

引用格式: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, et al. Potential and regional distribution for the energy utilization of crop residues in China[J]. Resources Science, 2017, 39(3): 473-481]. DOI: 10.18402/resci.2017.03.09

# 中国秸秆能源化利用潜力与秸秆能源企业区域布局研究

张崇尚<sup>1</sup>, 刘 乐<sup>1</sup>, 陆岐楠<sup>1</sup>, 徐新良<sup>2</sup>, 仇焕广<sup>1</sup>

(1. 中国人民大学农业与农村发展学院, 北京 100872; 2. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

**摘 要:** 中国是农业生产大国, 秸秆资源较为丰富, 开发利用农作物秸秆资源、发展生物质能源具有重大的经济和生态效益。因此, 科学评估中国秸秆资源能源化利用的潜力及其在不同地区的布局尤为重要。本文利用各省农业生产数据测算了全国各省大田作物田间秸秆产量和可利用秸秆资源数量, 在此基础上利用土地遥感数据和 GLO-PEM 模型, 测算了 1km×1km 栅格尺度的秸秆资源分布密度并评估了秸秆能源企业在各地区布局的适宜性。相比之前的研究, 本研究考虑了秸秆资源在不同区域的分布密度差异, 这对于计算秸秆这类收集和运输成本较高的资源的可利用率具有重要意义。此外, 本文也通过 2014 年和 2010 年的对比, 分析中国秸秆资源分布密度和能源企业适宜布局的变化趋势。研究结果表明: 2014 年中国主要大田作物秸秆资源总量为 8.97 亿 t, 可收集资源量为 7.69 亿 t, 可能源化利用秸秆资源总量为 1.86 亿 t, 吉林、江苏、河南、安徽、黑龙江等省份适宜建立大型秸秆能源企业, 且未来秸秆能源布局也将向这些地区集中。东北、华北、长江中下游地区、成都平原、西南以及新疆等少部分地区适宜建立小型秸秆能源企业。

**关键词:** 秸秆能源化; 分布密度; 潜力; 区域布局; 中国

DOI: 10.18402/resci.2017.03.09

## 1 引言

面对石化能源稀缺和环境污染带来的双重压力, 世界各国逐渐重视开发和利用生物质能源替代传统能源。尽管生物质能源的发展对缓解全球能源危机和减小环境污染发挥了一定作用<sup>[1]</sup>, 但目前主要以粮食或油料等经济作物为原料, 这不仅会威胁全球粮食安全, 也会加剧部分发展中国家的贫困问题<sup>[2]</sup>。中国是人口大国, 人地矛盾突出且水资源严重不足, 若发展以农作物为原料的生物能源必将会影响中国粮食安全和畜牧业的可持续发展。

而农作物秸秆能够通过相应的工业技术转化为生物能源, 具有重要的开发价值。作为全球农业生产大国, 中国农作物秸秆资源十分丰富, 如果将

秸秆能源化利用不仅能够解决能源稀缺和浪费问题, 也可以改善农村生态环境。然而, 当前中国农作物秸秆资源综合利用效率较低, 部分农作物秸秆被农户在田野中就地露天焚烧, 不仅浪费了宝贵的资源, 也造成了严重的环境污染<sup>[3]</sup>。因此, 开发中国农作物秸秆资源, 发展生物质能源具有重大的经济效益和生态效益。

农作物秸秆能源化利用的可行性不仅取决于秸秆资源数量, 还受到其空间布局的影响。中国农业生产在空间上分布不均匀, 因此农作物秸秆资源在空间分布上也相应存在较大差异, 而不同地区的秸秆资源量和分布密度决定了其适合不同的秸秆利用方式。因此, 有效利用秸秆资源, 除了解秸秆

收稿日期: 2016-03-01; 修订日期: 2017-02-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(71473255, 71673290, 71573262); 中国农业科学院科技创新工程(ASTIP-IAED-2017-03)。

作者简介: 张崇尚, 男, 安徽阜阳人, 博士生, 研究方向为农业资源与环境经济学。E-mail: zhangcs91@163.com

通讯作者: 仇焕广, E-mail: hgqiu@ruc.edu.cn

资源量外,还要考虑秸秆资源的空间分布。

但是,当前关于中国秸秆能源化利用布局的研究大多仅测算出可能源化利用的秸秆资源量,较少考虑秸秆资源的空间分布密度<sup>[4-6]</sup>和秸秆收集半径<sup>[7,8]</sup>。农作物秸秆体大质轻,对收集和运输要求较高。一般而言,秸秆密度越大,收集半径越小,秸秆收集和运输成本也相应越低,进行大规模秸秆资源能源化利用的经济可行性更高。尽管部分研究考虑了秸秆分布密度和收集半径,但其一仅计算省级层面分布密度,误差较大<sup>[7]</sup>;其二没有对不同年份的秸秆密度和能源企业布局适宜性进行对比,无法从动态角度判断中国可能源化利用潜力和秸秆能源企业适宜性布局的变化趋势<sup>[7,8]</sup>。近年来,中国耕地分布发生较大变化。与2010年相比,2014年农作物播种面积增加了4771.44万hm<sup>2</sup>,并且在不同地区耕地变化差异明显,这对秸秆资源分布以及区域秸秆能源企业布局的适宜性均会产生较大影响。

