集成点燃和火源的火险指数应用研究*

黄宝华[1,2] 工程师 张 华**[1] 研究员 周利霞[3]
(1 中国科学院 海岸带环境过程与生态修复重点实验室(烟台海岸带研究所),山东 烟台 264003
2 烟台市地理信息中心,山东 烟台 264003 3 烟台市自然博物馆,山东 烟台 264003)

学科分类与代码:6203010(火灾科学与消防工程) 中图分类号:X913.4 文献标志码:A
基金项目:烟台市科技基金资助(2009163)。

【摘 要】 为利用点燃和火源概率的集成火险指数(IFDI)准确地监测和评估森林火险,应用中分辨率成像分光辐射谱仪(MODIS)和数字高程模型(DEM)数据,反演出可燃物预热能量(Q_{ig})所需参数。通过计算得到Q_{ig}。考虑其在实际传递过程中的热量损失,得到与实际情况相符的点燃概率指数。由DEM计算得到地表粗糙度指数,结合人口密度指数,得到火源概率指数(FRPI)。利用上述2个指数组成IFDI。应用IFDI,研究分析黑龙江地区2004年全年火险和10月12日重大林火处的着火点前12天火险情况。结果表明:随着火灾发生日期的接近,IFDI升高,即可根据IFDI对森林火险实施预警。

【关键词】 预热能量; 点燃概率指数; 火源概率指数(FRPI); 集成火险指数(IFDI); 火险等级; 数字高程模型(DEM)

Research on Application of Integrated Fire Danger Index Based on Ignition and Fire

HUANG Bao-hua[1,2] ZHANG Hua[1] ZHOU Li-xia[3]
(1 Shandong Provincial Key Laboratory of Coastal Zone Environmental Processes, Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, Yantai Shandong 264003, China
2 Geographic Information Center of Yantai City, Yantai Shandong 264003, China
3 Yantai Museum of Natural History, Yantai Shandong 264003, China)

Abstract: In order to monitor and assess forest fire danger, parameters needed for calculating heat of preignition(Q_{ig}) were obtained by using data acquired with a moderate resolution imaging spectro-radiometer (MODIS) and the DEM. Q_{ig} was calculated. Considering the actual transmission heat loss in the process, an ignition probability index was obtained. Surface roughness index was calculated from DEM. By combining it with population density index, a fire probability index was obtained. The above two indexes were combined to form an IFDI. The integrated risk index was used to analyze annual fire in Heilongjiang province in 2004, and changes of fire danger during 12 days before the data of the big forest fire, October 12, 2004, in the province. It was found that as close to the data, the IFDI value becomes higher—forest fire early waring can be issued according to the value.

Key words: heat of preignition; probability of ignition index; fire resource probability index (FRPI); integrated fire danger index (IFDI); fire degree; digital elevation model (DEM)

* 文章编号:1003-3033(2013)08-0037-06; 收稿日期:2013-05-16; 修稿日期:2013-06-30
** 通信作者:张华(1977-),男,河南郑州人,研究员。E-mail:hzhang@yic.ac.cn.

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

0 引 言

森林火灾(以下称林火)是一种世界性的严重自然灾害,同时也是许多地区植被变化的重要驱动力,它的格局影响了物种组成和生态系统构成[1]。过去几十年里,许多地区森林火灾的频率和严重程度不断增加。人为气候变化,至少在某些区域将增加林火频率和严重程度[2]。因此,科学地分析林火发生的条件和规律,适时预测火险程度,提前发出林火预报,并及时采取针对性预防措施是减少林火发生和损失的有效途径。

美国和加拿大均较早开展了森林火险预报研究工作,并建立了具有各自特色的预报系统。我国研究林火预报较晚,主要是在美国、加拿大等国家的林火预报方法的研究基础上结合我国实际情况进行的。随着计算机软件与数据库、地理信息系统(GIS,Geographical Information System)、遥感(RS,Remote Sensing)等信息技术的高速发展和应用,这些技术的应用已成为推进森林防火技术发展的必然趋势。当前 GIS 和 RS 林火火险模型存在以下问题:GIS 火险预报模型没有定量表示火险程度;定量表达火险程度的 RS 火险模型只考虑到植被信息,而忽略了火源(人为)、地形等其他引起林火因素的影响。以上问题的存在大大限制了火险预报的精度,因此,如何把二者充分结合起来综合分析,提出精确的火险预报方法就显得尤为重要。

