doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.12.063

氮肥减量追施对风沙区膜下滴灌花生生长与渗透调节物质的影响

夏桂敏[1]　何生辉[1]　徐正飞[2]　吴　毅[1]　郑俊林[1]　迟道才[1]

(1.沈阳农业大学水利学院,沈阳 110866;2.江苏省连云港市水利局,连云港 222000)

摘要:为探究膜下滴灌条件下氮肥减量追施对花生生长及渗透调节物质的影响,于 2023 年和 2024 年 5—10 月在辽宁省阜新市阿尔乡灌溉试验站开展测坑裂区试验,研究膜下滴灌(I_{MDI})和滴灌(I_{CK})条件下,不同施氮模式(N0,不施氮处理;N1,减施 1/4 氮肥一次施肥处理;SN1,减施 1/4 氮肥分 3 次追肥处理;N2,常规施氮量一次施肥处理)对花生主茎高、根系形态、渗透调节物质含量、产量及水分利用效率的影响。试验结果表明,2023 年和 2024 年,I_{MDI} 处理花生主茎高始终大于 I_{CK} 处理,且不同施氮模式下花生主茎高由大到小依次为 SN1、N2、N1、N0。花针期与结荚期,I_{MDI}SN1 处理花生根系形态指标均为最优。2023 年花针期,I_{MDI}SN1 处理根长较 I_{MDI}N1 与 I_{MDI}N2 处理分别提高 43.9% 和 36.6%。2024 年花针期,与 I_{MDI}N1 与 I_{MDI}N2 处理相比,I_{MDI}SN1 处理根表面积分别提高 52.2% 和 17.3%,根体积分别提高 49.5% 和 25.0%;与 I_{CK}N2 处理相比,I_{MDI}SN1 处理根长和根体积分别提高 41.8% 和 45.5%。干旱胁迫下花生体内脯氨酸含量由大到小依次为 SN1、N1、N2、N0,I_{MDI}SN1 处理脯氨酸含量较 I_{MDI}N1 与 I_{MDI}N2 处理分别提高 18.1% 和 34.8%(2024 年结荚期);可溶性蛋白含量由大到小依次为 N2、SN1、N1、N0,I_{MDI}N2 处理可溶性蛋白含量较 I_{MDI}SN1 与 I_{MDI}N1 处理分别提高 27.4% 和 40.6%(2024 年结荚期);可溶性糖含量由大到小依次为 SN1、N1、N2、N0,I_{MDI}SN1 处理可溶性糖含量较 I_{MDI}N1 和 I_{MDI}N2 处理分别提高 30.3% 和 40.0%(2024 年花针期)。I_{MDI} 处理产量显著高于 I_{CK} 处理,I_{MDI}SN1 处理较 I_{CK}N2 处理无显著差异。I_{MDI}SN1 处理水分利用效率较 I_{CK}N2 处理提高 32.3%(2023 年)和 41.1%(2024 年)。因此,膜下滴灌条件下减施 1/4 氮肥分 3 次追肥处理(I_{MDI}SN1)能提高花生对水氮的吸收利用,增强花生需水关键期的渗透调节作用,最终提高花生产量。研究结果可为风沙区花生节水减氮生产提供理论依据。

关键词:花生;水氮耦合;氮肥优化;渗透调节物质;膜下滴灌

中图分类号:S565.2;S275.6　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2025)12-0687-10　　**OSID**:

Effects of Reduced Nitrogen Fertilizer with Topdressing on Peanut Growth and Osmotic Adjustment Substances under Mulched Drip Irrigation in Sandy Areas

XIA Guimin[1]　HE Shenghui[1]　XU Zhengfei[2]　WU Yi[1]　ZHENG Junlin[1]　CHI Daocai[1]

(1. *College of Water Conservancy, Shenyang Agricultural University, Shenyang* 110866, *China*

2. *Water Conservancy Bureau of Lianyungang City, Jiangsu Province, Lianyungang* 222000, *China*)

Abstract: Aiming to investigate the effects of reduced nitrogen fertilizer with topdressing on growth and osmoregulatory substances in peanut under mulched drip irrigation, a split-plot experiment was conducted at the Aerxiang Irrigation Experimental Station in Liaoning Province from May to October in 2023 and 2024. The effects of different nitrogen application modes (N0, no nitrogen; N1, 25% nitrogen reduction with single application; SN1, 25% nitrogen reduction with three times application; and N2, conventional nitrogen rate with single application) on main stem height, root morphology, osmoregulatory substances, yield, and water use efficiency of peanuts under mulched drip irrigation (I_{MDI}) and drip irrigation (I_{CK}) were analyzed. Results indicated that in 2023 and 2024, the I_{MDI} treatment consistently exhibited greater main stem height than I_{CK} treatment across all nitrogen modes. SN1 obtained the highest main stem height, and followed by N2 and N1, N0 had the lowest main stem height. During the flowering and pod

收稿日期:2025-05-20　修回日期:2025-07-01

基金项目:国家重点研发计划项目(2022YFD1500705)和国家自然科学基金项目(52209063)

作者简介:夏桂敏(1973—),女,教授,博士,主要从事节水灌溉与资源高效利用研究,E-mail:xiagm1229@126.com

通信作者:郑俊林(1990—),男,副教授,博士,主要从事水肥调控与高效利用研究,E-mail:junlinzheng@syau.edu.cn

setting stage, the $I_{MDI}SN1$ treatment achieved the optimal root morphology. In 2023, at the flowering stage, compared with $I_{MDI}N1$ and $I_{MDI}N2$ treatments, the $I_{MDI}SN1$ treatment increased root length by 43.9% and 36.6%, respectively. In 2024, at the flowering stage, compared with the $I_{MDI}N1$ and $I_{MDI}N2$ treatments, the $I_{MDI}SN1$ treatment enhanced root surface area by 52.2% and 17.3%, and root volume by 49.5% and 25.0%, respectively. Compared with the $I_{CK}N2$ treatment, the $I_{MDI}SN1$ treatment increased root length and root volume by 41.8% and 45.5%, respectively. Under drought stress, SN1 treatment had the highest proline content, and followed by N1 and N2 treatment, the N0 treatment had the lowest proline content. During the pod setting stage in 2024, compared with the $I_{MDI}N1$ and $I_{MDI}N2$ treatments, the $I_{MDI}SN1$ treatment increased proline content by 18.1% and 34.8%, respectively. During the pod setting stage in 2024, the N2 treatment had the highest soluble protein content and followed by the SN1 and N1 treatment, the N0 treatment had the lowest soluble protein content, the $I_{MDI}N2$ treatment had 27.4% and 40.6% higher soluble protein content than the $I_{MDI}SN1$ and $I_{MDI}N1$ treatments, respectively. During the flowering stage in 2024, the SN1 treatment obtained the highest soluble sugar content, and followed by the N1 and N2 treatment, the N0 treatment had the lowest soluble sugar content, compared with the $I_{MDI}N1$ and $I_{MDI}N2$ treatments, the $I_{MDI}SN1$ treatment increased soluble sugar content by 30.3% and 40.0%, respectively. The I_{MDI} treatment had higher peanut yield than the I_{CK} treatment, but the $I_{MDI}SN1$ treatment had similar peanut yield with $I_{CK}N2$ treatment. Compared with the $I_{CK}N2$ treatment, the I_{MDI} SN1 treatment increased water use efficiency by 32.3% (2023) and 41.1% (2024), respectively. Thus, reducing nitrogen rate by 25% with three split applications under mulched drip irrigation ($I_{MDI}SN1$) could improve water and nitrogen utilization, enhance osmoregulation during the critical water requirement stages, and ultimately promote peanut yield. These findings could provide theoretical basis for water-saving and nitrogen reduction in peanut production in sandy regions.

