

轮作水稻对大棚土壤硝化作用和氮挥发的影响

王强^{1,2}, 徐建明¹, 姜丽娜², 林辉², 符建荣², 马军伟²

(1. 浙江大学国土资源与环境研究所, 杭州 310058; 2. 浙江省农业科学院环境资源与土壤肥料研究所, 杭州 310021)

摘要: 通过大棚茄子—水稻轮作(GER)和大棚茄子—揭膜休闲(GEF)2种栽培模式在大棚茄子栽培期间土壤硝化作用强度、氨挥发速率和土壤水热条件指标动态变化的比较, 研究了轮作水稻对大棚土壤硝化作用和氨挥发的影响。结果表明: (1) GER模式在大棚茄子各生育期土壤硝化作用强度都显著高于 GEF 土壤, 苗期最高峰时表土和根际土硝化作用强度分别为 56.6, 101.4 mg/(kg·h), 比 GEF 模式增加了 34.8% 和 42.4%; (2) GER 模式在大棚茄子基肥和追肥施用后土壤氨挥发速率都显著低于 GEF 土壤, 累积氨挥发量为 1.21 kg/hm², 比 GEF 模式减少了 76.7%; (3) GER 模式在大棚茄子各生育期表土和根际土 NH₄⁺—N 含量都低于 GEF 土壤, NO₃⁻—N 含量高于 GEF 模式; (4) GER 和 GEF 模式在大棚茄子收获后表土 NH₄⁺—N 含量分别为 30.4, 45.9 mg/kg, NO₃⁻—N 含量分别为 265.4, 255.5 mg/kg, 存在明显的氮素累积。夏季轮作水稻缓解了大棚土壤酸化、提高了大棚茄子生长期土壤 pH、温度和含水量, 对大棚土壤硝化作用有明显的促进作用, 可减少土壤氨挥发损失。但硝化作用强度的增加促进了土壤中硝酸根的累积, 存在加剧土壤次生盐渍化和氮损失的风险, 应加强轮作周期氮肥合理施用技术研究。

关键词: 水稻; 大棚土壤; 硝化作用; 氨挥发

中图分类号: S158.3

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2017)01-0186-05

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2017.01.031

Influence of Rice Rotation on Nitrification and Ammonia Volatilization of Soil under Vegetable Greenhouse Cultivation

WANG Qiang^{1,2}, XU Jianming¹, JIANG Lina², LIN Hui², FU Jianrong², MA Junwei²

(1. Institute of Soil and Water Resources and Environmental Science, Zhejiang University, Hangzhou 310058;

2. Institute of Environment, Resource, Soil and Fertilizer, Zhejiang Academy of Agricultural Sciences, Hangzhou 310021)

Abstract: The effects of rice rotation in summer on the nitrification and ammonia volatilization of soil under greenhouse vegetable cultivation were studied based on the comparison of soil nitrification intensity, ammonia volatilization rate and the index about soil hydrothermal condition during greenhouse eggplant cultivation between two different crop rotation systems, greenhouse eggplant-rice rotation (GER) and greenhouse eggplant-summer fallow without plastic covering (GEF). The results showed as follows: (1) The soil nitrification intensity in GER was significantly higher than that in GEF during the different growth period of eggplant. The nitrification intensities of surface soil and rhizosphere soil on the seeding stage in GER were 56.6 mg/(kg·h) and 101.4 mg/(kg·h), with the increases of 34.8% and 42.4% compared with GEF, respectively. (2) The soil ammonia volatilization rate and accumulative ammonia volatilization amount in GER were significantly lower than those in GEF. The gross ammonia volatilization amount of GER was 1.21 kg/hm², with the decrease of 76.7% compared with GEF. (3) The NH₄⁺—N amounts of surface soil and rhizosphere soil in GER were lower than those in GEF during the different growth period of eggplant, whereas the NO₃⁻—N amounts in GER were higher than those in GEF. (4) The NH₄⁺—N amounts of surface soil in GER and GEF after eggplant harvest were 30.4 mg/kg and 45.9 mg/kg, respectively, while the NO₃⁻—N amounts in GER and GEF were 265.4 mg/kg and 255.5 mg/kg, respectively, indicating the significant accumulation of nitrogen. The rice planting in summer alleviated the soil acidification and increased the pH, temperature and water content of soil during the greenhouse eggplant cultivation period. This also increased

