

地下水污染场地污染的控制与修复

赵勇胜

(吉林大学 环境与资源学院, 吉林 长春 130026)

摘 要: 我国存在大量的地下水污染场地, 给地下水资源的使用带来了严重威胁。对我国地下水污染场地划分为 4 大类, 15 个亚类, 为制定不同地下水污染场地的管理、控制和修复规定提供了依据; 对地下水污染防治规划的内容、方法和技术进行了论述, 提出了建立地下水污染的预警系统, 为污染的预防奠定基础; 最后介绍了地下水污染的控制与修复技术, 并对我国地下水污染防控和治理的基本原则进行了探讨。

关键词: 地下水污染场地类型; 地下水污染防治规划; 地下水污染预警系统; 污染控制; 修复

中图分类号: X523

文献标识码: A

文章编号: 1006-2939(2007)S1-0116-08

Groundwater pollution control and remediation

ZHAO Yong-sheng

(College of Environment and Resources, Jilin University, Changchun 130026, China)

Abstract: There are many groundwater pollution sites in China, which threatened the safety usage of water resources. This paper dealt with the groundwater pollution control and remediation in China. 4 types and 15 sub-types of groundwater pollution sites have been classified in China, the pollution prevention measures and plans have been discussed, and the groundwater pollution early warning system has been proposed, which lays the foundation for polluted site management. Finally the groundwater pollution remediation technologies have been considered, and the principals of groundwater pollution control and remediation in China have been discussed.

Key words: types of groundwater pollution sites; pollution prevention plan; groundwater pollution early warning system; pollution control; remediation.

0 引 言

我国的环境污染问题比较突出, 生态环境脆弱^[1]。经济的发展使废物的排放量不断增大, 使土壤和地下水的污染日益加重。如废水的排放、工业废渣和城市垃圾填埋场的泄漏、石油和化工原料的传输管线、储存罐的破损、农业灌溉等都有可能造成土壤和地下水的污染, 使本来就紧张的水资源短缺问题更加严重^[2]。特别是北方城市,

地下水在供水中占有很重要的地位, 地下水的污染加剧了水资源的短缺, 所以, 地下水污染的研究工作迫在眉睫。随着经济的快速发展, 经济实力的不断提升, 对地下水污染开展调查、进行污染控制甚至治理已经逐渐成为可能。地下水污染的控制与修复是我们面临的新的、极具挑战性的重要课题, 需要进行多学科交叉和联合攻关。

水的污染问题已经引起了人们的普遍关注, 长期以来, 我国把主要的注意力和研究、治理工作

收稿日期: 2007-06-25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50478006)

作者简介: 赵勇胜(1961—), 男, 蒙古族, 内蒙古达茂旗人, 吉林大学教授, 博士生导师, 主要从事地下水污染场地的模拟、控制与修复, 固体废物的处理研究, E-mail: zhaoyongsheng@jlu.edu.cn.

集中在地表水的污染,国家投入了大量的人力和物力进行地表水污染的防治,取得了一定的成效。而地下水污染由于其隐蔽性、复杂性、难以控制和治理的特性,以及治理、修复费用的巨大,地下水污染的修复在我国尚未展开。近年来,随着一些突发地下水污染事件的发生,地下水污染的问题也越来越引起人们的关注,国家有关部门也开始把地下水污染研究列为工作内容。如国土资源部已开始进行全国地下水污染的大调查;国家环保总局和国土资源部联合开展了“全国地下水污染防治规划”;在不同层次的科研项目中也出现了地下水污染控制和治理方面的课题。

含水层的污染是一个缓慢的过程,污染具有累积和滞后效应,有时在泄漏发生数年、甚至数十年后,才会发现其对含水层的污染,如大多数的垃圾填埋场渗滤液泄漏导致的地下水污染等^[3,4]。所以,需要进行污染源的辨析、污染途径的分析、

污染物在地下的迁移转化机理研究,并在此基础上,开展地下水污染的控制、污染的修复工作。

1 地下水污染场地的类型

我国存在大量的地下水污染场地,这些场地给地下水资源带来了严重的威胁,急需开展研究。根据笔者近年来的研究,我国地下水污染的场地数量巨大,仅就城市生活垃圾填埋场渗滤液泄漏导致的地下水污染问题就十分严重,几乎所有的城市都被垃圾填埋场“包围”,而这些以前建设的垃圾填埋场大多没有有效的卫生防护措施,造成了浅层地下水污染的普遍问题。又如城市众多的加油站地下储油罐泄漏,以及污水排放管线的泄漏等问题也比较普遍,造成了地下水的污染,形成了众多的污染场地。

