



粮豆轮作技术的“减肥增效”效应研究 ——基于东北地区轮作定位试验和农户调研分析

陈海江¹, 司伟¹, 魏丹², 李玉梅²

(1. 中国农业大学 经济管理学院, 北京 100089; 2. 黑龙江省农业科学院 土壤肥料与环境资源研究所, 黑龙江 哈尔滨 150086)

摘要:当前东北地区农业生产面临严重的生态环境挑战,在此背景下,该研究利用轮作定位试验和农户调研数据,从两个层面对粮豆轮作技术的“减肥增效”效应展开实证分析。研究结果显示:与已有研究一致,粮豆轮作能够增加玉米和大豆单产,减少大豆农药施用量和玉米化肥施用量。其中,和非轮作相比,轮作的大豆产量高 325.65 kg·hm⁻²,玉米产量高 803.81 kg·hm⁻²,节省大豆农药投入费用 42 元·hm⁻²,节省玉米化肥投入量 117 kg·hm⁻²。总体而言粮豆轮作技术具有“减肥增效”的生态效应。该研究结果为推广粮豆轮作技术和制定合理的轮作补贴标准提供了科学依据。

关键词:粮豆轮作;单产;农药;化肥

Study on the Effect of Reducing Fertilizer Input and Increasing Efficiency of Grain – Soybean Rotation Technology: Based on the Rotation Location Experiment and the Analysis of Household Survey in Northeast China

CHEN Hai-jiang¹, SI Wei¹, WEI Dan², LI Yu-mei²

(1. College of Economics and Management, China Agricultural University, Beijing 100089, China; 2. Soil Fertilizer and Environmental Resources Institute, Heilongjiang Academy of Agricultural Sciences, Harbin 150086, China)

Abstract: At present, the agricultural production in Northeast China is facing serious ecological problems. In this background, this paper used the rotation experiment and farmers' survey data to empirically analyze the effect of reducing fertilizer input and increasing efficiency of grain-soybean rotation technology from two aspects. The results indicated that: Consistent with existing studies, grain-soybean rotation technology could increase the yield of maize and soybean, reducing the amount of soybean pesticides and maize fertilizer use. In particular, the soybean yield of the rotation was 325.65 kg·ha⁻¹ higher than that of the non-rotation, and the maize yield was 803.81 kg·ha⁻¹ higher. In addition, the rotation saved 42 yuan·ha⁻¹ for soybean pesticides and 117 kg·ha⁻¹ for maize fertilizers. In general, there is indeed an ecological function of reducing fertilizer input and increasing efficiency in grain-soybean rotation technology. The research in this paper provided a scientific basis for promoting the adoption of grain-soybean rotation technology and establishing a reasonable rotation technology subsidy standard.

Keywords: Grain-soybean rotation; Yield; Pesticide; Fertilizer

东北地区是国家粮食安全的压舱石,但近年来农业生产中农药、化肥的使用情况令人堪忧。2000年以来,在全国亩均化肥施用量不断下降的背景下,东北地区却不降反升;亩均农药施用量虽低于全国平均水平,但呈加速增长态势。与此同时,该地区土壤退化严重,土层变浅、土壤板结现象普遍,而面源污染已造成辽河流域成为全国污染最严重的水域之一。另一方面,随着农资价格不断攀升,大剂量的农药、化肥使用不仅影响农户种植收益,同时还削弱了中国农产品的国际竞争力,当前国内外农产品价差不断扩大的根本原因是由生产成本

差距造成的。在此背景下,实现东北地区农业生产“减肥增效”的现实意义不言而喻。

作为一项复杂的系统工程,实现上述目标显然需要多管齐下。就种植制度而言,已有研究表明粮豆轮作技术有助于实现农业生产的“减肥增效”。从国外相关研究来看:Munkholm 等^[1]基于加拿大安大略省伊劳拉镇(Elora)30年的长期轮作定位试验发现粮豆轮作具有改善土壤肥力和提高作物产量的功效;Miao 等^[2]通过梳理多个粮豆轮作定位试验研究,总结发现轮作能够提高肥料利用效率、增加作物单产和改善生态环境;Bender 等^[3]研究证实轮

