

· 论 著 ·

污水处理厂污泥及微塑料暴露对斑马鱼氧化应激水平的影响

彭雪云, 吴南翔, 范宏亮, 白洁, 舒而怡, 陶核

杭州医学院公共卫生学院, 浙江 杭州 310013

摘要: **目的** 观察污水处理厂污泥及污泥中微塑料暴露对斑马鱼氧化应激水平的影响, 为污泥及微塑料对人类健康的影响研究提供依据。**方法** 选择野生 AB 型成年斑马鱼, 按 0、12.5、25、50、75 g/L 设计 5 个污泥暴露组, 从污泥中提取微塑料, 按 0、240、480、960 个/L 设计 4 个微塑料暴露组, 每组投放 24 尾斑马鱼。每日观察斑马鱼体色、活动力和死亡情况; 分别在暴露 0 h、24 h、48 h、72 h、96 h、7 d 后检测斑马鱼体内超氧化物歧化酶 (SOD)、过氧化氢酶 (CAT)、谷胱甘肽 (GSH) 和丙二醛 (MDA) 含量, 并采用双因素方差分析评价暴露浓度和时间对上述指标的影响。**结果** 75 g/L 污泥暴露下, 斑马鱼 72 h 开始出现死亡, 7 d 后全部死亡; 其他浓度污泥组和所有微塑料组斑马鱼体色、活动均正常, 未见死亡。污泥暴露浓度与暴露时间交互影响 SOD、CAT、GSH 和 MDA (均 $P < 0.05$); 随污泥暴露浓度和时间增加, 斑马鱼体内 SOD 呈下降趋势; CAT 呈先上升后下降趋势; GSH 呈先下降后上升趋势, 75 g/L 组 24 h 开始 GSH 持续降低; MDA 呈上升趋势。微塑料暴露浓度与暴露时间交互影响 SOD、GSH ($P < 0.05$), 而对 CAT、MDA 不存在交互作用 ($P > 0.05$); 随微塑料暴露浓度和时间增加, 斑马鱼体内 SOD 略有上升; CAT 呈先上升后下降趋势; GSH 在 24 h 略有升高, 72 h 后出现下降趋势; MDA 呈上升趋势。**结论** 污泥及其中所含的微塑料均可诱发斑马鱼氧化应激损伤, 暴露时间和浓度可交互影响氧化应激水平; 污泥中提取的微塑料对斑马鱼氧化应激水平的影响比污泥小。

关键词: 污泥; 微塑料; 氧化应激

中图分类号: R123.3

文献标识码: A

文章编号: 2096-5087 (2023) 03-0190-06

Effects of sewage treatment plant sludge and microplastic exposure on oxidative stress levels in zebrafish

PENG Xueyun, WU Nanxiang, FAN Hongliang, BAI Jie, SHU Eryi, TAO He

School of Public Health, Hangzhou Medical College, Hangzhou, Zhejiang 310013, China

Abstract: Objective To investigate the effects of the exposure of sludge from sewage treatment plants and microplastic extracted from sludge on the oxidative stress levels in zebrafish, so as to put insights into the research into the impact of sludge and microplastics on human health. **Methods** Adult wild AB zebrafish were exposed to five groups of sludge (0, 12.5, 25, 50 and 75 g/L) and four groups of microplastics extract from sludge (0, 240, 480, 960/L), with 24 zebrafish in each group. The color, activity and death of zebrafish were observed every day. The contents of superoxide dismutase (SOD), catalase (CAT), glutathione (GSH) and malondialdehyde (MDA) were detected 0 h, 24 h, 48 h, 72 h, 96 h and 7 d post-exposure. A two-factor ANOVA was used to analyze the effects of different concentrations and time of exposure on the indicators above. **Results** Under 75 g/L sludge exposure, zebrafish began to show mortality at 72 h and all died after 7 d. The zebrafish in the other sludge groups and all microplastic groups had normal color and activity, and no mortality was observed. Sludge concentration interacted with exposure time to affect SOD, CAT, GSH and MDA ($P < 0.05$). With increasing sludge concentration and exposure time, SOD decreased, MDA increased, CAT increased first and then decreased, GSH decreased first and then increased, and GSH continued to decrease since 24 h

