

4种熏蒸剂对土壤硝化作用及相关酶活性的影响

马涛涛^{1,2} 颜冬冬^{1,2} 毛连纲^{1,2} 王秋霞^{1,2} 李园^{1,2} 欧阳灿斌^{1,2}
郭美霞^{1,2} 曹焯程^{1,2,3*}

(¹ 中国农业科学院植物保护研究所, 北京 100193; ² 农业部农药化学与应用重点开放实验室, 北京 100193; ³ 现代农业产业技术体系北京市创新团队, 北京 100029)

摘要: 以北京市顺义区黄瓜、番茄轮作 3a 以上的温室土壤为对象, 采用室内恒温通气培养法, 研究氯化苦 (Pic)、1, 3-二氯丙烯 (1, 3-D)、二甲基二硫 (DMDS) 和威百亩 (MS) 等 4 种熏蒸剂对土壤硝化作用和几种相关酶活性的影响, 并对 Pic 处理中可能影响硝氮含量变化的一些指标进行了相关性分析。结果表明: 4 种熏蒸剂处理均对土壤硝化作用有明显抑制作用, 其中 Pic、1, 3-D 和 MS 处理对土壤硝化作用的抑制持续 28~56 d, 而 DMDS 的抑制作用只有 7 d 左右; Pic 对土壤蛋白酶活性表现出显著的增强作用, 而 MS 则对蛋白酶活性有强烈的抑制作用; 各熏蒸剂处理对土壤谷氨酰胺酶和天冬酰胺酶均表现出不同程度的抑制作用。Pic 处理土壤硝氮 (NO_3^--N) 与铵氮 (NH_4^+-N)、可溶性有机氮 (DON) 的相关系数分别为 -0.977 和 0.887, 均达极显著水平; 与可溶性氨基酸 (DAA) 和土壤微生物量氮 (SMBN) 相关系数分别为 -0.628 和 -0.645, 均达显著水平。

关键词: 熏蒸剂; 氯化苦; 1, 3-二氯丙烯; 二甲基二硫; 威百亩; 硝态氮; 酶活性

土壤氮是植物生长和发育所必需的大量营养元素之一, 也是植物从土壤中吸收量最大的矿质元素。土壤氮库中无机氮仅占土壤总氮量的 1%, 而植物所吸收的氮几乎都是无机形态, 所以, 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 (张金波和宋长春, 2004)。硝态氮 (NO_3^--N) 淋洗是土壤氮素的主要损失途径, 也是引起地下水污染的主要原因。土壤中累积的硝态氮如不能及时被作物吸收利用, 在夏季持续降雨和大量灌溉条件下, 会向下运移出作物根区, 不但会降低生物有效性, 而且会增加土壤深层 NO_3^--N 累积量或直接进入浅层地下水造成污染 (吕殿青等, 1999; Suprayogo et al., 2002)。土壤熏蒸

消毒是控制保护地土传病虫害最有效的方法 (曹焯程等, 2010), 但在杀死病原微生物的同时也会对土壤中非靶标微生物的组成产生强烈影响 (Bending & Lincoln, 2000; Tanaka et al., 2003; Ibekwe, 2004; Stromberger et al., 2005; Roux-Michollet et al., 2008)。部分学者认为土壤熏蒸剂抑制土壤的硝化作用, 熏蒸后土壤的 NO_3^--N 浓度明显低于未熏蒸土壤 (Draycott & Last, 1971; Rovira, 1976)。这是因为土壤中铵氮 (NH_4^+-N) 向 NO_3^--N 转化是在硝化细菌作用下进行的, 熏蒸剂能够杀灭细菌, 从而抑制硝化作用 (de Neve et al., 2004)。但是 Gasser 和 Peachey (1964) 等报道溴甲烷和威百亩熏蒸处理能够明显提高土壤 NO_3^--N 的浓度。为探讨熏蒸剂对土壤可渗性氮素转化过程的影响, 本试验主要研究了 4 种不同熏蒸剂处理对土壤硝化作用的影响及氮转化过程中多种形态氮素间的相关性。

