

山东省主要农作物秸秆肥料化及沼气化利用分析

庞力豪, 王丽霞, 姜凯阳, 张羽飞, 邵 蕾*

(中国农业大学烟台研究院, 山东 烟台 264670)

摘 要: 农作物秸秆不合理利用不仅会造成大量资源浪费, 而且直接焚烧产生的温室气体严重破坏大气环境。本文对山东省 2017 年 17 个地级市农作物种植情况进行统计, 概算出山东省主要农作物的秸秆资源总量。评估秸秆肥料化对于补充土壤 N、P、K 及有机质含量的效果; 构建秸秆沼气化利用及碳排放数学模型, 计算秸秆沼气化潜力, 对其燃烧利用后的碳排放量进行评估, 为秸秆沼气化碳减排工作提供参考依据。结果表明, 山东省 2017 年秸秆资源总量为 $6\,433.66 \times 10^4$ t, 肥料化还田的秸秆养分可替代 64.77×10^4 t 的尿素, 34.16×10^4 t 的过磷酸钙和 81.02×10^4 t 硫酸钾, 可补充土壤有机质 835.50×10^4 t; 秸秆沼气化潜力为 $17\,288.25 \times 10^5$ m³, 折合标准煤 1.23×10^6 t, 较秸秆直接焚烧减少 240.43×10^4 t 碳排放量。

关键词: 山东省; 秸秆; 肥料化; 沼气化; 碳排放

中图分类号: S216.2

文献标识码: A

文章编号: 2096-5877(2021)03-0048-06

Analysis on Fertilization and Fuel Utilization of Main Crops Straw in Shandong Province

PANG Lihao, WANG Lixia, JIANG Kaiyang, ZHANG Yufei, SHAO Lei*

(Yantai Institute of China Agricultural University, Yantai 264670, China)

Abstract: The unreasonable use of crop straw will not only waste a lot of resources, but also cause serious damage to the atmospheric environment by greenhouse gases produced by direct burning. In this study, the total amount of straw resources of main crops was estimated through the statistics of crop cultivation in 17 cities of Shandong Province in 2017. This paper evaluates straw fertilization on soil N, P, K and organic matter supplementation, and constructs the mathematical model of straw fuelling utilization and carbon emission, and obtains the total amount of bio-gas produced by bio-fermentation of crop straw. Carbon emissions after combustion and utilization were assessed to provide reference for carbon emission reduction of straw biogas. The results showed that the total amount of straw in Shandong Province in 2017 was $6\,433.66 \times 10^4$ t, and the nutrients of fertilized returned straw could replace 64.77×10^4 t of $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$, 34.16×10^4 t of $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ and 81.02×10^4 t of K_2SO_4 . A total of 835.50×10^4 t of organic matter was immobilized by soil. The straw could produce $17\,288.25 \times 10^5$ m³ of biogas which can replace 1.23×10^6 t of standard coal, and reduced 240.43×10^4 t of CO_2 compared with straw direct burning.

Key words: Shandong Province; Crop straw; Fertilization; Fuel utilization; Carbon emission

农作物秸秆作为一种生物质资源可以进行腐熟还田, 也是产沼气的优质原料。2015 年我国主要农作物秸秆资源量为 7.19×10^8 t^[1], 但由于处理方法不当, 田间焚烧和废弃等未利用的秸秆却达到 $2.15 \times 10^8 \sim 3.14 \times 10^8$ t, 占秸秆总量的 30% ~ 44%^[2]。秸秆

焚烧不仅产生大量 CO 、 NO_x 、PAHs 等对人体有害物质, 而且产生的 CO_2 和固体烟尘颗粒物严重污染大气, 造成巨大的环境负担。

合理开发秸秆资源对于我国发展生态循环农业及可再生能源事业具有重要意义。《山东省农作物秸秆综合利用试点工作方案》中指出: 形成秸秆肥料化、饲料化、燃料化、基料化、原料化“五化并举”的综合利用格局。构建秸秆综合利用长效机制, 改善农村环境, 带动农民增收, 推进资源节约、环境友好现代农业发展^[3]。本文通过山东省农作物产量概算出主要农作物秸秆资源总量; 通过对秸秆肥料化及沼气化研究, 计算秸秆

