

东北-黄淮海平原旱作区作物秸秆养分资源量 及还田替代化肥潜力

汪秋云¹, 李庆阳¹, 柴如山¹, 李军利¹, 王擎运^{1*}, 郅红建¹,
张世文², 马东豪³, 张佳宝³, 徐明岗⁴

(1. 安徽农业大学资源与环境学院, 农田生态保育与污染防治安徽省重点实验室, 自然资源部江淮耕地资源保护与生态修复重点实验室, 安徽省绿色磷肥智能制造与高效利用工程研究中心, 合肥 230036; 2. 安徽理工大学地球与环境学院, 淮南 232001; 3. 中国科学院南京土壤研究所, 土壤与农业可持续发展国家重点实验室, 南京 210008; 4. 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 耕地培育技术国家工程实验室, 北京 100081)

摘要: 东北-黄淮海平原旱作农业区(旱作区)是中国重要的粮食产区, 估算旱作区主要作物秸秆养分和化肥替代潜力, 可为该区域秸秆养分资源的合理利用和秸秆还田条件下化肥减施提供科学依据。基于 2015—2018 年统计年鉴数据, 对旱作区各市小麦、玉米和大豆 3 种作物秸秆养分资源量和利用潜力进行分析。结果表明: 小麦、玉米和大豆累积播种面积占旱作区作物播种面积的 81.49%; 作物秸秆资源年均产量分别为 9 432.24 万 t (小麦)、13 485.91 万 t (玉米)和 732.94 万 t (大豆), 占全国相应作物秸秆资源总量的 70.96%、51.63%和 42.34%。秸秆养分总量为 678.60 万 t, 包含 167.75 万 t (N)、67.12 万 t (P₂O₅)和 443.73 万 t (K₂O), 累计占该区域三大作物推荐施肥总量的 53.75%。秸秆还田模式下, 小麦、玉米和大豆秸秆当季替代化肥 (N+P₂O₅+K₂O) 潜力分别为 188.88、138.71 和 38.51 kg·hm⁻²。小麦主要种植区(黄淮海平原)小麦秸秆可实现 N 16.15~30.11 kg·hm⁻², P₂O₅ 7.89~14.71 kg·hm⁻², K₂O 112.18~209.16 kg·hm⁻² 的化肥替代; 玉米主要种植区(东北平原)玉米秸秆可实现 N 20.39~39.85 kg·hm⁻², P₂O₅ 10.39~20.31 kg·hm⁻², K₂O 66.60~130.18 kg·hm⁻²。可见旱作区秸秆还田替代化肥潜力较大。

关键词: 旱作农业区; 作物秸秆; 养分资源量; 秸秆还田; 化肥替代

中图分类号: S141.4

文献标识码: A

文章编号: 1672-352X (2022)04-0621-09

Nutrient resources of crop straw and its potential to replace chemical fertilizers in dryland farming region of the Northeast and Huanghuaihai Plain

WANG Qiuyun¹, LI Qingyang¹, CHAI Rushan¹, LI Junli¹, WANG Qingyun¹, GAO Hongjian¹,
ZHANG Shiwen², MA Donghao³, ZHANG Jiabao³, XU Minggang⁴

(1. School of Resources and Environment, Anhui Province Key Laboratory of Farmland Ecological Conservation and Pollution Prevention, Key Laboratory of Jianghuai Arable Land Resources Protection and Eco-restoration, Ministry of Natural Resources, Anhui Engineering Research Center for Intelligent Manufacture and Efficient Utilization of Green Phosphorus Fertilizer, Anhui Agricultural University, Hefei 230036; 2. School of Earth and Environment, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001; 3. State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008; 4. Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, National Engineering Laboratory for Improving Quality of Arable Land, Beijing 100081)

Abstract: The dryland farming region of the Northeast and Huanghuaihai Plain is the major grain-producing areas of China, and clearance of the nutrient resource quantity of main crop straw and utilization potential under straw returning in dryland farming region of the Northeast and Huanghuaihai Plain can provide reference data for reasonable utilization of straw nutrient resources and synthetic fertilizers reduction. Based on the China Statistical Yearbook during the period of 2015-2018, crop grass grain ratio, straw nutrient content and straw nutrient release

收稿日期: 2021-11-18

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0300801, 2018YFD0800301), 土壤与农业可持续发展国家重点实验室开放基金(Y20160014)和耕地培育技术国家工程实验室开放基金(201705)共同资助。

作者简介: 汪秋云, 硕士研究生。E-mail: wangqy_ahau@163.com

* 通信作者: 王擎运, 博士, 副教授。E-mail: qywang@ahau.edu.cn

rate, the amount of straw nutrient resources in dryland areas and their potential to replace chemical fertilizers were estimated for different cities and dryland farming region of the Northeast and Huanghuaihai Plain in this research. As results, the cumulative sown area of wheat, maize and soybean accounted for 81.49% of the dryland farming region; the average annual yield of the three crop straw resources were $9\,432.24 \times 10^4$ t (wheat), $13\,485.91 \times 10^4$ t (maize) and 732.94×10^4 t (soybean), accounting for 70.96%, 51.63% and 42.34% of the same crop straw resources in China, respectively. The total nutrient resources of the wheat, maize and soybean straw were 678.60×10^4 t, containing 167.75×10^4 t (N), 67.12×10^4 t (P_2O_5) and 443.73×10^4 t (K_2O), accounting for 53.75% of the total recommended fertilization amount for the three major crops in the dryland farming regions. Under the straw returning, the amounts of fertilizers substituted (N + P_2O_5 + K_2O) by wheat, maize and soybean straw in season were 188.88, 138.71 and 38.51 $kg \cdot hm^{-2}$, respectively. In the main wheat planting area (Huanghuaihai Plain), 16.15 - 30.11 $kg \cdot hm^{-2}$ (N), 7.89 - 14.71 $kg \cdot hm^{-2}$ (P_2O_5) and 112.18 - 209.16 $kg \cdot hm^{-2}$ (K_2O) of chemical fertilizers could be replaced by wheat straw in season; in the main maize planting area (Northeast Plain), 20.39 - 39.85 $kg \cdot hm^{-2}$ (N), 10.39 - 20.31 $kg \cdot hm^{-2}$ (P_2O_5) and 66.60 - 130.18 $kg \cdot hm^{-2}$ (K_2O) of chemical fertilizers could be replaced by the maize straw in season. In conclusion, straw returning has great potential to replace chemical fertilizers.

