

高富成, 李海俊, 穆晓国, 等. 化肥减量处理下蚯蚓-牛粪协同作用对菜薹生长及土壤中重金属锌、砷和铬含量的影响[J]. 江苏农业学报, 2024, 40(6):1078-1088.

doi:10.3969/j.issn.1000-4440.2024.06.015

化肥减量处理下蚯蚓-牛粪协同作用对菜薹生长及土壤中重金属锌、砷和铬含量的影响

高富成, 李海俊, 穆晓国, 高虎, 张莹, 叶林

(宁夏大学葡萄酒与园艺学院, 宁夏 银川 750021)

摘要: 为了探究化肥减量施用处理下协同施用蚯蚓-牛粪对菜薹生长及土壤重金属含量的影响,以菜薹和种植土壤为研究对象,采用盆栽试验方法,设置常规施肥(CK)、化肥减量30%+蚯蚓(CE)、腐熟牛粪+蚯蚓(FE)、化肥减量30%+腐熟牛粪(CFC)及化肥减量30%+腐熟牛粪+蚯蚓(CFE)共5个组别进行试验。结果表明,与CK相比,CFE处理显著提高了菜薹的生长性状指标($P<0.05$),包括株高、茎粗、总根系长度、根系总表面积、根系总体积和平均单根直径等。同时,蚯蚓的引入优化了土壤结构,增加了土壤养分含量,与CK及CFC处理相比,CFE处理的土壤pH值显著降低($P<0.05$);与CK相比,CFE处理的电导率(EC)、土壤有机质(SOM)含量、全氮(TN)含量、速效氮(AN)含量显著升高($P<0.05$)。此外,与CK相比,CFE处理显著降低了土壤中的砷、铬含量($P<0.05$),显著增加了锌含量($P<0.05$)。关于土壤理化性状对菜薹生长影响的研究发现,全氮含量、速效氮含量和速效磷含量是能共同影响菜薹株高、茎粗的土壤理化性状,而电导率、土壤有机质含量则会显著影响菜薹总根系长度和根系活力。综上,化肥减量30%+腐熟牛粪+蚯蚓联合处理在促进菜薹生长发育、优化土壤理化性状及降低土壤重金属污染方面具有潜在应用价值。

关键词: 化肥减量; 蚯蚓; 重金属; 菜薹; 土壤理化性状

中图分类号: S634.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2024)06-1078-11

Synergistic effects of earthworms and cow manure on the growth of flowering Chinese cabbage and contents of heavy metals zinc, arsenic and chromium in soil under reduced chemical fertilization

GAO Fucheng, LI Haijun, MU Xiaoguo, GAO Hu, ZHANG Ying, YE Lin

(College of Enology and Horticulture, Ningxia University, Yinchuan 750021, China)

Abstract: In order to investigate the effects of synergistic application of earthworms and cow manure under reduced chemical fertilizer application treatment on the growth of flowering Chinese cabbage and the contents of heavy metals in soil, a pot experiment was conducted using flowering Chinese cabbage and planting soil. Five groups of conventional fertilizer application (CK), 30% reduction of chemical fertilizer + earthworms (CE), decomposed cow manure + earthworms (FE), 30% reduction of chemical fertilizer + decomposed cow dung (CFC) and 30% reduction of chemical fertilizer + decomposed cow manure + earthworms (CFE) were tested. The results showed that compared with CK, CFE treatment significantly improved the growth trait indexes of flowering Chinese cabbage ($P<0.05$), including plant height, stem diameter, total root length, total root surface area, total root volume and average root diameter. Meanwhile, the introduction of earthworms optimized the soil structure and increased the soil nutrient con-

收稿日期:2023-06-01

基金项目:宁夏回族自治区重点研发计划项目(2021BBF02006);国家重点研发计划项目(2021YFD1600300);宁夏回族自治区重点研发计划项目(2021BBF02019);宁夏高等学校一流学科建设项目(NXYLXK2017B03)

作者简介:高富成(1999-),男,陕西榆林人,硕士,主要从事设施蔬菜生理栽培的研究。(E-mail)gfc3207@163.com

通讯作者:叶林,(E-mail)yelin.3993@163.com

of chemical fertilizer + decomposed cow dung (CFC) and 30% reduction of chemical fertilizer + decomposed cow manure + earthworms (CFE) were tested. The results showed that compared with CK, CFE treatment significantly improved the growth trait indexes of flowering Chinese cabbage ($P<0.05$), including plant height, stem diameter, total root length, total root surface area, total root volume and average root diameter. Meanwhile, the introduction of earthworms optimized the soil structure and increased the soil nutrient con-

tent. Compared with CK and CFC treatments, the soil pH in CFE treatment decreased significantly ($P < 0.05$). Compared with CK, the electrical conductivity (EC), soil organic matter (SOM) content, total nitrogen (TN) content, and available nitrogen (AN) content in CFE treatment were significantly increased ($P < 0.05$). In addition, compared with CK, CFE treatment significantly reduced the contents of arsenic and chromium in soil ($P < 0.05$), and significantly increased the content of zinc ($P < 0.05$). Studies on the effects of soil physicochemical properties on the growth of flowering Chinese cabbage found that total nitrogen content, available nitrogen content and available phosphorus content were the soil physicochemical properties that jointly affected the height and stem diameter of flowering Chinese cabbage, whereas electrical conductivity and organic matter content significantly affected flowering Chinese cabbage root length and root vigour. In conclusion, the combined treatment of 30% reduction of chemical fertilizer + decomposed cow manure + earthworms has potential application value in promoting the growth and development of flowering Chinese cabbage, optimizing soil physicochemical properties and reducing soil heavy metal pollution.

Key words: chemical fertilizer reduction; earthworms; heavy metals; flowering Chinese cabbage; soil physical and chemical properties

施肥是全球广泛采用的土壤管理策略,而肥料的施用方式是影响农业生产的重要因素^[1]。然而,过度和不平衡施肥会导致土壤富集大量重金属^[2],这已经成为影响农民维持土壤生产力的一个严重问题。菜薹是一种常见的带茎、带叶食用蔬菜,是中国内地销往中国香港、中国澳门的主要蔬菜之一,目前已在全国普遍种植^[3]。由于常年连作,使土壤中养分缺失,重金属积累,导致菜薹产量、品质下降^[4]。虽然施用有机肥是一种环保的养分补给方式,但其养分释放速率较慢,无法在短时间内满足作物对养分的需求^[5]。目前,通常采用非生物调控方法来改善土壤生态功能、促进植物的生长发育^[6-7]。

蚯蚓作为土壤生态系统中最重要“工程师”,可以通过活动来改善土壤生态功能^[8]。但是,由于常年连作,土壤含水量降低、板结严重、孔隙度降低,使得蚯蚓活性降低、数量减少。因此,有机肥的输入一方面可以为蚯蚓提供食物、提高蚯蚓的活性及数量,使其充分发挥在农田生态系统中的生态服务功能^[9],并能促进有机质矿化、养分含量提升和植物生长^[10]。另一方面,有机肥也可以优化土壤结构、提高土壤肥力,蚯蚓的取食和排泄活动可以增加土壤孔隙度,促进植物生长发育^[11]。此外,有研究发现,蚯蚓的活动可以降低土壤中的重金属含量,并通过其活动来改变重金属的活性^[12-13]。因此,本研究拟基于化肥减量施用条件下蚯蚓-牛粪的协同作用,分析其对菜薹生长发育及土壤结构的优化作用,以期提高土壤肥力,减轻重金属对菜薹生长的影响。同时,通过分析菜薹生长与土壤环境间的相关性,以期为菜薹种植业的可持续、绿色发展提供参考。

