

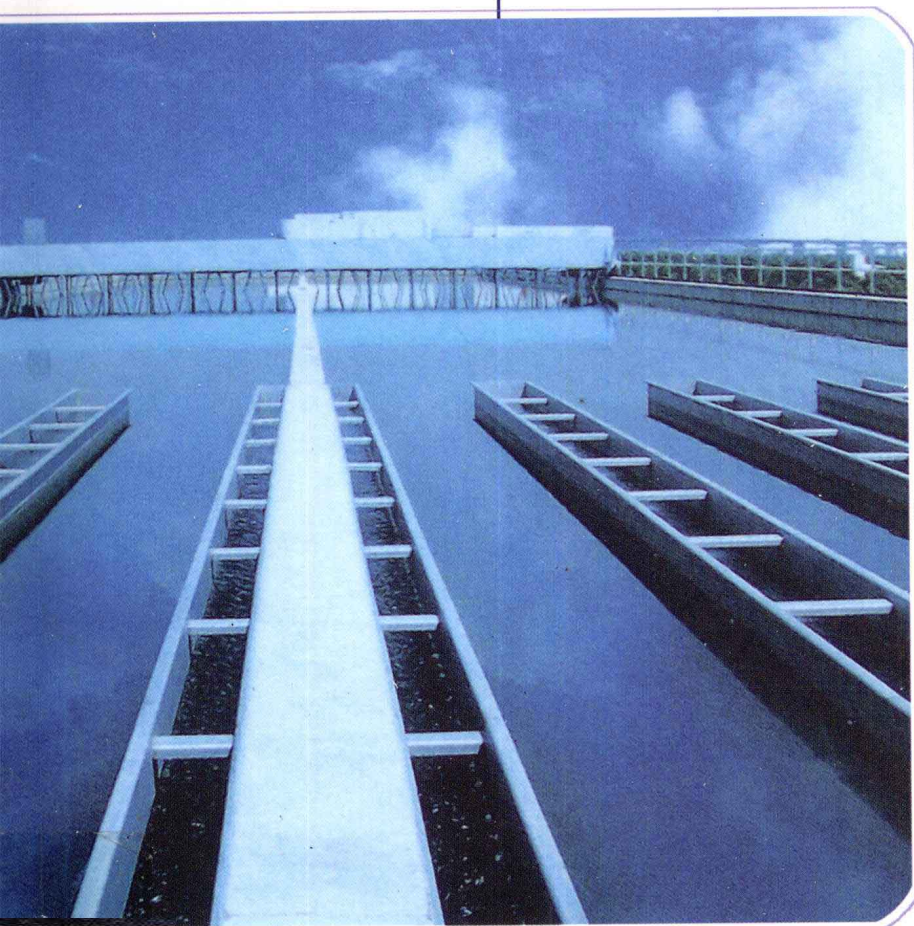
水体污染控制与治理科技重大专项资助 (2008ZX07314-004)

天津市科协自然科学学术专著基金资助



城市污水 再生利用规划设计

赵乐军 编著
王秀朵 安鼎年 主审



中国建筑工业出版社

水体污染控制与治理科技重大专项资助 (2008ZX07314-004)

天津市科协自然科学学术专著基金资助



城市污水再生利用规划设计

赵乐军 编著
王秀朵 安鼎年 主审

中国建筑工业出版社

序 言

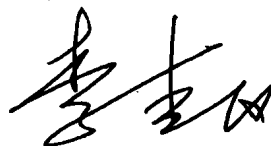
水是生命的源泉。水资源是基础自然资源，是生态环境的控制性因素之一，同时又是战略性经济资源，是一个国家综合国力的有机组成部分，是人类社会可持续发展的重要因素。

随着经济的快速发展和城市化进程的加速，水资源短缺与水环境污染已成为许多国家社会、经济可持续发展的瓶颈。我国水资源的人均占有量低，时空分布差异性大。北方地区大部分受到资源型缺水的困扰，南方多水地区由于受到不同程度的污染，呈现水质型缺水趋势，一些城市面临“有水难用”的困境。

污水再生利用是解决水资源短缺问题的有效途径之一，污水经过再生处理后，回用于工业用水、城市杂用水、环境用水、补充水源水、农田灌溉用水等用途，可以减少人类社会对新鲜水资源的需求，缓解水资源供需矛盾，还可以消减污染负荷。作为非常规水源，再生水比雨水、海水更加稳定、可靠，比长距离引水更经济。

本书比较系统全面地介绍了与污水再生利用有关的各项内容，主要包括：国内外污水再生利用情况、主要城镇污水处理工艺、污水再生利用水质指标、污水再生利用途径、污水再生利用处理技术、污水再生利用风险评价、污水再生利用工程规划与设计等内容，全书还附有与污水再生利用部分典型案例，是对近十年来我国污水再生利用规划设计领域取得成果和经验的总结，希望本书的出版能有助于提高我国污水再生利用的技术水平。

