植物营养与肥料学报 2014,20(1):139-147
Journal of Plant Nutrition and Fertilizer doi: 10.11674/zwyf.2014.0115

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

薛 亮[1], 马忠明[2*], 杜少平[3]
(1 甘肃省农业科学院土壤肥料与节水农业研究所, 兰州 730070; 2 甘肃省农业科学院, 兰州 730070;
3 甘肃省农业科学院蔬菜研究所,兰州 730070)

摘要: 在地处沙漠绿洲的甜瓜种植区,研究不同水、氮输入量对土壤氮素平衡和运移的影响,为当地甜瓜生产的水肥管理提供科学依据。通过 2009、2010 连续两年田间裂区试验,研究了不同灌水量(1500、2100、2700、3300 m^3/hm^2,以 W_{1500}、W_{2100}、W_{2700} 和 W_{3300} 表示)和施氮量(N 0、120、240、360 kg/hm^2,以 N_0、N_{120}、N_{240} 和 N_{360} 表示)对土壤硝态氮分布、累积和甜瓜的水、氮吸收以及产量的影响。结果表明,甜瓜收获后各处理土壤硝态氮含量在 0—40 cm 土层最高, 0—200 cm 土层呈现先减少后增加再减少的变化趋势,且施氮量越大,硝态氮在 80—120 cm 土层大量累积的趋势越明显。土壤硝态氮累积量随施氮量的增加而增加,随灌水量的增加而减少,灌水量超过 2700 m^3/hm^2 时,仅有不到 53% 的硝态氮留存在 0—100 cm 土层。甜瓜产量和果实氮素吸收量随灌水量和施氮量的增加而提高,但在 $W_{3300}N_{360}$ 处理略有下降。氮素回收率随施氮量的增加持续降低,氮收获指数以处理 $W_{2700}N_{240}$ 最大,水分利用效率以 $W_{1500}N_{240}$ 处理最大。$W_{2700}N_{240}$ 处理能够兼顾甜瓜产量,平衡氮素吸收运移与土壤中硝态氮的留存空间 3 个方面,是绿洲灌区甜瓜种植的高产高效的水氮输入模式。

关键词: 甜瓜; 施氮量; 灌水量; 硝态氮累积
中图分类号: S 153.6 +1; S652.601 **文献标识码:** A **文章编号:** 1008-505X(2014)01-0139-09

Effect of water and nitrogen coupling on soil nitrate movement and nitrogen uptake of muskmelon

XUE Liang[1], MA Zhong-ming[2*], DU Shao-ping[3]
(*1 Institute of Soil, Fertilizer and Water-saving Agriculture, Gansu Academy of Agricultural Sciences, Lanzhou 730070, China;*
2 Gansu Academy of Agricultural Sciences, Lanzhou 730070, China;
3 Institute of Vegetables, Gansu Academy of Agricultural Sciences, Lanzhou 730070, China)

Abstract: Effect of different water and nitrogen input on soil nitrogen balance and movement was studied to provide scientific basis for nitrogen fertilizer application reasonably in muskmelon planting area of irrigated desert oasis. The effects of different irrigation rates (1500, 2100, 2700, 3300 m^3/ha) and nitrogen rates (N 0, 120, 240, 360 kg/ha) on soil nitrate distribution and accumulation, water and nitrogen uptaked by muskmelon and the yield of melon were studied using a split plot experiment in 2009 and 2010. The results show that after the melon harvest the content of soil nitrate is highest in 0-40 cm soil layer, and has a trend of decreasing first, then increasing, and then decreasing in 0-200 cm soil layer. Under the same irrigation rate, with the increase of N fertilizer rate, the soil NO_3^--N contents are increased in 80-120 cm soil layers. The accumulation of soil nitrate is increased with the increase of nitrogen application and decreased with the increase of irrigation rate. There is less than 53% nitrate left in 0-100 cm soil layer when the irrigation rate is exceeded 2700 m^3/ha. The yield and nitrogen uptake of

收稿日期: 2013-05-13 **接收日期:** 2013-08-21
基金项目: 现代农业产业技术体系建设专项资金(CARS-26-20)资助。
作者简介: 薛亮(1982—),男,甘肃永登人,硕士,主要从事植物营养与调控方面的研究。E-mail: xuel_3521@163.com
* 通信作者 E-mail: mazhming@163.com

melon are increased with the increases of irrigation rate and nitrogen rate except the treatment of $W_{2700}N_{240}$. The nitrogen recovery efficiency is decreased with the increase of nitrogen rate. The highest nitrogen harvest index is obtained in the treatment of $W_{3300}N_{360}$ and the highest water use efficiency is obtained in the treatment of $W_{1500}N_{240}$. The treatment of $W_{2700}N_{240}$ not only can sustain the yield of melon, but also can balance the nitrogen uptake and movement, and can get higher yield and efficiency for water and nitrogen input in melon planting area in irrigated desert soil.

