

doi:10.3799/dqkx.2012.024

再生水地表回灌补给地下水的水质安全保障体系

靳孟贵, 罗泽娇, 梁杏, 鲍建国, 李民敬, 李平

中国地质大学生物地质与环境地质国家重点实验室, 湖北武汉 430074

摘要: 把城市污水净化处理为符合回灌标准的再生水并安全回灌补给地下水, 对于实现污水资源化、含水层恢复、缓解我国水资源供需矛盾和环境污染态势具有重要意义。针对再生水回灌地下水存在的水质安全问题, 通过理论分析、系列实验和技术集成形成了再生水地表回灌补给地下水的水质安全保障体系及关键技术。该安全保障体系包括场地选择与勘查、高效低成本的再生水处理技术、土壤—含水层系统数学模型和回灌方案设计技术、水质监控系统、安全评价技术以及回灌管理法规等。这些要素相互依赖、相互作用, 构成一个完整的体系。郑州郊区示范工程证实了该水质安全保障体系的可行性。2年示范工程表明, 处理的再生水水质达到《城市污水再生利用 地下水回灌水质》(GB/T 19772-2005)标准, 优于场地背景地下水水质, 补给含水层后的地下水基本达到《地下水质量标准》(GB/T 14818-1993)Ⅲ类水标准。建议有关政府部门把再生水利用及回灌补给地下水, 纳入水资源开发利用及环境保护规划的整体框架中, 尽快制定或完善再生水回灌补给地下水的相关法律、法规和标准体系, 建立再生水回灌许可证制度, 有序推进再生水回灌工程。

关键词: 再生水; 地下水; 人工补给; 地表回灌; 水质安全; 水文地质; 环境工程。

中图分类号: X143

文章编号: 1000-2383(2012)02-0238-09

收稿日期: 2010-09-12

Security System of Water Quality for Groundwater Recharge with Infiltration Basin and Reclaimed Water

JIN Meng-gui, LUO Ze-jiao, LIANG Xing, BAO Jian-guo, LI Min-jing, LI Ping

State Key Laboratory of Biogeology and Environmental Geology, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

Abstract: It is significant to ensure safe aquifer recharge using reclaimed water that meets the safety requirement for the sake of recovering aquifer depletion, relieving the conflict between water demand and supply, and controlling the serious environmental pollution in China. To improve the water quality of artificial recharge of groundwater using reclaimed water, we develop a security system of water quality for groundwater recharge with infiltration basin and reclaimed water and key technologies based on a series of experiments and theoretic analysis including the recharge site selection and investigation, higher-efficiency and low-cost wastewater treatment technologies, mathematical models of soil-aquifer system and the design of recharge and pumping schemes, monitoring and controlling system of water quality, safety assessment, regulations and standards, and so on. These key factors are interactive and interdependent. The pilot project in Zhengzhou demonstrates the feasibility of the security system of water quality for groundwater recharge with infiltration basin and reclaimed water, with a two-year operation showing that the water quality of the reclaimed water by the waste water treatment system satisfies the surface recharge requirement in the standard of (GB/T 19772-2005) and is better than that of the original groundwater at the site, and groundwater quality after recharge basically reaches grade III of groundwater quality (GB/T 14818-1993). It is suggested to integrate the use of reclaimed water and artificial recharge of groundwater with the utilization of water resources and environmental protection planning, to make and issue relative laws, regulations and standards, and to establish permission regulation on artificial aquifer recharge as soon as possible so as to promote artificial aquifer recharge using reclaimed water.

Key words: reclaimed water; groundwater; artificial recharge; surface recharge; water quality safety; hydrogeology; environmental engineering.

基金项目: 国家高技术研究发展计划(No. 2007AA06Z337); 高等学校博士学科点专项基金(No. 20100145110010).

作者简介: 靳孟贵(1957-), 男, 教授, 主要从事地下水与环境的教学与科研工作. E-mail: mgjin@cug.edu.cn

我国水资源紧缺,尤其是北方供需矛盾日趋尖锐.因超采导致地下水位持续下降及大规模水位降落漏斗(Lu *et al.*, 2011),由此衍生地面沉降、海水入侵、岩溶塌陷、地裂缝、水质恶化、植被退化、土地沙化等一系列环境问题.在一些城市,地下水过量开采还对建筑物、道路交通、给排水管道系统、防洪设施等造成诸多危害.同时,城市污水排放严重威胁着地表水和地下水水体质量.据住房和城乡建设部建城[2011]61号文,截至2011年3月底,全国设市城市、县累计建成城镇污水处理厂2996座,处理能力达1.33亿m³/d.污水处理厂出水数量非常巨大,但目前利用程度不高.污水处理厂二级处理出水依然含有一定浓度的污染物,一般直接排入邻近地表水体,对地表水甚至地下水产生不良影响,致使许多地表水体水质恶化.污水处理厂二级出水经过适当处理可达到《城市污水再生利用 地下水回灌水质》(GB/T 19772-2005)标准.因此,把城市污水净化处理为符合回灌标准的再生水并安全回灌补给地下水,对于实现污水资源化、含水层恢复、缓解水资源供需矛盾和环境污染态势具有重要意义.

