

• 国家水体污染控制与治理科技重大专项集成与示范 •

地下水源城市饮用水安全保障共性技术研究与示范

张国祥 张亚峰 高云鹤 张树冬 高国伟

(沈阳水务集团有限公司 沈阳 110002)

摘要 针对地下水源城市普遍存在铁、锰、砷、氨氮、有机物等污染问题,开展了优化调度、水质预警以及地下水修复技术研究,有效控制了水厂原水的特征污染物浓度;开发了受污染含锰含铁地下水处理集成技术、基于现行处理工艺的强化除砷技术,建立了中试基地与示范工程;实测结果表明,示范工程的出水水质达到 GB 5749—2006 标准,实现了水质安全保障的目标。

关键词 地下水 三氮 渗透反应格栅(PRB) 除铁除锰 强化除砷 水专项

1 关键技术问题

地下水作为我国重要的供水水源,在保证居民生活用水、社会经济发展和维持生态环境平衡等方面起着重要的作用。据统计,我国城镇供水地下水水厂数量约为水厂总数的 37%,供水量约为总水量的 17%,华北、西北和东北地下水供水人口占城市总供水人口的比例分别高达 66%、65% 和 47%。

沈阳市、郑州市均是我国取用地下水量较大的城市。由于水源井沿河分布,其主要补给源为河水,这也造成了补给过程中污染物迁移至地下水的问题。水质分析表明,目前沈阳市地下水水源主要问题是锰、铁、氨氮、臭味超标,同时有机污染严重;黄河郑州段两岸地下水中砷、铁、锰、氨氮等超标具有普遍性,其中砷含量达到 0.06 mg/L,铁、锰等含量也较高。

随着《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2006)全面实施,水中超标项目有可能进一步增加,目前采用的常规地下水处理工艺已不能保障饮用水的水质安全,水源水质恶化与供水技术之间的矛盾愈显突出。因此针对典型地区地下水水源污染物超标、特别是砷超标的严重问题,建立完善的饮用水安全保障体系十分必要。

2 主要研究内容与关键技术路线

本课题针对我国普遍存在的地下水水质安全问题,以我国重要的地下水源城市——沈阳、郑州为示范基地,开展特征污染物辨识并进行健康风险评估,研究典型污染物的迁移规律及富集、释放机理与关

键因素,开发不同水文地质条件下的水源水质控制技术,研究微污染含铁锰地下水除铁锰、氨氮和有机物机制与相互作用机理及水质净化主要影响因素与关键工艺参数,在系统研究高级氧化预处理、生物降解和吸附多种处理工艺耦合与技术集成的基础上,开发微污染含铁锰地下水水质净化优化集成工艺系统;研究基于曝气—接触过滤除铁工艺的强化除砷技术,开发以复合金属氧化物为活性组分、能同时去除砷、铁、锰等关键污染物的原位负载—包覆再生强化除砷技术。

课题技术路线总的原则是:结合地方需求,研发关键技术;支撑示范工程,创建技术体系;保障饮水安全,实现跨越发展。课题具体实施技术路线如图 1 所示。

3 主要技术成果

3.1 地下水源污染优化监测及预报系统

该系统是一个综合考虑水文地质条件,地表水—地下水交互特点,结合数学模型和现代信息管理技术,对傍河型地下水水源地水质进行监测预报的决策支持系统。系统主要功能包括:地图浏览、地图信息查询、水位分析、水质分析、空间分析、水质预测、数据库管理功能,如图 2 所示。

系统的构建包括污染源数据库和水源地基础信息数据的建立。污染源数据库覆盖了点、线、面三类污染源,污染源的调查对象包括工业企业、垃圾填埋场、农业区、居民区等;水源地基础信息数据库可以实现对各种基础数据的录入、修改、删除等功能。预测指标确定为氨氮、亚硝酸盐氮、硝酸盐氮;根据李官水源区 2000~2012 年水质动态变化特征,确定污

