

有机肥替代对棉花养分积累、产量及土壤肥力的影响

汪苏洁[#], 贵会平[#], 董强, 张恒恒, 王香茹, 牛静, 张西岭^{*}, 宋美珍^{*}

(中国农业科学院棉花研究所/棉花生物学国家重点实验室, 河南 安阳 455000)

摘要:【目的】研究不同有机肥替代率对黄河流域棉株生物量、养分积累、产量、氮磷比及土壤肥力的影响, 试图探索出有机肥替代化肥的适宜替代率, 为有机肥、无机肥在黄河流域棉田合理施用提供参考依据。【方法】试验始于 2016 年, 在中国农业科学院棉花研究所试验基地设置 6 个施肥处理: T1: 不施肥, T2: 100% 化肥, T3: 20% 有机肥 + 80% 化肥, T4: 40% 有机肥 + 60% 化肥, T5: 50% 有机肥 + 50% 化肥, T6: 100% 有机肥。经 3 年施肥后, 2018 年进行田间取样, 分析不同施肥处理对棉花生物量、养分积累、产量、氮磷比及土壤肥力的影响。【结果】(1) 有机肥替代 50% 化肥处理提高棉株生物量、养分积累和籽棉产量。(2) 与单施化肥处理相比, 施用有机肥处理土壤有机质、全氮、速效磷、碱解氮含量均有增高趋势, 全部施有机肥显著增加土壤速效磷含量。(3) 棉株全氮、全磷积累量与棉株生物量呈极显著正相关, 棉株根、茎氮磷比与籽棉产量呈极显著负相关。【结论】有机肥替代部分化肥能减少化肥用量, 连续应用有机肥替代部分化肥具有增加土壤肥力的趋势; 有机肥替代 50% 化肥处理能增加棉花生物量、养分积累量, 提高籽棉产量, 替代效果最好。

关键词: 有机肥替代; 棉花; 养分积累; 产量; 土壤肥力

Effects of organic fertilizer substitution on cotton nutrient accumulation, yield and soil fertility

Wang Sujie[#], Gui Huiping[#], Dong Qiang, Zhang Hengheng, Wang Xiangru, Niu Jing, Zhang Xiling^{*}, Song Meizhen^{*}

(Institute of Cotton Research, Chinese Academy of Agricultural Sciences/State Key Laboratory of Cotton Biology, Anyang, Henan 455000, China)

Abstract: [Objective] The effects of different organic fertilizer replacement rates on cotton biomass, nutrient accumulation, yield, N:P ratio soil fertility in the Yellow River Basin were studied, and the suitable replacement rates of organic fertilizer to replace part of chemical fertilizer were explored, in order to provide reference for the rational application of organic and inorganic fertilizers in the cotton field in the Yellow River Basin. [Method] The experiment began in 2016, six fertilization treatments were set up in the experimental base of Institute of Cotton Research, Chinese Academy of Agricultural Sciences. T1: no fertilization, T2: 100% chemical fertilizer, T3: 20% organic fertilizer + 80% chemical fertilizer, T4: 40% organic fertilizer + 60% chemical fertilizer, T5: 50% organic fertilizer + 50% chemical fertilizer, T6: 100% organic fertilizer. After 3 years of fertilization, field sampling was conducted in 2018 to analyze the effects of different fertilization treatments on cotton biomass, nutrient accumulation, yield, N:P ratio and soil fertility. [Result] (1) Organic fertilizer treatment instead of 50% chemical fertilizer treatment had the greatest effect on the biomass of cotton plant, the nutrient accumulation of cotton plant and cotton yields. (2) Compared with the 100% chemical fertilizer, the application of organic fertilizers increased the content of soil organic matter, total nitrogen, available phosphorus, and alkali-hydrolyzable nitrogen, and application of 100% organic fertilizer significantly increased the content of soil available phosphorus. (3) There was a significant positive correlation between the accumulation of total nitrogen and total phosphorus of cotton plant and the biomass of cotton plant, and a significant negative correlation between the N:P ratio in root and stem and seed cotton yield. [Conclusion] Partial substitution of chemical fertilizer

收稿日期: 2019-12-19 第一作者简介: 汪苏洁 (1995—), 女, 硕士研究生, wangsujie951230@163.com; 贵会平 (1988—), 女, 硕士, huiping.828@163.com; # 同等贡献。* 通信作者: 张西岭, hainan1571@163.com; 宋美珍, songmzcrci@163.com
基金项目: 国家重点研发计划——黄河流域棉区棉花化肥农药减施增效技术集成与示范 (2017YFD0201906); 中国农业科学院科技创新工程项目; 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项 (1610162020020501)

with organic manure could reduce chemical fertilizer use, and continuous application of organic fertilizer to replace some chemical fertilizers has a tendency to increase soil fertility. Substitution of chemical fertilizer by 50% organic fertilizer was most effective to improve cotton biomass and nutrient accumulation and increase seed cotton yield.

Keywords: organic fertilizer replaces chemical fertilizer; cotton; nutrient accumulation; yield; soil fertility

施肥是作物增产最有效的途径,20 世纪全世界作物产量增加的一半来自化肥的贡献^[1],近些年的研究表明,生产中大量施用化肥并没有显著提高作物产量^[2]。过量的化肥投入不仅造成生产资源的浪费,导致土壤酸化^[3],而且造成生态环境污染^[4-5]。有机肥具有改善土壤理化性质,提高作物对养分的吸收和利用^[6]。研究表明,有机肥部分替代化肥可以减少化肥的用量,提高肥料利用率,改善土壤理化性质,提升土壤肥力,促进作物高产优质,降低环境污染风险^[7-9]。

棉花是世界范围干旱、半干旱地区重要的纤维作物^[10],在我国国民经济中具有举足轻重的地位。田间合理施用化学氮肥能够获得较高的籽棉产量^[11],而配施有机肥能够显著提高棉花单株成铃数,能促进棉花生长发育和地上部干物质积累^[12]。滴灌条件下,与单施化肥相比,有机氮肥部分替代化学氮肥有利于棉株养分积累,可提高棉花氮素表观利用率、偏生产力、肥料氮贡献率和农学效率^[13];综合养分吸收、氮素利用率、产量及经济效益等方面,有机氮肥替代 10% 化学氮肥处理是最有效、合理的施肥方式。因此,有机肥部分替代化肥是一种能改善棉田土壤环境,提高土壤肥力,提高氮肥利用率,进而提高棉花产量的施肥方式,但最佳有机氮肥替代率还需进一步试验研究。本研究在黄河流域棉区进行连续 3 年定位试验基础上,对有机肥不同替代率进行研究,探讨其对棉株生物量、养分积累、产量、土壤肥力及棉株氮磷化学计量比的影响,研究有机肥替代化肥的适宜替代率,以期对有机肥、无机肥在黄河流域棉田中合理施用提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

