

长白山林区森林生物量变化定量驱动分析*

杨金明¹ 范文义^{1**} 李明泽¹ 田利军² 毛学刚¹ 于颖¹

(¹ 东北林业大学林学院, 哈尔滨 150040; ² 大兴安岭塔河林业局, 黑龙江塔河 165204)

摘要 根据研究区单木生物量模型及森林资源清查资料计算样地生物量,采用试验精度较高的遥感模型进行4期遥感数据的森林生物量估算,获得区域单位面积生物量变化值,并利用bootstrap方法对引起这种变化的气象因素、森林经营活动因素和社会经济因素等驱动因子进行变量筛选,利用偏最小二乘算法建立不同时间段的森林生物量变化驱动模型,计算变量投影重要性指标(VIP)定量刻画各因素对森林生物量变化的影响重要程度.结果表明:目前人为因素对长白山林区森林生物量变化的影响程度(VIP值)已经小于自然因素,说明国家对林区的森林保护政策已经起到了明显的效果.本文拓宽了森林生物量变化驱动分析的内容,引入了VIP值对森林生物量的变化驱动因子进行定量刻画,为定量分析森林生物量的变化提供了一条新的途径.

关键词 森林生物量 定量分析 VIP值

文章编号 1001-9332(2011)01-0047-06 **中图分类号** S757 **文献标识码** A

Quantitative driving analysis of forest biomass changes in Changbai Mountain forest region.
YANG Jin-ming¹, FAN Wen-yi¹, LI Ming-ze¹, TIAN Li-jun², MAO Xue-gang¹, YU Ying¹
(¹*School of Forestry, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China*; ²*Tahe Administration of Forestry in Great Xing'an Mountain, Tahe 165204, Heilongjiang, China*). -*Chin. J. Appl. Ecol.*, 2011, 22(1): 47-52.

Abstract: Based on the forest inventory data and single tree biomass model, the forest biomass in the sampling plots in Changbai Mountain forest region was calculated, and, by using the estimated forest biomass from four periods' remote sensing data and based on high accuracy remote sensing models, the changes of regional forest biomass were analyzed. In the meanwhile, the driving factors such as meteorological factors, management factors, and socio-economic factors that caused forest biomass change were selected by bootstrap method, and the driving model of forest biomass change in different time period was set up by using partial least-squares method. The Variable Importance in Projection (VIP) values representing the importance of each of the factors affecting the forest biomass change in study region were calculated. The results showed that the influence of human activity factors (VIP values) on Changbai Mountain forest biomass changes was less than that of natural factors, suggesting that the national forest protection policy for forest regions had played an obvious role. Our research broadened the content of forest biomass change driving analysis, and the introduction of calculating VIP value, which can quantitatively represent the influence of driving factors to forest biomass change, provided a new way for the quantitative analysis on forest biomass change.

Key words: forest biomass; quantitative analysis; VIP value.

森林生物量是森林生态系统的最基本数量特征^[1]. 它可以反映森林与其环境在物质循环和能量流动上的关系,是整个森林生态系统运行的能量基

础,也是研究生物生产力、净第一性生产力、碳循环、全球气候变化的基础^[2-4]. 目前,国内外对森林生物量已有大量研究报道,主要是对某一特定时期特定区域的森林生物量或碳储量进行估测^[5-9],而对森林生物量的变化成因却较少见报道.

森林生物量随时空而变化^[10]. 在空间上,生物量随不同地区、不同群落类型^[11]、不同生境条件^[12]

* 国家高技术研究发展计划项目(2006AA12Z104)、中央高校科研业务经费专项资金项目(DL09EAQ01)和教育部博士点学科专项(20070225003)资助.

** 通讯作者. E-mail: fanwy@163.com

2010-06-15 收稿,2010-10-21 接受.

等的变化而变化,同时也随湿度和温度等环境梯度及干扰等的变化而发生变化^[13];在时间上,自然状态下的生物量随森林的演替阶段而变化,即森林生物量通常随林龄的增加而增加,在成熟林时接近一个稳定值^[14-15].以往研究者对森林生物量在时间尺度上的变化多是描述其自然变化结果及规律^[16-17],而森林作为人类的生存环境之一,其生物量受人类活动的影响不容忽视,甚至在某一阶段,人类活动对森林生物量的变化可能起到主导作用.因此,研究人类活动对森林生物量变化的影响,对于认识人类与森林生态系统之间的关系具有重要的意义.

