

调亏灌溉与施氮对花生产量及水氮利用的影响

胡家齐,夏桂敏,张柏纶,张 葵,迟道才

(沈阳农业大学水利学院,辽宁 沈阳 110866)

摘 要:为减缓干旱造成花生减产的现象,探明调亏灌溉在辽西半干旱区的适用性,以及对花生全生育期生长、产量和水氮利用效率影响,以白沙 1016 为研究对象,进行主区为施氮量,子区为水分亏缺度的田间裂区试验研究。施氮量为 0(N0)、40(N1)、60(N2)和 80(N3) $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 4 个水平;水分亏缺为花针-结荚期连续控水,设重度亏水(灌水下限为 45%,上限为 90%)(W1)、中度亏水 55%(W2)、轻度亏水 65%(W3)(占田间持水量百分比)和雨养(W0)4 个水平。试验结果表明,增施氮肥和调亏灌溉对花生耗水量、花生生长和水氮利用影响显著。调亏灌溉处理较雨养处理,可显著增加花生株高 12.73%,增产 13.09%,提高 NAE 120.68%,但会显著降低 WUE,最多降低 20.92%。随着施氮量的增加,花生株高、叶面积指数和干物质质量以及产量和 WUE 呈先增后减趋势,产量和 WUE 最高增加 32.03%和 34.03%,NAE 随施氮量增加而降低,由最高的 33.23 $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (N1)降至 9.57 $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (N3),降幅达 247%。调亏灌溉下,水氮具交互效应显著,因此在辽西半干旱地区推荐施氮 60 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,花针-结荚期采取中度亏水处理(N2W2)为适宜本地区的水氮调控模式。产量为 6 485.03 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,而且还能维持较高的 WUE 和 NAE,分别达到 2.02 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 38.82 $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

关键词:调亏灌溉;花生;水氮互作;产量;水氮利用

中图分类号:S274.1;S565.2 **文献标志码:**A

Effects of regulated deficit irrigation and nitrogen application on growth, yield and water-nitrogen use of peanut

HU Jia-qi, XIA Gui-min, ZHANG Bai-lun, ZHANG Yan, CHI Dao-cai

(College of Water Conservancy, Shenyang Agricultural University, Shenyang, Liaoning 110161, China)

Abstract: A field experiment was conducted to assess effects of RDI and nitrogen coupling on growth, yield and water-nitrogen use efficiency of peanut Baisha 1016 in the whole growth stage of peanut for mitigating yield decline caused by drought and explore the feasibility of regulated deficit irrigation(RDI) in the semi-arid region of western Liaoning province. The main plot was nitrogen with four levels, N0(0 $\text{kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$), N1(40 $\text{kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$), N2(60 $\text{kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$), and the subplot was the water deficit (severe deficit-W1, 45% of field capacity; moderate deficit-W2, 55% of field capacity; light deficit-W3, 65% of field capacity). The results indicated that RDI could significantly increase the plant height of peanut by 12.73%. The highest yield could be increased by 13.09% and increased Nitrogen Agronomic Efficiency (NAE) 120.68%, but it could decrease water use efficiency (WUE) by 20.92% at most. With the increase rate of nitrogen, the peanut plant height, leaf area index (LAI), dry matter, yield and WUE all showed a single-peak curve. The highest yield and WUE increased by 32.03% and 34.03% respectively comparing to N0 treatment. NAE reduced by 247% from 33.23 $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (N1) to 9.57 $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (N3). There was a significant interaction effect between RDI and nitrogen. The finding suggest nitrogen fertilized at 60 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ and moderate deficit at flowing podding stage with the highest peanut yield (6 485.03 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$), higher water use efficiency (2.02 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$) and nitrogen agronomic efficiency (38.82 $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$) in this region.

Keywords: regulated deficit irrigation; peanut; water and nitrogen interaction; yield; water-nitrogen use

花生是辽宁省种植面积第三大的作物,是第一大经济作物,2014 年全省花生种植面积达到35.60 万 hm²,占全国花生种植总面积的 6.6%,产量 62 万 t,占全国的 9.6%,种植面积和产量分别位列全国的第 5 位和第 8 位^[1],辽宁省在花生种植上具有一定优势。花生虽属于抗旱作物,但在其整个生长发育过程中仍然需要适量的水分,因为水分亏缺会严重影响花生的呼吸作用和光合作用^[2],从而影响花生产量的形成。同时花生也是耐瘠作物,有着丰富的根瘤,可以满足花生需氮量的 50%左右^[3]。

