

## 林火烈度的量化指标构建

杨 达<sup>1,2</sup>, 吴志伟<sup>1</sup>, 梁 宇<sup>1</sup>, 贺红士<sup>1</sup>

(1. 中国科学院沈阳应用生态研究所森林与土壤生态国家重点实验室, 沈阳 110016; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 基于野外样点实测数据, 根据火烧迹地各组分生物量, 构建了火烧烈度的量化指标: 火烧烈度指数 (Fire Severity Index, FSI)。依据构建的 FSI, 对过火林分的火烧烈度进行了量化分级, 并通过野外记录的综合火烧指数 (Composite Burn Index, CBI), 对 FSI 进行验证分析。结果表明: FSI 能够直接量化火烧烈度严重性, 可准确地揭示不同火烧烈度对林分生物量和碳储量的影响程度。

**关键词:** 火烧烈度指数; 综合火烧指数; 生物量; 大兴安岭

中图分类号: S762 文献标识码: A 文章编号: 1002-6622(2014)06-0140-06

DOI: 10.13466/j.cnki.lyzygl.2014.06.029

## Establishment of Quantitative Indexes of Forest Fire Severity in Forest Region

YANG Da<sup>1,2</sup>, WU Zhiwei<sup>1</sup>, LIANG Yu<sup>1</sup>, HE Hongshi<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Forest and Soil Ecology, Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** Based on the field inventory data, the quantitative index of fire severity (Fire Severity Index, FSI) was established. The grading of fire severity was conducted by means of FSI. According to CBI (composite burn index) from fieldwork, verification of FSI was put in effect. The results showed that FSI could directly quantify fire severity and accurately reveal effect of different fire severities on forest biomass and carbon storage.

**Key words:** fire severity index, composite burn index, biomass, Daxin'anling

林火烈度 (fire severity) 是指林火对森林生态系统植被、土壤养分和土壤理化特性的影响/破坏程度<sup>[1-3]</sup>。林火烈度的大小直接影响森林生态系统碳库的动态变化过程<sup>[2]</sup>。量化火烧面积和火烧烈度时空变化格局对研究火干扰对碳循环的影响十分

重要<sup>[4]</sup>。因此, 定量评价林火烈度, 有助于火干扰下森林生态系统碳储量的精确估算, 从而提高不同火烧烈度对碳储量影响的量化精度。

随着 3S (RS, GIS, GPS) 技术的不断发展, 遥感卫星数据在火烧烈度评估方面得到了广泛应

收稿日期: 2014-08-22; 修回日期: 2014-10-31

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (41371199); 国家自然科学基金面上项目 (31370483);

国家自然科学基金青年基金项目 (31200362)

作者简介: 杨达 (1986-), 男, 安徽临泉人, 在读硕士, 主要从事森林景观生态学和干扰生态学研究。

Email: yangda12@mails.ucas.ac.cn

通讯作者: 贺红士 (1962-), 男, 研究员, 博导, 主要从事景观生态学研究。Email: HeH@missouri.edu

用<sup>[5-8]</sup>。综合来看,归一化火烧比率(normalized burn ratio, NBR)、差分归一化火烧比率(differenced normalized burn ratio, dNBR)和相对差分归一化火烧比率(relative differenced normalized burn ratio, rdNBR)能够较好地反映林火烈度,被广泛用于景观和区域尺度上林火烈度的定量评价。在国外,Miller等<sup>[9]</sup>对RdNBR估测火烧烈度的精确性进行了验证;Soverel等<sup>[5]</sup>应用dNBR和RdNBR指数对加拿大西部的火烧烈度进行了评估,比较了dNBR和RdNBR在估算林火烈度的精确性。在评估林火烈度方面,RdNBR指数的评估精度并不比dNBR指数高;Barrett等<sup>[4]</sup>利用光谱和非光谱数据模拟了阿拉斯加北方黑云杉森林的火烧烈度,结果表明这种模拟方法能比单一的遥感数据提供更多的火烧烈度信息。在国内,吴志伟等<sup>[10]</sup>基于Landsat影像数据分析了植被和地形对火烧烈度的相对贡献;常禹等<sup>[2]</sup>综述了林火烈度评价及其空间异质性研究进展;王晓莉等<sup>[1]</sup>利用NBR指数对1986—2010年大兴安岭呼中林区森林过火区林火烈度进行了定量评价,分析了林火烈度与植被类型、海拔、坡度和坡向等环境因子的关系。

