

• 研究论文 •

介孔活性炭阿维菌素载药系统的性能研究

孙长娇, 崔海信*, 刘琪, 顾微, 姜建芳

(中国农业科学院 农业环境与可持续发展研究所, 北京 100081)

摘要: 研究了介孔活性炭对阿维菌素的载药特性, 以判断其作为阿维菌素载体的可能性。以扫描电子显微镜、比表面积分析仪和粒度分析仪对其进行了物理性状表征。将其负载阿维菌素的能力与常规农药载体进行比较, 并进一步分析和评价了该载药系统的吸附动力学特性、缓-控释性能和抗紫外光降解能力。结果表明: 供试活性炭载体为不规则球形颗粒状介孔材料, 平均粒径为 814 nm, 比表面积为 $1\,719.25\text{ m}^2/\text{g}$, 孔容积为 $0.043\text{ m}^3/\text{g}$, 孔径为 4.80 nm。吸收动力学数据符合伪二级动力学模型, 对阿维菌素的载药量为 220.6 mg/g , 显著高于其他常规农药载体, 呈现了优良的吸附性能; 载药系统的释药时间从 90 h 延长到 672 h 以上, 表现出了良好的缓释效果; 紫外光照射 72 h 后, 阿维菌素原药的分解率为 77%, 而有活性炭载体保护的阿维菌素的分解率为 30%, 表明该载药系统有效地减缓了阿维菌素的光降解速率。研究表明, 以介孔活性炭作为阿维菌素载体, 可显著改善药物的缓-控释特性以及分散性和光稳定性。

关键词: 介孔活性炭; 阿维菌素; 载药系统; 缓释; 控释; 光降解

DOI: 10.3969/j.issn.1008-7303.2010.02.17

中图分类号: TQ450.68

文献标志码: A

文章编号: 1008-7303(2010)02-0214-07

Properties of abamectin delivery system loaded by mesoporous activated carbon

SUN Chang-jiao, CUI Haixin*, LIU Qi, GU Wei, JIANG Jian-fang

(Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture,

Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract The loading properties of mesoporous activated carbon for abamectin were studied to determine its potential as the carrier of abamectin. Physical properties of mesoporous activated carbon were characterized by scanning electron microscope, specific surface area analyzer and particle size analyzer. Drug-loading capacity of mesoporous activated carbon was compared with other conventional pesticide carriers, and the adsorption kinetics, sustained-release properties and resistance to UV degradation of the drug delivery system were analyzed and evaluated. The results showed that the mesoporous activated carbon were irregular spherical particles with specific surface area of $1\,719.25\text{ m}^2/\text{g}$, pore volume of $0.043\text{ m}^3/\text{g}$ and average pore diameter of 4.80 nm, and its drug-loading capacity for abamectin reached 220.6 mg/g and was significantly excellent over other

收稿日期: 2009-12-11; 修回日期: 2010-03-12

作者简介: 孙长娇 (1984), 女, 辽宁省东港市人, 硕士研究生, E-mail: sunchangjiao@hotmail.com; * 通讯作者 (Author for correspondence):

崔海信 (1963-), 男, 吉林省扶余县人, 研究员, 博士生导师, 主要从事农业纳米生物技术方面的研究, 电话: 010-82106013, E-mail: haixincu@cjas.org.cn

基金项目: 国家高技术研究发展计划 (“863”计划) 重大项目 (2006AA10A203).

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

conventional pesticide carriers. The adsorption processes followed a pseudo second-order kinetic rate equation. Drug release time was extended from 90 h to 672 h, which may significantly extend the duration of drug. The drug degradation rate was 77% in the original drug of abamectin, while only 31% decomposed under UV radiation in abamectin delivery system with mesoporous activated carbon, which showed that mesoporous activated carbon effectively inhibited the photo-degradation of the drug. These results indicated that mesoporous activated carbon can be used as drug carrier for abamectin to improve properties of sustained-controlled release, dispersity in water and photo-stability.

