

五氯酚钠对鲫鱼的急性毒性: 悬浮颗粒物的影响

王乙震^{1,2}, 黄岁樑^{1,*}, 林超², 罗阳², 许维²

1. 南开大学环境科学与工程学院 环境污染过程与基准教育部重点实验室 水环境数值模拟研究室 天津城市生态环境修复与污染防治重点实验室, 天津 300071

2. 海河水利委员会海河流域水资源保护局, 天津 300170

摘要: 悬浮颗粒物在水生态系统中普遍存在, 为了研究悬浮颗粒物对氯酚类化合物生物毒性的影响, 以高岭土为模拟悬浮颗粒物, 考察了不同浓度的悬浮颗粒物(0、25、50、100、250 和 500 mg·L⁻¹) 存在条件下五氯酚钠(NaPCP) 对鲫鱼(*Carassius auratus*) 的毒性效应。等温吸附实验结果显示, 悬浮颗粒物对水体中五氯酚钠的吸附作用不明显($P > 0.05$)。96 h 急性毒性实验结果显示, 五氯酚钠对鲫鱼的 96 h - LC₅₀ 随颗粒物浓度 [SS] 的增加而减小, 两者间的关系为 $LC_{50} = 146.7 \exp(-[SS] / 186.8) + 121.7$, $r^2 = 0.99$ 。等效线图法评价结果表明, 悬浮颗粒物可增强五氯酚钠对鲫鱼的急性毒性, 两者呈毒性增加作用。

关键词: 悬浮颗粒物; 五氯酚钠; 急性毒性; 鲫鱼

文章编号: 1673-5897(2012)4-415-08 **中图分类号:** X171.5 **文献标识码:** A

Influence of Suspended Particles on Acute Toxicity of Sodium Pentachlorophenol to *Carassius auratus*

Wang Yizhen^{1,2}, Huang Suiliang^{1,*}, Lin Chao², Luo Yang², Xu Wei²

1. Key Laboratory of Pollution Processes and Environmental Criteria of Ministry of Education, Numerical Simulation Group for Water Environment, Tianjin Key Laboratory of Remediation and Pollution Control for Urban Ecological Environment, College of Environmental Science and Engineering, Nankai University, Tianjin 300071, China

2. Haihe Water Resources Protection Bureau, Haihe River Water Conservancy Commission, Tianjin 300170, China

Received 13 December 2011 **accepted** 11 January 2012

Abstract: Suspended particles are ubiquitously distributed in aquatic ecosystem. In order to investigate the influence of suspended particles on biological toxicity of chlorophenols, the kaolinite was used as a model for suspended particles, and acute toxicity of sodium pentachlorophenol (NaPCP) to *Carassius auratus* was studied at different concentrations of suspended particles (0, 25, 50, 100, 250 and 500 mg·L⁻¹). The isothermal adsorption experiments revealed that NaPCP could not be significantly adsorbed onto suspended particles ($P > 0.05$). Acute toxicity results showed that 96 h - LC₅₀ of NaPCP to *Carassius auratus* decreased with increasing the concentrations of suspended particles. The relationship between the value of 96 h - LC₅₀ and the concentration of suspended particles ([SS]) could be described by the following equation: $LC_{50} = 146.7 \exp(-[SS] / 186.8) + 121.7$, $r^2 = 0.99$. Results of isobole analysis demonstrated that suspended particles could potentiate the toxicity of NaPCP to *Carassius auratus* in a synergistic manner.

收稿日期: 2011-12-13 录用日期: 2012-01-11

基金项目: 国家自然科学基金(51079068); 天津市科技支撑计划重点项目(09ZCYSF00400; 08FDZSF03402); 国家水体污染控制与治理重大专项(2008ZX07314-005-011; 2009ZX07209-001)

作者简介: 王乙震(1986-), 男, 硕士, 研究方向为水污染控制, E-mail: xiaoyiw2009@mail.nankai.edu.cn;

* 通讯作者(Corresponding author), E-mail: slhuang@nankai.edu.cn

Keywords: suspended particles; sodium pentachlorophenol; acute toxicity; *Carassius auratus*

目前,大部分水生生物毒性实验均是在简化的实验室条件下进行的,如实验用水通常为自来水或配制水,离子强度极低且离子种类单一,基本不含悬浮颗粒物和溶解性有机质(DOM),pH值和温度稳定^[1-4]。然而化学物质对水生生物的毒性往往会受到水体硬度、pH值、温度、悬浮颗粒物和溶解性有机质等环境因素的影响。研究表明,硬度和pH值可改变重金属离子对水生生物的毒性^[5-6]。温度可改变水生生物对化学物质的毒物代谢动力学,从而影响化学物质对水生生物的毒性^[7]。Bejarano等^[8]在研究百菌清、毒死蜱和氟虫腈3种疏水性农药对入海口处水蚤的急性和慢性毒性时发现,DOM可降低百菌清和毒死蜱的生物有效性,进而可降低百菌清和毒死蜱对水蚤的急性和慢性毒性,但是DOM的存在却使比氟虫腈毒性更低或相当的代谢产物的产量减小,进而增强了氟虫腈对水蚤的急性毒性,特别是对雄性水蚤的急性毒性。

