

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2020.04.004

孙喜军, 吕爽, 高莹, 等. 蚯蚓粪对作物连作障碍抑制作用研究进展. 土壤, 2020, 52(4): 676–684.

蚯蚓粪对作物连作障碍抑制作用研究进展^①

孙喜军¹, 吕爽^{1*}, 高莹², 蔡苗¹, 王小荣¹

(1 西安市农业技术推广中心, 西安 710061; 2 咸阳职业技术学院, 陕西咸阳 712000)

摘要: 随着集约化生产的进一步发展, 连作障碍已成为制约我国一些地区种植业可持续发展的瓶颈问题。蚯蚓粪是一种优质的有机肥, 目前已成功应用于连作障碍防治, 并取得了一定的研究成果。本文简要介绍了蚯蚓粪的理化性质和生物学性质, 综述概括了其在抑制连作障碍方面的研究进展, 并对以后的研究提出了展望, 以期能为作物连作障碍综合防治提供一定的参考。

关键词: 蚯蚓粪; 连作障碍; 抑制作用

中图分类号: S141 **文献标志码:** A

Research Progresses on Inhibition Effect of Vermicompost to Continuous Cropping Obstacles

SUN Xijun¹, LÜ Shuang^{1*}, GAO Ying², CAI Miao¹, WANG Xiaorong¹

(1 Xi'an Agricultural Technology Extension Center, Xi'an 710061, China; 2 Xianyang Vocational Technical College, Xianyang, Shaanxi 712000, China)

Abstract: With the further development of intensive production, continuous cropping obstacles have become a bottleneck of the sustainable development of planting in some regions of China. As a favorable organic fertilizer, currently the vermicompost has been successfully applied to the prevention and control of continuous cropping obstacles, and also achieved some research achievements. In this paper, the physicochemical and biological properties of vermicompost were introduced, some research progresses on the inhibition effect of vermicompost to the continuous cropping obstacles were summarized, and also the future research was prospected. It's hoped that this paper could provide a certain reference for the comprehensive control of continuous cropping obstacles.

Key words: Vermicompost; Continuous cropping obstacles; Inhibition

连作障碍, 即同种作物或近缘作物在同一块土地上连续种植两茬以上后, 即使采用常规栽培管理措施也会出现作物生长环境恶化和生长发育异常的现象^[1-2]。作物连作障碍问题由来已久, 空间分布极为广泛, 涉及作物众多, 且产生危害较为严重。从时间上看, 古希腊植物学家 Theophrastus 早在公元前 300 年就已记录了连作障碍, 而我国于公元 540 年成书的《齐民要术》也涉及了连作障碍内容^[3]; 从空间上看, 连作障碍在世界各国普遍发生, 我国称这类问题为“重茬问题”, 欧美国家称其为“再植病害”或“再植问题”^[4], 日本则称之为“连作障碍”或“忌地现象”^[5]; 从涉及作物种类上看, 连作障碍广泛发生于经济作物、药用作物、粮食作物和林(果)木等的

生产中, 尤以经济作物和药用作物连作障碍发生最为严重和普遍; 从产生的危害来看, 连作常会导致土壤板结和次生盐渍化、作物生理病害加重、植株生长发育异常、果实品质变劣和产量下降等^[1-2]。

作物连作障碍产生原因极为复杂, 其是由土壤、作物等诸多因素综合作用产生的结果。关于连作障碍产生机制, Plenk^[6]于 1795 年提出了“毒素”学说, Molish^[7]于 1937 年提出了作物“相生相克”学说, 1983 年日本的泷岛^[5]又归纳提出“五大成因”学说。近年来, 国内外学者分别从土壤肥科学、微生物学和栽培学等多个学科入手, 对作物连作障碍产生机制进行了深入研究。总体看来, 连作障碍产生机制可归结为以下 5 种学说: ①“土壤理化性质恶化”学说^[1]。

①基金项目: 陕西省重点研发计划项目(2018ZDCXL-N-19-1)、西安市科技局设施农业新技术研究项目(NC1504)、西安市科技局软科学研究项目(2017145SF/WM036)和咸阳职业技术学院大学生科技创新研究项目(2017XS-3)资助。

* 通讯作者(gracelv79@163.com)

作者简介: 孙喜军(1985—), 男, 甘肃庆阳人, 硕士, 农艺师, 主要从事耕地质量保护与提升方面的研究。E-mail: jlusxj@126.com

该学说认为长期连作导致土壤出现板结、酸化和次生盐渍化等问题,通气透水性变差,直接负面影响作物生长。②“土壤养分比例失衡”学说^[8]。该学说认为作物长期连作条件下,因作物根系对营养元素的选择性单一吸收,导致土壤营养元素比例失衡,进而对作物的生长产生不利影响。③“土壤生物学环境恶化”学说^[5,9-11]。该学说认为长期连作导致土壤酶活性降低、土壤微生物区系失衡及土传病虫害加深等,从而对作物生长产生不利影响。④“化感作用”学说^[12]。目前有两种认识:一种认为根系分泌物(如酚酸类物质)是连作障碍的直接“罪魁祸首”^[5],且根系分泌物之间存在增效作用(单一物质不起作用,两者以上才能表现出作用)和拮抗作用(单一物质起作用,两种以上作用弱化)^[13-14]。另一种认为,作物根系分泌的化感物质仅仅是连作障碍的前提条件,化感物质进一步诱导调控土壤微生物区系发生改变才是连作障碍的“元凶”^[2-3]。如:Li等^[2]的研究指出,连作花生根系持续分泌的化感物质并不直接产生毒害作用,而是通过改变土壤微生物区系间接来实现的,连作年限越长,土壤中的酚酸量越多,土壤微生物中真菌数量增多,而细菌和放线菌数量明显减少,土壤微生物区系发生改变。Qu和Wang^[15]也指出,连作过程中由于酚酸物质积累,导致土壤微生物区系发生改变,进而对连作地黄种植生长产生影响。⑤“根际微生态失衡”学说^[16]。该理论认为根际作为植物、土壤和微生物相互作用的重要界面,是物质和能量交换的节点。连作引起的土壤理化性质改变及作物根系分泌物和残茬引起的根际土壤微生态变化均可导致连作障碍发生^[16]。

