

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.

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

张 国^{1,2}, 逯 非², 赵 红³, 杨广斌⁴, 王效科^{2*}, 欧阳志云²

(1. 贵州师范大学喀斯特研究院, 贵阳 550001; 2. 中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085; 3. 济南市环境研究院, 济南 250100; 4. 贵州师范大学地理与环境科学学院, 贵阳 550001)

摘 要: 为了了解我国秸秆利用现状, 实施了全国性问卷调查, 并结合国家统计数据进行分析, 研究结果表明: 2011 年我国 9 种主要作物(水稻、小麦、玉米、高粱、马铃薯、油菜、向日葵、棉花和甘蔗)的秸秆总产量为 778 Mt, 其中焚烧 27%、还田 38%、燃料 17%、饲料 14%、其他用途 4%; 山东、河北和河南的还田量之和占全国的一半; 还田方式主要是机械粉碎还田, 还田量占全国全部还田量的 67%。农户支持还田的原因是改善土壤质量和提高作物产量, 反对原因是机械成本增加、病虫害加重和影响下季作物种植。因此, 应因地制宜发展不同的秸秆资源化利用模式和还田方式, 加强技术研发、宣传培训和政策扶持等。

关键词: 覆盖还田; 机械粉碎还田; 秸秆焚烧; 秸秆还田; 燃料; 饲料

中图分类号: X712 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2017)05-0981-08 doi:10.11654/jaes.2016-1505

Residue usage and farmers' recognition and attitude toward residue retention in China's croplands

ZHANG Guo^{1,2}, LU Fei², ZHAO Hong³, YANG Guang-bin⁴, WANG Xiao-ke^{2*}, OUYANG Zhi-yun²

(1. Institute of Karst, Guizhou Normal University, Guiyang 550001, China; 2. State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 3. Jinan Environmental Research Institute, Jinan 250100, China; 4. School of Geography and Environmental Science, Guizhou Normal University, Guiyang 550001, China)

Abstract: To clarify the situation of crop residue usage in China, we carried out a farmer survey across the country. Based on the survey and national statistical data, our results indicated that the national total residue product of nine major crops (rice, wheat, corn, sorghum, potato, cotton, rapeseed, sunflower, and sugarcane) was 778 Mt in 2011. On a national scale, the percentages of residue burning, retention, fuel, feed, and other usage were 27%, 38%, 17%, 14%, and 4%, respectively. The total amount of residue retention in Shandong, Henan, and Hebei Provinces accounted for approximately half of the national residue retention, 67% of which was attributed to crushing return. As for farmers' recognition of, and attitude toward, residue retention, the supporters mainly addressed improvement of soil quality and crop yield, while the objectors complained of increasing economic cost, crop disease exacerbation, and lower sowing quality of the next crop. To avoid resource waste and environmental pollution, differentiated approaches toward residue usage and retention should be conducted, accompanied by measurements of publicity and training, technology development, and policy support across China.

Keywords: residue mulching; crushing return; residue burning; residue retention; fuel; feed

收稿日期: 2016-11-25

作者简介: 张 国(1974—), 男, 山东泰安人, 博士, 讲师, 从事全球气候变化、碳氮循环和土壤生态学研究。E-mail: zhangguo2007@cau.edu.cn

* 通信作者: 王效科 E-mail: wangxk@rcees.ac.cn

基金项目: 中国科学院科技服务网络计划项目(STS 计划); 国家自然科学基金项目(41361091); 中国科学院青年创新促进会资助项目

Project supported: The Science and Technology Service Network Initiative of CAS(STS-Network); The National Natural Science Foundation of China (41361091); Youth Innovation Promotion Association of CAS

农作物秸秆作为农业生产的生物质副产品,具有巨大的潜在利用价值。上世纪70年代前,我国农作物秸秆产量比较少,主要用作生活燃料和饲料^[1]。随着现代农业的发展、生活水平的提高和化石能源的普及,农业生产力的提高促进了秸秆产量的增加,同时秸秆作为燃料和饲料的比例也在下降^[1-2]。为了快速处理和节约成本,农户习惯于将秸秆直接焚烧或弃置在田间地头^[3],但是秸秆焚烧会引起土壤有机质和营养成分的下降^[4]。2000—2003年,我国秸秆年产量600 Mt,其中140 Mt被焚烧^[5]。这些焚烧的秸秆排放了约7.7 Tg CO₂ eq·a⁻¹的CH₄和2.2 Tg CO₂ eq·a⁻¹的N₂O,同时排放了3.6 Mt大气污染物(其中颗粒物1.0 Mt)^[5-6]。秸秆的焚烧、弃置不仅浪费了生物质资源,而且加重了气候变暖 and 环境污染。

秸秆作为生物质资源,可以用于还田、燃料、饲料或其他用途(如工业原料和食用菌基料等)^[7]。秸秆还田包括多种方式,如机械粉碎还田、覆盖还田和留高茬还田等^[8]。秸秆还田结合施用化肥,能够提高土壤养分含量^[9],促进土壤固碳和改良土壤结构^[10]。秸秆就地还田还能减少外运产生的收集、运输和储存的成本^[11]。秸秆直接燃烧可作为农村生活能源,秸秆的燃烧值为标准煤的一半并且含硫量低于煤,因此是一种清洁的可再生能源^[12]。我国现代畜牧业产生了巨大的饲料需求,原因是动物产品需求增加和草地面积缩小退化,而秸秆作为重要的粗饲料可以弥补这个需求^[13-14]。因此,通过积极推广还田、燃料和饲料等综合利用方式,可以减少焚烧和废弃秸秆引起的环境污染和温室气体排放。

