

中国农作物秸秆综合利用潜力研究

霍丽丽¹, 赵立欣^{1*}, 孟海波¹, 姚宗路²

(1. 农业农村部规划设计研究院, 农业农村部农业废弃物资源化利用重点实验室, 北京 100125;
2. 中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所, 北京 100081)

摘要: 针对秸秆分区布局规划不完善, 导致地区性、季节性、结构性秸秆过剩, 资源浪费与环境污染问题突出, 研究秸秆综合利用规划理论, 提出“一主多元、农用优先”秸秆综合利用途径。中国秸秆综合利用潜力总量 8.76 亿 t, 比 2015 年增加利用量 1.56 亿 t, 其中秸秆肥料化、饲料化和能源化利用量分别增加 8 722.4 万 t、5 122.3 万 t 和 1 720.1 万 t。通过肥料和饲料化利用, 可直接和间接替代化肥潜力氮肥 (N) 1 481.6 万 t、磷肥 (P_2O_5) 419 万 t、钾肥 (K_2O) 1 885.1 万 t, 节本增效节约化肥成本约 685.9 亿元 (折合 98.5 元/t 秸秆); 通过能源化利用, 可替代煤炭等化石能源 5 982.4 万 t (标准煤), 可减排二氧化碳 1.5 亿 t、二氧化硫 448.7 万 t、氮氧化物 224.3 万 t, 烟尘 4068 万 t, 经碳排放交易经济效益可达 20.25 亿元 (折合 16.9 元/t 秸秆), 环境和经济效益显著。

关键词: 秸秆; 能源; 肥料; 饲料; 综合利用; 规划理论方法

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2019.13.026

中图分类号: TK6

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2019)-13-0218-07

霍丽丽, 赵立欣, 孟海波, 姚宗路. 中国农作物秸秆综合利用潜力研究[J]. 农业工程学报, 2019, 35(13): 218—224.

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2019.13.026 <http://www.tcsae.org>

Huo Lili, Zhao Lixin, Meng Haibo, Yao Zonglu. Study on straw multi-use potential in China [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2019, 35(13): 218—224. (in Chinese with English abstract)

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2019.13.026 <http://www.tcsae.org>

0 引言

中国农业生产总量大, 秸秆是农业副产物, 也是宝贵的生物质资源, 将秸秆资源变废为宝, 提高秸秆资源的产业附加值, 促进种养良性循环和满足村镇清洁供暖等民生之需。秸秆一直是中国农业常用肥料、农村居民生活的主要燃料和大牲畜的主要饲料, 少部分作为工业原料和食用菌基料, 多为粗放型利用。随着工业化、城镇化和农业现代化步伐不断加快, 秸秆的用途和利用方式都发生了结构性变化, 秸秆肥料化利用比例增加, 并根据不同区域开展不同模式的秸秆还田的科学利用, 秸秆作为薪柴燃料的比例逐渐降低, 用于饲料的需求明显提高, 用于肥料、原料、基料、燃料的领域加快拓展, 精细化加工处理的需求越来越迫切。但是, 由于秸秆分区布局规划不完善, 秸秆多元规模利用的需求与规模化工程应用量不足的矛盾日益凸显, 导致地区性、季节性、结构性的秸秆过剩, 违规焚烧现象屡禁不止, 不仅浪费资源、污染环境, 还严重威胁交通运输安全。

秸秆资源评价研究相关文献较多, 如崔明等对中国主要农作物秸秆资源能源化利用分析评价^[1]; 田宜水等研

究了秸秆资源调查与评价方法, 并制定了行业标准^[2]; 曹志宏等^[3]以质量、能量和谷物当量 3 种形态综合核算中国秸秆资源量。相关研究对一些区域秸秆利用进行了利用潜力分析, 如孙建飞等^[4]江苏省进行了秸秆资源量估算及利用潜力分析, 方放等^[5]对黄淮海地区农作物秸秆资源分布及利用结构分析, 马秋颖等^[6]对东北玉米秸秆利用方式分析, 成本效益排序为秸秆饲料>秸秆发电>秸秆糖醇。亟需研究秸秆规划理论方法来科学评价全国秸秆资源结构合理的五料化利用潜力。

本文通过研究秸秆综合利用规划理论, 根据秸秆资源品种和资源量、耕地与畜牧承载、产业布局等, 提出秸秆综合利用评价方法, 并基于 2015 年秸秆资源量, 分区域综合评价秸秆肥料化、饲料化、能源化等秸秆利用潜力, 有效提高秸秆综合利用水平, 为秸秆综合利用提出分区域规划建议, 为政府决策及产业发展提供理论支撑。

1 规划理论与评价方法

1.1 规划理论

资源科学评价, 明晰区域分布。对秸秆种类、资源量、可利用量等进行科学评价, 分析各类秸秆区域分布现状, 结合农业、畜牧、能源等的发展及相关规划, 科学评估秸秆五化利用途径的资源潜力。

农业可持续发展, 实现资源永续。基于耕地质量与承载力, 种养循环平衡发展等农业可持续发展理论, 建立与农业环境相适应的生态和经济系统, 既充分合理利用秸秆资源发展农业和能源生产, 又能保障秸秆资源增值, 使资源得到永续利用。

收稿日期: 2019-03-01 修订日期: 2019-06-26

基金项目: “现代农业产业技术体系专项资金资助”(CARS-02-31); 国家重点研发计划课题(2017YFF021190401)