当前的研究注重把不同的变量因子整合到火灾指数中,得到可以用来评估森林火灾的火险等级系统和指标[3]。笔者将充分利用中分辨率成像分光辐射谱仪(MODIS,Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer)多波段、高精度的特点,获取火灾前与火灾相关地表温度、相对湿度等火险预报因子,整合基于物理可燃物预燃能量的点燃概率指数和基于人为、地形等原因的火源概率指数(FRPI,Fire Resource Probability Index)模型,对我国黑龙江地区的火险预报进行应用研究。

1 研究技术路线与方法

1.1 技术路线

利用 MODIS 反演得到植被水体指数(NDWI,Normalized Differential Water Index)、相对绿度(RG,Relative Greenness)、地表温度(ST,Surface Temperature)、相对湿度(RH,Relative Humidity);由 NDWI 和 RG 计算得到活可燃物湿度,由 ST 和 RH 计算得到死可燃物湿度,详细计算见文献[4];由人口密度(PD,Population Density)计算出人口火险频率指数。最后由点燃概率指数和 FRPI 构成森林火险指数评估系统(图 1)。利用火点指数获取着火点实地信息[5]与集成火险指数(IFDI,Integrated Fire Danger Index)结合来进行分析与验证。

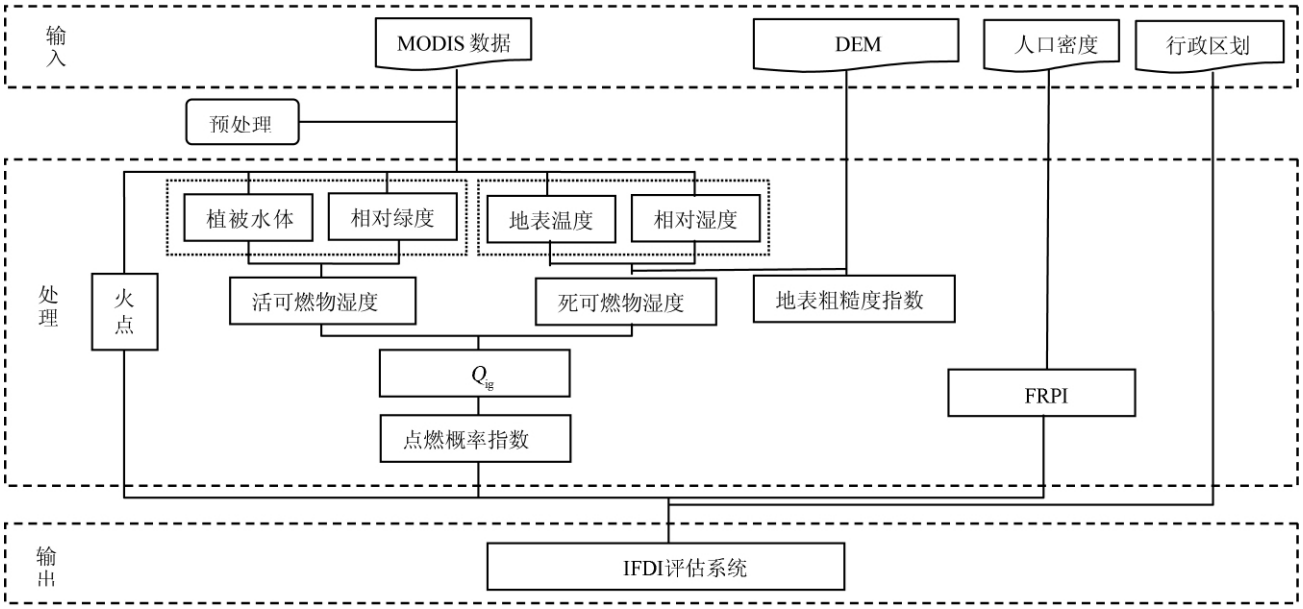

图1　集成点燃和火源的火险指数评估系统技术框图

Fig. 1　Integrated ignition and fire danger index evaluation technology system diagram

