

水资源管理的新战略

人工地下水回灌 (含光盘)

云桂春 成徐州 等 编 著

中国建筑工业出版社

水资源管理的新战略

人工地下水回灌

云桂春 成徐州 等编著

中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

水资源管理的新战略：人工地下水回灌/云桂春，
成徐州等编著. —北京：中国建筑工业出版社，2004

ISBN 7-112-06474-0

I. 水... II. ①云...②成... III. 地下水-水
循环 IV. P641.25

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第034847 号

**水资源管理的新战略
人工地下水回灌**

云桂春 成徐州 等编著

*

中国建筑工业出版社出版、发行（北京西郊百万庄）

新华书店经销

北京建筑工业印刷厂印刷

*

开本：787×1092 毫米 1/16 印张：11¼ 字数：270 千字

2004 年 8 月第一版 2004 年 8 月第一次印刷

印数：1—3,500 册 定价：33.00 元（含光盘）

ISBN 7-112-06474-0

TU·5706 (12488)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题，可寄本社退换

（邮政编码 100037）

本社网址：<http://www.china-abp.com.cn>

网上书店：<http://www.china-building.com.cn>

城市污水再生后用于人工地下水回灌工程是当前水资源管理以及环境工程领域的热点之一。本书全面系统的论述了人工地下水回灌工程的基本理论，每部分内容都结合了当前国内外正在开展的相关研究项目的最新进展和成果，并介绍了国外主要工程实例和国内首次开展人工地下水回灌工程研究的情况，具有较好的理论性和实用性。

本书内容包括：地下水回灌在水资源一体化管理中的地位与作用；地下水回灌工程的勘探与选址；回灌水及其预处理；土壤含水层处理；健康风险及其评价；人工地下水回灌工程的设计与运行；地下水回灌工程的工程实例介绍；回灌工程设计经济问题；高碑店人工地下水回灌工程案例。本书所附光盘介绍了美国 Gilbert 和 West Basin 2 处人工地下水回灌工程实例。

本书适用于给水排水，水资源开发和利用，环境工程与环境保护，污水处理、再生及回用，水利、水电等部门的策划、设计、科研、管理和施工人员参考，也可用做相关专业大专院校师生的教学参考用书。

* * *

责任编辑：俞辉群

责任设计：崔兰萍

责任校对：张虹

前 言

随着工农业的发展和世界人口的持续增长,水资源短缺已成为人类面临的最严峻的资源问题之一。中国拥有世界 20% 的人口却只享有世界 6% 的水资源,其中现实可利用量只有 $1.1 \times 10^{12} \text{m}^3$ 左右,仅占淡水资源总量的 39.3%,是世界上 13 个贫水国之一。全国 2/3 以上的城市存在缺水问题,其中 100 多个城市严重缺水。与此同时,我国现在每天排放的污水约 1.13 亿吨,有相当数量的城镇污水未经处理直接排放,致使全国许多江、河、湖泊和城市水源受到了不同程度的污染,更加剧了水资源短缺,形成恶性循环。

城市污水经再生后充分利用是扩大给水水源的重要途径之一。城市污水水量、水质稳定,再生水厂基建投资比远距离引水经济得多。合理利用城市污水可以缓解水资源紧张、减轻环境污染,具有重要的社会、环境和经济意义。

根据回用方式及水循环过程,污水回用可分为“管对管 (pipe-to-pipe)”式短循环和地下水回灌 (groundwater recharge) 长循环两种。短循环是以工农业回用和中水回用为主,污水处理后在本系统内部闭路循环,或在局部范围内回用,比如用作冷却水等。长循环即地下水回灌,是将污水经深度处理后,回灌到地下水含水层中,然后同地下水一起作为新的水源开发利用。

从可持续发展的角度出发,地下水回灌是污水回用最有益的一种方式。地下水回灌可以补充枯竭的地下水资源,扩大地下水资源的存储量。地下含水层贮存再生水供城市用水高峰时使用,可以有效解决供水和需求之间的矛盾,对于旱和半干旱的缺水地区尤为重要。相对于地表贮水,地下含水层贮水不存在蒸发损失、二次污染等问题,还可以利用地下水的流动实现水资源的异地存取。再生水用于地下回灌时,可以通过土壤含水层处理 (SAT, Soil Aquifer Treatment),借助其物理、化学和生物过程进一步改善水质。此外,地下水回灌还可用于水力阻拦海水入渗、控制或防止地面沉降及预防地震、稀释和净化被污染的地下水、调节水温、保持取水构筑物出水能力等。这种方式可以提供高质量的回用水乃至饮用水,同时也体现了“三化”的治废原则和可持续发展的思想,是城市污水回用的重要发展方向。

