

微酸性电解水对溶液体系中有机磷农药的 降解机制及途径分析研究

李慧颖, 李嘉欣, 郝建雄*

(河北科技大学生物科学与工程学院, 石家庄 050018)

摘要: 目的 研究对硫磷、甲基对硫磷和乐果对微酸性电解水的敏感性, 检测其降解产物并推断降解过程。**方法** 以对硫磷、甲基对硫磷和乐果标准品单一组分为研究对象, 通过调节反应时间、微酸性电解水有效氯浓度和有机磷农药的初始浓度, 采用气相色谱-质谱联用法检测有机磷农药的降解产物。对有机磷农药在微酸性电解水主要活性成分次氯酸和羟自由基作用下的降解途径进行了分析。**结果** 在反应时间 30 s 下, 有效氯浓度为 5.66 mg/L 时, 对硫磷、甲基对硫磷和乐果的降解率均能达到 100%。并检测到对硫磷和甲基对硫磷的直接降解产物对氧磷和甲基对氧磷。**结论** 微酸性电解水能够有效降解有机磷农药, 并对 HOCl 和·OH 共同作用于有机磷农药这一降解途径做出假设。该研究对于电解水在消除果蔬有机磷农药残留的应用具有一定的理论意义。

关键词: 微酸性电解水; 有机磷农药; 农残消除; 降解途径

Study on the degradation mechanism and pathway of chlorpyrifos by slightly acidic electrolyzed water in aqueous system

LI Hui-Ying, LI Jia-Xin, HAO Jian-Xiong*

(College of Bioscience and Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang 050018, China)

ABSTRACT: Objective To study the sensitivity of parathion, methyl parathion and dimethoate to slightly acidic electrolyzed water respectively, detect the degradation products and infer the degradation process. **Methods** Taking parathion, methyl parathion and dimethoate as the research objects, the degradation products of organophosphorus pesticides were detected by gas chromatography-mass spectrometry (GC-MC) by adjusting the reaction time, the available chlorine concentration (ACC) of slightly acidic electrolyzed water and the initial concentration of organophosphorus pesticides. The hypothesis degradation pathway of organophosphorus pesticides under the combination influence of hypochlorous acid and hydroxyl radical (·OH) was analyzed. **Results** When the reaction time was 30 s and the ACC was 5.66 mg/L, the degradation rate of parathion, methyl parathion and dimethoate reached 100%. The direct degradation products of parathion and methyl parathion, paraoxon and methyl paraoxon were detected. **Conclusion** Slightly acidic electrolyzed water can effectively degrade organophosphorus pesticides, and it is assumed

基金项目: 国家自然科学基金项目(31301571)、河北高等学校科学技术研究项目(QN2017331)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China (31301571), and Hebei University Science and Technology Research Project (QN2017331)

*通信作者: 郝建雄, 教授, 主要研究方向为食品安全。E-mail: cauhjx@163.com

*Corresponding author: HAO Jian-Xiong, Professor, School of Bioscience and Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang 050018, China. E-mail: cauhjx@163.com

that HOCl and $\cdot\text{OH}$ act together on the degradation pathway of organophosphorus pesticides. The research has certain theoretical significance for the application of electrolyzed water in eliminating organic phosphorus pesticide residues in fruits and vegetables.

KEY WORDS: slightly acidic electrolyzed water; organophosphorus pesticides; pesticide residues elimination; degradation pathway

0 引言

有机磷农药在中国被广泛使用,据资料显示,每年在农牧业等方面使用的农药仅有30%产生了相应作用,70%并无作用于目标物,残留的有机磷农药不仅对环境产生危害,同时也对食品安全产生了消极影响。有机磷农药中高毒农药比重过大,即使在较低浓度下也可通过抑制乙酰胆碱酯酶活性和修饰胆碱能信号传导来损害人体健康^[1]。尽管许多高毒农药被禁用,但接触有机磷农药混合物依然具有致突变性、致癌性、致畸性、细胞毒性、遗传毒性和免疫毒性等危害^[2-3]。近年来许多研究人员对消除或降解农药残留进行了大量研究,主要为吸附^[4]、光照^[5]、超声波^[6]等物理方法,氧化剂氧化^[7]、光催化降解^[8]等化学方法和微生物^[9]、酶制剂^[10]等生物方法。

微酸性电解水 pH 在 5.5~6.5,具有杀菌作用,作为一种广谱杀菌剂被广泛应用。有研究证明,电解离子水可在短时间内杀灭各种细菌如金黄色葡萄球菌^[11]、白色念珠菌^[12]、芽孢杆菌^[13]、大肠杆菌^[14]、沙门氏菌^[15]等,各种霉菌如毛霉、青霉、曲霉^[16-17]等以及肠道病毒、流感病毒^[18]等各类微生物。目前已应用于果蔬保鲜、农副产品食品杀菌、设备消毒和改良食品品质等各个方面,将微酸性电解水应用于果蔬中农药残留降解的研究,有利于拓宽其食品安全方面的应用,为该技术在食品安全方面的应用提供了新途径。

本研究选取有机磷农药对硫磷、甲基对硫磷和乐果标准品水溶液体系为研究对象,考察了水溶液体系中单一组分对微酸性电解水的敏感性,通过鉴定不同反应阶段下农药降解产物结构,对其降解途径进行了分析,旨在为将微酸性电解水用于果蔬农药残留消除的新应用提供理论支持。

