

森林火灾后生态变化遥感监测评价 模型的构建方法研究*

高世忠 周万村 范建容 郭 洁

(中国科学院成都山地灾害与环境研究所 成都 610041)
(水利部)

摘 要 通过攀西林区云南松林的一系列旧火烧迹地的更新恢复和生态变化的遥感调查,对各生态因子的空间分布特征及生态变化的影响规律进行分析,确定了评价因子(变量)及其评价标准,利用遥感信息,以及地形、土壤、林分和林木受害程度等要素的 8 个因子的模糊综合评判结果和火烧年限等为变量,通过多组数据的多元统计分析,建成森林火灾后生态变化遥感监测评价模型,经野外调查结果验证分析,达到了预期的攻关目标。为使该模型能适应森林生态遥感监测运行系统的需要,对各监测因子数据的获取、植被指数的提取等方面进行了深入的方法探索。

关键词 遥感,森林火灾,生态变化,监测模型

1 前 言

森林火灾后生态变化趋势和动态特征的监测预报是森林经营管理中的一项重要的基础性工作,在国内外都受到林业部门的高度重视。但用遥感和计算机技术相结合的方法进行的监测研究尚处于试验探索阶段,成功的方法和可投入运行的监测系统国内尚不多见,所以在“八五”国家科技攻关项目《西南林区等火灾监测评价》中安排了《森林火灾后生态变化遥感监测评价技术》研究课题。本文仅就有关遥感监测评价模型构建方法的研究情况简述如下。

2 技术路线和方法

针对监测模型构建研究中的几个关键问题,即:① 森林火灾后生态变化规律和动态特征的研究;② 影响生态变化的主导因子及其评价标准的确定;③ 生态监测因子(变量)数据的获取方法的探索等,结合主、客观条件,拟订了切实可行的技术路线和研究方法,选择多时相的 TM 图象和数据为主要信息源,以 SPOT、MSS 卫星象片和彩红外航空象片为辅助资料,在横断山中段的攀西林区云南松林的 5 个主要林型组中,选择草类—云南松林和灌木—云南松林两个林型组不同年代的新、旧火烧

* 为国家“八五”科技攻关项目 85-724-01-03 的《森林火灾后生态变化遥感监测评价技术》的部分成果。参加者有游先祥、兰立波、黄雪樵、赵子玉、龙先华等。野外观测和试验得到四川省林业厅护林防火办公室、凉山州和西昌市林业局的大力支持与帮助,深表谢忱。

收稿日期:1995 年 2 月 6 日;收到修改稿日期:1995 年 8 月 14 日

迹地(以下简称“迹地”)作为观测样地,并在每一样地周边就近选取条件与之相近的未过火林地作为对比样地。以它们的常规调查结果为参照,以森林植被的光谱特性为指导,从森林生态因子的空间分布规律及其对生态变化的影响作用的遥感图象判读分析入手,研究迹地更新和生态景观变化——林木长势恢复和生物量增长,与其在不同时相的遥感图象上的影象特征(即形态-结构特征和色调-灰度特征)变化的相关关系;在证实TM 图象对森林火灾后生态变化的趋势和动态特征的反映具有较强的敏感性和可靠性的基础上,以植被指数提取法代替常规的野外调查法,以便获取生态监测所必需的特征信息,并依靠生态环境地理信息系统(EGIS)的操作、运算和处理功能,在图形和图象信息库的支持下,建立森林生态变化遥感监测数学模型。整个研究工作的技术路线和工艺流程如图1。

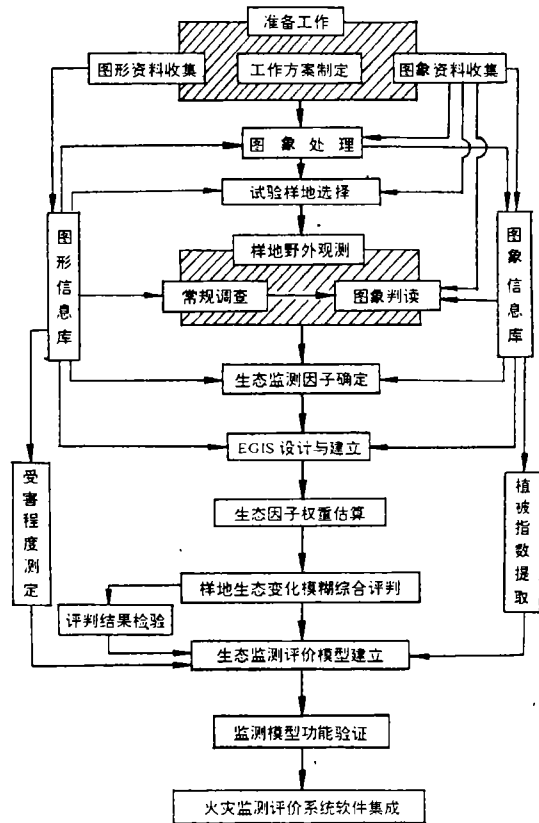


图1 研究工作的技术路线和工艺流程

Fig.1 Flowchart of the study

3 监测评价因子及其评价标准的确定

构成森林生态系统的因素多种多样,森林火灾后它们的空间分布和对生态变化的影响作用既千差万别,又错综复杂,且随时间和空间的变化而变化,从而使生态景观恢复千姿百态。为深入了解各生态因子和生态变化规律,以便使所构建的监测模型能准确地表达森林火灾后生态变化的复杂过程。通过常规的和遥感的方法对各样地的全面调查,在掌握火灾前后生态因子和生态变化的大量资料的基础上,并结合前人的有关林火生态的研究成果,遵循生态主导性原则和数据易于获取等要求,从众多的生态因子中筛选出对生态变化影响作用突出的地形、土壤、林分和林木受害程度等要素的8个主导因子作为生态监测评价因子,并制订了如表1所示的评价标准。

