文章编号:1000-7601(2025)06-0215-08 doi:10.7606/j.issn.1000-7601.2025.06.21

水钾互作对宁夏引黄灌区设施西瓜产量及钾素吸收利用的效应分析

杨万邦[1,2],王晓媛[3],魏兆辉[1],杜慧莹[1],田 梅[1],
郭 松[1],岳 贞[1],李 好[2],于 蓉[1]

(1.宁夏农林科学院园艺研究所,宁夏 银川 750002; 2.西北农林科技大学大学园艺学院,陕西 杨凌 712100;
3.宁夏回族自治区农业技术推广总站,宁夏 银川 750001)

摘 要:为了筛选适宜宁夏引黄灌区设施栽培西瓜最佳灌水量与施钾肥量组合,设计灌水量(W1:1 400 $m^3 \cdot hm^{-2}$,W2:1 800 $m^3 \cdot hm^{-2}$,W3:2 200 $m^3 \cdot hm^{-2}$)与施钾肥量(K0:0 $kg \cdot hm^{-2}$,K1:80 $kg \cdot hm^{-2}$,K2:160 $kg \cdot hm^{-2}$,K3:240 $kg \cdot hm^{-2}$)组合,研究水钾互作对西瓜叶片叶绿素相对含量、果实性状、品质、产量、灌溉水利用效率、养分吸收效果及肥料利用等方面的影响。结果表明:(1)高水高钾处理下设施西瓜叶片叶绿素相对含量更高,W3K3 处理叶片 SPAD 值伸蔓期为 49.13、开花坐果期为 53.87、膨瓜期为 64.96、成熟期为 68.20;(2)W2K3、W3K2、W3K3 处理下设施西瓜品质较其他处理更优,中心部位可溶性固形物含量比 W1K0、W1K1、W2K0 处理分别提高0.85~0.94 个百分点、0.76~0.85 个百分点、0.89~0.98 个百分点;(3)W1K3 处理下灌溉水利用效果最佳,与除 W1K2 以外的处理差异均显著,增幅为 5.47%~53.78%;W3K1、W3K2、W3K3 处理下西瓜增产效果明显,产量分别达到 73 309.70、73 906.42、73 975.70 $kg \cdot hm^{-2}$,与 W1K0、W1K1、W1K2、W2K0、W2K1 处理间差异显著,增幅分别为 5.18%~7.47%、6.04%~8.34%、6.14%~8.45%;(4)W3K3 处理钾元素吸收效果最佳,且植株含钾量、植株钾积累量、果实含钾量、果实钾积累量、钾总累积量均最高,增幅分别为 5.47%~32.47%、7.02%~54.76%、4.55%~27.93%、4.63%~38.73%、6.12%~48.36%;(5)W3K2、W3K3 处理促进钾肥利用,钾肥当季利用率在 W3K2 处理下最高(15.71%)、其次为 W3K3 处理(15.42%);(6)钾肥当季利用率与除总酸指标以外的品质、产量、钾积累量等指标呈显著正相关关系。综上,在宁夏引黄灌区 2 200 $m^3 \cdot hm^{-2}$灌水量下,配合施钾肥 160 $kg \cdot hm^{-2}$或 240 $kg \cdot hm^{-2}$有助于增强设施西瓜光合作用、促进养分吸收、改善果实品质、提高产量。

关键词:设施西瓜;钾肥;灌水量;叶片叶绿素;果实性状;灌溉水利用效率;产量;品质

中图分类号:S651 **文献标志码**:A

Effect analysis of water-potassium interaction on yield and potassium absorption and utilization of greenhouse-cultivated watermelon in the Ningxia Yellow River irrigation area

YANG Wanbang[1,2], WANG Xiaoyuan[3], WEI Zhaohui[1], DU Huiying[1],
TIAN Mei[1], GUO Song[1], YUE Zhen[1], LI Hao[2], YU Rong[1]

(1. *Research Institute of Horticulture of Ningxia Academy of Agriculture and Forestry Sciences*, *Yinchuan*, *Ningxia* 750002, *China*;
2. *College of Horticulture*, *Northwest A&F University*, *Yangling*, *Shaanxi* 712100, *China*;
3. *Ningxia Hui Autonomous Region Agricultural Technology Extension General Station*, *Yinchuan*, *Ningxia* 750001, *China*)

Abstract: This study aimed to screen out the optimal combination of irrigation water volume and potassium fertilizer application amount suitable for watermelons grown in solar greenhouses in Ningxia. The experiment was designed with combinations of the irrigation amount (W1: 1 400 $m^3 \cdot hm^{-2}$, W2: 1 800 $m^3 \cdot hm^{-2}$, W3: 2 200 $m^3 \cdot hm^{-2}$) and the potassium application amount (K0: 0 $kg \cdot hm^{-2}$, K1: 80 $kg \cdot hm^{-2}$, K2: 160 $kg \cdot hm^{-2}$, K3:

收稿日期:2025-05-15 **修回日期**:2025-06-18

基金项目:宁夏农业高质量发展项目(NGSB-2021-7-03,NKYG-22-03);国家重点研发计划项目(2023YFD2300700,2018YFD0201308);宁夏回族自治区自然科学基金(2022AAC03442);国家西甜瓜产业技术体系专项(CARS-25)