1 材料与方法

1.1 仪器与试剂

安捷伦 5975 系列质谱仪、安捷伦 7890 气相色谱仪 [安捷伦(中国)科技有限公司]; AR1140 电子天平、FA2004B 电子天平、PHS-3C 精密 pH 计 [奥豪斯仪器(常州)有限公司]; VORIEX-5 旋涡混合器(海门市其林贝尔仪器制造有限公司)。

对硫磷标准品、甲基对硫磷标准品、乐果标准品 (100 $\mu\text{g}/\text{mL}$,农业部环境保护科研检测所)。

氯化钠(分析纯,天津市欧博凯化工有限公司); 碘化钾(分析纯,天津市凯通化学试剂有限公司); 硫代硫酸钠、可溶性淀粉(分析纯,天津市永大化学试剂有限公司); 冰乙酸、三氯甲烷(分析纯,天津市富宇精细化工有限公司)。

1.2 实验方法

1.2.1 微酸性电解水的制备

采用实验室自制可调式电解水发生器来制备微酸性电解水^[19]。制备好的电解水需 5 min 内完成检测理化指标, pH 值用 pH 计检测,有效氯浓度(available chlorine concentration, ACC)采用碘量法测定^[20]。微酸性电解水的制备方法如表 1。

1.2.2 反应时间对微酸性电解水降解有机磷农药降解效果影响实验

取 5 mL 1 号微酸性电解水,分别加入 200 μL 对硫磷标准品溶液、甲基对硫磷标准溶液和乐果标准溶液于 10 mL 离心管中,振荡 30 s,然后加入 1 mL 中和剂 0.2 mol/L 硫代硫酸钠溶液终止反应,取 1 mL 三氯甲烷进行萃取,重复萃取 2 次,萃取完成后用三氯甲烷定容至 2 mL,过 0.22 μm 膜,备用。反应时间分别为 1、2、3、5、10 min 进行实验,操作步骤如上,并对 2、3、4 号微酸性电解水进行重复实验。

表 1 微酸性电解水制备条件及理化指标

Table 1 Production conditions and physical and chemical indicators of slightly acidic electrolyzed water

样品编号	HCl/mL	NaCl/g	电压/V	电流(A)	时间/min	极板间距/cm	pH	有效氯浓度/(mg/L)
1	0	12	12	1	3	8	6.00	1.95
2	0	12	12	5	3	8	6.33	5.66
3	0	8	12	5	3	3	6.35	10.63
4	0.2	12	12	10	15	15	5.95	29.32

1.2.3 微酸性电解水有效氯浓度对有机磷农药降解效果影响实验

取 5 mL 1 号微酸性电解水, 分别加入 200 μL 对硫磷标准溶液、甲基对硫磷标准溶液和乐果标准溶液于 10 mL 离心管中, 振荡 30 s, 然后加入 1 mL 中和剂 0.2 mol/L 硫代硫酸钠溶液终止反应, 取 1 mL 三氯甲烷进行萃取, 重复萃取 2 次, 萃取完成后用三氯甲烷定容至 2 mL, 过 0.22 μm 膜, 备用。振荡时间分别 0.5、2、10 min 进行实验, 操作步骤如上, 并对 2、3、4 号微酸性电解水进行重复实验。

1.2.4 有机磷农药初始浓度对降解效果影响实验

分别取 0.5、1、2、3、5 mL 1 号微酸性电解水, 各分别加入 200 μL 3 种不同有机磷农药标准溶液于 10 mL 离心管中, 振荡 30 s, 然后加入 1 mL 中和剂 0.2 mol/L 硫代硫酸钠溶液终止反应, 取 1 mL 三氯甲烷进行萃取, 重复萃取 2 次, 萃取完成后用三氯甲烷定容至 2 mL, 过 0.22 μm 膜, 备用。反应时间分别为 0.5、1、2、3、5、10 min 进行试验, 操作步骤如上, 并对 2、3、4 号微酸性电解水进行重复实验。

1.2.5 气相色谱-质谱联用法分析有机磷农药降解产物

色谱柱: 采用 DB-FFAP; 进样口温度: 250 $^{\circ}\text{C}$; 柱温: 起始温度 60 $^{\circ}\text{C}$, 以 10 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 升温速率至 220 $^{\circ}\text{C}$, 保持 33 min; 载气: 氦气, 流速 1 mL/min; 不分流; 接口温度: 250 $^{\circ}\text{C}$; 离子源温度: 250 $^{\circ}\text{C}$; 电离方式: 电轰击电离 (electron ionization, EI); 扫描范围: 25~450 amu; 扫描周期: 0.2 s。

1.2.6 农药降解率计算

气相色谱定量方式采用外标法, 以峰面积进行计算样品中农药的残留量, 按公式(1)计算, 农药降解率按公式(2)计算。

$$\omega = \frac{V_1 \times V_3 \times A}{V_2 \times A_s \times V_4} \times \varphi \times 1000 \quad (1)$$

式中: ω 表示样品中农药含量, $\mu\text{g}/\text{L}$; φ 表示标准溶液中农药的含量, mg/L ; A 表示样品中农药的峰面积; A_s 表示标样中农药的峰面积; V_3 表示样品定容体积, mL ; V_1 表示提取溶剂总体积, mL ; V_2 表示吸取出用于检测的提取溶液的体

