

减氮配施硝化抑制剂与菌剂对温室黄瓜 产量品质和土壤氮素损失的影响

赵宇晴^{1,2}, 杨迎⁴, 田晓楠⁴, 郭娇¹, 张丽娟^{1,2}, 郭艳杰^{1,2,3}, 李博文^{1,2,3}

(1.河北农业大学资源与环境科学学院,河北 保定 071001;2.河北省农田生态环境重点实验室,河北 保定 071001;

3.华北作物改良与调控国家重点实验室,河北 保定 071001;4.河北师范大学环境科技有限公司,石家庄 050000)

摘要:通过探究减氮配施硝化抑制剂 DMPP 与微生物菌剂及二者联合施用对温室黄瓜土壤氮素各主要途径损失及黄瓜对氮素吸收利用的影响,并结合黄瓜产量和品质,旨在筛选出温室黄瓜生产的适宜氮素损失调控措施。以黄瓜品种“津绿 20—10”为试验材料进行田间小区试验,设置 6 个处理,分别为不施氮对照(CK)、常规施氮(CN)、减氮(RN)、减氮+DMPP(RND)、减氮+微生物菌剂(RNM)、减氮+DMPP+微生物菌剂(RND+M)。监测分析了土壤氧化亚氮(N_2O)排放、氨(NH_3)挥发和土壤剖面硝态氮($NO_3^- - N$)累积量,以及黄瓜对氮素的吸收利用、产量和品质指标。结果表明:(1)与 CN 相比,RN、RND、RNM 和 RND+M 能够促进黄瓜对氮素的吸收和利用,提高氮素利用率。等氮条件下,RND+M 可使黄瓜地上部植株氮素总吸收量增加 18.93%,尤其是氮肥表观利用率(REN)和农学效率(AEN),分别达到 25.30%和 41.16 kg/kg($p < 0.05$),表现出明显的正协同效应,且优于硝化抑制剂或菌剂单施效果。(2)RN、RND、RNM 和 RND+M 较 CN 可使土壤 N_2O 排放显著降低 26.38%~41.45%、 NH_3 挥发明显减少 28.82%~37.70%,0—120 cm 土壤剖面 $NO_3^- - N$ 累积显著降低 13.07%~62.32%;等氮条件下,RNM 处理对土壤 N_2O 排放和 NH_3 挥发影响不大,但能显著降低 90—120 cm 土层 $NO_3^- - N$ 累积量,较 RN 降低 27.35%。RND 和 RND+M 可使 N_2O 排放分别降低 20.11%和 20.47%,0—120 cm 土壤剖面 $NO_3^- - N$ 累积量分别降低 30.06%和 24.70%,减少氮素在土壤中的累积和淋失风险,但增加 NH_3 挥发风险($p > 0.05$),总体表现为 $RND \approx RND+M \geq RNM \approx RN$ 。(3)RND+M 处理产量为 70.32 t/hm²,节本增收较 RN 增加 5 150 元/hm²,且其在提高黄瓜果实品质方面效果较明显,可溶性蛋白含量较 RN 及 RNM 处理分别提高 16.36%与 4.01%。综合经济效益和环境效益,尤其是土壤可持续发展角度考虑,试验条件下,追施氮素 316 kg/hm²,同时配施 2%纯氮量的 DMPP 与 75 L/hm² 菌剂,是实现温室黄瓜增产提质、绿色高质量发展的适宜氮素损失调控措施。

关键词:硝化抑制剂;微生物菌剂;温室黄瓜;氮素损失;氮肥利用率

中图分类号:S156.2

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2023)04-0267-11

DOI:10.13870/j.cnki.stbcbx.2023.04.033

Effects of Nitrogen Reduction Combined with Nitrification Inhibitor and Microbial Agents on Greenhouse Cucumber Yield and Quality and Soil Nitrogen Loss

ZHAO Yuqing^{1,2}, YANG Ying⁴, TIAN Xiaonan⁴, GUO Jiao¹,

ZHANG Lijuan^{1,2}, GUO Yanjie^{1,2,3}, LI Bowen^{1,2,3}

(1.College of Resources and Environmental Sciences, Hebei Agricultural University,

Baoding, Hebei 071001; 2.Key Laboratory of Agricultural Ecological Environment, Baoding,

Hebei 071001; 3.National Key Laboratory of Crop Improvement and Regulation in North China, Baoding,

Hebei 071001; 4.Hebei Normal University Environmental Technology Co., Ltd., Shijiazhuang 050000)

Abstract: By exploring the effects of nitrogen reduction combined with nitrification inhibitor DMPP and

收稿日期:2022-12-27

资助项目:河北省重点研发计划项目(21326905D);河北省现代农业产业技术体系蔬菜产业创新团队项目(HBCT2018030206);国家自然科学基金项目(21307025)

第一作者:赵宇晴(1999—),女,硕士研究生,主要从事农业环境技术与应用研究。E-mail:1813044785@qq.com

通信作者:郭艳杰(1983—),女,副教授,硕士生导师,主要从事土壤氮素循环与环境效应研究。E-mail:guoyanjie928@126.com

李博文(1963—),男,教授,博士生导师,主要从事土壤与环境研究。E-mail:kjli@hebau.edu.cn

microbial agents and their combined application on soil nitrogen losses in different ways and nitrogen absorption and utilization of cucumber planting in greenhouse, and to screen the optimum nitrogen losses regulation measures for greenhouse vegetable production system by considering both yield and quality. The cucumber variety “Jinlv 20-10” was used as the experimental material to carry out filed experiment, and six treatments were set up, including no nitrogen application control (CK), conventional nitrogen application (CN), nitrogen reduction application (RN), nitrogen reduction application + DMPP (RND), nitrogen reduction application + microbial agent (RNM), nitrogen reduction application + DMPP + microbial agent (RND+M). Soil nitrous oxide (N_2O) emission, ammonia (NH_3) volatilization and soil profile nitrate nitrogen ($\text{NO}_3^- - \text{N}$) accumulation, as well as the absorption and utilization, yield, and quality indicators of nitrogen by cucumbers were monitored and analyzed. The results showed that: (1) Compared with CN treatment, the absorption and utilization of nitrogen and nitrogen utilization rate of cucumber were improved by RN, RND, RNM and RND+M treatments. Under the same nitrogen application rate, RND+M treatment could increase total nitrogen absorption in shoots of cucumber by 18.93%, especially the apparent recovery rate of applied nitrogen (REN) and agronomic efficiency of nitrogen fertilizer (AEN) could reached up to 25.30% and 41.16 kg/kg ($p < 0.05$), respectively, showing obvious positive synergistic effect, and better than the application of DMPP or microbial agent alone. (2) The soil N_2O emission, NH_3 volatilization and $\text{NO}_3^- - \text{N}$ accumulation in 0–120 cm soil profile were significantly decreased by 26.38%~41.45%, 28.82%~37.70%, and 13.07%~62.32% in the RN, RND, RNM and RND+M treatments compared with CN, respectively. Under the same nitrogen application rate, RNM treatment had little effect on N_2O emission and NH_3 volatilization in soil, but it could significantly reduce the $\text{NO}_3^- - \text{N}$ accumulation in 90–120 cm soil layer, which was 27.35% lower than that of RN. The N_2O emission in the treatments of RND and RND+M were reduced by 20.11% and 20.47%, and $\text{NO}_3^- - \text{N}$ accumulation in 0–120 cm soil profile were reduced by 30.06% and 24.70%, respectively, reducing the risk of nitrogen accumulation and leaching in the soil but increasing the potential risk of NH_3 volatilization ($p > 0.05$). The performance of prevention and control of nitrogen losses was as follows: $\text{RND} \approx \text{RND} + \text{M} \geq \text{RNM} \approx \text{RN}$. (3) Compared with RN treatment, the cucumber yield in RND+M treatments reached up to 70.32 t/hm². Besides, the cost-saving and profit-increasing increased 5150 yuan/hm². Moreover, the effect of RND+M treatment on improving the quality of cucumber fruit was more obvious, and the soluble protein content was 16.36% and 4.01% higher than that of RN and RNM treatment respectively. Comprehensive considering both the economic and environmental benefits, especially from the perspective view of sustainable soil development, under the experimental conditions, nitrogen applied as top dressing at the rate of 316 kg/hm², combined with 2% pure nitrogen of DMPP and 75 L/hm² microbial agent, which is considered to be an appropriate nitrogen losses regulation measure to achieve the high yield and quality, and green and high-quality development of greenhouse cucumber.

