

DOI: 10.11766/trxb201411040554

强还原土壤灭菌防控作物土传病的应用研究*

蔡祖聪 张金波 黄新琦 朱同彬 温 腾

(南京师范大学地理科学学院江苏省地理信息资源开发与利用协同创新中心, 南京 210046)

摘要 随着集约化种植程度的不断提高, 土传病原菌侵染、土壤酸化、次生盐渍化、养分平衡失调等引起的作物连作障碍发生率不断攀升, 严重威胁着集约化农业的可持续发展。强还原土壤灭菌 (Reductive Soil Disinfestation, RSD) 法是一种作物种植前的土壤处理方法, 即: 在发生土传病害的土壤上, 添加大量的易分解有机物料、灌溉、薄膜覆盖或淹水阻隔与大气的交换, 快速创造土壤强还原环境, 短期内杀灭土传病原菌的方法。强还原杀灭土传病原菌的作用机理包括: 1) 厌气杀灭好氧病原菌; 2) 还原过程产生有毒有害的物质杀灭土传病原菌; 3) 强还原改变土壤微生物群落结构, 抑制土传病原菌活性。强还原土壤灭菌法还具有提高土壤 pH, 减轻次生盐渍化的作用, 具有广谱性和环境友好性。本文介绍了该方法的起源、作用机理、影响该方法效果的因素及其应用前景。

关键词 强还原土壤灭菌; 连作障碍; 有机废弃物再利用; 作用机理

中图分类号 S154 **文献标识码** A

随着经济和技术的快速发展, 高投入和高产出的集约化种植已经成为我国重要的农业生产模式。伴随着这一种植方式的不断推广和发展, 以土传病原菌和土壤退化为主的连作障碍问题日益突出。香蕉、西瓜、蔬菜、烟草等作物均出现了以土传病害频发为主的连作障碍问题。土传病害在高投入和高产生的大棚种植中更为严重, 而且还常伴随土壤酸化、次生盐渍化和养分失调成因的连作障碍^[1], 严重地威胁着我国农业生产的可持续发展。为了防治连作障碍, 科技工作者发展了一系列防治方法和技术, 如轮作、间作套种、施用生物有机肥、增施有机肥、高温闷棚、灌溉洗盐、调节土壤 pH、选用抗性品种、嫁接栽培等^[2]。这些方法和技术大多针对某一特殊问题, 具有一定的防治或缓解连作障碍的效果。但由于这些方法作用单一, 常常不能解决多因素成因的连作障碍问题, 如土壤熏蒸灭菌只能杀灭病原菌, 并不能改善土壤的理化性状, 而且同时还可能杀灭有益微生物; 施用石灰可以提高土壤 pH, 中和土壤酸性, 但不一定能降低土传病原菌数量等。因此, 现阶段亟需一种全面且有效防控连作障碍的方法。本文介绍强还原土壤灭菌方法

对防治作物土传病害和修复退化土壤的作用。此方法目前在日本、荷兰和美国已经被广泛应用于土壤灭菌。

1 强还原土壤灭菌方法的起源

高投入和高产生的集约化种植模式起源于欧、美、日等经济发达国家, 伴随着集约化种植模式而来的土传病原菌侵染引发的土传疾病, 导致作物发病率提高, 产量大幅度降低甚至绝收的问题也首先出现在这些国家。以土传病害为主的连作障碍严重地影响集约化生产的可持续发展。为了克服以土传疾病为主的连作障碍, 20世纪50年代后, 这些国家广泛采用土壤化学熏蒸灭菌方法, 取得了很好的效果。但是, 随后人们逐渐认识到土壤熏蒸灭菌使用的化学药品危害环境和人类健康, 如最常用的溴甲烷有破坏臭氧的作用。随着《关于消耗臭氧层物质的蒙特利尔议定书》在各国生效, 化学药品土壤熏蒸灭菌方法也逐渐被禁止^[3]。为了替代土壤化学熏蒸灭菌, 在国外发展了太阳辐射灭菌、蒸汽灭菌等方法^[4-5]。21世纪初, 日本科学工作者受可持

