

不同水氮组合对退砂地西瓜生长和产量及水氮利用效率的调控效应

李佳乐,肖玉珍,王香,杨甜,张显

(西北农林科技大学园艺学院,陕西 杨凌 712100)

摘要:在宁夏中卫连续30余年压砂首次退砂的土地进行种植试验,以当地主栽的西瓜品种‘金城5号’为试验材料进行膜下滴灌栽培。灌溉量设置3个水平:常规灌溉(中水 W2, 3 000 m³ · hm⁻²)、常规灌溉加灌20%(高水 W3, 3 600 m³ · hm⁻²)、常规灌溉减灌20%(低水 W1, 2 400 m³ · hm⁻²)和5个施氮水平:N0(0 kg · hm⁻²)、N1(80 kg · hm⁻²)、N2(160 kg · hm⁻²)、N3(240 kg · hm⁻²)、N4(320 kg · hm⁻²),采用完全随机区组设计,共15个处理。结果表明:高水处理下,西瓜膨瓜期蔓长在5种氮水平下比中水处理分别提高9.15%、8.41%、8.69%、11.58%和12.00%;中水处理下,伸蔓期、开花坐果期和膨瓜期N2的西瓜蔓长较N0处理提高5.42%~7.13%;N2水平下,3个时期中水较低水处理西瓜蔓长提高2.71%~16.67%。低水处理和高水处理的西瓜可溶性总糖含量分别较中水处理降低13.09%~60.21%和6.69%~9.14%;中水和低水处理下N2处理的可溶性总糖含量较N0分别提高21.19%和70.47%,高水处理下N3处理的可溶性总糖含量较N0提高8.25%。在施氮量相同时,灌水对植株生长的促进作用表现为W3>W2>W1,而对西瓜品质的提高作用表现为W2>W3>W1。当灌溉水平为3 600 m³ · hm⁻²、施氮量为240 kg · hm⁻²时产量最高,为64 299.67 kg · hm⁻²。土壤有机质含量和脲酶活性在T4处理下达到最高;土壤全氮含量不会随着施氮量的增加逐渐升高,但会随着灌溉水平提高逐渐升高;在相同灌溉水平下,N1、N2、N3和N4条件下土壤铵态氮含量分别较N0处理平均提高11.90%、16.87%、24.58%和46.39%。提高灌溉量有利于提高氮肥偏生产力,但会使水分利用效率降低,施氮量从N0增加到N4时,W1灌溉水平下的水分利用效率最高。当灌溉水平为3 600 m³ · hm⁻²、施氮量为240 kg · hm⁻²时,西瓜生长、产量和水氮利用效率最佳。

关键词:香山硒砂瓜;退砂地;水氮组合;水氮利用效率;宁夏

中图分类号: S651; S605 **文献标志码:** A

Regulation effects of different water and nitrogen combinations on watermelon growth, yield, and water and nitrogen use efficiency in sand removal field

LI Jiale, XIAO Yuzhen, WANG Xiang, YANG Tian, ZHANG Xian

(College of Horticulture, Northwest A&F University, Shaanxi, Yangling 712100, China)

Abstract: The watermelon cultivar ‘Jincheng No. 5’, the main watermelon cultivar in Zhongwei, Ningxia, was used as the experimental material for planting experiment. Three levels of irrigation were set: conventional irrigation (medium water W2, 3 000 m³ · hm⁻²), conventional irrigation plus 20% (high water W3, 3 600 m³ · hm⁻²), conventional irrigation minus 20% (low water W1, 2 400 m³ · hm⁻²). Five nitrogen application levels including N0 (0 kg · hm⁻²), N1 (80 kg · hm⁻²), N2 (160 kg · hm⁻²), N3 (240 kg · hm⁻²), and N4 (320 kg · hm⁻²) were used in the experimental design, with a total of 15 treatments. The results showed that the growth of watermelon plants under high water treatment increased by 9.15%, 8.41%, 8.69%, 11.58% and 12.00%, respectively, compared with that under medium water treatment. Under medium water treatment, watermelon vine length of N2 increased by 5.42%~7.13% compared with N0, and 2.71%~16.67% under lower water treatment. The total

收稿日期:2024-04-25

修回日期:2024-07-25

基金项目:宁夏回族自治区退砂地土壤改良与植物营养调控项目(2022)

作者简介:李佳乐(2000-),男,河北衡水人,硕士研究生,研究方向为农艺与种业。E-mail:lijiale1208@163.com

通信作者:张显(1961-),男,陕西扶风人,教授,主要从事西、甜瓜种质改良、新品种选育及抗逆机制研究。E-mail:zhangxian@nwsuaf.edu.cn

soluble sugar content of watermelon under low water treatment decreased by 13.09% to 60.21% compared to medium water treatment, whereas under high water treatment, it decreased by 6.69% to 9.14%. The total soluble sugar under N2 treatment was increased by 21.19% and 70.47% compared with N0 under medium water and low water treatment, respectively. Under high water treatment, the total soluble sugar under N3 treatment was 8.25% higher than that under N0 treatment. Under the same nitrogen application, the promoting effect of irrigation on plant growth was $W3>W2>W1$, and the effect on watermelon quality was $W2>W3>W1$. The highest yield was $64\ 299.67\ \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ when the irrigation level was $3\ 600\ \text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ and the nitrogen application was $240\ \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$. Soil organic matter content and urease activity reached the highest level under T4 treatment. The total nitrogen content in the soil did not increase consistently with higher nitrogen application rates, however, it did increase gradually with higher irrigation levels. At the same irrigation level, the ammonium nitrogen content in the soil under N1, N2, N3, and N4 application conditions increased by 11.90%, 16.87%, 24.58%, and 46.39%, respectively, compared to N0. The increase of irrigation rate was beneficial to the increase of nitrogen partial productivity, but it will reduce the water use efficiency. When the nitrogen application rate increased from N0 to N4, the water use efficiency under W1 irrigation level was the highest. When the irrigation level was $3\ 600\ \text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ and the nitrogen application rate was $240\ \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, the growth, yield and water and nitrogen use efficiency of watermelon were the best.

Keywords: *selenomardia xiangshanensis*; sand removal land; water and nitrogen combination; water and nitrogen use efficiency; Ningxia

“香山晒砂瓜”为葫芦科西瓜属植物,是我国宁夏回族自治区的重要西瓜品牌,其核心主产区地处我国西部干旱地带的中卫市香山区^[1]。近年来尽管晒砂瓜产业经济收益显著,但由于长期连作和不规律施肥,压砂地连作障碍严重,土壤酸化板结,微生物结构失衡,对生态环境造成不可逆损害^[2],同时由于压砂地扩张、荒漠土地开垦及砂地资源开采无序,令宁夏地区出现土沙化和植被退化问题^[3]。因此,针对性开展退砂试验是解决土壤退化、生态环境破坏、土壤性质恶化等问题的重要措施^[4]。退砂是指将覆盖的砂石推除,在土地上进行覆膜种植西瓜。目前退砂地西瓜刚刚起步,对于水分和肥料的需求量尚不明确,因此合理调控水肥用量,对更好地保护环境、保证西瓜正常生长以及提高当地农民收益具有重要意义。水分和肥料是影响粮食安全生产中的两个最主要因素^[5]。适宜的水肥条件不仅可以促进作物生长发育,还可以降低农业成本,从而提高水肥利用率^[6-7]。谢忠奎等^[8]研究发现,砂田西瓜采用滴灌方式且补灌量控制在 45 mm 以上,才能既保证品质又可以提高产量。杜少平等^[9]研究发现砂田西瓜施氮量 $120\ \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 可以保证西瓜高产优质;顾淑琴^[10]研究发现砂田西瓜注水 4 次以上产量可以达到较高水平。宁夏沙坡头区地处半干旱地带,水资源匮乏严重^[11],降水与西瓜的生育时期不同期^[12],水资源的利用主要依靠引黄灌溉。灌水和施肥是影响植株生长与高效生产的主

要因素。目前我国关于水氮互作的研究较多,但是针对宁夏退砂地的水氮施用量问题研究尚显不足。宁夏中卫沙坡头区是晒砂瓜的主产区,从保护生态环境和节约水资源角度考虑,探讨退砂地水氮耦合一体化施用技术对于该地区保护环境、节约水资源、增产增效有重要意义^[13-14]。因此,本试验研究了不同灌溉水平下不同施氮量对退砂地西瓜生长、水氮利用效率以及土壤性质的影响,为“退砂西瓜”高产高质提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于 2023 年 5 月—2023 年 9 月在宁夏回族自治区中卫市沙坡头区香山乡深井村 ($37^{\circ}02'N$, $105^{\circ}08'E$) 通茂农业合作社退砂地进行(连续 30 余年进行压砂西瓜种植,于 2022 年 3 月进行退砂)。试验区海拔 1 760 m,位于宁夏中部,日照充足,干旱少雨,年平均降水量 180 mm,而蒸发量则达 2 100~2 400 mm,属半干旱气候,具有典型的大陆性季风气候和沙漠气候的特点。试验地具体气温降水情况见图 1。试验区土地为沙壤土,试验地处理前 0~20 cm 耕作层土壤基本理化指标如表 1 所示。

