

森林火灾预报的新视角

赵宪文

(中国林业科学研究院资源信息研究所, 北京 100091)

[摘要] 从森林火灾成灾的三个基本因子(火源、环境和可燃物)入手,在宏观上对西南地区森林火灾预报方法进行了探讨。在预测林火发生方面,考虑到人为火是发生森林火灾的主要原因,有很大随机性,因而采用了马尔科夫随机过程理论。在分析成灾环境时,采用了与天、地、生相关分析的方法。特别在可燃物的贮量估测方面,用航天遥感数据,提出一套新的框算方法,为在区域的尺度上估测森林火灾给出了有效的、定量的方法,从而提高了可信度。

[关键词] 森林火灾预报; 航天遥感; 火灾基本因子; 新视角

中国是森林火灾多发和损失严重的国家,1987年的大兴安岭特大森林火灾震惊世界。根据1950~1989年全国森林火灾资料分析,40年来共发生森林火灾63万多起,总过火面积超过3500万 hm^2 ,烧毁林木 $9.9 \times 10^8 \text{m}^3$,价值1500亿元人民币。平均每年发生森林火灾15800多起,森林过火面积近90万 hm^2 ,平均每年森林火灾面积占全国森林总覆盖率的0.8%左右,为世界平均水平的8倍,平均每10万 hm^2 森林面积年发生森林火灾次数为12.7起,每10万 hm^2 森林平均年过火面积为721.7 hm^2 ;全国平均每次森林火灾的面积为56 hm^2 。如以每公顷损失20 m^3 估算,林木共损失 $7 \times 10^8 \text{m}^3$ ^[1]。大兴安岭1950~1976年森林火灾过火面积就相当于同期造林保存面积,几十年的心血毁于一炬。可见,森林火灾是我国林业发展所面临的重要问题之一。与其它灾种不同,森林火灾起因大多为人为所致,所以,森林火灾的防患,就更为可能,而其中很重要的一个问题就是火灾的预报,在这方面的研究不乏其例。如用可燃物和气象要素来预测火险(居恩德1993);据厄尔尼诺—南方涛动异常来预测火灾(王述洋1993),以及用火灾自身发生规律来预报(李勇1992)等。

本研究从宏观的角度对形成森林火灾三要素的预测方法进行了探讨,同时引入遥感方法,使可燃物宏观预测成为可能,变得可信。

众所周知,森林火灾的发生必须同时具备火源、可燃物和可燃环境3个条件,缺一不可,这是传统的燃烧环理论。本研究则有别于传统观念:在引发火灾的火源研究中侧重于人为引发火灾随机因素的考虑;在可燃物预测中,采用遥感的方法进行了定量的估算;在可燃环境分析中则着眼于天、地、生大环境的分析,而不是拘泥于小环境的预测。以此,试图寻求预报大区域森林火灾的易行、可信的方法。

选择西南地区的云南为试验区,因为这里是中国第二大林区,同时又是火灾多发省。

1 森林火灾发生(火源)的预测

在西南林区,人为活动极为频繁,90%的森林火灾都是人为所致。实践表明,人口集居处发生火灾次数(以及成灾次数)较多,但火灾危险性小;火灾发生的情况比较复杂,往往与客观分析偏差较大。如火险级高,但人们警惕性高,火灾却没有发生。反之,在火险级并不高时,由于麻痹火灾发生了。它反映出人为因素与环境的无规性。在此

我们力图通过变量本身的变化反映其动态规律，用森林火灾历史资料建立模型，充分考虑到人为活动的无序性。为此应用了马尔科夫决策理论。

1.1 概念与方法

用马氏理论进行预测时，首先要建立转移概率矩阵。转移概率是一族时间上齐次的马尔科夫转移律，当系统处于状态 i ，则无论系统的历史如何，下次只与 i 有关，其转移状态 j 的概率为 $P(j/i)$ ，记为 P_{ij} 。转移概率矩阵的各行之和均为 1，并且它是由不大于 1 的非负元素组成。设已知转移概率矩阵 $P = [P_{ij}]$ ，当前火灾概率初始分布为 P_0 ，则下一年火灾分布为 $P_1 = P_0 P$ ，再下年火灾发生概率为 $P_2 = P_1 P_0$ 。依次类推，可求出今后若干年火灾发生概率： $P_n = P_{n-1} \cdot P = P_{n-2} \cdot P^2 = \dots = P_0 P^n$ 。