Key words: peanut; water-nitrogen coupling; nitrogen fertilizer optimization; osmoregulation substances; mulched drip irrigation

0 引言

花生作为我国主要油料作物之一,具有总产、单产高且种植业产值最大等优点[1]。辽西北地区是辽宁省花生主产区,该地区干旱频发,导致花生在生长关键期遭受干旱胁迫,从而严重限制了花生产量[2]。干旱胁迫是影响作物生长的主要非生物因素之一[3]。干旱胁迫会影响植物对营养元素的吸收利用,导致植物代谢紊乱,从而造成植物生长受阻或死亡[4]。膜下滴灌作为一种高效节水技术,结合了滴灌与地膜覆盖的双重优势,具有增温保墒,减少棵间蒸发的优点,能够有效缓解干旱胁迫对花生生长发育造成的不利影响。

氮是作物生长发育所必需的营养元素之一,参与作物体内蛋白质、核酸、氨基酸等物质合成过程。大量研究表明,合理施氮能够提高作物光合效率,促进作物光合产物转运与积累,提高作物产量与品质[5]。然而,由于辽西北地区风沙土土壤结构不佳,持水保肥能力弱,导致氮肥易随水流失,作物难以吸收利用,从而造成水氮利用效率低[6-7]。减少氮肥用量虽可降低氮肥流失风险,但过度减氮却会造成作物养分供应不足,进而导致作物减产[8]。因此,优化施氮模式,对于解决辽西北花生生产中施氮量高及氮肥流失等问题具有重要意义。合理施氮还可以有效增强植株渗透调节作用,提高对外界环境的抵抗能力,显著增加各径级根长、根表面积以及根体积[9]。渗透调节是植物适应干旱的重要生理机制,能够通过维持植物细胞水分吸收[10-11],同时积累大量渗透调节物质从而降低细胞水势,产生对干旱胁迫的适应性[12]。然而,作物渗透调节能力并不随施氮量增加而增强[13],反而减少氮素施入,保持低氮水平条件下作物渗透调节系统调节作用更好[14]。此外有研究表明,分次施入氮肥能促进作物在干旱环境下对渗透调节物质的积累,从而维持较高渗透调节功能[15]。与氮肥一次性基施相比,分次施入氮肥能提高作物体内渗透调节物质含量,保持较强生理优势[16]。综上,减少氮肥施入和分次施入氮肥能促进作物渗透调节物质积累,提高抵抗干旱胁迫能力。然而,膜下滴灌条件下氮肥减量和追施对风沙区花生渗透调节作用的影响尚不明晰。

因此,本试验以辽西北地区滴灌为对照,采用裂区试验设计,探究膜下滴灌条件下氮肥减量追施对风沙区花生生长发育及渗透调节物质的影响,以期为辽西北地区花生绿色高效生产提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于 2023—2024 年 5—10 月在辽宁省阜新市

彰武县阿尔乡灌溉试验站进行(42°49′N,122°23′E,海拔 257.63 m)。该地属于温带半干旱季风气候,年平均气温 7.2℃,平均相对湿度 61.0%,平均无霜期 156 d。多年平均降雨量 412 mm,蒸发量 1 781 mm,降雨量年内分布不均,夏季降雨量占全年降雨量的 66.0% 以上,两年试验期间降雨量分别为 338.4 mm(2023 年)和 553.6 mm(2024 年)。土壤理化性质为:容重 1.53 g/cm^3、田间持水率 24%(体积含水率)、有机质含量 1.1 g/kg、速效磷含量 3.6 mg/kg、速效钾含量 54.5 mg/kg。两年花生生长季降雨量和平均气温如图 1 所示。

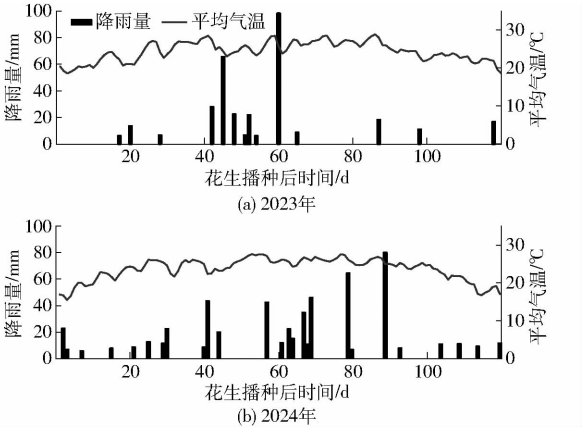


图 1　试验区 2023 年和 2024 年花生生长季降雨量和平均气温

Fig. 1　Precipitation and daily mean air temperature in experimental site during peanut growing seasons in 2023 and 2024

1.2　试验材料

供试花生品种采用当地广泛种植的白沙 1016。供试氮肥采用尿素(N 含量为 46%,339 kg/hm^2),磷肥采用过磷酸钙(P_2O_5 含量为 12%,600 kg/hm^2),钾肥采用硫酸钾(K_2O 含量为 50%,144 kg/hm^2)。其中磷、钾肥作为基肥一次性施入。

1.3　试验设计

采用裂区试验设计,主区为灌溉方式,包括滴灌(I_{CK})和膜下滴灌(I_{MDI}),子区为不同施氮模式,包括不施氮肥(N0)、减施 1/4 氮肥并一次性施入(N1),减施 1/4 氮肥并分 3 次施入(水肥一体化)(SN1)、常规施氮量一次性施入(N2),共 8 个处理,每个处理设置 3 次重复,共 24 个小区。试验在测坑内进行,测坑上方安装有自动遮雨棚,降雨时关闭遮雨棚,以消除降雨对控水的影响。各试验小区面积为 5 m^2(2.5 m × 2.0 m)。N1 处理氮肥用量为 254 kg/hm^2,于播种前一次性施入土壤;SN1 处理氮肥用量为 254 kg/hm^2,分别于苗期、花针期、结荚期按照比例 1∶1∶1施用,施肥前将肥料溶于水中,随灌溉水施入田间;N2 处理氮肥用量为 339 kg/hm^2,于播种前一次性施入土壤。滴灌和膜下滴灌具体控水标准如下:苗期和饱果期,土壤水分控制下限均为田间持水率的 70% ±5%;花针期和结荚期,土壤水分控制下限为田间持水率的 55% ±5% 时,灌水上限均为田间持水率的 90%[6]。采用 TDR 便携式土壤水分测量仪测量生育期内土壤含水率,当土壤含水率降低至控水下限时即灌水至上限。

试验采用大垄双行种植模式,垄台宽 0.8 m,垄沟宽 0.4 m,深 0.2 m。滴灌带距播种行 15 cm,地膜选择 0.010 mm 白色地膜,相邻两沟和垄上均埋设 Trime 管。播种深度 5 cm,每穴 2 ~ 4 粒花生,株距 8 ~ 10 cm,播前灌溉保证出苗。采用内镶片式滴灌带(北京绿源塑料有限责任公司),滴头流量为 2.0 L/h,滴头工作压力为 0.1 MPa,相邻滴头间距为 30 cm,滴灌带走向与垄平行,置于垄中。2023 年和 2024 年均为 5 月 24 日播种,9 月 25 日收获。

1.4　观测指标与方法

1.4.1　土壤含水率

播种前,在每个小区靠近滴灌带处选择 2 个观测点并预埋土壤水分监测管(Trime 管),使用 TRIME - PICO 64/32 型 TDR 便携式土壤水分测量仪分别测定 0 ~ 20 cm、20 ~ 40 cm 和 40 ~ 60 cm 土层土壤含水率。