特为之序。



2011年3月10日

前 言

水资源短缺是我国的基本国情之一。我国北方城市大部分受到资源型缺水的困扰,南方多水地区由于受到不同程度的污染,呈现水质型缺水趋势,一些城市面临“有水难用”的困境。另外,我国的水资源在时间和空间分布上也很不均衡。在时间上,大部分地区每年汛期连续四个月的降水量占全年的 60%~80%,不但容易形成春旱夏涝,而且水资源量中大约有 2/3 左右形成洪水径流量;在空间上,全国水资源有 80.4% 分布在长江流域及其以南地区,人均水资源占有量为 3481m³,水资源相对丰富;长江流域以北地区尤其是黄河、淮河、海河三个流域是我国水资源最为紧张的地区,人均水资源量约 500m³,耕地亩均水资源量少于 400m³。预测到 2030 年我国人口增加到 16 亿时,人均水资源量将降低到 1760m³,按照国际上一般公认的标准,人均水资源量少于 1700m³ 为用水紧张的国家,因此,我国未来水资源的形势是十分严峻的^{[1]2-3,30}。

污水再生利用是解决水资源短缺问题的有效途径之一,通过污水再生利用,可以减少人类社会对新鲜水资源的需求,缓解水资源供需矛盾,还可以减轻人类生产、生活对水环境的影响。经过国内长时间的实践、讨论,客观地总结成败得失,对水资源优化配置、对节水、回用和调水的关系有了比较一致的看法,“先节水、后回用、再调水”的观点得到了学术界和决策层的普遍认可,这也是污水回用事业的重要基础之一^{[2]7}。

我国《城市污水再生利用技术政策》中提出,“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”。

广义的污水回用既包括小区或者工业企业内部的分散回用,也包括城镇污水处理厂的集中回用。根据《城市污水再生利用分类》GB/T 18919—2002 的定义,城市污水再生利用限指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,通过管道输送或者现场使用方式予以利用的过程。本书所指的污水回用,除非特别说明,一般指经过城市污水处理厂二级或者二级以上处理出水的集中回用。

截止到 2010 年底,全国设市城市、县累计建成城镇污水处理厂 2832 座,污水处理能力达到 1.25 亿 m³/d,全国正在建设的城镇污水处理厂项目 1600 个,总设计能力为 3900 万 m³/d,在 654 个设市城市中,已有 607 个城市建有污水处理厂,累计建成污水处理厂 1688 座,形成污水处理能力 1.067 亿 m³/d,全国已有 1034 个县城建成了污水处理厂,处理能力达到 2066 万 m³/d^[3]。

另外,自从新的《城镇污水处理厂污染物排放标准》GB 18918—2002 实施以来,各地执行新标准,逐步对已经建成的污水处理厂实施提标改造,很多污水处理厂的出水水质

提高到一级 B 甚至一级 A 的标准。污水处理率的不断提高及排放标准的日趋严格, 为开发利用污水资源奠定了良好的水源基础。

本书在写作过程中主要借鉴了 20 世纪 80 年代以来特别是 2000 年以来学术期刊上、国内外学术会议上发表的有关污水再生利用的论文、近年来出版的相关书籍、美国、澳大利亚等国有关污水再生利用的指南等, 尽量采用 2004~2010 年的数据, 以反映污水回用的最新动态。

本书在撰写过程中力求做到论述系统严谨, 前后呼应, 资料翔实新颖, 以实用性为主, 兼顾理论性。书中所引用的国内工程实例全部来自权威出版物、经过调查确认、或者作者亲身参与的工程。书中引用的国外污水回用工程实例, 均经过认真筛查, 尽量选用工程所在国技术人员发表的最新参考文献, 尽量引用原作, 对于翻译成中文的资料, 尽量找到原版资料对照, 并将非国际单位制单位统一换算成国际单位制, 以便尽量向读者提供准确、完整的信息。

