

水氮互作对花针期花生生理特性及生长的影响

修俊杰 刘学良

(铁岭市农业科学院, 112000, 辽宁铁岭)

摘要 为明确花针期水氮互作对花生生理特性及生长的影响, 试验于铁岭市花生示范基地防雨棚中进行, 设正常灌水和花针期干旱处理, 副处理设 0、90、180kg/hm² (分别为 N0、N1、N2) 共 3 个氮水平, 研究水、氮互作对花生植株性状指标、内源保护酶活性等的影响。结果表明, 与对照相比, 干旱处理的各性状指标、过氧化氢酶 (CAT) 活性、可溶性蛋白质含量、根系活力和干物质重降低, 叶片超氧化物歧化酶 (SOD) 和过氧化物酶 (POD) 活性、丙二醛 (MDA) 和脯氨酸 (Pro) 含量、根冠比 (R/S) 增大。N1 处理最有利于植株抗旱性的整体提高, N0 和 N2 处理则表现相反。复水后 10d, 干旱处理的花生内源保护酶活性、可溶性蛋白质、MDA、Pro 含量迅速恢复至正常处理水平, 但根系活力和干物质重仍低于正常处理水平。并且施氮肥有利于提高干旱处理的各性状指标, 如花生叶片内源保护酶活性、可溶性蛋白质和 Pro 含量、根系活力、干物质重、R/S 和水分胁迫指数。综上, N1 处理较适宜, 耐旱性较好。因此, 可以通过施氮肥提高花生的抗氧化能力, 进而提高抗旱性。

关键词 花生; 花针期; 水氮互作; 生理特性

花生是我国种植面积较大的油料作物, 也是我国粮油作物中在产量、消费量及贸易量均占优势的特征农产品之一^[1], 我国的花生种植区域主要集中在干旱、半干旱地区^[2]。近几年, 随着全球变暖, 季节降雨分布不均, 干旱已成为非生物胁迫环境中作物产量和品质下降的主要逆境因子之一^[3-6]。据统计^[7], 我国花生每年因干旱造成的减产达 20% 以上。花生是耐旱作物, 其抗旱性是复杂的生理代谢过程, 是由多基因共同控制的数量性状^[8-9]。氮是作物生长发育所必需的大量营养元素, 但是氮必须溶解在水中才能被根吸收, 因此干旱胁迫会影响植物对氮的吸收, 而氮肥的施用一定程度上有利于提高作物的抗旱性^[10]。有研究^[11-12]表明, 干旱胁迫或土壤中缺氮肥会引起作物叶片内源保护酶活性降低、膜脂过氧化物和活性氧积累量增加、光合能力下降等不利影响, 最终导致作物产量降低。但干旱胁迫条件下, 因氮肥的种类和用量不同, 对作物生理代谢及生长发育产生的影响也不同^[10, 13-15]。有研究^[16-17]表明, 干旱条件下, 适量氮肥能促进植株生长, 增加作物叶片内源保护酶活性, 降低丙二醛 (MDA) 含量, 提高叶片抗氧化能力, 从而提高抗旱性。但也有研究^[18-19]认为, 水分胁迫条件下, 施氮肥能促进植物地上部生长, 加速蒸腾作用, 导

致土壤中水分流失, 加剧了干旱胁迫。

前人^[20-22]已从玉米、水稻和小麦等作物的农艺性状、叶片光合特性、根系活力和内源激素等方面对植物抗旱机理进行了深入研究。花生花针期是对水肥最为敏感的时期, 有关氮肥在干旱胁迫及复水后对花针期植株形态特征、内源保护酶活性等指标变化与抗旱能力的强弱关系研究较少。本文在前人研究的基础上, 系统深入地研究了花生花针期水分胁迫条件下, 不同施氮水平对植株性状指标、叶片内源保护酶活性、可溶性蛋白质含量、MDA 含量、根系活力及干物质积累量等变化规律的影响, 探索土壤水分胁迫条件下氮影响花生的酶学基础及代谢机理, 旨在为解决花针期短期干旱问题如何运用合理的氮肥来调控, 改善花生的抗旱性, 进一步改善品质并获得高产提供科学的理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验于 2020-2021 年在辽宁省铁岭市花生试验示范基地进行, 采用盆栽方法, 遇到雨天有移动防雨棚。供试土壤为轻砂壤土, 有机质 1.38%、全氮 0.096%、有效氮 (N) 124.5mg/kg、有效磷 (P₂O₅) 167mg/kg、有效钾 (K₂O) 150mg/kg、pH 5.2, 土

