

文章编号:2095-7386(2024)01-0034-07

DOI:10.3969/j.issn.2095-7386.2024.01.005

# 聚酰胺微塑料吸附水环境中对氯间二甲苯酚 和卡马西平的行为研究

姜清荣,高梦婕,蔡园,王梦瑶,肖耀东,薛婷丹,胡纯  
(武汉轻工大学 化学与环境工程学院,武汉 430023)

**摘要:**为了评估微塑料对有机污染物的载体效应,以聚酰胺(PA)微塑料为研究对象,考察其在水环境中对对氯间二甲苯酚(PCMX)和卡马西平(CBZ)的吸附行为。结果表明:准二级动力学模型和 Freundlich 模型对 PA 微塑料的吸附过程具有更好的拟合效果,说明整个吸附过程是非均匀表面多层吸附,同时涉及颗粒内扩散、疏水分配作用多阶段共同作用;不同的 pH 值和盐度会影响静电作用或离子交换程度,使吸附效率发生改变。该研究可为微塑料作为载体迁移有机物污染物提供理论依据。

**关键词:**微塑料;氯间二甲苯酚;卡马西平;吸附

中图分类号:X 131.2

文献标识码:A

## Study on the adsorption behavior of p-chloro-m-xyleneol and carbamazepine in water environment by polyamide microplastics

JIANG Qingrong,GAO Mengjie,CAI Yuan,WANG Mengyao,XIAO Yaodong,XUE Tingdan,HU Chun  
(School of Chemical and Environmental Engineering, Wuhan Polytechnic University, Wuhan 430023, China)

**Abstract:**In order to evaluate the carrier effect of microplastics on organic pollutants,the adsorption behavior of p-chloro-m-xyleneol (PCMX) and carbamazepine (CBZ) on polyamide (PA) microplastics in water environment was investigated. The results show that the adsorption process of PA microplastics was accurately completed by the Freundlich and pseudo-second-order kinetic theories,indicating that the whole adsorption process is a multi-layer adsorption of heterogeneous surface dominated by chemical adsorption,and involves the multi-stage interaction of intra-particle diffusion and hydrophobic distribution. Different pH and salinity will affect the degree of electrostatic interaction or ion exchange,which will change the adsorption efficiency. This study can provide a theoretical basis for microplastics as carriers to migrate organic pollutants.

**Key words:**microplastics;para-chloro-meta-xyleneol;carbamazepine;adsorption

收稿日期:2023-11-08.

作者简介:姜清荣(1996—),男,硕士研究生,E-mail:1362287088@qq.com.

通信作者:胡纯(1980—),男,博士,副教授,硕士研究生导师,E-mail:huchun1980@126.com.

## 0 引言

微塑料广泛分布于生态环境中,会随着生态系统的迁移转化对人类健康造成影响<sup>[1,2]</sup>。水环境中所含的微塑料可以为溶解于水中的有机污染物提供吸附位点,成为其远距离迁移的载体<sup>[3-7]</sup>,而有机物聚集在微塑料上后可能会进一步加剧对水生环境的潜在风险。有研究表明,生态环境中不同类型的微塑料对药品和个人护理用品(PPCPs)、多氯联苯(PCBs)、多环芳烃(PAHs)、多溴联苯醚(PBDEs)、内分泌干扰物(EDCs)等有机污染物存在显著的吸附作用<sup>[8-12]</sup>,其吸附能力受到微塑料和有机物自身理化性质、溶液 pH、盐度、温度等各种因素的影响<sup>[13-17]</sup>。

PCMX 是一种典型的酚类化合物,是市场上销售的消毒剂中最常用的有效成分之一。目前,洗手液和家用清洁剂等产品含有 PCMX 的浓度分别为 0.05%(w/v)和 4.8%(w/v)。而在过去疫情防控期,随着人们对消毒剂需求量增加的同时,水环境中 PCMX 的含量也在逐年增加。虽然 PCMX 通常被认为对人类无毒,但它可能对水生内脊椎动物表现出毒性<sup>[18]</sup>。例如,水环境中 PCMX 的浓度达 4  $\mu\text{g/L}$  时,会造成淡水鱼的孵化率的降低和增加其身体弯曲的程度,过高的浓度会进一步地加剧诱导诱变、遗传毒性和组织病理学效应的风险<sup>[19-21]</sup>。CBZ 通常被称为抗癫痫和抗惊厥药,在欧洲和北美的污水处理厂所流出物中经常被检测到<sup>[22]</sup>。有研究表明,CBZ 不易自然降解,进入自然水环境后,对绿藻、甲壳类、刺胞动物和水螅等水生植物和生物具有高毒性<sup>[23,24]</sup>。

