

中国秸秆优质化能源开发利用特征及影响因素

王明新¹, 叶倩¹, 王迪²

(1.常州大学环境与安全工程学院, 常州213164; 2.常州信息职业技术学院现代服务学院, 常州213164)

摘要:为考察中国秸秆优质化能源开发利用特征, 本文在分析中国2009—2016年秸秆优质化能源产量年际变化、区域分布及结构特征的基础上, 采用增强回归树方法定量分析了秸秆优质化能源开发利用水平的省际差异及其影响因素。结果表明: 中国秸秆优质化能源产量从2009年的119.63万t标准煤上升到2016年的508.51万t标准煤, 以生物气化和固化成型为主, 其中生物气化比重逐渐下降, 固化成型比重迅速上升。全国秸秆优质化能源开发利用水平均值从2009年的7.54kg标准煤/hm²上升到2016年的30.51kg标准煤/hm²。供给、需求和环境因素对其省际差异的贡献率分别为37.10%、35.60%和22.30%。秸秆优质化能源开发利用水平总体上随着粮食作物播种面积比例、农村居民人均纯收入、农村人均用电量和农村能源财政投入的上升而上升, 随着人均耕地面积和机耕面积比例的上升而下降, 随着饲草需求强度的上升呈先上升后下降趋势。当前中国秸秆优质化能源开发利用很大程度上依赖于农村经济发展水平的提高和行政力量的推动。西北、东北和华中等地区应加强对秸秆优质化能源开发利用的财政和科技支持力度。

1 引言

中国农业经济的快速发展伴随着农作物秸秆、谷壳等农业废弃物排放量日益增加。许多地区作物收获季节大量秸秆被直接焚烧于田间地头, 造成了严重的资源浪费与环境污染[1, 2]。为此, 国家大力推进秸秆的资源化利用, 包括肥料化、饲料化、能源化、基料化和原料化等。能源化利用不但可以避免秸秆被直接焚烧, 还可以替代部分化石能源并缓解空气污染压力, 因此近年来包括生物气化(即沼气工程)、热解气化、固化成型、炭化、直燃发电等能源化利用方式得到了快速发展[3, 4]。

目前关于秸秆资源化利用的区域差异研究, 主要关注秸秆的资源化利用潜力及其区域差异[4-7], 得出可供能源化利用的秸秆总量为1.56亿~1.87亿t; 利用潜力的测算大多围绕沼气工程的推广情况开展分析, 而其他如热解气化、固化成型、炭化等秸秆优质化能源利用情况则很少得到关注[8-11]。关于秸秆资源化利用方式的影响因素研究, 主要关注农户对秸秆沼气、秸秆还田的偏好及其影响因素[12-15], 结果表明农户的秸秆能源化利用需求与其家庭的经济资本、社会资本、人力资本和自然资本禀赋均有密切关系。这些研究较少关注区域差异的影响因素, 也很少考虑秸秆其他潜在利用方式的竞争性影响。此外, 以往研究通常仅对影响因素进行定性分析, 未能定量评估各影响因素对秸秆沼气工程区域差异的贡献率。

针对以上分析, 本文在测算秸秆优质化能源开发利用水平的基础上, 为考察秸秆优质化能源开发利用的驱动因素, 把影响秸秆优质化能源开发利用的因素分解为供给、需求和环境等3种类型, 采用增强回归树定量分析秸秆优质化能源开发利用水平与各影响因素的关系, 以及各因素对其省际差异的贡献率, 旨在阐明秸秆优质化能源开发利用特征及其影响因素, 为中国秸秆优质化能源开发利用的优化布局提供参考。

2 研究方法 with 数据处理

2.1 研究方法

2.1.1 增强回归树

增强回归树(Boosting Regression Tree, BRT)是基于分类回归树算法的一种自学习方法, 能够得出自变量对因变量的影响载荷, 及其他自变量取均值或不变的情况下, 该自变量与因变量的相互关系, 并且输出的因变量与自变量关系很直观, 结果容易理解, 且可以分析因变量与非数值变量之间的关系[16-17], 在国内外数据建模方面有较多的应用[18-19]。该方法在运算过程中多次随机抽取一定量的数据分析自变量对因变量的影响程度, 剩余数据用来对拟合结果进行检验, 对生成的多重回归树取均值并输出, 能够提高模型的稳定性和预测精度, 这种方法在处理不同数据格式时具有很大的灵活性, 且对预测变量的独立性无需作出事先假设, 能够适应复杂的非线性关系。

本文以各省份秸秆优质化能源开发利用水平为因变量, 以影响秸秆优质化能源开发利用水平的因素为自变量, 采用BRT方法对因变量与自变量的关系进行拟合, 考察各因素在其他因素取均值时, 该因素与秸秆优质化能源开发利用水平之间的数量关系, 并计算各指标对省际差异的贡献率。BRT分析在R语言(R i386 3.2.4

Revised)中完成，参数设置时，学习速率设置为0.01，树的复杂性设置为5。

2.1.2 指标选择

本文把秸秆优质化能源开发利用的影响因素分解为供给因素、需求因素和环境因素。反映各影响因素的指标选择说明如下：

(1) 供给因素

供给方面主要受制于秸秆资源量及其潜在用途的竞争性影响。由于中国农作物秸秆主要来自于粮食作物，粮食作物较多的地方更有利于秸秆优质化能源的开发利用，因此考察粮食播种面积比例(X_{11} , %)对秸秆优质化能源利用的影响，采用粮食播种面积占农作物总播种面积的比例来反映。潜在竞争性用途方面，采用2个指标来反映：一是机耕面积比例(X_{12} , %), 反映秸秆还田的竞争性影响。机械化程度较高的地区，秸秆粉碎后直接还田更方便，因此对能源化利用的需求可能较低。二是饲草需求强度(X_{13} , kg/hm^2)，反映秸秆饲用的竞争性影响，以畜牧业饲草总需求量与农作物总播种面积的比值来表示。在大牲畜饲养规模较大的地区，秸秆可以作为饲料，因此对于秸秆能源化利用可能起到竞争效应。

