

DOI: 10.7524/AJE.1673-5897.2012051001

陈玉明, 卢少勇, 朱旭, 等. 泥鳅在污染物毒性评价中的应用研究[J]. 生态毒理学报, 2013, 8(4): 447-455

Chen Y M, Lu S Y, Zhu X, et al. A Review on Application of Loach to Assessing Toxicity of Pollutants [J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2013, 8(4): 447-455 (in Chinese)

泥鳅在污染物毒性评价中的应用

陈玉明¹, 卢少勇^{1,*}, 朱旭^{1,2}, 胡家会³

1. 中国环境科学研究院 环境基准与风险评估国家重点实验室 国家环境保护湖泊污染控制重点实验室 湖泊环境研究中心洞庭湖生态观测研究站 湖泊工程技术中心, 北京 100012
2. 吉林建筑工程学院环境工程系, 长春 130021
3. 聊城大学生命科学学院, 聊城 252059

摘要: 泥鳅营底栖生活, 生存能力强, 易于饲养, 便于采集和处理, 有作为模式生物的潜力。受到污染物胁迫时, 泥鳅在分子、细胞、组织、器官和个体水平上会发生明显的变化, 其存活、生长和繁殖从而受到影响。泥鳅的这些特性可以被用来进行污染物毒性评价。从急性毒性、蓄积毒性、生殖力毒性、遗传毒性等方面, 综述和分析了泥鳅在污染物毒性评价中的应用研究进展, 并对未来研究重点进行了展望。

关键词: 泥鳅; 急性毒性; 蓄积毒性; 生殖毒性; 遗传毒性; 联合毒性

文章编号: 1673-5897(2013)4-447-09 **中图分类号:** X171.5 **文献标识码:** A

Review on Application of Loach to Assessing Toxicity of Pollutants

Chen Yuming¹, Lu Shaoyong^{1,*}, Zhu Xu^{1,2}, Hu Jiahui³

1. Engineering and Technology Centre of Lake, Dongtinghu Lake Ecological Observation and Research Station (DEORS), Research Centre of Lake Environment, State Environmental Protection Key Laboratory for Lake Pollution Control, State Key Laboratory of Environmental Criteria and Risk Assessment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China
2. Department of Environment Engineering, Jilin Architectural and Civil Engineering Institute, Changchun 130021, China
3. Department of Life Sciences, Liaocheng University, Liaocheng 252059, China

Received 10 May 2012 **accepted** 18 July 2012

Abstract: For some advantages, such as living in the bottom of water, having strong viability, being easy to cultivate, loach have potency to be a model organism. Exposed to pollutants, loach obviously changed on the level of molecular, cell, tissue, organ and individual, which may affect the survival, growth and reproductive of loach. These attractive characteristics make loach suitable as a candidate fish to assess toxicity of pollutants. Acute toxicity, cumulative toxicity, reproductive toxicity, genotoxicity and other toxicity of pollutants to loach were reviewed. Perspectives about application of loach to toxicity have been discussed, expecting to contribute to the further research in this field.

收稿日期: 2012-05-10 录用日期: 2012-07-18

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2012ZX07105-002, 2009ZX07106-005, 2008ZX07101); 中央级公益性科研院所基本科研业务专项(2012-YSKY-14)

作者简介: 陈玉明(1980-), 男, 硕士, 研究方向为水生生态毒理学, E-mail: ymchen08@aliyun.com;

* 通讯作者(Corresponding author), E-mail: lushy2000@163.com

Keywords: loach; acute toxicity; cumulative toxicity; reproductive toxicity; genotoxicity; joint toxicity

随着工农业发展、城建规模扩大、人口膨胀、商业全球化进程推进,环境污染问题日益严重。其中,化学品引起的污染尤为突出。目前,全球约 10 万种合成化学品进入环境成为污染物,且每年新增 1 000 余种化学物质^[1]。大部分化学物质经地表径流、农业排灌、工业排放和大气沉降等途径进入水体。水中污染物种类多,主要有酸、碱、石油、农药、洗涤剂、防腐剂、重金属、细菌、真菌毒素及放射性废料等。污染物通过毒害水生生物而破坏水生生态系统结构和功能,经饮用、接触及食物链等途径危害人体健康。长期以来,为识别污染物毒性,减少生态灾害发生,多种水生生物,如藻类、大型水生植物、浮游动物、软体动物、底栖生物和鱼类等,被广泛用于污染物毒性评价和环境监测^[2-3]。

泥鳅(*Misgurnua anguillicaudatus*)又名鳅鱼、气候鱼,广布于中国、日本、朝鲜、俄罗斯及印度等国,在美洲和欧洲也被发现。污染物对泥鳅毒性的研究历史较短:20 世纪 70 年代,开展了针对欧洲泥鳅(*Misgurnus Fossilis*)胚晶的甲基化作用^[4]及硬水中硫酸铜对石鳅(*Barbatula barbatula*)毒性的研究^[5];90 年代,主要针对 Hg、Cu、Pb 和 Zn 4 种重金属对泥鳅胚胎发育和仔鱼成活的影响展开研究^[6]。近些年,泥鳅毒理学研究多集中于农药、洗涤剂及重金属等的毒性效应。因具独特生物学特征、底栖习性、强耐污能力及对某些污染物的敏感性,泥鳅成为毒理学研究中较理想的实验材料^[7-10]。综述了泥鳅在污染物急性毒性、蓄积毒性、生殖毒性、遗传毒性等毒性评价中的应用,供相关研究参考。

1 急性毒性实验

鱼类急性毒性是鱼在短期内一次或多次接触外来化合物后所引起的中毒效应,甚至死亡,接触时间常为 24、48、72 和 96 h,中毒效应可表现在分子、细胞、组织和个体水平上,接触途径有皮肤接触、饮食和腹腔注射等^[11-16]。半数致死量(LD₅₀)、无致死浓度(LC₀)、全致死浓度(LC₁₀₀)、半数致死浓度(LC₅₀)和半效应浓度(EC₅₀)等是评价有毒污染物毒性强弱的常用指标。国际上,关于鱼类急性毒性实验的技术标准和评价方法较多,且不断更新^[13-14]。美国环保局常用鱼类 48 h-EC₅₀ 和 96 h-LD₅₀ 评价化学物质的生态毒性^[12];经济合作与发展组织(OECD)以 LC₅₀ 作为化学品急性毒性的评价终点^[13]。我国有