作者简介: 霍丽丽, 高级工程师, 博士, 主要从事生物质资源开发利用研究。

Email: huolili666@126.com

*通信作者: 赵立欣, 研究员, 主要从事农业废弃物综合利用研究。

Email: zhaolixin5092@163.com

规划系统全面，实现循环经济。遵循循环经济的“减量化-再利用-再循环”3R（reduction-reuse-recycling）发展理念，进行秸秆综合利用科学系统规划，合理配置秸秆的多元利用途径，由过去传统农业领域向现代农业、新能源、工业领域转变，充分发挥秸秆利用的多功能和高效率，大幅度提高秸秆资源的产业附加值，经济、生态和环境效益并重，实现综合效益显著提升。

坚持农业优先、农工复合利用。合理安排“五料化”利用优先时序，坚持秸秆综合利用与农业生产相结合，避免资源竞争或资源不足，实现农业种植、畜牧养殖、农村能源、工业生产相互协调、促进。

市场需求导向、原料保障供应。充分发挥市场在资源配置的约定性作用，建立以市场为导向，企业为主体、农民参与的长效机制。以新型农业经营主体为依托，提高秸秆收储运专业化水平，建立秸秆存储站，配备专业化收储运装备，建立专业的收储运服务网络，实现秸秆收储运的专业化和市场化，保障秸秆后续利用。

1.2 评价方法

基于耕地地力与承载力、种养循环、竞争性利用等研究，综合考虑秸秆培肥地力、草食饲料稳定供应等因素，结合区域资源禀赋，坚持“一主多元、农用优先”秸秆综合利用途径，“一主”即以农业生产与农村能源利用为主，在满足农业和畜牧业需求，以及农村用能的基础上，“多元”即科学引导因地制宜，推动秸秆向肥料、饲料、燃料、基料与原料等多元循环方向发展，实现“市场用户需求导向、原料供应持续保障、农工复合高效利用、综合效益显著提升”的秸秆综合利用模式。

1) 秸秆肥料化利用潜力

$$P_F = \sum_{i=1}^n P_K(i, j) \times F_j$$

式中 P_F 为秸秆肥料化利用潜力，万 t； $P_K(i, j)$ 为第 i 种农作物秸秆在第 j 省的可收集资源量，万 t； F_j 为第 j 省的农作物秸秆肥料化还田利用比率。

2) 秸秆饲料化利用潜力

$$P_S = Q \times \sum_{i=1}^n S_c(i, j) \times C_j - M(j)$$

式中 P_S 为秸秆饲料化利用潜力，万 t； Q 为牛单位草食饲料需求量，kg/（头·d）； $S_c(i, j)$ 为第 i 种草食牲畜在第 j 省的存栏量，万头（只）； C_j 为草食饲料需求量牛当量； $M(j)$ 为第 j 省的干草产量，万 t。

3) 秸秆能源化、基料化或原料化利用潜力

$$P_Y = \sum_{i=1}^n P_y(i, j)$$

式中 P_Y 为秸秆能源化、基料化或原料化利用潜力，万 t； $P_y(i, j)$ 为第 i 种农作物秸秆在第 j 省的秸秆能源化、基料化或原料化途径的利用量，万 t。

1.3 数据来源

全国各省秸秆理论资源量、可收集资源量、利用量数据来源于 2016 年度全国农村可再生能源统计。

2 秸秆资源量与综合利用现状

2015 年底，全国农作物秸秆产生总量 10.4 亿 t，其中，可收集资源量 9 亿 t。按秸秆种类分玉米、水稻、小麦三大类作物秸秆可收集量分别达到 3.61、1.97、1.55 亿 t，占秸秆可收集总量的 79.2%；按区域分，华东、东北、华中区域秸秆资源量大，可收集总量 5.3 亿 t，占全国的 59%。

2015 年秸秆利用量达到 7.2 亿 t，秸秆综合利用率达到 80.1%，详见表 1。秸秆肥料化、饲料化、燃料化、原料化、基料化利用率分别为 43.2%、18.8%、11.4%、2.7%、4.0%，其中肥料、饲料、基料占比 66%，形成了肥料化、饲料化等农用为主。各区域秸秆利用，华中、华东区以肥料化利用为主；华北、西北区以肥料、饲料结合；华南区肥料、燃料结合；东北农区和西南农区则是肥料、饲料和燃料稳步推进，形成多元化利用格局。

表 1 不同区域秸秆综合利用率

Table 1 Comprehensive utilization of straw in different regions

地区 Region	可收集资源量占比 Collectable energy ratio	秸秆利用率 Utilization					未利用率 Unutilized rate
		肥料 Fertilizer	饲料 Feed	基料 Base	燃料 Fuel	原料 Raw material	
东北区 Northeast China	19.09	28.8	17.8	0.5	13.5	2.5	36.9
华北区 North China	12.53	37.9	33.5	12.3	5.8	1.0	9.5
华中区 Central China	16.66	53.6	12.3	2.3	9.8	3.9	18.1
华东区 East China	23.21	54.6	12.7	4.7	10.9	2.6	14.5
华南区 South China	7.12	39.8	7.3	2.9	21.9	4.8	23.2
西北区 Northwest China	12.23	43.2	29.1	3.1	5.9	2.0	16.7
西南区 Southwest China	9.16	35.2	22.9	3.2	18.4	3.1	17.2
全国 Total	100	43.2	18.8	4.0	11.4	2.7	19.9

