

污水回用决策与技术

周彤 主编



化学工业出版社

环境科学与工程出版中心

污水回用决策与技术

周 彤 主编

化学工业出版社

环境科学与工程出版中心

• 北 京 •

(京) 新登字 039 号

图书在版编目 (CIP) 数据

污水回用决策与技术/周彤主编. —北京: 化学工业出版社, 2001.10

ISBN 7-5025-3559-4

I. 污… II. 周… III. ①污水处理-概况-世界
②污水-废水综合利用-概况-世界 IV. X703

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2001) 第 077091 号

污水回用决策与技术

周彤 主编

责任编辑: 董琳

责任校对: 陈静

封面设计: 于兵

*

化学工业出版社 出版发行

环境科学与工程出版中心

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

发行电话: (010) 64918013

<http://www.cip.com.cn>

*

新华书店北京发行所经销

北京管庄永胜印刷厂印刷

三河市前程装订厂装订

开本 850×1168 毫米 1/32 印张 13 字数 353 千字

2002 年 1 月第 1 版 2002 年 1 月北京第 1 次印刷

印数: 1—4000

ISBN 7-5025-3559-4/X · 121

定 价: 30.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换

前 言

我国是一个水资源短缺的国家，城市缺水问题尤为突出。随着经济发展和城市化进程的加快，当前相当部分城市严重缺水。这几年的干旱，更显示出解决城市水问题的极端重要性和紧迫性，它直接关系到人民群众的生活，关系到社会稳定，关系到城市的可持续发展。

我们党和政府对当前水资源的严峻形势给予高度重视，采取各种措施，包括污水回用，来缓解水的危机。国务院召开全国节水会议，并在通知中指出：大力提倡城市污水回用等非传统水资源的开发利用，并纳入水资源的统一管理和调配。在国民经济和社会发展第十个五年计划纲要中将“污水处理回用”第一次明确写入纲要。纲要中规定：重视水资源的可持续利用，坚持开展人工增雨、污水处理回用、海水淡化。多渠道开源，建设一批骨干系统工程。

在国家全面启动污水回用这样重要时刻，长期从事污水回用的管理者和技术人员，于2001年6月在大连就污水回用的规划决策、技术经济分析与再生处理工艺等进行了研讨，研讨会得到国家计委、国家科委、建设部、大连市政府高度重视，中国咨询协会副会长刘振峨、大连市副市长王承敏、中国工程院院士张杰到会并讲话。会议期间与会后，作者们提交了高质量的论文，不但可推动污水回用的进展，而且在学术上也展示了我国污水资源化的水平。编者作为全国污水回用研究会秘书长，将有关论文加以编辑出版，以满足当前污水回用工作中对此类图书的需要。

建设部俞正声部长最近率团就污水回用专题到国外进行了考察，表明了我国政府对污水回用的高度重视。随团考察的建设部科技委副主任、中国土木工程学会水工业分会理事长聂梅生根据此次调研为本书写了“污水回用的技术路线”一文，作为代序，放在本

书首篇。聂梅生同志长期主持国家科技攻关研究，对污水回用给予格外关注和支持，这篇代序高屋建瓴，提出了协调人与自然关系的战略性思想，对指导我国污水回用事业具有重要意义。

借本书出版机会，向多年倡导污水回用的领导和专家致敬，向多年从事污水回用研究与实践的技术人员致谢，这本书是他们辛勤劳动的结晶。由于编者水平有限，收集内容不够全面，错误之处难免，敬请读者指正。

编 者

2001 年 6 月

内 容 提 要

本书全面地介绍了国内外污水处理与回用的规划决策、技术经济分析与再生处理工艺,列举了大量工程实例。全书共分三篇,内容包括污水回用实施决策、回用工程和回用技术。汇集了国内多位有关专家的共计五十二篇文章。

本书可供环境科学、市政工程、给水排水及其他相关专业的研究人员和工程技术人员参考。对从事环境和水资源管理、决策人员也有较好的参考价值。也适宜作为大专院校市政环境类专业师生的参考书。

