

城市污水地下回注: 水资源的再生与循环利用

Groundwater Recharge with Sewage Effluent: Regeneration and Circulating Utilization of Water Resources

朱书堂 赵 刚 马远乐 赵璇 彭珂珂 杨小晶

(清华大学核能技术设计研究院 北京 100084)

甘一萍

(高碑店污水处理厂 北京 100000)

一、我国北方水资源现状

近 20 年来, 随着我国经济的高速发展和城市规模、人口的扩张, 工农业及城市生活对水资源的需求急剧增加。我国北方大部分地区已面临严重的水资源短缺, 有将近 300 个城市缺水, 年供水不足量达到 600 亿 m^3 ; 传统上干旱、半干旱的西北地区水资源状况更加严峻; 历史上并不缺水的华北地区、黄淮海平原甚至华东一些沿海城市也加入水资源短缺的行列。水资源供应不足已成为影响我国可持续发展的主要因素之一。

总体上, 我国可再生淡水量相当可观: 平均年降水量 600mm, 总水量接近 6 000 km^3 。但是, 我国淡水总量中能够形成淡水资源的水量有限, 约为 2 800 km^3 , 仅占全球淡水资源总量的 6.75%, 居世界第六位; 其中现实可利用量只有 1 100 km^3 左右。并且水资源分布极端不均衡, 地域分布和季节分布相

差悬殊。地域分布上: 南部地区集中了我国水资源量的 80% 以上; 北方地区人口占全国总人口的 44%, 可耕地占总量的 59%, 而水资源拥有量仅为 14% 强。季节分布上: 华北地区降雨量又主要集中在夏季(6~8 月), 其它季节降雨极少。在降雨集中的季节, 很大一部分水量形成地表径流流失; 其它季节则相对干旱。这些特性决定了华北地区水资源需求相当大程度上依赖于地下水。北方城市以取用地下水作为主要水源, 华北和西北城市用水中地下水比例高达 72% 和 66%。

地下水系统实质上是一个看不见的地下水库, 它的作用是将地表降水渗入地下的部分滞、蓄在土壤(砂石)孔隙体中, 其本身并不能增加水资源总量。地下水的开采应该形成一个动态平衡, 一个循环期内被开采的水量应该得到补充、恢复(一般在丰水季通过降雨渗流补充)。如果地下水被长期开采而得不到补充, 就被认为是过度开采。过度开采

子, 为下一步工程设计奠定基础。“九五”期间完成每一步的计算和设计报告。到 2010~2020 年完成为下一步遥控开采工程设计计算提供依据和一切必要的数据、资料、工艺技术。

初步框算, “九五”期间每年投入 16 人开展工作, 以每人年 10 万计算, 包括建立试验设备等, 整个“九五”计划期间内至少需经费约 800 万元。在此, 我们呼吁我国有关部门和专家学者在发展空间技术的同时, 对此给予一定的重视, 并联合起来采取相应的对策, 积极开展工作。

参 考 文 献

[1] L. J. Wittenberg, et al. Fusion technology, 10(1986) 167
[2] 冯开明, 邓柏权. D- 3He 聚变商用堆 Mooncity 的放射性及废物处置计算. 核科学与工程 1993, 13(2): 164
[3] 谁将开采月球. 美国《纽约时报》, 1995-1-19
[4] 邓柏权. G. A. Emmert, D- 3He 聚变动力可行性研究.