以上通过遥感数据反演得到的火烧烈度需要野外实测数据进行验证,基于地面调查的综合火烧指数(composite burn index, CBI)<sup>[1]</sup>是最常用的方法。Epting等<sup>[11]</sup>利用遥感指数对火烧烈度估算进行了评估,通过遥感指数和样地实测CBI值的相关分析,结果表明NBR与CBI在森林估算森林火烧烈度方面高度相关;Hoy等<sup>[12]</sup>对Landsat TM/ETM+影像提取火烧烈度的潜力进行了评估,结果表明dNBR和实测CBI值相关性较低。目前,CBI是美国林署进行林火烈度评价的野外调查评价标准<sup>[2]</sup>。

CBI虽然能够很好地反映火干扰对森林结构组成的影响程度,但是在量化不同火烧烈度对森林生物量和碳储量的影响程度方面存在一些不足。因为通过CBI定性描述而确定的火烧烈度并不利于火干扰下森林生物量和碳储量的量化研究。为此,本文提出了一种针对火干扰下生物量和碳储量估算的火烧烈度量化指标:火烧烈度指数(Fire Severity Index, FSI)。通过建立森林火烧烈度的野外定量

估测方法(FSI),旨在更好地评价火干扰对森林生物量和碳储量的影响程度,为景观尺度上量化火烧烈度对森林生物量和碳储量的影响提供科学依据。

## 1 研究区概况

研究区位于黑龙江省大兴安岭呼中林业局(51°17'42"~51°56'31"N,122°42'14"~123°18'05"E),总面积94万hm<sup>2</sup>,其中林地面积60多万hm<sup>2</sup>。该区海拔较高,多在700~1200m,是雷击火多发区。属寒温带大陆性气候,具有明显的山地气候特点。年均温为-4.7℃,年降水量503.6mm,主要集中在6—8月,无霜期80~100d。研究区夏季短暂,冬季寒冷而漫长,冰冻期长达半年,绝对最低温度-47.5℃。

在植物区系上属泛北极植物区东西伯利亚植物区系,以西伯利亚植物区系成分为主,混有东北植物区系成分和蒙古植物区系成分。植被属寒温带针叶林,林型以兴安落叶松构成的明亮针叶林为主,优势树种为兴安落叶松(*Larix gmelinii* Rupr),其他主要乔木树种有山杨(*Populus davidiana* Dode)、白桦林(*Betula platyphylla* Suk.)和樟子松(*Pinus sylvestris* L. var. *mongholica* Litv.)等。

## 2 研究方法

### 2.1 外业调查

野外调查于2013年7—8月进行,在大兴安岭呼中林区在2010年火烧迹地设置样方,在每个样方中,分别记录其经纬度、海拔、坡度、坡向、坡位、林型、林龄、火烧烈度等因子,共获取45个火烧样点数据。

样方中的活生物量包括乔木、灌木和草本三部分。对于乔木,设置的样方大小为20m×20m,对每个样方内的乔木(高度>1.37m)进行每木检尺,记录其树种、胸高直径(DBH)和树高(H);对于灌木和草本的调查,在20m×20m的大样方中设置2m×2m和1m×1m的小样方各3个,采用全部生物量收获法,对每个小样方内的灌木和草本称重并取样。

死生物量调查包括枯立木、倒木、树桩和枯落物四部分。在设置的20m×20m的样方中,对每个样方内的枯立木(高度>1.37m)进行每木检尺,记

录其树种、胸高直径(*DBH*)和树高(*H*);对样方内的每个倒木测量其大端、中端、小端直径和长度;对于树桩(高度 $< 1.37\text{m}$ )测量其高度和中端直径。在 $20\text{m} \times 20\text{m}$ 的大样方中设置3个 $0.5\text{m} \times 0.5\text{m}$ 的小样方调查枯落物,采用全部生物量收获法,对每个小样方内的枯落物进行称重并取样。

