



氮磷调控对大豆 – 玉米轮作下植株光合生产能力和产量的影响

张明聪, 何松榆, 金喜军, 王孟雪, 任春元, 战英策, 胡国华, 张玉先

(黑龙江八一农垦大学 农学院, 黑龙江 大庆 163319)

摘要:为探明黑龙江垦区玉米 – 大豆轮作体系下的氮磷肥施用对玉米和大豆光合生产能力和产量的影响。采用小区试验法, 于 2016 – 2017 年在黑龙江省九三管局分别实施玉 – 豆和豆 – 玉轮作, 玉米茬口实施增氮减磷, 大豆茬口实施减氮增磷, 使一个轮作周年内氮磷肥施用总量一致。结果表明: 2016 年玉 – 豆轮作下玉米实施增氮减磷处理 (MT2), 与常规施肥 (MCK) 相比, 提高了玉米叶片 SPAD 值、叶片的净光合速率、气孔导度和蒸腾速率, 增加了乳熟期营养器官和穗干重, 显著提高了玉米产量, MT2 处理较 MCK 处理增产 4.45% ($P < 0.05$); 2017 年玉 – 豆轮作下大豆实施减氮增磷, 与常规施肥相比, 各处理均提高叶片的光合速率, 增加了鼓粒初期和鼓粒盛期营养器官干物质积累量, 产量均有所增加, 但未达显著水平。2016 年豆 – 玉轮作下大豆实施减氮增磷方案, 与常规施肥相比, 各处理均降低叶片 SPAD、叶片的光合速率、大豆营养器官的干物质积累量, 降低了大豆产量, 但未达显著水平; 2017 年豆 – 玉轮作下玉米实施增氮减磷, 与常规施肥相比, 各处理提高了叶片 SPAD、光合速率、大喇叭口期后的玉米干物质积累量和玉米产量, 其中, MT2 与 MCK 相比增加 12.65% ($P < 0.05$)。2 年试验表明, 在总施肥量不变的情况下, 大豆玉米轮作体系下大豆茬口减 50% 的大豆氮、增 50% 的玉米磷, 玉米茬口增 50% 的大豆氮、减 50% 的玉米磷处理可提高轮作周期的叶片的光合生产能力, 显著提高玉米产量, 同时保证大豆产量不降低, 使轮作周期总产量提高。本研究结果可为黑龙江垦区玉米 – 大豆轮作高效施肥提供理论依据。

关键词:大豆 – 玉米轮作; 氮磷调控; 光合生产能力; 产量

Effects of Nitrogen and Phosphorus Regulation on Photosynthetic Capacity and Yield under Soybean and Maize Rotation

ZHANG Ming-cong, HE Song-yu, JIN Xi-jun, WANG Meng-xue, REN Chun-yuan, ZHAN Ying-ce, HU Guo-hua, ZHANG Yu-xian

(College of Agronomy, Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing 163319, China)

Abstract: In order to explore the effects of nitrogen and phosphorus regulation on photosynthetic capacity and yield under soybean and maize rotation in Heilongjiang reclamation region. It was carried out in the Jiusan administration bureau of Heilongjiang province. A field experiment was conducted in two growing seasons (2016 and 2017), maize-soybean and soybean-maize rotation were planted respectively in 2016, increasing nitrogen and reducing phosphorus in maize stubble, reducing nitrogen and increasing phosphorus in soybean stubble, to ensure that the total amount of nitrogen and phosphorus fertilizer was the same during rotation period. The results indicated that under increasing nitrogen and reducing phosphorus of maize stubble with maize-soybean rotation in 2016, compared to conventional fertilization comparison (MCK), the application of increasing 50% nitrogen of soybean and reduced 50% phosphorus of maize in maize stubble (MT2) increased SPAD, net photosynthetic rate (P_n), stomatal conductance (G_s) and transpiration rates (T_r) of leaves, dry weight of vegetative organs and ear at milk-ripening stage, yield of maize. Applying MT2 resulted in higher yield increased by 4.45% ($P < 0.05$) as compared to MCK. In 2017, soybean was planted to reduce nitrogen and increase phosphorus with maize-soybean rotation, compared to MCK, increased the photosynthetic rate of leaves, dry matter accumulation of vegetative organs at early and late of R5 stage, and increased yield of soybean but did not reach the significant level. While under reducing nitrogen and increasing phosphorus of soybean stubble with soybean-maize rotation in 2016, compared to conventional fertilization comparison (SCK), reduced SPAD of leaves, photosynthetic rate of leaves and dry matter accumulation of vegetative organs, and reduced yield of soybean, but did not reach the significant level. Increasing nitrogen and reducing phosphorus of maize stubble with soybean-maize rotation in 2017, compared to MCK, increased SPAD of leaves, photosynthetic rate of leaves, dry matter accumulation after large bell stage and yield of maize. Yield of MT2 was 12.65% higher than that of MCK ($P < 0.05$). This study investigated the relationship between ways of NP applications and changes of photosynthetic capacity through in a field experiment during two growing years, aiming to provide a theoretical basis for high-yield and high-efficient photosynthetic capacity under the same of the total amount fertilizer during rotation period. The application of reducing 50% nitrogen of soybean and increasing 50% phosphorus of maize in soybean stubble, and the application of increasing 50% nitrogen of soybean and reducing 50% phosphorus of maize in maize stubble can significantly increase yield of maize, but soybean yield was not decreased, so the total

收稿日期: 2018-07-17

基金项目: 国家科技支撑计划 (2014BAD11B01-02); 大庆市指导性科技计划项目 (zd-2016-107); 黑龙江省自然科学基金面上项目 (C2016042); 中国博士后科学基金 (2016M591568); 黑龙江八一农垦大学博士科研启动基金 (XYB2014-04); 国家现代农业产业技术体系 (CARS-04-PS17)。

