

# 地下水循环井修复技术发展现状综述

李乃营<sup>1,2</sup>, 王瑜<sup>\*1,2</sup>, 孔令镛<sup>1,2</sup>, 岳昌盛<sup>3</sup>, 张治晖<sup>4</sup>, 吕建国<sup>1,2</sup>

(1. 中国地质大学(北京), 北京 100083; 2. 自然资源部深部地质钻探技术重点实验室, 北京 100083;  
3. 中冶建筑研究总院有限公司, 北京 100088; 4. 中国水利水电科学研究院, 北京 100044)

**摘要:**地下水循环井修复技术(GCW)是通过为地下水创造三维环流来进行地下水修复的新型原位修复技术。本文阐述了该技术在国内外的发展现状,介绍了真空化气井系统、气流提升井系统和密度驱动对流井系统的特点、优势和适用条件以及它们在实际工程的应用情况。针对地下水循环井修复技术目前存在的修复范围小、修复时间长、场地要求高、抽注不平衡等问题,提出需要在大范围水力调控、原位生物修复、多相同步修复、一体化智能设备等方面对该技术进行改进的建议。

**关键词:**地下水循环井;地下水原位修复;含水层;地下水污染;三维环流

**中图分类号:**X523;P634 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-9686(2021)09-0119-08

## Advances in groundwater circulation well technology

LI Naiying<sup>1,2</sup>, WANG Yu<sup>\*1,2</sup>, KONG Lingrong<sup>1,2</sup>, YUE Changsheng<sup>3</sup>, ZHANG Zhihui<sup>4</sup>, LÜ Jianguo<sup>1,2</sup>

(1. *China University of Geosciences, Beijing* 100083, China;

2. *Key Laboratory on Deep Geo-drilling Technology of the Ministry of Land and Resources, Beijing* 100083, China;

3. *Central Research Institute of Building and Construction Co., Ltd., MCC Group, Beijing* 100088, China;

4. *China Institute of Water Resources and Hydropower, Beijing* 100044, China)

**Abstract:** Groundwater circulating well technology (GCW) is an in-situ remediation technology that repairs groundwater by creating a three-dimensional circulation for groundwater. This paper describes the development of the technology at home and abroad. It introduces the characteristics, advantages and applicable conditions of UVB, NOVOCS™ and DDC as well as their field applications. In view of the problems with groundwater circulation well technology such as limited repair range, long repair time, strict site requirements, unbalanced pumping and injection, it is proposed to improve the technology in terms of large-scale hydraulic control, in-situ biological repair, multi-phase synchronized repair, and integrated intelligent equipment, etc.

**Key words:** groundwater circulation wells(GCW); in-situ remediation of groundwater; aquifer; polluted groundwater; three-dimensional circulating flow

## 0 引言

由于各类污染物的不合理处置以及因事故发生的泄露等因素,我国的地下水出现了严重的污

染,而且在不断加重,《全国城市饮用水安全保障规划(2006—2020年)》显示,全国近20%的城市集中式地下水水源水质劣于Ⅲ类,部分城市的地下水甚

收稿日期:2021-01-08; 修回日期:2021-04-23 DOI:10.12143/j.ztgc.2021.09.015

基金项目:国家重点研发计划项目“场地土壤污染成因与治理技术”专项课题“非均质低渗透含水层污染羽原位修复工程优化设计技术”(编号:2018YFC1802402)

作者简介:李乃营,男,汉族,1996年生,硕士研究生,研究方向为钻注修复技术,北京市海淀区学院路29号中国地质大学(北京)工程技术学院,2584406109@qq.com。

通信作者:王瑜,男,汉族,1979年生,副教授,博士生导师,地质工程专业,博士,研究方向为钻注修复技术与装备研究,北京市海淀区学院路29号中国地质大学(北京)工程技术学院,wangyu203@Cugb.Edu.cn。

引用格式:李乃营,王瑜,孔令镛,等.地下水循环井修复技术发展现状综述[J].钻探工程,2021,48(9):119-126.

LI Naiying, WANG Yu, KONG Lingrong, et al. Advances in groundwater circulation well technology[J]. Drilling Engineering, 2021, 48(9):119-126.