林分状况既是影响生态变化的内在主导因素,又是生态景观恢复结果的重要标志。在各生态要素的影响下生态系统所发生的变化,首先反映在林分状态的变化上,也反映在不同时相的遥感图象的色调-灰度特征差异上。不同龄级的林木的耐火性不同,火险等级也不同,灾后恢复的速度和效果有明显差异^[1]。云南松中、幼龄林火险等级高于近、成熟林,其耐火性和灾后生长机能恢复也比近、成熟林差。故林龄因子的评价直接

根据林木的龄级状况及其对生态的影响作用大小评分。郁闭度与林地可燃物和林下调落物数量正相关,故郁闭度越大,火行为强度越高,林木受害程度越严重。一般灌木—云南松林可燃物和林下调落物较多,故受害程度比草类—云南松林严重,灾后恢复相对较困难。郁闭度的数值直接参与监测评价运算。

表 1 生态监测评价因子及其评价标准

Table 1 Ecofactors and evaluation criteria for ecological monitoring and evaluation

等 级			1	2	3	4
项 目		评价依据	95—100	80—95	60—80	<60
林 分	林龄 (a)	X_6	21—40	41—60	$\geq 60, 10—20$	<10
	郁闭度	X_7	≥ 0.7	0.4—0.7	0.3—0.4	<0.3
土 壤		X_5	棕红壤, 山地红壤	褐红壤	山地棕壤	褐红壤
地 形	海拔 (m)	X_4	1600—2800	1300—1600	>2800	<1300
	坡度 ($^{\circ}$)	X_1	0—15	16—35	36—40	>40
	坡 位	X_3	中	中上, 中下	上	下
	坡 向	X_2	N	NE, NW, E, W	SE, SW	S
受害程度 (%)		X_8	≤ 30	30—35	50—70	≥ 70
生态恢复评语			很好	良好	一般	差
植被指数比 D			≥ 0.9	0.7—0.9	0.3—0.7	<0.3

土壤要素是林木重要的生境条件之一,本身是一个受多种因素综合影响的生态因子。尽管火对土壤结构和营养成分含量有一定影响^[2,3],但土壤对生态变化的影响主要以其与光、热、水、气和地形条件形成的地域组合体的综合影响为主。在攀西明显的垂直气候条件下,以棕红壤、山地红壤和黄棕壤的地域组合最适于云南松的生长和灾后恢复^[4]。故土壤要素主要以其种类和海拔的组合对生态恢复的适宜性进行评价。

地形条件也是森林的重要生境条件之一,是影响森林生态变化的间接要素。火烧过程中,它通过控制温度、风速、风向等气象条件而间接地影响林木受害程度;灾后恢复过程中,它通过对光、热、水、气、土等生境条件的重新搭配而形成不同的地域组合体,综合地影响林木更新恢复的速度和效果。其评价系根据海拔、坡度、坡向和坡位等4个因子的空间分布状态及其对生态变化影响作用的大小进行。

林木受害程度取决于火行为强度。不同的火行为强度对林木造成的伤害不同。为操作方便,与火行为强度对应,将受害程度分为重度、中度和轻度3级,其受害程度评价指标示如表2。

轻度受害,一般与低强度火有关,多发生于草类—云南松林。烧死草类、部分灌木和幼树,对70%以上树木生长影响不大,故灾后恢复较快,一般3—4个生长季(以

表2 林水受害程度指标
Table 2 Indicatrix of stand deforestation degree

受害程度	火行为强度	树干碳化高度 (占枝下高比例)	树冠受害比例		树木死亡率(%)		林下植被死亡率(%)		生态景观恢复时间 (生长季)
			枝条碳化	叶变色	幼树 (占幼树)	中成树* (占中成树)	草类	灌木	
轻度	低强度火 <350 kW / m 火焰高 <2m	$< \frac{1}{3}$	$\frac{1}{4}$	$< \frac{1}{3}$	<30	<10	100	70	3—4
中度	中强度火 350—750kW / m 火焰高 2—4m	$\frac{1}{3} - \frac{2}{3}$	$\frac{1}{4} - \frac{2}{3}$	$\frac{1}{3} - \frac{3}{4}$	30—70	10—30	100	100	4—6
重度	高强度火 >750kW / m 火焰高 >4m	$> \frac{2}{3}$	$> \frac{2}{3}$	$> \frac{3}{4}$ (大部分顶梢未变色)	>70	>30	100	100	6—7

一年为一个生长季)后即可全面恢复。重度受害,多为高强度火所致,以灌木—云南松林发生较多。不仅草、灌被烧光,连树木也严重烧伤,奄奄一息,但凡是顶梢未死者都有复活的希望¹⁾,只是恢复时间较长,一般6—7个生长季或更长时间才能达到正常水平。介于重度和轻度之间者为中度受害,约4—6个生长季便可恢复。

4 生态变化遥感监测评价模型的构建

综上所述,森林生态系统是一个多因素多变量的错综复杂的大系统,各要素对生态变化的影响作用的性质、方式和程度互不相同;它们既相互制约,又相互联系,以不同特征的组合对生态系统产生综合的影响。因此,生态变化的遥感监测评价本身就带有复杂性和模糊性的特色。