Key words: muskmelon; nitrogen rate; irrigation rate; nitrate accumulation

农业生产中增施氮肥是提高作物产量和品质的重要措施,但作物并不能完全吸收当季投入的氮素,其中有7%的氮素通过淋洗或径流从土壤中损失[1-2]。调查显示,我国大田0—100 cm土层土壤硝态氮的累积量在N 0～500 kg/hm^{2}之间,蔬菜瓜果种植区累积量为N 0～1700 kg/hm^2[3-4]。通常,处于根区的硝态氮具有一定的生物有效性,但即便如此,每年进入地下水的硝态氮有近20%来自根区[5]。据报道,以硝态氮形式流失的氮素占全球氮肥施入量的19%[6],这不但造成氮肥资源的浪费,而且也给土壤、地下水环境带来危害。巨晓棠等[7-9]分析认为,过量施入氮肥和频繁高量灌水是造成氮素淋溶、土壤深层氮累积和地下水硝酸盐含量严重超标的主要原因。李世清等[10-11]在玉米上的研究发现,水、氮投入水平对土壤剖面中硝态氮残留量及不同层次的分布有很大影响,当超过正常施氮量,土壤硝态氮的含量随施氮量的增加呈线性增长,作物对氮素的吸收也受到抑制,作物产量有停止增加甚至下降的趋势。同时,土壤质地也会对氮素淋溶产生影响,质地较轻的土壤,硝态氮更易向下淋溶。习金根等[12]采用土柱模拟方法研究了滴灌条件下氮肥在土壤中的流失状况,结果显示砂壤土上氮素的淋失量明显高于粘壤土。Wang等[13]的研究结果表明,砂质土壤上硝态氮容易淋洗,尤其是在施肥后最初的几次灌水后。孙克刚[14]报道,相对于潮土和褐土,砂姜黑土累积的硝态氮量明显较大。甘肃省民勤县位于巴丹吉林沙漠和腾格里沙漠边缘,光热条件好,土壤结构疏松,十分有利于甜瓜生长,但由于缺乏必要的科技引导,生产中多采用高水高肥管理模式,水氮流失严重,生产成本居高不下。针对本地区干旱少雨的生态条件以及甜瓜生产现状,有关研究表明,适宜的水肥组合能够促进甜瓜的光合效应[15],显著提高其水分利用效率,产量和品质也得以提高[16-17],而对于甜瓜生产中氮肥的有效、持续利用效果的研究尚未见报道。本研究通过大田试验,分析水氮配合对甜瓜产量、水、氮利用效率及土壤硝态氮分布和累积特性的影响,探索当地生态条件下的适宜水、氮投入量,以期为甜瓜生产中的水氮管理和甜瓜优质高产提供科学依据和实践指导。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于2009～2010年在甘肃省民勤县进行,试验区位于甘肃河西内陆河流域东端,年降水量110 mm(2009年、2010年甜瓜生育期降水量和日平均温度见图1),年蒸发量为1265 mm,年均气温7.4℃,年日照时数2832 h,年有效积温(≥10℃)3194℃。试验地土壤为砂壤土,0—20 cm土层土壤基本养分状况见表1。

1.2 试验设计

试验采用裂区设计,参考当地的灌溉和施肥量,以灌溉量为主区,施氮量为副区,各设置4个水平。灌溉量为1500、2100、2700、3300 m^3/hm^2,表示为W_{1500}、W_{2100}、W_{2700}、W_{3300};施氮量为N 0、120、240、360 kg/hm^2,以N_0、N_{120}、N_{240}、N_{360}表示。每处理3次重复,小区面积30 m^2,随机排列。株距50 cm,种植密度20010 plant/hm^2。为防止小区间发生肥料渗漏,小区间间隔50 cm,并在相邻小区间垂直放置地膜至地表以下40 cm。试验地前茬为小麦,收获后整地并冬灌,之后一半土地为2009年的试验地,其余土地继续休闲为2010年试验备用。

供试甜瓜品种为“银帝2号”(中熟品种),于2009年5月1日播种,8月13日收获;2010年5月7日播种,8月16日收获。

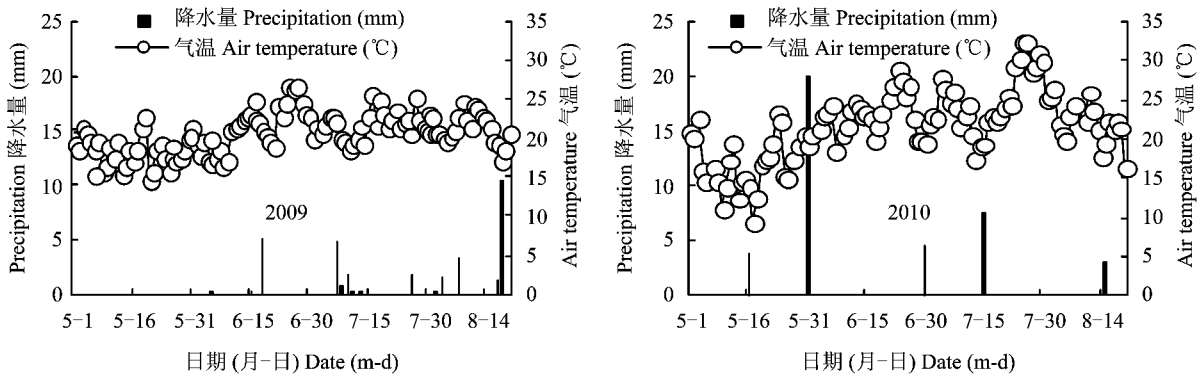

图 1　2009 和 2010 年甜瓜生育期降水量和日平均气温

Fig. 1　Rainfall and air temperature during the muskmelon growth periods in 2009 and 2010 years

表 1　试验区土壤基本养分状况

Table 1　Soil basic properties in the experimental site

年份 Year	有机质(g/kg) Organic matter	全氮(g/kg) Total nitrogen	速效磷(mg/kg) Available P	速效钾(mg/kg) Available K	pH (Soil : H_2O = 1 : 1)
2009	10.42	0.60	9.49	101.00	8.35
2010	9.48	0.55	8.23	106.99	8.30