定位试验田位于中国农业科学院棉花研究所试验基地(河南省安阳县,36°4'28"N,114°31'33"E)。供试土壤为潮土,2016 年 4 月开始试

验时,土壤基础养分含量为有机质 17 g·kg⁻¹,全氮 0.93 g·kg⁻¹,碱解氮 74 mg·kg⁻¹,速效磷 10 g·kg⁻¹,速效钾 199 mg·kg⁻¹,pH 8.68。

1.2 供试材料

供试品种为中棉所 100^[14]。供试肥料为尿素(N 46%)、重过磷酸钙(P₂O₅ 46%)、硫酸钾(K₂O 50%);有机肥为腐熟猪粪,其含有机质 24.8%,N 2.3%,P₂O₅ 2.22%,K₂O 2.22%。

1.3 试验设计

试验基于课题 2016 年定位试验,播种日期为 4 月 25 日。试验设 6 个处理:T1(对照):不施肥,T2:100%化肥,T3:20%有机肥+80%化肥,T4:40%有机肥+60%化肥,T5:50%有机肥+50%化肥,T6:100%有机肥。T2、T3、T4、T5 总氮磷钾用量一致,有机肥替代处理替代比例按照氮肥(纯 N)计算。试验采取随机区组排列,每个处理 3 次重复。氮肥 45%基施、55%追施,优先施有机肥(6 月 20 日追肥,其中 T5 处理基施 50%,追施 50%),磷肥、钾肥、有机肥全部基施。采用 80 cm 等行距种植模式,密度为每 667 m² 3 500 株,小区面积为 66.64 m²。

1.4 样品采集

1.4.1 植株样品采集与测定。连续 3 年施肥后,2018 年每个重复分别于 6 月 15 日(蕾期)、7 月 16 日(花期)、8 月 13 日(铃期)、9 月 11 日(吐絮期)采集具有代表性的棉株 2 株,蕾期棉株分根、茎、叶 3 部分,其余时期棉株分根、茎、叶、生殖器官四部分,全部于 105 ℃杀青 30 min,80 ℃烘干至恒重,冷却至室温后称量不同器官生物量,取其平均值。称量后的棉株样品磨碎过 100 目筛(筛孔直径 0.150 mm)后,称取 0.120 0 g,用浓 H₂SO₄-H₂O₂ 法消煮制备待测液,用流动分析仪 AA3 测定全氮、全磷含量^[15];火焰光度计法测全钾含量^[16]。2016、2017、2018 年棉花收获期,每个重复随机选取 10 株,统计吐絮数,晒干后室内轧花考种,计算铃重和衣分,以小区实收棉花记产。

表 1 不同处理的施肥量
Table 1 Fertilizer amount of different treatments kg·hm⁻²

处理 Treatments	基施 Basal fertilizer				追施 Topdressing
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	猪粪 Swine manure	N
T1	0	0	0	0	0
T2	101.25	120.00	150.00	0	123.75
T3	56.25	76.57	106.57	1 956.0	123.75
T4	11.25	33.13	63.13	3 913.0	123.75
T5	0	11.41	41.41	4 891.3	112.50
T6	0	0	0	9 782.6	0

1.4.2 土壤样品采集与测定。连续施肥第 3 年(2018 年)收获后采集试验区土壤样品,采样深度为 0~20 cm,每小区选 5 个样点,混合为 1 个样品,剔除砾石和植物残根,风干过 20 目筛(筛孔直径 0.850 mm),取出少许过 100 目筛。土壤有机质测定采用重铬酸钾容量法;土壤全氮测定采用凯氏蒸馏法;土壤碱解氮测定采用扩散法;土壤速效磷测定采用碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法;土壤速效钾测定采用醋酸铵浸提-火焰光度计法;土壤 pH 测定采用水浸提-电位法(土水比 1:2.5)^[16]。

1.5 计算方法

1.5.1 棉株养分积累量计算方法。植株氮(磷、钾)积累量(mg)=植株生物量(g)×植株氮(磷、钾)含量(%)×10³。

1.5.2 棉株氮磷化学计量比计算方法。棉株氮磷化学计量比(N:P)=棉株全氮积累量(mg)/棉株全磷积累量(mg)。

1.6 数据处理方法

采用 Excel 2010、SPSS 22 和 SAS 9.2 软件进行数据处理及分析。

2 结果与分析

2.1 有机肥不同替代比例对棉株生物量的影响

表 2 结果表明,在各个生育阶段,施肥处理整株及茎、叶、生殖器官生物量均高于不施肥处理,其中有机肥替代 50%化肥处理整株及生殖器官生物量均为最高。与单施化肥相比,单施有机肥处理在各生育时期对棉株整株及各器官生物量的积累无显著差异。有机肥与化肥配施处理中,棉株整株及根、茎、生殖器官生物量随着有机肥替代化肥比例的增加而逐渐增加;在吐絮期之前,有机肥替代 50%化肥处理整株及根生物量均显著高于有机肥替代 20%化肥处理和有机肥替代 40%化肥处理。说明使用一定量有机肥替代化肥能够增加棉株干物质积累。

表 2 有机肥不同替代比例对棉花生物量的影响
Table 2 Effect of applications with manure and inorganic fertilizers in different proportions on cotton biomass g·plant⁻¹

时期 Stages	处理 Treatments	根 Root	茎 Stem	叶 Leaf	生殖器官 Reproductive organs	整株 Whole plant
蕾期	T1	1.02 b	0.97 d	4.08 b	—	6.07 c
Squaring stage	T2	1.15 b	1.35 b	4.64 ab	—	7.14 abc
	T3	1.03 b	1.05 d	4.10 ab	—	6.18 c
	T4	1.13 b	1.18 c	4.38 ab	—	6.70 bc
	T5	1.51 a	1.59 a	5.10 ab	—	8.20 a
	T6	1.04 b	1.31 bc	5.21 a	—	7.57 ab

