

拦截沟技术在污染地下水风险管控与修复中的应用

张峰, 王唯实, 刘昊

(上海格林曼环境技术有限公司, 上海 200001)

摘要: 拦截沟是一种有效的地下水修复和风险管控技术, 但该技术目前在我国工程应用和相关研究较少。拦截沟设计和构筑方法的基础是现有的水文地质理论研究和工程实践。本文综述了拦截沟的技术原理、适用范围和设计要点, 并结合工程实际总结施工与运行要点, 阐明了该技术的应用现状, 明确了该技术的应用前景及今后进一步研究发展的方向。

关键词: 污染地下水; 风险管控; 修复; 拦截沟

中图分类号: X523

文献标志码: A

DOI: 10.16803/j.cnki.issn.1004-6216.2020.06.028

Application of Interceptor Trench in Risk Control and Remediation of Contaminated Groundwater

ZHANG Feng, WANG Weishi, LIU Hao

(Shanghai Greenment Environmental Technology Co., Ltd., Shanghai 200001, China)

Abstract: Interceptor trench is an efficient technique to remediate the contaminated groundwater and control the risk. However, the technique is neither widely used nor researched in China. The design and the construction of the interceptor trench are based on the state-of-art hydrogeological theory and engineering practice. This review summarizes the technical principles and the scope of application as well as the key points of the interceptor trench design. Considering of the practical experience, this article also reviews the construction and the operation of interceptor trenches, thus clarifying the application status. Finally, the prospects of the technique and the further research direction is proposed.

Keywords: Contaminated Groundwater; Risk Control; Remediation; Interceptor Trench

CLC number: X523

地下水是我国重要的水资源之一, 400 余个城市的饮用水来自地下水^[1]。近年来随着工业生产活动加剧、超量使用农药和化肥, 加之化学品生产存储设施的老化渗漏等原因, 我国地下水污染形势较为严峻^[2-3]。

地下水拦截沟是一种用于快速收集污染地下水的地下工程, 其运行可显著提高低渗透率地层中污染地下水的收集速率, 有效拦截地下水污染羽的迁移, 是一种简单实用的污染地下水风险管控和修复技术。地下水拦截沟技术在其原理、设计施工运行等方面均已较为成熟, 在国外已有大量工程实践, 但在国内工程应用尚少, 相关研究也较为匮乏^[4-5]。

本文从拦截沟的技术原理出发, 分析了国内外拦截沟技术的应用范围和设计要点, 并结合工程实

际, 阐述了拦截沟的施工方式, 并提出未来研究方向, 以期拦截沟技术能更好地服务于地下水污染防治和修复工作, 保障水生态安全和人体健康。

1 技术原理

拦截沟通常为地下长条形结构, 一般由沟渠、底部集水管、中部高渗透性填充材料, 以及顶部密封材料和抽提系统构成, 典型的拦截沟见图 1。

开挖沟渠为土工结构, 其底部及地下水下游方向侧表面可覆有防渗膜衬垫以防止污染物往深部及下游迁移。集水管作为地下水集水通道使用, 周围由石英砂等高渗透性填充材料形成渗透性良好的地下反滤层, 地下水经此渗入集水管。高渗透性填充材料上方为顶部密封材料, 以防止地下挥发性

收稿日期: 2020-04-01

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC1803303)

作者简介: 张峰(1981-), 男, 硕士、高级工程师。研究方向: 污染场地调查与修复。E-mail: sailor.zhang@greenment.net

引用格式: 张峰, 王唯实, 刘昊. 拦截沟技术在污染地下水风险管控与修复中的应用[J]. 环境保护科学, 2020, 46(6): 167-172.

有机污染物的气相溢出及地表径流的入渗。抽提系统由抽提泵及竖直抽提管构成,潜水泵置于集水管内,将汇集的地下水经竖直抽提管泵出至地面处理。根据需要竖直抽提管可由地下集水井替代^[6],潜水泵置于集水井内,用井内液位计控制泵的启停,以实现拦截沟内水位的控制。在设置集水井的情况下,在部分设计中拦截沟内的集水管会取消,直接通过沟内的高渗透性填充材料来汇集地下水流入集水井内。