1.3　种植模式与田间管理

采用该地区地膜覆盖、宽垄种植的模式,播种前开灌水沟呈“V”字形,同时形成平垄,沟深 30 cm,沟宽 70 cm,垄宽 130 cm,甜瓜种植在垄上距垄中心 55 cm 处,种植前用地膜覆盖灌水沟和种植带。灌溉采用沟灌方式,水表控制水量。播种前 5 ~ 6 d 沟内灌水坐实土壤,待地墒适宜时覆盖地膜。伸蔓期、开花坐果期分别灌水 1 次,果实膨大期灌水 2 次,果实定个后灌水 3 次,每次灌水定额为总灌溉定额的 1/8。氮肥用尿素(含 N 46%), 50% 基施,其余作追肥,其中苗肥占 10%,蔓肥 20%,果肥 20%。磷肥用过磷酸钙(含 P_2O_5 18%),施用量为 P_2O_5 135 kg/hm^2,钾肥用硫酸钾(含 K_2O 50%),施用量为 K_2O 75 kg/hm^2,磷、钾肥均作基肥施入。基肥条施在播种带,施肥深度 15 cm,追肥采用穴施法,灌水前在灌水沟一侧距甜瓜种植点 10 cm 处挖一深 10 cm 的小穴,施入肥料后用土掩盖。

1.4　样品采集、测定项目和方法

甜瓜收获后每小区选 3 个点,采样点与播种点、施肥点位于一条直线上,在垄上距离播种点 15 cm 处用土钻采集土壤剖面 0—200 cm 土层土壤样品,每 20 cm 为一层。土样采回后用手捏碎,鲜样用烘干法测定土壤含水量(干基),其余样品经风干,混合,过 2 mm 筛。

称取 5 g 左右样品,用 50 mL 2 mol/L 的 KCl 溶液浸提,振荡 1 h 后过滤,用连续流动分析仪测定 NO_3^--N 含量。土壤有机质含量用重铬酸钾容量法—外加热法; 全氮用半微量凯氏法; 速效磷用 0.5 mol/L $NaHCO_3$ 浸提—钼蓝比色法; 速效钾用 NH_4OAc 浸提—火焰光度法测定。土壤容重用环刀法; pH 用酸度计法测定[18]。

甜瓜收获期取样考种、测产,收获后按小区计算最终产量,同时取 7 株植株样品,105℃ 杀青 30 min 后,于 80℃ 烘干至恒重,计算地上部干物重。样品粉碎过筛后,用 H_2SO_4-H_2O_2 消煮,凯氏法测定植株和果实全氮含量。

硝态氮累积量 $I = h \times C \times B/10$

式中: I 为硝态氮累积量(kg/hm^2);h 为土层厚度(cm);C 为硝态氮含量(mg/kg);B 为该土层的平均容重(g/cm^3)。

氮收获指数 NHI(%) = (果实吸氮量/植株吸氮量) ×100

氮肥回收率 NRE(%) = (施氮区地上部分吸氮量 - 不施氮区地上部分吸氮量)/施氮量 ×100

水分利用效率 WUE[kg/(mm·hm^2)] = Y/ET

式中: Y 为产量(kg/hm^2);ET 为农田耗水量

(mm)。

农田耗水量 ET(mm) = R + I + △W

式中：R 为降水量(mm)；I 为灌水量(mm)；△W 为土壤贮水量的变化量(mm)。

试验数据用 SAS 6.12 统计软件进行处理。

2 结果与分析

2.1 水氮耦合对土壤剖面硝态氮分布的影响

甜瓜收获后不同水氮水平下硝态氮在土壤剖面中的分布状况见图 2。由此可以看出，两年间的分布类似，同一施氮量下，硝态氮含量在土壤表层(0—20 cm)最高，随着土层深度的增加硝态氮含量逐渐下降，且随着灌溉量的增加，同一土壤深度不同施氮量处理间硝态氮含量差异越明显；在 W_{1500}、W_{2100}水平下，0—40 cm 土层，N_{360}处理硝态氮含量高于 N_{240}、N_{120}、N_0，40 cm 以下土层硝态氮含量变化幅度较小；而在 W_{2700}、W_{3300}水平下，0—40 cm 土层，硝态氮含量比 W_{1500}、W_{2100}灌溉水平时低，土壤深度超过 40 cm，硝态氮含量有起伏，并在 80—120 cm 土层有大量累积的趋势。

氮肥对于硝态氮分布的影响较为明显，施用氮肥后，硝态氮在土层中的残留量明显增加，施氮量增大，硝态氮在土壤剖面各层次中的分布也呈现升高的趋势，土壤各个层次硝态氮分布的大小顺序为 $N_{360} > N_{240} > N_{120} > N_0$，灌溉量越大，这种分布越明显；施氮量越大，硝态氮在剖面内的起伏变化越大，而 N_{120}、N_0 处理在整个剖面未出现明显的淋洗峰；灌溉量低于 2100 m^3/hm^2 时，各个施氮水平下硝态氮分布差异不明显，但达到 2700 m^3/hm^2 水平后，不同施氮条件下硝态氮的分布变化幅度增大，在 60—160 cm 土层间，N_{240}和 N_{360}处理均出现一个累积峰值，但 N_{120}、N_0 处理未出现累积峰；土壤中硝态氮含量与施氮量的高低成正比，施氮量越高，硝态氮在土壤剖面中出现的峰值也越高。

2.2 水氮耦合对土壤剖面硝态氮累积的影响

图 3 显示，随着灌溉量的不断增加，硝态氮在 0—200 cm 土壤剖面内的累积总量逐渐减少，比较不同灌溉量下硝态氮累积总量(取不同施氮量的平均值)，2009 年由 W_{1500}处理时的 204.96 kg/hm^2 降低到 W_{3300} 处理时的 158.20 kg/hm^2，2010 年由 205.49 kg/hm^2(W_{1500}处理)降低到 163.80 kg/hm^2(W_{3300})处理；同一施氮条件下，硝态氮在土壤剖面(0—200 cm)中的累积量随灌溉量的增大而降低，

