

不同植被类型森林火灾及雷击火自组织临界性

王明玉¹, 李 华², 舒立福¹, 宋卫国³, 田晓瑞¹

(1. 中国林科院森林生态环境与保护研究所, 北京 100091; 2. 黑龙江省大兴安岭林科所, 加格达奇 165000;
3. 中国科学技术大学火灾科学国家重点实验室, 合肥 230026)

摘要:利用黑龙江省大兴安岭林区呼中区 1965~2002 年的雷击火数据、黑龙江省 1981~2000 年森林火灾数据及森林资源数据,对雷击造成的森林火灾的自组织临界性及不同植被类型条件下的自组织临界性作了研究,比较了在不同尺度和植被类型条件下火干扰的自组织临界性、自相似性,并与传统的森林火灾元胞自动机模型模拟的结果进行比较。结果表明:中国黑龙江省不同森林类型的火干扰具有自组织临界行为,森林可燃物已经达到临界状态,其临界值在 1.8~2.86 之间,具有自相似性;当森林的面积过小时,森林火灾的“面积-频率”分布曲线上会出现频率峰,表现出“有限面积效应”现象。

关键词:森林火灾;火干扰;雷击火;自组织临界性

The self-organized criticality study on forest fires in different vegetation and lightning fires

WANG Ming-Yu¹, LI Hua², SHU Li-Fu¹, SONG Wei-Guo³, TIAN Xiao-Rui¹ (1. *Institute of Forest Protection, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China*; 2. *Institute of Forestry Research of Heilongjiang Daxing'anling Mountains, Jiagedaqi 165000, China*; 3. *State Key Laboratory of Fire Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China*). *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(8): 1803~1807.

Abstract: The occurrence of forest fires is impacted by many factors, such as vegetation type, weather conditions, human and topography. This research utilized the 1965~2002 lightning fires historical data in Huzhong, 1981~2000 forest fire data in Heilongjiang province and the vegetation distribution map, we studied the SOC (self-organized criticality) of lightning fires and SOC of the forest fires in different vegetation type. We studied the scale invariance and robustness of SOC in different scale and different vegetation, and compared the results with the traditional CA (cellar automata) forest fire model simulation. The research shows that the forest fires in north China have the characteristic of self-organized behavior, and the forest fuel has got the critical condition, α is between 1.8~2.86, the behavior presents self-similar in different scale and different vegetation, has the robustness characteristic. When the area is small, impacted by finite-size effect, size-frequency line in log-log hyperbola has distinct peak.

Key words: forest fire; fire disturbance; lightning fire; SOC

文章编号:1000-0933(2004)08-1803-05 中图分类号:S7 文献标识码:A

火干扰对于森林生态系统的结构与功能起着重要的生态学作用,人为火的产生影响着火干扰的自然格局与进程。火干扰作为森林生态系统中重要的驱动因子一直引起研究者的广泛关注。自然灾害的“频率-面积”关系对于预测灾害的发生和减轻自然灾害具有重要意义^[1,2],而稳定的频率-面积的幂率关系与自组织临界性密切相关。1988 年 Bak^[3]等提出自组织临界性的概念,用来解释他们所构造的一个简单细胞自动机的模型。自组织临界性用来解释自然界中的一些分形结构^[1,5],关于它的研究涉及了理论研究和数值模拟等各个方面^[6~9]。人们构造了一系列的数值模型来解释一些自然现象,如沙丘模型^[10,11]、滑块模型^[12~13]、森林火灾模型^[14~19]、生物进化模型^[9,20]、化学反应^[21]等。

基金项目:国家科委“973”资助项目(2001CB409600)

收稿日期:2003-04-04;修订日期:2004-03-10

作者简介:王明玉(1976~),男,山东龙口人,助研。主要从事森林火灾研究。E-mail:fire@forestry.ac.cn

Foundation item: China NKBRF Project (No. 2001CB409600)

Received date: 2003-04-04; Accepted date: 2004-03-10

Biography: WANG Ming-Yu, mainly engaged in forest fire, E-mail: fire@forestry.ac.cn

