

重金属锰和铅暴露对秀丽隐杆线虫生理及生化指标的影响*

刘继伟^{1,2}, 张滢月¹, 孟若楠¹, 丁艳丽¹, 吴雅楠¹, 王野¹

(1. 内蒙古科技大学 生命科学与技术学院, 内蒙古 包头 014010; 2. 内蒙古科技大学 生命科学与技术学院 内蒙古自治区生命健康与生物信息学重点实验室, 内蒙古 包头 014010)

摘要: 以与人类基因同源性高达65%的模式生物——秀丽隐杆线虫为研究对象, 对其急性暴露后测定半数致死浓度、寿命、运动能力、抗氧化应激能力、抗紫外应激能力、脂褐素及活性氧的积累水平, 并对活性氧-脂褐素、活性氧-寿命分别进行了相关性分析, 旨在系统探究重金属锰和铅暴露对其生理和生化指标的毒性效应。研究结果表明, 锰和铅暴露可以显著缩短线虫的寿命(锰和铅暴露下线虫的寿命分别缩短了40%和30%), 加速了线虫的衰老进程; 锰和铅暴露还显著抑制了线虫的自发运动能力(锰和铅暴露下A级运动能力分别降低了55%和30%)。同时暴露组线虫体内活性氧水平显著升高(锰和铅暴露下活性氧荧光强度较对照组分别增加了1.5倍和1.2倍), 且对氧化应激和紫外应激的抵抗能力显著下降(锰和铅暴露且存在氧化应激的条件下, 线虫的平均寿命分别下降了32%和45%; 锰和铅暴露且存在紫外应激的条件下, 线虫的寿命均缩短了20%)。最后, 通过相关性分析证实, 活性氧水平与脂褐素积累呈正相关(锰和铅暴露下 R^2 分别为0.8923和0.7370)。研究揭示了锰和铅对线虫的毒性效应, 为理解重金属对人体潜在的神经毒性、促衰老作用及氧化损伤具有重要意义。

关键词: 铅; 锰; 秀丽隐杆线虫; 生理及生化指标

中图分类号: Q89

文献标识码: A

文章编号: 2095-2295(2026)01-0015-10

DOI: 10.16559/j.cnki.2095-2295.2026.01.002

Effects of heavy metals manganese and lead exposure on physiological and biochemical indicators in *Caenorhabditis elegans*

LIU Jiwei^{1,2}, ZHANG Yingyue¹, MENG Ruonan¹, DING Yanli¹, WU Yanan¹, WANG Ye¹

(1. School of Life Science and Technology, Inner Mongolia University of Science & Technology, Baotou 014010, China; 2. Inner Mongolia Key Laboratory of Life Health and Bioinformatics, School of Life Science and Technology, Inner Mongolia University of Science & Technology, Baotou 014010, China)

Abstract: Our study utilized the model organism *Caenorhabditis elegans*, which shares up to 65% genetic homology with humans, as the research subject. Following acute exposure, we determined the median lethal concentration, lifespan, locomotor capacity, resistance to oxidative stress, resistance to ultraviolet stress, and the accumulation levels of lipofuscin and reactive oxygen species. This systematic investigation aimed to examine the toxic effects of heavy metals manganese and lead on physiological and biochemical indicators. Results demonstrated that both manganese and lead exposure significantly shortened the nematode's lifespan (by 40% and 30%, respectively), accelerating the aging process. Furthermore, manganese and lead exposure markedly inhibited spontaneous movement (Class A movement capacity was reduced by 55% and 30%, respectively). Concurrently, reactive oxygen species levels were significantly elevated in exposed groups (with fluorescence intensity increasing by 1.5-fold and 1.2-fold under manganese and lead exposure,

* 基金项目: 国家自然科学基金(82460544)。

作者简介: 刘继伟, 男, 讲师, E-mail: 2020904@imust.edu.cn

收稿日期: 2025-10-16

respectively, compared to the control). The resistance to both oxidative and ultraviolet stress was substantially impaired (under oxidative stress conditions with manganese and lead exposure, the mean lifespan decreased by 32% and 45%, respectively; under ultraviolet stress conditions with manganese and lead exposure, lifespans were shortened by 20% in both cases). Finally, correlation analysis confirmed that reactive oxygen species levels were positively correlated with lipofuscin accumulation (with R^2 values of 0.892 3 and 0.737 0 under manganese and lead exposure, respectively). This research reveals the toxic effects of manganese and lead on *Caenorhabditis elegans* and provides important insights into understanding the potential neurotoxicity, pro-aging effects, and oxidative damage of heavy metals in humans.

Key words: lead; manganese; *caenorhabditis elegans*; physiological and biochemical indicators

随着全球工业化与城市化的快速推进,人类暴露于各种环境污染物的风险显著增加,其中重金属污染作为主要的环境因素之一,因其持久性、生物累积性和毒性特征,已成为环境科学领域的重要研究内容。铅和锰作为典型的重金属污染物,对人类健康和生态系统的潜在威胁尤为突出。秀丽隐杆线虫作为1种模式生物,广泛应用于生物学研究,特别是环境毒理学领域。该生物因其透明的体型、已完成的基因组序列、大量的卵产量、短暂的生命周期等优点,使其成为研究生命现象普遍规律的重要工具^[1]。线虫的这些特性使其在评估环境污染物(如重金属)的毒性效应时,具有重要的实验价值。

