

水氮耦合对河西地区西瓜成熟期生长的影响

蔡子文, 赵朔阳, 刘彬汉, 田靖

(甘肃省农业科学院张掖节水农业试验站, 甘肃 张掖 734000)

摘要: 研究不同水氮对甘肃省河西地区西瓜生育后期生长状况的影响, 为西瓜合理栽培提供技术支持。以西研8号为指示品种, 采用田间裂区试验设计, 主处理为3个灌水量: 分别为田间最大持水量80%、65%、50%, 副处理为4个施氮量, 分别为施N 0、100、200、300 kg/hm², 对西瓜生育后期伤流液量、可溶性蛋白(SP)、谷氨酰胺合成酶(GS)、硝酸还原酶(NR)、过氧化氢酶(CAT)、过氧化物酶(POD)、根系脱氢酶活性含量及西瓜生长状况进行了检测。结果表明, 灌水量为田间最大持水量的80%时施N 200 kg/hm²处理伤流液量最高, 为32.04 mg/h; 西瓜SP含量最高, 为4.62 mg/g; 水氮均显著影响西瓜根系脱氢酶活性, 田间最大持水量65%处理最大, 平均达84.06 μg/(g·h)。GS、NR及根系活力在施N 100、200 kg/hm²处理中随灌水量增加呈先升后降的趋势, 且田间最大持水量65%处理最高。综合评价可知, 田间最大持水量65%下施N 200 kg/hm²处理西瓜成熟期生长综合评价得分最高, 为0.72, 西瓜生育后期生长状况最佳, 适宜河西地区西瓜品种西研8号的水肥管理。

关键词: 西瓜; 氮代谢酶; 根系活力; 抗逆指标; 综合评价

中图分类号: S651

文献标志码: A

文章编号: 2097-2172(2024)04-0364-07

doi: 10.3969/j.issn.2097-2172.2024.04.012

Effects of Water and Nitrogen Coupling on the Growth of Watermelon during Maturity in Hexi Region

CAI Ziwen, ZHAO Shuoyang, LIU Binhan, TIAN Jing

(Zhangye Water-saving Agriculture Experimental Station, Gansu Academy of Agricultural Sciences, Zhangye Gansu 734000, China)

Abstract: In order to explore the effects of water and nitrogen coupling on the late stage of growth of watermelon in Hexi region of Gansu Province, Xiyan 8 was used as test material, a field split-plot experiment was conducted with 3 main treatments of 80%, 65% and 50% field capacities, and 4 secondary treatments of N 0 kg/ha, N 100 kg/ha, N 200 kg/ha and N 300 kg/ha nitrogen application rates, and a total of 12 treatments were set up. The amount of wound fluid, soluble protein content (SP), glutamine synthetase (GS), nitrate reductase (NR), catalase (CAT), peroxidase (POD), root dehydrogenase activity and growth status were detected. The results showed that 80% field capacity+N 200 kg/ha had the highest fluid volume (32.04 mg/h) and SP content (4.62 mg/g). Water and nitrogen significantly affected the root dehydrogenase activity of watermelon, and 65% field capacity treatment was the highest with an average of 84.06 μg/(g·h). GS, NR and root activity increased firstly and then decreased with the increase of irrigation amount in N 100 kg/ha and N 200 kg/ha treatments and were both peaked at 65% field capacity. The overall evaluation showed that 65% field capacity+N 200 kg/ha treatments had highest scores of comprehensive evaluation of watermelon growth at maturity stage (0.72), the growth of watermelon in this treatment group was the best at the late stage, which was suitable for Xiyan 8 watermelon cultivation in Hexi region.

Key words: Watermelon; Nitrogen metabolizing enzyme; Root vigor; Stress resistance index; Comprehensive evaluation

西北地区水资源短缺, 甘肃省水资源更是“濒临失调”。随着工业迅猛发展和环境污染等问题的加重, 用于灌溉的水资源将愈加匮乏^[1]。人们在

追求农业经济效益最大化时, 往往会投入大量化肥, 再加上常年连作等, 导致土壤质量及农产品品质的下降^[2]。

收稿日期: 2024-02-11

基金项目: 甘肃省农业科学院成果转化项目(2022GAAS-CGZG03); 甘肃省农业科学院条件建设项目(2022GAAS-TJJS04)。

作者简介: 蔡子文(1978—), 男, 甘肃永昌人, 副研究员, 主要从事经济作物育种与栽培研究及技术示范推广工作。
Email: 550812086@qq.com。

