

DOI: 10.3724/SP.J.1006.2021.04279

研究简报

商品有机肥替代部分化肥对连作棉田土壤养分、棉花生长发育及产量的影响

卢合全 唐薇* 罗振 孔祥强 李振怀 徐士振 辛承松*

山东棉花研究中心 / 山东省棉花栽培生理重点实验室, 山东济南 250100

摘要: 研究商品有机肥替代部分化肥对连作棉田土壤养分变化、棉花生长发育及产量的影响, 探索有机肥替代部分化肥实现化肥减量增效的可行性, 为黄河流域棉区棉花科学施肥提供理论依据和技术支撑。2016—2018 年在山东省临清市安排 3 年定位施肥试验, 以陆地棉(*Gossypium hirsutum* L.)品种 K836 为试验材料, 随机区组设计, 设置不施肥(NF)、化肥常规用量(NPK)、商品有机肥用量(COF)、化肥常规用量与商品有机肥用量配施(NPK+COF)、化肥常规用量的 70% 与商品有机肥用量配施(0.70NPK+COF)共 5 个处理。结果表明, 0.70NPK+COF 处理较 NF 显著提高棉田土壤肥力、棉花干物质积累量、SPAD 值和叶面积指数, 协调改善了棉花产量构成, 籽棉产量逐年增加 9.63%、26.18%和 59.96%。0.70NPK+COF 处理较 NPK 提高棉田土壤有机质含量, 而土壤碱解氮、有效磷、速效钾含量、棉花干物质积累量、SPAD 值、叶面积指数、籽棉产量和产量构成因素均无显著差异, 3 年内 0.70NPK+COF 与 NPK 处理的籽棉产量均保持在一个相对稳定的产量水平(3976~4105 kg hm⁻²)。NPK+COF 处理较 NPK 和 0.70NPK+COF 均增加土壤养分含量, 提高棉花叶绿素 SPAD 值和净光合速率, 但没有显著提高棉花产量。据此, 商品有机肥替代部分化肥(0.70NPK+COF)能够培肥连作棉田地力、促进棉花生长发育和持续高产稳产, 是一种节肥增效环保的施肥技术模式。

关键词: 棉花; 商品有机肥; 减施化肥; 土壤肥力; 生长发育; 产量

Effects of commercial organic fertilizer substituting chemical fertilizer partially on soil nutrients, plant development, and yield in cotton

LU He-Quan, TANG Wei*, LUO Zhen, KONG Xiang-Qiang, LI Zhen-Huai, XU Shi-Zhen, and XIN Cheng-Song*

Cotton Research Center, Shandong Academy of Agricultural Sciences / Shandong Key Laboratory for Cotton Culture and Physiology, Jinan 250100, Shandong, China

Abstract: The objective of this study is to investigate the effects of commercial organic fertilizer replacing partial chemical fertilizer on soil nutrients, plant development, and yield in cotton, and to assess the feasibility of achieving stable yield by reducing chemical fertilizer, thus providing theoretical basis and technical support for scientific fertilization and soil nutrient improvement in Yellow River Basin. A three-year field experiment from 2016 to 2018 was carried out using variety K836 with five treatments including no fertilizer (NF), traditional chemical fertilizer (NPK), commercial organic fertilizer (COF), traditional chemical fertilizer plus commercial organic fertilizer (NPK+COF), and traditional chemical fertilizer reduction 30% plus commercial organic fertilizer (0.70NPK+COF) by a randomized blocks design at Linqing city of Shandong province. Results showed that 0.70NPK+COF increased soil nutrients, dry matter accumulation, leaf SPAD value, and LAI at different growth stages in cotton, and compared with NF, the yields were annually increased by 9.63%, 26.18%, and 59.96% during three years. Compared with NPK, 0.70NPK+COF increased soil organic matter, but there was no significant difference in alkaline hydrolysis nitrogen, available phosphorus, and potassium contents of soil, dry matter accumulation, leaf SPAD value, LAI, yield and yield components between 0.70NPK+COF and NPK. Both 0.70NPK+COF and

本研究由山东省重点研发计划项目(公益性科技公关)(2019GNC106134)资助。

This study was supported by the Key Research and Development Program of Shandong Province (Public Welfare Science and Technology)(2019GNC106134).

* 通信作者(Corresponding authors): 唐薇, E-mail: tangweijn@163.com; 辛承松, E-mail: xin5306@126.com

第一作者联系方式: E-mail: hqlu780708@163.com

Received (收稿日期): 2020-12-21; Accepted (接受日期): 2021-04-14; Published online (网络出版日期): 2021-06-18.

URL: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1809.S.20210618.1116.004.html>

NPK had similar yield of 3976–4105 kg hm⁻² from 2016 to 2018; COF+NPK increased soil organic matter, LAI, and leaf SPAD value, but there was not significantly increase in yield and yield components compared with NPK and 0.70NPK+COF. In conclusion, replacing partial chemical fertilizer with commercial organic fertilizer (0.70NPK+COF) was an economic, environmental, and feasible fertilization method for increasing soil nutrients, promoting cotton growth, maintaining high and stable yield.

Keywords: cotton; commercial organic fertilizer; chemical fertilizer reduction; soil fertility; growth and development; yield

施肥是影响土壤肥力^[1-3]、作物养分吸收利用^[3-4]、生长发育及产量^[5-7]最重要的农艺措施之一。传统有机肥兼有全养分、缓效性等功能,可增加土壤有机质、提高作物产量^[2],与化肥配施在更新土壤有机质、改善土壤理化性状、增加作物产量和提高氮素利用率方面具有显著效果^[8-12]。但是传统有机肥(农家肥)存在体积大、施用不便、劳动强度大、用工成本高等现实问题^[8-14],导致传统有机肥基本上被化肥取代。随着化工的发展和化肥生产量的不断增加,化肥在提高和保障作物产量方面发挥了重要促进作用。正是由于化肥在作物增产中的重要作用,近年来棉花生产中盲目过量施用化肥现象很普遍、也非常严重^[15-16],但过量施用化肥并没有明显提高棉花产量和品质,反而导致棉田土壤板结,降低了肥料利用率和肥料报酬^[4],土壤中大量的盈余养分淋溶流失,还造成了环境污染^[17]。为推进生态高效农业的发展,2015年2月17日农业农村部制订了《到2020年化肥使用量零增长行动方案》,确定到2020年,主要农作物化肥使用量实现零增长。在保障作物产量的前提下,减少化肥用量,配施有机肥是实现中国化肥零增长,减少环境污染的重要技术途径之一^[18-19]。近年来,商品有机肥利用自身技术和加工优势,克服了传统有机肥无害化水平低、劳动强度大等弊端,已经成为有机肥利用的新途径,逐步在市场上获得认可,在生产中的应用范围日趋扩大^[20-22]。国内外很多学者在有机肥等量替代部分化肥养分的条件下,对小麦、玉米、水稻等作物开展了大量试验研究^[20-25],一致认为,合理的替代比例能够促进作物的生长,有效改善产量构成,具有增加作物产量、提高土壤养分含量和肥料利用率的效应。截至目前,商品有机肥与化肥减量配施对棉田土壤肥力、棉花生长发育、产量及产量构成因素的影响尚少见报道。本文通过连续3年定位施肥试验,深入研究了商品有机肥替代部分化肥对连作棉田土壤养分变化、棉花生长发育和产量的影响,旨在为指导商品有机肥替代部分化肥在棉花生产中的应用、建立黄河流域棉区棉花施肥技术新模式、提高养分利用效率提供理论依据和技术指导。

1 材料与方法

1.1 试验地点

试验于2016—2018年在山东棉花研究中心临清试验站(115°72'E、36°68'N)棉花连作定位试验田进行。该试验田位于山东省临清市临馆街166号,属暖温带半湿润季风气候,年均气温12.9℃,≥10℃积温4404℃,多年平均降水量557.1 mm,年蒸发量1882 mm,平均无霜期200 d,

年日照时数2567 h。小区定位施肥处理前试验田为连续植棉多年的一熟棉田,沙壤土,中等偏上地力,具有广泛代表性,有良好的灌、排水条件。安排试验之前耕层(0~20 cm)土壤的基础养分含量为:碱解氮43.39 mg kg⁻¹、有效磷28.53 mg kg⁻¹、速效钾120.30 mg kg⁻¹、有机质11.22 g kg⁻¹。

