澳大利亚森林火灾风险相关研究进展及其启示

State-of-the-art of Australian Bushfire Risk Researches and Its Enlightenment

邹志翀 冷红

Zou Zhichong, Leng Hong

摘要: 自然灾害是生态系统的原生组成部分, 当它与城市系统发生冲突时会产生巨大的破坏作用。适应性的城市规划能够基于对灾害规律本质的认知, 避免或有效降低灾害的冲击, 进而减少灾害风险并保障生命财产安全。澳大利亚的森林火灾有其独特的发生、发展、蔓延和演化的规律。澳大利亚的森林火灾研究和其他相关学科的长足发展为其森林火灾适应性城市规划研究奠定了必要的理论基础。本文主要对不同学科在澳大利亚森林火灾规律、城市火灾风险和社区火灾脆弱性的相关研究现状进行归纳分析, 并简要介绍现行的澳大利亚首都森林火灾适应性城市规划中的火灾保障区和火灾缓冲区的设置方法。澳大利亚多学科交叉的火灾相关研究促进了其灾害适应性城市规划的发展, 其中的宝贵经验和科学做法对发展中国的城市规划有一定的借鉴意义。

Abstract: Natural disasters originally belong to the ecosystem, which usually bring losses due to their inevitable conflicts with urban systems. Adaptive urban planning is based on essential understanding of disaster principles. Adaptive plans can reduce disasters risk and protect lives, properties and livelihoods by avoiding or diminishing the conflicts between natural disasters and urban systems. Australian bushfires are unique in their special characteristics of occurrence, propagation and interactivities with human systems. Relative researches on bushfires and related disciplines provide a necessary theoretical foundation for Australian bushfire adaptive urban planning studies. This paper introduces the state-of-the-art of researches on Australian bushfire laws, urban bushfire risk, and community bushfire vulnerability. The present Australian Capital Territory Bushfire Adaptive plans and the settings of bushfire prone zones, fire management zones and bushfire abatement zones in specific spatial plans are briefly introduced. Multidisciplinary development of Australian bushfire science benefits its adaptive urban planning to bushfires, which is significantly a positive learning example to promote urban planning in China.

关键词: 澳大利亚森林火灾; 自然灾害风险; 灾害风险脆弱性;

火灾缓冲区设置

Keywords: Australian Bushfires; Natural Disasters Risk; Disaster Risk Vulnerability; Fire Abatement Zone

村镇区域自然灾害综合风险评估与灾变环境模拟关键技术研究
(2014BAL05B0601), 2015 年度黑龙江省留学回国人员择优资助

作者: 邹志翀, 哈尔滨工业大学建筑学院, 副教授, 硕士生导师。

zouzichong@sina.com

冷红, 哈尔滨工业大学建筑学院, 教授, 博士生导师。hitlaura@126.com

引言

森林火灾 (Bushfire) 是澳大利亚自然生态系统的重要组成部分。每年火灾都会烧掉几千万公顷的灌木、草地和森林^[1]。对于生活在城市郊区的居民来说, 森林火灾带来的危险是不可避免的, 经常造成房屋损坏、财产损失和人员伤亡^[2,3]。1939 年以来, 澳大利亚森林大火烧毁了超过 11 000 间房屋, 值得关注的是, 超过 60% 的损失是由几起特大火灾造成的^[4]。

森林火灾能否蔓延到城区范围受多种因素的制约, 包括火灾烈度、城市边界的属性、人员与火灾的互动关系以及城区环境状况^[5]。澳大利亚森林火灾对社区安全的影响极大, 社区火灾风险呈不均匀分布, 地处城市边缘的社区火灾安全问题异常突出^[6,7]。虽然离森林和草场比较近的社区火灾风险通常较高, 但是距离并非是火灾风险的唯一变量。事实证明, 热量传递和悬浮在空中燃烧着的碎屑也能够导致建筑物起火^[8,9]。建筑物及其环境因素 (如: 建筑自身结构、建筑物内的物品、防火护栏、临近建筑特征、周边植物分布等) 对火灾在城区内的蔓延起关键作用^[10]。

受到气候变化的影响, 澳大利亚森林火灾对城市系统和城市边缘社区安全的影响呈明显上升的态势^[11]。澳大利亚城市中面临森林火灾威胁的建筑物平均比例从 11% (20 世纪 90 年代) 上升到 17% (2010 年)^[12]。根据对澳大利亚“风险先驱”的 PerilAUS 数据库中建筑物损坏状况数据的分析, 多数的房屋烧毁于为数不多的几起极端事件, 比如 2003 年的堪培拉大火灾。城市边缘的建筑物随机火灾损毁关联度 (在忽视地形、地表覆盖物及火灾蔓延路径的情况下, 特定区域内的建筑物受到火灾蔓延影响而受到任何程度损毁的关联

程度)为1:3 000^[2];假设建筑的火灾生存概率为40%,则房屋的烧毁概率大概在1:5 000^[3]。结合社区自身的地理条件、社区状况、天气情况、火灾对策、人员互动等具体属性特征,火灾风险的空间分布呈现显著的差异性。

鉴于澳大利亚火灾的独特性,明确其发生、发展、蔓延、传播的规律是准确计算火灾风险的基础。在火灾风险暴露性无法改善的情况下,社区脆弱性是决定灾害损失的关键。本文内容组织如下:(1)介绍当前澳大利亚森林火灾规律研究、火灾风险研究和社区火灾脆弱性研究的主要进展;(2)以首都特区的火灾风险缓冲区设置为例说明澳大利亚森林火灾及其风险相关研究在灾害适应性城市规划中的应用;(3)从遵循客观规律、谋求多学科共同促进城市规划科学发展和重视地域化参数在专项规划研究中的作用三个方面说明澳大利亚森林火灾适应性城市规划对中国城市规划工作的借鉴意义。

1 澳大利亚森林火灾规律及其风险相关研究

1.1 森林火灾规律相关研究

当前的澳大利亚森林火灾及其风险研究基础是由多个学科共同奠定的^[13]。理解火灾的发生、发展和蔓延的客观规律是评估火灾风险、制定防火规范、组织防灾演练、指挥应急救援以及灾后重建恢复等防灾减灾工作的必要基础。自然事件(如闪电)、意外事故和人为因素均能引发森林大火并蔓延成灾。但澳大利亚联邦犯罪调查局发布的数据显示,澳大利亚至少有60%的森林火灾是人为蓄意破坏行为引发的^[14]。

切尼(Cheney)通过研究不同地表燃料的火焰特性及其能量释放将澳大利亚的森林火灾进行了分类^[15]。火头过后,火焰的直接接触和热辐射只是部分建筑物起火的原因,更多的房屋是被随风飘送的燃烧碎屑所引燃的;并且这种现象可以发生于火头到达之前、建筑过火过程中以及火头经过后^[16]。燃屑的这种长效引燃机制能够导致大范围的建筑物起火。通过对比分析发生在澳大利亚不同区域的森林火灾,麦克昂尼等(McAneney et al.)指出建筑物损毁分布是地表风环境(风向与风速)和火灾传播方向与可燃物最小距离的函数^[2]。在2003年堪培拉火灾中,渡菲区(Duffy)被损毁的建筑物间隔在40 m以上,这意味着传播火灾的主要因素是燃屑而不是火焰的直接接触和热辐射。这是在最远影响范围内房屋的损失呈连续分布的最主要原因。在渡菲区案例中,平均的植被—植被火灾传播距离是850 m,最远可达1 100 m,如图1a所示;建筑物的平均损毁率与距离基本呈线性分布,由燃屑导致的建筑物损毁最远可达400 m,如图1b所示^[2]。燃屑的性质和数量、建筑物的结构和构造、天气状况和环境特征是建筑物起火的主要因素,如图2所示。

