

doi: 10.12029/gc20220206

费宇红, 刘雅慈, 李亚松, 包锡麟, 张鹏伟. 2022. 中国地下水污染修复方法和技术应用展望[J]. 中国地质, 49(2): 420-434.

Fei Yuhong, Liu Yaci, Li Yasong, Bao Xilin, Zhang Pengwei. 2022. Prospect of groundwater pollution remediation methods and technologies in China[J]. Geology in China, 49(2): 420-434(in Chinese with English abstract).

中国地下水污染修复方法和技术应用展望

费宇红^{1,2}, 刘雅慈^{1,2}, 李亚松^{1,2}, 包锡麟^{1,2}, 张鹏伟^{1,2,3}

(1. 中国地质科学院水文地质环境地质研究所, 河北 石家庄 050061; 2. 河北省地下水污染机理与修复重点实验室, 河北 石家庄 050061; 3. 中国地质科学院研究生院, 北京 100037)

摘要:【研究目的】: 中国地下水污染调查和修复日益受到科学界的重视, 了解和掌握地下水污染修复方法和技术有助于对污染场地进行科学修复。【研究方法】: 本文在系统分析国内外地下水污染修复案例的基础上, 对中国地下水污染修复现场实施的技术方法进行总结。【研究结果】: 结合中国区域经济发展特征和地下水污染调查评价成果认为, 复杂的水文地质条件制约, 污染物受地下水流速、流向和渗透系数的非均一性影响, 使修复后的场地出现拖尾和反弹; 污染物与含水层岩性制约, 污染物与低渗透性岩土体的附和解吸, 常生成二次污染; 场地详细调查和评价需求, 修复工程的设计需由场地详细调查进行指导, 场地地下水质量评价、地下水污染健康风险评估、污染程度评价为修复工程开展和完成提供科学依据。【结论】: 中国地下水污染修复面临着方法与技术方法相协调的机遇和挑战, 地下水污染修复需以含水层岩性和水文地质条件为依托。

关键词: 地下水污染; 修复方法; 修复技术; 场地; 水资源与环境地质调查工程

创 新 点: 含水层岩性和地下水动力条件是地下水污染修复的关键; 针对污染物和场地的复杂性, 将地下水污染修复分别按方法和技术进行梳理。

中图分类号: P618.13 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2022)02-0420-14

Prospect of groundwater pollution remediation methods and technologies in China

FEI Yuhong^{1,2}, LIU Yaci^{1,2}, LI Yasong^{1,2}, BAO Xilin^{1,2}, ZHANG Pengwei^{1,2,3}

(1. Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, China Academy of Geosciences, Shijiazhuang 050061, Hebei, China; 2. Key Laboratory of Groundwater Contamination and Remediation, China Geological Survey (CGS) & Hebei Province, Shijiazhuang 050061, Hebei, China; 3. Graduate School of Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China)

Abstract: This paper is the result of the water resources and environmental geological survey engineering.

[Objective] The investigation and remediation of groundwater pollution in China has been paid more attention by the scientific community. Understanding and mastering the methods and technologies of groundwater pollution remediation is helpful for the scientific remediation of polluted sites. **[Methods]** Based on the systematic analysis of groundwater pollution remediation cases at home and abroad, this paper summarizes the technical methods implemented on the groundwater pollution remediation site in

收稿日期: 2021-09-14; 改回日期: 2021-11-04

基金项目: 国家自然科学基金 (41907175, 41972262) 资助。

作者简介: 费宇红, 女, 1960年生, 博士, 研究员, 主要从事水资源、水环境和地下水污染调查评价研究; E-mail: yuhong_fei@163.com。

China. [Results] Combining the characteristics of China's regional economic development and the results of groundwater pollution investigation and evaluation, it is believed that the complex hydrogeological conditions are restricted, and the pollutants are affected by the heterogeneity of groundwater velocity, flow direction and permeability coefficient, which makes the restored site appear tailing and rebound; pollutants are restricted by the lithology of aquifers, and the adhesion and desorption of pollutants and low-permeability rock and soil often generate secondary pollution; Groundwater quality assessment, groundwater pollution health risk assessment, and pollution degree assessment provide a scientific basis for the development and completion of restoration projects. [Conclusions] Groundwater pollution remediation in China faces opportunities and challenges in the coordination of methods and technical methods. Groundwater pollution remediation needs to rely on aquifer lithology and hydrogeological conditions.

Key words: groundwater contamination; remediation methods; remediation techniques; site; water resources and environmental geological survey engineering

Highlights: Aquifer lithology and groundwater dynamic conditions are the keys to groundwater pollution remediation; according to the complexity of pollutants and sites, groundwater pollution remediation is sorted by methods and technologies.

About the first author: FEI Yuhong, female, born in 1960, researcher, engaged in the investigation and evaluation of water resources, water environment and groundwater pollution; E-mail: yuhong_fei@163.com.

Fund support: Supported by National Natural Science Foundation of China (No.41907175, No.41972262).

1 引言

人类活动污染地下水极大地破坏了自然环境和生态系统,并对地下水水源造成威胁,也可能对地表水水源带来风险。地下水是中国北方地区的重要供水水源,资料显示(中华人民共和国水利部, 2021), 2020年中国地下水利用量为892.5亿 m^3 ,其中北方地区地下水开采量达820.5亿 m^3 ;水资源紧缺的京津冀总供水量为214.66亿 m^3 (外流域生态补水除外),地下水利用率达48.8%。因此,地下水污染修复十分重要和必要。

中国地下水污染场地分布与工业类型、区域分布密切相关,中南、西南地区矿产资源丰富,钢铁及有色金属冶炼等重工业相对发达,导致这些区域工业场地地下水主要以无机重金属污染为主(李春平等, 2011)。通过对陕西省某冶炼厂界内土壤及地下水中的重金属含量(刘勇等, 2015)调查,发现地下水受到Pb、Zn、Cd等重金属严重污染,超标倍数达98.8、61.4、334.1倍。有机类污染场地主要分布在京津冀及江浙沪等沿海地区,如江苏某化工厂周边地下水污染调查发现,含水层受四氯化碳、四氯乙烯等复合有机污染,检出率超过80%(刘伟江等, 2018);此外京津冀平原浅层地下水挥发性有机污染物检出率达29.17%(席北斗等, 2019);京津冀建设用地土壤污染风险管控和修复名录显示(北京市生态环境局, 2019; 河北省生态环境局, 2019; 天津市生态环境局, 2019),化工污染场地占比高达44.1%,

主要污染物为苯系物、氯代烃、石油烃,占比高达68.42%、57.89%、42.10%。

20世纪80年代,中国在人类活动强烈的地区开展过以“三氮”(硝酸盐氮、亚硝酸盐氮和氨氮)和几种重金属(砷、镉、铬(六价)、铅、汞)为主要对象的地下水污染调查,鉴于当时的认识和检测技术限制,没有涉及有机污染问题。中国地质调查局为系统掌握中国地下水开发利用区地下水水质和污染状况,在全国440万 km^2 开展了地下水污染调查评价(文冬光等, 2012; 中国地质调查局, 2016),采集地下水样品3.1万组,检测项目包括一般化学指标、无机毒理指标、重金属指标、挥发性有机指标和半挥发性有机指标等72项指标,调查评价结果发现地下水污染主要是点状(场地)分布,有机污染和无机污染均有发生。随着国家生态文明建设的发展,近10年来,先后出台了地下水污染防治规划和方案等一系列政策法规,将有力地指导和推动地下水污染修复工程的开展(中华人民共和国国务院, 2011; 环境保护部等, 2013; 中华人民共和国国务院, 2015; 生态环境部等, 2019)。

国外地下水污染修复早在20世纪70年代末就开始起步了,1980年美国超级基金诞生,将污染场地修复上升至国家法律层面,在污染场地修复方法与技术方面做了大量的探索,为中国的环境保护工作提供了可以学习和借鉴的成果。较为著名的是Hans F主编的《In situ remediation of chlorinated solvent plumes》(Stroo et al., 2015)和John H著的

《Groundwater Chemicals Desk Reference》(Montgomery, 2000),特别是后者,很受地下水污染研究者的青睐,曾四次再版。纵观国内外地下水污染修复研究和实践(陈鸿汉等, 2006; 王焰新, 2007),发现修复污染的地下水是一项复杂的系统工程,它包含对毒性化学物质的物理、化学和生物处理方法,还涉及了污染场地条件调查,以及污染物的异位、原位修复技术。本文针对中国在地下水污染方法和技术方面的进展进行详细阐述。

2 机遇和挑战

污染物在含水层中运移,与岩土和地下水相互作用,直至排泄到地表水,其过程具有复杂性、隐蔽性,并在参与水循环运动的同时,构成对包气带和地表水污染的风险。因此,修复受污染的地下水除需要了解污染物化学性质外,更需要掌握含水层的地质和水文地质特征,充分考虑污染物和介质的相互作用,用地学理论指导施工。

2.1 地下水流向、流速和渗透性是地下水污染修复的基础

确认地下水流向可以得知地下水污染物迁移方向,是制定污染修复方案的基础,如投放污染修复剂的位置、抽取污染地下水井的布设、渗透性反应墙位置设计等。

地下水渗流速度推动污染物扩散,受含水介质非均质性的影响,渗透系数分布不均,渗透系数高污染物扩散快,常形成污染物运移的“优先通道”,导致地下水污染分布情况难以准确掌握,给判断污染修复剂的投放方式和用量带来困难。

污染物随水流遇到低渗透地层,迁移受到阻

隔,同时与岩土发生吸附作用,被捕获的污染物成为新的污染源,向渗透性高的区域释放污染物,形成地下水二次污染。被吸附污染物的反向扩散现象导致地下水污染修复拖尾和反弹(图1)。Travis et al.(2006)对大量DNAPL污染场地分析,发现修复后浓度虽下降70%~96%,但由于低渗透区的污染物常通过溶解和反向扩散再进入地下水,没有一个场地能达到最大污染限制(MCLs)标准。获取渗透系数最可靠的方法是现场抽水试验,这也是水文地质工作的基本方法。

