

旱砂田补灌水氮互作对西瓜产量、品质及水氮利用的影响*

杜少平¹ 马忠明^{2**} 薛亮³

(¹甘肃省农业科学院蔬菜研究所, 兰州 730070; ²甘肃省农业科学院, 兰州 730070; ³甘肃省农业科学院土壤肥料与节水农业研究所, 兰州 730070)

摘要 为了探明旱砂田西瓜在有限补灌条件下的最佳水氮耦合形式, 采用完全随机裂区设计, 研究不同补灌量(W: 0、35、70、105 m³ · hm⁻²)和施氮量(N: 0、120、200 kg · hm⁻²)处理对旱砂田西瓜生长、产量、品质以及水氮利用率的影响. 结果表明: 西瓜叶片的光合速率、水分利用效率、产量和氮肥利用率均随着补灌量的增加而增加; 西瓜氮肥偏生产力和氮肥利用率均随施氮量的增加而降低; 施氮量在 0~120 kg · hm⁻²时, 西瓜叶片的光合速率和品质指标随施氮量的增加而增加, 超过 120 kg · hm⁻²时不再显著增加, 甚至有下降趋势; 水氮耦合对西瓜产量和水氮利用效率的互作效应显著, 其中灌水的增产效应大于氮肥, 以 W₇₀N₂₀₀ 和 W₁₀₅N₁₂₀ 处理的西瓜产量最高, 较对照分别增产 42.4% 和 40.4%, 水分利用效率随水氮组合水平的提高而增加, W₇₀ 和 W₁₀₅ 水平下的所有施氮处理均在 26 kg · m⁻³ 以上, W₁₀₅N₁₂₀ 处理的西瓜氮肥偏生产力和氮肥利用率最高. 综合考虑各因素, 在本试验条件下, 砂田西瓜生育期补灌量 105 m³ · hm⁻²、施氮量 120 kg · hm⁻² 处理为产量和效益兼优的最佳水氮组合.

关键词 水氮互作; 微量注射灌溉; 水分利用效率; 氮肥利用率; 旱砂田

文章编号 1001-9332(2015)12-3715-08 **中图分类号** S318 **文献标识码** A

Interactive impact of water and nitrogen on yield, quality of watermelon and use of water and nitrogen in gravel-mulched field. DU Shao-ping¹, MA Zhong-ming², XUE Liang³ (¹*Institute of Vegetables, Gansu Academy of Agricultural Sciences, Lanzhou 730070, China*; ²*Gansu Academy of Agricultural Sciences, Lanzhou 730070, China*; ³*Institute of Soil, Fertilizer and Water-saving Agriculture, Gansu Academy of Agricultural Sciences, Lanzhou 730070, China*). -*Chin. J. Appl. Ecol.*, 2015, 26(12): 3715–3722.

Abstract: In order to develop the optimal coupling model of water and nitrogen of watermelon under limited irrigation in gravel-mulched field, a field experiment with split-plot design was conducted to study the effects of supplementary irrigation volume, nitrogen fertilization, and their interactions on the growth, yield, quality and water and nitrogen use efficiency of watermelon with 4 supplementary irrigation levels (W: 0, 35, 70, and 105 m³ · hm⁻²) in main plots and 3 nitrogen fertilization levels (N: 0, 120, and 200 kg N · hm⁻²) in sub-plots. The results showed that the photosynthetic rate, yield, and water and nitrogen use efficiency of watermelon increased with the increasing supplementary irrigation, but the nitrogen partial productivity and nitrogen use efficiency decreased with increasing nitrogen fertilization level. The photosynthetic rate and quality indicators increased with increasing nitrogen fertilization level as the nitrogen rate changed from 0 to 120 kg N · hm⁻², but no further significant increase as the nitrogen rate exceeded 120 kg · hm⁻². The interactive effects between water and nitrogen was significant for yield and water and nitrogen use efficiency of watermelon, supplementary irrigation volume was a key factor for the increase yield compared with the nitrogen fertilizer, and the yield reached the highest for the W₇₀N₂₀₀ and W₁₀₅N₁₂₀ treatments, for which the yield increased by 42.4% and 40.4% compared to CK. Water use efficiency (WUE) was improved by supplementary irrigation and nitrogen rate, the WUE of all nitrogen fertilizer treatments were more than 26 kg · m⁻³ under supplemental irrigation levels 70 m³ · hm⁻² and 105

* 国家西瓜产业技术体系土壤肥料岗位项目(CARS-26-20)和农业部西北地区蔬菜科学观测实验站项目(2015-A2621-620321-G1203-066)资助.

** 通讯作者. E-mail: mazhming@163.com

2015-01-20 收稿, 2015-08-13 接受.

$\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$. The nitrogen partial productivity and nitrogen use efficiency reached the highest in the treatment of $W_{105}N_{120}$. It was considered that under the experimental condition, $105 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ of supplementary irrigation plus $120 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ of nitrogen fertilization was the optimal combination of obtaining the high yield and high efficiency.

Key words: water-nitrogen interaction; microjet irrigation; water use efficiency; nitrogen use efficiency; gravel-mulched field.

