

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

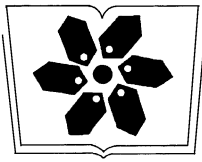
Acta Ecologica Sinica



第 32 卷 第 19 期 Vol.32 No.19 **2012**

中国生态学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 32 卷 第 19 期

2012 年 10 月 (半月刊)

目次

中国野生东北虎数量监测方法有效性评估	张常智, 张明海, 姜广顺 (5943)
城市居民食物氮消费变化及其环境负荷——以厦门市为例	于洋, 崔胜辉, 赵胜男, 等 (5953)
珠江口水域夏季小型底栖生物群落结构	袁俏君, 苗素英, 李恒翔, 等 (5962)
2010 年夏季雷州半岛海岸带浮游植物群落结构特征及其与主要环境因子的关系	 (5972)
阿根廷滑柔鱼两个群体间耳石和角质颞的形态差异	龚玉艳, 张才学, 孙省利, 等 (5972)
黄河三角洲滨海草甸与土壤因子的关系	方舟, 陈新军, 陆化杰, 等 (5986)
盘锦湿地净初级生产力时空分布特征	谭向峰, 杜宁, 葛秀丽, 等 (5998)
菜豆根瘤菌对土壤钾的活化作用	王莉雯, 卫亚星 (6006)
花生植株和土壤水浸液自毒作用研究及土壤中自毒物质检测	张亮, 黄建国, 韩玉竹, 等 (6016)
遮荫对金莲花光合特性和叶片解剖特征的影响	黄玉茜, 韩立思, 杨劲峰, 等 (6023)
火干扰对小兴安岭草丛、灌丛沼泽温室气体短期排放的影响	吕晋慧, 王玄, 冯雁梦, 等 (6033)
古尔班通古特沙漠南部植物多样性及群落分类	顾韩, 牟长城, 张博文, 等 (6044)
黄土高原樟子松和落叶松与其他树种枯落叶混合分解对土壤的影响	张荣, 刘彤 (6056)
长期集约种植对雷竹林土壤氨氧化古菌群落的影响	李茜, 刘增文, 米彩红 (6067)
H ₂ O ₂ 参与 AM 真菌与烟草共生过程	秦华, 刘卜榕, 徐秋芳, 等 (6076)
北京山区防护林优势树种分布与环境的关系	刘洪庆, 车永梅, 赵方贵, 等 (6085)
旱直播条件下弱化感潜力水稻根际微生物的群落结构	邵方丽, 余新晓, 郑江坤, 等 (6092)
不同森林类型根系分布与土壤性质的关系	熊君, 林辉锋, 李振方, 等 (6100)
臭氧胁迫下硅对大豆抗氧化系统、生物量及产量的影响	黄林, 王峰, 周立江, 等 (6110)
垃圾填埋场渗滤液灌溉对土壤理化特征和草本花卉生长的影响	战丽杰, 郭立月, 宁堂原, 等 (6120)
稻麦轮作系统冬小麦农田耕作措施对氧化亚氮排放的影响	王树芹, 赖娟, 赵秀兰 (6128)
不同施氮措施对旱作玉米地土壤酶活性及 CO ₂ 排放量的影响	郑建初, 张岳芳, 陈留根, 等 (6138)
北方农牧交错区农业生态系统生产力对气候波动的响应——以准格尔旗为例	张俊丽, 高明博, 温晚霞, 等 (6147)
.....	孙特生, 李波, 张新时 (6155)
辽宁省能源消费和碳排放与经济增长的关系	康文星, 姚利辉, 何介南, 等 (6168)
基于 FARSITE 模型的丰林自然保护区潜在林火行为空间分布特征	吴志伟, 贺红士, 梁宇, 等 (6176)
不同后作生境对玉米地天敌的冬季保育作用	田耀加, 梁广文, 曾玲, 等 (6187)
云南紫胶虫种群数量对地表蚂蚁多样性的影响	卢志兴, 陈又清, 李巧, 等 (6195)
阿波罗绢蝶种群数量和垂直分布变化及其对气候变暖的响应	于非, 王吟, 王绍坤, 等 (6203)
专论与综述	
海水养殖生态系统健康综合评价: 方法与模式	蒲新明, 傅明珠, 王宗灵, 等 (6210)
海草场生态系统及其修复研究进展	潘金华, 江鑫, 赛珊, 等 (6223)
水华蓝藻对鱼类的营养毒理学效应	董桂芳, 解绶启, 朱晓鸣, 等 (6233)
环境胁迫对海草非结构性碳水化合物储存和转移的影响	江志坚, 黄小平, 张景平 (6242)
生态免疫学研究进展	徐德立, 王德华 (6251)
研究简报	
喀斯特峰丛洼地不同森林表层土壤有机质的空间变异及成因	宋敏, 彭晚霞, 邹冬生, 等 (6259)
准噶尔盆地东南缘梭梭种子雨特征	吕朝燕, 张希明, 刘国军, 等 (6270)



封面图说: 岸边的小白鹭——鹭科白鹭属共有 13 种, 其中有大白鹭、中白鹭、白鹭 (小白鹭)、黄嘴白鹭等, 体羽皆是全白, 世通称白鹭。夏季的白鹭成鸟繁殖时枕部着生两条狭长而软的矛状羽, 状若双辫, 肩和胸着生蓑羽, 冬季时蓑羽常全部脱落, 白鹭虹膜黄色, 嘴黑色, 脚部黑色, 趾呈黄绿色。小白鹭常常栖息于稻田、沼泽、池塘水边, 以及海岸浅滩的红树林里。白天觅食, 好食小鱼、蛙、虾及昆虫等。繁殖期 3—7 月。繁殖时成群, 常和其他鹭类在一起, 雌雄均参加营巢, 次年常到旧巢处重新修葺使用。

彩图提供: 陈建伟教授 北京林业大学 E-mail: cites.chenjw@163.com

DOI: 10.5846/stxb201109111333

吴志伟, 贺红士, 梁宇, 罗旭, 蔡龙炎. 基于 FARSITE 模型的丰林自然保护区潜在林火行为空间分布特征. 生态学报, 2012, 32(19): 6176-6186.

Wu Z W, He H S, Liang Y, Luo X, Cai L Y Y. Spatial distribution characteristics of potential fire behavior in Fenglin Nature Reserve based on FARSITE Model. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(19): 6176-6186.

基于 FARSITE 模型的丰林自然保护区 潜在林火行为空间分布特征

吴志伟, 贺红士*, 梁宇, 罗旭, 蔡龙炎

(森林与土壤生态国家重点实验室, 中国科学院沈阳应用生态研究所, 沈阳 110164)

摘要: 将 FARSITE 火行为模型应用于丰林自然保护区林火行为预测, 并根据 Rothermel 和 Rinehart 制定的林火行为等级标准, 编制潜在林火行为空间区划图, 以探讨林火行为的空间分布特征。研究表明: 在有可能、易发生和极易发生 3 个森林火险等级下, 丰林自然保护区林火行为主要分布在 Class I 和 Class II 等级上, 使用手工工具可能从火头控制火势蔓延; 林火行为等级空间分布特征较为明显, Class III 等级的火行为主要分布在区域中东部, Class II 主要分布在区域中部, 而 Class I 则主要分布在区域四周; 高强度林火行为主要分布在可燃物模型为 FL-I 和 FL-II, 海拔为 300—400 m、坡度为平坡和缓坡、坡向为阳坡上。高强度林火发生在接近道路与居民点 500 m 的区域内分布面积明显高于分布在距离道路居民点 500—1000 m 和 1000—1500 m 区域。

