生物质原料供应链技术经济研究进展

马国杰[1, 2]，常春[1, 2]，陈俊武[1]

（1郑州大学化工与能源学院，河南郑州450001；2河南省杰出外籍科学家工作室，河南郑州450001）

摘要：生物质原料供应链是生物质资源转化的基础保障，是未来实现大规模生物质能源开发利用的关键所在。本文对生物质供应链相关技术问题进行了分析，分别介绍了生物质原料收获与收集、储存与预处理、运输等技术现状与存在的问题。同时，对供应链的技术经济性进行了综述，对比阐述了国内外采用的研究方法，通过建立定量化的数学模型来优化供应链的技术经济指标是当前研究的主要方式。国内外研究结果显示，生物质原料的收购价格、收集半径和收购模式是影响生物质供应链成本的关键因素。我国由于户均耕地占有面积小，生物质原料分散，生物质供应链是一个复杂的系统工程。在此基础上，进一步对生物质供应链的发展提出了展望，为生物质资源供应链的研究与发展提供参考和借鉴。

随着人们对生物质资源开发利用的重视，对生物质资源的需求也在不断增加。如何保证大量生物质资源的收集、储存以及运输等过程的顺利实施，已经成为生物质能源研究及应用领域中的重要课题。目前，生物质能源在我国能源消耗的比例仅占5%，而国外一些发达国家的生物质能源消耗占比可达20%。由此可见，我国对生物质能源的需求仍具有较大的空间[1-2]。

我国生物质资源量十分丰富，仅每年农作物秸秆产量可以达到7亿吨。随着人们对生物质原料需求的日益增加，生物质原料的供应链将成为决定生物质资源开发利用、实现工业化、商业化应用的重要基础保障。众所周知，虽然生物质原料来源广泛、数量巨大，但由于大多数生物质原料的密度较低，且分布分散，因此生物质原料的供应链过程，包括收集、运输、预处理，直至进入工厂的整个物流过程，已经成为影响原料成本的关键问题。例如，国内的许多生物质发电企业正是受制于原料供给不足而导致设备开工不足，企业亏损。由此可见，如何开发有效、经济且适用于不同种类的大规模生物质原料供应链系统显得尤其重要。据此，本文针对生物质供应链系统存在的问题进行分析，并综述近年来人们在生物质供应链研究的成果，从技术经济的角度，对生物质原料供应链的研究进行综述和展望，为生物质供应链的研究与应用提供参考和借鉴。

1生物质原料供应链

生物质原料资源种类众多，常见的生物质原料主要包括农业废弃物、林业废弃物、能源作物、藻类和城市固体废弃物等。在我国，生物质原料资源丰富，产能可相当于全国能源消费总量的30%左右。在实现生物质原料利用的过程中，生物质原料供应链是由生物质到生物燃料整个生产过程的桥梁。在整个物流系统中，主要包括生物质原料的收获与收集、原料储存、原料预处理、运输等步骤。保证整个物流有效、经济地运行，是实现生物燃料大规模商业化生产的关键所在[3]。

生物质原料的收获与收集是整个供应链的第一步，它是生物质从起始到储存的关键步骤，该步骤包括粉碎、收获、收集及打包等操作。储存是原料生物质保持稳定的关键步骤，在生物质进行预处理前，保持原料的稳定均一是生物质后续转化的物质基础。预处理步骤是通过物理、化学或生物的方法将生物质转化为更加稳定的形式，以利于运输和转化。运输是通过运输基础设施，如卡车、铁路、船运或管线等，将生物质运输至生物炼制厂。这些步骤构成了完整的生物质供应链，如图1所示[4]。

