

不同水氮调控对绿洲灌区膜下滴灌西瓜生长及产量的影响

罗双龙¹, 马忠明², 薛亮¹, 王智琦¹, 唐文学¹, 连彩云¹

(1. 甘肃省农业科学院土壤肥料与节水农业研究所 兰州 730070; 2. 甘肃省农业科学院 兰州 730070)

摘要: 为优化河西绿洲灌区西瓜高效栽培的最佳水氮供应量, 采用裂区试验设计, 主处理设置 3 个土壤水分下限 (分别为计划湿润层土壤田间持水量的 50%、65% 和 80%), 副处理设置 4 个施氮水平 (0、100、200 和 300 kg·hm⁻²), 研究不同水氮调控对膜下滴灌西瓜生长、产量、品质和水分利用效率的影响。结果表明, 在氮肥施用量为 200 kg·hm⁻² 时, 有利于西瓜生长和干物质积累, 促进西瓜产量和品质的形成, 较其他施氮水平西瓜成熟期干物质质量增加了 2.80%~13.30%, 中心可溶性固形物含量、产量和水分利用效率分别提高 0.12~0.61 百分点、0.32%~7.57% 和 1.57%~12.43%; 西瓜产量随土壤水分下限提高而提高, 分别较 50% 土壤水分下限显著提高了 7.38%~17.97%。在土壤水分下限为田间持水量的 65%、氮肥施用量为 200 kg·hm⁻² 时, 西瓜可溶性固形物含量和水分利用效率最大, 分别为 11.00% 和 229.05 kg·hm⁻²·mm⁻¹。综合考虑西瓜产量、品质和水分利用效率, 土壤水分下限为田间持水量的 65%, 氮肥施用量为 200 kg·hm⁻², 是河西绿洲灌区露地西瓜高效绿色生产的方案。以西瓜产量和可溶性固形物含量最大值交集的 85% 来确定土壤水分下限和氮肥施用区间, 可得土壤水分下限为 72.25%~75.02%, 氮肥施用量区间为 204.25~254.15 kg·hm⁻²。

关键词: 西瓜; 叶绿素; 产量; 耗水量; 氮肥施用量

中图分类号: S651

文献标志码: A

文章编号: 1673-2871(2025)06-101-08

Effects of different water and nitrogen regulation on the growth and yield of watermelon under mulch drip irrigation in irrigation area

LUO Shuanglong¹, MA Zhongming², XUE Liang¹, WANG Zhiqi¹, TANG Wenxue¹, LIAN Caiyun¹

(1. Institute of Soil Fertilizer and Water-Saving Agriculture, Gansu Academy of Agricultural Sciences, Lanzhou 730070, Gansu, China;

2. Gansu Academy of Agricultural Sciences, Lanzhou 730070, Gansu, China)

Abstract: To clarify the effects of water-nitrogen synergy on the growth, yield, quality, and water use efficiency of watermelon under film mulching drip irrigation in the Hexi Oasis Irrigation District, and to seek and optimize the optimal water and nitrogen supply for efficient cultivation of watermelon in the irrigation district. A split-plot experimental design was adopted. The main treatments set three soil moisture lower limits (50%, 65%, and 80% of the field water-holding capacity of the planned wetted layer soil, respectively), and the sub-treatments set four nitrogen application levels (0, 100, 200, and 300 kg·hm⁻²). The effects of different water-nitrogen regulations on the growth, yield, and quality of watermelon under film mulching drip irrigation were studied. The results showed that when the nitrogen application rate was 200 kg·hm⁻², it was beneficial to the growth and dry matter accumulation of watermelon, and promoted the formation of watermelon yield and quality. Compared with other nitrogen application levels- the dry matter mass at the mature stage increased by 2.80%-13.30%, and the soluble solid content, yield, and water use efficiency increased by 0.12-0.61 percent point, 0.32%-7.57%, and 1.57%-12.43%, respectively. The yield of watermelon increased with the increase of the soil moisture lower limit, increasing significantly by 7.38%-17.97%, compared with the 50% soil moisture lower limit. When the soil moisture lower limit was 65% of the field water-holding capacity and the nitrogen application rate was 200 kg·hm⁻², the sugar content and water use efficiency of watermelon were the highest, being 11.00% and 229.05 kg·hm⁻²·mm⁻¹, respectively. Considering the yield, quality, and water use efficiency of watermelon comprehensively, a soil moisture lower limit of 65% of the field water-holding capacity and a nitrogen application rate of 200 kg·hm⁻² is the plan for efficient and

收稿日期: 2024-10-29; 修回日期: 2025-01-14

基金项目: 甘肃省农业科学院青年基金(2021GAAS41); 国家西甜瓜产业技术体系专项(CARS-25)

作者简介: 罗双龙, 男, 在读硕士研究生, 主要研究方向为作物栽培与生理生态。E-mail: 919671952@qq.com

通信作者: 马忠明, 男, 研究员, 主要从事作物栽培与节水农业研究。E-mail: mazhming@163.com

green production of open-field watermelon in the Hexi Oasis Irrigation District. By determining the soil moisture lower limit and nitrogen application range with 85% of the intersection of the maximum values of watermelon yield and soluble solid content, the soil moisture lower limit is 72.25%-75.02%, and the nitrogen application range is 204.25-254.15 kg·hm⁻².

