.
- [7] Anderson H E. Aids to determining fuel models for estimating fire behavior. USDA, Forest Service. Rep. No. GTR INT-122, 1982.
- [8] Burgan R E R, Richard C. BEHAVE: Fire behavior prediction and fuel modeling system-FUEL subsystem. USDA, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station. General Technical Report INT-167, 1984.
- [9] Andrews P L. BEHAVE: Fire behavior prediction and fuel modeling system-Burn subsystem, Part 1. USDA, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station. Rep. No. GTR INT-194, 1986.
- [10] Finney M A. FARSITE: Fire area simulator - model development and valuation. USDA, Forest Service. Rep. No. Paper RMRS-RP-4. 1998.
- [11] Sandberg D V, Ottmar R D, Cushon G H. Characterizing fuels in the 21st Century. International Journal of Wildland Fire, 2001, 10(3/4): 381-187.
- [12] Ottmar R D, Sandberg D V, Riccardi C L, et al. An overview of the fuel characteristics classification system: Quantifying, classifying, and creating fuelbeds for resource planning. Canadian Journal of Forest Research, 2007, 37 (12): 2383-2393.
- [13] Cheney P. A National Fire Danger Rating System for Australia. International Forest Fire News. [1992 -2 -6]. http://www.fire.uni-freiburg.de/iffn/country/au/au_4.htm.
- [14] Van Wagner C E. Development and Structure of the Canadian Forest Fire Behavior Prediction System. Forestry Canada, Forestry Canada Fire Danger Group. Information Report ST-X-3. 1992.
- [15] Giakoumakis M N, Gitas I Z, San-Miguel J. Object-oriented classification modeling for fuel type mapping in the Mediterranean, using LANDSAT TM and IKONOS imagery preliminary results. Viegas. Forest Fire Research & Wildland Fire Safety. Rotterdam: Millpress, 2002: 1-13.
- [16] Keane R E, Burgan R E, Wagtendonk J V. Mapping wildland fuel for fire management across multiple scales: Integrating remote sensing, GIS, and biophysical modeling. International Journal of Wildland Fire, 2001, 10 (4): 301-319.
- [17] van Wagtendonk J W, Root R R. The USE of multitemporal Landsat normalized difference vegetation index (NDVI) data for mapping fuels models in Yosemite National Park, USA. International Journal of Remote Sensing, 2003, 24 (3): 1639-1651.
- [18] Lanorte A, Lasaponara R. Fuel type characterization based on coarse resolution MODIS satellite data. Journal of Biogeosciences and Forestry, 2008, 1: 60-64.
- [19] Lefsky M A, Cohen W B, Parker G G, et al. Lidar Remote Sensing for Ecosystem Studies. BioScience, 2002, 52(1): 19-30.
- [20] Austin J M, Mackey B G, Van Niel K P. Estimating forest biomass using satellite radar: an exploratory study in a temperate Australian Eucalyptus forest. Forest Ecology and Management, 2003, 176(1/2/3): 575-583.
- [21] Andersen H E, McGaughey R J, Reutebuch S E. Estimating forest canopy fuel parameters using LIDAR data. Remote Sensing of Environment, 2005, 94(4): 441-449.
- [22] Kalabokidis K, Hay C, Hussin Y. Spatially resolved fire growth simulation//Proceedings of the 11th Conference on Fire and Forest Meteorology, 1991: 188-195.
- [23] Vasconcelos M J, Guertin D P. FIREMAP: Simulation of fire growth with a geographic information system. International Journal of Wildland Fire, 1992, 2(2): 87-96.
- [24] Lopes A, Cruz M, Viegas D. Firestation—an integrated software system for the numerical simulation of fire spread on