悬浮颗粒物在水生态系统中普遍存在,其产生源广泛,例如风浪、水流等水动力条件及船舶活动所造成的底泥再悬浮,以及水土流失等均会产生大量的悬浮颗粒物。悬浮颗粒物在湖泊或河流中的浓度在 $10\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 到数百 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间,有时甚至更高^[9]。据文献报道,太湖水中悬浮颗粒物浓度在 $258\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 以上的时间每年多达125 d^[10]。一般认为悬浮颗粒物可吸附水体中的化学物质特别是疏水性有机物和重金属离子,改变这些化学物质的生物有效性,从而改变化学物质对水生生物的毒性效应^[11-12]。实际上,悬浮颗粒物本身也会在水生生物产生一定影响^[13-14]。Kirk和Gilber^[13-14]的研究表明,悬浮颗粒物会对蚤类产生急性毒性,并且当悬浮粘土颗粒浓度为50和 $100\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,蚤状蚤(*Daphnia pulex*)的生存受到显著影响;悬浮颗粒物浓度与大型蚤的繁殖、生长以及其幼体生存情况呈逆相关。可见,悬浮颗粒物会增加水生生物所处生存状态的压力,可能影响化学物质在水生生物体内的毒代动力学^[11,15]。

氯酚类化合物是芳香族化合物中用途最广、污染较严重、毒性较大的一类化合物^[16]。五氯酚(PCP)及其钠盐(NaPCP)是我国地表水中主要的氯酚类污染物^[17]。Gao等^[18]监测了我国松花江、海河、黄河、长江、淮河和珠江等主要河流中3种氯酚

类化合物的浓度,在600多个采样点中,五氯酚及其钠盐的检出率高达85.4%,浓度范围为 $1.1\sim 594\text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$;其中在长江中检出的五氯酚及其钠盐浓度最高。在水环境中,五氯酚一般以其共轭碱(NaPCP)的形式存在,且五氯酚钠易溶于水^[19]。现有研究认为五氯酚是内分泌干扰物^[20],被美国和欧盟列为优先监测的有机污染物之一^[17,19]。国际癌症研究机构已将五氯酚及其钠盐列为2B类致癌物^[21],且已有研究表明五氯酚钠具有一定的遗传毒性^[21]。水环境中氯酚类化合物主要来源于工业排放^[22],若所排放的污水中污染物含量超标或发生泄漏事故,过量的氯酚类化合物将会对水生动物产生急性毒性。

鲫鱼(*Carassius auratus*)在我国分布广泛,是一种重要的经济鱼类。本研究选择鲫鱼作为受试生物,探究了悬浮颗粒物与五氯酚钠共存时对鲫鱼的联合急性毒性效应,分析了悬浮颗粒物对五氯酚钠急性毒性效应的影响,旨在揭示悬浮颗粒物对氯酚类化合物的生物毒性的影响机理,并为污水排放水质标准的制定提供一定的数据参考。

1 材料与方法(Materials and methods)

1.1 实验动物

实验所用鲫鱼(*Carassius auratus*)购自天津市塘沽区鱼市场,鱼苗来自天津市某养殖场,平均体长 $(4.3\pm 0.5)\text{ cm}$,平均体质量 $(0.70\pm 0.14)\text{ g}$,1月左右鱼龄。用脱氯自来水驯养5~7 d后用于实验,驯养期间每天投喂鲫鱼鱼食1次,但在实验前一天和实验期间不喂食。驯养期间鲫鱼死亡率不超过3%。

1.2 实验仪器与试剂

Trace DSQ GC-MS 分析仪(美国热电公司),配有DB-5MS 毛细管色谱柱($30\text{ m}\times 0.25\text{ mm}\times 0.25\text{ }\mu\text{m}$)。

五氯酚钠,分析纯,含量 $\geq 98\%$,购于天津市百世化工有限公司;五氯酚标准样品,购于国家标准物质标准样品信息中心;高岭土,化学纯,购于天津市福晨化学试剂厂,过200目筛,用作悬浮颗粒物代表;正己烷,色谱纯,购于天津市津东天正精细化学试剂厂;浓硫酸、碳酸钾和无水硫酸钠均为分析纯,购于天津市津科精细化工研究所;乙酸酐,分析纯,购于天津市化学试剂批发公司。

1.3 实验方法

实验用水均为曝气4 d以上的自来水,水质参数如下:水温 $(20\pm 1)\text{ }^{\circ}\text{C}$,pH值 7.4 ± 0.2 ,总硬度

(以 CaCO_3 计) 为 $(257.5 \pm 0.6) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 溶解氧 $\geq 7.6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。用蒸馏水配制 $2 \text{ mg} \cdot \text{mL}^{-1}$ 五氯酚钠母液。高岭土用作模拟悬浮颗粒物。

1.3.1 悬浮颗粒物对五氯酚钠的吸附实验

吸附实验在 2 L 烧杯中进行, 参照文献 [2] 中吸附实验的悬浮颗粒物及化合物浓度的设置。五氯酚钠溶液初始实际浓度为 $272 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$, 悬浮颗粒物浓度为 $250 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 持续曝气以保持颗粒物呈悬浮状态。分别在 0、1、2、4、8、12 和 24 h 时取样, 水样经过滤后测定其五氯酚钠浓度。设 2 个平行, 空白对照组中不加悬浮颗粒物。

