夏李佳,蒋海燕,邵海燕,等.亚硒酸钠添加量及添加方式对蚯蚓生长及其富硒能力的影响[J].江西农业大学学报,2025,47(3):832-840.
XIA L J,JIANG H Y,SHAO H Y,et al.Effects of exogenous selenium addition amount and method on earthworm growth and its selenium enrichment capacity[J].Acta agriculturae universitatis Jiangxiensis,2025,47(3):832-840.

亚硒酸钠添加量及添加方式对蚯蚓生长及其富硒能力的影响

夏李佳[1],蒋海燕[1],邵海燕[2],吴建富[1*],荣勤雷[1]

(1.江西农业大学 国土资源与环境学院,江西 南昌 330045;2.江西省鹰潭市余江区农业农村粮食局,江西 鹰潭 335200)

摘要:【目的】旨在探讨亚硒酸钠添加方式和添加量对富硒蚯蚓生产的影响,为富硒蚯蚓生产提供参考依据。【方法】在大棚环境条件下,采用质量配比16∶4∶1的3种物料(牛粪、秸秆、沼泥),以亚硒酸钠为硒源,赤子爱胜属大平二号蚯蚓为供试对象,研究了亚硒酸钠添加量(以Se计,硒质量分数分别为80,100,120 mg/kg)及其添加方式(一次性添加,用S表示;分3次添加,用SS表示)对蚯蚓生长、繁殖及其硒含量的影响,以筛选最佳富硒蚯蚓养殖方式。【结果】养殖60 d后,与S处理组相比,SS处理组蚯蚓的存活率、生物量增长率、产茧率和硒富集系数分别提高了8.33%~18.33%、28.85%~60.89%、8.33~131.67个/百条及0.78~0.95。SS处理组蚯蚓硒富集量略低于S处理组,不过蚯蚓体硒含量能维持在231.28~264.30 mg/kg,且以处理SS_{120}为最高。相同添加方式下,过高的外源硒质量分数抑制了蚯蚓的存活率、生物量和产茧率,而SS处理组能保证蚯蚓生长繁殖,同时还能维持较高的硒富集量。【结论】处理SS_{100}为最佳富硒蚯蚓养殖方式,养殖60 d时,蚯蚓的存活率、硒富集量、生物量增长率、产茧率和硒富集系数分别为81.67%、236.70 mg/kg、65.83%、108.33个/百条和2.31。

关键词:赤子爱胜蚯蚓;亚硒酸钠;硒添加量;硒添加方式;生长繁殖;蚯蚓硒富集
中图分类号:S899.8　　**文献标志码:**A　　**开放科学(资源服务)标识码(OSID):**
文章编号:1000-2286(2025)03-0832-09
CSTR:32399.14.aauj.2025071

Effects of exogenous selenium addition amount and method on earthworm growth and its selenium enrichment capacity

XIA Lijia[1],JIANG Haiyan[1],SHAO Haiyan[2],WU Jianfu[1*],RONG Qinlei[1]

(1.College of Land Resource and Environment,Jiangxi Agricultural University,Nanchang 330045,China;2. Agriculture and Rural Food Bureau of Yujiang District,Yingtan City,Jiangxi Province,Yingtan,Jiangxi 335200,China)

收稿日期:2024-12-25　　**修回日期:**2025-02-15
基金项目:江西省重点研发计划"揭榜挂帅"项目(20223BBF61016)和国家自然科学基金项目(32260808)
Project supported by the Key Project of Technology Research and Development of Jiangxi Province("Take-and-lead" Program)(20223BBF61016),and the National Natural Science Foundation of China(32260808)
作者简介:夏李佳,硕士生,orcid.org/ 0009-0009-5766-7037,15779926498@163.com;*通信作者:吴建富,教授,博士,主要从事土壤肥料与作物养分管理和土壤生态修复研究,orcid.org/0000-0003-3766-7733,wjf6711@126.com。
©《江西农业大学学报》编辑部,开放获取CC BY-NC-ND协议

Abstract: [**Objective**] This study aims to investigate the effects of sodium selenite addition methods and dosages on the production of selenium-enriched earthworms, thus providing a reference for selenium-enriched earthworm cultivation. [**Method**] Under greenhouse conditions, three materials (cow manure, straw, and biogas slurry) were mixed in a weight ratio of 16∶4∶1. The effects of sodium selenite addition (with selenium concentrations of 80, 100, and 120 mg/kg, calculated as Se) and its supplementation methods (one-time addition, denoted as S; divided into three additions, denoted as SS) on the growth, reproduction, and selenium content of *Eisenia fetida* (Daping No.2 earthworms) were explored to identify the optimal breeding method for selenium-enriched earthworms with sodium selenite as the selenium source. [**Result**] Results showed that after 60 days, the survival rate of SS-treated group (8.33%-18.33%), biomass growth rate (28.85%-60.89%), cocoon number (8.33-131.67 per 100 earthworms), and bioaccumulation factor of selenium (0.78-0.95) were increased compared with those the S-treated group. Although selenium accumulation was slightly lower in the SS-treated group, body selenium concentrations remained high (231.28-264.30 mg/kg), with SS120 being the highest. Under the same addition method, excessive selenium inhibited growth and reproduction, but the SS-treated group balanced growth and enrichment. [**Conclusion**] The SS100 method has been identified as the optimal selenium-enriched earthworm farming technique. After 60 days of cultivation, the survival rate, selenium accumulation, biomass growth rate, cocoon production, and selenium bioaccumulation factor of SS100 earthworms were 81.67%, 236.70 mg/kg, 65.83%, 108.33 cocoons per 100 earthworms, and 2.31, respectively.

