

响应面法优化巴旦木壳对废水中 Pb、Cu 和 Cd 的吸附及同时测定

加列西·马那甫 王建华 万越 马福东*

(新疆农业大学 化学化工学院, 乌鲁木齐 830052)

摘 要 研究废弃巴旦木壳对模拟废水中 Pb、Cu 和 Cd 的去除率。在单因素实验的基础上,采用响应面法对吸附剂投加量、吸附时间和 pH 值 3 因素进行优化。实验结果表明,Pb、Cu 和 Cd 分别在最佳吸附剂投加量 0.4 g,吸附时间 49.38 min,pH 值为 9.96;吸附剂投加量 0.4 g,吸附时间 49.91 min,pH 值为 10.13;吸附剂投加量 0.4 g、吸附时间 49.83 min、pH 值为 10.42 的条件下,去除率分别为 87.42%、73.49% 和 85.11%。采用偏最小二乘法(PLS)对 Pb、Cu 和 Cd 模拟混合试样吸附后的溶液测定的曲线进行拟合回归,计算得出吸附剂对 Pb、Cu 和 Cd 的去除率分别为 83.2%、66.0% 和 83.3%。用 PLS 对吸附后的模拟废水样品进行计算分析,并间接得出巴旦木壳对 Pb、Cd 和 Cu 的去除率和建立 Pb、Cd、Cu 三组分同时测定的多元校正分析方法。

关键词 巴旦木壳;废水;响应面法;吸附;重金属;偏最小二乘法

中图分类号:O657.32 TH744.12 文献标志码:A 文章编号:2095-1035(2022)01-0013-07

Optimization of Adsorption of Pb, Cu and Cd in Wastewater by Almond Wood Shells and Its Simultaneous Determination by Response Surface Methodology

JIALIEXI · Manafu, WANG Jianhua, WAN Yue, MA Fudong*

(College of Chemistry and Chemical Engineering of Xinjiang Agricultural University, Urumqi, Xinjiang 830052, China)

Abstract The removal rate of Pb, Cu and Cd in simulated wastewater by discarded almond wood shells was studied. On the basis of the single factor test, the response surface method was used to optimize the three factors such as adsorbent dosage, adsorption time and pH value. The experimental results show that the best adsorption conditions are Pb; the adsorbent dosage is 0.4 g, the adsorption time is 49.38 min, and the pH is 9.96; Cu; the adsorbent dosage is 0.4 g, the adsorption time is 49.91 min, and the pH is 10.13; Cd; the adsorbent dosage is 0.4 g, the adsorption time is 49.83 min, and the pH is 10.42, under these

收稿日期:2021-07-19 修回日期:2021-10-12

基金项目:国家自然科学基金项目(21564015)

作者简介:加列西·马那甫,男,高级实验师,主要从事分析化学研究。E-mail: jialiexi@sina.cn

* 通信作者:马福东,男,实验师,主要从事农产品、有机材料的合成及检测研究。E-mail: xjaumafud@163.com

引用格式:加列西·马那甫,王建华,万越,等. 响应面法优化巴旦木壳对废水中 Pb、Cu 和 Cd 的吸附及同时测定[J]. 中国无机分析化学, 2022, 12(1): 13-19.

JIALIEXI · Manafu, WANG Jianhua, WAN Yue, et al. Optimization of Adsorption of Pb, Cu and Cd in Wastewater by Almond Wood Shells and Its Simultaneous Determination by Response Surface Methodology[J]. Chinese Journal of Inorganic Analytical Chemistry, 2022, 12(1): 13-19.

conditions, the removal rates of Pb, Cu and Cd are 87.42%, 73.49% and 85.11%, respectively. Partial least squares method (PLS) was used to simultaneously determine the solution after adsorption of Pb, Cu and Cd simulated mixed samples. The calculated removal rates of Pb, Cu and Cd by the adsorbent were 83.2%, 66.0% and 83.3%. Partial least squares (PLS) was used to calculate and analyze the sample of simulated wastewater after adsorption, and the removal rate of Pb, Cd and Cu by almond wood shells was obtained indirectly.

