

不同有机物料接种蚯蚓对设施菜地土壤 培肥及作物生长的影响^①

吴迪¹, 刘满强², 焦加国², 薛利红¹, 李辉信², 胡锋², 杨林章^{1*}

(1 江苏省农业科学院农业资源与环境研究所, 南京 210014; 2 南京农业大学资源与环境科学学院, 南京 210095)

摘要: 设施蔬菜栽培长期施用过量化肥, 往往导致土壤质量退化及作物产量降低等问题。因此, 采用生态友好的农业生产方式已成为农业可持续发展的趋势。本研究在野外调控试验的第3年采集作物和土壤, 研究了施用不同有机物料条件下, 接种赤子爱胜蚓(*Eisenia foetida*)对设施菜地土壤性质和作物生长的影响。结果表明, 在不同有机物料施用下接种赤子爱胜蚓均显著地提高了黄瓜和菠菜的产量, 其中在施用腐熟牛粪+食用菌渣条件下接种赤子爱胜蚓效果最显著。此外, 在腐熟牛粪和腐熟牛粪+食用菌渣施用条件下, 接种赤子爱胜蚓显著地提高土壤的硝态氮($\text{NO}_3\text{-N}$)、团聚体平均重量直径(MWD)、微生物生物量碳(MBC)、微生物生物量氮(MBN)和代谢熵($q\text{CO}_2$), 而在施用商品有机肥的处理中, 接种赤子爱胜蚓仅显著地提高了土壤 $\text{NO}_3\text{-N}$ 和 $q\text{CO}_2$ 。本研究促进了对蚯蚓在设施农业生态系统中服务功能的理解, 并为设施农业生产提供了理论基础。

关键词: 赤子爱胜蚓; 有机物料施用; 黄瓜-菠菜轮作; 土壤性质

中图分类号: S154.1 文献标识码: A

近年来, 我国温室栽培蔬菜覆盖面积将近 330 万 hm^2 ^[1]。与此同时, 大量施用化肥虽然有利于农业增产创收, 但也造成了一系列环境问题, 例如: 土壤结构退化、土壤肥力下降、土壤生物多样性降低及作物产量降低等^[2]。环境友好的可持续农业管理措施越来越受青睐, 采用有机肥替代化肥的使用已经成为农业可持续发展的一种趋势^[3]。

我国农业废弃物资源极为丰富, 有机废弃物既是重要的有机肥源, 又是严重的环境污染源, 充分利用有机废弃物资源是变废为宝的有效措施。农业废弃物制成的有机肥在提高土壤生态服务功能的各个方面都表现出巨大的潜力, 大量研究发现, 长期施用有机肥可以有效改善土壤的孔隙结构状况, 提高水稳性团聚体的数量和土壤微生物活性^[4-5]。但是, 有机肥也存在速效养分低、在作物生长关键期不能提供足够需求养分等缺陷^[6], 而土壤动物蚯蚓正好可以弥补这一缺陷。

蚯蚓被认为是土壤生态系统中最重要工程师, 它可以通过挖穴、取食和排泄活动影响土壤生态功

能^[7]。有研究报道, 蚯蚓的活性对提高植物生长以及养分循环起着至关重要的作用^[8]。相比连续高强度化肥输入降低蚯蚓的活性和数量而言^[9], 有机肥的输入可以为蚯蚓提供食物来源, 有利于增强其活性并充分发挥其在农田生态系统中的生态服务功能, 如促进有机物的降解、改善土壤的养分循环及提高生态系统的生产力^[10]。然而, Leroy 等^[11]认为农田蚯蚓的生物量及其活性受添加不同有机物料种类影响。因此, 研究在不同有机物料施用下蚯蚓在农田生态系统中的生态功能有着极其重要的意义。

本研究利用野外设施菜地, 通过施用不同有机物料(商品有机肥、腐熟的牛粪、腐熟的牛粪+食用菌渣), 结合接种赤子爱胜蚓(*Eisenia foetida*), 探究土壤肥力及作物产量的变化, 并从中选取最佳的有机物料配施方式, 为农田生产应用及管理提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 供试土壤

田间试验地点设在江苏省苏州市相城区望亭镇

基金项目: 国家自然科学基金项目(41601323, 41771287)、土壤与农业可持续发展国家重点实验室开放基金项目(Y20160033)、国家重点研发计划课题项目(2016YFD0801101)和中国博士后基金项目(2015M581753)资助。

* 通讯作者(lzyang@issas.ac.cn)

作者简介: 吴迪(1987—), 男, 福建福安人, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为农业固体废弃物的资源化利用。E-mail: wudinjau@163.com