火烧烈度调查采用综合火烧指数 *CBI* 完成。在调查样地内,按照森林垂直结构,分5个层次调查: A: 地表可燃物和土壤; B: 草本、低矮灌木和 $< 1\text{m}$ 高的小树层; C: 高大灌木和 $1 \sim 5\text{m}$ 的乔木层; D:

次林冠层( $5 \sim 20\text{m}$ ); E: 主林冠层( $> 20\text{m}$ )。在每一调查层都有若干个观测变量,结合观测值确定每个样方的火烧烈度(表1)。*CBI*取值范围为 $0 \sim 3$ (0代表未火烧;1代表轻度火烧;2代表中度火烧;3代表重度火烧)然后对各层的估测值加以综合,并根据每个样点的*CBI*得分值,把调查的火烧迹地的火烧烈度划分为a、b、c三个等级。a为轻度火烧(low severity)  $0 < CBI < 1$ ; b为中度火烧(moderate severity)  $1 < CBI < 2$ ; c为重度火烧(high severity)  $2 < CBI < 3$ 。

表1 综合火烧指数(*CBI*)调查内容和评价标准

Tab. 1 Investigation items and evaluation criterion of Composite Burn Index (*CBI*)

分层	火烧特征描述	林火烈度			
		未过火 0	轻 0~1	中 1~2	重 2~3
A	枯枝落叶和直径 $< 7.6\text{cm}$ 的死可燃物消耗	无变化	50% 枯枝落叶被消耗	100% 枯枝落叶被消耗	80% 细可燃物被消耗
	半腐殖质	无变化	轻度烧焦	50% 消耗	100% 消耗
	直径 $7.6 \sim 23.3\text{cm}$ 的粗可燃物	无变化	20% 消耗	40% 消耗	$> 60\%$ 消耗 深度烧焦
	直径 $> 20.3\text{cm}$ 的大型倒木	无变化	10% 消耗	20% 消耗	$> 40\%$ 消耗 深度烧焦
	新生裸露岩石/土壤的盖度/颜色	无变化	10% 发生改变	40% 发生改变	$> 80\%$ 发生改变
B	叶片变化率/%	无变化	30	80	$> 95$
	存活率/%	100	90	50	$< 20$
	植物定植	无变化	低	中	高一无
	物种组成/多样性	无变化	变化小	变化中等	变化大
C	叶片变化率/%	0	20	$60 \sim 90$	$> 95$
	存活率/%	100	90	30	$< 15$
	盖度变化率/%	无变化	15	70	$> 90$
	物种组成/多样性	无变化	变化小	变化中等	变化大
D	绿色林冠/%	100	80	40	$< 10$
	黑色林冠/%	无	$5 \sim 20$	60	$> 85$
	棕色林冠/%	无	$5 \sim 20$	$40 \sim 80$	$> 80$
	林冠死亡率/%	无	15	60	$> 80$
	熏黑高度/m	无	1.5	2.8	$> 5$
	林木死亡率/%	无	15	60	$> 80$
E	绿色林冠/%	100	95	50	$< 10$
	黑色林冠/%	无	$5 \sim 10$	50	$> 80$
	棕色林冠/%	无	$5 \sim 10$	$30 \sim 70$	$> 70$ 或无
	林冠死亡率/%	无	10	50	$> 70$
	熏黑高度/m	无	1.8	4	$> 7$
	林木死亡率/%	无	10	50	$> 70$

## 2.2 数据处理

### 2.2.1 枯立木 倒木 树桩的材积估算

枯立木材积的计算公式如下<sup>[13]</sup>:

$$V = DBA \times H \times f \quad (1)$$

式中:  $V$  为材积 ( $m^3$ );  $DBA$  为胸高端面积 ( $m^2$ );  $H$  为枯立木高度 ( $m$ );  $f$  为形数 (取 0.41)。

