

林火蔓延模型模拟空间精度评价研究

周宇飞 刘鹏举 唐小明

(中国林业科学研究院资源信息研究所)

摘要:在林火蔓延模拟过程中,为技术基础林火蔓延模型模拟空间精度评价是一个十分重要的问题。以林火蔓延模拟、地理信息系统和计算机图形学为技术基础,以林火蔓延的边界位置、面积和轮廓形状为主要指标,提出了一套林火模型模拟空间精度的评价方案,并通过模拟实验证明了该方案的可行性。结果表明,这一方案可以满足林火蔓延模型模拟空间精度评价的需要,为多模型林火蔓延模拟中模型的选择提供了依据。

关键词:林火蔓延模拟;空间精度评价;空间相似性;豪斯多夫距离

中图分类号: S762.2 文献标志码:A 文章编号:1000-1522(2010)02-0021-06

ZHOU Yu-fei; LIU Peng-ju; TANG Xiao-ming. **Space accuracy evaluation of forest fire spreading model.** *Journal of Beijing Forestry University* (2010) 32(2) 21-26 [Ch, 14 ref.] Research Institute of Resource Information Techniques, Chinese Academy of Forestry, Beijing, 100091, P. R. China.

Space accuracy evaluation of forest fire spreading model is very important in the process of forest fire spreading simulation. This paper integrated the knowledge of forest fire spreading simulation, geographical information system and computer graphics, and put forward a solution for space accuracy evaluation of forest fire spreading model based on the three key characteristics of fire field boundary: location, area and shape. A simulation experiment was executed to verify the feasibility of the solution. The result shows that the solution can satisfy the needs of space accuracy evaluation of forest fire spreading model and provide the basis for the model evaluation in forest fire spreading simulation.

Key words forest fire spreading simulation; space accuracy evaluation; space similarity; Hausdorff distance

用计算机模拟森林火灾的蔓延过程是森林防火的重要手段^[1]。自1946年W. R. Fons首先提出林火蔓延的数学模型以来,世界上许多国家都提出了自己的林火蔓延模型^[2]。林火蔓延模拟在这些林火蔓延模型的基础上设计计算机算法,模拟火场边界线随时间的发展变化过程^[3-4]。在实际应用过程中,无论是使用哪种类型的模型和算法进行林火蔓延模拟,模型模拟结果的空间精度都是用户最关心的问题之一。而目前对森林火灾的评价研究多集中在过火面积、林价和林木死亡率这类来源于火灾损失的评价方面^[5-7],直接对应于模型模拟空间精度评价的研究仅通过模型模拟与现实火场的遥感数据比较获取评价结果,且评价指标难以量化^[4,8]。在实际应用中,需要应用多个模型同时模拟林火蔓延

的情况,缺乏具体的量化指标,很难判断哪个模型更适合于模拟该场林火。另外,并不是每场林火都能通过遥感数据获取完整的火场边界。野外实地量测由于地形等因素的影响往往只能采集到部分火场边界^[9]。在这种情况下,迫切需要一套科学的方法来评价林火模型模拟的空间精度。

本文针对林火蔓延模型模拟评价存在的问题,结合林火蔓延模拟、地理信息系统以及计算机图形学等方面的研究,在对林火蔓延边界位置校正的基础上,选取面积叠置率和火场边缘轮廓相似程度为主要评价指标,提出一套评价林火模型模拟空间精度的方案,为林火蔓延模型模拟空间精度评价提供新的解决方法。

收稿日期:2008-09-19

基金项目:“863”国家高技术研究发展计划项目(2006AA12Z213)。

第一作者:周宇飞,博士生。主要研究方向:地理信息系统。电话:010-62888904 Email: ttzyftt@163.com 地址:100091 北京市颐和园后中国林业科学研究院资源信息研究所。

责任编辑:刘鹏举,副研究员。主要研究方向:林业GIS应用开发技术。电话:010-62888904 Email: liupeng@caf.ac.cn 地址:同上
(Q1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>
本刊网址: <http://www.bjfujournal.cn>; <http://journal.bjfu.edu.cn>

