

DOI: 10.3724/SP.J.1118.2016.15113

阿维菌素在模拟水产养殖生态系统中的蓄积与消除规律

张卫卫¹, 符贵红¹, 王元¹, 湛嘉², 房文红¹, 沈锦玉³, 周俊芳¹, 姚嘉赞³

1. 中国水产科学研究院 东海水产研究所, 农业部东海与远洋渔业资源开发利用重点实验室, 上海 200090;

2. 宁波市检验检疫科学技术研究院, 浙江 宁波 315012;

3. 浙江省淡水水产研究所, 浙江 湖州 313001

摘要: 采用 UPLC-MS/MS 法, 研究了阿维菌素泼洒用药后, 该药物在水体、底泥、伊乐藻(*Elodea nuttallii*)和水产动物体内的蓄积与消除规律。结果显示, 以 6 $\mu\text{g/L}$ 浓度单次泼洒用药后, 水体中阿维菌素消解较快, 其半衰期为 63.8 h。阿维菌素在养殖水环境中消减的同时, 逐渐由水体向底泥、伊乐藻和水产动物迁移。底泥中阿维菌素峰浓度、曲线下面积和半衰期分别为 1.25 $\mu\text{g/kg}$ 、469.2 $\mu\text{g}/(\text{kg}\cdot\text{h})$ 和 115.5 h, 说明伊乐藻中的相应值分别为 8.75 $\mu\text{g/kg}$ 、2521.7 $\mu\text{g}/(\text{kg}\cdot\text{h})$ 和 315.0 h, 说明伊乐藻对阿维菌素有明显的吸收和富集作用。该模拟系统中的异育银鲫(*Carassius auratus gibelio*)对阿维菌素具有明显的吸收, 其血液、肾、鳃、肝和肌肉组织阿维菌素的最高浓度($C_{\max}$)依次为 50.9、45.37、21.25、15.47 和 11.9 $\mu\text{g/kg}$; 而该模拟系统中的中华绒螯蟹(*Eriocheir sinensis*)仅鳃组织检出阿维菌素, 其 $C_{\max}$ 在 12 h 为 8.08 $\mu\text{g/kg}$, 血淋巴、肌肉和肝胰腺等组织均未检出阿维菌素。生物富集系数 F_{BC} 值显示, 对阿维菌素的富集浓度由高到低依次为鲫鱼、伊乐藻、中华绒螯蟹、底泥, 显示阿维菌素在不同分配相和不同生物组织的富集作用差异较大。

关键词: 阿维菌素; 异育银鲫; 中华绒螯蟹; 伊乐藻; 底泥; 蓄积与消除

中图分类号: S942

文献标志码: A

文章编号: 1005-8737-(2016)01-0225-08

阿维菌素(Avermectin, AVM)属于大环内酯类化合物, 主要破坏虫体细胞膜上氯离子通道而使其发生肌肉麻痹死亡^[1], 对线虫类、节肢动物幼体以及蠕虫等具有良好杀灭和防治效果, 被广泛应用于农业和畜牧业生产^[2-4], 也被用于水产养殖防治鱼类中华鲈、锚头鲈^[5]、虾蟹寄生虫^[6]等疾病。在水产养殖中阿维菌素施用多采用全池泼洒方式, 药物进入池塘后在驱虫杀虫的同时, 将在池塘不同生态位中进行代谢和迁移, 因此为了正确评价其对环境和水产动物源食品的安全性, 研究其在水产养殖池塘生态系统中的行为和归宿十分必要。关于阿维菌素在环境中行为变化的研究主要集中在光降解、水降解及在土壤中的迁移^[7-9], 在

水产养殖中主要是研究其在单一动物体内的蓄积和消除^[10]。本研究通过探讨阿维菌素在实验室模拟水产养殖池塘生态系统中的环境行为变化, 阐明阿维菌素在水体、沉积物 and 不同生态位生物体内的蓄积与消除, 及在水产动物不同组织、器官中的分布和迁移等规律, 为水产养殖中阿维菌素的合理使用提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 仪器设备

UPLCTM 超高效液相色谱串联 XEVO 系统组成的三重四极杆串联质谱联用仪(WATERS, 美国); 3-18K 高速冷冻离心机(SIGMA 公司, 德国);

收稿日期: 2015-03-24; 修订日期: 2015-06-08.

基金项目: 上海市中华绒螯蟹产业技术体系项目(D2010100208); 农业部公益性行业科研专项(201203085).

作者简介: 张卫卫(1986-), 男, 硕士研究生, 主要从事水产动物药理学研究. E-mail: wwzhangcn@163.com

通信作者: 房文红(1968-), 研究员, 从事水产动物药理学与病害防治研究. E-mail: fwenhong@163.com

PT-MR 2100 高速匀浆机(KINEMATICA AG 公司, 瑞士); N-EVAPTM 氮吹仪(ORGANOMATION 公司, 美国); 真空旋转蒸发仪(HEIDOLPH, 德国); SK3300LHC 超声波清洗仪(科导, 中国); QL-901 旋涡混合器(其林贝尔, 中国); PL2002 电子天平(梅特勒-托利多, 瑞士); AC/KDF150-1-300 净水器(开能, 中国)。

