

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第2期

Vol.36 No.2

2015

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

霾与非霾期间汞在不同粒径颗粒物上的分布特征 朱琮宇,程金平,魏雨晴,薄丹丹,陈筱佳,江璇,王文华(373)

大气传输路径对上甸子本底站气溶胶光学特性的影响 蒲维维,石雪峰,马志强,赵秀娟,张小玲,徐晓峰(379)

近3年太原市夏季降水的化学特征研究 郭晓方,崔阳,王开扬,何秋生,王新明(388)

太原市PM_{2.5}中有机碳和元素碳的污染特征 刘珊,彭林,温彦平,白慧玲,刘凤娴,史美鲜,李丽娟(396)

青海省西宁市和天峻县大气颗粒物中有机氯农药和类二噁英多氯联苯的水平与分布 李秋旭,何畅,马召辉,马丽花,扎西卓玛,王英,金军(402)

北京10个常绿树种颗粒物吸附能力研究 王兵,张维康,牛香,王晓燕(408)

人工湿地空气微生物群落碳源代谢特征 宋志文,王琳,徐爱玲,吴等等,夏岩(415)

春季融雪补给后巩乃斯河水物理化学性质空间分布特征研究 刘翔,郭玲鹏,张飞云,马杰,牟书勇,赵鑫,李兰海(421)

青藏高原湖泊小流域水体离子组成特征及来源分析 李鹤,李军,刘小龙,杨曦,张伟,王洁,牛颖权(430)

亚热带深水水库——龙滩水库季节性分层与富营养化特征分析 张垒,李秋华,黄国佳,欧腾,李翎,吴迪,周黔兰,高廷进(438)

长江河口水库沉积物磷形态、吸附和释放特性 金晓丹,吴昊,陈志明,宋红军,何义亮(448)

黄河口溶解无机碳时空分布特征及影响因素研究 郭兴森,吕迎春,孙志高,王传远,赵全升(457)

苕溪干流悬浮物和沉积物的磷形态分布及成因分析 陈海龙,袁旭音,王欢,李正阳,许海燕(464)

滇池表层沉积物氮污染特征及其潜在矿化能力 孟亚媛,王圣瑞,焦立新,刘文斌,肖焱波,祖维美,徐天敏,丁帅,周童(471)

城郊排水沟渠溶质传输的暂态存储影响及参数灵敏性 李如忠,钱靖,董玉红,唐文坤,杨继伟(481)

艾比湖表层沉积物重金属的来源、污染和潜在生态风险研究 张兆永,吉力力·阿不都外力,姜逢清(490)

工矿业绿洲城郊排污渠沉积物重金属的形态分布规律及风险评价 臧飞,王胜利,南忠仁,王兆炜,任业萌,王德鹏,廖琴,周婷(497)

山东省典型工业城市土壤重金属来源、空间分布及潜在生态风险评价 戴彬,吕建树,战金成,张祖陆,刘洋,周汝佳(507)

UV协同ClO₂去除三氯生及其降解产物的研究 李玉瑛,何文龙,李青松,金伟伟,陈国元,李国新(516)

氯化铁絮凝-直接过滤工艺对地下水中As(V)的去除机制研究 康英,段晋明,景传勇(523)

负载纳米零价铁铜藻基活性炭的制备及其去除水中Cr(VI)的研究 曾淦宁,武晓,郑林,伍希,屠美玲,王铁杆,艾宁(530)

磁性石墨烯吸附水中Cr(VI)研究 刘伟,杨琦,李博,陈海,聂兰玉(537)

TiO₂@酵母复合微球固定床吸附荧光增白剂-VBL的研究 王菲,张凯强,白波,王洪伦,索有瑞(545)

MnO₂/CFP复合电极的制备及电吸附Pb²⁺特性的研究 刘方园,胡承志,李永峰,梁乾伟(552)

吸附相反应技术制备微弱光响应的多组分掺杂TiO₂催化剂 王挺,祝轶琛,孙志轩,吴礼光(559)

掺铁TiO₂纳米管阵列模拟太阳光光电催化降解双酚A的研究 项国梁,喻泽斌,陈颖,徐天佐,彭振波,刘钰鑫(568)

天然矿物负载Fe/Co催化H₂O₂氧化降解阳离子红3R 马楠,刘华波,谢鑫源(576)

臭氧微气泡处理酸性大红3R废水特性研究 张静,杜亚威,刘晓静,周玉文,刘春,杨景亮,张磊(584)

碳源类型、温度及电子受体对生物除磷的影响 韩芸,许松,董涛,王斌帆,王显耀,彭党聪(590)

低温低溶解氧EBPR系统的启动、稳定运行及工艺失效问题研究 马娟,李璐,俞小军,魏雪芬,刘娟丽(597)

O池溶解氧水平对石化废水A/O工艺污染物去除效果和污泥微生物群落的影响 丁鹏元,初里冰,张楠,王星,王建龙(604)

改善污泥脱水性能的丝状真菌的分离及其促进污泥脱水的机制初探 周雨璐,付豪逸,范先锋,王振宇,郑冠宇(612)

热碱处理对污水处理厂污泥特性的影响研究 杨世东,陈霞,刘操,肖本益(619)

不同退化程度羊草草原碳收支对模拟氮沉降变化的响应 齐玉春,彭琴,董云社,肖胜生,贾军强,郭树芳,贺云龙,闫钟清,王丽芹(625)

地表臭氧浓度升高对旱作农田N₂O排放的影响 吴杨周,胡正华,李岑子,陈书涛,谢燕,肖启涛(636)

亚热带次生林不同土壤呼吸组分的多年观测研究 刘义凡,陈书涛,胡正华,沈小帅,张旭(644)

川中丘陵县域土壤氮素空间分布特征及其影响因素 罗由林,李启权,王昌全,李冰,张新,冯文颖,翁倩,吴冕(652)

黄土丘陵区土地利用变化对深层土壤活性碳组分的影响 张帅,许明祥,张亚锋,王超华,陈盖(661)

汶川地震灾区不同气候区土壤微生物群落碳源代谢多样性 张广帅,林勇明,马瑞丰,邓浩俊,杜锟,吴承祯,洪伟(669)

土壤电动修复的电极空间构型优化研究 刘芳,付融冰,徐珍(678)

有机氯农药污染场地挖掘过程中污染物的分布及健康风险 张石磊,薛南冬,杨兵,李发生,陈宣宇,刘博,孟磊(686)

水稻不同生育期根际及非根际土壤砷形态迁移转化规律 杨文骏,王英杰,周航,易开心,曾敏,彭佩钦,廖柏寒(694)

植物根系体外溶液的提取方法研究:以多环芳烃为例 朱满党,都江雪,乐乐,李金凤,杨青青,陆守昆,占新华(700)

垂序商陆叶细胞壁结合锰机制研究 徐向华,刘翠英,李平,郎漫,赵小艳,杨建军,官敏(706)

1株筛自柴油污染土壤的铜绿假单胞菌对萘的降解特性研究 刘文超,吴彬彬,李晓森,卢滇楠,刘永民(712)

CdSe/ZnS量子点对斑马鱼胚胎发育的毒性效应 陈慕飞,黄承志,蒲德永,郑朝依,袁开米,金星星,张耀光,金丽(719)

锯齿新米虾对Cu²⁺和毒死蜱毒性的生理响应 李典宝,张玮,王丽卿,张瑞雷,季高华(727)

同步衍生超声乳化微萃取气相色谱法测定环境水样中的苯胺类化合物 田立勋,戴之希,王国栋,翁焕新(736)

热水环境中Na⁺活化斜发沸石吸附钙离子除硬过程研究 张硕,王栋,陈远超,张兴文,陈贵军(744)

区域经济-污染-环境三维评价模型的构建与应用 樊新刚,米文宝,马振宁(751)

《环境科学》征订启事(401) 《环境科学》征稿简则(437) 信息(489,522,726,735)

CdSe/ZnS 量子点对斑马鱼胚胎发育的毒性效应

陈幕飞¹, 黄承志², 蒲德永¹, 郑朝依¹, 袁开米¹, 金星星¹, 张耀光¹, 金丽^{1*}

(1. 西南大学生命科学学院, 淡水鱼类资源与生殖发育教育部重点实验室, 重庆 400715; 2. 发光与实时分析教育部重点实验室, 重庆 400715)

