

蚯蚓粪对土壤环境质量和作物生长影响的研究现状与展望^①

单颖¹⁾ 赵凤亮¹⁾ 林艳¹⁾ 刘声廷¹⁾

李玮¹⁾ 何振立²⁾ Adel.M.R.A. Abdelaziz^{1,3)}

(1 中国热带农业科学院环境与植物保护研究所 海南海口 571101;

农业部儋州农业环境科学观测实验站 海南儋州 571737;

2 佛罗里达大学印第安河研究教育中心食品与农业研究所 美国佛罗里达 34945;

3 埃及农业研究中心有机农业中心实验室 埃及开罗 12619)

摘要 蚯蚓粪是一种优质、安全的天然有机肥料,对土壤环境质量和作物生长具有明显的改善和促进作用。综述蚯蚓粪的性质及其在改善土壤理化性状、提高土壤肥力和促进作物生长方面的研究现状,并提出了当前研究存在的局限和对未来工作的展望。

关键词 蚯蚓粪;土壤性质;土壤肥力;作物生长

中图分类号 X705 文献标识码 A Doi: 10.12008/j.issn.1009-2196.2017.06.003

Research Advances and prospective on effects of vermicompost on soil environment quality and crop production

SHAN Ying¹⁾ ZHAO Fengliang¹⁾ LIN Yan¹⁾

LIU Shengting¹⁾ LI Wei¹⁾ HE Zhenli²⁾ Adel.M.R.A. Abdelaziz^{1,3)}

(1 Environment and Plant Protection Institute, CATAS, Haikou, Hainan 571101;

Danzhou Investigation and Experimental Station of Agricultural Environment,

Ministry of Agriculture, Danzhou 571737, China;

2 University of Florida, IFAS, Indian River Research and Education Center, Fort Pierce,

FL 34945, USA;

3 Central Lab. of Organic Agriculture, Agricultural Research Center (ARC),

9 Cairo Univ. st., Giza12619, Egypt)

Abstract Vermicomposts are high quality, safe and natural organic fertilizer, which could improve soil quality and crop growth in an obvious way. In this article, the characteristics of vermicompost and its effect on boosting physicochemical properties and fertility of soil, and also the plant production were summarized. The limitations of current researches and the prospects of future work were presented, either.

Keywords vermicompost; soil properties; soil fertility; plant production

化肥作为粮食增产的决定性因子之一,具有肥效快、增产效果显著等优点,在中国的农业生产中发挥着举足轻重的作用^[1]。研究表明,中国52%的

农作物增产来自化肥的贡献^[2]。近年来,中国化肥用量持续快速增长,2010年的化肥消费量占世界化肥消费总量的34%^[3]。然而,过度依赖化肥并没

基金项目:国家公益性行业(农业)科研专项(No.201503106);海南省重点研发项目(No.ZDYF2016149);国家青年自然科学基金(No.31401945);国家外国专家局高端外国专家项目(No.GDW20154600260)。

收稿日期:2017-03-09;责任编辑/黄艳;编辑部E-mail:rdnk@163.com。

单颖(1990~),女,硕士,研究实习员,主要研究方向为农业面源污染防控与土壤改良,E-mail:shanying@catas.cn。

通讯作者。E-mail:zfl7409@163.com。

有带来粮食产量的大幅增长,反而产生了肥料利用率低、资源浪费和环境污染等问题。因此,使用有机肥替代化肥或与化肥配施在农业生产中受到广泛关注,充分利用农作物秸秆及畜禽粪便生产有机肥,对于资源充分利用,减少化肥投入,实现养分循环和环境保护具有重要的意义^[4]。

蚯蚓堆肥是一种将有机物料转化为肥料和土壤改良剂的方法,其产物蚯蚓粪具有比表面积大、排水性高、持水量大和通气性好的特点,且含有丰富的营养成分和有益微生物,具有很好的供肥、保肥以及改良土壤的能力^[5-6]。已有研究表明,蚯蚓粪作为一种土壤改良剂和新型有机肥,在滨海盐碱地、红壤的土壤改良^[7-8],以及生菜、西红柿、玉米、烤烟等作物育苗及生长上表现出良好效果^[9-12]。本文总结了施用蚯蚓粪对农田土壤理化性状、肥力状况和作物生长影响的研究现状,以便正确认识蚯蚓粪的优缺点,为科学研究和农业生产中合理施用蚯蚓粪提供参考依据。