Key words: Watermelon; Chlorophyll; Yield; Water consumption; Nitrogen application level

河西绿洲灌区光热资源丰富,昼夜温差大,有利于果蔬等作物生长和糖分积累,是我国主要的瓜果生产基地。同时,区域水资源天然禀赋有限,降水量少且分布不均,气候干燥、蒸发量大,农业生产中长期水资源匮乏的问题尤为突出。灌区作物生长高度依赖灌溉,而水资源短缺已成为制约该地区农业可持续发展的重要因素。缺水导致绿洲灌区农业灌溉用水紧张,作物产量受限,农民收入难以提高。在农业生产中普遍存在灌溉模式粗放、大水大肥现象突出、种植农户科学灌溉与精准施肥意识淡薄、水肥资源浪费严重等现象。传统灌溉施肥方式不仅限制了作物产量,生产的成本大,而且容易导致土壤盐碱化、养分发生深层渗漏等问题,严重影响农田环境^[1]。因此,针对目前河西灌区水资源短缺及水肥利用率低的现状,研发推广高效节水灌溉技术和高效水肥管理策略,助推区域作物水肥高效利用和绿色可持续发展势在必行。膜下滴灌水肥一体化技术将地膜覆盖和滴灌技术相结合,可有效将水分和养分通过膜下铺设的滴灌带直接运输到作物根部,实现灌水和施肥一体化管理,达到了节水、节肥、高效生产的目的^[2]。目前,膜下滴灌水肥一体化技术已从最初的玉米、棉花等作物扩展到水果、蔬菜等作物,此外,在设施温室、无土栽培等现代农业生产中也得到了广泛应用和推广。

西瓜作为一种世界广泛种植的日常水果,富含碳水化合物和人类身体所需的维生素,口感佳,具有较高的经济价值。我国西瓜种植面积和产量分别占世界的 52.7%和 67.0%,是世界上重要的西瓜生产和消费大国^[3],在农业生产中占有重要地位。而河西绿洲灌区依靠其独特的光热资源条件,有利于西瓜生长和糖分的积累,是我国西瓜主产地之一。近年来,在西瓜生产中,种植农户一味地追求产量,过量灌水和施肥问题比较突出,导致西瓜产量和品质降低,造成土壤环境恶化^[4-5],同时对区域生态环境和人类健康造成了一定的影响^[6]。研究表明,采用滴灌水肥一体化技术可以节省 50%化肥用量,降低肥料使用成本,对修复土壤、改善环境效果明显^[7-8],可实现根据西瓜生产中需水需肥的特点精准施肥和灌水的目标。西瓜需水量大,对水分较为敏感,灌水和施肥对西瓜的产量和品质影响较大。

水、氮作为作物生长发育的主要限制因素,在物质转化、养分运输和作物形态建成及生长发育中发挥主要作用^[9-10]。水氮协调利用可有效协调作物养分运输,提高作物光合效率,促进作物产量提高和品质改善^[11-12]。合理协调水氮供应有利于作物干物质积累和产量、品质的提高,促进作物高产高效生产。因此如何协调水氮关系,有效发挥水氮协同作用,是河西灌区膜下滴灌西瓜绿色高效可持续生产的关键。

目前,在膜下滴灌方式下,有机肥与化肥配施、灌水量和不同化肥投入对西瓜生产及产量的影响方面做了大量研究,并提出了相应的灌水和施肥方案,但在膜下滴灌条件下有关水肥协同调控对西瓜生长发育、产量和品质影响的研究较少。因此,笔者基于河西绿洲灌区水资源严重短缺、西瓜生产中灌水施肥不合理、缺乏科学依据的现状,开展水氮协同调控对灌区膜下滴灌西瓜生长、产量和品质影响方面的研究,以期为灌区西瓜产业高效绿色发展提供依据和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于 2022 年在甘肃省张掖市甘州区小满镇甘肃省农业科学院张掖节水农业试验站进行。张掖节水农业试验站位于河西绿洲灌区的中心腹地,处于河西走廊中部,地下水深 100 m,热量丰富,昼夜温差较大,光照充足;年平均气温 7.3℃,年日照时数 3085 h,海拔 1570 m, >0℃的有效积温 3388℃,年降水量不足 101.2 mm,属无灌溉就无农业的典型灌溉农业区,是典型的温带荒漠性气候。西瓜生育期平均降水量 40.5 mm,蒸发量 947.2 mm。0~20 cm 土壤容重为 1.36 g·cm⁻³,最大田间持水量为 31.55%(表 1)。

1.2 材料

试验材料为金城 5 号,采购自中卫市金城种业有限责任公司,该品种生育期 105 d,果实椭圆形,浅绿色底,深绿色锯齿状条带,皮厚小于 1.3 cm,平均单果质量 7.3 kg。供试氮肥为尿素[N 含量(w,后同)46.4%,山西晋丰煤化工有限责任公司生产],磷肥为重过磷酸钙(P₂O₅ 含量 44%,云南弘祥化工有

表1 试验区不同土层土壤容重与田间持水量
Table 1 Soil bulk density and field capacity in different soil layers of the experimental area

土层深度 Soil layer depth/cm	土壤容重 Soil bulk density/ (g·cm ⁻³)	田间持水量 Field water- holding capacity/%
0~20	1.36	31.55
21~40	1.43	29.46
41~60	1.44	29.22
61~80	1.47	28.91
81~100	1.47	28.74

