第 25 卷第 9 期
2005 年 9 月

环 境 科 学 学 报
Acta Scientiae Circumstantiae

Vol. 25, No. 9
Sep., 2005

江 敏, 李咏梅, 顾国维. 含氮杂环化合物对水生生物的毒性作用研究 [J]. 环境科学学报, 2005, 25(9): 1253 - 1258
JIANG Min, LI Yongmei, GU Guowei. Study on toxicity of nitrogenous heterocyclic compounds to aquatic organisms [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2005, 25(9): 1253 - 1258

含氮杂环化合物对水生生物的毒性作用研究

江 敏[1,2,*], 李咏梅[1], 顾国维[1]

1. 同济大学污染控制与资源化研究国家重点实验室, 上海 200092
2. 上海水产大学生命科学与技术学院, 上海 200090

收稿日期: 2005-01-12 **修回日期**: 2005-05-24 **录用日期**: 2005-06-08

摘要: 研究了 6 种典型含氮杂环化合物对水生生物的急性毒性, 获得了吲哚、吡啶、喹啉、异喹啉、2-甲基喹啉和 8-羟基喹啉对小球藻的 48 h EC_{50}、对大型蚤的 48 h LC_{50}、对斑马鱼的 96 h LC_{50} 及对发光细菌的 15 min EC_{50} 值. 6 种物质对大型蚤、斑马鱼及发光细菌的毒性与其价分子连接性指数、辛醇/水分配系数显著相关. 发光细菌毒性结果与大型蚤、斑马鱼的毒性结果显著相关, 而与小球藻不相关.

关键词: 含氮杂环化合物; 小球藻; 大型蚤; 斑马鱼; 发光细菌; 价分子连接性指数、辛醇/水分配系数

文章编号: 0253-2468(2005)08-1253-06 **中图分类号**: X171.5 **文献标识码**: A

Study on toxicity of nitrogenous heterocyclic compounds to aquatic organisms

JIANG Min[1,2,*], LI Yongmei[1], GU Guowei[1]

1. State Key Laboratory of Pollution Control and Resource Reuse, Tongji University, Shanghai 200092, China
2. College of Aqua-Science and Technology, Shanghai Fisheries University, Shanghai 200090, China

Received 12 January 2005; **received** in revised form 24 May 2005; **accepted** 8 June 2005

Abstract: Aquatic organisms are in danger of heterocyclic compounds since their commonly existence in industrial wastewater. Thus the acute toxicity of six typical nitrogenous heterocyclic compounds to aquatic organism was studied. The indole, pyridine, quinoline, iso-quinoline, 2-methylquinoline and 8-hydroxyquinoline to the 48 h EC_{50} of *Chlorella vulgaris*, the 48 h LC_{50} of Daphnia *magna straus*, the 96 h LC_{50} of *Brachydanio rerio* and the 15 min EC_{50} of *Photobacteium phosphoreum* were obtained. The toxicity of these six compounds to *magna straus*, *Brachydanio rerio* and *Photobacteium phosphoreum* had high relevance with valence molecular connectivity index and octanol/water partition. Toxic results to *magna straus*, *Brachydanio rerio* and *Photobacteium phosphoreum* had high coefficient with each other, while had no relevance with that of *Chlorella vulgaris*.

Keywords: heterocyclic compound; *Chlorella vulgaris*; *magna straus*; *Brachydanio rerio*; *Photobacteium phosphoreum*; valence molecular connectivity index; octanol/water partition

含氮杂环化合物广泛存在于石油工业、食品工业、农药、药厂等排放的废水中(Novotny, 1981), 其中的许多物质对动物和人体具有毒性、致突变性和致癌性, 同时又很难为自然界的微生物所降解, 即使在废水的好氧生物处理中降解程度也较低, 从而对生态系统和人类健康产生潜在和长远的危害(Ganczarczyk, 1981). 国内外对含氮杂环化合物毒性的研究主要集中在其对大鼠等陆生生物的影响上, 并提出了多种物质对大鼠等的半数致死剂量以及三致作用情况等, 如吡啶、吲哚、喹啉及 2-甲基喹啉对大鼠的经口半数致死剂量分别为 891、1 000、460 及 1 230 mg·kg^{-1} (《中国商品大辞典》编辑委员会, 1994); 这 4 种物质对水生生物的毒性研究也仅限于淡水纤毛虫, 其半数抑制浓度依次为 15.49、0.617、0.977 及 0.339 mol·L^{-1} (王连生, 1994). 陈景文研究了 13 种取代氮杂环类化合物对大型蚤的急性毒性(陈景文, 1996); Niculescu 等利用四膜虫研究了氮杂环化合物的毒性(Niculescu *et al*., 2000). 尽管如此, 长期以来含氮杂环化合物对水生生物的毒性仍然缺乏全面而系统的研究. 本文研究了 6 种常见含氮杂环化合物对处于水生态系统不同食物链结构处水生生物的急性毒性, 研究结果将为这些物质的急

