

王长义,郝振萍,陈丹艳,等.设施土壤连作障碍产生原因及防治方法综述[J].江苏农业科学,2020,48(8):1-6.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2020.08.001

# 设施土壤连作障碍产生原因及防治方法综述

王长义,郝振萍,陈丹艳,张爱慧,朱士农

(金陵科技学院园艺园林学院,江苏南京 210038)

**摘要:**连作障碍是世界性难题,作物长期连作导致土传病害发生严重,影响作物的产量和品质,已成为制约现代农业可持续发展的重要限制因子。近年来,国内外学者对土壤连作障碍的产生机制和防治措施从多方面、多角度进行了研究。然而,受研究条件和研究基础限制,未能深入揭示连作障碍发生的真正原因。本文从土壤养分失衡、土传病虫害积聚、植物自毒和根际微生态系统失衡等方面系统阐述了连作障碍发生机制,从间作、轮作、嫁接和增施微生物肥料等方面系统总结了当前生产中连作障碍的防治措施,并提出土壤连作障碍的发生是由于连作作物的根系分泌物影响土壤微生物的群落结构和根际土壤微环境,根际土壤微生物群落结构和土壤微环境的改变造成土壤供应养分和水分能力的降低,最终造成作物产量降低、产品品质下降。

**关键词:**设施;土壤;连作障碍;进展;产生原因;防治方法

**中图分类号:** S344.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2020)08-0001-05

我国是设施农业生产大国,温室面积占世界设施农业总面积的 85% 以上,据有关部门统计,2015 年,我国大拱棚以上的温室面积超过 213 万  $\text{hm}^2$ 。在设施作物生产中连作障碍普遍存在,已成为制约我国设施农业发展的最大限制因子。连作障碍是指同一作物或近缘作物连作后,即使在正常栽培管理情况下,也会产生产量降低、品质变劣、生育状况变差的现象。作物产生连作障碍的主要原因归纳起来可分为以下几个方面:(1)土壤养分亏缺或失衡;(2)土壤有害生物积聚;(3)土壤理化性状恶化;(4)化感物质和植物自毒作用;(5)土壤微生物区系劣变等<sup>[1]</sup>。近年来,我国设施土壤连作障碍的发展呈加重趋势,设施作物由最初仅西瓜、黄瓜等瓜类作物必须通过嫁接才能进行生产,发展到温室主要蔬菜番茄、黄瓜、茄子、辣椒、甜瓜和西瓜等均须通过嫁接才能进行生产。

## 1 连作障碍产生的原因

连作障碍是植物-土壤-微生物及其环境等

诸多因素综合作用的外在表现。目前普遍认为,土壤养分亏缺或失衡、土传病虫害积聚、土壤生态环境的破坏和植物自毒作用是连作障碍产生的主要原因。近年来,学者们转向研究环境友好型、资源优化型的生物防治方法,认为根际微生态失调可能是连作障碍发生的主要原因<sup>[2]</sup>。

### 1.1 土壤养分失衡

土壤养分失调理论认为,植物在生长过程中对某些元素进行选择吸收,特别是对某些中量、微量元素有着特殊需求,长期连作往往会造成土壤养分的不均衡,致使作物体内各种养分比例失调,进而出现生理和功能性障碍。在葡萄生产中,与种植 3 年的葡萄新园相比,种植 30 年,重茬 3 次的葡萄园,土壤中铁(Fe)、锰(Mn)含量减少,锌(Zn)、铜(Cu)含量增加,Zn/Mn、Zn/Fe、氮(N)/Fe、磷(P)/Fe、Zn/钾(K)等比例严重失调<sup>[3]</sup>;也有研究表明,黄瓜长期连作可造成土壤中 N、P、K 等养分元素供应的失衡<sup>[4]</sup>。基于养分失衡理论,在连作土壤中,可通过夏季休闲及秸秆还田对连作温室土壤养分失衡进行修复,试验结果表明,夏季秸秆覆盖增加了土壤 N、P、K 的有效性以及土壤微生物群落生物量、多样性和种群密度<sup>[5]</sup>。

