

老化聚酰胺吸附Pb(II)的研究

杜婉婷¹, 崔炜恒¹, 崔亚婷¹, 丁庆伟^{1,2}, 刘宏芳^{1,2}

(1. 太原科技大学 环境与资源学院, 山西 太原 030024;

2. 山西省生态功能材料与污染修复技术工程研究中心, 山西 太原 030024)

摘要: 为了评估老化对聚酰胺(PA)微塑料吸附重金属的影响, 本研究通过SEM和XPS对老化前后的PA进行表征分析, 并开展紫外老化前后PA吸附Pb(II)的动力学实验以及环境因子对PA吸附Pb(II)的影响研究。实验结果表明: 紫外老化增加了PA的表面粗糙度、孔洞和含氧官能团的数量; 吸附过程更符合准二级动力学模型; $2.5 < \text{pH} < 6$ 时, PA的吸附能力与pH呈正相关关系, 即随着PA表面的去质子化作用增大, PA对Pb(II)的吸附能力增强; 盐度会抑制PA对Pb(II)的吸附能力, 盐度越高, 抑制作用越明显, 而老化作用缓解了盐度对PA吸附Pb(II)的抑制作用。

关键词: 聚酰胺; 微塑料; 光老化; Pb(II); 重金属吸附

中图分类号: X52 **文献标识码:** A **doi:** 10.62756/jnuc.issn.1673-3193.2024.11.0002

引用格式: 杜婉婷, 崔炜恒, 崔亚婷, 等. 老化聚酰胺吸附Pb(II)的研究[J]. 中北大学学报(自然科学版), 2025, 46(6): 793-799.

DU Wanting, CUI Weiheng, CUI Yating, et al. Study on Pb(II) adsorption by aged polyamides[J]. Journal of North University of China(Natural Science Edition), 2025, 46(6): 793-799.

Study on Pb(II) Adsorption by Aged Polyamides

DU Wanting¹, CUI Weiheng¹, CUI Yating¹, DING Qingwei^{1,2}, Liu Hongfang^{1,2}

(1. College of Environment and Resources, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, China;

2. Shanxi Ecological Functional Materials and Pollution Remediation Technology Engineering Research Center, Taiyuan 030024, China)

Abstract: In order to evaluate the effect of aging on the adsorption of heavy metals on polyamide microplastics (PA), this study characterized and analyzed PA before and after aging by SEM and XPS, and carried out kinetic experiments on the adsorption of Pb(II) by PA before and after photoaging and the effect of environmental factors on the adsorption of Pb(II) by PA. The experimental results show that photoaging increases the surface roughness, pores and oxygen-containing functional groups of PA; pseudo-second-order kinetics describes the adsorption process better; the adsorption capacity of PA is positively correlated with pH at $2.5 < \text{pH} < 6$, the adsorption capacity of PA on Pb(II) is enhanced with the increase of deprotonation on the surface of PA; the salinity would inhibit the adsorption capacity of PA on Pb(II), and the higher the salinity, the more obvious the inhibition is. Salinity inhibits the adsorption of Pb(II) by PA, and the higher the salinity, the more obvious the inhibition, and the aging effect alleviates the inhibi-

收稿日期: 2024-11-07

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(U21A20524)

作者简介: 杜婉婷(1999-), 女, 硕士生, 主要从事水污染的研究。

通信作者: 刘宏芳(1977-), 女, 教授, 博士, 主要从事土壤及地下水污染修复的研究。E-mail: liu_hf@163.com。

tion of salinity on the adsorption of Pb(II) by PA.

Key words: polyamide; microplastic; photoaging; Pb(II); heavy metal adsorption

0 引言

自20世纪50年代,塑料产品以超3%的年增长率进入到人们的日常生活中^[1]。国家统计局公布的数据显示,2023年1~11月我国塑料的累计产量为 7.4885×10^7 t,其中产生的微塑料具有比表面积大、化学性质稳定以及疏水性强等特点,可用作去除水体中重金属的吸附材料^[2-6]。目前发现的微塑料品种有聚乙烯(PE)、聚丙烯(PP)、聚苯乙烯(PS)、聚氯乙烯(PVC)、聚乙烯醇(PVA)、聚酰胺(PA)等,其中聚酰胺(PA)研究最为广泛^[7-8]。

