

不同灌溉方式对设施番茄土壤剖面硝态氮分布及灌溉水分效率的影响

聂斌¹, 李文刚², 江丽华³, 郑福丽³, 林海涛³, 宋效宗³, 赵长星⁴

(1. 湖南农业大学 资源与环境学院, 长沙 410128; 2. 山东省农业科学院, 济南 250100;

3. 山东省农业科学院 农业资源与环境研究所, 济南 250100; 4. 青岛农业大学, 山东 青岛 266109)

摘要:为了弄清不同灌溉方式对日光温室番茄水分利用效率及硝态氮在土壤剖面中迁移的影响,选择山东寿光日光温室,以当地主栽品种“齐达利”为试材,研究了沟灌、小水勤灌和滴灌3种灌溉条件下设施番茄的产量,水分利用效率及硝态氮在0—90 cm土壤剖面中的分配规律。结果表明,与传统沟灌相比,小水勤灌、滴灌均能够显著提高设施番茄经济产量,增产率分别为15.5%,11.3%,同时节水率分别为16.7%,36.0%,而相应产量水分效率则分别提高了38.7%,74.0%;同时,两种灌溉方式还显著改变了硝态氮在土壤剖面的分布,将更多的硝态氮保留在作物所能再利用的土层中,减少了硝态氮的淋失,对保护地下水环境具有重要意义。

关键词:灌溉方式; 温室; 番茄; 硝态氮; 水分利用效率

中图分类号:S275

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2012)03-0102-06

Effects of Different Irrigation Methods on Nitrate Nitrogen Distribution in Soil Profile and Irrigation Water Use Efficiency of Tomato in Greenhouse

NIE Bin¹, LI Wen-gang², JIANG Li-hua³, ZHENG Fu-li³,

LIN Hai-tao³, SONG Xiao-zong³, ZHAO Chang-xing⁴

(1. College of Resources and Environmental Science, Hu'nan Agricultural University, Changsha 410128, China; 2. Shandong Academy of Agricultural Sciences, Ji'nan 250100,

China; 3. Institute of Agricultural Resources and Environment, Shandong Academy of Agricultural Sciences Ji'nan 250100, China; 4. Qingdao Agricultural University, Qingdao, Shandong 266109, China)

Abstract: In order to reveal the effects of different irrigation methods on water use efficiency (WUE) and nitrate nitrogen distribution in soil profile, the experiments were conducted in the solar greenhouse in Shouguang County of Shandong Province, and a local majorly-cultivated tomato variety Qidali was chosen as experimental material. Tomato yields, WUE, and nitrate nitrogen distribution in different soil layers (0—90 cm) were investigated with three irrigation methods including little and frequent furrow irrigation, drip irrigation and furrow (conventional) irrigation. The results showed that under the condition of drip-irrigation and little and frequent furrow-irrigation, compared to furrow (conventional) irrigation, irrigation water-saving rate were up to 36.0% and 16.7%, tomato yield increased by 11.3% and 15.5%, and WUE increased by 74.0% and 38.7%, respectively. The first two irrigation regimes in comparison with furrow irrigation also changed the nitrate nitrogen distribution in the soil profile, which led to more nitrate nitrogen reservation in the soil layers for crop reuse, and that reduced the risk of nitrate nitrogen leaching, and consequently it was of greatly importance to protect local groundwater environment.

Key words: irrigation method; greenhouse; tomato; nitrate nitrogen; water use efficiency

收稿日期:2011-12-03

修回日期:2011-12-27

资助项目:国家自然科学基金项目(40701077);山东省现代农业产业技术体系(SCTX2011-02);中国可持续农业技术研究发展计划(2011CJAC11J02)

作者简介:聂斌(1985—),男(土家族),硕士,湖南湘西人,主要从事灌溉施肥对蔬菜作物水肥利用效率及环境影响方面的研究。E-mail: niebin34@163.com

通信作者:宋效宗(1977—),男,山东寿光人,博士,助理研究员,主要从事设施蔬菜水肥高效利用及其对环境影响方面的研究。E-mail: xz.song@163.com

