

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2022.375>



电化学-水动力循环耦合井内生物 反应器去除地下水中苯胺

李爽, 文章*, 朱棋, 刘慧, 杨舒婷

中国地质大学环境学院, 湖北武汉 430078

摘要: 为使含水层中苯胺污染的原位修复过程高效安全且不产生二次污染, 提出了一种电化学-水动力循环下的井内生物反应器修复地下水中苯胺的方法. 在水动力循环系统的驱动下, 评价了苯胺在水动力循环系统的挥发情况并且通过电化学手段提供氧气, 井内生物反应器提供修复载体, 在砂槽模拟的含水层体系中开展井内生物反应器降解苯胺的修复实验, 并对生长曲线及含水层中苯胺修复进行了模拟. 289 h 的修复使体系内苯胺平均浓度从 298 mg/L 降低到 132 mg/L, 去除率为 56.5%. 运行过程中, 监测点苯胺平均浓度在 48 h 内去除速率为 1.10 mg/(L·h), 48~72 h 内去除速率为 0.85 mg/(L·h), 72 h 到 289 h 内苯胺去除速率维持在 0.65 mg/(L·h), 氧化降解逐步减弱. 该过程符合 Michaelis-Menten 方程, 反应速率为: $-6.71 \times 10^{-7} / (15+t)^2$. 该修复系统是基于地下水动力循环技术的改进, 有望应用于有机污染地下水修复.

关键词: 苯胺污染; 电化学-水动力循环; 井内生物反应器; 动力学模型; 水文地质.

中图分类号: X523

文章编号: 1000-2383(2022)11-4176-08

收稿日期: 2022-07-14

Removal of Aniline from Groundwater by an Electrochemical-Hydrodynamic Cyclic Coupling In-Well Bioreactor

Li Shuang, Wen Zhang*, Zhu Qi, Liu Hui, Yang Shuting

School of Environmental Studies, China University of Geosciences, Wuhan 430078, China

Abstract: To ensure the efficient and safe in-situ remediation process of aniline contamination in aquifer without secondary pollution, a method for the remediation of aniline in groundwater by an in-well bioreactor under electrochemical and hydrodynamic cycle is proposed. Driven by the hydrodynamic circulation system, the volatilization of aniline in the hydrodynamic circulation system was evaluated and oxygen was provided by electrochemical means. The bioreactor in the well provided the repair carrier. The remediation experiment of aniline degradation by the bioreactor in the well was carried out in the aquifer system simulated by the sand tank. The growth curve and aniline restoration in aquifer were simulated. After 289 hours of repair, the average concentration of aniline in the system was reduced from 298 mg/L to 132 mg/L, and the removal rate was 56.5%. During operation, the removal rate of aniline was 1.10 mg/(L·h) in 48 h, 0.85 mg/(L·h) in 48–72 h, and 0.65 mg/(L·h) in 72 h to 289 h. Oxidative degradation was gradually weakened. The process conforms to the Michaelis-Menten equation, and the reaction rate is $-6.71 \times 10^{-7} / (15+t)^2$. This system is based on the improvement of groundwater dynamic circulation technology, and is expected to be applied to organic groundwater remediation.

基金项目: 国家重点研发计划项目 (No. 2018YFC1802504); 国家自然科学基金项目 (No. 42022018).

作者简介: 李爽 (1997–), 女, 硕士研究生, 从事地下水污染与防治工作. ORCID: 0000-0002-7525-4457. E-mail: 763056016@qq.com

* **通讯作者:** 文章, ORCID: 0000-0001-9672-3219. E-mail: wenz@cug.edu.cn

引用格式: 李爽, 文章, 朱棋, 刘慧, 杨舒婷, 2022. 电化学-水动力循环耦合井内生物反应器去除地下水中苯胺. 地球科学, 47(11): 4176–4183.

Citation: Li Shuang, Wen Zhang, Zhu Qi, Liu Hui, Yang Shuting, 2022. Removal of Aniline from Groundwater by an Electrochemical-Hydrodynamic Cyclic Coupling In-Well Bioreactor. *Earth Science*, 47(11): 4176–4183.

Key words: aniline contamination; electrochemical - hydrodynamic cycle circulation; in - well bioreactor; dynamical model; hydrogeology.