为弥补上述研究的不足,本文借鉴现有研究方法,利用2014年中国各省各类农作物产量数据、卫星遥感监测获取的全国耕地空间分布数据和GLO-PEM模型模拟的农田净第一性生产力(Net Primary Productivity, NPP)数据,估算可能源化利用秸秆资源的空间分布密度,结合不同规模秸秆能源企业的资源需求量和秸秆收集半径,并对比现有研究结果,分析了不同秸秆能源企业在各地区布局的适宜性及其变化趋势,以期为中国未来秸秆资源的能源化利用提供科学依据。

## 2 数据来源和研究方法

### 2.1 数据来源

本研究所使用的数据主要包括各省各类农作物产量统计数据、全国耕地空间分布数据和农田净第一性生产力(Net Primary Productivity, NPP)数据。

(1)各省各类农作物产量统计数据来源于《中国统计年鉴(2015)》<sup>[9]</sup>。

(2)耕地数据为通过遥感监测获取的2015年全国1:10万比例尺耕地空间分布数据,来源于中国科学院资源环境数据中心的全国土地利用数据库。该数据库是在国家科技支撑计划、中国科学院知识创新工程重要方向项目等多项重大科技项目的支持下经过多年的积累而建立的覆盖全国陆地区域

的多时相1:10万比例尺土地利用现状数据集<sup>[10-15]</sup>。该数据集是以Landsat TM/ETM遥感影像为主要数据源,通过人目视解译生成。土地利用类型包括耕地、林地、草地、水域、居民地和未利用土地6个一级类型以及25个二级类型。通过野外调查实地验证,土地利用一级类型综合评价精度达到94.3%以上,满足1:10万比例尺用户制图精度<sup>[14,15]</sup>。本研究利用GIS技术,从2015年土地利用现状数据集中提取耕地空间分布数据用于估算可能源化利用秸秆资源空间分布密度。

(3)NPP数据来源于GLO-PEM模型估算的2014年中国耕地净第一性生产力数据。GLO-PEM是一个基于NOAA/AVHRR数据开发的主要由遥感资料驱动的生产力效率模型,由描述冠层辐射吸收、利用、自养呼吸以及这些过程如何受环境条件控制等几个相互联系的部分组成。GLO-PEM模型结构原理<sup>[16-19]</sup>以及在中国耕地生产力变化估算中的应用已在专门文章中有详细的论述<sup>[20]</sup>。

### 2.2 计算方法

参考蔡亚庆等<sup>[3]</sup>和Qiu等<sup>[8]</sup>的参数取值和研究方法,本文估算了2014年中国主要农作物的可能源化秸秆资源利用量与秸秆能源企业的空间分布(秸秆主要指大田作物,见表1)。首先需要计算各省份农作物秸秆的理论资源总量、可收集量以及可能源化利用秸秆资源量,然后在此基础上根据全国耕地空间分布数据和耕地净第一性生产力数据,计算栅格尺度上的可能源化利用秸秆资源的分布密度以及秸秆能源企业布局适宜性。

在上述计算过程中,涉及到农作物秸秆的理论资源总量、可收集量以及可能源化利用量三个指标。这些指标的计算方法较为成熟,在大量研究中普遍使用<sup>[2-8,23]</sup>。

#### 2.2.1 农作物秸秆资源总量

农作物秸秆资源总量通常依据农作物产量与草谷比系数相乘计算得出。计算公式为:

$$TR = \sum_{i=1}^n R_i \times e_i \quad (1)$$

式中  $TR$  为秸秆资源理论总量;  $R_i$  为第  $i$  类农作物的实际产量;  $e_i$  为第  $i$  类农作物的草谷比系数。

#### 2.2.2 农作物秸秆可收集资源量

农作物秸秆可收集资源量指在排除田间焚烧、

2017年3月

地头堆弃以及其他损耗之后可收集利用的秸秆资源数量<sup>[10]</sup>,一般采用秸秆资源总量和可收集系数的乘积计算,其计算公式为:

$$TR_A = \sum_{i=1}^n R_i \times e_i \times \varepsilon_i \quad (2)$$

式中  $TR_A$  为农作物秸秆可收集资源量;  $\varepsilon_i$  为第  $i$  类农作物可收集系数。

### 2.2.3 农作物秸秆可能源化利用量

农作物秸秆可能源化利用量指除了农村其他秸秆用途外,可用于能源化利用的数量。作物秸秆资源可用于生活用能和其他加工品等多种用途,为准确计算秸秆可能源化利用量,需将其他用途扣除,仅计算田间秸秆可能源化利用量(不包括秸秆加工副产物)。具体公式为:

$$TR_E = \sum_{i=1}^n R_i \times e_i \times \varepsilon_i \times S_i \quad (3)$$

式中  $TR_E$  为可能源化利用秸秆资源量;  $S_i$  为第  $i$  种农作物的可能源化利用秸秆比例,即扣除农村基本生活能源需求、秸秆直接还田、饲料化利用、工业原料以及食用菌基料等用途后所剩比例。