阐明微塑料对有机物的吸附行为,是揭示复合污染水环境中两者环境行为和潜在风险的前提。因此,本研究结合微塑料的表征,探讨水环境中常被检测到的 PA 微塑料对 PCMX 和 CBZ 的吸附行为,进一步分析影响吸附行为的环境因素,本研究旨在为微塑料作为载体迁移有机物污染物提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与试剂

HCl、NaOH、PCMX 和 CBZ 购自国药集团化学试剂有限公司。PCMX 和 CBZ 用超纯水溶解,制备成浓度为 20 mg/L 储备液,并于避光条件下储存;PA(200 目)微塑料购自中诚塑化有限公司。将

微塑料先经过 36 h 的超纯水浸泡,再加入 5% HCl 浸泡 48 h,搅拌均匀,使其充分接触,最后进行清洗烘干备用。

### 1.2 微塑料表征

使用扫描电子显微镜(SEM, ZEISS Gemini300, Germany)对 PA 微塑料的形态结构进行详细观察;采用全自动比表面及孔隙度分析仪(BET, Micromeritics ASAP2460, America)来测定比表面积以及孔径尺寸。

### 1.3 吸附动力学实验

称量 0.100 g PA 微塑料放入棕色小瓶中,分别加入 100 mL 初试浓度为 5 mg/L 的 PCMX 和 CBZ 溶液,而后在恒温振荡器中以 200 r/min、25  $^{\circ}\text{C}$  进行恒温振荡,分别在第 0.1、0.15、0.5、1、2、4、8、12、24、36、48 h 进行采集测样。实验设置 3 个平行样,并进行空白和对照试验,以此来扣除试验造成的误差。

### 1.4 吸附等温线实验

称量称取 0.100 g PA 微塑料放入棕色小瓶中,分别加入 20 mL 初试浓度为 1、3、5、8、10、15、20 mg/L 的 PCMX 和 CBZ 溶液。而后在台式恒温振荡器中以 200 r/min、25  $^{\circ}\text{C}$  进行恒温振荡 24 h 后采集测样。实验设置 3 个平行样,并进行空白和对照试验。

### 1.5 环境影响因素实验

为了研究 pH 和盐度对 PA 微塑料吸附 PCMX 和 CBZ 的影响。将储备液稀释定容前,使用 0.1 mol/L NaOH 或 HCl 溶液将初始 pH 值分别调节到 3.0、5.0、7.0、9.0、11.0;通过添加不同质量的 NaCl,制备了一组 NaCl 溶液(0%, 0.5%, 1.5%, 2.0%, 2.5%, 3.0%, 3.5%)。实验条件与动力学试验一致。

### 1.6 PCMX 和 CBZ 的检测

采用紫外吸收光谱法测量 PCMX 和 CBZ 的浓度。将各时间段的样液经离心后,取出上清液经 0.22  $\mu\text{m}$  的针筒过滤器注入 10 mm 石英比色皿中,使用紫外/可见分光光度计(UV2100, LabTech, China)分别于 220 nm、282 nm 吸收波长测量 PCMX 和 CBZ 的吸光度。进而根据标准曲线计算出相应的浓度。

### 1.7 数据处理

使用 Excel 2019 进行吸附动力学和等温吸附线实验数据处理;使用 Origin 2021 对所处理的数据进行图形绘制并拟合曲线参数。

分别使用准一级动力学模型、准二级动力学模型、颗粒内扩散模型对吸附动力学过程进行分析,模型函数分别为式(1)~(3)。

$$Q_t = Q_e (1 - e^{-k_1 t}) \quad (1)$$

$$Q_t = \frac{k_2 t Q_e^2}{1 + k_2 t Q_e} \quad (2)$$

$$Q_t = k_{id} t^{1/2} + C_i \quad (3)$$

其中, $Q_t$  和  $Q_e$  分别为  $t$  时刻和吸附平衡时 PA 微塑料对 PCMX 和 CBZ 的吸附量(mg/g); $t$  为吸附时间(h); $k_1$ 、 $k_2$  和  $k_{id}$  分别为准一级动力学、准二级动力学和内扩散模型的速率常数; $C_i$  为颗粒内扩散常数<sup>[25]</sup>。