1.4.2　主茎高

自花生出苗后,用刻度尺每隔 10 d 测定 1 次主茎高,测定时在每个小区选取生长状况良好、具有代表性的 3 株花生。

1.4.3　根系形态

分别在苗期、花针期、结荚期和饱果期末,选取长势均匀的 3 株花生,将花生根系完整取出后,用水冲洗干净,用扫描仪(Epson LA2400 型,分辨率为 400 dpi)对根系进行扫描,扫描时将根系放入特制透明托盘内,加入 3 ~ 5 mL 水以避免根系分支互相缠绕,扫描后保存图像,采用 WinRhizo Pro Vision 5.0 a 根系分析软件(Regent Instruments Inc.,加拿大)对图像进行分析,得到根长、根表面积、根体积等形态指标。

1.4.4　脯氨酸、可溶性蛋白及可溶性糖含量

在花针期和结荚期,当土壤含水率降低至控水下限时取新鲜花生叶片组织,同时在复水 3 d 后进行取样。采用茚三酮法[17]测定花生叶片脯氨酸含量,采用蒽酮比色法[17]测定花生叶片可溶性糖含量,采用考马斯亮蓝 G - 250 法[17]测定可溶性蛋白含量。

1.4.5　产量与水分利用效率

花生成熟后,选取 1 m^2 长势均匀的花生植株,将

果实全部摘下装入纱网袋自然阴干。当花生含水率降至14%时,用电子天平(精度为0.01 g)称取百果质量。根据花生产量和耗水量计算花生产量与水分利用效率(WUE),计算式为

$$WUE = \frac{Y}{10ET} \tag{1}$$

其中

$$ET = W_0 - W_t + W_T + P_0 + K + M \tag{2}$$

$$W_T = 1\,000(H_2 - H_1)\theta \tag{3}$$

式中 WUE——水分利用率,kg/m^3

Y——花生产量,kg/hm^2

ET——耗水量,mm

W_0——生育期始土壤计划湿润层水量,mm

W_t——生育期末土壤计划湿润层水量,mm

W_T——土壤计划湿润层增加而增加水量,mm

P_0——时段内计划湿润层中保存的有效降雨量,mm;降雨时关闭遮雨棚,P_0为0

K——时段内地下水补给量,mm;由于该测坑为有底测坑,K为0

M——时段内灌水量,mm

H_1——生育期始土壤计划湿润层深度,m

H_2——生育期末土壤计划湿润层深度,m

θ——$H_2 \sim H_1$内土层平均含水率(体积含水率),m^3/m^3

1.5 数据处理与统计分析

采用Microsoft Excel 2021进行数据整理,利用R studio软件进行数据方差分析,均值差异采用Tukey's HSD检验,利用Origin 2021软件绘图。

2 结果与分析

2.1 灌溉方式与施氮模式对花生主茎高的影响

不同灌溉方式和施氮模式对花生主茎高的影响如图2所示。由图2可知,花生全生育期主茎高呈"S"形变化趋势。

从灌溉方式主效应来看,进入花针期后,花生主茎高始终表现为I_{MDI}大于I_{CK},说明膜下滴灌对于花生茎的生长具有明显促进作用。从不同施氮模式主效应来看,不施氮(N0)处理主茎高明显低于其他处理,主茎高随着施氮量增加而增加,说明氮素能促进花生主茎生长。不同施氮模式中,花生主茎高由大到小始终为SN1、N2、N1、N0,即减氮分次追施处理(SN1)花生主茎高始终大于其他处理。由此可知,适量降低氮肥施用量的同时结合分次追施,不仅不会降低花生主茎高,还会促进花生主茎高增长。

2.2 灌溉方式与施氮模式对花生根系形态的影响

不同灌溉方式与施氮模式对花生根系形态影响的方差分析如表1所示。由表1可知,不同灌溉方式(2023年结荚期根长除外)与施氮模式主效应均显著影响花针期和结荚期根长、根表面积和根体积,二者交互效应显著影响花针期根表面积与结荚期根体积。

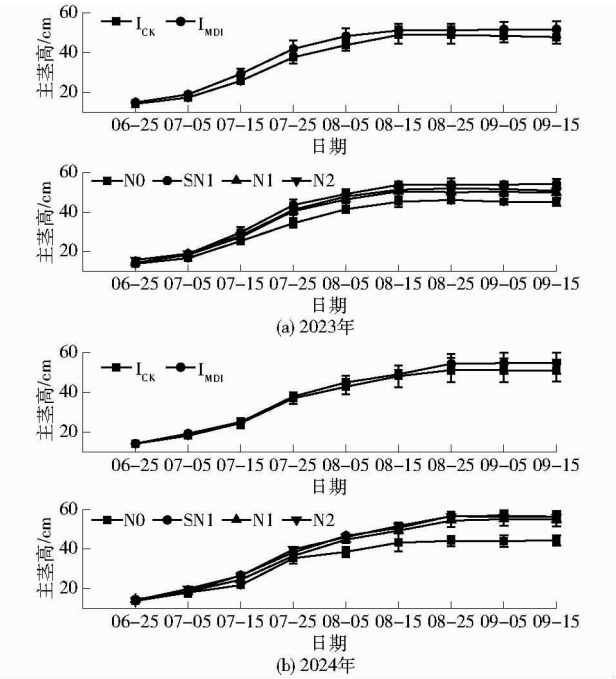


图2 不同灌溉方式和施氮模式对花生主茎高的影响

Fig. 2 Effects of different irrigation methods and nitrogen application modes on main stem height of peanut

2.2.1 根长

由表1可知,不同灌溉方式下花生根长始终表现为膜下滴灌(I_{MDI})大于滴灌(I_{CK})处理。相同灌溉方式下,不同施氮模式下花生根长由大到小依次为SN1、N2、N1、N0。以2023年花针期为例,I_{MDI}SN1处理根长较I_{CK}SN1处理提高37.2%,较I_{MDI}N1与I_{MDI}N2处理分别提高43.9%和36.6%,不同灌溉施肥组合处理中,I_{MDI}SN1处理花针期和结荚期根长均为最大,相较于传统滴灌常规施氮(I_{CK}N2)处理提高69.6%(花针期)。

2.2.2 根表面积

由表1可知,膜下滴灌处理(I_{MDI})下花生根表面积均大于滴灌(I_{CK})处理。相同灌溉方式下,不同施氮模式下花生花针期根表面积存在显著差异,花生根表面积由大到小依次为SN1、N2、N1、N0。以2024年为例,花针期,I_{MDI}SN1处理根表面积较I_{MDI}N1与I_{MDI}N2处理分别提高52.2%和17.3%;结荚期,I_{MDI}SN1处理根表面积较I_{MDI}N1提高66.1%,但与I_{MDI}N2处理间无显著差异。不同灌溉施肥组合处理中,I_{MDI}SN1处理花针期和结荚期根表面积均为最大,较I_{CK}N2处理分别提高41.8%(花针期)和48.4%(结荚期)。

表 1　不同灌溉方式和施氮模式对花生花针期和结荚期根系生长影响方差分析

Tab. 1　ANOVA for effects of different irrigation methods and nitrogen application modes on root growth traits of peanut at flowering and pod setting stages

