

基于遥感的漳平市杉松林地表可燃物负荷量估测

陈芸芝, 陈崇成^{*}, 汪小钦, 唐丽玉

(福州大学福建省空间信息工程研究中心, 福州大学空间数据挖掘和信息共享教育部重点实验室, 福州 350002)

摘要: 杉木林和马尾松是分布于漳平市的两种易燃的可燃物类型。其可燃物负荷量的多少决定着林火行为。在利用 ASTER 计算杉木林小班平均植被覆盖度的基础上估算其郁闭度, 通过与地面调查结果比较分析, 校正已发生明显变化的小班郁闭度。根据已有估测方程, 结合小班数据中的年龄、胸径和树高等因子对杉木地表可燃物负荷量进行了估测, 据此对各杉木小班的燃烧性、燃烧强度及火险等级等因素进行初步评价。最后对漳平市另一易燃的可燃物马尾松类型开展地表可燃物负荷量估测及分析。

关键词: 地表可燃物负荷量; 杉木林; 马尾松; 植被覆盖度; 郁闭度

1 引言

不同类型林分地表可燃物负荷量研究, 可为林火蔓延、灭火可视化建模与仿真, 防火和用火提供科学的依据^[1]。用于可燃物负荷量估测的主要因子有: 郁闭度、年龄、平均树高、平均胸径以及每亩林木株数等^[2-6]。本文利用 ASTER 估测杉木林小班平均植被覆盖度的基础上计算其郁闭度, 通过与地面调查结果比较分析, 修正部分实测数据有较大偏差的小班郁闭度, 根据已有估测方程, 结合小班数据中的年龄、胸径和树高等因子对杉木地表可燃物负荷量进行了估测, 据此对各杉木小班的燃烧性、燃烧强度及火险等级等因素进行初步评价。最后对漳平市另一易燃的可燃物马尾松类型开展地表可燃物负荷量估测及分析。

2 森林可燃物类与遥感图像分析

可燃物负荷量估测通常是针对不同的可燃物类型进行的。因此, 要计算森林可燃物负荷量, 需要对可燃物种类进行划分。划分可燃物种类的方法有多种^[1, 4, 7-9], 本文首先对相关文献中的分

类依据进行综合 (表 1), 针对杉木人工林和马尾松林这两种林地不同的可燃物类型, 在利用专题图层的分类结果剔除变化区域的基础上, 分别根据相应的可燃物负荷量估测方程进行地表可燃物负荷量的估测与分析。

目前, 遥感技术在提取地表水平方向信息的性能优于提取垂直方向信息的性能, 而且可燃物负荷量估测的各因子中, 郁闭度是一个极其重要的因子。鉴于小班的郁闭度呈离散的十个等级, 且难以实时更新。因此, 本次研究以遥感监测进行小班郁闭度修正为切入点, 开展遥感监测在森林可燃物负荷量估测中的应用研究, 具体研究步骤如图 1 所示。

该调查研究采集了漳平市森林资源二类调查形成的小班数据和覆盖漳平市的 ASTER 影像。分析处理中, 对 4 景 ASTER 影像进行分析处理, 并经重采样生成 15m 分辨率的图像。对地表可燃物, 着重考虑对林火影响比较大的易燃物。其中, 小班数据除了表示小班界线的图形外, 还有对应的属性库。其除包含有优势树种、树种组成、郁闭度、年龄、平均树高、平均胸径以及每亩林木株数等对可燃物类型研究及负荷量估测直接有用

收稿日期: 2006-11-24 修回日期: 2007-02-11

资助项目: 国家 973 前期研究专项 (2004CCA02100)、国家自然科学基金项目 (30671680)、福建省教育厅科技项目 (2006F5022)。

作者简介: 陈芸芝 (1982-) 女, 硕士、实习研究员, 从事环境与资源遥感研究, 已发表学术论文 8 篇。

E-mail: chenyunzh@fzu.edu.cn

* 通讯作者: 陈崇成 (1968-) 男, 博士、教授, 从事资源与环境信息工程、环境与自然资源遥感、空间数据挖掘与虚拟地理环境等研究, 已正式发表学术论文近 80 篇。E-mail: chenc@fzu.edu.cn

表 1 森林可燃物分类
Tab. 1 Fuel classification of forest

空间分布	生活力	物种类别	时滞	燃烧性
地表层可燃物	死地被物	凋落物 (落叶、枯草、直径小于 0.5 cm 的小枝、死的苔藓球果等)	1h (注: h为 hour缩写)	易燃
		半分解层 (直径在 0.6~ 2.5cm 的小枝条)	10h	可燃
		直径在 2.6~ 7.5 cm 之间的木棍、枯立木、倒木	100h以上	缓慢可燃
	活地被物	地衣、苔藓		可燃
		草本、灌木小枝叶 (≤0.6 cm)		
		灌木大枝 (> 0.6 cm)		缓慢可燃
乔木树冠层可燃物	活体	地表层树干		难燃
		小枝 (≤ 1cm)		可燃
		树叶		
		大枝 (> 1cm)		缓慢可燃
		树干		难燃
地下可燃物	死体	树根		
		泥炭、腐殖质		缓慢可燃

