

国土资源公益性行业科研专项项目研究成果

# 华北平原典型地区地下水 回灌关键技术与工程示范

刘少玉 郜洪强 陈立 邵景力 等著



地质出版社

国土资源公益性行业科研专项项目研究成果

# 华北平原典型地区地下水 回灌关键技术与工程示范

|     |     |     |     |     |
|-----|-----|-----|-----|-----|
| 刘少玉 | 郜洪强 | 陈立  | 邵景力 | 赵红梅 |
| 崔雅莉 | 王哲  | 马琳娜 | 赵华  | 刘鹏飞 |
| 芦岩  | 周晓妮 | 宋淑红 | 刘林敬 | 刘敏  |
| 何泽  | 耿新新 |     |     |     |

著

地质出版社

· 北 京 ·

## 内 容 提 要

该书以华北平原典型地区为例,针对华北平原地下水严重超采、开采漏斗扩张和地下水资源不断减少的问题,运用沉积学、高分辨率层序地层学和浅层地下水人工补给调蓄调控优化控制系统理论思想,系统采用水文地质钻探、岩土颗粒分析、光释光测试、抽水试验、渗水试验、室内堵塞与解堵试验、室内回灌渗流试验及室外现场回灌试验等方法,以及地下水数值模拟、地下水动态监测与检测和现代地理信息系统地下水回灌管理平台建设等综合技术手段,查明了回灌区浅层含水层结构及其空间展布规律和水文地质参数系列,据此合理布设了4种形式不同深度的回灌井类型,并以此为核心集成地面回灌水源引入水质净化处理保证工程设施建设,从而形成地下水高效回灌系统。从防止发生物理、化学和生化3种类型堵塞的角度出发,探索了地下水回灌堵塞类型机理及相应的处理方法,解决了水质安全条件下的包气带建井、洗井、分层快速回灌、预防堵塞和高效回灌运行等关键技术问题。成功建立了藁城区梨园庄村典型地下水回灌示范工程,通过试验取得了大量基础数据,整理分析了回灌中的现象和存在的基本规律,在理论方面做了初步探索,对未来的研究具有启发性。该书还探索和系统总结了高效地下水回灌技术系统和区域地下水回灌模式及亚模式,具有较广泛的应用价值。

该书重点立足于浅埋含水层地下水井回灌技术的典型研究,但其总体成果从系统的理论、系列的技术应用到区域模式的总结上都突破了典型研究的局限性。其研究方法、科学思路和技术路线都富有先进性,对于更好指导地下水科学回灌,提高华北地区地下水资源安全保障能力和改善水环境有重要现实和深远意义。本书可作为水文、水利、资源、地质环境和生态环境领域教学与实践重要的参考资料。

### 图书在版编目(CIP)数据

华北平原典型地区地下水回灌关键技术工程示范 /  
刘少玉等著. —北京:地质出版社, 2017. 6

ISBN 978 - 7 - 116 - 10285 - 9

I. ①华… II. ①刘… III. ①华北平原 - 地下水补给  
- 研究 IV. ①P641. 25

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 030640 号

---

责任编辑:田野 房媛

责任校对:李玫

出版发行:地质出版社

社址邮编:北京海淀区学院路31号,100083

咨询电话:(010) 66554528(邮购部);(010) 66554631(编辑室)

网 址: <http://www.gph.com.cn>

传 真:(010) 66554686

印 刷:北京地大彩印有限公司

开 本:787 mm × 1092 mm  $\frac{1}{16}$

印 张:28.5

字 数:700千字

版 次:2017年6月北京第1版

印 次:2017年6月北京第1次印刷

定 价:118.00元

书 号:ISBN 978 - 7 - 116 - 10285 - 9

---

(如对本书有建议或意见,敬请致电本社;如本书有印装问题,本社负责调换)

# 序

水，是生命之源泉。万物之生长，都依赖于水。原始人类，饮用的是天然雨水、河水。原始，有的是以自然洞穴为居，既可以挡风避雨，又可有洞内水源，或者傍河而居，有河水供给。

对于地下水，主要还是从饮用地下水的露头——泉水的利用为主。我国战国时期，公元前 475 ~ 221 年，就已利用山西太原晋祠泉，灌溉 4 万亩农田。秦朝时，距今 2100 多年前，修建了广西临安的灵渠，沟通湘、漓两江，实际上沟通了我国主要的长江和珠江两大流域；战国时期，就已开采四川自贡的深部盐卤水；这表明，我国在地表水和地下水的开发中，早已达到很高的水平。

地表水易于开发利用，所以世界上许多国家和地区，在初期发展中，各方面用水首先是选择地表水。我国早期修建的都江堰迄今仍发挥分水与灌溉防洪作用。但是，地表水仍是数量有限，而且后来工业发展过程，地表水又多受污染，所以工业发展一定阶段后，城镇人群的大量生活饮用水，就转向采用地下水资源。据不完全统计，我国有 70% 左右的城镇的人民生活用水，是采用地下水。