国家环境保护总局(现环保部)^[15]和农业部^[16]分别于1999年和2007年颁布了关于秸秆禁烧和综合利用的政策,促进了秸秆综合利用,减少了生物质资源浪费。政策的实施伴随着现代农业的发展影响了我国秸秆利用方式,因此有必要认识当前我国的秸秆利用现状。本研究通过全国性的农户问卷调查的方式,评估我国的秸秆利用现状,了解农户主要的还田方式,并探索农户对秸秆还田的态度及原因。这些研究可以为制定新的政策和措施提供帮助,有利于促进我国秸秆综合利用和农业生产的可持续发展。

1 材料与方法

1.1 数据来源

根据气候、种植制度和耕种方式,我国大陆地区农田可以分为4个农业区域^[17](图1):东北区(辽宁省、吉林省、黑龙江省)、华北区(北京市、天津市、河北

省、山西省、内蒙古自治区、山东省、河南省)、西北区(陕西省、甘肃省、青海省、宁夏回族自治区、新疆维吾尔自治区)和南方区(上海市、江苏省、浙江省、安徽省、福建省、江西省、湖北省、湖南省、广东省、广西壮族自治区、海南省、重庆市、四川省、贵州省、云南省、西藏自治区)。2012年我们采用随机问卷方式进行了全国范围的实地调查,调查对象是具有种植经验的农户,每省份随机选择2~5个县,每个县至少选择一个村,每村随机选择5个有经验的农户进行调查^[18-19]。调查内容是2011年作物的农田管理措施,涉及秸秆内容包括作物经济产量、秸秆产量、秸秆利用比例、还田方式和农户对还田的态度及原因等。此次调查共获得1126份有效问卷,分布在全国152个县域(图1),水稻(387份)、小麦(304份)和玉米(346份)的问卷数占有效问卷的92%。本文中各省作物播种面积和产量来自《中国农业年鉴2012》^[20]。

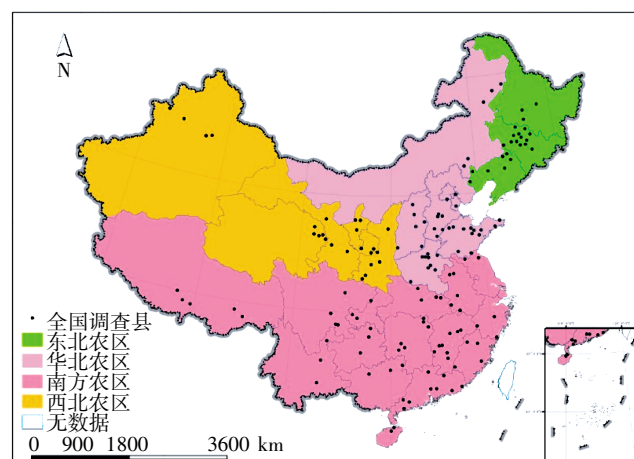


图1 全国调查县域分布

Figure 1 Map of the study area showing the distribution of counties surveyed in China

1.2 问卷有效性

全国实地调查经历了4个阶段:预调查、调查员培训、正式调查和数据输入分析^[18-19]。为了保证调查的有效性,我们在设计调查问卷时,设计了三角互证问题(Triangulation questions),包括作物产量、秸秆还田类型和农户对还田的态度等。有效问卷指填写了秸秆处理方式比例且加和为100%的问卷。我们将各省作物的调查产量和统计年鉴中相应产量进行了 t -检验,结果表明没有显著性差异。

1.3 秸秆利用方式和还田方式

本研究的目标作物是水稻、小麦、玉米、高粱、马

铃薯、油菜、向日葵、棉花和甘蔗等9种作物。这些作物代表了我国主要的粮食和经济作物,其他作物也有秸秆产量,但用途比较单一,具体用途可参考《中国有机肥料养分志》^[21]。我国作物在收获后,秸秆一般利用方式包括焚烧、还田、燃料、饲料和其他用途(如秸秆被农户出售,后被用来生产生物质能源、造纸或育苗等)。本研究调查到农户这一层次,无法对生产生物质能源等其他用途做出详细分析,因此本研究将秸秆利用只分为这5种方式。对于某个省份来说,不同秸秆用途比例($U_k, \%$)通过公式(1)计算得到,其值介于0~100之间。

$$U_k = \sum_i \frac{\left(\frac{\sum_n U_{ikn}}{N_i} \times A_i \right)}{\sum_n A_i} \quad (1)$$

式中: i 指9种作物之一; U_{ikn} 是被调查省份第 n 个农户的第 k 种秸秆利用方式面积比例, $\%$; k 指还田、焚烧、燃料、饲料或其他利用方式; N_i 为调查种植作物 i 的农户总数, U_{ikn} 和 N_i 通过调查获得; A_i 为该省作物 i 的播种面积,数据取自《中国农业年鉴2012》^[20]。

根据上面的计算,该省的不同利用方式的秸秆量(Q_k, Mt)通过公式(2)计算:

$$Q_k = U_k \times \sum_i (Y_i \times R_i \times F_i) \quad (2)$$

式中: Y_i 为该省作物 i 的总产量, 10^4 t ,数据取自《中国农业年鉴2012》^[20]; R_i 为作物 i 的草谷比,取值参考毕于运等^[22]和《中国生物质资源可获得性评价》^[23]; F_i 为作物 i 的干物质含量, $\%$,数据取自IPCC指南^[24]。

根据我国常见的还田方式,将其分为留高茬还田、粉碎翻压还田、覆盖还田、堆沤还田和腐熟剂处理还田^[25]。本研究的秸秆利用方式包括饲料,因此还田方式中没有包括过腹还田。

