

# 攀西林区森林火灾后生态变化的遥感监测\*

高世忠 周万村 范建容 郭 洁

(中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所 成都 610041)

**提 要** 选择攀西云南松林区为试验地,以遥感图像分析和常规调查为手段,以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为导向,通过一系列迹地的生态恢复与其影像特征变化的相关性研究,选择恰当的生态因子,在地理信息系统(EGIS)支持下,建立森林生态变化动态监测模型,经验证,其功能符合预期的攻关目标要求。

**关键词** 攀西林区 森林火灾 生态变化 遥感监测

保持区域生态平衡,维护人类生存环境稳定的关键之一,在于防止森林火灾和灾后森林生态系统的恢复和重建。而森林火灾后的生态变化动态监测,正是为森林生态系统的恢复和重建提供科学依据和决策支持。因而在国内外都受到林业部门高度重视。但用遥感和计算机技术相结合的方法作监测,国内尚不多见。多时相的遥感数据,既包含着火灾前后森林植被的空间分布信息,又反映了森林生态变化和迹地更新的动态信息,是动态监测的重要信息源,具有成本低,速度快,信息丰富和准确可靠的优势。

## 1 试 验 区 概 况

### 1.1 自然环境背景

试验区位于 27°20'—28°00'N,101°30'—102°30'E,地处四川省凉山彝族自治州的西昌、德昌和盐源三县、市接壤地带,为攀西林区核心部位,属横断山脉中段,以中山地貌为主。气候为干湿季分明的亚热带季风型<sup>[1]</sup>,垂直气候发育,形成“一山有四季,十里不同天”的复杂多样性气候。土壤、植被亦呈垂直分布。

### 1.2 云南松生态特征

1. 生态主导作用突出 云南松(*Pinus yunnanensis*)为喜温性的深根性树种,具有生长快,抗干旱,耐瘠薄,更新能力强等特性,为西南林区亚热带暖温性针叶林的主要建群种,在攀西林区分布最广,从海拔 1 300—3 100m 到处都有,面积占攀西林地一半多,故对区内生物地理群落结构、生态特征和物质循环起主导作用。区内以草类-云南松林和灌木-云南松林面积最大,群落结构简单,林相整齐,层次分明,故作为此次研究之主要对象。

2. 生产力高,生物量大 云南松林生产力高,林木生长快,生物量大,活立木蓄积

\* 为“八五”国家攻关项目“西南林区等火灾监测评价”(724-01-03)的“森林火灾后生态变化遥感监测评价技术”研究的部分内容。

参加者有游先祥、兰立波、黄雪橦、赵子玉、龙先华等,野外试验与观测工作得到四川省林业厅护林防火办公室、凉山彝族自治州林业局和西昌市林业局的大力支持与帮助,深表谢忱。

本文改回日期:1995-01-13。

平均  $127.5\text{m}^3/\text{ha}$ , 最适生环境(海拔  $17\,000\text{—}2\,800\text{m}$ )可达  $460.0\text{m}^3/\text{ha}$ <sup>[1]</sup>.

3. 生态脆弱, 抗逆力差 目前的云南松林多为人工纯林, 树种单一, 失去生态的多样性和不同物种共存共荣、优势互补的特性, 故抗逆能力下降, 经不住灾害的袭击; 云南松富含油脂, 在干燥多风的旱季, 容易发生火灾, 故攀西林区为省内森林火灾高发区之一, 其火灾发生率和受灾面积均占全省之半, 其中云南松林占  $80\%$ <sup>[1]</sup>; 一旦山上林木遭毁, 引起强烈的水土流失, 甚至滑坡、泥石流等, 将危及山下和沟谷的生态系统, 此种链锁式反应往往造成区域生态平衡失调.

