

生态因素下森林生物质动态潜力研究

蒲刚清¹, 刘贞², 汪毅霖³

(1.重庆房地产职业学院营销系, 重庆401331; 2.重庆理工大学管理学院, 重庆400054; 3.西南政法大学经济学院, 重庆401120)

摘要: 2050年生物质能将占人类总能源消耗的50%以上, 其开发与利用成为解决能源危机及实现可再生能源总量分配目标的关键。考虑林业结构、采伐剩余物是否保留及地力发展等因素, 设计11种情景对其潜力进行探究; 分析不同因素的影响效率, 提出相关林业建设和产业发展建议。考虑采集运输及存储等技术水平, 探究产业原料实际供给情况。生态结构调整的逆向作用较小, 而采伐剩余物保留的较大。地力水平提升可显著提高我国生物质可利用潜力。考虑生态因素, 2020、2030和2050年的森林生物质潜力分别为32806.92万吨~36880.68万吨、38730.14万吨~45922.51万吨和41793.57万吨~50862.63万吨, 分别是传统理论值的1.04~1.17倍、1.16~1.38倍和1.13~1.37倍。考虑技术水平时, 其潜力是传统理论值的72.41%、81.32%和81.03%。

2013年, 我国人均GDP约为6700美元, 我国原油及天然气对外依存度分别为58%及31.6%。未来, 我国人均能源消费量将继续快速增加。联合国能源署预计, 到2050年生物质能将供给全球能源的50%以上。许多学术专家和研究机构对生物质能发展抱有极高的期望[1-4], 生物质能已然成为许多国家的能源消费支柱[5-7]。各国陆续制定和执行生物质能发展计划, 以推进其开发和利用[8-9]。第三代生物质能技术的发展及我国能源结构中生物质能的发展失衡[10-12], 为我国生物质能发展提供了契机; 发展生物质能已然成为应对我国能源危机及实现可再生能源总量分配目标的重要途径; 而发展生物质能的前提是对其生物质潜力进行测量, 为其产业发展提供基础数据。在对森林生物质的潜力进行理论测算时, 通常考虑林种类别、不同林种的面积及其相对应的剩余物系数等因素, 测算当前或以往的潜力状况[13-18]。在此基础上, 亦有学者考虑木材加工对于森林生物质潜力的影响[19-24]。同时, 不少学者从生态角度出发, 研究采伐剩余物保留与否对地力水平发展的影响, 以探究生物质潜力的变化[25-38]。

在森林生物质潜力方面, 我国一般从林种面积、对应生物质系数、采伐量、采伐剩余物系数、木材量与木材加工系数等方面入手, 探究各历史年限的生物质潜力。国外偏重于研究生态因素对潜力评估的影响, 而国内偏重于研究对采伐迹地的物理、化学和生物因素的影响。本文拟在传统的理论研究基础上, 以生态要求为出发点, 依据我国森林建设规划, 考虑林种结构、采伐剩余物管理方法、地力水平发展及技术水平等因素, 对森林生物质能潜力进行动态评估; 对比单因素影响下的潜力, 探究不同的生态因素的影响程度和影响方向; 探究不同生态因素组合下的森林生物质潜力, 评估其潜力发展态势; 对比传统理论值, 探究其理论值在森林建设动态发展过程中的有效性; 考虑技术水平, 为我国森林生物质能源产业的原材料供应能力提供基础数据。

一、能源潜力情景仿真设计

(一) 森林生物质能潜力情景设计

依据我国《森林法》, 森林种类分为防护林、特种用途林、用材林、薪炭林及经济林5类; 其中, 防护林和特种用途林为公益林, 用材林、薪炭林及经济林为商品林。森林生物质潜力的影响因素包括林种结构、采伐剩余物的保留方法及地力水平的发展状态3类。其中, 林种结构包括传统结构和生态结构2类; 采伐剩余物的管理方法包括保留和不保留2类; 地力水平发展包括国内发展水平、国际平均水平和国际先进水平3类。为探究不同影响因素对于森林生物质潜力的影响方向和影响效率, 本文设计了5种基于单因素影响下的森林生物质潜力的仿真情景。情景1为基础情景, 研究传统林种结构、采伐剩余物不保留及地力水平处于国内发展水平时的森林生物质潜力; 情景2为生态结构情景, 研究生态林种结构、采伐剩余物不保留及地力水平处于国内发展水平时的森林生物质潜力; 情景3为采伐剩余物保留情景, 研究传统林种结构、采伐剩余物保留及地力水平处于国内发展水平时的森林生物质潜力; 情景4为地力水平发展情景, 研究传统林种结构、采伐剩余物不保留及地力水平处于国际平均发展水平时的森林生物质潜力; 情景5亦为地力水平发展情景, 不过研究的是传统林种结构、采伐剩余物不保留及地力水平处于国际先进水平时的森林生物质潜力。本文拟对比不同情境下的森林生物质潜力, 探究3种影响因素对于我国森林生物质潜力的发展的影响方向和影响效率, 从而为我国林业建设和生物质能源产业发展提供参考依据。