2.2 污染物在含水介质中迁移特征是地下水污染修复的关键

污染物进入包气带和含水层后,除受水的机械弥散作用外,还在含水介质中发生吸附、解吸、溶解、沉淀、氧化、还原、络合作用(图2)。污染物与岩土产生吸附作用,致使污染延迟,在水力作用下可能形成地下水二次污染;污染物向下迁移过程与岩土颗粒有很大关系,颗粒粗、孔隙大的含水层中污染物多受重力作用向下渗透。

地下水氯代烃类有机污染是较难调查的一种场地,修复也是十分困难的。氯代烃作为干洗剂、金属清洗剂、萃取剂、脱脂剂和化工原料,19世纪初就开始广泛应用于工业中,由于使用不当和储罐泄露等等因素,造成地下水污染。氯代烃是比水重的非水溶性液体,也称作重质非水相液体(DNAPLs),最为常见的氯代烃污染物有四氯乙烯、三氯乙烯、三氯乙烷以及四氯化碳。重质非水相液体进入地下水中,随强径流迁移到低渗透区,并逐渐溶解、扩散形成污染羽、黏着于低渗透岩性的吸附相、向上进入包气带的气相(图3)。认识污染物在含水层中

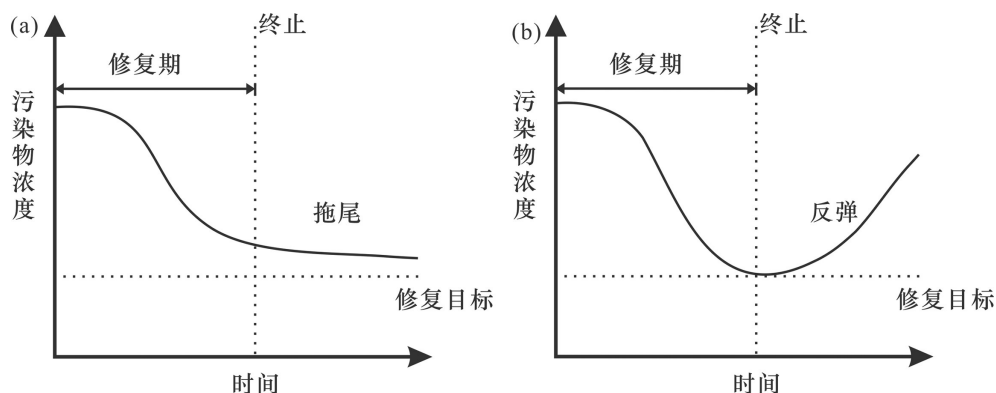


图1 地下水污染修复拖尾(a)和反弹(b)示意图

Fig.1 Diagram of tailing(a) and rebound(b) in groundwater pollution remediation

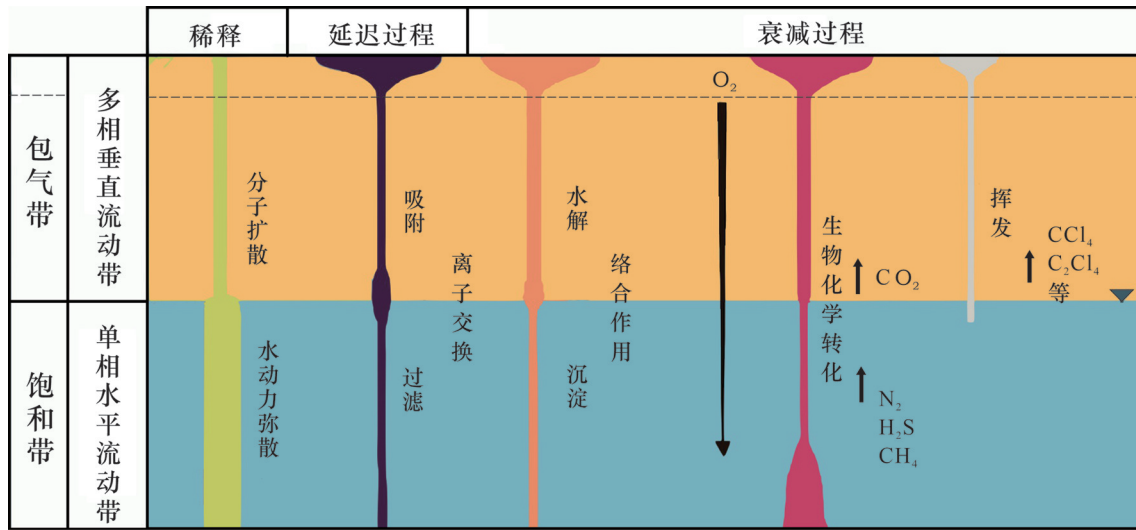


图2 污染物在含水系统中的迁移转化路径(据 Foster, 1987)

Fig.2 Transport and transformation path of contaminants in aquifer system (after Foster, 1987)

的转换关系,有助于探索合适的修复方案。

2.3 污染场地调查和评价是地下水污染修复的支撑

污染场地的调查和评价贯穿于整个修复过程的始终,其中污染场地调查是地下水污染修复工作的基础(张兆吉, 2015)。调查的起始工作,是对场地的背景信息进行收集,包括场地及区域的地质、水文地质条件,现状与历史情况等,从而对污染进行简单识别。通过确定场地环境情况、污染类型,判断污染的可能分布,制定采样计划,进行现场采样、数据评估与结果分析等工作,以确定污染物种类、浓度(程度)和空间分布。最后还应进行场地特征参数、受体暴露参数的调查,针对不同的情况,着重调查不同的特征参数,为地下水修复工作的展开提供指导。

调查的数据成果支撑了污染评价的工作,主要包括污染程度评价、健康风险评价、污染过程仿真刻画和预测。其中污染程度评价包括地下水质量评价、地下水污染评价两种。

除依据《地下水质量标准》(GB/D14848-2017)的单指标评价方法之外,学术界还研究了许多更清晰指明地下水质量的方法,如单指标综合评价方法、某类地下水贡献率评价方法(费宇红等, 2014)、模糊数学评价法(李亚松等, 2014)、灰色聚类评价方法(赵雪松, 2020)等。其中费宇红等(2014)评价了华北平原地下水质量,认为华北平原按第四纪沉积韵律含水层岩性从山前至滨海颗粒由粗变细,孔隙由大变小,地下水质量逐渐变差, I 至 III 类的地下水从 49% 降至 3.9%, V 类地下水从 21% 升至 86.9%, 原生指标中锰、总硬度、溶解性总固体、碘化物对超 III 类水单指标贡献率超过 50%。李亚松等(2014)对滹沱河冲积平原地下水质量进行评价,评价结果显示:超 III 类水样点占到总取样点的 21.5%, 主要分布在工业聚集区和排污河流两侧,影响地下水质量的主要为常规无机组分,如溶解性总固体、总硬度、铁、锰、硝酸盐氮等。赵雪松(2020)则对营口地区地下水浅层水质进行综合评价,结果表明氨氮和氟化物是对区域地下水水质影响最为关键的两个指标,营口地区地下水水质总体在 III~IV 水之间变幅。周晓妮等(2020)在漳河流域污染调查评价中发现研究区浅层地下水化学成分由西向东具有明显

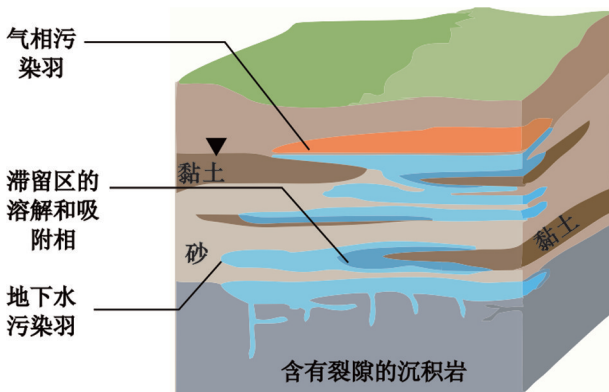


图3 地下水重质非水相污染模式图(据 Stroo et al., 2015)

Fig.3 Diagram of groundwater polluted by DNAPLs (after Stroo et al., 2015)

的分带性,将研究区分类后解释了溶解性总固体与主要离子的相关关系。苗晋杰等(2020)在首都副中心及重点区域地下水环境质量评价中发现影响非首都区域地下水质量的主要为常规无机组分,并提出了几点对策建议。李海学等(2021)对黄土高原的质量调查评价发现,流域内地下水质量以 I~IV类为主,劣质地下水主要受总硬度、硫酸盐、铁、溶解性总固体等天然原生组分影响,砷、氟、硒、碘等原生组分超标是流域部分地区地下水饮水安全的主要威胁。

地下水污染评价是对场地污染程度的识别,许多学者提出过各种评价方法根据地下水污染的定义,污染程度的划分是与对照值或背景值相对比,中国地质调查局提出的《地下水污染调查评价技术要求》(DD2008-7)用“变化指数”描述地下水污染状况(式1)。张兆吉等(2012)用实测值与背景值之差与标准值对比的方法(式2),评价了华北平原地下水污染。该方法能够将污染程度与背景相比,还能与标准值对照。

$$I = \frac{C}{C_0} \quad (1)$$

其中: I 是变化指数; C 为水样实测含量,mg/L; C_0 是背景值或对照值,mg/L。

$$P_{ki} = \frac{C_{ki} - C_{0i}}{C_{III}} \quad (2)$$

其中: P_{ki} 为 k 水样第 i 个指标的污染指数; C_{ki} 为 k 水样第 i 个指标的实测含量,mg/L; C_{0i} 为水样组分 i 指标的对照值,mg/L; C_{III} 为《地下水质量标准》(GB/T 14848-2017)中Ⅲ类指标限值,mg/L。