限公司生产),钾肥为硫酸钾(K₂O 含量 50%,国投新疆罗布泊钾盐有限责任公司生产)。

1.3 试验设计

试验采用裂区设计,主区为土壤水分下限,设 3 个水平,分别为计划湿润土层田间持水量的 50%、65%和 80%,用 W1、W2 和 W3 表示;副区为施氮量,设 4 个水平,分别为 0、100、200、300 kg·hm⁻²,用 N0、N100、N200 和 N300 表示,共计 12 个处理,3 次重复,小区面积为 45 m²(5 m×9 m)。窄行 50 cm,覆 90 cm 地膜,宽行 200 cm,株距为 50 cm,种植密度为 16 000 株·hm⁻²。2022 年 6 月 1 日定植,8 月 20 日收获。灌水方式采用膜下滴灌,一膜两管,两条滴灌带间距 50 cm,滴头间距 50 cm,西瓜苗移栽位置位于滴灌带出水口,定植前 1 d 滴灌适量的水,定植后培土浇灌充足的缓苗水。西瓜苗期至伸蔓期计划湿润层深度为 20 cm,伸蔓期至成熟期为 40 cm,利用 TRIME-PICO-IPH TDR 剖面土壤水分测量系统实时观测土壤水分,当水分达到土壤水分下限时开始灌水,灌溉至田间持水量的 90%。试验所用磷肥和钾肥分别为 180 kg·hm⁻²和 210 kg·hm⁻²,氮肥 40%和全部的磷肥、钾肥做基肥于播前瓜行沟施,60%的氮肥在西瓜伸蔓期、开花坐果期和果实膨大期按 15%、25%和 20%随滴灌进行追肥。

1.4 测定项目与方法

1.4.1 植株生长指标的测定 分别在西瓜伸蔓期、开花坐果期和果实膨大期每小区随机取 3 株具有代表性、长势一致的植株,使用 SPAD-520 叶绿素仪测定叶绿素含量,用直尺测定西瓜的主蔓长,用游标卡尺测定西瓜的茎粗。在西瓜伸蔓期、开花坐果期、膨果期和成熟期每个小区取 3 株具有代表性、生长一致的植株,分茎、叶和果实放入烘箱,105 ℃杀青 30 min,然后 80 ℃烘干至恒质量,称干质量。

1.4.2 产量和品质的测定 西瓜成熟时,每小区随

机选取具有代表性的 10 个瓜计算单瓜质量,并统计每个小区瓜数,然后计算产量。使用 PAL-1 糖度仪测定样品西瓜的可溶性固形物含量。

1.4.3 土壤含水量的测定 在西瓜的不同生育时期取 0~100 cm 土层含水量,每 20 cm 一层,用烘干法测定。

1.4.4 作物耗水量用水量平衡法来计算 计算公式如下:

$$ET_{1-2}=10 \sum_{i=1}^n \gamma_i H_i (\theta_{i1}-\theta_{i2})+M+P+K。$$

式中,ET₁₋₂为阶段耗水量;i 为土层编号;n 为总土层数;γ_i为第 i 层土壤容重;H_i为第 i 层土壤厚度;θ_{i1}和 θ_{i2}分别为第 i 层土壤时段初和时段末的质量含水量;M 为时段内的灌水量;P 为有效降水量;K 为时段内的地下水补给量,当地下水埋深大于 2.5 m 时,K 值可以忽略不计,本试验的地下水埋深在 2.5 m 以下,故 K 值为 0。

作物水分利用效率/(kg·hm⁻²·mm⁻¹)=产量/耗水量。

1.5 数据分析

采用 Excel 2010 进行试验数据整理和计算,采用 SPSS 21.0 进行随机区组双因素方差分析及相关性分析,采用 Duncan 新复极差法进行多重比较。

2 结果与分析

2.1 不同水氮处理对西瓜主蔓长的影响

由表 2 可知,不同土壤水分下限对各时期西瓜主蔓长有极显著影响,氮肥施用量对西瓜开花坐果期主蔓长影响极显著,二者交互作用对西瓜主蔓长无显著影响。在同一土壤水分条件下,在伸蔓期,W1 处理下,不同氮肥施用量处理间主蔓长差异不显著,W2、W3 处理下,西瓜主蔓长随氮肥施用量增加呈先增加后减小的趋势,在氮肥施用量为 200 kg·hm⁻²时达到最大,较 N0 分别增加 11.27%和 31.98%;在开花坐果期,W1、W2 处理条件下西瓜主蔓长在 N100 施肥条件下达到最大,分别较 N0 增加 17.85%和 21.43%,W3 条件下,主蔓长在 N200 条件下达到最大,较 N0 增加 16.12%;在膨果期,W1 处理下西瓜主蔓长在 N200 条件下达到最大,W2、W3 处理下西瓜主蔓长在 N0 处理下最大。在同一氮肥施用量条件下,N0 条件下,伸蔓期,西瓜主蔓长随土壤水分下限增加呈先增加后减小的趋势,其他时期西瓜主蔓长随土壤水分下限升高而增加,N0、N100、N200 和 N300 处理在伸蔓期 W3 较 W1 分别