李博昊等^[9]对聚酰胺-6微塑料(PA-6)吸附Pb(II)和Cd(II)的研究结果表明,PA-6微塑料对Pb(II)和Cd(II)均具有较强的吸附能力,且PA-6与重金属离子之间以化学吸附为主。长期暴露在环境中的微塑料,会在太阳光作用下发生老化现象,导致微塑料发生裂解、破碎、表面粗糙度增加,甚至形成更小粒径的微塑料颗粒,进而影响其对重金属的吸附行为^[10-12]。翟利芳等^[13]研究发现老化聚乙烯苦布网对Pb(II)的吸附量显著增大。Guan等^[14]研究发现,老化后聚乙烯(PE)对沉积物中Pb(II)的吸附能力增加,吸附量从 $10.153 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 增加到 $10.464 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,较老化前增加了 $0.311 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。边少晨等^[15]的聚酰胺66(PA66)微塑料老化前后吸附Cd(II)的对比实验结果表明,PA66微塑料的比表面积和C=O官能团含量会影响Cd(II)的吸附量。Tang等^[16]研究了连云港沿海养殖区的尼龙绳老化前后对Pb(II)的吸附,所得结论与边少晨等^[15]的研究结论保持一致。另外,微塑料对重金属的吸附也会受到溶液pH、盐度等环境因子的影响,例如,Chen等^[17]研究发现,盐度会抑制原始和老化聚苯乙烯(PS)对Cu(II)的吸附。

综合前人研究,本文选择聚酰胺作为吸附材料,研究紫外光老化前后聚酰胺吸附Pb(II)的动力学过程以及环境因子(pH和盐度)对聚酰胺吸附Pb(II)的影响。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

本文材料PA-6购于阿拉丁生化科技股份有限公司,粒径约为100~200目(约75~149 μm);

Pb(NO₃)₂、HNO₃、NaOH为分析纯。

将聚酰胺用5%的HNO₃、去离子水分别浸泡3次,并超声处理30 min后,放入35℃的烘箱干燥,所得实验材料记为V-PA,将其放入黑色密封袋室温保存备用。采用500 W汞灯对V-PA紫外光照射96 h,所得样品记为A-PA。

1.2 实验仪器

扫描电子显微镜(SEM)(德国ZEISS Sigma 300),X射线光电子能谱仪(XPS)(美国Thermo Scientific K-Alpha),电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-OES)(美国PerkinElmer Optima 7300V)。

1.3 实验方法

1.3.1 吸附动力学实验

Pb(II)的质量浓度为 $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,PA的用量为 $3 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$,实验pH为5.0。将装有混合液的离心管置于25℃,220 r·min⁻¹的恒温摇床中,避光振荡48 h,于10, 30, 60, 90, 120, 240, 480, 720, 1440和2880 min取样,经0.22 μm 的滤膜过滤后测定上清液中Pb(II)的质量浓度。

1.3.2 环境因子对PA吸附Pb(II)的影响实验

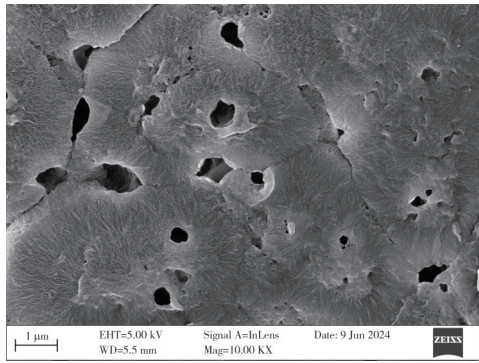
1) pH的影响。用0.1 mol·L⁻¹的HNO₃/NaOH溶液调节混合液的pH为2.5, 3.0, 4.0, 5.0和6.0,在温度为25℃,转速为220 r/min的恒温摇床上充分振荡反应,于预先设定的时间取样分析。