为了消除倒木形状带来的误差,假设倒木呈圆柱形,倒木材积的计算采用公式<sup>[14]</sup>如下:

$$V = \pi L_i (D_s^2 + D_L^2) / 80000 \quad (2)$$

式中:  $V$  为单个倒木的材积 ( $m^3$ );  $D_s$  为小端直径 ( $cm$ );  $D_L$  为大端直径 ( $cm$ );  $L_i$  为倒木长度 ( $m$ )。

树桩材积的计算公式:

$$V = H \times A_m \quad (3)$$

式中:  $V$  为树桩材积 ( $m^3$ );  $H$  为树桩高 ( $m$ );  $A_m$  为树桩中端断面面积 ( $m^2$ )。将每个样点的枯立木材积、倒木材积、树桩材积换算到单位面积储量 ( $t/hm^2$ )。

### 2.2.2 生物量估算

1) 活生物量。对于乔木和枯立木,结合每个样点的胸径和树高,采用主要树种异速生长方程<sup>[15]</sup>计算出其生物量 (表 2)。

表 2 各树种单木生物量方程

Tab. 2 Single wood biomass equation of tree species

树种	干	枝	叶
兴安落叶松	$W_s = 0.025 (D^2 H)^{0.96}$	$W_b = 0.0021 (D^2 H)^{0.8181}$	$W_l = 0.00126 (D^2 H)^{0.968}$
樟子松	$W_s = 0.0134 (D^2 H)^{1.02}$	$W_b = 0.0105 (D^2 H)^{0.7386}$	$W_l = 0.181 D^{1.8415}$
白桦	$W_s = 0.1193 (D^2 H)^{0.8372}$	$W_b = 0.002 (D^2 H)^{1.12}$	$W_l = 0.000015 (D^2 H)^{1.47}$
山杨	$W_s = 0.2286 (D^2 H)^{0.6938}$	$W_b = 0.0247 (D^2 H)^{0.7378}$	$W_l = 0.0108 (D^2 H)^{0.8181}$

对于灌木和草本,把每个样方取回的样品在实验室进行 24 ~ 48h 的烘干 ( $75^\circ C$ ) 处理至恒重,并称其干重,得到每个样方内的枯落物生物量。最后把乔木层、灌木层和草本层的生物量换算到单位面积生物量 ( $t/hm^2$ )。

2) 死生物量。结合每个样点的胸径和树高,采用主要树种异速生长方程<sup>[15]</sup>计算出枯立木的生物量,由于是枯立木,生物量方程只包括树干部分<sup>[16]</sup>。

利用枯立木材积与生物量的回归关系计算倒木和树桩的生物量。拟合结果和关系式如图 1 所示。

把每个样方取回的枯落物样品在实验室进行 24 ~ 48h 烘干 ( $75^\circ C$ ) 至恒重,并称其干重,得到每个样方内的枯落物生物量。最后把枯立木、倒木、树桩和枯落物的生物量换算为单位面积生物量 ( $t/hm^2$ )。

### 2.2.3 FSI 计算公式构建

随着火烧烈度的增加,活生物量转化为死生物量的比重增大,死生物量与总生物量 (死生物量与活生物量) 的比值能很好地反映林火烈度严重性。这一比值定义为火烧烈度指数 (FSI), 计算公式如下:

$$FSI = \frac{B_d}{B_d + B_l} \quad (0 < FSI < 1) \quad (4)$$

式中:  $FSI$  为火烧烈度指数,  $B_d$  为死生物量,  $B_l$  为活生物量。

$$B_d = B_{sn} + B_{lo} + B_{st} + B_{li} \quad (5)$$

式中:  $B_{sn}$  为枯立木生物量 (snags biomass),  $B_{lo}$  为倒木生物量 (logs biomass),  $B_{st}$  为树桩生物量 (stumps biomass),  $B_{li}$  为枯落物生物量 (litters biomass)。

$$B_l = B_{tr} + B_{sh} + B_{he} \quad (6)$$

式中:  $B_{tr}$  为乔木生物量 (trees biomass),  $B_{sh}$  为灌木生物量 (shrub biomass),  $B_{he}$  为草本生物量 (herbs biomass)。