Keywords almond wood shells; waste water; response surface methodology; adsorption; heavy metal; partial least squares

随着工业生产活动的增加,人们生存的环境受到严重破坏。由于重金属在生物体内存在累积效应以及在环境中的难降解性,影响人体神经系统和脑细胞功能,造成难以挽回的伤害,并且会通过母体传递给婴儿^[1-4]。

目前重金属的去除方法主要有化学沉淀法、反渗透法、离子交换法和生物吸附法。其中吸附法由于方法简单、易于回收而被广泛使用^[5-8]。国外逐渐重视利用廉价的农林废弃物制备吸附剂来清除废水中的重金属。常用的农林废弃物有锯末、橙皮、花生壳、核桃壳等。而我国作为农业大国,农业生产过程中的很多废弃物却没有得到有效的回收利用^[9-10]。

巴旦木是新疆特产之一,属于壳类食物,在享用果肉后大量壳成为废料被丢弃,造成资源浪费。本实验以巴旦木壳为原料,探讨其对水中 Pb、Cu、Cd 的吸附性能,并利用响应面法对巴旦木壳吸附条件进行优化^[11-13]。

分光光度法作为常用的测定方法具有操作简便、周期短等优点。但不能对多组分混合体系进行同时测定,当体系内含有多个组分互相干扰时,用分光光度法测定之前必须先进行分离,许多组分难以分离,得不到准确测定结果。由于 Pb、Cu 和 Cd 的吸收光谱重叠较严重,相互干扰,经典分光光度法无法进行同时测定。本文研究三组分吸光度的加和性,采用正交实验进行校正模型的建立,在确定的波长范围和波长间隔对光谱相互重叠的 Pb、Cu 和 Cd 模拟样品进行测定。用 PLS 对吸附后的模拟废水样品进行计算分析,并间接得出巴旦木壳对 Pb、Cu 和 Cd 的去除率和建立 Pb、Cu、Cd 三组分同时测定的多元校正分析方法^[14-15]。实验结果具有一定的实用价值。

1 实验部分

1.1 仪器与试剂

TU-1810 型紫外-可见分光光度计(北京普析通

用仪器有限责任公司),AL204-IC 电子分析天平(梅特勒-托利多仪器有限公司,上海),DHG-9055A 电热鼓风干燥箱(上海一恒科学仪器有限公司)。

醋酸铅、硫酸铜、硫酸镉、PAR[4-(2-吡啶偶氮)间苯二酚]、四硼酸钠、盐酸、氢氧化钠、乙醇、甲醛、硫酸、硝酸均为分析纯试剂。

1.2 实验方法

1.2.1 巴旦木壳吸附剂的制备

洗净巴旦木壳,用水浸泡 48 h,每 12 h 更换一次水,于 60 °C 烘干,用粉碎机粉碎,待用。

1.2.2 模拟水样的配制

分别移取 0.25 mL Pb(10 mg/mL)、0.6 mL Cu(1 mg/mL) 和 0.25 mL Cd(1 mg/mL)溶液,混合,用水稀释至 50.00 mL,作为模拟混合样品。

1.2.3 吸附实验

称取一定量的巴旦木壳吸附剂,分别置于 50 mL 含 Pb、Cu 和 Cd 或混合试样的模拟废水中,调节 pH 值,震荡吸附一定时间,离心,取上清液加入缓冲溶液和显色剂,定容,用分光光度法测定,计算浓度及去除率。

$$\text{去除率} = (c_0 - c) / c_0 \times 100\%$$

c_0 —吸附前重金属浓度,mg/mL; c —吸附后重金属浓度,mg/mL。

1.2.4 巴旦木壳吸附重金属单因素实验

以不同的吸附剂投加量(A)、吸附时间(B)和 pH 值(C)为单因素进行实验,考察各因素对巴旦木壳吸附重金属的影响。

1.3 标准曲线的绘制

于 25.00 mL 量瓶中加入 2 mL 硼砂-硼酸缓冲液、1 mL PAR-乙醇溶液,再分别移取 0.80、1.00、1.20、1.40、1.60 和 1.80 mL Pb(50 μg/mL)、Cu(5 μg/mL)和 Cd(5 μg/mL),用水定容,摇匀。反应 20 min,用试剂作空白,在 522、495 和 496 nm 处测定吸光度。计算得 Pb、Cu 和 Cd 的标准曲线回归方程分别为: $y = 0.12536x - 0.08657$, $R^2 =$

$0.9949; y = 0.50943x - 0.0871, R^2 = 0.9993; y = 1.63571x - 0.07405, R^2 = 0.99767$ 。