1 林火空间精度评价总体方案

利用计算机进行林火蔓延模拟可以实时获取火场发展的整体趋势,为林火扑救决策提供支持^[1]。林火蔓延模拟由于受到可燃物载量、地形因素、气象因素等复杂环境的影响,很难进行精确模拟。为了更准确地预测林火发展态势,需要对不同林火蔓延模型模拟结果的空间精度进行评价,从而可以选择合适的模型进行模拟。空间精度的评价通常需要将火场模拟边界和从不同途径获取的实际火场边界进行分析比较得到。火场边界在地理信息系统中通常是由具有一定形状的多边形来描述,而对于一个空间多边形实体,其空间几何属性可以由位置、面积和形状等基本特征来描述^[10]。位置是确定火场范围的关键,且是面积和空间相似性评价的基础。在位置确定的情况下,面积的评价结果可以直接作为模型选择的依据。当面积精度相差不大或实际量测数据的完整程度不够而无法进行面积评价的时候,需要进行火场轮廓的空间相似性评价。本文提出的林火模拟空间精度评价方案的基本流程见图1。

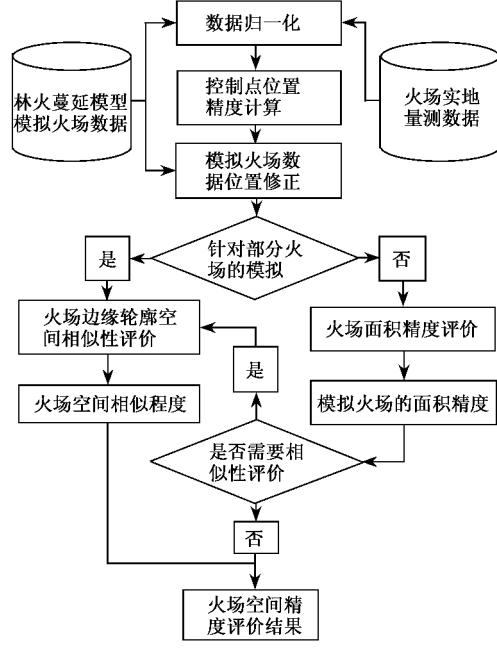


图1 林火模拟空间精度评价方案流程

Fig. 1 Flow of space accuracy evaluation
project of forest fire emulation

如图1所示,由于林火蔓延模型模拟火场数据与火场实地量测数据的表现形式多种多样,如果不进行空间尺度和数据表达方式上进行统一,则后面的评价将难以进行。因此,首先需要将数据进行归一化处理,方便后面评价程序的使用。数据归一化后,需要对模拟火场数据位置进行修正,主要方法是通过实地量测的地面控制点和模拟数据中对应点的位

置进行比较,计算出模拟过程中产生的点位置的系统误差,从而完成对模型模拟数据的位置进行修正。位置校正后,需要根据实际情况进行评价。当评价目标是整个火场时,通过比较火场模拟范围与量测范围的火场面积即可得到评价结果;当火场范围过大或火场边界数据获取困难,只能获取火场的部分边界时,根据火场面积很难做出科学的评价,需要依据部分火场边缘轮廓的形状对模拟结果做出准确评价。火场面积精度的评价通过对模拟火场边界和实际量测火场进行叠置分析,计算重合部分面积在整个火场面积中所占的比重来评价。在完成面积评价后,通过面积精度的计算结果判断模型的空间模拟精度。当通过空间校准后的面积精度不能区别模型的适宜性时,例如两个模型模拟结果的面积精度都很高的情况下,需要进行边缘轮廓空间相似性评价。本文依据火场的空间几何特征引入几何中豪斯多夫距离(Hausdorff Distance, HD),并通过修正来完成火场边界空间相似程度评价。模拟火场的面积精度评价结果和火场空间相似程度评价结果综合判断得到火场空间精度评价结果。

2 林火蔓延模型模拟空间精度评价方法

2.1 数据预处理及模拟数据位置校正

在林火蔓延模型模拟空间精度的评价中,需要把同一区域的林火模拟图像与实地量测生成的图像进行比较,这就要求对这些图像进行相应的预处理,才能进行下一步的评价操作。预处理操作包括图像空间配准、尺度匹配,以及将图像格式数据统一栅格或矢量化等归一化处理。