### 2.2.4 可能源化利用秸秆资源空间分布密度

本文使用耕地 NPP 数据将公式(3)的各省份可能源化秸秆资源量分解到  $1\text{km} \times 1\text{km}$  栅格尺度,以进一步计算栅格尺度的可能源化利用秸秆资源密度。在理想状态下,应当首先使用县级农作物产量数据计算各县的可利用秸秆资源数量,然后用 NPP 数据分解到栅格尺度。但本文没有直接用县级尺度的数据主要是出于以下因素的考虑:①2008年以后,中国县级不同作物的产量数据农业部不再公开,难以获得;②2008年之前从农业部相关机构获得的县级农业数据质量相对较差,特别是各县粮食产量加总数据与省级数据差距较大。因此,本文直接将省级的可能源化利用秸秆资源总量数据分解到栅格尺度。该方法的一个可能的不足之处在于,隐含假设了同一省内各县农作物类型结构基本一致,这也可能带来了一定误差。但是,考虑到近几年的县级农业数据难以获得,并且前几年的县级农业生产数据质量不高,而采用省级数据所计算结果的误差可能更小。

借鉴 Qiu 等的研究方法<sup>[8]</sup>,依据耕地上每个栅格上全年的 NPP 数值,对每个省的可能源化利用秸秆

资源数量进行分解,从而得到栅格尺度的可能源化利用秸秆资源密度:

$$D_g = \frac{TR_E}{\sum NPP_g} \times NPP_g \quad (4)$$

式中  $D_g$  为可能源化利用秸秆资源分布密度;  $TR_E$  为公式(3)计算获得的农作物秸秆资源可能源化利用量;  $NPP_g$  为栅格  $g$  的 NPP 值。该式基于栅格计算的 NPP 值和前文计算的省级层面秸秆能源化利用潜力,获得栅格尺度上的单位 NPP 下可能源化利用秸秆资源量,再结合 NPP 地图,得到栅格尺度的可能源化利用秸秆资源密度。

### 2.3 参数设定

由上述计算公式可知,可能源化利用秸秆资源量的计算结果不仅取决于各类农作物产量,也受草谷比系数和可收集系数等参数取值的影响,这也是不同文献之间测算结果差异较大的原因。由于不同文献所用参数及其取值差异较大<sup>[21-23]</sup>,为保证参数的准确性,蔡亚庆等<sup>[3]</sup>和 Qiu 等<sup>[8]</sup>通过对比和分析已有研究系数取值的优劣,最终确定各个参数的取值,具有较好的代表性。因此,本文采用其系数取值(见表1)。依据该系数计算的秸秆资源量和收集量等见表2。

## 3 结果分析

### 3.1 秸秆资源总量、可收集量和可能源化利用资源量

基于中国2014年各农作物产量,结合草谷比系数、可收集系数,利用公式(1)和公式(2),本文计算出了秸秆资源总量和可收集利用量。表2给出了具体计算结果,可以看出,2014年中国农作物秸秆资源总量为8.97亿t,可收集量为7.69亿t。尽管可收集秸秆资源量低于农业部公布的8.08亿t<sup>[24]</sup>,但比其他研究结果的6.34亿t和7.0亿t等取值略高<sup>[3,24,25]</sup>,处于大部分研究中间,表明本文的计算结果较为可靠。

从各省来看,中国秸秆资源分布差异较大。河南秸秆资源总量和可收集秸秆资源量均居全国之首,分别达到0.84亿t和0.69亿t;紧随其后的是黑龙江、山东、河北、安徽、吉林和江苏等省份,秸秆资源总量分别为0.72亿t、0.66亿t、0.46亿t、0.45亿t、0.44亿t和0.42亿t。相比之下,西藏、北京和上海地



表1 各农作物草谷比系数、可收集系数取值

Table 1 Residue to product ratio and collection coefficients

of crop residues		
农作物	草谷比系数	收集系数
水稻	0.90	0.75
小麦	1.16	0.74
玉米	1.75	0.95
薯类	0.70	0.8
其他粮食作物	1.17	0.8
高粱	1.65	0.8
豆类	1.54	0.88
花生	1.94	0.88
油菜	2.04	0.89
芝麻	2.04	0.88
向日葵	2.04	0.88
胡麻	2.04	0.88
麻类	2.50	0.87
棉花	3.44	0.9
甘蔗	0.23	0.88

资料来源:蔡亚庆等<sup>[19]</sup>和 Qiu 等<sup>[8]</sup>。

区的秸秆资源量最少,均不足0.02亿t。2014年全国可收集秸秆资源量为7.69亿t,其在全国的分布情况与秸秆资源总量的分布基本一致。

根据公式(3),本文也计算了2014年中国可能源化秸秆资源量(表2)。结果表明,2014年中国约有1.86亿t秸秆可用于能源化利用,折合成标准煤约为0.93亿t(按照1t秸秆折合0.5t标准煤计算。)。从地区分布来看,可能源化秸秆资源量较高地区主要集中在东北地区的黑龙江、吉林;北部和西北地区的内蒙古、新疆,黄淮海地区的河南、安徽,东部地区的江苏,以及西南地区的广西。