Keywords: *Eisenia fetida*; sodium selenite; selenium addition amount; selenium addition method; growth and reproduction; selenium accumulation of earthworm

【研究意义】硒(Se)是植物生长的有益元素,也是人和动物生长必需的微量营养元素。尽管硒对人体健康有重要作用,但其在人群中的摄入情况却不乐观。中国约有72%的地区处于低硒区,约有5~6亿人硒摄入不足[1],营养学家制定的硒日推荐摄入量为45~50 μg/d,但我国人均摄入量不到40 μg/d。以往研究表明[2],人体严重缺硒会引发健康问题,如克山病、大骨节病,补充硒可以降低疾病风险。与无机硒相比,膳食中的有机硒更易被人体吸收,且毒性阈值更高,安全性更强[3]。因此,越来越多的研究关注食品中硒的生物强化,并主张将有机硒源作为硒补充剂,以弥补硒摄入不足。硒的生物强化技术是增加膳食有机硒的有效方式,目前的强化技术主要通过植物、动物和微生物将无机硒转化为有机硒[4],有关动物硒强化的研究较少。蚯蚓作为饲料添加剂和动物蛋白质来源的研究已大量存在,其具备硒富集与转化能力,亦可作为潜在的富硒动物蛋白饲料。【前人研究进展】蚯蚓因具有生长繁殖快、体型大、硒富集能力强等优势而被用作硒的生物强化载体[5-6]。Gan等[7]研究表明,蚯蚓具有硒转化能力,在20 mg/kg亚硒酸盐和硒酸盐处理下饲养21 d,蚯蚓体硒87%~91%为有机硒,欧阳培等[8]和刘军[9]的研究结果与此类似。蚯蚓硒转化受到多种因素的影响,其中,外源硒质量分数和培养时间对蚯蚓有机硒转化率具有直接影响。外源硒添加能够提高蚯蚓体硒含量[10]。岳士忠等[11]研究表明,调节蚯蚓饲料中硒质量分数为20 mg/kg,饲养45 d后蚯蚓体的硒富集量可达97.78 mg/kg,蚯蚓体硒生物富集系数达到4.91。另外,相关研究[12]表明,随着基质硒质量分数和培养时间的不同,蚓体有机硒含量在82.25%~95%之间波动,蚯蚓体的硒富集量随着外源硒含量的增加而上升,而蚯蚓的存活率随着外源硒添加质量分数的增加而下降,存活率降低会极大减少富硒蚯蚓的产出率。由此可见,在一定的外源硒质量分数添加范围内,蚯蚓硒富集转化能力才能发挥更大的效用。富硒蚯蚓是优质的富硒动物蛋白,用于硒补剂和富硒畜禽饲料的开发,对缓解人体地域性缺硒具有重要意义。

【本研究切入点】虽然我国富硒蚯蚓养殖技术上有了长足的进步,但依旧存在富硒蚯蚓产出量不高的问题。目前富硒蚯蚓的培养研究主要围绕于外源硒的种类、添加量和底物种类,以及饲养时间上,对外源硒的添加方式如何影响蚯蚓生长繁殖及蚯蚓体硒富集效果的研究相对较少。【拟解决的关键问题】本研究拟以牛粪、秸秆、沼泥为混合基质,探究不同亚硒酸钠添加量及添加方式对蚯蚓硒富集效果及蚯蚓产出率的影响,旨在为富硒蚯蚓高效养殖及富硒动物蛋白的开发提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试蚯蚓为大平二号蚯蚓(赤子爱胜蚓属)由瑞金市杰仕柏蚯蚓养殖有限公司提供;亚硒酸钠(含Se≥99%)购于默克公司;牛粪、沼泥均取自瑞金市杰仕柏蚯蚓养殖有限公司;水稻秸秆取自试验地周围稻田。发酵风干后的牛粪与秸秆均过4 mm筛,备用。有机物料的基本化学性质如表1所示。

表1 有机物料基本化学性质

Tab.1 Basic chemical properties of organic materials

物料 Materials	全硒/(mg·kg^{-1}) Total Se	全碳/% Total C	全氮/% Total N	pH
预发酵牛粪 Pre-fermented cow manure	0.87	34.16	1.06	8.26
水稻秸秆 Rice straw	0.10	38.71	0.85	6.61
沼泥 Cripple	5.82	30.85	4.28	7.98

1.2 试验设计

试验于2023年8—10月在瑞金市杰仕柏蚯蚓养殖有限公司进行。用塑料桶养殖蚯蚓,其桶口直径23 cm,高18 cm,每个塑料桶中装入按牛粪∶秸秆∶沼泥质量比16∶4∶1的混合物料90 g(干重),调节物料C/N比为30,使蚯蚓高效堆肥。混合物料中秸秆密度小,保证良好的透气性;沼泥的粒径小,保证良好的适口性;预发酵牛粪碳氮比适宜,减轻发酵过程有害气体对蚯蚓的毒害,维持适宜的生存环境。混匀后向塑料桶中加入一定量1.8 g/L亚硒酸钠储备液(以Se计)并充分拌匀,使混合物料中Se含量为80,100,120 mg/kg。其中,Se的添加方式分为一次性添加(S)和分3次添加(SS),S处理组在第0天将硒全部加入,SS处理组在第0、15、30天各添加总量的1/3,试验设计如表2所示。加硒物料陈化7 d后,调节其含水量至70%~80%,每个塑料桶分别接种20条环带成熟的大平二号蚯蚓,并用多层无纺布和橡皮筋将桶口封好,避免蝇虫进入,将其放在室温阴暗处培养,物料温度保持在(24±4)℃,定期浇水保证物料湿度为70%~80%,每个处理15次重复,培养60 d。