### 1.2 土传病虫害积聚

土传病虫害积聚理论认为,连作为根系病原菌提供了寄生和繁殖场所,造成病原菌积累,再加上化肥施用过量导致土壤中病原菌拮抗菌减少,过度

收稿日期:2019-03-12

基金项目:土壤与可持续农业国家重点实验室开放基金(编号:Y412201447);金陵科技学院博士启动基金(编号:jit-b-201319)。

作者简介:王长义(1975—),男,山东济南人,博士,副教授,主要从事设施园艺作物逆境生理及分子生物学研究。E-mail:cywang@jit.edu.cn。

使用农药导致病原菌抗药性增加,使农业生态环境恶化。土传虫害主要是病原线虫寄生于植物的根部形成根结线虫病害。韩雪等的研究表明,植物根系分泌物为土壤中的病原微生物提供了营养,促进了病原微生物的繁殖,抑制了有益微生物的生长<sup>[6]</sup>。吴凤芝等的研究表明,土壤微生物群落多样性指数、丰富度及均匀度指数均随着种植年限的增加而降低<sup>[7-8]</sup>。马宁宁等在番茄上的研究表明,连作明显改变了土壤细菌的群落结构和土壤真菌的优势种群结构,连作 20 年的番茄土壤真菌优势种群数量最多,且与非优势种群真菌的数量差异较大,而多数土传病害是由真菌引起的<sup>[9]</sup>。类芽孢杆菌 SQR-21 是西瓜枯萎病的生物调控因子,尖孢镰刀菌是西瓜枯萎病的致病真菌,接种 SQR-21 的西瓜根系分泌物中致病真菌分生孢子的萌芽率降低,而接种尖孢镰刀菌的根系分泌物中致病真菌分生孢子的萌芽率提高;西瓜根系分泌物中的肉桂酸对尖孢镰刀菌分生孢子的萌发具有刺激作用<sup>[10]</sup>。在西瓜和水稻间混套作系统中,西瓜的根系分泌物促进了西瓜枯萎病病原孢子的萌芽与繁殖,而水稻根系分泌物对其具有抑制作用<sup>[11]</sup>。基于连作障碍的病虫害理论,在茄子生产中,可通过嫁接恢复茄子根际土壤微生物群落多样性,从而提高茄子对土传病害的抗性<sup>[12]</sup>。

### 1.3 植物自毒作用

植物自毒作用理论认为,在连作条件下,土壤生态环境特别是病原微生物代谢产物、植物茎叶挥发和淋洗物、植物残体腐解物以及根系分泌物的化感作用等对植物生长产生抑制作用。近年来,该理论受到广泛重视。张重义等对药用植物连作障碍发生的原因进行了分析,认为药用植物的化感自毒作用是其连作障碍产生的主要原因<sup>[13]</sup>。Huang 等的研究表明,花生植株不同部位及根际土壤水浸液对花生种子萌发和幼苗生长均具有不同程度的抑制作用<sup>[14]</sup>。花生的根系分泌物显著抑制了花生幼苗株高的生长和鲜质量的增加<sup>[15]</sup>。其中豆蔻酸、软脂酸和硬脂酸在花生根部的积累可能与花生土传病害的发生有关<sup>[16]</sup>;对羟基苯甲酸、香草酸和香豆酸则随着连作年限的延长而增加,这些酚酸对花生幼苗的株高和根长生长表现出低促高抑特点,对茄腐镰刀菌孢子萌发有促进作用<sup>[17]</sup>。在茄子的根系分泌物中,肉桂酸和香草醛在低浓度时能促进茄子幼苗的生长,高浓度时则抑制茄子幼苗的生长<sup>[18]</sup>。

同样,黄瓜根系分泌物中的肉桂酸对黄瓜幼苗本身具有自毒作用,而对黑籽南瓜幼苗根系生长无显著影响<sup>[19]</sup>,这为以黑籽南瓜为砧木嫁接黄瓜提供了理论基础。Yu 等采用植物根系浸提液对几种葫芦科植物进行处理,结果发现,西瓜、甜瓜和黄瓜的胚根伸长生长和幼苗生长都会被自身根系浸提液抑制,但南瓜、苦瓜和丝瓜很少发生自毒作用<sup>[20]</sup>。辣椒的根系浸出液也显著抑制了辣椒种子发芽和胚根伸长生长,并对生菜种子萌芽和胚根伸长生长产生了抑制作用<sup>[21]</sup>。但西瓜的根系浸提液并没有抑制南瓜种子的萌发和胚根的伸长生长<sup>[20]</sup>,这为西瓜在生产过程中以白籽南瓜作为砧木进行嫁接提供了理论基础。

