

土壤熏蒸对土壤氮循环及其功能微生物的影响研究进展

王 晴¹, 张大琪¹, 方文生¹, 李 园^{1,2}, 王秋霞^{1,2}, 颜冬冬^{*,1,2}, 曹坳程^{*,1,2}

(1. 中国农业科学院 植物保护研究所, 北京 100193; 2. 现代农业产业技术体系北京市创新团队, 北京 100193)

摘要: 土壤熏蒸凭借高效、广谱等优点已被广泛应用, 但正因为其具有广谱性, 熏蒸剂在杀死土壤有害生物的同时, 也影响着驱动土壤中各种元素循环、转化的非靶标微生物。土壤氮循环是连接大气、土壤和水体的重要枢纽, 而与氮循环有关的关键过程主要由微生物所驱动, 因此, 土壤熏蒸势必会影响氮循环中的物质转化。已有研究表明, 熏蒸剂可显著改变一些与土壤氮循环相关的功能基因及功能微生物的种类及丰度, 其中一些熏蒸剂在进行熏蒸处理后, 短期内均能提高土壤中氮的矿化速率, 增加土壤中的氮素累积矿化量, 而固氮、硝化和反硝化过程均受到抑制, 可提高对氮素的利用率。本文就常用的几种熏蒸剂在进行土壤熏蒸后, 对土壤中氮循环中的固氮、矿化、硝化和反硝化等反应中的各个关键过程和功能微生物产生的影响进行综述, 可为研究土壤熏蒸的环境风险提供依据。

关键词: 土壤熏蒸; 土传病害; 氮循环; 功能微生物

中图分类号: S472; S482.6 文献标志码: A 文章编号: 1008-7303(2021)06-1063-10

Research progress on the effect of soil fumigation on soil nitrogen cycles and functional microorganisms

WANG Qing¹, ZHANG Daqi¹, FANG Wensheng¹, LI Yuan^{1,2},
WANG Qiuxia^{1,2}, YAN Dongdong^{*,1,2}, CAO Aocheng^{*,1,2}

(1. Institute of Plant Protection, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100193, China;

2. Beijing Innovation Consortium of Agriculture Research System, Beijing 100193, China)

Abstract: Soil fumigation has been widely used with the advantages of high efficiency and broad spectrum, moreover, the broad spectrum of fumigants can not only kill the harmful organisms in the soil, but also affect the non-target microorganisms driving the circulation and transformation of various elements in the soil. Soil nitrogen cycle is an important hub connecting the atmosphere, soil and water, and the key processes related to the nitrogen cycle are mainly driven by microorganisms. Therefore, soil fumigation is bound to affect the material transformation in the nitrogen cycle. Existing research shows that the fumigant can significantly change the species and abundance of functional genes and microorganisms related to nitrogen cycles. In the short term, fumigation can improve soil nitrogen

收稿日期: 2020-10-20; 录用日期: 2021-05-28.

基金项目: 国家重点研发计划 (2017YFD0201600); 北京市优秀人才培养资助 (2018000021223ZK47).

作者简介: 王晴, 女, 硕士研究生, E-mail: wangqingxxx000@163.com; *颜冬冬, 通信作者 (Author for correspondence), 男, 副研究员, 从事土壤熏蒸对养分循环影响研究, E-mail: yandongdong@caas.cn; *曹坳程, 通信作者 (Author for correspondence), 男, 研究员, 从事土壤熏蒸剂应用技术研究, E-mail: caoac@vip.sina.com

mineralization rate and increase the amount of accumulated nitrogen mineralization in the soil, but the nitrogen fixation, nitrification and denitrification process were suppressed, which could improve the utilization rate of nitrogen. This review summarized that the key processes of nitrogen fixation, mineralization, nitrification and denitrification in soil nitrogen cycle and the effects of functional microorganisms after fumigating with several commonly used fumigants to provide a basis for studying the environmental risks of soil fumigation.

Keywords: soil fumigation; soil-borne diseases; nitrogen cycle; functional microorganisms

0 引言

目前, 高度集约化和长期单一化的连作栽培模式在增加高附加值作物产量的同时也引发了一系列的问题, 不仅易导致土壤退化, 而且土传病害的发生还愈加严重, 使得农作物产量大大降低^[1]。目前, 国内外主要利用传统耕作调控、生物防治技术、物理消毒技术和化学防治技术等系列措施改善土壤环境, 控制土传病害的传播蔓延。其中, 在农作物种植前使用熏蒸剂对土壤进行消毒处理, 是当前最为有效的防治土传病害的措施^[2]。溴甲烷 (methyl bromide) 曾是一种有效的土壤熏蒸剂, 但由于其可显著破坏臭氧层, 中国已于 2015 年禁止其在农业领域中使用^[3]。目前, 溴甲烷的化学替代剂主要有氯化苦 (chloropicrin)^[4]、威百亩 (metam-sodium)^[5]、棉隆 (dazomet)^[6]、二甲基二硫 (dimethyl disulfide)^[7]、1,3-二氯丙烯 (1,3-dichloropropene)^[8-10]、异硫氰酸甲酯 (methyl isothiocyanate)^[11-12] 和异硫氰酸烯丙酯 (allyl isothiocyanate)^[13-14] 等。

氮素是植物生长必需的营养元素之一。其主要通过氮输入与氮输出等外循环过程以及土壤氮矿化、生物固持、硝化与反硝化作用等内循环过程进行迁移转化, 是陆地生态系统循环的基本物质之一^[15]。其中, 土壤氮素的输入来源主要是氮肥的添加和植物凋落物的分解释放; 氮素输出主要包括植物吸收、微生物固定和挥发淋失等过程^[16]。大气中的氮气是最大的可自由获取的氮库, 但仅有少量的固氮细菌或者真菌可以通过生物固氮作用直接将其利用^[17]。土壤氮库中的氮主要以有机氮的形式存在, 而植物吸收的氮几乎都是无机形式, 因此, 土壤氮库中的有机氮必须不断地通过微生物的矿化作用转化为植物可吸收的有效态氮^[18]。另外, 硝化作用产生的硝态氮容易淋溶到水体和土壤中, 反硝化作用的产物 N_2O 是

重要的温室气体, 对臭氧层具有破坏作用。因此, 土壤氮素内循环不仅影响着土壤对植物本身的供氮能力, 还与氮素在大气、土壤、水体中的转化和迁移等过程紧密相关^[19]。

鉴于溴甲烷是因为严重破坏臭氧层而被禁止在农业上使用的, 对于熏蒸剂的研究, 除了关注土壤熏蒸剂本身的药效外, 越来越多的学者关注其在环境中的行为。氮既是植物必需的营养元素, 又是造成环境污染的重要元素^[20]。土壤熏蒸除了能够有效杀灭土壤有害生物外, 对土壤中的非靶标生物也会产生一定的影响, 进而改变土壤生态系统的结构和功能^[21]。微生物是驱动土壤元素循环转化的引擎, 与氮循环有关的关键过程均由微生物所驱动^[22-23], 并且微生物发挥作用的过程均是由各种关键酶介导的酶促反应, 其酶均由相应的功能基因编码, 因此土壤中氮素的转化可以用功能基因和微生物的变化进行表征 (图 1)。土壤氮循环过程及主要微生物可以作为生态系统服务功能指标, 部分微生物可以作为土壤微生态指示性微生物开展研究。土壤熏蒸对土壤中氮循环转化过程及其功能微生物的影响一直是广大学者研究的热点问题。目前常采用高通量测序、荧光定量 qPCR、宏转录组学等分子生物学手段以及常

