

Cause Analysis and Treatment of Heavy Metal Pollution in Groundwater

Tengzhi Zhou¹, Bozhi Ren^{1,2}, Xiuzhen Yang¹

¹School of Civil Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan Hunan

²Hunan provincial Key Laboratory of Shale Gas Resource Utilization, Xiangtan Hunan

Email: 623671005@qq.com, 564975554@qq.com

Received: Mar. 26th, 2017; accepted: Apr. 10th, 2017; published: Apr. 13th, 2017

Abstract

Groundwater pollution of heavy metal has become a key issue in the field of water resource and water environment, seriously affecting human healthy and restricting regional economic development. This paper reviews the present situation of heavy metal pollution in groundwater of urban and rural areas, and analyzes the causes of heavy metal pollution from the natural and social circulation of water. This paper introduces the relevant technology at present for the treatment of heavy metal pollution in groundwater. *In-situ* remediation technology is widely used in the treatment of heavy metal pollution in groundwater because of its economical, effective and environmental friendly. Finally, according to the Chinese reality of heavy metal pollution in groundwater, some new ideas of treatment of heavy metal pollution in groundwater are put forward.

Keywords

Groundwater, Heavy Metal, Cause Analysis, *In-Situ* Remediation, *Ex-Situ* Remediation

地下水重金属污染成因分析及治理研究

周腾智¹, 任伯帜^{1,2}, 杨秀贞¹

¹湖南科技大学土木工程学院, 湖南 湘潭

²页岩气资源利用湖南省重点实验室, 湖南 湘潭

Email: 623671005@qq.com, 564975554@qq.com

收稿日期: 2017年3月26日; 录用日期: 2017年4月10日; 发布日期: 2017年4月13日

摘要

地下水重金属污染问题已成为水资源和水环境领域的重点课题,严重影响人体健康和制约区域经济发展。

本文综述了我国城镇、农村地区地下水中重金属污染现状，从水的自然循环和社会循环角度分析了地下水重金属污染的成因。研究了现阶段对于治理和控制地下水重金属污染的相关技术进展。原位修复技术由于其成本低、效果好、环境友好等优势，在治理地下水重金属污染中广泛应用。最后，结合我国地下水重金属污染实际，提出了防治地下水重金属污染的新思路。

关键词

地下水，重金属，成因分析，原位修复，异位修复

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

近年来，随着居民生活水平的提高，经济总量不断攀升以及“绿色发展”和“可持续发展”等概念的提出，我国对地下水的开发利用与保护也日趋重视。地下水是水资源的重要组成部分，全国有超过 400 个城市开采地下水，40% 的农田依赖于地下水的灌溉，地下水供水量占全国总供水量的 20% [1]，地下水对居民生活和工业生产有着巨大的影响。但是，由于一些人为或者天然的原因，导致重金属物质通过渗流、越流、径流进入到地下水中。重金属污染物不但能对人们身体健康产生严重危害也能对周边的土壤环境、动物、植被产生严重破坏[2] [3] [4] [5]。本文主要针对目前地下水中的重金属污染，对其污染的成因、污染的现状 & 处理技术等方面进行综述。

2. 地下水重金属污染现状

通常来说，由于地下水位于地表以下，所以很难被污染，但是由于其具有不确定性、隐蔽性、延时性、广泛性、不可还原性等特点，使得地下水一旦被污染，不容易被发现也不容易被治理。

2.1. 城市地下水重金属污染

地下水资源是城市供水的重要一部分，近年来，随着对地下水的利用日益增加，地下水的污染也日趋严重。吉林省松原市是我国一座典型的依靠工业发展起来的新兴城市，全市总水资源量 $15,157 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，其中地下水资源量达到了 $13,135 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，占全市总水资源量的 86.6%。李立军等[6]对该区的地下水污染状况进行调查，发现铁、锰等重金属物质超出国家限值，其主要污染原因与生活垃圾，石油生产、材料运输等过程密不可分。而在我国西南地区的贵阳市，该市地下水供水量为 $0.182 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，水质条件较好，但是在人流集中的地区，依然存在地下水重金属污染的问题。杨秀丽等[7]对贵阳市地下水污染现状进行了评价，结果表明，在大部分农村地区地下水水质较好，但是在工业企业或者市区等地区，地下水中铝、镍等重金属污染较为严重。