表 2 (续)
Table 2 (Continued)

g·plant⁻¹

时期 Stages	处理 Treatments	根 Root	茎 Stem	叶 Leaf	生殖器官 Reproductive organs	整株 Whole plant
花期 Flowering stage	T1	5.18 b	9.32 c	13.50 c	2.50 c	30.50 d
	T2	6.53 b	14.42 b	19.17 b	4.33 ab	44.45 bc
	T3	5.82 b	12.75 b	18.02 b	3.00 bc	39.58 c
	T4	6.65 b	17.50 a	20.37 b	5.07 a	49.58 b
	T5	8.67 a	20.23 a	25.67 a	5.15 a	59.72 a
	T6	5.50 b	12.25 bc	18.92 b	3.30 bc	39.97 c
铃期 Bolling stage	T1	8.36 b	30.03 b	43.30 a	50.90 c	132.61 c
	T2	7.73 b	36.14 ab	45.47 a	70.99 bc	160.32 bc
	T3	8.64 b	38.21 ab	47.23 a	59.29 c	153.37 c
	T4	8.96 b	41.83 ab	51.24 a	70.42 bc	172.45 bc
	T5	13.70 a	45.21 a	50.90 a	92.43 a	202.23 a
	T6	9.94 b	48.45 a	54.69 a	83.28 ab	196.36 ab
吐絮期 Boll Opening stage	T1	15.10 a	38.15 b	38.55 d	119.58 b	211.38 b
	T2	18.67 a	58.85 a	53.70 ab	137.77 ab	268.99 a
	T3	16.83 a	55.07 a	58.23 a	125.21 b	255.34 ab
	T4	17.37 a	56.88 a	60.23 a	140.56 ab	275.03 a
	T5	18.40 a	60.75 a	43.98 cd	172.95 a	296.07 a
	T6	17.37 a	55.87 a	50.05 bc	136.91 ab	260.19 ab

注:同列数字后小写字母不同表示处理间 0.05 水平差异显著;“—”表示无数据。

Note: Values followed by different lowercase letters in the same column are significantly different among treatments at the 0.05 probability level; " — " means no data.

2.2 有机肥不同替代比例对棉花氮磷钾吸收积累的影响

2.2.1 有机肥不同替代比例对棉花氮吸收积累的影响。表 3 结果显示,在各个生育阶段,施肥处理整株及茎、叶中氮积累量均高于不施肥处理,其中有机肥替代 50%化肥处理整株及根、茎中氮积累量均为最高。与单施化肥相比,单施有机肥处理在吐絮期以前棉株整株及各器官中氮积累量的积累无显著差异。有机肥与化肥配施处理中,棉株整株及茎中氮积累量随着有机肥替代化肥比例的增加而逐渐增加,有机肥替代 20%化肥处理生殖器官中氮积累量显著低于有机肥替代 40%化肥处理和有机肥替代 50%化肥处理。说明使用一定量有机肥替代化肥能够增加棉株氮积

累量,尤其能够增加生殖器官的分配数量。

2.2.2 有机肥不同替代比例对棉花磷吸收积累的影响。由表 4 可知,在各个生育阶段,施肥处理整株及茎、叶中磷积累量均高于不施肥处理,其中有机肥替代 50%化肥处理整株及根、茎、生殖器官中磷积累量均为最高。除了铃期,与单施化肥相比,单施有机肥处理棉株整株及各器官中磷积累量无显著差异。有机肥与化肥配施处理中,棉株整株及生殖器官中磷积累量随着有机肥替代化肥比例的增加而逐渐增加,有机肥替代 50%化肥处理整株及生殖器官磷积累量显著高于有机肥替代 20%化肥处理。说明使用一定量有机肥替代化肥能够增加棉株磷积累量,尤其能够增加生殖器官的分配数量。

表 3 有机肥不同替代比例对棉花氮积累的影响

Table 3 Effect of applications with manure and inorganic fertilizers in different proportions on cotton nitrogen accumulation

g·plant⁻¹

时期 Stages	处理 Treatments	根 Root	茎 Stem	叶 Leaf	生殖器官 Reproductive organs	整株 Whole plant
蕾期 Squaring stage	T1	11.91 a	19.64 b	151.44 c	—	183.00 b
	T2	14.36 a	28.07 ab	183.71 abc	—	226.15 ab
	T3	12.34 a	21.47 ab	164.74 bc	—	198.55 b
	T4	14.99 a	24.62 ab	172.50 abc	—	212.12 ab
	T5	17.07 a	32.29 a	204.69 ab	—	254.05 a
	T6	12.16 a	25.34 a	209.71 a	—	247.22 a
花期 Flowering stage	T1	33.02 b	100.90 d	482.08 c	85.53 c	701.54 c
	T2	40.76 b	154.35 bc	718.76 b	133.15 ab	1 047.02 b
	T3	36.98 b	140.40 c	679.62 b	103.02 bc	960.03 b
	T4	46.58 b	181.22 ab	712.67 b	168.20a	1 108.66 b
	T5	62.04 a	211.32 a	949.05 a	163.36 a	1 385.77 a
	T6	33.70 b	125.52 cd	660.45 b	105.64 bc	925.31 b
铃期 Bolling stage	T1	57.35 b	227.45 b	1 218.39 a	1 461.50 bc	2 964.69 b
	T2	49.79 b	266.04 ab	1 316.58 a	1 506.67 bc	3 139.09 b
	T3	61.22 b	334.37ab	1 555.02 a	1 382.60 c	3 333.20 ab
	T4	60.61 b	348.60 ab	1 652.30 a	1 608.47 ab	3 669.98 ab
	T5	93.89 a	398.56 a	1 540.52 a	1 963.14 a	3 996.11 a
	T6	67.81 b	360.54 ab	1 597.28 a	1 790.15 ab	3 815.78 ab
吐絮期 Boll Opening stage	T1	113.63 a	372.01 b	934.31 b	2 268.29 d	3 688.24 b
	T2	133.82 a	528.63 ab	1 520.75 a	3 017.17 bc	5 200.37 a
	T3	129.31 a	519.78 ab	1 583.75 a	2 438.59 c	4 671.43 a
	T4	128.48 a	539.77 ab	1 668.83 a	2 863.30 ab	5 200.38 a
	T5	136.18 a	584.98 a	1 051.48 b	3 802.20 a	5 574.84 a
	T6	126.26 a	507.55 ab	1 198.39 b	2 859.01 cd	4 691.21 a

注:同列数字后小写字母不同表示处理间在 0.05 水平差异显著;“—”表示无数据。

Note: Values followed by different lowercase letters in the same column are significantly different among treatments at the 0.05 probability level; " — " means no data.