重金属锰和铅的环境污染源多种多样,主要通过采矿、冶炼、玻璃制造、纺织印染、造纸等工业活动,以及工业废水排放、燃煤副产物、城市地表径流和土壤侵蚀等途径持续释放到环境中^[2]。人类主要通过空气吸入、食物摄取、饮用水接触等途径暴露于这些重金属,而职业暴露和皮肤接触也是重要的暴露途径^[3]。内蒙古地区拥有丰富的矿产资源^[4],加上重工业多集中于呼包鄂城市群,重金属污染问题日益突显。早在2016年的1项研究显示内蒙古某些河段的沉积物中存在较高水平的重金属污染^[5];在另外1项研究中,研究人员发现内蒙古包头市某稀土矿区地下水中主要污染重金属为锰和铅,尤其锰含量超标严重^[6]。在土壤和沉积物中的长期蓄积,锰和铅会对人类和生态系统构成潜在的健康风险^[7],并影响动物的生长发育以及环境的整体健康。锰是人体所必需的微量元素,适量摄入对维持多种生理功能至关重要^[8],但长期接触高浓度的锰则可能导致神经系统的损害以及体内生化代谢的紊乱,从而引发一系列健康问题,例如增加帕金森病等神经系统疾病的风险^[9]。类似,铅具有显著的生物蓄积性,可在体内长期存留,并引起慢性中毒;铅在人体或动物体内易积累于海马体,导致神经发育毒性^[10],同时还会影响泌尿系统,导致慢性肾病或

急性肾损伤^[11],并会对肝细胞造成损伤^[12]。

线虫模型已经揭示了多种重金属的毒性效应。例如,镍对线虫的运动能力、生长和摄食有不同的毒性影响^[13];汞则对线虫的神经发育产生毒性^[14];砷能够提高线虫体内活性氧的水平^[15];而镉则抑制与神经退行性疾病相关的SOD1酶活性^[16]。在这些研究中,锰和铅的毒性效应同样不容忽视。锰暴露能够引发线虫神经元的神经变性^[17],并且显著影响线虫的嗅觉适应、学习能力和发育可塑性^[18]。铅暴露则会显著缩短线虫的寿命,并减少后代数量,表现出明显的生殖毒性^[19]。此外,铅还具有内分泌干扰作用,可能引发相关基因表达异常^[20]。然而,现有的研究大多集中于对锰和铅毒性效应的单一角度观察,尚缺乏对其生理与生化指标的系统性评估。因此,研究利用秀丽隐杆线虫模型,旨在系统探究不同浓度铅、锰暴露对线虫运动行为、抗氧化应激能力、抗紫外应激能力、寿命以及脂褐素和活性氧水平的影响,同时进行了活性氧水平分别与脂褐素积累水平和寿命进行了相关性分析,为揭示其毒性作用及环境风险评估提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 实验材料

野生型秀丽隐杆线虫N2,中国科学院长春应用化学研究所药物化学生物课题组李宏源老师赠;大肠杆菌OP50,实验室保存;氨苄青霉素、盐酸四环素、琼脂粉、氯化钾、氯化钠、氯化钙、氯化镁、硫酸镁、磷酸氢二钾、磷酸二氢钾、磷酸二氢钠、磷酸氢二钠、丙三醇、95%乙醇、无水乙醇、氯化铵、次氯酸钠、氢氧化钠、氢氧化钾均购自鼎国生物公司;蛋白胨购自Usb公司;IPTG购自Genview公司;酵母提取物、胰蛋白胨购自OXOID公司。

1.2 实验器材

电子天平购自奥豪斯仪器(常州)有限公司;超

净工作台购自苏州净化设备有限公司;恒温摇床购自上海天呈实验仪器制造有限公司;恒温水浴锅购自国华电器有限公司;高速台式离心机购自湖南湘仪实验室仪器开发有限公司;恒温培养箱武汉瑞华仪器设备有限责任公司;高压蒸汽灭菌锅购自上海博迅实业有限公司等。

1.3 实验方法

1.3.1 秀丽隐杆线虫的培养、冻存与同期化

线虫的培养与冻存:线虫在含有 E. coli OP50 的 NGM 培养基上于 20 °C 恒温培养,约 1 周进行 1 次转板。秀丽隐杆线虫冻存时将线虫悬液与冻存液 1:1 混合,放入 -80 °C 冰箱冻存。

线虫的同期化:李云飞等^[21]将 10~20 条处于产卵时期的线虫在含有 E. coli OP50 的 NGM 培养基上于 20 °C 恒温培养箱培养。待其产卵 5~8 h 后,将成虫挑走,含有线虫卵的培养皿继续置于 20 °C 培养箱培养。

1.3.2 暴露液制备以及暴露方式

实验采用急性液体暴露的方式,将同期化到 L4 期的线虫转移到 12 孔板中。加入不同浓度的氯化锰(0、4、8、12 mM)和醋酸铅(0、10、50、100 μM),20 °C 急性暴露 4 h。

1.3.3 线虫致死率的测定

采用 1.3.2 中的暴露方式将线虫于氯化锰和醋酸铅不同浓度进行急性暴露,每孔 10 条线虫,每组设置 3 个重复。20 °C 暴露 4 h 后统计每组线虫死亡数,利用 Graphpad Pism 软件,将数据进行 Log 转换,随后在软件的 Analyze 选项中选择非线性拟合,计算出半数致死浓度。

1.3.4 线虫运动能力的测定

陈星昊等^[22]将急性暴露 4 h 后的 L4 期线虫放置于空板中,每板 10 只,每个处理浓度 3 个重复。观察线虫的运动能力,按以下标准对线虫的运动情况进行记录:运动能力 A 级(线虫自发地运动);运动能力 B 级(线虫只在被刺激时运动);运动能力 C 级(线虫在被刺激时仅头、尾部摆动)。整理数据并计算 A、B、C 级运动能力的比例。

1.3.5 线虫寿命测定

将急性暴露 4 h 后的线虫用缓冲液清洗 3 次后转移至含有 5-FU 的食物板中,于 20 °C 培养。对各组的线虫生存情况进行计数,此时记为实验第 0 d。随后,每隔 24 h,记录线虫的死亡数量,直至所有试

验线虫全部死亡,每组设 3 个平行,每个平行 20 条线虫,每组 60 条。整理数据并绘制生存曲线。

1.3.6 线虫体内脂褐素水平测定

刘泽坤等^[23]将急性暴露 4 h 后的线虫用缓冲液冲洗,离心弃上清。分别加入盐酸左旋咪唑进行麻醉,滴 2% 的琼脂糖凝胶中制片,用荧光显微镜进行拍照,激发波长为 450 nm。

