

DOI: 10.3969/j.issn.1004-6933.2012.06.016

可渗透反应栅(墙)技术综述

廖梓龙^{1,2}, 魏永富², 郭中小², 龙胤慧³

(1. 中国水利水电科学研究院研究生部, 北京 100038;

2. 水利部牧区水利科学研究所, 内蒙古 呼和浩特 010020; 3. 河北工程大学水电学院, 河北 邯郸 056021)

摘要: 为了促进可渗透反应栅(墙)PRB 技术在我国地下水修复领域的应用和发展, 对 PRB 技术进行简要综述, 包括 PRB 类型、原理, 污染羽流的类型和污染方式, 设计和安装 PRB 之前勘察的内容, 反应介质材料类型的介绍和选择等, PRB 的设计与施工、后期的维护与监测, 并对 PRB 技术的经济性进行评价与分析。提出我国在研究 PRB 技术时, 不应局限于研究反应介质, 还应考虑前期勘察、结构、运行监测等方面的因素, 并选择合理的地下水修复投融资方式和途径。

关键词: 渗透反应栅(墙); PRB; 地下水修复; 反应介质; 污染羽; 技术经济分析

中图分类号: X523

文献标志码: A

文章编号: 1004-6933(2012)06-0070-05

A review of permeable reactive barrier technologies

LIAO Zi-long^{1,2}, WEI Yong-fu², GUO Zhong-xiao², LONG Yin-hui³

(1. Postgraduate Department, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China;

2. Institute of Water Resources for Pastoral Areas, Ministry of Water Resources, Hohhot 010020, China;

3. School of Hydraulic and Hydro-power, Hebei University of Engineering, Handan 056021, China)

Abstract: In order to promote the application of permeable reactive barrier (PRB) technologies to groundwater remediation in China, this paper presents a brief review of PRB technologies, including the types and concept of PRB, the types of contaminant plumes and ways of contamination, the investigated items before design and installation of PRB, the introduction to and selection of material types of the reaction medium, and design and construction of PRB and post-maintenance and monitoring. Moreover, the economics of PRB technologies is evaluated and analyzed. It is pointed out that research focuses should be placed not only on the reaction medium, but also on pre-investigation, structure, monitoring, and reasonable investment and financing policies for groundwater remediation.

Key words: permeable reactive barrier ; PRB; groundwater remediation; reaction medium; contaminant plumes; technical and economic analysis

人类多年活动的影响, 尤其是不合理的水资源开发和利用, 严重威胁了地下水水质安全。根据唐克旺等^[1]的调查, 我国城市 1 817 个地下水饮用水源地中, 存在水质安全问题的高达 49.48%。

矿井、制造厂、提炼厂、垃圾填埋场等都是造成地下水污染的主要来源。工业处理中使用的金属、煤炭、石油, 不适当的废料处理, 突发性事故造成的具有放射性有害物质的泄露等, 导致地下水受到有

机、无机以及放射性污染。美国宾夕法尼亚州使用传统技术处理酸性矿井废水排泄的费用高达 150 亿美元, 说明使用新型经济性的地下水污染修复技术是必须的^[2]。可渗透反应栅(墙)PRB 技术被认为是修复地下水污染的新型自动高效技术^[3-4]。

1 PRB 概念

可渗透反应栅(墙)PRB 是一个位于地下, 装填

有反应介质,用于阻挡处理污染羽的反应栅。在反应栅内,污染羽在自然水力梯度下穿越反应介质后被转化成环境可接受的物质,达到修复水质的目标^[5]。

滑铁卢大学的学者在 19 世纪 90 年代初期首先提出了 PRB 的概念。第一座试用 PRB 墙于 1991 年安装在加拿大安大略省的 Borden,用于处理污染地下水的氯代溶解污染羽。第一座商用 PRB 墙于 1994 年安装在美国加利福尼亚的 Sunnyvale,同样也用于处理氯代溶解污染羽。此后,PRB 技术在全世界范围内开始广泛应用。在众多应用案例中,PRB 技术被认为是处理地下水有机污染或无机污染的一种有效手段^[6]。