砂田是指把粗砂与砾石掺杂的天然混成材料覆盖于土地表面 10~15 cm 厚的石子田.研究表明,砂田较土田具有减少蒸发和径流、提高土壤温度、增加水分入渗、阻止水土流失和土壤次生盐渍化的作用^[1-5],属土壤覆盖和水土保持方法之一,是干旱半干旱地区人民与干旱作斗争的一个智慧结晶^[6].砂田主要集中分布在我国降雨偏少的甘肃中部,以及宁夏、青海和新疆的部分地区^[7-9].近年来,随着砂田瓜菜产业的兴起,西瓜种植面积逐年扩大^[10].

我国西北干旱半干旱砂田分布区具有显著的大陆性气候特征,夏季炎热,冬季寒冷,日照充足,雨量稀少,年降雨量在 180~400 mm,蒸发量为 1500~3000 mm^[11].砂覆盖虽能有效地减少土壤蒸发,但受作物生育期降水量不足的限制,砂田作物产量很难进一步提高,特别是在作物生长的中后期,随着叶面积的增大和气温的升高,作物的耗水量不断增加,土壤中储存的水分逐渐减少,土壤含水量远远低于作物生长的最适含水量,作物虽能形成一定的产量,但产量水平很低.砂石覆盖也加大了砂田的施肥难度.施肥困难一直是困扰砂田生产的主要障碍之一,适合砂田条件的便捷施肥技术是砂田可持续发展的主要技术内容^[10,12].

目前迅速发展的旱区集雨技术,为补灌水源的解决提供了一条行之有效的途径.已有研究表明,自然降水不足时,补充灌溉可以大幅度提高砂田生产效益和水分利用效率^[11,13-15],而以往研究主要针对旱砂田西瓜传统半膜覆盖下的滴灌技术.此技术在甘肃砂田区由于受地块分散和无集中水源的限制,推广难度较大.本试验在旱砂田西瓜全膜覆盖栽培模式下,利用农用注灌、施肥一体机进行补灌、施肥一体化技术研究,以达到全膜覆盖保墒和机械补水、施肥相结合,期望为砂田西瓜干旱胁迫和施肥难问题的解决提供一条行之有效的途径.

1 研究区域与研究方法

1.1 试验区概况

试验于 2013 年在甘肃省农业科学院皋兰试验站

进行,试验地位于皋兰县中心乡三坪村(36°13' N, 103°42' E),平均海拔 1830 m 左右,属温带半干旱气候区,降水少且变率大,季节分配不均,多年平均降水量 260 mm,多集中在 7—9 月,占全年降水的 60%以上,年平均气温 7.0 °C,≥10 °C 的活动积温为 2798 °C,无霜期 142 d.试验地为 12 年砂田,土壤质地为砂土,土壤肥力偏低,播前土壤基础养分含量(0~20 cm 土层):有机质 $5.30 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、全氮 $0.45 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、碱解氮 $26.41 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、速效磷 $1.80 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、速效钾 $95.50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、有效硼 $0.50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、有效锌 $0.80 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、pH 8.38.

1.2 试验设计

供试西瓜品种为甘肃省农业科学院蔬菜研究所培育的‘陇抗九号’.

试验采用灌水(W)、氮肥(N)两因素裂区设计:主区为灌水处理,设 0、35、70、105 $\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ 4 个水平;副区为氮肥处理,设 N 0、120、200 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 3 个水平,小区面积为 32 m^2 ,3 次重复.在西瓜伸蔓期和果实膨大期利用 SLZG-600 注射机进行补灌施肥,其中伸蔓期注水量占灌溉定额的 1/3,果实膨大期占 2/3,补灌时在距作物根系 20 cm 处的砂层下注射.试验所用氮肥为尿素(N 46%)、磷肥为普过磷酸钙(P_2O_5 12%)、钾肥为硫酸钾(K_2O 50%),各处理磷、钾肥施用量均一致,即 P_2O_5 170 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 K_2O 220 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,氮肥 30%做基肥于播前瓜行条施,30%在西瓜伸蔓期、40%在膨果期做追肥随补灌注入作物根部.砂田西瓜播种采用宽窄行“品”字形穴播,宽行 0.9 m、窄行 0.6 m,播种密度为 12000 株 $\cdot \text{hm}^{-2}$,播后进行宽窄膜相配套的全膜覆盖技术.4 月 18 日播种,7 月 23 日收获,其他管理措施按常规方法.

1.3 测定项目及方法

分别于西瓜开花期和果实膨大期,每小区选取具有代表性的植株 5 株,使用 ADC Lci 光合仪测定第 5~6 片功能叶的光合速率和蒸腾速率.

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,并统计每小区西瓜数,然后计算产量.使用手持式折光仪测定果实含糖量,比色法测

定维生素 C 含量^[16],硝酸盐含量采用紫外分光光度法(NY/T 1279—2007),蛋白质含量采用凯式定氮法^[17],有效酸度用 pH 计测定^[17],土壤基础理化性状分析及植株干物质养分含量测定采用土壤农业化学常规分析方法^[17].