水资源缺乏已成为制约我国北方许多地区农业可持续发展的关键问题。山东省寿光市是我国著名的设施蔬菜生产基地,号称“中国蔬菜之乡”,设施蔬菜生产已成为该地区重要的支柱产业。近年来随着工农业生产的快速发展,该地区地下水位下降明显,水资源供需日趋紧张。与此同时,保护地生产中灌溉方式依然是传统的大水漫灌(沟、畦灌)为主,造成了水分利用率低下、水分养分资源浪费严重^[1-2]。解决这一问题的关键途径之一是提高现有水资源的有效利用率。因此,探索适于设施蔬菜生产的新的节水灌溉技术,根据作物不同生长阶段的需水特性进行适时、适量灌溉,以肥调水,以水促肥,协调水肥供应状况,最大限度地降低土壤水分无效蒸发和水肥资源的浪费,最终显著提高水分、养分的利用效率,实现水肥资源最优化利用是该地区设施农业发展的出路所在。

滴灌作为微灌技术的一种,是目前应用广泛的一项高效节水灌溉技术。灌溉施肥是将养分溶于水,通过微灌系统将水分、养分输送到植物根部区域,供植物吸收利用的先进施肥技术,被广泛应用于经济效益较高的果园及设施蔬菜栽培中。

小水勤浇是由沟灌演变而来的一种方式,主要是通过减少每次灌溉水量,适时提高灌溉频率,从而达到减少水分养分损失,提高水肥利用效率的一种灌溉方式,此项技术为当地老百姓摸索出来的经验,在寿光市种植水平较高的菜农中较多采用。

近年来国内外学者对滴灌条件土壤水分运动分布规律进行了深入系统的研究^[3-4],但多数研究主要考虑在大田常规灌溉方式或仅限于考虑室内情形下的氮素转化运移情况。而对于在当地应用较为普遍的小水勤浇,则缺少相关研究。随着设施生产的日益普遍和各种新问题的出现,开展设施生产条件下高效节水施肥技术研究至关重要,对当地设施蔬菜产业的可持续发展具有重要意义。

本试验以设施番茄生产为研究对象,研究沟灌、小水勤灌和滴灌三种灌溉方式下水分的利用效率及硝态氮在土壤剖面的迁移行为,目的是在评价灌溉方法对设施蔬菜生产节水节肥效果的同时,研究不同灌溉方式对农业环境(包括设施土壤环境和地下水环境)的影响,在当前我国北方水资源供需日趋紧张,肥料价格不断上涨的形势下,探索适于设施菜地高产高效与可持续发展的有效途径,为制订完科学合理的灌溉措施提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

1.1.1 试验点概况 试验于 2010 年 1 月至 2010 年 6 月在山东省寿光市设施番茄集约化种植区的稻田镇东刘营村进行。试验点位置:36°50′18″N,118°55′02″E。土壤类型为褐土,质地为壤土。供试温室土壤各层(0—90 cm)的基本理化性状见表 1。设施番茄一年种植两茬,连作制。供试作物为日光温室番茄(*Solanum lycopersicum*),品种为“齐达利”(先正达种子生产)试验大棚建于 2001 年,长 70 m,宽 9 m。番茄种植方式为开沟栽培,宽窄行种植(宽行 90 cm,窄行 60 cm),株距 45 cm。当地传统的灌溉方式为沟灌。

寿光地处中纬度带,北濒渤海,属暖温带季风区大陆性气候。受冷暖气流的交替影响,形成了“春季干旱少雨,夏季炎热多雨,秋季凉爽有旱,冬季干冷少雪”的气候特点。年平均温度 12.5℃,年降雨量约 550 mm,年平均蒸发量为 1 345.7 mm,无霜期 200 d 左右。2008 年,全市蔬菜播种面积达 5.7 万 hm²,占农作物播种总面积的 45%,总产 40 亿 kg 以上,产值 40 亿元。目前全市保护地蔬菜种植面积 3.7 万 hm²,约占蔬菜总播种面积的 2/3。蔬菜产业已经成为寿光农业支柱产业和农民收入主要来源,占农民收入的 70%以上。

