

毒死蜱在水溶液中的光化学降解*

吴祥为¹ 花日茂^{1*} 汤 锋¹ 李学德¹ 操海群¹ 岳永德²

(¹ 安徽农业大学资源与环境学院安徽省农产品安全重点实验室, 合肥 230036; ² 国际竹藤网络中心, 北京 100102)

【摘要】 研究了不同光源、水溶液温度、pH、水质对毒死蜱在水溶液中光化学降解的影响。结果表明, 毒死蜱在水溶液中的光解均呈一级动力学反应; 毒死蜱水溶液分别在高压汞灯、紫外灯、氙灯、太阳光照射下, 光解速度存在明显差异, 其光解半衰期分别为 0.62、6.92、19.74 和 22.50 h; 温度对毒死蜱光降解影响显著, 温度升高, 光解速度加快, 当温度升高到 35 °C, 光解速率达到最大; 毒死蜱在酸性至中性缓冲液中光解速度稳定, 在碱性缓冲液中光解速度加快; 不同水质对毒死蜱光解的影响差异较显著, 毒死蜱光解速率大小表现为蒸馏水 > 塘水 > 河水 > 湖水 > 稻田水。

关键词 毒死蜱 光源 水质 温度 pH 光解

文章编号 1001-9332(2006)07-1301-04 中图分类号 S482.3*3 文献标识码 A

Photochemical degradation of chlorpyrifos in water. WU Xiangwei¹, HUA Rimao¹, TANG Feng¹, LI Xuede¹, CAO Haiqun¹, YUE Yongde² (¹Key Laboratory of Anhui Agro-Food Safety, College of Resources and Environment, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China; ²International Center for Bamboo & Rattan, Beijing 100102, China). -Chin. J. Appl. Ecol., 2006, 17(7): 1301 ~ 1304.

In this paper, the effects of different light sources, temperature, pH, and water quality on the photochemical degradation of chlorpyrifos in water were examined under natural and simulated solar irradiation. The results showed that the photochemical degradation of chlorpyrifos in water followed the first order reaction, and its half-life was 0.62, 6.92, 19.74 and 22.50 h under high pressure mercury lamp (HPML), xenon lamp (XL), ultraviolet lamp (UV), and sunlight (SL) irradiation, respectively. Temperature had a significant effect on the degradation rate of chlorpyrifos, which was increased with increasing temperature and reached the maximum at 35 °C. The degradation rate of chlorpyrifos was stable both in acid and in neutral buffer solution, but enhanced in alkaline buffer solution. Water quality also had a significant effect, with a decreasing degradation rate of chlorpyrifos in the sequence of distilled water > tap water > river water > lake water > paddy water.

Key words Chlorpyrifos, Light sources, Water quality, Temperature, pH, Photochemical degradation.

1 引言

毒死蜱是目前全球应用最广泛的 5 种杀虫剂之一, 英文通用名称 chlorpyrifos, 化学名称 O, O-二乙基-O-(3, 5, 6-三氯-2-吡啶基) 硫逐磷酸酯, 1965 年由美国陶氏化学公司 (Dow Chemical Co.) 首先开发, 是一种广谱高效杀虫、杀螨剂, 用于防治蝼蛄、蛴螬、地老虎等地下害虫, 喷雾可防治粮食作物, 棉花、果树、蔬菜、甘蔗、花卉等作物上的多种害虫及螨类等; 还可以防治蚊、蝇、跳蚤、蜚蠊等卫生害虫, 已在美国、日本、加拿大、中国等 10 多个国家和地区注册, 使用量和应用范围目前还在不断增大^[6, 14, 15, 19]。毒死蜱大鼠急性经口毒性 LD₅₀ 为 163 mg · kg⁻¹, 急性经皮毒性 LD₅₀ > 2 330 mg · kg⁻¹, 对水生生物和蜜蜂有较高的毒性, 对人体和动物也有很高的毒性。近年来对毒死蜱及其系列产品尤其是卫生制剂对人类健康构成的威胁, 特别是对孕妇和儿童产生的危