*国家自然科学基金项目 (41301335) 资助

作者简介: 蔡祖聪 (1958—), 男, 浙江余姚人, 教授, 主要从事土壤碳氮循环与全球变化的研究。E-mail: zccai@njnu.edu.cn

收稿日期: 2014-11-04; 收到修改稿日期: 2014-12-12

续水稻种植的启发,发展了强还原土壤灭菌方法,称为生物土壤灭菌(Biological Soil Disinfestation, BSD),以区别于太阳辐射灭菌、蒸汽灭菌和化学灭菌方法^[6]。几乎是在同一时期,荷兰科学家Blok等^[7]独立地发展了同样的方法,应用于蔬菜和花卉的土传病原菌灭菌。该方法提出后,很快被美国科学工作者所接受,并被广泛应用于防治土传病原菌引发的作物病害,在田纳西州已经制订了详细的操作方案^[8]。我们在研究大棚蔬菜地土壤硝态氮快速积累机理和去除方法时,独立发现施用大量有机物料、淹水强烈还原土壤,可以快速修复因酸化、次生盐渍化而严重退化的大棚蔬菜地土壤,消除因土传病原菌和理化性质退化导致的连作障碍^[9-11]。通过这一方法的处理,土壤的理化性质和微生物学性质可以“还原”到集约化利用之前的状态。

目前在日本、荷兰和美国,对该方法的命名并不完全相同。在日本通常命名为生物土壤灭菌,即BSD,也称为强还原土壤灭菌(Reductive Soil Disinfestation, RSD)^[6, 12]。荷兰和美国科学工作者似乎更强调该方法创造土壤厌氧环境的特性,将此方法命名为厌氧土壤灭菌(Anaerobic Soil Disinfestation, ASD)^[7-8]。该方法的核心是通过大量施用易分解的有机物料,灌溉、覆膜阻止空气扩散进入土壤,在短时间内创造强烈的土壤还原状况,达到杀灭土传病原菌的目的。由于生物土壤灭菌的含义更加广泛,如接种对土传病原菌有抑制作用的微生物、施用生物有机肥等,也是生物学抑制土传病原菌的方法,如果将此方法命名为生物土壤灭菌方法(BSD),容易与其他的生物学方法相混淆。而土壤厌氧仅仅是该方法的必要条件,但并不是使土壤快速强烈还原的充分必要条件,因此厌氧土壤灭菌ASD也只是部分地反映了这一方法的特点。RSD名称则充分反映了该方法的特点,且还含有将土壤性质“还原”到集约化种植前的状态之意,所以,本文采用强还原土壤灭菌(RSD)命名该方法。

西瓜、烟草等与水稻轮作是我国普遍的传统种植模式,该种植模式可以有效地消除或延缓连作障碍出现的时间。然而,我国对此实践尚未作系统和深入研究,尚不能回答种植水稻对土传病原菌是否具有灭菌作用。RSD方法不同于淹水方法和施用有机肥的方法,它是一种作物种植前的土壤处理方

法:1)大量施用有机物料,目的不是为作物提供养分,而是为创造强还原土壤环境和产生对土传病原菌有毒有害的物质。这些有毒物质在处理结束前被完全分解,不会对处理后作物的生长产生毒害;2)淹水或覆膜阻止空气进入,以利于厌氧环境的形成;3)处理对土壤性质的影响强度远远高于淹水或施用有机肥的强度;4)处理时间短,一般1~4周即可完成处理,在处理期间,土壤条件不适宜于作物生长。所以,它是一种非常强烈的“医治”生物退化(土传病原菌侵染)和理化性质退化(酸化、次生盐渍化)土壤的方法。

2 强还原土壤灭菌方法的灭菌效果及机理

RSD方法是一种广谱的土传病原菌灭菌方法,对镰刀菌(*Fusarium* spp.)、齐整小核菌(*Sclerotium rolfsii*)、丝核菌(*Rhizoctonia* spp.)、腐霉菌(*Pythium* spp.)、轮枝菌(*Verticillium* spp.)、互隔交链孢霉(*Alternaria alternata*)、束状刺盘孢(*Colletotrichum dematium*)、青枯病茄科劳尔氏菌(*Ralstonia solanacearum*)和植物寄生根结线虫等均有很高的致死效果,尤其是对植物寄生的根结线虫,处理后的致死率几乎可达到100%^[13],对真菌和细菌类病原菌的致死率可达90%以上,甚至达到99%以上^[14-15]。日本、荷兰和美国对RSD灭菌的机理进行了大量的研究,发现其灭菌机理包括:1)土传病原菌大多是好氧微生物,RSD创造的强烈厌氧环境使这些好氧病原菌无法生存。2)有机物料厌氧发酵产生对土传病原菌有毒有害物质,杀灭土传病原菌。在厌氧发酵过程中可能产生的有毒有害物质包括乙酸、丙酸等有机酸,氨、硫化氢、生物活性物质和铁、锰等低价金属离子。这些有毒有害物质可以快速分解或快速再氧化,当RSD处理结束时,一般其浓度已经下降至对作物无害的程度。3)微生物群落结构变化,厌氧微生物数量增加,而好氧微生物数量相应减少,从而抑制好氧病原菌的生长。一般情况下,RSD对土传病原菌的致死作用不是单一机理的结果,而是多种机理共同作用的结果,针对不同的土传病原菌或采用不同的方法,对土传病原菌发挥主导作用的灭菌机理可能并不相同。