收稿日期: 2016-09-13

资助项目: 国家自然科学基金项目(31000941); 公益性行业(农业)科研专项(201303103); 国际植物营养研究所资助项目(Zhejiang-25)

第一作者: 王强(1979—), 男, 博士研究生, 副研究员, 主要从事植物营养与高效施肥技术研究。E-mail: qwang0571@126.com

通信作者: 徐建明(1965—), 男, 博士, 教授, 主要从事土壤化学与环境、土壤污染与修复研究。E-mail: jmxu@zju.edu.cn

the nitrification intensity and decreased the loss of ammonia volatilization. However, the increase of nitrification intensity caused soil nitrate accumulation. This might lead to secondary salinization and nitrogen loss in soil. Therefore, the rational application of nitrogen fertilizer should be more concerned during the whole rotation period.

Keywords: rice; greenhouse soil; nitrification; ammonia volatilization

硝化作用是大棚土壤氮素循环的中心环节,不仅直接影响大棚栽培中土壤氮素供应和氮肥的利用率,而且和大棚土壤酸化、次生盐渍化等土壤障碍以及氨挥发、硝态氮淋洗等生态环境问题直接相关^[1-2]。针对大棚土壤硝化作用特征和影响因素国内外学者已经开展了广泛的研究^[3-5],普遍认为长期大棚栽培后土壤 pH 下降和盐份累积都会影响硝化细菌和氨氧化细菌的活性,进而对土壤硝化作用产生抑制作用^[6-8]。由于土壤硝化作用受阻,土壤氨挥发量和氮素的气态损失都明显增加^[9]。大棚蔬菜—水稻轮作模式近年来在我国华东、华南地区发展迅速。许多研究均表明夏季轮作水稻能有效平衡大棚土壤养分,缓解土壤酸化、次生盐渍化等土壤障碍^[10-11]。由于夏季轮作水稻对大棚土壤障碍的调节效应,该轮作制中大棚蔬菜栽培期间土壤硝化作用特性势必发生改变,但现阶段对该问题的研究鲜有报道。另一方面,由于大棚蔬菜栽培的高效益,大棚蔬菜—水稻轮作制中大棚蔬菜栽培期间过量施肥现象仍然非常普遍^[12],影响了轮作制的进一步推广。因此本文通过大棚茄子—水稻轮作(GER)和大棚茄子—揭膜休闲(GEF)2 种不同栽培模式田间对比试验研究了夏季轮作水稻对大棚蔬菜栽培期间土壤硝化作用和氨挥发的影响,以期为大棚蔬菜—水稻轮作制中氮肥合理施用提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区域位于浙江省湖州市长兴县雉城镇彭城村(119°59′ E,31°3′ N),毗邻太湖。彭城村是长兴县

大棚茄子规模种植基地,从 1995 年左右即开始实行大棚茄子—水稻轮作。每年的 11 月至次年 5 月进行大棚茄子栽培,6—10 月轮作水稻。大棚茄子栽培期间通常施用有机肥 3.8 t/hm²、复合肥(N:P₂O₅:K₂O 比例为 16:16:16)1.8 t/hm²、碳酸氢铵和过磷酸钙各 1.2 t/hm² 作基肥,大棚茄子初果期后,用复合肥 0.5 t/hm² 兑水浇施作追肥,整个生育期根据大棚茄子长势追肥 6~7 次。氮(N)、磷(P₂O₅)、钾(K₂O)总投入量分别为 980,940,920 kg/hm² (有机肥中 N、P₂O₅、K₂O 养分含量分别按 1%,1.5%,2.5%估算)。水稻栽培期间基本不施肥,主要利用大棚茄子栽培后土壤残留的养分,起到平衡地力,保证下一季大棚茄子产量的效果。彭城村部分靠近太湖的田块每年 11 月至翌年 5 月进行大棚茄子栽培,茄子品种和施肥量与大棚茄子—水稻轮作模式基本一致。6—10 月进行揭膜休闲,或作为鱼汛期的晾晒场。