长白山林区森林生物量在全国森林生物量的构成中占有重要地位.自1949年以来,在自然因素及国家政策、社会经济和经营措施等人为因素的影响下,该地区森林生物量发生着明显的变化,深入研究这种变化及其成因,可为国家制定合理的森林资源可持续发展政策和森林经营保护措施提供科学依据.为此,本文综合考虑了自然因素与人为因素,建立了森林生物量变化驱动模型,定量分析了森林生物量的变化成因.

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

长白山位于吉林省东南部地区 127°40′—128°16′ E, 41°35′—42°25′ N 的地带.本地区冬季气候寒冷而漫长,夏季温暖多雨且短暂^[18-19].气候随海拔高度的变化差异很大.山脚为典型的暖温带气候,山顶却表现出复杂多变的近极地气候^[20].降水量随海拔的上升而逐渐增加,山下年均降水量为 600 ~ 900 mm,而山顶年均降水量为 1340 mm.水热条件及地质地貌的差异,形成了长白山北坡明显的土壤垂直带谱,从上而下依次为:高山冻原土(2000 m 以上)、山地生草森林土(1800 ~ 2000 m)、山地棕色针叶林土(1100 ~ 1800 m)、山地暗棕色森林土(1100 m 以下)^[21].

长白山自然植被类型随海拔高度的变化,呈现出明显的垂直分布带谱,构成了独特的自然景观格局^[22].从山下到山顶植被类型依次为:阔叶红松林(海拔 1100 m 以下)、以鱼鳞云杉(*Picea jezoensis* var. *komarovii*)和臭冷杉(*Abies nephrolepis*)为主要建群种的暗针叶林(海拔 1100 ~ 1800 m)、亚高山岳桦(*Betula ermanii*)林(海拔 1800 ~ 2000 m)和北极冻原特征植被(海拔 2000 ~ 2600 m)^[23].

1.2 研究方法

1.2.1 基础资料收集 本研究广泛收集研究区 20 世纪 70 年代(以 1970 年为代表)、80 年代(1987 年为代表)、90 年代(1997 年为代表)和 21 世纪初年(2007 年为代表)4 期相关数据.包括两类森林资源清查资料,卫星影像数据及 13 个林业局 1970—2007 年间的气象数据、经营活动数据和社会经济数据.其中,遥感数据为 1973 年 Landsat-MSS 数据、1987 年 Landsat-TM 数据、1997 年 Landsat-ETM 数据、2007 年 Landsat-TM 数据.

1.2.2 单位面积生物量计算 根据研究区相应单木生物量模型及森林资源清查资料计算样地生物量.对遥感数据经几何校正、辐射定标、大气校正、太阳高度角校正等处理后采用如下技术路线(图 1)计算 4 期森林生物量遥感反演图像.

其中,样地调查因子包括样地中心地理坐标、海拔高度、坡度、坡向;遥感因子包括单一波段值、植被指数^[24](归一化植被指数 NDVI、简单比值指数 SR、转换型植被指数 TVI、垂直植被指数 PVI、红外指数 II、土壤调整植被指数 SAVI、改进土壤调整植被指数 SAVI2、优化比值指数 MSR)、纹理信息、叶面积指数 LAI 及植被覆盖度等.纹理信息采用灰度共生矩阵法^[25].以样地生物量为因变量,样地调查因子和遥感因子为自变量,分别采用常规多元统计分析法^[26]、偏最小二乘回归分析法、联立方程组^[27-28]分析法建立森林生物量遥感反演模型,分析比较 3 种模型的精度,选择精度最高的联立方程组模型作为该地区的森林生物量遥感反演模型.结合 4 个时期的遥感数据,计算得到该地区各时期森林生物量遥感反演图像.从各期生物量遥感反演图像上各林业局区域范围内随机抽取 150 个点,平均后计算各林

