



清华大学百年校庆
TSINGHUA UNIVERSITY
CENTENARY CELEBRATION

清华大学百年校庆环境科学与工程系列著作

再生水水质安全评价与保障原理

胡洪营 吴乾元 黄晶晶 赵欣 等 著



科学出版社

清华大学百年校庆环境科学与工程系列著作

再生水水质安全评价与保障原理

胡洪营 吴乾元 黄晶晶 赵欣等 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书以再生水水质安全保障和再生水利用过程中的风险控制为目标,在提出水质安全保障与风险控制策略的基础上,根据近年来国内外污水再生利用领域的最新研究进展,总结了再生水中病原微生物和化学污染物的分布规律以及水质安全评价方法,阐述了再生水利用中的潜在安全问题、风险评价理论和水质标准制定方法,评价了典型再生处理工艺对污染物的处理特性,分析了再生水消毒的水质风险与控制原理,力求系统反映再生水水质安全保障领域的新思路、新方法和新成果。

本书内容系统性强,兼具前沿性、学术性和实用性,数据丰富,信息量大,可供污水处理与再生利用领域的科研人员、企业技术人员和相关行政管理部门以及环境工程和给水排水工程领域的本科生、研究生等参考。

图书在版编目(CIP)数据

再生水水质安全评价与保障原理 / 胡洪营等著. —北京:科学出版社,2011

(清华大学百年校庆环境科学与工程系列著作)

ISBN 978-7-03-030475-9

I. ①再… II. ①胡… III. ①再生水-水质-安全评价②再生水-水质-保障 IV. ①X824

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 037997 号

责任编辑:杨 震 刘 冉 / 责任校对:刘小梅

责任印制:钱玉芬 / 封面设计:黄华斌

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>

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2011 年 4 月第 一 版 开本:B5 (720×1000)

2011 年 4 月第一次印刷 印张:33

印数:1—2 200 字数:647 000

定价:98.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

丛 书 序

环境问题已成为人类发展所面临的最严峻挑战之一。保护和改善生态环境,实现人类社会的可持续发展,是全人类紧迫而艰巨的任务。高水平的科技支撑和高层次的创新人才是实现上述战略目标的根本保障,高等学校在推进可持续发展战略的历史进程中具有举足轻重的作用。

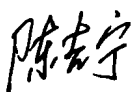
纵观世界著名大学的发展历史,与资源环境相关的学科始终是学校发展的重要支柱,当今的世界一流大学更将资源环境领域作为未来发展的主要推动力之一,资源环境问题的挑战为学科交叉和学科发展提供了宽广的创新平台。清华大学在建设世界一流大学的探索与实践过程中,始终将环境科学与工程学科列为优先发展学科。1977 年建立我国第一个环境工程专业,1984 年成立环境工程系,1997 年更名为环境科学与工程系,2011 年发展为环境学院。建立了以环境工程、环境科学、环境管理、市政工程、辐射防护与环境保护为重点的学科体系;先后建立了“环境科学与工程研究院”、“环境模拟与污染控制国家重点联合实验室”和“联合国环境规划署巴塞尔公约亚太地区协调中心”等高水平的开放式研究基地。1998 年率先在国内开展创建绿色大学的探索与实践,2008 年成立了“全球变化研究院”。

经过几代人数十年的努力与攀登,清华大学在资源环境领域形成了一支具有国际影响力的学术带头人和中青年学术骨干队伍,他们在水环境、大气环境、持久性有机污染、危险废物、全球气候变化和循环经济等领域积累了大量的基础理论和工程技术方面的研究成果。不仅为国家培养了一大批环境保护工程技术、科学研究和行政管理人才,而且通过“水体污染控制与治理重大专项”、“北京奥运空气质量保障”和重要国际环境公约谈判与履约等工作,为国家重大环境问题的解决和可持续发展战略的实施提供了理论支持、技术服务和决策支撑。