关键词: FARSITE; 林火行为; 空间分布; 模拟; 丰林保护区

Spatial distribution characteristics of potential fire behavior in Fenglin Nature Reserve based on FARSITE Model

WU Zhiwei, HE Hongshi*, LIANG Yu, LUO Xu, CAI Longyan

State Key Laboratory of Forest and Soil Ecology, Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110164, China

Abstract: Forest fire plays an important role in determining the species composition, age structure, and ecological processes of forest ecosystems. The high forest fuels accumulation coupled with a warmer and drier climate in recent decades makes the study of potential fire behavior of great practical significance. However, most forest fire behavior studies have been conducted at the plot-to-stand levels that cannot meet the landscape-to-regional levels fire management requirements. Researchers and managers are increasingly interested in spatially explicit fire simulation models that can simulate fire spread processes at larger spatial and temporal scales for use in fire management, planning, and scientific analyses. Thus, the main objective of this study was to simulate the potential fire behavior in Fenglin Nature Reserve under the low, moderate and extreme fire danger ratings with a spatially explicit fire behavior simulation model, FARSITE (Fire Area Simulator). According to the fire severity danger standard developed by Rothermel and Rinehart, potential fire behavior zone maps were obtained based on the FARSITE simulation results. Main conclusions from this study were drawn: 1) Under the low fire danger rating, the potential burned areas of classes I, II, III for Fireline intensity were 17765.82 hm², 105.5 hm², and 1.89 hm², respectively. The potential burned areas of classes I, II, and III for Flame length were 17722.71 hm², 61.47 hm², and 0.81 hm², respectively. Under the moderate fire danger rating, the potential burned areas of classes I, II, III for Fireline intensity were 16349.04 hm², 1483.92 hm², and 6.75 hm², respectively. The potential burned areas of classes

基金项目: 中国科学院知识创新工程重大项目(KZCX2-YW-444); 国家自然科学基金资助项目(41071120)

收稿日期: 2011-09-11; **修订日期:** 2012-02-14

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: heh@missouri.edu

I, II, and III for Flame length were 15785.10 hm^2 , 2033.37 hm^2 , and 21.24 hm^2 , respectively. Under the extreme fire danger rating, the potential burned areas of classes I, II, III for Fireline intensity were 7950.78 hm^2 , 7540.38 hm^2 , and 2351.52 hm^2 , respectively. The potential burned areas of classes I, II, and III for Flame length were 7108.65 hm^2 , 7263.54 hm^2 , and 3470.49 hm^2 , respectively. The results showed that under the low, moderate and extreme high fire danger rating, the potential fire behavior were mainly distributed on the Class I and class II that can be controlled by persons using hand tools at the head or flanks of fires; 2) The spatial distribution characteristic of fire was obvious. The Class III were mainly distribution on the mid-eastern region, Class II were mainly distribution on the middle region, and Class I were widely distribution on the edge of the region; 3) The high fire danger areas were distribution of the fuel model FL-I and FL-II, elevation gradient 300—400 m, slope gradient flat slope and gentle slope. High intensity fire within 500 m road and settlement was much more than that between 1000 and 1500 m; 4) The result may give a useful suggestion for fire and fuel management in Fenglin natural reserve. In the future the research should concentrate on validating the simulated results using observed fire behavior in Fenglin Nature Reserve.

Key Words: FARSITE; fire behavior; spatial distribution; simulation; Fenglin Nature Reserve

林火作为森林生态系统中极为活跃的干扰因子,对维持森林生态系统多样性和森林健康起着举足轻重的作用^[1],但是失去人为控制的火烧,任其在森林内自由蔓延则不仅会毁灭大面积的森林资源,同时还对人类的财产及生态环境造成巨大的危害^[2-4]。因此,如何对林火的类型、强度、蔓延速度及其空间分布等林火行为进行预测,进而提出有效的林火管理策略,成为各国森林生态学家、林学家和森林管理部门关注的焦点^[5-6]。

林火的发生和蔓延与地形、气象和森林可燃物密切相关,具有显著的空间变异性^[7-9]。综合区域植被覆盖类型、地形条件和气象状况,将森林火险区域划分为不同等级的空间地域,以表征林火发生和蔓延的空间差异性,实现林火管理的因地制宜性,成为一项重要的森林防火技术策略。长期以来,许多林火管理部门和研究人员根据当地的实地情况,实施了大量的林火行为野外试验研究^[10-12]。然而,大多数试验都是在林分尺度上进行的,样点上的试验研究的结果并不能满足景观和区域尺度上林火管理的需求。在景观尺度上,野外实验研究通常超过了实时观测(时间)与实地试验(空间)的能力,且野外燃烧实验不仅资金投入大,风险高,一旦失去控制很容易引发森林火灾^[4,13-16]。

随着空间信息技术和计算机技术的发展,利用计算机模型模拟林火发生和蔓延的空间分布规律深受林火管理和研究者的青睐^[17-18]。计算机火行为模型能够根据地形、气象和森林可燃物等林火因子,对林火的发生和蔓延过程进行模拟,实时、动态地预测林火的空间蔓延方向与速率,为及时、科学地布设防火隔离带,合理调动灭火资源,有效扑灭林火提供决策依据。作为新一代林火行为模拟模型的代表,FARSITE 模型不仅考虑了可燃物垂直结构及载量的空间分异特征,而且综合了地形和气象条件的微尺度的变异,模拟过程具有极强的空间直观性,模拟结果能够以地图形式输出,每一张图可以反映某一林火行为的瞬时状态,其模拟结果能够为林火行为空间区划提供科学依据^[19]。

小兴安岭丰林自然保护区自然资源丰富、植被群落类型复杂多样,是我国目前保存下来最为典型和完整的原生阔叶红松混交林分布区之一,也是中国和亚洲东北部很具代表性的温带原始红松针阔叶混交林区。但是,长期以来由于受外界干扰(人为或自然)较少,单纯依赖自然演替和更新,保护区龄组老化日趋严峻,林内地表可燃物载量高,极易引发森林火灾。因此,本研究以 FARSITE 模型为技术支撑,模拟丰林自然保护区潜在林火行为的空间分布特征,以期为林火管理和可燃物处理提供参考。

1 材料与方法

1.1 丰林自然保护区概况

丰林自然保护区位于小兴安岭南坡中段北缘,黑龙江省伊春市五营林业局境内,总面积为 18165.4 hm^2 ,森林覆盖率为 95%。保护区地形平缓,属低山丘陵地形,呈孤岛状,三面环水,海拔高度在 285—688 m 之间。

境内主要有汤旺河,丰林河和平原河等 9 条河流,以及季节性流水的小溪,纵贯全区,构成一个完整的水系。受东亚海洋气流及西伯利亚寒流的双重影响,具有大陆性及季风气候相结合的特点。气候严寒,总体上冬季漫长寒冷而夏季短促湿润。年平均温度在 -0.5°C 左右,极端最高气温为 34.9°C ,极端最低气温为 -44.5°C 。年平均降水量在 640.5 mm 左右。土壤主要是发育在阔叶红松林下的地带性土壤-暗棕色森林土,成土母质以花岗岩和片麻岩的风化物为主。

