

褐煤/麦饭石固定SRB颗粒处理含铬酸性矿山废水试验

狄军贞, 刘佳伟, 郭俊杰, 付赛欧

(辽宁工程技术大学 土木工程学院, 辽宁 阜新 123000)

摘要: 针对硫酸盐还原菌(SRB)生物法处理酸性矿山废水(AMD)易受重金属离子和高酸度的抑制与毒害等问题,采用玉米芯为碳源的微生物固定化技术,分别构造以麦饭石和褐煤为填料的1[#]和2[#]固定化颗粒,对比处理含Cr⁶⁺、SO₄²⁻的模拟酸性矿山废水的效果。实验结果表明:1[#]颗粒废水中COD的平均释放量(898 mg/L)要高于2[#]颗粒废水中COD的平均释放量(698.9 mg/L),而2[#]颗粒对AMD中pH提升(4~7.47)和对Cr⁶⁺、SO₄²⁻的平均去除率(96.57%、36.50%)要高于1[#]颗粒对AMD中pH提升(4~7.04)和对Cr⁶⁺、SO₄²⁻的平均去除率(85.96%、20.85%)。可见,褐煤颗粒有比麦饭石颗粒较强的调酸、吸附金属离子和异化硫酸盐活性的能力。

关键词: 玉米芯碳源; 硫酸盐还原菌; 固定化颗粒; 褐煤; 麦饭石; 微生物固定化技术; Cr⁶⁺去除率; 铬酸性矿山废水

中图分类号:X703

文献标识码:A

文章编号:1672-643X(2020)01-0029-04

Treatment of chrome-containing acid mine drainage with lignite or medical stone fixed SRB particles

DI Junzhen, LIU Jiawei, GUO Junjie, FU Saiou

(School of Civil Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China)

Abstract: In order to solve the problems caused by biological treatment of acid mine drainage (AMD) using sulfate reducing bacteria (SRB), in which SRB was easily suppressed and poisoned by heavy metal ions and high acidity, microbial immobilization technology with corncobs as carbon source was used to construct 1[#] and 2[#] immobilization particles with medical stone and lignite as fillers, respectively, and the simulated acid mine waste water containing Cr⁶⁺ and SO₄²⁻ was treated. The experimental results showed that the average release of COD in 1[#] particle waste water (898 mg/L) was higher than that in 2[#] particle waste water (698.9 mg/L), while the pH promotion (4~7.47) and the average removal rates of Cr⁶⁺ and SO₄²⁻ in AMD by 2[#] particles (96.57%, 36.50%) were higher than that of pH(4~7.04) and Cr⁶⁺, SO₄²⁻ (85.96%, 20.85%) in AMD by 1[#] particles. It can be seen that lignite particles have stronger abilities of acid regulation, metal ions attachment, and sulfate activity dissimilation than those of medical stone particles.

Key words: corncobs as carbon source; sulfate reducing bacteria(SRB); immobilization particle; lignite; medical stone; microbial immobilization technology; Cr⁶⁺ removal rate; chrome-containing acid mine drainage

1 研究背景

矿山开采过程中产生的酸性矿山废水(acid mine drainage, AMD)未经处理或处理效果不佳直接

排放到环境中不仅会对土地造成极大的破坏,而且还会严重影响到人的身体健康^[1-2]。近些年来,硫酸盐还原菌(sulfate reducing bacteria, SRB)固定化颗粒处理AMD引起了学者们极大的关注,SRB固

收稿日期:2019-07-13; 修回日期:2019-10-05

基金项目:国家自然科学基金项目(41672247, 41102157); 辽宁省“兴辽英才”青年拔尖人才计划项目(XLYC1807159); 辽宁省自然科学基金项目(2015020619); 辽宁省教育厅一般项目(LJYL031)

