

文章编号: 1000-0615(2016)08-1272-17

DOI: 10.11964/jfc.20150709961

· 综述 ·

重金属对鱼类早期发育的生态毒理效应

黄伟¹, 曹亮², 窦硕增^{2*}

(1. 国家海洋局第二海洋研究所, 国家海洋局海洋生态系统与生物地球化学重点实验室, 浙江 杭州 310012;
2. 中国科学院海洋研究所, 中国科学院海洋生态与环境科学重点实验室, 山东 青岛 266071)

摘要: 鱼类早期生活阶段对外界环境极为敏感, 即使低浓度的污染物暴露也可能对其胚胎发育、仔鱼生长存活造成损害, 导致种群数量和质量的降低。研究污染物对鱼类早期生活阶段的毒理效应和机制是揭示污染物对生物种群和水生生态系统潜在风险的有效途径。重金属对鱼类的影响在精、卵发生时即可显现。例如, 抑制卵(精)母细胞成熟和精子活力降低, 使受精率降低; 影响受精卵吸水膨胀过程, 改变胚胎发育速率、引起胚胎畸形、影响胚胎心率、改变孵化时间、降低孵化率; 影响初孵仔鱼体长、造成仔鱼畸形、影响卵黄囊吸收和胚后仔鱼发育生长、摄食行为等。重金属对鱼类早期发育阶段的毒性效应主要取决于金属种类、暴露浓度和受试鱼种及其发育阶段。此外, 外界环境条件等因素也会对重金属的毒性产生显著影响。本研究综合分析国内外关于重金属污染物对鱼类精卵、胚胎、仔鱼等早期发育过程生态毒理效应的研究进展, 并结合相关报道阐述了其毒性机制。

关键词: 仔鱼; 胚胎; 重金属; 毒理

中图分类号: S 917.4; X 503.225

文献标志码: A

重金属作为水体污染物的重要组分, 对生物的毒理效应一直是国内外学者关注的焦点。重金属进入水体后通过沉淀、吸附、络合与螯合及氧化还原作用在水体中迁移转化, 或被生物富集后随食物链传递而逐级放大, 从而影响鱼类生长、存活、繁殖和发育等各种生理过程。金属毒性强弱与鱼类对金属的吸收和蓄积作用密切相关, 此过程会直接导致生物个体不同组织和器官的结构与功能紊乱^[1]。

鱼类早期生活阶段 (early life stages, ELS) 又称为鱼类早期生活史, 是其整个生命过程中对外界环境尤其是重金属等污染物的毒性最为敏感的阶段。研究表明, 低浓度污染物不足以对成鱼造成明显毒害作用时, 可能会引起胚胎和仔稚鱼的毒性反应, 如抑制酶活性、引起卵黄

膜破裂、降低孵化率和存活率、改变孵化时间、引起胚胎仔鱼畸形、游泳行为异常和摄食率降低等^[2-6]。这些毒性作用可能通过影响渔业生物的早期补充过程导致其种群退化和资源衰退^[7]。

另一方面, 利用鱼类胚胎、仔鱼对污染物的毒理学反应进行生物监测已成为评价水体污染效应的重要手段, 它与传统生物监测法相比具有灵敏度高、周期短和操作简单等优点。因此, 研究污染物对鱼类早期生活阶段的毒理效应和机制是揭示污染物对水生生态系统潜在风险的有效途径^[1]。国内外学者陆续建立了以斑马鱼 (*Danio rerio*)、底鳉 (*Fundulus heteroclitus*)、青鳉 (*Oryzias latipes*) 和虹鳟 (*Oncorhynchus mykiss*) 为模式种的胚胎、仔鱼毒理实验技术 (early life stage test, EL-T) 用于水体污染评价, 并积极开展

收稿日期: 2015-07-10 修回日期: 2016-05-26

资助项目: 国家自然科学基金(41306112, 41406167); 国家重点基础研究发展规划项目(2015CB453302); 海洋公益性行业科研专项(201305043, 201405007); 浙江省自然科学基金(LY13D060004)

通信作者: 窦硕增, E-mail: szdou@qdio.ac.cn

用其建立生物早期预警系统的研究^[8]。本实验综合分析国内外关于重金属对鱼类精卵、胚胎和仔鱼毒理效应的研究成果,以期为开展相关研究提供参考。

1 对精、卵发生的影响

水体中重金属会造成鱼类成熟系数降低、精卵发生受阻等问题。例如,蟾胡鲂(*Clarias batrachus*)雌鱼经Hg暴露后,其卵巢发育迟缓、抑制了卵黄发生和卵母细胞退化;雄鱼则出现抑制精子发生的反应^[9]。翠鳢(*Channa punctata*)雌鱼经Hg暴露也引起卵母细胞增殖受抑制,其原因是Hg可扰乱激素分泌,低剂量Hg即可通过影响鱼类下丘脑—腺垂体轴抑制其性腺发育^[10]。

另外,Zn对虹鳉(*Poecilia reticulata*)卵巢成熟早期具有促进作用,但对晚期表现为抑制作用^[11];食物相Zn暴露抑制了鲤(*Cyprinus carpio*)卵母细胞成熟。而Pb暴露会抑制虹鳉精原细胞向初级精母细胞的过渡,原因可能是Pb导致促性腺激素分泌紊乱^[12]。

因此,重金属既可通过抑制鱼类性腺发育也可通过干扰其下丘脑和垂体腺中控制生殖周期的激素分泌来影响鱼类的精、卵发生过程。

2 对受精和胚胎发育的影响

2.1 受精卵吸水膨胀

鱼类卵间隙含卵黄膜分泌的胶体分散蛋白,此蛋白在鱼卵受精后吸收水分,导致受精卵膨胀^[13]。受精卵膨胀程度会直接影响胚胎发育,这是由于受精卵适度膨胀后能保证发育中的胚胎每5~10 s改变一次体位。若受精卵未充分膨胀则造成可供胚胎活动的空间狭小,引起仔鱼畸形。

研究表明,重金属暴露会对受精卵吸水膨胀过程产生影响:金属进入卵膜改变膜结构并影响膜透性,此过程可能有利于金属进入细胞但同时阻碍其他离子正常交换。Cu暴露可改变美洲红点鲑(*Salvelinus fontinalis*)细胞膜选择透性,扰乱卵周液与外环境的阳离子交换过程^[14]。此外,重金属还可以改变卵膜表面物理性质,从而影响受精卵吸水过程。例如,胖头鲮(*Pimephales promelas*)受精卵经Zn暴露后,其表面黏性增加、易破裂^[15]。金属在受精卵中的蓄积程度在不

同部位也有差异,绒毛膜是蓄积的主要部位。例如,安大略鲑(*Salmo salar salar*)的受精卵在10 mg/L Cd溶液中暴露22 h后,98%的Cd被阻挡于绒毛膜外,1.8%蓄积于胚胎,仅0.2%进入卵黄囊;Cd与绒毛膜结合会引起绒毛膜结构发生一系列理化变化进而影响孵化过程^[16]。在经Zn暴露的大西洋鲱(*Clupea harengus*)受精卵中,30%~50%的金属蓄积于绒毛膜,其余部分主要在卵周液中,极少量则进入胚胎^[17]。由此可见,胚胎发育阶段绝大多数重金属通常会蓄积于卵膜,也有部分蓄积于卵周液中,仅少量进入并蓄积于胚胎。

2.2 胚胎发育

重金属一般会抑制鱼类胚胎发育速率,导致整个胚胎发育周期延长^[18]。发育延迟可发生于胚胎各发育阶段,例如,Pb暴露能通过影响有丝分裂而延长底鳞的胚胎早期发育过程^[19]。金属暴露会抑制鲤的原肠胚期和器官发生期,原因是金属抑制了包括孵化酶—绒毛膜酶在内的特定蛋白合成^[20]。鲤胚胎经0.2 mg/L Cu或2 mg/L Pb溶液暴露后,最早在眼色素形成期出现发育迟缓,而孵化阶段延迟效应最明显^[1];暴露于0.001~0.05 mg/L Cd溶液也发生类似现象,不过初次抑制发育时间出现稍晚,发生于心跳期和体色素形成期^[21]。

重金属对发育阶段受精卵的致畸作用最早出现在卵裂期。斑马鱼卵经Zn暴露后,其胚盘有异常细胞突起,造成卵黄顶部出现锯齿状胚盘^[22]。经Pb处理的草鱼(*Ctenopharyngodon idella*)卵则出现分裂球大小、形状异常,部分细胞脱落以及囊胚畸形等^[11]。

重金属对器官发生期胚胎致畸作用的报道较多。真鲷(*Pagrus major*)胚胎经Cu、Cd暴露后出现围心腔水肿、尾部畸形、躯体痉挛、油球分裂、体色异常等畸形^[23-24](图版I)。底鳞胚胎经0.1 mg/L Hg暴露出现双眼部分融合、独眼畸形等多种眼囊畸形以及颅面、心血管和脊柱畸形,而一些畸形的产生可能与有丝分裂次数减少及染色体异常有关^[25]。Hg暴露导致的底鳞胚胎畸形可归纳为3种类型:①心血管畸形:心脏发育不全,包括心室缺陷、心脏异常,其中严重畸形的胚胎心脏跳动极微弱以致无法泵血,极端情况下心脏完全缺失(仅在胚胎心脏部位出现血块,未形成心肌组织);②脊柱畸形:是胚胎最