4.1 建立生态变化趋势模糊综合评判的数学模型

针对生态变化的复杂性和模糊性特点,采用多层次模糊综合评判方法^[5,6],以建立生态变化趋势的监测评价数学模型,即先对低层次的生态因子进行综合评判,再对各因子的评判结果进行高层次的综合评判。通过这样由低层次、小系统向高层次、大系统的逐步综合过程,以实现生态变化趋势的监测和预报。

4.1.1 划分因子集和拟定评语集

将影响生态变化的8个评价因子作为一个因素集 X ,下分地形(X_1)、土壤(X_2)、林分(X_3)、受害程度(X_4)等4个子集,即

$$X = \{X_1, X_2, X_3, X_4\} \quad (1)$$

1) 赵子正. 森林火灾的预防和扑救. 护林防火讲义, 四川省护林防火办公室. 1988年.

4 个子集分别为

$$\left. \begin{aligned} X_1 &= \{x_1, x_2, x_3, x_4\} \\ X_2 &= \{x_5\} \\ X_3 &= \{x_6, x_7\} \\ X_4 &= \{x_8\} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

森林火灾后生态变化趋势评语集拟定为

$$y = \{\text{很好, 良好, 一般, 差}\} \quad (3)$$

4.1.2 确定监测评价因子的权重

以生态因子野外调查和分析结果为依据, 对这些因子中任意两个因子 x_i 和 x_j 之间的重要性用多目标决策中的“二元对比法”进行两两比较, 分别给出各因子的重要性指标, 然后计算它们的比值 C_{ij} , 得到判断矩阵:

$$C_{mn} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & \cdots & C_{1m} \\ C_{21} & C_{22} & \cdots & C_{2m} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ C_{m1} & C_{m2} & \cdots & C_{mm} \end{bmatrix} \quad (4)$$

对矩阵 C 的每一行元素先相乘, 再求 m 次方根, 即得向量:

$$\beta = (\beta_1, \beta_2, \cdots, \beta_m)^T, \text{ 其中 } \beta_i = \left(\sum_{j=1}^m C_{ij} \right)^{\frac{1}{m}} \quad (i=1, 2, \cdots, m)$$

作归一化处理后即得另一向量:

$$A = (a_1, a_2, \cdots, a_m), \text{ 其中 } a_i = \frac{\beta_i}{\sum_{k=1}^m \beta_k}$$

经检验, 判断矩阵若具有满意的相容性时, 向量 A 即可作为权数集。

由上法得到的各因素集的模糊权数集为:

$$\begin{aligned} \text{生态恢复权数集 } \tilde{A} &= (0.0842, 0.0342, 0.2881, 0.5935), \\ \text{地形子权数集 } \tilde{A}_1 &= (0.2207, 0.5619, 0.0613, 0.1561), \\ \text{林分子权数集 } \tilde{A}_3 &= (0.1667, 0.8333). \end{aligned}$$

由于土壤和林木受害程度作为综合因素考虑, 未细分到次级因素, 故无子权数集。

4.1.3 求单因素评判矩阵

首先, 建立隶属函数。本研究选用升(降)半梯形分布, 建立起一元线性隶属函数, 然后, 以隶属函数计算每个评价因子对各评语的隶属程度, 从而诱导出单因素评判矩阵:

$$\tilde{R} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ r_{m1} & r_{m2} & \cdots & r_{mn} \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中, r_{ij} 为 i 因素对 j 等评语的隶属度。

4.1.4 多层次模糊综合评判

由于监测评价因子被分成两层, 故应作两级综合评判:

一级综合评判 由各类因子的权数集 \underline{A}_i 与该类的单因素评判矩阵 \underline{R}_i 进行模糊变换, 即得各类一级因子的评判结果

$$\underline{B}_i = \underline{A}_i \cdot \underline{R}_i = (b_1, b_2, \dots, b_j, \dots, b_n) \quad (6)$$

其中,

$$b_j = \sum_{i=1}^m a_i r_{ij}$$

此种变换法对所有因子依其权重大小均衡兼顾。

二级综合评判 一级综合评判结果 \underline{B}_i 是对因素集 X_i (2)式中单因素的评价; 二级综合评判则将每个因素集 X_i 作为一个单因素看待, 用初始模型(6)式作它的单因素评判, 于是构成因素集 X_i 的单因素评判矩阵, 亦即总的单因素评判矩阵:

$$\underline{R} = \begin{bmatrix} \underline{B}_1 \\ \underline{B}_2 \\ \underline{B}_3 \\ \underline{B}_4 \end{bmatrix} = (b_{ij})_{4 \times 4} \quad (7)$$

然后用生态恢复权数集 \underline{A} 和 \underline{R} 进行模糊变换, 即得生态变化结果的综合评语:

$$\underline{B} = \underline{A} \cdot \underline{R} \quad (8)$$

运用上述模糊综合评判模型对 18 块样地进行模糊综合评判, 其结果列于表 3。

4.2 建立生态变化动态监测评价的数学模型

上述模糊综合评判的结果综合地反映了森林火灾后在各生态因子的影响作用下森林生态变化的总趋势和迹地更新的总体效果。欲知迹地更新恢复过程中各生长季的变化情况, 还需建立动态监测模型来解决。