表 2 不同处理对西瓜主蔓长的影响

Table 2 Effects of different treatments on the main vine length of watermelon

cm

土壤水分下限 Soil water lower limit	施氮水平 Nitrogen fertilizer application level	生育时期 Growth stage		
		伸蔓期 Vine extension period	开花坐果期 Blooming and fruit setting period	膨果期 Fruit swelling period
W1	N0	48.89±2.01 ef	117.67±1.37 cd	160.22±6.41 cd
	N100	49.78±4.43 def	138.67±1.44 abc	155.89±7.91 d
	N200	48.11±3.28 ef	124.44±6.74 bcd	164.22±2.38 bcd
	N300	46.70±3.19 f	116.67±5.07 d	158.89±6.00 cd
W2	N0	54.22±5.25 bcde	122.89±14.55 bcd	184.89±12.77 abcd
	N100	55.00±5.91 bcdef	149.22±8.00 a	171.56±0.16 abcd
	N200	60.33±4.47 abcd	139.56±1.66 ab	177.89±10.65 abcd
	N300	58.22±17.85 abcde	139.89±2.28 ab	180.44±10.44 abcd
W3	N0	51.44±8.80 cdef	135.88±9.75 abcd	201.22±5.18 a
	N100	62.00±5.34 abc	149.89±2.31 a	187.78±23.82 abc
	N200	67.89±12.10 a	157.78±17.43 a	194.00±8.34 ab
	N300	63.11±10.62 ab	150.67±15.45 a	198.33±16.30 a
F 值	W	14.76**	12.70**	18.16**
F value	N	2.37	5.05**	0.79
	W×N	1.33	0.81	0.22

注:同列不同小写字母表在 0.05 水平差异显著,**表示极显著相关($p<0.01$)。下同。

Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant difference at 0.05 level, **represents extremely significant correlation ($p<0.01$). The same below.

增加 5.22%、24.55%、41.11%和 35.14%,开花坐果期 W3 较 W1 分别增加 15.48%、8.09%、26.79%和 29.14%,膨果期 W3 较 W1 分别增加 25.59%、20.46%、18.13%和 24.82%。

2.2 不同水氮处理对西瓜叶绿素含量的影响

由表 3 可知,土壤水分下限对各生育时期西瓜叶绿素含量有极显著影响,氮肥施用量和二者的交互作用对各生育时期西瓜叶绿素含量无显著影响。在同一土壤水分下限条件下,伸蔓期, W1 处理下西瓜叶片叶绿素含量在 N200 处理条件下最大,

表 3 不同处理对西瓜叶绿素含量的影响

Table 3 Effects of different treatments on the chlorophyll content of watermelon

SPAD

土壤水分下限 Soil water lower limit	施氮水平 Nitrogen fertilizer application level	生育时期 Growth stage		
		伸蔓期 Vine extension period	开花坐果期 Blooming and fruit setting period	膨果期 Fruit swelling period
W1	N0	58.88±0.25 a	54.87±0.77 bcd	53.18±0.09 abc
	N100	59.43±0.88 a	57.58±3.95 ab	54.16±1.05 abc
	N200	61.64±1.62 a	56.12±1.52 bc	54.98±1.48 a
	N300	60.22±0.58 a	60.57±2.80 a	54.83±2.80 a
W2	N0	53.77±2.10 bc	50.24±2.23 ef	51.02±4.63 abc
	N100	54.18±1.58 b	54.62±0.14 bcd	53.13±0.48 abc
	N200	53.45±1.32 bc	54.22±1.34 bcde	55.78±1.82 a
	N300	53.01±1.82 bc	52.56±0.61 cdef	54.22±2.38 a
W3	N0	48.00±1.94 d	49.57±3.22 f	50.48±2.94 abc
	N100	51.34±2.33 bcd	52.19±0.10 cdef	49.14±1.87 bc
	N200	49.99±1.41 cd	49.04±1.86 f	48.09±1.59 c
	N300	51.47±2.49 bcd	51.27±1.69 def	55.17±2.22 a
F 值	W	79.03**	16.82**	4.56**
F value	N	1.35	2.61	2.87
	W×N	0.86	1.97	1.64

W2 和 W3 土壤水分条件下,西瓜叶片叶绿素含量分别在 N100 和 N300 处理条件下最大,较不施肥处理分别增加了 0.76%、7.23%。开花坐果期,W1 土壤水分下限条件下,西瓜叶片叶绿素含量随施氮量增加呈先升高后降低再升高的趋势,在 N300 处理下达到最大值,在 W2 和 W3 土壤水分条件下,西瓜叶片叶绿素含量均在 N100 条件下最大。膨果期,W1、W2 条件下西瓜叶片叶绿素含量随氮肥施用量增加呈先升高后降低的趋势,在 N200 时达到最大;W3 水分条件下,N300 施用量条件下西瓜叶片叶绿素含量最高,且显著高于 N100、N200 处理,与 N0 处理差异不显著。同一土壤水分下限条件下,施肥处理较不施肥处理叶绿素含量分别提高 2.28%~10.39%、4.62%~8.72%和-1.10%~5.29%。在同一氮肥施用量条件下,伸蔓期和开花坐果期,西瓜叶片叶绿素含量随土壤水分下限升高而降低,表现为 W1>W2>W3。膨果期,N0、N100 和 N300 条件下,不同水分处理对西瓜叶片叶绿素含量的影响不显著;N200 条件下,随土壤水分下限升高呈先升高后降低的趋势,在 W2 处理下达到最大,表现为 W2>W1>W3。伸蔓期和开花坐果期,同一氮水平处理下,W2、W3 处理的西瓜叶片叶绿素含量分别较 W1 处理降低 8.67%~18.90%和 5.14%~15.35%。膨果期,西瓜叶片叶绿素含量在 W2N200 处理下最大。

