中国生态农业学报(中英文)
Chinese Journal of Eco-Agriculture
中文核心期刊
中国科技核心期刊
中国精品科技期刊
百种中国杰出学术期刊
中国科学引文数据库源刊

主要农作物秸秆养分资源现状及其肥料替代潜力分析——以安徽省为例

程文龙，韩上，李敏，王慧，卜容燕，曹哲伟，唐杉，武际

引用本文:
程文龙, 韩上, 李敏, 等. 主要农作物秸秆养分资源现状及其肥料替代潜力分析——以安徽省为例[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2020, 28(11): 1789–1798.

在线阅读 View online: https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.200219

(向下翻页，阅读全文)

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

安徽省作物养分供需分析及化肥减施潜力研究

Study on the input and demand of crop nutrients and the potential of fertilizer reduction in Anhui Province

中国生态农业学报(中英文). 2020, 28(2): 221–235 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.190537

基于土壤功能的中国主要农作物可能源化秸秆生态潜力分析

Evaluation of energy–oriented utilization potential of main Chinese crop residues based on soil protection functions

中国生态农业学报. 2017, 25(2): 276–286 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.160671

秸秆热解气化工程生态价值量估算方法研究

Ecological value estimation method of the straw pyrolysis engineering

中国生态农业学报(中英文). 2020, 28(6): 920–930 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.190563

沼液施用条件下添加浮萍对稻田氮素流失和Cu、Pb变化的影响

Nitrogen losses and Cu, Pb changes of paddy field affected by adding duckweed under biogas slurry application

中国生态农业学报(中英文). 2020, 28(4): 608–618 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.190825

不同轮作模式下秸秆还田与氮肥运筹对杂交籼稻产量及米质的影响

Effects of straw returning and nitrogen application on yield and quality of hybrid *indica* rice under different rotation patterns

中国生态农业学报(中英文). 2020, 28(10): 1581–1590 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.200236

中国生态农业学报(中英文) 2020 年 11 月 第 28 卷 第 11 期
Chinese Journal of Eco-Agriculture, Nov. 2020, 28(11): 1789−1798

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.200219

程文龙, 韩上, 李敏, 王慧, 卜容燕, 曹哲伟, 唐杉, 武际. 主要农作物秸秆养分资源现状及其肥料替代潜力分析——以安徽省为例[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2020, 28(11): 1789−1798

CHENG W L, HAN S, LI M, WANG H, BU R Y, CAO Z W, TANG S, WU J. Current situation of the main crop straw nutrient resources and the substitute potential of crop straw for chemical fertilizer: A case study of Anhui Province[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2020, 28(11): 1789−1798

主要农作物秸秆养分资源现状及其肥料替代潜力分析*

——以安徽省为例

程文龙, 韩 上, 李 敏, 王 慧, 卜容燕, 曹哲伟, 唐 杉, 武 际**

(安徽省农业科学院土壤肥料研究所/养分循环与资源环境安徽省重点实验室 合肥 230031)

摘 要: 安徽省农作物秸秆资源丰富, 充分利用秸秆养分资源对于农田养分投入的合理分配具有重要意义。评估全省主要农作物秸秆还田当季有效养分替代化肥潜力, 可为安徽省减肥增效提供科学依据。本研究以安徽种植面积较大的主要农作物水稻、小麦、玉米、大豆、花生和油菜为研究对象, 通过查阅安徽省统计数据和公开发表的文献资料, 对 2017 年安徽省主要农作物秸秆数量、秸秆还田率以及还田当季养分利用率进行估算, 明晰了全省化肥减施潜力。结果表明: 2017 年安徽省主要农作物秸秆资源量为 4 699.9 万 t, 秸秆资源分布上呈北部和中部较多、南部最少的特征。秸秆养分资源总量为 124.8 万 t, N、P_2O_5 和 K_2O 分别为 38.1 万 t、11.4 万 t 和 75.3 万 t, 分别占全省主要农作物养分需求的 40.1%、32.1%和 68.9%。理论上, 秸秆全量还田, 且养分充分利用的情况下, 秸秆养分替代化肥潜力大。但秸秆养分 N、P_2O_5 和 K_2O 当季利用率分别为 38.9%、52.3%和 69.9%, 实际秸秆 N、P_2O_5 和 K_2O 养分还田量仅占主要农作物养分需求的 15.6%、16.8%和 48.2%, 分别占农田养分总投入量的 8.6%、6.4%和 41.4%。通过秸秆还田, 全省可减施化肥 63.3 万 t, 减施比例为 19.8%, N、P_2O_5 和 K_2O 减施比例分别为 11.4%、17.2%、40.7%。进一步提高秸秆还田率和当季养分释放率, 是推进全省化肥减施增效的有利手段。

关键词: 秸秆产量; 秸秆养分资源量; 当季养分利用率; 化肥; 安徽省

中图分类号: S141 开放科学码(资源服务)标识码(OSID):

Current situation of the main crop straw nutrient resources and the substitute potential of crop straw for chemical fertilizer: A case study of Anhui Province*

CHENG Wenlong, HAN Shang, LI Min, WANG Hui, BU Rongyan, CAO Zhewei, TANG Shan, WU Ji**

(Soil and Fertilizer Research Institute, Anhui Academy of Agricultural Sciences / Key Laboratory of Nutrient Cycling and Resource Environment of Anhui Province, Hefei 230031, China)

Abstract: Anhui Province is rich in crop straw resources, it is important to fully utilize straw nutrient resources for the purpose of

* 国家重点研发计划项目(2018YFD0200900)、公益性行业科研专项(201503122)和安徽省重点研究与开发计划项目(1704e1002237)资助

** 通信作者: 武际, 主要从事绿肥作物综合利用技术、土壤培肥及作物高效施肥技术研究。E-mail: wuji338@163.com
程文龙, 主要从事植物营养与作物施肥技术研究。E-mail: wlchengche@163.com

收稿日期: 2020-03-25 接受日期: 2020-05-29

* This study was supported by the National Key Research and Development Project of China (2018YFD0200900), the Public Welfare Industry Research Project of China (201503122), and the Key Research and Development Project of Anhui Province (1704e1002237).