### 1.4 根际微生态系统失衡

根际微生态系统是一个以植物为核心,以植物-土壤-微生物及其环境条件相互作用过程为主要内容的微生态系统<sup>[22]</sup>。该理论认为,连作障碍的产生是由于植物根系分泌物、地上部淋洗物等不断进入土壤,使根际微生态系统中的微生物群落结构发生改变,导致一些原来非优势的种群成为优势种群,这些微生物代谢产物的累积有可能抑制作物生长。同时,植物在生长过程中产生大量次生代谢物,使害虫虫卵孵化,群体数量增加,进而侵染植物,给植物造成严重伤害<sup>[23]</sup>。在根际微生态系统中,土壤微生物是最活跃的因子,它们在土壤团粒结构的形成、植物营养元素的转化与供给、污染环境的净化与修复、农田病虫害的防治等过程中起着不可替代的作用。有些微生物,特别是根际微生物对植物生长具有促进作用,如豆科植物的固氮菌有生物施肥作用,根际微生物可分泌促进植物根系生长的物质,控制病虫害水平,诱导植物的抗逆性,诱导植物产生系统性抗性等<sup>[24]</sup>。刘峰等通过水苏糖铵盐培养液对土壤细菌进行培养,证明了水苏糖对土壤细菌有筛选作用,它抑制了大多数土壤细菌的繁殖,从而造成了地黄根部土壤微生物群落结构的失衡<sup>[25]</sup>。Zhang 等的研究表明,随着连作年限的增加,地黄根际土壤细菌种类大量减少,群落结构趋于简单,根际真菌的群落多样性降低,根际土壤微生物群落功能失调<sup>[26]</sup>。Xiong 等分别对连作 10、21、55 年的土壤理化性质、酶活性、微生物群落结构和组成进行了研究,结果表明,长期连作会导致土壤 pH 值、酶活性、有机质含量均显著降低,同时导致土壤细菌丰度降低<sup>[27]</sup>。

## 2 连作障碍的防治办法

生产上主要通过农业生态防治、植物调控防治和生物防治等方法来克服土壤连作障碍,具体措施包括间作、轮作、嫁接、增施微生物肥料等。

### 2.1 间作

间作具有增产、提高养分资源利用率等优点,可降解连作作物根际土壤中的自毒物质,改变自毒物质的种类和含量,从而减轻自毒物质对病原菌生长的刺激作用,缓解连作障碍<sup>[28]</sup>。大量研究证明,间作在克服土壤连作障碍中具有重要作用,胡国彬等研究发现,小麦与不同品种蚕豆间作改变了蚕豆根际的真菌群落结构,提高了蚕豆根际真菌的活性、多样性和丰富度,改善了根际土壤的微生态环境,降低了镰刀菌的数量,提高土壤酶活性并改善蚕豆生长,增加了蚕豆产量<sup>[29]</sup>。马琨等研究发现,玉米与马铃薯间作使土壤微生物群落总生物量降低,但群落功能多样性提高,促进了以羧酸类化合物、多聚化合物、芳香类化合物、氨基酸类化合物为碳源的微生物种群代谢活性的增强;蚕豆与马铃薯间作增加了土壤微生物总生物量,并增强了以碳水化合物为碳源的微生物种群代谢活性<sup>[30]</sup>。张亚楠等研究发现,茅苍术与花生间作减少了连作花生土壤线虫的总数,显著提高了花生根际土壤食细菌线虫、食真菌线虫和捕食或杂食线虫的相对丰度,降低了植物寄生线虫的相对丰度<sup>[31]</sup>。张海春等研究发现,用生菜或芹菜与番茄间作可以显著增加连作土壤中微生物总量、细菌数量和细菌或真菌的比例,显著降低真菌数量,提高土壤中蔗糖酶、脲酶、磷酸酶、过氧化氢酶活性<sup>[32]</sup>。以上研究结果表明,不同作物间的间作是生产上克服连作障碍的有效途径之一,能有效改善因连作造成的土壤根际生态环境的失衡,提高土壤酶活性和微生物种群多样性。

