

小麦花生一体化施肥对麦套花生生理特性及产量的影响

刘兆新, 刘妍, 杨坚群, 甄晓宇, 栗鑫鑫, 杨东清, 李向东

(山东农业大学农学院, 作物生物学国家重点实验室, 山东 泰安 271018)

摘要:以大花生品种606为材料, 选用N—P₂O₅—K₂O含量相同的普通复合肥和控释复合肥, 设置不施肥(CK)、拔节期施普通复合肥(JCF)、拔节期施控释复合肥(JCRF)、挑旗期施普通复合肥(FCF)、挑旗期施控释复合肥(FCRF)5个处理, 研究了不同肥料类型及施肥方式对麦套花生叶片叶绿素含量、叶绿素荧光参数、根系活力、硝酸还原酶活性和抗氧化活性的影响。结果表明:与普通复合肥处理相比较, 控释复合肥处理的 F_v/F_m 、 F_v/F_o 和 Φ_{PSII} 在结荚期之前差异不显著, 但在饱果期与成熟期显著高于JCF处理;根系活力与硝酸还原酶活性的变化规律与 F_v/F_m 、 F_v/F_o 和 Φ_{PSII} 基本一致;控释复合肥处理的SOD、POD和APX在花生苗期无明显差异, 但在中后期显著升高, 丙二醛(MDA)含量显著降低, 且小麦挑旗期追肥处理效果优于拔节期追肥。控释复合肥处理对小麦产量无明显影响, 但显著提高了花生产量, JCRF处理的荚果产量和籽仁产量较JCF分别提高5.1%和7.6%, FCRF较FCF处理提高5.9%和8.0%。表明在施N—P₂O₅—K₂O等量的条件下, 控释复合肥能够满足花生生长后期对养分的需求, 改善叶肉细胞的光合性能, 增强根系活力和NR活性, 促进根系对养分的吸收。同时, 提高中后期清除活性氧的能力, 有助于延缓叶片衰老, 从而提高麦套花生产量。两类型肥料对小麦和花生两种作物产量的提高均以挑旗期追肥效果最佳, 拔节期追肥次之。

关键词: 控释肥; 麦套花生; 叶绿素荧光; 抗氧化系统; 产量

中图分类号: S147.3

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2018)01-0344-08

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2018.01.054

Effects of Different Fertilizer on Physiological Characteristics and Yield of Peanut Intercropped with Wheat

LIU Zhaoxin, LIU Yan, YANG Jianqun, ZHEN Xiaoyu, LI Xinxin, YANG Dongqing, LI Xiangdong

(State Key Laboratory of Crop Biology, College of Agronomy, Shandong Agricultural University, Tai'an, Shandong 271018)

Abstract: Using peanut variety 606 as experimental material, five treatments including CK(no fertilizer application), JCF(applying common compound fertilizer at jointing stage), JCRF(applying controlled-release compound fertilizer at jointing stage), FCF(applying common compound fertilizer at flagging stage), FCRF(applying controlled-release compound fertilizer at flagging stage) were set under the same application rates of N—P₂O₅—K₂O, to test the effects of different fertilizers and different application methods on chlorophyll content, chlorophyll fluorescence parameters of leaves, root system vigor, the nitrate reductase activity and antioxidant activity at different growth stages of peanut. The results showed that there was no significantly difference in F_v/F_m , F_v/F_o and Φ_{PSII} between applying controlled-release compound fertilizer and applying common compound fertilizer before pod-setting stage, but the three parameters of applying controlled-release compound fertilizer were significantly higher than those of applying common compound fertilizer at pod-filling and mature stages. Trends of root vigor and nitrate reductase activity were similar with those of F_v/F_m , F_v/F_o and Φ_{PSII} . There was no obvious difference in the contents of SOD, POD and APX between applying common compound fertilizer and applying controlled-release compound fertilizer at seedling stage, but these parameters of applying controlled-release compound fertilizer significantly increased at middle and later stage, while MDA content decreased, and topdressing fertilizer at flagging stage was better than that at jointing stage. Controlled-release compound fertilizer had no significant effect on wheat yield, but significantly increased the yield of peanut. The pod yield and kernel yield in the JCRF treatment were increased by 5.1%

收稿日期: 2017-09-02

资助项目: 国家科技支撑计划项目(2014BAD11B04-2); 国家自然科学基金项目(30840056, 31171496); 山东省现代农业产业技术体系花生创新团队首席专家专项基金项目(SDAIT-04-01)

第一作者: 刘兆新(1991—), 男, 硕士研究生, 主要从事花生高产生理生态研究。E-mail: liuxiaoxin0110@163.com

通信作者: 李向东(1963—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事花生高产生理生态研究。E-mail: lixdong@sdau.edu.cn

and 7.6%, respectively, compared with the JCF treatment, and the yields in the FCRF treatment were increased by 5.9% and 8.0%, respectively, compared with the FCF treatment. Under the conditions of same application rates of $N-P_2O_5-K_2O$ and equal nutrient, controlled-release compound fertilizer could meet the nutrient requirement of peanut at the later growth stage, improve the photosynthetic ability of mesophyll cell, enhance root vigor and nitrate reductase activity, and promote nutrient absorption capacity of root system. Meanwhile, controlled-release compound fertilizer could increase the ability of scavenging active oxygen at the late stage, help to delay leaf senescence, thereby improving yield of peanut. Two types of fertilizer both could increase yields of wheat and peanut, and topdressing fertilizer at flagging stage was the best, and the effect of topdressing fertilizer at jointing stage followed.