从上述公式看到，预测在很大程度上取决于初始分布 P_0 。但事实上，经过一定时间转移后，由一个状态向下一个状态的转移向量的改变是很小的，即不论初始分布如何，当发生足够多次转移后，概率向量将趋于一个唯一固定的概率向量，被称之为“固定概率向量”，这点可由马氏长变程性质加以保证^[2,3]。

1.2 试算

以云南省 1951~1979 年林火资料进行试算，据 29 年火灾资料，将其用火灾损失面积划为 3 个等级，即：

A 为 10 0001~500 000 hm^2 ；

B 为 10 001~100 000 hm^2 ；

C 为 <10 000 hm^2 。

文献 [1] 指出火灾频数受人为活动影响大，所

$$[\bar{P}_1, \bar{P}_2, \bar{P}_3] \begin{bmatrix} 7/9 & 1/9 & 1/9 \\ 2/7 & 2/7 & 3/7 \\ 1/12 & 4/12 & 7/12 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = (0, 0, 0)$$

即，

$$-2/9\bar{P}_1 + 2/7\bar{P}_2 + 1/12\bar{P}_3 = 0 \tag{2}$$

$$1/9\bar{P}_1 - 5/7\bar{P}_2 + 4/12\bar{P}_3 = 0 \tag{3}$$

$$1/9\bar{P}_1 + 3/7\bar{P}_2 - 5/12\bar{P}_3 = 0 \tag{4}$$

解方程组(1)、(2)、(3)得

$$\bar{P} = [\bar{P}_1, \bar{P}_2, \bar{P}_3] = 1/276[117, 63, 96] \\ \approx [0.424, 0.228, 0.348]$$

通过固定概率向量，可以看出云南发生 A 级和 C 级面积损失的火灾较多，应当引起人们重视。

至此，我们对云南森林火灾近年以及较长期的

以本次用成灾面积来划分火灾等级。

表 1 1951~1979 年林火按成灾面积划分

Table 1 Grad of the damage area by forest fire from 1951 to 1979

年份	1951	1952	1953	1954	1955	1956
等级	C	B	B	A	A	A
年份	1957	1958	1959	1960	1961	1962
等级	A	A	B	A	A	A
年份	1963	1964	1965	1966	1967	1968
等级	A	C	C	C	C	C
年份	1969	1970	1971	1972	1973	1974
等级	B	C	C	B	C	B
年份	1975	1976	1977	1978	1979	
等级	B	C	C	C	A	

由上述资料得出转移概率矩阵如下：

$$P = \begin{bmatrix} A & B & C \\ 7/9 & 1/9 & 1/9 \\ 2/7 & 2/7 & 3/7 \\ 1/12 & 4/12 & 7/12 \end{bmatrix} \begin{matrix} A \\ B \\ C \end{matrix}$$

据此矩阵，可预测下一年不同等级火灾发生的概率，如已知今年的火灾发生状况是 B 级，即它的初始分布为 $P_0 = [0, 1, 0]$ ，则下一年发生火灾的分布为 $P_1 = P_0 P = [0, 1, 0] P = [2/7, 2/7, 3/7]$ ，即下一年发生 A、B、C 级火灾的概率分别为 2/7、2/7 和 3/7。

求解固定概率向量：设在上面讨论的问题中，待求固定向量为

$$\bar{P} = [\bar{P}_1, \bar{P}_2, \bar{P}_3]$$

$$\text{且 } \sum_{i=1}^3 \bar{P}_i = \bar{P}_1 + \bar{P}_2 + \bar{P}_3 = 1 \tag{1}$$

已知： $\bar{P} \cdot (P - I) = 0$ 其中 I 为单位阵，于是：

势态可以给出一个预估，而且符合本区火灾的自身规律。

2 考虑天、地、生相互制约对火烧环境的宏观预测

森林火灾灾害学最新研究表明，一定区域内森林火灾灾情年际变化极不平衡，每过若干年就会重复出现森林火灾活动异常、林地损失极其突出的时段——重灾时段，具有某种周期演变规律，究其原因，研究它的预报方法将是非常有意义的。