为探究森林生物质生态潜力, 考虑不同因素组合影响下的森林生物质的生态潜力, 另设计了6种仿真情景。情景6为生态结构国内情景, 研究生态林种结构、采伐剩余物不保留及森林地力水平处于国内发展水平的森林生物质潜力; 情景7为生态结构国际1情景, 研究生态林种结构、采伐剩余物不保留及森林地力水平处于国际平均水平的森林生物质潜力; 情景8为生态结构国际2情景, 研究生态林种结构、采伐剩余物不保留及森林地力水平处于国际先进水平的森林生

物质潜力；情景9为生态保留国际1情景，研究生态林种结构、采伐剩余物保留及森林地力水平处于国际平均水平的森林生物质潜力；情景10为生态保留国际2情景，研究生态林种结构、采伐剩余物保留及森林地力水平处于国际先进水平的森林生物质潜力；情景11为生态保留国内情景，研究生态林种结构、采伐剩余物保留及森林地力水平处于国内发展水平的森林生物质潜力。

（二）森林生物质潜力测算模型

构建生态角度下的森林生物质潜力模型：

$$P_n^B = \sum_{i=1}^5 [\varphi(S_n^i \times Y_n^i \times R^m) - \delta(Q_n^h \times R^{m,h})] + \lambda(R_n^{m,p} \times Q_n^p) \quad (1)$$

其中， P_n^B 表示报告期第 n 期森林生物质潜力总量； S_n^i 、 Y_n^i 及 R^m 分别表示第 i 种林种在报告期第 n

期的面积,单位面积林种生物质重量及其剩余物系数; Q_n^h 及 $R^{m,h}$ 分别表示第 n 期木材采伐量及采伐剩余物系数; $R_n^{m,p}$ 及 Q_n^p 分别表示加工剩余物系数及木材加工量; φ 、 δ 及 λ 分别为情景系数,依据不同的情景要求,采用不同的数值。

2. 不同林种面积模型

$$S_n^i = S_{n-1}^i + p_n^i (S_n - S_{n-1}) \quad (2)$$

其中, S_n^i 和 S_{n-1}^i 分别表示第 n 期及第 $n-1$ 期,第 i 种林种的面积; S_n 和 S_{n-1} 分别表示第 n 期和第 $n-1$ 期森林总面积; p_n^i 表示第 i 种林种在 n 期中所占森林新增面积比例。

3. 林种结构比例预测模型

公益林的建设目标以生态建设为主,而商品林以经济建设为主。依据历史数据,从经济方面考虑时偏重商业林的建设,而从生态方面考虑时偏重公益林的建设。采用最大结构与最小结构的配比,能强化两种建设目标下两种林分的结构区别。

$$a = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & \cdots & p_{15} \\ p_{21} & p_{22} & \cdots & p_{25} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ p_{n1} & p_{n2} & \cdots & p_{n5} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$a_{\text{mod1}}^i = \begin{bmatrix} \min(p_{11}, p_{21}, \dots, p_{n1}) \\ \min(p_{12}, p_{22}, \dots, p_{n2}) \\ \min(p_{13}, p_{23}, \dots, p_{n3}) \\ \max(p_{14}, p_{24}, \dots, p_{n4}) \\ \max(p_{15}, p_{25}, \dots, p_{n5}) \end{bmatrix}^{-1} \quad (4)$$

$$a_{\text{mod2}}^i = \begin{bmatrix} \text{average}(p_{11}, p_{21}, \dots, p_{n1}) \\ \text{average}(p_{12}, p_{22}, \dots, p_{n2}) \\ \text{average}(p_{13}, p_{23}, \dots, p_{n3}) \\ \text{average}(p_{14}, p_{24}, \dots, p_{n4}) \\ \text{average}(p_{15}, p_{25}, \dots, p_{n5}) \end{bmatrix}^{-1} \quad (5)$$