2.1 氧化还原状况突变的杀菌作用

RSD一般在两季作物的间隔期，温度较高时实施。在热带、亚热带地区一般选择夏季温度过高，不利于作物生长的休闲期进行。当大量的易降解有机物料添加到土壤中后，在水分饱和且隔绝空气的条件下，在1~3 d内土壤氧化还原电位（Eh）可以从好氧条件的几百毫伏下降至-200毫伏，甚至更低。好氧至厌氧导致的大幅度Eh变化，对好氧土传病原菌的生长极为不利。但是，有研究表明，尖孢镰刀菌虽然不能在厌氧环境下生长，但可以存活，而且在恢复好氧条件后开始生长^[16]。我们的实验结果也表明，将土壤置于N₂环境下，尖孢镰刀菌的数量并未发生显著的变化（未发表结果）。所以，单纯的厌氧环境可能并不是RSD处理致死土传病原菌的主要机理。

2.2 有毒有害物质的杀菌作用

有机酸是有机物料厌氧发酵的产物之一。我们的研究表明，发酵过程中产生的乙酸、丁酸、异戊酸、丙酸对土传病原菌有直接的致死效果。在RSD处理过程中，这些有机酸的浓度足可以达到致死尖孢镰刀菌和青枯菌的程度^[17]。但也有研究表明，RSD处理中，有机酸浓度可以达到致死青枯菌的水平，但最大浓度未能达到致死尖孢镰刀菌的水平，RSD对尖孢镰刀菌的致死作用可能还与其他因素有关^[18]。有机酸对土传病原菌的致死效果不仅与浓度有关，还与pH有关，酸性条件更有利于发挥有机酸对土传病原菌的致死作用^[19]。有机物料强烈发酵过程中，在有机酸产生的微区，pH可能远低于整个土层的pH。强酸性微区的存在也可能提高有机酸致死土传病原菌的效果^[6]。

RSD处理过程中，土壤还产生对土传病原菌可能具有致死效果的其他物质，如H₂S、NH₃、低价金属离子等。H₂S是RSD处理过程中出现恶臭的主要成分，对很多微生物具有毒害作用^[12, 14]。Momma等^[20]的研究表明，Fe²⁺、Mn²⁺溶液中土传病原菌受到明显的抑制。NH₃也是有机物厌氧发酵的产物，对大多数微生物具有毒害作用^[17]。这些物质在RSD处理中对土传病原菌的致死作用取决于其浓度。在红壤等富铁土壤中，RSD处理时，土壤溶液中可能有更高的Fe²⁺、Mn²⁺浓度，因而它们也可能发挥更大的作用。富含硫和氮的有机物料在厌氧分解过程中可能产生较高的H₂S和NH₃浓度，因此，利用这些有机物作有机物料时，H₂S和NH₃对

土传病原菌的致死效果可能会更大一些。

RSD处理时有些有机物料在分解过程中可以释放一些对土传病原菌有致死效果的生物活性物质^[21-22]，它们可能参与对土传病原菌的致死作用。由于十字花科植物含有这类生物活性物质，所以常被选作RSD处理的有机物料^[7, 23]，其中芥末属植物最常被优先选作RSD处理的有机物料。研究表明，芥末属植物作为绿肥翻入土壤后其含有的芥子油苷具有毒杀根结线虫的作用^[24]。