1.2 研究方法

1.2.1 土壤样品采集 试验前经实地走访和农户调查,选择相邻区域、土壤类型一致 GER(大棚茄子—水稻轮作)和 GEF(大棚茄子—揭膜休闲)栽培模式均持续 3 a 以上的大棚各 3 个,分别在大棚茄子种植前(2014 年 11 月)采集每个大棚表层土壤样品,测试土壤基础肥力指标(表 1)。大棚茄子生长期分别在苗期(2014 年 12 月)、始花期(2015 年 3 月)、初果期(2015 年 4 月)、盛果期(2015 年 5 月)和收获后(2015 年 6 月)取 GER 和 GEF 表层土壤样品和大棚茄子根际土壤样品。

表 1 供试土壤基础肥力

轮作模式	pH	有机质/(g·kg ⁻¹)	全氮/(g·kg ⁻¹)	碱解氮/(mg·kg ⁻¹)	速效磷/(mg·kg ⁻¹)	速效钾/(mg·kg ⁻¹)	NH ₄ ⁺ —N/(mg·kg ⁻¹)	NO ₃ ⁻ —N/(mg·kg ⁻¹)
GER	6.55	34.3	1.77	224.9	157.7	179.7	16.8	26.1
	(6.50~6.62)	(31.9~35.7)	(1.67~1.82)	(208.5~249.2)	(148.9~169.9)	(147.0~198.0)	(16.2~17.8)	(21.3~28.9)
GEF	5.71	25.2	2.32	289.4	179.6	245.3	12.7	68.3
	(5.54~6.00)	(23.3~28.0)	(2.21~2.41)	(261.1~314.5)	(176.9~184.4)	(235.0~252.0)	(10.9~16.3)	(51.4~84.0)

注:括号内数据为供试样地土壤基础肥力变化范围。

1.2.2 土壤氨挥发量测定 土壤氨挥发测定采用王朝辉等^[13]的通气法。捕获装置用 6 mm 厚灰黑色不透光的 PVC 管制成,上面放置 2 层间距约 5 cm 的海绵,海绵预先浸透磷酸甘油。每个大棚设 3 个捕获装置,每次取样后在大棚内更换捕获装置的位置。氨挥发测定从大棚茄子施基肥后开始,分别在施基肥后 10,20,35,125 d(第 1 次追肥前)取样。每次施追肥

前更换下层海绵,持续到下一次追肥前取样。取样时将通气装置下层海绵取出,迅速装入塑料袋中密封。上层海绵晒干湿情况每隔 5~7 d 换 1 次。样品带回实验室后,用 100 ml 的 KCl 溶液(1.0 mol/L)浸提吸收在下层海绵中的氨,采用 AA3 连续流动分析仪测定浸提液中的铵态氮(NH₄⁺—N)浓度。每次捕获期内的氨挥发量和氨挥发速率计算公式分别为:

$$M = \frac{C}{A \times 10}, V = \frac{M}{D \times 10}$$

式中: M 为氨挥发量 (mg/m^2); V 为氨挥发速率 ($\text{g}/(\text{hm}^2 \cdot \text{d})$); C 为浸提液中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度 (mg/L); A 为捕获装置的截面积 (m^2); D 为每次连续捕获的时间 (d)。累积氨挥发量为每次捕获期内氨挥发量的总和。

