

DOI: 10.11766/trxb202007260420

王远, 许纪元, 潘云枫, 赵冬青, 杨东平, 巨昇容, 闵炬, 施卫明. 长江下游地区水肥一体化对设施番茄氮肥利用率及氨挥发的影响 [J]. 土壤学报, 2022, 59 (3): 776–785.

WANG Yuan, XU Jiyuan, PAN Yunfeng, ZHAO Dongqing, YANG Dongping, JU Shengrong, MIN Ju, SHI Weiming. Effects of Fertigation on Nitrogen Use Efficiency and Ammonia Volatilization in Greenhouse Tomato Cultivation in Lower Reaches of the Yangtze River [J]. Acta Pedologica Sinica, 2022, 59 (3): 776–785.

## 长江下游地区水肥一体化对设施番茄氮肥利用率及氨挥发的影响<sup>\*</sup>

王 远<sup>1</sup>, 许纪元<sup>1</sup>, 潘云枫<sup>2</sup>, 赵冬青<sup>2</sup>, 杨东平<sup>2</sup>, 巨昇容<sup>1</sup>, 闵 炬<sup>1</sup>,  
施卫明<sup>1†</sup>

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

**摘 要:** 长江下游地区设施菜地面源污染问题突出、劳动力紧缺, 亟需节工、增效且环境友好的施肥技术; 水肥一体化滴灌施肥在北方设施蔬菜生产上得到广泛应用, 而应用在长江下游地区后对氮肥利用率及氨挥发的影响如何, 尚不明确。采用田间小区试验对设施番茄滴灌施肥后的氮肥利用率、土壤氨挥发和速效氮 (铵态氮和硝态氮) 残留等指标进行了系统观测和分析。结果表明: 在相同施氮量下, 相比传统肥料撒施方式, 滴灌施肥可使氮肥利用率由 23.92% 提高至 40.89%, 全生育期氨挥发累积量由 37.25 kg·hm<sup>-2</sup> 减少至 3.07 kg·hm<sup>-2</sup>, 氨挥发损失率由 16.56% 减少至 1.36%, 显著减少了 31.85% 的土壤硝态氮 (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N) 残留量。本研究为设施菜地水肥一体化技术在长江下游地区的推广应用提供了科学依据。

**关键词:** 水肥一体化; 设施蔬菜; 氮肥利用率; 氨挥发; 增效减排

**中图分类号:** X511; S641 **文献标志码:** A

## Effects of Fertigation on Nitrogen Use Efficiency and Ammonia Volatilization in Greenhouse Tomato Cultivation in Lower Reaches of the Yangtze River

WANG Yuan<sup>1</sup>, XU Jiyuan<sup>1</sup>, PAN Yunfeng<sup>2</sup>, ZHAO Dongqing<sup>2</sup>, YANG Dongping<sup>2</sup>, JU Shengrong<sup>1</sup>, MIN Ju<sup>1</sup>, SHI Weiming<sup>1†</sup>

(1. State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2. Yixing Bureau of Agriculture and Rural Affairs, Yixing, Jiangsu 214206, China)

**Abstract:** 【Objective】Greenhouse vegetable production in China has played an important role in ensuring market vegetable

<sup>\*</sup> 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) 和太湖水污染治理省级专项资金科研课题 (TH2018305) 共同资助 Supported by the National Key Research and Development Program of China (No. 2018YFD0800204), the Key Research and Development Program of Shandong Province, China (No. 2019JZZY010701) and the Scientific Research on Comprehensive Treatment of Taihu Lake Water Environment in Jiangsu Province of China (No. TH2018305)

<sup>†</sup> 通讯作者 Corresponding author, E-mail: wmsi@issas.ac.cn

作者简介: 王 远 (1988—), 男, 河南漯河人, 博士, 主要从事农田面源污染防控和作物氮素营养诊断方面的研究。E-mail: wangyuan@issas.ac.cn

收稿日期: 2020-07-26; 收到修改稿日期: 2020-09-24; 网络首发日期 (www.cnki.net): 2020-11-06

supply and increasing the income of farmers. As in the greenhouse vegetable production, a high rate of fertilizer was applied, the production brings about a series of environmental problems, such as soil degradation and increased risk of greenhouse gas emission, which undermines the sustainability of the greenhouse vegetable production. In the lower reaches of the Yangtze River, the problem of non-point source pollution and labor shortage the greenhouse vegetable production faces are prominent. It has become an urgent need to have some labor-saving, efficiency-enhancing, and environment-friendly fertilization techniques. Fertigation is a technology that can save both water and fertilizer, improve fertilizer utilization efficiency, and reduce greenhouse gas emission. Fertigation is mainly applied in greenhouses in the water-deficient areas in North China, and no so common in the lower reaches of the Yangtze River. So little is available in the literature about the effects of fertigation on emission reduction and efficiency improvement in this area. 【Method】 In this study, a field experiment, designed to have three treatments, i.e. CK (no N fertilizer applied), SF (chemical fertilizer broadcast) and DF (fertigation), was conducted in Yixing, Jiangsu. Tomato (*Solanum lycopersicum*) was grown in a row of plastic greenhouses. In Treatment SF, chemical fertilizer was broadcast three times, one base application and two topdressings, making up a total of 225 kg·hm<sup>-2</sup> nitrogen (N), and in Treatment DF, 225 kg·hm<sup>-2</sup> fertilizer was divided into five portions applied with irrigation separately as topdressing. Then, yield, N use efficiency, ammonia volatilization rate, and soil soluble N were measured for each treatment and systematically analyzed. 【Result】 Results show that fertigation significantly improved N use efficiency, and reduced soil ammonia volatilization rate and cumulative ammonia emissions, as compared with the treatment with fertilizer broadcast at the same N application rate. Treatment DF increased N use efficiency from 23.92% to 40.89% and was 71.10% higher than Treatment SF, and reduced cumulative ammonia emission from 37.25 kg·hm<sup>-2</sup> to 3.07 kg·hm<sup>-2</sup>, and the ammonia loss rate from 16.56% to 1.36% during the entire tomato growth period. In Treatment CK, SF and DF, the mean NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N residue in soil was 32.18, 45.70, and 67.06 mg·kg<sup>-1</sup>, and the mean NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N residue in the 0-50 cm soil layer was 3.07, 8.27, and 19.27 mg·kg<sup>-1</sup>, respectively. Fertigation significantly reduced the soil NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N residues by 31.85% as compared to the treatment of fertilizer broadcast. However, it increases the risk of N leaching to some extent. 【Conclusion】 Fertigation is an efficient method combining irrigation and fertilization, which can significantly improve N use efficiency and reduce ammonia volatilization loss and soluble N residues, when applied to greenhouse vegetable fields in the lower reaches of the Yangtze River. All the findings of the research may serve as a scientific basis for extrapolation of the technique of fertigation in the Lower Yangtze River Region.