第一作者简介: 张明聪 (1983 –), 男, 博士, 讲师, 主要从事土壤耕作与养分循环等研究。E-mail: zhangmingcong@163.com。

通讯作者: 张玉先 (1968 –), 男, 教授, 博导, 主要从事大豆逆境栽培生理和轮作体系研究。E-mail: zyx_lxy@126.com。

yield of soybean and maize rotation was increased.
Keywords: Soybean-maize rotation; Nitrogen and phosphorus regulation; Photosynthetic capacity; Yield

玉米和大豆是我国主要粮食作物,黑龙江省是我国大豆和玉米的主产区,玉米与大豆轮作可以解决大豆的连作障碍,改善土壤结构,维持土壤健康,提高植株地上部长势,缓解大豆和玉米连作中的病虫害和土壤养分匮乏的问题。大豆与玉米轮作是当前实现旱田种植效益最大化的主要轮作方式,一方面大豆的生物固氮可以为玉米提供氮素营养,另一方面玉米收获后创造的土壤环境又有利于促进大豆的生物固氮^[1];而氮素用量也是影响大豆根瘤固氮的主要因素之一^[2],大豆茬口适量施氮,可促进大豆根瘤活性提高,增加土壤氮残留,增强作物长势,提高作物的光合生产能力^[3-4];同时玉米是喜氮作物,需氮量远高于大豆,有研究表明豆-玉轮作中前茬大豆残留氮素供给是玉米养分吸收重要部分^[5],土壤高残留氮是提高玉米地上部长势和叶片的光合速率的主要途径之一^[6]。磷肥与氮肥不同,磷肥施入土壤后,大部分成为无效态磷,当季利用率较低,然而这些累积在土壤中的磷后效却很高^[7]。豆科作物吸收磷素较多,可以促进大豆对氮素的吸收^[8]。现阶段农业生产中大豆和玉米轮作周期内的施肥方案与传统单作相同,并没有考虑2种作物的养分需求特征以及地上部长势问题,因此

本研究控制一个轮作周期内总施肥量不变,从大豆和玉米的需肥特性出发,总体上满足玉米对氮素的需求,调整玉米大豆轮作周期内氮磷肥的施用量,系统比较和分析大豆和玉米轮作体系下氮磷调控对作物地上部光合生产能力及产量的影响,探明轮作周期内氮磷调控提高玉米和大豆光合生产能力和产量的主要原因,优化玉米和大豆轮作体系施肥方法,为黑龙江垦区玉米-大豆轮作提质增效提供理论和技术支撑,达到轮作周期内作物高产的目的。

1 材料与方法

1.1 材料

本试验以当地主栽大豆品种黑河43(亚有限结荚习性)和玉米品种德美亚1号为供试材料。供试肥料采用尿素(N 46%)、磷酸二铵(N 18%, P₂O₅ 46%)、硫酸钾(K₂O 50%)。

1.2 试验地概况

试验于2016-2017年在黑龙江省农垦九三管理局科技园区进行,2016年选玉米和大豆为前茬地块,分别种植大豆和玉米,2017年在2016年基础上实施轮作,土壤质地为壤土,土壤基本理化性质见表1。

表1 2016年土壤基本理化性质(0~20 cm)
Table 1 Soil foundation fertility of 0~20 cm in 2016

前茬作物 Fore crop	有机质 Organic matter /(g·kg ⁻¹)	全氮 Total N /(g·kg ⁻¹)	全磷 Total P /(g·kg ⁻¹)	全钾 Total K /(g·kg ⁻¹)	碱解氮 NO ₃ ⁻ -N /(mg·kg ⁻¹)	速效磷 Available P /(mg·kg ⁻¹)	速效钾 Available K /(mg·kg ⁻¹)	pH
玉米 Maize	15.6	0.82	0.62	0.83	146.6	35.9	161	6.08
大豆 Soybean	16.0	0.93	0.76	0.86	152.5	37.4	186	6.19

1.3 试验设计

2016年开展玉-豆轮作和豆-玉轮作模式(玉-豆模式选择大豆茬口、豆-玉模式选择玉米茬口),每个作物分别设置4个氮磷调控处理,各处理设置如下:

①玉-豆轮作模式。MCK:当地玉米常规施肥方案;MT1:在常规施肥基础上,增加1/3大豆氮肥施用量,减少玉米1/3磷肥施用量;MT2:在常规施肥基础上,增加1/2大豆氮肥施用量,减少玉米1/2磷肥施用量;MT3:在常规施肥基础上,增加2/3大豆氮肥施用量,减少玉米2/3磷肥施用量。

②豆-玉轮作模式。SCK:当地大豆常规施肥方案;ST1:在常规施肥基础上,减少1/3大豆氮肥施用量,增加玉米1/3磷肥施用量;ST2:在常规施肥基础上,减少1/2大豆氮肥施用量,增加玉米1/2磷肥

施用量;ST3:在常规施肥基础上,减少2/3大豆氮肥施用量,增加玉米2/3磷肥施用量。

大豆肥料于基肥一次性施用;玉米氮肥50%于基肥施入,50%于最后一次中耕时施入,磷钾肥于基肥一次性施用。大豆播种密度40万株·hm⁻²,玉米播种密度10万株·hm⁻²。全生育期无灌水。每个处理行长15 m,8垄,3次重复,小区面积78 m²。

2017年分别在玉米和大豆茬口实施轮作,玉-豆模式(前茬为玉米)减氮增磷,各处理表示为MCK-SCK、MT1-ST1、MT2-ST2、MT3-ST3;豆-玉模式(前茬为大豆)增氮减磷时,各处理表示为SCK-MCK、ST1-MT1、ST2-MT2、ST3-MT3。施肥方案同2016年,一个轮作周期施肥总量保持不变。玉米和大豆具体施肥量方案见表2和表3。

表 2 玉米施肥量和施氮时期

Table 2 Timing and amount of fertilizer applied with maize

(kg·hm⁻²)

