

WUSHUI ZIYUANHUA YU WUSHUI GUANGAI JISHU YANJIU

# 污水资源化与污水灌溉 技术研究

周振民 著



黄河水利出版社

# 污水资源化与污水灌溉技术研究

周振民 著

黄河水利出版社

## 内 容 提 要

本书是一本系统性研究区域污水资源化的专著。全书以开封市为例,结合开封市及其周边区域污水排放情况和综合开发利用状况,应用多学科理论,结合污水处理工程、市政工程、污水排放工程,对开封市污水资源化进行了系统性研究。全书共分9章,主要研究内容有:污水资源监测网络规划与污水资源监测技术;污水资源化系统优化规划设计研究;污水处理措施和污水资源化技术与推广应用;河流水质模拟信息管理系统软件开发与应用;水污染物总量控制和排污削减量计算与措施研究;污水灌溉技术试验研究;城市雨洪径流—用水—排水—水质数学模型研究;污水灌溉社会效益分析;污水资源化水质标准研究;重点污水处理工程设计研究;污水灌溉制度评价及土壤污染趋势预测;层次分析模型在污水资源化评价中的应用;污水回用水价理论研究等。

本书可供从事水利工程、水文水资源、水资源规划、城市规划与管理、城市水务、污水处理与水环境保护、农业污水灌溉、农业种植规划等学科研究的科研人员以及政府管理人员、决策者和有关技术人员参考,也可作为大专院校有关专业本科生、研究生的选修教材。

### 图书在版编目(CIP)数据

污水资源化与污水灌溉技术研究/周振民著. —郑州:  
黄河水利出版社, 2007. 1

ISBN 7-80734-154-8

I. 污… II. 周… III. ①城市污水—废水综合利用—  
研究—开封市②污水灌溉—研究—开封市 IV. X703

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 133117 号

组稿编辑:王路平 电话:0371-66022212 E-mail:wlp@yrcp.com

出版社:黄河水利出版社

地址:河南省郑州市金水路 11 号 邮政编码:450003

发行单位:黄河水利出版社

发行部电话:0371-66026940 传真:0371-66022620

E-mail:hhsclbs@126.com

承印单位:河南省瑞光印务股份有限公司

开本:787 mm×1 092 mm 1/16

印张:13

字数:300 千字

印数:1—2 600

版次:2007 年 1 月第 1 版

印次:2007 年 1 月第 1 次印刷

书号:ISBN 7-80734-154-8/X·26

定价:32.00 元



## 作者简介

周振民，男，汉族，1953年生，教授、博士(博士后)。2000年11月从意大利留学回国，先后担任华北水利水电学院院长助理，华北水利水电学院国际交流与合作处处长，现任华北水利水电学院国际教育学院院长、河南省特聘教授。华北水利水电学院水利水电工程学科带头人，全国模范教师，河南省优秀留学回国人员。

# 前 言

“污水资源化与污水灌溉技术研究”是水利部“948”计划技术创新与推广转化项目(合同编号:CT200210)。本研究选择河南省开封市为技术示范区,结合区域内污水资源排放、水资源工程分布、污水处理技术与污水资源化综合技术、污水灌溉作物种植结构与灌溉制度以及工农业生产发展趋势,应用多学科理论,开展了系统性研究。主要研究内容有:①开封市污水资源排放情况调查;②污水资源监测网络规划与污水资源监测技术;③污水资源化系统优化规划设计研究;④污水处理措施和污水资源化技术与推广应用;⑤河流水质模拟信息管理系统软件开发与应用;⑥水污染物总量控制和排污削减量计算与措施研究;⑦污水灌溉技术试验研究;⑧城市雨洪径流—用水—排水—水质数学模型研究,将系统优化理论应用于城市污水资源化优化规划与水环境承载能力研究;⑨污水灌溉社会效益分析;⑩污水资源化水质标准研究;⑪开封市重点污水处理工程设计研究;⑫开封市污灌制度评价及土壤污染趋势预测;⑬层次分析模型在污水资源化评价中的应用;⑭污水回用水价理论研究等。通过系统性研究,提出一套完整的与生产紧密结合的污水资源化技术、污水资源管理与开发利用理论技术和生产实用方案,促进当地工农业经济可持续发展,并在其他地区推广应用。

主要研究成果及创新点有:①基于非线性动力波汇流理论,提出了北方干旱地区城市雨水径流模型和雨水汇流模型,并将其成功地应用于城市雨洪资源计算,该项理论在国内外处于领先地位;②将系统优化理论应用于城市污水资源优化规划与水环境承载能力研究,为城市建设发展提供了技术支持,该项成果在国内处于领先地位;③开发了河流水质模拟信息管理系统计算机软件,它是目前较为成熟的、具有重要推广应用价值的水质模拟信息管理工具软件;④污水灌溉区土壤污染趋势预测理论技术,首次提出了重金属对土壤的污染趋势预报方案,在国内处于领先地位;⑤污水灌溉试验分析结果发现,污灌区土壤重金属含量在空间上与其包气带岩性结构剖面相对应,呈现出明显的峰值分布特征,表层(耕作层)是重金属的主要富集区,由此而可能造成粮食污染,这一结论在国内外属于创新性发现;⑥层次分析模型在污水资源化评价中的应用是本项研究的一个创新点;⑦首次提出了污水资源价格理论,对于我国城市污水资源的开发利用具有重要意义;⑧给出了污水灌溉对于人体健康影响的定量计算方法和计算结果,该项成果属国内创新。