1 蚯蚓粪及其性质

农作物秸秆、禽畜粪便、污泥等有机废弃物经过蚯蚓的吞食,在蚯蚓消化系统蛋白酶、脂肪酶、纤维酶和淀粉酶,以及蚯蚓与环境微生物的协同作用下,经消化分解的代谢过程,转化成为自身或易于其他生物利用的营养物质,经排泄后成为蚯蚓粪^[13]。蚯蚓粪是一种黑色或灰黑色、有自然泥土味的细碎物质,大多是0.5~3 mm粒径的颗粒状或椭圆状团聚体,有时也可再粘结成2~3 cm团块状。在堆肥过程中,由于蚯蚓的作用,有机物的矿化速度快、腐殖化程度高,蚯蚓粪较传统堆肥产物在理化性状、生化特征和营养成分方面更具有优势,但由于蚯蚓种类、所取食的有机物以及蚯蚓消化程度不同,蚯蚓粪的理化性质有所差异^[14-16]。研究表明,大量腐殖质使蚯蚓粪具有吸附能力强、阳离子交换量大、重金属含量低和保肥供肥性能好等特点^[17]。Lim等^[16]通过观察以稻秆为原料堆制的蚯蚓粪SEM图谱发现,蚯蚓粪呈现均一、多孔结构,比表面积大,颜色较深,而稻秆则呈现细长、纤维状结构。众多研究也表明,蚯蚓粪具有优良的孔性、通气性、持水性和排水性,并具有较高的水稳性和良好

的团聚体结构^[18]。

蚯蚓粪中含有丰富的有机质、腐殖质,以及植物生长所需的氮、磷、钾等大量元素,和铁、锰、铜、硼等多种微量元素。蚯蚓粪中的有机质含量约为20%~39.2%,腐殖质含量约为11.7%~25.8%,全氮约为0.32%~2.13%,全磷约为0.72%~1.72%,全钾约为0.4%~2.01%,全氮含量比一般土壤高1~14倍,速效磷高10~17倍,速效钾高8~11倍^[19]。蚯蚓粪中营养物质的含量主要取决于堆肥原材料,但通常蚯蚓粪中的大量和微量营养含量均高于相同原材料的普通堆肥产物^[5]。Gupta等^[17]利用污泥和牛粪加入赤子爱胜蚓进行堆肥,约3个月后发现产物蚯蚓粪较原始混合物的TN、TP、TK含量均有提高。李辉信等^[20]比较蚯蚓粪与自然腐熟牛粪发现,矿质氮、速效钾含量及微生物数量均增加。除有机质、腐殖质和植物所需的大量元素外,研究还发现,蚯蚓粪中含有大量的微量元素、氨基酸、植物生长激素,以及磷酸酶、脲酶、蔗糖酶等各种酶类物质^[21-22]。除此之外,蚯蚓的消化道被誉为有益微生物的小型“培养室”,蚯蚓吞食有机物和微生物后,在消化道内有机物中大部分细菌被杀死,有益微生物大量繁殖,最终将含有细菌、真菌和放线菌的有益微生物群体通过粪便排放出来。因此,蚯蚓粪中含有大量细菌和放线菌等有益微生物^[18]。综上,通过蚯蚓的消化、磨碎过程,有机物的分解转化速率高,产物蚯蚓粪形状均一、表面积大,营养成分含量高,富含植物生长激素和酶类物质,且微生物活性强。

2 蚯蚓粪对土壤理化性状的影响

蚯蚓粪具有特殊的理化性质,对于改善土壤的物理结构和化学性质具有重要意义,施用蚯蚓粪对土壤的理化性状改变明显。蚯蚓粪自身是团粒结构,且富含多糖,多糖在土壤中作为一种胶结剂有利于团聚体的形成和保持^[5]。土壤团聚体是良好的土壤结构体,由土壤原生颗粒和胶体凝聚、胶结形成,不同粒径团聚体的数量和空间排列方式决定了土壤孔隙的分布,进而决定土壤的水力特征,影响土壤的通气性、蓄水性、透水性和耕性^[23]。蚯蚓粪中能够改善土壤理化性状的腐殖质含量丰富,施入