连作障碍是长期困扰国内外农业生产的复杂问题之一,寻求克服或缓解连作障碍措施已成为亟待解决的问题。纵观连作障碍机制研究历史,目前研究已经从传统的单因子拓展到多因子,但由于作物连作障碍影响因子众多,形成机理复杂,克服连作障碍技术体系的建立、完善尚需进一步研究。目前生产上解决连作障碍的对策主要包括改善土壤理化性状、轮作换插、间作套种、土壤消毒灭菌、抗性品种选育和生物防治等方法^[1],其中轮作换茬是最为简单经济和行之有效的措施之一。然而伴随现代种植业的快速发展,在经济利益驱动以及农户种植习惯、耕地资源、气候条件等因素的共同影响下,农业生产中的连作(尤其是经济作物的设施栽培)趋势日益严重,已经成为制约部分地区种植业可持续发展的瓶颈问题。据报道,我国部分植棉区棉花的

连作面积高达60%~70%,最长连作年限甚至达到30 a,连作障碍导致的棉花产量和品质下降已经成为当地棉花产业的一大制约因素^[17]。近年来,经过学者的不懈探索和研究,以有机肥为代表的有机改良剂已成为防治作物连作障碍的重要措施。蚯蚓粪由于其在改善土壤物理、化学和生物学性质等方面的优势以及较强的实际可操作性,目前已将其成功应用于作物连作障碍防治并取得了一定的研究成果。本文简要介绍了蚯蚓粪的性质,综述概括了其在抑制连作障碍方面的研究进展,并对以后的研究提出了展望,以期能为作物连作障碍综合防治提供一定的参考。

1 蚯蚓粪性质

1.1 蚯蚓粪生产过程

蚯蚓粪是蚯蚓对有机废弃物进行生物降解的产物。农业生产中,蚯蚓粪又是一种将植物营养、生物活性激素和植物保护融为一体的优质高效有机肥料和土壤改良剂。目前市场上利用自动化连续生物反应器来规模化高效生产蚯蚓粪;蚓种选择以赤子爱胜蚓等表层种蚯蚓为主;饵料来源包括畜禽粪便、农作物秸秆、城市垃圾与生活垃圾、有机污泥等有机废弃物,尤以畜禽粪便(牛粪)最为常见。蚯蚓粪的理化性质和生物学性质在很大程度上由蚯蚓性质、饵料性质及蚯蚓消化程度等因素所决定^[18],其营养物质含量主要取决于饵料。

1.2 蚯蚓粪性质

蚯蚓粪是一种质地均一且具有自然泥土气味的黑(灰)色细碎类物质,团粒结构和毛管孔隙发育良好,通气、排水和保水性俱佳,比表面积较大^[19-21]。蚯蚓粪趋于中性,可溶性盐含量、阳离子交换量和腐殖酸含量较高^[22],且具有较高的稳定性、较强的吸附性能和缓冲能力以及较好的保肥供肥性能。蚯蚓粪富含细菌、真菌和放线菌等大量微生物和氨基酸、多糖、维生素等大量生物活性物质^[18],同时蚯蚓粪中还含有过氧化物酶、蛋白酶、脱氢酶等活性酶^[23]和赤霉素、生长素、细胞分裂素等植物激素^[24],可加速营养物质的转化,高效促进作物生长。

2 蚯蚓粪对作物连作障碍抑制作用研究进展

蚯蚓粪具有特殊的理化性质和生物学性质,施入土壤后能优化普通土壤理化性质和生物学性质,促进作物生长,改善品质和降低病虫害发病率,且在连作环境下仍具有这种功效。

2.1 对连作土壤性质的改良

2.1.1 对连作土壤理化性质的改良 蚯蚓粪能改良连作土壤物理性质和农化性质。相关研究表明,连作土壤施用适量蚯蚓粪,不仅能降低土壤容重,增加土壤总孔隙度和微团聚体数量,优化土壤的通气性能,解决土壤板结等问题^[25],而且还能显著增加连作土壤中有机质、全氮和氮磷钾有效养分以及中微量元素含量,调节土壤酸碱度,降低总盐分和电导率^[26-29],一定程度上缓解土壤酸化、盐渍化及养分比例失衡等问题,抑制连作障碍发生发展。蚯蚓粪能改良土壤物理性质和农化性质,这源于其富含的有机物质、土壤酶和有益微生物。有机质不仅是保持土壤良好理化性状和生物学性状的必要条件,而且是作物营养的重要来源^[30]。蚯蚓粪富含有机质^[20],且有机质中含有大量的氮、磷、钾和多种微量元素。当蚯蚓粪施入土壤后,伴随有机质的逐步矿化,其中的养分以一定的速率不断释放出来,可直接为作物提供全面丰富的养分。而且有机质在分解转化过程中产生的多种有机酸对土壤矿质部分也有一定的溶解能力,可以促进矿化作用,释放和增加土壤有效养分。蚯蚓粪还含有大量的腐殖质^[22],其在土壤遇到钙离子就会和黏土粒凝聚成稳定的团粒结构,极大改善土壤的透水性、蓄水性、通气性以及根系的生长环境。此外,腐殖质中的有机无机复合体还是消除许多作物化感自毒物质(如酚酸类物质)的自然装置^[31]。腐殖质中主要活性部分为腐殖酸,腐殖酸在提高土壤腐殖物质含量的同时还提高了其对酸碱度变化的缓冲性能。同时,蚯蚓粪中富含淀粉酶、纤维素酶、脂肪酶等多种酶,而且都具有较高的活性,这些酶在土壤养分转化利用过程中起着十分重要的作用^[23]。蚯蚓粪中的微生物在养分循环利用中也起着十分重要的作用。例如,蚯蚓粪中的固氮菌能固定空气中的氮,合成蛋白质,在土壤中积累大量氮素,从而被作物吸收利用;好气菌能分解腐殖质也可供作物吸收利用;硝化细菌对腐生菌有辅助和配合作用,把腐生菌分解有机肥料时产生的氨转化成对作物有效的硝酸盐,大大提高作物养分利用率。