处理 Treatment	施肥量 Fertilizer amount		氮肥 N		P ₂ O ₅	K ₂ O
			基肥 Base fertilizer	追肥 Top dressing		
MCK	增氮 0	减磷 0	69	69	105. 00	45
MT1	增 1/3 氮	减 1/3 磷	69	87	70. 05	45
MT2	增 1/2 氮	减 1/2 磷	69	96	52. 50	45
MT3	增 2/3 氮	减 2/3 磷	69	105	34. 95	45

表 3 大豆施肥量和施氮时期

Table 3 Timing and amount of fertilizer applied with soybean

(kg·hm⁻²)

处理 Treatment	施肥量 Fertilizer amount		基肥 N	P ₂ O ₅	K ₂ O
			Base N rate		
SCK	减氮 0	增氮 0	54	67. 50	30
ST1	减 1/3 氮	增 1/3 磷	36	102. 45	30
ST2	减 1/2 氮	增 1/2 磷	27	120. 00	30
ST3	减 2/3 氮	增 2/3 磷	18	137. 55	30

1.4 测定项目与方法

1.4.1 干物质积累量 于玉米大喇叭口期(大豆结荚初期)、玉米灌浆期(大豆鼓粒初期)和玉米乳熟期(大豆鼓粒盛期)分别取 5 株植株样品,玉米按叶片、茎秆、苞叶、穗轴、籽粒,大豆按叶片、叶柄、茎秆、荚果和籽粒将植株各器官分解,在烘箱中 85℃杀青 30 min 后,70℃烘干至恒重,称重。

1.4.2 植株光合速率 于玉米灌浆期和大豆鼓粒期选取晴朗天气,于上午 9:00 – 11:00,用美国 LI-COR 公司生产的 LI-6400 光合测定系统,使用开放式气路,测定不同处理下的玉米和大豆叶片的光合参数。选择红蓝光源叶室,设定光量子密度(PAR)为1 000 μmol·m⁻²·s⁻¹。每处理选取有代表性植株 10 株,测定其功能叶片中上部的光合速率,并用 SPAD 测定仪测定 SPAD(Soil plant analysis development)值,取 10 株测定结果的平均值。

1.4.3 收获测产 每小区取有代表性的 2 m² 植株进行考种测产。

1.5 数据分析

用 Excel 2013 进行原始数据的处理和制图,SPSS 17.0 数据处理软件进行相关的数据分析。

2 结果与分析

2.1 氮磷调控对大豆 – 玉米轮作下 SPAD 的影响

2.1.1 氮磷调控对玉米 SPAD 的影响 由图 1 可知,2016 年玉 – 豆模式下随着玉米追氮量的增加玉米 SPAD 值越大,MT3 较常规施肥处理 MCK 增加 7.07% (P < 0.05),说明追施较多的氮素利于被玉米吸收,利于叶片 SPAD 值的增加,可以提高叶片的光合速率;而 2017 年豆 – 玉模式下的玉米则表现为 ST2-MT2 处理 SPAD 值最大,较对照 SCK-MCK 增加 8.08% (P < 0.05),说明前茬大豆在减 1/2 氮,增 1/2磷处理下,能够促进后茬玉米对土壤残留养分的吸收,使该处理 SPAD 值最高,同时也证明 ST2-MT2 处理在氮磷调控上更有利于玉米植株对养分的吸收。

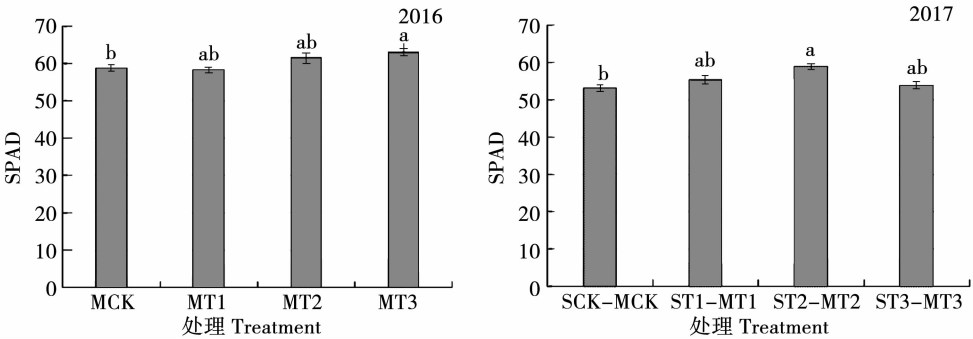


图 1 氮磷调控对玉米 SPAD 的影响

Fig. 1 Effects of nitrogen and phosphorus regulation on SPAD of maize

2.1.2 氮磷调控对大豆 SPAD 的影响 由图 2 可知,2016 年豆 - 玉模式下大豆随着施氮量的减少, SPAD 呈下降趋势,而 SCK、ST1、和 ST2 相比,差别不大,说明在大豆茬口适宜的减氮增磷调控有益于大豆植株的吸收土壤中的氮,提高减氮处理叶片 SPAD 值,而 ST3 较 SCK 相比,降低 9.45% ($P < 0.05$),说明大豆茬口不施氮肥,增施磷肥对氮素的吸收有较大影响;2017 年玉 - 豆模式下,由于前茬