1.2 试验处理及设计

以山东省主栽棉花(*Gossypium hirsutum* L.)品种K836为材料,设置不施肥(NF)、化肥常规用量(NPK)、商品有机肥用量(COF)、化肥常规用量与商品有机肥配施(NPK+COF)、化肥常规用量的70%与商品有机肥配施(0.70NPK+COF)共5个处理。施肥量和施肥方式见表1。

采用随机区组设计,每个小区四周设置1.5 m深的加厚优质塑料薄膜隔离(小区之间的土壤完全隔离、底部不封),施肥处理小区3年固定不变,重复3次,小区面积40 m²,6行区,行长8.78 m,76 cm等行距种植。

1.3 试验田管理

连续3年皆于4月5日前后灌水造墒,4月15日左右整地备播。播前精选棉种,发芽率93%以上。分别于2016年4月25日、2017年4月28日和2018年4月27日人工穴播,每穴3粒,播种后均采用厚度0.008 mm的地膜覆盖,留苗密度6.0万株 hm⁻²。棉花生育期内依天气和长势情况进行合理化控和灌溉,除试验处理的要求外,所有处理的管理一致,管理措施同一般高产田管理。

1.4 试验数据采集与方法

1.4.1 土壤主要养分的测定 当年棉花收获结束后每个小区均取0~20 cm土样测定养分含量。采用K₂Cr₂O₇-H₂SO₄消煮、FeSO₄容量法测定土壤有机质含量;用碱解扩散法测定土壤碱解氮含量;用Olsen法测定有效磷含量;用中性NH₄Ac浸提、火焰光度法测定速效钾含量。

1.4.2 单株生物量与叶面积 以化肥常规用量处理(NPK)的生育进程为参照,分别在现蕾期、初花期、盛铃期和始絮期取样测定。每个小区随机选3株代表性棉株,将棉株分成根(子叶节以下)、茎(枝)、叶(子叶、主茎叶、果枝叶)、果(蕾花铃),用LI-3100C叶面积仪测定单株叶面积,计算叶面积指数(leaf area index, LAI),分器官烘干称重。

1.4.3 叶绿素含量和净光合速率 于棉花始絮期,每小区选择具有代表性的6株棉花,首先利用SPAD-502叶绿素测定仪测定主茎倒二叶的SPAD值,分别夹取叶片5个不同部位,取其平均值表示该处理叶片的叶绿素含量;

表 1 施肥处理及施用方式

Table 1 Treatments and methods of fertilizer applications from 2016 to 2018

处理 Treatment	肥料用量及施肥方式 Amounts and methods of fertilizer applications
NF	不施化肥, 也不施有机肥。No fertilizer.
NPK	基肥: 尿素(N 46%) 67.80 kg hm ⁻² +复合肥(16-22-6) 442.50 kg hm ⁻² +硫酸钾(K ₂ O 50%) 54.90 kg hm ⁻² ; 见花时追肥: 尿素 332.55 kg hm ⁻² +硫酸钾 162.00 kg hm ⁻² 。 Urea 67.80 kg hm ⁻² , compound fertilizer 442.50 kg hm ⁻² , and K ₂ SO ₄ 54.90 kg hm ⁻² were applied as basal fertilizer; urea 332.55 kg hm ⁻² , and K ₂ SO ₄ 162.00 kg hm ⁻² were applied as topdressing when seeing first flower.
COF	基肥: 商品有机肥(有机质 50%, N 2.0%、P ₂ O ₅ 1.5%、K ₂ O 2.5%) 1200.00 kg hm ⁻² 。 Commercial organic fertilizer (organic matter 50%, N 2.0%, P ₂ O ₅ 1.5%, K ₂ O 2.5%) 1200 kg hm ⁻² were applied as basal fertilizer.
NPK+COF	基肥: 尿素(N 46%) 67.80 kg hm ⁻² +复合肥(16-22-6) 442.50 kg hm ⁻² +硫酸钾(K ₂ O 50%) 54.90 kg hm ⁻² +商品有机肥(有机质 50%, N 2.0%、P ₂ O ₅ 1.5%、K ₂ O 2.5%) 1200.00 kg hm ⁻² ; 见花时追肥: 尿素 332.55 kg hm ⁻² +硫酸钾 162.00 kg hm ⁻² 。 Urea (N 46%) 67.80 kg hm ⁻² , compound fertilizer (16-22-6) 442.50 kg hm ⁻² , K ₂ SO ₄ (K ₂ O 50%) 54.90 kg hm ⁻² , and commercial organic fertilizer (organic matter 50%, N 2.0%, P ₂ O ₅ 1.5%, K ₂ O 2.5%) 1200 kg hm ⁻² were applied as basal fertilizer; urea 332.55 kg hm ⁻² and K ₂ SO ₄ 162.00 kg hm ⁻² were applied as topdressing when seeing first flower.
0.70NPK+COF	基肥: 尿素(N 46%) 47.46 kg hm ⁻² +复合肥(16-22-6) 309.75 kg hm ⁻² +硫酸钾(K ₂ O 50%) 38.43 kg hm ⁻² +商品有机肥(有机质 50%, N 2.0%、P ₂ O ₅ 1.5%、K ₂ O 2.5%) 1200.00 kg hm ⁻² ; 见花时追肥: 尿素 232.78 kg hm ⁻² +硫酸钾 113.40 kg hm ⁻² 。 Urea (N 46%) 47.46 kg hm ⁻² , compound fertilizer (16-22-6) 309.75 kg hm ⁻² , K ₂ SO ₄ (K ₂ O 50%) 38.43 kg hm ⁻² , and commercial organic fertilizer (organic matter 50%, N 2.0%, P ₂ O ₅ 1.5%, K ₂ O 2.5%) 1200 kg hm ⁻² were applied as basal fertilizer; urea 232.78 kg hm ⁻² and K ₂ SO ₄ 113.40 kg hm ⁻² were applied as topdressing when seeing first flower.

NF: 不施肥, 作对照; NPK: 化肥常规用量; COF: 商品有机肥用量; NPK+COF: 化肥常规用量与商品有机肥配施; 0.70NPK+COF: 化肥常规用量的 70%与商品有机肥配施。

NF: no fertilizer, as control; NPK: traditional chemical fertilizer; COF: commercial organic fertilizer; NPK+COF: traditional chemical fertilizer plus commercial organic fertilizer; 0.70NPK+COF: traditional chemical fertilizer reduction 30% plus commercial organic fertilizer.

然后采用便携式光合作用系统测定仪 LI-6400 (LI-COR Lincoln, USA)测定主茎倒二叶的净光合速率(P_n)。

1.4.4 产量和产量结构 吐絮后分 3 期(霜前 2 期, 霜后 1 期)收获每个小区的籽棉, 晒干后称重计产; 每次收获时收取代表性的 50 铃, 晾干后称重, 取平均数作为全株平均铃重, 根据籽棉产量和全株平均铃重计算单位面积铃数。然后按小区轧花, 测定衣分。

1.4.5 棉柴比与早熟性测定 在收花结束后, 将每小区中间 2 行棉株自然拔出, 晾晒 30 d 后称重。以籽棉与棉柴重量之和作为其近似的生物产量, 以两者的重量比(棉柴比)作为光合产物分配情况和经济系数的指标, 以霜前收获的籽棉占总籽棉重量的百分比(%), 即霜前花率, 作为早熟性的指标。

1.5 数据统计分析

Microsoft Excel 2003 初步处理数据, DPS7.05 统计软件进行方差分析, LSD 法检验处理间差异显著性。

2 结果与分析

2.1 商品有机肥替代部分化肥对 0~20 cm 土层土壤养分的影响

2.1.1 商品有机肥替代部分化肥对连作棉田 0~20 cm 土层土壤有机质含量的影响 2016—2018 年不同施肥处理 0~20 cm 土层有机质含量的测定结果(表 2)表明, 与供

试前土壤相比, 施用商品有机肥处理(COF、NPK+COF 和 0.70NPK+COF)能够增加土壤有机质含量, 而不施肥(NF)和化肥常规用量(NPK)则没有增加土壤有机质含量, 并呈逐年下降趋势。2016 年 COF、NPK+COF 和 0.70NPK+COF 的有机质含量较 NF 分别增加 0.90%、1.08%和 0.81%, 2017 年和 2018 年分别增加 2.26%、2.53%、1.90%和 4.88%、5.07%、4.15%。2016 年 COF、NPK+COF 和 0.70NPK+COF 的有机质含量较 NPK 分别增加 0.54%、0.72%和 0.45%, 2017 年和 2018 年分别增加 1.62%、1.89%、1.26%和 3.27%、3.45%、2.54%。尽管连续 3 年 COF、NPK+COF 和 0.70NPK+COF 处理的有机质含量较 NPK 没有达到差异显著水平, 但是随年限的延续仍呈现持续升高的趋势, 表明施用外源有机质是增加土壤有机质含量的主要途径之一。