运用统计数学的方法, 对 m 个自变量 x_1, x_2, \dots, x_m 的几组观测数据 $(x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{im}, y_i)$, $(i=1, 2, \dots, n)$, 用线性表达式: $y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + \dots + a_mx_m$ 作回归分析, 其中的 $a_0, a_1, a_2, \dots, a_m$ 为回归系数, 用最小二乘法来确定, 即得 $Q = \sum_{i=1}^n [y_i - (a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + \dots + a_mx_m)]^2$ 达到最小。根据极值原理, 回归系数满足下列方程组:

$$(C^T C) \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ \dots \\ a_m \end{bmatrix} = C^T \begin{bmatrix} y_0 \\ y_1 \\ y_2 \\ \dots \\ y_n \end{bmatrix} \quad \text{其中} \quad C = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1m} \\ 1 & x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & x_{n1} & x_{n2} & \dots & x_{nm} \end{bmatrix}$$

表3 森林火灾后生态恢复趋势的模糊综合评判结果与野外调查结果的对比分析
Table 3 Analysis for comparison the result of fuzzy synthetical evaluation with field investigation

样地号	时间 (年、月)	受害程度	林分状况		地形			Fuzzy 评语			变化趋势	1992年5月野外调查结果			
			郁闭度	林龄	海拔	坡向	坡度	坡位	土壤	很好			良好	一般	差
1	1992.5	中	0.6	中	2300	SE45°	22°	中、上	红壤	0.174	0.199	0.627	0	一般	刚烧,可望恢复
2	1992.5	强	0.5	幼	1600	W	23°	上	紫色土	0.014	0.065	0.039	0.882	差	树木几乎全烧死
3	1986.4	中强	0.4	中	1800	NW35°	23°	中、上	紫色土	0.040	0.589	0.371	0	良好	山腰好,山顶稍差,局部陡坡有裸岩
4	1982.3	弱	0.7	中	1600	SW45°	15°	下	紫色土	0.156	0.777	0.067	0	良好	与周围未过火林地无法区分
5	1986.3	中强	0.7	中	1700	SE45°	24°	中	紫色土	0.148	0.507	0.345	0	良好	恢复不均匀,大部分良好,局部差
6	1982.3	强	0.4	中	2200	NW50°	30°	中、上	红壤	0.084	0.320	0.359	0.237	一般	基本恢复,但参差不齐,好坏不均
7	1991.4	中	0.6	中	2400	-山四面	32°	上	黄棕壤	0.142	0.813	0.045	0	良好	恢复速度快,较整齐,均匀
8	1992.4	弱	0.5	中	2300	S	35°	中、上	黄红壤	0.300	0.645	0.043	0.012	良好	恢复较容易,局部陡坡较难
9	1987.5	强	0.4	中幼	2300	W	33°	上	黄红壤	0.010	0.544	0.445	0	良好	恢复较好,但不均匀,盖度下降
10	1987.5	强	0.5	中幼	2200	W	30°	上	紫色土	0.010	0.554	0.436	0	良好	恢复好,但疏密不等,盖度不均
11	1990.4	中	0.4	中	1400	E	25°	中	红壤	0.029	0.606	0.365	0	良好	恢复好,但局部陡坡差
12	1983.2	强	0.4	中	1500	N	35°	中、上	红壤	0.057	0.285	0.658	0	一般	恢复一般,局部混交林好
13	1989.7	中	0.7	中	1800	N	30°	中、上	红壤	0.152	0.823	0.007	0.019	良好	恢复速度快,但不均匀,陡坡差
14	1991.4	中	0.4	中	2100	S	25°	中	红壤	0.039	0.894	0.067	0	良好	恢复速度快,效果明显
15	1985.4	中	0.6	中	1600	S	26°	下	红壤	0.070	0.281	0.637	0.012	一般	人为干扰人,恢复不均匀
16	1980.4	中	0.7	中	1800	S	30°	中、上	红壤	0.152	0.798	0.038	0.012	良好	恢复好,与周围浑然一体,陡坡差
17	1987.2	弱	0.7	中	2300	W	24°	中、上	黄棕壤	0.148	0.827	0.025	0	良好	恢复好,与周围无明显区别
18	1986.3	弱	0.6	中幼	1657	W	24°	下、中、上	紫色土	0.299	0.659	0.032	0	良好	恢复好,与周围无法区别

采用乔里斯分解法解出回归系数，再计算出下列4个量，以衡量回归效果：

$$\text{残差平方和为 } sse = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad \text{回归平方和为 } SSR = \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2$$

$$\text{复相关系数为 } r = \sqrt{1 - \frac{sse}{sse + SSR}} \quad \text{显著性检验量为 } F = \frac{SSR/m}{sse/(n-m+1)}$$

其中

$$\bar{y} = \sum_{i=1}^n \frac{y_i}{n}, \hat{y}_i \text{ 为由回归模型计算的估计值, } n \text{ 为样本个数, } m \text{ 为自变量个数。}$$

通过不同时相的遥感图象植被指数测定，共取得各样地与其对比样地的植被指数比值28组，然后运用上述数学模型作线性统计分析，在模糊综合评判结果的基础上，引入火烧年限 t ，建成如下的森林生态变化动态监测数学模型：

$$D = 9677.618 - 9677.574b_1 - 9676.974b_2 - 9677.343b_3 - 9677.945b_4 + 0.054t \quad (9)$$

式中， b_1, b_2, b_3, b_4 为模糊综合评判结果（即线性表达式中的 x_1, x_2, x_3, x_4 ）， t 为火灾后生长恢复年限（即 x_5 ）。

