中国生态农业学报(中英文)
Chinese Journal of Eco-Agriculture

前茬作物秸秆还田下轮作模式和施肥对大豆产量的影响

张国伟，王晓婧，杨长琴，束红梅，刘瑞显

Effects of rotational pattern and fertilization application on soybean yield under straws returning of preceding crop

ZHANG Guowei, WANG Xiaojing, YANG Changqin, SHU Hongmei, and LIU Ruixian

在线阅读 View online: https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.210084

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

不同轮作模式下秸秆还田与氮肥运筹对杂交籼稻产量及米质的影响

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

中国生态农业学报(中英文). 2020, 28(10): 1581–1590

两种轮作模式下秸秆还田对土壤呼吸及其温度敏感性的影响

Effect of straw mulching on soil respiration and its' temperature sensitivity under different crop rotation systems

中国生态农业学报(中英文). 2017, 25(8): 1106–1118

稻麦轮作下秸秆还田对稻麦产量和稻田可溶性有机碳含量的影响

Effects of straw incorporation on crop yield and dissolved organic carbon concentration at rice growing season in rice–wheat rotation cropping system

中国生态农业学报(中英文). 2019, 27(3): 431–440

秸秆还田与施肥方式对稻麦轮作土壤细菌和真菌群落结构与多样性的影响

Effects of straw returning and fertilization on soil bacterial and fungal community structures and diversities in rice–wheat rotation soil

中国生态农业学报(中英文). 2021, 29(3): 531–539

秸秆还田替代化学钾肥对喀斯特峰丛洼地春玉米产量及土壤钾素的影响

Spring maize yield and soil potassium balance under replacement of potassium with straw in karst peak–cluster depression

中国生态农业学报(中英文). 2017, 25(12): 1823–1831

秸秆还田对关中地区麦玉复种体系土壤氨排放的影响

Effect of straw returning on ammonia emissions from soil in a wheat–maize multiple cropping system in the Guanzhong region, China

中国生态农业学报(中英文). 2020, 28(4): 513–522

关注微信公众号，获得更多资讯信息

中国生态农业学报(中英文) 2021 年 9 月 第 29 卷 第 9 期
Chinese Journal of Eco-Agriculture, Sep. 2021, 29(9): 1493−1501

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.210084

张国伟, 王晓婧, 杨长琴, 束红梅, 刘瑞显. 前茬作物秸秆还田下轮作模式和施肥对大豆产量的影响 [J]. 中国生态农业学报 (中英文), 2021, 29(9): 1493−1501
ZHANG G W, WANG X J, YANG C Q, SHU H M, LIU R X. Effects of rotational pattern and fertilization application on soybean yield under straws returning of preceding crop[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2021, 29(9): 1493−1501

前茬作物秸秆还田下轮作模式和施肥对大豆产量的影响*

张国伟, 王晓婧, 杨长琴, 束红梅, 刘瑞显**

(江苏省农业科学院经济作物研究所/农业部长江下游棉花与油菜重点实验室 南京 210014)

摘 要: 探讨不同轮作模式下作物秸秆还田和施肥对大豆产量形成的影响, 可为多元化轮作模式下大豆增产增效提供理论基础和实践依据。于 2018—2020 年在江苏省农业科学院大豆试验基地, 以前茬作物秸秆还田下轮作模式为主区, 设置小麦、大蒜、芥菜型油菜和空白 (冬闲) 4 个轮作模式; 肥料施用水平为副区, 设置不施肥和施三元复合肥 (15∶15∶15) 225 kg·hm^{-2} 2 个施肥水平, 研究秸秆还田下不同轮作模式和施肥对大豆养分利用及产量形成的影响。结果表明, 轮作模式与施肥对大豆产量及产量构成影响显著, 且两因素对产量及产量构成、植株形态指标和病株率、土壤全氮和速效氮含量、生物量和氮素累积与分配等指标均存在极显著的互作效应。与冬闲-大豆模式相比, 其他轮作模式降低了土壤容重和速效氮含量, 提高了土壤有机质和全氮含量; 大蒜-大豆和芥菜-大豆轮作模式下株高、茎粗、底荚高度、分枝数、总生物量和籽粒生物量、总氮累积量和籽粒氮累积量最高, 利于产量形成, 最终产量较冬闲-大豆模式增加 4.40%~10.30% 和 5.66%~7.09% (施肥处理)、4.88%~8.23% 和 2.19%~8.78% (不施肥)。小麦-大豆轮作模式抑制植株生长, 总生物量和籽粒生物量、总氮累积量和籽粒氮累积量均最低, 尽管生物量、氮素收获指数和氮素生产效率最高, 但产量最低, 较冬闲-大豆模式分别降低 2.80%~7.30% (施肥处理) 和 7.45%~11.18% (不施肥)。此外, 小麦秸秆还田增加了大豆病株率, 而芥菜-大豆和大蒜-大豆轮作模式则降低了大豆病株率。施肥可以显著促进大豆生长, 降低病株率, 提高土壤全氮和速效氮含量、生物量及氮素累积量和收获密度, 尽管氮素收获指数和氮素利用效率较低, 但是显著提高了产量。与不施肥相比, 施肥使大蒜-大豆、芥菜-大豆和小麦-大豆轮作模式下大豆产量提高 9.21%~13.01%、7.97%~14.02% 和 15.00%~15.91%。因此, 在生产中建议推广大蒜-大豆和芥菜-大豆轮作模式。小麦-大豆轮作模式中在小麦秸秆还田后必须增施肥料才能达到高产。

关键词: 大豆; 轮作模式; 秸秆还田; 施肥; 产量

中图分类号: S565.1 **开放科学码(资源服务)标识码(OSID):**

Effects of rotational pattern and fertilization application on soybean yield under straws returning of preceding crop*

ZHANG Guowei, WANG Xiaojing, YANG Changqin, SHU Hongmei, LIU Ruixian**

(Institute of Industrial Crops, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences / Key Laboratory of Cotton and Rapeseed in the Lower Reaches of the Yangtze River, Ministry of Agriculture, Nanjing 210014, China)

* 国家重点研发计划项目 (2018YFD0201000) 和江苏特粮特经产业技术体系集成创新中心项目 (JATS[2020]152) 资助
** 通信作者: 刘瑞显, 主要从事作物生理生态研究。E-mail: liuruixian2008@163.com
张国伟, 主要从事作物栽培生理研究。E-mail: zgw_0721@163.com
收稿日期: 2021-02-09 接受日期: 2021-05-28

* This study was supported by the National Key Research and Development Program of China (2018YFD0201000) and Jiangsu Agricultural Industry Technology System (JATS[2020]152).
** Corresponding author, E-mail: liuruixian2008@163.com
Received Feb. 9, 2021; accepted May 28, 2021

