



# 有机肥通过改善红壤团聚体结构促进鲜食大豆高产

张景云<sup>1</sup>, 柳开楼<sup>2</sup>, 王志美<sup>3</sup>, 王发洪<sup>4</sup>, 何小林<sup>3</sup>, 朱莉英<sup>4</sup>, 徐小林<sup>2</sup>, 黄庆海<sup>2</sup>

(1. 江西省农业科学院 蔬菜花卉研究所, 江西 南昌 330200; 2. 江西省红壤及种质资源研究所, 江西 南昌 331717; 3. 江西省农业技术推广中心, 江西 南昌 330046; 4. 铅山县农业技术推广服务中心, 江西 铅山 334500)

**摘要:**为探究化肥配施有机肥条件下土壤团聚体与鲜食大豆产量的量化关系,本研究于2022和2023年在典型红壤坡耕地上设置不施肥(CK)、化肥(CF)、化肥配施有机肥(COF)等处理的田间小区试验,分析了不同处理的鲜食大豆产量性质、土壤团聚体组分及平均重量直径。结果表明:在所有处理中,COF处理的荚果数显著增加,2022年分别比CK和CF处理增加了55.1%和36.5%,2023年的增幅分别为53.98%和40.54%。COF处理的鲜食大豆带荚和不带荚籽粒鲜重也分别比CF处理提高了41.70%~40.65%和40.03%~41.78%。在所有处理中,COF处理的团聚体组分中>2.00 mm和0.25~2.00 mm的比例显著较高,而<0.053 mm的比例则显著较低。与CF相比,2022和2023年COF处理下>2 mm的比例分别增加了101.95%和53.06%,但0.25~2 mm、0.053~0.25 mm和<0.053 mm的比例则与CF处理无显著差异。进一步计算发现,2022和2023年COF处理的团聚体平均重量直径也比CF处理增加了25.95%和18.80%。结合线性拟合方程表明,当>2 mm团聚体组分的比例增加1%,2022和2023年的带荚鲜重分别提高0.16和0.19 t·hm<sup>-2</sup>,不带荚鲜重分别提高0.54和0.67 t·hm<sup>-2</sup>;同时,团聚体平均重量直径增加0.1 mm,带荚和不带荚的鲜重分别提高1.79~1.99 t·hm<sup>-2</sup>和0.83~0.91 t·hm<sup>-2</sup>。因此,化肥配施有机肥是提升红壤坡耕地鲜食大豆产量的主要措施,且通过改善团聚体结构可以显著促进鲜食大豆增产。

**关键词:**鲜食大豆;红壤;团聚体;有机肥

## Organic Fertilizer Promoted High Yield of Fresh Soybean by Improving Aggregate Structure of Red Soil

ZHANG Jingyun<sup>1</sup>, LIU Kailou<sup>2</sup>, WANG Zhimei<sup>3</sup>, WANG Fahong<sup>4</sup>, HE Xiaolin<sup>3</sup>, ZHU Liying<sup>4</sup>, XU Xiaolin<sup>2</sup>, HUANG Qinghai<sup>2</sup>

(1. Institute of Vegetables and Flowers, Jiangxi Academy of Agricultural Sciences, Nanchang 330200, China; 2. Jiangxi Institute of Red Soil and Germplasm Resources, Nanchang 331717, China; 3. Jiangxi Agricultural Technology Extension Center, Nanchang 330046, China; 4. Yanshan County Agricultural Technology Extension and Service Center, Yanshan 334500, China)

**Abstract:** The objective of this study was to explore the quantitative relationship between the soil aggregate and the fresh soybean yield under the condition of organic fertilizer application, a field plot experiment was conducted in 2022 and 2023 on typical slope farmland of red soil. There were three treatments which including no fertilizer (CK), chemical fertilizer (CF) and chemical fertilizer combined with organic fertilizer (COF). Then, the yield properties of fresh soybean, soil aggregate composition and average weight diameter among different treatments were analyzed. The results showed that: the pod number of fresh soybean in COF treatment was significantly higher than those in CK and CF treatments by 55.1% and 36.5% in 2022, respectively, they were increased by 53.98% and 40.54% in 2023. The grain weight of fresh soybean with pod and without pod in COF treatment was 41.70%-40.65% and 40.03%-41.78% higher than those in CF treatment, respectively. In all treatments, the proportion of >2 mm and 0.25-2 mm in COF treatment was significantly highest, while the proportion of <0.053 mm was significantly lowest. Compared with CF, the proportion of >2 mm under COF treatment increased by 101.95% and 53.06% both in 2022 and 2023, but the proportion of 0.25-2 mm, 0.053-0.25 mm and <0.053 mm had no significant difference with CF treatment. Further calculation showed that the average weight diameter of aggregates in COF treatment was higher than CF treatment by 25.95% and 18.80% in 2022 and 2023. The linear fitting equation found that the fresh weight of seeds with pods increased by 0.16 and 0.19 t·hm<sup>-2</sup> in 2022 and 2023, respectively, then, the fresh weight of seeds without pods increased by 0.54 and 0.67 t·hm<sup>-2</sup>, respectively, when the proportion of >2 mm aggregate components increased by 1%. Otherwise, the fresh weight with pods and without pods increased by 1.79-1.99 t·hm<sup>-2</sup> and 0.83-0.91 t·hm<sup>-2</sup>, respectively, when the average weight diameter of aggregates increased by 0.1 mm. Therefore, chemical fertilizer combined with organic fertilizer could be as the main pattern to increase the yield of fresh soybean in slope farmland of red soil. It also suggested that the yield of fresh soybean could be significantly increased by improving the aggregate structure.