Key words mesoporous activated carbon; abamectin delivery system; sustained release; controlled release; photo-degradation

目前,以农用抗生素为主体的生物农药已日益受到重视,但其市场占有率仍然很低,原因之一就是其使用效果易受环境因素影响,因此,改善药物的稳定性和缓-控释性能、延长持效期和提高有效利用率已成为生物农药剂型创制研究的主要发展方向^[1]。采用新型、高效的载体材料来控制药物的释放速率,可延长药效时间,提高其稳定性和利用率,减少施用频率及用量,从而达到降低成本和增加防效的目的^[2]。

阿维菌素 (abamectin) 是 20 世纪 80 年代开始投入市场的大宗生物农药产品^[3],具有广谱、高效、低毒、与其他常规农药无交互抗药性等特点,是迄今为止对昆虫、螨类和寄生虫等最为有效的杀虫剂之一^[4];其缺点是难溶于水,在水中分散性差,在日光下易迅速降解,半衰期较短^[5]。目前常用的阿维菌素制剂为乳油和可湿性粉剂,这些制剂产品的缓-控释性能、分散性、稳定性均有待改善,且乳油制剂因使用有机溶剂还易导致环境污染。尤其是当常规阿维菌素制剂用于土壤害虫防治时,药物释放速率过快会增大其被土壤团粒吸附和被微生物降解的比例,从而缩短药剂在土壤中的持效期,降低药效及其有效利用率^[6-7]。

李珠柱等^[8]以无机-有机双模板法,首次采用空心多孔二氧化硅制备出纳米颗粒作为阿维菌素的控释载体,包埋率高达 62.5%,并且对阿维菌素具有良好的紫外防护和缓释性能。但是空心二氧化硅的制备工艺相对复杂,不适合大规模工业化生产。

活性炭是广泛应用于工业、环境卫生和生物医药等领域的炭质吸附材料^[9],对气体及溶液中的无机或有机物及胶体颗粒等具有优良的吸附性能。20 世纪 90 年代, Sjogren 等^[10]报道了活性炭作为乙拌磷、毒死蜱、灭线磷、乙酰甲胺磷、敌敌畏、2,4-滴、二嗪磷、苯线磷等化学农药的控释剂,能够有效防止活性成分被紫外线降解,田间药效试验进一步证

明,以活性炭为载体的昆虫生长抑制剂吡丙醚的持效期可比原药延长 63 d。此外, Garrido 等^[11]的研究表明,向以海藻酸钠为基本控释材料的异丙隆、吡虫啉和灭蝇胺农药制剂配方中加入膨润土和活性炭后,其包封率比单独以海藻酸钠为控释材料的配方高,而且活性炭含量越高,包封率越高;复合配方的释放速率比只以海藻酸钠为载体的配方要低。但有关将活性炭作为生物农药载体的研究目前尚未见文献报道。

介孔活性炭的孔径在 2~50 nm,其孔径分布狭窄、孔道结构规则,而且具有更大的比表面积,通常能达到 1 000~3 000 m²/g,所以其吸附能力更强,应用范围更为广阔。Ariyadejvanich 等^[12]用废旧轮胎制备介孔活性炭,液相吸附实验证明,其吸附染料的能力优于商品活性炭; Kennedy 等^[13]将浸铜的介孔活性炭作为催化剂用于消除废水中的微生物,发现该催化剂能高效杀死废水中的病原体,且抗菌持效期较长,可被重复使用。

本研究以 92% 阿维菌素原药为对象,将介孔活性炭的载药性能与 9 种常用农药载体进行了比较;并进一步考察了介孔活性炭对阿维菌素的吸附动力学特性、载药系统的缓-控释性能及其抗紫外线降解能力,以期以介孔活性炭为载体的阿维菌素缓-控释剂型的开发提供理论依据。

1 实验部分

1.1 主要材料与仪器

材料与试剂:介孔活性炭(由清华大学提供);硅藻土、高岭土及人造沸石(国药集团化学试剂公司);辉沸石(广西宝丽西石矿有限公司);蒙脱土(浙江丰虹化工有限公司);凹凸棒土(明光市兴欣矿业有限公司);滑石粉(北京化学试剂公司);膨润土(Sigma 试剂公司);纳米二氧化硅(厦门迈凯伦科技有限公司);92% 阿维菌素(abamectin)原药(华

药集团先泰药业公司);所有试剂均为分析纯。

仪器: D 25MM 透析袋 (4 000~ 6 000) (美国联合碳化物公司); TristarII 3020 型表面积分析仪 (美国麦克仪器公司); Hitachi S-4500 型扫描电镜 (日本日立株式会社); Zetasizer Nano 纳米粒度分析仪 (英国马尔文公司); 岛津 UV-2550 型紫外可见分光光度计 (岛津国际贸易有限公司); CT14D 型离心机 (上海天美科学仪器有限公司); 紫外线降解装置为自行制作, 以两根 36W 主波长为 365 nm 的紫外灯管为光源, 灯管距离样品照射平台 15 cm, 实验装置外部用黑布进行遮光处理。