摘要: 本研究以模式生物斑马鱼 (*Danio rerio*) 为对象, 观察在不同浓度 CdSe/ZnS 量子点 (CdSe/ZnS QDs) 暴露下, 斑马鱼胚胎形态发育、氧化应激以及金属硫蛋白 *MT* 基因和应激蛋白 *Hsp70* 基因表达变化情况。结果表明, CdSe/ZnS QDs 对斑马鱼胚胎 72 hpf (hours post fertilization) 的半致畸效应浓度 (EC₅₀) 为 316.994 nmol·L⁻¹。QDs 暴露影响了斑马鱼胚胎的死亡率、畸形率、孵化率、自主运动频率和体长, 以及引起胚胎卵凝集, 心包囊肿, 脊椎弯曲等多种毒性效应; 同时导致斑马鱼体内超氧化物歧化酶 (SOD) 活性变化以及丙二醛 (MDA) 含量增加。QDs 还诱导斑马鱼 *MT* 基因和 *Hsp70* 基因表达上调, 斑马鱼机体产生一系列自我保护反应来减轻 QDs 所造成的伤害。这表明: CdSe/ZnS QDs 对斑马鱼胚胎产生了毒性效应, 其毒性可能与其核心 Cd²⁺ 的释放、粒径大小以及氧化应激有关。

关键词: CdSe/ZnS 量子点; 斑马鱼; 胚胎; 氧化应激; 基因表达; 发育毒性

中图分类号: X171.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)02-0719-08 DOI: 10.13227/j.hjks.2015.02.046

Toxic Effects of CdSe/ZnS QDs to Zebrafish Embryos

CHEN Mu-fei¹, HUANG Cheng-zhi², PU De-yong¹, ZHENG Chao-yi¹, YUAN Kai-mi¹, JIN Xing-xing¹, ZHANG Yao-guang¹, JIN Li^{1*}

(1. Key Laboratory of Freshwater Fish Reproduction and Development, Ministry of Education, School of Life Science, Southwest University, Chongqing 400715, China; 2. Key Laboratory on Luminescence and Real-Time Analysis, Ministry of Education, Chongqing 400715, China)

Abstract: The toxic effects of CdSe/ZnS QDs on zebrafish (*Danio rerio*) embryos at different developmental stages were investigated in this study. The voluntary movement frequency, body length, hatching rate, mortality and malformation rate, SOD activities, MDA contents, mRNA expression of metallothionein (*MT*) and heat stress protein 70 (*Hsp70*) were used as indicators. The results showed that the EC₅₀ was 316.994 nmol·L⁻¹ for zebrafish embryos (72 hpf) when exposed to CdSe/ZnS QDs. After the CdSe/ZnS QDs exposure, the embryos showed a significant increase in mortality and malformation rate, a decrease in hatching rate and body length, an advance in hatching time, and a changing in the spontaneous movement frequency, and many other toxic effects, such as the condensation of embryonic eggs, the formation of pericardial cysts and curvature of the spine. Moreover, it was found that the MDA contents in the embryos in CdSe/ZnS QDs groups were significantly increased, and the SOD activities were changed. In addition, the mRNA expression level of *MT* and *Hsp70* were up-regulated. All the information suggests that exposure of CdSe/ZnS QDs can cause toxic effects on zebrafish embryos, and the effects may be related to the releasing of Cd²⁺, particle size and oxidative stress.

Key words: CdSe/ZnS quantum dots; zebrafish (*Danio rerio*); embryos; oxidative stress; gene expression; developmental toxicity

量子点 (quantum dots, QDs) 是一种由 II ~ VI 或 III ~ V 族元素构成的半导体纳米材料, 粒径介于 1 ~ 100 nm 之间, 由半导体纳米晶体核心和外壳组成。核心多为金属与非金属形成的化合物, 如硒化镉 (CdSe)、硫化镉 (CdS)、磷化铟 (InP)、碲化镉 (CdTe)^[1,2] 等, 其外壳具有结合功能集团的作用, 使得 QDs 具有良好的光学稳定性、荧光性和生物兼容性等^[3], 被广泛应用于荧光探针、多功能药物传递、医学成像、生物芯片和环境监测等领域^[4,5]。随着 QDs 的广泛运用, 其生物学毒性效应和环境影响成为人们关注的焦点。近年来, 许多学者就 QDs 的毒性机制、生物毒性效应以及其对环境的危害等方面进行了研究。结果发现, QDs 的毒性取决于自身理

化性质的诸多因素, 包括 QDs 尺寸大小、核心镉离子的释放、表面电荷、壳层稳定性、表面修饰聚合物^[6-11] 等。量子点的毒性研究主要集中在体外细胞上^[6,7], 活体试验主要是以鼠类的研究甚多^[12]。然而在自然环境中, 这种人工合成的以镉系量子点为原料的产品可能随着产品的使用, 丢弃使其释放、掺入或流入等多种途径进入水体, 不可避免地水生生态系统造成一定的危害, 并可通过食物链在鱼

收稿日期: 2014-06-25; 修订日期: 2014-09-18

基金项目: 重庆市自然科学基金计划项目 (cstc2012jjA20005); 中央高校基本科研业务费专项 (XDJK2014C061); 重庆市百名杰出科技领军人才培养计划项目

作者简介: 陈幕飞 (1987 ~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为动物形态与发育, E-mail: cmf138@swu.edu.cn

* 通讯联系人, E-mail: jinll@swu.edu.cn

类等水生生物体内富集并最终进入人体,对人体健康构成威胁^[13]. 有研究指出纳米材料 TiO₂ 在地表水中的浓度为 21 ng·L⁻¹, C₆₀ 在污水厂出水中的浓度为 4 ng·L⁻¹^[14]; 但这些纳米材料与环境接触的过程能使其形成更高浓度的悬浮液,如无限搅拌,可使 C₆₀ 在淡水中的浓度达到 35 mg·L⁻¹^[15]. 量子点在水环境中的监测数据鲜见报道,甚至其对水生生物毒理学的研究资料也较少^[16],李鸿程等^[17]研究了 QDs 对雄性泥鳅的毒性试验,陈幕飞等^[18]报道了 QDs 对稀有鮰鲫胚胎发育的毒性. 因此,评价量子点对水生生物尤其是鱼类发育的安全性问题已引起众多学者们的关注.

本研究选用模式生物斑马鱼为试验对象,选取斑马鱼胚胎发育过程中的形态毒理学终点^[19]、体内氧化应激指标(SOD 和 MDA)和分子标志物(*MT* 和 *Hsp70* 基因)mRNA 表达量作为毒性指标,初步探讨 CdSe/ZnS QDs 对斑马鱼胚胎发育的影响,通过揭示 CdSe/ZnS QDs 对鱼类早期发育的毒性效应,旨在为鱼类的毒理学研究提供参考,也为量子点对生物的安全性评估提供基础资料.

1 材料与方法

1.1 试验用量子点

本试验所用量子点为水溶性聚乙二醇(PEG)修饰的非靶向 CdSe/ZnS QDs,浓度为 8 μmol·L⁻¹,粒径为 8~12 nm,单分散性一致,颗粒之间独立存在,荧光最大发射波长为 613 nm,购于武汉伽源量子点技术开发有限公司.

1.2 受精卵获取

试验亲鱼为本实验室长期饲养的斑马鱼(*Danio rerio*, AB 系),从养殖群体中挑选出性成熟斑马鱼雌雄分缸,在标准化斑马鱼培养系统中养殖,培养液 [58 mmol·L⁻¹ CaCl₂, 0.7 mmol·L⁻¹ KCl, 0.4 mmol·L⁻¹ MgSO₄·7H₂O, 0.6 mmol·L⁻¹ Ca(NO₃)₂·4H₂O, 0.5 mmol·L⁻¹ HEPES, pH 7; ionic strength (*I*) = 0.18 mol·L⁻¹] 加入 0.6% 商业化海盐,流水养殖系统中饲养,水温控制于 28℃ ± 0.5℃,光照周期为 14 L:10 D. 收集胚胎的前一天晚上,将雌雄以 1:2 配对移入交配盒,待其自然产卵受精.

