

王雪晶,杨再福,吴小倩,等. 电场强化铁炭修复地下水中苯和二甲苯的研究[J]. 江苏农业科学,2016,44(12):501-505.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2016.12.149

电场强化铁炭修复地下水中苯和二甲苯的研究

王雪晶,杨再福,吴小倩,余 阳,张姚姚

(东华大学环境科学与工程学院,上海 201620)

摘要:利用外加电场强化铁炭修复地下水中的苯和二甲苯污染,根据试验结果确定最佳条件:修复苯和二甲苯污染地下水的零价铁与活性炭的最佳比例分别为 1:1.5、1:1,修复的最佳 pH 值分别为 5.5、4.5,外加电场强化零价铁与活性炭联合修复苯和二甲苯的适宜电压分别为 18、27 V,可使苯和二甲苯的去除率分别达到 78.63% 和 94.17%。外加电场强化铁炭混合修复苯和二甲苯污染地下水可以使去除率比单独铁炭混合提高 28%~34%。

关键词:农用地;地下水;苯污染;二甲苯污染;零价铁;活性炭;外加电场;混合修复;污染治理

中图分类号: X523 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2016)12-0501-05

地下水是人类生活以及农业生产的重要水源,然而随着社会经济的快速发展和人类活动的一系列影响,地下水污染越来越严重,对农业生产带来严重危害。其中苯系物因管理和储存不当以及加工和运输过程中引起泄漏而导致的地下水污染情况也非常严重^[1-2]。这些排放物通过河流最终使地下水间接受到影响,许多地区河流以及地下水中已被检出苯类物质浓度很高^[3-4]。苯和二甲苯是地下水中常见的污染物^[5-10],在 2008—2010 年间全国 31 个省 69 个城市地下水有机污染物检测^[11]中,我国城市地下水中苯的超标率为 0.5%,超标率为第二大有机物。2014 年兰州发生地下水苯含量超标事件,自流沟苯含量远超出国家限值,达 10 $\mu\text{g/L}$ ^[12]。在 1985—2002 年,美国地质调查局对 5 000 多口地下水井的 55 种挥发性有机物的连续监测结果表明,二甲苯污染居第 8 位,浓度超过 0.2 $\mu\text{g/L}$,而苯污染居第 4 位^[13-15]。苯和二甲苯均

是 USEPA 公布的 129 种优先控制污染物,也是我国水环境优先控制污染物。由于地下水资源对农业的重要影响,地下水中苯类污染物的去除研究已成为必须。

零价铁具有良好的还原性以及吸附作用^[16-21],在与水接触后发生自动还原的过程,为苯的吸附和迁移转化提供了电子,起着电子源作用^[22-24]。Plagentz 等用零价铁柱和活性炭柱顺序联合处理苯,发现零价铁作为预处理方法可以去除大部分苯等有机物,再经过后续活性炭的吸附作用^[25],地下水中苯等有机物可以被有效去除 50%。李萌等通过试验制备铁炭填料,发现利用铁炭微电解原理处理有机污水可以使苯类有机物的去除率达到 70% 左右^[26]。但外加电场对微电解作用的影响研究迄今尚未见报道。本研究以含苯、二甲苯模拟地下水为研究对象,研究了在外加电场强化作用下,零价铁、活性炭和铁炭混合对地下水中苯和二甲苯的修复效果,探讨外加电场对铁炭微电解及对地下水中苯系物修复的影响,为农业用地中地下水中苯系物的污染与治理提供科学的参考。

收稿日期:2015-12-10

基金项目:上海市松江科技攻关项目(编号:14SJGGQT03)。

作者简介:王雪晶(1990—),女,内蒙古包头人,硕士研究生,主要从事地下水污染控制方面的研究。E-mail:1049051586@qq.com。

通信作者:杨再福,博士,副教授,主要从事土壤、地下水污染控制方面的研究。E-mail:1536178386@qq.com。

较好的脱色效果。

用所合成的双氰胺-甲醛絮凝剂处理 150 mL 丽春红(100 mg/L)染料废水的最佳工艺条件是:絮凝剂的加入量为 5 g, pH 值为 8,沉降时间为 120 min,搅拌速度为 120 r/min,搅拌时间为 20 min。