作者简介:杨万邦(1980-),男,宁夏固原人,助理研究员,主要从事西甜瓜育种与栽培研究。E-mail:yangwanbang-6@163.com

通信作者:于蓉(1981-),女,湖南祁县人,副研究员,主要从事西甜瓜育种与栽培研究。E-mail:yyrrhhyy@163.com

240 kg · hm^{-2}), to investigate the effects of water-potassium interaction on the relative content of chlorophyll, fruit character, quality, yield, irrigation water utilization, nutrient absorption, and fertilizer utilization of watermelon. The results showed that (1) the relative chlorophyll content of watermelon leaves under high water and high potassium treatment was higher. The relative chlorophyll content value of leaves with W3K3 was 49.13 at the vine extension stage, 53.87 at the flowering and fruiting stages, 64.96 at the fruit enlargement stage, and 68.20 at the maturity stage. (2) The quality of watermelon under W2K3, W3K2, and W3K3 treatments was better than that of other treatments. The soluble solids content in the central part increased by 0.85~0.94 percentage points, 0.76~0.85 percentage points, and 0.89~0.98 percentage points, respectively, compared with the W1K0, W1K1, and W2K0 treatments. (3) The effect of irrigation water utilization under W1K3 treatment was the best, which was significantly different from that of other treatments except W1K2, with an increase ranging from 5.47% to 53.78%. The yield of watermelon increased significantly under W3K1, W3K2, and W3K3 treatments, and the yields reached 73 309.70 kg · hm^{-2}, 73 906.42 kg · hm^{-2}, and 73 975.70 kg · hm^{-2}, respectively, which were significantly different from those of W1K0, W1K1, W1K2, W2K0, and W2K1 treatments, and the increases were 5.18%~7.47%, 6.04%~8.34% and 6.14%~8.45%, respectively. (4) The best potassium absorption effect was found in the W3K3 treatment. The potassium content in the plants, the potassium accumulation in the plants, the potassium content in the fruits, the potassium accumulation in the fruits, and the total potassium accumulation all reached the highest levels under the W3K3 treatment, with increases ranging from 5.47% to 32.47%, 7.02% to 54.76%, 4.55% to 27.93%, 4.63% to 38.73%, and 6.12% to 48.36%, respectively. (5) W3K2 and W3K3 treatments were conducive to the utilization of potassium fertilizer. The potassium fertilizer utilization rate in the current season was the highest under the W3K2 treatment (15.71%), followed by the W3K3 treatment (15.42%). (6) The utilization rate of potassium fertilizer in the current season is significantly positively correlated with indicators such as quality, yield, and potassium accumulation, except for the total acid index. In conclusion, irrigating with 2 200 m^3 · hm^{-2} water, combined with applying 80 kg · hm^{-2} and 240 kg · hm^{-2} of potassium fertilizer, respectively, can help increase photosynthesis in greenhouse-cultivated watermelons, promote nutrient absorption and fertilizer utilization, improve fruit quality, and increase the yield of watermelons.

Keywords: greenhouse-cultivated watermelon; potassium fertilizer; irrigation amount; chlorophyll of leaves; fruit trait; irrigation water use eficiency; yield; quality

西瓜果肉汁多甘甜,营养丰富,是我国重要的经济作物[1]。西瓜属于喜钾植物[2-3],其生育期较短,在整个生育期需要最多的营养元素为钾[4],充足的水分供应会促进西瓜根系对营养元素的吸收,但在其生育期缺钾会导致叶片叶绿素含量下降[5-6],抑制光合作用的进行,进而影响果实品质,并导致其产量降低[7]。李宁等[8]在研究越夏基质培黄瓜秧苗形态及生理指标时发现,高水高钾处理可显著提高黄瓜叶片叶绿素含量、净光合速率及各项生长指标;马襄鸿等[9]在研究水钾互作对春玉米碳代谢及产量的影响中发现,玉米产量会随着灌溉水平升高而提高;唐凡[10]在研究猕猴桃品质中发现,适量的水钾组合能明显提高果实品质;丁亚会等[11]认为"水钾一体"促进了烤烟中后期生长发育、干物质积累和烟叶钾素吸收。结合前人研究结果不难发现,适宜水分和钾素供应对作物生长具有重要意义。

近些年,我国钾肥需求量大[12],钾盐面临钾肥市场供不应求的局面[13],如何提高钾肥利用率成为一项很有意义的课题。设施西瓜是宁夏引黄灌区重要的园艺作物,但由于缺乏科学的水肥管理技术,导致水肥利用率低,而目前对该区域设施栽培西瓜水钾互作方面的相关报道相对较少。针对引黄灌区设施西瓜生产中钾肥利用率低、水钾协同效果差等问题,本研究设计不同灌水量与施钾肥量组合,明确水钾互作对设施西瓜叶片叶绿素相对含量、果实性状、品质、产量、灌溉水利用效率、养分吸收利用效果及肥料利用等方面的影响,筛选出适宜该区设施西瓜最佳灌水量与施钾肥量组合,以期为该区域生产优质的设施西瓜、促进水钾高效利用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验区位于宁夏回族自治区吴忠市利通区高闸镇设施农业园区(106°19′67″E,37°86′82″N),地

处引黄灌区,海拔 1 132 m,年平均降水量约 193 mm,年平均蒸发量约 2 014 mm,属温带大陆性半干旱气候。当地土壤类型为典型的灰钙土,土壤 pH 值8.14、有机质 17.15 g·kg^{-1}、全盐 0.98 g·kg^{-1}、全氮 0.92 g·kg^{-1}、全磷 0.95 g·kg^{-1}、全钾 21.12 g·kg^{-1}、水解氮 67.60 mg·kg^{-1}、有效磷 39.04 mg·kg^{-1}、速效钾 172.12 mg·kg^{-1}。

