

生育期连续调亏灌溉对花生光合特性和根冠生长的影响

夏桂敏¹ 汪千庆¹ 张峻霄¹ 吴奇¹ 迟道才¹ 张更元²

(1. 沈阳农业大学水利学院, 沈阳 110866; 2. 沈阳市水域事务服务与行政执法中心, 沈阳 110016)

摘要: 为研究不同水分胁迫条件下,花生生育期复水对叶片光合特性、干物质积累的影响,进而分析其补偿效应,于2018—2019年在辽西北阿尔乡灌溉试验站进行了膜下滴灌试验,采用两因素裂区试验设计,在花生的花针期(H,主区)、结荚期(J,副区)设置重度(H1、J1)、适度(H2、J2)和无亏(H3、J3)3个水平的水分胁迫处理,分别对应的土壤计划湿润层含水率下限为55%、65%、70%田间持水率(FC),对比分析了花生叶片光合特性、根冠干物质积累量、产量构成等指标。结果表明,单生育期重度水分胁迫处理(H1、J1)复水后叶片光合特性不能恢复到正常水平,抑制了花生根冠干物质的积累;适度水分胁迫处理(H2、J2)复水后产生的光合超补偿效应,使花生在生育末期根冠干物质积累高于无亏处理;而连续适度水分胁迫处理(H2J2)复水后叶片能更好地进行光合作用、积累根冠干物质,形成有利的根冠比。在2018—2019年的所有处理中,与H3J3处理相比,H2J2处理两年分别增产12.44%、11.98% ($p < 0.05$),分别节水9.32% ($p > 0.05$)和14.23% ($p < 0.05$),水分利用效率分别提高22.32%、27.78% ($p < 0.05$)。在辽西北地区,于花生花针期、结荚期施加适度水分胁迫是兼顾节水、增产的适宜处理。

关键词: 花生; 调亏灌溉; 光合特性; 补偿效应; 后效性; 水分利用效率

中图分类号: S275.6; S565.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2021)08-0318-11

OSID:



Effect of Continuous Regulated Deficit Irrigation in Growth Period on Photosynthetic Characteristics and Root and Crown Growth of Peanut

XIA Guimin¹ WANG Qianqing¹ ZHANG Junxiao¹ WU Qi¹ CHI Daocai¹ ZHANG Gengyuan²

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

2. Shenyang Water Affairs Service and Administrative Law Enforcement Center, Shenyang 110016, China)

Abstract: Aiming to investigate the effects of rehydration on photosynthetic characteristics of peanut leaves and dry matter accumulation under the condition of different water stress duration in multiple growth period, and reveal its compensation effect, the experiment of drip irrigation under the plastic film was carried out in Aerxiang Irrigation Experimental Station in Northwest Liaoning Province for two consecutive years from 2018 to 2019 and the split-plot design on two factors was adopted. In the experiment, three levels of water deficit treatments were set in the peanut flower-pegging stage (H/main zone) and pod setting stage (J/sub zone) respectively, namely, severe (H1/J1), moderate (H2/J2) and no deficit (H3/J3) treatments, corresponding to 55%, 65% and 70% field capacity (FC) of the lower limit of water content of planned wetting layer in soil, respectively, comparative analysis of peanut leaf photosynthetic characteristics, root-shoot dry matter accumulation, yield composition and other indicators. The experimental results showed that severe water stress treatment (H1/J1) during a single growth period after rehydration the photosynthetic characteristics of leaves could not be returned to normal levels, which inhibited the accumulation of dry matter in peanut roots and shoots. Moderate water stress treatment (H2/J2) during a single growth period after rehydration the photosynthetic super-compensation effect made the root and shoot dry matter accumulation of peanuts at the end of the growth stage higher than that of the no deficit treatment. However, continuous moderate water stress treatment (H2J2) after rehydration leaves can photosynthesize more effectively, accumulated root-shoot dry matter, and formed a favorable root-shoot ratio. In all the experiment in 2018—2019, compared with H3J3 treatment, H2J2

收稿日期: 2020-09-26 修回日期: 2020-10-20

基金项目: 辽宁省自然科学基金项目(20180550819)和辽宁省教育厅科学研究项目(LSNJC202003)

作者简介: 夏桂敏(1973—),女,教授,博士,主要从事农业与生态节水理论及技术研究,E-mail: xiagm1229@126.com

通信作者: 迟道才(1964—),男,教授,主要从事水肥调控与高效利用研究,E-mail: daocaichi@vip.sina.com

treatment increased yield by 12.44% ($p < 0.05$), 11.98% ($p < 0.05$), saved water by 9.32% ($p > 0.05$), 14.23% ($p < 0.05$), and water use efficiency was increased by 22.32% ($p < 0.05$) and 27.78% ($p < 0.05$), respectively. In the northwest of Liaoning Province, applying moderate water stress at the flower-pegging stage and pod setting stage was the suitable treatment for water saving and yield increasing.

Key words: peanut; regulated deficit irrigation; photosynthetic characteristics; compensation effect; consequent nature; water use efficiency

0 引言

花生是我国重要的油料与经济作物,2018 年辽宁省花生总产量 91.38 万 t,总种植面积 28.6 万 hm^2 ,其中位于辽西北的阜新市是花生主要生产区^[1-2]。该地区降雨年际间与年内差异显著、地区分布不均^[3-4],土壤资源是质地较粗的风沙土(GB/T 17296—2009),其土粒分散、结构差、漏水严重、保水能力差,导致灌溉用水量需求大^[5-7]。该地区以旱作雨养农业为主^[8],在干旱年份,同一地块种植玉米几乎绝收,花生也只能保证 50% 的产量^[9]。干旱频发、土壤保水性差导致该地区花生生长发育受到抑制,产量较低。因此,合理开发旱田节水潜力、有效调控水分精准分配对提高旱田的生产力具有重要意义。

调亏灌溉(Regulated deficit irrigation,RDI)的核心是在作物某一生育期施加一定程度的水分胁迫,通过调节光合产物在不同器官间的分配比例来达到节水增产的目的,该理论自提出以来,已经成功应用于多种作物上^[10-14]。相关研究表明,重度水分胁迫严重降低作物叶片净光合速率(Net photosynthesis rate, P_n)和蒸腾速率(Transpiration rate, T_r),复水后均低于对照,收获时整体生物量及产量显著低于对照^[15];适时适度的水分胁迫有利于提高作物的抗旱能力^[16],在复水后产生光合作用的补偿或超补偿效应,该效应表现为光合产物的补偿积累、根冠关系的调控^[17-18]及光合补偿现象的后效性,使作物在下一生长阶段保持较高的光合性能和维持较高的根冠比^[19-20],从而保证作物高效用水并获得高产^[21-22]。调亏灌溉处理通过生理、生长补偿提高作物产量及水分利用效率,有望解决干旱频发、风沙土条件下的辽西北花生减产、水分利用效率低的问题。但是,目前大多数研究只针对单生育期进行调亏灌溉,不适用于水资源紧张、土壤保水性差的辽西北风沙土区。

为了研究连续调亏灌溉对花生叶片光合特性、干物质积累的影响,分析不同胁迫历时下复水的补偿效应,本研究基于完全试验设计的思路,采用不同生育期连续调亏灌溉模式,对花生需水关键期(花

针期、结荚期)进行连续的水分胁迫处理,重点研究不同处理对花生复水后叶片净光合速率、蒸腾速率的影响,以及对花生根冠干物质积累、产量构成和水分利用效率的影响,以期阐明连续调亏灌溉的区域适用性和节水增产机制,为连续调亏灌溉模式在农业生产上的应用提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于 2018—2019 年在辽宁省重点试验站——阿尔乡灌溉试验站进行,试验站位于辽宁省阜新市彰武县阿尔乡镇北甸子村($42^{\circ}49'N,122^{\circ}23'E$,海拔 257.63 m),地处科尔沁沙地南缘,东、西、北三面与内蒙古自治区科左后旗毗邻。该地区属于温带半干旱季风气候,其主要特征是干燥,风沙大。年平均气温 7.2°C ,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,多年平均风速 3.2 m/s ,最大风速 24 m/s ,干燥系数 1.0 ~ 1.8。试验区地下水埋深 5.50 ~ 6.08 m,土壤理化性质为:容重 1.67 g/cm^3 、田间持水率 21.29% (体积含水率)、凋萎系数 7.57% (体积含水率)、pH 值 5.5、有机质质量比 0.01 g/kg 、碱解氮质量比 7.2 mg/kg 、速效磷质量比 1.7 mg/kg 、速效钾质量比 19.1 mg/kg 。

