

doi: 10.11838/sfsc.1673-6257.20407

太湖地区设施番茄水肥一体化技术增效减排效果评价研究

王 远¹, 许纪元^{1#}, 潘云枫^{2*}, 马明坤¹, 巨昇容¹, 赵冬青², 杨东平², 闵 炬¹, 施卫明¹

(1. 中国科学院南京土壤研究所, 土壤与农业可持续发展国家重点实验室, 江苏 南京 210008;
2. 宜兴市土肥站, 江苏 宜兴 214206)

摘 要:太湖地区设施蔬菜集约化程度高, 劳动力需求大, 化肥用量大, 面源污染问题突出。水肥一体化技术在节工、增效和减排上具有较好潜力。该技术在北方设施蔬菜种植上的研究较多, 然而, 尚缺乏在太湖水网地区应用效果的评价。为明确太湖地区水肥一体化技术在设施番茄上的化肥减施、增效和环境减排上的效果, 通过田间试验, 设置常规化肥氮 (FD) 处理, 并在此基础上分别减化肥氮 10% (R10%)、15% (R15%)、20% (R20%)、25% (R25%) 和 30% (R30%) 以及不施化肥氮 (CK) 处理, 分析水肥一体化技术对设施番茄产量、氮肥利用率、土壤氮挥发和经济效益的影响。结果表明: 在水肥一体化模式下设施蔬菜氮肥减施 10% ~ 20% 具有一定的增产效果, 其中 R15% 处理在产量、氮肥利用率和经济效益上均为最高。与 FD 处理相比, R15% 处理可增产 6.1%, 氮肥表观利用率达 41.3%, 毛利润增加 8.4%, 并且减少 17.7% 的氮挥发排放。研究可为水肥一体化技术在太湖地区的合理应用和推广提供科学指导。

关键词:水肥一体化; 化肥减施; 氮肥利用率; 经济效益; 环境效应

我国是世界上最大的蔬菜生产和消费国, 蔬菜在我国人民膳食结构中占据了极为重要的位置^[1]。太湖地区是我国经济较为发达的地区之一, 近年来设施蔬菜发展迅速, 为追求高产往往施入大量化肥。据文献统计: 我国设施蔬菜生产中化肥养分用量平均达到 1354.5 kg/hm², 是全国农作物化肥养分平均用量的 4.1 倍^[2], 蔬菜种植的肥料投入量也往往远超作物的需求量^[3]。已有研究表明, 设施菜地氮肥表观利用率平均仅为 10% ~ 20%^[4-5], 大量氮素流失到环境中, 在水网交错的太湖地区, 由过量施肥导致的面源污染问题日益严重^[6-7]。由于蔬菜品种繁多, 栽培方式多样, 蔬菜生产过程常常需要投入大量的劳动力^[8]。太湖地区经济发展迅速, 设施蔬菜日趋集约化、规模化, 劳动力需求大。因此, 该

地区设施蔬菜体系亟需节工、增效且环境友好的种植技术。近年来, 水肥一体化技术在北方蔬菜种植区得到广泛应用, 如李若楠等^[9]报道连续 3 年采用水肥一体化技术种植设施黄瓜和番茄, 土壤硝态氮含量和 EC 值均有所下降, 氮肥表观利用率显著增加 9.0% ~ 13.8%; 黄倩楠等^[10]报道采用设施水肥一体化技术种植花椰菜, 氮肥表观利用率最高达到 40% 以上。虽然太湖地区灌溉水资源充足, 实施水肥一体化技术的节水意义有限, 但其仍然可以在省工、节肥、提高肥料利用效率和减少环境排放等方面发挥重要作用^[11]。然而, 在南方水网地区应用水肥一体化技术对化肥减施、增效及环境减排影响的研究尚缺乏。基于此, 本研究于地处太湖之滨的江苏省宜兴市开展设施蔬菜水肥一体化田间试验, 对不同氮肥施用量下的设施蔬菜产量、氮肥利用率、氮挥发排放和经济效益等进行观测和分析, 为太湖地区设施蔬菜水肥一体化技术的推广应用提供科学指导。

1 材料与方法

1.1 试验点概况

试验于 2019 年在江苏省宜兴市周铁镇中新村 (119.96507° E, 31.38259° N) 进行。该地属亚热带季风气候, 年均气温 17.4℃, 4 ~ 8 月平均

收稿日期: 2020-07-10; 录用日期: 2020-09-11

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2018YFD0800204); 山东省重大科技创新工程项目 (2019JZZY010701)。