1.2　试验设计

设计灌水量与施钾肥量两个因素相互组合,灌水量设 3 个水平 3 次重复,钾肥(硫酸钾,K_2O 50%)施肥量设 4 个水平 3 次重复,随机区组设计,共计 36 个小区,灌水量与施钾肥量水平分别见表 1、2,氮肥(尿素,N46%)施肥量 150 kg·hm^{-2}、磷肥(过磷酸钙,P_2O_5 12%)施肥量 150 kg·hm^{-2}。供试材料为宁夏农林科学院园艺研究所育成的西瓜品种‘宁农科花黛’,采用嫁接育苗。垄宽 1.70 m、沟宽 0.50 m、垄高 0.15 m、株距0.50 m,错位栽植,栽植密度为 16 000 株·hm^{-2}。30%钾肥、30%氮肥和全部磷肥均作为基肥在西瓜种植行条施,其余钾肥与氮肥分别按表 2、3 用量在西瓜伸蔓期、开花坐果期、膨瓜期作为追肥并一起用水肥一体化设施滴灌施入,其他管理与当地常规生产相同。试验于 2023 年 3 月 15 日定植,6 月 5 日收获。

1.3　测试指标及方法

西瓜叶片叶绿素相对含量(SPAD 值)用莱恩德智能科技有限公司生产的 LD-YA 型手持叶绿素仪测定,测定时期包括伸蔓期、开花坐果期、膨瓜期、成熟期;果实中心和边缘可溶性固形物含量用 ATAGO 公司生产的 PAL-1 型数显糖度计测定;总糖用斐林试剂滴定法、总酸用氢氧化钠滴定法、维生素 C 用 2,6-二酚靛酚滴定法[14];植株及果实的全钾含量用火焰光度法测定[15]。

灌溉水利用效率(%)= 产量/灌溉量

西瓜钾积累总量(kg·hm^{-2})= 植株干物质量×植株含钾量×栽植密度+果实质量×果实含钾量×栽植密度

钾肥偏生产力(kg·kg^{-1})= 产量/施钾肥量

钾肥当季利用率(%)=(施肥处理作物养分积累量-不施肥处理作物养分积累量)/肥料投入量×100%

表 1　设施西瓜生育期灌水量/(m^3·hm^{-2})

Table 1　Irrigation of greenhouse-cultivated watermelon during growth periods

水平 Level	总灌水量 Total irrigation water amount	生育期 Growth period			
		幼苗期 Younger of seedling stage (10%)	伸蔓期 Vine extension stage (35%)	开花坐果期 Anthesis and fruit stage (20%)	膨果期 Fruit expansion stage (35%)
W1	1400	140	490	280	490
W2	1800	180	630	360	630
W3	2200	220	770	440	770

表 2　设施西瓜生育期施钾肥量/(m^3·hm^{-2})

Table 2　Amount of potassium fertilizer of greenhouse-cultivated watermelon during growth periods

水平 Level	总施肥量 Total fertilizer application amount	基肥 Base fertilizer (30%)	生育期 Growth period		
			伸蔓期 Vine extension stage (15%)	开花坐果期 Anthesis and fruit stage (15%)	膨果期 Fruit expansion stage (40%)
K0	0	0	0	0	0
K1	80	24	12	12	32
K2	160	48	24	24	64
K3	240	72	36	36	96

表 3　设施西瓜生育期施氮肥量/(m^3·hm^{-2})

Table 3　Amount of nitrogenous fertilizer of greenhouse-cultivated watermelon during growth periods

总施肥量 Total fertilizer application amount	基肥 Base fertilizer (30%)	生育期 Growth period		
		伸蔓期 Vine extension stage (20%)	开花坐果期 Anthesis and fruit stage (35%)	膨果期 Fruit expansion stage (15%)
150	45	30	45	30

1.4 数据处理与分析

采用 Office 2020 绘制图表;利用 SPSS 26.0 进行统计分析;采用新负极差法进行多重比较,显著性水平为 $P<0.05$。

2 结果与分析

2.1 水钾互作对设施西瓜叶片叶绿素相对含量的影响

由图 1 可以看出,整个生育期叶片的 SPAD 值呈上升趋势。同一生育期,灌水量和施钾肥量越大,叶片 SPAD 值越大,W3K3 处理叶片 SPAD 值较大,伸蔓期为 49.13、开花坐果期为53.87、膨瓜期为 64.96、成熟期为 68.20;其次为 W3K1 和 W3K2 处理,伸蔓期分别为 48.26 和 48.95、开花坐果期分别为 52.48 和 52.96、膨瓜期分别为 64.18 和 64.67、成熟期分别为 67.35 和 67.99。整体而言,高水高钾处理的西瓜叶片叶绿素相对含量更高。

2.2 水钾互作对设施西瓜果实性状的影响

由表 4 可以看出,水钾互作对设施西瓜果实性状的各指标影响不同。其中,不同灌水量与施钾肥量组合对西瓜果皮硬度、果肉硬度、纵径、皮厚的影响较大,果皮硬度在 W3K2 和 W3K3 处理下分别为 23.14 kg · cm^{-2}和 23.25 kg · cm^{-2},与 W1K0、W1K1、W2K0 处理差异显著,而与其他处理差异不显著;果肉硬度和皮厚在 W3K3 处理下分别为 0.83 kg · cm^{-2}和 0.72 mm,均与其他处理差异显著;西瓜纵径在 W2K3、W3K2、W3K3 处理下分别为 25.94、26.40、26.47 cm,与 W1K0、W1K1、W1K2、W1K3、W2K0、W2K1、W3K0 处理间差异显著;不同灌水量与施钾肥量组合对西瓜横径和果形指数的影响较小。整体而言,W2K3、W3K2、W3K3 处理下的设施西瓜果实性状较优。