1.3 试验设计

根据预试验的结果,设置 1 个空白对照组(浓度为 0 nmol·L⁻¹)、4 个 CdSe/ZnS QDs 浓度组:分别为 50、100、200 和 400 nmol·L⁻¹,以及浓度为 2

mg·L⁻¹ Cd²⁺ 作为阳性对照组(Cd²⁺ 浓度等同于 50 nmol·L⁻¹ QDs 含镉量),用斑马鱼培养液稀释成相应的浓度梯度. 为了减少试验误差以及避免受精过程的不确定性,在囊胚期于显微镜下挑选出发育正常的斑马鱼胚胎,并从囊胚期(2.5~3 h)开始染毒. 用 24 孔细胞培养板作为染毒试验容器,每孔放入 20 枚胚胎,分别加受试液 1 mL,将 24 孔细胞培养板置于精密恒温水浴锅中,水温控制在 28℃ ± 0.5℃. 试验重复 3 次,每个浓度设 3 组平行. 试验期间,及时剔除死亡个体,每间隔 12 h 换 1/2 同等浓度的溶液,光照周期为 14 L:10 D.

1.4 显微观察

每间隔 6 h 记录各浓度组胚胎死亡、畸形、孵化的情况,用 LEICA Mz16FA 荧光体视显微镜和 Nikon SMZ 1000 体视显微镜观察胚胎并照相. 用 Image-pro plus 6.0 图像软件分析 72 hpf 仔鱼体长. 孵化抑制率 = [(空白对照组胚胎孵化数 - 处理组胚胎孵化数)/空白对照组胚胎孵化数] × 100%

1.5 抗氧化指标测定

斑马鱼胚胎发育至 72 hpf 时,用 4℃ 的磷酸盐缓冲液(phosphate buffered saline, PBS)清洗受试斑马鱼胚胎,去除表面附着的 QDs,置于离心管中,吸去残余水分,加入预冷的 PBS 缓冲液冰浴匀浆,4℃ 12 000 r·min⁻¹ 离心 15 min,取上清液. 样品总蛋白含量和氧化应激指标(SOD 和 MDA)测定均按照试剂盒的说明书(南京建成生物工程研究所)进行.

1.6 *MT* 和 *Hsp70* mRNA 定量分析

根据 GenBank 中斑马鱼 *MT* 基因序列和 *Hsp70* 基因序列,用斑马鱼管家基因 *β-actin* 作为内参,设计 *MT*、*Hsp70* 和 *β-actin* 基因引物(如表 1). 所有引物由 Invitrogen 公司合成,选取发育至 24 hpf 和 72 hpf 试验组与对照组斑马鱼的胚胎,参照 Trizol (Invitrogen, Carlsbad, CA) 试剂提取总 RNA, *D*₂₆₀/*D*₂₈₀ 为 1.90 左右. 根据 PrimeScript RT reagent Kit with gDNA Eraser (TaKaRa 公司) 试剂盒将各样品 RNA 进行逆转录.

荧光定量 RT-PCR 反应体系(20 μL): SYBR Green Realtime PCR Master Mix (2 ×) 10 μL、正向及反向引物各 0.8 μL、cDNA 模板 1.6 μL、补充无菌水至总体积. 扩增条件为:预变性 95℃ 5 min, 40 个循环(95℃ 20 s, 58℃ 25 s, 72℃ 25 s),反应结束后制备溶解曲线. 每个反应设 3 复孔,所有检测样品均包含 1 个无模板的阴性对照以排除假阳性结

果. 采用 $2^{-\Delta\Delta CT}$ 法分析荧光定量结果^[20], 并利用统计学软件进行单因素方差分析.

表 1 real-time PCR 所用到的引物

Table 1 Primers sequences used for real-time PCR			
基因	序列号		5'-3'
MT	BC-045879	Forward	CTGGGATGGAATCTTGCG
		Reverse	AGCATTTCGGGTGGACGAT
Hsp70	NM-194273	Forward	GCCAAGACTGGAACCTTGCAAC
		Reverse	CGCAGCCAGAGGCACACT
β -actin	NM-131397	Forward	ATCACAGTTCAGCCTATTTCAAA
		Reverse	TGCCGTCTTCGATGGTCAG

1.7 数据处理

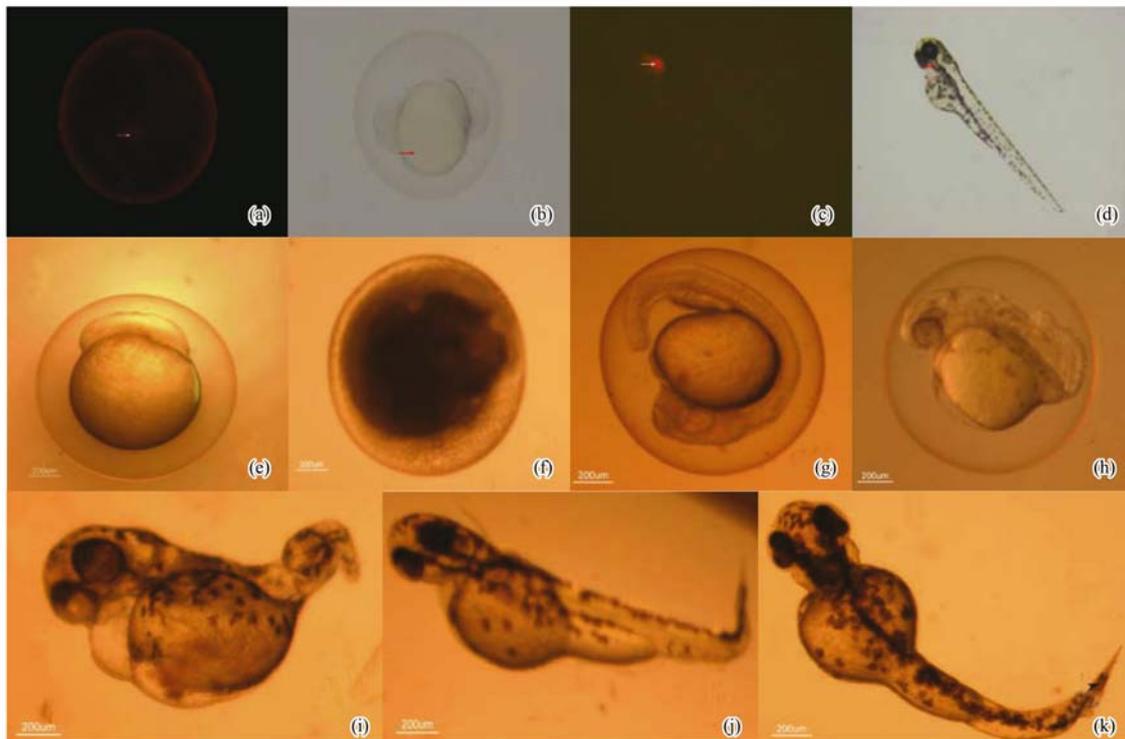
用 SPSS 17.0 统计软件进行数据统计和分析, 采用 t 检验进行比较, $P < 0.05$ 表示差异显著. 结果以平均值 \pm 标准误 (Mean \pm SE) 来表示.