2.1.2 对连作土壤生物学性质的改善 蚯蚓粪能改善连作土壤微生物区系和酶活性。当蚯蚓粪施入土壤后,土壤微生物区系发生变化,真菌数量与细菌数量的比值呈现下降趋势,土壤由“真菌型”向“细菌型”转变,连作障碍有所缓解^[32]。赵凤艳等人^[33]研究发现,蚯蚓粪施入设施番茄连作土壤后,土壤真菌门级优势菌(如担子菌门)相对丰度比空白对照降低

了 18%。另外,蚯蚓粪施入连作土壤后还能不同程度提高连作土壤中的多酚氧化酶、蔗糖酶、脱氢酶、过氧化氢酶和尿酶的活性^[34-35],进而促进养分循环,提高土壤肥力。Zhao 等人^[24]研究指出,在温室黄瓜连作条件下,施用蚯蚓粪基肥可以提高黄瓜产量和品质,并减少有益真菌和致病真菌的相对丰度,但这对根际土壤微生物群落有着积极的影响。蚯蚓粪能改善土壤微生物区系,这与其自身含有的拮抗微生物密切相关^[18]。Li 等人^[11]通过大田试验发现,长期的花生连作会改变土壤生物群落组成,病原真菌的增加是以牺牲土壤中一些拮抗性有益菌群为代价的。而当蚯蚓粪施入土壤后,其中的拮抗微生物可通过营养竞争、抗生、寄生(捕食)等方式,直接调节土壤中的微生物种群和数量^[18],抑制连作障碍的发生。同时,蚯蚓粪富含多种酶,一方面可直接提高土壤酶的活性,另一方面蚯蚓粪中富含的淀粉酶、脂肪酶和纤维素酶还能促进土壤中有机物质的分解和养分循环,进而提高土壤脱氢酶、酸性磷酸酶、碱性磷酸酶和尿酶等一些重要土壤酶的活性^[36]。田给林等^[34]指出,蚯蚓粪含有能降解连作根际土壤酚酸含量的微生物可能是其促进土壤尿酶等酶活性增加的原因之一。综合看来,蚯蚓粪对连作土壤生物学性质的改善主要通过 3 种途径实现:第一种为利用自带的多种微生物直接参与土壤生物学性质改善活动;第二种为通过调控土壤中的微生物区系来间接改善土壤微生物学性质;第三种为利用自带的土壤酶等生物活性物质,通过调控一系列生化过程来达到改善土壤生物学性质的目的。

2.2 对连作作物生长的促进和果实品质的改善

连作土壤施用适量蚯蚓粪对作物生长有着积极的影响。连作土壤施用适量蚯蚓粪:可提高作物出苗率,促进根、茎、叶等的生长,增加地上部和地下部生物量,显著提高作物农艺性状指标^[37-40];可提高果实维生素 C 和可溶性糖含量,降低硝酸盐含量及总酸度,增大糖酸比,明显改善品质^[37-39];可增加果实鲜重与干重以及果实数量,提高产量^[41]。蚯蚓粪对作物的促生作用不仅与自身富含的营养物质有关,而且与其自身“携带”的大量生物活性物质有关。蚯蚓粪自身“肥得流油”,其中作物生长所需的大量元素(氮、磷、钾等)和微量元素(铁、锰、锌、铜、硼等)不仅在蚯蚓粪中都有,而且含量较高^[42-43],例如:全氮、有效磷、速效钾含量分别高出一般土壤含量的 1 倍~14 倍、10 倍~17 倍和 8 倍~11 倍。当蚯蚓粪施入土壤后,其首先充当作物生长的“营养源”。蚯蚓粪富含腐殖酸,其被证明是一类生理活性物质^[40]。

Atiyeh 等^[44]的研究表明,将从蚯蚓粪中浸提的腐殖酸加入到栽培基质中,可显著增加西红柿和黄瓜的株高、叶面积和根干重等指标。García 等^[45]的研究也发现,蚯蚓粪中的腐殖酸可促进水稻根系生长。蚯蚓粪中含有的植物激素^[46-47]包括赤霉素、生长素、细胞分裂素等,目前已经有研究证实蚯蚓粪提取液中的植物激素可以显著促进作物生长^[48-49]。同时,蚯蚓粪中还含有维生素和 16 种氨基酸^[50],这些活性物质在作物新陈代谢中发挥着重要作用,直接影响着作物的生长、产量和品质。另外,蚯蚓粪中的有益微生物大量繁殖后产生多糖,多糖与作物分泌的黏液及矿物胶体、有机胶体相结合后,可在幼龄、尚未木栓化的根表面形成不连续的膜,保护根系免受病原微生物的入侵,提高抗病性^[18, 30]。总体来看,蚯蚓粪对作物生长和果实品质的改善,主要是通过 3 种途径实现:一是其作为“营养源”直接提供营养,促进作物生长和品质改善;二是通过自身含有的腐殖酸、植物激素以及氨基酸等活性物质调控作物新陈代谢,达到促生的目的;三是通过自有的微生物发挥作用。

2.3 对连作土壤土传病虫害的抑制

绝大部分连作障碍是由土传病害引起的^[5],研究表明,蚯蚓粪对连作障碍中的土传病害具有较好的抑制作用。Szczech 等^[51]指出,添加蚯蚓粪可抑制镰刀菌属病原菌对西红柿的感染。Yasir 等^[52]研究发现,蚯蚓粪浸提液能有效抑制镰刀菌孢子的萌发。蚯蚓粪还可以用来缓解(抑制)番茄的枯萎病和紫色甘蓝的根腐病^[51],小麦的丝核菌根腐烂病^[53],黄瓜的网斑病、枯萎病、立枯病和炭疽病^[54-56],西瓜的枯萎病^[57]等土传病害。蚯蚓粪对土传病害的抑制作用与其中含有的拮抗微生物关系密切^[56]。胡艳霞等^[56, 58]从新鲜蚯蚓粪中成功分离到两株拮抗活性强、抗菌性广的放线菌——球孢链霉菌(*Streptomyces globisporus*)和丁香苷链霉菌(*Streptomyces syringini*),抑菌试验表明,两株拮抗菌在蚯蚓粪对蔬菜苗期病害的控制中起重要作用,并解释蚯蚓粪中的拮抗微生物通过启动黄瓜体内的防御酶系,诱导黄瓜产生炭疽病系统抗性,从而控制病害发生。刘丽和张艳菊^[59]以及王莹^[60]也从新鲜蚯蚓粪中分离得到对黄瓜枯萎病有拮抗活性的洋葱伯克霍尔德菌(*Burkholderia cenocepacia*),并通过盆栽试验说明此拮抗菌对黄瓜枯萎病防治具有良好的效果。另外,刘雪连等^[61]利用 SL 培养基从蚯蚓粪中分离得到 54 株具有产酸性能的菌株,其中 6 个菌株对大肠杆菌具有拮抗作用;汪学军等^[62]采用琼脂法初步研究了蚯蚓粪中放线菌的抗菌活性,发现教