再生水在回灌补给地下水的过程中,经土壤—含水层系统(soil aquifer treatment, SAT)的自然净化,水质可进一步改善,同时可增加含水层的补给量和储存量;回灌到含水层的地下水经过一段时间后,可以回采用于不同用途的供水.其次,在超采地下水引起地面沉降或海水入侵的地区,利用再生水补给地下水,可以减缓海水入侵、地面沉降等地质环境问

题(Maliva and Missimer, 2010).但是,再生水中的部分有害物质可能进入含水层,影响地下水水质安全(Laws *et al.*, 2011).因此,如何建立再生水清洁水链、保证再生水补给含水层后的水质安全,是再生水补给地下水的核心.研发再生水补给地下水的水质安全保障技术,并开展示范试验,对于指导再生水利用和地下水人工补给工程,促进水资源的循环和可持续利用,以及我国社会、经济的发展和环境保护具有重要战略意义.

针对再生水回灌地下水存在的水质安全问题,通过理论分析和技术研发,形成了再生水地表回灌补给地下水的水质安全保障体系(图1).该水质安全保障体系包括场地选择与勘察、高效低成本的再生水处理技术、土壤—含水层系统数学模型和回灌—开采方案设计技术、水质监控系统、安全评价技术以及管理法规等.这些环节相互依赖、相互作用,具体回灌工程的建设 and 实施是一个系统工程,本文仅论述其要点.

1 场地选择与勘察

1.1 回灌场地选择原则

选择合适的场地,是再生水地表回灌工程成败的关键(云桂春等,2004).场地选择要考虑的主要因素包括足够的再生水源水、合适的水文地质条件、可用于地表回灌的土地,以及便于施工输送再生水到达回灌场地的渠道或管道施工条件.

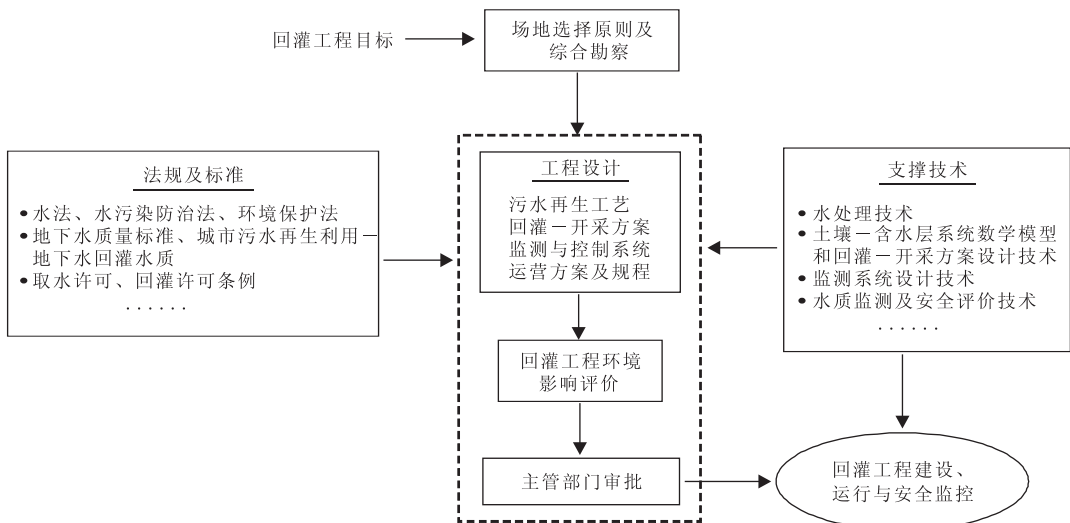


图 1 再生水地表回灌补给地下水的水质安全保障体系构成

Fig. 1 Security system of water quality for groundwater recharge with infiltration basin and reclaimed water

要考虑的水文地质条件主要包括含水层储存空间及边界条件(地质边界和水力边界)、含水层岩性(空隙率和渗透系数)、含水层规模和埋深、地下水的补给和排泄条件等(Bouwer, 2002). 理想的场地一方面要求含水层能快速接收并储存大量回灌水且自然排泄不快或具备有利的储水构造, 以及较好的回采条件; 另一方面要求原含水层水质较好, 能满足某种用途(最好为地下水质量标准 III 类水或更好的水); 还要求回灌场地包气带具备合适的岩性和厚度, 如土层具有一定的渗透性和过滤性、没有极低渗透层阻止回灌水入渗补给潜水、没有因干燥而易形成优先通道的膨胀土层使再生水直接进入含水层、有足够的粘土或者富含有机物的沉积物、具可利用的碳源等.

1.2 回灌场地勘察

在初步确定回灌场地后, 需要开展区域资料收集与分析、场地综合勘察、实验和评价工作, 查明场地气象水文条件、地层岩性及其含水性和渗透性、潜水位埋深、包气带土层结构及其物理化学性质. 现场勘察主要有水文地质钻探、抽水试验、入渗试验、水土样品采集等. 室内测试分析主要包括: 土壤颗粒组成、土壤饱和及非饱和渗透系数、水分特征曲线、水土常规化学组分和污染组分(重金属、有机物、三氮, 以及生物学指标等). 具体工作细则和方法可参阅有关规范, 如《供水水文地质勘察规范》(GB50027-2001)、《岩土工程勘察规范》(GB50021-2001)等.

完成场地勘察、实验与测试等工作后, 需编制可行性论证报告, 并提出回灌场地设计建议. 根据实际场地特征设计回灌注地深度和回采井位置. 在包气带入渗能力差的条件下, 可增加回灌注地深度或设计包气带浅井(或渗沟等), 使再生水回灌接近高渗透性土层, 提高入渗回灌能力.