## 2 研究的技术路线和所用遥感资料

### 2.1 技术路线

以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为导向, 以野外迹地的遥感图像判读和常规调查为手段, 在研究生态恢复与其影像特征和植被指数变化相关关系的基础上, 利用 PC-ARC/INFO 建立起来的生态环境地理信息系统(EGIS)对空间数据的操作、运算和处理功能, 在信息库的支持下, 对火灾后的森林生态变化作动态模拟, 以及火灾对生态环境变化的影响作用进行评价试验, 然后建立生态环境动态监测数学模型, 以完成对森林火灾后生态变化的动态监测和趋势预报.

### 2.2 所用遥感资料

主要有西昌幅的 1987 年和 1993 年 TM 数据及合成卫片, MSS 和 SPOT 卫片, 1980 年 1:4.8 万彩虹红外航片及攀西地区地物反射光谱曲线图<sup>1)</sup>等.

## 3 试验样地的选择和观测

### 3.1 样地的选择

在试验区内选择草类-云南松林和灌木-云南松林的 20 多个不同年代的火烧迹地作为观测样地, 以其观测结果的时间序列代替对某一个或几个迹地的定点逐年连续观测. 要求每个样地及其对比样地的生态景观有一定的代表性, 它们的火烧年代基本上成等间隔序列, 并尽可能距交通线近些, 以便于观测.

### 3.2 样地的常规调查

1. 林分状况调查 于每个样地及其对比样地内, 对应选取 1—3 个面积约  $400\text{m}^2$  的标准地, 对其中乔木层作每木检尺, 测量树高、枝下高、胸径、树冠投影面积等(照片 1)<sup>2)</sup>; 用伐倒木作树干剖析, 以测定火烧前后 5 年树木高和径生长量等(照片 2); 对灌、草层以  $1\times 1\text{m}^2$  或  $2\times 2\text{m}^2$  的小样方测量其中植株高度、盖度和密度等. 为评判林木受害程度而测量树干碳化高度和枝条、叶片烧损、变色的程度, 统计幼树和成树烧死和保留株数等(照片 3). 通过标准地调查, 以获取各样地火烧前后各林分因子的空间分布状况和生态变化等数据; 将各样地所测之数据以时间为序分析, 即可掌握火灾对森林生态系统的影响

1) 由中科院成都山地所刘琼招等于攀西林区彩虹红外航空摄影的同时准同步观测并制作.

2) 本文照片见刊末图版 I, 1.

规律以及灾后生态恢复的动态特征和趋势。

2. 土壤条件调查 于样地及其对比样地内不同地形部位对应选取 2—5 个  $1 \times 1 \text{ m}^2$  小样方, 测量其中凋落物数量、腐殖质层厚度等, 对各样地测量结果的时间序列分析即可掌握凋落物的累积规律。同时, 于不同地段挖掘 2—5 个深约 50 cm 的土壤剖面, 观察土壤层次和形态特征变化, 并分 0—5, 5—10, >10(cm) 三个层次采集土样, 以分析常规养分含量和理化性能(照片 4)。在各样地调查的综合分析后, 即可掌握不同火强度对土壤性能的影响作用, 以及火灾后土壤性能的变化规律。

3. 地形要素的调查 于每一样地内调查处于不同海拔、不同坡度、坡向和坡位的林分变化情况; 再与不同海拔、不同坡度、坡位和坡向的各样地的林分状况差异作对比分析, 可定性掌握各地形要素在火烧前后对生态影响作用的大小及其变化规律。

## 4 样地的野外遥感图像判读

到野外现场, 将图像与样地的生态景观现状作对照判读, 以掌握生态景观-影像特征(即形态-结构特征和色调-灰度特征)-常规调查结果三者之间的相关性。

### 4.1 生态因子判读

为便于分析, 在判读某个因子时, 假设其它因子相同或相似, 且无变化, 以避免分析中的复杂性和判读结果的不定性。以郁闭度为例, 在一个样地中选择郁闭度不同而其它条件相同或相似的两块(或两块以上)林地, 将它们的生态景观与其在不同时相图像上的影像特征作相关判读, 并参照常规调查结果, 分析它们灾后的恢复状况与其影像特征变化的相关关系。通过大量的判读, 即可掌握各生态因子的空间分布特征, 相应的生态景观现状与其影像特征差异间的相关性规律。