关鱼类急性毒性评价的技术标准有《水质:物质对淡水鱼(斑马鱼)急性毒性测试方法》,选用指标为 LD₅₀^[16]。

暴露在含污染物的溶液中,泥鳅对毒物刺激表现出明显应激反应,多为活动剧烈,游动迅速,易受惊扰,并伴有跃出水面现象;随染毒时间延长,其活动能力降低,游动趋缓且身体失衡;重度中毒时,其身体侧倾,游动减少,沉降水底静止不动直至死亡;个体死亡时,其常伴体表变白,眼球受损浑浊,上颌溃烂、有时出现大量血点、肛门外翻、体壁变薄等症状^[17-20]。近年,多用泥鳅评价农药、重金属等的毒性,不同污染物对其急性毒性有较大差异,通常农药类较大,见表 1。

表 1 污染物对泥鳅的 LD₅₀ 和安全浓度

Table 1 LD₅₀ and safe concentration of contamination to loach

污染物	LD ₅₀ /(mg·L ⁻¹)			安全浓度/(mg·L ⁻¹)	文献
	24 h	48 h	96 h		
高锰酸钾	7.23	5.61		0.75	[8]
硫酸铜	3.90	2.70		0.26	[8]
亚硒酸钠	209.5	92.5	44.8	0.448~4.48	[17]
聚维酮碘	449	393	360	90	[18]
醋酸钾	1.25×10 ⁻²	0.87×10 ⁻²		0.13×10 ⁻²	[19]
镉	2.8	2.4	1.8	0.07	[20-21]
汞			2.05		[22]
辛氟乳油	0.15×10 ⁻³	0.115×10 ⁻³		0.016×10 ⁻³	[23]
高效氯氟菊酯	0.8×10 ⁻³	0.4×10 ⁻³		0.015×10 ⁻³	[23]
莫比朗	0.28	0.26		0.064	[23]
甲氟菊酯	0.020	0.017		3.2×10 ⁻³	[23]
敌百虫	11.80	10.50		2.22	[8]
草威特	0.07	0.06			[24]
百草枯	0.72	0.65			[24]
氟乐灵	0.07	0.06			[24]
敌敌畏	1.02×10 ⁻²	0.68×10 ⁻²	0.64×10 ⁻²		[25]
双酚 A	8.32	8.02	6.43	2.24	[26]
对苯二胺	39.40	27.93	23.69	4.21	[27]
总氨	252.02	216.99	164.40		[28]
非离子型氨	3.40	2.92	2.22		[28]
甲醛	461.23	425.32	366.04	176.82	[29]
二氧化氯	1 110	984	942	232	[18]
福尔马林	138.5	122.3		25.3	[8]

2 蓄积毒性

鱼类长期生活在被污染的水中,会发生蓄积毒性。生物积累、扩大和富集等从不同侧面描述了污染物在生物体内的迁移、蓄积和分布。评价污染物对鱼类蓄积毒性的方法有野外调查、室内研究和模

型预测等,评价指标有生物积累系数(BAF)、生物富集系数(BCF)、生物放大因子(BMF)等^[30-32]。美国环保局、欧盟《化学品的注册、评估、授权和限制》(REACH)及 OECD 对化学物质进行了大量蓄积毒性测试^[31-32],评价指标多为 BCF。

泥鳅生活在水底,对污染物的吸收积累能力很强^[33-35]。将泥鳅暴露在含不同浓度 Cd 溶液中,42 d 后,Cd 可选择性地在雄性泥鳅体内肝、肾、肠和腮等器官富集,而其在肌肉、骨头和精巢中的含量很

低^[33]。在含 4.08 ng·L⁻¹ 多溴联苯醚 (polybrominated diphenyl ethers, PBDEs) 废水中暴露 3 个月后,泥鳅体内 PBDEs 富集量 266.50 ng·L⁻¹ (以湿质量计),是环境本底值的 65 倍^[34]。六溴环十二烷 (hexabromocyclododecanes, HBCDs) 在泥鳅体内平均富集量 1 791 ng·L⁻¹ (以脂肪质量计),是沉积物中含量的 128 倍^[35]。由表 2 知,泥鳅较其他鱼对各种污染物具很强的富集能力,且对不同种类污染物的生物富集作用差异较大。

表 2 污染物在鱼类体内的含量
Table 2 The content of contamination in fish

污染物	水中浓度	实验鱼	污染物在鱼体中含量(以干质量计)/(μg·L ⁻¹)	文献
PBDEs	5.38×10 ⁻²	泥鳅(<i>Misgurnus anguillicaudatus</i>)	23.79 *	[34,36]
HBCD		泥鳅(<i>Misgurnus anguillicaudatus</i>)	355.61	[35]
Cu	0.08	泥鳅(<i>Misgurnus anguillicaudatus</i>)	22.73	[37]
Pb	0.04	泥鳅(<i>Misgurnus anguillicaudatus</i>)	12.26	[37]
Zn	0.07	泥鳅(<i>Misgurnus anguillicaudatus</i>)	138.37	[37]
Cr	0.31×10 ⁻²	泥鳅(<i>Misgurnus anguillicaudatus</i>)	6.63	[37]
PCBs		泥鳅(<i>Misgurnus anguillicaudatus</i>)	7.93	[38]
PCBs		石鳅(<i>Barbatula barbatula</i>)	3.14	[39]
Cd		石鳅(<i>Barbatula barbatula</i>)	3.01	[39]
Pb		石鳅(<i>Barbatula barbatula</i>)	3.04	[39]
Hg		石鳅(<i>Barbatula barbatula</i>)	4.70	[39]
PCBs		鲫鱼(<i>Carassius auratus</i>)	11.64	[38]
PBDEs		鲑鱼(<i>Salmo trutta</i>)	6.43	[40]
PBDEs		淡水鳉(<i>Lota lota</i>)	13.93	[34]
HBCD		食用螺(<i>Littorina littorea</i>)	0.39	[35]
HBCD		欧洲鲫鱼(<i>Carassius carassius</i>)	0.78	[35]
PBDEs		鲤鱼(<i>Cyprinus carpio</i>)	32.18	[41]
PCBs		田螺(<i>Cipangopaludina chinensis</i>)	2.69	[38]