1.2 试验材料

试验所种植的花生品种为小白沙 1016,采用测坑试验,每个小区面积为 $5\text{ m}^2(2.5\text{ m} \times 2.0\text{ m})$,试验采用大垄双行和膜下滴灌结合的种植方式,每个小区种植花生 2 垄 4 行,垄台宽 0.8 m,垄沟宽 0.4 m,深 0.2 m。播种深度 5 cm,每穴 2 ~ 4 粒,株距 8 ~ 10 cm。在五月中旬,土壤表层(5 cm)温度达到 8 ~ 9°C 时开始播种。试验选择 0.008 mm 的地膜,覆膜和铺设滴灌带同步进行,滴灌带选用北京绿源公司生产的内镶片式滴灌带,0.1 MPa 下滴头标称流量为 2.0 L/h ,滴头间距 30 cm,滴灌带沿花生行向铺设于垄间,每根滴灌带控制两行花生。试验所用基肥为缓释控释肥(N、 P_2O_5 、 K_2O 比例为 13:6:6,总养分质量分数大于等于 50%,控释氮质量分数大于等于

22%) ,在播种时一次性施入,用量为 600 kg/hm²。

1.3 试验设计

花生整个生育期划分为 4 个生育阶段,即苗期、花针期、结荚期、饱果期,对应的计划湿润层深度分别为 30、40、50、50 cm。本试验采用裂区试验设计,共设 9 个处理,重复 3 次,试验设计方案见表 1,在花生的需水关键期(花针期、结荚期)进行不同程度的水分胁迫处理。花针期水分胁迫为主区,设 3 个水平:土壤相对含水率下限分别为田间持水率(Field capacity,FC)的 55%(重度亏水处理)、65%(适度亏水处理)和 70%(无亏水处理),灌水上限为田间持水率的 90%(低于下限灌至上限),结荚期水分胁迫为副区,设置水平同上,各生育期灌水量见表 2。

表 1 试验设计

Tab.1 Experimental design

处理	苗期	花针期(H)	结荚期(J)	饱果期
H1J1	70% FC	55% FC	55% FC	70% FC
H1J2	70% FC	55% FC	65% FC	70% FC
H1J3	70% FC	55% FC	70% FC	70% FC
H2J1	70% FC	65% FC	55% FC	70% FC
H2J2	70% FC	65% FC	65% FC	70% FC
H2J3	70% FC	65% FC	70% FC	70% FC
H3J1	70% FC	70% FC	55% FC	70% FC
H3J2	70% FC	70% FC	65% FC	70% FC
H3J3	70% FC	70% FC	70% FC	70% FC

注:百分数乘以 FC 表示各小区灌水下限。

表 2 各生育期灌水量

Tab.2 Irrigation amount in different growth stages

mm						
年份	处理	苗期	花针期(H)	结荚期(J)	饱果期	灌水总量
2018	H1J1	11.8	20.1	20.3	24.9	77.1
	H1J2	12.1	21.4	44.4	23.7	101.6
	H1J3	11.6	21.5	58.5	23.2	114.8
	H2J1	11.6	29.9	40.6	23.8	105.9
	H2J2	12.2	29.6	42.0	23.9	107.7
	H2J3	12.5	30.0	46.9	23.9	113.3
	H3J1	11.8	35.3	41.5	24.5	113.1
	H3J2	12.4	35.1	43.8	23.7	115.0
	H3J3	12.1	35.0	58.9	24.4	130.4
2019	H1J1	12.0	19.5	20.2	23.9	75.6
	H1J2	12.4	20.6	43.9	23.2	100.1
	H1J3	11.6	21.1	57.9	23.1	113.7
	H2J1	11.9	28.9	40.5	23.3	104.6
	H2J2	11.7	29.0	41.1	23.0	104.8
	H2J3	12.1	29.1	46.2	23.9	111.3
	H3J1	12.2	34.7	40.7	23.7	111.3
	H3J2	11.8	35.0	43.3	23.2	113.3
	H3J3	12.2	34.6	58.3	23.5	128.6

1.4 观测项目与方法

土壤含水率:每个小区选择 2 个观测点并预埋土壤水分监测管,使用德国 TRIME – PICO 64/32 型 TDR 便携式土壤水分测量仪进行土壤含水率观测,按照每 10 cm 一个层次测定 0 ~ 60 cm 土层的土壤含水率,在降雨前后加测,同时分别在每个生育期前取土,采用干燥法测量含水率,标定仪器含水率数值。

降雨量:采用自动气象站(TRM – ZS2 型,锦州阳光气象科技有限公司)自动采集数据(图 1)。

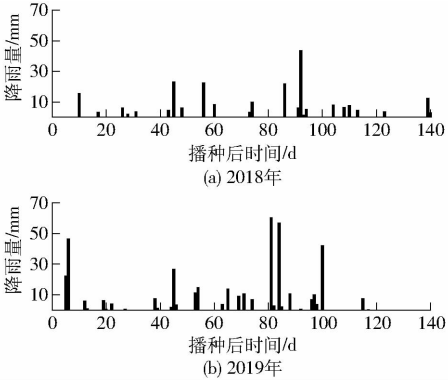


图 1 2018、2019 年播种后降雨量

Fig.1 Precipitation after sowing in 2018 and 2019

灌水量:采用重力滴灌的方式进行灌溉,并记录每次的灌水日期及灌水量。

花生叶片光合特性:于每个小区选择具有代表性的植株中上部位的叶片,采用英国 ADC LC Pro – SD 型全自动便携式光合仪,在花生花针期和结荚期复水之后,每隔 2 ~ 4 d 选择晴天于 10:00—12:00 连续观测相关数据,测定参数包括叶片净光合速率(P_n)和蒸腾速率(T_r)。

干物质测定:在每个生育期末期,于每个小区选取 3 株具有代表性的植株,采用干燥称量法测定各植株的根、茎、叶、荚果质量,按植物形态学对花生根冠比进行计算。

产量:每个小区单独测产,产量折算为花生质量含水率为 14% 的标准理论产量。

耗水量与水分利用效率:耗水量计算公式为

$$ET = W_0 - W_i + W_T + P_0 + K + M$$
 (1)

其中
$$W_T = 1\,000 (H_2 - H_1) \gamma \theta$$
 (2)

$$P_0 = \sigma P$$
 (3)

式中 ET ——时段内作物田间耗水量,mm

W_0 ——生育期始土壤计划湿润层的储水量,mm

W_i ——生育期末土壤计划湿润层的储水量,mm

W_T ——土壤计划湿润层增加而增加的水量,mm

P_0 ——时段内计划湿润层中保存的有效降雨量, mm
 K ——时段内地下水补给量, mm
 M ——时段内灌水量, mm
 H_1 ——生育期始土壤计划湿润层深度, cm
 H_2 ——生育期末土壤计划湿润层深度, cm
 γ ——土壤容重, g/cm³
 θ ——深度($H_2 - H_1$)内土层的平均含水率(质量含水率), g/g
 P ——次降雨量, mm
 σ ——降雨有效利用系数, $P \leq 5$ mm 时, $\sigma = 0$; P 为 5 ~ 50 mm 时, $\sigma = 1$; $P \geq 50$ mm 时, $\sigma = 0.75$

试验区地下水位深度足够,无地下水补给量, K 为 0。根据各处理产量和耗水量计算产量水分利用效率,计算公式为

$$WUE = Y/ET \tag{4}$$

式中 WUE ——产量水分利用效率, kg/m³

Y ——产量, kg/hm²

1.5 数据处理

采用 Excel 2013 和 DPS v7.05 处理系统进行数据处理与统计分析,采用 Duncan's 新复极差法进行多重比较,采用 Origin 2018 软件作图。

2 结果与分析

2.1 调亏灌溉处理对花生叶片光合特性的影响

两年中,花针期各处理复水后叶片净光合速率(P_n)和蒸腾速率(T_r)变化如图 2a、2b 所示。由图可知,2018、2019 年,花针期复水后不同处理花生叶片 P_n 和 T_r 的恢复趋势相似,在 0 d 时,受到水分胁迫的 H1 和 H2 处理的叶片 P_n 和 T_r 均低于 H3 处理,H1 处理叶片 P_n 和 T_r 比 H3 处理两年分别降低 25.97% ($p < 0.05$)、25.88% ($p < 0.05$) 和 19.78% ($p < 0.05$)、19.85% ($p < 0.05$),H2 处理的叶片 P_n 和 T_r 比 H3 处理两年分别降低 6.99%、7.51% 和 3.89%、1.86%,均无显著差异,这说明水分胁迫程度越大,叶片 P_n 和 T_r 下降程度越大,在受到水分胁迫时,叶片 P_n 的下降程度大于 T_r 。在复水 1 d 时,H2 处理叶片 P_n 和 T_r 基本恢复到 H3 处理水平,H1 处理的叶片 P_n 和 T_r 比 H3 处理两年分别降低 24.97%、25.03% 和 11.50%、13.29%。复水 5 d 时,H2 处理的叶片 P_n 和 T_r 出现超补偿现象。复水 7 d 时,H2 处理叶片 P_n 和 T_r 较 H3 处理两年分别提高 6.00%、1.77% 和 4.96%、4.22%,均无显著差异,H1 处理的叶片 P_n 和 T_r 两年分别恢复至 H3 处理的 83.52% ($p < 0.05$)、83.26% ($p < 0.05$) 和 93.76% ($p > 0.05$)、96.94% ($p > 0.05$),不能恢复到正常水平,并且 T_r