目 录

第一篇 污水回用实施决策

污水回用的技术路线	1
污水回用是解决城市缺水的有效途径——中国污水回用历程	7
提高城市污水利用率, 开辟大连新的水资源	24
再论天津市城市污水回用	29
从长春市缺水现状看污水回用的重大意义	40
沈阳市污水处理与水资源利用研究	45
北京市中水使用现状分析与远景预测	52
关于秦皇岛市水资源情况的思考	56
大连市实施污水(中水)再生回用建议	62
大连开发区污水回用的规划与实施	67
中水回用的市场、投入、效益与措施	71
城市的第二水源——污水回用	74
关于推进中水回用市场化进程的思考	80
建立水资源管理新机制, 推动城市污水资源化和污水治理设施市场化	88

第二篇 回 用 工 程

大连污水回用示范工程	92
城市污水处理与再利用工程	102
城市污水回用于钢铁工业的实践	110
高碑店污水处理厂回用工程设计	118
高碑店污水处理厂中水处理工艺最优运行的生产试验研究	125
城市污水再生回用作电厂循环冷却水	137
天津开发区污水处理厂污水再生利用工程	143
合肥市王小郢污水处理厂出水回用方案简介	154

三联舜湖社区污水回用设计简介	162
枣庄市中水回用工程设计和运行简介	166
淄博市城市污水分质处理回用研究	169
居住小区中水系统的设置和组合	177
青岛开发区污水回用工程可行性研究	189
大连市春柳河污水厂改造实例分析	192

第三篇 回 用 技 术

污水回用水质标准	196
污水再生工艺流程	221
深度处理单元技术	229
化学除磷	242
污水过滤	251
活性炭吸附	265
污水的零费用脱氮	271
污水回用中反渗透技术	278
回用工程设计计算举例	288
建筑中水技术的发展	304
日本中水发展概况、趋势及其运行机制分析	310
再生水回用于景观水体的水质标准与技术措施讨论	320
达标外排污水直接回用循环水系统的技术与应用	327
炼油污水回用于直流冷却可行性讨论	333
稠油污水回用注汽锅炉技术现状与发展趋势	336
对核桃壳过滤器设计数据的分析	340
活性滤料生物滤池在污水治理和中水回用中的应用	343
城市雨水污染控制与雨水的资源化利用	349
ClO_2 发生器在中水回用中的应用	358
国内外城市污水回用的现状及发展水平	361
复合二氧化氯发生器在中水回用中的应用	367
高效纤维过滤技术的特点及其在污水回用中的应用	373
污水回用管道的最优选择	377
美国污水回用综述	383
参考文献	407

第一篇 污水回用实施决策

污水回用的技术路线^①

上一个世纪末期，美国在水领域的总体战略目标发生了调整，由单纯的水污染控制转变为全方位的水环境可持续发展（Water Pollution Control——→Watersheds）。“Watersheds”的含义是：由可划分的水系、排放系统、以及接收水体所界定的地区或范围。可权且称之为“水区”。“水区”提出的背景是基于美国经济和社会的可持续发展。正如“美国水区新概念”一书中所说：“这个国家在上一个世纪将水和水生环境作为一种物品或商品来对待，所以我们花掉了数万亿美元修建控制水的设施，如：修堤、建坝、挖运河、调水等，这明确地反映了国家致力于经济发展和对自然过程的控制”。在这个时期，人与自然之间处于对立地位，为了经济的发展，对地球上亿万年来所形成的自然生态现象进行控制，以便在几年之内取得效益。但是，如果在这个过程中破坏了生态，大自然对人类的报复是等不到亿万年的，往往在几十年后就受到报复。因此，在全面总结和检讨了以往的经验、教训之后，“在上一个世纪的后二十年，提出了把恢复和修复国家水体的物理、化学和生物的自然完整性作为新的目标”。“水区”这一概念就是为了完成这个新目标而提出的。基于水区的管理方式是综合协调人和自然之间的关系，以保证经济发展和环境质量。这是一种将生态、经济、社会、以及公众参与综合起来的新的管理模式。随着战略目标的调整，带来了美国水的管理体制和技术路线两方面的变化。

