

改性活性炭构建菌载体及其吸附玉米中 黄曲霉毒素 B₁ 的工艺研究

丁梓雪, 常程程, 杨帆, 王彦钦, 孟宪刚

(兰州交通大学生物与制药工程学院, 兰州 730070)

摘要:旨在为生物处理黄曲霉毒素污染的粮食饲料提供技术支持,以活性炭(SH)为原料进行改性制备磁性活性炭(CSH),选用能高效降解黄曲霉毒素 B₁(AFB₁)的芽孢杆菌属菌株 WTX1 与 CSH 载体共培养构建磁性菌载体(FCSH),脱除受污染玉米中的 AFB₁,对 CSH 进行 BET 比表面积、氮吸附-脱附等温线及其对 AFB₁ 的等温吸附曲线分析,考察 FCSH 构建条件和 FCSH 吸附条件对 AFB₁ 脱除效果的影响,并利用傅里叶变换红外光谱 (FTIR) 和扫描电镜对吸附 AFB₁ 前后的 FCSH 进行表征。结果表明:CSH 为大孔结构,其对 AFB₁ 的等温吸附符合 Freundlich 方程;在固定化时间 16 h、固定化转速和吸附转速 160 r/min、固定化温度和吸附温度 35 °C、吸附 pH 8、振荡时间 48 h 条件下,FCSH 对 AFB₁ 脱除率为 97.45%;通过 FTIR 及扫描电镜证实了 FCSH 对 AFB₁ 的吸附作用,且 FCSH 对 AFB₁ 的吸附效果强于 CSH。综上,所制备的 FCSH 能高效脱除玉米中的 AFB₁。

关键词:磁性活性炭;芽孢杆菌;菌载体;黄曲霉毒素 B₁;生物脱除

中图分类号:TS201.6;O647.33 文献标识码:A 文章编号:1003-7969(2024)02-0063-07

Construction of bacterial carrier by modified activated carbon and its adsorption of AFB₁ from maize

DING Zixue, CHANG Chengcheng, YANG Fan, WANG Yanqin, MENG Xiangang

(School of Biological and Pharmaceutical Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: Aiming to provide technical support for biological treatment of aflatoxin-contaminated grain feed, magnetic activated carbon (CSH) was prepared through modification from activated carbon (SH), and the strain of *Bacillus* spp. WTX1, which was capable of efficiently degrading aflatoxin B₁ (AFB₁), was selected to co-culture with the CSH carrier to construct the magnetic bacterial carrier (FCSH) for the removal of AFB₁ from contaminated maize. BET specific surface area, nitrogen adsorption-desorption isotherms and isotherm adsorption curves for AFB₁ of CSH were analyzed, and the effect of FCSH construction conditions and FCSH adsorption conditions on the effect of AFB₁ removal were investigated. Fourier transform infrared spectrum (FTIR) and scanning electron microscope were used to characterize FCSH before and after adsorption of AFB₁. The results showed that CSH had a macroporous structure, and its isothermal adsorption of AFB₁ conformed to the Freundlich equation. The removal rate of AFB₁ by FCSH could reach 97.45% under the conditions of immobilization time 16 h, immobilization and adsorption speed 160 r/min, immobilization and adsorption temperature 35 °C, adsorption pH 8, and shaking time 48 h. The adsorption of FCSH on AFB₁ was confirmed by FTIR and scanning electron

microscope, and the adsorption effect of FCSH on AFB₁ was stronger than that of CSH. In conclusion, the prepared FCSH can effectively remove AFB₁ from maize.

Key words: magnetic activated carbon; *Bacillus* spp.; bacterial carrier; AFB₁; biological removal

收稿日期:2022-10-01;修回日期:2023-10-29

基金项目:甘肃省重点研发计划——农业类(20YF8NA041)

作者简介:丁梓雪(1996),女,硕士研究生,研究方向为食品安全(E-mail)1019154168@qq.com。

通信作者:孟宪刚,教授,博士(E-mail)mengxg@mail.lzjtu.cn。

黄曲霉毒素通常指二呋喃香豆素类化合物,黄曲霉毒素 B₁ (AFB₁)、黄曲霉毒素 M₁ (AFM₁)、黄曲霉毒素 G₁ (AFG₁) 和黄曲霉毒素 G₂ (AFG₂) 是最常见的黄曲霉毒素,其中 AFB₁ 被国际癌症研究组织列为 1 类致癌物,并且被认为是哺乳动物最有效的肝致癌物^[1-3]。黄曲霉毒素易对粮食和饲料造成污染^[1]。粮食储存条件不理想,就会导致黄曲霉毒素的污染。宁阳阳等^[4]对辽宁某粮库 100 份入库时未检测出黄曲霉毒素、储备两年的稻谷进行了筛查,其中有 13 份样品检测出黄曲霉毒素。鉴于 AFB₁ 对人体健康的巨大威胁,如何快速、高效、安全地脱除粮食中的 AFB₁ 十分重要。