Keywords: controlled-release fertilizer; peanut intercropped with wheat; chlorophyll fluorescence; antioxidative system; yield

花生是我国农产品出口的重要经济作物之一,总产量居油料作物之首。花生生产对提高农民收入、保障我国油脂供给安全和调整农村产业结构意义重大。氮素作为花生生长发育必需的大量营养元素,在花生产量和品质的形成中发挥着十分重要的作用^[1]。花生的 N 源有两条途径:一是土壤和肥料中的 N,二是根瘤菌固定大气中的 N。Wang 等^[2]研究表明,花生作为豆科作物可以自身固氮,但仍有一半以上的 N 需要从土壤和肥料中获取,适量的氮素供应还能够促进花生根瘤形成。因此,合理施用肥料是花生获得高产的重要手段。同时,合理施用肥料能够有效协调根瘤固氮与施氮的关系,减少氮肥浪费,降低对生态环境的不良影响。研究^[3]表明,花生荚果中约有 60% 的氮是从营养器官中重新调运的,只有 40% 是在荚果充实期同化的,花生在荚果成熟充实期间,营养器官内 N 的可利用性是产量提高的主要限制因素之一,因此,维持花生生长中后期叶片一定的含 N 量有助于荚果膨大充实,提高产量。麦套花生具有延长花生的生长期、弥补热量资源的不足、促进荚果充分发育和改善籽仁品质等优点,是小麦花生两熟制的主要种植方式^[1]。但前茬小麦在整个生育期内消耗了大量养分,而花生在中后期又无法追肥,导致后期土壤中的养分,尤其是大量元素 N 不能满足花生季的需求。因此统筹小麦花生一体化施肥是小麦花生两熟制高产高效优质栽培的重要技术措施。张翔等^[4]研究表明,通过调整氮磷钾在小麦花生上的分配比例、改变施肥时期等施肥措施,可有效增加花生结果枝、单株饱果数和出仁率,使花生产量和周年产量分别提高。控释肥具有肥效供应期长且稳定的特点,能根据作物需要调节养分释放模式,将营养元素缓慢地释放到土壤中,生产上使用控释肥料能够提高肥料利用率,降低养分挥发和淋洗损失,提高作物产量^[5-8]。聂军等^[9]研究表明,控释氮肥可提高水稻中后期叶片硝酸还原酶和谷氨酰胺合成酶活性,促进水稻孕穗后体内氮素的吸收与转化,从而提高水稻的吸氮量;范振

义等^[10]研究指出,控释肥能够延长冬小麦净光合速率高峰持续时间,在灌浆中后期仍能保持较高的净光合速率,从而获得更多的代谢产物,为小麦籽粒灌浆提供充足的养分供应。李学刚等^[11]研究表明等氮条件下,施用控释氮肥可提高棉花单株结铃数和单铃重,显著增加子棉产量;在 $N-P_2O_5-K_2O$ 等比例和等养分量处理下,与普通肥料相比,控释肥在花生生长的中后期仍能持续足量供给花生生长所需的养分,显著提高花生生育后期叶片叶绿素含量和净光合速率,增加根瘤重、荚果产量和总生物量^[12-13]。

针对麦套花生施肥技术,前人已经开展了氮、磷、钾和有机肥等单因素周年用量及分配效果试验,麦套花生不同施肥方式以及控释肥对花生的影响多集中在产量和肥料利用率方面,对麦套花生生理特性的研究较少且不深入,本研究选择普通复合肥和控释复合肥两种肥料类型,设置小麦拔节期和挑旗期两个追肥时期,探讨不同肥料类型以及不同追肥时期对麦套花生叶绿素荧光、根系活力、硝酸还原酶活性以及抗氧化系统等主要生理特性的影响,以期对麦套花生合理施肥和高产高效提供理论依据和技术指导。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验于 2015—2016 年在山东农业大学农学试验站旱棚栽培池内进行。栽培池长宽为 2.5 m×2.5 m,土壤类型为砂壤土。池内 0—20 cm 土层土壤养分状况:有机质 12.3 g/kg,碱解氮 76.77 mg/kg,速效磷 32.23 mg/kg,速效钾 70.92 mg/kg。

试验选用 $N-P_2O_5-K_2O$ 含量分别为 20%, 15%, 10% 的普通复合肥和控释复合肥为供试肥料,两种肥料均由山东农大肥业公司研制,其中控释复合肥的释放周期为 90 d。根据每生产 100 kg 冬小麦籽粒和花生荚果所需吸收的 N、P、K 量,设置两季作物总施肥量为 1 500 kg/hm² (折合纯氮 300 kg/hm², P_2O_5 225 kg/hm², K_2O 150 kg/hm²),其中冬小麦季

施总施肥量的 70%，即纯氮 210 kg/hm²，P₂O₅ 157.5 kg/hm²，K₂O 105 kg/hm²，分底施 35%和拔节期追施 35%、底施 35%和挑旗期追肥 35%，花生季施总施肥量的 30%，即纯氮 90 kg/hm²，P₂O₅ 67.5 kg/hm²，K₂O 45 kg/hm²，于始花前一次施用，以不施肥为对照，共计 5 个处理(表 1)。冬小麦于 10 月 10 日播种，行距 30 cm，6 月 10 日收获，供试品种为济麦 22。花生于 5 月 25 日(小麦收获前 15 d)套种在小麦行间，穴距 20 cm，每穴播两粒，10 月 5 日收获，供试品种为 606。2015 年 10 月至 2016 年 9 月试验期间，月平均气温和降雨量见图 1。以土壤相对含水量达 75%为目标，采用中子仪(CPN，美国)控制土壤含水量，于小麦拔节期和开花期，花生结荚期进行灌水，参照山仑等^[14]的方法计算灌水量，灌水源为井水，用水表计量和控制实际灌水量。随机区组排列，重复 3 次，田间管理同一般高产田。

表 1 试验不同处理施肥量 单位：%

处理	小麦			花生
	基肥	拔节期	挑旗期	始花前
CK	0	0	0	0
普通复合肥(JCF)	35	35	0	30
控释复合肥(JCRF)	35	35	0	30
普通复合肥(FCF)	35	0	35	30
控释复合肥(FCRF)	35	0	35	30