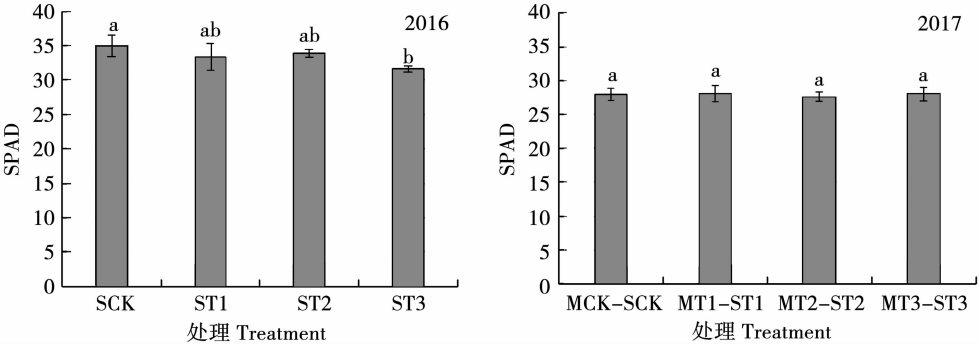


图 2 氮磷调控对大豆 SPAD 的影响

Fig. 2 Effects of nitrogen and phosphorus regulation on SPAD of soybean

2.2 氮磷调控对大豆 - 玉米轮作下光合速率的影响

2.2.1 氮磷调控对玉米光合速率的影响 2016 年,从表 4 可以看出,玉 - 豆模式下玉米增氮处理可以提高叶片的净光合速率、气孔导度、蒸腾速率和胞间 CO₂ 浓度,MT3 处理较 MCK 处理各指标均显著增加,其中 MT3 净光合速率、气孔导度、蒸腾速率较 MCK 分别增加 11.93%、35.71%、8.39% ($P < 0.05$),而和胞间 CO₂ 浓度降低 8.51%,说明增施氮肥和减施磷肥有利于叶片光合速率的增加,而 MT3

玉米实施增氮减磷方案,而在大豆茬口植株叶片 SPAD 未表现出明显的差异,说明在大豆 - 玉米轮作下通过适宜的氮磷调控可以调控叶片 SPAD 值,进而影响大豆 - 玉米轮作下的光合生产能力。与第一季种大豆相比,第二季种大豆在玉米增氮减磷的条件下,明显增加土壤残留氮素,促进第二季大豆对氮素的吸收,使 MT3-ST3 处理较 MCK-SCK 相比无显著差别。

处理与 MT2 处理差别不显著,表明在玉米氮磷调控中氮磷肥施用应适量;2017 年豆 - 玉模式下玉米光合速率的变化趋势与 2016 年相似,均表现出玉米增氮减磷处理可以提高叶片的光合速率,说明前茬大豆实施减氮增磷方案,对下茬玉米叶片光合速率影响不大,但可以显著提高 ST2-MT2 处理的净光合速率,与 SCK-MCK 处理相比,ST2-MT2 处理 P_n 、 G_s 和 Tr 分别增加 19.41%、30.77%、17.36%、而 C_i 降低 6.22%,且均达到显著水平 ($P < 0.05$)。

表 4 氮磷调控对玉米光合速率的影响

Table 4 Effects of nitrogen and phosphorus regulation on photosynthetic rate of maize

年份 Year	处理 Treatment	净光合速率 P_n /($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	气孔导度 G_s /($\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	蒸腾速率 Tr /($\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	胞间 CO_2 浓度 C_i /($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)
2016	MCK	20.15 ± 0.55 c	0.14 ± 0.01 c	1.43 ± 0.11 c	82.30 ± 1.09 a
	MT1	21.60 ± 0.23 b	0.15 ± 0.02 bc	1.50 ± 0.16 b	80.60 ± 2.39 a
	MT2	22.66 ± 0.29 a	0.17 ± 0.01 ab	1.52 ± 0.11 ab	75.10 ± 1.58 b
	MT3	22.56 ± 0.41 ab	0.19 ± 0.01 a	1.55 ± 0.19 a	75.30 ± 2.01 b
2017	SCK-MCK	18.14 ± 0.39 b	0.13 ± 0.01 c	1.21 ± 0.09 b	73.80 ± 2.03 ab
	ST1-MT1	19.55 ± 0.11 b	0.15 ± 0.01 b	1.31 ± 0.13 ab	75.30 ± 1.88 a
	ST2-MT2	21.66 ± 0.20 a	0.17 ± 0.01 a	1.42 ± 0.06 a	69.21 ± 1.26 c
	ST3-MT3	21.56 ± 0.32 a	0.17 ± 0.00 a	1.40 ± 0.07 a	71.90 ± 1.19 b

不同小写字母代表差异达到 5% 显著水平,下同。
Different lowercase represented significant differnt at 0.05 level. The same below.

2.2.2 氮磷调控对大豆光合速率的影响 由表 5 可知,2016 年随着大豆氮肥施用量的减少,光合速率相关指标均呈下降趋势,与 SCK 处理相比,ST3 处理大豆净光合速率、气孔导度、蒸腾速率浓度分

别降低 9.33%、26.67% 和 7.19%,胞间 CO₂ 增加 10.71%,说明大豆光合速率与氮施用量呈显著相关。2017 年玉 - 豆模式下,前茬玉米实施增氮减磷,与 MCK-SCK 处理相比,MT2-ST2 处理光合速率

指标显著增加,其中 P_n 、 G_s 、 Tr 分别增加 7.59%、25.64%、18.72%,均达到 5% 的显著水平,而 C_i 降低 3.74%,其它各处理均未表现出明显的差异性。

说明轮作周期内适当的氮磷调控可以显著改善群体质量,提高作物吸收养分能力,利于提高群体的叶片光合能力。

表 5 氮磷调控对大豆光合速率的影响

Table 5 Effects of nitrogen and phosphorus regulation on photosynthetic rate of soybean

年份 Year	处理 Treatment	净光合速率 P_n /($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	气孔导度 G_s /($\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	蒸腾速率 Tr /($\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	胞间 CO_2 浓度 C_i /($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)
2016	SCK	18.64 ± 0.31 bc	0.38 ± 0.03 a	4.62 ± 0.09 a	43.90 ± 2.19 c
	ST1	18.23 ± 0.22 c	0.35 ± 0.05 b	4.50 ± 0.10 ab	45.90 ± 1.36 b
	ST2	17.51 ± 0.31 a	0.34 ± 0.01 b	4.46 ± 0.13 b	48.60 ± 2.88 ab
	ST3	17.05 ± 0.43 ab	0.30 ± 0.02 c	4.31 ± 0.08 b	50.10 ± 2.39 a
2017	MCK-SCK	16.87 ± 0.29 b	0.39 ± 0.02 b	4.22 ± 0.16 b	48.11 ± 2.04 ab
	MT1-ST1	16.99 ± 0.31 b	0.41 ± 0.01 b	4.29 ± 0.23 b	49.36 ± 1.91 a
	MT2-ST2	18.15 ± 0.22 a	0.49 ± 0.01 a	5.01 ± 0.19 a	46.31 ± 1.99 b
	MT3-ST3	17.05 ± 0.19 ab	0.46 ± 0.02 ab	4.59 ± 0.18 ab	47.01 ± 2.18 ab