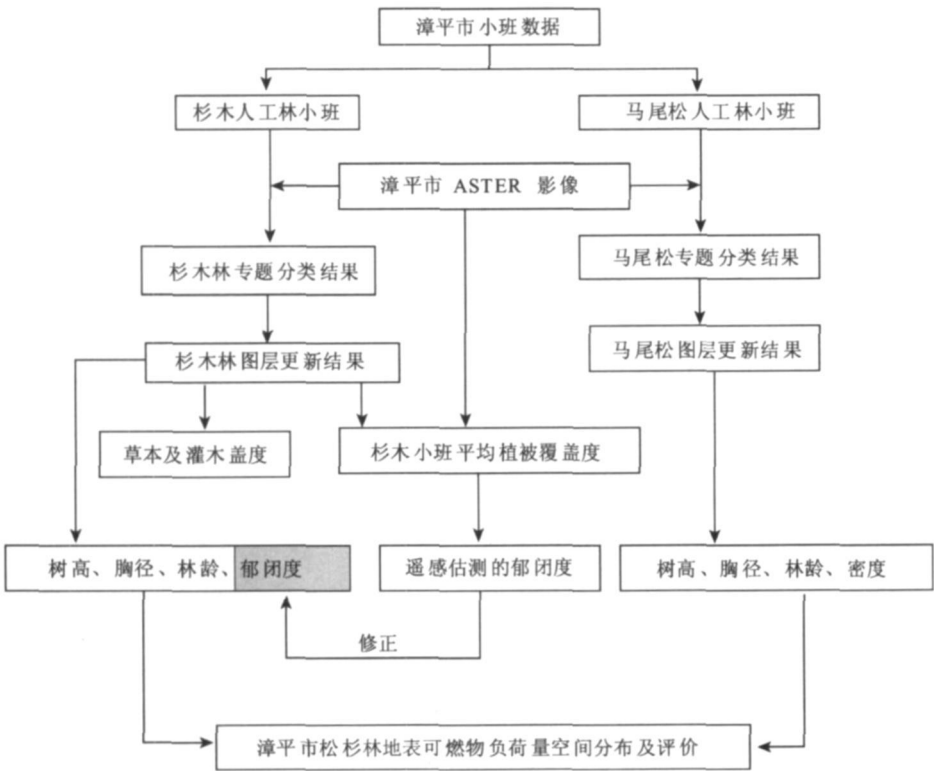


图 1 森林可燃物负荷量估测技术流程

Fig. 1 The flow chart of forest fuel loadings estimation

的信息外，还包含有起源、灌木层类型、灌木层高度、灌木层盖度、草本层类型、草本层高度及草本层盖度等辅助信息。

3 杉松林地表可燃物图像分析与估测

3.1 杉木林地表可燃物图像分析与其负荷量估测
依据文献 [2]，用于建立杉木人工林可燃物负

荷量估测方程的因子主要有郁闭度（无量纲 0~1）、年龄（a）、胸径（m）和树高（m）。这些林分特征因子在小班数据中均有记录。

选择代表杉木人工林且各因子统计值未缺失的小班，利用杉木林专题图层分类的结果，对发生变化的区域进行“擦除”，并利用 ARCGIS 中“elim in ate”命令，将面积在 10 个像元以内的“锯齿”去除^[10]。使可燃物负荷量估测仅针对未发生变化的区域进行。得到参与可燃物负荷量估测的杉木林小班计 9 372 个。

在进行可燃物负荷量估测时，首先要确定小班数据中各属性项中的量纲与估测方程中的各因子的量纲保持一致。为此，除林分平均年龄外，对原小班数据中的树高（H）、胸径（D）以及郁闭度等进行相应的调整。

小班数据中的树高是分米单位，胸径为厘米单位，采用 $height = H / 10$ $d = D / 100$ 作为中估算方程所需输入的树高和胸径。以下着重对小班郁闭度作调整。

(1) 林分小班郁闭度图像修正

小班数据中林分郁闭度分 1 至 10 个等级，分别对应于 0~ 0.1 0.1~ 0.20.9~ 1.0 为了方便计算，采用 0.05 0.15 0.25，0.95 分别代表这 10 个等级的小班郁闭度（ybd_1）。为了分析小班数据中记录的郁闭度是否存在较大的偏差，对小班平均植被覆盖度进行了提取。

另外，利用 ASTER 影像构建了 VBSI 指数影像^[11]，并采用混合像元法计算每个像元的植被覆盖度：

$$f_c = (S - S_{non}) / (S_{veg} - S_{non})$$
$$= (VBSI - VBSI_{non}) / (VBSI_{veg} - VBSI_{non}) \quad (1)$$

$VBSI_{veg}$ 表示全植被覆盖的像元 $VBSI$ ， $VBSI_{non}$ 表示从裸土地和沙石地等无植被覆盖的像元的 $VBSI$ 值。针对杉木人工林，从中选择色调纹理较均匀、郁闭度较大（郁闭度等级为 8 以上）的小班个数进行统计，从中选择 $VBSI$ 最大值 438.813 作为其 $VBSI_{veg}$ 。而 $VBSI_{non}$ 则从遥感影像上勾选道路两侧较亮的地块进行统计，选择其中的最小值 169.681。为建立小班数据和遥感计算结果的可比较关系，对各杉木林小班的植被覆盖度进行平均值统计，生成“遥感估测的小班平均植被覆盖度”（FCD_MEAN）的属性项。

植被覆盖度（FCD）、郁闭度（ybd）、草本盖

度（cbgd）、灌木盖度（gn gd）存在如下关系：
 $FCD = ybd + a^* \text{ cbgd} + b^* \text{ gn gd} \quad (0 \leq a \leq 1 \quad 0 \leq b \leq 1)$

$$\text{令 } dif = FCD - ybd = a^* \text{ cbgd} + b^* \text{ gn gd} \quad ybd = FCD * c \quad (0 \leq c \leq 1)$$