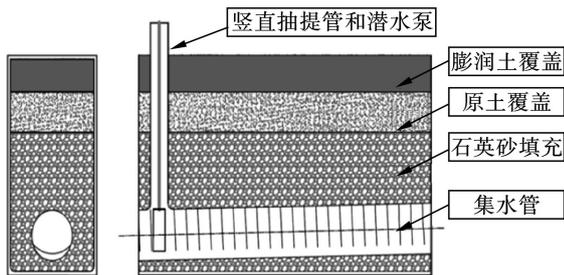


图 1 简单拦截沟结构示意图

随着拦截沟内抽提泵的运行,收集在集水管内的地下水被持续抽提出,使沟内与周边地下水位间形成水力降深,具体的降深水平则由抽提流量决定。人为形成的条状地下水位下降线改变了初始的地下水流动场,使得拦截沟周边的地下水往拦截沟方向移动,实现污染地下水的水力控制与风险管控。合理设计的地下水拦截沟可以有效收集沟体周边特别是地下水上游侧的污染地下水和非水相液体等污染物,在防止上游地下水污染继续往下游迁移的同时也可以抽出处理地下水污染,实现综合的地下水污染风险管控与修复目的。

虽然拦截沟主要用于拦截和收集地下污染的液体(包括溶解相的地下水污染羽及非水相液体(NAPL)污染物),但通过采用一些特殊的管路布置,利用沟内地下水位线上方较大的高渗透性材料空间还可进行污染气体抽提,通过真空强化抽提的方式帮助更加高效的实现污染地下水的风险管控和修复^[7]。对于密度差异较大的复合型污染物,还可在拦截沟内分层布置集水管和竖直抽提管,并同时抽提以提高管控和修复效果。拦截沟的抽提泵一般采用潜水泵或者撇油泵。抽提出的污染地下水根据污染程度的不同可选择直接排入周边市政污水管网或者通过地面废水处理设施采用物理、化学等方法处理达标后再排放。

拦截沟建设过程一般为:位置放线→沟渠开

挖→底部放置多孔集水管→填充高渗透性材料→填充低渗透性材料和密封材料→抽提泵及抽提管路安装。

拦截沟属于地下水污染治理技术中的物理被动收集法及水力控制法,相比于其他类似的地下水污染风险管控与修复技术,拦截沟技术具有如下优点。

1) 拦截沟技术对于污染物的适用性强,可用于重金属、无机污染物、挥发性有机物、半挥发性有机物、难降解有机物、石油烃类污染物及轻质或重质非水相液体污染在内的各类地下水污染的水力阻隔和修复^[8];

2) 拦截沟技术基本适用于各种地质与水文地质条件的污染场地,并且受场地异质性条件的影响较小,对于地下水埋深较浅的场地最为适用;

3) 相较可渗透反应墙(PRB),拦截沟对于污染物的普适性更强,施工机械简单,施工较为快速,建设成本低,日常维护要求低。但是拦截沟收集的污染地下水需要进行地面二次处理,运行成本较高;

4) 与相同长度和深度的物理隔水帷幕相比,拦截沟的建设和运行成本略高,但是拦截沟的拦截范围更大^[6],可以更有效实现地下水污染的水力控制,且在运行过程中可以逐步降低地下水污染负荷;

5) 通常情况下拦截沟相较等效的竖直抽提井群可节省约 70%^[8]的成本,且水力控制更为直接高效,效果更为稳定,对于场地异质性的适应性更强。但是对于地下水位埋深较深的情况,由于工程难度的增加,拦截沟的成本优势则不再明显;

6) 与水平井技术相比,拦截沟更适用于含水层污染厚度大,地下水位波动显著的场地。但是对于地下水位埋深超过 5 m 的污染场地或者场地上部有障碍物的情况下,水平井建设更具可操作性,成本更低。

2 适用范围

地下水拦截沟技术较为成熟,一般在处理地下轻质非水相液体(LNAPL)污染时优势更为突出。因此,从 20 世纪 70 年代开始,在美国地下水石油类污染治理中得到了广泛的应用^[8],如 GILBERT et al^[9]采用新型高效拦截沟技术完成了数个得克萨斯海岸平原石油化工企业的污染地下水修复工作。此外,拦截沟技术还可与其他场地修复技术结合使用以

实现更为高效的地下污染物去除,如 WIDDOWSON et al^[10] 将拦截沟技术与生物修复技术相结合实现场地内多环芳烃污染物的治理, BORDEN et al^[11] 在拦截沟基础上使用可渗透反应墙(PRB)技术实现了场地内高氯酸盐的污染治理。根据美国环保署(USEPA)^[12]2017年发布的超级基金修复报告,2012~2014年期间共有27个场地污染治理案例采用异位物理分离的方法,这其中就包含拦截沟技术和与其原理相近的物理分离技术。