1.3.2 急性毒性实验

将母液稀释至所需浓度。急性毒性实验同样在 2 L 烧杯中进行, 2 L 实验溶液中加入 10 条鲫鱼。(1) 无悬浮颗粒物毒性实验。根据预实验结果设置 7 个浓度组(以实际浓度计), 分别为 43、84、127、179、246、304 和 $383 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$, 同时设空白对照组, 每组设 3 个平行。实验过程中持续曝气。(2) 有悬浮颗粒物毒性实验。五氯酚钠浓度梯度设置同上, 分别向五氯酚钠处理组和空白对照组烧杯中加入一定量悬浮颗粒物, 使颗粒物浓度分别为 25、50、100、250 和 $500 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。实验过程中持续曝气以保持颗粒物呈悬浮状态。参照 OECD 关于急性毒性实验的标准方法 [2], 采用半静态换水式实验, 实验进行 96 h, 每 24 h 更换 1 次实验溶液, 以维持溶液中五氯酚钠浓度及悬浮颗粒物含量。每 24 h 观察并记录鲫鱼死亡情况, 鲫鱼死亡判断标准为用镊子轻微刺激其尾部无反应者认定为死亡。通过实验可得到五氯酚钠对鲫鱼的 96 h- LC_{50} , 以及各浓度悬浮颗粒物存在条件下五氯酚钠对鲫鱼的 96 h- LC_{50} 。

1.4 五氯酚钠浓度的测定

样品前处理方法: 取 10 mL 水样置于 60 mL 分液漏斗中, 加 0.5 mL 浓硫酸, 分别用 5 mL 正己烷萃取水样 2 次, 合并正己烷相; 再分别用 5 mL $0.1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 碳酸钾溶液提取正己烷相 2 次, 合并水相; 加入 1 mL 乙酸酐并充分振荡 2 min, 静置 10 min 后分别以 2.5、2 mL 正己烷萃取生成的五氯酚苯乙酸酯, 收集正己烷相并定容至 5 mL, 加入 0.2 g 无水硫酸钠脱水后待分析。

GC-MS 分析条件: 进样口温度为 280°C ; 检测器温度为 280°C ; 柱温程序为初温 50°C (保持 1 min), 以 $20^\circ\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$ 升至 170°C (保持 2 min), 再以 $10^\circ\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$ 升至 240°C (保持 3 min); 传输线温度为

280°C ; EI 电子源, 电子能量为 70 eV; 载气为 99.999% 氦气, 流速为 $1.0 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$; 进样量为 $1.0 \mu\text{L}$; 进样方式为不分流进样。

1.5 数据处理

采用 SPSS17.0 统计软件进行数据分析。

2 结果与分析(Results and analysis)

2.1 悬浮颗粒物对五氯酚钠的吸附

通过等温吸附实验考察溶液中五氯酚钠浓度在 24 h 内的变化, 探究高岭土模拟悬浮颗粒物是否会显著改变水体中五氯酚钠的浓度, 从而探讨悬浮颗粒物对五氯酚钠急性毒性的影响是否与悬浮颗粒物的吸附作用有关。如图 1 所示, 水相中五氯酚钠浓度从 0 h 时的 $(272 \pm 2.9) \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 变化到 24 h 时的 $(263 \pm 3.6) \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$, 在 24 h 内基本保持稳定, 未发生显著改变 ($P > 0.05$), 可知以高岭土为模型的悬浮颗粒物很少或基本不吸附五氯酚钠。目前悬浮颗粒物对五氯酚钠这类极性可离子化有机污染物的吸附研究还较少, 郎印海等 [23] 对胶州湾近岸沉积物中五氯酚钠的吸附-解吸研究表明, 沉积物中有机质含量与五氯酚钠的吸附量密切相关, 有机质含量越高, 吸附量越大; 实验中有有机质含量低的细砂沉积物对五氯酚钠的吸附量极少。本研究中, 水相中五氯酚钠浓度基本保持稳定的原因可能与高岭土有机质含量少有关, 此外, 还应与实验溶液中固液比相对较小有关。孟丽红等 [24] 在研究黄河水体颗粒物对多环芳烃的吸附行为时, 发现泥沙含量对多环芳烃的吸附有一定影响, 随着泥沙含量的减少, 总吸附量也随之减少。

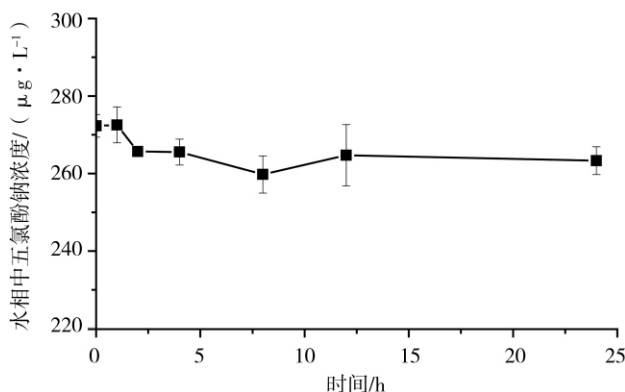


图1 悬浮颗粒物对五氯酚钠的吸附动力学

Fig. 1 Adsorption kinetic of sodium pentachlorophenol (NaPCP) on suspended particles