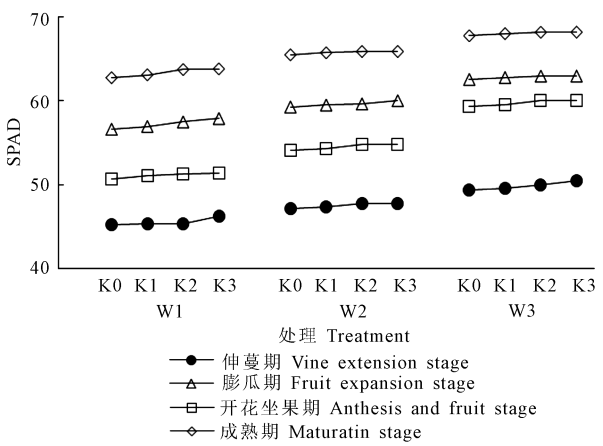


图 1 叶绿素相对含量 SPAD 值

Fig.1 SPAD value of relative chlorophyll content

2.3 水钾互作对设施西瓜品质的影响

由图 2 可以看出,水钾互作对设施西瓜各品质指标均有影响,且随着灌水量和施钾肥量的增加,可溶性固形物、总糖、维生素 C 含量也随之增加,其中设施西瓜可溶性固形物和总糖含量在 W2K3、W3K2、W3K3 处理下均较高,中心部位可溶性固形物和边缘部位可溶性固形物比 W1K0、W1K1、W2K0 处理分别提高了 0.85~0.94 和 0.49~1.15 个百分点、0.76~0.85 和 0.49~1.15 个百分点、0.89~0.98 和 0.63~1.29 个百分点。总糖含量较 W1K0、W1K1、W2K0 处理分别显著增加 8.17%~13.90%、7.47%~13.15%、9.70%~15.50%,而与其他处理下的可溶性固形物和总糖差异不显著。总酸含量在 W2K3、W3K3 处理下均较低,其中 W2K3 处理与 W1K0、W1K1、W1K2、W1K3、W2K0、W2K1、W3K0 处理相比,总酸含量降低 12.96%~19.24%;W3K3 处理与 W1K0、W1K1、W1K2、W1K3、W2K0、W2K1、W3K0 处理相比,总酸含量降低 14.44%~20.62%。维生素 C 含量在 W3K2、W3K3、W2K3 处理下较高,与 W1K0、W1K1、W1K2、W2K0、W2K1 处理间差异显著,增幅分别为 6.34%~15.39%、7.17%~16.29%、6.07%~15.10%。整体而言,W2K3、W3K2、W3K3 处理下的设施西瓜品质较其他处理更佳。

2.4 水钾互作对设施西瓜产量和灌溉水利用效率的影响

由图 3 可以看出,水钾互作对设施西瓜产量和水分利用的影响明显不同。具体表现为,产量随灌水量和施钾肥量的增加而增加,而灌溉水利用效率虽随施钾肥量的增加而增加,但随灌水量的增加呈降低趋势。其中,西瓜产量在 W3K1、W3K2、W3K3 处理下较高,分别达到 73 309.70、73 906.42、73 975.70 kg · hm^{-2},与 W1K0、W1K1、W1K2、W1K3、W2K0、W2K1 处理间差异显著,增幅分别为 5.18%~7.47%、6.04%~8.34%、6.14%~8.45%。灌溉水利用效率在 W1K3 处理下最高,与 W1K2 处理差异不显著,而较其他处理显著增加 5.47%~53.78%。总体而言,W3 与 K1、K2、K3 互作时,西瓜增产效果最明显,W1K3 处理下灌溉水的利用效果最佳。

2.5 水钾互作对设施西瓜钾素吸收效果的影响

由图 4 可以看出,钾元素积累量随灌水量和施钾肥量的增加而增大,其中,植株含钾量、植株钾积累量、果实含钾量、果实钾积累量及钾总累积量均在 W3K3 处理下达到最高,增幅分别为 5.47%~32.47%、

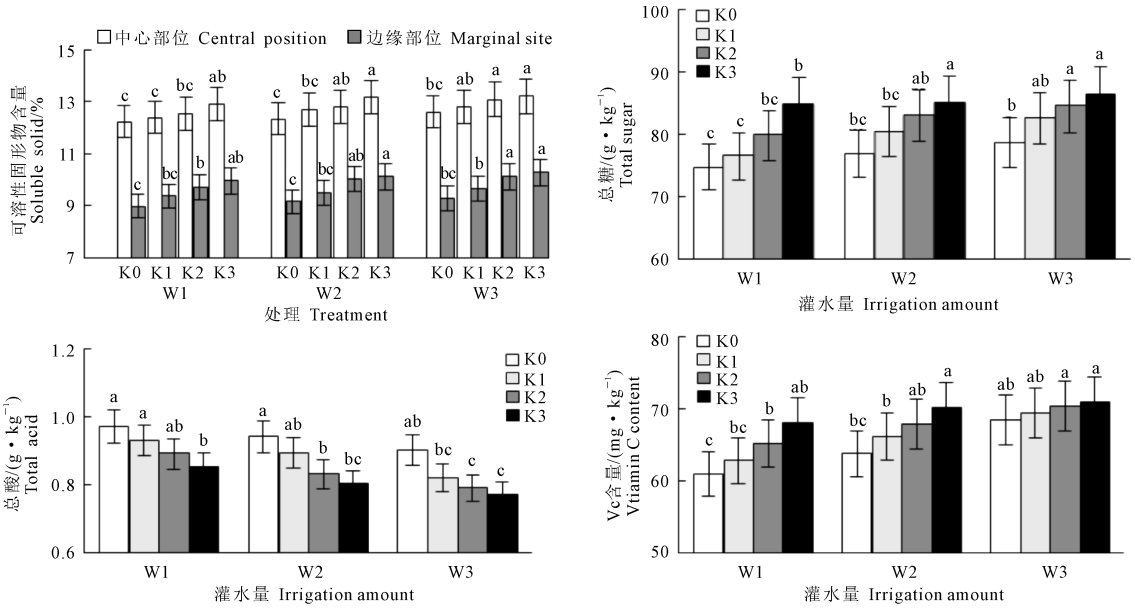
表 4　不同灌水和施钾水平对果实性状的影响

Table 4　Effects of different irrigation and potassium application levels on fruit traits