1.2 药品与试剂

阿维菌素标准品(92%阿维菌素 B1a, 8%阿维菌素 B1b, DR.EHRENSTORFER, 德国); 阿维菌素原粉(B1a 纯度大于 90%, 潍坊三江医药集团), 1%阿维菌素微乳剂由实验室制备; 乙酸乙酯、乙腈和甲醇, 均为 HPLC 级(TEDIA 公司); 超纯水由 MILLIPORE 公司 MILLI-Q ADVANTAGE A10 制备; D-SPE 净化填料(含 200 mg Al_2O_3 、100 mg PSA 和 150 mg C_{18}), 博纳艾杰尔公司。

1.3 试验设计

中华绒螯蟹(*Eriocheir sinensis*)体重(100 ± 20) g, 购自江苏省兴化市某养殖场; 异育银鲫(*Carassius auratus gibelio*)体重(165 ± 20) g, 购自上海市青浦某养殖场。实验前暂养 3 周, 挑选健康鲫鱼 120 尾, 蟹 150 只用于实验。伊乐藻(*Elodea nuttallii*)长度为 (35 ± 5) cm, 采自上海市浦东新区河道, 底泥采自闲置地。上述试验材料在试验前均未检出阿维菌素。

试验在模拟水产养殖生态系统中进行。设置 6 个平行组, 均为 $1 \text{ m} \times 1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ 水泥池, 池底铺 5 cm 厚底泥, 植入 40 棵伊乐藻, 每两天补水 1 次, 保持水深 80 cm, 水为经净水器处理的自来水。连续充气平衡 7 天, 每个水泥池放入 20 尾异育银鲫和 25 只中华绒螯蟹, 为了避免鱼和蟹活动对系统的影响, 将其放在网箱中(图 1)。实验结束时, 异育银鲫和中华绒螯蟹成活率 100%。

实验期间水温 $26 \sim 28^\circ\text{C}$, 连续充气, 溶解氧为 $7.1 \sim 8.5 \text{ mg/L}$, 水体 pH 值为 $7.2 \sim 7.5$, 投喂适量颗粒饲料。采用白炽灯照射(12 h 照明、12 h 黑暗), 水表面光照强度为 300 lx 。模拟系统稳定 7 d 后泼洒阿维菌素, 使其水体浓度达 $6 \mu\text{g/L}$ 。在药物泼洒后 0.5 h、2 h、6 h、12 h、1 d、2 d、3 d、5 d、7 d、9 d、12 d、15 d、20 d、25 d、30 d、35 d、

40 d 和 45 d 从每个水泥池中随机取 1 条异育银鲫(采集血液、肌肉、肝、鳃和肾)和 1 只中华绒螯蟹(采集血淋巴、肌肉、肝胰腺和鳃), 2 棵伊乐藻, 20 g 底泥和 5 mL 水样。血液或血淋巴加入含 2 mg 草酸铵抗凝剂的离心管混匀并离心 5 min (1000 r/min , 20°C), 取上清至 2 mL 离心管中保存; 水样放入 10 mL 离心管; 其他样品均直接放入密封袋, 所有样品置超低温冰箱冷冻保存。

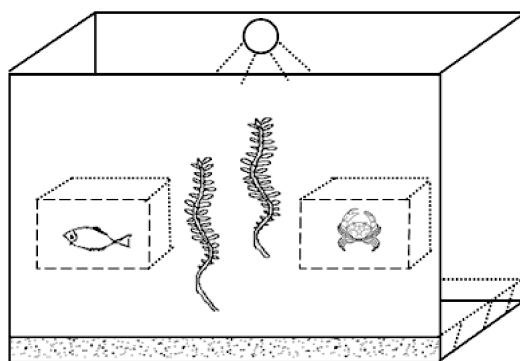


图 1 模拟水产养殖池塘生态系统
Fig. 1 Aquaculture pond ecosystem model

1.4 样品预处理

水样前处理: 取 1 mL 水样, 加入 1 mL 甲醇混匀, 过 $0.22 \mu\text{m}$ 聚四氟乙烯(PTFE)滤膜, 采用 UPLC-MS/MS 分析。

血浆和组织样品前处理: 鲫和蟹血浆、肌肉等组织样品的前处理同张卫卫等^[11]的方法。

底泥样品前处理: 称取 10 g 底泥样品至 50 mL 离心管, 加入 10 mL 乙腈、10 mL 乙酸乙酯和 5 g 氯化钠, 旋涡震荡 1 min, 于 4700 r/min 、 15°C 下离心 5 min, 转移上层液至 15 mL 离心管, 再用 5 mL 乙腈和 10 mL 乙酸乙酯重复提取 1 次, 合并上层液, 氮气吹干, 用乙腈定容至 1 mL, 加入 0.5 mL 去离子水, 旋涡震荡 1 min, 超声 2 min, 加入 0.45 g D-SPE 和 0.25 g NaCl, 旋涡震荡 2 min, 离心 8 min(10000 r/min , -4°C), -20°C 冷冻 2 h, 取上清液过 $0.22 \mu\text{m}$ 滤膜, UPLC-MS/MS 分析, 样品处理综合参考邓立刚^[12]的方法。