2 结果与讨论

2.1 吸附时间对去除率的影响

移取 Pb、Cu 和 Cd 废水试样 50.00 mL, 分别置于 150 mL 锥形瓶中, 加入吸附剂 0.2 g, 调节 pH 值为 9.0, 震荡 20、40、60、80、100 min, 离心, 分取上清液 3.0 mL, 加入缓冲液和显色剂稀释至 25.00 mL, 测定其吸光度, 考察不同吸附时间对 Pb、Cu 和 Cd 去除率的影响, 结果见图 1。当吸附时间增加到 40 min 时, Pb^{2+} 、 Cu^{2+} 和 Cd^{2+} 的去除率分别为 76.5%、68.4% 和 78.4%; 之后不再增加, 说明吸附时间达到最优值。

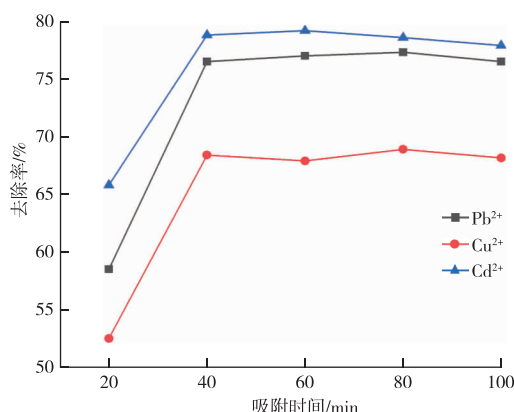


图 1 吸附时间对 Pb^{2+} 、 Cu^{2+} 和 Cd^{2+} 去除率的影响

Figure 1 The effect of adsorption time on the removal rate of Pb^{2+} , Cu^{2+} and Cd^{2+} .

2.2 巴旦木壳投加量对去除率的影响

移取 Pb、Cu 和 Cd 废水试样 50.00 mL, 置于 150 mL 锥形瓶中, 分别加 0.1、0.2、0.3、0.4 和 0.5 g 巴旦木壳样品, 调节 pH 值为 9.0, 震荡 40 min, 离心, 分取上清液 3.00 mL, 加入缓冲液和显色剂稀释至 25.00 mL, 测定吸光度, 考察不同巴旦木壳投加量对 Pb、Cu 和 Cd 去除率的影响, 结果见图 2。当吸附剂用量增加到 0.3 g 时, 去除率分别在 85.1%、71.3% 和 82.9%, 之后上升趋势变得不明显。

2.3 pH 值对去除率的影响

移取 Pb、Cu 和 Cd 模拟废水试样 50.00 mL, 置于 150 mL 锥形瓶中, 加入 0.3 g 吸附剂, 调 pH 值 3.0、5.0、7.0、9.0 和 11.0, 震荡 40 min, 离心, 分取上清液 3.00 mL, 加入缓冲液和显色剂稀释至 25.00 mL, 测定吸光度, 考察不同 pH 值对 Pb^{2+} 、

Cu^{2+} 和 Cd^{2+} 去除率的影响, 结果见图 3。当 pH 值增加到 9.0 时, Pb^{2+} 、 Cu^{2+} 和 Cd^{2+} 的去除率分别在 85.14%、68.19% 和 84.70%, 之后逐渐减小, pH 值为 9.0 时达到最优值。

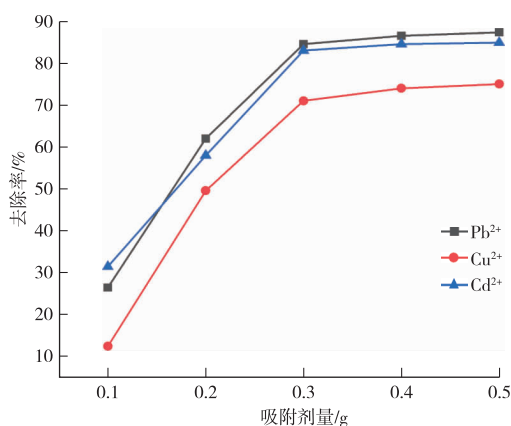


图 2 吸附剂用量对 Pb^{2+} 、 Cu^{2+} 和 Cd^{2+} 去除率的影响

Figure 2 The influence of the amount of adsorbent on the removal rate of Pb^{2+} , Cu^{2+} and Cd^{2+} .