2.1 背景

森林火灾预测理论和方法的研究已有 80 多年的历史，因受科技水平发展以及“可燃物—火源—气象要素”思维定式的影响，忽视了天、地、生相互作用。

最早尝试研究森林火灾年际变化规律与 ENSO（厄尔尼诺—南方涛动异常）关系的是 Dr. Simard A.J, 于 1982~1983 年开始发现了两种现象之间存在着某种遥相关关系。

厄尔尼诺 (EL Nino) 是指赤道东太平洋 (0°~10° S, 90°~180° W) 海温持续异常升高的现象；而南方涛动 (Southern Oscillation) 是指印度洋地区气压与南太平洋地区气压呈反向变化的现象，而且二者存在着紧密的“海—气”负相关。通常将此二者联系起来称作“厄尔尼诺—南方涛动异常”记为 ENSO。

2.2 分析

1) 用云南省 1951~1979 年的森林火灾资料与 ENSO 有关数据进行比较、分析 (图 1)。

从图 1 看出，云南省火灾高发生年多处在非

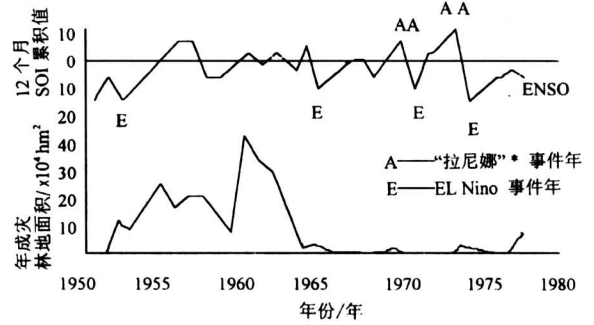


图 1 云南 1951~1979 年林火参数与 ENSO 数据比较

Fig.1 The curve of comparing fire parameters in Yunnan province with ENSO from 1951 to 1979

ENSO 事件年，多与拉尼娜事件年同步。近两年的云南林火发生状况恰恰证明了这一点，1997 年是 ENSO 年，云南林火发生较少，而随之到来的拉尼娜年 (1998) 云南林火发生的十分频繁。这一点非常像美国佛罗里达州 (图 2)^[4,5]，而与我国黑龙江的情况恰恰相反 (图 3)^[6]。

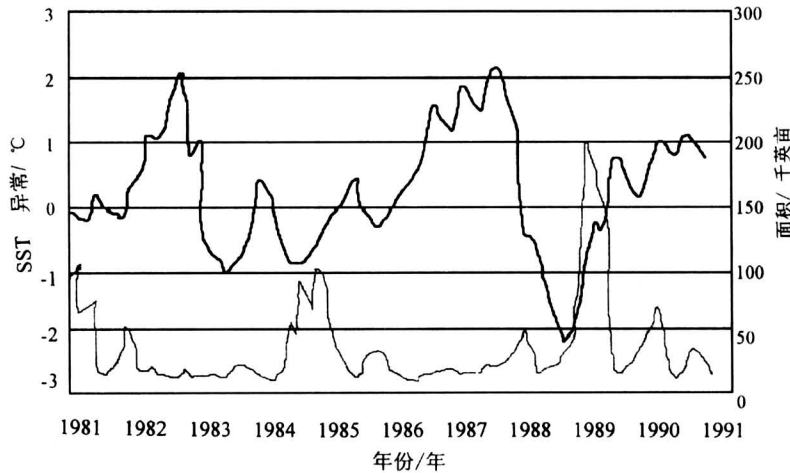


图 2 美国佛罗里达州 1981~1991 森林火灾过火面积与 SST 的关系

Fig.2 The relation between the forest fire area in Florida and SST from 1981 to 1991

Here solid line is SST, and dash line is fire area

实线—中太平洋海温 SST/°C；虚线—过火面积/千英亩

千英亩/hm²: 300/121 405.8; 250/101 171.5; 200/80 937.2; 150/60 702.9; 100/40 468.6; 50/20 234.3

2) 在分析比较上述问题时我们采用了森林成灾面积，因为最新研究结果 (Jim. Brenner, 1991) 指出：“森林火灾发生率多受人类社会、人为因素的影响，不可能有多大的应用价值；在森林火灾长期预