粮食中黄曲霉毒素的脱除方法有物理法、化学法以及生物法。物理法通常是采用加热、吸附、研磨、辐射等手段处理;化学法通常采用的手段是氧化、酸、碱处理;生物法主要有酶制剂降解,微生物吸附、降解等方法^[5-6]。但是,单独使用上述方法都有一定的局限性。目前应用最多的方法是物理吸附法,最常用的吸附剂为膨润土、活性炭。活性炭本身是一种具有高比表面积的多孔不溶性粉末状物质,其比表面积可达到 500 ~ 3 500 m²/g,表面呈惰性,对非极性有机物吸附性较强,所以能吸附脱除黄曲霉毒素。粉末活性炭具有吸附速度快、价格低的优点,但在实际使用过程中存在处理后与物质难以分离等缺点。因此,有研究通过改性将磁性材料负载到活性炭上从而可利用磁分离技术对活性炭进行分离、回收。例如吴静娜等^[7]制备磁性多壁碳纳米管萃取植物油中的 AFB₁,在 AFB₁ 水平为 5、10、20 μg/kg 时,AFB₁ 回收率为 81.5% ~ 104.5%。但活性炭仅是吸附 AFB₁,不能对 AFB₁ 降解。生物降解 AFB₁ 具有效率高、特异性强的优点,其中芽孢杆菌属菌株 WTX1 可高效降解 AFB₁,且降解产物对细胞无毒害作用^[8-9]。但目前利用磁性活性炭构建菌载体脱除玉米中 AFB₁ 的研究还较少。

本文以活性炭 (SH) 为实验材料,采用浸渍沉淀法制备磁性活性炭 (CSH),并将 AFB₁ 降解菌 (芽孢杆菌属菌株 WTX1) 负载于 CSH 上制得磁性菌载体 (FCSH),研究其对玉米中 AFB₁ 的脱除效果,为开发一种适用于工业化大规模吸附和降解粮食中 AFB₁ 的方法提供技术参考。

1 材料与方法

1.1 实验材料

1.1.1 原料与试剂

饲料玉米粒,甘肃农科院种子市场;AFB₁ 标准

品, Sigma 公司;甲醇、无水乙醇、氢氧化钠、戊二醛、钼酸、丙酮、醋酸异戊酯,色谱级,西陇科学股份有限公司;固体草酸,苏州卓盛环保科技有限公司;AFB₁ 免疫酶制剂试剂盒,上海佑隆生物科技有限公司;芽孢杆菌属菌株 WTX1,实验室自有,从青藏高原牦牛粪中分离得到;活性炭,苏州信清科技有限公司;硫酸亚铁、氯化铁,天津市致远化学试剂有限公司;溴化钾,国药集团化学试剂有限公司;蛋白胨,上海源叶生物科技有限公司;牛肉膏,北京奥博星生物技术有限责任公司;蔗糖,天津市光复科技发展有限公司;酵母粉,赛默飞世尔科技公司。

固定化培养基:蔗糖 10.0 g/L、牛肉膏 6.0 g/L、酵母粉 1.5 g/L、蒸馏水 1.0 L,调 pH 为 7.0,121 °C 灭菌 20 min。

1.1.2 仪器与设备

Nexus 670 傅里叶变换红外光谱仪,赛默飞世尔公司(美国);7404 振动样品磁强计,湖岸科技有限公司(美国);TriStar II 比表面积测定仪,麦克默瑞提克仪器有限公司;Sigma 300 扫描电镜,北京普瑞赛司仪器有限公司;SW - CJ - 2G 双人净化工作台,苏州净化设备有限公司;LDZX - 50KBS 立式压力蒸汽灭菌锅,上海申安医疗器械厂;LD - TPH 土壤 pH 检测仪,山东海曼科学仪器有限公司;SHA - B 双功能水浴恒温振荡器,常州天瑞仪器有限公司;TGL - 16G 离心机,上海安亭科学仪器厂。

1.2 实验方法

1.2.1 CSH 的制备

参考文献[10-12]采用浸渍沉淀法制备 CSH,并作部分调整,具体步骤如下:称取 9.75 g 硫酸亚铁和 9.45 g 氯化铁,加入 500 mL 蒸馏水,充分溶解,得储备液。在破壁机中将 SH 破碎后过 0.075 mm(200 目)筛,称取 15 g 于储备液中,用磁力搅拌机高速搅拌 30 min 后滴加 50 mL 5 mol/L 氢氧化钠溶液,将混合物在 100 °C 水浴下陈化 4 h,冷却至室温后去除上清液,加入去离子水反复搅拌洗涤沉淀至上清液 pH 为中性,再于无水乙醇中超声洗涤 20 min 后,除去乙醇,沉淀于 50 °C 干燥 4 h,研磨,过 0.075 mm(200 目)筛后得到 CSH。