分别使用 Linear 模型、Langmuir 模型和 Freundlich 模型对等温吸附过程进行分析,模型函数分别为式(4)~(6)

$$Q_e = k_d C_e \quad (4)$$

$$Q_e = \frac{k_L Q_m C_e}{1 + k_L C_e} \quad (5)$$

$$Q_e = k_F C_e^n \quad (6)$$

其中, $Q_m$  和  $Q_e$  分别为 PA 微塑料对 PCMX 及 CBZ 吸附体系中的最大吸附量(mg/g)和平衡吸附量(mg/g); $C_e$  为吸附平衡的浓度(mg/L); $k_d$ 、 $k_L$  和  $k_F$  分别为 linear、Langmuir 和 Freundlich 模型的常数项, $n$  为 Freundlich 指数<sup>[25]</sup>。

## 2 结果与讨论

### 2.1 PA 的形貌与表征

图 1 显示了两种不同放大倍数的 SEM 图像。可以观察到 PA 微塑料为不规则颗粒,表面呈现出一些褶皱、沟壑等,这些不规则的结构可能为 PA 微塑料吸附有机污染物提供了吸附的位点。PA 所测定 BET 数据见表 1。由表 1 可得,比表面积为 0.495 4 m<sup>2</sup>/g,PA 的平均孔径及孔隙体积分别为 7.787 1 nm 和 0.000 965 cm<sup>3</sup>/g,这与 SEM 所观察的结果相符合。

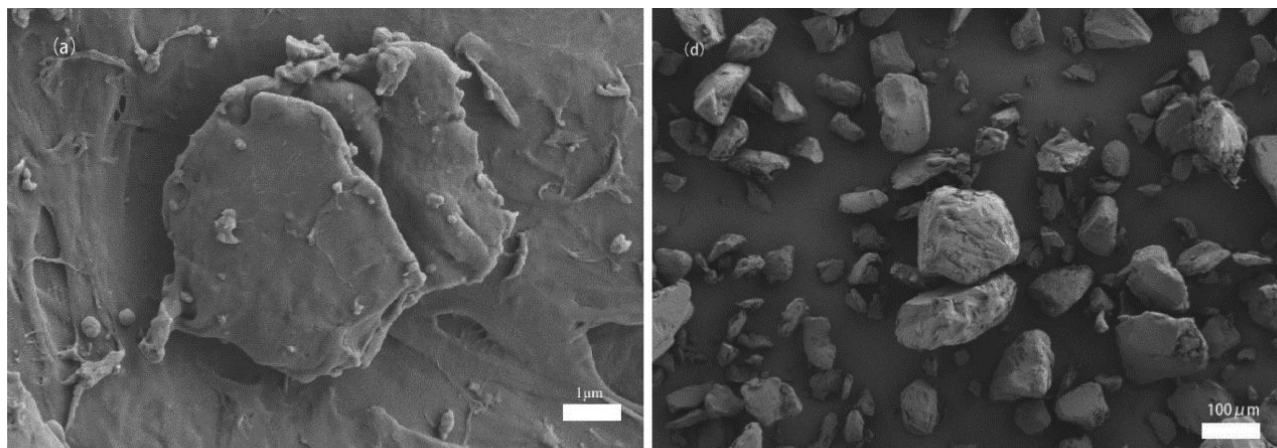


图 1 PA 扫描电镜图

Fig. 1 SEM micrographs of PA

表 1 PA 微塑料的比表面积及孔结构

Table 1 Specific surface area and pore structure of PA

| 微塑料 | 平均粒径/μm | 比表面积/m <sup>2</sup> · g <sup>-1</sup> | 平均孔径/nm | 孔隙体积/cm <sup>3</sup> · g <sup>-1</sup> |
|-----|---------|---------------------------------------|---------|----------------------------------------|
| PA  | 75      | 0.495 4                               | 7.787 1 | 0.000 965                              |