2.3 微生物群落结构的变化

由于强烈的土壤环境条件变化，可以预期RSD处理对土壤微生物群落结构的影响，但具体发生了哪些变化，这些变化与致死土传病原菌的关系等还有待深入的研究。环境条件剧烈变化对微生物群落结构的影响，本身是一个能引起科研工作者兴趣的科学问题。研究表明，RSD处理对土壤微生物数量不一定发生显著的影响^[15]，但群落组成会出现很大的变化，好氧微生物数量相对下降，厌氧微生物数量大幅度增加，甚至成为优势种群。我们的研究表明，土壤淹水及添加有机物料对于土壤中可培养细菌数量无显著影响，但显著降低土壤中可培养放线菌和真菌的数量。添加高量秸秆处理后，香蕉枯萎病的病原菌尖孢镰刀菌古巴专化型（FOC）的数量下降至仅为处理前土壤中数量的2.88%^[15]。Mowlick等^[25]的研究表明，RSD处理后，梭状芽胞杆菌成为绝对的优势种，其中部分在厌氧发酵中具有生成有机酸的能力，这或许是在RSD处理中发挥致死土传病原菌的途径之一。

3 强还原修复酸化和次生盐渍化土壤的机理

大棚生产在我国发展的时间很短。受经济利益的驱动，而又缺乏必要的大棚生产的肥料管理知识，过量施用化肥和偏施氮肥现象十分普遍。这种管理模式导致大棚蔬菜地土壤快速退化，几年内出现酸化、次生盐渍化及养分失调问题^[26-28]。RSD方法不仅对土传病原菌具有致死作用，对改良土壤理化性质退化成因的连作障碍也有很好的处理效果。我们的研究表明，受连作障碍危害的土壤，RSD处理完全控制了黄瓜枯萎病，产量从处理前的10.8 t hm⁻²提高至处理后的53.3~57.9 t hm⁻²^[9]。

我们的研究表明，严重酸化到pH为4.35的大

棚蔬菜地土壤, 经过强烈还原处理后, pH均大幅度提高, 随有机物料施用量的增加而升高, 最高可达6.49。落干后pH有所回落, 但添加有机物料的处理, 土壤pH仍均在5.5以上^[9]。但是, 对于并未酸化的土壤, RSD处理对pH的影响很小, 在处理过程中由于有机酸的生成甚至可能使土壤pH有所下降^[15, 29]。

大棚蔬菜地土壤次生盐渍化的盐主要为硝酸盐和硫酸盐^[27], 前者来源于大量施用的氮肥, 经硝化过程产生, 后者直接来源于大量施用的含硫酸盐肥料, 尤其是硫酸钾肥料。RSD处理的强烈还原环境使硝态氮迅速反硝化为 N_2 和 N_2O 逸出土壤, 当有机物料添加量足够大时, 积累的硝态氮可在1~2 d内下降至仅可检测的水平^[10]。强烈还原的土壤环境也可使部分硫酸盐还原成含硫气体, 或者被微生物同化为有机硫, 从而降低硫酸盐含量^[15]。但是, 如果添加的有机物料硫含量较高, 土壤的全硫则不一定降低^[9]。如果RSD在淹水条件下进行, 且处理中发生水分的向下渗透, RSD可能还会有洗盐作用。

RSD处理提高土壤有机质含量, 改善土壤结构性。虽然RSD处理选用易降解的有机物料, 但由于施用量大, 处理后仍有相当数量的有机物质残留在土壤中, 成为土壤有机质的一部分, 提高土壤有机质含量^[29], 改善土壤结构。此外, 我们的研究发现, 经RSD处理后蔬菜地土壤氮的转化过程发生显著变化, 加快无机氮周转速率, 提高氮的有效性^[30]。

4 影响强还原土壤灭菌效果的因素

在RSD处理过程中提高对土传病原菌具有致死效果的有毒有害物质浓度, 消除不利于作物生长的土壤理化障碍因素等的措施都将提高RSD的处理效果。在国外, 通过覆盖不通气的薄膜达到隔绝空气, 快速建立土壤还原环境; 在我国, 尤其是由水稻土转换而来的蔬菜地, 发育良好的犁底层具有隔水作用, 淹水隔绝土壤与大气的交换也可达到与膜覆盖同样的效果^[9, 15]。但是对于不宜淹水的土壤, 则宜用膜覆盖的方法。