作者简介: 修俊杰, 主要从事花生育种及栽培研究, E-mail: 544707915@qq.com

刘学良为通信作者, 主要从事花生育种及栽培研究, E-mail: lxliang0@yeah.net

基金项目: 农业攻关及产业化优质、高产花生增产提效关键技术与集成应用 (2020JH2/10200010)

收稿日期: 2022-06-27; 修回日期: 2022-07-15; 网络出版日期: 2022-12-26

壤田间持水量 31.01%。试验所用盆钵直径 32cm，高 25cm，每盆装土 17kg，土壤自然风干、捣碎、过筛后装盆，用水沉实。供试品种为当前主栽品种珍珠豆型花生铁引花 2 号（原远杂 9102）。于 5 月 15 日播种，9 月 15 日收获。每盆定壮苗 2 株。

试验设置土壤水分和氮素 2 个处理，主处理为水分胁迫，设置 2 个水平，一是正常灌水，土壤相对含水量始终保持在 75%±5%；二是花针期短期干旱，于 7 月 25 日，将正常灌水的植株停止灌水，土壤含水量自然减少，持续干旱 8d，植株出现萎蔫时复水，以后保持田间持水量在 75%±5% 直至收获。

副处理为 3 个氮素处理，不施氮 N0kg/hm²（N0）、中氮 N90 kg/hm²（N1）和高氮 N180kg/hm²（N2）。肥料种类为尿素，肥料以基肥方式，于装盆前一次性混匀施入。试验共 6 个处理组合，随机区组排列，每处理组合种植 30 盆，其他管理同大田。

铁引花 2 号（原远杂 9102）是目前我国的主栽品种，该品种的 2 年试验对水氮互作反应基本一致，试验数据较多，因此采用 2 年平均数据进行分析。

1.2 测定项目和方法

1.2.1 土壤含水量 在水分胁迫处理期间，每天 18:00 用 SU-LZW 土壤水分仪测土壤相对含水量。测定方法是在每盆植株与盆体边缘的中间部分均匀取 5 点测量，求其平均数，每个处理重复 10 次。

1.2.2 根系活力和干物质积累量 分别于干旱处理结束当天（T1）和复水后 10d（T2），每处理随机选择长势均匀一致的花生植株 10 株，取其中 3 株用流水将根系冲洗干净后取出，分别装进自封袋带回实验室后用 TTC 还原法测整株鲜根系活力^[23]。同时取 5 株主茎倒数第 3 片复叶，分别装进自封袋放于-40℃冰箱中用于内源保护酶活性、可溶性蛋白质和 MDA 含量等生理指标测定。剩余完整的 5 株按根、茎、叶、果等不同器官分开，105℃杀青 0.5h，80℃烘干至恒重，用精度为 0.01g 的电子天平测干物质积累量，并计算出水分胁迫指数（WSI）。

$$WSI (\%) = (\text{对照值} - \text{处理值}) / \text{对照值} \times 100.$$

1.2.3 内源保护酶活性、可溶性蛋白质、MDA 及 Pro 含量 采用考马斯亮蓝法^[23]测定可溶性蛋白质含量，采用氮蓝四唑（NBT）还原法^[23]测定超氧化

物歧化酶（SOD）活性，采用高锰酸钾滴定法^[23]测定过氧化氢酶（CAT）活性，采用愈创木酚法^[23]测定过氧化物酶（POD）活性，采用硫代巴比妥酸比色法^[23]测定 MDA 含量，采用茚三酮显色法^[23]测定 Pro 含量。

1.3 数据处理

采用 Excel 2007 处理数据和作图，利用软件 Stst 2013 进行方差分析。

2 结果与分析

2.1 花针期水氮互作对花生土壤相对含水量的影响

由表 1 可知，花针期土壤短期干旱后，经过干旱处理的花生植株土壤相对含水量显著降低，降低幅度随着氮素含量的增加而逐渐加大，这说明在干旱条件下，施氮肥易加剧土壤水分的流失。复水后 10d，土壤水分条件得到改善，干旱处理花生植株的土壤含水量恢复至正常处理水平。不同施氮水平的处理之间土壤含水量无显著差异。

表 1 花针期水氮互作对花生土壤相对含水量的影响
Table 1 Effects of nitrogen fertilizer on the soil relative water content under water-stress of peanut during pod-pin stage %

水分处理 Water treatment	T1			T2		
	N0	N1	N2	N0	N1	N2
干旱处理 Drought-stress	32.75c	25.19c	19.31c	77.15c	78.13c	76.83c
正常灌水 Well-watering	75.95a	72.87a	72.12a	75.04a	74.78a	74.01a

不同小写字母表示处理间在 5%水平上差异显著，下同
Different lowercase letter means significant difference at the 5% level, the same below