采用农田水分平衡法计算作物田间实际蒸散量.由于试验小区平整、地下水位深、土层深厚及土壤质地均一,在试验区很少产生深层渗漏和地下水补给,因此适用于计算本试验作物田间耗水量(ET , mm)的农田水分平衡方程为^[18]:

$$ET = P + \Delta H$$

式中: P 为生育期内的有效降雨量(mm); ΔH 为某一时段农田土壤贮水变化量(mm);当日(或1次)降水量在3 mm左右时,其大致与作物对降水的截留量相等^[19],故本文将大于3 mm的日(或1次)降水量视为有效降雨量.

水分利用效率($WUE, \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)=西瓜产量(kg)/耗水量(m^3)

成熟期西瓜氮素积累总量($NAA, \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)=成熟期植株干质量($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) \times 成熟期植株含氮量(%) + 成熟期果实质量($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) \times 成熟期果实含氮量(%)

氮肥偏生产力($NPFP$)=施氮区产量($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)/施氮量($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)

氮肥当季利用率(NRE)=(施肥处理作物氮积累量-不施肥处理作物氮积累量)/氮肥投入量 \times 100%.

1.4 数据处理

采用SPSS 16.0 软件进行数据统计分析,用LSD法进行差异显著性检验.

2 结果与分析

2.1 水氮互作对砂田西瓜光合特征的影响

由表1可以看出,西瓜果实膨大期叶片的光合速率高于开花期.这主要是由于此期西瓜果实直径和体积急剧增长需进行大量碳水化合物的积累,在低补灌量处理中,西瓜叶片蒸腾速率表现为开花期高于果实膨大期,而中、高补灌量处理中则相反,这可能与植物对干旱的自身调理功能有关.不同水、氮处理水平下,西瓜叶片光合速率表现出随着补灌量的增加而提高、随施氮量的增加先升高后降低的变化趋势;西瓜蒸腾速率则表现出随补灌量的增加在开花期先升高后降低,在果实膨大期逐渐增加,且随着施氮量的增加而增加的变化趋势.对水氮互作下

表 1 水氮互作对砂田西瓜光合特征的影响
Table 1 Effects of interaction between water and nitrogen on photosynthetic characteristics of watermelon

处理 Treatment	开花期 Flowering stage		结果期 Fruiting stage	
	光合速率 P_n ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	蒸腾速率 T_r ($\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	光合速率 P_n ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	蒸腾速率 T_r ($\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)
W_0N_0	9.33a	4.13c	11.42f	2.68g
W_0N_{120}	10.93a	4.75ab	16.18cd	2.96fg
W_0N_{200}	10.66a	4.38bc	14.74de	3.06fg
$W_{35}N_0$	9.72a	4.51bc	13.34ef	3.30ef
$W_{35}N_{120}$	11.13a	4.52bc	16.09cd	3.97cd
$W_{35}N_{200}$	10.52a	5.10a	13.48ef	3.72cde
$W_{70}N_0$	9.93a	3.01e	16.23cd	3.62de
$W_{70}N_{120}$	12.00a	2.41f	19.08ab	4.19bc
$W_{70}N_{200}$	9.86a	3.15e	15.67cd	3.27cde
$W_{105}N_0$	10.08a	3.62d	17.21bc	3.78cd
$W_{105}N_{120}$	11.66a	3.44de	20.87a	4.56b
$W_{105}N_{200}$	10.25a	4.23c	20.91a	5.33a

同列不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$) Different small letters in the same column meant significant difference among treatments at 0.05 level. 下同 The same below.

西瓜不同生育时期的光合指标进行二因素方差分析,结果表明,除开花期光合速率外,水氮互作对西瓜叶片光合速率和蒸腾速率的互作效应显著,且以高水中肥($W_{105}N_{120}$)和高水高肥($W_{105}N_{200}$)处理的最高.

2.2 水氮互作对砂田西瓜产量及构成因素的影响

由图1可以看出,水、氮处理均对砂田西瓜单瓜质量和产量影响显著.西瓜单瓜质量和产量均随着补灌量和施氮量的增加而提高,其中 W_{35} 、 W_{70} 、 W_{105} 水平下的西瓜平均单瓜质量较 W_0 分别显著提高 7.9%、12.0% 和 13.1%,产量分别提高了 15.0%、30.0% 和 27.9%; N_{120} 和 N_{200} 水平下的西瓜平均单瓜质量较 N_0 分别显著提高 4.6% 和 8.1%,产量分别提

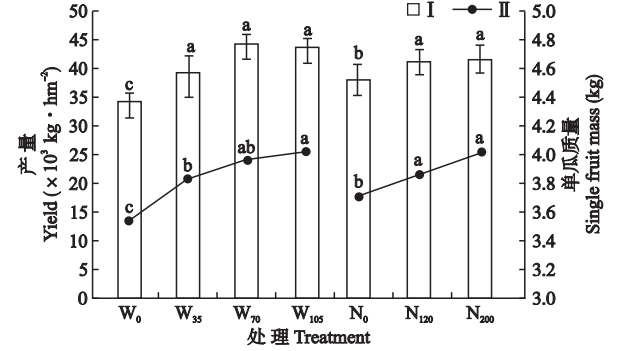


图 1 不同处理对西瓜产量 (I) 及单瓜质量 (II) 的影响
Fig.1 Effects of different treatments on yield (I) and single fruit mass (II) of watermelon.
不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$) Different small letters meant significant difference among treatments at 0.05 level. 下同 The same below.