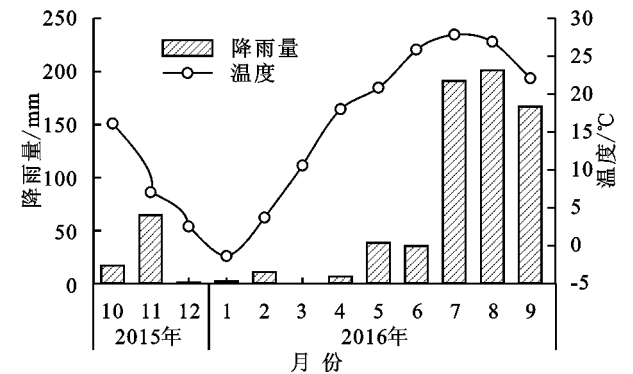


图 1 研究区的月平均气温和降雨量

1.2 测定项目与方法

分别于花生开花下针期、结荚期、饱果期和成熟期，选择生长一致、无破损健康主茎倒三叶测定叶绿素荧光特性，同时选择代表性植株 5 株，取主茎倒三叶和根系于冰盒中带回实验室测定叶绿素含量、硝酸还原酶活性和根系活力，在收获期测定产量。

在晴天上午 9:00—11:00，用 FMS-2 型便携调制式叶绿素荧光仪(英国 Hansatech 公司产)选择受光方向较为一致的主茎倒三叶测定光适应下最大荧光 F_m' 、稳态荧光 F_s 和暗适应 20 min 后初始荧光 F_o 、最大荧光 F_m 。计算 PSII 最大光化学效率 $F_v/F_m = (F_m - F_o)/F_m$ 、PS II 实际光化学效率 $\Phi_{PSII} = (F_m' - F_s)/F_m'$ 、PS II 潜在光化学活性 $F_v/F_o = (F_m - F_o)/F_o$ 、光化学

猝灭系数 $qp = (F_m' - F_s)/(F_m' - F_o)$ ；叶绿素含量采用 95% 的乙醇避光萃取法测定^[15]；根系活力采用 TTC 法^[16]测定；硝酸还原酶活性参照中国科学院上海植物生理研究所和上海植物生理学会^[17]的方法测定；超氧化物歧化酶(SOD)活性采用氮蓝四唑还原法测定^[18]；过氧化物酶(POD)活性采用愈创木酚法测定^[19]；抗坏血酸过氧化物酶(APX)活性采用 Nakano^[20]的方法测定；丙二醛(MDA)含量采用硫代巴比妥酸法测定^[21]。

1.3 数据处理

试验数据采用 Excel 2003 进行计算，利用 DPS 10.0 统计软件 LSD 法进行显著性及方差分析，用 Sigmaplot 10.0 作图。

2 结果与分析

2.1 不同施肥处理对花生叶片叶绿素及组分含量的影响

由表 2 可以看出，随生育期推进，花生叶片叶绿素 a、叶绿素 b 和叶绿素 a+b 均呈先增加后降低的变化趋势，于结荚期达最大值。各施肥处理的叶片叶绿素 a、叶绿素 b 和叶绿素 a+b 均较 CK 有不同程度的增加，且各时期的差异均达到显著水平。与普通复合肥处理相比，控释复合肥处理的叶片叶绿素 a、叶绿素 b 和叶绿素 a+b 在花针期与结荚期差异不明显，但在饱果期与成熟期 JCRF 较 JCF 分别增加 8.2%，6.7%，7.6%和 29.8%，21.1%，26.2%，FCRF 处理较 FCF 处理分别提高 4.9%，2.4%，6.1%和 5.1%，2.8%，4.3%。同一肥料类型不同追肥时期相比，FCF 处理的叶绿素 a、叶绿素 b 和叶绿素 a+b 在饱果期与成熟期较 JCF 处理分别增加 16.4%，10.7%，14.2%和 39.3%，24.6%，33.3%，FCRF 处理较 JCRF 处理分别增加 12.9%，6.3%，10.4%和 12.8%，5.8%，10.1%，处理间差异达到显著水平。可见，控释肥对维持麦套花生生育后期较高叶绿素含量效果明显，且小麦挑旗期追肥处理对花生叶片叶绿素含量提高作用大于拔节期追肥。各处理叶绿素 a/b 随生育进程逐渐降低，说明花生叶片中叶绿素 a 的降解速度快于叶绿素 b，施肥提高了各生育期的叶绿素 a/b，其中控释复合肥处理优于普通复合肥。

2.2 不同施肥处理对花生叶片叶绿素荧光特性的影响

2.2.1 F_v/F_m 和 F_v/F_o 的动态变化 由图 2 可知，随着花生生育时期的推移，叶片 F_v/F_m 和 F_v/F_o 均表现出先升高后降低的变化趋势，于结荚期达到最大值。施肥明显提高了麦套花生各生育时期叶片的 F_v/F_m 和 F_v/F_o ，控释复合肥处理在结荚期前与普通复合肥处理无显著差异，但在饱果期与成熟期较普通复合肥显著提高，拔节期追肥与挑旗期追肥表现出相

同变化趋势。说明控释复合肥有利于维持花生叶片生长后期较高的 PSⅡ 活性和最大光化学效率,且小麦挑旗期追肥效果优于拔节期追肥。

表 2 不同施肥处理对花生叶片叶绿素及组分含量的影响

生育时期	处理	叶绿素 a/ (mg·g ⁻¹)	叶绿素 b/ (mg·g ⁻¹)	叶绿素 a+b/ (mg·g ⁻¹)	叶绿素 a/b
花针期	CK	0.89b	0.47c	1.36c	1.89
	JCF	1.14a	0.58b	1.72b	1.96
	JCRF	1.20a	0.61a	1.81a	1.97
	FCF	1.22a	0.62a	1.84a	1.96
	FCRF	1.24a	0.63a	1.89a	1.97
结荚期	CK	1.31d	0.76d	2.07d	1.72
	JCF	1.44c	0.80c	2.24c	1.80
	JCRF	1.62b	0.87b	2.49b	1.86
	FCF	1.73a	0.91ab	2.64a	1.90
	FCRF	1.76a	0.92a	2.68a	1.91
饱果期	CK	0.98d	0.60d	1.58d	1.63
	JCF	1.22c	0.75c	1.97c	1.63
	JCRF	1.32b	0.80b	2.12b	1.65
	FCF	1.42a	0.83b	2.25ab	1.71
	FCRF	1.49a	0.85a	2.34a	1.75
成熟期	CK	0.72e	0.51d	1.23d	1.41
	JCF	0.84d	0.57c	1.41c	1.47
	JCRF	1.09c	0.69b	1.78b	1.58
	FCF	1.17b	0.71ab	1.88a	1.65
	FCRF	1.23a	0.73a	1.96a	1.68