图1 2003年堪培拉大火中渡菲区灾前与灾后植被分布对比
资料来源:参考文献[2]

图2 建筑物起火机制中的决定要素

资料来源:作者绘制

对火灾热辐射的预测是确定火灾安全区域的前提条件，对抢险、救援、疏散等工作有重要意义。安全区域的时空分布与火灾的蔓延过程密切相关。通过对不同燃料燃烧时辐射的热能评价，能够界定出热辐射量临界值及其后果如表 1；根据表 1 中的临界值计算出火灾对于人员和建筑物的安全距离如表 2^[17]。

天气状况对建筑物起火及火灾在城区内蔓延起着至关重要的作用。火灾造成的建筑物损失和成灾面积与极端天气条件（如同时出现强风和干旱）密切相关。降雨减少、空气湿度低和地表水分饱有率低同时出现会造成地表植被干枯和建筑构件干燥。这样的天气状况对防火和救火都非常不利^[18]。

1.2 火灾风险相关研究

热量不是森林火灾带来的唯一危险。火灾烟雾携带大量的有机毒物和无机毒物，能够大范围地威胁人畜健康，有时甚至是致死的重要因素。雷森等人（Reisen et al.）的研究中提供了一种切实可行的评价方法，评估了全澳大利亚境内各种森林植被燃烧产生的烟雾毒素等级^[19]。库克（Cook）通过烟室实验的方法评价了不同等级的森林火灾毒气对人类健康的影响^[20]。科尔比和吉尔克里斯特（Kolbe & Gilchrist）基于对 2003 年新南威尔士州火灾时连续 38 天（PM10 超过 415 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ）的空气数据分析，评价出火灾烟雾对健康的实际影响。研究证实了 70% 的火灾幸存者会出现至少一项与火灾烟雾吸入有关的健康问题，对应其研究区域范围，相当于 30 500 人受到影响^[21]。

针对森林火灾风险，布拉兹托克（Bradstock）早在 1998 年就提出了应用历史天气记录来预测城市边缘地带火灾风险的方法^[8]。随后他提出的地形指标和植被分布指标被多个森林火险指标体系所引用^[22,24]。比较经典的澳大利亚森林火险

指标体系包括 FFDI^[25]、GFDI4^[26]、GFDI5^[27] 和 FFWI^[28-30]。这四个指标体系所描述的森林火灾风险指数均是气温和风速的增函数，是相对湿度的减函数。在这三个变量中，风速对森林火险的影响最大。除了 FFWI 将风速描述为线性关系外，其他三个指标体系均将风速描述为指数关系。2009 年沙普尔斯等人（Sharples et al.）考虑到发生森林火险的临界风速与实际风速的关系，倡导实用性的同时提出了简单有效的 F 指标体系，简化了经典指标体系中对不同风速条件的描述^[31]。通过在澳大利亚和美国的实证研究，F 体系的准确性能够与经典的 FFDI 体系在某些特定情况下相当。

地理信息的应用为澳大利亚森林火灾的预防、应对与适应性规划提供了可靠的支持^[9]。阿特金森（Atkinson）应用地理信息系统（GIS），以气候、可燃物和地形等数据作为变量，对澳大利亚霍巴特和塔斯马尼亚的森林火灾起火和蔓延与火灾风险的关系作了量化分析^[32]。D-R（distance-from Road）起火—蔓延概率模型是在历史数据分析的基础上改进的 Olson 模型（1967 年），能够针对不同地表可燃物建模^[33]。

2003 年希尔兹和托尔赫斯特（Shields & Tolhurst）在森林火灾风险框架下开发了基于栅格运算的火灾蔓延时空关系算法，并对火灾在城市边界的蔓延进行了模拟^[34]。2003 年陈姓学者等人（Chen et al.）开发了基于 GIS 的森林火灾风险评估系统，整合了数据融合、风险评估和实时决策支持等功能^[35]。2009 年洛厄尔等人（Lowell et al.）根据地表复杂程度采用非监督分类方法对 SPOT 卫星影像进行 6~10 个类别的划分，并针对坡度、坡向、植被分布等地理变量建模评估维多利亚州森林火灾对城市环境的威胁^[22]。为了考虑天气因

表 2 人员及建筑物的火灾安全距离

燃料类型	安全距离 / m	
	对人	对建筑物
短草场（1 英尺）	15	9
积叶层（草和落叶）	37	24
长草场（2.5 英尺）	35	23
树丛	43	28
灌木丛	35	23
密树丛	32	21
南澳密树丛	32	21
树林	10	6
硬木林	32	21
有积叶层的树林	37	24
稀疏森林	35	23
中等密度森林	41	27
高密度森林	44	30

资料来源：参考文献 [17]

表 1 热辐射量临界值及其后果

热辐射 / kW/m^2	后果
1.40	对人无害
1.70	引起疼痛的最小值
2.10	暴露 60 秒引起疼痛的最小值
4.00	引起 1 度烧伤的最小值
4.70	暴露 30 秒后 2 度烧伤
7.00	保障救火员安全的最大值
10.00	多聚合物被引燃
11.70	无抗火防护的轻型钢材出现热疲劳
12.60	引燃树林
25.00	有抗火防护的轻型钢材出现热疲劳
37.50	消防设备损毁、建筑结构坍塌

资料来源：参考文献 [17]

素的影响,该研究采用FFDI森林火灾危险指标体系中的温度、风速和相对湿度作为关键变量;并应用1982—2006年间的卫星数据通过对比火灾前后森林植被覆盖的变化对模型有效性进行了校验。

2009年2月7日澳大利亚维多利亚州爆发了“黑色星期六”森林大火。在大火持续的35天里,共爆发了300余起大型火灾、1000余起中小型火灾,共造成173人死亡,414人受伤,影响范围超过了维多利亚州面积的一半。波茨等人(Potts et al.)在对2009年“黑色星期六”灾后恢复工作整理的基础上,着重强调了地理信息科学在森林火灾风险评估中起到的关键作用^[9]。

澳大利亚的森林火灾适应性城市规划的发展进程是曲折的。厄洛安托巴(Oloruntoba)通过实证分析,应用2009年维多利亚州森林大火的数据验证了巴里·特纳(Barry Turner)早在1976年提出的概念模型,印证了人类活动和城市空间规划与森林火灾在城市边缘蔓延的互动规律:鉴于人类活动和自然灾害的双重复杂性,城市空间规划方案对未来发生在城市边缘活动(现象)的预测存在不可避免的不确定性^[36]。将近两百年的森林火灾历史记录表明这种不确定性会将城市发展导入误区,直到火灾以人们最不愿意接受的方式将其纠正^[37]。