害颇受学者重视^[2, 4, 13, 18]。

美国环境保护局 (EPA) 从 1987 年开始对环境水体中的毒死蜱开始检测, 1987 ~ 1996 年间在水体中检测到的毒死蜱浓度为 0.04 ~ 0.40 μg · L⁻¹, 基本呈逐年上升趋势^[15]。由于毒死蜱的使用量和应用范围仍在扩大, 其在环境中行为令人担忧。目前, 有关毒死蜱的研究主要集中在剂型加工、定性定量分析、测定方法以及土壤中微生物降解上^[1, 6, 8, 9, 11, 12]。至于水溶液和自然水体中多因素对毒死蜱光化学降解的影响研究甚少, 此外, 化学农药在其生产、加工及使用过程中, 不可避免地通过多种途径进入水体生态系统, 造成水体生态系统的污染。为此, 本文对毒死蜱在水溶液中的光化学降解进行了研究, 旨在掌握毒死蜱在水体中的环境行为, 揭示其降解动态规律, 并为其污染消除提供科学依据。

* 国家自然科学基金资助项目 (20277001)。

** 通讯联系人。E-mail: rimaohua@ahau.edu.cn
2005-07-18 收稿, 2006-04-24 接受。

2 材料与方法

2.1 实验材料

毒死蜱纯度 95%, 由农业部农药检定所提供; 乙腈为色谱纯; 分析纯为磷酸二氢钠、磷酸氢二钠、醋酸钠、硼砂等。

湖水, 采自巢湖水质监测点; 河水, 采自合肥市董铺水库; 塘水, 采自合肥市琥珀塘(城市公园); 稻田水, 采自安徽寿县; 重蒸水, 用自来水经自动双重纯水器蒸馏制得; 实验前各种水(除蒸馏水)经滤纸过滤, 然后经高压蒸汽灭菌 121 °C 下维持 20 min. 各种水样的理化性质见表 1.

表 1 实验水样的理化性质

Table 1 Physical and chemical properties of the water samples

水样 Water samples	pH	电导率 Conductance ($S \cdot m^{-1}$)	COD _{cr} ($mg \cdot L^{-1}$)
重蒸水 Distilled water	6.55	2×10^{-4}	0.003
稻田水 Paddy water	7.40	4.2×10^{-2}	152.0
河水 River water	7.77	1.5×10^{-2}	69.2
塘水 Pond water	7.81	2.65×10^{-2}	120.5
巢湖水 Lake water	7.71	2.21×10^{-2}	150.5

高压汞灯(150 W)、紫外灯(60 W)、氙灯(150 W)均为上海电光器件厂生产; 太阳光为合肥地区(31.8°N)2004年4~5月, 晴朗天气9:00~16:00的太阳光, 光强为35 000~46 000 lx. 高效液相色谱仪为Agilent1100型, 配可变波长紫外检测器和HP化学工作站; 旋转石英水冷光解仪在室温和50 °C之间可通过电子继电器和数控超级低温水槽自动将光解仪内反应液温度控制在设定的温度。

2.2 毒死蜱在水中的光解实验

2.2.1 光源 移取一定量的毒死蜱标准母液, 加入到双重蒸馏水中, 经磁力搅拌器搅拌, 得到 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的毒死蜱反应液. 光解时移取 15 ml 反应液于具塞石英试管中, 分别在不同光源下照光, 以铝箔包裹为黑暗对照, 同时置于不同光源下照光. 每处理设 3 次重复, 于不同时间点进行取样测定分析。

2.2.2 温度 取 15 ml 浓度为 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 毒死蜱反应液到具塞石英管中, 以高压汞灯为光源, 分别在 $20 \text{ }^\circ\text{C} \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $25 \text{ }^\circ\text{C} \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $30 \text{ }^\circ\text{C} \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $35 \text{ }^\circ\text{C} \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $40 \text{ }^\circ\text{C} \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $45 \text{ }^\circ\text{C} \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $50 \text{ }^\circ\text{C} \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$ 条件下进行光解, 光解仪内的温度通过电子继电器控制在设定温度, 以铝箔包裹为黑暗对照, 同时置光解仪中照光. 每处理设 3 次重复, 于不同时间点进行取样测定分析。