1.4 统计分析

IPCC建议采用95%置信区间(95% confidential interval)反映研究指标的不确定性^[26]。根据IPCC的不确定性传递原则,我们计算了我国各省的不同利用方式下秸秆量的不确定性。

2 结果与分析

2.1 秸秆利用方式

2011年全国9种作物秸秆总产量为778 Mt,产量大于50 Mt的省份包括河南(84 Mt)、山东(75 Mt)、黑龙江(69 Mt)、河北(56 Mt)和吉林(52 Mt),这5个

省份的秸秆量占全国的43%(表1)。4个农业区的产量大小顺序是:华北区(282 Mt)>南方区(261 Mt)>东北区(152 Mt)>西北区(84 Mt)。用于焚烧、还田、燃料、饲料和其他用途的秸秆比例(秸秆量)分别是27.4%(200 Mt)、37.9%(295 Mt)、17.0%(137 Mt)、13.8%(113 Mt)和4.0%(34 Mt)。秸秆焚烧比例占1/3~2/3的省份有14个,其中11个位于南方区。还田量最多的省份为山东、河南和河北,三者还田总和(155 Mt)占全国还田量的54%;还田比例占一半以上的省份包括北京(89%)、河北(81%)、山东(78%)、河南(61%)、重庆(58%)和山西(56%)。秸秆作燃料超过10 Mt的省份包括东北三省和内蒙古,其用量之和占全国的46%。新疆、吉林和河南作饲料的秸秆量超过10 Mt,西藏、新疆、云南、甘肃和贵州各省秸秆作饲料的比例超过了1/3。

秸秆焚烧的比例在东北区和南方区占到1/3左右,而在华北区和西北区只有14%(图2);华北区和南方区秸秆还田比例最高,分别是62%和35%,东北区最低,只有9%;东北区秸秆作燃料比例占35%,为最高,次之是西北区,占30%;秸秆作饲料比例最高的区域是西北区和东北区,分别占24%和18%。

2.2 秸秆还田方式

调查结果表明,2011年4个农业区秸秆主要的还田方式都是机械粉碎还田,粉碎还田量占还田总量的67%(图3)。华北区粉碎还田量甚至占该区还田量的82%,占秸秆产量的一半;覆盖还田方式主要在华北区和南方区采用,分别占这两个区还田量的15%和28%;留茬还田在4个农业区都有农户采用,还田量分别占4个区还田量的27%(东北区)、16%(南方区)、13%(西北区)和2%(华北区);堆沤和腐熟还田主要分布于西北区和南方区,这两种方式之和分别占两个区的24%和18%。

2.3 农户对秸秆还田的态度

华北区、东北区和南方区中,支持秸秆还田的农户是持反对态度农户的4倍以上,支持率最高的是华北区(表2),这3个农业区反对秸秆还田比例也都低于20%。西北区的支持农户只占43%,反对农户比例(46%)超过支持农户,这和该区干旱的气候条件有关。南方区和东北区持无所谓态度的农户比例高于华北区和西北区。

调查的农户支持秸秆还田的理由,主要在于秸秆还田能增加土壤养分和替代部分化肥,提高农田土壤质量和作物产量,同时保护环境和减少秸秆外运等成

表 1 2011 年我国农作物秸秆产量和不同利用方式的比例
Table 1 Residue product and percentages of residue usages in China in 2011

省份	秸秆产量/Mt	秸秆用途/%				
		焚烧	还田	燃料	饲料	其他
辽宁	31.0	30.0±8.6	11.2±6.3	34.0±7.7	19.0±6.7	5.8±5.1
吉林	52.0	33.5±13.2	4.0±2.1	28.3±9.3	28.0±11.7	6.1±7.5
黑龙江	68.7	33.2±12.4	10.2±8.3	38.5±10.8	11.8±5.1	6.3±8.4
北京	2.2	3.3±3.1	88.6±9.2	5.3±3.1	2.8±1.6	—
天津	3.3	18.1±9.2	29.1±12.0	30.7±11.6	19.8±5.8	2.2±2.9
河北	56.3	5.8±5.1	80.8±10.4	9.0±6.6	4.4±3.2	—
山西	21.2	26.3±13.4	55.5±16.6	4.6±3.4	13.6±7.5	—
内蒙古	39.6	44.5±15.1	10.7±8.6	25.5±11.4	19.2±9.4	—
山东	75.4	4.1±4.6	77.8±9.0	11.9±6.5	2.2±2.6	4.0±4.5
河南	84.2	11.7±8.2	60.8±10.8	3.3±3.8	13.0±7.4	11.3±4.4
陕西	18.9	5.2±3.7	33.2±9.4	45.7±10.5	6.7±4.6	9.2±6.2
甘肃	14.5	16.6±6.4	13.5±6.8	19.5±9.9	40.8±13.3	9.6±11.1
青海	1.6	25.4±25.0	0.8±2.4	45.6±26.3	22.2±18.3	6.1±7.2
宁夏	5.2	41.8±28.7	30.0±26.5	2.3±3.4	16.4±9.1	9.5±8.4
新疆	43.4	14.1±8.2	19.3±15.7	23.0±9.0	34.6±16.8	9.0±7.5
上海	1.0	38.6±15.6	47.2±15.5	—	14.2±9.9	—
江苏	34.2	60.6±7.9	26.8±7.8	0.7±1.1	11.2±3.3	—
浙江	5.8	38.6±15.6	47.2±15.5	—	14.2±9.9	—
安徽	38.0	47.3±11.8	23.6±11.1	17.5±11.7	11.3±8.9	0.2±0.5
福建	3.8	47.9±22.6	26.8±19.5	—	—	25.3±18.5
江西	15.0	18.9±8.6	40.0±9.0	6.3±4.2	31.7±11.6	3.2±2.6
湖北	29.4	41.5±16.1	28.7±13.8	24.0±14.1	5.1±4.0	0.7±1.5
湖南	25.7	38.5±14.4	43.1±10.2	15.1±11.7	3.2±3.2	0.1±0.1
广东	9.9	8.4±0.1	38.0±43.8	39.2±45.2	13.1±32	1.3±3.2
广西	19.1	35.0±17.8	45.3±16.6	1.4±2.9	10.1±12.8	8.2±12.8
海南	1.5	53.6±15.6	29.1±13.5	13.7±10.9	2.7±2.1	1.0±1.2
重庆	10.1	35.7±23.7	58.0±26.9	2.6±6.1	3.3±7.6	0.3±0.8
四川	35.3	37.8±21.5	49.7±22.3	7.2±6.3	3.3±5.7	2.0±4.1
贵州	10.0	8.1±10.7	8.0±6.2	45.4±27.7	34.6±25.1	4.0±6.9
云南	21.2	17.4±24.6	22.0±18.3	15.1±25.6	45.5±16.0	—
西藏	0.5	24.5±15.8	0.8±1.3	—	74.7±16.4	—
全国	778.3	27.4±11.6	37.9±12.1	17.0±9.5	13.8±8.0	4.0±3.8