1.2 介孔活性炭的物理性状表征

采用 Hitachi S-4500 型扫描电镜 (SEM) 表征介孔活性炭的表面形态; 采用 Zetasizer Nano 纳米粒度分析仪测定活性炭的平均粒径; 采用 TristarII 3020 型比表面积分析仪测定活性炭的比表面积和吸附-脱附等温线; 将样品在 0.133 Pa 下经 300 °C 干燥 3 h 在低温 (-196.15 °C) 下测定 N₂ 的吸附-脱附等温线, 由 BET 法计算比表面积。

1.3 不同载体对药物的吸附效果测定

精确配制 10 mg/mL 的阿维菌素乙醇储备溶液, 于 4 °C 避光条件下保存。取 10 个干燥的 100 mL 带塞三角瓶, 分别加入 50 mL 阿维菌素储备液、0.5 g 介孔活性炭或其余 9 种常规农药载体, 混匀后置于恒温振荡器上, 于 100 r/min, 30 °C 条件下吸附 48 h。分别取 5 mL 样液于离心管中, 于 13 000 r/min 下离心 15 min, 吸取一定体积上清液, 用无水乙醇稀释适当倍数, 以无水乙醇为参比, 在 $\lambda_{max} = 245$ nm 下测定吸光度, 由标准曲线计算相应的阿维菌素浓度 c_t , 用式 (1) 计算出不同时刻的吸附量。每个样品平行测定 3 次, 取平均值。

$$q_t = \frac{(c_0 - c_t)V}{m} \quad (1)$$

式中, q_t 为 t 时刻载体对阿维菌素的吸附量 (载药量), mg/g; c_0 为阿维菌素的初始质量浓度, mg/mL; c_t 为 t 时刻溶液中剩余阿维菌素的质量浓度, mg/mL; V 为溶液体积, mL; m 为载体的质量, g。

1.4 阿维菌素初始浓度对载药量的影响测定

分别称取 10 份 0.5 g 介孔活性炭于 100 mL 带塞三角瓶中, 各加入 100 mL 不同初始质量浓度 (c_0 分别为 0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0, 2.0, 4.0, 6.0, 8.0 和 10.0 mg/mL) 的阿维菌素乙醇溶液, 混匀后于 25 °C 下吸附 48 h, 取样测定上清液的吸光度, 由式 (1) 计算出载药量。每个样品平行测定 3 次, 取平

均值。

1.5 介孔活性炭吸附动力学特性测定

称取 2 份 0.5 g 介孔活性炭, 分别加入 100 mL 不同初始质量浓度 (2.4 mg/mL) 的阿维菌素乙醇溶液, 混匀后分别于 25, 35 和 45 °C 下进行吸附, 待吸附进行 1, 2, 4, 8, 12, 24, 36 和 48 h 后取样测定上清液的吸光度, 由式 (1) 计算出载药量。每个样品平行测定 3 次, 取平均值。

1.6 载药系统的缓释性能测定

吸附反应结束后, 将样品放入离心机中于 13 000 r/min 下离心 15 min 倾掉上清液, 置于干燥箱中, 40 °C 干燥 24 h 得到载药活性炭。

称取 0.2 g 载药活性炭 (载药量为 224 mg/g), 分散至 20 mL 无水乙醇中, 将悬浮液全部转移到经过处理的透析袋中, 封口后放入 300 mL 无水乙醇 (外液) 中搅拌, 定时取样测定外液中阿维菌素浓度。对照组为将 224 mg 阿维菌素原药溶解于 100 mL 无水乙醇, 取 20 mL 溶液进行相同处理。测定分析时, 每次各取样 5 mL, 同时补加 5 mL 无水乙醇到外液中, 保持外液体积恒定为 300 mL。重复 3 次, 取平均值。

1.7 载药系统的抗光降解性能测定

称取 0.2 g 载药活性炭 (载药量为 200 mg/g), 分散到 20 mL 无水乙醇中。吸取 1 mL 悬浮液于若干直径为 6 cm 的培养皿中, 待乙醇在避光条件下完全挥发后置于自制紫外降解装置下照射, 分别于照射 12, 24, 36, 48, 60 和 72 h 时各取出 1 个培养皿, 向其中加入 5 mL 乙醇, 将载药活性炭悬浮。收集悬浮液至离心管中, 超声 30 min 后, 于 13 000 r/min 下离心 15 min, 吸取 1 mL 上清液, 稀释 5 倍后测定其吸光度。以初始浓度为 0.2 mg/mL 的阿维菌素乙醇溶液为对照, 处理和测试方法相同。重复 3 次, 取平均值。