1.3 社区火灾风险脆弱性相关研究

社区的安全、脆弱性和灾害风险的相关研究以保障居民生命财产安全为目标,它们是澳大利亚森林火灾研究中不可或缺的重要组成部分。在过去的50年里,澳大利亚公共安全与应急管理部门在一次次“烈火考验”下逐渐发展完善。灾害爆发时,越来越多的居民和社区以身家性命相托,期盼得到安全的疏散和妥善的安排。虽然全澳大利亚的社区和居民的抗灾能力不断增强,但是剧烈的气候变化和频发的森林火灾仍然是社区安全最严重的威胁之一^[38]。

生活在森林火灾频发区域的社区居民依靠经验对火灾规律及灾害风险控制逐渐有所认知。社区倡导在保障人员安全的前提下,居民通过清除建筑物及其周边的可燃物数量来控制火灾风险。但是相比于快速的火灾蔓延速度和火灾传播的距离,这种互动效果甚微^[16]。

为了有效增强社区对自然灾害的抵抗能力,2004年澳大利亚地质科学院对全澳大利亚所有社区的自然灾害风险的社会脆弱性进行了综合评估^[5]。该评估侧重于从社会属性层面对社区的灾害风险脆弱性进行评价,并揭示了社会脆弱性在社区灾害风险管理和控制中所起到的重要作用。这次评估同时满足了社区自然灾害风险建模和社区风险调查的双向需求。评估所采用的方法能够体现以家庭为单位,每个成员受

到自然灾害影响时的社会脆弱性。

麦吉(McGee)对比分析了澳大利亚、加拿大和美国的社区防火演练计划,指出居民出于保护自身生命财产安全的考虑会非常积极地参与火灾自救知识的学习,并参与互救训练和防火演练。尤其是亲身经历过火灾的幸存者,他们有很强烈的意愿帮助社区降低火灾风险^[39]。

哈里斯等人(Harris et al.)应用探索性分析方法对1939—2009年间的79起澳大利亚森林火灾在城区蔓延情况和所造成的社区损失进行了统计;并在此基础上构建了以燃料等级、火灾规模和传播速度作为变量的火灾损失预测模型^[40]。陈开平(Kaiping Chen)通过对2003年堪培拉大火火灾损失最大的渡菲区在灾前和灾后的卫星图像作分析(QuickBird影像和IKONOS-2影像),揭示了火灾从植被蔓延到社区的内在规律:在火灾从野外向社区边缘蔓延的过程中,植被是最主要的接触性火媒;火灾向社区的蔓延渗透程度受温度、湿度、风力和风向等气象条件的影响显著;建筑物烧毁的可能性与其距离火灾蔓延方向上的城乡边界的距离基本呈线性负相关^[41]。

基于地理信息科学的脆弱性评估能够表达地域化信息与灾害风险关联,进而可以成为直接指导实际防灾减灾工作的工具^[42]。鉴于其高维度信息融合能力、精准位置信息表达和可操作性等优点,政府和公众对基于地理信息科学的灾害风险地理空间脆弱性评价结果有迫切的需求。

斯兰加奇等人(Solangaarachchi et al.)应用澳大利亚国家统计局(ABS: Australian Bureau of Statistics)提供的2006年社区层级人口普查(CCD: Census Collection District)数据对悉尼市区及周边社区的森林火灾风险社会脆弱性进行评价,并指出不同社区由于其地理位置所产生的灾害风险脆弱性与社会脆弱性存在关联^[7]。巴克斯顿等人(Buxton et al.)验证了墨尔本城市边界社区的森林火灾风险脆弱性,并通过讨论局部人口集中与火灾风险脆弱性关系,阐述了常规土地利用规划在面临灾害威胁时所体现出的缺陷与错误^[6]。常规土地利用规划通常是一种期望性规划(anticipatory planning),它基于对历史和当前状况的预测,推断人类社会及其所处的自然系统存在复杂的非线性变化和互动关系。由于这种复杂的变化和互动关系,不可逆转的本质变化可能会突然发生在建成环境或是自然系统中,这些变化是常规土地利用规划中不确定性的根源,也是其在面临灾害威胁时所体现出的缺陷与错误的根本原因^[6,43]。

社区地理空间脆弱度评价能够为防灾减灾带来切实的好处。其突出的优点是能够将顶层的防灾决策和底层的切实需求结合到一起。除了官方主导的社区灾害风险脆弱性研究外,社区火灾安全的长足进步还得益于众多相关研究的贡献,其

中包括社区火灾行为研究、建筑起火—蔓延规律研究、火灾风险要素分析与定量评价研究以及相关的医学研究。

2 首都特区的森林火灾适应性城市规划

2.1 首都特区森林火灾适应性规划策略框架

澳大利亚首都特区 (ACT: Australian Capital Territory) 是典型的森林火灾高危内陆地区, 在应对森林火灾威胁时有其先天的脆弱性^[44]。

澳大利亚首都特区土地利用与规划管理局采用 AECOM Australia 的评估方案, 评价堪培拉地区应对气候变化的脆弱性^[45]。AECOM 模型给出了 2012—2050 年最可能出现两种气温变化假设。两种假设结果都将导致堪培拉地区面临极端高温、森林大火、暴雨和干旱等四种灾害的暴露度增加、敏感性增加, 并导致整体适应性降低。

首都特区的森林火灾风险对气候变化异常的敏感。如果首都特区未来气候变化朝着更干更热的方向发展, 则森林火灾的风险将会明显升高。为了减少未来森林火灾对城市区域的威胁, 从 2004 年起首都特区政府推行《ACT 战略性森林火灾管理规划》(ACT Strategic Bushfire Management Plan)。为了使得管理规划能够切实指导实际工作, 首都特区政府规定《管理规划》的更新周期不得超过五年。2014 年出台的最新版 (第三版) 的《管理规划》中明确要求首都特区的森林火灾适应性城市规划必须建立在森林火灾风险评估的基础上^[46]。

首都特区森林火灾风险评估包括对火灾暴露度 (exposure to bushfire)、敏感性 (sensitivity to bushfire) 和脆弱性 (bushfire vulnerability) 等三个方面的评价。森林火灾适应性城市规划主要是根据风险评估的结果划定森林火灾易发

区 (Bushfire Prone Zones)、火灾管理区 (Fire Management Zones)、森林火灾缓冲区 (Bushfire Abatement Zones) 以及政府用地管控^[46]。

2.2 首都特区空间规划中的森林火灾风险评估

根据 2005 年澳大利亚联邦科学与工业研究组织 (CSIRO) 公布的报告《气候变化对澳大利亚东南地区火灾易发天气出现的影响》(Climate Change Impacts on Fire-weather in South-east Australia)^[47], 使用气候变化模型 CCAM-Mark2 进行预测 (表 3), 在未来 40 年, 每年森林火险指标体系中气象指标达到“极度危险”的天数会从 23 天上升到 36 天 (2050 年)。