有机物料的品种和施用量对RSD处理效果有很大的影响。原则上, 各种易降解的有机物料均可用于强还原土壤灭菌。已经被研究的有机物料包括西

兰花、牧草、糖浆、糖渣、谷麸、麦麸、苜蓿、新鲜的覆盖作物、作物残渣和作物处理过程产生的废弃物、鸡粪、猪粪等^[7-8, 11, 14]。能够产生杀菌物质的芥末属植物残渣等是很好的有机物料^[8]。在美国田纳西州ASD实施方法中建议施用C/N比为10:1~35:1的有机物料^[8]。他们认为, 过低的C/N比导致有机物料氮的损失, 而过高的C/N比则使处理后的土壤出现缺氮情况, 需要施用更多的氮肥加以补充。我们的研究表明, 水稻、玉米秸秆粉碎后作为RSD的有机物料, 对香蕉尖孢镰刀菌具有很好的致死效果^[15]。由于大量施用氮肥, 大棚蔬菜土壤常常积累了大量的硝态氮^[10], 施用C/N比大的秸秆作为有机物料可以促进硝态氮的生物同化, 减少氮素损失。在日本用乙醇作为RSD的有机物料取得了很好的致死土传病原菌的效果^[31]。有机物料的选择应该把握易分解、就地取材和价廉的原则。作物秸秆已经成为我国最大宗的有机废弃物, 严重影响环境质量。因此, 如以作物秸秆为RSD处理的有机物料, 可以同时起到有机废弃物利用、保护生态环境的双重作用。

大剂量施用有机物是RSD处理的特色。Blok等^[7]用新鲜西兰花和牧草作为有机物料, 施用量为 $3.4 \sim 4.0 \text{ kg m}^{-2}$ 。美国田纳西州ASD实施方案最初建议的有机物料施用量为0.4%土壤重量的有机碳, 土壤的深度一般为耕作层^[8]。但这是以致死各种土传病原菌为目标的施用量, 如果需要致死的土传病原菌对RSD处理较为敏感, 则有机物料的施用量可适当减少。我们以水稻秸秆为有机物料, 处理香蕉尖孢镰刀菌高度侵染的土壤时, 发现施用量为土壤重量的0.6%和1.2%时, 杀菌效果并无显著差异^[15]。用乙醇作为RSD处理的有机物料时, Momma等^[6]建议用1%浓度的乙醇, 标准施用量为 100 L m^{-2} 。有机物料的施用量可根据土传病原菌及其密度、病原菌对RSD处理的抗性、处理时的温度和可用的处理时间等实际情况作适当的调整。当土传病原菌密度高时, 应适当加大有机物料的施用量。

温度是影响RSD处理效果的重要因素, 温度越高, 处理效果越好, 处理需要的时间也越短。但是, 该方法在日本北海道和荷兰的成功应用^[6-7], 证明在温带地区也可采用RSD方法处理土传病原菌侵染的土壤。在热带和亚热带地区, 宜选择在夏季温度高, 两季作物间隔期进行。

RSD处理的时间一般为1~4周, 可根据有机物料的施用量、温度、土传病原菌数量及可供处理的有效时间做调整。处理温度较低时, 需要较长的处理时间^[6]。一般而言, 当土壤不再有恶臭产生时, RSD即可结束^[8]。

5 强还原灭菌方法的研究与应用前景

RSD处理具有显明的特点: (1) 广谱性, 既具有致死土传真菌和细菌类病原菌的作用, 对植物根结线虫具有更好的致死效果, 而且具有改善土壤理化性状的作用, 因此, 对土传病原菌和土壤酸化、次生盐渍化成因的连作障碍均有较好的治理效果; (2) 不需要添加任何化学品, 环境友好; (3) 可以大量地利用农业有机废弃物, 减轻农业有机废弃物对环境的危害。但是, 这一方法的应用也受到诸多的限制, 以下几个方面还需要进行大量的研究。

1) 阻碍RSD方法应用的可能因素。费用、可操作性和处理效果是制约RSD方法应用的最大因素。RSD处理需要的有机物料、灌溉、薄膜等都将产生费用, 翻耕混合土壤与有机物料需要较大的人工投入。美国田纳西州的RSD实施方案只建议在具有很高经济价值且投入大的作物上应用^[8]。有一些措施可以降低RSD处理的成本, 如在土传病原菌侵染的土壤上种植速生十字花科植物或其他速生的覆盖植物, 或者利用当地产生的农业有机废弃物作为RSD处理的有机物料。对有充足水源的地区, 如需处理的土壤发育有渗透性较小的犁底层, 可以采用淹水代替覆膜, 以降低成本。虽然在原理上, RSD处理具有广谱性, 但对不同土传病原菌的致死效果并不完全相同, 只有通过实际的实验室和田间试验才能确定RSD方法是否足以防控连作障碍和制订出切实可行的处理方案。