用该工艺处理实际印染废水,脱色率为 67.48%。

参考文献:

- [1] 赵 雪,何瑾馨,展义臻. 印染废水处理技术的研究进展[J]. 化学工业与工程技术,2009,30(2):38-43.
- [2] 汤继军,高 枫. 双氰胺-甲醛缩聚物脱色剂的研究及应用[J]. 工业水处理,2002,22(4):27-28.
- [3] 邓书平. 复合絮凝剂的制备及其对印染废水的处理效果[J]. 中

1 材料与方法

1.1 仪器与材料

主要仪器:GC7900 气相色谱仪,上海天美科学仪器有限公司;FID 检测器,上海天美科学仪器有限公司;HT-5 小口

国非金属矿工业导刊,2010(2):43-45.

- [4] 刘占孟,聂发辉,汪群慧,等. 新型铁镁复合絮凝剂的制备及其处理印染废水的实验研究[J]. 环境污染与防治,2011,33(4):29-32.
- [5] 尚玉婷,陈 莉. 壳聚糖-TiO₂ 复合絮凝剂的制备及其在印染废水处理中的应用[J]. 天津工业大学学报,2013,32(3):56-60.
- [6] 王圆广,赵 丹. 聚合氯化铝铁与聚丙烯酰胺复合絮凝剂的制备及其对印染废水的处理[J]. 辽宁化工,2014,43(9):1131-1133.
- [7] 史会剑,朱大伟,胡欣欣,等. 印染废水处理技术研究进展探析[J]. 环境科学与管理,2015,40(2):74-77.
- [8] 贾艳萍,宗 庆,张兰河,等. 粉煤灰絮凝剂的制备及其在印染废水处理中的应用进展[J]. 硅酸盐通报,2015,34(3):733-737.
- [9] GB 11903—1989 水质色度的测定[S]. 国家环境保护局,1989.

径毛细管柱(30 m×0.32 mm×2.65 μm),上海星钛色谱仪器科技有限公司;恒温培养摇床,上海申贤恒温设备厂;电热鼓风干燥箱 DHG-9070A,上海一恒科技有限公司;电子天平 FA1004,上海恒平科学仪器有限公司;移液器(10~100 μL),BIOHIT 公司;移液器 YE3K069794(100~1 000 μL),Dragon-lab 公司;PB-10 型酸度计,Sartorius 公司;精密 pH 试纸,上海三爱思试剂有限公司(原上海试机三厂)。

试验材料:零价铁,分析纯,国药集团化学试剂有限公司;活性炭(颗粒),分析纯,上海凌风化学试剂有限公司;苯,分

析纯,国药集团化学试剂有限公司;二甲苯,分析纯,上海凌风化学试剂有限公司;甲醇,分析纯,上海凌风化学试剂有限公司;正己烷,分析纯,江苏省常熟市杨园化工有限公司。试验所用水为去离子水。

1.2 污染地下水

取上海松江区地下水井中的地下水然后加入苯、二甲苯模拟污染地下水,地下水水样的苯浓度为 100 mg/L,二甲苯浓度为 300 mg/L。地下水中苯与二甲苯污染后基本性质见表 1。

表 1 苯、二甲苯基本性质

性质	分子式	分子量(g/mol)	水中溶解度(mg/L)	密度(20℃)(g/mL)	电导率(S/cm)	纯度
苯	C ₆ H ₆	78.12	1 790	0.88	7.6×10 ⁻⁸	AR
二甲苯	C ₆ H ₄ (CH ₃) ₂	106.17	178	0.86	<1.0×10 ⁻¹⁵	AR