表2 试验设计

Tab.2 Experimental design

一次性添加 Single application(S)		分3次添加 Three incremental applications(SS)	
处理编号 Sample number	处理设置 Treatment	处理编号 Sample number	处理设置 Treatment
CK	不加硒(对照组)	/	/
S_{80}	第0天一次添加4 mL硒储备液	SS_{80}	第0、15、30天添加4/3 mL硒储备液
S_{100}	第0天一次添加5 mL硒储备液	SS_{100}	第0、15、30天添加5/3 mL硒储备液
S_{120}	第0天一次添加6 mL硒储备液	SS_{120}	第0、15、30天添加6/3 mL硒储备液

1.3 样品采集与处理

在试验的第1、15、30、45、60天各处理取3个小桶进行破坏性取样,将各处理蚯蚓、蚯蚓茧分离,蚯蚓清肠24 h后,用去离子水冲洗表面的残余硒,冷冻干燥后备用。本研究中实验动物操作程序符合《实验动物管理和使用指南》规定。

1.4 测定指标及方法

(1)蚯蚓生物量增长率测定

饲养前后,将蚯蚓清肠处理24 h,去离子水冲洗擦干蚯蚓表面水分后,称重测定其生物量。根据饲养前后蚯蚓生物量变化情况,计算蚯蚓总生物量的增加量。蚯蚓生物量增长率=(培养后蚯蚓总生物量-培养前蚯蚓总生物量)/培养前蚯蚓总生物量×100%

(2)蚯蚓产茧率测定

手动计算蚓茧总数量,蚯蚓产茧率用“个/百条”表示。

(3)蚓体硒富集系数计算

蚯蚓体硒富集系数(BAF)=蚓体硒含量/蚓粪硒含量

(4)蚯蚓体硒含量测定

把清肠洗净的蚯蚓放入冷冻干燥机中冷冻干燥,研磨成粉末,过50目筛。样品经微波消解后用AFS测定硒元素含量。蚯蚓粉放入烘箱干燥4 h后,称取约0.1 g(精确到0.000 1 g)蚯蚓粉放于微波消解管中,每管加入10 mL浓硝酸,将赶酸仪温度调至80 ℃预煮30 min到无气泡后,冷却后加入2 mL双氧水(30%),继续煮30 min至无大量气泡,冷却后进行微波消解,待程序完成,取出消解管至赶酸仪中,温度调节至150 ℃赶酸至2 mL,冷却后加入5 mL 50% HCl于赶酸仪100 ℃还原30 min,取出微波消解管放于通风橱中冷却,用去离子水将消煮液转移至25 mL容量瓶中,定容后摇匀。消煮液过0.45 μm水系滤膜,采用AFS测定滤液中硒含量。

(5)基质和蚯蚓粪硒含量测定

将风干基质(培养蚯蚓前)和蚯蚓粪自然风干,过100目筛后分别称取0.1 g(精确到0.000 1 g)样品经微波消解(过程见蚯蚓体硒含量测定部分)后采用AFS进行测定。

1.5　数据统计与分析

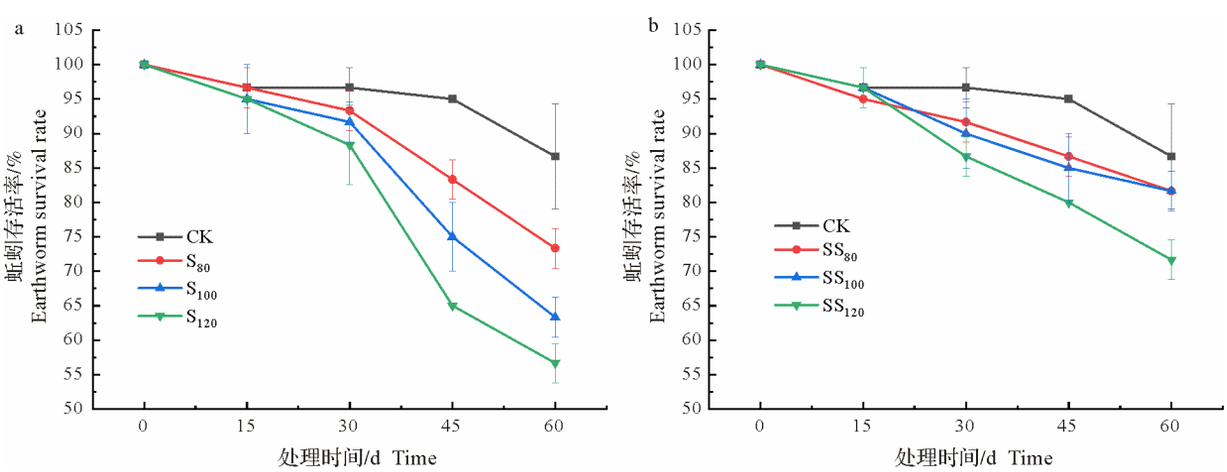
采用Excel和SPSS 26.0进行数据统计分析,采用ANOVA进行方差分析,采用最小显著极差法(LSD)对差异显著数据进行多重比较,$P<0.05$表示差异显著,$P<0.01$表示差异极显著。

2　结果与分析

2.1　硒处理对蚯蚓生长繁殖的影响

2.1.1　硒处理对蚯蚓存活率的影响

培养过程中,硒添加方式对蚯蚓存活率的影响如图1所示。可以看出硒添加导致蚯蚓存活率显著下降,硒质量分数越高蚯蚓存活率越低。分次添加处理组(SS)蚯蚓存活率均高于一次性添加处理组(S)。S处理组蚯蚓存活率下降幅度更大,至培养结束时蚯蚓存活率与对照相比降低了13.34%~30%,且以S_{120}处理蚯蚓存活率为最低(56.67%)。SS处理组,至培养结束时,蚯蚓存活率与对照相比降低了5%~15%,且以SS_{120}处理存活率为最低(71.67%),其中处理SS_{80}和SS_{100}蚯蚓存活率差异不显著,均为81.67%,且均高于其他处理。培养结束时,同等质量分数下,SS处理组蚯蚓存活率比S处理组高了11.37%~81.67%,其中,处理SS_{100}对蚯蚓存活率提高量最大,比S_{100}高了28.96%,而SS_{80}存活率提高量最小,与S_{80}相比高了11.37%。表明硒分次添加比一次性添加有利于提高蚯蚓存活率。



a:一次性添加处理(S);b:分3次添加处理(SS)。

a:Single addition treatment(S);b:Three times addition treatment(SS).