研究成果在开封市推广应用取得的主要经济效益指标:①实现污水灌溉,农业产量平均增加 16.4%,污灌区平均每年增加 1 152 万元;②增加了土地的肥力,平均单方污水增加 0.05 元,土地年增肥效益 250 万元;③减少居民疾病损失效益,单方水效益为 0.504 元,年效益为 2 520 万元;④工业回用水效益 1.2 元/m<sup>3</sup>,年效益为 2 400 万元;⑤市政回用水效益 1.2 元/m<sup>3</sup>,年效益为 1 200 万元;⑥减少常规水资源开发利用的工程投资 5 000 万元,按 30 年折旧计,平均每年 170 万元。以上平均年经济效益合计 7 692 万元。

污水资源化与污水灌溉技术研究是一项跨学科的庞大复杂的系统工程,涉及学科广

泛,因素众多,研究难度大。本项研究由于时间紧、任务重,加之经费有限,虽然经过课题组全体研究人员两年来的艰苦工作,取得了一些有重要理论及生产实际应用价值的成果,但是由于种种因素的制约,还存在许多不足之处,例如,对于多种作物的污水灌溉试验问题、不同水质的轮灌问题、最大限度地减小污水灌溉对作物和土壤负面影响的试验研究问题、河流水质模拟信息管理系统计算机软件功能和精度的进一步完善、污水资源的污染成分及污染机理分析、适宜小型分散式污水处理技术研究等,都需要在今后的实践中进一步探索、研究及推广应用。

参加本项目研究的单位和人员有:华北水利水电学院孟闻远、刘增进教授,许拯民、李秀琴、刘月老师;河南省豫东水利工程管理局惠北试验站冯跃华、石建平、马培培、张子敬;河南省开封水文水资源局宋铁岭、荣晓明、陈顺胜、胡风起等。华北水利水电学院吴昊、杨明庆、梁士奎、王铁虎、王桂宾、刘荻、王利艳、王学超、赵红菲等在本项目的实验、资料分析、绘图等项工作中做出了重要贡献,在此一并表示感谢。

中国工程院院士茆智教授和中国灌溉排水委员会主席许志方教授对本项目研究成果进行了全面审查,提出了许多宝贵意见。水利部黄河水利委员会总工程师薛松贵教授级高工针对本项目中的许多技术措施提出了十分重要的改进意见。在此表示衷心的感谢。水利部黄河水利委员会原副总工程师常炳炎教授级高工、中国农业科学院农田灌溉研究所黄宝全研究员、河南省水文水资源局王有振教授级高工等,在本项目的评价、改进以及今后的研究方向上都给予了极大的帮助。没有他们的帮助,是不可能圆满完成本项目的。在此一并表示感谢。

由于本项目要求时间紧,区域污水资源化研究牵涉因素复杂,涉及学科理论广泛,且受当地各种因素的影响,加之本人水平所限,书中不足之处在所难免。对于书中出现的疏忽遗漏甚至是谬误本人负完全责任。

作者

2006年9月4日

# 目 录

第 1 章 引 言	(1)
1.1 国内外水资源概况	(1)
1.2 国内外水资源污染状况分析	(4)
1.3 国内外污水资源化现状及开展污水资源化的可行性分析	(6)
1.4 污水资源化新技术及其应用分析	(9)
第 2 章 开封市区域概况分析	(15)
2.1 自然地理概况	(15)
2.2 水文气象条件	(15)
2.3 社会经济概况	(16)
2.4 水资源条件分析	(18)
2.5 水质环境分析	(20)
2.6 水资源开发利用分析	(22)
第 3 章 开封市城市污水资源量计算与水质特性分析	(26)
3.1 开封市城市污水来源分析	(26)
3.2 污水资源量计算	(27)
3.3 城市污水水质特性分析	(43)
3.4 开封市污水资源水质综合评价	(53)
第 4 章 开封市污水资源监测技术与污水资源分布情况调查研究	(56)
4.1 监测网络设计基本原则	(56)
4.2 监测断面优化设计原则	(57)
4.3 监测站点布设方案	(57)
4.4 监测参数、方法和频率的确定	(61)
4.5 开封市污水资源分布情况监测成果分析	(63)
第 5 章 开封市污水资源化与污水处理技术研究	(70)
5.1 国内外污水资源化途径及方法	(70)
5.2 开封市污水资源化目标	(74)
5.3 污水资源化水质标准研究	(77)
5.4 污水资源化规划设计	(89)
5.5 开封市重点污水处理工程设计研究	(118)
5.6 层次分析模型在污水资源化评价中的应用	(130)
5.7 污水回用水价研究	(137)
第 6 章 开封市污水灌溉技术研究	(146)
6.1 引 言	(146)

6.2	污水灌溉技术试验 .....	(148)
6.3	污水灌溉制度评价 .....	(156)
6.4	结    论 .....	(170)
<b>第 7 章</b>	<b>惠济河水质信息管理系统开发与应用</b> .....	<b>(171)</b>
7.1	研究意义 .....	(171)
7.2	水质模型的建立 .....	(171)
7.3	计算结果分析 .....	(176)
7.4	计算机程序的编制及其使用说明 .....	(178)
<b>第 8 章</b>	<b>开封市污水灌溉效益分析</b> .....	<b>(184)</b>
8.1	环境费用效益分析的常用方法 .....	(184)
8.2	再生水农业回用费用效益计算 .....	(185)
8.3	工业回用水、市政回用水的供水效益 .....	(190)
8.4	推广效益 .....	(190)
<b>第 9 章</b>	<b>开封市污水资源化管理与污水处理技术推广应用对策分析</b> .....	<b>(192)</b>
<b>参考文献</b>	.....	<b>(195)</b>
<b>附图一</b>	<b>开封市水系水利工程及水资源分区图</b>	
<b>附图二</b>	<b>开封市 1999 年降水量等值线图</b>	
<b>附图三</b>	<b>开封市 1999 年主要河流水质概况图</b>	