从时间趋势来看,与2010年相比,2014年除上海、浙江、辽宁和北京的可能源化秸秆资源量减少之外,其余省份均不变或增加。增幅较多的省份主要集中在黑龙江、吉林,新疆、内蒙古、安徽、广西、河南、湖北以及江西等省或自治区。这与可能源化秸秆资源量分布几乎一致,表明未来上述省份开展秸秆能源化利用的潜力较大。

3.2 可能源化利用秸秆资源分布密度

除可能源化秸秆资源量外,秸秆能源企业布局也要考虑秸秆资源分布密度。基于可能源化秸秆资源量计算结果和公式(4),本文计算了2014年中国1km×1km栅格水平的可能源化利用秸秆资源分

表2 2014年各地区秸秆资源量计算结果

Table 2 Results of crop residue by regions in 2014

地区	可能源化 利用比例	2014年秸秆资源量/亿t			2010年
		秸秆 资源 总量	可收集 秸秆 资源量	可能源化 利用秸秆 资源量	可能源化 利用秸秆 资源量/亿t
	/%				
全国	34.40	8.97	7.69	1.860	1.471
北京	23.13	0.01	0.01	0.001	0.002
天津	26.70	0.02	0.02	0.003	0.003
河北	22.70	0.46	0.40	0.054	0.049
山东	25.27	0.66	0.56	0.095	0.091
河南	37.07	0.84	0.69	0.203	0.193
辽宁	23.90	0.22	0.19	0.023	0.024
吉林	47.67	0.44	0.40	0.161	0.128
黑龙江	48.50	0.72	0.64	0.255	0.206
山西	17.00	0.17	0.15	0.006	0.005
陕西	18.67	0.16	0.13	0.010	0.010
甘肃	22.77	0.15	0.13	0.014	0.012
内蒙古	26.77	0.37	0.34	0.062	0.047
宁夏	20.30	0.05	0.04	0.006	0.005
新疆	33.57	0.31	0.27	0.071	0.056
西藏	17.10	0.01	0.01	0.000	0.000
青海	18.30	0.02	0.01	0.001	0.001
上海	46.23	0.01	0.01	0.003	0.004
江苏	45.07	0.42	0.32	0.113	0.107
浙江	50.17	0.08	0.07	0.026	0.026
安徽	43.73	0.45	0.36	0.122	0.110
湖北	40.83	0.35	0.28	0.086	0.079
湖南	27.83	0.34	0.27	0.040	0.038
江西	44.13	0.23	0.18	0.058	0.053
重庆	34.37	0.13	0.10	0.020	0.019
四川	21.10	0.42	0.34	0.013	0.012
贵州	29.57	0.14	0.12	0.017	0.016
云南	28.63	0.27	0.23	0.030	0.024
福建	24.87	0.07	0.05	0.008	0.008
广东	40.67	0.19	0.15	0.045	0.042
广西	44.83	0.36	0.30	0.105	0.094
海南	55.23	0.03	0.02	0.011	0.011

注:表中可能源化利用比例为扣除生活用能、秸秆还田、工业化及食用菌基料等用途后的废弃比例,参数取值来源于蔡亚庆等<sup>[19]</sup>和 Qiu 等<sup>[8]</sup>;2010年可能源化秸秆资源利用量来源于 Qiu 等<sup>[8]</sup>的计算结果,由于本文的参数取值与该文一致,故具有较强的可比性。

布密度(图1)。可以看出,不同地区的可能源化利用秸秆资源分布密度差异较大。东北、华北、华东和西南部分地区的资源密度较高,平均超过100t/

2017年3月

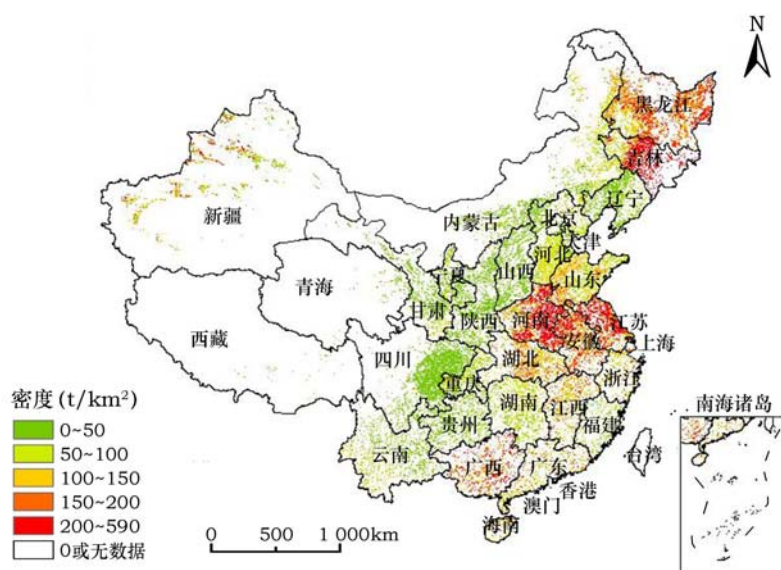


图1 2014年可能源化利用秸秆资源分布密度

Figure 1 Density distribution of crop residue resource available for commercial energy production in 2014