收稿日期: 2019-03-22

基金项目: 山东省重点研发计划项目(2018GNC110021); 烟台市科技发展计划项目(2017ZH097); 烟台开发区创新创业领军团队项目(TD2016003)

作者简介: 庞力豪(1996-), 男, 在读本科, 主要从事土壤肥料方面的研究。

通讯作者: 邵 蕾, 男, 博士, 副教授, E-mail: shaolei6751@163.com

肥料化补充土壤 N、P、K 及有机质的效果和沼气化利用的潜力。对秸秆沼气化利用后的碳排放量进行量化,同秸秆直接焚烧产生的碳排放量进行比较,计算秸秆沼气化碳减排量,为山东省秸秆综合利用提供参考依据。

1 数据来源与研究方法

1.1 数据来源

本研究中山东省主要农作物产量数据源自山东省统计局公布的《2018 年山东省统计年鉴》^[4]。结合山东省农作物种植结构的实际情况,本文选取 11 种主要农作物为对象进行研究:粮食作物(小麦、稻谷、玉米、谷子、豆类、薯类),油料作物(花生、油菜、芝麻),经济作物(棉花、烟叶)。

1.2 研究方法

1.2.1 秸秆资源概算

利用 2017 年山东省各地市主要农作物产量数据 P 和农作物草谷比系数 k,得出山东省主要农作物秸秆资源总量 R。

$$R_{\varphi} = \sum_1^{\varphi} P_n \times k_n^{[5]} \dots\dots\dots (1)$$

其中, R_{φ} 为 2017 年山东省 φ 种作物秸秆资源总量, φ 为所统计的作物种类数量(本研究中 $\varphi=11$), n 为作物种类, P_n 为 2017 年山东省 n 作物的产量, k_n 为 n 作物对应的草谷比系数。

草谷比是农作物单位面积秸秆产量与籽粒产量的比值^[6]。我国幅员辽阔,不同地域环境作物的草谷比不同。通过对相关文献的比较分析,结合山东省地域特点,本文采用谢光辉等^[7]和王晓玉等^[8]统计的主要农作物草谷比的平均值作为草谷比系数(表 1)。

表 1 山东省主要农作物草谷比系数

作物种类	小麦	稻谷	玉米	谷子	豆类	薯类	花生	油菜	芝麻	棉花	烟叶
草谷比(kg/kg)	1.33	1.29	0.96	2.03	1.36	0.42	0.89	2.57	1.78	2.64	0.71

1.2.2 秸秆肥料化

利用草谷比系数计算农作物秸秆资源所得质量为秸秆鲜基重^[9],通过秸秆鲜基重、干物质率和各物质含量计算秸秆所提供的 N、P、K 及有机质的量。

$$T = R \times p \times \theta_{N,P,K}^{[10]} \dots\dots\dots (2)$$

其中, T 为作物秸秆中的养分总量(包括 N、P、K 及其有机质), R 为秸秆鲜基重, p 为作物相应的秸秆干物质率, $\theta_{N,P,K}$ 为作物秸秆养分所占比例。

本文整理了相关文献^[11]及《中国有机肥料养分志》^[12]中对主要农作物秸秆干物质率,有机质及 N、P、K 含量的测定结果(表 2)。

表 2 主要农作物秸秆干物质率、有机质比例及 N、P、K 比例

%

作物种类	干物质率	有机质	N	P	K
小麦	85.00	83.00	0.65	0.08	1.05
稻谷	80.00	81.30	0.91	0.13	1.89
玉米	85.00	87.10	0.92	0.15	1.18
谷子	85.00	93.40	0.82	0.10	1.75
豆类	80.00	88.10	1.81	0.20	1.17
薯类	80.00	83.40	2.37	0.28	3.05
花生	80.00	88.60	1.82	0.16	1.09
油菜	80.00	85.00	0.87	0.14	1.94
芝麻	80.00	92.18	1.30	0.07	0.50
棉花	80.00	90.90	1.24	0.15	1.02
烟叶	80.00	91.70	1.44	0.17	1.85

根据杨艳华等^[13]对还田秸秆有机碳在土壤中转化分配的研究,秸秆还田后 42%~79% 有机碳被微生物分解以 CO_2 的形式通过土壤呼吸释放到大气中,不超过 40% 的还田秸秆碳会转化为土壤活性炭被作物利用。同时随着土壤团聚体直径增大,其转化比例呈负相关趋势。根据顾鑫等^[14]利