由于计算机模拟的算法、获取数据的方法和获取的数据质量等的差别,获取的图像点位置会存在系统误差,导致模拟数据点存在向某一方向偏移等问题。为了消除这类误差,以实际量测数据为准,参考地理信息系统中几何校正的方法,对模拟的数据进行校正。校正方法如下:首先根据实际采集的数据情况较均匀地选取数个火场边缘数据点,并将需要校正的模型模拟图像与实际量测图像(可认为是理论值)上的同名点进行距离差检查,然后列出各个检测点的经度方向与纬度方向的差异值。选用笛卡儿坐标系,将检测区上的各个检测点误差值标注在以理论原值为原点的坐标系中,观察和分析整体坐标误差,并对模型模拟数据进行位置校正。

该阶段涉及的操作处理属于地理信息系统基础的图像处理方法,具体操作可参见文献[10]。图像

的归一化处理十分重要,是后面进行评价的基础。

2.2 火场面积精度评价

在森林火灾中,过火面积对于评价火灾的大小、估算蓄积量的损失和计算火灾经济损失具有重要意义^[5-7],为了评价模型计算的火场面积精度,可以把模型的计算结果与实地量测结果进行比较,最后计算出相对误差作为精度评价的指标。

测算火场面积通常采用地图勾绘法、目测法和求积仪量测法等。各种不同的量测方法获得的数据误差各异,最终影响面积精度计算的可靠性。本文假定量测方法满足误差要求,将林火蔓延模型模拟得到的火场范围看作集合 M ,将实地量测得到的火场范围看作集合 R ,在只注重造成损失的情况下,模拟结果与实地量测结果的相对误差计算公式如下:

$$\varepsilon = \frac{|S_1 - S_2|}{S_2} \times 100\% \quad (1)$$

式中: ε 是模拟结果与实地量测结果的相对误差, S_1 是林火蔓延模型模拟结果的面积, S_2 是实地量测结果的面积。

计算得到的相对误差显然没有考虑到空间位置关系,而林火蔓延过程本身是与空间位置密切相关的。在确定空间位置的基础上,将模拟结果和实地量测结果进行叠合,计算其重合部分的面积作为对比依据,将更为合理。鉴于此,通过 2.1 所述的预处理方法来控制火场的基本位置后,对相同位置的火场实地量测数据与林火蔓延模型模拟得到的数据进行叠合,再计算面积误差,即两者面积的叠合率,其公式为:

$$\varepsilon = \frac{S_3}{S_2} \times 100\%$$

式中: S_3 是模拟结果和实地量测结果叠置后不重合区域的面积。

显然,利用模拟结果和实地量测结果两者面积的叠合率评价林火蔓延模型模拟火场面积的精度,考虑了空间位置方面的因素,比直接计算两者面积的差值更合理。

对林火蔓延模型模拟空间精度评价来说,火场面积精度是一个很重要的评价指标。在有条件获取完整的火场范围数据的情况下,利用火场面积精度评价就可以直接得到结果,但在有些情况下,仅利用火场面积精度评价是不够的,例如无法获取完整火场边界数据或是利用多个模型模拟同一场林火的面积精度评价结果相近等情况下,火场空间相似程度就成为判断林火蔓延模型模拟空间精度的主要依据。

2.3 火场边缘轮廓空间相似性评价

判断两个图形形状是否相似最常采用的方法是

模式匹配^[11]。近年来,在模式匹配的方法研究中,由于豪斯多夫距离能够有效地表征物体之间边缘轮廓的相似性,并可以对边缘轮廓的匹配程度进行量化,已被成功地应用于图像中物体的检测中^[11-14]。在林火模拟精度评价中,需要一种可量化指标来检测林火蔓延模型模拟结果与实地量测的林火边界之间的相似程度,豪斯多夫距离正好提供了这样一个量化的值。因此,利用豪斯多夫距离来评价火场边缘轮廓空间相似性是一种合适的方法。