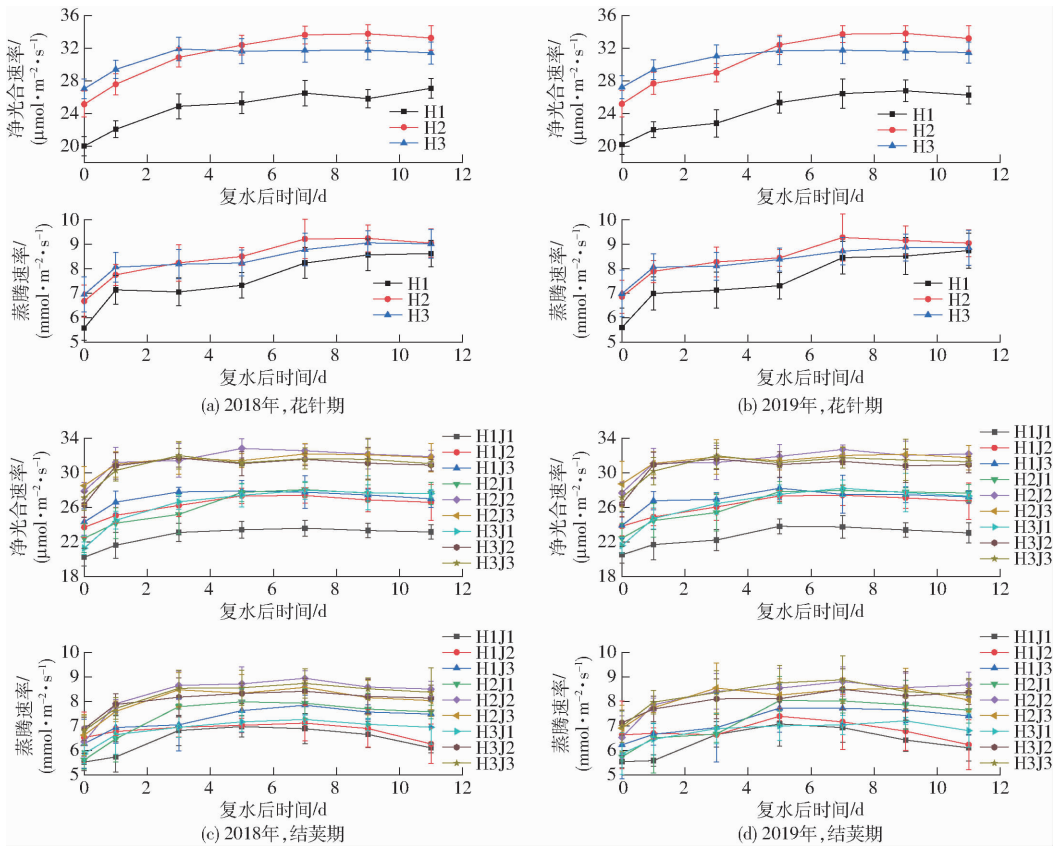


图 2 不同处理对花生叶片光合特性的影响

Fig. 2 Effects of different treatments on photosynthetic characteristics of peanut leaves

的恢复程度大于 P_n 。综合说明,花针期重度水分胁迫处理对花生光合系统造成损害,复水后不能恢复,适度水分胁迫复水后花生叶片能更好地进行光合作用。

两年中,结荚期各处理复水前后叶片净光合速率(P_n)和蒸腾速率(T_r)变化如图 2c、2d 所示,两年变化规律相似。由图分析可知,结荚期复水后不同处理花生叶片 P_n 和 T_r 都有不同程度的恢复。在 0 d 时,由 H1J1、H3J1、H3J3 处理的对比结果可知,结荚期的重度水分胁迫处理会使花生叶片的光合过程受到抑制,而且会加重花针期重度水分胁迫处理对花生光合系统的破坏;由 H2J1、H3J1、H3J3 处理的对比结果可知,花针期的适度水分胁迫处理对花生进行抗旱训练,使花生在结荚期遭受重度水分胁迫时叶片 P_n 和 T_r 降低幅度减小;由 H2J2、H3J2、H3J3 处理的对比结果可知,结荚期的适度水分胁迫同样会使花生叶片的光合过程受到抑制,但 H3J2 处理与 H3J3 处理之间无显著差异,H2J2 处理的叶片 P_n 两年均大于 H3J3 处理,分别提高 2.88%、1.95%,均无显著差异,说明花针期的适度调亏处理产生的光合超补偿现象一直延续到了结荚期的水分胁迫阶段,具有后效性;由 H1J2、H3J2、H3J3 处理的对比结果可知,结荚期的适度水分胁迫处理没有消除花针期的重度水分胁迫对花生光合系统的破坏。在复水阶段,各处理 P_n 和 T_r 的恢复情况较为复杂,但是各处理的 P_n 和 T_r 的补偿效应在 5 d 时基本达到峰值,随着时间的推进,土壤含水率下降,造成 P_n 和 T_r 降低。在复水 5 d 时,由 H1J1、H2J1、H3J1、H3J3 处理的对比结果可知,结荚期重度水分胁迫后的复水不能让花生的光合系统恢复正常,H1J1 处理的叶片 P_n 的恢复程度最低,两年分别恢复至 H3J3 处理的 75.11% ($p < 0.05$)、76.40% ($p < 0.05$),不及单生育期 H3J1 处理的 87.93% ($p < 0.05$)、88.25% ($p < 0.05$),说明花针期重度水分胁迫对花生光合系统的破坏,不利于结荚期复水后光合性能的恢复,具有后效性,H2J1 处理的叶片 P_n 和 T_r 两年分别恢复至 H3J3 处理的 89.02% ($p < 0.05$)、89.24% ($p < 0.05$) 和 93.33% ($p > 0.05$)、91.77% ($p > 0.05$),说明花针期的适度调亏灌溉处理有利于结荚期复水后光合性能的恢复;由 H1J2、H3J2、H3J3 处理的对比结果可知,结荚期适度水分胁迫后的复水不能消除花针期重度水分胁迫处理对花生光合系统的破坏,H1J2 处理的叶片 P_n 两年分别恢复至 H3J3 处理的 87.73% ($p < 0.05$)、87.66% ($p < 0.05$);由 H2J2、H3J2、H3J3 处理的对比结果可知,H2J2 处理的叶片 P_n 出现超补偿现象,较 H3J3 处理两年分别提高

5.33%、5.55%,均无显著差异,说明花针期的适度调亏灌溉处理有利于结荚期复水过程中光合作用的补偿。

2.2 调亏灌溉处理对花生干物质积累量的影响

不同处理花生根冠干物质积累量的方差及主效应分析如表 3 所示。由表 3 可知,2018、2019 年,花针期、结荚期的调亏灌溉处理及其交互作用均对花生的根冠干物质积累量产生显著影响,在花针末期,H1 处理的地上部和根系干物质积累量两年分别较 H3 处理降低 7.77% ($p < 0.05$)、8.44% ($p < 0.05$) 和 14.06% ($p < 0.05$)、14.06% ($p < 0.05$),且在生长后期也小于 H3 处理,说明花针期的重度水分胁迫处理造成的光合系统损害抑制了花生根冠干物质积累,且对根系的抑制更大,不利于花生生长;H2 处理的根冠干物质积累量及根冠比与 H3 处理无显著差异,但是根冠比较 H3 处理大,有利于花生抗旱和后期生长。两年中,结荚期处理结果与花针期处理结果相似。