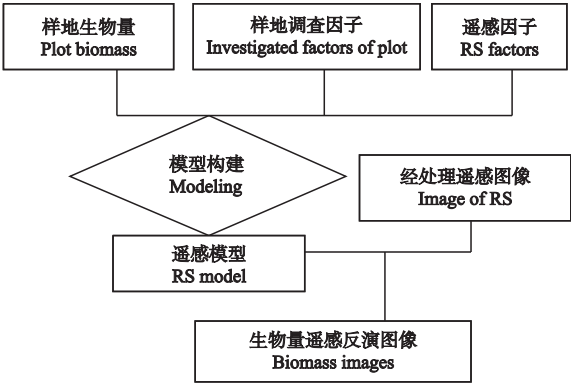


图 1 长白山林区森林生物量遥感反演技术路线
Fig. 1 Technique route of remotely sensed inversion of forest biomass in Changbai Mountain forest region.

表 1 森林生物量变化驱动因子计算表
Table 1 Driving factors' computing for changes of forest biomass

自变量 Independent variable	因变量 Dependent variable	BIOM ₇₀₋₈₇	BIOM ₈₇₋₉₇	BIOM ₉₇₋₀₇
气象因素 Meteorological factors	积温 Temperature (℃)	AVE ₈₁₋₈₇ -AVE ₇₀₋₈₀	AVE ₉₁₋₉₇ -AVE ₈₈₋₉₀	AVE ₀₁₋₀₇ -AVE ₉₈₋₀₀
	降水 Precipitation (mm)	AVE ₈₁₋₈₇ -AVE ₇₀₋₈₀	AVE ₉₁₋₉₇ -AVE ₈₈₋₉₀	AVE ₀₁₋₀₇ -AVE ₉₈₋₀₀
	日照 Sunshine (h)	AVE ₈₁₋₈₇ -AVE ₇₀₋₈₀	AVE ₉₁₋₉₇ -AVE ₈₈₋₉₀	AVE ₀₁₋₀₇ -AVE ₉₈₋₀₀
经营措施 Management measures	采伐量 Harvest (m ³ · km ⁻²)	AVE ₇₀₋₈₀ 、AVE ₈₁₋₈₇	AVE ₈₈₋₉₀ 、AVE ₉₁₋₉₇	AVE ₉₈₋₀₀ 、AVE ₀₁₋₀₇
	造林量 Afforestation (hm ² · km ⁻²)	AVE ₇₀₋₈₀ 、AVE ₈₁₋₈₇	AVE ₈₈₋₉₀ 、AVE ₉₁₋₉₇	AVE ₉₈₋₀₀ 、AVE ₀₁₋₀₇
	预算投资 Budget investment (yuan · km ⁻²)	AVE ₇₀₋₈₀	-	-
	育林基金 Silviculture fund (yuan · km ⁻²)	AVE ₇₀₋₈₀	-	-
	封山育林 Closing (hm ² · km ⁻²)	AVE ₈₀₋₈₇	AVE ₈₈₋₉₀ 、AVE ₉₁₋₉₇	AVE ₉₈₋₀₀
社会经济 Socio-economic	人口密度 Population density (person · km ⁻²)	AVE ₈₁₋₈₇ -AVE ₇₀₋₈₀	AVE ₉₁₋₉₇ -AVE ₈₈₋₉₀	AVE ₀₁₋₀₇ -AVE ₉₈₋₀₀
	新增公路 New highway (m · km ⁻²)	AVE ₇₀₋₈₀	AVE ₉₁₋₉₇	AVE ₉₈₋₀₀

BIOM₇₀₋₈₇ 表示 1970—1987 年间的生物量变化量; AVE₀₁₋₀₇ 表示 2001—2007 年平均值; “-”表示没有数据; 采伐量采用国家分配采伐指标 BI-OM₇₀₋₈₇ meant variation of biomass in 1970-1987, AVE₀₁₋₀₇ meant average in 2001-2007, “-” meant no data, harvest adopted country distribution cutting index.

业局 4 个时期单位面积森林生物量数据. 将相邻 2 期生物量数据做差计算相邻期森林生物量变化量.