伊乐藻样品前处理: 称取剪碎伊乐藻 10 g 至 50 mL 离心管, 参考底泥样品前处理提取上层液,

合并上层液后, 加入 100 mg C18, 100 mg 石磨炭黑, 漩涡 1 min, 离心 5 min (4700 r/min, 15℃), 转移上清液至 15 mL 离心管, 定容与后续操作同底泥样品前处理, 取上清液过 0.22 μm 滤膜, UPLC-MS/MS 分析。

1.5 色谱条件

采用 Waters 超高效液相色谱串联三重四级杆质谱(UPLC-MS/MS)法检测样品中阿维菌素含量, 色谱条件参考张卫卫等^[11]的方法, 所有样品的数据均为阿维菌素 B1a 组分的数据。

1.6 数据处理

水样、底泥和伊乐藻中阿维菌素消解方程为 $C_t = C_0 e^{-kt}$, 式中: C_0 和 C_t 分别为起始浓度和即时浓度, k 为消解常数, t 为时间; 方程拟合采用 Microsoft Excel 2010 计算。异育银鲫和中华绒螯蟹组织中阿维菌素药动学参数采用统计矩原理推算, 由药物与统计软件(DAS3.1)求得。水样、底泥和伊乐藻中阿维菌素浓度-时间关系的曲线下面积(AUC)采用梯形法计算。生物富集系数 $F_{BC} = C_f / C_w$, 式中: C_f 和 C_w 分别为阿维菌素在生物体内或组织内浓度和水中的浓度。

2 结果与分析

2.1 模拟养殖池塘水和底泥中阿维菌素浓度变化

施药后池塘水体和底泥中的阿维菌素浓度随时间变化如图 2 所示。施药后池塘水体中阿维菌素浓度呈快速下降, 在 168 h 时降至 0.62 μg/L, 随后下降缓慢, 360 h 时水体中阿维菌素浓度降至 0.1 μg/L。底泥中阿维菌素含量逐渐升高, 在 120 h 时达最高值 1.25 μg/kg, 随后下降, 至 960 h 时底泥中阿维菌素含量为 0.23 μg/kg。运用梯形法求得图 2 中水和底泥阿维菌素浓度-时间关系的曲线下面积(AUC)分别为 322.3 μg/(kg·h)和 469.2 μg/(kg·h)。

施药后伊乐藻中阿维菌素含量变化呈现快速升高再下降的趋势。伊乐藻中阿维菌素蓄积在 12 h 时达最高值 8.75 μg/kg, 后续阶段呈缓慢下降趋势, 720 h 时阿维菌素浓度降至 1.14 μg/kg(图 3)。伊乐藻中阿维菌素浓度-时间关系的曲线下面积(AUC)为 2521.7 μg/(kg·h)。

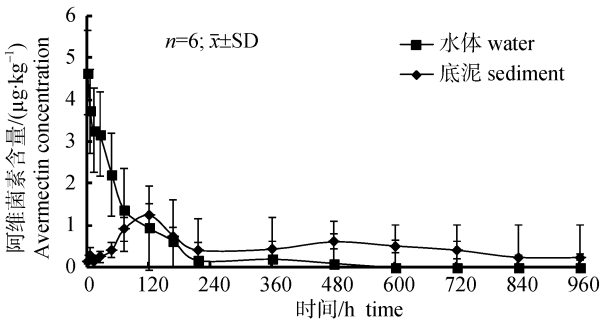


图 2 模拟养殖池塘水体和底泥中阿维菌素浓度随时间的变化

Fig. 2 Change of Avermectin concentrations with time in aquatic water and sediments

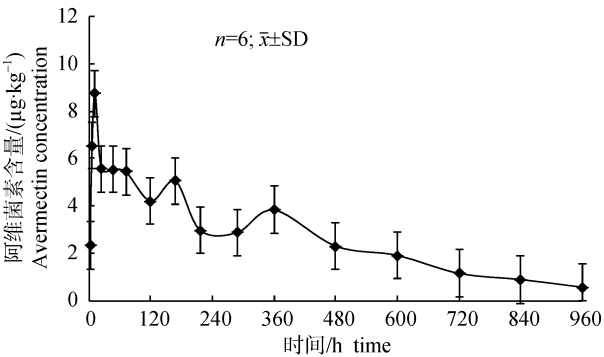


图 3 伊乐藻中阿维菌素含量随时间的变化

Fig. 3 Change of Avermectin concentration with time in *Elodea nuttallii*

阿维菌素在水体、底泥和伊乐藻中的消解动态呈指数型消解, 其消除曲线方程、相关系数及消除半衰期见表 1。

表 1 阿维菌素在水体、底泥和伊乐藻中的消解方程及半衰期				
Tab. 1 Elimination equation and half-life of Avermectin in aquatic water, sediment and <i>Elodea nuttallii</i>				
介质 media	消解方程 elimination equation	相关系数(r^2) correlation coefficient	半衰期/h elimination half-life time	
养殖水 aquatic water	$C_t = 3.780e^{-0.0114t}$	0.986	63.8	
底泥 sediment	$C_t = 1.642e^{-0.006t}$	0.907	115.5	
伊乐藻 <i>Elodea nuttallii</i>	$C_t = 6.475e^{-0.0022t}$	0.943	315.0	