污水回用分饮用回用和非饮用回用。通过地下水回灌,将处理过的城市污水补充地下水后再作为新水源进行开发,有意识地模糊了饮用水的来源,在保证水质的同时,可以有效克服公众的心理障碍问题,从而可以实现有计划的间接饮用回用。

根据中央关于未来 10 年环境保护的精神,北京市水环境保护的具体要求是:至 2010 年,使城市污水系统普及率达到 90% 以上,城市污水处理率达到 90%,处理水再利用率达到 30%。北京现有高碑店、方庄、北小河、酒仙桥和清河 5 个城市污水处理厂,2008 年奥运会前,北京市计划建成十几座污水处理厂,包括北苑、肖家河、五里坨、石景山、东坝、定福庄、郑王坟等。这些污水处理厂的建立为实现污水资源化与城市污水再利用提供了前提与保证。

参照美国加州的做法,若将 2000 年北京市规划城区污水 (264 万 t/d) 的 14% 经处理后用于地下回灌,地下含水层中将每天新增水量 36.96 万 t,到 2010 年时,规划城区排放污水 327 万 t/d,若污水中有 14% 用来补充地下水作为非饮用回用,则将节约淡水 45.78 万 t/d。北京市在 1961 到 1993 年间累计超采地下水 40 多亿 m^3 , 平均每年缺口为 1.25 亿 m^3 , 为 34.25 万 t/d。对比以上数据可知,如果能够实现规划城区污水 14% 的回灌率,可以填补地下水量的亏损缺口,实现地下水贮存量的动态平衡,扭转地下水位逐年下降的局面,并同时为北京市提供优质充足的水资源。

从近期来看,实施污水资源化战略,开展城市污水地下回灌可以为“绿色奥运”提供充足的水资源。将地下含水层看作储水的“地下水银行”,从地下水银行取出的再生水可以满足绿地浇灌、道路喷洒、洗车、小区中水、宾馆用水、奥运村绿化、运动场地、高尔夫球场用水以及大量的工业用水需求,将极大缓解北京市的水资源短缺现状。

利用人工地下水回灌工程实现城市污水饮用回用,需要解决的问题主要有:

- ◆ 针对地下水回灌的水质要求,对二级出水水质进行深入分析,去除优先控制组分,降低地下水回灌的健康风险;

- ◆ 对地下水回灌预处理技术的处理能力和处理机理进行研究,确定适用于地下水回灌的预处理工艺;

- ◆ 对土壤含水层处理 (SAT) 的处理能力和处理机理不断进行深入研究。回灌后再生水在土壤含水层中的水质变化是地下水回灌中最为关注的问题。

- ◆ 结合具体的回灌工程,确定合适的回用方式及其运行和维护条件。

清华大学核能与新能源技术研究院自 1995 年开始在德国联邦教育与科技部 (BMBF) 的支持下与德国柏林工业大学 Martin Jekel 教授、北京排水集团公司合作,在国内首次开展城市污水深度处理后地下水回灌的基本理论与工程研究,于 1998 年邀请美国 Gary Amy 教授和 Marie Light 女士来清华大学讲学,及 2002 年派专家组赴美国考察,对地下水回灌的理论与工程技术前沿有了较为深入的认识和了解,与德国的地下水回灌一期合作项目在 1998 年中德学术交流会议上获得了与会专家的一致好评,2001 年又通过了“九五”国家重点科技攻关项目“城市污水地下回灌技术研究”项目鉴定。本书汇集了清华大学核能与新能源技术研究院和北京市排水集团公司地下水回灌项目参加人员,以及合作单位北京地质勘察设计院有关专家的知识 and 经验。

本书全面系统的论述了当前水资源管理以及环境工程领域的热点 - 城市污水再生后用于人工地下水回灌工程的基本理论。本书强调理论联系实际,每章都结合实际课题展开,更列专章论述地下水回灌工程实例。此外本书所附光盘介绍了美国 Gilbert 和 West Basin 两处人工地下水回灌工程实例,包括水资源短缺背景,废水再生与回用规划,以及人工地下水回灌在水资源一体化管理中的应用等。全书共分 10 章,各章内容如下:

- ◆ 第 1 章概论,内容包括我国目前水资源概况、地下水回灌的基本概念、回灌方法以及地下水回灌在水资源一体化管理中的地位和作用;

- ◆ 第 2 章地下水回灌工程的勘探与选址,介绍勘探与选址的主要工作内容,包括场地的基本情况,土壤岩性,物理、化学、水力学性质、地下水性质、渗滤速率测量以及勘探与选址报告等。

