

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2022.01.012

# 羟基磷灰石对大肠杆菌吸附铬(VI)的影响

李彦霖, 孙志强, 马 军, 袁一星

(哈尔滨工业大学 环境学院, 黑龙江 哈尔滨 150090)

**摘 要:** 以实际水体作为实验用水,探究羟基磷灰石(HA)存在下大肠杆菌(*E. coli*)对六价铬[Cr(VI)]的捕获吸附特性。结果表明,*E. coli*对Cr(VI)的吸附符合假一级动力学,适宜pH值为6,该条件下*E. coli*对Cr(VI)的饱和吸附量为30.71 mg/g。纳米尺寸的HA释放和生物效应受浓度影响,当HA暴露浓度为5 mg/L时,正电性HA附着于细菌表面,促进*E. coli*与Cr(VI)接触,*E. coli*对Cr(VI)的饱和吸附量达到最高值55.98 mg/g。当HA暴露浓度为10~50 mg/L时,过量的HA附着在细菌表面,改变了细胞膜的通透性,因而吸附量略有降低,但依然高于*E. coli*单独对Cr(VI)的吸附量。当HA暴露浓度高于100 mg/L时,团聚在一起的HA对Cr(VI)也产生吸附作用,提高了体系对Cr(VI)的去除率。总体来说,HA和*E. coli*共同作用有助于提高对Cr(VI)的吸附效率。

**关键词:** 大肠杆菌; 羟基磷灰石; 铬(VI); 生物吸附

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2022)01-0077-06

## Effect of Hydroxyapatite on Adsorption of Chromium (VI) by *Escherichia coli*

LI Yan-lin, SUN Zhi-qiang, MA Jun, YUAN Yi-xing

(School of Environment, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China)

**Abstract:** The capture and adsorption characteristics of hexavalent chromium by *Escherichia coli* (*E. coli*) in the presence of hydroxyapatite (HA) were investigated in an actual water body. The adsorption of Cr(VI) by *E. coli* complied with pseudo-first-order kinetics, and the optimum pH was 6. Under this condition, the saturated adsorption capacity of *E. coli* for Cr(VI) was 30.71 mg/g. The nanoscale HA releases and biological effects were affected by concentration. When HA exposure concentration was 5 mg/L, positively charged HA attached to the bacterial surface and promoted the contact between *E. coli* and Cr(VI), and the saturated adsorption capacity of *E. coli* for Cr(VI) reached the maximum of 55.98 mg/g. When the exposure concentration of HA was 10–50 mg/L, excessive HA attached to the surface of bacteria and changed the permeability of cell membrane, so the adsorption capacity decreased slightly, but it was still higher than the adsorption capacity of Cr(VI) by *E. coli* alone. When the exposure concentration of HA was higher than 100 mg/L, the agglomerated HA also had adsorption ability on Cr(VI), which enhanced the removal efficiency of Cr(VI) in the system. In general, the synergistic effect of HA and *E. coli* can improve the adsorption efficiency of Cr(VI).

**Key words:** *Escherichia coli* (*E. coli*); hydroxyapatite; chromium(VI); biosorption

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51978195)

通信作者: 马军 E-mail: majun@hit.edu.cn

近年来,经济发展带来的环境问题越来越受到人们的关注,水体中的重金属污染尤为严峻。铬(Cr)经常出现于电镀、有色金属采选和冶炼等工业废水中,也是饮用水中常见的有害污染物。Cr(VI)具有高溶解性和水流动性,同时毒性也更强。在各种污水净化工艺中,吸附技术因具有运行设备简单、高效、稳定,且无二次污染等优点,在实际工程中得到广泛应用。由于污染物成分日趋复杂,仅利用分子间作用力的非均相吸附并不能满足水处理的需要。生物吸附剂因具有可控性、适应性等优势,使其在工业应用中更有竞争力。生物吸附剂去除重金属的速度更快,有利于处理大量废水<sup>[1]</sup>。环境中影响生物吸附效果的因素有很多,研究发现<sup>[2]</sup>,当存在其他离子、宽泛的温度范围和pH值时,生物吸附工艺依然能稳定运行。近年来,随着科技发展和人类生活的需要,越来越多的功能性纳米材料被研究和生产出来,难免会进入到自然环境中,由于纳米材料的特性,少量的外来污染进入水体就可以对环境与现有水处理工艺产生深远影响<sup>[3]</sup>。因此,研究纳米材料对环境和生物吸附的影响十分必要。