2) 盐度的影响。用NaCl将混合液中的盐度调节为0.05%, 0.1%, 0.25%和0.5%,相同实验条件下反应后取样分析。

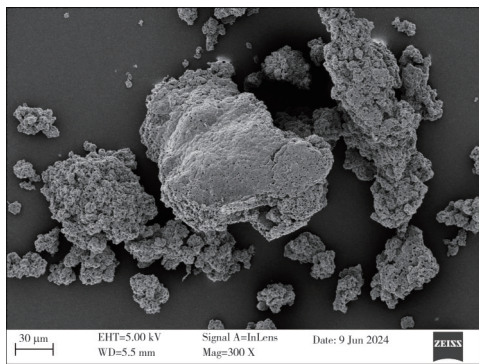
2 结果与讨论

2.1 SEM表征

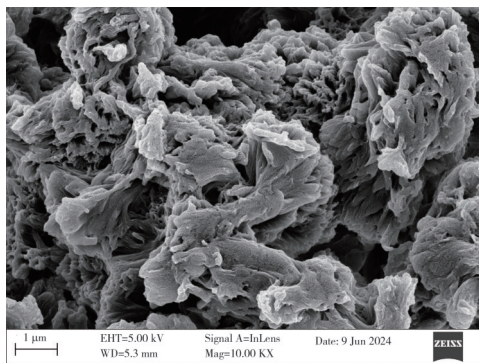
图1为PA的SEM图像。由图1(a)和图1(b)可知,V-PA为不规则的颗粒,表面比较平整,有少许的孔洞;由图1(c)和图1(d)可知,紫外老化处理后破坏了PA表面的结构,A-PA表面粗糙度、孔洞数量明显增加,部分颗粒发生了破碎,从大型团聚体上脱落,使团聚体表面呈现出了蜂窝状的孔洞结构。



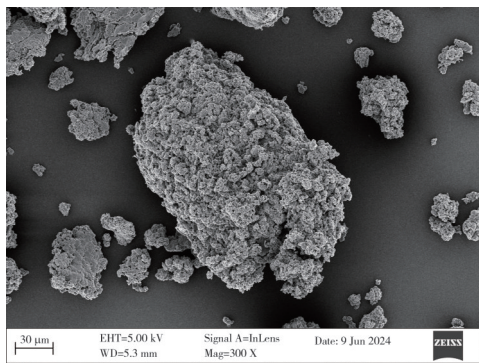
(a) V-PA(1 μm)



(b) V-PA(30 μm)



(c) A-PA(1 μm)



(d) A-PA(30 μm)

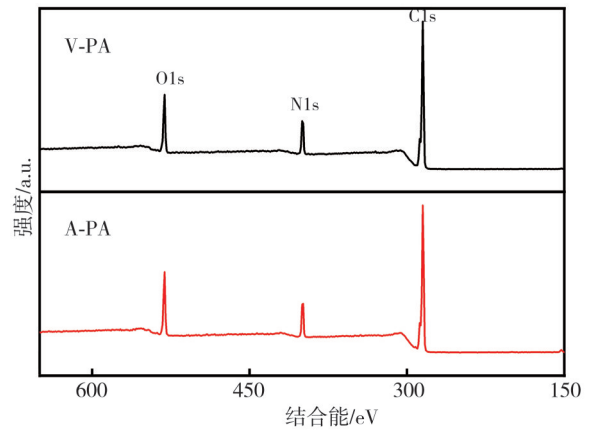
图 1 PA SEM 图

Fig. 1 SEM image of PA

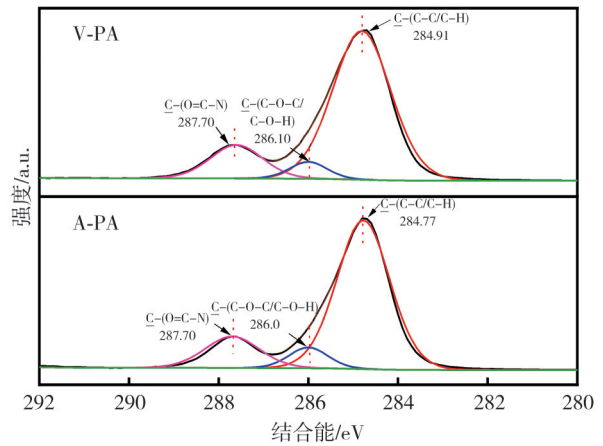
2.2 XPS 表征

图 2 为 PA 的 XPS 表征图。对比图 2(a) 全谱可

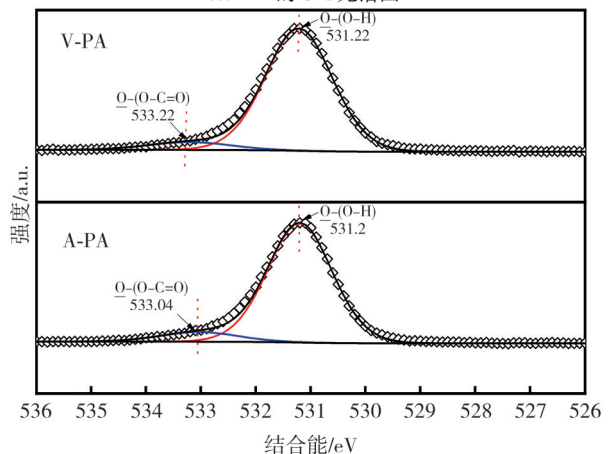
知, PA 有 3 个明显的峰 C1s、O1s 和 N1s, PA 老化后表面的 C1s 占比由 77.13% 降低至 76.52%, O1s 占比由 11.58% 增加到了 12.43%, N1s 占比由 11.30% 降低至 11.05%。