2.2 花针期水氮互作对花生植株性状的影响

由表 2 可知，花针期土壤短期干旱胁迫条件下，与正常灌水处理相比，根长、主茎高、侧枝长、分枝数和主茎叶数均显著降低，但干旱胁迫没有改变花生植株各性状指标随施氮量的增加而增大的趋势。表明氮素对植株生长表现出明显促进作用。T2 时干旱处理花生各性状指标迅速增加，其中根的增长明显高于正常灌水处理，而其他植株性状增长仍低于正常灌水处理。随着花生生育进程的推进，复水后不同施氮水平的各性状指标较干旱时继续增大，并且随施氮量的增加而增大的趋势没变。

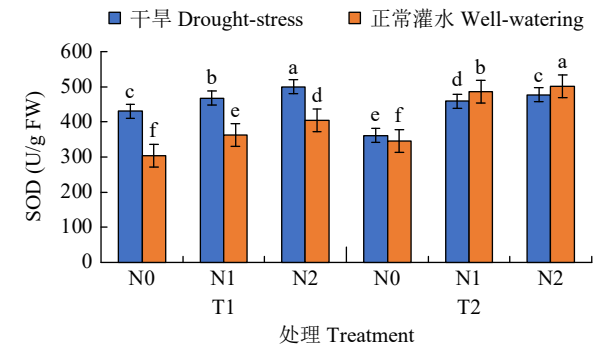
2.3 花针期水氮互作对花生叶片内源保护酶活性的影响

2.3.1 SOD 活性 由图 1 可知，T1 时干旱处理的

表 2 花针期水氮互作对花生植株性状的影响
Table 2 Effects of irrigation and nitrogen fertilizer on peanut characteristics at pod-pin stage

水分处理 Water treatment	氮素水平 Nitrogen level	T1					T2				
		根长 Root length (cm)	主茎高 Main stem height (cm)	侧枝长 Branch length (cm)	分枝数 Branch number	主茎叶数 Main stem leaves	根长 Root length (cm)	主茎高 Main stem height (cm)	侧枝长 Branch length (cm)	分枝数 Branch number	主茎叶数 Main stem leaves
干旱处理 Drought-stress	N0	27.5f	16.4e	18.1f	5.9d	12.9e	31.1e	18.2f	20.4e	6.3e	13.5e
	N1	30.9d	21.2c	23.8d	7.3c	13.8d	35.5c	24.9d	26.8c	8.2c	14.9d
	N2	34.7b	25.5b	29.1b	8.2b	15.2b	40.1a	30.5b	32.4b	9.4b	16.4b
正常灌水 Well-watering	N0	28.6e	19.1d	20.9e	6.2d	13.1e	30.7e	20.8e	23.7d	6.8d	14.1e
	N1	32.3c	25.3b	28.2c	8.2b	14.5c	34.2d	29.2c	31.8b	9.3b	15.7c
	N2	36.8a	30.8a	35.4a	9.5a	16.1a	38.4b	36.3a	38.7a	10.8a	17.8a

SOD 活性显著高于正常灌水处理,并且干旱处理和正常灌水处理 SOD 活性均随施氮量的增加而增强。说明干旱胁迫条件下,花生有较强的耐旱能力,并且施氮肥有利于提高花生的抗旱性。T2 时干旱处理的 SOD 活性降低,处理的差异较小,说明干旱处理过的 SOD 活性随土壤中水分条件改善已恢复至正常水处理水平,并且 2 个处理 SOD 活性均随施氮量的增加而增大。



不同小写字母表示处理间在 5%水平差异显著,下同
Different lowercase letters means significant difference at the 5% level, the same below

图 1 花针期水氮互作对 SOD 活性的影响
Fig.1 Effects of irrigation and nitrogen fertilizer on the activities of SOD at the pod-pin stage

2.3.2 POD 活性 由图 2 可知, T1 时干旱处理条件下 POD 活性明显增加,显著高于正常灌水处理,并且干旱处理的 POD 活性随施氮量的增加活性加大。干旱胁迫处理和正常灌水处理 POD 活性均表现 N2>N1>N0,说明施氮可以提高花生抗旱性。T2 时干旱胁迫处理的 POD 活性降低,低于正常灌水处理,但是处理的 POD 活性随氮量增加而增大的趋势不变。