Drosselt^[16]等 1992 年基于元胞自动机提出森林火灾模型,在它的模型中,森林是由二维网格表示,1 代表森林,0 代表空地,树木以概率 p 生长,森林火灾以概率 f 由雷击引发($p \ll f$),当火灾发生时,林火沿有林地的相邻的单元向外蔓延,林地变为空地。在此模型中,燃烧速度没有限制,并设定燃烧的平均面积,与之相关的唯一参数为 $a = p/f$,当 $a \rightarrow \infty$ 时,则达到临界状态。此模型涉及两个时间尺度,可燃物的缓慢积累和能量的快速释放。基于此基本模型,以后的研究者对其进行了一系列的改进。

森林火灾的发生面积与发生频率在双曲线上符合幂率关系^[16~19],用数学表达为:

$$N(S > s) \propto s^{-\alpha}$$

这里 N 表示火烧面积大于 s 的火烧次数, α 表示临界指数,当 $\alpha = 1$ 时表示小面积的火灾与大面积火灾对总火灾面积具有相同的贡献。当火烧面积过大或者森林总的面积过小时,会出现有限面积效应现象^[4,5,18]。

除了通过森林火灾模型来研究来研究森林火灾的自组织性外,许多研究者收集了大量的森林火灾历史数据,通过历史数据来对森林火灾的自组织性研究。如 Drossel^[16],宋卫国^[1,4],Ricotta^[19]等,结果表明,森林火灾具有自组织临界性。但是在森林火灾元胞自动机模型中,火源为随机的雷击火,并且受复杂外界条件的影响:如地形、气象、植被、人力扑救等^[20]。在以往的研究中,研究者一般将所有的火源均视为雷击火,并且是随机的,而实际上,人为火源占据着林火发生的很大一部分,并且由于人为火多集中在与人类活动较为临近的区域,因此人为火在一定程度上并不是完全随机的。同样在以后的研究中,人们一般将所研究的区域视为同质的植被类型,或者考虑不同地理区域的不同的可燃物类型,很少考虑不同植被之间的差异,事实上不同植被不但影响着火发生,同时也影响着火行为。本文在分别考虑在雷击火和不同植被条件下,在不同的空间尺度中来描述森林火灾的自组织临界性。在实际的森林火灾数据中,很难对有限面积效应的尺度进行定量评价,本文用不同尺度的森林面积对有限面积效应进行分析,分析在真实的森林火灾中有限面积效应的表现。

1 研究对象与方法

1.1 研究对象

研究区域分为两个尺度:一是较大尺度的黑龙江省,研究不同可燃物类型下的自组织临界性;一是呼中区,研究雷击火的自组织临界性。

黑龙江省位于东经 $121^{\circ}11' \sim 135^{\circ}05'$,北纬 $43^{\circ}25' \sim 53^{\circ}23'$,面积约 45.4 万 km^2 。地带性植被为寒温带针叶林和温带针阔叶混交林。森林主要分布在大兴安岭、小兴安岭、张广才岭、老爷岭和完达山等地区。松嫩平原和三江平原基本是少林地区。天然林比重大、人工林少。

黑龙江省是全国森林防火的重点省份,年均森林过火面积居全国之首,是火灾危害最严重的地区。

雷击火的研究区域选择地处寒温带针叶林区的黑龙江省大兴安岭北部原始林区呼中区,该区地处大兴安岭主山脉东坡,伊勒呼里山脉北坡,西部与内蒙古相邻,地理坐标为东经 $122^{\circ}42'14'' \sim 123^{\circ}18'05''$,北纬 $51^{\circ}17'42'' \sim 51^{\circ}56'31''$ 之间,总面积 94 万多 hm^2 ,其中林地面积 60 多万 hm^2 。

本地区属于中低山冻土地貌,海拔多在 $700 \sim 1200 \text{ m}$ 之间,坡度较大,最高山峰海拔 1404 m ,平均海拔 812 m ,是森林火灾发生较多的区域。该区植被属寒温带针叶林区,森林类型以兴安落叶松-偃松(*Larix gmelinii*-*Pinus pumila*)和偃松灌丛为主,分布遍及全区,还有少量白桦林(*Betula platyphylla*)和樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongolica*)。