常见的畸形类型,包括L-形、C-形、S-形等;
③颅面畸形:多种类型的眼部融合包括独眼畸形、无头畸形——主要由颅骨和脑发育不全导致^[26]。此外, Hg暴露还导致银大麻哈鱼 (*Oncorhynchus kisutch*) 胚胎出现脊髓细胞增大和空泡化, 脊柱肌肉水肿等畸形^[6]。

2.3 胚胎心率

金属暴露会导致胚胎心率产生变化。例如, 大眼梭鲈 (*Stizostedion vitreum*) 胚胎心率随甲基汞 (MeHg) 暴露浓度升高而显著降低^[4]。Cr溶液暴露导致鲤胚胎心率减少, 而Pb暴露则使鲤胚胎心率增加^[11, 27]。Cu暴露也抑制斑马鱼和鲤的胚胎心率^[11, 28]。

目前重金属对鱼类胚胎心率影响的机制尚未明确, 但研究表明, 金属暴露造成的胚胎心脏发育不全 (如心脏房室分化异常、心室残缺、心血管发育不良等)、干扰神经系统或抑制乙酰胆碱酯酶等因素都会影响胚胎心率^[26, 29]。有研究认为, Ca^{2+} 在维持心脏正常节律和兴奋—收缩耦联过程中发挥关键作用, Ca^{2+} 浓度平衡失调会导致严重的心率失常^[30]。而包括Cu、Cd在内的多种金属均被证明为 Ca^{2+} 拮抗剂, 可干扰机体正常的 Ca^{2+} 吸收和平衡。与以上结果不同, 有研究发现, Hg、Cd、Cu、Zn暴露对牙鲆 (*Paralichthys olivaceus*) 和真鲷胚胎心率均未产生显著影响^[23-24, 31-32]。由此可见, 重金属对鱼类胚胎心率的影响因受试鱼种不同而异, 胚胎心率或许并非指示海水金属污染的有效指标。

2.4 孵化时间

胚胎孵化前位于胚胎头部的“孵化腺”(胚胎表层的单细胞腺体)开始发育, 孵化腺细胞分泌的绒毛膜酶可溶解卵膜, 胚胎在卵内扭动冲破卵膜束缚即可破膜而出^[33-34]。许多证据表明, 重金属可影响孵化腺的分泌及酶活性。例如Norrgr€n等^[35]研究了低pH高Al环境中孵化的安大略鲑受精卵, 发现未孵化或未完全孵化的胚胎卵膜内表面非常完整, 而孵化个体卵膜内侧结构松散, 这可能是由污染物引起绒毛膜酶活性降低所致。经Cu或Zn暴露处理的鲤胚胎比对照组孵化腺表面积小, 并产生细胞内小颗粒, 而这些变化均导致绒毛膜酶分泌减少^[11]。

重金属引起孵化腺功能变化一般会造成孵

化启动时间推后, 不过就整个孵化过程而言则可能延长或缩短。例如, 草鱼胚胎经4 mg/L Pb暴露后, 其孵化启动时间比对照组推迟1.5 h, 但整个孵化过程却缩短^[11]。暴露于0.1 mg/L Cd的虹鳟胚胎比对照组提前50~60 h孵化^[36]; V暴露导致虹鳟胚胎在眼点形成期即提前蜕膜^[37]。随孵化启动, 卵膜破裂使大量金属涌入卵内, 可能对尚未发育完全的仔鱼产生影响导致其提前孵出。此外, 也有观点认为重金属造成受精卵缺氧、扰乱代谢过程、破坏细胞膜结构等对卵膜产生影响是导致提前孵化的原因^[14]。

另一方面, 多种重金属暴露会延长鱼类胚胎的孵化时间。Cd暴露会延长斑马鱼、牙鲆、真鲷、鲤和河虹银汉鱼 (*Melanotaenia fluviatilis*) 胚胎的孵化时间^[21, 24, 34, 38-39]。Cu暴露延长了鲤、真鲷和斑马鱼胚胎的孵化时间^[3, 21, 23]。Hg暴露也延长了牙鲆和真鲷胚胎的孵化时间^[31, 40]。同样, Zn、Pb和Ni暴露会分别延长真鲷、鲤和斑马鱼胚胎的孵化时间^[3, 21, 32]。

金属引起孵化酶失活、扰乱受精卵渗透压平衡, 而渗透压失衡又进一步影响孵化酶活性并造成胚胎肌肉乏力而无法破膜, 可能是延迟孵化的主要原因^[41]。需强调的是, 环境因素对胚胎孵化实验结果有一定影响, 例如, 20 °C时Cu或Pb对鲤胚胎孵化有延迟作用, 26 °C时孵化过程却缩短^[11]。重金属可能干扰多种鱼类胚胎发育过程、影响各发育阶段启动时间和孵化总时间。通常情况下, 孵化前各发育阶段都滞后 (即孵化启动时间延后), 但孵化过程本身则可能提前或延迟, 主要取决于金属种类、浓度及外界环境条件。

2.5 孵化率

金属经卵膜渗入卵内影响鱼类正常胚胎发育, 造成胚胎死亡, 因而使孵化率降低^[38]。即便低浓度的重金属暴露也可能降低胚胎的孵化率, 其程度取决于金属种类、浓度、受试鱼种以及外界环境因素, 而高浓度金属会彻底阻止胚胎孵化^[21, 42]。研究表明, 牙鲆胚胎暴露于20 μg/L Hg和1 mg/L Zn溶液后其孵化率显著降低^[41]。青鲮和底鲮胚胎分别暴露于15和10 μg/L Hg溶液后孵化率显著降低, 而20和32 μg/L Hg暴露则完全抑制其孵化^[3, 43-44]。安大略鲑胚胎在0.27和0.87 mg/L Cd暴露条件下, 其孵化率分别为60%和完全被抑

制^[45]。0.238 mg/L Ni暴露下,虹鳟孵化率显著降低,暴露浓度达1.68 mg/L时孵化被完全抑制^[42]。在0.48 mg/L Pb暴露下,斑马鱼胚胎的孵化率显著降低,Pb暴露浓度达0.98 mg/L时所有胚胎死亡^[3]。而1.76 mg/L Cu和0.98 mg/L Pb溶液暴露则分别完全抑制了虹鳟和斑马鱼胚胎的孵化^[3, 37]。

鱼类胚胎孵化对不同金属的敏感性存在差异。研究发现,重金属对鲤胚胎孵化的毒性为Cd > Pb > Cu > Zn > Co > Ni > Fe^[20],对鲢(*Müchthys miuy*)胚胎孵化的毒性为Cu > Cd > Zn > Pb > Cr^[46],对纹缟鰕虎鱼(*Tridentiger trionocephalus*)胚胎孵化的毒性为Cu > Zn > Pb^[47],对牙鲆和真鲷胚胎孵化的毒性为Hg > Cu > Cd > Zn^[23-24, 31-32](表1)。一般而言,Hg、Cu、Cd对鱼类胚胎孵化的影响较其他金属更大。

2.6 胚胎各发育阶段对重金属毒性的敏感性差异

胚胎发育不同阶段对重金属暴露的敏感性有一定差异,一般认为胚胎在初受精到原肠期阶段卵膜透性较高,故更易受金属影响。研究发现,鲫(*Carassius auratus*)的胚盘期对Hg、Cd暴露比眼点形成期更敏感;虹鳟初受精期胚胎较眼点形成期胚胎对Ni暴露更敏感^[42];Mn对虹鳟胚胎的毒性效应在眼点形成期前和孵化期最强烈^[48]。但也有研究表明,有些鱼类胚胎发育后期比前期对污染暴露更敏感。例如,虹鳟胚胎暴露于Cu、Zn、Cr、Ni、Fe混合溶液时,眼点形成期胚胎死亡率高于初受精阶段^[49];安大略鲑胚胎经Cd暴露后,其死亡高峰出现在卵黄血液循环开始阶段和仔鱼初孵阶段^[45]。研究发现,金属暴露的牙鲆初期胚胎(0~24h,囊胚期至原肠期)的死亡率较低,死亡高峰出现于胚胎发育后期至仔鱼孵出阶段^[24, 31]。发育前期由于卵膜保护,渗透到卵内的金属量较少;而发育后期随卵膜逐渐崩解,进入卵内的金属量增多,导致胚胎停止发育或死亡,尤其是当初孵仔鱼脱离受卵膜保护的内部环境直接与金属溶液接触,这可能是牙鲆在这一阶段死亡率较高的原因^[31]。但也有学者认为,鱼类胚胎发育任何阶段皆可能对污染暴露敏感性骤然增加或降低。例如,经Cd暴露的安大略鲑胚胎在原肠期、血液循环期和出膜期均突然出现死亡高峰^[45]。

3 仔鱼生长和发育

3.1 初孵仔鱼大小

多数研究发现,胚胎经重金属暴露会导致初孵仔鱼体型短小。例如,在含Cd水体中孵化的大西洋鲱和虹鳟仔鱼体型比正常孵化个体短小,但卵黄囊大于对照组仔鱼^[36, 50]。同样现象发生在经Cu、Pb暴露的鲤^[1]、Zn暴露的大西洋鲱^[17]、Ag暴露的美洲拟鲈(*Pseudopleuronectes americanus*)^[51]、Ni以及多种金属混合物暴露的虹鳟^[42, 49]初孵仔鱼中。造成此现象的原因可能与金属暴露引起仔鱼提前蜕膜孵化有关^[36]。但也有研究发现,有些鱼类如牙鲆和真鲷受精卵经Hg、Zn等重金属暴露后,其初孵仔鱼体长并未受到影响^[32, 40]。

