



Research  
Green Chemical Engineering—Article

## 香蕉假茎作为吸附剂用于水溶液中铅离子去除的条件优化、动力学与吸附平衡研究

Shridhar S. Bagali<sup>a,\*</sup>, Bychapur S. Gowrishankar<sup>b</sup>, Aashis S. Roy<sup>c,\*</sup>

<sup>a</sup> Department of Chemical Engineering, Siddaganga Institute of Technology, Tumkur, Karnataka 572 103, India

<sup>b</sup> Department of Biotechnology, Siddaganga Institute of Technology, Tumkur, Karnataka 572 103, India

<sup>c</sup> Department of Industrial Chemistry, Addis Ababa Science and Technology University, Addis Ababa 16417, Ethiopia

### ARTICLE INFO

#### Article history:

Received 2 January 2017

Revised 9 May 2017

Accepted 13 May 2017

Available online 13 June 2017

#### 关键词

香蕉假茎

铅

等温线

吸附

响应面分析法

### 摘要

香蕉假茎粉末等天然吸附剂对于去除废水中的重金属元素具有非常重要的作用。现有的去除重金属元素的常规方法难以满足水资源循环和化学工业的需求。本文论证了利用天然物质处理废水的可能性。利用环境扫描电子显微镜 (ESEM) 和傅里叶变换红外 (FTIR) 光谱学分析方法, 研究了香蕉假茎粉末吸附铅离子前后的变化。实验采用批处理方法研究了水溶液中铅离子去除的效果。通过改变初始 pH 值、吸附剂用量、初始铅离子浓度、吸附时间等参数, 研究了吸附动力学的影响。结果表明, 在水溶液 pH 值为 5.5 时, 香蕉假茎粉末达到零电荷点。采用吸附等温线和动力学模型分析实验数据, 采用朗缪尔吸附等温式拟合铅离子在香蕉假茎粉末表面的吸附作用。实验表明, 香蕉假茎粉末对铅离子的吸附量为  $34.21 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ , 与拟二级动力学模型相匹配。此外, 采用响应面分析法确定了铅离子吸附的最佳条件, 铅离子的去除率高达 89%。

© 2017 THE AUTHORS. Published by Elsevier LTD on behalf of the Chinese Academy of Engineering and Higher Education Press Limited Company. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

## 1. 引言

化学工业废水排放到环境中, 不仅对环境产生污染, 而且会造成严重的水资源短缺和引发各种疾病。一些传统方法在一定程度上可以减少或消除废水中的重金属 [1,2]。然而, 大多数发展中国家在向公众提供优质饮用水方面仍然面临着严重问题 [3]。重金属离子的存在降低了饮用水的质量, 给人类健康和生态系统造成危害, 给天然动植物群落的生存环境带来系列问题 [4–7]。目前化工行业的铅排放主要来自电镀化学品、医药化学品和电子特用化学品。铅在自然界中是有毒的, 对生物

多样性有极大的负面影响。铅的去除对环境科学家和工程师来说是一项具有挑战性的任务, 需要综合考虑环境成本、废水处理和成本等诸多因素 [1,8]。各种传统的水处理方法, 如电镀、降水、蒸发、膜分离、离子交换、混凝、气浮、反渗透、溶剂萃取、膜过滤、吸附, 以及一些生物处理法, 可用于废水中金属的回收 [9,10]。这些传统处理方法大多费时费力且能耗较高, 其使用范围仅限于批处理环节。因此, 当前研究的重点是如何实现连续化处理以及扩大规模和满足二级或三级污泥处理的要求。

为了克服上述困难, 开发高效、经济、环保、连续

\* Corresponding author.

E-mail address: [shridhar.bagali@gmail.com](mailto:shridhar.bagali@gmail.com); [aashisroy@gmail.com](mailto:aashisroy@gmail.com)

的铅离子去除工艺是十分必要的。研究表明, 农业废弃物可作为吸附剂, 用于废水中重金属离子的去除。一般来说, 用于去除重金属的农业废弃物有小麦、大米、燕麦、大麦和玉米的外壳。近年来, 人们的环保意识在不断增强, 法律对废水排放的限制也越来越严格。这些因素有力地促进了具有成本效益的重金属去除技术的发展[11,12]。在现有的常规处理方法中, 吸附法是去除各种工业废水中重金属的一种潜在的方法, 具有较好的普适性、高吸附容量和选择性优势。近年来, 研究人员开始研究采用各种生物质材料作为吸附剂以去除重金属离子, 这些吸附剂将成为商业吸附剂的良好替代品 [13–17]。

本文提出了采用香蕉假茎粉末作为废水中铅离子的吸附剂, 研究了初始pH值、吸附剂用量、初始铅离子浓度、吸附时间等因素对于吸附效果的影响。通过实验, 得到了废水中硝酸铅[Pb(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>]去除的最优实验条件。结果表明, 响应面分析法(RSM)和中心组合设计(CCD)是确定最优实验条件的最好的统计工具。