(2) 需求因素

需求因素取决于农村居民的生活水平、资源禀赋和能源需求。首先，人均纯收入比较高的地区，随着生活水平的提高，人们环境保护意识逐渐增强，对于空气质量的要求更高，因此更倾向于开发利用高品质的可再生清洁能源。第二，通常人均耕地面积较小的地方，农业在家庭收入中所占的比例较低，为了维持生计，农业兼业比例比较高，因此倾向于采用节省劳动力的耕作管理方式，对于秸秆能源化利用的需求也会比较低。第三，农村人均用电量反映农村能源需求，人均用电量比较高的地区，农村经济通常比较发达，倾向于充分利用各种可再生资源。因此，采用人均纯收入(X_{21} , 万元)、人均耕地(X_{22} , hm^2)和农村人均用电量(X_{23} , kWh)等3个指标来反映需求因素的影响。

(3) 环境因素

环境因素包括自然环境和社会环境，自然环境方面的影响比较复杂，难以用定量指标来衡量，因此采用非数值型的区域变量来反映诸如气候、土壤等可能影响秸秆能源化开发利用的因素。社会环境方面，秸秆优质化能源开发利用的初始

投资成本

较高，往往需要财

政投入的驱动。因此，采用区域类型

(X_{31} , 无量纲)和财政投入强度(X_{32} , $\text{元}/\text{hm}^2$)

)等2个指标来反映环境因素的影响，其中区域类型按中国通行的行政区划归并为华北、东北、华东、华中、华南、西南和西北等7个区域，财政投入强度采用单位播种面积的农村能源财政经费投入量来计算。

2.2 数据处理

依据《中国农业统计资料》[22]的统计范围，纳入分析的秸秆优质化能源类型包括生物气化、热解气化、固化成型和炭化等4种类型，各不同类型的秸秆能源根据其热值统一换算成标准煤。秸秆生物气化产生的沼气和热解产生的燃气分别按 $25\text{MJ}/\text{m}^3$ 和 $21\text{MJ}/\text{m}^3$

折算成标准煤[23]，秸秆固化成型和炭化形成的燃料

分别按 $18\text{MJ}/\text{m}^3$

和 $17\text{MJ}/\text{kg}$ 折算成标准煤[24]。由于统计部门仅统计热解气化的集中供气户数，参照生物质气化集中供气站的相关建设标准，按每户供气量 $1.5\text{m}^3/\text{d}$ 计算。

采用单位农作物播种总面积的秸秆优质化能源产量来反映各地区和省份秸秆优质化能源的开发利用水平，采用标准差来分析秸秆优质化能源开发利用水平的区域内差异和区域间差异。各指标数据均来自《中国农业统计资料》[22]和《中国统计年鉴》[25]。由于中国从2009年才开始全面统计除沼气工程以外的其他优质化能源利用数据，因此研究时间范围设定为2009—2016年，考虑数据可得性，把研究区范围设定为除港澳台地区外的31个省份。

3 结果分析

3.1 秸秆优质化能源产量及区域差异

2009-2016年中国秸秆优质化能源产量呈现出先增长后下降的趋势（图1），从2009年的119.63万t标准煤上升到2014年的534.43万t标准煤，随后下降至2016年的508.51万t标准煤。华东地区是中国秸秆优质化能源的主产区，2016年年产量占全国的37.62%。其次是华中、华北和西南地区，2016年秸秆优质化能源分别占全国总量的19.69%、14.22%和10.06%。

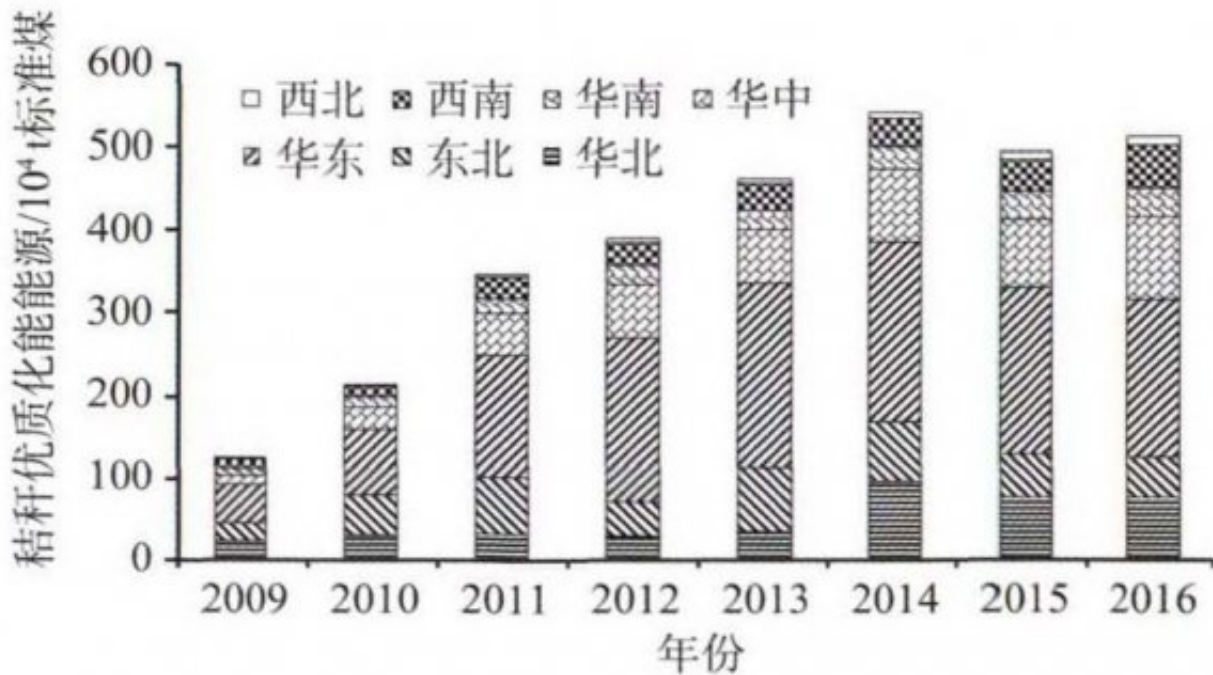


图1 2009—2016年中国各区域秸秆优质化能源产量

Figure 1 Straw-based high quality energy productivity in different regions of china, 2009-2016

