

—— 国家社会科学基金项目·管理学系列丛书 ——

中国北方缺水城市污水再生利用 管理对策研究

刘晓君 郭振宇 司渭滨 付汉良 等著



科学出版社

国家社会科学基金项目·管理学系

中国北方缺水城市污水再生利用 管理对策研究

刘晓君 郭振宇 司渭滨 付汉良 等 著

国家社会科学基金项目“西部干旱缺水地区城镇化背景下分散式
污水资源化管理对策研究”(课题编号: 12BGL083)

教育部人文社会科学研究基金项目“支撑我国西北地区经济可持续
发展的水环境承载力研究”(课题编号: 11YA790090)

陕西省社会科学基金项目“基于丝绸之路经济带建设
承载力研究——以陕西省为例”(课题编号: 13X6007)

西安市科技局软科学项目“西安市中水回用调查与对策研究”
[课题编号: SF1505(5)]

资助



科学出版社
北京

内 容 简 介

污水的再生利用具有资源循环利用和环境质量改善的双重属性,对于解决我国城市水资源短缺和水环境污染而言,其蕴藏着巨大潜力,但实际污水再生利用率仍远低于规划目标。在国家社会科学基金项目、教育部人文社会科学研究基金项目、陕西省社会科学基金项目及西安市科技局软科学项目的资助下,西安建筑科技大学研究团队对中国北方缺水城市污水再生利用管理对策进行系统的研究,本书系统介绍该方面的研究成果。本书主要包括干旱缺水地区城市污水再生利用对提高水资源和水环境承载力的贡献、再生水利用模式、再生水阶梯水价制定、再生水需求预测、再生水项目综合评价、再生水厂市场化融资模式等。

本书可作为高等院校科研人员和污水再生利用领域相关技术人员的参考用书,也可作为工程与经济管理等相关专业研究生的参考用书,还可作为政府单位相关职能部门的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

中国北方缺水城市污水再生利用管理对策研究 / 刘晓君等著. —北京:科学出版社, 2016

ISBN 978-7-03-049148-0

I. ①中… II. ①刘… III. ①城市污水-废水综合利用-研究-华北地区 IV. ①X799.303

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 143566 号

责任编辑: 徐 倩 / 责任校对: 张凤琴

责任印制: 徐晓晨 / 封面设计: 蓝正设计

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

北京索华虎彩印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016 年 6 月第 一 版 开本: 720×1000 1/16

2016 年 6 月第一次印刷 印张: 16 1/4

字数: 320 000

定价: 98.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

水资源紧缺是世界性问题,我国的水资源不足尤为突出,加之日益严重的水环境污染,使我国水资源的紧张局势进一步加剧,水资源问题已成为我国经济和社会可持续发展的主要瓶颈。污水的再生利用具有资源循环利用和环境质量改善的双重属性,对于解决我国城市水资源短缺和水环境污染来说,其蕴藏着巨大潜力,但实际污水再生利用率仍远低于规划目标。

在国家社会科学基金项目“西部干旱缺水地区城镇化背景下分散式污水资源化管理对策研究”(课题编号:12BGL083)、教育部人文社会科学研究基金项目“支撑我国西北地区经济可持续发展的水环境承载力研究”(课题编号:11YA790090)、陕西省社会科学基金项目“基于丝绸之路经济带建设的水资源承载力研究——以陕西省为例”(课题编号:13SC007)及西安市科技局软科学项目“西安市中水回用调查与对策研究”[课题编号:SF1505(5)]的资助下,首先,运用西安市的数据对污水再生利用对提高水资源和水环境承载力的贡献进行实证研究;其次,在此基础上从我国实际污水再生利用率偏低这一事实出发,深入查找根本原因,寻找出主要制约因素,对北方缺水城市再生水利用中的障碍进行系统分析;最后,针对制约因素,以提高再生水利用率为目标,从再生水利用模式、再生水价格制定、再生水需求预测、再生水项目综合效益评价、再生水厂市场化融资模式等方面提出适合我国国情的污水再生利用对策。主要内容如下。