1 材料与方法

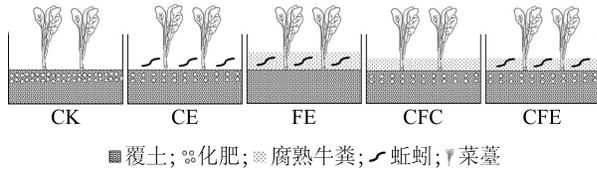
1.1 研究地区及供试材料

试验地位于宁夏回族自治区银川市宁夏大学实训基地2号玻璃温室,试验土壤为宁夏回族自治区银川市永宁县李俊镇供港蔬菜基地9年连作土壤,基本理化性状如下:pH值8.21,电导率0.61 mS/cm,全氮含量0.22 g/kg,速效氮含量1.43 mg/kg,速效磷含量145.43 mg/kg,速效钾含量21.36 mg/kg,有机质含量6.81 g/kg,锌含量15.31 mg/kg,砷含量2.44 mg/kg,铬含量7.08 mg/kg。菜薹品种为尖叶70,种子由宁夏悦丰生态农业科技有限公司提供,供试蚯蚓品种为赤子爱胜蚓(*Eisenia foetida*),购自华盛绿能(宁夏)农业科技有限公司。试验前对蚯蚓进行清肠处理,选取活性较高、体型较为一致的蚯蚓进行试验。

1.2 试验设计

盆栽试验采用长41 cm、宽27 cm、高19 cm的泡沫箱,每盆装入8 kg土壤。试验分为如下5个处理:常规施肥(CK)、化肥减量30%+蚯蚓(CE)、腐熟牛粪+蚯蚓(FE)、化肥减量30%+腐熟牛粪(CFC)和化肥减量30%+腐熟牛粪+蚯蚓(CFE),每个处理设置6个重复。肥料中的氮肥为尿素(含46%N),磷肥为过磷酸钙(含12% P_2O_5),钾肥为硫酸钾(含50% K_2O),牛粪、过磷酸钙全部作基肥施用,尿素、硫酸钾的40%作基肥施用,60%作追肥施用。追肥在菜薹3叶1心期后的第5 d、第12 d和第19 d进行,分别追施总肥量的15%、20%和25%。将牛粪均匀撒施在土壤表面,蚯蚓在种植前接种,接种密度为60 g/m²^[14],每条蚯蚓的平均重量为0.15

g, 接种时将蚯蚓均匀撒在土壤上即可。牛粪为腐熟牛粪, 全氮含量为 1.12 g/kg。除 CE 处理外, 其他处理的施氮量均相同。试验的设计见图 1。



CK: 常规施肥; CE: 化肥减量 30%+蚯蚓; FE: 腐熟牛粪+蚯蚓; CFC: 化肥减量 30%+腐熟牛粪; CFE: 化肥减量 30%+腐熟牛粪+蚯蚓。

图 1 试验设计示意

Fig.1 Schematic diagram of the experimental design

1.3 测定项目和方法

菜薹种子于 2022 年 7 月 10 日播种, 在菜薹生长出第 1 张真叶后进行间苗, 2022 年 8 月 26 日收获。采收后, 对土壤进行多点取样, 取样深度为 0~15 cm, 去除土样中的植物、可见蠕虫、可见昆虫及石块后, 用孔径 2 mm 的筛子对样本进行过筛处理。将土壤样本混合后分成多份(每份 80~100 g), 用于土壤理化性状的测定。

菜薹生长指标的测定。菜薹株高、茎粗用卷尺、游标卡尺量取, 用 EPSON EXPRESSION 4990 型扫描仪对根样进行扫描, 用 WinRHIZO 对扫描的根系图片进行分析, 得到总根系长度、根系总表面积、根系总体积、平均单根直径、根尖数、分叉数。

菜薹养分含量的测定。将烘干的菜薹叶片粉碎后过 0.5 mm 筛, 用 $H_2SO_4-H_2O_2$ 消煮后用凯氏定氮仪测定植株全氮含量, 用钼锑抗比色法测定全磷含量, 用原子吸收分光光度计测定全钾含量。

土壤理化指标的测定。土壤自然风干并过筛后, 按水:土=2.5:1.0(重量比)将土壤和水进行混匀后测定 pH 值; 用 DDS-307A 型电导率仪(上海雷磁)测定土壤电导率(EC); 土壤有机质含量用高温外加热重铬酸钾氧化-容量法测定; 土壤全氮含量用半微量开氏法测定; 土壤速效氮含量用碱解扩散法测定; 土壤速效磷含量用钼酸铵比色法测定; 用 CH_3COONH_4 溶液浸提火焰分光光度法测定速效钾含量^[15]。

菜薹和土壤中重金属含量的测定。用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)测定土壤、菜薹中的锌、砷、铬等重金属含量。

1.4 数据处理与统计分析

试验数据用 SPSS 22.0 进行统计分析, 基于主成分分析理论, 用 Z-score 法对数据进行标准化处理后, 通过因子分析提取主成分(Y_p), 并计算主成分系数, 得到 Y_p 的线性组合。根据主成分方程计算得到的主成分得分、以各个主成分方差贡献率占 2 个主成分总方差贡献率的比例为权重, 计算综合得分。用 Graphpad Prism 9.0 作图, 用 R 语言 Linket package 中的 Mantle-test 分析菜薹生长指标与土壤环境指标的相关性并检验其显著性。

$$X = \begin{pmatrix} X_{11} & X_{12} & \dots & X_{1p} \\ X_{21} & X_{22} & \dots & X_{2p} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ X_{n1} & X_{n2} & \dots & X_{np} \end{pmatrix}$$

$$Y_1 = \lambda_{11}X_1 + \lambda_{21}X_2 + \dots + \lambda_{p1}X_p$$

$$Y_2 = \lambda_{12}X_1 + \lambda_{22}X_2 + \dots + \lambda_{p2}X_p$$

.....

$$Y_p = \lambda_{1p}X_1 + \lambda_{2p}X_2 + \dots + \lambda_{pp}X_p$$

$$= \frac{\lambda_1}{\lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_p} Y_1 + \frac{\lambda_2}{\lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_p} Y_2 + \dots + \frac{\lambda_p}{\lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_p} Y_p$$