3.2 秸秆优质化能源产量结构

从能源结构变化看，中国秸秆优质化能源开发利用方式已逐渐从以生物气化为主改变为以固化成型为主（图2）。生物气化能源产量从2009年的65.56万t标准煤上升到2016年的208.08t标准煤，占全国总量的比例从2009年的54.81%下降到2016年的40.92%。固化成型能源从2009年的43.75万t标准煤上升到2016年的280.18万t标准煤，占全国总量的比例从2009年的36.57%上升到2016年的55.09%。可见，固化成型正逐渐成为中国秸秆优质化能源开发利用的主要发展方向，这主要是因为秸秆固化成型后的燃料比重大、体积小，便于储存和运输，因此相对于其他利用方式更受消费者欢迎。但固化成型过程耗能较大，降低了其净能源产出[24, 25]，因此应努力探索生产过程能耗低的固化成型工艺以实现净能源产出的最大化。热解气化和炭化则发展缓慢，在秸秆优质化能源总量的比重较低，且年际间波动较大。

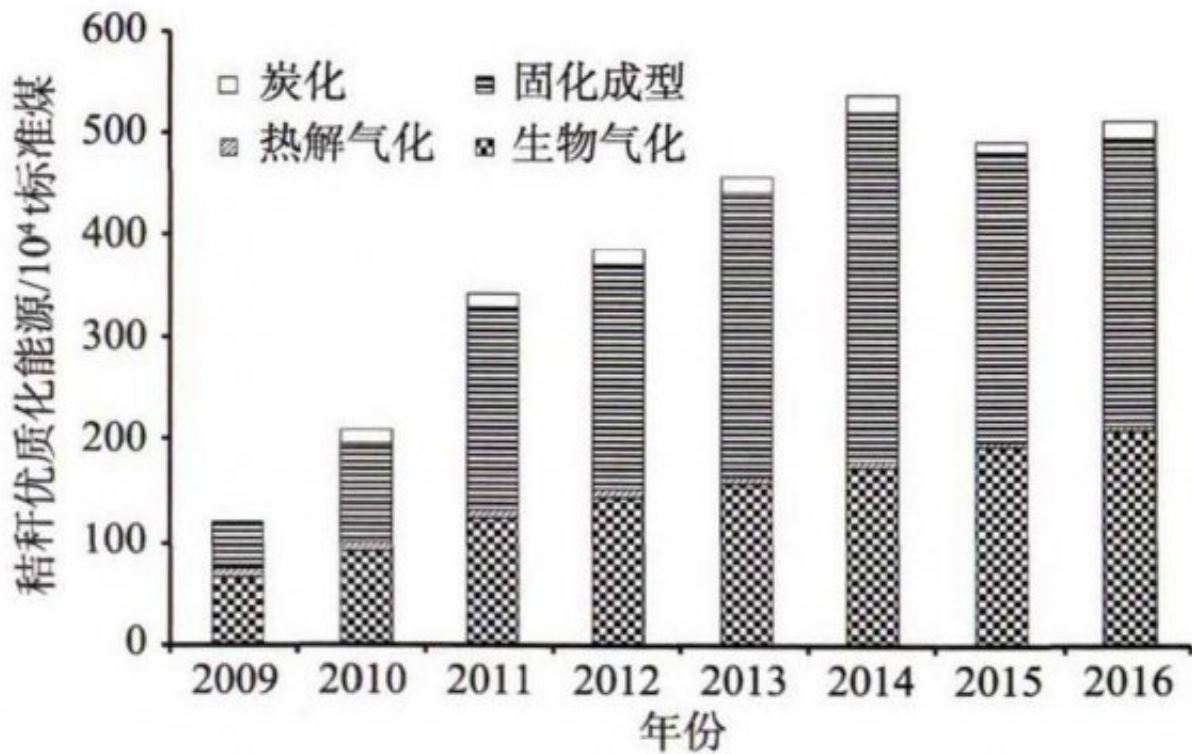


图2 2009—2016年中国不同类型秸秆优质化能产量

Figure 2 Straw-based high quality energy productivity of different fuel product types in China, 2009-2016

从2016年中国各省份秸秆优质化能源结构看(图3),以生物气化为主的共有12个省份,具体包括:华北地区的北京、山西和内蒙古,东北地区的吉林,华东地区的福建和江西,以及华南、西南和西北地区的所有省份,这与温度、沼气原料可行性、区域经济发展水平和社会服务体系完善程度有关。以固化成型为主的省份有华北地区的天津、河北,东北地区的辽宁和黑龙江,华东地区的上海、江苏、浙江、安徽和山东,以及华中3省。热解气化超过10%的省份只有北京、山西和吉林,分别为14.12%、16.40%和12.81%。秸秆炭化能源比重超过10%的省份有天津、浙江和湖北,分别为29.30%、11.51%和18.93%。可见,目前中国大部分省份秸秆优质化能源开发主要以生物气化和固化成型为主,其中生物气化主要分布于中西部地区和华南地区,固化成型则主要分布在东部地区和华中3省,热解气化和炭化仅在少数省份有一定分布。

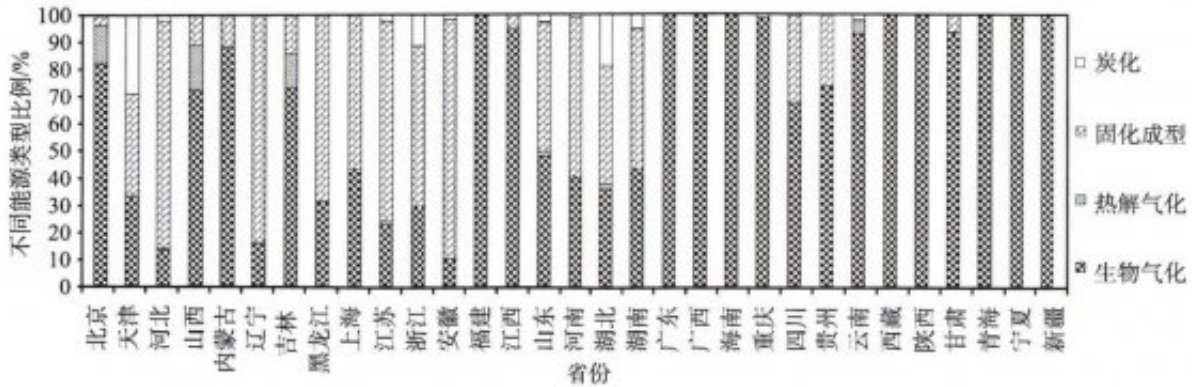


图3 2016年各省份不同类型秸秆优质化能源比例

Figure 3 Percentage of different fuel types of straw-based high quality energy in the provinces of China's mainland, 2016