至还检出了致癌、致突变、致畸污染物。地下水污染已经成为备受关注的环境问题和研究热点。生态环境部、自然资源部、住房和城乡建设部、水利部、农业农村部五部门于2019年3月28日印发的《地下水污染防治实施方案》，提出我国地下水污染防治的近期目标是“一保、二建、三协同、四落实”。其中“三协同”即协同地表水与地下水、土壤与地下水、区域与场地污染防治。

当前地下水修复技术主要有抽取处理技术、生物降解技术、原位化学氧化技术、地下水曝气技术、可渗透反应屏障技术等<sup>[1]</sup>。相对于以上修复处理技术，地下水循环井技术(Groundwater Circulation Wells, 简称GCW)综合利用物理、化学和生物过程来实现对地下水的原位修复,并可以和其他修复技术相结合实现对地下水的综合治理,修复效果好,修复效率高。

本文通过对目前公布的循环井修复技术相关文献和应用实例进行调研,重点介绍循环井修复技术的国内外发展现状,总结循环井的技术特点,并提出该技术亟待解决的重点问题,展望该技术未来的发展方向。

## 1 地下水循环井修复技术概述

GCW的工作原理是通过在循环井周围区域形成三维循环流场,循环流冲刷并带动污染物进入井内,通过曝气吹脱和抽提来去除掉易挥发或者气相有机物,同时曝气过程可以提高地下水中的含氧量,强化土著微生物对有机污染物的降解作用,从而实现了对地下水和土体中有机污染物的去除<sup>[2]</sup>。

循环井井体结构主要由井管、上部滤水管和下部滤水管组成。为维持循环井周围的三维循环流,需要在循环井内外形成水位差。形成水位差的方式有2种:一种是机械泵法,利用在井内安装提升泵,通过泵的抽提作用为地下水循环流提供动力;另一种是空气提升泵法,使用气泵在井内进行曝气,由于曝气形成的井内外密度差使得井内外形成水位差,实现地下水的三维循环。泵提法可以很好地控制循环流的速度,但是由于需要在井内安装提升泵,使得循环井的内径较大,能耗也比较高;井内曝气法可以把气泵等设备放置在地面,对内井径没有太高要求,而且相对节能<sup>[3]</sup>。

循环井的循环模式按照内井中地下水流方向,

可分为正向流模式和逆向流模式,目前常用的是正向流模式。正向流模式下,井内的地下水从下部往上流动,最终由井上端的滤水管排出,此时修复区的地下水是从上往下流动的,正向流循环井适用于处理比水重的污染物;逆向流模式中地下水流动方向和正向流模式下相反,适用于处理比水轻的污染物。正向流循环井可以使用机械泵法和空气提升泵法为地下水的三维循环提供动力,而逆向流循环井只能使用机械泵法<sup>[3]</sup>。

## 2 地下水循环井修复技术发展现状

### 2.1 国外地下水循环井修复技术发展现状

GCW技术在早期被称为“井中曝气”,德国的IEG Technologies GmbH对早期的循环井修复技术进行了大量的研究和实践,1980年,该公司开发的真空气化井系统(德语:Unterdruck Verdampfer Brunnen, UVB)首次投入了商业应用<sup>[4]</sup>。1986年后,GCW技术在欧洲得到了广泛的应用<sup>[5]</sup>。20世纪90年代后期,GCW技术已经趋于成熟而且获得了广泛的应用,美国的EPA使用GCW技术修复了许多包含VOCs(挥发性有机物)、杀虫剂、无机物等污染物的场地,这些应用实例证明了GCW技术可与生物修复、井中气提、表面活性剂、化学氧化、土壤气相抽提等修复技术结合在一起实现更广泛的适应性。1997年,美国国防部<sup>[6]</sup>建立了循环井技术修复地下水的场地应用认证系统,该系统包括循环井技术详细的技术原理、技术的评估方法和实施的具体步骤、循环井运行时的监测方法以及对运行效果的评价方法,为循环井技术在实际工程中的应用提供了详尽的指导。

#### 2.1.1 欧美循环井3种主要类型及其应用

地下水循环井修复技术在欧美几十年的应用过程中,形成了3种主要类型。

(1)真空气化井系统(UVB)。UVB是一个整体系统(见图1),包括地下的循环井系统、地表的抽提与空气净化系统。循环井井体由单井管和上下滤水管组成,循环井上下滤水管用封隔器隔开,无直接的水力联系。井内设置提升泵,被提升的地下水中的污染物在脱附反应器中被吹脱出,并被抽提到地面进行处理,通过将上部滤水管设置在水位线处,可以同时修复包气带的污染。该方法由于使用泵提法,可以应用于一些渗透性不是很好的场地<sup>[7]</sup>。