2.2 急性毒性实验

五氯酚钠可在鱼的肝脏和肾脏等器官内大量富集,对肝和肾造成严重损害,破坏生物体内的电子传递体系,并造成氧化损伤和 DNA 损伤^[25-26]。五氯酚钠对鲫鱼的毒性作用初期为强刺激作用,后期为抑制呼吸作用^[27]。在实验过程中,观察到鲫鱼在高浓度(383 ± 5.5) $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 五氯酚钠的作用下,初期表现为侧游,急窜,后期呼吸速率减缓,横卧烧杯底部。

五氯酚钠和悬浮颗粒物共同作用下鲫鱼的死亡率见表 1,且统计分析出了各悬浮颗粒物浓度下($0 \sim 500 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 五氯酚钠对鲫鱼的 96 h- LC_{50} ,以及不同五氯酚钠浓度下($0 \sim 383 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$) 悬浮颗粒物对鲫鱼的 96 h- LC_{50} 。结果表明,在悬浮颗粒物单独作用下,除 250 和 $500 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 悬浮颗粒物浓度组中鲫鱼死亡率为 10% 外,其他各浓度组中悬浮颗粒物均未明显影响鲫鱼的生存。

当悬浮颗粒物浓度为 $0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,五氯酚钠对鲫鱼的 96 h- LC_{50} 为 $265 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ ($0.265 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$),这与张民等^[28]报道的五氯酚对鲫鱼的 96 h- LC_{50} 为 $0.266 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 非常接近。当悬浮颗粒物浓度为 $500 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,五氯酚钠对鲫鱼的 96 h- LC_{50} 为 $134 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$,约为无悬浮颗粒物时的 96 h- LC_{50} 的 1/2。悬浮颗粒物浓度在 $0 \sim 500 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间时,五氯酚钠对鲫鱼的 96 h- LC_{50} 随颗粒物浓度的增加而减小;且在各悬浮颗粒物浓度下,鲫鱼 96 h 死亡率

随五氯酚钠浓度的升高而增大,呈现良好的剂量-效应关系。可见,五氯酚钠对鲫鱼的急性毒性随悬浮颗粒物浓度的增加而逐步增强。经数据拟合,五氯酚钠对鲫鱼的 96 h- LC_{50} 与悬浮颗粒物浓度之间的关系可用下式表示:

$$\text{LC}_{50} = 146.7 \exp(-[\text{SS}] / 186.8) + 121.7, r^2 = 0.99 \quad (1)$$

式中, LC_{50} 表示五氯酚钠对鲫鱼的 96 h 半致死浓度 ($\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$), $[\text{SS}]$ 表示悬浮颗粒物浓度 ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)。

同理,在五氯酚钠的各浓度组中,鲫鱼 96 h 死亡率随悬浮颗粒物浓度的增大而呈上升趋势。经数据拟合,悬浮颗粒物对鲫鱼的 96 h- LC_{50} 与五氯酚钠浓度之间的关系可用下式表示:

$$\text{LC}_{50} = 9372.3 \exp(-[\text{NaPCP}] / 50.2) + 198.1, r^2 = 0.89 \quad (2)$$

式中, LC_{50} 表示悬浮颗粒物对鲫鱼的 96 h 半致死浓度 ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$), $[\text{NaPCP}]$ 表示五氯酚钠浓度 ($\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)。

2.3 等效线图法评价悬浮颗粒物与五氯酚钠联合作用关系

目前常用的联合毒性作用评价方法有毒性单位法、相加指数法、混合毒性指数法、相似性参数法、等效线图法、半致死剂量指数法以及复合毒性指数法等^[29-30]。这些方法均有各自的优缺点和适用范围,等效线图法的优点是通过图形即可形象地描绘出不同比例混合物的作用类型,适合评价二元混合物的近似相加的联合作用^[30]。

表 1 五氯酚钠和悬浮颗粒物联合作用对鲫鱼的急性毒性

Table 1 Joint acute toxicity of NaPCP and suspended particles to *Carassius auratus*

