

DOI:10.13718/j.cnki.zwyx.2025.06.007

家庭园艺与公园场景下阿维菌素的残留降解动态研究

胡月，彭玮，熊艳芳，周涵宇，田立超

重庆市风景园林科学研究院/川渝共建乡土植物种质创新与利用重庆市重点实验室，重庆 401329

摘要：为评估阿维菌素在城市绿地环境喷雾使用后的残留风险，为病虫害防控安全用药提供科学依据，在家庭园艺和公园场景下追踪其在多介质环境的残留动态，通过液相色谱-质谱联用技术，测定阿维菌素在上述环境介质中的残留量随时间变化的规律。结果显示，在空气中，阿维菌素可迅速降解，施药后1 h降解率可达90%以上；阿维菌素在家庭园艺土壤和水体中降解速率较慢，半衰期分别为12.38 d和9.50 d，显著高于公园土壤和水体的6.13 d和1.18 d；阿维菌素在植物叶片中降解较快，半衰期约为1 d。综上所述，阿维菌素在城市多种环境介质中整体降解速率较快，残留风险较低，对生态环境较安全。

关键词：阿维菌素；城市绿地；残留；

降解动态

中图分类号:S436.6

文献标识码:A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



文章编号:2097-1354(2025)06-0058-07

Residual Degradation Dynamics of Abamectin in Home Gardening and Park Scenarios

HU Yue, PENG Wei, XIONG Yanfang,
ZHOU Hanyu, TIAN Lichao

Chongqing Landscape and Gardening Research Institute / Chongqing Key Laboratory of
Germplasm Innovation and Utilization of Native Plants, Chongqing 401329, China

Abstract: To explore the residual risk of abamectin after spray application in urban green spaces

收稿日期：2025-07-10

基金项目：重庆市科研机构绩效激励引导专项(CSTB2023JXJL-YFX0062, CSTB2024JXJL-YFX0051)。

作者简介：胡月，硕士，中级工程师，主要从事农药药效分析、残留检测与园林病虫害防控技术研究。

通信作者：田立超，博士，正高级工程师。

and guide the safe use of pesticides for pest control, abamectin was sprayed in home gardens and park environments. The amounts of abamectin residual in air, water, plant leaves and soil at different times were determined by liquid chromatography-mass spectrometry. The results showed that abamectin could rapidly degrade in the air, with a degradation rate of over 90% within 1 hour after application. The degradation rate of abamectin in the soil and water of home gardens was relatively slow, with half-lives of 12.38 days and 9.50 days, respectively, which were significantly longer than those in the soil and water of park (6.13 days and 1.18 days). Abamectin degraded relatively quick in plants, with a half-life of approximately 1 day. In conclusion, degradation of abamectin is relatively fast with a high overall degradation rate in various urban environmental media, and a low residual risk. It is relatively safe for the ecological environment.

Key words: abamectin; urban green space; residual; degradation dynamics

城市绿地是现代城市生态系统的重要组成部分,在提升居民生活质量、促进心理健康及营造宜居环境等方面发挥了不可替代的作用^[1-2]。植物群落作为城市绿地的核心元素,不仅通过花草树木构建出丰富的植物景观,还在碳氧平衡、吸污滞尘、涵养水源、维持生物多样性等方面具有重要生态功能^[3]。然而,城市园林病虫害种类繁多,病虫害防治逐渐成为园林养护的关键环节^[4]。阿维菌素是十六元大环内酯类的抗生素,可用于杀虫、杀螨、杀线虫,具有高效、广谱、对环境友好等特点,常作为城市园林病虫害防治的推荐用药^[5-6]。但阿维菌素急性经口毒性较高,对哺乳动物具有潜在生殖毒性,对蚯蚓、蜜蜂等非靶标生物具有高毒性,因此各国对阿维菌素的残留限量均做出了严格规定^[7-9]。国内外对阿维菌素的残留研究报道多集中于各类经济作物,如阿维菌素在柑橘和芹菜中的残留降解,以及阿维菌素在苹果、罗汉果及对应土壤中的残留及消解动态^[10-12],少有对阿维菌素在城市绿地环境中使用后的残留研究报道。城市绿地环境是城市居民游玩、休憩的主要场所,农药对城市环境的污染可通过呼吸、皮肤等方式进入人体,给人体健康带来危害^[13-14]。本文以城市绿地环境中常见的家庭园艺和公园环境为试验地点,分析比较了阿维菌素使用后,其在空气、水体、土壤、植物叶片中的残留及降解情况,可为阿维菌素在城市绿地植物养护中的合理应用提供参考和指导。