DOI: 10.19485/j.cnki.issn2096-5087.2023.03.002

基金项目: 浙江省科技厅院所专项 (1921D)

作者简介: 彭雪云, 硕士研究生在读

通信作者: 吴南翔, E-mail: zamewu@163.com

in the 75 g/L group. The microplastic concentration interacted with exposure time to affect SOD and GSH ($P<0.05$), but not CAT or MDA ($P>0.05$). With increasing microplastic concentration and exposure time, SOD and MDA increased, CAT increased first and then decreased, the GSH was slightly increased at 24 h and decreased after 72 h. **Conclusion** Both sludge and microplastics extracted from sludge can induce oxidative stress damage in zebrafish, and exposure time and concentration can interact to affect oxidative stress levels. The microplastics extracted from sludge have less effect on oxidative stress levels in zebrafish than sludge.

Keywords: sludge; microplastics; oxidative stress

污泥是污水处理厂污水处理经过好氧和厌氧消化产生的不溶性残渣^[1]。污泥中的成分极其复杂, 包含大量物理化学因子, 如重金属、农药、微塑料及持久性有机污染物等^[2-3]。污泥是微塑料进入自然环境的重要途径之一^[4], 研究表明微塑料可导致环境中生物的活性氧过载, 引发氧化应激反应, 并且通过食物链对人类健康构成威胁^[5-6]。为了解污泥及微塑料对生物体的健康影响, 本研究将成年斑马鱼暴露于污泥及污泥中提取的微塑料, 通过观察超氧化物歧化酶 (superoxide dismutase, SOD)、过氧化氢酶 (catalase, CAT)、谷胱甘肽 (glutathione, GSH) 和丙二醛 (malondialdehyde, MDA) 4 项指标评估污泥及污泥中微塑料暴露对斑马鱼的氧化应激水平的影响。

1 材料与方法

1.1 主要试剂与仪器 SOD 试剂盒、CAT 试剂盒、GSH 试剂盒、MDA 试剂盒均购自南京建成生物工程研究所; BCA 蛋白含量检测试剂盒购自江苏凯基生物技术股份有限公司; 其他试剂均为分析纯。L4-6K 低速离心机 (中国, 可成); Synergy 2 酶标仪 (美国, Biotek); PRO200 匀浆机 (美国, Pro Scientific); 恒温水浴锅。

1.2 污泥样品 2021 年夏、冬季在杭州市郊区污水处理厂采集污泥样品。在污泥堆中随机选取 4 方加中心 5 个点 (每点相距 2 m 左右), 采集距离表面 10 cm 处 (减少外界因素影响) 的污泥, 每个点采集 4 kg, 共计 40 kg。带回实验室后立即烘干、磨匀, 分别 4 °C 冷藏保存于玻璃罐中。

1.3 微塑料提取 采用浮选法提取污泥中的微塑料^[7-8]。污泥浸泡于饱和氯化钠, 超声 20 min, 静置 24 h。将含有微塑料的目标悬浮物收集于烧杯中, 剩余污泥称重, 分别放置于 50 mL 离心管中, 超声 20 min; 离心半径 10 cm、4 000 r/min 离心 10 min, 收集上层液体, 重复操作 3 次。使用 30% 过氧化氢 60 °C 恒温消化样品中有机杂质, 待消化完成后用不锈钢筛筛分微塑料。将微塑料置于体视显微镜下, 用

四分法将滤膜分为 4 个区域, 选择其中 1 个视野区域, 对其上样品进行计数, 并依次计数余下区域, 以此统计整张滤膜上的微塑料; 同样的方法重复进行 3 次计数。本实验所用微塑料含量由夏冬季混合样污泥提取后计数得 (9.61±0.27) 个/g 干重, 并以此混合样制备和设计实验。