新埂村虞河蔬菜基地(120°28.732'E, 31°26.798'N)。属于北亚热带季风气候, 常年平均气温 16.6 °C, 最高气温 38.1 °C, 最低气温 -6.1 °C, 10 °C 的有效积温 4 933.7 °C, 年均无霜期 231 d, 年平均降雨量 1 312 mm, 年日照 1 745 h, 年平均太阳总辐射量 4.94×10^5 J/cm²。试验地 0~20 cm 耕作层土壤基本性质见表 1。

表 1 供试土壤基本理化性质
Table 1 Basic physicochemical characteristics of tested soil

pH	有机质 (g/kg)	全氮 (g/kg)	速效氮 (mg/kg)	黏粒 (g/kg)	粉砂 (g/kg)	砂粒 (g/kg)
5.76	20.9	2.32	157.21	228	692	80

1.2 供试材料

试验选用种植的黄瓜品种为津杂二号(*Cucumis sativus* L.), 菠菜品种为内蒙古圆叶大菠菜(*Spinacia oleracea* L.)。供试有机物料: 腐熟的牛粪, 选自苏州市相城区望亭镇新埂村奶牛场, 黄瓜季施用牛粪的基本性质为: 含水量 76%, 有机碳含量 263.76 g/kg, 全氮 22.15 g/kg, 全磷 12.10 g/kg, 全钾 2.10 g/kg。菠菜季施用牛粪的基本性质为含水量 80%, 有机碳含量 232.53 g/kg, 全氮 21.05 g/kg, 全磷 11.30 g/kg, 全钾 3.25 g/kg; 商品有机肥, 选自沃丰有限公司生产的商品有机肥, 其基本性质为: 含水量 18%, 全氮 11.90 g/kg, 全磷 9.56 g/kg, 全钾 9.50 g/kg; 食用菌渣, 选自苏州市相城区望亭镇新埂村食用菌厂

生产完蘑菇剩下的下脚料, 其主要成分为棉籽壳、麸皮和石灰。其基本性质为含水量 75%, 全氮 6.70 g/kg, 全磷 2.03 g/kg, 全钾 2.31 g/kg。试验选用的蚯蚓品种为赤子爱胜蚓(*Eisenia foetida*)。

1.3 试验设计

本试验的小区始建于 2010 年, 试验小区由硅酸钙板围成大小为 2.4 m × 1.2 m, 埋入地下 0.6 m 深, 高出地表 0.2 m 深, 以防止蚯蚓逃逸。小区与小区之间间隔 0.5 m。本试验共设计 6 个处理, 每个处理 3 个重复(表 2)。定位试验从 2010 年开始, 前期研究结果表明经过 3 年“黄瓜-菠菜”轮作方式后, 生态系统已逐步趋于稳定。因此, 本研究的所有结果都基于 2012 年的田间试验数据。每季作物种植时, 不同有机物料作为基肥一次性施用, 在整个作物生产期内无任何化肥或追施肥料添加。赤子爱胜蚓经过清肠处理后, 接种量按 60 g/m²(相当于 100 条 ± 5 条赤子爱胜蚓)接种^[12]。蚯蚓的接种量在每季蔬菜种植前进行田间操作控制, 尽量将蚯蚓均匀散放到田面, 接种后观察蚯蚓的入土情况, 需要时替换掉活性差的蚯蚓。每季作物收获后进行蚯蚓的存活率及生物量调查, 每季作物种植前补充蚯蚓数量或用手捡去除到 60 g/m²密度。黄瓜生长季为每年 4 月初到 6 月底, 菠菜生长季为每年 10 月初到 12 月初。在蔬菜生长期, 其种植管理按照当地的生产标准进行管理种植。

表 2 试验设计
Table 2 Experimental design

代号	试验处理	处理说明
O	商品有机肥	当地处理: 沃丰有机肥 18 t/hm ²
OE	商品有机肥+赤子爱胜蚓	沃丰有机肥 18 t/hm ² , 爱胜蚓: 60 g/m ²
C	腐熟牛粪	腐熟牛粪: 30 t/hm ²
CE	腐熟牛粪+赤子爱胜蚓	腐熟牛粪: 30 t/hm ² , 赤子爱胜蚓: 60 g/m ²
CM	腐熟牛粪+菌渣(1:1)	腐熟牛粪与食用菌渣等质量施用: 30 t/hm ²
CME	腐熟牛粪+菌渣(1:1)+赤子爱胜蚓	腐熟牛粪与食用菌渣等质量施用: 30 t/hm ² , 赤子爱胜蚓: 60 g/m ²

1.4 样品采集与分析

1.4.1 蚯蚓存活率的调查 在每季作物收获后, 对所有试验小区(接种蚯蚓和没接种蚯蚓)进行 0.3 m × 0.3 m × 0.3 m 样方取样调查, 计算蚯蚓的条数和生物量。