作者简介: 王远 (1988-), 男, 河南漯河人, 助理研究员, 博士, 主要从事农田面源污染防控和作物氮素营养诊断相关研究。E-mail: wangyuan@issas.ac.cn; 许纪元 (1991-), 男, 江苏扬州人, 博士研究生, 主要从事农田面源污染防控相关研究。E-mail: yzxu_jiyuan@issas.ac.cn。王远和许纪元为共同第一作者。

通讯作者: 潘云枫, E-mail: 105163536@qq.com

气温 16.1 ~ 28.3℃, 年均无霜期 240 d 左右, 年均日照时数 1700 h, 年均降水量 1177 mm。试验田位于连栋塑料大棚内, 棚高 5.2 m, 大棚两侧设有通风口。根据中国土壤系统分类命名^[12], 供试土壤类型为普通肥熟旱耕人为土。0 ~ 20 cm 耕层土壤基础性质为: 有机质 22.21 g/kg, 全氮 1.54 g/kg, 硝态氮 60.81 mg/kg, 铵态氮 11.79 mg/kg, 有效磷 109.48 mg/kg, 速效钾 169.53 mg/kg, pH 5.80 (水土比 2.5:1)。

1.2 试验设置

设置不施化肥氮对照 (CK)、常规化肥氮量 (FD)、减施化肥氮 10% (R10%)、15% (R15%)、20% (R20%)、25% (R25%) 和 30% (R30%) 共计 7 个处理, 每个处理 3 次重复。小区面积 36.1 m², 采用随机区组排列。所有处理仅施用等量有机肥作为基肥, 施用量为 15 t/hm², 有机肥为腐熟羊粪, N、P₂O₅ 和 K₂O 含量分别为 0.62%、0.41% 和 0.35%, 基肥不施用化肥; 以水溶性肥料作为追肥, 其中氮肥为尿素、磷肥为磷酸二氢钾、钾肥在扣除磷酸二氢钾中的钾量后, 用硫酸钾补全钾用量。FD 处理追肥的化肥用量分别为 N 225 kg/hm²、P₂O₅ 75 kg/hm² 和 K₂O 330 kg/hm²。减氮 (R10% ~ R30%) 处理的尿素氮减量施用, 磷、钾用量与 FD 处理相同。追肥采用水肥一体化技术于开花初期、开花坐果期、第一穗果膨大期、第二穗果膨大期和第三穗果膨大期分 5 次施用, 5 次追肥的氮、磷、钾均按 1:2:3:3:1 施用。

供试蔬菜为番茄 (*Solanumly copersicum*), 品种为“东圣一号”。番茄采用穴盘播种育苗, 苗龄 4 ~ 5 周时人工移栽, 双行种植, 行间距 30 cm, 株距 40 cm, 畦面宽 80 cm, 沟宽 40 cm, 生育期为 3 ~ 7 月。基肥撒施后翻耕覆土, 移栽后采用滴灌进行灌溉, 在施肥处理进行追肥时, 对 CK 处理同步采用滴灌进行灌溉。每次追肥灌溉水用量控制在 135 ~ 180 m³/hm², 其余田间管理措施与当地种植习惯相同。

1.3 样品采集与测定

所有小区的成熟番茄分 5 次进行采摘计产, 5 次采摘全部完成后累加作为小区产量。番茄秸秆和果实烘干粉碎后测定全氮含量, 计算各处理的氮肥表观利用率 (RE_N):

$$RE_N = (U - U_0) / F$$

其中: U 为施肥处理的作物收获时地上部总吸氮量, U_0 为未施肥处理的作物收获时地上部吸氮总量, F 为相应处理的施肥量。

采用通气法对施肥后的土壤氮挥发进行连续监测, 采样装置为聚氯乙烯硬质塑料管, 内径 15 cm, 高 20 cm。采样时分别将两块厚度为 2 cm、直径为 16 cm 的海绵均匀浸以 15 mL 磷酸甘油溶液 (50 mL 磷酸 + 40 mL 丙三醇, 定容至 1000 mL), 下层海绵 (样品) 置于塑料管中部, 上层海绵 (隔离空气中的氮) 与塑料管顶部齐平。施肥后前 6 d 每天固定时间更换下层海绵, 之后每 3 d 更换一次下层海绵, 上层海绵每 3 d 更换一次, 直至检测氮挥发量接近空白处理。海绵样品中的氮采用 1 mol/L KCl 溶液浸提, 靛酚蓝比色法测定。

