

生育后期干旱胁迫与施氮量对花生产量及氮素吸收利用的影响

张智猛¹, 戴良香¹, 慈敦伟¹, 张冠初^{1,2}, 田家明^{1,3}, 秦斐斐¹, 徐扬¹, 丁红^{1*}

(1. 山东省花生研究所, 山东 青岛, 266100; 2. 沈阳农业大学, 辽宁 沈阳, 110000; 3. 新疆农业大学, 新疆 乌鲁木齐, 830056)

摘要: 为明确生育后期水分胁迫下施氮对花生产量、氮素吸收及氮肥利用效率的影响, 以花育25号为材料, 采用双因素试验设计, 通过防雨棚土柱试验研究了不同水氮处理对花生氮素吸收、分配、产量及氮肥利用率的影响。在荚果充实期设置水分条件分别为充足灌水(W0)、轻度干旱胁迫(W1)和重度干旱胁迫(W2), 设置5个施氮(N)水平, 即0 kg·hm⁻² (N0)、45 kg·hm⁻² (N1)、90 kg·hm⁻² (N2)、135 kg·hm⁻² (N3)和180 kg·hm⁻² (N4)。结果表明, W1N2处理下花生经济产量、全株生物量、籽仁和全株氮素积累量均达最大值。与其它氮肥处理相比, 同一水分条件下适量施氮(N2)处理增加花生产量, 提高收获指数。花生各器官中来自于¹⁵N原子标记的肥料中的¹⁵N原子百分比随施氮量的增加而显著增加, 但增加幅度不同。正常供水和轻度干旱胁迫条件下花生植株氮肥利用率随施氮量的增加先增加后降低, 而中度干旱胁迫下氮肥利用率随施氮量的增加而降低。本试验条件下, W1N2处理(轻度干旱胁迫和施氮90 kg·hm⁻²)处理下花生干物质与氮素积累量适宜, 氮素向生殖器官分配比例和氮肥利用率较高。

关键词: 花生; 荚果充实期; 干旱胁迫; 氮素积累; 产量; 氮肥利用率

中图分类号: S565.2; Q945.15

文献标识码: A

文章编号: 1007-9084(2019)04-0614-08

Drought effects at late growth stage and nitrogen application rate on yield and N utilization of peanut

ZHANG Zhi-meng¹, DAI Liang-xiang¹, CI Dun-wei¹, ZHANG Guan-chu^{1,2}, TIAN Jia-ming^{1,3}, QIN Fei-fei¹, XU Yang¹, DING Hong^{1*}

(1. Shandong Peanut Research Institute, Qingdao 266100, China; 2. Shenyang Agricultural University, Shenyang 110000, China; 3. Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830056, China)

Abstract: To clarify the effect of nitrogen (N) application on peanut yield, N uptake and N use efficiency under water stress at later growth stage (pod filling stage), peanut cv Huayu25 was planted in soil column which was protected from rainfall by a mobile shelter. Soil water condition at pod filling stage and N application rate were used as 2 factors for experimental design. The soil water condition was performed in 3 levels: well-watered conditions (W0), mild drought (W1) and medium drought (W2) (the corresponding soil water contents were respectively 70%–75%, 55%–60% and 45%–50% of field moisture capacity). N application rates were set in 5 levels: 0 (N0), 45 kg·hm⁻² (N1), 90 kg·hm⁻² (N2), 135 kg·hm⁻² (N3) and 180 kg·hm⁻² (N4). Result showed that peanut economic yield, plant biomass, and N accumulation in seed and total plant were the highest under W1N2 treatment. Compared with other N application rates, yield and harvest index were increased in N2 treatment under the same water treatment. The Ndff (percentage of N derived from ¹⁵N fertilizer) in peanut organs were significantly increased with the increasing of N application rate, while the increasing range was different. The N use efficiency of peanut were increased initially and then decreased with the N application under well-water condition and mild drought stress. The N use efficiency decreased with the increase of N application under moderate drought stress. It was concluded that peanut dry matter and N accumulation under W1N2 treatment were optimal, and N distribution in reproductive organs and N use effi-

收稿日期: 2018-11-08

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFD0201000); 山东省自然科学基金(ZR2017YL023); 山东省农业科学院创新工程(CXGC2018B05); 山东省现代农业产业技术体系花生创新团队(SDAIT-04-06); 国家自然科学基金(31771732)

作者简介: 张智猛(1963-), 男, 博士, 研究员, 主要从事作物栽培生理生态研究, E-mail: qinhdiao@126.com

* 通讯作者: 丁红(1983-), 女, 博士, 副研究员, 主要从事土壤与植物营养研究, E-mail: dingpeanut@163.com

ciency were the highest. The effect of water deficiency at pod filling stage on peanut yield could be compensated by applying $90 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ nitrogen fertilizer (N2).