表 1 供试温室番茄土壤基础理化性状^[5]

土层/ cm	有机质/ %	pH	容重/ (g·cm ⁻³)	全氮/ %	碱解氮/ (mg·kg ⁻¹)	硝态氮/ (mg·kg ⁻¹)	有效磷/ (mg·kg ⁻¹)	有效钾/ (mg·kg ⁻¹)
0—30	1.23	7.70	1.31	0.148	176.9	58.3	114.7	319.7
30—60	0.84	7.96	1.35	0.071	58.3	48.0	58.3	197.4
60—90	0.71	7.52	1.38	0.065	27.2	26.3	42.3	116.1

1.1.2 试验处理 共设三个处理,分别为农民习惯、小水勤浇、滴灌。考虑当地实际条件,在不影响试验的前提下,为便于操作,试验采用大区设计,每个处理设一个大区,每个大区面积 180 m²,大区内进行小区划分,3 次重复。为防止水分交叉侧渗影响试验结果,不

同小区之间用垂直埋深 50 cm 的塑料薄膜隔开。

施肥水平:试验各处理施肥总量一致。具体如下:基肥施用干鸡粪 2 500 kg,“联盟”牌三元复合肥(15—15—15)50 kg;追肥量折算后 N 为 600 kg/hm²,P₂O₅ 为 450 kg/hm²,K₂O 为 750 kg/hm²,肥料

品种为“东方誉源”牌螯合肥(20—10—20),单质肥料尿素、硫酸钾。追肥次数根据灌溉方式不同而不同。

农民习惯处理采用传统的沟灌方式,小水勤浇是由沟灌演变而来的一种方式,其核心是减少每次灌溉量,适时提高灌溉频率。滴灌采用重力滴灌的方式,滴灌设备由北京易润滴灌公司寿光分公司提供。农民习惯处理由农户按照习惯,根据番茄的生长发育状况确定灌水时间,而小水勤浇、滴灌两处理则由负压计指示进行灌溉。灌水量用精确度为 0.01 m^3 的水表(亚星牌)计量。具体灌水时间及每次灌水量见表 2。

表 2 灌水时间及每次灌水量 mm

日期(月-日)	农民习惯	小水勤浇	滴灌
03-10	55.24	43.39	36.42
03-24	65.27	45.24	32.13
04-03	—	35.16	30.15
04-12	68.31	45.54	37.95
04-20	—	42.50	39.47
05-01	75.90	44.02	42.50
05-09	—	35.16	30.15
05-15	74.38	48.57	37.19
05-24	72.24	40.09	35.84
06-03	75.27	42.37	37.51
06-10	68.31	40.09	32.13
合计	554.92	462.13	355.02

注:番茄幼苗于 2010 年 1 月 26 日移栽,6 月 20 日拉秧。至第一次灌溉之前,期间浇两次缓苗水,各处理相同且量少,在此忽略不计。

1.2 试验计算及测试分析方法

1.2.1 土壤剖面各层硝态氮含量的测定 于种植前、收获后对 0—30, 30—60, 60—90 cm 土壤剖面进行分层取样,每小区 4 次重复,采用四分法取样,同层混合均匀,用连续流动分析仪(FiaStar 5000 型)测定硝态氮含量,土壤容重采用环刀法。土壤剖面各层硝态氮累积量计算公式如下:

累积 N 量 = 各分层容重 × 该层硝态氮含量 × 土层厚度

1.2.2 番茄经济产量(Y)的统计 每小区选定两畦(4 行)跟踪计产,用电子台秤称量并记录每次收获果实的产量,换算成每公顷的产量即为番茄的经济产量。

1.2.3 产量水平水分利用效率的计算 利用产量水平水分利用效率(WUE)公式计算得到 $WUE = Y/I$ 。式中:Y——经济产量(kg/hm^2);I——灌水量(m^3/hm^2)。由于在试验开始前及试验结束后取样测定土壤含水量发现,土壤含水率均保持在 18%~20%,变化很小。因此在此忽略土壤水分在当季的消耗。