衡量回归效果的统计量：残差平方和为 $sse = 0.223$ ，回归平方和为 $SSR = 1.056$ ，复相关系数为 $r = 0.875$ ，显著性检验量为 $F = 14.387$ 。

4.3 生态监测模型因子数据的获取

模型的表达功能和适用水平高低，除模型构建方法科学，结构合理，因子（变量）选择恰当外，还取决于各因子数据获取方法简便，数据准确可靠。

4.3.1 植被指数比值的获取

植被指数有比值、差值、归一化差值等形式^[7,8]，它们随植被的长势恢复和生物量增加而增大，与植被空间分布密度（或冠群盖度）增大和叶绿素含量的增加而呈线性变化，故用植被指数提取法可获得各样地生态变化的动态特征信息。考虑到攀西复杂地形条件而选用归一化差值的形式，即

$$VI = (TM4 - TM3) / (TM4 + TM3)$$

它能使植被信号放大，增强绿色植被与其非绿色背景之间的反差，故能消除或削弱大气和地形阴影的影响。

由于观测样地都是不同年限的旧火场，故分别提取每个样地（ T ）及其对比样地（ R ）的TM4和TM3数据，代入上式算出 TVI 和 RVI ，以其比值 $D = TVI / RVI$ 表示该样地（ T ）从火烧到遥感成象这一时间段生态恢复的相对值。又因为每一样地内的不同地段林木恢复的不均一性而给 D 值带来偶然误差，故在每个样地及其对比样地内对应选取不同林分和立地条件的若干有代表性的测算点，则得到一系列的 TVI 和 RVI 值，以它们的平均值所计算的平均植被指数比值作为该样地的植被指数比值。

4.3.2 林木受害程度的评估

比较切实可行的有以下两种方法：

仪器观测法 林木受害程度与火行为强度呈正相关，所以在扑火的同时用仪器测量

火行为强度,目估火焰高度等,以评估受害程度。鉴于不同地段火行为强度的不均一性,故应在具代表性地段进行观测,以平均值作为受害程度。

标准地调查法 受扑火工作干扰和火场地形条件所限,仪器观测一般精度较差,有的地方则难以实现。故较为安全可靠的方法是于火灾后在火场不同地段选取 $20 \times 20 \text{ m}^2$ 或 $10 \times 10 \text{ m}^2$ 的标准地,用标准地调查法调查其中的树干碳化高度,树木烧死和保留株数,树冠枝、叶烧焦和变色的比例;用 $2 \times 2 \text{ m}^2$ 或 $1 \times 1 \text{ m}^2$ 的小样方调查林下灌木、草本的死亡率等数据,按表 2 的各项指标评估林木受害程度。

4.3.3 生态环境因子数据的获取

火灾中,林分、地形和土壤等生境因子均发生了不同程度的变化。但对生态变化而言,一般灾前生境条件好的林地,灾后的恢复速度和质量均比较好。故各生境因子数据可从相应比例尺的森林、地形、土壤等图件中直接采集,或将这些图件通过制图处理,使比例尺统一后存入数据库中,以供随时提取。

5 模型监测评估结果的检验与分析

5.1 模糊综合评判结果的验证与分析

根据最大隶属原则和所拟定的生态恢复评语集,按 Fuzzy 评语所给出的数据,将火灾后云南松林生态变化状况定为“很好”、“良好”、“一般”和“差”4个等级。其实 Fuzzy 评语所提供的生态变化信息,其内涵远远超出清晰的等级结论。它向人们展示的是迹地生态变化趋势在一般正常状态下的最大可能性,但不是唯一的可能性。因为4个等级数值之和为1,只有当其中一个的数值为1,其它3个为零时,其可能性才是唯一的;如果4个等级的数值相等或相近,则4个等级出现的可能性均等,预示生态发展趋势模糊不定;多数情况下4个等级的 Fuzzy 数值不等,则以其中数值最大的一个所相应的等级为发展趋势的最大可能性。由于生境条件和生态因子的复杂多变性及其影响作用的模糊不定性,生态恢复过程中的主要矛盾和次要矛盾相互转化的现象时有发生,所以还不能忽视生态变化向数值较小的其它等级转化的可能性。其次, Fuzzy 评语4个等级数值的大小,还表明迹地更新朝4个等级(方向)发展的速度和质量的差异,数值越大的,速度越快,林木更新恢复质量和效果越好。总而言之, Fuzzy 评语提示人们在迹地自然更新过程中应适时地辅以必要而有效的人工更新抚育措施,使生态变化迅速地朝着对人类有利的方向发展,缩短更新时间,以提高林地恢复的效果。

林分要素的影响作用权重为0.2881,仅次于受害程度,说明林分状况是生态变化的内在主导因素。野外调查证实,灾前郁闭度大的林地,灾后恢复一般都比较好的,这点也得到 Fuzzy 评语的肯定。如表3中郁闭度为0.7的4、5、13、16、17号样地的恢复趋势均以“良好”为主,向“很好”方向发展的可能性也较大,只是因为其它因素的差异而使它们的“良好”或“很好”的数值互不相同。又如3号样地郁闭度为0.4,5号为0.7,它们的受害程度、地形、土壤等条件相同或相近,恢复趋势同为“良好”,但3号向“一般”方向转化的可能性(0.371)比5号(0.345)要大,而向“很好”方向发展的