酒链霉菌(*Streptomyces chartreusis*)和吸水链霉菌奥萨霉菌素亚种(*S. ossamyceticus*)对藤黄八叠球菌(*Micrococcus luteus*)有较强的拮抗作用,灭癌素链霉菌(*S. gancidicus*)对枯草芽孢杆菌(*Bacillus subtilis*)具有较强的拮抗作用。这些研究都为以后分离抗菌物质用于防治病害奠定了一定的理论基础。目前学者认为蚯蚓粪抑制土传病害的机理主要包括“一般性抑制”和“特殊性抑制”两种机制^[18]。“一般性抑制”又称间接抑制,是指引起土传病害的微生物属于营养依赖型病原菌,当蚯蚓粪施入土壤后会迅速对土壤中有机营养物质的活性进行调控,病原菌的繁殖体由于得不到足够的营养而不能生长繁殖,从而抑制病原菌对连作作物根系的伤害。这种类型的抑制通常不会完全控制病害的发生,但能使病害程度降到最低限度。“特殊性抑制”也称直接抑制,这种抑制作用与蚯蚓粪中含有的拮抗微生物密切相关。例如已经鉴定的拮抗微生物有球孢链霉菌和丁香苷链霉菌^[56],链霉菌能产生抗生素及其他次生代谢物,并利用可溶性有机质产生胞外水解酶,通过渗入介质中的菌丝将所分泌的水解酶集结为很高的浓度,使其自身在土壤中具有很强的竞争力,从而抑制其他病害菌的繁殖,丰富土壤中拮抗微生物,减少土传病害发生。一般而言,两种机制在蚯蚓粪对病害的控制中均起作用^[18]。

连作障碍的土传虫害主要表现为线虫危害,尤其是根结线虫的危害。Edwards 和 Arancon^[63]、Arancon 等^[64]、Sarma 等^[65]的研究表明,添加适量蚯蚓粪可以显著减少作物寄生线虫的数量,降低作物的感染率。申飞等人^[66]在设施番茄地土壤线虫群落的研究中发现,与单施化肥相比,单施蚯蚓粪显著降低了食细菌线虫的比例。同时, Xiao 等^[67]研究指出,蚯蚓粪主要通过调节土壤性质和提高作物抗病性两种方式抑制根结线虫对番茄植株的危害。

2.4 对作物化感自毒作用的调控

酚酸类化感物质被公认为一些作物根系分泌物中的主要化感因子,其能在一定程度上诱导黄瓜等作物连作障碍的发生^[68-69],从而影响作物健康生长。总体来看,目前蚯蚓粪对化感作用调控方面的研究并不是特别多,具体机制尚不清楚。许永利^[57]探讨了连作环境中蚯蚓粪与酚酸物质的相互作用,指出外源酚酸添加到新鲜蚯蚓粪后,酚酸(丁香酸、香豆酸)降解效果明显,且不同酚酸比例发生变化,并将这种结果归因为蚯蚓粪对酚酸的降解和吸附。田给林等^[37,70]的研究表明,放殖蚯蚓能显著降低作物残体腐解产生的酚酸类化感物质浓度,从而缓解化感自毒作用;在

草莓连作土壤中施用蚯蚓粪,既可降解根际土壤酚酸,又能促进作物根系生长,从而达到抑制连作障碍的目的;蚯蚓粪可降解根际土壤酚酸,这可能源于蚯蚓粪中含有的能促进酚酸降解的微生物。分析认为,蚯蚓粪对酚酸类化感物质的调控,一方面可能是通过自身含有的腐殖质等物质的强大吸附作用来实现的;另一方面,由于蚯蚓粪中含有大量微生物,蚯蚓粪降解酚酸主要是通过某些特殊的微生物来实现的。总之,蚯蚓粪在缓解作物根系中化感自毒作用的潜力已经初步显现出来,但具体的调控机制尚需进一步的研究才能证实。

2.5 联合其他措施共同防治连作障碍的效果研究

田给林等^[37,70]的研究表明,土壤灭菌后施用蚯蚓粪能有效缓解连作障碍中的酚酸化感效应,促进草莓植株生长。Parle^[54]指出,与单独使用杀真菌剂相比,蚯蚓粪和杀菌剂一起施用能明显降低黄瓜的网斑病发生。许永利^[57]指出,蚯蚓粪+生防菌调控连作障碍的作用是协调的,但这种作用需长期多次使用后方能体现。总体看来,施用蚯蚓粪与灭菌等措施同时进行在一定程度上对连作障碍的防治功效具有同步性。另外,申飞等^[66]的研究表明,与单施蚯蚓粪或化肥或化肥配施益生菌相比,蚯蚓粪配施益生菌能够减缓植食性线虫增长,保持土壤环境健康和线虫群落稳定。同时,毛凯伦等^[71-72]的研究表明,与单施蚯蚓粪或单施腐殖酸相比,蚯蚓粪与腐殖酸混施(蚯蚓粪 1 800 kg/hm²和腐殖酸 600 kg/hm²)对改良烟田连作土壤性状和提高烤烟产质量效果较好,同时发现蚯蚓粪与酒糟混施(蚯蚓粪 1 800 kg/hm²+酒糟 600 kg/hm²)相比两者单施改良效果更好。尹恩等^[73]研究表明,蚯蚓粪(50%)与丛枝菌根真菌混施能有效降低生姜连作病害,提高生姜产量。另外,植株定植前还可利用蚯蚓粪复合基质培育抗病性较强的健康壮苗,从而抑制连作障碍的发生。有研究表明^[38,74],利用蚯蚓粪复合基质培育出的早期幼苗长势较好,农艺性状指标均显著提高,且移栽于连作土壤后,植株死亡率低,品质显著高于其他处理。