生育期	处理	根长/cm		根表面积/cm^2		根体积/cm^3	
		2023 年	2024 年	2023 年	2024 年	2023 年	2024 年
花针期	I_{CK}	758.69^{b}	488.18^{b}	125.44^{b}	115.27^{b}	2.02^{b}	2.05^{b}
	I_{MDI}	907.36^{a}	589.01^{a}	158.03^{a}	133.26^{a}	2.37^{a}	2.40^{a}
	N0	536.77^{c}	436.09^{b}	94.80^{d}	98.99^{c}	1.65^{b}	1.60^{c}
	SN1	1 117.22^{a}	647.25^{a}	178.02^{a}	155.70^{a}	2.57^{a}	2.81^{a}
	N1	823.96^{b}	514.14^{b}	137.38^{c}	109.21^{c}	2.19^{a}	2.10^{b}
	N2	854.16^{b}	556.90^{ab}	156.76^{b}	133.16^{b}	2.35^{a}	2.38^{b}
	I_{CK}N0	492.71^{d}	385.11^{c}	93.82^{d}	93.90^{d}	1.62^{c}	1.52^{d}
	I_{CK}SN1	942.08^{b}	580.90^{abc}	147.74^{bc}	140.49^{b}	2.40^{ab}	2.42^{b}
	I_{CK}N1	749.94^{bc}	490.91^{bc}	121.87^{cd}	120.56^{c}	2.02^{abc}	2.05^{bcd}
	I_{CK}N2	761.92^{bc}	495.81^{bc}	138.35^{c}	106.13^{cd}	2.04^{abc}	2.20^{bc}
	I_{MDI}N0	580.84^{cd}	487.06^{bc}	95.77^{d}	104.07^{cd}	1.68^{bc}	1.69^{cd}
	I_{MDI}SN1	1 292.37^{a}	713.60^{a}	208.30^{a}	170.91^{a}	2.74^{a}	3.20^{a}
	I_{MDI}N1	897.98^{b}	537.37^{abc}	152.88^{bc}	145.77^{b}	2.37^{ab}	2.14^{bc}
	I_{MDI}N2	946.39^{b}	618.00^{ab}	175.17^{ab}	112.28^{cd}	2.67^{a}	2.56^{b}
	I	*	**	**	*	*	*
	N	**	**	**	**	**	**
	I × N	*	ns	**	*	ns	*
结荚期	I_{CK}	978.57^{a}	546.01^{b}	145.67^{b}	130.76^{b}	2.16^{b}	2.21^{b}
	I_{MDI}	1 025.90^{a}	637.99^{a}	181.91^{a}	153.97^{a}	3.11^{a}	3.03^{a}
	N0	624.73^{c}	427.80^{b}	113.97^{c}	104.82^{c}	1.85^{c}	1.97^{c}
	SN1	1 346.56^{a}	700.29^{a}	209.22^{a}	191.03^{a}	3.58^{a}	3.23^{a}
	N1	943.05^{b}	588.62^{a}	159.41^{b}	114.82^{c}	2.27^{bc}	2.49^{b}
	N2	1 094.61^{b}	651.28^{a}	172.56^{ab}	158.78^{b}	2.85^{b}	2.78^{b}
	I_{CK}N0	563.06^{d}	358.44^{c}	103.99^{c}	96.30^{d}	1.83^{c}	1.89^{d}
	I_{CK}SN1	1 336.91^{ab}	667.62^{ab}	170.39^{bc}	182.76^{a}	2.71^{bc}	2.34^{cd}
	I_{CK}N1	852.95^{cd}	553.17^{ab}	146.95^{bc}	109.65^{cd}	1.97^{c}	2.26^{cd}
	I_{CK}N2	1 038.03^{abc}	604.79^{ab}	161.35^{bc}	134.33^{b}	2.12^{c}	2.35^{cd}
	I_{MDI}N0	686.39^{d}	497.15^{bc}	123.95^{bc}	113.34^{bcd}	1.87^{c}	2.05^{cd}
	I_{MDI}SN1	1 356.21^{a}	732.96^{a}	248.04^{a}	199.31^{a}	4.44^{a}	4.12^{a}
	I_{MDI}N1	1 033.15^{bc}	624.08^{ab}	171.87^{abc}	119.98^{bc}	2.58^{bc}	2.73^{bc}
	I_{MDI}N2	1 151.19^{abc}	697.76^{a}	183.78^{ab}	183.23^{a}	3.57^{ab}	3.22^{b}
	I	ns	*	*	**	**	*
	N	**	**	**	**	**	**
	I × N	ns	ns	ns	**	*	**

注：不同小写字母表示处理间差异显著（$0.01 \leqslant P < 0.05$）；* 和 ** 分别表示显著影响（$0.01 \leqslant P < 0.05$）和极显著影响（$P < 0.01$），ns 表示不显著。下同。

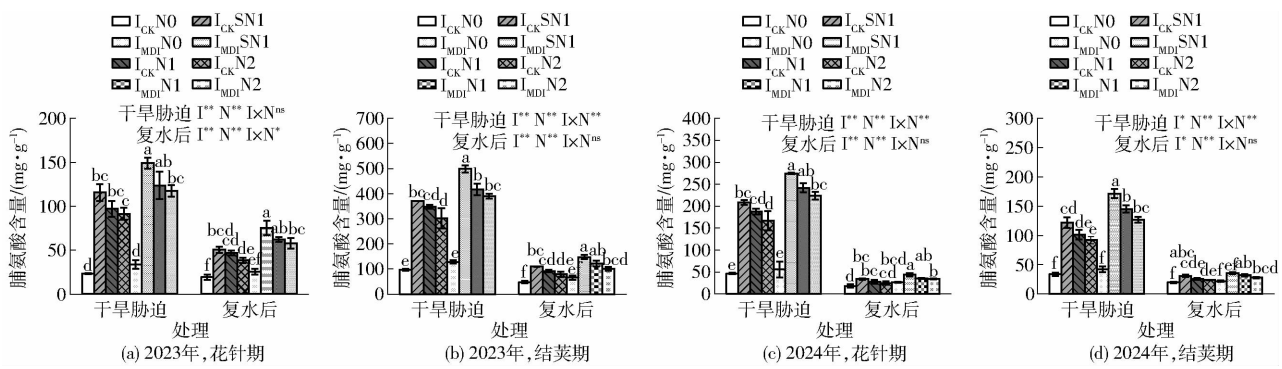
2.2.3　根体积

由表 1 可知，花生根体积变化基本与根长变化规律一致，不同灌溉方式下花生根体积始终表现为 I_{MDI} 处理大于 I_{CK} 处理。在相同灌溉方式下，根体积随着施氮量降低而逐渐减小，但整体上由大到小仍表现为 SN1、N2、N1、N0。以 2024 年为例，I_{MDI}SN1 处理根体积较 I_{MDI}N1 和 I_{MDI}N2 处理分别提高 49.5% 和 25.0%（花针期），50.9% 和 28.0%（结荚期）。I_{MDI}SN1 处理两年花生根体积均最大，较 I_{CK}N2 处理分别提高 45.5%（花针期）和 75.3%（结荚期）。

2.3　不同灌溉方式与施氮模式对花生渗透调节物质的影响

2.3.1　脯氨酸

不同灌溉方式和施氮模式对花生脯氨酸含量的影响如图 3（图中 *、** 表示显著影响（$0.01 \leqslant P < 0.05$）、极显著影响（$P < 0.01$），ns 表示不显著，不同小写字母表示处理间差异显著（$0.01 \leqslant P < 0.05$），下同）所示。由图 3 可知，灌溉方式和施氮模式主效应均显著影响脯氨酸含量，但二者交互效应对脯氨酸含量无显著影响。花针期和结荚期干旱胁迫