1 材料与方法

1.1 供试土样

2012 年 7 月取北京市顺义区黄瓜、番茄轮

马涛涛, 男, 硕士研究生, 专业方向: 土壤消毒技术, E-mail: majiansdau163.com

* 通讯作者 (Corresponding author): 曹焯程, 男, 研究员, 博士生导师, 专业方向: 土壤消毒使用技术与外来入侵植物防控, E-mail: caoac@vip.sina.com

收稿日期: 2014-01-03; 接受日期: 2014-08-05

基金项目: 国家自然科学基金项目 (40871131), 现代农业产业技术体系北京市创新团队项目

作 3 a 以上的温室菜地土壤进行检测, 经测供试土壤基本理化性质为: 有机质含量 $20.67 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 NH_4^+-N $38.31 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 NO_3^--N $112.99 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、速效钾 $197.35 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、速效磷 $305.73 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、阳离子交换量 $184.44 \text{ mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$, pH 值 (土壤: 水 = 1 : 2.5) 6.43。用专业取土器钻取种植垄表层以下 10 ~ 20 cm 处的土壤。土壤采回后, 剔除杂物及残留根系, 过 2 mm 筛后加入 2% 葡萄糖预培养, 恢复土壤的生物学活性, 测定熏蒸剂处理前土壤酶活性。

1.2 供试药剂

99% 氯化苦 (Pic), 大连染料化工有限公司生产; 95% 1, 3-二氯丙烯 (1, 3-D), 湖南省岳阳市云溪区道仁矾溶剂化工厂生产; 99% 二甲基二硫原药 (DMDS), 上海元吉化工有限公司生产; 42% 威百亩水剂 (MS), 沈阳丰收农药有限公司生产。

1.3 试验方法

称取 500 g 土样放入 2.5 L 干燥器中, 按照药剂与土壤质量比分别加入 Pic $53 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、1, 3-D $39 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、DMDS $68 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、MS $54 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (Spokas et al., 2006), 同时设置 1 组未添加熏蒸剂的对照, 每处理 3 次重复。密封后置于 25 °C 恒温箱中, 熏蒸 7 d, 于通风橱下敞气 5 min, 使气体散尽。敞气后, 将干燥器阀门打开, 使空气能够自由进入干燥器内, 有氧条件下恒温继续培养。从敞气时起定义为第 0 天, 之后定期取样测定土壤中铵态氮 (NH_4^+-N)、硝态氮 (NO_3^--N)、可溶性氨基酸 (DAA)、微生物量碳 (SMBC)、微生物量氮 (SMBN) 含量及土壤酶活性。每次取样前采用测质量法调节土壤含水量, 使之恒定。

土壤 NH_4^+-N 、 NO_3^--N 含量测定方法: 用 $2 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ KCl 溶液 10 mL 浸提 10 g 新鲜土样, $2000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 震荡 30 min, 过滤, 采用法国 Alliance Futura 流动分析仪直接测定滤液中 NH_4^+-N 、 NO_3^--N 浓度; 土壤蛋白酶活性采用 Ladd 和 Butler (1972) 方法测定; 土壤谷氨酰胺酶和天冬酰胺酶活性采用 Frankenberger 和 Tabatabai (1991a, 1991b) 的方法测定; 土壤硝化作用潜势 (NP) 参考 Schinner 等 (1995) 方法测定; 可溶性有机氮含量 (DON) = 可溶性总氮含量 (TSN) - [(铵氮 + 硝氮) 含量 (MinN)]; DAA 含量采用茚三酮

显色法测定; SMBN 和 SMBC 含量采用氯仿熏蒸浸提法测定; 土壤有机质含量采用重铬酸钾容量法 - 外加热法测定; 土壤速效磷含量采用 $0.5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ NaHCO_3 溶液浸提, 钼锑抗比色法测定; 土壤速效钾含量采用醋酸铵 - 火焰光度法测定; 阳离子交换量采用乙酸钠 - 火焰光度法测定。