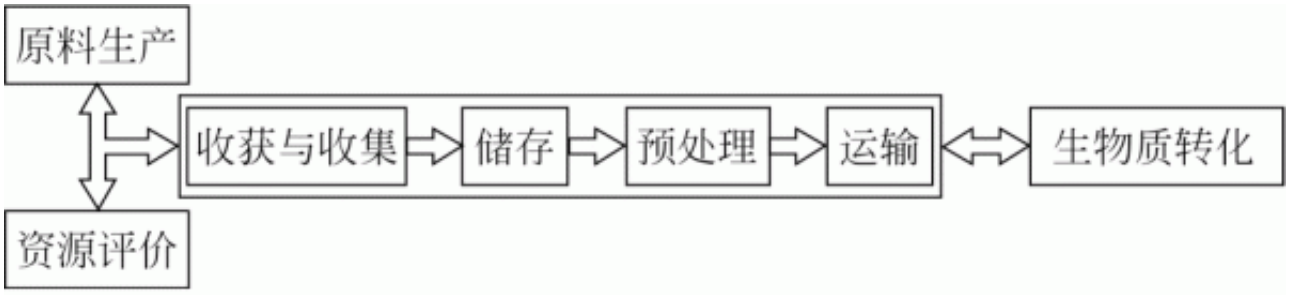

图1　生物质原料供应链

2生物质原料供应链技术

2.1收获与收集

生物质原料的收获与收集是供应链的首要环节。以秸秆原料为例，秸秆收割是整个原料收集过程的第一步，收割的方法和技术不仅影响着原料的储存、运输和加工，还对土壤的松紧和侵蚀有重要的影响[5]。

在机械化程度较高的美国，秸秆的收割过程通常分3步进行，第一步是联合收割机在行进过程中收割庄稼，收割剩余的生物质在收割机后排成一列；第二步由拖拉机牵引的打捆机将生物质进行打捆；第三步由拖拉机将打好的捆托运至田边。在操作上，可采用多程或单程操作[6]
。虽然这种收割方式已经比较成熟，但这种收割的方式仍存在以下弊端：①易造成原料夹带泥土和石块，污染原料；②需要专门的设备和劳力；③由于设备车辆频繁在田间移动，将导致土壤疏松度破坏，且不利于保持土壤中碳水平的稳定。同时，收割后的纤维素生物质原料通常以打捆的形式进一步收集，但目前的原料打包收集系统存在着诸如原料体积密度低、单位成本高、大规模处理困难等不足，尚难以满足未来大规模应用的要求。

在我国，废弃的秸秆由于得不到及时处理，很大一部分被焚烧或者抛弃。尤其随着农村青年劳力外出务工的增多，也不同程度增大了秸秆收集的难度，间接提高了原料的收集成本。为此，我国也在尝试推广应用机械代替人工收集秸秆，如近年来有研究者提出采用秸秆全自动收集粉碎致密成型联合机进行秸秆的收获与收集。该联合机能够将收集、粉碎和
致密成型同时
完成，收集的生物质以颗粒
的形式进行收集和暂存，有利于节省运输空间，降低运
输成本[7]
。然而，我国的机械化收集应用过程中仍存在着机械收集系统适应性差、打捆保形性不理想、易发生散捆等现象。

针对上述问题，开发高适应性的机械收集系统是当前需要解决的关键技术之一。国内外许多国家也正致力于新型收集系统的开发，以克服和解决目前原料收集存在的不足[8]。在此基础上，根据可持续收割技术的要求，在满足实用性、可持续性和经济性的前提下，大力开发大规模生物质原料收集的新模式，也将是今后研究的主要方向之一。

2.2原料储存和预处理

目前，原料的储存方式可分为干式和湿式两种，对于纤维原料如秸秆，通常以干式打包的形式进行储藏，即秸秆在打包前，要在田间自然风干至15%～35%的含水量范围，如果秸秆原料含水量过大，很容易造成秸秆的腐败，最终导致原料有效成分的流失。虽然这种储存方式已被成功开发并应用，但以这种方式储存原料的规模有限，难以满足未来大规模利用纤维原料进行生物炼制的需求。当储存原料在100万吨规模时，这种储藏方式将有可能不再实用，因此其他的储存方式应当给予考虑。

生物质造粒作为一种干式储存技术，能够有效地克服原料腐败流失的问题。经过造粒的原料不仅使原料不易自燃，而且可使原料密度增大，表面积降低。但是，目前生物质造粒的成本还比较高，因此现阶段还难以成为原料干式储存的主要方式。另外一种可替代的原料储存方式为湿式储存。湿式储存过程中，由于原料中湿度过高，原料极易腐败，所以可以通过青贮的方法来消除其中的氧气，以降低原料腐败变质。目前，青贮方法已成功应用于甜高粱和甘蔗渣的储藏，如果进一步降低建设和维护成本，该方法将可能成为解决储存中原料稳定性的有效方法。此外，原料储存场地也是一个需要考虑的问题。为了确保生物质能源企业生产的正常运行，生产企业需要考虑一定面积的原料储存区域，以备足一定时期生产所需的足够原料。这样不仅能够保证原料的持续供给，还有利于低价时收购备存原料，大幅度降低生物质原料的收购成本[8]。