生物吸附重金属的研究不得不考虑人为因素对吸附效能和机理的影响。姜风英等<sup>[4]</sup>发现,大肠杆菌BL21菌株在IPTG诱导下对多种重金属的吸附能力提高了2~5倍,并且在pH值为6~8范围内吸附能力基本保持不变。Wei等<sup>[5]</sup>将铅特异性结合蛋白PbrR结合到大肠杆菌中,实现对铅离子的高度敏感和选择性,可以从含有多种重金属离子的溶液中选择性吸附铅离子。羟基磷灰石(HA)是功能性人工合成材料,对蛋白质和重金属都有一定的吸附性,痕量投加就可以对环境或生物产生深远影响<sup>[6]</sup>。HA作为最常见的骨替代物,具有一定的溶解性,也可以参与细胞代谢,因此在医疗中被广泛使用。纳米级的HA被人工合成和使用后,会随着医疗废物和垃圾进入污水处理系统,进而排放到环境水体中。Yuan等<sup>[7]</sup>发现,HA不仅可以吸附固定重金属Cr(VI),而且吸附后产物极其稳定,不易发生脱附解吸。由于纳米材料特殊的理化性质,少量的颗粒进入环境水体就会引起水生态系统的改变,且其属于外来污染物,一旦进入水体则不易迁移转化和降解。因此,其对环境,尤其是水环境中微生物的影响不容小觑。笔者选择了在自然界中普遍存在的高致癌风险重金属铬作为目标重金属污染物、大肠

杆菌作为工程菌株,研究生物吸附重金属和纳米级羟基磷灰石吸附重金属的效果和机理。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验材料

大肠杆菌(*E. coli*)取自实验室保存菌株,将该菌株接种在LB培养基中,37℃、120 r/min条件下振荡培养6 h,期间利用紫外分光光度计测定细菌浓度,取样离心后冷冻干燥过夜,并根据OD值对细胞干质量作图,绘制标准曲线。配制浓度为500 mg/L的重铬酸钾储备液。

### 1.2 羟基磷灰石的制备

取物质的量之比为3:5的适量 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 和 $\text{CaCl}_2$ ,以N,N-二甲基甲酰胺(DMF)为溶剂,采用浓盐酸调节溶液pH值至2左右,隔绝空气超声2 h后移入反应釜中,在180℃下反应2 h。过滤产物,经超纯水和乙醇反复洗涤至中性,80℃干燥过夜,即得到纳米羟基磷灰石。

### 1.3 *E. coli*对Cr(VI)的吸附实验

取适量干质量的*E. coli*溶解于PBS缓冲液中,配制不同浓度的Cr(VI)溶液并加入到溶液中,恒温振荡6 h,静置后取上清液。采用ICP-OES检测上清液中的铬含量,同时进行对照实验。除*E. coli*培养和存储过程中的LB培养基用水为超纯水外,吸附实验所用水均取自黑龙江省松花江某支段,具体水质:浊度为17.9 NTU,色度为30度, $\text{UV}_{254}$ 为0.160  $\text{cm}^{-1}$ ,总无机碳(TIC)为7.98 mg/L,TOC为15.25 mg/L, $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 为15.54 mg/L,金属离子Ca、Mg、Al、Fe、Cr的浓度分别为18.536、3.617、0.028、1.865、0.002 mg/L。