2.2.3 水质和 pH 用不同类型水和 pH 为 4、7、9 的缓冲液配置浓度为 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的毒死蜱反应液, 将装有 15 ml 毒死蜱反应液的具塞石英管置于石英水冷光解仪中, 石英管距光源 15 cm, 照光体系通过电子继电器将反应体系的温度控制在 $(25 \pm 1) \text{ }^\circ\text{C}$; 以铝箔包裹为黑暗对照, 同时置于光解仪内. 每处理 3 次重复, 于不同时间点进行取样测定分析. 缓冲液配置参考文献^[10]的方法。

2.3 水中毒死蜱的测定方法

移取光解液或黑暗对照液 5 ml 到 25 ml 具塞试管中, 加入 5 ml 乙腈, 振摇 3 min, 倒入 10 ml 的容量瓶定容, 毒死蜱

残存量用 HPLC 测定分析. 该方法的添加回收率(每处理重复 3 次)为 96.05%~99.40%, 变异系数为 1.01%~3.71%, 符合试验要求。

HPLC 分析条件, Agilent 1100-HPLC Hypersil ODS 柱(4.6 mm × 250 mm, 5 μm); 可变波长紫外检测器, 检测波长 230 nm; 流动相, 乙腈/水 = 90/10 (V/V); 流速为 $1.0 \text{ ml} \cdot \text{min}^{-1}$; 柱温为 30 °C; 手动进样, 进样量 20 μl. 此条件下, 毒死蜱的保留时间约为 5.4 min, 采用外标法对毒死蜱进行定量计算。

2.4 紫外-可见吸收光谱测定

将不同的反应溶液用 760CRT 型双束紫外-可见吸收光谱仪在 190~800 nm 之间进行光谱扫描, 获得毒死蜱在不同反应体系中的吸收光谱。

2.5 数据处理

参考文献^[21]方法, 根据一级动力学反应公式 $C_t = C_0 e^{-kt}$, 求得光解半衰期 $(T_{1/2}) = \ln 2/k$. 其中, k 为光解速率常数, C_0 为毒死蜱的初始浓度, C_t 为 t 时刻毒死蜱的残存浓度. 当毒死蜱光解一半时, 即 $C_t = C_0/2$ 时, 所需的时间即为光解半衰期 $(T_{1/2})$.

3 结果与分析

3.1 不同光源下毒死蜱的光解

由表 2 可知, 在高压汞灯、氙灯、紫外灯、太阳光 4 种光源照射下, 毒死蜱的光解符合一级动力学规律, 但其光解速度存在明显差异. 光解速度表现为高压汞灯 > 紫外灯 > 氙灯 > 太阳光. 这主要是因为毒死蜱的光解受光源和其本身的紫外-可见吸收光谱的制约(图 1). 高压汞灯的发射光谱范围在 190~1 000 nm, 有着丰富的高能量、短波长的紫外光, 显然毒死蜱在高压汞灯下可顺利地进行直接光解; 紫外灯主要发射光谱也在紫外部分, 但光的强度比高压汞灯低得多; 太阳光只有 10% 的人射光在紫外区, 实际上, 太阳光到达地球表面后, 最短波长为 286.3 nm^[16], 286.3 nm 以下波长的光被大气中的臭氧层吸收, 氙灯的发射光谱和太阳光的发射光谱相似. 而毒死蜱本身的吸收光谱主要集中在紫外部分,

表 2 不同光源下毒死蜱的光解

Table 2 Photodegradation of chlorpyrifos under different light sources

光源 Light source	一级动力学方程 First order kinetic equation	决定系数 Decisive coefficient	速率常数 Rate constant (h^{-1})	$T_{1/2}$ Half-life (h)	差异显著性 $\alpha = 0.05$ Significance at 0.05
高压汞灯 HPML	$C_t = 9.4646e^{-1.1149t}$	0.9788	1.1149	0.62	a
紫外灯 UV	$C_t = 9.1143e^{-0.1001t}$	0.9664	0.1001	6.92	b
氙灯 XL	$C_t = 9.7707e^{-0.0351t}$	0.9814	0.0351	19.74	c
太阳光 SL	$C_t = 9.2478e^{-0.0308t}$	0.9461	0.0308	22.50	d

高压汞灯、紫外灯、氙灯、太阳光的光强分别为 9 000、200、900 和 35 000~46 000 lx. The light intensity of HPML, UV, XL and SL were 9 000, 200, 900 and 35 000~46 000 lx, respectively.