1.2 研究方法

收集 呼中区植被分布数据,1965~2002 年呼中区雷击火数据、黑龙江省 1981~2000 年森林火灾数据及植被分布数据。呼中区雷击火数据包括雷击火和不明原因引起的森林火灾,黑龙江省 1981~2000 年森林火灾数据包括火灾面积、地理坐标等,植被分布图将本区的可燃物根据植被类型分为:落叶松造林地、防护林、红松林、阔叶混交林、针阔混交林、云冷杉林、落叶松林、樟子松林。

用 ARCGIS8 将呼中区植被数据与黑龙江省植被分布数据数字化并进行投影变换,根据黑龙江省火灾数据的地理坐标,将之在 ARCGIS8 中叠加,并以此点为圆心作圆缓冲区,并与黑龙江省的植被分布数据进行叠加,求得每次火灾所燃烧不同可燃物类型面积的近似数据(表 1)(其中云冷杉林面积过小,不做计算)。将火灾面积与之发生的频率在双对数曲线下作

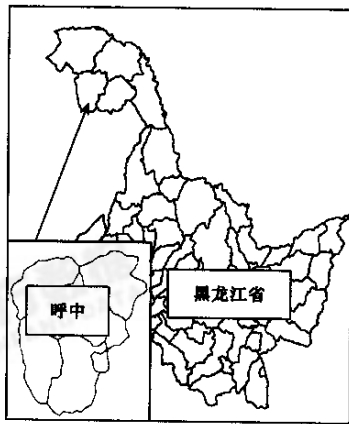


图 1 研究区域位置

Fig. 1 Study Area

图,并进行回归分析。

表 1 黑龙江省各类型森林植被面积
Table 1 Area of different vegetation type in Heilongjiang Province

森林植被类型 Vegetation type	落叶松造林地 ^①	防护林 ^②	红松林 ^③	阔叶混交林 ^④	针阔混交林 ^⑤	落叶松林 ^⑥	樟子松林 ^⑦
火灾次数(>1 hm ²)Number of fires	29	949	17	603	60	149	48
森林面积(×10 ⁴ hm ²)Forest area	88.6	2678.2	68.2	1063.8	178.6	425.0	34.1

①Larch plantation; ②Shelter forest; ③Korean pine forest; ④Broadleaf mixed forest; ⑤Conifer and broadleaf mixed forest; ⑥Deciduous conifer forest; ⑦Mongolian scotch forest

2 结果与分析

2.1 森林火灾模型的模拟

2.1.1 森林火灾模型演化规则 本文比较所采用的森林火灾模型是经典的森林火灾模型^[16],该模型为二维模型,用二维网格来表示森林,每个结点表示一棵树。其演化规则如下:

一棵着火的树的结点变为空地;如果一棵树最近邻的几棵树(上、下、左、右)中的任一棵树正在燃烧,那么它就被点燃;每一时间步中,随机选取一个结点,如果它为空地,则树木长出并在本时间步内完成;如果最近邻不存在着火状态,则该树以概率 f 被点燃。

森林火灾模型包括树木连续的生长(概率 p)和随机的雷击火发生(概率 f),比如 $f/p=1/100$ 表示在一定时间步内每发生一次雷击火(点燃或不点燃),会有 99 次生成树的机会(成活或不成活)^[16,18]。

2.1.2 森林火灾模型模拟结果 本文基于经典的森林火灾模型分别对不同的生长概率 p 和点火概率 f 进行模拟(图 3),的 p/f 依次为 500、1000、2000,在双对数曲线下作图,其拟合直线斜率依次为 -1.07 、 -1.29 、 -1.32 。可以看出,随着 p/f 值的增大,斜率的绝对值也增大。在森林火灾发生中意味着小面积的森林火灾对森林火灾的总体燃烧中的贡献增大。