1.2.3 土壤硝化作用强度的测定 大棚茄子栽培前、后的表层土壤样品和大棚茄子生育期表土、根际土壤硝化作用强度采用悬浮液培养法测定^[13]。称取 15.0 g 新鲜土样, 加入 100 ml 液体培养基 (1.5 ml KH_2PO_4 溶液 (0.2 mol/L)、3.5 ml K_2HPO_4 溶液 (0.2 mol/L) 和 15 ml $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 溶液 (0.2 mol/L) 按比例配制后, 调节 pH 到 7.2), 180 r/min 振荡 24 h, 每隔 6 h 吸取 15 ml 培养液过滤, 用于 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的测定, 每次取样后用等体积的培养基补足。以单位时间内 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的产生量 ($\text{mg}/(\text{kg} \cdot \text{h})$) 表示土壤硝化作用强度。

1.2.4 样品测定方法 大棚茄子生育期表层土壤含水量、土壤温度采用速测仪 (WET-2, 英国) 现场测定。土壤样品测定参照鲁如坤主编的《土壤农化分析方法》^[14]。土壤 pH 用 pH 计测定 (土水比为 1:2.5); 土壤 EC 值使用电导率仪测定 (土水比为 1:5); 土壤有机质含量采用油溶法测定; 土壤全氮含量采用凯氏定氮仪测定; 土壤碱解氮含量采用碱解扩散法测定; 土壤速效磷含量采用钼锑抗比色法测定; 土壤速效钾含量采用火焰光度法测定。硝化作用强度、氨挥发测定的浸提液采用连续流动分析仪 (AA3, 德国) 测定; 大棚茄子生长期表土和根际土 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量用 2 mol/L 的 KCl 溶液浸提后采用连续流动分析仪测定。

1.3 数据统计分析

采用 EXCEL 2010 软件统计数据并绘制图表, 采用 SPSS 10.0 软件对试验数据进行方差分析和显著性分析。

2 结果与分析

2.1 大棚茄子生长期土壤基本理化性状变化

大棚茄子生长期土壤温度逐渐升高, 到盛果期时 GER (大棚茄子—水稻轮作) 和 GEF (大棚茄子—揭膜休闲) 土壤温度分别达到 31.2、28.3 °C, 盛果期后略有下降 (图 1)。大棚茄子栽培期间土壤含水量在 34.1%~42.2% 之间波动, 主要受农户灌溉频率的影响, 2 种轮作模式土壤含水量都在始花期达到最高值 (图 1)。大棚茄子生长期表土和根际土 pH 都随着大棚茄子生长逐渐降低, GER 和 GEF 土壤 pH 从试验前的 6.4、5.8 分别下降到 5.5、4.7。2 种轮作模式根际土 pH 都低于表土, 可能是受土壤硝化作用的影响 (图 2)。土壤电导率是土壤中离子浓度

的直接反应, 大棚茄子生长期表土和根际土 EC 值都呈先升高再下降的趋势, 而且根际土 EC 值高于表土。GER 和 GEF 根际土 EC 值都在初果期达到最高值, 分别为 1.63、1.55 mS/cm (图 3)。综合来看, GER 模式在大棚茄子生长期土壤温度、含水量、电导率和 pH 都有高于 GEF 模式的趋势。