调亏灌溉(regulated deficit irrigation,简称 RDI)是一种利用作物的生理功能从而达到节水目的灌溉方式,于 20 世纪 70 年代中期由澳大利亚持续灌溉农业研究所 Tatura 中心提出^[4]。核心是利用植物自身对水分亏缺的应激性,主动降低营养器官的生长发育,自身调节光合产物向着生殖器官运移。从而抑制了营养器官的生长冗余,提高作物的经济系数,改善品质,达到节水、优质、高效的目的^[5]。而水氮互作是指在农业生态系统中水分和土壤中的氮肥相互作用的现象,其协同作用可以综合提高产量和 WUE^[6]。适当的氮肥用量可以提高植株的干物质积累,而干物质的积累是一切产量形成的前提^[7]。

我国学者于 1988 年引入调亏灌溉,最初用于果树的研究,康绍忠等人于 1998 年开始将调亏灌溉引入到大田作物的研究中^[8]。至此,调亏灌溉的研究在我国百花齐放,在冬小麦^[9]、大豆^[10]、棉花^[11]和水稻^[12]等作物的研究也都初见成果。但在花生的研究成果却少见报道。本试验以花生品种“小白沙”为研究对象,采取裂区试验设计,在花生的花针 结荚期进行不同程度的水分调亏,研究不同施氮量下调亏灌溉对花生生长、产量及水氮利用效率的影响,以期得出适宜花生的调亏灌溉程度和最佳氮肥施用量。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于 2016 年 5–9 月在北温带半干旱季风大陆性气候区的阜新蒙古族自治县进行,位于东经 121°02′~122°54′,北纬 41°42′~42°55′之间,海拔 213 m,多年平均降雨量为 493.1 mm,总辐射量为 138.5 kWh·m⁻²,年平均气温 7.2℃,作物生育期平均气温 20.2℃,10℃以上积温 2 900~3 400℃;无霜期 150 d。多年平均降雨量为 493.1 mm,其中夏季占全年的 68.5%,春旱、秋吊现象频繁,年平均蒸发量为 1 847.6 mm。土壤容重 1.40 g·cm⁻³,田间持水率 32.15%(占体积百分比),为砂壤土,地下水埋

深 8~13 m。土壤肥力中等,有机质含量为 13.05 g·kg⁻¹,全氮含量 1.28 g·kg⁻¹,碱解氮 92.15 mg·kg⁻¹,速效磷 18.76 mg·kg⁻¹,速效钾 201.43 mg·kg⁻¹,土壤 pH 值为 6.15。

1.2 试验材料与设计

试验在大田中进行,供试花生品种采用阜蒙县当地广泛种植的小白沙(白沙 1016),于 2016 年 5 月 14 日机械播种,9 月 17 日收获。试验地面积 500 m²,花生种植密度 2.25×10⁵株·hm⁻²。大垄双行种植,每条垄中布置一条滴灌带,垄距宽 100 cm,两行中间铺设一条滴灌带,采取膜下滴灌,灌溉水为地下水。取裂区试验设计,设两个因子(施氮量和水分亏缺度)。主区为施氮量,子区为水分亏缺度。施氮量为 0(N0)、40(N1)、60(N2)和 80(N3)kg·hm⁻²,4 个水平;水分亏缺为花针–结荚期连续控水,重度亏水灌水下限为 45%,(W1)上限为 90%(下同)、中度亏水 55%(W2)、轻度亏水 65%(W3)(占田间持水量百分比)和雨养(W0)4 个水平,共 16 个处理。每小区长 5 m,宽 2 m,小区间用 80 cm 深高分子树脂分隔,以防止水分和氮素侧渗,3 次重复。2016 年全生育期逐月降水量和有效降雨量如表 1 所示。

表 1 花生生育期内降水量及有效雨量

Table 1 Precipitation and effective precipitation during peanut growth period

指标 Index	日期 Date				
	05–14~ 05–31	06–1~ 06–30	07–01~ 07–31	08–01~ 08–31	09–01~ 09–17
降水量/mm Precipitation	12.4	42	236.9	80.7	7.6
有效降水量/mm Effectiveprecipitation	6.4	24.5	147.8	71.3	7.6

1.3 观测项目和方法

1.3.1 土壤含水率 在花生不同生育期内用澳大利亚 SENTEK 公司生产的 Diviner 2000 便携式土壤水分速测仪测定 10、20、30、40、50、60 cm 及 70 cm 深度的土壤含水量,每 5 天测定一次,灌溉前后及降雨前后加测。

1.3.2 株高、干物质及叶面积指数的测定 从花生出苗后,用刻度尺每 10 天测定花生株高,花生每个生育期结束后测定花生干物质质量和用雅欣理仪生产的 Yanxin-1241 叶面积仪测量花生叶面积并计算叶面积指数。

1.3.3 花生产量的测定 全生育期结束后,每小区单打单收,计算各小区花生产量,各处理取均值。

1.3.4 耗水量 ET 花生的耗水量采用水量平衡方程进行计算:

$$ET=W_0-W_t+W_T+P_0+K+M-F$$

$$W_T=667(H_2-H_1)\gamma(\theta_f-\theta)$$
$$P_0=\sigma\times P$$

各生育期耗水量/生育期天数

(1)

