

柴如山, 王擎运, 叶新新, 等. 我国主要粮食作物秸秆还田替代化学氮肥潜力[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(11): 2583–2593.

CHAI Ru-shan, WANG Qing-yun, YE Xin-xin, et al. Nitrogen resource quantity of main grain crop straw in China and the potential of synthetic nitrogen substitution under straw returning[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(11): 2583–2593.

我国主要粮食作物秸秆还田替代化学氮肥潜力

柴如山¹, 王擎运¹, 叶新新¹, 江波², 赵强², 王强¹, 章力干¹, 郅红建^{1*}

(1. 农田生态保育与污染防控安徽省重点实验室, 安徽农业大学资源与环境学院, 合肥 230036; 2. 安徽省庐江县农业技术推广中心, 安徽 庐江 231500)

摘要: 基于最新农业统计资料和文献数据, 分析了2013—2017年我国不同省份和不同农区主要粮食作物秸秆氮养分资源量及还田当季替代化学氮肥的潜力, 为秸秆还田条件下的化学氮肥替代和减施提供科学依据。结果表明, 我国主要粮食作物种植区域水稻、小麦和玉米秸秆年均产量分别为2.3亿、1.7亿和3.9亿t, 所含氮养分资源量分别为209万、108万和356万t。三大粮食作物秸秆氮养分资源主要分布在华北、长江中下游和东北农区, 分别占全国总量的31.6%、25.4%和24.2%。其中, 水稻秸秆氮养分资源主要分布在长江中下游农区(120.9万t); 小麦秸秆氮养分资源主要分布在华北农区(66.6万t), 玉米秸秆氮养分资源集中分布于华北农区(142.1万t)和东北农区(132.5万t)。水稻秸秆还田化学氮肥可替代量较大的省份为江苏、湖北、浙江、湖南、辽宁和安徽, 为34.6~46.5 kg·hm⁻²; 小麦秸秆还田化学氮肥可替代量较大的省份为河南、河北、山东、安徽、江苏和新疆, 为22.2~27.4 kg·hm⁻²; 玉米秸秆还田化学氮肥可替代量较大的省份有吉林、辽宁、内蒙古、宁夏、黑龙江、山东、江苏、新疆、湖南和安徽, 为54.3~70.7 kg·hm⁻²。在秸秆全量还田的情况下, 我国水稻、小麦和玉米秸秆还田当季化学氮肥可替代总量分别为99万、54万和192万t, 化学氮肥可替代量分别为33.6、23.4 kg·hm⁻²和51.2 kg·hm⁻²。我国主要粮食作物秸秆氮养分资源量巨大, 在秸秆还田化学氮肥替代潜力较大的地区, 合理利用秸秆氮养分资源是实现化学氮肥减量的重要途径。

关键词: 水稻; 小麦; 玉米; 秸秆还田; 化学氮肥替代

中图分类号: X712 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2019)11-2583-11 doi:10.11654/jaes.2019-0751

Nitrogen resource quantity of main grain crop straw in China and the potential of synthetic nitrogen substitution under straw returning

CHAI Ru-shan¹, WANG Qing-yun¹, YE Xin-xin¹, JIANG Bo², ZHAO Qiang², WANG Qiang¹, ZHANG Li-gan¹, GAO Hong-jian^{1*}

(1. Anhui Province Key Lab of Farmland Ecological Conservation and Pollution Prevention, School of Resources and Environment, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China; 2. Agricultural Technology Extension Center of Lujiang County of Anhui Province, Lujiang 231500, China)

Abstract: In this research, the nitrogen resource quantity of main grain crop straw and the potential of synthetic N substitution were estimated for different provinces and agricultural regions of China during the 2013—2017 period, based on the latest agricultural statistics and data published in the literature. The purpose of this research is to provide a scientific basis for synthetic N substitution and reduction under straw returning. Results indicated that the amounts of straw from rice, wheat, and maize in the main grain crop-planting areas of China were 230.06 million, 166.85 million, and 386.98 million tons per year, respectively. The amounts of straw N resources from rice, wheat, and maize were 2.09 million, 1.08 million, and 3.56 million tons per year, respectively; these were mainly distributed across north China, the

收稿日期: 2019-07-05 录用日期: 2019-09-16

作者简介: 柴如山(1986—), 男, 安徽亳州人, 博士, 讲师, 主要从事秸秆养分资源利用与土壤培肥研究。E-mail: rschai@ahau.edu.cn

*通信作者: 郅红建 E-mail: hjgao@ahau.edu.cn

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0300901, 2016YFD0200107); 安徽省重大科技专项(18030701188)

Project supported: The National Key R&D Program of China(2016YFD0300901, 2016YFD0200107); Anhui Provincial Science and Technology Major Project(18030701188)

middle and lower Yangtze River areas, and northeast China, and accounted for 31.6%, 25.4%, and 24.2% of the total national straw N resources, respectively. The straw N resources from rice and wheat were mainly distributed in the middle and lower Yangtze River areas (1.21 million tons) and north China (0.67 million tons), respectively. The maize straw N resource was mainly distributed in north China (1.42 million tons) and northeast China (1.33 million tons). In the main rice-cultivating provinces of China, the amounts of synthetic N substituted by rice straw incorporation per unit area of arable land were higher ($34.6\sim 46.5\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$) in Jiangsu, Hubei, Zhejiang, Hunan, Liaoning, and Anhui. The amounts of synthetic N substituted by wheat straw incorporation per unit area of arable land were relatively higher ($22.2\sim 27.4\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$) in Henan, Hebei, Shandong, Anhui, Jiangsu, and Xinjiang. The amounts of synthetic N substituted by maize straw incorporation per unit area of arable land were higher ($54.3\sim 70.7\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$) in Jilin, Liaoning, Inner Mongolia, Ningxia, Heilongjiang, Shandong, Jiangsu, Xinjiang, Hunan, and Anhui. In terms of the total straw returned to the fields, the amounts of synthetic N substituted by straw from rice, wheat, and maize could reach 0.99 million, 0.54 million, and 1.92 million tons per year, equivalent to 33.6, 23.4, and $51.2\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ of per unit area of arable land, respectively. Therefore, straw N resources were plentiful in China during this period. Making full use of straw N resources from the main grain crops could provide an effective solution for the reduction of synthetic N in China's croplands.