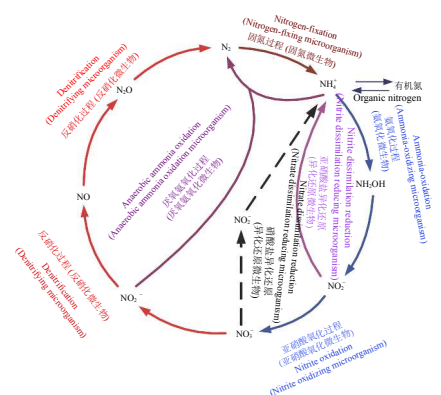


图 1 土壤氮循环及功能微生物^[23]

Fig. 1 Soil nitrogen cycling and functional microorganisms

规生物学手段对其进行相关研究^[24-26]。本文就近年来关于熏蒸剂对土壤氮循环过程中的固氮作用、矿化作用、硝化作用、反硝化作用及其功能微生物的影响的相关研究进展进行综述,旨在为研究土壤熏蒸的环境风险提供依据。

1 土壤熏蒸对固氮作用及其功能微生物的影响

生物固氮作用是指在固氮微生物的参与下,气态氮还原为氨的过程^[17]。根据固氮微生物的特性及其与植物的关系,可以将固氮微生物分为共生固氮微生物(包括根瘤菌 *Rhizobium*、弗兰克氏放线菌 *Frankiaceae*、念珠藻 *Nostoc*、单歧藻 *Tolypothrix* 等)、联合固氮微生物(包括固氮螺菌 *Azospirillum*、部分假单胞菌 *Pseudomonas adaceae* 等)和自生固氮微生物(包括固氮菌 *Azotobacter sp.*、克雷伯氏菌 *Klebsiella*、部分芽孢杆菌 *Bacillus*、梭菌

Clostridium、产甲烷菌 *Methanogenus* 及鱼腥藻 *Anabaena* 等) 3 类^[27-29]。据方文生^[24] 研究显示,大多数的固氮微生物在土壤熏蒸后都被短暂抑制,比如:用 1,3-二氯丙烯熏蒸,显著降低了固氮螺菌属的丰度,而提高了根瘤菌属的丰度;用棉隆熏蒸,前期会降低中慢生根瘤菌属和类芽孢杆菌属的数量;用氯化苦熏蒸,会降低中慢生根瘤菌属和固氮弓菌的数量;二甲基二硫会短暂抑制类芽孢杆菌属的生长,促进固氮弓菌属和中慢生根瘤菌属的生长(表 1)。

固氮酶是生物固氮过程中最重要的酶,其由钼铁蛋白(由 *nifD* 和 *nifK* 基因编码)和铁蛋白(由 *nifH* 基因编码)两个多亚基组成^[30]。只有钼铁蛋白和铁蛋白同时存在时固氮酶才能发生固氮作用。*nifH* 基因可以用来检测固氮微生物^[31]。方文生^[24] 的研究表明,分别使用 1,3-二氯丙烯、氯化苦、二甲基二硫和异硫氰酸烯丙酯进行熏蒸的前期均

表 1 土壤熏蒸对土壤氮循环功能微生物的影响

Table 1 Effects of soil fumigation on functional microorganisms of nitrogen cycle

功能微生物 Functional microorganism	属名 Genus name	1,3-二氯丙烯 ^[24] 1,3-dichloropropene	熏蒸剂 Fumigant							
			棉隆 ^[24] dazomet	异硫氰酸丙烯酯 ^[24] allyl isothiocyanate		氯化苦 ^[24] chloropicrin		二甲基二硫 ^[24] dimethyl disulfide		
				前期 Earlier period	后期 Later period	前期 Earlier period	后期 Later period	前期 Earlier period	后期 Later period	
固氮菌 Nitrogen-fixing bacteria	固氮螺菌属 <i>Azospirillum</i>	-								
	根瘤菌属 <i>Rhizobiales</i>	+								
	中慢生根瘤菌属 <i>Mesorhizobium</i>		-			-			+	
	固氮弓菌属 <i>Azoarcus</i>					-			+	
	类芽孢杆菌属 <i>Paenibacillus</i>		-						-	
硝化细菌 Nitrobacteria	亚硝化单胞菌属 <i>Nitrosomonadale</i>	-								
	硝化螺菌属 <i>Nitrospira</i>	-				-			-	
	亚硝化螺菌属 <i>Nitrosospira</i>		+			-				
反硝化细菌 Denitrifying bacteria	假单胞菌属 <i>Pseudomonas</i>	-	-			-				+
	副球菌属 <i>Paracoccus</i>	-								
	食碱菌属 <i>Alcanivorax</i>	+							+	
	芽孢杆菌属 <i>Bacillales</i>	+							+	
	链霉菌属 <i>Streptomyces</i>	+	+		+					+
	贪铜菌属 <i>Cupriavidus</i>		-			-				
	鞘脂单胞菌属 <i>Sphingomonas</i>		-							
	无氧芽孢杆菌属 <i>Anoxybacillus</i>		+		+					+
	黄杆菌属 <i>Flavobacterium</i>		+		+		-			
	芽单胞菌属 <i>Gemmatimonadales</i>									+
	剑菌属 <i>Ensifer</i>									+
无色杆菌属 <i>Achromobacter</i>									+	

注:“+”表示熏蒸剂对氮循环功能微生物的促进作用,“-”表示熏蒸剂对氮循环功能微生物的抑制作用。

Note: “+” means the promotion of fumigant on nitrogen-cycling microorganisms, and “-” means the inhibition of fumigant on nitrogen-cycling microorganisms.

降低了土壤中 *nifH* 的丰度, 而使用棉隆进行熏蒸的前期, *nifH* 丰度显著高于对照组处理, 用 1,3-二氯丙烯处理后土壤中的 *nifH* 丰度也高于对照组, 这可能是由于此前的肥料使用或者农事操作影响了土壤中的营养成分, 之前有研究表明, 增

加土壤中的营养物质可促进微生物的生长^[32], 上述熏蒸对土壤氮循环中的固氮微生物影响效应不同可能也是此原因。Li 等^[25] 的研究表明, 威百亩对 *nifH* 基因也有短暂的抑制作用 (表 2)。