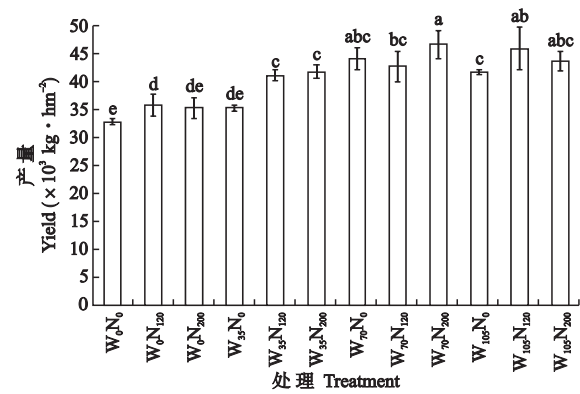


图2 水氮互作对西瓜产量的影响
Fig.2 Effects of water and nitrogen interaction on yield of watermelon.

高了8.4%和9.6%,表明在砂田旱区,补灌对西瓜的增产效果大于施氮处理。

双因素方差分析表明,水、氮处理对砂田西瓜产量的互作效应显著($F=2.74$),将西瓜产量(Y)与补灌量(W)和施氮量(N)的关系进行多元线性回归分析,建立数学关系式: $Y=95.14W+31.27N+32766.13$ ($R^2=0.715^*$).经显著性检验,此方程与实际情况拟合较好.方程的回归系数分析方程中,补灌量(W)的系数大于施氮量(N)的系数,表明补灌量是西瓜产量变化的主导因素,因此只有在适宜的补灌量下合理施用氮肥才能有效地利用水氮互作效应,提高西瓜产量.在本试验各处理中,以 $W_{70}N_{200}$ 和 $W_{105}N_{120}$ 处理的西瓜产量最高,为46039和45372 kg · hm⁻²,较对照分别显著提高了42.4%和40.4%。

2.3 水氮互作对砂田西瓜品质的影响

含糖量和有效酸度是影响西瓜风味的重要品质指标^[20].由图3可以看出,在本试验条件下,西瓜含糖量和有效酸度均随着补灌量和施氮量的增加表现出先增加后降低的趋势.其中,补灌量为35~70 m³ · hm⁻²处理的西瓜含糖量和有效酸度较 W_0 分别提高了0.2%和1.9%~2.4%, N_{120} 处理的西瓜含糖量

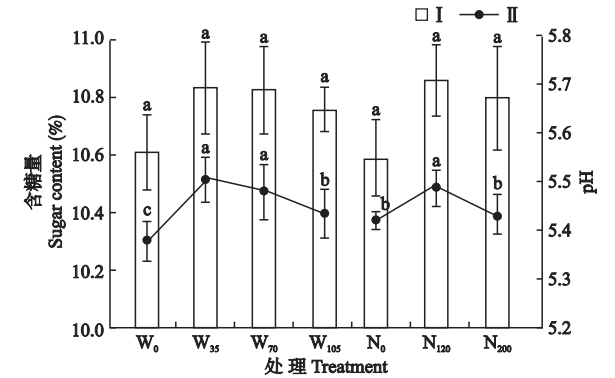


图3 不同处理对西瓜含糖量(I)和酸度(II)的影响
Fig.3 Effects of different treatments on sugar content (I) and acidity (II) of watermelon.

和有效酸度较 N_0 分别提高了0.3%和1.3%,表明适量的补灌和施氮量可提高西瓜含糖量和有效酸度,且补灌对西瓜有效酸度的正效应大于氮肥,而氮肥对含糖量的正效应大于补灌.总体来看,补灌与氮肥处理对西瓜有效酸度的影响均大于含糖量。

由表2可以看出,西瓜Vc含量表现出随补灌量的增加而提高、随施氮量的增加先升高后降低的变化趋势.其中, W_{105} 的平均Vc含量较 W_0 、 W_{35} 、 W_{70} 处理分别显著提高了11.2%、10.6%和3.9%, N_{120} 较 N_0 和 N_{200} 处理分别显著提高了13.8%和8.0%.补灌可显著提高西瓜蛋白质含量,较 W_0 提高了7.0%~9.3%, N_{120} 下的西瓜平均蛋白质含量较 N_0 和 N_{200} 分别显著提高了7.9%和6.7%.西瓜硝酸盐含量在 W_{35} 补灌水平下最高,之后随补灌量的加大而下降.这可能是由于补灌量加大使得氮素浓度降低,施氮处理的西瓜硝酸盐含量显著高于 N_0 ,其中 N_{120} 、 N_{200} 较 N_0 分别显著提高了31.7%和40.2%。

2.4 水氮互作对砂田西瓜水分利用效率的影响

由图4可以看出,随着补灌量的增加,砂田西瓜的田间耗水量呈先上升后下降趋势, W_{35} 和 W_{70} 处理的西瓜田间耗水量显著高于 W_0 和 W_{105} ,平均增幅为18.15 mm,在本试验条件下,耗水量的变化主要由土壤贮水量变化和灌水量决定,由于 W_{35} 和 W_{70} 水平下