根据污染现场调查总结的我国地下水污染场地的类型如图1所示。

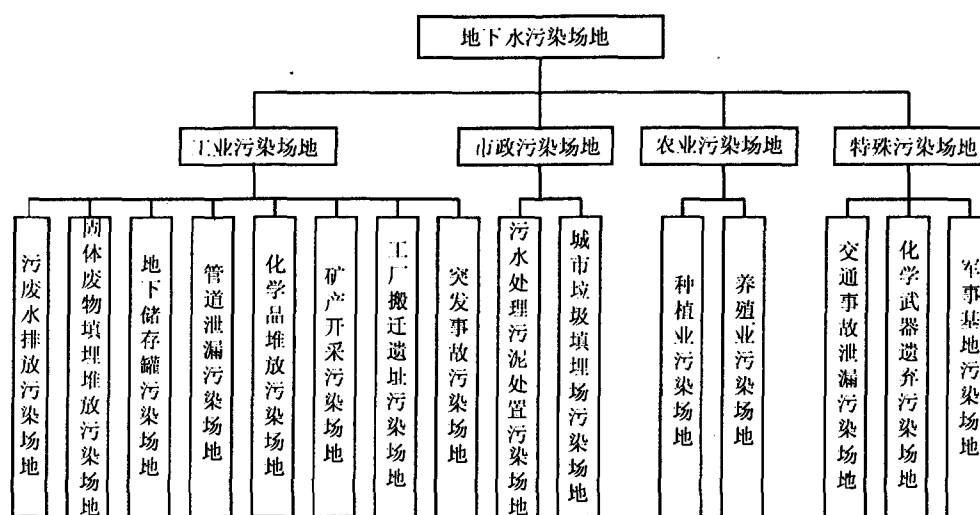


图1 地下水污染场地的类型

从图中可以看出,地下水的污染场地类型包括了人类经济活动的方方面面,如工业活动、农业活动、市政建设等。

2 地下水污染的预防

根据发达国家的经验,地下水一旦遭受污染,它的治理和恢复是非常困难的,治理费用巨大,所需的时间很长。如美国的超级基金(Superfund)项目是世界上规模最大、投资最多的环境污染修复计划,在20世纪的最后近20年里,美国在土壤和含水层污染治理方面的费用达到7500亿美元,仅清理油渗漏造成的土壤和地下水的污染费

用就达1600亿美元^[5,6]。所以,地下水污染应以预防和控制为主,其中地下水污染防治规划是非常重要的。

2.1 地下水污染的防治规划

地下水污染防治规划方案包括优先保护地下水饮用水源地、保护地下水现状使用功能、地下水系统保护完整性、地下水和地表水统筹兼顾;评价地下水现实和潜在(或规划用途)利用价值,各种利用功能地下水空间分布;制定国家地下水污染防治区划方案,确定重点流域、重点地区开展地下水污染防治区划。地下水污染防治规划涉及的内容有:规划区位置与范围、自然地理与经济社会概

况、土地利用状况、水文地质条件、地下水资源的开发利用、地下水环境问题分析等。具体内容包
括:(1)确定地下水遭受污染的脆弱性(目前国际上普遍利用 DRASTIC 模型);(2)确定污染荷载
的风险性,需要考虑土地利用和污染源类型、分布
等;(3)确定污染的危害性(根据地下水的不同使用
功能)。综合上述因素,确定地下水污染防治的
分带,确定不同分带的污染防治等级。划分地下
水污染防治的敏感带、缓冲带和一般带,并根据
不同带提出相应的污染预防和控制措施。

2.2 地下水污染的预警系统

由于不合理的开发利用,特别是废物排放,导
致了地下水的污染,而且有越来越严重的趋势。
此外,我国北方有很多地区天然状态下地下水
的水质状态不断恶化,如高矿化、高氟、高铁、高锰
等。基于防患于未然的原则,预测地下水水质的
变化趋势,进而提出防止水质进一步恶化和改善
地下水环境质量的技术对策是非常重要的。因此,
很有必要对地下水资源的状态进行分析和预警,
为水资源的科学管理提供依据。