西瓜是河西地区重要的经济作物,对农业增收、农民增收发挥着重要作用,但面对河西地区干旱缺水的情况,如何在提质增产的基础上高效利用水氮资源是当下亟待解决的问题^[3]。近年来,国内外对定植后西瓜生长阶段生理特性等方面进行了诸多研究,如过氧化物酶(POD)、过氧化氢酶(CAT)等在西瓜抗病生理机制中的作用^[4];氮代谢酶对植物氮素吸收和同化的影响^[2,5-7];以及根系活力与伤流液量的关系及对植物生长的影响^[8-10]。水肥一体化技术条件下灌水定额和施肥量对西瓜株高、茎粗和产量等指标产生直接的影响。分析比较现有文献,大多研究主要针对各处理在西瓜不同生育期的影响,而有关水氮对西瓜成熟期后生长状况评价的研究尚不多见。本研究分析了不同施氮量与灌水量的耦合效应对成熟期西瓜抗逆性、氮代谢、伤流强度及根系活力的影响,旨在为西瓜合理栽培提供技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于2023年4—8月在甘肃省农业科学院张掖节水农业试验站(38°56'N、100°26'E,海拔1570 m)进行。试验区地处河西走廊中段,黑河中上游。该区域干旱少雨,年降水量约130 mm,年均气温7.38℃。试验地播前耕层土壤基本理化性状为有机碳7.90 g/kg,全氮0.77 g/kg,全磷0.14 g/kg,全钾13.90 g/kg,全盐1.74 g/kg, pH 8.22。

1.2 试验设计与方法

试验于2023年3月1日进行温室育苗,3月24日开始炼苗,4月5日选取生长基本一致的两叶一心幼苗定植。定植后即浇灌定根水,缓苗25 d后进行水分处理,其余田间操作与当地传统种植方式一致。

试验采用裂区设计,主处理为3个灌水量,分别设田间最大持水量(W)下限80%(I 80%)、65%(I 65%)和50%(I 50%),灌水上限统一设定为田间最大持水量上限95%。水分控制采用墒情自动监测与远程控制系统管理。副处理为4个施氮量,施N量为0 kg/hm²(N 0)、100 kg/hm²(N 100)、200 kg/hm²(N 200)和300 kg/hm²(N 300)。氮肥选用尿素(N 46%),40%做基肥,其余追肥(伸蔓期15%、结果期10%、膨果前期20%、膨大中期

15%)。磷肥选用普通磷酸钙(P₂O₅ 18%),施P₂O₅量180 kg/hm²,做基肥施入;钾肥采用硫酸钾(K₂O 50%),施K₂O量75 kg/hm²,做基肥施入,肥料均随水滴灌。试验共设12个处理,3次重复,小区面积150 m²。

1.3 测定项目与方法

在西瓜成熟中后期(7月15日)每小区选取长势均匀的3株西瓜,取枝上第5~6片叶测定相关酶活性及可溶性蛋白含量等指标。西瓜叶谷氨酰胺合成酶(GS)活性、硝酸还原酶(NR)活性、可溶性蛋白(SP)含量、过氧化物酶(POD)活性、过氧化氢酶(CAT)活性及根系活力的测定参照《植物生理学实验指导》^[11]。

伤流液的收集参考梁建生等^[12]的方法稍作改动:当日17:00时,在距离地面20 cm处用剪刀剪去西瓜子蔓上部茎,然后用装有不同重量(0.1、1.0、2.0、3.0 g)脱脂棉的自封袋将下部茎套上,保证茎与脱脂棉完全接触,次日取回称重。另在当日9:00~17:00时采用同样方法收集伤流液量。脱脂棉吸收伤流液后增重即为伤流液量。