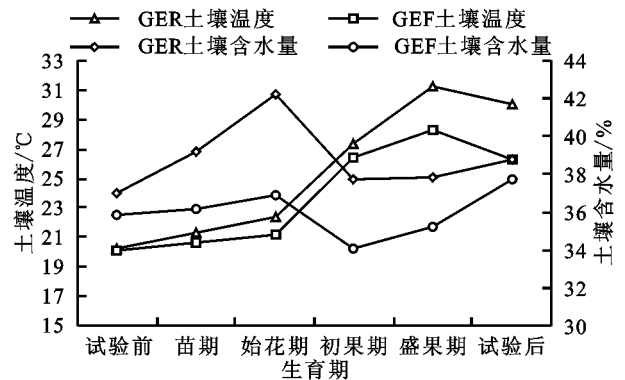


图 1 大棚茄子生长期土壤物理性状动态变化

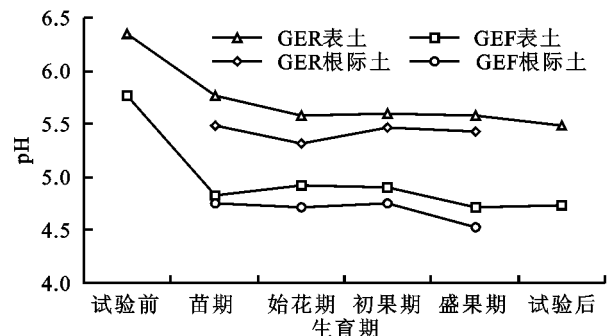


图 2 大棚茄子生长期土壤 pH 动态变化

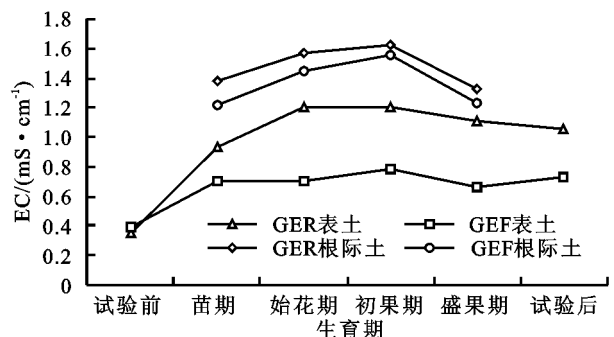


图 3 大棚茄子生长期土壤电导率动态变化

2.2 大棚茄子生育期内土壤硝化作用强度动态变化

由表 2 可知, 2 种轮作模式土壤硝化作用强度都在苗期和初果期出现高峰。GER (大棚茄子—水稻轮作) 苗期表土和根际土硝化作用强度分别为 56.6、101.4 $\text{mg}/(\text{kg} \cdot \text{h})$, 分别比 GEF (大棚茄子—揭膜休闲) 土壤增加了 34.8%、42.4%。初果期表土和根际土的硝化作用强度分别为 42.0、71.2 $\text{mg}/(\text{kg} \cdot \text{h})$, 虽然低于苗期土壤, 但仍然显著高于 GEF 模式。始花期、盛果期和试验后土壤硝化作用强度有所下降, GER 在各生育期土壤硝化作用强度都明显高于 GEF 模式。

2.3 大棚茄子生育期内土壤速效氮动态变化

GER (大棚茄子—水稻轮作) 模式在大棚茄子生

长期间表土和根际土 NH_4^+-N 含量都低于 GEF (大棚茄子—揭膜休闲) 模式表土和根际土中 NH_4^+-N 含量(图 4)。GER 和 GEF 模式在试验前表土 NH_4^+-N 含量分别为 16.8, 12.7 mg/kg。由于施肥影响, 苗期土壤 NH_4^+-N 含量迅速升高, 其中 GER 模式表土和根际土 NH_4^+-N 含量分别为 80.8, 67.0 mg/kg, 比 GEF 土壤降低了 23.2%, 30.2%。随着大棚茄子生长, 土壤 NH_4^+-N 含量逐渐下降, 但大棚茄子收获期后 GER 和 GEF 模式表土 NH_4^+-N 含量分别为 30.4, 45.9 mg/kg, 与大棚茄子种植前相比仍然有明显的增加。

表 2 大棚茄子各生育期硝化作用强度

		单位: mg/(kg · h)					
轮作模式	试验前	苗期	始花期	初果期	盛果期	试验后	
GER	表土	21.9	56.6	33.3	42.0	21.9	32.1
	根际土		101.4	46.1	71.2	41.8	
GEF	表土	7.3	27.4	21.7	26.7	18.7	28.2
	根际土		50.1	25.4	34.3	23.6	