表 2 土壤熏蒸对氮循环功能基因的影响

Table 2 Effects of soil fumigation on functional genes of nitrogen cycle

主要反应 Main reaction	关键酶 Key enzymes	功能 基因 Functional gene	熏蒸剂 Fumigant								
			1,3-二氯丙烯 ^[24] 1,3-dichloropropene		棉隆 ^[24] dazomet		氯化苦 ^[24] chloropicrin	二甲基二硫 ^[24] dimethyl disulfide		异硫氰酸 丙烯酯 ^[24] allyl isothiocyanate	威百亩 ^[26] metam- sodium
			前期 Earlier period	后期 Later period	前期 Earlier period	后期 Later period	前期 Earlier period	后期 Later period	前期 Earlier period	后期 Later period	
固氮反应 Nitrogen	固氮酶 Dinitrogenase	<i>nifH</i>	-	+	+	-	-	-	-	-	-
硝化反应 Nitrification	古菌单氨加氧酶 Archaea ammonia monooxygenase	AOA <i>amoA</i>	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		细菌单氨加氧酶 Bacterial ammonia monooxygenase	-	+	-	-	-	+	-	+	-
	亚硝酸盐氧化酶 Nitrite oxidase	<i>nxrB</i>	-	-	+	-	-	+	-	+	-
反硝化反应 Denitrification	硝酸盐还原酶 Nitrate reductase	<i>napA</i>	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		<i>narG</i>	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	亚硝酸盐还原酶 Nitrite reductase	<i>nirS</i>	-	+	+	-	-	+	-	+	-
	<i>nirK</i>	-	-	+	-	-	+	-	+	-	
	一氧化氮还原酶 Nitric oxide reductase	<i>qnorB</i>	-	+	-	-	-	+	-	+	-
<i>cnorB</i>	-	+	+	-	-	+	-	+	-		
一氧化二氮还原酶 Nitrous oxide reductase	<i>nosZ</i>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	

注: “+”表示熏蒸剂对氮循环功能微生物的促进作用, “-”表示熏蒸剂对氮循环功能微生物的抑制作用。

Note: “+” means the promotion of fumigant on nitrogen-cycling microorganisms, and “-” means the inhibition of fumigant on nitrogen-cycling microorganisms.

2 土壤熏蒸对矿化作用的影响

矿化作用是指在微生物的作用下, 将土壤中的有机氮转化为植物可直接利用的无机氮(硝态氮、铵态氮)的过程。分为两个阶段: 第一阶段为氨基化阶段, 在这个阶段各种复杂的含氮化合物如蛋白质、核酸等在微生物酶的水解下, 分解形成简单的氨基化合物; 第二阶段为氨化阶段, 即经氨基化作用产生的氨基酸等简单的氨基化合物, 在微生物参与下, 进一步转化释放出氨的过程。

颜冬冬等^[33]发现, 土壤分别用氯化苦、碘甲烷、1,3-二氯丙烯和二甲基二硫熏蒸处理, 短期内均能提高土壤中氮的矿化速率, 增加土壤中氮素累积矿化量。Neve等^[34]的研究表明, 用 Cyanamid DD95 (1,3-二氯丙烯+1,3-二氯丙烷) 熏蒸土壤后,

短期内也提高了氮的矿化速率, 但是随着微生物群落的恢复, 在熏蒸处理后期, 土壤中氮的矿化速率并没有显著差异。陈云峰等^[35]报道, 用溴甲烷熏蒸后覆盖不透膜(VIF膜), 可提高土壤铵态氮的释放, 太阳能消毒也能提高土壤铵态氮的释放。而 Collins^[36]研究发现, 生物熏蒸可提高土壤的矿化速率, 但经过威百亩和 1,3-二氯丙烯进行化学熏蒸后土壤的氮矿化速率降低。

土壤中的可溶性有机氮(soluble organic nitrogen, SON)能反映出土壤有机氮矿化的难易程度, 可以作为反映土壤氮素矿化能力的指标。马涛涛等^[37]的研究显示, 氯化苦处理后土壤中硝态氮含量的变化与 SON 含量有着极显著的相关关系。土壤经熏蒸后 SON 含量会大幅上升, 进而增强了有机氮矿化为无机氮的过程, 有助于植物对氮素的吸收

利用。有关熏蒸后土壤中 SON 转化为矿质氮的具体机制还有待进一步研究^[38], 但已有研究表明, 熏蒸后土壤中的矿质氮含量增加, 主要是由于土壤中的异养微生物将熏蒸剂杀死的微生物残体分解所致^[34, 39]。

3 土壤熏蒸对硝化作用及其功能微生物的影响

典型的硝化作用是指在有氧条件以及硝化微生物的参与下, 将 NH_3 或 NH_4^+ 经羟胺、亚硝酸盐氧化成硝酸盐的过程 ($\text{NH}_3/\text{NH}_4^+ \rightarrow \text{NH}_2\text{OH} \rightarrow \text{NO}_2^- \rightarrow \text{NO}_3^-$), 包括氨氧化和亚硝酸盐氧化两个反应。

研究表明, 多种熏蒸剂对硝化作用都有着不同程度的抑制作用。程新胜等^[40]发现, 用溴甲烷和威百亩熏蒸后, 土壤的硝化作用受到明显抑制。马涛涛^[38]发现, 棉隆有较强地抑制氨氧化过程的作用, 在一定程度上起到了硝化抑制剂作用。颜冬冬等^[33]的研究表明, 在分别使用氯化苦、碘甲烷、1,3-二氯丙烯和二甲基二硫 4 种熏蒸剂处理后, 土壤硝化作用过程受到显著抑制, 各熏蒸处理土壤中铵态氮的含量均高于对照组, 其中碘甲烷处理组铵态氮的含量最高。Stromberger^[41]认为, 用溴甲烷熏蒸土壤后, 土壤的硝化速率与对照组相比减少 55% 以上。但是, Chen 等^[42]研究发现, 使用臭氧熏蒸 5 年后, 小麦根际土壤中的硝化酶活性增加了 10%~34%。由于熏蒸剂本身性质的存在差异, 导致不同熏蒸剂的半衰期不同, 对硝化作用的抑制持续时间也不尽相同。马涛涛等^[38]的研究表明, 氯化苦和 1,3-二氯丙烯对土壤氮素硝化作用的抑制较强, 至少维持 28 d, 而二甲基二硫和威百亩的抑制作用维持至少 14 d; Ibekwe^[43]报道, 用 Cyanamid DD95 熏蒸土壤后至少 21 d 内, 土壤的硝化作用都会受到抑制。另外, Yan 等^[44]研究发现, 氯化苦在不同类型土壤中, 硝化作用的恢复时间有显著差异。

硝化作用第一步是在氨氧化细菌 (ammonia-oxidizing bacteria, AOB) 和氨氧化古菌 (ammonia-oxidizing archaea, AOA) 作用下完成氨的氧化, 第二步是在亚硝酸盐氧化细菌 (nitrite-oxidizing bacteria, NOB) 作用下完成亚硝酸的氧化。其中, 氨氧化反应是整个硝化反应的限速步骤, 各药剂对硝化作用的抑制主要是抑制 AOB 的活性。

AOB 产生的氨单加氧酶 (AMO) 可催化 NH_3 或 NH_4^+ 转化成羟胺, 氯化苦、1,3-二氯丙烯、二甲基二硫和威百亩均能作为 AMO 的底物被催化氧化^[45], 这些熏蒸剂对 AMO 活性抑制效应的强弱主要取决于它们同 AMO 的亲合力。Li 等^[25]发现, 用氯化苦熏蒸后, 土壤中 AOA 的丰度明显降低, 而 AOB 的丰度明显增加, 这可能是由于氯化苦对 AOA 和 AOB 的敏感性存在差异, 导致主导氨氧化过程的群体发生改变。