表2 不同处理对西瓜 Vc、蛋白质及硝酸盐含量的影响
Table 2 Effects of different treatments on Vc, protein and nitrate content of watermelon

处理 Treatment	Vc (mg · kg ⁻¹)				蛋白质 Protein (%)				硝酸盐 Nitrate (mg · kg ⁻¹)			
	N ₀	N ₁₂₀	N ₂₀₀	平均 Average	N ₀	N ₁₂₀	N ₂₀₀	平均 Average	N ₀	N ₁₂₀	N ₂₀₀	平均 Average
W ₀	33.67	36.80	31.17	33.88c	0.80	0.95	0.84	0.86b	142.11	215.39	231.15	196.22b
W ₃₅	31.97	36.57	33.63	34.06c	0.95	0.96	0.92	0.94a	199.31	266.22	311.10	258.87a
W ₇₀	32.90	36.93	39.10	36.31b	0.91	0.94	0.92	0.92a	182.94	215.85	222.75	207.18b
W ₁₀₅	34.83	41.57	36.67	37.69a	0.90	0.98	0.91	0.93a	158.18	201.58	191.86	183.87b
平均 Average	33.34c	37.97a	35.14b		0.89b	0.96a	0.90b		170.64b	224.76a	239.21a	

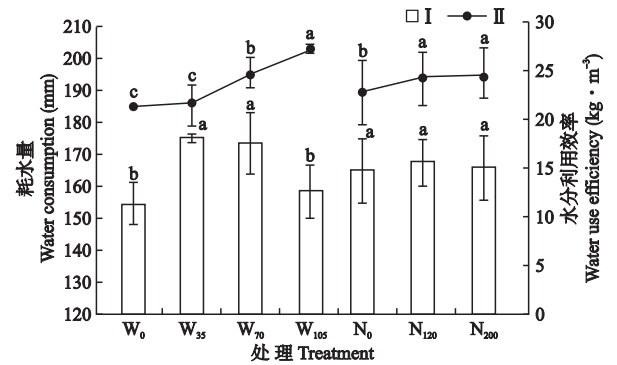


图4 不同处理对西瓜田间耗水量 (I) 及水分利用效率 (II) 的影响

Fig.4 Effects of different treatments on water consumption amount (I) and water use efficiency (II) of watermelon.

的西瓜膨果期叶片蒸腾速率和产量均显著高于 W₀ (表 1、图 1), 而补灌量较小, 导致田间耗水量较高; W₁₀₅ 处理的西瓜植株水分蒸腾量虽较大, 但水分补给量较多, 因此田间耗水量降低. 受田间耗水量和产量的影响, 西瓜产量水分利用效率随补灌量的增加而提高, 其中 W₁₀₅ 处理的最高, 较 W₀ 显著提高了 27.1%. 西瓜田间耗水量虽表现出随施氮量的增加而提高的趋势, 但差异不显著, 受产量提高的影响, N₁₂₀ 和 N₂₀₀ 处理的西瓜产量水分利用效率较 N₀ 分别显著提高了 7.4% 和 8.7%. 双因素方差分析表明 (表 3), 水氮耦合对砂田西瓜水分利用效率的互作效应显著 ($F = 2.84$), 其中以 W₇₀ 水平下的施氮处理和 W₁₀₅ 水平下的所有处理的西瓜水分利用效率最高, 达到 26.19~27.74 kg·m⁻³.

表 3 水氮互作对砂田西瓜水分利用效率的影响

Table 3 Effects of interaction between water and nitrogen on water use efficiency of watermelon

处理 Treatment	有效降水量 Effective precipitation (mm)	补灌量 Supplemental irrigation amount (m ³ ·hm ⁻²)	土壤贮水 变化 Soil water change (mm)	耗水量 Total water consumption amount (mm)	水分 利用效率 Water use efficiency (kg·m ⁻³)
W ₀	N ₀	106.04	0	41.43ef	147.47g
				53.78cd	159.82def
				50.76cde	156.80efg
W ₃₅	N ₀	106.04	35	65.69ab	175.23b
				67.28ab	176.82b
				65.76ab	175.30b
W ₇₀	N ₀	106.04	70	73.04a	186.08a
				49.94de	162.98cde
				59.55bc	172.59bc
W ₁₀₅	N ₀	106.04	105	33.80f	150.34fg
				53.50cd	170.04bcd
				39.03ef	155.57efg

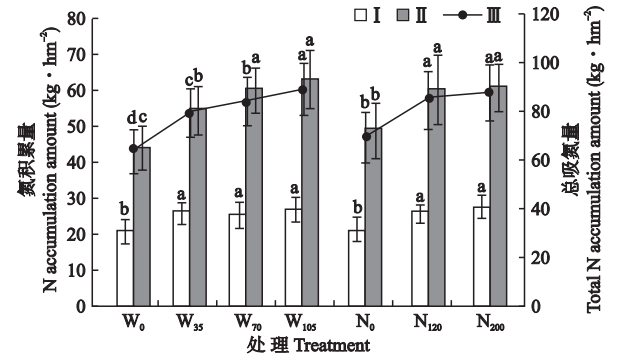


图5 不同处理对西瓜植株 (I)、果实 (II) 及总氮素积累 (III) 的影响

Fig.5 Effects of different treatments on plant (I), fruit (II) and total nitrogen accumulation amount (III) of watermelon.