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

1.2　研究方法

1.2.1　IFDI

火是各种气候因子、可燃物特征及地形要素综合作用的产物[6]。同时,人类活动对林火的发生也有很大的影响。各种影响林火的因素中可燃物含水率和特性直接影响森林火灾的点燃概率[7],人类活动主要通过人口密度和地形因子来体现,因此,从点燃和火源角度出发构建一个基于两者的 IFDI:

$$I_{FDI} = P(I/Q_{ig}) + F_{RPI} \quad (1)$$

式中: $P(I/Q_{ig})$ 为点燃概率指数; F_{RPI} 为火源概率指数。

1.2.2　点燃概率指数

点燃有自燃和引燃 2 种类型,自燃是指在没有外部引导情况下固体自身发生的阀烧,需要高强度热量,因此,自燃的森林火灾是非常少。笔者只考虑引燃,引燃点比较小,大多是局部高温启动燃烧,引燃发生在较低的温度,所以它在森林火灾发生中起的作用更加重要。

1) 预热能量。预热能量指的是可燃物颗粒从初始温度上升到点燃温度所需要的纯能量(无损失)。预热点燃能量可燃物点燃前的吸热反应,在预热过程中,火源会释放一些水分并挥发一些物质。预热点燃能量主要作用是去除可燃物中的水分,使之达到点火时的温度。因此,燃料中水分的含量决定了预热点的需要的热量,燃料中的水分越多,需要的能量越多,水分的存在也减小了可燃性挥发物演化,限制其可燃性。Schroeder[8-9] 利用初始可燃物温度(T_0,°C)和可燃物湿度含量(FMC,Fuel Moisture Content,%)来计算可燃物的 Q_{ig}。Schroeder 公式[10] 包括如下几部分: ①死可燃物达到燃点所需热量; ②提高可燃物湿度到沸点所需要的热量; ③解吸附作用所需热量; ④热蒸发水分所需热量; ⑤在燃料空隙中的水蒸气从沸点到燃点温度所需热量。

$$Q_{ig} = 605.03 - 1.113T_0 - 0.002\,43T_0^2 - T_0\frac{m}{100} + 77.62(1 - e^{-0.151\,m}) + 26.7955\,m \quad (2)$$

式中: Q_{ig} 为可燃物的预热能量,J; T_0 为植被表面温度,℃; m 为可燃物湿度,%。

2) 点燃概率指数计算。点燃概率和 Q_{ig} 之间的关系依赖于火源分布的大小,即点燃概率取决于火源产生的有效热量是否大于或等于 Q_{ig}。热量在传播过程中会部分丢失,而不能全部到达可燃物上,到达可燃物上的热量在达到可燃物燃点前也会有部分消散。因此,Schroeder 利用有效点燃热量大于或等于 Q_{ig} 的条件建立了点燃概率指数,其目的是计算出细小可燃物湿度和林火的关系[10]:

$$P(I/Q_{ig}) = \frac{0.000\,048\left(\frac{400 - Q_{ig}}{10}\right)^{4.3}}{50} \quad (3)$$

1.2.3　FRPI

FRPI 融合了人口密度和文化、可燃物和地形等因素,是他们之间复杂的相互作用结果,其中,由地形引出的地表粗糙度是最重要的持久变量。本地点燃和邻近引燃是导致火灾发生的点燃 2 种方式。邻近引燃指的是由邻近火源蔓延而来引起的火灾,其特点是在传播过程中部分会受到山体、峡谷和水体等与地表粗糙度密切相关的地形因素的破坏,因此,地表粗糙度起到抑制点火和蔓延的作用,是减小火灾频率一个重要因素。地表粗糙度是反映地表的起伏变化与侵蚀程度的指标,一般将其定义为地表基本单元的曲面面积与其投影面积之比。可以用格网对角连线的交点(中点)的高差 H 来表示粗糙度,H 越大,表明基本单元 4 个顶点的起伏变化也愈大。人口密度和地形之间联系是造成火灾在时间和空间上发生的重要因素,这些因素可以定量表示火灾危险,由此构建 F_{RDI}:

$$F_{RDI} = P_{DI} + S_{RI} \quad (4)$$

式中: P_{DI} 为人口密度指数; S_{RI} 为地表粗糙度指数。

2　应用分析

2.1　研究区概况、数据选取

黑龙江地属我国东北林区,由于夏季降雨量较大、空气湿度大,冬季空气温度低、积雪不易融化,所以在这 2 个季节一般不会发生火灾。通常防火期于防火戒严期在春季 2—6 月,秋季 9—11 月。据统计 2000—2009 年黑龙江省 10 a 间共发生林火 1 430 次,其中,自然火占 21.47%,人为火占 78.53%[11]。MODIS 数据由于易受云的影响,有些 MODIS 的数据质量较差甚至不能用,因此,选用的数据主要有: 黑龙江地区 2004 年 12 个月每月 1 期和 10 月份 1—12 日的数据为研究数据; 数字高程模型(DEM,Digital Elevation Model)、人口密度和行政区划数据。

2.2　点燃概率指数与火点关系

由黑龙江全年的死可燃物点燃概率指数(图 2)可以看出 1—4,11—12 月份的可燃物点燃概率指数在 0.3 左右,5—10 月份的死可燃物点燃概率指数大于 0.3。特别需要注意的是 5—9 月份死可燃物点燃概率指数大于 0.5,是一个高点燃概率火险值,这是因为 5—10 月份的温度高,死可燃物的湿度低; 由全省全年活可燃物点燃概率指数可以看出 6—10 月份的可燃物点燃概率指数小于 0.05,这是因为

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

6—10 月份的植被的可燃物湿度高，点燃概率低。2—5 月，11—12 月份的可燃物点燃概率指数大于 0.2，但由于该时期处于植被干枯期，因此反演出的也是死可燃物湿度的数据，因此，笔者只考虑死可燃物的点燃概率指数。

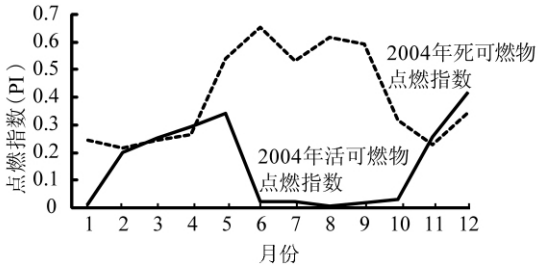

图 2　2004 年黑龙江死、活可燃物点燃指数值

Fig. 2　Dead and live fuel ignition index in Heilongjiang 2004

图 3 是 2004 年 10 月 12 日黑龙江特大森林火灾发生的前 12 天的死、活可燃物的点燃概率指数。由于 10 月份活可燃物的湿度大，从可以看出点燃概率指数都在 0.000 16 以下，也证实了上面提出的只考虑死可燃物时的思路。可以看出死可燃物的点燃概率指数值都在 0.3 以上，在 6，7，9，10 日甚至达到0.5以上，虽然11日有所下降，但12日又开始上升，由此可见，火灾发生前的点燃概率指数保持较高的状态，是一个危险信号，这也验证了点燃概率指数的应用价值。

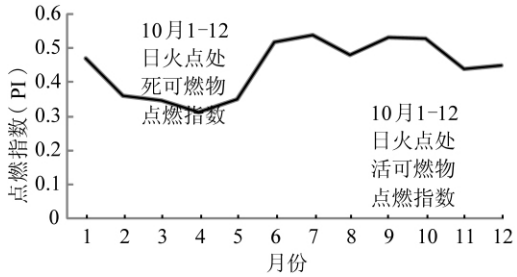

图 3　火灾发生前 12 天火点处死、活可燃物点燃概率指数值变化

Fig. 3　Changes of ignition index during 12 days before the firo

图 4 显示了 2004 年 1 月 11 日，5 月 10 日，10 月12 日这 3 个日期的死可燃物的点燃概率指数，可以看出 1 月份的点燃概率处于一个低概率值，而 5，10 月份的点燃概率值处于一个较高的值，与一年中黑龙江的防火期与戒严期相符。通过 2004 年全年和 10 月 12 日大火前 12 天的点燃概率指数的计算可以看出其在火险预报上具有良好的指示作用。