本书从开始撰写到出版历经 4 年多的时间, 本书得以顺利完成, 得益于国家及天津市相关项目的资金支持、许多专家和领导的鼓励和帮助。国家水体污染控制与治理科技重大专项“天津市中心城区景观水体功能恢复与水质改善技术开发及工程示范”(2008ZX07314-004) 课题、天津市科协自然科学学术专著基金为书籍出版提供了资金支持。作者所在单位及上级主管部门的领导李子英、赵建伟、邱志明、刘旭锴、李振强、王洪云给予了大量鼓励和指导, 书中吸收了李惠杰、刘文亚、杨宪云、杨树海、唐福生、曹金亮、张晓峰、郭淑琴等同志对污水再生利用的部分观点, 上海凡清环境工程有限公司、天津市艾盟科技发展有限公司、四川环能德美集团等公司、许以农、李建兴等同志提供了部分资料。经作者同意, 书中引用了王德河、格根图雅、乔晓时、丁永伟、白宇、王社平、李健、石凤林、禾志强、安鼎年、纪轩、刘春光等作者撰写的技术论文或者研究报告。初稿完成后, 潘留明、曹仲宏、唐凯锋、颜炳魁、陈衍玲等同志认真对初稿进行了校核, 安鼎年教授、王秀朵总工认真审阅了全稿, 并提出了很多宝贵建议。中国建筑工业出版社相关人员及中国给水排水杂志社衣春敏为书籍出版付出了辛勤的劳动, 对以上专项及基金的资助, 领导、老师、同事的支持表示衷心感谢。特别值得一提的是, 尊敬的李圭白院士在百忙之中抽出时间来为本书作序, 我们表示诚挚的敬意和感谢。

虽有关人员尽了最大努力, 但限于作者水平和污水再生利用技术的快速发展, 文献浩瀚, 因此书中疏漏乃至错误之处恐在所难免, 恳请读者批评指正。

目 录

第 1 章 概论	1
1.1 技术术语	1
1.2 世界各国污水处理及再生利用历程	2
1.3 国外污水再生利用状况	7
1.3.1 美国污水再生利用情况	7
1.3.2 以色列污水再生利用情况	9
1.3.3 澳大利亚污水再生利用情况	10
1.3.4 日本污水再生利用情况	12
1.3.5 新加坡污水回用状况	15
1.3.6 约旦、突尼斯污水回用情况	16
1.3.7 南非污水再生利用情况	18
1.3.8 纳米比亚污水再生利用情况	19
1.4 国内污水再生利用状况	20
1.4.1 我国的水资源状况	20
1.4.2 我国污水再生利用的历史进程	20
1.4.3 北京市污水再生利用状况	23
1.4.4 天津市污水再生利用状况	24
1.4.5 西安市污水再生利用状况	27
1.4.6 大连市污水再生利用状况	27
1.4.7 我国与污水再生利用有关的法规、政策、标准、规范	28
第 2 章 城镇污水及城镇污水处理	31
2.1 城镇污水来源、排水制度	31
2.1.1 城镇污水来源	31
2.1.2 排水制度	32
2.2 城镇污水处理沿革	33
2.2.1 国外发达国家污水处理沿革	33
2.2.2 我国污水处理的发展历程	34
2.3 城镇污水处理工艺概述	36
2.3.1 城镇污水处理程度	36
2.3.2 城镇污水处理厂进出水水质	36
2.3.3 污水处理工艺概述	39
2.4 我国城镇污水处理存在的问题	50

第3章 城镇污水再生利用水质指标	52
3.1 与污水处理、再生水回用相关的主要水质指标	52
3.1.1 物理指标	52
3.1.2 化学指标—无机物	54
3.1.3 化学指标—有机物	63
3.1.4 放射性指标	65
3.1.5 微生物指标	65
3.1.6 生物学指标	66
3.1.7 急性生物毒性指标	67
3.1.8 生物危害性指标	68
3.2 再生水水质基本要求	68
第4章 城镇污水再生利用途径	70
4.1 污水再生利用方式、再生利用类别	70
4.1.1 污水再生利用方式	70
4.1.2 污水再生利用类别	70
4.2 工业用水	72
4.2.1 国内外相关情况	72
4.2.2 工业冷却水回用	74
4.2.3 再生水回用于冷却水系统常见的水质问题	78
4.2.4 再生水工业回用的相关水质标准	81
4.2.5 再生水工业回用实例	87
4.3 景观环境用水	93
4.3.1 国内外相关情况	93
4.3.2 再生水回用于景观水体的分类	94
4.3.3 再生水回用于景观水体的潜在问题分析	95
4.3.4 湿地回用	98
4.3.5 再生水景观水体回用的相关水质标准	98
4.3.6 再生水景观环境回用实例	101
4.4 城市杂用水	106
4.4.1 国内外相关情况	106
4.4.2 城市杂用水回用的相关水质标准	109
4.4.3 城市杂用水回用实例	112
4.5 地下水回灌、补充水源水	114
4.5.1 地下水回灌国内外相关情况	114
4.5.2 再生水地下水回灌的相关水质标准	118
4.5.3 补充水源水、直接饮用水回用	121
4.5.4 再生水地下水回灌与补充水源水实例	122

