中国林木生物质能源潜力测算及变化趋势

臧良震[1]，张彩虹[2]

(1清华大学中国农村研究院，北京100084；2北京林业大学经济管理学院，北京100083)

摘要：基于各省份林业统计数据，文中利用自下而上分析方法测算了中国林木生物质能源的资源潜力，并对变化趋势进行分析。结果表明：1993—2013年中国林木生物质能源资源潜力由0.78亿t标准煤增长到1.05亿t标准煤，20年间增长了34.62%；从资源构成来看，灌木平茬剩余物和采伐剩余物是林木生物质能源的主要供给来源；从区域变化来看，不同省份资源潜力呈现明显差异，但全国平均水平的逐步提高并非个别省份资源潜力大幅度提高使然，而是绝大部分省份资源潜力的共同增长促成了平均水平的连年提高。

林木生物质能源是一种蕴藏在森林中的能量，具有污染少、灰分低、可再生等特性，并且林木在生长过程中可以有效地吸收大气中的二氧化碳，因此林木生物质能源在温室气体减排方面发挥了重要作用。中国森林资源极为丰富，全国森林面积达到20769万hm^2，活立木总蓄积量达到164.33亿m^3[1]。丰富的森林资源为中国林木生物质能源的开发利用奠定了良好基础。许多研究者已对林木生物质能源资源的状况进行了分析和评价，主要侧重于微观区域林木生物质能源资源潜力评价[2—5]、具体类型林木生物质能源资源潜力评价[6—8]和基于资源收集半径的资源潜力评价[9—10]等几个方面。总体来看，现有研究具有较强的应用价值但也存在许多不足之处，如研究数据多采用截面数据、研究对象聚焦于某一具体区域、研究内容局限于某一具体能源类型等，并且在林木生物质能源资源的种类、数量、分布等方面还缺乏系统性分析，尤其是从全国各省份的角度探索资源量的区域分布及变化等问题还有待进一步探索。为此，本文将在对林木生物质能源资源类型进行界定的基础上，采用各省份的林业统计数据测算中国整体林木生物质能源的资源潜力，并对资源的构成及空间变化状况进行分析，为中国林木生物质能源的产业布局及发展提供相应的理论支持。

1指标选取与数据来源

1.1指标选取

本文采用自下而上的系统分析方法构建林木生物质能源资源潜力估算模型，根据来源不同将林木生物质能源来源划分为3个部分，即林木生长剩余物、林业生产剩余物和能源林采伐物。林木生长剩余物是指在非保护区域内生长的且尚未列入工业用材采伐的林木所产生的剩余物资源，主要产生于为促进生长而采取的一系列生产活动过程中，包括灌木平茬剩余物、经济林抚育管理剩余物和四旁树抚育修枝剩余物等。林业生产剩余物是在森林经营和生产过程中所产生的林木剩余物，主要包括苗木修枝、定杆及截杆剩余物，中幼龄林抚育剩余物，森林采伐剩余物，林产品生产加工剩余物。能源林采伐物是指以生产林木生物质能源为主要目的的林木经过采伐后所产生的林木生物质资源，通常情况下主要包括薪炭林和油料能源林2种类型，但当前油料能源林种类较多，且中国尚未对油料能源林进行系统的数据统计，因此本文只选取薪炭林。

1.2数据来源

本文分别通过灌木林地面积、经济林面积、四旁树株数、苗木产量、中幼龄林抚育面积、年森林采伐限额、商品材产量、竹材产量和薪炭林面积9个具体指标测算林木生物质能源资源潜力，数据主要来自于《全国森林资源清查结果报告》、《中国林业统计年鉴》和《森林采伐限额汇总表》。由于部分数据每5年统计1次且个别区域存在缺失数据，本文只选取1993年、1998年、2003年、2008年和2013年5个年份作为研究时间点，并选取除港、澳、台地区之外的其他31个省份为研究对象。

2研究方法

林木生物质能源资源潜力通常包括4个部分，即林木生物质资源实物总蕴藏量、林木生物质资源可获得量、林木生物质资源可利用量和林木生物质能源潜力总量。

2.1林木生物质资源实物总蕴藏量计算方法

林木生物质资源实物总蕴藏量是指理论上森林资源所拥有的可再生能源资源量，可通过以下公式计算得出：

$$L_a = \sum_{i=1}^{n} FR_i \cdot u_i + \sum_{j=1}^{n} TC_j \cdot v_j + EF \cdot w \quad (1)$$