2.3.3 CAT 活性 由图 3 可知, T1 时干旱胁迫条件下,花生叶片 CAT 活性显著低于正常灌水处理。干旱处理过花生植株叶片 CAT 活性表现为 N1>

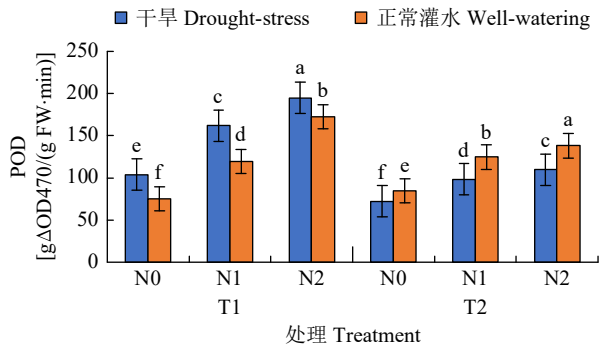


图 2 花针期水氮互作对 POD 活性的影响
Fig.2 Effects of irrigation and nitrogen fertilizer on the activities of POD at the pod-pin stage

N2>N0, 正常灌水处理 CAT 活性随施氮水平的增加而增大。T2 时 CAT 活性降低,干旱处理的 CAT 活性迅速恢复并接近正常处理水平,而且 2 个处理的花生叶片 CAT 活性均随施氮量的增加而增大。

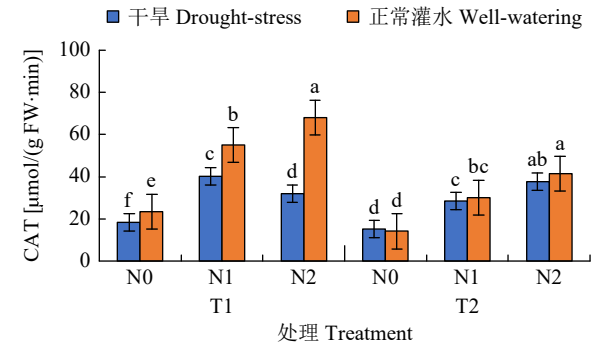


图 3 花针期水氮互作对 CAT 活性的影响
Fig.3 Effects of irrigation and nitrogen fertilizer on the activities of CAT at the pod-pin stage

2.4 花针期水氮互作对花生叶片可溶性蛋白质含量的影响

由图 4 可知, T1 时干旱胁迫条件下,可溶性蛋白含量低于正常灌水处理, N0、N1、N2 处理可溶性蛋白质含量分别降低 23.5%、14.3%、18.5%,以 N1 处理的降低幅度最小。T2 时可溶性蛋白质含

量仍低于正常灌水处理，干旱处理的 N0、N1、N2 处理叶片可溶性蛋白质含量分别降低 9.8%、4.3%、6.0%。与干旱处理结束时相比，复水后可溶性蛋白质含量降低幅度减小，说明干旱处理的可溶性蛋白质含量随着土壤中水分含量的增加而有所恢复。氮肥用量不影响花生叶片中可溶性蛋白质含量的变化趋势，T1 和 T2 时，不同施氮量的处理均表现为 N1>N2>N0。这说明氮肥不足或过量时对蛋白质运转不利。

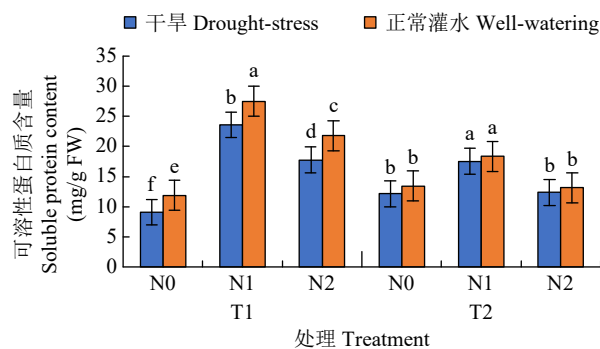


图 4 花针期水氮互作对可溶性蛋白质含量的影响
Fig.4 Effects of irrigation and nitrogen fertilizer on soluble protein contents at the pod-pin stage

2.5 花针期水氮互作对花生叶片 MDA 含量的影响

由图 5 可知，干旱胁迫条件下，T1 时花生植株叶片 MDA 含量显著增加，N0、N1、N2 处理的 MDA 含量较正常处理分别增加 35.7%、25.8%、68.6%，N1 的增加幅度最小。T1 时不同施氮量干旱处理的花生叶片 MDA 含量表现为 N0>N2>N1；而正常水处理的花生叶片 MDA 含量随施氮量的增加而减少。T2 时 MDA 含量随干旱的解除迅速减少，而正常灌水处理 MDA 含量随着细胞的衰老而增大，2 个处理差异不显著。复水后 MDA 含量在 N1、N2 之间差异较小，均明显低于 N0。这