Key words: peanut; pod filling stage; drought stress; nitrogen accumulation; yield; nitrogen use efficiency

花生是较抗旱耐瘠的经济和油料作物之一,全国约有70%的花生种植在干旱半干旱地区的瘠薄砂质土壤上。土壤水分亏缺和营养不足是限制干旱半干旱地区作物生长、发育和产量的两大主要因子,直接影响植物生长及对养分的吸收利用^[1,2]。常年因干旱造成的花生减产占全国花生总产量的20%以上^[3]。氮是组成蛋白质的重要元素,是决定花生籽仁品质的关键因子之一。

关于水分、氮素对作物产量、养分吸收及水氮利用的影响研究,结果表明适当增加施氮量和灌水量有利于作物吸收氮、磷、钾等养分^[4,5],且其吸收量与作物干物质积累及产量显著正相关^[6]。水分与氮素之间相互作用、相互影响,两者存在耦合效应,影响作物生长发育及养分吸收利用。研究水分胁迫条件下氮素营养对作物生长的影响及其机理,对提高作物产量和肥料利用率具有重要作用^[7-9]。氮素营养对作物的作用受土壤水分状况的影响。在土壤水分良好、轻度干旱和严重干旱情况下,氮营养对作物分别表现出正向调节作用、无明显作用和负效应,可以改善水分胁迫下水稻植株体内水分状况,增强抗旱性^[10,11];增施氮肥使小麦对干旱更敏感,影响其在干旱条件下的生长^[12]。

已有研究表明与花针期和结荚期相比,花生饱果成熟期需水量较少^[13],但此阶段干旱胁迫下易发生早衰,降低饱果率,从而减产,减产幅度达24%^[14,15]。目前,关于干旱胁迫下作物的响应机制及胁迫复水后的补偿效应等研究报道较多^[16-18],有关水分胁迫与氮素营养相结合的研究报道较少。本课题组对水分胁迫和氮肥对花生根系形态发育及叶片生理活性进行了研究,表明适量施用氮肥可促进干旱胁迫下花生根系和地上部生长,增强花生叶片抗胁迫能力,从而提高干旱胁迫下花生的产量^[19,20]。本研究在此基础上采用¹⁵N示踪技术,研究不同水氮处理对花生氮素吸收利用的影响,探求不同水分处理下氮素在花生体内的吸收、分配及利用情况,发挥水分、养分的最大增产效应,为合理调控水氮提供技术支撑。

1 材料与方法

1.1 材料

花生品种为抗旱高产型品种花育25号,生育期130d左右。氮素肥料为¹⁵N标记尿素(丰度10.19atom%,上海化工研究院)。

1.2 试验设计

试验在山东省花生研究所莱西试验站进行,使用PVC圆筒制成可拆卸的直径40cm、高100cm的圆柱桶模拟大田环境,进行花生土柱栽培试验。0~20cm土壤容重 $1.1 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, pH7.4,有机质含量 $14.3 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,碱解氮 $91.6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效磷 $28.4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效钾 $124.6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

试验为双因素设计,水分按Hsiao^[21]的标准设置3个水平:控制土壤含水量为田间持水量的70%~75%为正常供水水平(W0),控制土壤含水量为田间持水量的55%~60%为轻度干旱胁迫水平(W1),控制土壤含水量为田间持水量的40%~45%为中度干旱胁迫水平(W2)。干旱胁迫从荚果充实期(9月2日)开始控水至收获。以20cm为一层利用TRIME-PICO-IPH TDR剖面土壤水分测量系统测定土柱内的土壤体积含水量,计算每次的灌水量,灌水量总和记为全生育期耗水量。

设置5个氮肥水平,分别为N0(不施氮肥)、N1($45 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)、N2($90 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)、N3($135 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)和N4($180 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)5个水平。氮肥以示踪尿素控制,同时配合施用高产田要求的过磷酸钙($450 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)和硫酸钾($300 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$),肥料均以基肥方式施入,其它田间管理同于一般高产田。每个土柱内种植2株花生,随机排列,每个处理1个土柱重复3次,设定3次重复供产量测定,于2015年5月25日播种,10月9日收获。

1.3 取样与测定

1.3.1 样品采集 收获时打开PVC管,将土柱置于特制的钢筛上,小心抖落根系周围的土壤后取出花生植株,从子叶节部分用剪刀分开地上部和地下部。将花生植株分为叶(连同脱落残叶)、茎(包括果针)、根和荚果4部分进行收获。将钢筛上残留的根系、残叶等器官分别检出,用自来水将花生各器官充分浸泡后冲洗干净,风干。各器官先于105℃杀青30min后,再于70℃烘干至恒重。将烘干后各器

官样品粉碎过0.5mm筛后用于全氮含量及¹⁵N丰度的测定。

1.3.2 样品测定 全氮用凯氏定氮法测定;¹⁵N丰度由河北省农林科学院遗传生理研究所用美国热电公司同位素比率质谱仪测定。

1.4 计算方法

^{15}N 原子百分比=样品或¹⁵N标记肥料的¹⁵N丰度-¹⁵N自然丰度;

$\text{Ndff}(\text{percentage of N driven from } ^{15}\text{N fertilizer}) = \text{样品的 } ^{15}\text{N} \text{ 原子百分比} / \text{标记肥料的 } ^{15}\text{N} \text{ 原子百分比} \times 100\%$;

氮素积累量=干物质量×氮素含量;

肥料氮积累量=氮素积累量×Ndff;

植株器官¹⁵N积累量=该器官的氮素积累量×该器官的¹⁵N原子百分比;

花生氮肥利用率 $\text{NUE}\% = \text{施氮区花生吸收肥料氮总量} / \text{肥料全氮量} \times 100$ 。

其中,Ndff表示植株不同器官从肥料中吸收分配到的N量对该器官全氮量的贡献率,反映植株器官对肥料N的吸收竞争能力。

1.5 数据处理

用Excel 2003软件进行数据整理和作图,用SAS 8.0数据分析软件进行统计分析,采用LSD法进行差异显著性检验($\alpha=0.05$)。

2 结果与分析

2.1 不同水氮处理下花生干物质积累量

由表1可知,W1N2处理下花生全株生物量和经济产量(果壳和籽仁)显著高于其它处理,W2N4处理下最低,表明中度干旱胁迫条件氮肥施用量过大对花生生物量和产量具有显著降低效应。不同处理下花生收获指数的变化范围为0.57~0.63,变异系数为3.21%,平均而言,轻度干旱胁迫下收获指数高于正常供水和中度干旱胁迫。