作者简介:狄军贞(1979-),男,甘肃甘谷人,博士,教授,博士生导师,研究方向为水污染控制理论与技术。

通讯作者:刘佳伟(1995-),男,甘肃秦安人,硕士研究生,研究方向为煤矿酸性废水污染控制理论与技术。

定化能够提高 SRB 的活性以及耐毒性,营造适宜的微环境^[3-4]。本课题组在研究 SRB 固定化处理 AMD 过程中发现,麦饭石表面由于具有大量的孔隙结构,能够吸附溶液中大量的金属离子以及 H^+ ,并且能够为 SRB 的生长提供有利的条件^[5],但是天然麦饭石作为填料固定 SRB 在处理废水中的 Cr^{6+} 时效果并不理想^[6]。而褐煤表面也具有大量的孔隙结构,在酸性条件下对溶液中 Cr^{6+} 吸附能力较强^[7],因此本次实验分别采用麦饭石和褐煤作为填料固定 SRB 进行对比处理 AMD。

基于此,本次实验采用微生物固定化技术^[8],利用硫酸盐还原菌(SRB)、玉米芯以及褐煤和麦饭石制备固定化颗粒,对比分析不同材料的固定化颗粒对 AMD 中污染物的去除情况以及相关机理,探讨二者对 AMD 处理的差异,以期对 AMD 处理提供新的思路和方向。

2 材料和方法

2.1 原料

实验水样采用模拟酸性矿山废水(AMD),其中 SO_4^{2-} 、 Cr^{6+} 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 的浓度分别为 816、10、100、50 mg/L,其 pH 值为 4.0。

根据课题组前述研究^[9],确定麦饭石以及玉米芯的粒径和质量分数,褐煤作为对照实验和麦饭石保持一致。麦饭石采用阜新麦饭石,将其研磨筛分后取粒径为 200~300 目;褐煤采用山西大同的硬质褐煤,将其研磨筛分后取粒径为 200~300 目;玉米芯取自阜新农田,研磨至 100 目,作为 SRB 的天然碳源。实验所用的 SRB 取自恒温培养箱培养好的 SRB 菌种,在改进型的 Starkey 式培养基中富集培养,使得 SRB 的活性达到最大。

2.2 固定化颗粒制备

分别制备 1[#](麦饭石+玉米芯+SRB)和 2[#](褐煤+玉米芯+SRB)的固定化颗粒,先称取 9% 聚乙烯醇和 0.5% 的海藻酸钠在蒸馏水中充分溶胀 24 h 后,在 90℃ 恒温水浴锅内搅拌至无色气泡,将称量好的褐煤/麦饭石(质量分数为 15%),玉米芯(质量分数为 3%)倒入凝胶后并不断搅拌。待冷却至室温后加入质量分数为 30% 的浓缩菌液,用玻璃棒搅拌均匀至不再产生气泡,然后利用注射器将上述凝胶缓慢滴入至配好的 2% $CaCl_2$ 、pH 为 6 的饱和硼酸溶液中,并交联 4 h。最后用生理盐水洗涤 3 次,放入无有机成分的改进型 Starkey 式培养基中厌氧激活 12 h 等待备用。

2.3 试验方法

将制备好的固定化颗粒,按照固液比 1:10 放入 AMD 中,在恒温摇床中以 100 r/min、30℃ 进行反应,并定时测量溶液中的 pH、COD、ORP、 SO_4^{2-} 、 Cr^{6+} 、 Cr^{3+} 的值。

2.4 检测项目及方法

pH 值:玻璃电极法;COD:快速消解分光光度法;ORP:电导法; SO_4^{2-} :铬酸钡分光光度法; Cr^{6+} 和 Cr^{3+} :二苯碳酰二肼分光光度法。

3 结果分析与讨论

3.1 pH 变化规律

如图 1 所示,随着反应的进行,1[#]颗粒和 2[#]颗粒溶液中的 pH 值从 4 开始迅速上升,第 7 d 达到最大,分别为 7.61 和 8.07,接着 pH 值开始缓慢下降,第 11 d 时达到最小,分别为 6.62 和 7.45,最后 pH 又继续缓慢上升,出水 pH 值分别为 7.64 和 8.10。一开始溶液中 pH 值迅速上升,是因为麦饭石中含有 Al_2O_3 ,而褐煤表面具有可离子化基团 $RCOOH \rightleftharpoons RCOO^- + H^+$,皆具有良好的 pH 双向调节能力,可以调节体系的 pH 值^[10-11]。玉米芯水解产生酸使得 pH 缓慢下降,最后溶液中的 pH 继续缓慢上升是因为 SRB 在异化还原 SO_4^{2-} 的过程中会产生碱度^[12]。对比发现,两种颗粒皆可以调节 AMD 中的 pH 至中性或偏碱性范围内,2[#]颗粒的出水 pH 略大于 1[#]颗粒,但差别不大。