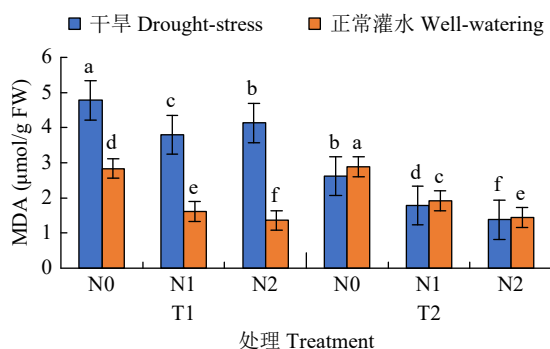


图 5 花针期水氮互作对 MDA 含量的影响
Fig.5 Effects of irrigation and nitrogen fertilizer on the content of MDA at the pod-pin stage

表明氮能提高花生抗旱能力，减轻细胞膜受损程度。

2.6 花针期水氮互作对花生叶片 Pro 含量的影响

由图 6 可知，干旱胁迫增加了 Pro 含量。T1 时 Pro 含量显著高于相应正常灌水处理。T2 时 Pro 含量均急剧降低，干旱处理的 Pro 含量仍高于相应正常处理。T1 和 T2 时 Pro 含量均表现为 N1>N2>N0。这说明氮能调节细胞渗透压，但是过量的氮不利于细胞液浓度提高。

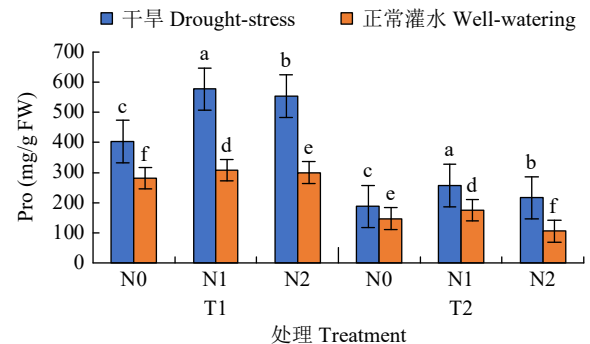


图 6 花针期水氮互作对 Pro 含量的影响
Fig.6 Effects of irrigation and nitrogen fertilizer on Pro contents at the pod-pin stage

2.7 花针期水氮互作对花生根系活力的影响

由图 7 可知，T1 时干旱处理的花生植株根系活力明显低于正常灌水处理，N0、N1、N2 处理的降低幅度分别为 32.4%、21.6%、47.4%。干旱处理的根系活力表现为 N1>N2>N0，正常灌水处理根系活力表现为随施氮量的增加而增大。T2 时根系活力迅速增加，干旱处理的花生根系活力显著高于正常灌水处理，且处理的根系活力均随施氮量的增加而增大。进一步分析施氮肥能提高干旱胁迫处理和正常灌水处理根系活力。

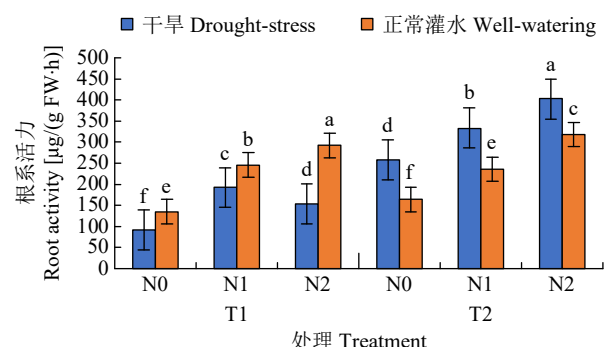


图 7 花针期水氮互作对根系活力的影响
Fig.7 Effects of irrigation and nitrogen fertilizer on root vigor at the pod-pin stage

2.8 花针期水氮互作对花生干物质积累量的影响

由表 3 可知，T1 时花生植株干物质积累量低

于 CK，但根冠比高于 CK。水分处理的干物质积累量、水分胁迫指数均随施氮量的增加而显著增大，水分处理的根冠比以 N1 为最小，其次为 N2、N0。复水对花生植株有显著的补偿效应，T2 时干物质积累量随着土壤中水分条件的改善显著增加，但应

低于正常处理，并随施氮水平的增加而增大的趋势没变。干旱处理的花生根冠比仍高于 CK，仍以 N1 处理为最小。与干旱处理比较，水分胁迫指数在复水后 N0 处理增大了 0.021；在 N1 和 N2 处理较干旱时分别降低了 0.034、0.09，这表明施氮肥能提高

表 3 花针期水氮互作对花生干物质积累量的影响
Table 3 Effects of irrigation and nitrogen fertilizer on dry matter accumulation in peanut at the pod-pin stage