拦截沟修复地下水修复的最为典型案例是在位于北卡罗来纳州昂斯洛县的美国海军陆战队训练基地莱琼军营^[13]。该场地土壤质地主要为砂、粉土和粘土;现场地下水位在地面以下约2m。因埋地的汽油和燃料储罐及管道的泄漏,导致场地部分区域土壤和地下水受到了苯系物的污染,在污染土壤进行开挖去除后,地下水中污染物初始浓度在5~50 μg/L之间。现场在两个地下水污染羽的下游分别安装了一套拦截沟抽取系统,其中系统A是一条长51.8m、宽0.9m、深3.7m的拦截沟,沟底部及地下水下游方向侧覆有土工膜衬垫,沟内填充砾石;系统B是一条长56m的拦截沟,其他设计参数类似于系统A。受污染地下水汇集于两套拦截沟系统中,并通过位于拦截沟一端的集水井和排水管道将收集的污染地下水泵出至一套地面废水处理系统中,废水处理单元包括油水分离、汽提和颗粒活性炭吸附,处理后的废水排放到地面排水系统。经过2.5年的运行,两套拦截沟系统在有效拦截地下水污染羽往外围扩散的同时逐步降低了地下水中污染物的浓度,运行后期抽取地下水中苯系物的平均浓度均接近于未检出。

3 设计要点

在设计修建拦截沟之前,首先需要判断已有地下水污染羽的位置和大小,并收集地下水水位、水力坡度、含水层的孔隙率和渗透系数等参数,综合水文地质和污染迁移因素计算确定拦截沟的长度、宽度和深度,以及运行的方式和抽提流量。拦截沟设计中除考虑沟体结构外,还需根据水文计算和模拟得到拦截沟的布设位置,迄今为止数据拟合使用最多的仍是小二乘回归估计,但随着计算能力的不断提高,基于蒙特卡洛的模拟也逐渐兴起^[14]。

地下水控制方程在三维上有解析解^[15],但不适

用于复杂的工程问题,而数值法用于拦截沟设计能提供较好的精确性,Modflow是基于Fortran的有限元法水质水流模拟软件,通过输入项在t时刻的状态计算下一个步长t+1时刻的地下水状态,将拦截沟作为特定的边界条件插入模型中,即可模拟拦截沟对周边地下水流场的影响,如HUDAK et al^[16]使用Visual Modflow模拟拦截沟运行,得到捕集地下水污染羽所需拦截沟的合理位置和最小长度和布设方式^[17]。除Modflow外,还有PEST, PEST++, iWinBUGS&OpenBUGS, DREAM, MCMC等完善的地下水模拟数据包,以及近年来基于Python的开源数据包pyEMU和pyMC^[14]。

MURDOCH^[18]提出了经典的拦截沟数值模型,应用了GRINGARTEN et al^[19]提出的拦截沟源项方程。该方法考虑地下水在拦截沟边界上的变化和地下水流量随时间变化,积分后得到拦截沟边界的降深,可以用来计算修建长方形拦截沟的几何参数(拦截沟的构筑长度和深度)。MURDOCH模型也可以较为准确地估计拦截沟运行效果:拦截沟保持抽提流量一定,长方形拦截沟长边中点处降深随时间增加而逐渐增加;保持拦截沟边界降深一定,抽提流量随时间增加逐步降低。

实际施工中,拦截沟的设计抽提流量一般根据试验结合计算得到,拦截沟运行初期(稳定运行前),抽提流量可用公式(1)估算^[20]。

$$Q_{s1} = \frac{2Kx_i}{a}(2hD_d - D_d^2) \quad (1)$$

拦截沟运行后期(稳定运行后),抽提流量可用公式(2)估算^[21]。

$$Q_{s2} = \frac{2\pi D_d K h}{\ln\left(\frac{2a+x_i}{x_i}\right)} \quad (2)$$

公式(1~2)中: Q_s 为抽提流量; D_d 为拦截沟内设计的水力降深; K 为含水层的渗透系数; $2x_i$ 为拦截沟的长度; a 为拦截沟设计的影响距离; h_i 为含水层的厚度。由公式(1~2)可知,拦截沟的影响范围与抽提流量、拦截沟内水力降深等因素相互制约,设计时可根据地下水水力拦截及抽出处理的目的不同以及NAPL的存在情况等综合考虑确定。