NaPCP 浓度 /(μ g•L ⁻¹)	鲫鱼死亡率						悬浮颗粒物	95% 置信
	悬浮颗粒物浓度/(mg•L ⁻¹)						96 h-LC ₅₀	区间
	0	25	50	100	250	500	/(mg•L ⁻¹)	/(mg•L ⁻¹)
0	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0. 10 ± 0	0. 10 ± 0	—	—
43 ± 0. 9	0 ± 0	0. 03 ± 0. 06	0. 03 ± 0. 06	0. 10 ± 0. 10	0. 17 ± 0. 12	0. 20 ± 0. 10	4 272	934 ~ 1. 4E + 8
84 ± 2. 6	0. 03 ± 0. 06	0. 03 ± 0. 06	0. 07 ± 0. 06	0. 17 ± 0. 06	0. 23 ± 0. 06	0. 30 ± 0	1 517	570 ~ 53 582
127 ± 8. 7	0. 13 ± 0. 15	0. 17 ± 0. 06	0. 20 ± 0. 10	0. 23 ± 0. 15	0. 33 ± 0. 12	0. 40 ± 0. 10	1 504	402 ~ 4. 2E + 6
179 ± 4. 2	0. 20 ± 0. 10	0. 27 ± 0. 12	0. 27 ± 0. 12	0. 33 ± 0. 23	0. 43 ± 0. 10	0. 53 ± 0. 06	448	182 ~ 64 917
246 ± 10. 8	0. 37 ± 0. 12	0. 43 ± 0. 06	0. 43 ± 0. 06	0. 47 ± 0. 15	0. 70 ± 0. 17	0. 70 ± 0	70	15 ~ 153
304 ± 6. 9	0. 60 ± 0. 10	0. 60 ± 0. 10	0. 70 ± 0. 10	0. 73 ± 0. 12	0. 80 ± 0. 17	0. 83 ± 0. 12	—	—
383 ± 5. 5	0. 80 ± 0. 20	0. 80 ± 0. 10	0. 83 ± 0. 15	0. 83 ± 0. 15	0. 90 ± 0. 10	0. 93 ± 0. 06	—	—
NaPCP 96 h-LC ₅₀ /(μ g•L ⁻¹)	265	253	234	211	155	134		
95% 置信区间 /(μ g•L ⁻¹)	235 ~ 308	219 ~ 301	203 ~ 276	176 ~ 258	129 ~ 186	108 ~ 161		

注: —表示不能计算出该条件下的数据。

为了评价悬浮颗粒物与五氯酚钠联合作用对鲫鱼的急性毒性效应,建立了等效线图(图2)。由表1可知,当五氯酚钠浓度为 $43 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,悬浮颗粒物对鲫鱼的 96 h- LC_{50} 为 $4\,272 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,那么当五氯酚钠浓度为 $0 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,悬浮颗粒物对鲫鱼的 96 h- LC_{50} 应大于 $4\,272 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。图2中,以悬浮颗粒物浓度为横坐标,五氯酚钠浓度为纵坐标,连接悬浮颗粒物和五氯酚钠单独作用时对鲫鱼的 96 h- LC_{50} 值所得的直线即为两者联合作用的理论等效线。悬浮颗粒物与五氯酚钠的各混合组的 LC_{50} 均在理论等效线的下方,可知悬浮颗粒物可增强五氯酚钠对鲫鱼的急性毒性,两者对鲫鱼呈毒性增强作用^[6]。

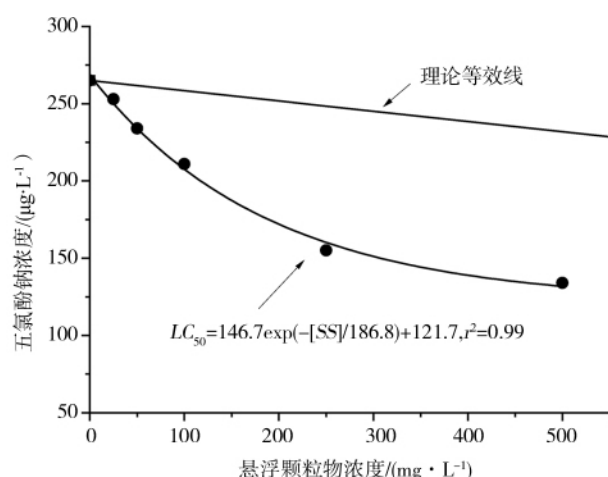


图2 等效线图评价五氯酚钠和悬浮颗粒物对鲫鱼的毒性作用关系

Fig. 2 Evaluation of toxicity interaction between NaPCP and suspended particles to *Carassius auratus* using isobole method

3 讨论(Discussion)

水生生物往往受到环境因素及化学物质的共同影响,悬浮颗粒物在水体中广泛存在,是影响化学物质对水生生物毒性的主要因素之一,了解悬浮颗粒物的作用对预测水体中化学物质对水生生物毒性十分必要。

Ra 等^[3]研究了在腐殖酸包覆的悬浮颗粒物存在条件下,一些医药品、雌激素和酚类化合物对大型溞(*Daphnia magna*)的急性毒性,悬浮颗粒物不能显著吸附布洛芬、吉非罗齐和托灭酸等3种医药品,以及雌素酮、 17β -雌二醇、 17α -乙炔基雌二醇等3种雌激素,因此这几种化合物对大型溞的急性毒性受悬浮颗粒物影响不大;悬浮颗粒物可显著吸附辛基酚和五氯苯酚,故可降低辛基酚和五氯苯酚对

大型溞的急性毒性。Cloran 等^[3]研究了不同类型的悬浮颗粒物存在时重金属镍离子对大型溞(*Daphnia magna*)的急性毒性,结果表明,悬浮颗粒物可减小镍离子对大型溞的毒性,且减小程度与不同悬浮颗粒物吸附镍离子的能力有关;悬浮颗粒物与水相中溶解态镍离子对大型溞的毒性呈协同作用。此外,水生生物通过摄食吸附有化学物质的悬浮颗粒物,也会使化学物质对水生生物的毒性增加^[4-33]。De Schamphelaere 等^[34]通过给大型溞(*Daphnia magna*)喂食含铜绿藻考察了铜离子对大型溞的慢性毒性,发现大型溞的生长和繁殖均受到抑制。