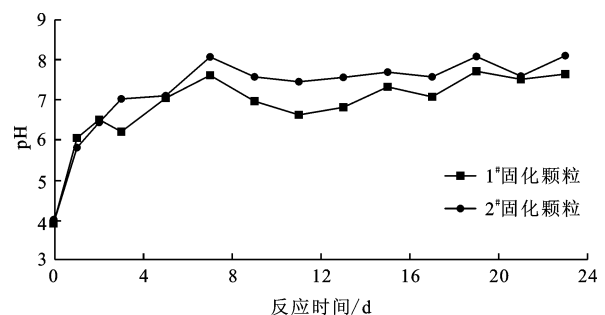


图 1 1[#]、2[#]固定化颗粒溶液的 pH 值随反应时间变化规律

3.2 Cr^{6+} 浓度的变化规律

如图 2 所示,随着反应的进行,1[#]颗粒溶液中 Cr^{6+} 的浓度不断降低,第 11 d Cr^{6+} 基本上已经被除去,去除率达 97.6%。而 2[#]颗粒对溶液中 Cr^{6+} 的去除效果较好,第 1 d 去除率就达到 96.4%。褐煤吸附铬过程中化学吸附起主要作用,在酸性条件下可将 Cr^{6+} 还原成 Cr^{3+} ^[13]。麦饭石具有良好的物化性能,对大多数重金属离子具有较好的吸附作用^[14]。

第 5 d 起 1[#]颗粒溶液中的 SO_4^{2-} 被 SRB 异化还原为 S^{2-} , 而 S^{2-} 可将 Cr^{6+} 还原成 Cr^{3+} , 进而加快 Cr^{6+} 去除效果。对比两种颗粒, 2[#]颗粒对 Cr^{6+} 的去除率远远大于 1[#]颗粒。这是因为褐煤表面带有负电荷, Cr^{6+} 在酸性环境下以 HCrO_4^- 、 $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$ 的形式存在于溶液中, 当溶液中 H^+ 较多时, 褐煤吸附溶液中 H^+ 有利于 HCrO_4^- 、 $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$ 的吸附与还原^[13-14]。虽然麦饭石对 Cr^{6+} 具有物理吸附能力, 但天然麦饭石致密块状及斑状结构的特征, 使其孔道分布不均匀且通透性较差^[15], 所以麦饭石对溶液中 Cr^{6+} 的吸附性能较差。