TRIVELLATOF 横向对比了(1)Clavenad(2)Bazanov(3)Vendernikov和Sokolov(4)Halek和Svec(5)Chapman和(6)Herbert的拦截沟水力计算

解析解^[22], 又将解析解与有限元模拟进行了纵向对比, 认为上述 6 个解析解仅适用于拦截沟尺度远小于含水层尺度的各向同性地层, 而数值解更有实际意义且适用于各项异性地层。同时, 也给出了改进的各向同性地层的拦截沟抽提流量的解析解, 见式(3~4)。

$$\hat{q} = \frac{\pi}{\ln \left[\sinh \left(\frac{\pi}{2} \frac{R}{\frac{d}{H} - 1} \right) \right] - \ln \left[\sinh \left(\frac{\pi}{2} \frac{L/d}{\frac{H}{d} - 1} \right) \right]} \quad (3)$$

$$\hat{q} = \frac{Q}{Kd} \quad (4)$$

公式(3~4)中: Q 为抽提流量; K 为地层渗透系数; R 为影响半径; d 为拦截沟深度, H 为含水层厚度; \hat{q} 为无单位的抽提流量。

根据美国环保署公开的拦截沟实施例^{[8]、[12]}, 一般情况下拦截沟常布设于污染羽的地下水下游方向, 平行于地下水等水位线走向线性布置, 而倒三角或正三角形布置的拦截沟在特定水文地质条件下, 运行效率可能高于直线型拦截沟^[17]。对于直线型的拦截沟, 在地下水流向、水力梯度和抽提流量大致不变的条件下, 拦截沟距离污染羽越远, 所需的拦截沟长度越大^[16]。考虑到地下水中污染物的横向弥散, 需要拦截的污染羽越长, 所需的拦截沟长度也越大。在实际设计中, 拦截沟的横断面长度一般为污染羽最大宽度的 1.2~1.5 倍。拦截沟的深度由地下水污染深度决定, 设计的拦截沟深度一般会比调查确定的地下水最大污染深度再多出 1~2 m。从拦截沟底部的地下水渗流是一个不可忽视的问题, 因此对于含水层厚度相对较小但地下水污染深度又较深的场地, 建议拦截沟的深度跨越整个含水层。对于重质非水相液体(DNAPL)污染场地, 拦截沟的深度需要至污染含水层下的隔水层顶板处, 但是一般不穿透隔水层。出于施工难度及经济性方面的考虑, 拦截沟的设计深度一般不超过 15 m, 否则需要重新考虑拦截沟是否是一项适用的技术。拦截沟的宽度则通常由场地条件及拟采用的施工设备决定, 一般取 0.3~1 m^[8]。拦截沟内的渗透性填料一般填充至地下水污染厚度的上表面之上。用于收集 LNAPL 的拦截沟的填料一般填充至地下水位以上约 0.3~0.5 m, 填料的上部可放置吸油棉等材料以加强对 LNAPL 的拦截和收集。

4 施工与运行

4.1 开挖与侧壁支撑

拦截沟的开挖使用专用开沟机进行最为便捷。根据设计, 深度小于土层开裂深度的拦截沟开挖无需支护^[23], 深度较大的拦截沟体的开挖需要使用板框、支挡等进行侧壁支护, 在场地条件允许的情况下一般也采用放坡的方式修筑拦截沟^[24-25]。现有技术条件下, 对比国内外的专用开沟机械, 小型链式开沟机开沟宽度 0.3 m 左右, 最大开沟深度不超过 2 m, 适用于小规模 LNAPL 污染场地的拦截沟建设; 中大型专用开沟机开沟深度可达 10 m 以上, 宽度可达 2 m 左右, 适用于 LNAPL、DNAPL 和复合型地下水污染场地的深度较大的拦截沟的建设。

创新性的地下连续墙作业方式也适用于拦截沟的开挖^[26], 其优点是无需专用开沟机也可实现“一体化”构筑, 且适用于修筑较深的拦截沟, 但缺点是不便于放置集水管。该方法将拦截沟分为置换区-保留区-开挖区分别进行施工。在地下水梯度较大的场地, 在拦截沟开挖前, 一般先安装竖直抽提管, 边开挖边抽提, 可以有效防止地下污染物在施工过程中流失, 使拦截沟尽快到达稳态运行。