本研究结果显示,悬浮颗粒物对水体中五氯酚钠浓度没有显著影响,但却使五氯酚钠对鲫鱼的急性毒性增强。Herbrandson 和 Zurek 等^[15,34]认为大型溞(*Daphnia magna*)可摄食水体中的悬浮颗粒物,造成自身的重力增大,大型溞在水中要保持与未摄食颗粒物时相当的深度,就需要消耗更多能量以及保持更高的代谢效率,因此毒物在大型溞体内的代谢动力学随之改变,使毒物对大型溞的毒性增强。Herbrandson 等^[11,15]证实了悬浮颗粒物可影响呋喃丹在大型溞(*Daphnia magna*)体内的毒物代谢动力学,并可使大型溞产生额外的能量支出。Zurek^[34]研究发现透明溞(*Daphnia hyaline*)暴露于 $100 \sim 1\,000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的悬浮颗粒物中时,其代谢能力增加 $10.6\% \sim 32.4\%$ 。此外,Kirk^[37]研究发现,在高藻密度和低藻密度条件下悬浮颗粒物使水溞(*Daphnia ambigua*)摄食藻的能力分别降低 $60\% \sim 70\%$ 和 27% 。悬浮颗粒物导致生物摄食活动异常,进而引起生物体能量收支的不平衡,使之更易遭受外界压力的损伤^[38]。本研究的实验过程中,通过检查鲫鱼的排泄物获知,鲫鱼也会摄食悬浮颗粒物,摄食后鲫鱼体内很可能也会发生上述文献中报道的类似的作用效果,从而使五氯酚钠对鲫鱼的急性毒性增强。

此外,水体中悬浮颗粒物还会引起水生生物死亡,影响其生长、繁殖以及物种丰度等,这些影响与悬浮颗粒物浓度、组成和粒径分布以及暴露时间有关^[39]。尖锐形状的颗粒物会刺激生物体肠道或外部暴露组织,并且引起机体能量分配的改变,或导致消化速率和呼吸速率的减小,这些生化或行为反应的改变可加剧化学物质对水生生物的毒性^[13]。Herbrandson 等^[15]研究表明,相对于小密度的腐烂泥炭悬浮颗粒物溶液,在大密度的表层土壤悬浮颗粒物溶液中,呋喃丹对大型溞(*Daphnia magna*)的

毒性更高,主要原因是大型蚤消化表层土壤比消化腐烂泥炭需要更多能量。本研究中,作为模型悬浮颗粒物的高岭土或许也会引起鲫鱼的生化或行为反应的改变,这也很可能是加剧五氯酚钠对鲫鱼急性毒性的原因之一。

本研究有助于更好地评价五氯酚钠对水生动物的毒理学风险。虽然实验中模型悬浮颗粒物没有显著影响水中五氯酚钠的浓度,但是在天然水体中,悬浮颗粒物对化学物质的吸附受很多因素影响,如悬浮颗粒物中有机质含量和种类^[4]、水相中离子强度^[41-42]和表面活性剂^[43]等。另外,本研究仅参考标准急性毒性测试方法,获得了悬浮颗粒物和五氯酚钠联合作用下的一些急性毒性基础数据,没有对暴露鱼体中五氯酚钠的实际含量进行检测,悬浮颗粒物对五氯酚钠急性毒性影响的研究还有待于进一步深入。

通讯作者简介:黄岁樑(1964—),男,博士,教授,主要从事水体环境学与水环境数值模拟研究。

参考文献:

- [1] Yilmaz M, Gül A, Erbaşlı K. Acute toxicity of alpha-cypermethrin to guppy (*Poecilia reticulata* , Pallas, 1859) [J]. *Chemosphere*, 2004, 56(4): 381–385
- [2] Selvi M, Sarlkaya R, Erkoç F, et al. Investigation of acute toxicity of chlorpyrifos-methyl on guppy, *Poecilia reticulata* [J]. *Chemosphere*, 2005, 60(1): 93–96
- [3] 韩庆莉, 赵志瑞, 白志辉, 等. 敌敌畏对鲫鱼的急性毒性及类球红细菌的解毒作用 [J]. *生态毒理学报*, 2009, 4(6): 847–853
- Han Q L, Zhao Z R, Bai Z H, et al. Acute toxicity of dichlorvos to *Carassius auratus* and the detoxification by *Rhodobacter sphaeroides* [J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2009, 4(6): 847–853 (in Chinese)
- [4] Mihaich E M, Friederich U, Caspers N, et al. Acute and chronic toxicity testing of bisphenol A with aquatic invertebrates and plants [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2009, 72(5): 1392–1399
- [5] Erickson R J, Benoit D A, Mattson V R, et al. The effects of water chemistry on the toxicity of copper to fathead minnows [J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 1996, 15(2): 181–193
- [6] Long K E, Van Genderen E J, Klaine S J. The effects of low hardness and pH on copper toxicity to *Daphnia magna* [J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2004, 23(1): 72–75
- [7] Honkanen J O, Kukkonen J V K. Environmental temperature changes uptake rate and bioconcentration factors of bisphenol A in tadpoles of *Rana temporaria* [J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2006, 25(10): 2804–2808
- [8] Bejarano A C, Chandler G T, Decho A W. Influence of natural dissolved organic matter (DOM) on acute and chronic toxicity of the pesticides chlorothalonil, chlorpyrifos and fipronil on the meiobenthic estuarine copepod *Amphiascus tenuiremis* [J]. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 2005, 321(1): 43–57
- [9] Boenigk J, Wiedroither A, Pfandl K. Heavy metal toxicity and bioavailability of dissolved nutrients to a bacterivorous flagellate are linked to suspended particle physical properties [J]. *Aquatic Toxicology*, 2005, 71(3): 249–259
- [10] 朱广伟, 秦伯强, 高光. 风浪扰动引起大型浅水湖泊内源磷暴发性释放的直接证据 [J]. *科学通报*, 2005, 50(1): 66–71
- [11] Herbrandson C, Bradbury S P, Swackhamer D L. Influence of suspended solids on acute toxicity of carbofuran to *Daphnia magna*: I. Interactive effects [J]. *Aquatic Toxicology*, 2003, 63(4): 333–342
- [12] Yang W C, Spurlock F, Liu W P, et al. Inhibition of aquatic toxicity of pyrethroid insecticides by suspended sediment [J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2006, 25(7): 1913–1919
- [13] Kirk K L, Gilbert J J. Suspended clay and the population dynamics of planktonic rotifers and cladocerans [J]. *Ecology*, 1990, 71(5): 1741–1755
- [14] Kirk K L. Effects of suspended clay on *Daphnia* body growth and fitness [J]. *Freshwater Biology*, 1992, 28(1): 103–109
- [15] Herbrandson C, Bradbury S P, Swackhamer D L. Influence of suspended solids on acute toxicity of carbofuran to *Daphnia magna*: II. An evaluation of potential interactive mechanisms [J]. *Aquatic Toxicology*, 2003, 63(4): 343–355
- [16] 金小伟, 查金苗, 许宜平, 等. 氯酚类化合物对青鱼和细鳞斜颌鲴幼鱼的毒性 [J]. *环境科学学报*, 2010, 30(6): 1235–1242
- Jin X W, Zha J M, Xu Y P, et al. Acute and chronic toxicities of three chlorophenols to *Mylopharyngodon piceus* and *Plagiognathops microlepis* at early life stage [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2010, 30(6): 1235–1242 (in Chinese)
- [17] 雷炳莉, 金小伟, 黄圣彪, 等. 太湖流域3种氯酚类