1.3.7 线虫抗氧化能力测定

根据张余威等^[24]的方法修改,将急性暴露后的 L4 期线虫加入 200 μL 体积分数为 0.6% 过氧化氢溶液。每 1 h 观察 1 次线虫的死亡存活数,直至所有线虫全部死亡,计算线虫的平均寿命。

1.3.8 线虫抗紫外应激能力的测定

将急性暴露 4 h 后的线虫用缓冲液清洗 3 次后转移至空板中。将线虫置于紫外直接照射环境下,每隔 1 h 记录线虫存活及死亡数目,直到线虫全部死亡。整理数据并计算平均寿命。

1.3.9 线虫体内活性氧水平测定

将急性暴露 4 h 后的线虫清洗 3 次,离心后弃上清,留约 100 μL 溶液,加入 ROS 探针 DCFH-DA。开盖置于 37 °C 培养箱孵育 3 h,用缓冲液清洗 3 次,转移至空板中。麻醉制片,用荧光显微镜进行拍照,激发波长为 680 nm。

1.3.10 数据分析

每个实验进行 3 次独立生物学重复,数据为 3 次独立实验平均值 ± 标准差 (SD)。Graphpad Pism 软件中的单因素方差分析用于比较对照组与给药组的显著性:ns, $p > 0.05$; *, $p < 0.05$; **, $p < 0.01$; ***, $p < 0.001$ 。使用 Graphpad Pism 作图。

2 结果与结论

2.1 重金属锰和铅暴露对线虫生存的影响

为探究锰和铅对线虫的毒性效应,首先检测了锰和铅暴露下线虫的致死率,采用不同浓度的氯化锰(0、10、20、30、40、50、60 mM)和醋酸铅(0、100、200、300、400 μM)分别对线虫进行 4 h 的急性暴露。研究发现 20 mM 及以上浓度的氯化锰导致线虫死亡率显著升高,通过计算得出氯化锰暴露下线虫的半数致死浓度为 55.5 mM(图 1a)。如图 1(b)所示,300 μM 及以上浓度的醋酸铅会导致线虫死亡率显著升高,最后通过计算得出醋酸铅暴露下线虫的半数致死浓度为 300 μM。

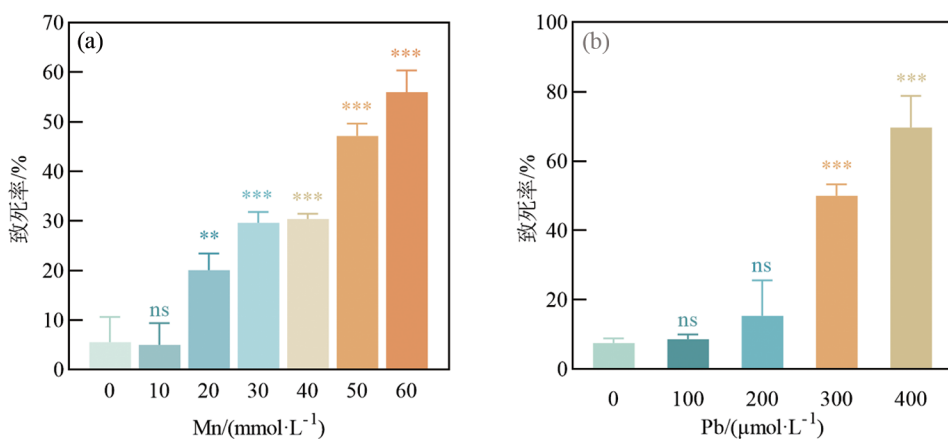


图1 重金属锰和铅暴露下线虫的半数致死率

Fig. 1 The median lethal rate of *c. degans* exposed to heavy metals manganese and lead

(a)氯化锰处理下线虫的半数致死率;(b)醋酸铅处理下线虫的半数致死率。

寿命是评价机体健康与毒物长期暴露效应的关键指标^[25]。为了探究锰和铅暴露对线虫寿命的影响,根据锰和铅暴露下线虫的致死率情况,采用不影响线虫存活的几个暴露浓度梯度分别对线虫进行4 h的急性暴露,将暴露后的线虫置于空板中,每天统计线虫的生存率,绘制线虫生存曲线。如图2(a)所示,在4 mM 氯化锰暴露下,线虫于第16 d全部死

亡,寿命缩短了20%;而当暴露浓度升高至8 mM和12 mM时,全部死亡时间提前至第12 d,寿命缩短了40%。类似地,由图2(b)可知,在10、50 μM和100 μM醋酸铅暴露下,线虫全部死亡时间分别在第21 d、第19 d和第16 d,寿命分别缩短了8%、30%。由以上结果表明,锰和铅暴露均能显著缩短线虫的寿命,且该效应呈现明显的浓度依赖性。

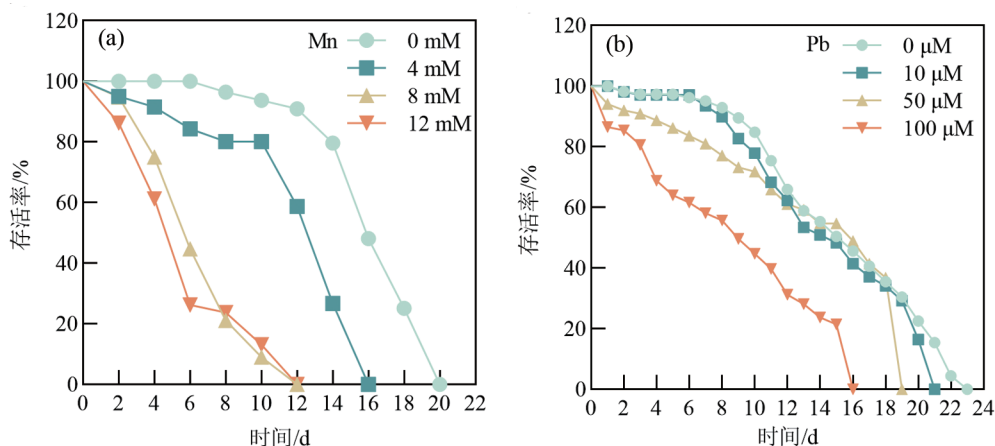


图2 重金属锰和铅暴露下线虫的生存曲线

Fig. 2 Survival curve of *c. elegans* exposed to heavy metals manganese and lead

(a)氯化锰处理下线虫的生存曲线;(b)醋酸铅处理下线虫的生存曲线。

2.2 重金属锰和铅暴露对秀丽隐杆线虫运动能力的影响

作为神经系统的基本功能,线虫的运动行为能直观反映其神经系统的状态^[26]。为了研究锰和铅

对线虫运动能力的影响,采用不同浓度的氯化锰和醋酸铅分别对线虫进行4 h的急性暴露,观察线虫运动能力的变化。运动能力分为3个等级:运动能力A级(线虫自发运动);运动能力B级(线虫只在