图1　硒添加量及添加方式对蚯蚓存活率的影响。

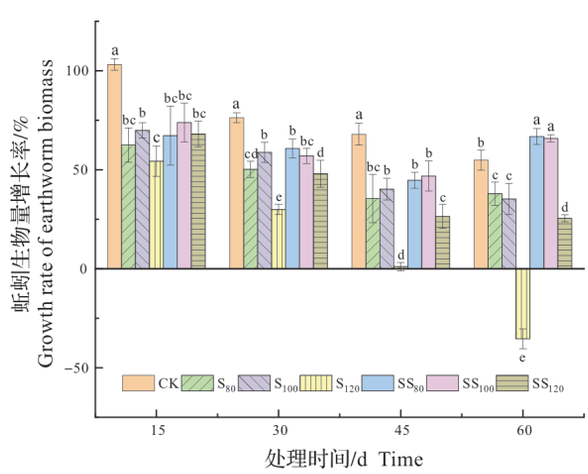
Fig.1　Effect of selenium addition amount and addition method on the survival rate of earthworms.

2.1.2 硒处理对蚯蚓生物量增长率的影响

蚯蚓生物量增长率表示蚯蚓饲养前后生物量的变化情况，培养过程中，硒添加方式及添加量对蚯蚓生物量增长率的影响如图2所示。SS处理蚯蚓生物量增加量基本上高于S处理组，无论是S还是SS，养殖15 d时，各处理蚯蚓生物量增长率均最高。S处理组中，蚯蚓生物量增长率随养殖时间的延长整体上呈现下降趋势；至培养结束时，各处理蚯蚓生物量增长率与15 d相比下降了24.54%~89.72%，其中S_{120}总生物量增长率最低，呈现负增长，为−35.42%。SS处理组中，处理SS_{80}和SS_{100}除了在60 d蚯蚓生物量增长率出现一定的增加，其余时间点均呈现下降趋势，处理SS_{120}蚯蚓生物量增长率随着养殖时间点延长呈现下降趋势；至培养结束时，处理SS_{80}和SS_{100}蚯蚓生物量增长率显著高于处理SS_{120}，且SS_{80}、SS_{100}处理间无显著差异，各处理蚯蚓生物量增长率与15 d相比下降了0.43%~42.55%。培养结束时，硒添加处理中，SS处理组蚯蚓总生物量增长率比S处理组高了28.87%~60.89%，表明SS处理比S处理组在维持蚯蚓生物量增长率的优势更突出。

2.1.3 硒处理对蚯蚓产茧率的影响

产茧率反映蚯蚓繁殖能力，硒添加方式及硒添加量对蚯蚓产茧率的影响如图3所示，SS处理组蚯蚓产茧率均高于S处理组，无论是S还是SS处理组，养殖30 d时蚯蚓产茧率均高于15 d。S处理组中，蚯蚓产茧率均随外源硒添加质量分数的增加而下降；30 d时各处理的蚯蚓产茧率是15 d的2.03~2.23倍，其中，处理S_{80}蚯蚓产茧率最高达196.67个/百条，显著高于处理S_{100}和S_{120}。SS处理组中，蚯蚓产茧率随着外源硒添加质量分数的增加呈现先上升后下降的趋势；30 d时各处理的蚯蚓产茧率是15 d的1.27~1.42倍，其中，处理SS_{100}蚯蚓产茧率最高达273.33个/百条，显著高于处理SS_{80}和SS_{100}，说明硒对蚯蚓产茧率的影响存在剂量效应。30 d时，同等硒添加质量分数下，SS处理组蚯蚓产茧率是S处理组的1.08~1.96倍，说明硒分次添加有利于蚯蚓产茧。

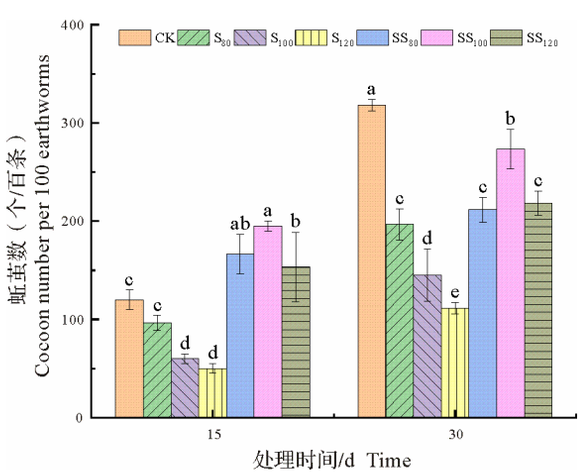


不同小写字母表示处理间差异显著（P<0.05）；误差棒则表示标准差（n=3）。

Different lowercase letters indicate significant differences between treatments（P<0.05）; Error bars represent the standard deviation（n=3）.

图2 硒添加量及添加方式对蚯蚓生物量增长率的影响

Fig.2 Effect of selenium addition on the growth rate of earthworm biomass



不同小写字母表示处理间差异显著（P<0.05）；误差棒则表示标准差（n=3）。

Different lowercase letters indicate significant differences between treatments（P<0.05）; Error bars represent the standard deviation（n=3）.