注: * 为便于比较,文献中不能得到干质量的采用含水率折算,泥鳅含水率取 78.21%^[36]。

2 多溴联苯醚 (PBDEs)、六溴环十二烷 (HBCD)、多氯联苯 (PCBs)

泥鳅对 PBDEs、Cu、Pb、Zn 和 Cr 的 BCF 分别为 442、281、308、2 122 和 2 138,可见,泥鳅对不同污染物的 BCF 差异很大,机理需深入研究。泥鳅对沉积物中污染物的累积可能与污染物毒性及其代谢动力学、鱼体生理机能改变有关,富集量与鱼体脂肪含量有关^[39]。由于泥鳅体内污染物积累量和环境中污染物的浓度有很好相关性,其可用于环境监测^[42]。

3 生殖力毒性评价

生殖力毒性涵盖化学物质对生物体产生的有关生殖和发育的各种损伤,测试方法有长期、短期,体内、体外;测试终点有性腺指数、配子发育、产卵量、精子浓度及活力、受精率、孵化率、畸形率、子代成活率等^[43-51]。其中,短期鱼类生殖测试正被广泛用于污染物对鱼类生殖的影响^[43-45],已被 OECD、US EPA 等组织和部门用作规范的检测方法^[46]。

泥鳅绝大多数种类为体外受精,配子被排出后直接受水环境影响;鱼精子表面缺少类似卵黄膜的

保护层,故精子细胞更易受水体污染物损伤。研究表明,重金属对泥鳅具生殖毒性。将泥鳅精子在不同浓度 Fe^{2+} 和 Cu^{2+} 溶液中暴露 2 h 后激活, Fe^{2+} 和 Cu^{2+} 分别在 60 和 $5 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 浓度时能明显降低精子活力^[47-49];运动状态下,泥鳅精子更易受重金属损害^[49]。环境中盐度对泥鳅排卵量影响较大,微酸环境利于其排卵,碱性和半碱性环境抑制其排卵^[50]。Yasui 等^[51]研究了盐离子和低温对泥鳅精子运动和受精率的影响,表明 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等离子及甲醇、二甲基亚砜、二甲基乙酰胺等低温保护剂可降低泥鳅的受精率。污染物对泥鳅胚胎具明显毒性作用^[52-53],常表现出明显抑制、致畸和致死作用,且不同发育期的胚胎对污染物敏感性有别。用 8-羟基喹啉分别处理隆起期、原肠胚中期、神经胚期和尾芽期的胚盘,孵化率较对照组显著降低,分别减少至 83.5%、74%、61%和 79%,畸形率较对照组显著增加,分别增加至 58%、72%、61%和 71%;在仔鱼孵出期开始处理时,泥鳅仔鱼死亡率由 3% 渐增至 100%^[53]。藻毒素能抑制泥鳅胚胎发育, EC_{50} 为 $244.6 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ ^[52],此作用具时间和剂量依赖性;卵黄蛋白原(Vtg)普遍存在于卵生非哺乳动物血液中,是卵黄蛋白前体,在雌性个体血浆中大量存在,雄性个体中含量极少^[53]。雌二醇和双酚 A 诱导雄性泥鳅体内卵黄蛋白原显著增加^[54-55]。由表 3 知,与其他鱼类比,雄性泥鳅更易受双酚 A 诱导而产生 Vtg。

表 3 鱼类 Vtg 诱导合成所需最低双酚 A 浓度
Table 3 Lowest concentration of bisphenol A inducing the production of Vtg in fish

实验鱼	最低浓度/ $(\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1})$ 文献
泥鳅(<i>Misgurnus anguillicaudatus</i>)	1 [56]
日本巨鲍螺(<i>Haliotis gigantea</i>)	10 [57]
虹鳟(<i>Oncorhynchus mykiss</i>)	40 [58]
呆鲮鱼(<i>Pimephales promelas</i>)	640 [59]

4 遗传毒性

遗传毒性表现为染色体、DNA、基因等遗传物质在结构或功能上出现有害改变^[60-64]。彗星实验和微核实验常作为检测化学物质遗传毒性的手段,彗星尾长、带彗星尾核百分率和微核千分率是评价遗传毒性大小的常用指标^[60-64]。泥鳅在正常状态下,带彗星尾核 DNA 百分率低于 10%;在含 Cd^{2+} 、 Pb^{2+} 、 Zn^{2+} 均 $0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的溶液中,暴露 1 d 后,带彗星尾核 DNA 百分率分别为 30%、35%和 35%;7

d 后,分别为 54%、52%和 60%,这说明 3 种重金属对泥鳅细胞 DNA 有很强破坏力^[60]。将泥鳅暴露在 $0.64 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 敌敌畏中,3、6 及 9 d,红细胞微核千分率分别为 1.000、1.234 和 1.157,与对照组差异显著^[26]。将泥鳅暴露在 $20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的重铬酸钾溶液中,微核千分率为 4.8,与对照组的 0.8 差异显著^[61];将泥鳅暴露在含不同浓度的精禾草克溶液中,24 h 后,红细胞微核千分率为 0.69^[62]。油污和洗衣粉等能诱导泥鳅红细胞微核率显著增加^[63-64]。微核测试法为较简便的遗传毒理学方法,已较广泛用来检测和评价各理化因子对机体致癌、致突变效应。