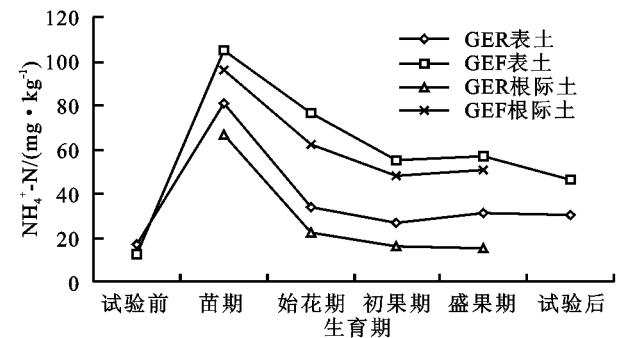


图 4 大棚茄子生长期间土壤铵态氮动态变化

与土壤 NH_4^+-N 含量趋势相反, GER 模式在大棚茄子生长期间表土和根际土 NO_3^--N 含量都高于 GEF 模式表土和根际土中 NO_3^--N 含量(图 5)。GER 和 GEF 模式表土 NO_3^--N 含量从苗期开始迅速升高, 在盛果期达到最高值, 分别为 395.3, 303.6 mg/kg; 试验后表土 NO_3^--N 含量分别为 265.4, 255.5

mg/kg, 存在明显的 NO_3^--N 累积。2 种轮作模式根际土 NO_3^--N 含量从苗期开始呈逐步下降的趋势, 主要是受茄子根系吸收的影响, 但 GER 模式根际土 NO_3^--N 含量在大棚茄子各生育期也明显高于 GEF 土壤。

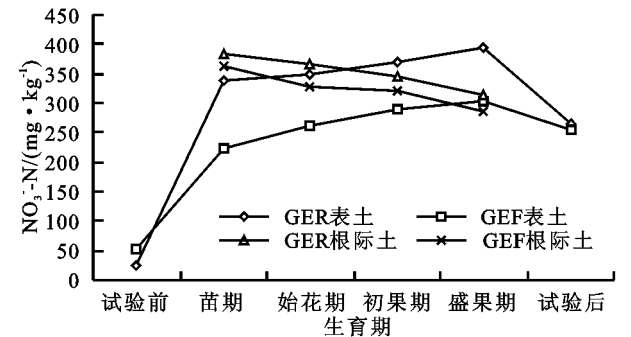


图 5 大棚茄子生长期间土壤硝态氮动态变化

2.4 大棚茄子生育期内氮挥发量动态变化

由表 3 可知, GER(大棚茄子—水稻轮作)在施基肥后 0—10 d 和 11—20 d 的土壤氮挥发速率分别为 3.0, 3.7 g/(hm² · d), 明显低于 GEF(大棚茄子—揭膜休闲)模式。GER 模式在施基肥 21 d 后, 土壤氮挥发速率明显下降, GEF 模式在施基肥后 21—35 d 土壤氮挥发速率仍然达到 40.1 g/(hm² · d), 远高于 GER 模式。GER 模式大棚茄子栽培期间 6 次追肥的土壤氮挥发速率在 1.4~29.7 g/(hm² · d) 之间, 而 GEF 模式不同追肥时期的土壤氮挥发速率范围为 18.3~43.3 g/(hm² · d)。虽然大棚茄子生长后期由于土壤温度的升高, 2 种轮作模式氮挥发速率的差异变小, 但 GER 模式大棚茄子生长期间土壤氮挥发速率都显著或极显著的低于 GEF 模式。由于地膜覆盖等因素的影响, 大棚茄子栽培期间土壤累积氮挥发量并不高, 但 2 种轮作模式间仍有显著的差异。GER 在整个试验期间土壤累积氮挥发量为 1.21 kg/hm², 比 GEF 土壤的累积氮挥发量降低了 76.7%。