1.4 数据处理

采用 SPSS 19.0 软件进行数据分析, 采用 Origin 8.0 软件进行作图。

2 结果与分析

2.1 不同熏蒸剂处理对土壤 NO_3^--N 含量的影响

由图 1 可知, 熏蒸剂处理后第 7 天, 4 种熏蒸剂处理的土壤 NO_3^--N 含量与对照相比均明显下降。其中, 硝化作用受抑制最强的是 Pic 处理, 土壤 NO_3^--N 含量为 $96.03 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 比对照 ($196.78 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 下降了 51.20%。1, 3-D、DMDS、MS 处理的 NO_3^--N 含量分别为 108.03、137.51、123.3 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 分别比对照下降了 45.1%、30.12%、37.34%。这种熏蒸剂可抑制土壤硝化作用的试验结论与 de Neve 等 (2004) 和颜冬冬等 (2010) 的研究结果一致。

14 d 时, DMDS 处理的土壤 NO_3^--N 含量比对照高 23.93%, 之后一直与对照趋于同一水平, 说明 DMDS 对硝化作用的抑制作用已经结束, 而第 14 天其他 3 种药剂处理的土壤 NO_3^--N 含量仍明显低于对照。随着处理时间的延长, 各处理土壤的 NO_3^--N 含量均呈增长趋势, 其中 Pic、MS 处理

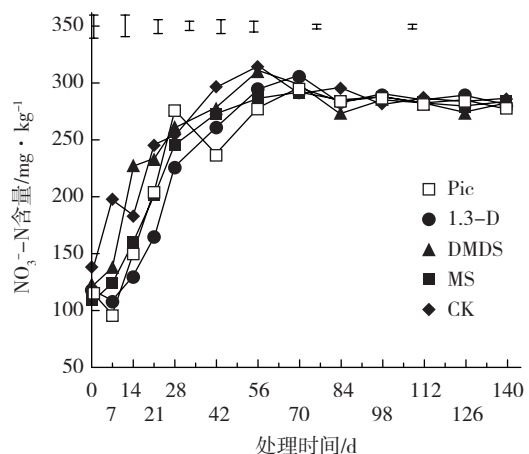


图 1 不同熏蒸处理对土壤 NO_3^--N 含量的影响

竖线为不同处理之间的 LSD 值, 表明不同处理的同一指标之间差异显著 ($\alpha=0.05$), 下同。

NO_3^- -N 含量在第 28 天恢复到对照的水平, 1, 3-D 处理则持续到第 56 天左右才达到对照水平, 说明 1, 3-D 对土壤硝化作用的抑制作用持续时间最长。

作物能够改变土壤表面硝态氮的分布状况, 限制土壤硝态氮向深层迁移 (Wu et al., 2003), 但是超过作物需要, 长期大量施用氮肥则会导致土壤中 NO_3^- -N 的累积 (Liu et al., 2003; Malhi et al., 2003), 土壤熏蒸剂能够显著抑制氮素的硝化作用, 使土壤经硝化作用产生的硝态氮缓慢释放给作物, 提高氮素利用率和经济效益 (Tanaka et al., 2003; de Neve et al., 2004; Yamamoto et al., 2008)。此外, 土壤熏蒸剂对防止硝态氮在地表大量累积、淋溶和反硝化产生有害气体也有一定的积极意义。

2.2 不同熏蒸剂处理对土壤硝化作用潜势 (NP) 的影响

土壤硝化作用潜势 (NP) 是反映土壤活性硝化菌群落大小的指标。由图 2 可知, 熏蒸处理后第 7 天, 4 种药剂处理土壤的 NP 值急剧下降, Pic 处理土壤 NP 为 $2.13 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$, 比对照下降了 82.45%, MS、1, 3-D 和 DMDS 处理分别比对照下降 68.95%、62.36% 和 54.94%。14~28 d, 除 DMDS 处理组外, 其他 3 种药剂处理土壤 NP 一直显著低于对照。35 d 时 Pic、DMDS 和 MS 处理的土壤 NP 分别为 10.12 、 11.28 和 $10.65 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$, 与对照 ($11.20 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$) 差异不显著, 而 1, 3-D 处理的土壤 NP ($9.26 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$) 仍然显著低于对照, 直到 42 d 后才逐渐恢复到对照水平。