Keywords: rice; wheat; maize; straw returning; synthetic N substitution

我国农作物秸秆资源丰富^[1-2], 秸秆中含有大量的有机物质和较丰富的养分元素, 是一种重要的有机肥料资源^[3-4]。在我国农业生产中秸秆还田被大力提倡, 近年来秸秆直接还田量持续增加, 2010—2015年我国秸秆直接还田率为61%^[2], 还田方式主要是机械粉碎直接还田^[5]。长期定位试验的研究结果表明, 秸秆还田可以提高土壤有机碳和养分含量^[6]、降低土壤容重和改善土壤结构^[7-8]。利用Meta分析的研究结果显示, 秸秆还田可以增加作物产量^[9-10]; 而且秸秆还田的增产效应会随还田时间的延长而增加^[11]。同时, 秸秆还田还能在一定程度上实现养分替代, 从而降低农田化肥用量^[12-15]。在陕西杨凌地区进行的5年定位试验的结果表明, 与常规施氮处理相比, 减量施氮20%处理降低了小麦和玉米产量, 而小麦玉米秸秆翻压还田减量施氮20%处理表现出明显的增产效果, 同时显著提高了小麦及玉米的氮肥偏生产力^[13-14]。在吉林省开展的6年双季稻稻草还田定位试验表明, 水稻秸秆全量还田在早稻和晚稻上分别可替代30%和27%的化肥氮肥, 同时显著提高了早稻产量并能保证晚稻产量, 而且显著增加了早稻和晚稻的氮肥农学效率、回收率和偏生产力^[13-14]。在吉林国家黑土肥力与肥料效益监测基地进行的长期定位试验(1990—2012年)显示, 等氮量投入条件下, 秸秆还田替代32%化学氮肥配施氮磷钾化肥处理与单施氮磷钾化肥处理下的春玉米产量没有显著差异^[15]。秸秆还田是实现化学氮肥替代和减量的重要途径, 有助于减轻化学氮肥施用产生的不良环境影响^[16-17]。

对我国主要粮食作物秸秆氮养分资源量及还田替代化学氮肥潜力进行评估是秸秆还田条件下化学

氮肥减施的基础。高利伟等^[18]基于统计数据和农户调研数据分析得出2006年我国水稻、小麦和玉米秸秆产量分别为1.8亿、1.1亿t和2.9亿t, 三大作物秸秆氮养分资源量分别为166万、75万t和268万t。刘晓永等^[2]利用统计数据和文献资料估算出2010—2015年期间我国秸秆资源年产量为9.0亿t, 其中谷类作物秸秆占70%; 全国秸秆氮养分资源总量为947万t, 单位耕地面积秸秆氮养分量为 $70\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。宋大利等^[1]的研究结果显示, 2015年我国水稻、小麦和玉米秸秆资源量分别为2.1亿、1.4亿t和2.7亿t, 所含氮养分资源量分别为172万、88万t和234万t, 三大粮食作物秸秆在全量还田条件下带入农田的氮养分量分别为57、37 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和62 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。目前对我国秸秆资源量的估算采用的多是草谷比法^[1-2, 18-19], 草谷比的选择在很大程度上影响着秸秆产生量和秸秆养分资源量估算结果的准确性。在近期的研究中, 对于秸秆草谷比的取值, 宋大利等^[1]和高利伟等^[18]在研究中采用的是通过文献收集和整理所得的全国平均值, 刘晓永等^[2]则是基于相关资料得出我国不同区域的作物草谷比。国家发展改革委办公厅和原农业部办公厅在2015年发布的《关于开展农作物秸秆综合利用规划终期评估的通知》中给出了我国不同农区(东北、华北、长江中下游、西北、西南和南方农区)主要农作物草谷比数据^[20], 这与以往研究中采用的作物草谷比有较大的差别, 有必要对我国主要农作物秸秆产生量和秸秆氮养分资源量进行重新估算。另外, 要实现秸秆还田化学氮肥替代潜力的准确评估, 还必须考虑秸秆氮养分的当季释放率^[2]。因此, 本研究以我国三大粮食作物为研究对象, 基于《中国统计年鉴》中2013—

2017年我国各省份主要粮食作物的年播种面积及产量,利用文献调研得出的相关参数,在省级尺度上估算了水稻、小麦和玉米秸秆氮养分资源量及其在还田条件下单位耕地面积氮养分当季释放量,以期为不同农区主要粮食作物秸秆还田条件下的农田化学氮肥减施提供科学依据和参考。

1 研究方法 with 数据来源

1.1 研究方法

本文研究区域为我国三大粮食作物水稻、小麦和玉米的主要种植省份。2013—2017年间,本研究所选择的水稻、小麦和玉米主要种植省份的播种面积分别占全国三大作物播种面积的96.8%、96.0%和98.3%。根据《关于开展农作物秸秆综合利用规划终期评估的通知》中对我国农区的划分情况^[20],本研究将三大粮食作物的主要种植省份划分为六大农区:东北农区(辽宁、吉林、黑龙江)、华北农区(河北、山西、内蒙古、山东、河南)、长江中下游农区(江苏、浙江、安徽、江西、湖北、湖南)、西北农区(陕西、甘肃、宁夏、新疆)、西南农区(重庆、四川、贵州、云南)和南方农区(福建、广东、广西)。

采用草谷比法对我国各省份主要粮食作物秸秆产生量进行估算。

各省份作物秸秆产生量的计算公式为:

$$W_s = W_p \times S_c \quad (1)$$

式中: W_s 为作物秸秆产生量; W_p 为作物产量; S_c 为作物草谷比。

各省份作物秸秆氮养分资源量的计算公式为:

$$W_N = W_s \times N_s \quad (2)$$

式中: W_N 为作物秸秆氮养分资源量; N_s 为作物秸秆氮养分含量。

各省份作物秸秆还田当季化学氮肥可替代量的计算公式为:

$$W_{RN} = W_N \times R_N \quad (3)$$

式中: W_{RN} 为作物秸秆还田当季可提供的氮养分资源量; R_N 为秸秆还田氮养分当季释放率。

各省份单位耕地面积作物秸秆还田当季化学氮肥可替代量的计算公式为:

$$A_{RN} = W_{RN} / A \quad (4)$$

式中: A_{RN} 为单位耕地面积作物秸秆还田当季可提供的氮养分资源量; A 为作物的播种面积。

1.2 数据来源

本研究中各省份主要粮食作物的年播种面积和

产量来自国家统计局编制的《中国统计年鉴》^[21]。为避免主要粮食作物播种面积和产量年际间的波动,本研究基于2013—2017年的省级统计数据对我国三大粮食作物秸秆氮养分资源量及秸秆还田当季的化学氮肥替代潜力进行估算。三大粮食作物的草谷比来自《关于开展农作物秸秆综合利用规划终期评估的通知》中的我国不同农区主要农作物草谷比数据^[20](表1)。原农业部对我国多个省份大样本秸秆进行养分测定的结果显示,水稻、小麦和玉米秸秆氮含量分别为9.1、6.5 g·kg⁻¹和9.2 g·kg⁻¹^[3]。刘晓永等^[2]通过文献总结得出还田条件下水稻、小麦和玉米秸秆中氮养分的当季释放率分别为47.2%、50.1%和54.0%。

表1 我国不同农区主要粮食作物草谷比

Table 1 Straw/grain ratios of main grain crops in different agricultural regions of China

农区 Agricultural region	水稻 Rice	小麦 Wheat	玉米 Maize
东北 Northeast China	0.97	—	1.86
华北 North China	0.93	1.34	1.73
长江中下游 Middle and lower Yangtze River areas	1.28	1.38	2.05
西北 Northwest China	—	1.23	1.52
西南 Southwest China	1.00	1.31	1.29
南方 South China	1.06	—	1.32