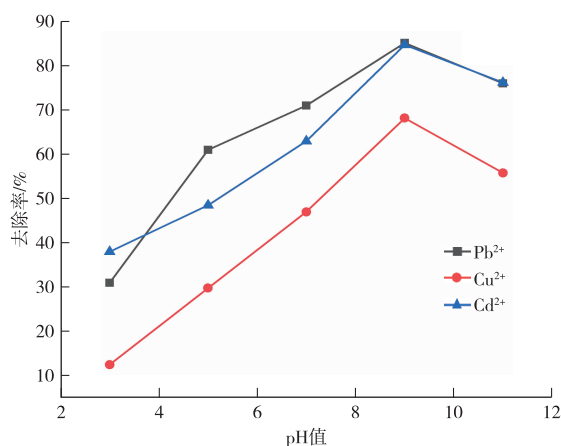


图 3 pH 值对 Pb^{2+} 、 Cu^{2+} 和 Cd^{2+} 去除率的影响

Figure 3 The effect of pH value on the removal rate of Pb^{2+} , Cu^{2+} and Cd^{2+} .

2.4 吸收光谱分析

分光光度法作为常用的测定方法, 具有操作简便、周期短等优点。但不能对多组分混合体系进行同时测定, 当体系内含有多个组分互相干扰时, 要先进行分离。为考察 Pb、Cu 和 Cd 的吸收光谱性质, 配制各单组分标准溶液, 绘制 Pb、Cu 和 Cd 的吸收光谱如图 4 所示, 它们在 520、494 和 497 nm 波长处有最大吸收, 且吸收光谱重叠较严重, 3 组分彼此相互干扰, 用经典的分光光度法难以进行单一组分的定量。

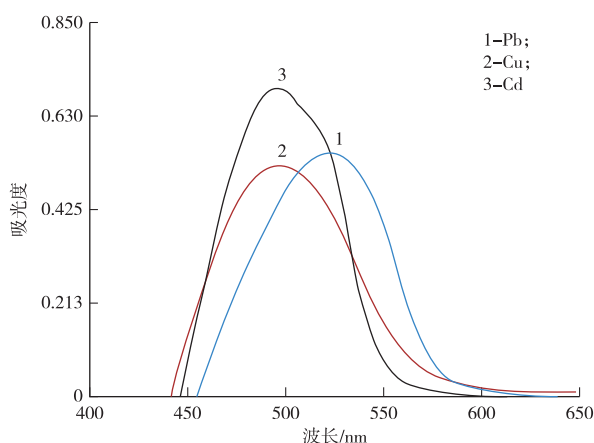


图 4 吸收光谱图

Figure 4 Absorption spectrum.

2.5 反应条件的优化

实验结果表明,选择 PAR(显色剂)的用量为 1 mL、硼砂-硼酸缓冲液用量为 2 mL、显色时间为 20 min 时,体系的吸光度值最大且稳定。Pb、Cu 和 Cd 的浓度分别在 1.40~8.00、0.24~1.30 和 0.10~0.50 $\mu\text{g/mL}$,遵守朗伯-比耳定律,具有良好的线性关系。

2.6 响应面法优化实验条件

2.6.1 Box-Behnken 设计实验

在单因素实验的基础上,以吸附剂投加量、吸附时间和 pH 值 3 因素为自变量,去除率(Y)为响应值,设计 3 因素 3 水平实验。实验设计水平见表 1,实验设计及结果见表 2。

表 1 响应面分析因素与水平

Table 1 Response surface analysis factors and levels

因素	水平		
	-1	0	1
吸附剂量/g	0.2	0.3	0.4
吸附时间/min	30	40	50
pH 值	7.0	9.0	11.0

2.6.2 模型方程的建立与方差分析

应用 Design-Expert 8.0.6 软件对表 2 的实验结果进行数据分析及模型方程建立,得到吸附剂量、吸附时间、pH 值与 Pb、Cu 和 Cd 的去除率之间的二次多项回归方程:

$$Y(\text{Pb}) = -180.46469 + 149.7375A + 2.21237B + 42.38438C - 0.63250AB - 1.025AC + 0.0465BC - 144.625A^2 - 0.029162B^2 - 2.40219C^2$$

$$Y(\text{Cu}) = -336.41025 + 243.22A + 1.65760B + 72.424C + 0.85AB - 17.55AC + 0.038BC - 179.7A^2 - 0.02567B^2 - 3.70175C^2$$

$$Y(\text{Cd}) = -270.57469 + 97.5625A + 1.86287B + 64.67063C + 0.2725AB + 5.9375AC - 0.12113BC -$$