(1) 实证分析污水再生利用对我国北方缺水城市水资源承载力提升的作用。选取西安市作为我国北方缺水地区的典型城市,将该系统划分为社会、经济、水资源与水环境四个子系统,建立水资源承载力系统动力学模型,探讨再生水回用于各方向的可行性,预测污水资源化对水资源承载力的贡献并优选发展策略。

(2) 分析我国污水再生利用率低下的根本原因。针对我国北方缺水城市再生水利用存在的两个明显反差,即污水再生利用规划目标高而实际建成产能力低,污水再生利用生产能力高而实际回用率低,分析我国水资源紧缺的实际情况和污水再生利用的必要性与紧迫性,以及污水再生利用存在的实际困难和障碍。

(3) 提出用于景观环境补水的再生水利用模式。为尽可能简化和回避再生管网建设,提出再生水集中生产后直接用于景观环境的利用模式,即由城市污水

(municipal wastewater) 处理直接生产可以满足城市杂用水质要求的再生水, 通过简单的管道直接送入城市人工或者天然湿地、河流、湖泊等景观水体, 作为城市生态用水和城市绿化、道路浇洒等杂用水水源。同时, 以渭河为例, 论证污水再生利用不仅是我国北方地区河流治理污染的必要条件, 而且是保障枯水期河道生态基流的重要措施; 以西安浐灞生态区为例, 论证污水再生利用对未来的城市生态建设具有重要意义。

(4) 建立再生水阶梯定价模型。针对北方缺水城市自来水价格及水资源费较低, 而再生水的制水成本相对偏高, 制定合理的再生水价格是比较困难的事实, 在合理划分再生水服务市场的前提下, 提出充分发挥阶梯水价调节作用的再生水定价思路 and 定价模型, 并结合西安市实际对再生水的阶梯水量和水价进行测算。

(5) 提出污水再生利用项目综合评价 (comprehensive evaluation) 方法。针对再生水项目评价方法不完善影响决策科学性, 并最终影响水资源可持续利用的实现问题。提出与经济效益、技术效果、环境效果和社会效果相统一的污水再生利用项目综合评价方法。

(6) 提出污水再生利用设施建设-经营-转让 (build-operate-transfer, BOT) 融资模式的改进建议。针对再生水生产具有一次性投资大、需要专业化技术管理的特点, 研究我国广泛使用的再生水市场化 BOT 融资模式 (方式) 中存在的量水质设计、投资方案比较与评估、成本核算、折旧移交等问题, 提出相应的科学实用的解决方法, 以规避和预防因为信息不对称而导致的商业陷阱, 为城市污水再生利用 BOT 模式的市场化健康发展提供科学依据。

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 中国水资源特点及问题分析	1
1.2 污水再生利用的必然性分析	4
1.3 中国再生水利用“两大反差”的现状分析	5
第 2 章 城市污水再生利用现状分析	8
2.1 城市污水再生利用概述	8
2.2 国内外污水再生利用的发展状况	16
2.3 城市污水再生利用与管理对策研究动态	19
2.4 本书内容结构	29
第 3 章 污水再生利用对水资源和水环境承载力贡献研究	30
3.1 水资源承载力的概念	30
3.2 水资源承载力系统分析	31
3.3 水资源承载力系统动力学模型构建	35
3.4 西安市水资源概况	48
3.5 西安市水资源承载力系统动力学模型参数的确定	63
3.6 西安市污水再生利用提高水资源承载力效果模拟研究	68
3.7 污水再生利用对改善中国北方城市生态环境的贡献研究	89
第 4 章 中国北方缺水城市污水再生利用的障碍分析	95
4.1 集中式污水再生利用障碍 RCA 分析	95
4.2 分散式再生水回用障碍的 RCA 分析	107
第 5 章 污水再生利用模式研究	112
5.1 中国污水再生利用政策分析	112
5.2 模式之一：集中处理直接用于环境的模式研究	115
5.3 模式之二：分散自循环利用模式	119
5.4 模式之三：用水大户就近回用或自行处理利用模式	124
第 6 章 中国北方缺水城市再生水定价研究	128
6.1 再生水定价的理论基础	128