一、管理体制

美国各州在水的管理体制上有所不同，并且州政府的权力很大，

① 作者为聂梅生。

各州的体制有其历史沿革。在加州与水回用有关的联邦、地方机构有以下几点。

(1) 美国资源再利用局(U. S. Bureau of Reclamation): 负责按照联邦第 16 号水回用基金计划, 为项目提供 25% 的设计和建设费用(1996 年以后每项不超过 2000 万美元), 以及 50% 的地方回用项目的规划费, 并与地方政府共同支持有关回用设施的研究以及建设的前期工作。

(2) 美国环境保护局(U. S. EPA): 负责制定法律、法规和标准。

(3) 加州水资源控制委员会(State Water Resources Control Board): 负责与九个地方水质控制委员会一起管制州地面水和地下水水质; 分配地面水水权; 管理“周转基金贷款计划”和“水回用贷款计划”为污水回用设施提供低息贷款及资助。

(4) 加州水资源部(California Department of Water Resources): 负责为地方的水回用计划和示范工程提供技术和资金来源。

(5) 加州卫生服务部(California Department of Health Service): 负责制定回用水的处理和使用标准。

(6) 城市和地方水的管理机构: 有的以水区划分, 如大洛杉矶分为若干个水区(water district), 其中西部盆地水区包括了 17 个市 5 个区; 南内华达水局(Southern Nevada Water Authority) 等。

由以上的机构设置可以看出: 美国联邦政府已经设有专门的管理资源再利用机构; 联邦政府和地方政府都有水回用的专项贷款和基金; 各个管水的机构各负其责; “水区”不以各级政府的行政管理管辖范围划分, 而是以水的涵盖范围及有利于水的大循环和优化管理而界定, 范围可大、可小。地方水区管理的核心是综合管理, 这是一个广义的概念, 包括政策制定、供排水厂管理、以及对水及与水有关的资源的控制和综合管理。

二、美国的水权和水市场概念

1. 水权

美国的水权是一个非常复杂的系统, 不仅各州不同, 而且在历

史上也发生过很多变化。以密西西比河为界，东部地区没有明确的水权，西部地区现存的水权基本上有两种。

(1) 水边界权 持有土地者同时持有该土地界限内的地上、地下水权。持有者有权用水，但无权将水送到所处的土地以外。这种水权是基于美国土地的私有制度。

(2) 优先者权 谁第一个开发使用，谁第一个有权。这种水权是始于西部矿产开发时，同时开发了采矿用水。

以上两种水权同时存在，并且至今互相冲突，具有美国在土地、矿产方面强烈的私有制特色。进入 21 世纪之后，美国更加强调公众对水资源的权益 (water right for all)，以及对政府合理利用水资源的信任权。

2. 水市场

水市场是指将水或水权在持有者之间进行转移或出售交易。

早在 20 世纪 70 年代末期，水可以像粮食一样进行成品交易的想法就出现了，但直到 1991 年以前，仍不能采用输送水的方式进行交易。1987~1991 年，加州遇上了大旱，1991 年州政府创立了“旱灾水银行” (Drought Water Bank)，当时该银行就像交易的中介人一样从农业用户手中尽可能地购买地面水，然后再出售给缺水的城市用户等。目前，联邦政府和州政府已取消了对输水交易的某些限制性条款。加州的圣地亚哥水局正在由 IID 灌区购水 $2.47 \text{ 亿 m}^3/\text{a}$ ，以满足城市用水，这将成为加州历史上最大的一次由农用水出售给城市用水的项目。水交易的动力在于各类用水之间的价差。将农用水节余的水出售给缺水的城市，将会给农民增加收入，但其负面的影响也不可忽视，如农村人口流入城市、降低就业机会、增加城市发展的压力等。更应提出的实例是：加州欧文斯谷将其地面水和地下水售给了 250 英里以外的洛杉矶市，以满足该市人口膨胀的需要。但在此之后，欧文斯谷的农业经济几乎消亡了。

