

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.02.014

水氮耦合对甜瓜氮素吸收与土壤硝态氮累积的影响*

岳文俊¹ 张富仓^{1,2} 李志军^{1,2} 邹海洋^{1,2} 高月^{1,2}

(1. 西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室, 陕西杨凌 712100;

2. 西北农林科技大学中国旱区节水农业研究院, 陕西杨凌 712100)

摘要: 在西北干旱半干旱地区, 设置3个水分水平和3个氮素水平, 共9个处理, 应用完全随机区组试验设计, 研究不同水氮处理组合对温室甜瓜氮素吸收分配、产量及土壤硝态氮分布和累积的影响。试验结果表明: 甜瓜成熟期地上部干物质质量以及氮素累积量以中水中氮(W_2N_2)处理为最大, 甜瓜采收后各处理硝态氮含量在0~15 cm土层内最高, 随土层的加深硝态氮含量逐渐减小。0~60 cm土层内硝态氮累积量随施氮量的增加而增大, 随灌水量的增加而减小。甜瓜产量随灌水量和施氮量的增加而提高, 但是在高水和高氮条件下略有下降。滴灌施肥的施氮量和灌水量控制在 N_2 (130 kg/hm²) 和 W_2 (1.0ET_c) 时, 有利于提高甜瓜产量, 是试验地区膜下滴灌条件下温室甜瓜生产中适宜的水氮组合。

关键词: 甜瓜 日光温室 水氮 干物质累积 氮素吸收 硝态氮

中图分类号: S158.3; S152.7⁺5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)02-0088-09

Effects of Water and Nitrogen Coupling on Nitrogen Uptake of Muskmelon and Nitrate Accumulation in Soil

Yue Wenjun¹ Zhang Fucang^{1,2} Li Zhijun^{1,2} Zou Haiyang^{1,2} Gao Yue^{1,2}

(1. Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid and Semiarid Areas, Ministry of Education, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China

2. Institute of Water-saving Agriculture in Arid Areas of China, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: A greenhouse muskmelon variety was grown under mulched drip irrigation to investigate the effects of different water and nitrogen levels on nitrogen nutrient absorption, distribution and yield of greenhouse muskmelon, soil NO_3^- -N distribution and accumulation, which can provide theoretical basis for high water-fertilizer use efficiency and the optimal regulation and control of greenhouse muskmelon. Muskmelon plants were subjected to three irrigation levels and three nitrogen levels, and totally were 9 treatments. Treatments were completely arranged according to randomization. Results showed that the above-ground dry matter accumulation and amounts of N accumulation were obtained in the treatment of W_2N_2 and the content of soil NO_3^- -N was the highest in 0~15 cm soil layer after the muskmelon harvest and the content of soil NO_3^- -N decreased with the increase of soil depth. The accumulation of 0~60 cm soil NO_3^- -N increased with the increase of nitrogen rate and decreased with the increase of irrigation amount. The yield of muskmelon increased with the increase of irrigation amount and nitrogen rate except for the treatment of W_3 and N_3 . It was concluded that the irrigation level W_2 and nitrogen level N_2 could be recommended as the best combination of water and nitrogen which can improve muskmelon yield in the production of muskmelon under drip irrigation with plastic film mulched in the experimental area.

Key words: Muskmelon Solar greenhouse Water and nitrogen Dry matter accumulation Nitrogen assimilation Nitrate nitrogen

收稿日期: 2014-09-05 修回日期: 2014-10-16

* 国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目(2011AA100504)和高等学校学科创新引智计划(111计划)资助项目(B12007)

作者简介: 岳文俊, 博士生, 主要从事节水灌溉理论与技术研究, E-mail: xjyuewenjun@sina.com

通讯作者: 张富仓, 教授, 博士生导师, 主要从事节水灌溉理论与技术研究, E-mail: zhangfc@nwsuaf.edu.cn

引言

日光温室作为北方地区重要的设施之一,在秋冬季节蔬菜生产中发挥着重要作用。但目前我国设施蔬菜生产还采用高水高肥,盲目、不合理的水肥管理措施,长期大量施氮以及不合理的灌溉,导致土壤内硝态氮淋失,不仅造成浪费,而且使地下水硝态氮含量超标,造成地下水污染^[1-2]。为此,设施农业合理的水肥管理措施对发展可持续农业具有重要意义。

研究表明,适宜的水氮组合可以提高甜瓜光合效应^[3],进而提高干物质累积量,干物质在各个器官之间的转移和分配直接影响甜瓜产量和品质^[4],灌水和施氮不仅影响甜瓜对氮素的吸收和利用^[5-8],而且影响硝态氮在土壤剖面的分布^[9-10]。另有研究表明,水氮输入量对土壤剖面硝态氮残留量以及硝态氮在不同土层中的分布有较大影响,土壤硝态氮含量随施氮量的增加而呈现线性增长趋势,当作物对氮素的吸收受到抑制时,作物产量增加不明显或有下降的趋势^[11]。

厚皮甜瓜果肉厚,果实大,营养价值高,属于高档果品,深受消费者喜爱^[12]。近年来,设施农业生产发展迅速,已成为农民致富的主要途径,但是在带来良好经济效益的同时,也产生了一些问题。尤其在生产实践中,没有合理的水氮管理措施,农民为了追求高产,往往过量灌水和施氮,导致水氮利用效率较低^[13-15],因此合理的水氮管理措施成为节水高产、防治土壤退化、生产无公害蔬菜的关键。以往研究大多集中在灌溉方式^[3]、灌水量^[16]以及氮肥^[17]等单因素方面来寻求最佳处理,没有考虑水氮协同效应,且没有提出温室甜瓜水氮耦合最优模式的量化指标,特别是适合陕西关中地区秋季设施栽培条件下甜瓜的水氮调控技术。

水氮调控不合理易引起早衰或者产量降低是目前水氮管理面临的主要问题。本文采用滴灌施肥技术,利用 Penman - Monteith 修正公式计算作物需水量,研究不同灌水量和施氮量对温室甜瓜产量、不同器官干物质和养分累积量及土壤硝态氮分布和累积特性的影响,以期为膜下滴灌条件下温室甜瓜的水氮高效利用和最优调控模式提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 试验材料

试验品种采用早熟厚皮甜瓜“一品天下 208”,选自杨凌千普农业开发有限公司。试验于 2013 年 7—10 月在杨凌节水示范园日光温室内进行,该示

范园位于东经 108°24',北纬 34°20',平均海拔高度 521 m。多年平均降水量为 600 mm,且降水主要分布在 6—9 月,年平均气温为 13℃,无霜期为 220 d 左右。温室内试验土壤为砂壤土,0~20 cm 土壤的基本性状为:土壤容重 1.48 g/cm³,田间持水率 19.34%,有机质 11.3 g/kg、碱解氮 71 mg/kg、有效钾 137.7 mg/kg、有效磷 65.7 mg/kg,土壤 pH 值为 7.54。