1.4 数据分析

采用 Excel 2016 对数据进行基础统计, SPSS 18.0 进行方差分析和多重比较, Origin 2019 作图, 图中误差线为均值的标准差。

2 结果与分析

2.1 番茄产量和氮肥利用率

不同处理的番茄产量、地上部氮积累量和氮肥表观利用率见表 1。各施氮处理的番茄产量均高于 CK 处理, 减氮 10% ~ 20% 的处理与 CK 间存在显著差异, 但各施氮处理间的差异尚未达到显著性水平。在施氮处理中, R15% 处理的番茄产量最高, 达到 111.96 t/hm², 比 FD 处理高出 6.1%; R30% 处理产量最低, 为 102.34 t/hm², 仅比 CK 处理高 7.0 t/hm²。各处理间地上部氮积累量的变化与产量变化趋势接近, 与 CK 处理相比, 各施氮处理均显著提高了番茄地上部氮积累量。R15% 处理的地上部氮积累量最高, 比 FD 处理增加了 8.5%, 比 CK 处理增加了 57.1%。R30% 处理的地上部氮积累量在各施氮处理中最低, 相比 FD 处理减少了 16.3%, 仅高于 CK 处理。氮肥表观利用率方面也表现为 R15% 处理最高, 达到 41.30%, 比 FD 处理高 12.4%; 其次是 R20% 处理, 氮肥表观利用率达到 35.97%, 比 FD 处理高 7.0%; 而 R10%、R25%、R30% 处理的氮肥表观利用率均低于 FD 处理, 其中 R30% 处理最低, 仅为 17.35%。与 FD 处理相比, R30% 处理虽未显著减产, 但地上部氮积累量显著减少, 导致氮肥表观利用率大幅下降。

表 1 不同处理的番茄产量和氮肥表观利用率

处理	产量 (t/hm ²)	地上部氮积累量 (kg/hm ²)	氮肥表观利用率 (%)
CK	95.36b	205.65d	—
FD	105.48ab	297.75ab	28.95
R10%	107.63a	291.00abc	28.87
R15%	111.96a	323.10a	41.30
R20%	109.08a	303.90ab	35.97
R25%	104.57ab	271.65bc	24.98
R30%	102.34ab	249.15c	17.35

注：同一列数据后的不同小写字母表示在 0.05 水平上存在显著差异。

2.2 不同氮肥施用量下的土壤氮挥发排放

番茄全生育期共计进行了 6 个时间段（1 次基肥 + 5 次追肥）的氮挥发观测，单次监测天数为 12 ~ 15 d（图 1）。各处理在不同取样时期的氮挥

发速率基本呈现先升高后下降的趋势，基肥和第 5 次追肥在施肥后第 4 d 达到最大氮挥发速率；追肥 1、追肥 2 和追肥 3 在施肥后第 2 d 达到最大氮挥发速率；追肥 4 在施肥后第 1 d 就达到了最大氮挥发速率。各处理的氮挥发速率随施氮量的减少而降低，但各处理间的氮挥发速率较为接近，差异并不显著。第 3 和 4 次追肥的化肥氮用量均为化肥氮总用量的 30%，但第 4 次追肥后的氮挥发速率显著大于第 3 次追肥。各处理在第 4 次追肥后均达到了全生育期氮挥发速率的最大值，其中 FD 处理的氮挥发速率最大，在施肥后第 1 d 高达 482.5 g/(hm²·d)。