土壤后,腐殖质易与钙离子胶结土粒凝聚形成稳定的团粒结构;且腐殖质为亲水胶体,保水能力强,导热性小,利于土壤保水保温^[18,24]。研究表明,施加蚯蚓粪的土壤中微生物数量增多、活性增强,易于形成团粒结构,土壤容重降低,总孔隙度增加^[6,25]。蚯蚓粪能够增加土壤中小于5 μm粒级的微团聚体数量,协调土壤水、肥、气和热的关系。优良的土壤结构使其具备良好的通气性、持水性、排水性和好氧环境,对植物根系的生长和营养物质的有效利用具有重要意义。

蚯蚓粪多呈中性偏碱性,向土壤中添加蚯蚓粪可以降低土壤交换态铝含量,用于改良酸性土壤^[26]。但也有研究发现,添加蚯蚓粪对土壤的pH没有影响,甚至可以降低土壤的pH。分析认为,有机物在分解过程中产生的有机酸可能产生酸化作用,或蚯蚓粪增加土壤的渗透性增强了盐分的流失^[5,27]。分析结果发现,蚯蚓粪对土壤pH的影响取决于堆肥原料和土壤性质^[28]。例如,张聪俐等^[10]在不同类型土壤中添加牛粪为原料的蚯蚓粪进行盆栽试验发现,土壤pH增加;而有研究添加猪粪为原料的蚯蚓粪发现,土壤pH随蚯蚓粪用量的提高而降低^[29]。而且,有研究发现,将蚯蚓粪施于酸性土壤,土壤pH升高;施于碱性土壤,土壤pH降低,说明蚯蚓粪具有较大的酸碱缓冲容量^[30],可以使土壤pH趋于中性,有利于提高作物所需营养物质的有效性,更好地满足大多数作物的生长要求。在土壤EC值的研究结果中也发现了类似的现象。陈小锦^[8]、张宁^[12]等发现,与不添加蚯蚓粪的对照相比,土壤的EC值随蚯蚓粪用量的升高而增加。Manivannan等^[29]发现,在黏土和沙土中添加蚯蚓粪,EC值分别下降了1.4和1.2倍。杭琼^[31]通过室内培养试验发现,与蚯蚓粪共培养的过程中,土壤EC值的变化呈现先平稳波动、随后急速增加、又下降趋于稳定的现象。Atiyeh等^[25]也发现,短期内土壤EC值随蚯蚓粪用量升高而增加,但实验结束时,土壤EC值又下降到几乎一致的水平。研究结果表明,蚯蚓粪中可溶性盐分含量高,钠离子和钾离子的交换作用强,且土壤孔隙度和渗透率的增加有助于盐分的流失,降低土壤EC值,降低土壤盐化的风险^[32]。EC值反映的是土壤可溶性盐分的含量,EC值过高

