植物营养与肥料学报 2013,19(3):623-631
Journal of Plant Nutrition and Fertilizer doi: 10.11674/zwyf.2013.0312

外源钙水平与花生下针期不同土壤水分对植株生理特性的影响

王 飞, 何春梅, 李清华, 林 诚
(福建省农业科学院土壤肥料研究所,福建福州 350013)

摘要: 沿海耕作风砂土土壤缺钙与干旱常相伴发生。通过盆栽试验,研究了不同钙肥水平下花生下针期至结荚初期土壤水分管理对植株生理特性及产量的影响。结果表明,下针期(55±3)%(LW)、(75±3)%(MW)和(95±3)%(HW)三种田间持水量条件下,叶片 SPAD 值、净光合速率、水分利用效率及产量均随着钙肥用量的增加而提高,其中施钙肥的花生荚果产量增幅 12.2% ~19.4%,而三种钙肥水平下,MW 比 LW 与 HW 的荚果产量分别显著提高 18.7% 与 56.5%,说明下针期过高或过低的水分均不利于光合作用及产量形成,尤其高水量条件下,其根系活力显著下降。花生成熟期产量与下针期叶片 SPAD 值、净光合速率、水分利用效率及根系活力呈显著正相关;不同水分管理与钙肥水平均显著影响花生产量,但水钙间产量交互效应不明显。耕作风砂土上增施钙肥增产潜力大,且一定程度上可缓解旱情,花生下针期调控约 75% 的田间持水量,其光合速率与产量最高。

关键词: 钙肥; 花生; 光合特性; 根系活力; 水分利用效率; 干旱胁迫
中图分类号: S565.2; S143.7+2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1008-505X(2013)03-0623-09

Effects of exogenous calcium and soil moisture at acicula forming stage of peanut on some physiological characteristics of plants

WANG Fei, HE Chun-mei, LI Qing-hua, LIN Cheng
(*Institute of Soil and Fertilizer, Resources and Environment, Fujian Academy of Agricultural Sciences, Fuzhou, Fujian 350013, China*)

Abstract: Lack of calcium and drought frequently happen together in coastal tillage wind-sand soils. Pot experiments was conducted to study the effect of soil moisture on physiological characteristics of leaves and roots of peanut at the acicula forming stage and yield of peanut under different calcium levels. The results showed that the SPAD values, net photosynthetic rates, water use efficiencies and yields are improved with the increase of calcium fertilizer levels under the conditions of (55±3)% (LW), (75±3)% (MW) and (95±3)% (HW) of field capacity, thereinto, pod yields of peanut increased by 12.2% - 19.4%; Compared with the LW and HW treatments, the pod yield at MW increased by 18.7% and 56.5% respectively. These results indicate that too high or too low soil moisture at the acicula forming stage are detrimental to the photosynthesis and formation of yield, especially under the high water content condition. The yield at the maturity is significantly and positively correlated to SPAD value, photosynthetic rate, water use efficiency of leaves and root vigor at the acicula forming stage. Both water management pattern and calcium fertilization level significantly affect the yield of peanut, but there are no significant coupling effects of the two factors. Increasing application of calcium fertilizer not only help to improve yield, but also to relieve drought in some way in tillage wind-sand soils. The photosynthetic rate and yield of peanut are highest to keep about 75% of field capacity at the acicula forming stage.

Key words: calcium fertilizer; peanut; photosynthesis characteristic; root vigor; water use efficiency; drought stress

收稿日期: 2012-08-05 **接受日期:** 2012-12-10
基金项目: 福建省自然科学基金项目(2010J01105)资助。
作者简介: 王飞(1976—),男,福建福州人,副研究员,主要从事土壤资源评价与持续利用方面的研究。E-mail:fjwangfei@163.com

花生是我国主要的油料作物之一,80%分布在闽东南沿海一带,福建年播种面积近10万 hm^2,但福建花生单产较低,除了耕作制度、品种与管理水平外,与种植土壤中某些养分供应水平较低可能分不开。受高温多雨气候及长期化肥偏施的影响,南方花生产区土壤钾、钙、镁等盐基离子缺失,土壤酸化,这一现象在沿海砂质旱地上表现尤为明显[1]。花生是喜钙作物,每形成100 kg产量需要吸收钙2.0～2.5kg,比磷还多[2]。研究表明,花生植株缺钙时其光合产物转化率低、运转不畅,荚果处于相对"饥饿"而导致空秕[3],受钙胁迫花生幼胚败育还可能与早期幼胚内能量转化、氧化还原系统、细胞内膜以及细胞骨架功能维持相关的功能基因的表达异常有关[4]。合理施用钙肥可有效提高花生产量与品质[5-6]。花生虽是一种耐旱性强的作物,但我国有70%的花生受到不同程度的干旱威胁,每年因干旱引起的减产达30%～50%[7-8]。福建沿海花生产区年降水量虽多,但区域和季节分布却不均匀,夏旱已成为闽东南沿海花生产区产量限制的主要气象因子[9],因而闽东南沿海土壤缺钙与缺水相伴发生,成为困扰花生生产的一个现实问题。