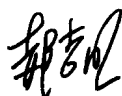
破解经济发展和环境保护这对矛盾的根本出路在于科学与技术进步,而成果和信息的广泛及时分享与交流是科技进步的重要方面。在

清华大学迎来百年华诞之际,我们组织出版《清华大学百年校庆环境科学与工程系列著作》,以其求教于环境科学与工程领域的同行,并期望为探索我国社会经济与环境保护的协调发展之路做出新的贡献。

衷心感谢系列著作的各位作者以及所有关心、支持和帮助编辑出版的同志们,诚恳地欢迎读者对本系列著作提出宝贵的批评和建议。



清华大学常务副校长



清华大学环境科学与工程研究院院长

中国工程院院士

2011年3月于清华大学

前 言

我国是一个水资源严重短缺的国家,水资源已成为制约社会和经济可持续发展的重要因素。污水再生利用是解决水资源短缺的有效途径,也是防污减排的重要措施。未来十至二十年将是我国污水再生利用事业的快速发展期。污水再生利用的关键是再生水水质安全保障。建立健全污水再生利用安全保障体系,深入了解再生水中的污染物种类、浓度水平及其健康和生态风险,不断发展再生水水质安全评价方法,开发污水再生处理先进技术和水质监控技术,是污水再生利用领域的重要课题。

本书以再生水水质安全保障和再生水利用过程中的风险控制为目标,在提出再生水利用安全保障与风险控制策略的基础上,利用大量的统计数据分析了再生水中病原微生物和化学污染物的存在水平和分布规律,系统总结了再生水水质安全评价方法,阐述了再生水不同用途存在的潜在安全问题以及健康与生态风险评估理论,探讨了再生水水质标准的制定方法。同时,本书还利用翔实的数据,系统总结了常见污水再生处理工艺对病原微生物和化学污染物的处理效果,阐述了再生水消毒存在的水质风险及其控制理论和技术原理。

从广义上讲,污水再生利用的对象包括城市污水(生活污水)和工业废水两种类型。本书以城市污水的再生利用为重点进行阐述,但大部分内容,如再生水水质保障策略、水质安全评价方法、风险评估方法以及消毒风险控制等内容也适用于工业废水。

本书在撰写过程中始终坚持先进性、前沿性、系统性和学术性原则,力图系统、客观反映再生水水质安全保障领域的新思路和最新的研究方法及成果。例如,将先进的风险管理思想引入再生水利用安全保障研究,指导安全保障体系构建、水质安全评价、水质标准制定以及再生水利用过程中的风险控制等;尽可能利用系统图和表格等形式将内容概括化和体系化,以提高内容的系统性和条理性;利用统计分析方法将大量的数据进行分析整理,力求数据的客观性和学术性。同时,还注重内容的实用性和可读性,以便使读者能够容易地获得更多的信息。例如,利用大量的统计分布图,给读者提供了丰富的实用信息;利用示意图提高内容的可读性等。

本书是作者及其研究组十年来研究成果的结晶。自2000年以来,作者所在的研究组从事再生水水质安全评价与污水再生利用技术研究的学生、博士后已经毕业、出站累计30余人次,其中包括本科生8人(董小妍、王丽莎、宁大亮、宋玉栋、张彤、张薛、赵欣、唐鑫)、硕士生6人(魏杰、张彤、田杰、王超、谢兴、杨佳)、博士生5

人(董春宏、王丽莎、宗祖胜、郭美婷、吴乾元)、博士后 6 人(魏东斌、梁威、李梅、白宇、孙迎雪、孙艳)。在此对所有做出贡献的同学表示衷心感谢! 是这些优秀、活泼,具有向上、拼搏和奋斗精神的学生使得在该方向的研究得以延续并不断深入,不断发现新问题,不断取得新成果。

本书的主要研究成果是在国家自然科学基金委员会面上项目、重大国际合作项目和杰出青年基金项目以及科技部科技攻关(科技支撑课题)和“863”课题、国家科技重大专项“水体污染控制与治理”项目等的支持下完成的,在此表示感谢!