同一氮肥水平下,与正常供水水平相比,轻度干旱胁迫降低花生营养器官干物质积累量(根、茎和叶),增加经济产量,提高收获指数;除N2水平外,其它氮肥水平下中度干旱胁迫降低花生干物质积累量。

同一水分条件下,除正常供水处理下的营养器官干物质积累量外,其它处理下干物质积累量均随施氮量的增加呈单峰曲线趋势变化,N2水平的峰值最高。与不施氮肥水平N0相比,N2均能增加花生经济产量和收获指数,表明适量施氮(N2)在降低肥

料施用量的同时可增加花生生产量,提高收获指数。

双因素方差分析表明,水分、氮肥及水氮互作对花生各器官干物质积累量及收获指数均呈极显著效应。

2.2 不同水氮处理下花生氮素积累量

正常供水条件下,花生植株各器官氮素积累量分配规律基本为籽仁>叶>果壳>茎>根,而干旱胁迫条件下,花生各器官氮素积累量的分配规律大致为籽仁>叶>茎>果壳>根,其中籽粒氮素积累量占全株氮素积累量的68.42%~77.67%,为氮素积累主要器官(表2)。同一水分条件下,叶片氮素积累量均随施氮量的增加先增加后降低,轻度干旱胁迫处理下最大,正常供水处理下次之,中度干旱胁迫下最低。同一氮肥水平下,轻度干旱胁迫下叶片、籽仁和全株氮素积累量高于正常供水和轻度干旱胁迫处理,表明轻度干旱胁迫处理促进氮素向叶片和籽仁的运输。

W1N2处理下花生叶片、籽仁和全株氮素积累量中氮素积累量最高,W2N4处理下最低,表明轻度干旱胁迫和适量施用氮肥能够促进氮素由地下部向地上部转运。双因素方差分析表明,除水氮互作对籽仁氮素积累量呈显著效应外,水分、氮肥和水氮互作对其它器官及整株氮素积累量均呈极显著效应。

2.3 不同水氮处理下花生各器官Ndff的差异

由表3可知,花生全株的Ndff为9.59%~40.39%,说明花生吸收的氮素50%以上来源于土壤和根瘤固氮。同一水分条件下,花生各器官及全株Ndff随施氮量的增加而显著增加,但增加幅度不同;N1处理下根中Ndff值最高,表明低氮处理下根系吸收氮肥后向其它器官的运转小于高氮处理。各氮肥处理下籽仁中Ndff值最低,表明根系吸收的肥料氮向籽仁的运输率较低。

与正常供水条件相比,轻度干旱胁迫降低叶片、果壳、籽仁及全株Ndff值,平均降低幅度分别为3.97%、4.25%、3.27%和2.79%;而中度干旱胁迫显著增加各器官及整株Ndff值,根、茎、叶、果壳、籽仁及全株的平均增加幅度分别为10.52%、11.07%、12.67%、19.22%、11.62%和11.56%。双因素分析表明,除对茎中Ndff值无显著效应外,水分、氮肥和水氮互作处理对其余各器官中Ndff值呈显著或极显著效应。

2.4 不同水氮处理下花生各器官¹⁵N吸收量及分配率

整株¹⁵N的吸收量在轻度干旱胁迫下最高,籽仁

表1 不同水氮处理对花生干物质积累量的影响

Table 1 Effects of water and nitrogen on dry matter accumulation of peanut single plant /g

| 处理 Treatment | 根 Root | 茎 Stem | 叶 Leaf | 果壳 Shell | 籽仁 Seed | 全株 Whole plant | 收获指数 Harvest index |
|-----------------|-----------|-----------|-----------|-------------|------------|-------------------|-----------------------|
| W0N0 | 2.11de | 6.44efg | 5.97cd | 6.09bc | 18.04def | 38.64e | 0.62ab |
| W0N1 | 1.80f | 8.45bc | 6.64bc | 5.87cd | 18.51cdef | 41.26cd | 0.59cde |
| W0N2 | 2.42bc | 6.69ef | 6.69bc | 6.33b | 19.00cd | 41.12cd | 0.62ab |
| W0N3 | 2.24bcde | 7.82bed | 8.23a | 6.11bc | 18.38cdef | 42.77c | 0.57ef |
| W0N4 | 2.32bcd | 7.11de | 7.02b | 5.41ef | 17.60def | 39.47de | 0.58ef |
| W1N0 | 2.36bc | 5.29hi | 6.62bc | 4.91h | 17.12f | 36.30f | 0.61bcd |
| W1N1 | 2.06e | 6.70ef | 6.45bc | 5.46ef | 18.51cdef | 39.18de | 0.61ab |
| W1N2 | 2.35bce | 8.51b | 8.26a | 6.99a | 23.30a | 49.40a | 0.61ab |
| W1N3 | 3.19a | 5.71ghi | 8.60a | 5.26fg | 19.70c | 42.46c | 0.59de |
| W1N4 | 2.08e | 5.09i | 7.02b | 5.65de | 18.74cde | 38.58e | 0.63a |
| W2N0 | 2.43bc | 6.07fgh | 5.50d | 4.70h | 17.51ef | 36.22f | 0.61ab |
| W2N1 | 2.45b | 7.59cd | 6.96b | 4.98gh | 17.33ef | 39.30de | 0.57f |
| W2N2 | 2.27bcde | 9.35a | 6.41bc | 6.41b | 21.19b | 45.63b | 0.60bcd |
| W2N3 | 2.23bcde | 6.48efg | 5.61d | 5.59de | 18.31cdef | 38.21ef | 0.63ab |
| W2N4 | 2.20cde | 3.86j | 6.52bc | 4.69h | 14.85g | 32.13g | 0.61bc |
| W | 0.000** | 0.000** | 0.000** | 0.000** | 0.000** | 0.000** | 0.000** |
| N | 0.000** | 0.000** | 0.000** | 0.000** | 0.000** | 0.000** | 0.000** |
| W×N | 0.000** | 0.000** | 0.000** | 0.000** | 0.000** | 0.000** | 0.000** |