其中, a 表示5种林种第 n 期的新增结构系数初始矩阵; p_{ni} 系 n 排 i 列指标值,表示第 i 种林种在第 n 期的林种新增比例; p_{n1} 、 p_{n2} 、 p_{n3} 、 p_{n4} 和 p_{n5} 分别表示薪炭林、经济林、用材林、防护林和特用林的在第 n 期的新增比例; a_{mod1}^i 和 a_{mod2}^i 分别表示生态结构情景和传统结构的系数重构初始矩阵。对3种情景系数矩阵进行归一化处理,模型如下:

$$a'_{\text{mod1}} = (a_{\text{mod1}}^i / \sum_{i=1}^5 a_{\text{mod1}}^i) \quad (6)$$

$$a'_{\text{mod}2} = (a_{\text{mod}2}^i / \sum_{i=1}^5 a_{\text{mod}2}^i) \quad (7)$$

其中, $a'_{\text{mod}1}$ 和 $a'_{\text{mod}2}$ 分别为归一化后生态结构和传统结构系数矩阵。

4. 木材采伐总量预测模型

$$Y_n = A_n \times U_n^i \quad (8)$$

其中, Y_n 指第 n 期的木材采伐量; A_n 为第 n 期的森林覆盖面积; U_n^i 为第 n 期的单位面积木材产量。第 6 次到第 8 次的全国森林资源清查报告, 我国林业木材产量由 $0.271 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ 逐渐提升到 $0.383 \text{ m}^3/\text{hm}^2$, 绝对量呈现上升趋势, 而相对量呈下降趋势。本文中的国内水平情景, 将利用上期单位产量、上期单位产量增量, 以及上期单位产量相对减少或相对增加量, 进行单位面积木材产量预测。此处理方式, 既可保证其增加趋势, 也可保证本期增加趋势的递减或递增趋势, 符合我国地力水平发展但发展速度下降的趋势。在国内水平情景下, 单位面积木材产量预测模型如下:

$$\begin{aligned} U_n^1 &= U_{n-1}^1 + (U_{n-1}^1 - U_{n-2}^1) - \\ &[(U_{n-2}^1 - U_{n-3}^1) - (U_{n-1}^1 - U_{n-2}^1)] = \\ &3U_{n-1}^1 - 3U_{n-2}^1 + U_{n-3}^1 \end{aligned} \quad (9)$$

其中, U_n^1 为国内水平情景下第 n 期单位面积木材采伐量, U_{n-1}^1 、 U_{n-2}^1 及 U_{n-3}^1 分别表示上期、 $n-2$ 期及 $n-3$ 期的单位木材产量; 此外, 为符合现实发展状况, 模型中前提条件要求面积木材产量随着年限的发展而增长, 或达到基本稳定而不改变状况; 当报告期单位面积木材产量 u_n^1 小于上期单位木材产量 u_{n-1}^1 时, 采用上期单位木材产量进行核定。同时, 为应对该模型无法满足地力水平持续发展的情况, 利用设计的国际平均水平情景及国际先进水平情景进行补充分析。此外, 因国内平均地力水平与国际水平及国际先进水平尚有一定发展差距, 2020 年的国际地力水平及国际先进地力水平仍采用国内平均水平。

二、生物质潜力情景仿真分析与评价

(一) 森林生物质潜力基础性测算

1. 主要年份不同林种面积及生长性生物质潜力

依据森林建设目标规划及我国森林发展现状[40]，采用直线增长方式进行测算，我国森林面积2020年将达到21490.92万公顷，2030年将达到23057.59万公顷，2050年将达到26190.92万公顷。依据国家统计局年鉴（2005—2013），获取各年份各林种的新增面积，依据公式（3）—（7）对传统林种结构和生态林种结构进行测算，并结合公式（2）测算的林种面积，测算主要年份不同林种结构下的各林种面积。我国森林在种植、生长和抚育过程中产生的生物质，不同学者[13, 17, 40-43]采用不同的生物质系数进行核算。本文依据相关文献对生物质系数进行加权平均，获得薪炭林、用材林、经济林、防护林及特用林的生物质能系数分别为8.30t/hm²、1.63t/hm²、0.62t/hm²、0.75t/hm²及0.75t/hm²。

2. 主要年份木材生产量及相关生物质潜力

依据第8次全国森林资源清查信息及国家统计局信息，我国2009—2013年单位面积木材生产量为0.383m³/hm²；折合系数0.6t/m³进行计算，依据公式（8）我国2012—2050年的木材生产量为4714.25万吨~6018.67万吨。森林采伐将产生大量的树梢、枝丫及树皮等剩余物，剩余物比例为0.35；采伐的木材进入制材厂，将产生锯末、截头、刨花等剩余物，剩余物比例为0.2[41, 44-45]。依传统理论测量，地力水平处于不发展状态，2012、2020、2030及2050年采伐剩余物和加工剩余合计分别为5725.86万吨、6036.08万吨、6479.11万吨和7356.16万吨。依据公式（1），对我国森林在种植、生长和抚育过程中产生的生物质，以及在采伐过程中产生的生物质和木材加工产生的生物质进行汇总，不考虑地力水平发展和采伐剩余物保留的森林生物质潜力，获得主要年份森林生物质潜力如表1所示。