目前关于水分与氮、磷、钾大量营养元素耦合效应研究的较多[10-12],但有关水分与中量元素钙肥耦合效应的报道甚少,如研究表明外源钙提高了干旱胁迫下苜蓿叶片POD酶活性、叶绿素含量和相对含水量,减轻了膜透性及对叶绿体结构的伤害,提高了苜蓿的抗旱性;不论是正常供水还是干旱胁迫,外源钙的增加均对棉花幼苗叶片膜透性、MDA等生理特性产生影响,但正常供水状况下生理指标变化较小[13-14]。而水分与钙肥二者在花生上的关系尚不清楚。有鉴于此,本研究通过盆栽试验探讨沿海耕作风砂土外源钙肥水平与花生需水关键生育期—开花下针期水分管理方式对叶片光合作用、根系活力、产量的影响及其相互关系,旨在明确南方沿海花生产区合理的水、钙管理利用模式,为花生高效生产提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试土壤采自福建沿海花生产区平潭县芦洋乡,土壤类型为耕作风砂土,质地为紧砂土。土壤基本理化性状:pH 5.9,有机质含量3.8 g/kg,碱解氮34.4 mg/kg,速效磷41.3 mg/kg,速效钾51.6 mg/kg,有效钙256.5 mg/kg,容重1.45g/cm^3,田间持水量15%。供试钙肥品种为贝壳粉(过0.147mm筛,主要成分为 $CaCO_3$,pH8.7、有效钙21.4%)。供试花生品种为"福花6号"。

1.2 试验设计

试验设在福建省农业科学院土壤肥料研究所玻璃网室。钙肥用量设3个水平,分别为Ca0(不施钙肥,低量水平)、Ca1(每kg土加入有效钙0.15 g,中量水平)、Ca2(每kg土加入有效钙0.45 g,高量水平)。花生开花下针期至结荚初期水分管理设3个水平,分别为:LW[控制田间持水量的(55±3)%,水分低量水平]、MW[控制田间持水量的(75±3)%,水分中量水平]、HW[控制田间持水量的(95±3)%,水分高量水平]。钙肥用量与水分管理共9个处理:1) LW+Ca0;2) LW+Ca1;3) LW+Ca2;4)MW+Ca0;5)MW+Ca1;6) MW+Ca2;7) HW+Ca0;8) HW+Ca1;9)HW+Ca2。

将土壤样品风干,过2mm筛,装盆,盆为13cm×33cm的聚乙烯塑料盆,每盆装土8.5 kg。每kg土施氮N 0.1g(按大田花生栽培施用量的2.5倍计算),N:P_2O_5:K_2O=1:0.8:1.2,氮、磷、钾肥分别采用尿素、磷酸氢二铵、氯化钾。钙肥与氮、磷、钾肥均作基肥施用。2011年4月7日播种,每盆播4粒花生种子,出苗后每盆保留两株。5月20至6月30日开花下针期至结荚初期按试验设计控制水分,当含水量低于下限时浇水,补水量为达到上限时的含水量。8月22日收获。花生开花下针期至结荚初期每天用TZS-Ⅰ土壤水分测量仪测定水分并结合称重控制各处理土壤水分,其余生育期(苗期、结荚成熟期)统一按75%的田间持水量控制水分。每处理设6次重复,各处理随机排列,并定期调换盆的位置。

1.3 测定项目与方法

在开花下针期末,结荚初期,选择晴天上午9:00～11:00,取花生倒3叶在自然光照强度下,用日本产SPAD-502叶绿素仪测定叶片SPAD值,用英国产LCPro+全自动便携式光合仪测定花生叶片的净光合速率(Pn)、蒸腾速率(Tr)、气孔导度(Gs)、胞间 CO_2 浓度(Ci)等光合特征参数,每株测2片叶。

在花生开花下针期末,结荚初期,分别取各处理的3个重复的植株样品,用于测定根系活力与花生生物量。根系活力的测定采用TTC法[15]。其余3个重复用于收获期测定生物产量与荚果产量。

土壤养分等的测定按常规方法[16]。贝壳粉中有效钙含量的测定用原子吸收分光光度法。试样的制备参照钙镁磷肥(GB20412-2006)中磷、镁试样溶液的制备方法:称取1g贝壳粉(精确至0.001g),置于干燥的250 mL锥形瓶或250 mL容量瓶中,准确加入150 mL预先加热至28～30℃的20g/L的柠檬酸溶液(pH约为2.1),塞紧瓶塞,保持溶液温度在28～30℃之间,置于振荡器振荡1h,干过滤,溶液用原子吸收分光光度计测定有效钙含量。

水分利用效率用净光合速率与蒸腾速率的比值(WUE = Pn/Tr, mmol/mol)表示[17]。

用Excel和DPS进行数据统计分析,最小显著极差法(LSD)进行差异显著性检验。

2 结果与分析

2.1 钙肥与水分管理对花生叶片SPAD值的影响

SPAD值反映了叶片中叶绿素含量的相对值,可用于快速诊断外界环境变化对作物的影响。由表1可知,在同一土壤水分含量的条件下,花生叶片的SPAD值随着施钙量的增加而增加,其中中量水分条件(MW)下表现尤为明显,各施钙水平间差异显著。而在同一钙肥用量处理,叶片SPAD值随水分含量的提高呈先增加后降低的趋势,说明在一定范围内,增加水分含量,有利于提高叶片的SPAD值,而过多的水分反而会降低其SPAD值。从平均值来看,不同水分含量间和不同钙肥水平间的差异均达到显著水平。水分与钙肥的综合效应,以MW+Ca2处理的SPAD值最高。从表1还可以看出,水分和钙的单因子的SPAD效应均达到极显著水平,但水分和钙肥的交互效应则不明显。