表 3 土壤氮挥发速率和累积挥发量

处理	挥发速率/(g · hm ⁻² · d ⁻¹)										累积氮挥发量/ (kg · hm ⁻²)
	施基肥后天数/d				追肥						
	0~10	11~20	21~35	36~125	第 1 次	第 2 次	第 3 次	第 4 次	第 5 次	第 6 次	
GER	3.0	3.7	0.7	0.5	7.6	1.4	12.7	14.5	24.8	29.7	1.21
GEF	97.4	89.9	40.1	2.6	19.9	19.5	23.3	18.3	43.3	34.8	5.19

3 讨论

土壤硝化作用受到土壤养分含量、温度、水分、pH 等环境因素以及种植模式、肥料类型等因素的影响^[15-16]。土壤 pH 值是影响硝化作用的主控因子^[7], pH 低于 6.0 时土壤硝化作用速率显著下降。申卫收等^[17]研究认为水稻田改制为菜地后土壤硝化作用是增强还是减弱主要决定于土壤 pH 的变化方向和程度, 土壤 pH 值降低幅度越大, 则土壤硝化率降低越显著。干湿交替

能促进土壤 pH 值向中性移动^[18]。本研究中 GER(大棚茄子—水稻轮作)模式在大棚茄子栽培前土壤 pH 即显著高于 GEF(大棚茄子—揭膜休闲)模式, 而且大棚茄子生长期间表土和根际土 pH 值也明显高于 GEF 模式, 可能是导致 GER 模式土壤硝化作用强度增加的主要原因。通常认为土壤温度范围在 25~35 ℃, 土壤含水量为 60% 饱和持水量时土壤硝化作用比较强烈^[19]。研究还发现, 菜地土壤常处于干湿交替状态比恒干或恒湿状

态更有利于土壤硝化作用的进行^[20]。本研究中 GER 模式在大棚茄子栽培期间土壤温度、含水量都高于 GEF 模式,可能也是导致 GER 模式土壤硝化作用强度大于 GEF 模式的原因。大棚土壤中养分累积和次生盐渍化对硝化作用的复合影响尚不明确。较高的土壤肥力能为氨氧化细菌、硝化细菌等微生物提供丰富的氮源^[21],但盐分的过量累积会影响氨氧化细菌和硝化细菌的活性^[8]。本研究中 GER 模式在大棚茄子栽培前土壤全氮、速效养分含量和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的累积量都显著低于 GEF 模式,在降低土壤养分含量的同时也减少了土壤盐渍化风险,因此 GER 模式中养分累积和次生盐渍化对硝化作用的影响还需进一步研究。

GER 和 GEF 栽培模式在大棚茄子生长期养分投入量一致,由于 GER 栽培模式中土壤硝化作用强度增加,大棚茄子栽培期间土壤氮挥发量显著降低,有利于减少氮素的氮挥发损失。但 GER 模式中硝化作用强度的增加也会增加土壤中 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的含量,加剧土壤酸化和次生盐渍化进程。另外虽然前期研究表明大棚茄子栽培后土壤累积的养分在水稻栽培期间具有良好的后效^[12],但淹水种稻期间 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的反硝化损失仍然是一个需要考虑的因素^[22]。因此 GER 模式在通过水稻养分吸收来平衡土壤氮养分的前提下,仍应加强大棚茄子栽培期间氮肥合理施用技术的研究,从而提高氮肥利用率,降低土壤中 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的累积。

4 结论

(1)GER 和 GEF 模式在大棚茄子栽培期间土壤硝化作用强度动态变化趋势一致,都表现为根际土大于表土,而且都在苗期和初果期出现高峰。GER 模式在大棚茄子各生育期土壤硝化作用强度都显著高于 GEF 模式,苗期高峰时表土和根际土硝化作用强度分别比 GEF 模式增加了 34.8%,42.4%。