Abstract: Field experiments were conducted from 2018 to 2020 at the Soybean Experimental Station of the Jiangsu Academy of Agricultural Sciences in Nanjing, Jiangsu Province. A split-plot design was used to study the effects of straw returning and fertilizer application on the nutrient utilization and yield of soybeans under different rotation patterns. The main plot factor was different rotation patterns with straw returning of preceding crop of soybean (wheat–soybean, garlic–soybean, leaf mustard–soybean, and winter fallow–soybean), while the sub-plot factor was fertilizer application (no fertilizer and nitrogen [N], phosphorus [P], and potassium [K] compound fertilizer [15∶15∶15] at 225 kg·hm^{-2}). The results showed that rotation pattern and fertilization application significantly affected the soybean yield and yield components under crop straw returning of preceding crop, and the two factors had significant interactive effects on the yield, yield components, plant morphological index, biomass, nitrogen accumulation and distribution, and disease rate of soybean, as well as soil total nitrogen, available nitrogen contents. Compared with the winter fallow–soybean planting pattern, the other three rotation patterns decreased soil bulk density and available nitrogen content but increased soil organic matter and total nitrogen contents. Plant height, stem diameter, height of the bottom pod, branch number per plant, total biomass, grain biomass, total nitrogen accumulation, and grain nitrogen accumulation were the highest under garlic–soybean and leaf mustard–soybean rotation patterns, which were beneficial for yield. The final yield increased by 4.40%–10.30% and 5.66%–7.09% under fertilization treatments and by 4.88%–8.23% and 2.19%–8.78% under no fertilization treatments compared to the winter fallow–soybean planting pattern, respectively. The wheat–soybean rotation pattern inhibited soybean plant growth, and the total biomass, grain biomass, total nitrogen accumulation, and grain nitrogen accumulation were the lowest. The harvest index of biomass and nitrogen and the nitrogen production efficiency were the highest, but the yield was the lowest in this case, decreasing by 2.80–7.30% in the fertilizer treatments and by 7.45%–11.18% in the no fertilizer treatment compared to the winter fallow–soybean planting pattern. Wheat straw returning increased the diseased plant rate, whereas the leaf mustard–soybean and garlic–soybean rotations decreased the rate of diseased plants. Compound fertilizer application promoted plant growth, reduced the rate of diseased plants, improved soil total nitrogen and available nitrogen contents, soybean biomass and nitrogen accumulation, and harvest density. Although harvest index and nitrogen use efficiency of soybean were low, the yield significantly increased. Compared with the no fertilizer application treatment, fertilizer application increased the soybean yields of the garlic–soybean, leaf mustard–soybean, and wheat–soybean rotations by 9.21%–13.01%, 7.97%–14.02%, and 15.00%–15.91%, respectively. Therefore, the garlic–soybean and leaf mustard–soybean rotation modes should be popularized. Under a wheat–soybean rotation pattern, high yield is achieved when wheat straw is returned to the field. In the wheat–soybean rotation, fertilizers must be applied after wheat straw is returned to the field to achieve high yield.

Keywords: Soybean; Rotation pattern; Straw returning; Fertilizer application; Yield

大豆 (*Glycine max*) 是我国重要的经济作物之一, 也是我国进口量最大的农产品, 对外依存度高达 85%。随着中美贸易战的升级, 中国大豆进口成本逐年上升, 为了振兴大豆产业, 亟需提高大豆单产水平, 改善大豆品质。轮作是一种用养结合的农业可持续发展种植模式, 目前长江流域和黄淮海流域夏大豆区主要以冬小麦 (*Triticum aestivum*)-大豆轮作为主, 但在徐淮地区大蒜 (*Allium sativum*)-大豆轮作的面积稳步增长; 而芥菜型油菜 (*Brassica juncea*) 秸秆在还田后腐解产生的化感物质具有显著的抑制病菌菌丝发展的作用, 近年来, 芥菜型油菜-大豆轮作的面积也逐年增加。因此, 研究不同轮作模式对大豆产量形成的影响对于提高大豆产量, 保持大豆产业可持续发展具有重要意义。

秸秆作为能直接利用的可再生资源, 粉碎后还田可以改善土壤理化性质, 补充土壤养分[1-4], 但也有研究[5-7] 表明秸秆还田对作物生长发育的影响有“先抑后扬”的趋势: 一方面, 还田秸秆在腐解过程中与土壤微生物争氮, 进而影响植株生长[8-9]; 另一方面, 作物秸秆还田后可以向土壤中释放对羟基苯甲酸、间苯三酚等化感物质, 进而抑制下茬作物幼苗生长[10-11]。生物量和氮素累积是产量和品质形成的基础, 在大豆的轮作模式中, 前人的研究[12-13] 主要集中在小麦和大豆轮作, 但是关于大蒜-大豆和芥菜型油菜-大豆轮作的研究尚少见报道。此外, 由于还田秸秆碳氮比较高, 还田后分解过程中往往与作物发生争氮现象, 进而影响植株生长, 而增施氮肥可以有效缓解秸秆腐解过程中与作物争氮的状况[14], 保证作物高产, 但在大豆轮作体系中的研究尚少见报道。本研究通过定位试验, 以长江流域和黄淮海流域夏大豆区存在的“小麦-大豆” “大蒜-大豆” “芥菜-大豆”和“冬闲-大豆” 4 种轮作模式为研究对象, 分析前茬作物秸秆还田下轮作模式和施肥对大豆产量形成的影响, 旨在为多元化轮作模式下大豆增产增效提供理论基础, 也为不同轮作模式下秸秆还田技术实施和推广提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验于 2018—2020 年在位于江苏省南京市的江苏省农业科学院大豆试验基地进行。试验开始前夏季休闲, 未种植其他作物, 0~20 cm 土壤 pH 值为 6.20, 容重为 1.42 g·cm^{-3}, 含有机质 11.9 g·kg^{-1}、全氮 0.92 g·kg^{-1}、

速效磷 35.8 mg·kg^{-1}、速效钾 134 mg·kg^{-1}。

采用裂区设置进行两熟制年内轮作定位试验, 以前茬作物秸秆还田下不同轮作模式为主区, 设置小麦、大蒜、芥菜绿肥和空白 (冬闲) 4 个轮作模式; 肥料施用水平为副区, 设置大豆季不施肥和施三元复合肥 (15∶15∶15) 225 kg·hm^{-2} 2 个施肥水平。肥料一次性基施。大豆的前茬作物收获后秸秆粉碎还田, 大豆收获后秸秆不还田。根据当地田间种植情况, 小麦、大蒜、芥菜绿肥生长季施肥量分别为三元复合肥 (15∶15∶15) 300 kg·hm^{-2}、600 kg·hm^{-2} 和 120 kg·hm^{-2}, 冬闲田不施肥。大豆生长季前茬作物秸秆还田量和秸秆氮输入量如表 1 所示。以江苏省大面积种植的夏播大豆品种'苏豆 13'为材料, 行距 40 cm, 株距 11.8 cm, 折合密度 2.12×10^5 株·hm^{-2}, 每穴 1 粒, 小区面积 28 m^2, 3 次重复。2019 年和 2020 年大豆分别于 6 月 17 日和 14 日播种。

表 1　大豆生长季前茬作物秸秆还田量和秸秆氮输入量

Table 1　Straw and nitrogen amounts of returned straws of crops before soybean growing season　　kg·hm^{-2}