利用遥感估算得到小班平均植被覆盖度（FCD_MEAN），以及小班数据中原有的郁闭度（ybd_1）、草本盖度（cbgd）、灌木盖度的值（gn gd），分别对应于 FCD、ybd、cbgd、gn gd 令 $dif1 = FCD_MEAN - ybd_1$ ，选择部分小班样本，根据其 $dif1$ 、cbgd、gn gd 可以对 a、b 进行估算，根据其 FCD_MEAN、ybd_1 就可以对 c 进行估算。由于高大乔木、灌木、草本空间布局的不同、会导致 a、b、c 值不同，针对小班郁闭度大小，分三种情况进行分析（图版 V 彩图 1）：

①郁闭度较高时（“ybd_1” ≥ 0.65）：选取 $dif1$ 、cbgd、gn gd 各项值均大于 0 的小班作为备选数据集，以第一个小班为起点，每间隔 10 个抽取一个样本进行回归分析，得到： $dif = 0.1551^* \text{ cbgd} + 0.1011^* \text{ gn gd} \quad ybd = 0.8731FCD$ ，由这个关系式可知，由于林隙空间较小，林隙中生长的灌木仅占其各自总数的 15% 和 10% 左右。植被覆盖度主要受郁闭度的影响，令 $ybd_2 = 0.8731FCD_MEAN$ ，由 $dif2 = ybd_2 - ybd_1$ 进行遥感反演与实测的郁闭度的比较分析。

表 2 $dif1$ 、 dif 、 $dif2$ 统计结果（小班郁闭度高）

Tab. 2 Statistics of $dif1$, dif and $dif2$ (original canopy closures were high)

参量	最小值	最大值	均值	标准偏差
dif1	- 0.231	0.246	0.091	0.072
dif	0	0.19	0.072	0.039
dif2	- 0.310	0.120	- 0.017	0.065

由表 2 中 $dif2$ 的均值可知， ybd_2 与 ybd_1 两者保持了较好的一致性。从 $dif1$ 、 dif 的统计结果来看，遥感估测的植被覆盖度与实测郁闭度差异可能较实际情况稍大，这一点可从 $dif1$ 的最大值、均值均高于 dif 反映出来。经过分析认为 $dif1$ 的值的合理范围应该是 $dif \pm 0.05 + 0.05$ 即 $[0.0.29]$ ，因此，判断 $dif1 < 0$ 的小班为实测郁闭度明显偏高（图版 V 彩图 2）

至于 $dif2 \geq 0$ 的小班，由于遥感估算的郁闭度与实测郁闭度相差不是很大，而且在郁闭度较大

的情况下，遥感对郁闭度的变化不是很敏感，因此，可以认为误差在允许范围以内。

综上可以断定 “ybd_1” ≥ 0.65 AND “difl” < 0 为郁闭度实测值有较大误差的小班，针对这部分小班，令 yubidu = ybd_2 其余小班 yubidu = ybd_1

②郁闭度中等时 (“ybd_1" < 0.65 and "ybd_1" ≥ 0.25): 上层高大乔木对下层植被的遮蔽作用减弱，灌木和草本的盖度有所增加，郁闭度和植被覆盖度的差值增大，林隙中草本和灌木生长量增加，郁闭度在植被覆盖度所占的比例下降。由回归分析可得 $d\hat{f} = 0.5470 * cbgd + 0.5039 * gmgd$, $ybd = 0.5389FCD$, $ybd_2 = 0.5389FCD_MEAN$, 相关的统计参量见表 3

表 3 difl、dif、dif2统计结果 (小班郁闭度中等)
Tab. 3 Statistics of difl, dif and dif2 (original canopy closures were moderate)

参量	最小值	最大值	均值	标准偏差
difl	- 0.146	0.733	0.383	0.140
dif	0	0.845	0.307	0.145
dif2	- 0.378	0.280	- 0.003	0.136

经过分析，判断 "ybd_1" ≥ 0.25 AND "ybd_1" < 0.65 AND "difl" < 0.15 的小班 (剔除处于阴影部分)，小班郁闭度偏高 (图版 V 彩图 3a)。而 "ybd_1" ≥ 0.25 AND "ybd_1" < 0.65 AND "dif2" > 0.22 的小班，小班数据中的郁闭度均为 0.25 明显偏低 (图版 V 彩图 3b)。针对这两部分的小班，令其 yubidu = ybd_2 以遥感估算的结果作为真实值。

③郁闭度较低时 ("ybd_1" < 0.25): 上层高大乔木对下层植被的遮蔽作用进一步减弱，草本盖度迅速增加，灌木盖度变化不大，郁闭度和植被覆盖度的差值进一步增大，植被覆盖率总体有所下降。经回归分析 $dif = 0.8420 * cbgd + 0.4256 * gmgd$, $ybd_2 = 0.1819 * FCD_MEAN$, 林隙中草本的盖度迅速增加，草本盖度在植被覆盖度中占主导。相关统计参量见表 4

从 difl、dif 的统计值来看，两者的差异明显地较前面两种情况大。而从森林资源调查的实践来看，草本盖度和灌木盖度的精度比郁闭度相对高，因此，当草本盖度和灌木盖度都较低时 (dif 值较小)，若 difl 值过高，则表明原小班郁闭

表 4 difl、dif、dif2统计结果 (小班郁闭度低)
Tab. 4 Statistics of difl, dif and dif2 (original canopy closures were low)

参量	最小值	最大值	均值	标准偏差
difl	0.437	0.878	0.673	0.059
dif	0	0.972	0.538	0.198
dif2	- 0.043	0.119	0.003	0.023