3.3 秸秆优质化能源开发利用水平

采用单位农作物播种面积秸秆优质化能源产量来反映各地区的秸秆优质化能源开发利用水平（表1）。从年际变化情况看，中国秸秆优质化能源开发利用水平得到了迅速的增长，从2009年7.54kg标准煤/hm²上升到2016年的30.51kg标准煤/hm²，年增长率为22.96%。2016年秸秆优质化能源开发利用水平最高的是上海、海南、北京和浙江，分别是全国平均水平的4.49、3.96、3.78和3.48倍，其后依次是江苏、天津、辽宁和河北，其他省份都低于50.00kg标准煤/hm²。

2009—2016年全国7大区域秸秆优质化能源开发利用水平见表2。华东地区开发利用水平最高，从2009年的12.36kg标准煤/hm²，上升到2016年的50.34kg标准煤/hm²，增长率为22.22%，其中2016年开发利用水平是全国平均水平的1.65倍；华北地区的开发利用水平也始终高于全国平均水平，从2009年的11.72kg标准煤/hm²上升到2016年的34.46kg标准煤/hm²，2016年是全国平均水平的1.13倍；其他地区由于2009年的基数较低，因此尽管近5年来的增长速度也比较快，但开发利用水平一直低于全国平均水平。其中西北、西南和东北地区2016年的开发利用水平仅为全国平均水平的22.03%、64.27%和70.76%。

表1 2009—2016年各省份秸秆优质化能源开发利用水平

Table 1 Development and utilization level of straw-based high quality energy in the provinces of China, 2009-2016

地区	(kg of coal equivalent/hm ²)							
	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
北京	430.42	433.48	407.12	302.48	330.67	406.66	1194.40	115.26
天津	31.18	54.81	48.69	30.37	27.08	382.52	31.00	85.46
河北	5.27	11.54	15.10	16.76	24.72	75.24	50.80	68.92
山西	8.24	8.80	9.45	9.81	8.14	7.45	7.77	7.88
内蒙古	1.04	1.84	2.88	3.64	4.21	3.26	2.18	4.40
辽宁	27.11	64.42	59.46	61.27	65.11	64.98	82.66	75.39
吉林	0.26	0.38	1.23	1.03	1.18	1.14	1.13	1.13
黑龙江	5.34	13.84	30.97	6.54	33.50	29.97	14.67	13.35
上海	0.00	9.43	16.21	17.66	35.54	47.87	57.24	137.04
江苏	14.38	46.26	82.58	108.94	121.96	111.82	97.35	98.44
浙江	28.40	75.46	51.68	69.88	90.47	99.24	116.43	106.10
安徽	2.04	2.19	9.66	17.09	23.36	20.71	32.94	43.54
福建	19.37	14.99	35.66	36.81	36.37	34.62	34.28	34.33
江西	5.47	10.85	9.63	11.50	13.68	14.96	15.59	16.44
山东	18.27	12.52	43.79	63.19	64.90	66.24	45.10	28.90
河南	4.12	13.95	13.95	18.71	14.31	22.81	25.00	31.66
湖北	2.70	5.33	25.16	30.57	29.20	38.56	41.37	41.08
湖南	3.14	4.51	14.34	14.53	23.00	28.45	17.46	25.11
广东	8.88	12.41	14.13	28.99	28.61	32.25	48.07	45.82
广西	2.53	3.09	4.02	4.19	3.69	3.01	2.54	4.15
海南	58.51	60.34	106.42	87.77	93.71	96.77	113.89	120.72
重庆	2.66	4.29	6.25	7.00	6.79	8.15	11.20	14.39
四川	7.66	10.14	20.31	23.71	27.10	28.76	30.47	41.71
贵州	2.75	1.89	3.96	4.46	4.97	5.53	6.52	8.59
云南	0.32	0.28	0.23	0.28	0.36	0.40	0.45	0.84
西藏	0.00	0.00	0.00	4.22	0.73	0.73	1.49	3.99
陕西	0.75	1.29	2.33	3.69	3.59	2.74	3.70	5.52
甘肃	1.88	2.79	2.98	3.15	3.26	3.85	4.47	7.53
青海	1.71	3.92	6.06	1.30	2.59	2.60	2.87	2.86
宁夏	1.98	2.19	3.99	7.40	9.31	9.64	9.83	9.75
新疆	0.62	1.15	2.20	2.74	3.51	4.20	6.08	6.84
全国	7.54	12.98	21.00	23.55	27.66	32.30	29.39	30.51

表2 2009—2016年各区域秸秆优质化能源开发利用水平

Table 2 Development and utilization level of straw-based high quality energy in the seven regions of China, 2009-2016 (kg of coal equivalent/hm²)

	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
华北	11.72	15.26	16.37	15.15	18.10	47.29	34.36	34.46
东北	8.16	20.17	29.25	15.78	31.58	29.24	24.13	21.59
华东	12.36	20.79	38.33	52.37	58.74	57.14	52.25	50.34
华中	3.49	9.14	16.99	20.66	20.61	28.48	27.07	32.18
华南	9.26	11.08	15.60	20.29	20.25	22.03	29.06	29.34
西南	4.04	5.03	9.61	11.03	12.26	13.13	14.41	19.61
西北	1.14	1.79	2.69	3.45	3.86	4.04	5.15	6.72
全国	7.54	12.98	21.00	23.55	27.66	32.30	29.39	30.51