耗水模数 (Water Consumption Percentage, CP)

= 各生育期耗水量/总耗水量

(2)

水分生产率 (Water Use Efficiency, WUE) = 花

生产量/耗水量

(3)

氮肥农艺利用率 (Nitrogen Agronomic Efficiency,

NAE)=(施氮区产量-不施氮区产量)/施氮量

(4)

式中, ET 为阶段耗水量 (mm); W_0, W_i 为一个时段 (生育期) 始末的土壤计划湿润层内的储水量 (mm); W_T 为由于土壤计划湿润层增加而增加的水量 (mm); θ_f 为田间持水率 (重量含水率), θ 为计划湿润层平均含水率 (重量含水率 (%)), γ 为土壤容重 ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$); P_0 为时段内有效降雨量 (mm), P 为次降雨量 (mm), σ 为降雨有效利用系数 ($P \leq 5 \text{ mm}$ 时, $\sigma = 0$; $P = 5 \sim 50 \text{ mm}$ 时, $\sigma = 1$; $P \geq 50 \text{ mm}$ 时, $\sigma = 0.75$), K 为时段内地下水补给量 (mm); M 为时段内灌水量 (mm); F 为时段内渗漏量 (mm)。地下水深度足够, 故无地下水补给, $K = 0$; 由于试验采用的灌水方式为滴灌, 灌水引起深层渗漏很小, 可忽略不计, 因此取 $F = 0$ 。

1.3.5 计算指标

耗水强度 (Water Consumption Intensity, CI) =

1.4 数据分析

采用 Excel 进行数据汇总、绘图, SPSS 20 进行统计分析和显著性检验 (Tucky HSD 法, $P < 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 不同水氮互作下花生全生育期的耗水特性

花生全生育期不同水分处理灌水量见表 2, 水氮互作花生不同生育期的耗水量、耗水模数和耗水强度见表 3, 由表 3 可以看出, 花生全生育期耗水量呈现出“前期少, 中期最多, 后期偏多”的特性, 这是

表 2 花生全生育期不同水分处理灌水量

Table 2 The irrigation amount of different water treatments in peanut growth period

处理 Treatment	花针期 Flower stage		结荚期灌水量 Pod stage		灌水总量/mm Irrigation quantity
	灌水次数	灌水定额/mm	灌水次数	灌水定额/mm	
	Irrigation times	Irrigation amount of per time	Irrigation times	Irrigation amount of per time	
W1	1	34.56	1	43.2	77.76
W2	2	26.88	1	33.6	87.36
W3	3	19.20	2	24.0	105.60

表 3 水氮互作花生不同生育期的耗水量、耗水模数和耗水强度与方差分析 (F 检验)

Table 3 Effects of water and nitrogen interaction on water consumption, diurnal water consumption and water consumption percentage and analysis of variance (F test) at different growth stages of peanut

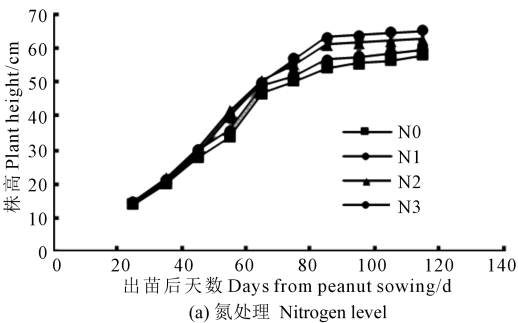
处理 Treatment	苗期 Seeding stage			花针期 Flower stage			结荚期 Pod stage			饱果期 Mature stage			全生育期 Total/mm
	CA/mm	CI/mm	CP/%	CA/mm	CI/mm	CP/%	CA/mm	CI/mm	CP/%	CA/mm	CI/mm	CP/%	
N0W0	27.08	0.75	10.66	120.30	3.54	47.33	48.54	2.11	19.10	58.25	1.94	22.92	254.17
N0W1	27.45	0.76	8.46	152.12	4.47	46.85	88.51	3.85	27.26	56.59	1.89	17.43	324.67
N0W2	27.31	0.76	8.30	145.66	4.28	44.28	92.00	4.00	27.97	64.01	2.13	19.46	328.99
N0W3	26.98	0.75	8.49	129.77	4.40	47.09	77.35	3.36	24.32	63.91	2.13	20.10	298.02
N1W0	28.39	0.79	10.84	99.80	2.94	38.09	69.19	3.01	26.41	64.63	2.15	24.67	262.01
N1W1	28.77	0.80	8.71	146.80	4.32	44.42	92.61	4.03	28.02	62.28	2.08	18.85	330.45
N1W2	28.08	0.78	8.37	131.73	3.87	39.26	107.47	4.67	32.03	68.26	2.28	20.34	335.55
N1W3	27.96	0.78	8.63	118.25	4.07	42.68	90.29	3.93	27.88	67.39	2.25	20.81	303.89
N2W0	29.07	0.81	11.76	93.53	2.75	37.83	78.33	3.41	31.68	46.32	1.54	18.74	247.25
N2W1	30.69	0.85	9.64	126.09	3.71	39.60	110.24	4.79	34.62	51.39	1.71	16.14	318.42
N2W2	31.24	0.87	9.73	117.56	3.46	36.62	120.87	5.26	37.65	51.33	1.71	15.99	321.00
N2W3	30.41	0.84	9.86	109.81	3.82	42.09	96.86	4.21	31.40	51.35	1.71	16.65	288.43
N3W0	31.27	0.87	12.31	90.40	2.66	35.58	78.93	3.43	31.06	53.48	1.78	21.05	254.08
N3W1	32.62	0.91	10.02	122.78	3.61	37.73	111.07	4.83	34.13	58.98	1.97	18.12	325.44
N3W2	31.20	0.87	9.55	124.49	3.66	38.08	112.15	4.88	34.31	59.04	1.97	18.06	326.89
N3W3	31.09	0.86	9.87	112.52	3.90	42.08	97.76	4.25	31.04	53.55	1.78	17.00	294.92
N	23.19 **		26.79 **	58.93 **		51.23 **	64.19 **		78.93 **	76.98 **		49.87 **	2.06
W	1.02		61.10 **	124.94 **		14.27 **	141.78 **		30.80 **	8.21 **		49.97 **	73.272 **
N * W	0.43		0.23	1.99		2.88 *	1.80		2.58 *	2.92 *		2.69 *	0.015