我国华北平原，其中面积约  $13.92 \times 10^4 \text{ km}^2$ ，分别从属北京市、天津市和河北省管辖。这个平原是我国首都所在，又是华北重要经济开发地区。特别是我国北方的重要产粮地之一，也是北方农业的发展基地。但是，由于长期工业发展与人民生活需求，完全依赖华北平原地下水，造成过量开采地下水，而形成大的地下水降落漏斗十多个，其中心水位埋深 26.5 ~ 84.2m。极个别的只有 8.7m，漏斗面积不断发展，诱发出现地面沉降，几乎已连成一片。这种情况，又会加剧旱涝灾害情况，使平原生态恶化，也加大各方面需水量。

例如：河北滹沱河上游修了黄壁庄水库，下游常因库水不下拽而使河道干涸，大力抽取地下水导致地下水位下降过大。水利部门进行一次放水试验，黄壁庄水库下拽  $8.78 \times 10^8 \text{ m}^3$  水，经 110km 至中山水文站。以前只需要 15 小时，下放水就可大部分到达中山水文站。经过这次试验，历经了 190 小时，才到达中山水文站，而测到的水量只有  $3.9 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，近  $5 \times 10^8 \text{ m}^3$  水自动下渗补给地下水。

我国处在季风气候条件，雨季多在 6 ~ 9 月份，华北平原，多年平均雨量只有 600mm

左右，一般不超过 800mm，仍呈半干旱气候条件。汛期时，又多发洪灾、内涝。因此，利用汛期集中降雨量，如何调蓄、回灌于地下，这是很重要的。通常，夏季集中降水的流量，又下泻入海，而冬、春季节又缺雨少水，而造成严重冬 - 春连旱。所以：“以丰补欠”、“以蓄补源”、“以灌补采”，是非常重要的。

对汛期过多的降水量可调蓄在地表水库，也可调蓄于地下水水库。调蓄的方法，可以“加大河道渗漏”，“人工凿井加灌措施”。

鉴于华北平原的地下水降落漏斗的危险现状，并考虑到目前南水北调的中、东线调水工程的胜利运行，因此，受国土资源部委托，中国地质科学院水文地质环境地质研究所、河北省地质调查院及中国地质大学（北京）共同完成《华北平原典型地区地下水回灌关键技术与示范工程》的公益性科研项目，并以藁城梨园庄人工回灌试验场为研究基地，对浅层回灌做出了积极探索。

刘少玉同志针对华北及西北的干旱、半干旱地区的水文地质特征做了很多研究，并曾参与了中国工程院西北水资源与环境方面咨询项目，进行有关西北内陆河流域的水环境及治理方面课题的研究。刘少玉同志在这方面有丰富经验和很好的科学认识。结合这次回灌的技术探索，也更加丰富了有关认识与经验。

可以说，这项刘少玉博士负责领导的成果，将会造福于华北广大人民，有助于解决华北平原更好开发利用地下水资源的问题。

刘少玉同志，曾是我的优秀博士生，也是好的合作者。这次为他的新成就，我欣然愿为之作序。



2016 年 7 月 18 日

# 前 言

地下水作为一种极其宝贵的资源，在全球供水中占有十分重要的地位，地下水也是我国北方比较稀缺的宝贵资源，是地区供水和良好环境维护发展的基础。随着我国北方地下水开采程度逐年提高，可用的地下水资源在不断地减少，尤其是旱季枯水期，经常出现用水集中，大力开采地下水用于农田灌溉，地下水位不断下降加深的现象，以致造成多年累积成连片的地下水位降落漏斗；而雨季丰水期到来，又常常出现汛期降水过剩、雨洪径流过量、甚至为度汛水库水被大量排放废弃的情况。

矛盾的是在缺水严重的华北地区，当地的降水、雨洪水及地表水总利用率尚处在较低的水平（一般不超过 25%）。一方面，华北平原具有得天独厚的广阔巨厚的地下粗颗粒松散沉积层，特别是冲洪积扇和古河道发育良好，加上过量开采造成的降落漏斗，具备了巨大的地下蓄水库容，而这一优势或因为自然补渗条件的限制或人为的减弱未能发挥应有的作用，地下水没能得到很好补充，地下水资源未获得应有的补给恢复；另一方面，集中过剩的宝贵的地表水资源又往往无处蓄存，从而造成内涝灾害，又不得不花费更多的人力、财力和物力去排洪排涝，尤其是近些年，在异常气候影响下，这种现象趋于频繁，从而造成水资源巨大流失浪费和人财物的巨大花销与损失。

地下水具有分布均匀、水质优异和便于就地开发利用的优点，但也有循环交换缓慢、更替周期漫长的不足（平均约需 1400a），而降水、河流具有量大、更新快（周期约 10 ~ 12d）的特点，但存在时空分配不均、难以满足需要的弱点。资料统计显示，北方降水 70% ~ 80% 集中于 7 ~ 9 月份的汛期，蒸发和地面径流损失多在 60% 以上。因此，充分利用地下空间储水能力，将集中易流失的降水、地表水灌入地下，加快人工有效调控储存，实现地下的调节利用，不失为缓解和解决水资源短缺矛盾的有效措施手段。