Keywords: nitrification inhibitor; microbial agent; greenhouse cucumber; nitrogen losses; nitrogen utilization rate

近年来,我国设施蔬菜产业发展迅猛,栽培面积不断增加,产业贡献日益提升,在我国打赢脱贫攻坚战和实施乡村振兴战略中发挥重要作用。2020年,我国设施蔬菜面积达到 4.10×10^6 hm²,占蔬菜总种植面积的 18.4%,产量达到 2.5 亿 t,占蔬菜总产量的 32.5%^[1-2],全国设施蔬菜产值超过 0.98 万亿元^[3]。然而,设施蔬菜生产过程中,菜农为了追求高产高收益,普遍采用“大水大肥”管理模式,尤其是氮肥用量远远超过作物生长所需,但其利用率不足 10%,损失严重^[4]。此外,

设施菜田灌溉频繁,平均每年灌溉定额高达 10 800 m³/hm²,远高于作物需求和土壤持水能力^[5]。水氮的过量投入造成土壤硝酸盐的大量累积与淋失^[6],导致温室蔬菜种植区附近地下水硝酸盐污染增加^[7],对人类健康构成威胁。过量氮素还可能会以氧化亚氮(N_2O)形式和氨挥发(NH_3)等气体形式排放进入大气,从而加剧温室效应及加重空气污染^[8]。有研究^[9]表明,氮肥施入设施菜地后,土壤中以 NH_3 和 N_2O 的气体形式损失的氮素约占投入氮素的 4.95%~11.57%。因

此,如何减少设施蔬菜生产中氮素损失,提高氮肥利用率,并降低其环境负效应,一直是当前农业生产亟须解决的难点和热点问题。

硝化抑制剂(nitrification inhibitors, NIs)可通过抑制土壤中 NH_4^+-N 转化为 NO_3^--N 的硝化过程,从而提高土壤对氮的固持能力,减少淋溶和反硝化损失。因此,利用氮肥与硝化抑制剂配施被认为是提高氮肥利用率,减少氮素损失的有效途径之一。目前,农业生产上常用的硝化抑制剂有双氰胺(dicyandiamide, DCD)和3,4-二甲基吡唑磷酸盐(3,4-dimethyl-1h-pyrazole phosphate, DMPP)。其中DMPP作为一种新型硝化抑制剂,具有硝化抑制作用时间长、用量少、硝化抑制率高、移动性相对较小、不易发生淋洗等特点^[10],且经毒理学和生态毒理学测试以及应用试验,与目前使用的硝化抑制剂相比具有一些明显的优势^[11]。例如,与DCD相比,DMPP具有吸附力强、降解慢等优点,且用量仅为DCD用量的1/4,但其硝化抑制效果及促进作物产量和品质提高方面要强于DCD^[12]。DMPP可使土壤硝态氮含量下降1.8%~38.3%^[13], N_2O 排放减少19%~95%^[10]。但需注意,由于硝化抑制剂施入土壤后抑制硝化作用的发生,会造成土壤 NH_4^+-N 离子累积,进而增加土壤 NH_3 挥发风险^[10]。但也有研究^[14]表明,DMPP在特定条件下能够减少 NH_3 挥发。此外,氮肥配施DMPP还能显著提升蔬菜产量和品质,可使温室黄瓜增产7.0%~11.6%^[15-16],可食部分硝酸盐含量降低27.44%,可溶性糖和Vc含量分别增加13.86%和40.24%^[16],蔬菜商品价值明显提高。

近年来,微生物菌剂因其具有直接或间接改良土壤、恢复地力、维持根际微生物区系平衡、减轻病害、降解有毒有害物质且环境友好等作用,为健康土壤培育以及蔬菜产业绿色高质量发展提供新的思路与技术^[17]。已有研究^[18]发现,微生物菌剂可使土壤 NO_3^--N 含量降低22%~29%,减少土壤 N_2O 排放达到58%~73%^[19], NH_3 挥发降低13%以上。同时可使设施黄瓜增产13.16%~22.58%^[20],可溶性糖含量和Vc含量分别提高124.79%和103.24%^[21],氮肥利用率增加24.56%^[22]。综上可知,DMPP或微生物菌剂对于减少氮素主要损失(N_2O 排放、 NH_3 挥发及氮素淋失等)、提高氮素利用率以及蔬菜产业促产提质方面均具有积极影响。已有研究^[23]表明,二者联合施用对于提高氮素利用具有协同作用,不仅增产提质还能提高植物的养分吸收,表现出极大的应用潜力。针对二者联合施用对氮素主要损失(N_2O 排放、 NH_3 挥发及氮素淋失等)的阻控效应如何?为此,本研究以温室蔬菜—黄瓜(*Cucumis sativus* L.)为研究

对象,采用田间原位小区试验法,探究减氮配施DMPP与微生物菌剂对温室黄瓜土壤氮素损失的影响,进而筛选出能够实现经济效益与环境效益双赢的氮素调控方案,旨在为我国温室蔬菜生产减少氮素损失,提高氮肥利用效率,降低环境负效应,提质增效绿色高质量发展以及硝化抑制剂和微生物菌剂的联合应用提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

本试验于2018年10月至2019年6月在河北省廊坊市永清县大青垓村设施蔬菜生产基地某一棚龄为20年的黄瓜土墙日光温室(39°24'10"N, 116°34'24"E)内进行。该地区属于温带亚湿润气候区,属大陆性季风气候。地处华北平原中部,位于永定河故道,自然条件得天独厚,年平均日照时间2740 h,年平均降水量540 mm,年平均气温11.5℃,年平均日照时间183天。尤其是得益于独特的水质和优质的土壤等自然生态环境,非常适合瓜菜生产。全村现有大棚1000余个,占地130 hm²,以种植黄瓜、番茄为主,蔬菜全年上市,主要供应京津市场。试验前采集温室内土壤样品,供试土壤为潮褐土,质地为壤质土,pH为8.19,全氮含量为0.88 g/kg,铵态氮含量为76 mg/kg,硝态氮含量为160 mg/kg,速效磷含量为84.4 mg/kg,速效钾含量为279 mg/kg,有机质含量为26.73 g/kg,土壤容重为1.23 g/cm³。

1.2 供试材料

供试氮肥为尿素(N,46%),磷钾肥为过磷酸钙(P_2O_5 ,12%)和硫酸钾(K_2O ,50%);供试硝化抑制剂为DMPP,分析纯;供试微生物菌剂由保定民得富新型肥料有限公司提供,有效菌种为胶质类芽孢杆菌(*Bacillus mucilaginosus* Krossilnikov) $\geq 10^9$ cfu/mL,菌剂为液态;供试蔬菜为温室黄瓜,品种为“津绿20—10”。

1.3 试验设计与布置

试验采用随机区组设计,共设6个处理,分别为:空白对照(CK,不施氮)、农民常规施氮(CN,当地农民常规施氮量)、减氮(RN,农民常规基础上减氮39%,结合当地黄瓜目标产量及土壤基础地力确定)、减氮+DMPP(RND,RN基础上配施纯氮量2%的DMPP)、减氮+微生物菌剂(RNM,RN基础上配施微生物菌剂75 L/hm²)、减氮+DMPP+微生物菌剂(RND+M,RN基础上配施纯氮量2% DMPP和75 L/hm²的微生物菌剂),3次重复,共18个小区,小区面积为3.6 m×7.5 m。黄瓜采用传统畦栽法种植,每小区3畦(每畦宽1.2 m,株距0.28 m),种植密度

为 61 000 株/hm²。试验开始前所有处理普施基肥,为腐熟猪粪 38 t/hm²(N,0.5%)。基肥施入 1 周后黄瓜开始定植(2018 年 10 月 29 日)。定植后正式开始试验,供试尿素、DMPP 及微生物菌剂全部以追肥形式施入。整个试验周期分别于 2018 年 12 月 24 日、2019 年 1 月 23 日、3 月 4 日、4 月 16 日和 5 月 11 日进行 5 次追肥。DMPP 施用量为施纯氮量的 2%,微生物菌剂用量为 75 L/hm²。所有处理磷钾肥以追肥形式施入,施用量及方式均相同,其中磷肥总用