根据 CSIRO 的预测, 首都特区整体的森林火灾风险暴露度将会有显著的大幅度升高。首都特区土地利用与规划管理局根据上述预测, 以草地火灾风险指数 (Grassland Fire Danger Index)、森林火灾风险指数 (Forest Fire Danger Index)、火灾燃料荷载 (Fuel Load) 和起火可能性 (Likelihood of Ignition) 为主要指标计算得到首都特区森林火灾风险暴露度如图 3 所示; 以森林火险强度 (Bushfire Risk Intensity)、当前应急救助点状况 (First Aid Stations) 和消防设施密度 (Density of the Hydrants) 为主要指标计算得到首都特区森林火灾风险敏感性如图 4 所示; 以及综合考虑环境因素、人口因素和社区文化因素的火灾脆弱性如图 5 所示^[48]。

表 3 两种情景下 2020 年和 2050 年出现火灾“极度危险”的天数

		CCAM-Mark 2			
首都 特区	当前情况	2020 低	2020 高	2050 低	2050 高
	23	26	28	28	36

资料来源: 参考文献 [47]

图 3 首都特区空间规划评估——森林火灾暴露度
资料来源: 参考文献 [48]

图 4 首都特区空间规划评估——森林火灾敏感性
资料来源: 参考文献 [48]

图 5 首都特区空间规划评估——森林火灾脆弱性
资料来源: 参考文献 [48]

2.3 首都特区森林火灾适应性规划中的空间管控

2003 堪培拉大火灾后，澳大利亚“抵抗自然灾害的影响”上升到了“国家安全”的高度。该理念在大灾之后深入人心，并且得到全国各界的积极响应^[49]。在以“防灾减灾”为首要任务的指导下，2004 版首都特区规划包括经济发展规划、社会发展规划和空间规划三个组成部分。其中空间规划部分以减小森林火灾暴露度为目的，大幅度削减了首都特区西侧的城市边界长度。与之配套的经济发展规划和社会发展规划也作出相应的调整。但由于该版空间规划的准备比较仓促，缺乏与之对应的森林火灾风险评估议案，因此空间规划中仅提出了火灾缓冲区的设置原则和基于历史森林火灾数据分析的粗略位置建议^[50]。

2009 年 2 月 7 日爆发的“黑色星期六”大火使澳大利亚政府认识到规划方案中的“不确定性”是防灾的最大障碍。这种不确定性是由自然系统和人类社会互动的复杂性所决定的，是预测性规划方案不可避免的弊端。学术界呼吁以“减小灾害风险”为目标的规划方案应该从“防灾减灾”能力建设转为“灾害适应性”能力建设，强调以尊重自然规律的方式减少人类社会与自然系统的冲突^[13]。

2009 年 3 月 2 日澳大利亚国会通过特别法案，责成各级政府和规划管理部门将有利于应对突发事件和自然灾害的规划优先权提升至最高级别^[49]。随着规划重心的转移，2010 年澳大利亚政府主导了新一轮的全澳森林火灾风险评估工作，并提出在社区层面实行火灾识别（Recognition of Bushfires）、降低风险（Risk Modification）、防灾备灾（Readiness）、积极响应（Response）、灾后恢复（Recovery）的 5R 战略，将以往的“专家防灾”转为“人人防灾”^[51]。为了尽量减少人工环境和自然系统的冲突，在空间规划和布局上也遵循“风险评价先行”的原则^[46]。

根据《2014 ACT 战略性森林火灾管理规划》，首都特区土地利用与规划管理局将首都特区森林火灾适应性规划中的空间管控区域细分为：森林火灾易发区、火灾管理区、森林火灾缓冲区，其逻辑关系如图 6 所示。

图 6 首都特区森林火灾适应性规划中的易发区、管理区和缓冲区的逻辑关系

资料来源：参考文献 [46]

2.3.1 森林火灾易发区

首都特区森林火灾适应性规划空间管控中的火灾易发区是基于森林火灾风险评估划定的。划定时主要考虑了针对生命财产安全的高风险城市区域。首都特区的城市边界紧邻森林和草场，因此森林火灾易发区的划定包括了建成区和部分城市边界区域，例如 Cook 社区和 Aranda 社区的火灾易发区如图 7 所示^[46]。

2.3.2 森林火灾管理区

在划定的火灾易发区中根据地表可燃物的覆盖状况划定火灾管理区。这些区域在火灾的发生、发展和传播过程中起着推波助澜的作用。由于这些区域多数与建成区紧密相连或穿插在建成区中，一旦发生火灾会极大威胁生命财产安全，因此需要人为的干预和管理。在空间管理上这些区域比其他的区域有优先使用消防资源的权利。鉴于资产所属权的关系，该区域的消防权责如图 8 所示^[46]。

图 7 首都特区森林火灾适应性规划空间管控——火灾易发区（Cook 和 Aranda 社区）

资料来源：参考文献 [46]

- 内部资产保护区
- 外部资产保护区
- 战略消防优先区
- 景观火灾管理区
- 农业火灾管理区
- 联合管理区

图 8 首都特区森林火灾适应性规划空间管控——火灾管理区

资料来源：参考文献 [46]

2.3.3 火灾缓冲区

在经历了 2003 堪培拉森林大火之后，首都特区土地利用与规划管理局收到多方需求和建议，要求堪培拉未来的城市规划必须以响应自然灾害影响为首要任务，必须制定防御森林火灾规划的原则和标准、划定森林火灾安全保障区和森林火灾缓冲区。堪培拉城市空间规划中的火灾风险缓冲区的设置如图 9 所示^[48]。基于当前的相关研究，现行的火灾缓冲区通常设置在城市外围，通过减少地表可燃物数量的方法控制森林火灾在城区蔓延的风险。

目前依据首都特区总体设计规范要求，堪培拉城市及其周边的任何土地开发活动必须首先进行综合自然风险评估，任何住宅区的开发必须首先完善火灾保障区和火灾风险缓冲区的设计。如果新开发土地的防火设计不达标或与现行城市防灾方案有冲突，则新地块的开发不能通过审批。

在减少预测性方案中的“不确定性”影响方面，澳大利亚采用了“风险评估先行”和加强社区“灾害适应性”能力建设的规划策略。不可否认，这种策略对于处理当前澳大利亚社会发展与自然灾害矛盾中的最主要冲突是行之有效的。但是作为当前城市防灾规划的前提，自然灾害风险评估的精度和准确性都有待进一步提高。而且目前澳大利亚的自然灾害风险评估工作都是基于当前状况或历史状况的评价，针对

未来灾害风险的预测能力还有待加强。社区“灾害适应性”建设的内涵应更多地侧重于“以人为本”的思想，对人员的培训、教育、演练和心理帮助也是防灾规划中必要的方面。对于自然灾害风险极高的社区，应该主要考虑空间收缩、人员撤离或是整体迁移，以有效规避自然灾害事件对人类社会系统的冲击。

3 对中国的启示

虽然大规模城市火灾的爆发在中国比较罕见，但是仍然有两种已知的自然灾害可以引发这样的城市灾难，即地震和森林大火^[52]。鉴于中国的城市发展与环境状况的特殊性，中国学者对地震导致的大规模城市火灾蔓延模型的研究比较多，且受日本相关研究的影响比较大。鉴于国情特点，中国的森林火灾研究侧重于森林安全与生产，鲜有研究涉及森林火灾对城市系统的冲击和影响。