注:W0:正常供水(田间持水量的70%~75%),W1:轻度干旱(田间持水量的55%~60%),W2:中度干旱(田间持水量的40%~45%);每公顷施氮量为N0:0;N1:45kg;N2:95kg;N3:135kg;N4:180kg;同列数据后不同小写字母代表置信区间 $P<0.05$ 内差异显著,*为差异显著($P<0.05$);**为差异极显著($P<0.01$);下同

Note: W0: well-watered conditions (soil water 70%~75%); W1: mild drought (soil water 55%~60%); W2: medium drought (soil water 45%~50%); N0: no nitrogen application; N1: 45 kg·hm⁻²; N2: 90 kg·hm⁻²; N3: 135 kg·hm⁻²; N4: 180 kg·hm⁻². Different lowercase letters in the same column mean significantly differences at 0.05 level; *: significant difference ($P<0.05$); **: highly significant difference ($P<0.01$). Same as below

表2 不同水氮处理对花生各器官氮素积累量的影响

Table 2 Effects of water and nitrogen on N accumulation in different peanut organs on single plant /mg

| 处理 Treatment | 根 Root | 茎 Stem | 叶 Leaf | 果壳 Shell | 籽仁 Seed | 全株 Whole plant |
|--------------|-----------|---------|-----------|----------|-----------|----------------|
| W0N0 | 34.61efg | 49.52d | 125.44def | 73.31a | 827.96bcd | 1110.84cdef |
| W0N1 | 28.32g | 63.40bc | 125.13def | 55.28c | 809.34bcd | 1081.48cdef |
| W0N2 | 42.95bcd | 51.57d | 129.27cde | 64.62b | 874.90b | 1163.32bc |
| W0N3 | 44.13bcd | 69.79ab | 165.56a | 77.27a | 782.98bcd | 1139.73bcde |
| W0N4 | 42.07bcd | 59.08c | 143.18bc | 51.95cd | 757.49d | 1053.77def |
| W1N0 | 42.90bcd | 44.37de | 123.74def | 43.94ef | 761.09cd | 1016.04f |
| W1N1 | 31.22fg | 50.98d | 138.77bcd | 42.87f | 781.50bcd | 1045.33def |
| W1N2 | 43.37bcd | 68.99ab | 174.28a | 64.45b | 1051.70a | 1402.80a |
| W1N3 | 70.06a | 50.08d | 172.03a | 62.93b | 865.11b | 1220.21b |
| W1N4 | 37.38def | 41.21e | 142.98bc | 44.90ef | 782.28bcd | 1048.76def |
| W2N0 | 45.42b | 48.76d | 112.30f | 42.92f | 786.83bcd | 1036.22ef |
| W2N1 | 45.01bc | 63.26bc | 148.96b | 50.42cde | 750.43d | 1058.07cdef |
| W2N2 | 39.27bcde | 75.07a | 118.44ef | 54.27c | 859.27bc | 1146.33bcd |
| W2N3 | 37.98cde | 46.43de | 97.59g | 46.23def | 798.39bcd | 1026.63f |
| W2N4 | 43.99bcd | 30.65f | 124.33def | 39.83f | 612.94e | 851.75g |
| W | 0.000** | 0.000** | 0.000** | 0.000** | 0.000** | 0.000** |
| N | 0.000** | 0.000** | 0.000** | 0.000 | 0.000 | 0.000** |
| W×N | 0.000** | 0.000** | 0.000** | 0.000 | 0.002* | 0.000** |

表3 不同水氮处理对花生各器官 Ndff 的影响

Table 3 Effects of water and nitrogen on Ndff value in different peanut organs /%

| 处理 Treatment | 根 Root | 茎 Stem | 叶 Leaf | 果壳 Shell | 籽仁 Seed | 全株 Whole plant |
|--------------|-----------|---------------------|-----------|-------------|------------|-------------------|
| W0N1 | 15.72g | 13.59g | 11.18h | 12.18g | 8.64f | 9.59 f |
| W0N2 | 28.58de | 29.29d | 28.33e | 25.88d | 19.86d | 21.87d |
| W0N3 | 29.40cd | 34.81c | 34.75bc | 28.83d | 26.47bc | 28.45bc |
| W0N4 | 38.39a | 44.03a | 43.65a | 44.02a | 35.54a | 37.65a |
| W1N1 | 14.82g | 14.08g | 12.08h | 12.96g | 8.16f | 9.36f |
| W1N2 | 25.72e | 24.95e | 23.64f | 22.29e | 16.36de | 18.25e |
| W1N3 | 32.09bc | 37.80bc | 32.28cd | 34.25c | 24.20c | 26.84c |
| W1N4 | 41.34a | 45.00a | 45.25a | 46.14a | 38.85a | 40.39a |
| W2N1 | 20.78f | 19.88f | 19.43g | 18.47f | 14.07e | 15.63e |
| W2N2 | 29.20cd | 30.39d | 30.18de | 27.40d | 20.06d | 22.45d |
| W2N3 | 34.35b | 39.48b | 38.38b | 39.29b | 29.79b | 31.63 b |
| W2N4 | 39.55a | 45.45a | 44.88a | 47.08a | 37.10a | 39.13a |
| W | 0.001** | 0.002* | 0.000** | 0.000** | 0.002* | 0.000** |
| N | 0.000** | 0.000** | 0.000** | 0.000** | 0.000** | 0.000** |
| W×N | 0.000** | 0.088 ^{ns} | 0.012* | 0.001** | 0.029* | 0.016* |