5 联合毒性

将泥鳅暴露在总浓度均为 $0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 Cd^{2+} - Pb^{2+} 、 Pb^{2+} - Zn^{2+} 、 Pb^{2+} - Zn^{2+} 、 Cd^{2+} - Pb^{2+} - Zn^{2+} 的混合液中,35 d 后,分别检测其肝胰脏细胞 ATPase 及 SOD 活性,发现 Cd^{2+} - Pb^{2+} 、 Pb^{2+} - Zn^{2+} 对泥鳅的联合毒性具明显协同作用,而 Pb^{2+} - Zn^{2+} 具明显拮抗作用^[65]。在不同(碱度-盐度)的复合污染溶液中,暴露 24、48、96 h 后研究泥鳅的存活率,表明盐度和碱度有交互作用,且一致表现为拮抗作用,在 24 h 时最强,而在 96 h 时最弱^[66]。用水生毒理联合效应 Marking 相加指数法评价了 Cu^{2+} - Hg^{2+} 、 Cu^{2+} - Cr^{6+} 、 Hg^{2+} - Cr^{6+} 等的联合毒性,表明 Cu^{2+} - Hg^{2+} 对泥鳅的联合毒性 24 h 时表现为拮抗作用,48 h 时表现为协同作用; Cu^{2+} - Cr^{6+} 和 Hg^{2+} - Cr^{6+} 对泥鳅的联合毒性 24、48 和 96 h 时均表现出协同作用^[67]。将泥鳅暴露在含不同浓度 Cd^{2+} - Pb^{2+} 溶液中,染毒 48 h 后,检测肝胰脏、肾、鳃的谷-草转氨酶(GOT)和谷-丙转氨酶(GPT)活性,表明 Cd^{2+} - Pb^{2+} 的联合抑制作用具明显协同效应^[68]。

6 其他毒性

将泥鳅暴露在分别含 100%、75%、50%和 25% 的未经处理的城市污水中,6 d 后,肝脏和血清中的 SOD、GOT、GPT 酶活力均高于对照^[69];在含不同浓度洗衣粉(20、30、40 和 $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)的溶液中饲养泥鳅 24 h 后,用 SDS-聚丙烯酰胺凝胶(PAGE)电泳法检测泥鳅血清酯酶(EST)和过氧化物酶(POD)表达,结果表明,实验中选用的洗衣粉能诱导泥鳅血清 POD 同工酶表达,但会抑制血清 EST 同工酶的表达^[70]。用静水换水法将泥鳅暴露在 $0.5 \sim 4.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Pb^{2+} 溶液中,4 d 后检测肌肉 POD 酶活性,发现不同浓度铅离子均可使 POD 活性明显变化,但

2.5 mg·L⁻¹的 Pb²⁺ 对 POD 有激活作用,其他浓度 Pb²⁺ 对 POD 有抑制作用^[71]。泥鳅经亚慢性 Hg(0.2 mg·L⁻¹)染毒 9~12 d 后,处理组泥鳅视网膜中胶质细胞反应加剧,15 d 后达平衡^[29]。

7 展望

尽管关于鱼类毒性已有较多报道,但生殖问题关乎鱼类存亡,对鱼类生殖毒性研究及有关健康的安全评价,尤其是雄性生殖毒性研究,将是今后研究热点。在泥鳅雄性个体中所表现出的一些特性,如明显第二性征^[5]、易识别和获得的精巢、具可被外源物质诱导的卵黄蛋白原和其他类似生物活性物^[5-6],将促进类似研究。仍需从泥鳅中寻找生物标志物,但标志物易获性、灵敏度、可操作性和标准化等还需进一步优化和解决。在贴近现实条件下,对泥鳅进行体内外毒性实验,获得更真实毒理学资料,将日益引人关注。

因血脑屏障存在,较其他脏器,环境毒物更难进入脑组织。随更多种类化学物质进入水环境,水生生物受毒物暴露时间更长,脑组织不再那么安全。开展神经毒性研究,能更好认识环境污染状况和污染物毒性。随水环境污染状况恶化、生物监测技术发展和各种污染物毒性评价和预算模型在环境质量管理中的应用^[72-73],泥鳅较其他鱼类更能耐受恶劣环境胁迫,能对污染物较敏感做出响应^[59,74],其在环境监测及污染毒性评价中将会有更好应用前景。

通讯作者简介:卢少勇(1976—),男,博士,研究员,主要研究领域为湖泊流域污染调查与控制、湖泊流域安全评估和生态修复等。

参考文献:

- [1] 朱广香,马恒东. 环境激素的危害及研究进展简介[J]. 黑龙江畜牧兽医, 2004, 24(8): 61-62
Zhu G X, Ma H D. The hazard of environmental hormones profile and its research progress [J]. Heilongjiang Animal Science and Veterinary Medicine, 2004, 24(8): 61-62 (in Chinese)
- [2] Wu Y, Wang W X. Accumulation, subcellular distribution and toxicity of inorganic mercury and methylmercury in marine phytoplankton [J]. Environmental Pollution, 2011, 159(10): 3097-3105
- [3] Watanabe H, Nakajima F, Kasuga I, et al. Toxicity evaluation of road dust in the runoff process using a benthic ostracod *Heterocypris incongruens* [J]. Science of the Total Environment, 2011, 409(12): 2366-2372
- [4] Vanyushin B F, Kiryanov G I, Kudryashova I B, et al. DNA-methylase in loach embryos (*Misgurnus fossilis*) [J]. FEBS Letters, 1971, 15(4): 313-316
- [5] Solbé J F G, Cooper V A. Studies on the toxicity of copper sulphate to stone loach *Noemacheilus barbatulus* (L.) in hard water [J]. Water Research, 1976, 10(6): 523-527
- [6] 周立红,陈学豪,秦德忠. 四种重金属对泥鳅胚胎和仔鱼毒性研究[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 Xia Men Fisheries College, 1994, 16(1): 11-19 (in Chinese)
- [7] 金燮理,李传武. 泥鳅 *Misgurnus anguillicaudatus* (Cantor) 生物学的初步研究[J]. 湖南师范大学自然科学学报, 1986, 9(2): 59-66
Jin X L, Li C W. Apreliminary study on the biology of loach, *Misgurnus anguillicaudatus* [J]. Journal of Hunan Normal University: Natural Science, 1986, 9(2): 59-66 (in Chinese)
- [8] 杨启超,万全,赵俊峰,等. 4种常用鱼药对泥鳅的急性毒性实验[J]. 水利渔业, 2006, 26(2): 93-95
Yang Q C, Wan Q, Zhao J F, et al. The acute toxicity tests of 4 kinds of commonly fish medicines on loach [J]. Reservoir Fisheries, 2006, 26(2): 93-95 (in Chinese)
- [9] Shao J, Shi G Q, Song M S, et al. Development and validation of an enzyme-linked immunosorbent assay for vitellogenin in Chinese loach (*Misgurnus anguillicaudatus*) [J]. Environment International, 2005, 31(5): 763-770
- [10] Lv X F, Shao J, Song M Y, et al. Vitellogenic effects of 17 β -estradiol in male Chinese loach (*Misgurnus anguillicaudatus*) [J]. Comparative Biochemistry and Physiology, Part C, 2006, 143(1): 127-133
- [11] Francisco S B. Comparative acute toxicity of organic pollutants and reference for crustaceans. I. *Branchiopoda*, *Copepoda* and *Ostracoda* [J]. Environmental Pollution, 2006, 139(3): 385-420
- [12] US EPA. Ecological Effects Test Guidelines, OPPTS 850.1075 Fish Acute Toxicity Test, Freshwater and Arine [S]. Washington D C: US EPA, 1996
- [13] OECD. Guideline for testing of chemicals, draft revised guideline 203: fish, acute toxicity test [S]. 1992
- [14] Almida J R, Gravato C, Guilhermino L. Challenges in assessing the toxic effects of polycyclic aromatic hydrocarbons to marine organisms: A case study on the acute toxicity of pyrene to the European seabass (*Dicentrarchus labrax* L.) [J]. Chemosphere, 86(9): 926-937