## 2. 材料和实验方法

### 2.1. 基于香蕉假茎的吸附剂的制备

香蕉假茎样品采自当地农场。首先将香蕉假茎样品切成5 mm大小的块, 用普通水清洗后再用软化水彻底清洗, 以除去泥浆和表面的其他杂质; 然后将块状香蕉假茎材料放置在空气中晾干以除去表面的水分, 之后将其置于烘箱中在105℃条件下加热24 h; 最后将样品用孔径500 μm的筛网过滤后, 储存在密封容器中以备后续实验使用。

### 2.2. 含铅原液的制备

将硝酸铅(分析纯)配置成铅离子浓度为10~50 ppm的系列溶液, 采用浓度为0.1 mol·L<sup>-1</sup>的盐酸和氢氧化钠溶液作为缓冲溶液, 调整溶液的pH值。

### 2.3. 批量吸附处理

实验采用了批量吸附处理, 研究了pH值为6的条

件下, 在铅离子浓度为10~50 ppm的溶液中, 铅离子吸附量达到最大时所需的最佳时间。将香蕉假茎粉末(1 g·L<sup>-1</sup>)作为吸附材料, 吸附时间变化范围为20~120 min, 时间间隔为20 min。每隔20 min, 收集样品、过滤、离心(2000 r·min<sup>-1</sup>, 5 min)。采用原子吸收分光光度法(Varian, SpectrAA 200)测定上清液中铅离子的浓度。通过式(1)计算铅离子吸附的百分比[18]。所有的实验均进行多次重复。

$$\text{Removal}(\%) = \frac{C_0 - C_e}{C_0} \times 100 \quad (1)$$

式中,  $C_e$ 表示在吸附平衡状态下溶液中铅离子浓度;  $C_0$ 表示铅离子的初始浓度。吸附剂的吸附容量( $q_e$ )通过式(2)计算得出。

$$q_e = (C_0 - C_e) \frac{V}{W} \quad (2)$$

式中,  $V$ 是溶液的体积(L);  $W$ 是吸附剂的质量(g)。

### 2.4. 实验设计的优化

实验设计检验了硝酸铅去除过程中的四个因素: 初始pH值、吸附剂用量、初始铅离子浓度和吸附时间。采用CCD设置的编码和非编码水平如表1所示。表2给出了相应实验参数。

### 2.5. 分析和优化

采用RSM对实验结果进行分析, 验证初始pH值、吸附剂用量、初始铅离子浓度三个因素对硝酸铅去除率产生的综合影响。利用方差分析进行研究。结合实验结果, 通过RSM得到响应曲面图。

### 2.6. 表征

样品的傅里叶变换红外光谱(FTIR)数据通过红外光谱仪(PerkinElmer, PE 1600)获得, 实验采用KBr压片法(样品: KBr = 1 : 5), 波数范围为400~4600 cm<sup>-1</sup>。重金属离子吸附前后香蕉假茎样品的表面形态通过环境扫描电子显微镜(ESEM) (FEI, Quanta 200)来表征。

表1 CCD中初始pH值、初始铅离子浓度和吸附剂用量的实验范围和水平

Variable	Parameter	Level				
		-α	-1	0	+1	+α
$x_1$	Initial pH	1.29552	3	5.5	8	9.70448
$x_2$	Initial lead ion concentration (mg·L <sup>-1</sup> )	12.9552	30	55.0	80	97.0448
$x_3$	Adsorbent dosage (g·L <sup>-1</sup> )	0.318207	1	2.0	3	3.68179

表2 20组实验中三种参数的组合

No.	Initial pH	Initial lead ion concentration ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )	Adsorbent dosage ( $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ )	Lead nitrate removal efficiency (%)	
				Experimental	Predicted
1	3.0	30.00	1.00	63	66
2	8.0	30.00	1.00	71	67
3	3.0	80.00	1.00	80	75
4	8.0	80.00	1.00	58	63
5	3.0	30.00	3.00	79	72
6	8.0	30.00	3.00	72	75
7	3.0	80.00	3.00	72	74
8	8.0	80.00	3.00	70	65
9	1.3	55.00	2.00	71	73
10	9.7	55.00	2.00	67	65
11	5.5	12.96	2.00	72	72
12	5.5	97.04	2.00	71	71
13	5.5	55.00	0.32	71	69
14	5.5	55.00	3.68	74	76
15	5.5	55.00	2.00	90	88
16	5.5	55.00	2.00	89	88
17	5.5	55.00	2.00	89	88
18	5.5	55.00	2.00	87	88
19	5.5	55.00	2.00	89	88
20	5.5	55.00	2.00	89	88

### 3. 结果与讨论

#### 3.1. 零电荷点

零电荷点(PZC)是对吸附物特性进行表征的重要手段,反应了吸附物在吸附剂表面的亲和力。如文献[17]所述,在pH值为2~10的范围内对香蕉假茎粉末的PZC值进行测定,得到香蕉假茎的PZC值为5.5。该结果表明,pH值低于5.5时,香蕉假茎粉末表面带正电荷,而pH值高于5.5时,其表面带负电荷。