收稿日期:2018-04-10

项目来源:国家现代农业产业技术体系建设专项(CRAS-04-07B);中央高校基本科研业务费(2018JG001)。

第一作者简介:陈海江(1987-),男,博士,主要从事农业经济研究。E-mail:chenhaijiang@cau.edu.cn。

通讯作者:司伟(1978-),男,博士,教授,博导,主要从事农业经济研究。E-mail:siwei@cau.edu.cn。

作具有减少病虫害的功效;Bullock^[4]分析表明粮豆轮作能够利用豆科作物的固氮作用减少化肥使用,同时还具有减少杂草和病虫害,提升土壤肥力的功效。国内研究中,朱艳等^[5]比较分析了不同耕作方式对大豆胞囊线虫群体数量的影响,结果显示和连作条件下相比,轮作能够明显减少大豆胞囊线虫群体数量;薛利红等^[6]通过定位试验证实轮作制度可以实现化肥减量而不减产,是治理农业面源污染的源头减量技术;张丽琼^[7]基于黄土高原长期轮作定位试验发现粮豆轮作具有改善土壤结构,提高土壤有机质含量和微生物活性等功效;李蕊等^[8]研究了粮豆轮作条件下,不同施肥方式对大豆根系和产量的影响,结果显示粮豆轮作具有“减肥增效”的功效。

以上研究清晰地显示了粮豆轮作的生态功效,但其依据主要基于轮作定位试验,缺乏农户层面的数据;同时考虑到农业生产和气候、地理环境息息相关,区域异质性可能影响粮豆轮作生态功效发挥,因此,针对东北地区,从轮作定位试验和农户两个层面对粮豆轮作的生态功效展开分析不仅能够丰富和充实已有研究,同时,对制定基于轮作生态功能的补贴标准也具有重要的指导意义。基于此,本文以黑龙江省农业科学院土壤肥料与资源环境研究所在东北地区开展的轮作定位试验和国家大豆产业技术体系产业经济研究室2017年度对该地区880份的大样本农户调研数据为依据,从轮作定位试验和农户层面分别分析粮豆轮作技术在东北地区是否同样具有“减肥增效”的功效。

1 材料与方法

1.1 材料

本研究分析所用的数据来源于黑龙江省农业科学院土壤肥料与资源环境研究所在嫩江、齐齐哈尔等地开展的轮作定位试验,其中,嫩江定位试验数据主要用于研究大豆、小麦和玉米在不同轮作方式下的产量差异,齐齐哈尔地区的轮作定位试验数据主要用于研究玉米和大豆不同轮作方式下的产量差异,两个定位试验的数据年份均为2012-2016年。农户层面分析所用的数据则来源于国家大豆产业技术体系产业经济研究室2017年度针对黑龙江省和内蒙古自治区的农户调研。调研地区农户主要以种植玉米和大豆为主,少量农户种植水稻、小麦、杂粮、杂豆等其它作物。

1.2 试验地概况和样本农户区域分布

嫩江定位试验点位于东北高纬高寒区,属于第

四积温带,年积温2 100~2 300℃,多年平均降水量480~520 mm,为寒温带大陆性季风气候,土壤平均pH 5.96,有机碳平均为24.97 g·kg⁻¹。齐齐哈尔定位试验点位于东北中北部地区,属于第三积温带,年积温2 300~2 500℃,年平均降水量500 mm左右,属寒温带大陆季风气候,土壤平均pH8.12,有机碳平均为15.22 g·kg⁻¹。

样本农户的区域分布于11个县、22个乡镇和44个村,其中9个县位于黑龙江省,2个县位于内蒙古自治区。样本村中8个村位于第一积温带、4个村位于第二积温带、20个村位于第三积温带、8个村位于第四积温带、4个村位于第五积温带。

