

渗透理论在森林火灾模拟系统中的仿真研究

夏其表, 李光辉, 尹建新

(浙江林学院 信息工程学院, 浙江 临安 311300)

摘要: 为了研究林火行为对林火决策的重要性的林火的时空特性, 主要利用渗透理论建立森林火灾的蔓延模型, 通过该模型来模拟森林火灾的动向, 仿真森林树木的分布情况和林火蔓延情况。仿真实验结果表明, 提出的模型初步反映了森林火灾随林木分布密度不同而呈现不同蔓延情况的规律。同时, 对风速、风向、地形等其他因素对火灾蔓延的影响进行了分析, 并简单介绍了森林火灾蔓延的改进模型。图 6 表 1 参 10

关键字: 森林保护学; 林火蔓延; 渗透理论; 仿真模型

中图分类号: S762 文献标志码: A 文章编号: 1000-5692(2009)02-0233-06

Application of percolation theory in forest fire simulation

XIA Qi-biao, LI Guang-hui, YIN Jian-xin

(School of Information Engineering, Zhejiang Forestry College, Lin'an 311300, Zhejiang, China)

Abstract: In order to know the importance of forest fire behavior to the decision making of forest fire fighting, a forest fire spreading model based on the percolation theory was established to simulate the forest distribution, the spread and movement of forest fire. The simulation experimental results indicated that the proposed model reflected the relationship between the forest fire spread characteristic and the forest density. Furthermore, we discussed other factors affecting the forest fire spreading, such as wind speed, wind direction, topography, and put forwards one modified model for forest fire spreading. [Ch, 6 fig. 1 tab. 10 ref.]

Key words: forest protection; forest fire spread; percolation theory; simulation model

森林是整个国民经济持续、快速、健康发展的基础, 在国家经济建设和可持续发展中具有不可替代的地位和作用。由于人们在社会生活中的某些失控及异常自然因素影响等原因, 森林火灾时有发生, 对人类的生命财产、地球资源及生态环境造成了巨大的危害^[1]。森林火灾具有突发性, 灾害发生地点具有随机性, 并且短时间内就能造成巨大损失等特性, 一旦火情出现, 就必须尽快根据当时情况采取扑救措施。扑救是否及时, 决策是否得当, 很大一部分因素取决于对林火行为的分析是否合理和准确, 因此, 必须把重点放在林火行为的分析、研究和模拟上^[2]。这其中, 如何对林火的发生和蔓延进行预报和预测, 进而为林火的预防和灭火指挥提供决策支持, 就成为迫切需要解决的一个重要课题^[3]。作者利用渗透理论仿真模拟森林树木的分布情况以及林火火势的蔓延情况, 将模拟场景分成一个个有规则的网格, 离散的模拟火势增长的过程^[4]。

1 基于渗透理论的林火蔓延模型

渗透理论是由 Broadbent 和 Hammersley 最先提出的, 主要用于解决森林防火、石油开采、电力阻抗计算等问题。作者在文中所使用的森林火灾模型就是利用渗透理论建立的一种二维模型, 用二维网

收稿日期: 2008-02-25; 修回日期: 2008-10-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60674072); 浙江省自然科学基金资助项目(Y107612)

作者简介: 夏其表, 讲师, 从事系统建模、电子系统检测等研究。E-mail: xqb@zjfc.edu.cn

格来表示森林(图1)。其中每一个网格称为元胞(CA)。它可以是一株树、一株点着的树或者是空地。按照渗透理论的原理,我们对森林网格做出如下假设:①树木在某个点的分布情况是随机的,也就是说在某一点上树木的分布情况不会随着周围树木的分布而改变;②森林着火时,首先从最左边的树木开始燃烧;③如图1所示,相邻着火点组成的一个区域称之为燃烧区域,只有直接相邻的树木才能引燃,间接相邻的树木不会被引燃;④由于森林着火时,最初被引燃的树木的多少直接影响到最终整片森林燃烧完毕的时间,因此,为了保证时间的一致性,我们设置各种森林分布密度下原始着火点都从左边缘开始,原始火点基本达到一致。