1.2 试验设计

试验设施氮量和灌水量 2 个因素,采用双因素完全随机区组设计,氮肥(尿素,含氮质量分数为 46%)处理分别为 N₁(70 kg/hm²)、N₂(130 kg/hm²)、N₃(180 kg/hm²) 3 个氮水平(以纯氮量计,具体施肥制度见表 1),施氮间隔为 10 d。磷肥和钾肥选用过磷酸钙(含 P₂O₅ 质量分数为 16%)和硫酸钾(K₂O 质量分数 48%),施用量分别为 60 kg/hm²(P₂O₅)和 130 kg/hm²(K₂O),起垄时一次性均匀撒施到土壤中。全生育期内采用 Penman - Monteith 修正公式和甜瓜作物系数 K_c 计算需水量,试验中作物系数 K_c 参照 FAO 56,取 0.5(伸蔓期)、1.05(开花坐果期)、1.05(果实膨大期)、0.75(成熟期)。水分处理设置 3 个水平,记作 W₁、W₂ 和 W₃,分别为作物需水量(ET_c)的 0.7、1.0、1.3 倍,甜瓜生育期内用放置在日光温室内的微型气象站(HOBO event logger, Onset Computer Corporation, USA)采集气象资料计算参考作物需水量 ET_o,灌水周期定为 5 d,试验共 9 个处理。每个处理 3 个重复,共 27 个小区,小区面积为 1.6 m×4.4 m,相邻小区之间垂直埋设 60 cm 隔水膜,以防小区之间水分横向渗透,试验地两端均设置保护行。

试验日光温室长 60 m,宽 8 m,坐北向南。采用杨凌秦川公司生产的滴灌管,滴头间距 40 cm,管壁厚 1 mm,10 m 水头下滴头流量为 3 L/h。为便于进行水肥处理,在日光温室内设置 3 个首部,每个首部都有独立的滴灌和施肥系统,通过安装在首部的增压泵和支路上的水表控制灌水器的工作压力和灌水量。滴灌施肥系统运行时采用肥料利用效率高的 1/4-1/2-1/4 模式,即前 1/4 时间灌清水,中间 1/2 时间施肥,后 1/4 时间再灌清水冲洗管道^[18],灌溉水利用系数为 0.95^[19]。甜瓜全生育期内共灌水 13 次,施氮肥 6 次。

甜瓜采用宽窄行起垄种植,宽行 120 cm,窄行 40 cm,垄长 440 cm,株距 40 cm,垄为等腰梯形,垄高 20 cm,上底垄宽 80 cm,下底垄宽 100 cm,沟宽 60 cm,两垄中心间距为 160 cm,采用膜下滴灌,在垄上铺设 2 条滴灌管,每行甜瓜布置一条滴灌管,一个滴头

对应一棵植株,用宽 150 cm 的白色地膜将整垄覆盖(图 1)。

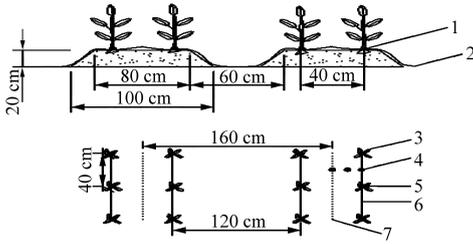


图 1 灌管布置与甜瓜种植模式

Fig. 1 Layout of drip irrigation pipe and muskmelon cropping pattern

1. 滴灌管 2. 地膜 3. 植株 4. 取样点 5. 灌水器 7. 垄中心线

秧苗于 8 月 20 日长至 3 叶 1 心后移栽到日光温室内,种植密度为 31 250 株/hm²,移栽后所有处理灌溉缓苗水 30 mm,保证整垄土壤含水率都达到田间持水率,经过一段时间缓苗后于 8 月 26 日开始按照设计进行灌水处理,一直持续到果实成熟拉秧。采用单蔓单瓜尼龙绳绕蔓的立式栽培方式,摘除主蔓 12 节位以下所有的侧蔓,每株在第 12~16 节的侧蔓上留瓜,瓜前留一叶摘心,当瓜长到鸡蛋大小时每株选最健壮瓜一个,其余全部打掉,主蔓 28 片叶时打顶。

表 1 试验处理设置以及生育期内的施氮量

Tab. 1 Treatments of experiment and nitrogen application rates during growing season kg/hm²

日期	W ₁ (0.7ET _c)			W ₂ (1.0ET _c)			W ₃ (1.3ET _c)		
	N ₁	N ₂	N ₃	N ₁	N ₂	N ₃	N ₁	N ₂	N ₃
8 月 21 日	10	20	30	10	20	30	10	20	30
8 月 31 日	10	20	30	10	20	30	10	20	30
9 月 10 日	20	30	40	20	30	40	20	30	40
9 月 20 日	20	30	40	20	30	40	20	30	40
9 月 30 日	5	15	20	5	15	20	5	15	20
10 月 10 日	5	15	20	5	15	20	5	15	20
总和	70	130	180	70	130	180	70	130	180

1.3 测定指标与方法

1.3.1 气象资料监测

温室中设小型气象站,自动气象站每 15 min 采集一次温室的气象数据,包括温室内大气压强、太阳辐射、有效辐射、当前温度、全天最高温度和最低温度、相对湿度。

1.3.2 灌水量的确定

ET_o 计算采用陈新明等^[20]的日光温室 Penman - Monteith 修正公式,即

$$ET_o = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{1713}{T + 273}(e_a - e_d)}{\Delta + 1.64\gamma} \quad (1)$$

式中 ET_o——参考作物蒸发蒸腾量,mm/d

R_n——净辐射,MJ/(m²·d)

G——土壤热通量,MJ/(m²·d),在逐日、逐旬计算中可忽略不计

γ——湿度表常数,kPa/°C

T——平均气温,°C

e_a, e_d——饱和水汽压、实际水汽压,kPa

Δ——饱和水汽压曲线斜率,kPa/°C

式中各参数均为温室内气象站一天 24 h 内的数值。

实际灌水量计算式为

$$Q = \frac{ET_{o5} K_c P A}{\eta} \quad (2)$$

式中 ET_{o5}——灌水前 5 d ET_o 的累积值,mm

P——土壤湿润比,为垄底宽与垄间距的比值,取值为 0.625

A——小区面积,取值 7.04 m²

η——灌溉水利用效率,取值为 0.95

表 2 甜瓜生育期内参考作物蒸发蒸腾量、作物系数、作物需水量和滴灌用水量

Tab. 2 Reference evapotranspiration (ET_o), crop coefficients (K_c), crop evapotranspiration (ET_c) and drip irrigation amount during growth period of muskmelon

日期	ET _o /mm	K _c	ET _c /mm	W ₁ /mm	W ₂ /mm	W ₃ /mm
8 月 20—25 日	19.40	0.50	9.70	31.58	31.58	31.58
8 月 26—30 日	15.73	0.50	7.87	5.80	8.28	10.76
8 月 31 日—9 月 4 日	12.46	0.50	6.23	4.59	6.56	8.53
9 月 5—9 日	17.53	0.50	8.77	6.46	9.23	12.00
9 月 10—14 日	23.19	1.05	24.35	17.94	25.63	33.32
9 月 15—19 日	13.10	1.05	13.76	10.14	14.48	18.83
9 月 20—24 日	7.57	1.05	7.94	5.85	8.36	10.87
9 月 25—29 日	15.34	1.05	16.11	11.87	16.95	22.04
9 月 30 日—10 月 4 日	16.33	1.05	17.14	12.63	18.04	23.46
10 月 5—9 日	17.20	1.05	18.06	13.31	19.01	24.71
10 月 10—14 日	17.77	0.75	13.33	9.82	14.03	18.24
10 月 15—19 日	11.11	0.75	8.33	6.14	8.77	11.40
总计	186.73		151.58	136.12	180.93	225.73