2 PRB 类型与原理

2.1 类型

传统的反应墙有连续墙(CRB)和漏斗-导水门式反应墙(F&G PRB),这两种形式的墙及其改进形式已经在污染场地修复中得到广泛应用。近些年,随着对 PRB 的深入研究,出现了一些新形式反应墙:微生物反应墙(SRB PRB)、原位氧化还原控制墙(ISRM)、地质虹吸墙(geosiphon cells)。

2.2 原理

PRB 的反应介质与污染物的反应过程主要有以下几种:

a. 吸附反应。这是一种将地下水污染羽吸附在反应栅上的污染羽物理消除方式。吸附时,污染羽的分子或颗粒结合在反应介质表面,吸附程度与反应介质的性质和 pH 值有关^[7]。常用的吸附剂有:零价铁、纳米铁、沸石、非晶态铁的氢氧化物等。

b. 沉淀反应。这是一种通过无机矿物的沉淀来去除污染物的方式。在沉淀反应过程中,低溶解的污染物质首先被沉淀析出,并被截留在反应栅中。常用的沉淀反应介质有石灰岩和磷灰石。

c. 降解反应。降解包括非生物降解和生物降解。非生物降解通过一系列分解污染羽的化学反应,最终使污染羽形成沉淀留在反应栅内或形成无害物质渗过反应栅。而生物降解是在降解初期提供微生物分解污染羽所需的电子供体(落叶壤料、锯末、麦秆、紫苜蓿草等)和营养物质(共性废弃料和堆肥)^[8-9]。

3 污染羽流

3.1 类型

3.1.1 有机污染

我国的地下水有机污染呈现分区特征:京津冀

典型地区地下水污染主要为氯代烃中的三氯甲烷、四氯化碳、三氯乙烯、四氯乙烯的有机污染;长江三角洲典型地区浅层地下水污染主要为农药及挥发性有机污染;珠江三角洲地区地下水污染主要为卤代烃类、单环芳烃类、多环芳烃类、甾脂肪酸类、酚类、酮类等化学工业品的有机污染^[10]。

3.1.2 无机污染

采矿、冶炼、机械制造、建筑材料、化工等工业所排出的废水中含有大量的无机污染物和重金属。重金属在人体内与蛋白质、各种酶发生强烈的相互作用,使它们失去活性。重金属在人体的某些器官中富集会造成人体的急性中毒等危害。以毒性元素砷为例,世界卫生组织将其列为致癌物质,在地下水中,砷以多种形式的化合物存在。而在 PRB 技术中,采用零价铁作为反应介质,就可以有效处理地下水污染物中的砷^[11-14]。

3.1.3 放射性污染

放射性污染对生物的危害是十分严重的。如果有大剂量的 X 射线、 γ 射线和中子在短时间内对人体全身照射,人体将会受到急性损伤。轻者常有脱毛、感染等症状,重者会出现腹泻、呕吐等症状,甚至出现中枢神经损伤直至死亡。放射性污染源主要有 4 类:原子能工业排放的废料、核武器试验的沉降物、医疗放射和科研放射。

3.2 污染方式

一般情况下,污染羽在地下水水流中的污染方式可以分为物理方式、化学方式和生物方式,见表 1。

表 1 污染羽污染方式及其表现形式

| 污染方式 | 物理方式 | 化学方式 | 生物方式 |
|------|--|------------------------------------|--|
| 表现形式 | 污染羽进入水体后只改变形状大小、空间位置等物理性质,主要表现为移流、沉降、紊动扩散和分子扩散 | 污染羽进入水体后发生分子结构或价态上的转化,水质发生了化学性质的变化 | 污染羽进入水体后,在生物体内及食物链的传递过程中发生生理生化作用,表现为分解、转化、富集 |

4 前期勘察

在设计和安装 PRB 之前,需要进行详细的前期勘察,以保证 PRB 能有效捕获污染羽并能长期高效运行。

4.1 场地条件

需要对场地进行详细的勘察与分析。例如,在我国,加油站的渗漏是一个不可忽略的地下水污染源,因为地下油罐和输油管线的老化以及一些加油站施工时的偷工减料,会留下加油站渗漏的隐患^[15]。此外,我国工业污染中,土壤层的污染也是十分严重的^[16]。如果只修复污染的地下水而忽略

了对土壤污染的修复,就很有可能因地下水遭到二次污染而造成地下水污染修复的失败。

场地的勘察清单通常包括地下水埋深、含水层厚度、地下水水流方向、水力渗透系数、水力梯度、导水系数、含水层边界、气候条件(降雨等)和其他条件(如土壤、植被、微生物等)。