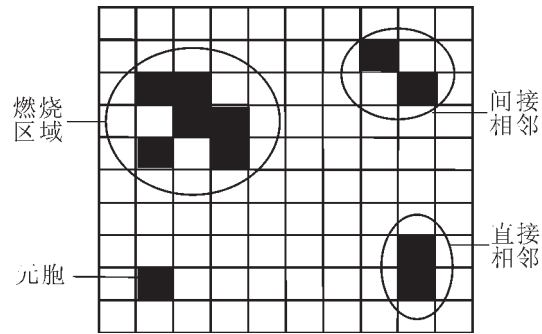


图1 渗透理论模型

Figure 1 Percolation theory model

在利用渗透理论模拟的不同林木分布情况下的火势蔓延图中,我们将燃烧一株树的时间计为1个单位,将所有可燃的树木燃烧完毕的时间总和称之为燃烧时间,其中2株树同时燃烧的时间只能计为1个时间单位。森林的燃烧时间和林木的分布密度直接相关。根据渗透理论的分析,我们以 p 表示森林中林木的分布概率密度,当 $p = 0.593$ 左右时,整个系统达到渗透极限,即此时森林的燃烧时间达到最大。

2 模拟算法设计

整片森林中某一点着火以后,火点迅速向四周蔓延,每个未着火点可能被多个方向的火源点燃,实际引燃该目标点的源点按最先达到的确定;每个新着火点又可作为新火源向周围直接相邻的4个方向蔓延^[5]。

我们利用渗透理论,建立了森林火灾的分布模型和蔓延模型,其主要结构如图2所示。主要的程序通过VC++实现,实现的主要步骤如下:①以概率 p 随机选取一个点,如果它为空地,则长出1株树;②左边缘树木被点燃;③如果1株树的直接相邻点(上下左右4株树)正在燃烧,那它将在此时被点燃;④着过火的树变为空地。模型中的核心算法如下:①生成树木的算法。如图1所示,四方网格中的格子用二维数组 $forest[i][j]$ 表示,并设置初始值为0。在主函数中产生一个随机数 r ,将 r 和森林概率密度值 p 相比较,如果 $r < p$,则在该点产生树木点,使 $forest[i][j] = 1$;输出显示所有树木。②引燃树木的算法。网格中燃烧的树木和燃尽树木的状态值都用数组 $burn[i][j]$ 来表示,并设置初始值 $burn[i][j] = 0$ (表示未燃烧状态)。模型中,我们假设森林的最初着火点都从左边缘开始,也就是说,如果 $forest[1][i] = 1$,则开始点燃该树,使得 $burn[1][i] = 1$ 。被燃烧的树木量用 $firecnt[0]$ 表示。③燃烧过程的模拟。当有一棵树木在网格 (i, j) 位置被点燃时, $burn[i][j] = 1$,这时与它直接相邻的树木即将被引燃。随着相邻的树木被点燃,燃烧的树木量 $firecnt[0]$ 和燃烧时间 $time$ 随之增加。每次程序扫描网格,“新”的点燃的树木($burn[i][j] = 1$)就转变成“老”的燃烧的树木($burn[i]$