6.2	再生水资源价值模型分析	131
6.3	再生水阶梯定价分析	134
6.4	再生水阶梯定价模型建立	137
6.5	西安市再生水定价实证分析	143
第7章	中国北方缺水城市再生水需求预测研究	154
7.1	再生水和自来水的品质差异成本与消费者最优行为分析	154
7.2	再生水用户分析	163
7.3	再生水项目的需求预测	168
第8章	污水再生利用项目评价研究	179
8.1	污水再生利用项目综合效益分析	179
8.2	分散式污水处理回用项目综合评价指标体系的构建	191
8.3	污水再生利用项目的综合评价模型	198
8.4	实证分析	204
第9章	污水再生利用项目 BOT 融资模式问题与对策	213
9.1	BOT 方式在城市污水资源化领域的适用性分析	213
9.2	BOT 方式在城市污水资源化设施应用中的风险管理	219
9.3	BOT 方式中的政府监管	226
9.4	城市污水和再生水处理工程 BOT 模式中的问题与对策研究	234
参考文献		245

第 1 章 绪 论

水是万物生命赖以生存、社会经济可持续发展所必不可少并无可替代的重要自然资源^[1]。世界水资源总量为 14 亿立方千米，其中淡水仅占 3.5%，储量为 49 亿立方米^[2]，并且绝大部分蕴藏在南极冰原和北极冰山，可供人类生产、生活利用的地表淡水储量仅为 25 亿立方米^[3]。进入 21 世纪以来，随着经济的发展和人口的增长，世界淡水资源日渐短缺，污染日益严重，地球的生态平衡系统遭到破坏，严重威胁着人类的生存和发展，许多国家陷入缺水困境。

1.1 中国水资源特点及问题分析

1.1.1 中国水资源特点

我国的水资源特点可以概括为以下几点。

(1) 总量大，人均水资源占有量少。

我国的淡水资源总量为 2.8 万亿立方米，居世界第六位，但是人均占有量仅为 2 240 立方米，约为世界人均水平的四分之一^[4]，排名为第 121 位（据联合国可持续发展委员会等组织在 1997 年对全世界 153 个国家和地区所做的统计）。

(2) 降水年内年际变化大。

降水时间分配呈现明显的雨热同期，夏秋多、冬春少。降水量越少的地区，年内集中程度越高。北方汛期 4 个月径流量占年径流量的比例一般在 60%~80%，南方汛期 4 个月径流量占全年的 50%~60%，易形成春旱夏涝。

(3) 水资源与人口、耕地分布不匹配。

我国水资源受季风气候的影响，基本上是南多北少、东多西少，山区多、平原少。全国年降水量的分布由东南的超过 3 000 毫米向西北递减至少于 50 毫米。长江及其以南地区（包括长江流域片、珠江流域片、浙闽台诸河片、西南诸河片）占全国总面积的 36.5%，却拥有全国 80.9%的水资源量。其余 63.5%的国土面积只有 19.1%的水资源量。其中，在黄河、淮河、海河 3 个流域中，耕地占 35%，人

口占 35%，国内生产总值（GDP）占 32%，水资源量却仅占全国的 7%，人均水资源量仅为 457 立方米，是我国水资源最紧缺的地区。

（4）水环境形势严峻。

2014 年年底，环保部公布的《2013 中国环境状况公报》中指出，2013 年，长江、黄河、珠江、松花江、淮河、海河、辽河、浙闽片河流、西北诸河和西南诸河十大流域的国控断面中，Ⅰ~Ⅲ类、Ⅳ~Ⅴ类和劣Ⅴ类水质断面比例分别为 71.7%、19.3%和 9.0%。全国水源地安全状况也已经受到威胁。