积, mL ; V_4 表示样品的体积, mL 。

$$\text{农药降解率}(\%) = \frac{\text{样品清除后农药含量} - \text{样品清除前农药含量}}{\text{样品清除前农药含量}} \times 100\% \quad (2)$$

1.2.7 数据处理

以上实验均重复测定 3 次, 实验中所有数据均由重复测定所得数据的平均值 \pm 标准差表示。测得的数据均由 SPSS Statistics 17.0 软件通过单因素方差分析利用邓肯法 ($P < 0.05$) 进行分析, 图表均由 Origin Pro. 8.0 软件绘制。

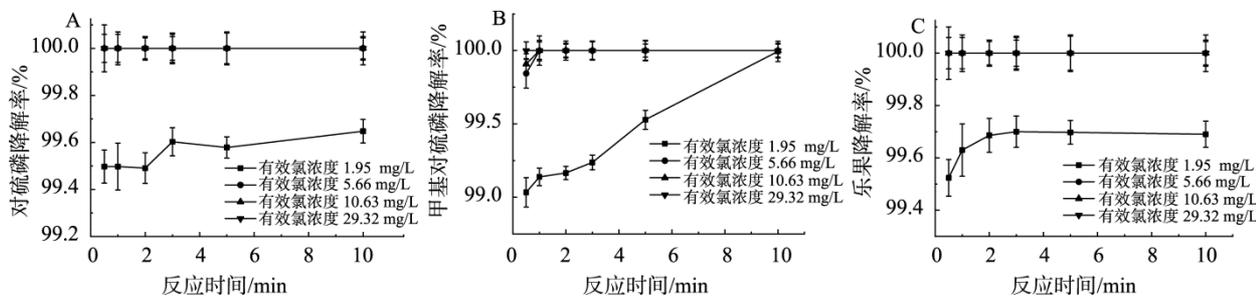
2 结果与分析

2.1 反应时间对降解效果的影响

分别在微酸性电解水有效氯浓度为 1.95、5.66、10.63、29.32 mg/L 下对体系中有有机磷农药的降解效果进行研究, 如图 1 所示。在 4 种不同有效氯浓度的微酸性电解水处理下, 3 种有机磷农药降解率均处于 99.0% 以上。当有效氯浓度为 1.95 mg/L 时, 降解率随时间的增加基本呈上升趋势, 并在反应时间为 10 min 时, 对硫磷与乐果的降解率达到 99.65% 左右, 甲基对硫磷降解率能够达到 100%。其他 3 种有效氯浓度在反应 1 min 时, 降解率均能达到 100%。微酸性电解水对这 3 种有机磷农药的降解效果相似。

2.2 ACC 对降解效果的影响

如图 2 所示, 测定不同 ACC 的微酸性电解水在反应时间为 0.5、2、10 min 时对硫磷的降解率。图 2A、C 中, 当反应时间一致时, 对硫磷和乐果的降解率与 ACC 呈正相关, 但 ACC 大于等于 5.66 mg/L 时, 降解率均能达到 100%。图 2B 可以得出, 在反应时间为 0.5 min 和 2 min 的较短时间内, 甲基对硫磷的降解率随 ACC 增加而提升, 当反应时间为 10 min 时, 4 种 ACC 的微酸性电解水对甲基对硫磷的降解率均能达到 100%。这一现象表明, ACC 对微酸性电解水降解对硫磷、甲基对硫磷和乐果降解效果相同。



注: A: 对硫磷; B: 甲基对硫磷; C: 乐果。

图 1 反应时间对微酸性电解水降解有机磷农药效果的影响

Fig.1 Effect of reaction time on the degradation effect of slightly acidic electrolyzed water on organophosphorus pesticide

2.3 对硫磷初始浓度对降解效果的影响

当微酸性电解水添加 0.5、1、2、3、5 mL 时, 对硫磷的初始浓度值得到改变, 分别为 4、6.7、10、20、40 $\mu\text{g/mL}$, 降解效果如图 3 所示。图 3A 可得, 当 ACC 为 5.66 mg/L、反应时间为 0.5 和 1 min 时, 对硫磷的初始浓度与降解率呈负相关。对硫磷初始浓度小于 10 $\mu\text{g/mL}$ 时, 降解率均大于 99.4%, 且速率呈直线下降。初始浓度处于 10 $\mu\text{g/mL}$ 与 40 $\mu\text{g/mL}$ 之间时, 降解率仍在 99.2% 以上, 但下降速率减慢。