豪斯多夫距离是一种极大、极小距离,它主要用于量测两个点集的匹配程度,不需要建立点与点之间的对应,只需计算两点集之间的最大距离即可。给定两个点集: $A = \{a_1, a_2, \dots, a_m\}$, $B = \{b_1, b_2, \dots, b_n\}$, m, n 分别表示点集 A 和点集 B 中所包含的点的个数,则两点集之间的豪斯多夫距离 $H(A, B)$ 定义如下:

$$H(A, B) = \max(h(A, B), h(B, A))$$

$$h(A, B) = \max_{a \in A} \{D(a, B)\}$$

$$D(a, B) = \min_{b \in B} \{D(a, b)\}, \forall a \in A$$

式中: $D(a, b)$ 是某种意义上的范数,在林火模拟精度评价的计算中,由于与林火空间位置度量密切相关的往往是距离,因此 $D(a, b)$ 采用欧氏距离来运算; $D(a, B)$ 定义的是点集 A 中的一个点 a 到点集 B 的距离,它是 a 点到点集 B 中任意一点的距离 $D(a, b)$ 的最小值; $h(A, B)$ 称为 A 和 B 之间的有向豪斯多夫距离; $h(A, B)$ 是点集 A 中所有的点到点集 B 的距离 $D(a, b)$ 的最大值;同理 $h(B, A)$ 表示的是 B 和 A 之间的有向豪斯多夫距离^[11-14]。

在火场边缘轮廓空间相似性评价中,一方面林火蔓延模型模拟中各计算机模拟算法的差异会导致林火蔓延模型模拟结果差异较大;另一方面,实地量测数据存在可靠性的问题,从而使得林火蔓延模型模拟数据和实地量测数据的边缘匹配程度达不到模式匹配的要求,不能将实地量测获得的数据看作模板简单套用。因此,需要对豪斯多夫距离的计算进行改进,使其适用于火场边缘轮廓空间相似性评价。

本文在进行火场边缘轮廓空间相似性评价时,只考虑相同计算机模拟算法下的林火蔓延模型的结果。将实际量测获得的结果的点集作为点集 A ,模型模拟后的结果作为点集 B ,最终采用的是基于平均距离值的豪斯多夫距离 (Modified Hausdorff Distance, MHD)。基于平均距离值的豪斯多夫距离 (MHD) 与基本的豪斯多夫距离 (HD) 所不同之处在于计算有向豪斯多夫距离时,利用均值代替了最大值,这样可以尽量消除实地量测或林火蔓延模型模拟过程中存在个别较大偏移的噪声点的影响,而更

注重于整体轮廓的相似程度^[12]。MHD 的计算公式如下:

$$H'(A, B) = \max(h'(A, B), h'(B, A))$$

$$h'(A, B) = \frac{1}{m} \sum_{a \in A} \{D(a, B)\}$$

$$h'(B, A) = \frac{1}{n} \sum_{b \in B} \{D(b, A)\}$$

式中: $H'(A, B)$ 表示的是基于平均距离值的豪斯多夫距离(MHD) $h'(A, B)$ 则是点集 A 和 B 之间的均值有向豪斯多夫距离 $h'(B, A)$ 表示的是 B 和 A 之间的均值有向豪斯多夫距离。

在进行林火蔓延模型模拟结果之间的空间相似程度比较时,林火蔓延模型与实地量测结果之间的MHD 越小的模型模拟结果与实地量测结果的空间相似程度越高。由于 MHD 直接体现了两点集之间的相似程度,故可以直接将 MHD 的取值作为相似性的度量。由于点集比较的方式并不要求获取完整的火场数据,故可以灵活应用到只有部分火场量测数据的模拟评价中。利用 MHD 进行火场边缘轮廓空间相似性评价的步骤如图 2 所示。