Key words: dryland farming region; crop straw; nutrient resource; straw returning; substitute for chemical fertilizers

作物秸秆蕴藏着大量的氮、磷、钾等养分元素, 秸秆还田不仅可弥补土壤中养分含量的不足与比例的失衡, 且有利于土壤有机质的积累和结构的改善, 是持续提升土壤质量的重要措施^[1-3]。科学统计旱作区主要粮食作物秸秆资源量及化肥替代潜力对合理减少化肥投入、改善耕地质量具有重要意义。

近年来, 秸秆还田受到前所未有的重视, 关于秸秆养分资源量及其养分替代潜力前人做了大量的研究^[4-13]。据统计, 我国水稻、小麦和玉米秸秆年均产量分别为 21 141.5 万 t、14 843.1 万 t 和 29 402.0 万 t, 总量达 65 386.6 万 t^[14]。李一等^[15]基于《中国统计年鉴》对我国主要粮食作物秸秆养分资源量的研究表明, 我国秸秆全量还田养分输入量分别为 758.66 万 t (N)、238.84 万 t (P_2O_5) 和 1 316.36 万 t (K_2O); 宋大利等^[16]研究表明秸秆全量还田可归还的养分分别为 N 54.4、 P_2O_5 15.5 和 K_2O 88.1 $kg \cdot hm^{-2}$ 。但这些研究主要基于全国水平上, 想要实现区域秸秆还田的合理利用, 必须从区域尺度进行分析^[17]。

东北平原和黄淮海平原是中国北方旱地农业区的重要组成部分, 该区域土壤质量的好坏直接影响作物产量稳定和国家粮食安全^[18-19]。而长期重用轻养的掠夺性生产方式严重制约了该区域作物的稳产、高产^[20-23]。前人对秸秆资源以及还田替代化肥潜力进行了大量的研究且主要基于全国水平上^[9-13]。除此之外, 在旱作区区域上, 秸秆养分资源潜力和空间分布特征仍然尚不多见。基于以上认识, 在界定东北-黄淮海平原旱作区的基础上, 作者通过对近年来该区域各市主要作物种植面积和产量分析, 参考何萍等^[24]最新有关秸秆养分含量及草谷比的研究成果, 估算了我国东北-黄淮海平原旱作区作物秸秆及

其蕴藏养分资源量, 分析了秸秆还田替代化肥潜力, 以期为该区域秸秆资源的高效利用提供较合理的基础数据及理论支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区域

以地形坡度小于 5° 、1 km^2 网格内的旱地面积占耕地面积的 40% 以上为界定标准, 划分出东北-黄淮海平原旱作区 (旱作区) 的范围, 包括黑龙江省、吉林省、辽宁省、河北省、山东省、河南省、安徽省、北京市和天津市。研究区地处东北平原和黄淮海平原, 隶属温带季风气候。其总体剖面为一条由东北向西南延伸的狭长地带, 最长跨度为 2 438 km, 具有明显的带状特征和区域分异^[25-26]。

1.2 数据来源

2015—2018 年东北-黄淮海平原旱作区小麦、玉米和大豆等作物播种面积和产量均来自各省市 (黑龙江、吉林、辽宁、河北、山东、河南、安徽、北京和天津) 统计局^[27-35]。作物秸秆养分含量以及草谷比参考何萍等《基于产量反应和农学效率的作物推荐施肥方法》^[24]; 作物秸秆直接还田养分当季释放率为近年研究文献统计结果 (表 1) ^[15, 36-39]。

1.3 研究方法

作物秸秆产量的计算公式为^[40-41]:

$$W_{iS} = W_{iP} \times N_{iG} \quad (1)$$

式 (1) 中: W_{iS} 为作物秸秆产量 ($\times 10^4$ t); W_{iP} 为作物产量 ($\times 10^4$ t); S_{iG} 为作物草谷比; i 为某一作物。

作物秸秆养分资源量的计算公式为:

$$W_{iN} = W_{iS} \times N_{iS} \quad (2)$$

式 (2) 中: W_{iN} 为作物秸秆养分资源量 ($\times 10^4$ t);

N_{iS} 为作物秸秆养分含量 ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$), 将单质磷 (P) 折算为五氧化二磷 (P_2O_5) 的系数为 2.29; 将单质钾 (K) 折算为氧化钾 (K_2O) 的系数为 1.21。

作物秸秆还田替代养分潜力的计算公式为:

$$A=(W_{iN}\times R)/a \quad (3)$$

式 (3) 中: A 为作物秸秆还田的化肥替代潜力 ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$); R 为秸秆直接还田养分当季释放率 (%); a 为主要粮食作物的播种面积 (hm^2)。

表 1 主要作物草谷比、秸秆养分含量和还田秸秆养分当季释放率

Table 1 Straw ratio of main crops, nutrient contents in straws and in-season nutrient release rates of returned straws

农作物	秸秆养分含量/ ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$) [24]			秸秆养分释放率/%[36-40]			草谷比[24]
	N	P_2O_5	K_2O	N	P_2O_5	K_2O	
小麦	5.8	1.0	18.8	50.11	62.01	89.05	1.17
玉米	7.9	1.3	13.7	54.04	73.03	84.43	1.04
大豆	8.9	3.2	8.4	52.06	54.41	84.30	1.17

2 结果与分析

2.1 东北-黄淮海平原旱作区主要作物秸秆资源量与分布特征

东北-黄淮海平原旱作农业区以小麦、玉米和大

豆的种植为主。3 种作物累计占旱作区作物播种总面积的 81.49% (图 1)。水稻、棉花、薯类等作物仅占该区域种植总面积的 18.51%。黄淮海平原旱作区采用冬小麦、夏玉米一年两熟轮作模式, 东北平原旱作区则以春玉米的单季种植为主。