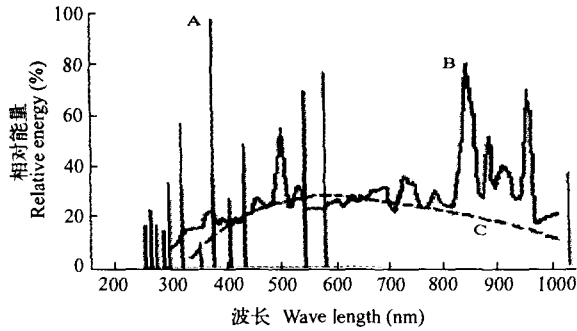


图1 3种光源的光谱分布图

Fig.1 Spectra distribution of three kinds of light sources.

A: 高压汞灯 High pressure mercury lamp; B: 氙灯 Xenon lamp; C: 太阳光 Sunlight.

最大吸收峰在 200 nm, 次大吸收峰分别在 230 和 290 nm. 从而导致了毒死蜱在高压汞灯下降解最快, 紫外灯下次之, 氙灯和太阳光下最慢.

3.2 不同水温对毒死蜱光解的影响

实验选择了 7 个不同的水环境温度, 研究了不同水温下毒死蜱在高压汞灯照射下的光解动力学. 结果表明, 随着温度的升高, 其光解速度不断加快, 在 35 °C, 光解速度达到最大, 此时的光解速率是 20 °C 的 1.46 倍. 当 > 35 °C 时, 光解速率不再增加, 基本保持在一个稳定水平 (表 3). 可见, 在光源一定, 温度较低的范围, 随着温度的升高, 毒死蜱光解速率增加, 光解加快. 但由于光化学反应不同于普通的热反应, 所需的活化能主要来自于光能, 而不是热能, 因此, 温度对于光解速率的增加是有限的, 温度升到一定程度, 毒死蜱的光解速率不再增加, 保持在一个稳定水平, 此时, 光源的能量分布与光强度成为光化学反应的制约因素.

表 3 水温对毒死蜱光解的影响

Table 3 Effects of water temperature on photolysis of chlorpyrifos

温度 Temperature (°C)	一级动力学方程 First order kinetic equation	决定系数 Decisive coefficient	速率常数 Rate constant (h ⁻¹)	T _{1/2} Half- life (h)	差异显著性 α=0.05 Significance at 0.05
20	C _t = 9.4004e ^{-0.2718t}	0.9481	0.2718	2.55	a
25	C _t = 9.1752e ^{-0.3047t}	0.9588	0.3047	2.27	b
30	C _t = 9.0635e ^{-0.3232t}	0.9510	0.3232	2.14	b
35	C _t = 9.4881e ^{-0.3959t}	0.9764	0.3959	1.75	c
40	C _t = 9.3780e ^{-0.4049t}	0.9773	0.4049	1.71	c
45	C _t = 9.2701e ^{-0.4017t}	0.9558	0.4017	1.73	c
50	C _t = 9.3372e ^{-0.3944t}	0.9597	0.3944	1.76	c

高压汞灯的光强为 5 000 lx The light intensity of HPML was 5 000 lx.

3.3 不同 pH 对毒死蜱光解的影响

从表 4 可知, 溶液的 pH 值在酸性至中性范围内, 光解速度较为缓慢, 对毒死蜱的光解速率影响也不大, 特别是酸性缓冲液中, 几乎没有变化, 在蒸馏水 (pH = 6.5) 和 pH = 4 的缓冲液中, 其光照半衰期分别为 50.28 和 50.21 min. 而在 pH 为 9 的缓冲液

中, 其光解半衰期缩短为 38.5 min, 光解速率常数是在蒸馏水中的 1.33 倍.