1.2 试验设计

供试品种为‘金城 5 号’嫁接苗,由中卫市通茂农业合作社提供。该品种为当地的主栽品种,晚熟、大果型、高抗枯萎病和炭疽病。

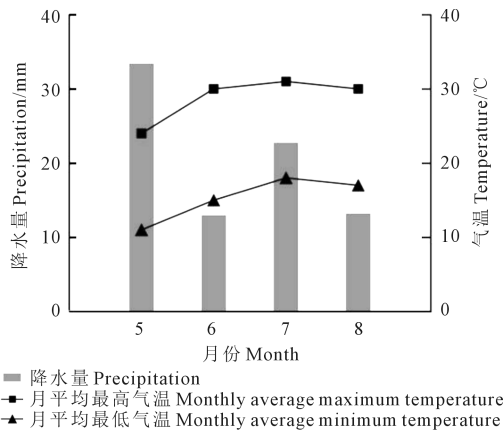


图 1 2023 年 5—8 月香山乡深井村降水与气温变化情况

Fig.1 Precipitation and temperature changes in Shengjing Village, Xiangshan Township, May to August in 2023

表 1 试验前 0~20 cm 土层土壤基本理化性质

Table 1 Basic physical and chemical properties of 0~20 cm soil layer before experiment

土层深度 Soil layer /cm	全氮 Total N /(mg·kg ⁻¹)	全磷 Total P /(mg·kg ⁻¹)	速效氮 Available N /(mg·kg ⁻¹)	速效磷 Available P /(mg·kg ⁻¹)	速效钾 Available K /(mg·kg ⁻¹)	有机质 Organic matter /(g·kg ⁻¹)	有机碳 organic carbon /(g·kg ⁻¹)	pH
0~20	355.50	160.50	5.54	4.07	192.47	9.26	5.37	7.86

施入、20%于开花坐果期施入、30%于膨瓜期施入。各处理的磷、钾肥用量一致,分别为 180、240 kg·hm⁻²。灌溉方式为膜下滴灌,三蔓整枝,主蔓第三节位留一单果,其他的管理正常进行。西瓜于 2023 年 5 月 21 日定植,2023 年 8 月 19 日收获。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 样品采集 试验开始前,在整个试验地以“五点取样法”采集 0~20 cm 深度土壤样品,去除杂质后混匀;在西瓜成熟收获期,每个处理随机选取 3 个采样点,采集 0~20 cm 土层的土壤去除杂质后混匀,用于测定土壤理化指标。在西瓜开花坐果期和成熟期每个处理各采 3 株植株样本,地上部和地下部分开,进行杀青、烘干、磨碎,用于测定植株氮素指标。每个处理选取 3 个瓜,将瓜瓤混合并采用“四分法”取样,置于-70℃保存,用于测定果实品质指标。

1.3.2 测定项目及方法 西瓜生长指标:于伸蔓期、开花坐果期、膨瓜期测定植株蔓长(自嫁接处起至生长点止)、茎粗(植株主茎基部第一节位)和叶片数(每株成熟叶片量)。西瓜产量:每个处理选择果形端正、成熟度好的西瓜进行逐个称量,折算成每公顷产量。西瓜外观品质:用直尺测量西瓜的纵径、横径以及果皮厚度,果形指数是纵径和横径的比值。西瓜果实品质:用 PAL-1 糖度计(日本 ATAGO)测定果实可溶性固形物含量(中心可溶性固形物取样位置为瓜瓤中心,边际可溶性固形物的取样

位置为靠近瓜皮的瓜瓤);果实可溶性总糖采用蒽酮比色法测定;可溶性蛋白含量采用考马斯亮蓝 G-250 染色法测定^[15]。植株全氮采用硫酸法消煮,用流动性分析仪进行含量测定;土壤全氮采用浓硫酸和高锰酸钾催化进行消煮,用流动性分析仪测定含量;土壤铵态氮、硝态氮、可溶性有机氮采用 0.5 mol·L⁻¹硫酸钾溶液进行提取,用流动分析仪测定含量;土壤速效氮、速效磷、速效钾和有机质含量由南京奥青生物科技公司代测。土壤蔗糖酶和淀粉酶采用 3,5-二硝基水杨酸比色法测定;脲酶采用靛酚蓝比色法测定;过氧化氢酶采用高锰酸钾滴定变色法测定^[15]。

各指标计算方法^[16]如下:

氮素积累量(kg·hm⁻²) = 氮素含量×干物质质量

营养器官氮素转运量(kg·hm⁻²) = 开花期营养器官氮素积累量-成熟期营养器官氮素积累量

营养器官氮素转运率(%) = 营养器官氮素转运量/开花期营养器官氮素积累量×100%

氮肥偏生产力(kg·kg⁻¹) = 施氮区产量/施氮量

水分利用效率(WUE, kg·hm⁻²·m⁻³) = 西瓜产量/耗水量

氮素利用指数 = 地上部干物质质量/整株氮素吸收量

1.4 数据处理

采用 IBM SPSS Statistics 19 进行试验数据统计分析,差异显著性采用 Duncan's 分析,采用 Origin 2021 进行图形绘制。

2 结果与分析

2.1 不同水氮组合对退砂地西瓜生长及产量的影响

2.1.1 不同水氮组合对西瓜生长的影响 方差分析表明灌溉和氮肥处理对西瓜植株生长的影响均达

表 2 各试验处理灌溉与施氮量

Table 2 Irrigation and nitrogen application rates of each treatment

试验编号 Test number	组合 Combination	灌水量(W) Irrigation amount /(m ³ ·hm ⁻²)	施氮量(N) Nitrogen amount /(kg·hm ⁻²)
T1	W3N0		0
T2	W3N1		80
T3	W3N2	3600	160
T4	W3N3		240
T5	W3N4		320
T6	W2N0		0
T7	W2N1		80
T8	W2N2	3000	160
T9	W2N3		240
T10	W2N4		320
T11	W1N0		0
T12	W1N1		80
T13	W1N2	2400	160
T14	W1N3		240
T15	W1N4		320

到显著水平。由表 3 可知,随着灌溉水平的提高,植株生长指标持续升高,以植株蔓长为例,低水处理的植株膨瓜期蔓长在 5 种施氮水平下分别比中水处理降低 13.73%、9.95%、11.03%、5.59% 和 7.75%,其中 T11 和 T14 与中水处理相比差异显著;高水处理的植株膨瓜期蔓长在 5 种氮水平下比中水处理分别提高 9.15%、8.41%、8.69%、11.58% 和 12.00%。随着灌溉水平的提高,退砂地西瓜植株蔓长的涨幅也随之升高,在高水处理前期涨幅不明显,甚至出现负增长,但生长后期高水处理涨幅明显。灌溉水平对退砂地植株蔓长的促进作用表现为 W3>W2>W1。在相同灌溉处理下,随着施氮水平的提高,植株生长指标呈现先升高后降低的趋势,高水处理下在 N3 处理升至最高值,中水和低水处理下在 N2 处理升至最高值。生长前期高水处理下植株生长指标在 5 种氮处理下表现为 N3>N4>N2>N1>N0,N3 处理的植株蔓长较 N0 提高 7.14%~22.82%;中水和低水处理的植株生长指标在 5 种氮处理下表现为 N2>N4>N3>N1>N0;中水处理下,N2 的西瓜蔓长较 N0 处理提高 5.42%~7.13%,较低水处理提高 2.71%~16.67%。生长指标测定结果表明,T4 处理长势最佳。

2.1.2 不同水氮组合对西瓜产量的影响 灌溉水平、施氮量、产量共同构成了一个开口向下的立体曲面(图 2),拟合曲面表明当施氮量高于 240 kg·hm⁻²、灌溉水平低于 3 600 m³·hm⁻²时西瓜产量最高,为 68 000 kg·hm⁻²。但本研究发现当灌溉水平

表 3 不同水氮组合对西瓜生长指标的影响

Table 3 Effects of different water and nitrogen combinations on the growth indicators of watermelon