图 1 和图 2 充分说明熏蒸剂处理能够在一定时间内抑制土壤氮素硝化作用, 有效控制氮肥的大量

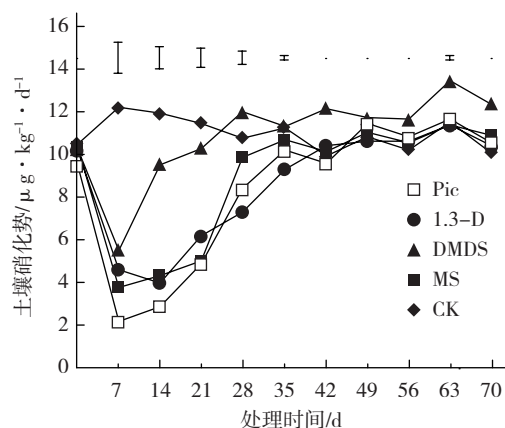


图 2 不同熏蒸剂处理对土壤硝化作用潜势 (NP) 的影响

积累, 避免氮肥浪费, 提高经济效益。但是, 熏蒸在抑制土壤硝化作用的同时, 也导致了土壤铵氮的积累, 增大了铵氮挥发浪费的几率, 应当引起关注。

2.3 不同熏蒸剂处理对土壤蛋白酶和脲化酶活性的影响

2.3.1 不同熏蒸剂处理对土壤蛋白酶活性影响 经测定, 熏蒸前土壤蛋白酶活性为 $25.60 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ 。敞气后 7 d, 与对照相比, Pic 熏蒸处理土壤蛋白酶活性增加了 1.06 倍, 明显提高, 即使去除 Pic, 土壤蛋白酶活性仍然继续增加, 在 28 d 时达到最大值, 为 $109.75 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$, 超过熏蒸前的 3 倍, 培养结束时仍然比对照高 14.21%。与之相反, MS 处理显著降低土壤蛋白酶的活性, 比对照下降 24.25%, 去除 MS 后, 土壤蛋白酶活性有所恢复, 但直到 56 d 之后才急剧上升, 培养结束时, 达到 $69.06 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$, 比对照低 7.4%。1, 3-D 和 DMDS 处理对土壤蛋白酶活性没有显著的影响 (图 3)。

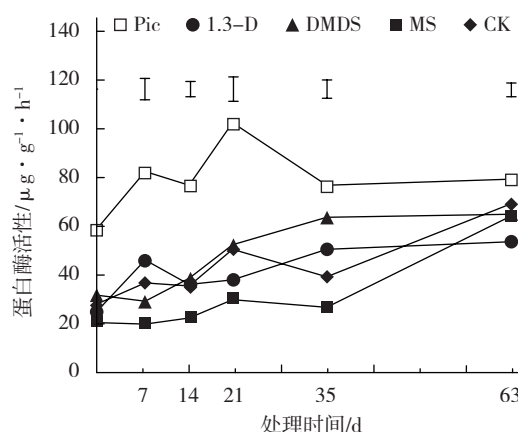


图 3 不同熏蒸剂处理对土壤蛋白酶活性的影响

2.3.2 不同熏蒸剂处理对土壤脲化酶活性影响 经测定, 熏蒸前土壤谷氨酰胺酶活性为 $9.35 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$, 土壤天冬酰胺酶活性为 $109.35 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ 。如图 4 所示, Pic 熏蒸处理对土壤脲化酶 (谷氨酰胺酶和天冬酰胺酶) 活性影响最大, 刚敞气时土壤谷氨酰胺酶和天冬酰胺酶活性分别比未熏蒸之前降低了 36.79% 和 68.99%, 即使除去 Pic 后培养 84 d, 土壤谷氨酰胺酶和天冬酰胺酶活性也没有恢复, 仍然保持极低水平, 仅为对照的 45.83% 和 31.31%; 1, 3-D 和 DMDS 仅在较短时间内对土壤谷氨酰胺酶活性有显著影响, 1, 3-D 在熏蒸时

