

我国农业生物质发电潜力评估及环境效益分析

张晟义, 张杰, 王童, 陈明月

(新疆财经大学工商管理学院, 新疆乌鲁木齐830012)

摘要:为评估我国农业生物质发电潜力及减排的环境效益,以相关统计数据为依据,结合相应的草谷比系数和资源可收集系数,估算2018年我国农业生物质资源理论可获得量与实际可获得量。通过计算各类农业生物质资源的低位热值,测算其发电潜力。基于生命周期理论(LCA),依据各类资源和污染物的减排量及其资源和环境价值,核算减排的环境收益。研究表明:2018年我国农业生物质净剩余量的发电潜力为14051.38MW,减排的环境收益为14943139.79元,应在资源禀赋和发展条件好的地区优先布局农业生物质发电产业,注重弥补农业生物质发电的正外部性。具体应做到:(1)整合供给端无序状态,充分发挥资源优势;(2)重视资源禀赋和发展条件,遵循因地制宜发展原则;(3)补偿农业生物质发电的正外部性,积极引进清洁发展机制(CDM)项目。

伴随着全球经济的迅猛发展和人口的不断增长,能源消费需求日益旺盛。电力能源作为日常消费能源之一,消费需求日益攀升。据2019年相关统计数据显示,2018年中国大陆31个省份中,有30个省份2018年电力消费量较2017年呈现上升趋势。然而,当前我国电力生产中,火电仍占据较大比例,不仅造成大量温室气体排放,还造成一定程度的环境污染。2019年10月24日,首届可持续发展论坛在北京召开,国家主席习近平向论坛致贺信,信中明确指出:中国秉持创新、协调、绿色、开放、共享的发展理念,推动中国经济高质量发展,全面深入贯彻落实2030年可持续发展议程,促进共同发展,携手构建人类命运共同体[1]。农业生物质发电作为一种清洁能源开发利用方式,实现了理论意义上的“零排放”。同时,中国作为世界农业大国,农业生物质资源丰富,且农业生物质发电技术较为成熟,因此,大力发展农业生物质发电势必成为优化我国能源消费结构、推动经济高质量发展以及增强可持续发展能力的重要举措。客观评估我国农业生物质净剩余量的发电潜力及减排的环境效益,具有重要的现实意义。

目前,国内外学者对农业生物质发电的研究涉及诸多方面。具体而言,Xu Xinliang等对中国能源作物的地域分布及其用于生物质能源生产的潜力进行了深入剖析,结果表明:中国能源作物储量丰富、开发潜力大,但省域之间存在较大差异[2];Jena L.Thompson等评估了玉米秸秆的收获和供应成本,证明成本是制约玉米秸秆资源化利用的首要因素[3];王圣等对我国农林生物质发电产业的发展现状及存在的问题进行深入分析,研究得到:运营成本高与核心技术缺失制约了农林生物质发电产业的发展[4];王斯一等基于资源价值流理论和生命周期理论(LCA),对燃煤发电和农业生物质发电的成本进行了比较研究,研究表明:与燃煤发电相比,虽然农业生物质发电运营成本高,但在长期发展过程中能创造出更大的资源价值和环境价值[5];常圣强等对国内外农业生物质气化发电技术研究进展进行了梳理,结论表明:我国应加大核心技术研发投入,研制出更加适合我国国情的生物质发电技术[6];李可心在研究中对我国秸秆发电产业的区域适宜性进行实证分析,进一步细化了区域内阻碍秸秆发电产业发展的影响因素,验证了因地制宜的发展原则[7];卫洪建利用遥感卫星数据测算了地理约束下我国农业生物质资源空间分布及能量潜力,研究表明:在考虑地理条件约束的情境下,我国农业生物质资源的开发、利用应遵循可持续发展的原则[8]。

综上所述,国内外关于农业生物质发电的研究相对来说比较成熟,但是,国内外相关研究更多聚焦于农业生物质资源能源化开发利用和产业发展层面,鲜有学者对农业生物质发电潜力及节能减排效益进行实证研究,基于此,本文将在以往研究的基础上,评估我国农业生物质资源净剩余量的发电潜力,并基于生命周期理论(LCA)核算减排的环境效益。

一、评估方法与参数选取

我国农业生物质资源主要为农作物秸秆及农业加工业剩余物,参考以往研究结果及考虑到数据可得性,本文主要选取谷物(主要选取小麦、水稻、玉米)、油料作物(主要选取花生、油菜)、糖类作物(主要选取甘蔗)、薯类作物、豆类作物和棉花的作物秸秆与加工剩余物为研究对象,通过实证分析,评估我国农业生物质资源净剩余量的发电潜力。基于生命周期理论(LCA)的视角,核算减排环境效益。具体包括以下6个部分。