量为 220 kg P₂O₅/hm²,钾肥总用量为 254 kg K₂O/hm²(表 1)。每次追肥时,微生物菌剂采用稀释后灌根,其他肥料采用沟施。灌水采用畦灌的方式,每次施肥时将肥料混匀后施入土壤,覆土后灌溉,其余时间根据黄瓜生长发育所需进行灌溉处理,整个生育期共灌溉 10 次,灌溉量约为 700 m³/hm²,除施肥外其他田间管理措施与当地常规管理方式一致。具体追肥方案见表 1。黄瓜生长 228 天后(2019 年 6 月 14 日)收获,试验结束。

表 1 温室黄瓜追施肥方案

处理	N 投入/(kg·hm ⁻²)					总计	DMPP/ (kg·hm ⁻²)	微生物菌剂/ (L·hm ⁻²)	P ₂ O ₅ / (kg·hm ⁻²)	K ₂ O/ (kg·hm ⁻²)
	2018-12-24	2019-01-23	2019-03-04	2019-04-16	2019-05-11					
CK	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CN	71	71	124	124	124	514	0	0	220	254
RN	44	44	76	76	76	316	0	0	220	254
RND	44	44	76	76	76	316	6.32	0	220	254
RNM	44	44	76	76	76	316	0	75	220	254
RND+M	44	44	76	76	76	316	6.32	75	220	254

1.4 样品采集与测定

1.4.1 气体样品

(1)N₂O 排放。采用静态箱—气相色谱法^[24]测定。密闭式静态箱体为 PVC 材质,高 15.50 cm,直径 13.50 cm,箱体顶部设置 1 个气体取样口和温度测定仪,下部的底座为圆柱体,四周有水槽;测定 N₂O 前先将底座插入土中 2.5 cm,然后将水封槽内注满水,罩上密封罩,使其形成 1 个密闭性气体的空间,其后将箱体内风扇打开,使箱体内气体混合均匀,最后用注射器从箱体顶端的气体取样口进行气体的采集。每次施肥灌水后第 1,2,3,5,7,9 天上午 9:00—11:00 采气,每次采集 30 mL,每隔 15 min 采集 1 次,共采集 3 次,采集气样的同时记录箱内温度。只进行灌水后则连续采集 3 天。其余时间根据田间管理现状每隔 10 天或 1 个月进行动态取气。采集后的气体样品利用 Agilent 7890A 型气相色谱仪进行测定。

(2)NH₃挥发。采用磷酸甘油海绵通气法^[25]测定。采用 PVC 材质管制成(直径 15 cm,高 14 cm)的上下开口的通气法装置。正式测定时,首先将通气装置插入土壤 5 cm 左右,然后在距离土面 5 cm 的通气管内放置 2 块间距为 2 cm 且已吸附 15 mL 磷酸甘油溶液(5% H₃PO₄ + 4% C₃H₈O₃)的海绵。每次施肥灌水后安装 NH₃采集装置进行气体采集。然后用 300 mL 的氯化钾溶液(1.00 mol/L)浸提已放于装置内 24 h 的海绵块,振荡过滤,最后用连续流动分析仪(SAN⁺⁺)测定滤液中 NH₄⁺-N 含量,直至无氨挥发则停止取样。

1.4.2 土壤样品 黄瓜收获后,每小区选择 3 点,用土钻分层采集 0—30,30—60,60—90,90—120 cm 土壤样

品^[26],四分法取混合土样作为检测样品,用于测定土壤无机氮(NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N)含量,采用 KCL 浸提,滤液用连续流动分析仪(SAN++)测定^[27]。

1.4.3 植物样品 于黄瓜盛瓜期,每个小区采集长势均匀,外观大小一致的商品果实样品 3 个,用于测定黄瓜硝酸盐含量及主要营养品质指标,具体测定方法参照《植物生理学实验指导》^[28]。其中,硝酸盐含量采用紫外分光光度法测定;Vc 含量采用钼蓝比色法测定;可溶性糖含量采用蒽酮比色法测定;可溶性蛋白质含量采用考马斯亮蓝 G-250 染色法测定。

黄瓜收获后,统计小区累计产量,并折合为单位面积产量(kg/hm²);同时采集各小区长势均匀的完整植株 3 株,按照地上部茎叶、果实部分分开,在 105 ℃下杀青 30 min,65 ℃烘干至恒重。烘干粉碎后植物样品采用浓 H₂SO₄—H₂O₂消化—凯氏定氮法^[29]测定全 N 含量。

1.5 数据统计与分析

(1)N₂O 排放通量计算公式为:

$$F = \rho \times H \times \frac{\Delta c}{\Delta t} \times \frac{273}{273 + T} \quad (1)$$

式中: F 为 N₂O 排放通量[μg/(m²·h)]; ρ 为标准状态下 N₂O 气体密度(其值为 1.25 kg/m³); H 为静态箱高度(m); $\Delta c/\Delta t$ 为 N₂O 浓度变化率[μL/(L·h)]; T 为测定时箱体內的平均温度(℃)。

(2)氨挥发速率计算公式为:

$$\text{NH}_3 - \text{N} = [M / (A \times D)] \times 10^{-2} \quad (2)$$

式中:NH₃-N 为氨挥发速率[mg/(hm²·d)]; M 为采用通气法单个装置平均每次测得的氨量(NH₃-N, mg); D 为每次连续捕获的时间(d); A 为捕获装置的横截面积(m²)。

(3) N_2O 累积排放量计算公式:

$$C = \sum \left[\frac{F_i + F_{i+1}}{2} \times 10^{-5} \times d \times 24 \right] \quad (3)$$

式中: C 为 N_2O 累积排放量(kg/hm^2); F_i 和 F_{i+1} 为 2 个连续相邻采样时期的气体排放通量 [$\mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$]; d 为 2 个连续相邻采样时间所相隔的天数。

(4) NH_3 累积挥发量计算公式:

$$C'_t = C_t + \frac{F_t + F'_t}{2} \times (t' - t) \quad (4)$$

式中: C'_t 和 C_t 为第 t' 次和第 t 次 NH_3 累积挥发量 (kg/hm^2); F'_t 、 F_t 分别为 t' 和 t 时气体产生速率; t' 和 t 为采样间隔时间(d)。

(5) N_2O 排放系数(%) = (施氮区 N_2O 累积排放量 - 不施氮区 N_2O 累积排放量) / 所施氮肥中氮素的总量 $\times 100\%$

(6) NH_3 挥发系数(%) = (施氮区 NH_3 累积挥发量 / 所施氮肥中氮素的总量) $\times 100\%$

(7) 土壤 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 累积量 ($\text{kg N}/\text{hm}^2$) = 土层厚度(cm) $\times$ 土壤容重 (g/cm^3) $\times$ 土壤硝(铵)态氮含量 (mg/kg) / 10

(8) 各器官吸氮量 (kg/hm^2) = 各器官生物量 $\times$ 各器官氮含量 / 10^6

(9) 氮肥表观利用率 (REN) (%) = (施氮区作物中总氮量 - 不施氮区作物中总氮量) / 所施氮肥中氮素的总量 $\times 100\%$

(10) 氮肥农学效率 (AEN) (kg/kg) = (施氮区作物产量 - 不施氮区作物产量) / 施氮量

(11) 氮肥偏生产力 (PFPN) (kg/kg) = 施氮区产量 / 氮肥施用量

(12) 节本增收 ($\text{元}/\text{hm}^2$) = (施添加剂处理区利润 - 不施添加剂处理区利润) - (施添加剂处理区支出一不施添加剂处理区支出)

文中所有数据采用 Microsoft Excel 2010 进行整理作图,采用 SPSS 20.0 统计软件[(IBM Co., Armonk, NY, USA)]对不同处理间植物吸氮量、 N_2O 排放量、 NH_3 挥发量以及土壤剖面 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 累积和各项植物指标等进行单因素方差分析 (ANOVA), 数据结果以平均值 $\pm$ 标准差表示。多重比较采用 Duncan 法 ($p < 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 温室黄瓜氮素吸收

