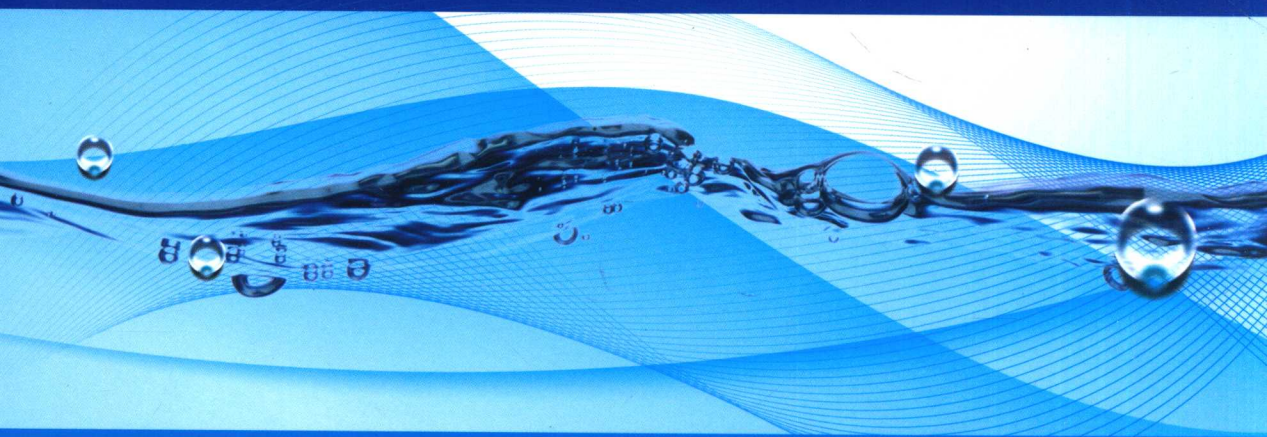


ZAISHENGSHUI RUSHEN
DUI DIXIASHUI HUANJING YINGXIANG DE YANJIU

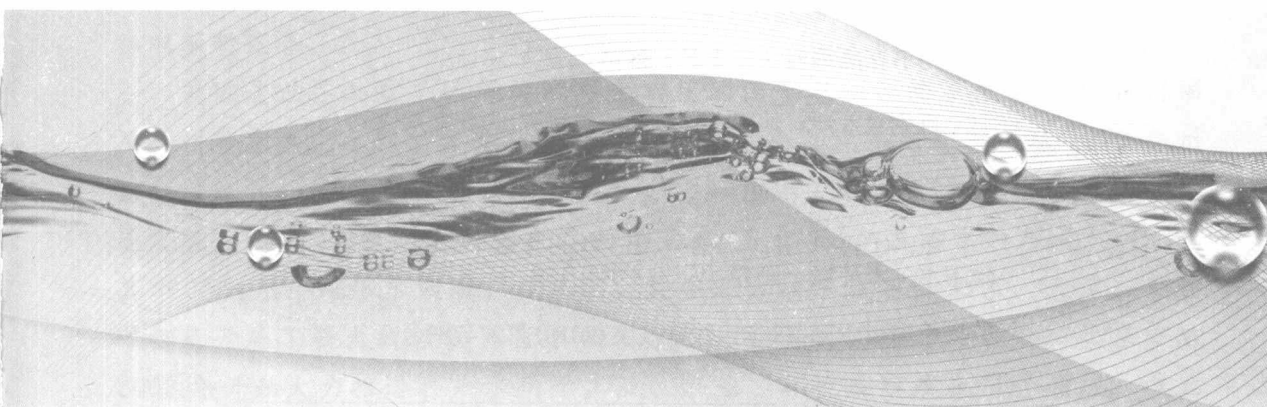
再生水入渗对地下水环境影响的研究

梁藉 孟庆义 等 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

再生水入渗对地下水环境影响的研究



梁藉 孟庆义 刘立才 郑凡东 孙涛 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书介绍了典型地区的再生水作为景观用水对地下水环境影响的研究成果。本研究过程中将野外物探、钻探与室内试验相结合,野外监测与室内技术模拟相结合,查阅国内外再生水回灌地下水文献及相关实验成果,综合分析并建立了水源地水质预警体系,并在此基础上提出地下水源地再生水用于河道景观水质标准的建议,制定再生水排入河道的各项措施。

本书可供水文水资源、地下水科学与工程等专业的研究、规划、设计人员使用。

图书在版编目(CIP)数据

再生水入渗对地下水环境影响的研究 / 梁藉等著

— 北京:中国水利水电出版社,2013.11

ISBN 978-7-5170-1410-2

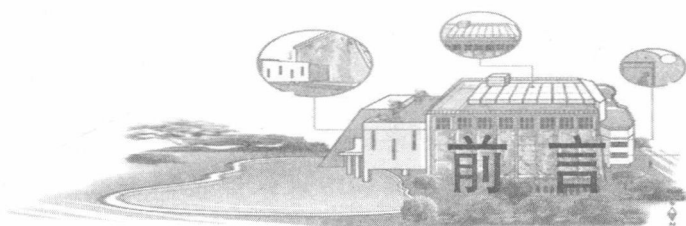
Ⅰ. ①再… Ⅱ. ①梁… Ⅲ. ①再生水—下渗—影响—
地下水—*—环境—研究 Ⅳ. ①P41.139