全书由胡洪营策划、组织撰写和审稿、统稿,各章主要撰写人员如下:

第 1 章:胡洪营;第 2 章:胡洪营、魏东斌;第 3 章:黄晶晶、李梅;第 4 章:黄晶晶;第 5 章:吴乾元、黄璜、魏东斌;第 6 章:吴乾元;第 7 章:吴乾元;第 8 章:赵欣、谢兴;第 9 章:赵欣;第 10 章:胡洪营、赵欣;第 11 章:黄晶晶、谢兴、张彤;第 12 章:李鑫、黄璜;第 13 章:吴乾元、黄晶晶、郭美婷、王丽莎;第 14 章:胡洪营。另外,汤芳和张逢参与了第 3 章、第 4 章和第 11 章的文字修改工作;庞宇辰参与了第 1 章的图表以及缩写词的编辑工作。

本书可供污水再生处理领域科研人员、工程技术人员以及环境工程专业和给水排水工程专业本科生、研究生参考,也可以作为再生水管理部门的参考资料。

受作者水平所限,书中不足和错误之处难免,希望读者指正。

胡洪营

2011 年 1 月于清华园

目 录

丛书序

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 污水再生利用的必要性与意义	1
1.2 污水再生利用的可行性	4
1.3 再生水利用途径	6
1.4 污水再生利用系统构成	7
1.5 再生水利用安全保障与风险控制面临的课题	10
参考文献	12
第 2 章 再生水利用安全保障与风险管理策略	13
2.1 再生水利用的安全问题	13
2.2 再生水水质安全保障与风险控制体系	14
2.3 污水及再生水中的污染物及其危害	17
2.4 再生水水质安全评价指标	19
2.5 关键风险因子识别与风险评价	24
2.6 再生水水质标准体系	25
2.7 再生水水源保障	26
2.8 城市污水再生处理系统优化	27
2.9 工业废水再生处理系统优化	32
2.10 再生水输配与储存系统优化与管理	46
2.11 再生水利用系统管理	46
参考文献	47
第 3 章 污水及再生水中的病原微生物	49
3.1 污水及再生水中常见的病原微生物及其危害	49
3.2 污水及再生水中常见的病毒	53
3.3 污水及再生水中常见的病原菌	58
3.4 污水及再生水中常见的病原性原虫	63
3.5 污水及再生水中病原微生物的浓度水平	65
3.6 病原微生物与水质之间的相关关系	81
3.7 病原微生物指标之间的相关关系	84

参考文献	89
第4章 污水及再生水中病原(指示)微生物的检测与评价方法	93
4.1 病毒及其指示微生物的检测方法	93
4.2 病原菌及其指示微生物的检测方法	99
4.3 病原性原虫的检测方法	103
4.4 污水中病原(指示)微生物检测的不确定性	104
参考文献	109
第5章 污水及再生水中的化学污染物	111
5.1 污水中的典型化学污染物	111
5.2 污水及再生水中的常规有机污染物	111
5.3 污水及再生水中的无机污染物	133
5.4 污水及再生水中的微量有毒有害污染物	142
5.5 污水及再生水的生物毒性	163
参考文献	167
第6章 再生水中的化学污染物表征及生物毒性评价方法	170
6.1 再生水中的化学污染物评价	170
6.2 溶解性有机污染物的组分分类与分离方法	171
6.3 有机物特性表征	176
6.4 微量有毒有害有机污染物的分析	186
6.5 再生水生物毒性评价及毒性物质识别	203
参考文献	222
第7章 再生水利用的潜在风险及水质要求	226
7.1 再生水在农、林、牧、渔业的应用及其潜在风险	226
7.2 再生水城市杂用及其潜在风险	241
7.3 再生水工业回用及其潜在风险	254
7.4 再生水景观和娱乐利用及其潜在风险	263
7.5 再生水饮用水增补应用及其潜在风险	273
7.6 再生水的地下水补给应用及其潜在风险	278
参考文献	286
第8章 再生水利用的健康风险评价	290
8.1 再生水利用的潜在健康风险	290
8.2 健康风险评价的基本方法	292
8.3 再生水利用过程中暴露剂量的确定	296
8.4 再生水利用过程中化学污染物的健康风险评价	306
8.5 再生水利用过程中病原微生物的健康风险评价	312