2 结果与分析

2.1 斑马鱼胚胎形态观察

CdSe/ZnS QDs 暴露对斑马鱼胚胎和孵出仔鱼

产生多种毒性效应[图 1(e) ~ 1(k)]. 从毒物暴露开始到 24 hpf, Cd²⁺ 对照组的胚胎已出现明显的中毒症状, 呈现出卵凝集现象[图 1(f)], 荧光体视显微镜下观察到 QDs 已通过卵膜进入胚胎体内[图 1(a) 和 1(b)]; 除空白对照组和 50 nmol·L⁻¹ QDs 浓度组胚胎发育正常外[图 1(e)], 其余 QDs 浓度组胚胎开始出现中毒症状, 个别胚胎出现不同程度的卵凝集现象. 36 hpf, QDs 浓度组和 Cd²⁺ 阳性对照组部分胚胎出现胚体畸形[图 1(h)]. 48 hpf, 200 nmol·L⁻¹ 和 400 nmol·L⁻¹ QDs 浓度组有胚胎部分提前出膜, 但提前出膜的仔鱼大多畸形[图 1(i)]. 60 hpf, QDs 浓度组和 Cd²⁺ 阳性对照组孵出仔鱼出现不同程度上的畸形, 主要表现为心包与卵黄囊肿, 尾部和脊柱弯曲等现象[图 1(i) ~ 1(k)]. 暴露至 72 hpf 时 QDs 主要集中在孵出仔鱼的头部及心脏周围[图 1(c) 和 1(d)]; 浓度组和 Cd²⁺ 阳性对照组未出膜的胚胎大多数在膜内死亡, 已孵出的仔鱼行动能力较弱, 体长明显缩短, 畸形加重, 有些胚胎还出现多种畸形并存现象.



a、b: 暴露至 24 hpf QDs 已进入胚胎内(箭头所示为同一位置); c、d: 暴露至 72 hpf QDs 在孵出仔鱼体内的分布(箭头示同一位置); e: 正常胚胎(囊胚期); f: 卵凝集; g: 正常胚胎; h: 胚体畸形; i: 心包囊肿、卵黄囊肿与短尾; j、k: 尾部、脊柱弯曲

图 1 CdSe/ZnS QDs 对斑马鱼胚胎/仔鱼的致死及致畸效应

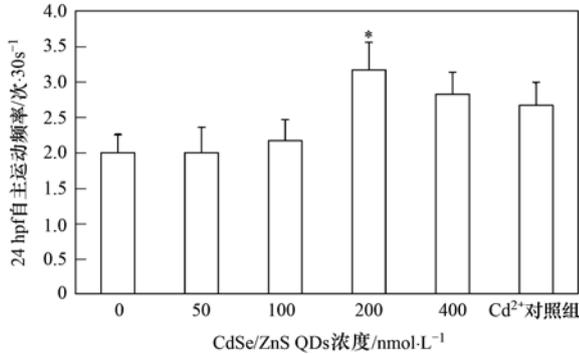
Fig. 1 Effects of exposure to CdSe/ZnS QDs on developing zebrafish embryos/larva

2.2 CdSe/ZnS QDs 对斑马鱼胚胎 24 hpf 自主运动频率的影响

斑马鱼胚胎发育至 24 hpf 时, 表现出胚体的自

主运动, 每个浓度组随机选 6 枚胚胎记录 30 s 胚体自主运动次数, 取均值进行比较(图 2). QDs 浓度组斑马鱼胚胎的自主运动频率均较空白对照组有所

增加,尤其是 $200 \text{ nmol}\cdot\text{L}^{-1}$ QDs 浓度组的胚胎自主运动频率增加明显 ($P < 0.05$). QDs 各浓度组虽有一定程度上的波动但均与 Cd^{2+} 阳性对照组的差异不明显 ($P > 0.05$).



* 表示 QDs 浓度组与空白对照组差异显著

图 2 CdSe/ZnS QDs 对斑马鱼 24 hpf 自主运动频率的影响

Fig. 2 Effects of QDs on spontaneous movement frequency of zebrafish embryos at 24 hpf

2.3 CdSe/ZnS QDs 对斑马鱼胚胎孵化的影响

QDs 对斑马鱼孵化率的影响见图 3. $200 \text{ nmol}\cdot\text{L}^{-1}$ QDs 浓度组斑马鱼胚胎最早出膜时间为 48 hpf, 比空白对照组、 Cd^{2+} 阳性对照组都提前 6 h; 54 hpf 时, $200 \text{ nmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $400 \text{ nmol}\cdot\text{L}^{-1}$ QDs 浓度组出膜率明显较空白对照组与 Cd^{2+} 阳性对照组高, 但出膜的仔鱼大多呈畸形; 72 hpf 时, 各试验组的胚胎最终孵化率均较空白对照组明显的降低, 计算其孵化抑制率发现, QDs 浓度组胚胎的孵化抑制率随着试验浓度的增加均有不同程度上升高, 其中 $200 \text{ nmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $400 \text{ nmol}\cdot\text{L}^{-1}$ QDs 浓度组胚胎孵化

抑制率分别为 28.33%、36.67%, Cd^{2+} 阳性对照组胚胎孵化抑制率为 30.43%.

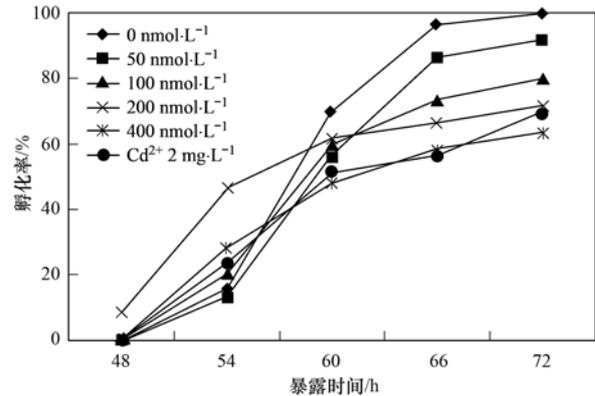


图 3 CdSe/ZnS QDs 对斑马鱼胚胎 72 hpf 孵化率的影响

Fig. 3 Effects of CdSe/ZnS QDs on hatching success of zebrafish embryos at 72 h

2.4 CdSe/ZnS QDs 对斑马鱼胚胎死亡率和畸形率的影响

对各组斑马鱼胚胎发育至 72 hpf 的畸形率与死亡率进行统计(表 2). 从表 2 可以看出, 随着 QDs 浓度的升高, 胚胎畸形率与死亡率均显著性升高, 各浓度组的畸形率与死亡率较空白对照组升高显著 ($P < 0.05$). Cd^{2+} 阳性对照组较 $50 \text{ nmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $100 \text{ nmol}\cdot\text{L}^{-1}$ QDs 浓度组胚胎畸形率和死亡率均显著性升高 ($P < 0.05$), 而比 $400 \text{ nmol}\cdot\text{L}^{-1}$ QDs 浓度组的畸形率和死亡率却显著的降低 ($P < 0.05$). 采用概率单位法, 得出斑马鱼胚胎 72 hpf 的 EC_{50} 为 $316.994 \text{ nmol}\cdot\text{L}^{-1}$, 其 95% 置信区间为: $264.976 \sim 398.263 \text{ nmol}\cdot\text{L}^{-1}$.

表 2 不同浓度 CdSe/ZnS QDs 对斑马鱼胚胎死亡率和畸形率的影响¹⁾

Table 2 Mortalities and malformation rates during embryonic development of zebrafish under QDs exposure

组别	CdSe/ZnS QDs 浓度/ $\text{nmol}\cdot\text{L}^{-1}$					Cd^{2+} 对照组
	0	50	100	200	400	
畸形率/%	0	$6.67 \pm 1.67^{**}$	$18.33 \pm 4.41^{**}$	$45.00 \pm 2.87^{**}$	$56.67 \pm 3.33^{**}$	33.33 ± 2.87
死亡率/%	0	$6.67 \pm 1.67^{**}$	$15.00 \pm 2.89^{**}$	$23.33 \pm 1.67^*$	$33.33 \pm 1.67^{**}$	23.33 ± 1.67

1) * 表示 QDs 浓度组与空白对照组差异显著; # 表示 QDs 浓度组与阳性对照组差异显著 ($P < 0.05$), 下同

2.5 CdSe/ZnS QDs 对斑马鱼 72 hpf 体长的影响

QDs 暴露至 72 hpf 时, 随着 QDs 浓度的增加, 斑马鱼仔鱼体长呈不同程度上的缩短(图 4), 100 、 200 和 $400 \text{ nmol}\cdot\text{L}^{-1}$ QDs 浓度组的仔鱼体长较空白对照组均显著性降低 ($P < 0.05$); Cd^{2+} 阳性对照组斑马鱼仔鱼体长与空白对照组、 $50 \text{ nmol}\cdot\text{L}^{-1}$ QDs 浓度组降低显著 ($P < 0.05$), 与其余浓度组仔鱼体长差异不明显 ($P > 0.05$).