### 2.2 吸附动力学

PCMX 和 CBZ 在 PA 上的吸附动力过程如图 2 所示。PA 对 PCMX 的吸附在反应开始的 3 h 内进入快速阶段,该阶段主要吸附特征是滤液中消毒剂含量快速下降。这是由于 PA 微塑料表面具有较多的吸附位点。紧接着伴随而来的是慢速的吸附阶段,吸附 5 h 后即将达到平衡状态;与 PCMX 相类

似的 CBZ 其吸附过程也分为 2 个阶段,其中 0~2 h 为吸附快速阶段,微塑料表面上吸附位点与 CBZ 快速地相结合。2~8 h 为缓慢吸附阶段,吸附速率较上一阶段有所下降。最终在 8 h 后达到吸附平衡。

动力学模型拟合图形及参数结果分别见图 2(a)和表 2。由表 2 的  $R^2$  和  $Q_e$  数值可得准二级动力学模型更适合描述 PA 微塑料对 PCMX 和 CBZ 的吸

附动力学过程。换言之,吸附过程主要是由吸附位点上的化学吸附为主导,同时涉及颗粒内扩散或疏水分配作用等多个阶段<sup>[26]</sup>。

PA 对 PCMX 和 CBZ 的吸附颗粒内扩散模型拟合结果见图 2(b),拟合参数结果如表 2 所示。通

过分析,内扩散模型分为 2 个阶段,说明 PCMX 和 CBZ 的吸附过程涉及多个阶段。在第一阶段中,拟合参数  $R^2$  的数值揭示了 PA 微塑料对 PCMX 和 CBZ 的吸附过程涉及颗粒内扩散作用<sup>[27]</sup>。

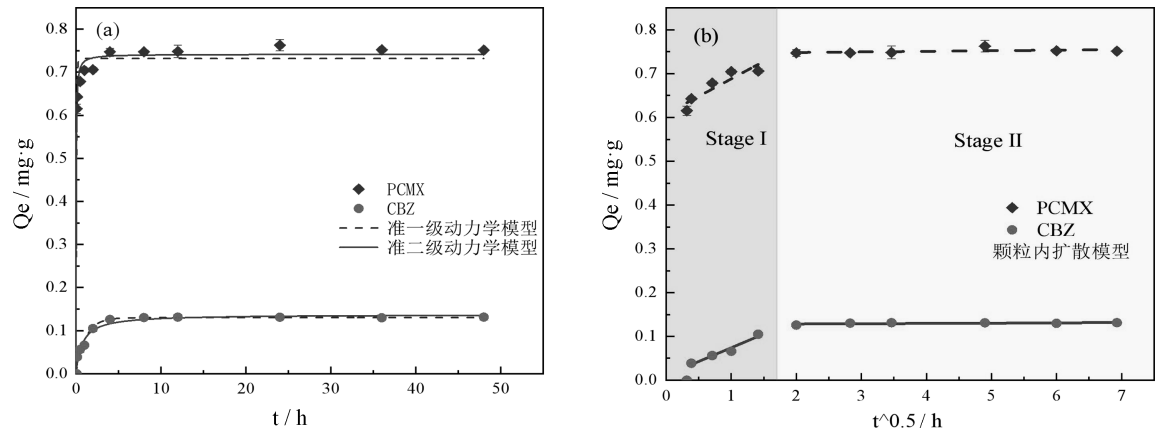


图 2 PA 对 PCMX 和 CBZ 的吸附动力学模型和颗粒内扩散模型拟合

Fig. 2 The adsorption kinetics models and intra-particle diffusion models of PA for PCMX and CBZ

表 2 吸附动力学拟合参数结果

Table 2 Parameters of adsorption kinetic

| 有机物  | 准一级动力学模型 |        |       | 准二级动力学模型 |        |       | 颗粒内扩散模型 |          |       |
|------|----------|--------|-------|----------|--------|-------|---------|----------|-------|
|      | $Q_e$    | $k_1$  | $R^2$ | $Q_e$    | $k_2$  | $R^2$ | $C_i$   | $k_{id}$ | $R^2$ |
| PCMX | 0.732    | 16.802 | 0.982 | 0.742    | 58.250 | 0.993 | 0.608   | 0.080    | 0.836 |
|      |          |        |       |          |        |       | 0.745   | 0.001    | 0.204 |
| CBZ  | 0.128    | 9.820  | 0.969 | 0.130    | 0.882  | 0.970 | 0.012   | 0.063    | 0.939 |
|      |          |        |       |          |        |       | 0.127   | 0.001    | 0.168 |