(a) PA 的 XPS 全谱图



(b) PA 的 C1s 光谱图



(c) PA 的 O1s 光谱图

图 2 PA 的 XPS 图谱

Fig. 2 XPS spectrum of PA

图 2(b) 分峰拟合结果显示, V-PA 和 A-PA 中均含有官能团: C-C/C=C (284.91 eV, 284.77 eV), C-OH/C-O-C (286.10 eV,

286.00 eV), O=C—O(287.70 eV)^[18-19], A-PA 表面的 C—C/C=C 基团占比从 78.42% 下降到 75.73%, 而 C—O 基团占比增加了 2.03%; C=O 基团占比增加了 1.53%, 这可能是由于 PA 中 C—C/C=C 经紫外线照射而断裂, 不饱和键与 O₂ 反应导致 C—O 和 C=O 占比明显增加。图 2(c) 显

示, V-PA 经紫外老化后 O—H 基团占比由 92.74% 下降到 91.15%, O=C—O 基团占比由 7.26% 增加至 8.85%, 证明了 PA 经光照老化后表面增加了羰基等含氧活性基团。表 1 显示, A-PA 的 O/C 值从 0.150 增加到了 0.162, 增加了 1.08 倍, 说明 PA 表面发生了氧化反应^[20]。

表 1 PA 表面 C1s 和 O1s 的元素峰占比和 O/C 比例

Tab. 1 Proportion of elemental peaks and O/C ratio of C1s and O1s on PA surface

PA	C1s 占比/%		O1s 占比/%			C 占比/%	O 占比/%	N 占比/%	O/C
	C—(C,H)	C—O	C=O	O—H	O—C=O				
V-PA	78.42	5.78	14.93	92.74	7.26	77.13	11.58	11.30	0.150
A-PA	75.73	7.81	16.46	91.15	8.85	76.52	12.43	11.05	0.162

2.3 PA 对 Pb(II) 吸附的动力学分析

图 3 为 PA 对 Pb(II) 吸附的准一级动力学模型和准二级动力学模型拟合结果。

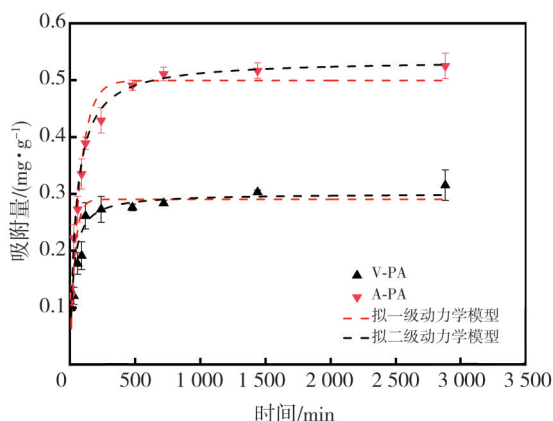


图 3 PA 吸附 Pb(II) 的吸附动力学模型

Fig. 3 Adsorption kinetics model of PA adsorption of Pb(II)

由图 3 可知, V-PA 和 A-PA 对 Pb(II) 的吸附表现出三个阶段: V-PA 和 A-PA 对 Pb(II) 吸附量均在 120 min 内迅速增加, 分别达到了 0.26 mg·g⁻¹ 和 0.389 mg·g⁻¹; 随着吸附时间的增加, 吸附效率逐渐降低, 吸附量在 480 min 左右开始趋于平缓; 720 min 之后, 趋于吸附的动态平衡。这是由于在初始快速

吸附阶段, PA 表面存在大量的吸附位点, 但随着吸附过程的进行, PA 表面的吸附位点被占据, 吸附速率逐渐降低并趋于平衡^[15]。

由图 3 可知, A-PA 和 V-PA 对 Pb(II) 的吸附量分别为 0.525 mg·g⁻¹ 和 0.315 mg·g⁻¹, 较 V-PA 增加了 0.21 mg·g⁻¹, A-PA 对 Pb(II) 的吸附量始终大于 V-PA 对 Pb(II) 的吸附量, 说明 PA 经老化处理后对 Pb(II) 的吸附能力显著增加。老化后的 q_e 升高说明了老化后增加了 PA 表面的含氧官能团, 增强了吸附位点且提高了 PA 对 Pb(II) 的吸附能力, 然而反应速率常数 k 降低说明了老化后 PA 对 Pb(II) 的吸附速率降低, 由于吸附速率与未占据的吸附位点成正比, 而老化 PA 表面的已占据的吸附位点增加, 导致了老化后 k 值降低, 这与前人^[20-21]的研究结果保持一致。