#### 3.2. 扫描电镜分析

利用ESEM分析粒径为500  $\mu\text{m}$ 的香蕉假茎粉末的表

面特性。结果如图1所示,该材料的自然属性及表面特性使其极适合于做吸附前和吸附后的吸附研究。香蕉假茎粉末纤维间的表面特性大大提高了其表面对重金属的吸附作用。

#### 3.3. 傅里叶变换红外光谱分析

图2为香蕉假茎粉末吸附前和吸附后的FTIR分析图谱,吸附范围为 $3750\sim 2275\text{ cm}^{-1}$ ,对应羟基的伸缩振动及其他缩合聚合物。在 $2900\text{ cm}^{-1}$ 处的对称伸缩振动出现在多糖中,与 $-\text{CH}_2$ 基团有关。芳香基的C—H键在 $878\text{ cm}^{-1}$ 和 $775\text{ cm}^{-1}$ 处发生角变形。FTIR分析图谱显示,在 $1650\sim 1337\text{ cm}^{-1}$ 和 $1243\sim 1028\text{ cm}^{-1}$ 处出现的波峰

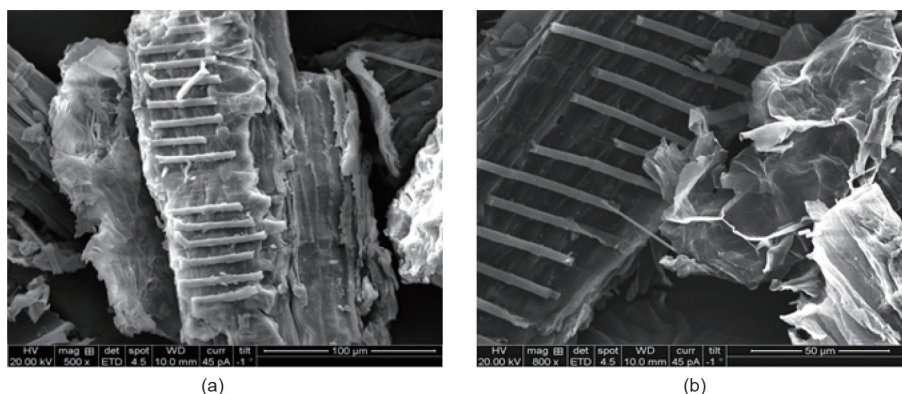


图1. 香蕉假茎粉末的ESEM照片。(a)吸附前;(b)吸附后。

对应的是C=C、C=O、C—C、—OH、—CH<sub>2</sub>、—CH和C—O—C键的振动。香蕉假茎粉末的FTIR结果揭示了多种官能团的存在，表明香蕉假茎粉末中含有半纤维素、纤维素和木质素，同时揭示了其具有轻盈、芳香的特性。结果表明，香蕉假茎粉末含有的官能团为生物吸附剂和金属离子之间的相互作用提供了适宜的环境[19]。

### 3.4. 初始 pH 值的影响

在吸附过程中，通过调节pH值可以为吸附剂表面达到最大吸附量创造适宜的条件。图3表明在pH值小于6时，硝酸铅的吸附量随着pH值的增加而增加，随后随着pH的增加吸附量在减少。吸附实验在一定条件进行，其中吸附剂用量为1 g·L<sup>-1</sup>，吸附时间为60 min，铅离子浓度为10 ppm，采用批量吸附处理。