西瓜成熟后期生长状况评价应用模糊数学中的隶属函数值法^[13-14]。综合评价前,将所有测定指标(伤流液量指标选择代表性强的一组:9:00~17:00时,脱脂棉2.0 g收集到的伤流液量)参考周璐瑶^[15]的方法将数据转为隶属函数值,计算公式为:

$$R(X_i) = (X_i - X_{MN}) / (X_{MA} - X_{MN})$$

各指标下对应隶属值乘以该指标的权重后,求和得到西瓜成熟期生长综合评价得分。

1.4 数据处理

采用Excel 2019和SPSS 26软件对数据进行统计分析。采用双因素(two-way ANOVA)和LSD法进行方差分析和多重比较。西瓜成熟期生长综合评价采用单因素方差分析,用Pearson法对西瓜测定指标进行相关性分析。利用Origin 2021软件作图。

2 结果与分析

2.1 不同水氮处理对西瓜茎蔓伤流液量的影响

由图1可知,白天(当日9:00~17:00时)不同重量脱脂棉收集的伤流液量均高于晚上(当日17:00至次日8:00时)。白天2.0 g脱脂棉收集伤

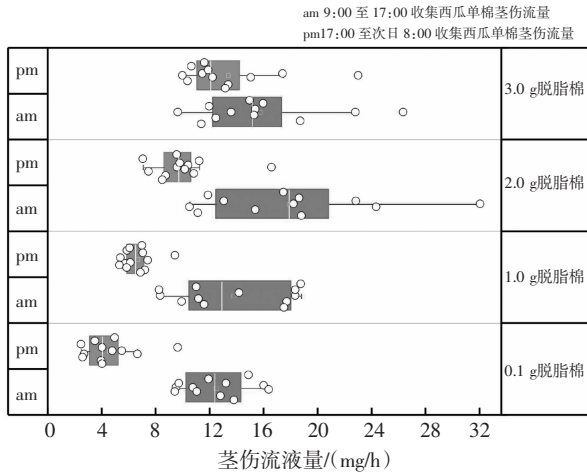
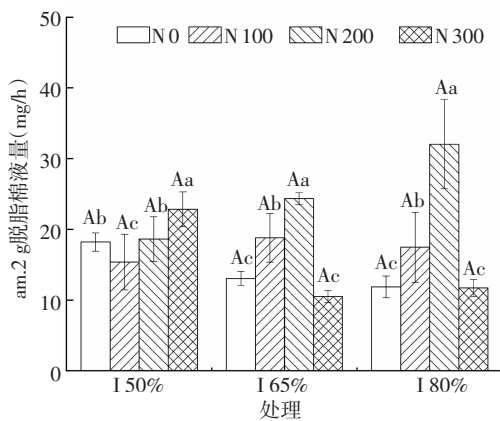


图 1 单株西瓜伤流流量

流流量高于其他重量脱脂棉在不同时间段收集到的伤流流量，且每株伤流流量为 10.00 ~ 32.00 mg/h，跨度较大、收集量大、代表性高，能更好地反映不同水氮对根系活力的影响。

由图 2 可知，在 I 50%处理下，不同施氮量处理伤流流量差异显著($P<0.05$)，N 300>N 200>N 0>N 100，N 300 处理伤流流量最高，为 22.83 mg/h；I 65%处理下，N 200 处理伤流流量显著高于其他各处理($P<0.05$)，为 24.33 mg/h，N 0、N 300 显著低于其他处理($P<0.05$)；I 80%处理趋势与 I 65%相同，N 200 显著高于其他各处理($P<0.05$)，为 32.04 mg/h，N 0、N 300 显著低于其他施氮处理($P<0.05$)。



注：不同大写字母表示不同灌水量间差异极显著($P<0.01$)，不同小写字母表示同一灌水量条件下不同施氮量间差异显著($P<0.05$)，下同。

图 2 不同水氮处理对 am.2 g 脱脂棉西瓜伤流流量的影响

2.2 不同水氮处理对西瓜根系脱氢酶活性的影响

由图 3 可知，水氮均显著影响西瓜根系脱氢酶活性。I 65%处理根系脱氢酶活性最大，平均达

84.06 $\mu\text{g}/(\text{g}\cdot\text{h})$ ；I 50%处理下，N 100 处理根系脱氢酶活性显著低于其他组 ($P<0.05$)；I 65%处理下，N 0 根系脱氢酶活性显著低于各施氮处理($P<0.05$)，为 60.76 $\mu\text{g}/(\text{g}\cdot\text{h})$ ；I 80%处理下，N 300 根系脱氢酶活性显著高于 N 100 和 N 200 处理，达 89.26 $\mu\text{g}/(\text{g}\cdot\text{h})$ ，高于其他施氮处理 40%左右。