**Key words:** Fertigation; Greenhouse vegetables; Nitrogen use efficiency; Ammonia volatilization; Efficiency increase and emission reduction

设施作物种植具有“高投入、高产出”的特点。近年来,我国设施菜地面积不断扩大,在农产品供给和农业农村经济发展方面发挥了重要作用<sup>[1]</sup>。2008年至今,我国设施作物种植面积从 81 万 hm<sup>2</sup> 增加至 370 万 hm<sup>2</sup><sup>[1-2]</sup>。设施蔬菜生产快速发展的同时也伴随着过量化肥和农药的投入,据文献统计:我国设施蔬菜生产中化肥养分用量(以 N、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 和 K<sub>2</sub>O 计)平均达到 1 354.5 kg·hm<sup>-2</sup>,为全国农作物化肥养分平均用量的 4.1 倍<sup>[3-4]</sup>;单茬蔬菜盈余氮量平均达到 324 kg·hm<sup>-2</sup>,以淋溶、硝化反硝化和氨挥发形式损失的氮达到 309 kg·hm<sup>-2</sup><sup>[5]</sup>。长江下游地区经济较为发达,在经济利益的驱动下大量的稻田改为设施菜地,种植面积增长迅速。为确保蔬菜的稳产高产通常大量施用氮肥,然而氮肥利用率较低,仅为 18.8%<sup>[6]</sup>,大量的

氮素损失进入环境中,面源污染问题日益严重<sup>[7-8]</sup>。

水肥一体化技术是一种将灌溉和施肥融为一体的技术,一般是将可溶性固体或液体肥料与灌溉水均匀混合后,采用滴灌的形式进行灌溉。滴灌能较为精准地将肥水施入作物根区,有效降低土壤水分和养分的深层渗漏,相比常规的肥料撒施可显著降低水、肥用量,提高水、肥利用效率<sup>[9-10]</sup>。农业农村部于 2016 年印发了《推进水肥一体化实施方案》,计划至 2020 年底水肥一体化技术推广应用面积达到 1.5 亿亩(合 1 000 万 hm<sup>2</sup>),其中设施菜地是水肥一体化技术推广应用的一个重要场景<sup>[3]</sup>。在山东省寿光市开展的水肥一体化研究显示,滴灌施肥方式可在减少氮肥投入 50%的前提下增加番茄产量,氮肥的偏生产力为常规漫灌方式的 3 倍,灌溉水利

用率提高 1 倍<sup>[11]</sup>。西北半干旱地区设施番茄采用滴灌施肥产量增加 31 t·hm<sup>-2</sup>，水分利用效率和氮肥利用率分别增加 46.4%和 76.5%<sup>[12]</sup>。长江下游地区河网密集，灌溉成本较低，但劳动力成本和农田肥料投入量远高于西部地区。因水肥一体化技术具有省工、省力、节肥的特点，近年来在该地区得到了广泛的推广应用，其节肥和增产效果也得到了一定验证<sup>[13-14]</sup>。然而，应用水肥一体化技术是否可有效降低该地区设施蔬菜生产过程中的氮素环境排放，降低的程度如何，尚缺乏数据支撑。

氨挥发是氮肥环境排放途径中占比最大的途径（N<sub>2</sub>除外）<sup>[15-16]</sup>。随着施氮量的增加和温度的升高，土壤氨挥发速率增大，累积氨挥发量显著增加<sup>[17-18]</sup>。设施蔬菜种植过程中大量施用有机肥和化肥，同时，设施内温度远高于开放环境，加之设施大棚在夏季均留有通风口降温除湿，这些因素大大增加了设施蔬菜体系氨挥发排放的风险。丁武汉等<sup>[5]</sup>通过文献调研和参数估算对全国 18 个省份的设施菜地氮素平衡进行了分析，得出氨挥发损失率平均为 10.32%。设施菠菜施用农民传统堆肥后氨挥发损失率达 10.97%<sup>[19]</sup>。不同施肥方式对土壤氨挥发有显著影响，与尿素表施相比，深施可降低 84.7%的氨挥发累积量<sup>[20]</sup>。当施肥深度达到 10 cm 以上时，氨挥发损失率降至施氮量的 2%以下<sup>[21]</sup>，氮肥表观利用率可达 60%<sup>[22]</sup>。西北较为干旱的地区采用水肥一体化方式种植大田作物，氨挥发损失率仅为 0.20%~3.52%<sup>[23-24]</sup>。对于设施菜地种植体系，与农户习惯的氮素表施相比，应用水肥一体化施肥后氨挥发损失情况如何，目前仍未见相关研究报道。

基于此，本研究选取广泛种植的设施番茄作为研究对象，在长江下游地区的江苏省宜兴市开展水肥一体化田间试验，对常规氮肥撒施和水肥一体化滴灌两种施肥方式下的氮肥利用率、土壤氨挥发和速效氮（铵态氮和硝态氮）残留等指标进行观测和分析，为长江下游地区设施菜地水肥一体化技术的推广应用提供科学依据。

## 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（31.38259°N，119.96507°E）进行。该地属亚热带季

风气候，年均气温 17.4 °C，4—8 月月平均气温 16.1~28.3 °C，年均无霜期 240 d 左右，年均日照时数 1 700 h，年均降水量 1 177 mm。试验田位于连栋塑料大棚内，棚龄 2 年，改建大棚前为稻麦轮作农田。根据中国土壤系统分类命名，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<sup>-1</sup>，全氮 1.54 g·kg<sup>-1</sup>，硝态氮（NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N）60.81 mg·kg<sup>-1</sup>，铵态氮（NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N）11.79 mg·kg<sup>-1</sup>，有效磷 109.5 mg·kg<sup>-1</sup>，速效钾 169.5 mg·kg<sup>-1</sup>，pH 为 5.80（水土比 2.5 : 1）。