### 2.2 轮作

轮作是目前生产上解决土壤连作障碍的最好方法。相关研究表明,西瓜—草菇—辣椒轮作的土壤较西瓜连作 2 年后的土壤初始值 pH 值上升,可溶性盐浓度(EC 值)降低,有机质含量提高,细菌和放线菌数量增加,真菌数量减少<sup>[33]</sup>。生产上,水旱轮作是改善设施蔬菜连作障碍最经济有效的途径,可以提高旱生蔬菜的产量和品质。菱—茄子轮作显著提高了土壤 pH 值,降低了水溶盐的总量,显著

提高了碱解氮、有效磷、速效钾的含量<sup>[34]</sup>。吴凤芝等研究了大棚黄瓜在轮作和连作条件下,土壤过氧化氢酶、脲酶、转化酶、多酚氧化酶活性的差异,结果表明,轮作土壤的过氧化氢酶、脲酶、转化酶的活性显著高于连作 7 年的土壤<sup>[35]</sup>。菊花与番茄轮作土壤的微生物量碳(C)、氮(N)含量以及总微生物种群数量、有机碳含量和总氮含量均显著高于对照<sup>[36]</sup>。通过在夏季休闲期种植水稻、水菠菜或水芹能有效缓解连作 15 年的辣椒连作障碍,显著提高秋茬辣椒的产量<sup>[37]</sup>。西瓜和大蒜轮作降低了土传病害的发生,并使土壤有机质含量显著提高,土壤酶活性显著升高,土壤细菌、放线菌种群数量和细菌/真菌比例显著增加,西瓜产量显著高于对照<sup>[38]</sup>。

### 2.3 嫁接

嫁接是目前生产上克服土壤连作障碍普遍采用的方法,能有效控制土传病害和线虫病害,提高植株对环境胁迫的抗性以及作物产量<sup>[39]</sup>。大量研究表明,茄子嫁接后其根系分泌物中的苯甲酸苄酯类化合物促进了植物生长物质含量的显著升高,并使其产量、生长势、抗病能力均显著高于对照<sup>[40-42]</sup>。番茄嫁接后其土壤微生物量 C 和 N 含量、总微生物种群数量、有机碳和总氮含量均显著高于对照,产量显著高于对照,而品质并未因嫁接而降低<sup>[36,43]</sup>。辣椒和西瓜嫁接改变了根系分泌物的蛋白质组成,进而增强了植株的抗性,显著提高了辣椒和西瓜的产量<sup>[44-46]</sup>。甜瓜嫁接后可提高对多种土传病害的抗性,进而提高了甜瓜的产量和品质<sup>[47]</sup>。以上研究结果表明,在生产上通过嫁接可以改变植物根系分泌物的种类和数量,进而影响根际微生物的群落结构与组成,使有益微生物数量增加,有害微生物种群密度降低,这有利于土壤有机质的矿化和矿质营养元素的供给,从而增强植株从土壤中获得水分和养分的能力,增强植株抗性,提高作物产量和品质。

### 2.4 增施微生物肥料

增施微生物肥料,改善因连作导致的土壤根际微环境失衡是防治连作障碍的最新尝试。Ling 等经过 4 年的试验发现,在苗圃和移苗时增施生物有机肥(BIO)能有效抑制西瓜枯萎病的发生<sup>[48]</sup>。生物有机肥(BIO-36 和 BIO-23)在茄子上的试验结果也表明,2 种生物有机肥均能抑制茄子青枯病的发生,同时使叶片中的过氧化氢酶(CAT)、过氧化物酶(POD)和超氧化物歧化酶(SOD)活性显著提高,根际土壤的真菌、放线菌数量显著提高,青枯劳

尔氏菌数量显著减少<sup>[49]</sup>。在果树上,增施植物生长促进根瘤菌提高了多年生苹果树土壤中固氮菌、磷酸盐增溶菌、硅酸盐细菌和拮抗菌的种群数量和密度<sup>[50]</sup>。而不同连作年限的番茄土壤中增施生物有机肥后生物量、根系活力、土壤 CAT 活性、土壤 SOD 活性、土壤 POD 活性均显著升高,土壤根际细菌和放线菌数量大量增加,土壤真菌数量显著减少<sup>[51]</sup>。在中药孩儿参种植过程中增施生物有机肥提高了土壤细菌的多样性,并使拮抗细菌种群数量明显增多,进而抑制了孩儿参枯萎病的发生<sup>[52]</sup>。在菊花生产中,增施生物有机肥不仅抑制了菊花镰刀枯萎病的发生,增强了土壤脲酶和过氧化氢酶活性,显著增加了土壤微生物群落数量,而且显著提高了菊花的观赏品质<sup>[53]</sup>。以上研究结果表明,在连作土壤中增施微生物肥料,能缓解因连作而引起的土壤微生物群落失衡,提高有益微生物特别是有益细菌和真菌在土壤微生物群落中的组成和占比,增强土壤酶的活性和植物对病原菌的抗性,进而提高作物的产量和品质。