$$225.375A^2 - 0.011737B^2 - 3.30219C^2$$

表 2 响应面分析方案及实验结果

Table 2 Response surface analysis plan and test results

编号	A	B	C	Pb 去除率/%	Cu 去除率/%	Cd 去除率/%
1	1	-1	0	82.62	69.55	80.80
2	-1	1	0	83.00	68.19	80.60
3	-1	0	1	73.02	66.21	68.60
4	0	-1	1	75.63	55.13	67.67
5	0	1	1	76.69	62.85	76.49
6	0	0	0	86.48	75.81	84.90
7	0	0	0	85.75	72.22	84.39
8	0	-1	-1	73.20	52.09	66.70
9	0	1	-1	70.54	56.77	68.21
10	-1	0	-1	71.32	47.37	60.76
11	0	0	0	88.89	73.36	82.60
12	1	0	1	79.24	60.57	79.49
13	1	0	-1	78.36	55.77	65.90
14	0	0	0	87.16	73.49	86.11
15	0	0	0	84.42	75.54	87.00
16	1	1	0	86.49	73.09	84.29
17	-1	-1	0	76.61	68.05	78.19

表 3~5 为 Pb、Cu 和 Cd 的回归模型方差分析结果,其中失拟差分别为 0.166 5、0.070 6、0.113 1 均大于 0.05,不显著; R^2 分别为 0.940 6、0.963 3、0.961 4,说明回归方程与实验相关性较好,不存在异常点。其中 Pb 的一次项中 A 为极显著,二次项中 C 为差异极显著,B 为显著,交互项不显著;Cu 的一次项中 C 为极显著,二次项中 C 为差异极显著,交互项为不显著;Cd 的一次项中 C 为极显著,A 为显著,二次项中 C 为差异极显著,交互项为不显著。说明 Pb、Cu 和 Cd 的各因素与实验的影响不是一般的线性关系。

2.7 PLS 最佳计算测定条件的确定

2.7.1 吸光度加和性的考察

配制 Pb、Cu 和 Cd 的混合溶液和浓度相同的单组分标准溶液,在最大波长处测定单一组分和模拟混合溶液的吸光度,根据公式 $|I - I_0|/I_0$ 的大小,分析体系的加和性。当加和性大于 0.1 表示加和性不好,小于 0.1 则相反。式中 I 表示模拟混合体系的吸光度, I_0 表示 3 种单组分标准溶液吸光度的加和值。计算可得混合体系的加和性不好。

2.7.2 波长范围及波长间隔的确定

波长范围及波长间隔的选择是进行建模和计算的关键步骤。按正交设计表 $L_9(3^3)$ 配制 9 组不同浓度的 Pb、Cu 和 Cd 模拟混合试样(表 6),从 400~650 nm,每隔 1 nm,250 个波长点测定各混合组分的吸光度值。根据吸收曲线,在相同波长间隔和不同波长选择范围,对同一模拟混合试样,采用 PLS

建立校正模型并进行拟合计算,结果为波长范围在 长间隔,对同一模拟混合试样进行分析,选择2 nm 间
400~650 nm 较好。保持相同的波长范围,只改变波 隔建立的校正模型较为稳定,计算结果为最佳。

表 3 Pb 的回归模型方差分析
Table 3 Pb regression model analysis of variance

项目	平方和	自由度	均方	F 值	P 值	显著性
模型	552.469 598 5	9	61.385 510 95	12.326 964 76	0.001 6	**
A	64.695 312 5	1	64.695 312 5	12.991 613 58	0.008 7	**
B	9.352 812 5	1	9.352 812 5	1.878 159 656	0.212 9	
C	15.568 2	1	15.568 2	3.126 285 826	0.120 4	
AB	1.600 225	1	1.600 225	0.321 344 84	0.588 5	
AC	0.168 1	1	0.168 1	0.033 756 545	0.859 4	
BC	3.459 6	1	3.459 6	0.694 730 184	0.432 1	
A ²	8.806 901 316	1	8.806 901 316	1.768 533 983	0.2253	
B ²	35.808 480 26	1	35.808 480 26	7.190 7827 69	0.031 5	*
C ²	388.749 796 1	1	388.749 796 1	78.065 735 11	<0.000 1	***
误差	34.858 425	7	4.979 775			
失拟差	23.829 425	3	7.943 141 667	2.880 820 262	0.166 5	
纯误差	11.029	4	2.757 25			
总误差	587.328 023 5	16				