1.3 试验设计

1.3.1 轮作定位试验 黑龙江省农业科学院土壤肥料与资源环境研究所在嫩江和齐齐哈尔地区的轮作定位试验始于2012年,2013年开始进行轮作制土培肥,2014年开始3年为一周期的初步评价,2015年开始新的轮作周期,到2016年正处于第二个周期中。其中嫩江地区的轮作定位试验主要比较分析豆-豆-豆、麦-豆-麦、麦-玉-豆、豆-玉-玉、玉-豆-豆、玉-玉-玉6种不同轮作方式下的作物产量差异;齐齐哈尔地区的轮作定位试验比较豆-豆-豆、玉-玉-玉、玉-豆-玉、豆-玉-玉4种不同轮作方式下的作物产量差异。考虑到东北地区的种植业结构和粮豆轮作补贴政策的条件设置,针对轮作定位试验,本文在分析时仅关注玉米和大豆两种作物在不同轮作方式下的产量差异。

1.3.2 农户抽样调查和问卷设计 为保证样本的代表性,农户调查采取多阶段分层抽样和现场随机抽样相结合的方式,最终一共获得农户问卷880份,其中有效问卷854份。问卷内容包括2014-2017年度农户的种植结构、投入产出(2017年度只有投入数据)、是否轮作等内容,能够满足本文研究所需。由于问卷中没有2017年度农户的产出数据,因此,农户层面的分析采用2016年的调研数据。通过对数据的整理和分析,研究轮作对大豆和玉米单产、大豆的农药使用、玉米化肥和农药使用情况的影响。

1.4 方法

无论是嫩江的轮作定位试验还是齐齐哈尔的轮作定位试验,在每种轮作方式下只有一块试验地,因此,分析不同轮作方式对玉米和大豆单产的影响,主要通过收集每种轮作方式下不同年份玉米

和大豆的单位产量,采用纵向比较(不同年份)和横向比较(不同耕作方式)的方式加以研究。

在农户层面,由于样本农户的有效调研问卷共有 854 份,不同轮作方式下农户有效问卷的样本量均保持在 200 份以上,因此,关于农户是否轮作对作物单产和农药、化肥投入量的影响主要通过均值比较和独立样本 T 检验研究两者的差异是否显著。此外,考虑到粮豆轮作主要是依靠豆科作物的固氮作用减少下一季作物的化肥使用^[9],因此针对大豆,仅分析轮作在减少作物病虫害方面的功效,即轮作是否减少了农户在种植大豆时的农药使用。而鉴于农药既有液体又有粉末,同时在使用时还需掺水,因此,为便于分析,统一折算成元·hm⁻²。

1.5 数据分析

由于轮作定位试验所收集的不同年份不同作物单产的数据量较少,因此通过 Excel 2016 软件对数据进行分析处理。而针对农户层面的数据分析:T 检验一般用来检验独立样本之间均值是否存在显著差异,本文选用 Stata 14 软件进行均值比较和独立样本 T 检验,以此来分析不同轮作方式下农户玉米和大豆单产差异以及农药和化肥投入量的差异。

表 1 嫩江地区不同轮作方式下产量对比

Table1 Comparison of yields under different cropping patterns in Nenjiang (kg·hm ⁻²)						
年份	豆-豆-豆	麦-豆-麦	麦-玉-豆	豆-玉-玉	玉-豆-豆	玉-玉-玉
Year	Soybean-soybean -soybean	Wheat-soybean -wheat	Wheat-maize -soybean	Soybean-maize -maize	Maize-soybean -soybean	Maize-maize -maize
2012	2053. 35	3212. 05	3340. 78	2048. 4	7177. 33	7114. 52
2013	2023. 29	2129. 84	9112. 13	9102. 57	2085. 18	8750. 18
2014	2729. 37	4032. 00	2626. 35	13786. 84	2808. 00	13009. 83
2015	1802. 90	1873. 20	3044. 25	1901. 70	10495. 06	11046. 10
2016	1743. 95	2948. 56	8023. 57	9726. 78	1901. 72	7890. 97

2.1.2 齐齐哈尔地区不同轮作方式下产量对比分析 由表 2 可知,大豆的最高产量出现在玉-豆-玉轮作方式下的 2013 年,而最低产量出现在豆-豆-豆连作方式下的 2016 年。纵向来看,在豆-豆-