国家水体污染控制与治理科技重大专项(2009ZX07424-002)。

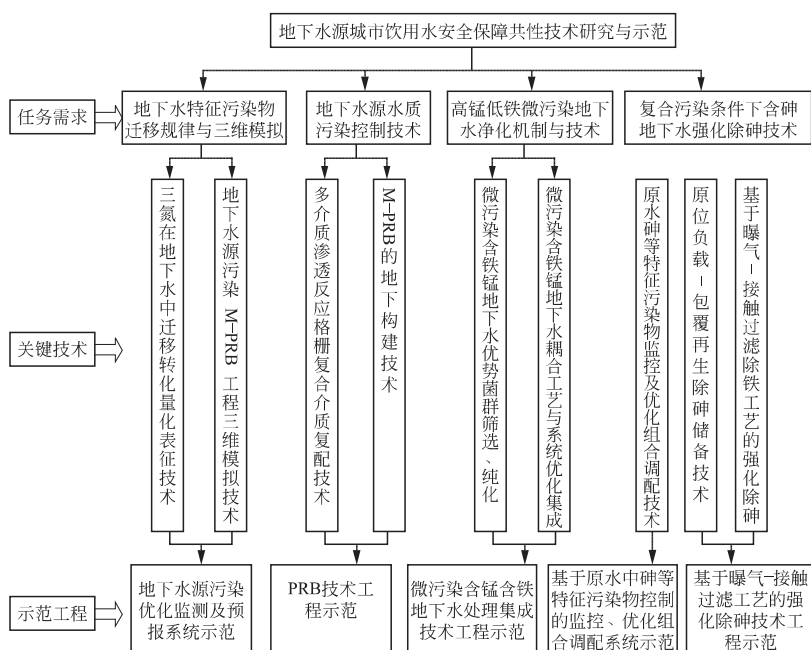


图1 课题实施技术路线

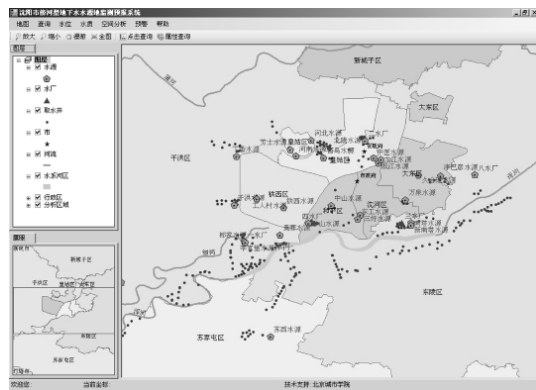


图2 地下水水质污染监测与预报系统



图3 地下水水质污染监测与预报系统操作平台

染监测频率枯、丰2次/a;系统最大预测时间长度360天。目前该系统已经进入实际应用阶段(见图3)。

3.2 PRB 复合介质复配与地下构建技术

渗透反应格栅(Permeable Reactive Barriers, PRB)是一种地下水污染的原位修复技术,污染水靠自然水力传输通过填充有活性反应材料的被动反应区,溶解的有机物、金属、核素等污染物被降解、吸附、沉淀得以去除。其具有能持续原位处理污染物(5~10年)、处理多种污染物(如重金属、有机物等)、处理效果好、安装施工方便、性价比相对较高等优点。

PRB介质的性能是其技术应用的关键,本课题对多介质渗透反应格栅复合介质复配技术进行了研究,提出了氨氮、NOM去除介质的筛选方法与复配原则,实现物理、化学和生物等多种去除机理的耦合,两种(或多种)污染物的同步去除。

课题组对吸附NOM的介质、吸附氨氮介质、释氧材料、碳源进行了筛选。对复合介质中的矿物材料利用多种手段(如XRD、SEM、XRF、红外、XPS)进行了表面矿相和成分识别(如图4),建立了M-PRBs介质性能评价的指标体系与方法体系。

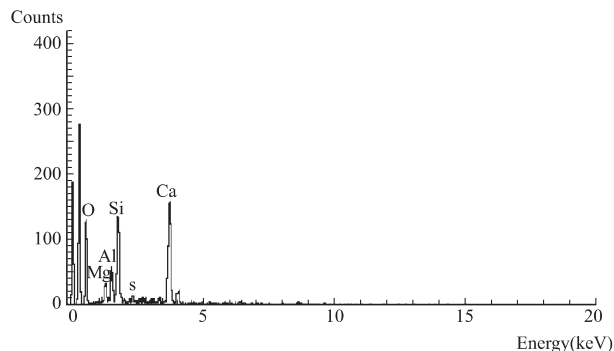


图4 反应介质能谱图

针对沈阳李官堡水源地具体的水文地质条件(地下水埋藏较深、含水层厚度大、介质渗透系数大),在浑河河水渗漏补给的地下水流经路径上构建傍河型PRB,主要构筑物包括:连续反应墙、释氧井、监测井、抽水井,如图5所示。