** Corresponding author, E-mail: wuji338@163.com

Received Mar. 25, 2020; accepted May 29, 2020

maintaining a nutrient balance in farmlands. For this cause, the potential of straw as a natural alternative to chemical fertilizers was evaluated in order to provide a scientific basis for the reduced use of chemical fertilizers in Anhui Province. In this study, we selected main crops such as rice, wheat, corn, soybean, peanut, and rape as study subjects in Anhui Province. We consulted the published literature and statistical data, and estimated the amount of straw, straw return rate, and nutrient utilization rate of main crops in Anhui Province in 2017. The results showed that the amount of straw estimated at 46.999 million tons in 2017. Furthermore, the distribution of straw resources was more in the northern and the middle regions of the province, and less in the southern regions. We also found that the total amount of straw nutrient resources was 1.248 million tons. The amounts of N, P_2O_5, and K_2O were 0.381, 0.114, and 0.753 million tons, respectively, and these accounted for 40.1%, 32.1%, and 68.9% of the main crop nutrient requirements of the entire province. Therefore, the potential of straw replacing chemical fertilizers is great in theory when all the straw is returned to the soil and the nutrients in the straw are fully utilized. However, the utilization rates of N, P_2O_5, and K_2O were only 38.9%, 52.3%, and 69.9%, respectively. The actual nutrients contents of N, P_2O_5, and K_2O of crop straws returned to the field accounted for only 15.6%, 16.8%, and 48.2%, respectively, of the nutrient demands of the main crops. Moreover, the actual amounts of N, P_2O_5, and K_2O returned to the field accounted for 8.6%, 6.4%, and 41.4% of the total input, respectively. By returning straw to the farmland, approximately 0.633 million tons of chemical fertilizer can be saved, representing 19.8% of the amount of chemical fertilizer that would have been used without the straw. It is also worth noting that the application reduction rates of N, P_2O_5, and K_2O were 11.4%, 17.2%, and 40.7%, respectively. Thus, the improvement in straw returning-to-field rate and release rate of nutrients in crop growth period point towards the benefits of promoting the reduced use of chemical fertilizers.

Keywords: Straw yield; Straw nutrient resources; Nutrient utilization rate in season; Chemical fertilizer; Anhui Province

安徽省作为农业大省，常年化肥施用量较大，据中国统计年鉴数据显示，2017 年安徽省化肥施用量达 318.7 万 t，位居全国第 4[1]。大量施用化肥在一定程度提高了作物产量，但易造成土壤耕地酸化、污染等问题，致使耕地严重退化[2]。而安徽省秸秆资源丰富，常年可收集的农作物秸秆达 4 800 万 t[3]，且秸秆含有丰富的碳、氮、磷、钾以及各种中、微量营养元素[4-6]。秸秆还田是秸秆资源的有效利用途径，同时还田后秸秆作为重要的有机肥源具有较大的化肥替代潜力。当前安徽省普遍存在施肥过量现象，为落实新时代国家粮食安全战略和实施“藏粮于地，藏粮于技”战略，推进农业供给侧结构性改革，提升耕地质量，评估安徽省主要农作物秸秆养分资源数量及替代化肥潜力具有重要意义。

前人对安徽省主要农作物秸秆养分资源量及其肥料替代潜力进行了大量研究。鲍恩财等[7]研究表明，安徽省秸秆资源分布呈现由北向南逐步递减的趋势，利用潜力上，由北向南可分为重点开发区、适度开发区和限制开发区。王晓斌[8]指出，2011 年安徽省主要农作物秸秆养分资源主要分布于淮北地区和江淮地区，全省秸秆养分资源可替代化肥 N、P_2O_5 和 K_2O 潜力分别为 47.9 万 t、15.0 万 t 和 90.4 万 t。关于秸秆养分资源替代肥料潜力的研究，前人主要集中于秸秆资源等养分替代化肥效果，而对秸秆替代化肥后，当季秸秆还田的养分有效性缺乏系统性评估。本文利用 2017 年安徽省统计年鉴数据和对已发表资料的统计，探讨和分析了安徽省主要秸秆当季还田有效养分量及其替代化肥潜力，以期为安徽省秸秆资源的高效利用、化肥减量增效提供理论依据。

1 研究方法和数据来源

1.1 研究对象

本文研究对象为安徽省主要农作物秸秆。研究作物主要有水稻(*Oryza sativa*)、小麦(*Triticum aestivum*)、玉米(*Zea mays*)、大豆(*Glycine max*)、花生(*Arachis hypogaea*)和油菜(*Brassica napus*)。

1.2 秸秆养分资源数量的核算方法

通过作物经济产量数据计算得到秸秆产量(M)，根据秸秆养分含量计算养分资源量。计算公式如下：

$$M_i=\sum Y_{ij}\times R_j \quad (1)$$

$$M_N=W_j\times N_j \quad (2)$$

$$M_P=W_j\times P_j\times 2.29 \quad (3)$$

$$M_K=W_j\times K_j\times 1.2 \quad (4)$$

式中：M_i 为第 i 个市农作物秸秆资源数量，Y_{ij} 为第 i 个市的第 j 种农作物的产量，R_j 为第 j 种农作物的草谷比，M_N 为秸秆氮素(N)养分资源量，W_j 为第 j 种农作物秸秆资源数量，N_j 为第 j 种农作物秸秆氮素养分含量，M_P 为秸秆磷素(P_2O_5)养分资源量，P_j 为第 j 种农作物秸秆磷素养分含量，2.29 为单质磷折算 P_2O_5 的系数，M_K 为秸秆钾素(K_2O)养分资源量，K_j 为第 j 种农作物秸秆钾素养分含量，1.2 为单质钾折算为 K_2O 的系数。

本文涉及的农作物产量、种植面积及化肥施用量均来自于《安徽省统计年鉴 2018》。农作物草谷比和作物单位经济产量所需吸收的养分数量(表 1)均通过查询国内外大量文献确定。秸秆养分含量参考全国农技推广站中心数据(表 1)[9]。

表 1　不同作物的草谷比、秸秆养分含量(风干基)和单位经济产量所需养分量

Table 1　Ratio of grain to straw, nutrient contents in straws (air-dried base) and nutrient requirements for unit economic yields of different crops