2 结果与分析

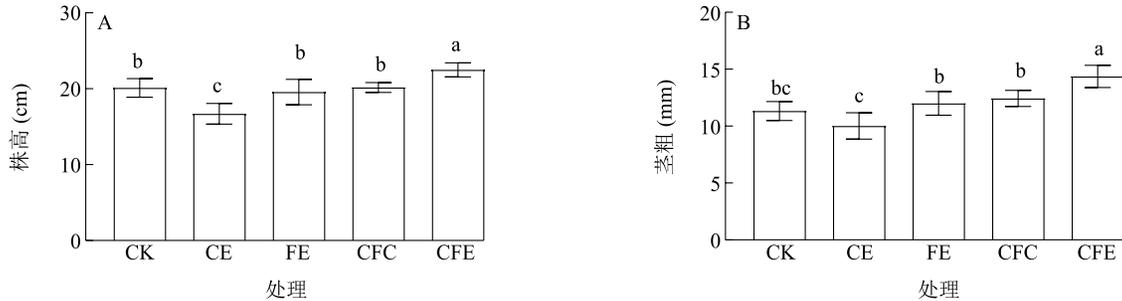
2.1 化肥减量施用条件下蚯蚓-牛粪的协同作用对菜薹生长的影响

由图 2 可知, 与 CK 相比, 在化肥减量施用条件下, 蚯蚓、牛粪的协同作用明显促进了菜薹的生长。与 CK 相比, CFE 处理菜薹的株高、茎粗分别增加了 11.73%、26.86%, 与 CK 间的差异均达到显著水平($P < 0.05$)。与 CK 相比, FE、CFC 处理对菜薹株高、茎粗未产生显著影响。CFE 处理与 FE 处理间的株高、茎粗存在显著差异($P < 0.05$)。与 CFC 处理相比, CFE 处理使菜薹株高增加了 11.51%, 茎粗增加了 15.56%。

由表 1 可以看出, 与 CK 相比, CFC、CFE 处理均显著增加了菜薹的总根系长度、根系总体积和平均单根直径, 而在根尖数、分叉数上, CK 与 CE、FE、CFC、CFE 处理之间没有显著差异。与 CK 相比, CFE 处理显著提高了菜薹的总根系长度、根系总表面积、根系总体积和平均单根直径, 分别提高了 31.03%、37.81%、98.51% 和 36.23%。此外, CFE 处理的总根系长度、根系总体积、平均单根直径分别

比 FE 处理增加了 12.91%、21.15%、17.50%。由上述结果看出,在相同氮肥用量下,与 CK 相比,接种蚯蚓能够促进菜薹根系的生长发育。此外,与

100%化肥处理(CK)相比,在相同氮肥用量下,化肥配施有机肥处理更利于菜薹根系的生长。



A:株高;B:茎粗。CK:常规施肥;CE:化肥减量 30%+蚯蚓;FE:腐熟牛粪+蚯蚓;CFC:化肥减量 30%+腐熟牛粪;CFE:化肥减量 30%+腐熟牛粪+蚯蚓。不同处理间标有不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。

图 2 化肥减量施用条件下蚯蚓-牛粪协同作用对菜薹株高、茎粗的影响

Fig.2 Synergistic effects of earthworms and cow dung on plant height and stem diameter of flowering Chinese cabbage under chemical fertilizer reduction

表 1 化肥减量施用条件下蚯蚓-牛粪的协同作用对菜薹根系形态指标的影响

Table 1 Synergistic effects of earthworms and cow dung on root morphology of flowering Chinese cabbage under chemical fertilizer reduction

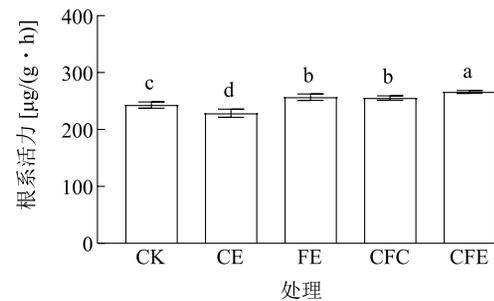
处理	总根系长度 (cm)	根系总表面积 (cm ²)	根系总体积 (cm ³)	平均单根直径 (mm)	根尖数 (个)	分叉数 (个)
CK	288.53±8.98c	42.56±4.37b	2.02±0.15d	0.69±0.07c	404.00±98.90a	851.33±238.12a
CE	213.64±9.37d	31.11±2.68c	1.12±0.15e	0.42±0.03d	424.67±96.96a	715.00±259.59a
FE	334.82±4.61b	53.24±1.03a	3.31±0.17b	0.80±0.01bc	510.33±30.12a	1 043.33±220.45a
CFC	336.82±5.10b	50.49±0.44ab	2.57±0.09c	0.83±0.03ab	683.33±171.45a	764.00±146.51a
CFE	378.06±5.64a	58.65±2.42a	4.01±0.18a	0.94±0.02a	795.67±105.99a	996.67±162.47a

CK:常规施肥;CE:化肥减量 30%+蚯蚓;FE:腐熟牛粪+蚯蚓;CFC:化肥减量 30%+腐熟牛粪;CFE:化肥减量 30%+腐熟牛粪+蚯蚓。同列数据后标有不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。

由图 3 可知,与 CK 相比,FE、CFC、CFE 处理的菜薹根系活力均有显著差异 ($P < 0.05$),分别提高了 5.67%、5.03%、9.42%。此外,与 FE、CFC 处理相比,CFE 处理的根系活力分别提高了 3.56%、4.18%。

2.2 化肥减量施用条件下蚯蚓-牛粪的协同作用对菜薹养分含量的影响

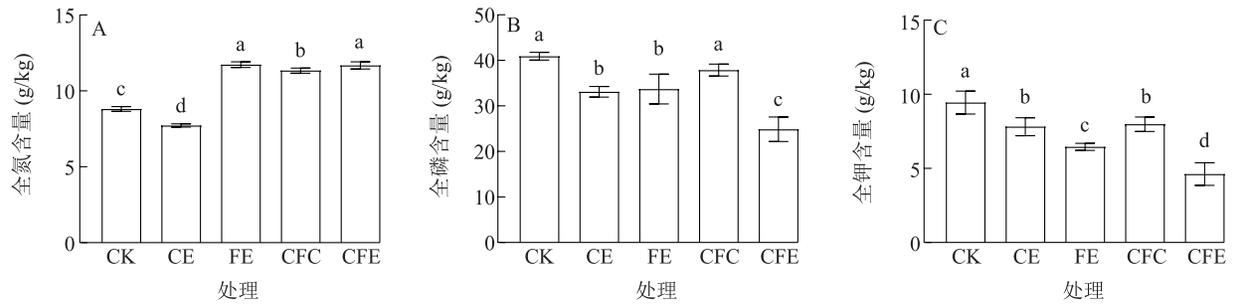
由图 4 可知,与 CK 相比,不同处理对菜薹的全氮、全钾含量均产生了显著影响 ($P < 0.05$)。与 CK 相比,FE、CFC、CFE 处理显著增加了菜薹的全氮含量 ($P < 0.05$),增幅分别达 33.13%、28.68%、32.56%,表明蚯蚓和牛粪联合使用能够有效提高菜薹的全氮含量。然而,与 CK 相比,CE、FE、CFE 处理均会导致菜薹全磷、全钾含量降低,其中 CFE 处理的全磷、全钾含量分别降低了 39.19%、51.14%。



CK:常规施肥;CE:化肥减量 30%+蚯蚓;FE:腐熟牛粪+蚯蚓;CFC:化肥减量 30%+腐熟牛粪;CFE:化肥减量 30%+腐熟牛粪+蚯蚓。根系活力以单位时间、单位鲜重根系中氯化三苯基四氮唑(TTC)的还原量计算。不同处理间标有不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。

图 3 化肥减量施用条件下蚯蚓-牛粪的协同作用对菜薹根系活力的影响

Fig.3 Synergistic effects of earthworms and cow dung on root vigour of flowering Chinese cabbage under chemical fertilizer reduction



A: 植株全氮含量; B: 植株全磷含量; C: 植株全钾含量。CK: 常规施肥; CE: 化肥减量 30%+蚯蚓; FE: 腐熟牛粪+蚯蚓; CFC: 化肥减量 30%+腐熟牛粪; CFE: 化肥减量 30%+腐熟牛粪+蚯蚓。不同处理间标有不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$)。