4.2 污染羽特征

描述污染羽特征是前期勘察所需要进行的一项关键工作。除了考虑将达西定律由二维问题扩展为三维问题之外,还需考虑不同透水边界的渗流折射问题^[17]和地下水污染的隐蔽性问题。污染羽特征的描述内容通常有:污染羽类型、污染羽方式、污染时间、污染路径、污染羽中各组分含量等。

4.3 水文地质化学特征

弄清水文地质化学特征是前期勘察工作的一项重要内容。牛少凤等^[18]运用有限元的思想,从水动力、水化学模型着手分析 PRB 技术的有效性及其敏感性。狄军贞等^[19]建立了地下水渗流、污染物与反应介质相互作用、相互耦合的模型,并得出结论:对流作用对溶质运移速度影响较大,吸附作用会促进反应介质对地下水污染物的去除,体现了单元内介质的化学特性对污染物的去除起主导作用。

用来描述水文地质化学特征的主要内容有:土壤与水的 pH 值、水的含盐量及导电性、EH 值、DO 值、地下温度、相关阴阳离子及合成物含量、BOD、COD 等。

5 反应介质

5.1 介质材料类型

5.1.1 零价铁和纳米铁

零价铁是一种化学还原性相当强的还原剂,它与地下水的有机污染物与无机污染物产生反应时,可以与多种氯代烃、有机氯农药及毒性金属产生反应,其主要机理为还原性脱氯^[20-21]。零价铁去除地下水中的砷污染效果很好。研究显示,每克零价铁可以去除 7.5 mg 的砷^[22]。此外,零价铁 PRB 还可以结合自然衰减来处理地下水的砷污染^[23]。在采用零价铁作为反应介质时,最突出的问题就是反应产物的沉淀导致其孔隙率减小,进而影响 PRB 的运行^[24]。

纳米铁颗粒小(粒径在 1~100 nm 范围内),比表面积大,反应活性高。在金属离子污染液中,纳米铁将金属离子还原为难溶态物质析出,比零价铁具有更高的还原效率和反应速率^[25]。

5.1.2 炭材料

炭材料主要是利用自身的吸附作用去除地下水

污染羽中的可吸附污染物。炭材料种类较多,包括各种非晶态活性炭、石墨及生物炭材料,其中活性炭应用较广泛。活性炭具有较发达的孔隙结构、较大的比表面积和独特的表面官能团(如羧基、羟基、内酯等),因而对溶液中的有机污染物或无机污染物以及胶体颗粒等有很强的吸附作用^[26]。在运用 PRB 修复地下水污染中,美国和日本对活性炭的使用占到了 50% 以上。

5.1.3 沸石

沸石是一种天然硅铝酸盐矿石,具有内表面积大、孔隙多、吸附能力强和离子交换等特点。沸石对污染羽中的各种阳离子有一定的选择性^[27]。有研究^[28]表明,沸石对氨氮的去除效果远好于零价铁和活性炭。

5.1.4 膨润土

膨润土又称为硼润岩或斑脱岩,是以蒙脱石为主要成分的黏土岩。膨润土的制备简单,具有比表面积大、吸附能力强和阳离子交换等特点,可以广泛应用于处理地下水无机污染和有机污染。实验结果表明,膨润土可以用来处理垃圾渗滤液中的金属离子污染物^[29]。

5.1.5 其他介质

郭红岩等^[30]利用树脂基作为 PRB 的填充材料有效去除了地下水中的极性和非极性有机污染物。2003 年加拿大温哥华与美国华盛顿的边境铬黄矿场应用基硫酸钠拌和有 pH 缓冲物(碳酸钾)的原位氧化还原控制反应墙(ISRM),成功处理了地下水铬化物污染^[31]。此外,第四纪沼泽植物的残体不能完全分解堆积而成的草炭土及农业土也被作为新型的反应介质来处理地下水污染^[32-33]。

5.1.6 复合介质

零价铁是应用最广的反应介质,通常将零价铁与其他活性材料相互混合作为反应介质^[34-35]。

除了采用不同配合比的复合介质,有的学者^[36]探讨了 PRB 生物介质的可能性,将聚乙烯醇(PVA)作为微生物载体,采用微生物固定化技术及包埋法将硝化与反硝化细菌混合包埋固定,制成负载生物介质,作为 PRB 介质治理地下水污染中的硝酸盐。