表1　不同钙肥用量与水分管理对叶片SPAD值的影响
Table 1　Effects of different calcium levels and water management pattern on SPAD values of peanut leaves

处理 Treatment	SPAD值 SPAD value	处理 Treatment	平均值 Mean
LW+Ca0	44.5 d	LW	45.6 b
LW+Ca1	45.5 cd	MW	48.5 a
LW+Ca2	46.7 c	HW	41.6 c
MW+Ca0	46.5 c	Ca0	43.8 c
MW+Ca1	48.3 b	Ca1	45.1 b
MW+Ca2	50.7 a	Ca2	46.8 a
HW+Ca0	40.4 f	*F*值 *F* value	
HW+Ca1	41.5 ef	水分 Water(W)	141.0**
HW+Ca2	42.9 e	钙 Ca	25.2**
		W×Ca	1.2

注(Note):同列数据后不同字母表示处理间差异达5%显著水平 Values followed by different letters in a column are significant among treatment at the 5% level. *和**分别表示在5%和1%水平差异显著 Mean significant difference at the 5% and 1% levels, respectively.

2.2 钙肥与水分管理对花生叶片生理特性的影响

2.2.1 钙肥与水分管理对花生叶片净光合速率的影响　光合作用直接影响作物生长发育与植株体内糖类等有机物质的合成。由表2可知,花生下针期末,不同水钙处理的花生叶片净光合速率的变幅为10.89～17.02 umol/(m^2·s)。同一水分条件,叶片净光合速率均随着钙肥用量的增加而上升,LW、MW和HW条件下,施钙肥处理的增幅分别为13.1%～24.3%、19.0%～36.1%和13.3%～24.8%,除HW+Ca1处理外,与相应的水分条件下Ca0处理相比,均差异显著,表明施钙肥有利于促进叶片的光合作用。而在同一钙肥用量条件下,随着水分含量的增加,叶片净光合速率均呈先增加后降低的趋势,其中Ca2条件下的3个水分处理间差异显著。从平均值来看,MW处理的净光合速率分别比LW与HW提高了7.3%和20.7%,均达到显著差异水平,表明在花生开花下针期至结荚初期低量与高量水分均不利于植物光合作用的进行。从钙施用量与水分含量对花生叶片净光合速率的综合影响可以看出,以MW+Ca2处理的净光合速率最高,这与叶片SPAD值表现基本一致。

2.2.2 钙肥与水分管理对花生叶片气孔导度的影响　气孔导度表示气孔张开的程度,影响植物的光合作用、呼吸作用及蒸腾作用。气孔可以根据环境条件的变化来调节自己开度的大小而使植物在损失水分较少的条件下获取最多的CO_2。由表2可以看出,不同水钙管理方式下开花下针期末至结荚初期叶片气孔导度变幅在1.82～3.48 mmol/(m^2·s),不同水钙处理对气孔导度的影响与叶片净光合速率表现相似,即在同一水分条件下,叶片气孔导度均随钙肥用量的增加而增加,其中MW与HW水分条件下施钙处理的花生叶片气孔导度均显著高于不施钙肥处理,而在同一钙肥用量下,气孔导度随水分增加呈先上升后下降趋势。从平均值来看,MW处理的叶片气孔导度均显著高于LW与HW,表现先增加后降低的趋势。表明MW水平的含水量有利于花

表2 不同钙肥用量与水分管理对花生生理特性的影响

Table 2 Effects of different calcium levels and water management pattern on physiological characteristics of peanut leaves

处理 Treatment	净光合速率 Pn [μmol/(m² · s)]	气孔导度 Gs [mmol/(m² · s)]	胞间 CO_2 浓度 Ci (μmol/mol)	蒸腾速率 Tr [mmol/(m² · s)]	水分利用效率 WUE (mmol/mol)
LW + Ca0	12.27 ef	1.82 cd	342.3 de	4.12 d	3.00 abcd
LW + Ca1	13.88 bcd	2.28 bc	357.7 bc	4.27 cd	3.35 abc
LW + Ca2	15.26 b	2.38 b	365.3 ab	4.34 bcd	3.52 ab
MW + Ca0	12.51 de	2.36 b	337.7 e	4.51 abc	2.78 cd
MW + Ca1	14.89 bc	3.07 a	359.3 bc	4.86 a	3.09 abcd
MW + Ca2	17.02 a	3.48 a	374.3 a	4.62 abc	3.67 a
HW + Ca0	10.89 f	1.58 d	343.2 de	4.27 cd	2.55 d
HW + Ca1	12.34 ef	2.41 b	349.8 cd	4.49 abc	2.75 cd
HW + Ca2	13.59 cde	3.15 a	359.0 bc	4.67 ab	2.91 bcd
平均值 Mean					
LW	13.80 b	2.16 b	355.1 ab	4.24 b	3.29 a
MW	14.81 a	2.97 a	357.1 a	4.67 a	3.18 a
HW	12.27 c	2.38 b	350.7 b	4.48 a	2.73 b
Ca0	11.89 c	1.92 c	341.1 c	4.30 b	2.77 b
Ca1	13.70 b	2.59 b	355.6 b	4.54 a	3.06 ab
Ca2	15.29 a	3.00 a	366.2 a	4.54 a	3.37 a
F 值 *F* value					
水分 Water(W)	17.6**	15.5**	2.3	7.8**	11.0**
钙 Ca	31.3**	26.3**	33.8**	3.5*	11.2**
W × Ca	0.85	1.9	2.2	0.8	1.0