不同处理根冠干物质积累量的交互效应分析如表 4 所示。由表 4 可知,2018、2019 年,在结荚末期,H1J1 处理地上部和根系干物质积累量两年分别为 H3J3 处理的 93.76% ($p < 0.05$)、94.14% ($p < 0.05$) 和 84.71% ($p < 0.05$)、84.55% ($p < 0.05$),H1J2 处理地上部和根系干物质积累两年分别为 H3J3 处理的 96.97%、96.82% 和 88.62%、88.87%,说明结荚期的适度调亏灌溉处理能够缓解花针期重度水分胁迫处理对花生造成的伤害,但是仍然没有达到 H3J3 水平,且两处理根冠比都显著小于 H3J3 处理,不利于花生后期生长。两年中,在结荚末期,H2J1 处理的根冠干物质积累量及根冠比都显著小于 H3J3 处理,H2J2 与 H2J3 处理根冠干物质积累都较 H3J3 处理高,其中 H2J2 处理的地上部和根系干物质积累量较 H3J3 处理两年分别提高 3.39%、3.34% 和 7.97%、8.31%,且根冠比较 H3J3 大,在生育后期补偿现象依然存在,H2J3 处理与 H3J3 处理间的各指标均无显著差异,说明 H2J1 处理不利于花生生长,H2J2 处理有利于花生根冠干物质的积累,具有促进根系发育的效果。在结荚末期,2018 年,H3J1 处理的根冠比小于 H3J3 处理,无显著差异,2019 年 H3J1 处理的根冠比显著小于 H3J3 处理,均不利于花生生长;H3J2 处理的根冠干物质积累量都较 H3J3 处理大,无显著差异,根冠比持平于 H3J3 处理,无显著差异。

2.3 调亏灌溉处理对花生产量及其构成的影响

不同处理花生产量构成的方差及主效应分析如表 5 所示。由表 5 可知,两年中,花针期、结荚期

表 3 不同处理花生干物质积累量的方差及主效应分析

Tab.3 Analysis of variance and main effects of different treatments on dry matter accumulation of peanut												
年份	因素	水平	花针期(H)			结荚期(J)			饱果期			
			地上部干物	根系干物质	根冠比	地上部干物	根系干物质	根冠比	地上部干物	根系干物质	根冠比	
			质积累量/ (g·株 ⁻¹)	积累量/ (g·株 ⁻¹)		质积累量/ (g·株 ⁻¹)	积累量/ (g·株 ⁻¹)		质积累量/ (g·株 ⁻¹)	积累量/ (g·株 ⁻¹)		
2018	花针期	H1	(18.63 ± 0.86) ^b	(1.10 ± 0.05) ^b	(0.059 ± 0.001) ^b	(172.41 ± 4.66) ^b	(10.67 ± 0.31) ^b	(0.062 ± 0.001) ^b	(130.72 ± 3.81) ^b	(7.59 ± 0.30) ^b	(0.058 ± 0.001) ^b	
			(20.28 ± 1.00) ^a	(1.29 ± 0.05) ^a	(0.064 ± 0.001) ^a	(180.01 ± 4.58) ^a	(12.11 ± 1.07) ^a	(0.067 ± 0.004) ^a	(138.76 ± 4.20) ^a	(8.80 ± 0.92) ^a	(0.063 ± 0.005) ^a	
		H2	(20.20 ± 0.97) ^a	(1.28 ± 0.06) ^a	(0.063 ± 0.001) ^a	(179.83 ± 2.13) ^a	(12.01 ± 0.37) ^a	(0.067 ± 0.002) ^a	(138.76 ± 1.84) ^a	(8.70 ± 0.32) ^a	(0.063 ± 0.002) ^a	
			H3	(19.57 ± 1.46) ^a	(1.22 ± 0.12) ^a	(0.062 ± 0.002) ^a	(173.89 ± 5.93) ^b	(10.93 ± 0.67) ^b	(0.063 ± 0.002) ^b	(133.14 ± 5.51) ^b	(7.77 ± 0.55) ^b	(0.058 ± 0.002) ^b
		J2		(19.83 ± 1.20) ^a	(1.23 ± 0.11) ^a	(0.062 ± 0.003) ^a	(179.44 ± 5.36) ^a	(11.97 ± 1.05) ^a	(0.067 ± 0.004) ^a	(137.77 ± 5.72) ^a	(8.69 ± 0.91) ^a	(0.063 ± 0.004) ^a
			J3	(19.71 ± 0.92) ^a	(1.22 ± 0.09) ^a	(0.062 ± 0.002) ^a	(178.92 ± 2.13) ^a	(11.89 ± 0.71) ^a	(0.066 ± 0.003) ^a	(137.32 ± 2.51) ^a	(8.63 ± 0.58) ^a	(0.063 ± 0.003) ^a
	H	14.68 *		41.46 *	49.45 *	41.22 **	81.48 **	85.66 **	54.74 **	99.00 **	87.79 **	
	J	0.14	0.10	0.25	28.11 **	75.63 **	52.62 **	30.03 **	98.09 **	73.83 **		
	H × J	0.08	0.16	0.13	12.45 **	25.19 **	24.96 **	15.55 **	30.54 **	25.46 **		
	2019	花针期	H1	(18.66 ± 0.87) ^b	(1.10 ± 0.05) ^b	(0.059 ± 0.001) ^b	(173.29 ± 5.21) ^b	(10.62 ± 0.37) ^b	(0.061 ± 0.001) ^b	(130.79 ± 3.99) ^b	(6.73 ± 0.40) ^b	(0.052 ± 0.003) ^b
				(20.27 ± 0.85) ^a	(1.29 ± 0.05) ^a	(0.064 ± 0.001) ^a	(180.32 ± 4.67) ^a	(12.08 ± 1.17) ^a	(0.067 ± 0.005) ^a	(139.79 ± 3.78) ^a	(8.69 ± 1.39) ^a	(0.062 ± 0.009) ^a
			H2	(20.38 ± 1.01) ^a	(1.28 ± 0.06) ^a	(0.063 ± 0.001) ^a	(180.12 ± 2.28) ^a	(11.92 ± 0.42) ^a	(0.066 ± 0.002) ^a	(139.50 ± 2.66) ^a	(8.51 ± 0.42) ^a	(0.061 ± 0.003) ^a
				H3	(19.74 ± 1.34) ^a	(1.22 ± 0.12) ^a	(0.062 ± 0.003) ^a	(174.47 ± 5.97) ^b	(10.75 ± 0.64) ^b	(0.062 ± 0.002) ^b	(134.48 ± 6.20) ^b	(7.37 ± 0.87) ^b
			J2		(19.95 ± 0.35) ^a	(1.23 ± 0.11) ^a	(0.062 ± 0.002) ^a	(179.55 ± 5.50) ^a	(11.98 ± 1.05) ^a	(0.067 ± 0.004) ^a	(138.16 ± 6.40) ^a	(8.70 ± 1.51) ^a
				J3	(19.63 ± 0.96) ^a	(1.22 ± 0.09) ^a	(0.062 ± 0.002) ^a	(179.71 ± 2.08) ^a	(11.89 ± 0.74) ^a	(0.066 ± 0.004) ^a	(137.44 ± 2.85) ^a	(7.86 ± 0.93) ^a
H		12.88 *	34.37 **		28.38 **	22.37 **	90.59 **	43.12 **	88.41 **	43.75 **	19.51 **	
J		0.24	0.11	2.23	15.52 **	99.69 **	51.05 **	9.29 **	29.52 **	24.31 **		
H × J		0.23	0.21	2.03	8.84 **	23.37 **	15.30 **	10.02 **	13.23 **	11.27 **		

注：* 表示在 0.05 水平上显著，** 表示在 0.01 水平上极显著；数字后不同小写字母表示同列指标显著差异达到 5% ($p < 0.05$)，下同。

调亏处理及其交互作用对花生产量及其构成都具有显著影响,2018 年花生产量由大到小表现为:H3、H2、H1 和 J2、J3、J1,与 H3 处理相比,H1 和 H2 处理产量分别减少 13.68% ($p < 0.05$) 和 0.62% ($p > 0.05$),与 J3 处理相比,J2 处理产量增加 16.03% ($p > 0.05$),H2 处理的单株荚果数、百果质量和百仁质量都显著高于 H1 处理,单株荚果数与百仁质量与 H3 无显著差异,百果质量显著高于 H3 处理;J2 处理的单株荚果数、百果质量、百仁质量显著高于 J1 处理,但是与 J3 处理无显著差异,这也是 H2、H3、J2、J3 产量较高的原因。2019 年花生产量由大到小表现为:H3、H2、H1 和 J3、J2、J1,H1 和 H2 处理较 H3 处理产量分别减少 18.49% ($p < 0.05$) 和 1.61% ($p > 0.05$),J1 和 J2 处理较 J3 处理产量分别减少 11.70% ($p < 0.05$) 和 0.59% ($p > 0.05$),同时产量构成方面的差异性也与 2018 年相似。而在出仁率方面,两年中,花针期的处理对其无显著影响,结荚期对其有显著影响,交互作用不显著。综上所述,花生在花针期 H2 水平、结荚期 J2 水平的调亏灌溉处理均能有效保证花生的产量。