4.2 管路安装

拦截沟集水管路安装一般先于渗透性材料填充。集水管一般选择直径较大的钢管、聚乙烯或聚氯乙烯管, 直径一般在 100~200 mm 之间, 一般为开缝筛管或者穿孔管, 外包满足挡土要求和透水要求的纱网或金属网^[27]。集水管安装时向竖直抽提管或地下集水井的方向倾斜, 坡度一般不小于 0.5%。

对于挥发性 LNAPL 污染, 大量污染物质以气相存在于土壤气中, 且更易于聚集在高渗透性的土层中^[28], 进行气相抽提可以有效地拦截和阻隔地下水污染。气相抽提会对地下土壤气施加向上的压力梯度, 在有气相抽提的情况下, 地下气相会形成负压状态, 直接作用于液相, 使挥发性油层趋向于向地表运动^[29-30]。在拦截沟内安置多层水平抽气管, 结合在外围加装的额外的空气注入井, 提高对污染羽的拦截效率。类似的, 对于 DNAPL 污染, 多相抽提系统协同作用, 同时抽提下层重质污染物和上层的地下水^[31]。

4.3 材料填充与密封

渗透性填充材料可看作拦截沟系统的反滤层,

因此宜采用磨圆度好的硬质岩石圆砾或专用的合成材料,不宜采用棱角形的渣料、风化料,以便于底部集水管收集地下水。渗透性填料的级配会影响拦截沟的运行效果,施工时一般根据含水层的岩性和土壤质地,合理选择渗透性材料的粒径和级配,以匹配工程设计的渗透系数、孔隙度和贮水率^[32]。

拦截沟顶部一般使用 HDPE 膜和膨润土-水泥进行密封^[33],使用水泥进行密封宜使用塑性混凝土,降低水泥用量,使用较小模强比的水泥,并适当添加粉煤灰以降低渗透系数和增加防渗层后期强度^[34]。掺膨润土防渗墙广泛用于生活垃圾填埋场,选用合适的膨润土掺量是优化防渗墙渗透系数的关键^[35]。

4.4 拦截沟的运行与监控

拦截沟运行时需要对抽提流量和沟内水位有一个精确的把控。对于存在 LNAPL 的场地,沟内水力降深太大会使周边 LNAPL 层随着降深漏斗的形成而往深处移动,使得污染深度增加。在运行的前期,拦截沟的影响半径未达最大值,地下水流线向拦截沟弯曲,拦截沟抽提对大范围流场的影响较小;随着运行时间的增加,在拦截沟影响范围内将形成稳定的水位下降线,可以影响更大范围的地下水流场^[18]。

拦截沟的运行效果不仅受抽提量的影响,也会受到其他水文地质参数的制约。当存在多层含水层介质时,各向同性的假设无法预估拦截沟的实际运行效果,地层异质性因素对拦截沟的运行有很大影响^[36]。因此在实际工程中,拦截沟运行期间一般在周边布设水位监测井,用以观测地下水水位变化和季节性渗流的影响,以及时调整拦截沟的抽提量,防止地下水污染羽流失。

为监控拦截沟的运行效果,在拦截沟内通常每隔 15 m 左右需要加装监控井以监控沟内水位和水质情况。监控井末端一般为弯管,井管整体呈 L 型,筛管部分一般高于拦截沟内水位高度;L 型监控井的水平段安装在渗透性填充材料底部^[6]。监控井在拦截沟运行期间还可以用于注射酸、碱或抗生素等药剂,以保证拦截沟内填料在长期运行过程中不发生阻塞问题。此外,在集水井或者抽提管处安装实时水位监控设备并与抽提泵连锁运行也是常用的维持拦截沟内水力降深的方法。拦截沟运行期间,收集抽提出的污染地下水的调节池一般有较

大的缓冲空间,如有 NAPL 相存在,一般对废水首先进行油水分离后再进行进一步的处理。

5 总结

作为一项综合性的污染地下水风险管控和修复技术,拦截沟结合了地下水水力阻隔和抽提处理技术的特点,可以有效阻拦地下水污染羽往下游迁移并快速全面的捕集污染地下水,具有施工速度快,应用成本低,管控和修复效果好等突出特点,在 LNAPL 普遍存在的石化类污染场地的预防性风险防控、应急性污染管控以及加油站等小面积污染场地的污染边界控制等方面具有广阔的应用空间。