1.3 试验方法

1.3.1 单因素试验 将地下水污染的苯和二甲苯水样各分 5 组放入 100 mL 锥形瓶,加入 100 mL 待处理的苯和二甲苯水样,分别用零价铁、活性炭、零价铁+活性炭处理水样,在恒温振荡箱中以 100 r/min 速度在 25℃条件下振荡 10 h,再静置 2 h。取液面 2 cm 下方清液 5 mL 经正己烷萃取后,取上层有机萃取液放入气相色谱仪分析,测定其中苯和二甲苯的含量。试验平行样 2 组,取其平均值。

1.3.2 外加电场联合处理试验 将地下水污染的苯和二甲苯水样在外加直流电压 9、18、27 V 的电强化作用下,分别用零价铁、活性炭、零价铁联合活性炭处理水样,静置反应 10 h,取 5 mL 水样经正己烷萃取后,取上层有机萃取液放入气相色谱仪进行分析,测定其中苯和二甲苯的含量。试验重复 2 次,取其平均值。

1.3.3 正交试验 根据上述单因素试验得到的最佳条件,制备一定量的处理水,分 3 组放入 2 000 mL 烧杯,各加入 500 mL 待处理的水样,按照表 2、表 3 确定设计正交试验,以

9、18、27 V 的外加电直流压静置反应 10 h,取 5 mL 水样经正己烷萃取后,取上层有机萃取液放入气相色谱仪进行分析。进行正交试验以确定最适铁炭比、pH 值、铁炭投加总量以及外加直流电压大小。

表 3 外加电场与铁炭联合修复地下水中二甲苯污染的最佳条件确定

其他因素	二甲苯污染地下水试验主要考察因素				
	铁炭比	pH 值	投加量(g)	电压(V)	联合处理
铁炭比	1:0.25	1:1	1:1	1:1	1:1
	1:0.5				
	1:1				
	1:1.5				
	1:02				
pH 值	6	2.5	4.5	4.5	4.5
		3.5			
		4.5			
		5.5			
		6.5			
投加量(g)	1.0	1.0	0.5	1.0	5.0
			1.0		
			3.0		
			5.0		
			10.0		
电压(V)				9	27
				18	
				27	

表 2 外加电场与铁炭联合修复地下水中苯污染的最佳条件确定

其他因素	苯污染地下水试验主要考察因素				
	铁炭比	pH 值	投加量(g)	电压(V)	联合处理
铁炭比	1:0.25	1:1.5	1:1.5	1:1.5	1:1.5
	1:0.5				
	1:1				
	1:1.5				
	1:2				
pH 值	6	2.5	5.5	5.5	5.5
		3.5			
		4.5			
		5.5			
		6.5			
投加量(g)	1.0	1.0	0.5	5.0	5.0
			1.0		
			3.0		
			5.0		
			10.0		
电压(V)				9	18
				18	
				27	

2 结果与分析

2.1 外加电场对 Fe⁰ 修复苯和二甲苯污染地下水的影响

外加电场对 Fe⁰ 修复苯和二甲苯污染地下水的影响见图 1 和图 2,在没有外加电场作用条件下,苯在零价铁投加量为 3.0 g 时达到最大去除率 20.07%,二甲苯在零价铁投加量为 5.0 g 时达到最大去除率 50.97%。在外加直流电压 9 V 的电强化作用下,苯的去除率最高达到 43.22%,比单独利用零价铁处理苯水样时提高了 23.15 百分点。二甲苯的去除率达 71.34%,较单独利用零价铁处理二甲苯水样时的去除率提高了 20.34 百分点。零价铁在与水接触之后发生自动还原的过程 Fe-2e⁻→Fe²⁺,Fe²⁺ 在氧化还原的循环过程中发生一系列自由基的链传递反应形成羟基自由基(HO·)^[27-28],