核聚变与等离子物理, 1989, 9(4): 213
[5] 邓柏权. D- 3He 商用堆工作物理参数的空间分析. 核聚变与等离子物理, 1993, 13(2): 8
[6] 邓柏权. G. A. Emmert, 聚变等离子体中的快离子压强. 核聚变与等离子物理, 1989, 9(3): 136
[7] 彭利林, 邓柏权. G. A. Emmert, 高温 D- 3He 等离子体聚变产物的即时能谱展宽计算. 核科学与工程, 1995, 15(1): 45
[8] Deng BaiQuan, Feng KaiMing, Peng LiLin et al. Feasibility studies of D- 3He fusion power in China, Nuclear Science and Techniques, Vol. 8, No. 3 (1997) 174
[9] 邓柏权. 月球 3He 资源开发的经济、技术可行性研究. 核科学与工程, 1995, 15(3): 279
[10] J. Jacquinot, et al. D- 3He Fusion in the Joint European Torus Tokamak-Recent Experimental Results, Fusion Technology, 21(4) (1992) 2254

(责任编辑 王宏章)

将形成地下漏斗,会带来严重的地质灾害,如地表沉降、建筑物塌陷、沿海地区海水入侵等,这些灾害已经在我国多个城市发生(天津、西安、太原、大连、烟台、秦皇岛、盘锦等)。在北京出现了区域性的地下水位下降^[1],导致部分含水层疏干,城区西部浅层含水层已经疏干,城东第一承压含水层部分疏干,面积达 323km²,地下水位大幅度下降,导致城东部地面沉降,最大降幅 600mm,沉降面积 260km²。据最近报道^[2],在华北冀、鲁、津地区,由于多年的地下水过度开采,地下漏斗已经连成一片,形成了一个面积达 4万 km² 的巨型大漏斗。

我国面临水资源短缺、地下水严重超采的同时,大量的城市废水被空排。这一方面是总体水资源的巨大浪费,同时也导致一系列的环境污染问题:用于灌溉污染农业;流进池塘污染养殖业;大量营养物质排入海中,直接或者间接地促使近海赤潮频繁发生,在更大范围内造成近海养殖业的损失和生态灾难。如何对城市废水资源进行综合管理、再生与循环利用,已成为缓解水资源短缺、维持国民经济可持续发展所必须面对的大课题。

二、可行的解决办法

基本上,华北地区的缺水问题存在以下可行的解决途径:节约用水——从技术上、政策上采取节水措施,使有限的水资源得到更加合理的利用;增加资源——调节水资源的时空分布,引入外部水源,从根本上增加当地可用的水资源总量,如南水北调、沿海城市海水淡化;循环利用——对废水进行深度处理后回注地下,利用土壤对水的洁净作用,达成水资源的循环再利用。

目前,我国缺水地区大多被动或主动地从政策上制定节水措施,节水新技术也得到一定的应用推广。这些措施、技术虽然可以很快奏效,但只是部分解决了一个节流问题,无法从根本上增加可用资源量,也就是开源问题,其作用毕竟有限。海水淡化成本高昂、规模有限,只能解决局部的、暂时的水资源短缺问题,它不可能大规模增加资源量、解决全局性的水资源短缺问题,在此不对这一方法过多阐述。南水北调工程投资规模大、周期长,长远来看可以部分满足增长的水资源需求^[3],但对目前面临的问题无能为力。本文针对急需解决的问题,主要阐述城市污水处理厂二级出水,经深度处理后回注地下,利用土壤的洁净作用使废水资源得以再生循环利用的相关问题。这种方法是将城市废水纳入水资源整体考虑。由于城市废水来源基本稳定,故基于废水资源的再生、循环再利用可以提供稳定、可靠的水源。

三、污水地下回注再生循环利用

1. 研究目标 地下水回注是指将目标水体,依靠自重力作用(池、渠漫灌)或者外力强制(压力井回注)注入地下指定层位,从而实现地下蓄水的工艺。作为水资源管理的手段,回注工程可以贮存过剩的水、补充枯竭的地下水系统、去除回注水中的悬浮物质和部分有机物质以改善水质,是污水治理与开发新水源相结合的重要途径。