在拦截沟的技术发展方面,还可以考虑如下一些情况。

1)应用数值神经网络^[37]、模糊运算^[38]等新兴的地下水模拟算法,将已有的中试数据作为训练数据,优化拦截沟设计,或者使用以上算法获取不易实际测量的水文参数,作为传统计算和模拟的补充;

2)对于挥发性有机物污染场地,采用沟内气相抽提辅助拦截沟的水力抽提运行,利用真空强化作用增加拦截沟的水力控制和污染地下水特别是 LNAPL 的收集效果,防止沟内水力降深过大引起的周边污染下移问题及有机蒸汽溢出问题;

3)通过拦截沟的合理设计有效调控污染流体在沟内的水力停留时间,同时采用具有污染物降解功能的渗透性填料来净化汇集入拦截沟内的地下水中的污染物,降低地面废水处理系统的污染负荷甚至取消地面废水处理系统;

4)采用水位监控、油位及油层厚度监控等手段智能控制抽提泵的运行,或者设计拦截沟内油相和水相的分层分别抽提,实时调节拦截沟的运行水平,有针对性的提高拦截沟的运行效果;

5)更为合理有效的将拦截沟技术与其他修复技术联用,以增加污染地下水风险管控和修复效果,节省修复时间和成本。

参考文献

- [1] JIA X, O'CONNOR D, HOU D, et al. Groundwater depletion and contamination: Spatial distribution of groundwater resources sustainability in China[J]. *Science of Total Environment*, 2019, 672: 551 - 562.
- [2] YU L, DING Y, CHEN F, et al. Groundwater resources protection and management in China[J]. *Water Policy*, 2017, 20(3) :