- ◆ 第 3 章回灌水及其预处理,内容包括回灌源水的类型、城市污水深度处理工艺,以

及清华大学核能与新能源技术研究院关于城市污水深度处理工艺的试验成果,地下水回灌的工程规范与水质标准等。

◆ 第4章土壤含水层处理,介绍土壤含水层的处理机理以及所关注的水质参数在土壤含水层中的净化效果。

◆ 第5章健康风险及其评价,介绍再生水用于饮用回用与非饮用回用的健康风险,风险评价的过程并以实际的示范工程为例,估算了再生水用于饮用回用所致的潜在健康风险。

◆ 第6章人工地下水回灌工程的设计,包括土壤地质勘察、土壤柱模拟试验与前期调查、预处理工艺设计,回灌工程设计要素分析,以及人工地下水回灌工程设计实例等。

◆ 第7章地下水回灌工程的运行,包括系统的启动与调试,工程的运行维护与过程控制,监测与维护等。

◆ 第8章,人工地下水回灌工程的若干工程实例,介绍美国、德国、以色列、科威特等国家的回灌工程。

◆ 第9章,回灌工程设计的经济问题,包括污水回用项目的经济问题概述、回灌工程的宏观经济效益计算等。

◆ 第10章,案例分析,以高碑店地下水回灌示范工程为例,介绍回灌工程的勘探、选址、设计、运行等问题。

◆ 结束语。

本书适用于水资源管理者,环保科研机构,污水处理厂等部门的人员阅读,也可供有关专业人员参考。

各章编写者为,第1章:赵璇、张猛;第2章、第3章:成徐州、胡俊(清华大学);第4章、第5章:皮运正、王建龙;第6章:胡俊(北京排水集团公司);第7章:甘一萍(北京排水集团公司);第8章:赵璇、张猛;第9章、第10章:成徐州。全书由云桂春、成徐州统稿。

感谢在本书编写过程中给予关心和帮助的德国和美国的有关专家,并向关心该书编著出版的所有同行专家和朋友致以深切的谢意。

人工地下水回灌工程在国外,特别是美国和欧洲发达国家已得到广泛开展,理论研究也比较深入,在中国的研究和应用实践才刚刚开始。本书力求反映这一领域的现状和发展趋势,以适应当今环境科学教育和水资源可持续利用的需要。限于编著者的知识和经验,以及成书时间仓促,本书肯定在许多方面存在很多缺点和不足,恳请各位专家和广大读者批评指正。

云桂春
2004年1月

目 录

前 言	4
第1章 概 论	1
1.1 我国水资源的主要特点	1
1.1.1 总量贫乏	1
1.1.2 分布不平衡	1
1.1.3 污染状况严重	2
1.2 我国一些主要地区的水资源状况	2
1.2.1 北京市	2
1.2.2 上海市	2
1.2.3 黄河沿岸	3
1.2.4 海河流域	3
1.2.5 沿海地区	3
1.2.6 辽宁省	4
1.3 人工地下水回灌的基本概念	4
1.3.1 人工地下水回灌的潜在优点	5
1.3.2 人工地下水回灌的某些潜在缺点	6
1.4 人工地下水回灌方法	6
1.4.1 地表回灌	6
1.4.2 井灌	7
1.4.3 地表回灌与竖井回灌结合	9
1.4.4 快速渗滤/取水	10
1.5 污水回用与水资源的持续性循环	10
1.6 人工地下水回灌需要解决的问题	10
第2章 地下水回灌场地评价与选址	12
2.1 基本情况调查	12
2.1.1 气象水文条件	13
2.1.2 地形和地表径流	13
2.1.3 土地使用情况	13
2.1.4 回灌水水质特征与环境效应	14
2.1.5 资金问题与其他问题	14
2.2 土壤岩性调查	15
2.2.1 试坑方法	15
2.2.2 钻井试验	15

2.3 土壤的物理性质	16
2.3.1 土壤的分类	16
2.3.2 土壤颜色	18
2.3.3 土壤结构	18
2.4 土壤的化学性质	18
2.4.1 土壤中黏粒的矿物学分析	18
2.4.2 土壤对磷和氮的吸附容量分析	18
2.5 土壤的水力学性质	19
2.5.1 饱和水力传导系数	19
2.5.2 给水度	19
2.5.3 非饱和水力传导系数	21
2.5.4 渗滤速度	21
2.5.5 垂直饱和和水力传导系数的测定	22
2.6 渗滤速率的测量	24
2.6.1 双环渗水试验	24
2.6.2 渗坑试验	25
2.6.3 筒形渗滤计测定方法	27
2.7 地下水	28
2.7.1 地下水实际流速	28
2.7.2 含水层贮水量	29
2.7.3 地下径流时间	29
2.7.4 地下水的主要化学性质	29
2.8 回灌工程的勘探与选址报告	29
2.9 回灌工程的中试试验	29
2.10 场地调查涉及的人员	30
2.11 场地勘探与选址总结	30
2.11.1 调查要求	30
2.11.2 调查内容与场地调查技术路线	30
第3章 人工地下水回灌用源水及其预处理	32
3.1 回灌源水的类型与水质分析	32
3.1.1 城市污水	32
3.1.2 雨水	33
3.1.3 灌溉回流水	34
3.2 地下水回灌水质标准及工程规范	35
3.2.1 地下水回灌工程规范	35
3.2.2 用于地下水回灌的再生污水水质标准	37
3.3 城市污水再生工艺	38
3.3.1 地下水回灌预处理的目标	38
3.3.2 土壤含水层处理对预处理的要求	39