2 结果与分析

2.1 我国主要粮食作物秸秆资源量及分布

2013—2017年我国主要粮食作物秸秆年均产量为7.8亿t,其中水稻、小麦和玉米秸秆年产量分别为2.3亿、1.7亿t和3.9亿t,占三大粮食作物秸秆总产量的29.3%、21.3%和49.4%。图1为我国各省份的作物秸秆年产量。可见,水稻秸秆主要分布在湖南、江西、江苏、黑龙江、湖北和安徽,其年产量分别为3375万、2610万、2460万、2279万、2262万t和1860万t,这些省份的水稻秸秆产量占全国水稻秸秆总产量的64.5%;小麦秸秆主要分布在河南、山东、安徽、河北和江苏,其年产量分别为4617万、3127万、1978万、1927万t和1615万t,这些省份的小麦秸秆产量占全国小麦秸秆总产量的79.5%;黑龙江、吉林、内蒙古、山东、河南、河北和辽宁玉米秸秆产量较高,分别为6300万、5356万、3856万、3714万、3217万、3057万t和2750万t,这些省份的玉米秸秆产量占全国玉米秸秆总产量的65.9%。三大粮食作物秸秆总资源量位

于全国前列的省份有黑龙江、河南、山东、吉林、河北、安徽和江苏,这些省份的主要粮食作物秸秆产量占全国三大粮食作物秸秆总产量的56.3%。

我国不同农区的主要粮食作物秸秆产量见表2。可见,长江中下游农区的水稻秸秆年产量较大,占全国水稻秸秆总产量的57.7%;东北、西南和南方农区的水稻秸秆产量基本相当,分别占全国水稻秸秆总产量的14.5%、13.4%和12.3%。小麦秸秆主要分布于华北农区,其次为长江中下游农区,分别占全国小麦秸秆总产量的61.4%和25.0%。玉米秸秆则集中分布于华北和东北农区,分别占全国玉米秸秆总产量的39.9%和37.2%。

2.2 我国主要粮食作物秸秆氮养分资源量及分布

2013—2017年,我国水稻、小麦和玉米秸秆的年均氮养分资源量分别为209.4万、108.5万t和356.0万t。从表3可以看出,水稻秸秆氮养分资源量较高的省份有湖南、江西、江苏、黑龙江、湖北和安徽,分别占全

国水稻秸秆氮养分资源总量的14.7%、11.3%、10.7%、9.9%、9.8%和8.1%;小麦秸秆氮养分资源主要分布在河南、山东、安徽、河北和江苏,分别占全国小麦秸秆氮养分总量的27.7%、18.7%、11.9%、11.5%和9.7%;玉米秸秆氮养分产量较高的省份为黑龙江、吉林、内蒙古、山东、河南、河北和辽宁,分别占全国玉米秸秆氮养分资源总量的16.3%、13.8%、10.0%、9.6%、8.3%、7.9%和7.1%。从全国范围来看,主要粮食作物秸秆氮养分资源总量位于前列的省份为黑龙江、河南、吉林、山东、河北、安徽、江苏和内蒙古,分别占全国三大粮食作物秸秆氮养分资源总量的11.7%、9.5%、8.1%、8.1%、6.0%、5.8%、5.6%和5.5%。

图2为我国不同区域主要粮食作物秸秆氮养分资源。从图2可见,水稻秸秆氮养分资源主要分布在长江中下游农区(120.9万t),其次为东北农区(30.4万t)、西南农区(28.1万t)和南方农区(25.7万t)。小麦秸秆氮养分资源集中分布在华北农区(66.6万t)和

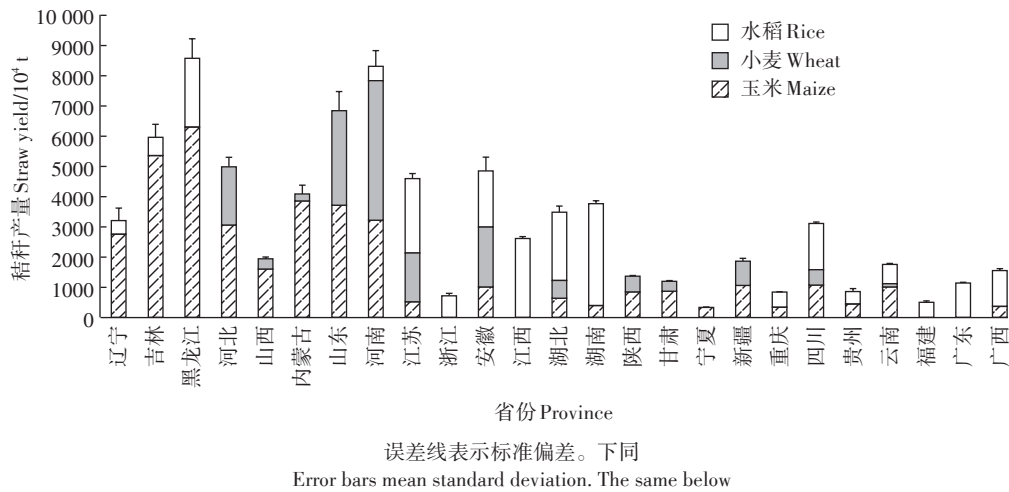


图1 我国不同省份主要粮食作物秸秆产量

Figure 1 Straw yields of main grain crops in different provinces of China

表2 我国不同农区主要粮食作物秸秆产量(10⁴ t)

Table 2 Straw yields of main grain crops in different agricultural regions of China(10⁴ t)

农区 Agricultural region	水稻 Rice	小麦 Wheat	玉米 Maize	总量 Total
东北 Northeast China	3336±267	—	14 406±1093	17 742±1345
华北 North China	479±25	10 239±446	15 443±1376	26 160±1763
长江中下游 Middle and lower Yangtze River areas	13 281±334	4176±275	2551±302	20 008±905
西北 Northwest China	—	1653±113	3094±83	4747±125
西南 Southwest China	3085±89	617±107	2845±341	6547±169
南方 South China	2825±124	—	360±9	3185±124

注:表中数据为平均值±标准差。下同。
Note: The data were mean±standard deviation. The same below.

长江中下游农区(27.1万t),这两个农区的小麦秸秆氮养分资源量占全国小麦秸秆氮养分资源总量的86.4%。玉米秸秆氮养分资源主要分布于华北农区(142.1万t)和东北农区(132.5万t),这两个农区的玉米秸秆氮养分资源量占全国玉米秸秆氮养分资源总量的77.1%;西北、西南和长江中下游农区的玉米秸秆氮养分资源量基本相当,分别为28.5万、26.2万t和23.5万t,这三个农区的玉米秸秆氮养分资源量占全国玉米秸秆氮养分资源总量的21.9%。主要粮食作物秸秆氮养分资源总量居于前列的为华北农区(213.0万t)、长江中下游农区(171.5万t)和东北农区(162.9万t),分别占全国三大粮食作物秸秆氮养分资源总量的31.6%、25.4%和24.2%。

2.3 我国不同省份主要粮食作物秸秆还田当季化学氮肥替代潜力

我国各省份主要粮食作物秸秆还田的化学氮肥可替代量见图3。可见,湖南、江西、江苏、黑龙江、湖

北和安徽这些省份水稻秸秆还田的化学氮肥可替代总量较大,分别为14.5万、11.2万、10.6万、9.8万、9.7万t和8.0万t;小麦秸秆还田化学氮肥替代量较大的省份有河南、山东、安徽、河北和江苏,其可替代总量