2.1.2 商品有机肥替代部分化肥对连作棉田 0~20 cm 土层土壤碱解氮含量的影响 由表 2 可知, 2016—2018 年连续 3 年 NF 和 COF 处理的碱解氮含量均逐年显著下降, 较 NPK 逐年分别减少 17.34%、41.21%、53.81%和 0.69%、8.28%、13.38%; NPK 和 NPK+COF 的碱解氮含量均呈逐年升高趋势, 但年际间尚未达到差异显著水平, 而 0.70NPK+COF 处理的碱解氮含量较稳定, 与 NPK 比较, 差异未达显著水平。

2.1.3 商品有机肥替代部分化肥对连作棉田 0~20 cm 土

层土壤有效磷含量的影响 连续 3 年 NF 和 COF 处理的有效磷含量均逐年显著下降, 较 NPK 处理逐年分别减少 13.63%、23.29%、30.10%和 0.87%、10.48%、18.91%; NPK、NPK+COF 和 0.70NPK+COF 处理的有效磷含量差异不显著, 说明短期内单施化肥或配施有机肥对土壤有效磷含量均没有显著影响(表 2)。

2.1.4 商品有机肥替代部分化肥对连作棉田 0~20 cm 土

层土壤速效钾含量的影响 各施肥处理的速效钾含量变化和有效磷含量变化一致(表 2)。连续 3 年 NF 和 COF 的土壤速效钾含量逐年显著下降, 较 NPK 处理逐年分别减少 14.25%、29.20%、51.64%和 0.88%、16.69%、23.16%; NPK、NPK+COF 和 0.70NPK+COF 的有效磷含量差异不显著, 说明短期内单施化肥或配施有机肥对 0~20 cm 土层土壤有效磷含量影响效果不明显。

表 2 2016—2018 年商品有机肥替代部分化肥对 0~20 cm 土层土壤养分的影响

Table 2 Effects of commercial organic fertilizer replacing partial chemical fertilizer on 0~20 cm soil nutrient in cotton field from 2016 to 2018

年份 Year	处理 Treatment	有机质 Organic matter (g kg ⁻¹)	碱解氮 Alkaline hydrolysis nitrogen (mg kg ⁻¹)	有效磷 Available phosphorus (mg kg ⁻¹)	速效钾 Available potassium (mg kg ⁻¹)
2016	NF	11.14 b	36.00 b	24.71 b	103.00 b
	NPK	11.18 b	43.55 a	28.61 a	120.11 a
	COF	11.24 a	43.25 a	28.36 a	119.05 a
	NPK+COF	11.26 a	43.65 a	28.64 a	120.22 a
	0.70NPK+COF	11.23 a	43.45 a	28.55 a	120.00 a
2017	NF	11.05 c	25.71 c	22.03 c	85.20 c
	NPK	11.12 b	43.73 a	28.72 a	120.34 a
	COF	11.30 a	40.11 b	25.71 b	100.25 b
	NPK+COF	11.33 a	43.82 a	28.77 a	122.32 a
	0.70NPK+COF	11.26 ab	43.70 a	28.57 a	120.22 a
2018	NF	10.85 c	20.30 c	20.11 b	59.00 c
	NPK	11.02 ab	43.95 a	28.77 a	122.01 a
	COF	11.38 a	38.07 b	23.33 b	93.75 b
	NPK+COF	11.40 a	44.08 a	28.90 a	123.25 a
	0.70NPK+COF	11.30 a	43.88 a	28.57 a	120.22 a

处理同表 1。同列不同小写字母表示同一年份处理间在 0.05 水平差异显著。

Treatments are the same as those given in Table 1. Values followed by different lowercase letters in the same column indicate significant difference at the 0.05 probability level in the same year among the treatments.

2.2 商品有机肥替代部分化肥对棉花干物质积累和叶面积指数的影响

2.2.1 商品有机肥替代部分化肥对棉株干物质积累的影响 由图 1 可知, 2016—2018 年, 不论在哪个生育时期, NF 的单株干物质积累量均逐年显著下降, NPK、COF、NPK+COF 和 0.70NPK+COF 的单株干物质积累量均显著高于 NF。2017—2018 年初花期至始絮期 COF 的单株干物质积累量均显著小于 NPK、NPK+COF 和 0.70NPK+COF。各生育时期 0.70NPK+COF 和 NPK 的单株干物质积累量均基本一致, 而 NPK+COF 高于 NPK 和 0.70NPK+COF, 但差异不显著。说明, 施肥显著促进了棉株的生长发育, 0.70NPK+COF 和 NPK 对促进棉花生长发育的效应基本相同。

2.2.2 商品有机肥替代部分化肥对棉花叶面积指数的影响 对 2016—2018 年各时期棉花叶面积指数(LAI)进

行显著性比较分析发现(图 2), 盛铃期以前, 所有处理的 LAI 均随生育进程递增, 盛铃期到始絮期, 所有处理的 LAI 均下降。2016—2018 年, NF 和 COF 同一时期的叶面积指数均呈逐年下降趋势, NPK、NPK+COF 和 0.70NPK+COF 同一时期的叶面积指数基本一致, 均显著高于 NF 处理。2016 年, 在现蕾期、初花期、盛铃期、始絮期, NPK 的群体叶面积指数较同期的 NF 分别增加 5.71%、7.74%、8.42%和 4.41%; COF 分别增加 5.71%、7.10%、7.11%和 4.41%; NPK+COF 分别增加 8.57%、8.39%、8.42%和 4.71%; 0.70NPK+COF 分别增加 5.71%、7.74%、8.42%和 4.71%。2017 年, NPK 的群体叶面积指数较同期的 NF 分别增加 11.76%、11.33%、13.70%和 9.01%; COF 分别增加 5.88%、6.67%、6.85%和 5.11%; NPK+COF 分别增加 14.71%、12.00%、13.97%和 9.61%; 0.70NPK+COF 分别增加 11.76%、11.33%、13.70%和

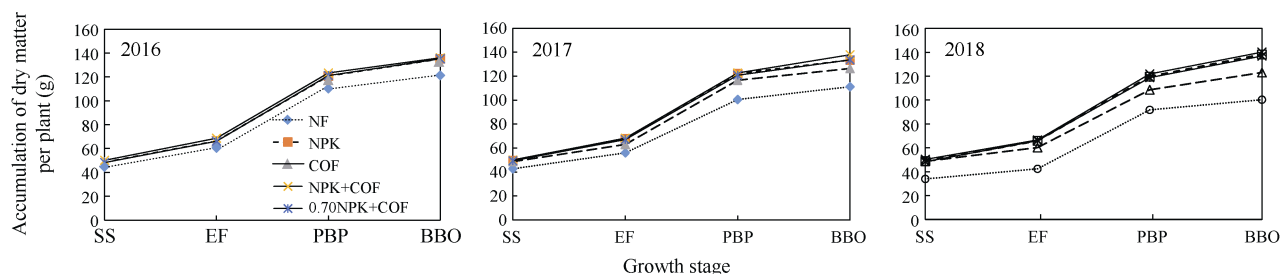


图 1 2016—2018 年商品有机肥替代部分化肥对不同生育期棉花干物质积累的影响

Fig. 1 Effects of commercial organic fertilizer replacing partial chemical fertilizer on dry matter accumulation at different growth stages in cotton from 2016 to 2018

处理同表 1。SS: 现蕾期; EF: 初花期; PBP: 盛铃期; BBO: 始絮期。

Treatments are the same as those given in Table 1. SS: squaring stage; EF: early florescence; PBP: peak boll period; BBO: beginning of boll opening.