**Keywords:** fresh soybean; red soil; aggregates; organic fertilizer

收稿日期:2023-11-06

**基金项目:**江西省豆类产业技术体系(JXARS-24-02);江西省重点研发计划“揭榜挂帅”项目(20223BBF61020);江西省双千计划项目(jxsq2020102116)。

**第一作者:**张景云(1980—),女,博士,副研究员,主要从事豆类栽培方面的研究。E-mail:zhangjingyun0108@126.com。

**通讯作者:**柳开楼(1984—),男,博士,副研究员,主要从事红壤改良与培肥方面的研究。E-mail:liukailou@163.com。

作为大豆产业的重要方向之一,鲜食大豆种植近年在我国南方地区发展迅速<sup>[1]</sup>。受温光资源的影响,南方地区籽粒型大豆种植的产量明显低于北方地区<sup>[2-3]</sup>,而鲜食大豆的产值效益较高<sup>[4]</sup>,因此,南方地区越来越多的农户开始大力发展鲜食大豆。

红壤坡耕地是我国南方地区重要的耕地资源<sup>[5]</sup>,也是种植和发展鲜食大豆的重要土壤类型。然而,由于红壤坡耕地普遍存在肥力偏低的现象<sup>[6]</sup>,通过外源肥料提升红壤坡耕地肥力是当地种植户在鲜食大豆增产中普遍采用的管理措施之一。大量研究证明,化肥配施有机肥是提升红壤坡耕地主要作物产量的关键途径<sup>[7-9]</sup>,与化肥处理相比,化肥配施有机肥条件下玉米产量可提升 129.9%~246.7%<sup>[7]</sup>,花生产量提高 77.99%<sup>[8]</sup>,油菜产量提升 56.22%~54.13%<sup>[9]</sup>。同时,化肥配施有机肥条件下红壤坡耕地的肥力质量得到了显著提升<sup>[10]</sup>,有研究表明,化肥配施有机肥条件下红壤团聚体平均重量直径比化肥处理提升了 77.78%~84.72%<sup>[11]</sup>,且土壤结构得到显著改善<sup>[12-14]</sup>。然而,由于豆农在种植过程中主要通过增施化肥来提升鲜食大豆产量<sup>[15]</sup>,对于如何配施有机肥则关注不多,再加上化肥配施有机肥对鲜食大豆的产量提升效果还缺乏系统评估,尤其是化肥配施有机肥条件下,红壤团聚体组分如何调控鲜食大豆产量还不清晰。因此,本研究通过田间小区试验,分别设置不施肥、化肥、化肥配施有机肥等处理,分析了鲜食大豆产量性质、土壤团聚体组分及平均重量直径,并构建团聚体组分及平均重量直径与鲜食大豆产量的量化关系,以期红壤地区鲜食大豆的产量提升提供技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于 2022 年和 2023 年在江西省南昌市进贤县张公镇山南吴村(116.168 6° E 和 28.358 6° N)进行,该地属于典型的亚热带季风气候,年均温、降水分别为 19.2 °C 和 1 715 mm。试验地土壤为红壤,试验前 0~20 cm 土壤的 pH 为 4.95,有机质、碱解氮、有效磷和速效钾含量分别为 17.25 g·kg<sup>-1</sup>、85.40 mg·kg<sup>-1</sup>、14.25 mg·kg<sup>-1</sup>和 79.50 mg·kg<sup>-1</sup>。

1.2 材料

鲜食大豆品种为浙鲜 9 号,由浙江省农业科学院提供。该品种生育期较短(约 85 d),且口感香甜柔糯,抗病性较好,适宜在我国南方地区作为鲜食春大豆种植。

有机肥为以芝麻加工废弃物为原料加工制成的芝麻饼粕有机肥,由广源生物肥料公司提供,有机质含量为 75%,氮(N)、磷(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)、钾(K<sub>2</sub>O)含量

分别为 6%、1.9% 和 1.3%。

化肥氮磷钾种类分别为尿素、钙镁磷肥和氯化钾,分别由山西天泽煤化工集团股份公司、鹰潭市亿丰磷肥有限公司和中化化肥有限公司提供,尿素的氮(N)含量为 46%,钙镁磷肥的磷(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)含量为 12%,氯化钾的钾(K<sub>2</sub>O)含量为 60%。

1.3 试验设计

设置不施肥(CK)、化肥(CF)和化肥配施有机肥(COF)。每个处理 3 次重复,小区面积 20 m<sup>2</sup>,小区长和宽分别为 5 m 和 4 m,每个小区播种 10 行鲜食大豆。各处理施肥量详见表 1,且化肥处理和化肥配施有机肥处理的氮投入相同,其中化肥配施有机肥处理按照有机氮和无机氮的比例分别为 70%和 30%进行配比。所有肥料全部基肥施用。鲜食大豆的株距和行距分别为 20 cm 和 40 cm。同时,加强田间管理,促进健壮生长;雨水多时须及时清沟排水,防积水引起烂种或影响根系生长,同时如遇旱及时沟灌。