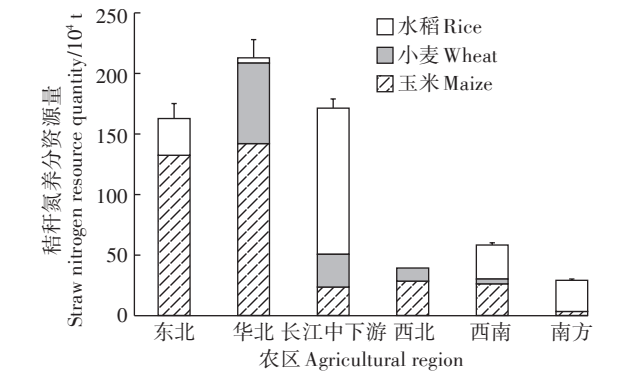


图2 我国不同农区主要粮食作物秸秆氮养分资源量
Figure 2 Straw nitrogen resource quantities of main grain crops in different agricultural regions of China

表3 我国不同省份主要粮食作物秸秆氮养分资源量(10 ⁴ t)					
Table 3 Straw nitrogen resource quantities of main grain crops in different provinces of China(10 ⁴ t)					
农区 Agricultural region	省份 Province	水稻 Rice	小麦 Wheat	玉米 Maize	总量 Total
东北 Northeast China	辽宁 Liaoning	4.1±0.3	—	25.3±3.9	29.4±3.8
	吉林 Jilin	5.5±0.4	—	49.3±3.6	54.8±4.0
	黑龙江 Heilongjiang	20.7±2.3	—	58.0±4.0	78.7±5.9
华北 North China	河北 Hebei	—	12.5±0.4	28.1±2.5	40.6±2.8
	山西 Shanxi	—	2.2±0.2	14.7±0.8	16.9±0.6
	内蒙古 Inner Mongolia	—	1.5±0.1	35.5±2.6	37.0±2.7
	山东 Shandong	—	20.3±0.9	34.2±4.6	54.5±5.5
长江中下游 Middle and lower Yangtze River areas	河南 Henan	4.4±0.2	30.0±1.6	29.6±2.9	64.0±4.2
	江苏 Jiangsu	22.4±0.3	10.5±0.7	4.8±0.7	37.6±1.3
	浙江 Zhejiang	6.5±0.7	—	—	6.5±0.7
	安徽 Anhui	16.9±1.3	12.9±1.1	9.3±1.3	39.1±3.7
	江西 Jiangxi	23.8±0.6	—	—	23.8±0.6
	湖北 Hubei	20.6±1.2	3.8±0.0	5.8±0.6	30.2±1.9
	湖南 Hunan	30.7±0.8	—	3.6±0.1	34.3±0.9
西北 Northwest China	陕西 Shaanxi	—	3.4±0.2	7.7±0.3	11.1±0.2
	甘肃 Gansu	—	2.1±0.1	8.0±0.1	10.1±0.2
	宁夏 Ningxia	—	—	3.0±0.1	3.0±0.1
	新疆 Xinjiang	—	5.2±0.4	9.7±0.7	15.0±0.8
西南 Southwest China	重庆 Chongqing	4.6±0.1	—	3.1±0.1	7.6±0.1
	四川 Sichuan	13.9±0.3	3.3±0.6	9.8±1.6	27.1±0.7
	贵州 Guizhou	3.8±0.3	—	4.0±0.7	7.8±0.9
	云南 Yunnan	5.8±0.6	0.7±0.1	9.2±0.9	15.8±0.3
南方 South China	福建 Fujian	4.5±0.4	—	—	4.5±0.4
	广东 Guangdong	10.3±0.2	—	—	10.3±0.2
	广西 Guangxi	10.8±0.6	—	3.3±0.1	14.1±0.6

分别为15.0万、10.2万、6.4万、6.3万t和5.3万t;黑龙江、吉林、内蒙古、山东、河南、河北和辽宁这些省份玉米秸秆还田的化学氮肥可替代总量较大,分别为31.3万、26.6万、19.2万、18.5万、16.0万、15.2万t和13.7万t。主要粮食作物秸秆还田的化学氮肥可替代总量位于全国前列的省份有黑龙江、河南、吉林、山东、河北、内蒙古、安徽和江苏,分别为41.1万、33.1万、29.2万、28.6万、21.5万、19.9万、19.4万t和18.4万t。从全国范围内来看,水稻、小麦和玉米秸秆还田的化学氮肥可替代总量分别为98.8万、54.3万t和192.3万t。

从表4可以看出,在我国水稻主要种植区域,水稻秸秆还田当季的化学氮肥可替代量为 $25.3\sim 46.5\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,其中江苏、湖北、浙江、湖南、辽宁和安徽这些省份水稻秸秆还田当季化学氮肥可替代量较大,为 $34.6\sim 46.5\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,其水稻总播种面积占全国水稻总播种面积的41.7%;云南、贵州、广东和广西这些省份水稻秸秆还田的化学氮肥可替代量相对较小,为 $25.3\sim 26.0\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,占全国水稻总播种面积的19.1%。在我国小麦主要种植区域,小麦秸秆还田当季的化学氮肥可替代量为 $8.6\sim 27.4\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。小麦秸秆还田化学氮肥可替代量相对较大的省份有河南、河北、山东、安徽、江苏和新疆,为 $22.2\sim 27.4\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,占全国小麦总播种面积的75.6%;而内蒙古、甘肃、四川、陕西、山西和湖北这些省份小麦秸秆还田的化学氮肥可替代量较小,为 $12.5\sim 17.2\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,占全国小麦总播种面积的22.6%;云南省小麦秸秆还田的化学氮肥可替代量最低,仅为 $8.6\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。在我国玉米主要种植区域,玉米秸秆还田当季的化学氮肥可替代量为 $26.7\sim 70.7\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。玉米秸秆还田,化学氮肥可替代量较大的省份有吉林、辽宁、内蒙古、宁夏、黑龙江、山东、

江苏、新疆、湖南和安徽,其玉米秸秆还田当季化学氮肥可替代量为 $54.3\sim 70.7\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,这些省份的玉米总播种面积占全国玉米总播种面积的57.0%;湖北、山西、河北、河南和甘肃这些省份玉米秸秆还田的化学氮肥可替代量为 $42.8\sim 47.1\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,其玉米总播种面积占全国玉米总播种面积的26.8%;贵州、广西、云南、重庆、四川和陕西这些省份玉米秸秆还田的化学氮肥可替代量相对较小,为 $26.7\sim 35.9\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,占全国玉米总播种面积的16.2%。水稻秸秆还田,我国长江中下游农区的化学氮肥可替代量较大,为 $37.9\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$;华北、东北和西南农区水稻秸秆还田的化学氮肥可替代量相差不大,分别为 31.9 、 $30.7\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $30.0\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$;南方农区的稍低,为 $26.4\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。华北和长江中下游农区小麦秸秆还田的化学氮肥可替代量相对较大,分别为 $25.9\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $23.3\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$;西南农区的较低,为 $13.7\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。玉米秸秆还田,东北农区的化学氮肥可替代量最大,为 $61.1\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$;西南和南方农区的化学氮肥可替代量相对较小,分别为 $32.6\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $29.9\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。从全国范围看,水稻、小麦和玉米秸秆还田当季的化学氮肥可替代量分别为 33.6 、 $23.4\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $51.2\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。