(1) 农业生物质资源的理论可获得量Total

$Product_{Theory} (TP_{Theory})$:指农业生物质资源可收集与利用量的理论最大值;

(2) 农业生物质资源的实际可获得量Total

$Product_{Reality} (TP_{Reality})$:指农业生物质资源收获过程中实际的可收集与利用量;

(3) 农业生物质资源的理论热值（按低位热值计

算） $Caloricity_{Theory}$ ：是指农业生物质资源在一定温度下完全燃烧后，冷却至原有温度时所释

放出的热量。（注：刘荣厚定义高位热值为“将一定量的生物质试样，放在一个密闭的容器中，在有过剩氧气存在的条件下使其完全燃烧，用水吸收放出的热量，然后由水温的升高计算出该生物质的发热量”；定义低位热值为“在大气状况下完全燃烧单位重量的生物质所得到的热量，等于从高位热值中减去水蒸气的汽化潜热后的热量”。[9]）

(4) 农业生物质资源的最大发电潜力Power Generation

Potential_{Maximum} (PGP_{Max})

)：考虑能量转换效率和年度持续运行时间的条件下，农业生物质资源的理论热值所能产生的最大发电量。

(5) 农业生物质资源净剩余量的发电潜力Power Generation Potential_{Net}

Surplus (PG_{PNS})

)：考虑能量转换效率、年度持续运行时间和农业生物质资源净剩余比率的条件下，农业生物质资源的理论热值所能产生的最大发电量。

(6) 环境效益Environmental Benefit (EB)：在农业生物质净剩余发电潜力约束下，与燃煤发电相比，农业生物质发电产生的资源价值和环境价值，其量化结果统一用货币价值来衡量。

这6部分的计算公式如下所示：

$$TP_{\text{Theory}}(n) = \sum_{m=1}^t P(m,n) \times RPR(m) \quad (1)$$

$TP_{\text{Theory}}(n)$ 表示第 n 个省份目标农业生物质资源理论可获得量，单位：万 t； $P(m,n)$ 表示第 m 种目标农作物在第 n 个省份的经济产量，单位：万 t； $RPR(m)$ 表示第 m 种目标农作物的草谷比系数。

$$TP_{\text{Reality}}(n) = \sum_{m=1}^t P(m,n) \times RPR(m) \times G(m) \quad (2)$$

$TP_{\text{Reality}}(n)$ 表示第 n 个省份目标农业生物质资源实际可获得量，单位：万 t； $G(m)$ 表示第 m 种目标农作物的可收集系数。

$$\begin{aligned} \text{Caloricity}_{\text{Theory}}(n) = \\ 10\,000 \times \sum_{m=1}^t P(m,n) \times RPR(m) \times G(m) \times C(m) \end{aligned} \quad (3)$$

$\text{Caloricity}_{\text{Theory}}(n)$ 第 n 个省份目标农业生物质资源的理论热值，单位：MJ； $C(m)$ 第 m 种目标农作物的低位热值，单位：MJ/t。

$$\begin{aligned} PGP_{\text{Max}}(n) = \\ \frac{\alpha \times 10\,000 \times \sum_{m=1}^t P(m,n) \times RPR(m) \times G(m) \times C(m)}{T} \end{aligned} \quad (4)$$

$PGP_{\text{Max}}(n)$ 表示第 n 个省份目标农业生物质资源的最大发电潜力，单位：MW； α 表示能量转换效率； T 表示年度持续运行时间，单位：s。M.Hiloidhari 等在研究中明确指出， T 的适宜取值为 365 d， α 较为保守的取值为 20%^[10]，本文借鉴 M.Hiloidhari 等人研究中的取值。

$$\begin{aligned} PGP_{\text{NS}}(n) = \\ \frac{\alpha \times 10\,000 \times \sum_{m=1}^t P(m,n) \times RPR(m) \times G(m) \times C(m)}{T} \times \beta \end{aligned} \quad (5)$$