丰林自然保护区植被类型多样,属长白山植物区系小兴安岭亚区,地带性植被为温带针阔叶混交林。针叶树种有红松(*Pinus koraiensis*)、臭冷杉(*Abies nephrolepis*)、云杉(*Picea* spp.)和兴安落叶松(*Larix gmelinii*)等;阔叶树有椴树(*Tilia* spp.)、枫桦(*Betula costata*)、水曲柳(*Fraxinus mandhurica*)、黄檗(*Phellodendron amurense*)、胡桃楸(*Juqlans mandshurica*)、榆树(*Ulmus* spp.)、色木槭(*Acer mono*)、蒙古栎(*Quercus mongolica*)、白桦(*Betula platyphylla*)和山杨(*Populus davidiana*)等^[20]。

1.2 FARSITE 模型

FARSITE(Fire Area Simulator, FARSITE)模型是美国 Missoula 火灾科学实验室开发的空間直观林火行为模拟模型,主要用于模拟不同地形、气象和可燃物下的林火蔓延过程和林火效应^[19]。它是首个集成了现有的地表火、树冠火和飞火等单一火行为模型的集合模型,其模拟过程具有很强的空間直观性,模拟结果能够以地图和表格的形式输出,每一张图和表可以反映某一火行为的瞬时状态。FARSITE 模型的输入参数主要包括景观(地形与可燃物)、天气、风和可燃物湿度。FARSITE 模型采用逐步控制式结构来实现林火模拟过程(图 1)。

1) 利用 GIS 建立地形、林分和可燃物模型图层,并录入相应的参数,建立必要的景观要素文件;

2) 设置模拟参数,主要包括模拟时间步长、空間距离和林火边界的分辨率、模拟的起始和终止时间以及火源点位确定;

3) 模拟运行并解释模拟结果。

1.3 数据准备与模型参数化

1.3.1 景观特征参数化

地形特征参数化:海拔、坡度和坡向。海拔主要用于模拟温度和湿度在不同海拔梯度上的空間变异。坡度用于计算火蔓延的方向效应,并与坡向共同作用确定太阳辐射量以及调整火蔓延速度和方向等。以 ArcGIS 软件为技术支撑,基于 DEM 数字高程模型(30 m $\times$ 30 m)生成了丰林保护区海拔、坡度和坡向图(图 2)。

1.3.2 可燃物特征参数化

可燃物特征主要包括地表可燃物和树冠层可燃物,分别用于计算地表火行为和树冠火行为。地表可燃物以地表火行为可燃物模型表征,主要包括可燃物载量、表面积体积比、床厚度、热值和含水率等。树冠可燃物主要以林冠盖度、树高、冠基高和林冠容重表征。冠层可燃物信息来自丰林自然保护区林相图。

2009 年和 2010 年在丰林自然保护区设置了 20 m $\times$ 20 m 共 52 块典型代表样地。在每个样地内,记录的信息有地理位置(经纬度)、海拔(m)、坡度($^{\circ}$)、坡向(东、南、西、北、东北、西北、西南和东南)和坡位(上、中和下)等立地条件,同时记录样地郁闭度、胸径(cm)、树高(m)和枝下高(m)等林分调查因子。在 20 m $\times$ 20 m 样方内的一条 28 m 对角线上的 7、14 和 21 m 处设置 1 m $\times$ 1 m 和 2 m $\times$ 2 m 的小样方各 3 块,分别用于调查地表死可燃物、草本和灌木层。在 1 m $\times$ 1 m 小样方内,测量草本的高度和盖度,并收割全部草本,称量其湿重并取样装袋;在 2 m $\times$ 2 m 小样方内,测量灌木的高度和盖度,并收割全部灌木,称量其湿重并取样装袋;在 1 m $\times$ 1 m 的小样内,收集不同时滞的地表死可燃物和半腐殖,野外称量其湿重并取样装袋。可燃物分类标准:1 h 时滞可燃物为 $D(\text{直径}) \leq 0.64 \text{ cm}$ 的小枝、树叶以及枯死杂草;10h 滞可燃物为 $0.64 \text{ cm} < D < 2.54 \text{ cm}$ 枝条;100h 时滞可燃物为 $2.54 \text{ cm} < D \leq 7.62 \text{ cm}$ 的粗枝。