长期以来,国土资源部门对我国地下水的水
质进行了系统的监测,水利部门也开始了监测和
分析,具有大量的系列监测资料,但对这些资料
的充分开发利用还远远不够,缺少对地下水质量
变化趋势实时预报和预警方面的工作。虽然地下
水数值模型的发展很快,可以对水量、水质进行
三维模拟预报^[7,8],但数值模型要求有足够的地
层岩性、水文地质条件等方面的资料,要有较高
的研究程度,建立数值模型的费用很大,所以,在
条件具备的地区才能够使用数值模型。

实际上,利用长系列的地下水动态资料对地
下水质量进行分析研究也是一种切实可行的方
法。可根据预警理论,利用随机、非确定性模型
对地下水水质进行预警,建立计算机软件系统,为
合理利用和管理地下水资源提供依据。通过开发
地下水的预警系统软件,使地下水监测资料的
分析具有实时性、动态性,同时,也加强了地下
水监测为国民经济的服务。此外,还可以利用这
一系统进行反馈分析,为地下水资源的保护和开
发利用提供决策支持^[9]。

地下水动态监测网络的建立与优化是实现
动态预警的关键。发达国家的地下水监测网络
比较完善,研究者可以共享其动态监测资料,甚
至实现了网络化,使国家的监测资料得到了充
分的利用。

我国尚需要在现有的基础上,完善和优化全
国地下水监测网络,并实现资料的共享。

3 地下水污染的控制与修复

地下水污染控制与修复的内容与框架如图
2 所示。

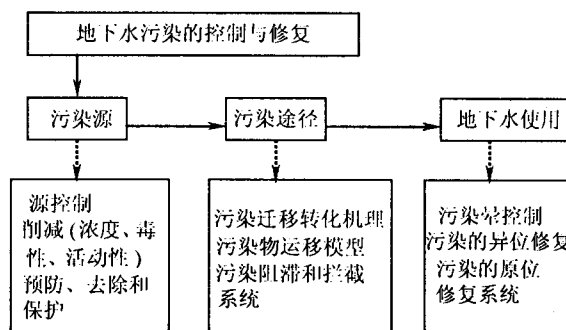


图 2 地下水污染控制与修复的内容与框架

首先要从污染源进行调查研究,包括污染源
的辨析、污染程度和范围的确定等。地下水污
染场地污染的控制和修复,首先要去除污染源,
控制污染物的来源,然后考虑污染物的削减,包
括浓度、毒性的降低,以及污染物在环境中的
迁移能力的降低等;要研究污染物在地下环境
中的迁移和转化作用,建立数值模型进行模拟
预报,从污染的途径上来阻断污染物的迁移,
进行污染晕的控制;最后,进行基于风险评估
的已污染场地污染物的异位处理和原位修复。

从图 2 的研究内容可以看出,地下水污染
的控制与修复,涉及了水文地质、环境地质、
环境工程等多个学科,特别是需要很强的水文
地质基础,如地下水污染途径、污染模拟模型
、地下水污染控制研究等,同时也需要很强的
环境工程知识,如废物处理、有机污染物的微
生物降解等。

3.1 地下水污染的异位处理方法

3.1.1 污染土体开挖方法

对于污染范围较小的情形,可以采用开挖
污染源处的污染土体,然后进行处理的方法来
去除污染源。这一方法对于地下水污染控制和
治理的效果很好,但对于污染面积较大的场地,
污染土体的开挖去除往往不现实,难以进行。

3.1.2 抽取-处理方法

抽取-处理方法(Pump and treat)就是采
用先抽取已污染的地下水,然后在地表进行处
理的方法。处理方法可以是物理化学法,也可
以是微生物法等。通过不断地抽取污染地下
水,使污染晕

的范围和污染程度逐渐减小,并使含水层介质中的污染质通过向水中转化而得到清除。目前,抽取-处理方法被应用于地下环境中易溶污染质的恢复和治理。有时需要注入表面活性剂来增强吸附在地层介质颗粒上的有机污染物的溶解性能,从而加快抽取-处理的速度^[10,11]。