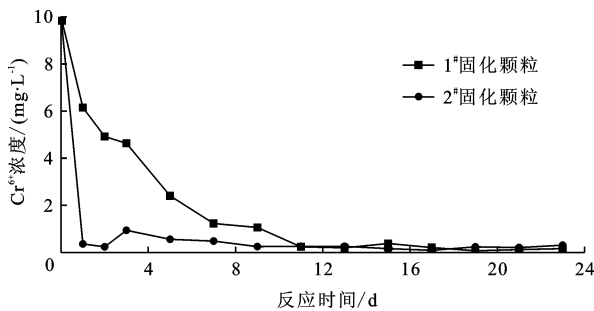


图 2 1[#]、2[#]固化颗粒溶液中的 Cr^{6+} 浓度随反应时间变化规律

3.3 Cr^{3+} 浓度的变化规律

如图 3 所示, 随着反应的进行, 1[#]溶液中 Cr^{3+} 的浓度第 1 d 迅速上升至 2.57 mg/L, 然后开始下降, 第 3 d 达到最低, 为 0.35 mg/L, 接着溶液中 Cr^{3+} 浓度继续上升, 第 7 d 达到最大值 2.23 mg/L, 最后溶液中 Cr^{3+} 的浓度开始逐渐下降, 直至达到动态平衡。这是因为阜新天然麦饭石对溶液中 Cr^{6+} 的吸附能力较差, 使得溶液中含有大量的 Cr^{6+} , 又由于阜新麦饭石中含有 FeO 等还原性物质, 可将溶液中的 Cr^{6+} 还原成 Cr^{3+} , 使得第 1 d 溶液中 Cr^{3+} 的浓度迅速上升。然后 Cr^{3+} 的浓度开始下降是因为麦饭石对 Cr^{3+} 也具有一定的吸附能力, 可吸附废水中被麦饭石还原成的 Cr^{3+} 。第 3 d 起溶液中 Cr^{3+} 的浓度继续上升是因为溶液中仍存在一定量的 Cr^{6+} 继续被还原成 Cr^{3+} , 从第 7 d 开始溶液中的 Cr^{6+} 基本上已经被除去, 一方面麦饭石继续吸附溶液中的 Cr^{3+} , 另一方面溶液中被 SRB 还原成的 S^{2-} 可与 Cr^{3+} 发生双水解反应形成 $\text{Cr}(\text{OH})_3$ 沉淀, 使 Cr^{3+} 浓度不断下降。从第 13 d 起 1[#]颗粒溶液中 Cr^{3+} 的浓度缓慢上升, 然后又下降, 接着又缓慢上升, 这是由于麦饭石对 Cr^{3+} 的吸附能力较差, 随着反应的继续进行出现了脱附现象。在整个反应过程中, 2[#]颗粒溶液中 Cr^{3+} 的浓度一直处于很低的水平, 平均浓度

仅为 0.12 mg/L。在反应过程中虽然大部分 Cr^{6+} 被还原成 Cr^{3+} , 但 Cr^{3+} 可与褐煤继续反应被褐煤吸附, 所以 Cr^{3+} 的浓度一直处于低水平状态^[13]。

对比发现, 两种颗粒均可以还原溶液中的 Cr^{6+} , 但是在反应前期 1[#]颗粒溶液中 Cr^{3+} 的浓度远远大于 2[#]颗粒。褐煤对 Cr^{3+} 的吸附也是以化学吸附为主, 且吸附效果随着 pH 的上升而提高, 当 pH 大于 4 时就有很好的去除效果^[13]。由前面分析可知, 天然麦饭石对 Cr^{3+} 的吸附性能较差, 所以前期溶液中存在较多的被还原成的 Cr^{3+} 。

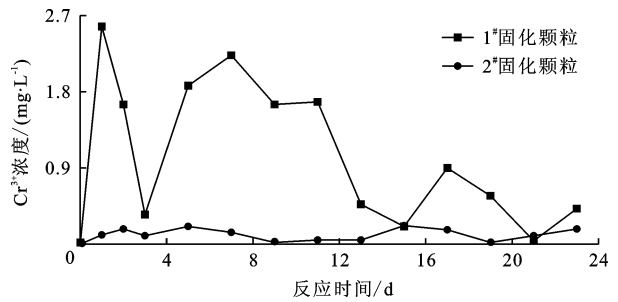


图 3 1[#]、2[#]固化颗粒溶液中的 Cr^{3+} 浓度随反应时间变化规律

3.4 SO_4^{2-} 浓度的变化规律

如图 4 所示, 第 1 d 测得两组实验中 SO_4^{2-} 的浓度皆大于模拟 AMD 所配制的浓度, 这是由于菌液中和在激活小球过程中皆存在 SO_4^{2-} , 在浓度梯度的作用下向溶液扩散导致 SO_4^{2-} 的浓度大于初始值。前 5 d 两组实验中 SO_4^{2-} 浓度均无明显变化, 从第 7 d 开始溶液中 SO_4^{2-} 浓度开始缓慢下降。这是因为溶液中存在大量的 Cr^{6+} 且呈酸性, 使得颗粒中 SRB 的活性大大降低^[16-17]。