1 材料与方法

1.1 试验材料及仪器

97%阿维菌素原药(上海麦克林生物科技有限公司)、1.8%阿维菌素乳油(华植河北生物科技有限公司)、甲醇(色谱纯,购自赛默飞世尔科技有限公司)、乙腈(色谱纯,购自赛默飞世尔科技有限公司)。

液相色谱质谱联用仪(安捷伦 1290II-6470B)、恒流个体采样器(北劳科安 AIR 型)、氮吹仪(莱伯泰科 ET)、固相萃取装置(莱伯泰科 W-SPE12)、超声波清洗器(上海力辰邦西仪器科技有限公司 LC-UC-100)、高速冷冻离心机、气浴恒温振荡器、电子天平、移液器、采样管。实验用水为一级去离子水。

1.2 试验设计

1.2.1 施药时间与方法

试验开始时间为 2025 年 3 月 20 日,试验地点为重庆市九龙坡区白市驿基地;家庭园艺为露台花园(有遮阴),公园为小游园。将 1.8% 阿维菌素乳油稀释 1 000 倍后,采用背负式自动喷

雾器进行施药1次，施药时间为10 min。

1.2.2 试验样品采集

空气样品采用硅胶采样管串联多孔玻板吸收管进行采集，多孔玻板吸收管中加入5 mL乙腈，采样流量500 mL/min，采集30 min。水体样品采用5点取样法，各取100 mL，混合后备用。土壤样品采用5点取样法，取0~10 cm处土层样品，混合后放入烘箱45 °C烘干，过2 mm孔径筛网；叶片样品包括桂花、海桐、山茶不同方位叶片各10片。空气样品采集时间分别为施药前和施药后10 min和1、3、5、7 h；水体、土壤、叶片样品采集时间分别为施药前和施药后1 h和1、2、4、10、15、21、31 d。

1.2.3 样品前处理

空气样品处理：将硅胶倒入5 mL离心管，加丙酮4 mL，超声洗脱30 min，10 000 r/min离心5 min，取上清液2 mL，氮吹仪40 °C吹至近干，用1 mL 90%乙腈水溶液溶解，过0.22 μm滤膜，待测；多孔玻板吸收管中的样品，氮吹仪40 °C吹至近干，用1 mL 90%乙腈水溶液溶解，过0.22 μm滤膜，待测。

水体样品处理：采集的水样经滤纸过滤后，取20 mL试样于50 mL离心管中，加甲酸1 mL，混合均匀。取HLB固相萃取柱依次用5 mL甲醇、5 mL水活化，加水样，用5 mL水淋洗，减压抽干，用6 mL甲醇洗脱。收集洗脱液，40 °C下氮气吹至近干。用1 mL 90%乙腈水溶液溶解残渣，涡旋1 min，过0.22 μm滤膜，待测。

土壤样品处理：称取样品5.0 g置于50 mL离心管中，加入10 mL乙腈，300 r/min摇床振荡提取30 min，超声5 min，加入无水硫酸镁1.2 g和氯化钠0.4 g，300 r/min剧烈振摇1 min，10 000 r/min离心5 min。取上清液2 mL于装有50 mg固相萃取吸附剂(PSA)和150 mg无水硫酸镁的5 mL离心管中，涡旋1 min，10 000 r/min离心5 min，上清液过0.22 μm滤膜，待测。