度值 ybd_1 偏低。这一点可以通过设定 difl 与 dif 的差值大小进行检测。本次的界定规则为：

"ybd_1" < 0.25 AND "difl" - "dif" > 0.45 小班郁闭度偏低 (图版 V 彩图 4)。对于这部分小班，其郁闭度的计算不再直接利用 ybd = 0.1819 * FCD_MEAN，而是采用 yubidu = FCD_MEAN - dif 其余小班 yubidu = ybd_2 使各个小班郁闭度的离散程度降低，更接近真实情况。

综上，郁闭度与原小班郁闭度相等的小班计 7507 个，1865 个小班郁闭度利用遥感影像进行了郁闭度的修正，约占杉木人工林小班的 20%，遥感对地面实测郁闭度起到较大的修正作用，同时能够对发生变化的区域进行快速监测。

(2) 杉木林地表可燃物负荷量估测及分析
利用修正后的小班郁闭度 yubidu、胸径 (dm)、树高 (hm)、以及原小班属性项中的年龄 (AGE, a)，就可以对杉木林可燃物负荷量进行估测。

打开小班属性表，添加属性项 Y，代表杉木人工林地表总可燃物负荷量 (kg/hm²)，根据文献 [2]，对 Y 进行赋值 (calculate):

$$Y = 22331.3 - 23035 * [yubidu] + 638.3 * [AGE] + 691.6 * [h] - 35.2 * [d]$$

同样地，添加属性项 Y₁，代表杉木人工林 1h 时滞可燃物负荷量 (kg/hm²)，对 Y₁ 进行赋值：

$$Y_1 = 31364.9 - 27489.1 * [yubidu] + 202.5 * [AGE] + 807 * [h] - 586.9 * [d]$$

添加属性项 Y₁₀，代表杉木人工林 10h 时滞可燃物负荷量 (kg/hm²)，对 Y₁₀ 进行赋值：

$$Y_{10} = - 5055.5 - 1533.7 * [yubidu] + 621.1 * [AGE] - 19.8 * [h1] + 343.10 * [d_1]$$

对于 100 h 时滞可燃物，即直径在 2.5 ~ 7.6 cm 之间的粗大干枯可燃物，文献指出，可能是由于杉木林分郁闭快，自然整枝早，所以地表上很少有，因此不对该类可燃物负荷量进行估测。

对 Y_{10} 出现负值的小班，令其 = 0 并根据 Y_1 、 Y_{10} 的比例进行调整，使 $Y = Y_1 + Y_{10}$ ，即 $Y_1 = Y_1 * Y / (Y_1 + Y_{10})$ ， $Y_{10} = Y_{10} * Y / (Y_1 + Y_{10})$ ，值调整后各项负荷量的统计值如表 5。

表 5 杉木林地表可燃物负荷量估测结果
Tab 5 Result of estimated surface fuel loadings of Chinese fir plantation

参量	最小值	最大值	均值	标准偏差
Y	6334	104344	29580	5610
Y_1	6334	51780	24226	3864
Y_{10}	0	62632	5354	2906
Y_1/Y	0.400	1	0.827	0.0757

地表可燃物中，细小可燃物即 1h 时滞可燃物主要决定林分发生火灾的难易程度，其负荷量占地表总可燃物负荷量的平均百分比为 82.7%，而较大枝桠可燃物（10h 时滞可燃物）主要影响火灾发生的强度，仅占小部分。两者的载量随郁闭度、林龄的变化而变化，选择不同龄组（AGZ）、不同郁闭度水平的小班进行统计分析，结果如表 6。

表 6 不同郁闭度、不同龄组杉木可燃物负荷量统计
Tab 6 Statistics of surface fuel loadings of different canopy closures and AGZs Chinese fir plantation stands

郁闭度	AGZ	AGE	Y	Y (张国防)	Y_1	Y_1 (张国防)	Y_{10}
0.4~0.5	1	9.0	20477		19613		863
0.5~0.6	1	11.9	21717	18415	20340		1377
0.5~0.6	2	17.38	26159		22075		4084
0.6~0.7	2	17.42	24122	24762	20134		3988
0.7~0.8	2	18.3	22725	23850	18388		4337
0.5~0.8	2	17.5	24986		20884	22300	4102
≥0.8	2	19.7	19698		15450	13840	4199
≤0.5	≥2	19.4	32072		26721	22830	5350

随着林分年龄的增长，郁闭度的总体趋势是先增加后减小，细小可燃物（1h 时滞可燃物）和总可燃物负荷量均呈现先增加后减小的趋势，而较大枝桠可燃物（10h 时滞可燃物）基本上呈逐渐上升的趋势。在森林郁闭后，随着林龄的增长，凋落物的积累，细小可燃物负荷量不断增加，总载量迅速增加。而后随着森林郁闭度的增加，高大乔木对下层草本遮蔽作用增强，导致地表上的杂草大量减少，细小可燃物和总可燃物负荷量随之下降。当郁闭度达到 0.8 以上时，可燃物负荷

量的降低尤为明显，此时由于林内温度低，湿度大，不易发生火灾。随着林龄的进一步增加，杉木人工林开始变稀疏，草本植物获得足够光能，迅速增长，细小可燃物负荷量迅速增加，同时由于林分胸径的增加，较大枝桠可燃物（10h 时滞可燃物）也迅速增加，火灾发生的概率和强度也迅速增加，很可能导致森林的严重破坏，此时更应做好森林的防火工作。经过对比，研究中计算的可燃物负荷量变化趋势与文献 [2] 所述的保持一致，负荷量大小在郁闭度 0.5~0.8 范围内保持一致，这也说明利用该文献中的估测方程对本研究区杉木人工林进行负荷量估测是可行的，两者的差异主要是由于样本数不一样引起的。