1.3 试验数据分析与统计

采用 DPS 7.05 数据分析软件对数据进行处理分析,Excel 2007 与 Sigmaplot 10.0 进行制表与绘图工作。

2 结果与分析

2.1 不同灌溉方式对土壤剖面(0—90 cm)硝态氮迁移的影响

2.1.1 不同灌溉方式对土壤剖面(0—90 cm)硝态氮含量的影响 由图 1 可以看出,经过一季实验后,不同灌溉方式对土壤硝态氮的迁移产生了明显的影响,在 0—30 cm 的耕层,硝态氮含量为滴灌 > 小水勤灌 > 农民习惯,表明滴灌能够对 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 在耕层土壤的积累起到显著的作用。在 30—60 cm 土层, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的平均含量则表现为小水勤灌 > 滴灌 > 农民习惯,由此说明,小水勤灌能够促进 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 在该土层中的积累;在 60—90 cm 土层, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的平均含量则表现为农民习惯 > 小水勤灌 > 滴灌表明农民习惯处理能够促进 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 在土壤剖面底层聚集,造成 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 淋失的风险。综上所述,三种灌溉方式对 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 垂向迁移影响明显不同,农民习惯处理中 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 分布呈现高一低一高的趋势,大量 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 积累在土壤剖面底层,而小水勤灌则为高一高一低一低一高的趋势, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 主要分布在中上层剖面中,而滴灌则呈现自上而下显著递减的趋势, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 主要分布在土壤表层中。由此可以看出,灌溉方式对硝态氮在土壤中的分布影响很大,灌水量过大易把硝态氮带入土壤深层,不能被作物吸收而造成淋洗损失。这与前人研究结果类似^[6]。

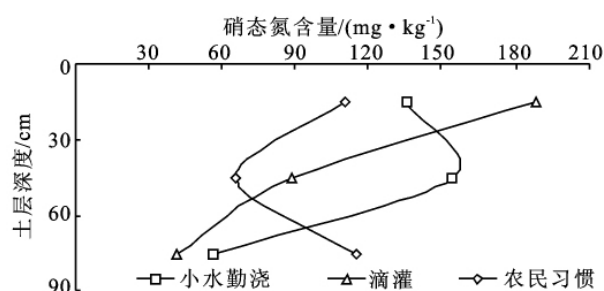


图 1 不同灌溉方式对土壤剖面硝态氮含量的影响

注:图 1 中数据为 3 次重复平均值,下同。

2.1.2 不同灌溉方式对耕层(0—30 cm)硝态氮残留的影响 耕层(0—30 cm)为作物根系吸收养分的主要区域, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 在该区域的残留量意味着作物可以直接再次充分利用的量。由图 2 可以看出,在施肥量相同的情况下,不同灌溉方式对耕层 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 积累量的影响明显不同,其中滴灌处理最高,达 741.00 kg/

hm²。显著高于其它处理,而小水勤灌,农民习惯分别为 531.33, 434.33 kg/hm², 尽管小水勤灌处理略高于农民习惯处理,但两者之间并无显著性差异($P < 0.05$)。

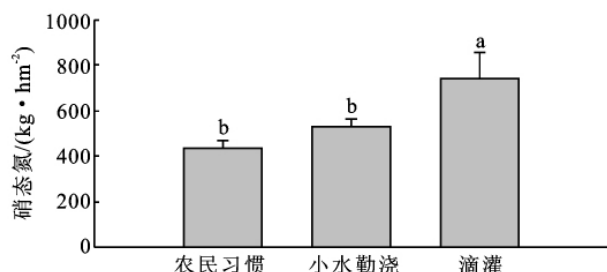


图2 不同灌溉方式对耕层(0—30cm)硝态氮残留的影响

注:图中数据采用 LSD 方差分析方法,同一行不含相同字母表示差异显著,小写字母表示不同处理间的显著性差异($P < 0.05$),大写字母表示不同处理间的极显著性差异($P < 0.01$)。下同。