测研究中应重点运用过火面积指标，而不用火灾次数指标，林火次数的规律性很弱，在人类尚不能完全控制森林大火的历史阶段，与天、地、生有关的某些环境因素，控制着林火强度和蔓延，因而也将

控制着森林火灾的最终规模”。

3) 将火灾次数、成灾面积与 ENSO 关系表示在同一张图上 (图 4)。从图 4 中看到, 林火发生次数与 ENSO 以及成灾面积无明显关系; 太阳黑子相对数与林火发生次数及成灾面积均无明显关系。由此有以下初步认识: 林火发生次数是与人为活动密切

相关的, 与林火的发生环境、天、地、生环境并没有直接关系。这一点与当前的一些研究是一致的; 森林成灾面积与 ENSO 现象有一定关系, 这与当前某些研究一致。而云南林火的成灾面积与太阳黑子活动无明显关系, 这一点与国内一些研究不尽相同。

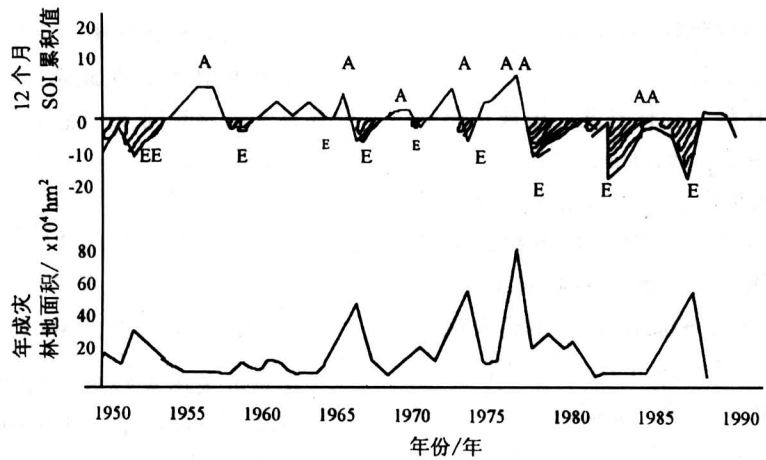


图 3 黑龙江省森林火灾年过火林地面积与 ENSO 的关系

Fig.3 The relation between forest fire area in Heilongjiang province and ENSO

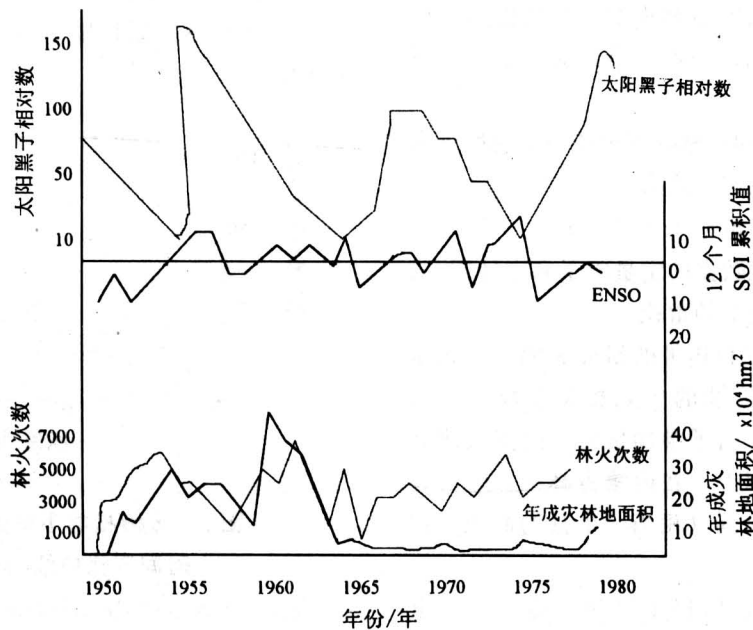


图 4 云南森林火灾年际活动与 ENSO 及太阳黑子活动关系

Fig.4 The relation between forest fire frequency in Yunnan province, ENSO sunspot