2.5 水氮互作对砂田西瓜氮素积累利用的影响

水、氮处理均可对西瓜的氮素积累产生显著影响, 补灌处理的西瓜植株、果实及总氮素积累量均显著高于 W₀, 其中 W₃₅、W₇₀、W₁₀₅ 处理的西瓜植株氮积累量较 W₀ 分别显著提高了 26.5%、23.2% 和 31.1%; 西瓜果实氮积累量较 W₀ 分别显著提高了 23.1%、35.4% 和 43.1%; 总吸氮量较 W₀ 分别显著提高了 24.2%、31.5% 和 39.3% (图 5). 由此可见, 西瓜总吸氮量随补灌量的增加而提高, 适量补灌对西瓜果实氮素积累的促进作用高于植株. 施氮处理可显著提高西瓜的氮素积累量, 其中 N₁₂₀ 和 N₂₀₀ 处理的西瓜植株氮积累量较 N₀ 分别显著提高了 22.1% 和 30.0%; 西瓜果实氮积累量较 N₀ 分别显著提高了 22.6% 和 24.0%; 总吸氮量较 N₀ 分别显著提高了 22.5% 和 25.9%. 由以上分析可知, 西瓜总吸氮量随施氮量的增加而提高, 但施氮量过高容易造成茎叶

表 4 水氮互作对砂田西瓜氮素吸收和利用的影响

Table 4 Effects of water and nitrogen interaction on nitrogen absorption and utilization of watermelon

处理 Treatment	植株吸氮量 Plant N accumulation (kg·hm ⁻²)	果实吸氮量 Fruit N accumulation (kg·hm ⁻²)	总吸氮量 Total N accumulation (kg·hm ⁻²)	氮肥偏生产力 N partial factor productivity (kg·kg ⁻¹)	氮肥利用率 Nitrogen use efficiency (%)
W ₀	N ₀	16.65d	38.50g	55.15f	-
W ₃₅	N ₀	22.20c	47.38f	69.57e	392.21c
W ₇₀	N ₀	23.47c	47.91f	71.38e	289.62e
W ₁₀₅	N ₀	22.85c	47.35f	70.20e	-

徒长,不利于果实氮素积累.双因素方差分析表明(表4),西瓜氮素积累量均随着水氮互作水平的提高而增加,西瓜氮肥偏生产力和氮肥利用率则随着补灌量的增加而提高,随着施氮量的增加而降低.在本试验所有水氮组合处理中, $W_{105}N_{120}$ 处理的西瓜氮肥偏生产力和吸收利用率均最高,分别达到了 $504.14\text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 20.2% .

3 讨 论

砂田主要分布在我国降雨量偏少的西北干旱半干旱雨养农业区.影响砂田生产潜力的主要障碍因子中,其影响程度排序为:水文年影响>压砂地类型影响>施肥水平影响^[21].因此,研究自然降水生产力问题,提高自然降水利用效率,制定科学合理补灌用水定额,对提高农业收入、解决当地农业生产问题具有重要的意义.水氮对作物的功能和作用各有不同,二者之间相互作用、相互影响,土壤的水分状况会影响作物对氮素的吸收、运转和利用,而适当增施氮肥可以在一定程度上减小土壤水分不足对产量造成的负效应^[22].已有研究表明,合理的水氮配置可显著提高作物的光合性能、品质与产量水平^[23-24].在本试验对砂田西瓜关键生育时期进行有限补灌并配施氮肥条件下,不同水氮处理较对照在提高西瓜光合速率、品质和产量的基础上,均表现出随着补灌量的增加而增加,随施氮量的增加先升高后降低的变化趋势,且以 $120\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 的施氮量效果最佳.水氮耦合对砂田西瓜产量的互作效应显著,表现为补水效应大于氮肥.这与前人研究结果一致^[25],据此可以认为,旱区砂田水分不足是影响西瓜生产的主要限制因素,只有合理匹配水肥因子,才能起到以肥调水、以水促肥,充分发挥水肥因子的整体增产作用.

已有研究表明,随灌水量的增加,总耗水量逐渐增加,土壤供水量和降水量占总耗水量的比例降低,表明灌水显著降低了土壤贮水的供水能力^[26-27].本研究表明,随着补灌量的增加,砂田西瓜的田间耗水量呈先上升后下降趋势,可能是由于本试验所设计的灌水量梯度较小的缘故.在本试验条件下,砂田西瓜生育期耗水量主要由降水、灌水和土壤供水3部分组成,在降水量恒定的条件下,补灌量从 $0\text{ m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$ 增加到 $70\text{ m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$ 时,平均土壤供水也从 48.66 mm 提高到 60.84 mm ,总耗水量增加;而当补灌量达到 $105\text{ m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$ 时,平均土壤供水却降至 42.11 mm ,导致土壤总耗水量下降.由此可见,在本试验微量注射灌溉条件下,作物耗水量主要取