注:同列不同字母表示不同处理间差异显著(P<0.05)。下同。

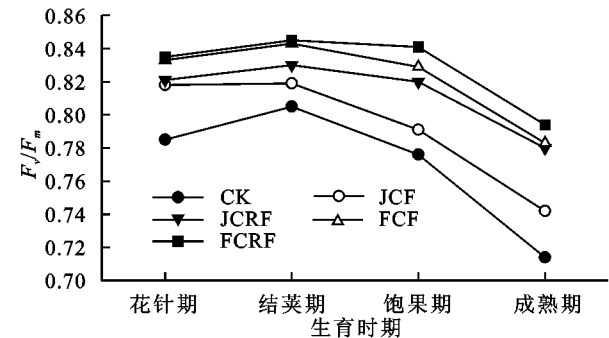


图 2 不同施肥处理对花生叶片光化学最大效率及 PSⅡ 活性的影响

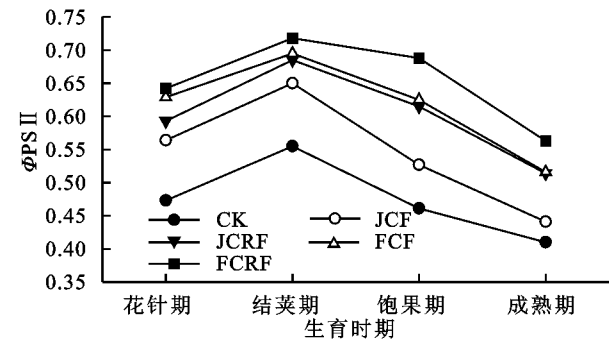


图 3 不同施肥处理对花生叶片实际光化学效率及光化学猝灭系数的影响

2.3 不同施肥处理对花生根系活力和叶片硝酸还原酶活性的影响

由图 4 可知,根系活力在花生整个生育期内呈先升高后降低的变化趋势,于结荚期达到最大值。施肥显著提高了各时期的根系活力,且控释复合肥的效果优于普通复合肥。各时期根系活力表现为 FCF>

2.2.2 qp 和 Φ_{PSII} 的动态变化 Φ_{PSII} 表示实际光化学量子产量,反映在光照条件下 PSⅡ 反应中心部分关闭情况下的实际原初光能捕获效率。由图 3 可知,随花生生育期延长,各处理 Φ_{PSII} 呈先增加后降低的趋势,在结荚期达最大值。各施肥处理的 Φ_{PSII} 均高于 CK。与普通复合肥处理相比,控释复合肥处理能够维持花生生长后期较高的 Φ_{PSII} 值,且小麦挑旗期追肥处理对 Φ_{PSII} 的提高作用大于拔节期追肥处理。表明控释复合肥可提高花生叶片后期的量子产量,有利于改善叶片后期的光合性能。光化学猝灭系数(qp)表示 PSⅡ 天线色素吸收的光能用于光化学电子传递的份额,它反映了 PSII 反应中心的开放程度。由图 3 可以看出,各施肥处理的 qp 较 CK 均有不同程度的提高且各个时期的差异均达到显著水平。控释复合肥处理的 qp 在结荚期后显著高于普通复合肥处理,饱果期与成熟期各处理 qp 均表现为 FCF>JCRF>JCF>CK。说明控释复合肥有利于 PSⅡ 反应中心在花生生育后期维持较高比例的开放部分,从而将更多的光能用于推动光合电子传递,提高 PSⅡ 电子传递能力,其中挑旗期追肥的效果优于拔节期追肥。

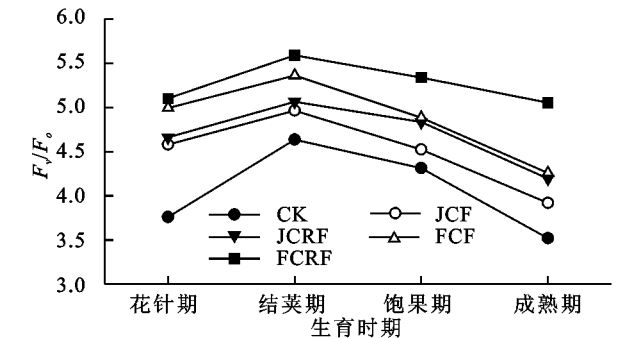


图 4 不同施肥处理对花生叶片实际光化学效率及光化学猝灭系数的影响

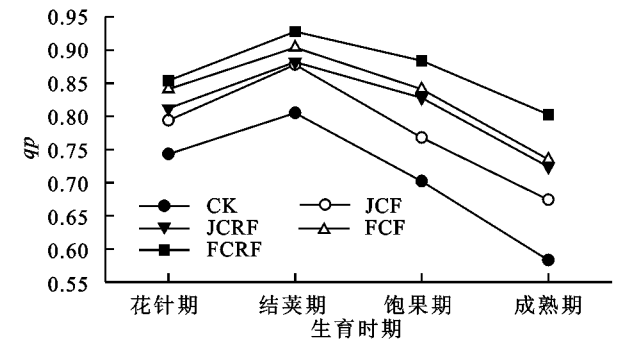


图 5 不同施肥处理对花生叶片实际光化学效率及光化学猝灭系数的影响

FCF>JCRF>JCF>CK,可见小麦挑旗期追肥对根系活力的提高效果更为明显,控释复合肥较普通复合肥能够维持麦套花生生育后期较高的根系活力,有利于后期根系对土壤中养分的吸收。