0 引言

苯胺易溶于水且能随地下水流动迁移、毒性强且难生物降解,属于持久性污染物(Itoh *et al.*, 1993; Hu *et al.*, 2015; Hou *et al.*, 2018; Liu *et al.*, 2020; 李旭等, 2022). 根据污水综合排放标准(GB8978-1996),苯胺二级废水排放标准为 2 mg/L. 根据前人研究报道,污染场地地下水苯胺的含量范围大约为 20 $\mu\text{g/L}$ ~2 500 mg/L(Wen *et al.*, 2015; 李坡等, 2021; Liu *et al.*, 2021). 苯胺广泛应用于印染、橡胶、塑料、农药、医药、炸药、汽油等领域(Itoh *et al.*, 1993; Zhang *et al.*, 2008, 2021). 苯胺引起的环境问题经常发生,如中石油吉林石化分公司苯胺泄露引发松花江水污染事件. 近年来,地下水动力循环等技术应用于地下水原位修复,取得了较好的效果(Yuan *et al.*, 2021). 挥发性有机污染物如三氯乙烯的修复已被广泛报道,但苯胺这种半挥发性污染物的修复却鲜有报道(Zhao *et al.*, 2016). 为了有效地处理含水层中低挥发性污染物,井内生物反应器等生物处理技术以其低成本,操作简单,无二次污染物的优势受到了青睐(Liu *et al.*, 2015, 2016; Jiang *et al.*, 2019). 在工业污水处理中红球菌、戴尔福特菌、丛毛单胞菌、欧文氏菌属、假丝酵母、食酸菌和假单胞菌等苯胺降解菌已广泛应用(Zhang *et al.*, 2008; Hou *et al.*, 2018),在地下水中应用较为广泛的菌种是假单胞菌(Zhao *et al.*, 2016), Zhang *et al.* (2011)从污泥中分离出一种易获取,价格低廉的苯胺降解菌,即污泥根瘤菌 *Rhizobium borbori*,该菌株是一种好氧菌,降解效果良好且在地下水的原位修复中应用较少. Gibert *et al.* (2007)研究表明,在好氧条件下,地下水原位生物修复对某些污染物效果更好,电化学法通过电解水产生氧气给污泥根瘤菌供氧,是一种绿色无二次污染的供氧方式(刘洋等, 2020, 2021). 本研究通过搭建模拟生物反应器,电解水供氧,在水动力循环作用下,选择典型有机污染物苯胺(AN)作为目标污染物,考察生物反应器在电化学循环井下对苯胺(AN)的去除效果,同时,探究了污泥根瘤菌对苯胺的耐受程度,为开发新的地下水苯胺污染的修复方法提供技术支持. 并进行了适应性挂膜,利用适当数学表达式揭示系统内微生物的去除规律(Alvarez and Speitel, 2001),为

地下水中生物治理有机污染提供一定的依据.

1 材料与方法

1.1 实验材料

苯胺储备液由一定量的苯胺和 1/2H₂SO₄混合制成,N-(1-萘基)乙二胺盐酸盐等化学试剂(分析纯)均购自国药集团,电源(MT152D 15V2A 30W),MMO 电极购于陕西开达化工有限公司. 实验所用生物载体为维纶丝,购自宜兴市联益环保有限公司,污泥根瘤菌购自北纳创联生物科技有限公司. 实验用水均为超纯水(18.2 M Ω ·cm),取自 NW 超纯水机(香港力康).

1.2 实验装置

试验装置图如图 1 所示,有机玻璃二维砂槽长 70 cm,宽 10 cm,高 62 cm,总体积为 43.4 L. 砂槽侧面分布了 6 排 6 列的取样口,从上到下分别编号为 1、2、3、4、5、6,从左至右编号分别为 A、B、C、D、E、F. 砂槽中间部分均匀填充 40~80 目的石英砂,将配好的苯胺溶液(330 mg/L 20 L)通过蠕动泵注入砂槽体系,构成潜水含水层. 通过测压板与取样孔连接获得水位,为使地下水形成循环,从右边井筒抽出通过井筒上方所连接硅胶管(7.9 $\times$ 11.1 mm)以等流量(80.64 mL/min)注入左侧井筒中,硅胶管底部位于井筛中部,通过筛孔流入含水层中,并且通过右侧筛孔流出含水层进入右侧井筒,构成循环. 抽水井内部放置 MMO 电极(80 $\times$ 20 mm)、DO 探头和生物反应器,用于降解苯胺同时监测溶解氧.