- [15] Vieira M C, Torronteras R, Córdoba F, et al. Acute toxicity of manganese in goldfish *Carassius auratus* associated with oxidative stress and organ specific antioxidant responses [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2012, 78(1): 212–217
- [16] 国家环保总局. 中华人民共和国国家标准. 水质: 物质对淡水鱼(斑马鱼)急性毒性测定方法 GB/T 13267—1991 [S]. 北京: 中国标准出版社, 1992
- [17] 刘民. 亚硒酸对泥鳅毒性作用的研究[D]. 济南: 山东师范大学, 2007: 15–17
- Liu M. The toxic effects of sodium selenite anhydrous on loach (*Misgurnus anguillicaudatus*) [D]. Jinan: Shandong Normal University, 2007: 15–17 (in Chinese)
- [18] 张俊杰, 鄢庆彬, 李胜忠, 等. 聚维酮碘和二氧化氯对泥鳅的急性毒性试验[J]. *水产科学*, 2010, 29(12): 729–731
- Zhang J J, Yan Q P, Li S Z, et al. Acute toxicity of PVP-I and chlorine dioxide to oriental weatherfish *Misgurnus anguillicaudatus* [J]. *Fisheries Science*, 2010, 29(12): 729–731 (in Chinese)
- [19] 李宁宁, 党炳俊, 杜启艳, 等. 有机融雪剂对泥鳅的急性毒性以及红细胞微核研究[J]. *湖北农业科学*, 2009, 48(9): 2224–2226
- Li N N, Dang B J, Du Q Y, et al. Research of CH_3COOK to *Misgurnus anguillicaudatus* of acute toxicity and effects on micronuclei in erythrocytes [J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2009, 48(9): 2224–2226 (in Chinese)
- [20] 赵艳民, 张雷, 秦延文, 等. 镉“加标”沉积物对泥鳅 (*Misgurnus anguillicaudatus*) 生物毒性研究[J]. *生态毒理学报*, 2011, 6(1): 80–86
- Zhao Y M, Zhang L, Qin Y W, et al. Bio-toxicity of cadmium-spiked sediments to *Misgurnus anguillicaudatus* [J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2011, 6(1): 80–86 (in Chinese)
- [21] 贾秀英. 镉对泥鳅幼鱼的急性和亚急性毒性研究[J]. *环境污染与防治*, 2001, 23(5): 227–228
- Jia X Y. Acute and subacute toxicity of cadmium on juvenile loach [J]. *Environmental Pollution and Control*, 2001, 23(5): 227–228 (in Chinese)
- [22] 万安, 孙庆艳, 华田苗, 等. 环境无机汞对泥鳅视网膜 S100 表达影响[J]. *动物学杂志*, 2007, 42(1): 48–53
- Wan A, Sun Q Y, Hua T M, et al. Exposure to inorganic mercury affects S100-expression in the retina of loaches [J]. *Chinese Journal of Zoology*, 2007, 42(1): 48–53 (in Chinese)
- [23] 江辉, 陈开健, 刘建波, 等. 4 种农药对泥鳅的急性毒性及敏感性研究[J]. *水利渔业*, 2005, 25(2): 74–76
- Jiang H, Chen K J, Liu J B, et al. The acute toxicity tests of 4 kinds of pesticides on loach [J]. *Reservoir Fisheries*, 2005, 25(2): 74–76 (in Chinese)
- [24] 党炳俊. 四种除草剂对两种泥鳅的毒性效应[D]. 新乡: 河南师范大学, 2011: 1–75
- Dang B J. The toxic effects of four herbicides on *Misgurnus anguillicaudatus* and *Para Misgurnus anguillicaudatus* (sauvage) [D]. Xinxiang: Henan Normal University, 2011: 1–75 (in Chinese)
- [25] 南平, 肖珍, 陈建军, 等. 敌敌畏农药的急性暴露对泥鳅的遗传毒性及生理影响[J]. *河南师范大学学报: 自然科学版*, 2011, 39(5): 138–141
- Nan P, Xiao Z, Chen J J, et al. Genetics toxicity and physiology toxicity of dichlorovos to *Misgurnus anguillicaudatus* [J]. *Journal of Henan Normal University: Natural Science Edition*, 2011, 39(5): 138–141 (in Chinese)
- [26] 雷忻, 李宗强, 廉振民, 等. 双酚 A 和对硝基酚对泥鳅的急性毒性效应[J]. *生态学杂志*, 2009, 28(11): 2257–2261
- Lei X, Li Z Q, Lian Z M, et al. Acute toxicity effects of bisphenol A and p-nitrophenol to *Misgurnus anguillicaudatus* [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2009, 28(11): 2257–2261 (in Chinese)
- [27] 于淑池, 许丽敏, 朱叶莲, 等. 对苯二胺对泥鳅的急性毒性及安全评[J]. *水生态学杂志*, 2011, 32(2): 131–134
- Yu S C, Xu L M, Zhu Y L, et al. Study on acute toxicity of p-phenylenediamine on *Misgurnus anguillicaudatus* and its safety evaluation [J]. *Journal of Hydroecology*, 2011, 32(2): 131–134 (in Chinese)
- [28] 刘洋. 氨氮对泥鳅成鱼及混合选育 F_2 代的胁迫作用[D]. 苏州: 苏州大学, 2011: 1–50
- Liu Y. Ammonia-N stress on *Misgurnus anguillicaudatus* and second generation population of mass selection [D]. Suzhou: Soochow University, 2011: 1–50 (in Chinese)
- [29] 南平, 杨炆, 王君, 等. 甲醛对泥鳅的毒性研究[J]. *河南农业科学*, 2012, 41(1): 156–159
- Nan P, Yang Y, Wang J, et al. Study on the toxicity of formaldehyde to loach *Misgurnus anguillicaudatus* [J]. *Journal of Henan Agricultural Science*, 2012, 41(1): 156–159 (in Chinese)
- [30] Zhao C Y, Boriani E, Chana A, et al. A new hybrid system of QSAR models for predicting bioconcentration factors (BCF) [J]. *Chemosphere*, 2008, 73(11): 1701–1707
- [31] Commission of the European Communities. Corrigendum to regulation (EC) No. 1907/2006 of the European Parliament and of the Council of 18 December 2006 concerning the Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals (REACH), establishing a European Chemicals Agency, amending Directive 1999/45/EC and repealing Council Regulation (EEC) No. 793/93 and Commission Regulation (EC) No. 1488/94 as well as Council Directive 76/769/EEC and Commission Directives 91/155/EEC, 93/67/EEC, 93/105/EC and 2000/21/EC (OJ L 396, 30.12.2006). OJ L136, 50 29 May [S]. Brus-