- 447 – 460.
- [3] HOU D, LI G, NATHANAIL P. An emerging market for groundwater remediation in China: Policies, statistics, and future outlook[J]. *Frontier of Environmental Science & Engineering*, 2018, 12(1): 16 – 18.
- [4] 顾凌云, 全向春, 李安捷, 等. 突发性场地污染应急控制技术研究进展[J]. *环境污染与防治*, 2012, 34(2): 82 – 86.
- [5] BOWLES M W, BENTLEY L R, HOYNE B, et al. In situ ground water remediation using the trench and gate system[J]. *Groundwater*, 2000, 38: 172 – 181.
- [6] THAKUR A K, VITHANAGE M, DAS D B, et al. A review on design, material selection, mechanism, and modelling of permeable reactive barrier for community-scale groundwater treatment[J]. *Environmental Technology & Innovation*, 2020, 19: 100917.
- [7] GUO H, QIAN Y, YUAN G X, et al. Research progress on the soil vapor extraction[J]. *Journal of Groundwater Science and Engineering*, 2020, 8(1): 57 – 66.
- [8] MURDOCH L C, WILSON D, SAVAGE K, et al. USEPA/625/R-94/003 Alternative methods for fluid delivery and recovery[R]. Washington D.C., 1994.
- [9] GILBERT S G, GRESS J J. Interceptor trenches for positive ground water control[J]. *Groundwater Monitoring & Remediation*, 1987, 7(2): 55 – 59.
- [10] WIDDOWSON M A, SHEARER S, ANDERSEN R G, et al. Remediation of polycyclic aromatic hydrocarbon compounds in groundwater using poplar trees[J]. *Environmental Science & Technology*, 2005, 39(6): 1598 – 1605.
- [11] BORDEN R, ZAWTOCKI C, LIEBERMAN T. Edible oil barriers for treatment of perchlorate[J]. *Contaminated Groundwater*, 2006: 196.
- [12] EPA-542-R-17-001 Superfund Remedy Report 15th Edition[R]. Washington D.C., 2017.
- [13] State of North Carolina UST program, Marine corps base camp Lejeune Campbell street fuel farm remedial action operation (RAO) optimization case studies[R], 2000.
- [14] RAJABIM M, ATAIE-ASHTIANI B, SIMMONS C T. Model-data interaction in groundwater studies: Review of methods, applications and future directions[J]. *Journal of Hydrology*, 2018, 567: 457 – 477.
- [15] HEMOND H F, FECHNER-LEVY E J. *Chemical Fate and Transport in the Environment*[M]. 3rd Edition. San Diego: Academic Press, 2014.
- [16] HUDAK P F. Remediating contaminant plumes in groundwater with shallow excavations containing coarse reactive media[J]. *Environmental Management*, 2018, 2(61): 304 – 309.
- [17] HUDAK P F. Performance comparison of interceptor trench configurations for extracting contaminated groundwater[J]. *Journal of Environmental Science and Health*, 2004, A39(5): 1295 – 1300.
- [18] MURDOCH L C. Transient analyses of an interceptor trench[J]. *Water Resources Research*, 1994, 30(11): 3023 – 3031.
- [19] GRINGARTEN A C, RAMEY H J. Unsteady-state pressure distributions created by a well with a single infinite-conductivity vertical fracture[J]. *Society of Petroleum Engineers Journal*, 1974, 257: 347 – 360.
- [20] HARR M E. *Groundwater and Seepage*[M]. New York: Dover Publication, 2015.
- [21] MUSKET M. *The Flow of Homogeneous Fluids Through Porous Media*[M]. Ann Arbor, Mich.: J. W. Edwards, 1937.
- [22] TRIVELLATO F. Comparison between analytical and numerical solutions of subsurface flow to a partially penetrating ditch[J]. *Advances in Water Resources*, 1991, 14(1): 2 – 9.
- [23] BRAJA M D. *Advanced Soil Mechanics, Fifth Edition*[M]. London: CRC Press, 2019.
- [24] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 国家质量监督检验检疫总局. 建筑地基基础设计规范: GB 50007-2011[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
- [25] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑基坑支护技术规程: JGJ120-2012 [S/OL].(2012-07-09)[2020-01-20]. http://www.mohurd.gov.cn/wjfb/201207/t20120709_210547.html.
- [26] HANFORD R W, DAY S R. Installation of a deep drainage trench by the bio-polymer slurry drain technique[DB/OL]. <https://www.geo-solutions.com/services/bio-polymer-trenches>, 2020.
- [27] 金发均, 马永泰. 渗沟排水设计中土工织物的使用[J]. *路基工程*, 2005(6): 64 – 66.
- [28] CHARBENEAUR J. *Groundwater Hydraulics and Pollutant Transport*[M]. 2nd Edition. Long Grove, IL: Waveland Press, 2006.
- [29] PERINA T. General well function for soil vapor extraction[J]. *Advances in Water Resources*, 2014, 66: 1 – 7.
- [30] DUGGAL A, ZYTNER R G. Comparison of one- and three-dimensional soil vapour extraction experiments[J]. *Environmental Technology*, 2009, 30(4): 407 – 419.
- [31] YOON H, OOSTORM M, WIETSMA T W, et al. Numerical and experimental investigation of DNAPL removal mechanisms in a layered porous medium by means of soil vapor extraction[J]. *Journal of Contaminant Hydrology*, 2009, 109: 1 – 13.
- [32] KUANG X, JIAO J J, ZHENG C, et al. A review of specific storage in aquifers[J]. *Journal of Hydrology*, 2020, 581: 124383.
- [33] 李琴. 地下水污染膨润土/水泥/粘土系原位阻截材料防染与兼容性能研究[D]. 长春: 吉林大学, 2020.
- [34] 宗郭峰, 刘建发, 肖恩尚, 等. 水工建筑物防染墙技术 60 年 I: 成墙技术和工艺[J]. *水利学报*, 2016, 47(3): 455 – 462.
- [35] 徐浩青, 周爱兆, 姜朋明, 等. 不同砂-膨润土垂直防染墙填筑土料的掺量研究[J]. *岩土力学*, 2019, 40(S1): 424 – 430.
- [36] SALO H, WARSTA L, TURUNEN M, et al. Simulating 3-D water flow in subsurface drain trenches and surrounding soils in a clayey field[J]. *Soil Tillage Research*, 2017, 168: 20 – 32.
- [37] GHOLAMI V, CHAU K W, FADAEI F, et al. Modeling of groundwater level fluctuations using dendrochronology in alluvial aquifers[J]. *Journal of Hydrology*, 2015, 529(3): 1060 – 1069.
- [38] GONG Y, ZHANG Y, LAN S, et al. A comparative study of artificial neural networks, support vector machines and adaptive neuro fuzzy inference system for forecasting groundwater levels near Lake Okeechobee, Florida[J]. *Water Resources Management*, 2015, 30: 375 – 391.