表1 传统理论测量下我国森林生物质潜力10⁴ t

	2012年	2020年	2030年	2050年
传统林种结构	30 371.80	31 521.95	33 367.47	37 058.50
生态林种结构		31 213.06	32 837.16	36 856.98

(二) 森林生物质潜力情景测算

依据第6次到第8次全国森林资源清查信息及国家统计局年鉴信息，这3次清查单位面积木材生产量分别为0.271m³/hm²、0.332m³/hm²及0.383m³/hm²；依据公式（9），2020、2030及2050年单位木材生产量分别为0.45m³/hm²、0.49m³/hm²及0.49m³/hm²。我国现有蓄积量为89.79m³/hm²，世界平均水平为118m³/hm²[47]。同时，世界平均水平下的单位面积木材生产量为0.50m³/hm²，本文以0.53m³/hm²作为世界先进水平下单位面积木材生产量来进行核算。考虑地力水平发展的时间性及提升的可行性，2020年的木材产量系数无论是国际平均水平还是国际先进水平依旧使用国内平均水平的0.45m³/hm²进行核定。此外，采伐剩余物留地与不留地相比，其森林成长性生物质产量将提高到1.10倍[34]。采伐过程中产生的生物质留地，要求在生物质潜力中进行扣除；留地的采伐剩余物会提升采伐迹地的抗逆性和营养物质的输入，改善采伐迹地的地力水平，提升生物质的潜力，由此引发的生物质潜力提升将汇入生物质潜力中[47-49]。基于公式（1）的仿真情景系数概况如表2所示。

依据表2数据对森林生物质潜力进行情景测算，测算结果如图1所示。

表2 基于构建模型下的仿真情景系数概况

	2020年			2030年			2050年		
	ϕ	σ	λ	ϕ	σ	λ	ϕ	σ	λ
情景1	1.17	1.17	1.17	1.28	1.28	1.28	1.28	1.28	1.28
情景2	1.17	1.17	1.17	1.28	1.28	1.28	1.28	1.28	1.28
情景3	1.17	0.12	1.17	1.28	0.13	1.28	1.28	0.13	1.28
情景4	1.17	1.17	1.17	1.31	1.31	1.31	1.31	1.31	1.31
情景5	1.17	1.17	1.17	1.38	1.38	1.38	1.38	1.38	1.38
情景6	1.17	1.17	1.17	1.28	1.28	1.28	1.28	1.28	1.28
情景7	1.17	1.17	1.17	1.31	1.31	1.31	1.31	1.31	1.31
情景8	1.17	1.17	1.17	1.38	1.38	1.38	1.38	1.38	1.38
情景9	1.17	0.12	1.17	1.31	0.13	1.31	1.31	0.13	1.31
情景10	1.17	0.12	1.17	1.38	0.14	1.38	1.38	0.14	1.38
情景11	1.17	0.12	1.17	1.28	0.13	1.28	1.28	0.13	1.28

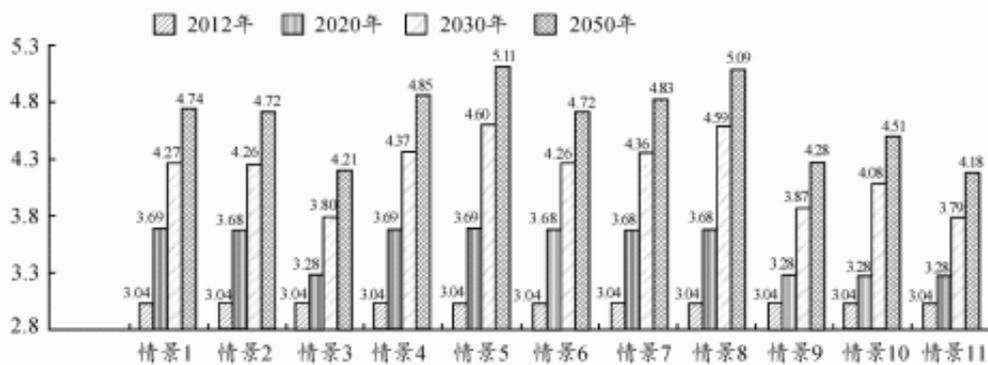


图1 不同仿真情境下的森林生物质潜力 (10⁸ 吨)