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第274789号

书 名	再生水入渗对地下水环境影响的研究
作 者	梁藉 孟庆义 等著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (发行部)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京嘉恒彩色印刷有限责任公司
规 格	184mm×260mm 16开本 10.75印张 255千字
版 次	2013年11月第1版 2013年11月第1次印刷
印 数	0001—1200册
定 价	58.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究



再生水利用是缓解全球性水资源短缺的重要途径之一。世界上许多国家和地区,如美国、以色列、日本、新加坡、澳大利亚等,都已开展了城市污水再生利用,并取得了良好的效果,再生水资源管理条例、规章制度及水质标准不断完善。

美国是世界上最早进行污水再生回用的国家之一,佛罗里达州和加利福尼亚州等在再生水利用方面位于世界前列。以佛罗里达州为例,从1972年州议会决议开始实施污水的循环利用和深井回灌后,再生水利用体系得到了迅速发展。在2011年,该州再生水利用量9.98亿 m^3 ,占污水处理量的49%,其中15%用于地下水回灌。在我国,许多北方缺水城市如北京、天津、大连等都已开展了较大规模的再生水回用工程,也取得了良好的成效。北京市从2003年开始大力推进再生水用于工业、农业、环境及市政杂用等领域。截至2008年,北京市年再生水利用量达到了6亿 m^3 ,首次超过地表水供应量。预计到2020年,北京市再生水利用量将超过10亿 m^3 ,利用率达到70%以上,再生水已成为北京市的有效新增水源之一。

再生水对地下水的影晌主要通过两种途径实现:一是再生水直接回灌补充地下水,另一种是用于河道景观或农业灌溉时,再生水中的污染物可能会随着水分渗滤进入地下水含水层。目前,我国还没有再生水直接回灌地下水的应用实例。但随着城市再生水的大规模利用,再生水对地下水的自然入渗补给将成为一种普遍现象。因此,研究再生水对地下水环境的影响十分重要,对于大幅度提高再生水利用率和缓解具有地下水超采带来的系列问题具有重要的现实意义。

本书是在北京市重大科技计划项目“北京市地下水资源安全评价及污染防治技术研究与示范”(D07050601490000)课题三“典型污染区污染防治与修复技术研究与示范”的研究基础上编纂而成。该研究以北京市密云县与怀

柔区两处再生水景观利用河道为研究对象，通过布置地表水及地下水监控断面，监测再生水入渗区水量和水质的变化。综合采用地下水水化学方法与同位素方法分析地下水动力场和水质变化规律。在分析研究区水文地质条件及全面调查研究区污染源分布的基础上，建立地下水渗流与水质耦合模型，预测再生水入渗对下游地下水水源区的影响。根据实测数据和模型预测结果评价地下水补给区再生水利用的安全性，建立监测预警体系和相应的技术标准，提出再生水排入河道的各项措施和建议。

本书由梁籍负责全书统稿，刘立才、郑凡东审核，孟庆义审定成稿。参加本书编写的还有北京市水科学技术研究院的李炳华、郭敏丽、廖日红、杨淑慧、张霓、韩丽、王远航、王培京、刘操、吴晓辉、金桂琴、贺晓庆、胡秀琳、许志兰、何刚、李垒、赵立新、顾永钢、黄赞芳、战楠。中国科学院地理科学与资源研究所的张应华、于一雷，中国水利水电科学研究院的孙涛、鲁帆给予了帮助。本书得到了项目负责单位刘培斌、贺国平等的指导和支持。此外，在本书编写过程中，还参考了其他一些单位及个人的研究成果，在此表示真诚的感谢。

再生水入渗对地下水环境的影响是再生水利用的一个重要方向，它的研究不仅涉及水文地质学等领域，还涉及环境水化学、微生物学等领域，具有明显的多学科交叉渗透的特点。它的研究不仅可以推动再生水的安全利用，而且还可以促进学科交叉发展。因此希望本书能起到抛砖引玉的作用，引导更多的研究人员从事到该领域的研究中来。

由于作者水平有限，书中错误和纰漏在所难免，恳请各位读者对本书的不足之处给予批评指正。

作者

2013年10月

符号对照表

符号	文字
N	氮
P	磷
$\text{NH}_3\text{—N}$	氨氮
TN	总氮
TP	总磷
$\text{NO}_3\text{—N}$	硝酸盐氮
CEC	阳离子交换量
DO	溶解氧
SS	悬浮物
$\text{NO}_2\text{—N}$	亚硝酸盐氮
TOC	总有机碳
BOD_5	生化需氧量
COD_{Mn}	高锰酸钾指数
Eh	氧化还原电位
BBP	邻苯二甲酸丁基苄基酯
DMP	邻苯二甲酸二甲酯
DnBP	邻苯二甲酸二正丁酯
DnOP	邻苯二甲酸二正辛酯
DEHP	邻苯二甲酸二(2-乙基己基)酯
PAHs	多环芳烃
VOCs	挥发性有机物
OCPs	有机氯农药
PAEs	邻苯二甲酸酯