注: Ndff 表示植株不同器官从 ^{15}N 肥料中吸收分配到 N 量对该器官全氮量的贡献率

Note: Ndff: percentage of N driven from ^{15}N fertilizer

和叶中与整株趋势相同。正常供水条件下,各器官 ^{15}N 的吸收量均随施氮量的增加而增加,但根中 N2 和 N3 水平、果壳中 N3 和 N4 水平未达显著差异水平。轻度干旱胁迫下,根、茎和果壳中 ^{15}N 的积累量随施氮量的增加在 N3 处理达最大值后下降,叶、籽仁和全株 ^{15}N 积累量随施氮量的增加而增加,但籽仁 N2 和 N3 处理未达显著差异水平。中度干旱胁迫下,根 ^{15}N 积累量随施氮量的增加而增加,茎中在 N2 处理达最大值后随施氮量增加而降低,叶中随施氮量的增加而增加,但 N2 和 N3 处理无显著差异,果壳、籽仁及整株中随施氮量的增加而增加,但 N3 和 N4 处理无显著差异。水分条件对籽仁和全株 ^{15}N 的吸收量的效应不显著,其它处理对各器官 ^{15}N 的吸收量均呈极显著效应。

^{15}N 在各器官的分配比例与施氮量无明显相关性,主要因为不同施氮量下各器官的干物质积累量不同。正常供水条件下,除 N2 水平外各氮肥水平下 ^{15}N 的分配比例为籽仁>叶>果壳>茎>根,N2 水平下果壳分配比例小于茎。籽仁在 N2 条件下 ^{15}N 分配率最高,茎在 N1 条件下分配率最高,叶在 N3 条件下分配率最高,果壳在 N3 条件下分配率最高,根在 N2 条件下分配率最高。轻度干旱胁迫下,根、茎、叶和果壳中 ^{15}N 分配率在 N4 水平下最低,而籽仁在 N4 水平下最高;中度干旱胁迫下,根中 N1 和 N4 水

平显著高于 N2 和 N3 水平,茎中随施氮量的增加先升高后降低,叶中 N1 和 N4 水平显著高于 N2 和 N3 水平,果壳中各施氮处理无显著差异,籽仁中 N3 水平显著高于其它施氮水平,N1 水平最低。水分条件对籽仁中 ^{15}N 的分配率无显著效应,其它处理对各器官 ^{15}N 的分配率呈显著或极显著效应。

2.5 不同水氮处理下花生的氮肥利用率

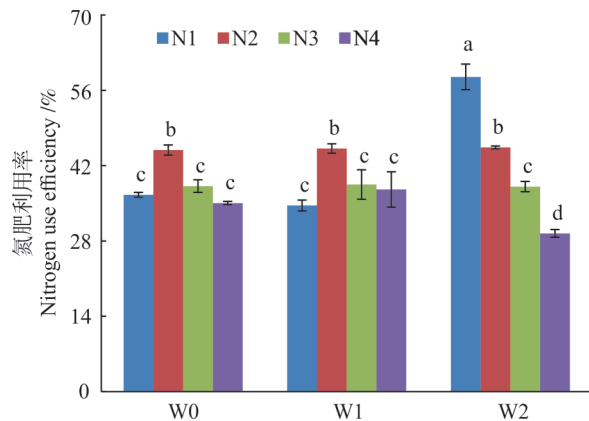
水分条件影响不同氮肥水平下花生的氮肥利用率(图 1),W2N1 处理下氮肥利用率最高,W2N4 处理最低,两者相差近一倍。正常供水和轻度干旱胁迫条件下花生植株氮肥利用率随着施氮量的增加先增加后降低,而中度干旱胁迫下氮肥利用率随施氮量的增加而降低,且各氮肥处理间差异达到显著水平。N2 和 N3 水平下,花生氮肥利用率受水分条件影响较小,而 N1 水平下花生氮肥利用率表现为 W2>W0>W1,N4 水平下表现为 W1>W0>W2。正常供水和轻度干旱胁迫条件下 N2 水平下氮肥利用率最高,显著高于其它氮肥处理。正常供水条件下 N2 水平分别比 N1、N3 和 N4 水平下氮肥利用率提高 22.77%、17.56% 和 28.13%;轻度干旱胁迫条件下分别提高 30.61%、17.34% 和 20.30%。双因素方差分析表明,水分、氮肥及水氮互作对花生氮肥利用率均有极显著效应。