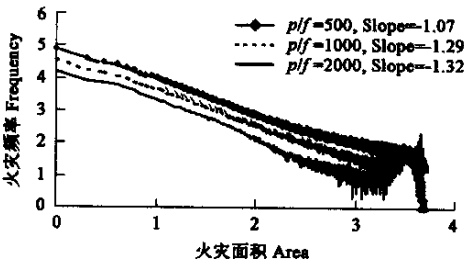


图 2 森林火灾模型模拟结果

Fig. 2 The simulation result of forest fire model

2.2 雷击火的自组织临界性研究

雷击火在自然灾害的主要部分,统计呼中 1965~2002 年共 130 场雷击火,对所有的雷击火数据($s>1\text{hm}^2$)与其发生的频率在双对数坐标系下做图(图 3),其拟合直线的斜率为 -2.26 ,表现出良好的“面积-频率”幂率关系,但比以上模型模拟结果都偏大。其原因在于:(1)在进行模型模拟时其 p/f 值过小,也就是说在进行模拟时森林火灾远远没有达到临界状态。事实上在真实的森林环境中 $p\gg f$,Grassberg^[17]对森林火灾模型进行了更接近于临界值的模拟($p/f=256000$),与 Grassberg 的模拟结果有很好的对应关系。(2)由于所研究的区域是国家级自然保护区,自 1984 年以来得到了很好的保护,整个区域的防火设施和防火力量都比较健全,许多火灾都是在没有扩大的情况下就已扑灭,也就是在研究区域内,中小面积的火灾对整个森林的贡献比较大。

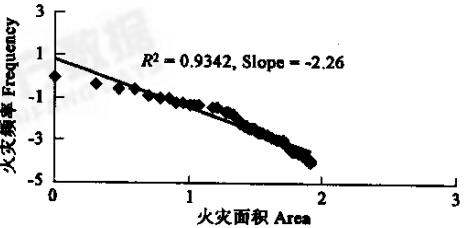


图 3 呼中区森林火灾面积-频率分布

Fig. 3 Distribution of size-frequency of Forest fires in Huzhong

(3)在保护区内,森林植被在长期的保护状态下,已经远远超过临界状态,在以后较长的时期内更具备发生大面积火灾的条件。

2.3 不同可燃物类型条件下的自组织临界性研究

分别统计不同可燃物类型下林火发生的次数与面积,将其发生的频率-面积数据在双对数坐标系下作图,分别计算其拟合直线的斜率,即临界值 α (图 4)。

历史数据森林火灾的面积频率关系表现出比较好的幂率关系,真实数据拟合直线的斜率比模型结果偏大,这说明这些年的森林火灾发生以中小面积为主,并且森林可燃物的积累远大于临界状态,在未来几十年中具有发生大面积火灾的可燃物条件。森林火灾的发生除了受可燃物影响外还受气候、地形、人为扑救等多种因素的影响,而不同可燃物类型之间的差异,主要受人为因素及植被分布的影响。图 4 的拟合直线的斜率具有很好的自相似性。

可以看出,不同可燃物类型的地区,其“面积-频率”关系也会有所不同。对于大面积的森林来说,可以认为不同植被类型的点火概率是相同的,对于同一地区来说,其所表现出来的“面积-频率”关系主要受不同植被类型的影响,在这种情况下,树种的燃烧性

成为影响频率面积分布的主要因素。同时由于人的因素在森林火灾的发生过程中具有重要作用,并且不同森林类型分布的区域差异,树种的燃烧性并不能完全成为评价一种森林类型发生火灾和火灾面积大小的指标,而根据历史火灾数据面积-频率关系,其拟合直线斜率的差异可以成为考核不同类型植被发生火灾程度的一个综合考核指标。