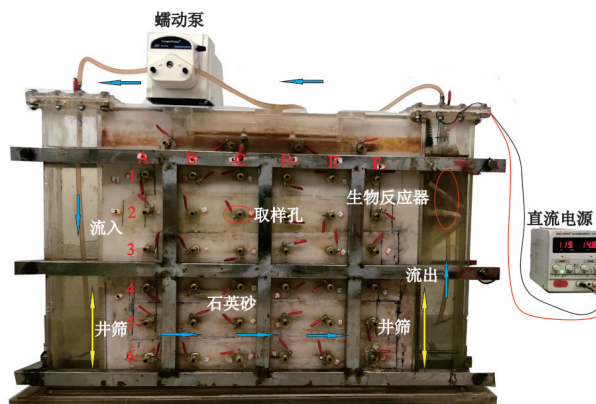


图 1 实验装置

Fig.1 Diagram of experimental device

1.3 实验过程

1.3.1 静态批实验 (1)污泥根瘤菌对苯胺的耐受性的测定:取同一株菌种(OD600 在 0.4~0.8)各 100 μL,接种到 10 mL 离心管中,分别添加 150 μL、100 μL、50 μL、40 μL、30 μL、20 μL、10 μL、0 μL 苯胺,加入牛肉膏蛋白胨液体培养基至 10 mL 刻度线,在 30 ℃ 恒温培养箱中培养,每小时测一次 OD600,平行测定 3 次,共测试 96 h.(2)载体适应性挂膜:将维纶丝放入不含苯胺的菌液 96 h,移入适应性挂膜浓度范围内的含一定苯胺浓度菌液的锥形瓶中,进行曝气,使污泥根瘤菌适应性生长.

1.3.2 二维砂槽实验 (1)苯胺挥发情况的评价:在蠕动泵转速为 80.64 mL/min 的条件下,仅进行地下水循环 237 h,每天监测 A2、A6、B3、B5、C1、C4、D2、D6、E1、E4、F3、F5 共 12 个点位的苯胺浓度以评价水动力循环系统作用下苯胺的挥发情况.(2)电化学-水动力循环强化下的井内生物反应器技术修复苯胺污染含水层:在蠕动泵转速为 80.64 mL/min,电流为 200 mA 的条件下,将电极和第一部分中挂好膜的生物载体同时放入抽水井井筒内,采用电化学-水动力循环下的井内生物反应器技术去除地下水中苯胺,采取连续通电方式,共通电 289 h,每天监测上述 12 个点位的苯胺浓度以探究该体系下苯胺的去除情况,同时监测抽水井中溶解氧的变化情况,溶解氧采用便携式溶解氧仪(AZ8403,台湾衡欣)测定,并测定了实验开始和结束时的 NH_4^+ 和 NO_3^- 浓度.

1.4 分析方法

生物量的测定(Zhao *et al.*, 2016)采用酶标仪(HBS-1101)测定光密度,载体上生物量和培养液中生物量测定波长分别为 570 nm 和 600 nm.酶标仪设定检测温度为 30 ℃,水样中苯胺浓度依据水质苯胺类化合物的测定 N-(1-萘基)乙二胺偶氮分光光度法(GB11889-89),检测限为 0.03~10 mg/L.阴阳离子含量采用离子色谱仪(Eco IC,瑞士万通)进行检测.

2 结果与讨论

为使污泥根瘤菌适应苯胺含量尽可能高的环境,需测定污泥根瘤菌对于苯胺的耐受程度.对微生物在 200 mg/L、250 mg/L、300 mg/L、350 mg/L、400 mg/L、450 mg/L、500 mg/L 的苯胺浓度下的生长进行了监测,平行测定 3 次取平均值,绘制了图 2 的生长曲线.采用最小二乘法进行非线性拟合.从低浓度到高浓度,图中 R^2 依次为 0.908 1、

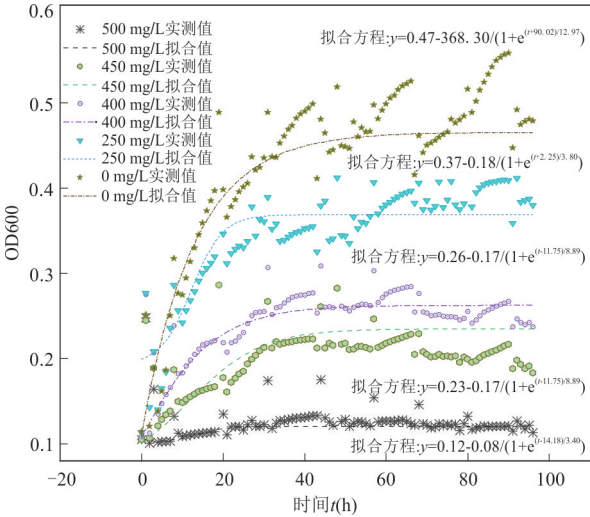


图 2 不同浓度苯胺条件下微生物生长曲线及其拟合曲线

Fig.2 Microbial growth curves and their fitting curves under different concentrations of aniline



图 3 挂膜前和挂膜后的生物载体
Fig.3 Biological carriers before and after membrane hanging

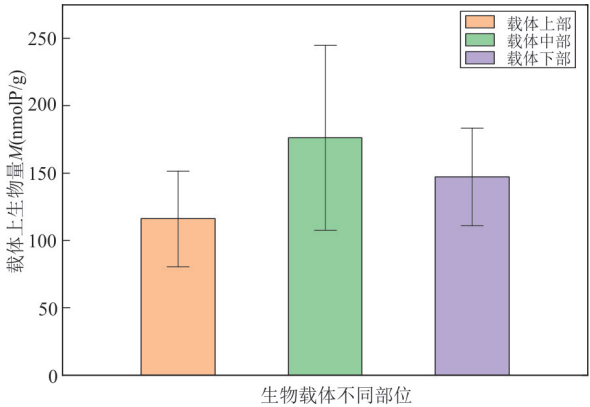


图 4 砂槽体系中初始时刻载体不同部位的生物量分布情况
Fig.4 Biomass distribution of different parts of the carrier at the initial time in the sand tank system

0.939 8、0.936 6、0.925 8、0.947 0、0.915 8、0.870 7、0.769 5,拟合效果良好,拟合曲线稳定时的生物量为最大生长量.