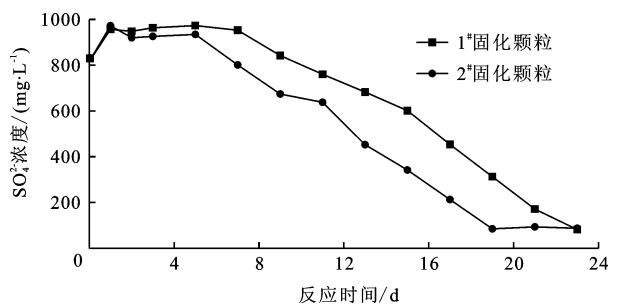


图 4 1[#]、2[#]固化颗粒溶液中的 SO_4^{2-} 浓度随反应时间变化规律

随着反应的继续进行, 颗粒中存活的 SRB 开始利用玉米芯水解的碳源还原溶液中的 SO_4^{2-} 。由于颗粒中 SRB 的活性较低, 可能存在其他产甲烷菌等细菌与 SRB 存在竞争关系^[18], 使得 SRB 的活性一直处于较低水平, 所以对溶液中 SO_4^{2-} 的还原速率较低。1[#]颗粒和 2[#]颗粒对 SO_4^{2-} 的最终去除率分别

为90%和89.31%。对比两种颗粒,1#颗粒对 SO_4^{2-} 的异化还原速率略小于2#颗粒,这是因为前期1#颗粒溶液中仍存在一定量的对SRB有毒害作用的铬离子,而2#颗粒溶液中的铬离子前期很快就被除去,所以2#颗粒SRB活性大于1#颗粒,使2#颗粒对 SO_4^{2-} 的还原速率较高。

3.5 ORP值变化规律

如图5所示,随着时间的不断变化,两组实验中ORP值均不断下降,从第19d起2#颗粒中ORP略有上升。前期两种颗粒吸附溶液中的 Cr^{6+} 使得ORP值不断降低。前期1#颗粒中的ORP值大于2#颗粒,是因为1#颗粒中仍存在一定量的 Cr^{6+} ,而2#颗粒中 Cr^{6+} 基本上已经被褐煤吸附除去。随着反应的继续进行,两种颗粒中的SRB不断还原水中的 SO_4^{2-} 生成 S^{2-} ,使得溶液中的ORP继续不断下降。后期由于2#颗粒中SRB的活性降低,使得ORP的值略有升高。

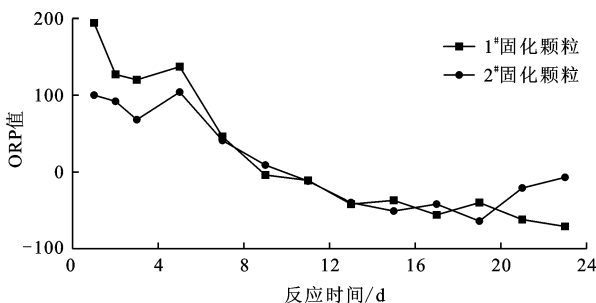


图5 1#、2#固化颗粒溶液中的ORP值随反应时间变化规律

3.6 COD浓度变化规律

如图6所示,随着反应的进行,COD的释放量先上升后下降,而后继续缓慢上升再继续下降。对比两种颗粒,前期1#颗粒COD释放量远远大于2#颗粒。这可能是由于麦饭石中含有 Fe_2O_3 、 Al_2O_3 、 SiO_2 等物质,在酸性条件下能够催化玉米芯水解^[19-20]。

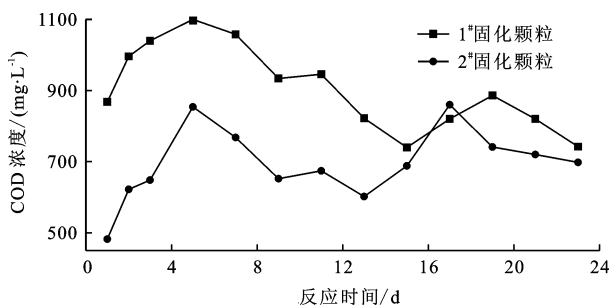


图6 1#、2#固化颗粒溶液中的COD浓度随反应时间变化规律

随着反应的继续进行,从第5d开始,SRB的活性开始慢慢增强,不断消耗水中的有机物,使得

COD逐渐下降。而后,颗粒内部的玉米芯大量被水解,使得水中的COD继续增加。最后,颗粒中的玉米芯基本上已经被水解成有机物,而1#颗粒中的SRB继续消耗水中的有机物,使水中COD下降。而2#颗粒中的SRB活性降低,对水中有机物的利用率大大降低,使得水中COD值几乎不变。对比两种颗粒发现,麦饭石能够促进玉米芯水解,为SRB提供更多的碳源,更加有利于其生存生长。