2.3 不同处理对西瓜干物质积累的影响

由表 4 可知,不同水氮处理对不同生育时期西瓜干物质积累有显著或极显著影响,二者交互作用对西瓜开花坐果期干物质积累有极显著影响。同一土壤水分下限条件下,伸蔓期,W1 处理下,西瓜干物质积累量随氮肥施用量增加呈先增加后减小的趋势,表现为 N200>N100>N300>N0。W2 和 W3 处理下,西瓜干物质积累量随氮肥施用量增加而增加,表现为 N300>N200>N100>N0。开花坐果期,W1 处理下,西瓜干物质积累量随氮肥施用量增加呈先增加后减小的趋势,表现为 N200>N100>N300>N0,W2 处理下表现为 N300>N200>N100>N0,W3 处理下表现为 N300>N100>N200>N0。膨果期,W1 和 W3 处理下,西瓜干物质积累量随氮肥施用量增加呈先增加后减小的趋势,W1 处理条件下表现为 N200>N100>N300>N0,W3 处理条件下表现为 N100>N200>N300>N0。成熟期西瓜干物质积累量随氮肥施用量增加均呈先增加后减小的趋势,其中 N200 处理最大。伸蔓期,施肥处理较不施肥处理干物质积累量分别增加 4.69%~14.78%、22.15%~41.21%和 36.26%~45.47%,开花坐果期分别增加 4.61%~15.46%、2.26%~11.01%和 14.55%~25.03%,膨果期分别增加 6.70%~27.97%、-13.86%~7.29 和 4.65%~23.59%,成熟期分别增加 4.41%~

表 4 不同处理对西瓜干物质积累的影响

Table 4 Effects of different treatments on the dry matter accumulation in watermelon

(g·plant⁻¹)

土壤水分下限 Soil water lower limit	施氮水平 Nitrogen fertilizer application level	生育时期 Growth stage			
		伸蔓期 Vine extension period	开花坐果期 Blooming and fruit setting period	膨果期 Fruit swelling period	成熟期 Maturity period
W1	N0	8.32±0.84 e	40.17±0.68 f	134.73±14.76 c	280.83±5.43 h
	N100	9.12±0.48 bcd	43.16±0.59 ef	156.71±6.35 bc	293.21±6.72 gh
	N200	9.55±0.45 bcd	46.38±0.47 e	172.42±13.83 abc	310.08±7.79 ef
	N300	8.71±0.62 de	42.02±1.86 ef	143.76±43.70 bc	310.04±4.79 ef
W2	N0	8.76±0.91 cde	52.30±3.92 cd	166.90±4.97 abc	304.35±2.74 fg
	N100	10.70±0.68 b	53.48±0.51 cd	165.71±12.68 abc	325.04±5.22 e
	N200	10.74±0.48 b	54.67±3.96 bcd	179.05±2.94 ab	344.83±4.51 d
	N300	12.37±1.08 a	58.06±3.04 bc	143.76±21.33 bc	318.96±11.66 ef
W3	N0	7.17±1.35 e	51.89±1.18 d	165.71±16.56 abc	357.33±5.72 cd
	N100	9.77±0.85 bcd	59.65±0.41 b	204.80±10.66 a	376.89±3.81 b
	N200	10.01±0.59 bcd	59.44±1.04 b	199.30±6.17 a	391.70±8.56 a
	N300	10.43±0.26 bcd	64.88±3.66 a	173.42±12.31 abc	367.35±12.19 bc
F 值	W	11.90**	108.81**	7.35**	88.18**
F value	N	12.81**	10.33**	3.34*	5.42**
	W×N	2.57	3.06*	0.87	0.55

注:*表示显著相关($p<0.05$)。下同。

Note: * represents significant correlation at 0.05 level. The same below.

10.42%、4.80%~13.30%和 2.80%~9.62%。在同一氮肥施用量条件下(N0 除外),伸蔓期,西瓜干物质积累量随土壤水分下限升高呈先增加后减小的趋势,表现为 W2>W3>W1;开花坐果期、膨果期和成熟期干物质平均积累量随土壤水分下限升高而增加,表现为 W3>W2>W1。

2.4 不同处理对西瓜产量和品质的影响

由表 5 可知,不同土壤水分下限对西瓜可溶性固形物含量、产量、耗水量和水分利用效率有极显著影响,氮肥对西瓜边部可溶性固形物含量和耗水量影响不显著,对西瓜中心可溶性固形物含量、产量和水分利用效率影响极显著,二者的交互作用对其影响不显著。在同一土壤水分下限条件下,西瓜可溶性固形物含量(W1 边部除外)、产量和水分利用效率(W1 除外)随氮肥施用量增加呈先升高后

降低的变化趋势,均在 N200 处理下达到最高,中心可溶性固形物含量表现为 N200> N100≥ N300> N0,产量和水分利用效率均表现为 N200> N300> N100 >N0;其中 N200 处理的西瓜中心可溶性固形物含量、产量和水分利用效率分别较其他施肥处理提高 0.12~0.61 百分点、0.32%~7.57%和 1.57%~12.43%。在同一氮肥施用量条件下,西瓜中心可溶性固形物含量随土壤水分下限升高呈先升高后降低的趋势,在 W2 条件下达到最大,分别较 W1、W3 处理增加 0.18~0.36 百分点和 0.33~0.51 百分点。N0、N100 和 N200 处理下,西瓜边部可溶性固形物含量随土壤水分下限升高呈先升高后降低的趋势,在 W2 土壤水分下限条件下达到最大,N300 处理下随土壤水分下限升高而降低。不同处理条件下西瓜生育期耗水量在 206.66~