水分处理 Water treatment	氮素水平 Nitrogen level	T1			T2		
		干物质积累量 Dry matter accumulation (g)	根冠比 Root/shoot	水分胁迫指数 Water stress index	干物质积累量 Dry matter accumulation (g)	根冠比 Root/shoot	水分胁迫指数 Water stress index
干旱处理 Drought-stress	N0	192.2b	0.085a	0.071c	327.1c	0.075b	0.092a
	N1	255.1a	0.077b	0.109b	416.8b	0.076b	0.075b
	N2	269.3a	0.078b	0.143a	475.3a	0.078a	0.053c
正常灌水 Well-watering	N0	206.8c	0.084a		360.3c	0.062d	
	N1	286.3b	0.076b		450.8b	0.063d	
	N2	314.2a	0.077b		502.1a	0.065c	

复水对花生植株生长的补偿效应。

3 讨论

本试验结果表明，干旱胁迫条件下，土壤中含水量随施氮水平的增加而减少，这表明氮素加速了花生土壤中水分条件的恶化。这主要是由于氮肥促进了花生地上部的生长，加剧了蒸腾作用，加速了土壤水分的流失。Pinheiro 等^[24]研究指出，水分胁迫条件下，作物会脱落部分叶片，减少体内水分的流失，同时将叶片中的营养物质转移到根、茎等器官，干旱解除后作物能快速恢复生长。本研究发现，干旱胁迫下花生植株各性状指标均降低，并随施氮水平的增加各性状指标相应地增大。复水后根系恢复生长，干旱处理的根系显著高于正常灌水处理，这是花生花针期对季节性干旱的适应性调节。其他植株性状指标仍低于正常灌水处理，但随施氮水平的增加而增大的趋势没变。

水分是影响作物生长发育的重要环境因素^[25]。在干旱胁迫下，植物体内活性氧自由基的积累加快，导致细胞膜受损，而防御系统中的内源保护酶能有效地清除活性氧自由基，这是作物抗逆性机制的表现^[26]。本试验发现，花针期短期干旱胁迫下，SOD 和 POD 活性明显升高，CAT 活性、可溶性蛋白质含量呈下降趋势，MDA 和 Pro 含量增大。因为干旱胁迫下，SOD 活性增大，歧化反应 H₂O₂ 的生成量增多，而 CAT 活性越小，H₂O₂ 的清除越少，H₂O₂ 在植物体内大量积累，细胞膜脂的氧化程度加

大，MDA 含量增大。本研究还发现，干旱胁迫下，SOD 活性随施氮量的增加而增加，CAT 活性、可溶性蛋白质和 Pro 含量以 N1 处理最高，MDA 含量在 N1 处理最低。可见干旱胁迫下，适量的施氮肥（90kg/hm² 左右），花生叶片细胞膜伤害最小。不施氮肥（0kg/hm²）或是过量施氮肥（180kg/hm²）则表现相反。复水后 10d，花生叶片的内源保护酶（SOD、POD、CAT）活性，可溶性蛋白质、MDA、Pro 含量迅速恢复至正常水处理。这说明复水后对花生植株生长有明显补偿效应。研究^[27-29]发现，逆境胁迫下，施氮肥能提高植物叶片 POD、CAT、SOD 活性，减小 MDA 含量，从而增强植物的抗旱性。本研究中还发现，花针期土壤短期干旱胁迫下，水分处理的 SOD、POD 活性均随施氮量的增加而增大，但 CAT 活性、可溶性蛋白质和 Pro 含量以 N1 处理最高，MDA 含量以 N1 处理最低。可见，在本试验的 3 个氮素水平中，以 N1 处理花生膜脂的过氧化程度最低，细胞膜伤害最小，不施氮肥（0kg/hm²）或是过量施氮肥（180kg/hm²）则表现相反。复水后适量的氮肥能促进花生快速恢复生长。试验还发现，复水后施氮肥能提高花生叶片内源保护酶活性、可溶性蛋白和 Pro 含量，降低 MDA 含量，这说明复水后氮肥能促进花生快速恢复生长。

根系是作物感应土壤中水分状况的重要器官。已有研究^[21-22]发现，水氮互作情况下能显著影响根系活力，并且随胁迫程度的加剧，根系活力明显降

低，而施氮肥能促进根系生长，增加根系活力。本研究表明，花针期短期干旱胁迫明显地抑制了花生的生长发育，表现为干旱处理的花生根系活力、干物质积累量显著降低，根冠比增大。干旱胁迫下，适量施氮肥（ $90\text{kg}/\text{hm}^2$ ）能提高花生根系活力，提高抗旱性；不施氮肥（ $0\text{kg}/\text{hm}^2$ ）或过量施氮肥（ $180\text{kg}/\text{hm}^2$ ）则相反。水分处理的花生干物质积累量则是随施氮水平的增加而显著增大；干旱胁迫下的花生根冠比以 N1 处理最低，N0 和 N2 处理较高；水分胁迫指数随施氮水平的增加而增大，施氮量越高，抑制越明显。这可能是过量的氮肥加剧了土壤中水分状况的恶化，降低了根系活力，进而影响干物质积累。复水后 10d，干旱处理的根系活力、干物质积累量迅速增加，根冠比降低，干旱处理的花生根系活力超过了正常灌水处理，干物质积累量则低于正常灌水处理，根冠比高于正常灌水处理。