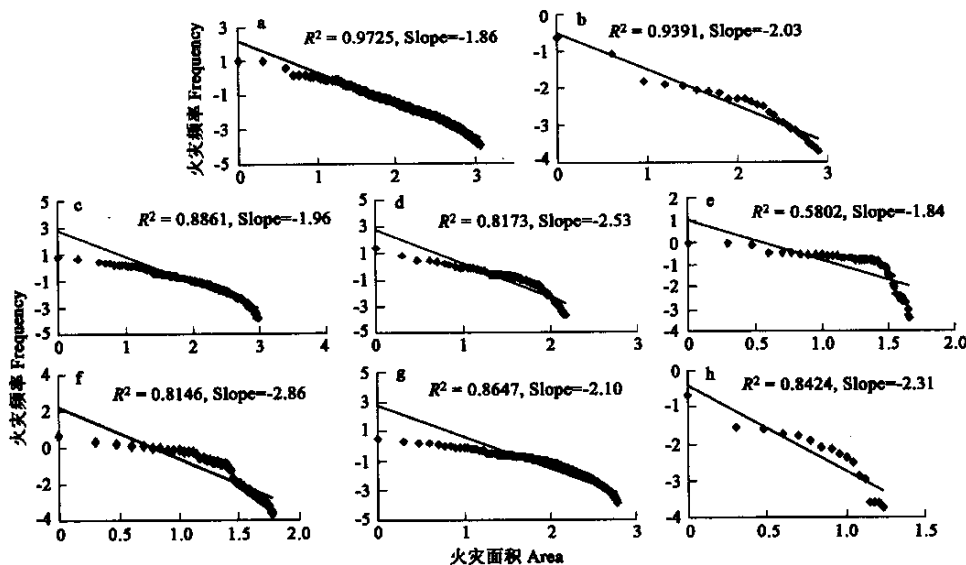


图4 黑龙江省及黑龙江省内不同植被类型森林火灾的频率-面积分布

Fig. 4 Distribution of size-frequency of forest fires in all forest and different vegetation type in Heilongjiang Province

a. 黑龙江全省森林火灾数据 Forest fires in Heilongjiang Province; b. 落叶松造林地火灾数据 Forest fires in Larch plantation; c. 防护林火灾数据 Forest fires in Shelter forest; d. 落叶松火灾数据 Forest fires in deciduous conifer forest; e. 樟子松林火灾数据 Forest fires in Mongolian Scotch forest; f. 针阔混交林火灾数据 Forest fires in conifer and broadleaf mixed forest; g. 阔叶混交林火灾数据 Forest fires in broadleaf forest; h. 红松林火灾 Forest fires in Korean pine forest

人为扑救对于大面积的森林火灾的作用是有限的,而对于中小面积的火灾,人为扑救对于火灾的蔓延仍会起重要作用。与1950~1989年研究结果^[1]1.09相比较, α 值有比较大的增加,1987年以后,森林防火力度的加强和人工林的增加都可能是影响可燃物积累的有效因素。

2.4 森林火灾的有限面积效应问题

在森林火灾模型的模拟过程中,由于模拟尺度的有限性,会出现有限面积效应问题,在真实的森林火灾系统中,这种现象也会存在。对有限面积效应影响的因素是多方面的,象穿过森林的河流、道路、防火林带等,其本质是森林火灾的自组织临界性受森林总面积和火烧面积的影响。

宋卫国等^[4]对有限面积效应问题进行了模拟,结果表明随着森林总面积的减少,面积-频率在双对数曲线下的分布在大面积或较大面积的分布会出现频率峰现象,由图4可以看出,随着森林总面积的减少,面积-频率曲线出现明显的波动现象,并且随着森林总面积的减少,这种波动更加明显。这表明,大面积的均一的森林类型容易发生大面积的森林火灾,而有效地多种植被类型的交错对控制大面积的森林火灾具有意义。

3 结论与讨论

在经典的森林火灾模型中,由于 f/p 值偏大使模拟的结果比真实的森林火灾数据的统计结果小,而在真实的森林生态系统中 $f/p \rightarrow \infty$,也就是说,林火发生的概率远小于树木生长的概率,在东北林区其 α 值在1.8~2.86之间,森林火灾发生以中小面积为主。

不同植被类型的森林火灾的频率-面积关系有所不同,植被燃烧性的差异和扑火的难易程度是影响这种差异的主要因素。对于燃烧性比较高、扑火力量不易到达的森林植被所在的区域更易发生较大面积的火灾,相应的其 α 值也会偏小;反之亦然。人工林的增加也是影响频率分布的一个重要因素,造林的增加相当于 p 增大,也就是使 f/p 有减小的趋势。

在真实的森林火灾中,也会存在有限面积效应现象,对于面积较小的樟子松表现尤为明显,对于黑龙江全省的森林面积认为面积足够大,可以认为不存在有限面积效应现象。并且,随着森林总面积的减小,面积-频率在火灾面积较大面积的区域出现

明显的频率峰。

呼中区、黑龙江省全省及不同类型植被类型下的自然火和雷击火的自组织具有自相似性,这表明在一定范围内自组织在不同尺度、不同植被类型条件下具有自相似的特征。雷击火是自然火的主要部分,人类的干扰一方面使火灾烧毁的面积减少,又使火烧的次数增加。中小面积森林火灾的发生频率可以用于预测未来大面积火灾发生的危险程度,在东北林区和呼中区,森林可燃物的积累已经远大于临界状态,具有发生大面积森林火灾的可燃物条件。如何减少和降低这些可燃物,这对减少发生大面积森林火灾具有重要意义。

References:

[1] Song W G, Fan W C, Wang P H. Self-organized criticality of forest fires in China. *Chinese Science Bulletin*, 2001, **46**(13):1134~1137.