表 1 不同处理的化肥和有机肥用量

Table 1 The amount of chemical and organic fertilizers in different treatments				
		单位:t·hm <sup>-2</sup>		
处理	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	有机肥
Treatments				Organic fertilizer
CK	0	0	0	0
CF	112.5	67.5	67.5	0
COF	33.75	67.5	67.5	1312.5

1.4 测定项目及方法

在鲜食大豆采摘期,每个小区选择 10 株豆荚饱满,色泽嫩绿的植株,测定株高和荚果数,并将采摘下的荚果去掉荚之后,使用 FOSS DS2500 近红外谷物分析仪测定籽粒的蛋白质和脂肪等品质指标。同时,在豆荚色泽嫩绿时将植株全部贴地收割,每个小区单独采摘籽粒饱满的豆荚,测定带荚和不带荚籽粒鲜重及秸秆鲜重,并根据小区面积计算单位产量。

在鲜食大豆采摘完,每个小区使用不锈钢铁锹采集 0~20 cm 的原状土壤样品,带回室内风干,采用湿筛方法通过团聚体分析仪测定 >2 mm、0.25~2 mm、0.053~0.25 mm 和 <0.053 mm 的土壤团聚体组分<sup>[16]</sup>,并进一步计算团聚体平均重量直径。

1.5 统计分析

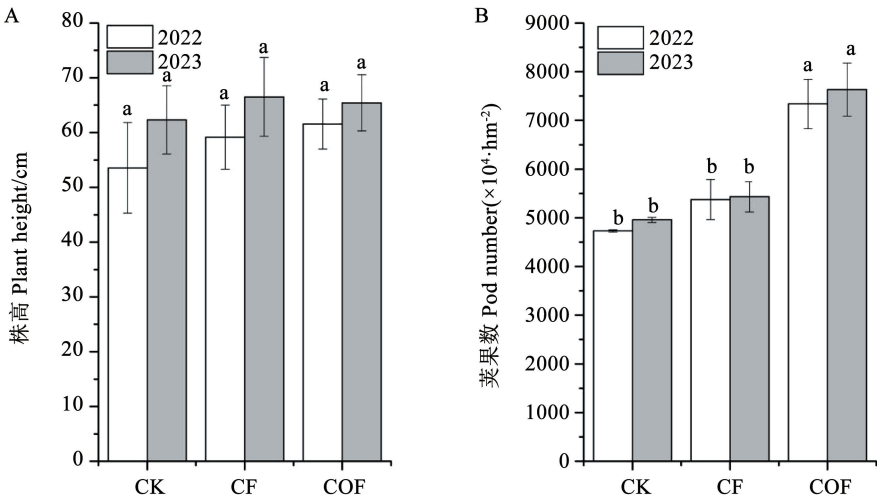
所有数据均采用 Excel 2010 进行整理,统计分析采用 SAS 9.1 软件进行,各处理之间差异采用新复极差法进行方差分析,团聚体组分和平均重量直径与鲜食大豆产量的相关关系采用线性方差进行拟合,所有图件均采用 Origin 8.5 进行制作。

2 结果与分析

2.1 不同施肥处理对鲜食大豆株高和荚果数的影响

如图 1 所示,不同施肥处理并未对鲜食大豆株

高产生显著影响,但显著改变鲜食大豆的荚果数。与 CK 处理相比,2022 和 2023 年均表现出 CF 处理的荚果数无显著增加,而 COF 处理的荚果数均显著高于 CK 和 CF 处理,2022 年的增幅分别为 55.1% 和 36.5%;2023 年分别为 53.98% 和 40.54%。



注:不同的小写字母表示相同年份各处理之间存在显著差异( $P < 0.05$ ),下同。  
Note: The different lowercase letters indicate significant differences among treatments in the same year ( $P < 0.05$ ). The same below.

图 1 不同施肥处理下鲜食大豆株高 (A) 和荚果数 (B)

Fig. 1 The plant height (A) and pod number (B) of fresh soybean under different fertilization treatments

2.2 不同施肥处理对鲜食大豆籽粒和秸秆鲜重及品质的影响

化肥配施有机肥显著提高了鲜食大豆的荚果和秸秆鲜重(表 2)。与 CK 处理相比,2022 年 COF 处理的带荚、不带荚籽粒和秸秆鲜重分别增加了 50.59%、48.05% 和 74.40%,2023 年的增幅则分别为 62.80%、50.15% 和 72.19%;同时,2022 年 COF

处理的带荚、不带荚籽粒和秸秆鲜重也分别比 CF 处理提高了 41.70%、41.78% 和 21.75%,2023 年的增幅分别为 45.65%、40.03% 和 22.89%。CF 处理的荚果鲜重则与 CK 相比无显著差异,但 CF 处理的秸秆鲜重则比 CK 处理增加了 43.2%。但是,不同施肥处理对籽粒蛋白质和脂肪含量则无显著影响( $P > 0.05$ )。

表 2 不同施肥处理下鲜食大豆荚果和秸秆鲜重及籽粒品质指标

Table 2 The fresh weight and grain quality indexes of fresh soybean pod and straw under different fertilization treatments