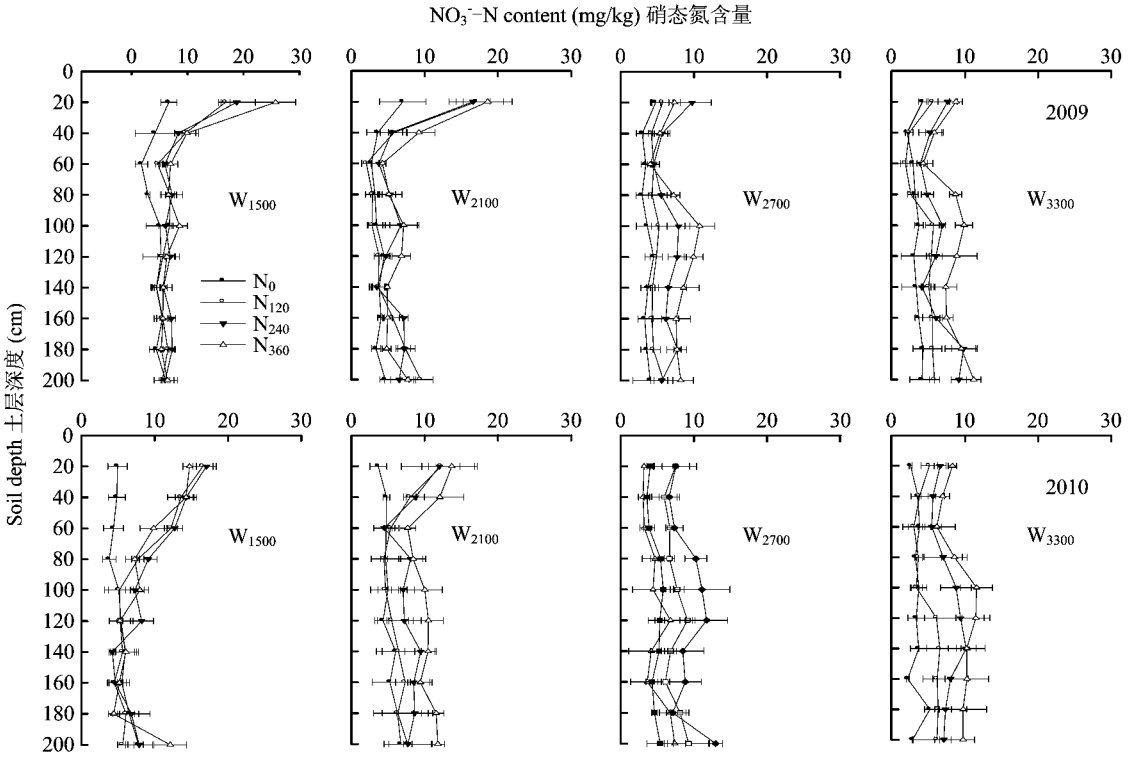

图 2 2009、2010 年不同灌溉和施氮水平下土壤剖面 NO_3^--N 含量分布

Fig. 2 NO_3^--N contents in soil layers under different irrigation rates and nitrogen fertilizer application rates

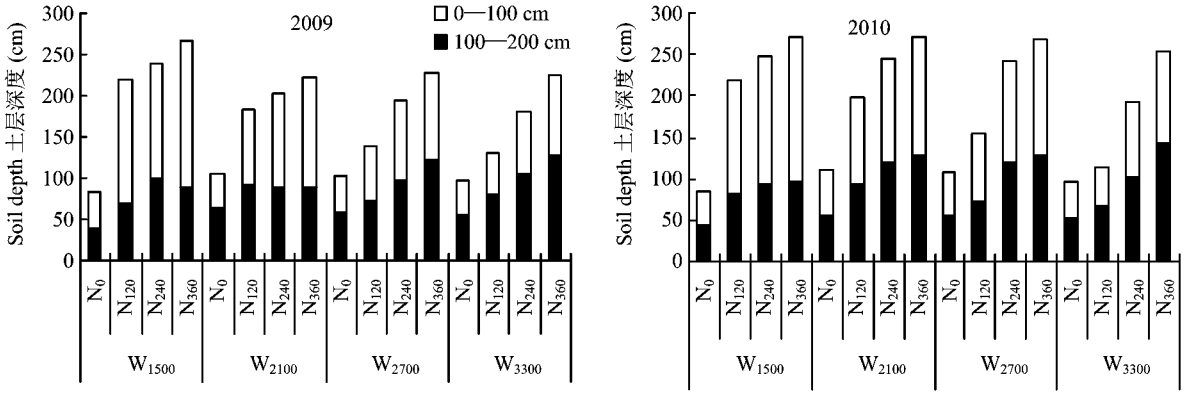

图 3　不同水氮条件对硝态氮累积量变化的影响

Fig. 3　The change of NO_3^--N accumulation under different irrigation and N rates

这种趋势在 N_{120}处理下最为明显,2009、2010 年累积量 W_{3300}比 W_{1500}处理下分别下降 40%、47%,而 N_{360}则分别下降了 17% 和 6%;灌水量的大小影响硝态氮在土壤剖面不同深度的累积,在 W_{1500}、W_{2100}水平时,硝态氮在 0—100 cm 土层内的累积的比例占 0—200 cm 土层的 50.21%～68.53%,而当灌溉量超过 2700 m^3/hm^2 时,硝态氮在 100 cm 内的累积比例占 0—200 cm 土层的 37.76%～52.16%。从两年的结果分析发现,在本试验设定的范围内,相对于 W_{1500}的灌溉水平,W_{3300}处理在 2009 年和 2010 年分别有 53% 和 47% 的硝态氮被淋洗到 100 cm 以下土层,这将直接影响作物的吸收和环境安全。

从图 3 还可以看出,2009 年和 2010 年间同一灌溉量水平下,增加施氮量显著提高了土壤硝态氮的累积量;而同一灌水量下 0—100 cm 土层硝态氮累积量占 0—200 cm 土层的比率随施氮量的增加无明显的变化趋势,说明绿洲灌区砂质土壤,硝态氮在土壤中的分布积累主要受灌水作用的影响。砂质土壤粘粒含量低,保水保肥性能差,硝态氮在砂质土壤上容易淋洗[13]。