表 2 的动力学拟合参数中, $R_2^2(0.964 \sim 0.989) > R_1^2(0.913 \sim 0.948)$, 表明准二级动力学模型能更好地描述 PA 对 Pb(II) 的吸附过程, 说明吸附涉及多个吸附阶段, 可能包括表面吸附、颗粒内扩散以及在吸附位点上的化学或物理吸附等, 这一结果与 Tang 等^[16]关于老化前后尼龙绳对 Pb(II) 的吸附动力学遵循准二级动力学模型的结果相一致。

表 2 PA 吸附 Pb(II) 的动力学拟合参数

Tab. 2 Dynamics fitting parameters of PA adsorption of Pb(II)

PA	拟一级动力学模型			拟二级动力学模型		
	k_1/h^{-1}	$q_e/(mg \cdot g^{-1})$	R^2	$k_2/(mg \cdot g^{-1} \cdot h^{-1})$	$q_e/(mg \cdot g^{-1})$	R^2
V-PA	0.028	0.29	0.913	0.128	0.301	0.964
A-PA	0.013	0.50	0.948	0.041	0.536	0.989

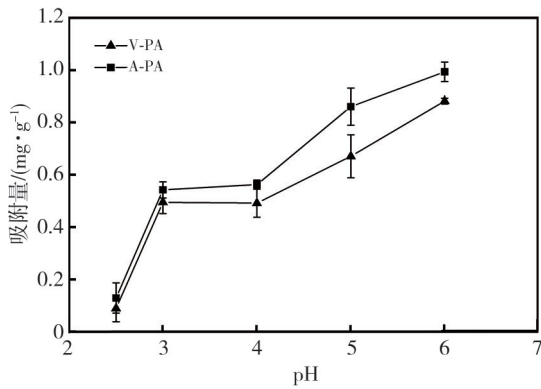
2.4 环境因子对 PA 吸附重金属的影响分析

2.4.1 pH 对 PA 吸附重金属的影响分析

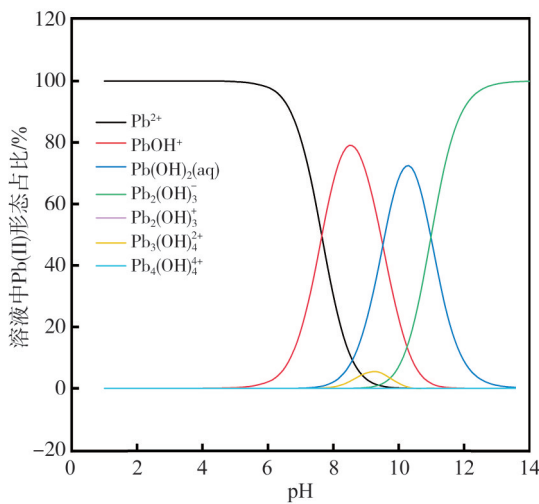
pH 对 PA 吸附 Pb(II) 的影响结果如图 4(a) 所

示。由图 4(a) 可知, PA 对 Pb(II) 的吸附量随着 pH 的增加而增加, 当 pH 值从 2.5 增加到 6.0 时, V-PA 对 Pb(II) 的吸附量从 0.088 mg·g⁻¹ 增加到了 0.881 mg·g⁻¹, 而 A-PA 对 Pb(II) 的吸附量从

0.129 mg·g⁻¹增加到了 0.993 mg·g⁻¹, 且 A-PA 始终体现出比 V-PA 更强的吸附能力。



(a) pH 对 PA 吸附 Pb(II) 的影响



(b) Pb(II) 的形态变化

图 4 不同 pH 条件下 PA 的吸附能力和溶液中 Pb(II) 的形态变化情况
Fig. 4 Adsorption capacity of PA and morphological changes of Pb(II) in solution under different pH conditions