对于从含水层中抽取出来的污染地下水,可以采用环境工程污水处理的多种方法进行处理,如碳吸附方法、化学氧化、以及微生物处理等。

3.2 地下水污染的原位处理方法

3.2.1 污染土壤气体提取法

污染土壤气体提取法(SVE)是对土壤挥发性有机污染进行原地恢复、处理的一种新方法,它用来处理包气带中岩石介质的污染问题。使包气带土(或土-水)中的污染质进入气相,进而排出^[12]。SVE系统要求在包气带中设立抽气井(井群),使用真空泵在地表抽取包气带中的空气,抽出的气体要经过除水汽和碳吸附后排入大气。根据 Michael 等人的研究工作^[3],随着包气带岩性的变化,SVE抽气井的有效半径为6~45 m;当平均渗透系数为 10^{-4} cm/s时,SVE系统的深度可达7 m。当然,SVE系统还可以增加一些措施进行改进,如在地表进行覆盖以避免抽气井附近地表空气直接进入形成“短路”,在这种情况下,抽气井有效半径可以达到90 m;可以在污染了的土壤附近设置空气补给井,以加强空气在包气带中的运动,或在补给井中加压注气等。

微生物排气法(Bioventing)也是SVE的一种方法,它是在包气带中注入和抽取空气,以增加地下氧气浓度,加速非饱和带微生物的降解。本方法可应用于所有可降解的污染物,但实际常应用于石油碳氢化合物污染的治理,而且已经有成功的实例。

3.2.2 井中汽提方法

井中气体去除方法包括使地下水进行循环,在去除井中使地下水中挥发性有机物VOCs汽化,污染气体可以抽取在地表处理或进入包气带用微生物降解。部分处理后的地下水可通过井注入包气带,再入渗到地下水面,未处理的地下水从底部进入井中取代被抽取的地下水。部分处理的地下水又逐渐循环进入水井被抽取处理,由此不断循环,直至达到处理的目标。

3.2.3 空气搅动法

空气搅动方法(Air sparging)包括:在含水层

中注入气体(通常为空气或氧气),使地下水中污染物汽化,同时,用增加地下氧气浓度的方法,加速饱和带、非饱和带中的微生物降解作用。汽化后的污染物进入包气带,可用SVE系统进行处理。有时这种方法也称为微生物搅动(Biosparging),用来强调微生物过程或表明微生物处理为主,挥发为辅的过程。

空气搅动方法可以用来处理土壤、地下水中大量的挥发性、半挥发性污染物,如汽油、与BTEX成分有关的其它燃料,以及氯化溶剂。根据实践经验,那些均质、渗透性好的污染场地,使用本方法较好。此外,本方法适用于具有较大饱和厚度和埋深的含水层,这两个因素影响搅动井的影响范围,如果饱和厚度和地下水埋深较小,那么治理时需要很多的搅动井才能达到目的。

3.2.4 原位冲洗方法

原位冲洗方法是将液体注入或渗入土壤、地下水污染带,在下游抽取地下水和冲洗混合液,然后再注入地下或进行地上处理。冲洗液可是水、表面活性剂、潜溶剂或其它物质。这种方法由于加强了对空隙的冲洗效果和作用,从而可以增大传统抽取-处理方法的处理效果。该方法的应用成功与具体场地的情况密切相关。虽然该处理方法不受污染深度和位置的限制,但需要事先进行大量的资料收集和可行性研究。

3.2.5 水平井技术

水平井技术在目前环境治理中被广泛应用,如原位微生物治理、空气搅动、真空抽取、土壤冲洗、饱和污染体抽取等。水平井由于水平方向较长的花管,与污染介质的接触面积很大,所以,在治理中具有更有效的作用和转化。此外,水平井与天然条件相一致,因为地下水在水平方向的传导率要大于在垂直方向的传导率,这样就能够更有效地汇集和抽取地下水和污染汽。定向式水平井可应用于地下具有障碍物的地区(如垂直井、公用事业管线)和地表具有障碍物的地区,如建筑、湖沼和湿地等,但水平井的钻进深度不能太大。

3.2.6 加热方法

利用蒸汽、热水、无线电频率(RF)或电阻(变化电流,AC)加热方法,在原位改变污染物受温度控制的特性,以利于污染物的去除。例如,挥发性的有机污染物在加热时可以挥发进入包气带,然后可以利用气体提取方法进行处理。蒸汽法最好应用于具有中等或高渗透性的地层,RF和AC加