小麦、水稻秸秆以肥料化利用为主，利用率分别为 63.1%和 55.2%；薯类秸秆以饲料化利用为主，利用率 57.4%；玉米秸秆以肥料化、饲料化利用为主，利用率分别为 35%和 29.2%；豆类秸秆以肥料化、饲料化利用为主，利用率分别为 22.1%和 31.2%；花生秸秆饲料化、燃料化并重，利用率分别为 16.9%和 26.0%；棉花、油菜、甘蔗秸秆则以肥料化、燃料化利用为主。水稻秸秆主要分布在华中、华东、东北区，包括湖南、江苏、湖北、四川、安徽和黑龙江等省份。小麦秸秆主要分布在华中、华东、华北区，包括河南、山东、河北、江苏和安徽等省份。玉米秸秆主要分布在东北、华北、华东区，包括黑龙江、吉林、河北、山东、河南、内蒙古和辽宁等省份。油菜主要分布在华中、西南、华东区，包括湖北、四川、山东、安徽、湖南和江苏等省份。棉花秸秆主要分布在西北、华东、华中区，包括新疆、山东和湖北等省份。薯

类秸秆主要分布在西南区,包括重庆、四川、贵州等省份。豆类秸秆主要分布在东北和华北区的黑龙江和内蒙古等省份。甘蔗秸秆主要分布在华南和西南区的广西、广东和云南等省份。

3 秸秆综合利用潜力

3.1 秸秆肥料化利用

秸秆肥料化利用主要为直接还田,2015 年还田总量为 3.89 亿 t,平均单位面积还田量为 13.4 kg/hm²。华东、华南和西北区秸秆肥料化利用较高,分别为 17.5、18.0 和 18.2 kg/hm²,分别占秸秆可收集量的 54.6%、39.8%和 43.2%,华中区、华北区、东北区分别为 14.4、11.1 和 10.6 kg/hm²,分别占秸秆可收集量的 53.6%、37.9%和 28.8%,西南区秸秆肥料化利用量较少,为 6.7 kg/hm²,占秸秆可收集量的 35.2%。

秸秆还田后在土壤中分解,能有效提高土壤有机质含量和肥料利用率,改良土壤结构和物理性状,综合改善土壤水、肥、气、热等方面的生态效益^[7]。相关研究表明,秸秆还田能够显著增加小麦产量,与秸秆不还田相比可增产 2.75%。在秦岭—淮河一线南北地区秸秆还田的最佳条件为实行免耕与翻耕交替耕作方式,采用玉米秸秆半量还田方法,施氮水平为 200~300 kg/hm²^[8]。2013—2015 年在宁夏灌区春玉米-水稻-春玉米轮作体系下,合理的秸秆还田量应控制在 16.7~23.3 kg/hm²之间,以达到作物增产和土壤培肥的双重目标^[9]。黄淮海小麦玉米轮作地区单季秸秆还田能维持较高的土壤生产力,同时提供大量秸秆的饲料化、能源化和原料化多元利用^[10]。根据以上研究,秸秆肥料化利用占总量的一半为宜,未超过 50%的按 50%计,超过区域按现有还田量计。经测算,全国单位面积秸秆还田量为 16.4 kg/hm²,秸秆肥料化利用总量可达 4.76 亿 t,秸秆肥料化利用潜力可增加 8 722.4 万 t。不同区域秸秆肥料化增加量见表 2。东北区秸秆肥料化增加潜力较大,其次为华北和西南区。

表 2 不同区域秸秆肥料化利用潜力
Table 2 Straw fertilization utilization potential

地区 Region	2015 年秸秆还田量 Return to field 2015/ (10 ⁴ t)	单位面积还田量 Unit returned to field/ (kg·hm ⁻²)	肥料化利用潜力 Fertilizer utilization potential/ (10 ⁴ t)	增加潜力 Increased potential/ (10 ⁴ t)
东北区 Northeast China	4 943.4	10.6	8 586.7	3 643.3
华北区 North China	4 276.0	11.1	5 636.8	1 360.8
华中区 Central China	8 033.9	14.4	8 033.9	0.0
华东区 East China	11 413.2	17.5	11 413.2	0.0
华南区 South China	2 552.6	18.0	3 203.1	650.5
西北区 Northwest China	4 751.2	18.2	6 601.2	1 850.0
西南区 Southwest China	2 905.5	6.7	4 123.0	1 217.5
全国 Total	38 875.5	13.4	47 597.9	8 722.4

3.2 秸秆饲料化利用

2015 年,全国秸秆饲料化利用总量 1.69 亿 t,占秸秆可收集资源量的 18.8%。根据中国统计年鉴,全国牛、马、驴、骡等大牲畜年底数量 1.22 亿头、羊存栏量 2.28 亿只,草食饲料需求量 8 kg/d (头牛当量),牛的草食饲料是羊的 5 倍计算^[11-13],全国年干草产量 31 746 万 t^[14],能够满足草食饲料需求量的 59.1%,干草产量折合 4.73 kg/d (头牛当量),按照现有养殖量估计,秸秆饲料需求量 3.27 kg/d (头牛当量),年秸秆饲料化利用总量可达 2.2 亿 t,秸秆饲料化利用增加潜力 5 122.3 万 t。