为了便于生物质的运输和后续的生物转化过程，发展生物质原料预处理技术也十分必要。预处理技术是通过物理、化学或生物的方法将生物质转化为更加稳定的形式，以利于运输和转化。常见的方法有：致密化（压块、烘烤）、现场热解、研磨、干燥、化学处理、青贮、分级处理、混配等。但目前的预处理方法仍存在成本较高、效率低的不足。

因此，发展低成本的致密化技术是该领域研究的热点。此外，在原料储存过程中利用酸、石灰或臭氧对生物质原料进行预处理也是有益的尝试，这不仅可以强化生物质的物理结构的改变，还可以减少后续原料处理的费用。

2.3原料的运输

原料运输技术也是生物质原料供应链系统的重要技术之一。开发适用于不同尺寸、形状、质地的原料运输系统将有效地降低生物质原料的运输成本。由于生物质密度较低，大量生物质原料的运输将增加原料装卸及运输的费用。因此

上述的预处理技术可以有效降低原料的运输费用。此外，在原料运输技术的研究中，需要评估重型车辆对农村道路和运输网络的影响，同时还要考虑其他的运输方式。有研究者利用Arena系统软件，对生物质能供应链收集运输方式进行了仿真优化研究。仿真结果显示：不同的车辆运输速度和运输量的不同，对生物质原料整体收集运输过程的效率差异较大，采用运力大、速度快的公路交通运输工具有更高的运输效率和更好的能耗表现。但在实际情况中，农用车可以适应多样的道路条件、节省车辆购置费用，适合于短距离的初始阶段运输活动[9]。

3生物质原料供应链技术经济

生物质原料供应链模式的选择是保证供应链经济、高效实施的前提，建立良好供应链运行模式，是保证生物质原料物流从田间到生物炼制企业的重要环节。其中，生物质供应链的物流成本是最令人关注的问题，尤其对于生物质企业的战略决策尤为重要。依据供应链环节和生物质生命周期理论，国内外研究者对物流成本进行了许多研究，提出了不同的方法和研究思路，所得的结果为供应链的技术经济分析提供了重要参考依据。

在生物质原料供应链模式研究中，美国能源部曾提出了先进统一模式的原料供应体系。该原料供应体系中，原始的生物质资源可以转化为生物炼制企业的生产原料商品，并将有稳定、高密度、高质量的特点。该系统能够使难以利用或未充分利用的资源通过就地的生物质预处理站点转化为大量稳定、高密度的流动性原料，可以直至原料供应体系的终端[8]
。采用这种商品化原料的供应体系，不仅可以减少生物炼制企业的生产风险，还可以促进当地原料的收割方式，也有利于农作物种植的多样性和农作物轮种的实践操作。

美国能源部曾对不同生物质原料的供应链经济指标进行规划，并对供应链各个组成部分的费用进行了比较。图2和表1列举了木质生物质原料在热解转化途径中的物流成本[10]
。从图表中的数据可以看出，随着原料收集技术的进步，不同转化路径的原料供应链费用都能实现大幅度下降。但由于原料自身属性及转化加工方式的差异，不同原料的供应链费用也存在着一定差异，因此，针对不同的原料和转化路径，原料供应链的费用需要针对性地考虑[11]。