三、技术路线

在污水处理的技术路线上，关键性的转变是由单项技术转变为技术集成。以往是以达标排放为目的，针对某些污染物去除而设计

工艺流程，现在要调整到以水的综合利用为目的，将现有的技术进行综合、集成，以满足所设定的水资源化目标。

从污水处理用词的演变可以看出其技术发展的方向：由传统意义上的“污水处理”(wastewater treatment)转变为“水回用”(water reuse)，对“水回用”的一般理解是经处理后的水重复使用，是指小范围内的循环；由“水回用”发展到“水再利用”(water reclamation)就进一步具有开发和资源化的含义，目前在美国已被广泛采用；最近，加州又在有关的规范和标准中用“水循环”(water recycling)代替了“水再利用”；“水循环”的概念更加符合水在自然界中的大循环，经处理后的水可用于工业、市政、农业、以及地面、地下等多种用途。以上概念的演变体现了战略目标的调整，这将必然促使技术路线和工艺流程的升级换代，具体体现在以下几方面。

1. 城市二级污水处理厂升级换代

二级污水处理厂普遍增加了三级处理工艺流程，以便于实现再利用目的。在生化处理二沉池之后增加过滤、消毒已是普遍的要求，原有的大型二级污水处理厂，几乎都计划增加后处理工艺（多层滤料滤池之后加氯或用紫外线消毒）。如：洛杉矶的 Hiparen Treatment Plant、丹佛市的 Central Treatment Plant 等，原处理能力都在 70 万 m^3/d 以上，目前都在进行后续三级处理的改造。三级处理后的水用于市政绿化、高尔夫球场、洗车、污水处理厂内工艺用水等。

2. 污水三级处理后增加高级深度处理

经上述三级处理后的出水，采用微滤膜过滤，和反渗透膜处理的方法，是目前较为成熟并已进入应用阶段的工艺技术。处理后的出水水质可达到饮用水标准，目前多用于补充作为饮用水水源的地面水或地下水。

3. 建立“水银行”(Water Bank)概念，将地面水和地下水互补使用

将丰水期剩余的自来水，以及经深度处理后的达标水回注到地下含水层储存，当干旱或需要用水时，从“水银行”中调出所需的

地下水以满足供水需求。在地下水缺乏地区提出了这样的口号：“从地下取出一滴水，就要注回一滴水(drop of water out, drop of water in)”。凡是有干河床可用之处，都要利用作为深度处理场所，以便于将处理后的水回灌地下，利用这种土地处理的方法，其出水水质与采用膜技术的效果相当。与地面水库相比，地下水银行具有以下优点。(1) 不存在因建水库或大坝而造成对环境的影响。(2) 不需要修建长距离的输水系统。(3) 蒸发量远比地面水库少。

水银行已在美国一些水区中使用，包括 Kern 水银行项目。

4. 城市污水的集中处理与分散处理

1985 年以前，美国建污水处理厂的资金是由联邦政府投入 85% (共计 800 亿美元)、地方政府投入 15% 来解决，要求至少达到二级污水处理厂出水标准，1985 年以后改为发行债券。由于有资金的保证，城市集中二级污水处理厂已得到 100% 的普及。

城市污水分散处理的提出和发展有以下原因。

(1) 分散处理，就地回用。由于回用对象不同，对水质的要求和处理工艺也不同。就地回用又可以节约输水管线，因此回用水厂的规模一般都在几万吨/日的水平上，最大的要算丹佛市拟在 2004 年建 17 万 t/d 的污水回用厂。

(2) 在已建了集中污水处理厂的情况下，新厂可采用将污水与污泥分开处理的方案，污水就近收集、处理、回用，污泥输送到集中污水处理厂处理。污泥的集中处理有利于实现处理设施的规模效益，节约投资，回收能源。丹佛市的 Sand Creek Wastewater Reuse Facility (2 万 t/d) 就是采用了这种方式。

(3) 随着科学技术的发展，尤其是膜技术的发展，污水处理设施实现了装置化、小型化，使污水分散处理和回用得以实现。

(4) 污水处理离不开能源，随着世界性的能源短缺和大气污染的加剧，新能源的使用已经是刻不容缓，而太阳能、燃料电池等都适合于分散使用，例如在居民住宅小区中使用，这就使污水处理随之走向分散化。

城市污水的分散处理和建立回用水厂，将引起城市水规划方面

的改变,应予以重视。

四、回用水标准

美国的回用水标准是各州不一、并且针对不同的回用对象所制定的标准也不一样,但标准都很严格。加州执行的是 22 号条例(Title 22),克罗拉多州执行的是 84 号规范(Regulation #84),这些文件都详细地规定了不同回用对象的水质标准,如:用于农业灌溉、工业冷却、市政景观等。