3.2 仔鱼畸形

胚胎期经重金属暴露会导致仔鱼出现颅面、心脏、卵黄囊、脊柱、尾等器官的多种畸形。严重畸形的仔鱼不能正常游泳和摄食,一般在卵黄囊吸收完全或略早时即死亡。例如,Hg暴露造成青鳞、斑马鱼、胖头鲷、牙鲆和真鲷仔鱼产生眼部、颌部和脊柱畸形、尾和鳍膜弯曲、围心腔水肿、心脏畸形、内脏出血和血管萎缩等^[6, 32, 40, 43, 52](图版II)。Zn暴露造成大西洋鲱、河虹银汉鱼、斑马鱼、牙鲆、真鲷和真鲷(*Phoxinus phoxinus*)、白亚口鱼(*Catostomus commersoni*)等鱼类仔鱼的眼部、颅面、颌、鳃弓和卵黄囊畸形、脊柱弯曲、色素异常、围心腔水肿等^[17, 22, 38, 53-55]。Cu、Cd暴露使斑马鱼、白亚口鱼、河虹银汉鱼、鲤、牙鲆、真鲷和莫桑比克罗非鱼(*Oreochromis mossambicus*)卵黄囊畸形、心源水肿、脊椎、颅面和眼部畸形、尾部缺失或未分离、鳍条损伤、脊柱弯曲、色素异常和神经系统异常等^[1, 23, 29, 38, 54, 56-58]。Pb暴露导致斑马鱼仔鱼皮肤瘤、卵黄囊吸收缓慢、尾部卷曲以及鲤侧凸和完全卷曲等多种脊柱畸形^[27, 56]。重金属造成的仔鱼畸形大体上可归纳为以下类型:①颅面畸形:如双头,颌部、鳃弓畸形等;②眼部畸形:如独眼畸形、双眼部分融合等;③脊柱畸形:可分为脊柱前弯、脊柱侧凸和驼背,具体表现是脊柱弯曲成L形、C形、S形等;④尾部畸形:包括尾部卷曲、缺失等;⑤心血管畸形:包括围心腔水肿、心脏出血以及血管萎缩等;⑥卵黄囊畸形:包括卵黄囊水

肿、吸收缓慢等；⑦其他畸形：如连体、鳍膜腐烂、鳍条损伤、色素异常等。

仔鱼畸形中最常见的类型是脊柱畸形，这种畸形仔鱼一般只能在水中原地旋转，丧失自主游动和捕食能力，当卵黄囊耗尽后最终死亡。脊柱畸形主要与骨骼发育异常有关，由于金属暴露不仅导致生物体内钙、磷等离子损耗，还造成骨骼系统正常发育必需的肌球蛋白和肌节大幅减少，导致各种骨骼畸形的产生^[59]。金属对初孵仔鱼的致畸效应取决于暴露时间，不过胚胎所处发育阶段对作用结果也有一定影响。例如，Słomińska等^[60]比较了不同发育阶段的鲤胚胎暴露于Cu、Pb后孵化仔鱼的畸形情况，发现金属暴露对任何阶段的胚胎都有强烈的致畸作用，但受精至原肠期阶段或孵化阶段致畸效应略低。

3.3 卵黄囊吸收率

重金属导致的任何能量生产或消费过程的变化最终都反映于仔鱼生长上，因此，仔鱼的生长指标是衡量毒性作用的有效手段^[61]。初孵(卵黄囊期)仔鱼依靠来自卵黄囊的内源性营养，其生长取决于卵黄囊吸收情况，此时卵黄囊大小可用来间接表示卵黄囊吸收率。重金属暴露引发的解毒和代谢活动已被证实会干扰卵黄囊吸收过程，例如，60 μg/L Hg、80 μg/L Cu、1.2 mg/L Cd暴露6 d均抑制了牙鲈仔鱼的卵黄囊吸收^[40, 59]；莫桑比克罗非鱼仔鱼经0.2 mg/L Cu暴露4 d后，其体长较正常孵化仔鱼短，卵黄囊却大于正常个体^[62]；安大略鲑仔鱼经0.2 μg/L Cd暴露后，其卵黄囊吸收和仔鱼生长受到抑制^[63]。一般认为，由于Ca在卵黄囊蛋白动员和运输过程中有重要作用，Cd等重金属是通过影响仔鱼对Ca的吸收而影响卵黄囊的吸收过程。

3.4 仔鱼发育和生长

金属暴露会影响仔鱼胚后发育速率。研究发现，Cu、Cd、Pb暴露会抑制鲤胚后仔鱼发育，延长仔鱼从开口摄食起的某些特定发育过程^[1]。Ni暴露可延迟虹鳟初孵仔鱼的上浮时间，50%的正常孵化仔鱼在孵化后14 d即上浮，而经0.7 mg/L Ni暴露的仔鱼的上浮时间滞后2 d^[42]。经0.2 mg/L Cu溶液暴露的鲤仔鱼各发育阶段的起始时间(从仔鱼进入完全外源性摄食期)都被延长，

最终导致发育迟滞，即经Cu暴露的个体需40 d发育至鱼苗期，而未暴露个体仅需32 d^[11]。

仔鱼生长率随周围环境改变而变化，金属暴露通常会抑制仔鱼的生长率，且与浓度密切相关。在常见的重金属污染物中，Hg、Cd、Cu对仔鱼生长抑制作用更为明显，低浓度暴露即可影响仔鱼生长。例如，牙鲈仔鱼经10 μg/L Hg暴露80 d，其体长和体质量均显著低于未暴露个体^[64]。安大略鲑仔鱼暴露于0.47 μg/L Cd溶液后其生长率显著降低，且与Cd浓度和暴露时间显著相关^[45]。此外，仔鱼体质量增长率对环境因素变化极其敏感，体质量较之体长对金属的毒性反应更灵敏。例如，点鳢(*Ophiocephalus punctatus*)仔鱼经Cd暴露后其生长率若以体长计减少11%，以体质量计则减少16%^[65]；虹鳟暴露于0.025~0.2 mg/L Cu溶液后其体长并未受影响，体质量的增量却明显减少^[1]。

一般认为，仔鱼生长率降低主要与金属暴露影响其摄食相关。金属暴露会引起仔鱼摄食活动和生长率同时降低，因此，生长率降低与金属会造成仔鱼食欲不振有关^[66]。此外，金属暴露引起的各种发育畸形涉及心脏、眼、口、脊柱、尾、鳍等器官，这些畸形会对仔鱼循环、消化、运动和神经等系统产生不利影响，进而扰乱了仔鱼索饵行为，导致其摄食活动减少并最终抑制仔鱼生长^[41]。仔鱼生长还可能受金属暴露引发的水电解质平衡失调等代谢紊乱的不利影响。离子平衡为生物机体维持正常代谢功能所必需，离子平衡失调会导致生长率降低。此外，污染胁迫引发的解毒和氧化应激等过程需消耗大量能量，这也是导致仔鱼生长受抑制的原因之一^[67]。

3.5 仔鱼各发育阶段相对敏感性

鱼类早期生活阶段的一个显著生理发育现象是高死亡率，即便在适宜环境条件下，处于“关键阶段”(critical period)即从内源性(卵黄囊)营养至外源性营养(初次摄食的建立)阶段的仔鱼死亡率通常也较高。在此发育阶段，包括金属暴露在内的多种外界环境因子变化均可能导致仔鱼形态器官结构变异和功能紊乱并对其运动和摄食行为产生持久影响。

仔鱼在不同发育阶段对金属毒性的敏感性亦有差异。例如，白亚口鱼早期发育过程关键

时期对Cu、Zn毒性的敏感性由高至低依次为初次游泳、鳃循环出现、胆囊发育完全、口和胸鳍活动、开鳃、开口、卵黄囊完全吸收^[54]。但多数研究认为, 鱼类对金属的敏感性随日龄增加而逐渐降低。彩塘鳢 (*Mogurnda mogurnda*) 和丑虹银汉鱼 (*M. splendida inornata*) 仔鱼对U毒性的敏感性随着其发育而逐渐降低, 但在鳃充气、消化道贯通、鳃发育以及开始外源性摄食等特定发育时期, 其敏感性可能突然增加^[68]。条纹狼鲈 (*Morone saxatilis*) 7日龄仔鱼较1日龄仔鱼(卵黄囊期)对Cd暴露更敏感, 即卵黄囊期仔鱼比卵黄囊吸收后的仔鱼对Cd耐受性更强。许多鱼类急性毒理实验研究表明, 仔鱼在卵黄囊被吸收、初次开口摄食阶段对金属敏感性增加^[69]。由于开口摄食期是仔鱼发育的关键阶段, 任何形态结构和功能损伤都可能影响仔鱼的摄食能力和行为, 仔鱼在此阶段的非正常死亡很可能与金属暴露导致仔鱼的摄食失败密切相关。

但也有研究发现, 初孵仔鱼对金属暴露的耐受性更强。例如, 初孵化真鲷仔鱼比后期仔鱼对Cd暴露更具耐受性, 这可能与初孵仔鱼尚未开口以及鳃发育程度较低有关。当鳃完全发育后, 仔鱼的滤水量相应增加, 金属可能直接对鳃上皮细胞造成伤害, 导致仔鱼更容易受损^[70]。

4 结语

水体中重金属会对鱼类精卵、胚胎、仔鱼等各早期阶段的发育、存活和生长等生命过程产生毒性效应, 从而降低子代的数量和质量。金属蓄积于亲鱼性腺后可直接影响配子的产量和活力即其繁殖力和质量, 也可能在胚胎或仔鱼发育阶段产生影响。金属暴露会改变胚胎发育速率、孵化时间、心率, 降低孵化率, 导致畸形率增加等, 还影响初孵仔鱼大小、卵黄囊吸收率、摄食行为、生长率、畸形率等指标, 其毒性作用受金属种类、浓度、暴露时间、受试鱼种及其发育阶段以及环境条件等因素控制。