4.6	农田灌溉	137
4.6.1	国内外相关情况	137
4.6.2	再生水回用于农田灌溉的水质标准	141
4.6.3	再生水回用于农田灌溉实例	149
4.7	热泵热能利用	152
4.7.1	热泵热能利用的基本情况	152
4.7.2	城镇污水热泵热能利用水质	156
4.7.3	城市污水热能利用的实例	157
第5章	污水再生利用处理技术	159
5.1	污水处理厂二级出水中的污染物及其对回用的影响	159
5.1.1	城市污水处理厂二级出水中的残留污染物	159
5.1.2	二级出水中残留污染物对污水再生利用的影响	160
5.1.3	常用的污水再生处理单元及其组合	161
5.2	混凝	163
5.2.1	混凝过程	163
5.2.2	混凝剂	163
5.2.3	混凝剂的配制和投加	165
5.2.4	影响混凝效果的因素	165
5.2.5	混合设施	167
5.2.6	絮凝设施	169
5.3	沉淀与气浮	173
5.3.1	沉淀概述	173
5.3.2	混凝沉淀除磷	183
5.3.3	澄清	183
5.3.4	气浮	185
5.4	石灰处理	187
5.4.1	工艺流程概述	187
5.4.2	石灰投加量	189
5.4.3	石灰投加系统及设备	190
5.4.4	石灰处理影响因素及处理后水质变化	191
5.4.5	石灰处理工艺实例	192
5.5	过滤	198
5.5.1	过滤概述	198
5.5.2	部分过滤器形式简介	201
5.5.3	微絮凝过滤和直接过滤	213
5.5.4	混凝/沉淀/过滤工艺工程实例	215
5.6	膜分离	223

5.6.1	膜分离工艺概述	223
5.6.2	膜污染、浓差极化、膜劣化及预防措施	233
5.6.3	预处理	238
5.6.4	膜处理组合工艺流程	239
5.6.5	微滤	241
5.6.6	超滤	244
5.6.7	纳滤	245
5.6.8	反渗透	246
5.6.9	浓缩液处置	247
5.6.10	膜工艺工程实例分析	248
5.7	膜生物反应器 (MBR) 工艺	254
5.7.1	MBR 工艺概述	254
5.7.2	MBR 工艺分类	256
5.7.3	MBR 工艺流程及性能参数	258
5.7.4	膜污染及控制	260
5.7.5	膜生物反应器工艺工程实例	262
5.8	曝气生物滤池	263
5.8.1	曝气生物滤池工艺概述	263
5.8.2	曝气生物滤池工艺工程实例	271
5.9	湿地处理	273
5.9.1	湿地处理工艺概述	273
5.9.2	人工湿地去除污染物机理	274
5.9.3	人工湿地分类及设计	276
5.9.4	湿地处理工艺工程实例	281
5.10	臭氧氧化	285
5.10.1	臭氧氧化工艺概述	285
5.10.2	臭氧氧化工艺工程实例	292
5.11	活性炭吸附	295
5.11.1	活性炭吸附工艺概述	295
5.11.2	活性炭吸附操作方式	298
5.11.3	生物活性炭技术	300
5.11.4	活性炭吸附与其他工艺单元的组合	301
5.11.5	粉末活性炭投加与活性炭的再生	302
5.11.6	活性炭吸附工艺工程实例	304
5.12	消毒	306
5.12.1	液氯消毒	308
5.12.2	二氧化氯消毒	312

5.12.3	紫外线 (UV) 消毒	315
5.12.4	臭氧消毒	321
5.12.5	几种常用消毒方法的比较与评价	323
5.13	再生水回用中营养盐的去除	327
第 6 章	污水再生利用风险评价	331
6.1	风险及风险评价概述	331
6.1.1	风险、可接受风险度	331
6.1.2	风险评价	331
6.2	城市污水再生利用风险	332
6.2.1	再生水中的主要污染物	333
6.2.2	城市污水回用风险分类	335
6.3	城市污水回用风险评价的主要内容	337
6.3.1	人体健康风险评价	337
6.3.2	生态环境风险评价	338
6.3.3	用户设备与产品风险评价	339
6.3.4	社会评价	339
6.4	城市污水回用风险评价的基本方法	339
6.4.1	人体健康风险评价分类	340
6.4.2	人体健康风险评价步骤——四步法	340
6.4.3	生态风险评价	345
6.5	城市污水回用风险评价存在的不足	345
第 7 章	污水再生利用工程规划与设计	347
7.1	污水再生利用系统组成	347
7.2	再生水用户调查	347
7.2.1	阶段划分	347
7.2.2	再生水用户调查实例	350
7.3	再生水水量确定	351
7.3.1	用户调查法预测需水量	351
7.3.2	定额法或者经验法预测需水量	356
7.3.3	部分污水再生利用工程规划或设计再生水用水量计算方法	358
7.4	再生水水源	360
7.5	再生水供水水质	361
7.6	再生水处理系统	361
7.7	再生水输配水系统	363
7.7.1	输配水方式	363
7.7.2	输配水线路选择的原则	363
7.7.3	输配水管道设计水量	364