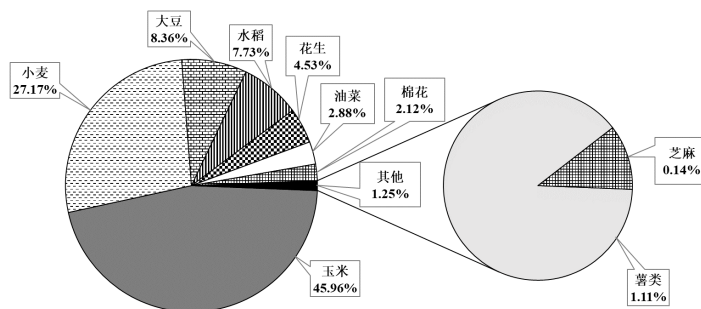


图 1 东北-黄淮海平原旱作区主要农作物播种面积

Figure 1 Proportion of sown area of main crops in dryland farming region of the Northeast and Huanghuaihai Plain

2015—2018 年的东北-黄淮海平原旱作区小麦、玉米和大豆秸秆年均产量为 23 651.08 万 t, 约 67.31% 的秸秆资源分布于小麦-玉米轮作的黄淮海平原旱作区 (图 2 (d))。几种作物在不同区域及省份间的分布差异很大。小麦秸秆年均产量约为 9 432.24 万 t, 占旱作区小麦、玉米和大豆秸秆资源总量的 39.88%, 并集中 (99.64%) 分布于黄淮海平原旱作区 (图 2 (a))。其中, 河南、山东两省小麦秸秆资源年均产量分别为 4 053.13 万 t 和 2 034.98 万 t, 累计占旱作区小麦秸秆资源总量的 64.55%。玉米秸秆年均产量约为 13 485.91 万 t, 占主要作物秸秆资源总量的 57.02%。玉米在黄淮海平原和东北平原旱作区均有分布 (图 3 (b)), 但秸秆资源以吉林和黑龙江两省的产量最高。两省玉米秸秆资源年均产量为 7 221.10 万 t, 占整个旱作区玉米秸秆资源总量的 45.68%。大豆秸秆资源年均产量 (732.94 万 t) 较低, 仅占该区域主要作物

秸秆资源总量的 3.10%。其中, 62.34% 的大豆秸秆资源分布于黑龙江省 (图 2 (c))。

2.2 东北-黄淮海平原旱作区主要作物秸秆养分资源量

2015—2018 年的东北-黄淮海平原旱作区秸秆 (小麦、玉米和大豆) 养分氮、磷、钾资源年均产量分别为 167.75 万 t (N)、67.12 万 t (P_2O_5) 和 443.73 万 t (K_2O), 累计 678.60 万 t (表 2)。其中, 小麦秸秆氮、磷、钾资源分别占区域秸秆养分资源总量的 32.62% (N)、32.19% (P_2O_5) 和 48.67% (K_2O); 玉米秸秆氮、磷、钾资源分别占区域秸秆养分资源总量的 63.50% (N)、59.81% (P_2O_5) 和 50.69% (K_2O); 大豆秸秆氮、磷、钾资源分别占区域秸秆养分资源总量的 3.89% (N)、8.00% (P_2O_5) 和 1.69% (K_2O) (表 2)。

三大作物秸秆养分资源总量 ($\text{N}+\text{P}_2\text{O}_5+\text{K}_2\text{O}$) 在东北-黄淮海平原两大旱作区的分布特征明显

不同。其中，约 68.86% 秸秆养分资源分布于黄淮海平原旱作区，且呈现出中间多、南北少的分布特征；而在东北平原旱作区秸秆养分资源则呈现出北多、南少的现象。秸秆养分在不同省份间的分布同样存在较大差异。以黄淮海平原旱作区河南和东北平原旱作区黑龙江为例，秸秆养分资源总量分别为 183.24 万 t 和 113.16 万 t，累计占旱作区主要作物秸秆养分资源总量的 43.68%（图 3（a））。同时，与秸秆养分资源总量分布特征相似，

秸秆氮磷养分资源以东北平原旱作区的黑龙江省和黄淮海平原旱作区的河南省居多(图 3(b)和(c))。两省氮、磷养分资源累计占旱作区主要作物秸秆养分资源总量的 43.93% (N) 和 45.36% (P_2O_5)。钾与氮、磷相比，在秸秆中的养分资源总量最高，占作物秸秆总养分的 65.39%。其中，16.76% 和 28.52% 的秸秆资源钾蕴藏于黄淮海平原的山东省和河南省（图 3（d）），两省也是冬小麦种植较为集中的区域（图 3（a））。