被刺激时运动);运动能力 C 级(线虫在被刺激时仅头、尾部摆动)。一般来说,A 级运动能力代表健康、完整的神经肌肉功能,B 级运动能力表明神经系统已经出现中度损伤或功能衰退,C 级运动能力表明

严重的、近乎瘫痪的神经肌肉功能障碍。结果显示,随着锰暴露浓度的升高,C 级运动能力的线虫比例显著上升,如图 3(a)所示;而 12 mM 氯化锰暴露下 A 级运动能力则相应减少了 55%,显著降低(图 3b)。

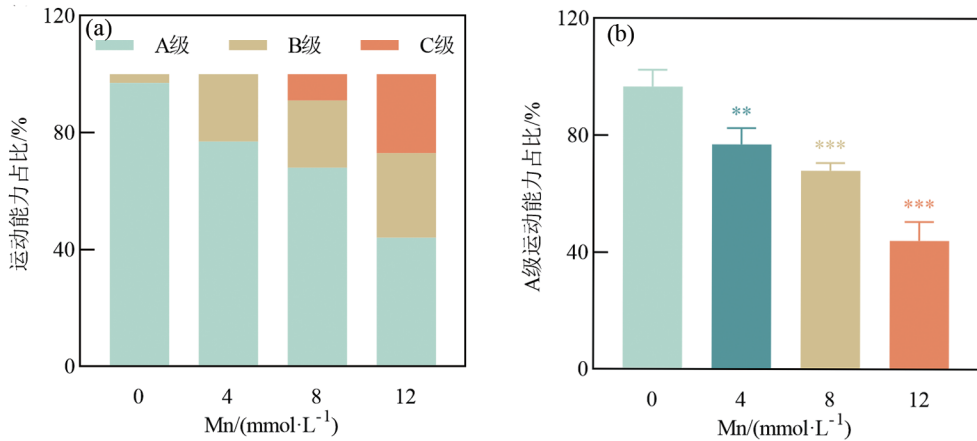


图 3 重金属锰暴露下线虫各级运动能力的变化

Fig. 3 Change in locomotor ability of *c. elegans* at different levels under manganese exposure

(a) 氯化锰处理对线虫各级运动能力的影响;(b) 氯化锰处理下 A 级运动能力占比的变化。

类似地,在醋酸铅暴露条件下,C 级运动能力线虫的比例也随浓度增加而上升,如图 4(a)所示,A 级运动能力随着浓度上升而下降,如图 4(b)所示,

特别是在 100 μM 浓度下,A 级运动能力出现显著下降(降低了 30%)。上述结果表明,锰与铅暴露均会使线虫自主运动能力减弱。

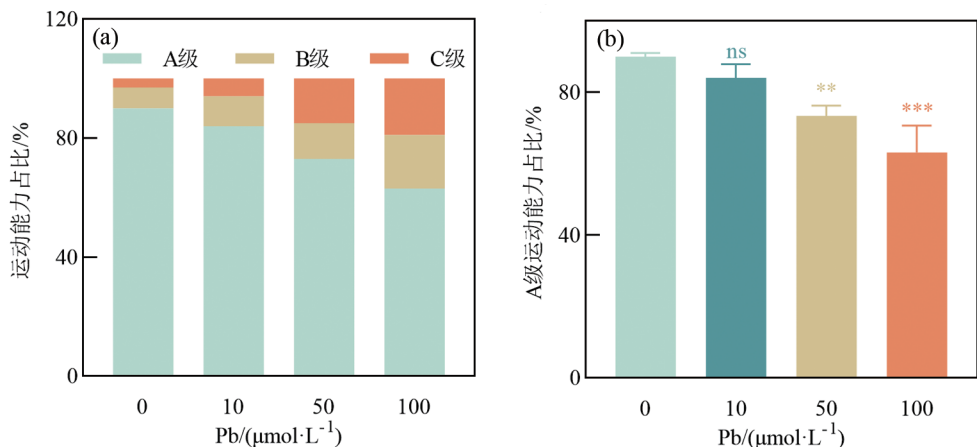


图 4 重金属铅暴露下线虫各级运动能力的变化

Fig. 4 Change in locomotor ability of *c. elegans* at different levels under lead exposure

(a) 醋酸铅处理对线虫各级运动能力的影响;(b) 醋酸铅处理下 A 级运动能力占比的变化。

2.3 重金属锰和铅暴露使线虫的生化指标紊乱

脂褐素是一种自发荧光物,是衰老的生物标志

物^[27]。为探究锰和铅暴露对线虫体内脂褐素水平的影响,用不同浓度的氯化锰和醋酸铅分别对线虫进行 12 h 的急性暴露,并分析荧光强度。实验结果

显示,氯化锰暴露下的线虫荧光强度均比对照组的线虫更强(12 mM 氯化锰暴露下荧光强度较对照组增加了1.8倍)且呈现出浓度依赖性,如图5(a)所示;当线虫暴露于浓度不低于50 μM 的醋酸铅时,