2.2 阿维菌素在水产动物组织中的蓄积与消除

泼洒用药后, 异育银鲫和中华绒螯蟹体内阿维菌素浓度随时间变化见图 4。异育银鲫血浆、肌肉、肝、肾和鳃中的阿维菌素浓度总体上呈现先升高再下降趋势, 峰浓度依次为 50.90 $\mu\text{g/L}$ 、11.91 $\mu\text{g/kg}$ 、15.47 $\mu\text{g/kg}$ 、45.37 $\mu\text{g/kg}$ 和 21.25 $\mu\text{g/kg}$, 除肾脏达峰时间为 120 h, 其他组织均为 72 h。中华绒螯蟹仅在鳃组织中检测到阿维菌素, 其变化趋势与异育银鲫相似, 峰浓度为 8.08 $\mu\text{g/kg}$, 达峰时间为 12 h; 而在中华绒螯蟹血淋巴、肌肉和胰腺腺组织中均未检出阿维菌素。

阿维菌素在异育银鲫和中华绒螯蟹体内蓄积和消除过程的药动学参数采用统计矩原理计算,

如表 2 所示。阿维菌素在异育银鲫血浆和组织的 AUC_{0-t} 由大到小依次为肾、血浆、鳃、肝和肌肉, 中华绒螯蟹鳃 AUC_{0-t} 远低于异育银鲫的各个组织。

2.3 底泥、伊乐藻和水产动物的富集作用

图 5 为底泥、伊乐藻和水产动物不同组织对阿维菌素的富集作用。阿维菌素的生物富集系数由高至低依次为鲫鱼、伊乐藻、中华绒螯蟹和底泥, 鲫鱼体内组织以血浆和肾脏富集倍数最高, 其次为鳃和肝脏, 肌肉富集量最低; 中华绒螯蟹仅在鳃中富集。结果显示, 阿维菌素在水产动物体内的富集存在着种属差异, 同一生物体内不同组织器官对阿维菌素的富集能力也存在着差异。

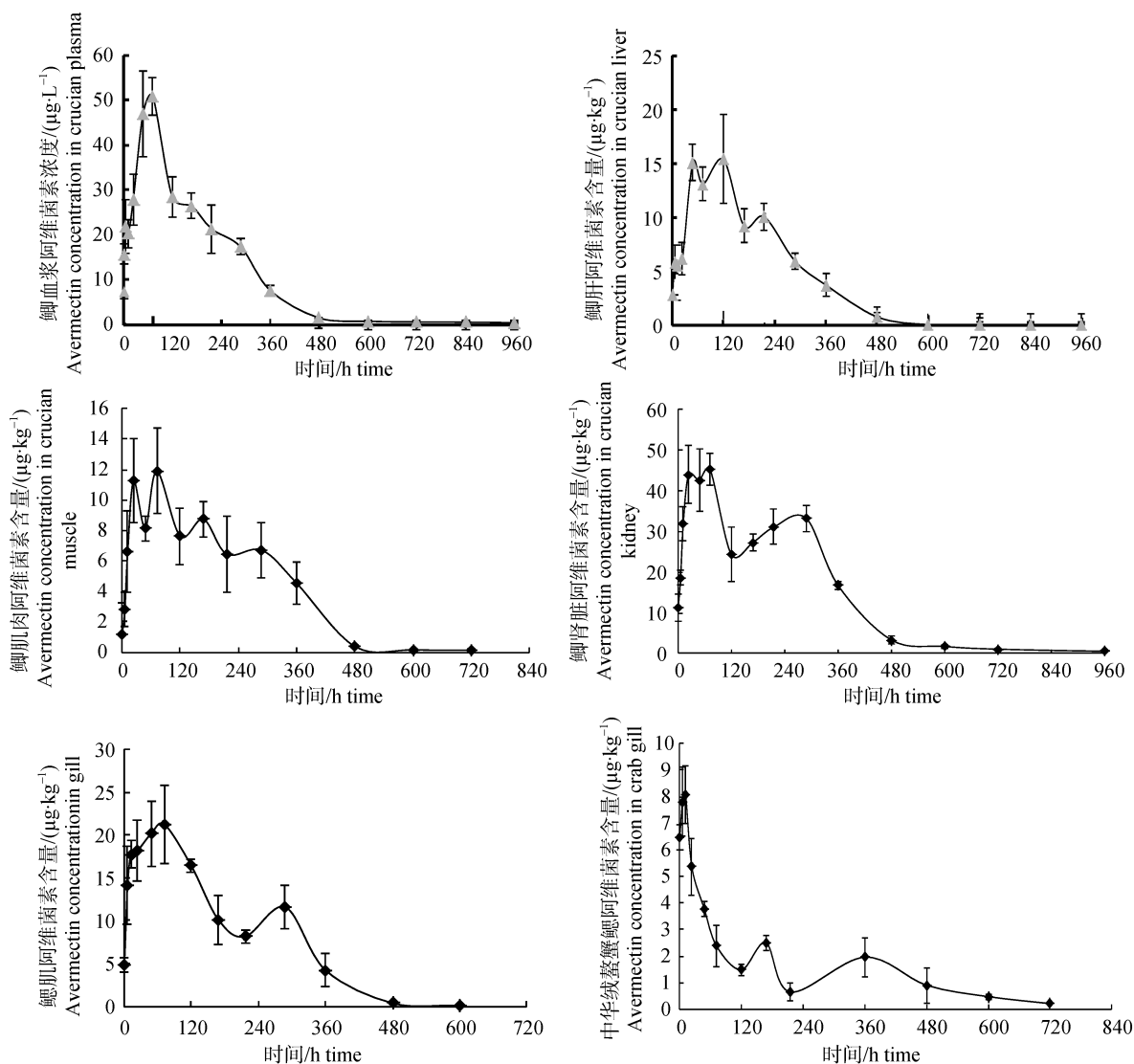


图 4 阿维菌素药浴暴露的鲫鱼和中华绒螯蟹组织中药物浓度-时间曲线关系

Fig. 4 Avermectin concentration-time curves in different tissues of *Carassius auratus gibelio* and *Eriocheir sinensis* under Avermectin exposure