判断 " Y_1 " ≥ 30 000 AND " $yubidu$ " ≤ 0.5 为易燃小班，" Y_1 " ≤ 20 000 AND " $yubidu$ " ≥ 0.8 为难燃小班，其余为中等易燃小班；判断 " Y_{10} " ≤ 2000 为燃烧低强度小班，" Y_{10} " ≥ 8000 为燃烧高强度小班，其余为中等强度。难燃低强度、中等易燃低强度、难燃中等强度的均为低火险等级的小班；易燃中等强度、易燃高强度、中等易燃高强度的均为高火险等级的小班；其余为中等火险的小班（图版 VI 彩图 5）。

3.2 马尾松林地表可燃物负荷量估测

马尾松是福建省造林面积最大的乡土树种之一。由于马尾松造林初期生长较缓慢，林地较干燥，林下植被较易燃，加上松针含油脂，容易引发山林火灾。因此，研究其地表可燃物的分布和负荷量，对研究其林火行为，进行森林防火预报或林火仿真都具有重大的意义。目前，国内有关马尾松地表可燃物（包括灌木、草本、凋落物）负荷量的研究并不多，在福建林区，除个别研究涉及少数几个林分马尾松地表可燃物的分布及其燃烧性能 [12] 外，其余的研究 [13~15] 则围绕森林生态学开展的马尾松纯林或混交林凋落物量或生物量的调查，且研究区同样集中在特定的教学林场或国有林场，这些研究虽具有一定的参考价值，但都不足以支持马尾松这一可燃物类型的负荷量估测。因此，本次马尾松地表可燃物负荷量估测参照邻近的湖南省开展的马尾松人工林可燃物负荷量的研究 [3]，选择林分年龄（ x_1 ，单位：a）、密度（ x_2 ，单位：株/hm²），胸径（ x_3 ，单位：cm），树高（ x_4 ，单位：m）几个林分因子（小班数据库

获得), 建立地表可燃物负荷量 (单位为 kg/hm^2) 预测模型。

首先选择马尾松人工纯林并且参与估测的各个因子的值在小班数据库中的值没有缺失, 输出到新的小班图层。同样, 需要利用马尾松专题图层分类的结果, 对变化的部分进行去除。打开新的图层的属性数据库, 林分年龄 (单位: a)、胸径 (单位: cm) 分别取小班中的 AGE 及 D 即可。添加 (Add Field): m idu 及 h1 两个项, 分别对其赋值 (calculate values),

$m\ idu = 15 * [ZS_S]$ (ZS_S 是小班中的原属性项, 表示每亩林木株数, 单位: 株/亩);

$h1 = 0.1 * [H]$ (H 是小班中的原属性项, 表示树高, 单位: dm);

对上述各项进行统计 (表 7):

表 7 马尾松林可燃物负荷量估测因子统计				
Tab 7 Statistics of the factors used in Masson pine plantation's surface fuel loading estimation equation				
参量	最小值	最大值	均值	标准偏差
AGE	4	43	13.35	5.4
m idu	300	11400	2347	642.7
D	1	260	16.9	31.6
h ₁	0.3	23	4	2.3

其中胸径比文献中样本的胸径有较大偏差, 由于因子的统计分布的不一致, 有可能导致估测方程的不适用, 这是研究中需要考虑的问题。为计算地表可燃物负荷量, 需添加属性项 Y_g。由于该研究中涉及到树冠层可燃物负荷量的估测, 因此, 本次对树冠层估测也进行尝试, 属性库中同时增加了 Y_c用以代表树冠层可燃物负荷量。

(1) 马尾松幼龄林可燃物负荷量估测
根据文献 [3], 马尾松人工幼龄林地表 Y_g (kg/hm^2) 和 Y_c (kg/hm^2) 冠层可燃物负荷量采用下列方程进行估测:

$$Y_g = 5295.41 + 554.7901 * [AGE] - 0.6252 * [m\ idu] - 37.2637 * [D] - 740.5606 * [height]$$
$$Y_c = 12633.34 - 1932.961 * [AGE] + 2.212 * [m\ idu] + 326.8125 * [D] - 647.5625 * [height]$$

由于冠层可燃物负荷量缺少可供验证的数据, 本次着重利用相关文献中的实测数据对地表可燃物负荷量估测的方程进行评价。冠层可燃物负荷

量的估测要视其结果判断。
在马尾松人工林小班选择幼龄林小班, 进行统计分析, 其平均年龄 10.2 年, 频度最高的草本类型为芒萁, 与文献 [12] 中描述的芒萁马尾松林分相类似, 为此, 首先利用上述方程及该文中的四个林分的实测的林分因子对地表可燃物负荷量进行估测, 将估测的结果同实测的数据比较 (表 8), 评估该地表可燃物负荷量估测方程的适用性。

表 8 马尾松幼龄林地表可燃物负荷量估测与实测结果比较
Tab. 8 Comparison between estimated and field surveyed surface fuel loadings of young Masson pine plantation

编号	年龄	密度	胸径	树高	Y _g	实测
1	12	1100	6.4	3.3	8583	15000
2	12	900	12.7	6.3	6251	9000
3	15	2100	9.0	7.6	6340	10500
4	10	1300	8.4	1.5	8606	11600

从对比结果来看, 估测值与实测值存在一定偏差, 说明该估测方程存在一定的局限性。正如 [4] 所述, 估测地表可燃物负荷量时, 以上述各林分因子为建模单元, 只能得出与地表层凋落物可燃物负荷量的值, 在估测地表草本及灌木可燃物负荷量时应该引入灌木和草本盖度等因子。同时, 林下植被类型的不同, 也是造成误差的原因。鉴于误差不是非常大, 而除林分 1 外, 其余林分预测值与实测值的变化趋势基本保持一致, 考虑到目前有关马尾松林可燃物负荷量估测的方程很少, 认为该方程基本适用。对估测结果进行统计, 结果如表 9。