### 1.2 试验设计

试验共设 3 个处理：无化肥氮处理（CK）、化肥撒施（SF）和水肥一体化滴灌（DF）。各处理在移栽前施用 15 t·hm<sup>-2</sup> 商品有机肥，有机肥的主要成分为腐熟羊粪，N、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 和 K<sub>2</sub>O 含量分别为 6.2 g·kg<sup>-1</sup>、4.1 g·kg<sup>-1</sup> 和 3.5 g·kg<sup>-1</sup>。各处理的化肥用量、施肥次数和施肥日期见表 1。化肥氮采用尿素、磷肥采用磷酸二氢钾（KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>）、钾肥在扣除 KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> 中所含钾素后，用硫酸钾（K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>）补全用量。小区采用随机区组排列，每处理设 3 个重复，小区面积 36.1 m<sup>2</sup>。供试作物为番茄（*Solanum lycopersicum*），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，DF 处理滴灌追肥时，CK 和 SF 处理同步采用滴灌进行灌溉，每次灌溉水用量 135~180 m<sup>3</sup>·hm<sup>-2</sup>，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

采用通气法对施肥后的土壤氨挥发进行连续监测，采样装置为聚氯乙烯硬质塑料管，内径 15 cm，高 20 cm。为了减少因装置安放位置造成的测试结果差异，在每个试验小区内均匀布设 5 个采集装置。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 1 000 mL），下层海绵（样品）置于塑料管中部，上层海绵（隔离空气中的氨）与塑料管顶部齐平。施肥后前 6 天每天固定时间更换下层海绵，之后每 3 天更换一次下层海绵，上层海绵每 3 天更换一次，直至检测氨挥发量接近空白处理。海绵样品中的氨采用 1 mol·L<sup>-1</sup> KCl 溶液浸提，靛酚蓝比色法测定。

表 1 不同处理的化肥施用情况

Table 1 Chemical fertilization relative to treatment

处理 Treatment	化肥用量 Chemical fertilizer application rate/ (kg·hm <sup>-2</sup> )			基肥 Basal fertilizer	追肥 1 <sup>1)</sup> Topdressing 1	追肥 2 Topdressing 2	追肥 3 Topdressing 3	追肥 4 Topdressing 4	追肥 5 Topdressing 5
	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	04-14 <sup>2)</sup>	04-27	05-12	05-27	06-12	06-24
	CK	0	75	330	50%	0	25%	0	25%
SF	225	75	330	50%	0	25%	0	25%	0
DF	225	75	330	0%	10%	20%	30%	30%	10%

注: CK, 无化肥氮处理; SF, 化肥撒施; DF, 水肥一体化滴灌。<sup>1)</sup> 追肥 1~追肥 5 特指 DF 处理的追肥时期, CK 和 SF 处理的第一次和第二次追肥时间与 DF 处理的追肥 2 和追肥 4 时间一致。<sup>2)</sup> 04-12 等表示施肥日期(mm-dd)。Note: CK, no chemical N applied; SF, fertilizer broadcast; DF, fertigation. <sup>1)</sup> Topdressing 1-Topdressing 5 refers specifically to the five times of topdressing in Treatment DF, and the first and second topdressing in Treatment CK and SF coincided with the second and fourth topdressing in treatment DF in timing. And <sup>2)</sup> 04-12 indicates date of fertilization (mm-dd) .

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。番茄收获后采集各小区 0~20 cm、20~40 cm 和 40~50 cm 土层的土壤样品, 测试硝态氮和铵态氮含量。番茄茎叶和果实烘干粉碎后测试全氮含量, 计算各处理的氮肥利用率 (nitrogen recovery efficiency, RE<sub>N</sub>) 和农学效率 (agronomic efficiency of applied nitrogen, AE<sub>N</sub>):

$$RE_N = (U - U_0) / F \quad (1)$$

$$AE_N = (Y - Y_0) / F \quad (2)$$

式中,  $U$  为施氮处理的作物收获时地上部氮积累量, kg·hm<sup>-2</sup>;  $U_0$  为未施化肥氮处理的作物收获时地上部氮积累量, kg·hm<sup>-2</sup>;  $F$  为相应处理的氮肥施用量, kg·hm<sup>-2</sup>;  $Y$  为施氮处理所获得的作物产量, kg·hm<sup>-2</sup>;  $Y_0$  为未施化肥氮处理的作物产量, kg·hm<sup>-2</sup>。

#### 1.4 数据分析

采用 Excel 2016 软件对数据进行基础统计, SPSS 18.0 软件进行方差分析, 利用邓肯 (Duncan) 法进行多重比较 ( $P < 0.05$ ), Origin 2019 软件绘图, 图中误差棒为±标准差。

## 2 结果

### 2.1 不同施肥方式下的番茄产量和氮肥利用率

无化肥氮处理 (CK) 的番茄产量最低, 但由于蔬菜田基础肥力较高, 产量仍然达到了 95.36 t·hm<sup>-2</sup>, 化肥撒施 (SF) 和水肥一体化 (DF) 处理的番茄产量分

别较 CK 处理增加了 4.80% 和 10.61% (表 2)。番茄果实干物质质量、茎叶干物质质量和地上部氮积累量在三个处理间的趋势与产量一致, 均为 DF 处理最高, CK 处理最低。SF 处理的氮肥利用率为 23.92%, DF 处理的氮肥利用率相比常规撒施处理增加了 71%, 达到 40.89%。SF 处理的氮肥农学效率为 20.36 kg·kg<sup>-1</sup>, DF 处理相比 SF 处理提高了 121%, 达到 44.98 kg·kg<sup>-1</sup>。

### 2.2 不同施肥方式下的土壤氨挥发速率

水肥一体化肥料施用分为基肥和 5 次追肥, 共计进行了 6 个时间段的氨挥发监测, 单次监测天数为 12~15 d; 常规撒施分为基肥和 2 次追肥, 共进行了 3 个时间段的氨挥发监测, 单次监测天数为 15~21 d, 施肥后的土壤氨挥发速率见图 1。各处理肥料施用后, 土壤氨挥发速率基本呈现先增加后减小的趋势。DF 处理前 4 次施肥 (基肥+3 次追肥) 后的土壤氨挥发速率较低 (图 1a), 平均为 53.58 g·hm<sup>-2</sup>·d<sup>-1</sup>, 较 CK 处理平均高出 1 倍; 第四次和第五次追肥后的土壤氨挥发速率稍高, 氨挥发速率峰值分别达到 482.5 和 215.6 g·hm<sup>-2</sup>·d<sup>-1</sup>, 这主要是由于随着氨挥发监测的进行 (4—7 月), 温度逐渐升高, 加速了氨挥发排放。在第四次施肥后第 9 天和第五次施肥后第 6 天, 水肥一体化处理的土壤氨挥发速率基本降至与不施肥处理接近。