注: CA: 耗水量; CI: 耗水强度; CP: 耗水模数。* 表示影响显著 $P < 0.05$, ** 表示极显著 $P < 0.01$, 下同。
Note: CA: Water consumption; CI: Water consumption intensity; CP: Water consumption percentage. *, and ** indicate significant at $P < 0.05$, extremely significant effect at $P < 0.01$. The same below.

由于花生的生理特性决定的,耗水最多的生育阶段是花针期,其次是结荚期而后是饱果期和苗期。苗期气温低,花生生长缓慢,因此耗水量最低;花针期和结荚期耗水量占花生全生育期耗水量的 64.5%~74.27%,不仅因为这两个生育期历时长,耗水强度高于其它生育期,还因为这一阶段是花生营养生长和生殖生长的重要时期;而饱果期,花生营养器官基本不再生长,主要为果实膨大,和营养的转移,因此耗水量低。分析结果表明施氮量对于花生各生育期的耗水量、耗水强度和耗水模数影响极显著,但是对于花生全生育期总耗水量的影响却不显著,说明施氮虽然会引起花生某个生育期的需水变化,但是经过调亏灌溉处理,在之后的生育期发生了明显的耗水补偿,因此生育期总耗水量变化不大。而水分亏缺除对花生苗期的耗水量和耗水强度影响不显著外,对其它生育期和全生育期的各项指标影响均达极显著水平。 $N \times W$ (施氮与亏水的交互作用)对花生饱果期的耗水量、耗水强度及耗水模数均影响显著。

2.2 不同水氮互作对花生生长的影响

2.2.1 不同水氮互作对花生株高的影响 水氮主



因子对花生株高的影响见图 1,株高是反映作物生长性状的重要特征指标。作物生长性状决定了产量的大小和品质优劣。由图 1 可知,在整个生长过程中,株高的增长情况均呈“S”型增长。不同水氮处理的增长趋势相同,苗期株高增长较为缓慢,苗期至花针期主茎高增长加快,不同处理的差异开始显现,结荚期增长速率逐渐减缓,到成熟期基本停止生长。花生株高增加速率与花生耗水强度基本一致(表 2)。由图 1a 可知,N2 处理(施氮 60 kg · hm⁻²)有利于花生株高的增长,并且从 7 月 23 日(花针期)差异开始明显,并且最终保持到收获,N2 处理株高最终达到 64.26 cm,分别高于 N0、N1 和 N3 处理 10.24%、3.86%和 4.69%。由图 1b 可知,W3 处理(灌水下限 65%)即保持土壤湿润有利于花生株高的增长,并且从 7 月 13 日(花针期)差异开始明显,并且最终保持到收获,W3 处理株高最终达到 64.26 cm,分别高于 W0、W1 和 W2 处理 12.73%、9.52%和 4.03%。并且水分对于花生株高的影响较氮肥的影响更为显著。