1.2.3 森林生物量变化驱动因子整理 将 1970—2007 年分成 1970—1987 年、1987—1997 年和 1997—2007 年 3 个时间段, 建立生物量变化驱动模型. 每个时间段的自变量因子获得方法为: 气象因素取后一时间段的平均值减去前一时间段的平均值, 经营措施同时考虑两个时间段的值, 社会经济因素中人口密度的变化采用后一时间段减去前一时间段的值. 具体实施方法见表 1.

1.2.4 变量投影重要性指标 (VIP) 计算 由于本文收集的样本数较少, 所以采用偏最小二乘回归方法. 首先采用 bootstrap 统计检验方法对变量进行筛选, 然后利用筛选出的自变量进行偏最小二乘回归, 其中判定提取的成分数利用交叉有效性检验的方法^[29-31]. 在此过程中, 将变量投影重要性指标 VIP_j^[24]按下式进行计算:

$$VIP_j = \sqrt{\frac{p}{Rd(Y; t_1, t_2, \dots, t_m)} \sum_{h=1}^m Rd(Y; t_h) w_{hj}^2}$$

式中: p 为自变量的个数; m 为提取的有效成分个数;

$Rd(Y; t_1, t_2, \dots, t_m) = \sum_{h=1}^m Rd(Y; t_h)$ 为 m 个成分 t_1, t_2, \dots, t_m 对 Y 的累计解释能力; $Rd(Y; t_h) = \frac{1}{q} \sum_{k=1}^q r^2(y_k, t_h)$ 为 t_h 对 Y 的累计解释能力; w_{hj} 为轴 w_h 的第 j 个分量^[29].

2 结果与分析

2.1 长白山林区森林生物量变化驱动模型

利用 bootstrap 变量筛选法对 1970—1987 年生

物量变化驱动因子进行筛选, 设置检验水平 $\alpha = 0.3$, 取 $B = 1000$ 次, 重复抽样次数 $n_B = 9$ 个. 其中日照、1970—1980 年采伐量、预算投资 3 个自变量未通过显著性检验, 拒绝域临界值见表 2.

同理, 对其他两个时间段的生物量变化驱动因子进行 bootstrap 检验, 其中 1987—1997 年中降水、1988—1990 年采伐量、1988—1990 年封山育林和人口密度 4 个变量未通过检验; 1997—2007 年中 1998—2000 年采伐量、2001—2007 年造林量和封山育林 3 个变量未通过检验. 利用通过检验的变量对 3 个时间段进行偏最小二乘建模, 其结果见表 3.

各时期生物量变化驱动模型分别为:

$$\text{VAROFBIO}_{1970-1987} = -73.9806 + 0.0212x_{11} - 2.1140x_{12} + 1.5021x_{13} + 1.1849x_{14} + 1.0691x_{15} + 6441.5350x_{16} + 1779.2370x_{17} + 287.9028x_{18}$$

表 2 1970—1987 年 $\alpha=0.3, B=1000$ 时 bootstrap 检验拒绝域临界值

Table 2 Rejection region and critical value of bootstrap tests when $\alpha=0.3, B=1000$ from 1970 to 1987

变量 Variable	回归系数 Regression coefficient	临界值 Critical value
积温 Temperature	0.300	0.140
降水 Precipitation	-0.263	0.173
日照 Sunshine	-0.047	0.129
1970—1980 年采伐量 1970-1980 harvest	0.140	0.154
1981—1987 年采伐量 1981-1987 harvest	0.249	0.068
1970—1980 年造林量 1970-1980 afforestation	0.369	0.203
1981—1987 年造林量 1981-1987 afforestation	0.205	0.121
预算内投资 Budget investment	0.077	0.092
人口密度 Population density	0.358	0.117
新增公路 New highway	0.557	0.351
育林基金 Silviculture fund	0.101	0.061

表 3 不同时间段偏最小二乘建模结果
Table 3 Modeling results of PLS of three periods

时间段 Time	建模样本 Modeling samples	提取成分数 Extracted compositions	R^2	RMSE	PRE
1970—1987	9	5	0.975	3.070	82.47
1987—1997	10	6	0.975	2.982	80.31
1997—2007	9	5	0.976	3.929	85.89

$PRE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (1 - abs(\frac{T_i - P_i}{T_i}) \times 100\%)$, $RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^n (T_i - P_i)^2}$,
 T 、 P 分别表示实际值和预测值 T and P meant measured and predicted value, respectively.