呈现出极强的氧化性,为苯和二甲苯的吸附和迁移转化提供了电子,另外羟基自由基在外加电场作用的特定条件下,可以和苯、二甲苯发生加成反应^[29],发生开环反应并降解,促使苯和二甲苯的降解率增加。统计分析结果表明,外加电场强化零价铁处理组和无电场的零价铁对照组间差异不显著($P > 0.05$)。试验结果表明,外加电场能够有效促进地下水中苯和二甲苯的去除。

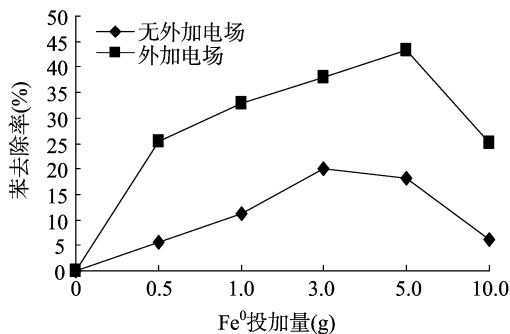


图1 外加电场对 Fe^0 修复苯污染地下水的的影响

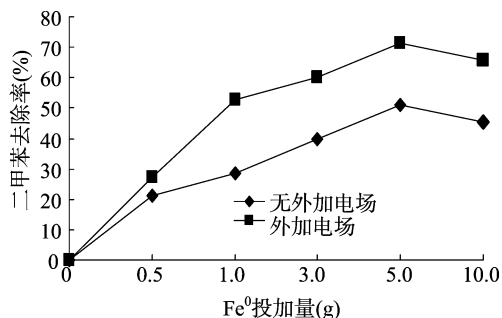


图2 外加电场对 Fe^0 修复二甲苯污染地下水的的影响

2.2 外加电场对活性炭修复苯和二甲苯污染地下水的的影响

外加直流电场对活性炭处理苯和二甲苯污染的影响见图3、图4。在外加直流电压 9 V 的电强化作用下,当 100 mL 苯处理水样中活性炭的投加量为 3.0 g 时,苯的去除率达到最大值 55.03%,高于未施加外加电压单独利用活性炭处理苯水样时的最大去除率(29.23%),有外加电场作用下的苯去除率比没有外加电场只有活性炭处理条件下的去除率提高了 25.80 百分点。在外加直流电压 9 V 的电强化作用下,当 100 mL 二甲苯处理水样中活性炭的投加量为 5.0 g 时,二甲苯的去除率达到最大值 69.32%,高于未施加外加电压单独利用活性炭处理苯二甲水样时的最大去除率 57.10 百分点,有外加电场作用下的二甲苯去除率比没有外加电场只有活性炭处理条件下的去除率提高了 12.22 百分点。活性炭较大的比表面积以及微孔结构使得活性炭本身具有较好的吸附能力,有利于地下水中苯和二甲苯的去除,外加电场也可以使有机物发生转化,因此可以用来去除地下水中的苯和二甲苯,使得在外加电场作用下苯和二甲苯的去除率比没有外加电场时活性炭单独作用下的去除率有所提高。根据统计分析,外加电场强化活性炭处理组和无电场的活性炭对照组间差异显著($P < 0.05$)。试验结果表明,在外加电场的的作用下,苯和二甲苯的去除率均比没有外加电场只有活性炭处理条件下的去除率有所提高,苯的去除率提高了 25.80 百分点,二甲苯的去