不同减氮处理在各施肥时期的氮挥发累积量见图 2。施用基肥后，与 CK 处理相比，FD 处理并未

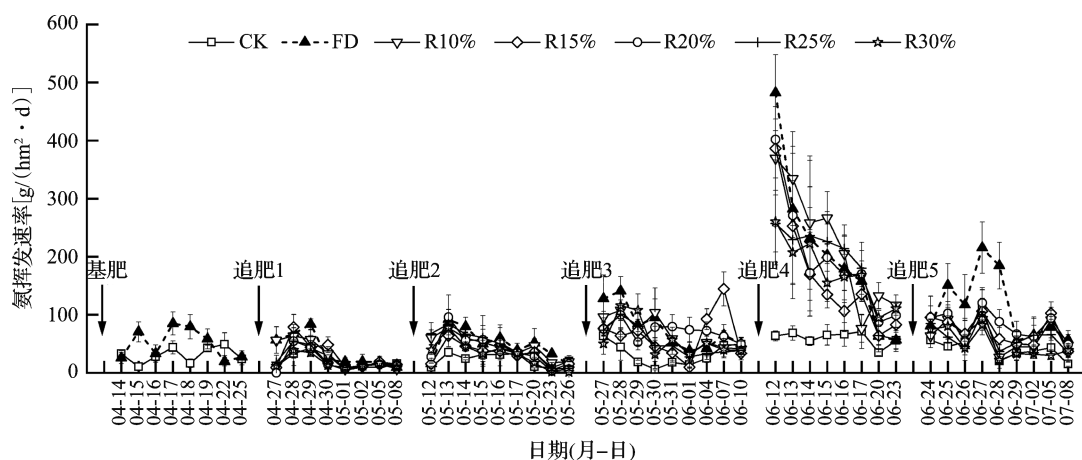


图 1 不同处理的土壤氮挥发速率

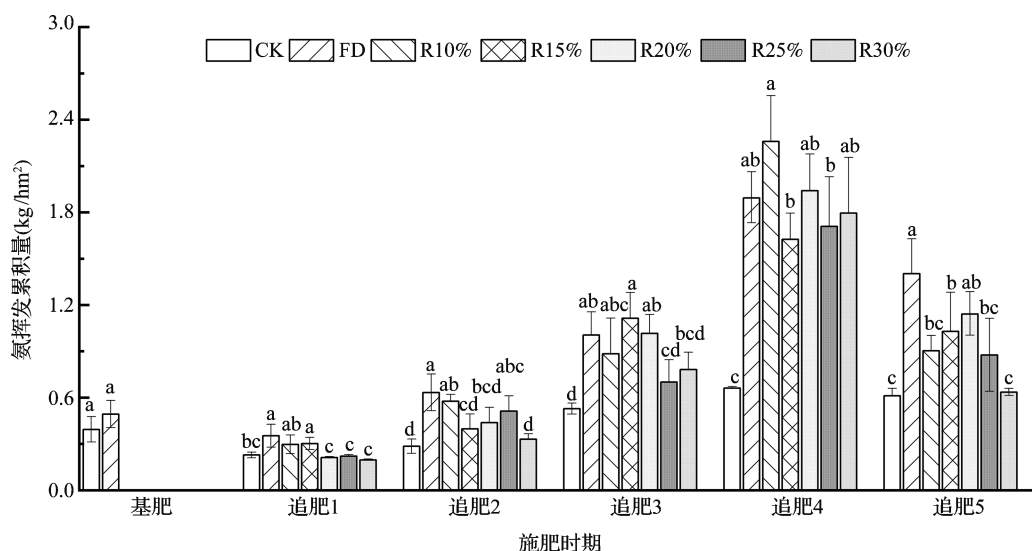


图 2 不同施肥时期的土壤氮挥发累积量

注：同一施肥时期的不同小写字母表示处理间存在显著差异 ($P < 0.05$)。

显著增加土壤氨挥发累积量。在 5 次追肥中, FD 处理相比 CK 处理均显著增加了土壤氨挥发累积量, 但部分减氮处理 (R10% ~ R30%) 与 CK 处理间的氨挥发累积量差异不显著。对比 5 次追肥的氨挥发累积量, 各处理均在第 4 次追肥后达到最大氨挥发排放量, 在该时期氨挥发累积量的大小排序为 R10% > R20% > FD > R30% > R25% > R15% > CK。R10% 处理在第 4 次追肥后氨挥发累积量最高, 但其与 FD 处理间不存在显著差异。

对比各处理在番茄生长期间的氨挥发累积量 (图 3) 可以看出, 各施肥处理的氨挥发累积量均显著高于 CK 处理, 其中 FD 处理的氨挥发累积量最高, 达到了 5.8 kg/hm^2 , 其余各减氮处理氨挥发累积量均低于 FD 处理。FD 和 R10% 处理与减氮 R25% 和 R30% 处理间的氨挥发累积量存在显著

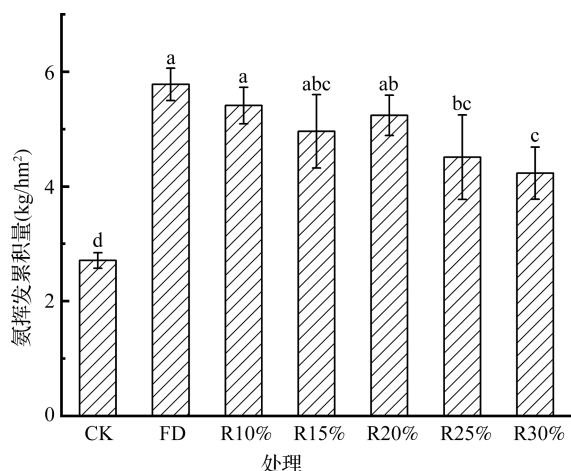


图 3 不同处理的土壤氨挥发累积量

注: 不同小写字母表示处理间存在显著差异 ($P < 0.05$)。

差异, R15% 处理与氨挥发累积量最低的 R30% 处理没有显著差异。各处理减去 CK 处理的氨挥发累积量后, 由化肥氮施用导致的氨挥发表观损失率分别为 0.96%、0.91%、0.79%、0.93%、0.68% 和 0.61% (FD ~ R30%)。对比由化肥氮施用导致的氨挥发损失量, 减氮 30% 处理相比 FD 处理减少了 50.4% 的氨挥发累积量。