式中: x_{11} 为积温; x_{12} 为降水; x_{13} 为采伐量; x_{14} 为 1970—1980 年造林量; x_{15} 为 1981—1987 年造林量; x_{16} 为人口密度; x_{17} 为新增公路; x_{18} 为育林基金.

$$VARO_{1987-1997} = 34.6034 + 0.1362x_{21} + 31.6338x_{22} + 0.2310x_{23} - 2.5703x_{24} + 0.3200x_{25} - 0.1137x_{26} - 407.7960x_{27}$$

式中: x_{21} 为积温; x_{22} 为日照; x_{23} 为采伐量; x_{24} 为 1988—1990 年造林量; x_{25} 为 1991—1997 年造林量; x_{26} 为封山育林; x_{27} 为新增公路.

$$VARO_{1997-2007} = 40.9817 - 0.2256x_{31} - 0.6185x_{32} + 8.1681x_{33} - 306.9930x_{34} + 1.3723x_{35} - 544.5150x_{36} + 331.9303x_{37}$$

式中: x_{31} 为积温; x_{32} 为降水; x_{33} 为日照; x_{34} 为 2001—2007 年采伐量; x_{35} 为 1998—2000 年造林量; x_{36} 为人口密度; x_{37} 为新增公路.

2.2 长白山林区森林生物量变化驱动因子 VIP 值
构建模型的 PLS 分析过程中,自变量投影重要性指标 VIP 值见图 2.

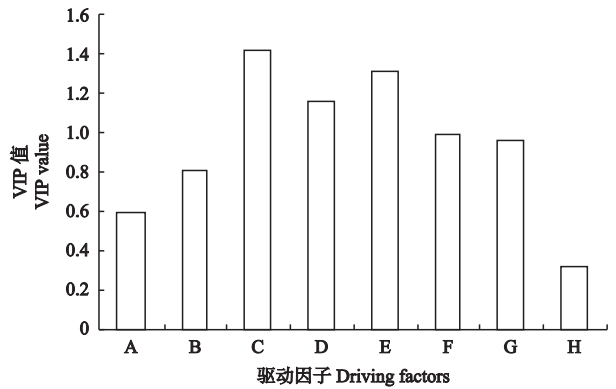


图 2 1970—1987 年自变量投影重要性指标 VIP 值
Fig.2 VIP values from the variable projection from 1970 to 1987.
A: 温度 Temperature; B: 降水 Precipitation; C: 1981—1987 年采伐量 Harvest from 1981 to 1987; D: 1970—1980 年造林量 Afforestation from 1970 to 1980; E: 1981—1987 年造林量 Afforestation from 1981 to 1987; F: 人口密度 Population density; G: 新增公路 New highway; H: 育林基金 Silviculture fund.

由图 2 可以看出,对 1970—1987 年生物量变化起重要作用的因子为:80 年代经营措施(依次为 1981—1987 年采伐量,1981—1987 年造林量)、70 年代经营措施(主要为 1970—1980 年的造林量)、社会经济变化(主要为人口密度变化)、气象条件变化. 1987—1997 年和 1997—2007 年自变量 VIP 见表 4.

从表 4 可以看出,影响 1987—1997 年间生物量变化的因子按重要性依次为:80 年代经营措施(主要为 1988—1990 年造林量)、社会经济因素(主要为 1991—1997 年新增公路)、气象条件变化(主要为平均日照变化). 对 1997—2007 年间生物量变化起重要作用的因子依次为:社会经济因素(人口密度变化)、气象条件变化(平均降水和平均积温)、90 年代经营措施(1998—2000 年造林量).

2.3 长白山林区森林生物量驱动分析

将每个时期的所有驱动因子的 VIP 值按经营措施、社会经济因素和气象条件分别加以分析,得图 3.