2) RSD方法的机理。虽然对RSD处理防控连作障碍的总体机理已经比较清楚, 但是, 对于特定条件下具体发挥作用的机理并不明确。在特定的条件下, 土传病害发生与否, 不仅取决于土传病原菌的数量, 还取决于土壤理化性质、微生物群落结构、作物本身的生长状况及其管理水平。但是, 对这些因素与土传病发病率之间关系的认识仍停留在概念或定性阶段, 尚需建立定量关系, 以指导生产。短时间和强烈的还原环境对土壤微生物群落

结构的影响是RSD方法防控土传病害的可能机理之一, 但是, 目前尚不清楚土壤微生物群落结构与土传病原菌活性之间的关系。高通量测序技术可以提供土壤微生物群落结构变化方面的大量信息, 为研究土壤微生物群落结构变化在抑制土传病原菌中的作用提供了技术基础^[32]。土壤中化感物质的积累也是连作障碍的可能成因, RSD处理是否有助于消除化感物质积累引起的连作障碍, 目前还未见研究报告。

3) RSD处理的环境风险评价。虽然RSD处理不需要添加任何化学品, 但大量有机物料在还原条件下发酵, 可能产生大量的 CH_4 。由于反硝化作用过于剧烈, 可能短期内出现 N_2O 的大量积累和排放, 在以硝酸盐积累为特征的次生盐渍化土壤, RSD处理导致的 N_2O 的排放可能更加严重^[10, 33]。除这些温室气体外, RSD处理过程中还可排放 H_2S 及其他含硫气体、具有恶臭的挥发性物质等。如在淹水条件下进行, 未彻底分解的水溶性有机质、硝酸盐和硫酸盐均可能向下迁移, 对地下水环境产生不利影响。目前尚无RSD方法环境风险的评价。在大面积推广该方法之前, 尤其是以淹水代替覆膜时, 必需对RSD方法的环境风险做出科学评价。

参考文献

- [1] Cao Z H, Huang J F, Zhang C S, et al. Soil quality evolution after land use change from paddy soil to vegetable land. *Environmental Geochemistry and Health*, 2004, 26 (2): 97—103
- [2] 张子龙, 王文全. 植物连作障碍的形成机制及其调控技术研究进展. *生物学杂志*, 2010, 27 (5): 69—72. Zhang Z L, Wang W Q. Progress on formation mechanism and control measurements of continuous cropping obstacles in plants (In Chinese). *Journal of Biology*, 2010, 27 (5): 69—72
- [3] Pizano M, Besri M, Marcotte M, et al. Montreal Protocol on Substances that Deplete the Ozone Layer// United Nations Environment Programme (UNEP) 2010 report of the Methyl Bromide Technical Potions Committee. 2010 Assessment. 2011. <http://ozone.unep.org/teap/Reports/MBTOC/MBTOC-Assesment-Report-2010.pdf>
- [4] Katan J, Greenberger A, Alon H, et al. Solar heating by polyethylene mulching for the control of diseases caused by soil-borne pathogens. *Phytopathology*, 1976, 66: 683—688