2.6 CdSe/ZnS QDs 对斑马鱼氧化应激的影响

QDs 对斑马鱼胚胎的影响还体现在氧化损伤方面(图 5). 对发育至 72 hpf 斑马鱼的抗氧化酶测定显示, $100 \text{ nmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $200 \text{ nmol}\cdot\text{L}^{-1}$ QDs 浓度组斑马鱼 SOD 活性较空白对照组升高明显 ($P < 0.05$), 然而随 QDs 浓度的增加, $400 \text{ nmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 浓度组 SOD 活性却显著性的降低 ($P < 0.05$); Cd^{2+} 阳性对照组较空白对照组相比, SOD 活性降低明显, 其活性与

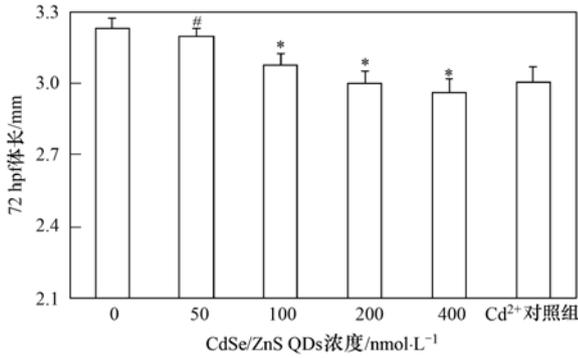


图4 CdSe/ZnS QDs 对斑马鱼 72 hpf 仔鱼体长的影响

Fig. 4 Effects of CdSe/ZnS QDs on body length of zebrafish larva at 72 hpf

400 nmol·L⁻¹ QDs 浓度的 SOD 活性相接近. 斑马鱼体内 MDA 含量随 QDs 浓度升高而升高(图 5), 各 QDs 浓度组的 MDA 含量均较空白对照组显著性升高($P < 0.05$); Cd²⁺ 阳性对照组 MDA 含量为 4.22 mmol·mg⁻¹, 显著高于 QDs 浓度组($P < 0.05$).

2.7 CdSe/ZnS QDs 对斑马鱼 MT 和 Hsp70 基因表达的影响

荧光定量的结果显示(图 6), 胚胎发育至 24 hpf 时, MT 基因随 QDs 浓度的增加总体表现出上调趋势, 其中高浓度组(200 nmol·L⁻¹ 和 400 nmol·L⁻¹) MT 基因表达量较空白对照组上调极为明显($P < 0.05$). 随着胚胎发育的继续, 在受精后 72 h 时, MT 基因表达量略有下降, 但仍较空白对照组有显著性的差异. 相比 Cd²⁺ 阳性对照组在胚胎受精 24 h 时, MT 基因表达量与各浓度组之间有着极显著的差异($P < 0.05$), 但随着胚胎发育的继续, 在受精 72 h 时, 其 MT 基因表达量降低明显与空白对照组无显著性差异.

在 Hsp70 基因表达方面(图 6), 24 hpf 时, QDs

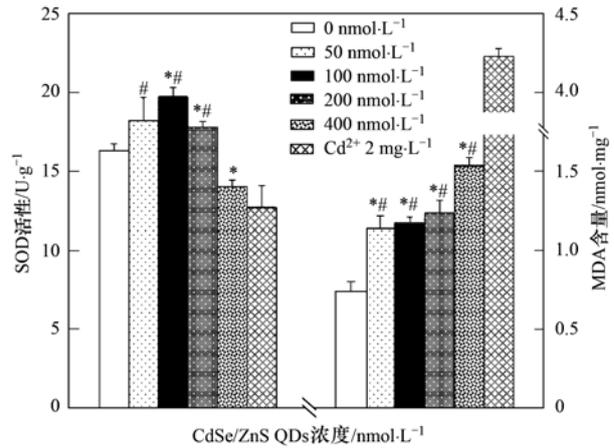


图5 CdSe/ZnS QDs 对 72 hpf 斑马鱼 SOD 活性和 MDA 含量的影响

Fig. 5 Effects of CdSe/ZnS QDs on SOD activities and MDA contents of zebrafish at 72 hpf

浓度组 Hsp70 基因表达量较空白对照组呈上调趋势, 100、200 和 400 nmol·L⁻¹ QDs 浓度组的 Hsp70 基因表达量上调显著($P < 0.05$); 胚胎发育至 72 hpf 时, Hsp70 基因表达量与浓度组之间呈不同程度的变化, 其中 50 nmol·L⁻¹ 和 100 nmol·L⁻¹ QDs 浓度组 Hsp70 基因表达量与较空白对照组上调显著($P < 0.05$); Cd²⁺ 阳性对照组随着胚胎发育的继续, Hsp70 基因表达量明显上调, 其中 72 hpf 时其表达量是空白对照组的 8.74 倍, 较 QDs 浓度组有着明显的上调($P < 0.05$).

3 讨论

3.1 CdSe/ZnS QDs 对斑马鱼胚胎发育的影响

有研究指出, 胚胎的孵化是由于孵化酶、胚体扭动以及膜脂质的过氧化共同作用, 来减弱卵膜的脆性, 从而使胚胎破裂出膜^[16]. 关于 QDs 的毒性作

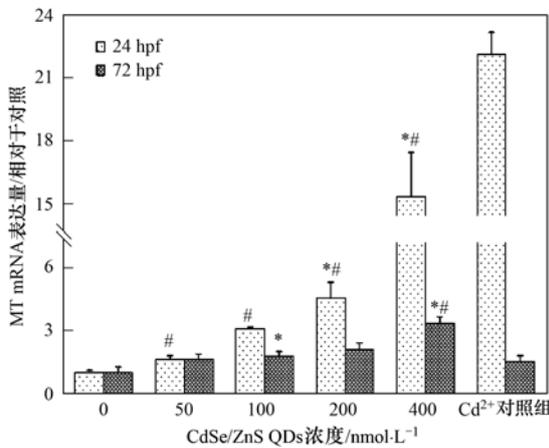
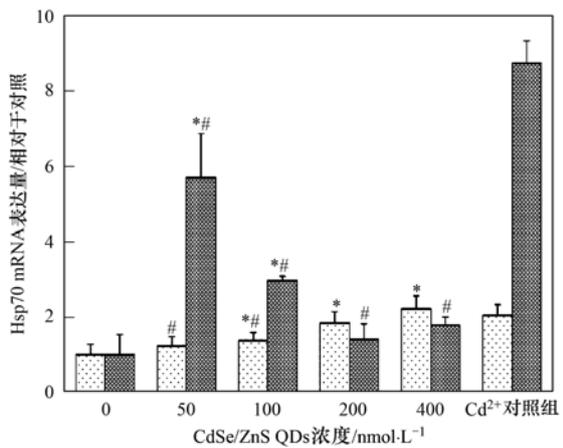


图6 CdSe/ZnS QDs 对斑马鱼 MT 和 Hsp70 基因 mRNA 表达的影响

Fig. 6 Effects of CdSe/ZnS QDs on MT and Hsp70 mRNA of zebrafish



用机制研究表明,由于生物体或外界环境的氧化作用,QDs壳层结构受到破坏,壳层氧化脱落,进而引起中心核的氧化以及 Cd^{2+} 释放,从而产生毒性;另外其毒性还与QDs的纳米性质等有关^[8,21,22].本试验采取低于QDs实际应用浓度的较低剂量浓度,对斑马鱼初期发育进行持续暴露72 hpf.结果显示,在CdSe/ZnS QDs暴露至24 hpf时,可观察到QDs已进入斑马鱼胚胎内,进入胚体的QDs导致其发育形态、死亡率、畸形率、孵化率、自主运动和体长发生了变化,并造成心包、卵黄囊水肿等多种毒性现象.此外,200 $\text{nmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 和400 $\text{nmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 浓度的QDs促使胚胎提前出膜,但在其72 hpf的孵化抑制率均高于空白对照组.这表明CdSe/ZnS QDs较易(粒径小于8~12 nm)通过卵膜渗透进入胚胎^[23],QDs降解释放出的 Cd^{2+} ,可能影响到其孵化酶、渗透功能和生物物理学等一方面或多方面的正常功能^[24],从而导致胚胎畸形或死亡;同时,进入胚胎的QDs聚集在细胞膜上,造成膜脂质过氧化和膜渗透功能的改变,使卵膜脆性减弱^[25],再加上胚体的扭动,进而改变胚胎的孵化出膜的时间和孵化率.本研究还表明,无论从斑马鱼畸形和死亡情况还是氧化应激以及基因标志物的变化情况看, Cd^{2+} 阳性对照组(等同于50 $\text{nmol}\cdot\text{L}^{-1}$ QDs的含镉量)对斑马鱼胚胎的毒性作用远远大于50 $\text{nmol}\cdot\text{L}^{-1}$ QDs,这可能是因为QDs外壳的保护作用,其核心 Cd^{2+} 在斑马鱼胚胎体内只有部分被释放出来,释放出的 Cd^{2+} 对鱼体造成了一定程度的伤害^[10].