基金项目: 国家自然科学基金(No. 50108009)
作者简介: 江 敏(1972 —), 女, 副教授, E-mail: mjiang@shfu.edu.cn; *通讯作者(责任作者)
Foundation item: National Natural Science Foundation of China (No. 50108009)
Biography: JIANG Min (1972 —), female, assistant professor, E-mail: mjiang@shfu.edu.cn; * **Corresponding author**

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

性毒性危险性评价提供基础数据,也为有关水质标准的制定提供参考,为水生态系统的保护提供依据.

1 材料与方法(Materials and Methods)

1.1 实验药品

选用吲哚、吡啶、喹啉、异喹啉、2-甲基喹啉和8-羟基喹啉开展毒性研究.所用化学药品均为分析纯,以蒸馏水分别配制成0.5、1.0 、1.0、1.0、0.5和0.2 g·L^{-1}的母液,按试验设计浓度进行稀释.

1.2 试验生物

试验用小球藻(*Chlorella vulgaris*)藻种取自上海水产大学藻种室,采用F/2配方进行培养和扩繁(陈明耀,1997);大型蚤(Daphnia *magna straus*)取自上海水产大学渔业学院基础生物实验室,为纯品系生物株,参照大型水蚤测试标准方法对水质等的规定进行饲养(GB/T 16125,1995),每批试验蚤均为同龄同母体后代;试验用1月龄斑马鱼(*Brachydanio rerio*)取自同一亲本繁殖的后代,试验开始前驯养7～10d,驯养期间每日投饵1次,按日常管理要求进行曝气、换水和清污.试验用发光细菌为明亮发光杆菌(*Photobacteium phosphoreum*),购自中国科学院南京土壤研究所,试验前取1 mL冷的2 %NaCl溶液注入已开口、含0.5 g发光细菌冻干粉的安瓿瓶中,充分混匀后,放入置有冰块的保温瓶内,2 min后发光菌即复苏发光,放置备用.

1.3 藻类急性毒性试验方法

根据预备试验结果,确定吲哚、吡啶、喹啉、异喹啉、2-甲基喹啉及8-羟基喹啉的浓度范围分别为:3.80～43.28、14.70～167.43、43.80～498.91、43.84～499.37、6.36～72.44及14.85～71.68 mg·L^{-1},按等对数间距设置7个试验组及1个对照组,每次试验设3个平行.在250 mL三角烧瓶中加入不同体积的高浓度杂环化合物母液及含有营养盐的培养液至100 mL并摇匀,再加入100 mL处于对数生长期的藻液,使初始小球藻密度控制在(10～20)×10^{4}个·mL^{-1}左右,毒物浓度为设计浓度.记录第0、24、48 h的藻液密度.采用阻碍生长试验法求得毒物浓度对数与生长阻碍率的拟合方程及EC_{50}值(黄国兰,1994):

$$\mu = (\ln N_t - \ln N_0)/(t - t_0) \quad (1)$$

式中,μ为相对最大生长速度;N_0为试验开始时(t_0)的藻密度;N_t为试验开始后t时间的藻密度.

$$B = [(\mu_b - \mu_{tox})/\mu_b] \times 100\ \% \quad (2)$$

式中,B为生长阻碍率;μ_b为对照组的相对最大生长速度;μ_{tox}为试验组的相对最大生长速度.

将毒物浓度对数与生长速度阻碍率进行线性回归,求得拟合方程及EC_{50}值.