# 第 1 章 引 言

## 1.1 国内外水资源概况

### 1.1.1 世界水资源状况分析

水是人类赖以生存的基本条件,全球水的总储量为  $13.86 \times 10^9 \text{ km}^3$ ,其中 96.5% 存在海洋中,约覆盖地球表面总面积的 71%,在陆地上、大气和生物体中的水只占很少一部分,可供人类利用的淡水资源所占比例极小,约为 2.5%,且其中 87% 储存于两极冰盖、高山冰川、冰冻地带和深度 750m 以上的地下层。包括河流、湖泊及浅层地下水在内的淡水资源仅占地球水总储量的约 0.26%。陆地上通过全球水文循环的多年平均年径流量有  $4.7 \text{ 万 km}^3$ ,其中有 40% 分布于适合人类生存的地区。全球年降水总量约为  $500 \text{ 万 km}^3$ ,约  $100 \text{ 万 km}^3$  降落在陆地上,其中约有  $65 \text{ 万 km}^3$  通过蒸发返回大气中,约有  $35 \text{ 万 km}^3$  存留在河流、湖泊、水库、湿地或渗入地下。

随着人类社会的进步和经济的发展,工业、农业、城市的日益扩展,特别是世界人口急剧增多,加之人类活动失控,造成水资源污染和严重浪费,使世界水资源日趋匮乏。据联合国教科文组织统计,按全球人口为 50 亿~60 亿人计算,人均占有水量为  $8\ 000 \sim 10\ 000 \text{ m}^3$ 。1997 年“第一届世界水论坛”报告说,由于世界水资源消费量急剧增加,人均水资源占有量已降到  $4\ 800 \text{ m}^3$  (1995 年为  $7\ 300 \text{ m}^3$ )。据统计,20 世纪初,全球水消耗量为  $5\ 000 \times 10^9 \text{ m}^3/\text{a}$ ,到 20 世纪末,已增长为  $50\ 000 \times 10^9 \text{ m}^3/\text{a}$ ,其中,69% 为农业用水,23% 为工业用水,生活用水占 8%,亚洲、非洲和南美洲以农业用水为主,欧洲、北美和中美以工业用水为主,水资源消费结构很不平衡。

世界水资源分布很不平衡,亚马孙河流域、南亚和东南亚暴雨多水,而中东、北非、中亚北部和大洋洲中部却雨水很少。60%~65% 的淡水集中分布在 9~10 个国家,例如俄罗斯、美国、加拿大、印度尼西亚、哥伦比亚等,其中奥地利每年有 840 亿 t 水,可满足欧盟 3.7 亿人口的用水需求,而占世界人口总量 40% 的 80 多个国家却为水资源匮乏的国家,其中有近 30 个国家为严重缺水国,非洲占 19 个,像马尔他人均淡水占有量仅  $82 \text{ m}^3$ ,科威特为  $95 \text{ m}^3$ ,利比亚为  $111 \text{ m}^3$ ,卡塔尔为  $91 \text{ m}^3$ ,成为世界上 4 大缺水国;而几个富水国,水资源消费急剧上升,1954~1994 年美洲大陆用水量增加 100%,非洲大陆增加 300% 以上,欧洲大陆增加 500%,亚洲大陆增长幅度更高。地下水开采量为  $5\ 500 \times 10^9 \text{ m}^3/\text{a}$  (20 世纪 80~90 年代),其中大于  $100 \times 10^9 \text{ m}^3/\text{a}$  的有十余个国家,占总开采量的 8.5%。美国纽约人均日耗水量为 600~800L,日本大阪为 575L,法国巴黎为 443L,意大利罗马为 435L,相差极为悬殊。

## 1.1.2 中国水资源状况

我国地域辽阔,地形复杂,绝大部分处于季风气候区,受热带、太平洋低纬度上温暖而潮湿气团的影响以及西南印度洋和东北鄂霍次克海水蒸气的影响,我国水资源总量丰富,而人均水资源占有量相对不足,且时空分布不均。

### 1.1.2.1 中国水资源供需形势分析

据统计,我国多年平均降水量约  $6\ 190\text{km}^3$ ,折合降水深度  $648\text{mm}$ ,而全球平均降水深度为  $834\text{mm}$ ,亚洲为  $740\text{mm}$ ,我国的年平均降水明显低于世界和亚洲年平均值。我国多年平均水资源总量约为  $2.812\ 4 \times 10^{12}\text{m}^3$ ,占世界水资源总量的  $6\%$ ,河川径流量为  $2.711\ 5 \times 10^{12}\text{m}^3$ ,少于巴西、俄罗斯、加拿大、美国和印度尼西亚,居世界第 6 位。由于地表径流量巨大的时空变化,地下水资源也是我国大部分地区重要的供水水源,尤其是北方地区。我国矿化度小于  $2\text{g/L}$ 、与降水和地表水有直接水力联系的浅层地下水资源量为  $6\ 762\text{亿}\text{m}^3$ ,其中  $97.6\%$  转化为河川基流。

据 2002 年水资源公报,全国平均年降水量  $660\text{mm}$ ,折合降水总量  $62\ 610\text{亿}\text{m}^3$ ,全国地表水资源量  $27\ 243\text{亿}\text{m}^3$ ,折合径流深  $287\text{mm}$ ,北方缺水地区(5 个流域片,包括松辽河、海河、黄河、淮河和黑龙江流域片)地表水资源量比常年偏少  $27.5\%$ (其中海河片比常年偏少  $72.4\%$ ),在各省行政区域中,地表水资源比常年偏少的有 15 个省(区、直辖市),其中偏少  $50\%$  以上的有 6 个省(区、直辖市)。2002 年从国外流入我国境内的水量为  $278\text{亿}\text{m}^3$ ,从国内流出国境及流入国际界河的水量有  $6\ 705\text{亿}\text{m}^3$ ,入海水量为  $17\ 693\text{亿}\text{m}^3$ 。2002 年全国地下水资源量  $8\ 697\text{亿}\text{m}^3$ ,大部分与地表水资源量重复,不重复的只有  $1\ 012\text{亿}\text{m}^3$ ,将地表水资源量与地下水资源量中的不重复部分相加,2002 年全国水资源总量为  $2.825\ 5 \times 10^{12}\text{m}^3$ ,其中北方 5 个流域片水资源总量  $4\ 158\text{亿}\text{m}^3$ ,比常年偏少  $22.4\%$ ,全国产水总量占降水量的  $45\%$ ,平均每平方公里产水量  $29.8\text{万}\text{m}^3$ 。