1.4.2 植株样品的采集及分析 在黄瓜结果期, 累积采收一个月的黄瓜重量作为其产量。在菠菜成熟期, 采收每个小区地上部菠菜的生物量作为菠菜的产量。

1.4.3 土壤样品的采集及分析 分别在黄瓜和菠菜成熟期, 用土钻在各小区内采集耕作层(20 cm)土壤样品, 土样分两部分收集, 一部分采取盒子盛放土

壤原状土, 防止运输过程中受挤压, 从而破坏团聚体结构。取回的土壤过 8 mm 筛后装入硬质塑料瓶中用于团聚体的分离。另一部分土壤采集于 4 °C 保鲜盒里, 带回实验室进行测定。

土壤水稳性团聚体测定, 用湿筛分离的方法^[13]将土样分离成: >2、2~0.25、0.25~0.053、<0.053 mm 4 个级别的团聚体, 最后用平均重量直径(MWD)来描述团聚体的稳定性^[14]; 土壤 pH 使用无 CO₂ 水浸提(1:2.5 的土水比)电位法测定; 铵态氮(NH₄⁺-N)和硝态氮(NO₃⁻-N)采用 2 mol/L KCl 浸提, 流动分析仪(Skalar,

Breda, Holland)测定;土壤微生物生物量碳(MBC)和微生物生物量氮(MBN)采用氯仿熏蒸提取法测定^[15-16];土壤代谢熵($q\text{CO}_2$):采用土壤基础呼吸与MBC的比值来表示^[17],其中土壤基础呼吸通过气相色谱 Agilent GC 7890A 测定 CO_2 值^[18]。

1.5 数据分析

采用 SPSS 软件对数据进行统计分析,分析前用 Kolomogorov-Smirnov 和 Levene 方法检验数据的正态分布及方差齐性,并在必要时用对数对数据进行转换。以独立样本 T 检验分析有无蚯蚓的差异,均值的比较检验采用 Duncan 法(显著性水平设为 0.05)。利用 Origin 8.5 作图。

2 结果与分析

2.1 蚯蚓生物量

在黄瓜和菠菜收获后,通过调查蚯蚓的数量及生物量发现,施用 3 种不同有机物料条件下接种的蚯蚓数量及生物量大小顺序依次为: $\text{CME} > \text{CE} > \text{OE}$ (表 3)。与初始接种量相比,施用腐熟牛粪+食用菌渣条件下蚯蚓生物量增加幅度最大,达到 33%~58%(表 3)。

2.2 土壤性质

施用不同有机物料下接种蚯蚓对土壤性质的影响不同。无论在黄瓜季还是在菠菜季,施用腐熟牛粪

或腐熟牛粪+食用菌渣,在蚯蚓的作用下,土壤的硝态氮(NO_3^--N)、团聚体平均重量直径(MWD)、微生物生物量碳(MBC)、微生物生物量氮(MBN)和代谢熵($q\text{CO}_2$)均显著升高(表 4)。其中在腐熟牛粪处理中接种蚯蚓提高土壤 MWD 主要是由于蚯蚓提高了土壤 2~0.25 mm 团聚体含量,降低了土壤 0.25~0.053 mm 以及 <0.053 mm 的团聚体含量;而在腐熟牛粪+菌渣处理中接种蚯蚓提高土壤 MWD 则是由于蚯蚓提高了土壤 2~0.25 mm 团聚体含量,降低了土壤 <0.053 mm 的团聚体含量(图 1)。相比较之下,在施用商品有机肥条件下接种蚯蚓,仅提高了土壤的 NO_3^--N 和 $q\text{CO}_2$ 含量(表 4)。

表 3 2012 年黄瓜-菠菜轮作体系中蚯蚓数量及生物量
Table 3 Changes in earthworm population and biomass after cucumber and spinach harvests in 2012

处理	2012 年黄瓜季		2012 年菠菜季	
	数量(条)	生物量(g)	数量(条)	生物量(g)
O	0 c	0 d	0 d	0 d
OE	69 ± 11 a	79.5 ± 10.2 c	71 ± 11 c	80.2 ± 7.9 c
C	0 c	0 d	0 d	0 d
CE	80 ± 13 ab	100.0 ± 12.1 b	90 ± 6 b	112.0 ± 12.6 b
CM	0 c	0 d	0 d	0 d
CME	106 ± 10 a	133.0 ± 10.5 a	131 ± 22 a	158.0 ± 11.6 a

注:表中同列数据小写字母不同表示处理间差异显著($P < 0.05$),下表同。

表 4 不同有机物料和蚯蚓在黄瓜季和菠菜季对土壤性质的影响

Table 4 Effects of earthworms and different manures on soil properties in seasons of cucumber and spinach