(三) 森林生物质潜力情景仿真分析

1. 基于单因素的效度影响分析

森林生物质潜力受到林种结构、地力水平发展状态及采伐剩余物是否保留等因素的影响，因此对比分析包括基础情景在内的单一因素影响下的5种情景结果，有利于探究不同因素对于生物质潜力的影响程度和影响方向。图2为单因素影响下森林生物质潜力情况。

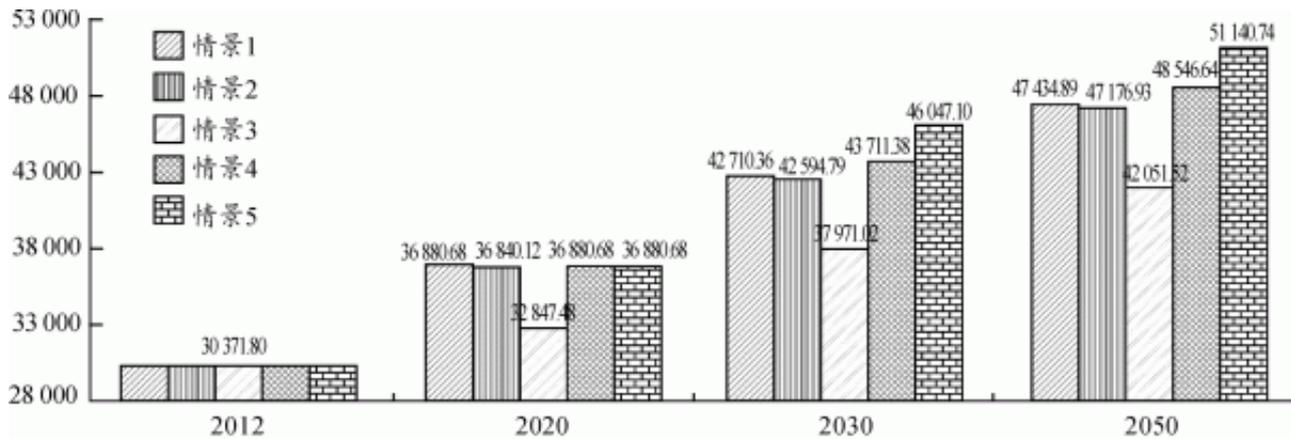


图2 单因素影响下森林生物质潜力分析(10⁴吨)

相对于基础情景而言，生态结构的调整与采伐剩余物保留，对我国森林生物质潜力具有逆向影响，2种森林建设政策的执行势必会造成我国森林生物质潜力的下降，进而影响我国生物质能源产业的原材料供给状况。生态结构的调整的逆向作用较小，而采伐剩余物保留政策的逆向作用较大。2020、2030及2050年，生态结构情景相对于基础情景，分别造成40.56万吨、115.57万吨及257.96万吨的生物质潜力下降，分别占比0.11%、0.27%和0.54%。促进新增森林面积的生态化，可积极促进生态环境的发展，同时对于产业发展影响较小，适用于森林的生态建设。而采伐剩余物保留情景，在2020、2030及2050年，造成4033.2万吨、4739.34万吨和5383.37万吨的森林生物质潜力下降，分别占比10.94%、11.10%和11.35%。采伐剩余物保留，有利于采伐迹地的土壤保护和二次林的生长，同时对于生物质能产业发展的原料供给造成较大影响。在产业发展原料供给充足的前提下，执行采伐剩余物留地的政策路径，可保证森林生态建设和生物质能产业的协同发展。在产业全面发展的未来，基于生态约束需继续执行采伐剩余物留地的森林建设政策；同时，由于采伐剩余物留地会造成森林生物质对产业原材料的供给不足，故应提高其他生物质来源的供给，例如农业生物质、城市有机废物及木质家具的回收等方面。

依据情景分析结果，地力水平提升可显著提高我国生物质可利用潜力。2020年的地力水平均考虑的是国内发展水平，不具有代表性。而2030年和2050年，相对于基础情景，地力水平处于国际平均水平，可分别增加1001.02万吨、1111.75万吨，均占比2.34%；地力水平处于国际先进水平，可分别增加3336.74万吨、3705.85万吨，均占比7.81%。提升地力水平成为提升我国生物质潜力的重要途径，地力水平提升涉及林种选择、抚育手段、病虫害防治和其他森林管理水平提升等多个方面。森林地力水平的提升，促进国内发展水平逐渐和世界平均水平靠近，保证了我国森林生物质潜力提升；而进一步提高地力水平，使其达到世界先进水平，增加林木蓄积量，会额外地带来2000余万吨的生物质潜力。