注(Note): Pn—Net photosynthetic rates; Gs—Stomatal conductance; Ci—Intercellular CO_2 concentration; Tr—Transpiration rate. 同列数据后不同字母表示处理间差异达5%显著水平 Values followed by different letters in a column are significant among treatment at the 5% level. * 和 ** 分别表示在5%和1%水平差异显著 Mean significant difference at the 5% and 1% levels, respectively.

生叶片气孔的扩张,尤其在施高量钙的条件下。

2.2.3 钙肥与水分管理对花生叶片胞间 CO_2 浓度的影响 胞间 CO_2 浓度反映了植物细胞同化 CO_2 能力的大小。表2显示,花针期末不同水分与钙肥用量处理对叶片胞间 CO_2 浓度的影响与叶片气孔导度相似,其中,同一水分条件下,施钙肥均可提高胞间 CO_2 浓度,Ca2 处理的胞间 CO_2 浓度均显著高于 Ca0,LW 与 MW 含水量下的 Ca1 处理也显著高于 Ca0,而仅在 MW 条件下,Ca1 与 Ca2 处理间差异显著,表明钙肥的肥效发挥与含水量关系密切。从平均值来看,MW 水分条件的叶片胞间 CO_2 浓度显著高于 HW,而与 LW 水平的差异不明显。

2.2.4 钙肥与水分管理对花生叶片蒸腾速率的影响 由表2还可以看出,花针期至结荚初期,同一水分条件下,随着钙肥用量的增加,叶片净光合速率均呈逐渐上升的趋势(MW + Ca2 处理除外),其中在 HW 水分条件下,Ca2 显著高于 Ca0 处理,但 LW 与 MW 条件下施钙的各处理蒸腾速率却无显著差异。同一钙肥用量下,随着水分含量的提高,Ca0 与 Ca1 处理的叶片蒸腾速率呈先上升后下降趋势,而 Ca2 处理其蒸腾速率却呈逐步上升趋势。从平均值可看出,随着土壤含水量的增加,叶片蒸腾速率总体提高,MW 与 HW 处理均显著高于 LW,说明水分含量对蒸腾速率的影响明显。综合水分和施钙两个因子

对叶片蒸腾速率的影响,可看出以 MW + Ca1 处理最高,但与 MW + Ca2 处理差异并不显著。

2.2.5 钙肥与水分管理对花生叶片水分利用效率的影响　水分利用效率反映了植物耗水与干物质生产的关系,是评价植物生长适宜程度的综合指标。从表 2 还可看出,同一水分含量条件下,随着钙肥用量的提高,水分利用效率呈逐步上升的趋势,说明钙肥对水分利用效率表现出正效应。而在同一钙肥用量下,随着水分含量的增加,水分利用效率总体呈逐渐降低的趋势(MW + Ca2 除外)。从平均值来看土壤水分与施钙对水分利用效率的影响,在本试验条件下,LW 处理有高于 MW 的趋势,而 HM 与 LW 和 MW 处理相比则呈相反趋势。

2.3　钙肥与水分管理对花生根系活力及产量的影响

根系活力反映了根系的生长发育状况,是根系生命力的综合指标。由表 3 可知,随着水分含量的提高,下针期花生根系活力总体呈先增加后降低的

表 3　不同钙肥用量与水分管理对花生根系活力及产量的影响

Table 3　Effects of different calcium levels and water management pattern on root vigor and yields of peanut

处理 Treatment	下针期末根系活力 Root vigor in late acicula forming stage [μg/(g·h)]	下针期末生物量 Biomass in late acicula forming stage (g/pot)	成熟期生物量 Biomass in maturation stage (g/pot)	成熟期荚果产量 Pod yield in maturation stage (g/ pot)	成熟期果仁产量 Nutlet yield in maturation stage (g/pot)
LW + Ca0	34.6 ab	81.9 c	102.2 abc	17.1 cd	9.1 cd
LW + Ca1	34.4 bc	81.2 c	100.6 bcd	20.2 bc	10.7 bc
LW + Ca2	34.3 bc	86.3 bc	105.3 abc	23.6 ab	12.6 ab
MW + Ca0	33.0 c	86.5 bc	106.1 ab	22.1 ab	12.1 ab
MW + Ca1	35.9 a	90.2 ab	109.3 ab	24.2 ab	12.9 ab
MW + Ca2	35.6 ab	96.2 a	113.0 a	26.0 a	13.7 a
HW + Ca0	26.8 e	70.9 d	88.1 e	14.8 d	8.0 d
HW + Ca1	30.4 d	81.1 c	90.8 de	16.3 cd	7.7 d
HW + Ca2	31.3 d	83.3 c	94.3 cde	15.0 d	7.7 d
平均值 Mean					
LW	34.4 a	83.1 b	102.7 b	20.3 b	10.8 b
MW	34.9 a	91.0 a	109.4 a	24.1 a	12.9 a
HW	29.5 b	78.4 c	91.1 c	15.4 c	7.8 c
Ca0	31.5 b	79.8 c	98.8 a	18.0 b	9.7 b
Ca1	33.6 a	84.2 b	101.4 a	20.2 ab	10.4 ab
Ca2	33.7 a	88.6 a	104.2 a	21.5 a	11.3 a
F 值 *F* value					
水分 Water(W)	104.1**	25.7**	17.6**	21.9**	33.5**
钙 Ca	18.8**	12.5**	1.6	3.7*	3.1
W × Ca	6.7**	1.8	0.2	1.0	1.5