- sel; Commission of the European Communities, 2006
- [32] OECD. OECD Guidelines for the Testing of Chemicals Proposal for a New Guideline, Bioaccumulation in Sediment-Dwelling Benthic Oligochaetes [S]. Paris: OECD, 2007
- [33] 吕雪飞, 邓玉林, 周群芳. 镉在雄性泥鳅体内的富集分布[J]. 化学通报, 2010, 77(10): 932—937
Lv X F, Deng Y L, Zhou Q F. Accumulation and distribution of cadmium in male Chinese loaches (*Misgurnus anguillicaudatus*) [J]. Chemistry, 2010, 77(10): 932—937(in Chinese)
- [34] Qin X F, Xia X J, Li Y, et al. Ecotoxicological effects of mixed pollutants resulted from e-wastes recycling and bioaccumulation of polybrominated diphenyl ethers in Chinese loach (*Misgurnus anguillicaudatus*) [J]. Journal of Environmental Sciences, 2009, 21(10): 1695—1701
- [35] Zhang X L, Yang F X, Luo C H, et al. Bioaccumulative characteristics of hexabromocyclododecanes in freshwater species from an electronic waste recycling area in China [J]. Chemosphere, 2009, 76(11): 1572—1578
- [36] 赵振山, 高贵琴, 印杰, 等. 泥鳅和大鳞副泥鳅营养成分分析[J]. 水利渔业, 1999, 19(2): 16—17
- [37] 王胜强, 孙津生, 丁辉, 等. 用泥鳅作底泥重金属毒性指示生物的研究[J]. 山东建筑工程学院学报, 2005, 20(1): 52—55
Wang S Q, Shun J S, Ding H, et al. Research on using *Misgurnus mizolepis* as an indicator to predict the toxicity of heavy metals in the sediment [J]. Journal of Shandong University of Architecture and Engineering, 2005, 20(1): 52—55 (in Chinese)
- [38] 张晓岭, 杨方星, 闻胜, 等. 电子废物污染地区水生生物体内多氯联苯的异构体分布特征和毒性[J]. 水生生物学报, 2009, 33(5): 811—816
Zhang X L, Yang F X, Wen S, et al. Congener pattern and toxicity of polychlorinated biphenyls in aquatic organisms from an electronic and electrical waste area [J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2009, 33(5): 811—816
- [39] Boscher A, Gobert S, Guignard C, et al. Chemical contaminants in fish species from rivers in the North of Luxembourg: Potential impact on the Eurasian otter (*Lutra lutra*) [J]. Chemosphere, 2010, 78(7): 785—792
- [40] Mariussen E, Fjeld E, Breivik K, et al. Elevated levels of polybrominated diphenylethers (PBDEs) in fish from Lake Mjøsa, Norway [J]. The Science of the Total Environment, 2008, 390(1): 132—141
- [41] Eljarrat E, Labandeira A, Marsh G, et al. Decabrominated diphenyl ether in river fish and sediment samples collected downstream an industrial park [J]. Chemosphere, 2007, 69(8): 1278—1286
- [42] Silva J M, Tsui T K N, Coimbra J, et al. Branchial ammonia excretion in the Asian weatherloach *Misgurnus anguillicaudatus* [J]. Comparative Biochemistry and Physiology, Part C, 2010, 151(1): 40—50
- [43] Bosker T, Hewitt L M, Munkittrick K R, et al. Validation of a refined short-term adult fish reproductive test with improved power for mummichog (*Fundulus heteroclitus*) to test complex effluents [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2010, 73(7): 1596—1601
- [44] Bosker T, Munkittrick K R, MacLachy D L. Challenges in current adult fish laboratory reproductive tests: Suggestions for refinement using a mummichog (*Fundulus heteroclitus*) case study [J]. Environmental Toxicology and Chemistry, 2009, 28(11): 2386—2396
- [45] Melvin S D, Munkittrick K R, Bosker T, et al. Detectable effect size and bioassay power of mummichog (*Fundulus heteroclitus*) and fathead Minnow (*Pimephales promelas*) adult reproductive tests [J]. Environmental Toxicology and Chemistry, 2009, 28(11): 2416—2425
- [46] OECE. Revised Draft OECD Guidelines for the Testing of Chemicals, Version 2. The Fish Screening Assay for Endocrine Active Substances [S]. Paris: OECD, 2008
- [47] 陈玉明, 陈杰, 王曰文, 等. 硫酸铜对泥鳅精子活力的影响[J]. 动物医学进展, 2011, 32(4): 41—44
Chen Y M, Chen J, Wang Y W, et al. Effect of copper sulfate on sperm activity of loach [J]. Progress in Veterinary Medicine, 2011, 32(4): 44—47 (in Chinese)
- [48] 陈玉明, 陈杰, 王曰文, 等. Fe^{2+} 对雄性泥鳅生殖毒性的研究[J]. 湖北农业科学, 2011, 50(7): 1444—1447
Chen Y M, Chen J, Wang Y W, et al. Research about reproductive toxicity of Fe^{2+} to the male loach, *Misgurnus anguillicaudatus* [J]. Hubei Agricultural Sciences, 2011, 50(7): 1444—1447 (in Chinese)
- [49] 陈玉明, 胡家会, 陈杰, 等. Cu^{2+} 对泥鳅精子运动的影响[J]. 四川动物, 2011, 30(4): 556—559
Chen Y M, Hu J H, Chen J, et al. Effects of Cu^{2+} to sperm motility of the loach [J]. Sichuan Journal of Zoology, 2011, 30(4): 556—559 (in Chinese)
- [50] 何振平, 王秀云, 靳晓敏, 等. 几种因素对泥鳅排卵量的影响[J]. 河北职业技术师范学院学报, 2001, 15(2): 24—26
He Z P, Wang X Y, Sun X W. Effects of several factors on the spawning quantity of *Misgurnus anguillicaudatus* [J]. Journal of Hebei Vocation-Technical Teachers College, 2001, 15(2): 24—26 (in Chinese)
- [51] Yasui G S, Fujimoto T, Rodriguez L A, et al. The effect of ions and cryoprotectants upon sperm motility and fertilization success in the loach *Misgurnus anguillicaudatus* [J]. Aquaculture, 2012, 344—349: 147—152
- [52] Liu Y D, Song L R, Li X Y, et al. The toxic effects