在实验过程中, 0 时刻的黑暗对照和照光结束时 (75 min) 的黑暗对照毒死蜱残存浓度不变, 从而排除了在照光的时间内 pH 影响毒死蜱水解的可能性. pH 对毒死蜱光解速度的影响可能与毒死蜱在不同缓冲液中的吸收光谱 (图 2) 有差异, 毒死蜱在蒸馏水、pH = 4 和 pH = 7 的缓冲液中的紫外吸收较弱, 在 pH = 9 的缓冲液中紫外吸收较强, 在 190 ~ 220 nm 有一宽的吸收带, 且有一定的蓝移. 因此导致毒死蜱在酸性至中性的范围内, 光解速度稳定, 而在碱性条件下光解加快.

表 4 不同 pH 缓冲液中毒死蜱的光解

Table 4 Photolysis of chlorpyrifos in different pH buffer aqueous solution

处理 Treatments	一级动力学方程 First order kinetic equation	决定系数 Decisive coefficient	速率常数 Rate constant (min ⁻¹)	T _{1/2} Half-life (min)	差异显著性 α=0.05 Significance at 0.05
Distilled water	C _t = 8.7535e ^{-0.0138t}	0.8931	0.0138	50.21	a
pH = 4	C _t = 8.9366e ^{-0.0137t}	0.9198	0.0137	50.58	a
pH = 7	C _t = 9.0681e ^{-0.0146t}	0.8931	0.0146	47.46	a
pH = 9	C _t = 8.9906e ^{-0.0182t}	0.9596	0.0182	38.50	b

蒸馏水的 pH 为 6.5, 光强为 8 000 lx The pH value of distilled water was 6.5 and the light intensity of HPML was 8 000 lx.

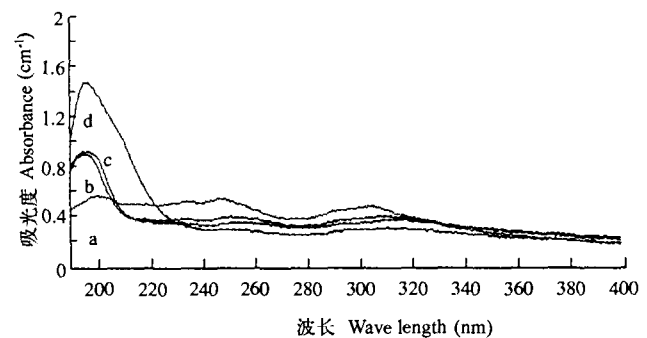


图 2 毒死蜱在不同 pH 缓冲液的紫外-可见光吸收光谱图

Fig.2 UV-VIS spectrum of chlorpyrifos in different pH buffer aqueous solutions.

a) 蒸馏水 + 毒死蜱 Distill water + chlorpyrifos; b) pH 为 4 的缓冲液 + 毒死蜱 Buffer solution of pH 4 + chlorpyrifos; c) pH 为 7 的缓冲液 + 毒死蜱 Buffer solution of pH 4 + chlorpyrifos; d) pH 为 9 的缓冲液 + 毒死蜱 Buffer solution of pH 4 + chlorpyrifos.

3.4 不同水质对毒死蜱光降解的影响

农药施用后, 可通过多种途径进入不同水质的水体, 农药在不同水质中的光解速度有差异. 从表 5 可以看出, 高压汞灯照射下, 毒死蜱在蒸馏水和塘水中的光照半衰期比较接近, 分别为 0.88 和 0.90 h, 在河水和巢湖水中半衰期分别为 0.97 和 1.02 h, 稻田水中的半衰期最长, 为 1.14 h. 可见, 高压汞灯下照射下, 毒死蜱在 5 种不同水中的光解速度大小分别为蒸馏水 > 塘水 > 河水 > 巢湖水 > 稻田水.