可能会损伤植物生长。综上,添加蚯蚓粪对土壤物理结构的改善作用显著,但对土壤酸碱性、离子交换能力的影响尚不统一,机理仍不明确,需要进一步研究。

3 蚯蚓粪对土壤肥力的影响

施用蚯蚓粪可以增加土壤养分含量,促进养分的活化,保持速效养分供应平衡,提高土壤的供肥能力,改良和培肥地力效果显著。蚯蚓粪含有丰富的养分,自身即可作为一种天然的、可逐渐释放营养物质的肥料及土壤改良物质。蚯蚓在参与堆肥的过程中,除形成大量优良的土壤团聚体之外,还促进了土壤有机物质的分解与转化,加强土壤腐殖质的形成和富集,为提高土壤肥力创造了良好的物质基础。Ngo等^[33]、王明友等^[34]研究发现,与常规施肥相比,施用蚯蚓粪使土壤中有机碳和全氮含量显著提高。杭琼^[31]研究发现,利用蚯蚓粪改良果园底土,可以显著增加土壤中全氮和全磷的含量。Manivannan等^[29]在田间试验中发现,在粘土和沙土中施用蚯蚓粪,较常规施用无机肥相比,2种质地土壤中钙、镁、钠、铁、锰、锌、铜等微量元素的含量均有提高。有机质对土壤养分供给和淋失具有重要意义,施用蚯蚓粪将大量有机质带入土壤,有机质分解产生有机酸,通过酸溶作用可以促进矿物的风化和养分释放,通过络合(整合)作用可以增加矿质养分的有效性^[23]。张宁^[12]向果园耕层土壤中施加原料为牛粪的蚯蚓粪,发现土壤中有机质、碱解氮、速效磷和速效钾的含量显著升高,且随着蚯蚓粪用量的增加而升高。张聪俐等^[10]通过盆栽试验发现,无论向果园或菜园土壤中添加蚯蚓粪,土壤中的有机质、碱解氮、有效磷和速效钾的含量均随着蚯蚓粪施入量的增加而显著提升。王福友等^[7]、张荣涛等^[35]在盐碱土壤的改良研究中同样发现了蚯蚓粪显著提高土壤速效养分的作用。Manivannan等^[29]通过大田试验也发现,添加蚯蚓粪的土壤中有氮、磷、钾的含量提高了1.4~1.7倍。

同时,蚯蚓粪在土壤的碳氮循环中也起着重要的作用^[36]。研究发现,蚯蚓粪中大量的团粒结构可以增强对有机碳的物理性保护,有利于碳在大颗粒土壤中微团聚体的长期稳定性,增加了土壤的碳储

量^[37]。Martin^[38]通过1年的培养试验发现,蚯蚓粪可以明显降低有机碳的矿化率。王明友等^[34]通过田间小区试验研究发现,蚯蚓粪与化肥配施可以显著提高土壤活性有机碳和微生物量碳、氮含量,以及碳库管理指数。土壤微生物量碳、氮是反映土壤碳、氮养分循环及转化过程的重要参数,能直观体现土壤微生物生长状态和土壤肥力状况。崔丽娟^[39]在番茄生长试验中也发现,施入蚯蚓粪处理的土壤微生物量碳、氮含量均显著高于对照处理。研究表明:新鲜蚯蚓粪中的铵态氮和可溶性有机氮都较高,加入土壤,随着时间的延迟, NH_4^+ 含量逐渐降低;相反, NO_3^- 含量随蚯蚓粪用量的提高呈线性增加的趋势, NH_4^+ 易被吸附、淋溶、植物吸收或通过硝化作用转化为 NO_3^- ,蚯蚓粪中微生物数量多、活性强,增强了硝化作用,促进 NH_4^+ 向 NO_3^- 转化,有利于作物吸收^[25,40]。陈小锦^[8]在红壤中添加不同用量蚯蚓粪发现,在蚯蚓粪用量较低时(0%~5%),土壤中 NH_4^+ 含量随着蚯蚓粪含量的增加迅速增加,之后有所下降,在蚯蚓粪用量为10%时达到最小值;而 NO_3^- 含量随着蚯蚓粪添加量的增加出现显著升高的现象,进一步说明蚯蚓粪可以促进土壤中有机氮的氨化作用和硝化作用。

除此之外,施用蚯蚓粪可以通过提高酶和微生物活性的双重作用,促进土壤中养分的活化。Pramanik等^[41]研究蚯蚓粪对磷的影响时发现,蚯蚓粪可以使土壤中有效磷含量增加13%~26%。其中,试验前7d,土壤有效磷含量小幅降低,随后逐渐升高,在60~90d时达到稳定水平;而加入无机磷肥的处理中土壤有效磷含量在前45d逐渐增加,后期出现降低。分析认为,磷肥施入土壤后极易被吸附固定形成难溶性磷酸盐,从而影响磷的释放和利用,而加入蚯蚓粪可以降低对磷的吸附,通过微生物和酶的作用促进有机磷向无机磷转化,从而提高磷素的有效性。苏晓红等^[42]研究也表明,施用蚯蚓粪可以提高土壤中磷酸酶的活性,增加有效磷和水溶性磷的含量,有利于土壤有效磷的稳定供给。崔丽娟^[39]、李继蕊等^[43]研究也证明,蚯蚓粪对土壤过氧化氢酶、脲酶、蔗糖酶和磷酸酶活性具有促进作用;贾德新等^[44]、井大炜^[45]通过大田试验研究蚯蚓粪对豇豆、杨树苗根际土壤微生物活性的影响发