注:数值表示为平均值±95%置信区间;—表示未调查到。
Note: The values showed as mean±95% confidential interval. —represented no farmers surveyed.

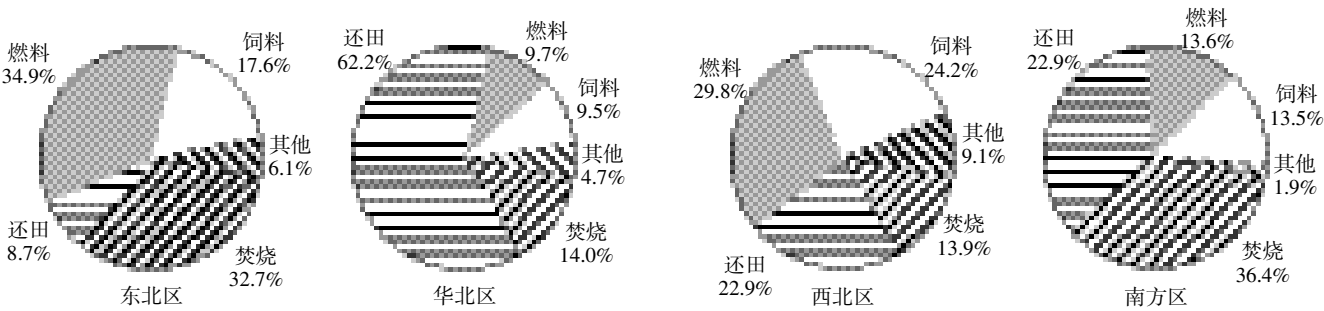


图 2 2011 年我国农作物秸秆不同用途的比例
Figure 2 Percentages of residue usages in China in 2011

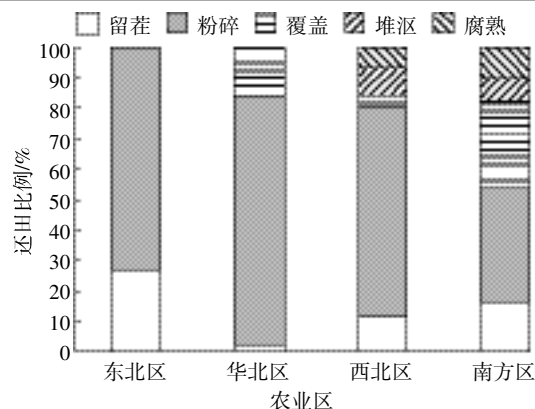


图 3 2011 年我国农作物秸秆不同还田方式的比例
Figure 3 Percentages of residue retention types in China 2011

本(表 3)。农户反对秸秆还田的原因主要包括秸秆可作为燃料和饲料使用,而且还田会增加机械操作成本,有时会加重作物病虫害。农户持无所谓态度,一般是因为当地环境条件限制了秸秆还田的实施(比如气候、地理和技术等),使其对还田技术缺乏了解。

3 讨论

我国秸秆利用方式在不同地区和年代存在着明显的差异。2011 年,全国农作物秸秆焚烧比例从 2000 年的 21%^[1]增加到 27%(表 1)。东北三省及内蒙古、南方区江苏、安徽、湖北、湖南等地秸秆焚烧比例达到甚至超过了 1/3。东北区秸秆焚烧严重是因为秋收后地温低,秸秆还田不易腐烂^[27],而南方是因为夏收茬口紧、上茬还田影响下茬种植,而且冬季无需采暖^[28-29]。秸秆产量的增加和禁烧措施促进了秸秆资源化利用,如河北的还田比例从 2006 年的 41%^[30]增加到 2011 年的 81%(表 1)。辽宁省辽中县秸秆还田比例(14%)稍高于全省平均值(11%),但是焚烧比例(15%)明显低于全省平均值(30%),原因在于辽中县是全国畜禽养殖基地,较多秸秆被作为饲料,减少了田间焚烧^[31]。浙江省秸秆焚烧比例从 2011 年的 39%下降到 2013 年