### 3 展望

土壤连作障碍是世界性难题,降低土壤复种指数,使土壤得到适当的修整是解决连作障碍的最好方法。然而,随着世界人口的急剧膨胀和可耕地面积的不断萎缩,降低复种指数几乎是一项不可能完成的工作,特别是在发展中国家。目前,各国科学家对土壤连作障碍的研究取得了一定的成果,也提出了许多解决措施,但从目前生产上看,各种防治措施还存在许多局限性。受经济效益和实施成本的影响,间作和轮作在生产上应用不多;嫁接是生产上防治连作障碍的有效措施,但也不能从根本上消除连作障碍,只是延缓了土壤连作障碍的发生,因为砧木本身也会发生连作现象;增施微生物有机肥可部分缓解土壤连作障碍,但因土壤是一个复杂的生物系统,其作用效果仍待检验。发达国家在园艺作物生产,特别是设施作物生产中普遍采用无土栽培的方法彻底解决土壤连作障碍问题,然而,受生产成本的影响,无土栽培并不能在世界范围内大面积推广。

从近年来各国科学家对土壤连作障碍的研究结果来看,土壤连作障碍产生的原因可能是连作作物的根系分泌物影响土壤微生物的群落结构和根际土壤微环境;土壤微生物特别是根际土壤微生物

群落结构的改变严重影响了土壤养分的矿化能力,根际土壤微环境的改变影响了土壤的 pH 值和相关土壤酶的活性,造成土壤供应养分和水分的能力降低;连作作物因得不到充足的养分和水分,加之根系分泌生长抑制物质的存在,最终造成作物产量降低、产品品质下降。

### 参考文献:

- [1] 李天来,杨丽娟. 作物连作障碍的克服——难解的问题[J]. 中国农业科学,2016,49(5):916-918.
- [2] Zhou X, Wu F. Dynamics of the diversity of fungal and *Fusarium* communities during continuous cropping of cucumber in the greenhouse[J]. FEMS Microbiology Ecology, 2012, 80(2):469-478.
- [3] Guo X W, Li K, Guo Y S, et al. Effect of grape replant on the soil microbial community structure and diversity[J]. Biotechnology & Biotechnological Equipment, 2011, 25(2):2334-2340.
- [4] 吕卫光,余廷国,诸海涛,等. 黄瓜连作对土壤理化性状及生物活性的影响研究[J]. 中国生态农业学报,2006,14(2):119-121.
- [5] Tian Y Q, Zhang X E, Liu J, et al. Effects of summer cover crop and residue management on cucumber growth in intensive Chinese production systems: soil nutrients, microbial properties and nematodes[J]. Plant and Soil, 2011, 339(1/2):299-315.
- [6] 韩雪,吴风芝,潘凯. 根系分泌物与土传病害关系之研究综述[J]. 中国农学通报,2006,22(3):316-318.
- [7] 吴风芝,王学征. 设施黄瓜连作和轮作中土壤微生物群落多样性的变化及其与产量品质的关系[J]. 中国农业科学,2007,40(10):2274-2280.
- [8] An M, Zhou X, Wu F, et al. Rhizosphere soil microorganism populations and community structures of different watermelon cultivars with differing resistance to *Fusarium oxysporum* f. sp. *niveum*[J]. Canadian Journal of Microbiology, 2011, 57(5):355-365.
- [9] 马宁宁,李天来. 设施番茄长期连作土壤微生物群落结构及多样性分析[J]. 园艺学报,2013,40(2):255-264.
- [10] Ling N, Huang Q W, Guo S W, et al. *Paenibacillus polymyxa* SQR-21 systemically affects root exudates of watermelon to decrease the conidial germination of *Fusarium oxysporum* f. sp. *niveum*[J]. Plant and Soil, 2011, 341(1/2):485-493.
- [11] Hao W Y, Ren L X, Ran W, et al. Allelopathic effects of root exudates from watermelon and rice plants on *Fusarium oxysporum* f. sp. *niveum*[J]. Plant and Soil, 2010, 336(1/2):485-497.
- [12] Yin Y L, Zhou B L, Li Y P. Effects of grafting on rhizosphere microorganisms of eggplants[J]. Allelopathy Journal, 2009, 23(1):149-156.
- [13] 张重义,林文雄. 药用植物的化感自毒作用与连作障碍[J]. 中国生态农业学报,2009,17(1):189-196.
- [14] Huang Y Q, Han X R, Yang J F, et al. Autotoxicity of peanut and identification of phytotoxic substances in rhizosphere soil[J]. Allelopathy Journal, 2013, 31(2):297-308.