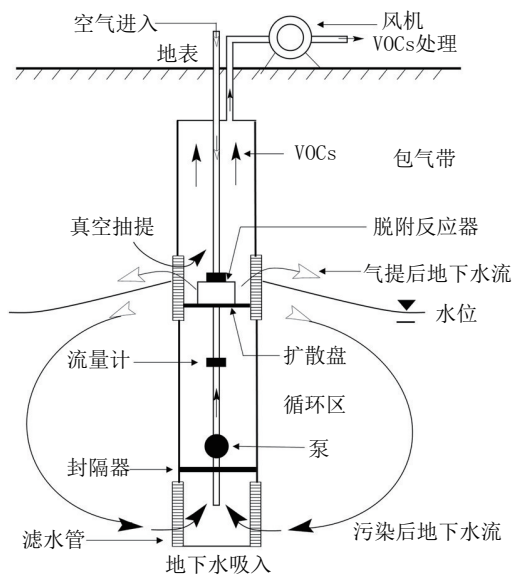


图1 真空气化井工作原理示意

Fig.1 Schematic diagram of UVB operation

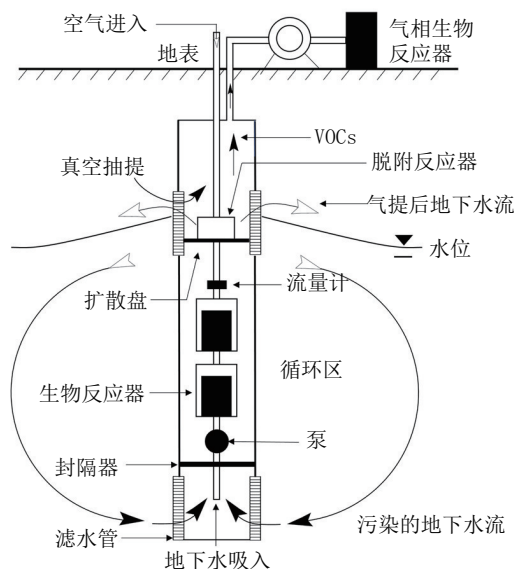


图2 循环井联合井内生物反应器技术

Fig.2 Schematic diagram of GCW-BS operation

美国加州的 March 空军基地应用 UVB 修复地下水的三氯乙烯 (Trichloroethylene, TCE) 污染, 12 个月, 场地地下水中的 TCE 质量浓度下降了 90%。此外, 在 Massachusetts 空军基地和 Porthuene 基地<sup>[8]</sup> 应用 UVB 修复被 TCE 和苯系物 (BTEX) 污染的地下水均取得了良好的效果。

Fayaz S. Lakhwala 等<sup>[9]</sup> 在纽约的一个场地联合应用井内生物反应器和 UVB (图 2) 修复地下水。该系统从循环井下部滤水管处泵取地下水通过泵上部连接的生物反应器, 残余污染物在脱附反应器被吹脱后, 进入地表的气相生物反应器进一步处理, 难挥发性污染物随地下水返回含水层。运行了 15 个月后, 该场地中土壤和地下水中的目标污染物总量下降了 75%, 其中生物修复去除的量占 35%~56%; 含氯有机物质量浓度平均下降 52%, 不含氯有机物质量浓度平均下降 88%。

(2) 气流提升井处理系统。1992 年美国斯坦福大学 Gvirtzman 等<sup>[10]</sup> 发明了循环井中气提处理地下水中有机的技术, 而第一个气流提升井中处理系统即 NOVOCs<sup>TM</sup> 在美国能源部 Hanford WA 实验室实验成功。该系统主体由内井管和外井管组成, 并设置镂空滤水管 (见图 3)。NOVOCs<sup>TM</sup> 通过向含水层注入高压空气产生地下水循环流, 并吹出挥发性污染物, 通过真空抽提把污染物抽到地面进行处理。

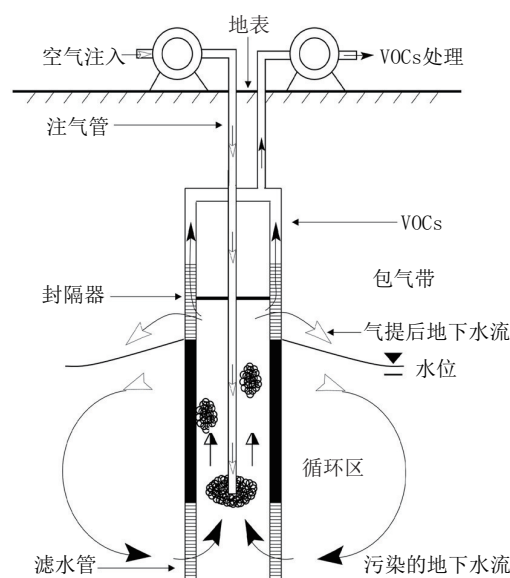


图3 气流提升井工作原理示意

Fig.3 Schematic diagram of NOVOCs<sup>TM</sup> operation

1995—1996 年, 在美国加州的 Edward 空军基地<sup>[11]</sup> 成功应用 NOVOCs<sup>TM</sup> 进行了修复实验。NOVOCs<sup>TM</sup> 运行 191 d 后, 场地内 TCE 浓度降低了 90%。实验显示 TCE 去除率和地下水深度有关, 地下水上的区域内, 循环井的影响区域达到 15 m, TCE 质量浓度从 160  $\mu\text{g/L}$  下降到了 5  $\mu\text{g/L}$ , 而靠近隔水层的地下水区域内, 循环井影响区域不到 9 m, TCE 质量浓度保持在 173~270  $\mu\text{g/L}$  之间, 这是该