1.2.2 SH 和 CSH 的表征

利用振动样品磁强计在室温下测量样品的磁滞回线,测定比饱和和磁化强度。根据氮吸附 - 脱附等温线计算比表面积 (BET),同时采用 BJH 理论评估孔径分布和孔体积。

1.2.3 CSH 对 AFB₁ 的吸附

称取 30 mg CSH 于 5 mL 离心管中,加入 3 mL

质量浓度分别为 0、25、50、100、200 ng/mL 的 AFB₁ 标准溶液,每个质量浓度为一个处理组,每个组 3 个重复。在 37 °C、120 r/min 条件下振荡 1 h,3 000 r/min 离心 4 min,取上清液过 0.22 μm 有机滤膜后,待测。

1.2.4 CSH 对 AFB₁ 的吸附动力学分析

分别利用 Langmuir 和 Freundlich 方程拟合得到 CSH 对 AFB₁ 的等温吸附曲线。

Langmuir 模型方程见公式(1),其线性化方程见公式(2)。

$$Q_{eq} = \frac{Q_{max} K_L C_{eq}}{1 + K_L C_{eq}} \quad (1)$$

$$\frac{C_{eq}}{Q_{eq}} = \frac{1}{K_L Q_{max}} + \frac{C_{eq}}{Q_{max}} \quad (2)$$

式中: Q_{eq} 为平衡时单位质量吸附剂吸附 AFB₁ 的质量,ng/g; Q_{max} 为单位质量吸附剂吸附 AFB₁ 的最大质量,ng/g; K_L 为 Langmuir 吸附常数,ng/mL; C_{eq} 为平衡时上清液中 AFB₁ 的质量浓度,ng/mL。

Freundlich 模型方程见公式(3),其线性化方程见公式(4)。

$$Q_{eq} = K_F C_{eq}^{1/n_F} \quad (3)$$

$$\ln Q_{eq} = \ln K_F + \frac{1}{n_F} \ln C_{eq} \quad (4)$$

式中: Q_{eq} 为平衡时单位质量吸附剂吸附 AFB₁ 的质量,ng/g; K_F 为 Freundlich 吸附常数,(ng/g)/(ng/mL)ⁿ; C_{eq} 为平衡时上清液中 AFB₁ 的质量浓度,ng/mL; n_F 为 Freundlich 吸附常数。

1.2.5 FCSH 的构建

取 1.5 g CSH 与 100 mL 固定化培养基于 250 mL 的锥形瓶中,以 13% 的接种量接入活化好的芽孢杆菌属菌株 WTX1,在一定温度和转速下固定化一定时间,取出后 3 000 r/min 离心 4 min,将沉淀用生理盐水冲洗并过滤得磁性菌载体(FCSH)。同时将上清液涂布于牛肉膏蛋白胨培养基上培养 32 h,采用平板计数法测定其菌落数。以游离菌作空白对照,每组 3 个平行,测定载体对 WTX1 的固定率(Y)^[13]。

$$Y = (A_0 - A_1) / A_0 \times 100\% \quad (5)$$

其中: A_0 为游离菌落数; A_1 为上清液菌落数。

1.2.6 FCSH 对 AFB₁ 的吸附脱除

将玉米粒浸泡到 10 μg/mL 的 AFB₁ 标准溶液中,振荡 5 min 后捞出避光晾干,粉碎后过 0.355 mm(45 目)筛。称取 20 g 上述玉米粉于锥形瓶中,加入 10 颗沸石,在无菌操作条件下将 4.0 g FCSH 加入锥形瓶中,用固体草酸或氢氧化钠调节混合物的 pH,在一定转速和温度下振荡一定时间,40 °C 下烘干,在滤纸上置多块磁铁,多次少量摇晃样品直至 FCSH 吸附在磁铁上,得到黄色的玉米粉。

1.2.7 AFB₁ 含量的测定及 AFB₁ 脱除率的计算

称取 4.0 g 样品于 100 mL 锥形瓶中,加入 20 mL 甲醇-水(体积比 7:3)溶液,振摇 15 min,过滤后取 1 mL 滤液,加入 1 mL 纯水进行稀释,即为待测样液。采用 AFB₁ 免疫酶制剂试剂盒,利用 ELISA 直接竞争酶联免疫吸附微孔模式测定待测样液中 AFB₁ 的质量浓度。AFB₁ 脱除率按公式(6)计算。

$$R_{ads} = \left(1 - \frac{C_t}{C_0}\right) \times 100\% \quad (6)$$

式中: R_{ads} 为 AFB₁ 脱除率; C_0 为吸附前 AFB₁ 的质量浓度,ng/mL; C_t 为吸附后 AFB₁ 的质量浓度,ng/mL。

1.2.8 傅里叶红外光谱(FTIR)测定

称取 100.0 mg 的溴化钾颗粒在研钵中充分研磨,加入 1.0 mg 的样品继续研磨充分混匀后倒入模具,在压片机上压成圆形透明薄片后上机进行检测。

1.2.9 扫描电镜(SEM)分析

通过扫描电镜观察样品的微观形态。将样品进行消磁处理后用等渗生理盐水冲洗,后经戊二醛及锇酸双固定,漂洗后用逐级增高浓度的丙酮脱水,随后用醋酸异戊酯作为中间液冷冻干燥后喷金进行扫描。