轮作模式/还田秸秆 Rotation pattern / returned straw	肥料运筹 Fertilizer treatment	2019				2020			
		秸秆还田量 Amount of returned straw	秸秆养分输入量 Nutrient input of straw			秸秆还田量 Amount of returned straw	秸秆养分输入量 Nutrient input of straw		
			N	P	K		N	P	K
大蒜-大豆/大蒜 Garlic-soybean / garlic	F0	2528	26.79	7.83	46.01	2601	27.57	8.01	45.58
	F	2528	26.79	7.83	46.01	2694	28.56	8.34	46.19
芥菜-大豆/芥菜 Leaf mustard-soybean / leaf mustard	F0	3795	35.27	3.42	61.85	3855	35.85	3.58	62.18
	F	3795	35.27	3.42	61.85	3894	36.21	3.67	62.25
小麦-大豆/小麦 Wheat-soybean / wheat	F0	7400	68.31	9.03	115.50	7548	68.69	9.44	114.03
	F	7400	68.31	9.03	115.50	7624	69.38	9.51	114.81
冬闲-大豆/- Winter fallow-soybean / -	F0	0	0	0	0	0	0	0	0
	F	0	0	0	0	0	0	0	0

F0为不施肥, F为施用三元复合肥(15∶15∶15) 225 kg·hm^{-2}。F0 indicates no fertilizer, F indicates application of ternary compound fertilizer (15∶15∶15) 225 kg·hm^{-2}.

1.2　测定项目与方法

植株形态指标、产量和产量构成测定: 于 R1 期每小区连续标记 30 株, 每小区标记 3 个点, 捡拾标记植株脱落叶片, 并于大豆收获时每小区取连续 20 株考种, 调查株高、底荚高度、分枝数、单株荚数、单株粒数、百粒重等, 计算产量。统计实收密度并参照王建生等[15] 的方法调查发病级 1 级及以上植株数量, 计算枯萎病发病率。

土壤物理性状和养分含量测定: 分别于 V2 期和 R8 期用环刀法测定 0~30 cm 土壤容重, 每 5 cm 分层取样, 测定各土层容重后, 计算平均值获得。并用取土器取 0~30 cm 土层土壤, 去杂, 过筛, 参照鲍士旦[16] 方法测定土壤有机质、全氮和速效氮含量。

生物量与养分累积分配测定: 收获时每小区取植株 3 株, 按生殖器官和营养器官分开, 105 ℃ 杀青 30 min 后, 80 ℃ 烘至恒重, 称生物量。样品粉碎后用凯氏定氮法测定全氮含量[16], 再根据各器官干物质重计算氮累积量。

$$\text{收获指数} = \text{生殖器官干物质重}/\text{整株干物质重}\times 100 \quad (1)$$

$$\text{氮收获指数} = \text{生殖器官氮累积量}/\text{整株氮累积}\times 100 \quad (2)$$

$$\text{氮素生产效率} = \text{产量}/\text{氮素总吸收量} \quad (3)$$

1.3　统计分析方法

采用 Microsoft Excel 软件处理数据和作图, 用 SPSS 11.0 软件分析进行统计分析。

2　结果与分析

2.1　前茬秸秆还田下轮作模式和施肥对大豆产量及产量构成的影响

分析表 2 可知, 前茬作物秸秆还田轮作模式和施肥对产量及产量构成影响显著, 其中大蒜-大豆和芥菜-大豆轮作模式下单株荚数、单株粒数、百粒重、实际收获密度和产量均较高, 冬闲-大豆轮作模式次之, 小麦-大豆轮作模式最低。与不施肥相比, 施肥使大蒜-大豆、芥菜-大豆和小麦-大豆轮作模式下大豆产量显著 (P<0.05) 提高 13.01%、7.97%、15.00% (2019 年) 和 9.21%、14.02%、15.91% (2020 年), 表明施肥可以显著增加大豆产量。不同轮作模式下, 施肥处理大蒜-大豆和芥菜-大豆轮作模式下产量分别较冬闲-大豆轮作模式显著 (P<0.05) 增加 10.30% 和 7.09% (2019 年)、4.40% 和 5.66% (2020 年)。

2.2　前茬秸秆还田下轮作模式和施肥对大豆形态指标和病株率的影响

分析表 3 可知, 前茬作物秸秆还田下轮作模式和施肥及其互作效应对大豆株高、茎粗、底荚高度、

表 2 前茬作物秸秆还田下轮作模式和施肥对大豆产量及产量构成的影响

Table 2 Effects of rotation pattern and fertilization application on soybean yield and yield components with straw returning of preceding crop

年份 Year	轮作模式/还田秸秆 Rotation pattern / returned straw	施肥处理 Fertilization treatment	单株荚数 Pod number per plant	单株粒数 Seed number per plant	百粒重 100-seed weight (g)	实际收获密度 Harvest density ($\times10^4$ plants·hm^{-2})	产量 Yield (kg·hm^{-2})
2019	大蒜-大豆/大蒜 Garlic-soybean / garlic	F0	37.4±2.19ab	78.4±1.39bc	22.24±0.74bcd	19.95±0.47a	3478.51±89.74b
		F	40.7±2.45a	85.9±1.99a	22.78±0.25a	20.09±0.49a	3931.22±124.34a
	芥菜-大豆/芥菜 Leaf mustard-soybean / leaf mustard	F0	37.1±1.28ab	77.7±1.64bc	22.61±0.25ab	20.12±0.47a	3534.68±87.78b
		F	40.2±3.27a	84.4±2.62a	22.69±0.51ab	19.93±0.46a	3816.67±119.04a
	小麦-大豆/小麦 Wheat-soybean / wheat	F0	32.8±2.92c	69.4±3.46e	21.46±0.21e	19.29±0.48d	2872.91±86.98e
		F	35.5±1.99bc	76.5±2.70cd	22.08±0.27cd	19.56±0.56bc	3303.92±89.33c
	冬闲-大豆/- Winter fallow-soybean / -	F0	34.9±1.95bc	72.8±2.35de	21.88±0.27de	19.65±0.60b	3129.98±133.79d
		F	37.2±1.50ab	81.8±2.09ab	22.47±0.27abc	19.39±0.46cd	3563.97±177.53b
	F 值 *F* value	轮作模式 Rotation pattern (A)	24.569**	12.026**	41.273**	102.913**	94.552**
		施肥水平 Fertilizer treatment (B)	8.730*	132.099**	13.453**	0.049	445.298**
		轮作模式×施肥水平 A×B	0.053	0.581	1.035	8.041**	4.367*
2020	大蒜-大豆/大蒜 Garlic-soybean / garlic	F0	36.8±1.28d	78.8±1.72c	22.18±0.22b	19.97±0.48a	3490.32±43.17d
		F	41.1±1.28a	84.7±1.80a	22.57±0.22a	19.94±0.46a	3811.89±86.62a
	芥菜-大豆/芥菜 Leaf mustard-soybean / leaf mustard	F0	37.2±1.28d	76.2±1.69d	22.29±0.22b	19.92±0.55a	3383.41±58.17e
		F	39.9±1.10b	85.3±1.76a	22.66±0.22a	19.96±0.56a	3858.06±54.39a
	小麦-大豆/小麦 Wheat-soybean / wheat	F0	33.7±1.42e	72.2±1.77f	21.88±0.22c	19.38±0.43b	3061.53±76.24g
		F	36.6±1.35d	80.7±2.48b	22.31±0.22b	19.71±0.43a	3548.62±64.32c
	冬闲-大豆/- Winter fallow-soybean/ -	F0	36.5±1.99d	74.8±1.56e	22.21±0.14b	19.83±0.48a	3294.37±96.97f
		F	38.2±1.35c	81.5±2.20b	22.58±0.14a	19.84±0.48a	3651.10±89.09b
	F 值 *F* value	轮作模式 Rotation pattern (A)	112.903**	64.314**	12.076**	6.069*	165.329**
		施肥水平 Fertilizer treatment (B)	545.514**	785.811**	3013.410**	89.634**	1780.104**
		轮作模式×施肥水平 A×B	18.595**	7.754**	3.962	78.902**	18.337**