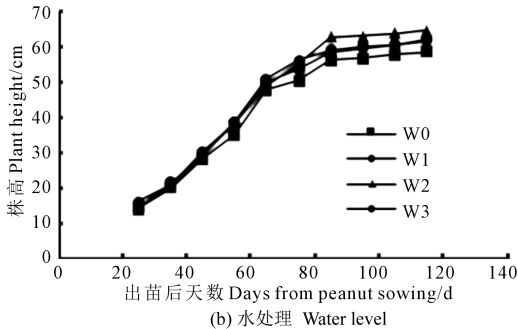


图 1 水氮互作对花生株高的影响

Fig.1 Effects of water and nitrogen interaction on plant height of peanut

2.2.2 不同水氮处理对花生叶面积指数影响 不同水氮供应对花生叶面积指数的影响见图 2,由图 2 可知,随着生育期的推进,花生叶面积指数呈现先增加后减小的趋势,在花生结荚期叶面积指数达到最大。在不同施氮及灌水处理下,花生叶面积指数呈不同变化趋势。其中,花生苗期时,不同施氮量对叶面积指数无显著影响。在花针期、结荚期及饱果期,施氮量对叶面积指数均有显著影响,叶面积指数随施氮量的增加显著增加,在 N3 处理(60 kg · hm⁻²)达到最大(图 2a)。调亏灌溉可以增加花生叶面积指数,花生各生育期叶面积指数均在 W2 中度亏水处理(灌水下限 55%)达到最大(图 2b)。

2.3 不同水氮互作对花生干物质的影响

水分和肥料与作物的干物质累积密切相关,由

表 3,表 4 可知施氮量、水分亏缺以及水氮交互作用对花生干物质质量的影响均达到极显著水平。N2W2 处理(灌水下限 55%,施氮 60 kg · hm⁻²)干物质累积最大,达到 113.41 g,以 N0W0(雨养不施氮)处理花生干物质累积最小,为 64.66 g。分析其主效应,N2 处理分别高出 N0、N1 和 N3 处理 29.17%、18.48%和 18.10%,并且达到显著水平。全部灌水处理皆高于雨养处理。W2 处理分别高出 W0、W1 和 W3 处理 15.41%、7.16%和 8.39%,且达到显著水平。

2.4 不同水氮互作对花生产量的影响

由表 4 可知,施氮量与水分亏缺以及二者的交互对于花生的产量都有着极显著的影响。进行因子主效应检测分析(表 5)可知,随着氮肥施入量的增加,花生的产量呈先显著增加,后又降低的趋势,

即当施氮量到达 N2 处理 ($60\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$) 时,花生达到最大产量 $5\,765.89\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,继续增加氮肥施用量,则会造成减产。可见,增加氮肥有利于花生增产,过量的氮肥又会抑制产量形成。调亏灌溉可以增加花生产量,相较于不灌水,轻度亏水和中度亏水分别增产 7.09% 和 13.09%。轻度亏水,中度亏水的产量显著高于不灌水和重度亏水的产量。分析二者的交互效应(表 4)表明,在 N0 和 N2 下,最大产

量出现在中度亏水,而 N1 和 N3 下则是轻度亏水产量最大。说明在不同的施氮处理下,水分亏缺程度对于产量的影响不甚一致,特别是高氮处理下的中度亏水和重度亏水,产量低于不灌水处理。说明过量的氮肥和较为严重的水分亏缺都会造成花生的显著减产。通过多重对比,N2W2 处理 ($6\,485.03\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$) 产量最高,显著高于当地常规处理 N2W0 处理 ($4\,903.87\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$),增产 32.24%。

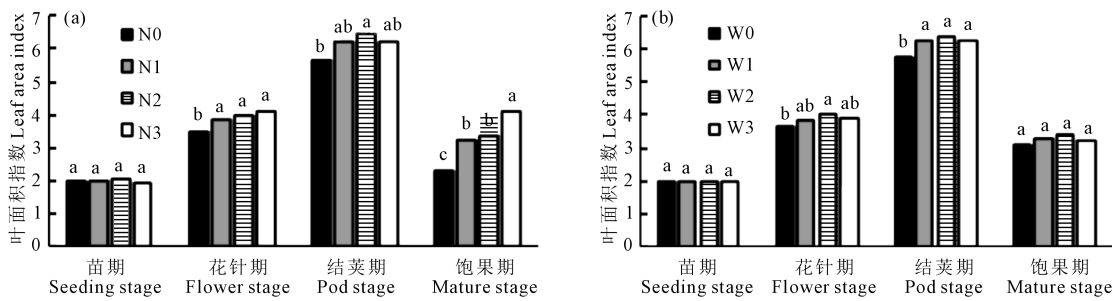


图 2 不同水氮供应对花生叶面积指数的影响

Fig.2 The effects of different water and nitrogen supply on leaf area index of peanut

表 4 水氮互作花生的干物质、产量和水氮利用效率及方差分析(F 检验)