由图 1 可知,与 CK 相比,各施氮处理均表现为黄瓜各器官及总吸氮量显著提高 ($p < 0.05$),各器官吸氮量表现为茎叶 < 果实。与 CN 相比,RN、RND、RNM 和 RND+M 处理茎叶吸收氮量变化不大 ($p < 0.05$)。但各减氮处理的黄瓜果实吸收氮量相比于 CN 则增加 12.82% ~ 30.75%,其中 RND、RNM 和

RND+M 处理达到显著性差异水平 ($p < 0.05$)。等氮条件下,RND+M 处理果实吸收氮量较 RN 处理显著增加 13.71% ($p < 0.05$),而 RND 和 RNM 处理的果实吸氮量相比于 RN 处理的提升幅度未达到显著水平。与 CN 相比,各减氮处理黄瓜总吸收氮量有所增加,其中 RND、RNM 和 RND+M 处理增加效果显著 ($p < 0.05$)。在等氮条件下,RND+M 处理增加效果显著 ($p < 0.05$),比 RN 增加 18.93%,但与 RND、RNM 处理差异不显著 ($p > 0.05$)。

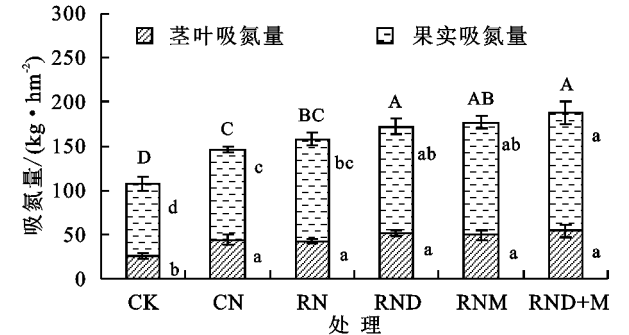


图 1 不同处理下黄瓜植株各部位吸氮量

从表 2 可以看出,各减氮处理的 REN 相较 CN 处理增加 92.13% ~ 237.33%。等氮条件下,RND、RNM 和 RND+M 处理 REN 均有所提高,以 RND+M 处理对氮肥表观利用率升幅度明显 ($p < 0.05$),较 RN 处理增加 75.57%,但 RND、RNM 处理的 REN 相较于 RN 处理增幅不显著 ($p > 0.05$)。CN 处理 AEN 为 15.76 kg/kg ,RN 对 AEN 提升幅度不大 ($p > 0.05$),但 RND、RNM 和 RND+M 处理则能显著提升 AEN,DMPP 和菌剂二者联合效果优于单独 DMPP 或菌剂施用,表现出明显的协同效果 ($p < 0.05$)。与 CN 处理相比,减氮或减氮增施 DMPP 或菌剂可显著提升 PFPN ($p < 0.05$),但各减氮处理间差异不大 ($p > 0.05$)。

表 2 温室黄瓜氮素吸收利用相关指标

处理	氮肥表观利用率 (REN)/%	氮肥农学效率 (AEN)/(kg·kg ⁻¹)	氮肥偏生产力 (PFPN)/(kg·kg ⁻¹)
CN	7.50±0.86c	15.76±1.19d	127.26±7.93b
RN	14.41±1.59bc	20.39±0.53cd	201.77±11.36a
RND	20.32±2.14ab	35.08±2.56b	216.46±10.17a
RNM	21.91±1.65ab	26.22±1.33c	207.59±12.33a
RND+M	25.30±2.27a	41.16±6.72a	222.53±17.46a

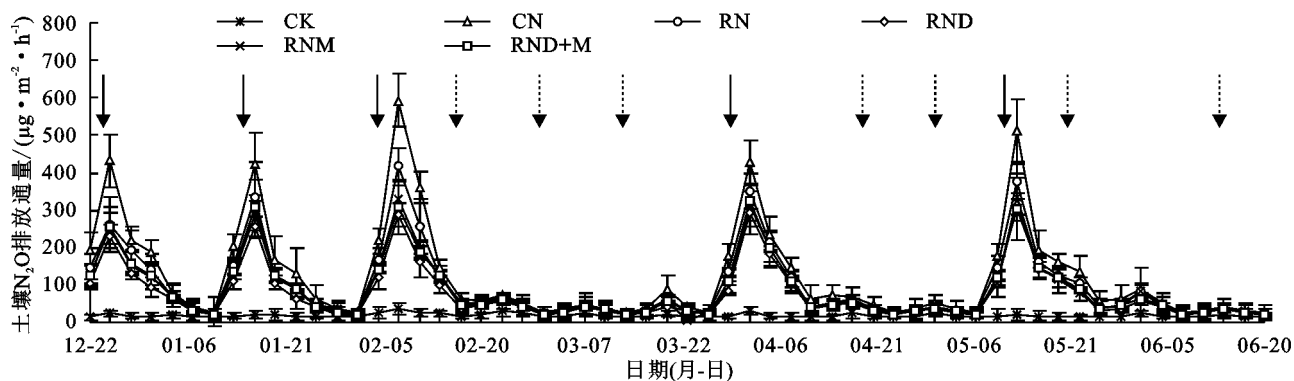
注:表中数据为平均值 $\pm$ 标准差;同列不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($p < 0.05$)。下同。

2.2 土壤 N_2O 排放和 NH_3 挥发损失

2.2.1 土壤 N_2O 排放通量 从图 2 可以看出,在整个试验期间,CK 土壤 N_2O 排放通量变化不大,仅为 13.25 ~ 36.76 $\mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,平均值为 18.33 $\mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。各施氮处理土壤 N_2O 排放通量变幅为 20.92 ~ 593.91 $\mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,平均值为 76.86 ~ 123.65 $\mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,于每次追肥灌水后均表现为先上升后下降的趋势,

排放高峰出现在施肥灌水后的第 3 天,随后快速下降,并在第 9 天后与 CK 处理相近。与 CN 相比,RN、RND、RNM 和 RND+M 处理土壤 N_2O 平均排放通量分别显著降低 21.72%,37.84%,30.01%,

31.21%。等氮条件下,RND、RNM 和 RND+M 处理较 RN 处理土壤 N_2O 平均排放通量分别降低 20.59%,10.58%,12.12%,其中 RND 处理对 N_2O 的减排效果最为明显。



注:“↓”表示追肥灌水时间,“...”表示灌水时间。下同。

图 2 黄瓜追肥期间土壤 N_2O 排放动态变化

2.2.2 土壤 NH_3 挥发速率 由图 3 可知,整个试验期内,CK 处理土壤 NH_3 挥发速率变幅不大,仅为 3.45~11.66 $mg/(m^2 \cdot d)$,平均值为 6.54 $mg/(m^2 \cdot d)$ 。各施氮处理土壤 NH_3 挥发速率均在每次追肥灌水后第 3 天达到高峰,随后呈现逐渐降低趋势,变幅为 3.13~52.72

$mg/(m^2 \cdot d)$,平均值为 13.35~19.84 $mg/(m^2 \cdot d)$ 。与 CN 相比,RN、RND、RNM 和 RND+M 处理土壤 NH_3 平均挥发速率显著降低 19.99%~32.71% ($p < 0.05$)。等氮条件下,减氮配施 DMPP、菌剂及二者联合施用对土壤 NH_3 挥发影响不大 ($p > 0.05$)。