同列不同小写字母表示不同轮作模式及施肥处理间在P<0.05水平差异显著。*、**分别表示在P<0.05和P<0.01水平影响显著。Different lowercase letters in the same column indicate significant differences at P<0.05 level among fertilization treatments and rotation patterns. * and ** indicate significant effect at P<0.05 and P<0.01 levels, respectively.

分枝数和病株率影响均显著 (P<0.05)。大蒜-大豆和芥菜-大豆轮作模式下株高、茎粗、底荚高度和分枝数较高, 冬闲-大豆模式次之, 小麦-大豆轮作模式最低; 病株率呈相反趋势。施肥显著增加株高、茎粗、底荚高度和分枝数, 降低病株率。以 2020 年为例, 施肥处理下, 与冬闲-大豆模式相比, 大蒜-大豆和芥菜-大豆轮作模式下株高、茎粗、底荚高度和分枝数分别增加 6.39% 和 7.76% (P<0.05)、6.49% 和 5.31% (P<0.05)、6.36% 和 8.91% (P<0.05)、2.63% 和 2.63%, 病株率则降低 86.84% 和 89.47% (P<0.05), 而小麦-大豆轮作模式下株高、茎粗、底荚高度和分枝数分别降低 2.99% (P<0.05)、8.12% (P<0.05)、1.27% 和 5.26%, 而病株率则增加 50.00% (P<0.05)。

2.3 前茬秸秆还田下轮作模式和施肥对生物量累积分配的影响

分析表 4 可知, 前茬作物秸秆还田下种植模式和施肥及其互作对大豆生物量累积分配影响显著 (P<0.05), 不同轮作模式下, 大蒜-大豆和芥菜-大豆轮作模式下总干重和籽粒干重较高, 冬闲-大豆模式次之, 小麦-大豆模式下最低。而收获指数在小麦-大豆轮作模式下最高, 大蒜-大豆和芥菜-大豆轮作模式下次之, 冬闲-大豆模式下最低。施肥显著提高了总干重和籽粒干重 (P<0.05), 但是降低了生物量收获指数。两年数据表明, 在大蒜-大豆和芥菜-大豆轮作模式中施肥处理下总干重和籽粒干重最高, 收获指数相对较高, 利于高产形成。

2.4 前茬秸秆还田下轮作模式和施肥对氮素累积分配的影响

由于在 2019 年试验时主要关注了产量效应, 在发现处理间产量差异较大后, 于 2020 年试验测定了氮累积与分配。如表 5 所示, 前茬作物秸秆还田下种植模式和施肥及其互作对大豆总氮累积量、籽粒氮累积量、氮素收获指数和氮素生产效率影响显著 (P<0.05)。大蒜-大豆和芥菜-大豆轮作模式下总氮累积量和籽粒氮累积量较高, 冬闲-大豆模式次之, 小麦-大豆轮作模式下最低。而收获指数和氮素生产效率则表现为小麦-大豆轮作模式显著高于其他 3 种模式 (P<0.05)。施肥显著增加总氮累积量和籽粒氮累积量 (P<0.05), 却降低氮素收获指数和氮素生产效率 (P<0.05)。不同处理下, 在大蒜-大豆和芥菜-大豆轮

表 3　前茬作物秸秆还田下轮作模式和施肥对大豆形态指标和病株率的影响

Table 3　Effects of rotation pattern and fertilization application on plant morphological and diseased plant rate of soybean with straw returning of preceding crop

年份 Year	轮作模式/还田秸秆 Rotation pattern / returned straw	施肥处理 Fertilization treatment	株高 Plant height (cm)	茎粗 Stem diameter (mm)	底荚高度 Height of bottom pod (cm)	分枝数 Branch number per plant	病株率 Diseased plant rate (%)
2019	大蒜-大豆/大蒜 Garlic-soybean / garlic	F0	75.5±1.11c	7.28±0.25a	16.3±0.31c	3.3±0.17ef	0.11±0.02d
		F	78.3±1.37a	7.32±a0.07	17.2±0.32a	4.0±0.26ab	0.13±0.02d
	芥菜-大豆/芥菜 Leaf mustard-soybean / leaf mustard	F0	75.2±1.25c	7.36±0.07a	15.8±0.31d	3.5±0.26de	0.13±0.02d
		F	76.5±1.82b	7.42±0.04a	16.9±0.35b	4.1±0.20a	0.12±0.02d
	小麦-大豆/小麦 Wheat-soybean / wheat	F0	66.2±1.33f	6.11±0.07d	14.4±0.29f	3.1±0.26f	1.21±0.17a
		F	70.2±1.37e	6.38±0.08c	15.3±0.30e	3.5±0.20de	1.01±0.14b
	冬闲-大豆/- Winter fallow-soybean / -	F0	69.6±1.45e	6.28±0.17c	15.8±0.52d	3.6±0.17cd	0.87±0.12bc
		F	72.4±1.27d	6.72±0.16b	15.9±0.31d	3.8±0.26bc	0.85±0.12c
	F 值 *F* value	轮作模式 Rotation pattern (A)	384.592**	231.247**	337.685**	10.015**	133.333**
		施肥水平 Fertilizer treatment (B)	182.866**	56.636**	294.502**	108.300**	143.765**
		轮作模式×施肥水平 A×B	7.526*	12.393**	25.742**	5.900*	129.856**
2020	大蒜-大豆/大蒜 Garlic-soybean / garlic	F0	74.9±1.06d	6.92±0.04b	16.1±0.31c	3.4±0.26cd	0.08±0..02d
		F	78.0±1.37b	7.21±0.03a	16.7±0.31b	3.9±0.35a	0.10±0.02d
	芥菜-大豆/芥菜 Leaf mustard-soybean / leaf mustard	F0	75.8±1.32c	7.12±0.03a	16.5±0.31b	3.6±0.26abc	0.09±0.02d
		F	79.2±1.38a	7.13±0.04a	17.1±0.32a	3.9±0.17a	0.08±0.02d
	小麦-大豆/小麦 Wheat-soybean / wheat	F0	69.3±1.37g	6.03±0.03a	15.1±0.30f	3.2±0.20d	1.32±0.19a
		F	71.3±1.39f	6.22±0.03d	15.5±0.28e	3.6±0.17abc	1.14±0.16b
	冬闲-大豆/- Winter fallow-soybean / -	F0	71.2±1.46f	6.75±0.03c	15.8±0.52d	3.5±0.17bcd	0.74±0.10c
		F	73.5±1.54e	6.77±0.21c	15.7±0.44de	3.8±0.20ab	0.76±0.11c
	F 值 *F* value	轮作模式 Rotation pattern (A)	429.036**	228.270**	81.982**	16.895**	133.333**
		施肥水平 Fertilizer treatment (B)	298.148**	17.694**	865.280**	21.774**	90.090**
		轮作模式×施肥水平 A×B	4.895*	5.050*	129.114**	0.355	147.748**