决于土壤贮水量的变化,少量补灌不但不会降低土壤贮水的供水能力,反而可能提高植株对土壤贮水的利用能力,只有当灌水达到一定量后,才会显著降低土壤贮水的供水能力.本试验所设计的灌水量值也显著低于前人在砂田西瓜上的研究结果.谢忠奎等^[13]研究表明,砂田西瓜只有将补灌量控制在 45 mm 左右,才能既提高产量和水分利用率,又不降低西瓜品质;田媛等^[11]研究表明,砂田西瓜在全生育期补灌为 $360\text{ m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$ 时,集雨滴灌砂田西瓜的产量比传统砂田增产 296% ,接近3倍;康建宏等^[15]在宁夏砂田上的研究得出砂田西瓜的适宜补水量为 $225\sim 300\text{ m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$.本试验补灌量范围内的西瓜产量虽不如前人研究的增产幅度大,但更切合旱区生产实际.砂田所分布的旱区年降雨量仅在 $180\sim 400\text{ mm}$,雨水资源比较短缺,且有“十年九旱”之说,当地农户多采用集雨水窖解决生活、生产用水问题,而一眼窖的水容量为 $30\sim 60\text{ m}^3$,若按照 $350\text{ m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$ 的补灌量计算,只能补灌 $0.1\sim 0.2\text{ hm}^2$ 的砂田,显然不能满足生产需求;若按本试验最大补灌量 $105\text{ m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$ 计算,能补灌 $0.3\sim 0.6\text{ hm}^2$ 的砂田,则明显增加了砂田的补灌面积.另外,前人采用的是滴灌或人工穴灌法,水分是通过砂层再渗透到西瓜的根部;而本试验应用注水枪直接将水分注射到砂层下的西瓜根部,减少了砂层对水分的截留和蒸发损失.

水氮互作不仅影响作物的产量、品质,对水氮利用效率也有影响.本研究中,西瓜水分利用效率随灌水量的增加而增加;在灌溉水平较低时,水分利用效率随施氮量的增加呈上升趋势,当灌溉量达到 $105\text{ m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$ 时,施氮量对水分利用效率的影响不再显著;氮吸收量随灌水量和施氮量的增加而同步提高,氮肥偏生产力和氮肥利用率随灌水量的增加而增加,在同一灌水量水平下,则随施氮量的增加表现出先增加后降低的趋势,表明一定范围内增施氮肥能够提高水氮利用效率,但超过该范围,水氮利用效率不再增加甚至降低.这与栗丽等^[27]和赵炳梓等^[28]的研究结果一致.

旱区砂田补灌水肥一体化技术不仅缓解了西瓜关键生育时期的干旱胁迫,且有效解决了砂田生产中存在的施肥难和肥料利用率低的瓶颈问题.综合考虑水氮互作对西瓜产量、品质及水氮利用率等因素的影响,本试验条件下,补灌量 $105\text{ m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$ 、施氮量 $120\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 为旱砂田西瓜高产、优质、高效的水氮优化组合模式.