1.4 实验动物 实验用斑马鱼选择野生 AB 型, 体长 (3.06±0.25) cm, 饲养于专用的独立全自动养殖系统中。养殖和实验用水为自来水经过砂滤、活性炭和反渗透膜过滤的纯水并添加海盐氯化钠和碳酸氢钠, 经紫外灯灭菌, 在系统中自动循环。条件如下: 水温 24~30 °C, 室温 25~27 °C, 盐度 0.25‰~0.50‰, 电导率 500~800 μS/cm, pH 值 7.0~8.0, 溶解氧 5~8 mg/L, 总氨氮小于 0.02 mg/L, 达到斑马鱼饲养标准 (ISO 标准 7346/3)。保持 14 h 光照、10 h 黑暗交替循环, 每日投喂丰年虾 2 次, 实验前在连续曝气的水中驯化 7 d。实验前 12 h 停止喂饲, 驯化期间无死亡。

1.5 污泥、微塑料暴露处理及分组 预试验结果显示, 当 75 g/L 污泥暴露 72 h 斑马鱼开始出现死亡, 100 g/L 污泥暴露 48 h 斑马鱼全部死亡。以 75 g/L 为最高浓度, 12.5 g/L 为起始浓度, 按照 2 倍梯度 (用自制养殖水配制) 设计 12.5、25、50、75 g/L 4 个暴露组和自制养殖水对照组 (即暴露浓度为 0 g/L)。微塑料暴露浓度根据预试验结果, 即 50 g 干重污泥可提取约 480 个微塑料, 设计 240、480、960 个/L 3 个暴露组和自制养殖水对照组。

将驯化后健康、性别随机的斑马鱼分为对照组和实验组, 置于 10 L 养殖缸, 鱼缸暴露液体积为 3 L, 每缸投放斑马鱼 24 尾。采用静态换水, 每 2 d 更换一次, 检测 pH 值为 7.2~7.4、氨氮浓度 (纳氏试剂分光光度法) 为 0.02~0.10 mg/L, 超过即更换。实验期间所有养殖缸持续曝气, 以保证斑马鱼必须的生存环境以及污泥和微塑料在水中的均匀分布。饲养条件同 1.4。

1.6 斑马鱼一般状态观察 实验期间每日观察斑马鱼体色、反应灵敏性、觅食活动等行为变化和死亡情

况，及时清理死鱼。

1.7 氧化应激指标检测 暴露 0 h、24 h、48 h、72 h、96 h 和 7 d 捞出实验所需数量斑马鱼，冰浴冷冻处死，用冰生理盐水冲洗、滤纸吸干称重后置于离心管中。每 2 尾鱼一组，按照质量 (g) : 体积 (mL) = 1 : 9 的比例加入冰生理盐水，于冰上研磨制备组织匀浆液。将制备好的组织匀浆液以离心半径 10 cm、2 000 r/min 离心 15 min。取上清液测定蛋白质量。采用 WST-1 法测定 SOD，采用钼酸铵法测定 CAT，采用微板法测定 GSH，采用 TBA 法测定 MDA，均使用酶标仪，并严格按照试剂盒说明书操作。计算各氧化应激指标的致突变率 (mutation rate, MR)，MR=暴露组氧化应激指标值/对照组氧化应激指标值。

1.8 统计分析 采用 SPSS 25 软件统计分析。氧化应激指标检测结果服从正态分布，采用均数±标准差 ($\bar{x}\pm s$) 描述，采用双因素方差分析评价暴露时间和浓度对氧化应激指标的交互影响。检验水准 $\alpha=0.05$ 。

2 结果

2.1 斑马鱼一般情况 12.5、25、50 g/L 污泥组和 240、480、960 个/L 微塑料组斑马鱼体色正常、反应灵敏、觅食活动正常。75 g/L 污泥组斑马鱼随暴露时间增加，出现活动迟缓、反应灵敏性下降，72 h 开始出现死亡，7 d 后全部死亡。

2.2 污泥暴露组斑马鱼氧化应激指标比较 双因素方差分析结果显示，斑马鱼 SOD、CAT、GSH 和 MDA 均存在污泥暴露浓度与暴露时间交互作用 ($P<0.05$)。随污泥暴露浓度和暴露时间增加，SOD 呈下降趋势，除 50 g/L 组暴露 72 h 以外，其他组 SOD 水平均低于对照组；CAT 呈先上升后下降趋势，50 g/L 组暴露 96 h 时 CAT 达到最大，并在暴露 7 d 时明显降低；GSH 呈先下降后上升趋势，75 g/L 组在暴露 24 h 开始 GSH 持续降低；MDA 呈上升趋势，各暴露组均低于对照组 ($P<0.05$)，暴露 24 h 起 MDA 的 MR 值超过 1，7 d 时 MR 值为 2.15~3.13。见表 1。