2 结果与分析

2.1 基于东北地区轮作定位试验的分析

2.1.1 嫩江地区不同轮作方式下产量对比分析 嫩江地区定位试验不同轮作方式下的产量对比(表 1):大豆的最高产量出现在 2014 年度玉-豆-豆轮作方式下,而最低产量出现在 2016 年度豆-豆-豆连作方式下。各年份间纵向比较发现,在豆-豆-豆连作方式下,除 2014 年产量有所回升之外,2012-2016 年大体上呈下降趋势,而不同耕作方式间的横向比较显示,除 2014 年之外,其它年份轮作方式下大豆产量均高于连作方式下大豆产量(不考虑起始年份)。此外,2014 年度不同种植方式下大豆产量普遍较高,因此,该年度豆-豆-豆连作方式下大豆的产量出现回升可能与年份有关。

进一步分析不同轮作方式下玉米的产量变化。玉米的最高产量出现在豆-玉-玉轮作方式下的 2014 年;最低产量出现在玉-玉-玉连作方式下的 2016 年(不考虑起始年份)。纵向比较显示,连作方式下玉米单产的变化波动较大,而大豆存在较为明显的减产;横向对比发现,除 2015 年外,其它年份轮作方式下高于连作方式下的玉米单产(表 1)。

豆连作方式下,2012-2016 年大豆产量呈不断下降趋势,而横向比较发现,玉-豆-玉和豆-玉-玉轮作方式下种植大豆的年份产量均高于豆-豆-豆连作方式下大豆的产量。

表 2 齐齐哈尔地区不同轮作方式下产量对比

Table 2 Comparison of yields under different cropping patterns in Qiqihar (kg·hm ⁻²)				
年份	豆-豆-豆	玉-玉-玉	玉-豆-玉	豆-玉-玉
Year	Soybean-soybean -soybean	Maize-maize -maize	Maize-soybean -maize	Soybean-maize -maize
2012	2232. 50	13625. 10	14653. 00	2279. 00
2013	2137. 50	13708. 50	2361. 50	13990. 50
2014	2096. 00	13647. 00	15970. 00	14595. 50
2015	2032. 40	13233. 00	2145. 00	2185. 00
2016	2002. 50	10203. 00	11224. 00	10345. 00

进一步分析4种植方式下玉米产量的差异。从表2可知:玉米最高产量出现在2014年玉-豆-玉轮作方式下,而最低产量则出现在2016年玉-玉-玉连作方式下。从纵向来看玉-玉-玉连作方式下,2012-2016年间,除2013年玉米产量有短暂波动之外,大体上呈现不断下降的趋势;而横向比较发现玉-豆-玉和豆-玉-玉轮作方式下种植玉米的年份产量均高于相同年份玉-玉-玉连作方式下的产量。

综上所述,从嫩江的轮作定位试验和齐齐哈尔的轮作定位试验来看,总体上,轮作条件下的玉米和大豆产量高于连作条件下的产量。同时,从表1和表2可以看出随着连作年份的增加,大豆的单产大体上呈下降趋势,而玉米的这种趋势则在表2中

得以体现。因此基于定位试验推断,在东北地区粮豆轮作技术同样具有提高作物单产的功效。

2.2 基于农户层面微观数据的分析

2.2.1 轮作对大豆单产的影响 在调查样本中2015和2016年均种植大豆的农户为200户;2015年种植玉米,2016年种植大豆的农户为254户,样本数为454户。对2016年度轮作农户和非轮作农户的大豆单产方差分析结果显示:轮作农户大豆单产的均值为3 724 kg·hm⁻²,而非轮作农户大豆单产均值为3 398 kg·hm⁻²,轮作农户和非轮作农户相比,大豆单产高325.65 kg·hm⁻²,两者在1%水平上存在显著差异(表3)。该结果与轮作定位试验的结果较为一致,由此推断轮作提高大豆单产的功效在农户层面同样成立。