中国牧草资源分布极不均匀,主要分布在内蒙古、新疆、四川、西藏、青海、云南、甘肃等省。据测算,全国干草产量可满足饲草需求量的 59.1%。西南、西北地区的干草产量占饲草需求量的 92.3%、80.9%,华北、华南地区的干草产量占饲草需求量的 70.7%和 48.1%。华东、华中、东北地区干草产量仅占饲草需求量的 14.9%、16.2%和 23.5%。

西北、华北和西南区干草和秸秆饲料量可满足现有草食畜牧需求。华中、华东、华南、东北地区干草和秸秆饲料量仅满足草食畜牧需求量的 42.8%、63.7%、66.7%和 76%。全国秸秆饲料比例约占畜牧养殖饲草需求量的 40%,其中,东北区秸秆饲料比例占 52.5%,华北和华东区占比超过 40%。

目前,基于 2015 年全国各区域的干草产量和秸秆饲料利用量测算,见表 3。华北、西北和西南区的饲草自给率超过了 100%,可适当降低秸秆饲料利用量。东北区、华东区和华南区饲草自给率分别为 76%、63.7%和 66.7%,可提高秸秆饲料量。华中区饲草自给率最低,为 42.8%,应大幅增加秸秆饲料利用量。总体而言,全国秸秆饲草增加潜力为 5 122.3 万 t。

3.3 秸秆能源化利用

2015 年,全国秸秆能源化利用量 1.03 亿 t,秸秆规模化能源利用量约 2 740 万 t,包括生产生物质成型燃料年利用量 800 万 t,农林生物质发电量 260 万 kW,生物天然气年利用量约 50 亿 m³。秸秆作为薪柴用于户用炊事取暖利用量约 7 546 万 t。秸秆作为生物质能源原料,含有丰富的碳、氢和氧等养分,具有资源丰富和清洁环保等优点,可转化为成型燃料、生物天然气、发电等,直接替代煤炭、天然气等化石能源,为村镇等分散区域清洁用能提供有效途径。

秸秆能源化利用潜力分析,以秸秆为原料,生物质发电量、生物天然气、成型燃料占 50%计;秸秆产气潜力按 300 m³/kg 计;1 t 生物质成型燃料利用秸秆量按 1.2 t 计;近年来,全国秸秆集中供暖等规模化能源利用逐渐增加,直接作为户用薪柴使用量逐年降低^[15],根据不同区域的经济水平发展和用能习惯不同,本文假设东北、西北和西南区降低幅度按 10%计,其他区域降低幅度按 20%计。根据十三五可再生能源规划,到 2020 年,生物质成型燃料年利用量 3 000 万 t,农林生物质发电量 700 万 kW,生物天然气年利用量约 80 亿 m³,据测算,秸秆规模化能源利用量将达到 5 615 万 t,详见表 4。由此,秸秆规模化能

源利用增加潜力 2 875 万 t。随着城镇化进程不断增加，农村居民用能品质提升，以及大气环境保护要求，秸秆作为薪柴用于炊事取暖比例将逐渐降低，秸秆能源化利用潜力总量可达 12 006 万 t，秸秆能源化利用增加潜力 1 720 万 t。

3.4 秸秆综合利用潜力分析

根据现有秸秆利用相关规划和政策，以 2015 年可收集资源量为基准，假设全国秸秆可收集资源量 9 亿 t 基本保持稳定，秸秆基料化利用量 3 592.2 万 t 和原料化利用量

2 450.6 万 t 基本保持稳定。全国农作物秸秆综合利用总量 8.76 亿 t，利用率可达 97%，见表 5。除西南区外，其他区域秸秆利用率均超过 90%，其中，华中区秸秆利用需求潜力大于该区域秸秆可收集资源量，主要原因是畜牧养殖业与饲草资源不匹配，为满足牛羊等饲草需求，秸秆饲料量应大幅提高，饲草缺口 1 556.8 万 t。西南区秸秆综合利用率为 87%，可适当加大还田比例，促进秸秆全量利用。

表 3 不同区域秸秆饲料化利用潜力
Table 3 Straw feed utilization potential in different regions

地区 Regions	大牲畜存栏量 Large herbivore breeding stock/10 ⁴	羊存栏量 Sheep breeding stock/10 ⁴	饲草需求量 Forage demand/10 ⁴ t	干草产量 Hay production/ 10 ⁴ t	秸秆饲料利用 量 Straw feed consumption/ 10 ⁴ t	饲草自给率 Forage self-sufficiency rate/%	秸秆饲料增 加量 Increase in straw feed/10 ⁴ t	预计秸秆饲 料利用总量 Estimated total straw feed/10 ⁴ t	秸秆占饲 草需求总 量比例 Straw ratio to total feed demand/%
东北区 Northeast China	1 544.2	2 257.3	5 827.3	1 370.2	3 060.0	76.0	1 397.1	4 457.1	76.5
华北区 North China	1 547.9	8 346.8	9 394.4	6 645.8	3 771.2	110.9	-1 022.6	2 748.6	29.3
华中区 Central China	1 795.5	2 937.8	6 958.5	1 124.8	1 850.1	42.8	3 983.6	5 833.7	83.8
华东区 East China	1 119.1	3 671.3	5 411.8	806.8	2 642.9	63.7	1 962.1	4 605.0	85.1
华南区 South China	806.1	310.8	2 535.3	1 220.4	470.3	66.7	844.6	1 314.9	51.9
西北区 Northwest China	1 962.7	8 659.9	10 788.5	8 729.3	3 199.0	110.6	-1 139.8	2 059.2	19.1
西南区 Southwest China	3411	4 916	12 831.1	11 849.4	1 884.3	107.0	-902.6	981.7	7.7
全国 Total	12 186.5	31 099.9	53 746.9	31 746.7	16 877.9	90.5	5 122.3	22 000.2	40.9