率提高了 12.22 百分点。表明外加电场能够有效提高活性炭对苯和二甲苯的去除率。

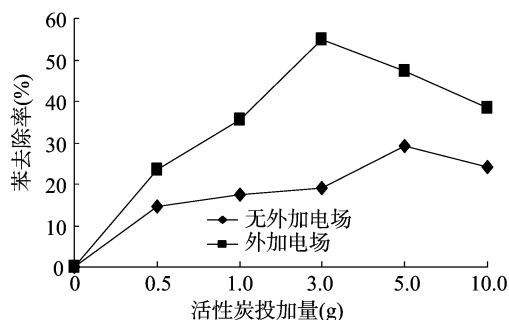


图3 外加电场对活性炭修复苯污染地下水的的影响

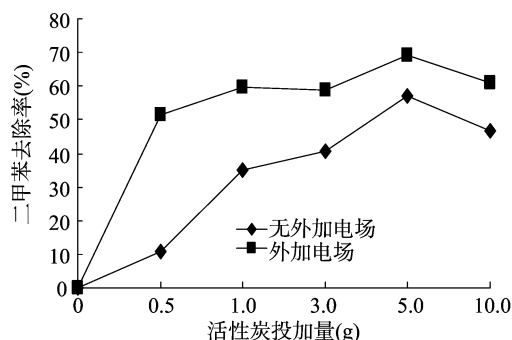


图4 外加电场对活性炭修复二甲苯污染地下水的的影响

2.3 外加电场对铁炭混合修复苯和二甲苯污染地下水的的影响

图5和图6分别给出了在外加电场强化作用下混合铁炭修复地下水中苯和二甲苯污染的情况。在 25 °C 试验条件下,分别向 100 mL 苯和二甲苯处理水样中投加铁炭比为 1:1 的混合铁炭 0.5、1.0、3.0、5.0、10.0 g,对处理水样分别进行有 9 V 外加直流电压和没有外加电场作用的试验,同时利用铁电极在仅有外加直流电压 9 V 的电场作用而没有混合铁炭参与的同一条件下处理浓度为 100 mg/L 的苯水样和浓度为 300 mg/L 的二甲苯水样作为对照,经过 10 h 的外加电场试验发现只有外加电场作用时苯的去除率为 5.63%,二甲苯的去除率为 10.42%。造成这一结果的原因可能是在没有投加混合铁炭的情况下是利用工业铁网作为电极,所选铁电极并不是纯铁制成,可能还含有其他元素(包括炭),因此对地下水中苯和二甲苯有一定去除效果。

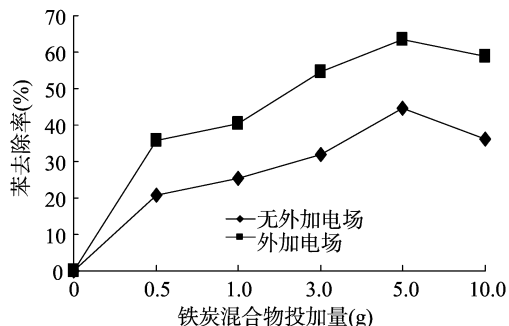


图5 外加电场对铁炭混合修复苯污染地下水的的影响

由图5可知,在外加电场强化作用下,地下水苯的去除率

最高达到63.59%,高于未施加外加电场单独利用铁炭混合处理苯水样时的最大去除率(44.72%),有外加电场作用下的苯去除率比没有外加电场只有混合铁炭处理条件下的去除率提高了18.87个百分点,而且高于只有外加电场作用没有铁炭混合处理时苯的去除率(5.63%)。

图6所示,在外加电场作用下,二甲苯的去除率最高可以达到82.13%,高于未施加外加电压单独利用铁炭混合处理二甲苯水样时的最大去除率(65.23%),有外加电场作用下的二甲苯去除率比没有外加电场只有活性炭处理条件下的去除率提高了16.90个百分点,也高于只有外加电场作用没有混合铁炭处理时二甲苯的去除率(10.42%)。