本研究采用系统聚类的方法在丰林自然保护区划分了 3 个可燃物模型,代表性植被类型分别为阔叶红松

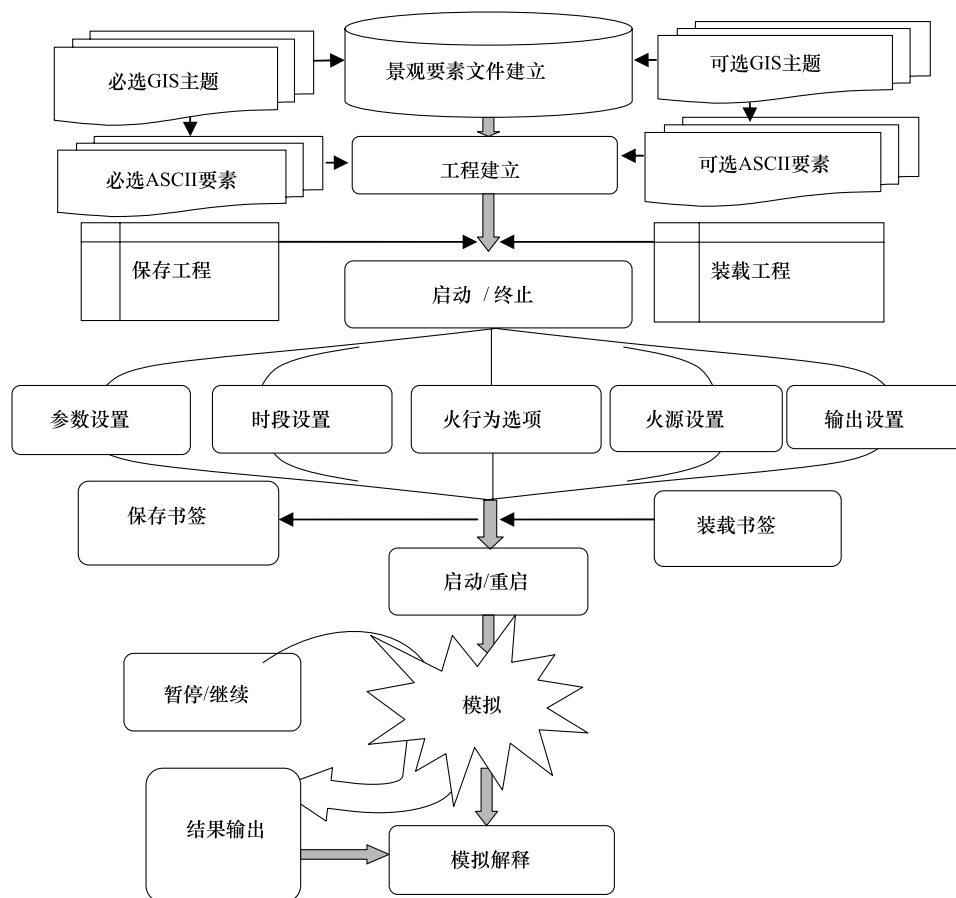


图1 FARSITE 模型运行流程图

Fig. 1 The general flow of FARSITE simulation

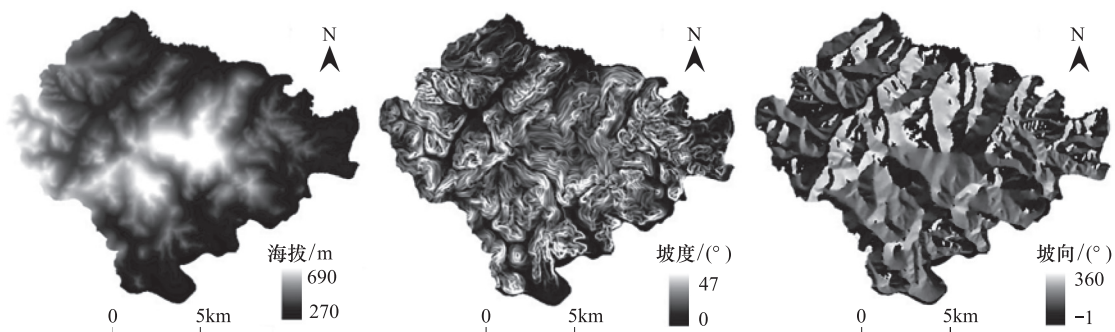


图2 丰林自然保护区地形特征图

Fig. 2 Topography map of Fenglin Natural Reserve

表1 丰林自然保护区可燃物模型定制

Table 1 Custom fuel model values for Fenglin nature reserve

模型 Fuel model	载量 (±S. E.) Fuel loading / (t/hm ²)					床厚度 Fuel bed depth/m	熄灭时含水率 Moisture of extinction Dead fuel /%	热值 Heat content /(kJ/kg)
	1 h	10 h	100 h	草本	灌木			
FL-I	3.08±0.13	0.76±0.08	0.85±0.18	0.19±0.03	0.32±0.03	0.30	30	21880
FL-II	1.43±0.20	0.40±0.06	0.21±0.12	0.28±0.04	0.24±0.05	0.15	20	21695
FL-III	3.60±0.20	1.03±0.12	0.48±0.14	0.14±0.02	0.38±0.05	0.30	30	21045

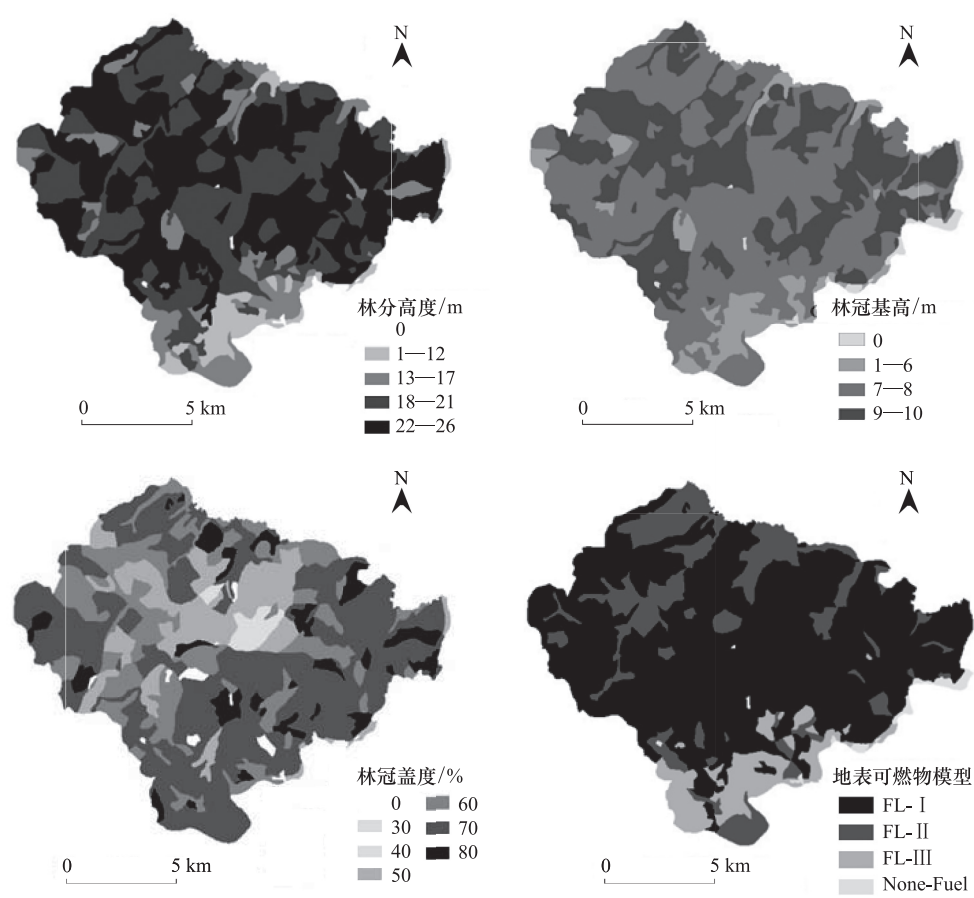


图3 丰林自然保护区可燃物特征图

Fig. 3 Stand and fuel model map of Fenglin Natural Reserve

林(模型 FL-I)、云冷杉林(模型 FL-II)和杨桦林(模型 FL-III)(表1)。林冠盖度、树高、冠基高等参数来源于丰林保护区的林相图(图3)。

1.3.3 气象与可燃物湿度信息

本研究拟模拟在可能发生、易发生和极易发生3个森林火险等级下的林火行为空间分布特征。3个森林火险下的气象及森林可燃物的含水率等信息参考贺萍等^[21]在丰林自然保护区的研究结果而设定(表2,表3)。

表2 森林地被可燃物含水率与森林火险等级关系表

Table 2 The relationship between surface forest fuel moisture and forest fire danger rating							
级别 Class	可燃性 Flammability	气温/℃ Temperature	风力/级 Wind	相对湿度/% Humidity	降水/mm Precipitation	含水率/% Moisture	可能火情 Fire
1	难燃	<-5	<2	>85	>1	>45	基本无火情
2	不易燃	-5—0	<2	65—85	<1	35—45	不易发生
3	较易燃	0—10	2—3	45—65	无降水	25—35	有可能
4	易燃	10—15	> 4	25—45	无降水	15—25	易发生
5	极易燃	>18	<5	<15	无降水	≤15	极易发生

1.4 林火蔓延模拟

1.4.1 火源设置

火源指的是林火来源及其空间分布位置。林火发生具有极强的不确定性,但研究表明居民点和道路附近

是林火高发区,为此本研究在主要道路和居民点附近两个像元内(60 m)随机产生了6个起火点(图4)。

表 3 3 个森林火险等级下的天气条件和可燃物含水率
Table 3 The weather conditions and fuel moisture content under three fire danger rating

火险 Fire danger	极易发生 Extreme	易发生 Moderate	可能发 Low
降雨量 Precipitation/mm	0	0	0
最低温度 minimum temperature/℃	15	10	0
最高温度 maximum temperature/℃	28	18	10
最高湿度 Maximum humidity/%	25	45	65
最低湿度 Minimum humidity/%	15	25	45
风速 Wind speed /(km/h)	33	20	12
1 h 可燃物湿度 1 h fuel moisture/%	3	8	12
10 h 可燃物湿度 10 h fuel moisture/%	4	9	13
100 h 可燃物湿度 100 h fuel moisture/%	5	10	14
草本湿度 Herbaceous moisture/%	70	120	170
灌木湿度 Shrub moisture/%	70	120	170

1.4.2 模拟参数

本研究模拟整个研究区的潜在林火行为空间分布,没有控制林火蔓延的时间及其他因素的干扰(比如扑火),模拟过程至于整个研究区燃烧完毕。在模拟初期,设置了24 h的可燃物湿度调整期。模拟的时间步长设置为30 min,林火蔓延边界和空间距离分辨率分别为60 m和30 m。模拟过程中,开启了树冠火和飞火模拟模块,其中飞火的点燃频度设置为5%。FARSITE 模型模拟输出结果较多,本研究仅选取了火焰长度和火线强度指标,以刻画丰林自然保护区的潜在林火行为特征。