解决任何问题，必须从实际出发，应该说，过去曾经利用宽阔的天然河道、蓄洪洼地和闲置的土地进行大面积地下水补给的时代已经不具备普遍性了，因为随着华北地区人口增多，城市扩张、景观建设需要及土地利用程度的提高，一度的行洪河道、蓄洪洼地和闲置河岸地大多都被开发为其他用途，过去城市建设发展往往与大江大河相伴而生，两者相互促进良性和谐发展，而现在的河道、尤其是城市河道不再起到单一行洪方面的功能作用了，更多的是景观美化、调节局部小气候的宜居作用。同时随着城市地下空间利用的发

展,河道对地下水补给功能作用也在逐渐丧失。上述条件情况的变化,促使我们必须依据现实情况为解决问题的出发点,努力做到因地制宜,将中外新老人工补给地下水的技术经验融合起来。经过对以往地区地下水不同回灌方式效率的深入分析比较,选择了高效率的浅井或浅井群作为本项目回灌工程示范的主要形式,也是本项目立项初旨之一。

项目内容设置上,经过了立项阶段的专家充分咨询讨论,最终分解为四个主要研究内容即四个课题:课题一为华北平原典型地区地下水回灌系统条件研究,重点是回灌区地层结构、水文地质参数研究和回灌水源条件分析;课题二为地下水高效回灌方式(布井、井结构)研究及工程示范,重点是地下水高效回灌井的建井技术体系研究;课题三为回灌工程防堵处理关键技术、方法研究及监测技术,重点是回灌水源净化适宜性及回灌井物理、化学及生物防堵技术系统研究;课题四为地下水回灌数值模拟及优化控制技术,重点是从较大范围的区域—研究区—试验场三级三维数值模拟、优化控制及地理信息管理平台建设。

针对项目研究重点,就如何利用地下水含水层储存优势,通过浅部钻探的松散层结构研究和现场试验水文地质参数的系列研究,确定了浅层回灌井结构形式,并对在含水层包气带中如何打回灌井,如何使用泥浆,如何冲洗疏通井壁,如何克服井下堵塞问题都做了有意义的技术探索,其中如何利用现代技术建井、先进材料成井、科学快速水质处理、管道控制回灌、自动动态监测、计算机数值模拟、现代信息优化管理控制等,都是可取的技术和值得进一步深入探索的问题。本项目的显著特色是各个课题都十分重视第一手实际资料的获取,为此课题一在研究区、回灌试验场实施钻井9眼、观测孔2眼(深60m),粒度样品测试800组,抽水试验2组,渗水试验3组;课题二施工了4眼回灌井和2眼监测孔,并取得了大量室内室外回灌试验数据;课题三建立了专门的室内防堵实验室及试验场观测仪器设备,取得了大量宝贵的数据;课题四在研究区设立了16个地下水位监测点,监测周期14个月,并进行了多次水位统测,所有这些为研究工作打下了最坚实的基础。项目最终成果是在各个课题成果报告基础上,根据项目负责人编写的大纲,经充分讨论通过,历时大半年统编、充实和深化,完成了报告讨论稿。后经过有关专家推敲斧正和补充完善,形成送审稿。

刘少玉研究员承担了项目立项申请、项目任务书设计、回灌工程示范建设和成果大纲编写、成果报告的统编、充实和深化,以及本专著第1章第1、3节、第7章、第13章第4节、第14章、前言和结论与其它章节部分内容的编写工作,并完成各个课题成果审查、项目成果终审、修改完善和定稿;赵红梅副研究员、刘林敬硕士完成了第4章编写;邵洪强高级工程师、卢岩硕士完成第2章第4节和第5章编写;陈立博士、马琳娜、耿新新硕士完成了第1章第2节部分内容和第8章编写;邵景力教授、崔雅莉教授等完成了第1章

第2节部分内容和第9、10、11、12章的编写；刘鹏飞硕士完成了第1章第2节（国外研究现状及趋势）、第4节、第3章第1、2节、第6章大部分和第7章第2节部分内容的编写；宋淑红博士完成第2章第2、3节和第3章第3节编写；周晓妮博士完成了第1章（国内研究现状及趋势）和第2章编写；王哲硕士完成第13章第2、3节编写，刘敏博士完成第13章第1节编写。刘鹏飞硕士在室内外试验、数据整理和制图方面投入了大量精力和劳动，张文强硕士为报告认真校对、编排做出了重要贡献。项目各个课题重要参加者还有：刘翠翠、杨劲松、姜高磊、边文英、王成敏、毕志伟、王利康、刘哲、毛欣、王振华、贺元、廉巍、丁彦宇、成蒙、卢蓉、朱谱成、张凤峨、钱龙、李华耀、宋白雪、徐映雪、张秋兰、刘文娜、翟彩霞、石岳、杨扬、李维静、代俊宁、李园、赵雅楠、黄丽平等。