2.3 吸附等温线

吸附等温线模型拟合图形和参数结果分别见图 3 及表 3,其中 linear、Langmuir 和 Freundlich 模型所对应的  $R^2$  值分别为 PCMX:0.981、0.962、0.999; CBZ:0.969、0.914、0.996,这意味着 3 种模型都能很好地解释 PA 微塑料对 PCMX 和 CBZ 的吸附特点。然而在非线性模型中,Freundlich 模型的  $R^2$  (PCMX=0.999,CBZ=0.996)高于 Langmuir 模型的  $R^2$  (PCMX=0.981,CBZ=0.969),这意味着吸附过程为非均匀表面的多层吸附<sup>[25,29-31]</sup>。而 Linear 模型的拟合参数  $R^2$  ( $>0.96$ )意味着在 PA 微塑料的吸附过程中存在疏水分配作用。

2.4 环境影响因素

2.4.1 pH 值的影响

当环境中的 pH 值与微塑料的零电荷点一致时,微塑料呈电中性;当环境中的 pH 值小于其零电荷点时,微塑料带正电;当环境中的 pH 值大于其零

电荷点时,微塑料带负电<sup>[32,33]</sup>。pH 值对 PA 吸附 PCMX 和 CBZ 的影响见图 4(a),PA 微塑料对两者的吸附作用随 pH 变化,呈现出先降低后增加,又而后降低的一个趋势。当 pH 等于 7 时,PCMX 和 CBZ 的  $Q_e$  达到最大值(分别为 0.753 mg/g、0.160 mg/g)。其原因可能是 pH 影响了 PA 微塑料的表面电荷,造成两者之间的静电作用发生改变,从而影响吸附能力<sup>[26,34]</sup>。

有研究表明 pH 值不会影响 CBZ 的性质,而会影响吸附剂的性质<sup>[32]</sup>。而 PCMX 由于具有羟基官能团,其表面带有负电荷。当微塑料处于酸性条件下,微塑料对 PCMX 和 CBZ 的吸附作用较差;当 pH 在 5~9 时,微塑料表面正电荷变多,由于异种电荷相吸的作用,吸附效果得到提高;当 pH 继续升高时,微塑料表面由正电荷向负电荷转变,进而产生静电斥力,因而 PA 微塑料对 PCMX 和 CBZ 吸附效率较之前有所降低<sup>[32]</sup>。