1.4.3 林火行为等级标准

单延龙^[22]和 Rothermel^[23]等人根据林火危害程度和需要采取的扑救措施,将林火行为划分了若干个等级,本研究根据二人的研究结果,拟采用表4所示的标准刻画丰林自然保护区的林火行为空间分布特征。

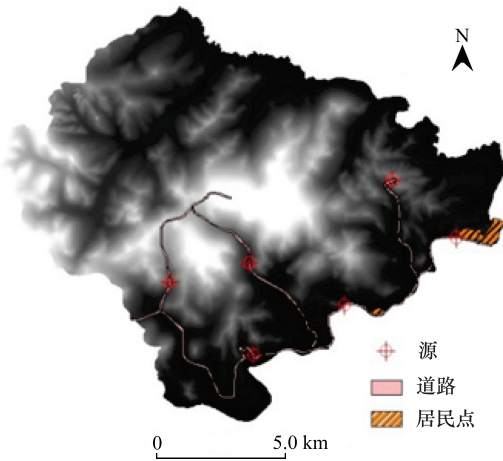


图 4 火源空间位置
Fig.4 Spatial location of fire ignitions

表 4 不同林火烈度下的火行为和扑救措施
Table 4 Fire behavior and suppression measures under different fire severity

林火烈度等级 Fire severity	火行为 fire behavior		火情解释 Interpretation
	火焰长度/m Flame length	火线强度/(kJ·m ⁻¹ ·s ⁻¹) Fireline intensities	
I	<0.8	<170	火势很弱,计划火烧可在该范围执行
II	0.8—1.1	170—350	火势较强,扑火人员需使用二号工具、风力灭火机等扑打火头或火翼;使用手工具可能火头控制火势蔓延
III	1.1—2.5	350—1730	火势强,使用手工工具很难从火头灭火,需使用灭火飞机,消防车等设备才能控制火势
IV	2.5—3.5	1730—3460	火势很强,呈熊熊燃烧态势,可能出现树冠火,飞火等;火头控制火基本无效
V	3.5	3460	火势非常强,出现树冠火和飞火,火头控制火势蔓延无效

2 结果与分析

2.1 潜在林火行为总体特征

从表 5 可以看出,丰林自然保护区,在极易发生、易发生和可能发生 3 个森林火险等级下,潜在林火行为最高等级为Ⅲ。其中,极易发生火情下 3 个火行为等级面积分布较为分散,火焰长度分别占总面积的 40% (7108.65 hm²)、41% (7263.54 hm²) 和 19% (3470.49 hm²),火线强度分别占总面积的 45% (7950.78 hm²)、42% (7540.38 hm²) 和 13% (2351.52 hm²);在易发生和可能发生火情下,则以 Class I 所占面积为据对的优势。

总体来看,在易发生和可能发生火情下,林火行为主要分布在 Class I 和 Class II 等级上,处于 Class III 等级的林火面积非常少,这在一定程度上表明丰林自然保护区在本研究设定的气象条件下,火势一般,通过使用手工工具或者风力灭火机等扑火工具,基本可以在火头或者火翼控制林火蔓延。但在极易发生火情下,有 19% 的区域处于 Class III 等级上,火势强、火险等级较高,是林火管理的重点监护对象。应该有针对性地对区域制定适宜的林火管理策略,如实施可燃物处理,降低可燃物载量,或者设置林火隔离带,有效地控制其蔓延。

显然,林火发生、蔓延与气象条件,尤其是风速密切相关,而且在既定的地形和温度、湿度等气象条件下,风速和风向往往确定了林火蔓延方式和燃烧强度。因此,本研究结果只能反映在该既定的气象条件下的潜在林火行为,在其他气象条件下的林火行为有待进一步研究。这也进一步说明,建立林火行为动态监测系统是十分必要的。

表 5 潜在林火行为总体特征

Table 5 The general characteristics of the potential fire behavior

发生可能 Possibility	等级 Rating	火焰长度 Flame length		火线强度 Fireline intensity	
		面积/hm ² Area	比重/% Ratio	面积/hm ² Area	比重/% Ratio
极易发生 Extreme	Class I	7108.65	40	7950.78	45
	Class II	7263.54	41	7540.38	42
	Class III	3470.49	19	2351.52	13
易发生 Moderate	Class I	15785.10	88	16349.04	92
	Class II	2033.37	11	1483.92	7
	Class III	21.24	1	6.75	1
可能发生 Low	Class I	17722.71	100	17765.82	99
	Class II	61.47	≤1	105.5	≤1
	Class III	0.81	≤1	1.89	<1

2.2 潜在林火行为的空间分异特征

林火行为空间分布反映了火灾的空间蔓延风险,有助于帮助林火管理者设定有针对性的林火防控体系。由图 5—7 可以看出,丰林自然保护区在 3 个火险等级下,火行为等级空间分布特征较为明显,且 3 个火行为等级的空间分布结构类似,即 Class III 等级的火行为主要分布在区域中东部,形成大的连续面;Class II 等级主要分布在区域中部,面积较大,且空间表现为连续;而 Class I 等级面积相对较小,则主要分布在四周,但也成片的连续面。

林火发生和蔓延与林型和立地条件密切相关。在植被类型和局部地形的作用下,一些林班是林火的高发生区域,变现为林火蔓延较快,林火燃烧强度较大。进一步分析发现,在极易发生火情下,Class III 等级的林火行为主要分布在 4、5、6、14、15、22 和 23 等林班内,且在其他林班内也有一定分布,但面积分布相对较小。这表明,这些林班所在区域是丰林自然保护区和林火管理的重点对象,应该采取积极有效的针对性的管理措施,确保林火安全。

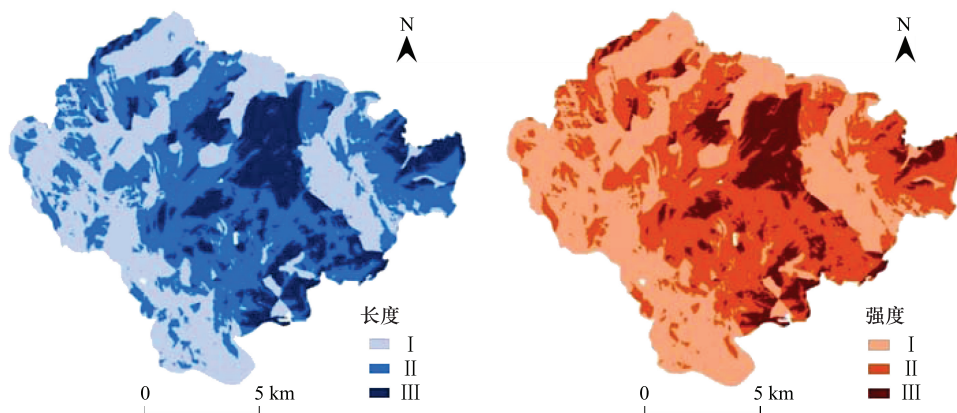


图 5 极易发生火险下火焰长度和火线强度空间分布图

Fig. 5 Spatial distribution of flame length and fire intensity under extreme fire danger