地下水污染修复的控制指标用风险控制值表示,根据《污染场地风险评估技术导则》(HJ 25.3-2014),其定义是土壤和浅层地下水中污染物通过不同暴露途径,对人体健康产生危害的概率。陈梦舫等(2017)针对污染物在不同环境介质中的分配、迁移和转化规律,提出了基于“污染源-暴露途径-受体”链的污染场地风险评估模型。通过科学的调查技术,得到准确的评价结果,从而确定地下水污染修复的控制指标,能够有针对性地选择修复方法,指导修复过程、位置和程度。

3 地下水污染修复方法

地下水污染修复方法有三种思路,第一是将污染物移出,可概括为物理修复方法;第二是将污染

物降解,其中包括化学方法和微生物法;第三种是利用天然过程分解、稀释污染物,即自然衰减法(刘伟江等,2016)。在实际工作中,场地的复杂条件可能会给地下水污染修复带来诸多问题(Chapelle, 2001),例如过高、过低的渗透性以及非均质地层,含水层过深,地球化学、微生物条件制约,持续的污染释放,复杂混合污染物等,确定使用何种方法是地下水污染修复工作中的关键问题。通过识别污染物的空间分布、运移特征和水岩作用机理,研究污染场地的水动力条件,掌握其物理、化学和生物过程,是污染修复研究中的基本和重点问题,也是如今的前沿问题。

3.1 物理方法

物理修复方法是以物理规律起主导作用的方法,主要包括:水动力控制法、流线控制法、屏蔽法、被动收集法、热处理法等。

水动力控制法是通过人工抽取地下水或向含水层内注水的方式改变地下水原来的水力梯度,进而将受污染的地下水水体与未受污染水体隔开。抽水井和注水井的布置需根据水文地质条件确定。一般在污染水体的上游注水,使其形成地下水分水岭,从而阻止上游未污染水体向下补给污染水体,同时,在下游抽水将污染水体抽出处理。本方法的优点是实施过程简单,适用于常规修复和应急修复,难点是水力截获带的规模和几何形态不易控制(顾栩等,2014)。

流线控制法是保持地下水流场不变的一种方法(Sale et al., 1997),该法设有一个污染物抽提廊道、一个地下水抽水廊道和一个注水廊道,首先抽水廊道中抽取地下水,然后把抽出的地下水注入相邻的注水廊道内,以确保最大限度地保持水力梯度。同时在污染物抽取廊道中抽取污染物质,抽提速度略大于抽水速度,以保障水动力场的平衡。

屏蔽法是在地下建立各种物理屏障,将受污染水体圈闭起来,以防止污染物进一步扩散蔓延。常用的灰浆帷幕法是用压力向地下污染水体周围灌注灰浆,在其周围形成一道帷幕,屏蔽污染水体。

被动收集法是在地下水流的下游挖一条足够深的沟道,在沟内布置收集系统,让地下水侧向流出至沟道,借随之流出的机会收集污染物,如将水面漂浮的油类污染物、或受污染的地下水等。物理

屏蔽法和被动收集法多数应用在地下水污染治理初期,作为一种临时控制方法。

热处理法是将污染的地下水加热,促使污染物和地下水转化为气态,用抽提井将蒸汽抽提至地表进行处理。

3.2 化学方法

化学方法是将污染物通过氧化或者还原等原理转化为无害物质。对抽出至地表的污染物,可采用沉淀法与氧化还原法等,对含水层中的污染物则是投放氧化剂或还原剂。

氧化剂注入地下水污染区域,增大水体中溶解氧含量,促进水体中多种有机物的氧化分解。常用的氧化剂有二氧化氯、Fenton试剂、过氧化氢、次氯酸盐、高锰酸钾、臭氧、过氧化钙等。该方法多用于处理难降解的污染物,如氯代烃类污染等;其优势是成本低、处理速度快;不足之处是反应过程可能生成新的化学物质导致二次污染,而且氧化剂反应过程中会有气体或热释放,对污染物的分布产生影响。有学者研究过氧化钙缓释技术,来控制 H_2O_2 和 O_2 的释放速率,满足污染物氧化和降解的需求,可以节省原材料和平衡氧气水平(蒲生彦等, 2020)。实验优选出小麦秸秆、凹凸棒土、零价铁粉为内层配比和凹凸棒土、硅藻土、水泥为外壳配比的复合缓释功能材料作为氧化剂,在淮河流域新汴河北岸地下水硝态氮污染场地应用,运行到第78天时,硝态氮去除率达89%~95%(张会玲等, 2016)。

化学还原方法利用还原剂转化或降解地下水中的污染物。研究发现,氯代烃类污染物与金属催化剂接触脱氯可达修复目的(Lowry et al., 1999), Gillham and O'Hannesin(1994)最早提出用零价铁修复地下水中氯代有机物污染。而近年来的研究发现纳米零价铁可以对地下水中多种污染物质进行还原去除,如各种卤代烃以及Cr、Pb、As等重金属。该方法具有工程造价低、施工简单、环境扰动小、修复效果好等优势;但由于其在水体中易发生团聚、沉淀和钝化等,导致修复效率降低(张威等, 2012)。

3.3 微生物修复方法

微生物修复是指利用天然存在的或可培养的功能微生物菌群,在适宜环境条件下通过自身代谢作用,将污染物降解成无毒或低毒物质的一种修复方法,分为好氧微生物修复和厌氧微生物修复。

研究人员从吉林省石油化工废水处理厂的污染土壤和活性污泥混合物中分离出好氧降解挥发性有机氯污染物的菌株(Li et al., 2008)。然而,厌氧微生物降解比好氧微生物降解占有更大的比重(王朋等, 2021)。上海市某汽车配件厂地下水氯代烃污染的原位还原修复中,厌氧微生物的还原脱氯起到主要作用(孟梁等, 2014)。南京某工业污染场地下水中有机污染物1,2,4-三氯苯在原位厌氧条件下,可完全被微生物降解(Qiao et al., 2018)。

实际修复工程中需要筛选适宜的菌株注入地下水,并添加药剂改变环境条件以提高菌群的活性(Mani Tripathi et al., 2018)。微生物修复适用于大面积污染区域的治理,具有成本低,二次污染影响小的特点。

3.4 自然衰减方法

当有机污染物泄漏进入土壤或地下水中,通过天然过程来分解和改变这些化学物质,这一过程称为自然衰减(赵勇胜, 2007)。它包括土壤颗粒的吸附、污染物质的微生物降解、地下水中的稀释和弥散。由于土壤颗粒的吸附,使部分污染物不会迁移到场地以外,同时微生物作用是污染物降解的重要作用。稀释和弥散虽不能分解污染物,但可以有效地降低许多场地的污染风险。自然衰减方法对于污染程度低的场地更为适合,如严重污染场地的外围,或污染源很小的情形。自然衰减方法可以和其他治理方法联合使用以缩短治理时间。

4 地下水污染修复技术

按污染修复位置将其分为原位修复技术、异位修复技术、监测修复技术(杨梅等, 2008;宋易南等, 2020)。在修复过程中结合使用物理、化学和微生物等污染修复方法。

4.1 异位修复技术

异位修复技术是将污染的地下水抽出至地面处理。常用的有:抽出-处理技术、多相抽提技术等。

4.1.1 抽出-处理技术

抽出-处理(Pump and treatment, P&T)技术是应用较早且较广的一种地下水污染修复技术。根据污染情况,在污染场地布设一定数量的抽水井,将地下水中的污染物抽出地表,通过地上处理设备,采用物理、化学、微生物方法进行修复,之后将

处理达标的地下水回灌地下水或排入管网,基本流程如图4。主要修复的污染物包括工业溶剂、重金属和石油等化学物质。

抽出-处理技术适合于污染物浓度高、范围大、埋藏深的场地;其前期修复效率高、处理量大,但后期易出现污染物拖尾和反弹;抽出处理对非水相液体(DNAPLs)效果甚微,对地下水流场和水环境干扰大(蒲敏, 2017)。抽出处理污染物的回收率不一定能够达到100%,对于“一抽一灌”双井,井孔扰动下的地下水稳定流场可分为内循环区、外循环区和非循环区。张帅等(2020)研究了由内循环区的水动力学特性得到回收率的理论公式和变化曲线,认为回收率取决于地下水侧向径流的方向和相对强度,随抽水流量的增大而增加。

王家樑(2019)使用抽出-处理方法对上海某搬迁化工厂场地修复,该场地地下水受砷、苯、乙苯、四氯化碳和氯仿污染,污染面积1189 m²,修复地下水污染量为4475 m³,设置33口抽提井,抽出量为150~200 m³/d,抽出后采用“初沉+高级氧化+混凝沉淀”工艺进行处理,处理后的地下水检测达标后,纳管排放。

陈思莉等(2020)对广东珠海某电镀行业企业柴油泄漏的地下水污染,采用表面淋洗与抽出-处理技术相结合的修复技术。处理方法是挖除重污染土壤后,在泄漏点设置9个喷头,洒水量为1.3 m³/h,喷淋时间为2 h/d,泄漏点西绿化带设置5个喷头,洒水量为0.7 m³/h,喷淋时间为9 h/d,淋洗水进入地下水后

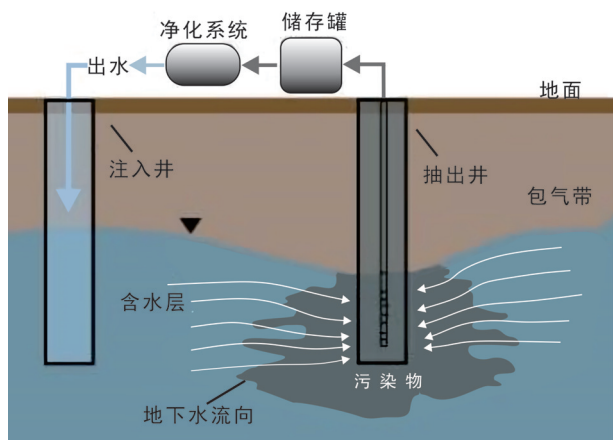


图4 地下水污染抽出处理技术示意图

Fig.4 Schematic diagram of pump and treatment technology for groundwater pollution