- complex topography. *Environmental Modelling & Software*, 2002, 17(3): 269–285.
- [25] Perry G L, Sparrow A D, Owens I F. A gis-supported model for the simulation of the spatial structure of wildland fire, Cass Basin, New Zealand. *Journal of Applied Ecology*, 1999, 36(4): 502–518.
- [26] Weise D R, Biging G S. A qualitative comparison of fire spread models incorporating wind and slope effects. *Forest Science*, 1997, 43(2): 170–180.
- [27] Noble I R, Bary G A V, Gill A M. McArthur's fire-danger meters expressed as equations. *Australian Journal of Ecology*, 1980, 5(2): 201–203.
- [28] Ensiris. SiroFire: A computer-based fire spread simulator [EB/OL]. [2006]. <http://www.ensirisjv.com/ResearchCapabilities/Achievements/ForestHealthBiosecurityandFire/BushfireResearch/BushfireSoftware>.
- [29] Cheney N P, Gould J S, Catchpole W R. Prediction of fire spread in grasslands. *International Journal of Wildland Fire*, 1998, 8(1): 1–13.
- [30] Van Wagner C E. The development and structure of the Canadian Forest Fire Weather Index System. Canadian Forest Service, Petawawa National Forestry Institute. FTR-35. 1987.
- [31] Richards G D. A general mathematical framework for modeling two-dimensional wildfire spread. *International Journal of Wildland Fire*, 1995, 5(2): 63–72.
- [32] Karafyllidis I, Thanailakis A. A model for predicting forest fire spreading using cellular automata. *Ecological Modelling*, 1997, 99(1): 87–97.
- [33] Berjak S G, Hearne J W. An improved cellular automaton model for simulating fire in a spatially heterogeneous Savanna system. *Ecological Modelling*, 2002, 148 (2): 133–151.
- [34] Encinas L H, White S H, del Rey A M, et al. Modelling forest fire spread using hexagonal cellular automata. *Applied Mathematical Modelling*, 2007, 31(6): 1213–1227.
- [35] Alexandridis A, Vakalis D, Siettos C I, et al. A cellular automata model for forest fire spread prediction: The case of the wildfire that swept through Spetses Island in 1990. *Applied Mathematics and Computation*, 2008, 204 (1): 191–201.
- [36] Yassemi S, Dragicevic S, Schmidt M. Design and implementation of an integrated GIS-based cellular automata model to characterize forest fire behaviour. *Ecological Modelling*, 2008, 210(1/2): 71–84.
- [37] Karafyllidis I, Thanailakis A. Design of a dedicated parallel processor for the prediction of forest fire spreading using cellular automata and genetic algorithms. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2004, 17(1): 19–36.
- [38] Innocenti E, Silvani X, Muzya A, et al. A software framework for fine grain parallelization of cellular models with OpenMP: Application to fire spread. *Environmental Modelling & Software*, 2009, 24(7): 1–13.
- [39] Richards G D. An elliptical growth model of forest fire fronts and its numerical solution. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 1990, 30 (6): 1163–1179.
- [40] 毛贤敏. 风和地形对林火蔓延速度的作用. *应用气象学报*, 1993, 4(1): 100–104.
- [41] 温广玉, 刘勇. 林火蔓延的数学模型及其应用. *东北林业大学学报*, 1994, 22(2): 31–36.
- [42] 唐晓燕, 孟宪宇, 葛宏立, 等. 基于栅格结构的林火蔓延模拟研究及其实现. *北京林业大学学报*, 2003, 25(1): 54–58.
- [43] 黄作维, 张贵. 基于 GIS 模型的林火蔓延研究. *湖南林业科技*, 2004, 31(2): 17–19.
- [44] 宋丽艳, 周国模, 汤孟平, 等. 基于 GIS 的林火蔓延模拟的实现. *浙江林学院学报*, 2007, 24(5): 614–618.
- [45] 毛学刚, 范文义, 李明泽. 基于 GIS 模型的林火蔓延计算机仿真. *东北林业大学学报*, 2008, 36(9): 38–41.
- [46] 单延龙, 张敏, 胡海清. 大兴安岭地区樟子松林地表可燃物模型. *东北林业大学学报*, 2005, 33(2): 74–76.
- [47] 郭利峰, 牛树奎, 阚振国. 北京八达岭人工油松林地表枯死可燃物负荷量研究. *林业资源管理*, 2007(5): 53–58.
- [48] 田晓瑞, 戴兴安, 王明玉. 北京市森林可燃物分类研究. *林业科学*, 2006, 42(11): 76–80.
- [49] 覃先林, 易浩若. 基于 MODIS 数据的森林可燃物分类方法: 以黑龙江省为实验区. *遥感技术与应用*, 2004, 19 (4): 236–239.
- [50] Tian X R, McRae D J, Shu L F, et al. Fuel classification and mapping from satellite images. *Journal of Forestry Research*, 2005, 16(4): 311–316.
- [51] 黄华国, 张晓丽. 基于三维曲面元胞自动机模型的林火蔓延模拟. *北京林业大学学报*, 2005, 27(3): 94–97.
- [52] 王长缨, 周明全, 张思玉. 基于规则学习的林火蔓延元胞自动机模型. *福建林学院学报*, 2006, 26(3): 229–234.
- [53] 王惠, 周汝良, 庄娇艳, 等. 林火蔓延模型研究及应用开发. *济南大学学报: 自然科学版*, 2008, 22(3): 295–300.
- [54] 薛晔, 黄崇福. 自然灾害风险评估模型的研究进展. *应用基础与工程科学学报*, 2006, 14(增): 1–10.
- [55] 史培军. 三论灾害研究的理论与实践. *自然灾害学报*, 2002, 11(3): 1–9.
- [56] Gonzalez-alonso F, Cuevas J M, Casanova J L, et al. A forest fire risk assessment using NOAA AVHRR images in the Valencia area, eastern Spain. *International Journal of Remote Sensing*, 1997, 18(10): 2201–2207.
- [57] Burgan R E, Klaver R W, Klaver J M. Fuel models and fire potential from satellite and surface observation. *International Journal of Wildland Fire*, 1998, 8(3): 159–170.
- [58] Ana. Integration of satellite sensor data, fuel type maps and meteorological observations for evaluation of forest fire risk at the pan-European scale. *International Journal of Remote Sensing*, 2002, 23(13): 2713–2719.
- [59] Peng G, Li J, Chen Y, et al. A forest fire risk assessment