2.3 氮磷调控对大豆 – 玉米轮作下干物质积累量的影响

2.3.1 氮磷调控对玉米干物质积累量的影响 由图 3 可知,2016 年氮磷调控对玉米干物质积累量的动态变化,灌浆期前各处理干物质积累量差别不大,而乳熟期 MT2 处理较 MCK 处理显著增加,营养器官和穗干重分别增加 8.52% 和 5.14% ($P < 0.05$),而 MT1、MT2 和 MT3 均表现为差别不显著,

说明适宜的氮磷调控可以调节玉米光合产物积累量;2017 年豆 – 玉模式下,前茬大豆实施减氮增磷方案,在玉米实施增氮减磷方案可以提高大喇叭口期后的玉米干物质积累量,利于玉米对土壤残留养分的吸收,其中 ST2-MT2 较 SCK-MCK 相比,乳熟期营养器官和穗干重分别增加 9.30% 和 10.01% ($P < 0.05$)。说明适当的调整轮作周期氮磷水平,可以提高玉米生育后期光合产物的积累。

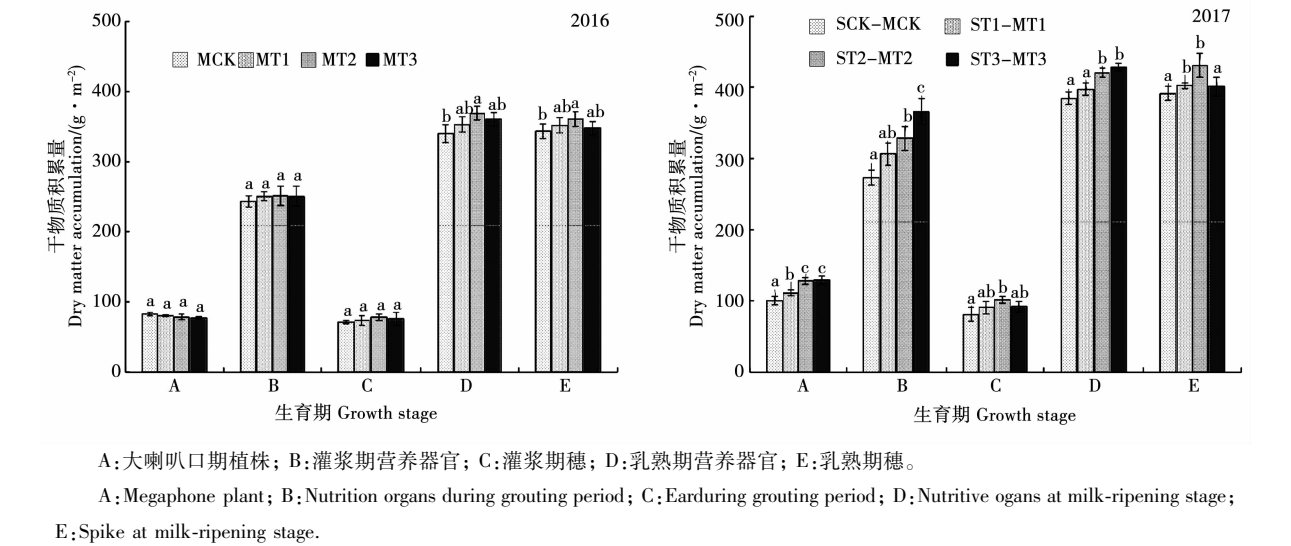
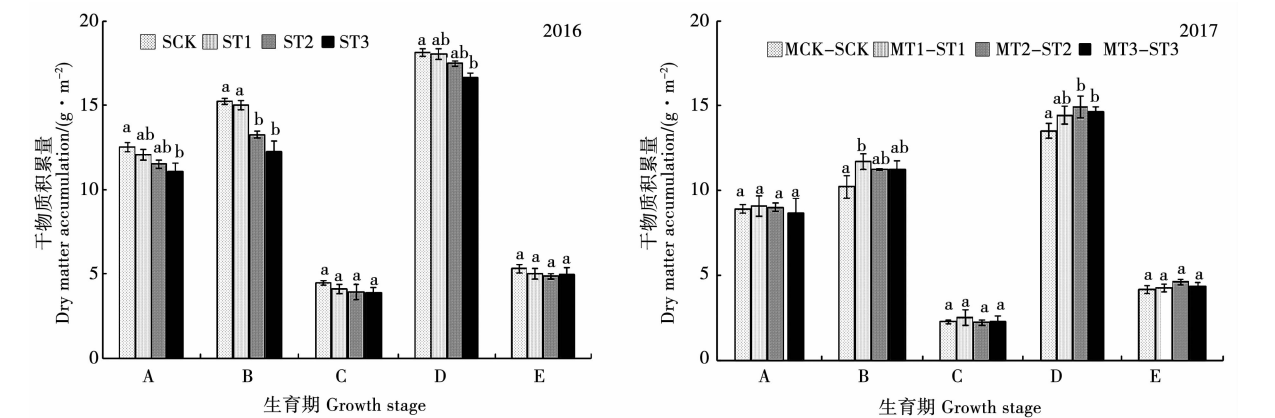


图 3 氮磷调控对玉米干物质积累量的影响

Fig. 3 Effects of nitrogen and phosphorus regulation on dry matter accumulation of maize