现,蚯蚓粪与化肥配施可以显著增加根际土壤中细菌数、放线菌数、微生物总量及微生物量碳含量,主要是由于蚯蚓粪自身带入大量活性微生物,以及可以为微生物生长提供良好的环境和新的能源,土壤酶和微生物活性的改变有助于提高土壤中养分离子的有效性和养分保持能力。还有研究指出,添加蚯蚓粪可以减少养分在土壤中的淋溶。目前,关于蚯蚓粪影响土壤养分迁移转化的机理尚不够明确,如对土壤碳、氮矿化作用的影响及其机理,仍需进一步深入研究。

4 蚯蚓粪对作物生长的影响

综上,蚯蚓粪无论在改善土壤理化性质还是养分供应方面都具有较大的优势,对促进作物生长、提高产量和品质具有重要意义,这一结果已在众多作物中得到了证实。张聪俐等^[10]证明,添加蚯蚓粪后,玉米的株高、地上和地下部干物质量、叶绿素SPAD值、植株地上部、地下部的全氮和全钾含量均随着蚯蚓粪施用量的增加而升高,但当蚯蚓粪用量达到20%时,对玉米的株高、地上和地下部干物质量会出现抑制作用。郑金伟等^[46]研究奶牛粪蚯蚓堆制物对生菜生长及品质的影响时发现,添加蚯蚓粪促进生菜植株的生长,并提高了品质,蚯蚓粪添加量为30%~50%时,生菜茎、叶中可溶性糖和Vc含量明显增加,硝酸盐含量降低。吕振宇等^[47]施用蚯蚓粪有机肥开展甘蓝田间试验发现,蚯蚓粪与无机肥配施可以极显著增加甘蓝产量,并提高品质,降低甘蓝硝酸盐含量,提高Vc含量。Federico等^[48]研究发现,施用蚯蚓粪,番茄的株高增加,果实中碳水化合物含量增加,酸度降低。李继蕊等^[43]采用盆栽试验研究表明,添加蚯蚓粪定植35d后,黄瓜株高、茎粗分别提高了31.3%、14%,产量提高36.7%,且黄瓜果实中游离氨基酸、可溶性蛋白、可溶性糖和Vc的含量均有增加。蚯蚓粪与传统无机肥料相比,其有效养分的含量更高,如 NO_3^- 、有效P、速效K、交换性Ca和Mg等。有研究指出,蚯蚓粪对作物生长的促进作用不仅来源于养分,还有大量微生物的活动可以增加土壤中矿质营养和腐殖质含量、酶的活性,还能刺激多种生长激素的释放,促进根系发育、增强抗病能力、影响作物生长^[18]。李

欢等^[49]通过田间试验研究蚯蚓粪对夏季玉米生长的影响发现, 蚯蚓粪主要通过影响夏玉米关键生育期土壤微生物量碳的变化, 进而影响了土壤中碳向植物的输入, 最终调控了产量。蚯蚓粪还可以显著影响作物地下部的生长, 研究表明, 蚯蚓粪与化肥配施可以促进作物根系的生长, 增强根系活性。陈小锦等^[8]发现, 适量蚯蚓粪可以促进不结球白菜幼苗的根系生长, 有助于其对营养成分的吸收。施入蚯蚓粪还可以明显增加玉米根系分泌物含量, 改善玉米根际区域的微生态环境^[50]。