综上所述，选取了我国南方和北方两个工业较为发达的典型地区，对部分城市地区的地下水重金属污染进行了简要阐述，可以看出，城市地下水中的重金属污染，主要是由于粗放式的经济发展，工业在经济总量中的比重越来越高，矿区开采、金属冶炼等传统工业生产废水的排放、矿物堆放、人们生活垃圾不加分类的堆放以及材料运输过程等等因素的综合作用对城市中的地下水造成重金属污染。

2.2. 农村地下水重金属污染

农村不同于城市，相对于城市而言，人口较为稀少，工业欠发达，生产以农牧业为主，经济较为滞

后。但由于环境保护意识的不到位，部分农村生活垃圾就地填埋，生活废水直接排放，城市高污染企业向农村转移，过度使用农药和化肥过度使用等问题，农村中的地下水水质也逐渐变差。龚琴宏等[8]研究了南昌市农村地区的地下水水质情况，通过对地下水中的铁、锰和总硬度进行了取样检测，发现部分地区地下水中的铁、锰含量严重超标，其中锰是主要的污染物。

农村地区由于其工业滞后，其地下水的重金属污染受到工业化的影响较小，主要是因为过度放牧和农耕造成的水土流失，过度施用化肥和农药，生活垃圾就地填埋和生活废水直接排放等原因造成对地下水的水质污染，部分农村地区由于靠近工矿企业受到重金属污染的问题更加严重。

3. 地下水重金属污染成因

重金属对人们生产生活具有重要的意义，但是由于人为或天然的原因，重金属物质被释放到地下水中，污染地下水，并通过水在自然和社会中的循环对人们的身体健康造成影响。

3.1. 人为污染因素

人为的重金属污染因素，首先是工业生产，我国目前是 GDP 总量第二大国，对工业生产有着高度的依赖，由此也产生了许多许多的环境问题[9] [10] [11]。尤其是在矿山开采和金属冶炼等传统的工业形式中，露天堆放矿物和矿渣由于雨水的冲刷通过渗流和土壤的释放进入到地下水中，在金属冶炼和金属加工中的生产废水中本身就含有大量的有毒重金属，不进行处理直接排出并汇入河流、湖泊之中，重金属污染物质通便会通过河流、湖泊进入到地下水中。

人们的生活垃圾和化石燃料的燃烧，也是对地下水产生重金属污染的重要原因，随着科技的进步，信息工业的高速发展，人们对电子产品的依赖性也越来越强。同时，这些产品也存在着更新换代速度快、含有多种有毒重金属物质的特点。这部分垃圾由于不加甄别的露天堆放，在大气降雨的作用下渗入土壤中，继而进入地下水中污染水源。化石燃料的燃烧对地下水中重金属污染物影响则主要表现在随着我国汽车数量的不断升高，含重金属的汽油或柴油在燃烧[12] [13]之后，由汽车尾气进入大气中又通过降雨对地下水污染。

3.2. 天然污染因素

天然的污染因素主要是由于地质条件的侵蚀和风化使得重金属污染物质进入到地下水中。当地下水在岩层中流动时，对岩层产生溶蚀和潜蚀作用，岩层中的可溶性矿物会溶于地下水中并随着水的流动参与到水的循环中去，对人的生命健康和自然环境造成威胁。地下水中的风化作用对产生重金属污染的影响则主要是由于矿物岩石由于化学风化、生物风化、物理风化等作用，导致岩层变得松散，在地下水的水力剪切等作用下混入水中，最终对地下水造成污染。

4. 地下水治理技术

地下水不易受到重金属的污染，然而一旦地下水被重金属污染，很难被及时的发现和处理。目前，按照对地下水修复的方式可以分为原位和异位修复技术，其中原位修复技术主要是可渗透性反应墙、化学修复技术、电动修复技术、生物修复技术。异位修复技术以抽出处理法为主。

4.1. 原位修复技术

4.1.1. 可渗透性反应墙

可渗透性反应墙(permeable reactive barriers, PRBs)是一种通过在地下水径流的方向设置一道由特殊材料组成的反应墙。当受污染水体经过时，与反应材料发生作用，使得重金属物质被吸附在反应材料上，