热法可用于低渗透性的地层,因为粘土含量高的地层捕获 RF 或 AC 能量的效果好。

3.2.7 处理墙/反应带方法

处理墙方法也称为被动屏障法或被动处理墙方法。首先在污染源的下流开挖沟槽,然后充填反应介质,与流经的污染地下水进行反应,使污染物得到处理。用于反应的充填介质可以包括零价铁、微生物、活性碳、泥炭、蒙脱石、石灰、锯屑或其它物质。在处理墙中污染物的反应包括降解、吸附和沉淀等。有时,为了使污染了的地下水能够充分与处理墙的介质发生作用,往往采用“狭道和闸门”(funnel and gate)方法。Suthersan 等人采用地下反应带的方法来处理污染了的地下水,利用注入并在污染源的下流地带注入反应介质,形成一个“污染物的反应带”,污染物与注入的介质发生物理、化学和生物化学作用,而使地下水中的污染物得以阻截、固定或降解^[13,14]。

3.2.8 原位稳定-固化方法

在已污染的包气带或含水层中,注入可使污染物不继续迁移的介质,使有机或无机污染物达到稳定状态。污染物可以是被介质凝固、粘合(固化),或者是由于化学反应使其活动性降低(稳定)。该方法要求对拟处理场地的水文地质条件非常了解,可应用于具有中等或较高渗透性能的地层。

3.2.9 电动力学方法

电动力学方法可以使污染物从地下水、淤泥、沉积物和饱和或非饱和的土壤中分离或提取出来。电动力学治理的目标是:通过电渗、电移或电泳现象,形成附加电场影响地下污染物的迁移。当在土壤中施加低压电流时,会产生这些现象。这三种过程的基本特点是:在污染了的土体两侧设置电极并施加电压。这种方法主要是用来处理具有低渗透性的土体污染问题。在使用该方法前,应进行一系列实验分析,以确定该方法是否适用于拟处理场地。

3.2.10 原位微生物处理

如果微生物的选择、控制和营养的配比适当,几乎所有的有机污染质都可以被微生物降解。从 20 世纪 70 年代开始,人们进行污染含水层的微生物原位处理的研究,已有许多利用微生物进行原地处理的实例。目前,在发达国家这一方法的应用越来越普遍,对微生物原位处理方法的研究,一直是学术界和工程技术界的热点和重点。

绝大多数的微生物原位处理采用的是好氧模式(不排除特殊情况下的厌氧处理方法)。地下水中虽然具有氧气含量,但远达不到微生物处理的需求。例如氧化 1 mg 的汽油污染质在理论上需要 2.5 mg 的氧气,因此,这一处理方法需要把氧气和营养物质注入地下。微生物原位处理的原理与其它微生物处理方法完全一致,最主要的区别就是微生物原位处理是在地下,环境条件比较复杂且难以控制,而一般的微生物处理是在地上的处理容器或处理池中进行的,相对容易控制。

3.2.11 自然衰减方法

当有机污染物泄漏进入土壤或地下水中,会存在一些天然过程来分解和改变这些化学物质。这些过程统称为自然衰减(Natural attenuation)^[15],它包括土壤颗粒的吸附、污染质的微生物降解、在地下水中的稀释和弥散。由于土壤颗粒的吸附,使一些污染物不会迁移到场地以外,微生物降解是污染物分解的重要作用。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。

自然衰减方法也称为“本能恢复治理”(Intrinsic remediation)或“被动治理”(Passive remediation)。美国 EPA 的 John Wilson 博士把污染场地的天然衰减形象化地用蜡烛的燃烧来比喻^[3]。蜡烛就像场地中的污染物,燃烧过程就是天然衰减过程。蜡烛火苗看起来稳定,这是由于蜡在不断地减少;同样,污染场地对土壤和地下水的污染在一定的范围内达到“稳定”,这并不意味着污染的终止,而是因为污染与天然衰减达到了稳定状态。最后,蜡烛被燃烧掉,同样,在土壤和地下水中的污染物最终可以被天然微生物降解和其它天然衰减过程所净化。

一般来说,自然衰减方法对于那些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它治理方法联合使用,可以使治理的时间缩短。