处理 Treatment	蔓长 Vine length/cm			茎粗 Stem size/mm			叶片数 Number of blades		
	伸蔓期 Elongation stage	开花坐果期 Blossom and fruit period	膨瓜期 Distending stage	伸蔓期 Elongation stage	开花坐果期 Blossom and fruit period	膨瓜期 Distending stage	伸蔓期 Elongation stage	开花坐果期 Blossom and fruit period	膨瓜期 Distending stage
T1	89.67e	176.00cd	294.17b	6.03ab	8.01abc	9.48ab	13.50abc	20.67bc	34.00cd
T2	94.50bcde	185.83bcde	292.17bcd	6.01abc	8.07ab	9.67ab	14.00ab	19.67cd	36.33bcd
T3	92.67cde	195.50abcd	313.67ab	6.17ab	8.22ab	9.75ab	15.00a	23.00abc	39.00ab
T4	108.17ab	216.17a	320.00a	6.07ab	8.15ab	10.02a	15.00a	23.50ab	41.00a
T5	103.50abcd	207.17ab	315.50ab	5.91bc	8.26a	10.02a	15.00a	23.67a	38.33a
T6	103.50abcd	179.67cde	269.50def	5.85bc	7.61de	9.53ab	12.33abc	19.33cd	36.33bcd
T7	97.00abcd	187.67bcde	272.81defg	5.96abc	8.06abc	9.78ab	13.67ab	19.83cd	36.67bcd
T8	97.67abcd	198.00abcd	288.67cde	5.61c	8.17ab	9.79ab	13.67ab	21.83abc	40.00bc
T9	109.11a	195.66abcd	282.33def	5.88bc	8.11ab	9.86ab	13.33abc	24.33a	39.67ab
T10	107.50ab	199.17abc	286.17def	6.35a	8.12ab	9.91a	13.83ab	23.00abc	39.00ab
T11	91.00de	166.17e	248.50g	5.83bc	7.44e	9.02b	11.00c	19.33d	32.50d
T12	94.50bcde	176.00de	258.13fg	5.78bc	7.86bcd	9.37ab	12.00bc	19.17d	36.67cd
T13	106.17abc	177.83cde	269.97def	5.78bc	7.93cd	9.83ab	12.00abc	19.50cd	35.33cd
T14	103.33abcd	180.17cde	258.67ef	5.79bc	7.85cd	9.72ab	13.33abc	20.17bcd	39.17bcd
T15	106.17abc	188.33bcde	255.60fg	6.02abc	7.70d	9.90a	13.83ab	18.67d	37.00bcd

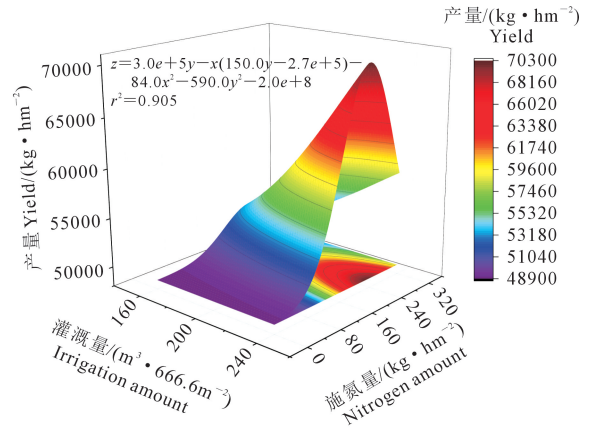
注:同列不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。下同。

Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant differences between treatments ($P<0.05$). The same below.

为 $3\ 600\ \text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ 、施氮量为 $240\ \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时产量最高,为 $64\ 299.67\ \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。由此可知,当灌溉水平与施氮量超过适宜范围时会造成减产,同时灌溉与施氮需协同作用。当地常规管理的退砂地西瓜产量估算为 $54\ 750\ \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,本试验的 T2、T3、T4、T5、T9 处理较其分别提高 0.10%、9.89%、29.17%、6.09%、12.64%。灌溉水平对产量的提高作用表现为 $W3 > W2 > W1$;在相同灌溉水平下,产量随着施氮量的增加呈现先升高后降低的趋势。本研究中 T4 处理产量最高,T1 处理产量最低。退砂土地没有石块的覆盖,蒸发量较大,因此需水量也更多,低水灌溉导致植株早衰而减产,但是水氮协同也会相对提高产量,与不施氮相比平均提高 11.44%。各水氮处理对退砂地西瓜产量的影响均表现为 $N3(T4、T9、T14) > N2(T3、T8、T13) > N4(T5、T10、T15) > N1(T2、T7、T12) > N0(T1、T6、T11)$ 。

2.1.3 不同水氮组合对植株干、鲜质量的影响 从不同水氮组合对退砂地西瓜植株开花坐果期和成熟期地上部鲜质量来看(图 3),T4 处理的鲜质量最大,分别为 $785.22\ \text{g}$ 和 $1\ 670\ \text{g}$;T11 处理的鲜质量最小,两个时期分别为 $334.67\ \text{g}$ 和 $853.73\ \text{g}$ 。在高水处

理下,施氮量对开花坐果期和成熟期地上部鲜质量的提高作用表现为 $N3 > N2 > N4 > N1 > N0$;在中水和低水处理下,施氮量对开花坐果期和成熟期地上部鲜质量的提高作用均表现为 $N2 > N3 > N4 > N1 > N0$ 。T4 处理的开花坐果期和成熟期地上部鲜质量较 T8 处

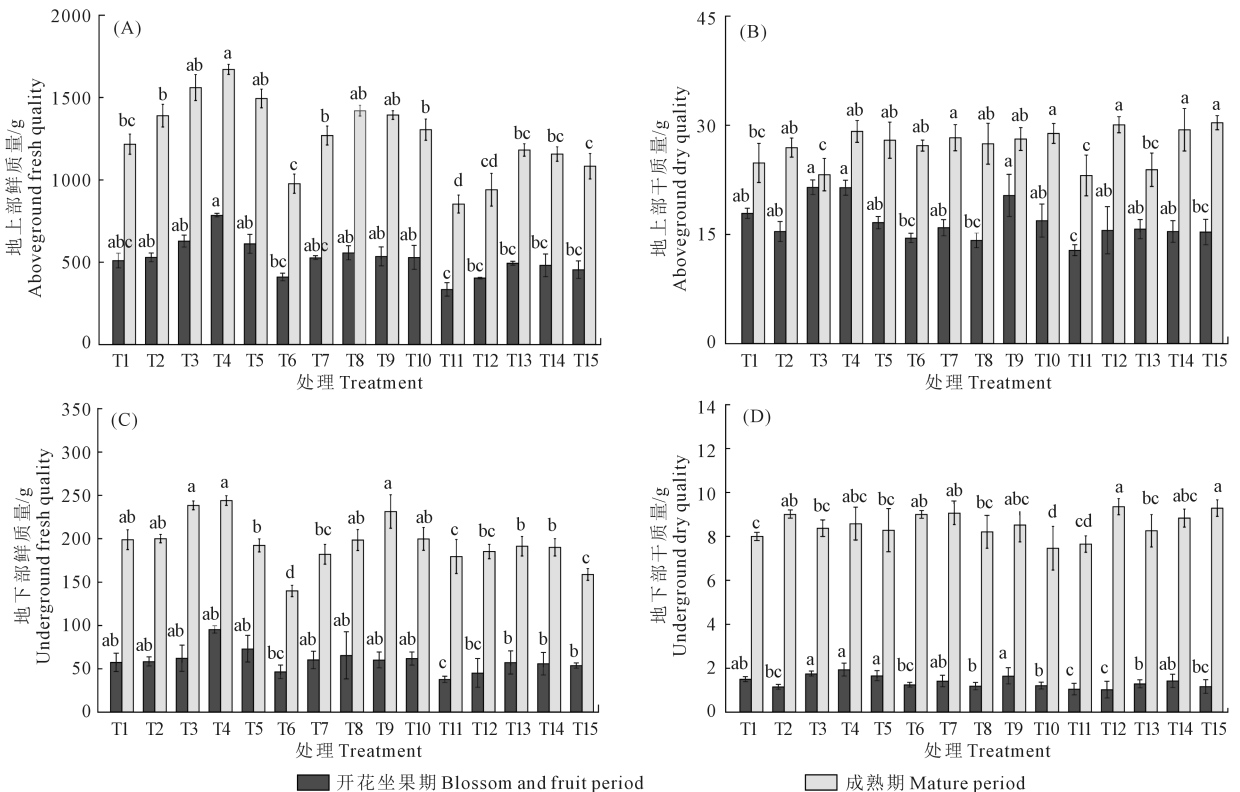


注: x : 灌溉量; y : 施氮量; z : 产量。

Note: x : Irrigation amount; y : Nitrogen application rate; z : Yield.