中国早期的城市火灾蔓延模型，是在简化的城市模型基础上构建的概率模型。黄维章在简化城市布局的基础上，为满足统计性和准确性的要求，将城市分割成大小相等的 1/2 英里见方的小块，基于热辐射的火灾蔓延概率，仅使用考虑建筑物距离作为唯一变量推导出火灾由一幢已燃建筑向周围建筑物蔓延的数学期望^[53]。赵振东以建筑物的地震破坏状态、可燃物盛容装置的破坏、燃料溢出、电器火花等火灾因素为主要变量，提出与建筑结构地震破坏状态相关的次生火灾发生和蔓延的危险性概率模型^[54]。

2003 年日本学者樋本圭佑（Himoto Keisuke）基于地震后建筑物火灾的物理传播过程，构建了经典的震后城市火灾物理蔓延模型^[55,56]，该模型被广泛采用以模拟震后火灾对城市的破坏状况。为了适应中国城市建筑物火灾蔓延的规律，中国学者赵思健对樋本模型进行简化，并构建了包括建筑物内部火灾蔓延和建筑间火灾蔓延两部分的地震后城市火灾蔓延模型^[57,58]。

随着空间信息技术的快速发展和广泛应用，GIS 在中国城市火灾蔓延模型研究中得到大量应用。许建东基于经典概率模型在 ArcGIS 平台上构建了震后城市火灾蔓延模拟模型。该模拟模型结合福州市具体情况，考虑了燃料的表现密度、防火墙设计和气候环境等因素^[59]。谢旭阳简化了阻止和促进震后火灾蔓延的因素，在对建筑物分类分级的基础上，基于 GIS 对地震次生火灾蔓延范围进行了模拟研究^[60]。国艳分析地震次生火灾成因后，以经典的火灾蔓延速度模型为基础，在 MapX 上开发了城市地震火灾蔓延模拟算法，并以鞍山市为例进行了城市火灾模拟研究^[61]。王碧君基于现有理论构建了以城市住区为例的地震次生火灾元胞自动机蔓延模型，并在 StarLogo 上进行模拟，其优点是模型简单、计算量小，缺

图 9 堪培拉城市空间规划中火灾风险缓冲区设置
资料来源：参考文献^[48]

点是考虑的因素不足,准确性有待评价^[62]。基于城市火灾过程的蔓延模型对气象条件、地形条件、地表附着物属性、植被属性、建筑物火灾荷载和防火设计等必要参数的要求比较高。准确的模拟计算一方面依靠先进的模拟算法;另一方面依靠于参数的准确测定,尤其是本地化参数的准确测定。目前中国的相关研究在第二个方面较为薄弱。

中国城市火灾风险研究有两种主流研究方法。第一种研究方法是基于灾害历史数据的统计分析研究方法。这类研究的特点是根据特定区域的火灾历史记录数据,采用包括定性预测、灰色预测、人工神经网络、数理统计、回归分析等方法,对未来火灾发生概率和损失程度(风险)进行预测。刘大鹏在对广州市森林火灾历史数据分析的基础上,提炼了六个与火灾实际损失相关的因子,并采用层次分析法赋予相应的权重,采用多元回归方法构建了火灾损失预测模型^[63]。彭晨通过对日本全国所有城市和部分中国城市的火灾数据分析,发现消防响应第一出动时间和消防战斗时间都符合对数正态分布规律;在第一出动时间下过火面积的发生概率有幂函数关系;平均过火面积和平均经济损失与第一出动时间和消防战斗时间有相关关系^[64]。张诚对中国某市1997—2007年的月度火灾及气象数目进行了Box-Cox变换,通过对变换后的月度平均温度、平均相对湿度、平均风速、平均降雨量等气象因子与火灾发生起数进行分析,构建了基于Box-Cox变换的线性回归模型^[65]。李炳华采用因子分析法从13个常用的火灾统计指标中构建了火灾后果总量、火灾发生率、平均经济损失和平均死亡人数等四个公因子来表征城市火灾风险^[66]。王健对城市消防站火灾记录数据进行时间序列分析,发现武汉市火灾发生具有明显的时间标度特征^[67]。王健通过对比北京、天津和合肥的城市消防站火灾记录的时空分布特征,讨论中国典型的快速城市化进程对城市火灾风险的影响^[68]。这类研究最主要的弊端在于采用历史火灾数据作为研究的基础,分析所得到的特征模型能够很好地反映过去城市火灾的状况。但是随着气候变化和城市扩张,用过去的规律预测未来的状况将会出现较大的偏差。

第二种中国城市火灾风险研究方法是指标法,即针对某一区域(城市)建立一套火灾风险评价指标体系,并确立体系中各级指标的权重,然后根据评价区域内的实际情况逐项打分,最终通过得分高低判定火灾风险的程度。这类方法所得到的风险是一个相对概念,可以是一个风险等级范畴,也可以是一定范围内的数值。郑双忠从全社会抵抗火灾的角度出发,根据火灾风险的特征以及火灾危险源类别区分,在专家咨询和故障树分析的基础上,采用主成份分析法提炼了城市火灾风险评价指标^[69]。张一先等人构建了基于城市特征、火灾危险发生源、消防能力和火灾故障处理能力等指标的城

市火灾安全评估方法^[70]。刘梅构建了基于火灾灾情、火灾危险源和风险抵抗能力等三个类别五个等级的火灾风险指标体系,并以北京市为例进行火灾风险的模糊综合评价^[71]。吴晓涛采用模糊层次分析法评价社区火灾应急救援能力^[72]。张昌文等人构建了基于GIS的城市火灾风险区划框架^[73]。席洪林在城市火灾危险源的两级分类基础上,构建了城市火灾综合风险评价指标体系,通过R型分层聚类方法对指标进行了提炼,并采用模糊综合评价方法对中国某市进行了风险评估^[74]。虽然指标法是中国城市火灾风险研究的一种主流研究方法,但是目前少有研究将城市火灾及其影响因素作为一个“城市火灾系统”进行整体考虑。

中国城市火灾研究的另一个聚焦点是事故类火灾的分析、模拟和风险评估。程亮在GIS平台上采用天然气管网火灾模拟和城市火灾蔓延模型对城市天然气管网单点火灾蔓延进行了模拟^[75]。佟淑娇在火灾风险特征分析的基础上,使用CASSTQRA软件对长距离油气运输管线的火灾风险进行了分段半定量化评价^[76]。伍爱友将三角模糊理论融合到传统的故障树方法中用以评价城市事故火灾风险^[77]。纪杰应用计算流体力学中的Large Eddy模拟方法评价了城市隧道火灾的烟囱效应对烟雾扩散的影响^[78]。刘恒亚基于计算流体力学模拟方法评估化工厂火灾风险^[79]。事故火灾作为城市火灾的一个类型,具有较高的研究价值。但是当前的事故火灾风险研究多聚焦于事故风险本身,缺乏火灾事故对城市系统冲击的风险评价,也缺乏从城市空间规划研究视角出发的降低事故类火灾风险的研究方法。