7.7.4 设计水压·····	365
7.7.5 调节设施·····	365
7.8 安全措施·····	366
7.9 污水再生利用规划设计案例分析·····	368
7.9.1 规划案例分析——以天津市中心城区再生水资源利用规划为例·····	368
7.9.2 设计案例分析——以天津市咸阳路再生水厂工程为例·····	378
附录 A 美国国家环保局 (U. S. EPA) 2004 污水再生利用指南·····	390
附录 B 《城镇污水热泵热能利用水质》CJ/T 337—2010 主要内容·····	396
参考文献·····	397

第 1 章 概 论

1.1 技 术 术 语

1 城镇污水 urban wastewater

城镇中排放的各种污水和废水的统称，它由综合生活污水、工业废水和入渗地下水三部分组成。在合流制排水系统中，还包括被截留的雨水。

2 污水再生利用 wastewater reclamation and reuse, water recycling

以城镇污水处理厂出水为再生水源，经再生工艺净化处理后，达到可用的水质标准，通过管道输送或者现场使用方式予以利用的全过程。

3 再生水 reclaimed water, recycled water

再生水系指污水经适当再生工艺处理后，达到一定的水质标准，满足某种使用功能要求，可以进行有益使用的水。

4 直接回用 direct reuse

由再生水厂通过输送设施直接输送至水回用的现场而不经排入天然水体的中间过程，比如工业回用、城市杂用、景观环境用水等。

5 间接回用 indirect reuse

将处理后的再生水排放入地表水体或者地下含水层，然后取水回用的方式。

6 有计划回用 planned reuse

再生水的直接或者间接利用是经过认真计划的，并在整个供水期间，对其进行控制。

7 无计划回用 unplanned reuse

污水处理厂出水排出后的回用（无控制），例如在污水处理厂排放口的下游，引水回用。

8 城市杂用水 urban miscellaneous water consumption

用于冲厕、道路清扫、消防、城市绿化、车辆冲洗、建筑施工的非饮用水。

9 工业用水水源 raw water for industrial uses

系指锅炉补给水、工艺与产品用水、冷却用水、洗涤用水等的源水。

10 循环冷却水系统 recirculating cooling water system

以水作为冷却介质，并循环运行的一种给水系统，由换热设备、冷却设备、处理设施、水泵、管道及其他有关设施组成。

11 浓缩倍数 cycle of concentration

循环冷却水中含盐量与补充水中含盐量的比值。

12 景观环境用水 reclaimed water for scenic environment use

指满足景观需要的环境用水,即用于营造城市景观水体和各种水景构筑物的水的总称。

13 观赏性景观环境用水 reclaimed water for aesthetic environment use

指人体非直接接触的景观环境用水,包括不设娱乐设施的景观河道、景观湖泊及其他观赏性景观用水。它们由再生水组成,或部分由再生水组成(另一部分由天然水或者自来水组成)。

14 娱乐性景观环境用水 reclaimed water for recreational environment use

指人体非全身性接触的景观环境用水,包括设有娱乐设施的景观河道、景观湖泊及其他娱乐性景观用水。它们由再生水组成,或部分由再生水组成(另一部分由天然水或者自来水组成)。

15 地下水回灌 groundwater recharge

指一种有计划地将地表水、城市污水再生水在内的任何水源、通过井孔、沟、渠、塘等水工构筑物从地面渗入或注入地下补给地下水,增加地下水资源的技术措施。

16 地表回灌 surface recharge

指在透水性较好的土层上修建沟、渠、塘等蓄水构筑物,利用这些设施,使水通过包气带渗入含水层,利用水的自重进行回灌,一般包括田间入渗回灌、沟渠河网入渗回灌以及坑塘入渗回灌等。

17 井灌 injection recharge

指通过回灌井将水注入地下含水层的回灌方式。

18 农田灌溉 farmland irrigation

按照农作物生长的需要,利用工程设施,将水送到田间,满足作物用水需求。

19 饮用水直接回用 direct potable reuse

将再生水直接加入到饮用水给水系统的回用方式,往往意味着再生水与饮用水混合在一起供水。

20 饮用水间接回用 indirect potable reuse

将再生水加入原水水源中,混合后的原水经过给水处理流程然后供水给用户。

21 热泵 heat pump

热泵是一种利用高位能使热量从低位热源流向高位热源的节能装置。

22 污水热泵 sewage heat pump

利用污水或者处理后的污水,借助制冷循环系统,通过消耗少量的电能,将污水中的能量“汲取”出来进行使用的设备。

1.2 世界各国污水处理及再生利用历程

污水用作农业灌溉水源可追溯到五千多年以前,根据目前研究结果,公元前 3500 年前,希腊克里特文明就采用污水灌溉农田。公元前 2600 年,雅典、塞浦路斯等地利用污水灌溉农作物,一是保证卫生;二是利用污水中的肥效提高农作物的产量。公元前 500