表 9 马尾松幼龄林地表可燃物负荷量估测结果统计
Tab. 9 Estimation result of young Masson pine plantation's surface fuel loadings

参量	最小值	最大值	均值	标准偏差
Y _g	-1493	12778	6566	2463
Y _g > 0 (1364)	214	12778	6609	2406
Y _c	-25137	26338	-659	8517
Y _c > 0 (678)	34	26338	6851	3852

与冠层可燃物负荷量估测的结果相比而言, 地表可燃物估测的结果相对比较稳定, 标准偏差小, 除少数小班出现负值以外, 大部分小班的值落在合理的范围。究其原因, 是因为树冠层可燃

物负荷量估测的方程各因子前面的系数均较大, 样本之间的差异引起的负荷量较大的波动, 容易导致不合理值的出现。树冠层负荷量的标准偏差较大, 而且负值小班个数约占一半, 因此, 树冠层估测的结果仅作参考, 并不作太多的参考, 但地表可燃物负荷量估测的结果具有一定的参考价值。

根据估测出来的地表可燃物负荷量, 生成可燃物负荷量空间分布 (见图版 V彩图 6)。

漳平市西南部幼龄林地表层负荷量大于中北部, 幼龄林的林下植被易燃, 对西南部应加强地表可燃物的清理。

(2) 马尾松中龄林可燃物负荷量估测

$$Y_g = 8029.02 - 139.7803 * [AGE] - 0.2922 * [midu] - 316.5469 * [D] + 95.7598 * [height]$$
$$Y_c = -8110.703 - 465.8404 * [AGE] + 4.6876 * [midu] + 4484.164 * [D] - 3681.641 * [height]$$

统计结果见表 10

表 10 马尾松中龄林可燃物负荷量估测结果

Tab. 10 Estimation result of middle-aged Masson pine plantation's surface fuel loadings

参量	最小值	最大值	均值	标准偏差
Y _g	- 35927	5542	2698	4100
Y _g > 0 (1444)	93	5542	3608	842
Y _c	- 49470	532306	24420	55910
Y _c > 0 (1449)	10 96	532306	26255	57239

地表的计算结果的平均值 3 608kg/hm²同与文献 [9] 中马尾松林分 (18年生) 中易燃物和可燃物 (剔除活的树叶部分) 负荷量总和 9.56+2.44-7.69=4.31 (t/hm²) 即 4 310 kg/hm² 相类似, 而且统计结果表明标准偏差较小, 因此认为估测结果是合理的。而树冠层负荷量的标准偏差则太大, 其结果同样仅作参考。

同幼龄林地表可燃物负荷量相比, 中龄林地表可燃物负荷量减小, 呈现出与杉木人工林相类似的变化规律。即随着林龄的增加, 地表可燃物负荷量先是逐渐上升而后开始下降, 直至林分自然稀疏后才又开始增加。

图版 VI彩图 7是漳平市马尾松中龄林地表可燃物的空间分布情况。

同幼龄林不同的是, 中龄林地表可燃物负

荷量较大的小班南北皆有分布, 北部少, 但由于中龄林郁闭较好, 林内湿度增加, 而地表可燃物负荷量相对幼龄林地又较少, 所以火灾隐患相对较低。

4 结语

本文以福建漳平市为研究区域, 选择南方典型树种杉木和马尾松为对象, 基于空间信息集成技术定量研究了林下可燃物类型和负荷空间分布。分析表明, 遥感在获得可燃物类型空间分布以及小班郁闭度方面均发挥作用, 较好地修正了原地面调查的结果。随着遥感技术的发展, 新型遥感数据如激光雷达数据 (LiDAR) 数据的应用, 遥感技术在获取量化信息如平均树高、胸径、冠层郁闭度以及林相等方面将进一步发挥优势^[16~18], 它将在林地可燃物制图、定量自动估测可燃物负荷量的基础上, 更有效地推动林火遥感的研究。

参考文献

[1] 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

[2] 张国防, 欧文琳, 陈瑞炎等. 杉木人工林地表可燃物负荷量动态模型的研究. 福建林学院学报, 2000, 20 (2): 97~100

[3] 袁春明, 文定元. 马尾松人工林可燃物负荷量和烧损量的动态预测. 东北林业大学学报, 2000, 28 (6): 24~27.

[4] 邓湘雯, 聂绍元, 文定元等. 南方杉木人工林可燃物负荷量预测模型的研究. 湖南林业科技, 2002, 29 (1): 24~27.