表 5 不同处理对西瓜产量和品质的影响
Table 5 Effects of different treatments on watermelon yield and quality

土壤水分下限 Soil water lower limit	施氮水平 Nitrogen fertilizer application level	w(可溶性固形物) Soluble solids content/%		产量 Yield/(kg·hm ⁻²)	耗水量 Water consumption/mm	水分利用效率 Water use efficiency/ (kg·hm ⁻² ·mm ⁻¹)
		边部 Edge	中心 Center			
W1	N0	8.66±0.21 b	10.15±0.14 f	45 255.24±1 131.37 e	206.66±5.92 d	216.69±11.53 ab
	N100	8.79±0.28 ab	10.56±0.09 cde	47 482.90±493.05 d	223.95±8.10 bcd	212.38±10.10 ab
	N200	8.90±0.28 ab	10.76±0.04 bc	48 313.23±855.13 cd	212.86±12.89 d	227.58±16.83 a
	N300	8.93±0.38 ab	10.52±0.09 de	48 159.25±712.05 cd	221.18±19.48 bcd	219.81±23.64 ab
W2	N0	8.86±0.54 ab	10.51±0.01 de	49 400.00±711.81 cd	251.31±14.00 abc	203.73±8.01 bc
	N100	8.91±0.42 ab	10.88±0.15 ab	50 346.67±547.80 c	237.22±30.02 abcd	205.67±27.95 bc
	N200	9.31±0.23 a	11.00±0.14 a	53 140.00±581.26 b	232.15±4.89 bcd	229.05±2.17 a
	N300	8.88±0.34 ab	10.70±0.10 bc	50 373.33±294.54 c	232.22±10.54 bcd	217.38±10.39 ab
W3	N0	8.47±0.02 b	10.14±0.04 f	53 048.89±1 684.48 b	271.64±13.81 a	192.41±3.89 c
	N100	8.63±0.19 b	10.37±0.05 e	53 881.48±859.19 b	270.43±18.81 a	200.40±16.27 bc
	N200	8.88±0.38 ab	10.61±0.13 cd	56 995.56±1 038.02 a	271.64±10.88 a	209.95±2.28 abc
	N300	8.68±0.29 ab	10.37±0.15 e	55 023.70±858.12 ab	266.65±3.74 ab	206.71±5.94 bc
F 值	W	3.63*	35.69**	105.21**	15.42**	8.63**
F value	N	1.70	28.82**	12.59**	0.98	5.99**
	W×N	0.15	0.66	0.85	0.89	0.49

271.64 mm,西瓜产量和耗水量随土壤水分下限升高而逐渐升高,均表现为 W3>W2>W1,W3 产量较 W1、W2 分别增加 13.48%~17.97%和 7.02%~9.23%,W3 耗水量较 W1、W2 分别增加 20.56%~31.44%和 8.09%~17.01%。水分利用效率在 W2 及 N200 处理条件下最大,为 229.05 kg·hm⁻²·mm⁻¹,在 N0、N100 和 N300 条件下,随土壤水分下限升高而降低。

2.5 目标优化

以土壤水分下限和施氮量为自变量,产量和可溶性固形物含量为因变量,构建二元二次方程,分

别建立施氮量和土壤水分下限与西瓜产量和可溶性固形物含量关系的二元二次方程。

产量方程为: $Y=0.91W^2-0.074N^2-0.017WN+131.86W+31.44N+36\ 436.41$ ($R^2=0.87$);

可溶性固形物含量方程为: $Z=-0.001\ 6W^2-0.000\ 014\ 675N^2-0.000\ 011\ 93WN+0.194W+0.006\ 15N+4.236$ ($R^2=0.97$)。

由图 1 可知,西瓜产量和可溶性固形物含量无法同时达到最大值,西瓜产量随土壤水分下限升高成线性增加。在生产生活中,很难实现西瓜产量和品质同时达到最大值。因此,以西瓜产量和可溶性