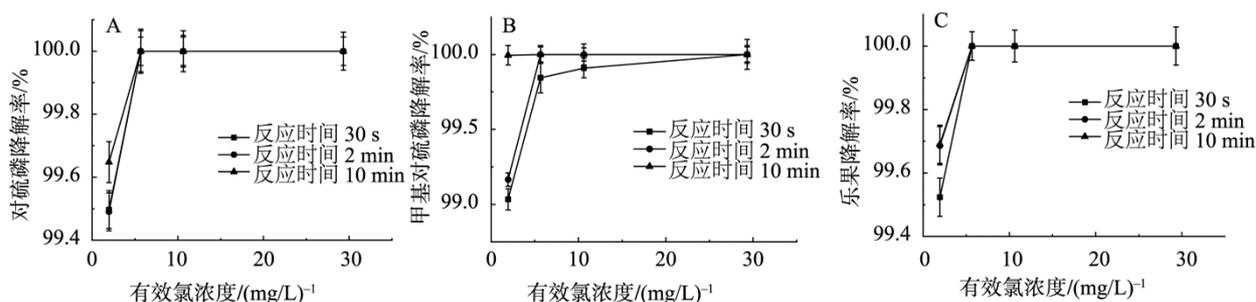
图 3B 为 ACC 5.66 mg/L、反应时间 30 s 时乐果初始浓度对降解效果的影响。在较低的初始浓度下(小于等于 6.7 $\mu\text{g/mL}$), 乐果降解率一直处于 100%。但随着乐果初始浓度的增大, 降解率逐渐降低, 初始浓度为 40 $\mu\text{g/mL}$ 时, 降解率仍在 40% 以上。初始浓度为 6.7、10、20 $\mu\text{g/mL}$ 时, 不同反应时间下的降解率如图 3C 所示。初始浓度为 6.7 $\mu\text{g/mL}$ 条件下, 乐果的降解率一直处于 100%, 初始浓度为 10 $\mu\text{g/mL}$ 的条件下, 乐果降解率在反应 5 min 内约为 99.8%, 处于较为平稳状态, 大于 5 min 后, 随时间延长降解率逐渐增加, 最终在 10 min 时达到 100%。初始浓度为 20 $\mu\text{g/mL}$ 条件下, 乐果降解率一直处于 99.6% 左右, 无明显变化。这一结果表明, 随着乐果初始浓度增大, 降解率

会逐渐降低并趋于平稳, 这与对硫磷初始浓度对降解效果的影响类似。

当对硫磷与乐果初始浓度达到一定大的浓度值后, 微酸性电解水对乐果的降解达到了饱和状态, 降解率会呈直线下降。

2.4 有机磷农药降解产物分析

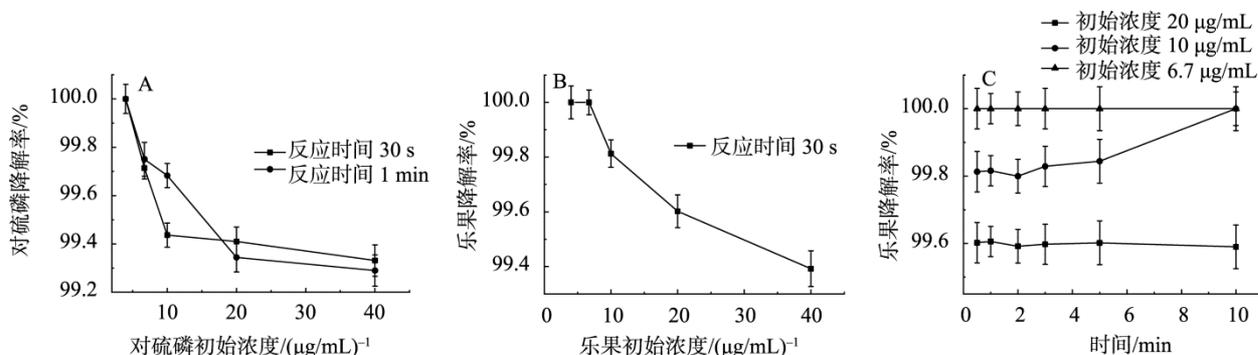
有机磷农药降解产物的总离子流图如图 4 所示, 图 4A、B 为对硫磷降解产物总离子流图, 除对硫磷外还存在对硫磷的氧化产物对氧磷, 对硫磷和对氧磷的保留时间分别为 24.403 min、22.997 min。可以看出, 随着 ACC 增加及反应时间的延长, 对硫磷量减少而对氧磷增多。有研究得出, 采用紫外处理对硫磷后的产物中, 发现了 8 种不同降解产物, 其中 4-硝基苯酚和对氧磷含量最高; YAO 等^[21]采用超声波处理对硫磷得到的 10 种降解产物中, 对氧磷含量约占对硫磷的 10%, 4-硝基苯酚约占 20%; WU 等^[22]采用臭氧的方式降解对硫磷的研究中, 同样得出对氧磷为主要降解产物这一结果。本研究检测出对硫磷的主要降解产物为对氧磷, 与上述研究结果相符, 而未检出 4-硝基苯酚, 其原因可能为微酸性电解水进一步分解 4-硝基苯酚, 导致其含量低于检出限。



注: A: 对硫磷; B: 甲基对硫磷; C: 乐果。

图 2 不同 ACC 对微酸性电解水降解有机磷农药效果的影响

Fig.2 Effect of different available chlorine concentrations on the degradation of organophosphorus pesticide in acidic electrolyzed water