## 2 结果与讨论

### 2.1 HA的表征

相比于传统溶剂热法,本实验加入超声以后加速了HA形成晶核的过程,缩短了高温高压的反应进程,成功合成了“针簇”状的HA,如图1(a)、(b)所示。HA“针簇”团的直径为30  $\mu\text{m}$ 左右,微纳米级多片状羟基磷灰石的交错嵌合形成了单个“簇”。当大肠杆菌暴露于小尺寸的HA后,大肠杆菌对重金属的吸附效能会受到生物应激反应的影响。位于2900~2750  $\text{cm}^{-1}$ 的弱宽峰和1600  $\text{cm}^{-1}$ 附近的弱宽峰是P=O的伸缩振动峰,磷酸根的不对称振动峰位于1190~976和660~520  $\text{cm}^{-1}$ 处。3600~3000

$\text{cm}^{-1}$ 的强宽吸收带是属于结合水的—OH伸缩振动峰,如图1(c)所示。图1(d)表明,受超声辅助合成的影响,HA的结晶度不高,反应时间短控制了晶粒尺寸在所需范围内。HA的(002)、(211)、(300)晶面的特征衍射峰分别位于 $26.12^\circ$ 、 $29.68^\circ$ 和 $32.32^\circ$ 处,符合JCPDS羟基磷灰石的标准卡片(pdf #09-0432),说明成功合成了针簇状的HA。

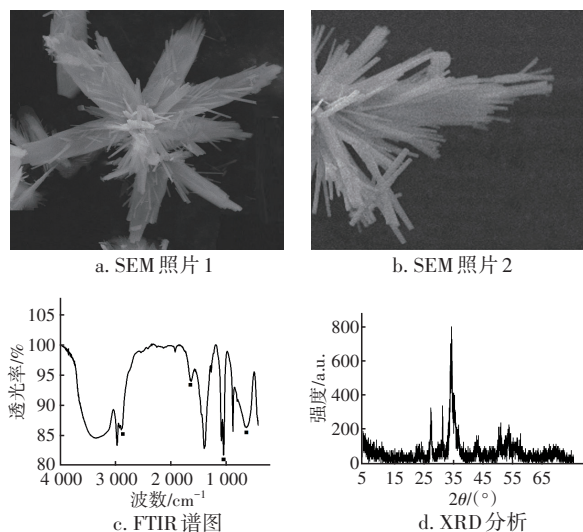


图1 HA的形态特征

Fig.1 Morphology characterization of HA

## 2.2 HA暴露时间和pH值的影响

当温度为 $25^\circ\text{C}$ 、*E. coli*浓度为 $1\text{ g/L}$ 、 $\text{Cr(VI)}$ 浓度为 $50\text{ mg/L}$ 时,考察HA暴露(暴露浓度为 $5\text{ mg/L}$ )与未暴露条件下*E. coli*吸附 $\text{Cr(VI)}$ 的效果,结果如图2所示。

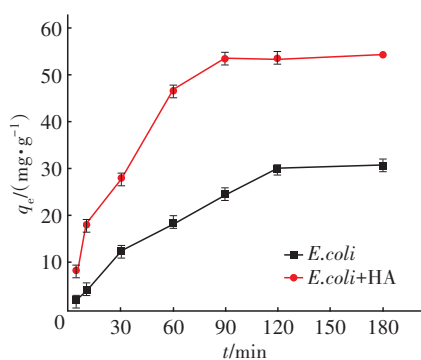


图2 HA暴露时间对*E. coli*吸附 $\text{Cr(VI)}$ 的影响

Fig.2 Influence of HA exposure time on adsorption of  $\text{Cr(VI)}$  by *E. coli*

从图2可以看出,前30 min时,*E. coli*对 $\text{Cr(VI)}$ 的吸附量 $q_e$ 在两组实验中均快速上升,且投加HA的实验组 $q_e$ 增加趋势明显高于对照组,说明在HA