灌水水平 Amount of irrigation water	施钾水平 Amount of potassium fertilizer	果皮硬度 Peel hardness /(kg·cm^{-2})	果肉硬度 Pulp hardness /(kg·cm^{-2})	纵径 Vertical diameter/cm	横径 Transverse diameter/cm	果形指数 Fruit shape index number	皮厚 Skin thick /mm
W1	K0	20.47±1.76c	0.53±0.07g	21.77±1.13e	19.19±1.17b	1.13±0.01b	0.51±0.05g
	K1	21.03±0.61bc	0.57±0.09f	22.00±2.84e	19.27±2.11b	1.14±0.15b	0.56±0.08f
	K2	21.84±2.57ab	0.61±0.07e	23.19±0.97cd	19.52±0.82ab	1.19±0.16ab	0.65±0.05cd
	K3	22.21±0.26ab	0.74±0.07c	24.29±1.46bc	19.73±1.09ab	1.23±0.37ab	0.71±0.06ab
W2	K0	21.88±1.40bc	0.59±0.11ef	22.29±2.10de	19.66±2.22ab	1.13±0.25b	0.59±0.09e
	K1	22.41±1.35ab	0.68±0.08d	22.60±1.29de	20.25±1.10ab	1.12±0.19b	0.64±0.07d
	K2	22.50±0.52ab	0.74±0.10c	24.77±1.63ab	20.33±0.76ab	1.22±0.10ab	0.66±0.04c
	K3	22.65±2.25ab	0.77±0.05b	25.94±0.93a	19.94±2.17ab	1.30±0.23a	0.68±0.09bc
W3	K0	22.56±2.73ab	0.69±0.04d	23.19±1.09cd	19.92±0.80ab	1.16±0.17ab	0.63±0.06d
	K1	22.68±1.25ab	0.74±0.06c	25.29±0.98ab	21.03±1.82ab	1.20±0.13a	0.64±0.04cd
	K2	23.14±2.19a	0.79±0.05b	26.40±2.11a	21.35±1.87a	1.24±0.30a	0.69±0.09b
	K3	23.25±1.06a	0.83±0.09a	26.47±1.34a	21.36±2.88a	1.24±0.17a	0.72±0.03a

注:同列不同小写字母代表处理间差异显著(P<0.05)。

Note: Different lowercase letters in the same column represent significant differences between treatments (P<0.05).



注:不同小写字母代表不同灌水量与施钾肥量组合间差异显著(P<0.05),下同。

Note: Different lowercase letters represent significant differences between different irrigation amounts and potassium application amounts (P<0.05), the same below.

图 2　水钾互作对西瓜品质的影响

Fig.2　Effects of water and potassium interaction on watermelon quality

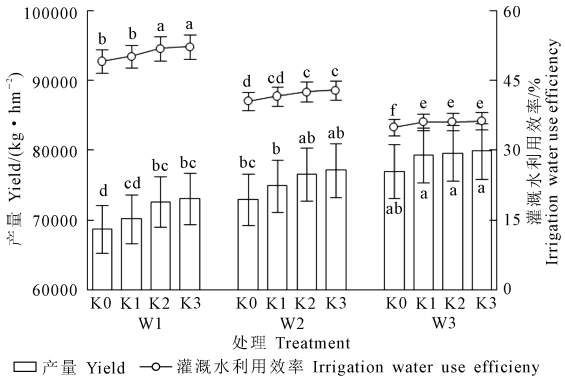


图 3　不同处理下西瓜产量和灌溉水利用效率

Fig.3　Watermelon yield and irrigation water use efficiency under different treatments

7.02%~54.76%、4.55%~27.93%、4.63%~38.73%、6.12%~48.36%。植株地上部干物质量在 W3K2 和 W3K3 处理下较大,与 W2K3、W3K0、W3K1 处理间差异不显著,而较其他处理相比增幅分别为5.11%~15.44% 和 6.68%~17.17%。果实质量在 W3K1、W3K2、W3K3 处理下较高,与 W1K0、W1K1、W1K2、W1K3、W2K0、W2K1 处理间差异显著,增幅分别为 5.18%~7.47%、6.04%~8.34%、6.14%~8.45%。总体而言,钾元素吸收效果在 W3K3 处理最佳。