用 $\delta^{13}C$ 法研究秸秆添加对土壤团聚体有机碳的影响表明,27.49% 的秸秆碳会被土壤转化为有机碳利用,故本研究选取 27.49% 作为秸秆还田后秸秆有机碳在土壤中有效转化率。

通过秸秆还田提供的 N、P、K 量折算可替代的尿素(46-0-0)、过磷酸钙(0-12-0)和硫酸钾

(0-0-50)量,评估秸秆还田减少的化肥投入量。

1.2.3 秸秆沼气化

产沼系数指单位质量的秸秆经过生物发酵后可以产生的沼气的量。利用不同作物秸秆的干物质率 p 以及产沼系数 g ,概算出山东省主要农作物秸秆的沼气产量 G 。

$$G_{\varphi} = \sum_1^{\varphi} R_n \times p_n \times g_n^{[15]} \cdots \cdots \cdots (3)$$

表 3 主要农作物秸秆产沼系数

作物种类	小麦	稻谷	玉米	谷子	豆类	薯类	花生	油菜	芝麻	棉花	烟叶
产沼系数(m ³ /kg)	0.45	0.4	0.5	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.6	0.45

1.2.4 碳排放

碳排放研究采用 IPCC 法对秸秆产沼直接燃烧进行评估^[17]。将秸秆在其加工、发酵、燃烧过程中直接或间接排放的全部温室气体转换为 CO₂ 当量,作为本研究中的碳排放量 C ,计算公式如下:

$$C = \frac{(q_1 + q_2)G}{V_m} \times M \cdots \cdots \cdots (4)$$

其中, C 为沼气直接燃烧的碳排放量,kg(CO₂ eq); G 为作物产沼总量,根据邓舟等^[18]的研究,本文以 q_1 表示沼气中 CH₄ 含量,取值 60%, q_2 为 CO₂ 含量,取值 38%。根据阿伏伽德罗定律, V_m 为标准状况下(STP,0℃,100 kPa)理想气体摩尔体积 22.4 L/mol, M 为 CO₂ 的摩尔质量 44.04 g/mol。

其中, G_{φ} 为山东省 φ 种作物秸秆产沼总量, φ 为作物种类数量, n 为统计的作物种类, R_n 为山东省 n 作物用于沼气的秸秆资源量, p_n 为 n 作物秸秆的干物质率, g_n 为 n 作物秸秆的产沼系数。

本文参照张婷婷等^[16]对不同作物的产沼系数取值,具体见表 3。

由于秸秆直接焚烧所产生气体成分复杂,碳排放量难以直接进行计算,所以根据其燃烧热值折合标准煤再进行碳排放的量化。引入秸秆折煤系数 λ 以及标准煤燃烧碳排放系数 μ 。

$$C_{\varphi} = \sum_1^{\varphi} R_n \times \lambda_n \times \mu \cdots \cdots \cdots (5)$$

其中, C_{φ} 为 φ 种农作物秸秆燃烧的碳排放总量, φ 为研究统计的作物种类数量, n 为统计的作物种类, R_n 为 n 作物用于沼气的秸秆资源量, λ_n 为 n 作物秸秆的折煤系数, μ 为标准煤燃烧碳排放系数。

本文参照韦茂贵等^[19]所确定的作物秸秆折煤系数取值(表 4)以及国家发改委能源研究所公布的标准煤燃烧碳排放系数 2.456 7 kg/kg(CO₂)^[20]。

表 4 主要农作物秸秆折煤系数

作物种类	小麦	稻谷	玉米	谷子	豆类	薯类	花生	油菜	芝麻	棉花	烟叶
折煤系数(kg/kg)	0.545	0.462	0.535	0.462	0.651	0.432	0.541	0.61	0.529	0.624	0.549

2 统计结果及数据分析

2.1 山东省主要农作物秸秆资源分布

根据山东省 2017 年作物种植面积及草谷比系数取值(表 1),计算山东省 17 个地市主要农作物秸秆资源总量(表 5)。2017 年山东省秸秆资源总量为 6 433.66×10⁴ t。山东省作为农业大省,秸秆资源充足,丰富的秸秆资源是推动山东省农业发展肥料化、能源化的一大优势。