### 4.2 林木长势和生物量变化的判读

林木长势和生物量变化是生态变化的主要标志。前者表示林木健康恢复状况, 它影响森林反射光谱特性和影像色调的变化; 后者使森林光谱反射率和影像色调的饱和度发生变化。野外判读时, 先对样地的林木长势与其对比样地作对比观察, 并与图像对比判读, 以分析火烧前后云南松林的生态景观变化与其不同时相的影像特征差异的相关性; 再结合常规调查数据, 研究长势恢复和生物量增加与其影像特征变化的相关性; 然后将同一帧图像上不同年代(或同一样地不同时相的遥感图像上)的这种相关性分析结果以时间为序分析, 即可掌握火灾后各年云南松林生态恢复与其影像特征变化的相关性规律, 以及遥感信息与常规调查数据之间的相关性。大量的判读结果证明, TM 图像对各种地形条件下的森林生态景观特征及其变化的反映是敏感的和准确的, 因而用遥感信息提取技术取代常规的调查方法作森林生态变化动态监测是可行的和可靠的。

## 5 生态监测评价因子的确定

通过对生态因子的常规调查和图像判读分析, 并根据主导性和易于操作的原则, 确定林分、土壤、地形和林木受害程度等四方面的 8 个因子作为生态监测评价因子。

### 5.1 林分状况

1. 龄组结构 森林的抗火性和生态恢复速度与龄组密切相关;不同龄级有不同的火险等级,一般幼、中龄林火险等级高于近、成熟林;异龄林中,烧伤严重或死亡最多的是幼龄树;因中龄林处于生长旺盛期,故火灾后恢复比近、成熟林快,幼龄林大多难以恢复。

2. 郁闭度 林地可燃物和林下凋落物数量同郁闭度(或覆盖度)呈正相关,相对而言,灌木-云南松林比草类-云南松林可燃物和凋落物多,故前者火强度较后者大;同一林地内郁闭度越大的地段,林木受害越严重。乔、灌、草混生且盖度较大的疏林地,火灾损失比其它疏林地严重。调查证实,云南松林的生态恢复与灾前林分状况密切相关,即灾前林分状况好的林地,灾后恢复一般都比较良好。因此林分因子直接从数据库中提取。

## 5.2 土壤条件

攀西土壤垂直分布明显<sup>[2]</sup>,云南松最适生土壤为棕红壤、山地红壤和黄棕壤。

火灾对土壤结构和营养成分含量有一定影响。野外剖面观察,火烧后土壤分布层次基本无变化,仅 AO 层(腐殖质层)有不同程度变薄和变色,土体结构受到不同程度破坏;对土壤营养物质含量的影响取决于火的强度。高强度火烧将使土壤营养物质循环受到严重破坏,而中、低强度火烧,对土壤营养物质循环却有一定的促进作用。相对而言,云南松林下灌、草生长不良,凋落物也不多,故林火多属中、低强度火,大面积高强度火很少,更无地下火,故火灾使土壤养分元素有明显的积聚作用,对云南松灾后恢复有利。所以民间有“火不烧山地不肥”之说。土壤因子数据直接从数据库中提取。

## 5.3 地形要素

地形要素(包括海拔、坡度、坡向和坡位)是影响森林生态的间接而重要的环境因素。火烧过程中,它使火场及其附近的温度、风速、风向等气象条件发生变化而影响林木受害程度;灾后恢复过程中,它与光、热、水、气、土等生境条件既相互制约,又相互联系而形成不同的地域组合,综合地影响林木更新恢复的速度和效果。此外,坡位在很大程度上还反映了人为活动对森林生态的影响作用。各地形因子数据直接从数据库中提取。