注(Note):同列数据后不同字母表示处理间差异达 5% 显著水平 Values followed by different letters in a column are significant among treatment at the 5% level. * 和 ** 分别表示在 5% 和 1% 水平差异显著 Mean significant difference at the 5% and 1% levels, respectively.

趋势,其中HW条件下的根系活力显著低于LW与MW,而对钙肥用量而言,随着钙肥施用量的增加,根系活力总体呈上升趋势,Ca2与Ca1处理均显著高于Ca0。从开花下针期末花生生物量来看,不论是水分还是钙肥均极显著影响下针期末生物量。不同钙水平和不同土壤含水量对成熟期花生生物量、荚果产量及果仁产量的效应与下针期末的生物量规律基本一致。其中MW比LW与HW处理的花生荚果产量分别显著提高18.7%与56.5%,果仁产量提高19.4%～65.4%。综合水分与钙肥用量两个因素,不同处理的花生产量均以MW+Ca2处理最高,其成熟期生物产量、荚果产量、果仁产量分别较其他水钙处理增加3.9%～22.0%、7.4%～75.7%、5.9%～78.7%,表明耕作风砂土施用高量钙肥且在下针期控制土壤水分田间持水量在75%左右,有利于花生的生长发育与高产。值得一提的是在此土壤水分状况下,从Ca0到Ca1再到Ca2处理,花生荚果产量分别提高12.2%和19.4%,果仁产量分别提高7.2%和16.5%,且Ca2处理均显著高于Ca0,显示出增施钙肥的增产潜力。

2.4 花生叶片SPAD值、光合特性、根系活力及产量的相互关系

相关分析表明(表4),叶片净光合速率、SPAD值、气孔导度、水分利用效率、根系活力及产量间存在显著的正相关关系,表明花生开花下针期叶绿素及光合特征与花生产量的形成密切相关,提高产量的生理基础是下针期光合速率与根系活力的改善。随着土壤钙营养与水分环境条件的改善,下针期根系活力、叶片叶绿素相对含量与光合作用呈同步上升趋势。从中也可看出,开花下针期是花生水

表4 叶片生理特性、根系活力与产量的相关性

Table 4 The correlation among physiological characteristics of leaves, root vigor and yield of peanut

项目 Item	净光合速率 Pn	气孔导度 Gs	胞间CO_2浓度 Ci	蒸腾速率 Tr	SPAD值 SPAD value	水分利用效率 WUE	根系活力 RV
气孔导度 Gs	0.93**	1.0					
胞间CO_2浓度 Ci	0.91**	0.76*	1.0				
蒸腾速率 Tr	0.48	0.44	0.43	1.0			
SPAD值 SPAD value	0.86**	0.93**	0.60	0.41	1.0		
水分利用效率 WUE	0.91**	0.85**	0.84**	0.09	0.79**	1.0	
根系活力 RV	0.75*	0.76*	0.49	0.24	0.88**	0.77**	
成熟期生物量 BMS	0.78**	0.88**	0.48	0.34	0.98**	0.73*	0.90**
成熟期荚果产量 PYMS	0.82**	0.96**	0.57	0.39	0.95**	0.75*	0.78**
成熟期果仁产量 NYMS	0.77**	0.94**	0.51	0.34	0.94**	0.72*	0.77**
下针期末生物量 BMAS	0.88**	0.85**	0.64*	0.59	0.92**	0.71*	0.82**

注(Note): Pn—Net photosynthetic rates; Gs—Stomatal conductance; Ci—Intercellular CO_2 concentration; Tr—Transpiration rate. WUE—Water use efficiency; RV—Root vigor; BMS—Biomass in maturation stage; PYMS—Pod yield of maturation stage; NYMS—Nutlet yield of maturation stage; BMAS—Biomass in end of acicula forming stage. *和**分别表示在5%和1%水平差异显著 Mean significant difference at the 5% and 1% levels, respectively. n=9