表 2 基于统计矩原理的阿维菌素药动学参数
Tab. 2 Pharmacokinetic parameters based on statistical moment theory following Avermectin exposure

药动学参数 pharma-cokinetic parameters	单位 unit	异育银鲫 <i>Carassius auratus gibelio</i>				中华绒螯蟹 <i>Eriocheir siensis</i>	
		血浆 plasm	肌肉 muscle	肝 liver	肾 kidney	鳃 gill	鳃 gill
C_{max}	$\mu\text{g/L}(\text{kg})$	50.90	11.91	15.47	45.37	21.25	8.08
T_{max}	h	72	72	120	72	72	12
AUC_{0-t}	$\mu\text{g/L}(\text{kg}) \cdot \text{h}$	10031.2	3070.5	3857.5	12892.0	4886.4	1103.7
$AUC_{0-\infty}$	$\mu\text{g/L}(\text{kg}) \cdot \text{h}$	10035.1	3085.0	3865.2	12950.6	4894.6	1139.0
MRT_{0-t}	h	164.5	188.6	183.6	200.3	160.0	222.9
$MRT_{0-\infty}$	h	166.0	191.6	184.8	203.1	160.8	243.4
$t_{1/2}$	h	69.17	74.25	64.69	73.20	47.05	113.55

注: 血浆 C_{max} 和 AUC 的单位分别为 $\mu\text{g/L}$ 和 $\mu\text{g}/(\text{L} \cdot \text{h})$, 其他组织的单位分别为 $\mu\text{g/kg}$ 和 $\mu\text{g}/(\text{kg} \cdot \text{h})$.
Note: The plasma concentration units of C_{max} and AUC are $\mu\text{g/L}$ and $\mu\text{g}/(\text{L} \cdot \text{h})$, respectively, and those in other tissues are $\mu\text{g/kg}$ and $\mu\text{g}/(\text{kg} \cdot \text{h})$, respectively.

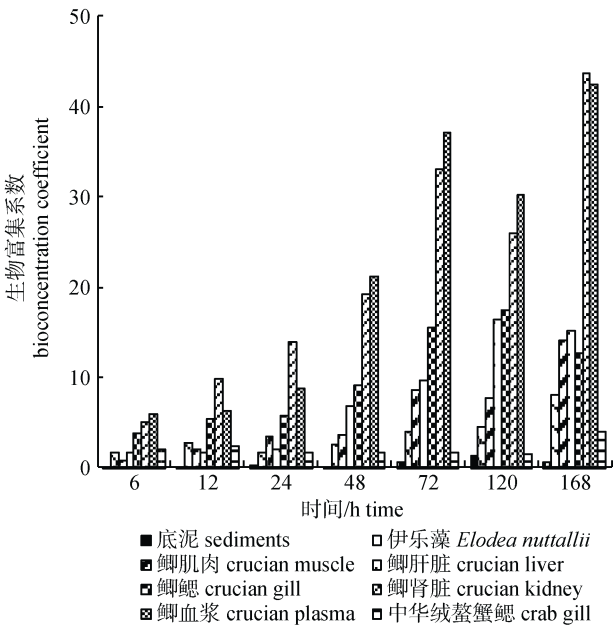


图 5 底泥、伊乐藻和水产动物对阿维菌素的富集系数
Fig.5 The bioconcentration coefficient of Avermectin in sediments, *Elodea nuttallii* and aquatic animals

3 讨论

3.1 阿维菌素在养殖池水中的光解和水解

阿维菌素作为一种大环内酯类抗生素类驱虫药,在水产养殖中主要用于防治中华鲢、锚头鲢等寄生虫^[5]。全池泼洒进入池塘生态系统后,可经光、水、微生物和动植物等多种途径降解^[7-8, 13]。有研究报道,阿维菌素在中性条件下比较稳定,避光条件下水解速率较慢,水温 25℃、pH7.0 水

中降解半衰期为 78.8 d,在杭州华家池池水(pH7.21)中降解半衰期为 88.9 d^[8]。在不同光照强度下,阿维菌素降解速率随着光照强度增强而提高,在 1800 lx 时半衰期为 19.64 h,而在 11000 lx 时半衰期仅为 3.85 h^[14]。本研究的光照强度设为 300 lx,试验水体中阿维菌素降解半衰期为 63.8 h,虽大于 1800 lx 光照强度下的光解半衰期^[14],但远远小于阿维菌素水解半衰期^[8]。通过上述比较分析,作者认为在模拟池塘系统下阿维菌素的降解主要是通过光解作用降解。