2.2.3 有机肥不同替代比例对棉花钾吸收积累的影响。表 5 表明,在各个生育阶段,施肥处理整株及根、茎、叶钾积累量均高于不施肥处理,其中有有机肥替代 50%化肥处理整株及根、茎中钾积累量均为最高。与单施化肥相比,单施有机肥处理棉株整株及根、叶、生殖器官中钾积累量的积累大多无

显著差异。有机肥与化肥配施处理中,棉株整株钾积累量随着有机肥替代化肥比例的增加而逐渐增加,有机肥替代 50%化肥处理整株及生殖器官钾积累量显著高于有机肥替代 20%化肥处理。说明使用一定量有机肥替代化肥能够增加棉株钾积累量,尤其能够增加生殖器官的分配数量。

表 4 有机肥不同替代比例对棉花磷积累的影响
Table 4 Effect of applications with manure and inorganic fertilizers in different proportions on cotton phosphorus accumulation

时期 Stages	处理 Treatments	根 Root	茎 Stem	叶 Leaf	生殖器官 Reproductive organs	整株 Whole plant
蕾期 Squaring stage	T1	2.90 b	4.14 d	14.63c	—	21.67 d
	T2	3.50 ab	5.75 b	18.55 abc	—	27.80 abc
	T3	3.13 b	4.18 d	11.53 c	—	22.61 cd
	T4	3.56 ab	4.83 cd	16.31 bc	—	24.71 bcd
	T5	4.44 a	6.66 a	20.28 ab	—	31.38 a
	T6	3.14 b	5.54 bc	20.97 a	—	29.65 ab
花期 Flowering stage	T1	5.14 c	14.70 d	39.83 c	13.76 c	73.43 c
	T2	6.57 bc	21.92 bc	61.87 b	22.42 ab	112.78 b
	T3	6.27 bc	18.34 cd	60.14 b	17.13 bc	101.88 b
	T4	7.86 b	26.24 b	60.99 b	29.02 a	124.11 b
	T5	11.25 a	32.90 a	83.36 a	29.07 a	156.58 a
	T6	5.22 c	18.14 cd	59.00 b	18.26 bc	100.62 b
铃期 Bolling stage	T1	9.83 b	38.69 b	119.83 c	271.72 c	440.06 c
	T2	8.53 b	45.58 ab	127.72 bc	286.33 bc	468.16 bc
	T3	11.90 b	60.30 ab	161.19 ab	261.09 c	494.48 bc
	T4	11.35 b	61.06 ab	170.71 a	308.23 bc	551.35 ab
	T5	17.83 a	69.27 a	165.50 ab	391.91 a	644.51 a
	T6	12.31 b	66.65 a	174.44 a	345.02 ab	598.42 a
吐絮期 Boll Opening stage	T1	22.20 a	67.71 b	126.45 c	463.50 c	679.86 c
	T2	25.70 a	98.81 ab	187.81 ab	608.60 b	920.93 ab
	T3	26.33 a	108.00 a	236.32 a	525.68 bc	896.33 b
	T4	22.66 a	107.09 a	243.13 a	579.47 bc	952.36 ab
	T5	27.19 a	118.76 a	164.74 bc	772.59 a	1 083.28 a
	T6	22.81 a	109.14 a	223.58 a	609.14 b	964.67 ab

注:同列数字后小写字母不同表示处理间在 0.05 水平差异显著;“—”表示无数据。

Note: Values followed by different lowercase letters in the same column are significantly different among treatments at the 0.05 probability level; " — " means no data.

2.3 有机肥不同替代比例对棉花籽棉产量及其构成因素的影响

从表 6 看出,有机肥处理籽棉产量随试验年限有增加趋势,但差异不显著。2016—2018 年不同处理间铃重差异不显著。2017 年 T6 处理衣分显著低于 T2 处理;2016 和 2018 年 T2、T3、T4、T5、T6 处理间衣分没有显著差异。总体来说,黄

河流域棉田连续 3 年进行有机肥替代可维持与化肥相当的产量,并且随着施肥年限的增加,有机肥替代处理产量高于单施化肥处理,有机肥替代 50%化肥效果最好。

2.4 有机肥不同替代比例对土壤肥力的影响

由表 7 可知,不同施肥处理与不施肥(T1)处理间,土壤有机质、速效钾、碱解氮含量和 pH 没

表 5 有机肥不同替代比例对棉花钾积累的影响
Table 5 Effect of applications with manure and inorganic fertilizers in different proportions
on cotton potassium accumulation g·plant⁻¹

时期 Stages	处理 Treatments	根 Root	茎 Stem	叶 Leaf	生殖器官 Reproductive organs	整株 Whole plant
蕾期 Squaring stage	T1	21.12 b	23.85 d	77.62 b	—	122.59 c
	T2	25.34 ab	35.82 b	104.24 ab	—	165.41 ab
	T3	22.20 b	28.14 cd	88.80 ab	—	139.14 bc
	T4	25.42 ab	31.76 bc	94.50 ab	—	151.68 abc
	T5	31.27 a	41.79 a	106.87 ab	—	179.92 a
	T6	21.83 b	32.59 bc	110.84 a	—	165.26 ab
花期 Flowering stage	T1	63.74 b	156.74 e	177.76 c	49.75 c	447.99 d
	T2	79.58 b	249.57 bc	277.36 b	84.86 ab	691.36 bc
	T3	69.86 b	228.80 cd	266.55 b	61.68 bc	626.89 bc
	T4	85.78 b	294.46 b	283.35 b	101.94 a	765.53 b
	T5	116.10 a	361.02 a	422.85 a	101.43 a	1 001.40 a
	T6	65.07 b	193.46 de	234.40 bc	63.86 bc	556.79 cd
铃期 Bolling stage	T1	60.51 b	271.66 b	317.95 b	1 099.67 c	1 749.80 c
	T2	61.27 b	437.22 ab	502.50 a	1 240.18 bc	2 241.17 b
	T3	72.92 b	494.53 a	564.45 a	1 039.55 c	2 171.44 bc
	T4	71.11 b	489.43 a	588.80 a	1 235.85 bc	2 385.18 b
	T5	112.57 a	559.12 a	565.75 a	1 607.76 a	2 845.20 a
	T6	82.70 b	499.23 a	486.61 a	1 438.10 ab	2 506.64 ab
吐絮期 Boll Opening stage	T1	104.31 a	300.18 b	301.87 c	2 476.49 b	3 182.85 c
	T2	129.73 a	596.40 a	615.20 ab	2 981.27 b	4 322.60 ab
	T3	120.13 a	536.37 a	614.60 ab	2 627.05 b	3 898.15 bc
	T4	116.74 a	529.99 a	676.49 a	2 938.45 b	4 261.67 ab
	T5	127.29 a	552.80 a	458.74 bc	3 673.39 a	4 812.22 a
	T6	117.45 a	501.14 ab	457.22 bc	2 746.34 b	3 822.15 bc

注:同列数字后小写字母不同表示处理间在 0.05 水平差异显著;“—”表示无数据。

Note: Values followed by different lowercase letters in the same column are significantly different among treatments at the 0.05 probability level; " — " means no data.