参考文献:

- [1] Jezierska B, Ługowska K, Witeska M. The effects of heavy metals on embryonic development of fish (a review)[J]. *Fish Physiology and Biochemistry*, 2009, 35(4): 625-640.
- [2] Weis J S, Khan A A. Effects of mercury on the feeding behavior of the mummichog, *Fundulus heteroclitus* from a polluted habitat[J]. *Marine Environmental Research*, 1990, 30(4): 243-249.
- [3] Dave G, Xiu R Q. Toxicity of mercury, copper, nickel, lead, and cobalt to embryos and larvae of zebrafish, *Brachydanio rerio*[J]. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 1991, 21(1): 126-134.
- [4] Latif M A, Bodaly R A, Johnston T A, et al. Effects of environmental and maternally derived methylmercury on the embryonic and larval stages of walleye (*Stizostedion vitreum*)[J]. *Environmental Pollution*, 2001, 111(1): 139-148.
- [5] Zhou T, Scali R, Weis J S. Effects of methylmercury on ontogeny of prey capture ability and growth in three populations of larval *Fundulus heteroclitus*[J]. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 2001, 41(1): 47-54.
- [6] Devlin E W. Acute toxicity, uptake and histopathology of aqueous methyl mercury to fathead minnow embryos[J]. *Ecotoxicology*, 2006, 15(1): 97-110.
- [7] Chen C Y, Dionne M, Mayes B M, et al. Mercury bioavailability and bioaccumulation in estuarine food webs in the Gulf of Maine[J]. *Environmental Science and Technology*, 2009, 43(6): 1804-1810.
- [8] Zha J M, Wang Z J. Acute and early life stage toxicity of industrial effluent on Japanese medaka (*Oryzias latipes*)[J]. *Science of the Total Environment*, 2006, 357(1-3): 112-119.
- [9] Kirubakaran R, Joy K P. Toxic effects of mercuric chloride, methylmercuric chloride, and emisan 6 (an organic mercurial fungicide) on ovarian recrudescence in the catfish *Clarias batrachus* (L.)[J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 1988, 41(4-6): 902-909.
- [10] Ram R N, Sathyanesan A G. Effect of mercuric chloride on the reproductive cycle of the teleostean fish *Channa punctatus*[J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 1983, 41(1): 902-909.
- [11] Jezierska B, Witeska M. Metal toxicity to fish[M]. Siedlce: University of Podlasie, 2001.
- [12] Ruby S M, Jaroslowski P, Hull R. Lead and cyanide toxicity in sexually maturing rainbow trout, *Oncorhynchus mykiss* during spermatogenesis[J]. *Aquatic Toxicology*, 1993, 26: 225-238.

- [13] Peterson R H, Martin-robichaud D J. Water uptake by atlantic salmon ova as affected by low pH[J]. Transactions of the American Fisheries Society, 1982, 111(6): 772-774.
- [14] Stouthart X J H X, Haans J L M, Lock R A C, *et al.* Effects of water pH on copper toxicity to early life stages of the common carp (*Cyprinus carpio*)[J]. Environmental Toxicology and Chemistry, 1996, 15(3): 376-383.
- [15] Benoit D A, Holcombe G W. Toxic effects of zinc on fathead minnows, *Pimephales promelas*, in soft water[J]. Journal of Fish Biology, 1978, 13(6): 701-708.
- [16] Beattie J H, Pascoe D. Cadmium uptake by rainbow trout, *Salmo gairdneri* eggs and alevins[J]. Journal of Fish Biology, 1978, 13(5): 631-637.
- [17] Somasundaram B, King P E, Shackley S E. Some morphological effects of zinc upon the yolk-sac larvae of *Clupea harengus* L[J]. Journal of Fish Biology, 1984, 25(3): 333-343.
- [18] 吴玉霖, 赵鸿儒, 侯兰英. 重金属对牙鲆胚胎和仔鱼的影响[J]. 海洋与湖沼, 1990, 21(4): 386-392.
Wu Y L, Zhao H R, Hou L Y. Effects of heavy metals on embryos and larvae of flat fish *Paralichthys olivaceus*[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 1990, 21(4): 386-392(in Chinese).
- [19] Perry D M, Weis J S, Weis P. Cytogenetic effects of methylmercury in embryos of the killifish, *Fundulus heteroclitus*[J]. Archives of Environmental Contamination and Toxicology, 1988, 17(5): 569-574.
- [20] Kapur K, Yadav N A. The effects of certain heavy metal salts on the development of eggs in common carp, *Cyprinus carpio* var. *communis*[J]. Acta Hydrochimica et hydrobiologica, 1982, 10(5): 517-522.
- [21] Witeska M, Jezierska B, Chaber J. The influence of cadmium on common carp embryos and larvae[J]. Aquaculture, 1995, 129(1-4): 129-132.
- [22] Speranza A W, Seeley R J, Seeley V A, *et al.* The effect of sublethal concentrations of zinc on reproduction in the zebrafish, *Brachydanio rerio* Hamilton-Buchanan[J]. Environmental Pollution, 1977, 12(3): 217-222.
- [23] Cao L, Huang W, Shan X J, *et al.* Cadmium toxicity to embryonic-larval development and survival in red sea bream *Pagrus major*[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2009, 72(7): 1966-1974.
- [24] Cao L, Huang W, Liu J H, *et al.* Toxicity of short-term copper exposure to early life stages of red sea bream *Pagrus major*[J]. Environmental Toxicology and Chemistry, 2010, 29(9): 2044-2052.
- [25] Weis J S, Weis P. Effects of heavy metals on development of the killifish, *Fundulus heteroclitus*[J]. Journal of Fish Biology, 1977, 11(1): 49-54.
- [26] Weis J S, Weis P, Heber M, *et al.* Methylmercury tolerance of killifish (*Fundulus heteroclitus*) embryos from a polluted vs non-polluted environment[J]. Marine Biology, 1981, 65(3): 283-287.
- [27] Stouthart X J H X, Spanings F A T, Lock R A C, *et al.* Effects of water pH on chromium toxicity to early life stages of the common carp (*Cyprinus carpio*)[J]. Aquatic Toxicology, 1995, 32(1): 31-42.
- [28] Johnson A, Carew E, Sloman K A. The effects of copper on the morphological and functional development of zebrafish embryos[J]. Aquatic Toxicology, 2007, 84(4): 431-438.
- [29] Hallare A V, Schirling M, Luckenbach T, *et al.* Combined effects of temperature and cadmium on developmental parameters and biomarker responses in zebrafish (*Danio rerio*) embryos[J]. Journal of Thermal Biology, 2005, 30(1): 7-17.
- [30] Morad M, Goldman Y E, Trentham D R. Rapid photochemical inactivation of Ca^{2+} -antagonists shows that Ca^{2+} entry directly activates contraction in frog heart[J]. Nature, 1983, 304(5927): 635-638.
- [31] Huang W, Cao L, Shan X J, *et al.* Toxicity testing of waterborne mercury with red sea bream (*Pagrus major*) embryos and larvae[J]. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 2011, 86(4): 398-405.
- [32] Huang W, Cao L, Shan X J, *et al.* Toxic effects of zinc on the development, growth and survival of red sea bream *Pagrus major* embryos and larvae[J]. Archives of Environmental Contamination and Toxicology, 2010, 58(1): 140-150.
- [33] 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.
- [34] Fraysse B, Mons R, Garric J. Development of a zebrafish 4-day embryo-larval bioassay to assess toxicity of chemicals[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2006, 63(2): 253-267.