(a) 2023年,花针期 (b) 2023年,结荚期 (c) 2024年,花针期 (d) 2024年,结荚期

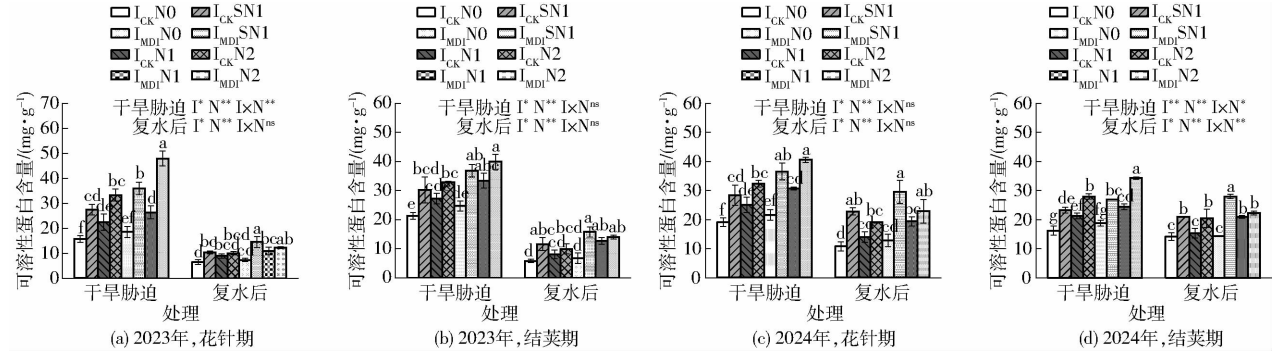
图 3 不同灌溉方式和施氮模式对花生脯氨酸含量的影响

Fig. 3 Effects of different irrigation methods and nitrogen application modes on proline content of peanut

下,花生体内脯氨酸开始大量积累,复水后恢复至正常水平。干旱胁迫下,不同灌溉方式脯氨酸含量积累表现为 I_{MDI}处理大于 I_{CK}处理,不同施氮模式间脯氨酸含量积累量由大到小依次为 SN1、N1、N2、N0;复水后各处理脯氨酸含量大幅下降,但各处理脯氨酸含量规律与干旱时一致。不施氮处理(N0)由于缺乏氮素,脯氨酸合成受限,因此脯氨酸含量最低。由图 3 可知,干旱胁迫下,I_{MDI}SN1 处理花针期和结荚期花生体内积累的脯氨酸含量最高。以 2024 年干旱胁迫为例,花针期,I_{MDI}SN1 处理脯氨酸含量较 I_{MDI}N2 处理提高 22.6%,与 I_{MDI}N1 处理并无显著差异;结荚期,I_{MDI}SN1 处理脯氨酸含量较 I_{MDI}N1 与 I_{MDI}N2 处理分别提高 18.1% 和 34.8%。I_{MDI}SN1 处理脯氨酸含量较 I_{CK}N2 处理分别提高 64.4%(花针期)和 86.4%(结荚期)。复水 3 d 后脯氨酸含量恢复正常,不同水氮处理中 I_{MDI}SN1 处理脯氨酸含量仍为最高。

2.3.2 可溶性蛋白

不同灌溉方式和施氮模式对花生可溶性蛋白含量的影响如图 4 所示。由图 4 可知,灌溉方式和施氮模式主效应均显著影响可溶性蛋白含量,二者交互效应显著影响 2024 年结荚期可溶性蛋白含量。干旱胁迫下,花生体内可溶性蛋白含量表现为先增多后减少的变化趋势,整体表现为 I_{MDI}处理大于 I_{CK}处理。相同灌溉方式下,不同施氮模式下可溶性蛋白含量由大到小依次为 N2、SN1、N1、N0,复水后各处理可溶性蛋白含量降低,由大到小依次为 SN1、N2、N1、N0。



(a) 2023年,花针期 (b) 2023年,结荚期 (c) 2024年,花针期 (d) 2024年,结荚期

图 4 不同灌溉方式和施氮模式对花生可溶性蛋白含量的影响

Fig. 4 Effects of different irrigation methods and nitrogen application modes on soluble protein content of peanut

由图 4 可知,干旱胁迫下,I_{MDI}N2 处理可溶性蛋白含量最高,复水后,各处理可溶性蛋白含量下降,可溶性蛋白含量最高处理为 I_{MDI}SN1 处理。以 2024 年结荚期为例,干旱胁迫下,I_{MDI}N2 处理可溶性蛋白含量较 I_{MDI}SN1 与 I_{MDI}N1 处理分别提高 27.4% 和 40.6%;复水后,I_{MDI}SN1 处理可溶性蛋白含量较 I_{MDI}N1 处理与 I_{MDI}N2 处理分别提高 33.6% 和 25.4%,较 I_{CK}N2 处理提高 36.4%。

2.3.3 可溶性糖

不同灌溉方式和施氮模式对花生可溶性糖含量的影响如图 5 所示。由图 5 可知,灌溉方式和施氮模式主效应均显著影响可溶性糖含量,二者交互效应显著影响 2024 年花针期可溶性糖含量。干旱胁迫下,花生体内可溶性糖含量积累增多,复水后含量下降。不同灌溉方式下,花针期和结荚期干旱时和复水后可溶性糖含量均表现为 I_{MDI}处理大于 I_{CK}处理,不同施氮模式处理下可溶性糖含量由大到小依次为 SN1、N1、N2、N0。

由图 5 可知,干旱和复水前后 I_{MDI}SN1 处理下花生可溶性糖含量最高。以 2024 年花针期为例,

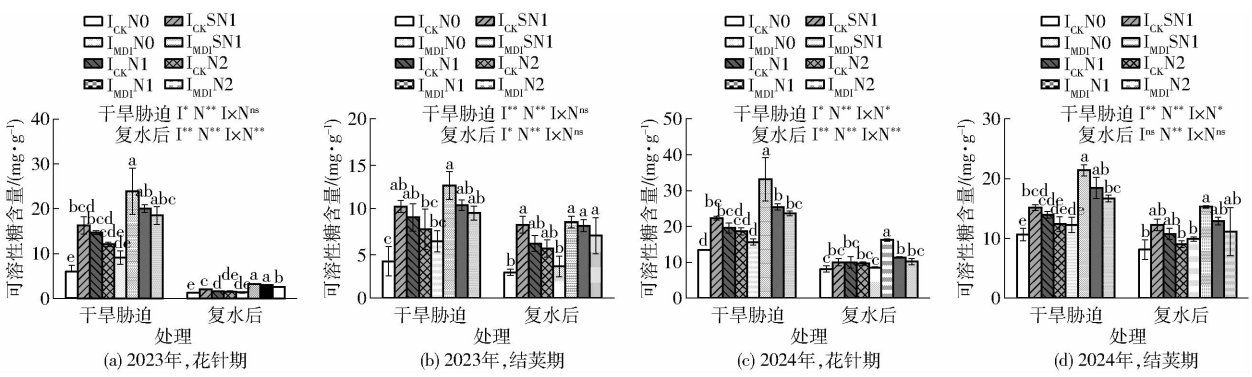


图 5　不同灌溉方式和施氮模式对花生可溶性糖含量的影响

Fig. 5　Effects of different irrigation methods and nitrogen application modes on soluble sugar content of peanut

I_{MDI}SN1 处理可溶性糖含量较 I_{MDI}N1 与 I_{MDI}N2 处理分别提高 30.3% 和 40.0%，较 I_{CK}N2 处理提高 78.2%。复水 3 d 后可溶性糖含量减少，大小关系与干旱胁迫下规律一致，I_{MDI}SN1 处理可溶性糖含量较 I_{MDI}N1 与 I_{MDI}N2 处理分别提高 43.1% 和 59.0%，较 I_{CK}N2 处理提高 68.1%。

2.4　不同灌溉方式与施氮模式对花生产量和水分利用效率的影响

不同灌溉方式与施氮模式对花生产量和水分利用效率影响的方差分析如表 2 所示。由表 2 可知，灌溉方式和施氮模式主效应均显著影响花生全生育期灌水量、耗水量、产量及水分利用效率，二者交互效应显著影响花生耗水量与 2024 年灌水量和产量。