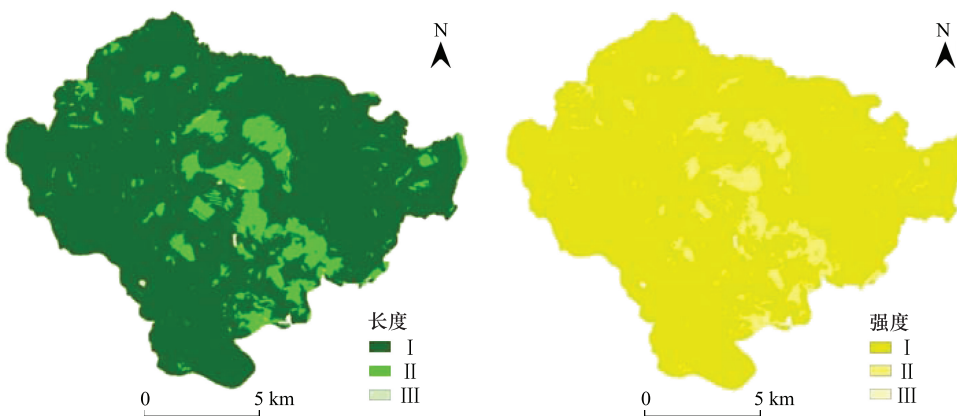


图 6 易发生火险下火焰长度和火线强度空间分布图

Fig. 6 Spatial distribution of flame length and fire intensity under high fire danger

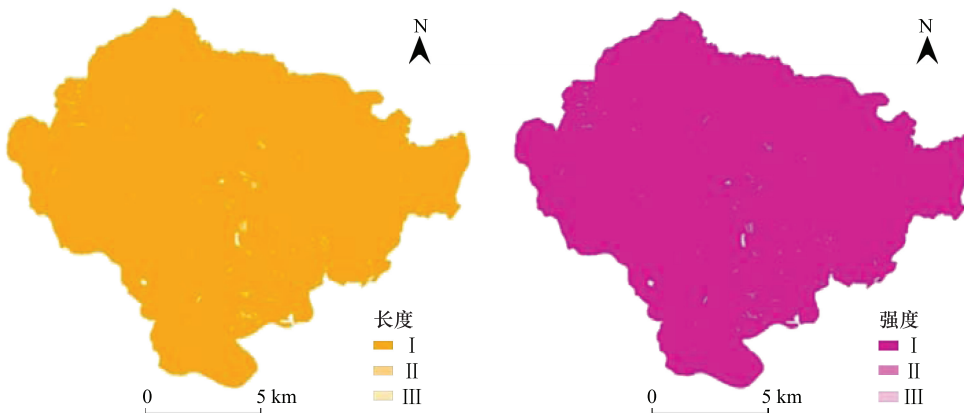


图 7 可能发生火险下火焰长度和火线强度空间分布图

Fig. 7 Spatial distribution of flame length and fire intensity under low fire danger

2.3 潜在林火行为在不同影响因子上的分布特征

影响森林火险因子有气候因子、植被因子、地形因子及人类活动等,并且林火发生和蔓延是在这些影响因子的共同作用下的结果。从表 6 可以看出,3 个火行为等级在不同影响因子上的分布特征类似,但面积随着等级提高而降低。丰林自然保护区林火行为在不同的影响因子上的分布特征为:

(1)可燃物类型上的分布 可燃物是林火引燃和蔓延的载体,不同的可燃物载量、厚度、林下草本和灌木结构以及林分郁闭度等因子均可引发不同的林火行为。FL-I 和 FL-Ⅱ,尤其是 FL-I 是以红松为优势的森林群落类型,在丰林自然保护区分布广泛,且其为易燃树种,林内可燃物载量高,因而林火分布面积大。

(2)林分发生的地形特征为 丰林自然保护区林火主要发生在海拔为 300—400 m、坡度为平坡和缓坡、坡向为半阴和阳坡上。地形通过气流和局地小气候直接影响林火的发生与蔓延,坡度影响可燃物干燥度、坡向影响太阳辐射量大小、海拔则影响蒸发量等气象信息。

(3)高强度林火发生在接近道路与居民点 500 m 的区域内分布面积明显高于分布在距离道路居民点 500—1000 m 和 1000—1500 m 区域。距离道路和居民点附近地带,地形以平缓坡为主,地表有大量的杂草生长,可燃物积累较多,所以林火蔓延速度快,而距离道路和居民点远的地带,坡度相对大,可燃物以树木凋落物为主,杂草等较少。同时,距离道路和居民点距离越近,人类活动越加频繁,林火发生的概率越大。

表 6 潜在林火行为在不同影响因子上的分布

Table 6 Distribution of potential fire behavior on different influencing fire factors

变量 Variable	类型 Type	面积 Area/hm ²					
		I		II		III	
		火焰长度 Flame Length	火线强度 Fireline Intensity	火焰长度 Flame Length	火线强度 Fireline Intensity	火焰长度 Flame Length	火线强度 Fireline Intensity
可燃物类型 Fuel type	FL- I	2392.52	2954.43	4933.35	5101.47	1969.47	1239.48
	FL-Ⅱ	3373.56	3380.4	43.29	40.14	7.47	3.78
	FL-Ⅲ	1330.92	1601.37	2267.28	2379.87	1476.99	1093.95
海拔 Elevation	270—300	600.03	624.15	247.95	309.87	293.04	207
	300—400	3922.92	4263.57	2946.69	3084.75	1228.77	750.65
	400—500	1577.16	1886.49	2504.88	2443.86	984.6	736.29
	500—600	944.46	1108.89	1288.71	1342.53	719.64	501.39
	600—690	40.23	23.95	257.31	339.39	240.66	155.7
坡度 Slope	平坡	2706.3	2853.27	1413.9	1563.03	773.55	477.45
	缓坡	3844.98	4435.11	5238.45	5427.63	2458.08	1678.77
	斜坡	519.03	618.75	593.46	540.36	224.73	178.11
	急坡	9.63	13.23	30.78	29.34	10.98	8.82
	陡坡	0.18	0.72	2.25	1.89	0.72	0.54
坡向 Aspect	险坡	0.27	0.36	0.27	0.18	0.00	0.00
	阴坡	1567.26	1790.01	1653.03	1615.41	894.24	709.11
	半阴坡	2106.54	2367.36	2271.51	2339.39	898.65	569.97
	半阳坡	1447.83	1617.84	1636.56	1706.31	686.52	446.76
	阳坡	1950.57	2137.23	1688.58	1866.24	986.94	622.62
与道路和居民点距离	< 500m	1283.58	1482.21	1454.76	1411.02	601.38	446.49
Distance to road and settlement	500—1000 m	942.66	1084.23	1436.49	1517.76	376.20	153.36
	1000—1500 m	742.32	839.16	1113.48	1235.97	449.28	229.95

3 结论与讨论

本研究将 FARSTE 火行为模型应用于景观尺度的森林火险区划与森林防火工作中,适应森林可燃物与林火管理的发展趋势。研究结果表明:1)在本研究设定的有可能、易发生和极易发生 3 个森林火险下,丰林自然保护区林火行为主要分布在 I 和 II 等级上,这在一定程度上表明丰林自然保护区在该气象条件下,通过使用手工工具火风力灭火机等工具,基本可以在火头或者火翼控制林火扩展;2)丰林自然保护区在 3 个火险等级下,火行为等级空间分布特征较为明显,且 3 个火行为等级的空间分布类似。III 等级的火行为主要分布在区域中东部,II 主要分布在区域中部,而 I 则主要分布在区域四周。在极易发生火情下,III 等级的林班主要有