年 Years	处理 Treatments	籽粒鲜重		秸秆鲜重	籽粒蛋白质	籽粒脂肪
		Fresh weight of grain/(t·hm <sup>-2</sup> )		Fresh weight of straw/ (t·hm <sup>-2</sup> )	Grain protein/%	Grain fat/%
		带荚 With pod	不带荚 Without pod			
2022	CK	17.60 ± 0.13 b	9.39 ± 0.45 b	8.20 ± 0.47 c	66.08 ± 0.60 a	30.63 ± 0.21 a
	CF	18.71 ± 0.75 b	9.80 ± 0.56 b	11.75 ± 0.09 b	66.35 ± 0.87 a	30.49 ± 0.21 a
	COF	26.51 ± 1.02 a	13.90 ± 0.30 a	14.31 ± 1.83 a	66.34 ± 0.27 a	30.64 ± 0.12 a
2023	CK	16.49 ± 0.98 c	9.48 ± 0.32 b	8.45 ± 0.33 c	65.34 ± 0.55 a	30.22 ± 0.25 a
	CF	18.43 ± 0.22 b	10.16 ± 0.69 b	11.84 ± 0.12 b	66.02 ± 0.94 a	30.45 ± 0.31 a
	COF	26.84 ± 0.89 a	14.23 ± 0.85 a	14.55 ± 1.24 a	65.34 ± 0.36 a	30.35 ± 0.28 a

2.3 不同施肥处理对土壤团聚体组分及稳定性的影响

不同施肥处理显著影响土壤团聚体组分的分配比例如表 3 所示。在所有处理中,2022 和 2023 年均显示 COF 处理的 > 2 mm 和 0.25 ~ 2 mm 的比例显著较高,而 < 0.053 mm 的比例则显著较低。与

CK 相比,2022 年 COF 处理下 > 2 mm、0.25 ~ 2 mm 和 0.053 ~ 0.25 mm 的比例分别增加了 217.69%、111.12% 和 137.46%,2023 年则只有 > 2 mm 的比例显著高于 CK(增幅为 142.18%);但是,2022 年和 2023 年 < 0.053 mm 的比例则比 CK 分别降低了 57.94% 和 38.42%。同时,2022 和 2023 年 COF 处理

下 >2 mm 的比例比 CF 处理分别增加了 101.95% 和 53.06% ,但 0.25 ~ 2 mm、0.053 ~ 0.25 mm 和 <0.053 mm 的比例则与 CF 处理无显著差异。进一步计算团聚体平均重量直径发现,与 CK 相比,2022 年 CF 和

COF 处理的团聚体平均重量直径分别增加了 70.14% 和 114.26% ,2023 年则只有 COF 比 CK 显著提升 22.76% ,且 COF 处理也显著高于 CF 处理(2022 年和 2023 年的增幅分别为 25.95% 和 18.80% )。

表 3 不同施肥处理下土壤团聚体组分变化  
Table 3 The changes of soil aggregate components under different fertilization treatments

年 Years	处理 Treatments	团聚体组分比例 Aggregate components proportion/%				团聚体平均重量直径 Mean weight diameter of
						Mean weight diameter of aggregate/mm
		> 2 mm	0.25 ~ 2 mm	0.053 ~ 0.25 mm	< 0.053 mm	
2022	CK	3.35 ± 1.00 b	23.38 ± 0.91 b	4.70 ± 1.71 b	68.57 ± 2.56 a	0.37 ± 0.02 c
	CF	5.26 ± 2.61 b	43.56 ± 6.92 a	13.00 ± 3.15 a	38.17 ± 10.88 b	0.64 ± 0.12 b
	COF	10.63 ± 1.90 a	49.37 ± 2.86 a	11.16 ± 8.05 a	28.84 ± 9.22 b	0.80 ± 0.06 a
2023	CK	3.35 ± 1.00 b	23.38 ± 0.91 b	4.70 ± 1.71 b	68.57 ± 2.56 a	0.37 ± 0.02 b
	CF	5.26 ± 2.61 b	43.56 ± 6.92 a	13.00 ± 3.15 a	38.17 ± 10.88 b	0.64 ± 0.12 a
	COF	10.63 ± 1.90 a	49.37 ± 2.86 a	11.16 ± 8.05 a	28.84 ± 9.22 b	0.80 ± 0.06 a

2.4 不同施肥处理下土壤团聚体组分比例与鲜食大豆产量的相关关系

土壤团聚体组分比例与鲜食大豆产量存在密切关系(图 2)。通过拟合方程(表 4)表明,在各团聚体组分中,2022 年和 2023 年均显示 >2 mm 团聚体组分与带荚鲜重和不带荚鲜重均存在显著的正相关关系,且 2022 年还显示出 0.25 ~ 2 mm 团聚体

组分与带荚鲜重和不带荚鲜重均显著正相关,而 <0.053 mm 团聚体组分则为显著的负相关关系。进一步通过拟合方程的斜率发现,>2 mm 团聚体组分的比例增加 1% ,2022 和 2023 年的带荚鲜重分别提高 0.16 和 0.19 t · hm<sup>-2</sup> ,不带荚鲜重分别提高 0.54 和 0.67 t · hm<sup>-2</sup> ;反之,通过降低 <0.053 mm 团聚体组分的比例也可以提高鲜食大豆产量。