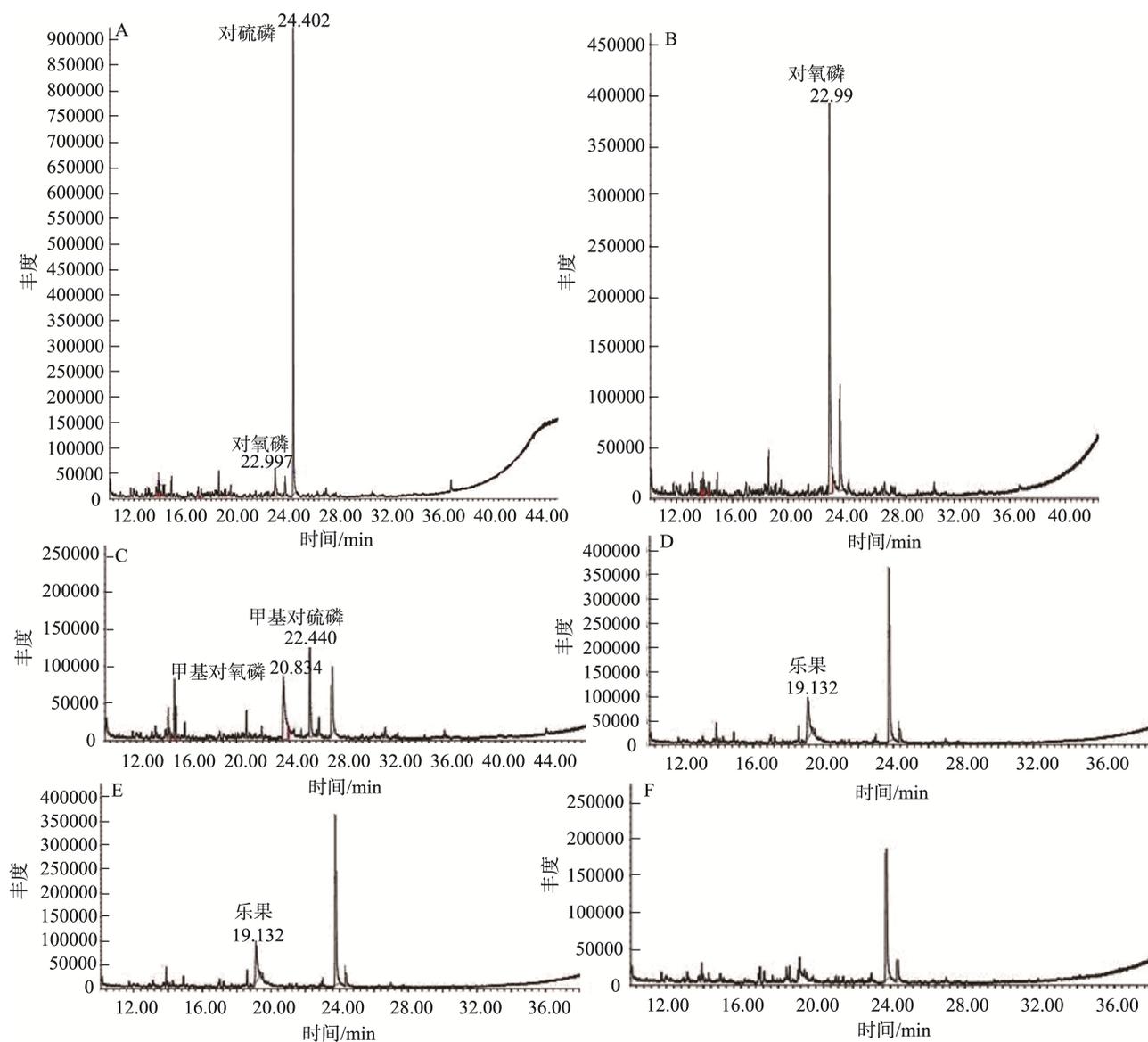
注: A: 对硫磷; B: 乐果; C: 不同初始浓度下乐果降解率随反应时间的变化。

图 3 有机磷农药初始浓度对其降解效果的影响

Fig.3 The effect of the initial concentration of organophosphorus pesticide on its degradation effect

图 4C、D 为甲基对硫磷降解产物总离子流图, 甲基对硫磷的保留时间为 22.440 min, 除此外还发现了氧化物甲基对氧磷, 保留时间为 20.833 min。通过总离子流图可以看出, 随着 ACC 的增加以及反应时间的延长, 甲基对硫磷含量逐渐减少而甲基对氧磷含量增加, 这一现象与对硫磷的结果一致。采用光催化降解甲基对硫磷和超声波处理后, 生成直接降解产物甲基对氧磷, 而后被分解为 4-硝基苯酚, 再经过氧化和水解反应最后被分解为小分子物质^[23-24]。本研究检测出甲基对硫磷的降解产物为甲基对氧磷, 与上述研究结果相符。

图 4E、F 为乐果降解产物总离子流图, 乐果保留时间为 19.132 min, 可以看出除乐果外, 并无其他降解产物生成。在自由氯与乐果的研究中得出, 氧乐果为乐果的主要降解产物^[25]。采用超声波处理乐果后发现氧乐果为主要降解产物^[26], 采用微波辐射辅助高级氧化工程方式处理乐果, 得到的降解产物中同样发现了氧乐果^[27]。而本研究本没有检测出氧乐果, 由此猜想, 与对硫磷和甲基对硫磷一样, 很可能存在氧乐果直接被微酸性电解水降解为小分子物质, 不能被检出。



注: A: 对硫磷降解产物总离子流图(ACC 1.95 mg/L, 反应时间 30 s); B: 对硫磷(ACC 5.66 mg/L, 反应时间 5 min); C: 甲基对硫磷(ACC 5.66 mg/L, 反应时间 30 s); D: 甲基对硫磷(ACC 5.66 mg/L, 反应时间 10 min); E: 乐果(ACC 10.63 mg/L, 反应时间 10 min); F: 乐果(ACC 5.66 mg/L, 反应时间 10 min)。

图 4 有机磷农药降解产物总离子流图

Fig.4 Total ion current diagram of organophosphorus pesticide degradation products