图 2 灌溉量、施氮量、产量拟合曲面模型

Fig.2 Fitting surface model of irrigation, nitrogen application and yield



注:不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。下同。

Note: Different lowercase letters indicate significant differences between treatments ($P < 0.05$). The same below.

图 3 不同水氮组合对西瓜植株干质量和鲜质量的影响

Fig.3 Effects of different water and nitrogen combinations on dry mass and fresh mass of watermelon plants

理分别提高 31.83% 和 38.75%, 较 T13 处理分别显著提高 16.59% 和 30.77%。从开花坐果期和成熟期地下部鲜质量来看, T4 处理最高, 分别达到 95.67 g 和 244.07 g; T11 处理最低, 分别为 37.68 g 和 179.45g。施氮量对开花坐果期和成熟期地下部鲜质量的影响与地上部表现一致, 植物干物质的积累与植物鲜质量的变化同样呈正相关关系。T4 处理的开花坐果期地上部干质量较 T8 和 T13 处理分别提高 5.07% 和 26.78%。W3、W2、W1 灌溉水平下开花坐果期和成熟期地下部干质量分别为 1.49~1.93、1.18~1.64、1.02~1.42 g 和 8.00~9.00、7.46~9.06、7.64~9.28 g, 可以看出不同水氮组合处理对植株地下部干质量影响幅度不大。

2.2 不同水氮组合对退砂地西瓜品质的影响

含糖量和果形指数是影响西瓜风味和外观品质的重要指标^[17]。由表 4 可以看出, 不同水氮组合对西瓜的外观品质(果形指数)影响较小。当地昼夜温差较大, 糖分积累较多, 不同水氮组合下西瓜的含糖量间无显著差异, 但总体趋势表现为西瓜可溶性总糖含量随着灌溉水平和施氮量的增加先增加后降低, 即 W2>W3>W1。低水处理的西瓜可溶性总糖含量较中水降低 13.09%~60.21%, 高水处理的西瓜可溶性总糖含量较中水降低 6.69%~9.14%。可以看出, 水分对西瓜可溶性总糖含量影响较大, 低水导致糖积累量降低。退砂土地没有石块的覆盖, 蒸发量较大, 因此需水量也更多, 光合能力减弱, 从

而导致低水情况下植株糖积累较少。中水和低水处理下施氮对西瓜可溶性总糖含量的提高作用表现为 N2>N4>N3>N1>N0, N2 处理的可溶性总糖含量较 N0 分别提高 21.19% 和 70.47%; 高水处理下施氮对西瓜可溶性总糖含量的提高作用表现为 N3>N4>N2>N1>N0, N3 处理下的可溶性总糖含量较 N0 提高 8.25%。可溶性固形物含量(TSS)是市场交易中评价西瓜甜度的重要指标^[17]。T9 处理的中心可溶性固形物含量最高, 达到 12.30%。在高水处理下, 施氮量对西瓜果实的中心 TSS 与边际 TSS 提高作用表现为 N3>N2>N1>N4>N0; 在 N3 水平下, 灌溉对西瓜果实的中心 TSS 与边际 TSS 的提高作用表现为 W2>W3>W1, 说明在 N3 处理下适当降低灌水量有利于提高可溶性固形物的含量。

2.3 不同水氮组合对退砂地土壤性质和酶活性的影响

2.3.1 不同水氮组合对土壤氮及有机质、有机碳含量的影响

初次退砂的土地仍有压砂残留的土壤问题, 氮肥施用对退砂土壤中氮元素含量有显著影响。如表 5 所示, 在相同灌溉水平下, 土壤全氮含量随着施氮量的增加呈逐渐上升的趋势, 中高氮处理下灌溉水平对退砂地土壤全氮含量提高作用表现为 W3>W2>W1。施氮水平对退砂土壤硝态氮、铵态氮和速效氮含量均有显著影响; 在相同灌溉水平下增施氮肥显著提高土壤铵态氮含量, N1、N2、N3 和 N4 施氮条件下退砂地土壤铵态氮含量分别较 N0

表 4 不同水氮组合对西瓜品质的影响

Table 4 Effects of different water and nitrogen combinations on watermelon quality

处理 Treatment	纵径 Longitudinal diameter /cm	横径 Transverse diameter /cm	果形指数 Fruit shape index/%	果皮厚度 Peel thickness /mm	中心可溶性 固形物 Central soluble solid/%	边际可溶性 固形物 Marginal soluble solid/%	中边差 Side-to-center shading/%	可溶性蛋白 Soluble protein /(mg·g ⁻¹)	可溶性总糖 Total soluble sugar /(g·kg ⁻¹)
T1	30.76cd	20.60bc	1.50a	10.89a	10.57c	7.99b	2.58ab	3.56b	303.11a
T2	32.07abc	20.76bc	1.55a	11.01a	11.91ab	9.42a	2.49ab	3.71b	320.40a
T3	32.29ab	21.49ab	1.50a	10.95a	11.74ab	9.86a	1.89b	3.87b	314.93a
T4	33.34a	21.61ab	1.54a	11.06a	11.67ab	9.91a	1.76b	3.69b	328.63a
T5	32.98ab	21.10ab	1.56a	9.68ab	11.92ab	9.68a	2.24ab	3.71b	300.66a
T6	31.86bc	21.11ab	1.50a	10.46ab	11.81b	8.53ab	3.28a	3.73b	335.28a
T7	31.79bc	20.81ab	1.53a	10.17ab	11.01bc	9.04ab	1.97b	3.87b	292.49a
T8	31.61bc	21.61ab	1.47a	10.36ab	12.06a	9.44a	2.61ab	3.96b	406.84a
T9	32.12abc	21.92a	1.47a	10.37ab	12.30a	8.51b	3.79a	3.83b	317.53a
T10	33.94a	21.96a	1.55a	10.73ab	11.93ab	9.09ab	2.84ab	5.01a	358.43a
T11	29.08d	19.61c	1.49a	10.33ab	11.28bc	8.57b	2.71ab	3.12b	209.09b
T12	31.43bc	20.54bc	1.53a	10.71ab	11.69b	9.59a	2.10ab	3.75b	337.46a
T13	30.82bc	20.66bc	1.49a	10.15ab	11.68b	9.26a	2.42ab	3.88b	358.62a
T14	31.43bc	20.71bc	1.52a	10.00ab	11.78ab	9.58a	2.20ab	3.89b	324.30a
T15	30.60bc	20.14bc	1.52a	9.27b	11.43b	9.03ab	2.40ab	3.95b	359.48a

平均提高 11.90%、16.87%、24.58% 和 46.39%；不同水氮处理的土壤速效氮含量介于 6.42~17.78 mg·kg⁻¹，W3 灌溉水平下施氮对退砂地土壤速效氮的影响强度最大，其中 T4 处理较 T1 处理显著提高 24.35%。施氮对硝态氮的影响在中水处理下表现为逐渐增大，在高水处理下表现为 N3>N4>N2>N1>N0，呈现出随着施氮水平的增加逐渐升高的趋势；但在低水处理下呈现先升高后降低的趋势，T13 处理含量最高。水氮组合对退砂地土壤有机质和有机碳的影响较大，T4 处理有机质和有机碳含量最高，分别达到 15.15 g·kg⁻¹ 和 8.79 g·kg⁻¹，T11 处

理含量最低，分别为 9.96 g·kg⁻¹ 和 5.78 g·kg⁻¹，T4 较 T11 处理两指标含量分别提高 55.29% 和 55.31%。在低水和中水水平下，N3 处理土壤有机质和有机碳含量均较其他处理有不同程度提高。在 5 个施氮水平下灌溉对退砂地土壤有机质和有机碳含量的提高作用大致表现为 W3>W2>W1。定植前有机质含量为 9.26 g·kg⁻¹，有机碳含量为 5.37 g·kg⁻¹，收获后各处理土壤有机质和有机碳的含量明显上升。其中 T4 处理较定植前土壤有机质和有机碳的含量升高最多，分别提高 38.88% 和 38.91%。可见合理施肥会改善压砂残留的土壤性质。

表 5 不同水氮组合对退砂地土壤性质的影响

Table 5 Effects of different water and nitrogen combinations on soil properties in sand removal field