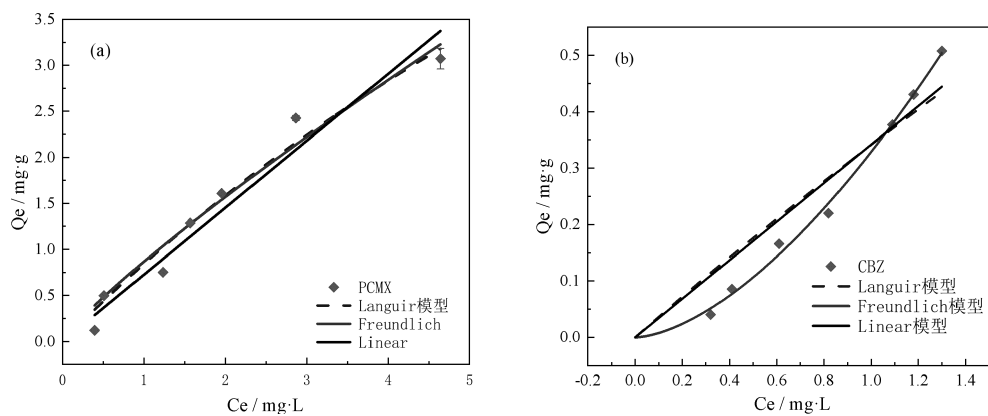


图 3 PA 对 PCMX 和 CBZ 的吸附等温曲线拟合

Fig. 3 Adsorption isotherm curve fitting of PCMX and CBZ by PA

表 3 吸附等温模型拟合参数结果

Table 3 Fitting parameters of adsorption isothermal model

| 有机物  | Linear 模型 |       | Langmuir 模型 |       |       | Freundlich 模型 |       |       |
|------|-----------|-------|-------------|-------|-------|---------------|-------|-------|
|      | $k_d$     | $R^2$ | $Q_m$       | $k_L$ | $R^2$ | $k_F$         | $n$   | $R^2$ |
| PCMX | 0.727     | 0.981 | 13.318      | 0.068 | 0.962 | 0.868         | 1.169 | 0.999 |
| CBZ  | 0.342     | 0.969 | 5.207       | 0.070 | 0.914 | 0.329         | 0.614 | 0.996 |

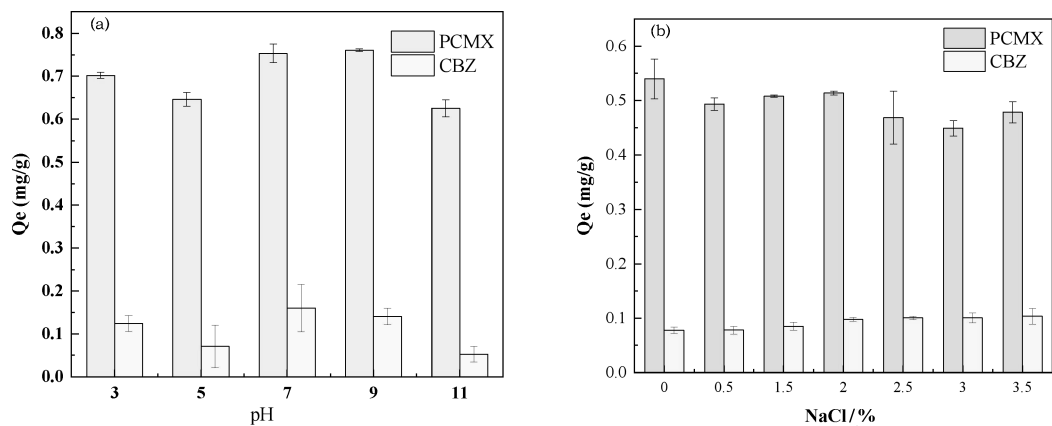


图 4 pH、离子强度对 PA 吸附 PCMX 和 CBZ 的影响

Fig. 4 Effect of pH and ionic strength on adsorption of PCMX and CBZ by PA

2.4.2 盐度的影响

盐度能改变吸附过程的离子交换程度和静电作用从而改变吸附效率。盐度对 PA 吸附 PCMX 和 CBZ 的影响结果如图 4(b)所示,当 NaCl 的含量分别为 0%、3.5%时,PCMX 和 CBZ 的  $Q_e$  达到最大值,分别为 0.540 mg/g、0.103 mg/g。这可能是由于盐度的增加使得更多的  $Na^+$  被吸附在带负电荷的微塑料表面,导致微塑料表面的吸附位点减少,从而影响了微塑料对 PCMX 的吸附作用<sup>[35]</sup>。而随着  $Na^+$  浓度的增加,PA 微塑料对 CBZ 的吸附量逐渐上升,这种现象可以解释为离子浓度的增加,降低了 CBZ 的溶解度,促进了 PA 微塑料 CBZ 的吸附<sup>[36]</sup>。

3 结论

(1)通过 SEM 和 BET 的结果,可以观察到 PA 微塑料为不规则颗粒,表面呈现出一些褶皱、沟壑等,这些不规则的结构可能为 PA 微塑料吸附有机污染物提供了吸附的位点。

(2)PCMX 的吸附能力强于 CBZ,准二级动力学模型更适合描述 PA 微塑料的吸附动力学过程,同时吸附过程涉及颗粒内散阶段。Freundlich 模型能够更好地描述等温吸附过程,Linear 模型的高拟合度意味着存在疏水分配作用。因此,整个吸附过程为非均匀表面的多层吸附,主要以吸附位点的化