抽取至厂区污水厂处理,治理历时9个月,地下水石油类浓度降至0.3 mg/L以下,达到相关标准限值。

4.1.2 多相抽提修复技术

多相抽提(Multi-phase extraction, MPE)是通过高度真空的系统抽气去除地下水和包气带中气态污染物,该技术同时抽取土壤气体和地下水中的污染物到地面,再进行多相分离及处理,抽提系统分为单泵或双泵结构。其工作模式是:液相抽提水位下降,包气带毛细边缘暴露,用气相抽提清除该区域的污染物。

该技术对环境友好、修复效率高、地面扰动小、适宜高浓度污染场地修复,特别是处理VOCs和石油烃类污染物见效较快。在MPE工作中可以运用多相流数值模拟指导抽提工程,通过精确把握泵的位置、流速、LNAPL气相传质系数、水土特征等参数(USACE, 1999; Edwards et al., 2002; Qi et al., 2020),优化MPE运行,提高修复效果。

在中国许多场地是多相抽提技术与原位氧化方法联合应用的。如王锦淮等(2017)在化工厂有机污染场地采用多相抽提+原位化学氧化联合技术修复苯系物污染地下水,工程运行25天后,对氯苯、1,2-二氯苯、1,4-二氯苯的去除率达99%。王磊等(2014)在某电子机械厂地下水受石油烃、苯系物、多环芳烃复合污染场地的修复中,先用多相抽提技术强化去除污染地下水中的LNAPL,然后又应用原位化学氧化技术修复,总用时45 d,达到修复目标。张晶等(2016)用过硫酸钠为氧化剂,在石油烃、苯系物和多环芳烃等地下水污染场地降解率分别达99.8%、94.4%、92.2%。

4.2 原位修复技术

4.2.1 曝气修复技术

曝气(Air sparging, AS)修复技术是利用竖井建立注气-抽气系统,将空气注入地下水位以下,使污染物质从液相进入气相,含有污染物的气体在浮力作用下上升到包气带,然后通过抽气系统抽出到地上处理,从而达到修复目标,曝气技术的基本流程如图5。

曝气修复技术适用于可溶的挥发性有机物吹脱;促进存在于地下水位以下和毛细管边缘的残留态和吸附态有机物的挥发,如石油、氯代烃溶剂等;氧的传输过程可促进好氧生物对污染物的降解(Johnson et al., 1993; Dadrasnia et al., 2013; Chao et

al., 2018)。该技术具有所需设备数量少、易安装和操作简便等优势,在20世纪80年代末90年代初得到广泛认可和应用。之后研究发现,空气的注入方式、场地条件和污染物特征等都可影响修复效果(Yang et al., 2005; Neriah et al., 2016, 2019),如注气井在含水层中水平延伸,注入氢气、丙烷、氧气等不同的气体种类,空气脉冲式注入或注入加热后空气等。利用三维模拟槽对影响气体流型的因素进行深入研究(张英, 2004; 宋兴龙, 2015),认为曝气压力与曝气流量呈线性正相关关系,曝气修复中气体的最大饱和度在49%~76%,理论曝气压力范围一般不超过60 kPa,超过此范围后,影响区域变化很小(王贺飞等, 2014)。

Bass et al.(2000)针对美国多个曝气注入场地修复案例进行了汇总与分析,发现岩性和污染物类型对修复效果有明显影响,不同注气模式对修复效果未出现明显差异,氯化溶剂污染场地修复效果相对较好,石油类污染场地修复后易出现反弹。

循环井技术是曝气技术的一种,是井内曝气,在封闭的竖井中放入注气管和抽气管,竖井与地下水连通,注入的气体在井内形成地下水三维循环模式,使污染物与水分离,收集后处理。该方法不适用于大范围污染修复,并对低渗透性含水层修复效果差。屈智慧等(2016)用循环井技术对化工厂污水排放管道周围地下水污染进行修复,在污染场地布设4个循环井和9个监测井,循环井通过空气压缩机连续24 h曝气,压力200 kPa,治理前循环井附近

氯苯浓度最高值达153.14 mg/L,循环井运行28天后降为3.94 mg/L,去除率95%以上,但仍未达氯苯的1.0 mg/L国家标准限值,后续修复速度较慢。

4.2.2 热处理修复技术

原位热处理(In-situ thermal treatment)技术是曝气技术的改进。曝气技术的注入和抽出处理过程对污染物去除缓慢,特别是吸附在含水层中的污染物,去除速率受扩散的限制。热处理技术是将污染的地下水加热,促使污染物和地下水转化为汽态,用抽提井将蒸汽抽提至地表进行处理。可分为直接注入热气、电阻加热、热传导加热、射频加热等(Hicknell et al., 2018)。处理可采用汽水分离、吸收法、化学氧化法、活性炭吸附法或冷凝法等。

该技术对于低渗透性地层中去除NAPL、DNAPL效果较好(Baker et al., 2016),USEPA应用电阻加热做了多个野外污染场地修复(USEPA, 2004)。赵勇胜等(2019)对蒸汽在多孔介质中的迁移规律修复氯苯实验研究认为,注入蒸汽为0.3 kg/h,在氯苯初始为56.8 mg/kg的条件下,热蒸汽修复细砂中氯苯3.5 h后去除率达98.0%,其中88.4%的氯苯通过挥发去除,9.6%的氯苯随蒸汽冷凝前锋迁出,仅2.0%的氯苯残留在多孔介质中。将地下增温应用于东北某油田区石油类污染场地修复(初彤等, 2018),现场实验发现增温强化空气扰动修复过程中温度传导半径为2~4 m,曝气场污染物去除半径达10 m,比非增温强化条件污染物去除范围扩大3~5 m,去除率有效提高40%~50%。

4.2.3 可渗透反应墙修复技术

可渗透反应墙(Permeable reactive barrier, PRB)技术是当前较为流行的技术(USEPA, 1998),由于它的“墙”体可以搭载各种修复方法,所以应用广泛,并且可治理的污染类型较广。其流程是在地下安装一个填充有活性反应材料的可透水墙体,当受污染的地下水在自然水力梯度的作用下流过活性材料墙体时,溶解的有机物、重金属、核素等污染物与活性材料发生吸附、沉淀、氧化还原和微生物降解反应而被去除,达到修复的目的。可渗透反应墙是定位于污染区,捕获污染羽,流出污染区,因此,它是介于原位和异位之间的修复方法,技术模式如图6。

常见PRB结构(图7)为连续墙式结构(Continuous Reactive Wall)和隔水漏斗-导水门式结构(Funnel-

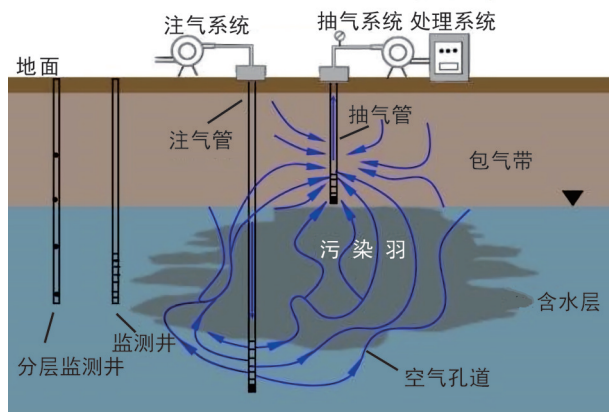


图5 地下水污染曝气处理技术示意图

Fig.5 Schematic diagram of air sparging technology for groundwater pollution

and-Gate)(陈仲如等, 2012; Faisal et al., 2018)。当地下水体污染程度较小时, 一般采用连续墙式结构, 即在地下水流动的区域安装连续的活性渗滤墙; 当地下水体污染程度和污染区域较大时, 一般采用隔水漏斗-导水门式结构。以上两种结构通常适用于潜水埋藏较浅的场地, 而对于潜水埋藏较深的场地, 还可采用灌注处理带式 PRB(Compounds et al., 2000; 宋权威等, 2019)。不同 PRB 结构类型的优缺点与使用条件见表 1。活性反应材料包括零价铁、活性炭、离子交换树脂、螯合剂和微生物等, 要求其具有抗腐蚀性、活性持久等特征。

O'Hannesin and Gillham(1998)在加拿大安大略省的军事基地, 用 22% 的粒状铁和 78% 的砂混合形成可渗透的墙, 将其置于 268 mg/L 三氯乙烯和 58 mg/L 四氯乙烯污染羽的径流路径上, 结果去除了 90% 的三氯乙烯和 86% 的四氯乙烯。

黄永炳 (2018)对砷吸附机理研究发现, 铁改性锰矿对砷的去除效果最好, 并应用于郴州市苏仙区 PRB 砷污染修复场地。中国地质大学(北京)曾在沈阳、焦作完成 2 处 PRB 的示范工程, PRB 建成运行监测表明, 通过沸石渗透反应墙, 可有效原位修复受氨氮(NH₄⁺-N)污染的地下水(Hou et al., 2014; Li et al., 2014)。针对国内 Cr(VI) 污染场地特点, 有研究认为用开挖-填充法或非开挖的水力压裂注入法、土壤搅拌法、高压旋喷法等技术, 构建可渗透性反应墙修复大型复杂铬污染场地, 能够阻止和降低含铬地下水扩散(郭丽莉等, 2020)。

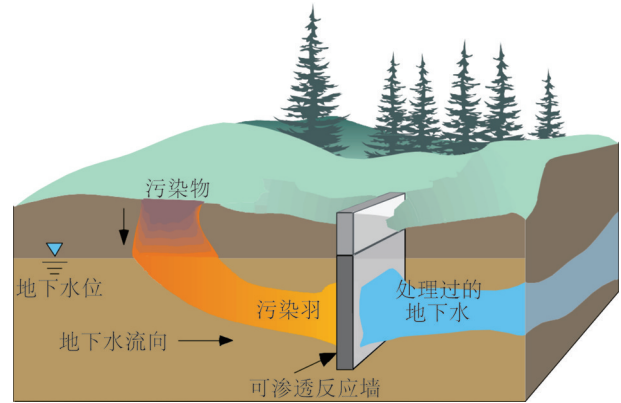


图 6 地下水污染可渗透性反应墙技术示意图(USEPA, 1998)