在城市火灾风险脆弱性的研究方面,中国学者也取得了较为突出的研究成果。刘铁民在近年来中国重大火灾事故频发的形势下,提出城市消防要考虑公共系统的脆弱性^[80]。徐波指出城市建设实体易损性、经济易损性和社会易损性三个方面;其中城市建设实体易损性评价主要采用建筑物和生命线系统的灾害可靠性的指标,经济易损性评价主要采用二、三产业结构比重指标,社会易损性评价主要采用人口自然属性、教育程度、收入状况和疾病易感性等指标^[81]。郑荣虎梳理了城市区域火灾脆弱性的概念,分析了火灾风险要素的构成;并讨论了脆弱性控制在抑制火灾风险的形成和防灾减灾中的作用,应用层次分析法构建出城市区域火灾脆弱性评价的指标体系^[82]。张勇以城市脆弱性、消防能力和火灾损失为一级指标,通过层次分析法和灰色关联度模型构建了城市火灾风险指标体系,对海口17个区和1个县进行了火灾风险评估^[83]。当前的城市火灾风险脆弱性研究多集中在概念研究层面,仅采用了半定量的研究方法,缺乏有地域针对性的计算模型和算法模型。

虽然中国城市火灾及其风险研究已经取得了长足的进

步,但是中国幅员辽阔且人口众多,尤其受到全球气候变化的影响,未来20年中国大部分地区的灾害风险暴露度呈现上升趋势^[84]。在如何处理好未来中国城市与灾害风险的问题上,澳大利亚森林火灾适应性规划的经验在一定程度上具有借鉴价值。

3.1 尊重自然生态法则,遵循客观规律

国内外城市规划工作中受到普遍认可的低影响开发(Low Impact Development)即是以理解和尊重自然生态客观规律为前提,倡导人工系统与自然系统的平衡发展。森林火灾是澳大利亚自然生态系统的重要组成部分,其发生、发展和蔓延的客观规律不会以人类的意愿改变。为了解决人类活动与自然灾害的冲突,城市规划的首要任务之一就是在空间上优化布局,减小火灾蔓延到城市区域的可能性。当火灾与城市的冲突在空间上不可避免时,城市规划需要在充分理解并尊重自然生态系统规律的基础上,提供合理的抵抗、规避和疏散方案,以减小灾害的冲击和影响。

3.2 发展强化相关交叉学科,促进城市规划协调发展

澳大利亚火灾适应性规划研究工作成果是基于城市规划师与空间信息科学、环境科学、生物学、物理学、化学、医学、数学、统计学和管理科学等众多领域工作者在火灾和城市研究领域的协调发展。众多相关学科的长足进步为制定和落实可靠的灾害适应性城市规划方案奠定了必要的理论基础。

虽然不同学科的研究角度和采用的研究方法各不相同(比如:城市规划相关研究多采用预测类研究方法,灾害风险研究逐步量化社区脆弱性的影响,环境管理研究提供气候变化与火灾的关系的分析,行政管理研究着重解决城市及区域政策的可行性与合理性的问题,火灾行为学从燃烧全过程检测火灾的物理和化学变化,林业和生态管理部门更关心火灾对生态环境的影响,应急管理学科侧重于研究灾害互动与应急反应效率,工商业界更关注于企业危机应对和组织效率,安全科学研究已经从群体风险研究阶段过渡到个人风险研究阶段等等),但是通过切实可行的方案将众学科的研究成果凝聚在以保障社区安全为核心的城市规划中的做法是值得我们学习并借鉴的。以城市规划为核心引领其他学科共同解决城市问题,是城市规划学科未来发展的重要方向。

3.3 重视地域化参数在专项规划研究中的作用

虽然澳大利亚有完善且详尽的联邦规划法律、法规和标准体系,但是具体的规划项目往往优先采用州政府出台的法规和标准作为规划依据。在防灾、交通和遗产保护等专项规划研究工作上往往“专事专办”,在遵照联邦和州立法律和

法规的基础上,采用由相关学科研究提供的相对前沿的“本地参数”。这样做的好处不仅能够在时间和空间上细化联邦和州立标准的使用,使得规划方案更符合地域性需求;而且在某种程度上能够促进其他学科提供更多的能够服务于城市规划领域的研究成果,吸引更多其他行业专家共同解决城市规划问题。

4 结语

城市规划的首要任务是解决未来的城市矛盾,营造和谐、健康、高效、舒适的人居环境。鉴于城市系统的复杂性及其与其他自然、人工系统的作用与联系,城市矛盾的内涵和外延是非常广泛的。因此城市规划需要在其他众多的自然学科、社会学科、人文艺术学科所共同奠定的基础上平衡人口与用地的矛盾、时间与空间的矛盾、资源与效用的矛盾、发展与环境的矛盾。

本文综述了当前澳大利亚城市规划及相关学科在森林火灾适应性规划研究方面所取得的进展。森林火灾作为澳洲大陆生态系统的重要组成部分,其发生、发展、蔓延和演化具有独特规律。充分理解并尊重灾害规律是澳大利亚适应性城市规划的基础。火灾规律研究和其他相关学科的长足发展为澳大利亚的火灾适应性城市规划研究奠定了必要的理论基础。作为适应性城市规划的代表,堪培拉的社区规划充分考虑了火灾风险及社区灾害脆弱性的空间分布。其整体城市规划通过火灾风险缓冲区的设置,降低森林火灾蔓延到城市区域的可能性。

受未来气候变化的影响,中国城市自然灾害暴露性将会有所增加。如何在灾害风险增加的情况下,解决未来的城市矛盾,澳大利亚灾害适应性城市规划的经验值得我们学习和借鉴。道法自然,充分理解并遵循自然生态系统的客观规律是适应性城市规划的基础。恰当地将地域化参数引入相应的专项规划研究中不仅能够解决国家标准在时间和空间上过于宽泛的问题,而且能够吸引更多其他行业专家共同解决城市规划研究中的核心问题。以城市规划为核心,倡导并引领其他相关学科共同解决日益突出的城市问题是未来城市规划研究发展的方向。**UPI**

参考文献

- [1] Wikipedia. Bushfires in Australia[EB/OL]. (2017-08-06)[2017-08-15]. https://en.wikipedia.org/wiki/Bushfires_in_Australia
- [2] MCANENEY J, CHEN K, CROMPTON R, et al. Australian bushfire losses: past, present and future[C]. The 4th International Conference on Wildfire, 2007: 13-17.
- [3] MCANENEY J, CHEN K, PITMAN A. 100-Years of Australian bushfire property losses: is the risk significant and is it increasing?[J]. Journal of Environmental Management, 2009, 90(8): 19-22.