（5）北方地区水资源呈减少趋势。

受全球气候变暖影响，近 20 年来我国北方地区水资源量减少明显，其中黄河、淮河、海河和辽河区地表水资源量减少 17%，水资源总量减少 12%；海河区地表水资源量减少 41%，水资源总量减少 25%。

我国的水资源特点反映出，我国总体上是一个干旱缺水的国家，同时也是世界水污染情况最严重的国家之一，而水污染又加剧了我国的水资源不足。

1.1.2 中国北方缺水城市水资源特点

我国北方缺水城市，尤其是处于黄河上游流域的西北地区城市的水资源极其贫乏，很多城市年降雨量小于 400 毫米，随着城市化进程的推进和人民生活水平的日益提高，城市需水总量不断提高，城市缺水状况不断加剧，部分城市居民生活和工业用水只能依靠地下水开采。随着各行业用水需求量的增加，有些城市地下水的开采量已占到可开采量的 90%以上，局部地区已大幅度超过可开采量，造成大面积地下水位降低，加剧了地面沉降、地裂缝等环境地质问题的发生。用水量的增加带来污水排放量的增加，使城市周边地区水体污染严重，生态环境更加脆弱。在全国缺水城市中，2007 年时已有 90%以上的城市水域受到污染，约 50%的重点城镇集中饮用水水源不符合取水标准^[5]。

以地处西北的西安市为例，人均水资源的占有量仅有 314 立方米，远远低于全国人均 2 240 立方米和陕西省人均 1 133 立方米的水平，也远低于地区经济和社会发 展所必需的人均 1 000 立方米的临界值，属于极度缺水城市。随着新丝绸之路经济带建设规划和关中-天水经济区发展规划的实施，城市规模不断扩大，人口总量和城镇人口迅速增加，城市用水量日益增长，自来水供需矛盾将更加突出。与此同时，用水量的增加导致污水的大量产生，水污染问题随之而来，水资源与水环境的双重问题将严重影响社会经济的可持续发展。

1.1.3 中国水资源战略

我国的水资源战略可以简单概括为“总量控制、优化配置、高效利用”12字方针。

1) 总量控制

总量控制包括控制开发利用的水资源总量、排放进入水环境的污染物总量、各类水资源储存形态的合理比例和总量等。到2030年,全国水资源开发利用总量控制在7000亿立方米以内。

2) 优化配置

根据我国水资源时空分布的特点进行适当的区域调水和配置,以解决资源与需求在时空上的矛盾,为社会经济发展和人民生活水平提高提供支撑。到2030年之前实现南水北调的东线和中线方案。

3) 高效利用

我国的水资源效率相对较低,工业、农业、生活等各个方面节水潜力非常大,节水方式包括水资源利用领域的技术进步实现、污水再生利用、水循环等,通过提高水资源的利用效率,以解决水资源供求之间的矛盾。到2030年,万元GDP水耗和万元工业增加值耗水量分别降到70立方米和40立方米。

1.1.4 中国水资源利用的问题

我国水资源利用方面的问题可以概括为以下几点。

(1) 我国地域幅员辽阔,南北差异巨大,水资源与经济社会人口的布局极不协调,导致全国旱涝灾害年年发生。

(2) 技术水平及经济管理等导致水资源利用率低下,浪费严重。占我国用水份额最大的农业灌溉领域,其水有效利用系数不足0.5,同时工业综合耗水指标亦是发达国家的数倍之多,以上两点共同反映了技术与管理水平的差距。而生活用水指标则远远低于工业化国家的水平,反映了生活水平的差距^[6]。