1.4 大型蚤急性毒性试验方法

试验参照大型水蚤测试标准方法进行(GB/T 16125,1995).根据预备试验结果,确定吲哚、吡啶、喹啉、异喹啉、2-甲基喹啉及8-羟基喹啉的浓度范围分别为:0.02～0.27、49.00～558.11、5.48～62.47、5.48～41.21、5.30～39.86及1.00～10.00 mg·L^{-1},按等对数间距设置7个试验组及1个对照组,每次试验设3组平行,结果取3组平均值.试验在100 mL烧杯内进行,试验液总体积为100 mL.以经充分曝气的自来水将高浓度含氮杂环化合物母液稀释成所需浓度后,在每个烧杯中放入蚤龄小于24 h的幼蚤10只.试验光暗比为16∶8,光强为2000Lx左右.试验水温为(25±1)℃.于24 h、48 h观察记录大型蚤的死亡状况,按几率单位法求算半数致死浓度及相关方程(周永欣等,1998).

1.5 斑马鱼急性毒性试验方法

试验按照水质对淡水鱼(斑马鱼)急性毒性测定方法(GB/T13267—91)进行(GB/T 13267,1991).吲哚、吡啶、喹啉、异喹啉、2-甲基喹啉及8-羟基喹啉的浓度范围分别为:9.00～18.00、392.00～686.00、36.17～41.69、19.73～30.79、2.12～15.90及0.06～0.40 mg·L^{-1},按等对数间距设置浓度.以经充分曝气后的自来水将各物质母液稀释至所需浓度后,每一浓度组放入10尾斑马鱼,分别于24、48、72、96 h观察中毒及死亡情况.采用几率单位法求算各物质对斑马鱼的LC_{50}值及相关方程(周永欣等,1998).

1.6 发光细菌急性毒性试验方法

在25 ℃下,按照发光细菌法进行纯物质EC_{50}的测定(GB/T 15441,1995).将各物质配成系列浓度梯度,吲哚、吡啶、喹啉、异喹啉、2-甲基喹啉及8-羟基喹啉的浓度范围分别为:2.00～30.00、200.00～900.00、0.50～40.00、1.00～25.00、20.00～80.00及0.05～1.75 mg·L^{-1},各浓度组中均需加入NaCl,使其质量比为30 %;同时配制30 %的NaCl溶液作为对照.分别取对照溶液与测试液2 mL于测试管中,加入10 μL复活菌液,反应15 min后测试其发光度.同时进行$HgCl_2$的毒性试验,以验证结果的可靠性.试验结束后按下式计算各浓度组的相对发光度:

$$A = I_1/I_2 \times 100\ \% \quad (3)$$

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

式中,A 为相对发光度,I_1 为测试液发光量(mV),I_2 为对照溶液发光量(mV).每一浓度组设 3 个平行,将溶液浓度与相对发光度平均值进行线性回归,用直线内插法求得相对发光度为 50 %时所对应的溶液浓度,即为 EC_{50}.

2　结果(Results)

藻类毒性试验采用正处于指数生长期的藻液进行接种,以消除藻种质量对试验结果的影响.而由于经过较长时间的实验室驯化和饲养,大型蚤和斑马鱼的质量得到了充分保证,对照组死亡率均为 0,使试验结果更能反映毒物的真实毒性.发光细菌试验则采用 $HgCl_2$ 作为参照物,在同样试验条件下建立了 6 个 $HgCl_2$ 工作曲线方程,其 R^2 为 0.9729～0.9982,$HgCl_2$ 的 EC_{50} 为(0.093 ±0.011) mg·L^{-1},符合国标关于发光细菌毒性试验结果可信度(0.10 ± 0.02 mg·L^{-1})的要求.

6 种含氮杂环化合物对 4 种水生生物的急性毒性试验结果见图 1～图 6.6 种物质对藻类、大型蚤、斑马鱼及发光细菌急性毒性试验的拟合方程呈现良好的线性相关.参照有关标准对化合物毒性进行分级(张爱云等,1999;Joint IMCO/FAQ/UNESCO/WMO group,1969),则 8-羟基喹啉对小球藻为剧毒,其余 5 种均为低毒;吲哚对大型蚤为高毒、8-羟基喹啉为中等毒,其余均为低毒;而 8-羟基喹啉对斑马鱼属高毒,其余均为低毒.在发光细菌的毒性试验中,即使是毒性最大的 8-羟基喹啉,毒性也仅有 $HgCl_2$ 的 1/18,而异喹啉、吲哚、喹啉、2-甲基喹啉和吡啶的毒性则分别为 $HgCl_2$ 的 1/181、1/302、1/573、1/1116 和 1/22564,远远小于 $HgCl_2$.