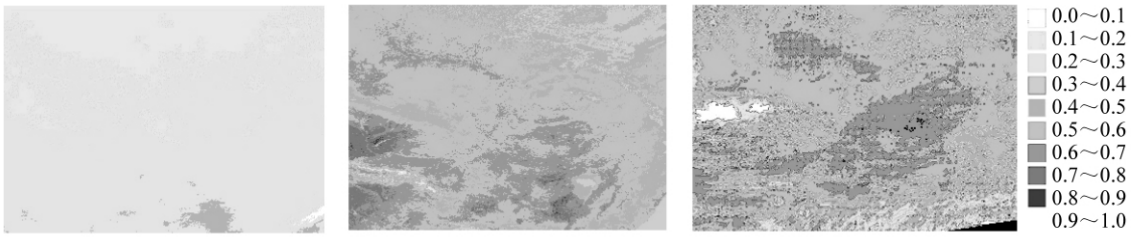

图 4　黑龙江 2004 年 1 月 11 日，5 月 19 日和 10 月 12 日死可燃物点燃概率指数

Fig. 4　Dead fuel ignition probability index diagram in January 11th, May 19th and October 12th in 2004 in Heilongjiang

2.3　FRPI

2.3.1　森林火灾与人口密度关系

通过分析人口密度与林火的分布情况，人口密度与林火分布情况呈对数关系(图 5)，人口密度在 20～160 之间的火灾次数多，此后随着人数的增加火灾呈现次数减少的趋势，下式为火灾(F)与人口密度关系式。

$$F = -40.7\ln(P_D) + 114.2 \tag{5}$$

式中 P_D 为人口密度。

将上式进行归一化，表 1 是黑龙江人口密度统计数据，构成人口密度指数 P_{DI}，

$$P_{DI} = \frac{F - F_{mean}}{F_{max} - F_{min}} \tag{6}$$

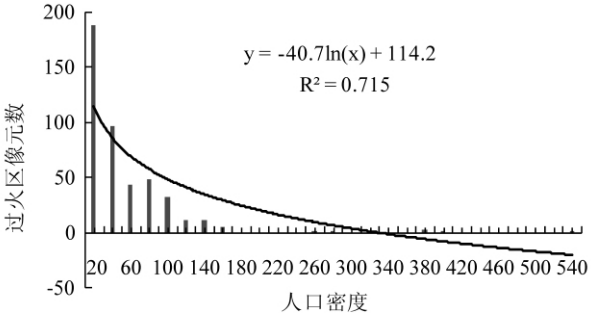

图 5　林火分布与人口密度关系图

Fig. 5　Fire distribution vs population density

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

表 1　黑龙江人口密度统计数据

Table 1　Statistics of Heilongjiang population density data

统计值	最小值/(人·km^{-2})	最大值/(人·km^{-2})	均值/(人·km^{-2})	标准偏差
—	0	55 537	567.585 803	5 430.164 986

2.3.2　地表粗糙度指数与森林火灾关系

通过分析地表粗糙度与林火分布关系,地表粗糙度与林火分布呈现较好的幂指分布关系(图 6),林火主要发生在地表粗糙度为 1.001 ~ 1.017 之间。

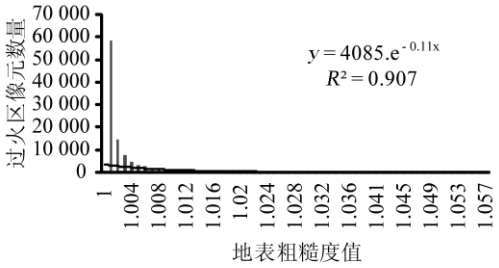

图 6　地表粗糙度与林火分布关系图

Fig. 6　Fire distribution vs surface roughness

下式是林火分布和地表粗糙度关系 F_{CE} 为林火分布数:

$$F_{CE} = 4\ 085e^{-0.11E} \tag{7}$$

式中 E 为地表粗糙度。

将上式进行归一化,式(8)为构成地表粗糙度指数 S_{RI}。表 2 是黑龙江地区地表粗糙度统计数据。

$$S_{RI} = \frac{F_{CE} - F_{CE\,mean}}{F_{CE\,max} - F_{CE\,min}} \tag{8}$$

表 2　黑龙江地表粗糙度统计数据

Table 2　Heilongjiang surface roughness statistics

统计值	最小值	最大值	均值	标准偏差
—	1.000 000	12.992 169	1.016 524	0.323 017

2.3.3　森林火灾与 FRPI 关系

由黑龙江地区林火分布与 FRPI 关系图(图 7)可以看出,林火与人为 FRPI 呈现较好的对数分布关系。这表明林火发生概率随人口密度和地表粗糙度变化而变化,低人口密度期,人为点燃概率随人口密度的增加而增加,导致森林火灾发生频率增加,因此,平坦地区(通常是草原和草地)较地表粗糙的地方(林地)往往更多火灾;高人口密度期,地形控制火灾频率的作用变得越来越小,然而在森林火灾扑灭方面,人口密度和农业活动作用变得更大,所以,相对于地形平坦的地区,地表粗糙的地方燃烧数量增加。

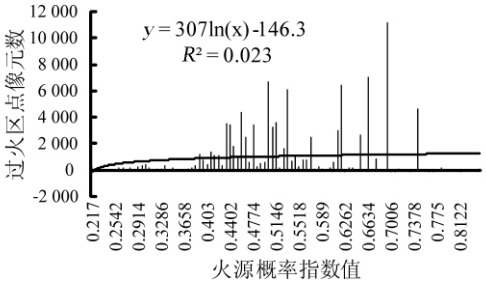

图 7　林火分布与 FRPI 关系

Fig. 7　Relationship between fire probability index and forest distribution

2.4　IFDI

根据黑龙江林火特点,参照原林业部 1995 年 12 月 1 日颁布实施的行业标准《全国森林火险天气等级》[12],将黑龙江森林火险等级分为 5 级,最低 1 级最高 5 级(表 3),该标准可作为黑龙江森林火险等级实况的评定和森林火险天气等级预报准确率的事后评价依据。

表 3　黑龙江森林火险等级

Table 3 Heilongjiang forest fire danger rating

等级	IFDI 值	危险程度	防火对策
Ⅰ	0 ~ 0.2	没有燃烧危险,不能蔓延	—
Ⅱ	0.2 ~ 0.4	低度危险,较易燃烧、蔓延	注意用火安全
Ⅲ	0.4 ~ 0.6	中度危险,容易燃烧、蔓延	加强防火宣传和用火审批工作,落实防患措施工作
Ⅳ	0.6 ~ 0.8	高度危险,容易燃烧、蔓延	禁止野外用火,加强巡护,做好扑救准备工作
Ⅴ	> 0.8	极度危险,极易燃烧、蔓延	禁绝一切火源,发布火险预警及扑火队伍待命出发

据 MODIS 提取的火点数据显示,火灾发生的地方大多 IFDI 值大。2012 年 10 月 12 日火灾发生前 12 天的 IFDI 均大于 1(图 8),并在 8—12 日呈现一个较高的上升趋势。12 日着火点的像元数为 441 个,这些地点的综合火险预报等级均在Ⅳ级及以上的可燃、易燃或强燃区域,可能发生火灾的危害程度在高度危险以上,有 321 次火灾火警发生Ⅴ级综合火险等级的条件下,占总发生次数的 73%;有

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

120 起发生在Ⅳ级森林火险等级的天气下，占总发生次数的 27%，而在预报不能点燃或难燃的Ⅰ，Ⅱ和Ⅲ级区域未发生林火。这表明了基于点燃概率指数和火灾概率指数的 IFDI 预报模型的准确性。