- of microcystin-LR on embryo-larval and juvenile development of loach, *Misgurnus mizolepis* Gunther [J]. *Toxicon*, 2002, 40(4): 395—399
- [53] 吴小华, 杜启艳, 党炳俊, 等. 8-羟基喹啉对泥鳅胚胎的毒性[J]. *西北农业学报*, 2010, 19(12): 31—34
Wu X H, Du Q Y, Dang B J, et al. Toxicity of 8-hydroxyquinoline on embryos and larvae of *Misgurnus anguillicaudatus* [J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2010, 19(12): 31—34 (in Chinese)
- [54] Pan M L, Bell W J, Telfer W H. Vitellogenic blood protein synthesis by insect fat body [J]. *Science*, 1969, 165(25): 393—394
- [55] 赵岩, 时国庆, 孙春宝, 等. 双酚 A 对泥鳅卵黄蛋白原的诱导[J]. *科学技术与工程*, 2007, 7(9): 2156—2159
Zhao Y, Shi G Q, Shun C B, et al. Induction of loach vitellogenin by bisphenol A [J]. *Science Technology and Engineering*, 2007, 7(9): 2156—2159 (in Chinese)
- [56] Lv X F, Zhou Q F, Song M Y, et al. Vitellogenic responses of 17 β -estradiol and bisphenol A in male Chinese loach (*Misgurnus anguillicaudatus*) [J]. *Environmental Toxicology and Pharmacology*, 2007, 24(2): 155—159
- [57] Kashiwada S, Lshikawa H, Miyamoto N, et al. Fish test for endocrine-disruption and estimation of water quality of Japanese rivers [J]. *Water Research*, 2002, 36(8): 2161—2166
- [58] Lindholm C, Pedersen K L, Pedersen S N. Estrogenic response of bisphenol A in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) [J]. *Aquatic Toxicology*, 2000, 48(2-3): 87—94
- [59] Sohoni P, Tyler C R, Hurd K, et al. Reproductive effects of long term exposure to bisphenol in the fathead minnow (*Pimephales promelas*) [J]. *Environmental Science & Technology*, 2001, 35(14): 2917—2925
- [60] 张迎梅, 王叶菁, 虞闰六, 等. 重金属 Cd²⁺、Pb²⁺ 和 Zn²⁺ 对泥鳅 DNA 损伤的研究[J]. *水生生物学报*, 2006, 30(4): 399—404
Zhang Y M, Wang Y Q, Yu Y L, et al. Effects of heavy metals Cd²⁺, Pb²⁺ and Zn²⁺ on loach *Misgurnus anguillicaudatus* [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2006, 30(4): 399—404 (in Chinese)
- [61] 刘敬禹. Cr⁶⁺ 对泥鳅外周血细胞微核率的影响[J]. *水生态学报*, 2011, 32(5): 119—122
Liu J Y. Effect of Cr⁶⁺ on outer blood corpuscle microkernel in *Misgurnus anguillicaudatus* [J]. *Journal of Hydroecology*, 2011, 32(5): 119—122 (in Chinese)
- [62] 谢志浩, 李骏, 平波, 等. 四种除草剂对泥鳅红细胞遗传毒性的研究[J]. *应用与环境生物学报*, 2003, 9(4): 412—416
Xie Z H, Li J, Ping P, et al. Study on genetic toxicity of four herbicides on erythrocytes of *Misgurnus anguillicaudatus* [J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2003, 9(4): 412—416 (in Chinese)
- [63] 陈建军, 崔俊莉, 支君, 等. 油污净残留的毒理学研究[J]. *西北农业学报*, 2010, 19(11): 34—37
Chen J J, Cui J L, Zhi J, et al. Toxicology research on kitchen cleanser remains [J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2010, 19(11): 34—37 (in Chinese)
- [64] 赵跃萍, 张虎芳. 洗衣粉和胭脂红对泥鳅红细胞核诱变的比较研究[J]. *山西师范大学学报: 自然科学版*, 2006, 20(3): 64—66
Zhao Y P, Zhang H F. The effects of laundry powder on POD and EST isozyme of *Misgurnus anguillicaudatus* [J]. *Journal of Shanxi Normal University: Natural Science Edition*, 2006, 20(3): 64—66 (in Chinese)
- [65] 张迎梅, 王叶菁, 虞闰六, 等. 重金属胁迫对泥鳅肝胰脏 ATPase 和 SOD 活性的影响[J]. *甘肃科学学报*, 2008, 20(3): 55—59
Zhang Y H, Wang Y Q, Yu Y L, et al. Effects of heavy metals on ATPase and SOD activities of hepatopancreas in *Misgurnus anguillicaudatus* [J]. *Journal of Gansu Sciences*, 2008, 20(3): 55—59 (in Chinese)
- [66] 李洪涛, 周文宗, 高红莉, 等. 运用均匀设计法检验盐度和碱度对泥鳅的联合毒性作用[J]. *水产科学*, 2006, 25(11): 563—566
Li H T, Zhou W Z, Gao H L, et al. Joint toxicity of salinity and alkalinity to oriental weatherfish *Misgurnus anguillicaudatus* by uniform design [J]. *Fisheries Science*, 2006, 25(11): 563—566 (in Chinese)
- [67] 高晓莉, 齐凤生, 罗胡英, 等. 铜、汞、铬对泥鳅的急性毒性和联合毒性实验[J]. *水利渔业*, 2006, 23(2): 63—64
Gao X L, Qi F S, Luo H Y, et al. Toxic effects of Cu, Hg, and Cr on loach *Misgurnus anguillicaudatus* [J]. *Reservoir Fisheries*, 2006, 23(2): 63—64 (in Chinese)
- [68] 王丙莲, 张迎梅, 侯亚妮, 等. 镉、铅对泥鳅组织转氨酶活性的影响[J]. *兰州大学学报: 自然科学版*, 2006, 42(3): 67—70
Wang B L, Zhang Y M, Hou Y N, et al. Effects of cadmium and lead on transaminase activities in tissues of *Misgurnus anguillicaudatus* [J]. *Journal of Lanzhou University: Natural Sciences*, 2006, 42(3): 67—70 (in Chinese)
- [69] 陈建军, 曹香林, 杜启艳, 等. 新乡市城市污水对泥鳅的生理毒性与遗传毒性研究[J]. *环境污染与防治*, 2008, 30(11): 31—34
Chen J J, Cao X L, Du Q Y, et al. Physiological toxicity and genotoxicity of Xingxiang wastewater on loach [J]. *Environmental Pollution and Control*, 2008, 30(11): 31—34 (in Chinese)
- [70] 赵跃平, 张虎芳, 张晓红, 等. 洗衣粉对泥鳅血清同工