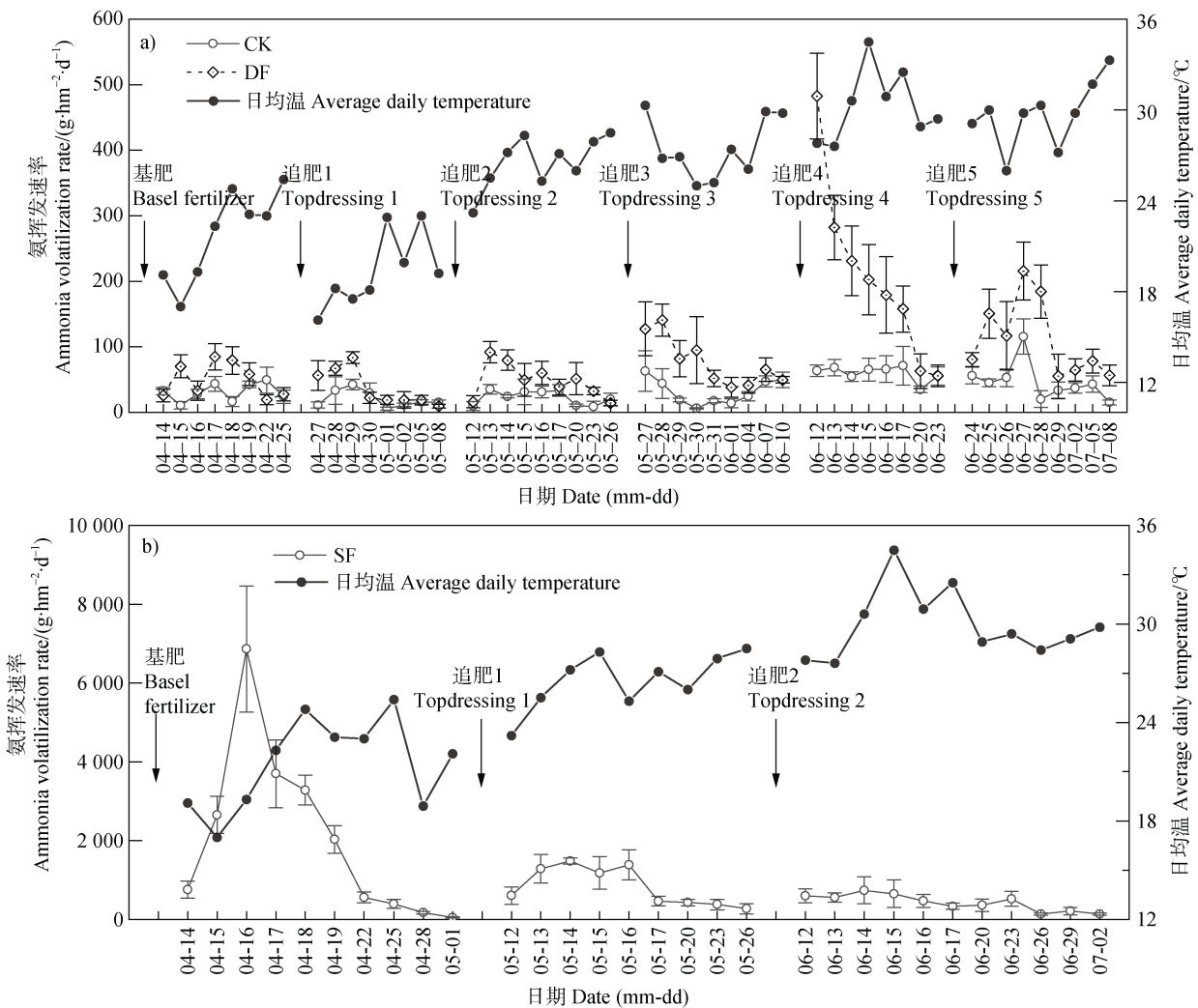
对于 SF 处理的土壤氨挥发速率 (图 1b), 三次施肥中基肥的氨挥发速率峰值最高, 在施肥后第三天达到 6 864 g·hm<sup>-2</sup>·d<sup>-1</sup>, 随后氨挥发速率逐渐下降。第一次追肥和第二次追肥后也均在施肥后第三天出现峰值, 最大氨挥发速率分别为 1 487 和 649.6 g·hm<sup>-2</sup>·d<sup>-1</sup>。

表 2 施肥方式对番茄产量和氮肥利用率的影响

Table 2 Tomato yield and nitrogen use efficiency relative to treatment

处理 Treatment	产量 Yield/ (t·hm <sup>-2</sup> )	果实干物质量 Fruit dry matter/ (t·hm <sup>-2</sup> )	茎叶干物质量 Leaf and stem dry matter/ (t·hm <sup>-2</sup> )	地上部氮积累量 N accumulation in above-ground / (t·hm <sup>-2</sup> )	氮肥利用率 Nitrogen use efficiency /%	氮肥农学效率 Agronomic efficiency of applied nitrogen/ (kg·kg <sup>-1</sup> )
CK	95.36±2.76a	6.67±0.19a	3.87±0.40a	0.21±0.01a		
SF	99.94±4.19ab	7.00±0.29ab	4.51±0.41a	0.26±0.04b	23.92	20.36
DF	105.5±4.73b	7.38±0.33b	4.67±0.53a	0.30±0.02b	40.89	44.98

注：同列的不同小写字母表示处理间差异在 0.05 水平上显著。Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant difference between treatments at the 0.05 level.



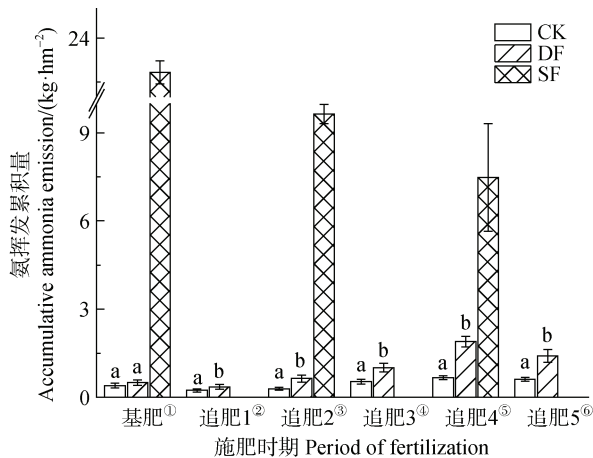
注：取样时间为 1 天时，温度即为当日日均温，当取样时间为 3 天时，温度为 3 天的平均值。Note: When sampling took place once a day, the temperature recorded is the mean temperature of that day, and when sampling did once every 3 days, the temperature recorded is the mean temperature of the 3 days.