作物 Crop	草谷比 Straw/grain	秸秆养分含量 Nutrient content in straw ($g \cdot kg^{-1}$)			单位经济产量所需吸收的养分数量 Nutrient requirement for unit economic yield ($kg \cdot t^{-1}$)		
		N	P_2O_5	K_2O	N	P_2O_5	K_2O
水稻 Rice	1.0[10-11]	8.3	2.7	20.6	14.6[18]	6.2[18]	19.2[18]
小麦 Wheat	1.1[9,12]	6.2	1.6	12.3	24.6[19]	8.5[19]	27.7[19]
玉米 Maize	1.2[9,13-14]	8.7	3.1	13.4	25.8[19]	9.8[19]	27.8[19]
大豆 Soybean	1.6[15-16]	16.3	3.9	12.7	81.4[20-21]	23.0[20-21]	32.0[20-21]
花生 Peanut	1.5[15,17]	16.6	3.4	11.9	43.7[22]	10.0[22]	53.8[22]
油菜 Rapeseed	3.0[11,15]	8.2	3.2	22.4	43.0[23]	27.0[23]	87.0[23]

1.3　秸秆养分资源数量及化肥减施量的核算方法

秸秆还田当季释放的无机养分才能被作物吸收利用，因此秸秆还田有效养分=秸秆养分资源量×秸秆还田率(%)×当季养分释放率(%)。安徽省秸秆还田率和当季养分释放率参考刘晓永[24]研究结果(表 2)。减施化肥量=2017 年化肥施用量+秸秆还田有效养分–推荐施肥量。

1.4　数据分析

采用Microsoft Excel 2010、ArcGIS 10.2对数据进行处理和作图。

表 2　作物秸秆还田率及养分当季释放率[24]

Table 2　Ratios of straw to farmland and rates of in-season nutrient release from straw of different crops[24]　%

作物 Crop	秸秆还田率 Ratio of straw to farmland	养分当季释放率 Rate of in-season nutrient release from straw		
		N	P_2O_5	K_2O
水稻 Rice	92.77	47.19	66.69	84.91
小麦 Wheat	78.11	50.11	62.01	89.05
玉米 Maize	70.11	54.04	73.03	84.43
大豆 Soybean	61.44	52.06	54.41	84.30
花生 Peanut	61.44	51.61	66.50	85.82
油菜 Rapeseed	61.63	52.65	66.31	82.18

2　结果与分析

2.1　安徽省主要农作物秸秆资源量及其分布情况

本研究估算 2017 年安徽省主要农作物秸秆资源量为 4 699.9 万 t(表 3)，其中秸秆数量仍以水稻、小麦和玉米三大粮食作物最高，分别占总量的 34.4%、38.3%和 13.7%，其他作物秸秆总量仅占 13.6%。从秸秆养分资源数量看，水稻、小麦和玉米三大粮食作物养分资源数量分别占总养分量的 40.9%、29.1%和 13.0%，其他作物以油菜秸秆养分资源数量最高，占 9.0%。作物秸秆以水稻氮、磷和钾养分数量最高，分别占单质养分总量的 35.2%、38.6%和 44.2%。

从不同地区主要农作物的秸秆(水稻、小麦、玉米、大豆、花生、油菜)及其养分资源分布来看，2017 年安徽省16个市的秸秆及其养分资源分布各地区差异较大(表4)，江淮地区和淮北地区秸秆总量较多，分别占全省总量的40.9%和39.0%，其中秸秆数量前3的市为阜阳、亳州和宿州，分别占全省秸秆总量的 13.7%、11.5% 和10.6%。秸秆养分资源总量最高的为阜阳，其次为滁州和亳州，分别占全省秸秆养分资源总量的12.0%、10.8%和9.8%。从各市的秸秆数量看，大于400万t的市4个，300万~400万t的市4个，200万~300万t的市1个，100万~200万t的市4个，低于100万t的市3个。

2.2　主要农作物化学养分需求及其分布情况

安徽省 2017 年主要农作物产量为 4 097.7 万 t，包括水稻、小麦、玉米、大豆、花生和油菜，种植面积 738 万 hm^2，作物理论化学养分需求总量为 239.8 万 t。N、P_2O_5 和 K_2O 需求量分别为 95.2 万 t、35.5 万 t、109.1 万 t(表 5)。在生产中三大粮食作物仍占据主要地位，其中作物产量以小麦最高，其次为水稻和玉米；小麦对 N、P_2O_5、K_2O 需求量最高，分别为 40.3 万 t、13.9 万 t、45.3 万 t。在本研究的作物中产量和种植面积最低的为花生，其对 N、P_2O_5 和 K_2O 需求量最低。

表 3 2017 年安徽省不同作物秸秆量、秸秆养分资源量及其在全部秸秆中的占比

Table 3 Crop straw yield, contained nutrients quantities and their percentages in the whole straw yields in Anhui Province in 2017

作物 Crop	秸秆 Straw		秸秆养分资源量 Straw nutrient					
	产量 Yield ($\times10^4$ t)	占比 Percentage (%)	N		P_2O_5		K_2O	
			数量 Amount ($\times10^4$ t)	占比 Percentage (%)	数量 Amount ($\times10^4$ t)	占比 Percentage (%)	数量 Amount ($\times10^4$ t)	占比 Percentage (%)
水稻 Rice	1 616.6	34.4	13.4	35.2	4.4	38.6	33.3	44.2
小麦 Wheat	1 800.8	38.3	11.3	29.7	2.9	25.4	22.1	29.4
玉米 Maize	642.6	13.7	5.6	14.7	2.0	17.5	8.6	11.4
大豆 Soybean	170.9	3.6	2.8	7.3	0.7	6.1	2.2	2.9
花生 Peanut	136.2	2.9	2.3	6.0	0.4	3.5	1.6	2.1
油菜 Rapeseed	332.8	7.1	2.7	7.2	1.0	8.9	7.5	10.0
总计 Total	4 699.9	100.0	38.1	100.0	11.4	100.0	75.3	100.0

表 4 2017 年安徽省不同地区水稻、小麦、玉米、大豆、花生、油菜等主要农作物秸秆及其养分资源分布

Table 4 Distribution of straws and their nutrients resources of rice, wheat, corn, soybean, peanut, rape in different regions of Anhui Province in 2017