1.2.10 统计分析

采用 Origin 2018 软件进行数据分析。

2 结果与讨论

2.1 SH 和 CSH 的表征

表 1 为 SH 和 CSH 的表征参数。图 1 为 SH 和 CSH 的氮吸附-脱附等温线。

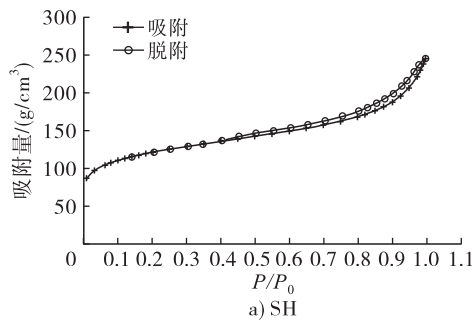
表 1 SH 和 CSH 的表征参数

项目	比表面积/(m ² /g)	微孔内比表面积/(m ² /g)	外比表面积/(m ² /g)	孔容/(cm ³ /g)	平均孔径/nm	比饱和磁化强度/(emu/mg)
SH	441.32	227.27	214.04	0.379 3	3.438 7	0
CSH	272.71	132.04	140.66	0.390 2	5.724 5	30.13

由表 1 可知,CSH 的比表面积是 SH 的 62%,同样 CSH 的微孔内比表面积以及外比表面积均小

于 SH 的,这是由于部分铁离子颗粒结合在孔洞表面,使得 CSH 比表面积减小,CSH 的孔容和平均孔

径较 SH 的都明显增大。CSH 的比饱和磁化强度为 30.13 emu/mg, 表明 CSH 表面负载上了铁离子。由图 1 可知, SH 和 CSH 的吸附-脱附等温线



与常见的 II 型吸附-脱附等温线有较高的拟合度, 结合比表面积的变化及未磁化前的吸附剂结构, 得出 CSH 的孔结构为大孔结构。

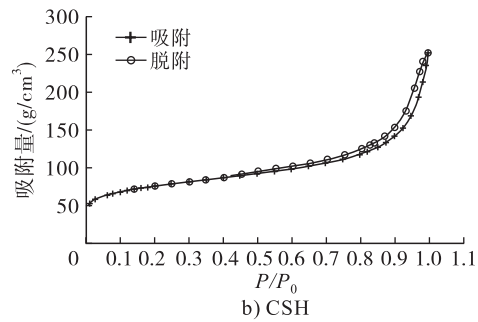


图 1 氮吸附-脱附等温线

2.2 CSH 对 AFB₁ 的等温吸附曲线

等温吸附曲线是吸附量随着平衡浓度变化的曲线。图 2 为 CSH 吸附 AFB₁ 的 Freundlich 和 Langmuir 拟合曲线。

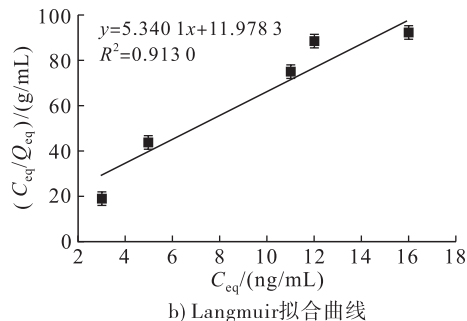
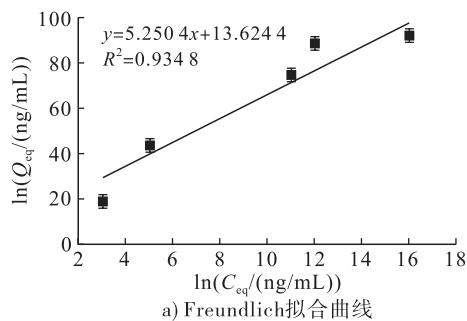
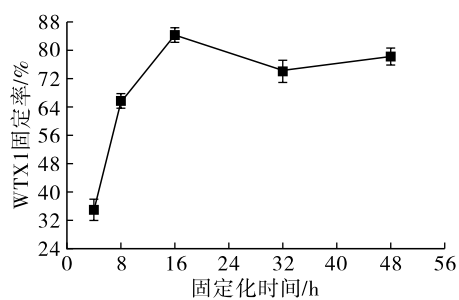


图 2 CSH 吸附 AFB₁ 的 Freundlich 和 Langmuir 拟合曲线

2.3 FCSH 构建及吸附条件对 AFB₁ 脱除效果的影响

2.3.1 固定化时间

在吸附 pH 7、固定化转速和吸附转速 120



r/min、固定化温度和吸附温度 37 °C、振荡时间 24 h 的条件下, 考察固定化时间对 WTX1 固定率及 AFB₁ 脱除效果的影响, 结果如图 3 所示。