达到去除有毒重金属或者降低重金属毒性[14] [15]的目的。

用于去除重金属污染物的 PRBs 技术填充材料有很多种[16] [17]，零价铁是常用的 PRBs 技术填充材料[18] [19]，Lien H L 等[20]利用零价铁去除水中高浓度亚砷酸盐，通过吸附柱实验测得零价铁对砷的吸附容量，Alowitz M J 等[21]进行了利用零价铁降解水中 Cr^{6+} 的实验，也取得了很好的效果。PRBs 技术虽然具有使用方便、处理费用低、不破坏环境等优点，但是也有其局限性，长期使用条件下容易在 PRBs 的反应材料上产生堵塞，严重影响其对含重金属地下水的处理能力，在处理高浓度的含重金属地下水时，反应材料会在较短的时间内达到饱和状态，失去处理能力。目前已经有许多学者对 PRBs 技术所使用的填充材料进行研究，使其更加高效和经济[22] [23] [24]。

4.1.2. 化学修复技术

化学修复技术分为化学氧化技术(*in-situ* chemical oxidation, ISCO)和化学还原技术(*in-situ* chemical reduction, ISCR)是在受重金属污染的地下水中使用化学药剂，改变重金属离子的价位，降低其毒性，或者与水中阴离子结合产生沉淀，达到治理重金属污染地下水的目的。Fenton 试剂法由于其在使用过程中产生了羟基自由基($\cdot\text{OH}$)，在处理被三价砷污染的地下水时，能将毒性较强的三价砷转化为毒性较低的五价砷，并且由于五价砷的溶解性低于三价砷，从而降低了砷的污染浓度[25] [26]。化学修复技术是通过改变重金属离子的价位来达到治理地下水的目的，同时也造成了很大的局限性，在处理受到复合污染的地下水时，使用化学修复技术容易产生二次污染。

4.1.3. 电动修复技术

电动修复技术的原理是在受污染的地下水中施加直流电压以形成电场梯度，各种可溶态的重金属污染物由于电场的作用，被迁移出地下水。原位电动修复技术具有高度选择性、易于自动化控制、成本低等特点，在近年来也得到了越来越广泛的运用，Ha Ik Chung 等[27]研究了将原位电动修复技术应用于去除土壤中的铅，在单独使用原位电动修复技术的情况下，对铅的去除率可达 88%。随着信息产业不断的发展，原位电动修复技术这种有着高度自动化特点的技术也将会受到更多的关注。

4.1.4. 生物修复技术

生物修复技术是通过微生物的代谢活动，降解有毒重金属污染物的技术。原位生物修复技术在使用时，不会破坏地下水和土壤的自然环境，目前对于利用细菌等微生物处理水中的重金属物质已有比较多的研究。任茂明[28]进行了使用趋磁细菌处理重金属废水的静态吸附试验，在合适的 pH 条件下，趋磁细菌对 Fe^{2+} 、 Cr^{3+} 和 Ni^{2+} 都有较好的处理效果，去除率达到 95% 以上。赵晓红等[29]利用 SRV 菌直接吸附去除水中的 Cu^{2+} ，当菌废比达到 1:1 时，对铜的去除率达到 99.12%。由于生物多样性的特点，人们可以培养各种各样的微生物以适应不同的受污染情况，不管是在处理单一废水或者是多种污染物质复合污染的废水时，原位生物修复技术都有较强的适用性。

4.2. 异位修复技术

异位修复技术主要是抽出处理法(*pump and treat*, P&T)，异位修复技术需要将受污染的地下水先从地下抽出，在地面上进行处理后，根据实际的地质条件再通入地下，其成本较高，对自然环境有一定的破坏，甚至出现地表沉降等地质灾害[30]。但是在应对突发性的地下水重金属污染的情况中，其能够及时控制住地下水受污染的程度。

当受污染的地下水被抽出地面后，对其的处理方法主要是沉淀法。通过重金属离子与阴离子结合，达到沉淀去除重金属污染物的目的。使用沉淀法处理受重金属污染的地下水，其处理效果好、见效快、成本低但是也容易出现二次污染的问题。异位修复技术在处理突发性的地下水污染时，能够在较短的时