式中，L_a 表示林木生物质资源实物总蕴藏量；i 和 j 表示第 i 和第 j 种林木生物质资源类型；FR_i 表示林地生长过程中第 i 种林木的资源量，具体通过灌木林地面积（hm^2）、经济林面积（hm^2）、四旁树株数（株）计算而得；TC_j 表示林业生产过程中所用的林木资源量，包括抚育间伐量、采伐量和加工量，具体通过苗木产量（株）、中幼龄林抚育面积（hm^2）、年森林采伐限额（m^3）、商品材产量（m^3）、竹材产量（根）计算而得；EF 表示薪炭林资源量，具体用薪炭林面积（hm^2）计算而得；u_i、v_j 和 w 表示不同种类林木生物质资源量的折算系数。林木的资源量数据可以直接通过相应的统计资料获取，因此计算林木生物质资源实物总蕴藏量的关键在于确定折算系数。本文通过文献研究后确定以下折算系数的具体取值（见表 1）[11-13]。

表 1　折算系数、可获得系数和利用系数

指标	灌木林地	经济林	四旁树	苗木	中幼龄林抚育	森林采伐	商品材	竹材	薪炭林
折算系数	10	7.2	2	0.125	7.2	1.17	0.9	5	16
可获得系数/%	33	100	100	100	10	58	20	20	25
可利用系数/%	56	20	33	67	222	6.14	26.14	26.14	100

注：在折算系数中，灌木林地、经济林、中幼龄林抚育和薪炭林的单位为 t/hm^2，四旁树、苗木和竹材的单位为 kg/株，森林采伐和商品材的单位为 t/m^3。

2.2林木生物质资源可获得量计算方法

林木生物质能源资源主要来自剩余物和能源林。以上所计算的林木生物质资源实物总蕴藏量中既包含剩余物和能源林部分，也包含其他工业生产活动所需的主干、果实等部分。因此可获得的剩余物和能源林这部分林木生物质资源量称为林木生物质资源可获得量，可通过以下公式计算得出：

$$L_b = \sum_{i=1}^{n} L_{ai} \cdot \lambda_i \qquad (2)$$

式中，L_b 表示林木生物质资源可获得量，λ_i 表示第 i 种林木生物质资源可获得系数（见表 1）。

2.3林木生物质资源可利用量计算方法

林木生物质资源可利用量是指林木生物质资源可获得量中可以用来进行能源生产的生物质总量，主要是通过林木生物质资源可获得量与可利用系数相乘获得：

$$L_c = \sum_{i=1}^{n} L_{bi} \cdot f_i \qquad (3)$$

式中，L_c 表示林木生物质资源可利用量，f_i 表示第 i 种林木生物质资源的可利用系数（见表 1）。

2.4林木生物质能源资源潜力总量计算方法

林木生物质能源资源潜力总量是指最终可获得的林木生物质资源量中所蕴含的能源总量，即将可利用资源量转换成标准煤之后的总量，由林木生物质资源可利用量与林木折标煤系数相乘获得。根据《中国能源统计年鉴》中所确定的各种能源折标煤参考系数，本文选取折标煤系数为0.571，即林木生物质能源资源潜力总量L_d可由以下公式计算得出：

$$L_d = 0.571 \times \sum_{i=1}^{n} L_{ci} \qquad (4)$$

2.5核密度估计法

本文利用核密度
估计法分析中国林木生物质能源资源
潜力总量收敛的动态性和长期趋势。假设X_1、X_2……X_n为独立同分布样本，则核密度经验分布函数为：

$$F_n(y) = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\theta_i(X_i \leqslant y) \tag{5}$$