注:表中 W₂ 始终大于 ET_c 是因为考虑了灌溉水利用系数 0.95。

1.3.3 植株地上部生物量和全氮含量的测定

在甜瓜伸蔓期、开花期和成熟期采集植物样品,分茎、叶片、叶柄、果实取样,每个处理选 3 株,称完鲜质量后放入干燥箱在 105℃ 下杀青 0.5 h,75℃ 恒温干燥至恒质量,用电子天平称量干物质量。所有植物样品均干燥后粉碎,并过 0.5 mm 筛,在阴凉干燥处密闭保存。植物样品(茎、叶片、叶柄和果实)用浓 H₂SO₄-H₂O₂ 消煮,然后用凯氏定氮仪测定全氮含量。

1.3.4 果实产量、形态以及灌溉水生产效率的测定

成熟后,用百分之一电子天平称单果质量,各处理单株产量之和记做该处理产量,计算平均单果质量,折算为 t/hm^2 。在每个处理中选取同一授粉日期的3个代表性果实,用游标卡尺测量果实纵径和横径同时计算果形指数(纵径与横径之比)。灌溉水生产效率(IWP),是单位体积灌水量所能收获的产量,其单位为 kg/m^3 ,即每个处理的总产量与总灌水量的比值^[21]。

1.3.5 土壤硝态氮测定

土壤样品采用土钻法获取,每个小区取3个点,具体采样点如图1所示,于成熟期用土钻取土,每15 cm取土一次,测定土层深度为0~60 cm,鲜样取回后捏碎,经风干后混匀过2 mm筛。称取5 g风干土样,用50 mL的氯化钾溶液(2 mol/L)浸提振荡0.5 h后过滤,用连续流动分析仪(AutoAnalyzer-III,德国 Bran + Luebbe 公司)测定硝态氮含量。0~60 cm土层内的硝态氮累积量计算式为

$$M = \frac{CHB}{10} \quad (3)$$

式中 M ——土壤硝态氮的累积量, kg/hm^2

C ——土壤硝态氮含量, mg/kg

H ——土层深度, cm

B ——土壤干容重, g/cm^3

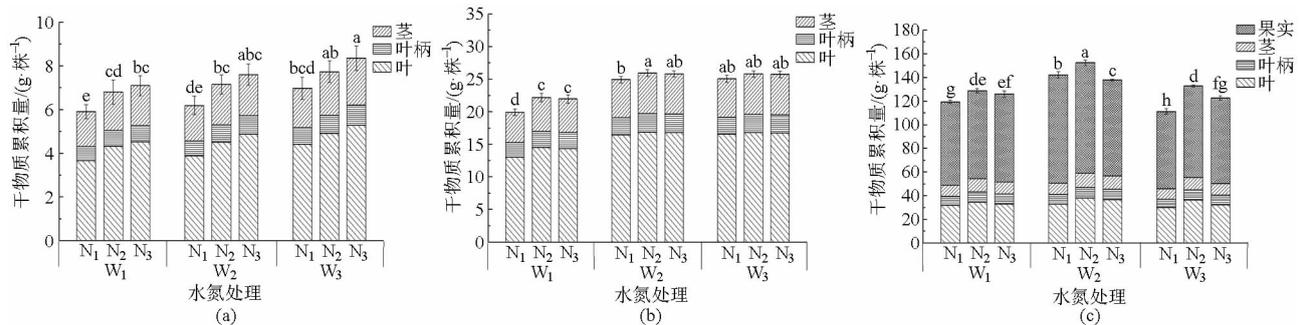


图2 不同水氮处理对甜瓜不同生育期各器官干物质累积量与分配的影响

Fig.2 Effects of different water and nitrogen levels on dry matter accumulation and distribution in plant organs of muskmelon at different stages

注:同一时期不同字母表明处理之间差异显著($P < 0.05$),相同字母,表明各处理之间差异不显著($P > 0.05$)。下同。

(a) 伸蔓期 (b) 开花期 (c) 成熟期

说明提高灌水量和施氮量均有利于地上部各器官生长。甜瓜干物质在在地上部各器官的分配比例显示,叶片是伸蔓期甜瓜干物质的累积中心,其次为茎,叶柄的累积量最小,分别占地上部干物质总量的63.26%、25.91%、10.83%(9个处理的平均值)。

开花期为甜瓜由营养生长转入生殖生长的初始阶段,但该时期仍然以营养生长为主。开花期不同水氮处理甜瓜全株干物质累积量差异明显(图2b),其累积量变化范围为19.92~25.91 g/株。相同氮

1.3.6 数据处理

统计数据采用SPSS软件进行分析,多重比较采用LSD法($P < 0.05$ 为显著性水平),所测数据用Origin作图。

2 结果与分析

2.1 甜瓜不同生育期各器官干物质累积量与分配

图2为不同水氮处理对甜瓜不同生育期各器官干物质累积量与分配的影响。伸蔓期是甜瓜的营养生长时期,由图2a可知,伸蔓期不同水氮处理甜瓜全株干物质累积量差异明显,其累积量变化范围为5.91~8.36 g/株。相同氮处理条件下,地上部各器官(叶片、叶柄、茎)干物质累积量随灌水量的增加而增大,但在中水 W_2 和高水 W_3 处理下,相对应的氮肥处理之间差异不显著。与 W_1 相比较, W_2 、 W_3 处理在 N_1 、 N_2 、 N_3 3种氮肥水平下,甜瓜伸蔓期地上部干物质总量分别增加了4.74%、5.15%、7.14%和18.06%、13.83%、17.81%。在相同灌水处理条件下,地上部各器官干物质累积量随着施氮量的增加而增大,但是 N_2 与 N_3 处理之间没有显著性差异。与 N_1 相比较, N_2 和 N_3 处理在 W_1 、 W_2 、 W_3 3种灌水水平下,甜瓜伸蔓期地上部干物质总量分别增加了15.07%、15.51%、10.95%和20.09%、22.84%、19.84%。

处理条件下,地上部各器官(叶片、叶柄、茎)干物质累积量随灌水量的增加呈现先增加后减小的趋势, W_2 处理的全株干物质总量均高于 W_1 和 W_3 ; 在相同灌水处理条件下, N_2 处理的地上部干物质质量均高于 N_1 和 N_3 。表明甜瓜进入开花期后,在高水高氮条件下并不利于地上部干物质累积。甜瓜干物质在在地上部各器官的分配比例显示,进入开花期后,叶片仍然是甜瓜干物质的累积中心,其次为茎,叶柄的累积量最小,分别占地上部干物质总量的65.40%、