### 3.5. 吸附剂用量的影响

由实验可知，吸附剂用量在硝酸铅的去除过程中起了重要的作用。随着吸附剂用量的增加，更多的活性位

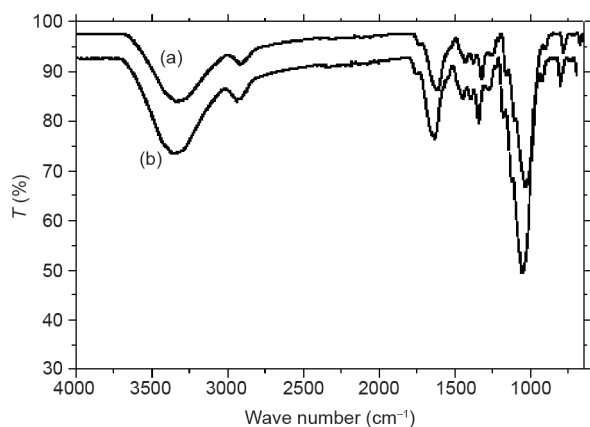


图2. 香蕉假茎粉末的FTIR图谱。(a)吸附前；(b)吸附后。

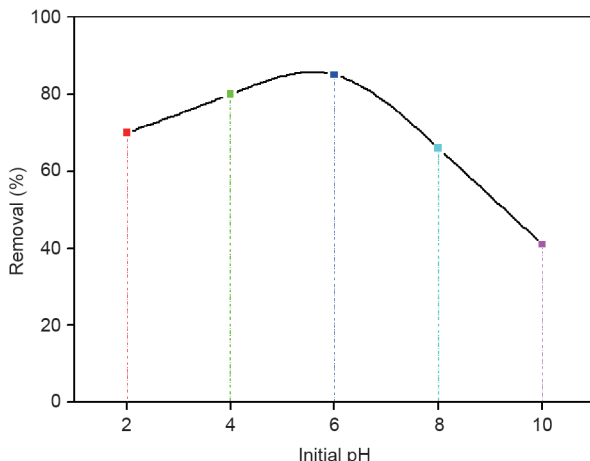


图3. 初始pH值对吸附效果的影响。

点随之呈现，增强了吸附剂与金属离子之间的相互作用，从而提高了香蕉假茎粉末对金属离子的吸附作用。在本研究中，吸附剂用量的选取范围为0.2~1 g·L<sup>-1</sup>。固定参数如下：初始pH为6，吸附时间为60 min，初始铅离子浓度为10 ppm。如图4所示，吸附剂用量为1 g·L<sup>-1</sup>时对应的硝酸铅去除率达到最大值。

### 3.6. 初始铅离子浓度和吸附时间的影响

本实验研究了初始铅离子浓度和接触时间对硝酸铅最大吸附量的综合影响。选用铅离子的初始浓度范围为10~50 ppm、浓度间隔为10 ppm、吸附时间为20~120 min来研究硝酸铅的去除率。吸附剂用量和pH值分别为1 g·L<sup>-1</sup>和6。如图5所示，硝酸铅的去除率随着铅离子浓度的增加而降低，并随着吸附时间的增加而增加。

### 3.7. 吸附等温线

本实验采用不同的吸附等温线模型——朗缪尔吸附等温线模型和弗罗因德利希吸附等温线模型来研究香蕉

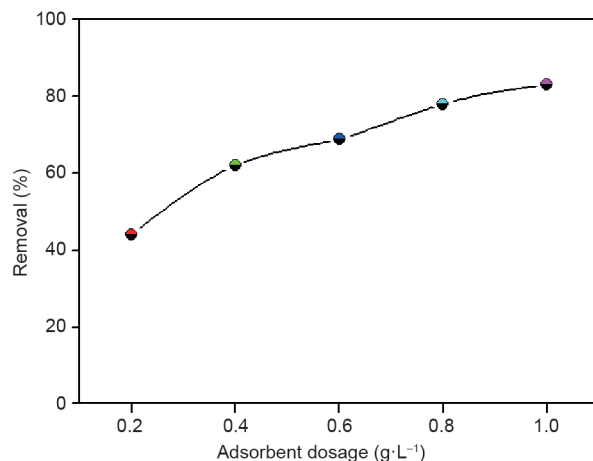


图4. 吸附剂用量对吸附效果的影响。

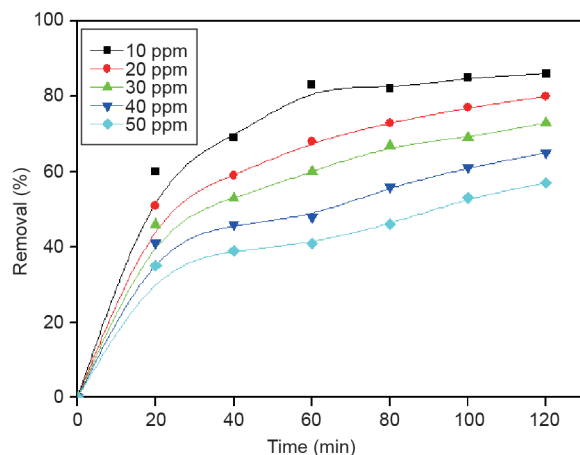


图5. 铅离子浓度和吸附时间对吸附效果的影响。

假茎粉末的吸附能力。将实验吸附数据与这两个模型进行关联。大多数文献研究认为,均相介质特定位点的吸附广泛采用朗缪尔吸附等温线。一旦吸附物占据一个位点,该位点达到平衡就不能再次进行吸附。式(3)为朗缪尔线性方程,描述了单层曲线的饱和吸附。

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{Q_0 b} + \frac{C_e}{Q_0} \quad (3)$$