2.3　水氮耦合对甜瓜产量和水氮利用率的影响

2009、2010 年的甜瓜产量、总吸氮量和果实吸氮量的变化趋势类似(表 2)。总体上,产量、总吸氮量和果实吸氮量均随着灌溉量的提高而增加,$W_{2700}N_{240}$处理的产量和果实吸氮量均最高,两年间产量为 53849 kg/hm^2、55544 kg/hm^2,果实吸氮量为 92.13 kg/hm^2、94.42 kg/hm^2;同时在 W_{3300}处理时,2009 年的 N_{120}、N_{240}、N_{360}处理和 2010 年的 N_{120}、N_{240}处理的产量和吸氮量又有所降低,而 2010 年 N_{360}处理下产量和果实吸氮量 $W_{3300} > W_{2700}$;同一灌水量下,除 2009 年 W_{1500}条件下各施氮处理间方差分析不显著外,其余两年间 N_{240}处理的产量、吸氮量均显著高于 N_{120}、N_{360}。

表 2 显示,2009 年甜瓜氮收获指数(NHI)在 31.42% ～ 49.04% 之间,2010 年在 33.80% ～ 48.50%之间,均以处理 $W_{1500}N_0$ 最低,处理 $W_{2700}N_{240}$ 最高;W_{1500}、W_{2100}、W_{3300}处理下氮收获指数随着施氮量的增加而升高,但在 W_{2700}处理下,氮收获指数顺序为 $N_{240} > N_{360} > N_{120} > N_0$,各处理间差异显著。两年间甜瓜氮肥回收率(NRE)在施氮量相同的条件下均以处理 $W_{1500}N_{120}$最低,同一灌水量下随着施氮量的增大 NRE 显著减小。在 N_{120}、N_{240}处理下,随着灌水量的增大,NRE 呈现先增长后下降的趋势,两年内均是在 $W_{2700}N_{240}$处理中最大;在 N_{360}处理下,NRE 随灌水量的增大而增大。水分利用效率(WUE)的变化趋势两年间相似,总体上,除未施氮处理外,其余处理间灌水量越大,WUE 越小;同一灌水量下,N_{240}处理的水分利用效率最高。在本试验条件下,增加灌溉量有利于甜瓜产量、吸氮量、氮收获指数和氮肥回收率的提高,但降低了水分利用效率。

从表 2 还可以看出,在本试验条件下,灌水和施氮对 2009 年、2010 年的甜瓜产量、总吸氮量、果实吸氮量、氮收获指数和氮肥回收率的影响均达到显著或极显著水平,但对水分利用效率的影响不显著;水分和氮肥的交互作用对 2010 年产量以及两年间总吸氮量、果实吸氮量、氮收获指数和水分利用效率的影响均达到极显著水平,但对 2009 年的产量无显著影响,而且对两年间的氮肥回收率也无显著影响。

3 讨论与结论

3.1 水氮耦合对硝态氮分布和累积的影响

农田土壤中输入的氮素转换为硝态氮后,成为作物吸收利用的主要形态[19],作物对硝态氮的吸收利用可减少土壤硝态氮向深层的迁移,但是当硝态氮的量超过作物需要时,施氮和灌水都会造成土壤中硝态氮大量累积。高亚军等[20-21]在黑垆土和红油土上的研究认为,施氮对硝态氮累积的作用大于灌水,施氮次数越频繁,硝态氮的累积量越大。栗丽等[22]在褐土上的研究发现,0—200 cm 土层硝态氮的累积量与施氮量呈显著线性关系,而与灌水量无明显的相关性。本研究结果发现,硝态氮在土壤剖面中的分布与施氮量紧密相关,施氮量从 0 增加到 360 kg/hm^2,0—200 cm 土层的硝态氮累积量随之显著提高,尤其在 0—40 cm 土层更加明显,这与张树兰等[23]的研究结论相同,但对硝态氮在土壤不同深度的累积,陈子明等[24]的研究认为,水分作用更加突出。王晓英等[25]的研究也表明,频繁灌水导致硝态氮随水迁移并在 0—100 cm 土层累积,而水氮互作决定 100—200 cm 土层硝态氮的累积量。本研究中,随着灌溉量逐渐增大,硝态氮在 0—100 cm 土层的累积量占 0—200 cm 土层内累积总量的比例由最高的 68.53%、64.41% 下降至 37.76%、40.69%,总体上呈现累积量区域随灌溉量的加大而下移的趋势,灌溉量超过 2700 m^3/hm^2 时仅有不到 53% 的硝

表 2 不同水氮条件对甜瓜水氮利用率的影响

Table 2 Effects of irrigation and nitrogen application levels on water use efficiencies and nitrogen use efficiencies of melon