3.4 秸秆优质化能源开发利用水平的影响因素

3.4.1 贡献率分析

各类因素对秸秆优质化能源开发利用水平的影响结果见图4-6。曲线表示各因子在其他因子取均值时，该因子与秸秆优质化能源开发利用水平之间的关系。模拟结果表明，供给因素、需求因素和环境因素对秸秆优质化能源开发利用水平省际差异的贡献率为37.10%，35.60%和22.30%。各指标中，人均纯收入和饲草需求强度的贡献率超过了15.00%，另有区域类型、财政投入强度农村人均用电量和粮食作物播种面积比例的贡献率也超过了10.00%，其他指标的贡献率相对较小。可见，秸秆优质化能源开发利用水平主要取决于供需因素，环境因素也存在一定的影响。纵坐标取值范围反映了各因素对秸秆优质化能源开发利用水平的影响幅度，人均纯收入和财政投入的增加对于秸秆优质化能源开发的促进幅度最大。

3.4.2 供给因素的影响

供给因素中，首先，在其他条件取均值条件下，秸秆优质化能源开发利用水平随着粮食播种面积比例的增加而增加，取值范围在25.00~40.00kg/hm²范围内波动（图4a），表明粮食作物秸秆供应量决定了秸秆优质化能源开发利用的潜力；其次，秸秆优质化能源开发利用水平随着饲草需求强度的增加呈先上升后下降趋势，取值范围在25.00~50.00kg/hm²范围内波动（图4b），这是因为在饲草需求强度相对较低的地区，主要是农区，畜禽养殖主要依赖商品化饲料，饲草需求强度可以反映大型牲畜的养殖规模，其产生的畜禽粪便可以与秸秆一起作为生物气化的原料，因此对秸秆生物气化起到了促进作用；另一方面，饲草需求强度较高的地区主要是牧区或半牧区，大型牲畜和牛饲养以饲草和秸秆为主，因此对秸秆能源化利用有着竞争性影响；第三，秸秆优质化能源开发利用水平随着机耕面积比例的增加呈下降趋势，取值范围在27.00~46.00kg/hm²范围内波动（图4c），与前文的假设相符，即机耕面积比例比较高的地区，秸秆的还田比例较高，可用于能源化的秸秆资源量受到竞争性影响。

3.4.3 需求因素的影响

需求因素中，在其他条件取均值条件下，秸秆优质化能源开发利用水平随着人均纯收入和农村人均用电量的增加而增加，取值范围分别在10.00~80.00kg/hm²和25.00~45.00kg/hm²范围内波动（图5a和5b），表明随着人民生活水平和农村用电量需求的增加，更倾向于利用秸秆开发可再生清洁能源。其次，秸秆优质化能源开发利用水平随着人均耕地面积的增加总体上呈下降趋势，取值范围在27.00~42.00kg/hm²范围内波动（图5c），可见人多地少的省份更倾向于开发秸秆优质化能源，这与前面的假设相反，主要是因为人多地少的地方，通常每家每户的秸秆资源量较小，对于农户自行资源化利用的激励较小，但却有利于集中开发利用，为固化成型等商品化能源利用方式提供了有利条件，从而有利于秸秆优质化能源利用开发水平的提高。

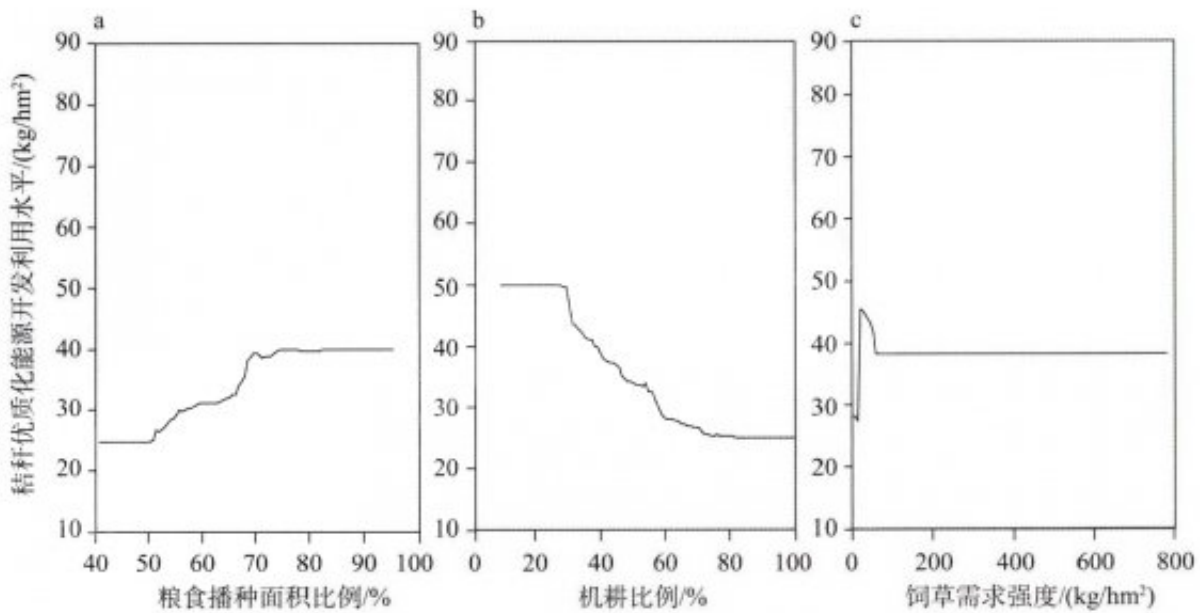


图4 秸秆优质化能源开发利用水平与供给因素的关系

Figure 4 Relationship between development and utilization level of straw-based high quality energy and supply factors