2 污水再生(水处理)工艺设计——廉价高效的再生水处理技术

以城镇污水处理厂二级处理出水为水源, 其水质达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918-2002)一级 B 标准. 用于回灌的再生水水质需要达到《城市污水再生利用 地下水回灌水质》(GB/T 19772-2005)标准. 对比以上 2 个标准关于 COD、BOD₅、SS 或浊度、氨氮、粪大肠菌群数、总磷(TP)等基本控制项目的限值可知, 二级处理排水

(达到一级 B 标准)需要进一步净化才能达到《城市污水再生利用 地下水回灌水质》(GB/T 19772-2005)标准要求.

本课题研发形成的水处理工艺流程为: 源水→集水池→混凝反应池→斜管沉淀池→纤维球过滤罐→吸附罐→臭氧消毒→出水调节池. 城镇污水处理厂二级处理排水(水质达到一级 B 标准)经过上述处理工艺, 其出水水质可满足《城市污水再生利用 地下水回灌水质》(GB/T 19772-2005)地表回灌标准要求.

在上述工艺中重点利用天然矿物研发了廉价、高效、安全的絮凝剂(潘洁等, 2011)和吸附剂; 其次是各环节参数优化和技术集成; 另外, 在示范工程流程中增加了湿地处理环节.

2.1 改性膨润土絮凝剂

利用膨润土的阳离子交换、吸附和无毒等特性, 选取天然膨润土作为絮凝剂原料. 经过原料提纯、筛分、改性等技术疏通膨润土层间通道, 扩大膨润土层间距, 提高膨润土吸附能力, 增强改性膨润土对污水的处理效果, 筛选出适合于再生水处理的絮凝剂(鲍建国等, 2009).

改性膨润土对某污水处理厂二级出水净化能力的研究表明, 微波加硫酸铁(WFE)改性膨润土对高锰酸盐指数(I_{Mn})去除能力很强, 对总磷去除能力较强(潘洁等, 2011). 为验证 WFE 改性膨润土对水质波动的适应性, 将其用于净化生活污水, 浊度去除率 92%~99%, I_{Mn} 去除率 77%~86%, TP 去除率 80%~94%. 可见, WFE 改性膨润土对生活污水浊度、 I_{Mn} 和 TP 这三类污染组分具有较强且稳定的净化能力, 出水水质能达到《城市污水再生利用 地下水回灌水质》(GB/T 19772-2005)标准中的地表回灌水质要求. 改性膨润土对污水 pH、电导率没有明显影响, 对总氮(TN)和氨氮的处理能力相对较弱. 总之, WFE 改性膨润土对某污水处理厂二级出水、某生活污水均有较强的净化能力.

2.2 斜发沸石改性及其对氨氮的去除

沸石主要通过离子交换作用和吸附作用去除氨氮. 离子交换作用主要去除污水中离子态的氨氮; 吸附作用主要去除污水中分子态的氨氮. 采用不同方法(NaCl、焙烧、微波、NaCl+微波、微波+NaCl)对天然斜发沸石改性实验发现, 与天然斜发沸石原矿相比, 除焙烧改性对氨氮去除率没有提高外, 其他 4 种改性斜发沸石的吸附饱和量和氨氮去除率均升高, 其中微波+NaCl 改性去除率最高. 此外, 通过改

性影响因子系列实验得出微波+NaCl改性的最佳改性参数。

将不同氨氮含量的废水分别流经装填有改性沸石的有机玻璃柱,并在不同出水时间取样测定关注组分.结果表明,当进水氨氮浓度为0.32 mg/L时,改性斜发沸石对氨氮没有去除效果;当进水氨氮浓度为0.61 mg/L时,有一定的去除效果.当改用氨氮浓度为6.23 mg/L的贾鲁河水时,出水氨氮浓度接近1 mg/L,去除率80%以上,基本达到《城市污水再生利用 地下水回灌水质》(GB/T 19772-2005)地表回灌氨氮限值1 mg/L的要求.当改用污水处理厂二级处理出水(氨氮浓度1.73 mg/L)或人为提高氨氮至12.64 mg/L时,出水氨氮浓度均小于1 mg/L.

改性斜发沸石达到饱和后其吸附能力随之消失,通过物理(逆流动态再生方式)或化学方法(如NaCl、NaOH)对其进行再生处理,使其恢复吸附和交换能力,继续使用.此举既可节约成本,又可保护环境.

3 回灌—开采方案设计技术

系列土柱再生水回灌实验表明,砂质壤土对污水中重金属、总磷、总氮(张沙沙等,2010)、微生物(Lian *et al.*, 2011)有一定的去除效果.包气带土壤主要通过吸附和微生物的降解去除氨氮.微生物活动频繁时,其代谢产物大分子胞外聚合物易堵塞孔隙,造成土柱渗透系数下降,水力停留时间增长,有利于包气带对氮素的降解,但不利于入渗.干湿交替回灌条件下,停止回灌后,包气带有良好的好氧环境,积累在土壤中的氨氮通过硝化作用生成硝态氮和亚硝态氮;再次回灌初期,水流淋洗造成出水硝态氮含量猛增.干期越长,硝化作用越强烈(张沙沙等,2010;张沙沙,2011).

郑州场地再生水回灌实验表明,采用干湿交替的地表回灌方式,控制合适的干湿周期调控包气带含水量及气体、氧化还原条件、微生物等物理化学和生物条件,可防止入渗孔隙堵塞、持续保持土壤—含水层系统的净化能力和适当的入渗能力.回灌田块与回采井位置影响着再生水在含水层中的停留时间,可采用井流力学或数值模拟模型计算设计.通常根据场地水文地质条件和实验参数,建立饱和和非饱和水流与溶质运移模型设计回灌—开采方案.