2.1.3 不同灌溉方式对可利用土层(30—60 cm)硝态氮的影响 通常认为,30—60 cm 土层为过渡土层,在合适的条件下,其中的硝态氮可以为作物再次吸收利用,但同时也存在向下层迁移淋失的风险。由图3可以看出,不同处理对该层中 NO₃⁻-N 的积累效果不同,NO₃⁻-N 的积累量以小水勤灌最高,达 605.00 kg/hm²;滴灌次之,348.67 kg/hm²;农民习惯 255.67 kg/hm²。三者之间存在显著性差异($P < 0.05$)。表明小水勤灌处理能够有效地将表层迁移下来的 NO₃⁻-N 积累在该层(30—60 cm)。增加作物根系再次吸收利用的机会。

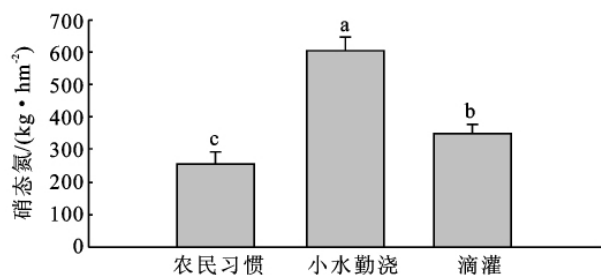


图3 不同灌溉方式对可利用土层(30—60cm)硝态氮的影响

2.1.4 不同灌溉方式对不可再利用土层(60—90 cm)硝态氮的影响 通常认为番茄为浅根系作物,根系所能吸收的营养主要在 0—60 cm,而超出该部分直至更深土层中的硝态氮累积,作物就无法再利用。由此认为,积累在 60—90 cm 土层的 NO₃⁻-N 为损失不可再利用的氮。由图4可以看出,各处理的 NO₃⁻-N 的积累表现为农民习惯>小水勤灌>滴灌,最高的农民习惯处理中其积累量为 453.33 kg/hm²,显著高于其它处理,表明在农民习惯处理下,每次大量的灌水极易造成 NO₃⁻-N 的淋失并在土壤剖

面底层发生积累。郭大应等^[7]通过室内土柱试验发现:灌溉使表土层饱和后,产生重力水下渗,若水量大,在同等水量和硝态氮含量条件下,土壤湿度不同,硝态氮在土壤中的淋失和向下运移累积有明显区别,在低湿度土壤中像硝酸盐一类易溶盐比在高湿度土壤中更容易被淋失。本试验结果与其有相同的规律。究其原因,在于灌溉土壤硝态氮的累积量与土壤湿度负相关。土壤剖面的湿度越小(沟灌),越有利于上层土壤中的硝态氮因大量重力水下渗而累积于底土,污染地下水。高湿度土壤(滴灌),虽然用较少的水就可将上层硝态氮向下淋洗,但由于机械弥散和反硝化作用,较少有硝态氮在底土和地下水中大量累积。同样,减少每次灌水量,适当增加灌溉频率(小水勤灌),也显著减少了 NO₃⁻-N 的迁移淋失风险。

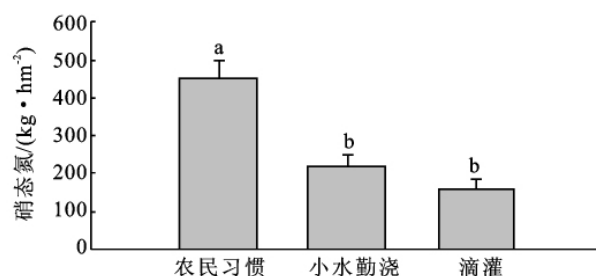


图4 不同灌溉方式对不可再利用土层(60—90 cm)硝态氮的影响

2.1.5 不同灌溉方式对土壤剖面(0—90 cm)硝态氮累积量的影响 灌溉是影响硝态氮淋失的重要因素之一。灌溉带来的下渗水流是累积在土壤中的硝态氮向下迁移直至淋失的必要条件。灌水量和灌水方式都对硝态氮的迁移淋失有重要作用^[8]。如图5所示,尽管不同灌溉对不同土层的影响各不相同,然而对 0—90 cm 土壤剖面总的积累来说,小水勤灌>滴灌>农民习惯,其中小水勤灌能够显著增加 NO₃⁻-N 在土壤剖面的积累,而农民习惯中大量的 NO₃⁻-N 已经淋失出 90 cm 土壤剖面而进入更深土层,具有污染地下水的潜在风险。