2 结果与讨论

2.1 介孔活性炭的物理性状表征

介孔活性炭样品的扫描电镜观测结果 (放大 20 万倍) 如图 1 所示, 样品呈不规则球形颗粒状, 粒子的分散性较好。纳米粒度分析仪分析结果见图 2 样品颗粒的平均粒径为 814 nm, 峰型为对称性较好的正态分布, 说明活性炭粒径较为均一。另外, 采用比表面积测定仪测定了介孔活性炭的比表面积, 以 N₂ 吸收量对相对压作图, 得到介孔活性炭的吸附-脱附等温线 (见图 3)。采用比表面

积检测 (BET) 法测得介孔活性炭的比表面积为 $1\,719.25\text{ cm}^2/\text{g}$ 采用 B.H 法测得孔容积为 $0.043\text{ cm}^3/\text{g}$ 平均孔径为 4.80 nm , 介于微孔 ($< 2\text{ nm}$) 和大孔 ($> 50\text{ nm}$) 之间, 表明该活性炭符合介孔材料标准。活性炭通常具有 3 种孔隙结构: 微

孔 ($< 2\text{ nm}$), 介孔 ($2\sim 50\text{ nm}$) 和大孔 ($> 50\text{ nm}$), 微孔与介孔类的小孔可以使活性炭具有非常大的比表面积, 从而有利于产生优良的吸附性能。孔隙大小、孔径分布、比表面积以及表面化学性质均是影响吸附性能的主要因素^[14]。

2.2 介孔活性炭与常规农药载体的载药性能比较

表 1 为介孔活性炭和其他 9 种常规农药载体材料对溶液中阿维菌素的吸附效果比较。可以看出, 几种载体材料对阿维菌素的载药能力大小为: 活性炭 $>$ 纳米二氧化硅 $>$ 滑石粉 $>$ 膨润土 $>$ 人造沸石 $>$ 硅藻土 = 凹凸棒土 $>$ 蒙脱土 $>$ 辉沸石, 其中介孔活性炭载体对阿维菌素表现出了优良的吸附性能, 其载药量达到 220.6 mg/g 显著高于其他常规农药载体。介孔活性炭的吸附能力可能主要与其孔隙结构、表面化学性质以及矿物质含量等因素有关, 但并非与比表面积及孔径分布呈简单的线性相关。其良好吸附能力的形成可能与有机分子与吸附剂内表面容易接近有重要关系, 因而主要受限于其内表面的大小^[15]。供试介孔活性炭的比表面积较大, 孔隙结构丰富, 并且具有丰富的羧基、羟基和羰基

表 1 不同载体材料对阿维菌素的吸附效果

Table 1 The adsorption effect of abamectin with different carrier materials

载体 Carriers	粒径 / μm Particle size	载药量 / (mg/g) Amount of adsorbed abamectins
活性炭 Activated carbon	0.8	220.6
硅藻土 Diatomite	48	4.7
辉沸石 Stibite	75	2.4
蒙脱土 MMT	75	3.5
凹凸棒土 Attapulgite	38	4.7
人造沸石 Zeolite	380	9.4
高岭土 Kaolin	48	30.7
膨润土 Bentonite	75	35.4
滑石粉 Talc	38	36.6
纳米二氧化硅 Nano-silica	0.03	44.3

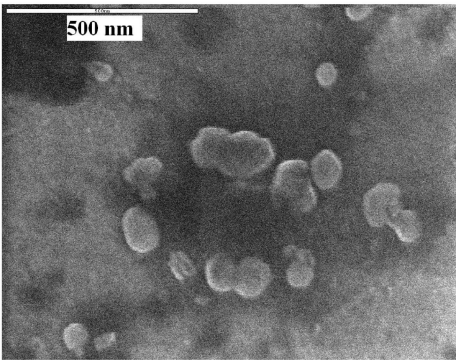


图 1 介孔活性炭扫描电镜照片 ($\times 2\times 10^6$)
Fig 1 SEM photograph of mesoporous activated carbons ($\times 2\times 10^6$)