8.6 健康风险评价面临的课题	318
参考文献	321
第9章 再生水利用的生态风险评价	323
9.1 再生水利用的潜在生态风险	323
9.2 再生水灌溉对土壤生态的影响	326
9.3 再生水对地表水生态的影响	327
9.4 再生水对地下水的影响	335
9.5 生态风险评价方法	337
9.6 生态风险评价及该领域面临的课题	345
参考文献	345
第10章 再生水水质标准制定方法	347
10.1 再生水水质标准制定原则	347
10.2 再生水水质标准指标体系	348
10.3 基于健康风险评价的再生水生物学标准制定方法	349
10.4 再生水景观利用的氮磷水质标准确定方法	360
参考文献	366
第11章 污水再生处理工艺对病原微生物的去除	369
11.1 病原微生物的去除原理	369
11.2 污水再生处理工艺对病毒的去除	371
11.3 污水再生处理工艺对病原指示菌的去除	377
11.4 污水再生处理工艺对病原性原虫的去除	383
11.5 典型污水再生处理工艺对于病原微生物的去除	389
11.6 病原微生物去除率之间的相关关系	393
参考文献	397
第12章 污水再生处理工艺对化学污染物的去除	399
12.1 污水再生处理系统及典型工艺	399
12.2 污水中常规有机污染物的去除	403
12.3 污水中氮磷等无机污染物的去除	407
12.4 污水中微量有毒有害有机污染物的去除	426
12.5 污水中的重金属的去除	440
参考文献	444
第13章 再生水消毒及其风险控制	449
13.1 再生水消毒的意义及该领域面临的课题	449
13.2 再生水氯消毒及其风险	452
13.3 再生水紫外线消毒及其风险	472

13.4	再生水臭氧消毒及其风险·····	486
13.5	再生水消毒工艺风险控制方法及其指标·····	491
	参考文献·····	496
第14章	再生水安全保障技术发展需求 ·····	502
14.1	再生水水质评价指标与方法·····	502
14.2	再生水利用健康与生态风险评价·····	503
14.3	再生水水质标准制定方法·····	504
14.4	污水再生处理过程中的水质安全保障技术·····	504
14.5	再生水储存与输配过程中的水质劣化控制技术·····	507
14.6	再生水利用过程中的风险产生机制与控制技术·····	507
	参考文献·····	508
	主要缩略词一览表 ·····	509

第 1 章 绪 论

1.1 污水再生利用的必要性与意义

水是人类和一切生物赖以生存的基本要素,也是保障工农业生产和维系自然生态健康必不可少的资源。水资源在自然界循环中总量保持不变,但其质量(水质)却发生复杂的变化,只有水质达到必要的要求时才能成为可以利用的水资源。

随着地球上人口的增加、工农业生产的发展以及水环境污染程度的日趋严重,许多地区的可用水资源相继出现了危机,严重制约了社会、经济的发展。采取有效措施解决水资源危机,越来越受到社会各界的广泛关注。

地球的水资源总量约为 13.86 亿 km^3 ,淡水仅占总量的 2.5%,且淡水资源的 77%为极地冰川、冰帽,22%为地下水,因此,可供人类使用的淡水不到水资源总量的 1%,这其中的一部分还在河流、湖泊、沼泽中。尽管如此,从可用淡水资源的总量看,地球上的淡水可以满足人类需求,许多地区之所以出现水资源短缺问题,其主要原因可大致归纳为以下几点:水资源分布的时空不均匀性、人类活动造成的水资源污染、人口的急剧增加、生产规模的持续扩大、城市化进程的加快、水资源利用率不高、奢侈的用水习惯等(钱易,1996;USEPA,1992)。