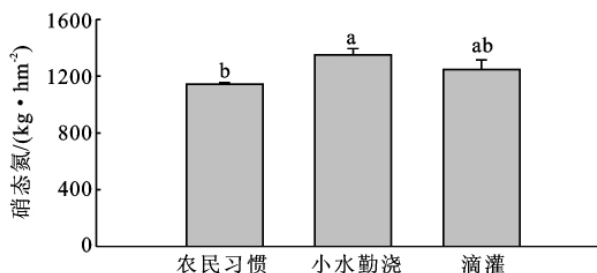


图5 不同灌溉方式对土壤剖面(0—90 cm)硝态氮累积量的影响

同时,与试验开始前含量仅为 532.53 kg/hm² 相

比,土壤剖面中的 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 积累量均显著增加,增长率分别为 154.38%, 134.66%, 114.70%, 表明在当前施肥条件下,高投入量的施肥是造成 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 积累的主要原因之一,应通过改进施肥方法结合有效灌溉设施,促进施用肥料的充分利用,减少 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 在土壤中的积累,从而降低对地下水环境的污染风险。这与前人的研究结果相一致^[9]。

2.2 不同灌溉方式对温室番茄经济产量水平和水分利用效率的影响

由表 3 可以看出,不同灌溉方式对设施番茄产量影响不同,产量水平表现为小水勤灌>滴灌>农民习惯,三者之间存在显著性差异($P<0.05$)。究其原因,可能是由于农民习惯中较大的灌水量将大量养分随水淋洗出作物根层以外不能被利用。而小水勤灌则主要将养分保留在 0—60 cm 土层为作物吸收利用。提高了养分利用率,而对于滴灌处理来说,由于养分过量聚集在表层 0—30 cm 土层中,造成作物生理性吸收障碍,间接抑制了作物对养分的充分吸收,长期的连作种植则容易导致设施土壤发生次生盐害。此结果表明,对采取滴灌的土壤,应在每茬或每年结束后对土壤进行翻耕或洗盐,降低盐分累积带来的次生盐渍化风险,以便更好利用滴灌节水节肥的优势,促进滴灌技术的推广。

表 3 不同灌溉方式对温室番茄经济产量水平和水分利用效率的影响

处理	产量/(kg·hm ⁻²)	产量水分效率/%
农民习惯	95591c	172C
小水勤浇	111648a	242B
滴灌	104875b	295A

产量水分效率(WUE)是表征作物单位耗水量条件下获得经济产量多少的一个参数。由表 3 所示,不同处理的产量水分效率差异明显,表现为滴灌>小水勤灌>农民习惯,三者之间存在极显著差异($P<0.01$)。试验结果表明,不同灌溉方式对番茄产量影响达到显著水平,采用小水勤浇与滴灌方式,不仅能显著提高番茄产量,而且还有很好的节水效果,这种灌溉方式可以在日光温室番茄生产中加以推广应用^[10]。

由表 3 可以看出,滴灌尽管未能获得最高产量,但由于其仅用较低的耗水量就获得了较高的产量,尤其适用于我国北方某些水资源极度匮乏的地区,在设施蔬菜生产中发展滴灌节水技术是一个不错的选择^[11]。