- [5] Gamliel A, Austerweil M, Kritzman G. Non-chemical approach to soilborne pest management-organic amendments. *Crop Protection*, 2000, 19 (8) : 847—853
- [6] Momma N, Kobara Y, Uematsu S, et al. Development of biological soil disinfestations in Japan. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2013, 97 (9) : 3801—3809
- [7] Blok W J, Lamers J G, Termorshuizen A J, et al. Control of soilborne plant pathogens by incorporating fresh organic amendments followed by tarping. *Phytopathology*, 2000, 90 (3) : 253—259
- [8] Shrestha U, Wszelaki A L, Butler D M. Implementing anaerobic soil disinfestation in Tennessee. 2014. <http://extension.Tennessee.edu/publications/Documents/SP765-B>
- [9] 朱同彬, 孟天竹, 张金波, 等. 强还原方法对退化设施蔬菜地土壤的修复. *应用生态学报*, 2013, 24 (9) : 2619—2624. Zhu T B, Meng T Z, Zhang J B, et al. Effects of strong reductive approach on remediation of degraded facility vegetable soil (In Chinese). *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2013, 24 (9) : 2619—2624
- [10] 朱同彬, 张金波, 蔡祖聪. 淹水条件下添加有机物料对蔬菜地土壤硝态氮及氮素气体排放的影响. *应用生态学报*, 2012, 23 (1) : 109—114. Zhu T B, Zhang J B, Cai Z C. Effects of organic material amendment on vegetable soil nitrate content and nitrogenous gases emission under flooding condition (In Chinese). *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2012, 23 (1) : 109—114
- [11] 朱同彬, 孙盼盼, 党琦, 等. 淹水添加有机物料改良退化设施蔬菜土壤. *土壤学报*, 2014, 2014, 51 (2) : 335—341. Zhu T B, Sun P P, Dang Q, et al. Improvement of degraded greenhouse vegetable soil by flooding and/or amending organic materials (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2014, 51 (2) : 335—341
- [12] Katase M, Kubo C, Ushio S, et al. Nematicidal activity of volatile fatty acids generated from wheat bran in reductive soil disinfestation. *Nematological Research*, 2009, 39 (2) : 53—62
- [13] Uematsu S, Tanaka-Miwa C, Sato R, et al. Ethyl alcohol as a promising material of reductive soil disinfestation for controlling root knot nematode and soilborne plant disease//Obenauf G L. Annual international research conference on methyl bromide alternatives and emissions reductions, 2007: 75.1—75.3
- [14] Messiha N A, Diepeningen A D, Wenneker M, et al. Biological soil disinfestation (BSD), a new control method for potato brown rot, caused by *Ralstonia solanacearum* race 3 biovar 2. *European Journal of Plant Pathology*, 2007, 117 (4) : 403—415
- [15] 黄新琦, 温腾, 孟磊, 等. 土壤快速强烈还原对于尖孢镰刀菌的抑制作用. *生态学报*, 2014, 34 (16) : 4526—4534. Huang X Q, Wen T, Meng L, et al. The inhibitory effect of quickly and intensively reductive soil on *Fusarium oxysporum* (In Chinese). *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34 (16) : 4526—4534
- [16] Momma N, Usami T, Shishido M. Detection of *Clostridium* sp. inducing biological soil disinfestation (BSD) and suppression of pathogens causing fusarium wilt and bacterial wilt of tomato by gases evolved during BSD (In Japanese with English summary). *Soil Microorganisms*, 2007, 61: 3—9
- [17] Huang X Q, Wen T, Zhang J B, et al. Toxic organic acids produced in biological soil disinfestation mainly caused the suppression of *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense*. *BioControl*, DOI: 10.1007/s10526-014-9623-6
- [18] Momma N, Yamamoto K, Simandi P, et al. Role of organic acids in the mechanisms of biological soil disinfestation (BSD). *Journal of General Plant Pathology*, 2006, 72 (4) : 247—252
- [19] Momma N, Usami T, Amemiya Y, et al. Factors involved in the suppression of *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici* by soil reduction (In Japanese with English summary). *Soil Microorganisms*, 2005, 59: 27—33
- [20] Momma N, Kobara Y, Momma M. Fe²⁺ and Mn²⁺ potential agents to induce suppression of *Fusarium oxysporum* for biological soil disinfestation. *Journal of General Plant Pathology*, 2011, 77 (6) : 331—335
- [22] Kirkegaard J A, Wong P T W, Desmarchelier J M. *In vitro* suppression of fungal root pathogens of cereals by *Brassica* tissues. *Plant Pathology*, 1996, 45 (3) : 593—603
- [22] Larkin R P, Griffin T S. Control of soilborne potato diseases using *Brassica* green manures. *Crop Protection*, 2007, 26 (7) : 1067—1077
- [23] Mowlick S, Yasukawa H, Inoue T, et al. Suppression of spinach wilt disease by biological soil disinfestation incorporated with *Brassica juncea* plants in association with changes in soil bacterial communities. *Crop Protection*, 2013, 54: 185—193
- [24] Ramirez R A, Henderson D R, Riga E, et al. Harmful effects of mustard bio-fumigants on entomopathogenic