学吸附为主导,同时涉及颗粒内扩散、疏水分配作用多阶段共同作用。

(3)不同的 pH 值会对 PA 微塑料的表面电荷产生影响,使 PA 微塑料与 PCMX 和 CBZ 两种有机污染物之间的静电作用发生改变,进而影响吸附能力。当 pH 等于 7 时,PCMX 和 CBZ 的  $Q_e$  达到最大值,分别为 0.753 mg/g、0.160 mg/g;而盐度能改变吸附过程中的离子交换程度和静电作用从而改变吸附效率,当 NaCl 的含量分别为 0%、3.5%时,PCMX 和 CBZ 的  $Q_e$  达到最大值,分别为 0.540 mg/g、0.103 mg/g。

#### 参考文献:

- [1] 陈璇,章家恩,危晖.环境微塑料的迁移转化及生态毒理学研究进展[J].生态毒理学报,2021,16(6):70-86.
- [2] Pleiter M G, Pedrouzo-Rodríguez A, Verdú I, et al. Microplastics as vectors of the antibiotics azithromycin and clarithromycin: Effects towards freshwater microalgae[J]. Chemosphere, 2020, 268(7):128824.
- [3] Mato Y, Isobe T, Takada H, et al. Plastic resin pellets as a transport medium for toxic chemicals in the marine environment[J]. Environmental science & technology, 2001, 35(2):318-324.
- [4] Teuten E L, Rowland S J, Galloway T S, et al. Potential for plastics to transport hydrophobic contaminants[J]. Environmental science & technology, 2007, 41(22):7759-7764.
- [5] Atugoda T, Wijesekara H, Werellagama D R I B, et al. Adsorptive interaction of antibiotic ciprofloxacin on polyethylene microplastics: Implications for vector transport in water[J]. Environmental Technology & Innovation, 2020, 19:100971.
- [6] Elizalde-Velazquez A, Subbiah S, Anderson T A, et al. Sorption of three common nonsteroidal anti-inflammatory drugs (NSAIDs) to microplastics[J]. The Science of the Total Environment, 2020, 715(5):136974. 1-136974. 9.
- [7] Li H, Wang F, Li J, et al. Adsorption of three pesticides on polyethylene microplastics in aqueous solutions: Kinetics, isotherms, thermodynamics, and molecular dynamics simulation[J]. Chemosphere, 2021, 264(2):128556.
- [8] Li J, Zhang K, Zhang H. Adsorption of antibiotics on microplastics[J]. Environmental Pollution, 2018, 237:460-467.
- [9] Rambabu U, Balaram V, Ratheesh R, et al. Assessment of Hazardous Substances in Electrical Cables: Implementation of RoHS Regulations in India[J]. Journal of Testing and Evaluation, 2018, 46(5):1930-1941.
- [10] Rochman C M, Hoh E, Kurobe T, et al. Ingested plastic transfers hazardous chemicals to fish and induces hepatic stress[J]. Scientific Reports, 2013, 3(1):3263.
- [11] Wang Z, Chen M, Zhang L, et al. Sorption behaviors of phenanthrene on the microplastics identified in a mariculture farm in Xiangshan Bay, southeastern China[J]. Science of the Total Environment, 2018, 628:1617-1626.
- [12] 李明媛,陈启晴,刘学敏,等.微塑料吸附有机污染物的研究进展[J].环境化学,2022,41(4):1101-1113
- [13] Bakir A, Rowland S J, Thompson R C. Enhanced desorption of persistent organic pollutants from microplastics under simulated physiological conditions[J]. Environmental Pollution, 2014, 185(2):16-23.
- [14] Guo X, Pang J, Chen S, et al. Sorption properties of tylosin on four different microplastics[J]. Chemosphere, 2018, 209:240-245.
- [15] Hale S E, Cornelissen G, Arp H P H. Comment on "Partition Coefficients of Organic Contaminants with Carbohydrates"[J]. Environmental Science & Technology, 2011, 45(3):1158-1158.
- [16] Wang F, Shih K M, Li X Y. The partition behavior of perfluorooctanesulfonate (PFOS) and perfluorooctanesulfonamide (FOSA) on microplastics[J]. Chemosphere, 2015, 119:841-847.
- [17] Wang J, Liu X, Liu G, et al. Size effect of polystyrene microplastics on sorption of phenanthrene and nitrobenzene[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2019, 173:331-338.
- [18] Yost L J, Rodricks J D, Turnbull D, et al. Hu-