8.11%。2018 年, NPK 的群体叶面积指数较同期的 NF 分别增加 19.35%、25.66%、32.69%和 19.21%; COF 分别增加 16.12%、14.29%、22.44%和 13.25%; NPK+COF 分别增加 22.58%、26.32%、33.01%和 20.20%, 0.70NPK+COF 分别增加 19.35%、25.56%、32.69%和 19.54% (图 2)。连续 3 年, NF 各生育期的叶面积指数显著降低; 由于试验前土壤基础肥力为中等偏上, 因此, 2016 年 COF、NPK+COF 和 0.70 NPK+COF 的叶面积指数与 NPK 差异不显著, 2017—2018 年除现蕾期外, 初花期至始絮期 COF 的叶面积指数显著降低, 而 NPK+COF 和 0.70 NPK+COF 的叶面积指数与 NPK 无显著差异。

2.3 商品有机肥替代部分化肥对棉花叶绿素含量和净光合速率的影响

2.3.1 商品有机肥替代部分化肥对连作棉田棉花叶绿素含量的影响 由表 3 可知, 2016—2018 年 NPK 处理的棉花叶绿素含量年间基本一致; NF 处理的叶绿素含量

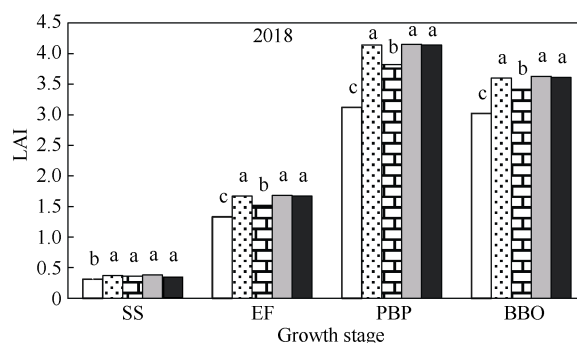


图 2 2016—2018 年商品有机肥替代部分化肥对棉花叶面积指数的影响

Fig. 2 Effects of commercial organic fertilizer replacing partial chemical fertilizer on leaf area index (LAI) in cotton from 2016 to 2018

处理同表 1, 缩写同图 1。图柱上不同小写字母表示处理间在 0.05 水平差异显著。

Treatments are the same as those given in Table 1. Abbreviations are the same as those given in Fig. 1. The bars marked different lowercase letters indicate significant difference among treatments at the 0.05 probability level.

逐年显著下降, 较 NPK 处理分别减少 6.33%、11.96%和 21.08%; 2016 年, COF、NPK+COF、0.70NPK+COF 和 NPK 的叶绿素含量基本相同; 2017—2018 年, 0.70NPK+COF 和 NPK 的叶绿素含量基本相同, 均显著高于 COF 处理, 略低于 NPK+COF。

2.3.2 商品有机肥替代部分化肥对连作棉田棉花净光合速率的影响 各处理棉花净光合速率的变化趋势与叶绿素含量的变化趋势基本一致(表 3)。2016—2018 年 NPK 的净光合速率年间基本一致, NF 逐年显著下降, 较 NPK 分别减少 2.17%、8.54%和 21.00%; 2016 年 COF、NPK+COF、0.70NPK+COF 和 NPK 基本相同; 2017—2018 年 0.70NPK+COF 的叶绿素含量和 NPK 基本相同, 较 NF 逐年分别高 8.95%和 26.13%, 较 COF 分别高 5.66%和 8.95%, 较 NPK+COF 分别低 1.06%和 3.75%。

2.4 商品有机肥替代部分化肥对棉柴比和早熟性的影响

由表 4 可知, 连续 3 年 NF 和 COF 的棉柴比呈逐年下降趋势, 0.70NPK+COF 的棉柴比与 NPK 处理基本相同,

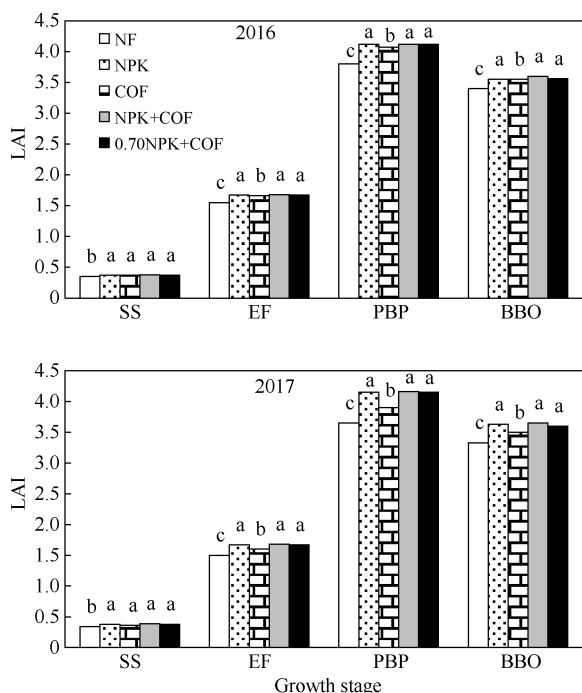


表 3 2016–2018 年商品有机肥替代部分化肥对棉花叶绿素含量和净光合速率的影响

Table 3 Effects of commercial organic fertilizer replacing partial chemical fertilizer on SPAD and leaf (the second leaf from the top) P_n in cotton from 2016 to 2018

处理 Treatment	叶绿素含量 SPAD value			净光合速率 P_n ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)		
	2016	2017	2018	2016	2017	2018
NF	51.8±1.3 b	48.6±1.4 c	43.8±2.0 c	27.1±1.4 b	25.7±1.3 c	22.2±1.1 c
NPK	55.3±2.2 a	55.2±1.5 a	55.5±1.8 a	27.7±1.2 a	28.1±1.3 a	28.1±0.9 a
COF	54.7±1.1 a	53.3±1.3 b	53.0±1.6 b	27.5±1.5 a	26.5±1.8 b	25.7±1.2 b
NPK+COF	56.0±1.8 a	56.2±1.4 a	56.3±1.5 a	28.2±1.4 a	28.3±1.5 a	29.3±1.7 a
0.70NPK+COF	55.2±1.3 a	55.3±1.8 a	55.6±1.6 a	27.5±1.3 a	28.0±1.8 a	28.2±1.4 a

处理同表 1。同列不同小写字母表示处理间在 0.05 水平差异显著。

Treatments are the same as those given in Table 1. Values followed by different lowercase letters in same column indicate significant difference among treatments at the 0.05 probability level.

表 4 2016–2018 年商品有机肥替代部分化肥对棉柴比和早熟性的影响

Table 4 Effects of different fertilizer on seed cotton/stalk and earliness of cotton from 2016 to 2018

处理 Treatment	2016		2017		2018	
	棉柴比	早熟性	棉柴比	早熟性	棉柴比	早熟性
	Seed cotton/stalk	Earliness (%)	Seed cotton/stalk	Earliness (%)	Seed cotton/stalk	Earliness (%)
NF	0.66 b	94.5 a	0.62 c	95.4 a	0.50 c	95.8 a
NPK	0.70 a	92.9 b	0.72 a	93.9 b	0.72 a	91.9 b
COF	0.70 a	92.0 b	0.66 b	93.7 b	0.62 b	90.1 b
NPK+COF	0.68 b	89.4 c	0.69 b	90.4 c	0.66 b	88.6 c
0.70NPK+COF	0.71 a	92.8 b	0.73 a	94.0 b	0.75 a	91.5 b

处理同表 1。同列不同小写字母表示处理间在 0.05 水平差异显著。

Treatments are the same as those given in Table 1. Values followed by different lowercase letters in same column indicate significant difference among treatments at the 0.05 probability level.