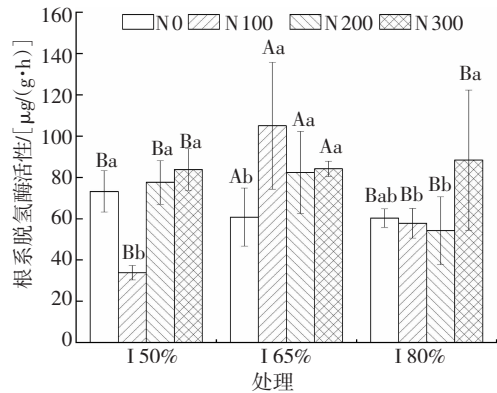


图 3 不同水氮处理对根系活力(根系脱氢酶活性)影响

2.3 不同水氮处理对西瓜可溶性蛋白及氮代谢酶的影响

由图 4 可知，与 N 0 相比，施氮提高了西瓜 SP 含量。其中 I 50%时 N 100 处理显著高于其他施氮处理 ($P<0.05$)，为 3.79 mg/g；I 65%处理下，各施氮处理均显著高于 N 0 处理 ($P<0.05$)，施氮平均提高可溶性蛋白 22%；I 80%时 N 200 处理显著高于其他施氮处理($P<0.05$)，为 4.62 mg/g。

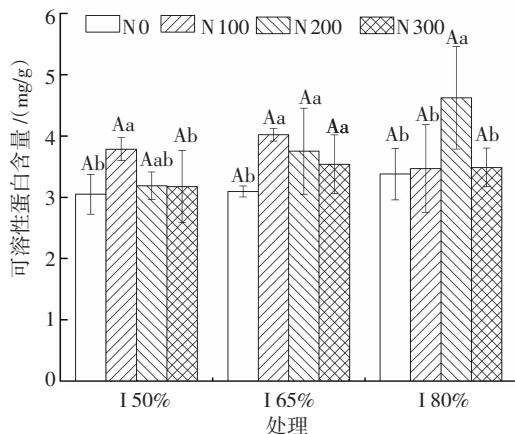


图 4 不同水氮处理对西瓜可溶性蛋白(SP)含量的影响

由图 5 可知，水氮共同影响了西瓜叶 GS 的含量。I 65%处理西瓜叶 GS 含量最高，平均达 7.58 $A_{540}/\text{g}\cdot\text{h}$ 。I 50%处理下 GS 随施氮量的增加而增加，I 50%时 N 300 处理的 GS 达 10.35 $A_{540}/\text{g}\cdot\text{h}$ ；I 65%处理下，各施氮组均显著高于 N 0($P<0.05$)，提高约 6 倍；I 80%处理下，N 100 和 N 300 处理均显

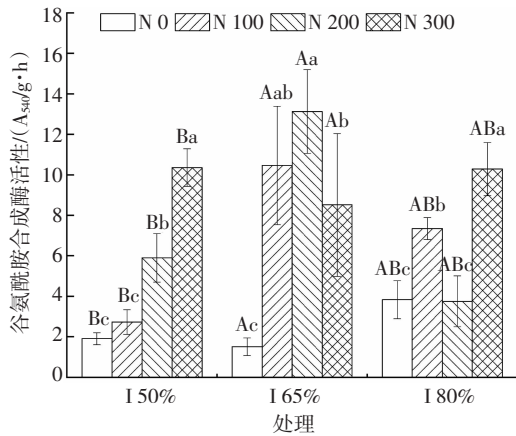


图5 不同水氮处理对西瓜谷氨酰胺合成酶(GS)的影响

显著高于 N 0、N 200 处理($P < 0.05$)。

NR 受水氮共同作用。由图 6 可知, 随灌水量的增加, N 100 和 N 200 处理的 NR 呈先增后降的趋势。I 50% 处理下, 增加施氮量可显著提高 NR ($P < 0.05$), N 300 处理最高, 为 $5.86 \mu\text{g}/(\text{g}\cdot\text{h})$ 。I 65% 处理下, N 200、N 300 显著高于 N 0 和 N 100 处理组 ($P < 0.05$)。I 80% 处理下, N 300 处理达峰值 $5.45 \mu\text{g}/(\text{g}\cdot\text{h})$, 且显著高于 N 0 和 N 100 处理 ($P < 0.05$)。