4、5、6、14、15、22 和 23 等林班;3) 林火发生主要在可燃物模型 FL-I 和 FL-II 上;海拔为 300—400 m、坡度为平坡和缓坡,坡向为半阴和阳坡上。高强度林火发生在接近道路与居民点 500 m 的区域内分布面积明显高于分布在距离道路居民点 500—1000 m 和 1000—1500 m 区域。

综合 GIS 技术和火行为模拟模型,能够快速准确地预测区域林火发生的特征,模拟结果可为林业和森林防火部门提供有价值的参考。比如林火管理部门应该加强在高火险区域的监护,从源头上维护林火安全。然而,本研究森林火行为空间区划只是在既定的气象和火源信息下对丰林自然保护区的林火发生的潜在可能性进行单次模拟与预测,模拟次数有限。显然林火的发生与蔓延具有巨大的变异性和不确定性,如火源位置和风速等都很难确定,今后应该进行多次模拟,并将多次模拟的结果与历史林火发生状况进行对比分析,以验证模拟结果的可靠性。应该由于本研究存在的局限性,该结果只能作为森林可燃物和林火管理的参考依据。

目前,我国还没有一个通用的可燃物分类标准和林火扩展模拟模型,如何结合我国森林生态系统实际情况和自然特点,通过大量的实地观测与模型应用,获取、积累更全面真实的参数信息,构建适合我国的空间直观火行为模型,是今后林火管理研究的重要方向。

References:

- [1] Taylor A H, Skinner C N. Fire history and landscape dynamics in a late-successional reserve, Klamath Mountains, California, USA. *Forest Ecology and Management*, 1998, 111(2/3): 285-301.
- [2] Qu Z L, Hu H Q. A prediction model for forest fire-burnt area based on meteorological factors. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18(12): 2705-2709.
- [3] Krasnow K, Schoennagel T, Veblen T T. Forest fuel mapping and evaluation of LANDFIRE fuel maps in Boulder County, Colorado, USA. *Forest Ecology and Management*, 2009, 257(7): 1603-1612.
- [4] He H S, Chang Y, Hu Y M, Liu Z H. Contemporary studies and future perspectives of forest fuel and fuel management. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2010, 34(6): 741-752.
- [5] Li C, Lan Corns G W, Yang R C. Fire frequency and size distribution under natural conditions; a new hypothesis. *Landscape Ecology*, 1999, 14(6): 533-542.
- [6] Jin S, Hu H Q. Study on forest fire regime of Heilongjiang Province I. forest fire spatial and temporal dynamics and statistical distribution. *Scientia Silvae Sinicae*, 2002, 38(1): 88-94.
- [7] Rothermel R C. A Mathematical Model for Predicting Fire Spread in Wildland Fuels. USDA Forest Service General Technical Report INT-115, 1972.
- [8] Sandberg D V, Ottmar R D, Cushon G H. Characterizing fuels in the 21st Century. *International Journal of Wildland Fire*, 2001, 10(4): 381-387.
- [9] Shan Y L, Zhang M, Yu Y B. Current situation and developing trend of the study on forest fuel. *Journal of Beihua University: Natural Science*, 2004, 5(3): 264-269.
- [10] Catchpole E A, Catchpole W R, Rothermel R C. Fire behavior experiments in mixed fuel complexes. *International Journal of Wildland Fire*, 1993, 3(1): 45-57.
- [11] Shu L F, Tian X R, Ma L T. The studies and application of forest fire ecology. *Forest Research*, 1999, 12(4): 422-427.
- [12] Helms J A. Positive effects of prescribed burning on wildfire intensities. *Fire Management Notes*, 1979, 40(3): 10-13.
- [13] He H S, Shang Z B, Crow T R, Gustafson E J, Shifley R S. Simulating forest fuel and fire risk dynamics across landscapes-LANDIS fuel module design. *Ecological Modelling*, 2004, 180(1): 135-151.
- [14] Stephens S L. Evaluation of the effects of silvicultural and fuels treatments on potential fire behaviour in Sierra Nevada mixed-conifer forests. *Forest Ecology and Management*, 1998, 105(1/3): 21-35.
- [15] Finney M A. Design of regular landscape fuel treatment patterns for modifying fire growth and behavior. *Forrest Science*, 2001, 47(2): 219-228.
- [16] Finney M A, Seli R C, McHugh C W, Ager A A, Bahro B, Agee J K. Simulation of long-term landscape-level fuel treatment effects on large wildfires. *International Journal of Wildland Fire*, 2007, 16(6): 712-727.
- [17] He H S, Keane R E, Iverson L R. Forest landscape models, a tool for understanding the effect of the large-scale and long-term landscape processes. *Forest Ecology and Management*, 2008, 254(3): 371-374.
- [18] Finney M A, Ryan K C. Use of the FARSITE fire growth model for fire prediction in U. S. national parks // *International Emergency Management*

and Engineering Conference. Paris, France, 1995.

- [19] Finney M A. FARSITE: Fire Area Simulator-Model Development and Evaluation. USDA Forest Service General Technical Report RMRS-RP-4, 1998.
- [20] Liu X M, Bu R C, Deng H W, Hu Y M, Liu Z H, Wu Z W. Estimation and spatial pattern analysis of forest biomass in Fenglin Nature Reserve based on Geostatistics. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(16): 4783-4790.
- [21] He P, Meng C, Tian F. The relation of change pattern of forest by combustible substance moisture and the forest fire size class in Xiaoxing'anling Mountains. *Heilongjiang Meteorology*, 2008, 25(3): 25-27.
- [22] Shan Y L. Study on Forest Fuel of Daxing'an Mountains in Northeast China [D]. Harbing: Northeast Forestry University, 2003.
- [23] Rothermel R C, Rinehart G C. Field Procedures for Verification and Adjustment of Fire Behavior Predictions. General Technical Report INT-142, USDA Forest Service Ogden, UT, 1983.

参考文献:

- [2] 曲智林, 胡海清. 基于气象因子的森林火灾面积预测模型. *应用生态学报*, 2007, 18(12): 2705-2709.
- [4] 贺红士, 常禹, 胡远满, 刘志华. 森林可燃物及其管理的研究进展与展望. *植物生态学报*, 2010, 34(6): 741-752.
- [6] 金森, 胡海清. 黑龙江省林火规律研究 I. 林火时空动态与分布. *林业科学*, 2002, 38(1): 88-94.
- [9] 单延龙, 张敏, 于永波. 森林可燃物研究现状及发展趋势. *北华大学学报: 自然科学版*, 2004, 5(3): 264-269.
- [11] 舒立福, 田晓瑞, 马林涛. 林火生态的研究与应用. *林业科学研究*, 1999, 12(4): 422-427.
- [20] 刘晓梅, 布仁仓, 邓华卫, 胡远满, 刘志华, 吴志伟. 基于地统计学丰林自然保护区森林生物量估测及空间格局分析. *生态学报*, 2011, 31(16): 4783-4790.
- [22] 单延龙. 大兴安岭森林可燃物的研究 [D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2003.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 32, No. 19 October, 2012 (Semimonthly)