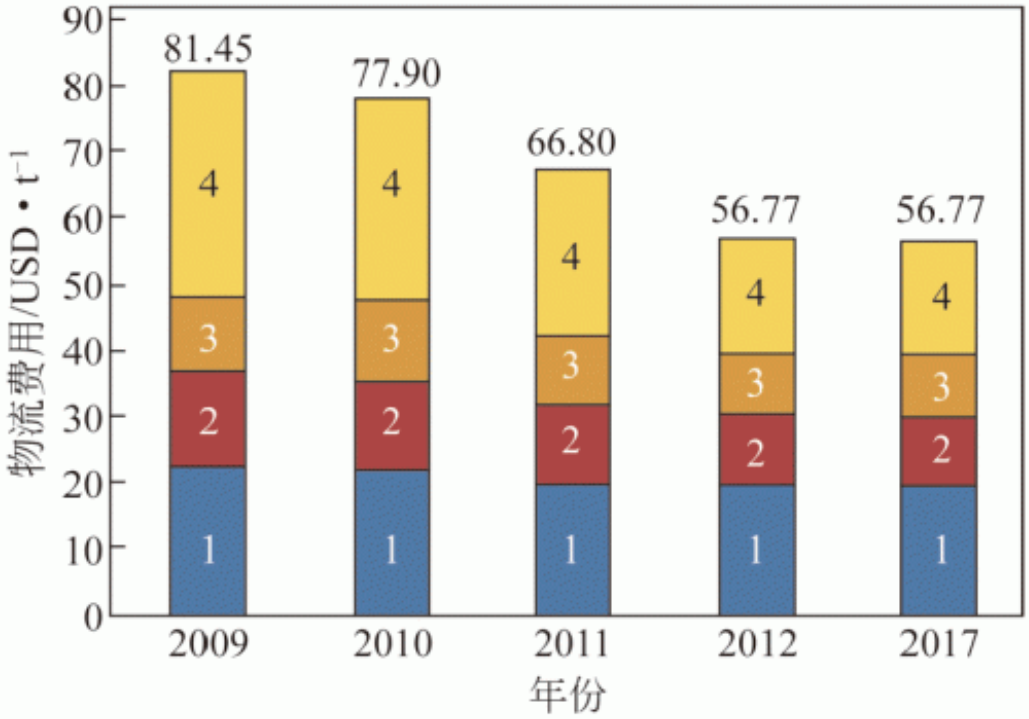

图2　用于生物质热解木质生物质原料的物流费用

1—收获与收集；2—着陆预处理；3—运输与处理；4—厂内接收与处理

表1　用于生物质热解木质生物质原料的物流费用明细（2007年美元基准）

年份/年	费用/USD·t⁻¹					
	原料供应链总费用	收获与收集	储存与运输	着陆预处理	运输与处理	厂内接收与处理
2009	81.45	22.30	0.00	13.60	12.50	33.05
2010	77.90	21.30	0.00	13.60	12.00	31.00
2011	66.80	19.40	0.00	12.20	10.50	24.70
2012	56.77	18.75	0.00	11.42	8.95	17.65
2017	56.77	18.75	0.00	11.42	8.95	17.65

此外，在生物质供应链物流成本的研究中，国外的研究大多通过建立定量化的数学模型来优化供应链的技术经济指标。如Thorsell等[12]
通过计算模拟了生物质原料的收集成本；Gronalt等[13]
通过创建新型模拟供应网络，研究林业生物质对运输成本的影响。近年来，一些新方法和理论在生物质供应链技术经济评价的研究中得到应用。Jensen等[14]

[15]提出了一种基于危险与可操作性分析（hazard and operability analysis，HAZOP）文献调研方法，并将其成功应用于生物质供应链的模型优化。通过HAZOP方法，能够有效地描述生物质供应链存在的危险性及后果，为供应链的发展和建设提供了建议。Lam等[16]提出了一种全面系统的消除瓶颈方法，通过将P-框图与持续性指数（SI）相结合，来明确生物质工业中的瓶颈，同时利用层次分析法可以确定经济可持续性、环境可持续性和社会可持续性的优先规模。

在我国，目前较缺乏生物质原料供应链技术经济性研究的系统成果。虽然很多生物质项目在启动前大都进行了相关的技术经济分析，但很少就未来生物质收储运的细节展开研究。近年来，随着生物质研究及应用的不断深入，国内学者在供应链技术经济领域也加大了研究力度。如檀勤良等[17]
针对1×30MW生物质发电企业为例，以生物质电厂利润最大为目标，对燃料的收集、运输、预处理、储存和使用各环节进行了研究，建立了多期非线性优化模型，其供应链模型如图3所示。通过优化计算得出：电厂收购农业剩余物与林业剩余物的最优价格分别为217元/吨和277元/吨。两种燃料之间的价差不能过大，否则会导致经纪人更倾向于收集某一种燃料。通过优化结果与企业实际运行结果的比较，可以发现我国生物质电厂的燃料收购和使用模式存在问题，主要表现在电厂没有充分发挥其在燃料供应链中的主导地位，从而导致原料供应的比例不合理，并由此造成成本的增加。