不同处理花生产量构成的交互效应分析如表 6 所示。由表 6 可知,2018、2019 年中,H1J1、H1J2 处理产量显著低于 H3J3 处理,H1J3 处理产量高于 H3J3 处理,无显著差异。H2J1 处理产量较 H3J3 处理两年分别减少 2.99% ($p > 0.05$) 和 3.38% ($p > 0.05$),H2J2 和 H2J3 处理产量较 H3J3 处理两年分别增加 12.44% ($p < 0.05$)、11.98% ($p < 0.05$) 和 6.72% ($p > 0.05$)、9.92% ($p < 0.05$)。在花针期调

表 4 不同处理干物质积累量的交互效应分析

Tab.4 Analysis of interaction effect on dry matter accumulation among different treatments							
年份	处理	结荚期(J)			饱果期		
		地上部干物质积累量/(g·株 ⁻¹)	根系干物质积累量/(g·株 ⁻¹)	根冠比	地上部干物质积累量/(g·株 ⁻¹)	根系干物质积累量/(g·株 ⁻¹)	根冠比
2018	H1J1	(167.15±2.72) ^e	(10.32±0.15) ^e	(0.062±0.001) ^d	(126.72±0.89) ^f	(7.26±0.06) ^f	(0.057±0.001) ^e
	H1J2	(172.87±1.27) ^d	(10.67±0.02) ^{de}	(0.062±0.001) ^d	(130.61±2.17) ^{ef}	(7.56±0.09) ^{ef}	(0.058±0.001) ^e
	H1J3	(177.22±1.16) ^{bcd}	(11.02±0.03) ^d	(0.062±0.001) ^d	(134.83±1.78) ^{cde}	(7.94±0.07) ^e	(0.059±0.001) ^{de}
	H2J1	(174.44±1.48) ^{cd}	(10.71±0.16) ^{de}	(0.061±0.001) ^d	(133.67±1.76) ^{de}	(7.60±0.16) ^{ef}	(0.057±0.001) ^e
	H2J2	(184.31±1.59) ^a	(13.00±0.14) ^a	(0.071±0.001) ^a	(142.73±1.13) ^a	(9.57±0.08) ^a	(0.067±0.001) ^a
	H2J3	(181.27±1.59) ^{ab}	(12.60±0.16) ^{ab}	(0.070±0.001) ^{ab}	(139.87±1.44) ^{ab}	(9.23±0.11) ^{ab}	(0.066±0.001) ^{ab}
	H3J1	(180.08±2.20) ^{ab}	(11.75±0.35) ^c	(0.065±0.001) ^c	(139.03±1.73) ^{abc}	(8.45±0.25) ^d	(0.061±0.001) ^{cd}
	H3J2	(181.13±2.47) ^{ab}	(12.23±0.41) ^{bc}	(0.068±0.001) ^{bc}	(139.98±1.95) ^{ab}	(8.93±0.35) ^{bc}	(0.064±0.002) ^b
	H3J3	(178.27±1.02) ^{bc}	(12.04±0.27) ^{bc}	(0.068±0.001) ^{bc}	(137.27±1.02) ^{bcd}	(8.73±0.23) ^{cd}	(0.064±0.001) ^{bc}
2019	H1J1	(167.97±3.37) ^d	(10.18±0.17) ^f	(0.061±0.001) ^c	(126.90±0.84) ^d	(6.60±0.43) ^d	(0.052±0.004) ^{de}
	H1J2	(172.75±1.17) ^{cd}	(10.70±0.09) ^e	(0.062±0.001) ^c	(130.07±2.14) ^{cd}	(6.84±0.31) ^d	(0.053±0.003) ^{cde}
	H1J3	(179.15±1.22) ^{abc}	(10.99±0.02) ^{de}	(0.061±0.001) ^e	(135.41±1.73) ^{bc}	(6.75±0.57) ^d	(0.050±0.004) ^e
	H2J1	(175.02±3.12) ^{bc}	(10.55±0.24) ^{ef}	(0.060±0.002) ^c	(136.18±1.51) ^b	(7.19±0.73) ^{cd}	(0.053±0.006) ^{cde}
	H2J2	(184.38±2.10) ^a	(13.04±0.20) ^a	(0.071±0.001) ^a	(143.64±1.73) ^a	(10.28±0.11) ^a	(0.072±0.001) ^a
	H2J3	(181.56±1.98) ^{ab}	(12.64±0.17) ^{ab}	(0.070±0.002) ^a	(139.55±3.14) ^{ab}	(8.6±0.30) ^b	(0.062±0.001) ^b
	H3J1	(180.42±2.10) ^{ab}	(11.51±0.34) ^{cd}	(0.064±0.002) ^{bc}	(140.37±2.89) ^{ab}	(8.31±0.26) ^{bc}	(0.059±0.001) ^{bcd}
	H3J2	(181.53±2.28) ^{ab}	(12.21±0.38) ^b	(0.067±0.001) ^{ab}	(140.78±1.60) ^{ab}	(8.96±0.20) ^b	(0.064±0.002) ^b
	H3J3	(178.42±1.93) ^{abc}	(12.04±0.20) ^{bc}	(0.068±0.001) ^a	(137.34±2.61) ^b	(8.24±0.36) ^{bc}	(0.060±0.003) ^{bc}

表 5 不同处理花生产量构成的方差及主效应分析

Tab.5 Analysis of variance and main effects of different treatments on yield components of peanut						
年份	因素	水平	产量/(kg·hm ⁻²)	单株荚果数/个	百果质量/g	百仁质量/g
2018	花针期	H1	(2 453.38±366.03) ^b	(38.20±1.18) ^b	(130.32±3.97) ^c	(51.10±2.20) ^b
		H2	(2 824.51±188.37) ^a	(40.31±1.45) ^a	(137.52±4.92) ^a	(53.64±2.06) ^a
		H3	(2 842.27±152.41) ^a	(41.16±0.79) ^a	(141.13±2.50) ^b	(54.87±1.15) ^a
	结荚期	J1	(2 484.51±371.89) ^b	(38.71±1.80) ^b	(132.73±6.93) ^b	(51.38±2.78) ^b
		J2	(2 846.70±250.63) ^a	(40.60±1.60) ^a	(138.48±5.47) ^a	(54.39±1.68) ^a
		J3	(2 788.95±121.92) ^a	(40.36±1.09) ^a	(137.76±3.78) ^a	(53.83±1.40) ^a
	H		85.73 **	72.20 **	78.32 **	55.51 **
	J		77.20 **	25.09 **	23.96 **	27.63 **
	H×J		42.62 **	3.67 *	6.45 **	4.52 **
2019	花针期	H1	(2 140.60±358.02) ^b	(34.71±1.46) ^b	(130.89±3.93) ^c	(51.54±2.61) ^b
		H2	(2 574.50±177.63) ^a	(37.04±1.26) ^a	(138.41±4.84) ^a	(54.20±1.84) ^a
		H3	(2 616.61±154.68) ^a	(37.89±0.59) ^a	(141.91±2.67) ^b	(55.13±1.28) ^a
	结荚期	J1	(2 250.05±401.73) ^b	(35.47±2.22) ^b	(133.72±6.94) ^b	(51.75±3.04) ^b
		J2	(2 533.33±313.03) ^a	(37.06±1.48) ^a	(139.35±5.57) ^a	(54.89±1.33) ^a
		J3	(2 548.33±130.28) ^a	(37.11±1.03) ^a	(138.15±4.30) ^a	(54.24±1.56) ^a
	H		88.02 **	37.11 **	62.30 **	18.23 **
	J		92.98 **	26.53 **	23.122 **	24.29 **
	H×J		82.12 **	6.19 **	7.82 **	6.39 **

亏处理水平为 H3 时,J1、J2 水平之间产量差异不显著,同时两者均大于 J3 处理水平。2019 年花生总产量较 2018 年减少 8.96%,2019 年全生育期内有效降雨量比 2018 年高 136.8 mm,而花生是喜旱作物,这可能是导致 2019 年花生减产的原因。两年中,H1J1 处理的产量均是最低,分别是 2 013.35、1 748.16 kg/hm²。2018 年中 H1J3、H2J2、H2J3、H3J1、H3J2 处理的产量较高,产量为 2 826.67 ~ 3 013.36 kg/hm²,之间无显著差异,2019 年中 H2J2、H2J3、H3J1、H3J2 处理的产量较高,产量为 2 659.04 ~ 2 715.28 kg/hm²,之间无显著差异,2018 年和 2019 年最高产量均为 H2J2 处理。