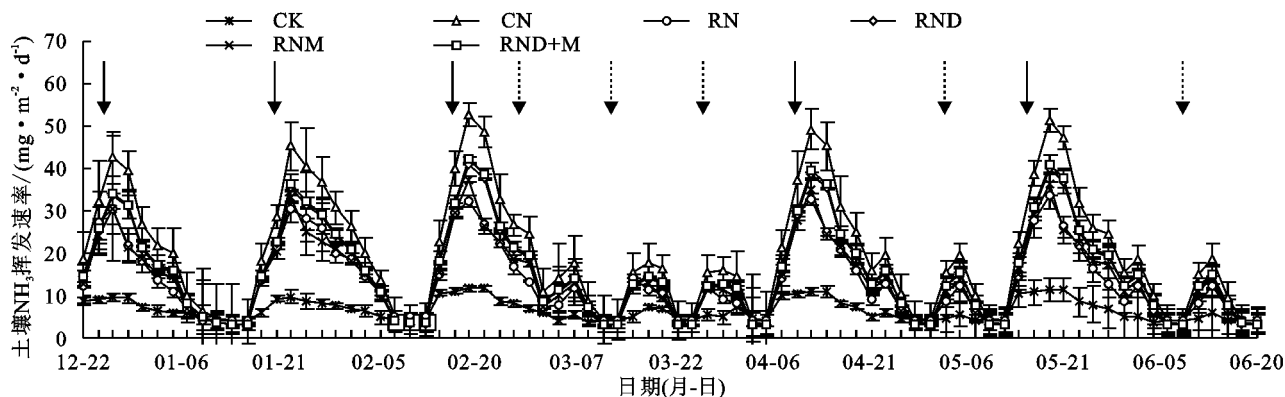


图 3 黄瓜追肥期间土壤 NH_3 挥发动态变化

2.2.3 土壤 N_2O 排放与 NH_3 挥发累积排放量 从表 3 可以看出,RN、RND、RNM 和 RND+M 处理土壤 N_2O 累积排放量较 CN 显著降低 26.38%~41.45%。等氮条件下,RND、RNM、RND+M 较 RN 处理分别减少 20.11%,5.67%,20.47%,其中 RND 和 RND+M 对 N_2O 的减排效果达到显著性差异水平 ($p < 0.05$)。与 CN 处理相比,RN、RND、RNM 和 RND+M 处理土壤 NH_3 累积挥发量显著降低 28.82%~37.70% ($p < 0.05$)。等氮条件下,与 RN 处理相比,RNM 处理土壤 NH_3 累积挥发量有所降低,但降低率仅为 2.12%;而由于添加硝化抑制剂 DMPP 后硝化作用减缓,延长 $NH_4^+ - N$ 的存留时间,造成土壤 $NH_4^+ - N$ 累积^[10],使得 RND、RND+M 处理促进土壤 NH_3 累积挥发量,但均未达到显著性差异 ($p > 0.05$)。各施氮处理 N_2O 排放系数为 0.92%~1.26%,RND 与 RND+M 处理减排效果较好,且 RND+

M 效果优于 RND; NH_3 挥发系数为 1.63%~3.68%,且与 CN 相比,各减氮处理有效减少 NH_3 挥发,但减氮处理间差异不显著。

进一步分析黄瓜追肥期间不同处理土壤 N_2O 排放和 NH_3 挥发气态损失量及其占比(表 3)可以看出,各施氮处理土壤 NH_3 累积挥发量要高于 N_2O 累积排放量,表明温室黄瓜种植体系氮素气态损失以 NH_3 挥发为主。与 CN 相比,RN、RND、RNM 及 RND+M 处理的 N_2O 排放和 NH_3 挥发气态损失量显著降低 32.75%~35.44% ($p < 0.05$),但各减氮处理间差异不显著。这是由于与减氮处理相比,CN 处理具有更高的底物浓度,氮肥的减施减少尿素的投入与反硝化过程中的底物供应,从而降低 NH_3 挥发与 N_2O 排放^[30]。各施氮处理土壤气体总损失占比不大,仅为 3.31%~3.67%,可见温室黄瓜生产体系中

N₂O 排放和 NH₃ 挥发不是氮素损失的主要途径,但 二者的环境影响却不容忽视。

表 3 不同处理下土壤 N₂O 排放与 NH₃ 挥发损失量及其占比

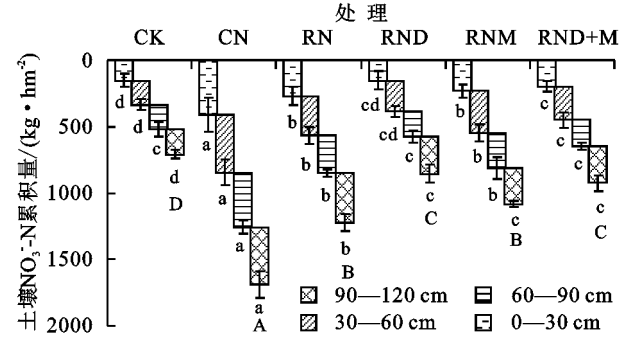
处理	化肥 N/ (kg·hm ⁻²)	N ₂ O 排放		NH ₃ 挥发		N ₂ O 和 NH ₃ 总损失/ (kg·hm ⁻²)	N ₂ O 和 NH ₃ 气态损失率/%
		总累积量/ (kg·hm ⁻²)	排放 系数/%	总累积量/ (kg·hm ⁻²)	挥发 系数/%		
CK	—	1.48±0.21d	—	3.41±0.50c	—	4.88c	—
CN	514	7.43±1.11a	1.16a	16.34±1.26a	3.18	23.76a	3.67a
RN	316	5.47±0.65b	1.26a	10.40±1.02b	3.29	15.87b	3.40a
RND	316	4.37±0.21c	0.92c	11.33±1.92b	3.59	15.70b	3.42a
RNM	316	5.16±0.34b	1.16b	10.18±5.81b	1.63	15.34b	3.31a
RND+M	316	4.35±0.54c	0.91c	11.63±5.76b	3.68	15.98b	3.51a

2.3 土壤剖面 NO₃⁻—N 累积

黄瓜收获后,各处理 0—120 cm 土壤剖面 NO₃⁻—N 累积量见图 4。CK 处理土壤剖面 NO₃⁻—N 累积量随土层深度增加变化不大。各施氮处理则随着土层深度的增加呈现先升高后降低又升高的变化趋势,30—60,90—120 cm 土层均出现 NO₃⁻—N 累积高峰,表明土壤 NO₃⁻—N 有向下淋溶的趋势。CN 处理由于氮肥的过量投入,导致 0—120 cm 土层土壤剖面内不同土层均检测到大量 NO₃⁻—N 的存在,总累积量达 1 689.72 kg/hm²。不同土层内各减氮处理土壤 NO₃⁻—N 累积量较 CN 相比分别显著降低 33.29%~62.32% (0—30 cm), 28.01%~33.01% (30—60 cm), 30.81%~53.55% (60—90 cm) 和 13.07%~36.84% (90—120 cm) ($p<0.05$)。等氮条件下,0—30,30—60,60—90 cm 土层中,RND,RND+M 较 RN 分别显著减少 43.51%,26.78%和 20.69%,14.78%及 32.87%,30.62% ($p<0.05$),RND 与 RND+M 二者之间差异不大。但在这 3 个土层中,RNM 处理土壤剖面 NO₃⁻—N 累积量与 RN 处理相比均未达到显著性差异水平 ($p>0.05$)。90—120 cm 土层中,RND,RDM、RND+M 处理较 RN 处理分别显著降低 25.46%,27.35%和 26.44% ($p<0.05$),但三者之间差异不显著。

在 0—120 cm 土壤剖面中,RN、RND、RNM 和 RND+M 处理土壤 NO₃⁻—N 总累积量分别为 1 225.79, 857.32,1 082.88,922.99 kg/hm²,较 CN 处理分别显著降低 27.46%,49.26%,35.92%,45.38% ($p<0.05$)。等氮条件下,RND、RND+M 处理土壤的 NO₃⁻—N 累积量较 RN 分别显著减少 30.06%和 24.70% ($p<0.05$),RNM 处理虽有所减少,但与 RN 差异不显著。其中 RND+M 处理的 NO₃⁻—N 累积量显著低于 RNM 处理,与 RND 处理差异不显著。由于黄瓜根系较浅,主要分布在 0—60 cm 土壤剖面内,60 cm 以下累积的氮素很难再被根系吸收利用,因此 60—120 cm 剖面范围内累积的氮素极易发生淋溶损失。本研究中,在减氮的基础上

配施 DMPP 或/和菌剂,均可减少 0—60,60—120 cm 土层 NO₃⁻—N 累积,其中 RND+M 及 RND 处理之间差异不显著,但与 RNM 处理相比,0—60,60—120 cm 土层 NO₃⁻—N 累积分别显著减少 17.38%,12.12%与 28.95%,12.63% ($p<0.05$)。



注:图中不同小写字母表示同一土层不同处理间土壤 NO₃⁻—N 累积量在 5% 水平差异显著;不同大写字母表示 0—120 cm 剖面不同处理间土壤 NO₃⁻—N 累积量在 5% 水平有显著差异。