表3 2016年度轮作与非轮作农户大豆单产方差分析

是否轮作 Rotation or not	样本数 Number of samples	均值 Mean/(kg·hm ⁻²)	标准误 Standard error	标准差 Standard deviation
非轮作农户 Non-rotation farmers	200	3398.37	73.07	1033.43
轮作农户 Rotation farmers	254	3724.02	70.79	1128.19
$\mu_{\text{非轮作}} - \mu_{\text{轮作}} \quad \mu_{\text{Non-rotation}} - \mu_{\text{Rotation}}$		-325.65***		

***表示在1%水平下存在显著性差异,下同。
*** represent significant difference at 1% level , the same as below.

2.2.2 轮作对玉米单产的影响 由于部分农户既种玉米也种大豆,因此用于轮作对大豆和玉米单产影响研究的样本总和大于854户。轮作与非轮作农户玉米单产方差分析结果显示:玉米种植户显然多于大豆种植户,并且与表3不同,玉米连作的农户数亦显著大于大豆连作的农户数,这应该和种植玉米的收益较高有关,同时也从侧面表明当前东北地区农户采纳轮作技术的比例不高。从样本量来看,2015和2016年都种植玉米的农户为408户,2015

年种植大豆和2016年种植玉米的农户为257户,总户数为665户。其中,轮作农户的玉米单产均值为14 832 kg·hm⁻²,非轮作农户的玉米单产均值为14 029 kg·hm⁻²。相比于非轮作农户,轮作农户玉米单产高803.81 kg·hm⁻²,并且两者在1%水平上差异显著(表4)。此结果表明,轮作不仅能够显著提高农户的大豆单产(表3),同样也能显著提高农户的玉米单产。

表4 2016年度轮作与非轮作农户玉米单产方差分析

是否轮作 Rotation or not	样本数 Number of samples	均值 Mean/(kg·hm ⁻²)	标准误 Standard error	标准差 Standard deviation
非轮作农户 Non-rotation farmers	408	14028.57	310.52	6272.27
轮作农户 Rotation farmers	257	14832.37	513.27	8228.40
$\mu_{\text{非轮作}} - \mu_{\text{轮作}} \quad \mu_{\text{Non-rotation}} - \mu_{\text{Rotation}}$		-803.81***		

2.2.3 轮作对大豆农药使用的影响 非轮作农户农药的使用费用均值为354元·hm⁻²,而轮作农户农药使用费用均值为312元·hm⁻²,两者相差42

元·hm⁻²。方差分析表明,这种差异在10%水平上显著,即相比于非轮作农户,轮作农户使用更少的农药(表5)。

表 5 2016 年度轮作与非轮作农户大豆农药使用方差分析

Table 5 Analysis of variance of pesticide use in rotating and non-rotation soybean planters in 2016

是否轮作 Rotation or not	样本数 Number of samples	均值 Mean/(kg·hm ⁻²)	标准误 Standard error	标准差 Standard deviation
非轮作农户 Non-rotation farmers	199	353. 93	20. 30	286. 31
轮作农户 Rotation farmers	254	312. 09	14. 87	236. 96
$\mu_{\text{非轮作}} - \mu_{\text{轮作}} \mu_{\text{Non-rotation}} - \mu_{\text{Rotation}}$		41. 84 *		

表 5 中非轮作农户样本数与表 3 不一致是由于部分变量存在数据缺失; * 表示在 10% 水平下存在显著差异。下同。

The number of non-rotating households intable 5 is inconsistent with table 3 due to missing data in some variables; * represent significant difference at 10% level. The same as below.

2. 2. 4 轮作对玉米化肥、农药使用的影响 非轮作农户化肥平均施用量为1 118. 06 kg·hm⁻², 而轮作农户仅为1 000. 85 kg·hm⁻², 两者化肥施用量相差达 117. 21 kg·hm⁻², 在 1% 水平上显著, 表明农户采纳轮作技术能够显著减少对玉米的化肥使用(表 6)。

表 6 2016 年度轮作与非轮作农户玉米化肥投入方差分析

Table 6 Analysis of variance of fertilizer use in rotating and non-rotation maize planters in 2016