## 5.4 林木受害程度

林木受害程度即火灾对林木所造成的不同程度伤害。分重度、中度和轻度三级。其数据可于扑火的同时用仪器测火强度,或于灾后用前述的常规调查法中的标准地测量。

受害程度取决于火强度和森林各层可燃物的数量和含水量。火强度增高,林木死亡率和受害程度增大。云南松为阳性树种,树干、枝、叶富含油脂,燃烧性能好,其凋落物均易燃,一遇火种,极易成灾。轻度伤害一般与低强度火<sup>[1]</sup>相关,多为地表火和下山火所为,以草类-云南松林发生较多。因其伤害未超过森林生态系统的自我调节能力,故不会破坏生态平衡,约 3—4 个生长季后即可恢复(照片 5,6)。重度伤害多为高强度火所致,以林下凋落物累积量较大的灌木(或草、灌)-云南松林发生较多,树木大都严重烧伤,奄奄一息,但只要树梢未死者均有复活的希望,只是恢复时间较长,要 6—7 个生长季(照片 7,8)。介于二者之间的为中度伤害,4—6 个生长季后即能恢复。

## 5.5 云南松林生态变化的趋势分析

野外调查和火烧试验(照片 9,10)表明,云南松耐火性强,中、成龄树一般都不易烧死,只因受害程度的不同,生态恢复时间有长短而已(照片 11);幼龄树易被烧死,故纯幼

龄林一旦遭中、高强度火灾,极难恢复,幼树较多的异龄林灾后郁闭度和盖度降低较明显;异龄疏林受灾后多向草地退化;而密度较大的异龄林,受低、中强度火烧,相当于强度抚育,有利于林龄整齐化和林木生长(照片12)。灌木层在不同强度火烧中死伤都较多(照片13—16),尽管不同类的灌木恢复速度不一,但普遍比乔木慢且数量和盖度都明显降低。各种草本植物灾后的萌发和生长恢复均为最快,一个生长季后即可全面恢复。而草被的迅速恢复,有利于保水保土保肥,对乔、灌木层的恢复大有裨益。

## 6 植被信息提取

在攀西森林植被反射光谱曲线(图1)中,近红外光区呈强反射峰,是因反射率与植被的健康状况(长势)和生物量线性相关;红光区呈强吸收谷,是因红光被叶绿素大量吸收而作为光合作用之能量,故其反射率与长势成负相关<sup>[3,4]</sup>。与之对应的TM4(近红外)波段对植被长势、林冠结构和生物量敏感;TM3(红光)波段对叶绿素敏感,它们的不同组合,如比值 $TM4/TM3$ ,差值 $TM4-TM3$ ,归一化差值 $(TM4-TM3)/(TM4+TM3)$ 等,称作植被指数或绿度值。它们随植被的长势和生物量的增长而增大,随植被空间分布的密度(或盖度)和叶绿素含量的增大而增大。所以用不同时相遥感数据所提取的植被指数值,即能准确而客观地反映火灾后森林生态的变化。

因为归一化差值能使植被信号放大,使绿色植被与其非绿色背景之间的反差增强,消除或削弱大气和地形阴影的影响,故考虑攀西山高谷深坡陡的情况,选用归一化差值,即

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

分别提取样地(T)及其对比样地(R)的TM4和TM3数据,用上式计算它们的归一化差值TVI和RVI,其比值 $D = TVI/RVI$ 即为该样地从火烧后到遥感成像这段时间内林木长势和生物量恢复的相对值;从不同年代各样地比值 $D_i$ 的时间序列可看出火灾后各生长季森林生态恢复的动态量值特征。因各迹地生态因子差异较大,即使同一迹地内的不同地段的生态因子也互不相同,故植被指数及其比值之差异也较大。因此在每一样地及其对比样地内对应选取尽量多的不同林分状况和地形条件的若干测定点,即得到一系列的TVI和RVI值,以它们的平均值计算该样地的植被指数比。