- nematodes. *Biological Control*, 2009, 48 (2) : 147—154
- [25] Mowlick S, Hirota K, Takehara T, et al. Development of anaerobic bacterial community consisted of diverse clostridial species during biological soil disinfestation amended with plant biomass. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2012, 58 (3) : 273—287
- [26] Ju X T, Kou C L, Zhang F S, et al. Nitrogen balance and groundwater nitrate contamination: Comparison among three intensive cropping systems on the North China Plain. *Environmental Pollution*, 2006, 143 (1) : 117—125
- [27] Shi W M, Yao J, Yan F. Vegetable cultivation under greenhouse conditions leads to rapid accumulation of nutrients, acidification and salinity of soils and groundwater contamination in South-Eastern China. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2009, 83 (1) : 73—84
- [28] 李刚, 张乃明, 毛昆明, 等. 大棚土壤盐分累积特征与调控措施研究. *农业工程学报*, 2004, 20 (3) : 44—47. Li G, Zhang N M, Mao K M, et al. Characteristics of soil salt accumulation in plastic greenhouse and its control measures. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2004, 20 (3) : 44—47
- [29] McCarty D G. Anaerobic soil disinfestation: Evaluation of anaerobic soil disinfestation (ASD) for warm-season vegetable production in tennessee. Master's Thesis, Tennessee, USA: University of Tennessee, 2012
- [30] Zhu T B, Dang Q, Zhang J B, et al. Reductive soil disinfestation (RSD) alters gross N transformation rates and reduces NO and N₂O emissions in degraded vegetable soils. *Plant and Soil*, DOI: 10.1007/s11104-014-2160-3
- [31] Kobara Y, Uematsu S, Tanaka-Miwa C, et al. Possibility of the new soil fumigation technique with ethanol solution//Obenauf G L. Annual international research conference on methyl bromide alternatives and emissions Reductions, 2007: 74.71—74.72
- [32] Shennan C, Muramoto J, Lamers J, et al. Anaerobic soil disinfestation for soil borne disease control in strawberry and vegetable systems: Current knowledge and future directions. *ISHS Acta Horticulturae 1044: VIII International Symposium on Chemical and Non-Chemical Soil and Substrate Disinfestation*, 2014: 165—175
- [33] Zhu T B, Zhang J B, Yang W Y, et al. Effects of organic material amendment and water content on NO, N₂O, and N₂ emissions in a nitrate-rich vegetable soil. *Biology and Fertility of Soils*, 2013, 49: 153—163

APPLICATION OF REDUCTIVE SOIL DISINFESTATION TO SUPPRESS SOIL -BORNE PATHOGENS

Cai Zucong Zhang Jinbo Huang Xinqi Zhu Tongbin Wen Teng

(*Jiangsu Center for Collaborative Innovation in Geographical Information Resource Development and Application, School of Geography Science, Nanjing Normal University, Nanjing 210046, China*)

Abstract With farming cultivation increasing steadily in intensiveness, obstacles to successive cropping, such as soil-borne pathogens, soil acidification, secondary salinization and unbalanced nutrient supply, occur more frequently, and seriously sabotage sustainability of the intensive agriculture. The threat is even more serious in China due to excessive application of N fertilizers and farmers' poor knowledge about intensive agriculture. Firstly developed in Japan and the Netherlands in the early 2000's as an alternative of chemical soil disinfestation and named as biological soil disinfestation (BSD) or reductive soil disinfestation (RSD) in Japan or anaerobic soil disinfestation (ASD) in the Netherlands and the USA, the method is now being widely applied in these countries. RSD refers to the pre-planting soil treatment method, i.e. applying decomposable organic materials at a very high rate to the soils infested with soil-borne pathogens, flooding or irrigating the field to water saturation, and mulching the field with plastic film to limit gas exchange between the soil and the atmosphere and create the soil in a very intensively reductive state for a short period of time (a few days). The method can be conducted in the fallow season between two crops when temperature is

higher than 25 °C and the treatment usually lasts 2 ~ 4 weeks mainly depending on temperature, amount of the organic material applied, and population of pathogens. The researches have demonstrated that the method controls a broad-spectrum of pests and is an alternative to chemical fumigation with gaseous pesticides, such as methyl bromide, effective to eliminate or reduce the populations of fungal and bacterial pathogens and root-knot nematodes. The mechanisms of RSD for disinfestation include: 1) creating an anaerobic condition that kills aerobic soil-borne pathogens; 2) producing substances harmful and toxic to the pathogens during the treatment period; and 3) altering structure of the soil microbial community and inhibiting the activity of soil-borne pathogens. Besides, the RSD method has some effects of increasing soil pH and alleviating soil secondary salinization, and its application is universal and environment-friendly. An introduction is presented in the paper to the development, mechanisms for suppressing soil-borne pathogens and remediation of acidified or secondarily salinized soils, and factors influencing the effectiveness of the RSD method and prospects of the application of the method as well.

Key words Reductive soil disinfestation; Successive cropping obstacle; Recycling of organic wastes; Mechanisms of the functions

(责任编辑: 卢 萍)