2.森林生物质生态潜力分析

森林生物质未来的潜力发展，会同时受到林种结构、采伐剩余物管理方法及地力水平发展的综合影响。通过因素组合的方法，可测算我国森林生物质生态潜力未来的发展态势；对比分析包括基础情景在内的7种仿真情景结果，可探究其理论潜力的发展趋势。

应用传统理论研究，而不考虑林种的生态结构要求、地力水平发展状况及剩余物保留，主要年份的森林生物质潜力分别为31521.95万吨、33367.47万吨和37058.50万吨。不同仿真情境下与传统理论测量结果的差异如图3所示。

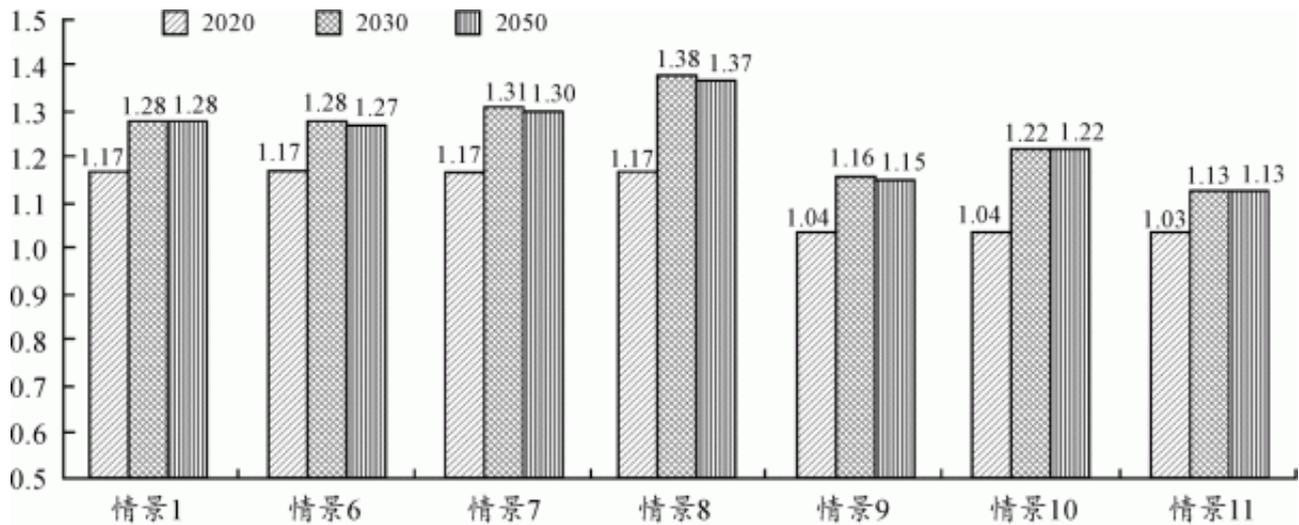


图3 不同仿真情境下与传统理论测量结果的差异

受到采集、运输及存储等环节的技术水平的限制，尽管生物质潜力开发可为100%，但生产过程中的供给只能达到65%[50]。2020年，在不同情景下，生物质生态潜力最高为36880.68万吨，最低为32806.92万吨，加权平均为35117.40万吨，实际上能达到22826.31万吨；2030年，在不同情景下的加权平均为41745.52万吨，实际上能达到27134.59万吨；2050年，在不同情景下的加权平均为46195.35万吨，实际上能达到30026.978万吨。2020、2030和2050年，森林生物质潜力对于生物质能源产业的实际供给能力分别为传统理论测量方法的72.41%、81.32%和81.03%。因此，提升技术水平，减少生物质从供应点到需求点的过程损耗，就能有效地提高生物质能源产业的原材料供应能力。

三、结论

应用传统测量方法测算，我国生物质潜力会因为森林面积的上升而逐渐上升，将由2012年的30371.80万吨在主要年份上升到31521.95万吨、33367.47万吨和37058.50万吨。综上所述，得出以下结论：生态结构调整的逆向作用较小，而采伐剩余物保留政策的逆向作用较大。地力水平的提升可显著提高我国生物质可利用潜力，具有正向影响。地力水平提高可作为提升森林生物质潜力的重要手段，而采伐剩余物保留政策的实行需要结合其他提升手段的执行，生态结构政策的执行应在森林建设中受到重视。考虑生态因素的影响，我国2020、2030和2050年的森林生物质潜力，分别是传统理论值的1.04~1.17倍、1.16~1.38倍和1.13~1.37倍。考虑采集、运输及存储等技术水平时，主要年份内森林生物质潜力对于生物质能源产业的实际供给能力是传统理论测量方法的72.41%、81.32%和81.03%。