2.6 蚯蚓粪施用方法研究

蚯蚓粪对连作障碍的防治程度与其用量存在一定关系。Szczech^[75]研究表明,泥炭土生长介质中加入不同量蚯蚓粪后,番茄以及紫色甘蓝的土传真菌病害受到不同程度抑制,且抑制病害程度随蚯蚓粪加入量的增加而增大。Kashem 等^[76]的研究表明,随着蚯蚓粪施用量增加,番茄的产量和品质也逐步上升。但大量研究表明,随着蚯蚓粪用量的增加,连作障碍抑

制效果并不是持续上升,而是呈现先上升后下降的“马鞍形”变化,且较低比例的蚯蚓粪抑制连作障碍效果更为明显,但这一最佳比例会随作物种类发生变化,目前尚无统一意见。胡艳霞等^[55]的研究表明,当蚯蚓粪体积浓度为 20% 时,控制黄瓜病害的程度最大,防效达 96.1%;而张永平等^[39]则认为 6% 的蚯蚓粪浓度能更好缓解花生连作障碍;尹恩等^[25]在研究生姜连作障碍时发现,当蚯蚓粪浓度为 50% 时,姜瘟病发病率最低,病情指数最小,生姜生长指标最好,产量最高。

蚯蚓粪不宜保存过久,否则肥效下降明显。施用蚯蚓粪时,应尽可能使用新鲜的,而且最好是经过短期发酵的。发酵可使其中不够腐熟的粪料彻底熟化,使有益微生物增殖更多,肥效也会更高。蚯蚓粪一般经过简单的风干过筛处理即可施用,也可将蚯蚓粪制成粒肥或者水溶肥施用^[77],更有研究报道将蚯蚓粪浸提液作为浸种剂^[78]或者将浸提液直接加入土壤中以防止根结线虫^[79]。蚯蚓粪施用方法与一般有机肥和化肥大同小异,常用的方法有底施法、沟施法和地面撒施法。滕明姣等人^[80]的研究结果表明,蚯蚓粪集中施用更能发挥其功效。大田种植时,一般将蚯蚓粪作为基肥一次性施入土壤。同时注意,蚯蚓粪是一种缓释性肥料,必须酌情添加氮、磷、钾等速效肥料^[81]。研究发现,连作烟区施用基肥时用蚯蚓粪替代 30% 化肥的处理能有效改良植烟连作土壤,提升烟叶品质并实现化肥减施增效^[82]。

2.7 蚯蚓粪的生态安全问题

蚯蚓粪本身成分复杂,例如,不同饵料蚯蚓粪可能含有一些特殊成分,如有机污泥含有重金属离子,长期不当使用以有机污泥为来源的蚯蚓粪势必会造成土壤中重金属积累,进而危害作物生长和人类健康。蚯蚓粪中含有多种微生物,既有大量有益微生物,也有大量有害微生物,而目前对蚯蚓粪中微生物的研究并不是特别多,造成其中的有害微生物对土壤及作物的影响并不是特别清楚,存在一定的安全风险。蚯蚓粪中含有多种有机酸,如丁酸、丙酸等,已有研究表明,有机酸能抑制种子萌发,伤害作物幼根,影响植株生长^[83]。蚯蚓粪不仅成分较为复杂,且性质易受堆制过程中的环境因素和蚓种等的影响,但国内蚯蚓粪行业至今尚无统一标准,不同企业生产的蚯蚓粪性质差别较大,整体市场有待进一步规范。

设施农业连作过程中土壤硝酸盐含量会明显增加,导致土壤盐渍化问题突出。Atiyeh 等^[84]、Doan 等^[85]的研究表明,随着蚯蚓粪用量的增加,土壤中

NO₃ 含量呈线性增加; 陈小锦^[86]在红壤中添加不同用量的蚯蚓粪时也发现, NO₃ 含量随蚯蚓添加量显著升高。这说明蚯蚓粪有加重连作土壤硝酸盐的潜在风险。分析原因, 一方面蚯蚓粪本身含有硝酸盐; 另一方面, 蚯蚓粪会促进土壤中的硝化作用, 最终将使土壤中 NO₃ 含量增加。土壤中适量的 NO₃ 会有利于植物根系营养吸收, 但过量的 NO₃ 将会抑制植物根系营养吸收, 导致土壤的电导率升高, 加重连作障碍。所以在具体生产过程中, 务必注意蚯蚓粪不合理施用所引起的 NO₃ 含量增加的问题。

针对蚯蚓粪对土壤酸碱性的影响, 前人开展过系列研究, 但结果并不一致。张聪俐等^[87]的研究表明, 蚯蚓粪施入土壤后土壤 pH 升高; 但 Manivannan 等^[88]的研究表明, 蚯蚓粪施入土壤后, 土壤 pH 随蚯蚓粪用量增加而下降。而 Fernández 等^[89]的研究表明, 施用蚯蚓粪可以使碱性土壤和酸性土壤的 pH 趋于中性。Mitchell 和 Alter^[90]则指出蚯蚓粪可以减少土壤的交换态铝, 调节酸性土壤的 pH, 从而达到改良酸性土壤的作用。分析认为, 蚯蚓粪对土壤 pH 的影响, 一方面取决于饵料及自身性质, 另一方面还取决于土壤酸碱度和性质。在农业生产中, 针对不同连作土壤和作物, 为取得良好效果, 应对不同饵料的蚯蚓粪有所区分。