(3) 水环境污染严重,湖泊富营养化及萎缩严重,加剧了可利用水资源的不足,已经严重影响到人们的生产和生活^[7]。

(4) 城市化发展迅速,再生回用率低下,缺水城市增多,导致每年经济损失在2000亿元以上。国家“十一五”规划指出,北方城市污水资源化回用率平均达到20%，“十一五”规划末实际完成再生水的生产能力仅占当年处理污水总量的10%。

(5) 水资源价格及收费不尽合理,发挥不了应有的杠杆作用。绝大部分仍然以支付直接运行费为原则,很少考虑回收成本、合理回报及企业发展。尤其是管

网建设基本上采用投资、维护及更新全部由政府财政支付的办法。

可见,我国所面临的水资源短缺与水环境污染双重压力,已成为制约我国经济和社会可持续发展的瓶颈,而污水资源的再生利用具有提供水源和减轻污染的双重作用,对缓解水资源短缺、减轻水环境污染蕴藏着巨大的潜力,也为满足国家水资源可持续利用提供有力保障^[8]。

1.2 污水再生利用的必然性分析

1.2.1 水是可再生资源

地球上的淡水存在两大循环,即大循环和小循环。大循环是指海水被蒸发后,部分被输送到陆地,与陆地的水蒸气一同遇冷凝结形成降雨,部分再度蒸发,部分以地表和地下径流的形式回归大海的过程。小循环特指陆地水蒸发与海洋蒸发的水汽一同遇冷形成降水再度被蒸发的过程。水的大小循环是人类及地球陆地一切生命体淡水来源的根本补给方式。

水循环理论告诉我们,水是可再生资源。在很多情况下,水仅仅是一种载体和介质。它可以通过各种方法再生和净化。我们所使用的一切干净的自然界的水,其实是污染水再生的结果。再生和净化使淡水资源永续不绝。因此,当自然净化能力不足时,就需要通过人工净化补充。

1.2.2 污水再生利用是解决水污染的重要途径

我国北方河流大多处于季风区,河流以降雨补给为主,在年内年际间具有不均匀性和波动性。在枯水季节河道来水减少,经济生活用水反增,导致大多数河道缺水甚至干涸,严重影响河流水生态和河流水质。河流流量的减少降低了河流稀释自净能力,在排污量不减少的情况下,河流水质变差,污染加重。为了保障河流水质,污水再生利用是减少污染负荷的最好方法之一。其优点是减少排污,增加水供给,减少河道取水,提升河流纳污能力。所以,污水再生利用是解决我国北方地区河流污染的重要途径。

1.2.3 再生水是满足城市生态需水的主要水源

努力改善城乡生态环境,践行科学发展观,是生态文明的具体体现。在提升和改善城市生态环境的过程中,大力发展城市林地、公共绿地、城市湿地都涉及

对水的需求和对水的消耗。不断发展的工业、不断改善的生活、不断提升的环境都对水资源提出了更高要求。因此,把工业、生活等排放的废水和污水,收集起来,再生处理,达到回用要求,重新回归自然,是再生水回用的目标。

综上所述,从我国水资源条件和水资源战略看,节约水资源、提高水资源利用率、以循环经济理念发展污水资源化产业,不断提高再生水利用水平,将是我国今后一个时期水资源领域的重要方向和趋势。污水再生利用与远距离调水、海水淡化、雨水收集利用等方式比较,无论从可靠性、技术可实现性、经济性上看,都具有明显的优势。因此,无论从经济发展的需求,还是从环境保护的要求,还是从水资源供给的角度看,通过再生水资源化来解决与日俱增的水资源缺乏是我国的必然选择。

1.3 中国再生水利用“两大反差”的现状分析

据国家建设部和科技部 2006 年联合颁布的《城市污水再生利用技术政策》中 2.2 条规定:2010 年北方缺水城市的再生水直接利用率达到城市污水排放量的 10%~15%,南方沿海缺水城市达到 5%~10%;2015 年北方地区缺水城市达到 20%~25%,南方沿海缺水城市达到 10%~15%,其他地区城市也应开展此项工作,并逐年提高利用率。