5.2 反应介质的选择

为了确保 PRB 系统的有效性,反应介质的选择必须考虑反应材料的反应能力、稳定性、有效性、费用、水动力性能以及环境友好性等因素。

6 PRB 设计与施工

6.1 PRB 设计

通常根据场地条件、污染羽特性、水文地质化学

条件等因素,来确定 PRB 的位置、形式、尺寸、使用寿命、监测方案、费用等。

6.2 PRB 施工

在施工时应考虑多个方面的问题,如 PRB 的渗透系数应该大于蓄水层的渗透系数,以保证污染羽不会绕流、漫溢或潜流;要根据污染物的类型,选择适当的墙体材料和墙体厚度,以保证修复效果;要易于安装和施工;安装的墙体应能大部分或完全捕获地下水污染羽;要注意反应单元与隔水墙的安装方式^[37];在施工时,应将 PRB 嵌入弱透水层或不透水基岩中,以防止地下水污染羽渗漏。2003 年美国华盛顿州 Benton 镇 Hanford 场地一部分反应单元由于堵塞问题导致了污染羽绕流,产生了较严重的后果,在运行过程中,发现 65 个反应单元中大约 7 个反应单元存在反应产物堵塞问题^[37-38]。

此外,还需要注意 PRB 施工过程中人的健康和安全问题:①开挖墙基和地层时,要避免离子作用的放射性物质、硅废料等暴露于施工工人;②沟渠塌陷;③注意反应介质中化学物质的暴露;等,并采取相应的安全措施以保障施工安全^[9]。

7 后期维护与监测

为了精确衡量监测效果,需在上梯度、下梯度及 PRB 内布置监测井以观测水位深度变化,并周期性监测相关的水文地质化学参数、流速等。将监测井置于漏斗-导水门式反应墙的侧墙,可以提供水位和水质数据,这些数据对决定 PRB 的运行方式很重要,例如,门内水位升高时,将减缓反应速率。进行示踪试验可以提供污染羽流最优路径的数据资料,但比较昂贵。

监测井的布置要保证能够捕获污染羽流的运动方向,因此应在浓度较高或接近反应墙的位置集中布置监测井。常用的监测指标有 pH 值、Eh 值、BOD₅、COD 等。

8 技术经济性分析

与其他地下水修复技术相比,PRB 技术高效低廉。美国特拉华州纽波特某沿海平原区有染料生产工厂、氧化铬生产工厂及垃圾填埋场,经过 1970 年与 1980 年的地下水取样研究,显示该场地受到严重的金属污染(镁、钡、镉、镍、铜、铅、锌)和挥发性有机化合物污染(三氯乙烯和四氯乙烯)。经研究,选用砂土、硫酸钙、零价铁、碳酸镁的混合介质,垂直污染羽布置,嵌入不透水层。采用的连续墙(CRB)结构于 2002 年施工,耗资近 400 万美元。2005 年的监测数据显示,污染物锌的质量浓度从 100 ~ 1 000

μg/L 降至 9 μg/L,钡从 4 000 ~ 8 000 μg/L 降至 1 000 μg/L。该反应墙的处理效果基本达到了预期目标。吉林大学花费 300 万 ~ 500 万元人民币运用 PRB 技术有效处理了污染场地中的有机氯农药污染^[39]。

8.1 PRB 各部分费用

了解 PRB 技术的各部分费用是能否有效建设 PRB 的关键。目前,国内的研究主要是反应介质、影响因素等方面,这些对于 PRB 技术能否有效处理地下水污染羽很重要,但人们普遍忽略的一个问题是,反应介质的费用在 PRB 的总费用中所占的比例只有约 20% 左右。表 2 是美国的一些场地 PRB 各部分的费用,根据具体的结构、布局、污染羽等的不同,各部分费用的子费用构成也有所不同^[40]。