- [35] Norrgren L, Degerman E. Effects of different water qualities on the early development of Atlantic salmon and brown trout exposed *in situ*[J]. *Ambio*, 1993, 22(4): 213-218.
- [36] Woodworth J, Pascoe D. Cadmium toxicity to rainbow trout, *Salmo gairdneri* Richardson: a study of eggs and alevins[J]. *Journal of Fish Biology*, 1982, 21(1): 47-57.
- [37] Giles M A, Klaverkamp J F. The acute toxicity of vanadium and copper to eyed eggs of rainbow trout (*Salmo gairdneri*)[J]. *Water Research*, 1982, 16(6): 885-889.
- [38] Williams N D, Holdway D A. The Effects of pulse-exposed cadmium and zinc on embryo hatchability, larval development, and survival of Australian crimson spotted rainbow fish (*Melanotaenia fluviatilis*)[J]. *Environmental Toxicology*, 2000, 15(3): 165-173.
- [39] Cao L, Huang W, Liu J H, *et al.* Accumulation and oxidative stress biomarkers in Japanese flounder larvae and juveniles under chronic cadmium exposure[J]. *Comparative Biochemistry and Physiology-Part C: Toxicology and Pharmacology*, 2010, 151(3): 386-392.
- [40] Huang W, Cao L, Liu J H, *et al.* Short-term mercury exposure affecting the development and antioxidant biomarkers of Japanese flounder embryos and larvae[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2010, 73(8): 1875-1883.
- [41] 黄伟. 汞、铅、锌对褐牙鲈(*Paralichthys olivaceus*)早期发育过程毒理作用的研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2010.
- Huang W. Toxic effects of mercury, lead and zinc on early life stages of flounder (*Paralichthys olivaceus*)[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2010(in Chinese).
- [42] Nebeker A V, Savonen C, Stevens D G. Sensitivity of rainbow trout early life stages to nickel chloride[J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 1985, 4(2): 233-239.
- [43] Heisinger J F, Green W. Mercuric chloride uptake by eggs of the Ricefish and resulting teratogenic effects[J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 1975, 14(6): 665-673.
- [44] Sharp J R, Neff J M. Effects of the duration of exposure to mercuric-chloride on the embryogenesis of the estuarine teleost, *Fundulus heteroclitus*[J]. *Marine Environmental Research*, 1980, 3(3): 195-213.
- [45] Rombough P J, Garside E T. Cadmium toxicity and accumulation in eggs and alevins of Atlantic salmon *Salmo salar*[J]. *Canadian Journal of Zoology*, 1982, 60: 2006-2014.
- [46] 柳敏海, 陈波, 罗海忠, 等. 五种重金属对早繁鲈鱼胚胎和仔鱼的毒性效应[J]. *海洋渔业*, 2007, 29(1): 57-62.
- Liu M H, Chen B, Luo H Z, *et al.* Toxic effects of five heavy metals on the embryos and larvae of *Miichthys miiuy* Basilewsky during early developing stages[J]. *Marine Fisheries*, 2007, 29(1): 57-62(in Chinese).
- [47] 庄平, 赵优, 章龙珍, 等. 三种重金属对长江口纹缟虾虎鱼早期发育的毒性作用[J]. *长江流域资源与环境*, 2009, 18(8): 719-726.
- Zhuang P, Zhao Y, Zhang L Z, *et al.* Toxicology of three heavy metal ions to early life development of *Tridentiger trigonocephalus*[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2009, 18(8): 719-726(in Chinese).
- [48] Lewis M. Effects of low concentrations of manganous sulfate on eggs and fry of rainbow trout[J]. *Progressive Fish Culturist*, 1976, 38(2): 63-65.
- [49] Kazlauskienė N, Stasiūnaitė P. The lethal and sublethal effect of heavy metal mixture on rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) in its early stages of development[J]. *Acta Zoologica Lituonica*, 1999, 9(2): 47-54.
- [50] von Westernhagen H, Rosenthal H, Sperling K R. Combined effects of cadmium and salinity on development and survival of herring eggs[J]. *Helgoländer Wissenschaftliche Meeresuntersuchungen*, 1974, 26(3): 416-433.
- [51] Klein-Macphee G, Cardin J A, Berry W J. Effects of silver on eggs and larvae of the winter flounder[J]. *Transactions of the American Fisheries Society*, 1984, 113(2): 247-251.
- [52] Samson J C, Shenker J. The teratogenic effects of methylmercury on early development of the zebrafish, *Danio rerio*[J]. *Aquatic Toxicology*, 2000, 48(2-3): 343-354.
- [53] Bengtsson B E. Vertebral damage to minnows *Phoxinus phoxinus* exposed to zinc[J]. *Oikos*, 1974, 25(2): 134-139.
- [54] Munkittrick K R, Dixon D G. Effects of natural exposure to copper and zinc on egg size and larval copper tolerance in white sucker (*Catostomus commersoni*)[J].

- Ecotoxicology and Environmental Safety, 1989, 18(1): 15-26.
- [55] Ojaveer E, Annist J, Jankovski H, *et al.* On effect of copper, cadmium and zinc on the embryonic development of Baltic spring spawning herring[J]. Finnish Marine Research, 1980, 247: 135-140.
- [56] Ozoh P T E. Malformations and inhibitory tendencies induced to *Brachydanio rerio* (Hamilton-Buchanan) eggs and larvae due to exposures in low concentrations of lead copper ions[J]. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 1979, 21(4-5): 668-675.
- [57] Cheng S H, Wai A W K, So C H, *et al.* Cellular and molecular basis of cadmium-induced deformities in zebrafish embryos[J]. Environmental Toxicology and Chemistry, 2000, 19(19): 3024-3031.
- [58] Wong C K C, Wong M H. Morphological and biochemical changes in the gills of tilapia (*Oreochromis mossambicus*) to ambient cadmium exposure[J]. Aquatic Toxicology, 2000, 8(4): 517-527.
- [59] 曹亮. 铜、镉对褐牙鲈(*Paralichthys olivaceus*)早期发育阶段的毒理效应研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2010.
- Cao L. Toxic effects of cadmium and copper to early life stages of flounder (*Paralichthys olivaceus*)[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2010(in Chinese).
- [60] Słomińska I, Jezierska B. The effect of heavy metals on postembryonic development of common carp, *Cyprinus carpio* L[J]. Archiwum Rybactwa Polskiego, 2000, 8(1): 119-128.
- [61] Norberg-King T J. An evaluation of the fathead minnow seven-day subchronic test for estimating chronic toxicity[J]. Environmental Toxicology and Chemistry, 1989, 8(11): 1075-1089.
- [62] Hwang P P, Lin S W, Lin H C. Different sensitivities to cadmium in tilapia larvae (*Oreochromis mossambicus*; teleostei)[J]. Archives of Environmental Contamination and Toxicology, 1995, 29(1): 1-7.
- [63] Peterson R H, Metcalfe J L, Ray S. Effects of cadmium on yolk utilization, growth, and survival of Atlantic salmon alevins and newly feeding fry[J]. Archives of Environmental Contamination and Toxicology, 1983, 12(1): 37-44.
- [64] Huang W, Cao L, Ye Z J, *et al.* Antioxidative responses and bioaccumulation in Japanese flounder larvae and juveniles under chronic mercury exposure[J]. Comparative Biochemistry and Physiology-Part C: Toxicology and Pharmacology, 2010, 152(1): 99-106.
- [65] Shukla J P, Pandey K. Toxicity and long term effects of a sublethal concentration of cadmium on the growth of the fingerlings of *Ophiocephalus punctatus* (BL.)(J). Acta Hydrochimica Hydrobiologica, 1988, 16: 537-540.
- [66] Marr J C A, Lipton J, Cacela D, *et al.* Relationship between copper exposure duration, tissue copper concentration, and rainbow trout growth[J]. Aquatic Toxicology, 1996, 36(1-2): 17-30.
- [67] Oruc E O, Uner N, Sevgiler Y, *et al.* Sublethal effects of organophosphate diazinon on the brain of *Cyprinus carpio*[J]. Drug and Chemical Toxicology, 2006, 29(1): 57-67.
- [68] Holdway D A. Uranium toxicity to two species of Australian tropical fish[J]. Science of the Total Environment, 1992, 125(92): 137-158.
- [69] Wright D A, Meteyer M J, Martin F D. Effect of calcium on cadmium uptake and toxicity in larvae and juveniles of striped bass (*Morone saxatilis*)[J]. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 1985, 34(1): 196-204.
- [70] Kuroshima R, Kimura S, Date K, *et al.* Kinetic analysis of cadmium toxicity to red sea bream, *Pagrus major*[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 1993, 25(3): 300-314.
- [71] 柳学周, 徐永江, 兰功刚. 几种重金属离子对半滑舌鳎胚胎发育和仔稚鱼的毒性效应[J]. 海洋水产研究, 2006, 27(2): 33-42.
- Liu X Z, Xu Y J, Lan G G. Toxic effects of several heavy metals on the embryos, larvae of *Cynoglossus semilaevis* Günther[J]. Marine Fisheries Research, 2006, 27(2): 33-42(in Chinese).
- [72] 周立红, 陈学豪, 秦德忠. 四种重金属对泥鳅胚胎和仔鱼毒性的研究[J]. 厦门水产学院学报, 1994, 16(1): 11-19.
- Zhou L H, Chen X H, Qin D Z. The study on the toxicity of four kinds of heavy metal to *Misgurnus anguillicaudatus* embryo and juvenile fish[J]. Journal of Xiamen Fisheries College, 1994, 16(1): 11-19(in Chinese).
- [73] 吴鼎勋, 洪万树. 四种重金属对鮟鲇鱼胚胎和仔鱼的毒性[J]. 台湾海峡, 1999, 18(2): 186-190.