其荧光强度显著高于对照组,说明醋酸铅暴露下的线虫体内脂褐素堆积较对照组显著升高(100 μM 醋酸铅暴露下荧光强度较对照组增加了0.6倍),如图5(b)所示。

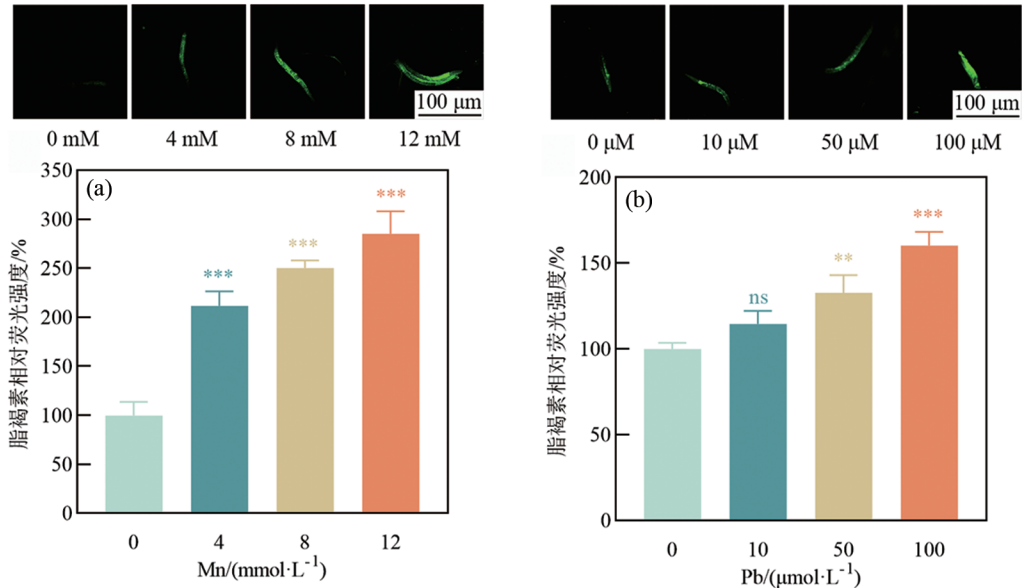


图5 重金属锰和铅暴露下线虫体内脂褐素水平的变化

Fig. 5 Change in lipofuscin levels in *c. elegans* exposed to heavy metals manganese and lead

- (a) 氯化锰处理下线虫体内脂褐素水平的变化及相对荧光强度;
(b) 醋酸铅处理下线虫体内脂褐素水平的变化及相对荧光强度。

另外,活性氧在体内过量累积时,会对线虫机体造成损害^[25]。为探究锰和铅暴露下对线虫体内活性氧水平的影响,用不同浓度的氯化锰和醋酸铅分别对线虫进行12 h的急性暴露后,分析荧光强度。实验结果显示,同对照组相比,氯化锰暴露下线虫荧光强度明显增强,12 mM 氯化锰暴露下,荧光强度较对照组增加了1.5倍,如图6(a)所示;与之类似,醋酸铅暴露下的线虫荧光强度较对照组线虫更强,100 μM 醋酸铅暴露下荧光强度较对照组增加了1.2倍,如图5(b)所示。综上,可以发现锰和铅暴露会促进线虫体内脂褐素的堆积,增加线虫体内活性氧的累积,对线虫造成损害,加快了线虫的衰老进程。

2.4 重金属锰和铅暴露使线虫应激抵抗能力下降

应激反应是机体对内外环境刺激产生的非特异性应答。当生存环境的不利变化威胁线虫时,会触发其应激抵抗反应,以维持稳态。用不同的浓度的氯化锰和醋酸铅分别对线虫进行急性暴露,并加入

过氧化氢处理以模拟氧化应激,通过统计线虫的平均寿命探究锰和铅暴露对线虫抗氧化应激能力的影响。实验结果显示,加入过氧化氢后,氯化锰暴露组的线虫平均寿命显著缩短(12 mM 氯化锰暴露下线虫的平均寿命缩短了20%),如图7(a)所示;同样,在醋酸铅暴露组中,当浓度达到50 μM 及以上时,线虫平均寿命也出现显著下降(100 μM 醋酸铅暴露下线虫的平均寿命下降了20%),如图7(b)所示。该结果表明,重金属锰与铅的暴露会削弱线虫的抗氧化应激能力。

紧接着,使用紫外线照射模拟紫外应激条件来探究锰和铅暴露对线虫抗紫外应激能力的影响,用不同浓度的氯化锰和醋酸铅分别对线虫进行4 h的急性暴露,随后用紫外线进行照射并统计线虫寿命。实验结果显示在氯化锰暴露下线虫的平均寿命显著下降,与对照组相比,4、8和12 mM 氯化锰浓度暴露下线虫的存活率均下降(下降了20%),如图8(a)所示;类似,醋酸铅暴露下线虫的存活率同样下降了