* 拉尼娜, 记为 LN, 是指中、东太平洋上海表温度比多年温度值低的时段。

3 可燃物的贮量遥感预测

林中积累的枯落物是森林火灾发生的物质基础。因此有大量的文章在探讨这一问题。研究表明,小于1 cm的可燃物是森林火灾发生的要害;可燃物含水率与燃点的关系极为密切;细小可燃物的贮量推算公式多种多样。如美国林火专家(Rothermel, 1972)归纳出9个可燃物模型;Anderson(1982)给出了13种图片识别方法;Rothermel(1973)提出了动态模型。Bruce认为林龄、森林密度、植被是影响可燃物负荷量的主要因子,W.Henary(1978)等三名美国林学家认为,火烧后5年内表层可燃物将迅速增加,Willian(1980)认为火烧后可燃物总负荷量随火烧后时间而逐渐增加,澳大利亚R.J.Raison(1932)、P.V.Woods、P.K.Khanna指出桉树火烧后稳定状态的负荷量是11.1~29.4 t/hm²,中国邱学颖指出建立细小可燃物与年龄、郁闭度、树高、胸径的多元关系是可行的。

本研究所给出的方法是利用遥感数据建立其与林分因子关系,通过林分因子,推算出某种林分下的可燃物贮量,从而对该地区的林火危险性予以评价。这是宏观评价某大区域林火发生可能性的较好途径。这一点正是我们以往没有借助遥感数据时感到十分困惑的^[11]。

从文献[9]中已知遥感数据可在一定精度下求出相应的林分蓄积,其关系式为:

$$y = a_1 x_1 + a_2 x_2 + \dots + a_n x_n,$$

式中自变量为遥感数据的定量因子和定性因子,因变量为一定面积样地上的蓄积。

据对温带、亚热带和热带的研究表明,蓄积量与多波段数据及其比值项的多元相关系数一般为0.4~0.6,如加上定性因子参加估测,按流域建立关系则通常可达0.7以上。在内蒙古林区,经实地验证估测森林蓄积量全局(相当一个县的面积)精度已达95%以上。

生态学研究已知,植物干材重(Q)与叶重(L)相关关系为 $Q = aL^b$ (a、b为待求参数);森林凋落物现存量与环境相关式为: $W = 1.428 \times 10^{-4} N^{1.16} E^{0.94} A^{0.45}$ (N、E、A分别为纬度、经度及高程),由此我们不难推出森林凋落物贮量,据云南资料推导了云南松的叶重与干材重的公式,即

$$Q = 40.92 \times L^{0.63} (\text{相关系数 } r = 0.7049)^{[8]}.$$

$\log Q = 1.612 + 0.63 \log L$,如每公顷蓄积(Q)为

270 m³,于是叶重为20.23 t/hm²。如每年落叶20%,则每年枯落物量为4 t/hm²,分解60%,积累1.6 t/hm²。按该区10年没发生火灾计,则累积近16 t/hm²。这便是森林火灾隐患之所在。

另一方面,为从时间序列上推断某区域枯落物积累量,有必要导出火灾后n年内枯落物(易燃物)积累量公式。

在生态学和林学中,表达植物生物量增长的函数有几种类型^[10],在此选择 $f(x) = a + be^{-cx}$ 并令其自变量为时间t,然后对其积分,从而求得其贮量。导出下式:

$$w = \int_0^n f(t) dt$$

$$\int_0^n (a + be^{-ct}) dt = an - b/c(e^{-cn} - 1).$$

于是可求出火烧后n年凋落物积累量理论值,扣除分解部分即可估测出当前贮量,这对预报林火危险性是有意义的。

用云南松资料拟合出的方程为:

$$w = 15.227t + 1402.6(e^{-0.01t} - 1) (r = -0.67)$$

其中:t为最后一次火烧后年限(年);

W为枯落物积累量(t/hm²)。其拟合曲线如图5所示。

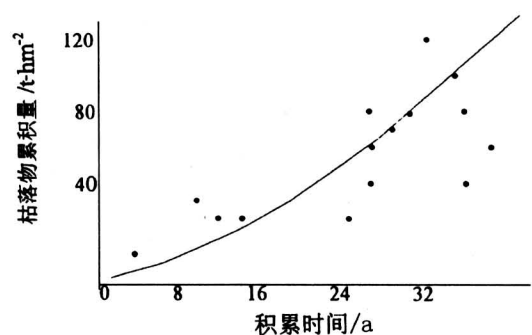


图5 云南松林下枯落物积累量随时间变化曲线(<40年)