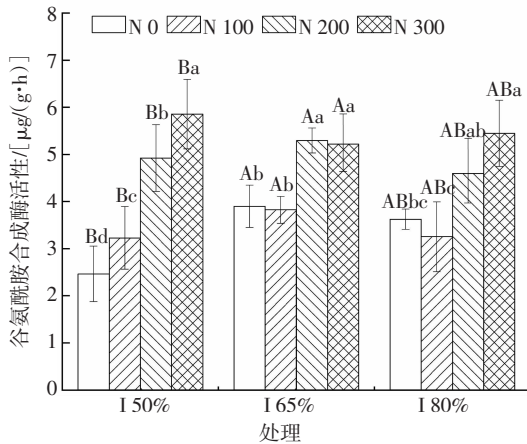


图6 不同水氮处理对西瓜硝酸还原酶(NR)的影响

2.4 不同水氮处理对西瓜抗逆指标的影响

CAT 和 POD 是植物抗性评价的正向指标, 在一定范围内与植物所受胁迫呈正相关。由图 7 可知, 西瓜成熟期的 CAT 维持在 $7 \sim 8 \text{ mg}/(\text{g}\cdot\text{min})$,

I 80% 处理下, N 0 和 N 100 处理 CAT 显著高于 N 200 处理, 其余处理均无显著差异 ($P < 0.05$)。由图 8 可知, POD 在西瓜成熟期维持在 $400 \sim 600 \mu\text{g}/(\text{g}\cdot\text{min})$, 在各水氮条件下无显著差异 ($P < 0.05$)。

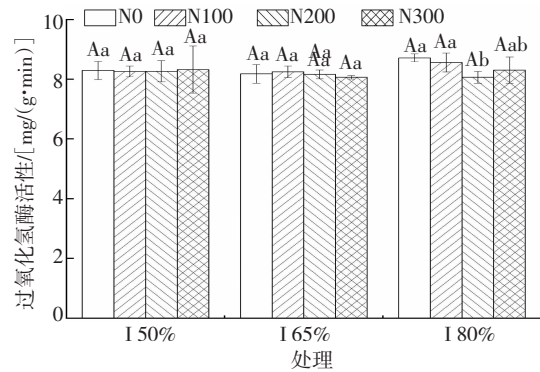


图7 不同水氮处理对过氧化氢酶(CAT)的影响

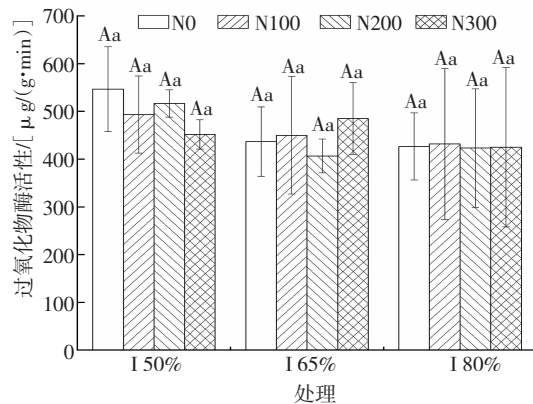


图8 不同水氮处理对过氧化物酶(POD)的影响

2.5 不同水氮处理下西瓜成熟期生长状况综合评价

从表 1 可以看出, NR、SP 受施氮量的影响 ($P < 0.05$), GS、根系活力受灌水量、施氮量及其交互作用的影响 ($P < 0.05$), POD 受定额灌水量影响 ($P < 0.05$), 伤流液量受施氮、灌水量与施氮量交互的影响 ($P < 0.01$)。定额灌水量和施氮量均对 CAT 无显著影响 ($P > 0.05$)。