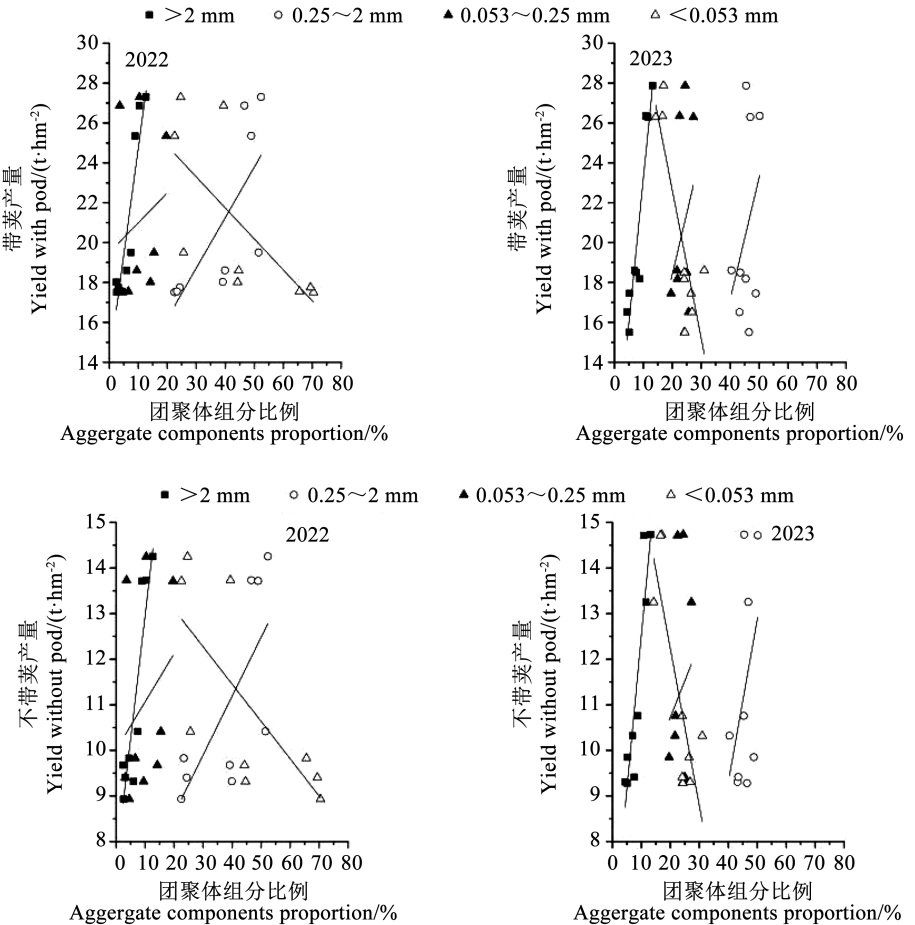


图 2 团聚体组分比例与鲜食大豆产量的相关关系  
Fig. 2 The correlation between aggregate components proportion and fresh soybean yield

表 4 团聚体组分比例与鲜食大豆产量的拟合方程

Table 4 The fitting equation of aggregate components proportion and fresh soybean yield

年 Years	团聚体 Aggregate	带荚产量 Yield with pod			不带荚产量 Yield without pod		
		拟合方程	$R^2$	$P$	拟合方程	$R^2$	$P$
		Fitting equation			Fitting equation		
2022	> 2 mm	$y = 0.16x + 14.07$	0.8387	0.0003	$y = 0.54x + 7.54$	0.8090	0.0006
	0.25 ~ 2 mm	$y = 0.09x + 11.14$	0.4775	0.0236	$y = 0.13x + 6.03$	0.4635	0.0260
	0.053 ~ 0.25 mm	$y = 0.27x + 19.50$	-0.0951	0.5976	$y = 0.11x + 10.02$	-0.0540	0.4674
	<0.053 mm	$y = -0.06x + 27.95$	0.4299	0.0328	$y = -0.08x + 14.72$	0.4532	0.0280
2023	> 2 mm	$y = 0.19x + 8.75$	0.8755	0.0001	$y = 0.67x + 5.78$	0.8247	0.0004
	0.25 ~ 2 mm	$y = 0.57x - 7.29$	0.0205	0.3157	$y = 0.36x - 4.97$	0.1013	0.2103
	0.053 ~ 0.25 mm	$y = 0.73x + 6.17$	-0.0382	0.4287	$y = 0.16x + 7.51$	-0.1113	0.6692
	<0.053 mm	$y = -0.17x + 37.47$	0.7046	0.0029	$y = -0.34x + 19.10$	0.6530	0.0052

2022 和 2023 年相关分析结果均表明,团聚体组分比例与鲜食大豆带荚产量和不带荚产量分别显著正相关(图 3),且可以用线性方程进行拟合( $P < 0.01$ )(表 5)。这说明提高团聚体平

均重量直径可以增加鲜食大豆产量。当团聚体平均重量直径增加 0.1 mm,鲜食大豆带荚和不带荚的鲜重分别提高 1.79 ~ 1.99 t·hm<sup>-2</sup>和 0.83 ~ 0.91 t·hm<sup>-2</sup>。