区域 Region	市 City	秸秆 Straw		秸秆养分量 Straw nutrient ($\times10^4$ t)				排名 Ranking
		产量 Yield ($\times10^4$ t)	占比 Percentage (%)	N	P_2O_5	K_2O	合计 Total	
淮北地区 Huaibei Region	淮北 Huaibei	148.4	3.2	1.1	0.3	1.9	3.3	13
	亳州 Bozhou	539.9	11.5	4.1	1.2	6.8	12.2	3
	宿州 Suzhou	495.8	10.6	4.2	1.2	6.4	11.7	5
	阜阳 Fuyang	645.4	13.7	4.9	1.4	8.6	15.0	1
	总计 Total	1 829.5	39.0	14.3	4.1	23.7	42.2	Ⅱ
江淮地区 Jianghuai Region	蚌埠 Bengbu	369.3	7.9	3.3	0.9	5.2	9.3	7
	淮南 Huainan	310.0	6.6	2.4	0.7	5.2	8.3	9
	滁州 Chuzhou	491.2	10.5	3.9	1.2	8.4	13.5	2
	合肥 Hefei	388.2	8.3	3.2	1.0	7.4	11.7	4
	六安 Lu'an	359.2	7.6	2.9	0.9	6.6	10.4	6
	总计 Total	1 917.9	40.9	15.7	4.7	32.8	53.2	Ⅰ
沿江地区 Region along the Changjiang River	安庆 Anqing	278.9	5.9	2.4	0.8	5.6	8.8	8
	铜陵 Tongling	83.0	1.8	0.7	0.2	1.7	2.6	15
	芜湖 Wuhu	166.3	3.5	1.4	0.5	3.3	5.1	10
	马鞍山 Ma'anshan	133.6	2.8	1.1	0.3	2.5	4.0	12
	总计 Total	661.8	14.0	5.6	1.8	13.1	20.5	Ⅲ
江南地区 Region south of the Changjiang River	池州 Chizhou	90.1	1.9	0.8	0.3	1.8	2.8	14
	宣城 Xuancheng	159.4	3.4	1.3	0.4	3.1	4.8	11
	黄山 Huangshan	41.2	0.9	0.4	0.1	0.8	1.3	16
总计 Total		290.7	6.2	2.5	0.8	5.7	8.9	Ⅳ

表 5 2017 年安徽省主要作物产量、种植面积及养分需求量

Table 5 Yields, sown areas and nutrient requirements of major crops of Anhui Province in 2017

作物 Crop	产量 Yield ($\times10^4$ t)	播种面积 Sown area ($\times10^3$ hm^2)	生长所需养分量 Nutrient requirement ($\times10^4$ t)		
			N	P_2O_5	K_2O
水稻 Rice	1 616.6	2 326.0	23.6	10.0	31.0
小麦 Wheat	1 637.1	2 392.0	40.3	13.9	45.3
玉米 Maize	535.5	844.7	13.8	5.2	14.9
大豆 Soybean	106.8	935.6	8.7	2.5	3.4
花生 Peanut	90.8	183.4	4.0	0.9	4.9
油菜 Rapeseed	110.9	698.3	4.8	3.0	9.6
总计 Total	4 097.7	7 380.0	95.2	35.5	109.1

从全省不同地区主要农作物的养分需求分布来看, 2017 年安徽省 16 个市的主要农作物养分需求呈现由北向南递减的趋势(表 6), 淮北地区和江淮地区养分需求总量较多, 分别占全省总量的 43.0%和 38.9%, 沿江地区和江南地区次之, 占全省总量的 12.6%和 5.5%。其中作物养分需求量前 3 的市为阜阳、亳州和宿州, 分别占全省作物养分需求总量的 14.8%、12.8%和 11.9%。

表 6　2017 年安徽省不同地区主要农作物养分需求分布

Table 6　Nutrient requirements of major crops in different areas of Anhui Province in 2017

区域 Region	市 City	养分需求量 Nutrient requirement ($\times10^4$ t)				排名 Ranking
		N	P_2O_5	K_2O	合计 Total	
淮北地区 Huaibei Region	淮北 Huaibei	3.6	1.2	3.6	8.4	10
	亳州 Bozhou	13.0	4.5	13.2	30.7	2
	宿州 Suzhou	12.1	4.1	12.3	28.5	3
	阜阳 Fuyang	14.8	5.2	15.5	35.5	1
	总计 Total	43.5	15.0	44.6	103.1	Ⅰ
江淮地区 Jianghuai Region	蚌埠 Bengbu	8.3	2.8	9.3	20.4	5
	淮南 Huainan	5.8	2.2	6.8	14.8	8
	滁州 Chuzhou	9.2	3.5	11.0	23.7	4
	合肥 Hefei	6.5	2.7	8.6	17.8	6
	六安 Lu'an	6.3	2.5	7.8	16.6	7
	总计 Total	36.1	13.7	43.5	93.3	Ⅱ
沿江地区 Region along the Changjiang River	安庆 Anqing	4.5	2.0	6.2	12.7	9
	铜陵 Tongling	1.3	0.6	1.8	3.7	15
	芜湖 Wuhu	2.7	1.2	3.6	7.5	11
	马鞍山 Ma'anshan	2.3	1.0	3.0	6.3	13
	总计 Total	10.8	4.8	14.6	30.2	Ⅲ
江南地区 Region south of the Changjiang River	池州 Chizhou	1.4	0.6	2.0	4.0	14
	宣城 Xuancheng	2.7	1.1	3.5	7.3	12
	黄山 Huangshan	0.7	0.3	0.9	1.9	16
总计 Total		4.8	2.0	6.4	13.2	Ⅳ

2.3　作物养分需求与秸秆养分量、化肥施用量对比分析

将安徽省复合肥的 N∶P_2O_5∶K_2O 按照 1∶1∶0.8 计入单质肥, 得到全省的化肥施用情况[24]。全省主要农作物养分需求与秸秆养分量及化肥施用量的对比如图 1 所示。总体来看 2017 年全省氮肥、磷肥施用过量, 而钾肥偏低。全省化肥施用总量为 318.7 万 t, N、P_2O_5 和 K_2O 分别为 156.4 万 t、88.0 万 t 和 74.3 万 t, N∶P_2O_5∶K_2O 为 1∶0.56∶0.47。N、P_2O_5 和 K_2O 化肥施用量分别是作物养分需求量的 1.6 倍、2.5 倍和 0.7 倍。从区域分布上看, 化肥施肥总量: 江淮地区>淮北地区>沿江地区>江南地区, 各区域施肥总量占全省总量比例分别为 43.4%、33.7%、16.1%、6.9%。全省共有 6 个市的氮肥用量超过了作物养分需求量的 2 倍, 13 个市的磷肥用量超过作物养分需求量的 2 倍, 全省各市钾肥用量是作物养分需求量的 0.5~1.1 倍, 有 15 个市的钾肥用量均低于作物养分需求量。施肥强度上, 2017 年安徽省农作物单位播种面积化肥施用强度为 360 $kg\cdot hm^{-2}$, 中国农作物单位播种面积化肥施用强度为 352 $kg\cdot hm^{-2}$, 均远高于联合国粮农组织规定的化肥施用限值 225 $kg\cdot hm^{-2}$。全省 16 市均高于联合国粮农组织规定的化肥施用限值, 而超过安徽省平均水平的市达 6 个。