3.2.12 植物处理方法

植物处理方法(Phytoremediation)使用植物来净化污染了的土壤和地下水。其优点是利用植物天然能力去吸收、聚积和降解土壤和水环境中的污染物。研究表明,植物过程处理方法可应用于多种污染物的处理,包括多数金属和放射性物质,各种有机化合物(如氯化溶剂、BTEX、PCBs、PAHs、农药、杀虫剂炸药、营养物质和表

面活性剂)。根据资料,该方法适用于大面积低到中等表面土层(0~0.9 m)污染的治理,以及大量的水体低浓度污染问题,而且处理目标要求也不十分严格的情形。对地下水原位处理的深度限于3 m,但可通过低地、湿地进行异位处理。有5种植物处理方法:植物根部吸收法、植物吸取法、植物转化法、植物激化或植物辅助下的微生物降解、植物稳定方法。

表1 地下水污染修复方法处理效果对比

修复方法	污染晕控制效果	修复效果	修复时间	相对修复费用
抽取处理法(初期)	好	好(初期)	长	低(初期)
抽取处理法(后期)	好	差	长	中等
原位生物修复	差	中等	几年	中等
土壤冲洗/表面活性剂冲洗	差	中等	中等	中等
植物修复	中等	中等	长	低
有监测的自然衰减	差	中等	长	低
蒸气强化的土壤气体抽取处理	好	中等	中等	高

实际上,当污染刚发生,地下水污染物浓度较高,特别是在污染源附近,此时采用抽取-处理方法非常有效,能够极大程度地减轻污染,去除污染物。但在地下水污染修复的后期,抽取-处理方法的效果越来越差。其原因是污染物从含水层固相介质向水中的转化速率越来越小,存在“拖尾效应”和“回弹效应”。所以,如果只使用抽取-处理方法进行污染地下水场地的修复,可能需要几十年乃至更长的时间^[10]。所以,地下水污染场地的后期处理往往采用微生物原位处理等综合方法。

3.4 地下水污染修复的终点

污染修复的终点(Remediation end points)或修复的标准在地下水污染控制和修复中非常重要,但这一标准难以确定,目前我国还没有地下水污染修复的标准。在发达国家也很少有统一的地下水污染修复标准,如在美国不同的州,其地下水污染的修复有不同的法规。但总体上来说,地下水污染的清除标准(Cleanup standard)是以地下饮用水中化学物质的最大污染水平(MCLs),以及非强制性的基于感观考虑的水质标准(SDWR)等现有标准作为依据,在进行毒理分析、污染风险性评价等基础上制定的。如美国马里兰州在2001年8月制定了“土壤和地下水污染清除标准”,用来指导本州已污染土壤和地下水的清理和修复。标准中污染物的浓度限值采用了“基于风险评价的浓度”(RBC),当治理工程使土壤和地下水中的污染物质达到这一标准时,污染修复就可

3.3 地下水污染修复技术处理效果分析

一般的地上污染物物理化学处理、微生物处理方法比较成熟,但用于处理地下水的污染存在着费用大、时间长等问题。所以,目前对于已经污染了的地下水,趋向于使用污染物的原位处理,特别是微生物原位处理方法。部分处理方法的对比见表1。

以停止。马里兰州“土壤和地下水污染清除标准”中部分污染物的浓度(含量)限制,见表2。

虽然规定了地下水污染的清除标准,但在许多情况下现有的技术能力难以达到要求,所以,马里兰州还规定了根据具体情况地下水污染的修复可以按照“超级基金项目”等其它框架来进行,或针对具体的污染场地制定修复计划,经州环境部批准后实行。

3.5 地下水污染控制与修复的基本原则

根据发达国家地下水污染修复的研究成果和实践,结合多年来笔者进行的地下水污染调查、模拟预报,以及污染防治的研究经验,总结地下水污染与控制的基本原则如下:

(1) 污染源的去除是关键。污染地下水的控制和治理的关键,首先是去除和清理污染源,切断进入地下含水层中的污染物来源,为后续的污染治理奠定基础。

(2) 污染晕的控制是前提。在地下水污染的修复过程中,要防止地下水污染的进一步扩展,使污染面积增大。发达国家的经验表明,污染地下水的修复是一个漫长的过程,因此,采取科学的方法和技术控制污染晕的扩展,避免带来进一步的危害十分重要,是污染治理的前提。