图3 硒添加量及添加方式对蚯蚓产茧率的影响

Fig.3 Effects of selenium addition amount and method on cocoon production rate of earthworms

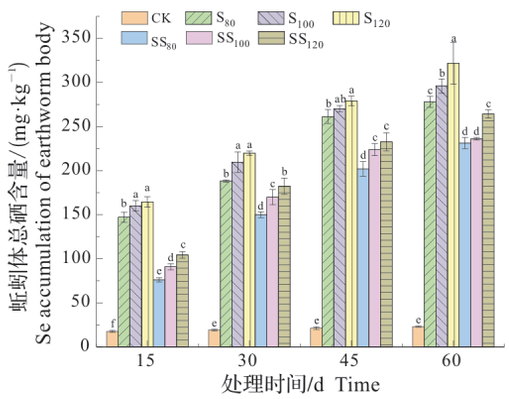
2.2 硒处理对蚯蚓富硒效果的影响

图4所示为不同硒添加方式及硒添加量对蚯蚓总硒含量的影响。S处理组蚯蚓硒富集量高于SS处理组，蚯蚓体总硒含量随着养殖时间和外源硒添加量的增加而逐渐上升，养殖60 d时各处理蚯蚓硒含量均达最高。S处理组中，60 d各处理蚯蚓体硒富集量为278~321.74 mg/kg，是15 d的1.85~1.96倍，且以处理S_{120}的蚯蚓富硒效果为最好，显著高于处理S_{80}和S_{100}。SS处理组中，60 d蚯蚓体硒富集量为231.28~264.30 mg/kg，是15 d的2.53~3.04倍，且以处理SS_{120}的蚯蚓富硒效果为最好，显著高于SS_{80}和SS_{100}。至培

养结束时,同等质量分数下,S处理组蚯蚓硒富集量比SS处理组高了46.72~59.91 mg/kg,其中处理S_{120}比处理S_{80}高了43.74 mg/kg,表明S处理有利于蚯蚓硒富集。

2.3　硒处理对蚯蚓体硒富集系数的影响

硒的添加方式及添加量对蚯蚓体硒富集系数的影响如图5所示。可以看出各处理蚯蚓体BAF均大于1,表示蚯蚓具有硒富集能力。S处理组中,蚯蚓体BAF随着养殖时间的增加呈现先上升后下降再缓慢上升的趋势,且任意时间点,BAF随着外源硒添加质量分数的增加而下降,养殖30 d时各处理的蚯蚓体BAF最高,60 d时,各处理的蚯蚓体硒BAF为1.41~1.79,比15 d低了0.07~0.3,其中,处理S_{80}最高。SS处理组中,BAF整体上呈现先下降后上升的趋势,且任意时间点,BAF随着外源硒添加质量分数的增加而下降,60 d时,各处理的蚯蚓体硒富集系数为2.26~2.74,其中,SS_{80}处理BAF最高,显著高于处理SS_{100}和SS_{120}。同等质量分数下,SS处理BAF均大于S处理,至60 d培养结束时,SS处理组各处理BAF比S处理组各处理高了50.91%~60.16%。BAF随着物料中Se含量的增加而降低,表明Se含量较高的处理组中物料残留的硒质量分数更高;SS处理组BAF高于S处理组,说明SS处理蚯蚓体硒富集速度快于S处理,S处理中蚯蚓粪的硒残留更高。



不同小写字母表示处理间差异显著(P<0.05);误差棒则表示标准差(n=3)。

Different lowercase letters indicate significant differences between treatments(P<0.05); Error bars represent the standard deviation(n=3).

图4　硒添加量及添加方式对蚯蚓体总硒含量的影响

Fig.4　Effects of selenium addition amount and method on the Se accumulation of earthworm body

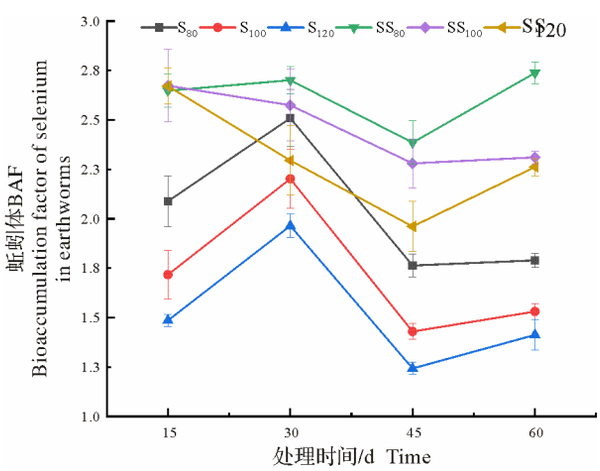


图5　硒添加量及添加方式对蚯蚓体硒富集量的影响

Fig.5　Effects of selenium addition and method on bioaccumulation factor of selenium in earthworms

3　讨　论

3.1　硒添加对蚯蚓生长繁殖的影响

硒对蚯蚓具有一定的毒害作用,外源硒添加质量分数过高严重影响蚯蚓生长、繁殖。与一次性添加相比,分次添加有利于蚯蚓生长、繁殖。SS处理,蚯蚓存活率、总生物量增加量和繁殖率均高于S处理,分别高了8.34%~18.34%、28.87%~60.89%、1.08~1.96倍。