系统用于场地修复的第一个案例。

1995—1997年,应用NOVOCs™井和土壤气相抽提技术(Soil Vapor Extraction, SVE)相结合对密西西比州一个地下水受到BTEX污染的场地进行了修复,使BTEX质量浓度平均降低了91%。

(3)密度驱动对流系统(Density Driven Convection Wells, DDC)(见图4)。由德国的Wasatch Environmental Inc.开发,DDC系统结构简单,由井管和注气管构成,和NOVOCs™的地下水循环方式一致,但是DDC强调把吹脱出的污染物引入包气带以进行微生物的降解,无气体地表处理系统。该技术对场地包气带的厚度、渗透性以及土著微生物的类型要求较高,应用受到限制<sup>[7]</sup>。

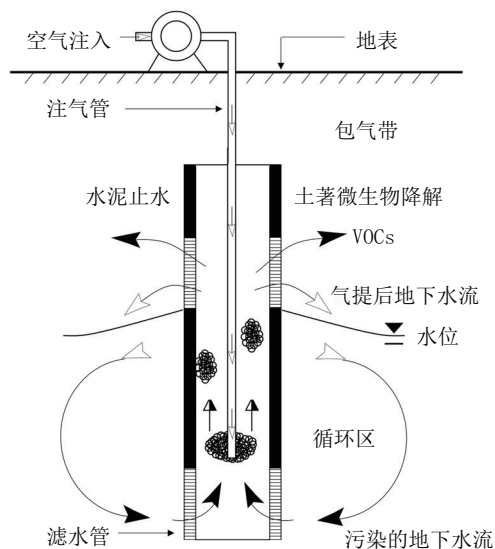


图4 密度驱动对流井工作原理示意

Fig.4 Schematic diagram of DDC operation

1995—1997年,应用DDC联合SVE对Keesler空军基地<sup>[12]</sup>进行了为期18个月地下水修复实验,场地地下水中的总石油烃(total petroleum hydrocarbon, TPH)去除率高达98%,但实验显示循环井影响区域外的地下水中TPH存在累积现象,浓度升高为修复前浓度的2倍。

### 2.1.2 循环井和清洁能源技术结合的研究

使用风力发电机供应能量的循环井修复系统在2004年被应用于修复前内布拉斯加州军械厂地下水的TCE污染问题。这是首次使用风力发电机为地下水修复系统提供动力,风力发电机不会对生态环境造成负面影响,该系统受到了公众的欢迎<sup>[13]</sup>。

2003年加州大学戴维斯分校的Sutton P<sup>[14]</sup>开发出一种使用太阳能供电的循环井系统,用来修复干洗店泄露的含氯溶剂造成的地下水污染问题。他和中央山谷地区水质控制委员会(Regional Water Board)合作,在加利福尼亚州索诺拉市的前Sierra Launderers干洗店进行了一项试点研究,以评估该系统的可靠性,显示出该技术可以大大降低修复成本。

### 2.1.3 双循环井系统和多重滤水管循环井

Jeffrey A. Cunningham等在2004年验证了由一个“正向流”循环井和一个“逆向流”循环井组成的双循环井系统对污染地下水进行修复<sup>[15]</sup>。双循环井结构如图5所示,该设计可用来应对含水层中存在隔水层的情况。

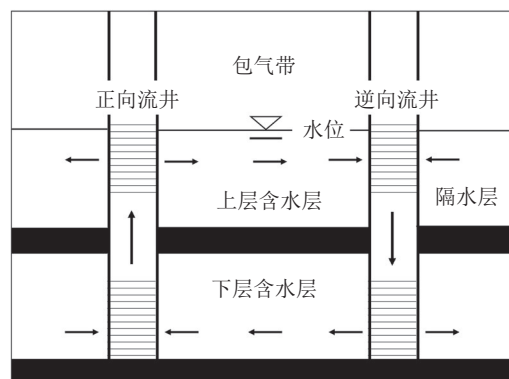


图5 双循环井运行原理示意

Fig.5 Schematic diagram of double GCW operation

Mark N. Goltz等<sup>[16]</sup>也在2005年应用“正向流井”结合井中气提和“逆向流井”结合生物修复的双循环井系统修复50 m×60 m的TCE污染场地。修复后发现TCE质量浓度从3000 μg/L降低到平均250 μg/L,累计去除8.1 kg TCE,在双循环井停止运行后,含水层中TCE质量浓度出现回升。