图 5 即 ACC 为 5.66 mg/L 条件下的微酸性电解水降解对硫磷后, 对氧磷与对硫磷初始浓度在反应时间为 0.5、1 min 下的关系曲线。峰面积与物质浓度成正比, 由图 5 可得, 随着对硫磷初始浓度的增加对氧磷含量降低, 且下降趋势明显。图 6 即 ACC 为 1.95、5.66 mg/L 条件下, 有机磷农药含量与反应时间的关系。如图 6A 所示, 当 ACC 为 1.95 mg/L 时, 对氧磷含量随时间增加而增加, 于反应 3 min 时保持不变, 当 ACC 为 5.66 mg/L 时, 随着反应时间延长对氧磷含量先增加后减少, 由此猜想, 微酸性电解水能够进一步分解对氧磷。在图 6B 中, 在 ACC 1.95 mg/L 条件下, 甲基对氧磷一直为零。在 ACC 10.63 mg/L 条件下, 现象同对氧磷变化相似。由此猜想, 微酸性电解水降解甲基对硫磷后, 生成的主要降解产物甲基对氧磷被进一步分解, 在 ACC 1.95 mg/L 条件下, 由于甲基对氧磷被微酸性电解水分解, 故其含量为零。

2.5 微酸性电解水对有机磷农药的降解途径分析

微酸性电解水降解有机磷农药是个复杂的化学反应过程, 光催化降解有机磷农药过程中·OH 攻击有机磷农药的 P=S 键而把原来的 P=S 键转换成 P=O 键, 这是光催化降解有机磷农药的一个反应特性^[28]。通过分析有机磷农药的降解过程, 认为对硫磷、甲基对硫磷和乐果在酸性微酸性电解水中的降解途径是 HOCl 和·OH 共同作用的结果。有机磷农药的 P=S 键受到 HOCl 和·OH 攻击, 形成含有 O-P-S 环的中间产物。中间产物进一步被分解失去 S 得到含有 P=O 化合物, 而含 S 化合物被 HOCl 氧化形成 SO₄²⁻。含有 P=O 化合物进一步被·OH 作用, 最终被降解为 PO₄³⁻、CO₂、NO₃²⁻、SO₄²⁻等物质。由于降解过程产生的含 P=O 化合物具有强电负性, 因此比对硫磷等有机磷农药具有更高毒性, 但含 P=O 化合物会被微酸性电解水进一步分解, 其毒性远小于原有有机磷农药。从总体来看, 对硫磷、甲基对硫磷和乐果这 3 种有机磷农药被微酸性电解水降解后, 毒性会

大大降低。

3 结 论

本研究以对硫磷标准品、甲基对硫磷标准品和乐果标准品 3 种有机磷农药作为研究对象, 探究了微酸性电解水对各个有机磷农药降解效果的影响及降解产物, 并推测其降解途径。通过改变反应时间、ACC 浓度和有机磷农药初始浓度, 测定在不同反应条件下有机磷农药的降解效果和降解产物, 进而明确降解途径。实验结果表明, 在 ACC 大于等于 5.66 mg/L 时, 对硫磷、甲基对硫磷和乐果的降解率均能达到 100%。除此以外, 对氧磷和甲基对氧磷作为对硫磷和甲基对硫磷的主要降解产物也被检出, 并能被微酸性电解水进一步降解为小分子物质, 对 HOCl 和·OH 共同作用于有机磷农药这一降解途径做出假设, 以期微酸性电解水应用于果蔬农药残留消除提供科学依据。

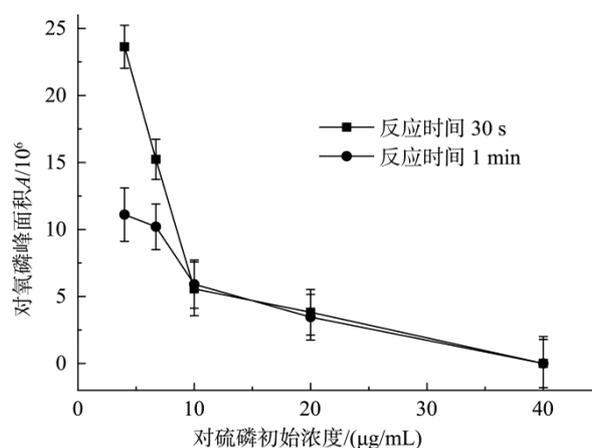
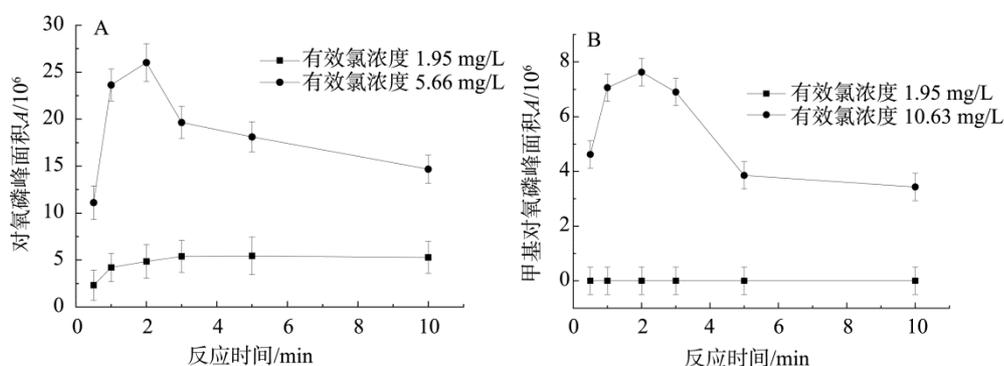