采用深层连续钻探的反应墙构筑技术及井填式的反应介质安装技术,突破了渗透反应格栅技术应用构建不超过30m的极限,解决了一般反应

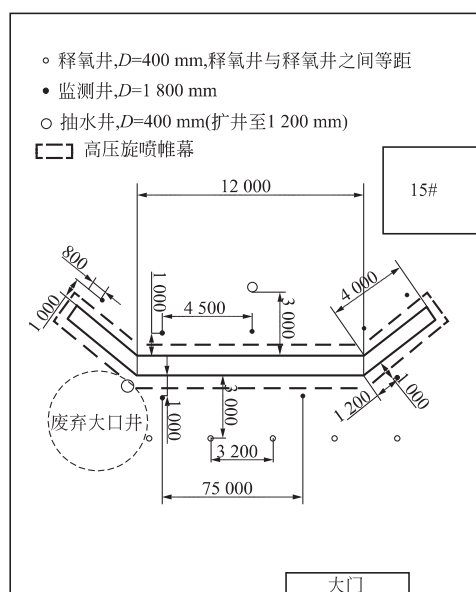


图5 傍河型 PRB 结构示意图

墙可能存在的不连续性问题,同时还可对大埋深 PRB 中反应介质进行简单、快速更换,缩短了维护时间。

硝酸盐氮和亚硝酸盐氮的设计出水标准为:硝酸盐氮 ≤ 20 mg/L;亚硝酸盐氮 ≤ 1 mg/L。运行期间出水硝酸盐氮和亚硝酸盐氮浓度均在设计标准之下,如图6所示。本成果适用于污染源阻控和浅层的地下水,可以修复多污染组分的地下水。

3.3 微污染含锰含铁地下水处理集成技术

针对沈阳地区地下水高锰、低铁、含氮氮和有机物复合污染的水质特点,筛选出具有同步除铁锰、氮氮的复合菌种,建立以“氧化—生物降解—过滤”为核心的微污染高锰低铁地下水耦合工艺,并根据地下水水质、温度等因素的变化情况,对耦合工艺进行技术优化,建立了针对 $C[Fe^{2+}] < 2.96$ mg/L, $C[Mn^{2+}] < 8.61$ mg/L, $C[NH_3-N] < 6.1$ mg/L 的低铁、高锰含氮氮条件下的“跌水曝气—生物强化过滤”集成处理工艺。

在实验室条件下,从实际运行的普通除铁锰、氮氮滤柱中分离纯化细菌,筛选出具有除铁锰、氮氮复合功能的优势细菌,共分离获得 418 株纯菌,再对其用选择性培养基进行筛选,测试其降解(净化)性能,用含有铁锰、氮氮的水进行驯化,最终筛选出 5 株除铁锰优势菌、3 株除氮氮优势菌(硝化菌),鉴定