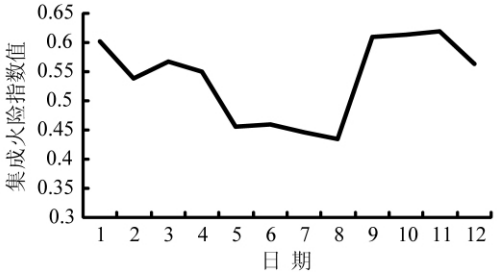

图 8　火灾发生前 12 天的 IFDI 变化情况

Fig. 8　Changes of IFDI during 12 days before the fire danger

用的点燃和火源 2 方面。其中，点燃概率指数以点燃能量为基础发展起来，具有明确的物理意义，并充分考虑到了引燃火在实际能量传递过程中与实际情况相符热量损失问题; FRPI 充分考虑了人为因素和地形因素对林火的影响。IFDI 可用于比较不同时间和不同生态系统类型火险情况，并且由于其具有灵活性和可扩展性，有利于火险模型的集成和发展。

2）通过 IFDI 的应用可得随着火险指数的升高，火灾发生的概率增大，表明 IFDI 对森林火险具有良好的应用效果，是森林火险预警的有效工具。

3）利用可每天获取 4 次的 MODIS 数据，IFDI 能够加强对森林火灾的实时监测和预警能力。

3　结　论

1）IFDI 充分考虑到了林火发生中起到重要作

参 考 文 献

[1] Thonicke K, Venevsky S, Sitch S, et al. The role of fire disturbance for global vegetation dynamics: coupling fire into a dynamic global vegetation model [J]. Global Ecology and Biogeography, 2001, 10(6): 661 – 677.

[2] Schumacher S, Bugmann H. The relative importance of climatic effects, wildfires and management for future forest landscape dynamics in the Swiss Alps [J]. Global Change Biology, 2006, 12 (8): 1 435 – 1 450.

[3] Dolling K, Chu P S, Fujioka F. A climatological study of the Keetch/Byram drought index and fire activity in the Hawaiian Islands [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2005, 133 (4): 17 – 27.

[4] 黄宝华，田力，周利霞，等. 基于 MODIS 数据的火险潜在指数(FPI)及其应用研究 [J]. 国土资源遥感，2008，19(3): 56 – 60.
HUANG Bao-hua, TIAN Li, ZHOU Li-xia, et al. Study on MODIS data-based potential point index (FPI) and its application [J]. Remote Sensing for Land & Resources, 2008, 19(3): 56 – 60.

[5] 周利霞，高光明，邱冬生，等. 基于 MODIS 数据的 FPI-NDVI 火灾监测方法研究 [J]. 安全与环境学报，2008，8(2): 113 – 116.
ZHOU Li-xia, GAO Guang-ming, QIU Dong-sheng, et al. Study on MODIS data-based FPI-NDVI fire-monitoring method [J]. Journal of Safety and Environment, 2008, 8(2): 113 – 116.

[6] Koutsias N, Kalabokidis K, Allgower B. Fire occurrence patterns at landscape level: beyond positional accuracy of ignition points with kernel density estimation methods [J]. Natural Resource Modeling, 2004, 17(4): 359 – 375.

[7] De la Riva, J Perez, F Renault, et al. Mapping forest fire occurrence at a regional scale [J]. Remote Sensing of Environment, 2004, 92(3): 363 – 369.

[8] Rothermel R C. A Mathematical Model for Predicting Fire Spread in Wildland Fuels [M]. Ogden: USFS, 1972: 35 – 40.

[9] Deeming J E, Cohen J D. The 1978 National Fire-danger Rating System: Technical Documentation [M]. Ogden: USDA, 1983: 27 – 30.

[10] Mark J. Schroeder. Ignition Probability [R]. Office Report 2106 – 1, 1969.

[11] 张冬有，邓欧，李亦秋，等. 黑龙江省 1980—2005 年森林火灾时空特征 [J]. 林业科学，2012，48(2): 175 – 179.
ZHANG Dong-you, DENG Ou, LI Yi-qiu. et al. Temporal and spatial characteristics of forest fires in Heilongjiang province between 1980 and 2005 [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2012, 48(2): 175 – 179.

[12] LY/T 1172—1995，全国森林火险等级 [S].
LY/T 1172 – 1995, National Forest Fire Danger Rating [S].

作者简介： 黄宝华 (1977 –)，男，吉林临江人，工程师，博士研究生，研究方向为 GIS 与遥感应用。E-mail: huangbaohua78@126.com.

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net