亚硒酸钠对蚯蚓的致死作用具有时间效应和剂量效应,高硒质量分数对蚯蚓生长产生直接抑制效应,严重甚至导致蚯蚓死亡。硒添加量50 mg/kg短时间接触对赤子爱胜蚓存活率影响较小[13],然而,蚯蚓体硒含量会随着硒接触时间的延长而上升[14],长时间接触可能会延迟对蚯蚓毒害。外源硒的剂量是影响蚯蚓存活率的因素之一,刘向辉等[15]研究表明,饲养84 d时,饲料硒质量分数由200 mg/kg上升到300 mg/kg时,蚯蚓死亡率由90%至全部死亡。本研究结果与其类似,至培养结束时,随着外源硒添加质量分数由80 mg/kg上升到120 mg/kg,蚯蚓的存活率由73.33%~81.67%下降到56.67%~71.67%。另外,除了硒剂量和饲养时间会影响蚯蚓存活率外,外源硒的种类也是存活率的影响因素之一。Gan等[7]研究表明,硒质量分数为20 mg/kg时,以硒酸盐为硒源的蚯蚓在21 d内的死亡高于以亚硒酸盐为硒源。此外,还有研究[16]以不同比例亚硒酸钠和富硒酵母的混合硒源,研究其对蚯蚓生长繁殖的影响。然而,目前并没有关于硒添加方式对蚯蚓存活率影响的研究,本研究以硒添加方式为切入点,结果表明,60 d内,SS处理蚯蚓

存活率高于S处理，高了8.34%~18.34%，至培养结束时，SS_{80}和SS_{100}蚯蚓存活率均达到81.67%，高于其他处理组。分析导致分次添加蚯蚓存活率较高的原因主要有：一是蚯蚓通过自身的硒转化能力将无机硒转化为毒性较小的有机硒，使分次添加处理蚯蚓接触亚硒酸钠的瞬时质量分数低于一次性添加；二是蚯蚓将硒由头部组织向重要器官分布较少的尾部组织转移，缓解硒的毒害作用[7,14,17]。此外，还与分次添加蚯蚓接触亚硒酸钠质量分数的过程，为硒质量分数递增的过程，为蚯蚓提供硒耐受性适应培养过程，减少外源硒质量分数过高产生的应激反应有关。

分析导致蚯蚓生物量下降的主要原因，与外源硒质量分数过高产生的蚯蚓存活率下降有关（表3），根据斯皮尔曼相关Sig≤0.05，总生物量增加量的变化与蚯蚓存活率密切相关。硒质量分数是蚯蚓生物量的影响因素之一。另外，硒质量分数过高对蚯蚓生物量也会产生抑制作用，硒质量分数低于45 mg/kg时，具有促进作用[9]。本研究与其结果类似，S处理中，培养60 d时，S_{80}、S_{100}、S_{120}对蚯蚓生物量均呈现抑制作用，其中S_{120}甚至呈现负增长，说明其生物量低于原始投放量。此外，岳士忠等[11]研究表明，蚯蚓饲养物料的差异也会造成蚯蚓生物量增加量的变化。不过，目前并没有关于硒添加方式对蚯蚓生物量影响的研究，研究结果显示，至60 d培养结束时，SS处理蚯蚓总生物量增长率比S处理高了28.87%~60.89%，其中，SS_{80}和SS_{100}在存活率低于对照组的情况下，蚯蚓生物量显著高于对照。分析原因与硒分次添加导致蚯蚓瞬时接触硒质量分数较低，而低质量分数亚硒酸钠对蚯蚓总生物量有促进作用有关。

表3 斯皮尔曼相关系数

Tab.3 Spearman correlation coefficient

指标 Indicator	相关系数 Coeff	显著性水平（双尾）Sig.(two-tailed)
总生物量增长率 Growth rate of earthworm biomass	1.000	0.000
蚯蚓存活率 Survival rate of earthworms	0.751**	0.000

**在0.01级别（双尾），相关性显著。

** At the 0.01 scale(two-tailed), the correlation is significant.

茧的数量多少表示蚯蚓繁殖能力大小。由于本研究的饲养时间较长，30 d后蚯蚓茧孵出小蚯蚓，且每个茧孵出蚯蚓条数不一致，平均3~4条，因此试验仅对30 d之前的产茧率进行分析。研究中SS处理蚯蚓产茧率均高于S处理，S处理产茧率均低于对照，且产茧率随着外源硒质量分数上升而下降，说明饲料硒质量分数大于80 mg/kg时，对产茧率呈抑制作用。SS处理组在第15天时对产茧率呈促进作用，在第30天呈抑制作用，这与SS处理二次加硒导致饲料总体硒质量分数上升有关，其中，SS_{100}产茧率显著高于其他处理，说明硒对蚯蚓的繁殖率存在剂量效应，浓度过高、过低都将抑制蚯蚓的繁殖，硒质量分数小于40 mg/kg时，对蚯蚓产茧率呈现促进作用，这与Yue等[17]研究类似。

3.2 硒添加对蚯蚓富硒效果的影响

蚯蚓对硒具有一定的富集能力，以往的研究多是关于外源硒的种类及添加量、底物种类对蚯蚓体硒富集的影响，很少有研究关注外源硒的添加方式对蚯蚓体硒富集效果的影响。本研究对硒添加方式和添加量对蚯蚓体硒富集量及富集系数的影响做了分析。与刘向辉等[15]和戈峰等[18]试验结果相同，本研究蚯蚓体硒富集量随着外源硒质量分数的升高及培养时间的延长而上升，且S处理组蚯蚓体硒富集量均高于SS处理组。富集量在培养结束时达到最高值，其中，S_{120}硒富集量最高，达321.74 mg/kg。分析产生差异的原因是，SS处理蚯蚓对硒的总富集时间小于S处理，第2次、第3次投放的亚硒酸钠富集时间都小于60 d，最终导致蚯蚓硒富集量小于一次添加处理。