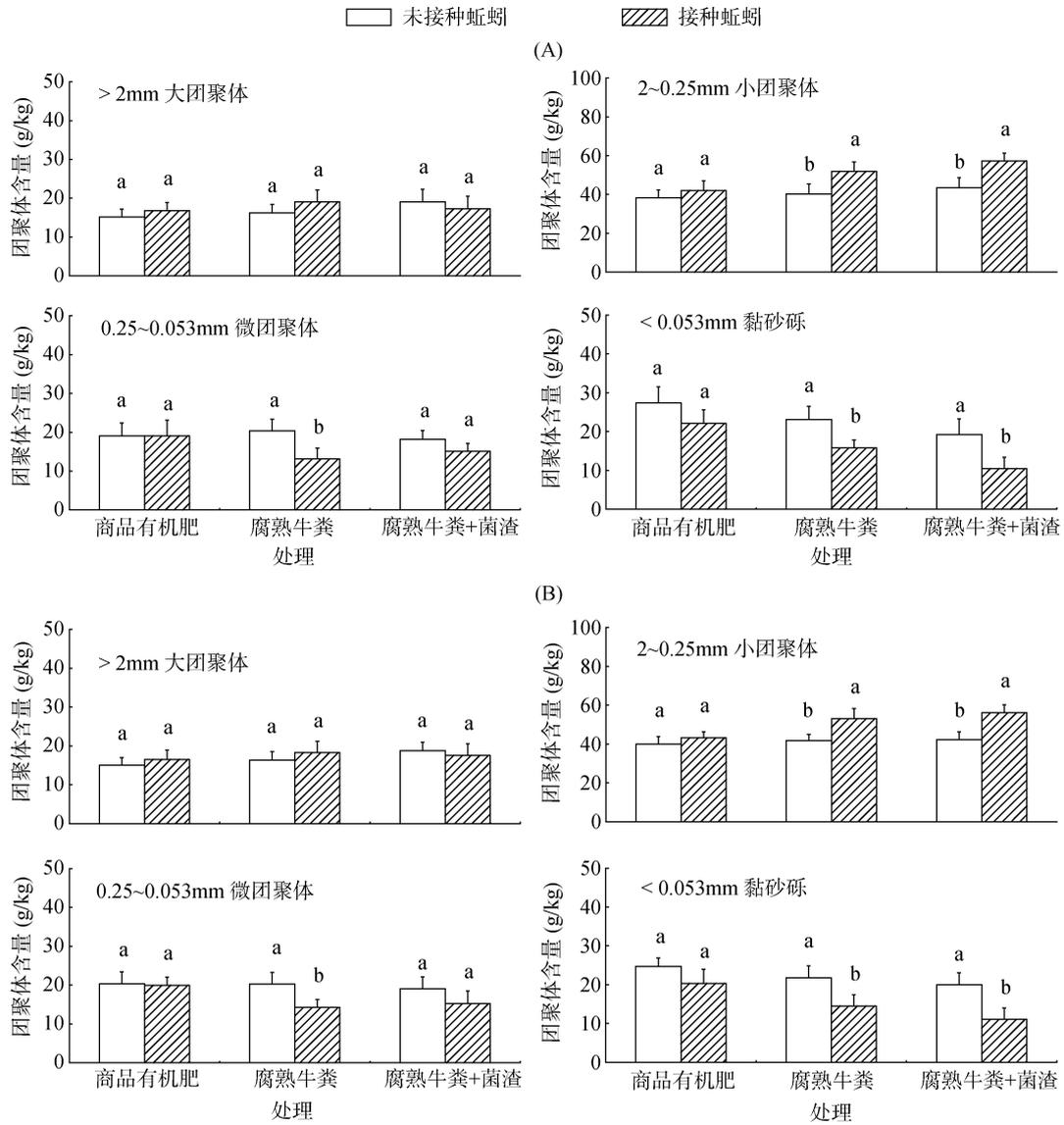
种植季	处理	$\text{NO}_3^--\text{N}(\text{mg}/\text{kg})$	$\text{NH}_4^+-\text{N}(\text{mg}/\text{kg})$	pH	MWD(mm)	MBC(mg/kg)	MBN(mg/kg)	$q\text{CO}_2(\mu\text{g}/\text{kg})$
黄瓜季	O	60.5 ± 7.8 b	20.8 ± 5.21 a	5.45 ± 0.05 a	0.87 ± 0.09 a	200 ± 26.2 a	26.8 ± 4.3 a	1.56 ± 0.11 b
	OE	82.4 ± 9.7 a	18.9 ± 3.98 a	5.50 ± 0.09 a	1.00 ± 0.13 a	213 ± 20.7 a	31.3 ± 6.7 a	1.90 ± 0.07 a
	C	73.2 ± 8.5 b	24.7 ± 4.17 a	5.62 ± 0.14 a	0.93 ± 0.10 b	254 ± 19.8 b	32.7 ± 4.9 b	1.63 ± 0.09 b
	CE	94.3 ± 9.0 a	27.4 ± 6.29 a	5.57 ± 0.11 a	1.21 ± 0.08 a	315 ± 21.2 a	45.6 ± 4.2 a	2.00 ± 0.12 a
	CM	80.6 ± 7.3 b	26.7 ± 3.18 a	5.43 ± 0.09 a	1.12 ± 0.05 b	284 ± 26.7 b	35.7 ± 5.1 b	1.82 ± 0.10 b
	CEM	105.9 ± 11.2 a	30.2 ± 5.25 a	5.47 ± 0.13 a	1.31 ± 0.07 a	339 ± 24.1 a	50.3 ± 6.4 a	2.33 ± 0.15 a
菠菜季	O	55.6 ± 8.3 b	22.7 ± 1.77 a	5.40 ± 0.11 a	0.90 ± 0.11 a	221 ± 18.9 a	23.7 ± 5.2 a	1.37 ± 0.09 b
	OE	72.4 ± 6.2 a	23.6 ± 6.72 a	5.42 ± 0.08 a	1.02 ± 0.12 a	217 ± 15.7 a	28.9 ± 4.0 a	1.85 ± 0.13 a
	C	60.7 ± 7.5 b	27.8 ± 3.21 a	5.50 ± 0.15 a	0.97 ± 0.09 b	241 ± 27.1 b	27.6 ± 3.7 b	1.57 ± 0.12 b
	CE	80.9 ± 6.5 a	31.2 ± 5.77 a	5.46 ± 0.13 a	1.27 ± 0.05 a	297 ± 23.5 a	36.9 ± 3.9 a	2.02 ± 0.15 a
	CM	71.3 ± 8.9 b	30.6 ± 3.82 a	5.40 ± 0.07 a	1.10 ± 0.09 b	278 ± 28.9 b	30.1 ± 6.4 b	1.66 ± 0.10 b
	CME	96.2 ± 10.1 a	33.9 ± 4.19 a	5.38 ± 0.11 a	1.33 ± 0.06 a	352 ± 32.6 a	43.5 ± 5.9 a	2.18 ± 0.20 a