几率(0.040)却比5号(0.148)小得多。林龄与树木耐火性和火险等级密切相关^[1],幼龄树耐火性能差^[2],火险等级高,受害程度或死亡率比中、成龄树高得多,故纯幼龄林中、高强度火灾后大都无法恢复。如纯幼龄树的2号样地的Fuzzy评语为“差”,与野外调查结果完全一致。中龄林处于生长发育旺盛期^[1,2],故灾后恢复一般都较为容易,效果也好,这点在表3中得到明确的反映。但郁闭度较小,立地坡度较陡的中龄林,火灾中受害往往较重,故灾后恢复就要差些。如重度受害的郁闭度同为0.4的6号和12号样地的恢复结果都是“一般”,也是符合实地情况的。异龄密林中的幼树在火灾中死亡较多,其恢复后的林分密度或郁闭度有不同程度的降低。这点就是5、13、16号样地的恢复趋势除“良好”之外还有向“一般”和“差”的方向发展的原因之一。

受害程度的影响权重为0.5935,居4大要素之首,证明它是影响生态恢复的关键因素。尽管云南松是“烧不死”的树木,但受害越严重,灾后恢复的难度越大,所需时间也越长。一般的中、轻度伤害大都未超出林木生态的自然调控能力,故一般恢复都比较好,如轻度受害的4、8、17、18号样地,不管其它因素如何,恢复趋势均为“良好”,而向“很好”方向发展比向“一般”方向发展的可能性大得多。实地调查证实,4、17、18号样地的恢复状况均达到了火烧前(即对比样地)的水平。中度受害的7、11、13、14、16号样地的恢复也为“良好”,但朝“很好”方向发展的可能性就比轻度受害林地小了。而重度受害林地的恢复结果一般都不如前二者。如2号样地为“差”,6、12号样地为“一般”,9、10号样地虽为“良好”,其数值仅比“一般”略高一点,若在恢复过程中稍遇不测,将会出现“一般”的结局。中偏重度受害的3、5号样地由“良好”变“一般”的可能性也很大,只是由于恢复过程中人工抚育抓得好,才保住了“良好”,但恢复不均匀。这一事实说明,在迹地自然更新恢复过程中必要的人工抚育和管护工作的重要性。

地形因子的影响权重为0.0842,明显小于受害程度和林分状况。这与它们在生态恢复过程中的间接影响身份相配称。但当地形因子处于极端状态时,其影响作用就不容忽视了。如坡度 $>35^\circ$ 的陡坡林地灾后恢复一般都很困难,以陡坡为主的12号样地1983年遭火烧,1992年野外调查时,其9年的恢复结果还未达到火烧前的水平;同样6、8、13、15、16号样地中的局部陡坡地段的林木恢复状况也并不佳,有的沦为裸岩或光顶,有的退化为荒坡,甚至诱发局部崩塌,故其评语中有“差”的数据显示。所以陡坡林地特别要注意防火和灾后的人工更新抚育,以防止生态退化。再如13和16号样地,其它条件均相同,只是坡向一南一北,其评语中就出现4个等级数值的明显差异,说明坡向的影响在起作用。

综上所述,遥感与模糊综合评判法的有机结合,使生态变化趋势的评估结果与实地景观状况基本符合,从而证明模型及其构建方法是科学的合理的。

然而,评估结果的准确度大小,除了取决于模型及其软件设计水平外,还在于各评判因子数据的来源和采集方法的可靠性和准确性。4大要素中,林分、地形和土壤数据来自相应的图件,其精度较为可靠。而对生态影响权重最大的受害程度系当地护林防火部门提供,多属火灾现场目视估计的,并未用仪器或标准地调查法等施测评估,故误差较大,这些误差必然殃及Fuzzy评语的准确性,如1、9、10号样地因受害程度欠准确,

故其评语与各生态因子之间的相关性规律不如其它样地那么明显，也与实地景观状况有一定出入。将它们与条件相同或相似的其它样地比较，如 1 号与 7 号比较，9、10 号与 6、12 号比较，便不难看出其中端倪。

5.2 动态监测结果的验证与分析

选择表 4 所列的 5 个迹地作动态监测评估检验，将其结果与模糊综合评判和植被指数比值测定的结果进行对比验证。3 种方法不同，但因描述的是同一事物或现象，故具有相同或相近的结论，同时也与野外调查结果基本一致，证明动态模型及其软件的设计是科学而合理的，模型的功能是健全而适用的。

将表 4 中各迹地的 Fuzzy 评语所给出的生态变化趋势与其林分、地形、土壤和受害程度等因素作相关性分析，并与野外调查的景观状况作比较，证明 5 个迹地的模糊综合