氨氧化细菌可分成 5 个菌属: 亚硝化单胞菌属 (*Nitrosomonas*)、亚硝化螺菌属 (*Nitrospira*)、亚硝化球菌属 (*Nitrosococcus*)、亚硝化弧菌属 (*Nitrosovibrio*) 以及亚硝化叶菌属 (*Nitrosolobus*)^[46]。大多数氨氧化细菌属于 β -变形菌和 γ -变形菌两类^[47]。方文生^[24]研究表明, 分别用 1,3-二氯丙烯和氯化苦熏蒸, 可显著减少土壤中亚硝化单胞菌属的丰度, 而用棉隆熏蒸的前期会增加亚硝螺菌属的丰度。用 1,3-二氯丙烯、氯化苦和二甲基二硫熏蒸, 短期内均可降低硝化螺菌属的丰度; 而 Neilson^[48]研究结果表明, 使用氯化苦熏蒸后土壤中硝化螺菌属的数量得以提高。

氨氧化反应是指 NH_3 或 NH_4^+ 在氨单加氧酶 (ammonia monooxygenase, AMO, *amoA* 基因编码) 的催化作用下转变为羟胺^[47, 49], 然后羟胺在羟胺还原酶 (hydroxylamine oxidoreductase, HAO, *hao* 基因编码) 的作用下转变为 NO_2^- ^[49]。亚硝酸盐氧化反应是指在亚硝酸盐氧化还原酶 (nitrite oxidoreductase, NXR, *nrxB* 基因编码) 作用下^[50], 由 NO_2^- 转化为 NO_3^- 的过程, 并且分别用功能基因古菌 *amoA* (AOA *amoA*)、细菌 *amoA* (AOB *amoA*) 和 *nrxB* 的丰度来评估古菌和细菌氨单加氧酶及亚硝酸盐氧化酶的活性。但是目前氨氧化过程的主导群体尚未确定。Leininger 等^[51]的研究表明, 古菌主导土壤中的氨氧化过程, 然而 Di^[52]研究发现, 在含氮丰富的草地中的氨氧化过程是由细菌驱动的而不是古菌, 因此结果具有不确定性。李君^[26]研究表明, 被威百亩抑制的土壤, 其硝化过程主要反映在 AOA *amoA* 基因, AOB *amoA* 的下降并没有达到统计学的显著水平; 同时 Chen 等^[42]也发现, AOA *amoA* 的丰度高于 AOB *amoA*, 但是两者的变化均未达到显著性差异。Fang 等^[53]发现, 在使用棉隆熏蒸后, 会显著降低土壤硝化反应中的 AOA *amoA*、AOB *amoA* 和 *nrxB* 功能基因

的丰度。

4 土壤熏蒸对反硝化作用及其功能微生物的影响

反硝化作用是微生物在无氧或低氧条件下,将硝酸盐(NO_3^-)作为电子受体完成呼吸作用以获得能量的过程,因其会导致大量的氮流失,因此又称为脱氮作用^[54]。反硝化过程主要分为4个步骤: $\text{NO}_3^- \rightarrow \text{NO}_2^- \rightarrow \text{NO} \rightarrow \text{N}_2\text{O} \rightarrow \text{N}_2$ 。燕平梅等^[55]研究表明,分别用溴甲烷、威百亩和氯化苦进行熏蒸处理后,土壤反硝化作用在熏蒸前期均受到抑制,到后期则自然恢复。但是颜冬冬^[56]、Chen等^[42]却得到了相反的结果,用氯化苦和棉隆熏蒸土壤后,表现出明显的促进土壤反硝化作用过程;Chen等^[42]使用臭氧对土壤进行熏蒸处理5年后,发现小麦根际土壤中生物反硝化酶的活性增加了4%~5%。对反硝化作用有显著促进作用的氯化苦和棉隆均为含氮化合物,可在土壤中经过微生物降解和化学降解为亚硝酸盐、硝酸盐、硝基甲烷和甲酰胺等小分子的含氮化合物,这些化合物都是典型的反硝化作用底物,从而在一定程度上促进了土壤的反硝化作用过程。

土壤中的反硝化微生物种类众多,在真菌、细菌、古细菌中均有发现^[57-58],并且已有多人证明熏蒸处理可对反硝化细菌的数量产生影响。Roux-Michollet等^[59]发现,用蒸气对土壤进行熏蒸处理后,土壤中的反硝化细菌数量减少,反硝化细菌群落结构遭到破坏,酶活性受到持续的抑制。燕平梅等^[60]的研究结果显示,溴甲烷熏蒸改变了土壤中的 nosZ 型反硝化微生物群落组成和反硝化细菌数量,但是不同浓度的氯化苦、威百亩熏蒸对土壤 nirS 型反硝化细菌群落多样性指数和均匀度指数无显著影响。方文生^[24]研究表明,用1,3-二氯丙烯熏蒸,显著减少了土壤中的假单胞菌和副球菌等的丰度,增加了食碱菌、芽孢杆菌和链霉菌等的丰度;棉隆可抑制芽孢杆菌、假单胞菌、贪铜菌和鞘脂单胞菌的数量,短暂增加无氧芽孢杆菌、黄杆菌及链霉菌的数量;氯化苦在熏蒸初期,可降低黄杆菌、假单胞菌和贪铜菌的数量,在熏蒸后期则可显著刺激芽单胞菌、芽孢杆菌和剑菌的生长;在熏蒸后期,二甲基二硫可显著增加假单胞菌、无色杆菌和链霉菌等的丰度;同样地,异硫氰酸烯丙酯可显著增加黄杆菌、无

色杆菌、链霉菌和无氧芽孢杆菌等的丰度。

由 NO_3^- 还原成 NO_2^- 的过程是在硝酸盐还原酶的催化下完成的。硝酸盐还原酶包含膜结合硝酸盐还原酶(membrane-bound nitrate reductase, NAR, 由 narG 、 narH 、 narJ 基因编码)、周质硝酸盐还原酶(periplasmic-bound nitrate reductase, NAP, 由 napA 、 napB 基因编码)两种^[61],多数生物含有这两种酶^[54]。由 NO_2^- 还原成 NO 的过程是由亚硝酸盐还原酶(nitrite reductase, NIR)催化完成的。亚硝酸还原酶包含 cdI-NIR (nirS 基因编码)和 Cu-NIR (nirK 基因编码)两种,这两种酶普遍存在于细菌和古菌中^[62]。 NO 还原成 N_2O 的过程是由一氧化氮还原酶(nitric oxide reductase, NOR)催化完成,一氧化氮还原酶包含 cNOR (cnorB 、 norC 基因编码)、 qNOR (qnorB 基因编码)两种^[63],广泛存在于各种环境中。 N_2O 还原成 N_2 的过程是在一氧化二氮还原酶(nitrous oxide reductase, NOS)催化下完成的。一氧化二氮还原酶存在于多种细菌(变形菌门 Proteobacteria、拟杆菌门 Bacteroidetes、绿菌门 Chloromycota)和古菌(泉古菌门 Crenarchaeota 和嗜盐菌门 Halophilic bacteria)中^[64], nos 基因簇通常包含 nosL 、 nosY 、 nosF 、 nosD 、 nosZ 、 nosR 等6个基因^[24]。