$R^2=0.940\ 6$

表 4 Cu 回归模型方差分析
Table 4 Cu regression model analysis of variance

项目	平方和	自由度	均方	F 值	P 值	显著
模型	1 234.182 786	9	137.131 420 7	20.438 909 91	0.000 3	* *
A	10.488 2	1	10.488 2	1.563 225 802	0.251 4	
B	32.320 8	1	32.320 8	4.817 290 716	0.064 2	
C	134.152 2	1	134.152 2	19.994 868 55	0.002 9	* *
AB	2.89	1	2.89	0.430 743 366	0.532 6	
AC	49.280 4	1	49.280 4	7.345 053 755	0.030 2	
BC	2.310 4	1	2.310 4	0.344 356 219	0.575 8	
A ²	13.596 669 47	1	13.596 669 47	2.026 531 2	0.197 6	
B ²	27.745 216 84	1	27.745 216 84	4.135 317 675	0.081 5	
C ²	923.146 311 6	1	923.146 311 6	137.591 401 1	<0.000 1	***
误差	46.965 32	7	6.709 331 429			
失拟差	37.514 8	3	12.504 933 33	5.292 802 23	0.0706	
纯误差	9.450 52	4	2.362 63			
总误差	1281.148 106	16				

$R^2=0.963\ 3$

表 5 Cd 回归模型方差分析
Table 5 Cd regression model analysis of variance

项目	平方和	自由度	均方	F 值	P 值	显著性
模型	1 101.353 7	9	122.372 633 3	19.393 400 36	0.000 4	**
A	62.384 45	1	62.384 45	9.886 578 251	0.016 3	*
B	32.967 2	1	32.967 2	5.224 584 051	0.056 2	
C	117.657 8	1	117.657 8	18.646 201 84	0.003 5	**
AB	0.297 025	1	0.297 025	0.047 072 001	0.834 4	
AC	8.265 625	1	8.265 625	1.309 921 757	0.290 0	
BC	13.359 025	1	13.359 025	2.117 114 858	0.189 0	
A ²	27.459 532 89	1	27.459 532 89	4.351 738 626	0.075 4	
B ²	9.145 006 579	1	9.145 006 579	1.449 284 608	0.267 8	
C ²	797.066 111 8	1	797.066 111 8	126.317 639 8	<0.000 1	***
误差	44.170 1	7	6.310 014 286			
失拟差	32.795 9	3	10.931 966 67	3.844 478 44	0.113 1	
纯误差	11.374 2	4	2.843 55			
总误差	1145.523 8	16				

$R^2=0.961\ 4$

注: * 为 $P<0.05$ 显著,**为 $P<0.01$ 极显著,***为 $P<0.0001$ 差异极显著

表 6 模拟混合样品校正组质量浓度组成
Table 6 The mass concentration composition
of the simulated mixed sample calibration group

/($\mu\text{g} \cdot \text{mL}^{-1}$)			
序号	Pb	Cu	Cd
1	2.00	0.20	0.40
2	2.00	0.16	0.50
3	2.00	0.14	0.60
4	2.40	0.20	0.50
5	2.40	0.16	0.60
6	2.40	0.14	0.40
7	2.60	0.20	0.60
8	2.60	0.16	0.40
9	2.60	0.14	0.50

2.7.3 模拟混合试样的测定

按照正交设计表 $L_9(3^3)$ 配制 9 组不同浓度的 3 组分混合模拟样品作为校正组,通过光谱结果建立模型。用确定的波长范围及波长间隔对 9 组不同浓度的模拟样品预测组进行分析,用 PLS 计算平均误差和相对预报误差(表 7)。

表 7 模拟混合样品预报组质量浓度组成、PLS 预测值及误差分析
Table 7 The mass concentration composition,
PLS prediction value and error analysis of
the simulated mixed sample forecast group

/($\mu\text{g} \cdot \text{mL}^{-1}$)						
序号	预报组质量浓度			PLS 预测值		
	Pb	Cu	Cd	Pb	Cu	Cd
1	2.40	0.16	0.44	2.41	0.16	0.45
2	2.40	0.20	0.48	2.37	0.22	0.50
3	2.40	0.18	0.52	2.41	0.18	0.54
4	2.80	0.16	0.48	2.81	0.15	0.49
5	2.80	0.20	0.52	2.85	0.20	0.51
6	2.80	0.18	0.44	2.84	0.19	0.45
7	2.20	0.16	0.52	2.17	0.17	0.52
8	2.20	0.20	0.44	2.21	0.19	0.44
9	2.20	0.18	0.48	2.24	0.17	0.49
平均误差/%				1.03	4.29	2.07
回收率/%				100.4	100.6	101.6