23.67%、10.93% (9个处理的平均值)。

成熟期甜瓜果实膨大结束,营养器官停滞生长。由图2c可知,相同氮处理条件下,地上部各器官(叶片、叶柄、茎、果实)干物质累积量随灌水量的增加,呈现先增加后减小的趋势, W_2 处理的全株干物质总量均高于 W_1 和 W_3 ,平均高出15.57%和17.96%;在相同灌水处理条件下, N_2 处理的地上部干物质均高于 N_1 和 N_3 ,平均高出11.08%和7.20%。随着灌水量和施氮量的增加,甜瓜地上部干物质均呈现先增大后减小的趋势。这主要是因为进入开花期后灌水量增加(作物系数 K_c 由0.5调整为1.05),与此同时施氮量也在逐渐增加,而在高水(W_3)和高氮(N_3)处理下土壤水分和氮肥达到极端程度所致,说明适量灌水和施氮能够提高甜瓜地上部干物质,但当灌水量和施氮量过高时,地上部干物质增长速度会减缓。甜瓜干物质在地上部各器

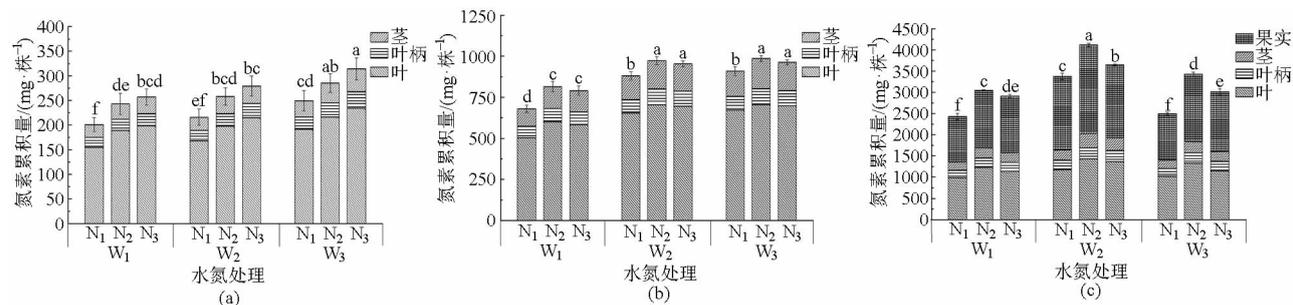


图3 不同水氮处理对甜瓜不同生育期各器官氮素累积量与分配的影响

Fig. 3 Effects of different water and nitrogen levels on amounts of N accumulation and distribution in plant organs of muskmelon at different stages
(a) 伸蔓期 (b) 开花期 (c) 成熟期

由图3b可知,开花期相同氮处理条件下,甜瓜叶片、叶柄、茎中的氮素累积量随灌水量的增加,呈现先增加后减小的趋势, W_2 处理的全株氮素累积量均高于 W_1 和 W_3 ,平均高出25%和2%;在相同灌水处理条件下, N_2 处理的全株氮素累积量均高于 N_1 和 N_3 ,平均高出12.42%和3%。表明进入开花期后,增加灌水量和施氮量可以促进甜瓜各器官对氮素的吸收,但施氮量和灌水量过大时,会对甜瓜各器官氮素吸收产生一定的抑制作用。氮素累积分配与伸蔓期一致,均表现为叶片>茎>叶柄。

成熟期相同氮处理条件下,甜瓜叶片、叶柄、茎、果实中的氮素累积量随灌水量的增加呈现先增加后减小的趋势, W_2 处理的全株氮素累积量均高于 W_1 和 W_3 ,平均高出32.83%和24.59%;在相同灌水处理条件下, N_2 处理的全株氮素累积量均高于 N_1 和 N_3 ,平均高出27.63%和10.67%。从图3c可以看出成熟期高水、高氮处理下的全株氮素累积总量明显低于中水、中氮处理,抑制作用更加明显。试验

官的分配比例显示,果实是成熟期甜瓜干物质的累积中心,其次为叶片和茎,叶柄的累积量最小,分别占地上部干物质总量的59.63%、26.08%、7.98%、6.30%(9个处理的平均值)。与伸蔓期和开花期相比,成熟期地上部各营养器官(叶片、叶柄、茎)干物质累积量占地上部干物质总量的比例明显下降。

2.2 甜瓜不同生育期各器官氮素累积量

由图3可知,不同水氮处理都影响各器官对氮素的累积量,且在不同生育期表现有差异。由图3a可知,伸蔓期相同氮处理条件下,甜瓜叶片、叶柄、茎的氮素累积量随灌水量的增加而增大,表现为 $W_3 > W_2 > W_1$;在相同灌水处理条件下,甜瓜叶片、叶柄、茎的氮素累积量随着施氮量的增加而增大,表现为 $N_3 > N_2 > N_1$,其中甜瓜叶片中氮素吸收累积量最高,其次为茎,叶柄中氮素累积量最低。

结果表明甜瓜果实中氮素吸收累积量最高,其次为叶和茎,柄中氮素累积量最低。在伸蔓期,不同水氮处理下甜瓜氮素累积量平均有76.75%分配到叶片中,10.08%分配到叶柄,13.17%分配到茎;成熟期,果实分配量平均达到46.69%,叶、叶柄、茎内氮素分配量明显降低,分别为38.37%、7.16%、7.77%。

干物质累积量反映了作物的营养生长,同时也反映出植物对氮素的吸收情况,其与生殖生长之间是相互依赖,又是相互制约的关系。如果没有健壮的营养器官,植物体内就缺乏足够的营养元素,则生殖过程就不可能获得足够的养分,生殖器官的生长就没有物质基础。

2.3 甜瓜产量、果实形态和灌溉水生产效率

植物光合作用的产物主要供应营养器官和生殖器官(果实)的生长,依据“库-源”关系,甜瓜产量作为光合作用的“库”容量,它能客观说明由于不同水氮处理供应所产生的植物同化能力的差异。由表3

可知, W_2N_2 处理下甜瓜产量最高, 除与 W_2N_1 处理没有显著性差异外, 与其他各处理差异显著。在相同灌水处理条件下, 中氮(N_2)处理的产量高于在相同水分处理下低氮(N_1)处理和高氮(N_3)处理的产

量。处理 W_2N_2 、 W_3N_1 获得产量的最大值和最小值, 分别为 25.59 t/hm^2 和 20.18 t/hm^2 。在相同氮肥条件下, 甜瓜产量均以灌水处理 W_2 最高, 其次是 W_1 处理, 而 W_3 最低。

表 3 不同水氮处理对甜瓜产量、果实形态和灌溉水生产效率的影响

Tab.3 Effects of different water and nitrogen levels on yield, fruit appearance and IWP of muskmelon