年份 Year	处理 Treatment		产量 Yield (kg/hm^2)	总吸氮量 Total N uptake (kg/hm^2)	果实吸氮量 Fruit N uptake (kg/hm^2)	NHI (%)	NRE (%)	WUE [kg/(mm·hm^2)]
2009	W_{1500}	N_0	28688 b	106.35	33.41	31.42 c	—	15.19 c
		N_{120}	41414 a	156.08	65.85	42.19 b	27.03 a	18.41 b
		N_{240}	45252 a	166.09	72.78	43.82 b	16.40 b	20.11a
		N_{360}	42558 a	160.72	78.37	48.76 a	10.12 c	18.91 b
	W_{2100}	N_0	31430 b	103.09	34.28	33.25 c	—	10.14 c
		N_{120}	44113 a	157.98	66.73	42.24 b	27.04 a	14.00 b
		N_{240}	48560 a	174.38	73.88	42.37 b	16.50 b	15.42 a
		N_{360}	42981 a	152.74	69.28	45.37 a	10.56 c	13.64 b
	W_{2700}	N_0	31135 c	99.98	35.86	35.87 d	—	8.41 c
		N_{120}	44256 b	165.34	73.28	44.32 c	31.18 a	10.92 b
		N_{240}	53849 a	187.87	92.13	49.04 a	23.44 b	13.30 a
		N_{360}	48150 b	182.29	86.90	47.67 b	14.18 c	11.89 b
	W_{3300}	N_0	33109 c	94.06	33.36	35.47 c	—	6.83 c
		N_{120}	44192 b	155.32	66.74	42.97 b	27.85 a	8.92 b
		N_{240}	51548 a	180.32	85.74	47.55 a	21.84 b	10.41 a
		N_{360}	46605 ab	186.16	84.33	45.30 a	14.95 c	9.42 b
				F 值 *F*-value				
灌水量 Irrigation rate (I)			11.64**	8.66**	23.94**	5.55**	16.65**	2.50
施氮量 Nitrogen rate (N)			176.85**	235.13**	269.01**	3.06**	210.62**	0.67
I×N			1.58	7.21**	6.64**	7.96**	1.35	6.32**

续表 2　Table 2 continuos

年份 Year	处理 Treatment		产量 Yield (kg/hm²)	总吸氮量 Total N uptake (kg/hm²)	果实吸氮量 Fruit N uptake (kg/hm²)	NHI (%)	NRE (%)	WUE [kg/(mm·hm²)]
2010	W_{1500}	N_0	30033 c	98.88	33.42	33.80 c	—	13.97 c
		N_{120}	42020 b	136.40	56.73	41.59 b	19.43 a	18.68 b
		N_{240}	47952 a	175.28	74.81	42.68 b	17.25 b	21.31 a
		N_{360}	43205 b	162.99	72.58	44.53 a	10.88 c	19.20 b
	W_{2100}	N_0	32021 c	108.38	34.29	31.64 a	—	10.57 c
		N_{120}	44946 b	144.18	62.92	43.64 a	23.86 a	14.27 b
		N_{240}	52689 a	196.75	85.88	43.65 a	21.50 b	16.72 a
		N_{360}	43554 b	158.87	72.30	45.51 a	10.56 c	13.83 b
	W_{2700}	N_0	33023 c	118.21	41.87	35.42 c	—	9.10 c
		N_{120}	49442 b	194.47	85.88	44.16 b	36.67 a	12.21 b
		N_{240}	55544 a	194.68	94.42	48.50 a	24.40 b	13.71 a
		N_{360}	50016 b	186.55	88.52	47.45 a	14.63 c	12.35 b
	W_{3300}	N_0	32036 c	121.13	43.32	35.76 c	—	8.40 c
		N_{120}	46324 b	163.54	68.10	41.64 b	28.98 a	9.36 b
		N_{240}	52051 a	197.24	92.13	46.71 a	24.50 b	10.52 a
		N_{360}	48164 b	185.12	85.73	46.31 a	14.56 c	9.73 b
					F 值 *F*-value			
灌水量 Irrigation rate (I)			8.12*	43.80**	91.42**	24.49**	20.31**	0.20
施氮量 Nitrogen rate (N)			272.37**	177.83**	238.51**	22.29**	204.61**	0.27
I×N			3.31**	8.68**	8.46**	5.59**	2.64	5.22**

注(Note): NHI—氮收获指数 Nitrogen harvest index; NRE—氮肥回收率 Nitrogen recovery efficiency; WUE—水分利用效率 Water use efficiency. 同列中同一灌溉水平下不同施氮处理数值后不同字母表示处理间差异达 5% 显著水平 Values followed by different letters in the same column are significantly different among different treatments at the 5% level between N rates in the same irrigation level.

态氮留存在 0—100 cm 土层,这可能与砂质土的渗漏特性和较弱的吸附作用有关,再加上大量的灌水,可能导致硝态氮更容易随灌水向土壤深层迁移[26]。硝态氮的分布在 0—200 cm 土层呈现先减少后增加再减少的变化趋势,在 80—120 cm 土层有大量累积的现象,但在更深的土壤层次中硝态氮含量略有降低但并未有明显的累积消减趋势,这可能是由于长期耕作累加的结果,尤其是在 2008 年冬灌时一次性灌水量超过 2000 m^3/hm^2,使很大部分硝态氮淋洗到较深的土壤中,从而使得甜瓜产量、氮素吸收量和水分利用效率(WUE)很难对高灌溉量产生积极的响应[27]。所以在砂壤土中,尽管施氮量决定了土壤中硝态氮的累积总量,但减少灌水量能够在一定程度上降低硝态氮向土壤深层的迁移量,防止地下水源遭受污染,并能有效地减少水资源浪费。

3.2　水氮耦合对甜瓜产量及氮素吸收的影响

灌溉和施氮都有增加作物产量和提高作物氮素吸收的作用,但作物产量对水肥需求有一定的阈值[28],如果施用量超过作物的需要,反而会扰乱作物的正常生育进程,导致营养生长和生殖生长比例失调,这在小麦上的试验中得到了验证[29]。本试验条件下,甜瓜产量、氮素吸收量和氮收获指数均随灌水量的增加而提高,尤其从低水平(W_{1500})到中高水平(W_{2700})的增幅更加明显,并在 $W_{2700}N_{240}$ 处理达到最高水平;增加施氮量可显著提高各灌水水平下氮肥的吸收能力,且施氮量由低氮(N_{120})到中氮