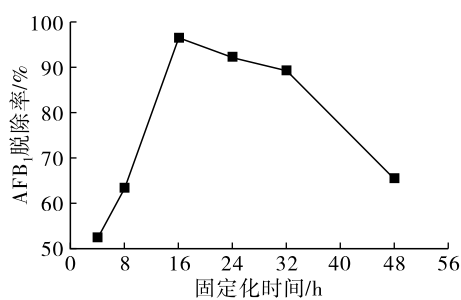


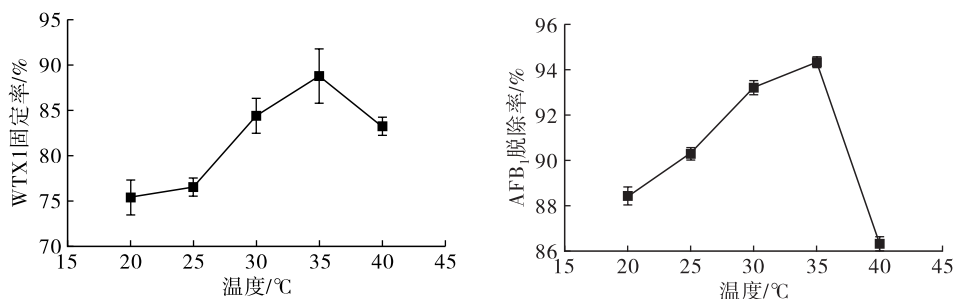
图 3 固定化时间对 WTX1 固定率及 AFB₁ 脱除效果的影响

由图 3 可知, 随着 WTX1 固定化时间的延长, AFB₁ 脱除率呈先增后减的趋势, 与 WTX1 固定率随固定化时间变化的趋势基本一致。这是因为固定化时间过短时, 微生物菌株没有完全负载在磁性活性炭上, 培养过程中容易脱落, 造成 FCSH 中微生物数量过少, AFB₁ 脱除率较低; 而固定化时间过长时, 微生物生长繁殖过多, 后期微生物因缺乏营养进入早衰期, 导致 AFB₁ 脱除率下降。当固

定化时间为 16 h 时, WTX1 固定率和 AFB₁ 脱除率均最高, 分别达到 84.31% 和 95.32%。因此, 选择最佳固定化时间为 16 h。

2.3.2 固定化温度和吸附温度

在吸附 pH 7、固定化转速和吸附转速 120 r/min、固定化时间 16 h、振荡时间 24 h 的条件下, 考察固定化温度和吸附温度对 WTX1 固定率以及 AFB₁ 脱除效果的影响, 结果如图 4 所示。

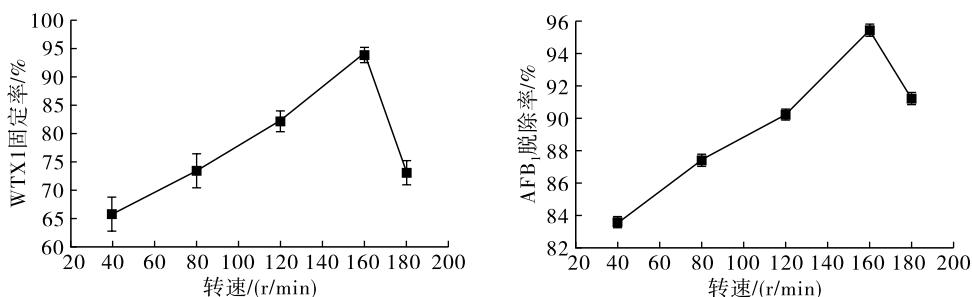
图4 固定化温度和吸附温度对 WTX1 固定率及 AFB₁ 脱除效果的影响

由图4可知,当固定化温度和吸附温度均从20℃升高至35℃时,WTX1固定率和AFB₁脱除率持续升高,在35℃时均最高,分别达到88.78%和94.33%,随着温度继续升高,WTX1固定率和AFB₁脱除率均降低,这可能是由于过高的温度影响了FCSH中微生物的生长繁殖。因此,选择最佳固定

化温度和吸附温度为35℃。

2.3.3 固定化转速和吸附转速

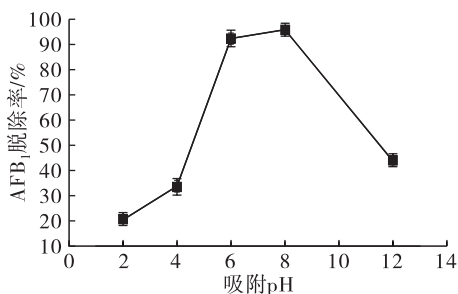
在吸附pH 7、固定化时间16 h、振荡时间24 h、固定化温度和吸附温度37℃条件下,考察固定化转速和吸附转速对WTX1固定率及AFB₁脱除效果的影响,结果如图7所示。