表 1 污泥暴露组斑马鱼不同时间氧化应激指标水平

Table 1 Levels of oxidative stress indicators at different time in zebrafish exposed to sludge

暴露浓度/ (g/L)	暴露时间	SOD/ (U/mg prot)	CAT/ (U/mg prot)	GSH/ ($\mu\text{mol/g prot}$)	MDA/ (nmol/mg prot)
0 (n=10)	0 h	15.41±1.15	11.89±1.00	21.22±1.63	2.28±0.39
	24 h	15.81±1.23	12.07±1.37	20.77±2.13	2.31±0.41
	48 h	15.76±1.39	11.93±1.75	19.88±1.76	2.68±0.32
	72 h	14.08±1.99	12.72±1.71	21.11±2.39	2.44±0.39
	96 h	14.73±1.66	11.27±1.64	21.05±1.78	2.34±0.40
	7 d	14.26±1.70	12.33±1.03	21.66±2.11	2.40±0.36
12.5 (n=10)	24 h	10.30±1.71 ^b	15.17±2.37 ^b	16.04±2.60 ^b	3.67±0.24 ^b
	48 h	9.93±1.31 ^b	16.47±2.54 ^b	15.25±1.87 ^b	4.17±0.37 ^b
	72 h	9.70±1.42 ^b	13.21±1.74	16.47±2.39 ^b	4.65±0.13 ^b
	96 h	8.89±1.22 ^b	14.32±2.08 ^b	17.39±2.46 ^b	4.98±0.26 ^b
	7 d	8.37±0.93 ^b	14.85±3.04 ^b	19.40±1.89	5.16±0.11 ^b
25 (n=10)	24 h	13.80±1.13 ^b	11.32±1.38	17.32±2.78 ^b	4.14±0.43 ^b
	48 h	14.49±2.73	14.40±2.61 ^b	20.01±1.24	4.67±0.29 ^b
	72 h	13.39±0.80	15.09±1.96 ^b	21.49±2.00	5.61±0.30 ^b
	96 h	6.78±0.53 ^b	13.02±1.30	21.55±1.49	5.89±0.37 ^b
	7 d	6.57±0.35 ^b	6.58±1.41 ^b	19.61±1.39	7.52±0.38 ^b
50 (n=10)	24 h	10.44±1.22 ^b	10.96±1.37	8.79±1.78 ^b	3.36±0.38 ^b
	48 h	15.21±1.01	13.81±1.74	19.50±2.36	4.68±0.37 ^b
	72 h	15.58±0.39 ^b	13.78±1.71	20.41±1.34	4.88±0.38 ^b
	96 h	12.98±0.32 ^b	16.82±2.35 ^b	23.92±2.88 ^b	5.47±0.24 ^b
	7 d	7.76±0.24 ^b	7.16±2.52 ^b	26.40±2.98 ^b	7.42±0.62 ^b

表 1 (续) Table 1 (continued)

暴露浓度/ (g/L)	暴露时间	SOD/ (U/mg prot)	CAT/ (U/mg prot)	GSH/ ($\mu\text{mol/g prot}$)	MDA/ (nmol/mg prot)
75	24 h (n=10)	6.45±0.19 ^b	11.54±1.58	11.08±1.93 ^b	3.65±0.44 ^b
	48 h (n=10)	7.27±0.62 ^b	13.73±1.88	13.47±1.75 ^b	3.51±0.39 ^b
	72 h (n=8)	7.02±0.45 ^b	13.20±1.52	13.71±0.85 ^b	4.46±0.17 ^b
	96 h (n=6)	8.18±0.66 ^b	14.49±2.20 ^b	5.19±0.61 ^b	5.55±0.78 ^b
	7 d (n=0)	—	—	—	—
F值 ^a		26.894	11.615	25.772	32.789
P值 ^a		<0.001	<0.001	<0.001	<0.001