显著大于 NPK+COF 处理。说明, 不施肥(NF)和仅施有机肥(COF)处理, 由于养分供应偏少, 不仅影响了棉花营养生长, 还减少了光合产物向生殖器官的分配; NPK+COF 处理的施肥量偏多, 能较好地促进棉花营养生长, 但不利于光合产物向生殖器官的分配。NF 的早熟性显著高于其他处理, NPK+COF 的早熟性最低, 0.70NPK+COF 和 NPK 的早熟性介于二者之间。说明, 0.70NPK+COF 促进了干物质向生殖器官转运, 使棉柴比更为协调, 早熟性更适宜。

2.5 商品有机肥替代部分化肥对棉花产量和产量构成因素的影响

由表 5 可知, NF 的单位面积铃数逐年减少, 铃重也逐年下降。与 NF 比较, 2016–2018 年 NPK 处理的单位面积铃数逐年分别增加 3.35%、18.67%和 43.10%, NPK+COF 分别增加 3.81%、18.67%和 42.89%, COF 分别增加 3.05%、12.22%和 26.36%, 0.70NPK+COF 分别增加 3.35%、17.80%和 41.84%; NPK 的铃重逐年分别增加 1.90%、8.18%和 16.09%, NPK+COF 分别增加 3.28%、9.09%和 16.47%, COF 分别增加 1.72%、8.00%和 4.60%, 0.70NPK+COF 分

别增加 1.72%、8.18%和 12.45%; NPK 的衣分逐年分别增加 3.13%、3.61%和 4.16%, NPK+COF 分别增加 3.68%、3.69%和 4.16%, COF 分别增加 3.63%、3.66%和 4.16%, 0.70NPK+COF 分别增加 3.63%、3.66%和 3.90%。表明, 施肥各处理均比不施肥处理(NF)逐年增加了单位面积棉花成铃数、铃重和衣分, 而 0.70NPK+COF 的铃数、铃重和衣分和 NPK、NPK+COF 3 年内差异不显著。

NF 和 COF 的籽棉产量均逐年迅速下降, 2017 年、2018 年 NF 的产量较 2016 年分别减产 14.04%和 31.94%, COF 分别减产 6.10%和 9.89%, 其他施肥处理(NPK、NPK+COF 和 0.70NPK+COF)的籽棉产量均显著高于 NF(表 5)。其中 0.70NPK+COF 和 NPK 的籽棉产量 3 年内均保持在一个相对稳定的产量水平($3976\sim 4105 \text{ kg hm}^{-2}$), 处理间没有显著差异。NPK+COF 的产量略高于 NPK 和 0.70NPK+COF, 差异未达到显著水平。表明, 化肥常规用量基础上再增加有机肥并没有起到显著的增产作用, 适量减施化肥配施有机肥(0.70NPK+COF)能够获得化肥常规施用量的产量效果。

表 5 2016–2018 年商品有机肥替代部分化肥对棉花籽棉产量和产量构成因素的影响

Table 5 Effects of commercial organic fertilizer replacing partial chemical fertilizer on seed cotton yield and yield component from 2016 to 2018

年份 Year	处理 Treatment	籽棉产量 Seed cotton yield (kg hm ⁻²)	单位面积铃数 Boll density (bolls m ⁻²)	铃重 Boll weight (g)	衣分 Lint percentage (%)
2016	NF	3666.55±25.27 b	65.6±5.1 b	5.80±0.31 b	38.60±1.50 b
	NPK	4020.17±22.25 a	67.8±4.3 a	5.91±0.23 a	39.81±2.03 a
	COF	4000.90±27.81 a	67.7±4.2 a	5.90±0.32 a	40.00±1.40 a
	NPK+COF	4031.30±36.57 a	68.1±3.6 a	5.99±0.42 a	40.02±1.12 a
	0.70NPK+COF	4019.81±29.82 a	67.8±4.4 a	5.90±0.30 a	40.00±1.50 a
2017	NF	3151.66±28.62 c	57.3±5.5 c	5.50±0.32 b	38.51±1.80 b
	NPK	4073.40±35.71 a	68.0±5.0 a	5.95±0.22 a	39.90±2.00 a
	COF	3756.88±32.22 b	64.3±5.1 b	5.94±0.33 a	39.92±1.61 a
	NPK+COF	4105.04±37.60 a	68.0±4.7 a	6.00±0.31 a	39.93±1.56 a
	0.70NPK+COF	3976.80±32.42 a	67.5±6.1 a	5.95±0.35 a	39.92±1.60 a
2018	NF	2495.28±25.75 c	47.8±4.0 c	5.22±0.33 b	38.50±1.84 b
	NPK	4105.25±38.00 a	68.4±5.0 a	6.06±0.25 a	40.10±1.40 a
	COF	3605.35±37.50 b	60.4±5.0 b	5.46±0.27 b	40.10±1.42 a
	NPK+COF	4152.85±34.31 a	68.3±6.5 a	6.08±0.27 a	40.10±1.35 a
	0.70NPK+COF	3991.36±46.32 a	67.8±4.4 a	5.97±0.31 a	40.00±1.77 a

处理同表 1。同列不同小写字母表示同一年份处理间在 0.05 水平差异显著。

Treatments are the same as those given in Table 1. Values followed by different lowercase letters in same column indicate significant difference among treatments at the 0.05 probability level in same year.

3 讨论

3.1 商品有机肥替代部分化肥对棉田土壤肥力的影响

近二十多年来,在作物生产过程中,普遍存在重施化肥,轻施或不施有机肥的现象^[15-16],从而导致土壤质量下降。因此,改进施肥方式,适当减少化肥用量,保护农业生态环境刻不容缓。近几年来,减施化肥与增施有机肥对土壤肥力的影响成为研究热点^[22-25]。研究表明,有机肥替代部分化肥后,能协调有机与无机养分的平衡供应,增加土壤养分含量^[20,24]。何浩等^[25]研究表明,减氮 10%配施商品有机肥可以提高玉米生育期内的土壤碱解氮、有效磷、速效钾的含量。温延臣等^[20]通过定位试验发现,与单施化肥相比,商品有机肥替代部分化肥 3 年后,土壤有机碳增加了 19.5%,土壤全氮提高了 12.3%。徐明岗等^[26]报道,化肥与有机肥配合施用,5 年后土壤有机质含量提高了 18.5%,均显著高于单施化肥处理。何浩等^[19]和唐宇等^[27]均发现,商品有机肥替代部分化肥较常规施肥和不施肥,土壤碱解氮、速效磷、速效钾、有机质含量均显著提高。赵满兴等^[28]报道,与常规化肥处理比较,化肥减量配施有机肥能够显著增加土壤有机质质量分数,但显著降低了碱解氮和速效磷质量分数。本试验结果表明,与 NPK 处理比较,2016 年 COF、NPK+COF 和 0.70NPK+COF 处理的土壤有机质含量分别提高 0.54%、0.72%和 0.45%,2017 年和 2018 年分别提高 1.62%、1.89%、1.26%和 3.27%、

3.45%、2.54%。由此可知,有机肥的施用是土壤有机质含量增加的主要来源之一。尽管 0.70NPK+COF 的氮肥用量显著减少,但其土壤碱解氮含量较稳定,与 NPK 差异不显著,本试验结果与宇万太等^[29]、梁尧等^[30]的结论基本一致。分析认为,低量有机肥虽然不能保证土壤氮的大量供给,但是有机质可能通过改善土壤结构,促进了速效氮与土壤的结合,减少了氮素流失,因而有利于耕层土壤碱解氮含量的稳定。连续 3 年 NF 处理的土壤有效磷和速效钾含量逐年显著下降,较 NPK 处理逐年分别减少 13.63%、23.29%、30.10%和 14.25%、29.20%、51.64%,而 NPK、NPK+COF 和 0.70NPK+COF 处理的土壤有效磷和速效钾含量差异不显著。进一步说明,适量减施化肥与有机肥配施,能够增加土壤有机质含量,改善土壤理化特性和养分供应,培肥了棉田土壤肥力。

3.2 商品有机肥替代部分化肥对棉花叶面积指数、光合速率和干物质积累的影响

叶面积指数(LAI)动态和光合速率影响作物干物质积累和产量形成,不同的施肥方式对叶面积动态和光合能力的影响也不尽相同。罗洋等^[31]研究发现,化肥和有机肥配合施用提高了叶面积和光合速率,促进了玉米生长发育,干物质积累加快;王立刚等^[32]研究表明,施用有机肥促进了玉米叶片的生长,在到达 LAI 最大值后稳定时间较长,以后缓慢下降,这使得玉米在生育后期还能保持较大的叶面积,叶片 SPAD 值也显著增加,有利于籽粒的充