3 讨论

在寿光市传统的保护地生产模式中,通常是在施

肥后立即灌溉或将肥料溶于灌溉水中随水施入。但这样的施肥方式会导致可溶性肥料迅速地随水淋失掉而造成肥料浪费。李俊良等的研究结果表明,当季施入的氮肥在蔬菜收获结束后能够淋洗到 200 cm 深度,并有可能淋洗到更深的层次,肥料的淋洗损失非常严重^[12]。而通过对两种不同养分比例的复合肥在两个不同的保护地蔬菜轮作体系中的应用研究表明,施肥量的增加使大量 N 素以 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的形式在 0—30 cm 土层中累积,同时 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 也通过淋洗作用向下移动到 30—90 cm 土层。而 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 在土壤表层以下土层的累积,也无疑增大了 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 淋失的可能性^[13]。

小水勤灌和滴灌由于其每次较低的灌溉量,可以更快的让日光温室土壤在灌溉后迅速恢复至根系生长较适宜的温度范围,提高了温室内的空气温湿度,延长了作物在早春低温期的生长周期,而且较低的土壤湿度也会促进作物根系深扎扩散,提高根系对养分的吸收能力,增加作物产量^[14-15]。但是使用滴灌也存在一定的问题需要解决,比如滴头残留盐分拮抗或者结晶易堵塞、表层盐分残留累积导致土壤次生盐渍化等问题,造成脱水、脱肥、根系吸收养分困难等,影响蔬菜作物的生长,这可以从试验结果中番茄的产量差异看出。这也是本课题下一步需要继续深入研究的问题。而对于小水勤灌,则由于基本不额外增加农民投入成本,且操作简捷方便,与农民传统的灌溉方式相比,增产效果显著,同时节约了水资源的无效消耗,更是值得大力推广。由此,本试验认为小水勤灌和滴灌减少了水分深层渗漏几率,从而降低了硝态氮的深层淋洗风险,增加了温室番茄的产量,提高了水分利用效率,对提高设施土壤健康可持续利用、保护并节约地下水资源具有重要意义。

4 结论

(1) 小水勤灌、滴灌比传统的沟灌方式分别节水 16.7%, 36.0%, 同时显著提高设施番茄经济产量,因而相应产量水分效率则分别提高了 38.7%, 74.0%; 可见对于番茄这类对水分需求量不大且有阶段性差异的作物来说,只要控制适当,以上两种灌溉方式均能很好的促进番茄生长,值得在日光温室栽培中进行大力推广。

(2) 番茄作为浅根系作物,通常认为根系所能吸收的养分绝大多数分布在 0—60 cm 土层中,而超出 0—90 cm 土层直至更深,作物就无再利用。本试验结果表明,两种灌溉方式显著改变了硝态氮在土壤剖面中的分布,对比 0—90 cm 土壤剖面总的累积量,其

大小顺序为小水勤灌>滴灌>农民习惯,其中小水勤浇能够显著增加 NO_3^- -N 在土壤剖面的积累,将更多的硝态氮保留在作物所能够再利用的中上土层中,减少了硝态氮向深层土壤的淋失。而农民习惯中大量的 NO_3^- -N 已经淋失出 90 cm 土壤剖面而进入更深土层,具有污染地下水的潜在风险。

参考文献:

- [1] 李廷轩,周健民,段增强,等. 中国设施栽培系统中的养分管理[J]. 水土保持学报,2005,19(4):70-75.
 - [2] 刘兆辉,江丽华,张文君,等. 山东省设施蔬菜施肥量演变及土壤养分变化规律[J]. 土壤学报,2008,45(2):296-303.
 - [3] 周建斌,陈竹君,李生秀. Fertigation—水肥调控的有效措施[J]. 干旱地区农业研究,2001,19(4):16-21.
 - [4] 张建君,李久生,任理. 滴灌施肥灌溉条件下土壤水氮运移的研究进展[J]. 灌溉排水,2002,21(2):75-78.
 - [5] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京:中国农业出版社,2000.
 - [6] 马腾飞,危常州,王娟,等. 不同灌溉方式下土壤中氮素分布和对棉花氮素吸收的影响[J]. 新疆农业科学,2010,47(5):859-864.
 - [7] 郭大应,熊清瑞,谢成春,等. 灌溉土壤硝态氮运移与土壤湿度的关系[J]. 灌溉排水,2001,20(2):66-68,72.
 - [8] 杜春先,聂俊华,王祥峰. 室内模拟有机肥中 NO_3^- 、 NO_2^- 的淋失规律及其对土壤环境的影响[J]. 山东农业科学,2004(6):48-50.
 - [9] 高兵,任涛,李俊良,等. 灌溉策略及氮肥施用对设施番茄产量及氮素利用的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2008,14(6):1104-1109.
 - [10] 吴燕,梁银丽,朱娟娟,等. 灌溉方式对樱桃番茄产量和品质的影响[J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版,2009,37(8):177-181.
 - [11] 徐淑贞,张双宝,鲁俊奇,等. 日光温室滴灌番茄需水规律及水分生产函数的研究及应用[J]. 节水灌溉,2001(4):26-28.
 - [12] 李俊良,朱建华,张晓晟,等. 保护地番茄养分利用及土壤氮素淋失[J]. 应用与环境生物学报,2001,7(2):126-129.
 - [13] 朱建华. 蔬菜保护地氮素去向及其利用研究[D]. 北京:中国农业大学,2002.
 - [14] 韦彦,孙丽萍,王树忠,等. 灌溉方式对温室黄瓜灌溉水分分配及硝态氮运移的影响[J]. 农业工程学报,2010,26(8):67-72.
 - [15] 付时丰,李中,杨丽娟,等. 保护地栽培条件下灌水方法对土壤温度的影响[J]. 灌溉排水学报,2006,25(1):67-70.
-
- (上接第 101 页)
- [6] 姜志林. 森林生态系统蓄水保土的功能[J]. 生态学杂志,1984(6):58-63.
 - [7] 张宗应,王勤,徐小牛. 安徽大别山区不同林分类型的土壤特性及其水源涵养功能[J]. 水土保持学报,2003,17(3):59-62.
 - [8] 张秋良,魏强,代海燕,等. 大青山不同林地类型土壤特性及其水源涵养功能[J]. 水土保持学报,2008,22(2):111-115.
 - [9] 郎南军,彭明俊,温绍龙,等. 金沙江流域不同林分类型的土壤特性及其水源涵养功能研究[J]. 水土保持学报,2005,19(6):106-109.
 - [10] 杨清培,陈旭梅,李鉴平,等. 信丰森林健康示范区主要森林枯落物持水与蒸发特征研究[J]. 江西农业大学学报,2009,31(5):867-873.
 - [11] 国家林业局. 森林土壤分析方法[M]. 北京:中国标准出版社,1999:14-33.
 - [12] 李志飞,赵雨森,辛颖,等. 阿什河上游 3 种人工林土壤贮水量与入渗特征[J]. 中国水土保持科学,2010,8(1):77-80.
 - [13] 孙艳红,张洪江,程金花,等. 缙云山不同林地类型土壤特性及其水源涵养功能[J]. 水土保持学报,2006,20(2):106-109.
 - [14] 邓鉴锋. 西樵山森林改造对林地土壤理化性质的影响[J]. 广东林业科技,2005,21(2):14-18.
 - [15] 张雷燕,刘常富,王彦辉. 宁夏六盘山地区不同森林类型土壤的蓄水和渗透能力比较[J]. 水土保持学报,2007,21(1):95-98.
 - [16] 吕皎,王棣. 油松混交林的水土保持及水源涵养功能研究[J]. 水土保持学报,2001,15(4):44-46.
 - [17] 张洪江,孙艳红,程金花,等. 缙云山不同林地类型土壤特性及其水源涵养功能[J]. 水土保持学报,2006,20(2):106-109.
 - [18] 丁访军,王兵,钟洪明,等. 赤水河下游不同林地类型土壤物理特性及其水源涵养功能[J]. 水土保持学报,2009,23(3):179-183,231.
 - [19] 肖洋,满秀玲,范金凤. 公别拉河流域主要森林类型的土壤肥力与涵养水源功能[J]. 北京林业大学学报,2006,34(1):28-34.
 - [20] 周本智,傅懋毅. 庙山坞自然保护区毛竹林细根生产和周转研究[J]. 江西农业大学学报,2008,30(2):239-245.