图 4(b) 为不同 pH 条件下 Pb(II) 在溶液中的形态变化, 发现 pH 小于 5.0 时, 溶液中 Pb(II) 形态主要以 Pb²⁺ 存在, 当 pH 在 5~7 之间时, 溶液中主要的 Pb(II) 形态为 Pb(OH)⁺, 当 pH 大于 7 时, Pb²⁺ 逐渐以 Pb(OH)₂ 的形式析出。pH 为 2.5 时, 溶液因强酸条件存在大量的 H⁺ 离子, PA 表面的官能团会与 H⁺ 离子发生质子化作用, 降低了 PA 的亲水性, 从而发生团聚行为^[22], 也可能溶液中的 H⁺ 离子和 Pb(II) 发生竞争吸附行为, 占据了 PA 表面的吸附位点, 导致 PA 对 Pb(II) 的吸附量最低^[18]。随着 pH 值的增大, 溶液中的 H⁺ 离子浓度降低, PA 表面的 -COOH 等官能团发生了去质子化反应, 导致 PA 表面的电负性和吸附位点增加, 更易与 Pb(II) 发生结合, 可能是发生了静电引力和表面络合, 从而提高了吸附能力。

PA 对 Pb(II) 的吸附能力随着溶液 pH 值的增加而增强, 这与王琮杰等^[19]关于 pH 对老化后的聚乙烯(PE)和聚丙烯(PP)吸附 Cu(II) 和 Zn(II) 的吸附结果相一致。

2.4.2 盐度对 PA 吸附重金属的影响

盐度对微塑料吸附重金属的影响较为显著, 会导致微塑料发生团聚行为, 破坏溶液中的电荷平衡和改变微塑料的表面性质等, 进而影响微塑料对重金属的吸附能力。图 5 为 NaCl 对 PA 吸附 Pb(II) 的影响的实验结果。

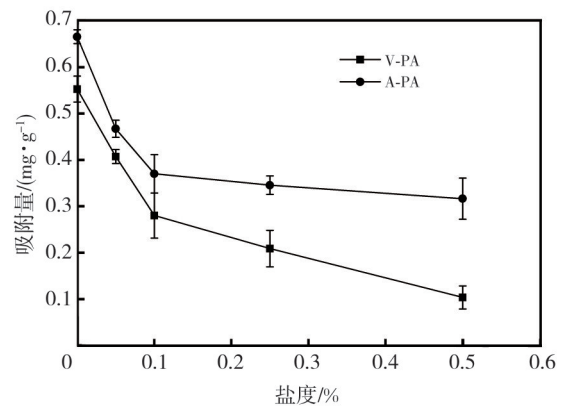


图 5 NaCl 质量浓度对 PA 吸附 Pb(II) 的影响

Fig. 5 The effect of NaCl mass concentration on PA adsorption of Pb(II)

伴随 NaCl 质量浓度的逐渐增加, V-PA 对 Pb(II) 的吸附量从 0.553 mg·g⁻¹ 降低到 0.104 mg·g⁻¹, 降低了 0.449 mg·g⁻¹, A-PA 对 Pb(II) 的吸附量从 0.67 mg·g⁻¹ 降低到 0.317 mg·g⁻¹, 降低了 0.353 mg·g⁻¹, 呈逐渐降低的趋势, 出现这一趋势的原因包括: 1) Na⁺ 的水合离子半径为 0.106 nm, 而 Pb²⁺ 的水合离子半径为 0.406 nm, PA 与 Na⁺ 具有更高的亲和力, 溶液中 Cl⁻ 也可与 Pb²⁺ 形成 PbCl⁺、PbCl₂、PbCl₃⁻ 等, 进而抑制了 Pb(II) 与 PA 发生络合, 从而降低了对 Pb(II) 的吸附能力^[22-23]; 2) 根据 Derjaguin-Landau-Verwey-Overbeek 理论, 溶液中离子强度(IS)的增加, PA 表面周围的双电层被压缩变薄, 抑制了 PA 表面的静电排斥力, 从而使微塑料发生了团聚行为, 导致 PA 表面的吸附位点减少, 降低了对 Pb(II) 的吸附能力^[24-25]。盐度对微塑料吸附 Pb(II) 的抑制作用为 V-PA > A-PA, 原因可能是老化增加了 PA 表面的含氧官能团和吸附位点, 从而缓解了盐度对 A-PA 吸附 Pb(II) 的抑制作用, 这与 Huang 等^[26]关于盐度对老化前后聚乳酸(PLA)和聚苯乙烯(PS)对 Pb(II) 吸附的结果相一致。

3 结 论

1) 紫外老化后 PA 的表面粗糙度及孔洞明显增加。XPS 表征发现, C=C/C-C 断裂, C-O、C=O 基团占比分别增加了 2.03% 和 1.53%, O/C 值从 0.150 增加到了 0.162, 说明了 PA 老化过程中发生了氧化反应。