有显著性差异;与单施化肥处理相比,施用有机肥处理土壤有机质、全氮、速效磷、碱解氮含量均有增高趋势,变化范围分别为 1.2%~5.7%、4.0%~5.0%、9.8%~40.0%、3.7%~11.6%,且单施有机肥处理(T6)处理速效磷含量显著高于单施化肥(T2)处理。

2.5 有机肥不同替代比例对棉株氮磷化学计量比的影响

由图 1 可知,不同比例有机肥替代处理氮磷比为 5.175~10.275,棉株叶中氮磷比最高。不同处理间棉株根、茎、叶氮磷比没有显著差异。生殖器官中,与对照 T1 处理相比,T5 处理氮磷比显



表 6 有机肥不同替代比例对棉花产量及其构成因素的影响
Table 6 Effect of applications with manure and inorganic fertilizers in different proportions on cotton yield and yield component factors

处理 Treat- ments	籽棉产量			产量构成因子 Yield component factors					
	Seed cotton yield /(kg·hm ⁻²)			铃重 Boll weight /g			衣分 Lint percentage /%		
	2016	2017	2018	2016	2017	2018	2016	2017	2018
T1	4 001.40 a	3 971.71 a	4 071.76 a	5.51 a	5.28 a	5.21 a	37.43 a	40.98 a	39.52 a
T2	4 066.66 a	4 178.83 a	4 153.02 a	5.37 a	5.32 a	5.43 a	36.50 ab	41.12 a	39.90 a
T3	3 740.17 a	4 024.77 a	4 299.12 a	5.50 a	5.25 a	5.51 a	36.23 b	40.87 a	40.50 a
T4	3 957.14 a	3 990.48 a	4 289.16 a	5.51 a	5.02 a	5.39 a	36.40 b	40.51 ab	39.92 a
T5	4 012.03 a	4 108.86 a	4 314.38 a	5.57 a	5.56 a	5.37 a	36.90 ab	40.06 ab	39.69 a
T6	3 752.28 a	4 000.61 a	4 208.84 a	5.58 a	5.46 a	5.52 a	36.20 b	39.82 b	40.41 a

注:同列数字后小写字母不同表示处理间在 0.05 水平差异显著。
Note: Values followed by different lowercase letters in the same column are significantly different among treatments at the 0.05 probability level.

表 7 有机肥不同替代比例对土壤肥力的影响
Table 7 Effect of applications with manure and inorganic fertilizers in different proportions on soil fertility

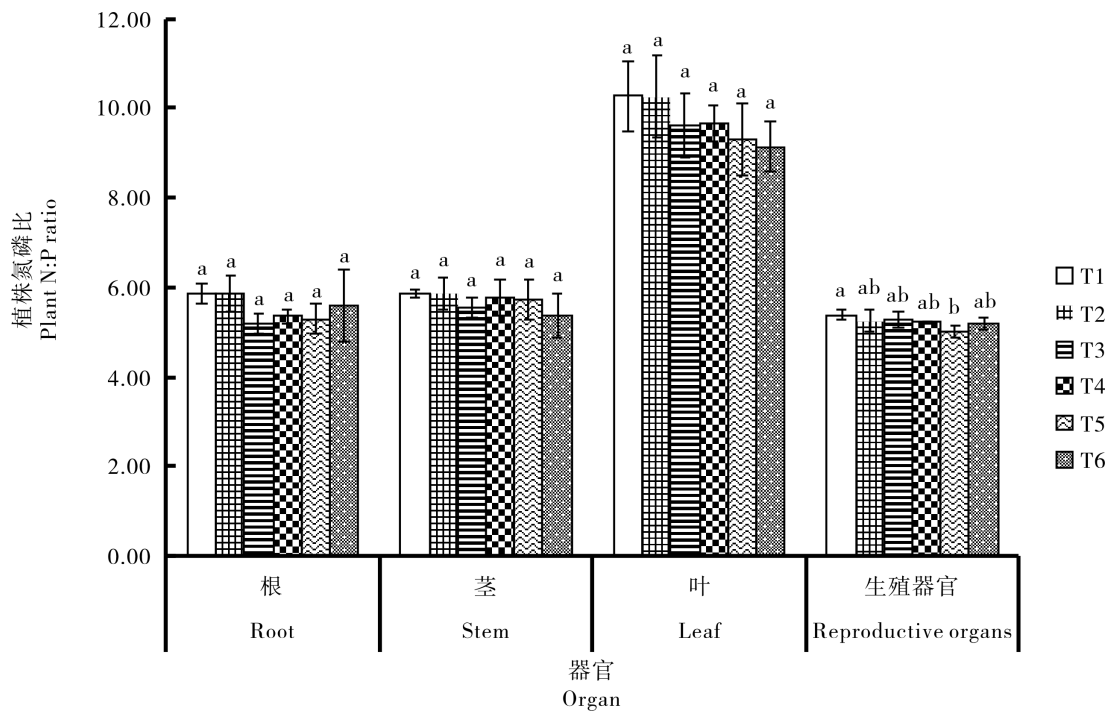
处理 Treat- ments	有机质 Organic matter / (g·kg ⁻¹)	全氮 Total nitrogen / (g·kg ⁻¹)	碱解氮 Available nitrogen / (mg·kg ⁻¹)	速效磷 Available phosphate / (mg·kg ⁻¹)	速效钾 Available potassium / (mg·kg ⁻¹)	pH
T1	15.86 a	1.03 b	65.24 a	14.12 ab	230.45 a	8.03 a
T2	16.01 a	1.06 ab	62.80 a	12.57 b	239.58 a	8.05 a
T3	16.50 a	1.10 ab	65.12 a	13.80 ab	243.75 a	7.97 a
T4	16.35 a	1.15 a	65.16 a	16.69 ab	237.19 a	7.99 a
T5	16.20 a	1.11 ab	68.41 a	15.40 ab	234.98 a	7.98 a
T6	16.92 a	1.11 ab	70.10 a	17.58 a	243.54 a	8.10 a

注:同列数字后小写字母不同表示处理间在 0.05 水平差异显著。
Note: Values followed by different lowercase letters in the same column are significantly different among treatments at the 0.05 probability level.