## 7 生态变化动态监测评价模型的建立

### 7.1 生态因子的权重计算

根据各生态因子在生态变化中的影响作用大小,采用二元对比法,分别给以重要性指标 $f_{x_i}(x_i)$ 和 $f_{\bar{x}_i}(x_i)$ ,则权重比估计值为

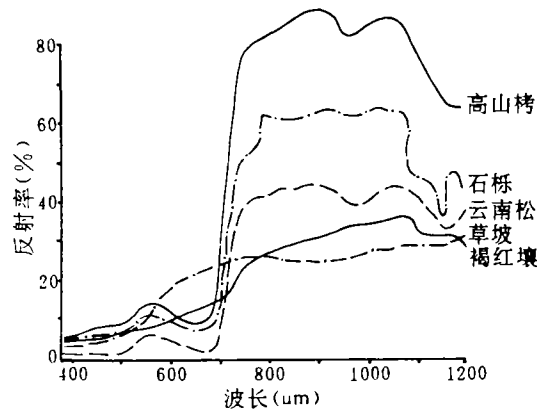


图1 攀西森林植被反射光谱曲线

Fig. 1 Reflective spectro-curve of forest vegetation

$t_{ij} = f_{x_j}(x_i)/f_{x_j}(x_j)$

然后建立权重矩阵

$T = (t_{ij})$

通过一系列运算而求得各因子的权重值.

7.2 各样地生态变化的模糊综合评判

根据每个样地中各生态因子的立地现状及其对生态所能发挥的实际影响,分别给各因子分级评分(表 1),从而组成单因子评判的组合矩阵  $R$ ;再通过  $R$  将所计算的单因子权重向量  $A$  作模糊变换而建成各样地生态变化的模糊综合评判初始模型,即

$B = A \circ R = (b_1, b_2, b_3, b_4).$  (1)

其中

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

表 1 生态监测评价因子及评价标准

Table 1 Evaluation factor of ecologic monitoring and its standard

等 级		1	2	3	4	
项 目	依 据	分 数	95—100	80—95	60—80	<60
	数					
林 分	林 龄 (a)	21—40	41—60	≥60, 10—20	<10	
	郁 闭 度	≥0.7	0.4—0.7	0.3—0.4	<0.3	
土 壤		棕红壤, 山地红壤	褐红壤	山地棕壤	褐红壤	
地 形	海拔(m)	1600—2800	1300—1600	>2800	<1300	
	坡度(°)	0—15	16—35	36—40	>40	
	坡 位	中	中上, 中下	上	下	
	坡 向	N	NE, NW, E, W	SE, SW	S	
受害程度(%)		≤30	30—35	50—70	≥70	
生态恢复评语		很好	良好	一般	差	
植被指数比值		≥0.9	0.7—0.9	0.3—0.7	<0.3	

然后利用初始模型对评判因子作分层综合评判,从而形成总的模糊矩阵

$R = \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ B_3 \\ B_4 \end{bmatrix} = (b_{ij})_{4 \times 1}$

经过模糊变换,可得出该样地的综合评判结果——森林更新和生态变化的总趋势.

7.3 动态监测评价模型的建立

上述模糊综合评判结果,是一个迹地火灾后生态系统在众多生态因子综合影响下林木更新恢复的总体效果和趋势,而不是更新恢复过程中各时间段的动态变化情况.因此以  
上述模糊综合评判结果  $B = (b_1, b_2, b_3, b_4)$ , 火烧年限  $t$  和植被指数比值  $D$  为变量,通过对 28  
组植被指数比值作多元线性回归分析后形成如下的动态监测评价数学模型,即

$$D = 9677.618 - 9677.574b_1 - 9676.974b_2 - 9677.343b_3$$
$$- 9677.945b_4 + 0.054t,$$

(2)

其中,  $b_1, b_2, b_3, b_4$  为模糊综合评判结果. 复相关系数  $R=0.875$ .