表 4 1987—1997 年和 1997—2007 年自变量 VIP 值
Table 4 VIP values during 1987—1997 and 1997—2007

1987—1997		VIP	1997—2007		VIP
平均积温 Average temperature	perature	0.90	平均积温 Average temperature	perature	1.01
平均日照 Average sunshine	shine	1.17	平均降水 Average precipitation	precipitation	1.14
1991—1997 年采伐量 1991—1997 harvest	量	0.35	平均日照 Average sunshine	shine	0.69
1988—1990 年造林量 1988—1990 afforestation	量	1.36	2001—2007 年采伐量 2001—2007 harvest	量	0.80
1991—1997 年造林量 1991—1997 afforestation	量	0.79	1998—2000 年造林量 1998—2000 afforestation	量	1.03
1991—1997 年封山育林 1991—1997 closing	量	0.74	人口密度 Population density	密度	1.48
1991—1997 年新增公路 1991—1997 new highway	量	1.29	1998—2000 年新增公路 1998—2000 new highway	量	0.56

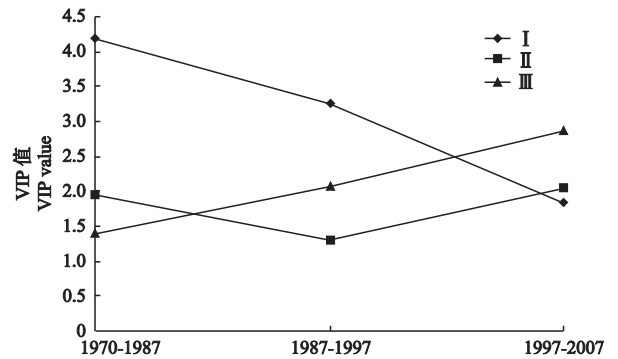


图 3 驱动因子影响程度比较
Fig.3 Comparison of impact degree for driving factors.
I :经营措施 Management measures; II :社会经济 Socio-economic; III :气象因素 Meteorological factors.

从图 3 可以看出, 1970—1987 年间, 对长白山林区森林生物量变化的影响因素中, 经营措施及社会经济这两个非自然因素的作用要远大于气象变化即自然因素的作用, 而到了 1997—2007 年间, 气象因素对长白山林区森林生物量变化的影响程度要大于经营措施和社会经济因素. 由此可以看出, 1970—2007 年间, 人为因素对森林生物量的变化所起的作用是一个由强到弱的过程, 而自然因素的影响程度是一个逐渐增强的过程.

3 结论与讨论

本文应用偏最小二乘算法对 1970—2007 年长白山林区分 3 个时间段建立了森林生物量变化驱动力模型, 利用 bootstrap 方法对生物量变化的驱动因子进行了筛选, 并采用计算 VIP 值的方法定量刻画了各时期各驱动因子所起作用的重要程度. 结果表明, 1970—2007 年间, 森林经营措施对该区域森林生物量变化的影响程度 (VIP 值) 逐渐降低, 气象因素对生物量变化的影响程度逐渐增加, 并且在 20 世纪 90 年代末气象因素的 VIP 值超过了经营措施的 VIP 值. 社会经济指标的 VIP 值 1970—1990 年逐渐降低, 1990—2007 年逐渐增大.

分析这几十年来国有林区发展战略可知, 建国初期到 20 世纪 80 年代, 国家对国有林区的大开发战略造成了该地区森林资源的锐减, 这一时期经营措施主要为采伐, 社会经济主要是木材经济, 因此非自然因素对 1970—1987 年间森林生物量变化的影响程度 (VIP 值) 大于自然因素. 1987—1997 年国家施行限额采伐, 并于 90 年代末实施天然林保护工程, 经营措施逐渐从采伐转变为对森林资源的保护, 社会经济逐渐转变为多种经营经济, 使得人为活动因素对森林生物量变化的 VIP 值降低, 而自然因素对森林生物量变化的 VIP 值逐渐增强并超过人为因素. 由此可见, 目前人类活动对长白山林区森林生物量变化的影响力已经小于森林生物量的自然生长能力, 说明国家对林区的森林保护政策已经起到了明显的效果. 因此, 要想使该区域森林生物量能继续提高并且最终保持稳定, 还需要对林区实施相应的保护措施.