表 4 不同水氮处理对花生各器官¹⁵N吸收量(A)及分配率(D)的影响Table 4 Effects of water and nitrogen on ¹⁵N accumulation (A) and distribution (D) in organs of single peanut plant

| 处理 Treatment | 根 Root | | 茎 Stem | | 叶 Leaf | | 果壳 Shell | | 籽仁 Seed | | 全株 Whole plant /mg |
|--------------|---------|---------|---------|---------|---------|-----------|----------|---------|---------------------|---------------------|---------------------|
| | A /mg | D /% | A /mg | D /% | A | D /% | A /mg | D /% | A /mg | D /% | |
| W0N1 | 0.45g | 4.30ef | 0.88f | 8.33ab | 1.42f | 13.51g | 0.68f | 6.49a | 7.10f | 67.38bc | 10.54e |
| W0N2 | 1.25de | 4.83cd | 1.54d | 5.95de | 3.73d | 14.42efg | 1.71bc | 6.58a | 17.67d | 68.22b | 25.89c |
| W0N3 | 1.32d | 4.02fg | 2.47ab | 7.49bc | 5.85b | 17.72a | 2.27a | 6.87a | 21.13cd | 63.90d | 33.04b |
| W0N4 | 1.65c | 4.07fg | 2.65a | 6.56cde | 6.37a | 15.75cde | 2.32a | 5.75b | 27.43b | 67.87b | 40.42a |
| W1N1 | 0.47g | 4.73de | 0.73f | 7.33bc | 1.71f | 17.11abc | 0.57f | 5.69b | 6.50f | 65.15cd | 9.97e |
| W1N2 | 1.14e | 4.36def | 1.75c | 6.72cd | 4.19c | 16.10bcd | 1.46d | 5.61b | 17.51d | 67.21bc | 26.05c |
| W1N3 | 2.28a | 6.90a | 1.92c | 5.88de | 5.67b | 17.05abc | 2.19a | 6.65a | 21.24cd | 63.53d | 33.31b |
| W1N4 | 1.57c | 3.69g | 1.88c | 4.43f | 6.59a | 15.33def | 2.11a | 4.91c | 31.16a | 71.64a | 43.32a |
| W2N1 | 0.95f | 5.65b | 1.28e | 7.61bc | 2.93e | 17.39ab | 0.95e | 5.63b | 10.75e | 63.72d | 16.86d |
| W2N2 | 1.17e | 4.46def | 2.33b | 8.90a | 3.64d | 13.92fg | 1.52cd | 5.80b | 17.51d | 66.92bc | 26.17c |
| W2N3 | 1.31d | 3.99fg | 1.84c | 5.58e | 3.79d | 11.49h | 1.85b | 5.61b | 24.17bc | 73.32a | 32.96b |
| W2N4 | 1.77b | 5.23bc | 1.42de | 4.18f | 5.68b | 16.76abcd | 1.91b | 5.62b | 23.15c | 68.21b | 33.92b |
| W | 0.000** | 0.000** | 0.000** | 0.003* | 0.000** | 0.000** | 0.001** | 0.000** | 0.680 ^{ns} | 0.098 ^{ns} | 0.731 ^{ns} |
| N | 0.000** | 0.000** | 0.000** | 0.000** | 0.000** | 0.010* | 0.000** | 0.001** | 0.000** | 0.000** | 0.000** |
| W×N | 0.000** | 0.000** | 0.000** | 0.000** | 0.000** | 0.000** | 0.000** | 0.042* | 0.002* | 0.000** | 0.000** |

注:A表示吸收量,D表示分配率

Note: A indicates absorption and D indicates distribution ratio



注:W0:正常供水(田间持水量的70%~75%),W1:轻度干旱(田间持水量的55%~60%),W2:中度干旱(田间持水量的40%~45%);每公顷施氮量为N0:0;N1:45kg;N2:95kg;N3:135kg;N4:180kg;小写字母代表0.05水平的差异显著

Note: W0: well-watered conditions (soil water 70%~75%); W1: mild drought (soil water 55%~60%); W2: medium drought (soil water 45%~50%); N0: no nitrogen application; N1: 45 kg·hm⁻²; N2: 90 kg·hm⁻²; N3: 135 kg·hm⁻²; N4: 180 kg·hm⁻². Different lowercase letters in the same column mean significantly differences at 0.05 level; *: significant difference ($P<0.05$); **: highly significant difference ($P<0.01$). Same as below

图1 不同水氮处理对花生氮肥利用率的影响

Fig. 1 Effects of water and nitrogen on N use efficiency of peanut

3 讨论

3.1 产量

干旱胁迫是影响干旱半干旱地区作物生产的主要因素,水分和养分具有强烈的交互作用。在水分亏缺的条件下合理使用肥料,可达到“以肥调水、以水促肥”的目的,对增强作物抗旱性,提高水分利用效率,促进作物对有限水资源的充分利用具有重要作用^[22,23]。研究表明,干旱胁迫抑制了作物的生长、降低其产量和氮素吸收利用能力,适量施氮可减轻干旱胁迫对作物生长发育的影响,增强叶片光合功能、延长叶片功能期、促进作物在干旱条件下的生长^[12,24~26];但施氮量过高作物叶片叶绿素含量和光合速率得不到充分的补偿效应,进而影响产量^[27]。由此表明,在适宜的范围内,施肥和灌水对产量存在明显的正效应,可相互促进水肥的吸收;过量时会引起负效应,呈现出报酬递减规律^[7]。

本研究结果表明,与正常供水处理相比,轻度干旱增加花生产量,促进碳水化合物向生殖器官的积累。此时适量施用氮肥具有补偿效应,但随着胁迫程度的增加,负效应增强,与大豆中结论相一致^[28]。