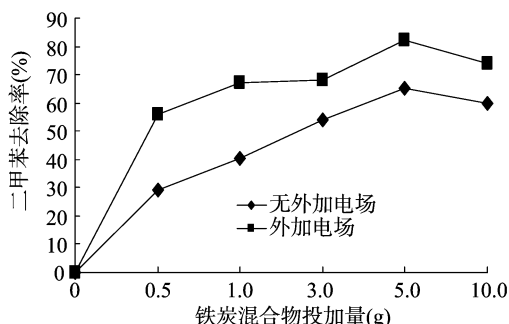


图6 外加电场对铁炭混合修复二甲苯污染地下水的的影响

外加电场强化铁炭处理苯和二甲苯污染地下水的去除率高于单独铁炭和单独外加电场处理苯和二甲苯污染地下水的效果之和,结果表明,外加电场起到了强化铁炭微电解的作用,使地下水中苯和二甲苯的去除效率较单独铁炭混合以及单独电场作用条件下的去除效率均有所提高。零价铁作为强还原剂,可以直接吸附某些有机物,特别是在弱酸性溶液中,零价铁丰富的比表面积显出较高的表面活性,能吸附地下水中的苯和二甲苯。活性炭有巨大的比表面积,因此具有很强的吸附能力,能吸附地下水中的苯和二甲苯。而且铁炭结合具有微电解作用,铁和炭之间存在电极电位差,使得水中的零价铁和活性炭颗粒能形成细微原电池,这些细微电池以电位低的铁成为阳极,电位高的炭为阴极,在含有电解质的水溶液中发生微电解反应^[30-31]。

阳极反应: $\text{Fe} - 2\text{e}^- \rightarrow \text{Fe}^{2+}$, $E^0(\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}) = -0.44 \text{ V}$;

阴极反应: $2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2$, $E^0(\text{H}^+/\text{H}_2) = 0 \text{ V}$ 。

根据统计分析,外加电场强化铁炭处理组和无电场的铁炭对照组间差异不显著($P > 0.05$)。这与“2.1”节中结果一致,说明外加电场对苯、二甲苯的去除主要作用于零价铁。外加电场能推动铁离子还原峰正方向移动,降低反应过电位,促进还原反应快速进行,通过外加电场的强化作用使铁炭微电解效果大大增强,加强了对含苯和二甲苯地下水的处理效果,使得外加电场强化铁炭混合的去除率高于单纯铁炭混合时的去除率,再次强化了对含苯和二甲苯污染的模拟地下水的处理效果。

2.4 外加电场与铁炭联合修复地下水苯和二甲苯污染的最佳条件确定

按照表2、表3设计联合处理试验,确定外加电场与铁炭联合修复地下水苯和二甲苯污染的最佳条件。

试验结果表明,对100 mg/L含苯地下水处理水样外加直

流电压18 V,在电强化作用下按照1:1.5的铁炭比投加5.0 g混合铁炭,pH值为5.5时,联合处理下,苯的去除率达到最大值(78.63%),高于单独微电解法处理地下水中苯的去除率(44.72%),也高于单独电解作用下的去除率(5.63%)。

对300 mg/L的含二甲苯地下水处理水样外加直流电压27 V,在电强化作用下按照1:1的铁炭比投加5.0 g混合铁炭,pH值为4.5时,联合处理下,二甲苯的去除率达到最大值(94.17%),高于单独微电解法处理地下水中二甲苯的去除率(65.23%),也高于单独通电试验条件下的去除率(10.42%)。

结果表明,利用外加电场强化的修复地下水中苯和二甲苯效果优于单独微电解法(铁炭)和单独电解法(电场作用),并且外加电场强化的修复效果优于单独微电解法和单独电解法之和。表明外加电场促进了铁炭修复的效果。