3.2 CdSe/ZnS QDs对斑马鱼的氧化应激作用

正常情况下机体的氧化系统处于动态平衡中,但当机体在遭受各种有害物质刺激时,体内的活性氧自由基(ROS)就会产生过多,超出机体的自我清除能力,导致体内的氧化系统和抗氧化系统失去平衡,造成机体组织损伤、脂质过氧化,从而引起机体生理机能的改变^[26].SOD作为鱼类体内普遍存在的一种清除生物氧化产生的ROS^[27]的抗氧化酶,在保护生物体正常机理功能和控制膜脂质过氧化等方面扮演着重要的角色.本研究结果表明,低浓度(50、100和200 $\text{nmol}\cdot\text{L}^{-1}$)QDs暴露下斑马鱼胚胎体内的SOD活性较空白对照组和 Cd^{2+} 阳性对照组明显升高,可能的原因是生物体酶活性在低浓度暴露物作用下升高的一种刺激反应,称此反应为“毒物兴奋效应”^[28];然而400 $\text{nmol}\cdot\text{L}^{-1}$ QDs浓度组和 Cd^{2+} 阳性对照组SOD活性均较空白对照显著性降低,这可能是因为QDs进入机体后,核心镉离子部

分释放与氧分子发生作用,机体受到损伤,产生过量的ROS^[29],导致体内的氧化系统和抗氧化系统失去平衡,致使SOD大量的消耗,超出机体的自我清除能力.MDA是机体脂质过氧化作用的产物,作为反映机体氧化损伤程度的指标之一,其含量的变化可在一定程度上反映出生物机体细胞受损伤的程度.本研究发现,QDs暴露72 hpf时,斑马鱼机体MDA含量明显增加.这些结果表明,CdSe/ZnS QDs暴露导致了斑马鱼体内产生过量的ROS,体内脂质过氧化反应加强,机体抗氧化系统失衡而遭受严重的氧化损伤.

3.3 CdSe/ZnS QDs对斑马鱼MT与Hsp70基因表达的影响

目前关于鱼类对重金属的解毒机制有大量的研究,并认为MT蛋白作为调节生物体内重金属的水平以及保护机体免受有毒金属和氧化应激诱导药物的损伤方面有很大的作用^[30].QDs其核心物质主要为镉离子,QDs穿过细胞膜进入细胞后,镉离子被释放到细胞质中,游离的镉离子会引发MT蛋白家族上调等一系列自我保护反应^[31].本研究结果显示QDs从一定程度上影响了斑马鱼胚胎MT基因表达的上调,尤其是24 hpf QDs浓度组胚胎MT基因表达量上升极为明显,400 $\text{nmol}\cdot\text{L}^{-1}$ QDs浓度组MT基因表达量较72 hpf上调5倍左右,原因可能是由于该时期QDs刚通过卵膜进入斑马鱼胚胎,胚胎体内对QDs产生的一种自我保护反应;72 hpf时,由于胚胎的发育,其体内逐步形成了一种自我反应体系来降低QDs对其的毒性作用.这一损伤结果在一定程度上表明,氧化损伤产生的ROS或许在量子点引发的细胞毒性中起着重要作用^[25].有研究指出, Cd^{2+} 暴露会诱导斑马鱼类胚胎MT基因的过量表达,本研究不论QDs浓度组还是 Cd^{2+} 阳性对照组都明显的诱导了MT基因的表达,这可能是由于QDs的核心 Cd^{2+} 部分释放所致^[16].

有研究表明,Hsp可作为受污染土壤与海洋中生物所产生的胁迫标记^[32].Blechinger等^[33]在转基因斑马鱼胚胎试验中证实了 Cd^{2+} 明显的诱导Hsp70基因表达水平的上调.本研究结果显示QDs在一定程度上影响了斑马鱼胚胎Hsp70基因表达情况,72 hpf时低浓度(50 $\text{nmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 和100 $\text{nmol}\cdot\text{L}^{-1}$)QDs试验组Hsp70基因表达水平显著提高,其原因除了释放出的 Cd^{2+} 影响外,还可能与该时期胚胎孵化出膜对外界的适应性有关.

4 结论

(1) CdSe QDs 暴露明显影响了斑马鱼胚胎死亡率、畸形率、孵化率、自主运动和体长的变化,引起多种毒性效应;导致抗氧化系统失衡,诱导 *MT* 与 *Hsp70* 基因的表达。

(2) CdSe QDs 的发育毒性可能与其纳米性质(如粒径较小、易吸附性等)以及核心 Cd^{2+} 的释放有关,但更重要原因可能是 QDs 的纳米性质与自身释放的 Cd^{2+} 共同作用导致的脂质过氧化反应。

参考文献:

- [1] Medintz I L, Uyeda H T, Goldman E R, *et al.* Quantum dot bioconjugates for imaging, labelling and sensing [J]. *Nature Materials*, 2005, **4**(6): 435-446.
- [2] Michalet X, Pinaud F F, Bentolia L A, *et al.* Quantum dots for live cells, *in vivo* imaging and diagnostics [J]. *Science*, 2005, **307**(5709): 538-544.
- [3] Alivisatos A P. Semiconductor clusters, nanocrystals, and quantum dots [J]. *Science*, 1996, **271**(5251): 933-937.
- [4] Gao X H, Cui Y Y, Levenson R M, *et al.* *In vivo* cancer targeting and imaging with semiconductor quantum dots [J]. *Nature Biotechnology*, 2004, **22**(8): 969-976.
- [5] Breunig M, Bauer S, Goepferich A. Polymers and nanoparticles; Intelligent tools for intracellular targeting [J]. *European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics*, 2008, **68**(1): 112-128.
- [6] Shiohara A, Hoshino A, Hanaki K, *et al.* On the cyto-toxicity caused by quantum dots [J]. *Microbiology and Immunology*, 2004, **48**(9): 669-675.
- [7] Zhang Y B, Chen W, Zhang J, *et al.* *In vitro* and *in vivo* toxicity of CdTe nanoparticles [J]. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 2007, **7**(2): 497-503.
- [8] Lovrić J, Bazzi H S, Cuie Y, *et al.* Differences in subcellular distribution and toxicity of green and red emitting CdTe quantum dots [J]. *Journal of Molecular Medicine*, 2005, **83**(5): 377-385.
- [9] Selvan S T, Tan T T, Ying J Y. Robust, non-cytotoxic, silica-coated CdSe quantum dots with efficient photoluminescence [J]. *Advanced Materials*, 2005, **17**(13): 1620-1625.
- [10] Kirchner C, Liedl T, Kudera S, *et al.* Cytotoxicity of colloidal CdSe and CdSe/ZnS nanoparticles [J]. *Nano Letters*, 2005, **5**(2): 331-3389.
- [11] Guo G N, Liu W, Liang J G, *et al.* Probing the cytotoxicity of CdSe quantum dots with surface modification [J]. *Materials Letters*, 2007, **61**(8-9): 1641-1644.
- [12] Yang R H, Chang L W, Wu J P, *et al.* Persistent tissue kinetics and redistribution of nanoparticles, quantum dot 705, in mice: ICP-MS quantitative assessment [J]. *Environmental Health Perspectives*, 2007, **115**(9): 1339-1343.
- [13] Brant J, Lecoanet H, Wiesner M R. Aggregation and deposition characteristics of fullerene nanoparticles in aqueous systems [J]. *Journal of Nanoparticle Research*, 2005, **7**(4-5): 545-553.
- [14] Gottschalk F, Sonderer T, Scholz R W, *et al.* Modeled environmental concentrations of engineered nanomaterials (TiO₂, ZnO, Ag, CNT, fullerenes) for different [J]. *Environmental Science Technology*, 2009, **43**(24): 9216-9222.
- [15] Oberdörster E, Zhu S, Blickley T M, *et al.* Ecotoxicology of carbon-based engineered nanoparticles; Effects of fullerene (C60) on aquatic organisms [J]. *Carbon*, 2006, **44**(6): 1112-1120.
- [16] King-Heiden T C, Wicinski P N, Mangham A N, *et al.* Quantum dot nanotoxicity assessment using the zebrafish embryo [J]. *Environmental Science & Technology*, 2009, **43**(5): 1605-1611.
- [17] 李鸿程, 骆文茹, 陶涌, 等. CdSe 量子点对雄性泥鳅的毒性效应研究 [J]. *中国科学(B 辑): 化学*, 2009, **39**(10): 1277-1284.
- [18] 陈幕飞, 张耀光, 郑朝依, 等. CdSe/ZnS 量子点对稀有鮟鮓胚胎发育的影响及其氧化应激作用 [J]. *环境科学学报*, 2014, **34**(7): 1884-1890.
- [19] 朱琳, 史淑洁. 斑马鱼胚胎发育技术在毒性评价中的应用 [J]. *应用生态学报*, 2002, **13**(2): 252-254.
- [20] Livak K J, Schmittgen T D. Analysis of relative gene expression data using real time quantitative PCR and the 2^{-ΔΔCT} method [J]. *Methods*, 2001, **25**(4): 402-408.
- [21] De Gaspar I, Blaquez M J, Fraile B, *et al.* The hatching gland cells of trout embryos; characterisation of N- and O-linked oligosaccharides [J]. *Journal of Anatomy*, 1999, **194**(1): 109-118.
- [22] Derfus A M, Chan W C W, Bhatia S N. Probing the cytotoxicity of semiconductor quantum dots [J]. *Nano Letters*, 2004, **4**(1): 11-18.
- [23] Li K G, Chen J T, Bai S S, *et al.* Intracellular oxidative stress and cadmium ions release induce cytotoxicity of unmodified cadmium sulfide quantum dots [J]. *Toxicology in Vitro*, 2009, **23**(6): 1007-1013.
- [24] Yamagami K. Mechanisms of hatching in fish; secretion of hatching enzyme and enzymatic choriolysis [J]. *American Society of Zoologist*, 1981, **21**(2): 459-471.
- [25] 宋尔群, 魏宏, 宋杨. 量子点细胞毒性效应研究进展 [J]. *环境化学*, 2011, **30**(3): 585-590.
- [26] Winston G W. Oxidants and antioxidants in aquatic animals [J]. *Comparative Biochemistry and Physiology Part C: Comparative Pharmacology*, 1991, **100**(1-2): 173-176.
- [27] 刘慧, 王晓蓉, 王为木, 等. 低浓度锌及其 EDTA 配合物长期暴露对鲫鱼肝脏锌富集及抗氧化系统的影响 [J]. *环境科学*, 2005, **26**(1): 173-176.
- [28] Stebbing A R. Hormesis—the stimulation of growth by low levels of inhibitions [J]. *Science Toxicology Environment*, 1982, **22**(3): 213-234.
- [29] Petrache S N, Stanca L, Serban A I, *et al.* Structural and oxidative changes in the kidney of crucian carp induced by silicon-based quantum dots [J]. *International Journal of*

- Molecular Sciences, 2012, **13**(8): 10193-10211.
- [30] Eroglu K, Atli G, Canli M. Effects of metal (Cd, Cu, Zn) interactions on the profiles of Metallothionein-Like proteins in the Nile Fish *Oreochromis niloticus*[J]. Environmental Contamination and Toxicology, 2005, **75**(2): 390-399.
- [31] 李晓明, 陈楠, 苏媛媛, 等. 镉系量子点细胞毒性的研究进展[J]. 科学通报, 2013, **58**(15): 1393-1402.
- [32] 李培军, 熊先哲, 杨桂芬, 等. 动物生物标志物在土壤污染物生态学研究中的应用[J]. 应用生态学报, 2003, **14**(12): 2347-2350.
- [33] Blechinger S R, Warren J T, Kuwada J Y, *et al.* Developmental toxicology of cadmium in living embryos of a stable transgenic zebrafish line [J]. Environmental Health Perspectives, 2002, **110**(10): 1041-1046.

《环境科学》编辑部关于启用编辑信息管理系统公告

《环境科学》编辑部已经开通本刊网站并启用编辑信息管理系统(网站地址:<http://www.hjcx.ac.cn>). 该系统能实现在线投稿、在线审稿、期刊浏览检索等功能,欢迎广大作者、读者和审稿专家使用. 目前我刊所有来稿都通过网站编辑信息管理系统进行. 作者使用编辑信息管理系统投稿时请先进行注册,注册完毕后以作者身份登录,按照页面上给出的提示投稿即可. 如果您在使用过程中有问题,请及时与我刊编辑部联系.