$PGP_{\text{NS}}(n)$ 表示第 n 个省份目标农业生物质资源净剩余量的发电潜力，单位：MW； β 表示目标农业生物质资源的净剩余比率，王亚静等通过实证研究测算出我国农业生物质资源净剩余比率约为 17.87%^[11]，本文借鉴该取值。

$$EB(n) = \sum_{i=1}^k \left[\left(\frac{\alpha \times 10\,000 \times \sum_{m=1}^l P(m,n) \times RPR(m) \times G(m) \times C(m)}{T} \times \beta \right) \times 1\,000 \times Q_i / 1\,000 \times \lambda_i \right] + \frac{\alpha \times 10\,000 \times \sum_{m=1}^l P(m,n) \times RPR(m) \times G(m) \times C(m)}{T} \times \beta \times 1\,000 \times Q_{\text{煤炭}} / 1\,000 \times \lambda_{\text{煤炭}} \quad (6)$$

$EB(n)$ 表示第 n 个省份减排的环境收益； Q_i 表示与燃煤发电相比，农业生物质发电运行过程中第 i 种污染物的减排排放量，单位： $\text{g}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ ； $Q_{\text{煤炭}}$ 表示与燃煤发电相比，农业生物质发电运行过程中煤炭的节约量，单位： $\text{g}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ ； λ_i 表示第 i 种污染物的环境价值，单位： $\text{元}/\text{kg}$ ； $\lambda_{\text{煤炭}}$ 表示煤炭的资源价值，单位： $\text{元}/\text{kg}$ 。

第 m 种目标农作物在第 n 个省份的经济产量从相关统计数据中获得，目标农作物的草谷比系数、低位热值以及可收集系数均基于文献分别整理在表1、表2和表3中。

表1 目标农作物秸秆形式与草谷比系数^[24]

目标农作物	水稻		玉米		花生		小麦	油菜	甘蔗	薯类作物	豆类作物	棉花
秸秆形式	稻草	稻壳	玉米秆	玉米芯	花生秧	花生壳	麦秸	油菜秆	蔗渣	薯蔓	豆秸	棉秆
草谷比系数	0.9	0.27	1.2	0.25	0.8	0.31	1.2	2.6	0.24	0.5	1.7	9.2

表2 目标农作物秸秆的低位热值^[24]

单位： MJ/t

目标作物秸秆	稻草	稻壳	玉米秆	玉米芯	花生秧	花生壳	麦秸	油菜秆	蔗渣	薯蔓	豆秸	棉秆
低位热值	13970	12560	15539	14395	15490	19200	15363	14567	9738	14230	16146	15991

表3 目标农作物秸秆的可收集系数^[24]

目标作物秸秆	稻草	稻壳	玉米秆	玉米芯	花生秧	花生壳	麦秸	油菜秆	蔗渣	薯蔓	豆秸	棉秆
可收集系数	0.78	0.95	0.95	0.97	0.85	0.7	0.76	0.85	0.88	0.8	0.88	0.9

二、实证结果分析

(一) 我国农业生物质发电潜力评估

1. 我国农业生物质资源存量概况

本文以中国大陆31个省份（包含自治区、直辖市）主要农产品经济产量的统计数据为研究基础，选取谷物（主要选取小麦、水稻、玉米）、油料作物（主要选取花生、油菜）、糖类作物（主要选取甘蔗）、薯类作物、豆类作物和棉花的作物秸秆与加工剩余物为主要研究对象，通过公式计算出2018年我国国内9种主要农业生物质资源的理论可获得量和实际可获得量，具体如表4和表5所示。

表 4 2018 年国内主要农业生物质资源可获得量（按类别统计）

序号	农业生物质资源	理论可获得量/万t	实际可获得量/万t	所占比率/%（按实际可获得量计算）
1	玉米秆	30861.36	29318.2920	35.02
2	稻草	19091.61	14891.4558	17.79
3	麦秸	15773.28	11987.6928	14.32
4	玉米芯	6429.45	6236.5665	7.45
5	稻	5727.483	5441.1089	6.50
6	棉秆	5614.76	5053.2840	6.04
7	油菜秆	3452.54	2934.6590	3.51
8	豆秸	3264.68	2872.9184	3.43
9	蔗渣	2594.352	2283.0298	2.73
10	花生秧	1386.56	1178.5760	1.41
11	薯蔓	1432.75	1146.2000	1.37
12	花生壳	537.292	376.1044	0.45
13	总计	96166.12	83719.8875	100.00