目 录

前言

符号对照表

第1章 绪论	1
1.1 研究背景与意义	1
1.2 国外再生水入渗补给地下水发展现状	2
1.3 我国再生水利用发展现状及存在问题	4
1.4 研究内容及技术路线	5
第2章 再生水入渗补给地下水的风险及研究进展	7
2.1 再生水利用潜在风险	7
2.2 再生水入渗补给地下水方式	11
2.3 再生水入渗过程中水质净化研究进展	11
2.4 再生水入渗补给地下水安全性研究概况	14
第3章 研究区概况及再生水厂水质	15
3.1 研究区范围	15
3.2 地形地貌	16
3.3 气象水文	16
3.4 地质与水文地质	16
3.5 水源地概况	21
3.6 再生水厂基本情况	21
3.7 再生水厂出水无机组分特征	24
3.8 再生水厂出水有机组分特征	29
3.9 再生水厂出水主要组分评价	32
第4章 研究区污染源调查	34
4.1 排污口的分布和排污量	34
4.2 工业污水排放	35
4.3 垃圾填埋场	35
4.4 农业污染源调查	36
4.5 畜禽养殖业调查	37
4.6 加油站调查	37
第5章 区域地下水动态变化规律分析与评价	39
5.1 区域地下水位动态变化规律分析	39

5.2 研究区地下水水质动态变化规律研究	43
第6章 再生水入渗区地下水环境动态变化规律分析	50
6.1 地下水监测网的建立	50
6.2 地下水水质监测	51
6.3 水质监测剖面及其变化规律	52
6.4 研究区地下水质量现状评价	60
第7章 淋溶模拟柱试验	70
7.1 实验目的和意义	70
7.2 土样采集分析	70
7.3 淋溶模拟柱试验概况	78
7.4 淋溶模拟柱试验结果分析	81
7.5 三氮迁移转化规律分析	90
第8章 再生水入渗补给地下水同位素研究	93
8.1 实施方案与技术路线	93
8.2 同位素示踪原理	94
8.3 同位素示踪成果	95
第9章 地下水环境变化模拟分析研究	111
9.1 地下水概念模型的建立	111
9.2 地下水数学模型的建立	116
9.3 地下水 Cl^- 运移数值模拟模型	132
第10章 区域水源地预警体系研究	138
10.1 国内外研究现状	138
10.2 水源地水质预警建设	140
第11章 再生水用于河道景观的水质标准研究	143
11.1 再生水用于河道景观水质标准研究的范围与准则	143
11.2 水质控制指标选择	143
11.3 水质指标限值标准的确定原则	144
11.4 再生水作为水源地景观用水水质指标的综合确定	144
第12章 再生水排入水源地河道的措施研究	152
12.1 北京市再生水入渗风险评价分区	152
12.2 再生水排入水源地河道的技术措施	153
12.3 再生水排入水源地河道的管理措施	154
第13章 研究结论与展望	159
13.1 结论	159
13.2 展望	159
参考文献	161

第 1 章 绪 论

再生水入渗补给地下水可以有效地增加地下水资源的存储量,较好地利用含水层的储水空间,起到年度和年际间的调节作用。再生水入渗补给地下水将成为再生水利用的一个重要方向,它的研究不仅涉及水文地质、水文地球化学等领域,还涉及环境水化学、微生物学等领域,具有明显的多学科交叉渗透特点,是地表水—土壤水—地下水资源转化研究领域的一个新的重要研究方向。它的研究不仅可以推动规模化再生水涵养地下水,而且还可以促进学科交叉发展。

1.1 研究背景与意义

近年来,我国城市污水处理能力得到了突飞猛进的增长,截至 2009 年一季度^[1],已建成并投入运营的污水处理厂共 1590 座,设计日处理规模已达 9000 多万 m^3 ,日实际处理量近 7000 万 m^3 ,年处理污水量将达 250 亿 m^3 ,约占全国城市供水总量的 50%。但是,我国污水再生利用率还相当低,根据城市污水再生利用规划,到 2015 年北方地区缺水城市要达到 20%~25%,南方沿海缺水城市要达到 10%~15%。按照发达国家的水平计算,如果污水再生利用率能够达到 70%,则我国每年还有近 150 亿 m^3 的再生水资源可以得到开发利用,潜力非常巨大。但是,再生水与其他水源相比,物理、化学性质有显著差异,如何避免再生水大规模应用对水环境产生的负面影响,是目前急需解决的问题。

近 30 年来,我国地下水开采量以每年 25 亿 m^3 的速度递增,有效保证了经济社会的发展需求。但是,北方和东部沿海地区地下水超采越来越严重。初步统计,全国已形成大型地下水降落漏斗 100 多个,面积达 15 万 km^2 ,超采区面积 62 万 km^2 ,严重超采城市近 60 个,造成众多泉水断流,部分水源地枯竭。地下水超采区主要分布在华北平原(黄淮海平原)、山西六大盆地、关中平原、松嫩平原、下辽河平原、西北内陆盆地的部分流域(石羊河、吐鲁番盆地等)、长江三角洲、东南沿海平原等地区。华北平原最为严重,河北平原和北京市平原区地下水超采量累计分别达到 500 亿 m^3 和 60 亿 m^3 ;由于严重的地面沉降,天津市已不能继续超采地下水。长期持续超采造成华北平原深层地下水水位持续下降,储存资源不断减少,目前有近 7 万 km^2 面积的地下水位在海平面以下;沧州市深层地下水漏斗中心区水位最大下降幅度近 100m,低于海平面超过 80m,地下水储存资源濒于枯竭。由于地下水开采引起的地面塌陷、海水入侵等问题不容忽视。