河北地质职工大学朱新船教授，在回灌井抗冲击钢筋水泥滤水管研制、回灌井反循环钻机寻租、包气带建井中的生物可降解泥浆科学配比使用技术、护壁泥浆及填料层泥浆冲洗技术上给予大力帮助和现场指导；衡水绿环地下水回灌工程有限责任公司董事长兼总经理刘金生，在回灌井钻井技术、填料技术、回灌防堵回扬技术上给予了热情帮助；在试验场选址和建设中，藁城区水务局倪华利副局长、藁城区城建局聂彦超局长、土地园林建设处陈新勇处长、石家庄农业现代化生态园彭春海书记、梨园庄村党支部李建新书记给予的大力支持、关照和帮助；在回灌试验中，石津渠藁城水管站站长赵春房提供了帮助；尤其是水文地质环境地质研究所所长助理、工会主席李增水在工程示范场地协调落实方面给予巨大无私的帮助和强有力的支持，使项目工程示范得以落实，费宇红研究员、严明疆博士在提供资料方面给予了切实的帮助。在此，一并表示衷心的感谢！

在项目研究过程中，一方面除了关注学习国内外相关技术经验，还十分重视室内回灌井控制性实验和防治堵塞控制性实验的研究，因为只有人为严格控制的室内实验条件下，才能重现自然的原本面目，才能理解真正的固有自然规律。对取得的大量试验数据，整理了回灌中的水量水位变化现象和存在的基本规律，在理论方面仅做了启示性初步探索。室内试验设计、试验过程和室外回灌场建设及试验过程，也促进了一些回灌关键技术的进步发展。并将从书本文献学来的技术经验和试验中取得的认识及时回馈应用到试验数据分析中，坚持从学习到认识、从认识到实践，从实践的一般认识提高到规律性总结，再升华为理性认识。

开展地下水人工回灌无疑是解决水资源短缺的一种有效途径，未来在地下水回灌工程被不断应用的同时，其回灌技术也面临着越来越多、越来越大的挑战，人工回灌对地下水环境方面产生的影响也越来越受到关注，因此，地下水环境工程也将是未来一个重要发展方向。

本书的中心章节的主要数据都是试验中取得的，误差难免，但真实可信，在创新思潮推动下，我们也试图站在学科推进的角度进行一些尝试，尤其对地下水回灌过程阶段性判断、回灌量时空变化规律与渗流规律、高效地下水回灌技术系统、区域地下水回灌模式归纳总结等方面的一些认识还很不成熟，也受主客观多方面因素的制约，就地下水人工回灌而言，也面临着包气带建井技术、水质快速净化保证技术和防治堵塞诸多关键技术难题亟待进一步研发完善，因此，一些看法不够深入，也不一定完全正确，难免存在认识上的局限和错误，尚待商讨和长期不懈的探索，欢迎指正。

项目负责人 刘少玉

2016年7月

# 目 录

序

前言

|                              |    |
|------------------------------|----|
| 1 绪论 .....                   | 1  |
| 1.1 华北平原地下水回灌背景与需求 .....     | 1  |
| 1.2 地下水回灌研究现状与发展趋势 .....     | 5  |
| 1.3 研究目标与主要内容 .....          | 12 |
| 1.4 地下水人工回灌主要关键技术问题 .....    | 18 |
| 本章小结 .....                   | 21 |
| 2 研究区区域概况 .....              | 22 |
| 2.1 自然地理 .....               | 22 |
| 2.2 社会经济概况 .....             | 26 |
| 2.3 滹沱河流域地下水回灌历史概况 .....     | 27 |
| 2.4 回灌区水源条件分析 .....          | 31 |
| 本章小结 .....                   | 36 |
| 3 地质和水文地质 .....              | 37 |
| 3.1 地质概况 .....               | 37 |
| 3.2 滹沱河冲洪积扇水文地质概况 .....      | 38 |
| 3.3 浅层地下水开发利用状况及经济环境效应 ..... | 45 |
| 本章小结 .....                   | 51 |
| 4 研究区及回灌场含水层结构研究 .....       | 52 |
| 4.1 粒度参数与沉积亚相关系 .....        | 52 |
| 4.2 典型钻孔地层结构 .....           | 61 |
| 4.3 研究区含水层结构 .....           | 73 |
| 4.4 试验场含水层结构 .....           | 90 |
| 本章小结 .....                   | 95 |
| 5 回灌区水文地质参数研究 .....          | 97 |
| 5.1 抽水试验 .....               | 97 |