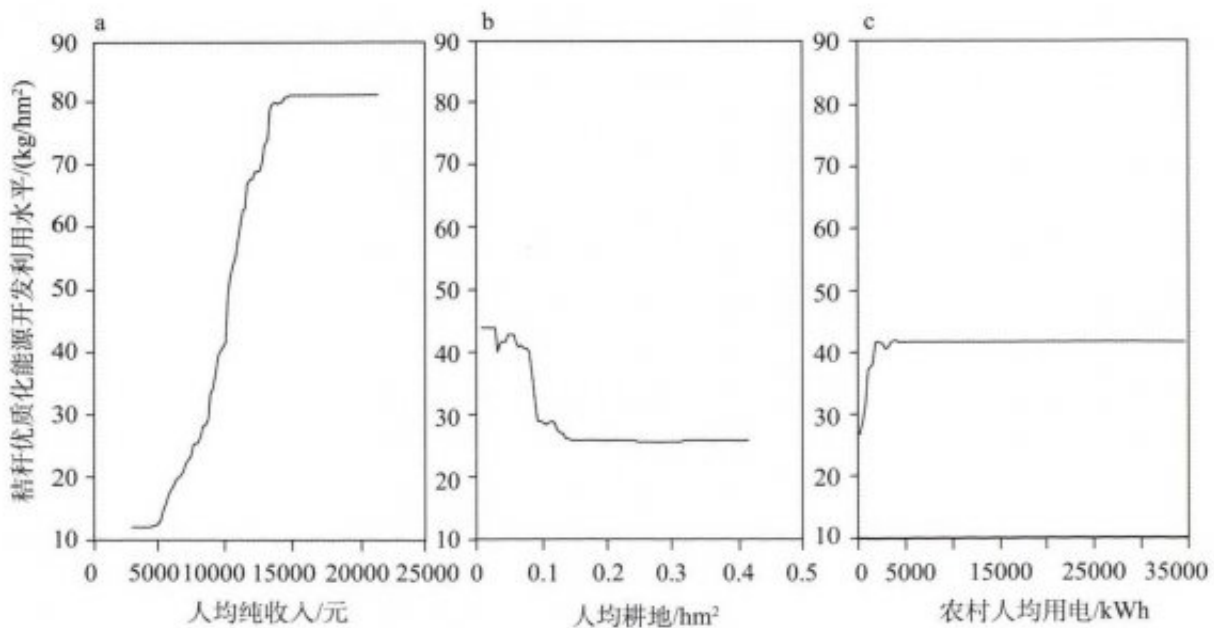


图5 秸秆优质化能源开发利用水平与需求因素的关系

Figure 5 Relationship between development and utilization level of straw-based high quality energy and demand factors

3.4.4环境因素的影响

环境因素

中，秸秆优质化

能源开发利用水平总体上随着财政投

入强度的增加而上升，取值在20~65kg/hm²

范围内(图6a)，表明秸秆优质化能源的开发利用目前还严重依赖于行政力量的推动，尤其是在北京和天津，财政投入力度远高于全国水平，极大地推动了秸秆固化成型燃料的开发利用。区域类型反映除以上供给、需求和政策外的其他

因素的影响，华北、东北和华南地区的秸秆优质化能源开发程度较高，华中、华东、西北和西南地区依次递减(图6b)。地形是一个较为重要的区域影响因素如辽宁、河北、山东、江苏等秸秆优资源化能源开发程度较高的省份，其地形相对比较平坦，规模化程度较高，秸秆收集运输较为方便，显著降低了运输成本，提高了秸秆优质化能源开发利用的经济可行性。