3 讨论

目前对我国秸秆数量进行估算的相关研究采用的均是草谷比法^[1-2, 18-19, 22]。草谷比的取值是影响秸秆产生量和秸秆养分资源量估算结果的关键因素。作物的草谷比取值受到自然条件、作物品种以及作物的生物产量和经济产量等因素的影响^[23]。毕于运等^[19]在对我国秸秆产生量进行估算的过程中,采用的是牛若峰和刘天福主编的《农业技术经济手册(修订本)》

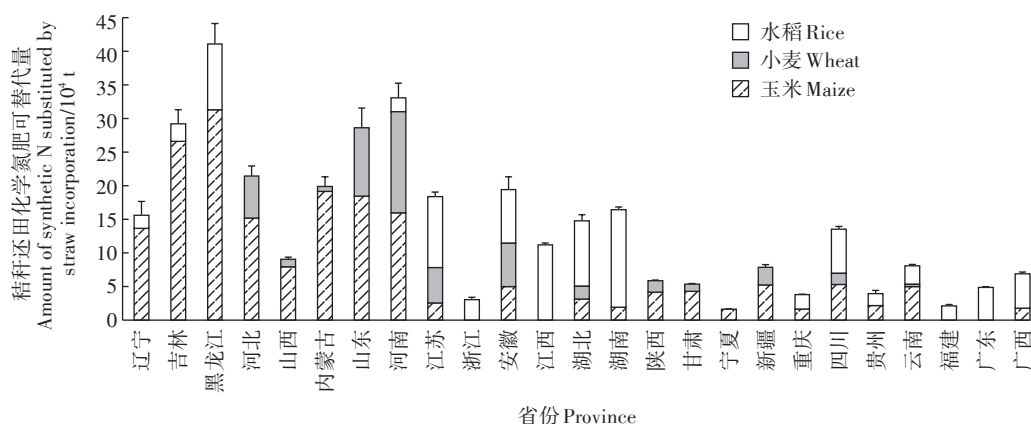


图3 我国不同省份主要粮食作物秸秆还田的化学氮肥可替代量

Figure 3 The amounts of synthetic N substituted by main grain crop straw incorporation in different provinces of China

表4 我国不同省份和农区主要粮食作物秸秆还田的化学氮肥可替代量($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)

Table 4 The amounts of synthetic N substituted by main grain crop straw incorporation in different provinces and agricultural regions of China($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)

农区 Agricultural region	省份 Province	水稻 Rice	小麦 Wheat	玉米 Maize
东北 Northeast China	辽宁 Liaoning	34.7±1.6	—	57.2±7.2
	吉林 Jilin	33.8±1.2	—	70.7±2.3
	黑龙江 Heilongjiang	29.3±0.3	—	56.3±1.4
	平均 Average	30.7±0.4	—	61.1±2.1
华北 North China	河北 Hebei	—	26.8±0.8	46.6±2.0
	山西 Shanxi	—	17.0±1.3	47.0±1.9
	内蒙古 Inner Mongolia	—	12.5±0.7	56.7±0.8
	山东 Shandong	—	26.6±0.2	55.6±1.0
	河南 Henan	31.9±1.1	27.4±0.9	46.6±1.3
	平均 Average	31.9±1.1	25.9±0.6	50.9±0.8
长江中下游 Middle and lower Yangtze River areas	江苏 Jiangsu	46.5±0.2	23.7±0.6	55.5±3.0
	浙江 Zhejiang	39.2±0.6	—	—
	安徽 Anhui	34.6±0.8	25.6±0.6	54.3±2.3
	江西 Jiangxi	33.3±0.2	—	—
	湖北 Hubei	44.4±0.7	17.2±0.4	47.1±1.6
	湖南 Hunan	35.1±0.4	—	55.2±0.3
西北 Northwest China	平均 Average	37.9±0.3	23.3±0.5	52.6±1.4
	陕西 Shaanxi	—	16.0±1.1	35.9±1.2
	甘肃 Gansu	—	13.5±1.1	42.8±0.9
	宁夏 Ningxia	—	—	56.6±2.6
	新疆 Xinjiang	—	22.2±0.5	55.4±1.5
西南 Southwest China	平均 Average	—	17.8±0.9	45.1±0.7
	重庆 Chongqing	31.5±0.2	—	35.5±0.4
	四川 Sichuan	33.4±0.3	15.8±0.7	35.7±0.8
	贵州 Guizhou	25.9±2.0	—	26.7±1.6
	云南 Yunnan	25.3±0.5	8.6±0.5	31.9±0.8
南方 South China	平均 Average	30.0±0.6	13.7±0.5	32.6±0.9
	福建 Fujian	28.1±0.2	—	—
	广东 Guangdong	26.0±0.6	—	—
	广西 Guangxi	26.0±0.3	—	29.9±0.2
平均 Average		26.4±0.3	—	29.9±0.2

中主要粮食作物的草谷比(水稻0.9、小麦1.1、玉米1.2),得出2005年全国水稻、小麦和玉米秸秆产量分别为2.1亿、1.1亿t和1.7亿t。高利伟等^[18]参考相关文献得出我国水稻、小麦和玉米的草谷比分别为1.0、1.1和2.0,并基于此对2006年全国作物秸秆资源量进行评估,结果显示我国水稻、小麦和玉米秸秆数量分别为1.8亿、1.1亿t和2.9亿t。毕于运等^[19]和高利伟

等^[18]在研究中采用的小麦草谷比均为1.1,两者使用的水稻草谷比较为接近,而玉米的草谷比差别较大,分别为1.2和2.0。宋大利等^[1]在对我国主要农作物秸秆资源量进行估算时通过文献整理得出水稻、小麦和玉米的草谷比分别为1.0、1.1和1.2,估算得出2015年我国水稻、小麦和玉米秸秆资源量分别为2.1亿、1.4亿t和2.7亿t,与毕于运等^[19]的研究结果相比,小麦和玉米秸秆产量有较大幅度的增长。刘晓永等^[2]基于文献资料等得到我国不同区域作物的草谷比:水稻主产区长江中下游地区的水稻草谷比为1.08,高于东北(0.91)、西南(0.95)和东南地区(0.93);小麦主产区华北、长江中下游和西北地区小麦的草谷比分别为1.34、1.39和1.10,其中西北地区的小麦草谷比相对偏低;玉米主产区华北、东北、西北和西南地区玉米的草谷比分别为1.23、1.11、1.29和1.28,其中东北地区的玉米草谷比相对较低。刘晓永等^[2]的研究结果显示,2010—2015年间我国秸秆资源年产量为9.0亿t,其中谷类作物秸秆占70%。本研究采用文献^[20]的数据,其中长江中下游农区的水稻草谷比为1.28,高于以往研究,东北、西南和南方农区的水稻草谷比相差不大,分别为0.97、1.00和1.06;华北、长江中下游和西北农区的小麦草谷比分别为1.34、1.38和1.23,高于宋大利等^[1]、高利伟等^[18]和毕于运等^[19]采用的小麦草谷比1.1,而与刘晓永等^[2]通过文献总结所得到的分区小麦草谷比较为接近;华北、东北、西北和西南农区玉米的草谷比分别为1.73、1.86、1.52和1.29,高于宋大利等^[1]、刘晓永等^[2]以及毕于运等^[19]在研究中采用的玉米草谷比。本研究结果表明,2013—2017年我国三大粮食作物水稻、小麦和玉米秸秆年均产量分别为2.3亿、1.7亿t和3.9亿t,与宋大利等^[1]对2015年我国水稻、小麦和玉米秸秆资源估算量相比,分别高出10.5%、16.5%和43.5%。