Talbe 4 Effects of water and nitrogen interaction on dry weight, yield, water and nitrogen use efficiency and the analysis of variance(F test) of peanut

处理 Treatment	干物质/g Dry weight	耗水量/mm Water consumption	产量/($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$) Yield	WUE/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	NAE/($\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$)
N0W0	64.66f	254.17	4155.53i	1.64fg	—
N0W1	76.99cdef	324.67	4211.07i	1.32jk	—
N0W2	71.65ef	328.99	4645.50gh	1.41ij	—
N0W3	78.53cde	298.02	4244.40i	1.31k	—
N1W0	75.92cdef	262.01	4783.73fgh	1.83d	15.70de
N1W1	80.41cde	330.45	5094.50ef	1.54fgh	23.46c
N1W2	84.03cde	335.55	5115.40de	1.52ghi	23.99c
N1W3	77.81cde	303.89	6147.57b	1.86cd	49.80a
N2W0	78.99cde	247.25	4598.85gh	1.98ab	20.03cd
N2W1	98.36b	318.42	5440.07cd	1.77de	21.41cd
N2W2	113.41a	321.00	6485.03a	2.02a	38.82b
N2W3	86.21bc	288.43	6234.57ab	2.16a	34.65b
N3W0	84.22cd	254.08	4951.53cd	1.95bc	9.95ef
N3W1	71.81def	325.44	4609.30h	1.42ij	5.67f
N3W2	81.90cde	326.89	4656.67gh	1.42ij	6.26f
N3W3	81.30cde	294.92	4946.93c	1.68ef	16.39de
N	3068.92**	2.06	355.900**	424.253**	988.909**
W	890.59**	73.272**	111.867**	207.984**	395.740**
N*W	682.24**	0.015	35.883**	30.399**	97.443**

注: 同一列不同字母表示具有显著的差异,相同字母表示没有差异($P<0.05$),下同。
Note: Different lowercase letters in columns are significantly different at 0.05 probability level, and the same letter indicates no difference, at 0.05 level. The same below.

2.5 不同水氮互作对花生 WUE 的影响

对于 WUE,由方差分析(表 4)可知,施氮、水分亏缺和二者的交互对于 WUE 的影响显著。由主效应分析(表 5)可知,氮肥方面,花生的 WUE 随着施氮量的增加呈先增加后降低的趋势,在 N2 处理达到最大值($1.93\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$),随后是 N1 和 N3 处理,

N0 处理最低,仅为 $1.44\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$;水分亏缺方面,不灌溉处理的 WUE 最高,其值为 $1.85\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$,轻度亏水和中度亏水处理产量达到最高值($5\,523.11\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, $5\,300.65\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$),但轻度亏水处理的 WUE 也达到较高值($1.70\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$)。而分析二者的交互效应(表 4),无论何种的灌水条件下,不同的

施氮量对于花生 WUE 的影响都一致,皆在施氮量为 N2(60 kg · hm⁻²)时,WUE 达到最大值。但在不同的施氮条件下,WUE 对水分的响应变化却不一致,不同氮肥条件下,水分对于作物产量激发的潜力不同,从而导致单位体积水所对应的产量变化不同,进而导致水分对 WUE 的影响不甚一致。N2W0 和 N2W2 处理有着最大的 WUE,且二者差异不显著,分别为 1.98 kg · m⁻³和 2.02 kg · m⁻³。

表 5 不同水氮主因子间多重比较分析(Tukey HSD 法)

Table 5 Multiple comparison(Tukey HSD test) between main factors of water and nitrogen				
主因子 Main factor	干物质/g Dry weight	产量 Yield /(kg · hm ⁻²)	WUE /(kg · m ⁻³)	NAE /(kg · kg ⁻¹)
N				
N0	72.96c	4366.99c	1.44c	—
N1	79.54b	5283.55b	1.70b	33.23a
N2	94.24a	5765.89a	1.93a	28.73b
N3	79.80b	4916.11b	1.63bc	9.57c
W				
W0	75.95d	4879.71c	1.85a	15.23c
W1	81.89b	4838.74c	1.53b	16.85c
W2	87.75a	5225.65ab	1.62b	29.69b
W3	80.96b	5518.37a	1.70ab	33.61a

2.6 不同水氮互作处理对花生 NAE 的影响

NAE 反映氮肥对产量的贡献,由表 4、表 5 知,施氮量和水分亏缺以及二者的交互效应对 NAE 影响极显著。NAE 随着施氮量的增加显著降低,由最高的 33.23 kg · kg⁻¹(N1)降低到 9.57 kg · kg⁻¹(N3),降幅达到 247%。而随着亏水程度的减轻,NAE 显著提高,相比不灌水处理 W1,W2 和 W3 分别提高了 10.64%,94.94%和 120.68%,并且均达到显著水平。由表 4 的二者交互表明,在不同的亏水处理下,NAE 均呈随着施氮量的增加而显著降低的趋势,而在 W2 条件下,则是先升后降。在不同的施氮条件下,NAE 随着水分亏缺的减缓而有所升高。说明水氮交互作用能够抑制 NAE 的下降,如 N2W1 处理的 NAE 比 N3W3 处理增加 30.63%,而二者的产量差异却不显著,可见不同施氮和亏水可以降低花生种植中的施氮量,从而减轻了发生氮素流失的现象。