3.3.3	用于地下水回灌的污水再生工艺	41
3.3.4	预处理工艺总结	47
3.4	城市污水再生工艺研究	48
3.4.1	DGB 吸附工艺	48
3.4.2	GAC (粒状活性炭) 工艺	49
3.5	本章总结	49
第 4 章	土壤含水层处理 (SAT) 系统	51
4.1	土壤含水层处理 (SAT) 系统的组成	51
4.1.1	土壤含水层的性质与基本概念	51
4.1.2	土壤含水层处理的基本原理	52
4.1.3	SAT 系统的动态特性	54
4.1.4	土壤含水层处理的实际效果	54
4.2	回灌水中主要关注的组分	55
4.2.1	营养元素	55
4.2.2	痕量重金属	57
4.2.3	消毒副产物及其前体物	58
4.2.4	优先污染物	63
4.2.5	药物	66
4.2.6	病毒与病原微生物	68
第 5 章	污水再生与回用的健康风险及其评价	71
5.1	风险评价方法学	71
5.1.1	风险评价的基本概念	71
5.1.2	风险评价的历史回顾	72
5.2	途径与结果描述	73
5.2.1	风险评价的过程	73
5.2.2	非饮用回用	74
5.2.3	饮用回用	75
5.3	关注的病原微生物	79
5.4	消毒与消毒副产物产生的风险	81
5.5	流行病学	82
第 6 章	人工地下水回灌工程的设计	84
6.1	土壤地质条件勘察	84
6.2	土壤柱模拟实验与前期调查	84
6.3	预处理工艺设计	85
6.4	回灌工程的设计要素	86
6.5	人工地下水回灌工程设计实例	87
6.5.1	回灌场地选择及回灌前水文地质勘察	87
6.5.2	回灌池水力负荷	87
6.5.3	回灌池面积、个数的确定	88

6.5.4 回灌水量的确定	88
6.5.5 预处理工艺设计	88
6.5.6 监测井和取水井的布置	92
第7章 地表渗滤人工地下水回灌工程的运行	93
7.1 系统的启动与调试	94
7.1.1 调试前的准备	94
7.1.2 预处理设备调试	95
7.1.3 回灌池	95
7.1.4 取水井	96
7.1.5 仪表和控制系统	96
7.2 运行维护与过程控制	96
7.2.1 预处理工艺的过程控制	96
7.2.2 回灌池的运行管理	97
7.3 监测与维护	100
7.3.1 水位监测	100
7.3.2 水温监测	100
7.3.3 水量监测	100
7.3.4 水质监测	101
第8章 人工地下水回灌若干工程实例	103
8.1 美国亚利桑那州 Tucson 市 Sweetwater 再生水地下回灌工程	103
8.1.1 Tucson 市的背景情况	103
8.1.2 污水处理状况及回灌前的预处理工艺	103
8.1.3 回灌设施	104
8.1.4 水质监测	108
8.1.5 再生水应用	108
8.2 美国 Orange County Water District 回灌工程	109
8.3 德国柏林地区地下水回灌工程	111
8.4 以色列 Dan Region 污水再生工程	114
8.5 科威特地下水回灌工程	118
8.6 快速渗滤取水工程	118
8.7 间接地下回灌——河岸土壤渗滤与河床渗滤	120
第9章 地下水回灌的经济分析	122
9.1 经济可行性	122
9.2 人工地下水回灌工程的效益	123
9.2.1 供水效益	123
9.2.2 扬程效益	123
9.2.3 水质效益	123
9.2.4 控制洪水	123
9.2.5 防治海水倒灌	123