2) 老化后 PA 对 Pb(II) 的吸附量由 $0.315 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 增加到 $0.525 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$, PA 经老化处理后对 Pb(II) 的吸附能力显著增强, 通过模型拟合发现, PA 对 Pb(II) 的吸附过程符合准二级动力学模型。

3) $2.5 < \text{pH} < 6$ 时, pH 与 PA 的吸附能力呈正相关关系, 即随着 PA 表面的去质子化作用增大, PA 对 Pb(II) 的吸附能力增强。

4) 盐度会抑制 PA 对 Pb(II) 的吸附能力, 盐度越高, 抑制作用越明显, 且老化作用缓解了盐度对 PA 吸附 Pb(II) 的抑制作用。

参考文献:

[1] 周世跃, 白梅, 丁帅, 等. 环境中微塑料的污染现状及潜在生物效应研究进展[J]. 再生资源与循环经济, 2023, 16(1): 12-15.
ZHOU Shiyue, BAI Mei, DING Shuai, et al. Study on pollution status and potential biological effect of microplastics in environment[J]. Recyclable Resources and Circular Economy, 2023, 16(1): 12-15. (in Chinese)

[2] 2023 年第 1 季度我国塑料制品产量分析[J]. 聚氯乙烯, 2023, 51(5): 47.

[3] GEYER R, JAMBECK J, LAW K L. Production, use, and fate of all plastics ever made[J]. Science Advances, 2017, 3(7): e1700782.

[4] WANG L L, GUO C X, QIAN Q Q, et al. Adsorption behavior of UV aged microplastics on the heavy metals Pb(II) and Cu(II) in aqueous solutions[J]. Chemosphere, 2023, 313: 137439.

[5] 顾馨悦, 徐修媛, 咸泽禹, 等. 老化聚氯乙烯微塑料与镉对小麦的联合毒性[J]. 环境化学, 2021, 40(9): 2633-2639.
GU Xinyue, XU Xiuyuan, XIAN Zeyu, et al. Joint toxicity of aged polyvinyl chloride microplastics and cadmium to the wheat plant[J]. Environmental Chemistry, 2021, 40(9): 2633-2639. (in Chinese)

[6] WANG C, LIU X, MA Q, et al. Distribution and effects of microplastics as carriers of heavy metals in river surface sediments[J]. Journal of Contaminant

Hydrology, 2024, 266: 104396.

[7] ZHU G Q, YUE K, NI X Y, et al. The types of microplastics, heavy metals, and adsorption environments control the microplastic adsorption capacity of heavy metals. [J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2023, 30(33): 80807-80816.

[8] TANG S, LIN L, WANG X, et al. Interfacial interactions between collected nylon microplastics and three divalent metal ions (Cu(II), Ni(II), Zn(II)) in aqueous solutions [J]. Journal of Hazardous Materials, 2021, 403: 123548.

[9] 李博昊, 赵永豪, 孙洪杰, 等. 常见微塑料对水中镉离子和铅离子的吸附: 吸附能力和吸附机制[J]. 生态毒理学报, 2023, 18(2): 356-365.
LI Bohao, ZHAO Yonghao, SUN Hongjie, et al. Adsorption of typical microplastics towards Cd^{2+} and Pb^{2+} in water: Adsorption capacity and mechanism [J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2023, 18(2): 356-365. (in Chinese)

[10] XU L, LI H X, HAN L H, et al. Research progress on the adsorption and desorption of typical pollutants on microplastics[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2021, 29(6): 961-969.

[11] LI Y, ZHANG Y, SU F, et al. Adsorption behaviour of microplastics on the heavy metal Cr(VI) before and after ageing[J]. Chemosphere, 2022, 302: 134865.

[12] 张芷晗, 刘研萍, 郭荣欣, 等. 微塑料对重金属 Cr(VI) 和 Pb(II) 的吸附特征研究[J]. 应用化工, 2024, 53(2): 262-267.
ZHANG Zhihan, LIU Yanping, GUO Rongxin, et al. Characterization of the sorption of heavy metals Cr(VI) and Pb(II) by microplastics [J]. Applied Chemical Industry, 2024, 53(2): 262-267. (in Chinese)

[13] 翟利芳, 王平, 卢媛, 等. 自然老化微塑料对重金属 Cu(II)、Pb(II)、Cr(III) 的吸附综合性实验设计[J]. 实验技术与管理, 2023, 40(2): 26-31.
ZHAI Lifang, WANG Ping, LU Yuan, et al. Comprehensive experimental design of adsorption of heavy metals Cu(II), Pb(II) and Cr(III) onto naturally aged microplastics [J]. Experimental Technology and Management, 2023, 40(2): 26-31. (in Chinese)

[14] GUAN Y, GONG J L, SONG B, et al. The effect of UV exposure on conventional and degradable microplastics adsorption for Pb(III) in sediment[J]. Chemosphere, 2022, 286: 131777.