表 4 森林生态动态监测评价模型验证结果
Table 4 Result of vevification to the model

序	验证样地位置	生态评价因子			Fuzzy 评语	火灾时间 灾后生长 季(年)	生态动态变化情况的对比			
		受害程度	林 分	地 形			土 壤	模型 计算	TM 图象 测算	1993 年 野外调查
1	德昌 茨达 典水	中 度	龄组： 灌木—云南 松中龄林混 生阔叶树 郁闭度：0.7	海拔：2000—2700m 坡度 25—30° 坡向，南和西 坡位：中、上坡	上坡位： 山地棕壤 中坡位： 山地黄棕壤	很好：0.148 良好：0.827 一般：0.025 差：0	$\frac{1986}{1}$	0.653	0.670 (1987年 图象)	恢复情况良好、与 周围未过火林地 浑然一体，无法区 分，中坡位优于上 坡位，山顶较差。
2	盐源 平川 大梁 子	中 度	龄组： 灌木—云南 松中龄林 郁闭度：0.6	海拔：1900—2500m 坡度：30—35° 坡向：西 坡位：中、上坡	黄红壤	很好：0.010 良好：0.544 一般：0.446 差：0	$\frac{1987}{6}$	0.849	0.880 (1993 年 图象)	总体已全面恢复， 与周围已无明显 界线，但不同区段 不均匀，陡坡较差
3	德昌 锦川 新马	中 度	龄组： 草类—云南 松中幼龄林 郁闭度：0.5	海拔：1500—2000m 坡度：30—35° 坡向：东和西 坡位：上坡	红壤	很好：0.057 良好：0.285 一般：0.658 差：0	$\frac{1989}{4}$	0.635	0.700 (1993 年 图象)	恢复一般，但不 同坡度和坡向地 段有一定差异，山 顶差，某些地段 有人为破坏痕迹
4	盐源 右所 赵碧 山	中 偏 重 度	龄组： 草灌—云南 松中龄林 郁闭度：0.5	海拔：1800—2700m 坡度：30—35° 坡向：—山四面 坡位：中、上坡	上坡位： 山地黄棕壤 中坡位： 黄红壤	很好：0.142 良好：0.813 一般：0.045 差：0	$\frac{1991}{2}$	0.703	0.880 (1993 年 图象)	恢复较好，乔灌 草三分天下，层 次分明，陡坡稍 差，中坡不如上坡
5	西昌 黄连 大德	重 度	龄组： 草类—云南 松中龄林 郁闭度：0.6	海拔：2200m 坡度：30° 坡向：北偏西 50° 坡位：中上坡	红壤	很好：0.084 良好：0.320 一般：0.359 差：0.237	$\frac{1982}{5}$	0.555	0.550 (1987 年 图象)	恢复一般，中坡不 如上坡，受人为影 响较大，恢复不均 匀，山顶最好

评判结果是正确的。其中，迹地 1、2、4 的发展趋势都是“良好”，且都有向“很好”转化的可能性，但向“差”退化的可能性为零；再将它们的“良好”、“很好”和“一般”的数值作纵横向比较可知，迹地 1 的恢复前景稍优于 4，更优于 2。迹地 3 和 5 的生态变化趋势同为“一般”，但 3 号的“一般”要比 5 号的“一般”清晰明朗得多，并有向“良好”转化的较大可能性，而无“差”的迹象；而 5 号虽有“良好”的希望，却有“差”的忧虑。按 Fuzzy 数值大小将 5 个迹地的恢复情况排出优至劣顺序为 1,4,2,3,5 这一结果与实地调查相一致。

如果说 Fuzzy 数值给出的是迹地更新恢复的总成果，那么动态模型的计算值就是其中的阶段性成果，二者是局部和整体的关系。比如某迹地的 Fuzzy 评语是“良好”，那么该迹地的阶段（一个或几个生长季）的动态量值应是“良好”或“很好”的水平，决不会低于“良好”等级，也就是说，模型计算值应与 Fuzzy 评语给出的最大可能趋势保持一致。这一点在表 4 中得到明确的反映。为便于对比，统统以 6 年代入 t （火烧当年算 1 年，故 t 为 5 个生长季加 1），计算出 5 个迹地的 5 个生长季后生态变化量值（表 5），并依数值大小排序，其结果与 Fuzzy 数值排序比较，除 1 号和 4 号迹地因 0.005 之差而移位外，其它均相同。证明计算值与 Fuzzy 数值在反映各迹地生态变化规律方面有着很好的相关性和协调一致性。从而证明模型计算值是可靠的。

表 5 模型计算值与 Fuzzy 评语的对比分析
Table 5 Analysis for comparison the result of model with Fuzzy judgment

迹地号	1	2	3	4	5
Fuzzy 评语结果	良好 (0.827)	良好 (0.544)	一般 (0.658)	良好 (0.813)	一般 (0.359)
模型计算值	0.861	0.797	0.690	0.866	0.545
依 Fuzzy 评语排序	1	3	4	2	5
依计算值排序	2	3	4	1	5

如前所述，从 TM 图象上所测算的某一时间段的植被指数比值，理论上应与这一时间段的模型计算值相等或相近，因为它们是用不同方法对同一事物或现象的表达结果，但由于基础数据不可避免的观测误差的存在，使二者不能完全相等，即存在着一定的吻合差。通过对比表 4 中的 5 个模型计算值和图象测算值，尽管有吻合差，但总体上看，二者的一致性是很好的。再次证明模型的功能是健全的。

5.3 对存在问题的分析

存在问题从表 4 所列的 5 个样地的模型计算值普遍小于图象测算值而出现吻合差正负号“一边倒”的现象，特别是 4 号迹地吻合差过大；其次是表 5 中按计算值排序与按 Fuzzy 值排序在 1 号和 4 号迹地间因 0.005 之差而发生移位的现象。两个问题都与 4 号迹地的计算值有关，说明 4 号的计算值有不足之处，于是顺藤摸瓜，进行分析，找出了以下原因：

1. 动态模型中的各项系数，系通过对 28 组植被指数比值作线性统计分析后得来的，

一定程度上表达了生态变化的特征和普遍性规律;而从图象上所测算的各迹地的植被指数比值,是对各迹地图象的直接观测值,其中程度不同地包含着因具体目标的个别性和特殊性所产生的偶然误差。所以,这就是 5 个迹地的计算值与图象测算值之间普遍存在着吻合差的根本原因。