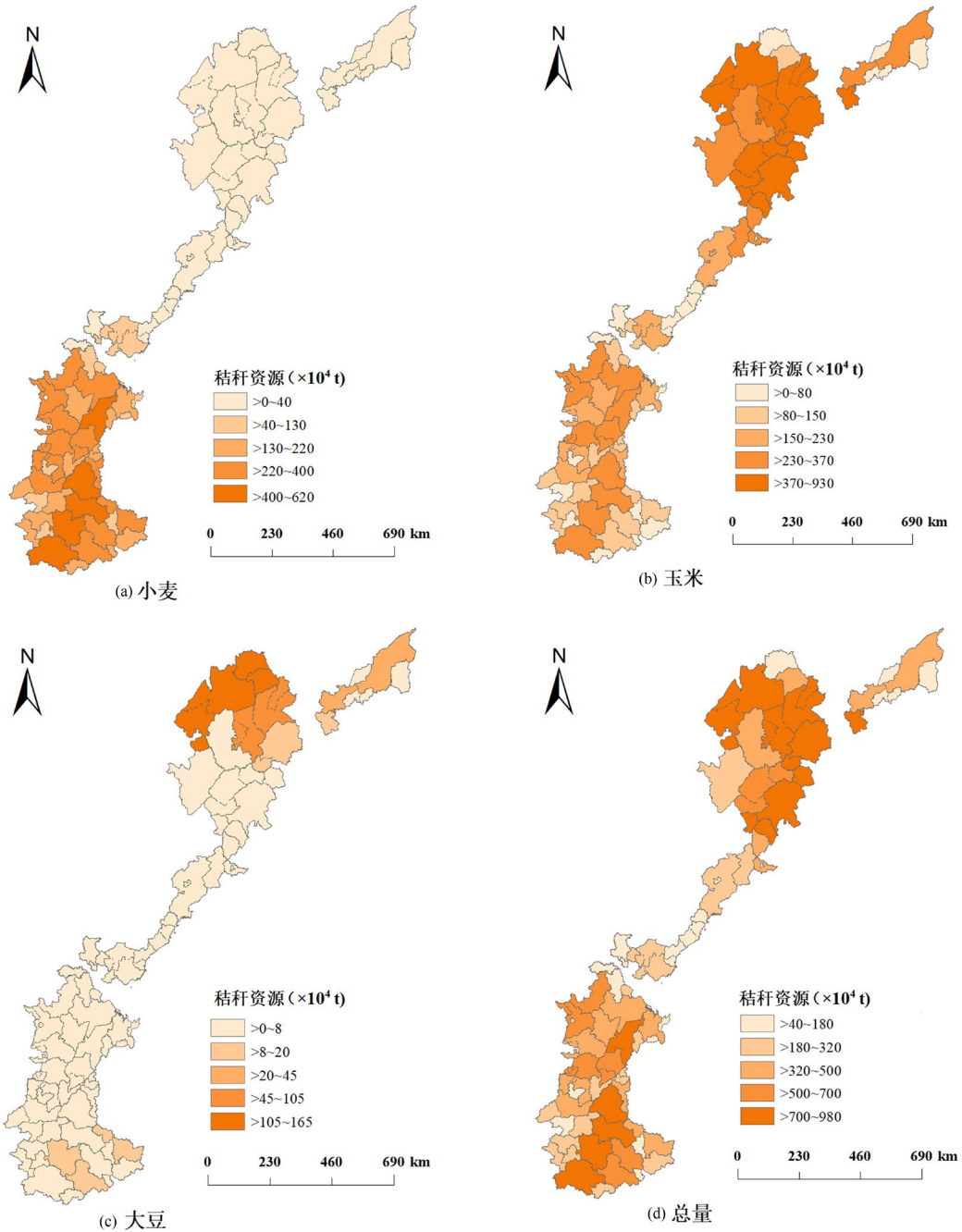


图 2 2015—2018 年东北-黄淮海平原旱作区主要作物秸秆资源分布图

Figure 2 Distribution of main crop straw resources in dryland farming region of the Northeast and Huanghuaihai Plain during the period of 2015-2018

表 2 2015—2018 年东北-黄淮海平原旱作区不同区域主要作物秸秆资源年均产量及其养分资源储量

Table 2 Annual average yields and nutrient resources of main crop straws in different regions of the dryland farming region in the Northeast and Huanghuaihai Plain during the period of 2015 - 2018

区域	作物	秸秆资源量/ ($\times 10^4$ t)	秸秆养分资源量/ ($\times 10^4$ t)			替代化肥潜力/ ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)		
			N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
东北	小麦	34.32±7.31	0.20±0.06	0.08±0.03	0.78±0.23	11.53±2.60	5.54±1.26	79.19±18.02
平原	玉米	7 221.10±301.40	57.02±2.97	21.49±1.12	119.17±6.22	29.56±1.35	16.49±0.75	104.30±4.76
	大豆	475.76±70.83	4.23±0.71	3.48±0.58	4.81±0.80	10.88±1.66	9.36±1.43	20.04±3.04
黄淮海	小麦	9 397.91±328.47	54.51±1.03	21.52±0.41	212.92±4.01	24.68±10.51	11.84±10.24	168.4±13.47
平原	玉米	6 264.81±463.96	49.49±2.62	18.65±0.99	103.43±5.47	19.31±11.10	11.48±11.48	68.77±14.97
	大豆	257.18±72.35	2.29±0.07	1.88±0.06	2.60±0.07	8.32±0.34	7.16±0.30	15.36±0.63
总计	小麦	9 432.24±338.50	54.71±1.97	21.61±0.78	213.70±7.68	22.80±0.31	10.95±0.15	155.62±2.18
	玉米	13 485.91±1 107.18	106.52±10.17	40.14±3.83	222.61± 21.26	26.97±0.67	15.08±0.41	95.18±2.41
	大豆	732.94±162.57	6.52±1.68	5.37±1.38	7.42±0.66	10.39±0.99	8.93±0.85	19.13±18.23
种植模式	小麦-玉米	-	-	-	-	51.43±6.37	25.74±3.18	250.42±33.31
	小麦-大豆	-	-	-	-	32.80±6.83	19.89±4.88	174.17±30.60
	单季春玉米	-	-	-	-	29.56±1.35	16.49±0.75	104.30±4.76
	单季春大豆	-	-	-	-	10.88±1.66	9.36±1.43	20.04±3.04