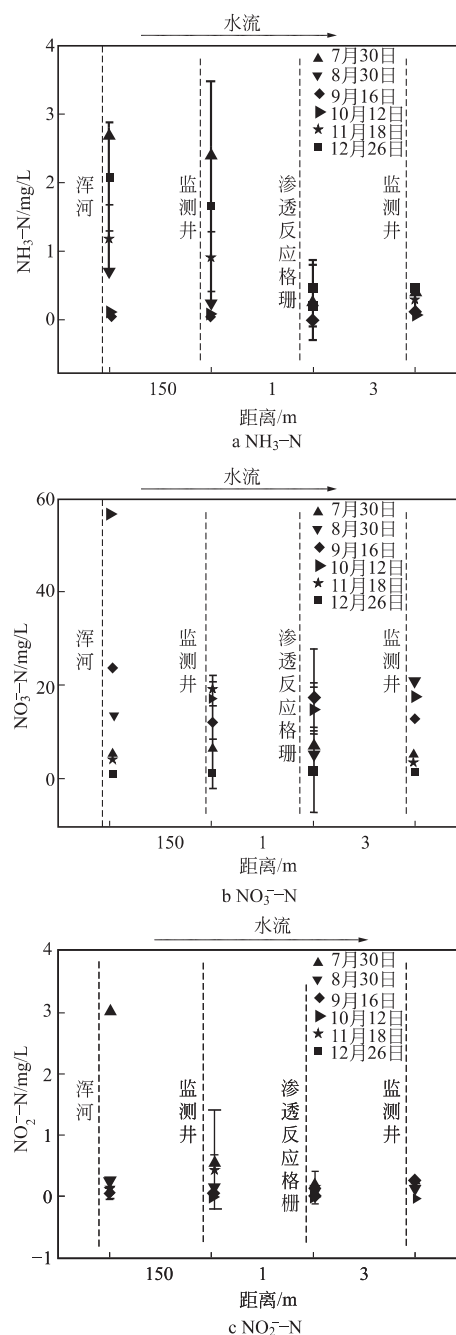


图6 傍河型 PRB 处理地下水监测结果

结果如表1所示。对8株菌进行生长特性测试,16SrDNA鉴定,然后按不同组合方式进行复配,测试复配菌的综合净化性能,最终确定最佳复配条件。

最佳复配混合菌群,静态条件下对铁、锰、氮氮平均去除率分别为94.7%、66.6%、58.6%。

将筛选出来的优势菌接种到微污染含锰含铁地下水处理集成技术示范工程滤池(工艺流程如图7),

表1 菌株鉴定结果

测序菌株名称	比对结果	相似度/%
T2#	(GU290329.1) <i>Citrobacter</i> sp. 2009/I12 16S ribosomal RNA gene ,partial sequence	99
T4#	(FJ542329.1) <i>Citrobacter freundii</i> strain MG-F1 16S ribosomal RNA gene ,partial sequence	99
T5#	(FJ542329.1) <i>Citrobacter freundii</i> strain MG-F1 16S ribosomal RNA gene ,partial sequence	99
T1#	(DQ279751.1) <i>Citrobacter</i> sp. Azor-4 16S ribosomal RNA gene ,partial sequence	99
T3#	(DQ279751.1) <i>Citrobacter</i> sp. Azor-4 16S ribosomal RNA gene ,partial sequence	99
X1#	(JF411231.1) <i>Bacillus niabensis</i> strain m6 16S ribosomal RNA gene ,partial sequence	99
X2#	(JN228329.1) <i>Pseudomonas stutzeri</i> strain 2D49 16S ribosomal RNA gene ,partial sequence	98
X3#	<i>Bacillus</i> sp. CJHH2 16S ribosomal RNA gene ,partial sequence(DQ279751.1) <i>Citrobacter</i> sp. Azor-4 16S ribosomal RNA gene ,partial sequence	99

经过三个月的运行调试,滤池滤速由初期的 0.5 m/h 逐步提高至后期的 3.5 m/h,反冲洗强度也由最初的 10 L/(s·m²)、5 min,增至后期的 15 L/(s·m²)、8 min。稳定运行后出厂水水质基本稳定,出水满足《生活饮用水卫生标准》要求,如图 8、图 9 所示。