叶片样品处理，参照张娇娇等^[15]的方法。叶片充分碾碎后，准确称取2 g试样，加入10 mL乙酸乙酯，300 r/min摇床提取30 min，超声5 min，加入无水硫酸镁1.2 g和氯化钠0.4 g，300 r/min剧烈振摇3 min，10 000 r/min离心5 min。取上清液5 mL于15 mL离心管，氮吹仪40 °C吹至近干，用90%乙腈水溶液2 mL溶解，涡旋3 min，倒入装有50 mg固相萃取吸附剂(PSA)和150 mg无水硫酸镁的5 mL离心管中，涡旋1 min，10 000 r/min离心5 min，取上清液过0.22 μm滤膜，待测。

1.3 分析方法

1.3.1 色谱和质谱条件

色谱柱：C18(2.1 mm×50 mm，粒径1.8 μm)；流动相：A为5 mmol/L乙酸铵溶液，B为乙腈；梯度洗脱条件：0~3 min，10% B；3~6 min，95% B，之后进行系统平衡；进样量：5 μL；流速：0.35 mL/min；柱温：40 °C。

质谱条件：电喷雾离子源；正离子扫描；多反应监测(MRM)；喷雾电压：5.5 kV；脱溶剂气温度：400 °C；母离子(m/z)为895.5，子离子(m/z)为751.3、449.2，碰撞能：45、50 eV；碎裂电压190 V。

1.3.2 标准曲线绘制

精密称定阿维菌素标准品，用乙腈溶解并稀释定容至50 mL，配制成标准储备液。然后用90%乙腈水溶液配制成阿维菌素浓度为2、10、25、50、100 μg/L的系列标准工作液，并根据不同基质配置匹配标准溶液，供液相色谱串联质谱仪测定。以测得特征离子色谱峰峰面积和标准

溶液浓度绘制标准曲线,求得回归方程和相关系数。

1.3.3 回收率试验

根据1.3中的样品前处理方法,取水体、土壤、叶片空白样品,分别添加3个水平(10、50、 $100\text{ }\mu\text{g/L}$)的阿维菌素,对加标样品进行测定,每个水平重复6次,计算回收率和相对标准偏差。

1.3.4 基质效应

根据空白基质标准曲线斜率和90%乙腈水溶液配制的标准曲线斜率,判断阿维菌素在不同环境样品中的基质效应。基质效应大于50%为强基质效应,20%~50%为中等基质效应,小于20%为弱基质效应。

1.4 计算公式

基质效益,空气中阿维菌素浓度,降解半衰期计算公式分别如下:

$$ME = \left| \frac{A - B}{B} \right| \times 100$$

式中,ME为基质效应(%);A为空白基质标准曲线斜率;B为90%乙腈水溶液配制的标准曲线斜率。

$$V_0 = V \times \frac{293}{273 + t} \times \frac{P}{101.3}$$

$$C = \frac{nc}{V_0 D}$$

式中, V_0 为标准采样体积(L);V为采样体积(L);P为采样点的大气压(kPa);t为采样点的温度($^{\circ}\text{C}$);C为空气中阿维菌素浓度($\mu\text{g}/\text{m}^3$);n为洗脱液的体积(mL);c为测得阿维菌素浓度($\mu\text{g}/\text{L}$);D为洗脱效率(%))。

$$C_t = C_0 e^{-kt}$$

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{k}$$

式中, C_t 为t时阿维菌素的残留浓度($\mu\text{g}/\text{L}$), C_0 为阿维菌素的初始浓度($\mu\text{g}/\text{L}$),k为降解系数,t为施药后时间(d), $T_{1/2}$ 为降解半衰期(d)。

2 结果与分析

2.1 标准曲线、检出限、定量限和基质效应

在不同基质中添加阿维菌素,建立标准曲线,结果如表1所示。不同基质中阿维菌素浓度在2~100 $\mu\text{g}/\text{L}$ 时具有良好的线性关系,相关系数(R^2)为0.989 6~0.999 2。不同基质中的检出限为0.16~0.68 $\mu\text{g}/\text{L}$,定量限为0.54~2.28 $\mu\text{g}/\text{L}$ 。阿维菌素在水体中的基质效应为39.58%,为中等基质效应;其在土壤和叶片中的基质效应均大于50%,为强基质效应,说明净化后基质对阿维菌素的影响依然较大,因此本研究采用基质匹配标准曲线法定量,以消除基质效应带来的影响。