在分析秸秆氮养分资源量时需要考虑秸秆的氮养分含量,相关研究多是参考全国农业技术推广服务中心编著的《中国有机肥料养分志》和《中国有机肥料资源》。高利伟等^[18]和刘晓燕等^[24]采用的是《中国有机肥料养分志》中水稻、小麦和玉米秸秆的氮含量,分别为9.1、6.5 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和9.2 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。宋大利等^[1]在对我国主要农作物秸秆氮养分资源量进行估算的研究中利用的是《中国有机肥料资源》中的秸秆氮养分含量参数:水稻秸秆8.3 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、小麦秸秆6.2 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、玉米秸秆8.7 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。《中国有机肥料养分志》中给出的主要粮食作物秸秆氮含量比《中国有机肥料资源》中的要

高。刘晓永等^[2]在参考《中国有机肥料养分志》和《中国有机肥料资源》的基础上,结合文献调研得出的水稻、小麦和玉米秸秆氮含量分别为 8.2 、 $5.4\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $8.9\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。本研究在对我国三大粮食作物秸秆氮养分资源量及还田替代化学氮肥潜力进行评估的过程中采用的是《中国有机肥料养分志》中的秸秆氮含量参数以及刘晓永等^[2]通过文献总结得出的水稻、小麦和玉米秸秆还田条件下氮养分当季释放率。高利伟等^[18]对2006年全国作物秸秆养分资源数量进行估算的结果显示,我国水稻、小麦和玉米秸秆氮养分资源量分别为166万、75万t和268万t。宋大利等^[1]的研究结果表明,2015年我国水稻、小麦和玉米秸秆氮养分资源量分别为172万、88万t和234万t,水稻、小麦和玉米秸秆在全量还田条件下带入农田的氮养分量分别为 57 、 $37\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $62\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。本研究的估算结果表明,2013—2017年我国水稻、小麦和玉米秸秆年均氮养分资源量分别为209万、108万t和356万t;在考虑还田秸秆氮养分当季释放率的情况下,秸秆全量还田下我国水稻、小麦和玉米秸秆还田当季化学氮肥可替代量分别为99万、54万t和192万t,单位耕地面积化学氮肥可替代量分别为 33.6 、 $23.4\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $51.2\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。若需更为准确地评估我国不同农区主要粮食作物秸秆氮养分资源量,应系统地对各农区的秸秆氮养分含量进行分析。马想等^[25]在黑土、潮土和红壤上开展的小麦和玉米秸秆腐解试验表明,秸秆腐解主要由气候、土壤和物料性质协同驱动,主控秸秆腐解的单因子是气候条件。我国各农区的水热条件和土壤类型不同,这会导致还田秸秆的腐解速度和秸秆氮养分当季释放率存在差异。另外,还田秸秆中氮养分当季释放量与秸秆还田下化学氮肥可替代量之间的关系还需要进一步探究。本文的研究结果只能在一定程度上为各省份主要粮食作物秸秆还田下的化学氮肥施用提供参考。

定位试验的研究结果表明,秸秆还田在保证作物产量的前提下可以替代部分化学氮肥,同时有利于提高氮肥利用效率^[12-15]。我国主要粮食作物秸秆氮养分资源集中分布在华北、长江中下游和东北农区,分别占全国三大粮食作物秸秆氮养分资源总量的31.6%、25.4%和24.2%。华北农区是我国玉米和小麦主产区,长江中下游农区是水稻和小麦主产区,东北农区是玉米和水稻主产区,而且在《关于开展农作物秸秆综合利用规划终期评估的通知》^[20]中这些农区的作物草谷比相对较高,所以秸秆氮养分资源主要分布

在这些农区。在作物产量较大的省份,秸秆氮养分资源也较为丰富,如水稻秸秆氮养分资源主要分布在湖南、江西、江苏、黑龙江、湖北和安徽等省份;小麦秸秆氮养分资源集中分布在河南、山东、安徽、河北和江苏等省份;玉米秸秆氮养分产量较高的省份为黑龙江、吉林、内蒙古、山东、河南、河北和辽宁。从单位耕地面积秸秆还田当季的化学氮肥可替代量来看,江苏、湖北、浙江、湖南、辽宁和安徽这些省份水稻秸秆还田当季化学氮肥可替代量较大;小麦秸秆还田化学氮肥可替代量相对较大的省份有河南、河北、山东、安徽、江苏和新疆;玉米秸秆还田化学氮肥可替代量较大的省份有吉林、辽宁、内蒙古、宁夏、黑龙江、山东、江苏、新疆、湖南、安徽、湖北、山西、河北和河南。在省级尺度上,综合考虑作物秸秆氮养分资源总量和单位耕地面积秸秆还田当季化学氮肥可替代量,江苏、湖北和安徽水稻秸秆还田的化学氮肥替代潜力较大;小麦秸秆还田化学氮肥替代潜力较大的省份有河南、山东、安徽、河北和江苏;玉米秸秆还田化学氮肥替代潜力较大的省份有黑龙江、吉林、内蒙古、山东、河南、河北和辽宁。在这些地区,需要进一步提高秸秆还田率,并完善秸秆还田技术,充分发挥秸秆氮养分的化学氮肥替代作用。同时,还田秸秆腐解过程对土壤氮有效性的影响也是在实际生产中需要注意的一个问题。在江西双季稻上进行的两年田间试验表明,在氮磷钾养分等量投入条件下,水稻秸秆全量还田在早稻和晚稻季分别替代30%和23%化学氮肥处理下,双季稻全生育期内土壤碱解氮和硝态氮含量高于单施化肥处理,同时水稻各生育期两个处理的土壤铵态氮含量相差不大^[26]。在陕西杨凌地区开展的5年定位试验结果表明,在氮养分等量施用情况下,小麦玉米秸秆翻压还田减量施氮20%处理较单施化学氮肥处理提高了土壤碱解氮含量^[12]。在吉林国家黑土肥力与肥料效益监测基地进行的长期定位试验(1990—2012年)显示,等氮量投入条件下,玉米各生育期秸秆还田替代32%的化学氮肥配施氮磷钾化肥处理与单施氮磷钾化肥处理下的土壤无机氮含量没有显著差异^[15]。也有研究发现,作物秸秆在淹水条件下腐解会形成更多的木质素残余物,其芳环上的酚羟基会固定土壤中的有效态氮形成苯酰胺,使土壤无机态氮含量下降^[27]。在旱地土壤上秸秆还田也提高了土壤有机质中酚基、羟基、羧基、芳香碳和酰胺含量,促进了土壤有机氮的形成,从而使土壤氮有效性下降^[28-29]。此外,秸秆还田条件下微生物在前期可能会与作物竞争