3.2 氮素分配和氮肥利用率

水分是影响作物氮素吸收转运分配以及最终

籽粒中氮素含量的重要因素之一。李世娟等^[29]对小麦研究表明,干旱胁迫不利于小麦植株对氮素的吸收,而刘恩科等^[30]研究表明小麦灌浆后期轻度干旱有利于营养器官的氮素向籽粒中转移,提高了氮肥利用效率和生产率,金欣欣等^[31]得到相同的结论。本研究表明籽仁氮素积累量占全株氮素积累量的68.42%~77.67%,为氮素积累主要器官,轻度干旱胁迫促进氮素向籽仁中的转移,与前人研究不一致的原因可能是作物类型、水分胁迫时期及氮肥施用量的差异。一定范围内增加施氮量会增加甘薯肥料氮的转运量,但过量施氮可能不利于氮素向块根的转移^[32],小麦中研究亦表明过量施用氮肥不利于氮素向小麦籽粒的转运^[33]。本研究表明,籽仁中¹⁵N积累量最高,除W1N4处理外,各处理下籽仁中¹⁵N积累量随施氮量的增加先增加后降低,表明适量施氮有利于氮素积累。

本试验表明,轻度和中度干旱胁迫条件下各氮肥处理均以N2处理表现出较高的干物质与氮素积累量,且向生殖器官分配的比例较高。W1N2处理较W0N2处理下干物质与氮素积累量分别提高了20.1%、20.6%,干物质向籽仁分配比例提高了2.1%,氮素分配比例基本一致;与W0N2处理相比,W2N2处理干物质积累量提高9.9%,干物质向籽仁分配比例仅提高0.5%,降低氮素积累量和氮素向籽仁分配比例。轻度干旱胁迫下适量施用氮肥花生干物质与氮素积累量适宜,向生殖器官分配比例较高,与水稻^[34]和棉花^[35]中研究相一致。

王晓英等^[36]研究表明在一定氮肥水平下,不灌水处理下小麦的氮肥利用率高于各灌水处理,而油菜^[25]、玉米^[37]及苹果^[38]等研究表明水分胁迫下氮肥利用率低于正常供水处理。由本试验可知,N1水平下中度干旱胁迫下氮肥利用率分别比正常供水和轻度干旱胁迫处理高59.91%和69.06%,本研究结果与小麦中研究结论相一致,与油菜、玉米及苹果中结论不一致,这可能与试验对象存在差异有关。花生是固氮作物,正常供水处理下根瘤固氮约占总吸氮量的一半,中度干旱胁迫下严重抑制了根瘤固氮能力,增加了肥料氮的吸收比例,提高了氮肥利用率。N2和N3水平下水分条件对花生氮肥利用率的影响不显著,而N4水平下中度干旱胁迫显著降低其氮肥利用率,表明在严重缺水条件下施用过量氮肥对花生生长和氮素吸收具有抑制作用。

4 结论

与正常供水条件相比,轻度干旱胁迫增加花生经济产量,提高其收获指数,干旱胁迫程度加重至中度干旱胁迫则呈相反趋势。籽仁为氮素积累主要器官,轻度干旱胁迫可促进肥料氮素向籽仁的转移。轻度干旱胁迫与适量施氮具有明显的协同互作效应,在保产的同时达到节水的目的,可显著提高水、氮利用率。施氮 $90\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ (N2)可补偿缺水对花生产量的影响,在此条件下花生干物质与氮素积累量适宜,氮素向生殖器官分配比例和氮肥利用率较高。

参考文献:

- [1] Song C J, Ma K M, Qu L Y, et al. Interactive effects of water, nitrogen and phosphorus on the growth, biomass partitioning and water-use efficiency of *Bauhinia faberi* seedlings [J]. *J Arid Environ*, 2010, 74 (9): 1003-1012.
- [2] 王磊,董树亭,刘鹏,等.水氮互作对冬小麦光合生理特性和产量的影响[J].*水土保持学报*,2018,32(3):301-308.
- [3] 高国庆,周汉群,唐荣华.花生品种抗旱性鉴定[J].*花生科技*,1995,24(3):7-9,15.
- [4] 胡国智,冯炯鑫,张炎,等.不同施氮量对甜瓜养分吸收、分配、利用及产量的影响[J].*植物营养与肥料学报*,2013,19(3):760-766.
- [5] 廖常健,张鹏,张玉龙,等.微灌水氮调控对花生生长发育及产量的影响[J].*中国油料作物学报*,2017,39(3):372-379.
- [6] 侯云鹏,韩立国,孔丽丽,等.不同施氮水平下水稻的养分吸收、转运及土壤氮素平衡[J].*植物营养与肥料学报*,2015,21(4):836-845.
- [7] 李玉斌,马忠明.水氮互作对膜下滴灌玉米产量及水氮利用的影响[J].*玉米科学*,2018,26(2):102-109.
- [8] 郑永美,冯昊,吴正锋,等.氮肥调控对土壤供氮特征及花生氮素吸收利用的影响[J].*中国油料作物学报*,2016,38(4):481-486.
- [9] Hamzei J. Seed, oil, and protein yields of canola under combinations of irrigation and nitrogen application [J]. *Agron J*, 2011, 103(4): 1152.
- [10] 杨建昌,王志琴,朱庆森.不同土壤水分状况下氮素营养对水稻产量的影响及其生理机制的研究[J].*中国农业科学*,1996,29(4):58-66.
- [11] 梁银丽,陈培元.土壤水分和氮磷营养对冬小麦根苗生长的效应[J].*作物学报*,1996,22(4):476-482.
- [12] 张岁岐,山仑,薛青武.氮磷营养对小麦水分关系的影响[J].*植物营养与肥料学报*,2000,6(2):147-