- [15] Liu P, Wan S B, Jiang L H, et al. Autotoxic potential of root exudates of peanut (*Arachis hypogaea* L.) [J]. Allelopathy Journal, 2010, 26(2): 197–205.
- [16] Wang Y Y, Wang Z W, Yang G C, et al. Effects of crop stubble on physicochemical properties of continuous cropping soil and cucumber yield and quality [J]. Natural Resources, 2012, 3: 88–94.
- [17] 李培栋, 王兴祥, 李奕林, 等. 连作花生土壤中酚酸类物质的检测及其对花生的化感作用 [J]. 生态学报, 2010, 30(8): 2128–2134.
- [18] Chen S L, Zhou B L, Wang R H, et al. Effects of grafted eggplants on allelopathy of cinnamic acid and vanillin in root exudates [J]. Journal of Applied Horticulture, 2009, 11(2): 119–122.
- [19] Ding J, Sun Y, Xiao C L, et al. Physiological basis of different allelopathic reactions of cucumber and figleaf gourd plants to cinnamic acid [J]. Journal of Experimental Botany, 2007, 58(13): 3765–3773.
- [20] Yu J Q, Shou S Y, Qian Y R, et al. Autotoxic potential of cucurbit crops [J]. Plant and Soil, 2000, 223(1): 149–153.
- [21] Sun H Y, Wang Y. Autotoxic effects of hot pepper (*Capsicum annuum* L.) on lettuce (*Lactuca sativa* L.) [J]. Allelopathy Journal, 2013, 32(1): 49–55.
- [22] 张福锁, 申建波. 根际微生态系统理论框架的初步构建 [J]. 中国农业科技导报, 1999, 1(4): 15–20.
- [23] 阮维斌, 王敬国, 张福锁, 等. 根际微生态系统理论在连作障碍中的应用 [J]. 中国农业科技导报, 1999, 1(4): 53–58.
- [24] Lugtenberg B, Kamilova F. Plant–growth–promoting rhizobacteria [J]. Annual Review of Microbiology, 2009, 63: 541–556.
- [25] 刘 峰, 温学森, 刘彦飞, 等. 水苏糖对地黄根际土壤微生物失衡的影响 [J]. 中草药, 2007, 38(12): 1871–1874.
- [26] Zhang Z, Lin W, Yang Y, et al. Effects of consecutively monocultured *Rehmannia glutinosa* L. on diversity of fungal community in rhizospheric soil [J]. Agricultural Sciences in China, 2011, 10(9): 1374–1384.
- [27] Xiong W, Li Z, Liu H, et al. The effect of long–term continuous cropping of black pepper on soil bacterial communities as determined by 454 pyrosequencing [J]. PLoS One, 2015, 10(8): e0136946.
- [28] 侯 慧, 董 坤, 杨智仙, 等. 间作系统根–土互动与连作障碍缓解机制 [J]. 中国农学通报, 2016, 32(29): 105–112.
- [29] 胡国彬, 董 坤, 董 艳, 等. 间作缓解蚕豆连作障碍的根际微生态效应 [J]. 生态学报, 2016, 36(4): 1010–1020.
- [30] 马 琨, 杨桂丽, 马 玲, 等. 间作栽培对连作马铃薯根际土壤微生物群落的影响 [J]. 生态学报, 2016, 36(10): 2987–2995.
- [31] 张亚楠, 李孝刚, 王兴祥. 茅苍术间作对连作花生土壤线虫群落的影响 [J]. 土壤学报, 2016, 53(6): 1497–1505.
- [32] 张海春, 张 浩, 胡晓辉. 不同间作模式对温室连作番茄产量、土壤微生物和酶的影响 [J]. 西北农业学报, 2016, 25(8): 1218–1223.
- [33] 张黎杰, 周玲玲, 姜若勇, 等. 大棚西瓜–草菇–辣椒轮作对解除设施西瓜连作障碍的效果 [J]. 江西农业学报, 2016, 28(4): 11–14, 18.
- [34] 洪文英, 吴燕君, 汪爱娟, 等. 菜–菱水旱轮作对连作障碍的消解效应及综合效益评价 [J]. 浙江农业科学, 2016, 57(10): 1715–1717.
- [35] 吴凤芝, 孟立君, 王学征. 设施蔬菜轮作和连作土壤酶活性的研究 [J]. 植物营养与肥料学报, 2006, 12(4): 554–558, 564.