处理 Treatment	全氮 Total N /(mg·g ⁻¹)	硝态氮 NO ₃ -N /(mg·g ⁻¹)	铵态氮 NH ₄ -N /(mg·g ⁻¹)	速效氮 Available N /(mg·g ⁻¹)	速效磷 Available P /(mg·g ⁻¹)	速效钾 Available K /(mg·g ⁻¹)	有机质 Organic matter /(g·kg ⁻¹)	有机碳 Organic carbon /(g·kg ⁻¹)
T1	305.37b	1.09d	2.62cd	12.32bc	4.89d	205.56bc	12.67cd	7.35cd
T2	310.86b	2.86bed	3.09bed	15.32b	6.76d	245.93bc	14.21b	8.24b
T3	316.80b	3.69bed	3.12bed	15.09b	10.55bc	285.74b	14.45b	8.38b
T4	332.30ab	6.21abc	3.35bc	17.78a	14.04a	330.40a	15.15a	8.79a
T5	353.85a	5.50bed	3.72b	16.38ab	9.41c	225.75de	13.18c	7.64
T6	309.67b	1.02d	2.68cd	10.20c	3.98e	208.21e	10.93g	6.33h
T7	311.27b	2.47bed	3.09bed	10.45c	5.68d	236.15ede	12.02h	6.97g
T8	314.67b	3.76bed	3.28bed	11.78c	5.93d	281.10b	12.20de	7.08de
T9	324.93ab	5.16bed	3.41b	13.02bc	10.65bc	301.80b	12.46de	7.23de
T10	324.30ab	6.06abc	4.12ab	9.89cd	8.19cd	240.45cd	11.63f	6.75f
T11	307.57b	1.69d	3.06bed	6.42e	5.08d	207.15e	9.96h	5.78h
T12	312.57b	6.80ab	3.10bed	8.00d	5.99d	215.80de	10.68g	6.19g
T13	317.47b	6.85a	3.34bc	8.03d	9.11c	235.92ede	12.55de	7.28de
T14	314.47b	2.19bed	3.63b	8.42d	13.24ab	280.01b	11.96ef	6.94ef
T15	319.47b	3.71bed	4.39a	9.12cd	12.02b	256.12c	10.58h	6.14h

2.3.2 不同水氮组合对土壤酶活性的影响 灌溉量和施氮量对退砂地土壤脲酶和蔗糖酶活性均有显著影响，脲酶在一定程度上可以反映土壤的供氮能力^[18]。如图 4 所示，在相同灌溉水平下，增施氮肥可不同程度提高土壤脲酶活性，N1、N2、N3、N4 水平下土壤脲酶活性分别较 N0 平均提高 1.77%、26.29%、46.65% 和 25.69%；在相同施氮量下，不同灌溉水平土壤脲酶活性表现为 W3>W2>W1，T3、T4、T5、T9 处理的脲酶较种植前明显提高。可以看出，脲酶活性随着施氮量的增加呈现先上升后下降的趋势，但水分对于脲酶活性的影响呈现正相关（图 4A）。蔗糖酶对增加土壤中易溶性营养物质起着重要的作用，如图 4C 所示，土壤蔗糖酶活性浮动较大，介于 0.054~0.378 mg·g⁻¹。T4 和 T9 处理的土壤蔗糖酶活性显著高于其他处理，可能因为高水中氮会增加蔗糖酶活性，W3 处理的土壤蔗糖酶活性较 W2 处理高 6.59%~10.69%；W1 处理的蔗糖酶

活性变化幅度不大，可能蔗糖酶和水分关系较大（图 4C）。不同水氮处理的土壤过氧化氢酶和淀粉酶活性分别介于 0.7037~0.9988 mg·g⁻¹ 和 10.58~17.66 ml·g⁻¹。过氧化氢酶和淀粉酶的变化趋势相同，即在灌溉水平一致时，随着施氮量的增加呈现先升高后降低的趋势；在施氮量一致时，随着灌溉水平的降低呈现降低的趋势（图 4B、D）。过氧化氢酶和淀粉酶在处理较种植前都有明显的提高，说明退砂种植后土壤酶活性较压砂有明显促进作用，其中 T4 处理的 4 种酶活性均显著增高。

2.4 不同水氮组合对退砂地西瓜水氮利用效率的影响

2.4.1 不同水氮组合对西瓜水分利用效率的影响 灌溉与施氮是决定西瓜产量水分利用效率的主要因素（图 5），随着灌溉量的增加，水分利用效率逐渐降低，W3 灌溉水平平均水分利用效率较 W2、W1 灌溉水平分别下降 10.57% 和 23.74%。同时水

分利用效率受施氮量的影响,不同施氮水平对水分利用效率的作用不同,在同一灌溉水平下水分利用效率随着施氮量的增大呈现先升高后降低的趋势。高水和中水灌溉条件下,施氮量均在 N3 时水分利用效率达到最高,分别为 $17.86 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $19.12 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{m}^{-3}$;但低水灌溉条件下施氮量在 N2 时水分利用效率达到最高,为 $22.39 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{m}^{-3}$ 。W3、W2、W1 水平水分利用效率分别为 $14.08 \sim 17.87$ 、 $16.10 \sim 19.21$ 、 $19.24 \sim 22.39 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{m}^{-3}$; W1 灌溉水平下 N2 水分利用效率最高。相较施氮量来看,从 N0 提高至 N4, W1 灌溉水平下的变化幅度最大,因灌溉量导致水分效率下降是无法人为调控的,但是可以通过调节施氮量来促进水氮协同作

用,进而提高水分利用效率。

2.4.2 不同水氮组合对西瓜植株氮素利用的影响 适当提高施氮量有利于退砂地西瓜植株氮素积累,在 3 个灌溉水平下植株氮素积累量的平均趋势均随着施氮量增加先升高后降低(表 6)。开花坐果期和成熟期氮素积累量最高的处理分别为 T4 和 T15,含量分别达到 $21.59 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $5.02 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,最低的 T11 和 T1 处理氮素积累量分别为 $6.51 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $3.19 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。平均氮素积累量在 W3 灌溉水平下最高,为 $19.68 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,较 W2、W1 分别提高 9.91% 和 23.22%。从相对氮素转运率来看,高水高肥处理的平均氮素转运率高,介于 46.17% ~ 78.66% 之间,最高处理为 T4,达到了 78.66%,T11 处

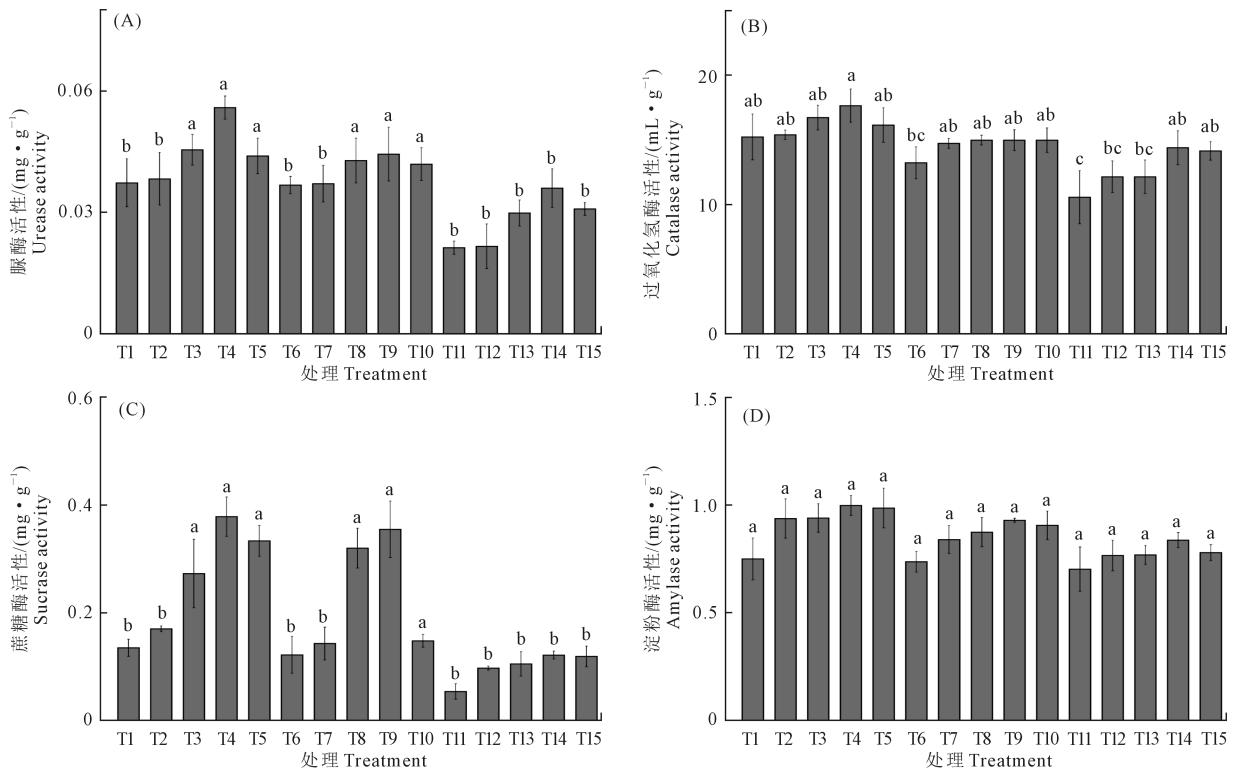


图 4 不同水氮处理对退砂地土壤酶活性的影响

Fig.4 Effects of different water and nitrogen treatments on enzyme activities of sand removal field