Fig.6 Schematic diagram of permeable reaction barrier technology for groundwater pollution(USEPA, 1998)

4.2.4 原位注入修复技术

原位注入修复技术是采用化学方法进行原位氧化、还原或生物修复, 其技术方法原理同前文的化学方法, 在此结合污染场地介绍几个修复工程。

王棣等(2018)对位于山前冲洪积扇区的北京某电镀厂的生产车间地下水 Cr(VI) 污染场地建立了原位注入修复系统。包含 1 个注入井和 4 个监测井, 监测井与注入井之间相距 3 m, 监测井分别设置在注入井的东南西北 4 个方位, 2 个监测孔为注入井的上游, 2 个在下游。共制备 300 L 浓度为 5 mg/L 的纳米零价铁药剂, 待药剂反应充分后进行原位注药, 使用 Geoprobe 钻机采用加压泵注的方式将药剂灌注到注药管中, 再通过钻头四周的孔洞进入到地

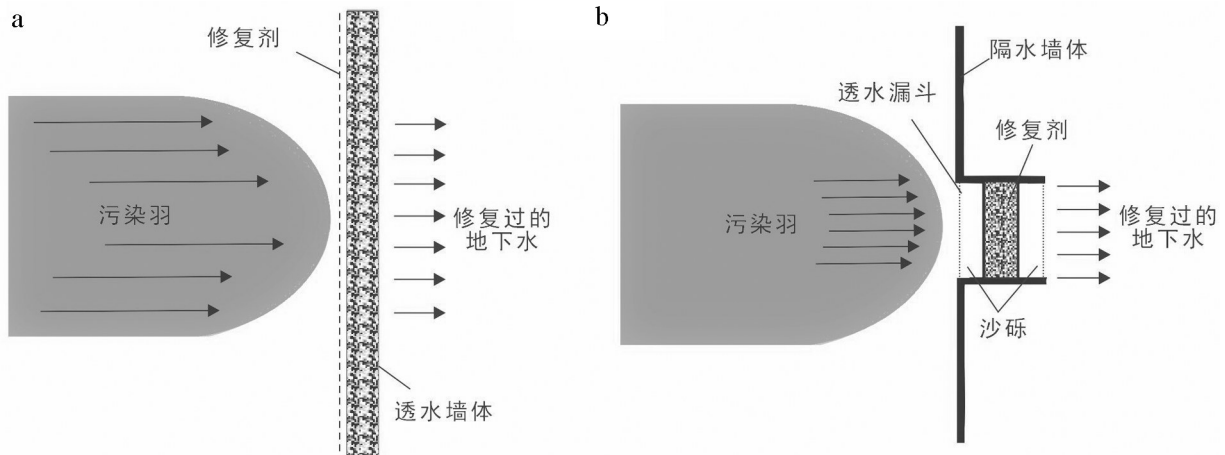


图 7 PRB 结构示意图(a, 连续墙式 PRB; b, 隔水墙漏斗门式 PRB)(USEPA, 1998)

Fig.7 Structure Diagram of PRB (a, Continuous wall PRB; b, Funnel and gate PRB) (USEPA, 1998)

表1 不同PRB结构类型的优缺点与使用条件(宋权威等, 2019)

PRB 结构类型	优点	缺点	适用条件
连续墙式	结构简单,设计安装方便,对天然地下水流场干扰小	复杂的污染物需要建立多道墙,费用增加	适用于地下水埋藏较浅、污染羽规模较小的场地
隔水漏斗-导水门式	对于污染区域较大、含水层较厚的区域,可节省资金	对天然地下水流场产生较大干扰	适用于埋藏较浅,污染羽规模较大的场地
灌注处理带式	结构简单、成本低	修复填料难以替换,填料影响范围有限	适用于地下水埋藏较深,含水层渗透性强的场地

下水中进行原位修复,多参数监测器对该场地地下水各理化参数进行长期监测表明注射井中六价铬还原率达到99%。

韩昱等(2019)对山东已闭坑煤矿煤层以下奥陶纪灰岩裂隙岩溶水污染,用原位和异位化学氧化方法进行治理。初步调查发现煤层采掘情况不明,煤层顶板垮落、地下空间支离破碎,地质构造较为复杂,污染物分布情况不明。鉴于污染物的迁移和扩散将直接危及下游3 km的中型供水水源地。修复方案分三步:第一,先在外围钻探两排注浆孔进行压力注浆,形成连续水泥止水帷幕污染源被成功阻隔在帷幕内;第二,将污染水抽出用芬顿高级氧化进行处理;第三,在地下水中注入氧化药剂,使附着在巷道底部的污染物受扰动后加速与氧化药剂反应,达到去除残留污染物的目的。经抽提循环氧化修复,场地COD浓度达到2~340 mg/L,氯甲烷由137~410 μg/L降为13~262 μg/L。

商磊等(2018)对唐山某电镀场Cr(VI)污水污染场地,进行原位和异位联合修复治理。主要工艺流程包括:第一,在场地污染源下游抽出地下水,控制污染晕的扩大;第二,利用还原剂去除污水中的六价铬;第三,将治理后的污水回灌污染土壤以淋洗污染土壤,经地下径流后再抽提出来继续处理,如此循环,以降低地下水中六价铬的含量。经过抽取还原淋洗修复,5347.5 m³受污染的地下水六价铬浓度由37.2 mg/L降至0.05 mg/L以下。

5 结论和建议

5.1 结论

中国科学界跟随国际先进学术思想开展了理论和试验研究,近20年,在区域地下水污染调查评价和地下水污染修复方面取得了众多成果。突出表现在以下三个方面。

(1)掌握地下水污染特征是防治和修复的基

础。污染物进入含水层后,与岩土发生吸附和解吸作用,污染程度受含水介质、分布、水动力条件影响。一些污染物受低渗透性岩土吸附,在水流作用下又开始释放污染物。开展详细水文地质调查、污染风险评价、污染程度评价对于污染场地防治和修复十分必要和重要。

(2)地下水污染修复方法。指用于清除地下水污染物的方法,包括物理方法、化学方法、生物方法和自然衰减法。物理方法是通过水动力场控制污染物运移,减少扩散程度;化学方法是投放可与污染物进行氧化或者还原的化学药剂,分解污染物达到降解目的;微生物方法是利用天然存在的或可培养的微生物菌群,通过自身代谢作用将污染物降解成无毒或低毒物质的一种修复方法;自然衰减是通过天然过程来分解和改变污染物的过程。

(3)地下水污染修复技术。指通过一定手段治理地下水污染的技术,根据修复工程的位置分为异位和原位修复:①异位技术。利用地下水井和包气带井,抽出地下水或抽出污染气体,至地面再修复。有抽出-处理技术、多项抽提技术等。该技术适合于污染物浓度高、范围大、埋藏深的场地;前期修复效率高、处理量大,后期易出现污染物拖尾和反弹。②原位技术。常用的有曝气修复技术、热处理修复技术、可渗透反应墙修复技术和原位注入修复技术。这些技术一大特点是将可降解污染物的修复剂置于地下,其优点是成本低,可修复的范围大,不受污染物埋藏深度限制,缺点是修复剂与岩土和地下水发生化学作用影响修复效果。

5.2 建议

(1)培养地学-环境学跨界相融的修复队伍。水文地质条件对污染修复的制约表现在:地下水流向、含水层岩性和渗透系数等对污染物的运移和修复剂的运移起到助推和阻碍作用,有些污染物进入地下水汇集在渗透性差难扩散的地层,而修复剂难

进入低渗透区,不能起到修复作用;修复过程中地注入井和地层常见结垢,将影响注入修复剂或降低含水层渗透率。鉴于此,进行地下水污染修复的队伍应该同时具备地质和环境学知识,并掌握水文地质钻探、物探方法,能够应对地质和水文地质条件干扰。

(2)制定污染场地水文地质调查细则。地下水污染修复方案的制定和实施需以详细水文地质调查为基础:场地级地下水补径排特征和水文地质参数不能用区域调查结果代替;污染场地往往是陈旧的工业厂区,堆积大量废物,污染物可能在持续排放,很难掌握地下水污染状况,给修复剂准确输送到污染场地带来一定困难。对于待修复的污染场应进行水文地质详细勘察,尽早编制技术细则,以指导地下水污染修复。