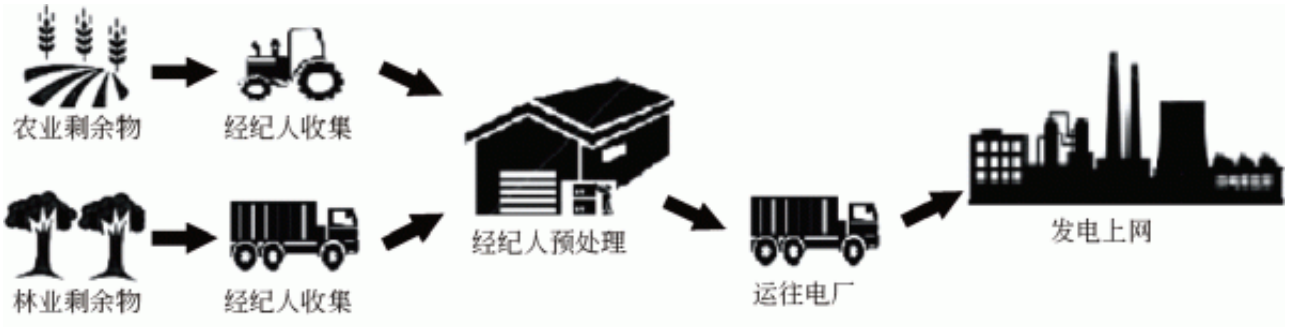

图3　生物质发电燃料供应链[15]

魏巧云[18]
对生物质发电秸秆供应链物流成本构成也进行了分析，研究表明：生物质发电企业在生物质秸秆供应链的地位并非主导或强势地位，这一定程度地降低了秸秆供应链的整体效益。各环节的成本结论分别为：原料打捆后，大捆要比小捆更加经济；同时，50km被认为是秸秆原料运送的临界运距，当运量一定时，运距小于50km时压缩物料反而增加了物流成本，因此可采用非压缩状态运输；当运距大于50km时，可以采用压缩后再运输，而且运距越长，原料压缩后的物料成本节约越显著。另外，秸秆的压缩密度为0.6~0.8t/m^3
，通常不同压缩密度对物流成本的影响不明显，但随着运距的增加，高压缩密度对物流成本的改善作用略显成效。

秸秆的收储模式也是国内生物质供应链的主要研究内容。国内常见的秸秆原料物流一般由秸秆利用企业、秸秆收储组织、秸
秆收集专业户和农
户构成，常见的模式主要有自收自用
模式、分散收储模式和集约化收储模式3种[19]
。为了优化秸秆供应链，有研究者在基于“农户+中间商+电厂”原料供应模式上，通过建立生物质发电供应链协同模型，对发电供应链系统进行了协同演化研究[20]
。此外，原料的收储点选择的优劣也是
影响物流供应优劣的重要内容。赵涛等[21]
采用重心法进行了生物质原料收储点的模型研究，利用运输成本作为选址决策依据，可以确定并优化出生物质不同来源区域收储点合理分布。

总体分析，当前我国生物质能产业的物流经济性普遍较低，需要耗费大量的人力、物力进行收集、储存、运输等。以秸秆发电为例，考虑到收购过程中车损、燃油及人力消耗，即使宽松估计，经济收购半径不宜超过50km，而木本

植物制油的路线则更显昂贵，其成本到底多高迄今没有准确的估计。此外，与发达国家农场为主的农业生产方式不同，我国国情不同，多以农户为主，户均耕地占有面积很小，生物质资源分散，保证生物质能源企业原料供应是一个复杂的系统工程[22]。

4结论与展望

随着对生物质原料需求的日益增加，生物质原料的供应链将是决定生物质资源开发利用的基础保障。为了使生物质能源实现大规模的石油替代，并实现工业化和商业化的运行，开发高效经济的生物质原料供应链已势在必行[23]。