全省的秸秆养分总量为 124.8 万 t, N、P_2O_5 和 K_2O 分别为 38.1 万 t、11.4 万 t 和 75.3 万 t。秸秆养分总量占全省作物养分需求量的 52.0%, N、P_2O_5 和 K_2O 分别占全省作物养分需求量的 40.1%、32.1%和 68.9%。秸秆养分总量占全省化肥施用量的 39.2%, N、P_2O_5 和 K_2O 分别占全省化肥施用量的 24.1%、13.0%和 101.4%。理论上, 秸秆全量还田, 且养分充

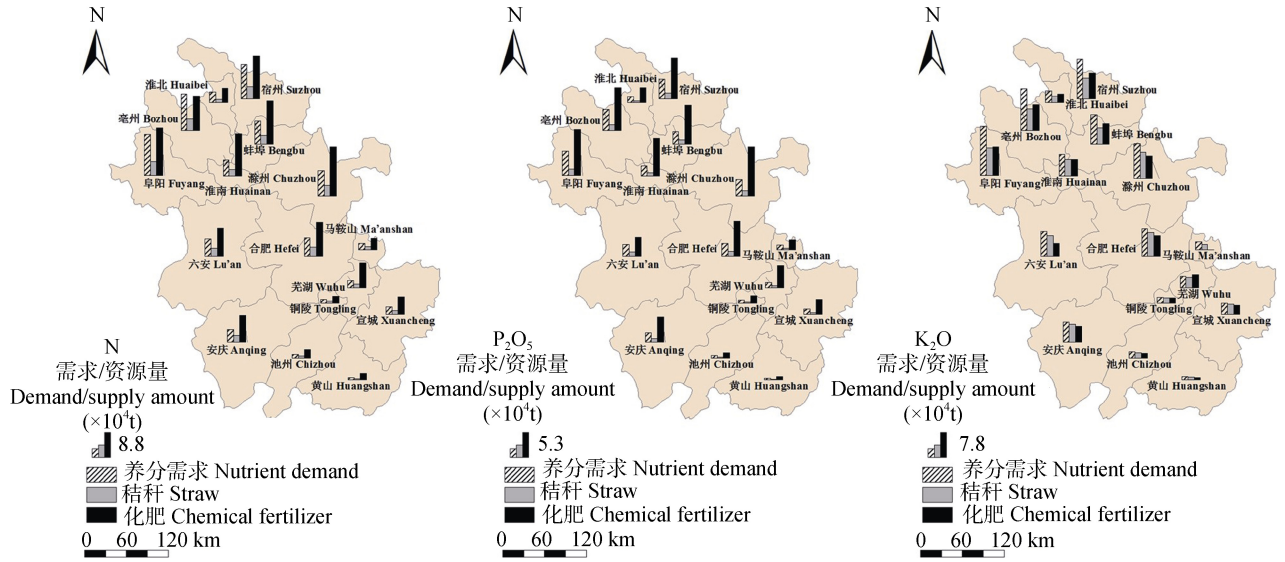

图 1 2017 年安徽省作物养分需求与秸秆养分资源量及化肥施用量情况

Fig. 1 Comparison of nutrients demands of crops and supplies of straw nutrients and chemical fertilizers in Anhui Province in 2017

分利用的情况下，全省秸秆养分总量替代化肥潜力为 39.2%，其中替代化肥潜力较大的为六安(57.1%)、马鞍山(49.7%)、池州(48.6%)、铜陵(46.8%)、合肥(45.0%)等市。施肥强度上，秸秆全量还田替代化肥后，全省平均施肥强度由 360 kg·hm^{-2} 降为 211 kg·hm^{-2}，超过安徽省平均水平的市由 6 个降为 1 个，高于联合国粮农组织规定的化肥施用限值的市由 16 个降为 5 个。因此，理论上，安徽省秸秆全量还田，且充分利用的情况下，具有较大的替代化肥潜力，但实际上秸秆养分还需进一步考虑其还田量以及当季养分释放率。

2.4 秸秆替代化肥潜力分析

依据各种主要农作物秸秆的还田率及当季养分释放率得出秸秆还田的有效养分[24]。如图 2 所示，全省秸秆还田当季有效养分总量为 73.4 万 t，N、P_2O_5 和 K_2O 分别为 14.8 万 t、6.0 万 t 和 52.6 万 t。秸秆还田当季有效养分总量占全省作物养分需求的 30.6%，N、P_2O_5 和 K_2O 分别占全省作物养分需求 15.6%、16.8%和 48.2%。农田养分(秸秆和化肥)总投入量为 392.1 万 t，N、P_2O_5 和 K_2O 分别为 171.2 万 t、94.0 万 t 和 126.9 万 t。农田养分总投入量是全省作物养分需求量的 1.6 倍，N、P_2O_5 和 K_2O 分别为 1.8 倍、2.6 倍和 1.2 倍。全省有 8 个市农田氮养分投入量和 15 个市的农田磷养分投入量超过了作物养分需求的 2 倍以上。

与全省推荐施肥量相比[24]，安徽省总减肥量为 63.3 万 t，减施比例为 19.8%；N、P_2O_5 和 K_2O 减施量分别为 17.9 万 t、15.1 万 t 和 30.2 万 t，减施比例分别为 11.4%、17.2%、40.7%。淮南、蚌埠、滁州、淮北、芜湖、马鞍山等市，氮磷钾肥均有较大的减施潜力，显著高于其他市，其中以淮南(58.3%)、蚌埠(42.0%)、滁州(40.6%)减施潜力最大。铜陵、安庆、亳州、阜阳等市磷钾肥减施潜力较大，但需补充氮肥。六安、池州、合肥、宿州需补充氮磷肥，黄山需补充氮磷钾肥。减施化肥后，秸秆还田有效养分 N、P_2O_5 和 K_2O 占全省农田养分总投入量的比重分别由 8.7%、6.3%和 41.5%，提升至 9.7%、7.6%和 54.4%。因此，秸秆还田减施化肥后，在全省氮磷肥投入上，化肥仍占据很大的比重，未来仍具有较大的减施空间，需进一步通过调节碳氮比[25]，添加腐熟剂[26]，对秸秆进行酸化、氨化或微波等处理[27]，以提高秸秆还田的当季养分释放率。