注:表中小写字母不同表示同一有机物料处理接种蚯蚓和不接种蚯蚓处理间差异显著($P < 0.05$)。

2.3 蔬菜产量

无论在黄瓜季还是在菠菜季,3 种不同有机物料施用下接种蚯蚓均显著地提高黄瓜和菠菜的产量(图 2)。在黄瓜季,不同有机物料接种蚯蚓与未接种蚯蚓相

比,黄瓜产量增幅达到 28.8%~32.3%(图 2)。在菠菜季,不同有机物料接种蚯蚓与未接种蚯蚓相比,菠菜产量增幅达到 29.0%~37.4%(图 2)。无论在黄瓜季还是在菠菜季,腐熟牛粪+食用菌渣施用下接种蚯蚓的



(图柱上方小写字母不同表示同一有机物料处理接种蚯蚓和不接种蚯蚓处理间差异显著($P < 0.05$), 下同)

图 1 不同有机物料和蚯蚓对土壤团聚体不同粒径组成在黄瓜季(A)和菠菜季(B)的影响

Fig. 1 Effects of earthworms and different manures on soil aggregate size distribution in seasons of cucumber (A) and spinach (B)

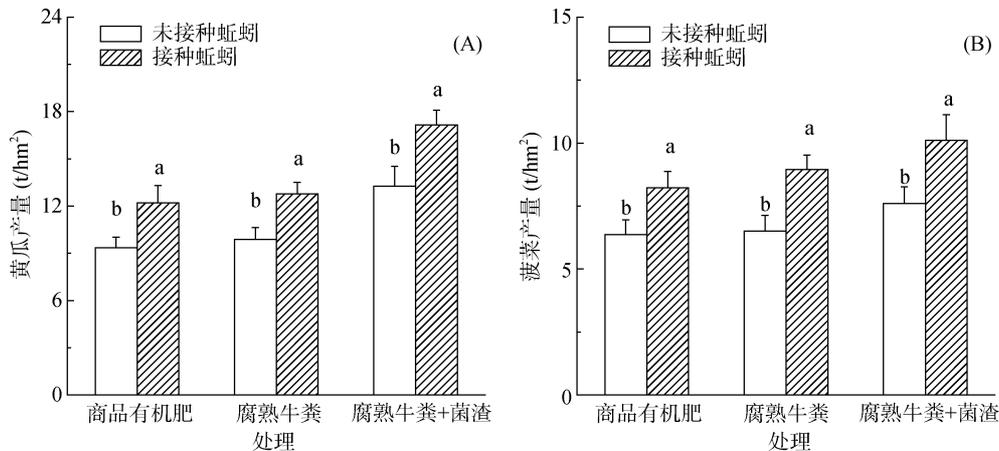


图 2 不同有机物料和蚯蚓对黄瓜产量(A)和菠菜产量(B)的影响

Fig. 2 Effects of earthworms and different manures on yields of cucumber (A) and spinach (B)