5.2 渗水试验..... 97

5.3 水文地质参数计算..... 99

5.4 区域水文地质参数分析及试验场参数确定 ..... 114

本章小结..... 128

6 地下水人工回灌工程示范系统 ..... 130

6.1 不同回灌方式回灌效率对比分析及选择 ..... 130

6.2 地下水人工回灌示范工程 ..... 136

本章小结..... 146

7 地下水回灌试验及结果分析 ..... 147

7.1 室内试验 ..... 147

7.2 试验场回灌试验 ..... 168

7.3 研究区回灌调蓄能力简析 ..... 195

本章小结..... 196

8 回灌工程防堵处理技术研究 ..... 198

8.1 回灌过程中堵塞机理研究 ..... 198

8.2 回灌水源处理技术研究 ..... 225

8.3 回灌过程中堵塞处理技术研究 ..... 242

8.4 现场回灌工程示范 ..... 252

本章小结..... 267

9 滹沱河冲洪积扇及研究区地下水流模型 ..... 269

9.1 水文地质概念模型 ..... 269

9.2 地下水流数值模型 ..... 278

9.3 模型的识别验证 ..... 279

9.4 区域与试验场地下水流模型耦合 ..... 286

本章小结..... 298

10 试验场地下水回灌方案分析..... 299

10.1 试验场回灌地下水流模拟..... 299

10.2 试验场地下水回灌方案确定及效果分析..... 314

10.3 试验场回灌水质变化趋势预测分析..... 321

本章小结..... 335

11 区域地下水调蓄与回灌论证..... 336

11.1 河道回灌..... 337

11.2 砂石坑回灌..... 341

|      |                    |     |
|------|--------------------|-----|
| 11.3 | 井回灌                | 345 |
| 11.4 | 石家庄市压采             | 348 |
| 11.5 | 综合回灌               | 352 |
| 11.6 | 地下水回灌方案对比分析        | 355 |
| 11.7 | 地下水优化调蓄和回灌方案论证     | 359 |
|      | 本章小结               | 370 |
| 12   | 地下水回灌管理信息系统        | 371 |
| 12.1 | 系统需求分析             | 371 |
| 12.2 | 系统总体框架             | 375 |
| 12.3 | 数据库建设              | 376 |
| 12.4 | 地下水模拟模型与信息系统的集成    | 377 |
| 12.5 | 系统应用               | 384 |
|      | 本章小结               | 396 |
| 13   | 华北平原地下水回灌补给模式      | 397 |
| 13.1 | 区域回灌补给水源条件分析       | 397 |
| 13.2 | 地下水补给储蓄条件分析        | 399 |
| 13.3 | 地下水补给入渗条件分析        | 408 |
| 13.4 | 华北平原地下水回灌补给类型及补给模式 | 409 |
|      | 本章小结               | 428 |
| 14   | 结论与展望              | 429 |
| 14.1 | 主要成果与结论            | 429 |
| 14.2 | 研究展望               | 434 |
|      | 参考文献               | 436 |

# 1 绪 论

## 1.1 华北平原地下水回灌背景与需求

### 1.1.1 任务来源、背景及研究意义

本项目来源于国土资源部公益性行业科研专项经费,由国土资源部国际合作与科技司组织充分论证,2011年6月经公开申报和北京竞聘答辩,于2011年年末正式批准启动,项目编号(201211079),起止时间:2012年1月—2014年12月。历时3年时间,由3家单位、40人参加了该项目的野外调查、试验和科学研究工作。

众所周知,我国的人均水资源占有量只有世界平均水平的 $1/4$ ,总体上是一个水资源严重缺乏的国家。在总量不足的情况下,我国的水资源还存在着时空分布严重不均的特点。尤其是我国的北方,汛期降水占全年降水的 $70\% \sim 80\%$ ,各地在汛期都存在着不同程度的弃水。因此,针对我国水资源时空分布不均的特点,为了有效地解决汛期余水的贮存和再利用问题,最大限度地发挥当地水资源的效益,除了在有条件的地区修建地表水库进行拦蓄之外,在没有合适的地形条件或是工程造价太高、蒸发损失大而不适合建地表水库的地方,选择地下含水层条件较好的地区,利用人工回灌贮存地下水以备后用,是值得重视的手段。

华北平原面积广大,是北方典型的缺水區,也是最重要的工业、农业生产和城镇快速发展集中区。无论是工业用水、农业灌溉和城镇生活供水,都以地下水为主要供水水源。持续几十年的超量开采,加之补给条件弱化,已经使地下水资源出现严重的枯竭状况。华北平原地下水位变化大致经历了天然流场阶段、局部地下水位下降阶段、区域地下水位快速下降阶段、地下水位震荡下降阶段。近几年,由于区域内降水分布较为均匀,农业用水量降低,城市加大供给地表水、减采地下水,已使部分地区水位下降得到抑制或略有恢复。地下水水位下降有其负面影响,但也提供了巨大的有利的地下水储水空间。因此,开展华北平原地下水人工回灌有着特别重要的资源保障与环境保护的意义。

地下水回灌是指采用人工手段,或借助于工程措施,人为地引导汛期洪水、沥水、河道与渠道弃水或再生污水通过地表渗滤或回灌井注水,甚至通过人工系统人为改变天然渗滤条件,将水从地面上渗透或直接输送到地下含水层中,以增加地下水资源量,随后同地下水一起作为新的水源开发利用,这就是所说的人工补给地下水,简称人工回灌或人工引渗。

地下水回灌的一般意义主要有:

①对径流和洪水实施有效的保存和处理,利用含水层蓄水;②补充可能的地下水水

量,增加地下水人工储备,提高供水能力,预防突发事件;③减少、控制或消除地下储水层水位之下降及地面下沉;④减少、阻止或改造咸水侵入体,减轻环境负效应;⑤为减少抽水和管道成本的蓄水,节省土地征用费与不必要的经济开支;⑥为夏季使用于冬季储存净水或冷水,允许通过地下扩散的热交换,有利于水能利用;⑦通过地面渗入,去掉悬浮固形物、有机质、细菌和病毒,改善地下水水质;⑧有利于防涝防渍,减轻灾害作用和环境危害;⑨与地面水库相比,地下水库占地少,蒸发损失少,蓄水容量大,成本低,不良生态影响小。

地下水回灌主要开始于20世纪60年代,随着水资源供需矛盾和环境问题日益突出而被水文地质工作者所关注,世界各国开展地下水人工回灌的工作发展得很快。1970年在英国里丁(Riding)召开了地下水人工回灌讨论会。1973年,在美国新奥尔良召开了地下废液管理与人工回灌地下水的国际学术讨论会。据参考资料,人工回灌地下水的数量占地下水开采量的比例为:德国为30%,瑞士为25%,美国为24%,荷兰为22%,瑞典为15%,英国为12%。中国从20世纪50年代开始研究以储冷为目的的地下水人工回灌工作,至20世纪60年代,上海市用人工回灌地下水来控制地面沉降和储冷、储热。20世纪70年代以来,华北平原地区由于大量开采地下水,使地下水水位大面积持续下降,形成了30多处地下水位区域降落漏斗,产生了一系列环境地质问题。为此,在北京、天津二市和河南、河北、山东三省的城乡地区,相继开展了浅层地下水和深层承压地下水的回灌试验;河北省在南宫市开展了利用古河道的含水层作为地下水库、人工回灌、调蓄河道洪水的试验研究。1979年10月,中国地质学会在北京召开了人工回灌地下水学术讨论会。

一般情况下,当地降雨径流、河川基流和洪水,经过净化处理的生活污水和工业废水等,凡能满足回灌水质要求的均可作为回灌水源。用于地下水回灌的水质,一般要求含重金属及难以降解的有毒物质应不超过生活饮用水水质标准,以防污染地下水。回灌时地表水需经过简易处理,其方法为:先将地表水漂浮物滤除送入大水池,使小颗粒泥沙沉淀,经初步过滤再送入加药池,形成絮凝状物质沉淀于池里,然后再经过沙过滤池和净化池,净化后的水即可用于回灌。地下水回灌方法有多种,主要为利用地表灌水回灌,利用河道和沟渠行水回灌,利用水库、坑塘蓄水回灌和向井中注水回灌,这些方法可单独使用,也可配合使用。

其中向井中注水回灌,是一种直接补给地下水的方式,占用场地小,适用于城市和工业区,也是补给浅部有较厚弱透水层潜水或深层承压水的有效途径。但是这种回灌方法由于井的滤水管过水面积有限,易堵塞,堵塞后清除也较困难,故回灌用水应加以过滤、消毒处理。

地下水回灌方式与回灌解决问题的目的有关,如增加工业用水水源、进行车间调温、制造冷源等,并且有着显著的经济效益,其回灌的范围不如农业宽广,回灌水量有限,补给水源的保证程度一般比农业要求高,回灌设备条件复杂要求高,这些要求对于以单纯增加地下水资源为目的的回灌来说在一个相当长的时期内是难以达到和不易推广的。本项目的研究工作仅限于增加地下水量,控制地下水质为目的的浅井回灌。

从大的方面来说,地下水回灌主要是利用地下有利的储水调蓄空间,解决地表水丰枯分配不均的地下存储、增加可采水量与社会用水不足及不协调问题,同时有利于水质改良

和水环境的良性维护。

### 1.1.2 必要性及需求分析

《华北平原典型地区地下水回灌关键技术与工程示范》的研究内容明确列入《国家中长期科学和技术发展规划纲要（2006-2020年）》水和矿产资源领域“水资源优化配置与综合开发利用”优先主题，同时，也是《国土资源部中长期科学和技术发展规划纲要（2006-2020年）》中地质环境与地质灾害领域“区域（流域）水循环与水土资源合理配置”优先主题，为国土资源领域科技进步与创新的重点。

华北平原人口多，经济发达，但水资源量少，资源环境问题集中、突出。特别是近几十年，由于气温偏高、降水减少、蒸发加大，工农业用水增大，水利工程截流损失以及污染、低效用水等，可用水资源急剧减少，缺水威胁越来越严重。在这种情况下，华北平原地下水作为地区主要供水水源，由于长期过度开采，出现区域地下水位大幅度下降、含水层疏干、地面沉降等一系列的环境地质问题。在一定程度上削弱了地下水对湖泊、湿地给水及植被保护的生态功能，加剧了地面干旱程度。为遏制漏斗发展、保障供水和保护环境，该项目研究刻不容缓，其迫切性主要表现在以下几个方面：