注：^a表示暴露浓度与时间交互作用检验值；^b表示在该时间点与对照组比较 $P<0.05$ 。

2.3 微塑料暴露组斑马鱼氧化应激指标比较 双因素方差分析结果显示，斑马鱼 SOD、GSH 均存在微塑料暴露浓度与暴露时间交互作用 ($P<0.05$)，而 CAT、MDA 不存在微塑料暴露浓度与暴露时间交互作用 ($P>0.05$)。与对照组比较，不同暴露浓度组 SOD 略有上升，随暴露时间和浓度增加，SOD 出现回落；CAT 呈先上升后下降趋势，整体变化波动较小，仅 480 个/L 组暴露 24 h 时 CAT 与对照组比较

差异有统计学意义 ($P<0.05$)；暴露 24 h 时，各浓度暴露组 GSH 均升高，与对照组差异均有统计学意义 ($P<0.05$)，72 h 后出现下降趋势；MDA 呈上升趋势，480、960 个/L 组各暴露时间点 MDA 与对照组比较差异均有统计学意义 ($P<0.05$)，暴露 24 h 起 MDA 的 MR 值超过 1，7 d 时 MR 值为 1.02~1.60。同一暴露时间，不同浓度微塑料组 MDA 的 MR 值增加幅度较不同浓度污泥组低。见表 2。

表 2 微塑料暴露组斑马鱼不同时间氧化应激指标水平

Table 2 Levels of oxidative stress indicators at different time in zebrafish exposed to microplastics

暴露浓度/ (个/L)	暴露时间	SOD/ (U/mg prot)	CAT/ (U/mg prot)	GSH/ ($\mu\text{mol/g prot}$)	MDA/ (nmol/mg prot)
0 (n=10)	0 h	15.28±0.70	11.19±1.23	21.88±1.38	2.20±0.30
	24 h	14.88±0.40	11.21±2.13	21.29±1.13	2.31±0.30
	48 h	14.73±0.26	11.49±2.49	24.64±3.68	2.33±0.21
	72 h	14.97±0.21	12.20±2.11	23.72±2.07	2.30±0.22
	96 h	14.98±0.18	12.72±1.83	20.55±1.10	2.18±0.25
	7 d	15.90±0.93	11.38±2.65	21.63±2.22	2.24±0.27
240 (n=10)	24 h	15.43±0.27 ^b	12.36±1.64	24.63±1.55 ^b	2.34±0.17
	48 h	15.18±0.51 ^b	12.78±1.06	26.21±3.45	2.32±0.24
	72 h	15.59±0.81	11.90±2.41	22.78±3.43	2.35±0.20
	96 h	14.54±0.23 ^b	11.21±1.37	19.08±1.44	2.27±0.21
	7 d	15.45±0.29	10.47±1.02	22.47±1.43	2.28±0.13
	480 (n=10)	24 h	15.51±0.37 ^b	13.50±1.02 ^b	26.00±1.85 ^b
48 h		14.55±0.23	13.22±2.57	25.77±2.08	2.68±0.25 ^b
72 h		14.71±0.76	13.04±1.28	20.16±1.92 ^b	2.76±0.34 ^b
96 h		14.35±0.73 ^b	12.47±1.62	19.03±2.16	2.64±0.22 ^b
7 d		15.06±0.39 ^b	11.22±1.01	22.93±0.56	2.88±0.19 ^b
960 (n=10)		24 h	15.65±0.55 ^b	12.67±1.56	29.82±3.34 ^b
	48 h	15.04±0.46	12.25±1.76	24.77±1.50	3.28±0.18 ^b
	72 h	15.61±0.36	11.65±1.26	22.99±2.31	3.21±0.19 ^b
	96 h	15.35±0.14	11.16±2.48	19.13±2.15	3.42±0.23 ^b
	7 d	15.62±0.95	10.73±1.82	20.43±1.94	3.58±0.32 ^b
	F值 ^a		3.638	1.144	8.289
P值 ^a		<0.001	0.327	<0.001	0.105