灌水处理	氮处理	产量/($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$)	纵径/mm	横径/mm	果形指数	灌溉水生产效率/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)
$W_1 (0.7ET_c)$	N_1	21.34 ^e	104.17 ^{cd}	109.89 ^{cd}	0.95 ^a	25.30 ^b
	N_2	23.28 ^c	108.40 ^{bc}	112.92 ^{abc}	0.96 ^a	27.59 ^a
	N_3	22.90 ^{cd}	106.46 ^{bc}	111.68 ^{bcd}	0.95 ^a	27.14 ^a
$W_2 (1.0ET_c)$	N_1	25.14 ^a	109.23 ^{ab}	113.61 ^{ab}	0.96 ^a	22.34 ^{cd}
	N_2	25.59 ^a	113.33 ^a	115.92 ^a	0.98 ^a	22.75 ^c
	N_3	24.18 ^b	109.23 ^{ab}	113.86 ^{ab}	0.96 ^a	21.49 ^d
$W_3 (1.3ET_c)$	N_1	20.18 ^f	100.82 ^d	108.76 ^d	0.93 ^a	14.35 ^f
	N_2	22.84 ^{cd}	107.25 ^{bc}	113.05 ^{abc}	0.95 ^a	16.24 ^e
	N_3	22.27 ^d	105.28 ^{bcd}	112.01 ^{bcd}	0.94 ^a	15.84 ^e

注:同一列数据后不同字母表明处理之间差异显著($P < 0.05$), 相同字母, 表明各处理之间差异不显著($P > 0.05$)。下同。

水、氮处理对甜瓜果实形态的影响都达到显著水平, 主要表现在纵径和横径这 2 项指标, 而果形指数各处理之间无显著性差异。 W_2N_2 处理的果实纵径和横径最大, 分别为 113.33 和 115.92 mm, W_3N_1 处理果实纵、横径最小, 分别为 100.82、108.76 mm, 显著低于 W_2N_2 处理。果形是甜瓜外观品质的主要指标, 它能直接影响消费者的购买欲望^[22], 通常用果形指数表示。 W_2N_2 处理的果实纵、横径最大, 同时果形指数也最高(接近 1), 果形较圆。 W_3N_1 处理的果实纵横、径最小, 果形指数也最低, 果形较扁。

由表 3 可知, 灌溉水生产效率(IWP)在 W_1N_2 处理获得最大值, 且随灌水量的增大而减小, 随施氮量的增大, 呈现先升后降的趋势, 在 N_2 处理最高。在 W_1 处理尽管灌溉水生产效率较高, 但产量较低, 由于试验地水源充足, 在生产中不可取。 W_2N_2 处理甜瓜的灌溉水生产效率较高, 说明在保证产量的前提下, 提高了灌溉水利用的经济效益, 同时还能降低温室内湿度^[22], 可有效预防作物病虫害的发生。

2.4 土壤剖面硝态氮含量分布

甜瓜收获期不同水氮处理下硝态氮在土壤剖面内的分布如图 4 所示。由图 4 可知, 在相同氮处理条件下, 硝态氮主要集中在 0~30 cm 土层内, 随土层深度的加深硝态氮含量逐渐减小, 表现出“上高下低”的趋势, 具有表聚特点, 这一结果与前人研究结果一致^[23]。随着灌水量的增加, 同一深度内不同施氮处理之间硝态氮含量差异越明显; 在相同灌水处理条件下, 0~30 cm 土层中, N_3 处理硝态氮含量显著高于 N_2 和 N_1 处理, 30~60 cm 土层中硝态氮变化幅度变小。氮肥对硝态氮在土壤中分布的影响比较明显, 各个土层硝态氮含量随着施氮量的增大而增加, 表明各个土层硝态氮含量与施氮量成正比关系; 施氮量越大, 硝态氮含量在土壤剖面中的变化幅度越大。

2.5 土壤剖面硝态氮累积量

图 5 显示, 随着灌水量的增加, 硝态氮在 0~60 cm 土层内的累积总量逐渐减小, 不同灌水量条件下硝态氮累积量(取不同施氮水平的平均值)由 W_1 处理的

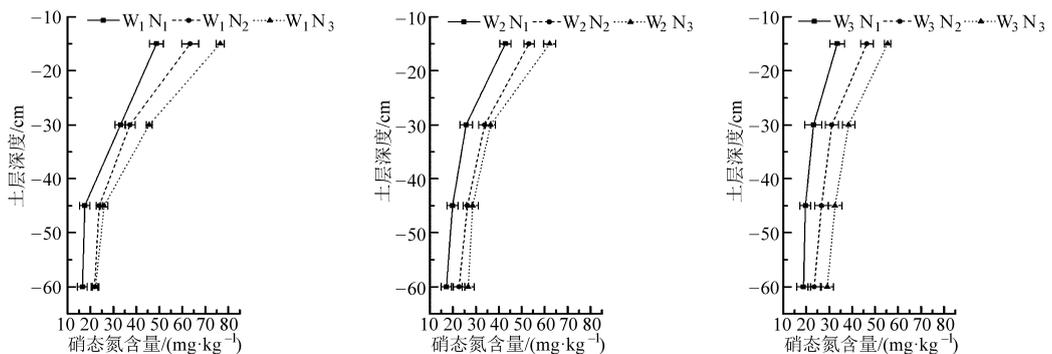


图 4 不同水氮处理对收获期 0~60 cm 土层内硝态氮含量分布的影响

Fig.4 Effects of different water and nitrogen levels on $\text{NO}_3^- \text{-N}$ distribution in 0~60 cm soil layer at harvest

329.36 kg/hm² 降低到 W₃ 处理的 279.44 kg/hm²。计算 0~60 cm 各土层硝态氮累积量占整个土层累积量的比例可知,0~15 cm 土层硝态氮累积量占整个剖面累积量的比例最大,为 38.07%。随着土层加深,不同水氮处理下各土层硝态氮所占百分数逐渐减小。灌水量影响硝态氮在不同土层深度的累积, W₁ 水平下硝态氮在 0~30 cm 土层中的累积比例占 0~60 cm 土层的 69.24%, W₂ 水平下为 63.47%, W₃ 水平下为 59.55%,随着灌水量的增加,硝态氮在 0~30 cm 土层的累积量占 0~60 cm 累积总量的比例逐渐降低,说明硝态氮累积量区域随着灌水量的增大有下移的趋势。

由图 5 还可以得知,在相同灌水处理条件下,土壤剖面硝态氮累积量随着施氮量的增加而增大;而灌水处理对 0~30 cm 土层累积量占 0~60 cm 土层累积总量的比值随施氮量的增大没有明显变化趋势,这是由于试验地土质为砂质土壤,硝态氮在土壤中的分布和累积主要受灌水处理影响所致。

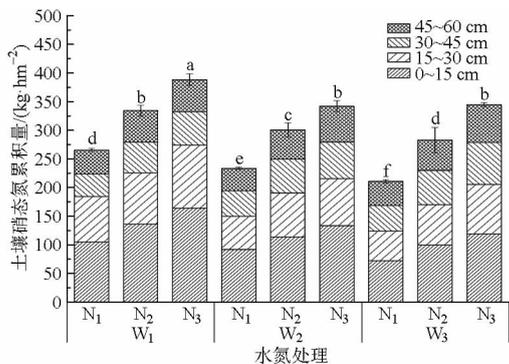


图 5 不同水氮处理对收获期 0~60 cm 土层内硝态氮累积量变化的影响

Fig. 5 Effects of different water and nitrogen levels on change of NO₃⁻-N accumulation in 0~60 cm soil layer at harvest