图 1 不同施肥方式下的土壤氨挥发速率  
Fig. 1 Soil ammonia volatilization rate relative to treatment

SF 处理的土壤氨挥发速率显著高于 DF 处理, 土壤氨挥发持续时间也 longer。SF 处理的土壤氨挥发峰值较 DF 处理约高 14 倍, SF 处理的土壤氨挥发速率降至与 CK 处理接近时, 所需的时间较 DF 处理多 6~9 d。

### 2.3 不同施肥方式下的土壤氨挥发累积量

SF 处理在单次施肥时期的氨挥发累积量远大于 DF 处理(图 2)。对于 SF 处理, 基肥的氨挥发累积量最高, 达到  $22.83 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ , 占化肥氮施用量的 20.29%; 第一次追肥和第二次追肥的氨挥发累积量依次下降, 分别占当次氮肥施用量的 17.14% 和 13.32%。DF 处理的氨挥发累积量在基肥期与 CK 处理间不存在显著差异, 在追肥期均存在显著差异, 但氨挥发累积量相差并不明显。DF 处理在 5 次追肥期的氨挥发累积量分别占当次氮肥施用量的 1.57%、1.41%、1.49%、2.80% 和 6.24%, 氨挥发损失率随气温的升高逐渐增加。

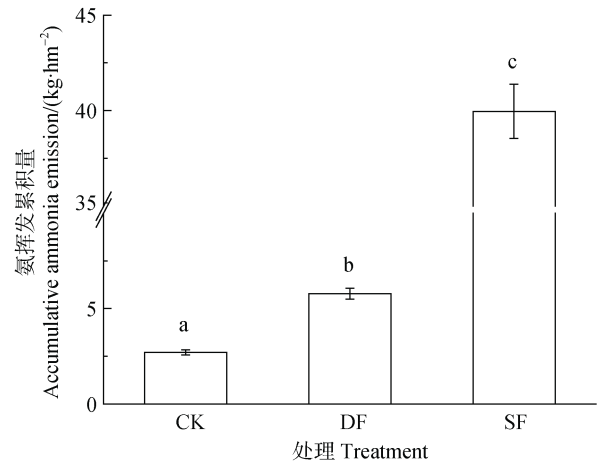


注: 追肥 1~追肥 5 特指 DF 处理、CK 和 SF 处理的第一次和第二次追肥时间与 DF 处理的追肥 2 和追肥 4 时间一致。同一施肥时期的不同字母表示处理间在 0.05 水平上存在显著差异。SF 处理在单次施肥时期的氮肥用量与 DF 处理不同, 故未进行显著性分析。Note: Topdressing 1-Topdressing 5 refers specifically to the five times of topdressing in Treatment DF, and the first and second topdressing in Treatment CK and SF coincided with the second and fourth topdressing in Treatment DF in timing. Different lowercase letters in the same fertilization period indicate significant differences between treatments at the 0.05 level. No significance analysis was conducted between Treatment SF and Treatment DF as they differed in nitrogen application rate in one single fertilization period. ① Basal fertilizer, ② Topdressing 1, ③ Topdressing 2, ④ Topdressing 3, ⑤ Topdressing 4, ⑥ Topdressing 5.

图 2 不同施肥时期的氨挥发累积量

Fig. 2 Accumulative ammonia emission relative to fertilization period

对比不同施肥方式下的氨挥发累积量(图 3), SF 处理的氨挥发累积量最大, 达到了  $39.96 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ , 减去 CK 处理的氨挥发累积量  $2.71 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ , 由当季化肥氮施用导致的氨挥发表观损失率为 16.56%; 水肥一体化处理的氨挥发累积量为  $5.78 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ , 氨挥发表观损失率为 1.36%。



注: 不同小写字母表示处理间差异在 0.05 水平上显著。

Note: Different lowercase letters indicate significant differences between treatments at the 0.05 level.

图 3 不同施肥方式下的氨挥发累积量

Fig. 3 Accumulative ammonia emission relative to treatment

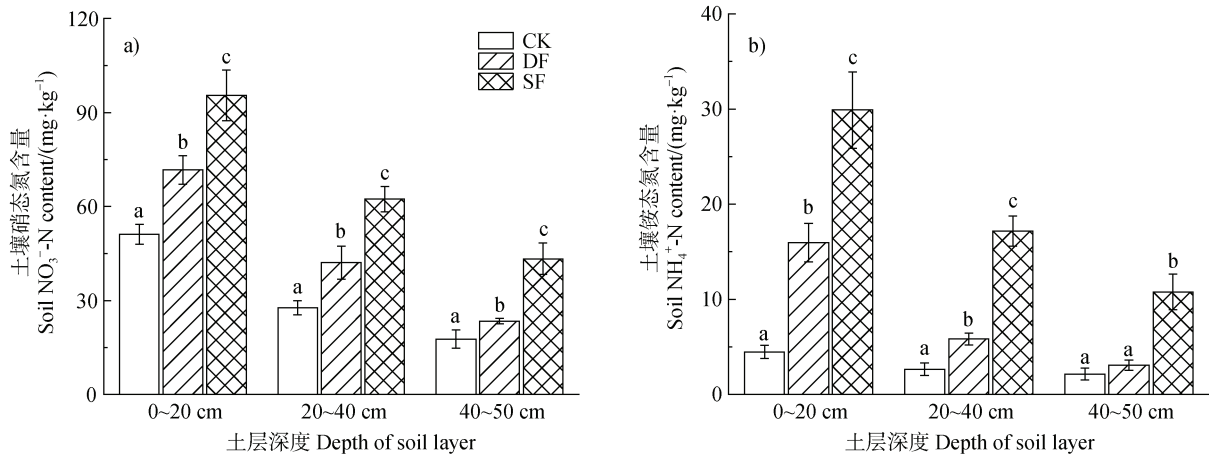
### 2.4 作物收获后的土壤速效氮残留量

番茄收获后, 对不同深度土壤的  $\text{NO}_3^-$ -N 和  $\text{NH}_4^+$ -N 残留量进行测定, 结果显示, 不同施肥方式下的土壤  $\text{NO}_3^-$ -N 和  $\text{NH}_4^+$ -N 残留量均存在较大差异(图 4)。在 0~20 cm 土层, CK、DF 和 SF 处理的土壤  $\text{NO}_3^-$ -N 和  $\text{NH}_4^+$ -N 残留量依次增加。DF 和 SF 处理的土壤  $\text{NO}_3^-$ -N 残留量分别较 CK 处理增加了 40.03% 和 86.63%,  $\text{NH}_4^+$ -N 残留量分别较 CK 处理增加了 257.7% 和 570.3%。在 20~40 cm 土层和 40~50 cm 土层, SF 处理的土壤  $\text{NO}_3^-$ -N 和  $\text{NH}_4^+$ -N 残留量依然显著高于其他两个处理, 但 CK 处理和 DF 处理间残留量的差值随土壤深度增加而逐渐缩小。DF 处理在 40~50 cm 土层的  $\text{NH}_4^+$ -N 残留量与 CK 处理间不存在显著差异。