CONTENTS

Assessment of monitoring methods for population abundance of Amur tiger in Northeast China	5943
..... ZHANG Changzhi, ZHANG Minghai, JIANG Guangshun (5943)	
Changes of residents nitrogen consumption and its environmental loading from food in Xiamen	5953
..... YU Yang, CUI Shenghui, ZHAO Shengnan, et al (5953)	
Analysis of the meiobenthic community in the Pearl River Estuary in summer	5962
..... YUAN Qiaojun, MIAO Suying, LI Hengxiang, et al (5962)	
Community characteristics of phytoplankton in the coastal area of Leizhou Peninsula and their relationships with primary environmental factors in the summer of 2010	5972
..... GONG Yuyan, ZHANG Caixue, SUN Xingli, et al (5972)	
Morphological differences in statolith and beak between two spawning stocks for <i>Illex argentinus</i>	5986
..... FANG Zhou, CHEN Xinjun, LU Huajie, et al (5986)	
Relationships between coastal meadow distribution and soil characteristics in the Yellow River Delta	5998
..... TAN Xiangfeng, DU Ning, GE Xiuli, et al (5998)	
Variation analysis about net primary productivity of the wetland in Panjin region	6006
..... WANG Liwen, WEI Yaxing (6006)	
Mobilization of potassium from Soils by <i>rhizobium phaseoli</i>	6016
..... ZHANG Liang, HUANG Jianguo, HAN Yuzhu, et al (6016)	
Autotoxicity of aqueous extracts from plant, soil of peanut and identification of autotoxic substances in rhizospheric soil	6023
..... HUANG Yuqian, HAN Lisi, YANG Jinfeng, et al (6023)	
Effects of shading on the photosynthetic characteristics and anatomical structure of <i>Trollius chinensis</i> Bunge	6033
..... LV Jinhui, WANG Xuan, FENG Yanmeng, et al (6033)	
Short-term effects of fire disturbance on greenhouse gases emission from sedge and shrubs forested wetland in Lesser Xing'an Mountains, Northeast China	6044
..... GU Han, MU Changcheng, ZHANG Bowen, et al (6044)	
Plant species diversity and community classification in the southern Gurbantunggut Desert	6056
..... ZHANG Rong, LIU Tong (6056)	
Effects of mixing leaf litter from <i>Pinus sylvestris</i> var. <i>mongolica</i> and <i>Larix principis-rupprechtii</i> with that of other trees on soil properties in the Loess Plateau	6067
..... LI Qian, LIU Zengwen, MI Caihong (6067)	
Effects of long-term intensive management on soil ammonia oxidizing archaea community under <i>Phyllostachys praecox</i> stands	6076
..... QIN Hua, LIU Borong, XU Qiufang, et al (6076)	
Hydrogen peroxide participates symbiosis between AM fungi and tobacco plants	6085
..... LIU Hongqing, CHE Yongmei, ZHAO Fanggui, et al (6085)	
Relationships between dominant arbor species distribution and environmental factors of shelter forests in the Beijing mountain area	6092
..... SHAO Fangli, YU Xinxiao, ZHENG Jiangkun, et al (6092)	
Analysis of rhizosphere microbial community structure of weak and strong allelopathic rice varieties under dry paddy field	6100
..... XIONG Jun, LIN Huifeng, LI Zhenfang, et al (6100)	
Root distribution in the different forest types and their relationship to soil properties	6110
..... HUANG Lin, WANG Feng, ZHOU Lijiang, et al (6110)	
Effect of silicon application on antioxidant system, biomass and yield of soybean under ozone pollution	6120
..... ZHAN Lijie, GUO Liye, NING Tangyuan, et al (6120)	
Effect of landfill leachate irrigation on soil physiochemical properties and the growth of two herbaceous flowers	6128
..... WANG Shuqin, LAI Juan, ZHAO Xiulan (6128)	
Nitrous oxide emissions affected by tillage measures in winter wheat under a rice-wheat rotation system	6138
..... ZHENG Jianchu, ZHANG Yuefang, CHEN Liugen, et al (6138)	
Effects of different fertilizers on soil enzyme activities and CO ₂ emission in dry-land of maize	6147
..... ZHANG Junli, GAO Mingbo, WEN Xiaoxia, et al (6147)	
The response of agro-ecosystem productivity to climatic fluctuations in the farming-pastoral ecotone of northern China: a case study in Zhunger County	6155
..... SUN Tesheng, LI Bo, ZHANG Xinshi (6155)	
The relationship between energy consumption and carbon emission with economic growth in Liaoning Province	6168
..... KANG Wenxing, YAO Lihui, HE Jienan, et al (6168)	
Spatial distribution characteristics of potential fire behavior in Fenglin Nature Reserve based on FARSITE Model	6176
..... WU Zhiwei, HE Hongshi, LIANG Yu, et al (6176)	
Chill conservation of natural enemies in maize field with different post-crop habitats	6187
..... TIAN Yaojia, LIANG Guangwen, ZENG Ling, et al (6187)	
Effect of population of <i>Kerria yunnanensis</i> on diversity of ground-dwelling ant	6195
..... LU Zhixing, CHEN Youqing, LI Qiao, et al (6195)	
Response of <i>Parnassius apollo</i> population and vertical distribution to climate warming	6203
..... YU Fei, WANG Han, WANG Shaokun, et al (6203)	
Review and Monograph	
Integrated assessment of marine aquaculture ecosystem health: framework and method	6210
..... PU Xinming, FU Mingzhu, WANG Zongling, et al (6210)	
Seagrass meadow ecosystem and its restoration: a review	6223
..... PAN Jinhua, JIANG Xin, SAI Shan, et al (6223)	
Nutri-toxicological effects of cyanobacteria on fish	6233
..... DONG Guifang, XIE Shouqi, ZHU Xiaoming, et al (6233)	
Effect of environmental stress on non-structural carbohydrates reserves and transfer in seagrasses	6242
..... JIANG Zhijian, HUANG Xiaoping, ZHANG Jingping (6242)	
Advances in ecological immunology	6251
..... XU Deli, WANG Dehua (6251)	
Scientific Note	
The causes of spatial variability of surface soil organic matter in different forests in depressions between karst hills	6259
..... SONG Min, PENG Wanxia, ZOU Dongsheng, et al (6259)	
Characteristics of seed rain of <i>Haloxylon ammodendron</i> in southeastern edge of Junggar Basin	6270
..... LÜ Chaoyan, ZHANG Ximing, LIU Guojun, et al (6270)	

《生态学报》2013 年征订启事

《生态学报》是中国生态学学会主办的生态学专业性高级学术期刊,创刊于 1981 年。主要报道生态学研究原始创新性科研成果,特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评介和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,300 页,国内定价 90 元/册,全年定价 2160 元。

国内邮发代号:82-7,国外邮发代号:M670

标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路 18 号 电 话:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@rcees.ac.cn 网 址: www.ecologica.cn

编辑部主任 孔红梅 执行编辑 刘天星 段 靖

生 态 学 报

(SHENGTAI XUEBAO)

(半月刊 1981 年 3 月创刊)

第 32 卷 第 19 期 (2012 年 10 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 32 No. 19 (October, 2012)

编 辑	《生态学报》编辑部 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085 电话:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn	Edited by	Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China Tel:(010)62941099 www.ecologica.cn Shengtaixuebao@rcees.ac.cn
主 编	冯宗炜	Editor-in-chief	FENG Zong-Wei
主 管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
主 办	中国生态学学会 中国科学院生态环境研究中心 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出 版	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:1000717	Published by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
发 行	科 学 出 版 社 地址:东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717 电话:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net	Distributed by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net
订 购	全国各地邮局	Domestic	All Local Post Offices in China
国外发行	中国国际图书贸易总公司 地址:北京 399 信箱 邮政编码:100044	Foreign	China International Book Trading Corporation Add:P. O. Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 许 可 证	京海工商广字第 8013 号		



ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 70.00 元