著降低;与 T2 处理相比,差异不显著。

由表 8 可知,棉株全氮、全磷积累量与棉株生物量极显著正相关,相关系数分别为 0.925、0.936,表明棉株生物量随棉株全氮、全磷积累量增加而增大。棉株根、茎氮磷比与籽棉产量呈极显著负相关,相关系数分别为-0.881、-0.654,表明籽棉产量随棉株根、茎氮磷比的降低而增加。

3 讨论
3.1 有机肥不同替代比例对棉花养分积累及产量的影响
棉花各生育期干物质的积累及分配是产量形成的基本保证,影响棉花经济产量的高低和品质的优劣,养分吸收又是生物量积累的基础,它反映养分的有效吸收状况^[17]。研究表明,有机肥能



注:同列数字后小写字母不同表示处理间在 0.05 水平差异显著。

Note: Values followed by different lowercase letters in the same column are significantly different among treatments at the 0.05 probability level .

图 1 有机肥不同替代比例对植株氮磷比的影响

Fig. 2 Effect of applications with manure and inorganic fertilizers in different proportions on N:P ratio in cotton

表 8 棉花生物量、产量和棉花养分指标的相关分析
Table 8 Correlation analysis of biomass and yield of cotton with nutrient index of cotton

指标 Index	生物量 Biomass / (g·plant ⁻¹)	籽棉产量 Seed cotton yield / (kg·hm ⁻²)
植株全氮含量 Plant total nitrogen content	0.925**	0.295
植株全磷含量 Plant total phosphorus content	0.936**	0.296
根氮磷比 Root N:P ratio	-0.118	-0.881**
茎氮磷比 Stem N:P ratio	-0.054	-0.654**
叶氮磷比 Leaf N:P ratio	-0.280	-0.007
生殖器官氮磷比 Reproductive organs N:P ratio	-0.330	-0.220
整株氮磷比 Whole plant N:P ratio	-0.330	-0.076

** : 在 0.01 水平上显著相关。 ** : Significant at the 0.01 probability level.

增加棉花干物质积累^[18]。本试验中不同生育期有机肥替代 50%化肥处理较单施化肥处理提高棉花整株生物量,与前人研究结论基本一致。

前人研究发现,在盐碱土上施用有机肥能够显著提高棉花氮磷钾积累,提高棉花产量^[19]。而本文针对潮土棉田的研究结果显示,一定量有机肥替代化肥能够增加棉株对氮磷钾的积累,尤其能够增加养分在生殖器官中的分配。

适宜的有机肥替代比例能增加作物产量^[20-21]。在本研究中,随着施肥年限的增加,有机肥替代处理较单施化肥处理增加了棉花产量,表明有机肥替代化肥的作用在大田作物上应用不是即时起效的,但是这种技术措施具有可持续性的环境生态效益^[22]。汤春纯等^[23]研究表明,有机无机肥配施质量比为 1 : 9 时,对棉花籽棉产量、皮棉产量、秸秆经济质量的效果最好。但是,本文结果显示有机肥替代 50%化肥处理籽棉产量最高,原因是有机肥替代化肥的作用效果不仅受作物品种的影响,还与有机肥的原料来源、土壤类型、土壤肥力水平等因素关系密切^[13]。

3.2 有机肥不同替代比例对土壤肥力的影响

研究发现,有机肥中的有机氮进入土壤后,需经过微生物的进一步转化分解才能释放出有效氮素供作物吸收利用^[24]。本试验结果显示,有机肥替代处理与单施化肥处理间土壤 pH 相近,这与人研究结果不同^[25-26],可能原因是试验棉田属于石灰性潮土,土壤缓冲能力强;再者施肥年限短,土壤酸碱度变化幅度小。在本研究中,单施有机肥处理土壤速效磷含量最高,显著高于单施化肥处理,主要是因为有机肥完全替代化肥本身增加磷的含量,有机肥施入土壤后,能促进无机磷的溶解,增加土壤速效磷含量^[27]。总体来看,有机肥替代处理可维持或一定程度增加土壤养分含量,保证棉株整个生育时期的养分供应。

3.3 有机肥不同替代比例对植株氮磷化学计量比的影响

氮磷比在植株不同器官的变化可看出氮和磷在植物体内的迁移转化过程^[28]。南学军等^[29]研究显示,生物质炭配施不同量氮肥对植物氮磷比无显著影响,但与单施氮肥相比,生物质炭配施氮肥显著降低小麦的氮磷比。本研究发现,有机肥替代部分化肥处理相比单施化肥处理降低棉株根、茎、叶、生殖器官及整株的氮磷比,但差异不显著。陈智伟^[30]研究显示,小白菜生物量与植株氮磷比呈极显著负相关、与植株全氮积累量呈极显著负相关、与植株全磷积累量呈极显著正相关。而本文研究表明,棉株生物量与植株全氮、全磷积累量呈极显著正相关;而与根、茎、叶、生殖器官及整株氮磷比呈负相关,但相关性不显著。总体结果表明,根、茎氮磷比越高越限制棉株产量。

3.4 试验存在的不足及展望

本试验中根据棉花需肥特性和试验田土壤质地确定化肥基追比例(基施 45%,追施 55%),其中 T5 处理由于 5%的有机肥(相对于追施的尿素,用量较少且轻)不能均匀撒施应用,遂全部基施。相对于速效氮肥,有机肥的矿化较慢,T5 处理中将需要追施的 5%的有机肥基施入土壤,一般认为这种差异不会对试验产生显著影响。本试验结果表明 T5 处理替代效果最好,是否因基追比例差异造成需进一步研究验证。

4 结论

本试验条件下,连续应用有机肥替代部分化肥具有增加其在土壤肥力的趋势,能够提高棉株氮磷钾积累量并增加生殖器官分配量。施肥处理在各年度内籽棉产量无显著差异,但有机肥处理籽棉产量随试验年限有增加趋势。从培肥地力对产量、生物量、养分积累量的影响综合来看,有机肥替代 50%化肥效果最好。