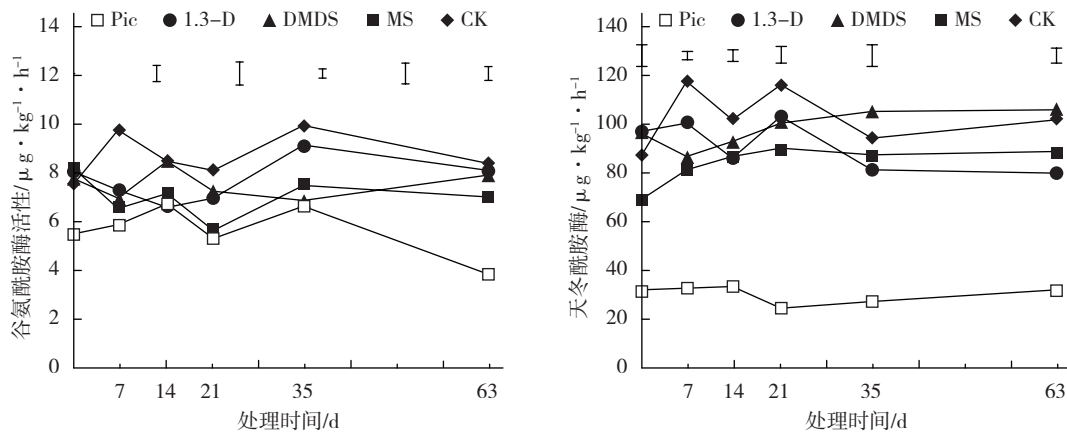


图4 不同熏蒸处理对土壤氨化酶活性的影响

对土壤天冬酰胺酶活性有一定的促进作用，敞气后7~84 d则表现为抑制作用；MS则与Pic相似，在整个培养过程中显著抑制了土壤谷氨酰胺酶和天冬酰胺酶活性。

2.4 土壤 NO₃⁻-N、NH₄⁺-N、DON、DAA、SMBN 和 SMBC 间的相关性分析

由于Pic处理对土壤酶活性影响最大，因此选取Pic处理的相关数据进行相关性分析(表1)。Pic处理土壤中NO₃⁻-N与NH₄⁺-N的相关系数为-0.977，呈极显著负相关；NO₃⁻-N与DON的相关系数为0.887，呈极显著正相关；NO₃⁻-N与DAA和SMBN的相关系数分别为-0.628和-0.645，均呈显著负相关。说明土壤NO₃⁻-N含量受多种因素的影响，因此熏蒸土壤中NO₃⁻-N的含量大小要从多个角度进行分析。NH₄⁺-N除了与NO₃⁻-N呈极显著负相关外，与DON的相关系数为-0.850，呈极显著负相关。由NO₃⁻-N、NH₄⁺-N和DON的相关性得知，熏蒸土壤中NO₃⁻-N与NH₄⁺-N含量的变化与土壤DON的含量变化紧密相关。近年来，随着植物营养机理研究的深入以及对生态环境问题的关注，可溶性有机氮在不同生态系统氮素循环中的作用引起很多学者的重视(Kalbitz et al., 2000)。有

学者提出，土壤中的可溶性有机氮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一个指标(Kalbitz et al., 2000; Murphy et al., 2000; Zhong & Makeschin, 2003)。熏蒸后可溶性有机氮含量的大幅上升增强了有机氮矿化为无机氮的过程(Zhang et al., 2011)，有助于植物对氮素的吸收利用。熏蒸土壤中DON转化为矿质氮的具体机制还有待进一步探索研究。

3 结论与讨论

3.1 熏蒸显著抑制土壤氮素硝化作用

硝化作用是在硝化细菌和亚硝化细菌的作用下将NH₄⁺氧化为NO₃⁻的过程，是土壤氮素转化中非常重要的一个过程，联系土壤氮素矿化-生物固持等作用(陈云峰等, 2007)。熏蒸处理抑制了土壤硝化作用，使土壤较长时间保持较高的NH₄⁺-N含量，减少NO₃⁻-N的累积，从而使NO₃⁻-N的淋溶损失和反硝化损失显著降低，但是在减少硝化和反硝化作用的同时也增加了NH₄⁺-N挥发的潜在可能性。由本试验结果可知，Pic在短时间(熏蒸至敞气后14 d)内对硝化过程的抑制率最高；1, 3-D对土壤硝化过程的抑制时间最长；硝化作用第一步是在氨氧化细菌(Ammonia-oxidizing bacteria, AOB)作用下完成氨的氧化，各熏蒸剂对硝化作用的抑制主要是通过抑制AOB的活性来完成。AOB产生的一种胞内酶-氨单加氧酶(Ammonia monooxygenase, AMO)能够催化氨氧化成羟胺，Pic、1, 3-D、DMDS和MS均可作为AMO的底物被催化氧化(武志杰等, 2008)，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