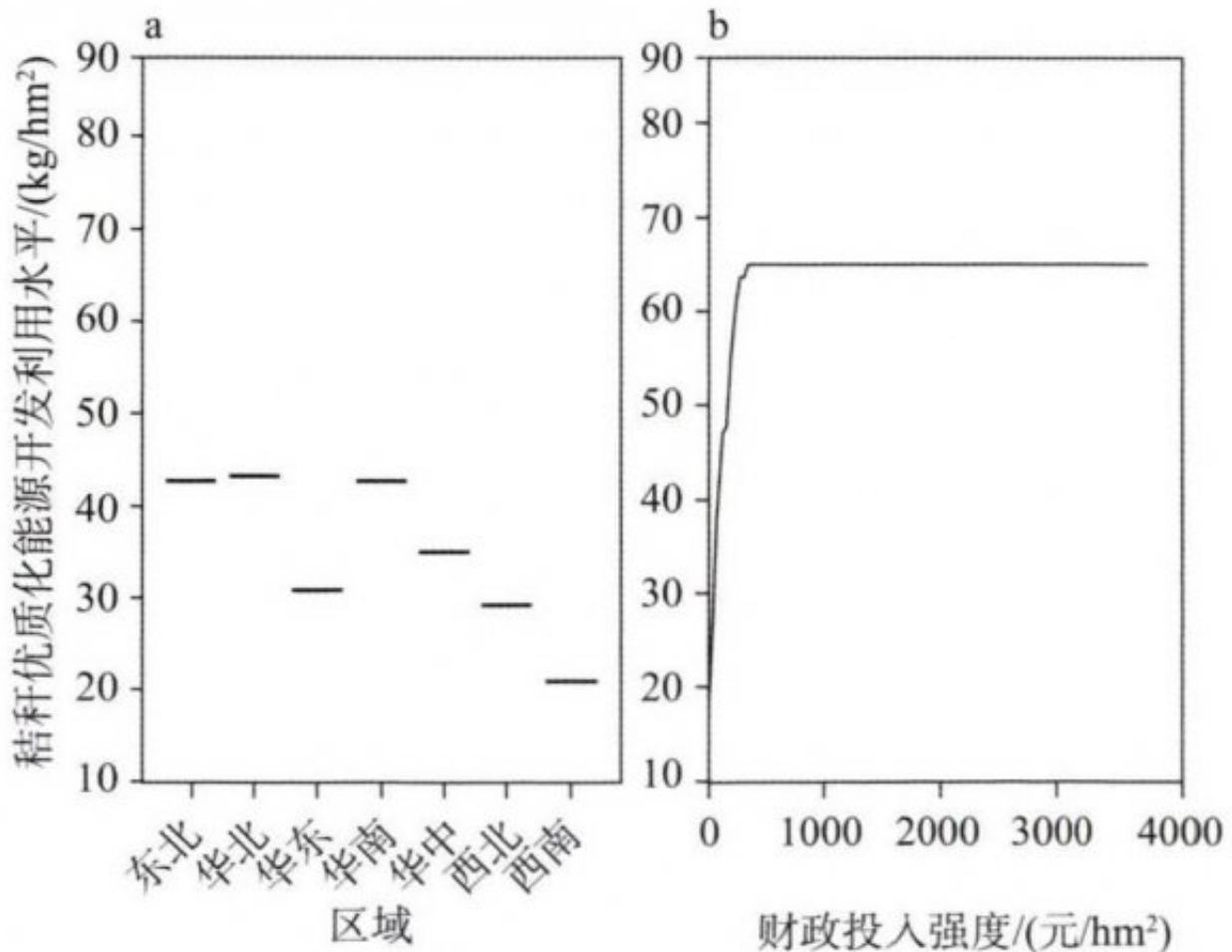


图6 秸秆优质化能源开发利用水平与环境因素的关系

Figure 6 Relationship between development and utilization level of straw-based high quality energy and environmental factors

4结论与政策启示

4.1结论

本文在分析了2009—2016年中国秸秆优质化能源产量年际变化、区域分布及结构特征的基础上，采用增强回归树方法定量分析了秸秆优质化能源开发利用水平的省际差异的及其影响因素。主要研究结论如下：

(1)2009—2016年，中国秸秆优质化能源产量呈迅速增长趋势，能源类型以生物气化和固化成型为主，生物气化主要分布在中西部地区和华南地区，固化成型主要分布于东部和华中地区。固化成型逐渐取代生物气化成为中国秸秆优质化能源开发的主要类型。

(2)全国秸秆优质化能源开发利用水平均值

从2009年的7.54kg标准煤/hm²上升到2016年的30.51kg标准煤/hm²。七大区域间差异和区域内的省际差异都比较大且总体上呈现扩大趋势。

(3)增强回归树较好地拟合了秸秆优质化能源开发利用水平与其影响因素之间的数量关系。供给因素、需求因素和环境因素对秸秆优质化能开发利用水平省际差异的贡献率分别为37.10%，35.60%和22.30%。

(4)各省份秸秆优质化能源开发利用水平总体上随着粮食作物播种面积比例、农村居民人均纯收入、农村人均用电量和农村能源财政投入的上升而上升，随着人均耕地面积和机耕面积比例的上升而下降，随着饲草需求强度的上升呈先上升后下降趋势。

(5)人均纯收入和财政投入的增加对于秸秆优质化能源产量的促进作用最为显著，可见当前中国秸秆优质化能源开发利用很大程度上依赖于农村经济发展水平的提高和行政力量的推动。

4.2政策启示

上述研究结论显示中国秸秆优质化能源产出

迅速上升，但其省际差异也呈扩大趋势，由此，本文基于前文的影响因素分析，从区域均衡、结构优化和布局调整等角度出发，提出如下3点针对性建议：

(1)中国秸秆优质化能源开发利用水平呈迅速增长趋势，但地域间不平衡现象比较突出，且对农村经济发展水平和财政经费投入的依赖较大，西北、东北和华中地区应加强对秸秆优质化能源开发利用的财政支持力度以提高其秸秆优质化能源开发利用水平。

(2)固化成型正逐渐成为中国秸秆优质化能源开发利用的主要方式，但目前分布范围相对较小，主要位于东部和华中地区，可结合乡村环境整治和节能减排措施，进一步扩大其开发利用的地域范围，同时需要进一步研发低能耗的固化成型工艺以实现其净能源产出的最大化。

(3)生物气化能源利用效率较高，但目前主要分布在中西部地区和华南地区，且近年来发展缓慢，应向适宜发展生物气化的地区提供资金和技术支持，并完善沼气社会化服务体系。

参考文献(References):

- [1] 李莉莉, 王琨, 姜珺秋, 等. 黑龙江省秸秆露天焚烧污染物排放清单及时空分布[J]. 中国环境科学, 2018, 38(9): 3280–3287. [Li L L, Wang K, Jiang J Q, et al. Emission inventory and the temporal and spatial distribution of pollutant for open field straw burning in Heilongjiang Province[J]. China Environmental Science, 2018, 38(9): 3280–3287.]
- [2] 方放, 王飞, 石祖梁, 等. 京津冀秸秆养分资源及秸秆焚烧气体污染物排放定量估算[J]. 农业工程学报, 2017, 33(3): 1–6. [Fang F, Wang F, Shi Z L, et al. Quantitative estimation on straw nutrient resources and emission of pollutants from straw burning in Beijing–Tianjin–Hebei region[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(3): 1–6.]
- [3] 赵晓, 常化振, 彭思洋, 等. 中国生物质燃气产能及碳减排潜力[J]. 中国环境科学, 2018, 38(8): 3151–3159. [Zhao X, Chang H Z, Peng S Y, et al. The analysis of biomass gas production capacity and carbon emission reduction potential in China [J]. China Environmental Science, 2018, 38(8): 3151–3159.]
- [4] 蔡亚庆, 仇焕广, 徐志刚. 中国各区域秸秆资源可能源化利用的潜力分析[J]. 自然资源学报, 2011, 26(10): 1637–1646. [Cai Y Q, Qiu H G, Xu Z G. Evaluation on potentials of energy utilization of crop residual resources in different regions of China[J]. Journal of Natural Resources, 2011, 26(10): 1637–1646.]