基于上述背景,污水资源化用于河道,河道的天然下渗补充地下水,对于水资源可持续利用、水资源的优化配置意义深远。再生水深度处理回补地下水、土壤对于不同污染物的吸收、净化效果,国内外不同领域的学者、研究人员开展过大量的室内试验进行研究,



取得了部分研究成果,但仍属于探索阶段,不能很好地用于生产实际,不能作为政府决策的依据和参考。因此,研究再生水涵养地下水的处理和回补方式、污染物的实际迁移转化规律等,对于大幅度提高再生水利用率和缓解地下水超采带来的系列问题具有重要的现实意义。

1.2 国外再生水入渗补给地下水发展现状

再生水通过土壤含水层处理系统后回灌补给地下水已经在世界上很多国家得到应用。在欧洲利用天然渗漏河床进行污水回灌已有 100 多年历史,即便是人工回灌也有半个世纪的时间。美国、以色列、德国、荷兰、奥地利、日本等国在再生水回灌方面开展了大量工作,取得了丰富的经验。

1.2.1 美国

20 世纪 70 年代初,美国引进了污水的再生回用计划,开始大规模回用污水,其大部分城市在保护环境的运动中,将其污水处理厂更名为水回用厂。在加利福尼亚州、佛罗里达州、夏威夷州和华盛顿州的法规和指南中都有关于再生水补给地下水的规定。其中佛罗里达州与华盛顿州提出了再生水用于地下水补给时对水质和处理方法的要求。加利福尼亚州和夏威夷州没有规定再生水补给地下水时的污水处理方法,而是针对实际情况来确定。加利福尼亚州和夏威夷州健康服务署对补给工程的所有相关方面进行评估,主要包括处理方法、污水水质与水量、补给区面积、水文地质条件等。

加利福尼亚州洛杉矶县的地下水回灌工程位于洛杉矶县东南部,是比较典型的地表漫灌的应用实例之一。回灌工程是地下水补给的主要水源,是洛杉矶市地区的主要水体。在 2002~2003 年间, San Jose 再生水厂三级处理的再生水以 $194 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{d}$ 被用于地下水补给。从再生水厂出来的再生水被排放到河流或者小溪中,自然流动到远离河道的回灌水池中,完全通过自然入渗的方式涵养地下水。

加利福尼亚州橘子县为了防止海水入侵,1972 年兴建了当时最大的污水深度处理厂(21 世纪水厂),设计能力为 $56780 \text{ m}^3/\text{d}$,再生工艺为:化学澄清、再碳酸化、活性炭吸附、反渗透、加氯,于 1976 年运行。21 世纪水厂的净化水通过 23 座多套管井,81 个分散回灌点将再生水注入 4 个蓄水层,注水井位于距太平洋约 5.6km 的地方,再生水与深层蓄水层并以 2:1 比例混合。该再生水回灌工程至今已成功仍在正常运行。该再生水厂和再生水补给地下水系统是一个成功的再生水回用工程,根据其实践经验,加利福尼亚州健康署还制定了再生水补给地下水工作指南,为其他再生水补给地下水工程提供依据。

在美国德克萨斯州的埃尔帕索,面对日益减少的含水层地下水供水量,该地区在 1985 年,将再生水以超过 $38 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{d}$ 的速度回补到 Hueco Bolson 含水层。最终,这些再生水估计经过 2~6 年的迁移后进入城市饮用水系统,虽然目前回灌入渗补给的再生水只占整个含水层体积的一小部分,但是长期的目标是为埃尔帕索提供需水总量的 25%。

1.2.2 以色列

以色列是再生水回用方面最具特色的国家。它地处干旱和半干旱地区,人均水资源占



有量仅为 476m^3 。早在 20 世纪 60 年代便将污水利用列为一项国家政策,目前已建成 200 个规模不等的污水回用工程,全国共建有 127 座污水库,4 座为地下蓄水库,并做到了再生水与其他水源水联合调控使用^①。其主要对策是农业节水和城市再生水回用。占全国污水处理总量 46% 的出水直接回用于灌溉,其余 33.3% 和约 20% 分别回灌于地下或排入河道,再生水回用程度堪称世界第一。目前,以色列 100% 的生活污水和 72% 的市政污水得到了回用。

以色列沿海平原位于地中海南岸,含水层主要由隔层砂、砂石、石灰质砂石、泥沙、红土、黏土等 6 种土壤组成。黏土将西部含水层分为 4~6 层,距离海岸线 5~8km,中部和东部地区为均质含水层,砂土与石灰质砂石的高渗水性保证了回灌水从非饱和带的快速迁移。