2.3 不同氮肥施用量下的经济效益分析

对水肥一体化技术下设施番茄氮肥减施的经济效益 (表 2) 进行分析。由于太湖地区灌溉水源充足, 灌溉成本及采用水肥一体化技术的节水成本等未在此考虑。各施氮处理所施用的肥料价格如下: 有机肥 0.57 元/kg、尿素 2.00 元/kg、磷酸二氢钾 5.20 元/kg、硫酸钾 3.00 元/kg。种苗和农药成本为 20000 元/hm², 水肥一体化设备维护以平均 10000 元/hm² 计算。人工费以 100 元/(人·d) 计算, 包括施肥、打药、除草、番茄采摘和整枝等其他田间管理, 其中施肥和灌溉人工以 3000 元/hm² 计算, 打药和除草人工以 2000 元/hm² 计算, 番茄采摘人工以 600 元/t (番茄) 计算, 整枝等其他田间管理以 10000 元/hm² 计算。番茄销售价格以 2.2 元/kg 计算。CK 处理的总成本最低, 约为 99214 元/hm², 施氮处理的总成本相比 CK 处理平均增加了 9.97%, 主要体现在有机肥施用的人工成本和产量增加后相应的采摘成本。与 FD 处理相比, 减施氮肥 10% ~ 20% 均可使利润增加, 其中减氮 15% 利润增加最高, 达到了 10365 元/hm², 增幅为 8.37%; 减施氮肥 25% ~ 30% 使毛利润有所下降, 其中 R30% 处理毛利润下降最多, 减收幅度达到 4.07%。

表 2 不同处理经济效益统计

处理	有机肥 (元/hm²)	化肥 (元/hm²)	人工 (元/hm²)	总成本 (元/hm²)	产值 (元/hm²)	毛利润 (元/hm²)	增收 (元/hm²)	增收 (%)
CK	0	0	69214	99214	209785b	110571b	-13200b	-10.66
FD	8550	3591	78289	108289	232060ab	123771ab	—	—
R10%	8550	3493	79577	109577	236783a	127206ab	3435ab	2.78
R15%	8550	3444	82176	112176	246312a	134136a	10365a	8.37
R20%	8550	3395	80449	110449	239979a	129530a	5759a	4.65
R25%	8550	3356	77743	107743	230059ab	122315ab	-1456ab	-1.18
R30%	8550	3297	76402	106402	225139ab	118738ab	-5033ab	-4.07

注: 同一列数据后的不同小写字母表示在 0.05 水平上存在显著差异。总成本 = 有机肥 + 化肥 + 人工 + 种苗和农药 + 水肥一体化设备维护费, 毛利润 = 产值 - 总成本。

3 讨论

设施菜地中化肥的施用量普遍偏高,化肥减氮在提高作物产量和氮肥利用率上已得到普遍认可^[13-15]。本研究中,与常规施肥量相比,5个减氮处理的番茄产量均未显著降低,其中减化肥氮15%处理在番茄产量、地上部氮累积量和氮肥表观利用率上均为最高(表1)。李英楠等^[16]的研究显示,与常规施肥(15-15-15复合肥4995 kg/hm²)相比,减氮15%未显著减少番茄单果质量和单株结果数,产量增加了1.3%。孙丽等^[17]在巢湖流域减量施肥对番茄产量的研究中发现,与习惯施肥相比,减氮15%可使番茄产量提高24.3%,减氮35%使番茄产量降低8.2%,该结果与本试验减氮15%可增产6.1%,减氮30%产量降低8.6%的结果(表1)类似。这说明在农民习惯施肥量的基础上减氮15%可维持番茄高产量,而当减氮量达到25%以上时,减产效果才开始显现。本研究中,增收区间为减氮10%~20%,与番茄的增产区间一致,这说明水肥一体化技术下,增收的前提是增产。王文军等^[18]的研究显示,与农民习惯施肥相比,减氮20%显著提高了利润,而减氮40%并未显著提高利润。杜文波^[19]的研究表明,与常规漫灌相比,滴灌水肥一体化净产值提高了25876元/hm²,其中产量提高带来的增收(24008元/hm²)远高于灌溉投入(954元/hm²)和病虫害投入(914元/hm²)。此外,与常规撒施相比,利用水肥一体化施肥可以在灌溉与施肥上节约一定的人工成本,但这种节约可能在大面积、长时期的种植中才能得到有效体现。