图 5 不同初始浓度对硫磷降解后对氧磷峰面积变化
Fig.5 Changes in the peak area of parathion after degradation of parathion with different initial concentrations



注: A: 对氧磷; B: 甲基对氧磷。

图 6 峰面积随反应时间的变化

Fig.6 Change of peak area with reaction time

参考文献

- [1] YU Y X, YOU J M, SUN Z W, *et al.* Determination of residual organophosphorus thioester pesticides in agricultural products by chemical isotope-labelling liquid chromatography-tandem mass spectrometry coupled with insyringe dispersive solid phase clean-up and in situ cleavage [J]. *Analytica Chimica Acta*, 2019, 1055: 44–55.
- [2] 马先发. 有机磷农药简介及其检测方法[J]. *广东化工*, 2020, 47(16): 286.
MA XF. Brief introduction and detection method of organophosphorus pesticides [J]. *Guangdong Chem Ind*, 2020, 47 (16): 286.
- [3] 苟练, 庞定国, 徐培渝. 有机磷农药联合毒性研究进展[J]. *环境卫生学杂志*, 2017, 7(6): 475–480.
GOU L, PANG DG, XU PY. Research progress on combined toxicity of organophosphorus pesticides [J]. *J Environ Hygi*, 2017, 7(6): 475–480.
- [4] 柴宗龙, 袁彩霞, 钱滢文, 等. 磁性纳米粒子修饰碳纳米管复合材料对菠菜中9种有机磷农药吸附性能研究[J]. *食品与发酵科技*, 2018, 54(3): 70–75.
CHAI ZL, YUAN CX, QIAN YW, *et al.* Study on the adsorption properties of magnetic nanoparticles modified carbon nanotube composite materials for 9 organophosphorus pesticides in spinach [J]. *Food Ferment Technol*, 2018, 54 (3): 70–75.
- [5] 李亚平, 胡艳芳, 杨凡昌, 等. 拟除虫菊酯类农药光降解的研究进展[J]. *土壤*, 2015, 47(1): 14–19.
LI YP, HU YF, YANG FC, *et al.* Research progress on photodegradation of pyrethroid pesticides [J]. *Soil*, 2015, 47(1): 14–19.
- [6] 高红刚, 娄金培. 超声波农药降解机降解效果研究[J]. *食品与机械*, 2017, 33(11): 91–93, 104.
GAO HG, LOU JP. Research on the degradation effect of ultrasonic pesticide degradation machine [J]. *Food Mach*, 2017, 33(11): 91–93, 104.
- [7] 刘乐, 丁一, 冯艳丽, 等. 纳米双氢氧化物对有机磷农药的吸附与降解[J]. *环境科学与技术*, 2018, 41(11): 93–99.
LIU L, DING Y, FENG YL, *et al.* Adsorption and degradation of organophosphorus pesticides by nano double hydroxide [J]. *Environ Sci Technol*, 2018, 41(11): 93–99.
- [8] SANGUINO GL, DELGADO AR, MORANCHEL AT, *et al.* Solar photocatalytic degradation of pesticides over TiO₂-rGO nanocomposites at pilot plant scale [J]. *Sci Total Environ*, 2020, 737: 140286.
- [9] NARAYANAN M, KUMARASAMY S, RANGANATHAN M, *et al.* Enzyme and metabolites attained in degradation of chemical pesticides β cypermethrin by *Bacillus cereus* [J]. *Mater Today Proc*, 2020, DOI: 10.1016/j.matpr.2020.05.722
- [10] 高煜煜, 白俊岩, 孙磊, 等. 有机磷水解酶对有机磷农药降解功效的评价[J]. *江苏农业科学*, 2019, 47(8): 217–220.
GAO MM, BAI JY, SUI L, *et al.* Organophosphorus hydrolase assesses the degradation effects of different organophosphorus pesticides [J]. *Jiangsu Agri Sci*, 2019, 47(8): 217–220.
- [11] CICHOSKI AJ, FLORES DRM, MENEZES CRD, *et al.* Ultrasound and slightly acid electrolyzed water application: An efficient combination to reduce the bacterial counts of chicken breast during pre-chilling [J]. *Int J Food Microbiol*, 2019, 301: 27–33.
- [12] MOKUDAI T, KANNO T, NIIWANO Y. Postantifungal-like effect of sublethal treatment of *Candida albicans* with acid-electrolyzed water [J]. *Archi Oral Biol*, 2015, 60(3): 479–487.
- [13] SHAKHAWAT HM, NKUFI TC, HWAN OD. Inactivation kinetics of slightly acidic electrolyzed water combined with benzalkonium chloride and mild heat treatment on vegetative cells, spores, and biofilms of *Bacillus cereus* [J]. *Food Res Int*, 2019, 116: 157–167.
- [14] GOMEZ-LOPEZ VM, GIL MI, PUPUNAT L, *et al.* Cross-contamination of *Escherichia coli* O157:H7 is inhibited by electrolyzed water combined with salt under dynamic conditions of increasing organic matter [J]. *Food Microbiol*, 2015, 46(5): 471–478.
- [15] JADEJA R, HUNG YC. Efficacy of near neutral and alkaline pH electrolyzed oxidizing waters to control *Escherichia coli* O157:H7 and *Salmonella typhimurium* dt 104 from beef hides [J]. *Food Control*, 2014, 41(7): 17–20.
- [16] ZHANG CL, ZHANG YY, ZHAO ZY, *et al.* The application of slightly acidic electrolyzed water in pea sprout production to ensure food safety, biological and nutritional quality of the sprout [J]. *Food Control*, 2019, 104: 83–90.
- [17] SHOJI K, TAKEDA J, SHI J, *et al.* Disinfection efficacy of slightly acidic electrolyzed water on fresh cut cabbage [J]. *Food Control*, 2009, 20(3): 294–297
- [18] HAO XX, SHEN ZQ, WANG JL, *et al.* *In vitro* inactivation of porcine reproductive and respiratory syndrome virus and pseudorabies virus by slightly acidic electrolyzed water [J]. *Veter J*, 2013, 197(2): 297–301.
- [19] 杨玉玲. 超声波技术在农药残留研究中的应用[J]. *农药研究与应用*, 2007, 11(2): 10–14.
YANG YL. Application of ultrasonic technology in pesticide residue research [J]. *Pesti Res App*, 2007, 11(2): 10–14.
- [20] 马海乐, 孙宝胜, 何荣海, 等. 果蔬清洗废水中乐果农药扫频超声波降解工艺优化[J]. *农业机械学报*, 2012, 43(11): 169–173, 179.
MA HL, SUN BS, HE RH, *et al.* Optimization of sweep frequency ultrasonic degradation process of dimethoate pesticide in fruit and vegetable cleaning wastewater [J]. *J Agric Mach*, 2012, 43(11): 169–173, 179.
- [21] YAO JJ, GAO NY, DENG Y, *et al.* Sonolytic degradation of parathion and the formation of byproducts [J]. *Ultrason Sonochem*, 2010, 17(5): 802–809.
- [22] WU J, LUAN T, LAN C, *et al.* Removal of residual pesticides on vegetable using ozonated water [J]. *Food Control*, 2007, 18(5): 466–472.
- [23] EDGAR M, LEYVA E, PALESTINO G, *et al.* Photocatalytic degradation of methyl parathion: Reaction pathways and intermediate reaction products [J]. *J Photochem Photobiol A*, 2007, 186(1): 71–84.
- [24] AKSHAYKUMAR KS, GOGATE PR. Ultrasonic degradation of methyl Parathion in aqueous solutions: Intensification using additives and scale up aspects [J]. *Sep Purif Technol*, 2011, 79(1): 1–7.
- [25] TIAN F, LIU W, GUO G, *et al.* Kinetics and mechanism of dimethoate chlorination during drinking water treatment [J]. *Chemosphere*, 2014,