同列不同小写字母表示不同轮作模式及施肥处理间在$P<0.05$水平差异显著。*、**分别表示在$P<0.05$和$P<0.01$水平影响显著。Different lowercase letters in the same column indicate significant differences at $P<0.05$ level among fertilization treatments and rotation patterns. * and ** indicate significant effect at $P<0.05$ and $P<0.01$ levels, respectively.

表 4　前茬作物秸秆还田下轮作模式和施肥对生物量累积分配的影响

Table 4　Effects of rotation pattern and fertilization application on biomass accumulation and allocation of soybean with straw returning of preceding crop

轮作模式/还田秸秆 Rotation pattern / returned straw	施肥处理 Fertilization treatment	2019 总干重 Total dry weight ($kg·hm^{-2}$)	2019 籽粒干重 Grain dry weight ($kg·hm^{-2}$)	2019 收获指数 Harvest index	2020 总干重 Total dry weight ($kg·hm^{-2}$)	2020 籽粒干重 Grain dry weight ($kg·hm^{-2}$)	2020 收获指数 Harvest index
大蒜-大豆/大蒜 Garlic-soybean/garlic	F0	11 184.1±193.96d	3061.1±62.18d	27.37±0.25c	11 604.3±287.28b	3114.6±56.12cd	26.84±0.48bcd
	F	13 220.5±292.94a	3459.8±91.54a	26.17±0.46e	13 043.0±259.44a	3400.3±62.10a	26.07±0.49cd
芥菜-大豆/芥菜 Leaf mustard-soybean / leaf mustard	F0	11 668.0±218.60c	3114.2±84.51c	26.69±0.45d	11 168.7±193.71b	3018.9±79.05de	27.03±0.93bc
	F	12 949.9±230.11ab	3359.2±61.72b	25.94±0.51e	13 097.9±238.29a	3438.2±62.46a	26.25±0.73a
小麦-大豆/小麦 Wheat-soybean/wheat	F0	8202.0±474.77f	2529.5±78.56g	30.84±0.53a	9333.4±517.94c	2743.1±66.60f	29.39±1.29ab
	F	9842.3±203.36e	2908.4±84.88e	29.55±0.51b	11 162.6±460.53b	3165.7±108.00bc	28.36±1.29cd
冬闲-大豆/- Winter fallow-soybean/-	F0	11 235.3±321.61d	2754.9±80.11f	24.52±0.50f	11 663.2±262.47b	2940.3±77.11e	25.21±0.50cd
	F	12 667.2±280.94b	3140.2±64.04c	24.79±0.49f	12 081.6±958.34b	3256.8±74.87b	25.03±0.44d
F 值 *F* value	轮作模式 Rotation pattern (A)	457.915**	178.518**	420.103**	22.204**	7.648*	9.382*
	施肥水平 Fertilizer treatment (B)	341.680**	1608.851**	157.077**	76.637**	30.757**	63.080**
	轮作模式×施肥水平 A×B	3.586	1345.338**	36.428**	4.631*	643.437**	4.308*

同列不同小写字母表示不同轮作模式及施肥处理间在$P<0.05$水平差异显著。*、**分别表示在$P<0.05$和$P<0.01$水平影响显著。Different lowercase letters in the same column indicate significant differences at $P<0.05$ level among fertilization treatments and rotation patterns. * and ** indicate significant effect at $P<0.05$ and $P<0.01$ levels, respectively.

表 5 前茬作物秸秆还田下轮作模式和施肥对氮素累积分配的影响

Table 5 Effects of rotation pattern and fertilization application on nitrogen accumulation and allocation of soybean with straw returning of preceding crop

轮作模式/还田秸秆 Rotation pattern / returned straw	施肥处理 Fertilization treatment	总氮累积量 Total nitrogen accumulation ($kg \cdot hm^{-2}$)	籽粒氮累积量 Grain nitrogen accumulation ($kg \cdot hm^{-2}$)	氮收获指数 Harvest index of nitrogen	氮素生产效率 Nitrogen production efficiency [$kg \cdot kg^{-1}$(N)]
大蒜-大豆/大蒜 Garlic-soybean / garlic	F0	201.20±7.99d	105.61±3.14d	52.49±0.32cd	17.29±0.27bc
	F	231.55±4.59a	119.36±2.99a	51.55±0.28e	16.98±0.38de
芥菜-大豆/芥菜 Leaf mustard-soybean / leaf mustard	F0	199.41±6.69d	107.44±3.85c	53.88±0.49ab	17.73±0.24a
	F	223.95±4.33b	115.89±4.24b	51.75±0.40de	17.04±0.25de
小麦-大豆/小麦 Wheat-soybean / wheat	F0	159.98±6.96g	87.27±2.06g	54.55±0.33a	17.96±0.29a
	F	189.11±5.34e	100.34±2.91e	53.06±0.29bc	17.47±0.31b
冬闲-大豆/- Winter fallow-soybean / -	F0	182.64±3.65f	95.04±3.50f	52.04±0.69de	17.14±0.23cd
	F	211.80±3.54c	108.34±2.93c	51.15±0.38e	16.83±0.22e
F 值 *F* value	轮作模式 Rotation pattern (A)	472.585**	452.287**	21.317**	24.866**
	施肥水平 Fertilizer treatment (B)	1058.737**	3465.151**	101.791**	366.792**
	轮作模式×施肥水平 A×B	2.179	36.073**	4.602*	14.853**

同列不同小写字母表示不同轮作模式及施肥处理间在$P<0.05$水平差异显著。*、**分别表示在$P<0.05$和$P<0.01$水平影响显著。Different lowercase letters in the same column indicate significant differences at $P<0.05$ level among fertilization treatments and rotation patterns. * and ** indicate significant effect at $P<0.05$ and $P<0.01$ levels, respectively.