3 讨论

随着我国产业结构调整，农业综合生产水平持续提高，农作物秸秆资源量显著增加，还田秸秆养分资源量呈不断增加趋势。2006 年中国农作物秸秆养分资源量 N、P_2O_5 和 K_2O 分别为 776 万 t、249 万 t 和 1 342 万 t[15]，经过近 10 年农业生产水平的发展，2015 年中国农作物秸秆养分资源量显著提高，N、P_2O_5 和 K_2O 分别达 1 481.6 万 t、419 万 t 和 1 885.1 万 t[28]，可替代单质化肥比例分别为 38.4%、18.9%和 85.5%[29]。2017 年安徽省秸秆养分资源量 N、P_2O_5 和 K_2O 分别占全省作物养分需求量的 40.1%、32.1%和 68.9%，从养分总量上看，秸秆能有效填补部分农田养分的支出，特别是能有效缓解钾肥不足的现

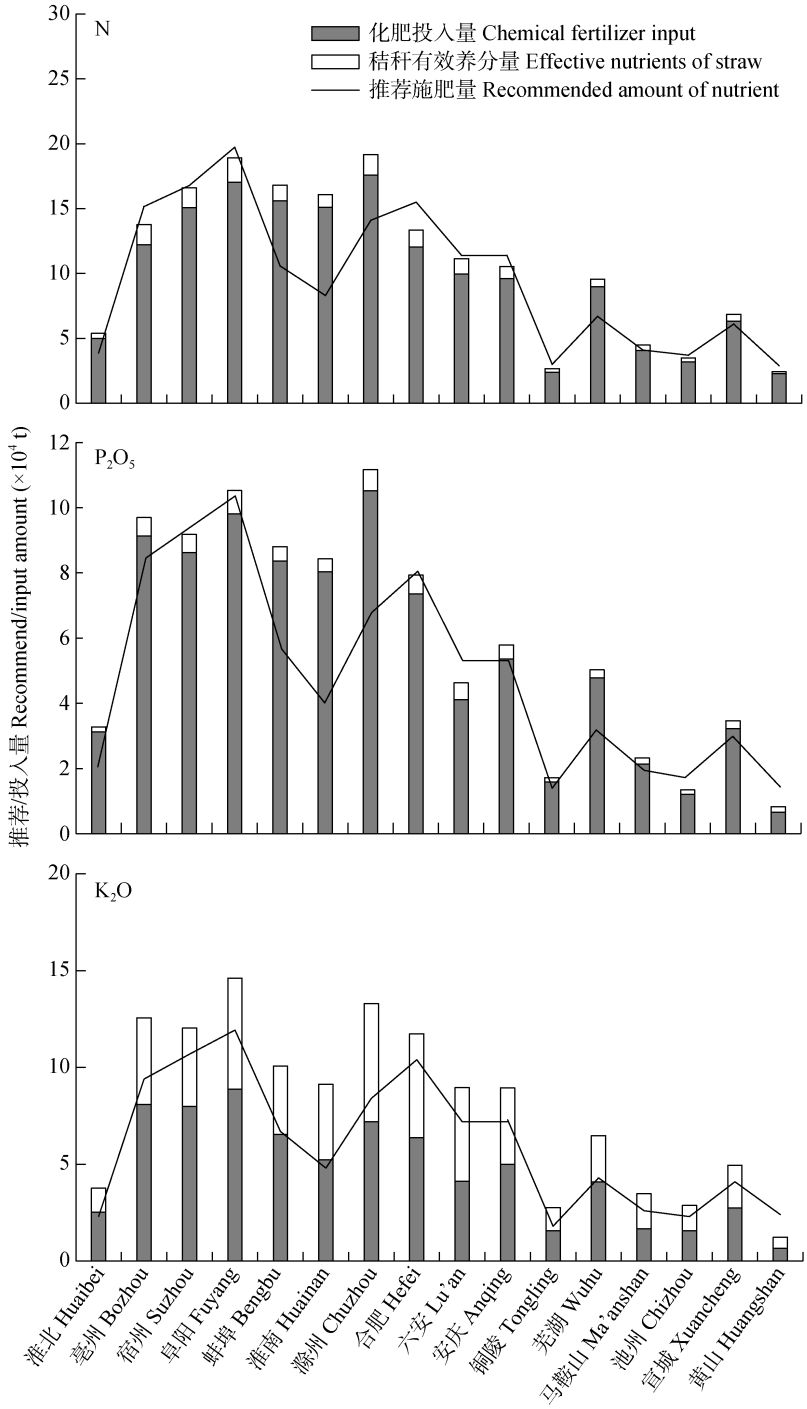

图 2　2017 年安徽省不同地区推荐施肥量与秸秆和化肥养分投入情况

Fig. 2　Fertilizer recommendation and the nutrient input of both straw and chemical fertilizer in different areas of Anhui Province in 2017

状。但秸秆在收集、还田处理及田间腐解过程中均伴随着养分的损失，因此秸秆还田率和养分释放率是当季秸秆还田有效养分的重要参数指标。2017 年安徽省秸秆还田当季有效养分 N、P_2O_5 和 K_2O 分别仅占全省作物养分需求 15.6%、16.8%和 48.2%，全省秸秆养分 N、P_2O_5 和 K_2O 当季利用率分别为 38.9%、52.3%和 69.9%，约 60%的氮和 50%的磷未被利用，未来可通过加强秸秆养分资源利用、提高秸秆还田关键技术等[29]，进一步提高秸秆的当季养分利用率。

安徽省农业生产区域化布局明显，农作物秸秆分布具有显著区域特点，整体呈现由北向南逐步递减的趋势[7]。2017 年安徽省主要农作物秸秆资源量为 4 699.9 万 t，秸秆分布呈现北部和中部较多，南部最少。这主要由于安徽淮北地区和江淮地区主要以平原为主，地理条件优越，是粮食的主产区，秸秆