我国水资源的特点和基本状况如下(高湘和李耘,2000;张寿全,1999):

1. 水资源分布不均匀

我国水资源总量约为 28 124 亿 m^3 ,其中河川年径流量为 2.7 万亿 m^3 ,相当于全球陆地年径流总量的 5.5%,居世界第 6 位,但我国人口基数大,人均水资源占有量只有 2 200 m^3 ,仅为世界人均占有量的 1/4,列世界第 110 位,是全球 13 个水资源极度缺乏的国家之一。

我国水资源分布在地域和季节上差异很大,东南多,西北少,黄河以北的耕地面积占全国的 64%,水资源却只占总量的 19%,而且北方降雨大多数集中在夏季 7、8、9 三个月。因此,水资源的短缺问题尤为突出。

2. 水污染引起的“水质型缺水”,加剧了水资源的短缺

我国江河、湖泊、水库普遍受到不同程度的污染,大约 80%的地表水和 45%的地下水已被污染,90%以上的城市水域污染比较严重。

近年来,我国长江、黄河、珠江、松花江、淮河、海河和辽河七大水系污染状况依然严峻。203 条河流 408 个地表水国控监测断面中,Ⅰ~Ⅲ类、Ⅳ~Ⅴ类和劣Ⅴ类水质的断面比例分别为 57.3%、24.3%和 18.4%。主要污染指标为高锰酸盐指数、五日生化需氧量和氨氮。其中,珠江、长江水质良好,松花江、淮河为轻度污染,黄河、辽河为中度污染,海河为重度污染。七大水系的主要污染指标为氨氮、五日生化需氧量、高锰酸盐指数和石油类。

2009 年七大水系的水质类别比例分布如图 1.1 所示。可以看出,位于中国南方的长江和珠江,由于径流量较大,河水稀释能力较强,水质相对较好,可作为饮用水水源水的Ⅰ~Ⅲ类水质断面分别占 87%和 85%。位于中国北方的辽河、松花江、海河、淮河水质较差,Ⅰ~Ⅲ类水质断面占各河流地表水国控监测断面数仅为 40%左右,海河仅为 34%,丧失水源水、景观等使用功能的劣Ⅴ类水质断面占海河水系国控监测断面的 42%。

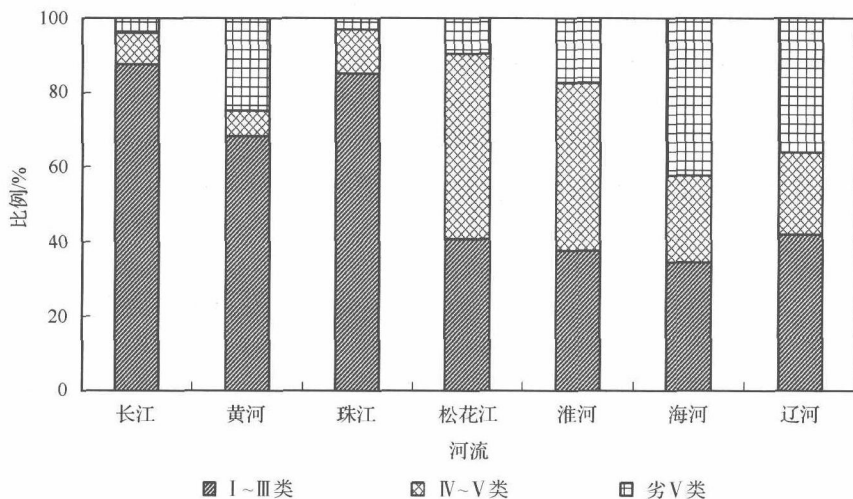


图 1.1 2009 年七大水系的水质类别比例分布

水源污染所带来的危害非常严重,据估计,目前世界有 1/4 的人类疾病是由水污染直接或间接引起的,饮用劣质水可能诱发许多传染病和地方病、引起致突变作用以及急性和慢性中毒等。