由图 9 可以看出, GS 与 NR、根系活力呈极显著正相关 ($P < 0.01$), 伤流液量与 SP 呈显著正相

表 1 各指标间方差分析^①

	NR	SP	GS	根系活力	POD	CAT	伤流液量
W%	NS	NS	*	**	*	NS	NS
N	*	*	**	**	NS	NS	**
W%*N	NS	NS	**	**	NS	NS	**

①W%指主处理灌水量, N 指副处理施氮量; * $P < 0.05$, ** $P < 0.01$, NS $P > 0.05$ 。

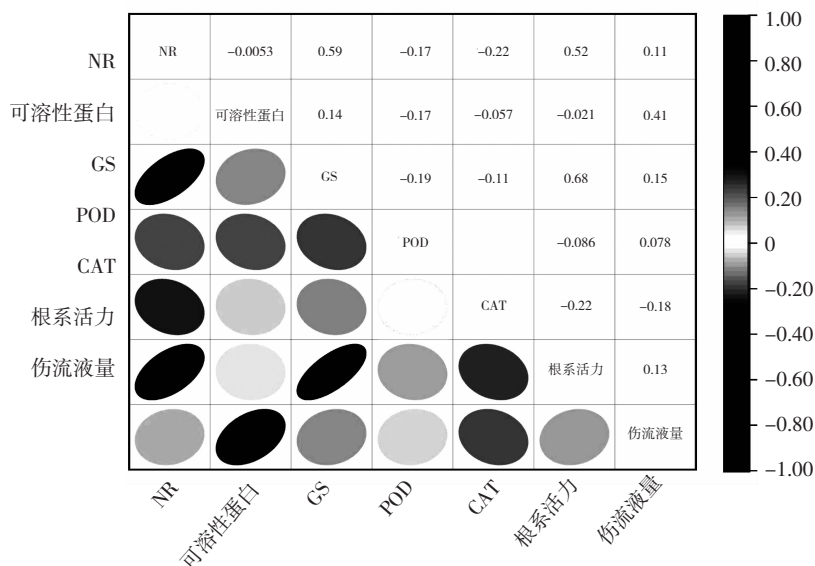


图 9 各指标间的相关性

表 2 不同水氮处理对西瓜成熟期生长状况综合评价

灌水处理	施氮量处理	根系活力	伤流液量	NR	SP	GS	POD	CAT	综合得分
I 50%	N 0	0.46	0.30	0.09	0.14	0.05	0.80	0.44	0.19 c
I 50%	N 100	0.03	0.20	0.26	0.39	0.11	0.66	0.43	0.15 c
I 50%	N 200	0.51	0.32	0.62	0.19	0.34	0.72	0.43	0.40 b
I 50%	N 300	0.58	0.46	0.82	0.18	0.66	0.55	0.46	0.57 ab
I 65%	N 0	0.33	0.12	0.40	0.15	0.03	0.51	0.37	0.17 c
I 65%	N 100	0.61	0.32	0.39	0.47	0.67	0.55	0.42	0.51 ab
I 65%	N 200	0.82	0.52	0.70	0.38	0.86	0.43	0.36	0.72 a
I 65%	N 300	0.59	0.03	0.68	0.30	0.53	0.64	0.30	0.45 ab
I 80%	N 0	0.32	0.08	0.34	0.25	0.19	0.48	0.71	0.13 c
I 80%	N 100	0.29	0.27	0.26	0.28	0.44	0.50	0.62	0.25 c
I 80%	N 200	0.41	0.79	0.55	0.67	0.19	0.48	0.30	0.57 ab
I 80%	N 300	0.75	0.05	0.73	0.29	0.66	0.48	0.45	0.49 ab
各指标权重		0.25	0.30	0.22	0.18	0.25	0.03	-0.23	

关($P < 0.05$)。

不同处理组西瓜成熟期生长状况综合评价结果(表 2)表明,高氮、高水均利于西瓜成熟期生长。I 65%时 N 200 处理得分最高,为 0.72; I 50%时 N 300 处理、I 65%时 N 100 处理、I 65%时 N 300 处理、I 80%时 N 200 处理、I 80%时 N 300 处理得分较高,分别为 0.57、0.51、0.45、0.57、0.49; I 50%时 N 0 处理、I 50%时 N 100 处理、I 65%时 N 0 处理、I 80%时 N 0 处理、I 80%时 N 100 处理得分较低。

3 讨论与结论

一般认为,生育后期根系活力受地上碳水化合物分配的制约,而光合产物等集中向果实迅速转运,向根部提供的底物缺乏;加之结果后期根叶生理功能的衰退,摄取外界水分和养分的能力减弱,往往会降低植物的抗逆性并引起过早衰退等。因此,保持根系和叶片生育期后期的功能,维持根叶活力对发挥西瓜的产量质量潜力和经济效益至关重要。