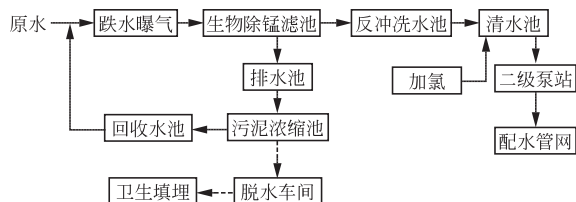


图7 示范工程工艺流程示意

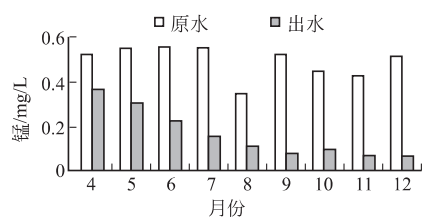


图8 示范工程除锰效果

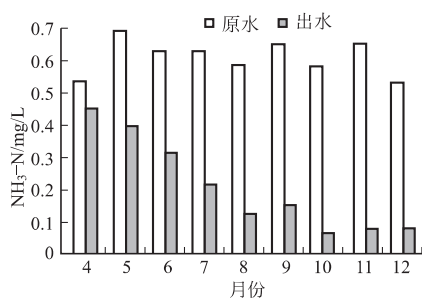


图9 示范工程除氨氮效果

3.4 基于现行曝气—接触过滤除铁工艺的强化除磷

以郑州东周水厂现行曝气—接触过滤工艺为基础,在水处理过程中引入原位生成的、兼具氧化与吸附功能的铁锰复合氧化物,实现磷去除的强化与优化。

经过小试、中试与生产性试验研究,得出如下结果:为强化曝气—微絮凝—过滤除铁锰工艺的同步除磷效果,在线投加 FeCl₃ 絮凝剂和 KMnO₄ 氧化剂为最优的加药组合方式,其最佳投量分别为 Fe(III) = 0.5 mg/L 和 Mn(IV) = 0.05 mg/L。

连续运行过程中,通过向滤池投加铁锰复合氧化物、成熟石英砂与新砂组合,显著提高了对磷等污染物的去除效果,磷去除率较原有处理工艺提高了 30% ~ 35%,达到 55% ~ 70%,保证了出厂水磷浓度低于 0.01 mg/L,如图 10、图 11 所示;出水浊度维持在 0.05 ~ 0.15 NTU,除浊效果较原有工艺提高了 0.5 ~ 5 个百分点;对铁、锰也有强化去除作用,铁、锰等指标满足国家《生活饮用水卫生标准》要求。

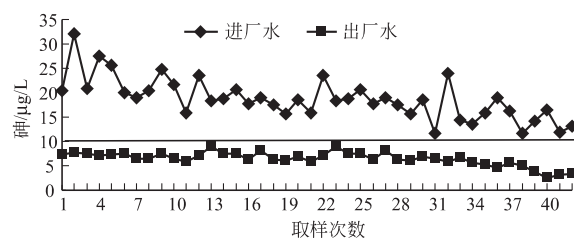


图10 东周水厂示范工程滤池磷去除效果

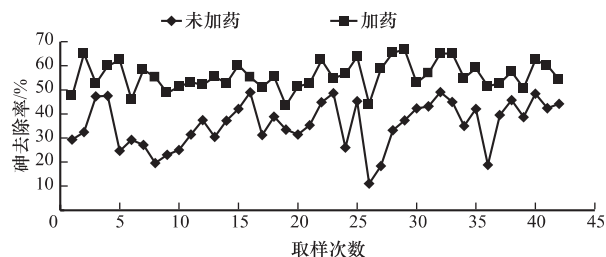


图11 东周水厂新旧工艺磷去除率比较

3.5 基于原水中磷等特征污染物控制的监控、优化组合调配系统

为保障水质安全,根据地下水监测磷等复合污染指标及水质演变规律,在对各水井磷浓度拟合的基础上,将郑州各水源的实际供水能力、水质特征及水厂处理工艺现状等作为约束条件,以综合水质指标和经济指标为目标,以各取水井的运行组合、取水量及运行时间为决策变量,构建综合考虑供水水质、

南水北调受水区城市饮用水安全保障共性技术与示范

顾军农 李玉仙 王 敏 曹 楠 白迪祺 樊康平

(北京市自来水集团有限责任公司 北京 100092)

摘要 随着“南水北调”中线工程逐步发挥作用,受水区的供水水源将会呈现多样性和复杂性,影响安全供水的因素越来越复杂,从而对处理工艺与输配水系统适应水源水质多样性的能力也提出更高的要求。课题依托南水北调受水区北京和郑州两个重要城市,针对“南水北调”中线工程通水后受水区城市供水系统中存在的问题,从水源、水厂、配水管网等方面进行系统研究,为南水北调受水区城市的饮用水安全保障提供技术支持。研究发现:在丹江口水库水源水质条件下,常规处理工艺出水水质可满足国家《生活饮用水卫生标准》,因此,受水区城市新建水厂工艺选择时首选常规或强化常规处理工艺;在水源频繁切换条件下,输配水质与管垢和生物膜的相互作用影响着铁腐蚀产物的释放过程。在稳定性低的管网中切换为强腐蚀性水时,铁腐蚀产物释放速率增加。基于对“黄水”产生机制的认识,提出了多水源切换管网“黄水”预防与控制技术,避免了2009~2012年间水源频繁切换所可能导致的“黄水”现象。