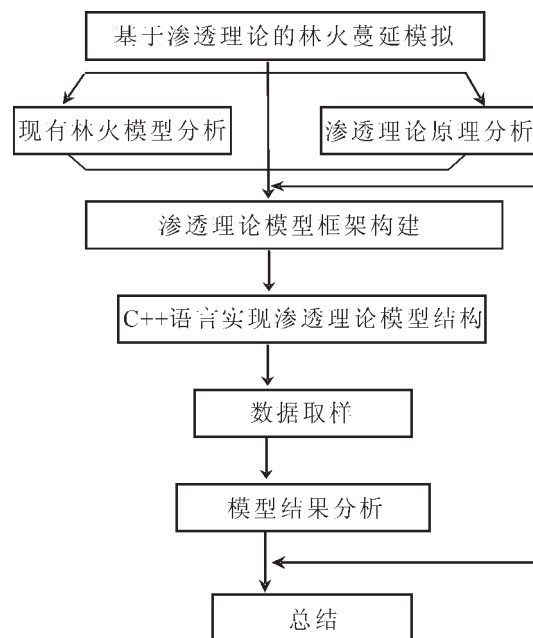


图2 林火蔓延模型结构

Figure 2 The structure of forest fire spreading model

的燃烧时间 $time$ 随之增加。每次程序扫描网格,“新”的点燃的树木($burn[i][j] = 1$)就转变成“老”的燃烧的树木($burn[i]$

[j] = 2)。到 $burn[i][j] = 3$ 时，表示该树已经燃烧完。从左边行开始，依次判断 $burn[i][j]$ 的值。如果 $burn[i][j] = 2$ ，则与它直接相邻的点的树木开始燃烧(图 1)，也即 $[i][j + 1]$ 点、 $[i][j - 1]$ 点、 $[i + 1][j]$ 点、 $[i - 1][j]$ 点如果存在树木的话，就被引燃，累加计算被引燃树木的数量和整片森林的燃烧时间。演示森林的分布情况和着火情况时，我们分 2 种情况进行模拟：一是由用户给定林木分布密度 p ，系统模拟指定密度下森林的着火情况；二是用户不给定分布密度，系统根据用户的需要依次模拟林木分布密度逐渐增大过程中树林的着火情况，同时对各种密度下的林木着火时间进行分析比较。

3 实验结果及其分析

为了更直观地显示森林的分布情况和燃烧情况，我们取样森林网格为 20×20 矩阵(如图 3 ~ 5 所示)，这样取的树木点比较清晰，便于观察树木分布情况和燃烧情况。其中图中的圆点表示树木分布点，方点表示被燃烧的树木分布点， p 代表整个森林的林木分布密度。我们分别取样 $p = 0.5$ ， $p = 0.6$ 和 $p = 0.7$ 等 3 种情况，对森林的分布情况和火势蔓延情况进行模拟，同时计算各种概率密度下的燃烧时间。分析时，我们都假设左边一行的树木首先被引燃。

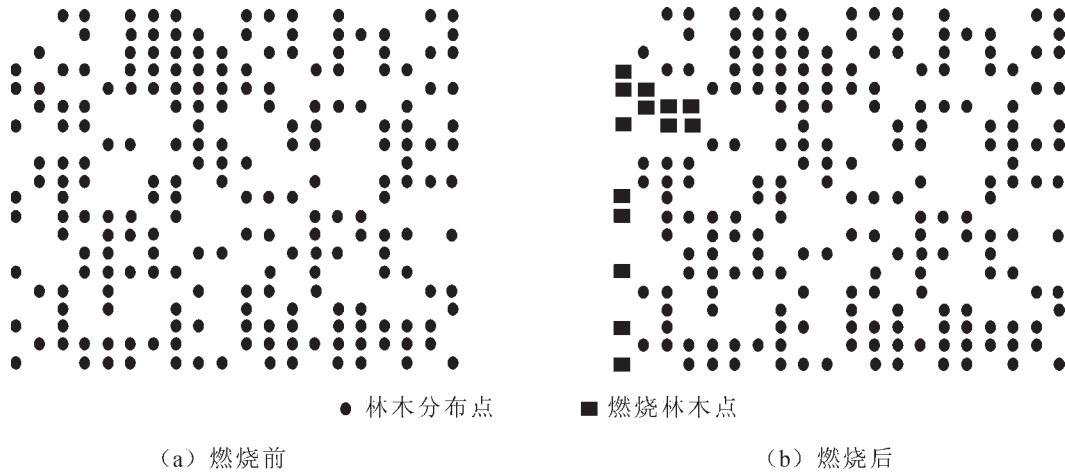


图 3 $p = 0.5$ 时林火火势蔓延图

Figure 3 Spreading states of forest fire while $p = 0.5$

图 3(a)和图 3(b)分别为林木分布概率为 0.5 时的森林分布情况和火场蔓延情况。从图中我们可以很清楚地看到，当林木分布密度 $p = 0.5$ 时，由于林木分布比较稀疏，直接相邻的树木比较少，火场蔓延区域较小，整片森林的燃烧时间也比较短，计算所得的燃烧时间仅为 6 个时间单位。