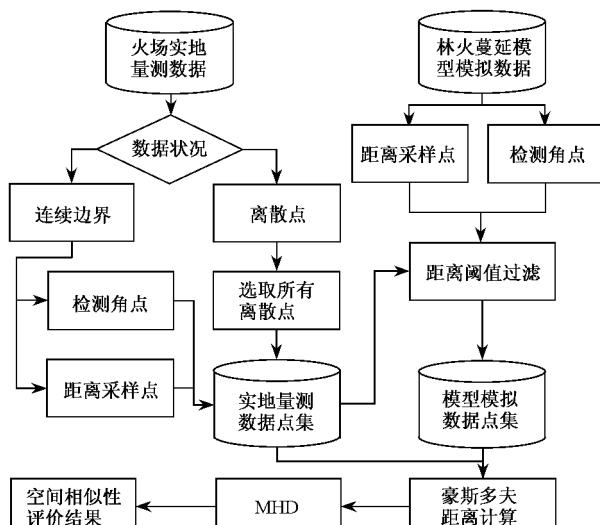


图 2 火场边缘轮廓空间相似性评价步骤

Fig. 2 Steps of space accuracy evaluation of forest fire boundary

利用 MHD 进行火场边缘轮廓空间相似性评价的关键是要分别获取火场实地量测数据和林火蔓延模型模拟生成的数据。火场实地量测数据点集来源于火场的实地量测数据,若所量测得到的数据是火场边缘的离散点,则直接选取实地量测点的经纬度坐标形成坐标点集即可。如果量测的数据是连续的火场边界线,则要进行线的角点检测并加入点集,然后再按照距离在边界线上采样,将得到的采样点也加入实地量测数据点集。由于角点对林火边缘轮廓形状起着决定作用,一旦找到了目标的角点,也就大

致掌握了林火边缘的形状,因此角点是量测数据点集的必然候选点。

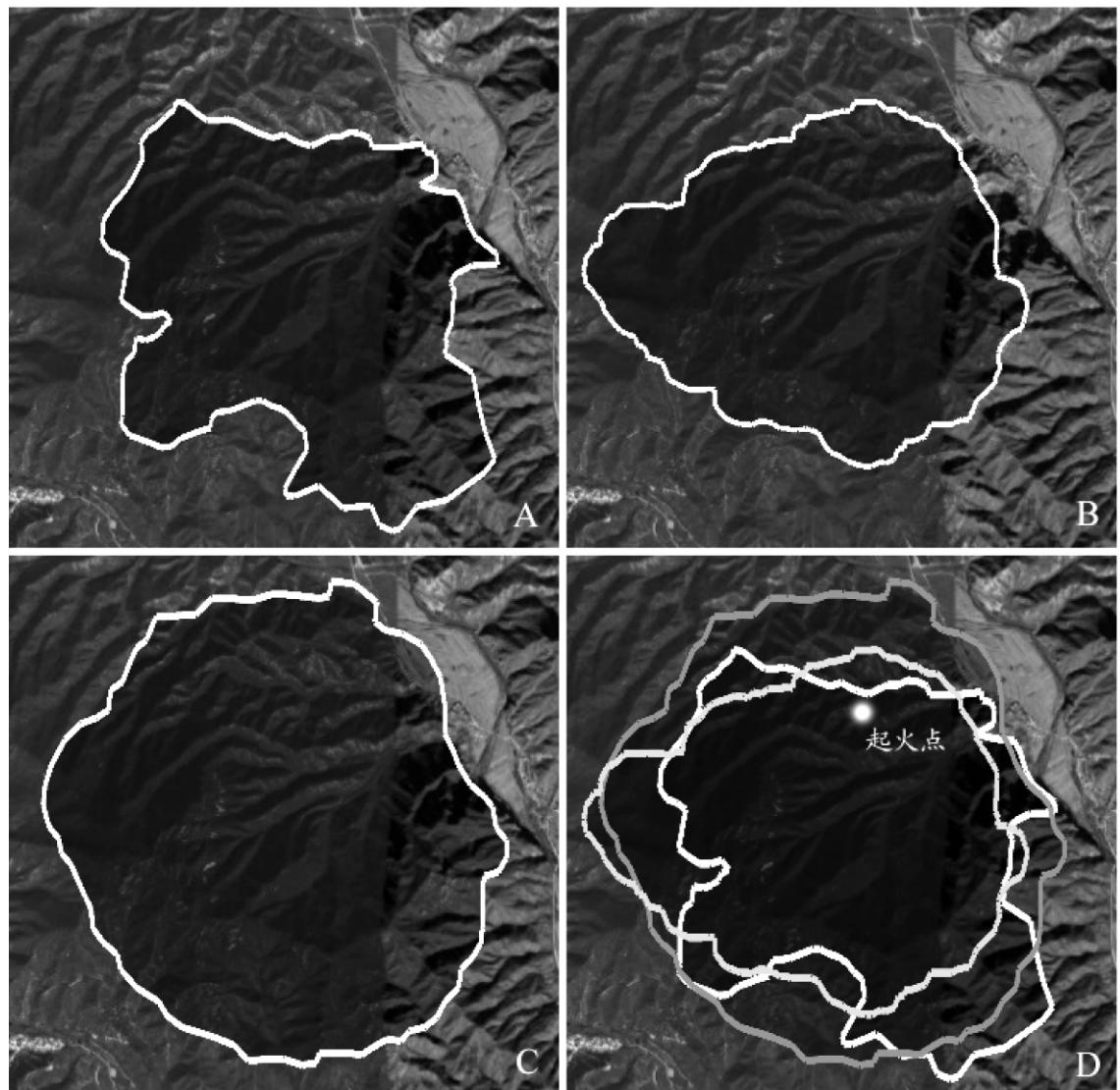
模型模拟数据点集来源于林火蔓延模型模拟得到的火场边界数据,由于模型模拟结果一般都是连续的火场边界线,所以通过按距离采样和检测角点即可生成模型模拟点集。考虑到实地量测的结果可能只是火场数据的一部分,导致模型模拟数据点集中一些点可能远远超出这一部分火场数据的范围,因此需要设定阈值。当模型模拟数据点集中的一点到实际量测数据点集的所有点的距离均大于该阈值,则说明该点所在位置超出了评价范围,需要在模型模拟数据点集中剔除该点,这样经过筛选后的点集就可以作为最终的模型模拟数据点集。