20%,如图8(b)所示。实验结果表明,锰和铅暴露

降低了线虫的抗紫外应激能力。

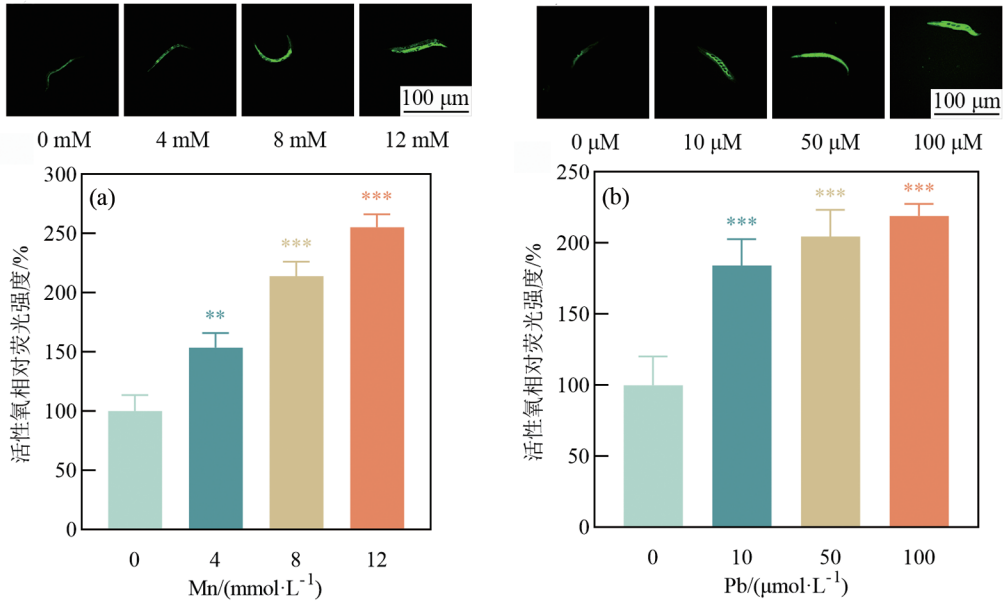


图6 重金属锰和铅暴露下线虫体内活性氧水平的变化

Fig. 6 Change in reactive oxygen species levels in *c. elegans* exposed to heavy metals manganese and lead

- (a)氯化锰处理下线虫体内活性氧水平的变化及相对荧光强度;
(b)醋酸铅处理下线虫体内活性氧水平的变化及相对荧光强度。

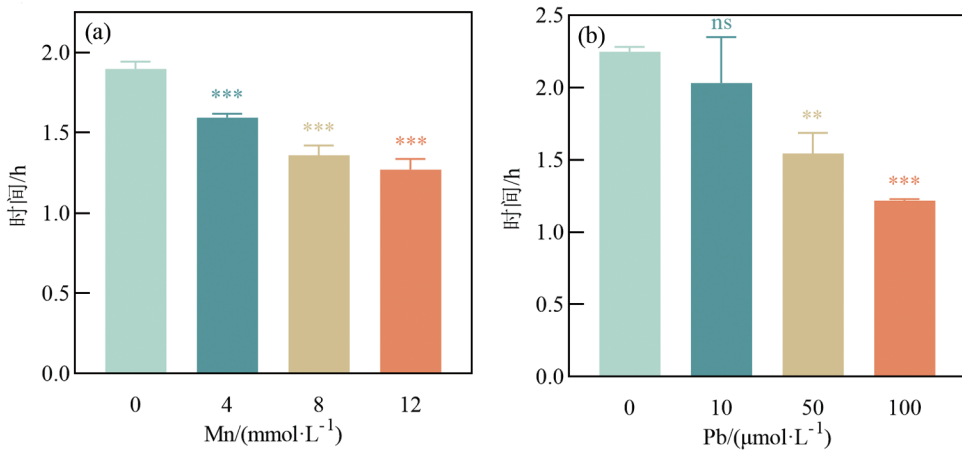


图7 重金属锰和铅暴露对氧化应激下线虫平均寿命的影响

Fig. 7 Effect of exposure to heavy metals manganese and lead on mean lifespan of *c. elegans* under oxidative stress

- (a)氯化锰处理对氧化应激线虫平均寿命的影响;(b)醋酸铅处理对氧化应激线虫平均寿命的影响。

2.5 重金属锰和铅暴露的毒性机制关联分析

为了探究生理生化指标间的级联效应,分别对活性氧水平与脂褐素积累水平、活性氧水平和寿命进行了相关性分析。活性氧水平与脂褐素积累量取3次生物学重复;寿命通过计算得出平均寿命,取3

次生物学重复,作图。通过相关性证实,重金属锰和铅暴露下活性氧水平与脂褐素积累均呈正相关, R^2 分别为0.8923和0.7370,如图9(a)、(b),与寿命均呈负相关, R^2 分别为0.9332和0.6383,如图9(c)、(d)。结果表明,活性氧积累水平升高,脂褐素积累水平升高,线虫的寿命会缩短。

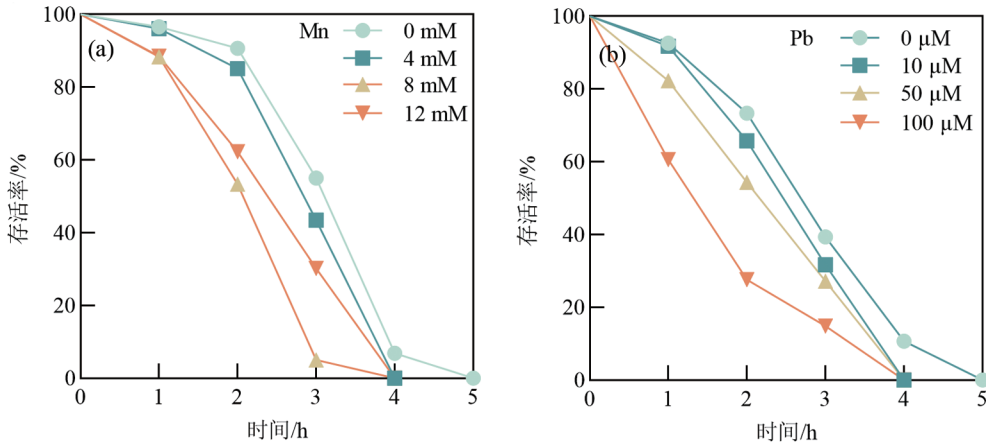


图8 重金属锰和铅暴露下线虫抗紫外应激能力的变化

Fig. 8 Change in resistance to UV stress in *C. elegans* exposed to heavy metals manganese and lead

(a) 氯化锰处理下线虫抗紫外应激能力的变化; (b) 醋酸铅处理下线虫抗紫外应激能力的变化。

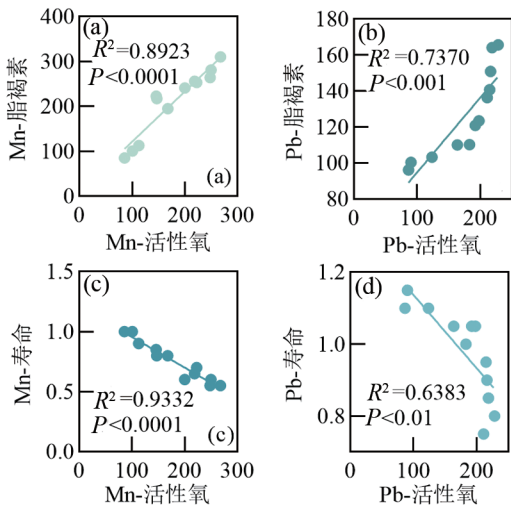


图9 活性氧与脂褐素、活性氧与寿命的相关性分析

Fig. 9 Correlation analysis of reactive oxygen species with lipofuscin and with lifespan