注:香港、澳门和台湾地区无数据。

km<sup>2</sup>。在省级层面,河南、吉林、江苏、黑龙江的秸秆资源分布密度最高,超过了200t/km<sup>2</sup>。此外,黑龙江、安徽、广西、新疆部分地区秸秆分布密度也较高。与此相反,甘肃、陕西、青海和西藏等地区的可能源化利用秸秆资源分布密度水平较低,平均不到20t/km<sup>2</sup>。

从时间趋势来看,与2010年相比<sup>1)</sup>,2014年各地区秸秆资源密度出现一定的变化,呈现“两极分化”的趋势,即秸秆分布密度较高地区越来越高,而较低地区越来越低。具体而言,黑龙江、吉林、河南和江苏等地区的秸秆分布密度增加,而内蒙古、山西、甘肃、福建、湖北、湖南等省份的秸秆资源密度有所下降。这可能是由不同地区耕地面积变化不同导致。近年来,中国东北、华北以及华东等地区作为中国传统粮食主产区,其耕地面积有所增加,秸秆资源也越来越丰富。

### 3.3 秸秆能源企业的区域布局适宜性

计算出各省的可能源化利用秸秆资源分布密度后,可以进一步评估各省建立秸秆能源企业的可行性。本文主要以燃料乙醇企业和秸秆发电企业为例,分析可能源化利用秸秆资源分布密度对秸秆能源企业区域布局适宜性的影响。

经济可行性是秸秆能源企业布局的重要因素,

运输成本是企业布局时需要考虑的主要经济条件。而运输成本与收集半径息息相关,因此分析秸秆能源企业布局适宜性时,需要设定合理的收集半径。部分研究表明,秸秆发电等综合利用的利润最大化收集半径为24~25km<sup>[26, 27]</sup>。因此,本文选择25km作为经济上可行的收集半径。

不同规模的秸秆发电和燃料乙醇企业,对秸秆资源总量和分布密度要求有所不同。在现有技术条件下,以25km为秸秆收集半径,建立6MW和25MW的发电企业分别需要4.752万t和18万t的秸秆资源量<sup>[8, 26, 27]</sup>,同时需要可能源化利用秸秆资源分布密度分别达到24t/km<sup>2</sup>和92t/km<sup>2</sup>;建立年产量为1万t和5万t的燃料乙醇企业分别需要6万t和30万t的秸秆资源量<sup>[8, 26, 27]</sup>。

基于上述设定,本文分析了2010年和2014年各地区建立秸秆发电企业和燃料乙醇企业的适宜情况。图2和图3分别绘制了2010年和2014年中国不同规模秸秆能源企业适宜分布情况。从图3可以看出,2014年吉林、江苏、河南等地区适宜建立年产能超过5万t的燃料乙醇企业;河南、江苏、安徽、吉林、黑龙江、广西以及新疆等局部地区适宜建立25MW以上的秸秆发电企业。而东北地区部分县、华北平原、长江中下游地区、重庆、西南部分地区、

1)2010年的秸秆资源分布密度可参考文献[8]中的图2。

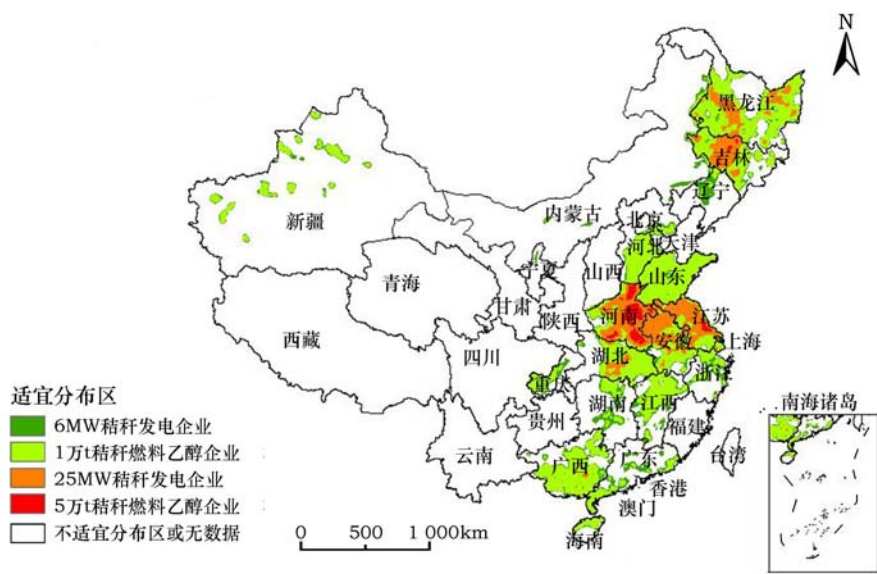


图2 2010年不同规模秸秆能源企业分布

Figure 2 Suitability distributions of bioenergy plants with different scale in 2010  
注:港、澳、台地区无数据。