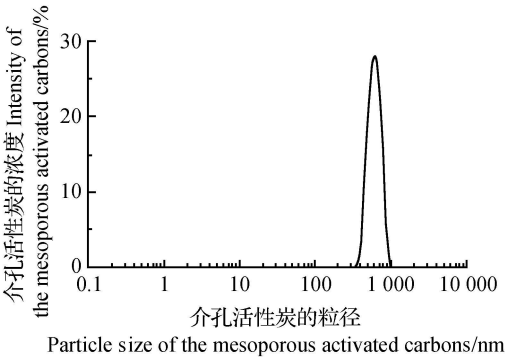


图 2 介孔活性炭粒径分布图

Fig 2 Particle size distribution of mesoporous activated carbons

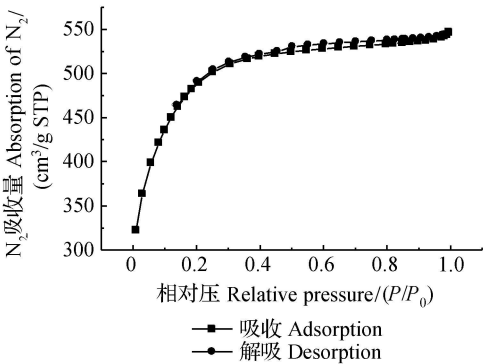


图 3 介孔活性炭吸附-脱附等温线

Fig 3 Adsorption-desorption isotherms of N_2 at $-196.15\text{ }^\circ\text{C}$ of mesoporous activated carbons

等表面功能基团,因而使其对阿维菌素更容易产生优良的吸附能力。

2.3 阿维菌素初始浓度对载药量的影响

图 4 显示了在 25 °C 条件下活性炭载药量随时间的变化情况。结果表明,不同初始质量浓度 (c_0) 下,介孔活性炭对阿维菌素的载药量随着吸附时间的延长而增大, c_0 为 2 mg/mL 时,吸附进行 12 h 后达到吸附平衡,载药量不再发生明显变化; c_0 为 4 mg/mL 时,吸附进行 20 h 后达到平衡。

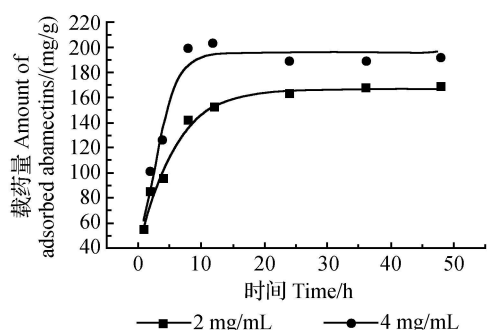


图 4 介孔活性炭载药量随时间的变化情况

Fig. 4 Adsorbed amounts of abamectin on the mesoporous activated carbons at 25 °C as a function of time

图 5 显示了介孔活性炭载药量随阿维菌素初始质量浓度变化的情况。结果表明,当 c_0 在 0~10.0 mg/mL 之间时,介孔活性炭对阿维菌素的载药量随 c_0 的增大而增大;在 c_0 为室温下的饱和质量浓度 10.0 mg/mL 时,载药量达到最大值 225.2 mg/g。

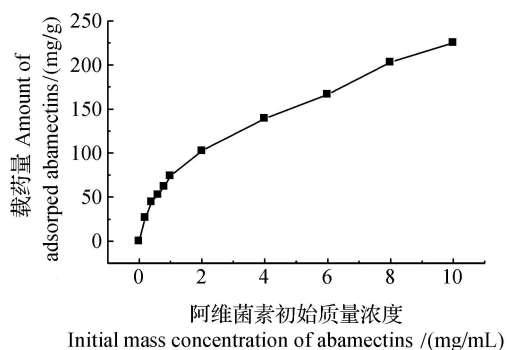


图 5 初始质量浓度对介孔活性炭载药量的影响

Fig. 5 Impact of initial mass concentrations on the adsorbed amounts of abamectin on the mesoporous activated carbons

通常,多孔吸附剂从溶液中吸附溶质的过程包含 3 个连续的物质转移过程^[16]:首先是溶质在溶液

中的迁移,即膜扩散;然后是溶质通过孔扩散,从粒子表面转移到吸附剂内部位点;最后是溶质转移到吸附剂内部的活性位点上。整个吸附过程在不同条件下所需要的时间是不同的。

2.4 不同温度下的吸附动力学

对吸附过程的动力学研究主要是为了描述吸附剂吸附溶质速率的快慢,通过动力学模型对数据进行拟合,从而探讨其吸附机理^[17]。本试验在吸附温度分别为 25、35 和 45 °C 条件下,研究了介孔活性炭对不同初始质量浓度阿维菌素溶液的吸附过程,并采用伪一级吸附模型、伪二级吸附模型和颗粒内扩散模型分别对数据进行拟合,以期得到最适合的描述。