分敏感时期,此时干旱或过量灌溉,即使结荚成熟期水分恢复至正常水平,产量形成也已受到不可逆转的影响。

3 讨论与小结

3.1 耕作风砂土不同钙水平对花生生长的影响与水分调控

本研究表明,开花下针期不论何种水分条件,随着钙肥用量的增加,花生光合速率、产量等均呈总体上升的趋势,即使本研究高量钙肥设置为中量钙肥的3倍,其用量已大大超过氮、磷、钾施用量,花生光合速率与产量仍保持着增加的趋势,而没有表现出明显的肥害,这可能与沿海砂质旱地花生生长对钙利用率较低有关。一方面是花生对钙需求量大,但下针后花生根系吸收的钙难以运转至荚果,荚果发育需要的钙主要靠自身从土壤与肥料中吸收,由于荚果对钙的吸收为被动吸收方式[18],吸收量主要取决于荚果周围土壤中的钙浓度和对水分的吸收。果实的蒸腾作用较小,因而对钙的吸收能力较弱,故施钙肥量要大,以保证下针期至成熟期荚果的营养需求。另一方面,钙在土壤中易移动,以往研究表明,700 mm 降水量下全耕层施钙时,棕壤中肥料钙淋失强烈[19],沿海砂质土壤对钙的吸附率极低,对贝壳粉钙肥吸附率仅 11.0%～19.2%,一次中等强度降水可使表层的贝壳粉钙集中分布在 10—15cm,迁移深度可至 20cm[20],即大部分钙肥通过淋溶方式迁移出花生荚果层土壤,花生施用钙肥其淋失量可能远大于吸收量,因而沿海砂质旱地花生产区钙肥宜分次施用,或结合有机肥施用,同时应控制适宜的灌溉量以提高钙的生物有效性与钙的利用水平。

3.2 下针期不同土壤水分对花生生长的影响与钙调控

花生下针期是花生需水的关键时期[21],本研究结果表明,在耕作风砂土上种植花生,开花下针期保持约 75% 田间持水量最适合花生的生长,其 SPAD 值、光合速率与根系活力最高,而土壤含水量较高或较低均不利于生育期的光合作用与干物质的累积,这可能是土壤较旱时,叶片为了保存水分的散失,气孔开张度小,气孔吸收 CO_2 较弱,相应的光合作用处于较弱水平,也有研究表明随着干旱胁迫加重,底物供应不足而限制了呼吸作用而影响生理代谢过程[22],而当土壤水分较多时,土壤缺氧,阻碍植株根系正常呼吸,使 TCA 途径受到抑制[22],进而影响到叶片气孔的开张以及光合作用。本研究也证实,花生叶片 SPAD 值、光合速率、气孔导度与根系活力、产量等具有显著正相关性,根系生长受阻,必然也影响叶片叶绿素的合成、气孔导度、光合作用以及产量形成。

根据旱情等级标准(SL424-2008),土壤相对湿度介于 50% 与 60% 之间的属于轻度干旱。夏旱为福建沿海花生生产的主要限制因素,而夏旱发生又多值花生开花下针期。本研究表明,花生开花下针期至结荚初期在 55% 的土壤田间持水量条件下,花生叶片 SPAD 值、净光合速率、水分利用效率及产量等均随贝壳粉钙肥用量的增加而增加,说明了轻度干旱条件下增施钙肥一定程度上可缓解旱情,这与姜义宝[13]等对干旱胁迫下外源钙对苜蓿生长影响的研究结果基本一致,其原因可能是一方面施肥提高了蒸腾失水量,减少了无效蒸发,提高了蒸腾/蒸发量,从而提高了水分利用效率,使得旱情得到一定程度缓解[23]。另一方面,随着钙、钙调素作为细胞内功能调节第二信使物质的发现,对钙的功能有了新的认识,钙与钙调蛋白在抗逆中的作用也被逐步了解,为了应对环境胁迫,Ca^{2+} 由质膜、液泡膜和内质网膜的 Ca^{2+} 通道进入胞质,产生钙瞬变与钙振荡,传递到钙信号靶蛋白,引起特异的生理反应以增强对逆境的抗性,如 SOD、POD 调节、脂膜透性调节与气孔调节等,但作用机理尚不清楚[24-26]。上述结果说明,闽东南沿海花生耕作风砂土增施钙肥,不仅是提供钙素营养需要,也是季节性抗旱的有效措施,这对于指导沿海花生生产具有现实的意义。

3.3 耕作风砂土花生的水钙交互效应

以往研究表明,不同作物间水分与氮、磷、钾肥间存在显著耦合效应,表现出协同效应或拮抗效应[27-28],但本研究表明,水分与钙肥两因子均显著影响花生生理及产量,但二者交互效应除根系活力外均不显著(表 1 ～表 3)。这可能是一方面耕作风砂土保水能力极低,水分对产量的效应要大大高于钙肥,因而水钙交互效应得以弱化,另一方面,供试沿海耕作风砂土的肥力低下,养分缺乏,如氮、钾及中微量元素,随着试验处理钙水平的提高,其它土壤养分可能逐渐取代钙成为养分限制因子而影响了产量形成,也弱化了水钙的交互作用,此外,土壤施用高量贝壳粉钙肥后,肥料中 CO_3^{2-} 的固磷作用也可能严重降低了磷的生物有效性而影响产量形成[29],这些因素均影响到花生的水钙交互过程与效应,有关这方面的研究还有待进一步深入。

参考文献:

[1] 周恩生. 福建沿海花生空秕诊断及其防治技术[J]. 中国土壤与肥料, 2008, (5): 53-56.
Zhou E S. The diagnose of sterile grain of peanut and its control in Fujian littoral[J]. China Soils Fert., 2008, (5): 53-56.