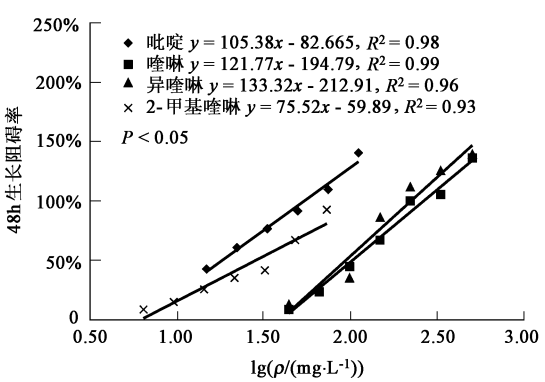

图 1　吡啶、喹啉、异喹啉与 2-甲基喹啉对小球藻的毒性作用

Fig. 1　Toxicity of pyridine, quinoline, iso-quinoline and 2-methylquinoline to *Chlorella sp*

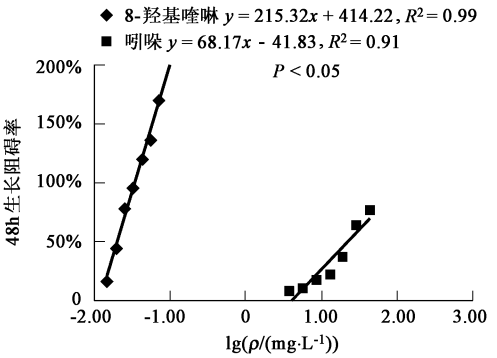

图 2　吲哚与 8-羟基喹啉对小球藻的毒性作用

Fig. 2　Toxicity of indole and 8-hydroxyquinoline to *Chlorella. sp*

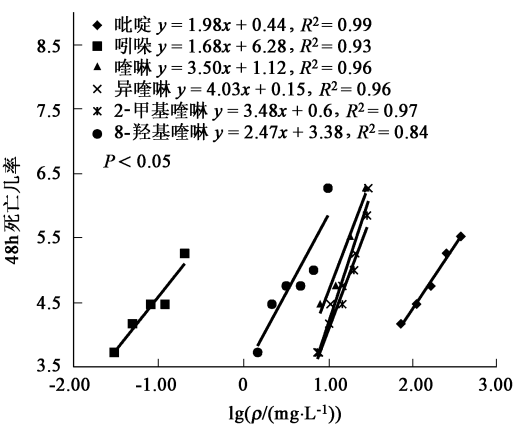

图 3　6 种含氮杂环化合物对大型蚤的毒性作用

Fig. 3　Toxicity of six nitrogenous heterocyclic compounds to *magna straus*

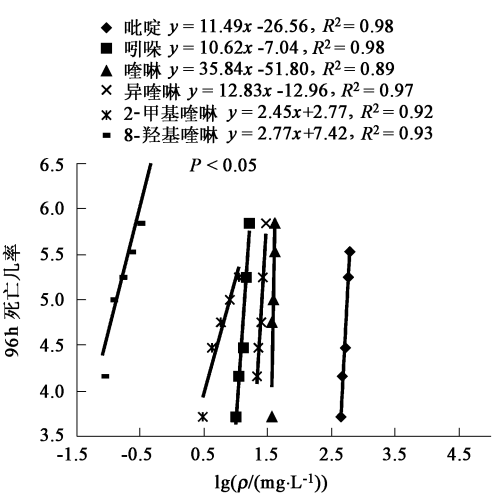

图 4　6 种含氮杂环化合物对斑马鱼的毒性作用

Fig. 4　Toxicity of six nitrogenous heterocyclic compounds to *Brachydanio rerio*

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

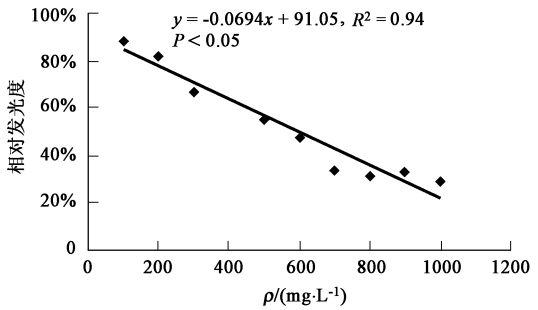

图 5 吡啶对发光细菌的毒性作用

Fig. 5 Toxicity of Pyridine to *Photobacteria Phosphoreum*

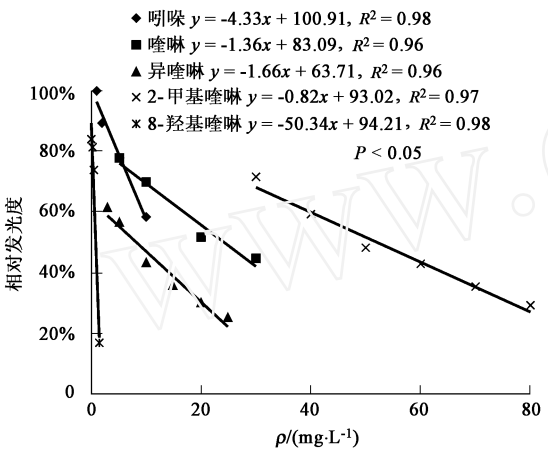

图 6 5 种含氮杂环化合物对发光细菌的毒性作用

Fig. 6 Toxicity of five nitrogenous heterocyclic compounds to *Photobacteria Phosphoreum*

3 讨论(Discussion)

3.1 含氮杂环化合物对 4 种生物的急性毒性比较