表 2 美国部分场地 PRB 各部分的费用^[40] 万美元

| 场地名称 | 前期勘察费 | 设计费 | 施工费 | 总费用 |
|--------------------------|-------|------|-------|-------|
| USCG Support Center | 15.0 | 14.5 | 50.0 | 79.5 |
| Moffett Federal Airfield | 10.0 | 17.5 | 33.2 | 60.7 |
| Dover AFB, DE | 16.5 | 20.0 | 29.6 | 66.1 |
| Kansas City Plant MO | 15.0 | 10.0 | 120.0 | 145.0 |
| Aircraft Maintenance OR | 35.0 | 3.5 | 70.0 | 108.5 |
| Nickel Rim, Ontario | 2.5 | 3.0 | 3.5 | 9.0 |
| Moffett | 11.8 | 17.5 | 457.2 | 486.5 |

8.2 我国 PRB 的资金筹集

目前,我国在筹集地下水保护与修复的资金时,基本依据“谁使用,谁污染,谁付费”的原则,将融资确定为政府、企业和个人 3 大来源。由于地下水资源具有公共性,地下水给人类带来的利益绝大部分是能够让整个社会受益的,因此无法十分精确地确定每个人的受益程度。但是在一定程度和一定范围内,是可以确定受益主体的,因此,应确立以政府为主导,企业和居民为辅的地下水修复资金投融资模式^[41]。

9 结语

1994 年,欧洲第一座以零价铁为反应介质的 PRB 在英国的贝尔法斯特的电子合成加工厂开始使用,用于处理地下水污染羽流中的氯代溶解物,如 TCE。经过十几年的发展,PRB 技术已经在美国、德国、奥地利、瑞典、法国、英国、丹麦等国家相继成功应用^[42]。与欧美等国的成功应用相比,廉价高效的 PRB 技术在我国目前还处在可行性研究阶段,因此,PRB 技术在我国地下水修复领域中仍需考虑和解决以下问题。

a. 我国关于 PRB 技术的研究主要集中在反应介质的处理效果、配合比、影响因素等方面,而这一部分所花费的资金在 PRB 总费用中只有 1/5。因此,在研究 PRB 技术时,不应局限于研究反应介质,

还应考虑前期勘察、结构、运行监测等方面的因素；

b. PRB 技术无能耗且可以长期运行,因此,在设计时需要重点考虑在各种复杂因素下(例如偶然性强降雨)PRB 是否能有效捕获污染羽流,如何避免反应介质堵塞或失效,监测井位置及深度是否合理等问题;

c. 为了能充分发挥 PRB 技术的处理效果,前期勘察是重中之重,断层的位置、周围岩层的透水性等都需要详细勘察。我国地理条件非常复杂,如,黄土高原地下水埋深较深,入渗作用和排泄作用都较强且矿化度高;东北地区 and 西南部高原地区冬季会出现冻土;西南部地貌为岩溶地貌等,在这些复杂区域应用 PRB 技术需要经过一定的试点试验后,才能应用于更大的场地范围;

d. 选择合理的地下水修复投融资方式和途径。这是将 PRB 技术引入我国地下水修复领域的必要条件。只有合理的投融资体系才能将该技术的经济性和效益发挥到极致。

参考文献:

[1] 唐克旺,朱党生,唐蕴,等. 中国城市地下水饮用水源地水质状况评价[J]. 水资源保护,2009,25(1):1-4.

[2] BRONSTEIN K. Permeable reactive barrier for inorganic and radionuclide contamination [M]. Washington D. C. : U S Environmental Protection Agency Press, 2005:1-11.

[3] NAFTZ D, MORRISON S J, DAVIS J A. Handbook of groundwater remediation using permeable reactive barriers: applications to radionuclides, trace metals, and nutrients [M]. New York: Academic Press, 2002:1-15.

[4] ROEHL K E, MEGGYES T, SIMON F G, et al. Long-term performance of permeable reactive barriers [M]. New York: Elsevier Press, 2005:5-10.

[5] USEPA. A citizens guide to permeable reactive barriers [M]. Washington D. C. : U S Environmental Protection Agency Press,2001:1-2.

[6] Department of Earth Sciences, University of Waterloo. Permeable reactive barriers [M]. New York: Elsevier Press, 2005:15-30.

[7] SIMON F G, MEGGYES T. Removal of organic and inorganic pollutants from groundwater using permeable reactive barriers[J]. Land Contamination & Reclamation, 2000, 8(2):103-116.