- [5] 朱开伟, 刘贞, 贺良萍, 等. 中国主要农作物秸秆可新型能源化生态经济总量分析[J]. 中国农业科学, 2016, 49(19): 3769–3785. [Zhu K W, Liu Z, He L P, et al. , Eco-economic potential analysis of Chinese main crops' bio-energy utilization straw resources[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2016, 49(19): 3769–3785.]
- [6] 张崇尚, 刘乐, 陆岐楠, 等. 中国秸秆能源化利用潜力与秸秆能源企业区域布局研究[J]. 资源科学, 2017, 39(3): 473–481. [Zhang C S, Liu L, Lu Q N, et al. Potential and regional distribution for the energy utilization of crop residues in China[J]. Resources Science, 2017, 39(3): 473–481.]
- [7] 张颖, 陈艳. 中部地区生物质资源潜力与减排效应估算[J]. 长江流域资源与环境, 2012, 21(10): 1185–1190. [Zhang Y, Chen Y. Assessment on potential of biomass resources and carbon emission reduction[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2012, 21(10): 1185–1190.]
- [8] 杨艳丽, 侯坚, 张培栋, 等. 中国农村户用沼气发展的空间分异格局[J]. 资源科学, 2009, 31(7): 1219–1225. [Yang Y L, Hou J, Zhang P D, et al. Spatial disparities of rural household biogas development in China[J]. Resources Science, 2009, 31(7): 1219–1225.]
- [9] 洪浩, 叶文虎, 宋波, 等. 中国生物质成型燃料产业化问题及实证研究[J]. 资源科学, 2010, 32(11): 2172–2178. [Hong H, Ye W H, Song B, et al. An empirical study on industrialization of biomass briquette in China[J]. Resources Science, 2010, 32(11): 2172–2178.]
- [10] 曹志宏, 黄艳丽, 郝晋珉. 中国作物秸秆资源利用潜力的多适宜性综合评价[J]. 环境科学研究, 2018, 31(1): 179–186. [Cao Z H, Huang Y L, Hao J M. Multi-suitability comprehensive evaluation of crop straw resource utilization in China[J]. Research of Environmental Science, 2018, 31(1): 179–186.]
- [11] 张伟明, 陈温福, 孟军, 等. 东北地区秸秆生物炭利用潜力、产业模式及发展战略研究[J]. 中国农业科学, 2019, 52(14): 2406–2424. [Zhang W M, Chen W F, Meng J, et al. Study of straw-biochar on utilization potential, industry model and developing strategy in Northeast China [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2019, 52(14): 2406–2424.]
- [12] 漆军, 朱利群, 陈利根, 等. 苏、浙、皖农户秸秆处理行为分析[J]. 资源科学, 2016, 38(6): 1099–1108. [Qi J, Zhu L Q, Chen L G, et al. Research on the farmers' behavior of straw processing in Jiangsu, Zhejiang and Anhui[J]. Resources Science, 2016, 38(6): 1099–1108.]
- [13] 丰军辉, 何可, 张俊飏. 家庭禀赋约束下农户作物秸秆能源化需求实证分析: 湖北省的经验数据[J]. 资源科学, 2014, 36(3): 530–537. [Feng J H, He K, Zhang J B. Family endowments constrain farmer demand for energy utilization of crop straws[J]. Resources Science, 2014, 36(3): 530–537.]
- [14] 石祖梁, 李想, 王久臣, 等. 中国秸秆资源空间分布特征及利用模式[J]. 中国人口·资源与环境, 2018, 28(S1): 202–205. [Shi Z L, Li X, Wang J C, et al. The spatial characteristics and utilization

- model of crop straw in China[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2018, 28(S1): 202–205.]
- [15] 张娇, 李世平, 郭悦楠. 基于保护动机理论的农户亲环境行为影响因素研究: 以秸秆处理为例[J]. *干旱区资源与环境*, 2019, 33(5): 8–13. [Zhang J, Li S P, Guo Y N, et al. Study on the influencing factors of farmers' environmental behavior based on the protection motivation theory[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2019, 33(5): 8–13.]
- [16] 李春林, 刘森, 胡远满, 等. 基于增强回归树和Logistic回归的城市扩展驱动力分析[J]. *生态学报*, 2014, 34(3): 727–737. [Li C L, Liu M, Hu Y M, et al. Driving forces analysis of urban expansion based on boosted regression trees and Logistic regression[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(3): 727–737.]
- [17] 葛跃, 王明新, 孙向武, 等. 基于增强回归树的城市PM_{2.5}日均值变化分析: 以常州为例[J]. *环境科学*, 2017, 38(2): 485–494. [Ge Y, Wang M X, Sun X W, et al. Variation analysis of daily PM_{2.5} concentrations based on boosted regression tree: A case study in Changzhou[J]. *Environmental Science*, 2017, 38(2): 485–494.]
- [18] Hale R, Marshall S, Jeppe K, et al. Separating the effects of water physicochemistry and sediment contamination on *Chironomus tepperi* (Skuse) survival, growth and development: A boosted regression tree approach[J]. *Aquatic Toxicology*, 2014, 152: 66–73.
- [19] Zhang W D, Yuan S F, Hu N, et al. Predicting soil fauna effect on plant litter decomposition by using boosted regression trees[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2015, 82: 81–86.
- [20] 田原宇, 乔英云. 生物质气化技术面临的挑战及技术选择[J]. *中外能源*, 2013, 18(8): 27–32. [Tian Y Y, Qiao Y Y. Biomass gasification technology challenges and technical options[J]. *Sino-Global Energy*, 2013, 18(8): 27–32.]
- [21] 杜德利, 王镇. 生物质致密成型产品的生产及应用[J]. *农业工程学报*, 2006, 22(S1): 154–158. [Du D L, Wang Z. Production and application of biomass solid product[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2006, 22(S1): 154–158.]
- [22] 中华人民共和国农业部. 中国农业统计资料[M]. 北京: 中国农业出版社, 2010–2017. [Ministry of Agriculture, PRC. *China Agriculture Statistical Report*[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2010–2017.]
- [23] 蒋恩臣, 何光设. 生物质热分解技术比较研究[J]. *可再生能源*, 2006, (4): 58–62. [Jiang E C, He G S. Comparison study on three biomass pyrolysis technologies[J]. *Renewable Energy Resources*, 2006, (4): 58–62.]
- [24] 朱金陵, 王志伟, 师新广, 等. 玉米秸秆成型燃料生命周期评价[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(6): 262–266. [Zhu J L, Wang Z W, Shi X G, et al. Life cycle assessment of corn straw pellet fuel[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2010, 26(6): 262–266.]
- [25] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2010–2017. [National Bureau of Statistics, PRC. *China Statistical Yearbook*[M]. Beijing: China Statistics Press, 2010–2017.]

原文地址：<http://www.china-nengyuan.com/tech/167719.html>