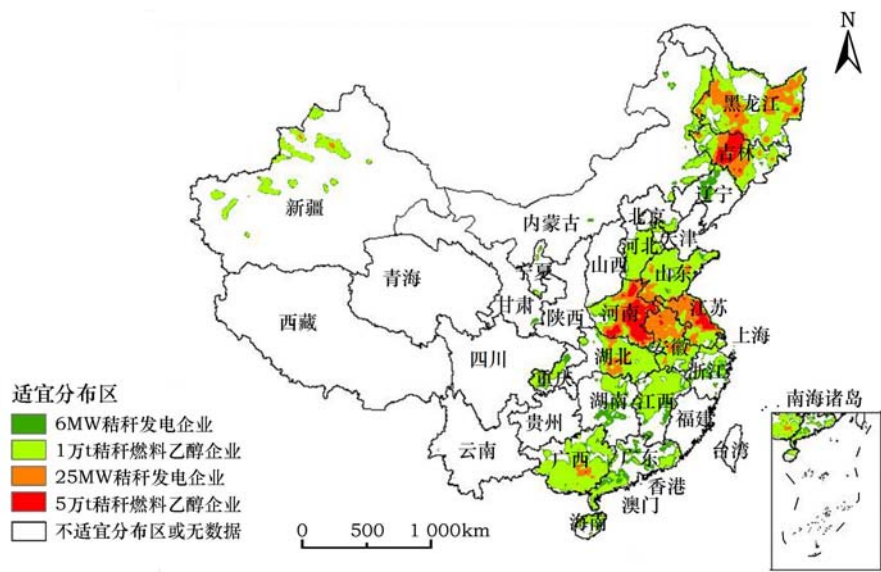


图3 2014年不同规模秸秆能源企业分布

Figure 3 Suitability distributions of bioenergy plants with different scale in 2014  
注:港、澳、台地区无数据。

海南以及新疆部分地区适宜建立年产能1万t燃料乙醇企业和6MW的秸秆发电企业。

2014年各地区秸秆能源企业布局的适宜性出现一定变化。首先,与2010年相比,2014秸秆能源企业适宜布局面积明显增加。由表3可以看出,不同规模的秸秆能源企业适宜分布面积均显著增加,特别是适宜大型发电企业和燃料乙醇企业的分布面积增加较多。其次,区域间秸秆能源企业布局适

表3 各类型秸秆能源企业布分布面积变化

Table 3 Change in distribution area of different types of bioenergy plants (km<sup>2</sup>)

秸秆能源企业	面积	
	2010年	2014年
6MW 秸秆发电企业	283 559	326 477
年产1万t燃料乙醇企业	1 097 572	1 118 936
25MW 秸秆发电企业	350 108	385 919
年产5万t大型燃料乙醇企业	44 307	111 126



2017年3月

宜性变化并不一致。对比图2和图3,可以看出大型秸秆能源企业在吉林、河南、江苏、广西等地区的适宜布局数量显著增加,尽管山东、重庆和广东等地区的秸秆能源企业适宜布局面积和规模均有所增加,但幅度较小。这也表明,未来中国秸秆能源企业的适宜布局区域可能进一步向华北、东北和华东等地区集中。

## 4 结论和讨论

近年来,中国能源需求快速增长,对国际能源市场的依赖也日益加深。与此同时,中国人均耕地和水资源严重不足,开发利用农作物秸秆资源已经成为中国未来发展生物质能源的重要选择。现有研究大多侧重于秸秆资源总量和可能源化利用秸秆资源量的计算,较少在秸秆资源分布密度和秸秆收集半径的基础上分析不同地区生物质能源企业布局的适宜性。本文利用2014年统计数据和卫星遥感数据,深入分析了中国农作物秸秆资源量和利用方式,计算2014年中国可能源化利用秸秆资源量以及秸秆资源空间分布密度,并基于此分析了不同秸秆能源企业空间布局的适宜性,同时判断秸秆能源企业布局的时空变化趋势。主要结论如下:

(1)中国农作物秸秆资源非常丰富,可能源化利用潜力巨大。2014年中国秸秆资源总量达到8.97亿t,可收集秸秆资源量为7.69亿t,可能源化利用秸秆资源量为1.86亿t,占可收集秸秆资源量的34.4%,表明中国秸秆资源的能源化利用前景广阔。

(2)中国可能源化利用秸秆资源密度差异明显,东北、华北、华东和西南部分地区可能源化秸秆资源分布密度较高,尤其是河南、吉林、江苏和黑龙江四省均超过了200t/km<sup>2</sup>。与此相反,甘肃、陕西、青海和西藏等地区的秸秆分布密度水平较低,平均不到20t/km<sup>2</sup>。从时间变化趋势来看,东北、华北、华东等地区的秸秆分布密度越来越高,而其他地区均变动不大,甚至有所下降。

(3)分析了秸秆能源企业在各区域布局的适宜性及变化趋势。结果表明,江苏、河南、安徽、吉林、黑龙江等省份适宜布局年产能5万t燃料乙醇企业和25MW的秸秆发电企业;东北地区部分县、华北平原、长江中下游地区、重庆以及四川省的成都平原、西南部分地区、海南以及新疆少部分地区适宜