式中，$F_n(y)$ 为林木生物质能源资源潜力总量经验分布函数；n 表示 31 个省份，X_i 表示第 i 个省份的林木生物质能源资源潜力总量；$X_i \leqslant y$ 为条件关系式，$X_i > y$ 时 $\theta_i(\cdot)=0$，$X_i \leqslant y$ 时 $\theta_i(\cdot)=1$。当核函数为均匀核时，核密度分布函数为：

$$f(x) = \frac{[F_n(x+h) - F_n(x-h)]}{2h} = \frac{1}{nh}\sum_{i=1}^{n}\eta_0\left(\frac{x-X_i}{h}\right) \tag{6}$$

式中，$f(x)$ 表示核密度分布函数，$\eta_0(\cdot)$ 表示核函数，h 表示带宽。若将核函数放宽则得到一般核密度分布函数形式：

$$f(x) = \frac{1}{nh}\sum_{i=1}^{n}\eta\left(\frac{x-X_i}{h}\right) \tag{7}$$

3结果与分析

3.1时间变化

通过以上计算公式，本文首先测算了1993年、1998年、2003年、2008年和2013年中国林木生物质资源实物总蕴藏量、可获得量和可利用量。具体来看，1993年中国林木生物质资源实物总蕴藏量为8.71亿t，1998年增加到9.81亿t，2003年略有降低(9.71亿t)，2008年后又开始增长(当年为11.34亿t)，2013年达到12.09亿t，总体呈现上升趋势。与林木生物质资源实物总蕴藏量的变化趋势相同，林木生物质资源可获得量在1993年为4.36亿t，1998年为4.92亿t，2003年降为4.74亿t，2008年后开始增加(当年为5.37亿t)，2013年达到5.68亿t。与前两者的变化状态有所不同，林木生物质资源可利用量呈持续上升趋势，2003年未出现下降，5个年份林木生物质资源可利用量分别为1.51亿t、1.69亿t、1.71亿t、1.92亿t和2.04亿t。总体来看，以上三者的变化较为稳定，未出现较大幅度的波动。

中国林木生物质能源资源潜力总量在1993—2013年整体呈现出逐渐上升趋势，1993年为0.78亿t标准煤，1998年达到0.86亿t，2003年仍为0.86亿t标准煤，2008年为0.99亿t，2013年达到1.05亿t，20年间增长了34.62%。

3.2资源结构

综合来看，林木生物质能源资源潜力总量的构成主要包括灌木平茬剩余物和采伐剩余物2类。5个年份灌木平茬剩余物林木生物质能源资源潜力在总量中所占比例平均值为50.27%，采伐剩余物为26.95%，二者合计高达77%。其他类型林木生物质能源资源按比例从高到低依次为薪炭林，经济林抚育管理剩余物，四旁树抚育修枝剩余物，林产品生产加工剩余物，苗木修枝、定杆及截杆剩余物，中幼龄林抚育剩余物，竹材加工剩余物，其所占比例分别为8.07%、6.29%、3.94%、1.91%、1.90%、0.50%和0.17%。

从各种资源的构成变化来看，除灌木平茬剩余物和采伐剩余物外，其他种类的林木生物质能源资源在潜力总量中所占比例变化较为平稳。灌木平茬剩余物林木生物质能源资源在潜力总量中所占比例在研究期内整体呈现上升趋势，只在2013年略有下降，1993年、1998年、2003年、2008年和2013年分别为40.3%、42.45%、55.37%、57.27%和55.98%；采伐剩余物林木生物质能源资源在潜力总量中所占比例呈现出先下降后上升的趋势，分别为32.04%、31.85%、21.65%、24.05%和25.18%。