表 2 我国农户对秸秆还田的不同态度			
Table 2 Farmers' attitudes to residue retention in China			
区域	支持	反对	无所谓
东北区	64%(50)	12%(9)	24%(19)
华北区	71%(148)	17%(35)	12%(26)
西北区	43%(92)	46%(99)	12%(25)
南方区	52%(146)	12%(34)	36%(103)
全国	55%(436)	23%(177)	22%(173)

注:数值表示为百分比(户数)。

的 22%^[32],而还田比例从 47%增加到 61%,反映了秸秆处理方式由焚烧向还田转变。其他一些研究表明,黑龙江^[27]、河南^[33]的秸秆利用比例和西北区^[34]的焚烧比例等,与本研究的结果基本一致。这些研究表明,我国秸秆资源化具有很大的潜力,但是资源化推广需要考虑不同地区间气候、地理和经济等差异。

我国农业土壤曾经由于有机物投入缺乏,30%~50%有机碳损失^[35-36]。近 30 年来东北区过度种植和不注意培肥土壤,也导致黑土有机碳含量急剧下降^[37],而在华北地区,秸秆还田显著增加了农田土壤有机碳含量^[38],因此我国农田收获秸秆应当优先考虑还田以培肥土壤。在秸秆资源充足或条件不适于还田地区,秸秆可以作为能源、饲料和工业原料。本研究表明我国作为生活燃料的秸秆占总产量的 17%,但由于传统的直燃效率比较低(最高仅有 12%~15%)^[39],秸秆能源化需要发展新型技术如制造沼气、固化成型、热解气化、直燃发电等^[40]。我国秸秆作为饲料的比例为 14%,其中西北区的秸秆饲料比例占该区秸秆产量的 1/4。秸秆饲喂前需进行物理、化学或生物学处理,提高适口性和消化率,只有这样才能促进秸秆饲料化,有利于我国“节粮型”畜牧业的发展^[14,41]。因此,我国秸秆资源化利用需要因地制宜,发展还田主导、种养结合和产业带动等各种综合利用的模式^[42]。

秸秆资源化能充分利用农作物的副产物,但资源化利用过程也会对环境产生一些影响。秸秆还田能培

表 3 我国农户对秸秆还田不同态度的原因
Table 3 Reasons for farmers' attitudes to residue retention in China

态度	原因	比例(户数)
支持	1.农艺因素:增肥土地,疏松改良土壤,保墒,提高产量,焚烧降低土壤质量	48%(209)
	2.环境因素:保持水土,减少焚烧污染和火灾,保护环境	17%(72)
	3.经济因素:节约化肥,省时省工,减少运输和储存费用	27%(117)
反对和无所谓	1.用途竞争:用作饲料、燃料等	22%(78)
	2.不利因素:增加成本,田间脏乱差,难分解影响耕地和播种,病虫害增加	28%(97)
	3.条件不具备:认识不深入,岭地多,气候不合适,没有合适的还田技术和机械	25%(86)

肥土壤和固碳减排,但也能增加稻田的甲烷排放^[43]。不同还田方式对固碳减排产生的影响不同^[44],如相比留高茬还田,覆盖还田可以更有效控制稻田温室气体排放强度^[45]。无论支持或反对秸秆还田的农户都没有考虑其对大气温室气体的影响,因此需要加强宣传,提高农户对这方面的认知(表3)。另外,秸秆堆沤还田排放 NH_3 和 N_2O ,导致氮素损失和大气变暖^[46]。秸秆能源化将一次性焚烧改成多次燃烧,作为可再生能源可以替代煤等化石能源,减少温室气体排放^[40]。秸秆饲料化处理可以满足畜牧业发展的要求,但是畜牧业扩张会增加温室气体排放和环境污染^[47]。总之,秸秆利用或还田方式的选择需要考虑它们对环境的这些影响,可以采用经验模型^[6]、生命周期^[48]和碳足迹^[49]等进行评估。

本文结果表明,相对于环境因素,农户更关注秸秆还田对农艺和经济的影响(表3)。Zhao等^[50]采用Meta方法分析发现全国秸秆还田实行9年后,谷物产量增加了7%,贫瘠缺水的农田增产效果更加明显;赵秀玲等^[51]综述了华北区的相关研究发现,合理的秸秆还田能改善土壤质量和增加作物产量;胡诚等^[52]研究认为,与不还田相比,秸秆还田能显著改良贫瘠的低产黄泥田,早晚稻秸秆还田结合腐熟剂比单施化肥增产24%。本研究中东北区农户支持还田比例占64%,说明黑土有机碳含量下降^[37]引起了农户对秸秆还田的重视,但该区低温导致秸秆分解缓慢,目前实际还田率只有9%(图2),说明适宜的还田技术在该区具有很大的推广潜力。梁尧等^[53]研究发现,与秸秆覆盖和无还田相比,东北黑土区采用深翻还田能够有效培肥土壤和实现玉米稳产、增产。我国西北区和南方区的还田支持率低于东北区(表2),原因可能在于西北区雨养农业占一定比例,缺水使秸秆无法充分分解,而南方区茬口紧和秸秆量巨大(一年两季甚至三季),导致还田支持率低。因此,只有通过开展不同环境条件下的田间试验,寻找适应我国不同地区气候、地理和种植制度的还田方式,秸秆还田才能得到快速发展。

4 结论

(1)根据气候、地理和种植制度的差异性,我国农作物生产应发展适应不同地区的秸秆资源利用化模式。

(2)我国农作物秸秆应优先考虑还田,培肥土壤以保证作物稳产、高产的可持续性。

(3)各农业区应因地制宜地发展秸秆还田技术,减少还田的负效应(如成本增加、病虫害加重和对下季作物播种的影响等),并帮助农户正确认识秸秆利用对环境的不利影响。

(4)在我国不适于秸秆还田地区或秸秆富余地区,应积极推广秸秆向新型能源和优质饲料的转化。

致谢:感谢中国农业大学资源与环境学院生态科学与工程系郑春燕、王轶和李钰飞等同学在调查期间的大力协助,同时感谢中国农业大学所有其他参与调查的同学。

参考文献:

- [1] 曹国良,张小曳,王丹,等. 秸秆露天焚烧排放的TSP等污染物清单[J]. 农业环境科学学报, 2005, 24(4): 800-804.
CAO Guo-liang, ZHANG Xiao-ye, WANG Dan, et al. Inventory of e-missions of pollutants from open burning crop residue[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2005, 24(4): 800-804.
- [2] Huang Y, Zhang W, Sun W J, et al. Net primary production of Chinese croplands from 1950 to 1999[J]. *Ecological Applications*, 2007, 17(3): 692-701.
- [3] Shi T T, Liu Y Q, Zhang L B, et al. Burning in agricultural landscapes: An emerging natural and human issue in China[J]. *Landscape Ecology*, 2014, 29(10): 1785-1798.
- [4] 田国成,王钰,孙路,等. 秸秆焚烧对土壤有机质和氮磷钾含量的影响[J]. 生态学报, 2016, 36(2): 387-393.
TIAN Guo-cheng, WANG Yu, SUN Lu, et al. Effects of wheat straw burning on content of soil organic matter, nitrogen, phosphorus, and potassium[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(2): 387-393.
- [5] 曹国良,张小曳,王亚强,等. 中国区域农田秸秆露天焚烧排放量的估算[J]. 科学通报, 2007, 52(15): 1826-1831.
CAO Guo-liang, ZHANG Xiao-ye, WANG Ya-qiang, et al. Estimation of emissions on open crops straw burning in China[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2007, 52(15): 1826-1831.
- [6] Lu F, Wang X K, Han B, et al. Modeling the greenhouse gas budget of straw returning in China[J]. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 2010, 1195(Suppl 1): E107-E130.
- [7] 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.
GAO Xiang-zhao, MA Wen-qi, MA Chao-bao, et al. Current situation analysis of utilization of resources of the crop straw in China[J]. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 2002, 21(3): 242-247.
- [8] 高旺盛. 中国保护性耕作制[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2011.
GAO Wang-sheng. Conservation farming system in China[M]. Beijing: China Agricultural University Press, 2011.
- [9] 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.
- [10] Lu F, Wang X K, Han B, et al. Soil carbon sequestrations by nitrogen