2.3.2 氮磷调控对大豆干物质积累量的影响 由图 4 可知,2016 年随着氮素施用量的减少,大豆干物质积累量呈下降趋势,且主要影响大豆营养器官的干物质积累量,对生殖器官干物质积累量无显著差别,其中,SCK 鼓粒初期营养器官与鼓粒盛期营养器官较 ST3 相比,分别降低 24.15% 和 8.96% ($P < 0.05$)。2017 年玉 – 豆模式下,通过前茬玉米实施增氮减磷方案后,大豆茬口与 2016 年有相同的变

化趋势,表现为减氮增磷处理增加了鼓粒初期和鼓粒盛期营养器官干物质积累量,其中 MT2-ST2 和 MT3-ST3 较 MCK-SCK 相比鼓粒盛期营养器官干物质积累量增加 10.39% 和 8.34% ($P < 0.05$)。说明通过前茬玉米的增氮减磷方案,增加土壤残留氮素,提高大豆茬口对土壤氮素的吸收能力,在大豆茬口实施减氮增磷的条件下,提高了鼓粒期后的营养器官干物质积累量。



A:结荚初期植株; B:鼓粒初期营养器官; C:鼓粒初期荚果; D:鼓粒盛期营养器官; E:鼓粒盛期荚果。
A:Plants in early pod bearing; B:The vegetative organs at the initial stage of granulation; C:Pod at early drum grain; D:The vegetative organs at drum grain stage; E:Pod at drum grain stage.

图4 氮磷调控对大豆干物质积累量的影响

Fig. 4 Effects of nitrogen and phosphorus regulation on dry matter accumulation of soybean

2.4 氮磷调控对大豆-玉米轮作产量的影响

2.4.1 氮磷调控对玉米产量的影响 由表6可知, 2016年玉米实施增氮减磷方案对穗行数、行粒数和百粒重均无明显差异,各处理中MT2处理产量最高,较MCK和MT3处理分别增加4.45%和5.32%

($P < 0.05$);2017年,通过前茬大豆减氮增磷方案的实施,ST2-MT2和ST3-MT3产量显著高于对照处理,与SCK-MCK相比,分别增12.65%和6.76% ($P < 0.05$)。说明在前茬大豆适宜调控氮磷肥,有助于下茬玉米提高产量。

表6 氮磷调控对玉米产量及产量构成的影响

Table 6 Effects of nitrogen and phosphorus regulation on yield of maize

种植年份	处理	穗行数	行粒数	百粒重	产量
Year	Treatment	Number of rows	Number of grains	100-grain weight/g	Yield/(t·hm ⁻²)
2016	MCK	29.24 ± 1.22 a	14.98 ± 0.51 a	30.21 ± 0.59 a	13.27 ± 0.11 b
	MT1	29.68 ± 2.03 a	14.63 ± 0.99 a	30.80 ± 0.61 a	13.37 ± 0.22 ab
	MT2	29.97 ± 1.06 a	14.99 ± 0.46 a	30.84 ± 0.44 a	13.86 ± 0.19 a
	MT3	30.08 ± 0.98 a	14.74 ± 0.42 a	29.70 ± 0.36 a	13.16 ± 0.21 b
2017	SCK-MCK	28.00 ± 2.01 b	13.82 ± 0.99 a	29.81 ± 0.11 a	11.54 ± 0.16 c
	ST1-MT1	28.68 ± 1.98 ab	13.97 ± 0.31 a	29.40 ± 0.22 a	11.78 ± 0.22 c
	ST2-MT2	30.49 ± 2.11 a	14.40 ± 0.99 a	29.61 ± 0.29 a	13.00 ± 0.19 a
	ST3-MT3	29.24 ± 3.01 ab	14.00 ± 0.41 a	30.12 ± 0.19 a	12.32 ± 0.13 b

2.4.2 氮磷调控对大豆产量的影响 如表7可知, 2016年随大豆氮肥施用量减少,大豆各处理产量均降低,但未达显著水平。2017年,通过前茬玉米实施增氮减磷方案,在大豆茬口表现出现2016年相反的变化趋势,即产量随大豆茬口施肥量的减少而增

加,但各处理均未达到显著水平。说明轮作体系下,增加玉米茬口增加氮量、减少磷量,在大豆茬口减少氮量、增加磷量不会使大豆茬口产量降低,相反还有一定的促进作用。

表7 氮磷调控对大豆产量及产量构成的影响

Table 7 Effects of nitrogen and phosphorus regulation on yield of soybean

种植年份	处理	株荚数	株粒数	百粒重	产量
Year	Treatment	Number of pod	Number of seeds	100-seed weight/g	Yield/(t·hm ⁻²)
2016	SCK	18.49 ± 1.11 a	45.61 ± 2.31 a	13.80 ± 0.31 a	2.33 ± 0.81 a
	ST1	18.53 ± 1.20 a	44.28 ± 1.99 a	14.03 ± 0.22 a	2.30 ± 0.53 a
	ST2	19.24 ± 2.36 a	44.58 ± 3.09 a	14.21 ± 0.36 a	2.31 ± 0.44 a
	ST3	18.64 ± 1.24 a	43.02 ± 2.88 a	13.98 ± 0.29 a	2.29 ± 0.36 a
2017	MCK-SCK	17.09 ± 1.31 a	30.13 ± 2.31 a	13.90 ± 0.26 a	1.55 ± 0.21 a
	MT1-ST1	18.53 ± 2.22 a	30.81 ± 3.02 a	14.03 ± 0.22 a	1.57 ± 0.19 a
	MT2-ST2	18.84 ± 2.19 a	30.69 ± 2.88 a	14.17 ± 0.31 a	1.61 ± 0.22 a
	MT3-ST3	18.24 ± 1.37 a	29.18 ± 2.16 a	13.89 ± 0.29 a	1.53 ± 0.17 a