多集中于此，具有较大的资源潜力。农田总养分投入方面，需进一步提高秸秆养分投入的占比，进而合理优化农田养分投入结构。2017 年全省农田养分总投入 392.1 万 t，秸秆还田有效养分和化肥占比分别为 18.7%和 81.3%，农田养分总投入量是全省作物养分需求的 1.6 倍，N、P_2O_5 和 K_2O 分别为 1.8 倍、2.6 倍和 1.2 倍。刘钦普[30]对安徽省面源污染的研究结果表明，全省氮、磷和钾 3 种单质肥料的环境污染风险程度分别为中度、高度和低度。本研究中，全省有 8 个市的农田氮养分和 15 个市的农田磷养分总投入量超过了作物养分需求的 2 倍以上，存在一定程度的环境污染风险。2017 年安徽省总减肥量为 63.3 万 t，减施比例为 19.8%，N、P_2O_5 和 K_2O 减施量分别为 17.9 万 t、15.1 万 t 和 30.2 万 t，减施比例分别为 11.4%、17.2%、40.7%。秸秆减施化肥后，在全省氮磷肥的投入上，化肥仍占据着很大的比重。其中氮肥施用较高的市主要集中于江淮地区，而全省秸秆养分资源量以江淮地区最为丰富，是发展秸秆养分还田的优势区域，氮肥减施潜力大。进一步根据全省秸秆资源分布的区域特性，在秸秆资源优势区域，提高秸秆的还田率、养分释放率，加大秸秆当季有效养分减施化肥潜力，有利于改善全省化肥施用过量的现状。

安徽省作为农业大省，是全国重要的商品粮生产基地。但全省耕地地力基础较差，主要以中低产田为主[31]。加强秸秆还田有利于提高土壤有机质含量和肥料利用率[29]。2017 年安徽省主要农作物秸秆资源量为 4 699.9 万 t，秸秆数量仍以水稻、小麦和玉米三大粮食作物最多，共占比达 86.4%。如何有效提高三大粮食作物秸秆直接还田的养分利用率显得尤为重要。已有的研究表明，通过调节秸秆碳氮比[25]，秸秆碳化处理等方式[32]，可在一定程度上提高秸秆还田的养分释放率。此外，秸秆区域化布局日趋明显，在全省农业较为发达的地区，秸秆资源丰富的北部和中部，可加大秸秆机械化还田，有利于秸秆资源的规模化利用，提高资源利用率。而安徽南方稻区存在大面积的冬闲田，是发展绿肥优势区域，有利于调节粮食作物秸秆还田后的碳氮比，促进秸秆养分的释放。因此，充分利用安徽省秸秆区域化布局特点，发挥区域优势，进一步降低安徽省化肥使用潜力。

4 结论

1)2017 年安徽省主要农作物秸秆资源量为 4 699.9 万 t，其中秸秆数量以水稻、小麦和玉米三大粮食作物最多，共占比达 86.4%，秸秆资源分布呈现北部和中部较多，南部最少。

2)全省农田养分总投入量(秸秆和化肥)为 392.1 万 t，秸秆还田有效养分和化肥占比分别为 18.7%和 81.3%。农田养分总投入量 N、P_2O_5 和 K_2O 分别为 171.2 万 t、94.0 万 t 和 126.9 万 t，是作物养分需求的 1.8 倍、2.6 倍和 1.2 倍。全省有 8 个市的农田氮和 15 个市的磷养分总投入量超过了作物养分需求的 2 倍以上，存在一定的环境污染风险。

3)安徽省主要农作物秸秆养分资源总量当季利用率为 58.8%，N、P_2O_5 和 K_2O 分别为 38.9%、52.3%和 69.9%。全省总减肥量为 63.3 万 t，减施比例为 19.8%，N、P_2O_5 和 K_2O 减施量分别为 17.9 万 t、15.1 万 t 和 30.2 万 t，减施比例分别为 11.4%、17.2%、40.7%。

参考文献 References

[1] 中华人民共和国统计局. 中国统计年鉴(2017)[M]. 北京: 中国统计出版社, 2017
National Bureau of Statistics of the People's Republic of China. China Statistical Yearbook (2017)[M]. Beijing: China Statistics Press, 2017

[2] 陈印军, 肖碧林, 方琳娜, 等. 中国耕地质量状况分析[J]. 中国农业科学, 2011, 44(17): 3557–3564
CHEN Y J, XIAO B L, FANG L N, et al. The quality analysis of cultivated land in China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2011, 44(17): 3557–3564

[3] 安徽省统计局. 安徽统计年鉴(2017)[M]. 北京: 中国统计出版社, 2017
Anhui Provincial Bureau of Statistics. Anhui Statistical Yearbook (2017)[M]. Beijing: China Statistics Press, 2017

[4] 武际, 郭熙盛, 鲁剑巍, 等. 不同水稻栽培模式下小麦秸秆腐解特征及对土壤生物学特性和养分状况的影响[J]. 生态学报, 2013, 33(2): 565–575
WU J, GUO X S, LU J W, et al. Decomposition characteristics of wheat straw and effects on soil biological properties and nutrient status under different rice cultivation[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(2): 565–575

[5] 张丹, 付斌, 胡万里, 等. 秸秆还田提高水稻-油菜轮作土壤固氮能力及作物产量[J]. 农业工程学报, 2017, 33(9): 133–140
ZHANG D, FU B, HU W L, et al. Increasing soil nitrogen fixation capacity and crop yield of rice-rape rotation by straw returning[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(9): 133–140

[6] SINGH Y, SINGH B, LADHA J K, et al. Long-term effects of organic inputs on yield and soil fertility in the rice-wheat rotation[J]. Soil Science Society of America Journal, 2004, 68(3): 845–853

[7] 鲍恩财, 田争光, 刘伟伟, 等. 主要农作物秸秆资源调查及能源化利用评价——以安徽省为例[J]. 中国农学通报, 2014, 30(29): 222–228

BAO E C, TIAN Z G, LIU W W, et al. Main crop straw resources investigation and energy utilization evaluation — Taking Anhui Province as an example[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2014, 30(29): 222–228

[8] 王晓斌. 安徽省农作物秸秆养分资源及农业利用方式的调查[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2013
WANG X B. The research on straw nutrient resource and utilization strategies of Anhui Province[D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2013