图5 固定化转速和吸附转速对 WTX1 固定率及 AFB₁ 脱除效果的影响

由图5可知,固定化转速和吸附转速均从40 r/min增加至160 r/min时,WTX1固定率和AFB₁脱除率均升高,在160 r/min时均达到最高,随后WTX1固定率和AFB₁脱除率都降低。转速的快慢会影响培养基与氧气的接触面,WTX1是一种需氧菌,转速增加,溶氧量增大,有助于WTX1的生长繁殖,但当固定化转速过大时,可能会对菌体造成破坏,使得WTX1固定率降低,进而影响AFB₁脱除率。因此,选择最佳固定化转速和吸附转速为160 r/min。

2.3.4 吸附 pH

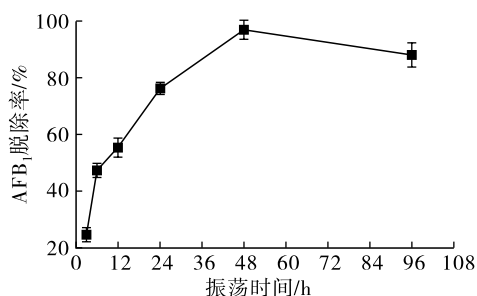
在固定化转速和吸附转速120 r/min、固定化时间16 h、振荡时间24 h、固定化温度和吸附温度37℃条件下,考察吸附pH对AFB₁脱除效果的影响,结果如图6所示。

图6 吸附 pH 对 AFB₁ 脱除效果的影响

由图6可知:随着吸附pH从2增加到8,AFB₁脱除率增加,在pH为8时AFB₁脱除率达到最高,为93.12%;随后pH再增加,AFB₁脱除率明显下降。过酸和过碱的环境均不适合WTX1的生长,从而影响对AFB₁的脱除。综上,选择最佳吸附pH为8。

2.3.5 振荡时间

在吸附pH 7、固定化时间16 h、固定化转速和吸附转速120 r/min、固定化温度和吸附温度37℃的条件下,考察振荡时间对AFB₁脱除效果的影响,结果如图7所示。

图7 振荡时间对 AFB₁ 脱除效果的影响

由图7可知,随着振荡时间的延长,AFB₁脱除率呈先增加后降低的趋势,在振荡时间为48 h时,

AFB₁ 脱除率达到最大,为 95.96%。振荡时间过短,FCSH 中的微生物繁殖时间过短,微生物数量过少,对于 AFB₁ 的脱除效果不佳;振荡时间过长,微生物繁殖过多,在降解 AFB₁ 的过程中不能及时利用,微生物进入衰亡期,菌体溶解,容易产生二次毒素污染。因此,选择最佳振荡时间为 48 h。

综上,在固定化时间 16 h、固定化转速和吸附转速 160 r/min、固定化温度和吸附温度 35 °C、吸附 pH 8、振荡时间 48 h 条件下,FCSH 对 AFB₁ 脱除率最高,为 97.45%。

2.4 FCSH 的结构表征

2.4.1 FTIR 分析

SH、CSH、FCSH 的红外光谱图如图 8 所示。

如图 8 所示,在 578 cm⁻¹ 处,CSH、FCSH 有较强的红外吸收峰,对应的是 Fe—O 官能团的弯曲振动,表明 CSH 和 FCSH 上都有含铁的官能团^[14]。在

3 424 cm⁻¹ (炭表面—OH 和水的 O—H 的拉伸振动)、1 749 cm⁻¹ (羧基和羰基中 C=O 的伸缩振动)、1 644 cm⁻¹ (羧基中 O—H 的伸缩振动)、1 072 cm⁻¹ (C=C 的伸缩振动) 处 FCSH 相较于 CSH 都出现了强且可以辨认的红外吸收峰,推测 FCSH 由于 WTX1 的负载,导致极性位点多于 CSH。