的影响下,*E. coli*可以更快地去除 $\text{Cr(VI)}$ ,60 min内实验组的 $q_e$ 就达到 $46.64\text{ mg/g}$ ,而对照组只有 $18.39\text{ mg/g}$ 。值得注意的是,HA暴露的实验组不仅提前到达吸附平衡,其吸附量也明显高于对照组。实验组的饱和吸附量 $q_m$ 从 $30.71\text{ mg/g}$ 提升至 $53.60\text{ mg/g}$ ,说明HA的存在对*E. coli*吸附 $\text{Cr(VI)}$ 产生了积极作用。

pH值不仅可以影响大肠杆菌的代谢速率和菌株活度,也可以使铬的存在形式发生改变。水中存在的 $\text{Cr(VI)}$ 的氧化态形式包括重铬酸盐( $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$ )、铬酸盐( $\text{CrO}_4^{2-}$ )、铬酸氢盐( $\text{HCrO}_4^-$ )、铬酸( $\text{H}_2\text{CrO}_4$ )、三铬酸盐( $\text{Cr}_3\text{O}_{10}^{2-}$ )、四铬酸盐( $\text{Cr}_4\text{O}_{13}^{2-}$ )和重铬酸氢盐( $\text{HCr}_2\text{O}_7^-$ )等。pH值对*E. coli*吸附 $\text{Cr(VI)}$ 的影响如图3所示。pH值为2~6时,聚合态的铬酸盐是铬的主要存在形式。*E. coli*适合生长的pH值范围为4.5~8.0,在此范围内,两组实验的 $q_e$ 均随着pH值的升高先增加后降低,对照组的 $q_e$ 明显低于实验组,且均在pH值为6时达到最佳吸附。若对比*E. coli*适合生长pH值范围内对铬的吸附作用,对照组的 $q_e$ 明显低于实验组,这一现象可能是因为HA呈弱碱性,加入HA后,其本身自带的羟基可以对酸起到一定的缓冲作用,让*E. coli*在pH值<6的环境中依然维持活力,可以有效吸附 $\text{Cr(VI)}$ <sup>[8]</sup>。其中,只有溶液中氢离子大于 $1\text{ mol/L}$ 时, $\text{HCr}_2\text{O}_7^-$ 、 $\text{Cr}_3\text{O}_{10}^{2-}$ 和 $\text{Cr}_4\text{O}_{13}^{2-}$ 才能稳定存在,因此本实验中可以不予考虑。虽然最适宜大肠杆菌生长的pH值为7~8,但pH值>8时, $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$ 更多地转化为 $\text{CrO}_4^{2-}$ ,这意味着捕获相同量的铬盐需要的*E. coli*增加,因此影响了吸附效率。pH值在10以上时,羟基磷灰石可能与*E. coli*发生络合,与Cr竞争*E. coli*上的吸附点位,因而 $q_e$ 反而低于对照组。

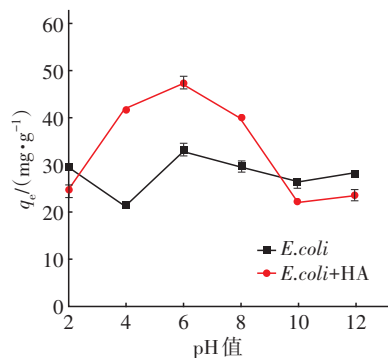


图3 pH值对*E. coli*吸附 $\text{Cr(VI)}$ 的影响

Fig.3 Influence of pH on adsorption of  $\text{Cr(VI)}$  by *E. coli*



### 2.3 *E. coli*和Cr(VI)初始浓度的影响

*E. coli*初始浓度对吸附Cr(VI)的影响如图4所示。可以看出,对照组和实验组对Cr(VI)的吸附量均随着*E. coli*初始浓度的升高而增加。当*E. coli*含量为 $10^4$  CFU/L时,对Cr(VI)的吸附量较低,对照组和实验组 $q_e$ 分别只有9.00和14.01 mg/g。这是因为*E. coli*浓度较低时,单位质量吸附剂官能团上可用的活性点位饱和,阻止了对Cr(VI)的进一步吸附。另外,体系中*E. coli*浓度低,意味着Cr(VI)的相对浓度较高,大量的Cr(VI)对细胞也会产生毒性效应,导致细胞代谢缓慢甚至死亡,影响了吸附效率。随着*E. coli*投量的增加,可用的吸附点位或官能团也会增加,最终达到吸附平衡。实验组对Cr(VI)的吸附量始终高于对照组,可能是因为HA能吸附部分重金属,缓解了Cr(VI)对*E. coli*的毒性作用。