Dan 地区污水再生工程位于特拉维夫南部,污水来自特拉维夫以及邻近的一些自治市,该区域人口约 210 万人,每年产生的污水量 1.2亿 m^3 ,污水再生工程主要包括污水收集、处理、地下水回灌和回用,从回收井抽取的地下水主要输送到南部沿海平原以及北部的内盖夫地区,回用于农田灌溉。该项目是以色列最大的污水回用项目,也是世界上最大的污水回用项目之一。

Dan 地区污水再生工程先后经过几次扩建,最近一次扩建是在 2003 年,扩建后回灌点增加到 5 个,年回用水量可达 1.4亿 m^3 。该地区的地下水回灌工程也是 SAT 系统成功运行的一个案例,回灌的再生水通过渗流区垂直下渗进入饱和区,再生水在 SAT 系统的停留时间可达 6~12 个月,从而可以保持回用水较好的水质。

1.2.3 德国

德国是欧洲开展再生水回灌较早的国家。德国回灌地下水主要有两种方法:一种是采用天然河滩渗漏;一种是修建渗水池、渗渠、渗水井等工程措施实施回灌。

早在 20 世纪 60 年代,德意志联邦(原西德)就利用被污染的河水通过由砂、砾石构成的河床实施地下水补给,通过与河道相隔一定距离的井取用循环后的地下水,取水量占总供水量的 14%。

德国许多水厂使用渗漏工程产生人工地下水,在整个国家使用这种方法生产的水占城市水厂总供水量的 12%。其主要方法是修建渗水池(如北鲁尔—维斯特伐利亚工业区)、渗渠(如汉堡—柯尔斯拉克厂)和渗水井(如威斯巴登—希尔斯坦水厂),将河水(受到轻度污染)通过渗漏工程回灌地下产生人工地下水。德国柏林将经过生物净化的污水投加氯化铁与助凝剂絮凝沉淀后,投加臭氧将有机物氧化,降解有机分子,同时杀灭细菌,再经无烟煤过滤,最后进行地下水回灌,经地质净化后作为饮用水重新抽取出来,该示范工程早在 20 世纪 70 年代已建成投入使用。

Langen 市为解决地下水位下降问题,将污水处理厂的二级出水通过曝气、沉淀、砂滤池过滤、臭氧氧化、活性炭吸附等措施深度处理后,利用土壤渗滤回灌补充地下水,该设施于 1979 年投入运行。

① 城市污水资源化暨地下水回灌技术国际研讨会文集 [C]. 北京:清华大学,2000。



综上可知再生水回灌地下在国外已经得到广泛应用, 实践经验表明: 再生水入渗补给地下水, 体现了减量化、无害化的原则和可持续发展的战略思想, 是扩大污水回用最为有益的方式。

1.3 我国再生水利用发展现状及存在问题

中国现在是世界上污水排放量最大的国家, 也是污水排放量增长速度最快的国家之一。对污水处理和再生水利用将是我国未来水利科学研究的重要课题之一。我国再生水利用起步虽晚, 但随着城市污水处理率的不断提高, 以及水资源短缺加剧, 城市再生水利用发展非常迅速。“十五”期间, 开展了城市污水再生利用政策、标准和技术研究与示范的系列研究, 并于2002~2005年先后出台了GB/T 18919—2002《城市污水再生利用分类》, GB/T 18920—2002《城市污水再生利用城市杂用水水质》, GB/T 18921—2002《城市污水再生利用景观环境用水水质》, GB/T 18923《城市污水再生利用补充水源水质》, GB/T 19923—2005《城市污水再生利用工业用水水质》, GB/T 19772—2005《城市污水再生利用地下水回灌水质》系列标准。同时, 在北京、天津、西安、合肥、石家庄和青岛等地建立起一批再生水景观环境示范工程, 极大地推动了再生水利用。这期间的再生水利用主要以农业灌溉、工业利用、景观用水、城市杂用为主, 而对于再生水入渗的研究主要处于实验阶段。

以北京为例, 20世纪90年代末, 以高碑店污水处理厂再生水回用项目建成为标志, 开始了再生水利用第一阶段。到2011年北京市再生水利用量已达7.1亿 m^3 , 利用率为60%, 其中: 农业灌溉用水3亿 m^3 , 工业冷却循环用水1.4亿 m^3 , 市政用水0.4亿 m^3 , 环境用水2.3亿 m^3 。2005年《北京市节约用水办法》颁布实施, 进一步明确“统一调配地表水、地下水和再生水”, 首次将再生水正式纳入水资源进行统一调配, 成为重要的组成部分。正是在政策的推动下, 北京市再生水利用规模不断扩大。根据规划, 到2015年, 北京中心城将建成13座中水厂, 中水生产能力将达到230万 m^3/d , 年再生水利用量将达到10亿 m^3 。拓展再生水利用渠道, 充分利用再生水资源是今后一段时期内发展的主要方向。为拓宽再生水利用渠道, 加强再生水利用, 2006年北京市组织实施了温榆河水资源利用工程, 该工程将温榆河城市污水经过膜生物反应器(MBR)处理后的再生水输送至顺义城北减河, 用于城北减河和潮白河环境用水, 同时增补地下水水源, 2007年10月建成通水后, 每年有3800万 m^3 的再生水流入潮白河, 目前已形成300万 m^3 , 约1.5个昆明湖大的水面景观。该工程开启了中国再生水地表入渗回灌增补地下含水层的实践。按照北京市有关部门的规划, 今后几年内将进一步拓展再生水利用计划, 将北运河城市污水深度处理后调到潮白河上游, 将清河和小红门污水处理厂的再生水调往永定河。这一系列工程中, 利用再生水入渗涵养地下水都将成为其主要目的之一。