从环境保护和新增水资源两方面考虑,城市污水应进行处理,并回用作为农业供水、生态环境或市政建设等用水。对地我国北方和西北地区,缺水的状况使得污水回用更加必要。雨水因季节性分布不均,故需要有效的水资源储备措施以便从时间上重新分配水量。经过处理后的污水大部分可用于回注地下水。回灌可以起到防洪涝抗旱和缓解地面沉降的双重作用。国外的相关研究与应用证明,回注后的回用水在经过地下多孔介质过滤吸附和微生物降解后水质良好。

国际上这方面的研究已经持续了较长时间,机理性研究已日渐成熟,目前已进入大规模应用阶段。我国对城市污水通过地下回注达成资源的再生利用的研究起步很晚,尚处于探索阶段。清华大学核能技术设计研究院的研究工作者对污水回注前重金属的去除及微生物的降解作用做了些实验研究,目前的研究集中于大规模数值模拟预测、示范项目的实施、环境影响及风险评价。

2. 回注水体 地下回注工程对水质的要求很严格。在地下回注过程中,伴随污水的注入,水中的污染物质也进入地下,威胁原已存在的地下水,特别是与水源或者潜在用户邻近的地区。所以,需要严格控制回注到地下的水体的水质。用于地下回注的水体为城市污水处理厂的二级出水,再经进一步的深度处理(絮凝沉淀和砂滤预处理),尽可能去除水体中悬浮物及无机污染物。美国和欧洲已经有相应的标准来指导工程设计。

北京现有 4 个城市污水处理厂:高碑店、方庄、北小河和酒仙桥。其中,高碑店污水处理厂日处理能力 70 万吨。还有十几座正在或者计划建立。随着这些污水处理厂不断投入运营,到 2010 年北京城市污水处理率将达到 90%。预计到 2030 年,我国的城市污水整体处理率将达到 80%,这部分处理后的污水总量每年约为 750 亿 m³, 占我国水资源现实年可利用量 1.1 万亿 m³ 的 7%。

3. 回注前的深度处理 污水厂二级出水必须经过进一步处理,才能满足地下回注对水质的要求。城市污水经地下回注再生循环利用需考虑 4 个主要因素,即致病菌、矿物质总量、重金属和稳定的有机化合物,对回注水水质的要求取决于当地地下水的水质。1992 年美国国家环保局提出城市废水非饮用回用的建议性指南,其中包括了对地下回注的

水质和处理工艺要求。对于以土壤渗滤方式进行人工地下水回灌, 要求污水必须经二级处理和消毒, 根据需要选择是否要进行深度处理, 回灌水经包气带渗滤后, 必须满足饮用水的水质标准, 并且不能检出病原菌。美国加州修订的标准中规定: 污水处理厂二级出水须经过滤去除悬浮物、消毒和经活性炭床吸附(接触时间不少于 30min) 处理后方可回灌地下。

二级出水地下回注前的深度处理方法一般为传统的污水处理方法, 主要有化学混凝、沉淀、过滤、活性炭吸附、膜分离技术、离子交换、臭氧氧化、土壤渗滤技术以及各单元工艺的组合等。污水深度处理的任务是去除残余的悬浮物及胶体、二级处理后残余的溶解性有机物以及无机盐类和难降解有机物等, 同时杀灭细菌和病毒。废水处理的程度则取决于回注的水量与水质、区域地下水的类型、天然地下水稀释的可能性、土壤类型、地下水位深度、回注方式, 回用前在含水层中的停留时间等。确定深度处理技术需考虑废水成分、选定技术对特定废水参数的改善情况、选定地区的土壤渗滤处理效果等因素。

我国城市污水处理厂二级出水的水质, 若以高碑店污水处理厂的技术为参照, 二级出水中硝酸根氮浓度低于国外回注要求^[4], 经过了“絮凝+沉淀+砂滤+活性炭过滤”的深度处理后, 砂酸根氮浓度进一步降低。污水中综合污染物指标 DOC 在 6~8mg/L, 达到国外回注水的要求, 但是, DOC 在含水层中的迁移扩散及其暴露的风险仍然很大。所以在高碑店回注工程中, 在能够确认地面回注水质情况下, 更需要明确的是溶解有机碳(DOC)和可吸附卤化物(AOX)在地下水中的分布与归宿, 以控制一般有机污染物和“三致”(致癌、致畸、致突)的消毒副产物进入作为饮用水源的含水层。