在获得火场量测数据点集和模型模拟数据点集之后,通过前面所述的方法根据实际情况对两组点集进行相应的 MHD 计算,并将 MHD 的取值作为评价火场空间相似程度的依据。

3 实验验证

以 2006 年 3 月发生在河北丰宁和北京怀柔交界地区的一起森林火灾为例,对本文提出的林火模型模拟空间精度评价方法进行验证。这场火灾发生于 3 月 24 日 11 时,至 3 月 26 日 10 时明火基本扑灭。火灾发生地植被是以荆条(*Vitex negundo*)、白草(*Pennisetum centrasianicum*)和绣线菊(*Spiraea salicifolia*)为主的灌草群落。火灾期间白天最高气温 5°,空气相对湿度在 10% 左右,风力 1~2 级,风向以西北为主。本文使用王正非模型和 Rothermel 模型这两种不同的林火蔓延模型分别对这次火灾进行了模拟,基本情况如图 3 所示。在遥感图像上量测得到此次火灾的过火面积约为 4.413 km²。计算出的相关数据见表 1。

从表 1 可以看到,当不考虑相对位置的情况下,Rothermel 模型的模拟数据与实地量测数据的面积较为接近,而当对其进行叠置分析以后,两种模型不重合区域的面积与实际面积比较得到的相对误差分别为 41.90% 和 52.37%,模型之间的误差差距大大缩小。然而通过经纬度坐标计算出的两组模型模拟数据与实地量测数据的 MHD 后,发现 Rothermel 模型模拟的数据与实地量测数据的 MHD 仍然比王正非模型的模拟数据与实地量测数据的 MHD 要小,这表明了此次模拟结果中 Rothermel 模型模拟的数据与实地量测数据的火场边缘轮廓形状相似性更高。



A. 实测火场范围; B. Rothermel 模型模拟的火场范围; C. 王正非模型模拟的火场范围; D. 数据的叠合分析

图3 实验所用火场数据示意图

Fig. 3 Fire data that experiment used

表1 Rothermel 模型模拟数据与王正非模型模拟数据的对比
Tab. 1 Simulation data contrast between Rothermel model and Wangzhengfei model

模拟模型	面积 /km ²	面积相对误差 /%	不重合区域 面积 /m ²	叠合后面积 相对误差 /%	与实际量测 数据的 MHD
Rothermel	4.150	5.96	1.849	41.90	0.001 907 0
王正非	6.274	42.17	2.311	52.37	0.002 742 3

4 结论与讨论

针对林火蔓延模型模拟空间精度评价问题,通过深入分析地理信息系统和图形学方面的理论知识,结合林火蔓延模拟方面的专业应用,从林火位置、面积及火场边缘轮廓入手,在模拟数据位置校正的基础上提出了一套基于火场面积精度和火场边缘轮廓相似性的合理的林火蔓延模型模拟空间精度的评价方法,解决了多模型模拟空间精度评价及基于部分火场边缘数据的模拟空间精度评价问题,使用