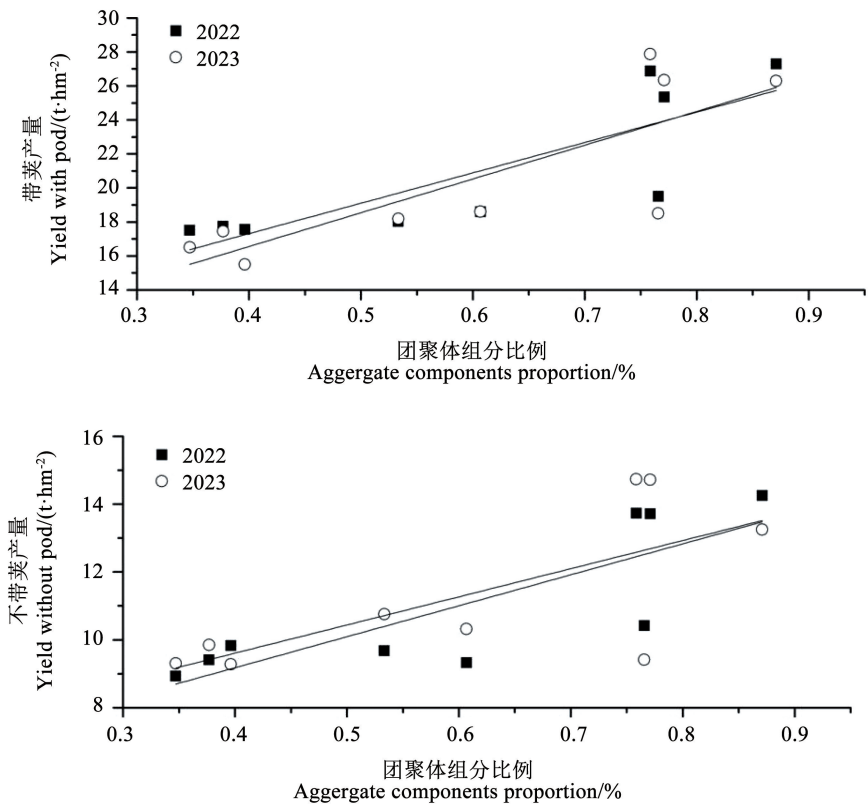


图 3 团聚体平均重量直径与鲜食大豆产量的相关关系

Fig. 3 The relationship between mean weight diameter of aggregateand fresh soybean yield



表 5 团聚体平均重量直径与鲜食大豆产量的拟合方程

Table 5 The fitting equation of mean weight diameter of aggregate and fresh soybean yield

年 Years	带荚产量 Yield with pod			不带荚产量 Yield without pod		
	拟合方程 Fitting equation	$R^2$	$P$	拟合方程 Fitting equation	$R^2$	$P$
2022	$y = 17.88x + 10.16$	0.6523	0.0052	$y = 9.13x + 5.52$	0.6361	0.0061
2023	$y = 19.87x + 8.60$	0.6237	0.0069	$y = 8.30x + 6.29$	0.4441	0.0298

3 讨论

3.1 化肥配施有机肥调控红壤坡耕地团聚体结构

在红壤坡耕地上,化肥配施有机肥是提升鲜食大豆产量的关键措施,这与玉米、花生、油菜上的研究结果一致<sup>[7-9]</sup>。但是,受土壤基础理化性质、作物品种和有机肥种类等因素的影响,与化肥相比,化肥配施有机肥条件下作物产量的增幅存在明显差异<sup>[17]</sup>。然而,本研究进一步分析发现,化肥配施有机肥条件下,鲜食大豆的籽粒蛋白质和脂肪含量则无显著变化。这与周芸等<sup>[11]</sup>在玉米上的研究结果不同。原因一方面与有机肥的种类和投入量有关,另一方面,可能是由于鲜食大豆的生育期较短<sup>[18]</sup>,化肥配施有机肥对作物品质的影响未得到凸显,因此,关于化肥配施有机肥对鲜食大豆品质指标的影响还有待进一步研究。

改善团聚体结构是提升红壤坡耕地生产力的主要途径之一<sup>[19]</sup>。大量研究已经证实,化肥配施有机肥是培育优良团聚体结构的关键<sup>[12-14]</sup>。本试验也表明,与化肥处理相比,化肥配施有机肥条件下红壤坡耕地 > 2 mm 团聚体组分比例分别增加了 101.95% 和 53.06%,其团聚体平均重量直径也显著提高(增幅分别为 25.95% 和 18.80%)。原因主要是化肥配施有机肥增加了外源有机碳投入,而大量的外源有机碳可以直接增加土壤有机碳含量<sup>[20-21]</sup>,从促进大团聚体形成,同时,土壤有机碳含量的增加也促进了微生物活性<sup>[22]</sup>,而微生物群落结构的改善也是优化团聚体结构的主要因素之一<sup>[23]</sup>。