9.3 效益/成本调整	124
9.4 地下回灌工程的费用构成与横向比较	124
9.5 回灌工程的宏观经济效益计算	125
9.5.1 回灌水量的分析与确定	125
9.5.2 回灌工程直接效益的计算	126
9.5.3 回灌工程宏观效益间接计算法	127
9.6 土壤渗滤与常规深度处理的经济比较	128
第 10 章 高碑店地下回灌示范工程	131
10.1 概述	131
10.2 场地特征分析	131
10.2.1 土壤岩性	132
10.2.2 土壤物理性质分析	133
10.2.3 土壤化学性质分析	133
10.2.4 地下水	134
10.2.5 渗滤速率测定	135
10.2.6 抽水试验与水丘计算	137
10.2.7 地质勘察试验总结	139
10.3 示范工程第一阶段：地表回灌	139
10.3.1 渗滤速率与水力负荷	141
10.3.2 地下水位的变化	143
10.3.3 示踪剂初步研究	144
10.3.4 包气带水质	145
10.3.5 含水层水质	148
10.3.6 地表回灌工程运行总结	148
10.4 示范工程第二阶段：快速渗滤取水工程	149
10.4.1 回灌工程改造：快速渗滤 + 竖井系统	149
10.4.2 快速渗滤 + 竖井回灌系统运行	150
10.4.3 快速渗滤 + 竖井回灌系统水质分析	151
10.4.4 快速渗滤 + 竖井回灌系统小结	153
结 语	155
附录：城市污水再生利用 地下水回灌水质	158

第 1 章 概 论

水资源是指水循环周期内可再生的、能为一般生态和人类直接利用的淡水资源，是人类生存和发展不可缺少、不可替代的自然资源。随着人类社会的进步、工农业的发展以及人口的持续增长，人类赖以生存的有限的淡水资源正在遭受污染和其他异常自然现象的侵蚀，越来越呈现出它的短缺性。水资源是制约一个国家或地区发展的重要因素。水既是自然资源，也是经济资源，具有价值和使用价值，维持有序稳定的运转，是水资源持续利用的必要条件。

1.1 我国水资源的主要特点

我国地域辽阔，地形复杂，大陆性季风气候非常显著，因而造成水资源具有总量贫乏、分布不平衡的特点。此外由于水资源短缺和不合理的开发利用以及大气和水体污染，在我国大部分地区和城市，极为有限的供水资源受到水质恶化和生态破坏的严重威胁，又大大加剧了水资源短缺的矛盾。

1.1.1 总量贫乏

我国淡水资源总量约为 2.8 万亿 m^3 ，其中地下水资源量约为 0.109 万亿 m^3 ，占全球水资源总量的 6.7%，居世界第 6 位。其中现实可利用的淡水资源只有 1.1 万亿 m^3 左右，人均占有量 900 m^3 ，低于世界平均水平的 1/4，居世界第 110 位，被联合国列为 13 个典型贫水国之一^[3]。

1.1.2 分布不平衡

我国水资源南北分布极不均衡，东西部地区差异也很明显，西北部严重缺水。华北、西北耕地面积占全国的一半，而总水量只占全国的 10% 左右。

我国多年平均降水总量 6.19 万亿 m^3 ，水资源的时间分布在年内和年际间很不均匀，且差异很大。大部分地区年内降水量主要集中在汛期，其量约占全年总量的 60% ~ 80%；丰水期和枯水期的交替周期可持续几年甚至几十年。据统计，我国多年平均降水总量 6.2 亿 m^3 ，折合平均降水 650mm，低于全球陆面降水的 834mm 和亚洲陆面降水的 740mm。

我国水资源的区域分布也极不均衡，水资源总量的 81% 分布在长江及其以南地区，而长江以北广大地区，水资源只占全国的 19%，人口却占全国的 45.3%。西北部严重缺水。华北人均水资源仅 300 m^3 左右，比极度缺水的以色列还要少^[2]。东南沿海和西南部分地区年降水超过 2000mm；西部地区包括内蒙古、宁夏、甘肃、青海年降水一般不到 200mm；新疆塔里木盆地、吐鲁番盆地和青海柴达木盆地年降水一般为 50mm，盆地中部不足 25mm，而蒸发量则一般在 3000mm 左右，属于没有灌溉就没有农业的地区^[3]。这片地区在中等干旱时期总供水量约为 570.4 亿 m^3 ，总需水量约为 583.3 亿 m^3 ，缺水达 12.9 亿 m^3 。由于气候干燥，水资源十分短缺，有些地区生活用水都很困难。

1.1.3 污染状况严重

我国主要水系如长江、黄河、松花江、珠江、辽河、海河、淮河和太湖、巢湖及滇池的断面监测结果表明, 36.9%的河段达到或优于地面水环境质量Ⅲ级标准, 其中Ⅰ类水质占8.5%, Ⅱ类水质占21.7%, Ⅲ类水质占6.7%; 63.1%河段的水质为Ⅳ、Ⅴ或劣Ⅴ类, 失去了作为饮用水源的功能, 其中Ⅳ类水质河段占18.3%, Ⅴ类水质占7.1%, 劣Ⅴ类水质占37.7%。