具有2个以上滤水管部分的循环井可以为厚含水层创建多个三维椭圆流场,这些厚含水层在整个深度上或多或少地分布着污染物,使用多重滤水管可创建更小的循环单元,加强原位冲洗并缩短循环时间。图6描述了具有3个滤水管段的GCW,在含水层中,创建了2个三维椭圆流场,被污染的水通过中间滤水管段部分进入,通过上下筛管部分重新回到含水层<sup>[17]</sup>。

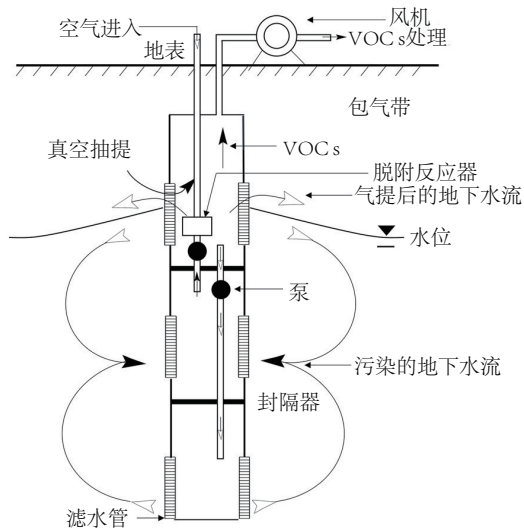


图6 三滤水管段循环井示意

Fig.6 Groundwater circulation wells with the three screen section pipe

2.2 国内循环井修复技术现状

国内循环井修复技术的研究起步较晚,相关研

究和实际工程应用还不是太多,详情见表1。

3 地下水循环井修复技术分析

3.1 GCW的优点

目前国内修复市场空间已经超过200亿元,未来5年修复行业复合增速预计在40%左右,市场前景广阔,使用GCW来治理地下水污染问题成为一项很有前景的技术,GCW本身的优点可以推动此技术的发展。

(1)国内原位修复技术常常修复不彻底,“拖尾”现象严重,而GCW对污染物浓度高的场地有机去除效率最高可达98%<sup>[12]</sup>,而且还可以同时对含水层和包气带的污染物进行修复,修复效率高。GCW运行过程中不会给含水层带来二次污染,而且不会产生横向水压,避免了污染物的扩散。

(2)目前国内地下水原位修复技术以抽提为主,而GCW不需要把污染地下水抽取至地表,相比于原位抽提降低了修复过程中的潜在风险,保护了场地土体的地层结构和原有微生物,且不会对地表

表1 国内从事相关研究的主要机构及其主要成果

Table 1 Major institutions engaged in GCW research in China

序号	机构名称	典型成果	相关专利	标准、代表性文献
1	博天环境集团有限公司	山西某焦化厂场地修复:GCW技术首次应用于中国大陆场地修复项目 <sup>[18]</sup>	(1)一种用于修复污染地下水及其流经污染土壤的循环井(专利号:201811615477.5) <sup>[19]</sup> ; (2)一种循环井(专利号:201811615475) <sup>[20]</sup>	
2	吉林大学	(1)地下水污染的控制和修复(国家973项目); (2)重大环境污染场事件净化和修复技术(国家863计划课题)		《地下水污染场地的控制与修复》(科学出版社,2015) <sup>[21]</sup>
3	中化环境控股有限公司	(1)地下水修复技术与设备; (2)有机污染场地修复技术与设备	重金属污染土壤与地下水一体化修复方法(专利号:201310278001.8) <sup>[22]</sup>	
4	中国水利水电科学研究院	(1)农业对地下水污染的发生机理与保护修复模式研究(水利部行业公益性项目); (2)河流生境修复的生态水力调控理论、关键技术及应用 IEG-GCW 修复技术	辐射井技术(专利号:201210484260.1) <sup>[23]</sup>	(1)《地下水质量标准》(GB/T 14848—2017) <sup>[24]</sup> ; (2)《机井工程技术标准》(GB/T 50625—2010) <sup>[25]</sup>
5	中科鼎实环境工程有限公司		针对地下水有机物污染物的循环井修复系统(专利号:201910713873.X) <sup>[26]</sup>	

建筑物造成不良影响。GCW不需要吹脱塔和储存设施,所需空间小,而且可以在现有曝气井的基础上改造而来,故GCW运行和维护成本较低。

(3)GCW为其他原位修复技术提供了地表下运行的空间,易于和其他原位修复技术相结合,而且循环井可以作为向被污染含水层中加入各种药剂的通道,例如表面活性剂、化学氧化药剂以及微生物营养物质,强化循环井的修复效果。

(4)安装简便,操作人员容易掌握。

### 3.2 GCW的局限性

目前GCW技术在我国仅有2个工程实例,这不仅仅是由于我国开展此项技术研究比较晚,还和循环井自身存在的一些缺点有关。现阶段的GCW并不能很好地满足国内的要求。

(1)国外的目标污染物大部分情况下比较单一,而国内复杂多相共存居多,适用于国外的GCW技术往往不适用于国内情况,还需要和其他原位修复技术相结合才可以取得比较好的修复效果。