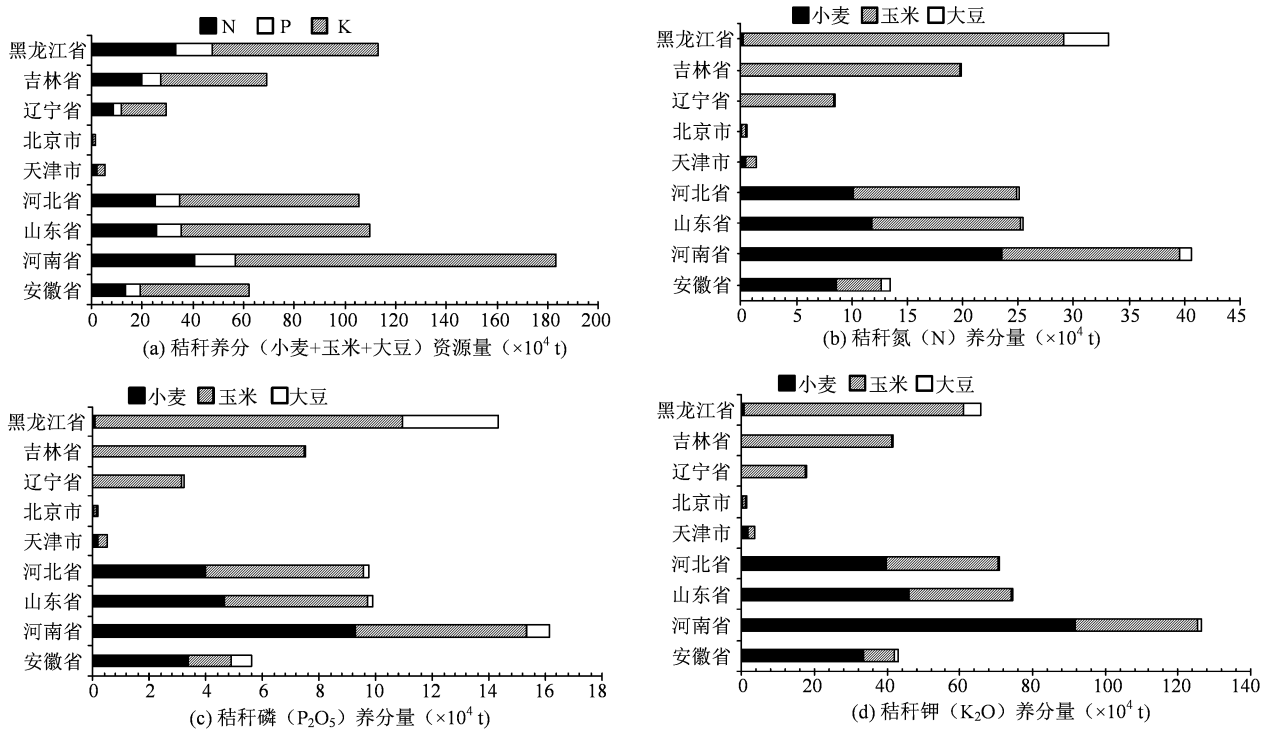


图 3 2015—2018 年东北-黄淮海平原旱作区各省市主要作物秸秆养分资源年均产量

Figure 3 Annual average yields of main crop straw nutrient resources in various provinces and cities of the dryland farming region in the Northeast and Huanghuaihai Plain during the period of 2015 - 2018

2.3 东北-黄淮海平原旱作区作物秸秆还田养分潜力

秸秆直接还田模式下, 3 种作物(小麦、玉米和大豆)秸秆当季替代氮肥(N)潜力均值分别为 22.39、29.04 和 10.41 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$; 替代磷肥(P_2O_5)潜力分别为 10.94、14.80 和 8.95 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$; 替代钾肥(K_2O)潜力分别为 155.55、94.87 和 19.16 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。玉米秸秆还田替代氮肥、磷肥潜力较大, 而小麦秸秆还田

替代钾肥潜力要显著高于其余作物。

在不同区域因种植制度和作物产量的不同, 秸秆还田养分替代潜力同样存在较大差异。其中, 黄淮海平原旱作区小麦秸秆还田替代化肥潜力较高(图 4(a)), 当季可释放 N 16.15~30.11 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、 P_2O_5 7.89~14.71 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 K_2O 112.18~209.16 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。玉米秸秆还田替代化肥潜力较高的地区主要分布于东

北平原旱作区(图4(b)),该区域玉米秸秆还田当季释放量为 $N\ 20.39\sim 39.85\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、 $P_2O_5\ 10.39\sim 20.31\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $K_2O\ 66.60\sim 130.18\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。在黄淮海平原玉米秸秆还田氮、磷、钾养分替代潜力分别为 $N\ 16.81\sim 33.66\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、 $P_2O_5\ 8.56\sim 17.00\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和

$K_2O\ 54.9\sim 108.96\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。各区域大豆秸秆还田替代化肥的潜力普遍较低(图4(c)),氮、磷、钾释放量分别为 $N\ 3.54\sim 20.03\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、 $P_2O_5\ 3.04\sim 17.22\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $K_2O\ 6.52\sim 40.20\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。

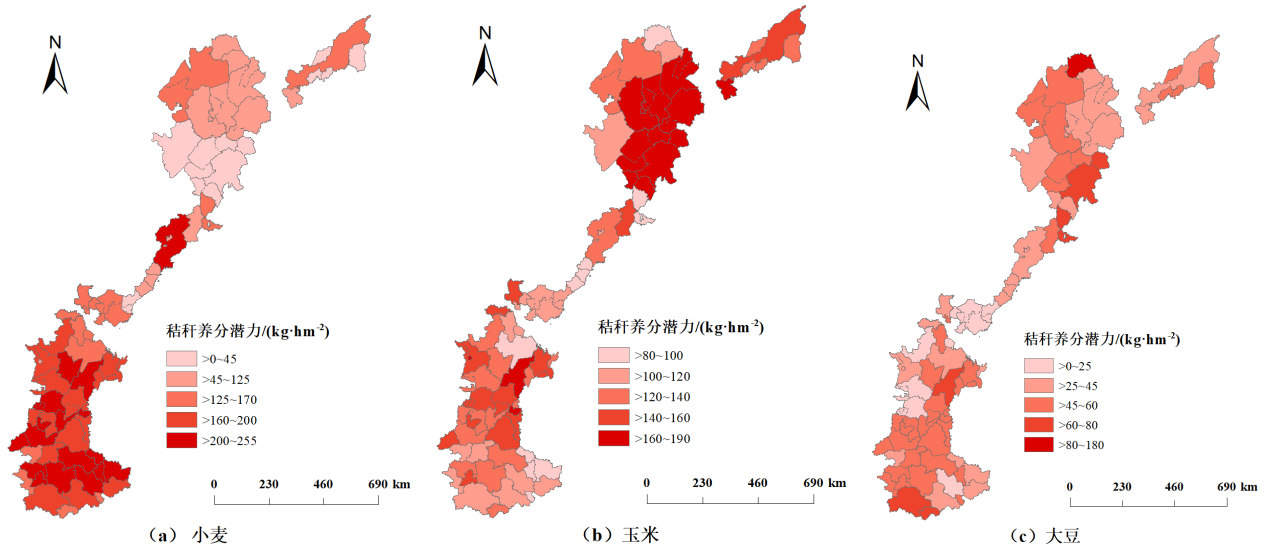


图4 2015—2018年东北-黄淮海平原旱作区各市单位面积主要秸秆还田化肥可替代量

Figure 4 Synthetic fertilizers substitute potential through main crop straw incorporation in different cities of the dryland farming region in the Northeast and Huanghuaihai Plain during the period of 2015 - 2018