五、几点建议

(1) 建立城市用水的综合规划概念,在城市范围内对水源、供水、污水处理、水回用、工业用水等进行统筹规划,制定城市可持续发展的用水规划,并设立城市水规划审批制度。建议成立城市水规划研究设计机构。

(2) 建立国家专项节水基金,发行债券,支持、鼓励建设节水和水回用设施。

(3) 城市污水处理厂的建设必须与回用一并考虑,除了满足排放标准外,在工艺流程中要考虑回用的水质要求,以免造成短期内的改扩建。

(4) 缺水地区新建的住宅小区应考虑强制性的节水措施,否则不予批准设计方案。我国城市每年新建住宅 5 亿 m^2 ,按现在的用水标准大约需要 275 万 m^3/d ,或约 10 亿 m^3/a 。美国拉斯维加斯市的给水节水率规划指标为 25%(目前达到了 16%),污水回用率为 8%。如果我国新建住宅小区能综合考虑给水节水和污水回用措施,节水 30%的目标是可以实现的,这样仅全国新建住宅小区每年可节水 3 亿多 m^3 ,三年之后,全国仅新建住宅区内,即可达到年节水量 10 亿 m^3 。

(5) 制定城市节水和水回用的技术指标体系;定期发布适用集成的技术措施;制订适度超前的标准、规范,为技术发展留下空间。

(6) 在全国建立 5~10 个不同回用类型的示范工程,如:市政景观、工业冷却、住宅小区中水、地下水回灌等。通过示范引路总结经验,推向全国。

污水回用是解决城市缺水的有效 途径——中国污水回用历程^①

一、解决城市缺水问题的紧迫性

我国是一个水资源贫乏的国家，人均水资源仅为世界平均水平的 1/4。同时水资源在时间和地区分布上很不平衡，南方多北方少，北方大部分地区人均水资源更低。在北方干旱半干旱地区全年的降水量主要集中在 7 月、8 月、9 月三个月，这使可利用的水尤其显得不足。

随着经济发展和城市化进程的加快，城市缺水问题尤为突出。当前相当部分城市水资源短缺，城市缺水范围不断扩大，缺水程度日趋严重，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，日缺水量达 1600 万 m^3 ，年缺水量 60 亿 m^3 ，由于缺水每年影响工业产值 2000 多亿元。天津、长春、大连、青岛、唐山和烟台等大中城市已受到水资源短缺的严重威胁。

2000 年北方地区出现百年不遇的大旱，使许多水库河流出现从来没有过的断流和枯干，北方 13 个省 318 个县级以上城市被迫限时供水，缺水人口达 2000 多万。2001 年上半年又是干旱年，入夏以来，全国受旱面积已达 2060 万公顷，5 月份北方八省大型水库蓄水量比去年同期减少 20%。

就拿长春市来说，2000 年 5 月份两个水库已无水可取，全市居民限时供水，所有洗浴业、洗车业、建筑业被下令必须停业，全市处于水荒之中，对经济造成的损失和对人们的心理影响非常大。大连市花巨额资金、耗时 20 余年的引碧工程，本以为可以一劳永逸的解决大连市的供水问题，没想到 1999 年、2000 年连续两年干旱，1999 年降雨量 295 mm，2001 年 410 mm，相当于以色列降水量，是常年的 50%，碧流河水库 9.3 亿方库容只剩 1 亿方多，还包括 0.7 亿方的死库容，很快就无水可供。市里紧急启动投资 11 个亿的引英入

① 作者为周彤、鲍宪枝、赵丽君、兰淑澄、杭世瑾。

连应急工程，也只能解决 7000 万方水。全市 220 万人口，日供水量由 120 万 m^3 压到目前 77 万 m^3 ，每户每月供 6 m^3 水，超过此定量收 10 倍水费，工业上超过限定指标按 20 倍收费，全市一般桑拿洗浴全部关闭。2000 年夏季有名的“大连草”面临无水之灾，大连开发区突击建成 64 km 再生水管线，用第二污水厂再生水浇灌开发区主街道绿化带草地，才保证开发区大道绿地生存。