[5] 胡海清. 利用林分特征因子预测森林地被可燃物载量的研究. 林业科学, 2005, 41 (5): 96~100

[6] Andersen H E, McGaughey R J, Reutebuch S E. Estimating forest canopy fuel parameters using LiDAR data. Remote Sensing of Environment, 2005, (94): 441~449

[7] 邱雪颖, 王宏良, 姚树人等. 大兴安岭森林地表可燃物生物量与林分因子关系的研究. 森林防火, 1994, (2): 16~18

[8] 张思玉, 兰海涛. 针叶幼林树冠火发生的内在机制. 东北林业大学学报, 1998, 26 (5): 77~80

[9] 张思玉, 张志祥. 杉木马尾松木荷人工纯林与混交林

- 火灾隐患的对比分析. 森林防火, 2001, (3): 27~30
- [10] 陈芸芝, 陈崇成, 凌飞龙 等. 生态环境遥感分类数据矢量化方法与应用. 地球信息科学, 2003, 5 (4): 88~93
- [11] 江洪, 王钦敏, 汪小钦. 福建省长汀县植被覆盖度遥感动态监测研究. 自然资源学报, 2006, 21 (1): 126~132
- [12] 张思玉, 张运生, 黎义明. 芒萁马尾松林下可燃物分布及其燃烧性. 森林防火, 2005 (4): 17~18
- [13] 樊后保, 苏素霞, 卢小兰 等. 林下套种阔叶树的马尾松林凋落物生态学研究III. 凋落物现存量及其养分含量. 福建林学院学报, 2003, 23 (3): 193~197
- [14] 樊后保, 李燕燕, 孙新 等. 马尾松纯林及其与阔叶树混交林的凋落量与养分通量. 应用与环境生物学报, 2005, 11 (5): 521~527
- [15] 林德喜, 樊后保. 马尾松林下补植阔叶树后森林凋落物量、养分含量及周转时间的变化. 林业科学, 2005, 41 (6): 7~15
- [16] Hyppä J, Yu X, Hyppä H, et al. Methods of airborne laser scanning for forest information extraction. Workshop on 3D Remote Sensing In Forestry, 2006, 2, 14~15, Vienna, 1~16
- [17] Clark M L, Clark D B, Roberts D A. Small footprint lidar estimation of sub-canopy elevation and tree height in a tropical rain forest landscape. Remote Sensing of Environment, 2004 (91): 68~89
- [18] Zimble D A, Evans D L, Carlson G C, et al. Characterizing vertical forest structure using small footprint airborne LIDAR. Remote Sensing of Environment, 2003 (87): 171~182

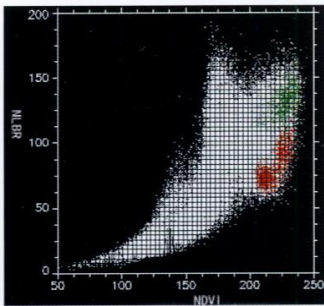
Estimation of Surface Fuel Loadings of Chinese Fir Plantation and Masson Pine Plantation in Zhangping City Based on Rs

CHEN Yunzhi, CHEN Chongcheng, WANG Xiaoqin, TANG Lijun

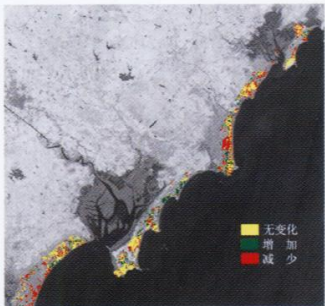
(Spatial Information Research Center of Fujian, Fuzhou University, Key Lab. of Spatial Data Mining & Information Sharing of Ministry of Education, Fuzhou 350002, China)

Abstract Chinese fir plantation and Masson pine plantation are two fire-prone fuel types distributed in Zhangping city, their fuel loadings determine fire behavior. Based on the calculation of mean vegetation fraction of each Chinese fir plantation stand, mean canopy closures are also estimated by regressive analysis. After careful comparison with the result of field survey, the original canopy closures of some fir stands, which had changed a lot, were corrected with the aid of remote sensing. Then, canopy closure and other factors such as age, DBH, mean stand height were used to estimate the surface fuel loadings of Chinese fir plantation stands by the existing estimation equation, and each stand's combustibility, fire intensity and fire risk ranking were evaluated according to the result. Finally, the other fuel types of Masson pine plantation's surface fuel loadings were also estimated and analyzed.

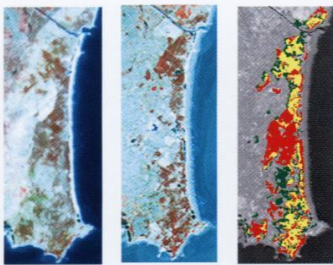
Key words surface fuel loadings, Chinese fir plantation, Masson pine plantation, vegetation fraction, canopy closure



彩图 4 NDVI 和 NLBR 散点图
Fig.4 Scatter plot of NDVI and NLBR (red parts: coastal protective forest; green parts: paddy fields with vegetation)



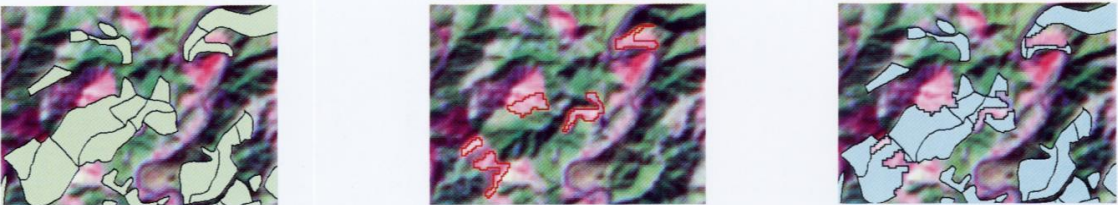
(a) 沿海防护林变化分布图
注:图(b)和图(c)中,从左到右分别为 2000 年 ETM+ (R4G3B2)、2005 年 CBERS-02 (R4G3B2)和防护林变化分布图



(b) 局部放大区域 1
(c) 局部放大区域 2

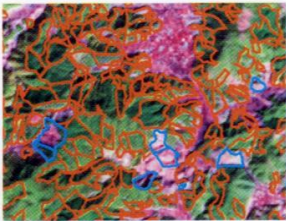
彩图 5 2000~2005 年沿海防护林变化分布图
Fig.5 Change in distribution of coastal protective forests from 2000 ~ 2005