式中,  $C_e$  为平衡条件下水溶液中铅离子的平衡浓度 ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ );  $q_e$  为吸附量 ( $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ );  $Q_0$  为最大吸附量 ( $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ );  $b$  是朗缪尔吸附参数 ( $\text{L}\cdot\text{mg}^{-1}$ )。利用截距函数预测  $C_e/q_e$  相对  $C_e$  的线性关系图,由此可以得出  $Q_0$  和  $b$ 。吸附系统的好与坏可由平衡参数  $R_L$  判定,其为朗缪尔吸附等温模型的一个重要的无量纲参数。该平衡参数由式(4)计算所得[18–21]:

$$R_L = \frac{1}{1 + bC_0} \quad (4)$$

式中,  $C_0$  为初始浓度。该参数表明了等温线的类型,其可能为不可逆 ( $R=0$ )、有利的 ( $0 < R < 1$ )、不利的 ( $R > 1$ )。通过绘制  $C_e/q_e$  相对  $C_e$  的线性关系图,得到朗缪尔吸附等温线。由图6可得铅离子吸附的  $Q_0$  和  $b$  的大小分别为  $34.21 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$  和  $0.22$ 。该朗缪尔吸附等温线的回归系数为  $0.9997$ 。

弗罗因德利希吸附等温线模型通常用于描述非均相吸附过程。在非均相表面,吸附过程通过多层吸附机理发生。弗罗因德利希吸附等温式如式(5)所示。

$$q_e = K_F C_e^{1/n} \quad (5)$$

式(6)为整理后的线性方程式[18–21]:

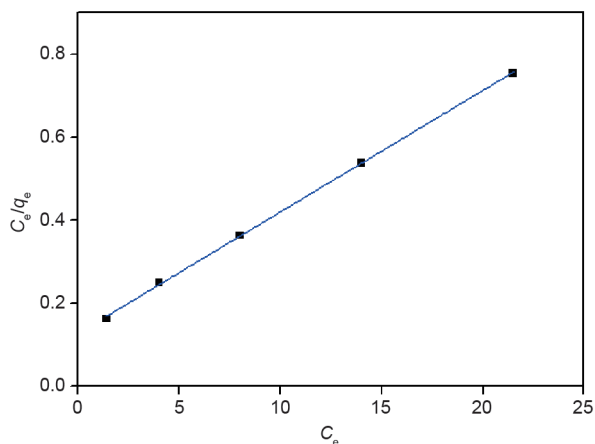


图6. 水溶液中铅离子的朗缪尔吸附等温线。

$$\log q_e = \log K_F + \frac{1}{n} \log C_e \quad (6)$$

式中,  $q_e$  为吸附能力 ( $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ );  $C_e$  为溶液中铅离子平衡浓度 ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )。对于弗罗因德利希吸附来说,其物理常数为  $K_F$  (弗罗因德利希吸附常数) 和  $n$  (吸附强度常数)。如图7所示,斜率  $n$  和截距  $K_F$  的值分别为  $2.25$  和  $8.024$ ,其吸附等温回归系数为  $0.97$ 。数据表明,朗缪尔等温吸附比弗罗因德利希等温吸附更加适合用来描述香蕉假茎粉末的吸附能力。

### 3.8. 吸附动力学

本研究使用两种模型对吸附动力学进行阐述:拟一级和拟二级动力学模型。在不同初始pH值、吸附时间、吸附剂用量和初始铅离子浓度条件下,利用香蕉假茎粉末去除硝酸铅。将实验数据与拟一级和拟二级动力学模型进行拟合。式(7)描述了拟一级动力学模型[18–21]。

$$\log(q_e - q_t) = \log q_e - \frac{K_1 t}{2.303} \quad (7)$$

式中,  $K_1$  为拟一级动力学模型的反应速率常数 ( $\text{min}^{-1}$ ),  $q_t$  表示时间为  $t$  时铅离子的吸收量。绘制  $\log(q_e - q_t)$  相对  $t$  的关系图,如图8所示。

拟二级动力学模型的选择是基于吸收能力的平衡,如式(8)[18–21]所示。

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{K_2 q_e^2} + \frac{t}{q_e} \quad (8)$$

式中,  $K_2$  为拟二级动力学模型的反应速率常数 [ $(\text{g}\cdot\text{mg}^{-1})\cdot\text{min}^{-1}$ ]。绘制  $t/q_t$  相对  $t$  的关系图,如图9所示。