山东省 17 个市地有 12 个市地降雨量比历年同期大幅度减少，其中青岛、烟台、潍坊、威海等市地降雨量减幅高达 50%~70%。省内 5000 多条河流，5500 多座大中型水库大部分干涸。烟台开发区刚建的净水厂，由于水库无水可取，变成了无米之炊。烟台开发区领导过去把污水认为是包袱，修长距离管道送到市区污水厂处理，干旱之时才后悔决策失误，如果自己有污水厂，早年污水厂的出水也可作为第二水源做应急之用。过去很多人没认识到污水也是资源。

天津市的引滦水曾为天津的生存和发展发挥了巨大作用，但由于连年干旱，滦河潘家口水库库存急剧减少。为缓解天津市水危机，国务院决定从黄河紧急调 4 亿 m^3 黄河水给天津。沿途省市为此付出了很大代价。但黄河水也十分紧缺，保证率不高，不是长远之计。天津市节水抓得紧，日供水量由 220 万 t 压至 158 万 t，压缩了 28%。对三口之家每月供水 8 t，超额加倍收费。承德市避暑山庄湖水出现了从来没有过的干枯，严重影响到旅游业的发展。其他中小城市抗旱灾能力更差，市民处在“渴水”之中。当前全国缺水形势严峻，这里不再详述。

我们党和政府历来十分重视水的问题，江总书记指出“当今水资源为世界各国所关注，我国的水资源大为短缺。我们过去的认识很不够，我们必须高度重视水的问题，人无远虑，必有近忧”。

朱镕基总理针对南水北调工程提出了“三先三后”原则，即“先节水后调水，先治污后通水，先环保后用水”。强调了调水的基础是节水治污。

在 2001 年初通过的“国民经济和社会发展第十个五年计划纲要”中将搞好污水处理回用明确写入纲要。纲要中规定：重视水资

源的可持续利用,坚持开展人工增雨、污水处理回用、海水淡化。多渠道开源,建设一批骨干水源工程。“十五”期间,全国新增供水能力 400 亿 m^3 。加大水的管理体制改革力度,建立合理的水资源管理体制和水价形成机制。采取多种方式缓解北方地区缺水矛盾。

二、污水回用的巨大潜力

长期以来,人们把用过一次的水称为“污水”、“下水”、“阴沟水”、“废弃水”,总把这种水与“污垢的”、“肮脏的”形象相联系,难以相信它还能再用。事实上水在自然界中是惟一不可替代,也是惟一可以再生的资源。人类使用过的水,污染杂质只占 0.1% 左右,比海水 3.5% 少得多。其余绝大部分是可再用的清水。污水经过适当再生处理,可以重复利用,实现水在自然界中的良性大循环。城市污水就近可得,易于收集,易于处理,数量巨大,稳定可靠,不受制于天,不受制于人。作为城市第二水源要比海水、雨水来得实际,比长距离引水花钱要少得多。开辟这种非传统水源,实现污水资源化,对保障城市安全供水具有重要的战略意义。

污水回用到底能给城市增加多少水量呢?可以粗略估算一下,城市供水量的 80% 变为城市污水排入管网中,收集起来再生处理后 70% 可以安全回用,则二者合计起来,即城市供水量的一半以上,可以变成再生水(或叫回收水、回用水、复新水、中水),返回到城市水质要求较低的用户上,替换出等量自来水,相应增加了城市一半供水量。可见对缺水城市来说,这种水源是一笔宝贵财富。这种潜力的开发非常值得。

我国城市污水年排放量已经达到 414 亿 m^3 ,目前,已建污水处理设施 400 余座,城市污水处理率达到 30%,二级处理率达到 15%。根据“十五”计划纲要要求,2005 年城市污水集中处理率达到 45%。这就给污水回用创造了基本条件,凡是污水处理厂都可将污水再次适当处理后回用。

全国污水回用率如果平均达到 20% (南水北调要求到 2030 年要达到 30%),则“十五”末期年回用量可达 40 亿 m^3 ,是正常年份年缺水 60 亿 m^3 的 67%。通过污水回用,可解决全国城市缺水量的