Fig.5 Curve of the accumulation of litter by time in Yunnan pine forest (<40 years)

在推断某区枯落物贮量时,可进行少量调查,对不同林型的典型样地,测其枯落物每平方米重量,然后据下式导出每公顷易燃物重量。

$$\text{易燃物重量}/\text{hm}^2 = \text{易燃物千克重数}/\text{m}^2 \times 10000 \quad (\text{t}/\text{hm}^2) / 1000.$$

同时测定最近发生火灾年限,即可求出估测式,

再对区域性枯落物积累量进行估测, 从而判定火灾发生的潜在危险。

以上, 讨论了用遥感数据预测和用模型估计枯落物贮量的两种方法。

4 结束语

从宏观上探讨了西南林区火灾预报方法, 围绕火灾发生的三要素, 火源、燃烧环境, 以及可燃物进行了探讨。在火源研究中突出了人为火随机性的考虑, 采用了随机过程方法, 以及为免除随机干扰选取成灾面积为变量因子进行分析; 在燃烧环境中, 重点探讨了大环境, 从全球气、水变化来分析西南林火是否存在某种关系和对应规律; 在可燃物贮量的研究中, 采用遥感数据通过立木蓄积间接推算枯落物贮量, 为宏观估测开拓了新的途径。并给出区域性时间序列下枯落物累积的算式。

本文的工作仅仅是初步。还有许多工作可作, 如区域性可燃物预测图的编绘, 火灾与天、地、生的关系, 以及火灾周期性因子的剔除, 文中研究内容和方法还有诸多不完备的地方, 这些将是今后的研究任务。

参考文献

- [1] 郑焕能. 中国森林火灾与对策[J]. 自然灾害学报, 1994, (3): 37~40
- [2] 李勇. 马尔科夫决策规划理论在森林火灾预测中的应用[J]. 森林防火, 1992, (4): 13~28
- [3] 朱明德. 统计预测与控制[M]. 北京: 中国林业出版社, 1993. 37~51
- [4] 张罗珍. 南方涛动异常对美国佛罗里达州森林火灾影响[J]. 森林防火, 1992, (4): 37~39
- [5] 王述洋. 厄尔尼诺—南方涛动异常对森林火灾年际活动规律的影响[J]. 世界林业研究, 1993, (1): 31~38
- [6] 王述洋. 黑龙江省未来十年森林火灾火情宏观预测[J]. 森林防火, 1993, (2): 11~14
- [7] 何忠秋. 森林可燃物负荷量模型研究[J]. 森林防火, 1993, (3): 11~13
- [8] 党承林. 云南松林的生物量研究[J]. 云南植物研究, 1991, 13(1): 59~64
- [9] 赵宪文. 应用航天遥感资料估测森林蓄积量[A]. 马俊如. 中国遥感进展[C]. 北京: 万国学术出版社, 1992. 217~221
- [10] France J. 农业中的数学模型[M]. 北京: 农业出版社, 1991, 115~219
- [11] 金可参. 大兴安岭地区地面可燃物分布调查研究[J]. 森林防火, 1984, (1): 16~19

A New Way to Study the Three Essential Factors of Forest Fire

Zhao Xianwen

(Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China)

[Abstract] This thesis took the three essential factors of forest fire (fire source, environment, and litter) as the point of departure, and has approached the forecast method of forest fire in tropical area of southwest China in a macroscopic scale.

This study supported by mathematical method was from a new angle. For example, in the aspect of forest fire forecast, the main cause of forest fire was artificial fire, which had lots of randomness. So Markov random processes could be employed in the study. In the aspect of the analysis of environment that contributes to forest fire, correlation analysis would reveal the relation among cosmos, earth and life, for instance, the relation between the El Nino (or La Nina) and the forest fire. Especially in the aspect of estimating the amount of litter, a new estimate method based on space remote sensing data was raised. It provided an effective and quantitative way with higher reliability for forest fire forecast on region scale.

[Key words] forecast of forest fire; space remote sensing; essential factors of forest fire; a new way