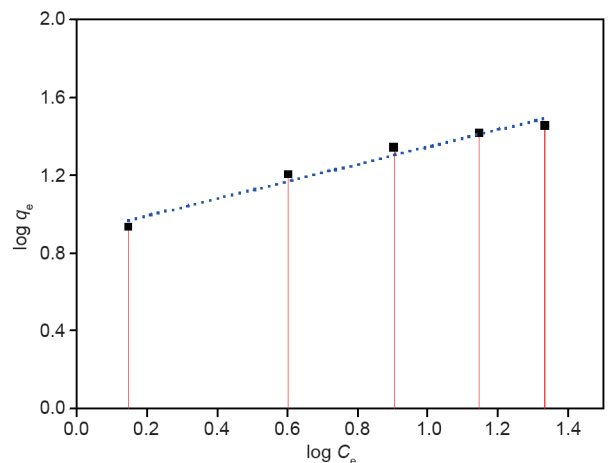


图7. 水溶液中铅离子的弗罗因德利希等温吸附线。

表3比较了拟一级和拟二级动力学模型的线性回归数值。基于回归数值,发现拟二级动力学相较于拟一级动力学与所得的动力学结果更加匹配。

### 3.9. 响应面分析法过程优化

通过采用CCD方法检测水溶液中硝酸铅的最大提取量,对影响硝酸铅去除率的过程条件进行优化。在20组实验中,对初始pH值、初始铅离子浓度和吸附剂用量三个参

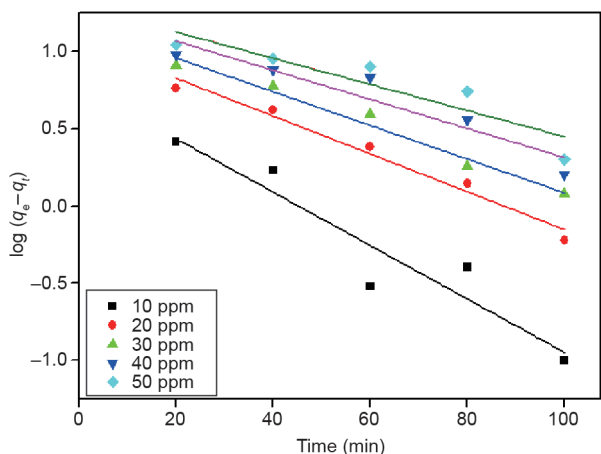


图8. 铅离子吸附的拟一级动力学模型。

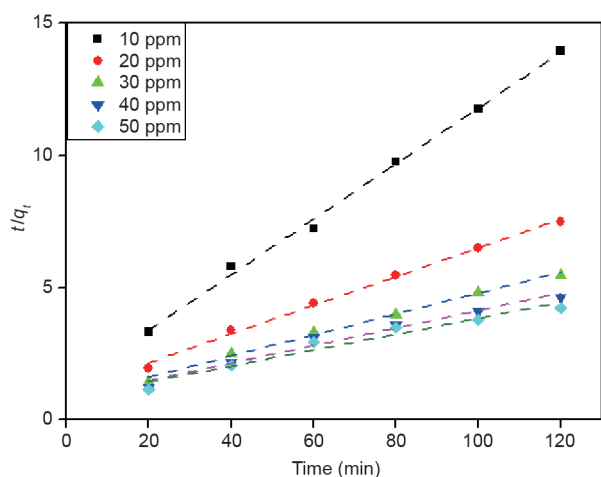


图9. 铅离子吸附的拟二级动力学模型。

表3 动力学模型参数

Model	Initial lead ion concentrations (ppm)				
	10	20	30	40	50
Pseudo first-order					
$K_1$ ( $\text{min}^{-1}$ )	0.039	0.028	0.025	0.022	0.017
$q_e$ ( $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ )	6.05	11.81	15.03	18.00	19.78
$R^2$	0.8981	0.9751	0.9772	0.8931	0.8336
Pseudo second-order					
$K_2$ ( $(\text{g} \cdot \text{mg}^{-1}) \cdot \text{min}^{-1}$ )	0.0090	0.0030	0.0020	0.0013	0.0011
$q_e$ ( $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ )	9.5	18.0	25.0	30.0	33.0
$R^2$	0.9969	0.9962	0.9938	0.9729	0.9571

数设置不同组合,并用软件运行该20组实验,如表2所示。

本文详细分析了初始pH值、初始铅离子浓度和吸附剂用量之间的相互作用对水溶液中硝酸铅的去除率产生的影响。利用Design-Expert(Stat-Ease, Inc. Minneapolis, USA)软件对回归结果和图形进行分析以确定最佳条件。多元回归数据分析采用Design-Expert软件。出于一定的考虑,采用因变量来估算参数。硝酸铅去除率的测试结果为二级多项式方程:

$$Y_1 = 88.81 - 2.18x_1 - 0.49x_2 + 1.91x_3 - 3.12x_1x_2 + 0.63x_1x_3 - 1.62x_2x_3 - 6.86x_1^2 - 5.98x_2^2 - 5.63x_3^2 \quad (9)$$

式中,  $Y_1$ 是以硝酸铅的去除率表示的因变量;  $x_1$ (初始pH值)、 $x_2$ (初始铅离子浓度)、 $x_3$ (吸附剂用量)为自变量的编码值。结果与二级动力学模型相吻合。式(9)拟合的优劣取决于判定系数( $R^2$ )和相关系数( $R$ )。相关系数( $R$ )表明了实验值和模型预测值之间的相关性。硝酸铅去除率的实验数据显示 $R^2=0.8992$ ,表明因变量共有89.92%的变异。硝酸铅去除率的实验数据 $R$ 值为0.9482,该值与模型预测值越接近越好。表4给出了方差分析结果。 $P<0.05$ 表明该模型是合适的。

表4 方差分析结果

Source	Sum of squares	Degree of freedom	Mean square	$F$	$P$
Model	1599.92	9	177.77	9.92	0.0007
Residual	179.28	10	17.93		
Total	1779.20	19			