表 4 不同区域秸秆能源化利用潜力
Table 4 Straw energy utilization potential in different regions

地区 Regions	2015 年			秸秆能源化利用潜力 Energy utilization potential						
	能源化利用总 量 Total energy utilization/ 10 ⁴ t	规模化能源利 用量 Scale energy utilization/ 10 ⁴ t	作为薪柴用量 Used as fuelwood/ 10 ⁴ t	生物质发电 量 Biomass power/ 10 ⁴ kW	生物天然气 Biomethane/ 10 ⁸ m ³	生物质成型 燃料 Biomass briquette/10 ⁴ t	规模化能源 利用量 Scale energy utilization/ 10 ⁴ t	作为薪柴用 量 Used as fuelwood/ 10 ⁴ t	能源化利用 总量 Total energy utilization/ 10 ⁴ t	能源化利用 增加量 Increase of energy utilization/ 10 ⁴ t
东北区 Northeast China	2 324	441	1 883	100	18	450	1 194	1 567	2 762	438
华北区 North China	658.2	491	167	120	11	600	969	148	1 117	459
华中区 Central China	1 465.6	681	785	140	16	900	943	804	1 747	282
华东区 East China	2 271.6	640	1 632	210	16	600	1 251	1 329	2 580	308
华南区 South China	1 401.8	297	1 105	65	2	450	504	925	1 429	27
西北区 Northwest China	648.3	114	535	35	11	100	427	396	823	175
西南区 Southwest China	1 516.5	76	1 440	30	6	100	326	1 222	1 548	31
全国 Total	10 285.7	2 740	7 546	700	80	3200	5 615	6 391	12 006	1 720

表 5 不同区域秸秆综合利用潜力
Table 5 Comprehensive utilization potential of straw in different regions

地区 Regions	秸秆综合利用潜力 Comprehensive utilization potential/10 ⁴ t	可收集资源量 Collectable resources/10 ⁴ t	综合利用率 Comprehensive utilization rate/%	增加潜力合 计 Increase total potential/10 ⁴ t	利用率增加 幅度 Increase margin/%	肥料利用增加 潜力 Increase in fertilizer utilization/10 ⁴ t	饲料利用增加 潜力 Increase in feed utilization/ 10 ⁴ t	燃料利用增加潜 力 Increase in fuel utilization/10 ⁴ t
东北区 Northeast China	16 319.4	17 173.4	95.0	5 478.0	31.9	3 643.3	1 397.1	437.5
华北区 North China	11 000.1	11 273.6	97.6	797.2	7.1	1 360.8	-1 022.6	459.0
华中区 Central China	16 542.7	14 986.8	110.4	4 265.4	28.5	0.0	3 983.6	281.8
华东区 East China	20 124.2	20 887.1	96.3	2 270.5	10.9	0.0	1 962.1	308.5
华南区 South China	6 439.2	6 406.2	100.5	1 521.9	23.8	650.5	844.6	26.8
西北区 Northwest China	10 046.6	11 002.0	91.3	885.0	8.0	1 850.0	-1 139.8	174.9
西南区 Southwest China	7 174.6	8 246.0	87.0	346.2	4.2	1 217.5	-902.6	31.4
全国 Total	87 646.7	89 975.0	97.4	15 564.8	17.3	8 722.4	5 122.3	1 720.1

根据相关文献方法[16], 秸秆肥料化的氮(N)、磷(P₂O₅)、钾(K₂O)理论养分资源替代化肥潜力分别为434.5、137.5和796.3万t, 不同区域化肥替代潜力见表6。水稻、小麦、玉米、大豆、等主要作物理论N、P₂O₅和K₂O等需求量分别为1 500、600、1 700万t, 需求比例为1: 0.4: 1.2 (N: P₂O₅: K₂O), 秸秆肥料化利用能够直接替代化肥需求量的29%、22.9%和46.8%。

奶牛与肉牛养殖比例按3:7计; 奶牛粪便中产生量24 kg/(头·d)、尿液产生量12.4 kg/(头·d), 肉牛粪便产生量13.63 kg/(头·d)、尿液产生量8.43 kg/(头·d)。牛粪便中氮(N)质量分数4 kg/t、磷(P₂O₅)质量分数2.7 kg/t、钾(K₂O)质量分数2.2 kg/t; 牛尿液中氮(N)质量分数7.8 kg/t、磷(P₂O₅)质量分数0.6 kg/t、钾(K₂O)质量分数12 kg/t。羊粪便产生量0.69 kg/(只·d)、尿液产生量0.41 kg/(只·d), 羊粪便中氮(N)质量分数7.5 kg/t、磷(P₂O₅)质量分数2.6 kg/t、钾(K₂O)质量分数4 kg/t, 羊尿液中氮(N)质量分数14 kg/t、磷(P₂O₅)质量分数1.96 kg/t、钾(K₂O)含量未计^[17-18]。通过饲料化过腹还田