3 讨 论

SPAD 是基于叶绿素对红光的强吸收和对远红外光的低吸收而研制出的叶绿素仪^[9],在玉米和大豆等作物研究表明,关键生育期叶片 SPAD 值与叶片氮素含量呈显著正相关^[10-12]。已有研究证明,叶片是植株氮素营养状况最灵敏的指示器官,SPAD 值能反应出土壤的氮素供应状况^[13]。在适宜条件下叶片 SPAD 值随施肥量的增加而增加^[14-15]。本研究发现,在 2016 年种植玉米实施增氮减磷方案时,MT3 处理 SPAD 值显著高于 MCK,与前人研究 SPAD 施肥量的增加而增加的结果相一致;而在 2016 年大豆实施减氮增磷方案后,2017 在此基础上进行玉米增氮减磷方案,ST2-MT2 处理具有较高的 SPAD 值,而 ST3-MT3 处理 SPAD 值低于 ST2-MT2 且与 SCK-MCK 无显著差别,与赵士诚等^[10]研究 SPAD 反映植株与土壤养分供应状况对氮过量不敏感的研究结果一致。说明在前茬大豆采用常规施肥处理条件下,SPAD 随施肥量增加而增加,而在前茬大豆实施减氮增磷后,SPAD 表现为 ST2-MT2 处理最高,表明在大豆茬口实施适宜的氮磷调控可以提高下茬玉米对养分的吸收利用能力,进而提高叶片的 SPAD 值。

氮素影响光合作用进程中的光反应和暗反应中的叶片蛋白氮的含量和活性^[16],磷素参与光合作用过程中的光合磷酸化和碳同化过程^[17],氮磷缺乏植株光合速率会明显降低。Kramer^[18]认为营养缺乏会使作物体内发生生理生化变化,而通过氮和磷素可以改善土壤和植物养分从而间接影响植株的光合作用^[19]。在本试验条件下,2016 年种大豆实施减氮增磷,随着氮肥施用量的减少,叶片净光合速率、气孔导度、蒸腾速率均降低,可能是由于土壤残留氮少及大豆实施减氮处理,限制了大豆对氮和磷的吸收,因此降低了叶片的光合速率;而 2016 年种玉米,2017 年种大豆时,表现为增施磷肥处理大豆光合速率指标均高于常规施肥处理,说明大豆生长发育较多依靠前茬作物残留氮素,在增加磷肥用量的同时提高了叶片的光合速率。

植株光合作用主要受气孔因素和非气孔因素的影响。气孔因素是由于水分胁迫,CO₂ 进入叶片受阻,气孔导度下降而使光合速率下降,非气孔因素是植株光合器官与光合活性下降引起的^[20]。若胞间 CO₂ 浓度(*C_i*)变化趋势与净光合速率和气孔导度一致,影响光合速率的因素主要为气孔因素,*C_i* 与净光合速率和气孔导度一致相反,则主要为非气孔因素^[21-22]。本试验中 *C_i* 浓度与光合速率和气孔

导度变化趋势相反,说明春大豆和春玉米影响光合速率的因素为非气孔因素,因此证明玉米和大豆提高光合作用主要原因是氮磷调控提高了光合器官的活性,增强了胞间 CO₂ 的扩散速率,从而提高叶片的光合速率。

作物产量形成的实质是光合产物的积累、转运及其向籽粒分配的过程^[19,23]。Zhang 等^[2]对大豆研究表明鼓粒期前积累干物质转运量对籽粒的贡献有限,籽粒产量主要来源于鼓粒期后的同化物的分配。刘伟^[24]对玉米研究表明玉米产量与花后的同化产物积累呈显著正相关。Flavio^[21]研究表明适宜的土壤养分状况对大豆鼓粒期同化物对籽粒产量的贡献率较高。本试验结果表明,2016 年种大豆,大豆营养器官的干物质积累量随氮素施用量的减少而下降,荚果干物质积累量无显著差别,而大豆产量表现出减产趋势;而 2017 年种大豆,表现为减氮增磷处理增加了鼓粒初期和鼓粒盛期营养器官干物质积累量,而籽粒干物质积累量表现为增加趋势,但未达显著水平。原因可能是由于前茬玉米实施增氮减磷方案,增加土壤氮素残留,提高了生物固氮能力,形成高产群体长势,但同化贡献率较低使籽粒干物质积累量未表现出显著差异,可能与本研究仅在一个轮作周期内有关,更加系统深入的研究有待在接下来的研究中进行论证。

4 结 论

2016 年和 2017 年实施玉米-大豆轮作,玉米茬口提高叶片 SPAD 值、光合速率和乳熟期营养器官和穗干重,提高玉米产量,其中 MT2 处理产量最高;大豆茬口提高叶片的光合速率,增加鼓粒盛期营养器官干物质积累量,产量均有所增加,但未达显著水平。2016 年豆-米轮作下,大豆茬口降低叶片 SPAD、光合速率、营养器官的干物质积累量和大豆产量;2017 年豆-米轮作下玉米茬口提高了叶片 SPAD、光合速率、大喇叭口期后的干物质积累量和玉米产量。2 年一个完整轮作周年试验证明,大豆-玉米轮作体系下大豆茬口减 50% 的氮肥、增 50% 的玉米磷肥与玉米茬口增 50% 的大豆氮肥、减 50% 的磷肥处理可提高轮作周期叶片的光合生产能力,显著提高玉米产量,同时保证大豆产量不降低,使轮作周期总产量有所提高。

参考文献

- [1] 周岚,杨永,王占海,等. 玉米-大豆轮作及氮肥施用对土壤细菌群落结构的影响[J]. 作物学报, 2013, 39(11): 2016-2022. (Zhou L, Yang Y, Wang Z H, et al. Influence of maize-

soybean rotation and N fertilizer on bacterial community composition[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2013, 39(11): 2016-2022.)

[2] Zhang M C, Sun W X, Liu Y Y, et al. Timing of N application affects net primary production of soybean with different densities [J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2014, 13 (12): 60345-60347.