- 化合物水质基准的探讨 [J]. 生态毒理学报, 2009, 4(1): 40-49
- Lei B L, Jin X W, Huang S B, et al. Discussion of quality criteria for three chlorophenols in Taihu Lake [J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2009, 4(1): 40-49 (in Chinese)
- [18] Gao J J, Liu L H, Liu X R, et al. Levels and spatial distribution of chlorophenols—2,4-Dichlorophenol, 2,4,6-trichlorophenol, and pentachlorophenol in surface water of China [J]. Chemosphere, 2008, 71(6): 1181-1187
- [19] 罗茜, 查金苗, 雷炳莉, 等. 三种氯代酚的水生态毒理和水质基准 [J]. 环境科学学报, 2009, 29(11): 2241-2249
- Luo Q, Zhao J M, Lei B L, et al. Review of the aquatic ecotoxicology and water quality criteria of three chlorophenols [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2009, 29(11): 2241-2249 (in Chinese)
- [20] Zha J M, Wang Z J, Schlenk D. Effects of pentachlorophenol on the reproduction of Japanese medaka (Oryzias latipes) [J]. Chemico-Biological Interactions, 2006, 161(1): 26-36
- [21] 徐韵, 李兆利, 李梅, 等. 五氯酚钠的遗传毒性效应研究 [J]. 南京大学学报: 自然科学, 2007, 43(4): 372-376
- Xu Y, Li Z L, Li M, et al. Genotoxicity of sodium pentachlorophenate (NaPCP) [J]. Journal of Nanjing University: Natural Sciences, 2007, 43(4): 372-376 (in Chinese)
- [22] Organization for Economic Co-operation and Development (OECD). OECD Guideline for Testing of Chemical: Fish, Acute Toxicity Test OECD Environment Health and Safety Publications Series on Testing and Assessment No. 203. [J]. Paris: OECD, 1992
- [23] 郎印海, 聂新华, 曹正梅, 等. 胶州湾近岸沉积物中五氯酚钠的吸附-解吸研究 [J]. 海洋环境科学, 2008, 27(3): 231-235
- Lang Y H, Nie X H, Cao Z M, et al. Study on adsorption-desorption of sodium pentachlorophenate in coastal sediments of Jiaozhou Bay [J]. Marine Environmental Science, 2008, 27(3): 231-235 (in Chinese)
- [24] 孟丽红, 夏星辉, 余晖, 等. 多环芳烃在黄河水体颗粒物上的表面吸附和分配作用特征 [J]. 环境科学, 2006, 27(5): 892-897
- Meng L H, Xia X H, Yu H, et al. Adsorption and partition of PAHS on particles of the Yellow River [J]. Environmental Science, 2006, 27(5): 892-897 (in Chinese)
- [25] Tugiyono, Gagnon M M. Metabolic disturbances in fish exposed to sodium pentachlorophenate (NaPCP) and 3,3',4,4',5-pentachlorobiphenyl (PCB126), individually or combined [J]. Comparative Biochemistry and Physiology Part C: Toxicology & Pharmacology, 2002, 132(4): 425-435
- [26] 王辅明, 朱祥伟, 马永鹏, 等. 低浓度五氯酚暴露对稀有鮡鲫体内SOD活性、GSH和HSP70含量的影响 [J]. 生态毒理学报, 2009, 4(3): 415-421
- Wang F M, Zhu X W, Ma Y P, et al. Effects of low concentration of pentachlorophenol exposure on SOD activity, GSH and HSP70 content in rare minnow (Gobio-cypris rarus) [J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2009, 4(3): 415-421 (in Chinese)
- [27] 叶雪平, 邵晓阳, 祝丽萍. 五氯酚对银鲫生理代谢的影响 [J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(4): 880-884
- Ye X P, Shao X Y, Zhu L P. Influence of pentachlorophenol on the metabolisms of silver crucian (Carassius auratus gibelio) [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2006, 25(4): 880-884 (in Chinese)
- [28] 张民, 王珺, 顾宇飞, 等. 鲫鱼肝脏代谢酶和血清性激素对低浓度五氯酚的响应 [J]. 环境科学研究, 2004, 17(4): 57-60
- Zhang M, Wang J, Gu Y F, et al. Response of metabolic enzymes in liver and serum hormone of Cyprinus carpio to low concentrations of pentachlorophenol [J]. Research of Environmental Sciences, 2004, 17(4): 57-60 (in Chinese)
- [29] 周后星. 复合污染生态学 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1995: 25-29
- [30] 孟庆俊, 肖昕. 不同方法对联合毒性作用的评价 [J]. 污染防治技术, 2004, 17(1): 33-35
- Meng Q J, Xiao X. Assessment of combined toxicity using different methods [J]. Pollution Control Technology, 2004, 17(1): 33-35 (in Chinese)
- [31] Altenburger R, Bödeker W, Faust M, et al. Evaluation of the isobologram method for the assessment of mixtures of chemicals: Combination effect studies with pesticides in algal biotests [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 1990, 20(1): 98-114
- [32] Ra J S, Oh S Y, Lee B C, et al. The effect of suspended particles coated by humic acid on the toxicity of pharmaceuticals, estrogens, and phenolic compounds [J]. Environmental International, 2008, 34(2): 184-192
- [33] Cloran C E, Burton G A, Hammerschmidt C R, et al. Effects of suspended solids and dissolved organic carbon on nickel toxicity [J]. Environmental Toxicology and Chemistry, 2010, 29(8): 1781-1787
- [34] De Schamphelaere K A C, Forrez I, Dierckens K, et al. Chronic toxicity of dietary copper to Daphnia magna [J]. Aquatic Toxicology, 2007, 81(4): 409-418

- [35] De Schampelaere K A C, Janssen C R. Effects of chronic dietary copper exposure on growth and reproduction of *Daphnia magna* [J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2004, 23(8) : 2038 – 2047
- [36] Zurek R. Effects of suspended materials on zooplankton: Laboratory investigations of *Daphnia hyaline* Leydig [J]. *Acta Hydrobiology*, 1983, 24(3) : 233 – 251
- [37] Kirk K L. Suspended clay reduces *Daphnia* feeding rate-behavioral mechanisms [J]. *Freshwater Biology*, 1991, 25(2) : 357 – 365
- [38] Jeon J, Ra J S, Lee S H, et al. Role of food and clay particles in toxicity of copper and diazinon using *Daphnia magna* [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2010, 73(3) : 400 – 406
- [39] Bilotta G S, Brazier R E. Understanding the influence of suspended solids on water quality and aquatic biota [J]. *Water Research*, 2008, 42(12) : 2849 – 2861
- [40] 王平. 水体中悬浮颗粒物对十溴二苯醚的吸附/解吸特性研究 [J]. *生态毒理学报*, 2009, 4(1) : 81 – 86
- Wang P. Behaviors of sorption-desorption of decabrominated diphenyl ether on suspended particulate matter in lake water [J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2009, 4(1) : 81 – 86 (in Chinese)
- [41] Lee C L, Kuo L J, Wang H L, et al. Effects of ionic strength on the binding of phenanthrene and pyrene to humic substances: Three-stage variation model [J]. *Water Research*, 2003, 37(17) : 4250 – 4258
- [42] 罗雪梅, 刘昌明. 离子强度对土壤与沉积物吸附多环芳烃的影响研究 [J]. *生态环境*, 2006, 15(5) : 983 – 987
- Luo X M, Liu C M. Effects of Ca^{2+} ionic strength on sorption of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) on soils and sediments in Yellow River Delta [J]. *Ecology and Environment*, 2006, 15(5) : 983 – 987 (in Chinese)
- [43] Smith J A, Jaffe P R, Chiou C T. Effect of ten quaternary ammonium cations on tetrachloromethane sorption to clay from water [J]. *Environmental Science & Technology*, 1990, 24(8) : 1167 – 1172 ◆