关键词 南水北调 水源切换 饮用水安全保障 “黄水”控制技术 腐蚀性 水质迁移转化规律 水专项

1 拟解决的关键技术问题

“南水北调”中线工程是一项规模空前的输水调

国家水体污染控制与治理科技重大专项(2009ZX07424-003)。

供水安全性及经济性的原水优化调配模型,并在郑州市北郊水源地东区进行应用示范(如图12),实现了东区水原井砷浓度、流量、压力等在线监测数据的获取与更新,时、日输配水量预测,原水井群优化组合调配计算与评估等功能。

4 结论

(1) 渗透反应格栅技术不仅有效降低了地下水

水工程,对于缓解我国南北水资源不平衡具有重大意义。随着“南水北调”中线工程逐步发挥作用,多水源的供水模式将有效保障受水区城市的水量需求,为受水区城市经济社会的协调发展提供重要支

源水厂原水的污染物浓度,进而降低后续处理工艺负荷,为出厂水水质达标做出贡献,而且对地下水水体环境具有良好的修复作用,有利于地下水体可持续利用。

(2) 微污染含锰含铁地下水处理集成技术以现有工艺为基础,通过功能菌群的筛选复配以及运行工艺、参数的优化集成,实现了降解超标铁、锰、氨氮等处理功能的复合,对我国地下水源原水铁、锰等超标的水厂改造起到了示范作用。

(3) 基于曝气—接触过滤工艺的强化除砷技术突破了大型水厂除砷技术难题,完成20万 m^3/d 的东周水厂示范性改造,为同类型水厂的技术改造提供了重要借鉴作用。

○ E-mail: zlszgb@163.com

收稿日期:2013-08-02

修回日期:2013-08-07

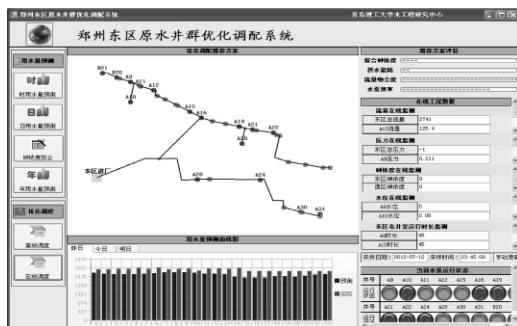


图12 郑州东区原水井群优化调配系统



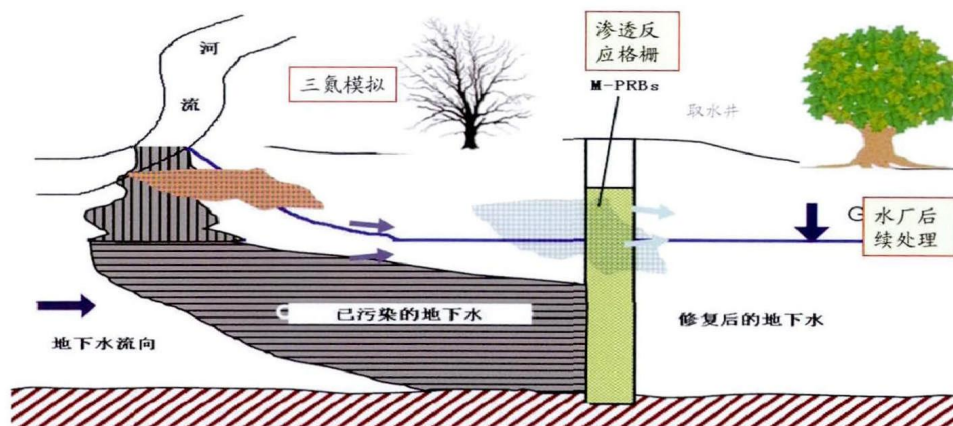
国家水体污染控制与治理科技重大专项 THE RESEARCH RESULTS



地下水源城市饮用水安全保障共性 技术与示范

2009ZX07424-002

含铁锰、氨氮浅层地下水污染物控制技术



针对沈阳示范区受污染地下水进行了主要污染物（三氮）迁移转化规律的研究，开发了沈阳市傍河型地下水源地监测预报系统，同时对不同污染程度下的处理工艺进行比较，确定了以微污染含铁锰地下水耦合处理为主要生产工艺、渗透反应格栅进行地下水修复的技术路线。当氨氮浓度超过6mg/L时，地下水首先要经过渗透反应格栅，氨氮含量经过削减后进入地下水耦合处理工艺系统；当氨氮浓度不超过6mg/L时，地下水直接进入耦合处理工艺系统。在实现污染物控制的同时，通过合理分配有效降低了处理成本。围绕这一重大成果，共计形成了8项软件著作权及专利。