本文提出的方法可以评价林火蔓延模型模拟结果的空间精度,为判断模型的区域适应性及模型的进一步修正提供了依据。

使用本文提出的方法从理论上对林火蔓延模型模拟的空间精度进行了研究与验证,结果表明该方法是一套理论可行的方法。在实际情况下,火场实地量测数据的采集受到地形条件、天气因素、采集设备等多种因素的影响,都会对位置精度的判定造成影响,由于欠缺实践操作,需要进一步的研究;另一方面,利用计算机模拟林火蔓延时驱动模型模拟的

林火因子数据的可靠程度也会对位置精度的判定造成影响;另外,如何通过对林火蔓延模型模拟空间精度评价实现对模型相关参数的修正,以便提高林火蔓延模型的模拟精度,有待于进一步研究。

参 考 文 献

- [1] 秦向东,阿布里提. 基于计算机图形技术的森林火灾模拟蔓延模型[J]. 林业科学, 2006, 42(7):73-77.
- [2] 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.
- [3] 秦向东, 阿布里提, 林其钊. 两类常用森林火灾蔓延模型的比较[J]. 自然灾害学报, 2005, 14(5):113-118.
- [4] FINNEY M A. FARSITE: Fire area simulator-model development and evaluation [R]. Ogden: USDA Forest Service Rocky Mountain Research Station, 2004.
- [5] 王霓虹, 吕瑞, 傅学杰. 森林火灾损失评估系统的研究与实现[J]. 东北林业大学学报, 2006, 34(6):31-33.
- [6] 李红, 舒立福, 田晓瑞, 等. 林火研究综述(IV)——GIS在林火管理中应用现状及发展趋势[J]. 世界林业研究, 2004, 17(1):20-24.
- [7] 易浩若, 纪平. 森林过火面积的遥感测算方法[J]. 遥感技术与应用, 1998, 13(2):10-14.
- [8] FINNEY M A. FARSITE: Fire area simulator-technology reference [R]. Ogden: USDA Forest Service Fire Sciences Laboratory, 1995.
- [9] BODROZIC L, STIPANICEV D, STULA M. Agent based data collecting in a forest fire monitoring system [C]//Software in telecommunications and computer networks. Split: SOFTCOM, 2006:326-330.
- [10] 陆守一. 地理信息系统[M]. 北京: 高等教育出版社, 2004: 84-177.
- [11] 蒋新土, 吕岳. 基于改进的加权 Hausdorff 距离的图像匹配[J]. 计算机应用研究, 2007, 24(4):182-183, 238.
- [12] DUBUISSON M P, JAIN A K. A modified Hausdorff distance for object matching [C]//Conference A: Computer vision & image processing. Jerusalem: IAPR, 1994:566-568.
- [13] HUTTENLOCHER D, KLANDERMAN G, RUCKLIDGE W. Comparing images using the Hausdorff distance [J]. Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1993, 15(9):850-863.
- [14] BAUDRIER D, MILLON G, NICOLIER F. Hausdorff distance-based multiresolution maps applied to an image similarity measure [C]//OSAV. Topical meeting on optical sensing and artificial vision. Saint Petersburg: State University ITMO, 2004: 267-272.

(责任编辑 冯秀兰)

《中国林业教育》2010年开办“知名教授介绍”栏目启事

《中国林业教育》是教育部主管的由北京林业大学和中国林业教育学会共同主办的全国性林业教育刊物, 双月刊, 80页, 面向国内外公开发行。2010年, 为了大力宣传对农林业教育和科研工作做出重大贡献的林业教育战线的专家学者, 本刊拟在封2、封3刊登“知名教授介绍”栏目。

“知名教授介绍”栏目投稿须知:

1. 稿件标题统一为“××××(学科)教授×××”, 例如“生态学与生态系统科学教授王国庆博士”。
2. 稿件应主要介绍知名教授的基本情况(职务、职称、学历、主要研究方向、主讲课程等)、学习经历、工作经历、主要的教育教学成果和科研成果(课题项目、获奖情况、论文发表情况等)、其他突出贡献等。作者可登录 <http://journal.bjfu.edu.cn/jy/> 查询范例。
3. 稿件字数为2000字左右, 并附1张本人2寸免冠彩色像片(电子版)。
4. 版面费: 暂不收取费用。
5. 投稿邮箱: liuxiaoling@bjfu.edu.cn。