参考文献:

- [1] Asif I, Dong Q, Madeeha A, et al. Untangling the molecular mechanisms and functions of nitrate to improve nitrogen use efficiency[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2020, 100(3): 904-914. DOI: 10.1002/jsfa.10085.
- [2] 奚振邦, 王寓群, 杨佩珍. 中国现代农业发展中的有机肥问题[J]. 中国农业科学, 2004, 37(12): 1874-1878. DOI: 10.3321/j.issn:0578-1752.2004.12.014.
- Xi Zhenbang, Wang Yuqun, Yang Peizhen. The issue on organic manure in developing modern agriculture in China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2004, 37(12): 1874-1878.
- [3] Guo J H, Liu X J, Zhang Y, et al. Significant acidification in major Chinese croplands[J]. Science, 2010, 327(5968): 1008-1010. DOI: 10.1126/science.1182570.
- [4] 林先贵, 冯有智. 潮土农田微生物研究进展[J]. 中国生态农业学报, 2016, 24(4): 416-434. DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.151347.
- Lin Xiangui, Feng Youzhi. Research progresses of farmland microorganisms in fluvo-aquic soil of China[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2016, 24(4): 416-434.
- [5] 田昌玉, 左余宝, 林治安, 等. 有机肥与无机肥氮素平行施用对土壤硝态氮积累与玉米产量的影响[J]. 土壤通报, 2010, 41(6): 1418-1422. DOI: 10.19336/j.cnki.trtb.2010.06.025.
- Tian Changyu, Zuo Yubao, Lin Zhi'an, et al. Corn yield and nitrate-N accumulation in the soil as influenced by organic and inorganic fertilizer[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2010, 41(6): 1418-1422.
- [6] 吴迪, 黄绍文, 金继运. 氮肥运筹、配施有机肥和坐水种对春玉米产量与养分吸收转运的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2009, 15(2): 317-326. DOI: 10.3321/j.issn:1008-505X.2009.02.011.
- Wu Di, Huang Shaowen, Jin Jiyun. Effects of nitrogen fertilizer management, organic manure application and bed-irrigation sowing on maize yield, and nutrient uptake and translocation[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2009, 15(2): 317-326.
- [7] 张绪成, 于显枫, 王红丽, 等. 半干旱区减氮增钾、有机肥替代对全膜覆盖垄沟种植马铃薯水肥利用和生物量积累的调控

- [J]. 中国农业科学, 2016, 49(5): 852-864. DOI: 10.3864/j.issn.0578-1752.2016.05.005.
- Zhang Xucheng, Yu Xianfeng, Wang Hongli, et al. Regulations of reduced chemical nitrogen, potassium fertilizer application and organic manure substitution on potato water fertilizer utilization and biomass assimilation under whole field plastics mulching and ridge-furrow planting system on semi-arid area[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2016, 49(5): 852-864.
- [8] 张昊青, 于昕阳, 翟丙年, 等. 渭北旱地麦田配施有机肥减量施氮的作用效果[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(1): 124-133. DOI: 10.11654/jaes.2016-0827.
- Zhang Haoqing, Yu Xinyang, Zhai Bingnian, et al. Reducing N fertilization rate through a combination of manure and chemical fertilizer in Weibei dryland[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2017, 36(1): 124-133.
- [9] Parijat S, Bhattacharya S S, Baruah K K. Organic substitution in fertilizer schedule: Impacts on soil health, photosynthetic efficiency, yield and assimilation in wheat grown in alluvial soil[J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2015, 203: 102-109. DOI:10.1016/j.agee.2015.02.003.
- [10] Asif I, Gui Huiping, Zhang Hengheng, et al. Genotypic variation in cotton genotypes for phosphorus-use efficiency [J]. Agronomy, 2019, 9(11): 689. DOI: 10.3390/agronomy9110689.
- [11] 秦宇坤, 李鹏程, 郑苍松, 等. 施氮量对低肥力棉田土壤氮素及棉花养分吸收利用影响[J]. 棉花学报, 2019, 31(3): 242-253. DOI: 10.11963/1002-7807.qykw.20190430.
- Qin Yukun, Li Pengcheng, Zheng Cangsong, et al. Effects of nitrogen application rates on soil nitrogen content, nutrient uptake and utilization of cotton in low fertility fields[J]. Cotton Science, 2019, 31(3): 242-253.
- [12] 王宁, 南宏宇, 冯克云. 化肥减量配施有机肥对棉田土壤微生物量、酶活性和棉花产量的影响[J]. 应用生态学报, 2020, 31(1): 173-181. DOI: 10.13287/j.1001-9332.202001.022.
- Wang Ning, Nan Hongyu, Feng Keyun. Effects of reduced chemical fertilizer with organic fertilizer application on cotton soil microbial biomass, enzyme activity and yield[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020, 31(1): 173-181.
- [13] 哈丽哈什·依巴提, 李青军, 张炎. 有机肥氮替代部分化肥氮对棉花养分吸收、氮素利用和产量的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2019, (3): 137-142. DOI: 10.11838/sfsc.1673-6257.18267.
- Halihashi Yibati, Li Qingjun, Zhang Yan. Effects of organic manure nitrogen replacing chemical fertilizer nitrogen on cotton nutrient uptake, nitrogen utilization efficiency and yield[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2019, (3): 137-142.
- [14] 姚金波, 张永山, 陈伟, 等. 中熟常规转基因抗虫棉——中棉所 100[J]. 中国棉花, 2016, 43(9): 33-34. DOI: 10.11963/issn.1000-632X.201609009.
- Yao Jinbo, Zhang Yongshan, Chen Wei, et al. A transgenic insect-resistance cotton variety, CCRI 100[J]. China Cotton, 2016, 43(9): 33-34.
- [15] 金宏鑫. 城市污泥堆肥对大豆重金属积累及养分吸收的影响[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2012.
- Jin Hongxin. Effects of municipal sewage sludge compost on heavy metal accumulation and nutrient uptake of soybean[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2012.
- [16] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000: 16-106.
- Bao Shidan. Soil and agricultural chemistry analysis[M]. 3ed. Beijing: China Agriculture Press, 2000: 16-106.
- [17] 戴婷婷, 盛建东, 陈波浪. 磷肥不同用量对棉花干物质及氮磷钾吸收分配的影响[J]. 棉花学报, 2010, 22(5): 466-470. DOI: 10.3969/j.issn.1002-7807.2010.05.014.
- Dai Tingting, Sheng Jiandong, Chen Bolang. Effect of different phosphorus fertilizer rate on dry matter accumulation and the absorption and distribution of nitrogen, phosphorous, potassium of cotton[J]. Cotton Science, 2010, 22(5): 466-470.
- [18] 田小明, 李俊华, 危常州, 等. 连续 3 年施用生物有机肥对土壤有机质组分、棉花养分吸收及产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(5): 1111-1118. DOI: 10.11674/zwf.2012.12026.
- Tian Xiaoming, Li Junhua, Wei Changzhou, et al. Effects of continuous application of bio-organic fertilizer for three year on soil organic matter fractions, cotton nutrient absorption and yield[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2012, 18(5): 1111-1118.
- [19] 罗佳, 盛建东, 王永旭, 等. 不同有机肥对盐渍化耕地土壤盐分、养分及棉花产量的影响[J]. 水土保持研究, 2016, 23(3): 48-53. DOI: 10.13869/j.cnki.rswc.2016.03.009.
- Luo Jia, Sheng Jiandong, Wang Yongxu, et al. Effects of different organic fertilizers on soil salinity, nutrients and cotton yield on salt-affecte land[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2016, 23(3): 48-53.
- [20] 孟琳, 张小莉, 蒋小芳, 等. 有机肥料氮替代部分化肥氮对稻谷产量的影响及替代率[J]. 中国农业科学, 2009, 42(2): 532-542. DOI: 10.3864/j.issn.0578-1752.2009.02.019.
- Meng Lin, Zhang Xiaoli, Jiang Xiaofang, et al. Effects of partial mineral nitrogen substitution by organic fertilizer nitrogen on the yields of rice grains and their proper substitution rate[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2009, 42(2): 532-542.
- [21] 谢军, 赵亚南, 陈轩敬, 等. 有机肥氮替代化肥氮提高玉米产量和氮素吸收利用效率[J]. 中国农业科学, 2016, 49(20): 3934-3943. DOI: 10.3864/j.issn.0578-1752.2016.20.008.
- Xie Jun, Zhao Yanan, Chen Xuanjing, et al. Nitrogen of organic manure replacing chemical nitrogenous fertilizer improve maize yield and nitrogen uptake and utilization efficiency[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2016, 49(20): 3934-3943.