2.4.1 伪一级吸附模型 采用 Lagergren 方程^[18]计算吸附速率:

$$\frac{dq_t}{dt} = k_1 (q_e - q_t) \quad (2)$$

式中, q_t 和 q_e 分别为 t 时刻和平衡态时的吸附量, mg/g; k_1 为伪一级吸附速率常数, h^{-1} 。

对式 (2) 从 $t=0$ 到 $t>0$ ($q=0$ 到 $q>0$) 进行积分,可以得到:

$$\ln(q_e - q_t) = \ln q_e - k_1 t \quad (3)$$

2.4.2 伪二级吸附模型 伪二级动力学方程^[19]表达式为:

$$\frac{dq_t}{dt} = k_2 (q_e - q_t)^2 \quad (4)$$

对式 (4) 从 $t=0$ 到 $t>0$ ($q=0$ 到 $q>0$) 进行积分,写成直线形式为:

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{t}{q_e} \quad (5)$$

令:

$$h = k_2 q_e^2 \quad (6)$$

式中, h 为初始吸附速率常数, $mg/(g \cdot h)$ 。

2.4.3 颗粒内扩散模型 最早由 Weber 等^[20]提出,其表达式为:

$$q_t = k_p t^{1/2} \quad (7)$$

式中, k_p 为颗粒内扩散速率常数, $mg/(g \cdot h^{1/2})$, 由 $q_t - t^{1/2}$ 线性图的斜率即可得到 k_p 。

按照上述 3 种动力学模型对实验数据进行线性拟合,通过直线的斜率和截距计算得动力学参数 (见表 2)。结果表明,只有伪二级方程对不同吸附条件下拟合的 R^2 值均达到 99% 的极显著水平。比较表中各个方程拟合的 R^2 值可知,伪二级吸附模型拟合结果最好, R^2 都大于 0.98。相比于只适用于

表 2 不同温度及初始质量浓度下介孔活性炭对阿维菌素的吸附动力学模型比较

Table 2 Comparison of the pseudo-first-order, pseudo-second-order and intraparticle diffusion models for different initial abamectin mass concentrations at different temperature

温度 Temperature /℃	阿维菌素 初始质量 浓度 c ₀ / (mg/mL)	伪一级吸附模型 Pseudo-first-order kinetic model					伪二级吸附模型 Pseudo-second-order kinetic model				颗粒内扩散模型 Intraparticle diffusion model	
		q _{e, 图} q _{e, exp}										
		/(mg/g)	q _{e, 计算}	q _{e, cal}	k ₁ /h ⁻¹	R ²	q _{e, 计算}	q _{e, cal}	h /	R ²	k _p /	R ²
			/(mg/g)				/(mg/g)			[mg/(g·h)]	[mg/(g·h ^{1/2})]	
25	2	178.2	81.57	0.0527	0.8412 ^{**}		177.6	177.62	0.9992 [*]		18.17	0.7936 ^{**}
	4	198.5	101.59	0.0658	0.8884 ^{**}		195.7	195.69	0.9856 [*]		19.07	0.5536 [*]
35	2	154.4	95.20	0.0470	0.9579 ^{**}		152.7	152.67	0.9984 [*]		16.97	0.9142 ^{**}
	4	174.4	40.58	0.0672	0.6457 [*]		178.9	178.89	0.9982 [*]		14.14	0.6311 [*]
45	2	191.2	101.11	0.0511	0.9274 ^{**}		190.1	188.68	0.9994 [*]		19.77	0.8364 ^{**}
	4	219.5	82.13	0.0435	0.3525		232.0	232.56	0.9856 [*]		19.84	0.7425 ^{**}

* P < 0.05 显著水平; ** P < 0.01 极显著水平。* P < 0.05 Significant level ** P < 0.01 Highly significant level

吸附初始阶段动力学描述的一级模型，伪二级模型包含了吸附的所有过程，如外部液膜扩散、表面吸附和颗粒内扩散等^[21]，因而更能真实、全面地反映阿维菌素在活性炭上的吸附过程。