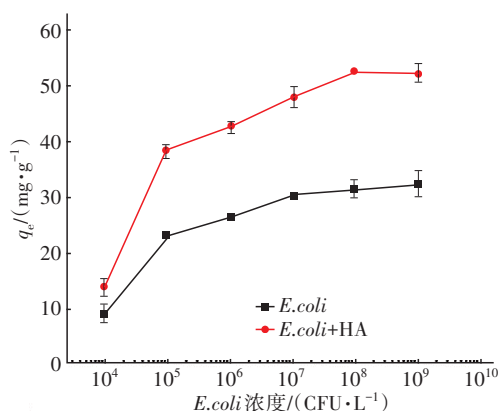


图4 *E. coli*投加量对吸附Cr(VI)的影响

Fig.4 Effect of initial concentration of *E. coli* on adsorption of Cr(VI)

Cr(VI)初始浓度对*E. coli*吸附Cr(VI)的影响如图5所示。可以看出,受扩散和传质动力的影响,Cr(VI)浓度较低时,吸附剂过量,吸附平衡时并没有达到吸附饱和, $q_e$ 低于饱和吸附量。同时,由于吸附质浓度低,要克服溶液和*E. coli*生物表面之间金属离子迁移的传质阻力更大,所以吸附容量较低。当Cr(VI)浓度超过200 mg/L时,吸附质过量,达到吸附饱和,*E. coli*可以吸附Cr(VI)的特定表面官能团减少,表面官能团结合金属离子的能力减弱。当溶液中Cr(VI)浓度达到300 mg/L时,对照组和实验组的 $q_e$ 分别降低至30.40和50.13 mg/g。过量的重金属离子进入细胞体内,超过了*E. coli*细胞的负荷能力,氧化应激效应、DNA和蛋白质氧化变性等毒

性效应加剧,大量细胞死亡。

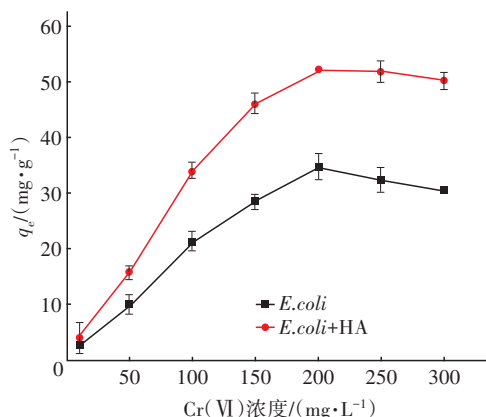


图5 Cr(VI)初始浓度对*E. coli*吸附Cr(VI)的影响

Fig.5 Effect of initial concentration of Cr(VI) on adsorption of Cr(VI) by *E. coli*