表 5 2018 年国内主要农业生物质资源可获得量（按省份统计）

序号	农业生物质资源	理论可获得量/万t	实际可获得量/万t	所占比率/% (按实际可获得量计算)
1	黑龙江	10159.65	9303.2044	11.06
2	河南	9299.858	7850.0065	9.33
3	山东	7525.389	6522.1304	7.75
4	新疆	6752.046	6037.2597	7.18
5	吉林	5030.019	4683.6094	5.57
6	内蒙古	4837	4538.5637	5.40
7	河北	5076.78	4457.7592	5.30
8	安徽	5324.579	4407.8520	5.24
9	四川	4897.292	4257.4518	5.06
10	江苏	4577.715	3741.5287	4.45
11	湖南	4191.237	3505.5991	4.17
12	湖北	4142.027	3464.816	4.12
13	广西	3482.643	3019.6715	3.59
14	辽宁	3041.708	2820.1814	3.35
15	云南	2868.283	2587.5002	3.08
16	江西	2863.804	2368.7336	2.82
17	山西	1796.025	1657.0624	1.97
18	广东	1811.174	1516.3265	1.80
19	陕西	1637.989	1438.4854	1.71
20	甘肃	1472.917	1314.4417	1.56
21	贵州	1355.824	1172.7224	1.39
22	重庆	1299.518	1126.6114	1.34
23	浙江	779.829	651.6446	0.77
24	福建	571.448	473.3917	0.56
25	宁夏	492.532	446.7558	0.53
26	天津	292.593	258.9201	0.31
27	海南	204.462	169.7751	0.20
28	青海	163.885	136.261	0.16
29	上海	122.555	99.8279	0.12
30	北京	47.305	43.7943	0.05
31	西藏	48.035	39.7618	0.05
32	总计	96166.12	84111.6491	100.00

由表4、表5可知，2018年我国主要农业生物质的理论可获得量约为96166.12万t。考虑到农业生物质的多用途性和可获得性，经计算得出2018年我国主要农业生物质的实际可获得量约为84111.65万t，表明我国农业生物质资源储量丰富。

从作物类别分析，水稻、玉米和小麦的作物秸秆和加工剩余物是农业生物质资源的三大主要来源，分别占据农业生物质资源实际可获得量的24.29%、42.47%和14.32%，且累计占比高达81.08%；而这三种作物正常年份产量波动很小，说明我国农业生物质资源供应结构具有内在的稳定性，整合供给端的分散性和无序性成为推动农业生物质发电产业发展的着力点。

从省域角度分析，黑龙江、河南、山东、新疆、吉林、内蒙古、河北、安徽、四川和江苏10个省份的农业生物质资源总量占据2018年我国农业生物质资源实际可得量的66.34%，表明农业大省具有较高的资源禀赋；而由于气候条件和作物种植结构的差异，农业生物质资源分布具有显著的地域差异，按资源实际可获得量降序排列可得：华东 > 华中 > 东北 > 华北 > 西北 > 西南 > 华南，区域资源可获得性应成为布局农业生物质发电产业的一个重要考量因素。

通过计算不同类别和不同省份农作物的实际可获得量，能够对全国农业生物质资源和农业生物质发电产业有更加清晰的认识，明确资源可利用情况，避免由于信息与认知障碍[14]造成的发展的盲目性。

2.我国农业生物质发电潜力评估

从数据统计分析的结果看，我国2018年农业生物质发电的最大潜力为78631.1201MW，农业生物质资源净剩余量的发电潜力为14051.3812MW。根据相关数据显示，截至2018年底，农林生物质发电项目遍布全国25个省、直辖市、自治区，总装机容量约8603MW，总装机容量与净剩余发电潜力之间的差额总共约为5987MW。按农业生物质资源类别和按省域进行统计分析的结果如表6、表7所示。省域总装机容量与净剩余发电潜力之间差额的统计结果如表8所示。

表 6 2018 年我国不同类别农业生物质发电潜力评估

序号	农业生物质资源	最大发电潜力/MW	净剩余量的发电潜力/MW	所占比率/% (按净剩余量发电潜力计算)	前五名省份及其占比情况统计
1	玉米秆	28892.5000	5163.0897	36.74	黑龙江15.48%，吉林10.89%，内蒙古10.5%，山东10.14%，河南9.14%
2	稻草	13193.4067	2357.6618	16.78	黑龙江12.66%，湖南12.61%，江西9.86%，湖北9.27%，江苏9.23%
3	麦秸	11679.7897	2087.1784	14.85	河南27.41%，山东18.8%，安徽12.23%，河北11.04%，江苏9.81%
4	玉米芯	5693.5169	1017.4315	7.24	黑龙江15.48%，吉林10.89%，内蒙古10.5%，山东10.41%，河南9.14%
5	棉秆	5124.7504	915.7929	6.52	新疆83.75%，河北3.92%，山东3.56%，湖北2.44%，安徽1.46%
6	稻壳	4334.1151	774.5064	5.51	黑龙江12.66%，湖南12.61%，江西9.86%，湖北9.27%，江苏9.23%
7	豆秸	2941.7897	525.6978	3.74	黑龙江35.33%，内蒙古10.71%，四川6.33%，云南6.15%，安徽5.36%
8	油菜秆	2711.1351	484.4798	3.45	四川22%，湖北15.46%，湖南15.38%，贵州6.49%，安徽6.35%
9	蔗渣	1409.9533	251.9587	1.79	广西67.46%，云南15.17%，广东13.07%，海南1.23%，江西0.6%
10	花生秧	1157.7969	206.8983	1.47	河南33.03%，山东17.7%，广东6.02%，河北5.68%，湖北4.66%
11	薯蔓	1034.4004	184.8474	1.32	四川18.89%，贵州10.16%，重庆9.94%，甘肃7.06%，云南5.61%
12	花生壳	457.9658	81.8385	0.58	河南33.03%，山东17.7%，广东6.02%，河北5.68%，湖北4.66%
13	总计	78631.1201	14051.3812	100.00	