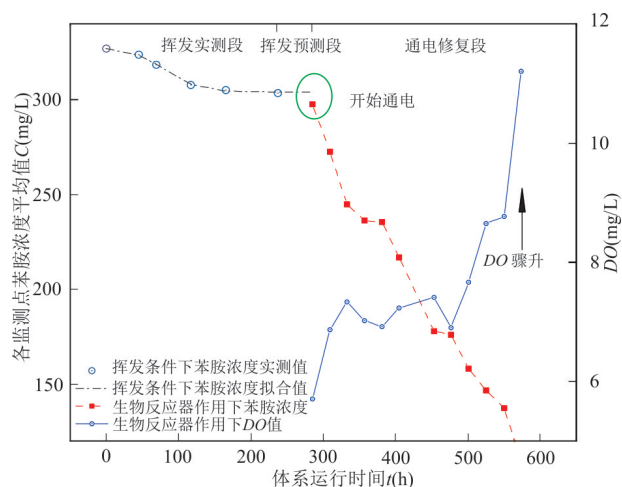


图5 含水层监测点苯胺平均浓度和井筒中 DO 随时间的变化

Fig.5 The average concentration of aniline in aquifer monitoring points and the change of DO in wellbore with time

随着苯胺浓度升高,最大生长量逐步降低,污泥根瘤菌的生长逐步受到抑制,且在苯胺浓度在 500 mg/L 时,OD600 维持在 0.1 左右,说明此时污

泥根瘤菌已基本不生长.为避免苯胺浓度太高导致污泥根瘤菌不生长,且污泥根瘤菌能适应砂槽体系内高浓度的苯胺,所以本次实验采用苯胺含量 350 mg/L 的菌液进行适应性生长挂膜.图 3 左图和右图分别为挂膜前后载体的图片,经过适应性挂膜,生物载体上负载了厚厚的生物膜.图 4 为污泥根瘤菌在实验砂槽体系中的初始时刻载体上不同部位分布的生物量情况,结果以 nmolP/g 载体表示,1 nmolP 约相当于大肠杆菌大小的细胞 10^8 个,误差棒表示测试 3 次的标准差.此时,载体上附着微生物量上部为 116.28 nmolP/g,中部为 176.30 nmolP/g,下部为 147.37 nmolP/g.由于污泥根瘤菌并不能以苯胺为唯一碳源、氮源生长,且缺乏生长必要的磷源,因此在实验砂槽体系中投加复合碳源、氮源 NH_4Cl 、磷源 KH_2PO_4 ,以模拟实际含水层中的苯胺修复情况.

Yuan *et al.* (2021) 通过地下水循环评价了三氯乙烯在砂槽体系中的挥发及吸附,因此,本次实验也采用地下水循环来评估苯胺的挥发和吸附.图 5 中前 237 h 描述了苯胺的挥发及吸附情况,通过