本研究结果与Yue等[19]的研究结果一致，物料中硒质量分数越高，BAF值越低，这可能是因为蚯蚓硒排出率增加，以及蚯蚓组织中Se结合位点饱和所致[20]。此外，BAF随着外源硒质量分数的升高而下降，说明蚯蚓对硒的富集量是有限度的。目前研究并未有对蚯蚓富硒堆肥过程中BAF变化的相关研究，本研究中S处理组各处理蚯蚓BAF于30 d达峰值，分析其原因可能与蚯蚓体的硒富集量上升有关；各处理BAF均在30~45 d出现下降，与物料的“浓缩效应”[21-22]有关，物料的“浓缩效应”导致物料硒质量分数的增加量大于蚯蚓体硒富集量，使各处理BAF出现下降；在45~60 d又呈现一定的上升，与富硒物料对蚯蚓的驯化作用[23]，导致蚯蚓耐受能力更强，富集作用更明显，BAF在堆肥过程产生波动的原因有待进一步研

究。SS处理中,BAF在15~45 d的下降主要与分次添加外源硒溶液致使物料硒质量分数梯度上升有关,45 d后呈现上升趋势,与硒分次添加驯化后的蚯蚓具有强提取作用有关[23]。BAF除了与外源硒的质量分数相关外,还与外源硒的添加方式密切相关。相同硒添加水平,硒分次添加BAF高于一次性添加,说明在同等硒投入量下,一次性添加在一定程度上抑制蚯蚓的硒富集能力,蚯蚓粪中硒残留量更高,而分次添加蚯蚓体硒富集速度快于一次添加。

富硒蚯蚓是优质的富硒动物蛋白,能用于硒补剂及富硒畜禽饲料的开发。随着人们健康意识需求的提高,硒作为必需微量元素,其补剂市场有望增长,另外,部分地区土壤硒含量低,硒的需求更依赖于硒补充剂。目前已有许多关于在鸡、兔饲料中添加富硒蚯蚓粉的研究[24-26],表明蚯蚓粉在一定程度上能提升畜禽组织硒沉积,此外,蚯蚓养殖成本低,可以降低富硒饲料的成本。对于富硒蚯蚓的生产效率来说,需要结合蚯蚓生长、繁殖和蚯蚓硒富集量一同衡量。从生产富硒蚯蚓的角度分析,虽然分次添加蚯蚓总硒含量低于一次添加,但蚯蚓的生物量显著高于一次添加,分次添加富硒蚯蚓产出投入比高、富集效率也更高,其中,处理SS_{100}更适合作为富硒蚯蚓养殖条件。从生产富硒蚯蚓粪角度分析,富硒粪可用于生产富硒有机肥,一次添加蚯蚓粪硒富集量更高,S_{100}蚯蚓存活率及繁殖率都相对较高,更适合作为富硒蚯蚓粪的生产条件。未来可以通过蚯蚓品种选择,以及联合微生物促进硒转化,以提高硒的利用率。至于不同生长阶段蚯蚓对硒耐受性及转化效率的差异,和蚯蚓的硒转化机理有待进一步研究。

4　结　论

本试验结果表明,养殖60 d时,SS处理组蚯蚓的存活率、生物量增长率、产茧率和硒富集系数均高于S处理组,分别提高了8.33%~18.33%、28.85%~60.89%、8.33~131.67个/百条及0.78~0.95,其中,处理SS_{100}为最佳富硒蚯蚓养殖方式,养殖60 d时,蚯蚓的存活率、硒富集量、生物量增长率、产茧率和硒富集系数分别为81.67%、236.70 mg/kg、65.83%、108.33个/百条和2.31。虽然SS处理蚯蚓体的总硒含量低于S处理,但从生产富硒蚯蚓角度看,分次添加富硒蚯蚓存活率、生物量增长率、富集效率以及产茧率更高,说明其投入产出比高,潜在产出量也更高。

参考文献 References:

[1] ZHU Y G,PILON-SMITS E A H,ZHAO F J,et al.Selenium in higher plants:understanding mechanisms for biofortification and phytoremediation[J].Trends in plant science,2009,14(8):436-442.

[2] 刘奇,王少康.硒与人类癌症关系的研究进展[J].现代疾病预防控制,2024,35(10):721-725.
LIU Q,WANG S K.Research progress on the relationship between selenium and human cancer[J].Modern disease control and prevention,2024,35(10):721-725.

[3] HAN X,QIN P,LI W,et al.Effect of sodium selenite and selenium yeast on performance,egg quality,antioxidant capacity,and selenium deposition of laying hens[J].Poultry science,2017,96(11):3973-3980.

[4] HOSSAIN A,SKALICKY M,BRESTIC M,et al.Selenium biofortification:roles,mechanisms,responses and prospects[J].Molecules,2021,26(4):881.

[5] STEWART D T,NOGUERA-OVIEDO K,LEE V,et al.Quantum dots exhibit less bioaccumulation than free cadmium and selenium in the earthworm *Eisenia andrei*[J].Environmental toxicology and chemistry,2013,32(6):1288-1294.

[6] RICHARDSON J,GÖRRES J,JACKSON B,et al.Trace metals and metalloids in forest soils and exotic earthworms in northern New England,USA[J].Soil Biology and biochemistry,2015,85:190-198.

[7] GAN X,HUANG J C,ZHANG M,et al.Remediation of selenium-contaminated soil through combined use of earthworm *Eisenia fetida* and organic materials[J].Journal of hazardous materials,2021,405:124212.

[8] 欧阳培,童斌.富硒蚯蚓含硒蛋白研究[J].厦门大学学报(自然科学版),1993(6):795-798.
OUYANG P,TONG B.Study on Se-proteins in the selenium rich earthworm[J].Journal of Xiamen university(natural science),1993(6):795-798.