(N_{240})的作用更明显,所以通过灌水量和施氮量适度调和可显著提升氮素的吸收和转运效率。甜瓜氮素回收率(NRE)以 W_{2700}水平最高,在 N_{120}水平有最大值,2009、2010 年分别为 31.18%、36.67%。增加施氮量到 240 kg/hm^2 时,2009、2010 年甜瓜产量分别增加 21.60%、22.35%,NRE 降低 7.74 和 12.27 个百分点,此后再增加施氮量,产量并不增加,NRE 降低趋势也更明显,说明甜瓜在吸收足够的氮素后,多余的氮肥对甜瓜吸收氮素无显著促进作用,而且会导致作物氮吸收效率降低。同时,必然有部分氮素在植株吸收的范围之外,加之本地区砂壤土的易渗漏的特性,若有大量的水分存在,会进一步加剧氮素向土壤深层的运移。通过水、氮运筹,利用合理的水、氮投入量和施用方法阻控化肥养分的损失,能够同时解决氮肥不足和过量的问题,是当前减少氮素损失的重点和核心[30-31]。综合考虑本地区土壤结构疏松的特点和甜瓜生育期蒸发强度大、降雨量极低的气候因素,改变氮肥惯用的撒施方式,结合沟灌集中穴施,参考甜瓜生长期的需肥规律,前氮后移,加强氮肥在中后期的追肥力度和频率,从而稳定产量,提高水肥利用效率,减少硝态氮淋失。本试验中,灌水和施氮的耦合效应对甜瓜产量、氮素吸收量和水分利用效率均产生极显著影响,$W_{2700}N_{240}$处理能够兼顾甜瓜产量,平衡氮素吸收、运移与土壤中硝态氮的留存空间三个方面,是绿洲灌区甜瓜种植高产高效的水氮输入模式。

参考文献:

[1] 朱兆良,金继运. 保障我国粮食安全的肥料问题[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(2): 259-273.
Zhu Z L, Jin J Y. Fertilizer use and food security in China[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2013, 19(2): 259-273.

[2] 朱兆良,文启孝. 中国土壤氮素[M]. 南京: 江苏科技出版社, 1992. 213-249.
Zhu Z L, Wen Q X. Nitrogen in soils of China[M]. Nanjing: Jiangsu Science and Technology Press, 1992. 213-249.

[3] 王智超. 农田土壤硝态氮累积及干湿交替过程的影响[D]. 北京: 中国农业大学硕士学位论文, 2006.
Wang Z C. Effects of nitrate accumulation and drying-wetting alternation on farm soil [D]. Beijing: Ms thesis of China Agricultural University, 2006.

[4] 张维理,田哲旭,张宁,李晓齐. 我国北方农用氮肥造成地下水硝酸盐污染的调查[J]. 植物营养与肥料学报, 1995, 1(2): 80-87.
Zhang W L, Tian Z X, Zhang N, Li X Q. Investigation of nitrate pollution in ground water due to nitrogen fertilization in agriculture in north China[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 1995, 1(2): 80-87.

[5] Yadav S N. Formulation and estimation of nitrate-nitrogen leaching from corn cultivation[J]. J. Environ. Qual., 1997, 26(3): 808-814.

[6] Lin B L, Sakoda A, Shibasaki R, Suzuki M. A modeling approach to global nitrate leaching caused by anthropogenic fertilization[J]. Water Res., 2001, 35(8): 1961-1968.

[7] 巨晓棠,张福锁. 中国北方土壤硝态氮的累积及其对环境的影响[J]. 生态环境, 2003, 12(1): 24-28.
Ju X T, Zhang F S. Nitrate accumulation and its implication to environment in north China[J]. Ecol. Environ., 2003, 12(1): 24-28.

[8] 刘宏斌,李志宏,张云贵,等. 北京市农田土壤硝态氮的分布与累积特征[J]. 中国农业科学, 2004, 37(5): 692-698.
Liu H B, Li Z H, Zhang Y G *et al*. Characteristics of nitrate distribution and accumulation in soil profiles under main agro-land use types in Beijing[J]. Sci. Agric. Sin., 2004, 37(5): 692-698.

[9] 段文学,于振文,张永丽,等. 施氮量对旱地小麦氮素吸收转运和土壤硝态氮含量的影响[J]. 中国农业科学, 2012, 45(15): 3040-3048.
Duan W X, Yu Z W, Zhang Y L *et al*. Effects of nitrogen fertilizer application rate on nitrogen absorption, translocation and nitrate nitrogen content in soil of dryland wheat[J]. Sci. Agric. Sin., 2012, 45(15): 3040-3048.

[10] 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 S Q, Li S X. The effects of applying fertilizers and water on maize production and fertilizer use efficiency[J]. Agric. Res. Arid Areas, 1994, 12(1): 47-56.

[11] Pant H K, Reddy K R, Lemon E. Phosphorus retention capacity of root bed media of sub-surface flow constructed wetlands[J]. Ecol. Eng., 2001, 17(4): 345-355.

[12] 习金根,周建斌,赵满兴,陈竹君. 滴灌施肥条件下不同种类氮肥在土壤中迁移转化特性的研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2004, 10(4): 337-342.
Xi J G, Zhou J B, Zhao M X, Chen Z J. Leaching and transforming characteristics of different nitrogen fertilizers added by fertigation[J]. Plant Nutri. Fert. Sci., 2004, 10(4): 337-342.

[13] Wang F L, Alva A K. Leaching of nitrogen from slow-release urea sources in sandy soils[J]. Soi. Sci. Soc. Am. J., 1996, 60(5): 1454-1458.

[14] 孙克刚,张学斌,吴政卿,等. 长期施肥对不同类型土壤中作物产量及土壤剖面硝态氮累积的影响[J]. 华北农学报, 2001, 16(3): 105-109.
Sun K G, Zhang X B, Wu Z Q *et al*. Effect of long-term and different measures of fertilizer applications on crop yield and accumulation of NO_3^--N in the profile of three major soils[J]. Acta Agric. Bor.-Sin., 2001, 16(3): 105-109.