从我国水资源总量上来说,同世界相比并不算少,位居世界第 6 位,然而由于人口众多,以 13 亿人计,我国人均占有水资源量仅  $2\ 173\text{m}^3$ ,约为世界人均占有水资源量的  $1/4$ ,相当于美国的  $1/6$ ,相当于加拿大的  $1/44$ ,居世界第 100~117 位,单位耕地面积占有水量仅为世界平均水平的  $80\%$ ,是世界上 13 个贫水国家之一。又由于我国水资源主要来源于降水,降水遭受大气环流、海陆位置以及地形、地势等因素的影响,使得降水量在时空分布上极不均匀,总格局是南方多北方少、东南多西北少,大多数降水集中在夏季 7、8、9 月 3 个月,我国西北、华北以及沿海缺水地区的工农业经济发展受到了水资源匮乏的严重影响。

随着人口的增长,预测到 2030 年我国人口将增长至 16 亿人,人均水资源量将降到  $1\ 760\text{m}^3$ ,按国际上一般承认的标准,人均年拥有水量在  $1\ 000\sim 2\ 000\text{m}^3$  时,会出现缺水现象,少于  $1\ 000\text{m}^3$  时,会出现严重缺水的水荒局面。海河、淮河和黄河片人均年占有水资源量在  $350\sim 750\text{m}^3$  之间,松辽河片人均也只有  $1\ 700\text{m}^3$ 。人均占有水资源量的不足,使我国大部分地区的用水紧张情况将长期存在,而且若不采取措施,水资源供需矛盾将会更加尖锐。

一方面我国人均水量远远低于世界平均水平,另一方面,又是用水量最多的国家。据

2002年水资源公报,全国总供水量5 497亿 m<sup>3</sup>,其中地表水资源供水量占80.1%,地下水源供水量占19.5%,其他水源供水量(指污水处理再利用量和集雨工程供水量)占0.4%,另外海水直接利用量为216亿 m<sup>3</sup>。2002年全国总用水量为5 497亿 m<sup>3</sup>,其中城镇生活用水(包括全部建制市、建制镇和具有集中供水设施的非建制镇的居民用水及公共设施用水)占5.8%,农村生活用水(包括农村居民和牲畜用水)占5.4%,工业用水占20.8%,农田灌溉用水占61.4%,林、牧、渔用水占6.6%。全国人均综合用水量为428m<sup>3</sup>,万元国内生产总值(当年价)用水量为537m<sup>3</sup>,城镇人均生活用水量为219L/d,农村人均生活用水量为94L/d,农田灌溉亩均用水量为465m<sup>3</sup>。在农业用水中,北方缺水地区农业用水量占总用水量的大部分,松辽河片农业用水量占总用水量的72.1%,海河片农业用水量占71.6%,黄河片农业用水量占76.9%,淮河片农业用水量占73.1%,内陆河片农业用水量占93.9%。

进入21世纪,我国水资源矛盾又将进一步加剧,预测到2010年,全国总供水量为6 400×10<sup>8</sup>~6 670×10<sup>8</sup>m<sup>3</sup>,相应的总需水量将达6 633×10<sup>8</sup>~6 988×10<sup>8</sup>m<sup>3</sup>,供需缺水233亿~318亿 m<sup>3</sup>。21世纪我国城市生活用水、工业用水量将大大增加。预测我国用水高峰期将在2030年前后出现,全国用水总量将达到8 000亿 m<sup>3</sup>,水资源供需矛盾将更加突出。

#### 1.1.2.2 水资源与工农业经济发展之矛盾分析

我国南方水多地少,水资源量占全国的80%,而耕地占全国的35%,人口占全国的53%。北方水少地多,人口占全国的47%,耕地占全国的65%,而水资源量只占全国的20%。从各流域来看,这种不平衡性表现得更明显。如表1-1所示。

表 1-1 中国水资源量分布状况

流域片	流域面积占全国的百分比(%)	水资源总量(×10 <sup>8</sup> m <sup>3</sup> )	耕地(万hm <sup>2</sup> )	人口数(亿人)	人均水量(m <sup>3</sup> /人)	亩 <sup>①</sup> 均水量(m <sup>3</sup> /亩)
内陆河片	35.3	1 303.9	553.3	0.35	3 725	1 470
黑龙江流域片	9.5	1 351.8	1 240.2	0.69	1 959	679
松辽河流域片	3.6	576.7	639.2	0.64	901	558
海河流域片	3.3	421.1	1 039.9	1.28	329	251
黄河流域片	8.3	743.6	1 211.6	1.09	682	382
淮河流域片	3.5	961.0	1 421.5	2.0	481	421
北方五片合计	28.2	4 054.2	5 552.4	5.7	711	454
长江流域片	19.0	9 613.4	4.13	2 289.6	2 328	2 620
珠江流域片	6.1	4 708.1	1.46	648.7	3 225	4 530
东南诸河片	2.5	2 591.7	0.75	324.4	3 456	4 920
西南诸河片	8.9	5 853.1	0.28	171.7	20 904	21 800
南方四片合计	36.5	22 766.3	3 434.4	6.62	3 439	4 130
全国	100	28 124.4	9 540.1	12.67	2 219.7	1 870