- [36] Tian Y Q, Zhang X Y, Liu J, et al. Microbial properties of rhizosphere soils as affected by rotation, grafting, and soil sterilization in intensive vegetable production systems [J]. Scientia Horticulturae, 2009, 2(123): 139–147.
- [37] Du X F, Wang L Z, Peng J, et al. Improvement of red pepper yield and soil environment by summer catch aquatic crops in greenhouses [J]. IOP Conference Series (Earth and Environmental Science), 2016, 41(1): 012022.
- [38] Yang R P, Mo Y L, Liu C M, et al. The effects of cattle manure and garlic rotation on soil under continuous cropping of watermelon (*Citrullus lanatus* L.) [J]. PLoS One, 2016, 11(6): e0156515.
- [39] Edelstein M. Grafting vegetable–crop plants: pros and cons [C]// International Symposium on Protected Cultivation in Mild Winter Climates: Production, Pest Management and Global Competition, 2004.
- [40] Bletsos F, Thanassouloupoulos C, Roupakias D. Effect of grafting on growth, yield, and *Verticillium* wilt of eggplant [J]. HortScience, 2003, 38(2): 183–186.
- [41] Moncada A, Miceli A, Vetrano F, et al. Effect of grafting on yield and quality of eggplant (*Solanum melongena* L.) [J]. Scientia Horticulturae, 2013, 149: 108–114.
- [42] Liu N, Zhou B L, Lu B, et al. Effects of grafting on root exudates of eggplant and allelopathy of benzyl benzoate on seedling growth [J]. Allelopathy Journal, 2015, 35(2): 163–173.
- [43] Khah E M, Kakava E, Mavromatis A, et al. Effect of grafting on growth and yield of tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) in greenhouse and open–field [J]. Journal of Applied Horticulture, 2006, 8(1): 3–7.
- [44] Colla G, Roupael Y, Cardarelli M, et al. Influence of grafting on yield and fruit quality of pepper (*Capsicum annuum* L.) grown under greenhouse conditions [J]. Acta Horticulturae, 2008, 782: 359–363.
- [45] Özmen S, Kanber R, Sarı N, et al. The effects of deficit irrigation on nitrogen consumption, yield, and quality in drip irrigated grafted and ungrafted watermelon [J]. Journal of Integrative Agriculture, 2015, 14(5): 966–976.
- [46] Song Y, Ling N, Ma J H, et al. Grafting resulted in a distinct proteomic profile of watermelon root exudates relative to the un–grafted watermelon and the rootstock plant [J]. Journal of Plant Growth Regulation, 2016, 35(3): 778–791.
- [47] Kim S, Moon J H, Huh Y C, et al. Effect of melon rootstocks with multiple disease resistance on yield and quality of melon (*Cucumis melo* L.) [C]// Cucurbitaceae 2016 Organizing Committee, 2016: 322–324.
- [48] Ling N, Deng K, Song Y, et al. Variation of rhizosphere bacterial