3 讨论

植株体在不同生长发育阶段各器官的干物质累积量与分配可以反映出植株体生长中心的变化^[24]。本试验表明,甜瓜不同生育期各器官的干物质累积量与分配表现出一定的差异性,甜瓜生育前期,叶片是甜瓜干物质的累积中心,在甜瓜发育后期,果实成为甜瓜干物质的累积中心,其干物质质量占全株干物质质量的百分比达到 59.63%,不同水氮处理对甜瓜植株各器官的干物质累积量的影响差异显著,这可能是不同水氮处理影响甜瓜生长发育的重要限制因素,试验结果表明,成熟期干物质累积量以 W₂N₂ 处理最大,灌水量和施氮量过低或者过高均不利于地上部干物质积累。甜瓜全生育期内干物质累积情况为:前期累积少,后期累积多,伸蔓期全株干物质累

积量为 5.91~8.36 g/株,到成熟期增加到 111.21~152.41 g/株。伸蔓期与成熟期干物质累积量均低于宋世威的研究^[25];甜瓜干物质累积量伸蔓期为 26~32 g/株,成熟期为 220~230 g/株,林多等^[26]和许俊香等^[27]在基质培养中研究甜瓜干物质累积量伸蔓期为 40 和 45 g/株、成熟期为 130 和 140 g/株,产生这一差异可能与甜瓜种植结构、密度、品种以及具体采样时间有关。甜瓜产量是由果实的累积量决定的,提高生物量向果实的分配可以提高产量。因此,研究滴灌施肥条件下甜瓜干物质积累、分配对于提高甜瓜生产的经济效益具有重要意义。

甜瓜在生长发育过程中,需要连续不断吸收矿物质元素,用以维持正常的生理代谢,其中对氮的需求量较多。本试验结果表明,不同水氮处理下每株甜瓜对氮素的吸收量为 2.4~4.1 g,范红伟等^[28]研究表明,甜瓜每株氮素养分的吸收量为 6~12 g, Sanchez 等^[29]研究认为温室甜瓜每株氮素养分的吸收量为 40.48 g,齐三魁等^[30]研究发现甜瓜每株氮素养分吸收量为 10 g,本试验与以上三者的研究差异较大,这可能是与甜瓜品种、栽培方式、产量和种植季节等差异有关。随甜瓜的生长进程,植株体内氮来分配也发生相应变化。伸蔓期,叶是营养中心,氮素养分绝大部分贮存在叶片内,叶片中含氮量占全株的 76.75%。到成熟期,营养中心向果实转移,果实内的含氮量占到全株的 46.70%,此时叶片中含氮量占全株的百分数降低为 38.37%。

本研究结果表明,灌水和施氮能够提高作物产量以及促进作物对氮素的吸收利用,但是在作物生长发育中水肥耦合存在一个阈值,低于阈值时,通过增加水肥投入增长明显,但当高于阈值时,增产效果不明显或有可能减产,这与前人研究相一致^[31]。提高灌水量或者增施氮肥都可以增加甜瓜产量^[32],而过度灌水并没有提高产量,这与 Fabeiro 等^[33]的研究相一致。Kirmak 等^[15]研究表明,当氮肥过量时,会对产量产生负效应。本试验中发现,施氮量从 70 kg/hm² 增加到 130 kg/hm² 时,产量提升 7.05%,而当氮肥继续增施至 180 kg/hm²,产量下降 3.28%,试验表明合适的施氮量接近 130 kg/hm²。

Ertek 等^[34]研究认为,在亏缺灌溉条件下,水分利用效率较高,高灌水量常导致灌溉水生产效率偏低。Zotarelli 等^[35]也有类似的报道,但是其观点与 Fabeiro 等^[33]不一致,后者认为较高的灌溉水生产效率是在没有水分限制条件下产生的,原因是该条件下可以获得高产。本试验结果表明在低水(W₁)处理条件下,甜瓜灌溉水生产效率最高。李毅杰等^[16]研究发现,在田间持水率 75% 的土壤含水率

条件下,甜瓜单果质量最大,但果形指数却最小。本研究发现不同水、氮处理对甜瓜果形指数没有产生显著性差异,这可能是因为果形指数主要取决于甜瓜品种,外部因素对其影响不大。

农田土壤中硝态氮是作物吸收利用的主要形态^[36],根系层内作物对硝态氮的有效吸收利用可以减少硝态氮向深层运移,但当硝态氮含量超过作物吸收量时,灌水和施氮均会导致土壤中硝态氮过量累积^[6]。高亚军等^[37]研究认为,施氮对硝态氮在土壤中的累积作用大于灌水,施氮次数越频繁,硝态氮累积量会越大。本研究发现,硝态氮在土壤中的累积量与氮肥用量密切相关,施氮量从 70 kg/hm² 增加到 180 kg/hm² 时,0~60 cm 土层内硝态氮累积量显著提高,尤其在 0~15 cm 土层内,这与张树兰等^[38]的研究结果类似,但对于硝态氮在土壤不同土层内的累积,陈子明等^[39]研究表明水分作用更为明显。本研究中,随着灌水量逐渐增大,硝态氮在 0~

30 cm 土层内的累积量占全剖面 0~60 cm 土层内累积量的比例由最高 69.24% 下降到 59.55%,硝态氮累积区域有下移的趋势。由于本试验土样仅取到 60 cm,60 cm 以下土壤硝态氮分布及累积情况有待进一步研究。

4 结束语

不同水、氮处理对温室甜瓜产量、干物质积累、氮素累积量、灌溉水生产效率等均产生显著性影响,综合考虑产量、节水节肥、水氮协同效应以及土壤硝态氮残留量等多种因素,在西北干旱半干旱地区温室甜瓜栽培模式下,滴灌施肥的施氮量和灌水量控制在 N₂(130 kg/hm²) 和 W₂(1.0ET_c) 时,甜瓜产量最高为 25.59 t/hm²,灌溉水生产效率较高为 22.75 kg/m³,而且甜瓜果形指数最高为 0.98,是试验地区膜下滴灌条件下温室甜瓜生产中适宜的水氮组合,能够为当地甜瓜优质高效生产提供依据。