[9] 全国农业技术推广服务中心. 中国有机肥料资源[M]. 北京: 中国农业出版社, 1999
National Agricultural Technology Extension Service Center of China. Organic Fertilizer Nutrition Records of China[M]. Beijing: China Agriculture Press, 1999

[10] 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. Energy potentiality of crop straw resources in China[J]. Renewable Energy Resources, 2007, 25(6): 80–83

[11] 刘刚, 沈镭. 中国生物质能源的定量评价及其地理分布[J]. 自然资源学报, 2007, 22(1): 9–19
LIU G, SHEN L. Quantitative appraisal of biomass energy and its geographical distribution in China[J]. Journal of Natural Resources, 2007, 22(1): 9–19

[12] 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]. Resources Science, 2003, 25(4): 62–67

[13] 李书田, 金继运. 中国不同区域农田养分输入、输出与平衡[J]. 中国农业科学, 2011, 44(20): 4207–4229
LI S T, JIN J Y. Characteristics of nutrient input/output and nutrient balance in different regions of China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2011, 44(20): 4207–4229

[14] 王琛, 胡玉福, 魏晋, 等. 区域农业废弃物资源存量估算及利用现状[J]. 四川农业大学学报, 2011, 29(1): 119–123
WANG C, HU Y F, WEI J, et al. Study on stock estimation and utilization status of agricultural residue resources at a county[J]. Journal of Sichuan Agricultural University, 2011, 29(1): 119–123

[15] 高利伟, 马林, 张卫峰, 等. 中国作物秸秆养分资源数量估算及其利用状况[J]. 农业工程学报, 2009, 25(7): 173–179
GAO L W, MA L, ZHANG W F, et al. Estimation of nutrient resource quantity of crop straw and its utilization situation in China[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(7): 173–179

[16] 国家统计局农村社会经济调查总队. 新中国五十年农业统计资料[M]. 北京: 中国统计出版社, 2000
Headquarters of Rural Social Economic Survey of the State Statistical Bureau. Fifty Years of Agricultural Statistics in New China[M]. Beijing: China Statistics Press, 2000

[17] 毕于运. 秸秆资源评价与利用研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2010
BI Y Y. Study on straw resources evaluation and utilization in China[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2010

[18] BURESH R J, PAMPOLINO M F, WITT C. Field-specific potassium and phosphorus balances and fertilizer requirements for irrigated rice-based cropping systems[J]. Plant and Soil, 2010, 335(1/2): 35–64

[19] LIU M Q, YU Z R, LIU Y H, et al. Fertilizer requirements for wheat and maize in China: The QUEFTS approach[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2006, 74(3): 245–258

[20] 张兴梅, 蔡德利, 王法清, 等. 不同大豆品种在养分吸收及产量上的比较[J]. 土壤肥料, 2004, (3): 41–42
ZHANG X M, CAI D L, WANG F Q, et al. Comparison of nutrient uptake and yield of different varieties of soybean[J]. Soils and Fertilizers, 2004, (3): 41–42

[21] SALVAGIOTTI F, CASSMAN K G, SPECHT J E, et al. Nitrogen uptake, fixation and response to fertilizer N in soybeans: A review[J]. Field Crops Research, 2008, 108(1): 1–13

[22] 周可金, 马成泽, 许承保, 等. 施钾对花生养分吸收、产量与效益的影响[J]. 应用生态学报, 2003, 14(11): 1917–1920
ZHOU K J, MA C Z, XU C B, et al. Effects of potash fertilizer on nutrient absorption by peanut and its yield and benefit[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2003, 14(11): 1917–1920

[23] 邹娟, 鲁剑巍, 刘锐林, 等. 4 个双低甘蓝型油菜品种干物质积累及养分吸收动态[J]. 华中农业大学学报, 2008, 27(2): 229–234
ZOU J, LU J W, LIU R L, et al. Dynamics of dry mass accumulation and nutrients uptake in 4 double-low rapeseed (*Brassica napus* L.) varieties[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2008, 27(2): 229–234

[24] 刘晓永. 中国农业生产中的养分平衡与需求研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2018
LIU X Y. Study on nutrients balance and requirement in agricultural production in China[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2018

[25] 李晓韦, 韩上, 雷之萌, 等. 氮素形态对油菜秸秆腐解及养分释放规律的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2019, 27(5): 717–725
LI X W, HAN S, LEI Z M, et al. Effects of nitrogen forms on decomposition and nutrient release of rapeseed straw[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2019, 27(5): 717–725

[26] 钱晓华, 张从军, 胡仁健, 等. 安徽省商品有机肥产业发展研究与对策[J]. 绿色科技, 2017, (19): 197–198
QIAN X H, ZHANG C J, HU R J, et al. Research and countermeasures on the development of commercial organic fertilizer industry in Anhui Province[J]. Journal of Green Science and Technology, 2017, (19): 197–198

[27] 张珺穜, 王婧, 张莉, 等. 理化预处理方式对玉米秸秆腐解与养分释放特征的影响[J]. 农业工程学报, 2016, 32(23): 226–232
ZHANG J T, WANG J, ZHANG L, et al. Effect of physical and chemical pretreatment on decomposition and nutrient release characteristics of maize straw[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(23):

226–232

[28] 霍丽丽, 赵立欣, 孟海波, 等. 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
HUO L L, ZHAO L X, MENG H B, et al. Study on straw multi-use potential in China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(13): 218–224

[29] 宋大利, 候胜鹏, 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 D L, HOU S P, WANG X B, 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

[30] 刘钦普. 安徽省化肥面源污染环境风险分析[J]. 生态与农村环境学报, 2015, 31(6): 876–881
LIU Q P. Environmental risk analyses of non-point source pollution from fertilization in Anhui Province, China[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2015, 31(6): 876–881

[31] 徐秀娟, 吴文革. 安徽省农作物秸秆资源及其综合利用[J]. 中国农业科技导报, 2009, 11(2): 39–43
XU X J, WU W G. Crop straw resources and their utilization in Anhui Province[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2009, 11(2): 39–43

[32] 李敏, 韩上, 武际, 等. 农作物秸秆炭化后养分变化及还田效应[J]. 中国农学通报, 2019, 35(16): 95–99
LI M, HAN S, WU J, et al. Crop straw biochar: Nutrients change and field returning effects[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2019, 35(16): 95–99