在试验过程中发现，复水后干旱处理的花生植株产生了大量的新根。可见，土壤水分条件的改善促进了根的生长，提高了对水和氮的吸收，表现出了快速生长趋势，弥补了因干旱胁迫造成的损失。复水后 N0 处理的水分胁迫指数继续增大，而 N1 与 N2 处理的水分胁迫指数较干旱时降低，这说明氮能提高水分对花生生长的补偿效应。同时复水后水分处理的根系活力、干物质积累量、根冠比均随施氮量的增加而增大，说明施氮肥有利于提高花生根系对水、氮的吸收。

4 结论

综上所述，花针期干旱后复水，施氮肥能显著影响花生的植株性状、内源保护酶活性、可溶性蛋白质含量、膜脂过氧化反应、根系活力及干物质积累量等。本试验在花针期土壤短期干旱胁迫中设置的 3 个施氮水平，以 $90\text{kg}/\text{hm}^2$ 较适宜。不施氮肥（ $0\text{kg}/\text{hm}^2$ ）和过量施氮肥（ $180\text{kg}/\text{hm}^2$ ）均不利于花生抗旱性提高。因为花针期干旱胁迫下，花生通过叶片保护酶活性、根系活力等生理生化过程综合调节整体的抗旱性，复水后这些指标快速恢复至正常处理，甚至高于正常处理指标。所以干旱后及时浇水，才能保证植株正常生长，进而实现高产。本研究对指导花生生产上花针期遇干旱情况下合理施肥有积极的指导意义。本试验采用盆栽试验，容器有限，在一定程度上限制花生根系生长，不能完

全反映品种本身的特性，有待大田生产试验进一步验证。

参考文献

- [1] 张立伟, 王辽卫. 我国花生产业发展状况、存在问题及政策建议. 油料资源, 2020, 11(45): 116-122.
- [2] 郝西, 张俊, 丁红, 等. 不同花生品种抗旱性评价. 花生学报, 2020, 49(4): 47-51.
- [3] 张艳正. 不同耐性花生品种响应干旱胁迫的机理研究. 沈阳: 沈阳农业大学, 2018.
- [4] Mackay A. Climate change 2007: impacts, adaptation and vulnerability. Contribution of working group II to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Journal of Environmental Quality, 2008, 37(6): 2407.
- [5] 丁红, 张智猛, 戴良香, 等. 干旱胁迫对花生生育中后期根系生长特征的影响. 中国生态农业学报, 2013, 21(12): 1477-1483.
- [6] 姜慧芳, 任小平. 干旱胁迫对花生叶片 SOD 活性和蛋白质的影响. 作物学报, 2004, 30(2): 169-174.
- [7] Sun L, Hu R, Shen G, et al. Genetic engineering peanut for higher drought and salt tolerance. Food and Nutrition Sciences, 2013, 4(6): 1-7.
- [8] 赵小波, 张廷婷, 闫彩霞, 等. 花生中三个 LEA 基因的克隆与表达分析. 花生学报, 2016, 45(4): 14-19.
- [9] 陈容钦, 舒文, 葛奎, 等. 干旱胁迫训练对花生生长及胁迫相关基因表达的影响. 植物生理学报, 2017, 53(10): 1921-1927.
- [10] Abid M, Tian Z, Tahir A, et al. Nitrogen nutrition improves the potential of wheat (*Triticum aestivum* L.) to alleviate the effects of drought stress during vegetative growth periods. Front Plant Sciences, 2016, 7: 981.
- [11] 李广浩, 刘平平, 赵斌, 等. 不同水分条件下控释尿素对夏玉米产量和叶片衰老特性的影响. 应用生态学报, 2017, 28(2): 571-580.
- [12] 刘艳, 汪仁, 华利民, 等. 施氮量对玉米生育后期叶片衰老与保护酶系统的影响. 玉米科学, 2012, 20(2): 124-127.
- [13] 王慧, 李鑫, 陈梦妮. 水氮配合对不同耐旱性红小豆根际土壤酶活性的影响. 山西农业科学, 2020, 48(11): 1812-1819.
- [14] Du J, Shen T H, Xiong Q Q, et al. Combined proteomics, metabolomics and physiological analyses of rice growth and grain with heavy nitrogen application before and after drought. BMC Plant Biology, 2020, 20(1): 556.
- [15] 李鑫鑫, 刘洪光, 林恩. 基于 ^{15}N 示踪技术的干旱区滴灌葡萄氮素利用分析. 核农学报, 2020, 34(11): 2551-2560.
- [16] 石珊珊, 周苏玫, 尹钧, 等. 高产水平下水肥耦合对小麦旗叶光合特性及产量的影响. 麦类作学报, 2013, 33(3): 549-554.
- [17] 胡云平, 张静, 刘丹. 水肥耦合对春小麦叶片生态特性及产量的影响. 江苏农业科学, 2017, 45(12): 48-52.
- [18] 胡梦芸, 门福圆, 张颖君, 等. 水氮互作对作物生理特性和氮素利用影响的研究进展. 麦类作物学报, 2016, 36(3): 332-340.
- [19] 吕广德, 王超, 靳雪梅, 等. 水氮组合对冬小麦干物质及氮素积累和产量的影响. 应用生态学报, 2020, 31(8): 2593-2603.
- [20] Maranov A, Samedovam A, Shirvany T. Root-shoot relationships in plant adaptation to nitrogen deficiency develop. Plant Soil Science, 82: 147-154.
- [21] 张国盛, 张仁陟, 黄高宝. 水分胁迫条件下春小麦根系对施肥的响应. 草业学报, 2003, 12(3): 105-109.
- [22] 张凤翔, 周明耀, 周春林, 等. 水肥耦合对水稻根系形态与活力的影响. 农业工程学报, 2006, 22(5): 197-200.