参考文献

- [1] Modaihsh AS, Horton R, Kirkham D. Soil water evaporation suppression by sand mulches. *Soil Science*, 1985, **139**: 357–361
- [2] William J, Gale RW, McColl. Sandy fields traditional farming for water conservation in China. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1993, **48**: 474–477
- [3] Zhou H-Y (周海燕), Wang Y-J (王瑛珏), Fan H-W (樊恒文), *et al.* Wind tunnel test on wind erosion resistance of gravelly farmland in the arid zone of central Ningxia. *Acta Pedologica Sinica* (土壤学报), 2013, **50** (1): 41–48 (in Chinese)
- [4] Xu Q (许强), Qiang L (强力), Wu H-L (吴宏亮), *et al.* Study on sandy-field ecosystem effect. *Journal of Ningxia University* (Natural Science) (宁夏大学学报: 自然科学版), 2009, **30**(2): 180–182 (in Chinese)
- [5] Nachtergate J, Poesen JW, van Wesemael B. Gravel mulching in vineyards of southern Switzerland. *Soil and Tillage Research*, 1998, **46**: 51–59
- [6] Ge G (戈敢). The development and importance of pebble mulch in China. *Journal of Agricultural Sciences* (农业科学研究), 2009, **30**(4): 52–54 (in Chinese)
- [7] Pang L (逢蕾), Xiao H-L (肖洪浪), Lu J-L (路建龙), *et al.* Soil profile structure and moisture character of gravel-sand mulched field in arid and semiarid area of China. *Journal of Desert Research* (中国沙漠), 2012, **32**(3): 698–704 (in Chinese)
- [8] Wu H-L (吴宏亮), Kang J H (康建宏), Chen F (陈阜), *et al.* Effect of different rotation patterns on soil microbial population and physiochemical properties under gravel-sand mulched field conditions. *Chinese Journal of Eco-Agriculture* (中国生态农业学报), 2013, **21**(6): 674–680 (in Chinese)
- [9] Ma Z-M (马忠明), Du S-P (杜少平), Xue L (薛亮). Influences of sand-mulching years on soil temperature, water content, and growth and water use efficiency of watermelon. *Journal of Desert Research* (中国沙漠), 2013, **33**(5): 1433–1439 (in Chinese)
- [10] Chen N-L (陈年来), Liu D-S (刘东顺), Wang X-W (王晓巍), *et al.* Research and development of gravel mulch production in Gansu Province. *China Cucurbits and Vegetables* (中国瓜菜), 2008, **21**(2): 29–31 (in Chinese)
- [11] Tian Y (田媛), Li X-L (李晓玲), Li F-M (李凤民), *et al.* Effect of supplemental irrigation with harvesting rain water on yield of watermelon and soil moisture in sand-field. *Journal of Desert Research* (中国沙漠), 2003, **23**(4): 459–463 (in Chinese)
- [12] Ma Z-M (马忠明), Du S-P (杜少平), Xue L (薛亮). The countermeasures research on the present condition and problems of melon in gravel mulched-field. *China Cucurbits and Vegetables* (中国瓜菜), 2010, **23**(3): 60–63 (in Chinese)
- [13] Xie Z-K (谢忠奎), Wang Y-J (王亚军), Chen S-H (陈士辉), *et al.* Effect of supplemental irrigation with harvested rainwater on watermelon production in gravel-and plastic mulched fields in the loess plateau of Northwest China. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2003, **23**(10): 2033–2039 (in Chinese)
- [14] Wang Y-J (王亚军), Xie Z-K (谢忠奎), Zhang Z-S (张志山), *et al.* Effects of rainwater harvesting for supplementary irrigation on watermelon in gravel and plastic mulched field in Gansu. *Journal of Desert Research* (中国沙漠), 2003, **23**(3): 300–304 (in Chinese)
- [15] Kang J-H (康建宏), Wu H-L (吴宏亮), Ding X-L (丁秀玲), *et al.* Study on appropriate amount of complementary irrigation with watermelon on gravel-mulched field. *Journal of Agricultural Sciences* (农业科学研究), 2010, **31**(2): 1–5 (in Chinese)
- [16] Hao J-J (郝建军). Experimental Technique in Plant Physiology. Shenyang: Liaoning Science and Technology Press, 2001 (in Chinese)
- [17] Bao S-D (鲍士旦). Soil and Agricultural Chemistry Analysis. Beijing: China Agriculture Press, 2000 (in Chinese)
- [18] Yang W-Z (杨文治), Shao M-A (邵明安). Research on Soil Moisture in Loess Plateau. Beijing: Science Press, 2000 (in Chinese)
- [19] Shi C-X (施成熙). Terrene Hydrology. Vol. 1. Beijing: Science Press, 1959 (in Chinese)
- [20] Zhang F (张帆), Gong G-Y (宫国义), Wang Q (王倩), *et al.* Analysis of watermelon quality structure. *Journal of Fruit Science* (果树学报), 2006, **23**(2): 266–269 (in Chinese)
- [21] Zhao X-Y (赵小勇), Tian J-C (田军仓). Study on natural precipitation productivity and barrier factors for gravel-mulched land watermelon in Ningxia. *Water Saving Irrigation* (节水灌溉), 2012(5): 16–18 (in Chinese)
- [22] Ma X-H (马兴华), Wang D (王东), Yu Z-W (于振文), *et al.* Effect of irrigation regimes on water consumption characteristics and nitrogen distribution in wheat at different nitrogen applications. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2010, **30**(8): 1955–1965 (in Chinese)
- [23] Luo H-H (罗宏海), Zhang H-Z (张宏芝), Tao X-P (陶先萍), *et al.* Effects of water and nitrogen manage-

ment modes on the leaf photosynthetic characters and yield formation of cotton with under-mulch drip irrigation. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2013, **24**(2): 407–415 (in Chinese)

[24] Fu X-L (付雪丽), Wang C-Y (王晨阳), Guo T-C (郭天财), *et al.* Effects of water-nitrogen interaction on the contents and components of protein and starch in wheat grains. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2008, **19**(2): 317–322 (in Chinese)

[25] Qiang L (强力). Study on Ecological Benefit and Coupling Effect of Water and Fertilizer of Suitable Crop in Sandy-field. Master Thesis. Yinchuan: Ningxia University, 2008 (in Chinese)

[26] Yang X-Y (杨晓亚), Yu Z-W (于振文), Xu Z-Z (许振柱). Effects of irrigation regines on water consumption characteristics and nitrogen accumulation and allocation in wheat. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2009, **29**

(2): 846–853 (in Chinese)

[27] Li L (栗 丽), Hong J-P (洪坚平), Wang H-T (王宏庭), *et al.* Effects of watering and nitrogen fertilization on the growth, grain yield, and water- and nitrogen use efficiency of winter wheat. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2013, **24**(5): 1367–1373 (in Chinese)

[28] Zhao B-Z (赵炳梓), Xu F-A (徐富安), Zhou L-Z (周刘宗), *et al.* Wheat yield and water-use efficiency as influenced by different combination of irrigation water and nitrogen fertilizer. *Soils* (土壤), 2003, **35**(2): 122–125 (in Chinese)

作者简介 杜少平,男,1979年生,硕士,助理研究员.主要从事砂田西瓜高效栽培技术研究. E-mail: dushaoping2007@163.com

责任编辑 肖 红