2017 年山东省小麦和玉米的种植面积分别为 4.08×10⁶ hm² 和 4.00×10⁶ hm²^[4],秸秆资源量分别为 3 318.50×10⁴ t 和 2 555.67×10⁴ t,共占全省秸秆资源总量的 91.3%。菏泽市与德州市秸秆资源量位居全省前两位,分别为 914.94×10⁴ t 和 854.80×10⁴ t,共占全省资源总量的 27.5%。

2.2 山东省主要农作物秸秆肥料化利用分析

为落实《山东省秸秆综合利用专项规划(2014-2020 年)》^[21],根据山东省农业农村厅及山东省农业信息网^[22]所公布的相关信息,2017 年山东省作物秸秆综合利用继续按照“五化并举”的综合利用格局,具体分布比例如表 6 所示。其中肥料化利用包括机械化粉碎还田、生物腐熟还田、养畜消化还田等方式^[23-24],燃料化利用包括大型沼气、生物质发电和热解气化燃料化利用^[25]。

根据表 6 以及本研究中所确定的山东省作物秸秆各营养成分比例(表 2),通过公式(2)计算 2017 年山东省主要农作物秸秆肥料化效益(表 7)。其中全省 2017 年秸秆肥料化后实际提升土壤有机质 835.50×10⁴ t;补充土壤 N、P、K 29.79×10⁴ t、4.11×10⁴ t 和 40.50×10⁴ t,可替代 64.77×10⁴ t 尿素、34.16×

表5 2017年山东省17个地市主要农作物秸秆资源量 10⁴ t

地区	小麦	稻谷	玉米	谷子	豆类	薯类	花生	油菜	芝麻	棉花	烟叶	秸秆总量
济南市	164.64	1.75	116.40	6.03	2.48	1.80	2.94	0.54	0.04	0.53	0.00	297.14
青岛市	168.12	0.09	160.35	0.24	1.30	0.94	34.15	0.00	0.00	0.11	0.06	365.36
淄博市	89.31	0.40	74.20	1.26	0.32	0.49	1.37	0.00	0.00	0.31	0.02	167.69
枣庄市	115.98	2.02	80.09	0.39	2.63	2.01	7.12	1.04	0.01	0.44	0.00	211.73
东营市	73.31	15.00	59.15	0.06	1.01	0.06	0.35	0.01	0.00	7.03	0.00	155.98
烟台市	87.95	0.40	98.13	0.74	3.29	2.50	37.54	0.00	0.00	0.02	0.00	230.57
潍坊市	271.30	0.00	217.96	4.63	1.60	1.53	18.23	0.02	0.02	2.69	1.64	519.62
济宁市	293.58	43.97	182.96	0.71	8.14	4.62	14.35	0.11	0.00	9.61	0.00	558.06
泰安市	156.95	0.27	122.68	0.87	4.34	1.57	19.70	0.20	0.00	0.98	0.00	307.56
威海市	24.01	0.00	40.03	0.00	1.70	1.44	18.86	0.00	0.00	0.00	0.00	86.05
日照市	44.64	2.77	43.71	1.46	1.36	2.72	22.56	0.00	0.00	0.10	0.59	119.91
莱芜市	4.67	0.00	18.89	0.31	0.07	0.86	2.14	0.00	0.00	0.25	0.20	27.40
临沂市	235.44	43.99	162.92	2.43	6.61	11.77	76.30	0.37	0.00	0.91	1.54	542.28
德州市	489.75	0.00	358.66	0.33	0.53	0.33	1.02	0.00	0.00	4.18	0.00	854.80
聊城市	370.75	0.09	261.22	0.51	1.45	0.43	3.85	0.30	0.00	1.54	0.00	640.13
滨州市	223.65	0.36	200.38	0.04	0.83	0.16	0.98	0.03	0.01	8.00	0.00	434.43
菏泽市	504.46	5.17	357.93	0.60	7.41	0.99	17.56	2.83	0.04	17.94	0.00	914.94
全省总计	3 318.50	116.28	2 555.67	20.62	45.07	34.22	279.04	5.46	0.12	54.65	4.04	6 433.66