表1 不同基质中阿维菌素线性方程、相关系数、检出限、定量限及基质效应

基质	标准曲线	R^2	LOD/($\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)	LOQ/($\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)	基质效应/%
溶剂	$y = 18.8395x + 47.9495$	0.990 4	0.16	0.54	0.00
水体	$y = 26.2964x + 76.9713$	0.996 6	0.30	1.01	39.58
土壤	$y = 5.5186x - 20.6388$	0.989 6	0.68	2.28	70.71
叶片	$y = 1.2396x + 67.2217$	0.999 2	0.64	2.14	93.42

2.2 方法的回收率及精密度

分别在水体、土壤和叶片基质中添加 10、50、100 $\mu\text{g}/\text{L}$ 系列标准溶液，然后进行加标回收试验，结果如表 2 所示。阿维菌素在不同基质中的回收率为 76.47%~105.41%，相对标准偏差为 5.20~10.40。

表 2 阿维菌素在水体、土壤、叶片样品中的添加回收率和相对标准偏差

样品	添加浓度/($\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)	平均回收率/%	相对标准偏差
水体	10	89.29	6.12
	50	103.63	5.20
	100	95.94	10.40
土壤	10	76.47	7.25
	50	82.19	9.73
	100	105.41	9.01
叶片	10	83.47	7.60
	50	90.54	8.81
	100	87.02	7.58

2.3 阿维菌素在空气、水体、土壤、叶片中的残留及降解动态

本试验分别检测了家庭园艺和公园使用阿维菌素后，其在空气、水体、土壤及叶片环境中的残留情况。表 3 列出了阿维菌素使用后在空气中的残留量，家庭园艺喷施阿维菌素 10 min 后，空气中的残留量约为 1.941 8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，1 h 后迅速下降至 0.169 9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，降解率达 90% 以上，5 h 后不再检出阿维菌素。公园环境中，施药后 10 min，空气中的残留量仅为 0.171 5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，1 h 后未检出。说明阿维菌素施药后在空气中残留时间较短。

阿维菌素在水体、土壤及叶片环境中的残留情况如图 1 和表 4 所示，阿维菌素在叶片中的降解速率明显高于水体和土壤环境，家庭园艺及公园植物叶片均在 4 d 后未检出阿维菌素；家庭园艺水体中阿维菌素的半衰期为 9.50 d，显著高于公园水体的 1.18 d，主要与公园中水体面积大、受阳光直射、植物及微生物较多等因素有关；家庭园艺土壤中阿维菌素的降解速率最低，半衰期可达 12.38 d，公园土壤中阿维菌素降解半衰期为 6.13 d，可能与阳光直射、土壤含水量不同等因素有关。

表 3 阿维菌素在空气中的降解

时间	家庭园艺			公园		
	检测含量/($\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)	空气中的残留量/($\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)	降解率/%	检测含量/($\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)	空气中的残留量/($\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)	降解率/%
10 min	29.334 1	1.941 8	0.00%	2.590 2	0.171 5	0.00%
1 h	2.566 9	0.169 9	91.25%	ND	—	—
3 h	1.072 8	0.071 0	96.34%	ND	—	—
5 h	ND	—	—	ND	—	—