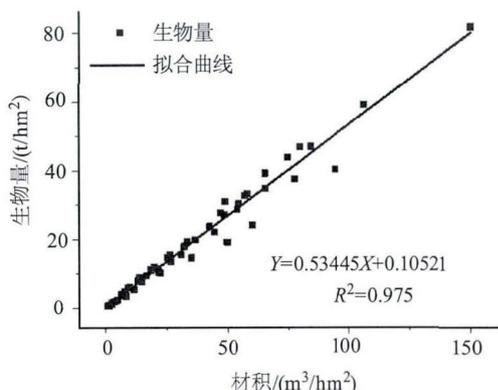


图 1 枯立木材积与生物量回归关系图

Fig. 1 Regression relationship between biomass and volume of snags

由公式(4)计算得到的 *FSI* 值在 0 和 1 之间, *FSI* 值越接近 0, 说明火烧程度越轻, 火干扰对森林生态系统碳储量的影响就越小; *FSI* 值越接近 1 表明火烧程度越严重, 火干扰对森林生态系统碳储量的影响越大。通过 *FSI* 可以对火烧烈度作出精确量化, 直接揭示出火干扰对森林生物量和碳储量的影响程度。

### 2.3 统计分析

数据的统计分析由 Office 2010 和 Origin 9.0 完成。

## 3 结果与分析

### 3.1 各样点 *FSI* 值

根据式(4), 计算出每个样点的 *FSI* 值(表3)。*FSI* 能够对火干扰下的森林生物量进行准确量化。火烧林分的 *FSI* 值小, 说明火烧程度较轻, 火灾发生时, 消耗的生物量较少, 火干扰对森林中活植被生物量的影响较小, 活生物量转化为死生物量的比例很小。因此, *FSI* 值小的火烧林分, 其生物量会有所减少, 但减少比重很小。火烧林分的 *FSI* 值大, 说明火烧程度很严重, 大部分甚至全部活植被被烧掉, 活生物量几乎全转化为死生物量, 表明 *FSI* 值大的火烧林分生物量将严重减少, 火干扰将对森林生物量产生重要影响。

### 3.2 *FSI* 验证分析

通过计算得到的每个样点的 *FSI* 值, 对火烧烈度进行分级。为了便于比较, 也把火烧烈度划分为 3 个等级。*FSI* 值划分标准: 0 ~ 0.5, 轻度火烧; 0.5 ~ 0.75, 中度火烧; 0.75 ~ 1, 重度火烧。

结合 *CBI* 调查表得到的各样点火烧烈度, 对 *FSI* 火烧烈度分级进行验证(表4)。从表4可以看出, 根据 *FSI* 值量化得到的火烧烈度与 *CBI* 调查得到的火烧烈度分级基本吻合。在调查的 45 个样点中, 有 38 个样点的火烧烈度相一致, 准确率达 84.4%。同时, *FSI* 和 *CBI* 火烧烈度分级也表现出一定的差异性, 有 7 个样点的火烧烈度分级表现出不一致性。这主要是由于二者的火烧烈度分级指标不同而造成的, *CBI* 是通过火烧林分的垂直分层进行定性描述, 结合火干扰对森林组成结构的影响程度, 来定性判断火烧烈度; 而 *FSI* 则是通过计算火烧迹地各组分生物量, 用死生物量与总生物量之