秸秆资源潜力2.2亿t, 草食畜牧养殖总量4.33亿头(只), 粪污产生总量约14.5亿t, 其中粪便8.2亿t、尿液6.3亿t。粪污中氮(N)、磷(P₂O₅)、钾(K₂O)理论养分替代化肥潜力分别为1 047.1、281.5和1 088.7万t。

通过肥料和饲料化利用, 秸秆综合利用可直接和间接替代化肥潜力分别为氮肥(N)1 481.6万t、磷肥(P₂O₅)419万t、钾肥(K₂O)1 885.1万t(表6)。肥料出厂价按照尿素1 571元/t、磷酸二胺2 500元/t、氯化钾2 500元/t计算^[19-21], 可节本增效节约化肥购置成本约685.9亿元, 折合单位秸秆替代化肥节约成本98.5元/t秸秆。

秸秆按发热量14.6 MJ/kg计^[22], 标准煤的发热量29.3 MJ/kg, 秸秆能源化利用1.2亿t, 可替代煤炭等化石能源5 982.4万t标准煤, 可减排二氧化碳1.5亿t、二氧化硫448.7万t、氮氧化物224.3万t, 烟尘4 068万t(表7)。按碳排放交易计算, 交易价格浮动11.6~75.1元/t, 按13.5元/t计(2017年以来最低价格)^[23], CO₂减排的经济效益可达20.25亿元, 折合单位秸秆碳排放增加收益16.9元/t秸秆, 环境和经济效益显著。

表6 秸秆综合利用直接或间接替代化肥潜力
Table 6 Potential of direct or indirect substitution of chemical fertilizer 10⁴t

地区 Regions	肥料化利用量 Fertilizer utilization	直接替代化肥潜力 Potential of direct substitution of chemical fertilizers			饲料化利用量 Feed utilization	粪便产生量 Fecal production	尿液产生量 Urine production	粪污产生总量 Total excrement production	间接替代化肥潜力 Potential of indirect substitution of chemical fertilizers		
		N	P ₂ O ₅	K ₂ O					N	P ₂ O ₅	K ₂ O
东北区 Northeast China	8 587	79.1	26.1	131.2	4 457.1	10 004	7 722	17 726	123.6	33.7	136.3
华北区 North China	5 637	69.4	22.2	110.1	2 748.6	11 561	8 651	20 211	156.8	40.8	142.7
华中区 Central China	8 034	67.3	20.9	132.7	5 833.7	11 711	9 025	20 737	145.4	39.6	158.8
华东区 East China	11 413	94.7	29.0	184.9	4 605.0	7 763	5 901	13 664	100.6	26.8	100.8
华南区 South China	3 203	29.6	9.2	60.3	1 314.9	5 004	3 901	8 905	59.8	16.6	70.3
西北区 Northwest China	6 601	56.1	17.8	99.5	2 059.2	14 174	10 681	24 855	188.4	49.5	179.0
西南区 Southwest China	4 123	38.4	12.3	77.5	981.7	22 081	17 047	39 128	272.6	74.4	300.9
全国 Total	47 598	434.5	137.5	796.3	22 000.2	82 298	62 928	145 226	1 047.1	281.5	1 088.7

表7 秸秆综合利用能源替代潜力及污染物减排量
Table 7 Straw energy substitution potential and pollutant emission reduction

地区 Regions	能源化利用量 Energy utilization/ 10 ⁴ t	折合标煤 Converted into standard coal/10 ⁴ t	减排量 Reduction of emissions/10 ⁴ t			
			CO ₂	SO ₂	NO _x	烟尘 Particulates
东北区 Northeast China	2 762	1 376.1	3 440.1	258.0	9.7	6.6
华北区 North China	1 117	556.7	1 391.7	41.8	20.9	378.5
华中区 Central China	1 747	870.7	2 176.8	65.3	32.7	592.1
华东区 East China	2 580	1 285.6	3 214.1	96.4	48.2	874.2
华南区 South China	1 429	711.8	1 779.6	53.4	26.7	484.1
西北区 Northwest China	823	410.2	1 025.4	30.8	15.4	278.9
西南区 Southwest China	1 548	771.3	1 928.2	57.8	28.9	524.5
全国 Total	12 006	5 982.4	14 956.0	448.7	224.3	4 068.0

4 结 论

秸秆科学规划应遵循资源科学评价, 明晰区域分布; 农业可持续发展, 实现资源永续; 规划系统全面, 实现循环经济; 坚持农业优先、农工复合利用; 市场需求导向、原料保障供应等理论方法。坚持“一主多元、农用优先”秸秆综合利用途径, “一主”即以农业生产与农村能源利用为主, “多元”即肥料、饲料、燃料、基料与原料等多元化利用, 实现“市场用户需求导向、原料供应持续保障、农工复合高效利用、综合效益显著提升”的秸秆综合利用模式。

基于上述规划理论与评价方法, 预计中国秸秆综合利用总量8.76亿t, 其中, 肥料化利用潜力4.76亿t, 饲料化2.2亿t, 能源化1.2亿t, 基料化和原料化共0.6亿t, 与2015年相比, 秸秆肥料化、饲料化和能源化利用量分别增加8 722.4万t、5 122.3万t和1 720.1万t。东北区、华北区、华东区、华南区、西北区、西南区等六大区域秸秆资源基本能够得到全量利用。华中区秸秆资源量无