基于以上土柱及野外场地再生水回灌实验,笔者研发了一维饱和非饱和及三维饱和水流、多组分

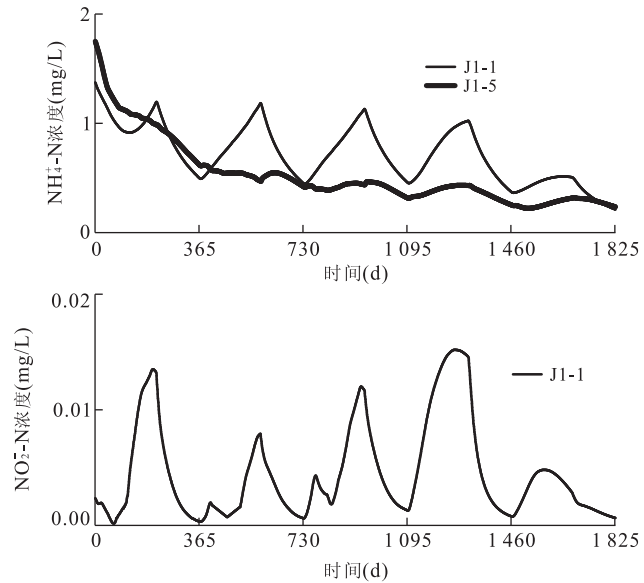


图2 观测孔中 NH_4^+ -N 和 NO_2^- -N 浓度变化趋势(据李平,2011)(J1-1 和 J1-5 为监测井编号)

Fig. 2 Predicted changes of NH_4^+ -N and NO_2^- -N in observation wells

溶质运移模型,用于分析再生水回灌条件下典型污染物在包气带和饱水带的迁移、转化规律及其对当地地下水水质水量的影响,优化设计再生水地表回灌及开采井回采方案.模型主要考虑对流、弥散、吸附、硝化、反硝化等作用对氮素运移和转化的影响.

一维饱和和非饱和水流和溶质运移模型用 HYDRUS 软件(Šimůnek *et al.*, 1998, 2007)实现,主要模拟不同回灌量及不同干湿交替回灌周期,分析入渗及污染物迁移转化特征,遴选满意回灌方案.饱和带水流和溶质运移模型分别用 FEFLOW 和 Visual MODFLOW 软件包实现.一维非饱和水流和溶质模型的下边界输出作为饱和带模型的输入.饱和带模型用于模拟不同回灌及开采方案的含水层响应,遴选满意回灌—开采方案.图2为模拟预测的郑州再生水回灌场地含水层 NH_4^+ -N 和 NO_2^- -N浓度变化趋势(李平,2011).

4 监测系统

合理有效的监测系统是适时掌控再生水回灌系统运行和补给含水层动态的前提.监测系统包括人工定时监测、在线实时监测以及预警等子系统.

(1) 人工定时监测:该监测项目主要为 GB/T 19772-2005规定的21个基本控制项目、52个选择性控制项目.监测项目和频次按预先监测、过程

监测、后监测略有不同。预先监测包括源水水质、地下水水质和水位等,为确定再生水工艺和回灌方案提供依据;过程监测和后监测,根据相关规定要求,兼顾各指标的特征和检测实施难度、时耗,确定各监测项目每天、每周、每月等不同级别的监测频次。

(2)在线监测:再生水回灌补给地下水后,对地下水水质产生的影响及水质发生的变化过程可通过水质在线监测系统实时监控,及时准确地掌握整个系统中低概率和影响大的污染事件,并向再生水厂及管理部门提出有效的应急措施。在线监测系统是(水质)预警系统的重要组成部分,是预警应急的信息来源。水质在线监测系统安装位置的确定原则,因水质预警对象不同而不同。在取水口之上一定距离范围内偶发性污染发生概率极低情况下,尽可能将源水水质监测点建于取水口上游足够远的地方,保证对偶发污染具有一定长度的预警时间。地下水水位、水质在线监测系统,应按回灌水入渗过程和地下水流场及水质分布特征设计。地表回灌还应该在包气带中布设在线监测,如含水量、pH 和温度等。

(3)预警系统:当水质在线监测系统发现水质异常状况后,通过数据传输系统将相关信息上报到设在系统管理中心的预警系统。预警系统收到相关信息后,立即对水质异常信息进行统计、分析,确定污染事件特征,制定处理方案,再由通讯系统将既定处理方案传达给应急处理系统,由应急处理系统最终实施应急方案。常见的应急措施包括:关闭进水口,停止回灌;强化再生水常规工艺去除污染物等。理想的(水质)预警系统应该有如下特点:反应时间短、自动化高、可远程操作、对污染物高度敏感、对广泛的污染物具有特定反应特性、对可能污染水样可自动保存、预警错误频率低、对运行维护人员技术要求低、重现性高、监测频率较高且经济耐用(ASCE/AWWA, 2006)。

5 再生水地表回灌工程环境影响评价及水质安全评价

5.1 回灌工程环境影响评价

再生水回灌补给地下水是否对环境产生影响,需作回灌工程环境影响评价,以帮助我们采取合理措施保证再生水回灌补给地下水的安全。根据常规建设项目的环境影响要求,回灌工程属于水利工程项目,其环境影响评价参照水利工程项目