- 151, 165.
- [13] 赵长星, 程曦, 王月福, 等. 不同生育时期干旱胁迫对花生生长发育和复水后补偿效应的影响[J]. 中国油料作物学报, 2012, 34(6): 627-632.
- [14] Boontang S, Girdthai T, Jogloy S, et al. Responses of released cultivars of peanut to terminal drought for traits related to drought tolerance[J]. *Asian J Plant Sci*, 2010, 9(7): 423-431.
- [15] Koolachart R, Jogloy S, Vorasoot N, et al. Rooting traits of peanut genotypes with different yield responses to terminal drought [J]. *Field Crop Res*, 2013, 149: 366-378.
- [16] 张翠梅, 师尚礼, 吴芳. 干旱胁迫对不同抗旱性苜蓿品种根系生长及生理特性影响[J]. 中国农业科学, 2018, 51(5): 868-882.
- [17] Puangbut D, Jogloy S, Toomsan B, et al. DROUGHT STRESS: physiological basis for genotypic variation in tolerance to and recovery from pre-flowering drought in peanut[J]. *J Agron Crop Sci*, 2010, 196(5): 358-367.
- [18] 罗宏海, 韩焕勇, 张亚黎, 等. 干旱和复水对膜下滴灌棉花根系及叶片内源激素含量的影响[J]. 应用生态学报, 2013, 24(4): 1009-1016.
- [19] 丁红, 张智猛, 戴良香, 等. 水氮互作对花生根系生长及产量的影响[J]. 中国农业科学, 2015, 48(5): 872-881.
- [20] 丁红, 张智猛, 戴良香, 等. 水分胁迫和氮肥对花生根系形态发育及叶片生理活性的影响[J]. 应用生态学报, 2015, 26(2): 450-456.
- [21] Hsiao T C. Plant responses to water stress[J]. *Annu Rev Plant Physiol*, 1973, 24(1): 519-570.
- [22] 陈娟, 马忠明, 吕晓东, 等. 水氮互作对固定道垄作栽培春小麦根系生长及产量的影响[J]. 应用生态学报, 2016, 27(5): 1511-1520.
- [23] Sandhu S S, Mahal S S, Vashist K K, et al. Crop and water productivity of bed transplanted rice as influenced by various levels of nitrogen and irrigation in northwest India[J]. *Agric Water Manag*, 2012, 104: 32-39.
- [24] 康晓育, 常聪, 孙协平, 等. 低氮和干旱胁迫对富士和秦冠生长及氮素利用的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(4): 965-973.
- [25] 邹小云, 刘宝林, 宋来强, 等. 施氮量与花期水分胁迫对不同氮效率油菜产量性能及氮肥利用效率的影响[J]. 华北农学报, 2015, 30(2): 220-226.
- [26] 吴自明, 王竹青, 李木英, 等. 后期水分亏缺与增施氮肥对杂交稻叶片光合功能的影响[J]. 作物学报, 2013, 39(3): 494-505.
- [27] 谷晓博, 李援农, 杜娅丹, 等. 不同施氮水平对返青期水分胁迫下冬油菜补偿效应的影响[J]. 中国生态农业学报, 2016, 24(5): 572-581.
- [28] 褚丽丽, 张忠学. 氮素营养与水分胁迫对大豆产量补偿效应的影响[J]. 生态学报, 2010, 30(10): 2665-2670.
- [29] 李世娟, 周殿玺, 诸叶平, 等. 水分和氮肥运筹对小麦氮素吸收分配的影响[J]. 华北农学报, 2002, 17(1): 69-75.
- [30] 刘恩科, 梅旭荣, 龚道枝, 等. 不同生育时期干旱对冬小麦氮素吸收与利用的影响[J]. 植物生态学报, 2010, 34(5): 555-562.
- [31] 金欣欣, 张喜英, 陈素英, 等. 不同灌溉次数和灌溉量对冬小麦氮素吸收转移的影响[J]. 华北农学报, 2009, 24(4): 112-118.
- [32] 徐聪, 李欢, 史衍玺. 不同施氮量对甘薯氮素吸收与分配的影响[J]. 水土保持学报, 2014, 28(2): 149-153.
- [33] 同延安, 赵营, 赵护兵, 等. 施氮量对冬小麦氮素吸收、转运及产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2007, 13(1): 64-69.
- [34] 郝树荣, 郑姬, 冯远周, 等. 水稻拔节期水氮互作的后效性影响研究[J]. 农业机械学报, 2013, 44(3): 92-96.
- [35] 石洪亮, 张巨松, 严青青, 等. 氮肥对非充分灌溉下棉花产量及品质的补偿作用[J]. 植物营养与肥料学报, 2018, 24(1): 134-145.
- [36] 王晓英, 贺明荣, 刘永环, 等. 水氮耦合对冬小麦氮肥吸收及土壤硝态氮残留淋溶的影响[J]. 生态学报, 2008, 28(2): 685-694.
- [37] 詹其厚, 陈杰. 水肥配合对玉米产量及其利用效率的影响[J]. 土壤肥料, 2005(4): 14-18.
- [38] 任饴华, 丰艳广, 陈建明, 等. 水氮耦合对苹果幼树生长及¹⁵N吸收利用的影响[J]. 山东农业科学, 2015, 47(5): 49-53.

(责任编辑:郭学兰)