3 讨论

3.1 东北-黄淮海平原旱作区作物秸秆资源量与主要影响因素

东北-黄淮海平原旱作区气候条件相对优越,耕地面积广,是我国重要的粮食主产区^[43]。该区域以小麦、玉米和大豆的种植为主,累积播种面积占统计区域的80%以上。3种作物秸秆资源年产量高达23 651.08万t,占全国小麦、玉米和大豆秸秆资源总量的57.48%。这其中包括全国70.96%小麦秸秆资源、51.63%玉米秸秆资源和42.34%的大豆秸秆资源^[42]。

在旱作区不同作物秸秆资源产量差异较大。小麦秸秆资源约9 432.24万t,要明显低于玉米秸秆资源(13 485.91万t),但远远高于大豆秸秆资源的年均产量(732.94万t)。这主要与播种面积有关,同时还受到不同作物草谷比的影响。在黄淮海平原旱作区通常采用冬小麦-夏玉米轮作,而东北平原旱作区则以单季春玉米的种植为主^[43-44]。在旱作区小麦种植面积要明显低于玉米。在该区域,冬小麦平均每年秸秆资源量约7 705.22 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,而玉米则为6 809.63 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。大豆种植面积远低于玉米与小麦,且秸秆年均单产不超过2 400 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,秸秆资源总量相对较少。草谷比是影响秸秆资源统计结果的另

外一个重要因素^[45],因采用不同草谷比,统计结果差异较大。柴如山等^[11]统计我国2013—2017年玉米作物秸秆年均产量为 $4.0\times 10^8\ \text{t}$,而李廷亮等^[14]的统计结果表明2014—2018年我国玉米秸秆年均产量仅为 $2.9\times 10^8\ \text{t}$ 。本文参照何萍等^[35]基于近十年全国范围内田间定位试验所建立的数据库查得小麦、玉米和大豆的草谷比分别为1.17、1.04和1.17,数据比较接近当前生产现状。

此外,因种植制度存在差异,黄淮海平原旱作区相比于东北平原旱作区秸秆资源总量较高^[39]。小麦秸秆主要分布在黄淮海平原,其播种面积高达 $1\ 215.34\times 10^4\ \text{hm}^2$,占旱作区小麦播种总面积的99.28%。玉米在黄淮海平原和东北平原均有分布。由于玉米在黄淮海平原的播种面积和平均单产均略低于东北平原,其在黄淮海平原秸秆资源总量要低于东北平原。黄淮海平原玉米秸秆资源单产约为 $6\ 185.01\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,而在东北平原秸秆资源平均则为 $7\ 463.55\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。在旱作区大豆播种面积较小,且产量较低,对区域秸秆资源分布特征影响不大。

3.2 东北-黄淮海平原旱作区秸秆养分资源分布特征与影响因素

在该区域3种主要作物播种面积和产量均呈现玉米>小麦>大豆。秸秆养分资源总量中有54.31%

来自玉米秸秆, 42.66%来自小麦秸秆, 大豆秸秆养分资源贡献率仅占 2.84%。在不同区域秸秆氮、磷、钾的储量均呈现 $K_2O > N > P_2O_5$ 变化特征, 秸秆钾的储量较大, 尤其在小麦秸秆中的含量要明显高于其余作物。这与宋大利^[16]和柴如山^[46]等研究结果一致。

受到种植模式的影响, 黄淮海平原秸秆与养分资源总量要明显高于东北平原, 黄淮海平原秸秆养分资源占该区域资源总量的 69.86%。尽管东北平原春玉米种植面积较大, 但单季种植并不能显著影响秸秆养分资源的区域分布特征。由于小麦和玉米秸秆氮、磷、钾养分含量的差异, 及其在东北、黄淮海两大区域种植制度的不同, 两大区域秸秆养分资源氮、磷、钾比例组成明显有各自特征^[4]。

3.3 东北-黄淮海平原旱作区秸秆还田替代化肥潜力与影响因素

依据宋大利等^[16]不同作物的推荐施肥量统计显示, 该区域三大作物年际施肥为 N 647.27 万 t、 P_2O_5 285.72 万 t 和 K_2O 329.62 万 t, 总量约为 1 262.61 万 t。东北-黄淮海平原旱作区秸秆氮、磷、钾养分资源约为 678.60 万 t, 约占该区域推荐施肥总量的 53.75%^[16]。秸秆还田模式下替代化肥潜力较大, 最高可替代氮肥 25.92%、磷肥 23.49%及钾肥 134.62%。

秸秆直接还田替代化肥潜力主要受到秸秆养分含量、当季释放率以及种植模式的影响^[46-47]。小麦秸秆中钾的含量明显高于玉米和大豆, 且主要种植于黄淮海平原。这必然会对该区域秸秆还田替代化肥潜力产生较大影响, 秸秆还田可基本实现钾肥的全量替代。秸秆养分释放是一个缓慢过程, 可长达数年, 但以当季释放为主^[48-50]。结合相关文献^[16]分析发现, 3 种作物秸秆养分氮、磷、钾当季释放率分别为 50.11% ~ 54.04% (N)、54.41% ~ 73.03% (P_2O_5) 和 84.30% ~ 89.05% (K_2O)。在不同作物秸秆中, 养分当季释放率总体呈现 $K_2O > P_2O_5 > N$ ^[43-46]。不同作物秸秆氮、钾释放率差异较小; 玉米秸秆磷的释放率约为 73.03%, 明显高于小麦 (62.01%) 和大豆秸秆 (54.41%)。

秸秆直接还田模式下养分释放将主要作用于下一季 (或下一年度) 作物^[51]。因此, 秸秆养分替代化肥潜力大小与种植模式有关^[11]。以黄淮海平原为例, 以冬小麦-玉米轮作为主, 或采用冬小麦-大豆的种植模式。小麦-玉米种植体系下替代化肥量要明显高于小麦-大豆轮作体系 (表 2), 但替代化肥率则表现出相反的规律。参照宋大利等推荐的施肥量^[16], 秸秆双季还田下小麦-玉米种植体系替代化肥率为 N

8.26%、 P_2O_5 9.84%和 K_2O 80.76%, 而小麦-大豆体系替代化肥率则为 N 14.63%、 P_2O_5 16.39%和 K_2O 138.85%。在两种种植体系下, 这种差异以钾肥替代率表现得最为明显。