4. 土壤的洁净作用 土壤本身有很强的洁净作用。当回注水通过包气带(地下水位以上的地层), 由于土壤的洁净作用, 水质将在两个方面发生变化。第一个变化是去除悬浮物, 减少浊度和总悬浮固体。第二个变化是通过天然存在的微生物的降解作用去除水中的无机营养物, 其代谢作用还可以去除一部分有机物。回注池开始运行的时候, 滞留于包气带的水被冲洗到地下含水层中, 从而可能在较短的时间内增加地下水中的无机盐浓度。但经长时间运行后, 这部分影响将减少到可以忽略, 地下含水层的水质最终将取决于回注水的水质和回注运作模式。回注水在土壤中的渗流过程, 地层孔隙体作为一个多相介质, 包含流动相和非流动相。伴随流动相的运动, 流动相中的污染物组分会发生对流-扩散现象; 流动相中污染物之间存在化学反应; 流动相与非流动相之间存在相间物质交换(溶

解/沉淀、吸附/解吸附), 同时还会发生地质化学/生物化学反应; 由于土壤微生物的存在, 还会发生有机质降解。实际上, 上述这些过程几乎是同步发生的, 构成复杂的污染物迁移转化过程。

污水处理厂二级出水经过深度处理后作为回注水体, 考虑两种类型的溶质污染物: 有机污染物和电子受体。回注污水中受关注的两种污染物为反映总污染水平的溶解有机碳(DOC)和优先控制的“三致”有害物质可吸附有机卤化物(AOX); 电子受体是溶解氧(DO)和硝酸根(NO_3^-), 也可以考虑其他的物质。污染物的生物降解消耗电子受体, 它们之间的关系是耦合的。

(1) 对流与弥散作用 回注水在土壤中运动时, 水溶性污染物会随着地下水的流动而迁移。纯粹由于地下水流动引起的污染物迁移过程, 称为对流过程。由于分子热运动, 水溶性污染物总是从高浓度向低浓度扩散, 这一过程称为“分子弥散”。同时, 由于流体的粘滞性引起的流动不均衡及孔隙介质的不规则形成的流速变化也会导致水溶性污染物的弥散作用, 这种作用被称为“机械弥散”。由于分子弥散在弥散中所占的比例足够小, 在地下水运动中, 一般不用考虑分子弥散。

(2) 吸附作用 在地下水回注过程中, 吸附作用是影响污染物迁移转化的一个重要因素。基于回注中主要污染物的弱电性和弱极性, 故认为控制过程为物理吸附, 并且这一过程是可逆的。表现为土壤胶体颗粒借助分子引力无选择性地把地下水中的分子态物质吸附在颗粒表面上, 同时, 当水中的物质浓度减少时, 这些吸附在土壤颗粒表面的物质能解吸并溶解到水中, 直到达到一个动态平衡, 通常认为这种平衡是瞬时完成的。由于回灌水中污染物的浓度很低, 可以认为其吸附等温线是线性的。吸附作用使得污染物迁移锋面相对地下水流锋面有一定的时间滞后。因为污染物不但以溶解的方式在水中存在且以吸附的方式在多孔介质表面存在, 相当于容量的增加使得停留时间加大, 从而产生迁移滞后。

(3) 生物降解作用 生物降解是城市二级污水地下回注过程中有机污染物被部分或大部清除的最重要的机制, 它保证有机污染物不会因为污水的不断回注而在地下堆积。污染物的降解主要通过土壤表面附着微生物进行。所以需要把土壤表面吸附的有机物同时考虑在内。污染物的降解途径需要进一步研究, 但是由于有机物的浓度很低, 污染物的降解过程一般可以用一级反映模式来模拟。根据氧气浓度, 降解可以分为 3 段来表示: 好氧、缺氧和厌氧反应过程。DOC 和 AOX 在 3 种条件下都能被微生物降解, 遵循如下的原则: 好氧反应消耗 DO、反应迅速, 厌氧反应消耗 NO_3^- 、反应缓慢; 好氧降解优