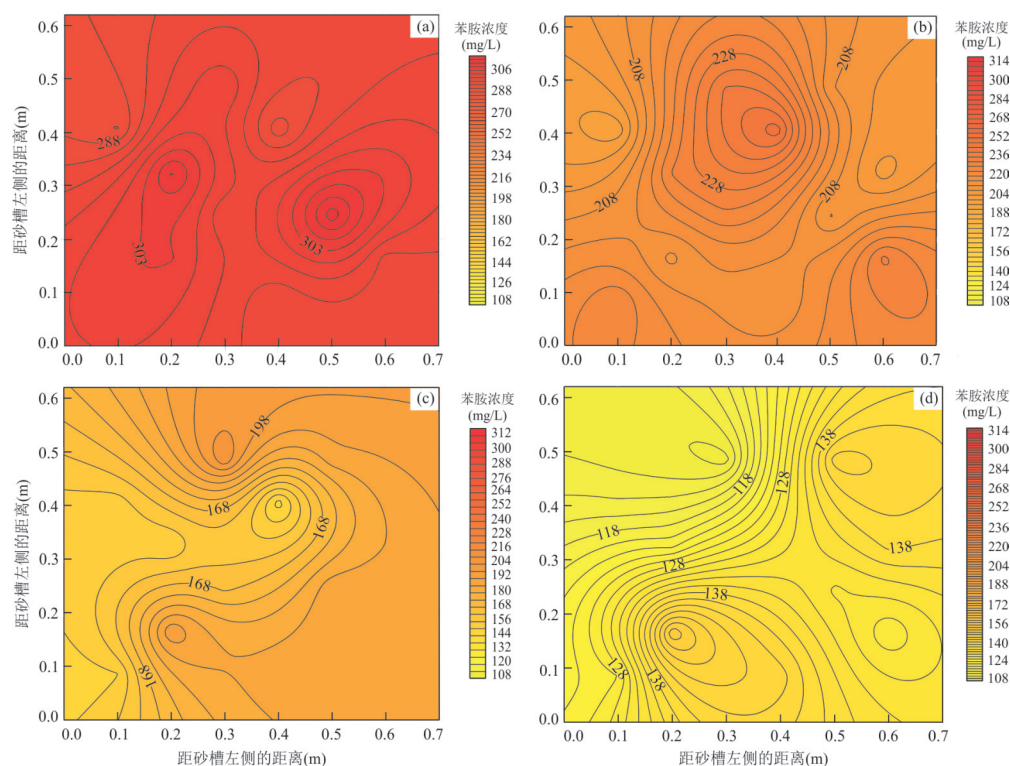


图6 含水层中砂槽内苯胺浓度分布变化图

Fig.6 Distribution change of aniline concentration in sand tank in aquifer

a. $t=0$ h; b. $t=120$ h; c. $t=196$ h; d. $t=289$ h

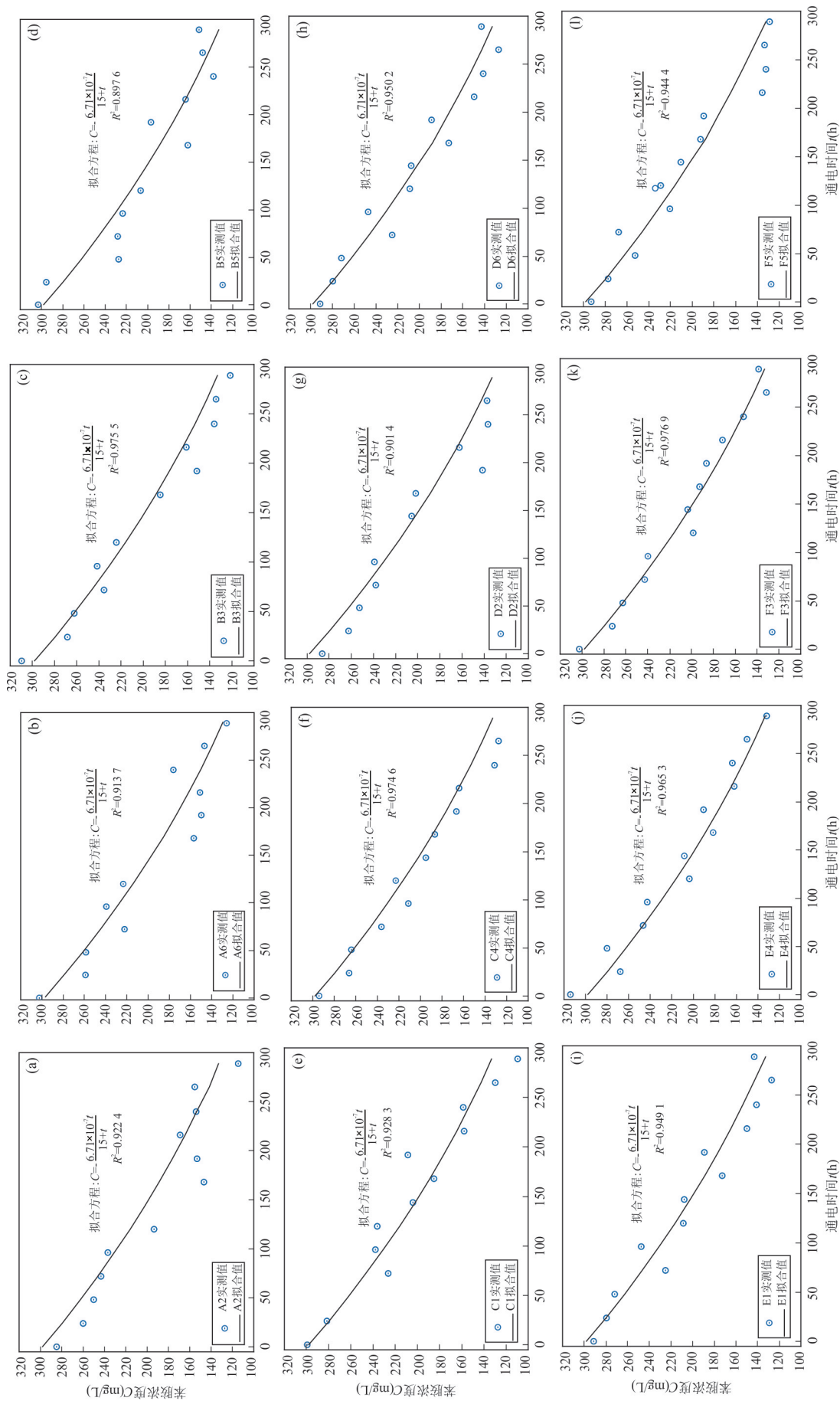


图7 苯胺浓度模拟图

Fig.7 Simulation diagram of aniline concentration

a.A2; b.A6; c.B3; d.B5; e.C1; f.C4; g.D2; h.D6; i.E1; j.E4; k.F3; l.F5

Boltzmann 函数对砂槽体系内苯胺浓度变化情况进行拟合,拟合方程为 $C = 303.92 + 23.76 / \left(1 + e^{\frac{t-80.3}{22.92}} \right)$, $R^2 = 0.9984$. 通过该方程对后期修复过程中体系苯胺的挥发情况进行预测,在通电前 48 h 内, $C = 303.92$ mg/L, 苯胺的挥发损失可忽略不计,吸附已达到平衡.

体系运行 285~574 h,在水动力循环的基础上,开始电解水并使用生物反应器修复,砂槽体系中各监测点位平均浓度及生物反应器附近的溶解氧变化情况如图 5 所示.电解水在阳极产生 O_2 , O_2 是有氧化降解的电子受体(刘洋等, 2020; Yuan *et al.*, 2021). 污泥根瘤菌 DN316^T (=CICC 10378T = LMG 23925T),基因组成为 DNA G+C 60.9 mol% (Zhang *et al.*, 2011),分裂生长利用氧气、 NH_4^+ 、 $H_2PO_4^-$ 产生物质、二氧化碳和水(Erdal and Cirpka, 2017). 污泥根瘤菌是一种专性好氧菌(Zhang *et al.*, 2011),苯胺加氧酶是在有氧条件下苯胺初始分解代谢的所必需的酶,在苯胺加氧酶的作用下,苯胺转换成邻苯二酚(Kahng *et al.*, 2000),在该代谢过程中,苯胺中的氨基与芳香环之间的键会断裂,从而释放出 NH_4^+ (Jiang *et al.