诚然,模型系数计算也有其不足之处。从统计学原理得知,线性统计分析所用的样本数和观测值越多,统计分析的结果越准确,所反映的规律性越明显。其所以动态监测是遥感的一大优势,是基于不同时相的遥感数据而言,亦即在森林生态变化的各个阶段(最好是每个生长季后),都能及时、快速、准确而廉价地获得各迹地更新恢复的动态特征信息。然而受经费等诸多因素的限制,模型构建中只用了 1987 年和 1993 年两个时相的 TM 数据,因为观测数据之少(仅 28 组),时间跨度之大,信息连续性之差而严重地降低了模型系数解算的质量和规律性的表达,进而影响了计算值的精确性。

2. 前已述及的对生态变化影响权重最大的林木受害程度,不是按要求观测而得,而是目测评估的结果,其误差之大可想而知,这不仅影响 Fuzzy 评语的准确性,而且受误差传播定律支配,必然影响模型计算值的精度。这也是计算值与图象测算值吻合差普遍存在的重要原因。

3. 监测评价模型是以攀西林区分布最广面积最大的草类—云南松林和灌木—云南松林的两个林型组为研究对象而构建的,而 4 号迹地属于草灌—云南松林,超出了模型的适用范围,所以吻合差过大也是意料中事。因此今后应针对不同林型组的生态变化规律而建立不同的监测模型,是减少评估计算误差的关键。

4. 模糊综合评判和动态监测模型中的林分(林龄和郁闭度)数据,取自相应比例尺的森林图件,其数值所描述的是乔木层的林分状况,并未顾及林下灌、草的生态变化特征。在模型因子选择时就意识到这一点,但苦于研究区内至今尚未见有考虑并表示林下植被状况的森林图件,只好“看菜吃饭”,因此模型计算值所提供的只能是迹地乔木层生态变化的动态信息。相比之下,图象测算值所给出的却是迹地植被群体的生态变化信息,其中除乔木之外,还有林下灌、草等植被的信息,信息量肯定比计算值大,所以 5 个迹地的图象测算值普遍比模型计算值偏大(也有偏小的,但几率较少),从而造成吻合差值的正负号普遍地“一边倒”(若为“计算值-测算值”则吻合差值为负,反之为正)。再将 5 个迹地的吻合差分别与它们的生境条件、林分状况以及野外景观状况作相关性分析,大体可发现,林下植被越发育的,其吻合差越大。对于草类—云南松林和灌木—云南松林而言,林下植被相对不发育,而 4 号迹地乔、灌、草三分天下,图象测算值中灌、草的数值占了优势,所以其吻合差比起其它迹地来,显得过大。

另外,从以上分析也不难理解表 5 中按计算值排序与按 Fuzzy 值排序发生移位现象的原因。

综上所述,所存在问题的产生根源不在模型及其构建方法方面,而主要在建模的基础资料(如图象)不足和模型变量(因子)数据的来源及其获取方法上。所以,模型及其构建的技术路线和方法具有可普遍推广的价值。

参 考 文 献

- [1] 马志贵,王金锡主编. 林火生态与计划烧除研究. 成都:四川民族出版社, 1993.
- [2] 郑焕能,居恩德. 火在森林生态平衡中的作用. 森林防火, 1984, (1,2 合刊).
- [3] 杨玉盛,李振问. 火对森林生态系统营养元素循环的影响. 森林防火, 1992年, (3).
- [4] 甘书龙主编. 四川省农业资源与区划. 成都:四川省社会科学院出版社, 1986.
- [5] 吕望名,陈永义等. 应用模糊集方法. 北京:北京师范大学出版社, 1985.
- [6] 彭嘉祖,冯晋臣. 模糊数学及其在林业中的应用. 中国林业出版社, 1988.
- [7] 邹尚辉. 植物生物量和作物产量遥感估算的若干理论问题. 遥感信息, 1987, (4).
- [8] 王品清. 我国卫星图象数据用于生物量研究. 遥感信息, 1987(4).

作 者 简 介

高世忠,男,生于1938年3月14日,高级工程师。1964年于原武汉测绘学院航空摄影测量系航测专业毕业后,长期从事遥感资源调查与制图研究,形成自己独特的学术见解和技术方法。曾承担“土地资源调查系列化方法研究”,“长江上游生态和社会经济条件研究与评价”,“长江上游水源林区土地利用调查与评价方法研究”等课题,先后共有7项成果获奖。在国内发表论文40多篇。

Remote Sensing Model for Ecological Change Monitoring and Evaluation after Forest Fire

Gao Shizhong Zhou Wancun Fan Jianrong Guo Jie
(*Institute of Mountain Disaster and Environment Chinese Academy of Sciences
and Ministry of Water Conservancy,Chendu*)

Abstract This paper introduces the method of remote sensing model for ecological change monitoring and evaluation after forest fire. According to the investigation of regeneration and ecological change of Yunnan Pinus fire slashes by remote sensing in Panxi, it analyses spatial distribution and change regular of ecofactors and determines major ecofactors and its evaluation criteria. Basing on remote sensing information and the result of fuzzy synthetical evaluation to eight factors or topography soil, stand and degree of deforestation and the years after forest fire, creates remote sensing model for ecological change monitoring and evaluation after forest fire. This model makes us achieve expected purpose. For forest ecological dynamic monitoring system by remote sensing, it's discussed that the data of monitoring factors and vegetation index are obtained.

Key words Forest fire, Remote sensing, Ecological change, Monitoring Model