(3) 污染物的去除是最终目标。在去除污染源、污染晕得到控制的情况下,利用综合的方法和技术进行污染的修复。

表 2 美国马里兰州部分污染物的土壤、地下水污染清除标准

污染物	地下水浓度/(mg·L ⁻¹)	土壤浓度/(mg/kg)		
		居住用地	非居住用地	防止地下水污染
丙酮	6.1E-02	7.8E+02	2.0E+04	2.5E+00
苯	5.0E-03	1.2E+01	1.0E+02	5.0E-03
四氯化碳	5.0E-03	4.9E+00	4.4E+01	5.0E-03
三溴甲烷	8.0E-02	8.1E+01	7.2E+02	6.7E-02
氯苯	1.1E-02	1.6E+02	4.1E+03	8.0E-01
乙苯	7.0E-01	7.8E+02	2.0E+04	1.5E+01
甲苯	1.0E+00	1.6E+03	4.1E+04	8.8E+00
二氯甲烷	5.0E-03	8.5E+01	7.6E+02	1.9E-02
苯乙烯	1.0E-01	1.6E+03	4.1E+04	5.7E+01
四氯乙烯	5.0E-03	1.2E+01	1.1E+02	4.8E-02
1,1,1-三氯乙烯	2.0E-01	2.2E+03	5.7E+04	6.0E+01
氯乙烯	2.0E-03	9.0E-02	7.9E+00	5.0E-03
二甲苯	1.0E+01	1.6E+04	4.1E+05	1.7E+02
萘	3.7E-02	4.7E+02	1.2E+04	1.0E+02
蒽	1.8E-01	2.3E+03	6.1E+04	4.7E+02
4-氯苯胺	2.0E-02	3.1E+01	8.2E+02	9.7E-01
2-氯酚	2.0E-02	3.9E+01	1.0E+03	—
1,2-二氯(代)苯	6.0E-01	7.0E+02	1.8E+04	9.3E+00
1,3-二氯(代)苯	1.8E-02	2.3E+02	6.1E+03	2.9E+00
1,4-二氯(代)苯	7.5E-02	2.7E+01	2.4E+02	3.3E-01
2,4-二氯苯酚	1.1E-02	2.3E+01	6.1E+02	1.2E+00
2,4-二硝基酚	1.0E-02	1.6E+01	4.1E+02	—
2,4-二硝基甲苯	5.0E-02	1.6E+01	4.1E+02	1.7E+00
苊	2.4E-02	3.1E+02	8.2E+03	1.4E+02
蔡	1.0E-02	1.6E+02	4.1E+03	3.3E-01
甲基汞	3.7E-04	7.8E-01	2.0E+01	—
2-硝基苯胺	1.0E-02	—	—	—
4-硝基苯胺	1.0E-02	—	—	—
硝基苯	2.0E-02	3.9E+00	1.0E+02	6.7E-01
2-硝基酚	2.9E-02	6.3E+01	1.6E+03	1.7E+00
4-硝基酚	5.0E-02	6.3E+01	1.6E+03	1.7E+00
五氯苯酚	5.0E-02	5.3E+00	4.8E+01	—
菲	1.8E-01	2.3E+03	6.1E+04	4.7E+02
酚	2.2E+00	4.7E+03	1.2E+05	1.3E+02
1,2,4-三氯(代)苯	7.0E-02	7.8E+01	2.0E+03	7.5E+00
2,4,5-三氯(苯)酚	3.7E-01	7.8E+02	2.0E+04	—
2,4,6-三氯(苯)酚	1.0E-02	5.8E+01	5.2E+02	—
阿特拉津	3.0E-03	2.9E+00	2.6E+01	8.8E-03
艾氏剂	8.0E-05	3.8E-02	3.4E-01	7.7E-03
4,4-DDT	2.0E-04	1.9E+00	1.7E+01	1.2E+00
狄氏剂	8.0E-05	4.0E-02	3.6E-01	4.0E-03
毒杀芬	3.0E-03	5.8E-01	5.2E+00	6.3E-01
砷	5.0E-02	2.0E+00	3.8E+00	—
钡	2.0E+00	5.5E+02	1.4E+04	—
镉	5.0E-03	3.9E+00	1.0E+02	—
铬(III)	5.5E+03	1.2E+04	3.1E+05	—
铬(VI)	1.0E-01	2.3E+01	6.1E+02	—
铜	1.3E+00	3.1E+02	8.2E+03	—
铁	3.0E-01	2.3E+03	6.1E+04	—
铅	1.5E-02	4.0E+02	4.0E+02	—
镁	5.0E-02	1.6E+02	4.1E+03	—
汞	2.0E-03	1.0E-01	1.2E-01	—
镍	7.3E-02	1.6E+02	4.1E+03	—
硒	5.0E-02	3.9E+01	1.0E+03	—
锡	2.2E+00	4.7E+03	1.2E+05	—
锌	1.1E+00	2.3E+03	6.1E+04	—
氰化物	2.0E-01	1.6E+02	4.1E+03	—
汽油有机物范围*(GRO)	4.7E-02	2.3E+02	6.2E+02	—
柴油有机物范围*(DRO)	4.7E-02	2.3E+02	6.2E+02	—