- Wu D X, Hong W S. Study on toxicity of four heavy metals to embryo and larval of *Nibeia miichthioides*[J]. Journal of Oceanography in Taiwan Strait, 1999, 18(2): 186-190(in Chinese).
- [74] 穆景利, 王莹, 王新红, 等. Cd²⁺、Hg²⁺、Cr⁶⁺和Pb²⁺对黑点青鳉(*Oryzias melastigma*)早期生活阶段的毒性效应研究[J]. 生态毒理学报, 2011, 6(4): 352-360.
- Mu J L, Wang Y, Wang X H, *et al.* Toxic effects of cadmium, mercury, chromium and lead on the early life stage of marine medaka (*Oryzias melastigma*)[J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2011, 6(4): 352-360(in Chinese).
- [75] Pickering Q H, Gast M H. Acute and chronic toxicity of cadmium to the fathead minnow (*Pimephales promelas*)[J]. Journal of the Fisheries Research Board of Canada, 1972, 29(8): 1099-1106.
- [76] Huckabee J W, Griffith N A. Toxicity of mercury and selenium to the eggs of carp (*Cyprinus carpio*)[J]. Transactions of the American Fisheries Society, 1974, 103: 822-825.
- [77] Spehar R L. Cadmium and zinc toxicity to flagfish, *Jordanella floridae*[J]. Journal of the Fisheries Board of Canada, 1976, 33(9):1939-1945.
- [78] Woo P T K, Sin Y M, Wong M K. The effects of short-term acute cadmium exposure on blue tilapia, *Oreochromis aureus*[J]. Environmental Biology of Fishes, 1993, 37(1): 67-74.
- [79] Voyer R A, Wentworth C E, Barry E P, *et al.* Viability of embryos of the winter flounder *Pseudopleuronectes americanus* exposed to combinations of cadmium and salinity at selected temperatures[J]. Marine Biology, 1977, 44(2): 117-124.
- [80] Perkins E J, Griffin B, Hobbs M, *et al.* Sexual differences in mortality and sublethal stress in channel catfish following a 10 week exposure to copper sulfate[J]. Aquatic Toxicology, 1997, 37(4): 327-339.
- [81] Mount D I, Stephan C E. Chronic toxicity of copper to the fathead minnow (*Pimephales promelas*) in soft water[J]. Journal of the Fisheries Research Board of Canada, 1969, 26(9): 2449-2457.
- [82] McKim J M. Evaluation of tests with early life stages of fish for predicting long-term toxicity[J]. Journal of the Fisheries Research Board of Canada, 1977, 34(8): 1148-1154.
- [83] Holcombe G W, Benoit D A, Leonard E N, *et al.* Long-term effects of zinc exposures on brook trout (*Salvelinus fontinalis*)[J]. Transactions of the American Fisheries Society, 1979, 108(1): 76-87.
- [84] Brungs W A. Chronic toxicity of zinc to the fathead minnow *Pimephales promelas* Rafinesque[J]. Transactions of the American Fisheries Society, 1969, 98(2): 272-279.
- [85] Stebler E F, Burks S L, Bantle J A, *et al.* Evaluation of the developmental toxicity of metal-contaminated sediments using short-term fathead minnow and frog embryo-larval assays[J]. Environmental Toxicology and Chemistry, 1988, 7(1): 27-34
- [86] Leblanc G A, Mastone J D, Paradise A P, *et al.* The influence of speciation on the toxicity of silver to fathead minnow (*Pimephales promelas*)[J]. Environmental Toxicology and Chemistry, 1984, 3(1): 37-46.
- [87] Woodward D F, Farag A M, Mueller M E, *et al.* Sensitivity of endemic Snake River cutthroat trout to acidity and elevated aluminum[J]. Transactions of the American Fisheries Society, 1989, 118(6): 630-643.
- [88] Myllynen K, Ojutkangas E, Nikinmaa M. River water with high iron concentration and low pH causes mortality of lamprey roe and newly hatched larvae[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 1997, 36(1): 43-48.
- [89] Cleveland L, Little E E, Hamilton S J, *et al.* Interactive toxicity of aluminum and acidity to early life stages of brook trout[J]. Transactions of the American Fisheries Society, 1986, 115(4): 610-620.
- [90] Blaylock B G, Frank M L. A comparison of the toxicity of nickel to the developing eggs and larvae of carp (*Cyprinus carpio*)[J]. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 1979, 21: 604-611.
- [91] Smith E J, Sykora J L, Shapiro M A. Effect of lime neutralized iron hydroxide suspensions on survival, growth, and reproduction of the fathead minnow (*Pimephales promelas*)[J]. Journal of the Fisheries Research Board of Canada, 1973, 30(8): 1147-1153.
- [92] Smith E J, Sykora J L. Early developmental effects of lime-neutralized iron hydroxide suspensions on brook trout and coho salmon[J]. Transactions of the American Fisheries Society, 1976, 105(2): 308-312.

Studies of toxicity effects of heavy metals on early life stages of fish: a review

HUANG Wei¹, CAO Liang², DOU Shuozeng^{2*}

(1. *Laboratory of Marine Ecosystem and Biogeochemistry, Second Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Hangzhou 310012, China;*

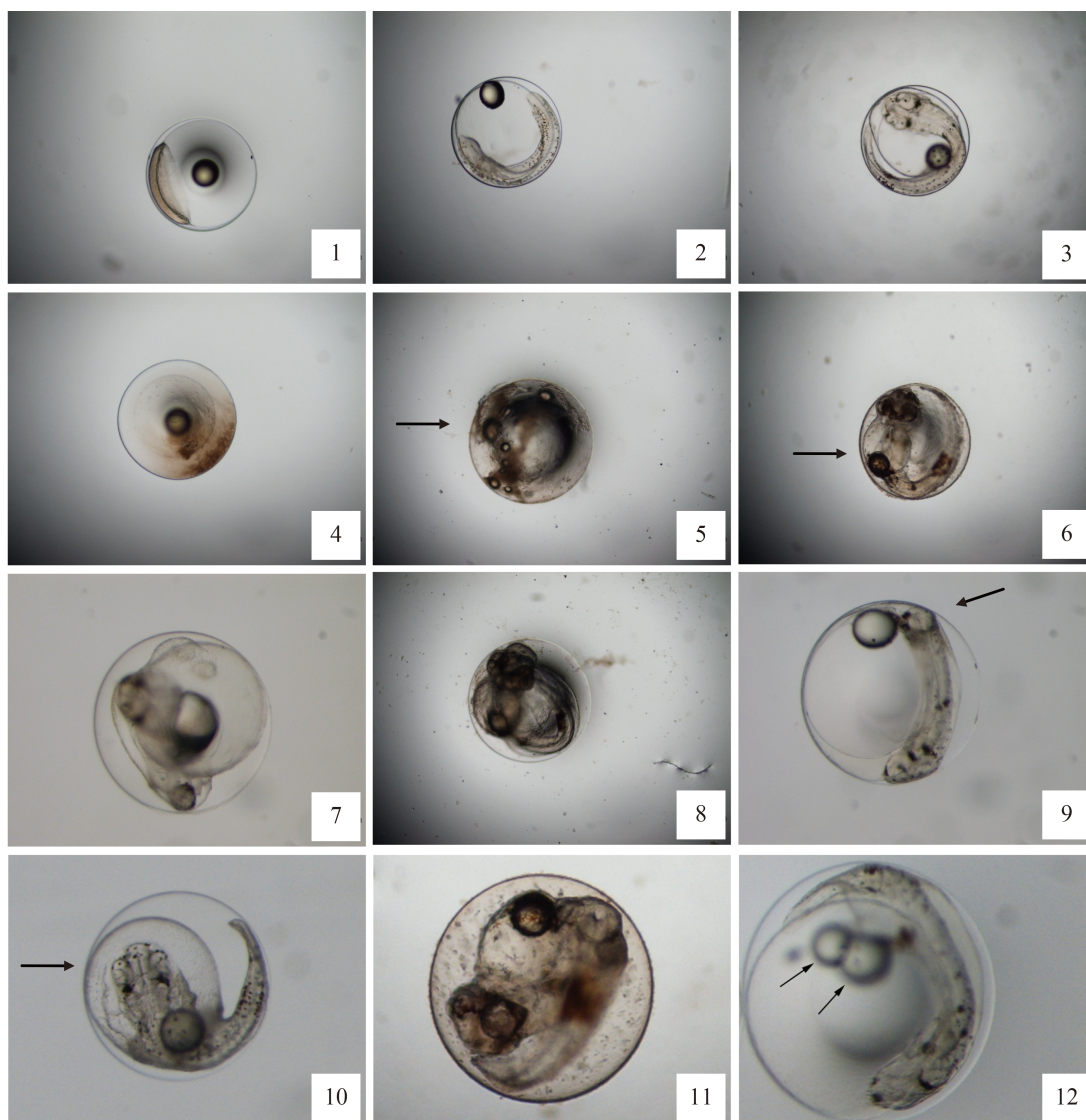
2. *Key Laboratory of Marine Ecology and Environmental Sciences, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China)*

Abstract: The early life stages (ELSS) of aquatic organisms are particularly sensitive to both natural and anthropogenic stressors. ELS bioassays have widely been used as a cost-effective means to rapidly detect and monitor metal pollution in aquatic environments. Exposure to waterborne heavy metals during the ELSS of fish can result in inhibition of oogenesis and spermatogenesis processes, reduced fertilization success, chromosomal abnormalities, increased incidence of yolk membrane ruptures, reduced hatching success and survival, altered time to hatch, embryonic and larval teratogenicity, inhibited growth and abnormal larval behaviors. Previous studies have shown that heavy metals in dissolved and suspended particulate matters in the waters and sediments of fish spawning and nursery grounds in the offshore of China were overloaded in the past decades. Therefore, biological damage caused by heavy metals to their reproduction, development, survival, and growth have been considered potential risks for deterioration of the wild population. In this paper, studies of the toxicity effects on the ELS of fish were reviewed in order to help researchers better understand the progress in this research field.