(2)目前GCW单井的影响范围仅为20~45 m,无法实现大范围的水力调控。

(3)GCW对场地水文地质条件要求高,各向异性强的地层修复效果不好,而且当场地中存在隔水层、含水层厚度不足时,影响修复效率甚至可能导致循环井不运行。GCW技术对污染物在地下水中的赋存形态有所要求,多相同步修复难,当存在自由相时,需要提前去除,增加了成本。

(4)目前国内的地下水修复普遍要求工期短,而循环井修复技术的修复和净化周期比较长。

(5)普通井型的抽注不平衡,进入循环井内部的地下水并不能全部注入含水层。

(6)循环井运行时会使地下水中CO<sub>2</sub>的含量减少,导致pH值升高,当地下水中铁、镁、钙离子含量比较高时,会产生矿物沉淀,堵塞滤水管;当补给到包气带的地下水中的某些成分和土壤中的物质发生反应导致土壤发生胶溶作用或者膨胀,也有可能堵塞滤水管,影响循环井的运行<sup>[7]</sup>。

(7)目前GCW技术还没有很好地解决循环与净化的协同问题。

(8)目前由于国内尚处于研究阶段,成套设备处于空白,这严重限制了循环井修复技术的大规模应用。

### 3.3 循环井技术的适用条件及影响因素

当前的GCW技术相较于其他原位修复技术对场地的条件要求较高,并不能用来修复所有类型的污染场地,故选择GCW技术时需要对场地进行详细的勘察,根据场地条件和污染物类型选择合适的循环井类型、设计地上污染物处理系统以及设置各类运行参数,以达到最佳的去除效率和最优经济性。

#### 3.3.1 场地条件的影响

表2列出了不同场地条件GCW的适用性。

表2 不同场地条件GCW的适用性评价<sup>[8]</sup>

Table 2 Site suitability evaluation for the GCW method

场地条件	类型	GCW适用性
地下水污染物类型	挥发性有机物	良好
	半挥发有机物	良好
	重金属	中等
包气带厚度/m	0~1.5	不适用
	1.5~300	中等
饱水层厚度/m	0~1.5	不适用
	1.5~34.5	中等
	>34.5	不适用
饱水层介质	孔隙介质	中等
	裂隙介质	不适用
	岩溶介质(石灰岩)	不适用
地下水流速/(m·d <sup>-1</sup> )	<0.0003	良好
	0.00003~0.3	中等
	>0.3	不适用
水平渗透系数(m·d <sup>-1</sup> )	0.009~0.3	中等
	>0.3	良好
各向异性(K <sub>x</sub> /K <sub>y</sub> )	3~10	中等
	>10	不适用

#### 3.3.2 设置监测井

随时观察地下水污染物动态,调整循环井的各类运行参数,降低成本。

#### 3.3.3 GCW两滤水管之间的距离和两井间距

适当增加上下滤水管距离,扩大循环区域,可增大地下水循环流强度,提高效率。当合理设计两井间距的时候,两循环井的循环区域会发生重叠,形成强烈的地下水垂直流动,这对于严重污染区域的修复是十分有利的<sup>[27]</sup>。

#### 3.3.4 运行参数的影响

抽提速率过小,污染物未被彻底清除,再次随地下水循环进入含水层;抽提速率过高,则能耗过大,增加运行成本。因此需要设定一个合适的抽提速率。在一定的范围内增加曝气量可以提高地下水循环的强度,强化水流对土壤的冲刷作用,使污染物解吸或溶解在地下水中,通过曝气去除;但是曝气量超过一定值后,不再起到加强地下水循环强度的作用,造成了能量的浪费<sup>[28]</sup>。

#### 4 循环井修复技术研究方向

随着国家对地下水污染治理问题的重视,为了适合我国对地下水修复工作日益提高的技术要求和越来越严格的验收标准,GCW需要满足水力调控半径大、同步修复协同高效、长期运行不堵塞、封堵材料抗污防腐、井内组件一体化和成套设备智能化等一系列要求,应开展以下几方面的研究工作。

(1)为了不断进行循环井系统设计的创新和提高修复效率,需要对循环井修复机理开展进一步的研究,包括有机物在气水两相间的传质、有机物在土壤和沉积物上的吸附/解吸、有机物在水相的溶解及其在含水层中的迁移过程。建立循环井技术修复地下水时三维流场模型,预测循环井单井影响区域,以及多循环井联合使用时地下水循环的流场情况。

(2)针对GCW修复半径小、对场地要求高的缺陷,急需开发新型的循环井井型,需要做到增大水动力调控区域,解决传统循环井抽注不平衡的问题,拓宽含水层修复条件,提高污染物的去除效率。在推进循环井新井型研究的同时,设计出配套的监测井。