参考文献：

- [1] ROBERTS J J, CASSULA A M, PRADO P O, et al. Assessment of dry residual biomass potential for use as alternative energy source in the party of General Pueyrredón, Argentina [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015, 41(1): 568 – 583.
- [2] WELFLE A, GILBERT P, THORNLEY P. Securing a bioenergy future without imports [J]. Energy Policy, 2014 (68): 1 – 14.
- [3] CORNELISSEN S, MICHÈLE K, DENG Y Y. The role of bioenergy in a fully sustainable global energy system [J]. Biomass and Bioenergy, 2012, 41(6): 21 – 33.
- [4] SEIFFERT M, KALTSCHMITT M, MIRANDA J A. The biomethane potential in Chile [J]. Biomass and bioenergy, 2009, 33(1): 564 – 572.
- [5] BP Amoco. Statistical Review of World Energy 2014 [R]. London: BP Amoco, 2014.
- [6] 夏方. 瑞典第一大能源——生物质能发展概况及其启示 [J]. 全球科技经济瞭望, 2013, 28(8): 71 – 76.
- [7] ANDERSSON K. Bioenergy the swedish experience, how bioenergy became the largest energy source in sweden [M]. Jönköping: Svebio, 2012.

- [8] 彭良才. 论中国生物能源发展的根本出路[J]. 华中农业大学学报(社会科学版), 2011(2): 1-6.
- [9] SPATARU C, ZAFEIRATOU E, BARRETT M. An analysis of the impact of bioenergy and geosequestration in UK future energy system [J]. Energy Procedia, 2014 (62): 733-742.
- [10] 李廉明, 余春江, 柏继松. 中国秸秆直燃发电技术现状化工进展[J]. 化工进展, 2010, 29(S1): 84-89.
- [11] 廖晓东. 我国生物质能产业与技术未来发展趋势与对策研究[J]. 决策咨询, 2015(1): 37-42.
- [12] 闫庆友, 陶杰. 中国生物质发电产业效率评价[J]. 运筹与管理, 2015, 24(1): 173-178.
- [13] 蔡飞, 王静, 史建军. 基于农林剩余物的河南省生物质能源生物质能资源潜力研究[J]. 北京林业大学学报(社会科学版), 2013, 12(2): 54-57.
- [14] 王效华. 江苏省生物质能资源调查与评估方案设计[J]. 农业工程学报, 2012, 28(4): 204-207.
- [15] 明庆忠, 郭树荣, 角媛梅. 山地高梯度森林生物质能效应研究(I): 研究方法[J]. 山地学报, 2011, 29(4): 409-416.
- [16] 明庆忠, 郭树荣, 角媛梅. 山地高梯度森林生物质能效应研究(II): 案例[J]. 山地学报, 2011, 29(4): 417-426.
- [17] 郑艳琳, 李福利, 刘芳. 山东省生物质能总量测算及其环境效益分析[J]. 安徽农业科学, 2011, 39(27): 16734-16735.
- [18] ISLAM S, AHIDUZZAMAN M. Biomass energy: Sustainable solution for greenhouse gas emission[J]. 2012, 1440(1): 23-32.
- [19] HALDER P K, PAUL N, BEG M R A. Assessment of biomass energy resources and related technologies practice in Bangladesh [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2014(39): 444-460.
- [20] 王晓明, 唐兰, 郝海青. 中国生物质资源潜在可利用量评估[J]. 三峡环境与生态, 2010, 32(5): 38-42.
- [21] VERKERK P J, ANTTILA P, EGGERS J. The realisable potential supply of woody biomass from forests in the European Union[J]. Forest Ecology and Management, 2011, 261(11): 2007-2015.
- [22] ĆOSIĆ B, STANIĆ Z, DUICA N. Geographic distribution of economic potential of agricultural and forest biomass residual for energy use: Case study Croatia [J]. Energy, 2011, 36(4): 2017-2028.
- [23] SIKKEMA R, FAAIJ A P C, RANTAC T, et al. Mobilization of biomass for energy from boreal forests in Finland & Russia under present sustainable forest management certification and new sustainability requirements for solid biofuels [J]. Biomass and Bioenergy, 2014, 71(12): 23-36.
- [24] 闫强, 王安建, 王高高. 全球生物质能资源评价[J]. 中国农学通报, 2009, 25(18): 466-470.
- [25] ASIKAINEN A, LIIRI H, PELTOLA S, et al. Forest Energy Potential in Europe (EU27) [M]. Joensuu: Finnish Forest Research Institute, 2008.
- [26] VASAITIS R, STENLID J, THOMSEN I M, et al. Stump removal to control root rot in forest stands [J]. Silva Fennica, 2008, 42(3): 457-483.
- [27] FERNHOLZ K, BRATKOVICH S, BOWYER J, et al. Energy from woody biomass: A review of harvesting guidelines and a discussion of related challenges [M]. Minneapolis: Dovetail Partners Inc., 2009.
- [28] WALSH D, STRANDGARD M. Productivity and cost of harvesting a stemwood biomass product from integrated cut-to-length harvest operations in Australian Pinus radiata plantations [J]. Biomass and Bioenergy, 2014(66): 93-102.
- [29] 赵康, 赵尘. 基于物质减量化原则的人工用材林采伐利用[J]. 西北林学院学报, 2009, 24(6): 204-207.
- [30] 潘辉, 黄石德, 张金文. 试论福建省桉树人工林的生态问题及其对策[J]. 中国生态农业学报, 2009, 17(3): 605-609.
- [31] 李静鹏, 徐明峰, 苏志尧, 等. 不同植被恢复类型的土壤肥力质量评价[J]. 生态学报, 2014, 34(9): 2297-2307.
- [32] CORBEELS M, MCMURTRIE R E, PEPPER D A, et al. Long-term changes in productivity of Eucalypt plantations under different harvest residue and nitrogen management practices: A modeling analysis [J]. Forest Ecology and Management, 2005, 217: 1-18.
- [33] 胡振宏, 何宗明, 范少辉. 采伐剩余管理措施对二代杉木人工林土壤全碳、全氮含量的长期效应[J]. 生态学报, 2013, 33(13): 4205-4213.