4 结论

(1)麦饭石和褐煤颗粒均具有调酸能力,但褐煤颗粒的调酸能力较强。

(2)褐煤作为填料固定SRB颗粒处理AMD中 Cr^{6+} 、 SO_4^{2-} 效果明显好于麦饭石颗粒,对AMD中的 Cr^{6+} 、 SO_4^{2-} 的平均去除率分别可达96.57%、36.50%。

(3)由于麦饭石可以催化玉米芯水解,使AMD中的COD含量可高达1100 mg/L。

(4)以麦饭石和褐煤为填料的SRB固定化颗粒虽对AMD有一定的处理效果,但SRB生物生长的活性较慢,应考虑提高生物活性的固定化方法或预处理措施。

参考文献:

- [1] 左莉娜,贺前锋.酸性矿山废水的治理技术现状及进展[J].环境工程,2013,31(5):35-38.
- [2] 商克俭,冯东梅,狄军贞,等.纳米 Fe_3O_4 生物麦饭石颗粒制备最优配比试验研究[J].非金属矿,2018,41(2):11-13.
- [3] 狄军贞,王明昕,赵微,等.麦饭石固定化SRB污泥颗粒处理模拟煤矿酸性废水的适应性[J].环境工程学报,2017,11(7):3985-3990.
- [4] 安文博,王来贵,狄军贞,等.响应曲面法优化SRB固定化颗粒基质中铁屑配比[J].工业水处理,2018,38(10):37-41.
- [5] 狄军贞,王明昕,王晨阳,等.麦饭石SRB污泥固定颗粒的稳定性及生物活性实验[J].非金属矿,2016,39(3):36-39.
- [6] 狄军贞,郭俊杰,董艳荣,等.超声波强化生物麦饭石固定化颗粒处理AMD试验[J].非金属矿,2019,42(4):90-92.
- [7] 魏立国,解丽萍,刘丽来.霍林河褐煤吸附铬离子的实验研究[J].黑龙江科技学院学报,2011,21(2):89-92.
- [8] 屈佳玉.微生物固定化技术及其在污水处理领域的研究进展[J].工业水处理,2010,30(10):14-16.

(下转第43页)

- of several rainfall products used for hydrological applications over West Africa using two high-resolution gauge networks[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 2013, 139(673):923-940.
- [12] HUFFMAN G J, ADLER R F, ARKIN P, et al. The global precipitation climatology project (GPCP) combined precipitation dataset[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 1997, 78(1):5-20.
- [13] ADLER R F, HUFFMAN G J, CHANG A, et al. The Version2 global precipitation climatology project (GPCP) monthly precipitation analysis (1979 - Present) [J]. Journal of Hydrometeorology, 2003, 4(6): 1147-1167.
- [14] 曾红伟, 李丽娟. 澜沧江及周边流域 TRMM 3B43 数据精度检验[J]. 地理学报, 2011, 66(7): 994-1004.
- [15] 嵇涛, 杨华, 刘睿, 等. TRMM 卫星降水数据在川渝地区的适用性分析[J]. 地理科学进展, 2014, 33(10):1375-1386.
- [16] XU Ran, TIAN Fuqiang, YANG Long, et al. Ground validation of GPM IMERG and TRMM 3B42V7 rainfall products over southern tibetan plateau based on a high-density rain-gauge network; Validation of GPM and TRMM over TP[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2017, 122(2):910-924.
- [17] 金晓龙, 邵华, 张弛, 等. GPM 卫星降水数据在天山山区的适用性分析[J]. 自然资源学报, 2016, 31(12):2074-2085.
- [18] LIU Xuemei, ZHANG Mingjun, WANG Shengjie, et al. Assessment of diurnal variation of summer precipitation over Qilian Mountains based on an hourly merged dataset from 2008 to 2014[J]. Journal of Geography Sciences, 2017, 27(3): 326-336.
- [19] FU Tonggang, HAN Lipu, GAO Hui, et al. Pedodiversity and its controlling factors in mountain regions - A case study of Taihang Mountain, China[J]. Geoderma, 2018, 310:230-237.
- [20] 高峰, 周新尧, 孔凡超, 等. 滑动时间窗长度对太行山区雷达反演降水的影响[J]. 气象, 2018, 44(4): 538-547.
- [21] 褚健婷, 夏军, 许崇育, 等. 海河流域气象和天文降水资料对比分析及时空变异[J]. 地理学报, 2009, 64(9):1083-1092.
- [22] JOYCE R J, JANOWIAK J E, ARKIN P A, et al. CMORPH: A method that produces global precipitation estimates from passive microwave and infrared data at high spatial and temporal resolution[J]. Journal of Hydrometeorology, 2004, 5(3):487-503.
- [23] 李显凤, 周自江, 李志鹏, 等. 基于江西省水文资料对中国融合降水产品的质量评估[J]. 气象, 2017, 43(12): 1534-1546.
- [24] MOU Tan, AB I, ZHENG Duan, et al. Evaluation of six high-resolution satellite and ground-based precipitation products over malaysia [J]. Remote Sensing, 2015, 7(2):1504-1528.
- [25] 张皓, 冯利平. 近 50 年华北地区降水量时空变化特征研究[J]. 自然资源学报, 2010, 25(2):270-279.
- [26] SHEN Yan, XIONG Anyuan, WANG Ying, et al. Performance of high-resolution satellite precipitation products over China[J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2010, 115(D02114):1-17.
- [27] 顾西辉, 张强, 孔冬冬. 中国极端降水事件时空特征及其对夏季温度响应[J]. 地理学报, 2016, 71(5):718-730.
- [28] 邵元亭, 刘奇俊, 荆志娟. 祁连山夏季地形云和降水宏微观结构的数值模拟[J]. 干旱气象, 2013, 31(1): 18-23.
- [29] 张蒙蒙, 江志红. 我国高分辨率降水融合资料的适用性评估[J]. 气候与环境研究, 2013, 18(4):461-471.