- [23] 张立军, 樊金娟. 植物生理学实验教程. 北京: 中国农业大学出版社, 2007.
- [24] Pinheiro C, Passarinho J A, Ricardo C P. Effects of drought and re-watering on the metabolism of *Lupinus albus* organs. *Journal of Plant Physiology*, 2004, 161: 1203-1210.
- [25] Burgess S S O, Turner N C, White D A, et al. Tree roots: Conduits for deep recharge of soil water. *Oecologia*, 2001, 126: 158-165.
- [26] Jiang Y W, Huang B R. Drought and heat stress injury to two cool-season turfgrasses in relation to antioxidant metabolism and lipid peroxidation. *Crop Science*, 2001, 41(2): 436-442.
- [27] 张立新, 李生秀. 氮、钾、甜菜碱对水分胁迫下夏玉米叶片膜脂过氧化和保护酶活性的影响. *作物学报*, 2007, 33(3): 482-490.
- [28] Saneoka H, Moghaieb R E, Premcahandra G S, et al. Nitrogen nutrition and water stress effects on cell membrane stability and leaf water relation in *Agrostis palustris* Huds. *Environmental and Experimental Botany*, 2004, 52: 131-138.
- [29] 章崇玲, 曾国平, 陈建勋. 干旱胁迫对菜苔叶片保护酶活性和膜脂过氧化的影响. *植物资源与环境学报*, 2000, 9(4): 23-26.

Effects of Water and Nitrogen Interaction on Physiological Characteristics and Growth of Peanut during the Pod-Pin Stage

Xiu Junjie, Liu Xueliang

(Tieling Academy of Agricultural Sciences, Tieling 112000, Liaoning, China)

Abstract To clarify the effects of water and nitrogen interaction on physiological characteristics and growth of peanut during the pod-pin stage, the changes of traits of peanut plants, endogenous protective enzyme activity, soluble protein, MDA, root activity and dry matter weight in peanut leaves were examined with soil water stress. The experiment was conducted by a normal irrigation with a short drought treatment under the rainproof shelter of Tieling peanut demonstration base and each treatment was imposed by three nitrogen levels: 0, 90, 180kg N/ha (N0, N1, N2). The results showed that, compared with control, the character indexes of peanut, the activity of CAT, soluble protein content, root activity, and dry matter weight were reduced; SOD and POD activity, MDA and proline content, the root/shoot ratio (R/S) were increased. The drought resistant of peanut with N1 treatment had a good performance, and the N0 and N2 had a opposite performance. Ten days after rehydration, the endogenous protective enzyme activities, soluble protein, MDA and proline contents recovered rapidly, but root activity and dry matter weight were showed still lower than normal water treatment levels. In addition, N application could promote the traits of peanut plants, such as endogenous protective enzyme activities, soluble protein and proline content, root ability, dry matter weight, R/S, and reduced water stress index. To sum up, N1 treatment was the most suitable N application for the drought stress, and the antioxidant ability of peanut can be improved by optimal application of nitrogen fertilizer, and then enhance the drought resistance.

Key words Peanut; Pod-pin stage; Water and nitrogen interaction; Physiological characteristics