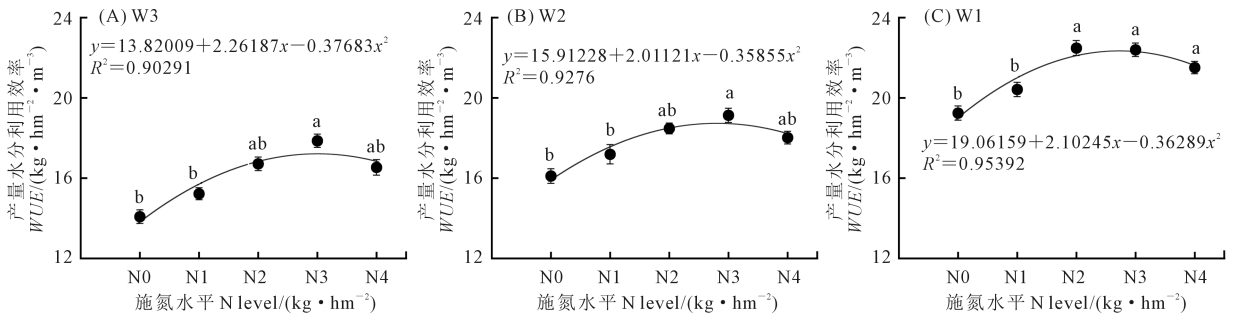


图 5 不同水氮组合对西瓜水分利用效率的影响

Fig.5 Effects of different water and nitrogen combinations on water use efficiency of watermelon

理氮素转运率最低,为 46.17%,T4 较 T11 处理提高 41.30%,其中,在不同灌溉水平下 N3、N4 处理与 N0 的差异均达到显著水平。在灌溉水平一致时,氮素转运率随着施氮量的增加呈现先升高后降低的趋势;在施氮量一致时,氮素转运率随着灌溉水平的降低呈现降低的趋势。平均氮素积累量、氮素转运量和氮素转运率均在 T4 处理达到最高,较 T1 处理分别提高 41.03%、46.64% 和 5.98%,且 3 个灌水量的平均氮素转运量随着施氮量的增加表现为先增高后降低,说明施氮量的提高会影响植株氮素的转运,进而影响氮素积累量。灌溉水平的增加与植株氮素利用呈现正相关关系,平均氮素积累量、氮素转运量以及氮素转运率均在 W3 灌溉水平达到最

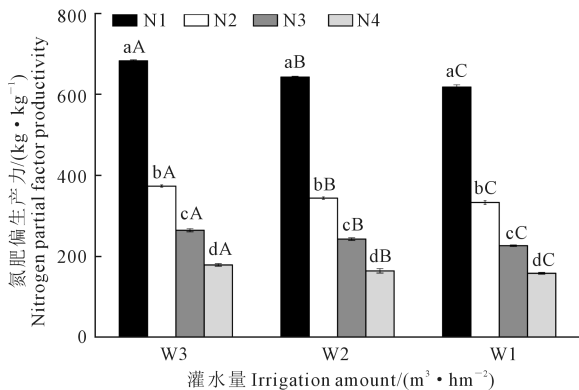
高,说明在退砂土地中适当增加灌溉量有利于促进水氮协同作用,增强退砂西瓜对氮素的吸收利用。

2.4.3 不同水氮组合对氮肥偏生产力的影响 氮肥偏生产力是指单位面积投入的氮肥所能够支持作物产量的能力。由图 6 可知,在相同的灌溉量下,不同施氮处理对氮肥偏生产力的促进作用表现为 N1>N2>N3>N4。在相同施氮量下,不同灌溉处理对氮肥偏生产力的促进作用表现为 W3>W2>W1,其中 W3N1 处理值最高,达到 682.67 kg·kg⁻¹。W3N1 相比 W2N1 和 W1N1 处理分别显著提高 5.89% 和 9.49%,W3 处理下 N1 较 N2、N3、N4 分别显著提高 45.33%、65.31%、73.87%。因此适当提高农田灌溉量可适度提高氮肥偏生产力。

表 6 不同水氮组合对西瓜氮素利用效率的影响

Table 6 Effects of different water and nitrogen combinations on nitrogen use efficiency of watermelon

处理 Treatment	氮素积累量 Nitrogen accumulation/(kg·hm ⁻²)		氮素转运量 Nitrogen transport capacity /(kg·hm ⁻²)	氮素转运率 Nitrogen transport rate/%	氮素利用指数 Nitrogen utilization index	
	开花坐果期 Blossom and fruit period	成熟期 Mature period			开花坐果期 Blossom and fruit period	成熟期 Mature period
	T1	12.26c			3.19c	9.06ab
T2	12.60c	3.36c	9.24ab	73.33ab	33.63b	46.05b
T3	13.93c	3.57bc	10.36ab	74.36ab	33.06b	45.59b
T4	21.59a	4.61ab	16.98a	78.66a	28.15c	44.50bc
T5	18.80b	4.48b	14.32ab	76.71a	34.04b	50.61ab
T6	9.57cd	4.34b	5.23bc	54.76d	31.06b	44.16bc
T7	13.11c	4.13b	8.98ab	68.46b	30.29b	55.92a
T8	15.72bc	4.59ab	11.13ab	70.80ab	31.34b	46.16b
T9	14.73bc	3.72bc	11.00ab	74.73ab	33.25b	59.07a
T10	14.29bc	4.46ab	9.83ab	68.81b	30.81b	50.99ab
T11	6.51d	3.36bc	3.01c	46.17d	34.08b	44.95bc
T12	9.47cd	3.51bc	5.75bc	60.77bc	31.91b	49.39ab
T13	13.87bc	3.71c	10.50ab	75.73a		
T14	13.19c	4.77ab	8.42ab	63.80bc		
T15	12.10c	5.02a	7.08bc	58.55c		



注:不同小写字母表示相同灌溉量下施氮量间差异显著 ($P<0.05$),不同大写字母表示相同施氮量下灌溉量间差异显著 ($P<0.05$)。

Note: Different lowercase letters indicate significant differences between nitrogen amounts under the same irrigation amount ($P<0.05$), different capital letters indicate significant differences between irrigation amounts under the same nitrogen amount ($P<0.05$).

图 6 不同水氮组合处理对西瓜氮肥偏生产力的影响

Fig.6 Effects of different water and nitrogen combinations on nitrogen partial factor productivity of watermelon

3 讨论

退砂地栽培模式下,水分和氮肥之间相互影响,相互作用,同时也相互制约。高玉侠等^[19]指出,在高灌水量情况下,西瓜的生长指标随着施氮水平的增加而逐渐降低。在本研究中,不同水氮组合对西瓜植株生长指标的影响随着施氮量的增加呈现先升高后降低的趋势;同时随着氮肥的施入灌溉水平对西瓜生长的影响显著提高,高水处理在施氮量为 240 kg·hm⁻²效果最佳。水氮处理对退砂地西瓜生长效应影响显著,说明水氮在植物生长过程中是相辅相成的,这与前人的研究结果一致。马波等^[20]基于水氮耦合建立的干物质积累模型表明,低水处理下植株干物质质量随养分的增加而逐渐变小,但是中水和高水处理下植株干物质质量随养分的增加而逐渐变大。在本研究中不同灌溉水平下,植株干物质积累量均随着施氮量的增加呈现先升高后降低

的趋势,具体表现为: $N_3 > N_2 > N_4 > N_1 > N_0$ (高水处理), $N_2 > N_3 > N_4 > N_1 > N_0$ (中水和低水处理)。灌水量对植株干物质积累量的影响表现为 $W_3 > W_2 > W_1$,这与前人的研究结果不太一致,可能是退砂土地直接暴露在表面,水分蒸发过多所致。