注：^a表示暴露浓度与时间交互作用检验值，^b表示在该时间点与对照组比较 $P<0.05$ 。

3 讨论

正常情况下,机体的氧化和抗氧化系统处于平衡状态,当受到外源性刺激时,氧化与抗氧化系统会失去平衡,导致氧化应激反应。本研究结果显示,污泥及其提取的微塑料可导致斑马鱼体内氧化应激损伤,并且暴露的浓度和时间可交互影响 SOD、CAT、GSH 和 MDA 水平。

SOD 是机体防御氧化损害的关键酶之一,是超氧阴离子自由基最有效的清除剂,当机体受到外源性刺激时,通过催化歧化反应清除体内过量的氧离子^[9]。当暴露于污泥时,斑马鱼体内 SOD 活力降低,除个别组以外,不同浓度污泥暴露组的 SOD 水平低于对照组。当暴露于同样剂量污泥提取的微塑料时,低浓度暴露组斑马鱼 SOD 活力略有上升,高浓度暴露组长时间暴露又出现回落。

CAT 可以清除机体内过多的过氧化氢,维持氧化平衡^[10]。当暴露于不同浓度污泥时,斑马鱼体内 CAT 活力随着暴露时间增加呈先上升后下降趋势;暴露于微塑料时,斑马鱼体内 CAT 活力变化趋势与暴露于污泥时基本一致。这与 XIE 等^[11]研究发现镉暴露引起黄鳝鱼体内 CAT 活力的变化趋势一致。CAT 活力升高的机制是否与机体受到污泥刺激后抗氧化基因 mRNA 水平变化有关,抑或是在高浓度污泥暴露下,超过了机体代偿能力,表现为毒物效应^[12],需要今后进一步研究探讨。此外,氨氮浓度对 CAT 有一定的影响。本实验养殖用水的总氨氮浓度维持在 0.02 mg/L 以下(Ⅱ类水质),作为溶媒加入污泥成为试验暴露体系后控制水质在Ⅲ类水以内,经检测(纳氏试剂分光光度法),75 g/L 污泥暴露组水中总氨氮平均浓度为 0.047 mg/L。何雅琪等^[13]报道,氨氮浓度为 0.15 mg/L 才出现斑马鱼行为抑制。薛凌展等^[14]对银鲫幼鱼的生长研究显示,总氨氮安全浓度为 14.87 mg/L,非离子氨氮安全浓度为 0.14 mg/L。这两位学者报道的氨氮安全浓度远大于本研究暴露体系的最高浓度,可以认为本研究的氨氮浓度对斑马鱼体内 CAT 的影响较小。

GSH 是体内重要的抗氧化分子,保护生物体免受氧化侵害^[15]。本研究显示,当暴露于不同浓度污泥时,斑马鱼体内 GSH 水平先下降后上升,随着暴露时间增加,GSH 水平虽有升高,但仍未恢复到对照组水平;给予 75 g/L 污泥暴露后,GSH 水平在暴露 24 h 时开始降低,至 96 h 最为显著。ALLEN 等^[16]和徐琨等^[17]学者也观察到一致现象。当暴露

于微塑料 24 h 时,各浓度组斑马鱼体内 GSH 水平较对照组略有升高,72 h 后出现下降趋势。

机体的氧化和抗氧化系统长时间失去平衡,产生的氧自由基会对机体造成攻击,发生脂质过氧化反应^[18]。MDA 能反映体内发生脂质过氧化的程度。本研究显示,斑马鱼体内 MDA 水平随着污泥暴露时间和浓度的增加而上升。暴露于微塑料时斑马鱼体内 MDA 水平变化趋势与暴露于污泥时一致,提示污泥和微塑料均会导致斑马鱼体内氧化应激反应发生和抗氧化能力受损,氧化与抗氧化作用失衡,导致 MDA 含量升高。

对污泥和微塑料导致的氧化应激指标变化进行比较发现,SOD 对污泥暴露更为敏感,CAT 的变化趋势相似,GSH 变化趋势相反。这些变化本质上是各氧化应激指标的消耗或应激调控增加的具体表现。高浓度污泥暴露后,斑马鱼 72 h 开始出现死亡,至 7 d 全部死亡,在此情况下所有氧化应激指标均出现消耗和应激不能。而同等剂量污泥提取的微塑料浓度暴露未见明显毒性反应和斑马鱼死亡,氧化应激指标却有相应变化,且以 MDA 水平升高最为显著,提示微塑料对斑马鱼的氧化应激反应和生存影响比污泥更小。