[8] HEMSI P S, SHACKELFORD C D, FIGUEROA L A. Modeling the influence of composing organic solids on sulfate reduction rates for iron precipitation [J]. Environmental Science & Technology, 2005, 39: 3215-3225.

[9] KHAN F I, HUSAIN T, HEJAZI R. An overview and

analysis of site remediation technologies [J]. Journal of Environmental Management, 2004, 71:95-122.

[10] 姜建军. 中国地下水污染现状与防治对策[J]. 环境保护,2007,(19):27-29.

[11] JOHNSTON R B, SINGER P C. Redox reaction in the Fe-As-O₂ system [J]. Chemosphere, 2007, 69: 517-525.

[12] BEAK D, WILKIN R T, FORD R G, et al. An examination of arsenic speciation in sulfuric solutions using X-ray absorption spectroscopy [J]. Environmental Science and Technology, 2008,42:1643-1650.

[13] USEPA. Zero-valent iron PRB application expands to arsenic removal[M]. Washington D C:U S Environmental Protection Agency Press, 2005:1-2.

[14] Department of Energy (DOE). Variation in hydraulic conductivity over time at the monticello permeable reactive barrier[M]. Colorado: U S Department of Energy Office of Legacy Management,2006:1-7.

[15] 于爽,严毅萍,康彩霞. 浅议我国地下水现状及地下水污染的防治[J]. 广西轻工业,2010(1):42-48.

[16] 骆永明. 污染土壤修复技术研究现状与趋势[J]. 化学进展,2009,21(2/3):558-565.

[17] KACIMOV A R, KLAMMLER H, IL'YINSKII N, et al. Constructal design of permeable reactive barriers: groundwater-hydraulics criteria [J]. Journal of Engineering Mathematics,2011, 71(4):319-338.

[18] 牛少凤,李春晖,富强,等. PRB 连续反应单元模拟与敏感性分析[J]. 环境科学研究,2009,22(6):718-722.

[19] 狄军贞,张琦,肖利萍. 基于渗流理论的污染地下水 PRB 修复机理的耦合模型研究[C]//中国环境科学学会. 2010 中国环境科学学会学术年会论文集. 北京:中国环境科学出版社,2010:3163-3167.

[20] ZOLLA V, SETHI R, MOLFETTA A D. Performance assessment and monitoring of a permeable reactive barrier for the remediation of a contaminated site[J]. American Journal of Environmental Sciences, 2007, 3 (3): 158-165.

[21] 刘菲,汤鸣皋,何小娟,等. 零价铁降解水中氯代烃的实验室研究[J]. 地球科学,2002,27(2):186-188.

[22] LIEN H L, WILKIN R T. High-level arsenite removal from groundwater by zero-valent iron [J]. Chemosphere, 2005,59(3):377-386.

[23] SU Chun-ming, PULS R W. Arsenate and arsenite sorption on magnetite: relations to groundwater arsenic treatment using zerovalent iron and natural attenuation [J]. Water Air and Soil Pollution,2008, 193:65-78.

[24] PARBS A, EBERT M, DAHMKE A. Influence of mineral precipitation on the performance and long-term stability of Fe₀-permeable reactive barriers: A review on the basis of 19 Fe₀-reactive barrier sites [J]. Groundwater, 2007, 4 (12):267-281.

(下转第 80 页)

- [5] 王长平, 乔铁军, 周瑾, 等. 臭氧-生物活性炭工艺出水 pH 的变化及机理[J]. 给水排水, 2010, 7(36): 21-24.
- [6] 王娟, 范迪. 臭氧氧化法深度处理造纸废水试验研究[J]. 工业水处理, 2009, 29(1): 33-35.
- [7] 吴峰, 华河林, 邓南圣. 三种偶氮染料降解历程在紫外-可见光谱上的表现[J]. 环境化学, 2000, 19(4): 348-351.
- [8] 张自杰. 排水工程[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2000.
- [9] 刘芳, 赵朝成, 张秀霞, 等. 组合填料生物滤池处理锦纶废水二级出水的性能研究[J]. 环境工程学报, 2007, 1(4): 38-43.
- [10] BARKER D J., STUCKEY D C. A review of soluble microbial products (SMP) in wastewater treatment systems[J]. Water Research, 1999, 33(14): 3063-3082.
- [11] LASPIDOU C S, RITTMANN B E. A unified theory for extracellular polymeric substances, soluble microbial products, and active and inert biomass [J]. Water Research, 2002, 36(11): 2711-2720.
- [12] 多金环, 安金辉. 可溶性微生物产物的产生及影响因素分析[J]. 化工环保, 2004, 24(3): 169-172.
- [13] MENAHEM R, JOSEPHA M. Classification of organics in secondary effluents [J]. Environment Science and Technology, 1971, 5(7): 606-609.
- [14] JANGA N, REN Xiang-hao, KIM G, et al. Characteristics of soluble microbial products and extracellular polymeric substances in the membrane bioreactor for water reuse[J]. Desalination, 2007, 202(1/3, 5): 90-98.