3.2 土壤团聚体结构与鲜食大豆的相关关系

在我国南方地区,通过化肥配施有机肥措施可以同时实现鲜食大豆增产和改善团聚体结构的目标。本研究表明,红壤坡耕地团聚体结构与鲜食大豆产量存在密切关系,这与其他研究结果相似<sup>[24-25]</sup>。进一步通过拟合方程发现,> 2 mm 团聚体组分比例增加 1%,带荚鲜重分别提高 0.16 和 10.19 t·hm<sup>-2</sup>,不带荚鲜重分别提高 0.54 和 0.67 t·hm<sup>-2</sup>;同时,当团聚体平均重量直径增加 0.1 mm,带荚和不带荚的鲜重分别提高 1.79 ~ 1.99 t·hm<sup>-2</sup> 和 0.83 ~ 0.91 t·hm<sup>-2</sup>。然而,由于红壤坡耕地在我国南方分布广泛,不同地区的红壤理化性质存在差

异<sup>[6]</sup>,再加上鲜食大豆的种植季节也存在差异<sup>[26]</sup>,因此,关于团聚体结构与鲜食大豆产量的量化关系还有待进一步研究。

4 结论

在红壤坡耕地上,化肥配施有机肥是实现鲜食大豆高产的主要措施。同时,化肥配施有机肥显著改善了红壤坡耕地的团聚体结构,且团聚体结构与鲜食大豆的量化关系表明,提高 > 2 mm 团聚体组分及平均重量直径,可以显著增加鲜食大豆产量。

参考文献

[1] 刘璐璐,李建飞,舒跃,等. 我国大豆生产消费现状及提升自给率策略[J]. 中国油料作物学报, 2022, 44(2): 242-248. (LIU L L, LI J F, SHU Y, et al. Current situation of soybean production and consumption in China and strategies to improve self-sufficiency rate[J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2022, 44(2): 242-248.)

[2] 陈学珍,谢皓,王春霞,等. 不同生态区大豆种质资源产量与品质性状分析[J]. 陕西农业科学, 2007, 53(6): 18-20, 27. (CHEN X Z, XIE H, WANG C X, et al. Analysis on yield and quality traits of soybean germplasm resources in different ecological regions[J]. Shaanxi Journal of Agricultural Sciences, 2007, 53(6): 18-20, 27.)

[3] 秦婷婷,曹鑫悦,周泽群,等. 1952 年以来我国大豆单产变异特征及其影响因素研究[J]. 中国生态农业学报, 2022, 30(1): 47-56. (QIN T T, CAO X Y, ZHOU Z Q, et al. Variation characteristics of soybean yield since 1952 and its influencing factors in China[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2022, 30(1): 47-56.)

[4] 赵朝森,赵现伟,王瑞珍. 国家区试鲜食夏大豆品种重要农艺性状的演变[J]. 中国油料作物学报, 2022, 44(6): 1218-1227. (ZHAO C S, ZHAO X W, WANG R Z. Evolution of important agronomic traits of vegetable summer soybean varieties attending national regional test[J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2022, 44(6): 1218-1227.)

[5] 范亚琳,刘贤赵,高磊,等. 不同培肥措施对红壤坡耕地土壤有机碳流失的影响[J]. 土壤学报, 2019, 56(3): 638-649. (FAN Y L, LIU X Z, GAO L, et al. Effects of fertility-building practices on soil organic carbon loss with sediment in sloping cropland of red soil[J]. Acta Pedologica Sinica, 2019, 56(3): 638-649.)

[6] 金慧芳,史东梅,钟义军,等. 红壤坡耕地耕层土壤质量退化特征及障碍因子诊断[J]. 农业工程学报, 2019, 35(20): 84-93. (JIN H F, SHI D M, ZHONG Y J, et al. Diagnosis of

obstacle factors and degradation characteristics of cultivated-layer quality for red soil sloping farmland [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35 (20): 84-93. )

[7] 柳开楼, 黄晶, 叶会财, 等. 长期施钾对双季玉米钾素吸收利用和土壤钾素平衡的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2020, 26(12): 2235-2245. (LIU K L, HUANG J, YE H C, et al. Effects of long-term potassium fertilization on potassium uptake, utilization and soil potassium balance in double maize cropping system[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2020, 26 (12): 2235-2245. )

[8] 李桂龙, 李朋发, 吴萌, 等. 化肥配施有机肥对花生根际细菌群落结构及共存网络的影响[J]. 土壤, 2022, 54(3): 498-507. (LI G L, LI P F, WU M, et al. Effects of chemical fertilizer combined with organic manure on peanut rhizosphere bacterial community structure and co-occurrence network[J]. Soils, 2022, 54(3): 498-507. )

[9] 邬梦成, 李鹏, 张欣, 等. 不同有机物施用对油菜-红薯轮作模式下养分吸收利用的影响[J]. 水土保持学报, 2018, 32 (1): 320-326. (WU M C, LI P, ZHANG X, et al. Effects of different organic matters application on nutrient absorption and utilization in rape and sweet potato rotation mode[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2018, 32(1): 320-326. )

[10] 杨旭初, 叶会财, 李大明, 等. 基于模糊数学和主成分分析的长期施肥红壤旱地土壤肥力评价[J]. 中国土壤与肥料, 2018 (3): 79-84. (YANG X C, YE H C, LI D M, et al. Assessment of red soil upland fertility in long-term fertilization based on fuzzy mathematics and principal component analysis [J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2018(3): 79-84. )