我国每年因环境污染造成的经济损失为883亿元, 其中水源污染占337亿元, 占污染总损失的45%^[4]。

由于我国人口众多, 人均占有水量较低, 再加上水资源在时空上分布极不平衡, 水污染状况严重, 导致我国600多个城市有300多个城市缺水。

1.2 我国一些主要地区的水资源状况

目前全国水资源已经出现了严重的赤字。我国的干旱缺水地区水资源供不应求的矛盾构成了国民经济和社会发展的制约瓶颈, 尤其在北方地区, 水资源短缺已经成为当地经济社会发展的最大制约因素。示例如下:

1.2.1 北京市

北京市位于世界上缺水最严重地区之一的华北平原上, 全市人均可利用水资源量仅为373m³, 不到世界人均占有量的10%, 远远低于国际公认的1000m³的缺水线^[5]。

据统计北京市地表水年均量约为25310m³, 地下水年均量为26210m³。随着人口的增加和社会经济的发展, 用水量逐年增加, 由于地表水资源严重不足, 不得不大量取用地下水以缓解供水的紧张局面。目前北京每年开采地下水26亿到27亿m³, 全市超采区形成1000多平方公里的下降漏斗, 漏斗区平均水位下降4m多, 中心水位下降20~30m, 严重的地区达40m。据统计, 北京市1998年较1980年地下水量减少28亿m³, 地下水水质下降, 取水成本加大。据预测到2005年北京市缺水7.94亿m³, 2010年缺水16.15亿m³, 到2020年遇平水年将缺水23.76亿m³, 遇枯水年缺水30.90亿m³, 水资源形势十分严峻^[6]。严重缺水的同时, 北京每天排放污水量高达245万m³^[7]。

以“绿色奥运”为推动力, 北京市的发展迅猛异常, 对水资源的需求将空前扩大, 节水和污水回用将是北京水资源有效利用的永恒话题。

1.2.2 上海市^[8]

上海是全国水面积比重最大, 河网最密的地区之一, 现有水域面积687.7km², 全市境内每100~300m之间就有1条较大的河流, 平均河流长度达7km/km²以上。上海水资源多年平均总量为596.6亿m³, 人均水资源占有量4500m³。地下水资源的总储量达到44.5亿m³, 目前实际开采量为1.3亿~1.5亿m³/年, 占总储量的2%~3%, 并呈逐年递减的趋势。长江河口段江宽水深, 径流丰富, 为上海提供了丰富而优质的饮用水源。在理想条件下, 全市符合饮用水标准的可用水量为274亿~337亿m³, 符合农业灌溉水质标准的可用水量为340亿~410亿m³。从总量看, 上海水资源的供需可以平衡, 水资源相当丰富。

但是, 上海市水资源总量中, 99%以上为地表水, 承压地下水资源量不足1%。地表水中潮水量占80%, 上游太湖来水占16.9%, 当地径流仅占3.1%。占总量97%的潮水和

太湖来水都仅能作为过境水,人均本地径流占有量仅为 145m^3 。若要对过境水加以开发利用,则必须依靠各种工程措施,做好控制调蓄。

1.2.3 黄河沿岸^[8]

黄河流域面积 $7.95 \times 10^5 \text{km}^2$ (含 $4.9 \times 10^4 \text{km}^2$ 内流区),占全国国土面积的 8.3%;其多年平均天然径流量 $5.80 \times 10^6 \text{km}^3$,占全国河川径流量的 2%,仅为长江的 1/20,流域内人均水资源量 593m^3 ;耕地占有水量仅为全国平均水平的 17%;属于水资源极为短缺的地区。

黄河流域灌溉面积发展很快,由 1950 年的 $8 \times 10^5 \text{km}^2$,增至 1995 年的 $7.7 \times 10^6 \text{km}^2$,增长了 9 倍多。灌溉年耗水由 20 世纪 50 年代初的 $1.22 \times 10^{10} \text{m}^3$,猛增到 90 年代的 $2.84 \times 10^{10} \text{m}^3$ 。与此同时,全流域人口从 1950 年的约 0.3×10^8 人,增至 1999 年底的 1.07×10^8 人。随着人口的增长,黄河流域工业、城镇生活和农村生活用水年均耗水量由 20 世纪 50 年代的不足 $2 \times 10^8 \text{m}^3$,增加到 90 年代的 $23.3 \times 10^8 \text{m}^3$,增长了 10 倍多。由于工业和城市生活用水要求保障程度高,在水资源紧缺的情况下,一些缺水地区已经不得不挤占农业灌溉水源,造成工农业用水矛盾日益突出,加剧了水资源供需矛盾。