References

- Bass D H, Hastings N A, Brown R A. 2000. Performance of air sparging systems: A review of case studies[J]. *J. Hazard. Mater.*, 72 (2/3): 101–119.
- Baker R S, Nielsen S G, Heron G, Ploug N. 2016. How effective is thermal remediation of DNAPL source zones in reducing groundwater concentrations?[J]. *Groundwater Monitoring & Remediation*, 36(1): 38–53.
- Beijing Municipal Ecology and Environment Bureau. 2019. Construction Land Soil Pollution Risk Control and Remediation List of Beijing[R]. Beijing: Beijing Municipal Ecology and Environment Bureau.
- Ben Neriah A, Paster A. 2016. Effect of temporal changes in air injection rate on air sparging performance groundwater remediation[J]. *Groundwater*, 54(6): 851–860.
- Chao H, Hsieh L, Hai N T. 2018. Increase in volatilization of organic compounds using air sparging through addition in alcohol in a soil–water system[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 344:942–949.
- Chapelle F H. 2001. Ground–water Microbiology and Geochemistry[M]. New York: Wiley.
- Chen Honghan, Chen Hongwei, He Jiangtao, Liu Fei, Shen Zhaoli, Han Bing, Sun Jing. 2006. Health–based risk assessment of contaminated sites: Principles and methods[J]. *Earth Science Frontiers*, 13(1): 216–223(in Chinese with English abstract).
- Chen Mengfang, Han Lu, Luo Fei. 2017. Methodology for Risk Assessment of Soil and Groundwater in Contaminated Sites [M]. Beijing: Science Press.
- Chen Sili, Yi Zhongyuan, Wang Ji, Pan Chaoyi, Chang Sha, Guo Qingwei, Zhou Jinguang, Sun Lan. 2020. Case study on remediation of diesel contaminated soil and groundwater by eluent–extraction technology[J]. *Environmental Engineering*, 38 (1): 178–182(in Chinese with English abstract).
- Chen Zhongru, Zhang Chengbo, Li Hongyi, Zhang Yongding, Qiu Jinan, Lin Tao. 2012. On the structure and design of permeable reactive barrier[J]. *Journal of Safety and Environment*, 12(4): 56–61(in Chinese with English abstract).
- China Geological Survey. [2016–05–17]. National Groundwater Quality and Pollution Survey (2005–2015)[DB/OL]. https://www.cgs.gov.cn/ddzt/jqthd/lhfjkwzz/dqhxccc/201607/t20160705_337538.html.
- Chu Tong, Yang Yuesuo, Lu Ying, Wu Yuhui, Chen Yu, Du Xinqiang. 2018. Thermal enhanced air sparging for oil contamination remediation in shallow groundwater of cold regions[J]. *CIESC Journal*, 69(8): 3701–3710(in Chinese with English abstract).
- Compounds I C O R, Wickramanayake G B, Gavaskar A R, Chen A. 2000. Chemical Oxidation and Reactive Barriers: Remediation of Chlorinated and Recalcitrant Compounds[M]. Columbus: Battelle Press.
- Dadrastia A, Shahsavari N, Emenike C U. 2013. Remediation of Contaminated Sites[M]. Hydrocarbon.
- Decree of the state council of the People's Republic of China. 2011. National Groundwater Pollution Control Plan (2011–2020) [R]. Beijing: Decree of the state council of the People's Republic of China.
- Decree of the state council of the People's Republic of China. 2015. Action Plan for Prevention and Control of Water Pollution[R]. Beijing: Decree of the state council of the People's Republic of China.
- Department of Ecology and Environment of Hebei Province. 2019. Construction Land Soil Pollution Risk Control and Remediation List of Hebei [R]. Shijiazhuang: Department of Ecology and Environment of Hebei Province.
- Edwards D A, Little J W, Lanik W, Hajali P A. 2002. Calibration of a model for volatile organic compound mass removal by multiphase extraction[J]. *Journal of Environmental Engineering (New York, N. Y.)*, 128(5): 472–475.
- Faisal A A H, Sulaymon A H, Khaliefa Q M. 2018. A review of permeable reactive barrier as passive sustainable technology for groundwater remediation[J]. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 15(5): 1123–1138.
- Fei Yuhong, Zhang Zhaoji, Guo Chunyan, Wang Chunxiao, Lei Ting, Liu Jin. 2014. Research on the method for evaluation and influence factors identification of regional groundwater quality: A case study of the North China Plain[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 35(2): 131–138(in Chinese with English abstract).
- Foster S S D. 1987. Fundamental Concepts in Aquifer Vulnerability, Pollution Risk and Protection Strategy[M]. The Netherlands, Netherlands Organization for Applied Scientific Research: Delft.
- Gillham R W, O'Hannesin S F. 1994. Enhanced degradation of halogenated aliphatics by zero–valent iron[J]. *Ground Water*, 32 (6): 958–967.

- Gu Xu, Du Peng, Shan Huimei, Ma Teng, Cheng Shenggao. 2014. Application of hydraulic capture technique in groundwater pollution restoration[J]. *Safety and Environmental Engineering*, 21(4): 52–58(in Chinese with English abstract).
- Guo Lili, Kang Shaoguo, Wang Qi, Xiong Jing, Li Shupeng, Kong Jiaoyan. 2020. Permeable reactive barrier for chromium contaminated groundwater remediation: An overview[J]. *Environmental Engineering*, 38(6): 9–15(in Chinese with English abstract).
- Han Yu, Liu Yuxian, Ding Guantao, Liu Yuxiang, Cao Guangming, Zhang Ruipeng, Sun Zhongjin, Tang Xiaoshan. 2019. Technologies of VOCs pollution remediation in groundwater[J]. *Acta Geologica Sinica*, 93(S1): 284–290(in Chinese with English abstract).
- Hicknell B N, Mumford K G, Kueper B H. 2018. Laboratory study of creosote removal from sand at elevated temperatures[J]. *Journal of Contaminant Hydrology*, 219:40–49.
- Hou Guohua, Liu Fei, Liu Mingzhu, Kong Xiangke, Li Shengpin, Chen Liang, Colberg P J S, Jin Song, Chen Honghan. 2014. Performance of a permeable reactive barrier for in situ removal of ammonium in groundwater[J]. *Water Science and Technology–Water Supply*, 14(4): 585–592.
- Huang Yongbing. 2018. Remediation of arsenic contaminated groundwater by manganese ores and PRB engineering technology[D]. Wuhan, Huazhong Agricultural University.
- Johnson R L, Johnson P C, Mcwhorter D B, Hinchey R E, Goodman I. 1993. An overview of in situ air sparging[J]. *Ground Water Monitoring & Remediation*, 13(4): 127–135.
- Li Chunping, Chen Mengfang, Luo Yongming, Song Jing, Wu Chunfa, Luo Fei, Wei Jing. 2011. Contaminants of concern and adverse environmental impact for key industries[J]. *The Administration and Technique of Environmental Monitoring*, 23(3): 7–13(in Chinese with English abstract).
- Li Haixue, Han Shuangbao, Wu Xi, Wang Sai, Liu Weipo, Ma Tao, Zhang Mengnan, Wei Yutao, Yuan Fuqiang, Yuan Lei, Li Fucheng, Wu Bin, Wang Yushan, Zhao Minmin, Yang Hanwen, Wei Shibo, 2021. Distribution, characteristics and influencing factors of fresh groundwater resources in the Loess Plateau, China[J]. *China Geology*, 4(3): 509–526.
- Li M T, Hao L L, Sheng L X, Xu J B. 2008. Identification and degradation characterization of hexachlorobutadiene degrading strain *Serratia marcescens* HL1[J]. *Bioresource Technology*, 99(15): 6878–6884.
- Li Shengpin, Huang Guoxin, Kong Xiangke, Yang Yingzhao, Liu Fei, Hou Guohua, Chen Honghan. 2014. Ammonium removal from groundwater using a zeolite permeable reactive barrier: A pilot-scale demonstration[J]. *Water Science and Technology*, 70(9): 1540–1547.
- Li Yasong, Zhang Zhaoji, Fei Yuhong, Qian Yong, Wang Zhao, Chen Jingsheng, Zhang Fenge. 2014. Groundwater quality and contamination characteristics in the Hutuo River plain area, Hebei Province[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 35(2): 169–176(in Chinese with English abstract).
- Li Zhenghong, Zhang Cuiyun, Zhang Sheng, Yin Miying, Ma Linna, Guo Xiuhong. 2007. Review on groundwater microbiology[J]. *South–to–North Water Diversion and Water Science & Technology*, 5(5): 60–63(in Chinese with English abstract).
- Liu Weiji, Chen Jian, Liu Rui, Liu Xin, Niu Haobo, Su Chunli. 2018. Investigation and evaluation of groundwater pollution around a chemical plant in Tancheng Country[J]. *Safety and Environmental Engineering*, 25(6): 67–75(in Chinese with English abstract).
- Liu Weiji, Fei Yuhong, Jing Liuxin, Wang Dong, Zhao Yongsheng. 2016. Technology Methods and Cases of Ground Water Pollution Prevention and Control in Typical Areas of North China Plain [M]. Beijing: China Environmental Science Press.
- Liu Yong, Wang Chengjun, Liu Hua, Ma Hongzhou, Zhang Qionghua, Feng Tao, Sun Dalin. 2015. Spatial distribution and ecological risk assessment of heavy metals in soil around a lead and zinc smelter [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 9(1): 477–484(in Chinese with English abstract).
- Lowry G V, Reinhard M. 1999. Hydrodehalogenation of 1– to 3–carbon halogenated organic compounds in water using a palladium catalyst and hydrogen gas[J]. *Environmental Science & Technology*, 33(11): 1905–1910.
- Mani Tripathi S, Chaurasia S. 2018. Bioremediation of groundwater: An overview[J]. *International Journal of Applied Engineering Research*, 13:16825–16832.
- Meng Liang, Guo Lin, Yang Jie, Luo Qishi. 2014. Research on the pilot scale in situ remediation of groundwater polluted by chlorinated hydrocarbons in a contaminated site[J]. *Industrial Water Treatment*, 34(8): 18–21(in Chinese with English abstract).
- Miao Jinjie, Jin Jihong, Du Dong, Liu Hongwei, Bai Yaonan, Zhang Jing, Guo Xu. 2020. Valuation of groundwater environmental quality and causes of problems in the capital sub–center and key regions[J]. *Geological Survey and Research*, 43(3): 224–229, 286(in Chinese with English abstract).
- Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China, Ministry of Natural Resources of the People's Republic of China, Ministry of Housing and Urban–Rural Development of the People's Republic of China, Ministry of Water Resources of the People's Republic of China, Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China. 2019. Groundwater Pollution Prevention Implementation of The Programme[R]. Beijing: Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China.
- Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China, Ministry of Land and Resources of the People's Republic of China, Ministry of Housing and Urban–Rural Development of the People's Republic of China, Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. 2013. Groundwater Pollution