表 6 不同处理产量构成的交互效应分析

Tab.6 Analysis of interaction effects of yield components among different treatments					
年份	处理	产量/(kg·hm ⁻²)	单株荚果数/个	百果质量/g	百仁质量/g
2018	H1J1	(2 013. 35 ± 46. 32) ^d	(36. 8 ± 0. 53) ^d	(125. 64 ± 1. 96) ^c	(48. 45 ± 0. 72) ^d
	H1J2	(2 520. 12 ± 67. 33) ^c	(38. 67 ± 0. 50) ^{cd}	(131. 90 ± 1. 63) ^b	(52. 53 ± 0. 99) ^{bc}
	H1J3	(2 826. 67 ± 152. 01) ^{ab}	(39. 133 ± 0. 70) ^{bc}	(133. 43 ± 2. 32) ^b	(52. 32 ± 0. 60) ^{bc}
	H2J1	(2 600. 04 ± 71. 20) ^c	(38. 67 ± 1. 10) ^{cd}	(131. 86 ± 3. 61) ^b	(51. 28 ± 1. 57) ^c
	H2J2	(3 013. 36 ± 45. 96) ^a	(41. 13 ± 0. 83) ^a	(140. 19 ± 2. 80) ^a	(54. 77 ± 1. 07) ^{ab}
	H2J3	(2 860. 12 ± 61. 46) ^{ab}	(41. 13 ± 0. 64) ^a	(140. 51 ± 1. 93) ^a	(54. 86 ± 0. 90) ^{ab}
	H3J1	(2 840. 15 ± 57. 06) ^{ab}	(40. 67 ± 0. 50) ^{ab}	(140. 70 ± 1. 85) ^a	(54. 41 ± 1. 14) ^{ab}
	H3J2	(3 006. 61 ± 67. 94) ^a	(42. 00 ± 0. 53) ^a	(143. 35 ± 2. 04) ^a	(55. 87 ± 0. 71) ^a
	H3J3	(2 680. 05 ± 71. 10) ^{bc}	(40. 80 ± 0. 60) ^{ab}	(139. 35 ± 2. 21) ^a	(54. 32 ± 1. 12) ^{ab}
2019	H1J1	(1 748. 16 ± 32. 61) ^f	(32. 93 ± 0. 61) ^d	(126. 53 ± 1. 90) ^c	(48. 26 ± 0. 79) ^d
	H1J2	(2 118. 73 ± 31. 62) ^e	(35. 27 ± 0. 61) ^c	(132. 68 ± 1. 7) ^b	(53. 48 ± 0. 69) ^{abc}
	H1J3	(2 554. 92 ± 146. 35) ^{bc}	(35. 93 ± 0. 58) ^{bc}	(133. 48 ± 3. 45) ^b	(52. 89 ± 1. 31) ^{bc}
	H2J1	(2 342. 95 ± 41. 27) ^d	(35. 80 ± 1. 40) ^c	(132. 82 ± 3. 22) ^b	(52. 10 ± 1. 05) ^c
	H2J2	(2 715. 28 ± 26. 60) ^a	(37. 53 ± 0. 70) ^{ab}	(140. 93 ± 2. 22) ^a	(54. 94 ± 0. 77) ^{abc}
	H2J3	(2 665. 26 ± 35. 90) ^{ab}	(37. 80 ± 0. 60) ^a	(141. 49 ± 2. 80) ^a	(55. 56 ± 1. 30) ^{ab}
	H3J1	(2 659. 04 ± 33. 02) ^{ab}	(37. 67 ± 0. 64) ^a	(141. 83 ± 1. 15) ^a	(54. 87 ± 1. 51) ^{abc}
	H3J2	(2 765. 99 ± 39. 26) ^a	(38. 40 ± 0. 20) ^a	(144. 45 ± 2. 58) ^a	(56. 26 ± 0. 41) ^a
	H3J3	(2 424. 80 ± 41. 49) ^{cd}	(37. 60 ± 0. 60) ^a	(139. 48 ± 1. 43) ^a	(54. 26 ± 0. 98) ^{abc}

2.4 连续调亏灌溉对花生耗水量及水分利用效率的影响

不同处理耗水量及水分利用效率的交互作用分析如表 7 所示。由表 7 可知,两年中,花针期、结荚期调亏灌溉处理及其交互作用对花生的耗水量及水分利用效率都具有显著影响。两年的气象条件相差较大,2019 年降雨较多,存在多个连续降雨情况,且极端降雨较多,导致被花生直接利用的降雨较少,2019 年花生总体耗水量小于 2018 年。

在所有处理中,H1J1 处理的耗水量最小,H3J3 处理的耗水量最大,其中 H2J2 处理能够在降低耗水量的同时,使花生增产。2018 年和 2019 年,H2J2 处理较 H3J3 处理两年分别节水 9. 32% ($p > 0. 05$) 和 14. 23% ($p < 0. 05$),增产 12. 44% ($p < 0. 05$) 和 11. 98% ($p < 0. 05$)。两年中,H2J2 处理的水分利用效率均较其他处理高,分别为 1. 37、1. 61 kg/m³,较 H3J3 分别提高 22. 32%、27. 78% ($p < 0. 05$)。

表 7 不同处理耗水量及水分利用效率的交互效应分析

Tab.7 Analysis of interact effects of water consumption and water use efficiency among different treatments				
处理	2018 年		2019 年	
	耗水量/(m ³ ·hm ⁻²)	水分利用效率/(kg·m ⁻³)	耗水量/(m ³ ·hm ⁻²)	水分利用效率/(kg·m ⁻³)
H1J1	(1 818. 64 ± 8. 14) ^b	(1. 11 ± 0. 02) ^d	(1 374. 68 ± 7. 36) ^g	(1. 27 ± 0. 02) ^e
H1J2	(2 280. 93 ± 105. 88) ^a	(1. 11 ± 0. 06) ^d	(1 556. 01 ± 42. 03) ^f	(1. 36 ± 0. 04) ^d
H1J3	(2 394. 49 ± 143. 40) ^a	(1. 18 ± 0. 03) ^{bcd}	(1 715. 78 ± 63. 73) ^{cde}	(1. 49 ± 0. 03) ^{bc}
H2J1	(2 215. 99 ± 62. 44) ^a	(1. 17 ± 0. 01) ^{cd}	(1 623. 45 ± 40. 84) ^{ef}	(1. 44 ± 0. 03) ^{cd}
H2J2	(2 194. 24 ± 5. 20) ^a	(1. 37 ± 0. 02) ^a	(1 685. 78 ± 33. 03) ^{de}	(1. 61 ± 0. 03) ^a
H2J3	(2 262. 14 ± 74. 60) ^a	(1. 26 ± 0. 01) ^{abc}	(1 875. 38 ± 36. 75) ^{ab}	(1. 42 ± 0. 02) ^{cd}
H3J1	(2 260. 57 ± 108. 42) ^a	(1. 26 ± 0. 07) ^{bc}	(1 810. 27 ± 30. 28) ^{abc}	(1. 47 ± 0. 02) ^{bc}
H3J2	(2 327. 26 ± 28. 04) ^a	(1. 29 ± 0. 03) ^{ab}	(1 785. 27 ± 41. 85) ^{bcd}	(1. 55 ± 0. 03) ^{ab}
H3J3	(2 398. 77 ± 68. 29) ^a	(1. 12 ± 0. 01) ^d	(1 925. 61 ± 56. 92) ^a	(1. 26 ± 0. 03) ^e
H	18. 46 **	73. 23 **	69. 99 **	91. 27 **
J	19. 10 **	12. 08 *	84. 23 **	46. 29 **
H × J	9. 38 **	16. 56 **	7. 77 **	54. 95 **

3 讨论

3.1 连续调亏灌溉对花生叶片光合特性的影响

有关不同生育期水分胁迫对花生叶片光合特性

的影响已有较多研究,严美玲等^[23]研究表明,花生幼苗的叶片净光合速率(P_n)在水分胁迫处理下会随着胁迫程度的增加而降低,复水后,中度和重度胁迫处理的叶片 P_n 会显著增加;汤笑^[24]研究表明,花