3.2 水生植物对池水阿维菌素的蓄积和降解

国外研究报道了水生植物对有机磷农药的吸附、蓄积和代谢。Brock 等^[15]在淡水生态系统模型中发现,水中大部分毒死蜱被伊乐藻吸附,只有很小比例沉积到底泥中,毒死蜱能在沉水水生植物中蓄积,主要因为其可被从水中吸收和从污染的底泥中吸收^[16],然而毒死蜱在植物中代谢很慢^[17]。本研究结果与毒死蜱的结果比较一致,在伊乐藻中阿维菌素的 AUC 和生物浓缩因子 F_{BC} 值高于底泥,说明伊乐藻能很好地蓄积阿维菌素,这是因为阿维菌素具有良好的层移活性,阿维菌素能渗透入叶片组织,并在表皮薄壁细胞内形成药囊并长期储存^[18],因此阿维菌素在伊乐藻中的消除半衰期很长。鉴于水生植物对环境污染物的蓄积和代谢作用,很多研究报道了利用水生植物来净化环境水质,如农药、抗生素和重金属,并且

在实践中发挥了重要作用^[19]。

3.3 阿维菌素在水产动物体内吸收和蓄积的种属差异

阿维菌素泼洒到养殖水环境中,除向底泥、伊乐藻等环境介质中迁移外,也可在水产动物体内富集。从 $C_{\max}$ 、AUC 和 F_{BC} 值等参数来看,异育银鲫对阿维菌素具有很强的吸收和富集作用,在鲫肾、鳃、肝和肌肉组织中有明显的蓄积;而中华绒螯蟹仅在鳃组织中检出阿维菌素,其他组织均未检出。结果表明,不同水产动物对阿维菌素的吸收和蓄积存在着种属的差异。造成阿维菌素在鲫和蟹之间吸收和蓄积差异的原因很可能与它们的体表结构不同有关,异育银鲫可以通过皮肤从水环境中直接吸收^[20],而中华绒螯蟹体表由甲壳构成,甲壳的隔离作用导致其不能由体表直接吸收药物^[21]。中华绒螯蟹只有通过鳃吸收水体中的阿维菌素,然而,在同一水环境中,中华绒螯蟹鳃中阿维菌素峰浓度和 AUC(分别为 $8.08 \mu\text{g/kg}$ 和 $1103.7 \mu\text{g/kg}\cdot\text{h}$)均小于异育银鲫鳃(分别为 $21.25 \mu\text{g/kg}$ 和 $4886.4 \mu\text{g/kg}\cdot\text{h}$),说明蟹的鳃对阿维菌素的亲和性低于鲫鱼,由此可以解释中华绒螯蟹对阿维菌素吸收少于异育银鲫。另外,阿维菌素对异育银鲫的 96 h LC_{50} 为 $0.98\sim 2.15 \text{ mg/L}$ ^[22],远低于阿维菌素对中华绒螯蟹幼蟹的 96 h LC_{50} (为 73.44 mg/L)^[23],也就是说阿维菌素对中华绒螯蟹的毒性低于异育银鲫。

3.4 阿维菌素在水产养殖环境中的消解和残留

阿维菌素作为杀虫剂泼洒到养殖水体中,不仅要考虑到药物在水产动物体内的残留消除,还要考虑在养殖水和底泥环境中的残留消解。我国规定了动物源食品(MRL 为 $20\sim 100 \mu\text{g/kg}$)^[24]和农产品(MRL 为 $10\sim 100 \mu\text{g/kg}$)中阿维菌素的最高残留限量^[25],却没有土壤中最高残留限量的规定。在本研究中以 $6 \mu\text{g/L}$ 剂量施用阿维菌素后,底泥中阿维菌素 $C_{\max}$ 为 $1.25 \mu\text{g/kg}$,均低于动物源食品和农产品的最高残留限量。再者,阿维菌素在粮食、蔬菜、水果等农作物和土壤中消解规律研究报道较多。阿维菌素在湿润稻田土壤和淹水稻田土壤中的平均消解半衰期分别为 17.20 d 和

13.51 d ,在黄瓜、柑桔和油菜等土壤中半衰期分别为 $7.9\sim 18.7 \text{ d}$ ^[26]、 7.86 d ^[27]和 $3.5\sim 3.9 \text{ d}$ ^[9]。本研究中模拟池塘底泥中阿维菌素消解半衰期除略大于油菜土壤外,均低于其他作物的土壤。阿维菌素在稻田水中平均消解半衰期为 2.52 d ^[28],与本研究模拟养殖池水消解半衰期接近。根据《化学农药环境安全评价试验准则》规定,土壤中农药的消解半衰期 $<30 \text{ d}$ 时,则将该农药归为易消解农药,因此认为本研究中在模拟养殖水环境中施用的阿维菌素属于易消解型农药。

参考文献:

- [1] Omura S. Ivermectin: 25 years and still going strong[J]. Int J Antimicrob Agents, 2008, 31(2): 91–98.
- [2] Halley B A, VandenHeuvel W J, Wislocki P G. Environmental effects of the usage of avermectins in livestock[J]. Vet Parasitol, 1993, 48(1): 109–125.
- [3] Chung K, Yang C, Wu M, et al. Agricultural avermectins: an uncommon but potentially fatal cause of pesticide poisoning[J]. Ann Emerg Med, 1999, 34(1): 51–57.
- [4] Lasota J A, Dybas R A. Avermectins, a novel class of compounds: implications for use in arthropod pest control[J]. Annu Rev Entomol, 1991, 36(1): 91–117.
- [5] Horsberg T E. Avermectin use in aquaculture[J]. Curr Pharmac Biotechnol, 2012, 13(6): 1095–1102.
- [6] Yin J J. The toxicity of Abamectin effects on *Macrobrachium nipponense* and the pharmacokinetics in *Macrobrachium nipponense*[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2011.[尹敬敬. 阿维菌素对日本沼虾的毒性作用及其药物代谢动力学研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2011.]
- [7] Liu W G, Zhu X Y, Yin M M, et al. Photodegradation of three abamectin liquid formulations[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2012, 31(10): 1906–1912.[刘卫国, 朱欣妍, 尹明明, 等. 阿维菌素 3 种剂型的光解研究[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(10): 1906–1912.]
- [8] Zhang W, Yu Y L, Tan C X, et al. Hydrolysis kinetics and mechanism of Abamectin[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2004, 23(1): 174–176.[张卫, 虞云龙, 谭成侠, 等. 阿维菌素水解动力学研究[J]. 农业环境科学学报, 2004, 23(1): 174–176.]
- [9] Yuan L, Wang H L, Li J Z, et al. Residue and dissipation kinetics of abamectin in cole and soil[J]. Environmental Chemistry, 2011, 30 (2): 490–494.[袁蕾, 王会利, 李建中. 阿维菌素在油菜和土壤中残留及降解行为研究[J]. 环境化学, 2011, 30(2): 490–494.]
- [10] Wang X Z, Lu H D. The acute toxicity and histopathology of

- Abamectin in Allogynogenetic crucian carp[J]. Journal of Dalian Fisheries University, 2010, 23(1): 66–70.[王锡珍, 陆宏达. 关于阿维菌素对异育银鲫的急性毒性和组织病理研究[J]. 大连水产学院学报, 2010, 25(1): 66–70.]
- [11] Zhang W W, Zhan J, Wang Y, et al. Accumulation and elimination of Avermectin in *Carassius auratus gibelio* following medicated bath exposure[J]. Marine Fisheries, 2014, 36(5): 461–468.[张卫卫, 湛嘉, 王元, 等. 药浴暴露下阿维菌素在异育银鲫体内蓄积和消除规律[J]. 海洋渔业, 2014, 36(5): 461–468.]
- [12] Deng L G. Study on Residual determination and degradation of abamectin in cabbage and soil[D]. Qufu: Shandong Normal University, 2009.[邓立刚. 阿维菌素(abamectin)在甘蓝和土壤中的残留检测技术及降解规律研究[D]. 曲阜: 山东师范大学, 2009.]
- [13] Zhang W, Lin K F, Cai L K, et al. Study on microbial degradation of Abamectin and mechanism[J]. Ecology and Environment Science, 2007, 16(2): 421–424.[张卫, 林匡飞, 蔡兰坤, 等. 阿维菌素的微生物降解及其机理研究[J]. 生态环境, 2007, 16(2): 421–424.]
- [14] Zhang W, Yu Y L, Lin K F, et al. The photolysis dynamics and mechanism of pesticide Abamectin in water[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2009, 18(5): 1679–1682.[张卫, 林匡飞, 虞云龙, 等. 农药阿维菌素在水中的光解动态及机理[J]. 生态环境学报, 2009, 18(5): 1679–1682.]
- [15] Brock T C, Crum S, Van Wijngaarden R, et al. Fate and effects of the insecticide Dursban® 4E in indoor Eelgrass-dominated and macrophyte-free freshwater model ecosystems: I. Fate and primary effects of the active ingredient chlorpyrifos[J]. Arch Environ Contam Toxicol, 1992, 23(1): 69–84.
- [16] Chambers J E, Levi P E. Organophosphates: Chemistry, Fate, and Effects[M]. Academic Press, 1992: 47–48.
- [17] Smith G N, Watson B S, Fischer F S. Investigations on dursban insecticide. Uptake and translocation of [36Cl] o, o-diethyl o-3, 5, 6-trichloro-2-pyridyl phosphorothioate and [14C] o, o-diethyl o-3, 5, 6-trichloro-2-pyridyl phosphorothioate by beans and corn[J]. J Agr Food Chem, 1967, 15(1): 127–131.
- [18] Yang H R. Study on Abamectin and cypermethrin in cabbage and soil residue dynamics and photolysis in Abamectin[D]. Hefei: Anhui Agriculture University, 2009.[杨会荣. 阿维菌素和高氯在甘蓝和土壤中的残留消解动态及阿维菌素的光解研究[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2009.]
- [19] A D. The removal efficiency and impact factors of 14 antibiotics in constructed wetlands[D]. Guangzhou: Jinan University, 2012.[阿丹. 人工湿地对 14 种常用抗生素的去除效果及影响因素研究[D]. 广州: 暨南大学, 2012.]
- [20] McKim J M, Nichols J W, Lien G J, et al. Dermal absorption of three waterborne chloroethanes in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) and channel catfish (*Ictalurus punctatus*)[J]. Toxicol Sci, 1996, 31(2): 218–228.
- [21] Tong R, Cheng Y X, Wu X G, et al. Ultrastructure and lipid profile of gills in three crabs living in different habitats[J]. Journal of Fisheries of China, 2011, 36 (9): 1426–1435.[佟蕊, 成永旭, 吴旭干, 等. 3 种不同栖息环境下蟹鳃的超微结构, 脂类组成及含量的比较[J]. 水产学报, 2011, 35(9): 1426–1435.]
- [22] Zhou S, Fang W H, Wu S Q. Evaluation of safety and efficacy of abamectin emulsion in water for aquaculture[J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2010, 18(3): 327–331.[周帅, 房文红, 吴淑勤. 渔用阿维菌素水乳剂的安全性和药效评价[J]. 上海海洋大学学报, 2010, 18(3): 327–331.]
- [23] Li H, Song W H, Li W K, et al. Acute toxicity of three pesticides to juvenile Chinese mitten crab (*Eriocheir sinensis*)[J]. Chinese Journals of Fisheries, 2013, 26(6): 44–47.[李赫, 宋文华, 李文宽, 等. 三种常用农药对中华绒螯蟹幼蟹的急性毒性研究[J]. 水产学杂志, 2013, 26(6): 44–47.]
- [24] The 235th Announcement of Ministry of Agriculture of the People's Republic of China for Maximum Residue Limits of Veterinary drugs in animals derived Food[S]. Beijing: China Standard Press, 2002.[中华人民共和国农业部第 235 号公告动物源性食品中兽药最高残留限量[S]. 北京: 中国标准出版社, 2002.]
- [25] Maximum Residue Limits for Pesticides in Food (GB 2763-2012)[S]. Beijing: China Standard Press, 2012.[GB 2763-2012 食品中农药最大残留限量[S]. 北京: 中国标准出版社, 2012.]
- [26] Jin F, Wang J, Wei S S, et al. Degradation dynamics and residues analysis of abamectin in cucumber and soil[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2014, 47(18): 3684–3690.[金芬, 王静, 魏闪闪, 等. 阿维菌素在黄瓜和土壤中的残留及其消解动态[J]. 中国农业科学, 2014, 47(18): 3684–3690.]
- [27] Fu Q, Yang R B, Liao H Y, et al. Degradation dynamics of avermectin in citrus and soil[J]. Journal of Analytical Science, 2011, 27(1): 85–88.[傅强, 杨仁斌, 廖海玉, 等. 阿维菌素在柑桔和土壤中的消解动态研究[J]. 分析科学学报, 2011, 27(1): 85–88.]
- [28] Zhang J. Behavior and effect of Avermectin in paddy field[D]. Changsha: Hunan Agriculture University, 2011.[张杰. 阿维菌素在稻田中的生态环境行为与效应研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2011.]