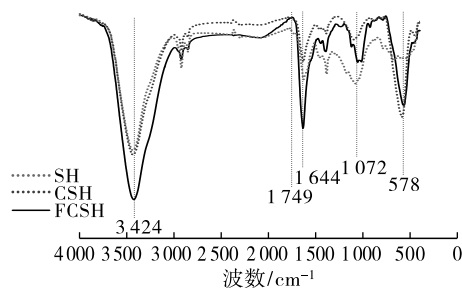


图 8 SH、CSH、FCSH 的红外光谱图

2.4.2 SEM 分析

SH、CSH、FCSH 的扫描电镜图如图 9 所示。

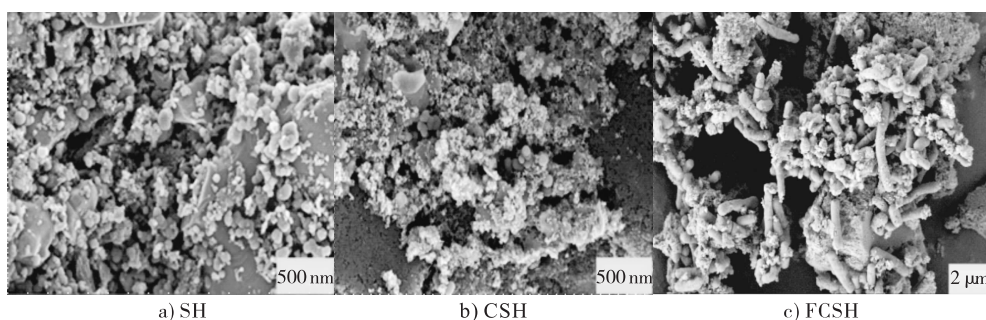


图 9 SH、CSH、FCSH 的扫描电镜图

由图 9 可知,相较于 SH,CSH 表面明显附着较多颗粒物质,为铁离子颗粒,与比饱和和磁强度结果(表 1)相符。FCSH 在炭结构表面有许多杆菌附着。综上,FCSH 制备成功。

2.5 FCSH 吸附 AFB₁ 的结构表征

2.5.1 FTIR 分析

FCSH 与吸附 AFB₁ 后 CSH、FCSH 的红外光谱图如图 10 所示。

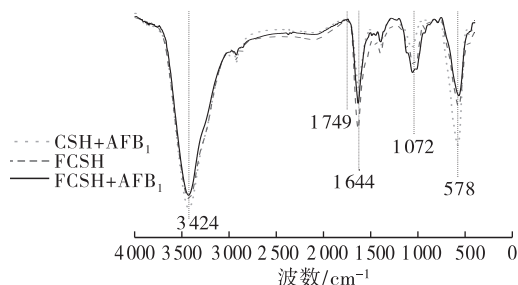


图 10 FCSH 与吸附 AFB₁ 后 CSH、FCSH 的红外光谱图

由图 10 可知,在 3 424 cm⁻¹ 处,FCSH 及吸附 AFB₁ 的 FCSH、CSH 都出现了强吸收峰,为炭表面—OH 和水的 O—H 的拉伸振动峰,FCSH 与吸附

AFB₁ 后 CSH 的吸收峰强于吸附 AFB₁ 后 FCSH 的,而吸附 AFB₁ 后 FCSH 在 1 749、1 644 cm⁻¹ 处吸收峰比吸附前减弱,这是因为吸附 AFB₁ 后 FCSH 的极性位点及官能团化学键减少,导致峰强度降低。因此,推测 FCSH 对 AFB₁ 有吸附作用^[15],且吸附效果强于 CSH 的。

2.5.2 SEM 分析

吸附 AFB₁ 前后 FCSH 的扫描电镜图如图 11 所示。

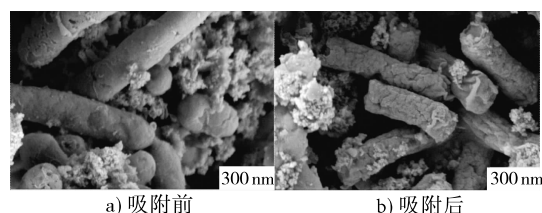


图 11 吸附 AFB₁ 前后 FCSH 的扫描电镜图

由图 11 可知:FCSH 表面负载的微生物表面饱满光滑,没有碎屑覆盖;吸附 AFB₁ 后,FCSH 表面出现了皱缩,且被许多附着物覆盖,证实了 FCSH 对 AFB₁ 有脱除效果。

3 结论

本文以 SH 为原料,采用浸渍沉淀法制备了 CSH,对其负载芽孢杆菌属菌株 WTX1 得到 FCSH,考察不同固定化条件和吸附条件对 FCSH 脱除 AFB₁ 的影响,并通过 FTIR 和扫描电镜证实 FCSH 对 AFB₁ 的吸附作用。结果表明:在固定化时间 16 h、固定化转速和吸附转速 160 r/min、固定化温度和吸附温度 35 ℃、吸附 pH 8、振荡时间 48 h 条件下, AFB₁ 脱除率可达 97.45%;通过 FTIR 和扫描电镜表征发现 FCSH 对 AFB₁ 有吸附作用,且 FCSH 的吸附效果强于 CSH。FCSH 对粮食中 AFB₁ 脱除有很大的潜力,可进一步扩展研究其对其他毒素的脱除。

参考文献:

- [1] KARAMI - OSBOO R, MAHAM M, NASROLLAHZADEH M. Rapid and sensitive extraction of aflatoxins by Fe₃O₄/zeolite nanocomposite adsorbent in rice samples [J/OL]. *Microchem J*, 2020, 158: 105206 [2022 - 10 - 01]. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2020.105206>.
- [2] REZAAE M, KHALILIAN F, ALI MASHAYEKHI H, et al. A novel method for the high preconcentration of trace amounts of the aflatoxins in pistachios by dispersive liquid - liquid microextraction after solid - phase extraction [J]. *Anal Methods*, 2014, 6(10):3456 - 3461.
- [3] WANG N, DUAN C, GENG X, et al. One step rapid dispersive liquid - liquid micro - extraction with in - situ derivatization for determination of aflatoxins in vegetable oils based on high performance liquid chromatography fluorescence detection [J]. *Food Chem*, 2019, 287:333 - 337.
- [4] 宁阳阳,宋平.我国粮食中黄曲霉毒素 B₁ 的污染情况及检测方法研究[J].*中国食品*,2021(9):123.
- [5] 鲍蕾,梁成珠,刘学惠,等.出入境农产品中真菌毒素的污染、检测及控制[J].*中国食品工业*,2005(1):60 - 61.
- [6] PHILLIPS T D, KUBENA L F, HARVEY R B, et al. Hydrated sodium calcium aluminosilicate: A high affinity sorbent for aflatoxin [J]. *Poult Sci*, 1988, 67(2):243 - 247.
- [7] 吴静娜,杨秀娟,韦璐阳,等.磁性多壁碳纳米管固相萃取 - 液质联用法测定植物油中的黄曲霉毒素 B₁ [J]. *农业研究与应用*, 2020, 33(6):33 - 38.
- [8] 唐璎,黄佳,邓展瑞,等.一株枯草芽孢杆菌降解黄曲霉毒素 B₁ 产物分析 [J]. *生物技术通报*, 2021, 37(12):82 - 90.
- [9] 杨冬,唐璎.枯草芽孢杆菌 WTX1 胞外酶降解 AFB₁ 酶学特性及降解位点分析 [J]. *生物技术通报*, 2023, 39(4):93 - 102.
- [10] 韩强,刘利军,郭晨辉,等.磁性纳米活性炭的制备及其吸附性能研究 [J]. *环境科学导刊*, 2021, 40(4):9 - 16, 96.
- [11] 莫冰玉,唐玉斌,陈芳艳,等.磁性活性炭的制备及其对水中甲基橙的吸附 [J]. *环境工程学报*, 2015, 9(4):1863 - 1868.
- [12] 陈瑞福.磁场对磁性吸附剂吸附锌、汞的影响 [J]. *水处理技术*, 1999, 25(1):42 - 44.
- [13] 张秀霞,秦丽姣,吴伟林,等.固定化原油降解菌的制备及其性能研究 [J]. *环境工程学报*, 2010, 4(3):659 - 664.
- [14] DONNET J, BOEHM H, STOECKLI F. Third international conference on carbon black [J]. *Carbon*, 2002, 40(2):137 - 224.
- [15] 王莉,徐晓珍,郑晓青,等.铁锰氧化物/生物炭复合材料对水中六价铬的吸附性能研究 [J]. *化工管理*, 2022(24):162 - 165.
- (上接第 55 页)
- [5] 邹成义,王康宁,左绍群.乳清粉、鱼粉和膨化大豆粉对 3 周龄断奶仔猪生产性能的影响 [J]. *西南农业学报*, 2000(S1):32 - 40.
- [6] 廖珂,王自蕊,游金明,等.不同处理豆粕及嗜酸乳杆菌培养物对断奶仔猪生长性能和肠道形态结构的影响 [J]. *动物营养学报*, 2018, 30(5):1872 - 1879.
- [7] BROKAW L, HESS B W, RULE D C. Supplemental soybean oil or corn for beef heifers grazing summer pasture: Effects on forage intake, ruminal fermentation, and site and extent of digestion [J]. *J Anim Sci*, 2001, 79(10):2704 - 2712.
- [8] 蒋树林,孟庆翔,马俊云,等.膨化全脂大豆对高产奶牛乳脂中 PUFA 含量的影响 [J]. *中国农学通报*, 2007, 23(2):5 - 9.
- [9] 纪鹏,陈萍,李胜利,等.不同油料籽实日粮对奶牛养分表观消化率、生产性能及血液指标的影响 [J]. *动物营养学报*, 2008, 20(2):217 - 222.
- [10] 王斐然,何雅琴,王富伟,等.补饲全脂膨化大豆对奶牛生产性能和消化代谢的影响 [J]. *动物营养学报*, 2021, 33(10):5677 - 5689.
- [11] 程宗佳.膨化大豆在鱼饲料中的养分消化率 [J]. *渔业现代化*, 2006(1):39 - 41.
- [12] 王娇,李军国,谷旭,等.膨化大豆代替豆粕对鸡蛋营养指标和蛋品质的影响 [J]. *饲料工业*, 2019, 40(3):39 - 43.
- [13] 钟丽华,卢德秋,范玉山.全脂膨化大豆粉在畜禽饲料中的应用 [J]. *饲料博览*, 2001(9):44 - 45.