- fertilizer application, straw return and no-tillage in China's cropland[J]. *Global Change Biology*, 2009, 15(2):281-305.
- [11] 徐亚云, 田宜水, 赵立欣, 等. 不同农作物秸秆收储运模式成本和能耗比较[J]. 农业工程学报, 2014, 30(20):259-267.
- XU Ya-yun, TIAN Yi-shui, ZHAO Li-xin, et al. Comparison on cost and energy consumption with different straw's collection-store-transportation modes[J]. *Transactions of the CSAE*, 2014, 30(20):259-267.
- [12] 林而达, 牡丹德, 孙芳. 中国农村发展中的能源、环境及适应气候变化问题[M]. 北京:科学出版社, 2011.
- LIN Er-da, DU Dan-de, SUN Fang. Rural development and its energy, environment and climate change adaptation policy[M]. Beijing: Science Press, 2011.
- [13] 刘海燕, 邱玉朗, 魏炳栋, 等. 秸秆生物学处理研究进展[J]. 中国奶牛, 2012(4):22-25.
- LIU Hai-yan, QIU Yu-lang, WEI Bing-dong, et al. Research advance on biological treatment of straw stalk[J]. *China Dairy Cattle*, 2012(4):22-25.
- [14] 兰晓玲, 郭玉明, 贺俊林. 我国秸秆饲料化利用技术研究综述[J]. 安徽农学通报, 2013, 19(13):103-104.
- LAN Xiao-ling, GUO Yu-ming, HE Jun-lin. Research review on the technology of stalk utilization in China[J]. *Anhui Agricultural Science Bulletin*, 2013, 19(13):103-104.
- [15] 中华人民共和国环境保护总局. 秸秆禁烧和综合利用管理办法[EB/OL].[2016-11-21]. http://www.zhb.gov.cn/info/gw/huanfa/199904/t19990412_78683.htm.
- Ministry of Environmental Protection of China. Measures on prohibition of straw burning and comprehensive use of straw[EB/OL].[2016-11-21]. http://www.zhb.gov.cn/info/gw/huanfa/199904/t19990412_78683.htm.
- [16] 中华人民共和国农业部. 加强秸秆综合利用禁止秸秆焚烧[EB/OL].[2016-11-21]. http://www.moa.gov.cn/zwllm/tzgg/tz/200706/t20070614_834976.htm.
- Ministry of Agriculture of China. The promotion of the integral utilization of crop straws and prohibiting straw burning[EB/OL].[2016-11-21]. http://www.moa.gov.cn/zwllm/tzgg/tz/200706/t20070614_834976.htm.
- [17] 逯非, 王效科, 韩冰, 等. 中国农田施用化学氮肥的固碳潜力及其有效性评价[J]. 应用生态学报, 2008, 19(10):2239-2250.
- LU Fei, WANG Xiao-ke, HAN Bing, et al. Assessment on the availability of nitrogen fertilization in improving carbon sequestration potential of China's cropland soil[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(10):2239-2250.
- [18] Zhang G, Wang X K, Sun B F, et al. Status of mineral nitrogen fertilization and net mitigation potential of the state fertilization recommendation in Chinese cropland[J]. *Agricultural Systems*, 2016, 146:1-10.
- [19] 张国, 逯非, 黄志刚, 等. 我国主粮的化学农药用量及其温室气体排放估算[J]. 应用生态学报, 2016, 27(9):2875-2883.
- ZHANG Guo, LU Fei, HUANG Zhi-gang, et al. Estimations of application dosage and greenhouse gas emission of chemical pesticides in staple crops in China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, 27(9):2875-2883.
- [20] 中国农业年鉴编委会. 中国农业年鉴 2012[M]. 北京:中国农业出版社, 2012.
- Editorial Board of China Agriculture Yearbook. China agriculture year-book 2012[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2012.
- [21] 何平安, 李荣, 邢文英. 中国有机肥料养分分志[M]. 北京:中国农业出版社, 1999.
- HE Ping-an, LI Rong, XING Wen-ying. Records of nutrients in organic fertilizer in China[M]. Beijing: China Agriculture Press, 1999.
- [22] 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 CSAE*, 2009, 25(12):211-217.
- [23] 中华人民共和国农业部, 美国能源部项目专家组. 中国生物质资源可获得性评价[M]. 北京:中国环境科学出版社, 1998.
- Ministry of Agriculture of China, U. S. Department of Energy Project Expert Team. Assessment of biomass resource availability in China[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 1998.
- [24] IPCC. Revised 1996 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories[R]. Paris: IPCC/OECD/IEA, 1997.
- [25] 农业部种植业管理司. 2014年耕地质量保护与提升技术模式[EB/OL].[2016-11-21]. http://www.moa.gov.cn/govpublic/ZZYGLS/201410/t20141008_4075303.htm.
- Department of Plantation Management, Ministry of Agriculture of China. Types of protection and improvement of cultivated land in 2014[EB/OL].[2016-11-21]. http://www.moa.gov.cn/govpublic/ZZYGLS/201410/t20141008_4075303.htm.
- [26] IPCC. Good practice guidance and uncertainty management in national greenhouse gas inventories[R]. Kanagawa: IPCC/IGES, 2000.
- [27] 朱清山, 常相铨, 牛文祥. 黑龙江省秸秆资源现状及发展利用研究[J]. 现代化农业, 2016(8):57-59.
- ZHU Qing-shan, CHANG Xiang-cheng, NIU Wen-xiang. Analysis on crop straw resources and its current status of utilization in Heilongjiang Province[J]. *Modernizing Agriculture*, 2016(8):57-59.
- [28] 彭立群, 张强, 贺克斌. 基于调查的中国秸秆露天焚烧污染物排放清单[J]. 环境科学研究, 2016, 29(8):1109-1118.
- PENG Li-qun, ZHANG Qiang, HE Ke-bin. Emission inventory of atmospheric pollutants from open burning of crop residues in China based on a national questionnaire[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2016, 29(8):1109-1118.
- [29] 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.
- YANG Fan, DONG Yan, XU Ming-gang, et al. Effects of straw returning on the integrated soil fertility and crop yield in southern China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2012, 23(11):3040-3044.
- [30] 高利伟, 王方浩, 马林, 等. 河北省作物秸秆资源及其利用状况分析[J]. 安徽农业科学, 2009, 37(23):11079-11083.
- GAO Li-wei, WANG Fang-hao, MA Lin, et al. Analysis on crop straw resources and its current status of utilization in Hebei Province[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2009, 37(23):11079-11083.
- [31] 王志刚, 吕杰, 郝凤明, 等. 区域秸秆资源利用现状、存量估算及潜力分析——以辽中县为例[J]. 资源与产业, 2016, 18(5):71-77.
- WANG Zhi-gang, LÜ Jie, XI Feng-ming, et al. A case study on Liaozhong County: Use situation, volume estimation and potential of regional straw resource[J]. *Resources and Industries*, 2016, 18(5):71-77.
- [32] 邵建均, 杨治斌, 刘银秀. 浙江省农作物秸秆利用现状及对策建议