图 4 黄瓜收获后 0—120 cm 土壤剖面 NO₃⁻—N 累积量

2.4 减氮配施 DMPP 与菌剂对温室黄瓜产量的影响及其经济效益分析

由表 4 可知,与常规施氮 CN 相比,减氮 RN 处理黄瓜产量有所降低,但未达到显著性差异水平 ($p>0.05$)。等氮条件下,RND、RNM、RND+M 处理较 RN 处理分别增产 7.28%,2.89%,10.29%,其中 RND+M 处理较 RND、RNM 处理分别增产 2.81%,7.20%,但均未达到显著性差异水平 ($p>0.05$)。进一步分析各处理黄瓜经济效益(表 4)可知,与常规施氮 CN 相比,减氮 RN 处理成本因肥料等投入减少而降低 4.08%,RND、RNM 和 RND+M 处理由于增施 DMPP 或菌剂等生产成本增加 5.40%~17.77%,但增施 DMPP 或菌剂促进黄瓜产量的提高和农户收入的增加,从节本增效来看,RND 效果最佳,达到 4 550 元/hm²,其次为 RND+M 为 3 160 元/hm²,RN 和 RNM 节本增效则表现为负值,这是由于产量降低导致收益的下降。等氮条件下,RND、RND+M 处理比 RN 处理的节本增收分别增加 6 540,5 150 元/hm²。由此可见,

合理减氮能够保证黄瓜稳产,增施硝化抑制剂或菌剂虽然成本有所增加,但对黄瓜产量的提高具有一定的促进作用,尤其是二者联合施用可显著提高黄瓜产量和收益,节本增收效果突出。

表 4 温室黄瓜产量与经济效益分析

处理	产量/ (t·hm ⁻²)	产值/ (×10 ³ 元·hm ⁻²)	投入化学肥料成本/(元·hm ⁻²)				其他/ (元·hm ⁻²)	DMPP/ (元·hm ⁻²)	菌剂/ (元·hm ⁻²)	总支出/ (元·hm ⁻²)	节本/ (元·hm ⁻²)	利润/ (元·hm ⁻²)	增收/ (元·hm ⁻²)	节本增收/ (元·hm ⁻²)
			基肥	氮肥	磷肥	钾肥								
CK	57.31b	137.54b	3800	0	0	0	10000	0	0	13800	—	123740	—	—
CN	65.41a	156.99a	3800	2570	4583	3302	10000	0	0	24255	—	132735	—	—
RN	63.76ab	153.02ab	3800	1580	4583	3302	10000	0	0	23265	-990	129755	-2980	-1990
RND	68.40a	164.16a	3800	1580	4583	3302	10000	2300	0	25565	1310	138595	5860	4550
RNM	65.60ab	157.44a	3800	1580	4583	3302	10000	0	3000	26265	2010	131175	-1560	-3570
RND+M	70.32a	168.77a	3800	1580	4583	3302	10000	2300	3000	28565	4310	140205	7470	3160

注:其他主要包括水费、电费、劳力、农药等支出。

2.5 减氮配施 DMPP 与菌剂对温室黄瓜果实硝酸盐和营养品质的影响

由表 5 可知,CK 处理黄瓜果实硝酸盐含量 147.26 mg/kg,各施氮处理下硝酸盐含量有所增加(CN>RN>CK),与 CN 处理相比,RND、RNM 和 RND+M 处理可使黄瓜果实硝酸盐含量降低 6.61%~18.28%,尤其是 RND+M 处理的效果最显著($p<0.05$)。等氮条件下,RND、RNM 和 RND+M 处理黄瓜果实硝酸盐含量比 RN 相比降低 0.82%~12.50%($p>0.05$),其中 RND+M 较 RND、RNM 处理分别降低 11.77%,7.83%,但均未达到显著性差异水平($p>0.05$)。

与 CK 处理相比,各施氮处理黄瓜果实 Vc 含量增

加 13.52%~31.69%,其中 RND+M 处理增加效果显著($p<0.05$),但施氮处理间差异不显著。各施氮处理黄瓜果实可溶性糖含量较 CK 处理显著增加($p<0.05$),施氮处理间差异不显著。黄瓜可溶性蛋白含量随施氮量的增加呈上升趋势(CN>RN>CK),等氮条件下,增施 DMPP 或/和菌剂均提高果实可溶性蛋白含量,尤其是 RND+M 配施效果最好,其可溶性蛋白含量较 RND 和 RNM 分别提高 5.53%和 4.01%($p>0.05$),较 RN 处理提高 16.36%,差异达显著性水平($p<0.05$)。由此可见,减氮或减氮配施硝化抑制剂或菌剂可以促进黄瓜果实品质的提高,尤其是硝化抑制剂和菌剂二者联合施用效果明显。

表 5 不同处理下黄瓜果实硝酸盐含量和主要品质

处理	硝酸盐含量/ (mg·kg ⁻¹)	维生素 C 含量/ (mg·kg ⁻¹)	可溶性糖含量/ (mg·100 g ⁻¹)	可溶性蛋白含量/ (mg·100 g ⁻¹)
CK	147.26±7.85b	83.98±23.26b	934.33±189.76b	458.04±148.04c
CN	190.86±2.49a	95.33±9.87ab	1225.11±308.69a	537.25±83.62ab
RN	178.25±5.90ab	104.52±6.93ab	1216.60±172.75a	509.48±112.78b
RND	176.78±10.59ab	105.67±8.08ab	1399.57±338.32a	561.76±134.78ab
RNM	169.22±5.12ab	103.16±19.52ab	1234.33±159.96a	569.93±112.46ab
RND+M	155.97±3.91b	110.59±5.51a	1405.96±160.86a	592.81±98.20a

3 讨论

3.1 减氮配施 DMPP 与菌剂对温室黄瓜氮素吸收利用的影响

本研究表明,施氮过量会降低作物吸氮量。常规施氮 CN 处理追施氮高达 514 kg/hm²,但黄瓜总吸收氮量以及不同氮素利用指标 REN、AEN 和 PFPN 却最低(表 2)。这是由于氮素投入过量,使土壤长期处于高氮条件,肥力过高,超过作物的正常需氮量导致氮肥利用率低下。因此,适当减少氮肥投入不但能满足蔬菜生长所需,还能提高氮素利用率^[31]。此外,减氮基础上配施硝化抑制剂或菌剂也能够促进蔬菜氮素吸收利用,实现蔬菜增产增效^[32-33]。本研究

中,适当减氮或配施 DMPP 与菌剂使黄瓜总吸氮量、果实吸氮量分别提高 7.9%~28.33%,12.82%~30.75%($p<0.05$)。虽然 RND、RNM 及 RND+M 处理间的各部位吸氮量未达显著性差异水平,但 RND+M 处理较 RND 及 RNM 的吸氮量均有所增加。各氮肥利用效率指标也有所提升,尤其是 RND+M 氮肥农学效率达到 41.16 kg/kg,明显优于二者单施($p<0.05$),氮肥表观利用率(25.3%)较 RND 和 RNM 也分别高出 24.51%和 15.47%,氮肥偏生产力(222.53 kg/kg)分别高出 2.8%和 7.2%(表 2)。可见,DMPP 和菌剂在促进黄瓜氮素吸收和利用方面表现出明显的协同效果。张春楠等^[23]田间试验也表明,DMPP 和微生物菌剂

(有效活菌数 1 200 亿/g)与化肥配施处理对甜瓜生长和土壤氮素利用促进效果最显著,表现出正协同作用。其原因一方面是由于硝化抑制剂 DMPP 与氮肥配合施用,能够抑制硝化过程,延长 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的存留时间,并供作物利用,从而提高肥效^[10],且只针对靶标微生物,对其他微生物无毒害作用^[34];另一方面,试验所用菌剂为胶质芽孢杆菌,具有一定的固氮作用^[35],还能抑制病害和改善土壤结构,从而促进植物吸收氮素,利于植物生长。因此,DMPP 与菌剂二者联合施用,为黄瓜生长提供良好的土壤条件和营养供应,表现出显著的正协同效应,但具体的作用机制还有待进一步研究。