的环境影响评价内容(程胜高等,2005;环境保护部,2011)。

(1)评价范围:以再生水处理及回灌补给区域为主,兼顾地下水流场所影响的范围。(2)评价期限:分别对再生水回灌工程建设期、运行期以及运行后进行评价。(3)评价重点:施工期评价重点为因施工、人员进驻和地貌改变而引发的环境污染、土地生产能力变化,以及施工对自然和人文遗迹及人群健康的影响等。运行期评价重点为工程运行可能引发的地下水水质、土壤环境质量、陆地水域景观和水文循环的变化以及盐渍化、湿地变化等环境问题。(4)保护和恢复措施:针对施工期与运行期主要的环境影响制定保护和修复措施。(5)成果:环境影响评价报告。

5.2 再生水回灌补给地下水工程的安全评价技术

再生水回灌补给地下水工程的安全评价,主要针对再生水回灌补给地下水工程的脆弱性。也就是对原水再生过程及回灌补给地下水各个环节的薄弱点和易受攻击的部位或环节,进行脆弱性分析;评价该工程能保证正常运行和维护系统安全的能力(如满足水质、水量的要求等),为水质安全保障提供技术支撑。由于涉及的环节众多,这项评价工作一般只选择系统的重要环节进行,如源水水质、输水管或渠道、水再生工厂和土壤含水层系统;同时还应考虑与该系统正常运行的周边条件、部门安全及协作等因素(ASCE/AWWA, 2006)。脆弱性评价可参照美国饮用水供水系统安全敏感性评价方法(ASDWA, 2002),结合再生水回灌补给地下水的特殊性和我国国情进行。

再生水中存在的微量有害物质、病原微生物和不利物理因子,影响着再生水的安全利用。再生水回灌补给地下水的过程中,这些微量有害物质可能进入含水层,影响地下水水质安全。再生水回灌补给地下水后在含水层约停留半年后将被回采,最为严格的水质要求是满足《生活饮用水卫生标准》(GB5749-2006)。因此,该安全评价就是基于人类健康风险评价(US NRC, 1983),可参照世界卫生组织(WHO)推荐的方法(WHO, 2011),结合我国具体情况开展再生水回灌补给地下水的安全评价。

再生水水质安全评价指标主要是《城市污水再生利用 地下水回灌水质》(GB/T 19772-2005)规定的 21 个基本控制项目与 52 个选择性控制项目及其限值。此外,我们通过具有较长污水灌溉历史的农作物区土壤和地下水环境调查,筛选了以下代表性补充项目:可吸附有机卤素(AOX)、茈、菲、萘烯、荧蒽、蒽、芘、苯胺、亚硝酸盐、粪大肠菌群数等(孙强等,2010;郑伟林

等,2010)。以回灌补给后的地下水作为饮用水目标,开展上述水质安全指标对人体的健康风险评价,根据风险水平判断水质安全与否,为保障再生水回灌补给地下水的水质安全提供决策依据。

6 法规保障体系

目前我国还没有健全的再生水回灌补给地下水的专门法规和标准,只有几个相关标准,即《城镇污水处理污染物排放标准》(GB18918-2002)、《城市污水再生利用 地下水回灌水质》(GB/T 19772-2005)。与再生水和地下水有关的法规、规范或标准主要有《中华人民共和国水法》、《中华人民共和国水污染防治法》、《中华人民共和国环境保护法》、《取水许可和水资源费征收管理条例》、《地下水质量标准》(GB/T 14818-1993)等。

为了确保再生水回灌补给地下水的水质安全,建议国家或地方有关部门,制定相关法规或指南,建立再生水回灌许可证制度,依照章法有序推进再生水回灌工程,避免出现地下水水质安全隐患或事故。

7 郑州再生水地表回灌示范工程

郑州再生水回灌工程场地位于郑州市东北城郊金水区祭城乡北录庄村北,郑州渔场东南。贾鲁河经场地西部,其上游河段有几个污水处理场出水排入该河。回灌工程,由人工湿地、水处理、回灌和监测等部分组成。由贾鲁河引水通过人工湿地初步净化,随后将湿地末端出水引入水处理系统进一步净化,使其达到再生水地表回灌标准后通过地表回灌系统回灌补给地下水。回灌的地下水通过回采井或鱼塘水井回采。示范工程运行期为2009年7月~2010年11月。

7.1 人工湿地工程

人工湿地工程主要由进水、强化净化池、一级湿地、二级湿地构成。用提水泵将贾鲁河污水送至强化净水池净化,再分别进入一、二级湿地,最后汇入低位蓄水池,通过提水泵引入水处理系统,多余的水抽排至排水渠返回贾鲁河。一级湿地由挺水植物组成,包括狭叶香蒲、荆三棱和茭草。二级湿地由沉水植物、浮水植物和挺水植物组成;沉水植物有大茨藻、狐尾藻,浮叶植物有壅菜,挺水植物有西伯利亚鸢尾和水生美人蕉。秋季在二级湿地增种了沉水植物黑

藻。冬季,一级湿地增种了菹草,二级湿地增种了菹草和伊乐藻(郭萧,2010)。2010年春季,二级湿地壅菜被莲藕替换。

7.2 水处理系统

示范工程水处理系统包括混凝沉淀、过滤、吸附、消毒4个单元。每个处理环节均布设了采样监测点。过滤和吸附达到饱和后,采用气冲与水冲相结合的方式反冲洗,气冲和水冲各5 min左右交替进行,多次循环直至反冲洗水澄清为止。示范工程水处理系统污水处理能力为13 m³/h。每日监测进水、混凝沉淀、过滤、吸附、消毒等环节的水质。