表 7 2018 年我国不同省份发电潜力评估

序号	省份	最大发电潜力/MW	净剩余量的发电潜力/MW	所占比率/% (按净剩余量发电潜力计算)		
1	黑龙江	8680.1440	1551.1417	11.04		
2	河南	7603.9466	1358.8253	9.67	36.47	
3	山东	6355.1874	1135.6720	8.08		
4	新疆	6037.2356	1078.8540	7.68		
5	吉林	4483.5280	801.2065	5.70		
6	内蒙古	4369.1327	780.7640	5.56	39.27	
7	河北	4338.9085	775.3630	5.52		
8	安徽	4096.0921	731.9717	5.21		
9	四川	3924.7451	701.3519	4.99		
10	江苏	3422.8101	611.6562	4.35		
11	湖北	3140.6552	561.2351	3.99		
12	湖南	3099.2800	553.8413	3.94		
13	辽宁	2699.9694	482.4845	3.43	11.91	
14	云南	2313.9126	413.4962	2.94		
15	广西	2281.4177	407.6893	2.90		
16	江西	2070.2398	369.9519	2.63		
17	山西	1606.3391	287.0528	2.04	10.41	
18	陕西	1382.2597	247.0098	1.76		
19	甘肃	1266.7173	226.3624	1.61		
20	广东	1261.5909	225.4463	1.60		
21	贵州	1071.1285	191.4107	1.36		
22	重庆	1026.1393	183.3711	1.31		
23	浙江	573.8453	102.5462	0.73		
24	宁夏	426.1448	76.1521	0.54	1.94	
25	福建	413.9562	73.9740	0.53		
26	天津	248.4284	44.3942	0.32		
27	海南	141.1940	25.2314	0.18		
28	青海	128.1998	22.9093	0.16		
29	上海	87.6954	15.6712	0.11		
30	北京	42.5352	7.6010	0.05		
31	西藏	37.7411	6.7443	0.05		
32	总计	78631.1201	14051.3812	100.00		100.00

表 8 2018 年我国农林生物质发电省域装机容量与净剩余发电潜力差额汇总

省份	装机容量/MW	净剩余量发电潜力总计/MW	差值（净剩余发电潜力-装机容量）/MW
山东	1431	1136	-295.0
安徽	1109	732	-377.0
黑龙江	862	1551	689.0
江苏	525	612	87.0
吉林	487	801	314.0
湖北	483	561	78.0
河北	456	775	319.0
湖南	452	554	102.0
河南	427	1359	932.0
山西	279	287	8.0
浙江	223	103	-120.0
广西	222	408	186.0
广东	220	225	5.0
江西	182	370	188.0
内蒙古	144	781	637.0
四川	121	701	580.0
贵州	90	191	101.0
辽宁	72	482	410.0
重庆	60	183	123.0
福建	54	74	20.0
宁夏	50	76	26.0
天津	30	44	14.0
陕西	30	247	217.0
甘肃	30	226	196.0
新疆	24	1079	1055.0
云南	0	413	413.0
海南	0	25	25.0
青海	0	23	23.0
上海	0	16	16.0
北京	0	8	8.0
西藏	0	7	7.0
总计	8063	14050	5987.0

由表6的统计数据可知：玉米的作物秸秆和加工剩余物发电潜力占比最高，为43.98%（玉米秸秆和玉米芯分别占比36.74%、7.24%），黑龙江、吉林、内蒙古、山东和河南为玉米秸秆和玉米芯净剩余量发电潜力排名前五的省份，五省累计净剩余发电潜力占据全国玉米秸秆和玉米芯净剩余发电潜力的比率约为56.15%。