图10给出了硝酸铅去除的三维响应曲面效果图(初始pH值、初始铅离子浓度和吸附剂用量)。通过对初始pH值和初始铅离子浓度的组合研究,得到吸附剂的最佳用量为 $2.5 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 。随着pH值和铅离子浓度的降低,吸附率有所提高。在对初始pH值和吸附剂用量的组合研究中,得到初始铅离子浓度的最佳值为 $54 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。pH值的降低和吸附剂用量的升高会提高吸附率。在对吸附剂用量和初始铅离子浓度的组合研究中得到pH值的最佳值为5.2。吸附剂用量和初始铅离子浓度的增加会导致吸附率的降低。实验结果表明,在较低的铅离子浓度和较高的吸附剂用量条件下,硝酸铅的去除率可达最大值(89%)。

## 4. 结论

本文研究了采用香蕉假茎粉末去除铅(II)的可能性,得到了影响铅(II)去除效果的参数的最优值。采用

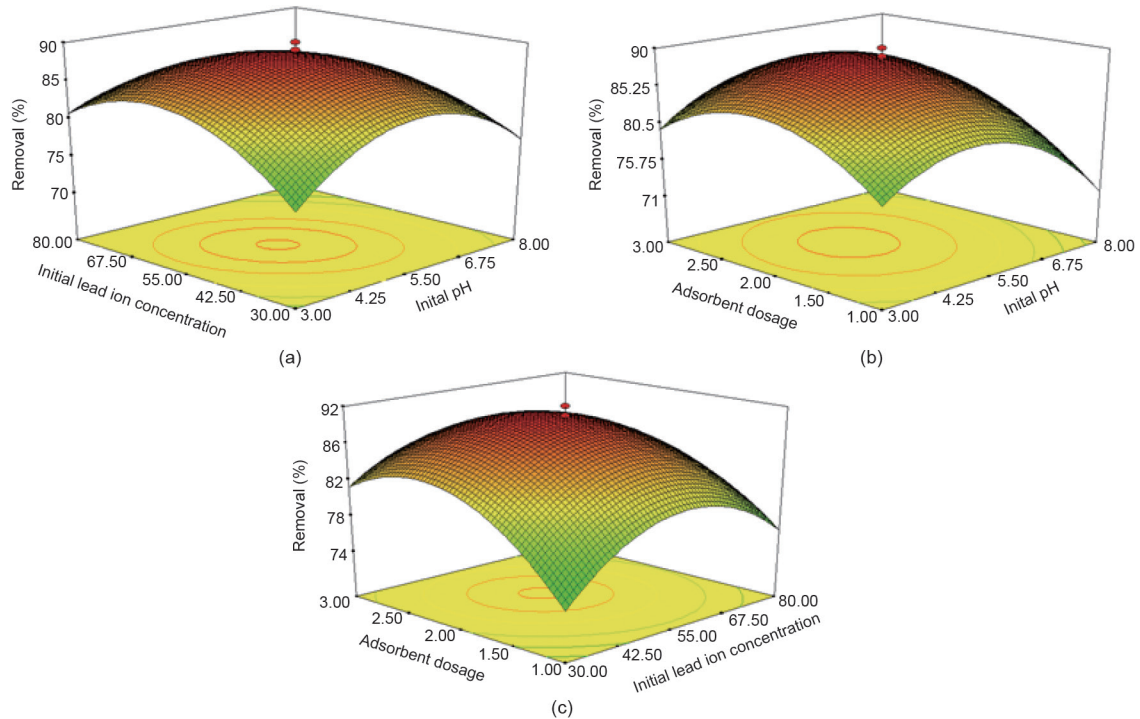


图10. 不同参数对硝酸铅去除效果的影响曲面图。(a)初始铅离子浓度和初始pH值；(b)吸附剂用量和初始pH值；(c)吸附剂用量和初始铅离子浓度。

ESEM研究了其表面形貌并用FTIR分析了其分子官能团。研究了三个参数——初始pH值、初始铅离子浓度和吸附剂用量对吸附效果的综合作用。实验结果采用三维响应曲面法来解释。结果表明，在pH值为5.2、初始铅离子浓度为 $54 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、吸附剂用量为 $2.5 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 时铅(II)的去除率达到最大值(89%)。该方法成功解决了初始pH值、初始铅离子浓度和吸附剂用量的优化。响应面图有助于理解三个参数之间的相互关系。朗缪尔吸附等温模型是香蕉假茎粉末去除铅(II)的最佳拟合模型。拟二级动力学模型是能更好地阐释香蕉假茎粉末去除铅(II)的动力学模型。本实验明确了香蕉假茎粉末作为一种廉价的吸附剂，在废水处理中可以用于去除重金属。

## 致谢

该研究获得了印度Siddaganga Institute of Technology化学工程和生物技术系的支持。

## Compliance with ethics guidelines

Shridhar S. Bagali, Bychapur S. Gowrishankar, and Aashis S. Roy declare that they have no conflict of interest or financial conflicts to disclose.