表3 每个样点的 *FSI* 值

Tab. 3 *FSI* values of plots

样方号	<i>FSI</i> 值	样方号	<i>FSI</i> 值	样方号	<i>FSI</i> 值
1	0.2724	38	0.5497	2	0.8102
3	0.2907	6	0.5685	4	0.8163
7	0.3119	8	0.5865	5	0.8380
10	0.3327	12	0.5936	9	0.8525
22	0.3547	18	0.6159	13	0.8738
26	0.3705	28	0.6254	14	0.8947
27	0.3875	35	0.6295	15	0.8992
34	0.4295	39	0.6495	16	0.9098
40	0.4463	42	0.6519	19	0.9247
44	0.4567	23	0.7251	20	0.9255
45	0.4705	31	0.7497	21	0.9417
11	0.4758	33	0.7585	24	0.9446
17	0.4993	36	0.7770	29	0.9564
25	0.5010	37	0.7954	30	0.9607
43	0.5033	41	0.8026	32	0.9886

表4 依据 *FSI* 值和 *CBI* 得分值划分的火烧烈度分级

Tab. 4 Fire severity grading from fire severity index and score of composite burn index

样方号	火烧烈度		样方号	火烧烈度		样方号	火烧烈度	
	<i>FSI</i>	<i>CBI</i>		<i>FSI</i>	<i>CBI</i>		<i>FSI</i>	<i>CBI</i>
1	轻度	a	38	中度	a	2	重度	c
3	轻度	a	6	中度	b	4	重度	c
7	轻度	a	8	中度	b	5	重度	c
10	轻度	a	12	中度	b	9	重度	c
22	轻度	a	18	中度	b	13	重度	c
26	轻度	a	28	中度	b	14	重度	c
27	轻度	a	35	中度	b	15	重度	c
34	轻度	a	39	中度	b	16	重度	c
40	轻度	a	42	中度	b	19	重度	c
44	轻度	a	23	中度	c	20	重度	c
45	轻度	a	31	中度	c	21	重度	c
11	轻度	b	33	重度	c	24	重度	c
17	轻度	b	36	重度	c	29	重度	c
25	轻度	b	37	重度	c	30	重度	c
43	轻度	b	41	重度	c	32	重度	c

比, 来对火烧烈度进行量化, 所以两者会存在一定的差异性。通过验证分析可知, *FSI* 能够较好地量化火烧烈度, 较准确地量化火干扰对森林生物量和碳储量的影响程度。

## 4 结论与讨论

*FSI* 能够较准确地量化火烧迹地的火烧烈度, 这对精确估算不同火烧烈度下的生物量和碳储量

具有重要意义。*FSI* 虽然能量化火干扰对火烧迹地各组分的影响程度, 但是对火干扰下的森林结构描述不足, 不能很好地直观反映火干扰对森林结构的影响。*CBI* 能够全面反映火干扰对森林组成结构的影响程度, 但在量化火烧烈度方面不如 *FSI* 精确, 尤其是在估算火干扰下的森林生物量和碳储量时, 通过 *CBI* 定性判断得到的火烧烈度会给估算结果带来一定的不确定性, 而 *FSI* 能在一定程度上减少这种不确定性, 可以较好地量化火干扰对森林生物量和碳储量的影响程度。