实。李占等^[33]报道,有机肥与无机肥合理配施能够增加冬小麦、夏玉米的单株叶面积,有利于地上部干物质积累。何浩等^[19]指出,等养分条件下有机肥替代化肥处理促进玉米的生长,在不同生育期的玉米株高、茎粗、叶片数和叶片 SPAD 值均有所增加;谭军利等^[34]研究表明,施用生物有机肥显著促进前期西瓜瓜蔓生长及叶片的发生和生长。冯克云等^[35]报道,化肥减量配施有机肥较单施化肥能够显著提高棉花盛蕾期以后棉花 LAI,使生育后期 LAI 下降缓慢,有利于维持较高的光合物质生产力;充分灌溉量下各有机肥配施光合速率表现为 M1 (75%化肥+25%有机肥)>M2 (50%化肥+50%有机肥)>M3 (25%化肥+75%有机肥),而在亏缺灌溉下表现为 M2>M1>M3,分析认为,低比例有机肥配施量处理中无机氮含量高,充足的水分有助于氮肥肥效的发挥,而在水分亏缺下,过量施氮或施氮不足均不利于提高棉花叶片光合性能。本研究发现,化肥减施配施有机肥(0.70NPK+COF)处理的棉花干物质积累量、叶绿素含量和净光合速率与常规化肥用量处理(NPK)基本一致,而常规化肥用量配施有机肥处理(NPK+COF)虽然提高了棉花干物质积累量、叶绿素含量和净光合速率,但与 0.70NPK+COF 和 NPK 处理没有达到差异显著水平,分析认为,作物养分吸收量有最佳阈值,棉花干物质积累量、叶绿素含量和光合速率的大小并不一定随着施肥量的显著增加而升高。

3.3 商品有机肥替代部分化肥对棉花产量和产量构成的影响

施肥是作物增产的有效措施,作物产量是评价施肥效果的重要指标之一。相关研究表明,有机肥替代部分化肥能有效协调有机与无机养分的供应,满足作物生长对养分的需求,并能获得高产^[8]。宋日等^[36]研究表明,有机无机肥配施,通过提高玉米中下层根系数量,延缓玉米根系的衰老,增加了春玉米产量。大部分学者认为,作物产量还受有机肥替代化肥比例的影响。刘占军等^[37]研究表明,用 30%有机肥氮替代化肥氮与 100%化肥氮的产量相当。陶磊等^[38]研究发现,在新疆北疆棉区,施用 3000 kg hm⁻²和 6000 kg hm⁻²的有机或生物有机肥,替代 20%、40%常规化肥用量,可保证棉花正常生长,并达到与单施化肥处理相同的产量。柯蓓^[39]报道,有机肥替代 10%、20%、30%化肥,甘薯的产量均比单施化肥处理显著增加,其中有机肥替代 20%化肥的增产效果最好。刘增兵等^[22]研究发现,在作物秸秆还田条件下,商品有机肥替代 80%、60%、40%和 20%无机肥处理的双季稻周年产量较对照分别增加了 2.10%、7.19%、10.32%和 7.99%,在全量化肥条件下增施 50%有机肥处理的产量较常规单施化肥处理增加了 12.25%。何浩等^[19]报道,等量养分条件下有机肥替代化肥处理改善了玉米穗部性状,增加了玉米产量。冯克云等^[35]研究表明,在不同的灌溉水分条件下有机肥最佳配施比例不同,其中在充分灌溉下, M1 处理(75%化肥+25%有机肥)的籽棉产量平均较单施化肥和不施肥

分别提高了 6.9%和 62.1%,而在亏缺灌溉下, M2 处理(50%化肥+50%有机肥)表现最佳,籽棉产量平均较 CF 和 CK 分别提高了 19.9%和 79.3%。但是,也有研究表明,生物有机肥替代化肥的产量与常规化肥处理持平,差异不显著^[27]。

作物产量的提高归因于产量构成因子的协调和改善。何浩等^[25]报道,商品有机肥等养分量替代部分化肥较常规化肥(NPK)处理有效改善了玉米穗部性状和产量构成,其中显著增加了穗粗和穗粒数,一定程度增加了穗长、穗行数、行粒数和千粒重。冯克云等^[35]发现,养分等量替代条件下,化肥减量配施有机肥较单施化肥显著提高了棉花单株铃数、单铃重。温延臣等^[20]研究表明,与不施肥对照相比,施肥显著增加了冬小麦单位面积的穗数和穗粒数,也增加了夏玉米的穗粒数和千粒重;但是等养分投入条件下,单施化肥和商品有机肥替代化肥处理之间产量构成指标未表现出显著性差异。本试验结果表明,在 3 年定位施肥试验期间,不施肥处理(NF)的棉花籽棉产量逐年显著下降,0.70NPK+COF 和 NPK 处理的籽棉产量水平趋于一致,3 年均保持在一个相对稳定的高产水平,处理间无显著差异。NPK+COF 处理的籽棉产量略高于 NPK 和 0.70NPK+COF 处理,差异未达到显著水平。本试验结果还表明,化肥合理减量并配施有机肥可以获得常规单施化肥的产量效果。与单施化肥比较,商品有机肥替代部分化肥处理对棉花产量构成因素(单位面积铃数、铃重和衣分)未表现出显著影响,这一试验结果与温延臣等^[20]报道基本一致。

在棉花生产实践中,中等偏上肥力的棉田存在过量施用化肥的问题,不仅没有明显提高棉花产量和品质,反而导致棉田土壤板结,降低了肥料报酬,还造成了环境污染。与化肥常规用量(NPK)比较,商品有机肥替代部分化肥(0.70NPK+COF)处理减施 N 素 20%,减施 P 素 10%左右,减施 K 素 10%左右,该处理不仅增加了耕层土壤有机质含量,土壤碱解氮、有效磷、速效钾含量、棉花干物质积累量、SPAD 值、叶面积指数、籽棉产量和产量构成因素与 NPK 处理无显著差异,而且 3 年内 0.70NPK+COF 与 NPK 的籽棉产量均保持在一个相对稳定的产量水平(3976~4105 kg hm⁻²)。

需要注意的是,虽然商品有机肥具有较好的培肥地力效果,但由于市场价格较高,为降低投入成本,商品有机肥不宜等量替代化肥减施的氮、磷、钾养分量。因此,在棉花生产中,提倡适当减少化肥用量(30%以内)并适量施用商品有机肥,既能改良土壤、培肥地力,又能实现棉花稳产和增效的目标。

References

- [1] Ozlu E, Sandhu S S, Kumar S, Arriaga F J. Soil health indicators impacted by long-term cattle manure and inorganic fertilizer application in a corn-soybean rotation of South Dakota. *Sci Rep*, 2019, 9: 11776.