表1 Pic熏蒸处理土壤中NO₃⁻-N、NH₄⁺-N、DON、DAA、SMBN和SMBC间的相关性

项目	NO ₃ ⁻ -N	DON	DAA	SMBN	SMBC
NH ₄ ⁺ -N	-0.977**	-0.850**	0.388	0.588	0.451
NO ₃ ⁻ -N	—	0.887**	-0.628*	-0.645*	-0.377
DON	—	—	-0.371	-0.682*	-0.348
DAA	—	—	—	-0.155	-0.271
SMBN	—	—	—	—	0.896**

注：*表示显著相关(α=0.05)，**表示极显著相关(α=0.01)。

的亲合力。通过熏蒸剂处理土壤 NO_3^- -N 和 NH_4^+ -N 含量的变化仅仅只能间接反映出抑制的强弱程度, 下一步将从氨氧化细菌种群数量、酶活性变化及化学反应动力学角度进一步评价熏蒸对土壤氮素硝化作用的抑制效应。

3.2 熏蒸对土壤氨化酶活性具有强烈影响

本试验结果显示, Pic 熏蒸处理显著提高了土壤蛋白酶活性, 其机理可能是熏蒸杀死的细胞将胞内蛋白酶释放出来, 而 Pic 本身对蛋白酶没有钝化作用。与 Pic 处理完全不同的是, MS 熏蒸处理显著降低土壤蛋白酶活性, 其原因应与 MS 的降解产物异硫氰酸甲酯对蛋白酶的钝化作用有关。1, 3-D 对土壤蛋白酶的活性影响不大, 一方面与 1, 3-D 是专门杀线虫剂, 对土壤微生物群落的影响很小有关 (Ibekwe et al., 2011), 另一方面也可能与 1, 3-D 熏蒸没有影响到土壤有机质和矿物胶体的复合物有关 (Zaman et al., 1999)。熏蒸处理均在一定程度上降低谷氨酰胺酶和天冬酰胺酶的活性, 即使解除熏蒸, 土壤氨化酶活性仍然比较低, 表明熏蒸剂对土壤氨化酶的负面效应。

3.3 熏蒸在一定程度上促进土壤有机氮矿化作用

土壤中不同形态的有机氮和无机氮之间的相关性能够在一定程度上表明氮素转化的情况, 并且对了解土壤中有机氮的矿化作用强弱具有重要参考意义。Pic 处理土壤 NO_3^- -N 含量的变化与 DON 含量有着极显著的相关关系。DON 在土壤中的行为即不同于矿质氮, 也不同于不溶性有机氮 (Hagedorn et al., 2011)。土壤中的 DON 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一个指标。熏蒸后可溶性有机氮含量的大幅上升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。熏蒸土壤中 DON 转化为矿质氮的具体机制还有待进一步探索研究。

参考文献

曹焯程, 郭美霞, 王秋霞, 李园, 颜东东. 2010. 世界土壤消毒技术进展. 中国蔬菜, (21): 17-22.

陈云峰, 曹志平, 于永莉. 2007. 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. 中国生态农业学报, 15 (5): 42-45.

吕殿青, 杨进荣, 马林英. 1999. 灌溉对土壤硝态氮淋吸效应影响的研究. 植物营养与肥料学报, 5 (4): 307-315.

武志杰, 史云峰, 陈利军. 2008. 硝化抑制作用机理研究进展. 土壤通报, 39 (4): 962-970.

颜冬冬, 王秋霞, 郭美霞, 郭章碧, 曹焯程. 2010. 4种熏蒸剂对土壤氮素转化的影响. 中国生态农业学报, 18 (5): 934-938.