作模式中, 施肥处理下总氮累积量和籽粒氮累积量最高, 收获指数适中, 利于高产形成。尽管小麦-大豆轮作模式下收获指数和氮素生产效率最高, 但是总氮累积量和籽粒氮累积量最低, 不利于产量形成。

2.5 前茬秸秆还田下轮作模式和施肥对土壤容重和有机质含量的影响

分析表 6 可知, 大豆 V2 期土壤容重和有机质均低于 R8 期。轮作模式对土壤容重和有机质含量影响达显著水平 ($P<0.05$)。小麦-大豆轮作模式下土壤容重最低, 大蒜-大豆和芥菜-大豆轮作模式次之, 冬闲-大豆模式最高, 而有机质含量则呈相反趋势。施肥对土壤容重和有机质含量的影响均未达显著水平。

2.6 前茬秸秆还田下轮作模式和施肥对土壤全氮和速效氮含量的影响

分析表 7 可知, V2 期田间土壤全氮和速效氮含量均低于 R8 期, 轮作模式和施肥对 V2 和 R8 期土壤全氮和速效氮影响达显著水平 ($P<0.05$)。大蒜-大豆、芥菜-大豆和小麦-大豆轮作模式下土壤全氮含量显著高于冬闲-大豆模式 ($P<0.05$), 施肥提高了不同轮作模式下土壤全氮含量。秸秆还田显著降低了

表 6 前茬作物秸秆还田下轮作模式和施肥对土壤容重和有机质含量的影响

Table 6 Effects of rotation pattern and fertilization application on soil bulk density and organic matter content with straw returning of preceding crop

轮作模式/还田秸秆 Rotation pattern / returned straw	施肥处理 Fertilization treatment	2019 容重 Bulk density ($g \cdot cm^{-3}$) V2	2019 容重 Bulk density ($g \cdot cm^{-3}$) R8	2019 有机质 Organic matter ($g \cdot kg^{-1}$) V2	2019 有机质 Organic matter ($g \cdot kg^{-1}$) R8	2020 容重 Bulk density ($g \cdot cm^{-3}$) V2	2020 容重 Bulk density ($g \cdot cm^{-3}$) R8	2020 有机质 Organic matter ($g \cdot kg^{-1}$) V2	2020 有机质 Organic matter ($g \cdot kg^{-1}$) R8
大蒜-大豆/大蒜 Garlic-soybean / garlic	F0	1.29±0.03d	1.43±0.04cd	17.8±0.31cd	18.3±0.26c	1.25±0.02b	1.44±0.03b	18.1±0.31aa	18.4±0.26bcd
	F	1.28±0.03e	1.43±0.02cd	17.9±0.38bc	18.4±0.17c	1.26±0.03b	1.45±0.03b	18.3±0.45a	18.6±0.10abc
芥菜-大豆/芥菜 Leaf mustard-soybean / leaf mustard	F0	1.28±0.04e	1.45±0.04bc	17.9±0.31bc	18.6±0.20b	1.26±0.03b	1.44±0.03b	18.2±0.32a	18.7±0.17ac
	F	1.30±0.03c	1.44±0.03c	17.8±0.33cd	18.4±0.30c	1.25±0.03b	1.43±0.03bc	18.3±0.38a	18.6±0.26abc
小麦-大豆/小麦 Wheat-soybean / wheat	F0	1.26±0.03f	1.39±0.04e	18.2±0.32a	18.8±0.20a	1.24±0.02b	1.41±0.03cd	18.1±0.32a	18.9±0.17a
	F	1.25±0.03g	1.40±0.02de	18.1±0.36ab	18.7±0.17ab	1.25±0.03b	1.39±0.02d	18.3±0.32a	18.8±0.17ab
冬闲-大豆/- Winter fallow-soybean / -	F0	1.32±0.03a	1.48±0.03ab	17.5±0.31e	17.7±0.20d	1.33±0.04a	1.49±0.03a	17.7±0.31b	18.1±0.20d
	F	1.28±0.03b	1.49±0.03a	17.6±0.33de	17.8±0.17d	1.31±0.04a	1.50±0.03a	17.6±0.31b	18.2±0.26cd
F 值 *F* value	轮作模式 Rotation pattern (A)	285.630**	41.421**	23.950**	123.857**	21.648**	60.781**	29.698**	6.686*
	施肥水平 Fertilizer treatment (B)	2.8770	0.110	0.000	0.750	0.607	0.128	3.477	0.150
	轮作模式×施肥水平 A×B	25.892**	0.404	1.240	6.750*	5.462*	1.149	1.739	1.350

同列不同小写字母表示不同轮作模式及施肥处理间在$P<0.05$水平差异显著。*、**分别表示在$P<0.05$和$P<0.01$水平影响显著。Different lowercase letters in the same column indicate significant differences at $P<0.05$ level among fertilization treatments and rotation patterns. * and ** indicate significant effect at $P<0.05$ and $P<0.01$ levels, respectively.

表 7　不同轮作模式下秸秆还田和施肥对土壤全氮和速效氮含量的影响

Table 7　Effects of rotation pattern and fertilization application on soil total nitrogen and available nitrogen contents with straw returning of preceding crop

轮作模式/还田秸秆 Rotation pattern / returned straw	施肥处理 Fertilization treatment	2019 全氮 Total nitrogen (g·kg^{-1}) V2	2019 全氮 Total nitrogen (g·kg^{-1}) R8	2019 速效氮 Available nitrogen (mg·kg^{-1}) V2	2019 速效氮 Available nitrogen (mg·kg^{-1}) R8	2020 全氮 Total nitrogen (g·kg^{-1}) V2	2020 全氮 Total nitrogen (g·kg^{-1}) R8	2020 速效氮 Available nitrogen (mg·kg^{-1}) V2	2020 速效氮 Available nitrogen (mg·kg^{-1}) R8
大蒜-大豆/大蒜 Garlic-soybean / garlic	F0	0.98±0.05cd	1.06±0.06c	15.9±0.61d	22.4±0.69d	1.07±0.05cd	1.09±0.07cd	16.3±0.98d	24.2±0.42de
	F	1.24±0.03ab	1.24±0.05b	22.7±0.69b	26.9±1.32c	1.28±0.06b	1.32±0.05a	22.5±0.54b	27.5±0.53c
芥菜-大豆/芥菜 Leaf mustard-soybean / leaf mustard	F0	0.96±0.04d	1.04±0.12c	16.2±0.37d	22.7±0.78d	1.04±0.06d	1.08±0.06d	16.9±0.98cd	23.9±0.55ef
	F	1.25±0.03a	1.28±0.10ab	23.1±0.43a	27.4±0.58bc	1.29±0.04ab	1.33±0.10a	22.8±0.42b	28.2±0.50b
小麦-大豆/小麦 Wheat-soybean / wheat	F0	1.04±0.03c	1.10±0.11c	16.1±0.52d	22.5±0.54d	1.12±0.03c	1.14±0.06c	17.1±1.46cd	23.6±0.43f
	F	1.28±0.03a	1.33±0.05a	23.4±0.48a	26.8±1.04c	1.32±0.07a	1.38±0.06a	22.9±0.46b	27.9±0.48b
冬闲-大豆/- Winter fallow-soybean / -	F0	0.94±0.04d	0.95±0.07d	17.9±0.45c	27.9±0.95b	1.02±0.05d	1.04±0.05d	18.3±0.78c	24.3±0.42d
	F	1.18±0.08b	1.27±0.08ab	22.4±0.43b	30.4±0.66a	1.23±0.05b	1.26±0.07b	24.9±2.69a	28.6±0.50a
F 值 *F* value	轮作模式 Rotation pattern (A)	8.010*	5.714*	14.801**	470.254**	19.579**	10.750**	8.312*	34.071**
	施肥水平 Fertilizer treatment (B)	546.336**	229.488**	182.808**	724.233**	192.857**	487.118**	225.891**	9973.146**
	轮作模式×施肥水平 A×B	1.150	3.276	180.542**	11.618**	0.349	0.686	0.194	38.002**

同列不同小写字母表示不同轮作模式及施肥处理间在$P<0.05$水平差异显著。*、**分别表示在$P<0.05$和$P<0.01$水平影响显著。Different lowercase letters in the same column indicate significant differences at $P<0.05$ level among fertilization treatments and rotation patterns. * and ** indicate significant effect at $P<0.05$ and $P<0.01$ levels, respectively.