由图 1～图 6 的数据可知,6 种物质对 4 种水生生物均具有明显毒性,随着化合物浓度的提高,水生生物的存活率、相对生长速度或相对发光度均随之下降. 化学物质对不同生物的毒性差异显著,如吲哚对小球藻及大型蚤的毒性大于 2-甲基喹啉,但对斑马鱼及发光细菌的毒性则小于后者;喹啉对大型蚤的毒性大于异喹啉,而对其余 3 种生物的毒性则小于后者. 同一化学物质对 4 种生物的半数致死浓度或半数效应浓度也有很大差异,如喹啉对小球藻的 48h EC_{50} 为 102.33 mg·L^{-1},对发光细菌的 EC_{50} 为 24.30 mg·L^{-1},但对大型蚤和斑马鱼的 48 h LC_{50} 与 96 h LC_{50} 则分别为 12.77 mg·L^{-1} 和 38.44 mg·L^{-1}. 可见,仅依赖一种生物的毒性研究结果对化学物质进行毒性分级和探讨其对水生生态系统的毒性影响是片面的,建立综合考虑包括浮游植物、浮游动物、大型鱼虾类及微生物等多种形态水生生物毒性在内的水生态基准,才能全面系统地了解化学物质的水生态毒性.

比较 6 种物质的毒性可以发现,总体上 8-羟基喹啉的毒性较其它物质强. 陈景文等的试验结果表明,取代氮类杂环化合物与其衍生物的毒性与其分子体积密切相关,增大其分子体积可增大毒性(陈景文等,1996). 8-羟基喹啉的相对分子量为 145.16,属九碳杂环化合物,其分子体积为六者中最大;同时,苯环上羟基的引入可增强与生物体内受体碱性基团的结合能力,导致活性和毒性的增高(郑微云等,1993),因而在 6 种物质中表现出较强的毒性. 吡啶则是其中唯一的单环物质,分子直径最小,与之相对应的毒性也最小.

3.2 含氮杂环化合物的结构、理化性质与毒性

根据化学物的结构计算而得的价分子连接性指数是一种拓扑指数,能反映分子中原子间的相互连接情况及分支分布、分子形状及体积,具有与多种理化性质及生物活性相关的特征. 戴树桂等对此进行了大量的研究,获得了许多有价值的成果(戴树桂等,1990);余训民等借鉴前人的毒性试验数据,对部分含氮杂环化合物进行了 QSAR 分析(余训民等,2001). 将本试验中 6 种物质对小球藻 48 h EC_{50} 值 Y_1、大型蚤 48 h LC_{50} 值 Y_2、斑马鱼 96 h LC_{50} 值 Y_3、发光细菌 15 min EC_{50} 值 Y_4 与其价分子连接性指数(表 1)进行线性拟合分析,其结果列于表 2. 由表 2 可知,6 种物质对大型蚤、斑马鱼及发光细菌的急性毒性与其价分子连接性指数之间呈显著线性相关,R^2 均在 0.92 以上;而小球藻的毒性结果则与其不相关.