蚯蚓粪中还含有大量的氨基酸、植物生长激素等活性物质, 能够促进作物根系发育、刺激作物生长。胡佩等^[51]已利用高效液相色谱法证明, 蚯蚓粪中含有较丰富的吲哚乙酸(IAA)和赤霉素(GA₃)等激素物质。Arancon等^[52]开展蚯蚓粪对番茄、胡椒和草莓生长的影响试验研究, 开始时通过添加无机肥统一养分含量, 发现添加蚯蚓粪的处理, 3种作物的产量均显著升高, 分析认为添加蚯蚓粪增加了根系土壤微生物数量和活性, 刺激产生了更多的植物生长激素, 促进了作物的生长。后期研究也证明了蚯蚓粪可以通过增加微生物的数量和活性来影响分泌植物生长激素, 对作物的生长发育、产量和品质有显著的促进作用^[53-54]。添加蚯蚓粪对土壤中的病原微生物有明显的抑制作用, 能够限制病原菌繁殖, 减轻土传病害的发生, 增强植株的抗性。张宁^[12]研究蚯蚓粪对西瓜和番茄生长的影响时发现, 添加蚯蚓粪后, 土壤细菌和放线菌数量均随蚯蚓粪用量的增加逐渐增多, 而真菌数量呈现下降趋势, 细菌数/真菌数比值增加, 从而减轻黄瓜的连作障碍。这一结果在张俊英等的研究中也得到了证明, 向黄瓜连作土壤中添加蚯蚓粪后, 细菌数量减少幅度较大, 真菌数量增多, 细菌数/真菌数比值呈增加趋势, 黄瓜的连作障碍减轻^[55]。

5 结论与展望

综上, 蚯蚓粪在改良土壤理化性状、改善土壤微生物环境、提高土壤肥力、促进作物生长等方面优势明显。鉴于其优良的性质和作用, 蚯蚓粪替代化肥或和化肥配施可以在农业生产中大面积推广使用。但是, 要合理利用蚯蚓粪, 避免其可能带来的

不利影响, 实现其对土壤的有效改良, 促进作物高产优质, 依然存在一些关键问题亟待明确和解决, 包括: (1) 蚯蚓粪作为有机肥或改良剂施入土壤后会参与土壤各项生物地球化学循环, 目前对蚯蚓粪的研究多集中在土壤改良或作物增产的效果方面, 但其机理以及蚯蚓粪中养分、酶以及微生物在土壤中的迁移转化特征尚不够明确, 因此, 有必要开展蚯蚓粪在土壤中的生物地球化学行为的深入研究; (2) 蚯蚓粪对作物生长的影响机制仍不够清晰, 是营养物质或是植物生长激素促进了作物的生长, 仍需进一步研究; (3) 已有研究表明, 过量施用蚯蚓粪有可能导致作物的减产。因此, 蚯蚓粪的合理用量, 以及和化肥的配施比例仍需探讨明确; (4) 由于特定的气候和耕作条件, 蚯蚓粪的作用会有所差异, 因此蚯蚓粪在不同地区和不同类型农业土壤的适用性还需要更为全面的探究, 以确保其有效性和安全性; (5) 当前蚯蚓粪多利用在培养或盆栽试验中, 结果表明对土壤性质、作物生长效果明显, 但针对长期田间试验的研究相对较少, 下一步需要开展长期定位试验明确蚯蚓粪对农业生态系统的长期影响效应。

参考文献

- [1] 张福锁. 协调作物高产与环境保护的养分资源综合管理技术研究与应用[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2008.
- [2] 曾希柏, 陈同斌, 胡清秀, 等. 中国粮食生产潜力和化肥增产效益的区域分异[J]. 地理学报, 2002, 57(5): 539-546.
- [3] 朱兆良, 金继运. 保障我国粮食安全的肥料问题[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(2): 259-273.
- [4] 黄鸿翔, 李书田, 李向林, 等. 我国有机肥的现状与发展前景分析[J]. 土壤肥料, 2006(1): 3-8.
- [5] 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 Science of Food and Agriculture, 2015, 95(6): 1 143-1 156.
- [6] Sharma S, Pradhan K, Satya S, et al. Potentiality of earthworms for waste management and in other uses: a review [J]. Journal of American Science, 2005, 1(1): 4-16.
- [7] 王福友, 王冲, 刘全清, 等. 腐殖酸、蚯蚓粪及蚯蚓