3. 社会需水量增加,用水效率低下

随着我国人口的增加、经济的发展,城市化进程的急剧加快,社会需水量持续增加,但可用水资源储量十分有限。据统计,全国 669 个城市中,400 个城市常年供水不足,其中有 110 个城市严重缺水,32 个百万以上人口的大城市中有 30 个长期受缺水的困扰,目前年缺水量达 60 亿 m^3 ,每年因缺水影响的工业产值达 2300

亿元(周彤, 2002)。

随着人口的进一步增加、人民生活水平的不断提高和生产的发展,如果仍然按照目前的粗放式用水模式,我国对水资源的需求仍将持续增长。据水利部门预测,到2050年,总需水量将达7000~8000亿 m^3 ,占我国可利用水资源量的28%以上,大大超过国际公认的发生水危机的水资源利用率(20%)。

我国工农业用水存在严重浪费现象。虽然近年来工业用水重复利用率逐年增加,2008年达到83%(图1.2),但产品的单位产量需用水量仍远远超过发达国家的用水量。美国工业用水量自20世纪80年代开始出现负增长,在以色列甚至有“每一滴水都要重复使用两次以上”的规定。

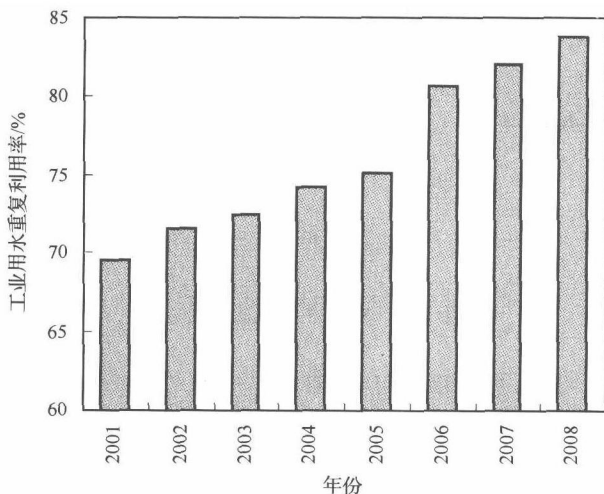


图1.2 我国工业用水重复利用率变化情况(中国环境保护部,1989~2009)

特别值得一提的是,近年来我国连年干旱,北方很多地区出现了前所未有的水资源危机,人畜饮水不足,工农业生产受到限制,给经济造成严重损失,给广大居民造成不良心理影响。

水危机及其所衍生的水质和生态问题不仅将严重束缚和制约经济发展,而且可能引发重大的社会和政治危机。因此,必须在充分节约用水的基础上,多方面开发非传统水源,以缓解因水资源紧张带来的一系列严重问题。

污水再生利用是解决水资源短缺的重要的、不可或缺的措施,也是一条成本低、见效快的有效途径。污水再生利用不但可以有效缓解水资源短缺问题,同时还可以减少污染排放,对改善水环境质量也具有重要的意义。

1.2 污水再生利用的可行性

1.2.1 城市污水水量稳定、可以利用潜力大

城市污水中杂质只占 0.1% (海水中杂质约为 3%), 绝大部分是可再用的清水。城市污水的基本组成如图 1.3 所示。城市供水量的 80% 变为污水排入下水道, 是一种很大的资源浪费, 至少有 70% 的污水 (相当于城市供水量一半以上) 经过再生处理后可以利用。污水经过收集、适当处理后重复使用, 可以构筑良好的水社会循环体系, 以保障水的自然循环。