由表 2 可知，2023 年和 2024 年，不同水氮处理中 I_{MDI}SN1 处理产量和水分利用效率均为最高。不同灌溉方式下，花生产量整体表现为 I_{MDI} 大于 I_{CK} 处理，不同施氮模式下花生产量由大到小依次为 SN1、N2、N1、N0。2024 年，I_{MDI}SN1 处理花生产量较 I_{MDI}N1 处理提高 7.18%，且两年内 I_{MDI}SN1 处理花生产量与滴灌条件下常规施氮（I_{CK}N2）处理相比并无显著差异。此外，两年内花生灌水量和耗水量均表现为 I_{MDI} 处理小于 I_{CK} 处理，I_{MDI}SN1 处理花生灌水量较 I_{CK}N2 处理降低 22.1%（2023 年）和 19.3%（2024 年）；耗水量较 I_{CK}N2 处理降低 12.8%（2023 年）和 25.6%（2024 年）。不同灌溉方式水分利用效率整体表现为 I_{MDI} 大于 I_{CK} 处理。不同施氮模式下水分利用效率由大到小依次为 SN1、N2、N1、N0，两年中 I_{MDI}SN1 处理水分利用效率较 I_{CK}N2 处理提高 32.3%（2023 年）和 41.1%（2024 年），并且显著高于 I_{MDI}N1

表 2　不同灌溉方式与施氮模式对花生耗水量、产量及水分利用效率的影响

Tab. 2　Effects of different irrigation methods and nitrogen application modes on water consumption, yield, and water use efficiency of peanut

处理	灌水量/mm		耗水量/mm		产量/(kg·hm⁻²)		水分利用效率/(kg·m⁻³)	
	2023 年	2024 年	2023 年	2024 年	2023 年	2024 年	2023 年	2024 年
I_{CK}	353.16^{a}	301.69^{a}	489.28^{a}	388.13^{a}	4 789.49^{b}	4 845.68^{b}	0.98^{b}	1.25^{b}
I_{MDI}	293.03^{b}	252.34^{b}	439.96^{b}	316.56^{b}	5 137.53^{a}	5 221.10^{a}	1.17^{a}	1.65^{a}
N0	299.76^{d}	252.91^{d}	440.83^{c}	326.71^{c}	4 424.65^{c}	4 371.72^{c}	1.01^{b}	1.36^{c}
SN1	328.72^{b}	283.64^{b}	469.45^{b}	355.01^{b}	5 490.13^{a}	5 443.83^{a}	1.17^{a}	1.55^{a}
N1	314.99^{c}	270.02^{c}	460.25^{b}	343.24^{b}	4 861.58^{bc}	4 938.49^{b}	1.06^{b}	1.46^{b}
N2	348.91^{a}	301.48^{a}	487.95^{a}	384.43^{a}	5 077.67^{ab}	5 379.51^{a}	1.05^{b}	1.42^{b}
I_{CK}N0	327.32^{d}	280.11^{c}	473.21^{cd}	360.74^{cd}	4 139.94^{c}	4 086.67^{d}	0.87^{e}	1.13^{e}
I_{CK}SN1	361.55^{b}	301.36^{b}	489.70^{b}	390.07^{b}	5 272.34^{ab}	5 300.75^{ab}	1.08^{bcd}	1.36^{c}
I_{CK}N1	343.99^{c}	295.56^{b}	478.87^{bc}	371.76^{bc}	4 777.01^{bc}	4 664.43^{c}	1.00^{cde}	1.25^{d}
I_{CK}N2	379.78^{a}	329.71^{a}	515.35^{a}	429.96^{a}	4 968.65^{ab}	5 330.85^{ab}	0.96^{de}	1.24^{d}
I_{MDI}N0	272.20^{f}	225.72^{e}	408.46^{g}	292.68^{g}	4 709.36^{bc}	4 656.77^{c}	1.15^{ab}	1.59^{b}
I_{MDI}SN1	295.90^{e}	265.92^{c}	449.20^{ef}	319.95^{ef}	5 707.91^{a}	5 586.90^{a}	1.27^{a}	1.75^{a}
I_{MDI}N1	285.98^{ef}	244.47^{d}	441.63^{f}	314.72^{fg}	4 946.15^{ab}	5 212.55^{b}	1.12^{bc}	1.66^{b}
I_{MDI}N2	318.05^{d}	273.25^{c}	460.55^{de}	338.90^{de}	5 186.69^{ab}	5 428.17^{ab}	1.13^{abc}	1.60^{b}
I	**	**	**	**	*	*	**	**
N	**	**	**	**	**	**	**	**
I×N	ns	*	**	*	ns	**	ns	ns

和 I_{MDI}N2(2024 年)处理。综上,膜下滴灌耦合氮肥减量追施能够实现风沙区花生减氮增产目标。

3 讨论

3.1 灌溉方式与施氮模式对花生生长性状的影响

水分和氮素是作物生长的必要物质基础,是影响作物产量形成的关键因素。现有研究表明,膜下滴灌下追施氮肥能够显著提升花生主茎高、侧枝长等生长指标[18]。WANG 等[19]研究发现,膜下滴灌能够改变土壤水分从而优化细根分布,促进作物对土壤水分的吸收,提高作物产量和水分利用效率。本研究结果表明,整个生育期内,膜下滴灌处理下花生主茎高以及根长、根表面积和根体积均优于滴灌处理,说明膜下滴灌的增温保墒作用,能够减少水分蒸发,维持土壤湿度稳定,进而促进花生主茎生长及根系发育。TANG 等[20]研究发现,追肥能够优化土壤中水氮分布,促进花生根系伸长。本研究结果表明,不同施氮模式下,氮肥减量追施(SN1)处理下花生主茎高大于常规施氮(N2)处理,且 SN1 处理下花生根长、根表面积和根体积均为最优。说明减氮条件下将氮肥分次追施能够实现花生不同生育期的氮素供应,促进花生营养生长与生殖生长之间的协调,有利于花生生长发育。然而,单纯的减氮处理(N1)下花生会由于缺乏氮源从而抑制主茎和根系发育。本试验结果表明,花生主茎高和根系指标均随着施氮量减少呈减小趋势;而减氮条件下将氮肥分次追施能够显著促进花生主茎和根系发育。综上,膜下滴灌下氮肥减量追施能够促进花生主茎和根系生长。