① 1亩=1/15hm<sup>2</sup>,下同。

20 世纪 90 年代中期,全国人均水资源占有量为  $2\,219.7\text{m}^3$ ,亩均耕地水资源量约为  $1\,870\text{m}^3$ ,北方五片(包括黑龙江流域、松辽河流域、海河流域、黄河流域和淮河流域)人均水资源占有量仅为  $711\text{m}^3$ ,不到全国平均水平的  $1/3$ ,亩均耕地水资源量为  $454\text{m}^3$ ,约为全国平均水平的  $1/4$ 。特别是海河流域,人均水资源量只有  $329\text{m}^3$ ,亩均耕地水资源量  $251\text{m}^3$ ,分别是全国平均水平的  $1/6$  和  $1/8$ ,是我国水资源最为紧张的地区。与此相反,南方四片(包括长江流域、珠江流域、东南诸河和西南诸河)水资源则较为丰富,总面积占全国的  $36.5\%$ ,耕地占全国的  $36\%$ ,但水资源量占全国水资源总量的  $81\%$ ,人均占有量  $3\,439\text{m}^3$ ,亩均耕地水资源量  $4\,130\text{m}^3$ ,分别是全国平均水平的  $1.5$  倍和  $2.2$  倍。地质矿产资源分布也反映了这种不平衡性,按照所探明的 49 种主要矿产资源的潜在价值估算,华北地区矿产资源约占全国的  $41.2\%$ ,水资源量仅占全国的  $4.7\%$ ;长江中下游及以南地区的矿产资源只占全国的  $10.2\%$ ,但水资源量占到全国的  $42.6\%$ 。

水资源的时空分布不均匀性,水资源的分布与人口分布、经济发展程度的不匹配,加剧了我国水资源的供需矛盾,给我国工农业生产发展带来了极大的困难,并成为制约 21 世纪中国社会经济持续发展的重要因素。因此,认识中国水资源特点,有效地加以控制,以促进水资源与环境、人口、经济的协调发展,是解决 21 世纪中国水问题的关键。

## 1.2 国内外水资源污染状况分析

### 1.2.1 国外地表水资源污染状况

目前全球范围的水体污染已经到了比较严重的程度。据报道,全世界每年有  $4\,000$  亿  $\text{m}^3$  的污水排入江河湖泊,污染了全球径流总量的  $21.4\%$  以上。

在法国巴黎郊区有 3 个水厂从不同的河流取水,供巴黎市区 400 多万市民饮用水,水质自 20 世纪 60 年代末开始严重恶化,水中含有大量的有机物和氨。塞纳河、瓦惹河和马思河都不同程度地受到工业和城市污水以及农业污染。它们的总有机碳(TOC)均在  $5\text{mg/L}$  以上,氨氮含量在  $0.3\sim 0.8\text{mg/L}$  之间。三氯甲烷、邻苯二甲酸酯、四氯乙烯等微量有机物含量较高,超过了饮用水标准,致使水厂不得不在水净化处理中增加各种深度处理工艺,强化对污染物的控制。

在英国苏格兰北部 Calder 地区的 Clyde 河、伦敦郊区的 Lee 河和英格兰中部的 Thames 河,由于工厂排放不合格的污水,水体产生了污染,水质监测结果发现,氟化物、六六六及氯丹、DDT 等含量都超过了饮用水标准。苏格兰高原地区的两条饮用水河流(Etive 河和 Allt Eigheach 河),受工业排放物的污染(硫化物及含氮化合物),水质逐渐酸化,1985 年水的 pH 值测定为  $4\sim 5$ ,其他超标物也大量存在,致使这两个饮用水源遭到彻底破坏。

德国的慕尼黑水厂以鲁尔河为水源,自 20 世纪 70 年代以来,河道上游污染物排放没有得到较好的控制,水源水质严重恶化,水厂进水溶解氧有机碳(DOC)高达  $3.6\sim 5.0\text{mg/L}$ ,氨氮( $\text{NH}_3 - \text{N}$ )为  $4\sim 6\text{mg/L}$ ,水厂采用的折点加氯工艺耗氯量高至  $10\sim 50\text{mg/L}$ ,致使出厂水中产生了大量的卤化有机物,检出的挥发性溶解有机氯(DOCl)为  $203$

$\mu\text{g}/\text{L}$ ,比原水提高了15~20倍。穿越德国境内的莱茵河,20世纪50年代以前水质较好,河水经堤岸过滤后即可饮用,但50年代后,河水不断受到各种化学物质的污染,河水经堤岸过滤后需进一步深度处理(臭氧-活性炭)才能饮用,70年代的调查结果表明,水中的污染物含量逐年增加, $\text{COD}_{\text{Cr}}$ 为16~22 $\text{mg}/\text{L}$ ,硫化物为50~100 $\text{mg}/\text{L}$ ,铁为0.5~1.0 $\text{mg}/\text{L}$ ,磷为0.7~2.0 $\text{mg}/\text{L}$ 。

在荷兰阿姆斯特丹的莱茵河段,自20世纪70年代以来,因受水体周围的土壤污染,水中有机物含量不断上升,水中检测出来各种氯代乙烷、氯硝基苯、三卤甲烷、四氯化碳、氯代异丙基醚以及多种有机氯杀虫剂。该市水厂的进水中,三卤甲烷含量高达20~100 $\text{mg}/\text{L}$ 。

西班牙的Lobregat河,因受粪便污水的污染,河水 $\text{COD}_{\text{Cr}}$ 有时高达100 $\text{mg}/\text{L}$ 左右, $\text{NH}_3-\text{N}$ 达5~9 $\text{mg}/\text{L}$ ,大肠杆菌数目严重超标,每100 $\text{mL}$ 水中含有 $2 \times 10^5 \sim 4 \times 10^5$ 个。