7.3 再生水回灌及监测系统

回灌系统主要有输水管网、灌水处理阀门、水表及回采抽水井等部分组成。为防止回灌场地SAT系统堵塞,共设计了4块回灌田轮流回灌。监测系统包括不同深度监测取样井孔17眼、包气带水分Trime监测剖面4个、包气带土壤水取样器11个,以及简易气象站。监测内容包括回灌水量、包气带含水量、不同深度地下水水位等。气象观测包括降水、蒸发、湿度、最高、最低气温等。水质监测项目为《城市污水再生利用 地下水回灌水质》(GB/T 19772-2005)中规定的21个基本控制项目与52个选择性控制项目。

7.4 水处理各个环节及整体净化效果

运行期水处理各环节及整体净化效果较好。监测结果表明,湿地出水或水处理进水的氯化物(Cl⁻)、硫酸盐(SO₄²⁻)、硝酸盐(NO₃⁻)、浊度和TP已低于回灌水质中的地面回灌标准限值。经过水处理后出水的浊度和TP远低于标准限值。在水处理各个环节pH和电导率变化不大。与进水相比,出水I_{Mn}有明显降低。贾鲁河水经湿地和水处理工艺净化后水质总体达到地下水回灌水质中的地表回灌标准要求。监测数据表明,水处理出水的浊度、pH、硫酸盐、氯化物、阴离子表面活性剂、COD(或I_{Mn})、硝酸盐、亚硝酸盐、氨氮、总磷、氰化物、硫化物和粪大肠菌群等各项指标均达到或低于《城市污水再生利用 地下水回灌水质》(GB/T 19772-2005)地表回灌标准限值要求(表1)。

如表2所示,郑州示范场地水处理进水浊度均低于10 NTU。虽然进水COD小于40 mg/L,但是经过水处理系统处理后,有机物含量仍然显著降低,如I_{Mn}去除率平均达到59%;各个环节中,絮凝阶段对有机物去除效果最为明显。虽然进水TP小于1.0 mg/L,但是该处理系统对TP仍然有明显去除,

表 1 2009 年 11 月 3 日郑州示范场地水处理系统进出水水质情况

Table 1 Water quality of inflow and outflow of waste water treatment system in Zhengzhou site, November 3th, 2009

取样位置	水温(°C)	pH 值	TN(mg/L)	NH ₄ ⁺ -N(mg/L)	NO ₃ ⁻ -N(mg/L)	COD _{Cr} (O ₂ , mg/L)	TP(mg/L)	TOC(mg/L)
水处理进水	16	7.49	9.83	1.49	6.78	8.24	0.74	5.93
回灌水	16	7.68	8.96	0.84	6.88	6.61	0.42	7.86
地表回灌标准		6.5~8.5	16.02	1.0	15	40	1.0	

取样位置	阴离子表面活性剂(μg/L)	氰化物(mg/L)	硫化物(mg/L)	Cr ⁶⁺ (mg/L)	AOX(μg/L)	苯胺(mg/L)	粪大肠菌群(个/L)
水处理进水	40	<0.004	<0.02	<0.004	67	0.11	9 200~16 000
回灌水	<25	<0.004	<0.02	<0.004	未检出	0.06	80~130
地表回灌标准	300	0.05	0.2	0.05		0.1	1 000

注:总氮(TN)是硝态盐、亚硝态盐和氨氮均以 N 计的总和(下同). COD_{Cr}低于国标 HJ/T 399-2007 测定下限 15 mg/L,数据仅作参考。

表 2 郑州示范场地水处理系统进出水水质部分监测结果

Table 2 Selected observations on water quality of inflow and outflow of the waste water treatment system at Zhengzhou site

日期	采样环节	pH	浊度(NTU)	I _{Mn} (O ₂ , mg/L)	TN(mg/L)	NH ₄ ⁺ -N(mg/L)	NO ₃ ⁻ -N(mg/L)	NO ₂ ⁻ -N(mg/L)	TP(mg/L)
2009-10-26	1	7.61	1.4	7.68	11.06	3.18	—	0.421	0.28
	5	7.73	0.7	2.94	9.77	0.69	—	0.020	0.02
2009-10-29	1	7.50	0.4	6.50	9.14	3.56	—	0.421	0.28
	5	7.57	0.4	4.10	8.64	0.58	—	0.006	0.04
2009-11-10	1	7.36	1.1	7.33	11.85	1.73	—	0.231	0.81
	5	7.51	0.2	4.35	10.54	0.79	—	0.014	0.16
2010-6-10	1	7.85	2.8	9.62	4.62	3.32	1.03	0.107	0.79
	5	7.71	2.8	3.41	3.85	0.57	2.43	0.003	0.04
2010-7-13	1	8.08	3.6	—	2.02	0.78	0.80	0.036	—
	5	7.87	1.8	—	1.81	0.65	0.99	0.017	—
2010-8-18	1	7.79	2.1	—	1.70	0.31	0.46	0.217	—
	5	7.98	1.4	—	1.86	0.27	0.70	0.020	—
2010-9-8	1	7.84	0.6	—	5.59	1.56	1.63	0.194	—
	5	7.77	1.0	—	5.11	0.64	1.42	0.016	—
2010-11-2	1	8.16	0.1	6.11	9.32	0.61	4.15	0.099	0.21
	5	8.12	2.4	2.75	8.12	0.69	4.15	0.006	0.02
2010-11-6	1	8.19	0.2	6.41	9.12	0.74	5.26	0.094	0.12
	5	8.11	0.1	2.73	7.51	0.57	4.78	0.009	0.03
地表回灌标准		6.5~8.5	10		NA	1.0	15	0.02	1.0