### 2.4 *E. coli*对Cr(VI)的吸附动力学

本实验合成的HA具有纳米形貌,它的体积效应和尺寸效应会对*E. coli*的细胞代谢产生影响,因而影响其对铬的捕获和吸附。为排除HA对Cr(VI)吸附的影响,将不同浓度的HA投加至Cr(VI)溶液中,恒温(25℃)振荡1 h后,测定溶液中Cr(VI)浓度,随后将*E. coli*加入至体系中继续反应。当HA暴露浓度为0.1~5 mg/L时,随着浓度增加,*E. coli*吸附Cr(VI)的 $q_e$ 迅速增大,并达到最大值55.98 mg/g;当HA暴露浓度为5~50 mg/L时,*E. coli*对Cr(VI)的吸附量随着HA浓度的增加呈下降趋势,也就是少量的HA对*E. coli*吸附Cr(VI)有促进作用,但随着HA浓度的增加,其纳米毒性占主导作用。一般情况下,羟基复合金属的HA带正电,大肠杆菌表面带负电,虽然Cr(VI)是金属离子,但铬酸盐是阴离子盐,因而少量HA附着在*E. coli*表面有助于*E. coli*吸引更多的Cr(VI),继续增大HA的暴露浓度,则过量的HA颗粒附着在*E. coli*表面,阻碍了*E. coli*与外界接触,同时纳米级的“针簇”可以穿透细胞膜,改变细胞的通透性。但是,当HA投加量达到100 mg/L时,测得的 $q_e$ 回升,结合前期吸附对照实验,可以认为此时HA对Cr(VI)也有吸附作用,吸附量可以达到14.77 mg/g,占总吸附量的31.97%。

不同HA暴露浓度下,*E. coli*对Cr(VI)的吸附动力学拟合参数见表1。大肠杆菌对重金属的生物吸附过程符合一阶动力学模型,当HA的暴露浓度为5、10和20 mg/L时,速率常数 $k_1$ 分别为0.014 64、

0.014 98和0.015 20 min<sup>-1</sup>。当继续增大HA暴露浓度时,速率常数比之前要低一个数量级,这与之前的实验结果相吻合,说明反应速率受单因素影响,即吸附体系中受HA浓度的影响<sup>[9]</sup>。

表1 不同HA暴露浓度下*E. coli*吸附铬的动力学参数(假一级动力学模型)

Tab.1 Kinetic parameters of adsorption of Cr(VI) by *E. coli* under different HA exposure concentration (pseudo-first-order)

项目	HA暴露浓度/(mg·L <sup>-1</sup> )				
	5	10	20	50	100
$q_e/(\text{mg} \cdot \text{g}^{-1})$	69.17	71.18	77.06	43.75	41.83
$k_1/\text{min}^{-1}$	0.014 64	0.014 98	0.015 20	0.008 96	0.004 98
$R^2$	0.96	0.96	0.92	0.87	0.86

## 2.5 *E. coli*对Cr(VI)的吸附等温模型

对*E. coli*吸附Cr(VI)过程进行Langmuir和Freundlich吸附等温模型拟合发现,实验组和对照组对Cr(VI)的吸附均更符合Langmuir吸附模型(见表2),实验组和对照组的 $q_m$ 分别为31.80和59.67 mg/g,接近实验值。说明*E. coli*吸附Cr(VI)属于生化过程,*E. coli*具有通过代谢方式或物理化学吸收途径从水中积累Cr(VI)的能力。另外,存在具有生物相容性的HA有助于提高吸附效率。

表2 *E. coli*对铬的等温吸附曲线拟合参数

Tab.2 Isotherm constants of adsorption of Cr(VI) by *E. coli*

项目	Freundlich吸附模型			Langmuir吸附模型		
	$\ln q_e = \ln K_F + (1/n) \times \ln C_e$			$C_e/q_e = 1/(K_L \cdot q_m) + C_e/q_m$		
	$K_F$	$n$	$R^2$	$K_L$	$q_m/(\text{mg} \cdot \text{g}^{-1})$	$R^2$
<i>E. coli</i>	10.71	0.55	0.945	0.39	31.80	0.988
<i>E. coli</i> + HA	18.31	0.66	0.911	0.32	59.67	0.998

## 2.6 HA对大肠杆菌活性的影响

在温度为25℃、*E. coli*浓度为1 g/L、Cr(VI)浓度为50 mg/L、反应时间为90 min条件下,考察HA浓度对*E. coli*吸附Cr(VI)的影响,结果如图6所示。可以看出,当HA浓度为0.01~0.1 mg/L时,随着HA浓度的增加,*E. coli*吸附铬的 $q_e$ 变化不明显。因为HA在体系中的浓度太小,不足以影响*E. coli*吸附Cr(VI)的过程;而过量的HA(500 mg/L)阻碍了*E. coli*与铬离子的接触,HA的相互团聚也阻碍了*E. coli*与外界接触,这种物理隔绝使得*E. coli*没有物质交换不能进行正常代谢,导致*E. coli*死亡。