除了大力发展生物质供应链各环节的技术外，也需要考虑其他的影响因素，如地域分布、政策扶持等。在我国，生物质原料的收集区域规划通常是按照行政区域进行划分，这势必导致行政部门在规划时只关注局部区域内生物质资源量供应，必然导致局部区域的企业重复建设和资源量的不平衡分配。因此在生物质原料供应区域划分中，建议按照自然经济区进行划分，以实现统筹布局、合理开发，有效保障生物质资源量的充足供应，这不仅利于降低原料供应链的成本，而且能有效促进生物质能源企业的健康发展。此外，作为新兴的生物质能源产业还属于弱势产业，有关生物质物流费用的政策也不明确，这进一步导致在物流环节中的不可预测费用的增加，最终使原料的价格大大超过预期。

同时，在生物质原料收集方面，需要学者及政府部门进一步深入研究，确立我国未来的生物质原料收集有效模式和相关政策，促进生物质能源产业持续健康的发展。

针对以上问题，对生物质原料供应链的发展提出以下几点展望：①尝试利用边际土地获取更多的生物质资源；②进一步优化并提高生物质供应链的供应模式和各环节技术水平；③针对不同生物质产品，建立不同的生物质供应链标准；④建议政府因时因地制定优惠政策，推动生物质企业发展。通过上述几方面问题的着手解决并协调发展，将会对生物质原料供应链的有效实施和顺畅运行提供保障，有利于推动我国生物质供应链的发展和日益完善。

参考文献

[1] 罗俊, 邵敬爱, 杨海平, 等. 生物质催化热解制备低碳烯烃的研究进展[J]. 化工进展, 2017, 36(5): 1555-11564.
LUO J, SHAO J A, YANG H P, et al. Research progress on production of light olefins from catalytic pyrolysis of biomass[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2017, 36(5): 1555-11564.

[2] 余强, 庄新姝, 袁振宏, 等. 木质纤维素类生物质制取燃料及化学品的研究进展[J]. 化工进展, 2012, 31(4): 784-791.
YU Q, ZHUANG X S, YUAN Z H, et al. Research progress on fuel and chemicals production from lignocellulose biomass[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2012, 31(4): 784-791.

[3] 檀勤良, 王瑞武, 潘昕昕, 等. 模糊供给下生物质发电燃料供应链模式研究[J]. 中国软科学, 2017, 2: 123-131.
TAN Q L, WANG R W, PANG X X, et al. Research on supply chain model of biomass power generation under fuzzy supply[J]. Chinese Soft Science Magazine, 2017, 2: 123-131.

[4] 张茜, 李洋, 王磊明. 生物质能秸秆回收物流成本分析及测算[J]. 中国农业大学学报, 2017, 22(12): 185-193.
ZHANG Q, LI Y, WANG L M. Analysis and calculation of the recycling logistics cost of biomass straw[J]. Journal of China Agricultural University, 2017, 22(12): 185-193.

[5] 文春波, 钱发军, 刘鹏. 农业秸秆资源化利用现状与评价[J]. 生态经济, 2018, 34(2): 147-150.
WEN C B, QIAN F J, LIU P. Situation and evaluation of agricultural straw resource utilization[J]. Ecological Economy, 2018, 34(2): 147-150.

[6] SHAH A, DARR M, KHANAL S, et al. A techno-environmental overview of a corn stover biomass feedstock supply chain for cellulosic biorefineries[J]. Biofuels, 2017, 8(1): 59-69.

[7] 宫娜, 孙嘉燕, 王述洋. 田间秸秆收集处理新技术的研究与探索

[J]. 森林工程, 2013, 29(6): 92-94.
GONG N, SUN J Y, WANG S Y. Research and exploration of a new technology about field straw collection and processing technology[J]. Forest Engineering, 2013, 29(6): 92-94.

[8] HESS J R, FOUST T D, HOSKINSON R, et al. Roadmap for agriculture biomass feedstock supply in the United States[EB / OL]. http://feedstockreview. ornl. gov / pdf / hess / roadmap for ag-biomass feedstock supply in US.pdf.