太湖地区设施蔬菜化肥常规撒施方式下,化肥氮表观利用率仅为18.8%^[14]。本研究中减氮15%处理的氮肥表观利用率达到了41.3%(表1)。蔡树美等^[20]报道设施黄瓜采用水肥一体化技术在适宜施氮量下的氮肥表观利用率超过了40%;邢英英等^[21]报道关中平原地区番茄采用水肥一体化技术,在适宜的氮肥用量和灌溉模式下,氮肥表观利用率最高可达60%。与之相比,在太湖地区设施蔬菜采用水肥一体化后其氮肥利用率仍有提升空间,可在水溶肥中增施增效剂,如硝化抑制剂、生物刺激素等^[22-23],或在基肥中添加生物质炭来进一步提高氮肥利用率,减少环境排放^[24]。本研究中减氮30%处理的产量虽未显著减少,但氮肥表

观利用率相比减氮15%处理却下降了58%,仅有17.35%,这主要是由于减氮30%处理的茎叶生物量显著低于其他处理,从而导致了该处理的地上部氮累积量比减氮15%处理下降了22.9%,造成了氮肥表观利用率急剧下降。

氨挥发是化肥氮损失的重要途径之一。本研究中,常规施氮量处理采用水肥一体化技术的氨挥发累积量为N 5.78 kg/hm²,表观损失率仅为0.96%(图3)。这可能是由于大棚内通风量有限,常常具有很高的湿度,同时,采用水肥一体化技术进行少量多次灌溉,不仅使肥料随水进入了土体,还使土壤保持了较高的含水量。有研究表明,80%的田间持水量相比20%田间持水量可以有效减少土壤氨挥发量2~3倍^[25];设施菜地相同施氮条件下,降低灌溉量可使氨累积排放量增加46.7%^[26]。华北地区玉米采用水肥一体化技术氨挥发累积量最高仅为0.99 kg/hm²^[27];河套灌区采用水肥一体化技术种植玉米,全生育期土壤氨挥发量占施氮量的1.93%~3.52%^[28];新疆地区棉田采用膜下滴灌,氨挥发损失率仅为0.13%~0.20%^[29]。这些研究均显示采用水肥一体化技术可以大大减少土壤氨挥发损失。目前,基于大田作物土壤氨挥发损失的研究较多,结论也相对一致,而对于蔬菜种植过程中的氨挥发损失研究较少,且结果存在较大差异。龚巍巍等^[30]报道种植上海青和生菜,肥料撒施后监测的氨挥发损失率约在21.3%~24.0%之间。贺发云等^[31]报道在pH为7.7的大白菜试验地上,当施氮量为300 kg/hm²时,氨挥发损失率为12.1%;在pH为5.4的小青菜试验地上,氨挥发损失率仅为0.29%~0.33%。习斌等^[32]报道设施番茄化肥氮施用量为360 kg/hm²时,氨挥发损失率为0.73%。一般认为,土壤pH是影响氨挥发损失的重要因素,而设施菜地由于连续大量施肥,极易造成土壤酸化,可能由此造成了设施土壤氨挥发损失关注度不高的现象。但最新研究表明,设施大棚内氨挥发损失也可以达到较高的水平,如武星魁等^[33]报道设施大棚(pH 6.6)种植包心菜和小青菜,氨挥发损失率分别为12.2%和10.1%;在设施土壤低氨挥发率的结果(0.80%~3.45%)下,随着土壤pH的增加,氨挥发量反而呈现减少的趋势^[26];在pH为7.99的设施菜地上种植茄子的氨挥发率仅为1.06%~1.29%^[34]。由此可见,土壤pH值可能并非是菜地土壤氨挥发的唯一决定因素,

土壤含水量、温度等因素也可直接影响土壤氮挥发过程^[35-36]。

4 结论

在太湖地区水肥一体化模式下, 现有的常规化肥氮用量存在过量问题。综合考虑设施番茄产量、氮肥利用率及氮挥发排放等因素, 在常规用量上可减施 15% 的化肥氮。在化肥氮减施 15% 处理下, 氮肥表观利用率达 41.3%, 比常规用量处理高 43.1%; 该处理下利润增加量最高, 达到了 10365 元/hm², 增幅为 8.4%。相比常规用量处理, 减氮 15%, 氮挥发排放量可减少 17.7%。常规化肥氮用量减氮 15%, 可维持设施番茄高产、增效的同时实现环境的减排。此外, 水肥一体化技术在太湖地区应用带来的增收主要是由于增产的贡献, 在种植规模逐渐扩大时, 对人工成本的节约将快速显现。