3.2 灌溉方式与施氮模式对花生渗透调节物质的影响

渗透调节是通过维持作物细胞水分吸收来帮助作物适应干旱和盐碱条件的生化机制。在作物受到水分胁迫时,渗透调节能够帮助作物维持有效生长膨压,从而适应干旱胁迫环境[9]。在渗透调节过程中,作物体内脯氨酸(Pro)、可溶性糖(SS)、可溶性蛋白(SP)等含量变化能有效反映作物对干旱胁迫的生理响应和适应能力。有研究发现,植物在干旱胁迫下,其体内脯氨酸物质会因干旱胁迫的影响而积累,从而降低干旱胁迫对植物的伤害[21]。可溶性蛋白能维持植物细胞的低渗透势,保护细胞结构稳定[22]。在胁迫解除后,可溶性蛋白还能参与细胞代谢进而被分解利用。可溶性糖在植物渗透调节过程中发挥重要作用,在干旱胁迫环境下植物体内会大量积累可溶性糖,从而维持细胞水分平衡。在胁迫解除后,可溶性糖会被分解合成其他有机物质,或通过代谢转化为能量。本试验中,在花针期和结荚期对花生植株进行调亏处理,使得花生处于干旱胁迫环境,花生叶片脯氨酸、可溶性蛋白、可溶性糖含量升高,在复水后渗透调节物质含量降低。BAO 等[23]研究发现,可溶性蛋白在干旱初期便会短暂增加,而脯氨酸和可溶性糖在干旱后会持续积累。此外,本研究发现,膜下滴灌处理下花生叶片渗透调节物质含量大于滴灌处理,这是由于膜下滴灌可以减少土壤水分蒸发,尤其在风沙区可更稳定地维持根系层水分,通过延长轻度胁迫时间,促进渗透调节物质的持续合成[24]。同时,施氮可以使作物在干旱逆境中维持较高的渗透调节功能,缓解逆境对作物的伤害,减少产量损失。本研究结果表明,在干旱胁迫下,未施氮处理花生植株体内脯氨酸、可溶性蛋白、可溶性糖含量均低于施氮处理。这是由于不施氮处理花生体内缺乏可用氮源,导致渗透调节物质合成受限,因而造成花生渗透调节物质含量低。罗颖等[25]研究发现,低氮环境会导致作物自身合成的氮化物减少,从而影响作物可溶性糖和可溶性蛋白合成,降低作物自身水分吸收与渗透调节能力。然而,花生合成的渗透调节物质并不表现为随着施氮量增加而增加。本试验结果发现,相同灌溉方式下,不同施氮模式中 SN1 处理下花生脯氨酸、可溶性糖含量在干旱胁迫时和复水后均为最高,而 N2 处理花生可溶性蛋白含量为相同灌溉方式下最大处理,复水后 SN1 处理下可溶性蛋白含量变为最高。说明通过水氮耦合处理能够通过提高氮素有效性来优化作物氮素供应,从而促进渗透调节物质合成。TIAN 等[26]研究发现,水氮耦合能促进氮素吸收,而较高的氮吸收量能通过维持作物新陈代谢活动来缓解水分胁迫所带来的危害。综上,氮肥减量追施处理能更好地促进花生植株在干旱胁迫下对渗透调节物质的积累。

3.3 灌溉方式与施氮模式对花生产量及水分利用效率的影响

氮素在作物新陈代谢过程中起着重要作用,充分影响作物体内蛋白质、核酸、氨基酸等物质的合成过程。水是作物体内养分吸收利用和转运的载体,决定了氮素对作物的有效性[27]。夏桂敏等[28]研究指出,施氮量和灌溉量对花生植株氮素吸收、分配及转运均产生调控与互补效应。张自茹等[29]研究发现,追肥处理相较常规一次性施肥更有利于提高花生光合能力,从而实现花生高产。张书红等[30]研究发现,与常规灌水施肥相比,膜下滴灌追肥能更好地按照作物各生育期需肥规律调整追肥比例,显著提高作物产量。本研究结果表明,相较于常规施氮处理,氮肥减量追施处理能提

高花生产量和水分利用效率，而减氮一次性施肥处理则降低了花生产量，说明减氮条件下通过将氮肥分次施入土壤能促进作物对氮素的吸收利用，进而提高作物产量。於凝等[31]研究发现，与旱作高肥模式相比，水肥一体化结合减氮处理能增加作物对氮素的积累，促进作物不同器官光合产物分配，进而提高水氮利用效率，增加作物产量。此外，本试验结果表明，SN1 与 N2 处理通过促进渗透调节物质的协同积累，优化根系形态，最终实现高产；而 N1 处理会导致代谢受阻，限制产量。综上所述，膜下滴灌耦合氮肥减量追施处理能满足花生不同生育期对水氮的需求，提高花生对水氮的吸收利用进而提高花生产量和水分利用效率。

4　结论

（1）不同施氮模式下，I_{MDI}SN1 处理花生主茎高、根长、根表面积以及根体积均最优，说明膜下滴灌耦合氮肥减量追施处理（I_{MDI}SN1）能促进花生主茎增长，以及提高根长、根表面积和根体积。

（2）花针期与结荚期干旱胁迫处理下，花生体内渗透调节物质积累增多，复水后回到正常水平。I_{MDI}SN1 处理花生体内脯氨酸、可溶性糖含量最多，复水后该处理可溶性蛋白含量最多。说明氮肥减量追施处理能提高作物合成渗透调节物质的能力，从而适应干旱胁迫环境，并在复水后能快速恢复。

（3）不同灌溉方式和施氮模式处理中，膜下滴灌耦合氮肥减量追施处理（I_{MDI}SN1）产量和水分利用效率最高。说明降低氮肥施用量的同时分次追施氮肥能满足花生不同生长时期对水氮的需求，提高花生对水氮的吸收利用，进而提高花生产量和水分利用效率。

（4）I_{MDI}SN1 处理能提高作物对水氮的吸收利用，增强花生需水关键期的渗透调节作用，改善花生主茎高、根长、根表面积及根体积等生长特性，最终提高花生产量，可为实现风沙区花生节水减氮绿色生产目标提供理论依据。

参　考　文　献

[1] 廖伯寿. 我国花生生产发展现状与潜力分析[J]. 中国油料作物学报，2020，42(2)：161－166.
LIAO Boshou. A review on progress and prospects of peanut industry in China[J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2020, 42(2): 161－166. (in Chinese)

[2] 陈雷，杨明达，贺群岭，等. 基于不同生育时期干旱对花生抗旱性的综合评定[J]. 花生学报，2024，53(2)：31－38，46.
CHEN Lei, YANG Mingda, HE Qunling, et al. Comprehensive evaluation on drought resistance of peanuts at different growth stages[J]. Journal of Peanut Science, 2024, 53(2): 31－38, 46. (in Chinese)

[3] 姚珍珠，夏桂敏，王淑君，等. 花生对水分胁迫的响应研究进展[J]. 中国油料作物报，2016，38(5)：699－704.
YAO Zhenzhu, XIA Guimin, WANG Shujun, et al. Research progress of the effects of water stress on peanut[J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2016, 38(5): 699－704. (in Chinese)

[4] 王海艺，韩烈保，黄明勇. 干旱条件下水肥耦合作用机理和效应[J]. 中国农学通报，2006(6)：124－128.
WANG Haiyi, HAN Liebao, HUANG Mingyong. Mechanism and effect of water and fertilizer coupling under drought stresses[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2006(6): 124－128. (in Chinese)

[5] 吴晓磊，刘俊明，曹辉，等. 不同施氮水平下调亏灌溉对冬小麦叶片光合与水氮利用效率的影响[J]. 农业机械学报，2025，56(6)：618－627.
WU Xiaolei, LIU Junming, CAO Hui, et al. Effects of regulated deficit irrigation with different nitrogen application levels on leaf photosynthesis and water and nitrogen use efficiency of winter wheat[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(6): 618－627. (in Chinese)

[6] 夏桂敏，汪千庆，张峻霄，等. 生育期连续调亏灌溉对花生光合特性和根冠生长的影响[J]. 农业机械学报，2021，52(8)：318－328.
XIA Guimin, WANG Qianqing, ZHANG Junxiao, et al. Effect of continuous regulated deficit irrigation in growth period on photosynthetic characteristics and root and crown growth of peanut[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(8): 318－328. (in Chinese)

[7] 窦超银，刘富强. 辽西北风沙土滴灌追氮次数对玉米生长和产量的影响[J]. 灌溉排水学报，2023，42(11)：67－73.
DOU Chaoyin, LIU Fuqiang. Effects of topdressing frequency on growth and yield of maize in aeolian sandy soil under fertigation[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2023, 42(11): 67－73. (in Chinese)

[8] 张冠初，戴良香，徐扬，等. 减氮配施钙肥对花生光合特性、产量及肥料贡献率的影响[J]. 中国油料作物学报，2020，42(6)：1010－1018.
ZHANG Guanchu, DAI Liangxiang, XU Yang, et al. Effect of nitrogen reduction and calcium fertilizer application on photosynthetic characteristics, yield and fertilizer contribution rate in peanut[J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2020, 42(6): 1010－1018. (in Chinese)

[9] DREWNIAK B, GONZALEZ-MELER M. Earth system model needs for including the interactive representation of nitrogen deposition and drought effects on forested ecosystems[J]. Forests, 2017, 8(8): 267.