表6 2017年山东省作物秸秆综合利用分配模式

利用方式	肥料化利用	饲料化利用	燃料化利用	基料化利用	原料化利用
所占比例(%)	65.7	17.4	6.8	4.1	6.0

表7 2017年山东省主要农作物秸秆肥料化效益 10⁴ t

地区	有机质	N	尿素	P	过磷酸钙	K	硫酸钾
济南市	38.68	1.31	2.86	0.18	1.54	1.88	3.76
青岛市	47.59	1.79	3.89	0.24	2.01	2.27	4.53
淄博市	21.85	0.74	1.60	0.11	0.88	1.05	2.10
枣庄市	27.48	0.97	2.12	0.13	1.11	1.33	2.67
东营市	20.13	0.70	1.52	0.10	0.83	1.02	2.03
烟台市	30.03	1.25	2.72	0.16	1.34	1.45	2.90
潍坊市	67.70	2.37	5.14	0.33	2.75	3.25	6.49
济宁市	71.88	2.56	5.56	0.35	2.92	3.63	7.27
泰安市	39.99	1.47	3.18	0.20	1.65	1.91	3.83
威海市	11.23	0.51	1.10	0.07	0.53	0.55	1.10
日照市	15.57	0.68	1.47	0.09	0.70	0.78	1.56
莱芜市	3.62	0.15	0.33	0.02	0.18	0.18	0.37
临沂市	69.80	2.88	6.27	0.37	3.04	3.62	7.23
德州市	111.20	3.67	7.98	0.53	4.37	5.28	10.55
聊城市	83.23	2.76	6.00	0.39	3.27	3.95	7.90
滨州市	56.65	1.91	4.17	0.28	2.30	2.69	5.39
菏泽市	118.88	4.08	8.87	0.57	4.74	5.66	11.33
全省总计	835.50	29.79	64.77	4.11	34.16	40.50	81.02

10⁴ t 过磷酸钙和 81.02×10⁴ t 硫酸钾。按尿素、过磷酸钙以及硫酸钾的价格每吨为 2 100 元,780 元和 3 000 元计算,2017 年山东省全省秸秆还田

可减少 38.7 亿元化肥投入。

2.3 山东省主要农作物秸秆沼气产量分析

根据主要农作物秸秆产沼系数(表 3),计算

2017年山东省主要农作物秸秆沼气化潜力(表8)。全省秸秆沼气化利用可产生17 288.25×10⁵ m³沼气。根据中国统计局能源统计司公布的《中国能源统计年鉴》^[20],1 m³的沼气燃烧产生的热值可替代0.714 kg标准煤。2017年山东省主要农作物秸秆沼气产量可替代1.23×10⁶ t标准煤。

表8 2017年山东省主要农作物秸秆沼气产量 10⁵ m³

地区	小麦	稻谷	玉米	谷子	豆类	薯类	花生	油菜	芝麻	棉花	烟叶	沼气总量
济南市	428.22	3.81	336.39	13.95	5.39	3.91	6.40	1.17	0.09	1.74	0.00	801.07
青岛市	437.29	0.20	463.42	0.56	2.83	2.05	74.30	0.00	0.00	0.36	0.00	981.01
淄博市	232.29	0.87	214.44	2.92	0.69	1.07	2.99	0.00	0.00	1.03	0.00	456.29
枣庄市	301.65	4.39	231.46	0.91	5.73	4.37	15.50	2.27	0.01	1.45	0.00	567.75
东营市	190.68	32.65	170.95	0.14	2.19	0.13	0.75	0.01	0.01	22.94	0.00	420.45
烟台市	228.76	0.88	283.61	1.70	7.15	5.43	81.70	0.00	0.00	0.07	0.00	609.30
潍坊市	705.66	0.00	629.90	10.71	3.48	3.33	39.66	0.03	0.03	8.79	0.01	1 401.61
济宁市	763.60	95.67	528.77	1.64	17.71	10.04	31.23	0.24	0.01	31.38	0.00	1 480.29
泰安市	408.22	0.60	354.53	2.01	9.44	3.41	42.87	0.44	0.01	3.21	0.00	824.74
威海市	62.44	0.00	115.70	0.00	3.71	3.14	41.04	0.00	0.00	0.00	0.00	226.03
日照市	116.10	6.03	126.32	3.37	2.96	5.93	49.10	0.01	0.00	0.31	0.00	310.12
莱芜市	12.15	0.00	54.59	0.73	0.16	1.88	4.66	0.00	0.01	0.83	0.00	75.00
临沂市	612.38	95.72	470.85	5.62	14.39	25.60	166.04	0.82	0.00	2.96	0.01	1 394.37
德州市	1 273.85	0.00	1 036.52	0.77	1.15	0.72	2.23	0.00	0.00	13.63	0.00	2 328.87
聊城市	964.31	0.20	754.94	1.18	3.15	0.93	8.37	0.65	0.00	5.01	0.00	1 738.73
滨州市	581.71	0.78	579.10	0.09	1.81	0.35	2.14	0.07	0.01	26.11	0.00	1 192.16
菏泽市	1 312.09	11.25	1 034.43	1.39	16.13	2.16	38.22	6.15	0.08	58.55	0.00	2 480.46
全省总计	8 631.42	253.03	7 385.89	47.67	98.07	74.46	607.20	11.87	0.26	178.36	0.01	17 288.25