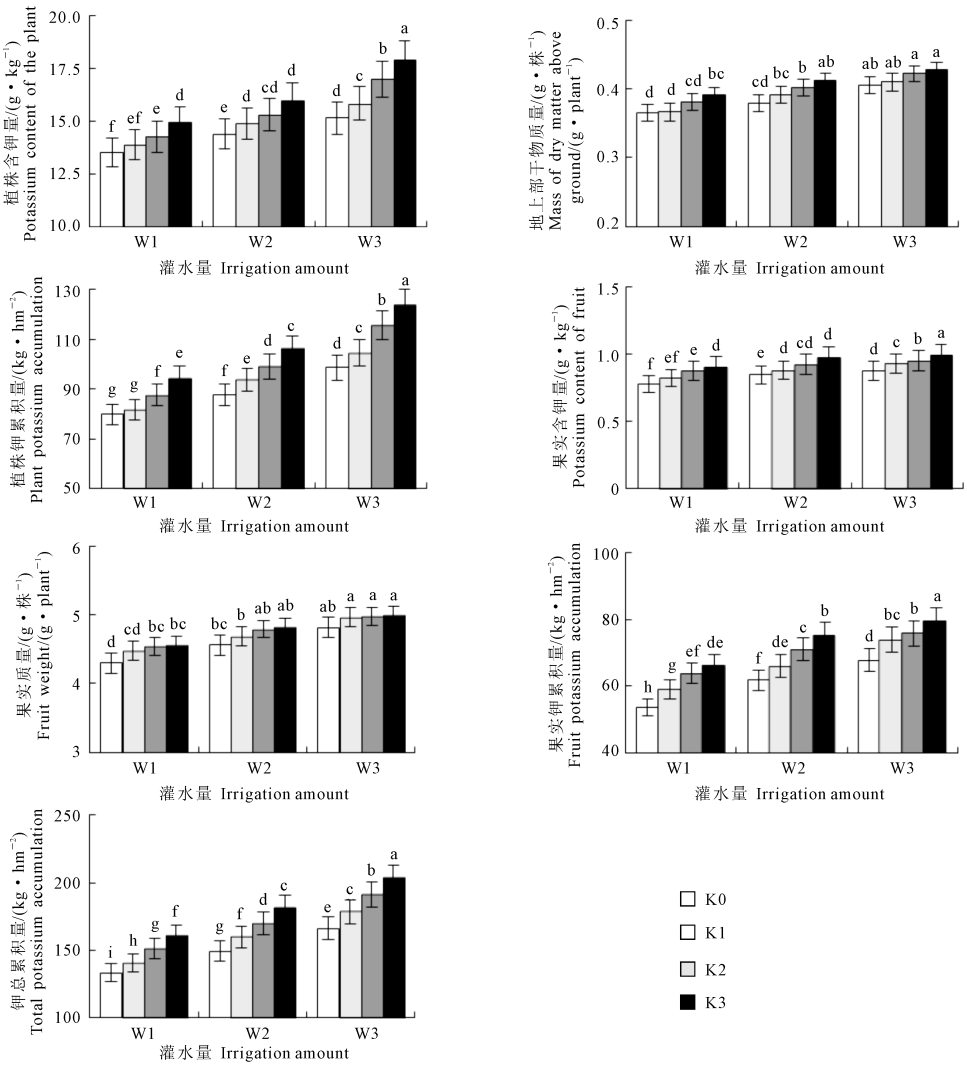


图 4 水钾互作对西瓜钾素吸收的影响

Fig.4 Effect of water and potassium interaction on potassium absorption of watermelon

2.6 水钾互作对设施西瓜钾肥利用率的影响

由图 5 可以看出,不同水钾互作模式下钾肥利用效果明显不同,钾肥当季利用率随灌水量和施钾肥量的增加呈现先增加后维持稳定的趋势,而钾肥偏生产力在灌水量不变时随施钾肥量的增加而降低,在施钾肥量不变时随灌水量的增加而增加。其中,钾肥当季利用率在 W3K2 处理下最高(15.71%),其次为 W3K3 处理(15.42%);除 W3K3 处理外,W3K2 处理较其他处理显著增加 16.97%~73.11%。钾肥偏生产力在 W3K1 处理下最高,为 916.37 kg·kg^{-1},是其他处理的 1.06~2.97 倍。总体而言,W3K2 和 W3K3 处理能促进钾肥的利用。

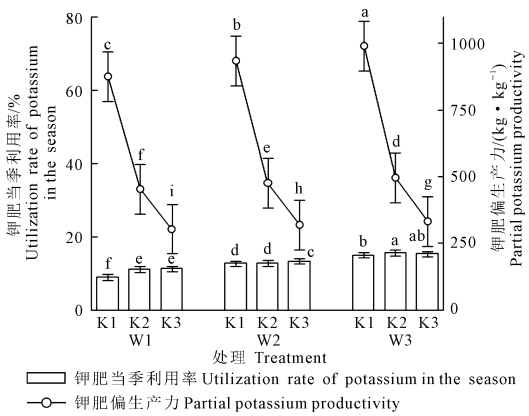


图 5 水钾互作对西瓜钾肥利用率的影响

Fig.5 Effect of water and potassium interaction on potassium use efficiency of watermelon

2.7 水钾互作条件下设施西瓜各指标间的相关性分析

设施西瓜品质、产量、灌溉水利用效率、钾素吸收及钾肥利用等各指标间 Pearson 相关性分析结果如表 5 所示。灌溉水利用效率与钾肥偏生产力呈显著正相关关系,钾肥当季利用率与除总酸指标以外的品质、产量、钾积累量等指标呈正相关关系,钾肥偏生产与中心可溶性固形物、总糖、产量、植株钾累积量、果实钾累积量呈显著负相关关系。

表 5　水钾互作条件下西瓜各指标间的相关性

Table 5　Correlation among watermelon indicators under interaction of water and potassium

指标 Index	中心可溶性固形物 Soluble solid in the center	边缘可溶性固形物 Edge site soluble solid center	总糖 Total sugar	总酸 Total acid	维生素 C Vitamin C	产量 Yield	灌溉水利用效率 Irrigation water use efficiency	植株钾累积量 Plant potassium accumulation	果实钾累积量 Fruit potassium accumulation	钾总累积量 Total potassium accumulation	钾肥当季利用率 Utilization rate of potassium in the season
灌溉水利用效率 Irrigation water use efficiency	−0.028	−0.004	−0.175	0.599	−0.104	−0.957					
钾肥当季利用率 Utilization rate of potassium in the season	0.634	0.671	0.613	−0.379	0.502	0.551	−0.162	0.584	0.625	0.613	
钾肥偏生产力 Partial potassium productivity	−0.159*	−0.219	−0.194*	0.212*	−0.144	−0.253*	0.034*	−0.065*	−0.171*	−0.1*	−0.518

注:“*”表示 $P<0.05$ 水平显著。

Note: “*” indicates significance at $P<0.05$ level.