(a) 氯化锰处理下线虫体内活性氧水平与脂褐素积累量的相关性分析; (b) 醋酸铅处理下线虫体内活性氧水平与脂褐素积累量的相关性分析; (c) 氯化锰处理下线虫体内活性氧水平与寿命的相关性分析; (d) 醋酸铅处理下线虫体内活性氧水平与寿命的相关性分析。

3 讨论

锰和铅作为环境中普遍存在的重金属污染物,对生物体健康和生态环境构成了显著的威胁。自然水平的锰在生物体内是必需的,对维持正常生理功能具有重要作用。然而,当锰暴露水平过高时,便会引发一系列毒性效应。过量的锰摄入会对中枢神经

系统产生显著毒性,进而引起神经系统损伤,表现为智力和认知功能障碍,并增加帕金森病的患病风险^[9]。此外,锰还可能损害呼吸系统、免疫系统及生殖功能,导致肺炎、支气管炎等疾病的发生^[28]。与锰相似,铅具有显著的生物蓄积性,易在体内长期存留并引发慢性中毒,给动植物带来极大的毒害作用^[29]。铅被国际权威机构认定为人类致癌物,对人体的多系统毒性已经得到广泛关注^[30]。在多种动物模型中,铅的毒性效应已被充分证实,包括对神经系统、免疫系统,以及生殖系统的显著危害^[10-11]。研究也证实了重金属锰和铅对线虫的寿命、运动能力以及抗应激能力都具有显著的毒性效应。

近年来,越来越多地研究利用线虫作为模型生物来评估重金属的毒性作用。有研究显示铜暴露能够显著降低线虫的繁殖力、运动能力及学习能力^[31];镉暴露会引起线虫体长、体宽、运动能力及生殖等指标明显降低^[32]。虽然也有研究证明了锰能诱发线虫神经元变性^[17],削弱其嗅觉适应学习与记忆能力,改变发育可塑性^[18],以及铅暴露会显著缩短线虫寿命并减少后代数量^[19],也会损害线虫的多巴胺能神经元功能^[33],但关于锰和铅暴露对秀丽隐杆线虫的生理和生化影响仍缺乏系统性的研究。研究从线虫的运动能力、寿命、抗氧化应激能力、抗紫外应激能力等方面系统评估了重金属锰和铅对线虫相关生理生化指标的影响,为全面评估重金属锰和铅的暴露风险提供参考。

研究结果发现锰和铅暴露均显著缩短了线虫的寿命,并且对其运动能力产生了明显的损害。此外,

暴露于这2种重金属的线虫表现出了显著的抗应激能力减弱,具体表现为在紫外线和氧化应激条件下,其存活率显著下降。在生理学指标方面,锰和铅暴露均显著增加了线虫体内脂褐素和活性氧的积累,表明这些重金属暴露可能加速线虫衰老进程,并进一步降低其抗氧化应激的能力。最后,通过相关性分析证实,重金属锰和铅暴露下,线虫体内活性氧水平与脂褐素积累量呈正相关,与寿命呈负相关。这些结果表明,锰和铅的毒性作用不仅仅通过直接的生物积累引发急性中毒反应,更可能通过长期的生理损害和加速衰老过程,干扰线虫的正常生理功能。这些研究为揭示锰和铅暴露的潜在毒性机制提供了新的视角,并为未来重金属污染的生态学研究提供了有力的实验依据。然而,上述研究仍存在一定的局限性。首先,尽管秀丽隐杆线虫是一种重要的模式生物,但其在生理结构和遗传背景等方面与高等动物仍存在一定差异,因此该研究结论在生物体内的普遍性需要更多的研究加以验证。其次,重金属锰和铅暴露诱导线虫相关生理生化指标变化的关键机制尚未明确,有待进一步深入研究。值得关注的是,Tang等^[34]人发现Cd、Pb、Mn的复合暴露所诱导的毒性效应大于单一金属暴露的毒性累加效应,这一发现凸显了复合污染研究更贴近真实环境暴露场景的实际意义。研究中仅设置了单一和急性暴露组别,未考虑到环境实际暴露情景,未来,研究将与高等动物相结合,并设置复合暴露组别和低浓度长期暴露组别以模拟实际暴露情景,深入研究以阐明重金属锰和铅对高等动物的毒性及机制,为重金属锰和铅的风险评估和污染防控提供参考。

参考文献:

[1] ZHANG A, YAN D. *Caenorhabditis elegans* as a model to study glial development[J]. *The FEBS Journal*, 2022, 289(6):1476.

[2] BALALI-MOOD M, NASERI K, TAHERGORABI Z, et al. Toxic mechanisms of five heavy metals: mercury, lead, chromium, cadmium, and arsenic[J]. *Frontiers in Pharmacology*, 2021, 12(64):39.

[3] MITRA S, CHAKRABORTY A J, TAREQ A M, et al. Impact of heavy metals on the environment and human health: Novel therapeutic insights to counter the toxicity [J]. *Journal of King Saud University Science*, 2022, 34(3):101865.

[4] 王晋,雷凯能,武小燕,等.典型稀土矿区土壤微生物

碳循环功能基因组成特征及影响因素研究[J]. *内蒙古科技大学学报*, 2024, 43(3):205.

[5] 马小玲,邓凤玉,刘颖. HR-ICP-MS 研究黄河三个连续区域段表层沉积物中重金属污染的空间分布和季节变化[J]. *光谱学与光谱分析*, 2016, 36(8):2705.

[6] 袁婷,张海红,姜欣颖,等. 北方某稀土矿区地下水对小鼠肝、肾生物损伤评价[J]. *环境科学与技术*, 2020, 43(3):170.