研究指出,合理灌溉处理可以使砂田西瓜产量提高^[21-22];马忠明等^[23]研究发现,砂田西瓜中合理的氮肥施用量可使西瓜产量较传统模式提高11.6%~12.5%。本研究中,不同水氮处理组合比当地农户种植模式西瓜产量提高0.10%~29.17%,并且施氮量在 $240 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 内;但杜少平等^[9]研究结果表明砂地西瓜适宜的施氮量在 $120 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,与本研究不一致,可能因为退砂土地直接暴露从而可能出现养分的淋溶以及养分随水分的蒸发。拟合曲面表明,当施氮量高于 $240 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、灌溉水平低于 $3\ 600 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ 时产量最高,为 $68\ 000 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,试验结果则证明当灌溉水平为 $3\ 600 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ 、施氮量为 $240 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时产量最高,为 $64\ 299.67 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。可以看出当灌溉水平与施氮量超过适宜范围时会造成减产,同时灌溉与施氮需协同作用。研究发现,水肥组合会影响西瓜的品质,西瓜的品质指标随着水肥用量的增加呈现先升高后降低的趋势^[24-25],砂田西瓜品质的灌溉效应大于施氮效应^[26]。本研究中西瓜可溶性总糖含量随施氮量的增加表现为先增加后降低的趋势,但灌溉水平对其影响表现为 $W_2 > W_3 > W_1$;低水处理的西瓜可溶性总糖含量较中水处理降低13.09%~60.21%,高水处理的西瓜可溶性总糖含量较中水处理降低6.69%~9.14%。可以看出,水分对西瓜可溶性总糖含量影响较大,低水导致糖积累量降低。西瓜可溶性固形物与西瓜含糖量呈正相关关系,在 N_3 水平下,灌溉对西瓜果实的中心可溶性固形物与边缘可溶性固形物的促进作用表现为 $W_2 > W_3 > W_1$,说明在 N_3 处理下适当降低灌水量有利于提高果实可溶性固形物的含量,在施肥方面并非随水分增多越高越好,高肥可能会影响植物的吸收。这与前人^[6,26-27]研究结果一致。西瓜的营养生长与生殖生长在不同水氮处理下呈现正相关关系,在本研究中西瓜植株生育前期只进行营养生长,过多的水肥对其生长的促进作用不明显;在植株营养生长与生殖生长并存的时期,生长量与灌溉量呈正相关关系,但是其均随着施氮量的增加呈现先升高后降低的趋势;西瓜的产量也呈现相同的趋势,但是西瓜的品质指标却随着水氮的施用均呈现出先升高后降低的趋势。

有研究指出,多年连续压砂会导致土壤有机

质、有机碳含量和土壤酶活性下降^[28]。本研究中,退砂并进行水氮组合处理后土壤有机质和有机碳的含量明显上升,其中 T_4 处理升高最多,分别升高38.88%和38.91%,且 T_4 处理的4种酶活性均显著增高。李洪义等^[29]研究指出,正常的灌溉水平较过量的灌溉水平土壤有机质含量提高较多,且适量化肥氮素的施用有利于提高土壤有机质含量。在本研究中由于刚刚退砂,土壤保墒能力较差,加上当地蒸发量过高,因此高水处理下的有机质含量相对中水与低水处理较高;且施用化肥对土壤有机质含量的影响表现为先升高后降低的趋势,可看出适量施用化肥有利于提高土壤有机质含量。且砂石推掉之后土地直接暴露,有利于空气的流动以及一些枯枝败叶、动物粪便、杂草、碎石块等随着旋耕机直接旋入土层当中,再加上适当的水分与肥料,可能会加强土壤微生物活动,有利于有机质的生成,相较于压砂地不进行直接旋耕更有利于提高土壤有机质与土壤酶活性。Liu等^[30]研究发现,过量施氮会影响植株对养分的吸收利用,影响植株干物质的积累。在本研究中,不同的水氮处理组合对植株氮素积累量影响显著,适当提高施氮量有利于干物质积累,在3个灌溉水平下平均氮素积累量的趋势均随着氮肥的增加先升高后降低。高水处理在施氮量 $240 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时氮素积累量最大,中水和低水处理在施氮量 $160 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时氮素积累量最大;超过植株的最大氮肥需求量会影响植株养分的吸收,此结果与前人研究一致^[31]。灌溉水平的提高可以提高土壤中养分的溶解程度,促进植株根系对养分的吸收。灌溉和施氮水平调控显著影响西瓜氮素积累转运和利用,是退砂地西瓜优质高产的重要影响因素。不同的水氮组合不仅影响植株生长,同时也会影响 WUE ,在本研究中 WUE 随着灌溉水平的增加而逐渐降低,在相同灌溉水平下 WUE 随着施氮量的增加呈现先升高后降低的趋势;氮素的吸收量以及氮肥偏生产力都随着灌溉水平的增加而同步提高,但同一灌水处理下各处理均表现出随氮肥用量的增大而先上升后下降的变化规律。说明在某一水氮水平下,施入适量的氮素能够有效地提高作物的 WUE 和氮肥偏生产力;这与洪婷婷^[32]和Xia等^[33]的研究结果相同。后续研究应进一步阐明在高量灌溉水平与施氮量之间的适应区间,避免导致水分和氮素的利用效率同时下降。

由于压砂导致土壤保墒能力降低,退砂后同样面临此问题,目前来看土壤理化性质差、团粒结构较少、土壤保墒能力降低是限制植株水氮利用协同

高效的原因。本试验主要是针对压砂地导致生态破坏而开展的研究,旨在实现退砂地接续产业的健康可持续发展。探讨不同水平的灌溉和施氮组合,是为了找寻较适宜目前刚起步的退砂地水氮组合模式,并在后续的研究中更加致力于土壤健康恢复以及更多有利于生态平衡的栽培措施的探索,满足保证当地农户收入和维持生态平衡的双重需求。

4 结 论

水氮组合是决定西瓜产量的关键因素,水、氮的施入可直接显著调控西瓜品质以及产量。适当提高灌溉量可以促进水氮耦合,合适的水氮组合可以提高氮肥偏生产力,但是灌溉量过高会影响水分利用效率。本研究发现,宁夏香山地区较适水氮组合为灌溉水平 $3\ 600\ \text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ + 施氮量 $240\ \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,此条件下西瓜生长、产量和水氮利用效率最佳。

参 考 文 献:

- [1] 朱彪,饶丽仙,陈佳.中卫市硒砂瓜产业发展现状及对策[J]. 现代农业科技, 2020, (20): 236-237, 240.
ZHU B, RAO L X, CHEN J. Development status and countermeasures of selenium-sand melon industry in Zhongwei City[J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2020, (20): 236-237, 240.
- [2] 刘云飞,沈健,苏壮壮,等.不同施肥组合对硒砂瓜产量和品质的影响[J]. 中国瓜菜, 2022, 35(11): 43-49.
LIU Y F, SHEN J, SU Z Z, et al. Impact of fertilization combinations on the yield and quality of seleni-um-rich pressed watermelon[J]. China Cucurbits and Vegetables, 2022, 35(11): 43-49.
- [3] 贾振江,刘学智,徐天渊,等.砂土混合覆盖下的土壤水分蒸发特性及其因子分析[J]. 水土保持学报, 2023, 37(2): 227-236.
JIA Z J, LIU X Z, XU T Y, et al. Analysis of soil water evaporation characteristics and its influencing factors under mixed sand cover[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2023, 37(2): 227-236.
- [4] 王迎霞,董艳梅.宁夏科技“赛马场”赛出真正“千里驹”[N]. 科技日报, 2023-09-07(3).
WANG Y X, DONG Y M. Ningxia science and technology “racetrack” race real “Qianli horse”[N]. Science and Technology Daily, 2023-09-07(3).
- [5] 郭丽,史建硕,王丽英,等.滴灌水肥一体化条件下施氮量对夏玉米氮素吸收利用及土壤硝态氮含量的影响[J]. 中国生态农业学报, 2018, 26(5): 668-676.
GUO L, SHI J S, WANG L Y, et al. Effects of nitrogen application rate on nitrogen absorption and utilization in summer maize and soil $\text{NO}_3\text{-N}$ content under drip fertigation[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2018, 26(5): 668-676.
- [6] 李涛,周旭,刘春梅,等.水氮耦合对芸豆生理及产量的影响[J]. 水利科学与寒区工程, 2020, 3(5): 28-34.
LI T, ZHOU X, LIU C M, et al. Effects of water and nitrogen coupling