间内迅速降低水中污染物质的含量，随着科技的进步，移动式净水设备的发展能对异位修复技术产生良好的促进作用。

5. 结论及展望

5.1. 结论

随着经济的发展，生活水平的不断提高，地下水受重金属污染的问题也日益严重。由于人为和天然的因素地下水在受到重金属污染后，不易被发现，也难以处理。目前，原位和异位修复技术是两种治理受重金属污染地下水的主要方式，原位修复技术使用起来更加方便，成本也更加便宜，不会对周边环境产生破坏。异位修复技术则由于其应用时间更加长，技术更加成熟，所以在应对于突发性的重金属地下水污染时更加有效。

5.2. 展望

地下水是人们生活生产用水的重要一部分，对已被重金属污染的地下水进行有效治理很有必要。不但要通过修复技术在污染发生的地区进行治理，也要通过完善相关法律法规和提高人们环保意识在源头上进行治理。下面结合我国地下水受污染的实际情况，提出对地下水重金属污染控制及预防的一些思路：

1) 目前关于地下水重金属污染的相关调查研究，主要集中于城区和企业附近等人口或生产较为密集的地区，对偏僻乡村的地下水重金属污染状况研究较少，加强这方面的相关研究有助于农村经济的发展也有助于人们的身体健康。

2) 对于突发性的重金属污染事故，特别是材料泄漏等突发事件，异位修复技术见效快，适用性广，但是由于其需要在地面上处理受污染的水，所以对地形要求高，研究出一种移动式的净水设备，对应急处理地下水重金属污染很为必要。

3) 单一使用某一种治理技术对受重金属污染的地下水进行处理都有其优势和局限性，应在以后的研究中，更多将各种技术的特点结合起来，对受重金属污染的地下水进行协同处理。

参考文献 (References)

- [1] 罗兰. 我国地下水污染现状与防治对策研究[J]. 中国地质大学学报(社会科学版), 2008, 8(2): 72-75.
- [2] Shoty, M., Parriaux, A. and Bensimon, M. (1999) Landfill Underground Pollution Detection and Characterization Using Inorganic Traces. *Water Research*, **33**, 3609-3625.
- [3] 徐友宁, 张江华, 柯海玲, 刘瑞萍, 陈华清. 某金矿农田土壤镉污染及其环境效应[J]. 中国地质, 2013, 40(2): 636-642.
- [4] 祝滔, 江长胜, 郝庆菊, 黄小娟. 重庆秀山锰矿区土壤和植物锰污染调查与评价[J]. 环境科学与技术, 2012, 35(9): 167-172.
- [5] 张建荣, 李娟, 许伟. 原位生物稳定固化技术在铬污染场地治理中的应用研究[J]. 环境科学, 2013, 34(9): 3684-3689.
- [6] 李立军, 马力, 张晶, 赵彦宁, 陈初雨, 王怀远, 宁庆华, 孙春. 吉林省松原市地下水污染评价及污染因素分析[J]. 地球学报, 2014, 35(2): 156-162.
- [7] 杨秀丽, 曾群, 苏泽志. 贵阳市地下水污染现状评价及防治对策[J]. 贵州地质, 2010, 27(4): 291-195.
- [8] 龚琴红, 熊江波, 曾建玲. 南昌地区农村饮用地下水铁锰污染调查及水质评价[J]. 江西化工, 2010(4): 45-49.
- [9] 吕建树, 张祖陆, 刘洋, 代杰瑞, 王学, 王茂香. 日照市土壤重金属来源解析及环境风险评价[J]. 地理学报, 2012, 67(7): 972-984.
- [10] 李小平, 徐长林, 刘献宇, 张旭. 宝鸡城市土壤重金属生物活性与环境风险评价[J]. 环境科学学报, 2015, 35(4): 1241-1249.
- [11] 刘春早, 黄益宗, 雷鸣, 郝晓伟, 李希, 铁柏清, 谢建治. 湘江流域土壤重金属污染及其生态环境风险评价[J].