施肥提供的氮源对作物各项生理指标和代谢

活动起关键作用, 植株氮代谢酶在吸收和同化氮源中起关键作用, 了解氮代谢酶活性对作物生长极为重要^[16]。赵鹏等^[17]研究发现, 随着田间持水量的增加, 叶片硝酸还原酶等氮代谢酶活性增加, 田间持水量达到 60% 时不再增长, 这与本研究 65% 田间持水量西瓜叶氮代谢酶活性达峰值的结果相同, 说明植株氮素的代谢同化在一定水限条件下受其影响, 当达到一定土壤水分便不再限制, 也间接说明氮代谢酶活性可以判断作物水分丰缺。

根系是植物吸收水分和养分的主要器官, 根系活力反映了植物吸收养分和水分的强弱, 通常根系活力的表征有根系脱氢酶活性、植物茎伤流液量大小等^[18-19]。植物蒸腾作用和光合作用等代谢活动主要是在日间进行, 伤流液量可反映不同水氮水平下植株整体的代谢适应性^[20]。本研究发 现, 白天收集的伤流液量明显高于晚上, 且不同水氮条件下存在一定差异性, 可反映根系活动状况, 这与郭士伟等^[8]研究基本一致。陆大克等^[21]认为, 由于作物吸收的水分和养分在土壤中的来源主要集中于根际土壤等小区域面积当中, 因此, 适宜的水肥配比能促进生育后期根系活力, 而过低、过高的灌溉额度与养分不利于根系的生长发育。本研究中, 田间最大持水量下限 65% 条件下施 N 100 ~ 300 kg/hm² 处理下根系脱氢酶活性较高, 增加灌溉额度会影响根系对养分的吸收, 在定额灌水下不同施肥比例对西瓜各项指标的影响及作用机理有待进一步研究。

逆境胁迫会严重影响植物的光合作用、膜稳定性等正常生理活动, 其中最为明显的表现为体内过氧化物酶(POD)、过氧化氢酶(CAT)等保护酶系统失去平衡, 造成活性氧累积的氧化伤害, 进而影响植物生长^[22]。本试验水氮设限范围内不存在明显的逆境环境, 西瓜成熟期叶 POD 和 CAT 的分析表明无早衰现象。由于植物体内不同保护酶对不同时期和不同类型的胁迫反应不尽相同, 前人对胁迫的报道也各有异同^[23-27]。可见, 植物体内活性氧清除系统对逆境的响应较为复杂, 有关胁迫对西瓜成熟后期保护性酶活性等的影响与不同生育期的关系还需进一步研究。

本研究中田间最大持水量为 50% 时施氮量为

300 kg/hm² 或田间最大持水量为 65% 施氮量在 100 ~ 300 kg/hm² 时, 西瓜水肥耦合效应显著, 能有效促进西瓜对营养物质的吸收和转化, 推荐为河西地区西瓜栽培适宜的水氮水平。

参考文献:

- [1] 李秀花, 吴纯渊. 中国西北五省区水资源利用的协调性分析[J]. 干旱区地理, 2022, 45(1): 9-16.
- [2] 杨凯, 吴倩, 蒲瑶瑶, 等. 熏蒸条件下有机肥部分替代化肥对西瓜光合和氮代谢酶活性的影响[J]. 土壤通报, 2020, 51(4): 905-911.
- [3] 高玉红, 闫生辉, 许娟, 等. 嫁接对西瓜根际土壤酶和叶片氮代谢酶活性及产量的影响[J]. 中国瓜菜, 2016, 29(6): 10-13.
- [4] 赵卫星, 康利允, 高宁宁, 等. 西瓜叶片防御酶活性变化与病毒病抗性的关系[J]. 河南农业科学, 2021, 50(5): 92-98.
- [5] 林丽琳, 陈晟, 施木田, 等. 镁对‘新天玲’西瓜叶片光合色素、可溶性蛋白含量和硝酸还原酶活性的影响[J]. 热带农业科学, 2015, 35(1): 26-30.
- [6] 徐国伟, 陆大克, 刘聪杰, 等. 干湿交替灌溉和施氮量对水稻内源激素及氮素利用的影响[J]. 农业工程学报, 2018, 34(7): 137-146.
- [7] 张小红, 赵依杰, 林强, 等. 钼对无籽西瓜叶片氮代谢关键酶活性的影响[J]. 云南农业大学学报(自然科学), 2017, 32(6): 1072-1078.
- [8] 郭士伟, 夏士健, 朱虹霞, 等. 水稻根系活力测定方法及超级稻两优培九生育后期根系活力研究[J]. 土壤, 2012, 44(2): 308-311.
- [9] GOODGER J Q, SHARP R E, MARSH E L, et al. Relationships between xylem sap constituents and leaf conductance of well-watered and water-stressed maize across three xylem sap sampling techniques[J]. Journal of Experimental Botany, 2005, 56(419): 2389-2400.
- [10] 朱士农, 郭世荣, 张爱慧, 等. NaCl 胁迫对西瓜嫁接苗叶片抗氧化酶活性及光合特性的影响[J]. 西北植物学报, 2008(11): 2285-2291.
- [11] 高俊凤. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [12] 梁建生, 曹显祖. 杂交水稻叶片的若干生理指标与根系伤流强度关系[J]. 江苏农学院学报, 1993(4): 25-30.
- [13] 范兵华, 马乐乐, 任瑞丹, 等. 有机营养液灌溉频次和灌水量对设施甜瓜产量、品质及肥水利用效率的影响[J]. 应用生态学报, 2019, 30(4): 1261-1268.
- [14] 陶向新. 模糊数学在农业科学中的初步应用[J]. 沈阳

- 农学院学报, 1982(2): 96-107.
- [15] 周璐瑶, 赵士文, 杜清洁, 等. 不同花生壳基质配比对西瓜生长、产量和品质的影响[J]. 中国瓜菜, 2022, 35(6): 29-34.
- [16] XU H W, LU Y, XIE Z M, et al. Changes in nitrogen metabolism and antioxidant enzyme activities of maize tassel in black soils region of northeast China.[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2014, 5: 515.
- [17] 赵 鹏, 熊淑萍, 李 琳, 等. 土壤水分对不同筋力型小麦花后旗叶氮素同化酶活性和籽粒蛋白质含量的影响[J]. 麦类作物学报, 2009, 29(3): 447-452.
- [18] 常 江, 张自立, 郜红建, 等. 外源稀土对水稻伤流组分的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2004(5): 522-525.
- [19] 马富举, 李丹丹, 蔡 剑, 等. 干旱胁迫对小麦幼苗根系生长和叶片光合作用的影响[J]. 应用生态学报, 2012, 23(3): 724-730.
- [20] 陈范骏, 米国华, 刘建安, 等. 玉米自交系木质部伤流液中氮素形态差异及其与氮效率的关系[J]. 中国农业科学, 1999(5): 43-48.
- [21] 陆大克, 段 骅, 王维维, 等. 不同干湿交替灌溉与氮肥形态耦合下水稻根系生长及功能差异[J]. 植物营养与肥料学报, 2019, 25(8): 1362-1372.
- [22] ALMESELMANI M, DESHMUKH P S, SAIRAM R K, et al. Protective role of antioxidant enzymes under high temperature stress[J]. *Plant Science*, 2006, 171(3): 382-388.
- [23] 王俊刚, 陈国仓, 张承烈. 水分胁迫对2种生态型芦苇(*Phragmites communis*)的可溶性蛋白含量、SOD、POD、CAT活性的影响[J]. 西北植物学报, 2002(3): 561-565.
- [24] 桑子阳, 马履一, 陈发菊. 干旱胁迫对红花玉兰幼苗生长和生理特性的影响[J]. 西北植物学报, 2011, 31(1): 109-115.
- [25] 李建设, 耿广东, 程智慧. 低温胁迫对茄子幼苗抗寒性生理生化指标的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2003(1): 90-92.
- [26] 刘慧英, 朱祝军, 吕国华. 低温胁迫对嫁接西瓜耐冷性和活性氧清除系统的影响[J]. 应用生态学报, 2004(4): 659-662.
- [27] 曹云英, 段 骅, 杨立年, 等. 抽穗和灌浆早期高温对耐热性不同籼稻品种产量的影响及其生理原因[J]. 作物学报, 2009, 35(3): 512-521.