对比单一处理下不同深度土壤的  $\text{NO}_3^-$ -N 和  $\text{NH}_4^+$ -N 残留量, 各处理均随着土壤深度的增加呈现逐渐减少的趋势, 但 CK 处理的土壤  $\text{NH}_4^+$ -N 残留量随着土壤深度的增加变化很小。CK、DF 和 SF 处理

在 3 个土层的平均  $\text{NO}_3^-$ -N 残留量分别为 32.18、45.70 和 67.06  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，平均  $\text{NH}_4^+$ -N 残留量分别为 3.07、

8.27 和 19.27  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，三个处理下的土壤速效氮残留量依次增加。



注：同一土层内的不同字母表示处理间在 0.05 水平上存在显著差异。Note: Different lowercase letters in the same soil layer indicate significant differences between treatments at the 0.05 level.

图 4 番茄收获后的土壤速效氮含量

Fig. 4 Soil readily available nitrogen content after tomato was harvested

### 3 讨论

#### 3.1 设施环境的土壤氮挥发排放

一般认为连年种植设施蔬菜的大棚会发生土壤酸化现象，因此，氮肥的氨挥发排放风险降低<sup>[25-26]</sup>。本研究所采用的连栋塑料大棚棚龄为 2 年，与本地区稻麦轮作农田相比 pH 稍低，但采用常规撒施的施肥方式时，化肥氮的氨挥发损失率仍然达到了 16.56%，与种植大田作物时氮肥的氨挥发损失率相近<sup>[27-28]</sup>。这可能一方面是由于大棚棚龄较短，土壤酸化现象并不明显，尿素颗粒水解后的微域环境仍然保持了较高的碱性；另一方面，大棚内温度较外界更高，更易促进尿素的水解和氨挥发<sup>[17, 29]</sup>。就施肥后的土壤氨挥发速率和氨挥发累积量（图 1~图 3）而言，氨挥发速率峰值的高低与尿素施用量相关，与棚内温度的变化也表现出了较为一致的趋势，这与氨挥发影响因素的研究结果一致。土壤氨挥发速率随着施肥量的增加而增大，且高挥发速率持续的时间也相应延长<sup>[17, 30]</sup>。高温会加快尿素的水解，同时降低氨在液相中的溶解度，加快氨的挥发速率<sup>[31]</sup>，有研究显示，温度升高能增加液相中  $\text{NH}_3$  在  $\text{NH}_3$  和  $\text{NH}_4^+$  总量中的比例，在 pH 大致不变的情况下，温度每升高 10℃（5~35℃ 范围内）， $\text{NH}_3$  的比例增加约

1 倍<sup>[32]</sup>。

在设施作物种植过程中，有机肥的施用也带来了较多的氮源。本研究中 DF 处理和 CK 处理在基肥期均未施用化肥氮，氨挥发损失量分别仅为 0.49 和 0.39  $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ （图 2，差异无统计学意义），这可能是由于施用的有机肥均为经过腐熟加工的商品有机肥，因此并未带来显著的氨挥发排放。李燕青等<sup>[33]</sup>在华北地区、吕凤莲<sup>[34]</sup>在关中地区小麦/玉米轮作农田中有机肥全量替代化肥后氨挥发损失率分别为 0.20% 和 0.26%；在稻田上<sup>[35]</sup>，有机肥全量替代化肥后氨挥发损失率也仅为 2.30%；在番茄和小青菜上的研究<sup>[36]</sup>也显示，仅施用有机肥氨挥发损失率分别为 0.48% 和 1.23%。上述研究结果均显示有机肥对土壤氨挥发的贡献非常小。有机肥中的氮源主要以有机氮的形式存在，同时，其在土壤中的矿化过程也是一个较为持续稳定的过程，不易在短时间内造成较高的氨挥发排放<sup>[37]</sup>。

#### 3.2 水肥一体化施用方式对土壤氮挥发和表观氮平衡的影响

采用水肥一体化的施肥方法与常规撒施相比，大大减少了氮肥施用后的氨挥发损失量，提高了氮肥利用率<sup>[23]</sup>。本研究中番茄全生育期氨挥发累积量由氮肥撒施的 37.25  $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$  减至水肥一体化方式的

3.07 kg·hm<sup>-2</sup>, 氮肥利用率由 23.92% 提高至 40.89% (表 2)。在水肥一体化施用方式下, 肥料随灌溉水滴灌进入农田, 由于滴头位置不变, 灌溉水由同一位置渗入土壤, 并在土表以下逐渐扩散, 土表留存肥料极少, 因此氨挥发量也很低。而肥料在试验小区内均匀撒施时, 仍然利用滴灌进行灌溉, 土表被水浸润的面积较小, 并不能完全将肥料溶解并带入土体, 因此肥料撒施产生的氨挥发量远远超过了水肥一体化方式下的氨挥发量。王肖娟等<sup>[23]</sup>对比了肥料撒施后漫灌和水肥一体化滴灌两种方式下棉田土壤的氨挥发量, 两种水肥管理模式下的氨挥发损失率均不足 0.20%, 这说明肥料随水进入土体是氨挥发减少的重要原因。相关水肥一体化的研究也显示, 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%<sup>[24]</sup>; 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·hm<sup>-2</sup>, 氮肥表观利用率达到 51.21%<sup>[38]</sup>。本研究中水肥一体化方式下的氮肥表观利用率相比常规撒施虽然提高了 71%, 但其绝对值仍远小于大田作物上的相关报道<sup>[23, 38]</sup>。这可能是由于设施土壤施用了大量有机肥和化肥, 基础肥力较高, 即使是不施化肥氮的处理也能达到相对较高的产量水平<sup>[37, 39]</sup>, 而种植大田作物的相关报道中不施肥处理的产量一般仅为施肥处理的 1/2 至 2/3 左右<sup>[33-34]</sup>。