生花针期的水分胁迫处理导致叶片 P_n 降低,在复水后, P_n 第1天恢复到较高水平,第3天接近对照水平,第8天达到或超出对照水平;吴晓茜^[11] 研究表明,花生花针期中度、结荚期轻度、饱果期中度的水分胁迫处理在复水后叶片能保持较高的光合性能。这些结论都是在单生育期调亏灌溉模式下得出的,关于多生育期连续的水分胁迫处理对花生叶片光合特性的影响鲜有报道。本研究结果表明,花针期、结荚期水分胁迫处理都会降低花生叶片的 P_n 和 T_r ,降低程度随着胁迫程度的增大而增大,复水后,叶片 P_n 和 T_r 恢复程度随着复水后时间的增加而增加,在花针期复水后7d达到稳定,在结荚期复水后5d达到稳定,复水有利于花生花针的下针和荚果的形成,这与顾学花等^[25] 的研究结果一致。水分胁迫处理降低叶片 P_n 主要有两个因素:①气孔因素,由于气孔关闭阻碍了 CO_2 进入叶片参与光合过程。②非气孔因素,光照破坏了得不到外界 CO_2 叶片的光合器官,造成光合过程受到抑制^[26-27]。本研究结果表明,花针期重度水分胁迫处理复水后不能恢复至无亏处理水平,可能是非气孔因素造成的,导致结荚期的水分胁迫处理会加重该伤害,不利于结荚期复水后叶片 P_n 和 T_r 的恢复;花针期适度水分胁迫处理有利于提高花生的抗旱能力,H2处理复水后叶片 P_n 和 T_r 较 H3 处理两年分别提高 6.00% ($p > 0.05$)、1.77% ($p > 0.05$) 和 4.96% ($p > 0.05$)、4.22% ($p > 0.05$)、H2J2 处理在水分胁迫阶段叶片 P_n 较 H3J3 处理两年分别提高 2.88% ($p > 0.05$)、1.95% ($p > 0.05$)、在复水后叶片 P_n 较 H3J3 处理两年分别提高 5.33% ($p > 0.05$)、5.55% ($p > 0.05$)、说明花针期适度水分胁迫复水后叶片 P_n 的超补偿效应一直延续到结荚期水分胁迫阶段,有利于结荚期复水后叶片 P_n 的补偿。

3.2 连续调亏灌溉对花生根冠干物质积累的影响

作物根冠生长受遗传因素控制,环境变化影响遗传特性的表达,光合作用是作物干物质形成和积累的重要途径,调亏灌溉可有效调整作物营养生长和生殖生长的关系,调节光合产物在根冠间的分配^[28],根冠比能反映作物在调亏灌溉处理下光合产物的分配情况。SUCKER 等^[29] 研究表明,光合产物会在水分胁迫下优先分配给根系,根冠比增大,相反,根冠比会减小。但是在严重的水分胁迫下,根系的生长会受到抑制^[30-31]。李明达等^[32] 研究表明,水分胁迫抑制了豌豆根冠的生长发育,复水后,豌豆根系和冠层的干物质积累速率加快,根冠比降低。一般认为,较大的根系和根冠比有利于作物抗旱,但是过于庞大的根系会影响地上部生长,从而影响最终产量,因此作物根系不仅存在数量上而且存在质

量上的冗余^[33]。所以在连续水分胁迫下确定合理根冠比对提高花生产量和水分利用效率具有重要意义。本研究表明,花针期、结荚期重度水分胁迫处理抑制了花生根冠生长,根冠比减小,复水后也不能恢复到正常生长状态,而适度水分胁迫处理复水后能够恢复正常生长,根冠比也与无亏处理无显著差异。两年中,在结荚末期,H2J2、H2J3、H3J1、J3J2 处理的地上部干物质积累量较 H3J3 处理提高 1.02% ~ 3.39%,H2J2、H2J3、J3J2 处理的根系干物质积累量较 H3J3 处理提高 1.41% ~ 8.31%,其中 H2J2 处理的根冠比最大,这种趋势一直保持到生育后期。

3.3 连续调亏灌溉对花生产量构成及水分利用效率的影响

不同生育期水分胁迫对花生产量构成及水分利用效率具有不同影响^[30,34-35]。有研究表明,苗期、花针期水分胁迫主要影响了花生的单株荚果数,结荚期、饱果期的水分胁迫主要影响了花生的百仁质量、出仁率,从而分别对产量造成不同程度的影响^[36]。吴晓茜^[11] 研究表明,花针期、结荚期和饱果期的调亏灌溉处理可显著减小花生全生育期耗水量,且耗水量随着水分胁迫程度的增大而减小,但水分利用效率不会随着耗水量的减少而降低。本研究结果表明,连续适度调亏灌溉处理能够提高花生单株荚果数、百果质量、荚果饱满度,从而提高花生产量,比单一生育期调亏灌溉处理提高单株荚果数或百仁质量具有优势,能最大程度增产,而且连续适度调亏灌溉处理能减少全生育期耗水量,从而表现出最大的水分利用效率。

4 结论

(1)花针期重度水分胁迫处理复水后,叶片不能恢复正常的光合作用,而适度水分处理胁迫复水后产生的补偿效应使叶片能够更好地进行光合作用,并且延续到结荚期的水分胁迫阶段,有利于结荚期水分胁迫复水后光合性能的补偿。

(2)花针期重度水分胁迫处理造成叶片光合系统的损害,抑制了花生根冠干物质的积累,且对根系生长的抑制更大,根冠比降低;而适度水分胁迫处理能够形成较大的根冠比,有利于结荚期抗旱;连续适度水分调亏处理的根冠比较大,能够延续到花生生育末期,有利于后期产量的形成。

(3)连续适度调亏灌溉处理的产量构成优于单生育期处理,能够在降低耗水量的同时提高花生产量,显著提高 WUE。因此,连续适度调亏灌溉处理能够更好地解决辽西北地区花生减产、水分利用效率低下的问题。

参 考 文 献

- [1] 陈中玉,高连兴,CHEN Charles,等.中美花生收获机械化技术现状与发展分析[J/OL].农业机械学报,2017,48(4):1-21.
CHEN Zhongyu, GAO Lianxing, CHEN Charles, et al. Analysis on technology status and development of peanut harvest mechanization of China and the United States [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(4): 1-21. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170401&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.04.001. (in Chinese)
- [2] 孙泓希,于洪波,于树涛,等.辽宁省花生产业现状与发展建议[J].农业科技通讯,2019(11):57-59.
SUN Hongxi, YU Hongbo, YU Shutao, et al. Current situation and development suggestions of peanut industry in Liaoning Province [J]. Bulletin of Agricultural Science and Technology, 2019(11): 57-59. (in Chinese)
- [3] 曹永强,李维佳,赵博雅.气候变化下辽西北春玉米生育期需水量研究[J].资源科学,2018,40(1):150-160.
CAO Yongqiang, LI Weijia, ZHAO Boya. Water requirements of spring maize in Northwest Liaoning Province under climate change [J]. Resources Science, 2018, 40(1): 150-160. (in Chinese)
- [4] 曹永强,刘佳佳,高璐.近54年来辽西北地区降水与太阳黑子关系研究[J].地理科学,2015,35(8):1027-1032.
CAO Yongqiang, LIU Jiajia, GAO Lu. Relationship between sunspots and precipitation in northwestern Liaoning in recent 54 years [J]. Scientia Geographica Sinica, 2015, 35(8): 1027-1032. (in Chinese)
- [5] 窦超银,孟维忠,佟威,等.风沙土玉米膜下滴灌适宜灌溉频率试验研究[J].灌溉排水学报,2016,35(2):13-17,49.
DOU Chaoyin, MENG Weizhong, TONG Wei, et al. Experiment study on irrigation frequency of maize under mulch-drip irrigation in aeolian sandy soil [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2016, 35(2): 13-17, 49. (in Chinese)
- [6] 张微,孙海明,王晓江,等.生物质土壤改良剂对风沙土改良效果研究[J].内蒙古林业科技,2013,39(2):1-6.
ZHANG Wei, SUN Haiming, WANG Xiaojia, et al. Improvement effects of aeolian sandy soil with biomass soil conditioner [J]. Journal of Inner Mongolia Forestry Science and Technology, 2013, 39(2): 1-6. (in Chinese)
- [7] 王道涵,焦峰,吕林有,等.生物质炭改良风沙土对磷的吸附解吸影响[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2019,38(6):544-548.
WANG Daohan, JIAO Feng, LÜ Linyou, et al. Effect of biomass carbon on adsorption and desorption of phosphorus in aeolian sand soil [J]. Journal of Liaoning Technical University(Natural Science), 2019, 38(6): 544-548. (in Chinese)
- [8] 窦超银,于景春,干早胁迫对辽西半干旱区玉米生长和产量的影响[J].灌溉排水学报,2013,32(4):84-87.
DOU Chaoyin, YU Jingchun, YU Xiuqin. Effects of drought stress on the growth and yield of maize in semi-arid area of West Liaoning [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2013, 32(4): 84-87. (in Chinese)
- [9] 朱品松.阜新市花生产业现状及发展对策[J].内蒙古农业科技,2010(3):78,114.
- [10] 庞秀明,康绍忠,王密侠.作物调亏灌溉理论与技术研究动态及其展望[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2005,33(6):141-146.
PANG Xiuming, KANG Shaozhong, WANG Mixia. Theory and technology research development and prospect of regulated deficit irrigation on crops [J]. Journal of Northwest A&F University(Natural Science Edition), 2005, 33(6): 141-146. (in Chinese)
- [11] 吴晓茜.沈阳地区花生调亏灌溉试验研究[D].沈阳:沈阳农业大学,2018.
- [12] KANG Shaozhong, SHI Wenjuan, ZHANG Jianhua. An improved water-use efficiency for maize grown under regulated deficit irrigation [J]. Field Crops Research, 2000, 67(3): 207-214.
- [13] ALI S, XU Yueyue, AHMAD I, et al. Tillage and deficit irrigation strategies to improve winter wheat production through regulating root development under simulated rainfall conditions [J]. Agricultural Water Management, 2018, 209(9): 44-54.
- [14] 刘小飞,李彪,孟兆江,等.隔沟调亏灌溉对冬小麦旗叶生理特性与产量形成的影响[J/OL].农业机械学报,2019,50(9):320-328.
LIU Xiaofei, LI Biao, MENG Zhaojiang, et al. Effects of regulated deficit irrigation under furrow irrigation on physiological characteristics of flag leaf after anthesis and yield formation of winter wheat [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(9): 320-328. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190937&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.09.037. (in Chinese)
- [15] 刘溢健,任建宏,殷俐娜,等.马铃薯块茎膨大期不同程度干旱后复水的源库补偿效应[J].应用生态学报,2019,30(11):3777-3786.
LIU Yijian, REN Jianhong, YIN Li'na, et al. Compensation effect of re-watering after different drought stresses on source-sink metabolism during tuber expansion period of potato [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2019, 30(11): 3777-3786. (in Chinese)
- [16] 闫永鑫,郝卫平,梅旭荣,等.拔节期水分胁迫-复水对冬小麦干物质积累和水分利用效率的影响[J].中国农业气象,2011,32(2):190-195,202.
YAN Yonglun, HAO Weiping, MEI Xurong, et al. Effects of water stress - rewatering at jointing stage on dry matter accumulation and WUE of winter wheat [J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2011, 32(2): 190-195, 202. (in Chinese)
- [17] 孟兆江,卞新民,刘安能,等.调亏灌溉对冬小麦光合生理特性的影响及其优化农艺技术组合[J].麦类作物学报,2006,26(2):86-92.
MENG Zhaojiang, BIAN Xinmin, LIU Anneng, et al. Effect of regulated deficit irrigation on physiological and photosynthetic characteristics of winter wheat and its optimized combination with agronomic techniques [J]. Journal of Triticeae Crops, 2006, 26(2): 86-92. (in Chinese)
- [18] 孟兆江,段爱旺,王晓森,等.调亏灌溉对棉花根冠生长关系的影响[J/OL].农业机械学报,2016,47(4):99-104.
MENG Zhaojiang, DUAN Aiwan, WANG Xiaosen, et al. Effect of regulated deficit irrigation on growth relation of root and shoot in cotton [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(4): 99-104. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160401&journal_id=jcsam