稻草和稻壳的净剩余发电潜力共占全国净剩余发电潜力的比率约为22.29%，各自占比分别为16.78%、5.51%。稻草和稻壳的净剩余发电潜力排名前五的省份为：黑龙江、湖南、江西、湖北和江苏，累计占全国稻草和稻壳净剩余发电潜力的比率约为53.62%。

麦秸的净剩余发电潜力占全国净剩余发电潜力的比率约为14.85%，其净剩余发电潜力排名前五的省份为：河南、山东、安徽、河北和江苏，累计占全国麦秸净剩余发电潜力的比率约为79.29%。

其他类别农业生物质资源的净剩余发电潜力累计占全国净剩余发电潜力的比率约为18.87%，按各自所占比率降序排列依次为：棉秆（6.52%）、豆秸（3.74%）、油菜秆（3.45%）、蔗渣（1.79%）、花生秧（1.47%）、薯蔓（1.32%）、花生壳（0.58%）。

综上所述，玉米、水稻和小麦三种作物的发电潜力累计占2018年全国农业生物质净剩余发电潜力的80.86%，是进行农业生物质发电的重要原料来源。此外，新疆棉秆净剩余发电潜力占全国棉秆净剩余发电潜力的83.75%，广西蔗渣净剩余发电潜力占全国蔗渣净剩余发电潜力的67.46%，表明资源分布存在地域差异，布局农业生物质发电产业应坚持因地制宜的原则，具体问题具体分析，充分发挥资源的相对优势。

2018年全国农业生物质净剩余发电潜力的省域分布情况如表7所示。全国农业生物质净剩余量的发电潜力大于1000 MW的省份共4个，发电潜力累计占比36.47%。发电潜力在500~1000 MW之间的省份共8个，发电潜力累计占比39.27%。

综上所述，发电潜力大于500 MW的12个省份发电潜力累计占比75.74%，而12个省份农业生物质实际可获得量累计占比74.63%，表明资源禀赋与发电潜力显著正相关。因此，在资源可获得量具有相对优势的省份，应着力提高资源利用率，充分挖掘发电潜力。

发电潜力在300~500 MW之间的省份共4个，发电潜力累计占比11.91%。发电潜力在100~300 MW之间的省份共7个，发电潜力累计占比10.41%。发电潜力小于100 MW的省份共8个，发电潜力累计占比1.94%。通过分析上述统计结果易发现，发电潜力低于500 MW的19个省份，或因耕地面积少导致农业生物质资源匮乏，或因经济发展水平低导致发展条件不足。

综上所述，资源禀赋和发展条件是影响区域农业生物质发电产业发展水平的重要因素。

由表8可知，2018年全国31个省份中，有28个省份装机容量小于其净剩余发电潜力，全国差额总计5987 MW。其中，新疆、河南、黑龙江、内蒙古和四川五省差额累计3893 MW，占全国差额总值的65.02%，应当成为农业生物质发电产业布局的重点地区。此外，全国总装机容量与总的净剩余发电潜力的比值约为57.39%，表明我国农业生物质发电产业仍具有较大发展空间。

（二）LCA视角下我国农业生物质发电减排环境效益评估

发展农业生物质发电产业具有显著的正外部效益，主要体现在节约资源和保护环境。本部分基于生命周期理论（LCA），并结合2018年中国大陆31个主要省份农业生物质资源净剩余量发电潜力的数据，核算在农业生物质净剩余发电潜力约束下，与传统燃煤发电相比，2018年我国农业生物质发电所能够实现的环境效益。环境效益的量化结果最终将以货币形式呈现，包括资源价值和环境价值两部分。

王斯一等指出：基于生命周期理论（LCA），农业生物质发电主要包括电厂建设、原料获取和电厂运营三个阶段[5]。考虑到研究数据的可得性，电厂建设将不纳入研究范畴内，本部分将研究重点着眼于农业生物质发电的原料获取和电厂运营两个阶段。

此外，由于农业生物质发电具有“碳平衡”的特点，因此在计算农业生物质发电的CO₂排放时，仅考虑农业生物质原料收集和预处理两个阶段。

的CO₂

排放量。经过查阅以往文献并基于LCA视角，整理得到：与传统燃煤发电相比，农业生物质发电每生产1千瓦时电力所节约的资源（主要为原煤）数量和污染物减排量，具体如表9所示。减排所节约的资源价值，主要依据2018年度原煤（5500卡）平均价格562.01元/t计算得到。环境价值则以2003年颁布的《排污费征收标准管理办法》和清洁发展机制项目核证减排量的价格为基础计算得到。每种减排物的资源和环境价值在表10中展示出来。结合表7、表9和表10，并利用公式(6)，可计算出2018年我国31个省份农业生物质发电在理论上可创造的环境效益。此外，由于多个省份装机容量小于其净剩余发电潜力，尚待实现的环境效益也将通过公式计算出来。具体计算结果如表11所示。