在东北平原春玉米或大豆连作的种植模式下, 秸秆还田替代化肥率分别为 N 13.83%、 P_2O_5 19.87%、 K_2O 100.97% (春玉米连作) 和 N 14.4%、 P_2O_5 12.65%、 K_2O 33.46% (大豆连作)。尽管两种连作模式下, 秸秆还田替代化肥率明显不同, 但因化肥施用量的不同, 玉米连作模式下替代化肥总量要明显高于大豆连作。在该区域玉米推荐施肥量为 N 213.70、 P_2O_5 83.00 和 K_2O 103.10 $kg \cdot hm^{-2}$, 肥料用量要显著高于大豆种植 (N 75.5、 P_2O_5 74.0 和 K_2O 59.9 $kg \cdot hm^{-2}$)^[16]。总体而言, 在东北-黄淮海平原旱作区秸秆还田模式下化肥钾替代率较高, 尤其在小麦-玉米轮作和玉米连作体系下可基本实现化肥钾的全量替代^[15]。

尽管秸秆还田可实现化肥不同程度的替代, 但这与传统化肥的施用有较大差别。秸秆养分释放是一个长期过程, 受多种因素影响^[47]。无机氮是作物需求的大量元素, 也是调节土壤碳/氮比促进秸秆腐解的重要因子^[52-53]。秸秆还田模式下, 作物苗期因秸秆腐解对无机氮需求量较大, 应适当提高氮素的基肥用量, 但随着秸秆氮的释放将足以保障作物生长需求实现部分养分的有机替代^[54-55]。部分地区土壤磷素总含量虽较高, 但有效性较低, 严重影响作物对磷素的吸收利用。秸秆腐解过程可通过磷素释放以及多种机制活化土壤磷^[56]。与氮养分和磷养分相比, 秸秆当中钾养分含量较高, 且当季释放率可以达到 85%左右^[39]。秸秆还田可以替代一部分化学钾肥的施用, 有助于减缓土壤钾库耗竭速度^[57-58]。

4 结论

东北-黄淮海平原旱作区以小麦、玉米和大豆的种植为主, 累计占该区域播种面积的 81.49%。2015—2018 年旱作区小麦、玉米和大豆秸秆年均产量分别为 9 432.24 万 t、13 485.91 万 t 和 732.94 万 t, 分别占该区域及全国 3 种作物秸秆资源量的 39.88%、57.02%、3.10% (东北-黄淮海旱作区) 和 70.96%、51.63%、42.34% (全国)。

东北-黄淮海平原旱作区三大作物秸秆养分资源总量约 678.60 万 t, 包括 167.75 万 t (N)、67.12 万 t (P_2O_5) 和 443.73 万 t (K_2O)。其中, 华北平原旱作区秸秆养分资源总量约 467.28 万 t, 占旱作区的 68.86%。

东北-黄淮海平原旱作区小麦、玉米、大豆秸秆养分资源量占该区域三大作物推荐施肥总量的 53.75%。秸秆还田模式下,小麦、玉米和大豆秸秆当季替代化肥潜力分别为 188.88、138.71 和 38.51 kg·hm⁻²。

参考文献:

- [1] 杨帆,董燕,徐明岗,等.南方地区秸秆还田对土壤综合肥力和作物产量的影响[J].应用生态学报,2012,23(11):3040-3044.
- [2] 刘文国,赵强,杨艳美.秸秆还田处理对土壤理化性状及玉米产量的影响[J].中国农学通报,2018,34(27):111-117.
- [3] 刘玲玲,刘婷,狄霖,等.秸秆全量还田对水稻生长及土壤理化性质的影响[J].扬州大学学报(农业与生命科学版),2018,39(3):81-85.
- [4] 高祥照,马文奇,马常宝,等.中国作物秸秆资源利用现状分析[J].华中农业大学学报,2002,21(3):242-247.
- [5] 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.
- [6] 靳海洋,蒋向,杨习文,等.作物秸秆直接还田思考与秸秆多途径利用商榷[J].中国农学通报,2016,32(9):142-147.
- [7] 吕开宇,仇焕广,白军飞,等.中国玉米秸秆直接还田的现状与发展[J].中国人口·资源与环境,2013,23(3):171-176.
- [8] 包建财,郁继华,冯致,等.西部七省区作物秸秆资源分布及利用现状[J].应用生态学报,2014,25(1):181-187.
- [9] 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.
- [10] 方放,王飞,石祖梁,等.京津冀秸秆养分资源及秸秆焚烧气体污染物排放定量估算[J].农业工程学报,2017,33(3):1-6.
- [11] 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.
- [12] 柴如山,安之冬,马超,等.我国主要粮食作物秸秆钾养分资源量及还田替代钾肥潜力[J].植物营养与肥料学报,2020,26(2):201-211.
- [13] 毕于运,高春雨,王亚静,等.中国秸秆资源数量估算[J].农业工程学报,2009,25(12):211-217.
- [14] 李廷亮,王宇峰,王嘉豪,等.我国主要粮食作物秸秆还田养分资源量及其对小麦化肥减施的启示[J].中国农业科学,2020,53(23):4835-4854.
- [15] 李一,王秋兵.我国秸秆资源养分还田利用潜力及技术分析[J].中国土壤与肥料,2020(1):119-126.
- [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.
- [17] 李胜男,纪雄辉,邓凯,等.区域秸秆资源分布及全量化利用潜力分析[J].农业工程学报,2020,36(12):221-228.
- [18] 姚成胜,滕毅,黄琳.中国粮食安全评价指标体系构建及实证分析[J].农业工程学报,2015,31(4):1-10.
- [19] WAN W, LIU Z, LI K J, et al. Drought monitoring of the maize planting areas in Northeast and North China Plain[J]. Agric Water Manag, 2021, 245: 106636.
- [20] 赵亚丽,薛志伟,郭海斌,等.耕作方式与秸秆还田对冬小麦-夏玉米耗水特性和水分利用效率的影响[J].中国农业科学,2014,47(17):3359-3371.
- [21] 薛彦东,辛景树,任意,等.华北小麦玉米轮作区耕地地力等级划分及特征[J].农业资源与环境学报,2015,32(6):530-536.
- [22] 杨永辉,武继承,张洁梅,等.耕作方式对土壤水分入渗、有机碳含量及土壤结构的影响[J].中国生态农业学报,2017,25(2):258-266.
- [23] 张向前,杨文飞,徐云姬.中国主要耕作方式对旱地土壤结构及养分和微生态环境影响的研究综述[J].生态环境学报,2019,28(12):2464-2472.
- [24] 何萍,徐新朋,周卫,等.基于产量反应和农学效率的作物推荐施肥方法[M].北京:科学出版社,2018.
- [25] 孙忠祥,李勇,赵云泽,等.旱作区土壤有机碳密度空间分布特征与其驱动力分析[J].农业机械学报,2019,50(1):255-262.
- [26] 宋强,夏可,杨斌,等.旱作区典型土类穿透阻力分布特征及耕层厚度确定[J].水土保持学报,2021,35(3):369-377.
- [27] 黑龙江省统计局.国家统计局黑龙江调查总队.黑龙江统计年鉴 2015 [M].北京:中国统计出版社,2015.
- [28] 吉林省统计局.国家统计局吉林调查总队.吉林统计年鉴 2016 [M].北京:中国统计出版社,2016.
- [29] 辽宁省统计局.辽宁统计年鉴(2015—2018) [M].北京:中国统计出版社,2016-2019.
- [30] 山东省统计局.山东统计年鉴(2015-2018)[M].北京:中国统计出版社,2016-2019.
- [31] 北京市统计局,国家统计局北京调查总队.北京区域统计年鉴(2015-2018)[M].北京:中国统计出版社,2016-2019.
- [32] 天津市统计局.国家统计局天津调查总队.天津统计年鉴(2015-2018)[M].北京:中国统计出版社,2016-2019.
- [33] 河北省统计局.国家统计局河北调查总队.河北统计年鉴(2015-2018)[M].北京:中国统计出版社,2016-2019.
- [34] 河南省统计局.国家统计局河南调查总队.河南统计年鉴(2015-2018)总第 33 期[M].北京:中国统计出版社,2016-2019.
- [35] 安徽省统计局.国家统计局安徽调查总队.安徽统计年鉴(2015-2018) [M].北京:中国统计出版社,2016-2019.
- [36] 青格尔,于晓芳,高聚林,等.腐解菌剂对玉米秸秆降解效果的研究[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2016,44(12):107-116.
- [37] 黄婷苗,郑险峰,王朝辉.还田玉米秸秆氮释放对关中黄土供氮和冬小麦氮吸收的影响[J].中国农业科学,2015,48(14):2785-2795.
- [38] LI J F, LU J W, LI X K, et al. Dynamics of potassium release and adsorption on rice straw residue[J]. PLoS One,