- on physiology and yield of kidney bean[J]. Water Resources Science and Cold Area Engineering, 2020, 3(5): 28-34.
- [7] 王利琴,杨建春.水肥耦合调控对胡麻苗期光合特性的影响[J]. 农学学报, 2020, 10(8): 19-22.
WANG L Q, YANG J C. Effect of water and fertilizer coupling on photosynthetic characteristics of flax at seedling stage[J]. Journal of Agriculture, 2020, 10(8): 19-22.
- [8] 谢忠奎,王亚军,陈士辉,等.黄土高原西北部砂田西瓜集雨补灌效应研究[J]. 生态学报, 2003, 23(10): 2033-2039.
XIE Z K, WANG Y J, CHEN S H, et al. Effect of supplemental irrigation with harvested rainwater on watermelon (*Citrullus lanatus*) production in gravel-and-plastic mulched fields in the Loess Plateau of Northwest China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2003, 23(10): 2033-2039.
- [9] 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.
DU S P, MA Z M, XUE L. Interactive impact of water and nitrogen on yield, quality of watermelon and use of water and nitrogen in gravel-mulched field[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, 26(12): 3715-3722.
- [10] 顾淑琴.旱砂田西瓜注水补灌效应研究[J]. 节水灌溉, 2016, (7): 44-45, 51.
GU S Q. Study on the effect of waterflood recharge on watermelon in dry sand field[J]. Water Saving Irrigation, 2016, (7): 44-45, 51.
- [11] 程良,张红玲,张娜,等.宁夏引黄灌区水资源开发利用存在的问题及对策[J]. 农业科技与信息, 2023, (12): 122-126.
CHENG L, ZHANG H L, ZHANG N, et al. Problems and countermeasures of water resources development and utilization in Ningxia Yellow River diversion irrigation area[J]. Information of Agricultural Science and Technology, 2023, (12): 122-126.
- [12] 赵永刚. 泾惠渠灌区农业节水实践与探索[J]. 地下水, 2017, 39(4): 119-120.
ZHAO Y G. Practice and exploration of agricultural water-saving in Jinghuiqu irrigation district [J]. Ground water, 2017, 39(4): 119-120.
- [13] 菅浩然,刘洪波,李连豪,等.不同微喷氮肥制度对冬小麦产量及水氮利用效率的影响[J]. 灌溉排水学报, 2020, 39(9): 26-31.
JIAN H R, LIU H B, LI L H, et al. Effects of different nitrogen fertilizations with micro-spraying system on yield, water and nitrogen use efficiency of winter wheat [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2020, 39(9): 26-31.
- [14] 潘敏睿,马军,王杰,等.水肥一体化技术发展概述[J]. 中国农机化学报, 2020, 41(8): 204-210.
PAN M R, MA J, WANG J, et al. Development of water and fertilizer integration technology [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2020, 41(8): 204-210.
- [15] 高俊凤. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006: 82-85, 118-121.
GAO J F. Experimental guidance for plant physiology [M]. Beijing: Higher Education Press, 2006: 82-85, 118-121.
- [16] 杜少平,马忠明,薛亮.补灌时期对砂田西瓜产量、品质及水氮利用的影响[J]. 节水灌溉, 2020, (4): 42-45, 51.
DU S P, MA Z M, XUE L. Effects of supplemental irrigation on

- yield, quality and water and nitrogen utilization of watermelon in gravel-mulched field[J]. *Water Saving Irrigation*, 2020, (4): 42-45, 51.
- [17] 张帆, 宫国义, 王倩, 等. 西瓜品质构成分析[J]. *果树学报*, 2006, 23(2): 266-269.
- ZHANG F, GONG G Y, WANG Q, et al. Analysis on quality and structure of watermelon[J]. *Journal of Fruit Science*, 2006, 23(2): 266-269.
- [18] 王曙光, 林先贵, 尹睿, 等. 接种 AM 真菌对 PAEs 污染土壤中微生物和酶活性的影响[J]. *生态学杂志*, 2004, 23(1): 48-51.
- WANG S G, LIN X G, YIN R, et al. Effect of inoculation with AM fungi on microorganism and enzyme activity in PAEs-polluted soil[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2004, 23(1): 48-51.
- [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.
- GAO Y X, LI H J. Effects of water and nitrogen coupling on watermelon growth[J]. *Agricultural Science and Engineering in China*, 2024, 36(1): 41-45.
- [20] 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.
- MA B, TIAN J C, SHEN H, et al. Dry matter and yield as well as water-N coupling model of watermelon in gravel mulched field and its validation[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(20): 129-136.
- [21] 康建宏, 吴宏亮, 丁秀玲, 等. 压砂地西瓜适宜补水量研究[J]. *农业科学研究*, 2010, 31(2): 1-5.
- KANG J H, WU H L, DING X L, et al. Study on appropriate amount of complementary irrigation with watermelon on gravel-mulched field[J]. *Journal of Agricultural Sciences*, 2010, 31(2): 1-5.
- [22] JALIL SHESHBAHREH M, MOVAHHEDI DEHNAVI M, SALEHI A, et al. Effect of irrigation regimes and nitrogen sources on biomass production, water and nitrogen use efficiency and nutrients uptake in coneflower (*Echinacea purpurea* L.)[J]. *Agricultural Water Management*, 2019, 213: 358-367.
- [23] 马忠明, 杜少平, 薛亮. 氮肥运筹对砂田西瓜产量、品质及氮素积累与转运的影响[J]. *应用生态学报*, 2015, 26(11): 3353-3360.
- MA Z M, DU S P, XUE L. Effects of nitrogen management on yield, quality, nitrogen accumulation and its transportation of watermelon in gravel-mulched field[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, 26(11): 3353-3360.
- [24] QIANG X L, SUN Z J, LI X Q, et al. The impacts of planting patterns combined with irrigation management practices on soil water[J]. *Agroforestry Systems*, 2024, 98(4): 979-994.
- [25] 王林闯, 刘璐, 李建明, 等. 灌水量和灌水频率对设施小果型西瓜产量和品质的影响[J]. *中国农学通报*, 2024, 40(7): 33-38.
- WANG L C, LIU L, LI J M, et al. Effects of irrigation amount and frequency on yield and quality of small-fruit watermelon in greenhouse[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2024, 40(7): 33-38.
- [26] 马波, 田军仓. 压砂地西瓜水肥耦合模型及优化组合方案[J]. *干旱地区农业研究*, 2010, 28(4): 24-29, 35.
- MA B, TIAN J C. Model of coupling water with fertilizer in gravel-mulched watermelon field and its optimum combination scheme[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2010, 28(4): 24-29, 35.
- [27] 张笑. 嫁接苗与自根苗压砂瓜滴灌水肥一体化试验研究[D]. 银川: 宁夏大学, 2017.
- ZHANG X. Experimental study on integrated water and fertilizer of grafted seedling and self-rooted seedling pressing melon drip irrigation[D]. Yinchuan: Master's Thesis of Ningxia University, 2017.
- [28] 赵莹, 刘晓彤, 罗健航, 等. 压砂地土壤质量演变特征及其退砂后土壤培肥建议[J]. *宁夏农林科技*, 2023, 64(11): 40-42, 69.
- ZHAO Y, LIU X T, LUO J H, et al. Developmental characteristics of soil quality in gravel-mulched fields and the suggestion methods on soil fertility after its gravel removal[J]. *Ningxia Journal of Agriculture and Forestry Science and Technology*, 2023, 64(11): 40-42, 69.
- [29] 李洪义, 贺任彬, 谢模典, 等. 自然和人为因素对耕地土壤有机质含量影响的研究[J]. *土壤通报*, 2023, 54(5): 1050-1059.
- LI H Y, HE R B, XIE M D, et al. Influence of natural and anthropogenic factors on soil organic matter content in farmland[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2023, 54(5): 1050-1059.
- [30] LIU X G, PENG Y L, YANG Q L, et al. Determining optimal deficit irrigation and fertilization to increase mango yield, quality, and WUE in a dry hot environment based on TOPSIS[J]. *Agricultural Water Management*, 2021, 245: 106650.
- [31] 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.
- [32] 洪婷婷. CO₂加富下水氮耦合对西瓜生长的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2022.
- HONG T T. Effects of CO₂ and enriched water nitrogen coupling on watermelon growth[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2022.
- [33] XIA G M, WANG Y J, HU J Q, et al. Effects of supplemental irrigation on water and nitrogen use, yield, and kernel quality of peanut under nitrogen-supplied conditions[J]. *Agricultural Water Management*, 2021, 243: 106518.