[2] 张二全, 武占社, 李英霞, 等. 土壤钙素水平对花生施钙效果的影响[J]. 花生科技, 1994, (2): 4-6.
Zhang E Q, Wu Z S, Li Y X *et al*. Effects of soil calcium levels on influences of applying calcium fertilizer to peanut[J]. Peanut Sci. Technol., 1994, (2): 4-6.

[3] 周恩生, 陈家驹, 王飞, 等. 钙胁迫下花生空秕微区特征及植株生理生化反应变化[J]. 福建农业学报, 2008, 23(3): 318-321.
Zhou E S, Chen J J, Wang F *et al*. Microanalysis characteristics and physiological and biochemical responses of sterile gain of peanut under Ca stress[J]. J. Fujian Agric., 2008, 23(3): 318-321.

[4] 张君诚, 蔡宁波, 张新文, 庄伟建. 钙影响花生胚胎发育P败育特异蛋白质的筛选与鉴定[J]. 作物学报, 2007, 33(5): 814-819.
Zhang J C, Cai N B, Zhang X W, Zhuang W J. Isolation and identification of specific expressed proteins from peanut (*Arachis hypogaea* L.) development/abortion embryo mediated by calcium [J]. Acta Agron. Sin., 2007, 33(5): 814-819.

[5] 周录英, 李向东, 王丽丽, 等. 钙肥不同用量对花生生理特性及产量和品质的影响[J]. 作物学报, 2008, 34(5): 879-885.
Zhou L Y, Li X D, Wang L L *et al*. Effects of different Ca applications on physiological characteristics, yield and quality in peanut[J]. Acta Agron. Sin., 2008, 34(5): 879-885.

[6] 周录英, 李向东, 王丽丽. 氮、磷、钾、钙肥不同用量对花生光合性能及产量品质的影响[J]. 花生学报, 2006, 35(2): 11-16.
Zhou L Y, Li X D, Wang L L *et al*. Effects of different application rates of N, P, K, Ca fertilizer on photosynthesis properties, yield and kernel quality of peanut[J]. J. Peanut Sci., 2006, 35(2): 11-16.

[7] 严美玲, 李向东, 林英杰, 等. 苗期干旱胁迫对不同抗旱花生品种生理特性、产量和品质的影响[J]. 作物学报, 2007, 33(1): 113-119.
Yan M L, Li X D, Lin Y J *et al*. Effects of drought during seedling stage on physiological traits, yield and quality of different peanut cultivars[J]. Acta Agron. Sin., 2007, 33(1): 113-119.

[8] 姜慧芳. 花生的抗旱育种[A]. 孙大容. 花生育种学[M]. 北京: 中国农业出版社, 1998. 256-275.
Jiang H F. Drought resistant breeding of peanut[A]. Sun D R. Science of peanut breeding[M]. Beijing: China Agriculture Press, 1998. 256-275.

[9] 郑海青. 闽东南花生、甘薯气象条件分析[J]. 气象, 2003, 29(3): 53-57.
Zheng H Q. Analysis of meteorological conditions for peanut and sweet potato growing in southeast Fujian[J]. Meteorological, 2003, 29(3): 53-57.

[10] 马强, 宇万太, 沈善敏, 张璐. 旱地农田水肥效应研究进展[J]. 应用生态学报, 2007, 18(3): 665-673.
Ma Q, Yu W T, Shen S M, Zhang L. Research advances in water-fertilizer effect on dry and farmland[J]. Chin. J. Appl. Ecol., 2007, 18(3): 665-673.

[11] Flavio H, Gutierrez B, Grant W T. Phosphorus nutrition and water deficits in field-grown soybeans[J]. Plant Soil, 1999, 207(1): 87-96.

[12] 张凤翔, 周明耀, 郭文善. 不同氮素水平下孕穗开花期土壤水分对冬小麦产量效应的研究[J]. 农业工程学报, 2006, 22(7): 52-55.
Zhang F X, Zhou M Y, Guo W S. Effects of soil moisture on yield of winter wheat in South China under different nitrogenous fertilizers[J]. Trans. Chin. Soc. Agric. Eng., 2006, 22(7): 52-55.

[13] 姜义宝, 崔国文, 李红. 干旱胁迫下外源钙对苜蓿抗旱相关生理指标的影响[J]. 草业学报, 2005, 14(5): 32-36.
Jiang Y B, Cui G W, Li H. Effect of coating medicago sativa seeds in calcium on drought resistance and interrelated physiological indexes under drought conditions[J]. Acta Pratac. Sin., 2005, 14(5): 32-36.

[14] 王广恩, 金卫平, 李俊兰, 等. 干旱胁迫下外源钙对棉花幼苗抗旱相关生理指标的影响[J]. 华北农学报, 2010, 25(增刊): 115-118.
Wang G E, Jin W P, Li J L *et al*. Effect of exogenoux calcium on drought resistance interrelated physiological indexes in cotton seedling under drought stress conditions[J]. Acta. Agric. Boreali-Sin., 2010, 25(Suppl.): 115-118.