表 9 农业生物质发电的资源节约量和污染物减排量^[14]

单位：g/(kW·h)

资源消耗/污染物排放	原煤	SO ₂	NO _x	CO	CO ₂	烟尘	粉煤灰	炉渣	废水
与燃煤发电相比减少量	438.543	7.77	6.78	1.46	668.73	13.35	44.95	40.04	279.31

表 10 减排物的资源/环境价值^[15]

单位：元/kg

资源/污染物	原煤	SO ₂	NO _x	CO	CO ₂	烟尘	粉煤灰	炉渣	废水
资源/环境价值	0.562	6.3	6.3	0.36	0.992	2.76	0.2	0.25	0.02

表 11 2018 年我国 31 个省份农业生物质发电的环境收益

序号	省份	农业生物质净剩 余发电潜力/MW	环境收益/元	差值/MW（净剩余发电 潜力-装机容量）	尚待实现的环境 收益/元
1	黑龙江	1551.14	1649584	689.0	732726.78
2	河南	1358.83	1445062	932.0	991148.57
3	山东	1135.67	1207746	-295.0	-313721.92
4	新疆	1078.85	1147323	1055.0	1121954.65
5	吉林	801.21	852054.3	314.0	333927.74
6	内蒙古	780.76	830314.5	637.0	677426.65
7	河北	775.36	824570.7	319.0	339245.06
8	安徽	731.97	778425.6	-377.0	-400925.98
9	四川	701.35	745862.6	580.0	616809.19
10	江苏	611.66	650474.4	87.0	92521.38
11	湖北	561.24	596853.4	78.0	82950.20
12	湖南	553.84	588990.4	102.0	108473.34
13	辽宁	482.48	513105	410.0	436020.29
14	云南	413.5	439738.4	413.0	439210.68
15	广西	407.69	433563	186.0	197804.33
16	江西	369.95	393430.5	188.0	199931.26
17	山西	287.05	305270.4	8.0	8507.71
18	陕西	247.01	262686.1	217.0	230771.72
19	甘肃	226.36	240728.3	196.0	208438.97
20	广东	225.45	239754	5.0	5317.32
21	贵州	191.41	203558.4	101.0	107409.88
22	重庆	183.37	195008.6	123.0	130806.09
23	浙江	102.55	109054.2	-120.0	-127615.70
24	宁夏	76.15	80985	26.0	27650.07
25	福建	73.97	78668.68	20.0	21269.28
26	天津	44.39	47211.59	14.0	14888.50
27	海南	25.23	26832.65	25.0	26586.60
28	青海	22.91	24363.23	23.0	24459.67
29	上海	15.67	16665.72	16.0	17015.43
30	北京	7.6	8083.44	8.0	8507.71
31	西藏	6.74	7172.37	7.0	7444.25
32	总计	14051.38	14943139.79	5987	6366959.72

由表11可知，在农业生物质净剩余发电潜力约束下，2018年我国31个省份农业生物质发电理论上可创造的减排环境收益为14943139.79元。其中，由于多个省份装机容量小于其净剩余发电潜力，尚待实现的环境效益为6366959.72元，尚待实现的环境效益占减排环境总收益的比率约为42.61%。表明我国农业生物质发电的正外部性（包括资源价值和环境价值）尚未得到充分补偿，最终致使我国农业生物质发电产业经济效益偏低、难以实现规模经济、缺乏市场竞争力。

此外，由于农业生物质发电产业前期资金投入量大，资本回收周期长且资本收益率较低，造成我国农业生物质发电产业存在严重的市场障碍。

综上所述，应大力补偿农业生物质发电的正外部性，同时积极引进CDM项目，以消除现存的市场障碍，充分开发农业生物质发电潜力，促进农业生物质发电产业可持续发展。

三、结论与建议

客观评估我国农业生物质发电潜力及其环境效益，有助于合理规划、布局农业生物质发电产业，促进经济社会可持续发展。通过利用相关统计数据进行了实证分析，研究表明：

(1) 2018年，我国农业生物质资源最大发电潜力约为78631.12MW，农业生物质资源净剩余发电潜力约为14051.38MW。其中，玉米、水稻和小麦三种作物的发电潜力累计占2018年全国农业生物质净剩余发电潜力的80.86%。净剩余发电潜力在500MW以上的省份共12个，发电潜力累计占比75.74%。因此，以玉米、水稻和小麦三种作物的秸秆和加工剩余物为主要原料的农业生物质发电产业应优先布局在发电潜力较大的12个省份。