[7] MACKLIN M G, THOMAS C J, MUDBHATKAL A, et al. Impacts of metal mining on river systems: a global assessment[J]. *Science*, 2023, 381(6664):1345.

[8] HASSONA N M, EL-WAHED A A A. Heavy metal concentrations of Beeswax (*Apis mellifera* L.) at different ages [J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2023, 111(3):1.

[9] 叶操. 水库重金属锰污染特征及原因分析[J]. *陕西水利*, 2023(9):92.

[10] MANSEL C, FROSS S, ROSE J, et al. Lead exposure reduces survival, neuronal determination, and differentiation of P19 stem cells[J]. *Neurotoxicology and Teratology*, 2019, 72:58.

[11] EKONG E B, JAAR B G, WEAVER V M. Lead-related nephrotoxicity: a review of the epidemiologic evidence [J]. *Kidney International*, 2006, 70(12):2074.

[12] ANDJELKOVIC M, DJORDJEVIC B A, ANTONIJEVIC E, et al. Toxic effect of acute cadmium and lead exposure in Rat Blood, Liver, and Kidney[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2019, 16(2):274.

[13] IJOMONE O M, MIAH M R, AKINGBADE G T, et al. Nickel-induced developmental neurotoxicity in *Caenorhabditis elegans* includes cholinergic, dopaminergic and GABAergic degeneration, altered Behaviour, and Increased SKN-1 Activity [J]. *Neurotoxicity Research*, 2020, 37(4):1018.

[14] MCELWEE M K, FREEDMAN J H. Comparative toxicology of mercurials in *Caenorhabditis elegans*[J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2011, 30(9):2135.

[15] LUZ A L, GODEBO T R, SMITH L L, et al. Deficiencies in mitochondrial dynamics sensitize *Caenorhabditis elegans* to arsenite and other mitochondrial toxicants by reducing mitochondrial adaptability [J]. *Toxicology*, 2017, 387:81.

[16] BOVIO F, SCIANDRONE B, URANI C, et al. Superoxide dismutase I (SOD1) and cadmium: A three models approach to the comprehension of its neurotoxic

- effects[J]. *Neuro Toxicology*, 2021, 84:125.
- [17] LAWES M, PINKAS A, FROHLICH B A, et al. Metal-induced neurotoxicity in a RAGE-expressing *C. elegans* model[J]. *Neurotoxicology*, 2020, 80:71.
- [18] RAJ V, NAIR A, THEKKUVEETIL A. Manganese exposure during early larval stages of *Caenorhabditis elegans* causes learning disability in the adult stage[J]. *Biochemical and Biophysical Research Communications*, 2021, 568:89.
- [19] 黄月娥,张楠,姜玉新,等.应用秀丽隐杆线虫评估重金属生物毒性效应研究[J].*中国血吸虫病防治杂志*, 2015, (3):290.
- [20] 孙娜. 重金属 Cd、Hg 和 Pb 对秀丽隐杆线虫 (*Caenorhabditis elegans*) 生殖内分泌干扰效应的研究[D]. 青岛:中国海洋大学, 2016.
- [21] 李云飞,李宏源,赵丽辉,等.取代短链脂肪酸对秀丽隐杆线虫的抗氧化作用[J].*中国生物化学与分子生物学报*, 2019, 35(4):404.
- [22] 陈星昊,陆思安,邹泽斌,等.天露土乌鸡汤对秀丽隐杆线虫的抗衰老作用[J].*食品与发酵工业*, 2026, 52(3):112.
- [23] 刘泽坤,贺小芳,洪颖,等.山药多糖延缓秀丽隐杆线虫衰老的药效评价及作用机制研究[J].*世界中医药*, 2024, 19(4):473.
- [24] 张余威,赵文俊,李伟杰,等.灭活芽孢杆菌 DU-106 对秀丽隐杆线虫的抗衰老作用[J].*食品科学*, 2023, 44(23):134.
- [25] 杜星芳,贾艳丽,韩紫薇,等.菜芙蓉多糖对秀丽隐杆线虫抗氧化作用的研究[J].*河北科技大学学报*, 2022, 43(3):308.
- [26] 王晗,米生权,孙雅焯,等.壳寡糖对秀丽隐杆线虫寿命的影响[J].*食品科学*, 2015, 36(1):229.
- [27] PAPAЕVGENIOU N, HOEHN A, GRUNE T, et al. P090-Lipofuscin effects in *Caenorhabditis elegans* ageing model[C]//Free radical biology and medicine orlando, Florida, USA, 2017, 108(suppl 1):S48.
- [28] 李佳欢.耐酸真菌(*Acidomyces* sp.)对重金属 Mn(II)的抗性机制研究[D].哈尔滨:黑龙江大学, 2023.
- [29] KUMAR A, KAMIE K, CABRAI-PINTO M M S C P, et al. Lead toxicity: health hazards, influence on food chain, and sustainable remediation approaches[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2020, 17(7):2179.
- [30] 刘洋,张婷婷,张永刚,等.植物乳杆菌 CCFM8661 对重金属铅的生物减除作用[J].*食品科学*, 2024, 45(15):112.
- [31] 郭欣.重金属 Cu 对秀丽隐杆线虫的毒性效应及分子机制[D].保定:河北大学, 2024.
- [32] 谢红旭.阻燃剂 V6 与镉暴露对线虫生殖毒性的协同效应及作用机制[D].广州:广东工业大学, 2025.
- [33] AKINYEMI A J, MIAH M R, IJOMONE O M, et al. Lead (Pb) exposure induces dopaminergic neurotoxicity in *Caenorhabditis elegans*: Involvement of the dopamine transporter[J]. *Toxicology Reports*, 2019, 6:833.
- [34] TANG B, TONG P, XUE K S, et al. High-throughput assessment of toxic effects of metal mixtures of cadmium (Cd), lead (Pb), and manganese (Mn) in nematode *Caenorhabditis elegans* [J]. *Chemosphere*, 2019, 234:232.

(责任编辑:师宝萍)