[15] 高慧娟,陈年来,黄海霞,等. 甜瓜光合特性对土壤水分条件的响应[J]. 甘肃农业大学学报, 2010, (5): 72-78.

Gao H J, Chen N L, Huang H X *et al*. Potosynthic reponse of melon leaf under soil water deficiency[J]. J. Gansu Agric. Univ, 2010, (5): 72-78.

[16] 王军，黄冠华，郑建华. 西北内陆旱区不同沟灌水肥对甜瓜水分利用效率和品质的影响[J]. 中国农业科学，2010，43(15): 3168-3175.
Wang J, Huang G H, Zheng J H. Effect of water and fertilizer application on melon water use efficiency and quality with different furrow irrigation in the oasis arid region of northwest China[J]. Sci. Agric. Sin., 2010, 43(15): 3168-3175.

[17] 薛亮，马忠明，杜少平. 沙漠绿洲灌区不同水氮水平对甜瓜产量和品质的影响[J]. 灌溉排水学报，2012，(3): 132-135.
Xue L, Ma Z M, Du S P. Yield and quality of melon grown under different irrigation and nitrogen rates in desert oasis area [J]. J. Irrig. Drain, 2012, (3): 132-135.

[18] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京：中国农业出版社，2000. 14-114, 242-282.
Bao S D. Agricultural chemistry analysis of soils[M]. Beijing: China Agricultural Press, 2000. 14-114, 242-282.

[19] 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 S Q, Wang R J, Li Z Y *et al*. Soil nitrogen pool should not to be ignored residual NO_3^--N accumulated in soil profile in semiarid and semi humid agro-ecological system [J]. Agric. Res. Arid Areas, 2004, 22(4): 1-13.

[20] 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 Y J, Li S X, Li S Q *et al*. Effect of fertilization and irrigation on residual nitrate N in soil [J]. J. Soil Water Conserv., 2005, 19(6): 61-64.

[21] 石维，同延安，赵营，樊红柱. 灌溉施肥对冬小麦土壤氮素盈亏的影响[J]. 麦类作物学报，2006，26(2): 93-97.
Shi W, Tong Y A, Zhao Y, Fan H Z. Effect of N fertilizer and irrigation on apparent budget of soil N in winter wheat in anthrosol [J]. J. Tritic. Crops, 2006, 26(2): 93-97.

[22] 栗丽，洪坚平，王宏庭，等. 施氮与灌水对夏玉米土壤硝态氮积累、氮素平衡及其利用率的影响[J]. 植物营养与肥料学报，2010，16(6): 1385-1365.
Li L, Hong J P, Wang H T *et al*. Effects of nitrogen application and irrigation on soil nitrate accumulation, nitrogen balance and use efficiency in summer maize[J]. Plant Nutri. Fert. Sci., 2010, 16(6): 1385-1365.

[23] 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 S L, Tong Y A, Liang D L *et al*. Nitrate-N movement in the soil profile as influenced by rate and timing of nitrogen application[J]. Acta Pedol. Sin., 2004, 41(2): 270-272.

[24] 陈子明，袁锋明，姚造华，等. 北京潮土 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 Z M, Yuan F M, Yao Z H *et al*. The movement and leaching loss of NO_3^--N in profile of Chao soil in Beijing[J]. Plant Nutri. Fert. Sci., 1995, 1(2): 71-79.

[25] 王晓英，贺明荣，刘永环，等. 水氮耦合对冬小麦氮肥吸收及土壤硝态氮残留淋溶的影响[J]. 生态学报，2008，28(2): 685-694.
Wang X Y, He M R, Liu Y H *et al*. Interactive effect of irrigation and nitrogen fertilizer on recovery and nitrate-N movement across soil profile in a winter wheat field[J]. Acta Ecol. Sin., 2008, 28(2): 685-694.

[26] Chen X, Zhang F, Römheld V *et al*. Synchronizing N supply from soil and fertilizer and N demand of winter wheat by an improved N_{min} method[J]. Nutr. Cycl. Agroecosys., 2006, 74(2): 91-98.

[27] 薛亮，周春菊，雷阳莉，等. 夏玉米分根交替灌溉施肥的水氮耦合效应研究[J]. 农业工程学报，2008，24(3): 91-94.
Xue L, Zhou C J, Lei Y L *et al*. Effect of water and nitrogen coupling under alternate furrow irrigation and fertilizer placement on summer maize[J]. Trans. Chin. Soc. Agric. Eng., 2008, 24(3): 91-94.

[28] 王朝辉，王兵，李生秀. 缺水与补水对小麦氮素吸收及土壤残留氮的影响[J]. 应用生态学报，2004，15(8): 1339-1343.
Wang Z H, Wang B, Li S X. Influence of water deficit and supplemental irrigation on nitrogen uptake by winter wheat and nitrogen residual in soil[J]. Chin. J. Appl. Ecol., 2004, 15(8): 1339-1343.

[29] Xu Z Z, Yu Z W, Wang D, Zhang Y L. Nitrogen accumulation and translocation for winter wheat under different irrigation regimes[J]. J. Agron. Crop Sci., 2005, 191: 439-449.

[30] 闫鹏，武雪萍，华珞，等. 不同水氮用量对日光温室黄瓜季硝态氮淋失的影响[J]. 植物营养与肥料学报，2012，18(3): 645-653.
Yan P, Wu X P, Hua L *et al*. Effects of different water and nitrogen amounts on nitrate leaching in sunlight greenhouse during cucumber growing season[J]. Plant Nutri. Fert. Sci., 2012, 18(3): 645-653.

[31] 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 L *et al*. Nutrient use efficiencies of major cereal crops in China and measures for improvement[J]. Acta Pedol. Sin., 2008, 45(5): 915-924.