* 为住宅地下水清除标准。

4 结 语

(1)地下水资源是水资源的重要组成部分,在我国北方地区地下水的供水意义非常重要。因此,开展地下水污染控制与修复的研究对于水资源的可持续利用具有重要意义。我国地下水的污染非常严重,存在着大量的污染场地,这些污染场地的类型不同,主要污染物、污染机理和特性复杂。因此,污染的控制方法和修复技术可能不尽相同,需要开展研究。随着经济的发展,地下水污染场地的控制与修复工作将会有很大的实际需求。

(2)在研究的基础上,对不同类型的地下水污染场地开展目标管理是非常重要的。首先要开展地下水污染场地的调查,建立污染场地的地下水监测网,并定期实施监测分析;进行不同级别、不同层次的地下水污染防治规划,以污染预防为主,建立地下水污染的预警系统;积极开展地下水污染控制与修复的研究工作,包括污染控制与修复技术、污染场地的修复基准和标准等。

(3)发达国家地下水污染控制与修复已经是研究的热点和前沿,而且有许多工程实例,取得了很多经验。我国在这一领域的研究刚刚起步,急需借鉴发达国家的经验,结合自己具体的条件,开展研究工作。地下水污染场地污染的控制与修复涉及水文地质学、环境工程等学科,需要进行学科交叉,联合攻关。

参考文献:

- [1] 张宗祜,卢耀如.中国西部地区水资源开发利用[M].北京:中国水利水电出版社,2002.
- [2] 陈梦熊.中国水文地质工程地质事业的发展与成就——从事地质工作60年的回顾与思考[M].北京:地震出版社,2003.
- [3] 赵勇胜,林学钰.地下水污染模拟及污染的控制和处理[M].长春:吉林科学技术出版社,1994.
- [4] Appelo C A J. Geochemistry, Groundwater and Pollution[M]. A A Balkema, Rotterdam, The Netherlands, 1994.
- [5] Mustafa M Aral. Advances in groundwater pollution control and remediation[M]. [S. l.]: Kluwer Academic Publishers, 1995.
- [6] Paul E. Flathman. Bioremediation: Field Experience [M]. [S. l.]: Lewis Publisher, 1994.
- [7] 林学钰.地下水管理[M].北京:地质出版社,1995.
- [8] 林学钰,廖资生,赵勇胜,等.现代水文地质学[M].北京:地质出版社,2005.
- [9] 洪梅,张博,赵勇胜.地下水水质预警研究及系统研制[J].长春科技大学学报,2000,(30):3.
- [10] Suthan S, Suthersan. Remediation engineering: Design concepts[M]. [S. l.]: Lewis Publishers, 1997.
- [11] Suthan S, Suthersan, Fred C, et al. In-situ remediation engineering[M]. [S. l.]: CRC Press, 2005.
- [12] Ulrich Hornung. Optimization of soil vapor extraction[A]. International workshop on "NAPL in the subsurface: modeling of contamination and remediation"[C]. Amsterdam, 1996.
- [13] Blowes D W, Ptacek C J, Jambor J L. In-situ remediation of chromate contaminated groundwater using permeable reactive walls: Laboratory studies [J]. Environ. Sci. Technol., 1997, 31(12): 3 348-3 357.
- [14] Bianchi-Mosquera G C, Allen-King, Mackay R M. Enhanced degradation of dissolved benzene and toluene using a solid oxygen-releasing compound[J]. Ground Water Monit. Remediation, 1994, 120-128.
- [15] Suthan S, Suthersan. Natural and Enhanced Remediation Systems [M]. [S. l.]: Lewis Publisher, 2002.