随生育期延长,各处理花生叶片硝酸还原酶活性呈单峰型变化趋势,结荚期出现活性高峰。花生结荚

期后,控释复合肥处理叶片的硝酸还原酶活性下降相对缓慢,下降幅度显著小于普通复合肥处理。饱果期与成熟期各处理硝酸还原酶活性均表现为 FCRF>FCF>

JCRF>JCF>CK。可见,控释复合肥能够维持麦套花生生长后期较高的硝酸还原酶活性,有利于后期氮素的转化,且小麦挑旗期追肥处理优于拔节期追肥。

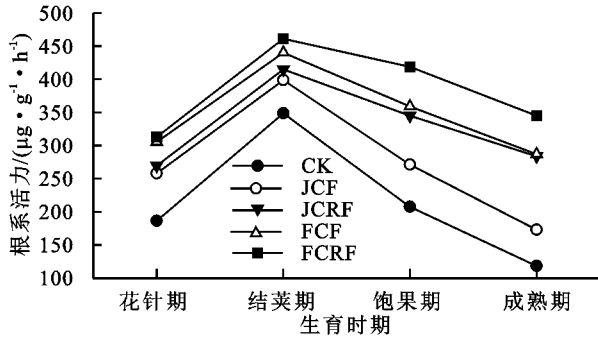
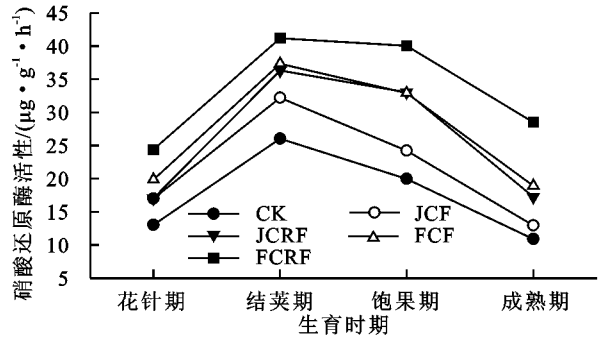


图 4 不同施肥处理对花生根系活力和叶片硝酸还原酶活性的影响



2.4 不同施肥处理对花生叶片膜质过氧化和保护酶活性的影响

2.4.1 丙二醛(MDA)含量 MDA为膜脂过氧化产物,标志着膜脂过氧化程度。由图 5 可知,整个生育期内,花生叶片 MDA 含量呈不断上升趋势。施肥显著降低了麦套花生各生育时期的 MDA 含量,小麦挑旗期追

肥处理下降幅度大于拔节期追肥。不同肥料类型间相比,JCRF 在各时期较 JCF 分别降低 1.6%,10.9%,7.8%,7.4%。FCRF 处理较 FCF 处理分别降低 5.7%,16.6%,14.2%和 14.7%,在结荚期、饱果期与成熟期均达到显著水平。表明控释复合肥有利于降低花生生育中后期叶片的膜脂过氧化程度,延缓叶片衰老。

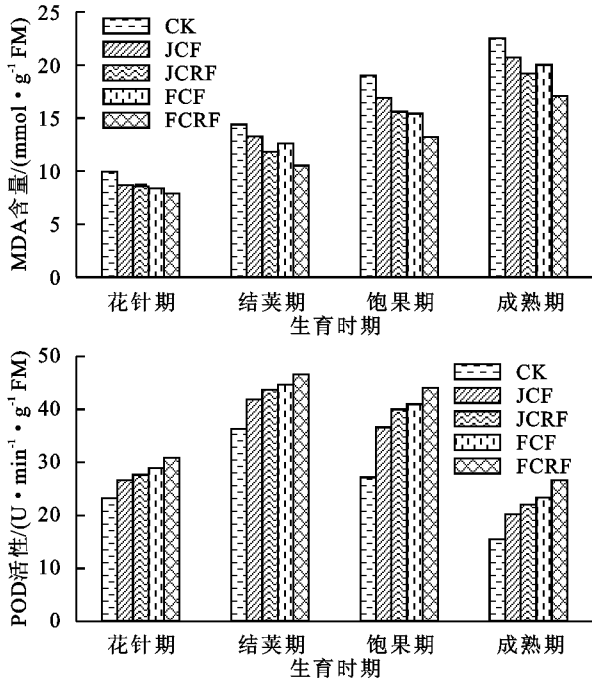
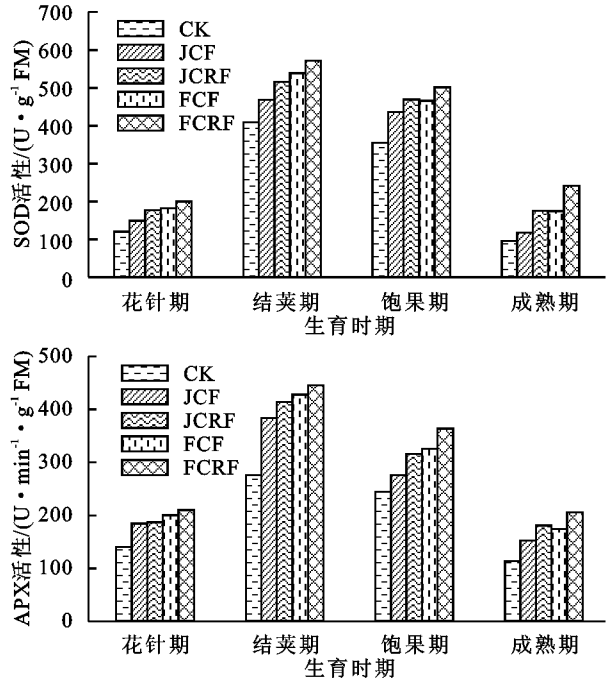


图 5 不同施肥处理对花生叶片 MDA 含量及 SOD、POD、APX 活性的影响



2.4.2 抗氧化酶活性 SOD、POD、APX 是植物体内的 3 种保护酶,SOD 是生物防御活性氧伤害的重要保护酶之一,POD 和 APX 分别是清除过氧化物与 H₂O₂ 的关键酶。较高的酶活性可以使植物保持较高的生理活性,延缓植株衰老进程。由图 5 可知,随生育期延长,各处理花生叶片 SOD 活性呈先升高后下降趋势,活性高峰出现在结荚期。施肥显著提高了各生育时期 SOD 活性,控释复合肥能够维持生育后期较高的 SOD 活性,在饱果期与成熟期 JCRF 处理较 JCF 分别提高 9.9%和 54.0%,FCRF 处理较 FCF 处理分别提高 7.7%和