2.4 秸秆沼气化利用碳排放量分析

根据主要农作物秸秆折煤系数(表4)以及标准煤燃烧碳排放系数计算碳排放量(表9)。2017年山东省秸秆燃料化利用比例为6.8%(表6),秸秆直接燃烧将向大气中排放580.33×10⁴ t CO₂当量。经沼气化处理后碳排放量为339.90×10⁴ t CO₂当量,减少了240.43×10⁴ t碳排放量,占直接燃烧CO₂排放量的41.42%。

3 结论与讨论

3.1 2017年山东省主要农作物秸秆资源总量为6 433.66×10⁴t。其中小麦、玉米秸秆量共占全省秸秆总量的91.3%。菏泽市、德州市以及聊城市秸秆资源量位居全省前三位,共占全省秸秆总量的37.5%。由于处理成本较高,农作物秸秆仍存在废弃或私自焚烧现象,禁烧工作压力较大。若要提高秸秆资源化利用率,政府应围绕秸秆肥料化及燃料化等领域,推广用量大、附加值高的秸秆综合利用技术,不断提升秸秆综合利用产业化发展水平。

3.2 2017年山东省秸秆肥料化利用后可补充土壤有机质835.50×10⁴ t,可减少64.77×10⁴ t尿素,

表9 2017年山东省秸秆直接燃烧与沼气化利用碳排放比较 10⁴ t CO₂

地区	沼气化利用	直接焚烧	碳排放减少量
济南市	15.75	26.77	11.02
青岛市	19.29	32.98	13.69
淄博市	8.97	15.12	6.15
枣庄市	11.16	19.13	7.97
东营市	8.27	14.00	5.74
烟台市	11.98	20.80	8.82
潍坊市	27.56	46.90	19.35
济宁市	29.10	50.06	20.95
泰安市	16.21	27.83	11.62
威海市	4.44	7.76	3.31
日照市	6.10	10.74	4.65
莱芜市	1.47	2.44	0.97
临沂市	27.41	48.32	20.90
德州市	45.79	77.28	31.49
聊城市	34.18	57.88	23.69
滨州市	23.44	39.33	15.89
菏泽市	48.77	82.99	34.22
全省总计	339.90	580.33	240.43

34.16×10⁴ t过磷酸钙以及81.02×10⁴ t硫酸钾的化肥投入量。化肥施用过量不仅造成耕地质量下

降,而且破坏生态环境。秸秆肥料化可有效减少化肥投入量,推进资源循环利用,减少土壤水体污染,响应国家有机肥替代化肥行动。

3.3 2017年山东省秸秆沼气潜力为 $17\ 288.25\times 10^5\text{ m}^3$,可替代 $1.23\times 10^6\text{ t}$ 标准煤,较直接燃烧可减少 $240.43\times 10^4\text{ t CO}_2$ 排放量。秸秆沼气化是实现能源清洁低碳发展,推动能源结构优化的重要手段。对于秸秆资源丰富的地区建设生物质能源燃气基地不仅充分发挥了秸秆的能源效益,而且缓解了直接燃烧对大气环境的污染,有利于建设资源节约型及环境友好型社会。