注：ND 表示未检出。

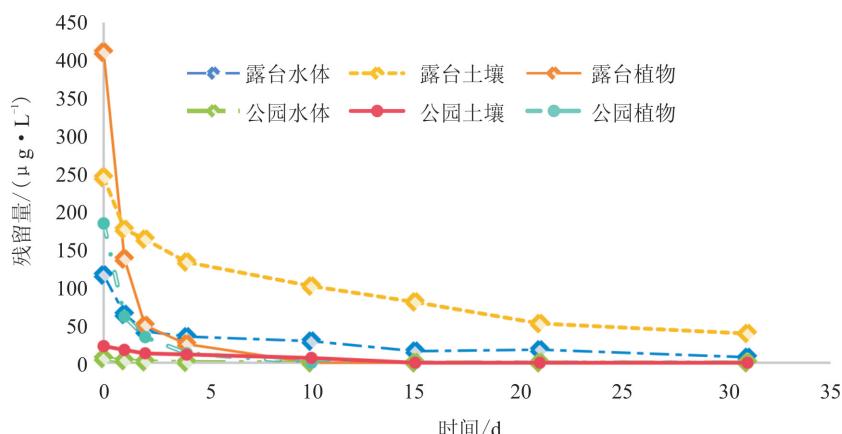


图1 阿维菌素在水体、土壤、叶片中的降解曲线

表4 阿维菌素在水体、土壤、叶片中的拟合方程

取样点	取样点	一级动力学方程	R ²	半衰期/d
家庭园艺	水体	$C_t = 63.452e^{-0.073x}$	0.864 6	9.50
	土壤	$C_t = 189.340e^{-0.056x}$	0.955 5	12.38
	植物	$C_t = 204.130e^{-0.691x}$	0.922 0	1.00
公园	水体	$C_t = 4.969e^{-0.587x}$	0.981 3	1.18
	土壤	$C_t = 18.719e^{-0.113x}$	0.919 1	6.13
	植物	$C_t = 144.990e^{-0.646x}$	0.961 2	1.07

3 结论与讨论

农药残留检测是评估农药安全的重要措施。目前,主流检测仪器如液相色谱质谱联用仪(LC-MS)和气相色谱质谱联用仪(GC-MS)具有较高的检测准确度和精密度,但基质效应普遍存在且难以避免^[16]。本研究结果显示,土壤和植物叶片中阿维菌素的检测均具有强基质效应,可能与两种基质的净化处理方式相似有关。空气中农药残留多采用气相色谱质谱联用仪进行检测,如拟除虫菊酯、毒死蜱等^[17-18]。本研究采用液相色谱质谱联用仪检测了空气、水体、土壤及植物叶片中阿维菌素的含量,结果表明,空气中的阿维菌素以极快的速度减少,原因可能是阿维菌素挥发性低,空气中阿维菌素多以气溶胶形式存在^[19],容易受重力、光照等因素影响而快速沉降、分解;土壤中阿维菌素降解速率较慢,这与相关报道的检测结果相似^[15, 20];室外公园水体中的阿维菌素降解较快,半衰期仅为1.18 d,远低于家庭园艺的9.50 d,可能与公园水体面积较大,农药容易扩散,且含有底泥和多种藻类等因素有关。张卫^[21]的研究发现,水体中的阿维菌素会不断向底泥和藻类中转移,而家庭园艺水体中则无底泥、藻类,且不容易受到阳光直射。阿维菌素在植物叶片中的降解速率较快,与其在枸杞、甘蓝和西兰花中的研究报道相似^[22-24]。根据检测结果,城市园林中喷施阿维菌素后,其在空气、水体、土壤及植物叶片中的半衰期整体较短,降解速率较快,初步判断其生态风险较低,对环境相对安全。但试验过程发现,阿维菌素有轻微刺激性气味,且考虑其对人体的潜在毒性,建议在城市绿地施药时,作业人员应做好个人防护,施药后需及时采取相关措施,保障公共健康。本研究系统评估了阿维菌素在城市多介质环境中的残留与降解行为,可为园林环境中阿维菌素合理施用及生态风险评估提供参考。

参考文献:

- [1] 李达昌.园林绿化在现代城市中的重要性及发展策略[J].发展,2024(10): 58-60.