处理蔬菜产量最高。

3 讨论

3.1 蚯蚓对土壤性质的影响

蚯蚓活动对土壤性质的影响与蚯蚓品种、土壤类型以及施用有机物料的性质都有着极大的联系^[19]。本研究中取用的赤子爱胜蚓属于典型的表层种,主要取食有机物并居住在有机物内。通过施用 3 种不同的有机物料对比,发现蚯蚓的生物量在腐熟牛粪+食用菌渣中最多,腐熟牛粪中次之,商品有机肥中最少。先前的一些研究也表明,发酵后的牛粪、蘑菇底料、食用菌渣与牛粪、猪粪等按不同比例混合都能促进蚯蚓的生长^[20]。Schon 等^[21]曾报道蚯蚓的生态功能与其生物量呈正相关。本研究发现施用腐熟牛粪和腐熟牛粪+食用菌渣条件下,蚯蚓显著地提高土壤结构的稳定性、土壤养分的有效性及土壤微生物的活性。土壤结构方面,本研究中蚯蚓提高了土壤 2~0.25 mm 团聚体数量。也有研究资料表明,农田接种蚯蚓可以改善土壤结构,如 Lavelle 等^[22]通过接种 *P. corethrurus* 种植 6 茬作物后,发现土壤大团聚体含量从 25.4% 增加到了 31.2%。土壤养分方面,3 种不同的有机物料接种蚯蚓都提高了土壤 NO_3^- -N 含量。一方面,蚯蚓通过分解有机物料能增加土壤的速效养分,并且每年蚯蚓在农田生态系统中通过其死亡后的组织可向周边土壤中释放 $\text{N } 10 \sim 74 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ ^[23];另一方面,研究报道蚯蚓黏液和蚯蚓粪中富含大量的 NO_3^- -N^[24]。土壤微生物活性方面,本研究通过连续 3 a 的田间试验,发现在施用腐熟牛粪和腐熟牛粪+食用菌渣条件下,蚯蚓都显著地提高土壤 MBC、MBN 及 $q\text{CO}_2$ 。大多数研究结果表明:蚓粪和蚓穴壁内的微生物量显著高于对照土壤,且过腹的土壤及有机物料更利于微生物侵染和繁殖^[25]。Wu 等^[26]研究发现,在施用牛粪的条件下,接种威廉腔环毛蚓显著提高土壤 MBC、MBN 及 $q\text{CO}_2$ 。综上所述,通过施用 3 种不同的有机物料接种蚯蚓后对土壤肥力提高程度的综合比较,发现在施用腐熟牛粪+食用菌渣条件下接种蚯蚓效果最好,单施腐熟牛粪并接种蚯蚓效果次之,施用商品有机肥接种蚯蚓的效果并不理想。可能是由于腐熟牛粪经过蚯蚓消化系统,在多种酶的作用下能迅速分解、转化成为自身或其他生物易于利用的营养物质^[27],这些营养物质为食用菌渣中大量的有益微生物生长提供良好的环境。同时,食用菌渣比较疏松,还能改善土壤结构。然而,商品有机肥是已经过加工成颗粒状的有机肥,并不很匹配赤子爱胜蚓的生境(取食

性),从而影响到蚯蚓活性及土壤生态功能的表达。

3.2 蚯蚓对作物产量的影响

当前,在全球人口不断增加、可利用耕地资源日渐减少、极端气候日趋频繁的背景下,全球食物生产正面临着前所未有的挑战,人们把更多的目光集中于传统农业发展与可持续农业的发展^[28]。蚯蚓在可持续农业发展生态系统中作用是不可忽略的,尤其是对作物生长的影响在农业生产上备受重视。Van Groenigen 等^[29]通过收集 58 篇论文 462 个数据进行整合分析,发现蚯蚓能显著地增加作物的产量 25%,地上部生物量 23%,地下部生物量 20% 以及总的生物量 21%。Wu 等^[26]研究发现,在施用牛粪的条件下,接种威廉腔环毛蚓可增加作物产量 18%~47%。蚯蚓促进植物生长可能的 5 条途径^[24]: 改善土壤结构; 产生植物生长调节物质; 刺激与植物共生的微生物; 抑制害虫和作物疾病; 增加养分的利用率。在本研究中,特别是在施用腐熟牛粪和腐熟牛粪+食用菌渣条件下,蚯蚓增加了土壤 2~0.25 mm 团聚体含量、土壤速效氮含量及微生物活性,为增加作物产量奠定了基础。值得注意的是,本研究发现作物的最大产量是在施用牛粪+食用菌渣接种蚯蚓的处理中。可能存在以下两方面原因: 作物生长初期较为缓慢,对养分的需求也相对较少,随着植株的生长,食用菌渣可在生产中作为有机肥的有效补充^[30]; 本研究在施用牛粪+食用菌渣接种蚯蚓的处理中土壤肥力最好,同时该处理中蚯蚓的生物量和数量也最多,这与 Schon 等^[21]报道植物的产量和其生物量呈正相关相吻合。