3 讨 论

调亏灌溉可以提高作物的 WUE 这一观点已经得到了广大学者的认同^[13],而 WUE 则是由作物的产量和耗水量共同影响的。作物的耗水量由自然降水,灌溉水和土壤贮水三部分构成,随着调亏灌溉程度减弱,即土壤保持较高的含水量,作物的耗

水量越大^[14],此时,灌溉水占作物总耗水量的比值却降低。花生苗期亏水会导致全生育期耗水量降低,而且随着亏水历时的增加,耗水量越低^[15]。但与 WUE 却不是单一的线性关系。花生前期水分亏缺会使其 WUE 提高,因为前期的干旱,有利于花生根系深扎,增加根冠比,进而增强花生的自身汲取土壤中水分的能力^[16]。施氮对于作物的耗水也有着明显的影响,在相同的灌溉方式下,增施氮肥会显著增加玉米的全生育期耗水量^[17],这与本研究所得出的花生全生育期耗水量和各生育期的耗水规律一致。有研究表明在典型的旱作农业区,进行适当的灌溉处理相对于雨养处理,在获得高产的同时,也能显著提高小麦的 WUE^[18]。但本研究表明,在进行轻度调亏灌溉(65%下限)处理时,产量较雨养显著提高,但 WUE 却有着下降的趋势,说明在在辽西半干旱区应用花针期-结荚期轻度调亏灌溉处理可以增加产量,可以维持较高的 WUE。有研究表明,一定的水分条件下,增施氮肥,有益于花生保持较大的叶面积指数,但过量氮肥会导致叶片过大从而相互遮挡,进而导致下部叶片衰老死亡,使花生的叶面积指数降低^[19]。过量施肥时,则 WUE 开始降低^[20-21],本研究虽是以花生为研究对象,但当控制灌水因素时,结论与其类似,说明不同作物对于氮的需求与反应具有一定的相似性。

虽然国内外对于调亏灌溉的研究已经很多,但对产量的影响却说法不一^[22]。产量受到气候、环境等多方面的影响,而水、氮只是其中两个比较重要的因子。增加灌水量和施肥量固然可以增加作物产量,但是只有当产量价值的边界条件大于投入的费用时,此时增加的水、肥才是有意义的^[23]。产量,耗水量和 WUE 是三个相互关联的变量,三者之间有着明显的耦合关系。调亏灌溉可以提高 WUE,而增施氮肥可以显著提高产量,故水氮互作可以综合提高作物产量和 WUE^[24-25]。在一些水资源量小,而且农业水管理较差的地区,将调亏灌溉运用于马铃薯,可以减少马铃薯水分敏感期—花期 25%的耗水量,而对产量无显著影响^[6]。本研究结果表明,N2W2 相较常规雨养处理增产 21.05%,WUE 仅降低 7.43%。所以,选定花生的需水关键期花针-结荚期进行调亏灌溉,可以达到增加产量而不显著降低 WUE 的效果。施加适量氮肥有益于花生保持较大的叶面积指数,但过量氮肥会导致叶片过大从而相互遮挡,进而导致下部叶片衰老死亡,使花生的叶

面积指数降低。

花生是耐瘠作物,有着丰富的根瘤,但是只能满足花生自身氮需求的 50%左右。在花生的种植中接种根瘤菌,使土壤中的根瘤菌增加,花生的产量先升高后降低,而生物量却是一直增高的^[26]。当土壤中的氮肥不足时,花生会出现较多的根瘤来进行固氮,从而维持花生产量的稳定,所以在降低氮肥施用量时,也能维持较大产量,而且 NAE 显著上升,当氮施用量从 67.5 kg · hm⁻²增加到 202.567 kg · hm⁻²时,NAE 下降达到了 200%^[27],与本试验得到的 247%类似,但试验条件不同,适宜的施氮量也不甚一致,所以结论有待进一步验证。本试验中虽然只是单独施加氮肥,并没有接种根瘤菌,但随着亏水程度的减缓,花生的 NAE 显著增加,且在试验过程中确实发现施氮量低的处理,花生根系的根瘤明显多于高氮处理,因此,可以综合考虑根瘤与施氮量和水分亏缺的关系,有待进一步验证,从而制定最佳的施肥灌水方式。