- [2] 陈飞, 马玲, 杨栗清, 等. 园林绿化在城市生态修复中的应用 [J]. 科技视界, 2013(11): 173.
- [3] 王蕾, 王志, 刘连友, 等. 城市园林植物生态功能及其评价与优化研究进展 [J]. 环境污染与防治, 2006, 28(1): 51-54.
- [4] 贾小琴, 李双元. 城市园林病虫害的危害现状及对策 [J]. 河北农机, 2023(18): 112-114.
- [5] 陈平, 刘正玲, 杨亚辉, 等. 5种杀虫剂对西花蓟马的室内毒力及其对巴氏新小绥螨的安全性评价 [J]. 云南农业大学学报(自然科学), 2024, 39(4): 23-28.
- [6] DEVI G. Biological Control of Plant-Parasitic Nematode through Avermectin: A Review [J]. Journal of Scientific Research and Reports, 2025, 31(2): 418-424.
- [7] 徐浩然, 杨仁斌, 廖海玉, 等. 高效液相色谱法测定土壤中阿维菌素残留 [J]. 环境监测管理与技术, 2011, 23(1): 51-53.
- [8] JANKOWSKA M, HRYNKO I, RUTKOWSKA E, et al. Dissipation, Processing Factors and Dietary Risk Assessment of the Bioinsecticide Abamectin in Herbal Plants Belonging to *Lamiaceae* Family from Open Field to Herbal Tea Infusion [J]. Chemosphere, 2024, 358: 142159.
- [9] QIAO L, XU J H, YANG Z, et al. Residual Risk of Avermectins in Food Products of Animal Origin and Their Research Progress on Toxicity and Determination [J]. Food Reviews International, 2023, 39(9): 7019-7047.
- [10] MOYE H A, MALAGODI M H, YOH J, et al. Avermectin B1a Metabolism in Celery: A Residue Study [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 1990, 38(1): 290-297.
- [11] PAN D, XIA M H, LUO Q J, et al. Resistance of *Panonychus citri* (McGregor) (Acari: Tetranychidae) to Pyridaben in China: Monitoring and Fitness Costs [J]. Pest Management Science, 2023, 79(3): 996-1004.
- [12] 陈晓兰, 蔡翔宇, 冯良军, 等. 阿维菌素在罗汉果和土壤中的残留及消解动态 [J]. 农药, 2021, 60(2): 123-127.
- [13] 李增梅, 邓立刚, 赵淑芳, 等. 超高效液相色谱-串联质谱法研究阿维菌素在苹果和土壤中的残留消解动态 [J]. 分析化学, 2010, 38(10): 1505-1509.
- [14] 谢永红. 农药污染对人体健康的危害 [J]. 四川农业科技, 2003(11): 30-31.
- [15] 张娇娇, 刘炎, 叶玉凤, 等. 阿维菌素在柑桔和土壤中的残留及其消解动态 [J]. 中国南方果树, 2017, 46(2): 49-53.
- [16] 闫君, 陈婷, 张婕, 等. 农药残留检测的基质效应研究综述 [J]. 食品科技, 2024, 49(6): 335-341.
- [17] 李晨光. 工作场所空气中多种拟除虫菊酯类农药残留的溶剂解析-气相色谱-质谱同时测定法 [J]. 职业与健康, 2020, 36(9): 1205-1207, 1212.
- [18] 刘红河, 陈卫, 刘桂华, 等. 工作场所空气中毒死蜱溶剂解吸气相色谱测定 [J]. 中国职业医学, 2011, 38(5): 430-432.
- [19] 王应昆, 潘天乐, 蔡义宇, 等. 在线测量技术在大气有机气溶胶研究中的应用与展望 [J]. 地球化学, 2024, 53(4): 479-495.
- [20] 孙蕊, 史娜, 刘慧君, 等. 苹果中阿维菌素的残留分析与消解动态研究 [J]. 食品安全质量检测学报, 2021, 12(3): 1247-1253.
- [21] 张卫. 农药阿维菌素在环境中降解和代谢研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2004.
- [22] 张怡, 张宗山, 王芳, 等. 阿维菌素在枸杞果实中的残留动态 [J]. 农药, 2007, 46(1): 46-47, 57.
- [23] 谢显传, 张少华, 王冬生, 等. 阿维菌素对蔬菜地土壤微生物及土壤酶的生态毒理效应 [J]. 土壤学报, 2007, 44(4): 740-743.
- [24] 袁蕾, 李建中, 莫汉宏, 等. 规范残留试验下阿维菌素在油白菜和结球甘蓝中的残留及消解动态 [J]. 农药学报, 2010, 12(2): 185-189.