Key words: fish larvae; embryos; heavy metals; toxicity

Corresponding author: DOU Shuozeng. E-mail:szdou@qdio.ac.cn

Funding projects: National Natural Science Foundation of China (41306112, 41406167); National Basic Research Program of China (973 program) (2015CB453302); National Marine Public Welfare Research Project of China (201305043, 201405007); Zhejiang Provincial Natural Science Foundation (LY13D060004)

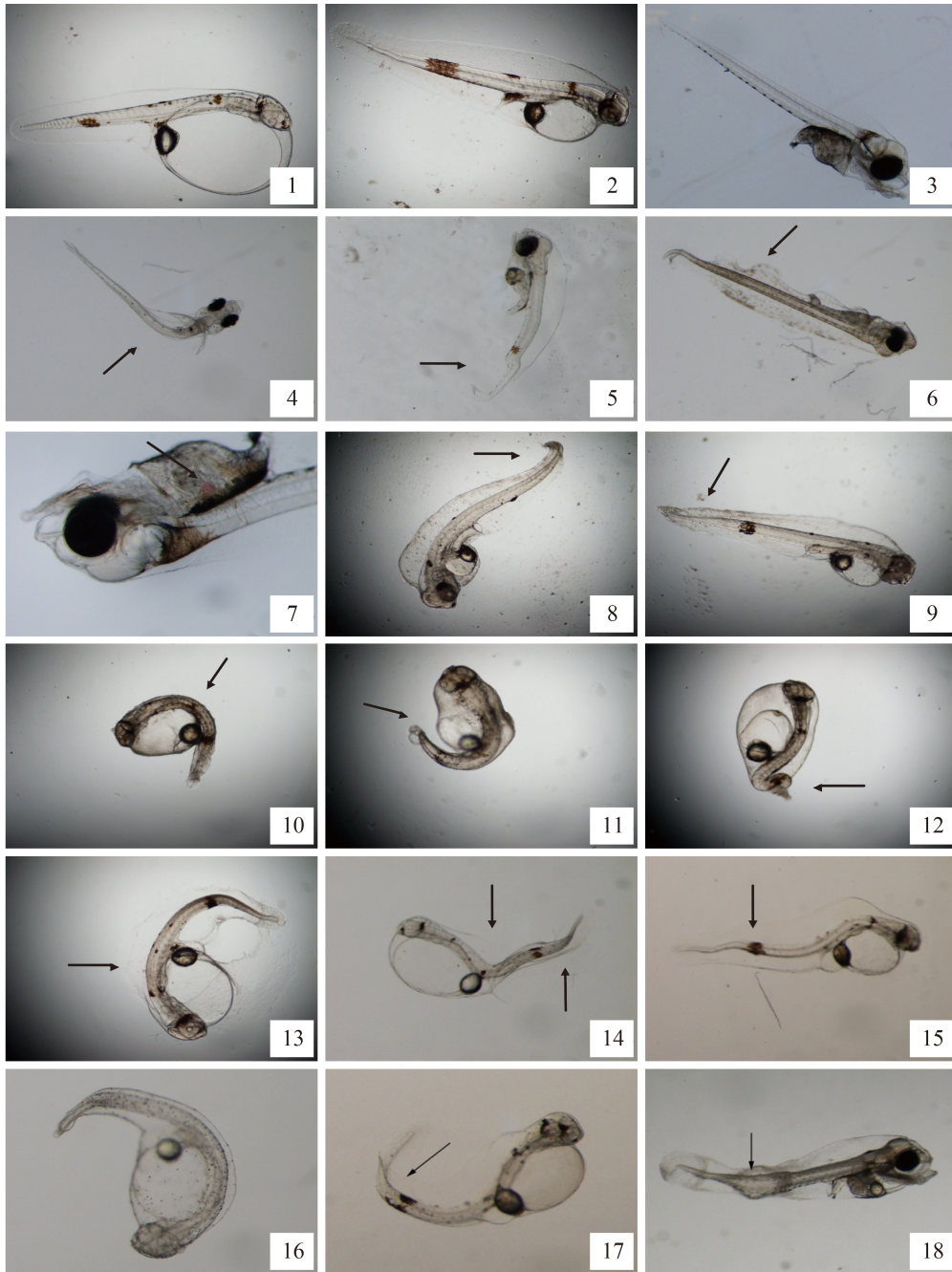


图版 I 重金属暴露造成的真鲷胚胎畸形

1~3. 正常发育的胚胎(对照组, 12 hpf, 36 hpf, 42 hpf); 4. 囊胚畸形(50 µg/L Hg, 18 hpf); 5. 囊胚表面粗糙(40 µg/L Hg, 24 hpf); 6. 围心腔水肿和发育迟缓(30 µg/L Hg, 60 hpf); 7. 头部畸形(2.4 mg/L Cd, 40 hpf); 8. 躯体痉挛和体色异常(3.2 mg/L Cd, 32 hpf); 9. 尾部发育不全(1.2 mg/L Cd, 44 hpf); 10. 围心腔水肿(0.08 mg/L Cu, 40 hpf); 11. 体色异常(0.12 mg/L Cu, 60 hpf); 12. 油球分裂(0.10 mg/L Cu, 60 hpf)

Plate I Morphological abnormalities of the red seabream embryos exposed to different metals

1-3. normally developed embryo (control, 12 hpf <hours post fertilization>, 36 hpf, 42 hpf); 4. blastodermal lesions (50 µg/L Hg, 18 hpf); 5. rough blastula surface (40 µg/L Hg, 24 hpf); 6. cardiac edema and delayed development (30 µg/L Hg, 60 hpf); 7. head deformity (2.4 mg/L Cd, 40 hpf); 8. spastic body contraction and abnormal pigmentation (3.2 mg/L Cd, 32 hpf); 9. undeveloped tail (1.2 mg/L Cd, 44 hpf); 10. cardiac edema (0.08 mg/L Cu, 40 hpf); 11. abnormal pigmentation (0.12 mg/L Cu, 60 hpf); 12. oil globule cleavage (0.10 mg/L Cu, 60 hpf)



图版 II 重金属暴露造成的真鲷仔鱼畸形

1~3. 正常发育的仔鱼 (对照组, 0 dph, 2 dph, 7 dph); 4. 脊柱畸形 (L形) (2.0 mg/L Zn, 5 dph); 5. 尾部弯曲 (0.5 mg/L Zn, 4 dph); 6. 鳍膜腐烂和体色异常 (2.5 mg/L Zn, 8 dph); 7. 心脏出血 (2.5 mg/L Zn, 7 dph); 8. 脊柱畸形和尾部弯曲 (20 µg/L Hg, 2 dph); 9. 鳍膜腐烂 (50 µg/L Hg, 2 dph); 10. 脊柱畸形 (C形) 和体色异常 (20 µg/L Hg, 0 dph); 11. 围心腔水肿 (2.4 mg/L Cd, 0 dph); 12. 尾部发育不全 (1.8 mg/L Cd, 0 dph); 13. 脊柱畸形 (C形) 和鳍膜腐烂 (2.4 mg/L Cd, 0 dph); 14. 脊柱畸形 (L形) 和尾部弯曲 (1.8 mg/L Cd, 0 dph); 15. 脊柱前弯和尾部弯曲 (2.4 mg/L Cd, 1 dph); 16. 体色异常 (0.12 mg/L Cu, 1 dph); 17. 脊柱前弯 (0.12 mg/L Cu, 0 dph); 18. 骨质增生 (0.12 mg/L Cu, 2 dph)

Plate II Morphological abnormalities of the red seabream larvae exposed to different metals

1-3. normally developed larvae (control, 0 dph <days post hatch>, 2 dph, 7 dph); 4. spinal deformities (L shaped) (2.0 mg/L Zn, 5 dph); 5. curled tail (0.5 mg/L Zn, 4 dph); 6. erosion of fins and abnormal pigmentation (2.5 mg/L Zn, 8 dph); 7. visceral hemorrhage (2.5 mg/L Zn, 7 dph); 8. spinal deformities and curled tail (20 µg/L Hg, 2 dph); 9. erosion of fins (50 µg/L Hg, 2 dph); 10. spinal deformities (C shaped) and abnormal pigmentation (20 µg/L Hg, 0 dph); 11. cardiac edema (2.4 mg/L Cd, 0 dph); 12. undeveloped tail (1.8 mg/L Cd, 0 dph); 13. spinal deformities (C shaped) and erosion of fins (2.4 mg/L Cd, 0 dph); 14. spinal deformities (L shaped) and curled tail (1.8 mg/L Cd, 0 dph); 15. lordosis deformity and curled tail (2.4 mg/L Cd, 1 dph); 16. abnormal pigmentation (0.12 mg/L Cu, 1 dph); 17. lordosis deformity (0.12 mg/L Cu, 0 dph); 18. hyperostegeny (0.12 mg/L Cu, 2 dph)

表 1 重金属对鱼类胚胎孵化率、仔鱼畸形率和生长率的影响

Tab. 1 The effect of metals on embryos hatchability, body malformations and growth rate of the larvae

重金属 metals	种名 scientific name	中文名 Chinese name	浓度/($\mu\text{g/L}$) concentration	孵化率 hatching rate	仔鱼畸形率 morphological abnormality	生长 growth rate	参考文献 references	
Hg	<i>Brachydanio rerio</i>	斑马鱼	32	完全抑制			[3]	
	<i>Cynoglossus semilaevis</i>	半滑舌鳎	200	完全抑制			[71]	
			50		增加			
	<i>Danio rerio</i>	斑马鱼	30		增加		[52]	
	<i>Fundulus heteroclitus</i>	底鳉	10	降低			[44]	
			20		增加			
			10		增加		[25]	
				50		增加		[19]
				5			降低	[5]
				<i>Misgurnus anguillicaudatus</i>	泥鳅	100	降低	增加
	<i>Nibeia miichthioides</i>	鮠状黄姑鱼	800	完全抑制			[73]	
			100	降低	增加			
	<i>Oryzias latipes</i>	青鳉	15	降低	增加		[43]	
			20	完全抑制				
	<i>Oryzias melastigma</i>	黑点青鳉	24	降低			[74]	
			48		增加			
	<i>Pagrus major</i>	真鲷	20	降低	增加		[31]	
			40			降低		
	<i>Paralichthys olivaceus</i>	牙鲆	10			降低	[40]	
			20	降低				
			40		增加			
			<i>Pimephales promelas</i>	胖头鲮	100		降低	[75]
			25		增加		[6]	
			<i>Salvelinus fontinalis</i>	美洲红点鲑	3	降低		[76]
			4	完全抑制				
			Cd	<i>Clupea harengus</i>	大西洋鲱	5×10^3	完全抑制	
<i>Cynoglossus semilaevis</i>	半滑舌鳎	1×10^3			增加		[71]	
<i>Cyprinus carpio</i>	鲤	10		降低	增加		[21]	
<i>Fundulus heteroclitus</i>	底鳉	100			增加		[25]	
<i>Jordanella floridae</i>	乔氏鳉	31				降低	[77]	
<i>Miichthys miituy</i>	鮠	62		降低	增加		[46]	
<i>Oncorhynchus mykiss</i>	虹鳟	100			增加		[36]	
<i>Oreochromis aureus</i>	奥利亚罗非鱼	10×10^3				降低	[78]	