3　讨论与结论

钾是西瓜生育期所需的重要营养元素之一,直接影响西瓜光合作用的进行、养分的吸收和转运[16],向土壤中施加充足的钾肥可以改善果实品质并促进西瓜增产[17]。本研究发现高水高钾处理下设施西瓜叶片叶绿素相对含量更高,主要是充足的灌水会促进叶片光合作用,若西瓜生育期钾肥供应严重不足,可能导致叶片发黄,叶绿素相对含量也随之降低[18]。李宁等[8]通过水钾复合处理对黄瓜叶片生理特征的研究以及颉嘉丽等[19]对马铃薯的研究也与本试验结果具有一致性。

在适宜的灌水量和施钾量条件下,西瓜果实性状和果肉品质的改善效果较为明显。其中,W3K2 和 W3K3 处理的果皮硬度较大,W3K3 处理果肉硬度和皮厚数值较大,W2K3、W3K2、W3K3 处理的纵径、可溶性固形物和总糖含量较高,且 W2K3 处理的中心部位可溶性固形物含量比 W1K0、W1K1、W2K0 处理提高了 0.85~0.94 个百分点,W2K3 处理边缘部位可溶性固形物含量比 W1K0、W1K1、W2K0 处理提高了 0.49~1.15 个百分点;W3K2 处理的中心部位可溶性固形物含量比 W1K0、W1K1、W2K0 处理提高了 0.76~0.85 个百分点,W3K2 处理边缘部位可溶性固形物含量比 W1K0、W1K1、W2K0 处理提高了 0.49~1.15 个百分点;W3K3 处理的中心部位可溶性固形物含量比 W1K0、W1K1、W2K0 处理提高了 0.89~0.98 个百分点,W3K3 处理边缘部位可溶性固形物含量比 W1K0、W1K1、W2K0 处理提高了 0.63~1.29 个百分点。杜少平等[20]和 Shen 等[21]研究结果与本研究大体相同,可能是果实硬度受到养分的调控,施钾有助于促进糖的代谢和转运,进而增加果皮和果肉硬度及果皮厚度,水分充足有利于养分从土壤向植物根系转运,最后运送至植株的各个营养器官,进而改变果实大小、可溶性固形物、总糖及维生素 C 含量[22-23]。

本研究认为,西瓜产量随灌水量和施钾肥量的增加而增大,灌溉水利用效率随施钾肥量的增加而提高,且随灌水量的增加呈降低趋势。W1K3 处理下灌溉水的利用效果最佳,W3 与 K1、K2、K3 互作时西瓜增产效果最明显,这一结论与马襄鸿等[9]、杜少平等[20]在相关作物产量方面的研究结果基本相同。此外,本研究表明,钾元素积累量随灌水量和施钾量的增加而增大,其中钾元素吸收效果在 W3K3 处理时最佳,这与金辉等[24]的研究结果趋势相同,表明充足的水分和钾肥条件有利于根系吸收土壤中的养分,使营养元素得以充分转运,进而达到增产的目的。

从设施西瓜品质、产量、灌溉水利用效率、钾素吸收及钾肥利用等指标间相关性分析可知,钾肥当季利用率与除总酸指标以外的品质、产量、钾积累量等指标呈显著正相关关系。这更能说明水钾互作有助于提高设施西瓜的品质和产量,促进钾元素的吸收。

综上所述,在宁夏引黄灌区 2 200 $m^3 \cdot hm^{-2}$ 灌水量下,结合施钾肥 160 $kg \cdot hm^{-2}$ 或 240 $kg \cdot hm^{-2}$ 组合有助于设施西瓜增强光合作用、促进养分吸收、改善果实品质、提高产量。

参 考 文 献:

[1]　赵姜. 中国西瓜产业发展的经济学分析[D]. 北京: 中国农业科学院, 2013.
ZHAO J. Economics analysis of watermelon industry in China[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2013.

[2] 王智钰. 嫁接对缺钾条件下西瓜钾素效率和产量品质的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2024.
WANG Z Y. The effect of grafting on potassium efficiency, yield and quality of watermelon under potassium deficient conditions [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2024.

[3] 董亚, 王硕, 吴萍, 等. 西瓜钾素吸收特征及钾肥施用优化机制[J]. 南京农业大学学报, 2018, 41(1): 98-104.
DONG Y, WANG S, WU P, et al. Absorption character of potassium and optimization mechanism of potassic fertilization on watermelon[J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2018, 41(1): 98-104.

[4] 范墨林. 西瓜不同基因型钾效率的评价及根系钾饥饿转录组研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2013.
FAN M L. Evaluation of potassium efficiency in different watermelon genotype and root transcriptome study under potassium starvation[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2013.

[5] 李国虎, 黄琪, 王汛,等. 砧木嫁接对缺钾条件下西瓜生长及品质的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2025, 53(9): 121-133.
LI G H, HUANG Q, WANG X, et al. Effects of rootstock grafting on the growth and quality of watermelon under potassium deficiency conditions [J]. Journal of Northwest A&F University(Natural Science Edition), 2025, 53(9): 121-133.

[6] BATTIE-LACLAU P, LACLAU J P, BERI C, et al. Photosynthetic and anatomical responses of eucalyptus grandis leaves to potassium and sodium supply in a field experiment[J]. Plant, Cell & Environment, 2014, 37(1): 70-81.