监测预报系统的建立，实现了对研究区污染物迁移转化规律的实时监控，为受污染地下水处理工艺的选择提供了依据。



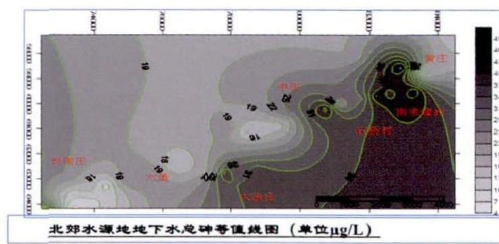
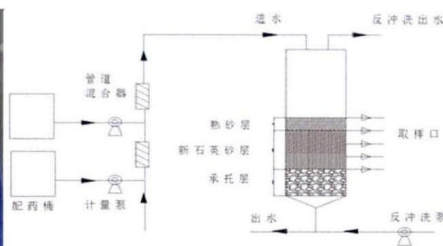
渗透反应格栅系统的建立，使水处理单元的污染物负荷降低到可承载水平，保障了耦合处理工艺系统的稳定运转，同时实现了水体修复功能。



经铁锰、氨氮微污染地下水耦合处理工艺系统处理过的原水，各项水质指标满足了《生活饮用水卫生标准》（GB5749-2006），确保了水质安全目标的实现。

复合污染条件下含砷地下水除砷技术

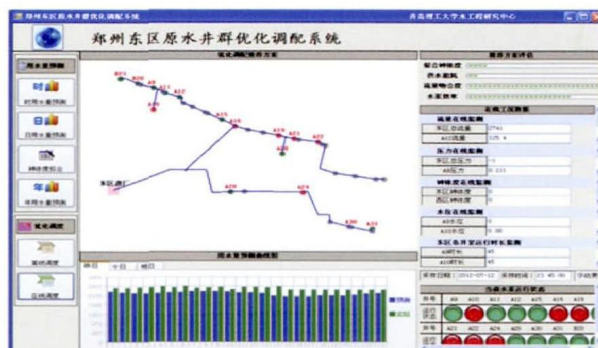
在水厂现在处理工艺基础上引入原位生成的铁锰复合氧化物负载在滤池滤料表面，通过其氧化作用将水中难以去除的As(Ⅲ)转化为易于去除的As(V)，通过其吸附作用将水中As(V)吸附形成颗粒态砷；进一步地，颗粒态砷在后续的接触过滤单元中得以过滤去除。该技术处理成本增加小于0.05元/m³，适用于中大型地下水水厂。



通过中试试验，确定了药剂组合、药剂投加比例以及滤池滤料组分。

通过前期背景调查与数值模拟，掌握了郑州水源地地下水砷的分布规律。

- 滤料：石英砂
- 过滤速度：10.2m/h
- 单池面积：48.6m²
- 滤层厚度：1.2m
- 承托层厚度：0.6m
- 滤料粒径：0.6-1.0mm
- 冲洗类型：单独水冲
- 冲洗强度：16-18L/s.m
- 配水管：Φ100mm
- 管距：300mm
- 孔径：Φ9mm
- 孔距：160mm



在东周水厂进行了生产性试验，完成除砷机理验证、处理水砷、铁、锰等指标去除效果分析。

完成原水井群优化调配系统软件，该软件可实现在线监测数据查询、用水量预测、各水井砷浓度拟合、优化调度及调度方案评估等功能，有效降低了后续工艺负荷。



通过中试研究、生产性试验研究以及示范工程应用，完成不同进水条件下砷、铁、锰等去除效果的评价，分析投加铁锰氧化物强化除砷的机理，确定适用于现行处理单元特点的强化除砷技术，形成技术可靠、经济成本最优的除砷技术。该技术易于应用，无需大规模工程改造即可有效强化砷的去除，且除砷效果明显优于石灰法和膜技术，处理成本远低于国际上的颗粒吸附剂—固定床技术。该技术的研究为水厂砷浓度异常超标情况下砷浓度可稳定在0.01mg/L以下提供了技术性保障。