(3)研发凝结时间可控、力学性能良好、抗污染、耐腐蚀、环保、低成本的封隔材料和耐疲劳、疏水、环保的循环井内单元封隔器,实现长效稳固封隔;研发强化原位微生物降解的预处理剂、功能菌剂、激活剂、流场调驱剂以及其载体等修复材料,提高原位生物降解的效率,提高有机污染物的整体去除率。

(4)针对GCW处理含自由相地下水流程复杂、成本高的问题,需要研究可分离多组分多相污染物的井内分离设备,实现多相组分高效分离。国内污染物成分比较复杂,复杂污染物又存在生物降解有机物和不可生物降解有机物2类,研究井内生物滤池技术、内电解的化学增强反应器等,促使不可生物降解有机物转化为可生物降解有机物;研究高效的井内生物增强反应器,以有效提高地下水有机物的

去除效果。研发将旋液分离设备、氧化/还原增强反应器、生物增强反应器集成于井内有限空间的一体化组件。

(5)地下水修复是一个复杂的工程系统,在利用GCW技术和其他技术进行有效集成的修复工艺过程中,需要实现抽提、水力循环、生物降解和高效净化协同调节,因为国内缺乏系统化的设备,这几者之间的参数和调配存在延迟。急需研究抽提—注入单元、多源信息决策系统、智能控制系统与软件,研制地下水原位同步循环井修复成套一体化设备,实现抽和注的自由切换和抽注平衡,高效节能,抽提、注入、曝气和井内组件联动,可时刻监测循环井系统工作状态,而且可以实现快捷拆卸和转场。

(6)设计一套行之有效的循环井施工工艺流程,制定一套循环井修复污染场地效果评价标准,为循环井技术在实际工程中的应用提供详细指导。

#### 5 展望

地下水循环井修复技术将吹脱、空气注入、气相抽提等技术结合应用在井中,可有效修复地下水,相比于其他原位修复技术有很多优点,在未来GCW可能成为地下水修复的重要研究方向。地下水循环井修复技术在国外已经获得了广泛的应用,但是由于我国地下水污染物十分复杂,国外的成果和经验并不能直接应用于我国的地下水修复,所以现阶段必须加强在循环井修复上的投入和研究,开发出新型循环井型,加大在水动力调控、三相原位同步修复方面的研究,研发出一体化设备智能控制技术,发展出适合我国国情的循环井修复技术体系,实现地下水污染物的高效净化。

#### 参考文献(References):

- [1] 杨伟,宋震宇,袁珊珊,等.污染地下水修复技术研究[J].环境科学与管理,2014,39(5):104-106.  
YANG Wei, SONG Zhenyu, YUAN Shanshan, et al. Review of contaminated groundwater remediation technologies[J]. Environmental Science and Management, 2014, 39(5): 104-106.
- [2] Cirpkao A, Kitanidis P K. Travel-time based model of bioremediation using circulation wells[J]. Groundwater, 2001, 39(3): 422-432.
- [3] 苗竹,吕正勇,魏丽.地下水循环井技术概述[C]//2018中国环境科学学会科学技术年会论文集(第三卷).2018.  
MIAO Zhu, LV Zhengyong, WEI Li. Overview of groundwater circulation well technology [C]//Proceedings of Science and