本文定量分析了自然因素和人为因素对森林生物量变化影响的重要程度, 与已有的相关研究^[16-17]相比, 拓宽了森林生物量变化驱动分析内容, 引入了 VIP 值, 对森林生物量的变化驱动因子所起的作用程度进行了定量刻画, 为定量分析森林生物量的变

化提供了一条新的途径. 同时能更准确地掌握森林生物量变化的主要原因, 为区域森林资源可持续发展的规划和森林保护经营措施的制定提供依据.

参考文献

- [1] Liu G-W (刘广文). Forests and carbon cycle. *Modern Agricultural Science and Technology* (现代农业科技), 2007(19): 219–220 (in Chinese)
- [2] Xu D-P (许等平), Li H (李 晖), Zhi C-G (智长贵), et al. Study on forest biomass estimation method based on CEBERS-WFI remote sensing data. *Forest Resources Management* (林业资源管理), 2010(3): 104–109 (in Chinese)
- [3] Zhao S-D (赵士洞), Wang Y-X (汪业勛). Forests and carbon circulation. *Impact of Science on Society* (科学对社会的影响), 2001(3): 38–41 (in Chinese)
- [4] Brown S, Sathaye J, Canell M, et al. Mitigation of carbon emissions to the atmosphere by forest management. *Commonwealth Forestry Review*, 1996, **75**: 80–91, 109, 111–112
- [5] Dong JR, Kaufmann RK, Myneni RB, et al. Remote sensing estimates of boreal and temperate forest woody biomass: Carbon pools, sources, and sinks. *Remote Sensing of Environment*, 2003, **84**: 393–410
- [6] Hame T, Salli A, Andersson K, et al. A new methodology for the estimation of biomass of conifer-dominated boreal forest using NOAA AVHRR data. *International Journal of Remote Sensing*, 1997, **18**: 3211–3243
- [7] Guo Z-H (郭志华), Peng S-L (彭少麟), Wang B-S (王伯荪). Estimating forest biomass in western Guangdong using Landsat TM data. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2002, **22**(11): 1832–1839 (in Chinese)
- [8] Guo Q-X (国庆喜), Zhang F (张 锋). Estimation of forest biomass based on remote sensing. *Journal of Northeast Forestry University* (东北林业大学学报), 2003, **31**(2): 13–16 (in Chinese)
- [9] Ma W (马 炜), Sun Y-J (孙玉军). Forest biomass in China. *World Forestry Research* (世界林业研究), 2009, **22**(5): 71–76 (in Chinese)
- [10] Saatchi SS, Houghton RA, Dos Santos Alvala RC, et al. Distribution of aboveground live biomass in the Amazon basin. *Global Change Biology*, 2007, **13**: 816–837
- [11] Liu W-D (刘万德), Zang R-G (臧润国), Ding Y (丁 易). Three low-elevation tropical forest biomass variation in Hainan Island. *Journal of Natural Resources* (自然资源学报), 2009, **24**(7): 212–222 (in Chinese)
- [12] Zheng X-X (郑晓翾), Zhao J-M (赵家明), Zhang Y-G (张玉刚), et al. Variation of grassland biomass and