参考文献:

- [1] 朱方林, 侯喜林. 江苏省蔬菜产业发展政策建议[J]. 长江蔬菜, 2020 (6): 33-35.
- [2] 黄绍文, 唐继伟, 李春花, 等. 我国蔬菜化肥减施潜力与科学施用对策[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23 (6): 1480-1493.
- [3] 闵炬, 孙海军, 陈贵, 等. 太湖地区集约化农田氮素减排增效技术实践[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37 (11): 2418-2426.
- [4] 蒋卫杰, 邓杰, 余宏军. 设施园艺发展概况、存在问题与产业发展建议[J]. 中国农业科学, 2015, 48 (17): 3515-3523.
- [5] Min J, Zhao X, Shi W M, et al. Nitrogen balance and loss in a greenhouse vegetable system in Southeastern China[J]. Pedosphere, 2011, 21 (4): 464-472.
- [6] 张锋. 中国化肥投入的面源污染问题研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2011.
- [7] 杨林章, 王德建, 夏立忠. 太湖地区农业面源污染特征及控制途径[J]. 中国水利, 2004, (20): 29-30, 5.
- [8] 郭健. 劳动力成本上升对我国农业种植结构的影响研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2018.
- [9] 李若楠, 武雪萍, 张彦才, 等. 滴灌氮肥用量对设施菜地硝态氮含量及环境质量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21 (6): 1642-1651.
- [10] 黄倩楠, 吴文勇, 韩玉国, 等. 滴灌施肥时机对设施蔬菜产量品质与氮肥利用效率的影响[J]. 水土保持学报, 2019, 33 (3): 292-297, 304.
- [11] 白由路. 高效施肥技术研究的现状与展望[J]. 中国农业科学, 2018, 51 (11): 2116-2125.
- [12] 中国科学院南京土壤研究所土壤系统分类课题组, 中国土壤系统分类课题研究协作组. 中国土壤系统分类检索 (第3版)[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2001.
- [13] 刘兆辉, 薄录吉, 李彦, 等. 氮肥减量施用技术及其对作物产量和生态环境的影响综述[J]. 中国土壤与肥料, 2016 (4): 1-8.
- [14] 闵炬, 施卫明. 不同施氮量对太湖地区大棚蔬菜产量、氮肥利用率及品质的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2009, 15 (1): 151-157.
- [15] 张福锁, 马文奇. 肥料投入水平与养分资源高效利用的关系[J]. 土壤与环境, 2000, 9 (2): 154-157.
- [16] 李英楠, 白亚丽, 杜南山, 等. 有机复混肥替代化肥减施对日光温室番茄生长及土壤环境的影响[J]. 中国瓜菜, 2019, 32 (11): 43-47.
- [17] 孙丽, 马友华, 何传龙, 等. 巢湖流域减量施肥对番茄产量品质和土壤硝态氮的影响[J]. 中国农学通报, 2011, 27 (25): 250-255.
- [18] 王文军, 朱克保, 叶寅, 等. 水肥一体肥料减量对大棚番茄产量、品质和氮肥利用率的影响[J]. 中国农学通报, 2018, 34 (28): 38-42.
- [19] 杜文波. 日光温室番茄应用滴灌水肥一体化技术初探[J]. 山西农业科学, 2009, 37 (1): 58-60.
- [20] 蔡树美, 张中华, 徐四新, 等. 不同灌溉方式下施氮水平对设施春黄瓜产量及氮肥利用率的影响[J]. 生态与农村环境学报, 2018, 34 (7): 606-613.
- [21] 邢英英, 张富仓, 张燕, 等. 滴灌施肥水肥耦合对温室番茄产量、品质和水氮利用的影响[J]. 中国农业科学, 2015, 48 (4): 713-726.
- [22] Sun L, Lu Y, Yu F, et al. Biological nitrification inhibition by rice root exudates and its relationship with nitrogen-use efficiency[J]. New Phytologist, 2016, 212 (3): 646-656.
- [23] 杨俊刚, 李艳梅, 孙焱鑫, 等. UAN添加氮肥抑制剂对生菜产量、品质及土壤氮平衡的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2020 (1): 67-74.
- [24] Tan G, Wang H, Xu N, et al. Biochar amendment with fertilizers increases peanut N uptake, alleviates soil N₂O emissions without affecting NH₃ volatilization in field experiments[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2018, 25 (9): 8817-8826.
- [25] Liu G, Li Y, Alva A K. High water regime can reduce ammonia volatilization from soils under potato production[J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2007, 38 (9-10): 1203-1220.
- [26] 罗伟, 程于真, 陈竹君, 等. 日光温室番茄-西瓜轮作系统不同水氮处理氮挥发特征[J]. 应用生态学报, 2019, 30 (4): 1278-1286.
- [27] 李格. 华北地区夏玉米滴灌施肥的肥料效应研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2019.
- [28] 李哲, 屈忠义, 任中生, 等. 河套灌区滴灌施肥对土壤氮挥发及玉米氮肥利用率的影响[J]. 灌溉排水学报, 2018, 37 (11): 37-42, 49.