参考文献:

- [1] 宋大利,侯胜鹏,王秀斌,等.中国秸秆养分资源数量及替代化肥潜力[J].植物营养与肥料学报,2018,24(1):1-21.
- [2] 彭立群,张强,贺克斌,基于调查的中国秸秆露天焚烧污染物排放清单[J].环境科学研究,2016,29(8):1109-1118.
- [3] 山东省农业厅 山东省财政厅.关于印发《山东省农作物秸秆综合利用试点工作方案》的通知[EB/OL].(2016-07-14)[2018-12-16]. http://nync.shandong.gov.cn/zwgk/tzgg/tfwj/201607/t20160714_3382179.html.
- [4] 陆万明.山东省统计年鉴2018[M].北京:中国统计出版社,2018:289-293.
- [5] 那伟,郝登宝,赵新颖,等.吉林省玉米秸秆资源量估算及其利用的自然适宜性分析[J].安徽农业科学,2018,46(36):61-63.
- [6] 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.
- [7] 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,2011,16(1):1-8.
- [8] 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.
- [9] 朱开伟,刘贞,吕指臣,等.中国主要农作物生物质能生态潜力及时空分析[J].中国农业科学,2015,48(21):4285-4301.
- [10] 袁慢慢,邹刚,胡润,等.稻油轮作下秸秆还田配施化肥对作物产量及肥料利用率的影响[J].生态学杂志,2018,37(12):3597-3604.
- [11] 庞力豪,邵蕾,葛猜猜,等.山东省主要农作物秸秆资源评估及肥料化利用经济效益分析[J].山东农业科学,2018,50(12):80-85.
- [12] 全国农业技术推广服务中心.中国有机肥料养分志[M].北京:中国农业出版社,1999:53-77.
- [13] 杨艳华,苏瑶,何振超,等.还田秸秆碳在土壤中的转化分配及对土壤有机碳库影响的研究进展[J].应用生态学报,2019,30(2):668-676.
- [14] 顾鑫,安婷婷,李双异,等. $\delta^{13}\text{C}$ 法研究秸秆添加对棕壤团聚体有机碳的影响[J].水土保持学报,2014,28(2):243-247,312.
- [15] 邱坤,宋静,程静思,等.秸秆沼气化发展现状与趋势—以四川省为例[J].中国沼气,2018,36(6):109-111.
- [16] 张婷婷,冯永忠,李昌珍,等.2011年我国秸秆沼气化的碳足迹分析[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2014,42(3):124-130.
- [17] 王艺鹏,杨晓琳,谢光辉,等.1995~2014年中国农作物秸秆沼气化碳足迹分析[J].中国农业大学学报,2017,22(5):1-14.
- [18] 邓舟,耿欣,张丽颖,等.沼气利用方式的碳足迹分析[J].环境卫生工程,2010,18(5):23-26.
- [19] 韦茂贵,王晓玉,谢光辉.中国各省大田作物田间秸秆资源量及其时间分布[J].中国农业大学学报,2012,17(6):38-50.
- [20] 文兼武.中国能源统计年鉴2013[M].北京:中国统计出版社,2013:355-356.
- [21] 山东省人民政府办公厅.关于印发山东省耕地质量提升规划(2014-2020年)的通知[EB/OL].(2014-12-23)[2018-12-20]. http://www.shandong.gov.cn/art/2014/12/23/art_2267_18813.html.
- [22] 山东省农业农村厅.山东部署打好农业农村污染治理攻坚战[EB/OL].(2018-12-05)[2018-12-20]. http://www.shandong.gov.cn/art/2018/12/5/art_2058_168888.html.
- [23] 梁卫,袁静超,张洪喜,等.东北地区玉米秸秆还田培肥机理及相关技术研究进展[J].东北农业科学,2016,41(2):44-49.
- [24] 刘武仁,郑金玉,罗洋,等.秸秆循环还田土壤环境效应变化研究[J].吉林农业科学,2015,40(1):32-36.
- [25] 石祖梁,刘璐璐,王飞,等.我国农作物秸秆综合利用发展模式及政策建议[J].中国农业科技导报,2016,18(6):16-22.

(责任编辑:刘洪霞)