(2) 2018年，我国农业生物质发电理论上可实现的环境收益为14943139.79元，尚待实现的环境收益为6366959.72元，尚待实现的环境效益占减排环境总收益的比率约为42.61%，表明我国农业生物质发电的正外部性亟须补偿。

为贯彻落实党中央号召，推动经济高质量发展，增强可持续发展能力，提出如下建议：

(1) 整合供给端无序状态，充分发挥资源优势。我国主要农作物产量稳定，每年能产出足量的农业生物质资源，供应结构具有内在稳定性。发展农业生物质发电产业的重点在于整合供给端的分散性和无序性，充分利用农业生物质储量丰富的优势，推动农业生物质发电产业可持续发展。

(2) 重视资源禀赋和发展条件，遵循因地制宜发展原则。我国农业生物质资源分布存在显著的地域差异，不同地区的发展条件参差不齐，应当正确把握区域内部的资源禀赋与实际发展条件，谨防信息与认知障碍所引发的发展的盲目性，遵循因地制宜的发展原则，科学、合理布局农业生物质发电产业。

(3) 补偿农业生物质发电的正外部性，积极引进CDM项目。我国农业生物质发电的正外部性尚未得到充分补偿，造成严重的市场障碍。应积极引进CDM项目，弥补农业生物质发电的正外部性，消除现存的市场障碍，充分开发农业生物质发电潜力，推动经济高质量发展，增强可持续发展能力。

[参考文献]

- [1] 张晟义, 张杰, 王童. 不确定条件下农林生物质发电供应链可持续发展的问题与建议 [J]. 信阳师范学院学报 (哲学社会科学版), 2020, 40(3): 42. DOI: 10.3969/j.issn.1003-0964.2020.03.008.
- [2] XU Xinliang, LI Shuang, FU Ying, et al. An analysis of the geographic distribution of energy crops and their potential for bioenergy production [J] . Biomass & Bioenergy, 2013(59): 325.
- [3] THOMPSON J L, YNER W E. Corn stover for bioenergy production: Cost estimates and farmer supply response [J]. Biomass & Bioenergy, 2014(62): 166.
- [4] 王圣, 徐静馨. 我国农林生物质发电现状及相关问题思考 [J]. 环境保护, 2018, 46(23): 61. DOI: 10.14026/j.cnki.0253-9705.2018.23.013.
- [5] 王斯一, 张彩虹, 米锋. 资源价值流视角下发电企业碳足迹与经济成本评价: 燃煤发电与生物质发电比

- 较研究 [J]. 工业技术经济, 2018, 37(12): 78. DOI: 10.3969/j.issn.1004-910X.2018.12.010.
- [6] 常圣强, 李望良, 张晓宇, 等. 生物质气化发电技术研究进展 [J]. 化工学报, 2018, 69(8): 3318. DOI: 10.11949/j.issn.0438-1157.20180235.
- [7] 李可心. 生物质发电产业的区域适宜性评价及能源环境经济效益实证研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2019.
- [8] 卫洪建. 中国农林剩余物和能源作物资源评估及减排效益分析 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2019.
- [9] 刘荣厚. 生物质能工程 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2009.
- [10] Hiloidhari, M, Baruah, DC. Crop residue biomass for decentralized electrical power generation in rural areas (part1): Investigation of spatial availability [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2011, 15(4): 1885. DOI: 10.1016/j.rser.2010.12.010.
- [11] 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. DOI: 10.3864/j.issn.0578-1752.2010.09.011.
- [12] 刘志彬. 中国生物质发电潜力评估与产业发展研究 [D]. 北京: 中国农业科学院, 2015.
- [13] 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. DOI: 10.3969/j.issn.1002-6819.2009.12.037.
- [14] 徐超. 江苏省农业生物质能源分布与利用的环境效益研究 [D]. 南京: 南京农业大学, 2010.
- [15] 刘俊伟, 田秉晖, 张培栋, 等. 秸秆直燃发电系统的生命周期评价 [J]. 可再生能源, 2009, 27(5): 102. DOI: 10.3969/j.issn.1671-5292.2009.05.024.

原文地址：<http://www.china-nengyuan.com/tech/180290.html>