#### 参考文献:

- [1] 王晓莉, 王文娟, 常禹, 等. 基于 NBR 指数分析大兴安岭呼中森林过火区的林火烈度 [J]. 应用生态学报, 2013, 24(4): 967-974.
- [2] 常禹, 陈宏伟, 胡远满, 等. 林火烈度评价及其空间异质性研究进展 [J]. 自然灾害学报, 2012, 21(2): 28-34.
- [3] Lentile L B, Smith F W, Shepperd W D. Influence of topography and forest structure on patterns of mixed severity fire in ponderosa pine forests of the South Dakota Black Hills, USA [J]. International Journal of Wildland Fire, 2006, 15(4): 557-566.
- [4] Barrett K, Kasischke E S, McGuire A D, et al. Modeling fire severity in black spruce stands in the Alaskan boreal forest using spectral and non-spectral geospatial data [J]. Remote Sensing of Environment, 2010, 114(7): 1494-1503.
- [5] Soverel N O, Perrakis D D B, Coops N C. Estimating burn severity from Landsat dNBR and RdNBR indices across western Canada [J]. Remote Sensing of Environment, 2010, 114(9): 1896-1909.
- [6] Escuin S, Navarro R, Fernandez P. Fire severity assessment by using NBR (Normalized Burn Ratio) and NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) derived from LANDSAT TM/ETM images [J]. International Journal of Remote Sensing, 2008, 29(4): 1053-1073.
- [7] Allen J L, Sorbel B. Assessing the differenced Normalized Burn Ratio's ability to map burn severity in the boreal forest and tundra ecosystems of Alaska's national parks [J]. International Journal of Wildland Fire, 2008, 17(4): 463-475.
- [8] Miller J D, Thode A E. Quantifying burn severity in a heterogeneous landscape with a relative version of the delta Normalized Burn Ratio (dNBR) [J]. Remote Sensing of Environment, 2007, 109(1): 66-80.
- [9] Miller J D, Knapp E E, Key C H, et al. Calibration and validation of the relative differenced Normalized Burn Ratio (RdNBR) to three measures of fire severity in the Sierra Nevada and Klamath Mountains, California, USA [J]. Remote Sensing of Environment, 2009, 113(3): 645-656.
- [10] Wu Z, He H S, Liang Y, et al. Determining relative contributions of vegetation and topography to burn severity from LANDSAT imagery [J]. Environ Manage, 2013, 52(4): 821-836.
- [11] Epting J, Verbyla D, Sorbel B. Evaluation of remotely sensed indices for assessing burn severity in interior Alaska using Landsat TM and ETM+ [J]. Remote Sensing of Environment, 2005, 96(3): 328-339.
- [12] Hoy E E, French N H F, Turetsky M R, et al. Evaluating the potential of Landsat TM/ETM+ imagery for assessing fire severity in Alaskan black spruce forests [J]. International Journal of Wildland Fire, 2008, 17(4): 500-514.
- [13] 刘志华, 常禹, 胡远满, 等. 呼中林区与呼中自然保护区森林粗木质残体储量的比较 [J]. 植物生态学报, 2009, 33(6): 1075-1083.
- [14] Waddell K L. Sampling coarse woody debris for multiple attributes in extensive resource inventories [J]. Ecological indicators, 2002, 1(3): 139-153.
- [15] 王晓莉, 常禹, 陈宏伟, 等. 黑龙江省大兴安岭森林生物量空间格局及其影响因素 [J]. 应用生态学报, 2014, 25(4): 974-982.
- [16] 闫平, 高述超, 刘德晶. 兴安落叶松林 3 个类型生物及土壤碳储量比较研究 [J]. 林业资源管理, 2008(3): 77-81.

(上接第 127 页)

#### 参考文献:

- [1] 陈存及, 陈伙法. 阔叶树种栽培 [M]. 北京: 中国林业出版社, 2000: 416-419.
- [2] 何国生, 林思祖, 黄云鹏. 福建生物质能源树种现状及其开发前景 [J]. 生物质化学工程, 2006, 40(S1): 224-229.
- [3] 黄建辉. 竹柏山地造林技术及其幼林生长情况调查 [J]. 绿色科技, 2011(7): 56-57.
- [4] 李丹, 邹双全. 竹柏苗木繁殖技术及其推广价值 [J]. 亚热带农业研究, 2014, 10(2): 141-143.
- [5] 黄云鹏. 竹柏优良单株选择及相关性状研究 [J]. 西南林学院学报, 2008, 28(2): 21-23.
- [6] 周俊新. 福建省竹柏资源状况及开发利用前景分析 [J]. 江西林业科技, 2008(5): 39-40.
- [7] 张贤珍. 农业数理统计计算程序 [M]. 北京: 农业出版社, 1990: 126-135.
- [8] 朱之梯. 林木遗传学基础 [M]. 北京: 中国林业出版社, 1992: 163-190.
- [9] 黄光兰, 莫永. 竹柏的特征特性与育苗技术 [J]. 中国园艺文摘, 2010(10): 101.
- [10] 李宝银, 周俊新, 李凌, 等. 乌桕与竹柏等树种混交效果评价 [J]. 华东森林经理, 2009, 23(1): 12-16.