反硝化过程中硝酸盐还原酶、亚硝酸盐还原酶、一氧化氮还原酶和一氧化二氮还原酶分别通过测定 napA 和 narG 、 nirS 和 nirK 、 qnorB 和 cnorB 、 nosZ 基因拷贝数来定量。李君^[26]的研究结果表明,只有使用高剂量威百亩处理,土壤中的 nosZ 、 nirS 和 narG 才会被短暂抑制,并且其在第12天时就恢复到了对照组的水平。Fang等^[65]发现,土壤分别经氯化苦、棉隆、二甲基二硫、异硫氰酸烯丙酯和1,3-二氯丙烯5种熏蒸剂处理后,均暂时减少了包含 napA 、 narG 、 nirS 和 nirK 酶编码基因的反硝化细菌的种群。用棉隆和二甲基二硫熏蒸后,带有 cnorB 、 qnorB 和 nosZ 基因的反硝化细菌相对稳定。Chen等^[42]的研究也显示,使用氯化苦连续熏蒸5年后,小麦田土壤中的 nirS 和 nirK 基因均没有显著性差异。由于土壤中能参与反硝化作用的微生物种类较多,许多具有反硝化用功能的微生物均能参与1,3-二氯丙烯、异硫氰酸甲酯、氯化苦和溴甲烷等熏蒸剂在土壤中的生物降解,而且每部分反应的功能基因所起的作用也存在较大差异,因此土壤熏蒸对反

硝化过程中的微生物种群和功能基因的影响也不尽相同。

5 总结与展望

综上所述, 熏蒸剂对土壤氮循环各过程及其功能微生物均有着不同程度的影响。氮矿化速率决定了土壤中用于植物生长的氮素的可利用性。熏蒸过后, 土壤氮循环中矿化作用增强, 使植物对土壤氮素的利用率有所提高。虽然硝化作用消耗了铵态氮, 减少了氨的挥发损失, 但是, 硝化作用产生的硝酸盐极易淋溶, 引起土壤性状恶化, 地下水富营养化且被严重污染等环境问题。土壤经熏蒸剂处理后, 硝化作用受到抑制, 减少了硝酸盐的产生, 在一定程度上减轻了氮素的淋溶损失。土壤反硝化作用可引起氮的气态损失而污染大气, 这关系到环境污染和氮素的经济利用; 同时, 反硝化作用产生的 N_2O 是重要的温室气体。土壤熏蒸处理能抑制反硝化过程, 减少气态氮的挥发损失。总之, 土壤熏蒸不仅对氮循环有着重要影响, 还影响着与氮循环相关联的大气、土壤、植物生长等各种环境, 在一定程度上缓解了对环境的压力。此外, 李君^[26]、颜冬冬^[18]和 Ruzo^[66] 等的研究表明, 氯化苦不仅能够控制病害发生还能提高作物产量, 表明氯化苦在熏蒸过程产生了肥料效应, 这可能是由于氯化苦造成了铵态氮的积累, 提高了植株对氮的吸收。

另外, 不同的土壤类型和土壤性质也会在熏蒸过程中对氮循环过程的响应及其恢复的影响造成差异。方文生的研究发现, 1,3-二氯丙烯、棉隆和氯化苦对功能基因的抑制作用, 在江西酸性红壤中比在北京碱性潮土的更强, 且抑制时间较长^[24]。熏蒸剂处理对土壤中氮循环各过程的影响主要发生在熏蒸初期, 待到熏蒸后期, 土壤微生物可以恢复到熏蒸之前的水平, 对硝化、反硝化过程的抑制作用也都减弱直至消失。而此恢复和重建过程同样受到土壤类型的影响, 如控制硝化作用的微生物大部分属于好氧微生物, 所以在通气性好的砂壤土中恢复较快, 而在酸性土壤中一般会抑制硝化作用的活性, 故在酸性土壤中, 控制硝化作用的微生物经熏蒸处理后恢复得相对较慢^[44]。此外, 方文生的研究还显示, 分别用异硫氰酸烯丙酯和二甲基二硫进行熏蒸, 在北京碱性潮土中的细菌总丰度在第 38 天时恢复到对照水

平, 而在江西酸性红壤中至培养结束时总细菌的丰度也未能恢复^[24]。氮循环功能基因的恢复与土壤中熏蒸剂的残留量及残留时间紧密相关, 熏蒸剂在砂性土壤中降解速率更快, 残存时间较短, 延缓了功能基因及功能微生物的恢复。另外, 有多个研究发现, 氮循环硝化与反硝化过程的功能微生物种群结构、功能基因与硝化、反硝化反应的强度存在着解偶联性, 与响应时间存在时间差^[18, 55, 60, 67-69]。这可能也是由于矿化、硝化、反硝化等各个过程受到土壤类型、pH 值、温度和土壤有机质等多方面影响的结果。

现阶段, 关于土壤熏蒸对土壤中氮循环及其微生物的影响取得了一定的研究进展。李君^[26]和方文生^[24]均应用荧光定量 qPCR 技术对土壤氮循环相关的功能基因及 16S rRNA 进行了定量, 明确了土壤氮循环主要功能基因对不同熏蒸剂的响应动态; 通过宏转录组分析, 研究土壤氮循环的功能基因在转录水平上对不同熏蒸剂的响应; 方文生^[24]还采用高通量测序技术分析了熏蒸条件下土壤细菌及氮循环微生物群落结构和多样性的变化; 此外, 方文生还借助¹⁵N、¹⁸O 双同位素法研究了熏蒸土壤中硝化作用、反硝化作用、硝化细菌的反硝化、硝化与反硝化耦合作用对 N_2O 排放的贡献, 明确了土壤熏蒸对 N_2O 生成路径的影响。

荧光定量 qPCR 技术、宏基因组分析、高通量测序等现代化分子技术以及同位素标记等传统方法的应用, 使土壤熏蒸对土壤氮循环相关功能基因和微生物的影响的研究愈加透彻, 但是其中的研究大多集中于室内试验, 关于田间自然条件下的定量试验较少。近期已有研究利用不同氮素转化过程中氮同位素效应的差异及主要微生物过程中特异同位素值 (site preference, SP) 的差异构建出同位素模型, 分析自然丰度的同位素值准确地定量主要微生物过程的贡献份额, 进而解决自然条件下区分微生物过程的难题^[17, 70]。总之, 运用稳定同位素技术, 联合参与微生物过程功能基因和氮素转化的同位素效应, 对未来研究氮素转化过程的微生物驱动机制具有重要的指导意义。

有关熏蒸剂处理对土壤中氮素循环影响的研究, 除了文中描述的研究较多的固氮过程、矿化过程、硝化过程及反硝化过程外, 还包括厌氧氨氧化作用及亚硝酸盐异化还原等其他氮素循环过程。此外, 在硝化过程的研究中, 全程硝化过程

(complete nitrification) 的发现也不断丰富着人们对硝化作用的认识^[46]。随着研究的不断深入, 尝试使用基因芯片、宏转录组、代谢组学以及多组学等手段, 在对土壤氮素循环过程的研究中, 将不断会有新途径、新功能微生物以及功能基因被发现和认知, 也由此决定下一步的研究方向。

参考文献 (References):