表5 HPML下不同水质中氯吡啶的光解
Table 5 Photolysis of chlorpyrifos in different types of water under HPML

水样 Water samples	一级动力学方程 First order kinetic equation	决定系数 Decisive coefficient	速率常数 Rate constant (h ⁻¹)	T _{1/2} Half-life (h)
蒸馏水 ¹⁾	$C_t = 9.0945e^{-0.7845t}$	0.9689	0.7845	0.88 ^a
塘水 ²⁾	$C_t = 9.1815e^{-0.7694t}$	0.9749	0.7694	0.90 ^a
河水 ³⁾	$C_t = 9.0151e^{-0.7176t}$	0.9522	0.7176	0.97 ^b
巢湖水 ⁴⁾	$C_t = 9.1413e^{-0.6808t}$	0.9609	0.6808	1.02 ^b
稻田水 ⁵⁾	$C_t = 9.0938e^{-0.6057t}$	0.9462	0.6057	1.14 ^c

1) Distilled water; 2) Pond water; 3) River water; 4) Lake water; 5) Paddy water. 光强为8 000 lx The light intensity of HPML was 8 000 lx.

4 讨 论

有机化合物的分子结构不同,其离解能有较大差异。对离解能较高的分子键,离解时需要能量较高的短波长照射^[16]。有机物吸收光能后发生电子跃迁,分子处于激发态,从激发态回到基态出现较大的反应势使有机物降解。由于分子的能级是量子化的,在特定的分子中使电子从较低能级跃迁到较高能级,需要一定的能量。有机物分子吸收光能后被激发,其激发过程所传递的能量与波长有关。波长越短,能量越高,越利于有机物分子光分解与结构转化^[3],所以造成毒死蜱光解速度大小为高压汞灯 > 紫外光 > 氙灯 > 太阳光。王敏欣等^[17]在进行异丙草胺光解时也得出同样结论,高压汞灯下的光解半衰期明显短于太阳光下。

不同类型水中毒死蜱的光解速率存在差异,导致这种原因与不同类型水中所含其它物质对光能的吸收与传导有关^[7,22]。重蒸水中不含其它物质,对光的吸收与传导阻碍小,而稻田水中则含有较为丰富的腐殖质等其它物质,在一定波长范围内,对光产生一定的遮蔽效应。这是导致毒死蜱在不同类型水中光解速率产生差异的重要原因。其次,产生这种现象原因可能与不同水质的pH、水中的离子种类与含量有关。自然水体中的DOM和其它活性发色团能吸收光能,从而引起有机污染物的间接光解^[5,20]。塘水中DOM等物质含量较高,对毒死蜱的光解有一定的促进作用,从而造成塘水中有机质含量比较高,但光解比河水快。

参考文献

- 1 Abu-Qare AW, Abou-Donia MB. 2001. Quantification of nicotine, chlorpyrifos and their metabolites in rat urine using high-performance liquid chromatography. *J Chromatogr B Biomed Sci Appl*, **757**: 295 ~ 300
- 2 Auman JT, Seidler FJ, Slotkin TA. 2000. Neonatal chlorpyrifos exposure targets multiple proteins governing the hepatic adenyl cyclase signaling cascade: Implications for neurotoxicity. *Dev Brain Res*, **121**: 19 ~ 27