(2)GER 模式在大棚茄子基肥和追肥施用后土壤氮挥发速率都显著低于 GEF 模式。GER 大棚茄子生长期累积氮挥发量为 1.21 kg/hm^2 ,比 GEF 模式减少了 76.7%。

(3)GER 模式大棚茄子各生育期表土和根际土 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量都低于 GEF 土壤, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量高于 GEF 模式。GER 和 GEF 模式在大棚茄子收获后表土 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量分别为 30.4,45.9 mg/kg, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量分别为 265.4,255.5 mg/kg,存在明显的氮素累积。

参考文献:

[1] Cui P, Fan F, Yin C, et al. Urea-and nitrapyrin-affected N_2O emission is coupled mainly with ammonia oxidizing bacteria

growth in microcosms of three typical Chinese arable soils [J]. Soil Biology & Biochemistry, 2013, 66(11): 214-221.

- [2] 贺纪正, 张丽梅. 土壤氮素转化的关键微生物过程及机制[J]. 微生物学通报, 2013, 40(1): 98-108.
- [3] 过燕琴, 高志亮, 张令, 等. 设施和露天栽培下有机菜地土壤氮素矿化和硝化作用的比较研究[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(12): 2436-2442.
- [4] 施振香, 柳云龙, 尹骏, 等. 上海城郊不同农业用地类型土壤硝化和反硝化作用[J]. 水土保持学报, 2009, 23(6): 99-102.
- [5] 闵红, 张丹, 绳金房, 等. 大棚蔬菜轮/连作系统土壤肥力与微生物因子综合评价[J]. 微生物学通报, 2011, 38(11): 1673-1678.
- [6] Shen W S, Lin X G, Gao N, et al. Land use intensification affects soil microbial populations, functional diversity and related suppressiveness of cucumber Fusarium wilt in China's Yangtze river delta[J]. Plant & Soil, 2008, 306(1): 117-127.
- [7] Yao H Y, Campbell C D, Qiao X R. Soil pH controls nitrification and carbon substrate utilization more than urea or charcoal in some highly acidic soils[J]. Biology & Fertility of Soils, 2011, 47(5): 515-522.
- [8] 杜春梅, 顿圆圆, 董锡文, 等. 蔬菜大棚使用年限对土壤电导率及功能微生物数量的影响[J]. 河南农业科学, 2014, 43(5): 69-71.
- [9] 蒋朝晖. 氮肥施用对大棚内土壤氮素转化及主要气态污染物释放的影响[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2013.
- [10] 潘瑞瑞, 刘野, 江解增, 等. 淹水栽培时间对土壤盐分及养分的影响[J]. 北方园艺, 2015(21): 178-182.
- [11] 袁建玉, 周增辉, 张娜, 等. 设施蔬菜水旱轮作前后耕作层土壤盐分和 pH 值的变化[J]. 江苏农业科学, 2014, 42(3): 301-303.
- [12] 王强, 徐建明, 姜丽娜, 等. 平衡施肥对大棚茄子—水稻轮作土壤中作物生产和土壤养分的影响[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2012, 38(2): 197-203.
- [13] 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.
- [14] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 第 1 版. 北京: 中国农业科技出版社, 2000: 12-194.
- [15] Shen W S, Lin X G, Shi W M, et al. Higher rates of nitrogen fertilization decrease soil enzyme activities, microbial functional diversity and nitrification capacity in a Chinese polytunnel greenhouse vegetable land[J]. Plant & Soil, 2010, 337(1): 137-150.
- [16] 孙波, 郑宪清, 胡锋, 等. 水热条件与土壤性质对农田土壤硝化作用的影响[J]. 环境科学, 2009, 30(1): 207-213.
- [17] 申卫收, 林先贵, 张华勇, 等. 不同栽培条件下蔬菜塑料大棚土壤氮磷生物转化特征[J]. 农业工程学报, 2008, 24(2): 199-204.