无机态氮^[30]。对于秸秆还田在作物生育前期可能导致的土壤氮有效性下降问题,可以通过改进施氮运筹(提高氮肥基肥比例)^[31]以及调节秸秆和氮肥的施入碳氮比^[32-33]得到解决。影响还田作物秸秆腐解及其养分释放的因素较多,包括秸秆还田方式、外源氮素供应、外施腐熟剂以及秸秆还田后的土壤环境条件等^[34]。田平等^[35]在东北棕壤土区进行的两年田间定位试验表明,玉米秸秆还田后150 d在旋耕还田和翻耕还田两种还田方式下的秸秆腐解率分别为78.0%和65.9%,氮释放率分别为53.5%和38.8%,玉米秸秆旋耕还田方式更适合此地区。马想等^[25]建议各地区在实行秸秆还田时需结合土壤因子及当地水热条件来确定秸秆还田时间。王秋菊等^[36]认为秸秆还田条件下的减氮要考虑到土壤的具体特性。今后应针对我国不同农区的气候条件、土壤类型和种植制度进一步开展秸秆还田替代化学氮肥试验,明确各农区主要粮食作物秸秆还田的化学氮肥可替代率。并根据各农区的具体情况有针对性地加强农田管理,提高还田秸秆氮养分当季释放率,以实现秸秆氮养分资源的高效利用和化学氮肥减量以及土壤肥力提升。

4 结论

(1)目前我国主要粮食作物秸秆数量及其氮养分资源量巨大,2013—2017年我国水稻、小麦和玉米秸秆年均产量分别为2.3亿、1.7亿t和3.9亿t,所含氮养分资源量分别为209万、108万t和356万t。三大粮食作物秸秆氮养分资源主要来自玉米和水稻秸秆,小麦秸秆氮养分资源占比相对较小。

(2)水稻秸秆氮养分资源主要分布在长江中下游农区,小麦秸秆氮养分资源主要分布在华北农区,玉米秸秆氮养分资源集中分布于华北和东北农区。这些农区主要粮食作物秸秆还田的化学氮肥可替代总量较大。

(3)江苏、湖北、浙江、湖南、辽宁和安徽这些省份单位耕地面积水稻秸秆还田化学氮肥可替代量较大;单位耕地面积小麦秸秆还田化学氮肥可替代量相对较大的省份有河南、河北、山东、安徽、江苏和新疆;吉林、辽宁、内蒙古、宁夏、黑龙江、山东、江苏、新疆、湖南和安徽这些省份单位耕地面积玉米秸秆还田化学氮肥可替代量较大。

(4)秸秆全量还田下我国水稻、小麦和玉米秸秆还田当季化学氮肥可替代总量分别为99万、54万t和192万t,单位耕地面积化学氮肥可替代量分别为

33.6、23.4 kg·hm⁻²和51.2 kg·hm⁻²。玉米秸秆还田的化学氮肥替代潜力最大,其次为水稻秸秆还田,小麦秸秆还田的化学氮肥替代潜力相对较小。

致谢:

本文部分数据来源于已发表的文献,在此对文献作者表示衷心感谢!

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.
SONG Da-li, HOU Sheng-peng, WANG Xiu-bin, 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.
- [2] 刘晓永, 李书田. 中国秸秆养分资源及还田的时空分布特征[J]. 农业工程学报, 2017, 33(21): 1-19.
LIU Xiao-yong, LI Shu-tian. Temporal and spatial distribution characteristics of crop straw nutrient resources and returning to farmland in China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33(21): 1-19.
- [3] 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.
National Agricultural Technology Extension and Service Centre. Records of nutrients in organic fertilizer in China[M]. Beijing: China Agriculture Press, 1999.
- [4] 牛新胜, 巨晓棠. 我国有机肥料资源及利用[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(6): 1462-1479.
NIU Xin-sheng, JU Xiao-tang. Organic fertilizer resources and utilization in China[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2017, 23(6): 1462-1479.
- [5] 张国, 逯非, 赵红, 等. 我国农作物秸秆资源化利用现状及农户对秸秆还田的认知态度[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(5): 981-988.
ZHANG Guo, LU Fei, ZHAO Hong, et al. Residue usage and farmers' recognition and attitude toward residue retention in China's croplands[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(5): 981-988.
- [6] 全孝飞, 颜晓元, 王书伟, 等. 长期施用有机物料对稻田生态系统服务功能的影响[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(7): 1406-1415.
QUAN Xiao-fei, YAN Xiao-yuan, WANG Shu-wei, et al. Effects of long-term application of organic materials on the ecosystem services of paddy fields[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(7): 1406-1415.
- [7] 房焕, 李奕, 周虎, 等. 稻麦轮作区秸秆还田对水稻土结构的影响[J]. 农业机械学报, 2018, 49(4): 297-302.
FANG Huan, LI Yi, ZHOU Hu, et al. Effects of straw incorporation on paddy soil structure in rice-wheat rotation system[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery*, 2018, 49(4): 297-302.
- [8] 王秋菊, 常本超, 张劲松, 等. 长期秸秆还田对白浆土物理性质及水稻产量的影响[J]. 中国农业科学, 2017, 50(14): 2748-2757.
WANG Qiu-ju, CHANG Ben-chao, ZHANG Jin-song, et al. Effects of