印度的Mahalon湖和Jalinahal湖是其国内的两个较大的饮用水水源,近几年来因环境污染,各种有机氯杀虫剂不断流失到湖泊中,在1985~1986年的调查中,测出湖水中含有六六六、环氧七氯、氯丹、DDT、DDE、DDD等数种杀虫剂,各种污染物浓度在20~50 $\mu\text{g}/\text{L}$ ,水质的恶化严重地危及了用水居民的身体健康。

在美国,作为水源的地下水和地表水同样受到污染。费城以特拉华河(Delaware)为饮用水水源,河水受到工业废水和城市净化后的污水的污染。麻省理工学院在1977~1978年对该河的水质调查中发现有近百种有机化合物,其中双醚的含量在0.4~0.5 $\mu\text{g}/\text{L}$ 。这些有机化合物与专门的工业工厂排放物有明显的相关关系,尤其是增塑剂、四甘醇和乙二醇。依阿华州的达文波特水厂以密西西比河为饮用水水源,1978年10月测得该河水质中总三卤甲烷为12 $\mu\text{g}/\text{L}$ ,其中三氯甲烷达10 $\mu\text{g}/\text{L}$ 。宾夕法尼亚的约克水厂以Codorus Creek河水作为水源,1973年12月水厂出水带有轻微的黄绿色和气味,分析表明是由水中生长的合尾藻和锥囊藻引起的,为解决这一问题,向水中投加100 $\text{mg}/\text{L}$ 的粉末活性炭,仍没有完全解决色、味问题。该水中的硝酸盐氮含量也达10~15 $\text{mg}/\text{L}$ 。

1958~1965年,美国对Breidenbach等地饮用水水源进行了广泛的调查,发现农药的浓度分别为:艾氏剂0.001~0.006 $\mu\text{g}/\text{L}$ ,环氧七氯0.0001~0.144 $\mu\text{g}/\text{L}$ ,DDT0.008~0.014 $\mu\text{g}/\text{L}$ 。美国环保局对30个可能会含有农药的水源水进行取样测试分析,结果发现多数水中含有氯丹、环氧七氯等有机污染物,在对68个水样的分析中有15%的水样含有艾氏剂,含量为0.014~0.02 $\mu\text{g}/\text{L}$ 。

据美国1989年报道,美国37个州的地表水源中的各类化学物质的浓度不断上升,19个州约10460 $\text{km}$ 长的河流遭受到有毒化学物质的严重污染。

### 1.2.2 我国水资源污染状况

据2002年中国水资源公报,全国废污水排放量631亿 $\text{m}^3$ 。其中,工业废水占61.5%,生活污水占38.5%;在评价的24个湖泊中,有12个湖泊水污染严重;在评价的146座水库中,水污染极为严重的超V类水库有8座;在12.3万 $\text{km}$ 评价河长中,IV类水河长占12.2%,V类水河长占5.6%。据2001年4月全国水环境通报,全国126个重点水质监测点的监测结果表明,全国水质达标河段率为59%,其中黄河流域多个干流河段

氨氮超标,水质均为Ⅳ类,尤其是支流河段,水质超标更为严重。黄河流域 8 个支流测报河段水污染极为严重,湟水入黄口河段水质为Ⅴ类,其余河段的水质均为超Ⅴ类。其中,污染最重的汾河太原段氨氮超标高达 231 倍,其入黄口河津段高锰酸盐指数、五日生化需氧量及挥发酚超标分别高达 240 倍、280 倍和 2 519 倍。

目前全国每年废污水的排放量在不断增加,例如,1997 年全国废污水排放量为 416 亿  $m^3$ ,到 2002 年,全国工业和城市生活废污水排放总量已达到 631 亿  $m^3$ ,同 1997 年相比,全国废污水排放量 5 年内增加了 200 多亿  $m^3$ ,平均每年以 40 多亿  $m^3$  的速度增加。大量废污水排入城市附近水体,使全国近 90% 的城镇饮用水水源受到污染,约有 50% 重点城镇的饮用水水源不符合取水标准,有的甚至取用Ⅴ类水源作饮用水水源。由于污染对工农业生产和农作物安全造成的经济损失一般占 GDP 的 1.5%~3.0%。

乡镇工业的迅速发展,也导致了大量的废污水排放。乡镇工业排污的特点是分散、浓度高和处理率低。据 1985 年统计,全国乡镇工业主要污染行业的废水排放总量为 27.2 亿 t,占全国废水排放总量的 8.5%,其中 COD 排放量为 117 万 t,占全国工业 COD 排放量的 11.96%。1989 年,乡镇工业外排废污水达标率仅为 14.8%。1990 年废污水排放量为 21.1 亿 t。1994 年全国乡镇工业废水排放总量为 43 亿 t,占全国废水排放总量的 16.6%,比 1989 年增长 1 倍多。乡镇工业废水污染,在一些局部地区造成了严重的危害,如淮河近几年由于中上游乡镇企业排放了高浓度废水导致大面积污染。

农业生产活动中所使用的农药、化肥以及用未经处理的污水农灌是造成地表径流水质污染的一个重要原因。

据统计,我国有 1 亿  $hm^2$  的耕地和 220 万  $hm^2$  的草原,每年使用农药 110.49 万 t(其中有机氮农药 86.23 万 t,有机磷农药 24.26 万 t),平均使用农药 10.8kg/ $hm^2$ 。一般来讲,只有 10%~20% 的农药附着在农作物上,而 80%~90% 则流失在土壤、空气和水体中,在灌水与降水等淋溶作用下污染地下水,如许多城市郊区因化肥引起地下水硝酸盐等氮污染。另外,我国有污水灌溉农田近 133 万  $hm^2$ ,其中以城市为中心形成的污灌区就有 30 多个,在农作物生长季节的污灌量相当于全国污水排放总量的 20%。这在缓和水资源紧张、扩大农药肥源和净化城市污水方面起了积极作用。但农灌污水大部分未经处理,有 70%~80% 的污水不符合农灌水质要求,而且多是生活污水和工业废水的混合水,其成分复杂,含有大量有毒有害的有机物和重金属。据统计,每年由于污水灌溉而渗漏的污水量高达 331t,直接污染地下水,使污灌区 75% 左右的地下水遭受污染。