土壤速效氮含量, 施肥却显著提高了速效氮含量 ($P<0.05$)。

3　讨论

作物秸秆中含有丰富的营养元素, 但秸秆在腐解时也会向土壤中释放化感物质, 进而影响作物出苗。本研究中, 大蒜、芥菜和小麦秸秆的还田量和向土壤中的养分输入量均为小麦>芥菜>大蒜, 大量的小麦秸秆集中还田造成土壤孔隙度增加, 失墒较快, 影响种子发芽出苗, 尚未腐解的秸秆阻碍根系伸长, 导致根系无法接触到土壤[17], 同时, 秸秆释放的化感物质也显著降低幼苗出苗率[18], 导致最终收获密度降低, 这与本研究中小麦秸秆还田后大豆收获密度最低的结果一致; 而大蒜和芥菜型油菜秸秆还田量仅为麦秸还田量的 35%~50%, 因此未影响出苗率 (2020 年)。此外, 本研究中小麦秸秆还田增加了大豆病株率, 这可能与 2019 和 2020 年度长江流域小麦病虫害发生相对较重, 小麦秸秆携带大量病菌或虫卵进入土壤有关; 大蒜和芥菜型油菜秸秆还田显著降低大田病株率, 可能与大蒜和芥菜型油菜秸秆在腐解过程中释放出的化感物质具有抑制菌丝生长和消灭线虫的作用有关[19-20]。

已有研究表明, 秸秆还田对作物植株生长具有重要的调控效应。本研究中大蒜和芥菜还田处理下大豆株高、茎粗、分枝数、单株荚数、单株粒数、百粒重和最终产量均最高, 最终产量较冬闲-大豆模式增加 4.40%~10.30% 和 5.66%~7.09% (施肥处理)、4.88%~8.23% 和 2.19~8.78% (不施肥)。这与林郸等[21]在“大叶芥菜 (*Brassica juncea* var. *foliosa*)-水稻 (*Oryza sativa*)”轮作模式和 Yang 等[22] 在“大蒜-西瓜 (*Citrullus lanatus*)”轮作模式中的研究结果一致。王幸等[23]在江苏徐州的研究认为小麦秸秆还田下可以提高大豆产量, 王秋菊等[24] 在黑龙江黑河地区的研究则表明小麦秸秆还田对大豆产量影响不显著, 而本研究试验表明小麦秸秆还田降低了大豆产量, 这可能与徐州属于温带半湿润季风气候, 黑河属于寒温带大陆性季风气候, 而南京属于亚热带湿润气候有关。本试验中的大豆生育前期处于梅雨季节, 多雨低温寡照, 麦秸中化感物质在雨水浸泡中充分释放, 影响大豆生长。而大蒜和芥菜秸秆还田量少, 化感物质相对较低, 同时还可以诱导真菌的丰富度和多样性, 促进作物生长[25]。

与冬闲-大豆模式相比, 秸秆还田降低了土壤容重和速效氮含量, 提高了土壤有机质和全氮含量, 小麦-大豆轮作模式下容重最低, 大蒜-大豆和芥菜-大豆轮作模式下次之, 冬闲-大豆模式最高, 而有机质和全氮含量则呈相反趋势, 这与秸秆还田量和秸秆养分输入量一致, 也与林郸等[21] 研究结果一致。此外, 秸秆还田显著降低了土壤速效氮含量, 其原因可能是秸秆碳氮比较高, 还田后分解过程中微生物大量增殖消耗土壤中速效氮含量[13]。

作物产量形成以生物量和养分吸收为基础。本研究中大蒜-大豆和芥菜-大豆轮作模式下总生物量和籽粒生物量、总氮累积量和籽粒氮累积量最高,

利于产量形成; 小麦-大豆轮作模式下尽管生物量和氮素收获指数和氮素生产效率最高, 但是总生物量和籽粒生物量、总氮累积量和籽粒氮累积量均最低, 不利于高产形成。

崔喜安等[26]研究认为小麦秸秆还田后, 增施氮肥可以显著提高大豆产量。本研究也发现增加施肥可以显著促进植株生长、降低病株率、提高土壤全氮和速效氮、生物量及氮素累积量和收获密度, 但是降低氮素收获指数和氮素利用效率。其原因可能是增施肥料, 尤其是氮肥, 降低了碳氮比, 利于微生物大量增殖, 加速了秸秆腐解, 此外增施氮肥还降低了化感物质对植物生长的抑制作用[27]。因此, 在生产中秸秆还田后必须增施化肥, 加速秸秆降解, 降低化感抑制效应。

4 结论

不同种植模式下前茬作物秸秆还田、施肥及其互作对大豆产量形成影响显著, 大蒜-大豆和芥菜-大豆轮作模式下增施肥料处理下大豆产量较高。小麦-大豆轮作模式下大豆总生物量和籽粒生物量、总氮累积量和籽粒氮累积量均较低, 不利于高产形成。秸秆还田后施肥处理可以显著促进植株生长、降低病株率、提高土壤全氮和速效氮、生物量及氮素累积量和收获密度, 进而增加产量, 其中施肥对小麦-大豆轮作模式中大豆的增产效果最高。在生产中建议推广大蒜-大豆和芥菜-大豆轮作模式。小麦-大豆轮作模式中在小麦秸秆还田后必须施肥才能达到高产。

参考文献 References

[1] BLANCO-CANQUI H, LAL R. Corn stover removal impacts on micro-scale soil physical properties[J]. Geoderma, 2008, 145(3/4): 335−346

[2] CHEN X W, ZHAO H B, LIU J F, et al. Winter wheat nitrogen utilization under different mulching practices on the Loess Plateau[J]. Agronomy Journal, 2020, 112(2): 1391−1405

[3] ZUO Q S, KUAI J, ZHAO L, et al. The effect of sowing depth and soil compaction on the growth and yield of rapeseed in rice straw returning field[J]. Field Crops Research, 2017, 203: 47−54

[4] 穆心愿, 赵霞, 谷利敏, 等. 秸秆还田量对不同基因型夏玉米产量及干物质转运的影响[J]. 中国农业科学, 2020, 53(1): 29−41
MU X Y, ZHAO X, GULI M, et al. Effects of straw returning amount on grain yield, dry matter accumulation and transfer in summer maize with different genotypes[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2020, 53(1): 29−41