3 结论

由于当前水资源短缺,地下水污染对农业生产造成严重影响,修复地下水污染使之得到重新利用对于农业灌溉已势在必行。零价铁、活性炭联合参与去除苯和二甲苯的反应,不仅发挥了零价铁自身氧化还原吸附有机物以及活性炭吸附有机物的作用,而且铁炭结合具有微电解作用(铁和炭之间存在电极电位差,发生微电解反应),由阳极反应产生的 Fe^{2+} 和 Fe^{3+} 经氧化、沉淀而形成的水合物可作为絮凝剂发生絮凝沉淀反应,深度去除水中苯和二甲苯,其效果优于单独零价铁和单独活性炭的处理效果,加强了对含苯和二甲苯污染的模拟地下水的处理。而且,利用外加电场强化铁炭微电解的修复效果,推动铁离子还原峰正方向移动,降低反应过电位,促进还原反应快速进行,使铁炭微电解效果大大增强,优于单独微电解法和单独电解法的修复效果,加强了对含苯和二甲苯地下水的处理效果。

根据正交试验确定在外加电场强化作用下铁炭修复地下水中苯和二甲苯的最佳试验条件为处理含苯地下水的最佳铁炭比为1:1.5,最佳pH值为5.5,在外加直流电压为18 V时,地下水中苯的去除率达到最大值78.63%,高于没有外加电场时33.91个百分点;在铁炭比为1:1、pH值为4.5、外加直流电压为27 V时,地下水中二甲苯的去除率达到最大值94.17%,高于没有外加电场时去除率28.94个百分点。表明外加电场可促进铁炭对苯和二甲苯的去除效率,外加电场可进一步加强铁炭之间的微电解作用。

参考文献:

- [1]唐自立,袁朝,周朝彬,等.盐胁迫下铃铛刺种子萌发技术初探[J].农村科技,2009(8):90-91.
- [2]胡变芳,张谨华,赵剑.苯对玉米种子萌发和幼苗的影响[J].江苏农业科学,2014,42(6):80-81,237.
- [3]Ma Z J, Meng D L, Wang Y X, et al. Study on the chemical constituents from the roots and stems of *Sphaerophysa salsula* (Pall.) DC [J]. Plant Cell, 2003, 20(2):1042-1061.
- [4]姚荣成.苦马豆的研究进展[J].药学实践杂志,2003,21(1):43-44.
- [5]Mackay D M, de Sieyes N R, Einarson M D, et al. Impact of ethanol