4 结论

蚯蚓的土壤生态服务功能与蚯蚓品种及施用有机物料的性质密切相关。在施腐熟牛粪及腐熟牛粪+食用菌渣条件下,接种赤子爱胜蚓提高了土壤 NO_3^- -N、平均重量直径、微生物生物量碳、微生物生物量氮和代谢熵。同时,在 3 种不同有机物料中接种赤子爱胜蚓分别提高黄瓜产量 28.8%~32.3% 和菠菜产量 29.0%~37.4%。从综合效果来看,在施用腐熟牛粪搭配食用菌渣条件下,接种赤子爱胜蚓改善土壤质量及促进作物生长的效果最佳,可推荐为农田施肥管理措施。目前,有关有机物料与土壤动物在农田生态系统中的联合作用往往被人们忽略^[31]。现有的研究主要是室内小尺度盆栽控制试验,而蚯蚓作为土壤生物多样性及可持续农业发展的重要组成部分,希望将来能有更多的田间试验报道来了解其发挥土壤

生态服务功能的机制。

参考文献：

- [1] Chang J, Wu X, Liu A, et al. Assessment of net ecosystem services of plastic greenhouse vegetable cultivation in China[J]. *Ecological Economics*, 2011, 70: 740–748
- [2] Ju X T, Xing G X, Chen X P, et al. Reducing environmental risk by improving N management in intensive Chinese agricultural systems[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2009, 106: 3041–3046
- [3] 孙振钧, 孙永明. 我国农业废弃物资源化与农村生物质能源利用的现状与发展[J]. *中国农业科技导报*, 2006, 8(1): 6–13
- [4] Meng Q, Sun Y, Zhao J, et al. Distribution of carbon and nitrogen in water-stable aggregates and soil stability under long-term manure application in solonchic soils of the Songnen plain, northeast China[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2014, 14(6): 1041–1049
- [5] Bowles T M, Acosta-Martinez V, Calderon F, et al. Soil enzyme activities, microbial communities, and carbon and nitrogen availability in organic agroecosystems across an intensively-managed agricultural landscape[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2014, 68: 252–262
- [6] Singh R, Sharma R, Singh D. Effect of vermicompost on plant growth, fruit yield and quality of strawberries in irrigated arid region of northern plains[J]. *Indian Journal of Horticulture*, 2010, 67(3): 318–321
- [7] Edwards C A. The importance of earthworms as key representatives of the soil fauna // Edwards C A. *Earthworm ecology*[M]. Boca Raton, USA : CRC Press, 2004: 3–11
- [8] Scheu S. Effects of earthworms on plant growth: Patterns and perspectives: The 7th international symposium on earthworm ecology Cardiff Wales 2002[J]. *Pedobiologia*, 2003, 47: 846–856
- [9] Blair J, Parmelee R, Allen M, et al. Changes in soil N pools in response to earthworm population manipulations in agroecosystems with different N sources[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1997, 29: 361–367
- [10] Huhta V. The role of soil fauna in ecosystems: A historical review[J]. *Pedobiologia*, 2007, 50: 489–495
- [11] Leroy B L, Van den Bossche A, De Neve S, et al. The quality of exogenous organic matter: Short-term influence on earthworm abundance[J]. *European Journal of Soil Biology*, 2007, 43: 196–200
- [12] Tao J, Chen X, Liu M, et al. Earthworms change the abundance and community structure of nematodes and protozoa in a maize residue amended rice-wheat rotation agro-ecosystem[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2009, 41: 898–904
- [13] Six J, Paustian K, Elliott E, et al. Soil structure and organic matter I. Distribution of aggregate-size classes and aggregate-associated carbon[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2000, 64: 681–689
- [14] Kemper W, Rosenau R. Aggregate stability and size distribution // Dane J H, Topp C. *Methods of soil analysis*[M]. Soil Science Society of America: Agronomy Monograph No9. Society of Agronomy, 1986: 425–442
- [15] Vance E, Brookes P, Jenkinson D. An extraction method for measuring soil microbial biomass C[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1987, 19: 703–707
- [16] Brookes P C, Landman A, Pruden G, et al. Chloroform fumigation and the release of soil nitrogen: A rapid direct extraction method to measure microbial biomass nitrogen in soil[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1985, 17: 837–842
- [17] Anderson T H, Domsch K. Application of eco-physiological quotients qCO_2 and qD on microbial biomasses from soils of different cropping histories[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1990, 22: 251–255
- [18] Alef K, Nannipieri P. *Methods in applied soil microbiology and biochemistry*[M]. UK: Academic Press, 1995
- [19] 张卫信, 陈迪马, 赵灿灿. 蚯蚓在生态系统中的作用[J]. *生物多样性*, 2007, 15(2): 142–153
- [20] 李瑞哲, 张红垒, 郭建伟, 等. 蘑菇底料等废弃物对蚯蚓生长发育的影响[J]. *中国食用菌*, 2010, 29(2): 32–33
- [21] Schon N L, Mackay A D, Gray R A, et al. Influence of earthworm abundance and diversity on soil structure and the implications for soil services throughout the season[J]. *Pedobiologia*, 2017, 62: 41–47
- [22] Lavelle P, Charpentier F, Villenave C, et al. Effects of earthworms on soil organic matter and nutrient dynamics at a landscape scale over decades // Edwards C A. *Earthworm ecology*[M]. Boca Raton, USA: CRC Press, 2004: 145–160
- [23] Whalen J K, Parmelee R W. Earthworm secondary production and N flux in agroecosystems: A comparison of two approaches[J]. *Oecologia*, 2000, 124: 561–573
- [24] Brown G G, Edwards C A, Brussaard L. How earthworms affect plant growth: Burrowing into the mechanisms // Edwards C A. *Earthworm ecology*[M]. Boca Raton, USA: CRC Press, 2004: 13–49
- [25] Tiunov A V, Scheu S. Microbial respiration, biomass, biovolume and nutrient status in burrow walls of *Lumbricus terrestris* L.(*Lumbricidae*)[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1999, 31: 2039–2048
- [26] Wu D, Liu M, Song X, et al. Earthworm ecosystem service and dis-service in an N-enriched agroecosystem: Increase of plant production leads to no effects on yield-scaled N_2O emissions[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2015, 82: 1–8
- [27] 张舒玄, 常江杰, 李辉信, 等. 奶牛粪蚯蚓堆肥的基质配方及对草莓育苗的影响[J]. *土壤*, 2016, 48(1): 59–65
- [28] Godfray H C J, Beddington J R, Crute I R, et al. Food security: The challenge of feeding 9 billion people[J]. *Science*, 2010, 327: 812–818
- [29] Van Groenigen J W, Lubbers I M, Vos H M, et al. Earthworms increase plant production: A meta-analysis[J]. *Scientific Reports*, 2014, 4: 6365. doi:10.1038/srep06365
- [30] 黄秀声, 翁伯琦, 黄勤楼, 等. 食用菌菌渣循环利用对农田生态环境的影响与评价指标[J]. *现代农业科技*,