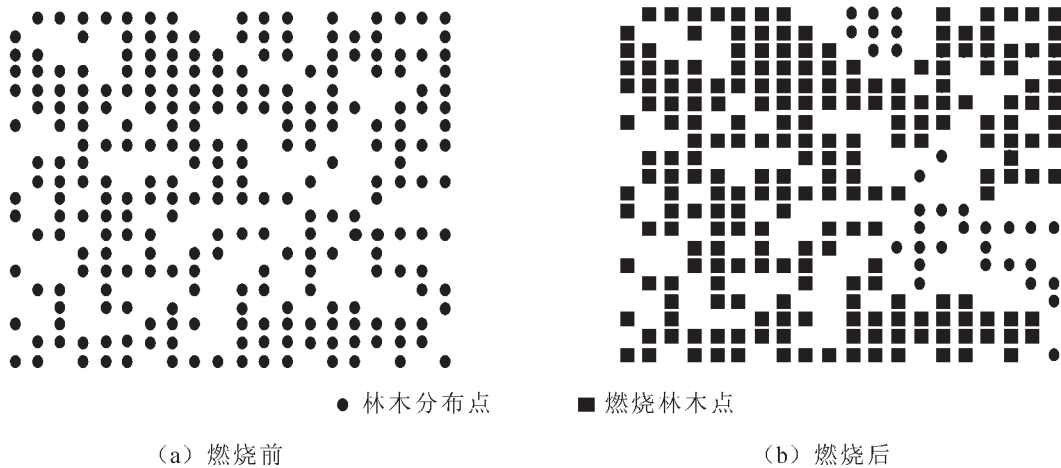


图 4 $p = 0.6$ 时林火火势蔓延图

Figure 4 Spreading states of forest fire while $p = 0.6$

当森林密度 p 在 0.6 附近时, 模型的渗透性达到极限, 被引燃的树木明显增多, 整个森林的燃烧时间达到峰值(图 4)。此时计算所得的森林平均燃烧时间达到 37 个时间单位。如果继续增大森林的分布密度, 由于此时地林木分布比较密, 相邻的树木比较多, 火场蔓延速度比较快, 导致整片森林的燃烧时间反而有所降低。如图 5 所示, 在 $p = 0.7$ 附近时, 几乎整片森林的树木都被烧光, 但计算所得的森林燃烧时间仅为 33 个时间单位左右, 反而比 $p = 0.6$ 时降低一些。

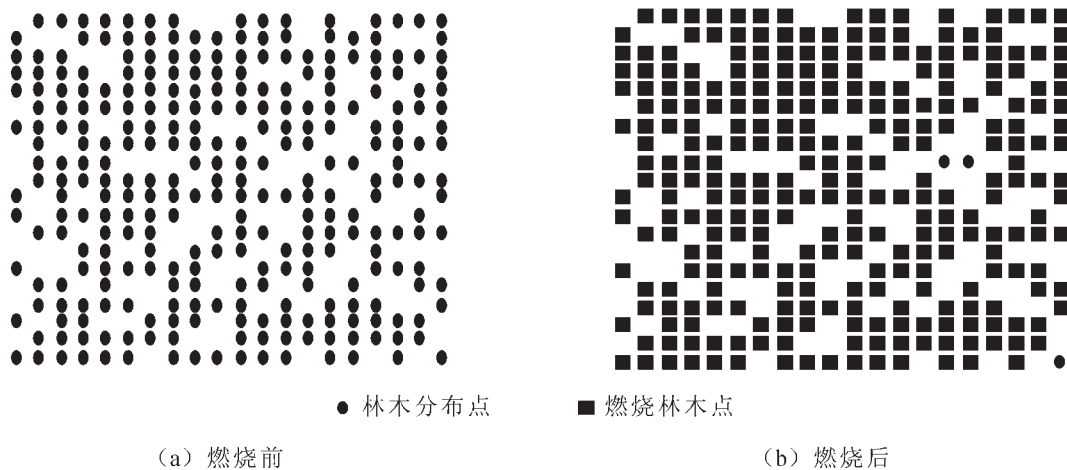


图 5 $p = 0.7$ 时林火火势蔓延图

Figure 5 Spreading states of forest fire while $p = 0.7$

为了进一步提高实验数据的正确性, 我们将森林网格取样为 150×150 矩阵, 重新分析各种概率密度下的火势蔓延情况和林木燃烧时间。分析时, 我们采用用户未给定林木分布密度 p 的方式, 让系统自行模拟各种概率密度下森林的火势蔓延情况。为了保证计算的正确性, 我们对各种概率密度下的森林着火情况各模拟 5 次, 计算 5 次模拟的平均燃烧时间。表 1 显示的即为各种概率密度下, 整片树林燃烧完所需的平均时间。