先, DO 的存在对厌氧反应有抑制, 只有氧气即将被消耗光时厌氧反应才可能发生, NO_3^- 的存在对好氧反应没有明显的抑制作用; 存在缺氧状态, 氧气浓度很低, 好氧反应缓慢, 好氧反应和厌氧反应都能发生, 但是微量的 DO 的存在对于厌氧反应有抑制作用, 所以厌氧反应也很缓慢。在 DOC 中存在一部分生物不可降解成分, 这部分作为惰性部分在降解中不予考虑; 另外, AOX 的降解一般认为以共代谢形式产生, 其降解速率直接和 DOC 的降解速率相关, 所以 AOX 的降解需要考虑这个因素。

5. 回用水水质要求 城市污水经地下回注的目的是再生循环利用。根据回用水的用途不同, 对其水质的要求也是不同的。直接回用必须满足饮用水标准与安全标准。目前各国都没有制订统一的标准。美国至 1992 年 3 月有 18 个州正式通过了再生水回用法, 并且制订了指南或设计标准。其中规定, 抽取前必须在地下停留 6 个月以上, 以保证进一步杀灭肠道病菌; 地下水位以上的包气带至少应有 3m 厚; 抽水点距回注点的水平距离至少应为 150m; 在抽取的水中如回注水超过 20%, 要求在取水点水质中的 TOC 含量小于 1mg/L , CDO 含量小于 5.0mg/L , NO_3^- N 含量小于 45mg/L , 氨氮含量小于 10mg/L , 大肠杆菌数小于 $2.2/100\text{mL}$ 水; 要求每天检测 COD 和 TOC, 每季检测的项目包括苯和四氯化碳等, 其主要目的在于控制有机污染物进入作为饮用水源的地下含水层。随着水质研究的不断深入, 对消毒副产物和药用活性物质可能引发的健康危害也提出了风险评价方法的建议。

迄今我国尚未制定再生污水地下回灌的水质标准, 为了推动此项研究, 清华大学曾遵循回注水质必须与当地地下水水质相符的原则, 根据美国和德国的有关法规和建议指南对回注水水质提出建议并在试验研究中参照执行。由于二级出水经过深度处理后, 多数指标已经达到甚至好于饮用水标准。对回用水的水质主要控制指标包括 DOC: 3.0mg/L ; AOX: $30\mu\text{g/L}$; $\text{NH}_4^+\text{-N}$: 10mg/L ; $\text{NO}_3^-\text{-N}$: 45mg/L 。

四、可行性分析与风险评价

1. 经济可行性 从宏观上来看, 污水厂二级出水回注的成本比远距离调水的成本要小一些。国外对远距离输水所做的成本—效益分析表明, 就地获得非传统新水源, 价格比远距离输水便宜得多。我国南水北调工程中, 中线工程按设计的采用贷款 70%、年利率 10.53%、偿还期为 15 年的筹资方案, 还贷期全线平均水价为 1.94 元/吨水。人工回注设施与规模相当的污水处理厂在土地相对便宜的地区投资水平是相当的, 同时运行与维护费用更低一些; 从北京市高碑店污水处理厂以每吨 0.5 元的污

水处理水价计算, 因为这部分水价包括了还贷款和运行费用, 所以从二级污水到市政高质量的中水的费用是较低的。考虑到高碑店的规模效应, 估计在缺水而地广的西北地区一个中小规模的污水处理厂, 通过地下回注提供的再生水的费用低于每吨 1.5 元。其次, 作为一种贮存水的方式, 含水层具有大容量、低成本的优点。同时, 相对地表水, 地下水的一个重要特征是受季节影响很小。跨区域大规模调水是一个巨大的工程, 并不是每个地区都能参与其中, 或者得到所需的便利; 而地下回灌在小地域就可以实现。