[2] Bak P. Catastrophes and self-organized criticality. *Computers in Physics*, 1991, **5**: 430~433.

[3] Bak P, Tang C, Wiesenfeld K. Self-organized criticality. *Phys. Rev. A.*, 1988, **38**:364~374.

[4] Song W G, Fan W C, Wang P H. Influences of finite-size effects on the self-organized criticality of forest-fire model. *Chinese Science Bulletin*, 2002,**47**(3):177~180.

[5] Schenk K, Drossel B, Clar S, *et al.* Finite-size effects in the self-organized critical forest-fire model. *Eur. Phys. J. B.*, 2000,**15**:177~185.

[6] Bak P. *How Nature Works; the Science of Self-Organized Criticality*. New York: Springer Verlag, 1996. 20~47.

[7] Bak P, Tang C, Wiesenfeld K. Self-organized criticality; an explanation of 1/f noise. *Physical Review Letters*, 1987,**59**:381~384.

[8] Bak P, Kan Chen, Michael Creutz. Self-Organized Criticality in the “Game of Life”. *Nature*, 1989,**342**:780~782.

[9] Ito K. Punctuated equilibrium model of biological evolution is also a self-organized critical model of earth-quakes. *Phys. Rev. E.*, 1995, **52**: 3232~3233.

[10] Feder J. The evidence for self-organized criticality in sand-pile dynamics. *Fractals*, 1995,**3**:431~443.

[11] Noever D A. Himalayan sandpiles. *Phys. Rev. E.*, 1993,**47**:724~725.

[12] Carson M, Langer J S. Mechanical model of an earthquake fault. *Phys. Rev. A.*, 1989,**40**:6470~6484.

[13] Ito K, Matsuzaki M. Earthquakes as self-organized critical phenomena. *J. Geophys. Res. B.*, 1990,**95**:6853~6860.

[14] Bak P, Chen K, Tang C. A forest-fire model and some thoughts on turbulence. *Phys. Lett. A.*, 1990,**147**:297~300.

[15] Clar S, Drossel B, Schwabl F. Forest Fires and Other Examples of Self-Organized Criticality. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 1996,**8**:6803~24.

[16] Drossel B, Schwabl F. Self-Organized Critical Forest-Fire Model. *Physical Review Letters*, 1992,**69**(11): 1629~32.

[17] Grassberger P. Critical behavior of the Drossel-Schwabl forest fire model. *New Journal of Physics*, 2002,**4**:17. 1~17. 15.

[18] Malamud B D, Morein G, Turcotte D L. Forest fires: Anexample of self-organized critical behaviour. *Science*, 1998,**28**:1840~1842.

[19] Ricotta C, Avena G, Marchetti M. The flaming sandpile: Self-organized criticality and wildfires. *Ecological Modeling*, 1999,**119**:73~77.

[20] Bak P, Sneppen K. Punctuated equilibrium and criticality in a simple model of evolution. *Phys. Rev. Lett.*, 1993,**71**(24):4083~4086.

[21] Simoyi R H, Wolf A, Swinney H L. One Dimensional Dynamics in a Multi-Component Chemical Reaction. *Phys. Rev. Lett.*, 1982, **49**: 245.

[22] Shu L F, Kou X J. Application of computational simulation and visible technology in fire science research. *Fire safety science*, 2001, **10** (3): 140~148.

参考文献:

[1] 宋卫国,范维澄,汪秉宏.中国森林的自组织临界性. *科学通报*,2001, **46**(13):1134~1137.

[4] 宋卫国,范维澄,汪秉宏.有限尺度效应对森林火灾模型自组织临界性的影响. *科学通报*, 2002,**47**(3):177~180.

[22] 舒立福,寇晓军,火灾科学.森林特殊火行为格局的卫星遥感研究. *火灾科学*,2001, **10**(3): 140~148.