3 总结与展望

蚯蚓粪作为一种高效有机肥, 最大的特点是将有机物、微生物、生长因子三者合理结合起来, 更好改善土壤生态环境, 最终达到增肥、抗病、养土的目的, 使作物病更少、果更香、瓜更甜。蚯蚓粪在抑制作物连作障碍方面, 尤其是在抑制土传病害方面的独特良好功效, 使其具备在农业生产中大面积推广应用的可能。但目前研究还存在以下问题: ①蚯蚓粪对连作障碍的抑制作用研究目前主要局限于土壤生态系统、作物生长发育和病虫害等方面, 尚停留在零散地解释连作障碍的外在表象, 缺乏内部系统性机理探究; ②研究表明, 连作条件下施用蚯蚓粪可调控作物化感自毒物质, 但蚯蚓粪对作物释放的化感物质的具体影响及调控机制研究尚不清楚; ③过高的粪(蚯蚓粪)土比会抑制作物生长, 但不同地区、不同作物连作种植条件下蚯蚓粪的最用量尚不明确; ④蚯蚓粪作为一种有机肥, 肥效缓慢, 为有效抑制连作障碍, 必须配施速效性化肥, 但目前对连作条件下蚯蚓粪和化肥最适配比探讨还很少; ⑤目前绝大部分试验仅限于盆栽, 缺乏长期的大田定位试验数据积累。只有进一步做好以

上工作, 才可能使蚯蚓粪在连作障碍综合防治中得到更好的实际应用。

参考文献:

- [1] 喻景权, 杜尧舜. 蔬菜设施栽培可持续发展中的连作障碍问题[J]. 沈阳农业大学学报, 2000, 31(1): 124-126.
- [2] Li X G, Ding C F, Hua K, et al. Soil sickness of peanuts is attributable to modifications in soil microbes induced by peanut root exudates rather than to direct allelopathy[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2014, 78: 149-159.
- [3] 李孝刚, 张桃林, 王兴祥. 花生连作土壤障碍机制研究进展[J]. 土壤, 2015, 47(2): 266-271.
- [4] Utkhede R S. Soil sickness, replant problem or replant disease and its integrated control[J]. *Allelopathy Journal*, 2006, 18(1): 23-38.
- [5] 泷岛. 防治连作障碍的措施[J]. 日本土壤肥料学杂志, 1983, 26(2): 170-178.
- [6] Plenck J J. *Physiologie und pathologie der pflanzen*[M]. Wien: Wappler, 1795: 1474-1475.
- [7] Molish H B. *Der einfluss einer pflanze auf die andere-allelopathie*[M]. Jena: Verlag von Gustav Fischer, 1937: 13-20.
- [8] 侯慧, 董坤, 杨智仙, 等. 连作障碍发生机理研究进展[J]. 土壤, 2016, 48(6): 1068-1076.
- [9] 尹承苗, 王玫, 王嘉艳, 等. 苹果连作障碍研究进展[J]. 园艺学报, 2017, 44(11): 2215-2230.
- [10] Li X G, Ding C F, Zhang T L, et al. Fungal pathogen accumulation at the expense of plant-beneficial fungi as a consequence of consecutive peanut monoculturing[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2014, 72: 11-18.
- [11] Li C G, Li X M, Kong W D, et al. Effect of monoculture soybean on soil microbial community in the Northeast China[J]. *Plant and Soil*, 2010, 330(1): 423-433.
- [12] 王飞, 李世贵, 徐凤花, 等. 连作障碍发生机制研究进展[J]. 中国土壤与肥料, 2013(5): 6-13.
- [13] Rimando A M, Olofsdotter M, Dayan F E, et al. Searching for rice allelochemicals[J]. *Agronomy Journal*, 2001, 93(1): 16-20.
- [14] 谢星光, 陈晏, 卜元卿, 等. 酚酸类物质的化感作用研究进展[J]. 生态学报, 2014, 34(22): 6417-6428.
- [15] Qu X, Wang J G. Effect of amendments with different phenolic acids on soil microbial biomass, activity, and community diversity[J]. *Applied Soil Ecology*, 2008, 39(2): 172-179.
- [16] 滕应, 任文杰, 李振高, 等. 花生连作障碍发生机理研究进展[J]. 土壤, 2015, 47(2): 259-265.
- [17] 顾美英, 徐万里, 茆军, 等. 新疆绿洲农田不同连作年限棉花根际土壤微生物群落多样性[J]. 生态学报, 2012, 32(10): 3031-3040.
- [18] 胡艳霞, 孙振钧, 程文玲. 蚯蚓养殖及蚓粪对植物土传病害抑制作用的研究进展[J]. *应用生态学报*, 2003, 14(2): 296-300.
- [19] Jongmans A G, Pulleman M M, Balabane M, et al. Soil structure and characteristics of organic matter in two