- 3 Barltrop JA, Coyle JD. 1978. Trans. Song X-Q (宋心崎), Liu W-Y (刘文渊), Shi H-C (石鸿昌), et al. 1983. Principle of Photochemistry. Beijing: Tsinghua University Press. (in Chinese)
- 4 Bian A-L (边安乐). 1997. Safety of chlorpyrifos. *Chin Agric Sci Bull (中国农学通报)*, **13**(6): 71 (in Chinese)
- 5 Cui H, Hwang HM, Cook SM, et al. 2001. Effect of photosensitizer rifoflavin on fate of 2,4,6-trinitrotoluene in a freshwater environment. *Chemosphere*, **44**: 621 ~ 625
- 6 David S, Stuart H, Kevin R. 1998. Analytical chemistry of chlorpyrifos and diruon in aquatic ecosystems. *Anal Chim Acta*, **360**: 1 ~ 16
- 7 Hua R-M (花日茂), Li X-Q (李湘琼), Li X-D (李学德), et al. 1999. Photochemical degradation of butachlor in different water. *Chin J Appl Ecol (应用生态学报)*, **10**(1): 57 ~ 59 (in Chinese)
- 8 Kulkarni AR, Sollimath KS, Dave AM, et al. 2000. Solubility study of hazardous pesticide (chlorpyrifos) by chromatography. *J Hazard Mater*, **80**: 9 ~ 13
- 9 Liu X (刘新), You M-S (尤民生), Wei Y-Z (魏英智), et al. 2003. Isolation of chlorpyrifos-degrading *Aspergillus* sp. Y and measurement of degradation efficiency. *Chin J Appl Environ Biol (应用与环境微生物学报)*, **9**(1): 78 ~ 80 (in Chinese)
- 10 Lou S-C (楼书聪). 1993. Confect Manual of Chemical Reagent. Nanjing: Jiangsu Science and Technology Press. (in Chinese)
- 11 Michelle LR, Jennifer SB. 2001. Analysis of fire ant pesticides in water by solid-phase microextraction and gas chromatography/mass spectrometry or high-performance liquid chromatography/mass spectrometry. *Anal Chim Acta*, **436**: 11 ~ 20
- 12 Pozo C, Martines-Toledo MV, Salmeron V, et al. 1995. Effect of chlorpyrifos on soil microbial activity. *Environ Toxicol Chem*, **14**(2): 187 ~ 192
- 13 Qin Y-H (秦钰慧), Wang Y-Y (王以燕). 2000. The newest decision of the Unite States on chlorpyrifos. *Pesticides (农药)*, **23**(5): 307 (in Chinese)
- 14 The Editorial Office of Chinese Agriculture Cyclopaedia (中国农业百科全书编辑部). 1993. Chinese Agriculture Cyclopaedia (Pesticides Volume). Beijing: Agriculture Press. (in Chinese)
- 15 Tian Q (田芹), Zhou Z-Q (周志强), Jiang S-R (江树人), et al. 2005. Degradation of chlorpyrifos in environmental water. *J Agro-Environ Sci (农业环境科学学报)*, **24**(2): 289 ~ 293 (in Chinese)
- 16 Wang L-S (王连生). 1990. Chemistry of Organic Contamination. Beijing: Science Press. (in Chinese)
- 17 Wang M-X (王敏欣), Li F-S (李发生), Han M (韩梅), et al. 2003. Photolysis kinetics of propisochlor in water. *Environ Sci (环境科学)*, **24**(5): 125 ~ 130 (in Chinese)
- 18 Whitney KD, Aeidler FL, Slotkin TA. 1995. Developmental neurotoxicity of chlorpyrifos: Cellular mechanism. *Toxicol Appl Pharmacol*, **134**(1): 53 ~ 62
- 19 Yue Y-D (岳永德), Tang F (汤锋), Hua R-M (花日茂), et al. 2000. Studies on the effects of selected pesticides and surfactants on photodegradation of chlorpyrifos. *J Anhui Agric Univ (安徽农业大学学报)*, **21**(1): 1 ~ 4 (in Chinese)
- 20 Zafriou OC, Jousot-Dubien J, Zepp RG, et al. 1984. Photochemistry of natural waters. *Environ Sci Technol*, **18**: 358 ~ 371
- 21 Zheng H-H (郑和辉), Ye C-M (叶常明). 2002. Photodegradation of acetochlor and butachlor in soil. *Environ Chem (环境化学)*, **21**(2): 117 ~ 122 (in Chinese)
- 22 Zheng H-H (郑和辉), Ye C-M (叶常明). 2001. Study on photolysis kinetics of acetochlor in water. *Pesticide Sci Adm (农药科学与管理)*, **22**(6): 12 ~ 13 (in Chinese)

作者简介 吴祥为,男,1978年生,硕士,讲师。主要研究方向为农药残留与环境毒理,发表论文5篇。Tel: 0551-2823795-3337;E-mail: wxwahau@ahau.edu.cn

责任编辑 刘丽娟