2. 社会效益 地下水回注除了能为我们提供廉价的再生水资源之外, 会带来额外的社会效益。当我们将深度处理的污水回注到地下, 把地下土壤作为土壤处理层利用的同时, 这部分水体会填补因超采地下水造成的地下水漏斗, 实现地下水储存量的动态平衡, 将扭转地下水位逐年下降的局面, 缓解或者抑制地表沉降, 亦有助于沿海地区防止海水入侵。

对北京来说, 地下水回注尤有特别意义。2008 年的奥运会, 一方面是对北京环境的一个挑战, 给供水和排水形成很大的压力, 城市市政用水将大大增加, 二级出水的直接排河将受到严格限制, 急切要求开发优质的中水资源; 另一方面也是行业发展的机遇, 改善环境需要很大的投入。2003 到 2007 年间, 北京将投入 540 亿元进行环境保护和治理, 不仅将用在工程建设和设备改进上, 同时也会推动研究的发展, 二级出水回注的应用研究亦有很大的发展空间。

3. 风险评价 如前所述, 在污水地下回注过程中, 伴随污水的注入, 水中的污染物质也进入地下。所以, 这一过程存在对地下水带来额外污染的风险, 特别是与水源或者潜在用户邻近的地区。以水资源再生循环利用为目的实施污水地下回注, 要避免出现这种额外污染, 严格控制污染物的迁移转化过程。在具体的工程项目实施前, 必须进行相应的风险评价。这样的风险评价应参考外国的一些经验。我国的地下水评价开展尚不广泛, 与大气评价和地表水评价比较, 其工作难度要大得多^[5], 还具有以下几个特征: 不仅需要评价水质的好坏, 还需要评价水量的多少, 分析区域范围内水的径流、补给和排泄的关系; 二级污水回注于地下介质中, 受地质、构造、水文地质条件及地球化学条件等多种因素的影响, 污染物在地下水和介质中的迁移转化情况十分复杂; 二级污水赋存和流动的环境包括包气带和饱和带, 饱和带可能具有承压性和潜水性, 介质可能是孔隙或裂隙, 增加了模拟的复杂性; 地下水的运动及其污染是一个缓慢的过程, 包括污染物

(下转第 6 页)

式。通过数值试验它可以回答一系列的问题,如局地蒸发的变化(三峡工程的完成、南水北调的实现等)对我国降水的影响、局地的人工增雨对降水的影响,等等;还可以揭示出我们感兴趣的区域降水的水汽来源。

3. 建立一个能计算出 $t_1 \sim t_2$ 期间我国长江流域和黄河流域地表水文状况的数值模式。该模式能根据 $t_1 \sim t_2$ 期间的降水分布和已知的地表状态(植被、土壤状况、水库、湖泊、河流状况等)计算出 $t_1 \sim t_2$ 期间地面水的时空变化过程

落到陆面的降水通过地表和河流含水水层的流动传输,相对于大气中的水汽传输要简单一些。在现有地理信息系统提供的详细的地表状况下,建立这样一个数值模式并不是太困难的事情。在气候的数值模拟中,陆面过程模式已经取得很大进展。可以选一个(比如,选戴永久博士在美国主持设计的那个模式)作为基础加以改进。因为这里要着重描述的不是地-气的感热、潜热、动量的通量,而是落在地表的水的传输、地表的径流和地下水的流动以及蒸发的耗损等。值得注意的是,对长江流域而言,重点考虑的是防洪;对黄河流域而言,重要的是干旱和半干旱地区水资源的合理利用。两者的目的不同,模式中省略和不可省略的过程也不同。

(上接第19页)