- [2] 唐继伟, 徐久凯, 温延臣, 田昌玉, 林治安, 赵秉强. 长期单施有机肥和化肥对土壤养分和小麦产量的影响. 植物营养与肥料学报, 2019, 25: 1827–1834.
Tang J W, Xu J K, Wen Y C, Tian C Y, Lin Z A, Zhao B Q. Effects of organic fertilizer and inorganic fertilizer on the wheat yields and soil nutrients under long-term fertilization. *Plant Nutr Fert Sci*, 2019, 25: 1827–1834 (in Chinese with English abstract).
- [3] 廖育林, 鲁艳红, 聂军, 谢坚, 周兴, 杨曾平. 长期施肥稻田土壤基础地力和养分利用效率变化特征. 植物营养与肥料学报, 2016, 22: 1249–1258.
Liao Y L, Lu Y H, Nie J, Xie J, Zhou X, Yang Z P. Effect of long-term fertilization on basic soil productivity and nutrient use efficiency in paddy soils. *Plant Nutr Fert Sci*, 2016, 22: 1249–1258 (in Chinese with English abstract).
- [4] 陶瑞, 李锐, 谭亮, 褚贵新. 减少化肥配施有机肥对滴灌棉花 N、P 吸收和产量的影响. 棉花学报, 2014, 26: 342–349.
Tao R, Li R, Tan L, Chu G X. Effects of application of different organic manures with chemical fertilizer on cotton yield, N and P utilization efficiency under drip irrigation. *Cotton Sci*, 2014, 26: 342–349 (in Chinese with English abstract).
- [5] 李成亮, 黄波, 孙强生, 奚兴霞, 杨越超, 张民. 控释肥用量对棉花生长特性和土壤肥力的影响. 土壤学报, 2014, 51: 295–304.
Li C L, Huang B, Sun Q S, Dou X X, Yang Y C, Zhang M. Effects of application rate of the controlled release fertilizer on cotton development and soil fertility. *Acta Pedol Sin*, 2014, 51: 295–304 (in Chinese with English abstract).
- [6] 王道中, 花可可, 郭志彬. 长期施肥对砂姜黑土作物产量及土壤物理性质的影响. 中国农业科学, 2015, 48: 4781–4789.
Wang D Z, Hua K K, Guo Z B. Effects of long-term fertilization on crop yield and soil physical properties in lime concretion black soil. *Sci Agric Sin*, 2015, 48: 4781–4789 (in Chinese with English abstract).
- [7] 张红梅, 金海军, 丁小涛, 余纪柱, 郝婷. 有机肥无机肥配施对温室黄瓜生长、产量和品质的影响. 植物营养与肥料学报, 2014, 20: 247–253.
Zhang H M, Jin H J, Ding X T, Yu J Z, Hao T. Effects of application of organic and inorganic fertilizers on the growth, yield and quality of cucumber in greenhouse. *Plant Nutr Fert Sci*, 2014, 20: 247–253 (in Chinese with English abstract).
- [8] 谢军, 赵亚南, 陈轩敬, 李丹萍, 徐春丽, 王珂, 张跃强, 石孝均. 有机肥氮替代化肥氮提高玉米产量和氮素吸收利用效率. 中国农业科学, 2016, 49: 3934–3943.
Xie J, Zhao Y N, Chen X J, Li D P, Xu C L, Wang K, Zhang Y Q, Shi X J. Nitrogen of organic manure replacing chemical nitrogenous fertilizer improve maize yield and nitrogen uptake and utilization efficiency. *Sci Agric Sin*, 2016, 49: 3934–3943 (in Chinese with English abstract).
- [9] 刘守龙, 董成立, 吴金水, 蒋平. 等氮条件下有机无机肥配比对水稻产量的影响探讨. 土壤学报, 2007, 44: 106–112.
Liu S L, Tong C L, Wu J S, Jiang P. Effect of ratio of organic manure/chemical fertilizer in fertilization on rice yield under the same N condition. *Acta Pedol Sin*, 2007, 44: 106–112 (in Chinese with English abstract).
- [10] 马俊永, 李科江, 曹彩云, 郑春莲. 有机-无机肥长期配施对潮土土壤肥力和作物产量的影响. 植物营养与肥料学报, 2007, 13: 236–241.
Ma J Y, Li K J, Cao C Y, Zheng C L. Effect of long-term located organic-inorganic fertilizer application on fluoro-aquic soil fertility and crop yield. *Plant Nutr Fert Sci*, 2007, 13: 236–241 (in Chinese with English abstract).
- [11] 孟琳, 张小莉, 蒋小芳, 黄启为, 徐阳春, 杨兴明, 沈其荣. 有机肥料氮替代部分无机氮对水稻产量的影响及替代率研究. 植物营养与肥料学报, 2009, 15: 290–296.
Meng L, Zhang X L, Jiang X F, Huang Q W, Xu Y C, Yang X M, Shen Q R. Effects of partial mineral nitrogen substitution by organic fertilizer nitrogen on the yields of rice grains and its proper substitution rate. *Plant Nutr Fert Sci*, 2009, 15: 290–296 (in Chinese with English abstract).
- [12] 吕真真, 吴向东, 侯红乾, 冀建华, 刘秀梅, 刘益仁. 有机-无机肥配施比例对双季稻田土壤质量的影响. 植物营养与肥料学报, 2017, 23: 904–913.
Lyu Z Z, Wu X D, Hou H Q, Ji J H, Liu X M, Liu Y R. Effect of different application ratios of chemical and organic fertilizers on soil quality in double cropping paddy fields. *Plant Nutr Fert Sci*, 2017, 23: 904–913 (in Chinese with English abstract).
- [13] Mandal N, Dwivedi B S, Meena M C, Singh D, Datta S P, Tomar R K, Sharma B M. Effect of induced defoliation in pigeonpea, farmyard manure and sulphitation pressmud on soil organic carbon fractions, mineral nitrogen and crop yields in a pigeonpea-wheat cropping system. *Field Crops Res*, 2013, 154: 178–187.
- [14] 陈洁, 梁国庆, 周卫, 王秀斌, 孙静文, 刘东海, 胡诚. 长期施用有机肥对稻麦轮作体系土壤有机碳氮组分的影响. 植物营养与肥料学报, 2019, 25: 36–44.
Chen J, Liang G Q, Zhou W, Wang X B, Sun J W, Liu D H, Hu C. Responses of soil organic carbon and nitrogen fractions to long-term organic fertilization under rice-wheat rotation. *Plant Nutr Fert Sci*, 2019, 25: 36–44 (in Chinese with English abstract).
- [15] 玛衣拉·吐尔逊, 甫祺娜依·尤力瓦斯, 阿斯亚·托乎提. 农户过量施用化肥行为的影响因素分析——以新疆棉花种植户为例. 棉花学报, 2016, 28: 619–627.
Tuexun M, Youliwasi F, Tuohuti A. Impact factors of household fertilization: a case study of cotton growing in Xinjiang, China. *Cotton Sci*, 2016, 28: 619–627 (in Chinese with English abstract).
- [16] 王占彪, 陈静, 张立峰, 陈阜, 孙红春, 刘连涛, 宋文, 李存东, 李亚兵. 河北省棉花生产碳足迹分析. 棉花学报, 2016, 28: 594–601.
Wang Z B, Chen J, Zhang L F, Chen F, Sun H C, Liu L T, Song W, Li C D, Li Y B. Carbon footprint analysis of cotton production in Hebei province. *Cotton Sci*, 2016, 28: 594–601 (in Chinese with English abstract).
- [17] 习斌, 翟丽梅, 刘申, 刘宏斌, 杨波, 任天志. 有机无机肥配施对玉米产量及土壤氮磷淋溶的影响. 植物营养与肥料学报, 2015, 21: 326–335.
Xi B, Zhai L M, Liu S, Liu H B, Yang B, Ren T Z. Effects of combination of organic and inorganic fertilization on maize yield and soil nitrogen and phosphorus leaching. *Plant Nutr Fert Sci*, 2015, 21: 326–335 (in Chinese with English abstract).
- [18] Jin S Q, Zhou F. Zero growth of chemical fertilizer and pesticide use: China's objectives, progress and challenges. *J Resour Ecol*, 2018, 9: 50–58.