- albic soil physical properties and rice yields after long-term straw incorporation[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2017, 50(14):2748-2757.
- [9] 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 Yan-hui, ZHU Xin-kai, GUO Wen-shan, 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.
- [10] Huang S, Zeng Y J, Wu J F, et al. Effect of crop residue retention on rice yield in China: A meta-analysis[J]. *Field Crops Research*, 2013, 154:188-194.
- [11] 王德建, 常志州, 王 灿, 等. 稻麦秸秆全量还田的产量与环境效应及其调控[J]. 中国生态农业学报, 2015, 23(9):1073-1082.
- WANG De-jian, CHANG Zhi-zhou, WANG Can, et al. Regulation and effect of 100% straw return on crop yield and environment[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2015, 23(9):1073-1082.
- [12] 杨晨璐, 刘兰清, 王维钊, 等. 麦玉米复种体系下秸秆还田与施氮对作物水氮利用及产量的效应研究[J]. 中国农业科学, 2018, 51(9):1664-1680.
- YANG Chen-lu, LIU Lan-qing, WANG Wei-yu, et al. Effects of the application of straw returning and nitrogen fertilizer on crop yields, water and nitrogen utilization under wheat-maize multiple cropping system[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, 51(9):1664-1680.
- [13] 曾研华, 范呈根, 吴建富, 等. 等养分条件下稻草还田替代双季早稻氮钾肥比例的研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(3):658-668.
- ZENG Yan-hua, FAN Cheng-gen, WU Jian-fu, et al. Replacement ratio of nitrogen and potassium fertilizer by straw incorporation in early rice under the same nitrogen, phosphorus and potassium input[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2017, 23(3):658-668.
- [14] 曾研华, 吴建富, 曾勇军, 等. 机收稻草全量还田减施化肥对双季晚稻养分吸收利用及产量的影响[J]. 作物学报, 2018, 44(3):454-462.
- ZENG Yan-hua, WU Jian-fu, ZENG Yong-jun, et al. Effects of straw incorporation with reducing chemical fertilizers on nutrient absorption and utilization and grain yield of double-cropping late rice under mechanical harvest[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2018, 44(3):454-462.
- [15] 高洪军, 朱 平, 彭 畅, 等. 等氮条件下长期有机无机配施对春玉米的氮素吸收利用和土壤无机氮的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(2):318-325.
- GAO Hong-jun, ZHU Ping, PENG Chang, et al. Effects of partially replacement of inorganic N with organic materials on nitrogen efficiency of spring maize and soil inorganic nitrogen content under the same N input[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2015, 21(2):318-325.
- [16] Liu X J, Zhang Y, Han W X, et al. Enhanced nitrogen deposition over China[J]. *Nature*, 2013, 494(7438):459-462.
- [17] Zhang W F, Dou Z X, He P, et al. New technologies reduce greenhouse gas emissions from nitrogenous fertilizer in China[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2013, 110(21):8375-8380.
- [18] 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 Li-wei, MA Lin, ZHANG Wei-feng, et al. Estimation of nutrient resource quantity of crop straw and its utilization situation in China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2009, 25(7):173-179.
- [19] 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 Yu-yun, GAO Chun-yu, WANG Ya-jing, et al. Estimation of straw resources in China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2009, 25(12):211-217.
- [20] 国家发展改革委办公厅, 农业部办公厅. 关于开展农作物秸秆综合利用规划终期评估的通知[EB/OL]. (2015-12-09)[2019-08-12]. http://www.ndrc.gov.cn/zcfb/zcfbtz/201512/t20151216_767695.html.
- Office of National Development and Reform Commission, Office of the Ministry of Agriculture. Announcement on the final assessment of planning for comprehensive utilization of crop straw[EB/OL]. (2015-12-09)[2019-08-12]. http://www.ndrc.gov.cn/zcfb/zcfbtz/201512/t20151216_767695.html.
- [21] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴(2014—2018)[M]. 北京: 中国统计出版社, 2014—2018.
- National Bureau of Statistics of China. China Statistical Yearbook (2014—2018)[M]. Beijing: China Statistic Press, 2014—2018.
- [22] Li H, Cao Y, Wang X M, et al. Evaluation on the production of food crop straw in China from 2006 to 2014[J]. *Bioenergy Research*, 2017, 10(3):949-957.
- [23] 彭春艳, 罗怀良, 孔 静. 中国作物秸秆资源量估算与利用状况研究进展[J]. 中国农业资源与区划, 2014, 35(3):14-20.
- PENG Chun-yan, LUO Huai-liang, KONG Jing. Advance in estimation and utilization of crop residues resources in China[J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2014, 35(3):14-20.
- [24] 刘晓燕, 金继运, 任天志, 等. 中国有机肥料养分资源潜力和环境风险分析[J]. 应用生态学报, 2010, 21(8):2092-2098.
- LIU Xiao-yan, JIN Ji-yun, REN Tian-zhi, et al. Potential of organic manures nutrient resources and their environmental risk in China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(8):2092-2098.
- [25] 马 想, 徐明岗, 赵惠丽, 等. 我国典型农田土壤中有有机物料腐解特征及驱动因子[J]. 中国农业科学, 2019, 52(9):1564-1573.
- MA Xiang, XU Ming-gang, ZHAO Hui-li, et al. Decomposition characteristics and driving factors of organic materials in typical farmland soils in China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2019, 52(9):1564-1573.
- [26] 曾研华, 吴建富, 潘晓华, 等. 稻草原位还田对双季稻田土壤理化与生物学性状的影响[J]. 水土保持学报, 2013, 27(3):150-155.
- ZENG Yan-hua, WU Jian-fu, PAN Xiao-hua, et al. Effects of rice straw incorporation on soil physical, chemical and biological properties in double cropping paddy fields[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2013, 27(3):150-155.
- [27] Schmidt-Rohr K, Mao J D, Olk D C. Nitrogen-bonded aromatics in

- soil organic matter and their implications for a yield decline in intensive rice cropping[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2004, 101(17):6351-6354.
- [28] Chen X, Mao A, Zhang Y J, et al. Carbon and nitrogen forms in soil organic matter influenced by incorporated wheat and corn residues[J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2017, 63(4):377-387.
- [29] Gao H J, Chen X, Wei J L, et al. Decomposition dynamics and changes in chemical composition of wheat straw residue under anaerobic and aerobic conditions[J]. *PLoS One*, 2016, 11(7):e0158172.
- [30] 凌 宁, 荀卫兵, 沈其荣. 根际沉积碳与秸秆碳共存下作物与微生物氮素竞争机制及其调控[J]. 南京农业大学学报, 2018, 41(4):589-597.
- LING Ning, XUN Wei-bing, SHEN Qi-rong. Plant-microbial competition for nitrogen in rhizosphere under straw returning regime: Mechanisms and manipulation[J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2018, 41(4):589-597.
- [31] 胡雅杰, 朱大伟, 邢志鹏, 等. 改进施氮运筹对水稻产量和氮素吸收利用的影响[J]. 植物营养与肥科学报, 2015, 21(1):12-22.
- HU Ya-jie, ZHU Da-wei, XING Zhi-peng, et al. Modifying nitrogen fertilization ratio to increase the yield and nitrogen uptake of super japonica rice[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2015, 21(1):12-22.
- [32] 李 涛, 何春娥, 葛晓颖, 等. 秸秆还田施氮调节碳氮比对土壤无机氮、酶活性及作物产量的影响[J]. 中国生态农业学报, 2016, 24(12):1633-1642.
- LI Tao, HE Chun-e, GE Xiao-ying, et al. Responses of soil mineral N contents, enzyme activities and crop yield to different C/N ratio mediated by straw retention and N fertilization[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2016, 24(12):1633-1642.
- [33] 张雅洁, 陈 晨, 陈 曦, 等. 小麦-水稻秸秆还田对土壤有机质组成及不同形态氮含量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(11):2155-2161.
- ZHANG Ya-jie, CHEN Chen, CHEN Xi, et al. Effects of wheat and rice straw returning on soil organic matter composition and content of different nitrogen forms in soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34(11):2155-2161.
- [34] 张经廷, 张丽华, 吕丽华, 等. 还田作物秸秆腐解及其养分释放特征概述[J]. 核农学报, 2018, 32(11):2274-2280.
- ZHANG Jing-ting, ZHANG Li-hua, LÜ Li-hua, et al. Overview of the characteristics of crop straw decomposition and nutrients release of returned field crops[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2018, 32(11):2274-2280.
- [35] 田 平, 姜 英, 孙 悦, 等. 不同还田方式对玉米秸秆腐解及土壤养分含量的影响[J]. 中国生态农业学报, 2019, 27(1):100-108.
- TIAN Ping, JIANG Ying, SUN Yue, et al. Effect of straw return methods on maize straw decomposition and soil nutrients contents[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2019, 27(1):100-108.
- [36] 王秋菊, 焦 峰, 刘 峰, 等. 草甸白浆土稻秆氮利用效率及氮素调控对水稻产量的影响[J]. 农业工程学报, 2019, 35(11):86-94.
- WANG Qiu-ju, JIAO Feng, LIU Feng, et al. Nitrogen utilization efficiency of rice straw and effect of nitrogen regulation technology on yield in meadow albic soil[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019, 35(11):86-94.