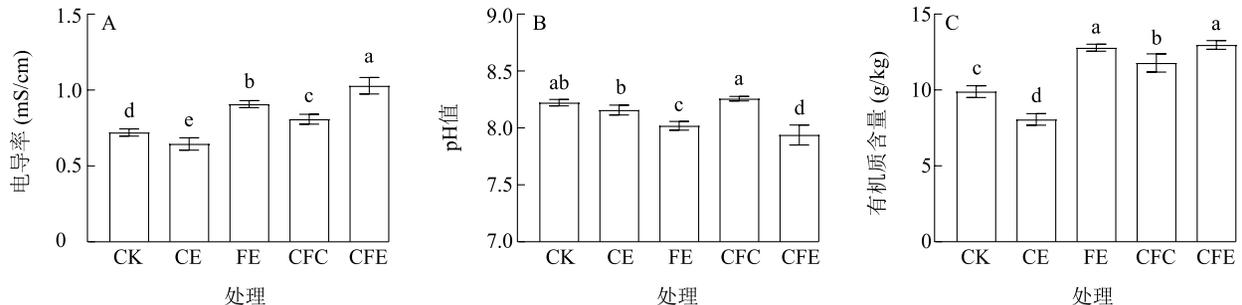
图 4 化肥减量施用条件下蚯蚓-牛粪的协同作用对菜薹营养成分含量的影响

Fig.4 Synergistic effects of earthworms and cow dung on nutrient content of flowering Chinese cabbage under chemical fertilizer reduction

2.3 化肥减量施用条件下蚯蚓-牛粪的协同作用对土壤理化性状的影响

由图 5A 可知,与 CK 相比,FE、CFC、CFE 处理的土壤电导率 (EC) 分别提高了 25.91%、12.11%、42.69%。此外,FE 处理的土壤 EC 比 CFC 处理提高了 12.31%,而 CFE 处理的土壤 EC 比 FE 处理提高了 13.33%,同时比 CFC 处理提高了 27.28%。在化肥减量施用条件下,蚯蚓和牛粪协同作用的 CFE 处理的土壤 EC 高于 CK、CFC 处理。

由图 5B 可知,仅 FE、CFE 2 个处理的 pH 值显



A: 土壤电导率; B: 土壤 pH 值; C: 土壤有机质含量。CK: 常规施肥; CE: 化肥减量 30%+蚯蚓; FE: 腐熟牛粪+蚯蚓; CFC: 化肥减量 30%+腐熟牛粪; CFE: 化肥减量 30%+腐熟牛粪+蚯蚓。不同处理间标有不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$)。

图 5 化肥减量施用条件下蚯蚓-牛粪的协同作用对土壤电导率 (EC)、pH 值和有机质含量的影响

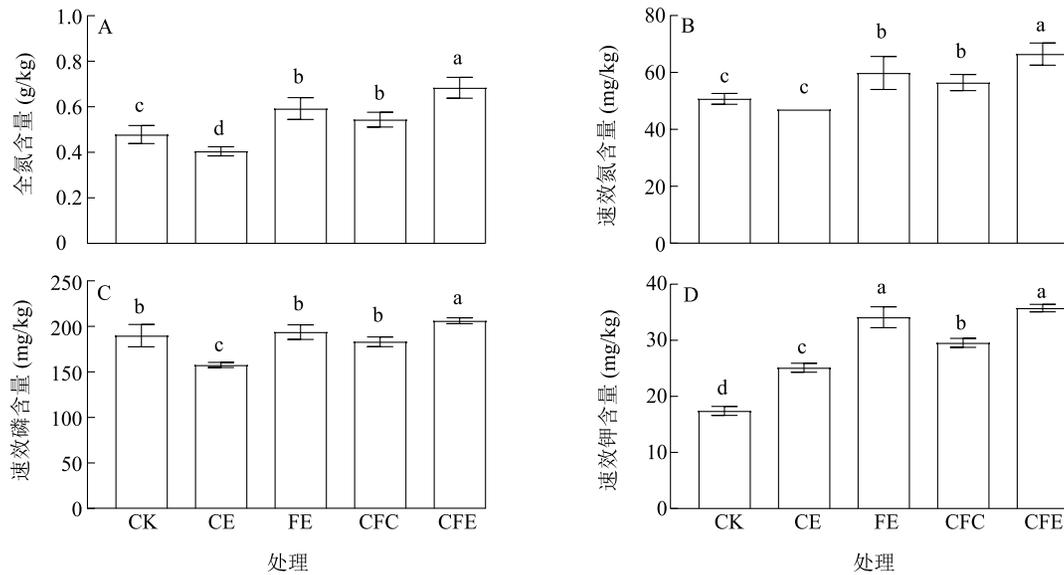
Fig.5 Synergistic effects of earthworms and cow dung on soil electrical conductivity (EC), pH value and organic matter content under chemical fertilizer reduction

与 CK 相比,除 CE 处理外,FE、CFC、CFE 处理都能显著提升土壤全氮含量,提升幅度分别为 23.84%、13.72%、42.97%;CFE 处理的全氮含量分别比 FE、CFC 处理增加了 15.45%、25.72%(图 6A)。与 CK 相比,FE、CFE 处理能够显著提高土壤的速效氮含量 ($P<0.05$),且 CFE 处理的土壤速效氮含量

显著低于 CK ($P<0.05$),降幅分别为 2.48%、3.43%。FE 处理的 pH 值比 CFC 处理低 2.89%,而 CFE 处理的 pH 值比 CFC 处理低 3.86%。上述研究结果表明,在相同氮肥用量下,接种蚯蚓可以降低土壤 pH 值。

由图 5C 可知,与 CK 相比,除 CE 处理外,其他处理均对土壤有机质含量有提升效果。FE、CFC、CFE 处理的土壤有机质含量分别比 CK 提高了 29.24%、19.06%、31.08%。此外,与 CFC 处理相比,FE、CFE 处理的有机质含量分别增加了 8.55%、10.10%。

比 CFC 处理提高了 17.75%(图 6B)。与 CK 相比,CE 处理的土壤速效磷含量显著降低 ($P<0.05$),CFE 处理的速效磷含量显著提升 ($P<0.05$),增幅为 8.61%(图 6C)。与 CK 相比,各处理均能显著提高土壤的速效钾含量,其中 CFE 处理的土壤速效钾含量比 CFC 处理增加了 21.02%(图 6D)。



A:土壤全氮含量;B:土壤速效氮含量;C:土壤速效磷含量;D:土壤速效钾含量。CK:常规施肥;CE:化肥减量30%+蚯蚓;FE:腐熟牛粪+蚯蚓;CFC:化肥减量30%+腐熟牛粪;CFE:化肥减量30%+腐熟牛粪+蚯蚓。不同处理间标有不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。