Accumulation and elimination of avermectin in a simulated aquaculture ecosystem

ZHANG Weiwei¹, FU Guihong¹, WANG Yuan¹, ZHAN Jia², FANG Wenhong¹, SHEN Jinyu³, ZHOU Junfang¹, YAO Jiayun³

1. Key Laboratory of East China Sea and Oceanic Fishery Resources Exploitation and Utilization, Ministry of Agriculture; East China Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Shanghai 200090, China;
2. Ningbo Academy of Science and Technology for Inspection and Quarantine, Ningbo 315012, China;
3. Zhejiang Institute of Freshwater Fisheries, Huzhou 313001, China

Abstract: Ultra-performance liquid chromatography tandem mass-spectrometry was used to study the environmental behavior of avermectin (AVM) in a simulated aquaculture pond ecosystem. AVM degradation in water, as well as the accumulation and elimination of AVM in sediments, *Elodea nuttallii*, and fish and crab tissues were explored. The results showed that 6 µg/L AVM had a half-life of 63.8 h in the simulated pond. At the same time, AVM was transferred to the sediment, *E. nuttallii*, and aquatic animals. The peak AVM concentration, concentration time curve, and half-life in sediment were 1.25 µg/kg, 469.2 µg/(kg·h), and 115.5 h, respectively. The corresponding values in *E. nuttallii* were 8.75 µg/kg, 2521.7 µg/(kg·h), and 315.0 h, respectively. These results indicate that AVM was absorbed and enriched in *E. nuttallii*. In the simulated system, crucian carp (*Carassius auratus gibelio*) absorbed AVM from water, and peak blood, kidney, gill, liver, and muscle concentrations were 50.9 µg/kg, 45.37 µg/kg, 21.25 µg/kg, 15.47 µg/kg, and 11.9 µg/kg, respectively. AVM was only detected in the gill of Chinese mitten crab (*Eriocheir sinensis*) at a peak concentration of 8.08 µg/kg but was not detected in hemolymph, muscle, or hepatopancreas. The bioconcentration factors in descending order were crucian carp > *E. nuttallii* > Chinese mitten crab > sediments. These results demonstrate different absorption and enrichment in different environmental components and tissues in the same aquatic animal.

Key words: Avermectin; *Carassius auratus gibelio*; *Eriocheir sinensis*; *Elodea nuttallii*; sediment; absorption and enrichment

Corresponding author: FANG Wenhong. E-mail: fwenhong@163.com