（1）华北平原地下水是地区发展支撑性资源，有着不可替代的资源保障和环境保护的功能作用，在未来水资源需求量增大，可用量却明显减少的形势下，需要采取多种切实措施加以保护利用，地下水回灌是地区环境、经济和社会可持续健康发展的迫切需要

华北平原水资源开发利用主要特点是补给源区地表河水主要被束缚在山区，平原河流大部分干涸；京、津、冀现有供水能力不能满足发展要求，缺水争水现象严重；河北省在缺水条件下，每年向京、津保证性供水约  $19.6 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。而且，在用水高峰期，城乡间争水和工业、农业间争水问题突出；生态环境用水和景观用水基本被生产、生活用水挤占，生态环境明显恶化。目前河北省地下水开采程度多数区达 100% 以上，超采普遍且比较严重，河北已经是全国最严重缺水的省份之一。

在过去 50 年中，华北平原大量开采地下水使总地下水储存量减少了约  $1300 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。地下水占供水总量约 70%，是地区发展支撑性资源，有着不可替代的作用。从城市到农村地下水普遍得到开发，各个行业都愿意开采使用地下水，且开采量逐年加大。但开采程度分布不平衡，部分地区超采严重，水位大幅下降。截至 2006 年，浅层地下水漏斗超过  $2 \times 10^4 \text{ km}^2$ ，漏斗水位埋深一般 30~60m，深层地下水漏斗超过  $7 \times 10^4 \text{ km}^2$ ，最大水头埋深达 110m，已经成为世界最大的地下水降落漏斗。漏斗使地下水天然流场发生巨大变化，诱发一系列环境地质问题，如地面沉陷、地裂缝等。2006 年大于 200mm 的地面沉降区面积达  $6.4 \times 10^4 \text{ km}^2$ ，其中北京、天津、沧州最大沉降量分别达到 1.2m、3.25m 和 2.5m，诱发了 400 多条地裂缝。

根据华北平原水供需平衡研究，2020 年总需水  $460 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，总供水量约  $285 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，水缺口在  $175 \times 10^8 \text{ m}^3$  左右，即使南水北调通水，仍处于缺水状态。从全国来看，没有哪个地区水资源供需矛盾如此突出，区域发展将长期受到水资源的严重制约。特别是近年来旱情加剧，在现有供水无法满足巨大的耗水体系情况下，未来华北平原地下水超采的范围和程度必将愈来愈严重，这关系到民生、社会经济的水安全和粮食安全问题。面对水资源紧缺，水环境问题严峻和生态地质环境问题突出的形势，破解上述一系列难题，达到环境

与人和谐用水共同发展,既是对专业工作者的艰巨考验,也是对整个社会个人行为的严格要求,调整水资源开发利用战略已经势在必行。需要对地下水资源采取多种切实可行的措施加以科学保护利用。以地下水“回灌”提高水储备持续地支撑“开采”是社会可持续发展的战略需要。

(2) 开展地下水回灌研究,既是有效遏制漏斗发展、维持供水稳定和保护地下水资源的可持续利用性、促进生态文明建设的需要,更是提高地下水战略资源安全保障能力的需要。

节流是必要的,但不能从根本上解决发展条件下巨大的水需求,开采地下水是为了供水或增加供水,而回灌更是为了解决开采过程中的水量不足。在地下水天然补给减弱条件下,实施人工回灌,可以比天然条件下更有效的弥补过去的超采、满足现在的开采和增加未来的开采潜力。而且在回灌过程中,保证漏斗采空区得到最佳恢复,地下水量得到充分补充,水质获得有效净化,同时在数量和质量上尽量满足开采的供水需要。这对遏制超采漏斗的进一步发展、防止其他环境灾害的诱发和保护地下水资源的可持续利用性,促进生态建设保护有重要意义。同时,在面临近些年干旱灾害加剧、地表污染事件增多和战争潜在威胁增强的情况下,人工回灌地下水在一定程度上也是提高地下水战略资源的国家安全保障能力的需要。

(3) 华北平原古河道以及开采形成的降落漏斗等采空区,提供了巨大的地下水回灌蓄水库容;水库弃水、雨洪水及南水北调水提供了充分水源,为回灌创造了客观条件。现有的技术完全有能力实现利用地下调蓄功能、提高水资源总体利用水平和人类生存环境质量的目標

华北平原山前带现代河道和古河道十分发育,岩性较粗,储水能力强,加上过量开采造成的降落漏斗,增加了包气带的厚度,为我们提供了巨大的地下蓄水库容或场所。据太行山前平原地下水调蓄功能研究,山前平原包气带厚度已经由 20 世纪 60 年代的 3~5m 增大到现今的 10~30m,局部地段大于 40m。可利用的地下调蓄的总库容达  $538 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,其中北京—永定河调蓄区约  $150 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,保定—石家庄—滹沱河调蓄区约  $250 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