- www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20160414&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.04.014. (in Chinese)
- [19] 郭相平,康绍忠.玉米调亏灌溉的后效性[J].农业工程学报,2000,16(4):58-60.
GUO Xiangping, KANG Shaozhong. After effect of regulated deficit irrigation (RDI) on maize[J]. Transactions of the CSAE, 2000, 16(4): 58-60. (in Chinese)
- [20] 吴晓茜,夏桂敏,李永发,等.调亏灌溉对黑花生生长、光合特性及水分利用效率的影响[J].沈阳农业大学学报,2018,49(1):57-64.
WU Xiaojian, XIA Guimin, LI Yongfa, et al. Effect of regulated deficit irrigation on growth, photosynthetic characteristics and water use efficiency of black peanut [J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2018, 49(1): 57-64. (in Chinese)
- [21] BUESA I, BADAL E, GUERRA D, et al. Regulated deficit irrigation in persimmon trees (*Diospyros kaki*) cv. 'Rojó Brillante' [J]. Scientia Horticulturae, 2013, 159(2): 134-142.
- [22] 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 Pomology & Horticultural Science, 2015, 68(2): 261-274.
- [23] 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 Meiling, LI Xiangdong, LIN Yingjie, et al. Effects of drought during seedling stage on physiological traits, yield and quality of different peanut cultivars[J]. Acta Agronomica Sinica, 2007, 33(1): 113-119. (in Chinese)
- [24] 汤笑.水氮及其互作对花生生理特性和产量品质的影响[D].泰安:山东农业大学,2007.
- [25] 顾学花,孙莲强,高波,等.施钙对于旱胁迫下花生生理特性、产量和品质的影响[J].应用生态学报,2015,26(5):1433-1439.
GU Xuehua, SUN Lianqiang, GAO Bo, et al. Effects of calcium fertilizer application on peanut growth, physiological characteristics, yield and quality under drought stress [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, 26(5): 1433-1439. (in Chinese)
- [26] 关义新,戴俊英,林艳.水分胁迫下植物叶片光合的气孔和非气孔限制[J].植物生理学通讯,1995(4):293-297.
GUAN Yixin, DAI Junying, LIN Yan. The photosynthetic stomatal and nonstomatal limitation of plant leaves under water stress [J]. Plant Physiology Journal, 1995(4): 293-297. (in Chinese)
- [27] LAWLOR D W, CORNIC G. Photosynthetic carbon assimilation and associated metabolism in relation to water deficits in higher plants [J]. Plant Cell & Environment, 2010, 25(2):275-294.
- [28] 魏永霞,马瑛瑛,冯鼎瑞,等.调亏灌溉下滴灌玉米根冠生长与水分动态响应特征[J/OL].农业机械学报,2017,48(7):180-188.
WEI Yongxia, MA Yingying, FENG Dingrui, et al. Characteristics of water dynamic response and growth of root and crown of maize under drip irrigation of regulated deficit irrigation [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(7): 180-188. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20170723&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.07.023. (in Chinese)
- [29] SUCKER J M, AIKEN R M. Dynamic root responses to water deficits [J]. Soil Science, 1992, 154(4): 281-289.
- [30] 姚君平,罗瑶年,杨新道,等.早、中熟花生不同生育阶段土壤水分亏缺对植株生育和产量的影响[J].花生科技,1985(2):1-8.
YAO Junping, LUO Yaonian, YANG Xindao, et al. Effects of soil water deficiency in different growth stages of early and mid-mature peanuts on plant growth and yield [J]. Journal of Peanut Science, 1985(2): 1-8. (in Chinese)
- [31] 张作为,李宏宇,付强,等.不同水分胁迫下的小麦/玉米间作群体响应机理研究[J/OL].农业机械学报,2020,51(1):245-255.
ZHANG Zuwei, LI Hongyu, FU Qiang, et al. Response mechanism of wheat/maize intercropping system under different water stresses[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(1): 245-255. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20200127&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.01.027. (in Chinese)
- [32] 李明达,张红萍.水分胁迫及复水对豌豆干物质积累、根冠比及产量的影响[J].中国沙漠,2016,36(4):1034-1040.
LI Mingda, ZHANG Hongping. Effects of water stress and rewatering on the dry matter accumulation, root shoot ratio and yield of pea [J]. Journal of Desert Research, 2016, 36(4): 1034-1040. (in Chinese)
- [33] 朱维琴,吴良欢,陶勤南.作物根系对于旱胁迫逆境的适应性研究进展[J].土壤与环境,2002,11(4):430-433.
ZHU Weiqin, WU Lianghuan, TAO Qinnan. Advances in the studies on crop root against drought stress [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2002, 11(4): 430-433. (in Chinese)
- [34] 刘吉利,赵长星,吴娜,等.苗期干旱及复水对花生光合特性及水分利用效率的影响[J].中国农业科学,2011,44(3):469-476.
LIU Jili, ZHAO Changxing, WU Na, et al. Effects of drought and rewatering at seedling stage on photosynthetic characteristics and water use efficiency of peanut [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2011, 44(3): 469-476. (in Chinese)
- [35] 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.
ZHAO Changxing, CHENG Xi, WANG Yuefu, et al. Effects of drought stress on peanut growth during different growth stages and compensatory effect after water recovery [J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2012, 34(6): 627-632. (in Chinese)
- [36] 张俊,刘娟,臧秀旺,等.不同生育时期水分胁迫对花生生长发育和产量的影响[J].中国农学通报,2015,31(24):93-98.
ZHANG Jun, LIU Juan, ZANG Xiuwang, et al. Effects of drought stress on yield and growth and development at different growth stages of peanut [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2015, 31(24): 93-98. (in Chinese)