[3] Kelley K W, Sweeney D W. Tillage and urea ammonium nitrate fertilizer rate and placement affects winter wheat following grain sorghum and soybean[J]. *Agronomy Journal*, 2005, 97(3):690-697.

[4] Stella A E, Max D C. Effect of soybean plant populations in a soybean and maize rotation [J]. *Agronomy Journal*, 2001,93(2): 396-403.

[5] Nyamadzawo G, Nyamugafata P, Chikowo R, et al. Improved legume tree fallows and tillage effects on structural stability and infiltration rates of a kaolinitic sandy soil from Central Zimbabwe[J]. *Soil Tillage Research*, 2007, 96(1-2): 182-194.

[6] 徐明杰, 张琳, 汪新颖, 等. 不同管理方式对夏玉米氮素吸收、分配及去向的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2015, 21(1): 36-45. (Xu M J, Zhang L, Wang X Y, et al. Effects of different management patterns on uptake, distribution and fate of nitrogen in summer maize[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2015, 21(1): 36-45.)

[7] Vandamme E, Pypers P, Vanlauwe B, et al. Residual phosphorus effects and nitrogen phosphorus interactions in soybean-maize rotations on a P-deficient Ferralsol[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2014, 98(2):187-201.

[8] Gentry L E, Below F E, David M B, et al. Source of the soybean N credit in maize production [J]. *Plant and Soil*, 2001, 236(2): 175-184.

[9] 赵婧, 张伟, 邱强, 等. 不同熟期大豆品种遗传改良过程中光合特性和冠层农艺性状的变化[J]. *大豆科学*, 2012, 31(4): 568-574. (Zhao J, Zhang W, Qiu Q, et al. Changes of photosynthetic characters and canopy agronomic traits among different maturity groups in soybean genetic improvement [J]. *Soybean Science*, 2012, 31(4): 568-574.)

[10] 赵士诚, 何萍, 仇少君, 等. 相对 SPAD 值用于不同品种夏玉米氮肥管理的研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2011, 17(5): 1091-1098. (Zhao S C, He P, Qiu S J, et al. Application of relative SPAD values for nitrogen fertilizer management of different cultivars of summer maize[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2011, 17(5): 1091-1098.)

[11] Hawkins J A, Sawyer J E, Barker D W, et al. Using relative chlorophyll meter values to determine nitrogen application rates for corn [J]. *Agronomy Journal*, 2007, 99(4): 1034-1040.

[12] Uddling J, Gelang J, Piikki H. Evaluating the relationship between leaf chlorophyll concentration and SPAD-502 chlorophyll meter readings [J]. *Photosynthesis Research*, 2007, 91(1): 37-46.

[13] Zlatev Z. Drought-induced changes in chlorophyll fluorescence of young wheat plants [J]. *Biotechnology and Biotechnological Equipment*, 2014, 23: 438-441.

[14] 李志宏, 张云贵, 刘宏斌, 等. 叶绿素仪在夏玉米氮营养诊断中的应用[J]. *植物营养与肥料学报*, 2005, 11(6): 64-768. (Li Z H, Zhang Y G, Liu H B, et al. Application of chlorophyll meter on N nutritional diagnosis for summer corn[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2005, 11(6): 64-768.)

[15] Shukla A K, Ladha J K, Singh V K, et al. Calibrating the leaf color chart for nitrogen management in different genotypes of rice and wheat in a systems perspective[J]. *Agronomy Journal*, 2004,96: 160-162.

[16] Farquhar G D, Sharkey T D. Stomatal conductance and photosynthesis[J]. *Annual Review of Plant Physiology*, 2003, 33: 317-345.

[17] 王琪, 徐程扬. 氮磷对植物光合作用及碳分配的影响[J]. *山东林业科技*, 2005(5): 59-62. (Wang Q, Xu C Y. Affects of nitrogen and phosphorus on plant leaf photosynthesis and carbon partitioning [J]. *Shandong Forestry Science and Technology*, 2005(5): 59-62.)

[18] Kramer P J. *Plant and water relationships: A modern synthesis* [M]. New York: Mc Graw-hill, 1969.

[19] Alessandro M, Laura E, Marco M, et al. Post-anthesis accumulation and remobilization of dry matter, nitrogen and phosphorus in durum wheat as affected by soil type[J]. *European Journal of Agronomy*, 2007 (26): 179-186.

[20] 张建恒, 李宾兴, 王斌, 等. 不同磷效率小麦品种光合碳同化和物质生产特性研究[J]. *中国农业科学*, 2006, 39(11): 2200-2207. (Zhang J H, Li B X, Wang B, et al. Studies on the characteristics of photosynthesis and dry matter production in wheat varieties with different P efficiency [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2006, 39(11): 2200-2207.)

[21] Gutiérrezboem F H, Scheiner J D, Rimskikorsakov H. Late season nitrogen fertilization of soybeans: Effects on leaf senescence, yield and environment [J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2004, 68: 109-115.

[22] 王晓娟, 贾志宽, 梁连友, 等. 不同有机肥量对旱地玉米光合特性和产量的影响[J]. *应用生态学报*, 2012, 23(2): 419-425. (Wang X J, Jia Z K, Liang L Y, et al. Effects of organic fertilizer application rate on leaf photosynthetic characteristics and grain yield of dryland maize[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2012, 23(2): 419-425.)

[23] Pang X L, Yang Y M, Yu C L, et al. Crop management for increasing rice yield and nitrogen use efficiency in northeast China [J]. *Agronomy Journal*, 2015, 107, 1682-1690.

[24] 刘伟, 张吉旺, 吕鹏, 等. 种植密度对高产夏玉米登海 661 产量及干物质积累与分配的影响[J]. *作物学报*, 2011, 37(7): 1301-1307. (Liu W, Zang J W, Lyu P, et al. Effect of plant density on grain yield dry matter accumulation and partitioning in summer maize cultivar denghai 661 [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2011, 37(7): 1301-1307.)