- [4] BLANCHI R, LUCAS C, LEONARD J, et al. Meteorological conditions and wildfire-related house loss in Australia[J]. *International Journal of Wildland Fire*, 2010(19): 914-926.
- [5] DWYER A, ZOPPOU C, NIELSEN O, et al. Quantifying Social Vulnerability: A Methodology for Identifying Those at Risk to Natural Hazards[R]. Commonwealth of Australia, 2004.
- [6] BUXTON M, HAYNES R, MERCER D, et al. Vulnerability to bushfire risk at Melbourne's urban fringe: the failure of regulatory land use planning[J]. *Geography Research*, 2011, 49(1): 1-12.
- [7] SOLANGAARACHCHI D, GRIFFIN A L, DOHERTY M D. Social vulnerability in the context of bushfire risk at the urban-bush interface in Sydney: a case study of the Blue Mountains and Ku-ring-gai local council areas[J]. *Natural Hazards*, 2012, 64(2): 1873-1898.
- [8] BRADSTOCK R A, GILL A M, KENNY B J, et al. Bushfire risk at the urban interface estimated from historical weather records: consequences for the use of prescribed fire in the Sydney Region of south-eastern Australia[J]. *Journal of Environmental Management*, 1998, 52(1): 259-271.
- [9] POTTS K E, BENNETT R M, RAJABIFARD A. Spatially enabled bushfire recovery[J]. *GeoJournal*, 2013, 78(1): 151-163.
- [10] BLANCHI R, LEONARD J. Property safety[M] // *Community Bushfire Safety*. CSIRO Publishing, 2008: 77.
- [11] HAMMER R B, RADELOFF V C, FRIED J S, et al. Wildland-urban interface housing growth during the 1990s in California, Oregon, and Washington[J]. *International Journal of Wildland Fire*, 2007, 16(3): 255-265.
- [12] ROSSI J L, SIMEONI A, MORETTI B, et al. An analytical model based on radiative heating for the determination of safety distances for wildland fires[J]. *Fire Safety Journal*, 2011, 46(8): 520-527.
- [13] OLORUNTOBA R. Plans never go according to plan: an empirical analysis of challenges to plans during the 2009 Victoria Bushfires[J]. *Technological Forecasting & Social Change*, 2013, 80(9): 1674-1702.
- [14] BRYANT C. Understanding bushfire: trends in deliberate vegetation fires in Australia[J]. *Environmental International*, 2008, 34(4): 459-475.
- [15] CHENEY N P. Quantifying bushfires[J]. *Mathematical and Computer Modelling*, 1990, 13(12): 9-15.
- [16] LEONARD J, BOWDITCH P. Findings of studies of houses damaged by bushfire in Australia[C]. *The 3rd International Wildland Fire Conference*, 2003: 3-6.
- [17] ZÁRATE L, ARNALDOS J, CASAL J. Establishing safety distances for wildland fires[J]. *Fire Safety Journal*, 2008, 43(8): 565-575.
- [18] BLANCHI R, LEONARD J. Investigation of Bushfire Attack Mechanisms Resulting in House Loss in the ACT Bushfire 2003[R]. CSIRO, 2005.
- [19] REISEN F, BROWN S K, SIMMONDS P, et al. Air Toxics Generated During Chamber Burns of Various Types of Australian Forest Fuels[R]. CSIRO, 2006.
- [20] COOK A, DEVINE E B, WEINSTEIN E P, et al. Respiratory irritants in Australian bushfire smoke: air toxics sampling in a smoke chamber and during prescribed burns[J]. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 2009, 56(3): 380-388.
- [21] KOLBE A, GILCHRIST K L. An extreme bushfire smoke pollution event: health impacts and public health challenges[J]. *New South Wales Public Health Bulletin*, 2009, 20(2): 19-23.
- [22] LOWELL K, SHAMIR R, SIQUEIRA A. Assessing the capabilities of geospatial data to map built structures and evaluate their bushfire threat[J]. *International Journal of Wildland Fire*, 2009, 18(8): 1010-1020.
- [23] ALEXANDER J D, SEAVY N E, RALPH C J, et al. Vegetation and topographical correlates of fire severity from two fires in the Klamath-Siskiyou Region of Oregon and California[J]. *International Journal of Wildland Fire*, 2006, 15(2): 237-245.
- [24] TAYLOR S W, ALEXANDER M E. Science, technology, and human factors in fire danger rating: the Canadian experience[J]. *International Journal of Wildland Fire*, 2006, 15(1): 121-135.
- [25] NOBLE I R, GILL A M, BARY G A. McArthur's Fire-danger Meters expressed as equations[J]. *Austral Ecology*, 1980, 5(2): 201-203.
- [26] PURTON C M. Equations for the McArthur Mark 4 Grassland Fire Danger Meter[R]. Bureau of Meteorology, 1982.
- [27] CHENEY N P, GOULD J S, CATCHPOLE W R. Prediction of fire spread in grasslands[J]. *International Journal of Wildland Fire*, 1998, 8(1): 1-13.
- [28] FOSBERG M A. Weather in Wildland Fire Management: the Fire Weather Index[R]. US For Serv Reprints of Articles by FS Employees, 1978.
- [29] ROADS J O, UEYOSHI K, CHEN S C, et al. Medium-range fire weather forecasts[J]. *International Journal of Wildland Fire*, 1991, 1(3): 159-176.
- [30] GOODRICK S L. Modification of the Fosberg Fire Weather Index to include drought[J]. *International Journal of Wildland Fire*, 2002, 11(4): 205-211.
- [31] SHARPLES J, MCRAE R H, WEBER R O, et al. A simple index for assessing fire danger rating[J]. *Environmental Modelling & Software*, 2009, 24(6): 764-774.
- [32] ATKINSON D, CHLADIL M, JANSSEN V, et al. Implementation of quantitative bushfire risk analysis in a GIS environment[J]. *International Journal of Wildland Fire*, 2010, 19(5): 649-658.
- [33] OLSON J S. Energy storage and the balance of producers and decomposers in ecological systems[J]. *Ecology*, 1963, 44(2): 322-331.
- [34] SHIELDS B, TOLHURST K. A theoretical framework for wildfire risk assessment[C]. *The 3rd International Wildland Fire Conference and Exhibition Incorporating 10th Annual Australasian Fire Authorities Council Conference: Urban and Rural Communities Living in Fire Prone Environment: Managing the Future of Global Problems*, 2003: 3-6.
- [35] CHEN K, BLONG R, JACOBSON C. Towards an integrated approach to natural hazards risk assessment using GIS: with reference to bushfires[J]. *Journal of Environmental Management*, 2003, 31(4): 546-560.
- [36] TURNER B A. The development of disasters—a sequence model for the analysis of the origins of disasters[J]. *The Sociological Review*, 1976, 24(4): 753-774.
- [37] UNDERWOOD U. Bushfire management in Australian forests—confronting a changing environment[C]. *Timber Communities of Australia Conference*, 2007.
- [38] HANDMER J, HAYNES K. Community Bushfire Safety[R]. CSIRO Publishing, 2008.
- [39] MCGEE T K. Public engagement in neighbourhood level wildfire mitigation and preparedness: case studies from Canada, the US and Australia[J]. *Journal of Environmental Management*, 2011, 92(10): 2524-2532.
- [40] HARRIS S, ANDERSON W, KILINC M, et al. The relationship between fire behaviour measures and community loss: an exploratory analysis for developing a bushfire severity scale[J]. *Natural Hazards*, 2012, 63(2): 391-415.
- [41] CHEN K. Quantifying bushfire penetration into urban areas in Australia[J]. *Geophysical Research Letters*, 2004(12): 179-206.
- [42] PRESTON B L, BROOKE C, MEASHAM T, et al. Igniting change in local government: lessons learned from a bushfire vulnerability assessment[J]. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 2009, 14(3): 251-283.
- [43] FISCHER J, PETERSON G D, GARDNER T A, et al. Integrating resilience thinking and optimisation for conservation[J]. *Trends in Ecology & Evolution*, 2009, 24(10): 549-554.
- [44] ACT Emergency Services Agency. History of Bushfire – ACT Rural Fire Service[EB/OL]. Australia Canberra: ACT Emergency Services Agency. (2011-09-06)[2014-12-02]. <http://esa.act.gov.au/actfrfs/learn-about-us/history-of-bushfires/>.
- [45] MEES P. A centenary review of transport planning in Canberra, Australia[J]. *Progress in Planning*, 2014, 87: 1-32.
- [46] ACT Government. Draft Act Strategic Bushfire Management Plan 2014[R]. Canberra, Australia, 2014.