从表 1 我们可以看到, 在概率密度 $p = 0.6$ 左右时, 整片森林的燃烧时间达到最大, 这能给林火扑救争取一个比较理想的时间。当 $p > 0.6$ 时, 由于树木的分布比较密, 相邻的树木非常容易引燃, 火的传播速度非常快, 导致整片森林的燃烧时间较短, 几乎所有的树木都被烧光, 这不利于火势的控制和扑救。当概率密度 $p < 0.6$ 时, 由于树木分布比较稀疏, 被燃烧的树木不是很多, 树林的燃烧时间很短, 但由此带来的树林经济效益可能也不高。因此, 根据林木种植要求和防火控制要求, 合理选取林木的分布密度是很关键的。

表 1 各种密度下森林的平均燃烧时间

Table 1 Average burning time in different densities

概率密度 p	燃烧时间 t	概率密度 p	燃烧时间 t
0.10	2.2	0.60	360.8
0.20	4.2	0.65	245.8
0.30	7.8	0.70	211.8
0.40	16.8	0.80	180.0
0.50	32.8	0.90	164.4
0.55	84.0	1.00	150.0

4 模型的改进

在对森林火灾系统进行建模时，我们将模拟场景分成了有规则的网格，离散的模拟火势增强的过程，将渗透理论的算法和计算机二维图像很好的结合起来，给人比较直观的感觉。在该模型中，我们主要研究了森林火灾与林分密度之间的关系。但是，森林火灾蔓延是一个多相、多组分可燃物在各种气象条件和地形影响下燃烧和运动的极其复杂的现象，植被、坡向、坡度、风向、风力^[6]等都会影响森林火灾的蔓延。例如，山地上坡比较容易着火，靠近峡谷的下坡燃烧速度缓慢；顺风方向，火势蔓延速度非常快，逆风则慢；在无风的条件下，纯林中的林火均匀地向四周蔓延，火灾区的形状近似圆形；当有风时，由于风力对燃烧区边缘各个地段的作用不同，燃烧区形状受风力影响呈椭圆形^[6-8]。

为了进一步将风力、坡度等多种因素考虑到林火蔓延模型中来，我们考虑将图 1 所示的渗透理论模型改进成栅格模型^[9]，如图 6 所示。把 T 时刻处火场边界位置的每个单元格都看作一个小火源，向它周围相邻的 8 个单元格蔓延，火蔓延到相邻格所需要的时间按以下公式计算： $\Delta t = \Delta t_1 + \Delta t_2$ ； $\Delta t_1 = d_1/v_1$ ； $\Delta t_2 = d_2/v_2$ 。其中：

Δt_1 为林火在源格中蔓延时间； Δt_2 为林火在目标格中蔓延时间； d_1 为源格中蔓延距离； d_2 为目标格中蔓延距离； v_1 为在源格中该方向的林火蔓延速度， v_2 为在目标格中该方向的林火蔓延速度，其计算式为： $v_{1,2} = W \cdot \xi \cdot (1 + \Phi_W + \Phi_S) / \rho_b \cdot \varepsilon \cdot Q_i$ 。其中 W 为火焰区发热强度 ($\text{kJ} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$)， ξ 为林火蔓延率， ε 为有效热系数， Φ_W 为风速修正系数， Φ_S 为坡度修正系数， ρ_b 为可燃物的体积密度 ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)， Q_i 为点燃单位质量可燃物所需的热量 ($\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$)。

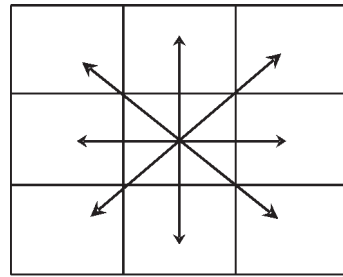


图 6 栅格图层林火蔓延过程

Figure 6 Grid diagram used to simulate spread process of forest fire

5 结论与展望

利用渗透理论提出了森林火灾的蔓延模型，它能较好地检测出不同的林木分布情况对森林火势蔓延和林木燃烧时间的影响。通过对模型的分析，我们可以发现，在森林分布达到一定密度后，由于相邻树木比较多，导致林火蔓延的速度比较快，不利于救火工作的展开；而当森林分布密度过小时，由于林木分布过于稀疏，火场蔓延区域较小，但林木的经济效益可能较低。因此，根据林木种植的经济要求和火灾扑救的控制要求，合理选择林木的分布密度就显得比较重要。