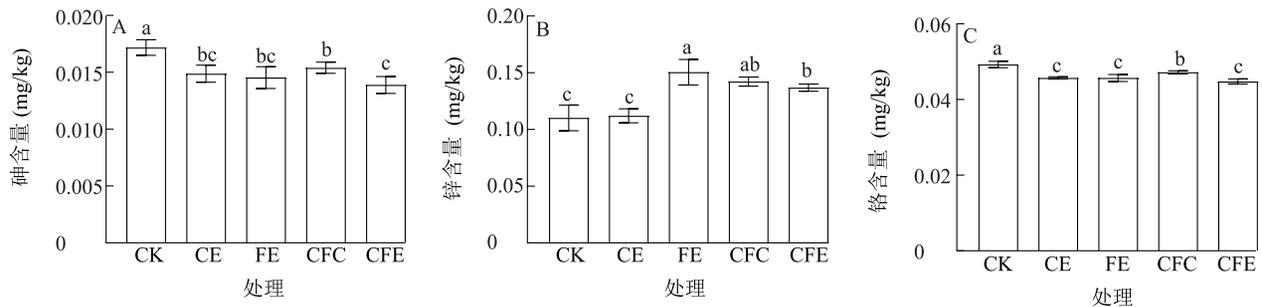
图6 化肥减量施用条件下蚯蚓-牛粪的协同作用对土壤全氮、速效氮、速效磷和速效钾含量的影响

Fig.6 Synergistic effects of earthworms and cow dung on the contents of total nitrogen, available nitrogen, available phosphorus and available potassium in soil under chemical fertilizer reduction

2.4 化肥减量施用条件下蚯蚓-牛粪的协同作用对菜薹及土壤重金属含量的影响

由图7可知,不同处理对菜薹重金属含量的影响不同。与CK相比,各处理均显著降低了菜薹中的砷、铬含量($P<0.05$)。与CFC处理相比,CFE处

理的砷含量降幅为10.89%,铬含量降幅为5.40%。与CFC处理相比,FE处理的铬含量降幅为3.26%。与CK相比,FE、CFC、CFE处理均显著提高了菜薹中的锌含量($P<0.05$)。由上述研究结果可以看出,各处理菜薹的重金属含量均符合食品安全标准。



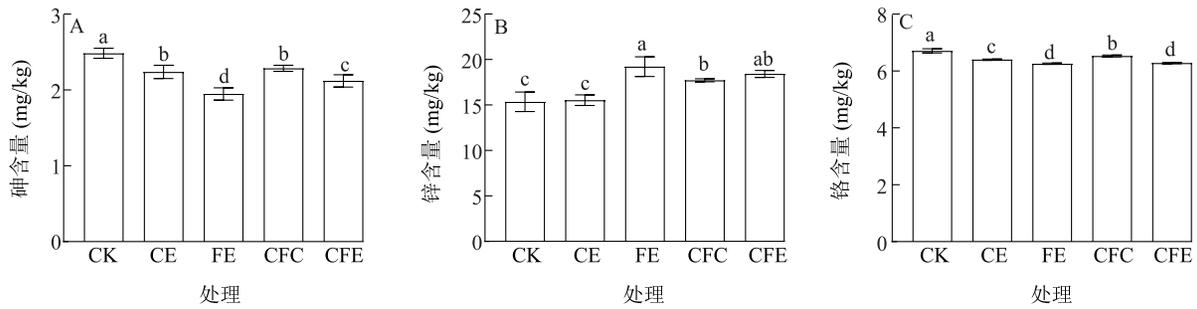
A:砷含量;B:锌含量;C:铬含量。CK:常规施肥;CE:化肥减量30%+蚯蚓;FE:腐熟牛粪+蚯蚓;CFC:化肥减量30%+腐熟牛粪;CFE:化肥减量30%+腐熟牛粪+蚯蚓。不同处理间标有不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。

图7 化肥减量施用条件下蚯蚓-牛粪的协同作用对菜薹重金属含量的影响

Fig.7 Synergistic effects of earthworms and cow dung on heavy metals content of flowering Chinese cabbage under chemical fertilizer reduction

由图8可以看出,与CK相比,各处理均显著降低了土壤中的砷、铬含量($P<0.05$)。与CFC处理相比,FE、CFE处理下砷含量的降幅分别达到了14.78%、7.22%,砷含量显著降低($P<0.05$)。与CK相比,FE、CFE处理的铬含量分别显著降低了

7.25%、6.87%($P<0.05$)。与CK相比,FE、CFC、CFE处理显著增加了土壤中的锌含量($P<0.05$),其中FE、CFC处理间的差异显著。上述结果表明,接种蚯蚓可以显著降低土壤中的重金属砷、铬含量。



A: 砷含量; B: 锌含量; C: 铬含量。CK: 常规施肥; CE: 化肥减量 30%+蚯蚓; FE: 腐熟牛粪+蚯蚓; CFC: 化肥减量 30%+腐熟牛粪; CFE: 化肥减量 30%+腐熟牛粪+蚯蚓。不同处理间标有不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。

图 8 化肥减量施用条件下蚯蚓-牛粪的协同作用对土壤重金属含量的影响

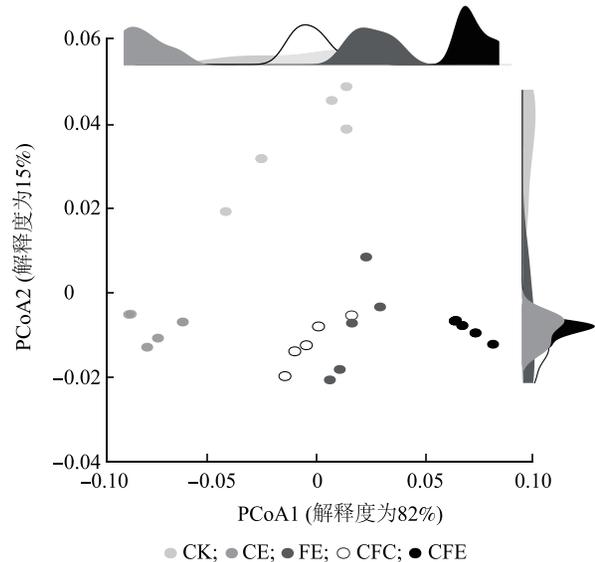
Fig.8 Synergistic effects of earthworms and cow dung on the content of heavy metals in soil under chemical fertilizer reduction

2.5 菜薹土壤理化性状指标的主坐标分析

运用 Bray_curtis 距离来构建主坐标, 以菜薹土壤理化性状指标作为分析对象, 展示各处理之间的差异。由图 9 可知, 第 1 主成分、第 2 主成分的解釋度分别为 82%、15%, 累计可解釋 97% 的菜薹土壤理化性状指标的变化情况; CK 与其余处理分开, 表明存在差异; CFC 和 FE 处理间的距离较近, 表明这 2 个处理在菜薹生长指标及土壤理化性状指标方面无太大差异。CFE 处理与 CK 间的距离最远, 表明二者在菜薹生长指标与土壤理化性状指标的变化上有差异。

2.6 菜薹生长指标与土壤理化性状、土壤重金属含量间的相关性分析

通过 Mantle-test 分析菜薹生长指标与土壤理化性状指标、土壤重金属含量间的相关性, 由图 10 可知, 土壤速效钾含量与土壤砷、铬含量之间存在显著负相关, pH 值与土壤砷、铬含量之间存在显著正相关。菜薹株高与土壤速效磷含量 ($r = 0.51, P = 0.001$)、全氮含量 ($r = 0.45, P = 0.001$) 和速效氮含量 ($r = 0.43, P = 0.003$) 间的相关性较大, 与土壤有机质含量 ($r = 0.39, P = 0.001$)、EC ($r = 0.38, P = 0.001$) 间的相关性相对较小。菜薹茎粗与土壤速效氮含量 ($r = 0.51, P = 0.001$)、速效磷含量 ($r = 0.50, P = 0.001$)、全氮含量 ($r = 0.47, P = 0.001$)、有机质含量 ($r = 0.46, P = 0.001$) 和 EC ($r = 0.45, P = 0.001$) 间的相关性较大, 与土壤速效钾含量 ($r = 0.25, P = 0.01$) 和 pH 值 ($r = 0.23, P = 0.014$) 间的相关性相对较小。菜薹总根系长度与土壤有机质含量 ($r = 0.84, P = 0.001$)、速效磷含量 ($r = 0.75, P = 0.001$)、EC ($r = 0.73, P = 0.001$)、全氮含量 ($r = 0.73, P = 0.001$)、速效