从表观氮平衡角度考虑, 本研究中水肥一体化处理相比肥料撒施处理增加番茄地上部氮素累积量 38.19 kg·hm<sup>-2</sup>, 氨挥发损失减少 34.18 kg·hm<sup>-2</sup>, 0~20 cm 土层硝态氮和铵态氮残留量降低了 83.11 kg·hm<sup>-2</sup> (土壤容重以 1.10 g·cm<sup>-3</sup> 计)。由此计算, 水肥一体化相比肥料撒施在其他氮素损失途径上增加了 79.11 kg·hm<sup>-2</sup>, 这部分损失可能是由氮素淋溶造成的。在水肥一体化方式下, 肥料直接随水进入土体并下渗, 且肥料溶液施用完毕后一般会继续用清水滴灌 30 min 冲洗管道, 进一步加剧了肥料的淋溶风险。因此, 采用水肥一体化滴灌时, 要适当控制灌溉量, 采用少量多次的灌溉方式。当然, 该计算结果的前提是各处理土壤氮素矿化量和番茄地下部分氮累积量相等, 而地上部氮累积量高一般会伴随着更发达的根系和更高的地下部氮累积量。因此, 水肥一体化滴灌施肥相比撒施是否增加了氮素淋溶, 仍需进一步的研究证实。

## 4 结 论

在长江下游地区, 相比传统肥料撒施, 应用水肥一体化技术可显著提高氮肥利用率, 减少土壤氨挥发排放量。相同氮肥用量条件下, 滴灌施肥较常规肥料撒施提高了 71% 的氮肥利用率; 全生育期氨挥发累积量减少了 91.76%, 氨挥发损失率由 16.56% 减少至 1.36%; 土壤 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 和 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 残留量分别显著下降了 31.85% 和 57.08%。因此, 长江下游地区设施蔬菜种植应用水肥一体化技术具有良好的增效减排潜力, 值得广泛推广。

## 参考文献 (References)

- [ 1 ] Jiang W J, Deng J, Yu H J. Development situation, problems and suggestions on industrial development of protected horticulture[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48 ( 17 ): 3515—3523. [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.]
- [ 2 ] Sun J, Gao H B, Tian J, et al. Development status and trends of protected horticulture in China[J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2019, 42( 4 ): 594—604. [孙锦, 高洪波, 田婧, 等. 我国设施园艺发展现状与趋势[J]. *南京农业大学学报*, 2019, 42( 4 ): 594—604.]
- [ 3 ] Huang S W, Tang J W, Li C H, et al. Reducing potential of chemical fertilizers and scientific fertilization countermeasure in vegetable production in China[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2017, 23 ( 6 ): 1480—1493. [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.]
- [ 4 ] Li T, Yu L, Wu Y, et al. Secondary salinization of greenhouse vegetable soils and its affecting factors in Shandong Province, China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2018, 55 ( 1 ): 100—110. [李涛, 于蕾, 吴越, 等. 山东省设施菜地土壤次生盐渍化特征及影响因素[J]. *土壤学报*, 2018, 55 ( 1 ): 100—110.]
- [ 5 ] Ding W H, Lei H J, Xu C, et al. Characteristics and spatial distribution of apparent nitrogen balance in the greenhouse vegetable cropping system in China[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2020, 37 ( 3 ): 353—360. [丁武汉, 雷豪杰, 徐驰, 等. 我国设施菜地表观氮平衡分析及其空间分布特征[J]. *农业资源与环境学报*, 2020, 37 ( 3 ): 353—360.]
- [ 6 ] Min J, Shi W M. Effects of different N rates on the yield, N use efficiency and fruit quality of vegetables cultivated in plastic greenhouse in Taihu Lake region[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2009, 15( 1 ): 151—157.



- [ 6 ] 闫炬, 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.]
- [ 7 ] Sun B, Zhang L X, Yang L Z, et al. Agricultural non-point source pollution in China: Causes and mitigation measures[J]. *Ambio*, 2012, 41 ( 4 ): 370—379.
- [ 8 ] Xie W M, Yu F, Feng X Y, et al. Investigation status of soil fertility and water pollution in representative villages of Taihu Lake watershed rural area[J]. *Soils*, 2014, 46 ( 4 ): 613—617. [谢文明, 于飞, 冯晓宇, 等. 太湖流域农村地区典型村镇土壤养分和水体污染现状调查[J]. 土壤, 2014, 46 ( 4 ): 613—617.]
- [ 9 ] Li R N, Wu X P, Zhang Y C, et al. Nitrate nitrogen contents and quality of greenhouse soil applied with different N rates under drip irrigation[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2015, 21 ( 6 ): 1642—1651. [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 ] Yi W Y, Cheng F P, Xiong C G, et al. Development status and countermeasures of integrative water and fertilizer in agriculture[J]. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 2017, 38 ( 10 ): 111—115, 120. [易文裕, 程方平, 熊昌国, 等. 农业水肥一体化的发展现状与对策分析[J]. 中国农机化学报, 2017, 38 ( 10 ): 111—115, 120.]
- [ 11 ] Fan Z B, Lin S, Zhang X M, et al. Conventional flooding irrigation causes an overuse of nitrogen fertilizer and low nitrogen use efficiency in intensively used solar greenhouse vegetable production[J]. *Agricultural Water Management*, 2014, 144: 11—19.
- [ 12 ] Xing Y Y, Zhang F C, Zhang Y, et al. Effect of irrigation and fertilizer coupling on greenhouse tomato yield, quality, water and nitrogen utilization under fertigation[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48 ( 4 ): 713—726. [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.]
- [ 13 ] Li C Z. Investigation on the nutrient status of vegetable soil and research on effect of fertigation[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2016. [李传哲. 设施菜地养分状况调查及水肥一体化技术应用效果研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2016.]
- [ 14 ] Wang W J, Zhu K B, Ye Y, et al. Effect of reducing fertilizer application on yield, quality and fertilizer utilization of greenhouse cultivation tomato under integration of water and fertilizer[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2018, 34 ( 28 ): 38—42. [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.]
- [ 15 ] Gu B J, Ju X T, Chang J, et al. Integrated reactive nitrogen budgets and future trends in China[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2015, 112 ( 28 ): 8792—8797.
- [ 16 ] Zhu Z L, Chen D L. Nitrogen fertilizer use in China - Contributions to food production, impacts on the environment and best management strategies[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2002, 63 ( 2/3 ): 117—127.
- [ 17 ] Lu L L, Wu G Y. Advances in affecting factors of ammonia emission in farmland[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2019, 24 ( 1 ): 149—162. [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.]
- [ 18 ] Wang J, Wang D J, Zhang G, et al. Effect of wheat straw application on ammonia volatilization from urea applied to a paddy field[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2012, 94 ( 1 ): 73—84.
- [ 19 ] Shan N, Han S H, Liu J P, et al. Emission of NH<sub>3</sub> and N<sub>2</sub>O from spinach field treated with different fertilizers[J]. *Environmental Science*, 2018, 39 ( 10 ): 4705—4716. [山楠, 韩圣慧, 刘继培, 等. 不同肥料施用对设施菠菜地 NH<sub>3</sub> 挥发和 N<sub>2</sub>O 排放的影响[J]. 环境科学, 2018, 39 ( 10 ): 4705—4716.]
- [ 20 ] Zhou L P. Effects of slow-released nitrogen fertilizers and urea placement on soil ammonia volatilization and nitrogen utilization of summer maize[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2016. [周丽平. 不同氮肥缓释化处理及施肥方式对夏玉米田间氨挥发和氮素利用的影响[D]. 北京: 中国农业科学院, 2016.]
- [ 21 ] Xu W L, Liu H, Zhang Y S, et al. Influence of the fertilization depth, irrigation and the ammonia volatilization monitoring method on ammonia volatilization characters of nitrogen fertilizer[J]. *Xinjiang Agricultural Sciences*, 2011, 48 ( 1 ): 86—93. [徐万里, 刘骅, 张云舒, 等. 施肥深度、灌水条件和氨挥发监测方法对氮肥氨挥发特征的影响[J]. 新疆农业科学, 2011, 48 ( 1 ): 86—93.]
- [ 22 ] Liu X W, Chen X Q, Wang H Y, et al. Effects and principle of root-zone one-time N fertilization on enhancing rice (*Oryza sativa* L.) N use efficiency[J]. *Soils*, 2017, 49 ( 5 ): 868—875. [刘晓伟, 陈小琴, 王火焰, 等. 根区一次施氮提高水稻氮肥利用效率的效果和原理[J]. 土壤, 2017, 49 ( 5 ): 868—875.]
- [ 23 ] Wang X J, Wei C Z, Zhang J, et al. Effects of irrigation mode and N application rate on cotton field fertilizer N use efficiency and N losses[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2012, 23 ( 10 ): 2751—2758. [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.]
- [ 24 ] Li Z, Qu Z Y, Ren Z S, et al. Nitrogen use efficiency and ammonia oxidation of corn field with drip irrigation in