在对森林火灾系统进行建模时，我们将模拟场景分成了有规则的网格，离散的模拟火势增强的过程，将渗透理论的算法和计算机二维图像很好地结合起来，给人比较直观的感觉。在该模型中，我们主要研究了森林火灾与种植的密度之间的关系，同时也简单介绍了森林火灾的规模与风速、风向、地形等因素之间的关系，并对渗透模型进行了改进。

随着计算机技术的飞速发展，尤其是计算机图形和虚拟现实技术的发展，林火蔓延模拟的研究也将向三维、立体的方向发展。除了文中所使用的渗透理论方法以外，也出现了一些新的林火研究方法，如突变理论、元胞自动机模拟林火蔓延、分形理论等，它们与计算机技术的结合必将对林火蔓延的研究做出新的贡献^[10]。

参考文献：

[1] 况代智. 基于组件 GIS 的森林防火信息系统的研究与开发[J]. 福建林业科技, 2006, 33 (3): 105 - 107.

KUANG Daizhi. Research and development of forest fireproofing information system based on ComGIS[J]. *J Fujian For Sci Technol*, 2006, 33 (3): 105 - 107.

[2] 武岳清. 林火蔓延模型及其动态模拟初探[J]. 林业资源管理, 2003, 10 (5): 69 - 71.

- WU Yueqing. Forest fire spread models and dynamic simulation[J]. *For Resour Manage*, 2003, **10** (5): 69 – 71.
- [3] 徐爱俊, 李清泉, 方陆明, 等. 基于 GIS 的森林火灾预报预测模型的研究与探讨[J]. *浙江林学院学报*, 2003, **20** (3): 285 – 288.
- XU Aijun, LI Qingquan, FANG Luming, *et al.* Study on model about forest fire forecast and prediction based on GIS [J]. *J Zhejiang For Coll*, 2003, **20** (3): 285 – 288.
- [4] 李建微, 陈崇成, 於其之, 等. 虚拟森林景观中林火蔓延模型即三维可视化表达[J]. *应用生态学报*, 2005, **16** (5): 838 – 842.
- LI Jianwei, CHEN Chongcheng, YU Qizhi, *et al.* Forest fire spread modeling and 3D visualization in virtual forest landscape[J]. *Chin J Appl Ecol*, 2005, **16** (5): 838 – 842.
- [5] 黄作维, 张贵. 基于 GIS 模型的林火蔓延研究[J]. *湖南林业科技*, 2004, **31** (2): 17 – 19.
- HUANG Zuwei, ZHANG Gui. GIS modeling-based forest fire spread[J]. *J Hunan For Sci Technol*, 2004, **31** (2): 17 – 19.
- [6] 舒立福, 王明玉, 田晓瑞, 等. 关于森林燃烧行为特征参数的计算与表述[J]. *林业科学*, 2004, **40** (3): 179 – 183.
- SHU Lifu, WANG Mingyu, TIAN Xiaorui, *et al.* Calculation and description of forest fire behavior characters[J]. *Sci Silv Sin*, 2004, **40** (4): 179 – 183.
- [7] 杜飞, 侯遵泽, 刘家琦. 森林地表火蔓延模拟方法及其计算机实现[J]. *火灾科学*, 2001, **10** (4): 204 – 208.
- DU Fei, HOU Zunze, LIU Jiaqi. Method of ground fire boundaries spread modeling and computer simulation[J]. *Fire Saf Sci*, 2001, **10** (4): 204 – 208.
- [8] 黄华国, 张晓丽, 王蕾. 基于三维曲面元胞自动机模型的林火蔓延模型[J]. *北京林业大学学报*, 2005, **27** (3): 94 – 97.
- HUANG Huaguo, ZHANG Xiaoli, WANG Lei. Simulation of forest fire spread based on a 3D-surface cellular automata model[J]. *J Beijing For Univ*, 2005, **27** (3): 94 – 97.
- [9] 陈天恩, 陈立平, 陈红, 等. 基于 GIS 的森林火灾现场模拟及其应用[J]. *自然灾害学报*, 2007, **16** (1): 76 – 80.
- CHEN Tian'en, CHEN Liping, CHEN Hong, *et al.* GIS-based forest fire simulation and its application[J]. *J Nat Disast*, 2007, **16** (1): 76 – 80.
- [10] 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.
- TANG Xiaoyan, MENG Xianyu, YU Haoruo. Review and prospect of researches on forest fire spreading models and simulation method[J]. *J Beijing For Univ*, 2002, **24** (1): 87 – 91.