- man health risk assessment of chloroxylenol in liquid hand soap and dishwashing soap used by consumers and health-care professionals[J]. *Regulatory Toxicology and Pharmacology*: RTP, 2016(80):116-124.
- [19] Rostkowski P, Horwood J, Shears J A, et al. Bioassay-Directed Identification of Novel Antiandrogenic Compounds in Bile of Fish Exposed to Wastewater Effluents[J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, 45(24):10660-10667.
- [20] Sreevidya V S, Lenz K A, Svoboda K R, et al. Benzalkonium chloride, benzethonium chloride, and chloroxylenol - Three replacement antimicrobials are more toxic than triclosan and triclocarban in two model organisms[J]. *Environmental Pollution*, 2018, 235(4):814-824.
- [21] Capkin E, Ozcelep T, Kayis S, et al. Antimicrobial agents, triclosan, chloroxylenol, methylisothiazolinone and borax, used in cleaning had genotoxic and histopathologic effects on rainbow trout[J]. *Chemosphere*, 2017, 182(3):720-729.
- [22] Cai N, Larese-Casanova P. Sorption of carbamazepine by commercial graphene oxides: A comparative study with granular activated carbon and multiwalled carbon nanotubes[J]. *Journal of Colloid & Interface Science*, 2014, 426:152-161.
- [23] Vernouillet G, Eullaffroy P, Lajeunesse A, et al. Toxic effects and bioaccumulation of carbamazepine evaluated by biomarkers measured in organisms of different trophic levels[J]. *Chemosphere*, 2010, 80(9):1062-1068.
- [24] Hamann, Enrico, Greskowiak, et al. The fate of organic micropollutants during long-term/long-distance river bank filtration[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 545:629-640.
- [25] 孙淑, 孟硕, 周震峰. 聚乙烯和聚氯乙烯微塑料对邻苯二甲酸酯的吸附[J]. *环境科学与技术*, 2022, 45(8):9-16.
- [26] Wu P, Cai Z, Jin H, et al. Adsorption mechanisms of five bisphenol analogues on PVC microplastics[J]. *Science of The Total Environment*, 2018, 650(1):671-678.
- [27] Chen X, Gu X, Bao L, et al. Comparison of adsorption and desorption of triclosan between microplastics and soil particles[J]. *Chemosphere*, 2021;263(1):127947.
- [28] 马晓燕, 赵志西, 谢青青, 等. 磁性水铁矿的制备及其对二甲基亚砷酸的吸附性能[J]. *化学通报*, 2023, 86(2):207-215.
- [29] Guo X, Pang J, Chen S, et al. Sorption properties of tylosin on four different Microplastics[J]. *Chemosphere*, 2018, 209(10):240-245.
- [30] Wang W, Wang J. Different partition of polycyclic aromatic hydrocarbon on environmental particulates in freshwater: Microplastics in comparison to natural sediment [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2017, 147:648-655.
- [31] Zuo L Z, Li H X, Lin L, et al. Sorption and desorption of phenanthrene on biodegradable poly (butylene adipate co-terephthalate) microplastics [J]. *Chemosphere*, 2018, 215(1):25-32.
- [32] 乔肖翠. 有机质及 pH 对卡马西平吸附及迁移影响研究[D]. 北京:中国地质大学, 2015.
- [33] Wang T, Yu C, Chu Q, et al. Adsorption behavior and mechanism of five pesticides on microplastics from agricultural polyethylene films [J]. *Chemosphere*, 2019, 244(4):125491.
- [34] B B X A, B F L A, B P C B A, et al. Microplastics play a minor role in tetracycline sorption in the presence of dissolved organic matter - ScienceDirect [J]. *Environmental Pollution*, 2018, 240(9):87-94.
- [35] 胡婷婷, 陈家玮. 土壤中微塑料的吸附迁移及老化作用对污染物环境行为的影响研究进展[J]. *岩矿测试*, 2022, 41(3):353-363.
- [36] Wang F, Wong C S, Chen D, et al. Interaction of toxic chemicals with microplastics: A critical review [J]. *Water Research*, 2018, 139(1):208-219.