王 娜,李保国,史吉平,等. 微生物在污泥减量中的应用研究进展[J]. 江苏农业科学,2020,48(8):6-12.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2020.08.002

# 微生物在污泥减量中的应用研究进展

王 娜<sup>1</sup>, 李保国<sup>2</sup>, 史吉平<sup>1</sup>, 颜薇芝<sup>1</sup>, 邹广彬<sup>3</sup>, 刘 莉<sup>1</sup>

(1. 中国科学院上海高等研究院, 上海 201210; 2. 上海理工大学医疗器械与食品学院, 上海 200093; 3. 光明生猪有限公司, 江苏盐城 224151)

**摘要:**目前,减量化和稳定化是污泥处理的主要目标。不论初沉污泥还是剩余污泥,如果处理不当会对环境造成二次污染。利用微生物降解污泥,由于微生物适应性强、操作简单、容易管理且经济环保的优势,具有良好的应用前景。对污泥减量的基本途径、污泥的生物可降解性及微生物降解污泥技术的研究进展进行综述,并分析微生物在污泥减量的应用中存在的问题以及今后的发展前景。

**关键词:**污泥;微生物;减量;污水处理;降解

**中图分类号:** X703 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2020)08-0006-07

污泥是污水处理过程中的副产物,是一种由有机物、微生物菌体、无机颗粒、胶体等组成的极其复杂的非均质体。近年来,虽然世界各地已经将多种污泥处置技术应用于各类污水处理,也能够有效地去除污泥中的有机物,但仍然有大量的污泥得不到及时处理。据统计,我国年均产湿污泥 2.4 亿 t<sup>[1]</sup>,其中仅城镇污水处理厂每年的湿污泥产生量就达到 4 000 多万 t。预测到 2020 年,我国城镇污泥的产生量将达到每年 6 000 万~8 000 万 t<sup>[2]</sup>。污泥成分复杂,其中含有大量难降解物质、致病微生物、寄生虫卵以及重金属等有毒有害物质,若处理不当,容易对环境造成二次污染,给人类的生存环境带来

严峻挑战。因此,减少污泥的产生已成为研究热点,寻找更经济和环境友好型的污泥降解替代方案越来越受到重视。

目前,国内外传统的污泥处置方法有卫生填埋、污泥堆肥、农业使用和污泥焚烧等。但由于场地限制、基础设施和运营管理成本高(例如,澳大利亚湿污泥的处理成本为 30~70 美元/t,欧洲湿污泥的处理成本为 30~100 欧元/t<sup>[3]</sup>)等原因,污泥处置问题尚未得到根本性解决。随着“水十条”和“土十条”的颁布,我国对污泥处置有了更高的要求,截至 2020 年,地级市的污泥无害化处理率要达到 90% 以上<sup>[4]</sup>。因此,解决污泥问题应该坚持污泥减量化的原则,从本质上对污泥进行减质和减容。

由于污泥特有的生物结构和复杂的微生物特性,其中的有机物被包裹在微生物细胞分泌的一些高分子聚合物中,即胞外聚合物(extracellular polymeric substances, EPS),是由多聚糖、蛋白质、核酸、脂肪和其他聚合物组成<sup>[5]</sup>。因此,污泥降解的本质和难点是污泥有机成分、微生物以及胞外聚合

收稿日期:2019-04-10

基金项目:国家重点研发计划(编号:2018YFC1901000);上海市科技兴农推广项目(编号:沪农科推字[2017]第 1-9 号);上海市科学技术委员会项目(编号:16dz1207100)。

作者简介:王 娜(1993—),女,甘肃武威人,硕士,助理工程师,主要从事环境微生物学的研究。E-mail:ldwangnai@163.com。

通信作者:刘 莉,博士,副研究员,主要从事废弃物资资源化利用。E-mail:liul@sari.ac.cn。

community in watermelon continuous mono-cropping soil by long-term application of a novel bioorganic fertilizer[J]. Microbiological Research, 2014, 169(7/8):570-578.

[49] 陈 希,赵 爽,姚建军,等. 微生物有机肥及杀菌剂对切花菊连作障碍的影响[J]. 应用生态学报,2015,26(4):1231-1236.

[50] Guo H, Mao Z Q, Jiang H X, et al. Community analysis of plant growth promoting rhizobacteria for apple trees[J]. Crop Protection, 2014, 62:1-9.

[51] Wang L, Lu X, Yuan H, et al. Application of bio-organic fertilizer to control tomato fusarium wilting by manipulating soil microbial

communities and development[J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2015, 46(18):2311-2322.

[52] Wu L K, Chen J, Wu H M, et al. Insights into the regulation of rhizosphere bacterial communities by application of bio-organic fertilizer in *Pseudostellaria heterophylla* monoculture regime[J]. Frontiers in microbiology, 2016, 7:1788.

[53] Zhao S, Chen X, Deng S P, et al. The effects of fungicide, soil fumigant, bio-organic fertilizer and their combined application on chrysanthemum *Fusarium* wilt controlling, soil enzyme activities and microbial properties[J]. Molecules, 2016, 21(4):526.