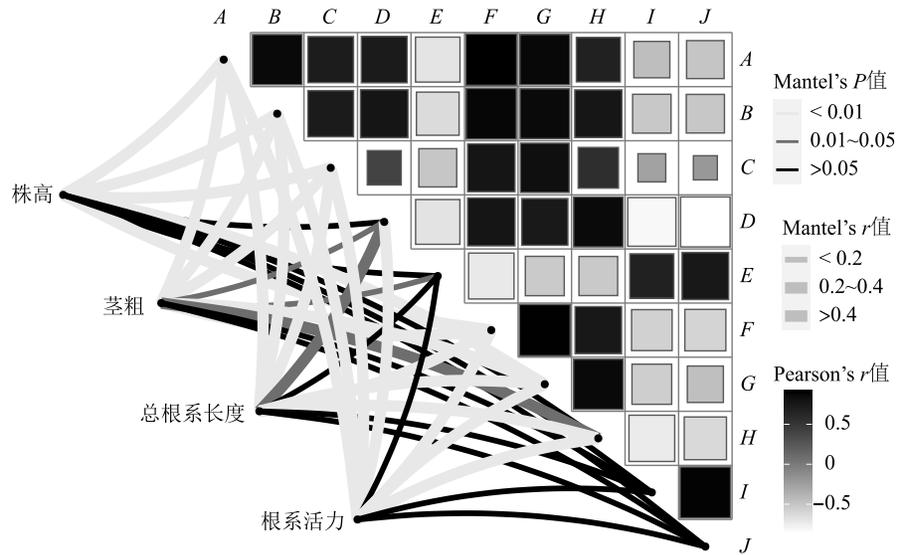


CK: 对照 (常规施肥); CE: 化肥减量 30%+蚯蚓处理; FE: 腐熟牛粪+蚯蚓处理; CFC: 化肥减量 30%+腐熟牛粪处理; CFE: 化肥减量 30%+腐熟牛粪+蚯蚓处理; PCoA1: 第 1 主成分; PCoA2: 第 2 主成分。

图 9 土壤理化性状的主坐标分析 (PCoA)

Fig.9 Principal coordinate analysis (PCoA) of soil physical and chemical properties

氮含量 ($r = 0.47, P = 0.002$) 和锌含量 ($r = 0.41, P = 0.001$) 间的相关性较大, 与土壤速效钾含量 ($r = 0.31, P = 0.009$) 间的相关性相对较小。菜薹根系活力与土壤 EC ($r = 0.82, P = 0.001$)、土壤有机质含量 ($r = 0.79, P = 0.001$)、全氮含量 ($r = 0.76, P = 0.001$)、速效磷含量 ($r = 0.64, P = 0.001$)、速效氮含量 ($r = 0.60, P = 0.001$) 和速效钾含量 ($r = 0.41, P = 0.001$) 间的相关性较大, 与土壤锌含量 ($r = 0.40, P = 0.001$)、pH 值 ($r = 0.32, P = 0.012$) 间的相关性相对较小。



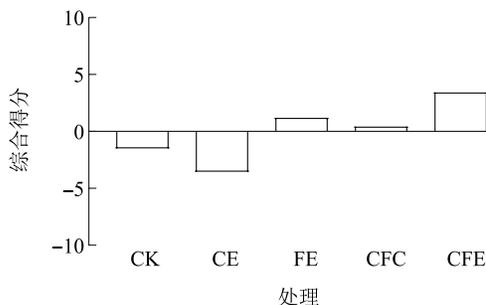
A:土壤全氮含量;B:土壤速效氮含量;C:土壤速效磷含量;D:土壤速效钾含量;E:土壤 pH 值;F:土壤电导率;G:土壤有机质含量;H:土壤锌含量;I:土壤砷含量;J:土壤铬含量。

图 10 菜薹生长指标与土壤理化性状、土壤重金属含量间的相关性分析

Fig.10 Correlation analysis between growth indices of flowering Chinese cabbage and soil physicochemical properties and soil heavy metals content

2.7 不同处理的综合评价

用主成分分析法计算菜薹生长指标(株高、茎粗、总根系长度、根系活力)及土壤理化性状指标、土壤重金属含量的主成分得分,并对其进行综合分析,由线性方程及各主成分的贡献率计算出各处理的综合得分,最后进行排名。各处理的综合得分排名如下:CFE 处理>FE 处理>CFC 处理>CK>CE 处理(图 11)。由此可见,在同等氮素水平下,蚯蚓与牛粪的协同处理对菜薹生长及土壤质量的影响均大于常规施肥处理。单接种蚯蚓的处理对菜薹生长及土壤质量方面的影响没有常规施肥处理效果明显。



CK:常规施肥;CE:化肥减量 30%+蚯蚓;FE:腐熟牛粪+蚯蚓;CFC:化肥减量 30%+腐熟牛粪;CFE:化肥减量 30%+腐熟牛粪+蚯蚓。

图 11 不同处理的综合得分

Fig.11 Comprehensive scores of different treatments

3 讨论

3.1 化肥减量施用条件下蚯蚓-牛粪的协同作用对菜薹生长的影响

本研究发现,在化肥减量的基础上,蚯蚓与牛粪的协同作用显著增加了菜薹的株高、茎粗,并促进了根系发育。在牛粪上接种蚯蚓可使番茄产量提高 20.4%~25.1%^[16]。蚯蚓对土壤的作用主要体现在两个方面:一方面通过其取食活动改变土壤孔隙度、团聚体稳定性;另一方面,形成的蚯蚓粪改变了土壤理化性状,间接影响了土壤微生物群落结构^[17-18],从而促进了植物生长。菜薹具有较短的成熟期,而单独添加蚯蚓、牛粪的处理不能满足其生长所需的最适养分含量,这一问题在有机肥中氮素释放速率较高的情况下得到了解决^[19]。蚯蚓通过分解有机物料增加土壤速效养分含量,更利于植物对养分的吸收^[20]。蚯蚓的作用不仅在于增加土壤速效养分含量,而且在于其活动有助于促进植物对养分的吸收。因此,在化肥减量施用的基础上,添加蚯蚓和牛粪不仅能够满足菜薹生长过程中对养分的需求,而且在改善土壤理化性状的同时,能够提高肥料的利用率^[21]。