- orchards differing in earthworm activity[J]. *Applied Soil Ecology*, 2003, 24(3): 219–232.
- [20] 周军. 一种清洁、环保的天然生态有机肥—蚯蚓粪[J]. *西北园艺*, 2004(4): U001.
- [21] Lim S L, Wu T Y, Lim P N, et al. The use of vermicompost in organic farming: overview, effects on soil and economics[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2015, 95(6): 1143–1156.
- [22] Elvira C, Goicoechea M, Sampedro L, et al. Bioconversion of solid paper-pulp mill sludge by earthworms[J]. *Bioresource Technology*, 1996, 57(2): 173–177.
- [23] Lavelle P. Biology and ecology of earthworms[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 1997, 64(1): 78–79.
- [24] Zhao H T, Li T P, Zhang Y, et al. Effects of vermicompost amendment as a basal fertilizer on soil properties and cucumber yield and quality under continuous cropping conditions in a greenhouse[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2017, 17(12): 2718–2730.
- [25] 尹恩, 吴丽丽, 陈毛华, 等. 不同比例蚯蚓粪对生姜连作障碍的影响[J]. *信阳农林学院学报*, 2017, 27(2): 99–102, 106.
- [26] 王胜, 郑仕军, 沈丽, 等. 蚯蚓粪对油菜根肿病的控制效果评价[J]. *西南农业学报*, 2010, 23(6): 1910–1913.
- [27] 王永和, 高亚娟, 李建龙, 等. 蚯蚓粪土壤改良剂克服草莓连作障碍的效果[J]. *江苏农业学报*, 2013, 29(5): 1039–1042.
- [28] 王佩雯, 朱金峰, 任志广, 等. 不同土壤改良剂处理下连作植烟土壤化学性质及土壤酶活性的耦合分析[J]. *中国农业科技导报*, 2017, 19(4): 82–91.
- [29] Gutierrezmiceli F A, Santiagoborraz J, Molina J M, et al. Vermicompost as a soil supplement to improve growth, yield and fruit quality of tomato (*Lycopersicon esculentum*)[J]. *Bioresource Technology*, 2007, 98(15): 2781–2786.
- [30] 黄昌勇, 徐建明. 土壤学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2010.
- [31] Rice E L. Allelopathy[M]. 2nd ed. New York: Academic Press Inc, 1984: 309–315.
- [32] 张俊英, 许永利, 刘志强. 蚯蚓粪缓解大棚黄瓜连作障碍的研究[J]. *北方园艺*, 2010(4): 58–60.
- [33] 赵凤艳, 吴盼盼, 李天来, 等. 蚓粪对设施番茄连作土壤真菌群落结构的影响[J]. *生态学杂志*, 2016, 35(12): 3329–3334.
- [34] 田给林, 严婷婷, 毕艳孟, 等. 草莓连作土壤灭菌与施用有机肥对根际土壤酚酸及土壤酶活性的影响[J]. *园艺学报*, 2015, 42(10): 2039–2048.
- [35] 熊孝楠. 蚓粪用量对设施内番茄连作土壤酶活性的调节[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2016: 20–24.
- [36] Chaoui H I, Zibilske L M, Ohno T. Effects of earthworm casts and compost on soil microbial activity and plant nutrient availability[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2003, 35(2): 295–302.
- [37] 田给林, 张潞生. 蚯蚓粪缓解草莓连作土壤障碍的作用[J]. *植物营养与肥料学报*, 2016, 22(3): 759–767.
- [38] 柏彦超, 周雄飞, 赵学辉, 等. 蚓粪基质克服西瓜连作障碍的应用效果研究[J]. *中国农学通报*, 2011, 27(8): 212–216.
- [39] 张永平, 乔永旭, 赵绪明, 等. 蚯蚓粪作基肥对夏播花生生长与产量的影响[J]. *江苏农业科学*, 2014, 42(8): 97–99.
- [40] Muscolo A, Sidari M, Pizzeghello D, et al. Effects of humic substances isolated from earthworm faeces[J]. *Dynamic Soil Dynamic Plant*, 2009, 32(4): 45–52.
- [41] 吴盼盼, 杨丽娟. 蚓粪对不同连作年限设施番茄生长、品质及产量的影响[J]. *江苏农业科学*, 2017, 45(7): 104–107.
- [42] Hosseinzadeh S R, Amiri H, Ismaili A. Effect of vermicompost fertilizer on photosynthetic characteristics of chickpea (*Cicer arietinum* L.) under drought stress[J]. *Photosynthetica*, 2016, 54(1): 87–92.
- [43] Hosseinzadeh S R, Amiri H, Ismaili A. Evaluation of photosynthesis, physiological, and biochemical responses of chickpea (*Cicer arietinum* L. cv. Pirouz) under water deficit stress and use of vermicompost fertilizer[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2018, 17(11): 2426–2437.
- [44] Atiyeh R M, Lee S, Edwards C A, et al. The influence of humic acids derived from earthworm-processed organic wastes on plant growth[J]. *Bioresource Technology*, 2002, 84(1): 7–14.
- [45] García A C, Santos L A, de Souza L G A, et al. Vermicompost humic acids modulate the accumulation and metabolism of ROS in rice plants[J]. *Journal of Plant Physiology*, 2016, 192: 56–63.
- [46] Tomati U, Grappelli A, Galli E. The hormone-like effect of earthworm casts on plant growth[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 1988, 5(4): 288–294.
- [47] Hemati A, Alikhani H A, Marandi G B, et al. Assessment of the possibility of humic acid extraction from vermicompost with urea// Xu J M, Wu J J, He Y. Functions of natural organic matter in changing environment[C]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2012: 225–228.
- [48] 胡佩, 刘德辉, 胡锋, 等. 蚓粪中的植物激素及其对绿豆插条不定根发生的促进作用[J]. *生态学报*, 2002, 22(8): 1211–1214.
- [49] Muscolo A, Sidari M, Attinà E, et al. Biological activity of humic substances is related to their chemical structure[J].