2010, 22: 268–271

[31] Doan T T, Jusselme D M, Lata J C, et al. The earthworm species *Metaphire posthuma* modulates the effect of organic

amendments (compost vs. vermicompost from buffalo manure) on soil microbial properties. A laboratory experiment[J]. *European Journal of Soil Biology*, 2013, 59: 15–21

Effects of Inoculating Earthworm to Vegetable Field on Soil Fertility and Plant Growth Following Different Organic Amendments

WU Di¹, LIU Manqiang², JIAO Jiaguo², XUE Lihong¹, LI Huixin², HU Feng², YANG Linzhang^{1*}

(1 *Institute of Agricultural Resource and Environment, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China;*
2 *College of Resources and Environmental Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China*)

Abstract: High inputs of chemical fertilizers could result in a series of problems such as soil degradation and crop low-production of protected vegetable cultivation. Ecological agricultural production style has been considered as one of the most feasible ways to the sustainability of agriculture. Based on the crop and soil samples collected in the third year of a field experiment, this paper aims to explore the effects of inoculating with earthworms (*Eisenia foetida*) following organic amendment on improving crop yield and soil quality. The results showed that *E. foetida* significantly increased the yields of cucumber and spinach among all the organic amendments, and the maximum crop yield appeared in the treatment of cattle manure combining edible mushroom dregs inoculated with *E. foetida*. Both the treatment of cattle manure and the treatment of cattle manure combining with edible mushroom dregs inoculated with *E. foetida* significantly increased soil NO_3^- -N, MWD, MBC, MBN and $q\text{CO}_2$. However, the treatment of commercial organic fertilizer inoculated with *E. foetida* only significantly increased soil NO_3^- -N and $q\text{CO}_2$. Therefore, this study not only promoted the understanding of ecosystem service function of earthworm, but also provided a theoretical basis for facility agriculture.

Key words: *Eisenia foetida*; Organic amendment; Cucumber-spinach rotation; Soil properties