3.2 减氮配施 DMPP 与菌剂对土壤氮损失的影响

本试验结果也表明,与农民常规追施氮相比,单一减氮 39%可显著减少氮素损失, N_2O 排放、 NH_3 挥发损失量以及 0—120 cm 土壤剖面硝态氮累积量分别降低 26.38%,36.35%和 27.46% ($p < 0.05$);同等减氮条件下,配施硝化抑制剂 DMPP 较单一减氮 RN 又进一步降低 20.11%的 N_2O 排放和 30.06%的硝态氮累积 ($p < 0.05$),却增加 8.94%的 NH_3 挥发 ($p > 0.05$)。由此可见,DMPP 对 N_2O 的减排作用大于对 NH_3 挥发的促进作用。这与高珊^[36]研究结果相同,减氮 30%配施 1%纯氮量 DMPP 较单一减氮可使设施番茄土壤 N_2O 排放和 0—60 cm 硝态氮残留量分别显著减少 28.94%和 27.74% ($p < 0.05$), NH_3 挥发则增加 26.35% ($p > 0.05$)。这是由于硝化抑制剂 DMPP 施入土壤后,硝化作用受阻导致土壤 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 离子累积,进而增加土壤 NH_3 挥发^[34],从而减少 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的产生和累积^[37],使得反硝化过程底物减少,降低 N_2O 的产生^[38]。此外,就氮素气态损失来说,本研究中各减氮处理气态总损失量上较 CN(23.76 kg/hm²)降低 32.75%~35.44%,差异达显著性 ($p < 0.05$)。因此,对于高投入氮素的设施蔬菜生产体系,减氮配施硝化抑制剂是减少土壤氮素损失、提高肥料利用率的有效方法。

本研究中,减氮配施菌剂在减少 N_2O 排放、 NH_3 挥发气态损失方面效果不大。但白志辉等^[19]结果表明,半量氮肥配合菌肥(有效菌种为解淀粉芽孢杆菌)处理不但促进雪菜增产,同时可使土壤 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量降低 22%~29%, N_2O 平均排放量降低 58.3%~73.1%;汪霞^[18]研究发现,真菌类微生物菌剂绿色木霉菌、细菌类微生物菌剂解淀粉芽孢杆菌和多黏类芽孢杆菌可使碱性土壤 NH_3 挥发量分别降低 42.21%,20.28%和 13.81%,以绿色木霉菌控氨效果最佳。可

见,不同微生物菌剂种类对土壤氮素损失的影响明显不同。减氮增施菌剂后 0—90 cm 土壤剖面硝态氮累积方面的效果与 RN 相差也不大 ($p > 0.05$),但在 90—120 cm 土层中,减氮配施菌剂土壤硝态氮累积量较 RN 却降低 27.35% ($p < 0.05$)。这与张春楠等^[23]在设施甜瓜上的研究结果相似,减氮配施菌剂可显著降低土壤中硝态氮含量。这是由于微生物菌剂施入后:(1)促进土壤中难溶性养分的活化,增强土壤的供氮能力,有利于作物的吸收和利用,提高土壤有效养分及利用率;(2)菌剂的有益微生物菌群在作物根部不断繁殖,分泌大量的几丁质酶、生根素等物质刺激作物根系生长,养分吸收能力增强^[39];(3)菌剂可以在植物根部土壤形成微生物群落,促进根系分泌物产生,抑制氨氧过程中的酶活性,从而抑制硝化作用^[40],减少氮素的累积及向深层次的淋失。

对于减氮配施 DMPP 与菌剂的施用效果来看,本研究显示,与 RN 及 RNM 处理相比,RND+M 处理的 N_2O 排放量显著减少 20.47%和 15.69% ($p < 0.05$),0—120 cm 土层土壤剖面总 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 累积量显著减少 24.70%和 14.77% ($p < 0.05$),虽然 NH_3 挥发量有增高的趋势,但均未达到显著水平。表明二者配施在减少氮素损失方面明显优于减氮或配施菌剂处理。其次,二者配施在减少 N_2O 排放、 NH_3 挥发和土壤剖面硝态氮累积方面效果与减氮配施 DMPP 效果相当,综合表现为 $\text{RND} + \text{M} \approx \text{RND} \geq \text{RNM} \approx \text{RN}$ 。二者联合施用时 DMPP 在减少氮素损失的效果较为突出,并未表现出明显的协同效应。这主要是由于菌剂在影响土壤氮素转化方面,效果要远小于 DMPP^[32]。但从农业绿色发展角度,菌剂在培育健康土壤、增加土壤养分有效性、微生物多样性等方面将发挥重要作用。

3.3 减氮配施 DMPP 与菌剂对温室黄瓜产量和品质的影响

本研究中,与常规施氮 CN 相比,减氮 RN 处理追施氮量虽然较 CN 降低 39%以上,但还能保证黄瓜稳产;等氮条件下,RND、RNM,以及 RND+M 处理较 RN 处理能够不同程度地促进黄瓜产量的提高,尤其是 RND+M 和 RND 处理,黄瓜产量分别达到 70.32,68.40 t/hm²,增产 10.29%和 7.28%,同时还能促进维生素 C(Vc)、可溶性糖和可溶性蛋白含量的提高,改善黄瓜果实品质,其中抑制剂和菌剂二者表现出良好的协同效果,较单一抑制剂或菌剂处理增产提质效果显著。此外,增施抑制剂和菌剂必然增加种植成本,但蔬菜产量提高增加的收益会抵消甚至超

过因抑制剂或菌剂施入导致成本的增加,本研究中 RND 节本增效效果最佳,达到 4 550 元/hm²,这与张琳等^[27]在温室黄瓜、田晓楠等^[41]在温室番茄和黄瓜轮作,以及 Zhao 等^[33]在温室辣椒的结果相同,其次为 RND+M 为 3 160 元/hm²,RN 和 RNM 由于产量降低导致表现为负值。硝化抑制剂或菌剂的施用能够促进蔬菜产量的提高和品质的改善,增加经济效益,对于保护环境 also 具有重要意义。

4 结论

(1)与 CN 相比,RN、RND、RNM 和 RND+M 能够促进黄瓜氮素吸收和利用,提高氮素利用率。等氮条件下,RND+M 可使黄瓜地上部植株氮素总吸收量增加 18.93%,其氮肥表观利用率(25.3%)较单一硝化抑制剂和单一菌剂分别高出 24.51%和 15.47%,氮肥偏生产力(222.53 kg/kg)分别高出 2.8%和 7.2%,尤其是氮肥农学效率达到 41.16 kg/kg,明显优于硝化抑制剂或菌剂单施效果($p < 0.05$)。

(2)RN、RND、RNM 和 RND+M 较 CN 可使土壤 N₂O 排放显著降低 26.38%~41.45%,NH₃ 挥发减少 28.82%~37.70%,0—120 cm 土壤剖面 NO₃⁻-N 累积显著降低 13.07%~62.32%;等氮条件下,RNM 处理对土壤 N₂O 排放和 NH₃ 挥发影响不大,但能显著降低 90—120 cm 土层 NO₃⁻-N 累积量,较 RN 降低 27.35%。RND 和 RND+M 可使 N₂O 排放分别降低 20.11%和 20.47%,0—120 cm 土壤剖面 NO₃⁻-N 累积量分别降低 30.06%和 24.70%,减少氮素在土壤中的累积及淋失风险,但增加 NH₃ 挥发风险($p > 0.05$),总体表现为 RND≈RND+M≥RNM≈RN。

(3)RND+M 处理的黄瓜产量为 70.32 t/hm²,节本增收较 RN 增加 5 150 元/hm²,且其在提高黄瓜果实品质方面效果较明显,可溶性蛋白含量较 RN 及 RNM 处理分别提高 16.36%与 4.01%。

(4)RND+M 处理效果最佳,即农民常规追氮基础上减施 39%(追氮 316 kg N/hm²),同时配施 2%纯氮量的 DMPP 和微生物菌剂(75 L/hm²),可实现经济与环境效益双赢,是温室黄瓜增产提质、绿色高质量发展的有效调控技术措施。

参考文献:

[1] 李庆,徐光耀,魏建美,等.江西蔬菜产业发展现状、问题与对策研究[J].江西农业学报,2020,32(2):125-130.
[2] 李佳朋.设施蔬菜连作障碍原因及防治措施分析[J].农民致富之友,2022(3):21-23.
[3] 梁宝忠.我国设施农业年产值达 9800 亿元[J].中国食品,2019(18):156.