8 生态变化监测评价模型的功能验证

8.1 模糊综合评判准确性检验

应用初始评判模型(1),对 18 块迹地的生态变化趋势进行预测试验,其结果与这些迹地的实地调查结果基本相符.

8.2 动态监测评价模型的功能检验

由于运用遥感与常规调查方法相结合而使所建立的动态监测模型(2)的监测评价结果的准确性和可靠性大为提高. 经对 4 个迹地的监测评价试验,其结果分别与遥感图像测算值、实际调查结果作对比分析(表 2),三者的结论基本相符.

表 2 生态动态监测评价模型功能验证结果

Table 2 The test result of The model function for ecologic monitoring evaluation

序	验证地位置	灾后年限(年)	受害程度	生态因子			生态动态变化结果		
				林分	地形	土壤	计算	图像测算	1993 年观察
1	德昌茨达典水	1	中度	龄组灌木-云南松林中龄林,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	上坡为山地棕壤,中坡为山地黄棕壤	0.653	0.670 (1987 年图像)	恢复最好
2	盐源平川梁子	6	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	黄红壤	0.849	0.880 (1993 年图像)	恢复良好
3	德昌锦川新马	4	中度	龄组草类-动南松幼中龄林郁闭度 0.5	海拔 1500—2000m,坡度 30°—35°,坡向,东和西,坡位中、上	红壤	0.635	0.700 (1993 年图像)	恢复一般(山顶较差)
4	盐源右赵碧山	2	中偏重度	龄组草灌-云南松林中龄林郁闭度 0.5	海拔 1800—2700m,坡度 30°—35°,坡向全方位,坡位中、上	上坡为山地黄棕壤,中坡为黄红壤	0.703	0.880 (1993 年图像)	恢复良好

验证结果再次说明,模糊综合评判和动态监测模型建立的技术路线和运作方法是可行的,模型的功能是符合森林生态变化监测要求的,达到了课题预期的攻关目标.

8.3 生态监测模型推广应用的的环境条件

监测模型是建立在生态环境地理信息系统(EGIS)基础上的,依靠 EGIS 的各种功能和相应信息库的支持,使繁琐而复杂的监测评价运算变得简便易行. 故该模型的推广应用亦应具备此类环境条件.

## 参 考 文 献

- [1] 四川省林业科学研究院,四川省护林防火指挥部办公室编. 森林生态与计划烧除研究. 成都:四川民族出版社, 1993. 1,20—38,80—81.
- [2] 甘书龙主编. 四川农业资源与区划. 成都:四川社会科学院出版社,1986. 上篇 1—27,134—135;下篇 143—164
- [3] 邹尚辉. 植物生物量和作物产量遥感估算的若干问题. 遥感信息. 1987,(4):19.
- [4] 王品清. 我国卫星图像数据用于生物量研究. 遥感信息. 1987,(4):18.

REMOTE SENSING MONITORING TO ECOLOGIC CHANGE AFTER  
FOREST FIRE IN PANXI FOREST AREA

Gao Shizhong Zhou Wancun Fan Jianrong Guo Jie

(Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences  
& Ministry of Water Conservancy Chengdu 610041)

## Abstract

Based on the investigation on *Pinus yunnanensis* forest, the time series of more than 20 burned areas in different year may be used to replace one or some fixed burned areas observed year by year. The disaster degrees of stand, soil, farmland and forest in study area are analysed by the normal investigation and remote sensing image interpretation. According to the spatial distribution of ecologic factors and the form, range and degree of ecologic affection, as well as the variation of the forest ecologic and the difference of image. The discriminating standard and affection of 8 major factors selected from a lot of factors will be determined. And then based on the information base and EGIS, the results of the ecologic trend prediction to 18 study areas with fuzzy integrated evaluation conform to the investigated data. The comparative analysis of the dynamic evaluation, image measure value and actual data of observation to 4 burned areas is basically identical. As a matter of fact, the technical line and method of the monitoring model are effective.

**Key words** Panxi forest, forest fire, ecologic change, remote sensing monitoring