张金波, 宋长春. 2004. 土壤氮素转化研究进展. 吉林农业科学, 29 (1): 38-43, 46.

Bending G D, Lincoln S D. 2000. Inhibition of soil nitrifying bacteria communities and their activities by glucosinolate hydrolysis products. *Soil Biology and Biochemistry*, 32 (8): 1261-1269.

de Neve S, Csitari G, Salomez J, Hofman G. 2004. Quantification of the effect of fumigation on short- and long-term nitrogen mineralization and nitrification in different Soils. *Journal of Environmental Quality*, 33 (5): 1647-1652.

Draycott A P, Last P J. 1971. Some effects of partial sterilization on mineral nitrogen in a light soil. *Journal of Soil Science*, 2: 152-157.

Frankenberger Jr W T, Tabatabai M A. 1991a. Factors affecting L-asparaginase activity in soils. *Biology and Fertility of Soils*, 11: 1-5.

Frankenberger Jr W T, Tabatabai M A. 1991b. Factors affecting L-glutaminase activity in soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 23: 875-879.

Gasser J K R, Peachey J E. 1964. A note on the effects of some soil sterilants on the mineralisation and nitrification of soil-nitrogen. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 3: 142-146.

Hagedorn F, Bucher J B, Schleppei P. 2001. Contrasting dynamics of dissolved inorganic and organic nitrogen in soil and surface waters of forested catchments with gleysols. *Geoderma*, 100 (1): 173-192.

Ibekwe A M, Papiernik S K, Gan J, Yates S R, Yang, C H, Crowley D E. 2001. Impact of fumigants on soil microbial communities. *Applied and Environmental Microbiology*, 7: 3245-3257

Ibekwe A M. 2004. Effects of fumigants on non-target organisms in soils. *Advances in Agronomy*, 83: 1-35.

Kalbitz K, Solinger S, Park J H, Michalzik B, Matzner E. 2000. Controls on the dynamics of dissolved organic matter in soils: a review. *Soil Science*, 165 (4): 277-304.

Ladd J N, Butler J H A. 1972. Short-term assays of soil proteolytic enzyme activities using protein and dipeptides derivatives as substrates. *Soil Bio Biochem*, 4: 19-30.

Liu X J, Ju X T, Zhang F S, Pan J R, Christie P. 2003. Nitrogen dynamics and budgets in a winter wheat-maize cropping system in the North China Plain. *Field Crops Research*, 83 (2): 111-124.

Malhi S S, Gill K S, Harapiak J T, Nyborg M, Gregorich, E G, Monreal C M. 2003. Light fraction organic N, ammonium, nitrate and total N in a thin Black Chernozemic soil under bromegrass after 27 annual applications of different N rates. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 65 (3): 201-210.

Murphy D V, Macdonald A J, Stockdale E A, Goulding K, Fortune S, Gaunt J L, Poulton P R, Wakefield J A, Webster C P, Wilmer W S. 2000. Soluble organic nitrogen in agricultural soils. *Biology and*