- 环境科学, 2012, 33(1): 260-265.
- [12] 李鱼, 董德明, 吕晓君, 路永正, 花修艺. 汽车尾气中铅对公路两侧土壤的污染特征[J]. 生态环境, 2004, 13(3): 549-552.
- [13] 李湘洲. 机动车尾气对土壤铅累积的影响及分布格局[J]. 中南林学院学报, 2001, 21(4): 36-39.
- [14] Wikins, R.T., Su, C.M., Ford, R.G., *et al.* (2005) Chromium-Removal Processes during Groundwater Remediation by a Zero-Valent Iron Permeable Reactive Barrier. *Environmental Science & Technology*, **39**, 4599-4605. <https://doi.org/10.1021/es050157x>
- [15] Blowes, D.W., Ptacek, C.J., Benner, S.G., *et al.* (2000) Treatment of Inorganic Contaminants Using Permeable Reactive Barriers. *Contaminant Hydrology*, **45**, 123-137.
- [16] Li, Z., Yuan, S., Wan, J., *et al.* (2011) A Combination of Electrokinetics and Pd/Fe PRB for the Remediation of Pentachlorophenol-Contaminated Soil. *Journal of Contaminant Hydrology*, **124**, 99-107.
- [17] Natale, F.D., Natale, M.D., Greco, R., *et al.* (2008) Groundwater Protection from Cadmium Contamination by Permeable Reactive Barriers. *Journal of Hazardous Materials*, **160**, 428-434.
- [18] 刘翔, 唐翠梅, 陆兆华, 卢欣, 李淼. 零价铁 PRB 技术在地下水原位修复中的研究进展[J]. 环境科学研究, 2013, 26(12): 1309-1315.
- [19] Kang, S. and Choi, W. (2009) Oxidative Degradation of Organic Compounds Using Zero-Valent Iron in the Presence of Natural Organic Matter Serving as an Electron Shuttle. *Environmental Science & Technology*, **43**, 878-883. <https://doi.org/10.1021/es801705f>
- [20] Lien, H.L. and Wilkin, R.T. (2005) High-Level Arsenite Removal from Groundwater by Zero-Valent Iron. *Chemosphere*, **59**, 377-386.
- [21] Alowitz, M.J. and Schierer, M.M. (2002) Kinetics of Nitrate, Nitrite and Cr(VI) Reduction by Iron Metal. *Environmental Science & Technology*, **36**, 299-306. <https://doi.org/10.1021/es011000h>
- [22] 张超宇, 张莹, 张玉玲, 张晟瑀, 耿宏志, 吴晓芳. 不同 PRB 材料修复东北某油田采区石油污染地下水的效果对比及影响因素分析[J]. 中国矿业, 2016, 25(7): 67-71.
- [23] 顾莹莹, 雷亚妮, 高孟春, 贾永刚, 李鸿江. 海绵铁作为渗透反应墙介质去除地下水中 NO₃⁻-N 的初步研究[J]. 环境污染与防治, 2013, 35(4): 33-37.
- [24] 林达红, 徐文焯, 张静, 肖筱瑜, 黎朝. 不同介质材料组合可渗透反应墙渗透性实验研究[J]. 矿产与地质, 2016, 30(2): 255-257.
- [25] Xie, X., Hu, Y. and Cheng, H. (2016) Rapid Degradation of p-Arsanilic Acid with Simultaneous Arsenic Removal from Aqueous Solution Using Fenton Process. *Water Research*, **89**, 59-67.
- [26] 朱濛, 涂晨, 胡学锋, 章海波, 李连祯, 李远, 骆永明. Fenton 法和类 Fenton 法降解土壤中的二苯砷酸[J]. 环境化学, 2015, 34(6): 1078-1085.
- [27] Chung, H.I. and Kamon, M. (2005) Ultrasonically Enhanced Electrokinetic Remediation for Removal of Pb and Phenanthrene in Contaminated Soils. *Engineering Geology*, **77**, 233-242.
- [28] 任茂明. 磁场-趋磁细菌处理重金属离子废水[D]: [硕士学位论文]. 天津: 天津大学, 2003: 2-9.
- [29] 赵晓红, 张敏, 李福德. SRV 菌去除电镀废水中铜的研究[J]. 中国环境科学, 1996, 16(4): 288-292.
- [30] 廉新颖, 王鹤立, 漆静娴, 孙慧超. 突发性重金属污染地下水应急处理技术研究[J]. 水处理技术, 2010, 36(11): 11-14.

期刊投稿者将享受如下服务：

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：aep@hanspub.org