在再生水应用方面, 北京市在全国处于领先水平。通过“十一五”期间水专项课题的研究和实施, 提出了污水处理工艺改选方案和运行的调控策略, 基本解决再生水生产工艺和技术问题。2011年北京市再生水利用量7.1亿 m^3 , 比上年新增0.3亿 m^3 , 再生水利用量已占全市总用水量的19%, 成为北京市稳定可靠的“第二水源”。连续三年超过地表水



用水量,成为北京市稳定可靠的新水源。“十二五”期间,北京市面临再生水大规模回用于景观及地下水涵养的趋势。

1.4 研究内容及技术路线

1.4.1 研究内容

本研究选择密云再生水补给区,布置监控断面,监测再生水入渗区水量和水质变化,建立地下水渗流与水质耦合模型,预测再生水入渗对下游地下水水源区的影响。根据实测数据和模型预测结果评价地下水补给区再生水利用的安全性,建立相应的技术标准和监测预警体系,在此基础上提出再生水排入河道的各项措施和建议。

综上所述,确定主要研究内容如下:

(1) 再生水对地下水环境影响的跟踪监测网建设。选择密怀顺平原再生水回用区,收集研究区水文地质资料,根据收集的资料与现场调查分析(包括水文地质钻探),查明研究区的水文地质条件,包括研究区的地层岩性结构,地下水水位、水质背景值,不同含水层的地下水流向、水力坡度等。在此基础上构建地表水及地下水环境监测网,并建立合适的监测方案,对研究区地表水、再生水及地下水进行监测。

(2) 污染物迁移转化规律模拟研究。对历史资料进行分析,获得不同水文地质单元的含水层渗透系数和弹性释水系数;通过室内土柱实验,分析典型溶质岩土介质中的迁移转化规律,并根据研究区空间尺度效应,获取地下水溶质运移的初始参数。构建研究区三维地层结构,建立三维渗流及溶质运移的数值模拟模型,并预测不同情景下再生水对地下水环境影响的长期变化。

(3) 预警体系研究。确定地下水污染预警指标、预警模型及预警级别,建立预警数据库,结合所建立的研究区地下水流和污染物迁移转化模型及监测网,建立研究区的污染预警体系,对地下水水源保护区范围内的污染事件进行预警预报。

(4) 再生水用于水源区水质标准研究。在实地调查、总结实施经验和收集分析国内外相关文献资料的基础上,对水质指标进行选取,参考并分析多种标准,确定水质指标限值,作为再生水用于水源区河道景观用水建议性标准。

(5) 再生水排入水源区河道各项措施研究。在研究北京市平原区再生水利用对地下水影响分区的基础上,总结再生水排入水源区河道的各种制度,提出了再生水排入河道的各项措施。

1.4.2 技术路线

本研究将采取野外物探、钻探与室内试验相结合、野外监测与室内技术模拟,查阅国内外再生水回灌地下水文献及相关实验成果,综合分析建立水源地水质预警体系,并在此基础上提出地下水水源区再生水用于河道景观水质标准的建议,制定再生水排入河道的各项措施。具体技术路线如图1-1所示。