- Soil Science Society of America Journal, 2007, 71(1): 75–85.
- [50] 陈宝书, 陈本建, 张惠霞, 等. 蚯蚓粪营养成分的研究[J]. 四川草原, 1998(3): 22–24.
- [51] Szczech M, Rondonański W, Brzeski M W, et al. Suppressive effect of a commercial earthworm compost on some root infecting pathogens of cabbage and tomato[J]. Biological Agriculture & Horticulture, 1993, 10(1): 47–52.
- [52] Yasir M, Aslam Z, Kim S W, et al. Bacterial community composition and chitinase gene diversity of vermicompost with antifungal activity[J]. Bioresource Technology, 2009, 100(19): 4396–4403.
- [53] Stephens P M, Davoren C W, Ryder M H, et al. Field evidence for reduced severity of Rhizoctonia bare-patch disease of wheat, due to the presence of the earthworms Aporetodea Rosea and Aporetodea Trapezoides[J]. Soil Biology & Biochemistry, 1994, 26(11): 1495–1500.
- [54] Parle J N. Micro-organisms in the intestines of earthworms[J]. Journal of General Microbiology, 1963, 31(1): 1–11.
- [55] 胡艳霞, 孙振钧, 周法永, 等. 蚯蚓粪对黄瓜苗期土传病害的抑制作用[J]. 生态学报, 2002, 22(7): 1106–1115.
- [56] 胡艳霞, 孙振钧, 孙永明, 等. 蚯蚓粪对黄瓜炭疽病的系统诱导抗性作用[J]. 应用生态学报, 2004, 15(8): 1358–1362.
- [57] 许永利. 蚯蚓粪解除西瓜连作障碍的效果及机理初探[D]. 北京: 中国农业大学, 2006: 18–43.
- [58] 胡艳霞, 孙振钧, 王东辉, 等. 蚯蚓粪中拮抗微生物分析[J]. 应用与环境生物学报, 2004, 10(1): 99–103.
- [59] 刘丽, 张艳菊. 蚯蚓粪中黄瓜枯萎病菌拮抗细菌的筛选及鉴定[J]. 东北农业科学, 2016, 41(3): 57–61.
- [60] 王莹. 蚯蚓粪中黄瓜枯萎病菌拮抗细菌的筛选、发酵条件优化及防治效果[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2015: 20–36.
- [61] 刘雪连, 张宁, 崔东良, 等. 蚯蚓粪中乳酸菌的分离及其在大肠杆菌 O157:H7 中的抗菌活性[J]. 基因组学与应用生物学, 2011, 30(1): 1–6.
- [62] 汪学军, 闫双林, 闵长莉, 等. 蚯蚓粪中放线菌分离及其抗菌活性研究[J]. 中国中药杂志, 2015, 40(4): 614–618.
- [63] Edwards C A, Arancon N Q. Vermicomposts suppress plant pest and disease attacks[J]. Biocycle Journal of Composting & Recycling, 2004, 45(3): 51–54.
- [64] Arancon N, Galvis P, Edwards C, et al. The trophic diversity of nematode communities in soils treated with vermicompost The 7th international symposium on earthworm ecology. Cardiff. Wales. 2002[J]. Pedobiologia, 2003, 47(5–6): 736–740.
- [65] Sarma B K, Singh P, Pandey S K, et al. Vermicompost as modulator of plant growth and disease suppression[J]. Dynamic Soil Dynamic Plant, 2010, 4: 58–66.
- [66] 申飞, 郭瑞, 朱同彬, 等. 蚓粪和益生菌配施对设施番茄地土壤线虫群落的影响[J]. 土壤学报, 2016, 53(4): 1015–1026.
- [67] Xiao Z G, Liu M Q, Jiang L H, et al. Vermicompost increases defense against root-knot nematode (*Meloidogyne incognita*) in tomato plants[J]. Applied Soil Ecology, 2016, 105: 177–186.
- [68] Yu J Q, Matsui Y. Phytotoxic substances in root exudates of cucumber (*Cucumis sativus* L.)[J]. Journal of Chemical Ecology, 1994, 20(1): 21–31.
- [69] Ye S F, Yu J Q, Peng Y Y, et al. Incidence of Fusarium wilt in *Cucumis sativus* L. is promoted by cinnamic acid, an autotoxin in root exudates[J]. Plant and Soil, 2004, 263(1): 143–150.
- [70] 田给林. 连作草莓土壤酚酸类物质的化感作用及其生物调控研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2015: 71–75.
- [71] 毛凯伦, 李司童, 李晓娜, 等. 蚯蚓粪与腐殖酸混施对植烟土壤质量及烟叶品质的影响[J]. 土壤通报, 2018, 49(4): 911–918.
- [72] 毛凯伦, 郑璞帆, 李司童, 等. 不同配比蚯蚓粪与酒糟对烤烟生长和品质的影响[J]. 华北农学报, 2017, 32(1): 215–219.
- [73] 尹恩, 王明跃, 武际, 等. 蚯蚓粪+AMF 对连作生姜的影响[J]. 韶关学院学报, 2017, 38(9): 65–70.
- [74] 杨玉凯, 林碧英, 李彩霞, 等. 蚯蚓粪复合基质对番茄幼苗生长及光合特性的影响[J]. 江苏农业科学, 2018, 46(14): 137–139.
- [75] Szczech M M. Suppressiveness of vermicompost against fusarium wilt of tomato[J]. Journal of Phytopathology, 1999, 147(3): 155–161.
- [76] Kashem M A, Sarker A, Hossain I, et al. Comparison of the effect of vermicompost and inorganic fertilizers on vegetative growth and fruit production of tomato (*Solanum lycopersicum* L.)[J]. Open Journal of Soil Science, 2015, 5(2): 53–58.
- [77] 张杏艳, 龚胜, 黄光云, 等. 蚯蚓粪制粒对植物生长的影响及其网络市场前景[J]. 天津农业科学, 2017, 23(6): 27–29, 39.
- [78] Kaur A, Singh B, Ohri P, et al. Organic cultivation of Ashwagandha with improved biomass and high content of active Withanolides: Use of Vermicompost[J]. PLoS One, 2018, 13(4): e0194314. DOI:10.1371/journal.pone.0194314.
- [79] 刘大伟, 韩文昊, 张艳菊, 等. 蚯蚓粪及浸提液对番茄根结线虫的防治效果[J]. 中国生物防治学报, 2017, 33(5): 686–691.

- [80] 滕明姣, 万兵兵, 王东升, 等. 蚓粪施用方式对不同品种番茄生长和土壤肥力的影响[J]. 土壤, 2017, 49(4): 712-718.
- [81] 杨明彰. 利用蚯蚓粪预防蔬菜土传病害发生[J]. 长江蔬菜, 2008(17): 21-22.
- [82] 李司童. 蚯蚓粪替代部分化肥对土壤性状及烤烟生长与品质的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2018.
- [83] 樊羿. 有机肥资源利用现状调查与施用有机肥对土壤环境的影响[D]. 郑州: 河南农业大学, 2006.
- [84] Atiyeh R M, Edwards C A, Subler S, et al. Pig manure vermicompost as a component of a horticultural bedding plant medium: effects on physicochemical properties and plant growth[J]. *Bioresource Technology*, 2001, 78(1): 11-20.
- [85] Doan T T, Ngo P, Rumpel C, et al. Interactions between compost, vermicompost and earthworms influence plant growth and yield: a one-year greenhouse experiment[J]. *Scientia Horticulturae*, 2013, 160: 148-154.
- [86] 陈小锦. 基于蚯蚓消解牛粪后的蚯蚓粪改良红壤的效果研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2016.
- [87] 张聪俐, 戴军, 周波, 等. 不同比例蚓粪对玉米生长以及土壤肥力特性的影响[J]. 华南农业大学学报, 2013, 34(2): 137-143.
- [88] Manivannan S, Balamurugan M, Parthasarathi K, et al. Effect of vermicompost on soil fertility and crop productivity - beans (*Phaseolus vulgaris*)[J]. *Journal of Environmental Biology*, 2009, 30(2): 275-281.
- [89] Fernández-Bayo J D, Nogales R, Romero E. Assessment of three vermicomposts as organic amendments used to enhance diuron sorption in soils with low organic carbon content[J]. *European Journal of Soil Science*, 2009, 60(6): 935-944.
- [90] Mitchell A, Alter D. Suppression of labile aluminium in acidic soils by the use of vermicompost extract[J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 1993, 24(11/12): 1171-1181.