- Prevention and Control Programme in North China Plain[R]. Beijing: Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China.
- Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. [2021-07-09]. 2020 China Water Resources Bulletin [DB/OL]. http://www.mwr.gov.cn/sj/tjgb/szygb/202107/t20210709_1528208.html.
- Montgomery J H. 2000. Groundwater Chemicals Desk Reference, Fourth Edition[M]. CRC Press.
- Neriah A B, Paster A. 2019. Enhancing groundwater remediation in air sparging by changing the pulse duration[J]. Groundwater Monitoring & Remediation, 39(1): 43-53.
- O'Hannesin S F U O, Gillham R W. 1998. Long-term performance of an in situ "iron wall" for remediation of VOCs[J]. Ground Water, 36(1): 164-170.
- Pu Min. 2017. Reviews on groundwater contaminants control and remediation technology: Rump and treat[J]. Environmental Engineering, 35(4): 6-10(in Chinese with English abstract).
- Pu Shengyan, Hou Guoqing, Lu Xue, Li Bowen. 2020. Review on application of calcium peroxide controlled-release technology in groundwater pollution remediation[J]. Industrial Water Treatment, 40(8): 1-6(in Chinese with English abstract).
- Qi Shengqi, Luo Jian, O'Connor D, Wang Yidong, Hou Deyi. 2020. A numerical model to optimize LNAPL remediation by multi-phase extraction[J]. The Science of the Total Environment, 718:137309.
- Qiao Wenjing, Luo Fer, Lomheim L, Mack E E, Ye Shujun, Wu Jichun, Edwards E A. 2018. Natural attenuation and anaerobic benzene detoxification processes at a chlorobenzene-contaminated industrial site inferred from field investigations and microcosm studies[J]. Environmental Science & Technology, 52(1): 22-31.
- Qu Zhihui, Wang Hongtao, Yang Yong, Yuan Sili, Sang Zhiwei, Zhang Yuhu. 2016. Research on effect in remediation of chlorobenzene contaminated groundwater by circulation well[J]. Chemical Engineer, 30(11): 29-32(in Chinese with English abstract).
- Sale T, Applegate D. 1997. Mobile NAPL recovery: Conceptual, field, and mathematical considerations[J]. Ground Water, 35(3): 418-426.
- Shang Lei, Dong Mingfang, Tian Xizhao, Shan Qiang, Bai Zhenyu. 2017. The engineering application of joint repair technology for Cr6+ in a sewage treatment site in Tangshan[J]. Environmental Engineering, 35(S1): 281-284(in Chinese with English abstract).
- Song Quanwei, Zhao Xingda, Chen Changzhao, Zhang Kunfeng, Chen Hongkun, Liu Yuling. 2019. Study on PRB remediation of groundwater polluted by oil pollutants[J]. Environmental Protection of Oil & Gas Fields, 29(1): 1-4(in Chinese with English abstract).
- Song Xinglong. 2015. Laboratory Simulation Study of Air Sparging for Remediation of Groundwater Pollution[D]. Chuangchun: Jilin University(in Chinese with English abstract).
- Song Yinan, Hou Deyi, Zhao Yongsheng, Zhu Jin, Zhang Qi, Qin Chuanyu, Wang Wenfeng. 2020. Remediation strategies for contaminated groundwater at chemical industrial sites in the Beijing-Tianjin-Hebei Region[J]. Research of Environmental Sciences, 33(6): 1345-1356(in Chinese with English abstract).
- Stroo H F, Ward C H. 2015. In Situ Remediation of Chlorinated Solvent Plumes[M]. Beijing: Geological Publishing House.
- Tianjin Ecology and Environment Bureau. 2019. Construction Land Soil Pollution Risk Control and Remediation List of Tianjin[R]. Tianjin: Tianjin Ecology and Environment Bureau.
- Travis M M, James M M, Charles J N. 2006. Performance of DNAPL source depletion technologies at 59 chlorinated solvent-impacted sites[J]. Ground Water Monitoring & Remediation, 26(1): 73-84.
- USACE. 1999. Engineering and extraction[R]. Washington DC: United States Army Corps of Engineers.
- USEPA. 1998. Permeable Reactive Barrier Technologies for Contaminant Remediation[R]. Washington DC: USEPA.
- USEPA. 2004. EPA 542-R-04-010, In Situ Thermal Treatment of Chlorinated Solvents. Fundamentals and Field Applications[S]. Washington, DC, USA.
- Wang Di, Wei Wenxia, Wang Linling, Wang Haijian, Li Jiabin. 2018. Remediation of chromium (VI) contaminated groundwater by in-situ injection of nanoscale zero valent iron[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 12(2): 521-526(in Chinese with English abstract).
- Wang Hefei, Song Xinglong, Zhao Yongsheng, Wang Xiaoman, Wang Qian, Qin Chuanyu, Sun Jiaqiang. 2014. Laboratory study for air flow during air sparging[J]. China Environmental Science, 34(11): 2813-2816(in Chinese with English abstract).
- Wang Jialiang. 2019. Application of extraction processing technology in groundwater pollution restoration project[J]. Shanghai Construction Science & Technology, (1): 67-69(in Chinese).
- Wang Jinhuai, Gu Chunjie. 2017. Engineering application of multiphase extraction and in-situ chemical oxidation combined technology in organic contaminated sites[J]. Shanghai Chemical Industry, 42(12): 20-24(in Chinese with English abstract).
- Wang Lei, Long Tao, Zhang Feng, Zhu Xin, Tian Meng, Lin Yusuo. 2014. Advancement in development of multi-phase extraction (MPE) technology for remediation of soil and groundwater[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 30(2): 137-145(in Chinese with English abstract).
- Wang Peng, Chen Wenying, Pu Shengyan. 2021. Research progress of enhanced in situ bioremediation technology for groundwater circulation well [J]. Safety and Environmental Engineering, 28(3): 137-146(in Chinese with English abstract).
- Wang Song, Chen Jiachang, Dai Zhenyu, Zhang Qiyi, Li Yunlong, Zhang Baogang. 2021. A research on microbial remediation of ti contaminated groundwater[J]. Earth and Environment, 46(3): 282-287(in Chinese with English abstract).

- Wang Y. 2007. Groundwater Contamination[M]. Beijing: Higher Education Press.
- Wen Dongguang, Lin Liangjun, Sun Jichao, Zhang Zhaoji, Jiang Yuehua, Ye Nianjun, Fei Yuhong, Qian Yong, Gong Jianshi, Zhou Xun, Zhang Yuxi. 2012. Groundwater quality and contamination assessment in the main plains of eastern China[J]. Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 37(2): 220–228(in Chinese with English abstract).
- Xi Beidou, Li Juan, Wang Yang, Tang Jun, Hong Hui. 2019. Strengthening the innovation capability of groundwater science and technology to support the coordinated development of Beijing–Tianjin–Hebei Region: Status quo, problems and goals[J]. Research of Environmental Sciences, 32(1): 1–9(in Chinese with English abstract).
- Yang Mei, Fei Yuhong. 2008. Research summary on groundwater pollution remediation technology[J]. Site Investigation Science and Technology, (4): 12–16(in Chinese with English abstract).
- Yang Xiaomin, Beckmann D, Fiorenza S, Niedermeier C. 2005. Field study of pulsed air sparging for remediation of petroleum hydrocarbon contaminated soil and groundwater[J]. Environmental Science & Technology, 39(18): 7279–7286.
- Zhang Huiling, Zhang Wen, Zhang Qingquan, Liu Cuicui, Ma Tianhai, Guo Hongyan. 2016. Research and application of composite slow-release functional materials for in situ remediation of nitrate-contaminated groundwater[J]. Journal of Nanjing University (Natural Sciences), 52(1): 115–124(in Chinese with English abstract).
- Zhang Jing, Zhang Feng, Ma Lie. 2016. Combined application of multiple remediation technologies by multi-phase extraction and in-situ chemical oxidation[J]. Environmental Protection Science, 42(3): 154–158(in Chinese with English abstract).
- Zhang Shuai, Wang Xusheng, Jiang Yonghai, Yang Yu. 2020. Theoretical equation of recovery ratio for treatment on groundwater contamination with paired wells of extraction-injection[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 51(5): 589–596(in Chinese with English abstract).
- Zhang Wei, Han Zhantao, Xu Guangming. 2012. Problems and countermeasures of using nanoscale zero-valent iron in groundwater contamination remediation[J]. South-to-North Water Diversion and Water Science & Technology, 10(4): 34–38(in Chinese with English abstract).
- Zhang Ying. 2004. Study on Organic Chemicals Removal Using Air Sparging [D]. Tianjin: Tianjin University.
- Zhang Zhaoji. 2015. Method for Regional Groundwater Contamination Survey and Evaluation[M]. Beijing: Science Press.
- Zhang Zhaoji, Fei Yuhong, Guo Chunyan, Qian Yong, Li Yasong. 2012. Regional groundwater contamination assessment in the north china plain[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 42(5): 1456–1461(in Chinese with English abstract).
- Zhao Xuesong. 2020. Application of improved grey cluster method in shallow groundwater quality comprehensive evaluation [J]. Water Resources & Hydropower of Northeast China, 38(8): 56–57, 60(in Chinese with English abstract)
- Zhao Yongsheng. 2007. Groundwater pollution control and remediation[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), (2): 303–310(in Chinese with English abstract).
- Zhao Yongsheng, Yang Yuanyuan, Gao Penglong, Kang Xuehe, Wang Haoying, Chang Yuehua. 2019. Migration characteristics of steam and its remediation to chlorobenzene contaminated soil[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 49(5): 1431–1437(in Chinese with English abstract).
- Zhou Xiaoni, Wang Zhenxing, Miao Qingzhuang, Zhang Bing. 2020. Study the shallow groundwater chemical characteristics in the typical area of Zhanghe catchment basin[J]. Geological Survey and Research, 43(3): 265–270(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 北京市生态环境局. 2019. 北京市建设用地土壤污染风险管控和修复名录[R]. 北京: 北京市生态环境局.
- 陈鸿汉, 谌宏伟, 何江涛, 刘菲, 沈照理, 韩冰, 孙静. 2006. 污染场地健康风险评价的理论和方法[J]. 地学前缘, (1): 216–223.
- 陈梦舫, 韩璐, 罗飞. 2017. 污染场地土壤与地下水风险评估方法学[M]. 北京: 科学出版社.
- 陈思莉, 易仲源, 王骥, 潘超逸, 常莎, 魏清伟, 周俊光, 孙兰. 2020. 淋洗-抽提技术修复柴油污染土壤及地下水案例分析[J]. 环境工程, 38(1): 178–182.
- 陈仲如, 张澄博, 李洪艺, 张永定, 邱锦安, 林涛. 2012. 可渗透反应墙的结构与设计研究[J]. 安全与环境学报, 12(4): 56–61.
- 初彤, 杨悦锁, 路莹, 武宇辉, 陈煜, 杜新强. 2018. 寒区石油污染场地浅层地下水原位增温强化空气扰动修复[J]. 化工学报, 69(8): 3701–3710.
- 费宇红, 张兆吉, 郭春艳, 王春晓, 雷廷, 刘瑾. 2014. 区域地下水质量评价及影响因素识别方法研究——以华北平原为例[J]. 地球学报, 35(2): 131–138.
- 顾栩, 杜鹏, 单慧娟, 马腾, 程胜高. 2014. 水力截获技术在地下水污染修复中的应用——以某危险废物填埋场为例[J]. 安全与环境工程, 21(4): 52–58.
- 郭丽莉, 康绍果, 王祺, 熊静, 李书鹏, 孔娇艳. 2020. 渗透式反应墙技术修复铬污染地下水的研究进展[J]. 环境工程, 38(6): 9–15.
- 韩昱, 刘玉仙, 丁冠涛, 刘玉想, 曹光明, 张瑞鹏, 孙中瑾, 汤晓珊. 2019. 地下水 VOCs 污染修复技术探讨[J]. 地质学报, 93(S1): 284–290.
- 河北省生态环境厅. 2019. 河北省建设用地土壤污染风险管控和修复名录[R]. 石家庄: 河北省生态环境厅.
- 环境保护部, 国土资源部, 住房和城乡建设部, 水利部. 2013. 华北平原地下水污染防治工作方案[R]. 北京: 环境保护部.
- 黄永炳. 2018. 锰矿修复神污染地下水及其 PRB 工程技术研究[D]. 华中农业大学.