注:1 表示处理前(湿地出水);5 表示处理后(回灌水);“—”表示缺测。

去除率最高 95%, 平均 89%, 出水 TP 比 GB/T 19772-2005 规定的地表回灌 TP 标准限值低一个数量级。经絮凝沉淀工艺的出水氨氮、亚硝酸盐、粪大肠菌群等有时不能满足地表回灌标准要求, 臭氧消毒阶段可有效去除亚硝酸盐和粪大肠菌群, 改性斜发沸石+活性炭可有效去除氨氮。

郑州再生水回灌示范工程表明以上人工湿地—水处理—地表回灌—回采—监测评价的再生水回灌技术体系具有较好的可行性和适用性。

8 结论与建议

基于系列实验及场地示范工程, 研发与集成了再生水地表回灌补给地下水的水质安全保障体系, 郑州场地示范工程证实了该水质安全保障体系的可行

性, 得到以下结论:

(1) 合理的回灌场地和回灌方式、经济有效的水处理工艺、完善的水质监测系统、慎密的环境影响与安全评价技术, 以及有力的管理体系, 是保障再生水回灌补给工程安全的基础。再生水地表回灌补给地下水是一个系统工程, 其水质安全保障体系, 包括再生水处理、土壤—含水层系统数学模型及回灌—开采方案设计、水质监控、安全评价技术以及回灌管理法规等。具体工程实施要结合再生水水源水特点、区域水文地质及场地条件来选择场地、设计方案并进行环境影响评价, 运行过程要严格执行有关技术标准。有条件的地区, 应尽量与湿地等生态景观工程结合。

(2) 基于微波加硫酸亚铁(WFE)改性膨润土絮凝剂和天然斜发沸石离子交换吸附材料集成的絮凝沉淀—过滤—吸附—臭氧消毒的水处理工艺可有效

去除污水处理厂二级出水的污染物,使出水达到再生水地表回灌的水质要求。

(3)基于系列土柱及野外场地再生水回灌实验,建立的饱和和非饱和水流、多组分溶质运移模型,可用于优化设计再生水地表回灌方案及开采井回采方案,分析预测不同回灌方案对当地地下水水质水量的影响。

(4)在郑州郊区建立了规模 $13 \text{ m}^3/\text{h}$ 的再生水处理一回灌地下水中试生产线。建立的由人工湿地、水处理、地面回灌及监测等组成的示范工程,通过近2年的运行实践表明,处理的再生水水质达到了再生水地表回灌标准,好于场地原背景地下水水质,补给含水层后的地下水基本达到了地下水质量标准Ⅲ类水要求。采用干湿交替的地表回灌方式,控制合适的干湿周期调控包气带含水量及气体、氧化还原条件、微生物等物理化学和生物条件,可防止入渗孔隙堵塞、持续保持土壤—含水层系统的净化能力和适当的入渗能力。

(5)合理有效的监测系统是适时掌控再生水回灌系统运行和补给含水层动态的前提。监测系统包括人工定时监测、在线实时监测以及预警系统等。再生水回灌工程应按《城市污水再生利用 地下水回灌水质》(GB/T 19772-2005)标准规定的21个基本控制项目与52个选择性控制项目及本研究增补的项目,严格监控水质动态。

建议有关政府及管理部门把再生水利用及地下水人工调蓄,纳入水资源开发利用及环境保护规划的整体框架中,并对回灌技术研发、工程实施与监测等工作给予持续支持和监管;在有条件的地区大力推广再生水回灌工程,并尽量与湿地等生态景观工程结合。尽快制定或完善再生水回灌的相关法律、法规和标准,建立再生水回灌许可证制度,有序推进再生水回灌工程,避免出现地下水水质安全事故或隐患。

致谢:感谢课题组马腾教授、刘慧教授、孙蓉琳副教授、李国卿高工、王志录高工等以及许多博士、硕士研究生的辛勤劳动和卓有成效的合作;感谢郑州市供水节水办公室的友好合作,以及郑州市水务局、河南省地质调查院、河南省第二水文地质工程地质队等单位的大力支持。

References

American Society of Civil Engineers/American Water Works Association, 2006. Guidelines for the physical security

of water utilities. ASCE/AWWA Draft American National Standard for Trial Use.

Association of State Drinking Water Administrator, National Rural Water Association, 2002. Security vulnerability self-assessment guide for small drinking water systems. <http://www.asdwa.org/index.cfm?fuseaction=page.viewPage&pageID=733>

Bao, J. G., Pan, J., Jin, M. G., et al., 2009. A method for preparing modified bentonite flocculating agent, Patent number ZL 200910272440. 1, Publication number CN 101693540 B. State Intellectual Property Office of the People's Republic of China (in Chinese).

Bouwer, H., 2002. Artificial recharge of groundwater: hydrogeology and engineering. *Hydrogeology Journal*, 10(1): 121-142. doi:10.1007/s10040-001-0182-4

Cheng, S. G., Luo, Z. J., Zeng, K. F., 2005. Environmental ecology. Chemical Industry Press, Beijing (in Chinese).