[15] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2003. 119-120.
Li H S. Principle and technology plant physiology and biochemistry experiment[M]. Beijing: Higher Education Press, 2003. 119-120.

[16] 鲁如坤. 土壤与农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000. 205-226, 325-336.
Lu R K. The analytical methods for soil and agrochemistry[M]. Beijing: China Agricultural Science Technology Press, 2000. 205-226, 325-336.

[17] 闫春娟, 韩晓增, 王文斌, 宋书宏. 水钾耦合对大豆光合特性及其产物积累运转的影响[J]. 中国油料作物学报, 2012, 34(1): 48-55.
Yan C J, Han X Z, Wang W B, Song S H. Effects of water-potassium coupling on photosynthetic characteristics and photoassimilation in soybean[J]. Chin. J. Oil Crop Sci., 2012, 34(1): 48-55.

[18] 孙彦浩, 陶寿祥. 花生的钙素营养特点和钙肥施用的研究概况[J]. 中国油料, 1991, (3): 81-82, 57.
Sun Y H, Tao S X. General study situation of calcium nutrient characteristics and calcium fertilizer application for peanut[J]. Chin. Oil, 1991, (3): 81-82, 57.

[19] 周卫，林葆. 棕壤中肥料钙迁移与转化模拟[J]. 土壤肥料，1996，(1)：17-23.
Zhou W, Lin B. Simulation of migration and transformation of calcium fertilizer[J]. Soil Fert., 1996, (1): 17-23.

[20] 何春梅，王飞，李清华，等. 沿海耕作风砂土对不同钙肥品种吸附－解吸特性的影响[J]. 福建农业学报，2011，26(6)：1039-1044.
He C M, Wang F, Li Q H *et al*. The effects of coastal wind sandy soil on the adsorption-desorption of different calcium variety fertilizer[J]. Fujian J. Agric. Sci., 2011, 26(6): 1039-1044.

[21] 官春云. 作物栽培学[M]. 北京：中国农业出版社，1997. 211-219.
Guan C Y. Subject of crop cultivation[M]. Beijing: China Agriculture Press, 1997. 211-219.

[22] 李志霞，秦嗣军，吕德国，聂继云. 植物根系呼吸代谢及影响根系呼吸的环境因子研究进展[J]. 植物生理学报，2011，47(10)：957-966.
Li Z X, Qin S J, Lu D G, Nie J Y. Research progress in root respiratory metabolism of plant and the environmental influencing factors[J]. J. Plant Physiol., 2011, 47(10): 957-966.

[23] 张仁陟，李小刚，胡恒觉. 施肥对提高旱地农田水分利用效率的机理[J]. 植物营养与肥料学报，1999，5(3)：221-226.
Zhang R Z, Li X G, Hu H J. The mechanism of fertilization in increasing water use efficiency[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 1999, 5(3): 221-226.

[24] 郭秀林，刘子会，李运朝，等. Ca^{2+}/CaM 对玉米干旱信息传递的介导作用研究[J]. 作物学报，2005，31(8)：1001-1006.
Guo X L, Liu Z H, Li Y C *et al*. Function of Ca^{2+}/CaM on transduction of stress signal[J]. Acta Agron. Sin., 2005, 31(8): 1001-1006.

[25] 毛国红，宋林霞，孙大业. 植物钙调素结合蛋白研究进展[J]. 植物生理与分子生物学学报，2004，30(5)：481-488.
Mao G H, Song L X, Sun D Y. Progress of study on calmodulin-binding proteins in plants[J]. J. Plant Physiol. Mol. Biol., 2004, 30(5): 481-488.

[26] 周卫，汪洪. 植物钙吸收、转运及代谢的生理和分子机制[J]. 植物学通报，2007，24(6)：762-778.
Zhou W, Wang H. The physiological and molecular mechanisms of calcium uptake, transport, and metabolism in plants[J]. Chin. Bull. Bot., 2007, 24(6): 762-778.

[27] 李邵，薛绪掌，郭文善，等. 水肥耦合对温室盆栽黄瓜产量与水分利用效率的影响[J]. 植物营养与肥料学报，2010，16(2)：376-381.
Li S, Xue X Z, Guo W S *et al*. Effects of water and fertilizer coupling on yield and water use efficiency in greenhouse potted cucumber[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2010, 16(2): 376-381.

[28] 李国生，王志琴，袁莉民，等. 结实期土壤水分和氮素营养对水稻产量与品质的交互影响[J]. 中国水稻科学，2008，22(2)：161-166.
Li G S, Wang Z Q, Yuan L M *et al*. Coupling effects of soil moisture and nitrogen nutrient during grain filling on grain yield and quality of rice[J]. Chin. J. Rice Sci., 2008, 22(2): 161-166.

[29] 吴刚，李金英，曾晓舵. 土壤钙的生物有效性及与其它元素的相互作用[J]. 土壤与环境，2002，11(3)：319-322.
Wu G, Li J Y, Zeng X D. Bio-avaivability of calcium in soil and the interaction with other elements[J]. Soil Environ. Sci., 2002, 11(3): 319-322.