自身转化及与介质的作用,过程的模拟和验证十分困难。在风险评价中,要抓住影响评价的主要环节,正确拟定评价的目标参数,这里就不详述了。

五、抓紧示范工程,积极推广应用

污水地下回注再生循环利用技术研究的目的大规模应用于工程实际,为缓解我国北方水资源短缺提供技术支撑手段。为此目的,清华大学核研院与高碑店污水处理厂联合建立了一项研究性质的二级污水回注示范工程。该示范工程得到了北京市相关部门及德国柏林工业大学的资助。通过该工程的探索,我们力图建立一套可以实施的污水地下回注的设计参考规程。

并不是所有的地下含水层都适合于污水回注工程。土地使用历史、土壤断面构成、地质条件、导水率的分布、地下水深度都是影响回灌工程是否成功的因素。如回注区存在阻流岩层时,将会引起上层的过度滞水。在地下多孔介质净化回注的二级污水的同时,水中的污染物质也进入地下,威胁原已存在的地下水,特别是与水源或者潜在用户邻近的地区。所以一方面需要控制回灌到地下的污水的水质,另一方面,须保证回灌水在地下介质中有足够的停留时间使得微生物能降解污染物到可以接受的程度。

高碑店污水处理厂地下回注示范工程的场地

故而,要建立的是两个模式而不是一个模式。利用数十年的资料根据实况降水算出地面水的时空变化过程,将计算的结果与实况比较就可以知道模式的误差。也许真正的大量工作就在于对模式进行改进和对参数进行调整,从而获得最接近实况的结果。如果模式的结果能够令人满意,那么这将是一个可以用来进行数值实验的模式。通过数值试验不仅可以回答我们感兴趣的种种问题,而且在“自然控制论”(曾庆存)思想的指导下,必将对长江流域防洪的调控和黄河流域水资源的合理利用起到积极作用。

4. 研讨全球水循环模式

虽然全世界已有数十个气候模式(海-陆-气耦合,并考虑冰雪过程)都描述了水循环过程,但这些模式并不能解决水循环问题。关键在于缺乏海面、陆面蒸发的描述。全球水循环模式的建立似应依据现有的全部资料,首先作为一个反(逆)问题探讨蒸发的计算方法。这个方法要满足全球水热平衡的制约关系。这是一个十分值得研讨的问题。

总之,为了更好地解决面临的有关水的实际问题,应该加强水循环的基础理论研究。

(参考文献略)

(责任编辑 蔡德诚)

选择在厂内一块南北走向的区域。回注池设计为 π 型的3个相邻的池子,干湿交替作业,以利于清理池底物理与生物堵塞、增加回注量。在回注池边缘及回注池的南方一定距离内,设置一系列的观测井用于检测和试验。其中,离回注池中心150米处是一口抽水井,以增大地下水的压力梯度,加快地下渗流,缩短示范工程所需时间。

通过这一示范工程,将获得一些必要的数据与经验。在此示范工程的基础上,以2002年10月投入运营的北京清河污水处理厂为依托,在奥运会规划区内建立一个中等规模的二级出水地下回注工程。这一示范工程的成功实施,将使污水地下回注再生利用技术得到进一步的推广应用,为缓解我国北方严重的水资源短缺、支持国民经济可持续发展起到一定的作用。

参 考 文 献

- [1] 宋秀杰,丁庭华.北京市地下污染的现状与对策.[J] 环境保护,1999(11)
- [2] 李俊义.华北出现巨大漏斗区.北京青年报,2002-9-3
- [3] 张宪宏.关于南水北调有关问题的探讨.[J] 科技导报,2002(5),3-5
- [4] 成徐洲,吴天宝,陈天柱.城市污水地下回灌技术现状与发展.[J] 中国给水排水,1999(6),20-21
- [5] 程盛高,张聪辰主编.环境影响评价与环境规划,中国环境科学出版社,1999

(删去全部12篇英文参考资料6篇中文参考资料)

(责任编辑 王宏章)