有机污染物的辛醇/水分配系数(log P)是描述化合物水溶性和脂溶性的参数,因而常被用作描述定量构效关系的结构参数. 有机污染物通常只有在具有适合的亲水性和亲脂性时才能发挥其最大的毒性作用. 一般 log P 与化合物的毒性关系有线性和抛物线型两种. 将上述 Y_1、Y_2、Y_3、Y_4 值与 6 种物质的 log P 值进行线性回归分析,结果见表 3. 与价分子连接性指数分析的结果类似,6 种物质对大型蚤、斑马鱼及发光细菌的急性毒性与其 log P 值之间表现出良好的线性关系,R^2 均在 0.88 以上,也即化合物的毒性随其疏水性的增大而增大;但小球藻的毒性结果却与之无线性关系.

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 1　6 种含氮杂环化合物的结构与理化参数

Table 1　The structural ,physical and chemical parameters of six nitrogenous heterocyclic compounds

	吲哚	吡啶	喹啉	异喹啉	2-甲基喹啉	8-羟基喹啉
价分子连接性指数 *	2.988	1.850	3.264	3.256	3.685	3.405
辛醇/水分配系数 log P	1.852	0.437	2.466	2.309	2.938	2.082

* 参照戴树桂(1990)介绍的方法计算而得.

表 2　6 种含氮杂环化合物对水生生物的急性毒性与价分子连接性指数的关系

Table 2　The relationship of six nitrogenous heterocyclic compounds toxicity to aquatic organisms with valence molecular conmectivity index

生物	拟合方程	r^2	显著性检验 (α = 0.05)
小球藻	$Y_1 = 0.0548x + 0.1867$	0.1086	不相关
大型蚤	$Y_2 = -1.4492x + 4.9434$	0.9229	显著相关
斑马鱼	$Y_3 = -4.1513x + 14.053$	0.9397	显著相关
发光细菌	$Y_4 = -4.3227x + 14.658$	0.9255	显著相关

x:分子连接性指数;浓度值单位取 mmol·L^{-1}

表 3　6 种含氮杂环化合物对水生生物的急性毒性与辛醇/水分配系数的关系

Table 3　The Relationship of six nitrogenous heterocyclic compounds toxicity to aquatic organisms with octanol/water partition

生物	拟合方程	r^2	显著性检验 (α = 0.05)
小球藻	$Y_1 = 0.1017x + 0.1503$	0.2691	不相关
大型蚤	$Y_2 = -1.0389x + 2.5797$	0.8827	显著相关
斑马鱼	$Y_3 = -2.9823x + 7.2957$	0.9007	显著相关
发光细菌	$Y_4 = -3.1034x + 7.617$	0.8865	显著相关

x:log P;浓度值单位取 mmol·L^{-1}

3.3　4 种水生生物急性毒性试验相关性比较

本试验所用 4 种生物分别代表了水生态系统食物链中的浮游植物、浮游动物、微生物及脊椎动物. Barry K. 利用发光细菌、虹鳟鱼及水蚤测定造纸厂废水的毒性时也发现发光细菌法的灵敏性高于虹鳟鱼,且发光细菌与虹鳟鱼测试结果具有良好相关性($r > 0.9$),与水蚤测试结果的相关系数 $r > 0.8$ (Barry *et al*. ,1990). 本研究也发现,6 种物质的发光细菌试验结果与斑马鱼和大型蚤的结果拟合度很好(表 4),R^2 达 0.99 以上,而与小球藻的结果之间无线性关系,这可能与前 3 者均属动物类,而小球藻属植物类,在生物组织构造、功能、生物吸收外源性化合物的途径、方式及对其代谢转化等多方面存在较大差异有关.