是否轮作 Rotation or not	样本数 Number of samples	均值 Mean/(kg·hm ⁻²)	标准误 Standard error	标准差 Standard deviation
非轮作农户 Non-rotation farmers	405	1118. 06	23. 72	477. 31
轮作农户 Rotation farmers	266	1000. 85	30. 44	496. 44
$\mu_{\text{非轮作}} - \mu_{\text{轮作}} \mu_{\text{Non-rotation}} - \mu_{\text{Rotation}}$		117. 21 * * *		

非轮作农户农药的施用均值为 208 元·hm⁻², 而轮作农户农药的施用均值为 232 元·hm⁻²。与预期不同的是, 轮作农户农药使用费用反而高于非轮作农户, 两者在 10% 水平上存在显著差异(表 7)。因此, 在农户层面没有发现轮作能够减少玉米农药使用的功效。这可能与轮作的时间长短有关, 已有研究表明长期轮作的效果要明显优于短期轮作^[1]。因此, 最终确定轮作能否减少玉米种植农户农药的使用, 可能需要进一步通过对农户的追踪调研加以确认。

表 7 2016 年度轮作与非轮作农户玉米农药使用方差分析

Table 7 Analysis of variance of pesticide use in rotating and non-rotation corn planters in 2016

是否轮作 Rotation or not	样本数 Number of samples	均值 Mean/(kg·hm ⁻²)	标准误 Standard error	标准差 Standard deviation
非轮作农户 Non-rotation farmers	405	207. 52	9. 75	196. 30
轮作农户 Rotation farmers	254	231. 94	12. 11	192. 95
$\mu_{\text{非轮作}} - \mu_{\text{轮作}} \mu_{\text{Non-rotation}} - \mu_{\text{Rotation}}$		-24. 41 *		

3 讨 论

不同于 Sindelar 等^[10]和 Mourtzinis 等^[11]诸多仅通过定位试验研究轮作“减肥增效”功能的已有研究, 本研究在此基础上增加了对农户层面的分析, 使得最终研究结果具有更加多元的实证支持。与 Forte 等^[12]和 Congreves 等^[13]的研究结果一致, 本研究发现粮豆轮作能够增加玉米和大豆的单产, 减少玉米化肥施用和大豆农药施用。但与 Simic 等^[14]和 Hunt 等^[15]的研究不同, 本研究在农户层面并没有发现轮作能够减少玉米的农药使用, 反而观察到相反的结果, 这可能与本研究在农户层面使用的是单一年份的数据相关, 最终确认轮作在减少玉米种植户农药施用方面的效应, 需要采用多年份的追踪数

据进一步加以验证。

通过以上分析可知, 首先, 粮豆轮作具有种地养地的功效, 能够实现在确保国家粮食安全战略不受冲击前提下, 促进东北地区农业可持续发展, 这对于当前中国农业生产中面临粮食安全与生态安全相互冲突的现实尤为重要, 因此有必要在农户层面进一步推广轮作技术; 其次, 当前国内大豆单产水平徘徊不前, 并且与世界大豆主产国差距明显, 粮豆轮作提高大豆单产的功效为此提供了一条解决问题的途径; 再者, 在当前东北地区实施粮豆轮作补贴政策背景下, 本文关于粮豆轮作“减肥增效”功效的研究可以为政府制定合理的补贴标准提供科学依据。此外, 鉴于当前东北地区存在种植业结构不合理, 推广粮豆轮作技术还有利于推动该地区

的种植业结构调整和农业供给侧改革。

4 结 论

本文结合轮作定位试验和农户层面的调研数据对东北地区粮豆轮作的“减肥增效”效应展开分析。研究结果显示:(1)无论是通过定位试验还是在农户层面,两者都清晰表明粮豆轮作能够增加玉米和大豆单产,其中,和非轮作农户相比,轮作农户的大豆产量高 $325.65\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,玉米产量高 $803.81\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$;(2)针对农户层面的分析发现,粮豆轮作能够减少大豆种植户农药投入 $42\text{ 元}\cdot\text{hm}^{-2}$,玉米种植户化肥投入 $117\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$;(3)与预期不同的是,轮作并没有减少玉米种植户农药使用,反而出现了相反的结果。但总体而言,本文在两个层面对轮作生态功效的实证分析与已有研究结果较为一致,可以确认在东北地区农户层面推广粮豆轮作技术能够实现“减肥增效”的既定目标,本文的研究对当前实施的粮豆轮作补贴政策 and 农业供给侧改革具有一定的启示作用。

参考文献

[1] Munkholm L J, Heck R J, Deen B. Long-term rotation and tillage effects on soil structure and crop yield[J]. Soil & Tillage Research, 2013, 127:85-91.