(上接第 32 页)

- [9] 狄军贞, 江富, 朱志涛, 等. 玉米芯为碳源固定化硫酸盐还原菌污泥代谢特性[J]. 环境工程学报, 2015, 9(4): 1687-1692.
- [10] 狄军贞, 江富, 朱志涛, 等. FeO 协同生物麦饭石的 PRB 系统井下原位处理煤矿酸性废水[J]. 环境工程学报, 2014, 8(12):5111-5116.
- [11] 王鲁敏, 邓昌亮, 于淑静. 龙口褐煤净化含汞废水的研究[J]. 烟台大学学报(自然科学与工程版), 1998, 11(2):153-156.
- [12] 王辉, 戴友芝, 刘川, 等. 混合硫酸盐还原菌代谢过程的影响因素[J]. 环境工程学报, 2012, 6(6):1795-1800.
- [13] 刘翠霞, 邓昌亮, 徐海宁. 龙口褐煤对废水中 Cr(VI) 的吸附与还原[J]. 化工环保, 1996, 16(6):337-342.
- [14] 陈婷, 曹加云, 管登高, 等. MnO₂ 改性麦饭石的制备及其对水中 Cr(VI) 的吸附性能[J]. 安徽化工, 2016, 42(6):50-52+56.
- [15] 张翔凌, 邓礼楚, 方晨佳, 等. 不同类型 LDHs 负载改性麦饭石对 Cr(VI) 吸附性能[J]. 环境科学, 2019, 40(1):300-309.
- [16] 赵宇华, 叶央芳, 刘学东. 硫酸盐还原菌及其影响因子[J]. 环境污染与防治, 1997, 19(5):41-43.
- [17] 马春花, 胡寒桥. 硫酸盐还原菌处理含重金属废水的实验研究[J]. 科技创新导报, 2010(20):5-6.
- [18] 朱志涛. 改性麦饭石固定化 SRB 污泥颗粒修复煤矿酸性废水研究[D]. 阜新:辽宁工程技术大学, 2016.
- [19] 曾翎, 姜华昌, 刘宝鉴, 等. 固体超强酸 SO₄²⁻/Fe₂O₃-Al₂O₃-SiO₂ 的制备及其催化性能[J]. 化工进展, 2010, 29(S1):257-260.
- [20] 狄军贞, 戴男男, 安文博. 铁屑强化麦饭石修复地下水阴离子试验研究[J]. 非金属矿, 2015, 38(3):72-74.