· 续表1 ·

重金属 metals	种名 scientific name	中文名 Chinese name	浓度/($\mu\text{g/L}$) concentration	孵化率 hatching rate	仔鱼畸形率 morphological abnormality	生长 growth rate	参考文献 references
	<i>Oryzias melastigma</i>	黑点青鳉	147	降低			[74]
			294		增加		
	<i>Pagrus major</i>	真鲷	800	降低		降低	[23]
			3.2×10^3	完全抑制			
			400		增加		
	<i>Paralichthys olivaceus</i>	牙鲆	2×10^3	降低	增加		[18]
			800	降低	增加		[59]
			24			降低	[24]
	<i>Pimephales promelas</i>	胖头鲟	57	降低			[75]
	<i>Pseudopleuronectes americanus</i>	美洲拟鲈	974	降低			[79]
	<i>Salmo salar salar</i>	安大略鲑	270	降低			[45]
			870	完全抑制			
			0.32			降低	
			2			降低	[63]
Cu	<i>Brachydanio rerio</i>	斑马鱼	1	降低			[3]
	<i>Ctenopharyngodon idella</i>	草鱼	200	降低	增加		[11]
	<i>Cynoglossus semilaevis</i>	半滑舌鳎	10	降低			[71]
			5		增加		
	<i>Cyprinus carpio</i>	鲤	600		增加		[11]
			51		增加		[14]
			200		增加		[11]
			100	降低	增加		
			200	降低	增加		
	<i>Danio rerio</i>	斑马鱼	1.1×10^3	完全抑制			[28]
			93			降低	
	<i>Ictalurus punctatus</i>	斑点叉尾鲴	46.5			降低	[80]
	<i>Miichthys miituy</i>	鲢	25.5	降低	增加		[46]
	<i>Misgurnus anguillicaudatus</i>	泥鳅	100	降低	增加		[72]
	<i>Nibea miichthioides</i>	鲢状黄姑鱼	1.6×10^3	完全抑制			[73]
			100	降低	增加		
	<i>Oncorhynchus mykiss</i>	虹鳟	240	降低			[37]
			1.8×10^3	完全抑制			
			4.6			降低	[66]
	<i>Oncorhynchus tshawytscha</i>	大鳞大麻哈鱼	40			降低	[11]

· 续表1 ·

重金属 metals	种名 scientific name	中文名 Chinese name	浓度/($\mu\text{g/L}$) concentration	孵化率 hatching rate	仔鱼畸形率 morphological abnormality	生长 growth rate	参考文献 references
	<i>Pagrus major</i>	真鲷	60	降低		降低	[24]
			80		增加		
	<i>Paralichthys olivaceus</i>	牙鲆	200	降低	增加		[18]
			60	降低			[59]
			80		增加		
			32			降低	
	<i>Pimephales promelas</i>	胖头鲮	18	完全抑制		降低	[81]
	<i>Poecilia reticulata</i>	虹鳉	200	降低			[11]
	<i>Salvelinus fontinalis</i>	美洲红点鲑	17.4			降低	[82]
	<i>Tridentiger trignocephalus</i>	纹缟鰕虎鱼	12.5 ^a	降低			
			12.5 ^b	降低			[47]
			50 ^c	降低			
			25 ^a		增加		
			100 ^b		增加		
			100 ^c		增加		
Pb	<i>Brachydanio rerio</i>	斑马鱼	480	降低			[3]
			960	完全抑制			
	<i>Ctenopharyngodon idella</i>	草鱼	4 $\times 10^3$	降低	增加		[11]
			5 $\times 10^3$	降低	增加		
	<i>Cynoglossus semilaevis</i>	半滑舌鳎	500		增加		[71]
	<i>Cyprinus carpio</i>	鲤	480		增加		[14]
			3 $\times 10^3$	降低	增加		[11]
			2 $\times 10^3$			降低	[60]
	<i>Fundulus heteroclitus</i>	底鳉	110		增加		[25]
	<i>Miichthys miiuy</i>	鲢	180	降低	增加		[46]
	<i>Misgurnus anguillicaudatus</i>	泥鳅	1 $\times 10^3$	降低	增加		[72]
	<i>Oryzias melastigma</i>	黑点青鳉	200	降低	增加		[74]
	<i>Paralichthys olivaceus</i>	牙鲆	1 $\times 10^3$		增加		[18]
			300			降低	[41]
	<i>Salvelinus fontinalis</i>	美洲红点鲑	235		增加		[83]
			32	降低			[82]
			25 $\times 10^3$			降低	[11]
	<i>Tridentiger trignocephalus</i>	纹缟鰕虎鱼	125 ^a	降低			
			250 ^b	降低			[47]
			500 ^c	降低			
			500 ^a		增加		
			1 $\times 10^3$ ^b		增加		
			2 $\times 10^3$ ^c		增加		
Zn	<i>Brachydanio rerio</i>	斑马鱼	5 $\times 10^3$	降低	增加		[22]
	<i>Carassius auratus</i>	鲫	3 $\times 10^3$	降低			[11]
	<i>Clupea harengus</i>	大西洋鲱	6 $\times 10^3$		增加		[17]
	<i>Cynoglossus semilaevis</i>	半滑舌鳎	4 $\times 10^3$	完全抑制			[71]
			500	降低	增加		

· 续表1 ·

重金属 metals	种名 scientific name	中文名 Chinese name	浓度/($\mu\text{g/L}$) concentration	孵化率 hatching rate	仔鱼畸形率 morphological abnormality	生长 growth rate	参考文献 references
	<i>Cyprinus carpio</i>	鲤	9×10^3		增加		[32]
	<i>Jordanella floridae</i>	乔氏鳉	85			降低	[77]
	<i>Miichthys miituy</i>	鳊	455	降低	增加		[46]
	<i>Misgurnus anguillicaudatus</i>	泥鳅	1×10^3	降低	增加		[72]
	<i>Nibea miichthioides</i>	鳊状黄姑鱼	1×10^3	降低	增加		[73]
	<i>Pagrus major</i>	真鲷	500	降低			[32]
			300		增加		
			1×10^3			降低	
	<i>Paralichthys olivaceus</i>	牙鲆	2×10^3	降低			[18]
			1×10^3	降低		降低	[41]
			2×10^3		增加		
	<i>Phoxinus phoxinus</i>	真鲈	200		增加		[53]
	<i>Pimephales promelas</i>	胖头鲮	2.8×10^3	完全抑制		降低	[84]
			295	降低	增加		[15]
			2×10^3		增加		[85]
	<i>Poecilia reticulata</i>	虹鳉	600			降低	[27]
	<i>Salvelinus fontinalis</i>	美洲红点鲑	534	降低	增加		[83]
	<i>Tridentiger trignocephalus</i>	纹缟鰕虎鱼	125 ^a	降低			[47]
			250 ^b	降低			
			500 ^c	降低			
			250 ^a		增加		
			1×10^{3b}		增加		
			1×10^{3c}		增加		
Cr	<i>Miichthys miituy</i>	鳊	536	降低	增加		[46]
	<i>Nibea miichthioides</i>	鳊状黄姑鱼	10×10^3	降低	增加		[73]
	<i>Oncorhynchus mykiss</i>	虹鳟	350			降低	[15]
	<i>Oryzias melastigma</i>	黑点青鳉	235	降低			[74]
			940		增加		
	<i>Paralichthys olivaceus</i>	牙鲆	10×10^3		增加		[18]
	<i>Pimephales promelas</i>	胖头鲮	4			降低	[61]
Ag	<i>Pimephales promelas</i>	胖头鲮	140×10^3	降低			[86]
			1			降低	[61]
	<i>Pseudopleuronectes americanus</i>	美洲拟鲈	386		增加		[51]
Al	<i>Oncorhynchus clarkii</i>	大麻哈鱼	50			降低	[87]
	<i>Pimephales promelas</i>	胖头鲮	450	降低			[88]
	<i>Salvelinus fontinalis</i>	美洲红点鲑	300	降低		降低	[89]
Ni	<i>Cyprinus carpio</i>	鲤	5×10^3	降低	增加		[90]
	<i>Oncorhynchus mykiss</i>	虹鳟	238	降低			[42]
			431			降低	
Fe	<i>Lampetra fluviatilis</i>	七鳃鳗	1.5×10^3	降低			[88]
	<i>Pimephales promelas</i>	胖头鲮	1.5×10^3	降低			[91]
			25×10^3			降低	
	<i>Salmo trutta</i>	鳟	1×10^3	降低			[11]
	<i>Salvelinus fontinalis</i>	美洲红点鲑	12×10^3	降低			[92]

注: a. 初受精受精卵; b. 器官形成期胚胎; c. 眼点形成期胚胎

Notes: a. fertilized eggs; b. organogenesis embryos; c. eyed embryos