2.5 载药系统的缓释性能

图 6 是阿维菌素原药和载药活性炭中阿维菌素的释放曲线。从中可见：阿维菌素原药溶出迅速，90 h 后，外液中阿维菌素浓度不再增加，即达到溶出平衡。而载药活性炭的释药速率比原药缓慢，在 100 h 之内，载药活性炭释药速率相对较快；100 h 后，曲线较为平缓，释药速率相对变慢，但外液中阿维菌素的浓度仍在缓慢增加；溶出 672 h 后，载药活性炭释药量达到载药量的 43.8%，药物仍有继续溶出的趋势。由于阿维菌素可能存在于活性炭的外部以及内部孔隙之中，所以整个释放过程复杂而缓慢。根据缓释曲线形状可以推断：首先是吸附在活

性炭外层的阿维菌素在前 100 h 内被快速释放，这对于控释剂快速达到起效浓度起着关键作用；然后内部孔隙间的阿维菌素开始释放，这一释放过程比较平稳，可维持相当长的时间。由此可见，以介孔活性炭为载体的阿维菌素缓释系统具有良好的缓释效果。

2.6 载药系统的抗紫外光降解性能

图 7 是在紫外光照射条件下载药活性炭和阿维菌素原药的分解率随时间变化的曲线。结果表明，照射 24 h 后，阿维菌素原药分解率为 40%，介孔活性炭中阿维菌素的分解率仅为 2%；照射 72 h 后，原药的分解率为 77%，而载药活性炭中阿维菌素的分解率为 30%。结果表明，以介孔活性炭作为载体可将阿维菌素吸附至其内部孔隙中，从而抑制了紫外光照射所引起的光分解作用，因此有可能显著改善阿维菌素在田间光照条件下的稳定性。

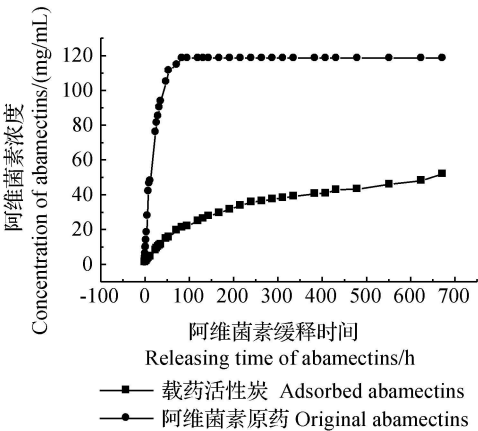


图 6 阿维菌素原药和载药活性炭的缓释曲线
Fig 6 The release profiles of original and adsorbed abamectins

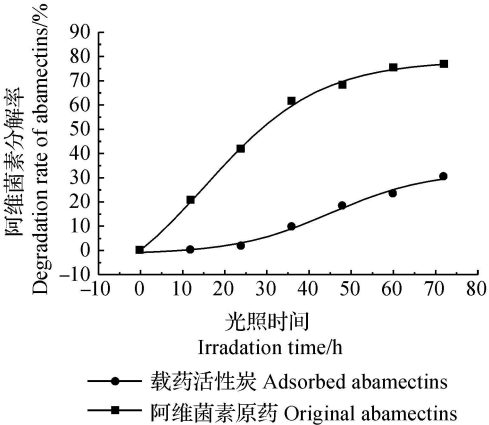


图 7 阿维菌素原药和载药活性炭的紫外光降解曲线
Fig 7 Change in degradation rate of original and adsorbed abamectins

3 结论

介孔活性炭具有发达的孔隙、巨大的比表面积和丰富的活性官能基团, 可将药物吸附或负载于其内部孔隙之中, 有利于改善难溶性药物的溶解度、分散性、稳定性和缓-控释特性, 从而提高药物的有效利用率。

本研究表明, 介孔活性炭相对其他常规农药载体而言, 对溶液中阿维菌素呈现了优良的吸附性能, 其吸附过程符合伪二级吸附模型。以介孔活性炭为载体的阿维菌素载药系统具有良好的缓释性能和光降解抑制效果, 这对于延长阿维菌素的作用时间、提高有效利用率、减少施用频率与药剂使用量均具有重要意义。此外, 介孔活性炭具有材料廉价、来源广泛, 载药过程与工艺简洁等优点, 因此其作为农药载体在生物农药缓-控释剂型开发与生产方面将具有良好的应用前景。

参考文献:

- [1] YAN Rui(严锐), ZHAO Hua(赵华), HU Yong-q i(胡永琪). 农药控释技术研究进展 [J]. *Agrochemicals* (农药), 2006 45 (7): 437- 439
- [2] LI Jia-cheng(李嘉诚), YU Shao-fan(喻少帆), FENG Yu-hong(冯玉红), et al. 以聚合物/硅藻土为控释材料的阿维菌素颗粒剂的制备及其性能研究 [J]. *Nat Sci J Hainan Univ* (海南大学学报: 自然科学版), 2006, 24(4): 412- 417.
- [3] WANG Lan(王兰), FENG Hong-zu(冯宏祖). 阿维菌素类杀虫剂的研究及应用前景 [J]. *Chin Plant Prot* (中国植保导刊), 2008 28(4): 13- 15.
- [4] ZHOU Jing(周菁), FU Ren-chun(付仁春), LONG Quan(隆泉), et al 阿维菌素微胶囊的制备工艺优化 [J]. *J Yunnan Univ Nat Sci* (云南大学学报: 自然科学版), 2003, 25(6): 511- 514.
- [5] LI Jian-feng(李剑锋), LIU Fan(刘凡), CHEN Jian-feng(陈建峰), et al 纳米缓释型阿维菌素粉剂新剂型研究 [J]. *J Beijing Univ Chem Technol* (北京化工大学学报), 2007, 34(4): 337- 340.
- [6] CHEN Pin-san(陈品三). 杀线虫剂主要类型、特性及其作用机制 [J]. *Pestic Sci Adm* (农药科学与管理), 2001, 22(2): 33- 35
- [7] CHEN Pin-san(陈品三). 杀线虫剂的减效因素和科学使用 [J]. *Pestic Sci Adm* (农药科学与管理), 2001, 22(4): 36- 39.
- [8] LI Zhu-zhu(李珠柱), WEN Li-xiong(文利雄), LIU Fan(刘凡), et al 新型阿维菌素纳米控释剂的制备及性能研究 [J].

- Chin J Pestic Sci* (农药学报), 2005 7(3): 275- 281.
- [9] MA Qing-lan(马青兰), WANG Zeng-zhang(王增长), LIM in-m in(李敏敏), et al 活性炭净化废水处理研究 [J]. *New Carbon Mater* (新型炭材料), 2002 17(1): 59- 61.
- [10] SJOGREN R D, SJOGREN D R. Controlled release of pesticides with activated carbon WO 96/38039[P]. 1996-12-05
- [11] GARRIDO-HERRERA F J GONZALEZ-PRADA S E FERNANDEZ-PEREZ M. Controlled release of isoproturon, imidaclopril, and cyromazine from alginate-bentonite-activated carbon formulations[J]. *J Agric Food Chem*, 2006, 54(26): 10053- 10060.
- [12] ARYADEVANICH J TANTHAPANCHAKOON W, NAKAGAWA K, et al Preparation and characterization of mesoporous activated carbon from waste tires[J]. *Carbon*, 2003 41(1): 157- 164
- [13] KENNEDY L J KUMAR A G, RAVNDRAN B, et al Copper impregnated mesoporous activated carbon as a high efficient catalyst for complete destruction of pathogens in water[J]. *Environ Prog*, 2007, 27(1): 40- 50
- [14] YUE Z R, ECONOMY J Nanoparticle and nanoporous carbon adsorbents for removal of trace organic contaminants from water [J]. *J Nanopart Res*, 2005 7(4): 477- 487.
- [15] MORENO-CASTILLA C. Adsorption of organic molecules from aqueous solutions on carbon materials[J]. *Carbon*, 2004 42(1): 83- 94.
- [16] SENTHILKUMAR S, VARADARAJAN P R, PORKODIK, et al Adsorption of methylene blue onto jute fiber carbon kinetics and equilibrium studies [J]. *J Colloid Interface Sci*, 2005, 284(1): 78- 82
- [17] LI Ying(李颖), YUE Qin-yan(岳钦艳), GAO Bao-yu(高宝玉), et al 活性炭纤维对活性染料的吸附动力学研究 [J]. *Environ Sci* (环境科学), 2007, 28(11): 2637- 2641.
- [18] AKSU Z. Biosorption of reactive dyes by dried activated sludge equilibrium and kinetic modeling[J]. *Biochem Eng J*, 2001, 7(1): 79- 84.
- [19] HO Y S, MCKAY G. Pseudo-second order model for sorption processes[J]. *Process Biochem*, 1999, 34(5): 451- 465
- [20] WEBER W J, MORRIS J C. Proceeding of International Conference on Water Pollution Symposium [M]. Oxford Pergamon Press 1962: 231
- [21] CHANG M Y, JUANG R S. Adsorption of tannic acid, humic acid and dyes from water using the composite of chitosan and activated clay [J]. *J Colloid Interface Sci*, 2004 278(1): 18- 25.

(责任编辑: 唐 静)