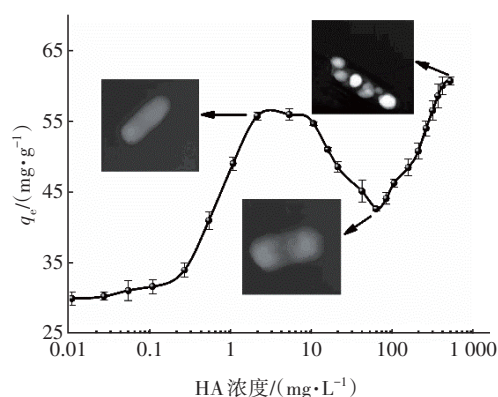


图6 HA浓度对*E. coli*吸附Cr(VI)的影响

Fig.6 Influence of HA concentration on adsorption of Cr(VI) by *E. coli*

将三个HA暴露浓度节点(分别为5、50和500 mg/L)吸附后的悬浊液进行超声,然后离心(12 000 r/min),取上清液重新测定Cr(VI)浓度。结果表明,在HA暴露浓度为5、50和500 mg/L条件下,未经超声处理时*E. coli*对铬的吸附量分别为55.98、45.04、60.77 mg/g,经超声处理后吸附量分别为5.33、38.94、55.62 mg/g。可见,当HA暴露浓度为5 mg/L时,超声对*E. coli*吸附Cr(VI)的影响最明显,而当HA的暴露浓度为500 mg/L时吸附量变化较小,这是因为超声会破碎细胞,被*E. coli*吸附的Cr(VI)会因细胞破碎死亡而重新释放到体系中,但被HA吸附的Cr(VI)仅有少部分发生脱附。

从图6中SEM照片发现,当HA暴露浓度在5 mg/L以下时,细胞完好,细胞膜光滑;当HA暴露浓度为50 mg/L时,细胞边缘已经模糊;而当HA浓度达到500 mg/L时,细胞发生裂解,细胞组织外泄。HA不同暴露浓度下,*E. coli*细胞形态发生改变,直接影响了*E. coli*对Cr(VI)的吸附效能。少量暴露的HA可以促进细菌对Cr(VI)的吸附,提高去除效率。当pH值>2时,*E. coli*细胞膜表面呈负电性,而且随着pH值的增加Zeta电位绝对值增大(见图7),*E. coli*颗粒间排斥更严重。这是因为细菌一般都带负电,而HA在本系统pH值范围内呈正电性,二者相互吸引,借助固相材料为载体,可以让细菌和Cr(VI)的有效接触增加,减少了分散到水中不能直接与细菌接触的有效离子比例。但水体中存在大量HA时,HA不仅可以阻碍细菌与Cr(VI)接触,还可能影响细胞代谢,从而降低了*E. coli*对Cr(VI)的吸附效率。纳米颗粒的毒性机理一般都与细胞膜

相关,HA的纳米级“针簇”刺破 *E. coli* 细胞膜,对细胞构成物理损伤,线粒体等细胞器外泄,导致氧化平衡被破坏等。自然水体中的HA含量相对较低,浓度在5 mg/L以下有益于细菌对重金属的吸附去除。但特殊污水,如某些化工废水中可能会聚集大量HA,因此利用纳米级HA增强大肠杆菌对水中Cr(VI)的去除需要严格监控HA浓度。