- using ASTER images in Peninsular Malaysia. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2007, 17 (2): 232–237.
- [60] Jaiswal R K, Mukherjee S, Raju K D, et al. Forest fire risk zone mapping from satellite imagery and GIS. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2002, 4(1): 1–10.
- [61] Xu D, Dai L M, Shao G F, et al. Forest fire risk zone mapping from satellite images and GIS for Baihe Forestry Bureau, Jilin, China. *Journal of Forestry Research*, 2005, 16 (3): 169–173.
- [62] Kalabokidis K D, Koutsias N, Konstantinidis P, et al. Multivariate analysis of landscape wildfire dynamics in a Mediterranean ecosystem of Greece. *Area*, 2007, 39 (3): 392–402.
- [63] Martinez J, Garcia C V, Chuvieco E. Human-caused wildfire risk rating for prevention planning in Spain. *Journal of Environmental Management*, 2009, 90(2): 1241–1252.
- [64] Vasconcelos M J P, Silva S, Tomé M. Spatial prediction of fire ignition probabilities: Comparing logistic regression and neural networks. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 2001, 67(1): 73–81.
- [65] Mbow C, Goita K, Benie G. Spectral indices and fire behavior simulation for fire risk assessment in savanna ecosystems. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 91 (1): 1–13.
- [66] Carmel Y, Paz b S, Jahashan F, et al. Assessing fire risk using Monte Carlo simulations of fire spread. *Forest Ecology and Management*, 2009, 257(1): 370–377.
- [67] Tong Z, Zhang J, Liu X. GIS-based risk assessment of grassland fire disaster in western Jilin province, China. *Stoch Environ Res Risk Assess*, 2009, 23(4): 463–471.
- [68] Chuvieco E, Aguadoa I, Yebra M, et al. Development of a framework for fire risk assessment using remote sensing and geographic information system technologies. *Ecological Modelling*, 2009, 221(1): 46–58.

The Research Advances of Wildfire Spreading and Wildfire Risk Assessment

GUO Zhixing^{1,2,3}, ZHONG Xingchun^{1,2,3}, FANG Weihua^{1,2,3}, CAO Xin^{1,2,3}, LIN Wei⁴

(1. State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resources Ecology (Beijing Normal University), Beijing 100875, China;

2. Key Laboratory of Environmental Change and Natural Disaster, Ministry of Education of China, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 3. Academy of Disaster Reduction and Emergency Management, Ministry of Civil Affairs & Ministry of Education, the People's Republic of China, Beijing 100875, China;

4. College of Resources Science & Technology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: Wildfire disasters have brought serious impacts on regional ecosystem and global climate system. The researches on wildfire risk assessment and fire spreading have positive effect on fire prevention. In this paper, the latest research status and trends of fuel type models, approaches of mapping fuel, wildfire spreading models, computer simulation techniques about wildfire spreading, and wildfire risk assessment were reviewed. Firstly, it is concluded that better fuel models should be developed to supply effective data for the research on regional or global fire risk assessment and fire spread, based on remote sensing information and situ data. Secondly, the geo-spatial information technology and computer technology give solutions to massive data calculation of fire simulation, to establish monitoring system and network information system of real-time, dynamic simulation on fire behavior. Thirdly, wildfire risk assessment is conducted based on disaster system theory, subsequent to the evaluation of hazard factors and vulnerability of burned regions by fuel models and spreading models. Fourthly, integrated, practical, multi-dimensional and standardized wildfire spreading model and decision support system as well as a national fire danger rating system, should be developed in China, to provide a scientific basis for wildfire disaster prevention.

Key words: wildfire; spread model; fuel; simulation technique; risk assessment

本文引用格式:

国志兴, 钟兴春, 方伟华, 等. 野火蔓延灾害风险评估研究进展. *地理科学进展*, 2010, 29(7): 778–788.