3.3区域变化

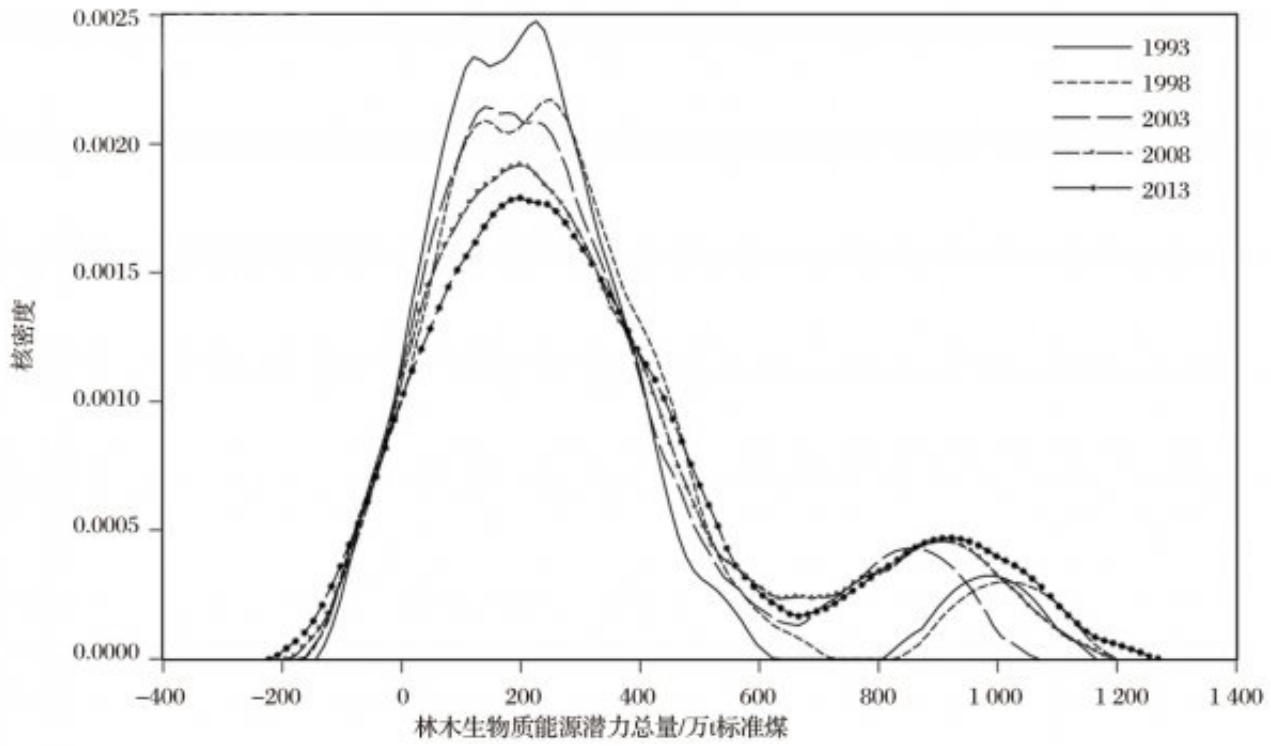

图1　中国林木生物质能源资源潜力总量的核密度估计

图1反映了中国林木生物质能源资源潜力总量的核密度估计曲线，横轴表示林木生物质能源资源潜力总量，纵轴表示核密度。总体来看，中国林木生物质能源资源潜力总量的区域变化呈现出以下特征。

首先，不同省份的林木生物质能源资源潜力总量存在明显差异。从图1中可以看出，5条曲线均呈现“双峰”分布态势，2个主峰之间距离较远，对应的核密度值差异较大，并且第1主峰所对应的林木生物质能源资源潜力总量较低，第2主峰对应的值较高。这充分表明，各省份的林木生物质能源资源潜力总量在分布方面存在较大差异，且绝大部分省份林木生物质能源资源潜力均处于较低水平，只有少部分省份处于较高水平。从5年平均值来看，林木生物质能源资源潜力总量较高的地区主要包括四川、云南、西藏、广西等西南地区省份以及内蒙古自治区，较低的区域主要包括海南、江苏、宁夏、北京等省市。

其次，大部分省份的林木生物质能源资源潜力总量逐步增加。1993—2013年5条曲线均缓慢地向右移动，尤其是第1主峰所对应的林木生物质能源资源潜力总量在不断增加，绝大部分省份均分布在第1主峰所对应的资源量周围。这表明，绝大部分省份的林木生物质能源资源潜力总量呈现出缓慢增长趋势。

再次，大部分省份林木生物质能源资源潜力总量的共同增加是促使全国平均水平逐步提高的主要原因。从图1中可以看出，1993—2013年第1主峰两侧的曲线逐步变宽，各省份林木生物质能源资源潜力总量的差异在逐步加大，但是变动幅度较小。与此同时，核密度估计曲线右侧部分变化幅度较大，但是仅有少数省份分布在第2主峰周围。这说明，长期以来中国林木生物质能源资源潜力总量的增加主要源于绝大部分省份资源潜力水平的共同提高，个别省份的大幅增加是导致各省份之间资源潜力总量存在差距的主要原因。