布局年产能1万t燃料乙醇企业和6MW的秸秆发电企业。而且从时间趋势上看,河南、吉林、黑龙江、江苏、安徽等省份未来秸秆能源化利用潜力较大,未来适宜布局秸秆能源企业的区域可能会进一步向这些地区聚集。

本文研究结果具有重要的政策含义。研究表明,中国2014年可能源化利用秸秆资源量为1.86亿t,这相当于0.93亿t标准煤,占中国2014年能源消费总量的2%左右,对于解决中国能源稀缺问题具有重要意义。而且考虑经济可行性,布局秸秆能源企业时,政府也要考虑地区可能源化秸秆资源密度,布置适当规模的企业,完善秸秆能源企业布局网络,并重点向东北、华北和华东等密度较高和未来发展潜力较大地区布局,防止由于盲目建设而导致资源浪费。此外,国家也应加大对秸秆能源企业的支持力度,使焚烧及部分用于造纸和农村生活能源的秸秆资源用于生物能源生产,从而减轻国家能源压力,同时降低秸秆不合理利用造成的环境污染。

## 参考文献(References):

- [1] 黄季焜,仇焕广. 我国生物燃料乙醇发展的社会经济影响及发展战略与对策研究[M]. 北京:科学出版社,2010. [Huang J K, Qiu H G. Social and Economic Impacts of Biofuel Development and Policy Implications for China's Biofuel Development[M]. Beijing: Science Press, 2010.]
- [2] 王亚静,毕于运,高春雨. 中国秸秆资源可收集利用量及其适宜性评价[J]. 中国农业科学,2010,43(9):1852-1859. [Wang Y J, Bi Y Y, Gao C Y. Collectable amounts and suitability evaluation of straw resource in China[J]. *China Agricultural Science*, 2010, 43(9): 1852-1859.]
- [3] 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. Analysis on the potentials of crop residues for commercial energy production in China[J]. *Journal of Natural Resource*, 2011, 26(10): 1637-1646.]
- [4] 张培栋,杨艳丽,李光全,等. 中国农作物秸秆能源化潜力估算[J]. 可再生能源,2007,25(6):80-83. [Zhang P D, Yang Y L, Li G Q, et al. Estimating potentials for crop residues for commercial energy production in China[J]. *Renewable Energy*, 2007, 25(6): 80-83.]
- [5] 毕于运,高春雨,王亚静,等. 中国秸秆资源数量估算[J]. 农业