- Fertility of Soils, 30 (5-6): 374-387.
- Roux-Michollet D, Czarnes S, Adam B, Berry D, Commeaux C, Guillaumeud N, Le Roux X, Clays-Josserand A. 2008. Effects of steam disinfestation on community structure, abundance and activity of heterotrophic, denitrifying and nitrifying bacteria in an organic farming soil. *Soil Biology & Biochemistry*, 7: 1836-1845.
- Rovira A D. 1976. Studies on soil fumigation I: effects on ammonium, nitrate and phosphate in soil and on the growth, nutrition and yield of wheat. *Soil Biology and Biochemistry*, 4: 241-247.
- Schinner F, Ohlinger R, Kandeler E, Margesin R. 1995. *Methods in soil biology*. Berlin: Springer Verlag Berlin Heidelberg: 3-6.
- Spokas K, Wang D, Venterea R, Sadowsky A. 2006. Mechanisms of N₂O production following chloropicrin fumigation. *Applied Soil Ecology*, 31 (1-2): 101-109.
- Stromberger M E, Klose S, Ajwa H. 2005. Microbial populations and enzyme activities in soils fumigated with methyl bromide alternatives. *Soil Science Society of America Journal*, 69 (6): 1987-1999.
- Suprayogo D, Van Noordwijk M, Hairiah K, Cadisch G. 2002. The inherent 'safety-net' of an Acrisol: Measuring and modelling retarded leaching of mineral nitrogen. *European Journal of Soil Science*, 2: 185-194.
- Tanaka S, Kobayashi T, Iwasaki K, Yamane S, Maeda K, Sakurai K. 2003. Properties and metabolic diversity of microbial communities in soils treated with steam sterilization compared with methyl bromide and chloropicrin fumigations. *Soil Science and Plant Nutrition*, 4: 603-610.
- Wu J S, Guo S L, Dang Y H. 2003. Mechanisms in the accumulation and movement of mineral N in soil profiles of farming land in a semi-arid region. *Acta Ecologica Sinica*, 23 (10): 2041-2049.
- Yamamoto T, Ultra V U, Tanaka S, Sakurai K, Iwasaki K. 2008. Effects of methyl bromide fumigation, chloropicrin fumigation and steam sterilization on soil nitrogen dynamics and microbial properties in a pot culture experiment. *Soil Science and Plant Nutrition*, 54 (6): 886-894.
- Zaman M, Di H J, Cameron K C, Frampton C M. 1999. Gross nitrogen mineralization and nitrification rates and their relationships to enzyme activities and the soil microbial biomass in soils treated with dairy shed effluent and ammonium fertilizer at different water potentials. *Biology and Fertility of Soils*, 2: 178-186.
- Zhang C L, Li G T, Lin Q M, Cao A C, Zhao X R. 2011. The dynamics of dissolved organic N in the fumigated soils. *Biology and Fertility of Soils*, 47 (7): 833-837.
- Zhong Z K, Makeschin F. 2003. Soluble organic nitrogen in temperate forest soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 35 (2): 333-338.

Effect of Four Fumigants on Soil Nitrification and Related Enzyme Activity

MA Tao-tao^{1, 2}, YAN Dong-dong^{1, 2}, MAO Lian-gang^{1, 2}, WANG Qiu-xia^{1, 2}, LI Yuan^{1, 2}, OU YANG Can-bin^{1, 2}, GUO Mei-xia^{1, 2}, CAO Ao-cheng^{1, 2, 3*}

(¹Institute of Plant Protection, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100193, China; ²Key Laboratory of Pesticide Chemistry and Application Technology, Ministry of Agriculture, Beijing 100193, China; ³Team-Innovation of Beijing Modern Agriculture and Industrial Technology Innovation System, Beijing 100029, China)

Abstract: Taking soil which cucumber, tomato rotation for more than 3 years in Shunyi District of Beijing vegetable greenhouses as research object, and adopting the method of indoor constant temperature with aerated condition, this paper studied the effects of 4 fumigants Chloropicrin (Pic), 1, 3-Dichloropropene (1, 3-D), methyl disulfide (DMDS) and methamsodium (MS) on soil nitrification and several related enzyme activities. The paper also conducted correlation analysis on certain targets, which might influence the contents of nitrate nitrogen in Pic treatment group. The results revealed that soil nitrate nitrogen concentration decreased significantly after all these 4 fumigation treatments. Among them, the inhibition on soil nitrification by Pic, 1, 3-D and MS treatments could last for 28-56 days, while the DMDS treatment could only last about 7 days. All fumigation treatment showed different inhibition levels on soil glutamine enzyme and asparagine enzyme. Pic showed significant promoting effect on soil protease activity, while on the contrary MS showed strong inhibitory effect. The correlation coefficients between NO₃⁻-N and NH₄⁺-N, NO₃⁻-N and DON, NO₃⁻-N and DAA, NO₃⁻-N and SMBN were -0.977, 0.887, -0.628 and -0.645, respectively and all of the correlation reached significant or very significant level.

Key words: Fumigant; Chloropicrin; 1, 3-Dichloropropene; Dimethyl disulfide; Methamsodium; Nitrate nitrogen; Enzymatic activity