[11] 周芸, 李永梅, 范茂攀, 等. 有机肥等氮替代化肥对红壤团聚体及玉米产量和品质的影响[J]. 作物杂志, 2019(4): 125-132. (ZHOU Y, LI Y M, FAN M P, et al. Effects of nitrogen in organic manure replacing chemical nitrogenous fertilizer on aggregates of red soil, maize yield and quality[J]. Crops, 2019 (4): 125-132. )

[12] 胡丹丹, 李浩, 宋惠洁, 等. 长期施肥条件下红壤有机碳化学结构与团聚体稳定性的关系[J]. 土壤通报, 2022, 53(1): 152-159. (HU D D, LI H, SONG H J, et al. The relationship between chemical structure of organic carbon and stability of aggregates in red soils under long-term fertilization[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2022, 53(1): 152-159. )

[13] ZHANG Z, LIU K, ZHOU H, et al. Three dimensional characteristics of biopores and non-biopores in the subsoil respond differently to land use and fertilization[J]. Plant and Soil, 2018, 428(1): 453-467.

[14] LIU K, HAN T, HUANG J, et al. Response of soil aggregate-associated potassium to long-term fertilization in red soil [J]. Geoderma, 2019, 352: 160-170.

[15] 章永根, 傅旭军, 俞慧明, 等. 种植密度与用肥量对鲜食夏大豆浙鲜19的影响[J]. 浙江农业科学, 2020, 61(5): 890-892, 895. (ZHANG Y G, FU X J, YU H M, et al. Effects of planting density and fertilizer amounts on fresh-edible summer soybean Zhexian 19 [J]. Journal of Zhejiang Agricultural Sciences, 2020, 61(5): 890-892, 895. )

[16] 柳开楼, 黄晶, 张会民, 等. 长期施肥对红壤旱地团聚体特性及不同组分钾素分配的影响[J]. 土壤学报, 2018, 55(2): 443-454. (LIU K L, HUANG J, ZHANG H M, et al. Effect of long-term fertilization on aggregation characteristics and distribution of potassium fractions in red soil[J]. Acta Pedologica Sinica, 2018, 55(2): 443-454. )

[17] 任科宇, 徐明岗, 张露, 等. 我国不同区域粮食作物产量对有机肥施用的响应差异[J]. 农业资源与环境学报, 2021, 38 (1): 143-150. (REN K Y, XU M G, ZHANG L, et al. Response of grain crop yield to manure application in different regions of China [J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2021, 38(1): 143-150. )

[18] 陈霞, 刘丽君, 赵贵兴, 等. 不同播期鲜食大豆品种生育特性及品质评价[J]. 大豆科学, 2008, 27(6): 988-992. (CHEN X, LIU L J, ZHAO G X, et al. Development traits and quality of vegetable soybeans under different planting date [J]. Soybean Science, 2008, 27(6): 988-992. )

[19] 孙波, 梁音, 徐仁扣, 等. 红壤退化与修复长期研究促进东南丘陵区生态循环农业发展[J]. 中国科学院院刊, 2018, 33 (7): 746-757. (SUN B, LIANG Y, XU R K, et al. Long-term research on red soil degradation and remediation promotes development of ecological recycling agriculture in hilly region of southeast China [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2018, 33(7): 746-757. )

[20] 黄尚书, 钟义军, 黄欠如, 等. 耕作深度及培肥方式对红壤坡耕地土壤理化性质及作物产量的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2020(4): 72-83. (HUANG S S, ZHONG Y J, HUANG Q R, et al. Effects of tillage depths and fertilizing patterns on soil physical-chemical properties and crop yield in red soil slop field[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2020(4): 72-83. )

[21] LIU K L, HUANG J, LI D M, et al. Comparison of carbon sequestration efficiency in soil aggregates between upland and paddy soils in a red soil region of China[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2019, 18(6): 1348-1359.

[22] WANG X, BIAN Q, JIANG Y, et al. Organic amendments drive shifts in microbial community structure and keystone taxa which increase C mineralization across aggregate size classes[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2021, 153: 108062.

[23] JIANG Y, QIAN H, WANG X, et al. Nematodes and microbial community affect the sizes and turnover rates of organic carbon pools in soil aggregates[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2018, 119: 22-31.

[24] 龚伟, 颜晓元, 蔡祖聪, 等. 长期施肥对小麦-玉米轮作土壤微团聚体组成和分形特征的影响[J]. 土壤学报, 2011, 48 (6): 1141-1148. (GONG W, YAN X Y, CAI Z C, et al. Effects of long-term fertilization on composition and fractal feature of soil micro-aggregates under a wheat-maize cropping system[J]. Acta Pedologica Sinica, 2011, 48(6): 1141-1148. )

[25] KUMARI K, PRASAD J, SOLANKI I S, et al. Long-term effect of crop residues incorporation on yield and soil physical properties under rice - wheat cropping system in calcareous soil[J]. Journal of Soil Science and Plant Nutrition, 2018.

[26] 张秋英, 杨文月, 李艳华, 等. 中国菜用大豆研究现状、生产中的问题及展望[J]. 大豆科学, 2007, 26(6): 950-954. (ZHANG Q Y, YANG W Y, LI Y H, et al. Current status, production problem and prospects of vegetable soybean in China [J]. Soybean Science, 2007, 26(6): 950-954. )