- [22] 温延臣, 张曰东, 袁亮, 等. 商品有机肥替代化肥对作物产量和土壤肥力的影响[J]. 中国农业科学, 2018, 51(11): 2136-2142. DOI: 10.16498/j.cnki.hnnykx.2007.06.029.
- Wen Yanchen, Zhang Yuedong, Yuan Liang, et al. Crop yield and soil fertility response to commercial organic fertilizer substituting chemical fertilizer[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2018, 51(11): 2136-2142.
- [23] 汤春纯, 李海平, 夏照明. 配施有机肥对提高棉花产量和肥料利用率的影响[J]. 湖南农业科学, 2007, 37(6): 123-124. DOI: 10.16498/j.cnki.hnnykx.2007.06.029.
- Tang Chunchun, Li Haiping, Xia Zhaoming. Effect of organic fertilizer on cotton yield and fertilizer utilization[J]. Hunan Agricultural Sciences, 2007, 37(6): 123-124.
- [24] 邢亚薇, 李春越, 刘津, 等. 长期施肥对黄土旱塬农田土壤微生物丰度的影响[J]. 应用生态学报, 2019, 30(4): 1351-1358. d DOI: 10.13287/j.1001-9332.201904.003.
- Xing Yawei, Li Chunyue, Liu Jin, et al. Effects of long-term fertilization on soil microbial abundance in farmland of the loess plateau, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2019, 30(4): 1351-1358.
- [25] 裴洲洋, 陈油鸿, 江春, 等. 不同施肥结构对土壤理化性质及烤烟氮、磷、钾含量的影响[J]. 安徽农学通报, 2016, 22(21): 35-37, 45. DOI: 10.3969/j.issn.1007-7731.2016.21.014.
- Pei Zhouyang, Chen Youhong, Jiang Chun, et al. Effects of different fertilization structures on soil physical and chemical properties and nitrogen, phosphorus and potassium content of flue-cured[J]. Anhui Agricultural Science Bulletin, 2016, 22(21): 35-37, 45.
- [26] 杨旸, 张树兰, 杨学云, 等. 长期定位施肥对旱作壤土小麦产量、养分效率及养分平衡的影响[J]. 土壤通报, 2017, 48(5): 1162-1168. DOI: 10.19336/j.cnki.trtb.2017.05.20.
- Yang Yang, Zhang Shulan, Yang Xueyun, et al. Effect of long-term fertilization on wheat yield, nutrient use efficiency and nutrient balance in rainfed loess soil[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2017, 48(5): 1162-1168.
- [27] 杨峰, 黄山, 崔亮, 等. 玉米/大豆套作下作物叶片氮、磷动态特征及其相关性分析[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(4): 781-789. DOI: 10.11674/zwylf.2013.0402.
- Yang Feng, Huang Shan, Cui Liang, et al. Dynamic changes and correlations of P and N concentrations in crop leaves under relay intercropping system of maize and soybean[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2013, 19(4): 781-789.
- [28] 杨有德, 李月芬, 赵兰坡, 等. 不同装土量对玉米植株·根系·籽粒养分浓度及化学计量比的影响[J]. 安徽农业科学, 2009, 37(22): 10456-10460, 10475. DOI: 10.13989/j.cnki.0517-6611.2009.22.092.
- Yang Youde, Li Yuefen, Zhao Lanpo, et al. Effects of different soil amounts on nutrients concentration and stoichiometry of maize plant, root and seed[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2009, 37(22): 10456-10460, 10475.
- [29] 南学军, 蔡立群, 武均, 等. 生物质炭与氮肥配施对春小麦产量及其 C : N : P 的影响[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(8): 1154-1162. DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.161184.
- Nan Xuejun, Cai Liqun, Wu Ju, et al. Effect of combined application of biochar and N-fertilizer on yield and C : N : P ratio of spring wheat[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2017, 25(8): 1154-1162.
- [30] 陈智伟. 生物质炭和磷肥施用对土壤养分、小白菜生物量和植株养分含量的影响[D]. 福州: 福建师范大学, 2018.
- Chen Zhiwei. Effect of biochar and ohosphate fertilizer application on soil nutrient, biomass and plant nutrient contents of pak-choi[D]. Fuzhou: Fujian Normal University, 2018. ●