- Technology Annual Meeting of Chinese Society of Environmental Sciences in 2018 (Volume 3). 2018.
- [4] Bernhardt, B., et al. Bioremediation welland method for bioremediation treatment of contaminated water: United States Patent, 5910245 A[P]. 1999-06-08.
- [5] Stamm J. Vertical circulation flows for vadose and groundwater zone in situ (bio-)remediation[J]. *Bioremediation*, 1995, 3(2): 483-494.
- [6] US. Army Corps of Engineers Hazardous, Toxic, Radioactive Waste Center of Expertise. Cost and performance report of the bofors nobel superfund site[R]. 1998.
- [7] 刘雪松,李敬杰,蔡月梅.井内气体吹脱技术原位修复有机污染地下水[J].*油气田环境保护*,2016,26(2):10-13.  
LIU Xuesong, LI Jingjie, CAI Xuemei. In situ remediation of organic contaminated groundwater by in-situ gas stripping technology[J]. *Environmental Protection of Oil & Gas Fields*, 2016, 26(2):10-13.
- [8] Spargo B J. In situ bioremediation and efficacy monitoring: Report of naval research laboratory[R]. Washington, 1996.
- [9] Fayaz S. Lakhwala, James G. Mueller, Richard J. Desrosiers. Demonstration of a microbiologically enhanced vertical ground water circulation well technology at asuperfund site[J]. *Groundwater Monitoring & Remediation*, 1998,18(2):97-106.
- [10] Gvirtzman H, Gorelick S M. The concept of in-situ vapor stripping for removing VOCs from groundwater[J]. *Transport in Porous Media*: 992, 8(1):71-92.
- [11] Gilmore T J, Spane F. A., White M.D, et al. The effect of geologic heterogeneities on the installation and operation of the pilot in-well vapor stripping system at an air force base in california [C]//28th Annual Meeting of the Geological Society of America. Denver, Colorado, 1996.
- [12] Foreword I. Field applications of in situ remediation technologies: ground-water circulation wells[J]. United States Environmental Protection Agency, 1998.
- [13] Elmore A C, Gallagher R , Drake K D. Using wind to power a groundwater circulation wells preliminary results[J]. *Remediation Journal*, 2004,14(4):49-65.
- [14] Sutton P. Solar powered in-well vapor stripping; a design, analytical model, and pilot study for groundwater remediation[J]. *Journal of Contaminant Hydrology*, 2014,171:32-41.
- [15] 刘勇波.适冷苯胺降解菌 *Pseudomonas migulae* AN-1 的好氧反硝化及生物循环井修复硝酸盐污染地下水研究[D].长春:吉林大学,2015.  
LIU Yongbo. Cold-adapted aniline degrading bacterium *pseudomonas migulae* AN-1: Aerobic denitrification and application for remediation of nitrate contaminated groundwater by bio-circulation well[D]. Changchun: Jilin University, 2015.
- [16] Mark N. Goltz, Rahul K. Gandhi, Steven M. Gorelick, et al. Field evaluation of in situ source reduction of trichloroethylene in groundwater using bioenhanced in-well vaporstripping[J]. *Environmental Science & Technology*, 2005,39(22):8963-8970.
- [17] J. Stamm, T. I. Eldho, M. Scholz. Flow simulation of a system of groundwater circulation well and pumping well for NAPL site remediation[J]. *Transactions on Ecology and the Environment*, 1998,17.
- [18] 张伟. 博天环境修复成功将地下水循环井技术引入中国大陆市场 [EB/OL]. [2018-06-22]. [http://www. water8848. com/ news/201806/22/113099. html](http://www.water8848.com/news/201806/22/113099.html).
- ZHANG Wei. Botian Environmental Remediation successfully introduced groundwater circulation well technology to the Chinese mainland market [EB/OL]. [2018-06-22]. <http://www. water8848. com/news/201806/22/113099. html>.
- [19] 博天环境集团股份有限公司. 一种用于修复污染地下水及其流经污染土壤的循环井;201811615477.5[P].2019-04-19. Botian Environment Group Co., Ltd. A circulating well used to repair contaminated groundwater and the contaminated soil in its flow path: 201811615477.5[P].2019-04-19.
- [20] 博天环境集团股份有限公司. 一种循环井;201811615475[P].2019-04-19. Botian Environment Group Co., Ltd. A circulating well: 201811615475[P]. 2019-04-19.
- [21] 赵勇胜. 地下水污染场地的控制与修复[M].北京:科学出版社,2015.  
ZHANG Yongsheng. Control and Remediation of Groundwater Contaminated Site[M]. Beijing: Science Press, 2015.
- [22] 曹心德. 重金属污染土壤与地下水一体化修复方法: 201310278001.8[P].2014-04-22.  
CAO Xinde. Integrated remediation method for heavy metal contaminated soil and groundwater: 201310278001.8 [P]. 2014-04-22.
- [23] 中国水利水电科学研究院. 辐射井技术:201210484260.1 [P].2013-03-20.  
China Institute of Water Resources and Hydropower Research. Radial well technology: 201210484260.1[P]. 2013-03-20.
- [24] GB/T 14848—2017, 地下水质量标准[S].  
GB/T 14848—2017, Groundwater quality standard[S].
- [25] GB/T 50625—2010, 机井工程技术标准[S].  
GB/T 50625—2010, Technical standard for mechanized well engineering[S].
- [26] 中科鼎实环境工程有限公司. 针对地下水有机物污染物的循环井修复系统;201910713873.X[P].2019-11-22.  
Zhongke Dingshi Environmental Engineering Co.,Ltd. Circulation well remediation system for groundwater organic pollutants: 201910713873.X[P]. 2019-11-22.
- [27] B. Herrling, J. Stamm. Hydraulic circulation system for in situ remediation of strippable contaminants and in situ bioreclamation (UVB method) [C]//Proceedings Rostov-on-Don, Russia, 1993.
- [28] 孙冉冉. 电强化地下水循环井对有机污染场地的修复研究 [D].上海:东华大学,2017.  
SUN Ranran. Rremediation of organic contaminated sites by electrokinetic-enhanced groundwater circulation well [D]. Shanghai: Dong Hua University, 2017.

(编辑 李艺)