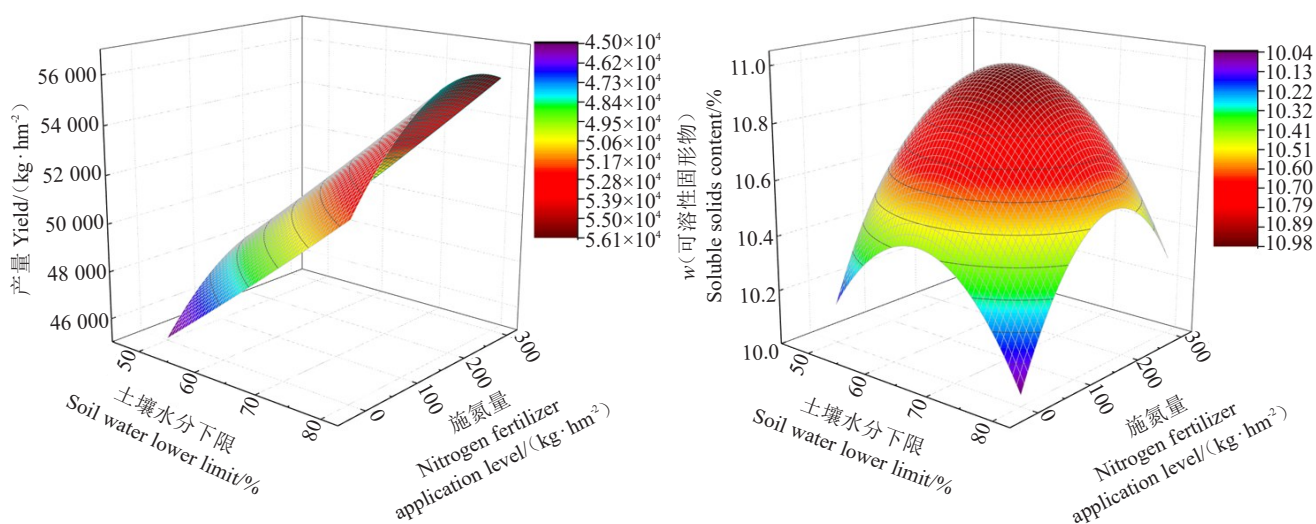


图1 不同水氮处理对西瓜产量和可溶性固形物含量的影响

Fig. 1 Effects of different water and nitrogen treatments on watermelon yield and soluble solids content

固形物含量最大值交集的85%来确定西瓜栽培适宜的土壤水分下限和氮肥施用区间,可得土壤水分下限为72.25%~75.02%,氮肥施用量区间为204.25~254.15 kg·hm⁻²。

3 讨论与结论

土壤中水分和养分含量是影响作物生长发育的关键因素,决定了作物对水肥的吸收能力^[13]。适宜的土壤水分和氮肥供应不但可满足作物不同生长发育阶段对水肥的需求,还能提高作物光合产物的积累及对水分、养分的吸收和利用效率^[14-15],进而促进作物生长及产量和品质的提高^[16]。

本研究表明,在伸蔓期,N0处理的西瓜主蔓长随土壤水分下限升高呈先增加后减小的趋势,在W2处理条件下达到最大,N100、N200和N300处理随土壤水分下限升高而增加。开花坐果期,西瓜主蔓长随土壤水分下限升高逐渐增加,随氮肥施用量增加呈先增加后减小的趋势。在W2土壤水分下限条件下,伸蔓期和开花坐果期,西瓜主蔓长分别在N200和N100条件下达到最大,当氮肥施用量超过此水平时西瓜主蔓长开始减小,这是因为适宜的水肥供应可有效促进西瓜生长,当养分供应过量时会抑制作物生长。在膨果期,W2和W3土壤水分条件下,N0水平西瓜主蔓长大于其他施氮水平处理,主要是因为,适量和过量的水分供应条件下,作物氮素严重供应不足时,会导致作物徒长^[17],从而导致主蔓长的增加。在同一氮肥施用量条件下,随土壤水分下限的提高,西瓜主蔓长逐渐增加,说明增加土壤水分可促进西瓜主蔓长的增加。

氮素供应不足容易导致作物光合效率下降^[18],降低作物叶片SPAD值,影响作物光合产物的积累。本研究中,在W1土壤水分下限条件下,伸蔓期、开花坐果期和膨果期西瓜叶片叶绿素含量分别在N200、N300和N200处理下达到最大。在W2土壤水分下限条件下,伸蔓期和开花坐果期西瓜干物质积累量随氮肥施用量增加而升高,膨果期和成熟期干物质积累量在N200处理条件下达到最大。超过此水平时,西瓜膨果期和成熟期干物质积累量会降低,说明过量氮肥投入会影响作物光合作用,从而抑制光合产物的运转与积累^[19]。大量研究表明,西瓜叶片叶绿素含量和干物质积累量随灌水量增加而升高^[20-21],而本研究却表明,在伸蔓期和开花坐果期,在同一氮肥施用量条件下,随土壤水分下限升高,西瓜叶片叶绿素含量呈逐渐下降趋势,这主要是因为作物在缺水的环境中,自身通过调节相关酶活性,调节叶片形态结构,从而提高其对环境适应性^[22]。同时,增加灌水量可有效促进作物光合产物的形成与积累,这与本研究中西瓜干物质积累量随土壤水分下限的升高而逐渐增加的结果相符。

适量的水氮供应是作物产量和品质形成的关键,有利于提高作物产量、品质^[23-25]及对水分、养分的利用效率^[26-27]。本研究表明,在同一施氮水平条件下,西瓜产量随土壤水分下限升高逐渐增加,而西瓜中心可溶性固形物含量随土壤水分下限和氮肥施肥量的增加呈先升高后降低的趋势,W2N200处理的西瓜中心可溶性固形物含量达到最大,说明水肥供应不足或过量会降低西瓜可溶性固形物含

量,从而影响西瓜品质^[28]。西瓜水分利用效率在W2N200处理下达到最高,这主要是因为过量的水氮供应导致大部分水分和养分在土壤中淋溶^[29]和挥发^[30],未被作物吸收利用,造成了水肥资源的大量浪费,这与前人的研究结果相同。

综上所述,西瓜作为河西灌区主要的经济作物,直接关系到种植农户的收入和生活,同时,区域农业生产面临着严峻的水资源短缺的现状,为了应对未来区域西瓜产业的绿色可持续发展,在生产中应综合考虑西瓜产量、品质和水肥利用效率。在本试验条件下,土壤水分下限为田间持水量的65%,氮肥施用量为200 kg·hm⁻²,是河西绿洲灌区露地西瓜高效绿色生产的方案,同时,以西瓜产量和可溶性固形物含量最大值交集的85%来确定土壤水分下限和氮肥施用量区间,可得土壤水分下限为72.25%~75.02%,氮肥施用量区间为204.25~254.15 kg·hm⁻²。