3.4　6 种含氮杂环化合物的水生态风险性评价

目前,以吡啶、吲哚、喹啉及其衍生物构成的众多含氮杂环化合物正成为农药、香料、染料等工业中备受瞩目和青睐的一类有机物,其在环境样品中的含量将随其使用范围与使用量的加大而不断增大. 根据本试验结果,若将 EC_{50} 或 LC_{50} 值的 1/10 作为安全浓度,并取其对 4 种生物所获安全浓度的最低值作为 6 种化合物对代表着水中微生物、浮游动植物及鱼类的这 4 种生物的安全限值,则吲哚、吡啶、喹啉、异喹啉、2-甲基喹啉及 8-羟基喹啉在水中的急性毒性安全限值分别为 0.017、1.815、1.277、0.824、0.811 及 0.002 mg·L^{-1}. 李咏梅等(2004)对上海宝钢化学工业公司焦化厂的污水进行分析发现,原废水中吡啶、喹啉、异喹啉、吲哚、2-甲基喹啉、8-羟基喹啉的含量可高达 3.5、37.8、16.8、33.2、22.3 及 4.8 mg·L^{-1},经厌氧段处理后为 2.8、5.6、11.0、19.8、28.2 及 11.0 mg·L^{-1},最终出水中异喹啉与 8-羟基喹啉仍有 1.1 与 0.9 mg·L^{-1} 的残留. 赵大传等(1996)研究认为,焦化厂蒸氨废水中喹啉、异喹啉及吲哚的含量可占有机物总量的 13.0 %,4.8 %及 23.9 %. 我国的地表水环境质量标准(GB3838-2002)仅对其中的吡啶进行了标准限值的规定,对其余 5 种毒性远较吡啶大的化合物却未作任何规定. 因此,在本研究基础上,仍有必要进一步完善这些物质对水生生物的毒性研究,制定相应的控制标准,以保护水生态系统.

表 4　斑马鱼、大型蚤与发光细菌毒性试验结果回归分析

Table 4　Relevancy of Photobacteria method to Magna and Brachydanio method

	拟合方程	r^2
斑马鱼与发光细菌	$y = 0.9424x - 0.772$	0.9954
大型蚤与发光细菌	$y = 0.3327x + 3.9375$	0.9975

注:y 为斑马鱼的 95 h LC_{50} 及大型蚤的 48 h LC_{50};x 为发光细菌的 EC_{50}

4　结论(Conclusions)

1) 6 种含氮杂环化合物对 4 种水生生物表现出不同的毒性:对小球藻的毒性大小由强至弱依次为:8-羟基喹啉 > 吡啶 > 吲哚 > 2-甲基喹啉 > 异喹啉 > 喹啉;对大型蚤的急性毒性依次为吲哚 > 8-羟基喹啉 > 喹啉 > 异喹啉 > 2-甲基喹啉 > 吡啶;对斑马鱼的毒性依次为 8-羟基喹啉 > 2-甲基喹啉 > 吲哚 > 异喹啉 > 喹啉 > 吡啶. 总体而言,8-羟基喹啉表现出相对较强的毒性.

2) 6 种物质对大型蚤、斑马鱼及发光细菌的急性毒性与化合物的化学结构、理化性质有关,急性毒性与价分子连接性指数建立的拟合方程之 R^2 较辛醇/水分配系数的 R^2 高;但对小球藻的急性毒性却与之无线性关系.

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

3) 由于生物种类的不同,发光细菌的毒性试验结果与大型蚤和斑马鱼的结果具有较好的线性关系,而与小球藻的结果无线性关系.

参考文献(References):

Barry K F, Carl J B. 1990. Comparison of Microtox testing with rainbow trout (acute) and ceriodaphnia (chronic) bioassays in mill wastewaters[J]. Tappi Journal: 169—174

Chen J W, Liao Y Y, Zhao Y H, *et al*. 1996. Studies of Heterocyclic nitrogen compounds[J]. Pesticides, 35(5): 21—24 (in Chinese)

Chen M Y. 1997. Cultivation of Live food[M]. Beijing: China Agriculture Press: 58—67 (in Chinese)

Dai S G, Wang J X, Song R G. 1990. Relationships between molecular connectivity and other parameters of organic contaminants [J]. Environmental Chemistry, 9(1): 1—9 (in Chinese)

Editorial Board of Dictionary of Chinese commodity. 1994. Dictionary of Chinese commodity-Chemical reagent section [M]. Beijing: China Commodity Press (in Chinese)

Ganczarczyk, J J. 1981. Fate of basic pollutants in treatment of coke-plant effluents[R]. Proc 36th Ind. Waste Conf., Purdue University: 147—154

GB/T 13267—91. 1991. Water quality-Determination of the acute toxicity of substance to a freshwater fish (*Brachydanio rerio Hamiltorr-Buchanan*) [S]. (in Chinese)