年, 雅典的污水和雨水通过渠道输送到城外灌溉农田^{[4]49, [5]69}。

1596 年, 约翰·哈林顿爵士 (Sir John Harrington) 发明了冲水式厕所, 并为伊丽莎白一世建造了第一个带阀门系统的冲水式厕所, 但由于没有防止排水道臭味反窜的 U 形弯管, 未得到广泛应用^{[4]4}。

1650 年, 在苏格兰爱丁堡, 城市污水被直接排放到邻近的农田, 用于作物灌溉^{[5]69}。

18 世纪末, 在伦敦开始使用水冲厕所, 19 世纪迅速推广普及, 水冲厕所直接与下水道相连, 粪便污水直接进入城市下水道系统, 不再需要污水池。水冲厕所大大改善了住户的生活条件, 但进入下水道系统的污水都排入伦敦的水源——泰晤士河, 致使泰晤士河受到严重污染, 引起水传染性疾病霍乱和伤寒的爆发^{[4]5}。

1830~1850 年霍乱和伤寒流行病蔓延整个伦敦、巴黎、汉堡和其他欧洲城市, 1831~1832 年和 1848~1849 年间, 霍乱流行英国, 导致成千上万人死亡^{[4]5, 49}。

1840~1850 年, 伦敦开始修建城市排水管道, 1848 年德国汉堡开始引进英国模式修建城市排水管道^{[6]353}。

1854 年约翰·斯诺 (John Snow) 博士证明了霍乱的爆发与被污水污染的城市供水之间的联系。英国开始沿泰晤士河北岸建立截留渠, 将污水排放口由城市中心转移到城市的下游, 这就是著名的截留渠——泰晤士水坝工程, 但这种转移并未从根本上解决问题, 英国著名的律师和当时公共卫生运动的倡导者——爱德温·查德威克 (Edwin Chadwick) 爵士积极推行分流制污水排放方法, 提出了“雨水回到河流, 污水回到土壤”的口号, 在这一思想影响下, 为减少下游水体污染, 从截留渠抽取污水进行农田灌溉, 使污水得到有效处理的同时, 还获得了较好的农业收成, 于是利用污水进行农业灌溉得到迅速推广。1875 年仅在英国就建有 50 座类似的污水农场用于污水处理与利用, 同时在欧洲的其他主要城市也有类似的污水农场建成^{[4]5, 49}。

1865 年英国皇家污水处置委员会的第一个报告结论是: “城市污水处置的正确方法是连续地将污水排向土地, 采用这种方法, 河流能够避免遭受污染”^{[7]31}。

1870~1890 年, 随着污水收集系统的发展, 污水农场得到发展。在英格兰、澳大利亚、德国、法国、意大利、美国都使用污水农场, 这种污水农场既可以看做是污水处理的一种形式, 在某种意义上也可以认为是一种早期的污水回用。这个阶段, 随着污水农场的推广应用, 人们逐渐发现, 根据作物的需求进行灌溉, 很难保证污水处理的水质。为了达到污水处理的水质要求, 经常进行超负荷灌溉, 结果农田土壤的毛细孔被阻塞, 气味难闻, 粮食作物被污染。随着城市人口的增加, 城市规模不断扩大, 城市周围可用于污水处理的农田面积不断缩小, 迫使人们研究强化的污水处理方法, 污水农场逐渐退出了历史舞台^{[4]8, 49, [7]159}。

1877 年, 德国科隆成立国际反河流、土壤、空气污染协会, 反对粪尿进入地表水体^{[6]366}。

1890 年, 美国加利福尼亚城镇开始采用污水灌溉^{[7]159}。

1891 年, 德国试验卫生学家 Pettenkofer 发表河流流速在 0.6m/s, 污水稀释 15 倍可以达到自净效果, 该观点成为污水排河的重要依据, 粪尿开始从农业利用转向水体

排放^{[6]353}。

1906年2月,加利福尼亚州卫生局的月刊中提及:“Oxnard正在安装一处处理污水的化粪池,出水排至海洋,为什么污水不用于灌溉以节约水中有价值的肥效,而同时使水彻底净化呢?化粪池与灌溉的结合看来对这个州是最合理、便宜和有效的系统”^{[7]155}。

1910年加利福尼亚州的报告中说,“35个城镇利用生活污水进行农灌,11个无预处理,24个通过化粪池处理”,当时化粪池是污水处理的最高级形式。1912年加利福尼亚州的贝克斯菲尔德(Bakersfield)开始使用污水处理厂出水进行灌溉,到1935年加利福尼亚州有62个城市采用污水处理厂出水灌溉耕作物和“野生”植物^{[7]156,159}。