陈芸芝 等:基于遥感的漳平市杉松林地表可燃物负荷量估测



原杉木小班 分类识别的变化斑块 更新后的杉木小班
彩图 1 利用专题分类结果“擦除”杉木林变化区域

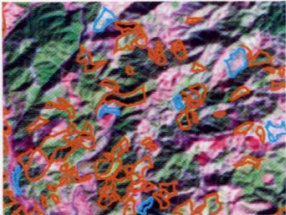
Fig.1 Erase area has changed in Chinese fir plantation layer by the result of classification



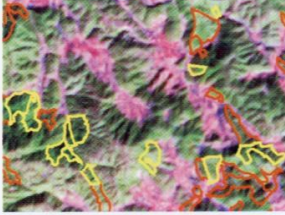
彩图 2 植被覆盖出现退化的小班(原小班郁闭度高)
Fig.2 Stands been degenerated (whose original canopy closures were high)



彩图 4 实测郁闭度偏低(原小班郁闭度低)
Fig.4 Stands of field-survey canopy closures were under-estimated (the original canopy closures were low)



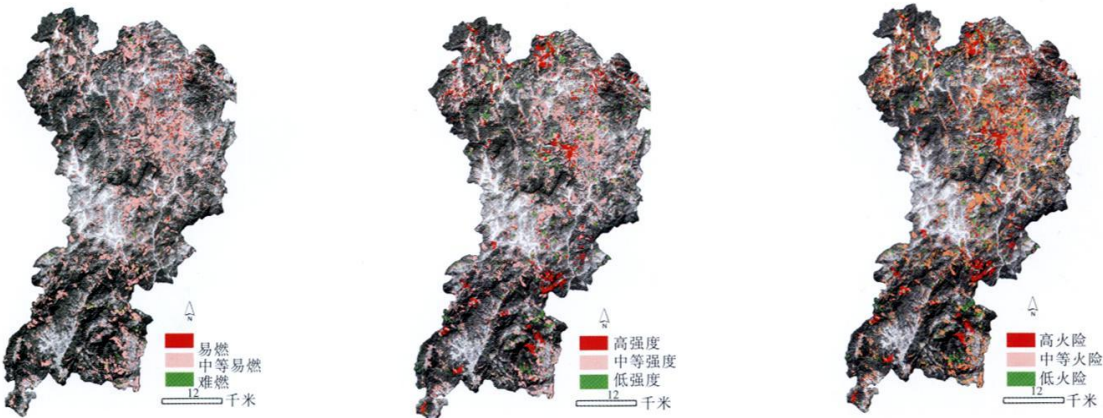
(a)小班郁闭度偏高



(b)小班郁闭度偏低

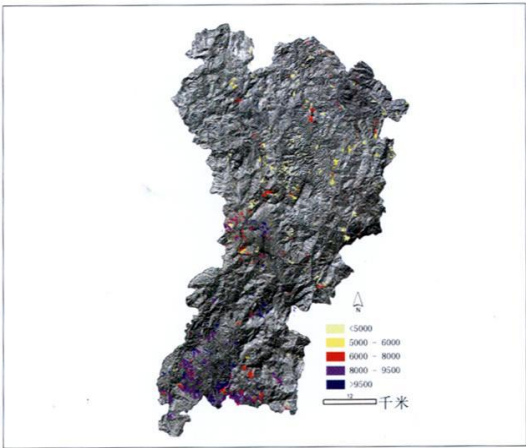
彩图 3 实测郁闭度出现较大偏差(原小班郁闭度中等)

Fig.3 Stands of field-survey canopy closure have errors (the original canopy closures were moderate)



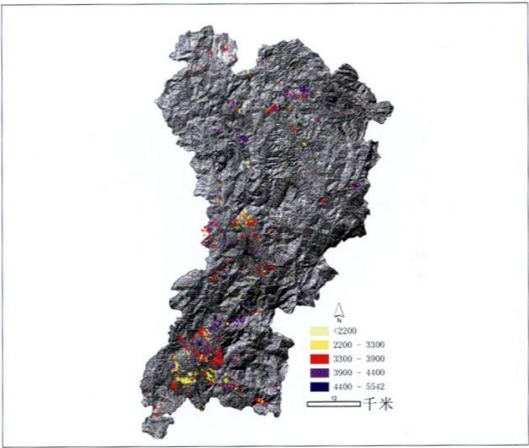
彩图 5 杉木林燃烧行为空间分布

Fig.5 Spatial distribution of Chinese fir plantation’s fire behavior in Zhangping city



彩图 6 马尾松幼龄林地表可燃物负荷量空间分布(kg/hm²)

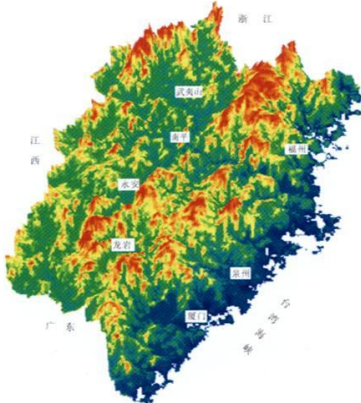
Fig.6 Spatial distribution of young Masson pine plantation’s surface fuel loadings(kg/hm²)



彩图 7 马尾松中龄林地表可燃物负荷量空间分布(kg/hm²)

Fig.7 Spatial distribution of middle-aged Masson pine plantation’s surface fuel loadings(kg/hm²)

郎玲玲 等:多尺度 DEM 提取地势起伏度的对比分析



彩图 1 研究区 DEM 三维效果图

Fig.1 3D map of DEM