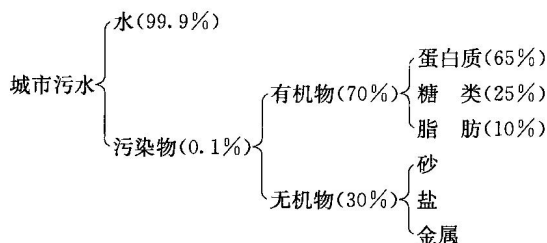


图 1.3 城市污水的基本组成

城市污水就近可得, 数量稳定可靠, 基本不受季节、雨旱季、洪水枯水等气候影响, 不受制于天, 是重要的城市第二水源。2008 年, 我国城市生活污水年排放量约为 330 亿 t (图 1.4), 城市生活污水处理率达 70% (图 1.5)。如果处理后城市生活

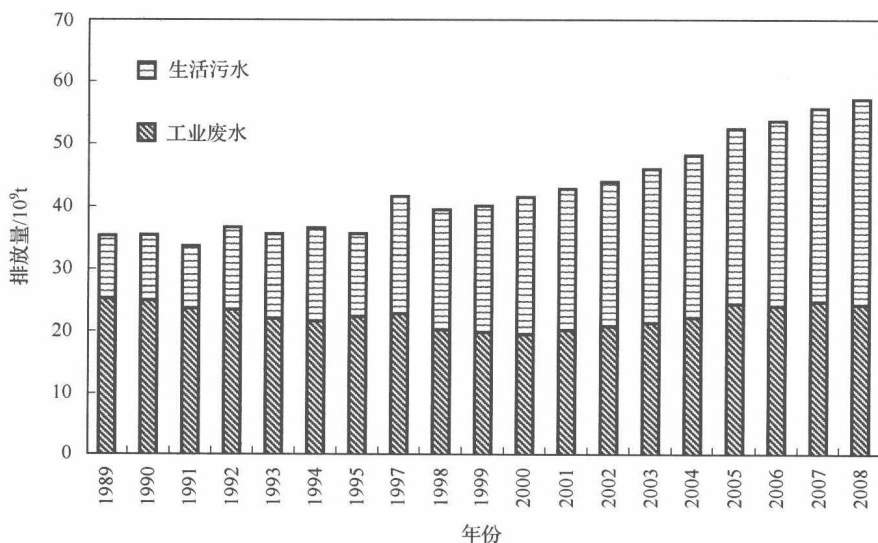


图 1.4 我国工业废水和城市生活污水排放量 (中国环境保护部, 1989~2009)