- [1] 卢维宏, 张乃明, 包立, 等. 我国设施栽培连作障碍特征与成因及防治措施的研究进展[J]. 土壤, 2020, 52(4): 651-658.
LU W H, ZHANG N M, BAO L, et al. Study advances on characteristics, causes and control measures of continuous cropping obstacles of facility cultivation in China[J]. Soils, 2020, 52(4): 651-658.
- [2] 王秋霞, 颜冬冬, 王献礼, 等. 土壤熏蒸剂研究进展[J]. 植物保护学报, 2017, 44(4): 529-543.
WANG Q X, YAN D D, WANG X L, et al. Research advances in soil fumigants[J]. J Plant Prot, 2017, 44(4): 529-543.
- [3] RISTAINO J B, THOMAS W. Agriculture, methyl bromide, and the ozone hole: Can we fill the gaps?[J]. *Plant Dis*, 1997, 81(9): 964-977.
- [4] 贺明. 硝基甲烷法合成氯化苦及其精制工艺研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2014.
HE M. Study on synthesis of chloropicrin from nitromethane and its refining process[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2014.
- [5] FU C H, HU B Y, CHANG T T, et al. Evaluation of dazomet as fumigant for the control of brown root rot disease[J]. *Pest Manag Sci*, 2012, 68(7): 959-962.
- [6] PRIDER J, WILLIAMS A. Using dazomet to reduce broomrape seed banks in soils with low moisture content[J]. *Crop Prot*, 2014, 59: 43-50.
- [7] MCAVOY T P, FREEMAN J H. Retention of the soil fumigant dimethyl disulfide by virtually and totally impermeable film mulches[J]. *HortScience*, 2013, 48(9): 1154-1158.
- [8] SCHNEIDER R C, SIPES B S, ODA C H, et al. Management of 1, 3-dichloropropene in pineapple for efficacy and reduced volatile losses[J]. *Crop Prot*, 1995, 14(8): 611-618.
- [9] MAO L G, WANG Q X, YAN D D, et al. Evaluation of the combination of 1, 3-dichloropropene and dazomet as an efficient alternative to methyl bromide for cucumber production in China[J]. *Pest Manag Sci*, 2012, 68(4): 602-609.
- [10] QIAO K, SHI X, WANG H, et al. Managing root-knot *Nematodes* and weeds with 1, 3-dichloropropene as an alternative to methyl bromide in cucumber crops in China[J]. *J Agric Food Chem*, 2011, 59(6): 2362-2367.
- [11] COPPING L G. Metabolic pathways of agrochemicals: part two - insecticides and fungicides[J]. *Pest Manag Sci*, 2000, 56(1): 103-104.
- [12] KENNEDY J F, TURAN N. Metabolic pathways of agrochemicals: Parts 1 & 2[J]. *Carbohydr Polym*, 2000, 41(4): 426.
- [13] AVATO P, D'ADDABBO T, LEONETTI P, et al. Nematicidal potential of Brassicaceae[J]. *Phytochem Rev*, 2013, 12(4): 791-802.
- [14] BANGARWA S K, NORSWORTHY J K, GBUR E E. Allyl isothiocyanate as a methyl bromide alternative for weed management in polyethylene-mulched tomato[J]. *Weed Technol*, 2012, 26(3): 449-454.
- [15] 徐欢, 王芳芳, 李婷, 等. 冻融交替对土壤氮素循环关键过程的影响与机制研究进展[J]. 生态学报, 2020, 40(10): 3168-3182.
XU H, WANG F F, LI T, et al. A review of freezing-thawing cycle effects on key processes of soil nitrogen cycling and the underlying mechanisms[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(10): 3168-3182.
- [16] 谢腾芳, 薛立, 王相娥. 土壤-植物-大气连续体系中氮的研究进展[J]. 生态学杂志, 2009, 28(10): 2107-2116.
XIE T F, XUE L, WANG X E. Nitrogen in soil-plant-atmosphere continuum: a review[J]. *Chin J Ecol*, 2009, 28(10): 2107-2116.
- [17] 林伟, 李玉中, 李昱佳, 等. 氮循环过程的微生物驱动机制研究进展[J]. *植物营养与肥科学报*, 2020, 26(6): 1146-1155.
LIN W, LI Y Z, LI Y J, et al. Advances in the mechanism of microbe-driven nitrogen cycling[J]. *J Plant Nutr Fertil*, 2020, 26(6): 1146-1155.
- [18] 颜冬冬. 熏蒸剂对土壤氮素转化的影响 [D]. 北京: 中国农业科学院, 2010.
YAN D D. Effect of fumigants on soil nitrogen transformation[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2010.
- [19] 杨莉琳, 姚琦馥, 梁珊, 等. 土壤氮素内循环对生态覆被变化响应的研究进展[J]. 中国生态农业学报, 2020, 28(10): 1543-1550.
YANG L L, YAO Q F, LIANG L, et al. Research progress on soil nitrogen internal cycling response to ecological cover change[J]. *Chin J Eco-Agric*, 2020, 28(10): 1543-1550.
- [20] 张晶, 林先贵, 尹睿. 参与土壤氮素循环的微生物功能基因多样性研究进展[J]. 中国生态农业学报, 2009, 17(5): 1029-1034.
ZHANG J, LIN X G, YIN R. Advances in functional gene diversity of microorganism in relation to soil nitrogen cycling[J]. *Chin J Eco-Agric*, 2009, 17(5): 1029-1034.
- [21] 卜东欣, 张超, 张鑫, 等. 熏蒸剂成百亩对土壤微生物数量和酶活性的影响[J]. 中国农学通报, 2014, 30(15): 227-233.
BU D X, ZHANG C, ZHANG X, et al. Effects of fumigant methamsodium on soil microbial population and enzyme activities[J]. *Chin Agric Sci Bull*, 2014, 30(15): 227-233.
- [22] 贺纪正, 张丽梅. 氨氧化微生物生态学与氮循环研究进展[J]. 生态学报, 2009, 29(1): 406-415.
HE J Z, ZHANG L M. Advances in ammonia-oxidizing microorganisms and global nitrogen cycle[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(1): 406-415.
- [23] GUO J, PENG Y, WANG S, et al. Pathways and organisms involved in ammonia oxidation and nitrous oxide emission[J]. *Crit Rev Environ Sci Technol*, 2013, 43: 2213-2296.
- [24] 方文生. 土壤熏蒸对氮循环功能微生物及 N₂O 生成的影响与机制 [D]. 北京: 中国农业科学院, 2019.
FANG W S. Effects and mechanisms of soil fumigation on nitrogen cycling microorganisms and N₂O production[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2019.
- [25] LI J, HUANG B, WANG Q X, et al. Effect of fumigation with chloropicrin on soil bacterial communities and genes encoding key enzymes involved in nitrogen cycling[J]. *Environ Pollut*, 2017: 227.
- [26] 李君. 两种熏蒸剂对土壤微生物多样性和群落结构的影响 [D]. 北京: 中国农业科学院, 2017.
LI J. Effects of two fumigants on soil microbial diversity and community structure[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2017.
- [27] HOFFMAN B M, LUKOYANOV D, YANG Z Y, et al. Mechanism of nitrogen fixation by nitrogenase: the next stage[J]. *Chem Rev*, 2014, 114(8): 4041-4062.
- [28] DIXON R, KAHN D. Genetic regulation of biological nitrogen fixation[J]. *Nat Rev Microbiol*, 2004, 2(8): 621-631.
- [29] SANTI C, BOGUSZ D, FRANICHE C. Biological nitrogen fixation in