- on the natural attenuation of benzene, toluene and o-xylene in a normally sulfate-reducing aquifer [J]. *Environmental Science & Technology*, 2006, 40(19): 6123-6130.
- [6] Mackay D M, de Sieres N R, Einarson M D, et al. Impact of ethanol on the natural attenuation of MTBE in a normally sulfate-reducing aquifer [J]. *Environmental Science & Technology*, 2007, 41(6): 2015-2021.
- [7] McGovern T, Guerin T F, Horner S, et al. Design, construction and operation of a funnel and gate in-situ permeable reactive barrier for remediation of petroleum hydrocarbons in groundwater [J]. *Water Air and Soil Pollution*, 2002, 136(1): 11-31.
- [8] Richmond S A, Lindstrom J E, Braddock J F. Assessment of natural attenuation of chlorinated aliphatics and BTEX in subarctic groundwater [J]. *Environmental Science & Technology*, 2001, 35(20): 4038-4045.
- [9] Vesela L, Nemecek J, Siglova M, et al. The biofiltration permeable reactive barrier: practical experience from Synthesia [J]. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2006, 58(3): 224-230.
- [10] Lock E A, Reed C J. Trichloroethylene: mechanisms of renal toxicity and renal cancer and relevance to risk assessment [J]. *Toxicological Sciences*, 2006, 91(2): 313-331.
- [11] 高存荣, 王俊桃. 我国 69 个城市地下水有机污染特征研究 [J]. *地球学报*, 2011, 32(5): 581-591.
- [12] 宋云, 李培中, 郭逸飞. 关于兰州石化泄漏导致自来水苯超标事件的解析 [J]. *环境保护*, 2015, 43(19): 54-57.
- [13] Moran M J, And J S Z, Squillace P J. Chlorinated solvents in groundwater of the United States [J]. *Environmental Science & Technology*, 2007, 41(1): 74-81.
- [14] Puls R W, Blowes D W, Gillham R W. Long-term performance monitoring for a permeable reactive barrier at the US Coast Guard Support Center, Elizabeth City, North Carolina [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 1999, 68(1/2): 109-124.
- [15] Skubal K L, Barcelon M J, Adriaens P. An assessment of natural biotransformation of petroleum hydrocarbons and chlorinated solvents at an aquifer plume transect [J]. *Journal of Contaminant Hydrology*, 2001, 49(1/2): 151-169.
- [16] Chen J L, Al-Abed S R, Ryan J A, et al. Effects of pH on dechlorination of trichloroethylene by zero-valent iron [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2001, 83(3): 243-254.
- [17] Alessi D S, Li Z H. Synergistic effect of cationic surfactants on perchloroethylene degradation by zero-valent iron [J]. *Environ Sci Technol*, 2001, 35(18): 3713-3717.
- [18] Kao C M, Lei S E. Using a peat biobarrier to remediate PCE/TCE contaminated aquifers [J]. *Water Research*, 2000, 34(3): 835-845.
- [19] Kohn T, Roberts A L. The effect of silica on the degradation of organohalides in granular iron columns [J]. *Journal of Contaminant Hydrology*, 2006, 83(1/2): 70-88.
- [20] Ritter K, Odziemkowski M S, Simpraga R, et al. An in situ study of the effect of nitrate on the reduction of trichloroethylene by granular iron [J]. *Journal of Contaminant Hydrology*, 2003, 65(1/2): 121-136.
- [21] Ghauch A. Picloram and dicamba in a conical apparatus by zero-valent iron power [J]. *Chemosphere*, 2001, 43(8): 1109-1117.
- [22] Gillham R W, O'hannesin S F. Enhanced degradation of halogenated aliphatics by zero-valent iron [J]. *Ground Water*, 1994, 32(6): 958-967.
- [23] Dries J, Bastiaens L, Springael D, et al. Competition for sorption and degradation of chlorinated ethenes in batch zero-valent iron systems [J]. *Environmental Science & Technology*, 2004, 38(10): 2879-2884.
- [24] Klausen J, Vikesland P J, Kohn T, et al. Longevity of granular iron in groundwater treatment processes: solution composition effects on reduction of organohalides and nitroaromatic compounds [J]. *Environ Sci Technol*, 2003, 37(6): 1208-1218.
- [25] Hindarso H, Ismadji S, Wicaksana F, et al. Adsorption of benzene and toluene from aqueous solution onto granular activated carbon [J]. *Journal of Chemical & Engineering Data*, 2001, 46(4): 788-791.
- [26] 李萌. 微电解填料的制备及其在有机废水处理中的应用 [D]. 长春: 吉林大学, 2011.
- [27] Pearson M A, Hoyne H E, Seaver L H, et al. Toluene embryopathy: delineation of the phenotype and comparison with fetal alcohol syndrome [J]. *Pediatrics*, 1994, 93(2): 211-215.
- [28] Kang N, Hua I. Enhanced chemical oxidation of aromatic hydrocarbons in soil systems [J]. *Chemosphere*, 2005, 61(7): 909-922.
- [29] Roberts E P, Bauer N. *In situ* chemical oxidation limited by site conditions: a case study [C] // Wickramanayake G B, Gavaskar A R, Chen A S C. Proceedings of the second international conference on remediation of chlorinated and recalcitrant compounds. Monterey, CA, 2000: 169-176.
- [30] Cheng H F, Xu W P, Liu J L, et al. Pretreatment of waste water from triazine manufacturing by coagulation, electrolysis, and internal microelectrolysis [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2007, 146(1/2): 385-392.
- [31] Wang Y P, Wang L J, Peng P Y, et al. Treatment of naphthalene derivatives with iron-carbon micro-electrolysis [J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2006, 16(6): 1442-1447.