1912年,加利福尼亚州旧金山市的金门(Golden Gate)公园,将化粪池出水排入观赏性湖泊,并用于浇灌约101hm²绿地。1932年,金门公园专门建成了水回收厂,处理单元包括格栅、除砂、预曝气、一次沉淀、活性污泥、二次沉淀与氯化。该厂在污水再生利用的历史上具有重大意义,因为建造该厂的唯一目的是回收利用污水,最初回收厂的出水仅用于观赏性湖泊,几年后出水被用于浇灌草地^{[7]160,[8]974}。

1914年5月,Arden和Lockett在英国曼彻斯特开发了活性污泥法。1917年,在美国得克萨斯州的休斯敦首次建成了生产规模的活性污泥工艺污水处理厂,这是污水处理、污水再生利用进程中具有里程碑意义的事件^{[4]13,20,50,[8]482}。

1918年4月6日,加利福尼亚州公共卫生局发布“控制使用污水灌溉的规定”,这是使用污水处理出水进行农业灌溉的第一个规定。这个规定禁止对生吃的番茄、芹菜、莴苣、浆果及蔬菜农场的产品用“原污水、化粪池、隐化池出水,或类似污水或被这些污水污染的水”进行灌溉,由蔬菜农场生产的需要煮熟吃的产品可以采用上述污水灌溉,但在收获期30日内不能使用污水进行灌溉^{[7]157}。

1926年,在亚利桑那州大峡谷(Grand Canyon)国家公园,污水经生物氧化、过滤与氯化后,用于冲洗厕所、喷灌绿地、冷却水和锅炉给水^{[7]19,[8]974}。

1933年,加利福尼亚州对1918年发布的“控制使用污水灌溉的规定”作了修订,免除了出水对蔬菜农场生食产品进行灌溉的限制,但其灌溉水应该是经过氧化的、不腐败的,而且必须经过可靠的过滤与消毒。为保证消毒的可靠性,强调需要有两套或者更多的加氯机、磅秤设备、备用氯源,每日两次分析大肠杆菌,并需作记录^{[7]157}。

1947年,美国污水厂协会和给水厂协会联合会召开联席会议讨论污水的回收。当时,美国有135处利用污水,其中有124处用于灌溉,10处用于工厂冷却、锅炉用水、淬火、工艺用水,1处用于溜冰场,回用水量为全美污水日流量的0.3%^{[9]8}。

20世纪50年代,北京市开始城市生活污水治理和综合利用的研究。1957年,当时的建工部联合农业部、卫生部把污水灌溉列入国家科研计划,从此开始兴建污水农业灌溉工程,污水灌溉得到了初步发展。1958年,召开了“全国城市污水灌溉农田会议”,污水灌溉在我国开始迅速发展^{[10]213}。

1961年,加利福尼亚州桑提县一座处理能力7570m³/d、采用常规活性污泥法处理工艺的二级出水经过渗滤后进入容积为113550m³的氧化塘,氧化塘出水经过自然过滤、氯化消毒后作为当地5个湖泊的补给水源。后来,该地的娱乐项目逐步增加,从划船、游戏

式钓鱼逐步发展到允许钓鱼人保存和食用所钓鱼类的“真正钓鱼”。1965年,圣迭戈卫生当局批准在湖泊最上游的隔离地区游泳,这是较早的再生水回用于娱乐用水的实例^{[7]165,[9]10}。

1962年,突尼斯利用污水处理厂的再生水灌溉位于La Soukra(突尼斯东北8km)的600hm²柑橘果园,采用再生水灌溉的目的是减轻由于过量抽取地下水引起的海水入侵^{[8]974,[11]104}。

1963年,美国水污染控制协会的政策声明中提及:“污水代表全国总的水资源中日益增长的部分,其价值在于:通过使水质复原到适当的程度,就很可能回收利用。为了这一目的,应当鼓励对回收污水方法和回用污水标准的研究”。

1965年,加利福尼亚州橘县供水区向州卫生部提出了用处理后的污水灌注到塔尔波特含水层的建议,将橘县卫生区一号污水处理厂生物滤池出水经混凝、沉淀、快速砂滤与氯化后进行灌注,这个建议的目的是研究在水力屏障系统中使用再生水的可行性,州公共卫生局批准了这个工程,但提出极限灌注水量为123.4万m³^{[7]164}。

1965年,美国南太和湖(South Lake Tahoe)公用事业区为解决一座处理能力为9462.5m³/d的二级污水处理厂出水出路问题,在常规活性污泥法处理之后增加了化学澄清系统(包括快速搅拌池、絮凝池、沉淀池)、混合滤料过滤、颗粒活性炭吸附,出水排入一座378.5万m³的水库,该水库可以进行划船、游泳、钓鱼等游乐活动,这是加利福尼亚州最早的废水深度处理系统^{[7]169,[9]10}。

1967年,加利福尼亚州的伯班克(Burbank)市将城市污水处理厂二级出水回用于发电厂循环冷却水,回用水量为18925m³/d,在投加氯气、酸和防腐剂之后,再生水水质接近淡水水质^{[12]15}。