## 1.3 国内外污水资源化现状及开展污水资源化的可行性分析

### 1.3.1 国内外污水资源化现状

应当指出的是,在各种解决水资源危机的措施中,城市污水资源化是一个具体可行的重要措施。此措施既开辟了新的水源,又减少了对水环境的污染和水生态的破坏,可产生

巨大的经济效益和环境效益,是解决“水危机”问题的战略性举措。一个明显的事实是西欧、北美等的发达国家,由于水资源和水污染问题日益突出,针对城市污水回用问题采取了大量有效措施,已普遍达到了总用水量逐年增加,但新鲜水的总取水量逐年减少的良性循环局面。其基本特点是污水回用率逐步提高。以美国为例,总用水量从 1975 年的 18 992 万  $\text{m}^3/\text{d}$  增加到 2000 年的 45 302  $\text{m}^3/\text{d}$ ,但同期内总新鲜水的取水量有所递减,即从 1975 年的总取水量 13 729 万  $\text{m}^3/\text{d}$  减为 2000 年的 12 526 万  $\text{m}^3/\text{d}$ ,相应污水排出量从 1975 年的 9 253 万  $\text{m}^3/\text{d}$  下降到 2000 年的 6 909 万  $\text{m}^3/\text{d}$ ,水的循环利用率从 1975 年的 51.3% 提高到 2000 年的 84.8% (未计算不可避免的损失,如蒸发、进入产品的水分等,实际回用率要更大一些)。事实表明,污水回用大有可为。在我国城市污水再生率与回用率都还很低的现实情况下,城市污水回用潜力还很大,比远距离取水更为经济有效。

我国在近十多年来,随着城市水荒的加剧,各级领导对水的问题越来越关注,认识到 21 世纪不是能源危机,而是“水的危机”,这已不是一句耸人听闻的口号,而是迫在眉睫的问题。不少城市频频告急,改革之城深圳深受缺水之苦,沿海城市大连每年因缺水减少工业产值 10 亿元以上,京津缺水,辽南、山西缺水,内蒙古、新疆也是视水如油。由于水的制约,影响到我国经济的顺利腾飞。在解决水资源短缺问题时,人们自然把目光转向了城市污水资源。我国政府和社会各界高度重视污水回用,许多专家、学者为污水回用做了大量的研究工作,现在已到了把污水回用从倡导转到落实推广的时候了。

20 世纪 80 年代以来,不少城市开展了污水回用的试验研究,国家“七五”、“八五”期间,污水回用都作为一个大课题列入攻关计划,已经取得了初步成果,提出了相应的污水资源化技术。在“八五”期间,一批城市污水处理厂陆续建设,一些污水处理厂的建设中包含了污水回用内容。国家“八五”科技攻关项目“城市污水回用技术”也对 A/O、A/A/O 及常规二级处理等工艺技术进行了深化研究和工程化实践,为不同环境和水质条件下的污水回用提供了投资较省、运行费用较低、效率高、处理效果较好的污水二级净化成套技术,处理出水水质指标达到或超过国家城市污水综合排放标准,解决了低温、低 C/N 比、生物除磷脱氮技术等关键问题;“八五”攻关推进了北京、天津等十余个城市重点开展污水回用事业;我国第一个城市污水回用于工业的示范工程在大连早已建成投产;污水回用这一新技术和新概念已经在我国缺水地区得到高度重视。可以预见,随着我国经济的持续不断发展和污水处理规模的不断扩大,作为解决水污染和水资源短缺的污水回用事业,必将得到更好的应用与发展。

从国内外的大量实践看,污水回用,将污水资源化的经济可行性是十分明显的,但目前我国的情况整体上是污水回用进展较缓慢,其主要原因是对污水回用的思想认识不足和资金投入不多。如有的地方对本地区水资源规划缺乏长远性,没有从战略眼光看待污水回用的重要作用,忽视了身边廉价的水源;有些部门对污水回用技术了解不全面,轻易否定在一些行业采用污水回用;有些地方本来就很缺水,却过分强调排江、排海而未积极回用等。围绕资金投入问题,涉及因素是多方面的,需要国家有关部门形成具体的战略对策,从污水回用立法、健全有关管理机制等方面使污水回用得到落实。

## 1.3.2 污水资源化可行性分析

### 1.3.2.1 技术可行性

专家指出,与用水量几乎相当的城市污水中只有 0.1% 的污染物质,是完全可以经处理后再利用的。国家“七五”、“八五”科技攻关计划都把污水回用作为重大课题加以研究和推广。1992 年全国第一个城市污水回用于工业的示范工程在大连建成,并已成功运行了 14 年。目前,北京、大连、天津、太原等大城市和一批中小城市在进行城市污水回用,解决水荒上已初见成效。《污水回用设计规范》(GB1996—8)已颁布实施,全国几十个大、中型污水回用工程正在建设之中,2000 年全国城市处理污水回用率约达 20%,对缓解北方和沿海城市缺水起到了一定作用。