《“十一五”全国城镇污水处理及再生利用设施建设规划》要求:到 2010 年全国北方 14 个重点省份的再生水生产利用率要达到 20%,全国新增 680 万立方米的再生水能力,相当再提高 7%(日处理 680 万立方米约相当年增加 20 亿立方米的再生水生产能力,占规划年处理污水总量(约 300 亿立方米)的 7%左右。

环境保护部、国家发展和改革委员会、水利部、住房和城乡建设部以环发〔2008〕15 号文印发的《淮河、海河、辽河、巢湖、滇池、黄河中上游等重点流域水污染防治规划(2006—2010 年)》的《黄河中上游流域水污染防治规划(2006—2010 年)》要求:“西安市、太原市的城市污水再生利用率要达到污水处理量的 40%以上,西宁、兰州、银川、包头、呼和浩特、天水、宝鸡、咸阳、渭南 9 个城市污水再生利用率要达到污水处理量的 30%以上,其他省辖市污水再生利用率要达到污水处理量的 20%以上。”

西安市政府通过的《西安市城市污水再生利用规划》(2008—2020 年)也提出“在 2010 年,使城市污水再生利用率达到 30%,管网普及率达到 60%。远期 2020 年,城市污水再生利用率达到 36%,管网普及率达到 80%。”

但是,根据住房和城乡建设部《中国城镇排水与污水处理状况公报(2006—2010)》(图 1-1),2010 年全国再生水生产能力约为 1 200 万米³/日,年生产能力约 33.7 亿立方米,再生水生产能力只占当年污水处理量的 10%。

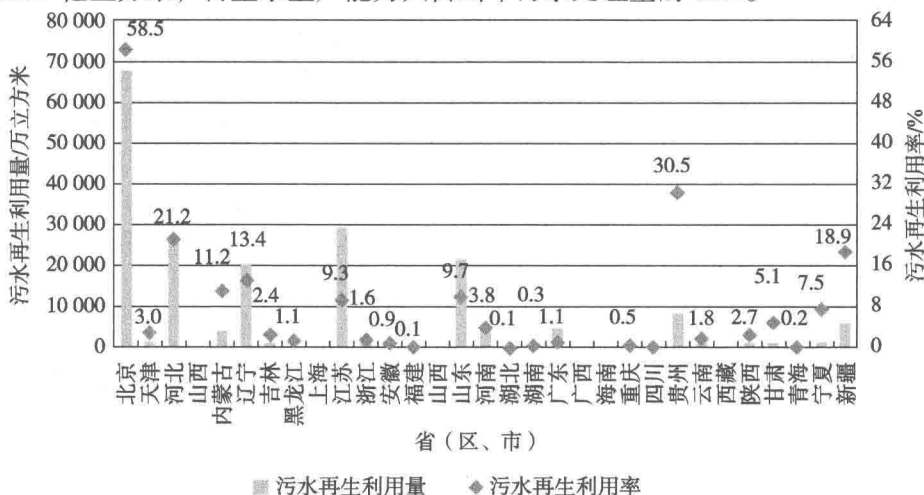


图 1-1 我国污水再生利用量和利用率统计

根据西安市的统计数据,截至 2014 年年底,西安市污水再生利用率仅为 15.02%。

由此可见,我国再生水的生产能力与规划要求有相当大的差距。

另外,根据 2004 年和 2005 年的调查数据,天津纪庄子再生水厂 MF (micro-filter) (微滤) 生产线的设计能力为 20 000 米³/日,但正常日产水量仅 3 000 立方米左右,最大日产水量约 6 000 立方米;北京六水厂生产能力为 17 万立方米/日,但日常供水量不到 20 000 立方米^[9]。