4 结 论

1)水氮互作下,N 的主效应对花生的各生育期耗水量均有极显著影响,N 对全生育期耗水量影响不显著,对花生产量、WUE 和 NAE 等重要指标皆影响极显著,随着施氮量的增加,花生株高、叶面积指数和干物质量以及产量和 WUE 都呈先增后减的变化趋势,产量和 WUE 最高增加 32.03%和34.03%,NAE 则是一直降低的,由最高的 33.23 kg · kg⁻¹ (N1)降低到 9.57 kg · kg⁻¹ (N3),降幅达到 247%。

2)W 的主效应对花生全生育期耗水量影响极显著,对花生株高和叶面积指数以及产量、WUE 和 NAE 影响极显著,W 的主效应可明显增加花生株高,最高增加 12.73%,最高可增产 13.09%,提高 NAE 120.68%,但会显著降低 WUE,最多降低 20.92%。

3)N * W 的交互响应可以综合提高花生的各项指标,并且达到显著水平,合理的水氮组合不仅可以维持较高的 WUE 和 NAE,还可以显著提高产量,达到高产高效。因此推荐施氮 60 kg · hm⁻²,花针-结荚期采取中度亏水处理 (N2W2),产量最高,为 6 485.03 kg · hm⁻²,相较当地常规种植方式增产 32.24%,而且还能维持较高的 WUE 和 NAE,分别达到 2.02 kg · m⁻³和 38.82 kg · kg⁻¹。

参 考 文 献:

[1] 中华人民共和国国家统计局. 2016 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2016.

[2] 姚珍珠, 夏桂敏, 王淑君, 等. 水分胁迫和斜发沸石应用对花生叶片光合特性及水分利用的影响[J]. 中国农村水利水电, 2016, (09): 105-110.

[3] 孙彦浩, 陈殿绪, 张礼凤. 花生施氮肥效果与根瘤菌固 N 的关系[J]. 中国油料作物学报, 1998, 20(03): 70-73.

[4] Boland A M, Mitchell P D, Jerie P H, et al. The effect of regulated deficit irrigation on tree water use and growth of peach [J]. Journal of Horticultural Science, 1993, 68(2): 261-274.

[5] Rowland D L, Faircloth W H, Payton P, et al. Primed acclimation of cultivated peanut (*Arachis hypogaea* L.) through the use of deficit irrigation timed to crop developmental periods [J]. Agricultural Water Management, 2012, 113: 85-95.

[6] Kifle M, Gebretsadikan T G. Yield and water use efficiency of furrow irrigated potato under regulated deficit irrigation, Atsibi Wemberta, North Ethiopia[J]. Agricultural Water Management, 2016, 14(1): 1-7.

[7] 邢英英, 张富仓, 张燕, 等. 滴灌施肥水肥耦合对温室番茄产量、品质和水氮利用的影响[J]. 中国农业科学, 2015, 48(04): 713-726.

[8] 康绍忠, 史文娟, 胡笑涛, 等. 调亏灌溉对于玉米生理指标及水分利用效率的影响[J]. 农业工程学报, 1998, (04): 88-93.

[9] 孟兆江, 孙景生, 刘祖贵, 等. 调亏灌溉对冬小麦不同生育阶段光合速率的影响[J]. 麦类作物学报, 2011, 31(06): 1130-1135.

[10] 白伟, 孙占祥, 刘晓晨, 等. 苗期调亏灌溉对大豆生长发育和产量的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2009, 27(04): 50-53.

[11] 孟兆江, 卞新民, 刘安能, 等. 调亏灌溉对棉花生长发育及其产量和品质的影响[J]. 棉花学报, 2008, 20(01): 39-44.

[12] 迟道才, 佟延旭, 陈涛涛, 等. 多生育期不同水分胁迫耦合对水稻产量及水分生产率的影响[J]. 沈阳农业大学学报, 2016, 47(01): 71-77.

[13] 蔡焕杰, 康绍忠, 张振华, 等. 作物调亏灌溉的适宜时间与调亏程度的研究[J]. 农业工程学报, 2000, 16(03): 24-27.

[14] 韩占江, 于振文, 王东, 等. 调亏灌溉对冬小麦耗水特性和水分利用效率的影响[J]. 应用生态学报, 2009, 20(11): 2671-2677.

[15] 刘吉利, 王铭伦, 吴娜, 等. 苗期水分胁迫对花生产量、品质 and 水分利用效率的影响[J]. 中国农业科技导报, 2009, 11(02): 114-118.

[16] 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(02): 450-456.

[17] 李文惠, 尹光华, 谷健, 等. 膜下滴灌水氮耦合对春玉米产量和水分利用效率的影响[J]. 生态学杂志, 2015, 34(12): 3397-3401.

[18] 杨吉顺, 李尚霞, 张智猛, 等. 施氮对不同花生品种光合特性及干物质积累的影响[J]. 核农学报, 2014, 28(01): 154-160.