2.7.4 样品分析

分别移取 0.25、0.60、0.25 mL Pb($10 \mu\text{g}/\text{mL}$)、Cu($1 \mu\text{g}/\text{mL}$)、Cd($1 \mu\text{g}/\text{mL}$) 溶液混合。加水稀释至 50.00 mL,加入 0.3 g 吸附剂,调节 pH 值为 9.0,震荡 40 min,离心,分取上清液 3.00 mL,加入 2 mL 缓冲溶液、1 mL 显色剂,用水稀释至 25.00 mL,混匀。在 450~570 nm,间隔 1 nm,测定其吸光度值。采用 PLS 计算模拟混合样品吸附后 Pb、Cu 和 Cd 的含量,并间接得出巴旦木壳对 Pb、Cu 和 Cd 的去除率。结果见表 8。

表 8 吸附剂对混合试样吸附后 PLS 测定浓度
Table 8 The determined concentration of PLS
after the adsorbent adsorbs the mixed sample

/($\mu\text{g} \cdot \text{mL}^{-1}$)						
样品	初始浓度	吸附后浓度	去除率 ¹⁾	混合试样 初始浓度	混合试样 吸附后浓度	去除率 ¹⁾
Pb	6	0.89	85.1	6	1.01	83.2
Cu	1.44	0.46	68.2	1.44	0.49	66.0
Cd	0.6	0.09	85.7	0.6	0.1	83.3

注: ¹⁾ 单位为%。

3 结论

巴旦木壳对低浓度重金属溶液具有良好的吸附能力。在单因素实验的基础上,采用响应面法对实验条件进行优化,最佳吸附条件为 Pb: 吸附剂投加量 0.4 g、吸附时间 49.38 min、pH 值为 9.96; Cu: 吸附剂投加量 0.4 g、吸附时间 49.91 min、pH 值为 10.13; Cd: 吸附剂投加量 0.4 g、吸附时间 49.83 min、pH 值为 10.42。在此条件下, Pb、Cu 和 Cd 的去除率分别为 87.42%、73.49% 和 85.11%。

采用偏最小二乘-分光光度法对 Pb、Cu 和 Cd 吸附后的模拟混合试样进行同时测定,解决了因多组分吸收光谱重叠和相互干扰不能进行同时测定的问题。说明采用 PLS 能够得到较为准确的结果。巴旦木壳作为一种新型吸附剂,具有一定研究意义。

参考文献

- [1] 嵇梦圆, 胡逸文, 梁程, 等. 农林废弃物基生物炭对重金属铅和镉的吸附特性[J]. 生态与农村环境学报, 2020, 36(1): 106-114.
JI Mengyuan, HU Yiwen, LIANG Cheng, et al. Adsorption of lead and cadmium on biochars produced from agroforestry wastes[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2020, 36(1): 106-114.
- [2] SAADAT S, KARIMI-JASHNI A. Optimization of Pb(II) ad-sorption onto modified walnut shells using factorial design and simplex methodologies[J]. Chem. Eng. J., 2011, 173(3): 743-749.
- [3] BHATTACHARYYA K G, SHARMA A. Adsorption of Pb(II) from aqueous solution by Azadirachta indica (Neem) leaf powder [J]. J. Hazard Mater., 2004, 113(1/2/3): 97-109.
- [4] 张更宇, 高晓峰. 电絮凝处理脱硫废水中重金属及动力学模型[J]. 中国无机分析化学, 2019, 9(6): 18-22.
ZHANG Gengyu, GAO Xiaofeng. Experiment and kinetic model of heavy metals removing in desulfurization wastewater by electrocoagulation [J].