(收稿日期:2011-10-13 编辑:高渭文)

(上接第74页)

- [25] 陈芳艳, 陆敏, 唐玉斌. 纳米铁在水污染控制中的应用研究进展[J]. 工业安全与环保, 2007, 33(2): 18-20.
- [26] 纪永志, 李鑫钢, 孙津生. 炭材料在水污染修复领域的应用研究[J]. 材料导报, 2006, 20(7): 84-87.
- [27] 董军, 赵勇胜, 赵晓波, 等. PRB 技术处理污染地下水的因素分析[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2005, 35(2): 226-230.
- [28] 崔海炜, 孙继朝, 陈玺, 等. PRB 技术在垃圾渗滤液污染地下水修复中的可行性研究[J]. 南水北调与水利科技, 2010, 8(6): 66-69.
- [29] 杨维, 杨军锋, 王立东, 等. 膨润土研究现状及其作为 PRB 反应介质的探讨[J]. 地质与资源, 2007, 16(2): 155-159.
- [30] 郭红岩, 孙媛媛, 艾弗逊, 等. 一种利用树脂基 PRB 技术去除地下水中有有机污染物的方法: 中国, CN101838025A [P]. 2010-09-22.
- [31] USEPA. In situ redox manipulation permeable reactive barrier emplacement: final report [M]. Washington D. C.: U S Environmental Protection Agency Press, 2004: 1-10.
- [32] 张莹, 张玉玲, 张晟瑀, 等. 修复石油类污染地下水的 PRB 反应介质研究[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2010, 40(2): 399-404.
- [33] ALONSO S, GALLO C. Treatment of fuel diesel with a permeable reactive barrier technology [J]. Medellin, 2007, 153: 151-157.
- [34] ZHANG Wei, DING Feng, WANG Hua-sheng. Treat of Cr(VI) contaminated groundwater by PRB simulation with ash and iron [M]. Suzhou: Suzhou University Press, 2011: 350-356.
- [35] 孟庆玲, 任群, 王显胜, 等. 组合材料渗透反应墙对硝基苯污染地下水的修复研究[J]. 北京大学学报: 自然科学版, 2010, 46(3): 413-416.
- [36] 杨维, 施爽, 金丰尧, 等. 去除地下水硝酸盐 PRB 生物介质可行性试验研究[J]. 环境科学与技术, 2010, 33(6E): 111-114.
- [37] 朱敬涛, 韩志勇, 魏相君, 等. 地下水原位治理的渗透性反应墙技术[J]. 环境科学与管理, 2010, 35(9): 74-78.
- [38] USEPA. Field demonstration of permeable reactive barriers to remove dissolved uranium from groundwater [M]. Washington D. C.: U S Environmental Protection Agency Press, 2000: 55-64.
- [39] 吉林大学环境与资源学院. 污染土壤和地下水的 PRB 治理和修复[R]. 长春: 吉林大学环境与资源学院, 2010.
- [40] POWELL R M, POWELL P D. Economic analysis of the implementation of permeable reactive barriers for remediation of contaminated groundwater [M]. Washington D. C.: U S Environmental Protection Agency Press, 2002: 10-25.
- [41] 姜雪松, 王玲. 我国地下水修复与保护融资方式理论分析[J]. 合作经济与科技, 2009, 366(4): 80-82.
- [42] BIRKE V, BURMEIER H, JEFFERIS S, et al. Permeable reactive barriers (PRBS) in Europe: potentials and expectations [J]. Journal of Engineering Geology and Environment, 2007, 1: 1-6.

(收稿日期:2011-10-18 编辑:彭桃英)