- non-legume plants[J]. *Ann Bot*, 2013, 111(5): 743-767.
- [30] VITOUSEK P M, MENGE D N, REED S C, et al. Biological nitrogen fixation: rates, patterns and ecological controls in terrestrial ecosystems[J]. *Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci*, 2013, 368(1621): 20130119.
- [31] ZEHR J P, JENKINS B D, SHORT S M, et al. Nitrogenase gene diversity and microbial community structure: a cross-system comparison[J]. *Environ Microbiol*, 2003, 5(7): 539-554.
- [32] FIERER N, ALLEN A, SCHIMEL J, et al. Controls on microbial CO₂ production: a comparison of surface and subsurface soil horizons[J]. *GCB Bioenergy*, 2003, 9(9): 1322-1332.
- [33] 颜冬冬, 王秋霞, 郭美霞, 等. 4种熏蒸剂对土壤氮素转化的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2010, 18(5): 934-938.
- YAN D D, WANG Q X, GUO M X, et al. Effects of four fumigants on soil nitrogen transformation[J]. *Chin J Eco-Agric*, 2010, 18(5): 934-938.
- [34] DE NEVE S, CSITÁRI G, SALOMEZ J, et al. Quantification of the effect of fumigation on short- and long-term nitrogen mineralization and nitrification in different soils[J]. *J Environ Qual*, 2004, 33(5): 1647-1652.
- [35] 陈云峰, 曹志平, 于永莉. 甲基溴替代技术对番茄温室土壤养分及微生物量碳的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2007, 15(5): 42-45.
- CHEN Y F, CAO Z P, YU Y L. Impact of alternative methyl bromide technology on soil nutrient and microbial biomass carbon in tomato greenhouse[J]. *Chin J Eco-Agric*, 2007, 15(5): 42-45.
- [36] COLLINS H P, ALVA A, BOYDSTON R A, et al. Soil microbial, fungal, and nematode responses to soil fumigation and cover crops under potato production[J]. *Biol Fertil Soils*, 2006, 42(3): 247-257.
- [37] 马涛涛, 颜冬冬, 毛连纲, 等. 4种熏蒸剂对土壤硝化作用及相关酶活性的影响[J]. *中国蔬菜*, 2014(11): 37-42.
- MA T T, YAN D D, MAO L G, et al. Effect of four fumigants on soil nitrification and related enzyme activity[J]. *China Veg*, 2014(11): 37-42.
- [38] 马涛涛. 熏蒸对土壤氮素硝化、矿化作用及动力学特征的影响 [D]. 北京: 中国农业科学院, 2014.
- MA T T. The effect of fumigation on soil nitrogen mineralization, nitrification and dynamic characteristics[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2014.
- [39] JENKINSON D S, POWLSON D S. The effects of biocidal treatments on metabolism in soil-V: a method for measuring soil biomass[J]. *Soil Biol Biochem*, 1976, 8(3): 209-213.
- [40] 程新胜, 杨建卿. 熏蒸处理对土壤微生物及硝化作用的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2007, 15(6): 51-53.
- CHENG X S, YANG J Q. Effect of soil fumigation on soil microbe and nitrification[J]. *Chin J Eco-Agric*, 2007, 15(6): 51-53.
- [41] STROMBERGER M E, KLOSE S, AJWA H, et al. Microbial populations and enzyme activities in soils fumigated with methyl bromide alternatives[J]. *Soil Sci Soc Am J*, 2005, 69(6): 1987-1999.
- [42] CHEN W, ZHANG L L, LI X Y, et al. Elevated ozone increases nitrifying and denitrifying enzyme activities in the rhizosphere of wheat after 5 years of fumigation[J]. *Plant Soil*, 2015, 392(1-2): 279-288.
- [43] IBEKWE A M. Effects of fumigants on non-target organisms in soils[J]. *Adv Agron*, 2004, 83: 1-35.
- [44] YAN D D, WANG Q X, LI Y, et al. Analysis of the inhibitory effects of chloropicrin fumigation on nitrification in various soil types[J]. *Chemosphere*, 2017, 175: 459-464.
- [45] 武志杰, 史云峰, 陈利军. 硝化抑制作用机理研究进展[J]. *土壤通报*, 2008, 39(4): 962-970.
- WU Z J, SHI Y F, CHEN L J. Research progress of the mechanisms of nitrification inhibition[J]. *Chin J Soil Sci*, 2008, 39(4): 962-970.
- [46] DAIMS H, LEBEDEVA E V, PJEVAC P, et al. Complete nitrification by *Nitrospira* bacteria[J]. *Nature*, 2015, 528(7583): 504-509.
- [47] PJEVAC P, SCHAUBERGER C, POGHOSYAN L, et al. AmoA-targeted polymerase chain reaction primers for the specific detection and quantification of comammox *Nitrospira* in the environment[J]. *Front Microbiol*, 2017, 8: 1508.
- [48] NEILSON J A D, ROBERTSON C J, SNOWDON E W, et al. Impact of fumigation on soil microbial communities under potato cultivation in southern Alberta[J]. *Am J Potato Res*, 2020, 97(2): 115-126.
- [49] SIMON J, KLOTZ M G. Diversity and evolution of bioenergetic systems involved in microbial nitrogen compound transformations[J]. *Biochim Biophys Acta*, 2013, 1827(2): 114-135.
- [50] SCHWEIGER P F. Nitrogen isotope fractionation during N uptake via arbuscular mycorrhizal and ectomycorrhizal fungi into grey alder[J]. *J Plant Physiol*, 2016, 205: 84-92.
- [51] LEININGER S, URICH T, SCHLOTTER M, et al. Archaea predominate among ammonia-oxidizing prokaryotes in soils[J]. *Nature*, 2006, 442(7104): 806-809.
- [52] DI H, CAMERON K, SHEN J, et al. Nitrification driven by bacteria and not archaea in nitrogen-rich grassland soils[J]. *Nat Geosci*, 2009, 2(9): 621-624.
- [53] FANG W S, YAN D D, WANG X L, et al. Evidences of N₂O emissions in chloropicrin-fumigated soil[J]. *J Agric Food Chem*, 2018, 66(44): 11580-11591.
- [54] PHILIPPOT L, HALLIN S, SCHLOTTER M. Ecology of denitrifying prokaryotes in agricultural soil[J]. *Adv Agron*, 2007, 96: 249-305.
- [55] 燕平梅, 高贵喜, 曹堉程, 等. 土壤熏蒸剂对土壤硝化、反硝化作用的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2014, 22(4): 401-407.
- YAN P M, GAO G X, CAO A C, et al. Effects of soil fumigants on soil nitrification and denitrification[J]. *Chin J Eco-Agric*, 2014, 22(4): 401-407.
- [56] 颜冬冬. 熏蒸对设施栽培土壤中可溶性氮素和氧化亚氮的影响及其微生物学机制 [D]. 北京: 中国农业科学院, 2013.
- YAN D D. The impact of different fumigation on dissolved N composition and nitrous oxide emission in greenhouse soil and its microbiological mechanisms[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2013.
- [57] ZUMFT W G. Cell biology and molecular basis of denitrification[J]. *Microbiol Mol Biol Rev*, 1997, 61(4): 533-616.
- [58] 郭丽芸, 时飞, 杨柳燕. 反硝化菌功能基因及其分子生态学进展[J]. *微生物学通报*, 2011, 38(4): 583-590.
- GUO L Y, SHI F, YANG L Y. Advances in functional genes and molecular ecology in denitrifiers[J]. *Microbiology China*, 2011, 38(4): 583-590.
- [59] ROUX-MICHELLET D, CZARNES S, ADAM B, et al. Effects of steam disinfection on community structure, abundance and activity of heterotrophic, denitrifying and nitrifying bacteria in an organic farming soil[J]. *Soil Biol Biochem*, 2008, 40(7): 1836-1845.
- [60] 燕平梅, 魏爱丽, 乔宏萍, 等. 威百亩熏蒸对土壤反硝化作用及 nirS 型反硝化细菌群落结构的影响[J]. *植物保护学报*, 2019, 46(2): 393-400.
- YAN P M, WEI A L, QIAO H P, et al. Influences of fumigation with metham-sodium on soil denitrification and nirS denitrifying bacterial community structure[J]. *J Plant Prot*, 2019, 46(2): 393-400.
- [61] KUYPERS M M M, MARCHANT H K, KARTAL B. The microbial