[2] Miao Y, Stewart B A, Zhang F. Long-term experiments for sustainable nutrient management in China. A review[J]. Agronomy for Sustainable Development, 2011, 31(2):397-414.

[3] Bender B E, Macguidwin A E. Nematode pest pressure in long term corn based cropping rotations[C]. American: American Phytopathological Society- North Cental, 2014.

[4] Bullock. Crop rotation[J]. Critical Reviews in Plant Sciences, 1992, 11(4):309-326.

[5] 朱艳,陈立杰,段玉玺. 不同耕作方式对大豆胞囊线虫群体数量的影响[J]. 大豆科学, 2007, 26(2): 208-212. (Zhu Y, Chen L J, Duan Y X. Effect of different tillage methods on population of soybean cyst nematode[J]. Soybean Science, 2007, 26(2): 208-212.)

[6] 薛利红,杨林章,施卫明,等. 农村面源污染治理的“4R”理

论与工程实践——源头减量技术[J]. 农业环境科学学报, 2013(5):881-888. (Xue L H, Yang L Z, Shi W M, et al. The “4R” theory and engineering practice of Non-point source pollution control in rural areas: Source reduction techniques[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2013(5):881-888.)

[7] 张丽琼. 长期轮作与施肥对土壤肥力的影响及其综合评价[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2016. (Zhang L Q. Effect of long-term rotation and fertilization on soil fertility and its comprehensive evaluation[D]. Yangling: Northwest Agriculture and Forestry University, 2016.)

[8] 李蕊,杨越,李彦生,等. 基于玉米-大豆轮作的不同施肥体系对大豆开花后根系形态及产量的影响[J]. 中国油料作物学报, 2018, 40(1): 64-73. (Li R, Yang Y, Li Y S, et al. Effects of different fertilization systems on root shape and yield of soybean after flowering based on maize-soybean rotation[J]. Chinese Journal of Oil Crops, 2018, 40(1): 64-73.)

[9] Karlen D L, Hurley E G, Andrews S S, et al. Crop rotation effects on soil quality at three northern corn/soybean locations[J]. Staff General Research Papers Archive, 2006, 6(1):1-6.

[10] Forte C T, Beutler A N, Galon L, et al. Soil physical properties and grain yield influenced by cover crops and crop rotation[J]. American Journal of Plant Sciences, 2018, 9(4):584-598.

[11] Sindelar A J, Schmer M R, Jin V L, et al. Crop rotation affects corn, grain sorghum, and soybean yields and nitrogen recovery [J]. Agronomy Journal, 2016, 108(4):1592 – 1602.

[12] Mourtzinis S, Marburger D, Gaska J, et al. Corn, soybean, and wheat yield response to crop rotation, nitrogen rates, and foliar fungicide application[J]. Crop Science, 2017, 57(2):983 – 992.

[13] Congreves K A, Hooker D C, Hayes A, et al. Interaction of long-term nitrogen fertilizer application, crop rotation, and tillage system on soil carbon and nitrogen dynamics [J]. Plant & Soil, 2017, 410(1-2):113-127.

[14] Simic M, Spasojevic I, Dragicevic V, et al. Combined application of crop rotation and low rates of herbicides for weed control in maize [C]// International Scientific Agricultural Symposium “agrosym 2015”, Jahorina, Bosnia and Herzegovina, Book of Proceedings, 2015.

[15] Hunt N D, Hill J D, Liebman M. Reducing freshwater toxicity while maintaining weed control, profits, and productivity: Effects of increased crop rotation diversity and reduced herbicide usage [J]. Environmental Science & Technology, 2017, 51(3): 1707-1717.