参 考 文 献

- Di H J, Cameron K C. Nitrate leaching in temperate agroecosystems: sources, factors and mitigating strategies [J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2002, 64(3): 237-256.
- 吕殿青,同延安,孙本华. 氮肥施用对环境污染影响的研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 1998, 4(1): 8-15.
Lü Dianqing, Tong Yan'an, Sun Benhua. Study on effect of nitrogen fertilizer use on environment pollution [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 1998, 4(1): 8-15. (in Chinese)
- 王洪源,李光永. 滴灌模式和灌水下限对甜瓜耗水量和产量的影响[J]. *农业机械学报*, 2010, 41(5): 47-51.
Wang Hongyuan, Li Guangyong. Effect of drip irrigation model and irrigation start point on water consumption and yield of sweet melon [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2010, 41(5): 47-51. (in Chinese)
- 许如意,别之龙,黄丹枫. 基质栽培中氮素浓度分段管理对网纹甜瓜干物质分配和品质的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2007(6): 31-33.
Xu Ruyi, Bie Zhilong, Huang Danfeng. Effects of different nitrogen concentration in different growth stage on the dry matter accumulation and quality of muskmelon [J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2007(6): 31-33. (in Chinese)
- Castellanos M T, Cabello M J, Cartagena M C. Nitrogen uptake dynamics, yield and quality as influenced by nitrogen fertilization in 'Piel de sapo' melon [J]. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 2012, 10(3): 756-767.
- 薛亮,马忠明,杜少平. 水氮耦合对绿洲灌区土壤硝态氮运移及甜瓜氮素吸收的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2014, 20(1): 139-147.
Xue Liang, Ma Zhongming, Du Shaoping. Effect of water and nitrogen coupling on soil nitrate movement and nitrogen uptake of muskmelon [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2014, 20(1): 139-147. (in Chinese)
- 胡国智,冯炯鑫,张炎,等. 施氮对甜瓜干物质积累、分配及产量和品质的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2014(1): 29-32.
Hu Guozhi, Feng Jiongxin, Zhang Yan, et al. Effect of fertilizing nitrogen on muskmelon's biomass accumulation, distribution, yield and quality [J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2014(1): 29-32. (in Chinese)
- 牛在垒,刘建辉,杜军志,等. 不同氮钾供肥量对厚皮甜瓜产量和品质的影响[J]. *北方园艺*, 2008(10): 8-12.
Niu Zailei, Liu Jianhui, Du Junzhi, et al. Effects of different amounts of nitrogen and potassium on yield and quality of muskmelon [J]. *Northern Horticulture*, 2008(10): 8-12. (in Chinese)
- Rajput T B S, Neelam Patel. Water and nitrate movement in drip-irrigated onion under fertigation and irrigation treatments [J]. *Agricultural Water Management*, 2006, 79(3): 293-311.
- 于红梅,李子忠,龚元石. 不同水氮管理对蔬菜地硝态氮淋洗的影响[J]. *中国农业科学*, 2005, 38(9): 1849-1855.
Yu Hongmei, Li Zizhong, Gong Yuanshi. Leached nitrate in vegetable field under different water and nitrogen fertilizer management practices [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2005, 38(9): 1849-1855. (in Chinese)
- 李世清,李生秀. 水肥配合对玉米产量和肥料效果的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 1994, 12(1): 47-56.
Li Shiqing, Li Shengxiu. The effects of applying fertilizers and water on maize production and fertilizer use efficiency [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 1994, 12(1): 47-56. (in Chinese)
- 妙晓莉. 大棚厚皮甜瓜栽培技术 [J]. *北方园艺*, 2008(1): 80-81.

- 13 刘世全,曹红霞,张建青. 不同水氮供应对小南瓜根系生长、产量和水氮利用效率的影响[J]. 中国农业科学,2014,47(7):1362-1371.
Liu Shiquan, Cao Hongxia, Zhang Jianqing. Effects of different water and nitrogen supplies on root growth, yield and water and nitrogen use efficiency of small pumpkin[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2014, 47(7): 1362-1371. (in Chinese)
- 14 Hartz T K, Hochmuth G J. Fertility management of drip irrigated vegetables[J]. HortTechnology, 1996, 6(3): 168-172.
- 15 Kirmak H, Higgs D, Kaya C, et al. Effects of irrigation and nitrogen rates on growth, yield and quality of muskmelon in semiarid regions[J]. Journal of Plant Nutrition, 2005, 28(4): 621-638.
- 16 李毅杰,原保忠,别之龙,等. 不同土壤水分下限对大棚滴灌甜瓜产量和品质的影响[J]. 农业工程学报,2012,28(6):132-138.
Li Yijie, Yuan Baozhong, Bie Zhilong, et al. Effects of drip irrigation threshold on yield and quality of muskmelon in plastic greenhouse[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(6): 132-138. (in Chinese)
- 17 胡国智,冯国鑫,张炎,等. 不同施氮量对甜瓜养分吸收、分配、利用及产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2013,19(3):760-766.
Hu Guozhi, Feng Jiongxin, Zhang Yan, et al. Effects of nitrogen fertilization on nutrient uptake, assignment, utilization and yield of melon[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2013, 19(3): 760-766. (in Chinese)
- 18 栗岩峰,李久生,饶敏杰. 滴灌系统运行方式施肥频率对番茄产量与根系分布的影响[J]. 中国农业科学,2006,39(7):1419-1427.
Li Yanfeng, Li Jiusheng, Rao Minjie. Effects of drip fertigation strategies and frequencies on yield and root distribution of tomato[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2006, 39(7): 1419-1427. (in Chinese)
- 19 Zeng C Z, Bie Z L, Yuan B Z. Determination of optimum irrigation water amount for drip-irrigated muskmelon (*Cucumis melo* L.) in plastic greenhouse[J]. Agricultural Water Management, 2009, 96(4): 595-602.
- 20 陈新明,蔡焕杰,李红星,等. 温室大棚内作物蒸发蒸腾量计算[J]. 应用生态学报,2007,18(2):317-321.
Chen Xinming, Cai Huanjie, Li Hongxing, et al. Calculation of crop evapotranspiration in greenhouse[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2007, 18(2): 317-321. (in Chinese)
- 21 张辉,张玉龙,虞娜,等. 温室膜下滴灌灌水控制下限与番茄产量、水分利用效率的关系[J]. 中国农业科学,2006,39(2):425-432.
Zhang Hui, Zhang Yulong, Yu Na, et al. Relationship between low irrigation limit and yield, water use efficiency of tomato in under-mulching-drip irrigation in Greenhouse[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2006, 39(2): 425-432. (in Chinese)
- 22 杨小振,张显,张宁,等. 嫁接砧木对西瓜品质影响的研究进展[J]. 中国瓜菜,2013,26(2):1-5.
Yang Xiaozhen, Zhang Xian, Zhang Ning, et al. Progress of research on effect of rootstocks on quality of grafted watermelon[J]. China Cucurbits and Vegetables, 2013, 26(2): 1-5. (in Chinese)
- 23 袁静超,张玉龙,虞娜,等. 水肥耦合条件下保护地土壤硝态氮动态变化[J]. 土壤通报,2011,42(6):1335-1340.
Yuan Jingchao, Zhang Yulong, Yu Na, et al. Dynamic changes of soil NO_3^- -N under the coupling of irrigation and fertilization in protected field[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2011, 42(6): 1335-1340. (in Chinese)
- 24 袁昌梅,罗卫红,张生飞,等. 温室网纹甜瓜发育模拟模型研究[J]. 园艺学报,2005,32(2):262-267.
Yuan Changmei, Luo Weihong, Zhang Shengfei, et al. Simulation of the development of greenhouse muskmelon[J]. Acta Horticulturae Sinica, 2005, 32(2): 262-267. (in Chinese)
- 25 宋世威. 有机生产系统中甜瓜氮素营养生理研究[D]. 上海:上海交通大学,2008.
Song Shiwei. Study on nutritional physiology of nitrogen in muskmelon under organic farming system[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2008. (in Chinese)
- 26 林多,黄丹枫. 基质栽培甜瓜矿质营养吸收规律的研究[J]. 植物营养与肥料学报,2003,9(1):112-116.
Lin Duo, Huang Danfeng. Study on macronutrient absorption of soilless medium cultivated muskmelon[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2003, 9(1): 112-116. (in Chinese)
- 27 许俊香,徐秋明,倪小会,等. 包膜尿素对甜瓜产量、氮素吸收和氮肥利用率的影响[J]. 华北农学报,2009,24(3):215-218.
Xu Junxiang, Xu Qiuming, Ni Xiaohui, et al. Effect of controlled release urea on melon yield, N uptake and N use efficiency[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2009, 24(3): 215-218. (in Chinese)
- 28 范红伟,黄丹枫. 西瓜、甜瓜安全生产实用技术[M]. 上海:上海科学技术出版社,2004:176-179.
- 29 Sanchez R L, Sironi J S, Crespo J A P. Growth and nutrient absorption by muskmelon crop under greenhouse conditions[J]. Acta Horticulturae, 1998, 458: 153-159.
- 30 齐三魁,吴大康,林德佩. 中国甜瓜[M]. 北京:科学普及出版社,1991.
- 31 王殿武,刘树庆,文宏达,等. 高寒半干旱区春小麦田施肥及水肥耦合效应研究[J]. 中国农业科学,1999,32(5):62-68.
Wang Dianwu, Liu Shuqing, Wen Hongda, et al. Study of the effect of fertilizer application and water-fertilizer coupling on spring wheat field in cold highland-semiarid region[J]. Scientia Agricultura Sinica, 1999, 32(5): 62-68. (in Chinese)