1968年在纳米比亚的温得和克建造了一座规模为4800m³/d的再生水厂,此水厂是世界上第一座饮用水再生水厂,运行40多年,一直稳定地生产可以接受的饮用水。经过技术革新后,目前供水能力为21000m³/d,处理工艺改造为双膜过滤工艺^{[8]974,[11]49}。

1972年美国《联邦水质污染控制法修正案》(Federal Water Pollution Control Act Amendments)颁布,1977年《清洁水法》(the Clean Water Act)及随后的修正案颁布,该法案通过后,市政当局得到了大笔的联邦资金用于建造和改进污水处理厂,此举为美国再生水的推广应用创造了许多机会^{[12]86,[13]45}。

1973年,世界卫生组织(WHO)首次发布了污水回用于农业及水产业的指南——《处理水再利用:污水处理及保护公众健康的方法》,该标准性文件对保护公众健康和在农业和水产业中合理利用污水及粪便提供了指导;1989年,WHO根据流行病学研究及其他信息,修订了污水回用于农业及水产业的指南——《污水回用于农业及水产业健康指南》,该指南在政策层面及技术标准的制定方面均产生了较大影响,很多国家采用了这一标准;2006年,WHO第三次修订了污水回用于农业及水产业的指南——《污水、粪便、灰水安全利用指南》^{[14]Ⅳ}。

1976年10月,加利福尼亚州橘县(Orange county)供水区,21世纪水厂生产57000m³/d达到饮用水标准的回用水,将其加压注入过量开采后的饮用水含水层以避免海

水入侵^{[8]974}。

1977年,佛罗里达州的圣彼得堡(St. Petersburg)市,采用再生水灌溉公园、高尔夫球场、学校操场、住宅草坪以及冷却塔的补充水,实施再生水回用后,人均新鲜水用水量由1650L/d降低到830L/d^{[11]47,[12]85}。

1977年,以色列特拉维夫Dan地区工程,污水处理厂出水被注入地下含水层,然后通过回收井回收,通过100km的输水管道,将提升的地下水输送到以色列南部,用于灌溉非限制性作物^{[8]974,[15]210}。

1980年,美国EPA的《污水再生利用指南》第一版出版发行,并于1992年进行了第一次修订,于2004年进行了第二次修订。

1983年10月27日,中国“六五”科技计划中城市污水回用课题小试在大连通过建设部鉴定,认为是中国国内首次提出的有关城市污水再生利用的研究成果;“青岛市城市污水回用于工业(中试)”于1984年完成了中试研究。两项研究表明,污水可以通过深度处理再次回用,是很有前途的水源,我国的污水再生利用工作开始起步^{[16]15}。

1987年北京市颁布实施《北京市中水设施建设管理试行办法》,这是我国有关污水再生利用的第一个地方性法规^{[17]2}。

1989年在天津纪庄子污水处理厂内建设了1500m³/d的污水回用示范工程,主体单元采用纤维球过滤,主要用于厂内脱水机房冲洗滤布、园林绿化和厂外煤建三厂生产用水^{[18]249,[19]761}。

1991年7月,“七五”国家科技攻关环保项目“城市污水资源化的研究”全面鉴定验收,一大批污水回用成套中试成果完成,为污水再生利用的工程化提供了科技支持。

1992年5月,大连春柳河污水回用工程建成投产,规模为1万m³/d,采用加速澄清+过滤工艺,主要用户为污水处理厂附近的煤气二厂、燃料分厂、橡胶厂、热电厂等^{[16]95,[20]967}。

2000年5月,新加坡日产新生水1万m³的勿洛(Bedok)再生水厂开始运行,该厂采用微滤+反渗透+紫外线消毒处理工艺。从2003年2月开始,新加坡公用事业部开始将新生水与水库中的原生水混合,作为间接饮用水使用。

2002年底,供水能力5万m³/d的天津纪庄子再生水厂正式向天津梅江居住区的用户供水。该项目是全国五个城市污水回用试点项目之一。

2003年3月,采用CMF+RO工艺的天津经济技术开发区新水源一厂开始供水,主要回用于热源厂冷却及生产、绿化灌溉、景观河道等^{[21]292,[22]281}。

2006年11月,澳大利亚自然资源管理部长理事会(NRMMC)、环境保护和遗产理事会(EPHC)、全国健康和医学研究理事会(NHMRC)、澳大利亚卫生部长会议(AH-MC)制定并颁布了《澳大利亚污水再生利用指南:管理健康和环境风险(阶段1)》;2008年5月,又发布了《澳大利亚污水再生利用指南:管理健康和环境风险(阶段2)——补充饮用水水源》^[23]。

2006年12月26日,中国国务院常务会议审议并原则通过“水体污染控制与治理”科技重大专项,专项中多项课题涉及再生水利用。