*, 2017). 将 298 mg/L 的苯胺降解到 132 mg/L 可产生约 25.03 mg/L 的 NH_4^+ ,而 NH_4^+ 从初始 1 600 mg/L 降低到 0.06 mg/L,这说明被污泥根瘤菌的代谢充分利用(He *et al.*, 2020; 赵淑凤等, 2021). 在 265~289 h 内,溶解氧骤然升高且在 289 h 时监测点已监测不到微生物存在,这可能是由于实验初始投放的 NH_4^+ 已几乎消耗完全,推测可能是因为缺乏氮源导致微生物死亡进而导致实验无法继续降解.图 6 描述了在电解水、水动力循环及生物反应器作用下,砂槽体系中 A2、A6、B3、B5、C1、C4、D2、D6、E1、E4、F3、F5 共 12 个采样点的苯胺浓度在通电时间 $t = 0$ h, 120 h, 196 h, 289 h 的分布图.苯胺浓度在每个时间都基本分布均匀,这说明水循环是充分的.同时,水动力循环促进 O_2 和苯胺及污泥根瘤菌的有效接触与反应,使苯胺被污泥根瘤菌好氧降解.通电 48 h 内监测点苯胺平均浓度降低 1.10 mg/(L·h),苯胺去除速率较快;通电 48~72 h 内平均浓度降低 0.85 mg/(L·h),苯胺去除速率减慢;从 72~289 h,苯胺浓度降低速率维持在 0.65 mg/(L·h).苯胺去除速率变化与混合阶 Michaelis-Menten (MME) 动力学表达式变化速率基本一致(Liu *et*

al., 2015),用 MME 方程对不同取样孔苯胺浓度随时间变化情况进行拟合结果如图 7 所示,该方程中 K_c 表示最大特定利用率或一级底物的利用率, K_{sc} 表示代谢底物的半饱和系数.污泥根瘤菌在苯胺中的细胞生长动力学模型和降解动力学模型中,不同点位: A2、A6、B3、B5、C1、C4、D2、D6、E1、E4、F3、F5 的 R^2 分别为: 0.922 4、0.913 7、0.975 5、0.897 6、0.928 3、0.974 6、0.901 4、0.950 2、0.949 1、0.965 3、0.976 9、0.944 4,拟合性良好,反应速率为 $-6.71 \times 10^{-7} / (15+t)^2$, $K_c = 25$ mg⁻¹d⁻¹, $K_{sc} = 15$ mg/L.