本研究结果提示污泥及其提取的微塑料可诱发斑马鱼体内氧化应激反应,并且存在蓄积毒性,导致斑马鱼机体无法代偿而造成不可逆的损害。污泥对生物体的氧化应激损伤与其所含的物理化学因子作用有关,对于微塑料等较新的、难以降解处理的污染物需要研究重点关注。此外,由于环境中的物质复杂多变,蓄积在污泥中的微塑料可能与其他污染物存在联合作用导致更大的生态风险。应采取更有效、更科学的方式处理污泥及污泥中的微塑料,推进保护环境可持续发展,保护人类健康。

参考文献

- [1] 何云.新时期城市污水处理厂污泥的处置与综合利用[J].资源节约与环保,2022(7):73-76.
- [2] 张伟军,张彧,潘思逸.污泥处理过程中毒害有机污染物的迁移转化规律与毒性效应[J].安全与环境工程,2022,29(2):183-198.
- [3] ZOU Y, YE C, PAN Y. Abundance and characteristics of microplastics in municipal wastewater treatment plant effluent: a case study of Guangzhou, China [J]. Environ Sci Pollut Res Int, 2021, 28(9): 11572-11585.
- [4] LI X, CHEN L, MEI Q, et al. Microplastics in sewage sludge from the wastewater treatment plants in China [J]. Water Res, 2018, 142: 75-85.
- [5] 高向荣,侯乐莹,盛静浩.微塑料健康危害效应的研究进展

- [J]. 预防医学, 2020, 32 (8): 800-804.
- [6] 赵乾秀, 白宇超, 白森, 等. 微塑料对哺乳动物的毒理机制研究进展 [J]. 预防医学, 2023, 35 (3): 218-221.
- [7] THOMPSON R C, OLSEN Y, MITCHELL R P, et al. Lost at sea: where is all the plastic? [J/OL]. Science, 2004, 304 (5672) [2023-02-10]. <https://doi.org/10.1126/science.1094559>.
- [8] CONSTANT M, BILLON G, BRETON N, et al. Extraction of microplastics from sediment matrices: experimental comparative analysis [J/OL]. J Hazard Mater, 2021, 420 [2023-02-10]. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126571>.
- [9] FRIDOVICH I. Superoxide radical and superoxide dismutases [J]. Annu Rev Biochem, 1995, 64: 97-112.
- [10] MOREL Y, BAROUKI R. Repression of gene expression by oxidative stress [J]. Biochem J, 1999, 342 (Part 3): 481-496.
- [11] XIE D, LI Y, LIU Z, et al. Inhibitory effect of cadmium exposure on digestive activity, antioxidant capacity and immune defense in the intestine of yellow catfish (*Pelteobagrus fulvidraco*) [J]. Comp Biochem Physiol Toxicol Pharmacol, 2019, 222: 65-73.
- [12] CALABRESE E J, BALDWIN L A. The hormetic dose-response model is more common than the threshold model in toxicology [J]. Toxicol Sci, 2003, 71 (2): 246-250.
- [13] 何雅琪, 任宗明. 基于在线生物监测系统的氨氮胁迫下斑马鱼行为响应 [J]. 水生生物学报, 2022, 46 (6): 903-913.
- [14] 薛凌展, 吴素琼, 张坤, 等. 氨氮对异育银鲫“中科3号”幼鱼急性毒性及肝脏抗氧化酶系统的影响 [J]. 农学学报, 2019, 9 (3): 44-50.
- [15] EROGLU A, DOGAN Z, KANAK E G, et al. Effects of heavy metals (Cd, Cu, Cr, Pb, Zn) on fish glutathione metabolism [J]. Environ Sci Pollut Res Int, 2015, 22 (5): 3229-3237.
- [16] ALLEN T, RANA S V. Effect of arsenic (As^{III}) on glutathione-dependent enzymes in liver and kidney of the freshwater fish *Channa punctatus* [J]. Biol Trace Elem Res, 2004, 100 (1): 39-48.
- [17] 徐琨, 杨爱江, 胡霞, 等. 镉在斑马鱼不同组织中的积累及其对抗氧化系统的影响 [J]. 生物技术通报, 2021, 37 (4): 145-154.
- [18] GUTTERIDGE J M. Lipid peroxidation and antioxidants as biomarkers of tissue damage [J]. Clin Chem, 1995, 41 (12): 1819-1828.