参考文献

- [1] 毛洪霞,高宏云,李向春.农田水利工程中节水灌溉技术运用探析[J].黑龙江粮食,2023(12):53-55.
- [2] 吴圣燕.农业灌溉模式与节水技术应用分析[J].黑龙江粮食,2023(5):44-46.
- [3] 张琳,杨艳涛,文长存,等.中国西瓜市场分析与展望[J].2015,11(6):21-24.
- [4] 杜少平,马忠明,薛亮.密度、氮肥互作对旱砂田西瓜产量、品质及氮肥利用率的影响[J].植物营养与肥料学报,2013,19(1):150-157.
- [5] 王强,扈新民,袁静,等.西瓜不同生长发育阶段的需水特性及其研究进展[J].蔬菜,2015(7):30-33.
- [6] 古斌权,李林章,邢乃林,等.水肥药一体化对西瓜生长发育和果实品质的影响[J].浙江农业科学,2020,61(1):67-69.
- [7] 沙志宏,吴翠平,江海.腐植酸液体肥料与化肥配施对设施栽培西瓜的影响[J].腐植酸,2018(5):29-33.
- [8] 侯东颖,郝科星,张曼,等.水肥一体化技术对西瓜产量及品质的影响[J].安徽农业科学,2018,46(25):116-118.
- [9] 马新超,轩正英,闵昊哲,等.水氮耦合对沙培黄瓜叶片抗氧化酶及水氮利用的影响[J].节水灌溉,2022(7):58-64.
- [10] 梁伟琴,贾莉,郭黎明,等.水氮耦合对春小麦干物质累积与植株氮素转运的影响[J].作物杂志,2022(4):242-248.
- [11] 闫文渊,秦军红,段绍光,等.水氮耦合对马铃薯光合特性、块茎形成和品质的影响[J].园艺学报,2022,49(7):1491-1504.
- [12] 雷庆元,张旭,朱韬,等.不同水氮处理对南疆复播玉米生理特性及产量的影响[J].西南农业学报,2022,35(5):1079-1088.
- [13] 谢志良,田长彦.膜下滴灌水氮耦合对棉花干物质积累和氮素

- 吸收及水氮利用效率的影响[J].植物营养与肥料学报,2011,17(1):160-165.
- [14] 周罕觅.苹果幼树水肥耦合效应及高效利用机制研究[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2015.
- [15] 王进鑫,张晓鹏,高保山.水肥耦合对矮化富士苹果幼树的促长促花作用研究[J].干旱地区农业研究,2004,22(3):47-50.
- [16] 程于真.不同水氮条件下日光温室氮肥利用与去向研究[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2019.
- [17] 李莎,李援农.水氮耦合对冬小麦生长的影响[J].节水灌溉,2012(4):1-4.
- [18] 马波,田军仓,沈晖,等.压砂地西瓜光合作用干物质及产量水氮耦合模型及验证[J].农业工程学报,2016,32(20):129-136.
- [19] 高玉侠,李洪军.水氮耦合对西瓜生长和产量的影响[J].中国农业文摘-农业工程,2024,36(1):41-45.
- [20] 杨万邦,王晓媛,于蓉,等.水氮互作对宁夏引黄灌区设施西瓜品质、产量和氮素吸收利用的影响[J].华北农学报,2024,39(4):154-161.
- [21] 崔振坤,于振文,石玉,等.水氮运筹对小麦光合物质生产和产量的影响[J].应用生态报,2024,35(6):1564-1572.
- [22] HUSSON O. Redox potential (Eh) and pH as drivers of soil/plant/microorganism systems: A trans disciplinary overview pointing to integrative opportunities for agronomy[J]. Plant and Soil,2013,362:389-417.
- [23] 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(4):713-726.
- [24] 郭培武,赵俊晔,石玉,等.水肥一体化对小麦水分利用和光合特性的影响[J].应用生态学报,2019,30(4):1170-1178.
- [25] 徐杰,陶洪斌,宋庆芳,等.水氮配置对华北冬小麦-夏玉米种植体系氮素利用及土壤硝态氮残留的影响[J].华北农学报,2011,26(4):153-158.
- [26] 闵炬,施卫明.不同施氮量对太湖地区大棚蔬菜产量、氮肥利用率及品质的影响[J].植物营养与肥料学报,2009,15(1):151-157.
- [27] 张燕,张富仓,强生才,等.水肥供应对温室滴灌施肥番茄生长及水氮利用的影响[J].干旱地区农业研究,2017,35(4):103-109.
- [28] 杜少平,马忠明,薛亮.旱砂田补灌水氮互作对西瓜产量、品质及水氮利用的影响[J].应用生态学报,2015,26(12):3715-3722.
- [29] 马志军,刘洪禄,范海燕,等.水氮互作对设施番茄土壤氮平衡及氮素利用效率的影响研究[J].北京水务,2024(5):6-13.
- [30] 李祯,史海滨,李仙岳,等.不同水氮运筹模式对田间土壤氮挥发及春玉米籽粒产量的影响[J].农业环境科学学报,2017,36(4):799-807.