- [J]. 浙江农业科学, 2014(8): 1137-1138, 1141.
SHAO Jian-jun, YANG Zhi-bin, LIU Yin-xiu. Current status and policy proposal for straw utilization in Zhejiang Province[J]. *Journal of Zhejiang Agricultural Sciences*, 2014(8): 1137-1138, 1141.
- [33] 吴一平, 张力维, 崔国强. 河南省农作物秸秆资源化利用的调查与思考[J]. 河南农业大学学报, 2010, 44(3): 352-359.
WU Yi-ping, ZHANG Li-wei, CUI Guo-qiang. Investigation and thoughts on the comprehensive utilization of crop stalk resources in Henan Province[J]. *Journal of Henan Agricultural University*, 2010, 44(3): 352-359.
- [34] 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.
BAO Jian-cai, YU Ji-hua, FENG Zhi, et al. Situation of distribution and utilization of crop straw resources in seven western provinces, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2014, 25(1): 181-187.
- [35] Lal R. Offsetting China's CO₂ emissions by soil carbon sequestration[J]. *Climatic Change*, 2004, 65(3): 263-275.
- [36] Liu C, Lu M, Cui J, et al. Effects of straw carbon input on carbon dynamics in agricultural soils: A meta-analysis[J]. *Global Change Biology*, 2014, 20(5): 1366-1381.
- [37] 刘书田, 窦 森, 侯彦林, 等. 中国秸秆还田面积与土壤有机碳含量的关系[J]. 吉林农业大学学报, 2016, 38(6): 723-732, 738.
LIU Shu-tian, DOU Sen, HOU Yan-lin, et al. Relationship between area of straw returning to the field and content of soil organic carbon in China[J]. *Journal of Jilin Agricultural University*, 2016, 38(6): 723-732, 738.
- [38] Liao Y, Wu W L, Meng F Q, et al. Increase in soil organic carbon by agricultural intensification in Northern China[J]. *Biogeosciences*, 2015, 12(5): 1403-1413.
- [39] Cao G L, Zhang X Y, Wang Y Q, et al. Estimation of emissions from field burning of crop straw in China[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2008, 53(5): 784-790.
- [40] 陈冬冬, 高旺盛, 陈源泉. 中国农作物秸秆资源化利用的生态效应和技术选择分析[J]. 中国农学通报, 2007, 23(10): 143-149.
CHEN Dong-dong, GAO Wang-sheng, CHEN Yuan-quan. Analysis on the ecological effect and technological selection of straw resources utilization in China [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2007, 23(10): 143-149.
- [41] 刘国丽, 杨 镇, 王 娜, 等. 微生物转化秸秆饲料研究进展[J]. 广东农业科学, 2014, 41(1): 110-114.
LIU Guo-li, YANG Zhen, WANG Na, et al. Research advances in microbial bioconversion of straw feed[J]. *Guangdong Agricultural Science*, 2014, 41(1): 110-114.
- [42] 石祖梁, 刘璐璐, 王 飞, 等. 我国农作物秸秆综合利用发展模式及政策建议[J]. 中国农业科技导报, 2016, 18(6): 16-22.
SHI Zu-liang, LIU Lu-lu, WANG Fei, et al. Development model and policy proposal for comprehensive utilization of crop straw in China[J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2016, 18(6): 16-22.
- [43] 逯 非, 王效科, 韩 冰, 等. 稻田秸秆还田: 土壤固碳与甲烷减排[J]. 应用生态学报, 2010, 21(1): 99-108.
LU Fei, WANG Xiao-ke, HAN Bing, et al. Straw return to rice paddy: Soil carbon sequestration and increased methane emission[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(1): 99-108.
- [44] 李新华, 朱振林, 董红云, 等. 秸秆不同还田模式对玉米田温室气体排放和碳固定的影响[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(11): 2228-2235.
LI Xin-hua, ZHU Zhen-lin, DONG Hong-yun, et al. Effects of different return modes of wheat straws on greenhouse gas emissions and carbon sequestration of maize fields[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34(11): 2228-2235.
- [45] 秦晓波, 李玉娥, 万运帆, 等. 免耕条件下稻草还田方式对温室气体排放强度的影响[J]. 农业工程学报, 2012, 28(6): 210-216.
QIN Xiao-bo, LI Yue-e, WAN Yun-fan, et al. Effects of straw mulching on greenhouse gas intensity under no-tillage conditions[J]. *Transactions of the CSAE*, 2012, 28(6): 210-216.
- [46] 沈玉君, 李国学, 任丽梅, 等. 不同通风速率对堆肥腐熟度和含氮气体排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(9): 1814-1819.
SHEN Yu-jun, LI Guo-xue, REN Li-mei, et al. The impact of composting with different aeration rates on maturity variation and emission of gas concluding N[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(9): 1814-1819.
- [47] 王凯军, 郑梦莉, 韩奇鹏, 等. 发展低碳畜牧业的必要性及应对措施[J]. 饲料博览, 2016(9): 8-10.
WANG Kai-jun, ZHENG Meng-li, HAN Qi-peng, et al. The necessity and countermeasures of developing low carbon animal husbandry[J]. *Feed Review*, 2016(9): 8-10.
- [48] 杨 娟, 王昌全, 白根川, 等. 秸秆还田下麦-稻轮作生产生命周期能耗及温室气体排放[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(1): 196-204.
YANG Juan, WANG Chang-quan, BAI Gen-chuan, et al. Life cycle energy consumption and greenhouse gas emissions of wheat-rice rotation system with straw returning[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34(1): 196-204.
- [49] 张婷婷, 冯永忠, 李昌珍, 等. 2011 年我国秸秆沼气化的碳足迹分析[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2014, 42(3): 124-130.
ZHANG Ting-ting, FENG Yong-zhong, LI Chang-zhen, et al. The carbon footprint analysis of straw biogas utilization of China in 2011[J]. *Journal of Northwest A&F University(Natural Science Edition)*, 2014, 42(3): 124-130.
- [50] Zhao H, Sun B F, Lu F, et al. Straw incorporation strategy on cereal crop yield in China[J]. *Crop Science*, 2015, 55(4): 1773-1781.
- [51] 赵秀玲, 任永祥, 赵 鑫, 等. 华北平原秸秆还田生态效应研究进展[J]. 作物杂志, 2017(1): 1-7.
ZHAO Xiu-ling, REN Yong-xiang, ZHAO Xin, et al. Advances in ecological effects of residue retained in North China Plain[J]. *Crops*, 2017(1): 1-7.
- [52] 胡 诚, 陈云峰, 乔 艳, 等. 秸秆还田配施腐熟剂对低产黄泥田的改良作用[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(1): 59-66.
HU Cheng, CHEN Yun-feng, QIAO Yan, et al. Effect of returning straw added with straw-decomposing inoculants on soil melioration in low-yielding yellow clayey soil[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2016, 22(1): 59-66.
- [53] 梁 尧, 蔡红光, 闫孝贡, 等. 玉米秸秆不同还田方式对黑土肥力特征的影响[J]. 玉米科学, 2016, 24(6): 107-113.
LIANG Yao, CAI Hong-guang, YAN Xiao-gong, et al. Effect of different maize straw-returning modes on the fertility of black soil[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2016, 24(6): 107-113.