## References

- [1] Ekebafé LO, Ekebafé MO, Erhuaga GO, Oboigba FM. Effect of reaction conditions on the uptake of selected heavy metals from aqueous media using composite from renewable materials. *Am J Pol Sci* 2012;2(4):67–72.
- [2] Regmi P, Garcia Moscoso JL, Kumar S, Cao X, Mao J, Schafraan G. Removal of copper and cadmium from aqueous solution using switchgrass biochar produced via hydrothermal carbonization process. *J Environ Manage* 2012;109:61–9.
- [3] Nguyen TAH, Ngo HH, Guo WS, Zhang J, Liang S, Yue QY, et al. Applicability of agricultural waste and by-products for adsorptive removal of heavy metals from wastewater. *Bioresour Technol* 2013;148:574–85.
- [4] Bhattacharyya KG, Gupta SS. Adsorption of a few heavy metals on natural and modified kaolinite and montmorillonite: A review. *Adv Colloid Interface Sci* 2008;140(2):114–31.
- [5] Nadeema M, Shabbira M, Abdullah MA, Shahc SS, McKay G. Sorption of cadmium from aqueous solution by surfactant-modified carbon adsorbents. *Chem Eng J* 2009;148(2–3):365–70.
- [6] Karnitz O Jr, Gurgel LV, de Melo JC, Botaro VR, Melo TM, de Freitas Gil RP, et al. Adsorption of heavy metal ion from aqueous single metal solution by chemically modified sugarcane bagasse. *Bioresour Technol* 2007;98(6):1291–7.
- [7] Miretzky P, Cirelli AF. Cr(VI) and Cr(III) removal from aqueous solution by raw and modified lignocellulosic materials: A review. *J Hazard Mater* 2010;180(1–3):1–19.
- [8] Yao Y, Gao B, Inyang M, Zimmerman AR, Cao X, Pullammanappallil P, et al. Biochar derived from anaerobically digested sugar beet tailings: Characterization and phosphate removal potential. *Bioresour Technol* 2011;102(10):6273–8.
- [9] Wang J, Chen C. Biosorbents for heavy metals removal and their future. *Bio-technol Adv* 2009;27(2):195–226.
- [10] Onundi YB, Mamun AA, Khatib MF, Ahmed YM. Adsorption of copper, nickel and lead ions from synthetic semiconductor industrial wastewater by palm shell activated carbon. *Int J Environ Sci Technol* 2010;7(4):751–8.
- [11] Mohan D, Sarswat A, Ok YS, Pittman CU Jr. Organic and inorganic contaminants removal from water with biochar, a renewable, low cost and sustainable adsorbent—A critical review. *Bioresour Technol* 2014;160:191–202.
- [12] Fu F, Wang Q. Removal of heavy metal ions from wastewaters: A review. *J Environ Manage* 2011;92(3):407–18.
- [13] Mussatto SI, Fernandes M, Rocha GJ, Orfão JJ, Teixeira JA, Roberto IC. Production, characterization and application of activated carbon from brewer's spent grain lignin. *Bioresour Technol* 2010;101(7):2450–7.
- [14] Mohan D, Pittman CU Jr. Arsenic removal from water/wastewater using adsorbents—A critical review. *J Hazard Mater* 2007;142(1–2):1–53.
- [15] Imyim A, Prapalimrunsi E. Humic acids removal from water by aminopropyl

- functionalized rice husk ash. *J Hazard Mater* 2010;184(1–3):775–81.
- [16] Gregorio C. Recent developments in polysaccharide-based materials used as adsorbents in wastewater treatment. *Prog Polym Sci* 2005;30(1):38–70.
- [17] Ofomaja AE, Ho YS. Effect of temperatures and pH on methyl violet biosorption by *Mansonia* wood sawdust. *Bioresour Technol* 2008;99(13):5411–7.
- [18] Rabindra PD, Kedar NG, Katsutoshi I. Adsorptive separation of heavy metals from an aquatic environment using orange waste. *Hydrometallurgy* 2005;79(3–4):182–90.
- [19] Pereira ALS, do Nascimento DM, Souza MM, Cassales AR, Morais JPS, Paula RCM, et al. Banana (*Musa sp. cv. Pacovan*) pseudostem fibers are composed of varying lignocellulosic composition throughout the diameter. *BioResources* 2014;9(4):7749–63.
- [20] Suresh Jeyakumar RP, Chandrasekaran V. Adsorption of lead (II) ions by activated carbons prepared from marine green algae: Equilibrium and kinetics studies. *Int J Indust Chem* 2014;5:2.
- [21] Ogunleye OO, Ajala MA, Agarry SE. Evaluation of biosorptive capacity of banana (*Musa paradisiaca*) stalk for lead (II) removal from aqueous solution. *J Environ Prot (Irvine Calif)* 2014;5(15):1451–65.