西安 2010 年再生水的日生产能力为 16 万吨,再生水的实际生产量仅 3.3 万米³/日,实际生产率只是生产能力的 20% 左右^[10]。

青岛海泊污水处理厂的深度处理设施,由于建成后管网不配套,1999 年建成后至今未用^[11]。

分散式再生水回用设施的利用率更低。对北京 13 家分散式再生水生产设施调查发现,除两家能达到满负荷运行外,其余设施的利用率仅为 60% 左右^[12,13]。

上述资料分析表明,我国污水再生利用领域存在两个巨大反差:一是规划的再生水回用目标值高而再生水生产能力低,即再生水回用的规划目标值与再生水生产能力之间存在较大的差距;二是再生水生产能力与再生水实际生产量之间存在较大的差距,即已经投入运行的再生水设施,大多数的实际生产量远远低于设计能力。

高的再生水规划目标反映了我国水资源不足的现实和再生水回用的紧迫性，而再生水生产能力与规划目标，以及再生水实际回用量与再生水生产能力之间的差距，说明我国再生水回用存在一定的障碍和困难。

再生水的回用率能否提高，再生水规划目标能否实现，在很大程度上取决于能否解决好再生水回用的制约问题。

本书正是从我国再生水回用领域存在上述两个明显反差这一实际出发，实证分析污水再生利用对提高水资源承载力的贡献，探寻再生水回用率低下的主要障碍，并通过分析、实例剖析与总结，针对我国污水再生利用的实际，提出适合我国国情可实现的再生水回用模式和经济管理举措，以推进我国再生水回用事业发展。

第2章 城市污水再生利用现状分析

2.1 城市污水再生利用概述

2.1.1 再生水及其内涵

1. 城市污水

我国《城市污水再生利用分类》(GB/T18919—2002)中对城市污水的定义是：“设市城市和建制镇排入城市污水系统的污水的统称。在河流制排水系统中，还包括生产废水和截流的雨水。”

2. 再生水

根据中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局发布的国家标准《城市污水再生利用工业用水水质标准》(GB/T19923—2005)中对再生水(reclaimed water, recycled water)的定义是“污水经适当再生水工艺处理后，达到一定的水质标准，满足某使用功能要求，可以进行有益使用的水”。美国环境保护局(US Environmental Protection Agency, USEPA)制定的《污水再生利用指南》对再生水的定义为“市政污水通过各种处理工艺使其满足特定的水质标准，可以被有益利用的水”。

再生水的定义说明，再生水的本质是受到污染被废弃、经过一定的工程措施重新恢复一定使用功能的水。所谓污染的水，本质是一些非水物质进入水中，影响了水的品质和使用功能。再生就是去除进入水中的非水物质，使水重新恢复功能的过程。由于再生水利用的领域和使用功能不同，再生水的处理程度、工程措施和水质标准也不同。

再生水水质介于自来水(上水)与排入管道内的污水(下水)之间，也称其为中水，所以再生水与中水的概念和内涵具有一致性。

3. 再生水资源

再生水是为解决水资源的稀缺、减轻水环境污染而开发的第二水源,能够满足人对水的需求和对水环境改善的愿望。在水资源缺乏日益严重的背景下,作为水资源在一定范围内的替代品,再生水也是紧缺的,具有稀缺性,因而再生水就具有了经济、社会和环境价值。再生水资源就是对可以替代新鲜水(fresh water)的不同类型再生水和不同用途再生水的统称。由于再生水的原水不同,为达到一定的水质标准所采取的再生水生产方式(即污水处理工艺)也各不相同。同时再生水的回用目的和利用方式也有很大的区别。例如,把城镇污水处理厂的处理方式称为集中式污水处理,把污水就地回收、就地处理利用的方式称为分散式污水处理,这会使再生水的利用途径也有着很大的不同,集中式污水处理需要利用敷设管线输送再生水,分散式污水处理可以就地使用。为了便于研究,凡是污水经过处理之后达到一定的水质标准,能够满足一定的用途,不区分处理方式、利用方式和利用途径,统称为再生水资源。