- [29] 王肖娟, 危常州, 张君, 等. 灌溉方式和施氮量对棉田氮肥利用率及损失的影响[J]. 应用生态学报, 2012, 23 (10): 2751-2758.
- [30] 龚巍巍, 张宜升, 何凌燕, 等. 菜地氨挥发损失及影响因素原位研究[J]. 环境科学, 2011, 32 (2): 345-350.
- [31] 贺发云, 尹斌, 金雪霞, 等. 南京两种菜地土壤氨挥发的研究[J]. 土壤学报, 2005, 42 (2): 253-259.
- [32] 习斌, 张继宗, 左强, 等. 保护地菜田土壤氨挥发损失及影响因素研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16 (2): 327-333.
- [33] 武星魁, 姜振萃, 陆志新, 等. 有机肥部分替代化肥氮对叶菜产量和环境效应的影响[J]. 中国生态农业学报, 2020, 28 (3): 349-356.
- [34] 佟鑫, 王珊珊, 张丽娟, 等. 不同施氮模式对设施茄子产量、品质及氮素气态损失的影响[J]. 土壤通报, 2019, 50 (3): 662-669.
- [35] Zhang Y S, Luan S J, Chen L L, et al. Estimating the volatilization of ammonia from synthetic nitrogenous fertilizers used in China[J]. Journal of Environmental Management, 2011, 92 (3): 480-493.
- [36] 卢丽丽, 吴根义. 农田氨排放影响因素研究进展[J]. 中国农业大学学报, 2019, 24 (1): 149-162.

Evaluation of the effectiveness of water and fertigation on efficiency increase and emission reduction for greenhouse tomato production in the Taihu Lake region

WANG Yuan¹, XU Ji-yuan^{1#}, PAN Yun-feng^{2*}, MA Ming-kun¹, JU Sheng-rong¹, ZHAO Dong-qing², YANG Dong-ping², MIN Ju¹, SHI Wei-ming¹ (1. Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Nanjing Jiangsu 210008; 2. Yixing Soil and Fertilizer Station, Yixing Jiangsu 214206)

Abstract: The intensive production of greenhouse vegetables in the Taihu Lake region has a high demand for labor and high fertilizer consumption, making a significant contribution to non-point source pollution in this area. Water and fertigation integration technology has excellent potential for labor-saving, improving fertilizer use efficiency, and reducing nitrogen emissions. This technology has been widely used in Northern China for greenhouse vegetable production. However, there is a lack of evaluation of the application's effectiveness in the Taihu Lake region. In order to clarify the effects of water and fertigation integration technology on fertilizer reduction, efficiency improvement and nitrogen emission reduction on greenhouse tomatoes in the Taihu Lake region, a field experiment was set up with conventional full dose fertilizer (FD) treatment, non-fertilizer (CK) treatment and a series of treatments with different percentages of nitrogen fertilizer reduction: 10% (R10%), 15% (R15%), 20% (R20%), 25% (R25%), 30% (R30%). The effects of water and fertigation integration technology on tomato yield, nitrogen use efficiency, soil ammonia volatilization, and economic efficiency were analyzed in detail. The results showed that under the water and fertigation integration technology reducing the nitrogen fertilizer application of 10% to 20% could effectively increase the tomato yield, and the R15% treatment had the highest yield, nitrogen use efficiency, and economic efficiency. Compared with FD treatment, the R15% treatment increased yield by 6.1%, increased gross profit by 8.4%, reduced ammonia volatilization by 17.7%, and reached a high nitrogen use efficiency of 41.3%. This research could provide scientific guidance for the appropriate application and popularization of water and fertigation integration technology in the Taihu Lake region.

Key words: water and fertigation integration; fertilizer reduction; nitrogen use efficiency; economic benefit; environmental effect