- Hetao irrigation district[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2018, 37 (11): 37—42, 49. [李哲, 屈忠义, 任中生, 等. 河套灌区滴灌施肥对土壤氨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.]
- [ 25 ] He F Y, Yin B, Jin X X, et al. Ammonia volatilization from urea applied to two vegetable fields in Nanjing suburbs[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2005, 42 (2): 253—259. [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.]
- [ 26 ] 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.
- [ 27 ] Tian Y H, Zeng K, Yin B. Ammonia emission following basal and tillering fertilization in Taihu Lake Region relative to monitoring techniques[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2019, 56 (5): 1180—1189. [田玉华, 曾科, 尹斌. 基于不同监测方法的太湖地区稻田基肥期氨排放研究[J]. *土壤学报*, 2019, 56 (5): 1180—1189.]
- [ 28 ] Wang J, Wang D J, Zhang G, et al. Comparing the ammonia volatilization characteristic of two typical paddy soil with total wheat straw returning in Taihu Lake region[J]. *Environmental Science*, 2013, 34 (1): 27—33. [汪军, 王德建, 张刚, 等. 麦秸全量还田下太湖地区两种典型水稻土稻季氨挥发特性比较[J]. *环境科学*, 2013, 34 (1): 27—33.]
- [ 29 ] Huang S Y, Tian C, Xie G X, et al. Mechanism and suitable application dosage of controlled-release urea effectively reducing ammonia volatilization in double-cropping paddy fields[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2019, 25 (12): 2102—2112. [黄思怡, 田昌, 谢桂先, 等. 控释尿素减少双季稻田氨挥发的主要机理和适宜用量[J]. *植物营养与肥料学报*, 2019, 25 (12): 2102—2112.]
- [ 30 ] Wang D, Yu Z W, Yu W M, et al. Effects of nitrogen application level on soil nitrate accumulation and ammonia volatilization in high-yielding wheat field[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2006, 17 (9): 1593—1598. [王东, 于振文, 于文明, 等. 施氮水平对高产麦田土壤硝态氮时空变化及氨挥发的影响[J]. *应用生态学报*, 2006, 17 (9): 1593—1598.]
- [ 31 ] 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.
- [ 32 ] Song Y S, Fan X H. Summary of research on ammonia volatilization in paddy soil[J]. *Ecology and Environment*, 2003 (2): 240—244. [宋勇生, 范晓晖. 稻田氨挥发研究进展[J]. *生态环境*, 2003 (2): 240—244.]
- [ 33 ] Li Y Q, Wen Y C, Lin Z A, et al. Effect of different manures combined with chemical fertilizer on yields of crops and gaseous N loss in farmland[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2019, 25 (11): 1835—1846. [李燕青, 温延臣, 林治安, 等. 不同有机肥与化肥配施对作物产量及农田氮肥气态损失的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2019, 25 (11): 1835—1846.]
- [ 34 ] Lü F L. Study on agronomic and environmental effects of combined application organic and chemical fertilizer under winter wheat and summer maize cropping system[D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2019. [吕凤莲. 冬小麦/夏玉米轮作体系有机无机肥配施的农学和环境效应研究[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2019.]
- [ 35 ] Xing Y, Sha Z M, Bei Z G, et al. Effects of fertilization methods on ammonia volatilization characteristics in rice fields[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2019, 47 (17): 313—318. [邢月, 沙之敏, 卑志钢, 等. 不同施肥方式对稻田氨挥发特征的影响[J]. *江苏农业科学*, 2019, 47 (17): 313—318.]
- [ 36 ] Sun Y J, Wu W L, Liu Y Q, et al. Effects of organic and mineral fertilizers on nitrogen utilization and losses[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2017, 22 (4): 37—46. [孙雅杰, 吴文良, 刘原庆, 等. 有机肥和化肥对盆栽番茄氮素利用以及损失的影响[J]. *中国农业大学学报*, 2017, 22 (4): 37—46.]
- [ 37 ] Wu X K, Jiang Z C, Lu Z X, et al. Effects of the partial replacement of chemical fertilizer with manure on the yield and nitrogen emissions in leafy vegetable production[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2020, 28 (3): 349—356. [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.]
- [ 38 ] Li G. Effects of drip fertigation on summer maize in North China[D]. Beijing: Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2019. [李格. 华北地区夏玉米滴灌施肥的肥料效应研究[D]. 北京: 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 2019.]
- [ 39 ] Yang J G, Li Y M, Sun Y X, et al. Effects of urea ammonium nitrate (UAN) with N inhibitor on lettuce yield, quality and soil N balance[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2020 (1): 67—74. [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.]

(责任编辑: 陈荣府)