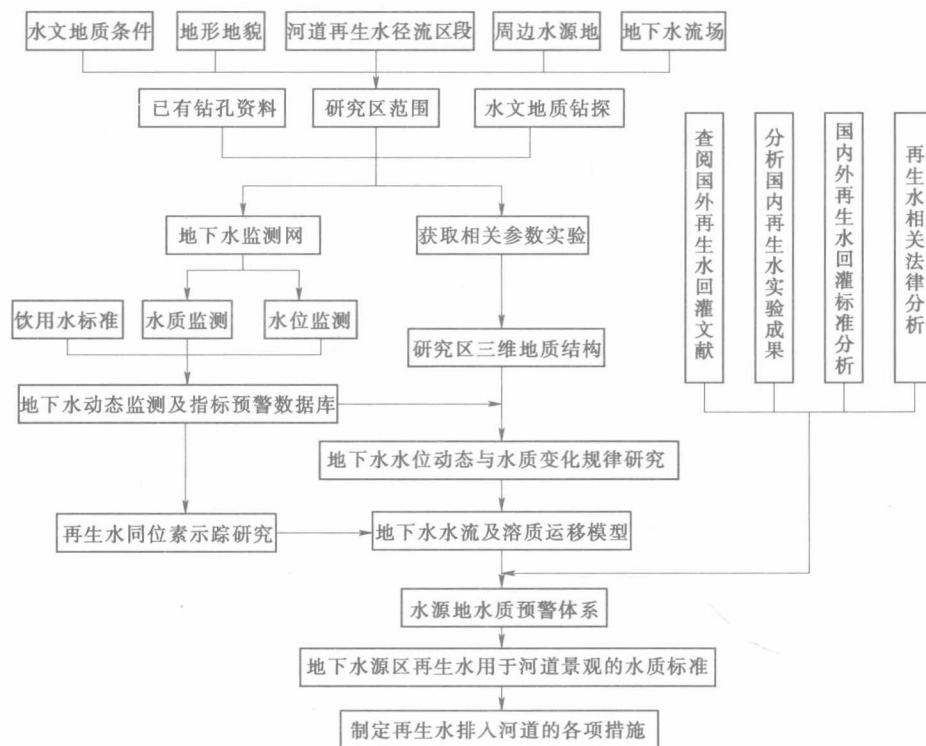


图 1-1 技术路线框图

第2章 再生水入渗补给地下水的风险及研究进展

再生水回用对地下水的影响可以通过两种途径实现：①再生水直接用于回灌入渗补给地下水；②再生水用于土地灌溉、河道景观时，再生水中的污染物可能会随着水分渗透进入含水层。

2.1 再生水利用潜在风险

2.1.1 病原体

再生水中最常见的人类微生物病原体发源于肠道。肠道病原体主要是通过宿主的粪便进入环境。它可以通过两种途径进入水环境：①排便经下水道污水流入；②经土壤和地表渗入。

再生水中发现的肠道病原体类型有病毒、细菌、原生动物和蠕虫。病原体水传播风险依赖于许多因素，包括病原体数量和在水中散布状况，所需感染剂量，暴露人群的易感性，排泄物污染水源几率，以及污水处理程度。

2.1.2 病毒

肠道病毒是再生水中存在的最小病原体。它们必须寄生于细胞中。因此，肠道病毒首先找到合适的宿主，然后感染宿主的细胞，在细胞中不断地进行自身繁殖。由于肠道病毒不具备自身繁殖能力，它们在水中并不活跃。这类病毒通常大部分散布在粪便污染水中。

在一些发达国家，通过广泛的疫苗接种，野生型脊髓灰质炎病毒已经基本上被根除。绝大多数肠道病毒的宿主范围较小，这意味着再生水中的大部分病毒只会感染人类，因此人类粪便污水是人类病毒感染关注的焦点。

2.1.3 细菌

细菌是再生水中最常见的病原体微生物。污水中存在大量的细菌病原体。细菌病原体很多起源于肠道，但是污水也存在导致非肠道疾病的细菌病原体，如军团菌、结核分枝杆菌和钩端螺旋体。细菌病原体新陈代谢旺盛，且具有自我复制能力。像其他肠道致病菌，它们常见的传播方式是通过受污染的水和食物，或者是人和人的直接接触。

2.1.4 原生动物

肠道原生病原体是单细胞真核生物病原体。肠道原生病原体脱离宿主后会进入持续休眠阶段，此时它们被称作胞囊或卵囊。在饮用水处理和污水再生利用时，原生病原体都会从水源中被分离出来。最常见的原生病原体有内阿米巴属、肠贾第虫（以前被称为梨形鞭毛虫属）和隐孢子虫。



饮用受卵囊污染的水或食物,或者人与人直接接触,都能够导致感染上述三种原生病原体。肠贾第虫和隐孢子虫普遍存在于淡水或河口水域,并且全世界很多国家都发现过这两种原生病原体。世界各地都可以检测到内阿米巴,虽然它常见于热带地区。像细菌病原体一样,各种家畜和野生动物都是原生病原体感染源。

2.1.5 寄生虫

肠虫(线虫类和绦虫)是常见的肠道寄生虫,它们通过排泄通道传播。在感染人类之前,这些寄生虫通常需要在中间宿主中生长。肠虫有很复杂的生命周期,需要在二级宿主中生长,因此不会影响到再生水。污水中会经常检测到蠕虫寄生虫,包括园虫(蛔虫)、钩蠕虫(十二指肠钩虫或美洲板口线虫)和鞭虫(毛首鞭形线虫),它们会造成很大的健康风险。这些蠕虫生命周期简单,不需要中级宿主,可以通过排泄物通道造成感染。

污水再生利用中存在的微生物病原体造成的健康风险获得了普遍关注。世界各地蠕虫感染的主要来源是使用了未经处理或部分处理的污水对农作物灌溉。在墨西哥,农民使用未经处理的污水进行灌溉农作物,他们被蠕虫感染的几率要大于普通人群。研究人员发现成年人蠕虫感染率与污水处理的程度相关,污水处理程度越高,感染率越小。

再生水和有机污泥用于谷类作物灌溉确实引起了人们对病原体感染的公共关注和商业关注。如果食用部分处理污水灌溉的蔬菜没有多大的健康风险,那么可以推测食用再生水灌溉生长的谷类作物的微生物病原体感染风险会更低。更具体地说,在人类食用之前,谷物通常经过了一定的处理,这样可进一步降低健康风险。