- [34] 翁贤权. 1代杉木采伐剩余物对2代杉木生长的影响[J]. 福建林业科技, 2013, 40(2): 24-27, 36.
- [35] 金文斌, 魏彦波, 张春雨. 基于森林生态系统管理的森林经营与传统森林经营的比较研究[J]. 浙江林业科技, 2010, 30(1): 48-52.
- [36] 孟庆军, 刘心娟, 路国兵. 抚育间伐对鲁中山区油松人工林生长的影响[J]. 林业科技开发, 2015, 29(1): 130-132.
- [37] 温小荣, 蒋丽秀, 刘磊. 江苏省森林生物量与生产力估算及空间分布格局分析[J]. 西北林学院学报, 2014, 29(1): 36-40.
- [38] 左舒翟, 任引, 王效科. 中国杉木林生物量估算参数及其影响因素[J]. 林业科学, 2014, 50(11): 1-12.
- [39] 胡锦涛. 携手应对气候变化挑战——在联合国气候变化峰会开幕式上的讲话[J]. 资源与人居环境, 2009(20): 14-15.
- [40] 吕文, 王春峰, 王国胜, 等. 中国林木生物质能源发展潜力研究(2)[J]. 中国能源, 2005, 27(12): 29-33.
- [41] 张希良, 吕文. 中国森林资源[M]. 北京: 中国农业出版社, 2008: 21.
- [42] 郭永伟. 山西林业剩余物能源化利用前景研究[J]. 经济问题, 2014(9): 123-125.
- [43] 马志强, 谢磊, 朱永跃. 我国生物质能开发利用现状[J]. 生产力研究, 2009(14): 106-117, 118.
- [44] 李静, 王兆君. 我国森林采伐剩余物利用研究[J]. 安徽农业科学, 2010, 38(7): 3787-3789.
- [45] 王志芳, 王飞, 李明. 林区森林采伐剩余物利用状况分析[J]. 中国林业经济, 2007(85): 17-19.
- [46] 耿国彪. 应对气候变化中国林业在行动[J]. 绿色中国, 2009(12): 22-27.
- [47] 崔飞, 邓湘雯, 邓东华, 等. 炼山造林后不同年龄杉木人工林林下植物多样性动态[J]. 中南林业科技大学学报, 2015, 35(6): 63-69.
- [48] 毛日华, 蔡东平, 吴高相, 等. 不同营林措施对马尾松天然更新的效果调查[J]. 现代农业科技, 2009(10): 33, 36.
- [49] 张鼎华. 皆伐炼山对林地养分元素资源迁移影响的研究[J]. 自然资源学报, 1997, 12(4): 343-348.
- [50] KUKRETY S, WILSON D C, ANTHONY W D, et al. Assessing sustainable forest biomass potential and bioenergy implications for the northern Lake States region, USA [J]. Biomass and Bioenergy, 2015, 81(10): 167-176.

原文地址: <http://www.china-nengyuan.com/tech/191215.html>