- 蛋白肥料对滨海盐碱土壤的改良效应[J]. 中国农业大学学报, 2015, 20(5): 89-94.
- [8] 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, 2015.
- [9] Papathanasiou F, Papadopoulos I, Tsakiris I, et al. Vermicompost as a soil supplement to improve growth, yield and quality of lettuce (*Lactuca sativa* L.) [J]. Journal of Food Agriculture and Environment, 2012, 10: 677-682.
- [10] 张聪俐, 戴军, 周波, 等. 不同比例蚯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.
- [11] 李晓娜, 陈富彩, 郑璞帆, 等. 施用蚯蚓粪对陕南烤烟土壤和烟叶钾营养、农艺与经济性状的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2016(3): 105-109.
- [12] 张宁. 蚯蚓粪对西瓜和番茄生长、品质及产量的影响[D]. 泰安: 山东农业大学, 2012.
- [13] 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.
- [14] Fornes F, Mendoza H D, Garcia D L F R, et al. Composting versus vermicomposting: a comparative study of organic matter evolution through straight and combined process[J]. Bioresource Technology, 2012, 118: 296-305.
- [15] Elvira C, Sampedro L. Vermicomposting of sludges from paper mill and dairy industries with *Eisenia andrei*: A pilot-scale study [J]. Bioresource Technology, 1998, 63(3): 205-211.
- [16] Lim S L, Wu T Y, Clarke C. Treatment and biotransformation of highly polluted agro-industrial wastewater from a palm oil mill into vermicompost using earthworms[J]. Journal of Agriculture and Food Chemistry, 2014, 62 (3): 691-698.
- [17] Gupta R, Garg V K. Stabilization of primary sewage sludge during vermicomposting[J]. Journal of Hazardous Materials, 2008, 153(3): 1 023-1 030.
- [18] 裴庆海. 蚯蚓粪的优点、作用和对土壤的影响[J]. 农村实用科技信息, 2005, (10): 18.
- [19] 蒋剑敏. 蚯蚓与土壤肥力[J]. 土壤, 1985, 17(4): 169-176.
- [20] 李辉信, 胡锋, 仓龙, 等. 蚯蚓堆制处理对牛粪性状的影响[J]. 农业环境科学学报, 2004, 23(3): 588-593.
- [21] 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.
- [22] Tomati U, Grappelli A, Galli E. The hormone-like effect of earthworm casts on plant growth [J]. Biology and Fertility of Soils, 1987, 5(4): 288-294.
- [23] 宁川川, 王建武, 蔡昆争. 有机肥对土壤肥力和土壤环境质量的影响研究进展[J]. 生态环境学报, 2016, 25 (1): 175-181.
- [24] Albanelli E, Plaxats J, Crbrero T. Chemical changes during vermicomposting (*Eisenia fetida*) of sheep manure mixed with cotton industrial wastes [J]. Biology and Fertility of Soils, 1988, 6 (3): 266-269.
- [25] Atiyeh R M, Edwards C A, Suler S, et al. Pig manure vermicompost as a component of a horticultural bedding plant medium: effects on physico-chemical properties and plant growth[J]. Bioresource Technology, 2001, 78(1): 11-20.
- [26] Mitchell A, Alter D. Suppression of labile aluminium in acidic soils by the use of vermicompost extract[J]. Communications in Soil Sciences and Plant Analysis, 1993, 24 (11-12), 1 171-1 181.
- [27] 曹业琦. 蚯蚓粪有机肥对酸浆保护地的培肥效果[D]. 延吉: 延边大学, 2014.
- [28] Valdez-pdrez M A, Fernandez-luque F, Franco-herandez O, et al. Cultivation of beans (*Phaseolus vulgaris* L.) in limed or unlimed wastewater sludge, vermicompost of inorganic amended soil[J]. Scientia Horticulturae, 2011, 128: 380-387.
- [29] Manivannan S, Balamurgan M, Parthasarathik, et al. Effect of vermicompost on soil fertility and crop productivity-beans (*Phaseolus vulgaris*) [J]. Journal of Environmental Biology, 2009, 30 (2): 275-281.
- [30] Fenandez-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.
- [31] 杭琼. 蚯蚓粪改良果园底土效果的初步研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2014.
- [32] Oo A N, Iwai C B, Saenjian P. Soil properties and maize growth in saline and nonsaline soils using cassava-industrial waste compost and vermicompost with or without earthworms[J]. Land Degradation