邮政地址:北京市海淀区双清路18号《环境科学》编辑部

邮 编:100085

电 话:010-62941102,010-62849343

传 真:010-62849343

E-mail:hjcx@rcees.ac.cn

网 址:www.hjcx.ac.cn

CONTENTS

Size Distribution Characteristics of Particulate Mercury on Haze and Non-haze Days	ZHU Qiong-yu, CHENG Jin-ping, WEI Yu-qing, <i>et al.</i> (373)
Impact of Atmospheric Pollutants Transport Pathways on Aerosol Optical Properties at Shangdianzi Background Station	PU Wei-wei, SHI Xue-feng, MA Zhi-qiang, <i>et al.</i> (379)
Chemical Characteristics of 3-year Atmospheric Precipitation in Summer, Taiyuan	GUO Xiao-fang, CUI Yang, WANG Kai-yang, <i>et al.</i> (388)
Pollution Characteristics of Organic and Elemental Carbon in PM _{2.5} in Taiyuan	LIU Shan, PENG Lin, WEN Yan-ping, <i>et al.</i> (396)
Levels and Distribution of Organochlorine Pesticides and Dioxin-Like Polychlorinated Biphenyls in Atmospheric Particulates in Xining and Tianjun, Qinghai Province, China	LI Qiu-xu, HE Chang, MA Zhao-hui, <i>et al.</i> (402)
Particulate Matter Adsorption Capacity of 10 Evergreen Species in Beijing	WANG Bing, ZHANG Wei-kang, NIU Xiang, <i>et al.</i> (408)
Carbon Sources Metabolic Characteristics of Airborne Microbial Communities in Constructed Wetlands	SONG Zhi-wen, WANG Lin, XU Ai-ling, <i>et al.</i> (415)
Spatial Distribution Characteristics of the Physical and Chemical Properties of Water in the Kunes River After the Supply of Snowmelt During Spring	LIU Xiang, GUO Ling-peng, ZHANG Fei-yun, <i>et al.</i> (421)
Composition Characteristics and Source Analysis of Major Ions in Four Small Lake-watersheds on the Tibetan Plateau, China	LI He, LI Jun, LIU Xiao-long, <i>et al.</i> (430)
Seasonal Stratification and Eutrophication Characteristics of a Deep Reservoir, Longtan Reservoir in Subtropical Area of China	ZHANG Lei, LI Qiu-hua, HUANG Guo-jia, <i>et al.</i> (438)
Phosphorus Fractions, Sorption Characteristics and Its Release in the Sediments of Yangtze Estuary Reservoir, China	JIN Xiao-dan, WU Hao, CHEN Zhi-ming, <i>et al.</i> (448)
Spatial-Temporal Distributions of Dissolved Inorganic Carbon and Its Affecting Factors in the Yellow River Estuary	GUO Xing-sen, LÜ Ying-chun, SUN Zhi-gao, <i>et al.</i> (457)
Distributions of Phosphorus Fractions in Suspended Sediments and Surface Sediments of Tiaoxi Mainstreams and Cause Analysis	CHEN Hai-long, YUAN Xu-yin, WANG Huan, <i>et al.</i> (464)
Characteristics of Nitrogen Pollution and the Potential Mineralization in Surface Sediments of Dianchi Lake	MENG Ya-yuan, WANG Sheng-ru, JIAO Li-xin, <i>et al.</i> (471)
Influence of Transient Storage on Solute Transport and the Parameter Sensitivity Analysis in a Suburban Drainage Ditch	LI Ru-zhong, QIAN Jing, DONG Yu-hong, <i>et al.</i> (481)
Sources, Pollution Statue and Potential Ecological Risk of Heavy Metals in Surface Sediments of Aibi Lake, Northwest China	ZHANG Zhao-yong, Jilili Abuduwaili, JIANG Feng-qing (490)
Speciation Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments in Suburban Outfall of Industrial Oasis Region	ZANG Fei, WANG Sheng-li, NAN Zhong-ren, <i>et al.</i> (497)
Assessment of Sources, Spatial Distribution and Ecological Risk of Heavy Metals in Soils in a Typical Industry-based City of Shandong Province, Eastern China	DAI Bin, LÜ Jian-shu, ZHAN Jin-cheng, <i>et al.</i> (507)
Removal of Triclosan with the Method of UV/ClO ₂ and Its Degradation Products	LI Yu-ying, HE Wen-long, LI Qing-song, <i>et al.</i> (516)
Mechanism of Groundwater As(V) Removal with Ferric Flocculation and Direct Filtration	KANG Ying, DUAN Jin-ming, JING Chuan-yong (523)
Preparation of Nano Zero-valent Iron/ <i>Sargassum horneri</i> Based Activated Carbon for Removal of Cr(VI) from Aqueous Solution	ZENG Gan-ming, WU Xiao, ZHENG Lin, <i>et al.</i> (530)
Adsorption of Cr(VI) on Magnetic Graphene from Aqueous Solution	LIU Wei, YANG Qi, LI Bo, <i>et al.</i> (537)
Adsorption of the TiO ₂ @Yeast Composite Microspheres for Adsorbing Fluorescent Whitening Agent-VBL in Fixed Bed	WU Fei, ZHANG Kai-qiang, BAI Bo, <i>et al.</i> (545)
Preparation and Pb ²⁺ Electrosorption Characteristics of MnO ₂ /CFP Composite Electrode	LIU Fang-yuan, HU Cheng-zhi, LI Yong-feng, <i>et al.</i> (552)
Preparation of Weak Light Driven TiO ₂ Multi Composite Photocatalysts via Adsorption Phase Synthesis	WANG Ting, ZHU Yi-chen, SUN Zhi-xuan, <i>et al.</i> (559)
Photoelectrocatalytic Degradation of Bisphenol A in Water by Fe Doped-TiO ₂ Nanotube Arrays Under Simulated Solar Light Irradiation	XIANG Guo-liang, YU Ze-bin, CHEN Ying, <i>et al.</i> (568)
Oxidation of Cationic Red 3R in Water with H ₂ O ₂ Catalyzed by Mineral Loaded with Fe/Co	MA Nan, LIU Hua-bo, XIE Xin-yuan (576)
Characteristics of Acid Red 3R Wastewater Treatment by Ozone Microbubbles	ZHANG Jing, DU Ya-wei, LIU Xiao-jing, <i>et al.</i> (584)
Effects of Carbon Sources, Temperature and Electron Acceptors on Biological Phosphorus Removal	HAN Yun, XU Song, DONG Tao, <i>et al.</i> (590)
Startup, Stable Operation and Process Failure of EBPR System Under the Low Temperature and Low Dissolved Oxygen Condition	MA Juan, LI Lu, YU Xiao-jun, <i>et al.</i> (597)
Effects of Dissolved Oxygen in the Oxidative Parts of A/O Reactor on Degradation of Organic Pollutants and Analysis of Microbial Community for Treating Petrochemical Wastewater	DING Peng-yuan, CHU Li-bing, ZHANG Nan, <i>et al.</i> (604)
Isolation of Filamentous Fungi Capable of Enhancing Sludge Dewaterability and Study of Mechanisms Responsible for the Sludge Dewaterability Enhancement	ZHOU Yu-jun, FU Hao-yi, FAN Xian-feng, <i>et al.</i> (612)
Impacts of Alkaline Thermal Treatment on Characteristics of Sludge from Sewage Treatment Plant	YANG Shi-dong, CHEN Xia, LIU Cao, <i>et al.</i> (619)
Responses of Ecosystem Carbon Budget to Increasing Nitrogen Deposition in Differently Degraded <i>Leymus chinensis</i> Steppes in Inner Mongolia, China	QI Yu-chun, PENG Qin, DONG Yun-she, <i>et al.</i> (625)
Impacts of Elevated Ozone Concentration on N ₂ O Emission from Arid Farmland	WU Yang-zhou, HU Zheng-hua, LI Cen-zi, <i>et al.</i> (636)
Multi-Year Measurement of Soil Respiration Components in a Subtropical Secondary Forest	LIU Yi-fan, CHEN Shu-tao, HU Zheng-hua, <i>et al.</i> (644)
Spatial Variability of Soil Nitrogen and Related Affecting Factors at a County Scale in Hilly Area of Mid-Sichuan Basin	LUO You-lin, LI Qi-quan, WANG Chang-quan, <i>et al.</i> (652)
Effects of Land Use Change on Soil Active Organic Carbon in Deep Soils in Hilly Loess Plateau Region of Northwest China	ZHANG Shuai, XU Ming-xiang, ZHANG Ya-feng, <i>et al.</i> (661)
Carbon Source Metabolic Diversity of Soil Microbial Community Under Different Climate Types in the Area Affected by Wenchuan Earthquake	ZHANG Guang-shuai, LIN Yong-ming, MA Rui-feng, <i>et al.</i> (669)
Optimization of Electrode Configuration in Soil Electrokinetic Remediation	LIU Fang, FU Rong-bing, XU Zhen (678)
Distribution and Health Risk of HCHs and DDTs in a Contaminated Site with Excavation	ZHANG Shi-lei, XUE Nan-dong, YANG Bing, <i>et al.</i> (686)
Transformation and Mobility of Arsenic in the Rhizosphere and Non-Rhizosphere Soils at Different Growth Stages of Rice	YANG Wen-tao, WANG Ying-jie, ZHOU Hang, <i>et al.</i> (694)
Extraction of Plant Root Apoplast Solution; A Case Study with Polycyclic Aromatic Hydrocarbons	ZHU Man-dang, DU Jiang-xue, YUE Le, <i>et al.</i> (700)
Mechanism of Manganese Binding to Leaf Cell Wall of <i>Phytolacca americana</i> L.	XU Xiang-hua, LIU Cui-ying, LI Ping, <i>et al.</i> (706)
Degradation Characteristics of Naphthalene with a <i>Pseudomonas aeruginosa</i> Strain Isolated from Soil Contaminated by Diesel	LIU Wen-chao, WU Bin-bin, LI Xiao-sen, <i>et al.</i> (712)
Toxic Effects of CdSe/ZnS QDs to Zebrafish Embryos	CHEN Mu-fei, HUANG Cheng-zhi, PU De-yong, <i>et al.</i> (719)
Physiological Response of <i>Neocaridina denticulata</i> to the Toxicity of Cu ²⁺ and Chlorpyrifos	LI Dian-bao, ZHANG Wei, WANG Li-qing, <i>et al.</i> (727)
Determination of Anilines in Environmental Water Samples by Simultaneous Derivatization and Ultrasound Assisted Emulsification Microextraction Combined with Gas Chromatography-Flame Ionization Detectors	TIAN Li-xun, DAI Zhi-xi, WANG Guo-dong, <i>et al.</i> (736)
Adsorption of Calcium Ion from Aqueous Solution Using Na ⁺ -Conditioned Clinoptilolite for Hot-Water Softening	ZHANG Shuo, WANG Dong, CHEN Yuan-chao, <i>et al.</i> (744)
Construction and Application of Economy-Pollution-Environment Three-Dimensional Evaluation Model for District	FAN Xin-gang, MI Wen-bao, MA Zhen-ning (751)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 汤鸿霄 陈吉宁 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2015年2月15日 第36卷 第2期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 2 Feb. 15, 2015

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行