3.2 化肥减量施用条件下蚯蚓-牛粪的协同作用对土壤理化性状的影响

接种蚯蚓后,土壤的 pH 值降低,并且在蚯蚓与

牛粪联合作用下,土壤 pH 值的下降效果显著。这与 Wang 等^[22]、王斌等^[23]的研究结果相似。土壤速效养分含量是评估土壤肥力的重要指标之一^[24],对植物的生长发育具有重要影响。在本试验中,蚯蚓+牛粪处理提高了土壤全氮含量、速效氮含量和速效钾含量。值得注意的是,蚯蚓黏液、粪便中含有大量 $\text{NO}_3\text{-N}$ 并且会释放大量的氮源、碳源,有利于土壤硝化反应的进行^[25]。蚯蚓与牛粪的协同作用不仅能够提高土壤肥力,而且能够优化土壤的理化性状,可能因为牛粪作为有机肥料,富含有机碳,施用后有助于提高土壤有机质含量并降低土壤孔隙度^[26-27]。同时,蚯蚓活动(如挖穴和取食)能降低土壤孔隙度,改变土壤团聚结构,这与 Gilot^[28]的研究结果一致。

3.3 化肥减量施用条件下蚯蚓-牛粪的协同作用对土壤重金属含量的影响

研究发现,添加蚯蚓会对土壤中的锌含量产生积极影响,并且添加蚯蚓可以降低土壤中锌的流动性^[29],这与本研究结果一致。此外,蚯蚓和牛粪的联合作用可以降低土壤中的砷、铬含量,其原因可能是蚯蚓通过表皮接触土壤中的金属,从中摄取大量或特定土壤成分,进而富集重金属^[30-31]。蚯蚓在取食牛粪后排出蚓粪,可以增加土壤孔隙度,提高微生物生长活性,并增加土壤腐殖质含量,由于蚯蚓粪具有较强的吸附能力,可以增加土壤的透气性并增强土壤的保水能力,从而吸附土壤中的重金属^[32]。在常年连作和不平衡施肥导致的土壤微生物群落结构失衡的情况下,接种蚯蚓后,土壤中的细菌、真菌数量显著增加,有助于调节微生物群落结构。此外,接种蚯蚓可以降低土壤 pH 值,提高有机碳含量,为微生物提供更适宜的生存环境^[33]。重金属在微生物群落的作用下被土壤中的有机、无机胶体富集和沉淀,从而降低土壤的重金属含量^[34]。接种蚯蚓后,土壤中的重金属含量降低还可能与植物根际分泌物有关,因为黄酮类化合物可以充当金属螯合物,而蚯蚓可以进一步提高植物中的黄酮含量,从而减少土壤中的重金属含量,缓解重金属胁迫的影响^[35]。

3.4 菜薹生长与土壤理化性状、重金属含量的相关性

氮、磷是叶菜生长发育过程中必不可少的大量元素,对叶菜表型生长的影响毋庸置疑^[36]。本研究发现,土壤全氮含量、土壤速效氮含量及土壤速效磷含量是共同影响菜薹株高、茎粗、总根系长度及根系

活力的主要土壤性状。这些养分通过对株高、茎粗的影响来调控菜薹生长,其中氮在植物生长发育过程中参与并加速植物生长激素(如吲哚乙酸、赤霉素和细胞分裂素等)的释放,从而提高作物产量,进一步证明氮素与菜薹株高、茎粗间的密切相关性^[37]。磷是能量代谢的重要成分,直接参与植物光合代谢并生成腺嘌呤核苷三磷酸(ATP),促进植物呼吸代谢,从而促进根系的生长和发育^[38]。根系的总长度和总表面积与根系交换吸附能量紧密相连,反映了根系的生理活力和被动吸收能力^[39]。土壤有机质含量和电导率同样会对菜薹的总根系长度、根系活力产生重要影响。研究发现,果树幼树根系活力会随着土壤有机质含量的增加总体表现出上升趋势^[40]。其原因可能由于施用有机肥改善了土壤理化性状和肥力,提高了土壤的保水保肥能力,从而为根系生长提供适宜的生长环境^[41]。此外,根系生理活性与土壤中盐分迁移密切相关^[42]。在根系吸收水分、养分的过程中,会将土壤中的盐分吸附、富集到根系周围^[43]。上述研究结果表明,菜薹的总根系长度、根系活力受到土壤电导率显著影响,这与本研究结果一致。本研究还发现,锌含量对菜薹总根系长度有显著影响。锌有利于次生根的生长发育^[44],还参与色氨酸合成,而色氨酸是合成吲哚乙酸的前体物质,色氨酸通过合成生长素来调控根系的构型变化。此外,锌还可以优化地上部和根系之间的物质循环^[45]。在植物组织器官中,核糖核酸酶(RNase)活性水平会影响核糖核酸(RNA)、可溶性蛋白质含量,从而影响植物体的新陈代谢^[46]。锌的缺乏会导致植物体内 RNase 活性上升,降低核糖核酸、蛋白质含量^[47],因此较低的 RNase 活性有助于促进根系的新陈代谢,从而有利于植物的良好生长。

4 结论

在化肥减量施用条件下,蚯蚓与牛粪的协同作用不仅显著降低了土壤 pH 值、增加了土壤有机质含量和 EC,而且促进了菜薹生长指标的提升。接种蚯蚓后,土壤中重金属砷、铬含量显著下降,有效控制了土壤中重金属的有效性,同时减少了土壤的重金属污染。接种蚯蚓后,菜薹的根系生长发育进程得到显著提升。氮素通过影响植物激素的合成而显著影响菜薹株高、茎粗,磷素通过能量代谢途径促进植物根系形态发育。综上,EC、有机质含量及锌含

量都是影响菜薹根长、根系活力的土壤性状。

参考文献:

- [1] YANG F, TIAN J, FANG H J, et al. Functional soil organic matter fractions, microbial community, and enzyme activities in a molisol under 35 years manure and mineral fertilization[J]. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 2019, 19(2): 430-439.
- [2] TILMAN D, BALZER C, HILL J, et al. Global food demand and the sustainable intensification of agriculture[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2011, 108(50): 20260-20264.
- [3] 王萍, 王玲, 于新, 等. 菜心采后贮藏保鲜技术研究进展[J]. *食品安全质量检测学报*, 2020, 11(19): 6956-6962.
- [4] 李海俊, 张莹, 高富成, 等. 菜心及其根际土壤环境对长期连作的响应[J]. *核农学报*, 2023, 37(10): 2052-2062.
- [5] XIAO L L, SUN Q B, YUAN H T, et al. A practical soil management to improve soil quality by applying mineral organic fertilizer[J]. *Acta Geochimica*, 2017, 36(2): 198-204.
- [6] 曾晓舵, 王向琴, 涂新红, 等. 农田土壤重金属污染阻控技术研究进展[J]. *生态环境学报*, 2019, 28(9): 1900-1906.
- [7] 陈亮, 侯杰, 胡晓蕾, 等. 植物生长调节剂在土壤中的环境行为综述[J]. *环境科学*, 2022, 43(1): 11-25.
- [8] JOHNSTON A S A. Land management modulates the environmental controls on global earthworm communities[J]. *Global Ecology and Biogeography*, 2019, 28(11/12): 1787-1795.
- [9] HUHTA V. The role of soil fauna in ecosystems: a historical review[J]. *Pedobiologia*, 2007, 50(6): 489-495.
- [10] ZHANG C, DAI J, CHEN X F, et al. Effects of a native earthworm species (*Amyntas morrisi*) and *Eisenia fetida* on metal fractions in a multi-metal polluted soil from South China[J]. *Acta Oecologica-International Journal of Ecology*, 2020, 102: 103503.
- [11] 邵元虎, 张卫信, 刘胜杰, 等. 土壤动物多样性及其生态功能[J]. *生态学报*, 2015, 35(20): 6614-6625.
- [12] CHENG Q, LU C S, SHEN H, et al. The dual beneficial effects of vermiremediation: reducing soil bioavailability of cadmium (Cd) and improving soil fertility by earthworm (*Eisenia fetida*) modified by seasonality[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 755(2): 142631.
- [13] SHI Y J, SHI Y J, ZHENG L S. Individual and cellular responses of earthworms (*Eisenia fetida*) to endosulfan at environmentally related concentrations[J]. *Environmental Toxicology and Pharmacology*, 2020, 74: 103299.
- [14] TAO J, CHEN X Y, LIU M Q, 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(5): 898-904.
- [15] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000: 25-144.
- [16] WU D, LIU M Q, SONG X C, et al. Earthworm ecosystem service and dis-service in an N-enriched agroecosystem: increase of plant production leads to no effects on yield-scaled N₂O emissions[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2015, 82: 1-8.
- [17] YANG Y J, LEI T, DU W, et al. Substituting chemical fertilizer nitrogen with organic manure and comparing their nitrogen use efficiency and winter wheat yield[J]. *Journal of Agricultural Science*, 2020, 158(4): 262-268.
- [18] XIANG H M, GUO L, ZHANG J E, et al. *In situ* earthworm breeding to improve soil aggregation, chemical properties, and enzyme activity in papayas[J]. *Sustainability*, 2018, 10(4): 1193.
- [19] SANCHEZ-DE LEON Y, LUGO-PEREZ J, WISE D H, et al. Aggregate formation and carbon sequestration by earthworms in soil from a temperate forest exposed to elevated atmospheric CO₂: a microcosm experiment[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2014, 68: 223-230.
- [20] VAN VLIET P C J, VAN DER STELT B, RIETBERG P I, et al. Effects of organic matter content on earthworms and nitrogen mineralization in grassland soils[J]. *European Journal of Soil Biology*, 2007, 43(1): S222-S229.
- [21] 张翰林, 郭惠宝, 白娜玲, 等. 蚯蚓对连作与轮作西瓜土壤细菌群落、微生物量和酶活性的影响[J]. *上海农业学报*, 2020, 36(6): 85-90.
- [22] WANG G, WANG L, MA F, et al. Integration of earthworms and arbuscular mycorrhizal fungi into phytoremediation of cadmium-contaminated soil by *Solanum nigrum* L[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2020, 389: 121873.
- [23] 王斌, 李根, 陈欢, 等. 蚯蚓作用下土壤化学组成和性状的动态变化[J]. *水土保持学报*, 2013, 27(3): 273-277.
- [24] 张田, 许浩, 茹淑华, 等. 不同有机肥中磷在土壤剖面中累积迁移特征与有效性差异[J]. *环境科学*, 2017, 38(12): 5247-5255.
- [25] LUBBERS I M, VAN GROENIGEN K J, FONTE S J, et al. Greenhouse-gas emissions from soils increased by earthworms[J]. *Nature Climate Change*, 2013, 3(3): 187-194.
- [26] 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.
- [27] 郭龙, 李陈, 刘佩诗, 等. 牛粪有机肥替代化肥对茶叶产量、品质及茶园土壤肥力的影响[J]. *水土保持学报*, 2021, 35(6): 264-269.
- [28] GILOT C. Effects of a tropical geophageous earthworm, *M. anomala* (Megascopidae), on soil characteristics and production of a yam crop in Ivory Coast[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1997, 29(3/4): 353-359.
- [29] LUKKARI T, TENO S, VAISANEN A, et al. Effects of earthworms on decomposition and metal availability in contaminated soil: microcosm studies of populations with different exposure histories[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2006, 38(2): 359-370.
- [30] LANNO R, WELLS J, CONDER J, et al. The bioavailability of chemicals in soil for earthworms[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2004, 57(1): 39-47.
- [31] AUDUSSEAU H, VANDENBULCKE F, DUME C, et al. Impacts of metallic trace elements on an earthworm community in an urban wasteland: emphasis on the bioaccumulation and genetic character-

- istics in *Lumbricus castaneus* [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 718: 137259.
- [32] 谭川疆, 潘忠图, 罗有发, 等. 不同改良剂对黔西北锌冶炼区农用地土壤重金属修复效果研究[J]. *地球与环境*, 2022, 50(4): 575-585.
- [33] 郝月崎, 孙 扬, 李晓晶, 等. 赤子爱胜蚓对乙草胺污染土壤微生物群落的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2018, 37(11): 2456-2466.
- [34] 李 扬, 乔玉辉, 莫晓辉, 等. 蚯蚓粪作为土壤重金属污染修复剂的潜力分析[J]. *农业环境科学学报*, 2010, 29(增刊1): 250-255.
- [35] ISLAM F, YASMEEN T, ARIF M S, et al. Combined ability of chromium (Cr) tolerant plant growth promoting bacteria (PGPB), and salicylic acid (SA) in attenuation of chromium stress in maize plants[J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2016, 108: 456-467.
- [36] 王继琛, 陆 强, 张 丽, 等. 叶面喷施稻壳醋液对不同种类叶菜生长的影响[J]. *南京农业大学学报*, 2013, 36(3): 66-70.
- [37] 袁金蕊, 李 霞, 李宝珍, 等. 植物生长调节剂对叶菜产量及氮吸收的影响[J]. *水土保持学报*, 2013, 27(2): 131-135, 188.
- [38] 李志霞, 秦嗣军, 吕德国, 等. 植物根系呼吸代谢及影响根系呼吸的环境因子研究进展[J]. *植物生理学报*, 2011, 47(10): 957-966.
- [39] 乔海涛, 杨洪强, 申为宝, 等. 缺氮和缺铁对平邑甜茶幼苗根系构型的影响[J]. *园艺学报*, 2009, 36(3): 321-326.
- [40] 汪晓谦, 邵竹松, 周家一, 等. 有机物料对梨园土壤养分及根系发育的影响[J]. *中国果树*, 2021(10): 40-44.
- [41] 张良英, 王永熙, 王小伟, 等. 草炭对桃园土壤理化性状及桃树生物效应的影响[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2008, 36(3): 145-149.
- [42] KITANO M, URAYAMA K, SAKATA Y, et al. Water and salt movement in soil driven by crop roots: a controlled column study [J]. *Biologia*, 2009, 64(3): 474-477.
- [43] 王京伟, 王磊元, 李 元, 等. 覆膜滴灌对温室番茄土壤理化性状及其生物学特性的影响[J]. *干旱区研究*, 2020, 37(4): 870-880.
- [44] 韩金玲, 李雁鸣, 马春英, 等. 施锌对小麦开花后氮、磷、钾、锌积累和运转的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2006, 12(3): 313-320.
- [45] 王 佳, 聂兆君, 扶海超, 等. 外源 Zn^{2+} 对冬小麦幼苗根系生长及部分氮代谢关键酶的影响[J]. *河南农业大学学报*, 2018, 52(3): 307-312.
- [46] 梁振凯, 郭聪颖, 王彩芝, 等. 氮锌配施促进小麦根系形态建成及其生理活性提高[J]. *植物营养与肥料学报*, 2020, 26(5): 826-839.
- [47] NASON A. Effect of zinc deficiency on the synthesis of tryptophan by *Neurospora* extracts [J]. *Science*, 1950, 112(2900): 111-112.

(责任编辑:徐 艳)