[15] 边少晨, 周伊玮, 陈勇民, 等. 老化微塑料对重金属镉的吸附特征[J]. 浙江科技学院学报, 2024, 36(3):

- 271-280.
- BIAN Shaochen, ZHOU Yiwei, CHEN Yongmin, et al. Adsorption characteristics of aging microplastics for heavy metal cadmium[J]. *Journal of Zhejiang University of Science and Technology*, 2024, 36(3): 271-280. (in Chinese)
- [16] TANG S, LIN L, WANG X, et al. Pb(II) uptake onto nylon microplastics: Interaction mechanism and adsorption performance [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2020, 386: 121960.
- [17] CHEN C, WEI F, YE L, et al. Adsorption of Cu^{2+} by UV aged polystyrene in aqueous solution [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2022, 232: 113292.
- [18] LI Y, ZHANG Y, SU F, et al. Adsorption behaviour of microplastics on the heavy metal Cr(VI) before and after ageing[J]. *Chemosphere*, 2022, 302: 134865.
- [19] 王琼杰, 张勇, 张阳阳, 等. 老化微塑料对水体中重金属铜和锌的吸附行为研究[J]. *环境科学学报*, 2021, 41(7): 2712-2726.
- WANG Qiongjie, ZHANG Yong, ZHANG Yangyang, et al. Adsorption of heavy metal ions Cu^{2+} and Zn^{2+} onto UV-aged microplastics in aquatic system [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2021, 41(7): 2712-2726. (in Chinese)
- [20] 刘文娟, 郭玉峰, 邓文博. 光老化对不同粒径聚苯乙烯微塑料吸附 Cu(II) 的影响[J]. *环境科学*, 2024, 45(6): 3708-3715.
- LIU Wenjuan, GUO Yufeng, DENG Wenbo. Effect of photoaging on adsorption of Cu(II) by polystyrene microplastics with different particle sizes[J]. *Environmental Science*, 2024, 45(6): 3708-3715. (in Chinese)
- [21] 范秀磊, 常卓恒, 邹晔锋, 等. 可降解微塑料对铜和锌离子的吸附解吸特性[J]. *中国环境科学*, 2021, 41(5): 2141-2150.
- FAN Xiulei, CHANG Zhuoheng, ZOU Yefeng, et al. Adsorption and desorption properties of degradable microplastic for Cu^{2+} and Zn^{2+} [J]. *China Environmental Science*, 2021, 41(5): 2141-2150. (in Chinese)
- [22] 叶宇航, 周润东, 于雪, 等. 水环境中微塑料对重金属的吸附及其影响因素[J]. *环境化学*, 2023, 42(3): 822-831.
- YE Yuhang, ZHOU Rundong, YU Xue, et al. Review on the adsorption of heavy metals with microplastics in water environment and its influencing factors [J]. *Environmental Chemistry*, 2023, 42(3): 822-831. (in Chinese)
- [23] 雷诗涵, 时晓雨, 陈珂怡, 等. 不可降解微塑料对重金属环境行为的影响研究进展[J]. *化学与生物工程*, 2024, 41(4): 9-17.
- LEI Shihan, SHI Xiaoyu, CHEN Keyi, et al. Research progress in effect of non-degradable microplastics on environmental behavior of heavy metals[J]. *Chemistry & Bioengineering*, 2024, 41(4): 9-17. (in Chinese)
- [24] 赵伟高, 田一梅, 赵鹏, 等. 淡水环境中微塑料与重金属的“木马效应”研究进展[J]. *环境科学*, 2023, 44(3): 1244-1257.
- ZHAO Weigao, TIAN Yimei, ZHAO Peng, et al. Research progress on trojan-horse effect of microplastics and heavy metals in freshwater environment [J]. *Environmental Science*, 2023, 44(3): 1244-1257. (in Chinese)
- [25] ALIMI O S, FARNER BUDARZ J, HERNANDEZ L M, et al. Microplastics and nanoplastics in aquatic environments: Aggregation, deposition, and enhanced contaminant transport [J]. *Environmental Science & Technology*, 2018, 52(4): 1704-1724.
- [26] HUANG W, DENG J, LIANG J, et al. Comparison of lead adsorption on the aged conventional microplastics, biodegradable microplastics and environmentally-relevant tire wear particles [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2023, 460: 141838.