有关资料表明^[8],目前黄河流域水资源利用率已达 55%,平均每年引用黄河径流量已达 $395 \times 10^8 \text{m}^3$,河川径流利用率达到 53%,其径流利用率已逾其承受能力的警戒水平,严重影响生态环境的可持续发展。20 世纪 70 年代,黄河下游多年持续断流,1972~1997 年的 26 年间,有 20 年发生断流,90 年代以来断流历时不断增长,1997 年累计达 226d,引发了许多社会问题和生态环境问题。据预测,2030 年黄河流域和有关地区将缺水 150 亿 m^3 左右,严重影响沿岸地带社会经济发展和人民生活,限制了沿岸地区经济潜力的发挥。

1.2.4 海河流域^[9]

海河流域水资源总量有 419 亿 m^3 ,占全国的 1.5%,人均水资源量 335m^3 ,耕地亩均水量 258m^3 ,仅为全国平均的 1/8。

1998 年,海河流域的降水量为 551mm,与多年平均值 548mm (1956~1984) 相近。该年全流域的水资源总供给量为 424 亿 m^3 ,其中地下水 258.8 亿 m^3 (含超采水量 38 亿 m^3),地表水 107.7 亿 m^3 (含 28 亿 m^3 未处理的污水),引取黄河水量 53 亿 m^3 ,其他水源 4.6 亿 m^3 (含污水处理回用、海水淡化、微咸水利用等),入海水量 40 多亿 m^3 。也就是说,在不考虑增加入海水量和不减少引黄水量的情况下,海河流域的缺水量在一般平水年份大约为 38 亿 m^3 (地下水实现采补平衡,污水得到处理利用)。

海河流域水资源的过度开采带来了一系列的生态环境问题,地下水位下降、含水层疏干、地面下沉、河道断流、湿地减少、生物多样性和环境多样性减少,水污染十分严重。

1.2.5 沿海地区

沿海地区是我国国民经济和社会发展的战略重心,走可持续发展道路,实现地区水资源的持续利用和生态环境的良性循环,是一项极其重要的战略任务^[11]。据预测 2010 年,宁波市、辽阳市和嘉兴市年缺水量(枯水年-特枯年)分别达 $2.61 \times 10^8 - 11.19 \times 10^8 \text{m}^3/\text{d}$ 、 $4.94 \times 10^8 - 5.05 \times 10^8 \text{m}^3/\text{d}$ 和 $1.24 \times 10^8 - 3.63 \times 10^8 \text{m}^3/\text{d}$ ^[12]。由于供水短缺,大连全市 60 多个大型投资项目难以上马;旅顺区自 20 世纪 80 年代以来,全区 10 万户居民每天供水仅 2~4h^[13]。

从西南的北海市到东北的大连市,特别是山东半岛、辽东半岛和渤海湾由于地下水超

采造成不同程度的海水入侵。目前, 山东半岛海水入侵总面积已达 643km², 每年粮食减产 2~3 亿 kg, 每年工业直接经济损失 3~4 亿元, 45 万人缺乏饮用水^[14]。海水现正继续以每年几十至几百米的速度向陆地含水层推进。

由于过度开采地下水使得部分城市出现了地面沉降。至今, 我国已有 50 多座大中城市出现了区域性地面沉降, 80% 分布在沿海地区, 较严重的是上海、天津、河北、苏州、宁波, 如表 1-1 所示^[15]。

中国沿海部分城市地面沉降统计表

表 1-1

地区	天津	沧州	上海	常州	苏州	无锡	南通	宁波	嘉兴	湛江
中心沉降 (mm)	2760	744	2700	1100	1450	1140	300	420	750	413
沉降面积 (km ²)	1300		850	200	150	100		120	600	

目前, 地面沉降在杭嘉湖平原、苏锡常地区、环渤海地区、东南沿海地区继续大面积扩展, 地面仍以 10~30mm/a 的速度下沉。由于地面沉降, 城市重力排污失效; 地区防洪、防汛效能降低; 城市建设和维护费用剧增; 管道、铁轨断裂, 建筑物开裂, 威胁城市建筑和安全; 港口淤积, 洪涝灾害加剧, 农业大幅减产; 地面高程失真, 影响防洪、防汛调度, 危及城市规划, 造成决策失误。区域生态环境的变迁, 地区经济、环境和社会综合效益的日益下降, 直接危及沿海地区经济的发展和社会的安定^[11]。

1.2.6 辽宁省^[16]

辽宁省多年平均地表水资源量为 325 亿 m³, 地下水综合补给量为 111 亿 m³, 扣除地表水与地下水之间的重复计算量 73 亿 m³, 全省水资源总量为 363 亿 m³。全省人均水资源占有量 856m³。1999 年至 2001 年春季连续 3 年的特大干旱, 加剧了辽宁省水资源短缺。仅以城市为例, 正常年 (保证率 95%) 时, 2000 年全省县级以上城市缺水量 169 万 m³/d, 其中省辖市缺水 98 万 m³/d, 市近郊区缺水 58 万 m³/d, 县级城市缺水 13 万 m³/d。2001 年 6 月 5 日统计, 全省 26 个城市缺水程度进一步加重, 新增缺水量 90 万 m³/d。