由于苯胺水动力循环作用下的挥发可忽略不计,苯胺在电化学-井内生物反应器-水动力循环系统中的实际去除率为 56.5%. 该修复过程通过水动力循环加速了苯胺与生物、 O_2 的结合速率,可以应用于有机污染地下水原位修复.

3 结论与建议

本文针对含水层中苯胺污染开展了研究,分别探究了污泥根瘤菌对苯胺浓度的耐受程度并进行了适应性挂膜、采用电化学-水动力循环系统在井内生物反应器介导下对苯胺的降解,并通过动力学模型刻画了苯胺的降解情况.模拟含水层修复结果表明,该体系效果较好,289 h 连续通电及生物修复后,含水层中苯胺浓度从 298 mg/L 降低到 132 mg/L,去除率达 56.5%. 地下水电解产生的 O_2 可有效用于原位生物降解苯胺.拟合所得方程可用于实际修复过程的参数及反应速率预测,实际应用中菌种的投加量可根据苯胺浓度确定,但需综合考虑其引起的生物堵塞等问题(Zhu *et al.*, 2019),如何提高利用污泥根瘤菌对苯胺的降解率及探究降解机制、服务于地下水修复过程,还需要进一步研究.

References

- Alvarez-Cohen, L., Speitel, G. E., 2001. Kinetics of Aerobic Cometabolism of Chlorinated Solvents. *Biodegradation*, 12(2): 105–126. <https://doi.org/10.1023/a:1012075322466>
- Erdal, D., Cirpka, O. A., 2017. Preconditioning an Ensemble Kalman Filter for Groundwater Flow Using Environmental-Tracer Observations. *Journal of Hydrology*, 545: 42–54. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.11.064>
- Gibert, O., Ferguson, A. S., Kalin, R. M., et al., 2007. Performance of a Sequential Reactive Barrier for Bioremediation of Coal Tar Contaminated Groundwater. *En-*

- Environmental Science & Technology*, 41(19): 6795–6801. <https://doi.org/10.1021/es071527f>
- He, Q., Song, J., Zhang, W., et al., 2020. Enhanced Simultaneous Nitrification, Denitrification and Phosphorus Removal through Mixed Carbon Source by Aerobic Granular Sludge. *Journal of Hazardous Materials*, 382: 121043. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.121043>
- Hou, L. F., Wu, Q. P., Gu, Q. H., et al., 2018. Community Structure Analysis and Biodegradation Potential of Aniline-Degrading Bacteria in Biofilters. *Current Microbiology*, 75(7): 918–924. <https://doi.org/10.1007/s00284-018-1466-4>
- Hu, R., Dai, S., Shao, D., et al., 2015. Efficient Removal of Phenol and Aniline from Aqueous Solutions Using Graphene Oxide/Polypyrrole Composites. *Journal of Molecular Liquids*, 203: 80–89. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2014.12.046>
- Itoh, N., Morinaga, N., Kouzai, T., 1993. Oxidation of Aniline to Nitrobenzene by Nonheme Bromoperoxidase. *European Radiology Experimental*, 29(4): 785–791.
- Jiang, Y., Wei, L., Yang, K., et al., 2017. Rapid Formation of Aniline-Degrading Aerobic Granular Sludge and Investigation of Its Microbial Community Succession. *Journal of Cleaner Production*, 166: 1235–1243. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.08.134>
- Jiang, Y., Yang, K., Shang, Y., et al., 2019. Response and Recovery of Aerobic Granular Sludge to pH Shock for Simultaneous Removal of Aniline and Nitrogen. *Chemosphere*, 221: 366–374. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.12.207>
- Kahng, H. Y., Kukor, J. J., Oh, K. H., 2000. Characterization of Strain HY99, a Novel Microorganism Capable of Aerobic and Anaerobic Degradation of Aniline. *FEMS Microbiology Letters*, 190(2): 215–221. <https://doi.org/10.1111/j.1574-6968.2000.tb09289.x>
- Li, P., Pu, S.Q., Li, J.S., et al., 2021. Remediation of Aniline Contaminated Groundwater by Reaction Zone with the Sodium Persulfate Sustained Release Capsules Reaction Zone. *China Environmental Science*, 41(12): 5718–5727 (in Chinese with English abstract).
- Li, X., Su, S.L., Wen, Z., et al., 2022. Numerical Analysis of Estimating Groundwater Velocity through Single-Well Push-Pull Test. *Earth Science*, 47(2): 633–641 (in Chinese with English abstract).
- Liu, H., Lin, H., Song, B., et al., 2021. Stable-Isotope Probing Coupled with High-Throughput Sequencing Reveals Bacterial Taxa Capable of Degrading Aniline at Three Contaminated Sites with Contrasting pH. *The Science of the Total Environment*, 771: 144807. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144807>
- Liu, L., Binning, P. J., Smets, B. F., 2015. Evaluating Alternate Biokinetic Models for Trace Pollutant Cometabolism. *Environmental Science & Technology*, 49(4): 2230–2236. <https://doi.org/10.1021/es5035393>
- Liu, N., Ding, F., Wang, L., et al., 2016. Coupling of Bio-PRB and Enclosed In-Well Aeration System for Remediation of Nitrobenzene and Aniline in Groundwater. *Environmental Science and Pollution Research*, 23(10): 9972–9983. <https://doi.org/10.1007/s11356-016-6206-3>
- Liu, R.M., Teng, Q., Wen, K.P., et al., 2020. The Environmental Functions and Ecological Effects of Organic Carbon in Silt. *Journal of Earth Science*, 31(4): 834–844. <https://doi.org/10.1007/s12583-020-1349-z>
- Liu, Y., Xie, W.J., Zheng, Y.S., et al., 2021. Electrolytic Circulation Well Drives Chemical Oxidation of TCE in a Simulated Aquifer. *Earth Science Frontiers*, 28(5): 197–207 (in Chinese with English abstract).
- Liu, Y., Yuan, S.H., Zhang, Y.Q., et al., 2020. Electrolytic Circulation Well Coupled with Oxidation and Reduction for Trichloroethylene Degradation in Groundwater. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 47(3): 44–51 (in Chinese with English abstract).
- Wen, Y.J., Yang, Y.S., Ren, H.J., et al., 2015. Chemical-Biological Hybrid Reactive Zones and Their Impact on Biodiversity of Remediation of the Nitrobenzene and Aniline Contaminated Groundwater. *Chemical Engineering Journal*, 280: 233–240. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2015.05.123>
- Yuan, S. H., Liu, Y., Zhang, P., et al., 2021. Electrolytic Groundwater Circulation Well for Trichloroethylene Degradation in a Simulated Aquifer. *Science China Technological Sciences*, 64(2): 251–260. <https://doi.org/10.1007/s11431-019-1521-7>
- Zhang, G. X., Ren, S. Z., Xu, M. Y., et al., 2011. *Rhizobium borbori* sp. nov., Aniline-Degrading Bacteria Isolated from Activated Sludge. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 61(pt4): 816–822. <https://doi.org/10.1099/ij.s.0.022228-0>
- Zhang, T., Zhang, J., Liu, S., et al., 2008. A Novel and Complete Gene Cluster Involved in the Degradation of Aniline by Delftia sp. AN3. *Journal of Environmental Sciences (China)*, 20(6): 717–724. [https://doi.org/10.1016/s1001-0742\(08\)62118-x](https://doi.org/10.1016/s1001-0742(08)62118-x)
- Zhang, W., Zhang, Q., Li, M., et al., 2021. Microbial Community and Function Evaluation in the Start-up Period of Bioaugmented SBR Fed with Aniline Wastewater.