[4] Fan Z B, Lin S, Zhang X M, et al. Conventional flood-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(5):11-19.
[5] 胡笑涛.温室番茄局部控制灌溉节水调控机制与水分亏缺诊断[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2012.
[6] 杨慧,谷丰,杜太生.不同年限日光温室土壤硝态氮和盐分累积特性研究[J].中国农学通报,2014,30(2):240-247.
[7] 王仕琴,郑文波,孔晓乐.华北农区浅层地下水硝酸盐分布特征及其空间差异性[J].中国生态农业学报,2018,26(10):1476-1482.
[8] 聂文静,李博文,郭艳杰,等.氮肥与 DCD 配施对棚室黄瓜土壤 NH₃ 挥发损失及 N₂O 排放的影响[J].环境科学学报,2012,32(10):2500-2508.
[9] 山楠,韩圣慧,刘继培,等.不同肥料施用对设施菠菜地 NH₃ 挥发和 N₂O 排放的影响[J].环境科学,2018,39(10):4705-4716.
[10] 俞巧钢,殷建祯,马军伟,等.硝化抑制剂 DMPP 应用研究进展及其影响因素[J].农业环境科学学报,2014,33(6):1057-1066.
[11] Zerulla W, Barth T, Dressel J, et al. 3,4-Dimethylpyrazole phosphate (DMPP) - A new nitrification inhibitor for agriculture and horticulture[J].Biology and Fertility of Soils,2001,34(2):79-84.
[12] Kou Y P, Wei K, Chen G X, et al. Effects of 3,4-dimethylpyrazole phosphate and dicyandiamide on nitrous oxide emission in a greenhouse vegetable soil[J].Plant, Soil and Environment,2015,64(1):29-35.
[13] 刘生辉,吴萌,胡锋,等.添加硝化抑制剂 DMPP 对红壤水稻土硝化作用及微生物群落功能多样性的影响[J].土壤,2015,47(2):349-355.
[14] Liu Z H, Gao J C, Xu L Y, et al. Effects of humic materials on soil N transformation and NH₃ loss when co-applied with 3, 4-Dimethylpyrazole phosphate and urea[J].Journal of Soil Science and Plant Nutrition, 2022,22(3):3490-3499.
[15] 李宝石,刘文科,王奇,等.根区施用硝化抑制剂 DMPP 对不同栽培方式下黄瓜产量及根区温室气体排放的影响[J].中国农业科技导报,2021,23(9):184-192.
[16] 伍少福,吴良欢,尹一萌,等.含硝化抑制剂复合肥对西瓜 黄瓜产量和营养品质的影响[J].农业环境科学学报,2006,25(6):1432-1435.
[17] 祝虹钰,刘闯,李蓬勃,等.微生物菌剂的应用及其研究进展[J].湖北农业科学,2017,56(5):805-808.
[18] 汪霞.微生物菌剂对碱性土壤氮挥发的控制及其机制研究[D].北京:中国科学技术大学,2017.
[19] 白志辉,王璠,曹建喜,等.解淀粉芽孢杆菌菌剂对雪菜生长和土壤氧化亚氮排放的影响[J].农业科学与技

- 术,2015,16(4):727-732,749.
- [20] 刘国庆,张广生,杨立城.微生物菌肥在设施蔬菜重茬栽培中的应用效果分析[J].青海农技推广,2021(2):24-27.
- [21] 赵贞.微生物菌肥对日光温室黄瓜生长发育及产量品质的影响[J].中国蔬菜,2012(18):149-153.
- [22] 张佼,屈峰,朱玉尧,等.增施有机肥和微生物菌剂对春季杨凌设施番茄产量和品质的影响[J].西北农业学报,2019,28(5):767-773.
- [23] 张春楠,张瑞芳,王鑫鑫,等.硝化抑制剂和微生物菌剂对甜瓜产量及氮素利用的影响[J].水土保持学报,2020,34(6):281-287,293.
- [24] 杨威,郭艳杰,李博文,等.氮肥与 DCD 配施对温室番茄膨果期土壤 N_2O 排放和产量的影响[J].河北农业大学学报,2013,36(3):25-29.
- [25] 王朝辉,刘学军,巨晓棠,等.田间土壤氮挥发的原位测定—通气法[J].植物营养与肥料学报,2002,8(2):205-209.
- [26] 聂文静,李博文,郭艳杰,等.氮肥与双氰胺配施对棚室黄瓜生长及土壤氮素淋失的影响[J].水土保持学报,2011,25(6):13-17,22.
- [27] 张琳,孙卓玲,马理,等.不同水氮条件下双氰胺(DCD)对温室黄瓜土壤氮素损失的影响[J].植物营养与肥料学报,2015,21(1):128-137.
- [28] 高君凤.植物生理学实验指导[M].北京:高等教育出版社,2006:140-144.
- [29] 鲍士旦.土壤农化分析[M].3版.北京:中国农业出版社,2000:264-268.
- [30] 张浩东,贾俊香,马智勇.减氮配施不同调节剂对土壤温室气体强度与冬小麦产量的影响[J].山西农业科学,2022,50(2):191-198.
- [31] Sun Y, Hu K L, Fan Z B, et al. Simulating the fate of nitrogen and optimizing water and nitrogen management of greenhouse tomato in North China using the EU-Rotate_N model[J]. Agricultural Water Management, 2013, 128(6):72-84.
- [32] 譙江兰.硝化抑制剂和菌剂对设施番茄生长及土壤养分状况的影响[D].河北保定:河北农业大学,2019.
- [33] Zhao Y N, Zhang M S, Yang W, et al. Effects of microbial inoculants on phosphorus and potassium availability, bacterial community composition, and chili pepper growth in a calcareous soil: A greenhouse study[J]. Journal of Soils and Sediments, 2019, 19(10):3597-3607.
- [34] 郭俊丽,刘毅,魏文学,等.双氰胺和 3,4-二甲基吡唑磷酸盐对蔬菜种植土壤氨氧化细菌和古菌的影响[J].环境科学,2019,40(11):5142-5150.
- [35] 田稼,吴小杰,孙超,等.胶质芽孢杆菌(*Bacillus mucilaginosus*)的研究进展[J].中国土壤与肥料,2017(6):15-22.
- [36] 高珊.硝化抑制剂对温室番茄施氮损失的影响及微生物效应研究[D].河北保定:河北农业大学,2019.
- [37] 李晓兰,兰翔,潘振鹏,等.有机肥及 DMPP 对蔬菜生产及硝态氮淋失的影响[J].中国土壤与肥料,2018(2):118-126.
- [38] Scheer C, Rowlings D W, Firrel M, et al. Impact of nitrification inhibitor (DMPP) on soil nitrous oxide emissions from an intensive broccoli production system in sub-tropical Australia[J]. Soil Biology Biochemistry, 2014, 77(7):243-251.
- [39] 王归鹏,马乐乐,范兵华,等.微生物菌剂对番茄全有机营养栽培养分转化及产量品质的影响[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2021,49(9):118-128.
- [40] 王锐,陈士勇,陈志青,等.根系分泌物对根际土壤关键氮转化过程的影响[J].作物杂志,2021(6):1-8.
- [41] 田晓楠,张丽娟,聂文静,等.设施番茄—黄瓜轮作体系适宜水氮管理和双氰胺调控模式研究[J].山东农业大学学报,2021,52(3):343-351.
- (上接第 266 页)
- [27] 邱德勋,赵佰礼,尹殿胜,等.黄土丘陵沟壑区土壤水分垂直变异及影响因素[J].中国水土保持科学(中英文),2021,19(3):72-80.
- [28] 赵晓光,吴发启,刘秉正,等.黄土高原坡耕地土壤水分主要受控因子研究[J].水土保持通报,1999,16(1):13-17,35.
- [29] Singh G, Singh B. Effect of varying soil water stress regimes on nutrient uptake and biomass production in *Dalbergia sissoo* seedlings in Indian desert[J]. Journal of Forestry Research, 2009, 20(4):307-313.
- [30] 马风云,李新荣,张景光.沙坡头人工固沙植被土壤水分空间异质性[J].应用生态学报,2006,17(5):789-795.
- [31] 张定海,李新荣,张鹏.生态水文阈值在中国沙区人工植被生态系统管理中的意义[J].中国沙漠,2017,37(4):678-688.