103(3): 181–187.

- [26] YAO JJ, HOFFMANN MR, GAO NY, *et al.* Sonolytic degradation of dimethoate: kinetics, mechanisms and toxic intermediates controlling [J]. *Water Res*, 2011, 45(18): 5886–5894.
- [27] ZHANG L, GUO X J, YAN F, *et al.* Study of the degradation behaviour of dimethoate under microwave irradiation [J]. *J Hazard Mater*, 2007, 149(3): 675–679.
- [28] EVGENIDOU E, KONSTANTINOI I, FYTIONOS K, *et al.* Study of the removal of dichlorvos and dimethoate in a titanium dioxide mediated photocatalytic process through the examination of intermediates and the reaction mechanism [J]. *J Hazard Mater*, 2006, 137(2): 1056–1064.

(责任编辑: 于梦娇)

作者简介



李慧颖, 硕士, 讲师, 主要研究方向为食品安全。

E-mail: 35041850@qq.com



郝建雄, 教授, 主要研究方向为食品安全。

E-mail: cauhjx@163.com

“食品化学性风险及安全控制研究”专题征稿函

农作物在生长过程中可能受到外来化学物质的污染, 包括环境中的污染物、生长过程中使用的农药和肥料等; 食物在从农场到餐桌的过程中经过加工也可能会发生一系列衍生性反应, 产生新的有害物质; 另外, 不法商贩的非法添加和成品的包装污染也会给食品带来化学性风险。由此可见, 加强宣传, 普及科学知识, 实施食品安全战略, 让全民参与到维护食品安全中来, 全面提升食品质量安全刻不容缓。

鉴于此, 本刊特别策划“食品化学性风险及安全控制研究”专题, 主要围绕食品化学性危害; 食品化学性风险、安全; (环境污染物、天然动植物毒素、食品供应链过程产生的污染和人为使用的非法物质等)等或您认为本领域有意义问题展开讨论, 计划在 2021 年 3/4 月出版。

鉴于您在该领域的成就, 学报主编国家食品安全风险评估中心 吴永宁 研究员特邀请您为本专题撰写稿件, 以期进一步提升该专题的学术质量和影响力, 综述及研究论文均可。请在 2021 年 3 月 30 日前通过网站或 E-mail 投稿。我们将快速处理并经审稿合格后优先发表。

同时烦请您帮忙在同事之间转发一下, 希望您能够推荐该领域的相关专家并提供电话和 E-mail。再次感谢您的关怀与支持!

投稿方式(注明专题食品化学性风险及安全控制研究):

网站: www.chinafoodj.com(备注: 投稿请登录食品安全质量检测学报主页-作者

登录-注册投稿-投稿栏目选择“2021 专题: 食品化学性风险及安全控制研究”)

邮箱投稿: E-mail: jfoods@126.com(备注: 食品化学性风险及安全控制研究专题投稿)

《食品安全质量检测学报》编辑部