- tion & Development, 2013, 26 (3): 300-310.
- [33] NgoGO P T, Rumpel C, Dignac M F, et al. Transformation of buffalo manure by composting or vermicomposting to rehabilitate degraded tropical soils [J]. Ecological Engineering, 2011, 37 (2): 269-276.
- [34] 王明友, 井大炜, 张红, 等. 蚯蚓粪对豇豆土壤活性有机碳及微生物活性的影响[J]. 核农学报, 2016, 30 (7): 1404-1410.
- [35] 张荣涛, 周东兴, 申雪庆. 蚯蚓粪对盐碱土壤速效养分和碱化指标的影响[J]. 国土与自然资源研究, 2013, 20(4): 83-94.
- [36] 贺慧, 郑华斌, 刘建霞, 等. 蚯蚓对土壤碳氮循环的影响及其作用机理研究进展[J]. 中国农学通报, 2014, 30(33): 120-126.
- [37] Bossuyt H, Six J, Hendrix P F. Protection of soil carbon by microaggregates within earthworm casts [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2005, 37 (2): 251-258.
- [38] Martin A. Short and long-term effects of the endogeic earthworm *Millsonia anomala* (Omodeo) (Megaseoleidae, Oligochaeta) of tropical savannas, on soil organic matter [J]. Biology and Fertility of Soils, 1991, 11(3): 234-238.
- [39] 崔丽娟. 蚯蚓粪对土壤主要微生物学特性影响的研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2012.
- [40] Doan T T, Ngo P T, 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.
- [41] Pramanik P, Bhattacharya S, Bhattacharya P, et al. Phosphorous solubilization from rock phosphate in presence of vermicomposts in Aqualfs [J]. Geoderma, 2009, 152: 16-22.
- [42] 苏晓红, 高志岭, 刘建玲, 等. 蚯蚓粪和磷肥配施对油菜生长和土壤性质的影响[J]. 河北农业大学学报, 2010, 33(3): 8-12.
- [43] 李继蕊, 史庆华, 王秀峰, 等. 不同配比蚯蚓堆肥和牛粪堆肥对根际微环境及黄瓜产量、品质的影响[J]. 山东农业科学, 2013, 45(6): 66-70.
- [44] 贾德新, 李士平, 王风丹, 等. 蚯蚓粪对豇豆根际土壤生物学特征及微生物活性的影响[J]. 浙江农业学报, 2016, 28 (2): 318-323.
- [45] 井大炜. 施用蚯蚓粪对杨树苗根际土壤生物学特征的影响[J]. 水土保持通报, 2014, 34(1): 133-137.
- [46] 郑金伟, 杨文霞, 李辉信, 等. 奶牛粪蚯蚓堆制物对生菜生长及品质的影响[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(6): 1423-1426.
- [47] 吕振宇, 马永良. 蚯蚓粪有机肥对土壤肥力与甘蓝生长、品质的影响[J]. 中国农学通报, 2005, 21(12): 236-240.
- [48] Federico A, Gutierrez M, Jorge S B, et al. Vermicompost as a soil supplement to improve growth, yield and fruit quality of tomato (*Lycopersicon esculentum*) [J]. Bioresource Technology, 2007, 98: 2781-2786.
- [49] 李欢, 向丹, 李晓林. 蚯蚓粪和生物有机肥对土壤养分及夏玉米产量的调控作用[J]. 土壤通报, 2011, 42(5): 1179-1183.
- [50] 徐宪斌. 蚯蚓粪配施化肥对玉米根际土壤生物学特征的影响[J]. 水土保持通报, 2017, 37(1): 78-82.
- [51] 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): 1205-1208.
- [52] Arancon N Q, Edwards C A, Bierman P, et al. Effects of vermicomposts on growth and marketable fruits of field-grown tomatoes, peppers and strawberries [J]. Pedobiologia, 2003, 47: 731-735.
- [53] Arancon N Q, Edwards C A, Bierman P. Influences of vermicomposts on field strawberries. Part 2. Effects on soil microbiological and chemical properties [J]. Bioresource Technology, 2006, 97: 831-840.
- [54] Arancon N Q, Edwards C A, Lee S, et al. Effects of humic acids from vermicomposts on plant growth [J]. European Journal of Soil Biology, 2006, 42: 65-69.
- [55] 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.