GB/T15441-1995. 1995. Water quality-Determination of acute toxicity-Luminescent bacteria test[S]. (in Chinese)

GB/T 16125 - 1995. 1995. Standard methods for bioassay of daphnia magna straus[S]. (in Chinese)

Huang G L, Dai S G, Sun H G, *et al*. 1994. Determination of the toxicity of organic pollutants to algae[J]. Environmental Chemistry, 12(3): 259—262 (in Chinese)

Joint IMCO/FAO/UNESCO/WMO Group of experts on the scientific aspects of marine pollution. 1969. Abstract of the report of the first session[J]. Water Res, 3: 995

Li Y M, Peng Y Z, Gu G W, *et al*. 2004. Degradation of organic compounds in coal coking wastewater treated by the A1-A2-O biofilm system[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 24(2): 242—248 (in Chinese)

Niculescu S P, Kaiser K L E, Schulta T W. 2000. Modeling the toxicity of chemicals to tetrahymena pyriformis using molecular fragment descripters and probabilistic neural networks [J]. Archives of Environmental Contamination and Toxicology, 39(3): 289—298

Novotny M. 1981. Compositional studies of coal bar by capillary gas chromatography/mass spectrometry[J]. Fuel, 60: 213—220

Wang L S. 1994. Chemistry of environmental health[M]. Beijing: Science Press (in Chinese)

Yu X M, Qin S X. 2001. Rsearch of QSPR/QSAR on Nitrogenous Heterocyclic Compounds. Journal of Jingzhou Normal University (Social Sciences), 24(5): 71—74 (in Chinese)

Zhang A Y, Cai D J. 1999. Toxicity and damage estimate of pesticides to algae[A]. Cai Daoji, Environmental toxicology of pesticides [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 128—134 (in Chinese)

Zhao D C, Cong J H. 1996. A GC/MS analysis of organic pollutants in cokeplant distilled ammonia wastewater[J]. Environmental Monitoring in China, 12(5): 30—32 (in Chinese)

Zheng W Y, Weng E Q. 1993. Introduction to environmental toxicology[M]. Xiamen: Press of Xiamen University (in Chinese)

Zhou Y X, Zhang Z S. 1998. Toxicity testing methods for aquatic organisms [M]. Beijing: Agriculture Press: 133 (in Chinese)

中文参考文献:

陈景文,廖宜勇,赵元慧,等. 1996. 取代氮杂环类化合物对大型蚤的定量结构-活性关系研究. 农药, 35(5): 21—24

陈明耀. 1997. 饵料生物培养[M]. 北京:中国农业出版社: 58—67

戴树桂,王菊先,宋仁高. 1990. 有机污染物分子连接性指数与其他理化参数的相关性[J]. 环境化学, 9(1): 1—8

《中国商品大辞典》编辑委员会. 1994. 中国商品大辞典-化学试剂分册[M]. 北京: 中国商业出版社

GB/T 13267—91, 水质 物质对淡水鱼(斑马鱼)急性毒性测定方法[S].

GB/T 15441-1995. 水质急性毒性的测定 发光细菌法[S].

GB/T 16125-1995, 大型水蚤测试标准方法[S].

黄国兰,戴树桂,孙红文,等. 1994. 有机污染物对藻类毒性的测定[J]. 环境化学, 12(3): 259—262

李咏梅,彭永臻,顾国维,等. 2004. 焦化废水中有机物在 A1-A2-O 生物膜系统中的降解机理研究. 环境科学学报, 24(2): 242—248

王连生. 1994. 环境健康化学[M]. 北京: 科学出版社

余训民,秦少雄. 2001. 含氮杂环化合物的 QSPR/QSAR 研究. 荆州师范学院学报(社会科学版), 24(5): 71—74

张爱云,蔡道基. 1999. 农药对藻类的毒性与危害性评估[A]. 蔡道基, 农药环境毒理学研究[M], 北京:中国环境科学出版社, 128—134

赵大传,丛锦华. 1996. 用 GC/MS 联用分析焦化厂蒸氨废水中的有机物组成. 中国环境监测, 12(5): 30—32

郑微云, 翁恩琪. 1993. 环境毒理学概论[M]. 厦门: 厦门大学出版社

周永欣,章宗涉. 1998. 水生生物毒性试验方法[M]. 北京:农业出版社: 133

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net