### 1.3.2.2 经济效益可行性

城市污水处理厂一般建在城市周围,在许多城市中,城市污水经二级处理后可就近回用于城市 and 大部分工农业部门,无需支付再生费用,以二级处理出水为原水的工业净水厂的制水成本一般低于甚至远低于以自然水为原水的自来水厂,这是因为取水距离大大缩短,节省了水资源费、远距离输水费和基建费。例如,将城市污水处理到可以回用作杂用水的程度的基建费用,与从 15~30km 外引水的费用相当;若处理到可回用作更高要求的工艺用水,其投资相当于从 40~60km 外引水。而污水处理与净化的费用只占上述所节省费用的小部分。另外,城市污水回用要比海水淡化经济,污水中所含的杂质少于 0.1%,而且可用深度处理方法加以去除;而海水则含 3.5% 的溶解盐和有机物,其杂质含量为污水二级处理出水的 35 倍以上。因此,无论基建费或运行成本,海水淡化费用都超过污水回用的处理费用,城市污水回用在经济上具有较明显的优势。

### 1.3.2.3 环境可行性

城市污水具有量大、集中、水质水量稳定等特点,适用于工业用水量变化小的特点。污水进行适度处理后回用于工业生产,可使占城市用水量 50% 左右的工业用水的自然取水量大大减少,使城市自然水耗量减少 30% 以上,这将大大缓解水资源的不足,同时减少向水域的排污量,在带来可观的经济效益的同时也带来很大的环境效益。

### 1.3.2.4 污水资源化回用目标可行性

多项研究结果表明,污水资源化的最经济利用目标是农业灌溉,其次是工业生产。污水回用往往将农业灌溉推为首选对象,其理由主要有两点:① 农业灌溉需要的水量很大,全球淡水总量中有 60%~80% 用于农业,污水回用农业有广阔的天地;② 污水灌溉对农业和污水处理都有好处,能够方便地将水和肥源同时供应到农田,又可通过土地处理改善水质。在我国当前污水回用于农业,还存在水质、长年利用和管理三方面的问题需要解决。从每个城市用水量和排水量看,工业都是大户。但是,面对清水日缺、水价渐涨的现实,工业除了尽力将本厂废水循环利用,以提高水的重复利用率之外,对城市污水再用于工业,也日渐重视。工业用水根据用途的不同,对水质的要求差异很大,水质要求越高,水处理的费用也越大。理想的回用对象应该是回用量较大且对处理要求不高的部门。符合这种条件的对象包括:① 间接冷却用水,其对水质的要求,如碱度、硬度、氯化物以及锰含量等,城市污水的二级处理出水均能满足,其对水量的要求很大,考虑循环使用之外,补充



用水量就占工业总取水量的 50% 左右,所以间接冷却用水应作为城市污水工业回用的首选对象;② 工艺用水,工艺用水包括洗涤、冲灰、除尘、致冷、锅炉补给水、产品用水等,其用水量占到工业总取水量的 20% ~ 40%,其中许多用途如冲灰、除尘等要求水质较低,污水可以简单处理后回用,原料加工过程用水、锅炉补给水等水质要求高,需要不同水质要求,要进行相应的高级处理。除了污水资源化后用于农业、工业外,还可以用于城市生活,但是城市生活用水量比工业用水量小,且水质要求比较高。世界上大多数地区对生活饮用水水源控制严格,例如美国环保局认为,除非别无水源可用,尽可能不以再生污水作为饮用水水源。现今再生污水可再用于城市生活的对象一般限于两方面:① 市政用水,即浇洒、绿化、景观、消防、补充河湖等用水;② 杂用水,即冲洗汽车、建筑施工以及公共建筑和居民住宅的冲洗厕所用水等。除此之外,污水还可以回用于油田开发地下水回注,补充地层水以免地陷,注入含水层防止海水倒灌等。

污水处理后的利用方式与当地地理、气候、经济等条件有关。在以农业生产为主的地区,污水处理后用于农业灌溉是其主要出路,也是较为经济的。而由于工业用水或城市生活用水要求水质条件较高,所以要完全达到工业或城市生活用水标准,从经济的观点来讲是不合理的。

## 1.4 污水资源化新技术及其应用分析

污水资源化是一项系统工程,它包括城市污水的收集系统、污水再生系统、输配水系统、用水技术和监测系统等,污水再生系统是污水资源化的关键所在。污水资源化的目的不同,水质标准和污水深度处理的工艺也不同。水处理技术按其机理可分为物理法、化学法、物理化学法和生物化学法等。通常污水资源化技术需要多种工艺的合理组合,即各种水处理方法结合起来对污水进行深度处理,单一的某种水处理工艺很难达到回用水水质要求。目前,我国城市污水深度处理或三级处理,已在应用的有混凝、沉淀、过滤等常规工艺,微絮凝过滤法以及生物接触氧化后纤维球过滤、生物炭过滤等方法。国外深度处理方法很多,主要有混凝澄清过滤法、活性炭吸附过滤法、超滤膜法、半透膜法、微絮凝过滤法、接触氧化过滤法、生物快滤池法、流动床生物氧化硝化法,离子交换、反渗透、臭氧氧化、氯吹脱、折点加氯等工艺。对于中水回用,一般可用能单独收集的清洁杂排水、生活污水或城市污水为原水进行处理。

无论哪种污水,其处理工艺首先都应经过预处理和初级处理,其后续处理工艺一般分 3 类:第一类为先生化后物化再消毒;第二类是只物化和消毒;第三类是物理处理及消毒。

污水资源化在国外已有丰富的经验,对缓解当地水资源供需矛盾起到了非常重要的作用,促进了当地社会效益的提高。

西欧、北美是世界上采用污水再生利用较早的发达地区,20 世纪 70 年代初,美国开始大规模建设二级污水处理厂,并注意回用污水。目前,美国有 357 个城市回用污水,再生回用点 536 个。全国城市污水回用总量约为  $9.4 \times 10^9 \text{ m}^3/\text{a}$ ,其中包括污灌用水、景观用水、工艺用水、工业冷却水、锅炉补给水以及回灌地下水和娱乐养鱼等多种用途。其中,污灌用水约为  $5.8 \times 10^9 \text{ m}^3/\text{a}$ ,占总回取水量的 60%,工业用水占总回取水量的 30%,城