4结论与展望

本文运用自下而上分析方法对中国林木生物质能源资源潜力进行了测算，结果表明：1)在资源总量方面，中国林木生物质能源资源实物总蕴藏量、林木生物质能源资源可获得量、林木生物质能源资源可利用量和林木生物质能源资源潜力总量总体上呈现出上升的变化趋势，1993—2013年林木生物质能源资源潜力总量由0.78亿t标准煤增长到1.05亿t标准煤，20年间增长了34.62%；2)在结构方面，林木生物质能源资源潜力总量的构成主要包括灌木平茬剩余物林木生物质能源资源和采伐剩余物林木生物质能源资源，两者合计所占比例高达77%；3)在区域分布变化方面，1993—2013年虽然不同省份林木生物质能源资源潜力总量呈现明显差异，但是绝大部分省份表现出逐步递增的变化趋势，并且资源量的增加主要来源于绝大部分省份资源潜力水平的逐步共同提高，个别省份的大幅提高是省份之间存在差距的主要原因。整体而言，中国林木生物质能源资源潜力巨大，资源潜力持续增加并且变化稳定，稳定的资源条件为林木生物质能源的开发提供了良好基础。在林木生物质能源开发过程中，一方面应着重开发利用资源潜力较大的灌木平茬剩余物和采伐剩余物，另一方面也应根据区域内资源潜力总量水平建立长期稳定的供给机制，实现林木生物质能源与其他能源的互补发展。

参 考 文 献

[1] 国家林业局．全国森林资源清查结果报告［M］．北京：中国林业出版社，2013.

[2] XUE Z, QU L Q, YANG X S. Potential production and spatial distribution of hybrid poplar as a biofuel crop in Connecticut, USA［J］. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2014, 7 (2): 10 – 18.

[3] PAREDES – SANCHEZ J P, GARCIA – ELCORO V E, ROSILLO – CALLE F, et al. Assessment of forest bioenergy potential in a coal – producing area in Asturias (Spain) and recommendations for setting up a Biomass Logistic Centre［J］. Applied Energy, 2016, 171 (6): 133 – 141.

[4] 邢红，赵媛，王宜强．江苏省南通市农村生物质能资源潜力估算及地区分布［J］．生态学报，2015，35（10）：3480 – 3489.

[5] 米锋，潘文婧，陈凯，等．内蒙古通辽地区农业生物质资源开发利用及其经济效益分析［J］．干旱区资源与环境，2014，27（9）：44 – 49.

[6] DUARTE A, SARACHE W, COSTA Y. Biofuel supply chain design from coffee cut stem under environmental analysis［J］. Energy, 2016, 100 (4): 321 – 331.

[7] 吴志庄，夏恩龙，王树东，等．中国竹类生物质能源开发利用及前景展望［J］．世界林业研究，2013，26（2）：60 – 64.

[8] 周本智，傅懋毅，杨校生，等．我国能源竹类植物资源及其开发潜力［J］．世界林业研究，2006，19（6）：49 – 52.

[9] ZHANG L, ZHANG C H, ZANG L Z. Case studies on biofuel supply logistics for forest bioenergy in China［C］//LISS 2013: Proceedings of 3rd International Conference on Logistics, Informatics and Service Science. Springer – Verlag Berlin Heidelberg, 2015: 1221 – 1225.

[10] 王武魁，苏贤明，施海，等．北京林业生物质资源空间密度分布计算及加工点选址优化［J］．北京林业大学学报，2010，32（11）：71 – 79.

[11] 中国林木生物质能源资源研究专题组．中国林木生物质能源资源培育与发展潜力调查［J］．中国林业产业，2006（1）：12 – 21.

[12] 刘刚，沈镭．中国生物质能源的定量评价及其地理分布［J］．自然资源学报，2007，22（1）：9 – 19.

[13] 吕文，王春峰．中国林木生物质能源发展潜力研究［J］．中国能源，2005，27（11）：21 – 26.

原文地址：http://www.china-nengyuan.com/tech/148287.html