- [19] 何浩, 危常州, 李俊华, 张宇彤. 商品有机肥替代部分化肥对玉米生长、产量及土壤肥力的影响. 新疆农业科学, 2019, 56: 325–332.
He H, Wei C Z, Li J H, Zhang Y T. Effects of commercial organic fertilizer replacing partial chemical fertilizer on maize growth, yield and soil fertility. *Xinjiang Agric Sci*, 2019, 56: 325–332 (in Chinese with English abstract).
- [20] 温延臣, 张曰东, 袁亮, 李伟, 李燕青, 林治安, 赵秉强. 商品有机肥替代化肥对作物产量和土壤肥力的影响. 中国农业科学, 2018, 51: 2136–2142.
Wen Y C, Zhang Y D, Yuan L, Li W, Li Y Q, Lin Z A, Zhao B Q. Crop yield and soil fertility response to commercial organic fertilizer substituting chemical fertilizer. *Sci Agric Sin*, 2018, 51: 2136–2142 (in Chinese with English abstract).
- [21] 陈志龙, 陈杰, 许建平, 张永春. 有机肥氮替代部分化肥氮对小麦产量及氮肥利用率的影响. 江苏农业科学, 2013, 41(7): 55–57.
Chen Z L, Chen J, Xu J P, Zhang Y C. Effects of partial mineral nitrogen substitution by organic fertilizer nitrogen on the yields of wheat and nitrogen use efficiency. *Jiangsu Agric Sci*, 2013, 41(7): 55–57 (in Chinese).
- [22] 刘增兵, 束爱萍, 刘光荣, 李祖章, 张文学, 袁福生, 胡启锋. 有机肥替代化肥对双季稻产量和土壤养分的影响. 江西农业学报, 2018, 30(11): 35–39.
Liu Z B, Shu A P, Liu G R, Li Z Z, Zhang W X, Yuan F S, Hu Q F. Effects of partial replacement of chemical fertilizer by organic manure on rice yield and soil nutrient in double cropping system. *Acta Agric Jiangxi*, 2018, 30(11): 35–39 (in Chinese with English abstract).
- [23] 井永苹, 李彦, 薄录吉, 张英鹏, 王艳芹, 付龙云, 仲子文. 有机肥部分替代化肥对作物产量及土壤氮素迁移的影响. 山东农业科学, 2019, 51(7): 48–54.
Jing Y P, Li Y, Bo L J, Zhang Y P, Wang Y Q, Fu L Y, Zhong Z W. Effects of partial substitution of chemical fertilizer with organic manure on crop yield and soil nitrogen migration. *Shandong Agric Sci*, 2019, 51(7): 48–54 (in Chinese with English abstract).
- [24] 傅伟, 刘坤平, 陈洪松, 陈香碧, 林海飞, 张伟, 王克林. 等氮配施有机肥对喀斯特峰丛洼地农田作物产量与养分平衡的影响. 中国生态农业学报, 2017, 25: 812–820.
Fu W, Liu K P, Chen H S, Chen X B, Lin H F, Zhang W, Wang K L. Effect of partial replacement of inorganic N with organic manure on crop yield and soil nutrient balance in arable ecosystem in karst peak-cluster depression. *Chin J Eco-Agric*, 2017, 25: 812–820 (in Chinese with English abstract).
- [25] 何浩, 张宇彤, 危常州, 李俊华. 不同有机替代减肥方式对玉米生长及土壤肥力的影响. 水土保持学报, 2019, 33(5): 281–287.
He H, Zhang Y T, Wei C Z, Li J H. Effects of different organic substitution reducing fertilizer patterns on maize growth and soil fertility. *J Soil Water Conserv*, 2019, 33(5): 281–287 (in Chinese with English abstract).
- [26] 徐明岗, 李冬初, 李菊梅, 八木一行, 宝川靖和. 化肥有机肥配施对水稻养分吸收和产量的影响. 中国农业科学, 2008, 41: 3133–3139.
Xu M G, Li D C, Li J M, Yagi K, Hosen Y. Effects of organic manure application combined with chemical fertilizers on nutrients absorption and yield of rice in Hunan of China. *Sci Agric Sin*, 2008, 41: 3133–3139 (in Chinese with English abstract).
- [27] 唐宇, 包慧芳, 詹发强, 侯敏, 王宁, 杨蓉, 林子敬, 龙宣杞. 化肥减施条件下配施生物有机肥对番茄生长及品质的影响. 新疆农业科学, 2019, 56: 841–854.
Tang Y, Bao H F, Zhan F Q, Hou M, Wang N, Yang R, Lin Z J, Long X Q. Effect of combined application of bio-organic fertilizer on tomato growth and quality under the condition of chemical fertilizer reduction. *Xinjiang Agric Sci*, 2019, 56: 841–854 (in Chinese with English abstract).
- [28] 赵满兴, 刘慧, 白二磊, 邓健. 腐殖酸肥或生物有机肥替代部分化肥对土壤肥力、红枣产量和品质的影响. 西北农业学报, 2019, 28: 981–987.
Zhao M X, Liu H, Bai E L, Deng J. Effects of combined application of chemical fertilizer with humic acid and bio-organic fertilizer on soil fertility and Jujube yield and quality. *Acta Agric Boreali-Occident Sin*, 2019, 28: 981–987 (in Chinese with English abstract).
- [29] 宇万太, 姜子绍, 马强, 周桦. 施用有机肥对土壤肥力的影响. 植物营养与肥料学报, 2009, 15: 1057–1064.
Yu W T, Jiang Z S, Ma Q, Zhou H. Effects of application of manure on soil fertility. *Plant Nutr Fert Sci*, 2009, 15: 1057–1064 (in Chinese with English abstract).
- [30] 梁尧, 苑亚茹, 韩晓增, 李禄军, 邹文秀, 任军, 李刚. 化肥配施不同剂量有机肥对黑土团聚体中有机碳与腐殖酸分布的影响. 植物营养与肥料学报, 2016, 22: 1586–1594.
Liang Y, Yuan Y R, Han X Z, Li L J, Zou W X, Ren J, Li G. Distribution of organic carbon and humic acids in aggregates of Mollisol as affected by amendments with different rates of organic manure plus mineral fertilizer. *Plant Nutr Fert Sci*, 2016, 22: 1586–1594 (in Chinese with English abstract).
- [31] 罗洋, 郑金玉, 郑洪兵, 李瑞平, 李伟堂, 刘武仁, 董英山. 有机无机肥料配合施用对玉米生长发育及产量的影响. 玉米科学, 2014, 22(5): 132–136.
Luo Y, Zheng J Y, Zheng H B, Li R P, Li W T, Liu W R, Dong Y S. Effects of manure and fertilizer application on growth and yield of maize. *J Maize Sci*, 2014, 22(5): 132–136 (in Chinese with English abstract).
- [32] 王立刚, 李维炯, 邱建军, 马永良, 王迎春. 生物有机肥对作物生长、土壤肥力及产量的效应研究. 土壤与肥料, 2004, (5): 12–16.
Wang L G, Li W J, Qiu J J, Ma Y L, Wang Y C. Effect of biological organic fertilizer on crops growth, soil fertility and yield. *Soil Fert Sci China*, 2004, (5): 12–16 (in Chinese with English abstract).
- [33] 李占, 丁娜, 郭立月, 孟杰, 李静, 李宵, 郑延海, 吴光磊, 曾彦, 蒋高明. 有机肥和化肥不同比例配施对冬小麦、夏玉米生长、产量和品质的影响. 山东农业科学, 2013, 45(7): 71–77.
Li Z, Ding N, Guo L Y, Meng J, Li J, Li X, Zheng Y H, Wu G L, Zeng Y, Jiang G M. Effects of different ratios of organic manure and chemical fertilizer on growth, yield and quality of winter wheat and summer maize. *Shandong Agric Sci*, 2013, 45(7): 71–77 (in Chinese with English abstract).
- [34] 谭军利, 田军仓, 王西娜, 李应海. 不同生物有机肥对老压砂地西瓜生长及产量的影响. 宁夏大学学报(自然科学版), 2016, 37: 476–481.

- Tan J L, Tian J C, Wang X N, Li Y H. Effects of bio-organic fertilizer of different types on growth and yield of watermelon in old gravel-mulched field. *J Ningxia Univ* (Nat Sci Edn), 2016, 37: 476–481 (in Chinese with English abstract).
- [35] 冯克云, 王宁, 南宏宇, 高建刚. 水分亏缺下化肥减量配施有机肥对棉花光合特性与产量的影响. *作物学报*, 2021, 47: 125–137.
- Feng K Y, Wang N, Nan H Y, Gao J G. Effects of chemical fertilizer reduction with organic fertilizer application under water deficit on photosynthetic characteristics and yield of cotton. *Acta Agron Sin*, 2021, 47: 125–137 (in Chinese with English abstract).
- [36] 宋日, 吴春胜, 马丽艳, 牟金明, 徐克章, 郭继勋. 有机无机肥料配合施用对玉米根系的影响. *作物学报*, 2002, 28: 393–396.
- Song R, Wu C S, Ma L Y, Mou J M, Xu K Z, Guo J X. Effect of application of combined fertilizers on the root system of maize. *Acta Agron Sin*, 2002, 28: 393–396 (in Chinese with English abstract).
- [37] 刘占军, 谢佳贵, 张宽, 王秀芳, 侯云鹏, 尹彩侠, 李书田. 不同氮肥管理对吉林春玉米生长发育和养分吸收的影响. *植物营养与肥料学报*, 2011, 17: 38–47.
- Liu Z J, Xie J G, Zhang K, Wang X F, Hou Y P, Yin C X, Li S T. Maize growth and nutrient uptake as influenced by nitrogen management in Jilin province. *Plant Nutr Fert Sci*, 2011, 17: 38–47 (in Chinese with English abstract).
- [38] 陶磊, 褚贵新, 刘涛, 唐诚, 李俊华, 梁永超. 有机肥替代部分化肥对长期连作棉田产量、土壤微生物数量及酶活性的影响. *生态学报*, 2014, 34: 6137–6146.
- Tao L, Chu G X, Liu T, Tang C, Li J H, Liang Y C. Impacts of organic manure partial substitution for chemical fertilizer on cotton yield, soil microbial community and enzyme activities in mono-cropping system in drip irrigation condition. *Acta Ecol Sin*, 2014, 34: 6137–6146 (in Chinese with English abstract).
- [39] 柯蓓. 有机肥替代部分化肥对甘薯产量及土壤养分含量的影响. *福建农业科技*, 2019, 50(9): 67–70.
- Ke B. Effect of partial replacement of chemical fertilizers with organic fertilizers on yield and soil nutrients content of sweet potato. *Fujian Agric Sci Technol*, 2019, 50(9): 67–70 (in Chinese).