[5] GASPAR E, NEVES H C. Chemical constituents in allelopathic straw of wheat (*Triticum aestivum* L.)[J]. Allelopathy Journal, 1995, 2(1): 79

[6] 董明辉, 顾俊荣, 陈培峰, 等. 麦秸还田与氮肥互作对大穗型杂交粳稻不同部位枝梗和颖花形成的影响[J]. 中国农业科学, 2015, 48(22): 4437−4449
DONG M H, GU J R, CHEN P F, et al. Effects of interaction of wheat straw residue with field and nitrogen applications on branches and spikelets formation at different positions in large panicle hybrid rice[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2015, 48(22): 4437−4449

[7] REBAFKA F P, HEBEL A, BATIONO A, et al. Short- and long-term effects of crop residues and of phosphorus fertilization on pearl millet yield on an acid sandy soil in Niger, West Africa[J]. Field Crops Research, 1994, 36(2): 113−124

[8] PRASAD R, GANGAIAH B, AIPE K C. Effect of crop residue management in a rice-wheat cropping system on growth and yield of crops and on soil fertility[J]. Experimental Agriculture, 1999, 35(4): 427−435

[9] 李彦斌, 刘建国, 程相儒, 等. 秸秆还田对棉花生长的化感效应[J]. 生态学报, 2009, 29(9): 4942−4948
LI Y B, LIU J G, CHENG X R, et al. The allelopathic effects of returning cotton stalk to soil on the growth of succeeding cotton[J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(9): 4942−4948

[10] SINGH S, SAVOY H J, YIN X H, et al. Phosphorus and potassium fertilizer rate verification for a corn-wheat-soybean rotation system in Tennessee[J]. Agronomy Journal, 2019, 111(4): 2060−2068

[11] WU H W, HAIG T, PRATLEY J, et al. Biochemical basis for wheat seedling allelopathy on the suppression of annual ryegrass (*Lolium rigidum*)[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2002, 50(16): 4567−4571

[12] 王幸, 吴存祥, 齐玉军, 等. 麦秸处理和播种方式对夏大豆农艺性状及土壤物理性状的影响[J]. 中国农业科学, 2016, 49(8): 1453−1465
WANG X, WU C X, QI Y J, et al. Effects of straw management and sowing methods on soybean agronomic traits and soil physical properties[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2016, 49(8): 1453−1465

[13] 李帆, 王静, 武际, 等. 尿素硝酸铵调节碳氮比促进小麦秸秆堆肥腐熟[J]. 植物营养与肥料学报, 2019, 25(5): 832−840
LI F, WANG J, WU J, et al. Fast production of wheat straw aerobic compost through regulating C/N ratio with urea ammonium nitrate solution[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2019, 25(5): 832−840

[14] HUANG T, YANG H, HUANG C C, et al. Effect of fertilizer N rates and straw management on yield-scaled nitrous oxide emissions in a maize-wheat double cropping system[J]. Field Crops Research, 2017, 204: 1−11

[15] 王建生, 李潇, 张海峰, 等. 大豆枯萎病菌尖孢镰孢遗传多样性及大豆品种抗性[J]. 植物病理学报, 2015, 45(2): 167−174
WANG J S, LI X, ZHANG H F, et al. Genetic diversity of *Fusarium oxysporum* and identification of resistance to soybean Fusarium wilt on soybean lines[J]. Acta Phytopathologica Sinica, 2015, 45(2): 167−174

[16] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000

BAO S D. Soil and Agricultural Chemistry Analysis[M]. Beijing: Chinese Agricultural Press, 2000

[17] 庄秋丽, 黄玉波, 姜秀芳, 等. 农作物秸秆还田及其有效还田方式的研究进展[J]. 中国农学通报, 2019, 35(22): 38−41
ZHUANG Q L, HUANG Y B, JIANG X F, et al. Straw returning and its effective returning method: research progress[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2019, 35(22): 38−41

[18] NAKANO H, MORITA S, SHIGEMORI H, et al. Plant growth inhibitory compounds from aqueous leachate of wheat straw[J]. Plant Growth Regulation, 2006, 48(3): 215−219

[19] GONG B, BLOSZIES S, LI X, et al. Efficacy of garlic straw application against root-knot *Nematodes* on tomato[J]. Scientia Horticulturae, 2013, 161: 49−57

[20] MONFORT W S, CSINOS A S, DESAEGER J, et al. Evaluating *Brassica* species as an alternative control measure for root-knot nematode (*M. incognita*) in *Georgia* vegetable plasticulture[J]. Crop Protection, 2007, 26(9): 1359−1368

[21] 林郸, 李郁, 孙永健, 等. 不同轮作模式下秸秆还田与氮肥运筹对杂交籼稻产量及米质的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2020, 28(10): 1581−1590
LIN D, LI Y, SUN Y J, et al. Effects of straw returning and nitrogen application on yield and quality of hybrid indica rice under different rotation patterns[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2020, 28(10): 1581−1590

[22] YANG R P, MO Y L, LIU C M, et al. The effects of cattle manure and garlic rotation on soil under continuous cropping of watermelon (*Citrullus lanatus* L.)[J]. PLoS One, 2016, 11(6): e0156515

[23] 王幸, 邢兴华, 徐泽俊, 等. 耕作方式和秸秆还田对黄淮海夏大豆产量和土壤理化性状的影响[J]. 中国油料作物学报, 2017, 39(6): 834−841
WANG X, XING X H, XU Z J, et al. Effects of tillage and straw returning on soybean yield and soil physicochemical properties in Yellow-Huai-Hai Rivers Valley[J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2017, 39(6): 834−841

[24] 王秋菊, 姜宇, 周鑫, 等. 豆麦轮作区麦秸长期还田对作物产量及土壤化学性质的影响[J]. 农业工程学报, 2019, 35(24): 113−120
WANG Q J, JIANG Y, ZHOU X, et al. Effects of long-term wheat straw returned to field on crop yield and soil chemical properties in soybean-wheat rotation areas[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(24): 113−120

[25] 陈昱, 张福建, 范淑英, 等. 秸秆腐解物对豇豆连作土壤性质及幼苗生理指标的影响[J]. 核农学报, 2019, 33(7): 1472−1479
CHEN Y, ZHANG F J, FAN S Y, et al. Effects of crop straw decomposition on the soil properties of the continuous cropping cowpea and the seedling physiological indexes[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2019, 33(7): 1472−1479

[26] 崔喜安, 姜宇, 米刚, 等. 长期麦秸还田对暗棕壤土壤肥力和大豆产量的影响[J]. 大豆科学, 2011, 30(6): 976−978
CUI X A, JIANG Y, MI G, et al. Effect of long-term application of wheat straw on fertility of dark brown soil and yield of soybean[J]. Soybean Science, 2011, 30(6): 976−978

[27] 史洪洲, 汪扬媚, 胡庭兴, 等. 核桃凋落叶分解对小麦生长的影响及施氮的缓解效应[J]. 应用与环境生物学报, 2017, 23(5): 818−825
SHI H Z, WANG Y M, HU T X, et al. Effects of decomposing walnut leaf litter on growth of wheat and counteracting effect of N fertilization[J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2017, 23(5): 818−825