38.2%,且小麦挑旗期追肥处理高于拔节期追肥。POD、APX 与 SOD 呈现出相似的变化规律,JCRF 处理的 POD 活性与 APX 活性在饱果期与成熟期较 JCF 分别提高 9.2%,13.2%和 14.5%,18.7%。FCRF 处理较 FCF 处理分别提高 7.6%,13.7%和 11.7%,17.8%。表明控释复合肥可增强花生生育中后期叶片清除活性氧的能力,从而延长叶片生理功能期。

2.5 不同施肥处理对产量及其构成因素的影响

2.5.1 不同施肥处理对花生产量及其构成因素的影响 由表 3 可知,与不施肥(CK)相比较,各施肥处理

的荚果产量和籽仁产量均显著提高,果数与仁数显著降低。JCRF 处理的荚果产量和籽仁产量较 JCF 分别提高 5.1% 和 7.6%,FCRF 较 FCF 处理提高 5.9% 和 8.0%,处理间差异均达到显著水平。不同追肥时期相比,FCF 处理的荚果产量和籽仁产量较 JCF 处理分别增加 6.1% 和 9.5%,FCRF 较 JCRF

处理分别增加 6.9% 和 9.9%。从产量构成因素来看,控释复合肥处理的果数与普通复合肥相比没有显著差异,但单株结果数和出仁率显著增加。可见,挑旗期追肥对麦套花生的增产效果优于拔节期追肥,且施用控释复合肥的作用大于普通复合肥,控释复合肥提高单株结果数和出仁率的作用显著。

表 3 不同施肥处理对花生产量及其构成因素的影响

处理	荚果产量 /(kg·hm ⁻²)	籽仁产量 /(kg·hm ⁻²)	果数/ (个·kg ⁻¹)	仁数/ (粒·kg ⁻¹)	单株 结果数/个	出仁率/ %
CK	5400±100.5d	3324±93.3d	496±8a	1356±4a	9.7±1.20d	61.5±0.50d
JCF	8188±44.4c	5412±84.2c	476±6b	1255±2b	12.5±0.66c	66.1±0.45c
JCRF	8603±31.3b	5823±29.5b	470±2bc	1156±6c	13.7±0.72b	67.7±0.21b
FCF	8685±52.1b	5926±31.5b	468±9bc	1145±11cd	14.4±0.15b	68.2±0.77b
FCRF	9200±64.7a	6399±56.7a	465±5c	1120±9d	15.1±0.97a	69.4±1.02a

注:表中数据为平均值±标准误差。下同。

2.5.2 不同施肥处理对冬小麦产量及其构成因素的影响 由表 4 可知,施肥显著提高了小麦籽粒产量,相同追肥时期籽粒产量在两种肥料类型间无明显差异,但挑旗期追肥处理显著高于拔节期追肥。与普通复合肥相比,控释复合肥处理穗粒数显著降低,JCRF 较 JCF 降低 5.9%,FCRF 较 FCF 降低 6.0%。而千粒重较普通复合肥显著提高,JCRF 较 JCF 提高 5.9%,FCRF 较 FCF 提高 4.3%。同一追肥时期两种肥料类型处理对单位面积穗数无显著影响,但挑旗期追肥处理穗粒数高于拔节期追肥。

测植物光合作用动态变化,分析估计光合机构量子效率和光合能力^[23]。张雷明等^[24]研究表明,施氮可显著提高灌浆期小麦 F_v/F_m 、 F_v/F_o 和 Φ_{PSII} 。本试验结果表明,控释复合肥处理的叶绿素荧光参数 F_v/F_m 、 F_v/F_o 、 Φ_{PSII} 和 qp 在麦套花生生长的中后期均显著高于普通复合肥处理。分析认为,控释复合肥养分释放具有均匀稳定的特点,能够确保花生在生长中后期也能获得充足氮素,有利于光合碳同化中以蛋白质为主体的各种酶及多种电子传递体等成分的合成,提高了 PSII 活性和光化学效率的提高,加快了光合色素把所捕获的光能转化为化学能的速度,从而为碳同化过程提供更加充足的能量,改善了叶肉细胞的光合性能,最终提高了叶片光合速率^[25]。而 qp 的提高,说明 PSII 反应中心开放部分的比例增大,使表观光合作用电子传递速率和 PSII 总的光化学量子产量提高,降低了非辐射能量耗散,使叶片所吸收的光能较充分地用于光合作用^[26]。

表 4 不同施肥处理对冬小麦产量及其构成因素的影响

处理	穗数/ (穗·m ⁻²)	穗粒数/ 粒	千粒重/ g	产量/ (kg·hm ⁻²)
CK	649±69.5c	30.2±0.10d	31.5±0.51e	5075.5±152c
JCF	679±29.5ab	35.8±1.10bc	35.7±0.12c	6950±201b
JCRF	683±43.5a	33.7±0.72a	37.8±0.37d	6875±89b
FCF	656±61.0c	39.8±0.25c	34.5±0.48a	7500.5±175a
FCRF	662±29.5bc	37.4±0.45b	36.0±0.22b	7350.5±251a

3 讨论

叶绿素是光合作用的基础,其含量高低与净光合速率直接相关,在叶片衰老后期,可以通过采取调控措施维持叶绿素含量,来提高净光合速率或减缓其下降速率^[22]。李学刚等^[11]研究表明,控释氮肥能够提高棉花生长中后期叶片叶绿素含量,从而维持了较高的净光合速率。本研究发现与普通复合肥处理相比较,控释复合肥处理的叶片叶绿素 a、叶绿素 b 和叶绿素 a+b 在饱果期与成熟期均显著提高,为光合作用提高奠定了基础。叶绿素荧光参与植物光合作用中吸收、传递、转换和碳同化等一系列复杂的过程,任何环境因子对光合作用的影响都可通过叶片叶绿素荧光动力学反映出来。因此,可以通过叶绿素荧光分析系统探