- its relationships with environmental factors in Hulunbeier, Inner Mongolia, China. *China Journal of Ecology* (生态学杂志), 2007, **26**(4): 533–538 (in Chinese)
- [13] Houghton RA. Aboveground forest biomass and the global carbon balance. *Global Change Biology*, 2005, **11**: 945–958
- [14] Whitmore TC. Tropical Rain Forests of the Far East. 2nd Ed. Oxford: Clarendon Press, 1984: 94–128
- [15] Hoshizaki K, Niiyama K, Kimura K, *et al.* Temporal and spatial variation of forest biomass in relation to stand dynamics in a mature, lowland tropical rainforest, Malaysia. *Ecological Research*, 2004, **19**: 357–363
- [16] Zhang H-F (张慧芳). Remotely Sensed Inversion of Forest Biomass and Its Temporal and Spatial Distribution Patterns Dynamics in Beijing. Beijing: Beijing Forestry University, 2008 (in Chinese)
- [17] Wang W-F (王维芳), Song L-N (宋丽楠), Sui X (隋欣). Estimation of forest biomass and its temporal and spatial distribution patterns in Maoershan Forest Farm, Heilongjiang Province. *Journal of Northeast Forestry University* (东北林业大学学报), 2010, **38**(1): 47–49 (in Chinese)
- [18] Yuan Z-Q (原作强), Li B-H (李步杭), Bai X-J (白雪娇), *et al.* Composition and seasonal dynamics of litter falls in a broad-leaved Korean pine (*Pinus koraiensis*) mixed forest in Changbai Mountains, Northeast China. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2010, **21**(9): 2171–2178 (in Chinese)
- [19] Zhang G-C (张国春), Liu Q-J (刘琪璟), Xu Q-Q (徐倩倩), *et al.* Soil nitrogen mineralization and primary productivity in *Rhododendron aureum* community of snowpacks in alpine tundra of Changbai Mountain. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2010, **21**(9): 2187–2193 (in Chinese)
- [20] Wang Z (王战), Xu Z-B (徐振邦), Li X (李昕), *et al.* The main forest types and their features of community structure in northern slope of Changbai Mountain. *Forest Ecosystem Research* (森林生态系统研究), 1980, **1**: 25–42 (in Chinese)
- [21] Cheng B-R (程伯容), Xu G-S (许广山), Ding G-F (丁桂芳), *et al.* Litterfall and its nutrient content of dominant types of forest ecosystem in Changbai Mountain. *Forest Ecosystem Research* (森林生态系统研究), 1984, **4**: 19–24 (in Chinese)
- [22] Hao Z-Q (郝占庆), Guo S-L (郭水良), Cao T (曹同). Plant Diversity and Distribution Pattern in Changbai Mountain. Shenyang: Liaoning Science and Technology Press, 2002 (in Chinese)
- [23] Xue D-Y (薛达元). Economic Valuation of Biodiversity: A Case Study on Changbaishan Mountain Biosphere Reserve in Notheast China. Beijing: China Environmental Science Press, 1997 (in Chinese)
- [24] Tong H-J (仝慧杰). Methods of Modeling Forest Biomass Based on Remote Sensing Information. Beijing: Beijing Forestry University, 2007: 36–50 (in Chinese)
- [25] Zeng W-H (曾文华). Texture Information Extraction in Remote Sensing Imageries with Gray Level Co-occurrence Matrix and Wavelet Transform. Changchun: Northeast Normal University, 2006: 10–29 (in Chinese)
- [26] Zhang Y-Y (张元元). The Research on the Remote Sensing Model for Forest Biomass in Daxingan Mountains. Haerbin: Northeast Forestry University, 2009: 27–30 (in Chinese)
- [27] Lang K-J (郎奎建). Linear consociation equation set model of forest ecological benefits. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2004, **15**(8): 1323–1328 (in Chinese)
- [28] Li Y (李勇), Shang G-J (商广娟). Legislative restrictions on the second line of linear equations model of identification and parameter estimation. *Journal of Beijing Normal University* (Natural Science) (北京师范大学学报·自然科学版), 1999, **35**(4): 447–454 (in Chinese)
- [29] Wang H-W (王惠文), Wu Z-B (吴载斌), Meng J (孟洁). Partial Least-Squares Regression: Linear and Nonlinear Methods. Beijing: National Defence Industry Press, 2006 (in Chinese)
- [30] Lindberg W, Persson JA, Wold S. Partial least-squares method for spectrofluorimetric analysis of mixtures of humic acid and ligninsulfonate. *Analytical Chemistry*, 1983, **55**: 643–648
- [31] Malthouse EC, Thmhane AC, Mah RSH. Nonlinear partial least squares. *Computers and Chemical Engineering*, 1997, **21**: 875–890

作者简介 杨金明,男,1986年生,硕士研究生.主要从事林业遥感与地理信息系统研究. E-mail: jinming0221@163.com

责任编辑 李凤琴