- [47] HENNESSY K, BATHOLS C, SUPPIAH R, et al. Climate Change Impacts on Fire-weather in South-east Australia[R]. Climate Impacts Group, CSIRO Atmospheric Research and the Australian Government Bureau of Meteorology, Aspendale, 2005.
- [48] AECOM Australia. Human Settlement Vulnerability and Adaptive Capacity Assessment: Spatial Plan Evaluation[R]. Canberra, Australia, 2010.
- [49] STUDDERT M. Forward[J]. Australian Journal of Emergency Management, 2009, 24(2): 2.
- [50] ACT Planning and Land Authority. The Canberra Spatial Plan[R]. Canberra, Australia, 2004.
- [51] OWNED C, LAND C. Bushfire Management Strategy for Council Owned and Controlled Land[R]. AVK Environmental Management, 2011.
- [52] LI S, DAVIDSON R A. Parametric study of urban fire spread using an urban fire simulation model with fire department suppression[J]. Fire Safety Journal, 2013, 61: 217-225.
- [53] 黄维章, 张锁春, 雷光耀. 城市火灾蔓延的数学模型和计算机模拟 [J]. 计算物理, 1993, 10(1): 9-19.
- [54] ZHAO Z D, YU S Z, ZHONG J R. Probability model for hazard analysis of post-earthquake fire occurrence and spread among buildings[J]. Earthquake engineering and engineering vibration, 2003, 23(4): 183-187.
- [55] HIMOTO K, TANAKA T. A physically-based model for urban fire spread[J]. Fire Safety Science, 2003, 7: 129-140.
- [56] HIMOTO K, TANAKA K. Development and validation of a physics-based urban fire spread model[J]. Fire Safety Journal, 2008, 43(7): 477-494.
- [57] ZHAO S. GisFFE—an integrated software system for the dynamic simulation of fires following an earthquake based on GIS[J]. Fire Safety Journal, 2010, 45(2): 83-97.
- [58] 赵思健, 熊利亚, 任爱珠. 基于 GIS 的城市特大火灾蔓延模拟 [J]. 火灾科学, 2006, 15(3): 128-137.
- [59] 许建东, 王新茹, 林建. 基于 GIS 的城市地震次生火灾蔓延初步研究——以福州市区为例 [J]. 地震地质, 2002, 24(3): 445-451.
- [60] 谢旭阳, 任爱珠, 刘铁民. 基于 GIS 的地震次生火灾蔓延范围模拟 [J]. 国家安全科学学报, 2005, 15(5): 3-7.
- [61] 国艳, 韩绍欣. 地震次生火灾蔓延模型在 Mapx 上的实现 [J]. 东北地震研究, 2007, 23(2): 64-69.
- [62] 王碧君. 城市地质次生火灾蔓延模型及应急疏散模拟分析 [D]. 大连理工大学, 2009.
- [63] 刘大鹏. 广州市森林火灾危害程度预测研究 [D]. 中南林业科技大学, 2007.
- [64] 彭晨. 消防响应时间统计规律及其与城市火灾规模相关性研究 [D]. 中国科学技术大学, 2010.
- [65] 张诚. 基于 Box-Cox 变换的城市火灾起数的模型研究 [D]. 合肥工业大学, 2013.
- [66] 李炳华. 基于模糊信息优化处理的城市火灾风险分析方法研究 [D]. 中国科学技术大学, 2010.
- [67] WANG Jian, LI Shuangge. Time-clustering behaviors of urban fires[J]. Procedia Engineering, 2014, 71: 214-219.
- [68] WANG J H, SUN J H, LO S M, et al. Statistical analysis on the temporal-spatial characteristics of urban fires under typical urbanization features[J]. Procedia Engineering, 2011, 11: 437-444.
- [69] 郑双忠. 城市火灾风险评估的研究 [D]. 东北大学, 2003.
- [70] 张一先, 王建平, 方宗堂, 董雪芳. 城市定量火灾安全评估方法 [J]. 苏州科技学院学报 (工程技术版), 2003, 16(4): 27-32.
- [71] 刘梅, 刘军. 北京市火灾风险综合评估指标体系研究 [J]. 消费技术与产品信息, 2007(7): 11-14.
- [72] WU X T, WU L P. Evaluation of the fire emergency rescue capability in urban community[J]. Procedia Engineering, 2011(11): 536-540.
- [73] 张昌文, 夏成华, 钟少波. 城市火灾风险区划中的 GIS 应用框架 [J]. 消防管理研究, 2012, 31(11): 1233-1237.
- [74] 席洪林. 基于模糊模式识别的城市火灾综合风险评价研究 [D]. 天津大学, 2011.
- [75] CHENG L, LI S, MA L, et al. Fire spread simulation using GIS: aiming at urban natural gas pipeline[J]. Safety Science, 2015, 75: 23-35.
- [76] TONG S, WU Z, WANG R, et al. Fire risk study of long-distance oil and gas pipeline based on QRA[J]. Procedia Engineering, 2016, 135: 368-374.
- [77] WU A, SHI S, LI R, et al. City fire risk analysis based on coupling fault tree method and triangle fuzzy theory[J]. Procedia Engineering, 2014, 84: 204-212.
- [78] JI J, GAO Z H, FAN C G, et al. Large eddy simulation of stack effect on natural smoke exhausting effect in urban road tunnel fires[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2013, 66: 531-542.
- [79] LIU X, ZHANG Q, XU X. Petrochemical plant multi-objective and multi-stage fire emergency management technology system based on the fire risk prediction[J]. Procedia Engineering, 2013, 62: 1104-1111.
- [80] 刘铁民, 张兴凯, 刘功智. 安全评价方法应用指南 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.
- [81] 徐波. 城市防灾减灾规划研究 [D]. 同济大学, 2007.
- [82] 郑荣虎. 城市区域火灾易损性评估研究 [D]. 江苏大学, 2012.
- [83] ZHANG Y. Analysis on comprehensive risk assessment for urban fire: the case of Haikou City[J]. Procedia Engineering, 2013, 52: 618-623.
- [84] 皇甫玥, 张京祥, 陆泉麟. 城市规划与城市灾害及其防治 [J]. 国际城市规划, 2009, 24(5): 51-55.

(本文编辑: 秦潇雨)