nitrogen-cycling network[J]. *Nat Rev Microbiol*, 2018, 16(5): 263-276.

[62] GRAF D R, JONES C M, HALLIN S. Intergenomic comparisons highlight modularity of the denitrification pathway and underpin the importance of community structure for N₂O Emissions[J]. *PLoS One*, 2014, 9(12): 0114118.

[63] SARAIVA L M, VICENTE J B, VICENTE J B, et al. The role of the flavodiiron proteins in microbial nitric oxide detoxification. *Adv Microb Physiol*. 2004, 49: 77-129.

[64] ZUMFT W G, KRONECK P M H. Respiratory transformation of nitrous oxide (N₂O) to dinitrogen by *Bacteria* and *Archaea*. [J]. *Adv Microb Physiol*, 2006, 52: 107-227.

[65] FANG W S, WANG X L, HUANG B, et al. Comparative analysis of the effects of five soil fumigants on the abundance of denitrifying microbes and changes in bacterial community composition[J]. *Ecotoxicol Environ Saf*, 2020, 187: 109850.

[66] RUZO L O. Physical, chemical and environmental properties of selected chemical alternatives for the pre-plant use of methyl bromide as soil fumigant[J]. *Pest Manag Sci*, 2006, 62(2): 99-113.

[67] 燕平梅, 魏爱丽, 赵文婧, 等. 氯化苦熏蒸对土壤反硝化作用及 nirS 型反硝化细菌群落结构的影响[J]. *植物保护*, 2019, 45(6): 208-213,

228.

YAN P M, WEI A L, ZHAO W J, et al. Effects of chloropicrin fumigation on soil denitrification and the community structure of nirS-denitrifying bacteria[J]. *Plant Prot*, 2019, 45(6): 208-213, 228.

[68] 燕平梅, 李娜, 赵文婧, 等. 威百亩熏蒸对土壤硝化作用及 amoA 型硝化细菌群落结构的影响[J]. *植物保护学报*, 2019, 46(6): 1357-1363.

YAN P M, LI N, ZHAO W J, et al. Effects of metham sodium fumigation on soil nitrification and the community structure of amoA nitrification bacteria[J]. *J Plant Prot*, 2019, 46(6): 1357-1363.

[69] 燕平梅, 乔宏萍, 赵文婧, 等. 溴甲烷熏蒸对土壤反硝化作用及 nosZ 型反硝化微生物群落结构的影响[J]. *微生物学报*, 2015, 55(1): 73-79.

YAN P M, QIAO H P, ZHAO W J, et al. Effects of methyl bromide fumigation on community structure of denitrifying bacteria with nitrous oxide reductase gene (nosZ) in soil[J]. *Acta Microbiologica Sinica*, 2015, 55(1): 73-79.

[70] IBRAIM E, WOLF B, HARRIS E, et al. Attribution of N₂O sources in a grassland soil with laser spectroscopy based isotopocule analysis[J]. *Biogeosciences*, 2019, 16(16): 3247-3266.

(责任编辑: 张 莉)

《农药学学报》2021 年影响因子年报

中国学术期刊影响因子年报(自然科学与工程技术·2021版)

编号: GST-JIFR 2021 NYXB

期刊名称: 农药学学报
 主办单位: 中国农业大学
 学科类目: 植物保护学
 研究层次: 基础研究
 CN / ISSN: CN 11-3995/S ISSN 1008-7303

计量指标统计表

一、影响力指数(GI)		2020年		2019年	
本引数值	学科最小值	本引数值	学科最小值	本引数值	学科最小值
1075	304	1210	2,042	9,071	596,501
二、载文量、可被引文献量(篇)		2020年		2019年	
载文量	可被引文献量	载文量	可被引文献量	载文量	可被引文献量
183	143	122	106	135	104
三、被引频次		2020年		2019年	
被引频次	被引频次	被引频次	被引频次	被引频次	被引频次
53	46	21	56	203	188
四、影响因子(JIF)		2020年		2019年	
影响因子	影响因子	影响因子	影响因子	影响因子	影响因子
0.373	1.971	1.886	1.666	1.428	3.21
五、其他参考指标		2020年		2019年	
总被引频次	总被引频次	总被引频次	总被引频次	总被引频次	总被引频次
1939	1939	1939	1939	1939	1939

《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司
 中国科学文献计量评价研究中心
 2021年10月

据《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司与中国科学文献计量评价研究中心联合发布的《中国学术期刊影响因子年报(自然科学与工程技术·2021版)》,《农药学学报》2021年度影响因子、被引频次及 Web 下载率等主要计量指标较 2020 年均出现了较大幅度增长,在 21 种植物保护类期刊中影响因子排名第三,影响力指数排名第七。

具体指标如下: 期刊复合影响因子 1.971, 较上年增长 51.03%; 期刊综合影响因子 1.690, 较上年增长 72.27%; 基础研究类影响因子 1.581, 较上年增长 75.67%。期刊总被引频次 1939, 较上年增长 10%。统计年前两年(2018 及 2019 年)发表文献在统计年的被引频次为 355, 较上年增长 72.33%。Web 即年(2020 年)下载率 120, 较上年显著增长 122.22%; Web 下载量 7.47 万次, 较上年增长 11.49%。期刊量效指数(JMI) 9.386, 较上年的 6.214 增长 51.04%。

注: 期刊量效指数(JMI)是指期刊影响因子与其对应发文量的比值, JMI 值越小, 表示发文规模很大而效用不高, 即平均每篇文章对该刊影响因子的贡献值很小。据统计, 2021 年中国科技类期刊的平均 JMI 值为 3.464, 80% 科技类期刊的 JMI 值范围在 0.460~7.463 之间, 本刊 JMI 值高出平均值 171%。

《农药学学报》编辑部
2021 年 12 月