- 2014, 9(2): e90440.
- [39] 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.
- [40] 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 Res*, 2017, 10(3): 949-957.
- [41] YIN H J, ZHAO W Q, LI T, et al. Balancing straw returning and chemical fertilizers in China: role of straw nutrient resources[J]. *Renew Sustain Energy Rev*, 2018, 81: 2695-2702.
- [42] 国家统计局. 金砖国家联合统计手册(2015-2018)[M]. 北京: 中国统计出版社, 2016-2019.
- [43] 李新华, 董红云, 朱振林, 等. 秸秆还田方式对黄淮海区域小麦-玉米轮作制农田土壤周年温室气体排放的影响[J]. 土壤与作物, 2019, 8(3): 280-287.
- [44] 仇少君, 赵士诚, 侯云鹏, 等. 东北三省典型春玉米种植区土壤剖面碳库变化特征[J]. 植物营养与肥料学报, 2018, 24(6): 1528-1538.
- [45] 柴如山, 徐悦, 程启鹏, 等. 安徽省主要作物秸秆养分资源量及还田利用潜力[J]. 中国农业科学, 2021, 54(1): 95-109.
- [46] 李昌明, 王晓玥, 孙波. 不同气候和土壤条件下秸秆腐解过程中养分的释放特征及其影响因素[J]. 土壤学报, 2017, 54(5): 1206-1217.
- [47] 戴志刚, 鲁剑巍, 李小坤, 等. 不同作物还田秸秆的养分释放特征试验[J]. 农业工程学报, 2010, 26(6): 272-276.
- [48] SINGH S, GHOSHAL N, SINGH K P. Variations in soil microbial biomass and crop roots due to differing resource quality inputs in a tropical dryland agroecosystem[J]. *Soil Biol Biochem*, 2007, 39(1): 76-86.
- [49] 匡恩俊, 迟凤琴, 宿庆瑞, 等. 3 种腐熟剂促进玉米秸秆快速腐解特征[J]. 农业资源与环境学报, 2014, 31(5): 432-436.
- [50] 曾莉, 张鑫, 张水清, 等. 不同施氮量下潮土中小麦秸秆腐解特性及其养分释放和结构变化特征[J]. 植物营养与肥料学报, 2020, 26(9): 1565-1577.
- [51] 刘禹池, 曾祥忠, 冯文强, 等. 稻-油轮作下长期秸秆还田与施肥对作物产量和土壤理化性状的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(6): 1450-1459.
- [52] 陈兴丽, 周建斌, 刘建亮, 等. 不同施肥处理对玉米秸秆碳氮比及其矿化特性的影响[J]. 应用生态学报, 2009, 20(2): 314-319.
- [53] 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.
- [54] 顾敏京, 左文刚, 严漪云, 等. 氮肥管理对秸秆全量还田双季晚稻土壤固定态铵的影响[J]. 扬州大学学报(农业与生命科学版), 2017, 38(2): 69-74, 81.
- [55] 严奉君, 孙永健, 马均, 等. 秸秆覆盖与氮肥运筹对杂交稻根系生长及氮素利用的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(1): 23-35.
- [56] 蒋炳伸, 沈健林, 王娟, 等. 秸秆还田稻田土壤生物有效性磷及水稻磷吸收[J]. 水土保持学报, 2020, 34(6): 309-317.
- [57] 张磊, 张维乐, 鲁剑巍, 等. 秸秆还田条件下不同供钾能力土壤水稻、油菜、小麦钾肥减量研究[J]. 中国农业科学, 2017, 50(19): 3745-3756.
- [58] 刘秋霞, 戴志刚, 鲁剑巍, 等. 湖北省不同稻作区域秸秆还田替代钾肥效果[J]. 中国农业科学, 2015, 48(8): 1548-1557.