植株生长发育是地上部和地下部协调发展的结果,地上部分可为地下根系提供充足的光合产物,有利于根系生理功能的建成,同时较大的根系生物量和较高的根系活力有利于对水分和养分的吸收和运输^[27]。前人研究^[28-29]表明,增施氮肥可以提高小麦、水稻等作物根系活力。本研究中,在麦套花生结荚期后,控释复合肥处理的根系活力下降相对缓慢,下降幅度显著小于普通复合肥处理,表明控释复合肥能够延长根系活力高值持续期,延缓后期根系衰老,有利于麦套花生后期根系对土壤中养分的吸收,满足花生荚果膨大过程中氮素吸收的要求,从而提高荚果和籽仁产量。

硝酸还原酶是植物氮代谢的关键酶,其活性大小影响着 NO₃⁻转化的程度和速度,在一定程度上能够

反映植物氮素同化及为蛋白质积累提供氮源的能力。已有研究^[30,10]表明,在施等养分条件下,与常规肥料相比,控释肥料能够显著提高夏玉米吐丝期至成熟期和冬小麦灌浆期至成熟期叶片中硝酸还原酶活性,促进植株氮的代谢。本试验条件下,与普通复合肥处理相比,控释复合肥处理显著提高了麦套花生饱果期与成熟期的硝酸还原酶活性。分析认为控释复合肥的养分在生育中后期稳定释放,确保后期土壤中具有较高的氮素含量,花生对 N 仍有较强的同化能力,促进了花生成熟过程中各器官的碳氮代谢,从而提高花生光合效率和产量^[31]。

植物在后期衰老过程中,体内 MDA 含量增加,同时活性氧积累过多,使膜脂产生脱酯化作用,磷脂游离,造成膜结构破坏,细胞内物质外渗,电导率增大,细胞失去活力。膜系统的破坏会引起一系列的生理生化紊乱,再加上活性氧对一些生物功能分子的直接破坏,这样植物就会受到伤害,但由于细胞内存在一系列的抗氧化系统而使这些活性氧得以清除^[32]。超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)和过氧化氢酶(CAT)等相互协作,共同维持植物体内活性氧的平衡,削弱膜脂过氧化作用,限制潜在的氧伤害,在作物衰老过程中起着重要的保护作用^[33]。丁红等^[34]研究指出适量施氮提高了叶片 SOD 和 POD 活性,降低了叶片膜脂过氧化程度,促进了花生根系和地上部生长。本试验研究结果表明,花生叶片在自然衰老过程中,MDA 含量持续上升,并在饱果期上升幅度较大。整个生育期内,不施肥处理的 MDA 含量明显高于施肥处理,普通复合肥处理也高于控释复合肥处理,且在饱果期与成熟期均达到显著水平。表明花生生长发育后期,膜质过氧化作用明显加强,叶片衰老加剧,而施用肥料能降低花生叶片 MDA 含量,延迟衰老,且控释复合肥的效果优于普通复合肥。分析认为由于控释复合肥的控释效果,在花生饱果期与成熟期养分仍能够稳定释放,使土壤氮素含量保持在较高水平,保证花生生育后期氮素供应,具有“肥效后移”的特点,推迟了叶片中的氮素向花生籽粒的提前转移,有利于延缓衰老,同时,有研究认为叶片中充足的氮素供应可促进玉米素核苷(ZR)、二氢玉米素腺苷(DHZR)和异戊烯基腺苷(iPA)的合成,刺激 SOD、POD 等抗氧化酶的产生,抑制 ABA 积累,降低 MDA 含量,使植物体内活性氧维持在较低水平,以此保护各类功能生物大分子,提高清除活性氧的能力,减少伤害^[35]。本试验条件下,与拔节期追肥相比,挑旗期追肥能显著提高花生生长后期 SOD、POD

和 APX 活性,降低 MDA 含量,降低叶片膜脂过氧化程度,表明适当推迟小麦追肥时间,更有利于延缓麦套花生的衰老。

王明友等^[36]研究了追氮时期对不同类型冬小麦籽粒产量的影响,指出拔节期或挑旗期是小麦高产优质兼顾的追氮时期;张玉树等^[13]研究指出,在等 N—P₂O₅—K₂O 比例和等养分总量条件下,与普通肥料相比,控释肥料可以减小对花生结瘤的抑制作用,使荚果产量提 2.5%~10.8%。本研究指出,与拔节期追肥相比较,挑旗期追肥能够明显提高小麦千粒重,从而提高产量,控释复合肥与普通复合肥处理产量差异不显著,但显著提高了花生的荚果产量和籽仁产量。表明在麦油两熟制一体化施肥中,追肥时期适当后移不仅能够为小麦生育后期提供养分,而且能够充当花生底肥的效应,为花生留下后效,起到“前施后用”的作用,其中控释复合肥的效果优于普通复合肥。

4 结论

(1)与普通复合肥相比,控释复合肥处理可增加麦套花生生长发育中后期叶片叶绿素含量,提高叶绿素荧光参数 F_v/F_m 、 F_v/F_o 、 Φ_{PSII} 和 qp ,改善叶肉细胞的光合性能。同时增强根系活力和 NR 活性,饱果期与成熟期根系活力和 NR 活性均表现为 FCRF>FCF>JCRF>JCF>CK,说明控释复合肥有利于花生生育后期根系对土壤养分的吸收,促进荚果膨大和充实。

(2)控释复合肥能提高中后期 SOD、POD 和 APX 活性,降低 MDA 含量,JCRF 在开花下针期、结荚期、饱果期和成熟期较 JCF 分别降低 1.6%,10.9%,7.8%,7.4%;FCRF 处理较 FCF 处理分别降低 5.7%,16.6%,14.2%,14.7%,在结荚期、饱果期与成熟期均达到显著水平。表明控释复合肥能够延长花生叶片功能期,有助于延缓衰老。

(3)控释复合肥能显著增加麦套花生产量,JCRF 处理的荚果产量和籽仁产量较 JCF 分别提高 5.1%和 7.6%,FCRF 较 FCF 处理提高 5.9%和 8.0%,主要表现为单株结果数和出仁率的提高。不同追肥时期相比,小麦挑旗期追肥效果优于拔节期追肥。

参考文献:

- [1] 万书波. 中国花生栽培学[M]. 上海:上海科学技术出版社,2003,252-272.
- [2] Wang C B, Zhang Y M, Shen P, et al. Determining N supplied sources and N use efficiency for peanut under applications of four forms of N fertilizers labeled by isotope ¹⁵N [J]. Journal of Integrative Agriculture, 2016, 15(2): 432-439.