2.1.6 微量有机物和重金属

虽然许多国家,如澳大利亚和美国,在污水再生利用方面规定了相应的标准,但是这些标准往往将重点放在微生物病原体和营养物导致的健康风险与环境风险上。除了重金属污染物,其他微量化合物很少在再生水利用标准中提到,而杀菌剂、毒剂的副产品和药用活性化学物只是简要提到。如今研究者正关注它们可能对人类健康和环境造成的潜在风险。如果这些化学物在污水处理过程中没有完全消除,它们很可能在环境中积累,并且最终进入食物链。

重金属污染物很容易在污水处理过程中被除去。污水中绝大多数的重金属污染物在处理过程中被固化沉积,处理后的污水中仅仅残余浓度极低的重金属化合物。因此,再生水农业回用方面重金属污染物不会成为令人担忧的问题。如果再生水来源于工业废水或者是处理不完全的污水,那么重金属化学物需给予关注。这种再生水用于农业灌溉会造成土壤中大量聚集重金属离子,从而被农作物吸收。据调查,纤维作物,如亚麻和棉花,如果种植在重金属污染的土壤中,它们会吸收大量重金属离子,最终会导致减产。如果水稻生长的稻田直接用造纸厂的工业废水灌溉,稻粒中重金属含量会很高且不能食用,因此会对大米为主要饮食组成的群体造成健康风险隐患。

除了重金属污染物,引起公众普通关注的微量化合物有药学活性化合物(PhAC)、内分泌干扰物(EDC)和消毒副产品(DBP)。这些药学活性化合物(PhAC)、内分泌干扰物(EDCs)通常来自工业或生活污水,消毒副产品产生于再生水的二次氯化处理。在处理后的再生水中,这些化学物的浓度往往很低(一般在 ng/L 的范围内),所以不会造



成健康风险，除非是长期大剂量摄入才会导致临床效果。因此，微量化合物也是一个令人关注的卫生领域。

2.1.7 内分泌干扰物

内分泌干扰物（EDCs）是一种外源性干扰内分泌系统的化学物质，进入动物或人体内可引起内分泌系统紊乱并造成生理异常。污水和环境中的已知内分泌干扰物包括雌性激素化合物（常见于避孕药中）、植物雌激素、杀虫剂，以及化工原料，如双酚 A、壬基苯酚和重金属。未经处理的污水是内分泌干扰物的主要来源，并且比其他水源的浓度更高。

虽然内分泌干扰物存在于未经处理的污水中，但是它们的浓度远远低于体内天然激素，并且比天然激素的内分泌功能小上千倍。再生水二级处理可以除去污水中绝大多数的内分泌干扰物。内分泌干扰物在处理后的再生水中浓度很低，而且它们在环境中潜在的半衰期短暂，这意味着内分泌干扰物在再生水农业回用中风险较小。

虽然内分泌干扰物对人类健康的影响较小，但却对常常接触到含有内分泌干扰物的野生动物（如美国佛罗里达州的短吻鳄，英国河流的鱼类）产生较大的影响。据调查，美国佛罗里达州的幼年短吻鳄鱼被发现患上生殖腺生长问题，这与佛罗里达大沼泽地中存在雌性激素化合物相关。乔布林研究表明，在英国河流内发现雌雄同体的鱼类，这与水源中存在的内分泌干扰物有关。

2.1.8 药物活性化合物

环境水域和污水中检测到的大多数药理学活性化合物是用于治疗人类和动物的不同种类的药物。这些药物包括止痛药，如布洛芬、咖啡因、镇痛剂，降低胆固醇药物，如抗生素和抗抑郁药。这些药物可以通过不同途径进入环境，但是最常见的途径是通过处理和未经处理的污水。

类似于内分泌干扰物，药理学活性化合物同样能够造成环境风险和人类健康风险问题，并且它们更加广泛地分布于污水和再生水中，因此需要给予更多的关注。有些药理学活性化合物很容易通过污水处理清除，但是其他一些则会持久地存在于水源中。然而，不管怎样，处理后的再生水中药理学活性化合物浓度很低，比日常药物使用和日常护理低很多，所以即便是再生水农业回用时被农作物摄取，它们也不会造成较大的人类健康风险。药理学活性化合物应关注的焦点在于它们增长了土壤和水中微生物对抗生素耐药性的抵抗性。

2.1.9 营养物

污水中存在的主要污染物是有机和无机营养物。最常见的有机营养物是溶解性有机碳（DOC）。依据不同的污水来源，溶解性有机碳可以采取不同的形式。有机碳的来源也可以影响到营养物的生物利用度。例如，排放水中的溶解性有机碳比污水处理厂和食品加工厂中的更加顽固。据调查，再生水中的有机碳可以刺激土壤中微生物的活性。再生水中有有机和无机营养物含有高比率的碳和氮，它们可以刺激土壤中的微生物，从而导致灌溉土壤的渗透系数下降。经研究，土壤中微生物通过过度生长和生物膜制造降低灌溉土壤的渗透系数，因为它们可以堵塞土壤颗粒之间的孔隙。在不同的研究中指出莴苣类植物用含有高浓度无机营养物的再生水灌溉，它们的产量会比地下水灌溉的同类农作物的产量高。观察到谷类农作物用污水或部分稀释的污水灌溉要比用未处理地下水灌溉时产量高。