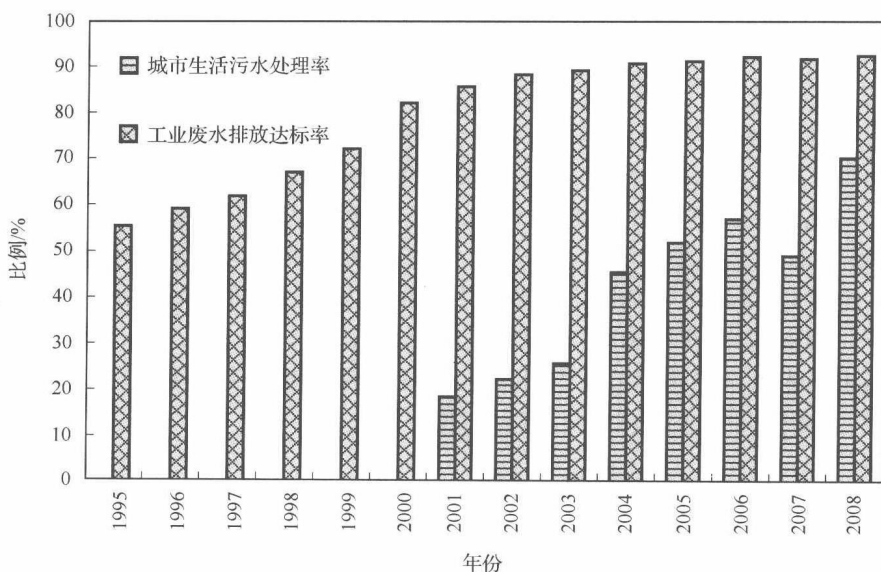


图 1.5 我国城市生活污水处理率和工业废水达标排放率

污水的回用率平均达到 20%，则污水回用量可达到 40 亿 m^3/a 以上，可见污水再生利用的潜力巨大。

据统计，在城市自来水消耗中，仅有 2% 左右被饮用，其他绝大部分都是工业用水（占 60%~80%）和生活用水，这些水完全可以用再生水代替，做到“优质水优用，低质水低用”，这也是国外普遍采用的对策（USEPA, 1992; Department of the Interior, Office of Water Research and Technology, 1979; Donald and Isam, 1995）。

1.2.2 污水再生处理技术发展迅速，能满足再生水水质要求

城市污水水量稳定、水质变化幅度小，其再生处理技术和工艺日趋成熟。城市污水经二级处理，再加上适当的深度处理措施，通过科学的工艺设计和系统运行管理，能满足不同再生水用途的水质要求。

国内外大量的实践经验证明，城市污水再生利用在技术上可行，随着水质净化技术的不断完善和进步，必将使城市污水再生利用的安全性得到进一步保证。事实上，污水再生利用已成为国外许多地区缓解水危机的重要途径，被广泛回用于工业、农业、市政杂用等用途。新加坡、纳米比亚等个别缺水国家（和城市）甚至将再生水回用于生活饮用水。

1.2.3 污水再生利用的经济和社会效益显著

城市污水处理厂大多建在城市附近,与外环境调水、远距离输水相比,大大减少了输水管线的基建投资和运行费用。据估算,污水再生形成 40 亿 m^3 水源的投资大约为 100 亿元,而形成同样规模的长距离引水(以大连“引英入连”工程为例)则需 600 亿元左右,海水淡化则需 1000 亿元,可见,污水回用在经济上具有明显优势(周彤, 2002;金兆丰和王健, 2001)。研究及实践证明,城市污水再生利用不仅可减少排污,而且可节省新鲜水资源及水资源开发费,节约的水资源又可用于扩大再生产,由此产生的直接和间接经济效益十分明显。

城市污水再生利用可节省大量新鲜水,用于保障城市生活用水,这对于促进社会稳定,不断提高生活水平,具有重大的社会效益。

1.2.4 污水再生利用的环境效益深远

城市污水再生利用开辟了第二水源,减少新鲜水资源的开采量,减轻城市供水不足的压力,缓解了供需矛盾,有利于水资源的保护及合理利用。城市污水再生利用一方面可减少污水排放量,减轻了对水体的污染,并能使部分被污染的水逐渐更新复活,有利于水环境状况的改善;另一方面减少了治理环境污染的投资,节水效益明显。干旱地区城市污水生态回用,还有利于生态恢复。因此,城市污水回用,符合可持续发展战略(金兆丰和王健, 2001)。

1.3 再生水利用途径

随着污水处理技术的发展和完善,再生处理后的出水水质不断提高,其用途越来越广泛。我国《城市污水再生利用:分类》(GB/T 18919—2002)中,以再生水回用的不同用途进行分类,如表 1.1 所示。《污水再生利用工程设计规范》(GB 50335—2002)对再生水利用途径也有相似的分类,如表 1.2 所示。

表 1.1 《城市污水再生利用:分类》(GB/T 18919—2002)规定的再生水利用途径

分类名称	细目名称	范 围
补充水源	补充地表水	河流、湖泊
	补充地下水	水源补给、防止海水入侵、防止地面沉降
工业用水	冷却用水	直流式、循环式
	洗涤用水	冲渣、冲灰、消烟除尘、清洗
	锅炉用水	高压、中压、低压锅炉
	工艺用水	溶料、水浴、蒸煮、漂洗、水利开采、水利输送、增湿、稀释、搅拌、选矿
	产品用水	