[7] 钟亚琴. 嫁接西瓜响应低钾胁迫的生理和分子机制研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2019.
ZHONG Y Q. Physiological and molecular mechanism of grafted watermelon in response to low potassium stress[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2019.

[8] 李宁, 刘颖, 张振兴, 等. 水钾复合处理对越夏基质培黄瓜秧苗形态及生理指标的影响[J]. 河北农业大学学报, 2024, 47(3): 31-38.
LI N, LIU Y, ZHANG Z X, et al. Effects of water-potassium composite treatment on morphology and physiological indexes of cucumber seedlings grown on substrate in over-summer[J]. Journal of Agricultural University of Hebei, 2024, 47(3): 31-38.

[9] 马襄鸿, 曹国军, 邓奥严, 等. 半干旱区水钾互作对春玉米碳代谢及产量的影响[J]. 扬州大学学报(农业与生命科学版), 2023, 44(3): 89-97.
MA X H, CAO G J, DENG A Y, et al. Effects of water potassium interaction on carbon metabolism and yield of spring maize in semi-arid area [J]. Journal of Yangzhou University(Agricultural and Life Science Edition), 2023, 44(3): 89-97.

[10] 唐凡. 避雨栽培滴灌水钾一体化对猕猴桃生长和品质调控效应研究[D]. 成都: 四川大学, 2021.
TANG F. Effects of drip irrigation and potassium integration on kiwi fruit growth and quality[D]. Chengdu: Sichuan University, 2021.

[11] 丁亚会, 肖海强, 王大海, 等. 水钾一体化对烤烟钾素吸收及生长的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(5): 1238-1248.
DING Y H, XIAO H Q, WANG D H, et al. Effect of potassium fertigation on potassium absorption and growth of flue-cured tobacco [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2017, 23(5): 1238-1248.

[12] 张硕. 中国钾盐供需形势分析[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2021.
ZHANG S. Analysis of potash resource supply and demand situation in China[D]. Beijing: China University of Geosciences(Beijing), 2021.

[13] 陈志勇, 朱清, 武海炜, 等. 全球钾盐资源特征及市场发展态势分析[J/OL]. 中国地质, 2025: 1-24(2025-01-22) [2025-10-22].https://link.cnki.net/urlid/11.1167.P.20250121.1800.007.
CHEN Z Y, ZHU Q, WU H W, et al. Characteristics and market development trend of global potash resources[J]. Geology in China, 2025: 1-24(2025-01-22) [2025-10-22]. https://link.cnki.net/urlid/11.1167.P.20250121.1800.007.

[14] 高俊凤. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006: 74-77.
GAO J F. Plant physiology experiment guidance[M]. Beijing: Higher Education Press, 2006: 74-77.

[15] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2013: 135-140.
BAO S D. Soil chemical analysis[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2013: 135-140.

[16] 胡玮. 嫁接对烤烟钾素吸收利用的影响及其机理研究[D]. 重庆: 西南大学, 2019.
HU W. Effects and mechanism of grafting on potassium absorption and utilization of flue-cured tobacco [D]. Chongqing: Southwest University, 2019.

[17] 马忠明, 杜少平, 薛亮. 磷钾配施对旱砂田西瓜产量、品质及养分利用率的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(3): 687-695.
MA Z M, DU S P, XUE L. Effects of combined application of P and K on the yield, quality and nutrient utilization of watermelon in gravel-mulched field[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2014, 20(3): 687-695.

[18] WANG Y, WU W H. Regulation of potassium transport and signaling in plants[J]. Current Opinion in Plant Biology, 2017, 39: 123-128.

[19] 颉嘉丽, 李明, 石铭福, 等. 钾肥对干旱胁迫下马铃薯生理特性、产量及品质的影响[J]. 西北农业学报, 2024, 33(11): 2059-2069.
JIE J L, LI M, SHI M F, et al. Effect of potassium fertilization on physiological characteristics,yield and quality of potato under drought stress [J]. Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica, 2024, 33(11): 2059-2069.

[20] 杜少平, 马忠明, 唐超男, 等. 水、氮、钾互作对砂田嫁接西瓜产量和品质的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2022, 28(8): 1535-1544.
DU S P, MA Z M, TANG C N, et al. Interactive effects of water,nitrogen,and potassium on yield and quality of grafted watermelon in gravel-mulched field[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2022, 28(8): 1535-1544.

[21] SHEN C W, WANG J, JIN X, et al. Potassium enhances the sugar assimilation in leaves and fruit by regulating the expression of key genes involved in sugar metabolism of Asian pears[J]. Plant Growth Regulation, 2017, 83(2): 287-300.

[22] 贾荣俭, 胡宇, 杨杰, 等. 叶面喷施 K_2SO_4 对‘瑞雪’苹果果实糖代谢的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2024, 42(2): 88-96, 130.
JIA R J, HU Y, YANG J, et al. Effects of foliar spraying K_2SO_4 on sugar metabolism in ‘Ruixue’ apple fruit[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2024, 42(2): 88-96, 130.

[23] 张雯. 钾对苹果果实品质的影响及其与 6-磷酸海藻糖代谢途径的关系[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2017.
ZHANG W. The influence of potassium on the quality of apple fruits and its relationship with the 6-Phosphogalactitol metabolism pathway [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2017.

[24] 金辉, 侯东颖, 张曼, 等. 水肥耦合对大棚西瓜产量、品质及养分吸收的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2021, (2): 141-148.
JIN H, HOU D Y, ZHANG M, et al. Effects of water and fertilizer combinations on yield,quality and nutrient absorption of watermelon in greenhouse[J]. Soils and Fertilizers Sciences in China, 2021, (2): 141-148.