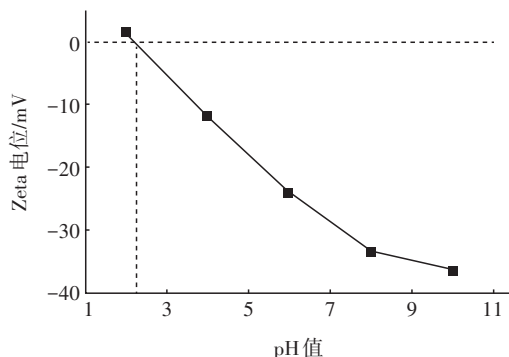


图7 *E. coli*的Zeta 电位变化

Fig.7 Change of Zeta potential of *E. coli*

### 3 结论

HA的暴露浓度对 *E. coli* 吸附Cr(VI)有影响, *E. coli* 对Cr(VI)的吸附符合假一级动力学方程,饱和和吸附量为30.71 mg/g。当HA浓度较低时对 *E. coli* 吸附Cr(VI)有明显的促进作用,HA暴露浓度为5 mg/L时其饱和和吸附量最高,可达到55.98 mg/g,这是因为一定量的HA颗粒可以促进 *E. coli* 细胞与Cr(VI)的有效接触,同时减缓Cr(VI)对细胞的毒性作用,进而提高吸附效率。HA的存在可以帮助细菌适应极端的酸碱环境,从而提高生物吸附效率。随着HA暴露浓度的增加, *E. coli* 对Cr(VI)的吸附量明显下降,铬酸盐与HA的细胞膜结合及其团聚释放的金属阳离子加剧了细胞的毒性作用,因而吸附量下降。当HA的暴露浓度增加时,由于HA对Cr(VI)有吸附作用,所测得的 $q_e$ 又有回升。

### 参考文献:

- [1] ALVAREZ A, SAEZ J M, COSTA J S D, et al. Actinobacteria: current research and perspectives for bioremediation of pesticides and heavy metals [J]. Chemosphere, 2017, 166: 41-62.
- [2] GUPTA V K, NAYAK A, AGARWAL S. Bioadsorbents for remediation of heavy metals: current status and their

future prospects [J]. Environmental Engineering Research, 2015, 20 (1): 1-18.

- [3] ZHANG H K, HU X K. Bioadsorption and microbe-mediated reduction of Sb(V) by a marine bacterium in the presence of sulfite/thiosulfate and the mechanism study [J]. Chemical Engineering Journal, 2019, 359: 755-764.
- [4] 姜凤英,程荣,周晓峰,等. 大肠杆菌 IscA 膜表面表达菌株在吸附水体重金属中的应用[J]. 环境科学学报, 2019, 39(7): 2125-2133.  
JIANG Fengying, CHENG Rong, ZHOU Xiaofeng, et al. Application of IscA surface-displayed *Escherichia coli* in bioadsorption of heavy metals in water [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2019, 39(7): 2125-2133 (in Chinese).
- [5] WEI W, LIU X Z, SUN P Q, et al. Simple whole-cell biodetection and bioremediation of heavy metals based on an engineered lead-specific operon [J]. Environmental Science & Technology, 2014, 48 (6): 3363-3371.
- [6] AMBASHTA R D, SILLANPÄÄ M. Water purification using magnetic assistance: a review [J]. Journal of Hazardous Materials, 2010, 180 (1/3): 38-49.
- [7] YUAN P Y, LIU S Y, LV Y T, et al. Effect of a dentifrice containing different particle sizes of hydroxyapatite on dentin tubule occlusion and aqueous Cr(VI) sorption [J]. International Journal of Nanomedicine, 2019, 14: 5243-5256.
- [8] GUPTA V K, NAYAK A, AGARWAL S. Bioadsorbents for remediation of heavy metals: current status and their future prospects [J]. Environmental Engineering Research, 2015, 20(1): 1-18.
- [9] HU X J, SHENG X, ZHANG W, et al. Nonmonotonic effect of montmorillonites on the horizontal transfer of antibiotic resistance genes to bacteria [J]. Environmental Science & Technology Letters, 2020, 7 (6): 421-427.

作者简介:李彦霖(1986-),女,黑龙江哈尔滨人,博士研究生,主要研究方向为纳米功能材料在复杂水体环境中的应用。

E-mail: liyanlin913@hotmail.com

收稿日期:2021-01-04

修回日期:2021-02-22

(编辑:任莹莹)