- Chinese Journal of Inorganic Analytical Chemistry, 2019, 9(6): 18-22.
- [5] 许振民, 施利毅. 光催化去除水体中重金属离子的研究进展[J]. 上海大学学报(自然科学版), 2020, 26(4): 491-499.
- XU Zhenmin, SHI Liyi. Review on photocatalytic removal of heavy metals from water[J]. Journal of Shanghai University(Natural Science Edition), 2020, 26(4): 491-499.
- [6] 万秋月. 香蕉皮对重金属离子铅的吸附性能研究[J]. 中国无机分析化学, 2018, 8(4): 4-8.
- WAN Qiuyue. Reduction and adsorption of heavy metal ions of lead from aqueous solution by banana peel[J]. Chinese Journal of Inorganic Analytical Chemistry, 2018, 8(4): 4-8.
- [7] 魏啸楠, 张倩, 李孟, 等. 磷酸改性生物炭负载硫化锰去除废水中重金属镉[J]. 中国环境科学, 2020, 40(5): 2095-2102.
- WEI Xiaonan, ZHANG Qian, LI Meng, et al. Removal of cadmium in wastewater by phosphoric acid modified biochar supported manganese sulfide[J]. China Environmental Science, 2020, 40(5): 2095-2102.
- [8] 范庆玲, 郭小甫, 袁俊生. 化学沉淀法去除飞灰浸取液中重金属的研究[J]. 河北工业大学学报, 2019, 48(3): 21-25.
- FAN Qingling, GUO Xiaofu, YUAN Junsheng. The removal of heavy metals in fly ash leaching solution by chemical precipitation[J]. Journal of Hebei University of Technology, 2019, 48(3): 21-25.
- [9] 刘雪梅, 吴凡, 章海亮, 等. 农林废弃物生物吸附剂处理重金属废水的研究进展[J]. 应用化工, 2019, 48(11): 2703-2706.
- LIU Xuemei, WU Fan, ZHANG Hailiang, et al. Research progress on the treatment of heavy metal wastewater by agroforestry waste biological adsorbent[J]. Applied Chemical Industry, 2019, 48(11): 2703-2706.
- [10] 吴纓, 汪洋, 李焱, 等. 农林废弃物吸附去除水中重金属的研究进展[J]. 安徽大学学报(自然科学版), 2016, 40(3): 95-103.
- WU Ying, WANG Yang, LI Yan, et al. Advance in application of agricultural and forestry residues as adsorbent for heavy metal from aqueous solutions[J]. Journal of Anhui University(Natural Science Edition), 2016, 40(3): 95-103.
- [11] 楚刚辉, 马依努尔. 酸酐改性巴旦木壳在罗丹明 B 分析中的应用[J]. 化学研究与应用, 2019, 31(4): 619-623.
- CHU Ganghui, MAYI Nuer. Badam shell modified by anhydride was applied for determination of Rhodamine B[J]. Chemical Research and Application, 2019, 31(4): 619-623.
- [12] 李慧峰, 黄咏梅, 李彦青, 等. 甘薯中总硒含量和无机硒含量分析的响应面优化[J]. 中国无机分析化学, 2020, 10(4): 76-82.
- LI Huifeng, HUANG Yongmei, LI Yanqing, et al. Response surface optimization for the analysis of total selenium content and inorganic selenium content in sweet potato[J]. Chinese Journal of Inorganic Analytical Chemistry, 2020, 10(4): 76-82.
- [13] 黄海艺, 张华, 闭建红, 等. 巴旦木壳活性炭的制备及其对 Cr(VI) 的吸附研究[J]. 水处理技术, 2015, 41(12): 52-56.
- HUANG Haiyi, ZHANG Hua, BI Jianhong, et al. Preparation of Badam shell activated carbon and the adsorption of Cr(VI) by it[J]. Technology of Water Treatment, 2015, 41(12): 52-56.
- [14] 薛永林, 任守信, 赵志超, 等. 化学计量学方法同时测定铁、铝和铍[J]. 分析科学学报, 2010, 26(5): 543-546.
- XUE Yonglin, REN Shouxin, ZHAO Zhichao, et al. Simultaneous determination of iron, aluminum and beryllium by chemometric method[J]. Journal of Analytical Science, 2010, 26(5): 543-546.
- [15] 樊明德, 谢巧勤, 陈天虎, 等. 化学计量学方法用于多组分分光光度分析—合成样品中钡、锶、钙的同时测定[J]. 分析测试学报, 2006, 25(6): 39-42.
- FAN Mingde, XIE Qiaoqin, CHEN Tianhu, et al. Application of chemometrics to multicomponent spectrophotometry-simultaneous determination of barium, strontium and calcium in synthetic samples[J]. Journal of Instrumental Analysis, 2006, 25(6): 39-42.