4. 再生水的生产和制备

再生水一般由城市污水经一级处理、二级处理和再生处理后获得^[14]。

一级处理(primary treatment)就是去除污水中漂浮物和悬浮物的过程,主要措施是格栅截留和重力沉降,包括在此基础上增加化学混凝或不完全生物处理等单元以提高处理效果的一级强化处理。

二级处理(secondary treatment, biological treatment)是在一级处理基础上,用生物处理方法进一步去除污水中胶体和溶解性有机物的过程,主要为活性污泥法和生物膜法,包括具有除磷脱氮功能的二级强化处理。

再生处理(reclamation treatment)是使污水达到一定的回用水质标准,满足某种使用功能要求的净化过程。

2.1.2 城市污水再生利用

我国《城市污水再生利用分类》(GB/T18919—2002)中对城市污水再生利用(wastewater reclamation and reuse, water recycling)的定义是“以城市污水为再生水源,经再生工艺净化处理后,达到可用的水质标准,通过管道输送或现场使用方式予以利用的全过程”。

再生水利用分为直接利用和间接利用两种途径。再生水直接利用是由再生水厂通过输水管道直接送给用户使用或现场直接使用;间接利用则是由污水处理厂将生产的再生水直接排入水体,由用户再从水体中取用。

再生水直接利用有三种通用的模式：①再生水厂系统铺设再生供水管网，与城市供水管网一起形成双供水系统。②由再生水厂铺设专用管道供工业用户使用，这种方式用途单一，比较实用。③大型公共建筑和住宅楼群的污水，就地处理、回收、循环再用^[15]。

再生水间接利用方式可以分为有意向间接利用和无意向间接利用。有意向间接利用是有计划地将再生水和新鲜水混合后再使用，这取决于时间和空间的安全保证。再生水从排入水体到被利用的时间滞后，以及混合后的物理化学净化作用，使再生水在自然生态系统中获得进一步的净化。在这一过程中，一方面，微生物可以由于自然死亡和吞噬而减少，挥发性有机物在水的表面丧失，有机物因为化学作用而转化；另一方面，水质也会因藻类的增长及初期雨水的排入而变坏。无意向的间接利用是以减少水体污染程度而采用的补水方式，其使用范围更加普遍。目前河流都受到不同程度的污染，向自然水体中补充再生水实际上就是再生水的无意向间接回用^[15]。

再生水回用的可行性体现在以下三个方面。

(1) 水源稳定。再生水的主要水源是城市污水处理厂的二级处理水和达标排放的工业废水，污水的排放量与用水人口和工业规模紧密相关，受季节、雨季、洪水、枯水年份的影响较小，可视为稳定的水源。

(2) 经济合理。首先，污水再生利用比远距离引水造价低。再生水水厂一般建在城市周边，便于城市取水，相对于远距离输水而言，可减少输水管网的投资和构筑物的基本建设费用。其次，再生回用比海水淡化经济。我国分散自循环式污水再生利用供水成本接近 2 元/米³，而与之相比海水淡化的成本为 4~7 元/米³，故污水再生利用相对于海水淡化更为经济。

(3) 外部效果明显。再生水的外部性体现在其不但具有调节气候、净化环境、美化景观的效用，而且再生水的使用能够减轻城市取水负担，缓解供水压力，减少污水排放量、减轻水体污染、维持生态平衡，从而促进水资源的良性循环，实现水资源的可持续利用，进而实现人类社会的可持续发展。

2.1.3 再生水系统的构成与分析

再生水系统是水资源系统的一个子系统，其构成如图 2-1 所示。再生水系统主要包括用途、水质、水量、水源、处理技术，以及成本、价格、系统规划、项目技术经济评价方法及管理模式等方面。