- 李春平, 陈梦舫, 骆永明, 宋静, 吴春发, 罗飞, 韦婧. 2011. 重点行业的关注污染物与环境危害简析[J]. 环境监测管理与技术, 23(3): 7-13.
- 李亚松, 张兆吉, 费宇红. 2014. 河北省滦沱河冲积平原地下水质量及污染特征研究[J]. 地球学报, 35(2): 169-176.
- 李政红, 张翠云, 张胜, 殷密英, 马琳娜, 郭秀红. 2007. 地下水微生物学研究进展综述[J]. 南水北调与水利科技, 5(5): 60-63.
- 刘伟江, 陈坚, 刘锐, 刘欣, 牛浩博, 苏春利. 2018. 邻城某化工厂周边地下水污染现状调查与评价[J]. 安全与环境工程, 25(6): 67-75.
- 刘伟江, 费宇红, 井柳新, 王东, 赵勇胜. 2016. 华北平原典型地区地下水污染防治技术方法及案例[M]. 北京: 中国环境出版社.
- 刘勇, 王成军, 刘华, 马红周, 张琼华, 冯涛, 孙大林. 2015. 铅锌冶炼厂周边重金属的空间分布及生态风险评价[J]. 环境工程学报, 9(1): 477-484.
- 孟梁, 郭琳, 杨洁, 罗启仕. 2014. 原位修复氯代烃污染场地地下水的现场中试研究[J]. 工业水处理, 34(8): 18-21.
- 苗晋杰, 靳继红, 杜东, 刘宏伟, 白耀楠, 张竞, 郭旭. 2020. 首都副中心及重点区域地下水环境质量评价与问题成因[J]. 地质调查与研究, 43(3): 224-229, 286.
- 蒲敏. 2017. 污染场地地下水抽出处理技术研究[J]. 环境工程, 35(4): 6-10.
- 蒲生彦, 侯国庆, 吕雪, 李博文. 2020. 过氧化钙缓释技术在地下水污染修复中的应用研究[J]. 工业水处理, 40(8): 1-6.
- 屈智慧, 王洪涛, 杨勇, 袁思莉, 桑志伟, 张玉虎. 2016. 循环井技术修复地下水氯苯污染的效果研究[J]. 化学工程师, 30(11): 29-32.
- 商磊, 董明芳, 田西昭, 单强, 白振宇. 2017. 唐山某电镀厂污水污染场地Cr(VI)的联合修复技术工程实例[J]. 环境工程, 35(增刊): 281-284.
- 生态环境部, 自然资源部, 住房城乡建设部, 水利部, 农业农村部. 2019. 地下水污染防治实施方案[R]. 北京: 生态环境部.
- 宋权威, 赵兴达, 陈昌照, 张坤峰, 陈宏坤, 刘玉龙. 2019. 渗透反应格栅修复地下水石油类污染研究[J]. 油气田环境保护, 29(1): 1-4.
- 宋兴龙. 2015. 地下水污染原位空气扰动修复技术模拟实验研究[D]. 长春: 吉林大学.
- 宋易南, 侯德义, 赵勇胜, 朱瑾, 张琪, 秦传玉, 王文峰. 2020. 京津冀化工场地地下水污染修复治理对策研究[J]. 环境科学研究, 33(6): 1345-1356.
- 天津市生态环境局. 2019. 天津市建设用地土壤污染风险管控和修复名录[R]. 天津: 天津市生态环境局.
- 王棣, 魏文侠, 王琳玲, 王海见, 李佳斌. 2018. 纳米铁原位注入技术对六价铬污染地下水的修复[J]. 环境工程学报, 12(2): 521-526.
- 王贺飞, 宋兴龙, 赵勇胜, 王晓曼, 王倩, 秦传玉, 孙家强. 2014. 地下水曝气技术气流模拟实验研究[J]. 中国环境科学, 34(11): 2813-2816.
- 王家樑. 2019. 抽出处理技术在地下水污染修复工程中的应用[J]. 上海建设科技, (1): 67-69.
- 王锦淮, 顾春杰. 2017. 多相抽提+原位化学氧化联合技术在有机污染场地的工程应用[J]. 上海化工, 42(12): 20-24.
- 王磊, 龙涛, 张峰, 祝欣, 田猛, 林玉锁. 2014. 用于土壤及地下水修复的多相抽提技术研究进展[J]. 生态与农村环境学报, 30(2): 137-145.
- 王朋, 陈文英, 蒲生彦. 2021. 地下水循环井原位强化生物修复技术研究进展[J]. 安全与环境工程, 28(3): 137-146.
- 王松, 陈家昌, 戴振宇, 张七一, 李云龙, 张宝刚. 2018. 铀污染地下水的微生物修复研究[J]. 地球与环境, 46(3): 282-287.
- 王焰新. 2007. 地下水污染与防治[M]. 北京: 高等教育出版社.
- 文冬光, 林良俊, 孙继朝, 张兆吉, 姜月华, 叶念军, 费宇红, 钱永, 龚建师, 周迅, 张玉玺. 2012. 中国东部主要平原地下水质量与污染评价[J]. 地球科学(中国地质大学学报), 37(2): 220-228.
- 席北斗, 李娟, 汪洋, 唐军, 洪慧. 2019. 京津冀地区地下水污染防治现状、问题及科技发展对策[J]. 环境科学研究, 32(1): 1-9.
- 杨梅, 费宇红. 2008. 地下水污染修复技术的研究综述[J]. 勘察科学技术, (4): 12-16.
- 张会玲, 张雯, 张庆泉, 刘翠翠, 马天海, 郭红岩. 2016. 复合缓释功能材料原位修复硝酸盐污染地下水的研究和应用[J]. 南京大学学报(自然科学), 52(1): 115-124.
- 张晶, 张峰, 马烈. 2016. 多相抽提和原位化学氧化联合修复技术应用——某有机复合污染场地地下水修复工程案例[J]. 环境保护科学, 42(3): 154-158.
- 张帅, 王旭升, 姜永海, 杨昱. 2020. 双井抽灌处理地下水污染的回收率理论公式[J]. 水利学报, 51(5): 589-596.
- 张威, 韩占涛, 许广明. 2012. 纳米零价铁用于地下水污染修复时存在的问题与对策[J]. 南水北调与水利科技, 10(4): 34-38.
- 张兆吉, 费宇红, 郭春艳, 钱永, 李亚松. 2012. 华北平原区域地下水污染评价[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 42(5): 1456-1461.
- 张兆吉. 2015. 区域地下水污染调查评价技术方法[M]. 北京: 科学出版社.
- 赵雪松. 2020. 改进灰色聚类法在地下浅层水质评价中的应用[J]. 东北水利水电, 38(8): 56-57, 60.
- 赵勇胜. 2007. 地下水污染场地污染的控制与修复[J]. 吉林大学学报(地球科学版), (2): 303-310.
- 赵勇胜, 杨元元, 高鹏龙, 康学赫, 王昊颖, 常月华. 2019. 多孔介质中热蒸汽的迁移特性及其修复氯苯污染土壤的效果[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 49(5): 1431-1437.
- 张英. 2004. 地下水曝气(AS)处理有机物的研究[D]. 天津: 天津大学.
- 周晓妮, 王振兴, 苗青壮, 张冰. 2020. 漳河流域典型区浅层地下水水化学特征分析[J]. 地质调查与研究, 43(3): 265-270.
- 中国地质调查局. [2016-05-17]. 全国地下水质量与污染调查计划(2005-2015) [DB/OL]. https://www.cgs.gov.cn/ddzt/jqthd/lhfjkwzz/dqhxdcg/201607/t20160705_337538.html.
- 中华人民共和国国务院. 2011. 全国地下水污染防治规划(2011-2020年)[R]. 北京: 中华人民共和国国务院.
- 中华人民共和国国务院. 2015. 水污染防治行动计划[R]. 北京: 中华人民共和国国务院.
- 中华人民共和国水利部. [2021-07-09]. 2020年中国水资源公报 [DB/OL]. http://www.mwr.gov.cn/sj/tjgb/szygb/202107/t20210709_1528208.html.