- 工程学报, 2009, 25(12): 211-217. [Bi Y Y, Gao C Y, Wang Y J, et al. Estimation of straw resources in China[J]. *Transactions of the CSAE*, 2009, 25(12): 211-217.]
- [6] 钟华平, 岳燕珍, 樊江文. 中国作物秸秆资源及其利用[J]. 资源科学, 2003, 25(4): 62-67. [Zhong H P, Yue Y Z, Fan J W. Characteristics of crop straw resources in China and its utilization[J]. *Resource Science*, 2003, 25(4): 62-67.]
- [7] Rosegrant M W, Zhu T, Msangi S, et al. Global Scenarios for Biofuels: Impacts and Implications[R]. Washington: International Food Policy Research Institute (IFPRI), 2006.
- [8] Qiu H G, Sun L X, Xu X L, et al. Potentials of crop residues for commercial energy production in China: A geographic and economic analysis[J]. *Biomass and Bioenergy*, 2014, 64(5): 110-123.
- [9] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴 2015[M]. 北京: 中国统计出版社, 2015. [National Bureau of Statistics of the People's Republic of China. China Statistical Yearbook 2015 [M]. Beijing: China Statistics Press, 2015.]
- [10] Liu J Y, Liu M L, Tian H Q, et al. Spatial and temporal patterns of China's cropland during 1990-2000: An analysis based on Landsat TM data[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2005, 98(4): 442-456.
- [11] 刘纪远, 张增祥, 庄大方, 等. 20世纪90年代中国土地利用变化时空特征及其成因分析[J]. 地理研究, 2003, 22(1): 1-12. [Liu J Y, Zhang Z X, Zhuang D F, et al. Spatial and temporal character and cause of China's land use during 1990-2000[J]. *Geography Research*, 2003, 22(1): 1-12.]
- [12] 刘纪远, 布和敖斯尔. 中国土地利用变化现代过程时空特征的研究: 基于卫星遥感数据[J]. 第四纪研究, 2000, 20(3): 229-239. [Liu J Y, Buheaosier. Spatial and temporal character of China's land use: Based on the remote sensing data[J]. *Quaternary Research*, 2000, 20(3): 229-239.]
- [13] Liu J Y, Zhang Z X, Xu X L, et al. Spatial patterns and driving forces of land use change in China during the early 21st century [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2010, 20(4): 483-494.
- [14] Liu J Y, Liu M L, Zhuang D F, et al. Study on spatial pattern of land-use change in China during 1995-2000[J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2003, 46(4): 373-384.
- [15] Liu J Y, Kuang W H, Zhang Z X, et al. Spatial temporal characteristics, patterns and causes of land-use changes in China since the late 1980s[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2014, 24(2): 195-210.
- [16] Prince S D, Goward S N. Global primary production: A remote sensing approach[J]. *Journal of Biogeography*, 1995, 22(4-5): 815-835.
- [17] Goetz S J, Prince S D. Satellite remote sensing of primary production: An improved production efficiency modeling approach [J]. *Ecological Modelling*, 1999, 122(3): 239-255.
- [18] Cao M K, Prince S D, Small J, et al. Satellite remotely sensed interannual variability in terrestrial net primary productivity from 1980 to 2000[J]. *Ecosystems*, 2004, 7: 233-242.
- [19] 闫慧敏, 刘纪远, 黄河清, 等. 城市化和退耕还林草对中国耕地生产力的影响[J]. 地理学报, 2012, 67(5): 579-588. [Yan H M, Liu J Y, Huang H Q, et al. Impact of urbanization and grain for green project on the cropland productivity[J]. *Journal of Geography*, 2012, 67(5): 579-588.]
- [20] Yan H M, Liu J Y, Huang H Q, et al. Assessing the consequence of land use change on agricultural productivity in China [J]. *Global and Planetary Change*, 2009, 67(1-2): 13-19.
- [21] Yang Y L, Zhang P D, Zhang W L, et al. Quantitative appraisal and potential analysis for primary biomass resources for energy utilization in China[J]. *Renewable and Sustainable Energy Review*, 2010, 14(9): 3050-3058.
- [22] 王晓玉, 薛帅, 谢光辉. 大田作物秸秆量评估中秸秆系数取值研究[J]. 中国农业大学学报, 2012, 17(1): 1-8. [Wang X Y, Xue S, Xie G H. Value taking for residue factor as a parameter to assess the field residue of field crops[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2012, 17(1): 1-8.]
- [23] 谢光辉, 韩东倩, 王晓玉, 等. 中国禾谷类大田作物收获指数和秸秆系数[J]. 中国农业大学学报, 2011, 17(1): 1-8. [Xie G H, Han D Q, Wang X Y, et al. Harvest index and residue factor of cereal crops in China[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2011, 16(1): 1-8.]
- [24] 农业部. 2014农业资源环境保护与农村能源发展报告[M]. 北京: 中国农业出版社, 2014. [Department of Agricultural. Report of Agricultural Resource and Environmental Protection and Rural Energy Development in 2014[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2014.]
- [25] 车莉. 农作物秸秆资源量估算、分布与利用潜力研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2014. [Che L. Study on Crop Residue Estimate, Spatial Distribution and Use Potential[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2014.]
- [26] 王志伟, 白炜, 师新广, 等. 农作物秸秆气化发电系统经济型分析[J]. 可再生能源, 2007, 25(6): 25-28. [Wang Z W, Bai W, Shi X G, et al. An economic analysis on crop straw gasification generation system[J]. *Renewable Energy Resource*, 2007, 25(6): 25-28.]
- [27] 吴创之, 周肇秋, 马隆龙, 等. 生物质气化发电项目经济型分析[J]. 太阳能学报, 2009, 30(3): 368-373. [Wu C Z, Zhou Z Q, Ma L L, et al. Economic analysis of biomass gasification and power generation projects[J]. *Acta Energiæ Solaris Sinica*, 2009, 30(3): 368-373.]



## Potential and regional distribution for the energy utilization of crop residues in China

ZHANG Chongshang<sup>1</sup>, LIU Le<sup>1</sup>, LU Qinan<sup>1</sup>, XU Xinliang<sup>2</sup>, QIU Huanguang<sup>1</sup>

(1. School of Agricultural Research and Rural Development, Renmin University of China, Beijing 100872, China;

2. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, China Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

**Abstract:** There are redundant crop residual resources in China and so developing crop residues as biomass energy shows great economic and ecological promise. For the efficient utilization of field crop residues, it is necessary to evaluate the potential and regional distribution of commercial production of field crop residues. First, we employed the yields of various crops in different provinces to calculate the theoretical amount of crop residue and the potential for commercial energy production. Remote-sensing data was mobilized to obtain NPP at a 1 km × 1 km grid level and distribution density of crop residue in different grids, and then suitability distribution of bioenergy plants in different regions was achieved. Compared to previous research, we considered the distribution density of crop residue in different regions because this is important to the use of crop residues which face high collection and transportation costs. We also analyzed the development trend of the distribution of crop residues and energy plants by comparing different years. Our results show that China's total output of crop residues in 2014 amounted to 0.897 billion ton, collectable amount of crop residue amounted to 0.769 billion ton. Based on the consideration of resources density, larger-scale power plants and fuel ethanol plants are suitable for Jilin, Jiangsu, Henan, Anhui and Heilongjiang Provinces. In the future, China's crop residue resources and energy plants will be concentrated in these areas. Small-scale power plants and fuel ethanol plants are suitable for Northeast China, Northern China, Southwest China, Middle and Lower Reaches of the Yangtze River, Chengdu Plain and Xinjiang. Government should support the energy utilization of crop residues and distribute energy plants according to crop residue density and scale.

**Key words:** energy utilization of crop residue; distribution density; potential; regional distribution; China