- 酶表达的影响[J]. 安徽农业科学, 2010, 38(13): 6869-6870, 6888(JP)
- Zhao Y P, Zhang H F, Zhang X H, et al. The effects of laundry powder on POD and EST isozyme in blood of *Misgurnus anguillicaudatus*[J]. Journal of Anhui agricultural Sciences, 2010, 38(13): 6869-6870, 6888 (in Chinese)
- [71] 闫华超, 王志斌, 秦冬冬, 等. 铅离子对泥鳅过氧化物酶活性影响的研究[J]. 水利渔业, 2008, 28(3): 22-24
- Yan H C, Wang Z B, Qin D D, et al. Research of effects of Pb^{2+} on POD of loach [J]. Reservoir Fisheries, 2008, 28(3): 22-24 (in Chinese)
- [72] Wang T, Lin Z F, Yin D Q, et al. Hydrophobicity-dependent QSARs to predict the toxicity of perfluorinated carboxylic acids and their mixtures [J]. Environmental toxicology and Pharmacology, 2011, 32(2): 259-265
- [73] Qin L T, Liu S S, Zhang J, et al. A novel model integrated concentration addition with independent action for the prediction of toxicity of multi-component mixture [J]. Toxicology, 2011, 280(3): 164-172
- [74] 李娟, 陈洁文, 甘居利, 等. 三氯杀螨醇对泥鳅血清 GST 和 AChE 活力的影响[J]. 生态毒理学报, 2011, 6(5): 551-556
- Li J, Chen J W, Gan J L, et al. Effects of dicofol on activities of GST and AChE in blood serum of loach (*Misgurnus anguillicaudatus*) [J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2011, 6(5): 551-556 (in Chinese) ◆

基因模式提供了对污染的良好评估

2013 年 7 月 5 日 来源:环境科学与技术

瑞士研究人员使用菲藻中的基因表达模式来评估环境中的汞污染和镉污染,他们得出结论,基因表达可用于评估环境污染。

来自日内瓦大学的一个研究小组监测了在一种叫作伊乐藻(*Elodea nuttallii*)的菲藻中的基因表达模式。研究者发现,在复杂的环境样品中,它们能对有毒金属污染提供相比其他终点(比如,生物累积)更好的评估。

“总之,我们证明了使用一种没有此前遗传学信息的生物体,使用基因表达谱来评估环境污染的可行性”,这些研究人员在一篇即将在《环境科学与技术》(Environmental Science and Technology)学报上发表的文章中写道。

他们表示,“鉴于可能开发出特定和灵敏的生物鉴定”,更广泛的环境毒理学界可能对该工作感兴趣。

引自《化学品安全信息周报》2013 年第 28 期总第 240 期(中国检验检疫科学研究院化学品安全研究所编译)
http://www.chinachemicals.org.cn/reported_detail.aspx?contentid=256&ClassID=229(2013-07-15)