法满足需求量, 需要外购饲草进行补充。

通过肥料和饲料化利用, 可直接和间接替代化肥潜在氮肥(N) 1 481.6 万 t、磷肥(P_2O_5) 419 万 t、钾肥(K_2O) 1 885.1 万 t。可节本增效节约化肥购置成本约 685.9 亿元, 折合单位秸秆替代化肥节约成本 98.5 元/t。通过能源化利用, 可替代煤炭等化石能源 5 982.4 万 t, 可减排二氧化碳 1.5 亿 t、二氧化硫 448.7 万 t、氮氧化物 224.3 万 t, 烟尘 4 068 万 t。经碳排放交易经济效益可达 20.25 亿元, 碳减排增收 16.9 元/t, 环境和经济效益显著。

[参 考 文 献]

- [1] 崔明, 赵立欣, 田宜水, 等. 中国主要农作物秸秆资源能源化利用分析评价[J]. 农业工程学报, 2008, 24(12): 291—296.
Cui Ming, Zhao Lixin, Tian Yishui, et al. Analysis and evaluation on energy utilization of main crop straw resources in China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2008, 24(12): 291—296. (in Chinese with English Abstract)
- [2] 田宜水, 赵立欣, 孙丽英, 等. 农作物秸秆资源调查与评价方法研究[J]. 中国人口·资源与环境 2011, 21 (S1): 583—586.
Tian Yishui, Zhao Lixin, Sun Liying, et al. Study on crop straw survey and evaluation method[J]. China Population Resources and Environment, 2011, 21 (S1): 583—586. (in Chinese with English Abstract)
- [3] 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 Zhihong, Huang Yanli, Hao Jinmin. Multi-suitability comprehensive evaluation of crop straw resource utilization in China[J]. Research of Environmental Sciences, 2018, 31(1): 179—186. (in Chinese with English Abstract)
- [4] 孙建飞, 郑聚峰, 程琨, 等. 基于可收集的秸秆资源量估算及利用潜力分析[J]. 植物营养与肥料学报 2018, 24(2): 404—413.
Sun Jianfei, Zheng Jufeng, Cheng Kun, et al. Estimate of the quantity of collectable straw resources and competitive utilization potential [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2018, 24(2): 404—413. (in Chinese with English Abstract)
- [5] 方放, 李想, 石祖梁, 等. 黄淮海地区农作物秸秆资源分布及利用结构分析[J]. 农业工程学报, 2015, 31(2): 228—234.
Fang Fang, Li Xiang, Shi Zuliang, et al. Analysis on distribution and use structure of crop straw resources in Huang-Huai-Hai Plain of China [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(2): 228—234. (in Chinese with English Abstract)
- [6] 马秋颖. 东北地区玉米秸秆主要利用方式成本效益分析研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2018.
Ma Qiuying. Study on Cost-Benefit Analysis of Main Utilization Pattern of Corn Straw in Northeast China[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences Dissertation, 2018. (in Chinese with English Abstract)
- [7] 赵鹏, 陈阜, 马新明, 等. 麦玉两熟秸秆还田对作物产量和农田氮素平衡的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2010, 28(2): 162—166
Zhao Peng, Chen Fu, Ma Xinming, et al. Effects of integrated straw on crop yield and nitrogen balance in winter wheat & summer maize [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2010, 28(2): 162—166. (in Chinese with English Abstract)
- [8] 周延辉, 朱新开, 郭文善, 等. 中国地区小麦产量及产量要素对秸秆还田响应的整合分析[J]. 核农学报, 2019, 33(1): 129—137
Zhou Yanhui, Zhu Xinkai, Guo Wenshan, et al. Meta-analysis of the response of wheat yield and yield components to straw returning in China[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2019, 33(1): 129—137. (in Chinese with English Abstract)
- [9] 白建忠, 陈泽, 丁永锋, 等. 秸秆还田量对水旱轮作作物产量和土壤肥力的影响[J]. 土壤通报, 2017, 48(5): 1185—1191
Bai Jiazhong, Chen Ze, Ding Yongfeng, et al. Effect of different straw incorporation rates on crops yields and soil fertility in the paddy upland rotation system [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2017, 48(5): 1185—1191. (in Chinese with English Abstract)
- [10] 李昊昱, 孟兆良, 庞党伟, 等. 周年秸秆还田对农田土壤固碳及冬小麦-夏玉米产量的影响[J]. 作物学报, 2019, 45(6): 893—903.
Li Haoyu, Meng Zhaoliang, Pang Dangwei, et al. Effect of annual straw return model on soil carbon sequestration and crop yields in winter wheat-summer maize rotation farmland [J]. Acta Agronomica Sinica, 2019, 45(6): 893—903. (in Chinese with English Abstract)
- [11] 姚继广. 畜禽标准化规模养殖[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2011.
- [12] 农业部办公厅. 关于下发《奶牛标准化规模养殖生产技术规范(试行)》的通知[J]. 中华人民共和国农业部公报, 2008, 5(3): 36—44.
- [13] 肉牛标准化规模养殖生产技术规范(试行)续[J]. 黑龙江畜牧兽医, 2013, 37(2): 52—54.
- [14] 杨旭东, 杨春, 孟志兴. 我国草原生态保护现状、存在问题及建议[J]. 草业科学, 2016, 33(9): 1901—1909
Yang Xudong, Yang Chun, Meng Zhixing. The current situation, problems and suggestions of grassland ecological protection in China[J]. Pratacultural Science, 2016, 33(9): 1901—1909 (in Chinese with English Abstract)
- [15] 丛宏斌, 姚宗路, 赵立欣, 等. 基于价值工程原理的乡村秸秆清洁供暖技术经济评价[J]. 农业工程学报, 2019, 35(9): 200—205.
Cong Hongbin, Yao Zonglu, Zhao Lixin, et al. Technical and economic evaluation for clean heating using straw in rural area based on principle of value engineering[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2019, 35(9): 200—205. (in Chinese with English Abstract)
- [16] 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.
Song Dali, Hou Shengpeng, Wang Xiubin, et al. Nutrient resource quantity of crop straw and its potential of