- Bioresource Technology*, 319: 124148. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.124148>
- Zhao, S.F., Liu, H., Zhao, L., et al., 2021. Responses of Different Iron and Nitrogen Transformation Functional Microorganisms to Fe(II) Chemical Oxidation. *Earth Science*, 46(4): 1481—1489 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, Y. S., Qu, D., Zhou, R., et al., 2016. Efficacy of Forming Biofilms by *Pseudomonas Migulae* AN-1 toward In Situ Bioremediation of Aniline-Contaminated Aquifer by Groundwater Circulation Wells. *Environmental Science and Pollution Research*, 23(12): 11568—11573. <https://doi.org/10.1007/s11356-016-6737-7>
- Zhu, Q., Wen, Z., Liu, H., 2019. Microbial Effects on Hydraulic Conductivity Estimation by Single-Well Injection Tests in a Petroleum-Contaminated Aquifer. *Journal of Hydrology*. 573: 352—364. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.03.031>
- ### 附中文参考文献
- 李坡, 蒲思淇, 李劲松, 等, 2021. 过硫酸钠缓释胶囊反应带修复苯胺污染地下水. *中国环境科学*, 41(12): 5718—5727.
- 李旭, 苏世林, 文章, 等, 2022. 单井注抽试验测算地下水流速的数值分析. *地球科学*, 47(2): 633—641.
- 刘洋, 谢雯静, 郑云松, 等, 2021. 电化学循环井驱动模拟含水层化学氧化降解三氯乙烯. *地学前缘*, 28(5): 197—207.
- 刘洋, 袁松虎, 张耀强, 等, 2020. 电化学循环井耦合氧化-还原降解地下水中三氯乙烯. *水文地质工程地质*, 47(3): 44—51.
- 赵淑凤, 刘慧, 赵磊, 等, 2021. 不同铁、氮转化功能微生物对 Fe(II) 化学氧化的响应. *地球科学*, 46(4): 1481—1489.