[9] 鲍香台, 张永, 林哲建, 等. 生物质供应链收集运输方式的仿真优化研究[J]. 物流技术, 2011, 30(12): 165-168.
BAO X T, ZHANG Y, LIN Z J, et al. Simulation and optimization of collection and transport modes of biomass energy supply chain[J]. Logistics Technology, 2011, 30(12): 165-168.

[10] U. S. Department of Energy. Biomass multi-year program plan[EB / OL]. http://www1. eere. energy. gov / bioenergy / pdfs / mypp_november_2012.pdf.

[11] KRISTIANTO Y, ZHU L. Techno-economic optimization of ethanol synthesis from rice-straw supply chains[J]. Energy, 2017, 141: 2162-2176.

[12] THORSELL S, EPPLIN F M, HUHNKE R L, et al. Economics of a coordinated biorefinery feedstock harvest system: lignocellulosic biomass harvest cost[J]. Biomass and Bioenergy, 2004, 27(4): 327-337.

[13] GRONALT M, RAUCH P. Designing a regional forest fuel supply network[J]. Biomass and Bioenergy, 2007, 31(6): 393-402.

[14] JENSEN I G, MÜNSTER M, PISINGER D. Optimizing the supply chain of biomass and biogas for a single plant considering mass and energy losses[J]. European Journal of Operational Research, 2017, 262: 744-758.

[15] LIM C H, LAM H L, NG W P Q. A novel HAZOP approach for literature review on biomass supply chain optimization model[J]. Energy, 2018, 146: 13-25.

[16] HOW B S, YEOH T T, TAN T K, et al. Debottlenecking of sustainability performance for integrated biomass supply chain: P-graph approach[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 193: 720-733.

[17] 檀勤良, 王婷然, 张一梅, 等. 多期生物质发电燃料供应链优化[J].

工业技术经济, 2017, 11: 21-28.
TAN Q L, WANG T R, ZHANG Y M, et al. Research on multi-stage optimization for a biomass power generation supply chain[J]. Journal of Industrial Technological Economics, 2017, 11: 21-28.

[18] 魏巧云. 生物质发电秸秆供应链物流成本分析[D]. 北京: 中国农业大学, 2014.
WEI Q Y. Research on supply chain logistics cost of straw for biomass power generation[D]. Beijing: China Agricultural University, 2014.

[19] 张晟义, 张卫东. 我国能源生物质供应物流面临的运营、战略与体制问题剖析[J]. 生态经济, 2012(5): 109-113.
ZHANG S Y, ZHANG W D. Analysis on the operation, strategy and institution problems of Chinese energy biomass supply logistics[J]. Ecological Economy, 2012(5): 109-113.

[20] 檀勤良, 潘昕昕, 王瑞武. 生物质发电供应链协同演化研究——基于山东省生物质发电厂的实证研究[J]. 中国农业大学学报, 2017, 22(2): 190-196.
TAN Q L, PANG X X, WANG R W. Research on synergetic evolution of biomass electricity generation supply chain: an empirical study on biomass power plant in Shandong Province[J]. Journal of China Agricultural University, 2017, 22(2): 190-196.

[21] 赵涛, 张国晨, 孙飞. 生物质原料的收储点选址与优化研究[J]. 中国农机化, 2012, 1: 194-197.
ZHAO T, ZHANG G C, SUN F. Study of location and optimization of biomass raw materials' transportation and store[J]. Chinese Agricultural Mechanization, 2012, 1: 194-197.

[22] 庄会永, 张雁茹, 田雅林, 等. 中国农林生物质工业化收集应用模式的研究[J]. 中国工程科学, 2011, 13(2): 102-106.
ZHUANG H Y, ZHANG Y R, TIAN Y L, et al. Research and experience on industrial collection and application model for agricultural and forestry biomass in China[J]. Engineering Sciences, 2011, 13(2): 102-106.

[23] 苏世伟, 陈妍, 聂影. 生物质燃料供应链物流成本的文献比较研究[J]. 江苏农业科学, 2017, 45(15): 7-10.
SU S W, CHEN Y, NIE Y. Literature comparison of logistics cost in biomass fuel supply chain[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2017, 45(15): 7-10.

原文地址：http://www.china-nengyuan.com/tech/148888.html