- substituting[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2018, 24(1): 1—21. (in Chinese with English Abstract)
- [17] 李国林. 规模化奶牛场产排污系数、污水存贮及土地消纳量相关技术参数研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2014. Li Guolin. The Related Technology Parameters Study of Large-Scale Dairy Farm's Pollutants Producing and Discharge Coefficient, Wastewater Storage and Amount of Land Given[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2014. (in Chinese with English Abstract)
- [18] 李林海. 畜禽粪便中的主要养分和重金属含量分析[J]. 南方农业, 2018, 12(23): 126—128.
- [19] 顾宗勤. 2017 年我国氮肥行业运行现状及 2018 年发展重点[J]. 中国石油和化工经济分析, 2018: 42—45.
- [20] 王莹. 2017 年我国磷复肥行业生产情况及发展趋势[J]. 磷肥与复肥, 2018, 69(33): 1—6. Wang Ying. Production and developing trend of phosphoric compound fertilizer industry in China in 2017[J]. Phosphate & Compound Fertilizer, 2018, 69(33): 1—6. (in Chinese with English Abstract)
- [21] 王栋. 国产钾肥对国际钾肥市场定价权的影响[J]. 资源与产业, 2018, 20(6): 86—94. Wang Dong. Influence of domestic potash fertilizer on global potash fertilizer market pricing[J]. Resources & Industries, 2018, 20(6): 86—94. (in Chinese with English Abstract)
- [22] 霍丽丽, 田宜水, 孟海波, 等. 生物质固体成型燃料全生命周期评价[J]. 太阳能学报, 2011, 32(12): 1875—1880. Huo Lili, Tian Yishui, Meng Haibo, et al. Life cycle assessment analysis for densified biofuel[J]. ACTA Energies Collars Sonica, 2011, 32(12): 1875—1880. (in Chinese with English Abstract)
- [23] 碳排放交易. 中国七大碳市场行情 K 线走势图, 2019. [2019-01-28] <http://www.tanpaifang.com/tanhangqing/>

Study on straw multi-use potential in China

Huo Lili¹, Zhao Lixin^{1*}, Meng Haibo¹, Yao Zonglu²

(1. Institute of Rural Energy and Environmental Protection, Chinese Academy of Agricultural Engineering Planning & Design, Key Laboratory of Energy Resource Utilization from Agriculture Residue, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100125, China; 2. Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, CAAS, Beijing 100081, China)

Abstract: Straw is both a by-product of agriculture and a valuable resource for biomass. Turning straw wastes into resource will increase industrial efficiency, promote the cycle of planting and breeding, and meet the needs of people's livelihood such as clean heating in villages and towns. In China, the zoning layout of straw utilization is still not perfect, resulting in structural excess of straw in different regions and in certain season. The problems of straw resource waste and environmental pollution are outstanding. Based on the theory of comprehensive utilization of straw, we proposed a comprehensive utilization path of straw, which was “agricultural priority, agricultural production, rural energy utilization, and diversified utilization of fertilizers, feed, fuel, base materials and raw materials”. The goal was “market user demand orientation, continuous supply of raw materials, comprehensive utilization for agriculture and industry, and significant improvement in comprehensive benefits”. The comprehensive utilization potential of straw in China was 876 million tons, an increase was 156 million tons from 2015, Fertilizer utilization potential of straw was 476 million tons; Feed utilization potential of straw was 220 million tons; Energy utilization potential of straw was 120 million tons; Base material and raw material utilization potential of straw was 60 million. Among them, fertilizer, feed and energy utilization increased by 87.224 million tons, 51.232 million tons and 17.20 million tons from 2015. The straw resources in the six regions of Northeast China, North China, East China, South China, Northwest China and Southwest China could be fully utilized. The demand for forage in Central China was still unsatisfactory. Through fertilizer and feed utilization, the directly and indirectly substitution potential of chemical fertilizers was: nitrogen fertilizer (N) 14.816 million tons, phosphate fertilizer (P_2O_5) 4.19 million tons, potash fertilizer (K_2O) 18.851 million tons, saving cost of fertilizers about 6 859 million yuan, equivalent to saving costs for unit straw replacement of fertilizer by 98.5 yuan per ton of straw. Through energy utilization, it could replace 59.824 million tons of fossil energy such as coal, reduce 150 million tons of carbon dioxide emissions, 4.487 million tons of sulfur dioxide, 2.243 million tons of nitrogen oxides, and 40.68 million tons of soot. The economic benefits of carbon emissions trading could reach 2 025 million yuan, equivalent to the increase in straw carbon emissions by 16.9 yuan per unit ton of straw. Therefore, environmental and economic benefits were significant. The results of the study provide a reference for improving the comprehensive utilization level of straw, and the government decision-making and industrial development.

Keywords: straw; energy; fertilizers; feed; multi-use planning; theoretical method