Guo, X., 2010. Study on purification effect of ladder-shaped floodplain wetlands simulation experiment (Dissertation). Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing (in Chinese).

Laws, B. V., Dickenson, E. R. V., Johnson, T. A., et al., 2011. Attenuation of contaminants of emerging concern during surface-spreading aquifer recharge. *Science of the Total Environment*, 409(6): 1087-1094. doi:10.1016/j.scitotenv.2010.11.021

Li, P., 2011. Numerical simulation of the migration and transformation of nitrogen in soil and groundwater under reclaimed water recharge (Report for Postdoc Research). China University of Geosciences, Wuhan (in Chinese).

Lian, J. J., Luo, Z. J., Jin, M. G., 2011. Transport and fate of bacteria in SAT system recharged with recycling water. Science Paper online. <http://www.paper.edu.cn/index.php/default/releasepaper/content/201104-503>

Lu, X. H., Jin, M. G., van Genuchten, M. T., et al., 2011. Groundwater recharge at five representative sites in the Hebei plain, China. *Ground Water*, 49(2): 286-294. doi:10.1111/j.1745-6584.2009.00667.x

Maliva, R. G., Missimer, T. M., 2010. Aquifer storage and recovery and managed aquifer recharge using wells: planning, hydrogeology, design, and operation. Schlumberger Water Services.

Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China, 2011. Technical guidelines for environmental assessment: groundwater environment HJ 610-2011. China Environmental Science Press, Beijing (in Chinese).

- Pan, J., Bao, J. G., Jin, M. G., et al., 2011. Modified bentonite for secondary effluent water from wastewater treatment plant. *Environmental Science & Technology*, 34(5): 140–143 (in Chinese with English abstract).
- Šimůnek, J., Šejna, M., van Genuchten, M. Th., 1998. The Hydrus-1D software package for simulating the one-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably-saturated media. U. S. Salinity Laboratory, Agricultural Research Service, U. S. Department of Agriculture.
- Šimůnek, J., Šejna, M., van Genuchten, M. Th., 2007. The HYDRUS software package for simulating the two- and three-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably-saturated media. User Manual Version 1.02. University of California Riverside, Riverside.
- Sun, Q., Ma, T., Qi, Z. C., et al., 2010. Spatial distribution characteristics of heavy metal elements in unsaturated zone of sewage irrigation area: a case study of sewage irrigation area in Taiyuan. *Geological Science and Technology Information*, 29(3): 86–90 (in Chinese with English abstract).
- US National Research Council, 1983. Risk assessment in the federal government: managing the process. National Academy Press, Washington DC.
- World Health Organization, 2011. Guidelines for drinking-water quality. IWA Publishing ISBN:9781780400303.
- Yun, G. C., Cheng, X. Z., et al., 2004. New strategy of water resource management: artificial recharge of groundwater. China Architecture & Building Press, Beijing (in Chinese).
- Zhang, S. S., 2011. Geochemical processes of nitrogen in the saturated-unsaturated zone during reclaimed water infiltration (Dissertation). China University of Geosciences, Wuhan (in Chinese).
- Zhang, S. S., Jin, M. G., Sun, Q., et al., 2010. Experiment on the transformation of nitrogen in variably saturated soil column under alternative leaching and drying conditions. *Earth Science Frontiers*, 17(6): 52–58 (in Chinese with English abstract).
- Zheng, W. L., Luo, Z. J., Zhang, S. S., et al., 2010. Polycyclic aromatic hydrocarbons in soil of Xiaodian wastewater irrigation area in Shanxi Province. *Safety and Environmental Engineering*, 17(2): 60–63 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 鲍建国, 潘洁, 靳孟贵, 等, 2009. 一种改性膨润土絮凝剂的制备方法, 专利号 ZL 200910272440. 1, 授权公告号 CN 101693540 B. 中华人民共和国国家知识产权局.
- 程胜高, 罗泽娇, 曾克峰, 2005. 环境生态学. 北京: 化学工业出版社.
- 郭萧, 2010. 梯级河滩湿地净化污染河水模型试验研究(博士学位论文). 北京: 中国科学院研究生院.
- 环境保护部, 2011. 环境影响评价技术导则: 地下水环境(HJ610-2011). 北京: 中国环境科学出版社.
- 李平, 2011. 再生水回灌条件下三氮在土壤及地下水中迁移转化模拟研究(博士后研究报告). 武汉: 中国地质大学.
- 潘洁, 鲍建国, 靳孟贵, 等, 2011. 改性膨润土处理污水处理厂二级出水的实验研究. *环境科学与技术*, 34(5): 140–143.
- 孙强, 马腾, 祁志冲, 等, 2010. 污水灌溉区包气带中重金属元素空间分布特征——以太原市某污水灌溉区为例. *地质科技情报*, 29(3): 86–90.
- 云桂春, 成徐州, 等, 2004. 水资源管理的新战略: 人工地下水回灌. 北京: 中国建筑工业出版社.
- 张沙沙, 2011. 再生水入渗过程中中氮素在饱和一非饱和带的地球化学过程(博士学位论文). 武汉: 中国地质大学.
- 张沙沙, 靳孟贵, 孙强, 等, 2010. 干湿交替条件下包气带土柱中氮素迁移转化规律实验. *地学前缘*, 17(6): 52–58.
- 郑伟林, 罗泽娇, 张沙沙, 等, 2010. 山西小店污灌区土壤中多环芳烃的研究. *安全与环境工程*, 17(2): 60–63.