收稿日期: 2023-01-04 修回日期: 2023-02-10 本文编辑: 徐文璐

(上接第 189 页)

- [12] 路凤, 刘娅, 李小娟, 等. 大气污染对呼吸系统疾病门诊量影响的病例交叉研究 [J]. 环境卫生学杂志, 2017, 7 (5): 408-412.
- [13] RÜCKERL R, SCHNEIDER A, HAMPEL R, et al. Association of novel metrics of particulate matter with vascular markers of inflammation and coagulation in susceptible populations—results from a panel study [J/OL]. Environ Res, 2016, 150: 337-347.
- [14] 中华人民共和国环境保护部, 国家质量监督检验检疫总局. 环境空气质量标准: GB 3095—2012 [S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2012.
- [15] GHOSH R, JOAD J, BENES I, et al. Ambient nitrogen oxides exposure and early childhood respiratory illnesses [J]. Environ Int, 2012, 39 (1): 96-102.
- [16] 李朝康, 龚科米, 吕焯, 等. 杭州市大气污染对居民死亡的影响研究 [J]. 预防医学, 2023, 35 (1): 11-16.
- [17] ZHANG H, NIU Y, YAO Y, et al. The impact of ambient air pollution on daily hospital visits for various respiratory diseases and the relevant medical expenditures in Shanghai, China [J/OL]. Int J Environ Res Public Health, 2018, 15 (3) [2023-02-08]. <https://doi.org/10.3390/ijerph15030425>.
- [18] 刘准, 陈丹, 霍细香, 等. 武汉市大气污染物水平与儿童呼吸道疾病门诊量的滞后效应分析 [J]. 环境与职业医学, 2018, 35 (2): 124-130.
- [19] 胡翠玲, 徐婕, 沈国妹, 等. 上海市空气污染物与儿童呼吸系统疾病门诊量的时间序列研究 [J]. 环境与职业医学, 2021, 38 (1): 23-29.
- [20] 赵凤敏, 吴一峰, 吴峰. 大气污染物浓度与上呼吸道疾病门诊就诊的关联性研究 [J]. 预防医学, 2016, 28 (2): 165-167.
- [21] ÜNAL E, ÖZDEMİR A, KHANJANI N, et al. Air pollution and pediatric respiratory hospital admissions in Bursa, Turkey: a time series study [J/OL]. Int J Environ Health Res, 2021 [2023-02-08]. <https://doi.org/10.1080/09603123.2021.1991282>.
- [22] BAI L, SU X, ZHAO D, et al. Exposure to traffic-related air pollution and acute bronchitis in children: season and age as modifiers [J]. J Epidemiol Community Health, 2018, 72 (5): 426-433.
- [23] SONG J, LU M, ZHENG L, et al. Acute effects of ambient air pollution on outpatient children with respiratory diseases in Shijiazhuang, China [J/OL]. BMC Pulm Med, 2018, 18 (1) [2023-02-08]. <https://doi.org/10.1186/s12890-018-0716-3>.
- [24] LIU P, WANG X, FAN J, et al. Effects of air pollution on hospital emergency room visits for respiratory diseases: urban-suburban differences in Eastern China [J/OL]. Int J Environ Res Public Health, 2016, 13 (3) [2023-02-08]. <https://doi.org/10.3390/ijerph13030341>.
- [25] DI CICCO M, KANTAR A, MASINI B, et al. Structural and functional development in airways throughout childhood: children are not small adults [J]. Pediatr Pulmonol, 2021, 56 (1): 240-251.

收稿日期: 2022-11-08 修回日期: 2023-02-08 本文编辑: 徐文璐