[9] 刘军.富硒肥料的研制及其对韭菜生长和品质的影响[D].泰安:山东农业大学,2011.
LIU J.Research on the processing of selenium-enriched fertilizer and its effects on growth and quality of Chinese chive[D].Tai'an:Shandong Agricultural University,2011.

[10] 刘念.基于牛粪为养料下蚯蚓对硒元素富集效应的影响研究[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2020.
LIU N.Study on the effect of earthworms on enrichment of selenium based on cow manure[D].Hohhot:Inner Mongolia Agricultural University,2020.

[11] 岳士忠,张慧琦,黄财德,等.不同基质及硒添加量对蚯蚓生长、繁殖和富硒能力的影响[J].应用与环境生物学报,2019,25(4):885-891.
YUE S Z,ZHANG H Q,HUANG C D,et al.Effects of different culture materials and selenium contents on the growth,reproduction,and tissue selenium enrichment of the earthworm *Eisenia fetida*[J].Chinese journal of applied and environmental biology,2019,25(4):885-891.

[12] 孙小斐,乔玉辉,孙振钧,等.富硒蚯蚓的培养及其硒富集作用研究[J].农业资源与环境学报,2014,31(6):570-574.
SUN X F,QIAO Y H,SUN Z J,et al.The cultivation and selenium enrichment of selenium enriched earthworm[J].Journal of agricultural resources and environment,2014,31(6):570-574.

[13] FISCHER E,KOSZORUS L.Sublethal effects,accumulation capacities and elimination rates of As,Hg and Se in the manure worm,*Eisenia fetida*(Oligochaeta,Lumbricidae)[J].Pedobiologia,1992,36(3):172-178.

[14] WANG R,YUE S,HUANG C,et al.Uptake,distribution,and elimination of selenite in earthworm *Eisenia fetida* at sublethal concentrations based on toxicokinetic model[J].Science of the total environment,2023,858.

[15] 刘向辉,戈峰,徐张红,等.亚硒酸钠对蚯蚓的毒性及蚓体富硒作用的研究[J].应用与环境生物学报,2001(5):457-460.
LIU X H,GE F,XU Z H,et al.The tocicoty of sodiumselenite to earthworm and selenium-accumulating effect of earthworm[J].Chinese journal of applied and environmental biology,2001(5):457-460.

[16] 张佐忠,刘念,要利仙,等.牛粪中添加硒源对蚯蚓生长繁殖及其粪肥力的影响[J].家畜生态学报,2023,44(4):82-86.
ZHANG Z Z,LIU N,YAO X L,et al.Effect of adding se element to cow dung on growth and reproduction of earthworms and their manure fertility[J].Journal of domestic animal ecology,2023,44(4):82-86.

[17] YUE S,ZHANG H,ZHEN H,et al.Selenium accumulation,speciation and bioaccessibility in selenium-enriched earthworm (*Eisenia fetida*)[J].Microchemical journal,2019,145:1-8.

[18] 戈峰,刘向辉,江炳缜.蚯蚓对金属元素的富集作用分析[J].农业环境保护,2002(1):16-18.
GE F,LIU X H,JIANG B Z.Accumulation of several metals in earthworm(*Eisenia foetida*)[J].Journal of agro-environment science,2002(1):16-18.

[19] YUE S,HUANG C,WANG R,et al.Selenium toxicity,bioaccumulation,and distribution in earthworms(*Eisenia fetida*)exposed to different substrates[J].Ecotoxicology and environmental safety,2021,217:112250.

[20] VIJVER M G,VAN GESTEL C A,LANNO R P,et al.Internal metal sequestration and its ecotoxicological relevance:a review[J].Environmental science & technology,2004,38(18):4705-4712.

[21] 方天龙,周鑫.2种堆肥方式与稻壳炭结合对污泥的处理效果研究[J].安徽农学通报,2021,27(22):160-163.
FANG T L,ZHOU X.Effect of two composting methods combined with rice husk charcoal on sludge treatment[J].Anhui agricultural science bulletin,2021,27(22):160-163.

[22] 斯鑫鑫,唐尚柱,赵晓海,等.蓝藻有机富硒肥的研制及其在普通白菜种植中的应用[J].江苏农业学报,2021,37(2):340-347.
SI X X,TANG S Z,ZHAO X H,et al.Development of selenium-enriched cyanobacteria organic fertilizer and itsapplication in bok choy planting[J].Jiangsu journal of agricultural sciences,2021,37(2):340-347.

[23] 徐池.重金属Cu对蚯蚓的驯化研究[D].南京:南京农业大学,2012.
XU C.The acclimation of earthworms under the stress of heavy metal(Cu)[D].Nanjing:Nanjing Agricultural University,2012.

[24] 刘志成,梁晓姣,邱淑春,等.富硒蚯蚓粉对芦丁鸡产蛋性能、蛋品质、硒沉积及抗氧化功能的影响[J].饲料研究,2023,46(13):38-43.
LIU Z C,LIANG X J,QIU S C,et al ,Effect of selenium-rich earthworm powder on laying performance,egg quality ,selenium deposition and antioxidant function in Chinese painted quail[J].Feed research,2023,46(13):38-43.

[25] 邱淑春,刘志成,刘永佳,等.富硒蚯蚓粉对比利时兔生长性能、血清指标、肌肉组织硒沉积和肉品质的影响[J].饲料研究,2025(1):102-107.
QIU S C,LIU Z C,LIU Y J,et al ,Effects of selenium-enriched earthworm powder on growth performance,serum indexes ,selenium deposition in muscle tissue,and meat quality of *Belgian rabbits*[J].Feed research,2025(1):102-107.

[26] SUN X,YUE S Z,QIAO Y H,et al.Dietary supplementation with selenium-enriched earthworm powder improves antioxidative ability and immunity of laying hens[J].Poultry science,2020,99(11):5344-5349.