- [3] 李向东,王晓云,张高英,等.花生衰老的氮素调控[J]. 中国农业科学,2000,33(5):30-35.
- [4] 张翔,毛家伟,司贤宗,等.小麦一花生统筹施肥对花生产量、品质及土壤肥力的影响[J]. 花生学报,2016,45(1):24-28.
- [5] 郑圣先,聂军,熊金英,等.控释肥料提高氮素利用率的作用及对水稻效应的研究[J]. 植物营养与肥料学报,2001,7(1):11-16.
- [6] 王新民,侯彦林,介晓磊.冬小麦施用控释氮肥增产效应研究初报[J]. 中国生态农业学报,2004,12(2):98-101.
- [7] 汪强,李双凌,韩燕来,等.缓/控释肥对小麦增产与提高氮肥利用率的效果研究[J]. 土壤通报,2007,38(1):693-696.
- [8] 李方敏,樊小林,陈文东.控释肥对水稻产量和氮肥利用效率的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2005,11(4):494-500.
- [9] 聂军,郑圣先,戴平安,等.控释氮肥调控水稻光合功能和叶片衰老的生理基础[J]. 中国水稻科学,2005,19(3):255-261.
- [10] 范振义,董元杰,陈学涛,等.控释肥对坡耕地冬小麦生理特性的影响[J]. 磷肥与复肥,2013,28(4):83-85.
- [11] 李学刚,宋宪亮,孙学振.控释氮肥对棉花叶片光合特性及产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2010,16(3):656-662.
- [12] 邱现奎,董元杰,史衍玺,等.控释肥对花生生理特性及产量、品质的影响[J]. 水土保持学报,2010,24(2):223-226.
- [13] 张玉树,丁洪,卢春生,等.控释肥料对花生产量、品质以及养分利用率的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2007,13(4):700-706.
- [14] 山仑,康绍忠,吴普特.中国节水农业[M].北京:中国农业出版社,2004:229-230.
- [15] Arnon D I, Copper enzymes in isolated chloroplast, poly-phenol oxidase in *Beta vulgaris* [J]. *Plant Physiology*, 1949, 24(1): 1-15.
- [16] 张志良.植物生理学实验指导[M].北京:高等教育出版社,2003.
- [17] 上海植物生理学会.植物生理学实验手册[M].上海:上海科学技术出版社,1999.
- [18] 王爱国,罗广华,邵从本.大豆种子超氧化物歧化酶的研究[J]. 植物生理学报,1983,9(1):79-86.
- [19] 李忠光,李江鸿,杜朝昆,等.在单一提取系统中同时测定五种植物抗氧化酶[J]. 云南师范大学学报(自然科学版),2002,22(6):44-48.
- [20] Nakano Y, Asada K. Hydrogen peroxide is scavenged by ascorbate-specific peroxidase in spinach chloroplasts [J]. *Plant and Cell Physiology*, 1981, 22(5): 867-880.
- [21] 林植芳,李双顺,林桂珠,等.水稻叶片的衰老与超氧化物歧化酶活性及脂质过氧化作用的关系[J]. 植物学报,1984,26(6):47-57.
- [22] 李向东,王晓云,余松烈,等.花生叶片衰老过程中光合性能及细胞微结构变化[J]. 中国农业科学,2002,35(4):384-389.
- [23] 林世青,许春辉.叶绿素荧光动力学在植物抗性生理学、生态学和农业现代化中的应用[J]. 植物学报,1992,9(1):1-16.
- [24] 张雷明,上官周平,毛明策,等.长期施氮对旱地小麦灌浆期叶绿素荧光参数的影响[J]. 应用生态学报,2003,14(5):695-698.
- [25] 谭雪莲,郭天文,张国宏,等.氮素对小麦不同叶位叶片叶绿素荧光参数的调控效应[J]. 麦类作物学报,2009,29(3):437-441.
- [26] 张旺锋,勾玲,王振林,等.氮肥对新疆高产棉花叶片叶绿素荧光动力学参数的影响[J]. 中国农业科学,2003,36(8):893-898.
- [27] Mackay A D, Barber S A. Effect of nitrogen on root growth of two corn genotypes in the field [J]. *Agronomy Journal*, 1986, 78(4): 699-703.
- [28] 熊淑萍,吴克远,王小纯,等.不同氮效率基因型小麦根系吸收特性与氮素利用差异的分析[J]. 中国农业科学,2016,49(12):2267-2279.
- [29] 孙静文,陈温福,曾雅琴,等.氮素水平对粳稻根系形态及其活力的影响[J]. 沈阳农业大学学报,2003,34(5):344-346.
- [30] 卫丽,马超,黄晓书,等.控释肥对夏玉米碳、氮代谢的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2010,16(3):773-776.
- [31] 张智猛,万书波,戴良香,等.施氮水平对不同花生品种氮代谢及相关酶活性的影响[J]. 中国农业科学,2011,44(2):280-290.
- [32] 袁琳,克热木·伊力,张利权. NaCl胁迫对阿月浑子实生苗活性氧代谢与细胞膜稳定性的影响[J]. 植物生态学报,2005,29(6):985-991.
- [33] 龚明,丁念诚,贺子义,等.盐胁迫下大麦和小麦叶片脂质过氧化伤害与超微结构变化的关系[J]. 植物学报,1989,31(11):841-255.
- [34] 丁红,张智猛,戴良香,等.干旱胁迫对花生根系生长发育和生理特性的影响[J]. 应用生态学报,2013,26(2):450-456.
- [35] 李文娟.玉米氮素营养生理及其与叶片衰老的关系[D].北京:中国农业科学院,2012.
- [36] 王明友,徐岱青,王晓理,等.追氮时期对不同类型冬小麦籽粒产量和品质的影响[J]. 安徽农业科学,2008,36(3):946-949.