地下水回灌主要是利用巨大的地下空间储存雨前水库弃水、雨季过剩沥水和外引缓用之水。根据以往研究,滹沱河上游黄壁庄水库每年有 2 次弃水,即汛前弃水和汛期弃水,根据 40 年降水资料建立的水库弃水量与上年降雨及本年降雨的回归方程预测结果,平水年份黄壁庄水库弃水量为  $1 \times 10^8 \sim 1.5 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,丰水年份  $3 \times 10^8 \sim 4 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。同时,岗南水库和黄壁庄水库每年通过石津渠向下游供水(枯水年  $2 \times 10^8 \sim 3 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,平水年  $5 \times 10^8 \text{ m}^3$  左右,丰水年  $6 \times 10^8 \text{ m}^3$  以上)做农灌之用。南水北调后,规划石津渠作为中线向衡水供水渠道,保障下游供水,因此,有一部分水可考虑做回灌之用。南水北调正常配水后即便不能直接做回灌之用,在丰水年和平水年情况下,也可以在用水淡季一定程度上替代出  $1.49 \times 10^8 \sim 2.57 \times 10^8 \text{ m}^3$  可调蓄水量。同时,一些城区及低洼地雨季沥涝水数量也很可观,这将为地下水的回灌提供必要的水源条件。显然,人工回灌在增强地下水补给次数、补给时间、补给能力和入渗效率上比靠天然补给更具有优越性。

总之,在客观上,项目实施的具体条件已经具备,在保证补给水源的水质和回灌区无污染源,并建设布局合理的引水、汇水和排水以及调节地表水设施的基础上,回灌示范工程建设必能实现。地下水的多方面优越性和强大的功能作用,将在回灌工程示范中得到统

一体现,研究成果可为地下水持续开发利用提供依据。

综上所述,通过开展《华北平原典型地区回灌关键技术与工程示范》研究,人工高效“回灌”解决开采中水量不足的实际问题。实施水资源开发战略转移,大力储备地下水资源,最大限度实现地下水和地表水合理配置和高效利用体系,实现水资源和环境双重保护,遏制地下水超采,控制和修复地下水漏斗,对促进华北平原地下水持续供给,保障区域用水安全、粮食安全、工程安全和环境安全具有非常重要的现实和长远意义。

## 1.2 地下水回灌研究现状与发展趋势

地下水回灌是利用工程措施将地表水注入地下含水层,人为增加地下水补给量的一种模式,其目的是将时间分配不均的、缺乏储存空间的、零散的、供水不稳定的地表水源,包括泉水、河流、水库弃水、雨洪水、处理后的再生水等,利用地下水回灌工程转化为较为稳定的、可持续利用的地下水资源。近30年来,世界各国对地下水回灌技术十分重视,发展十分迅速,取得了良好的经济效益与环境效益。在当前形势下,如何采用水资源转化的新观念与新技术,将多余地表水转化为地下水,在治理地下水超采的同时,增加水资源可利用量,进一步缓解缺水地区水资源的供需矛盾,实现有效利用地表优质水源与涵养地下水的“双赢”,成为当前水事工作的当务之急和重要课题。

### 1.2.1 国外研究现状及趋势

人工补给地下水,作为人工扩大地下水资源的一种手段,是解决当前许多地方水资源不足和改善水环境的一个重要途径,也是解决地下水过度开发引起的地下水降落漏斗、地面沉降和海水入侵等问题的有效方法,同时在地下水库、水源热泵、工程降水、城镇供水、农田灌溉、盐碱化土壤改良、污染控制、环境保护以及石油开发等领域也有着广泛的应用。地下水人工回灌具有悠久的历史,经历了最初的无意识阶段、人工补给阶段和综合应用阶段。

从人类开始有意识地利用地表水资源进行灌溉、拦截河水和积蓄雨水的时候,无意识的水资源地下存储就开始了。例如:1860年巴基斯坦开始修建了印度河流域巨大的灌溉系统,大量地表水流经灌溉渠网渗入地下。19世纪末期,伴随着水资源消耗量的持续增大,以及地下水资源的广泛开发,产生了地面沉降、海水入侵等一系列生态环境地质问题,由此受到了社会的广泛关注和重视,并明确提出进行地下水回灌,这一时期的地下水回灌主要是针对地下水开发利用过程中出现的负效应采取的一种应对办法。

伴随着经济和社会的迅速发展,水资源供需矛盾愈演愈烈,水资源短缺和水环境的恶化问题更加突出,人类开始将大气水、地表水和地下水视为一个统一的整体,从系统科学和环境科学的角度来寻找更加科学合理的方法,不再单一的、被动地应用地下水回灌,而是积极地将其与地下水开采、水资源调蓄和存储结合起来,统一规划,雨洪水的收集利用回灌、地下水人工调蓄、地下水库等更为系统和合理的方法被人类所采取。在一个多世纪的发展中,各国水文地质工作者都在积极探索更加高效、简单的地下水人工回灌方式,这些回灌方式主要分为地面回灌法和地下灌注法。