辽宁省每年排放污水量 28 亿 m³, 其中向辽、浑、太河流域的排放量达 20 亿 m³。主要江河枯、丰水期均有 70% 左右河段为超 V 类水质, 15% 的河段为 V 类水质, 10% 的河段为 III 类水质。城市河段不同程度地受到污染, 下游河段基本丧失应有的生态价值。全省地下水超采面积达 1500km², 超采量 4 亿 m³。沈阳地区形成了地下水位降深为 28m、面积为 280km² 的超采漏斗, 辽阳地区形成了降深为 23.5m、面积为 320km² 的超采漏斗。大连、营口、锦州、葫芦岛市的沿海地区, 海水入侵面积由 20 世纪 80 年代初的 50km² 发展到 90 年代的 766km²。过量开采地下水, 导致一些水源工程报废或效率降低, 加之污水入渗和海水入侵造成一系列环境地质问题。

1.3 人工地下水回灌的基本概念

人工地下水回灌有时也称为有计划的回灌, 是指将多余的地表水、暴雨径流水或再生污水通过地表渗滤或回灌井注水, 或者通过人工系统人为改变天然渗滤条件, 将水从地面

上输送到地下含水层中,随后同地下水一起作为新的水源开发利用。

地下回灌已有数千年的历史。人们在第一次用水灌溉他们的农田或者在构筑堤坝蓄水的时候,人工回灌就已经开始了。人们在生活和生产活动中用过的水都或早或迟会进入水圈的循环中,经过自然或人工净化后被再次利用。将经过处理或未经处理的污水排入水体,而后在下游被取用,是对污水无计划的间接再利用。美国给水协会对 155 座城市供水的研究结果表明,给水水源每 30m^3 水中就有 1m^3 是从上游城镇污水系统排出的^[18]。

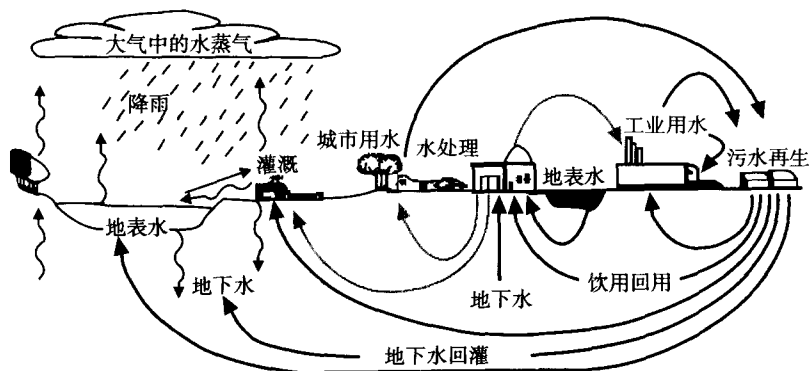


图 1-1 污水处理、再生与回用在水循环中的作用

我国在面临水资源严重短缺的今天,污水回用已成为水资源可持续利用的必然选择,而人工地下水回灌是污水回用中最有益的一种方式。污水经过深度处理后再通过土壤和含水层,借助于物理、化学和生物过程进行额外的净化,使回灌水的水质得到进一步改善,这样的系统称之为土壤含水层处理系统 (Soil Aquifer Treatment) 或地质净化系统。另一方面,地下含水层不只作为供水水源,也可视为天然贮水设施,于是为水资源的一体化管理提供了极大的灵活性。

1.3.1 人工地下水回灌的潜在优点

随着供水短缺与日俱增,在世界许多地区,尤其在干旱与半干旱地区,人工地下水回灌因其显示出若干潜在的优点,已成为污水回用的主要方式。

(1) 利用含水层蓄水与供水,在回灌水渗滤进入土壤并向下渗透到各种地质构造时发生自净作用;

(2) 将过剩的地表水或将过量降水、城市污水经深度处理后,回灌于地下适宜的含水层中,地下含水层便起到了地下水库的作用。在多雨季节和用水低谷,将再生水通过渗滤池或注水井回灌于地下,在枯水季节和用水高峰期提升出来利用,地下含水层便成为储蓄水的银行。与地面水库相比,地下水库不占地面,没有不良的生态影响,很少或几乎没有蒸发损失,不影响地表土层和植物,蓄水容量大,成本低,操作简单,容易实施;

(3) 利用含水层蓄水可以水力阻拦海水入侵,减少或防止地下水位下降,保持取水构筑物出水能力并能起到控制或防止地面沉降及预防地震的作用;

(4) 地下回灌技术容易被技术人员理解和掌握,并能克服一般公众对污水回用的心理障碍。