[10] SANDERS G J, ARNDT S K. Osmotic adjustment under drought conditions[M]// Plant responses to drought stress: from morphological to molecular features. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2012: 199－229.

[11] ZHANG J, WANG Q, XIA G, et al. Continuous regulated deficit irrigation enhances peanut water use efficiency and drought resistance[J]. Agricultural Water Management, 2021, 255: 106997.

[12] 张智猛,宋文武,丁红,等.不同生育期花生渗透调节物质含量和抗氧化酶活性对土壤水分的响应[J].生态学报,2013,33(14):4257-4265.
ZHANG Zhimeng, SONG Wenwu, DING Hong, et al. The responses of leaf osmoregulation substance and protective enzyme activity of different peanut cultivars to non-sufficient irrigation[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(14): 4257-4265. (in Chinese)
[13] 汲添.不同氮水平对北方粳稻渗透调节物质和氮代谢关键酶的影响[D].长春:吉林农业大学,2016.
JI Tian. Effects on osmotic adjustment and key enzyme in nitrogen metabolism of Japonica rice varieties at different nitrogen nutrition levels[D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2016. (in Chinese)
[14] CHEN Jikang, GAO Gang, YU Chunming, et al. Effects of nitrogen application on osmotic adjustment of ramie (*Boehmeria nivea* L.) with different nitrogen efficiency[J]. Agricultural Science & Technology, 2019, 20(6): 14-21,27.
[15] 蓝立斌,陈超君,米超,等.不同施氮方式对甘蔗生理生化性状的影响[J].南方农业学报,2011,42(1):26-29.
LAN Libin, CHEN Chaojun, MI Chao, et al. Effect of different application methods of nitrogen fertilizer on some physio-biochemical parameters in sugarcane[J]. Journal of Southern Agriculture, 2011,42(1):26-29. (in Chinese)
[16] ZHANG Z, YU Z, ZHANG Y, et al. Split nitrogen fertilizer application improved grain yield in winter wheat (*Triticum aestivum* L.) via modulating antioxidant capacity and ^{13}C photosynthate mobilization under water-saving irrigation conditions [J]. Ecological Process,2021,10:1-13.
[17] 孙晓梵,张一龙,李培英,等.不同施氮量对干旱下狗牙根抗氧化酶活性及渗透调节物质含量的影响[J].草业学报,2022,31(6):69-78.
SUN Xiaofan, ZHANG Yilong, LI Peiying, et al. Effects of different nitrogen application rates on antioxidant activity and content of substances involved in osmotic adjustment in *Cynodon dactylon* under drought stress[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2022, 31(6): 69-78. (in Chinese)
[18] 周顺新,王慧新,吴占鹏,等.膜下滴灌不同肥料种类对花生生理性状与产量的影响[J].花生学报,2014,43(2):27-30.
ZHOU Shunxin, WANG Huixin, WU Zhanpeng, et al. Influence of different fertilizer treatment on agronomic traits and yield of peanut under mulched drip irrigation[J]. Journal of Peanut Science, 2014, 43(2): 27-30. (in Chinese)
[19] WANG J, DU G, TIAN J, et al. Mulched drip irrigation increases cotton yield and water use efficiency via improving fine root plasticity[J]. Agricultural Water Management, 2021, 255: 106992.
[20] TANG Q, MA Y, ZHAO L, et al. Effects of water and nitrogen management on root morphology, nitrogen metabolism enzymes, and yield of rice under drip irrigation[J]. Agronomy, 2023, 13(4): 1118.
[21] KHAMPHENG B, 沈镭, 钟帅, 等. 脯氨酸引发提高烟草种子和幼苗抗逆性及其与抗氧化系统的关系[J].山西农业科学,2019,47(1):39-48.
KHAMPHENG B, SHEN Lei, ZHONG Shuai, et al. Improving the antioxidant system and its stress resistanceto tobacco seeds and seedling by proline priming[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences,2019, 47(1): 39-48. (in Chinese)
[22] QIU J R, XIANG X Y, WANG J T, et al. MfPIF1 of resurrection plant *Myrothamnus flabellifolia* plays a positive regulatory role in responding to drought and salinity stresses in Arabidopsis[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2020, 21(8):3011.
[23] BAO G, TANG W, AN Q, et al. Physiological effects of the combined stresses of freezing-thawing, acid precipitation and deicing salt on alfalfa seedlings[J]. BMC Plant Biology, 2020, 20: 1-9.
[24] YANG X, LUO L, YU W, et al. Recent advances in the acclimation mechanisms and genetic improvement of peanut for drought tolerance[J]. Agricultural Sciences, 2019, 10(9): 1178-1193.
[25] 罗颖,李聪,王沛,等.低氮胁迫下不同皮燕麦品种早期的响应研究及耐低氮性综合评价[J].草业学报,2024,33(2):164-184.
LUO Ying, LI Cong, WANG Pei, et al. Responses of different oat cultivars to low-nitrogen stress[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2024, 33(2): 164-184. (in Chinese)
[26] TIAN R, QI G, KANG Y, et al. Effects of irrigation and nitrogen application on soil water and nitrogen distribution and water-nitrogen utilization of wolfberry in the Yellow River Irrigation Region of Gansu Province, China[J]. Frontiers in Plant Science, 2023, 14: 1309219.
[27] GONZALEZ-DUGO V, DURAND J L, GASTAL F. Water deficit and nitrogen nutrition of crops. A review[J]. Agronomy for Sustainable Development, 2010, 30(3): 529-544.
[28] 夏桂敏,陈俊秀,迟道才.膜下滴灌水氮耦合效应对黑花生产量的影响[J].中国农村水利水电,2016(3):1-6.
XIA Guimin, CHEN Junxiu, CHI Daocai. The effects of water and nitrogen interaction on yield of black peanuts under the condition of mulched drip irrigation[J]. China Rural Water and Hydropower, 2016(3): 1-6. (in Chinese)
[29] 张自茹,鹿锦浩,邹晓霞,等.膜下滴灌氮肥运筹对花生光合和抗氧化特性的影响[J].花生学报,2023,52(1):44-51,71.
ZHANG Ziru, LU Jinhao, ZOU Xiaoxia, et al. Effects of nitrogen allocation on photosynthesis and antioxidant characteristics of peanut under mulching fertigation[J]. Journal of Peanut Science, 2023, 52(1): 44-51,71. (in Chinese)
[30] 张书红,董向阳,余进洋,等.不同基追比及追肥次数对膜下滴灌大蒜产量和品质的影响[J].灌溉排水学报,2023,42(增刊1):14-17.
ZHANG Shuhong, DONG Xiangyang, YU Jinyang, et al. Effects of different basal dressing ratio and topdressing timeson garlic yield and quality under mulch drip irrigation[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2023, 42(Supp.1): 14-17. (in Chinese)
[31] 於凝,王林林,李玲玲,等.水肥一体化减氮对陇中地区马铃薯产量和水分利用效率的影响[J].干旱地区农业研究,2024,42(4):70-78.
YU Ning, WANG Linlin, LI Lingling, et al. Effects of integrated water and nitrogen fertilizer reduction on potato yield and water use efficiency in Longzhong region of Gansu Province[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2024, 42(4): 70-78. (in Chinese)