- agricultural regions of China [J]. *Ambio*, 2004, 33(6): 300 - 305.
- 36 Zhang W F, Dou Z X, He P, et al. New technologies reduce greenhouse gas emissions from nitrogenous fertilizer in China [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2013, 110(21): 8375 - 8380.
- 37 张卫峰, 马文奇, 张福锁, 等. 中国、美国、摩洛哥磷矿资源优势及开发战略比较分析[J]. *自然资源学报*, 2005, 20(3): 378 - 386.
- Zhang Weifeng, Ma Wenqi, Zhang Fusuo, et al. Comparative analysis of the superiority of China's phosphate rock and development strategies with that of the United States and Morocco [J]. *Journal of Natural Resources*, 2005, 20(3): 378 - 386. (in Chinese)
- 38 王振刚. 湖北省磷肥生产环境影响的生命周期评价[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2004.
- Wang Zhen'gang. The life cycle assessment of phosphatic fertilizer production in Hubei province [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2004. (in Chinese)
- 39 张风华, 廖文华, 刘建玲. 连续过量施磷和有机肥的产量效应及环境风险评价[J]. *植物营养与肥料学报*, 2009, 15(6): 1280 - 1287.
- Zhang Fenghua, Liao Wenhua, Liu Jianling. Applications of phosphorus and organic fertilizers on yields of vegetables and their environmental impacts [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2009, 15(6): 1280 - 1287. (in Chinese)
- 40 Cao N, Chen X P, Cui Z L, et al. Change in soil available phosphorus in relation to the phosphorus budget in China [J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystem*, 2012, 94(2-3): 161 - 170.
- 41 何园球, 黄小庆. 红壤农业生态系统养分循环、平衡和调控研究[J]. *土壤学报*, 1998, 35(4): 501 - 509.
- He Yuanqiu, Huang Xiaoqing. Nutrient cycling, balance and regulation in red soil agroecosystem [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1998, 35(4): 501 - 509. (in Chinese)
- 42 赵佐平, 同延安, 刘芬, 等. 长期不同施肥处理对苹果产量、品质及土壤肥力的影响[J]. *应用生态学报*, 2013, 24(11): 1016 - 1022.
- Zhao Zuoping, Tong Yan'an, Liu Fen, et al. Effect of different long-term fertilization patterns on Fuji apple yield, quality and soil fertility on Weibei dryland, Shaanxi Province of Northwest China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2013, 24(11): 1016 - 1022. (in Chinese)
- 43 张福锁, 王激清, 张卫峰, 等. 中国主要粮食作物肥料利用率现状与提高途径[J]. *土壤学报*, 2008, 45(5): 915 - 924.
- Zhang F S, Wang J Q, Zhang W F, et al. Nutrient use efficiencies of major cereal crops in China and measures for improvement [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45(5): 915 - 924. (in Chinese)

~~~~~

(上接第 96 页)

- 32 吴海华, 盛建东, 陈波浪, 等. 不同水氮组合对全立交栽培伽师瓜产量与品质的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2013, 19(4): 885 - 892.
- Wu Haihua, Sheng Jiandong, Chen Bolang, et al. Effect of different irrigation and nitrogen levels on the yield and quality of trellis-cultivated custard apple (*Cucumis melo* var. *saccharinus* Naud) [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2013, 19(4): 885 - 892. (in Chinese)
- 33 Fabeiro C, Martin F, de Juan J A. Production of muskmelon (*Cucumis melo* L.) under controlled deficit irrigation in a semi-arid climate [J]. *Agricultural Water Management*, 2002, 54(2): 93 - 105.
- 34 Ertek A, Sensoy S. Irrigation frequency and amount affect yield components of summer squash (*Cucurbita pepo* L.) [J]. *Agricultural Water Management*, 2004, 67(1): 63 - 76.
- 35 Zotarelli L, Dukes M D, Scholberg J M, et al. Nitrogen and water use efficiency of zucchini squash for a plastic mulch bed system on a sandy soil [J]. *Scientia Horticulturae*, 2008, 116(1): 8 - 16.
- 36 李世清, 王瑞军, 李紫燕, 等. 半干旱半湿润农田生态系统不可忽视的土壤氮库-土壤剖面中累积的硝态氮[J]. *干旱地区农业研究*, 2004, 22(4): 1 - 13.
- Li Shiqing, Wang Ruijun, Li Ziyun, et al. Soil nitrogen pool should not be ignored residual  $\text{NO}_3^-$ -N accumulated in soil profile in semiarid and semi humid agro-ecological system [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2004, 22(4): 1 - 13. (in Chinese)
- 37 高亚军, 李生秀, 李世清, 等. 施肥与灌水对硝态氮在土壤中残留的影响[J]. *水土保持学报*, 2005, 19(6): 61 - 64.
- Gao Yajun, Li Shengxiu, Li Shiqing, et al. Effect of fertilization and irrigation on residual nitrate N in soil [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2005, 19(6): 61 - 64. (in Chinese)
- 38 张树兰, 同延安, 梁东丽, 等. 氮肥用量及施用时间对土体中硝态氮移动的影响[J]. *土壤学报*, 2004, 41(2): 270 - 272.
- Zhang Shulan, Tong Yan'an, Liang Dongli, et al. Nitrate-N movement in the soil profile as influenced by rate and timing of nitrogen application [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2004, 41(2): 270 - 272. (in Chinese)
- 39 陈子明, 袁锋明, 姚造华, 等. 北京潮土  $\text{NO}_3^-$ -N 在土壤中的移动特点及其淋失动态[J]. *植物营养与肥料学报*, 1995, 1(2): 71 - 79.
- Chen Ziming, Yuan Fengming, Yao Zaohua, et al. The movement and leaching loss of  $\text{NO}_3^-$ -N in profile of Chao soil in Beijing [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 1995, 1(2): 71 - 79. (in Chinese)