

江苏区域尾水调度处理规划

左玉辉 唐亮 著

中国环境科学出版社·北京

图书在版编目(CIP)数据

江苏区域尾水调度处理规划 / 左玉辉, 唐亮著. —北京:
中国环境科学出版社, 2004.8

ISBN 7-80163-928-6

I. 江… II. ①左…②唐… III. 污水处理—区域规划:
环境规划—江苏省 IV. X703

中国版本图书馆CIP数据核字(2004)第071502号

出版发行 中国环境科学出版社
(100062 北京崇文区广渠门内大街16号)
网 址: <http://www.cesp.cn>
电子信箱: jinhua@126.com
电 话: 010-67112735
传 真: 010-67113420

印 刷
经 销 各地新华书店
版 次 2004年10月第一版 2004年10月第一次印刷
印 数 1—2 000
开 本 880×1230 1/32
印 张 6.125
字 数 250千字
定 价 22.00元

【版权所有, 请勿翻印、转载, 违者必究】
如有缺页、破损、倒装等印装质量问题, 请寄回本社更换

摘要

系统集成的区域水污染控制模式可概括为“三级控制、三级标准”。第一级，对污染源的控制，达到排放标准；第二级，污水集中处理，污水处理厂达到出水标准；第三级，尾水处理处置，最终达到水环境标准。尾水是指虽经处理但尚未达到水环境标准的工业、生活、农业（畜禽养殖）排水，尾水并不等于清水，尾水处理是区域水污染控制的“收官”之举。

江苏北纳淮河，南含太湖，中跨长江，直达东海，它们分别是我国重点整治的“三河”、“三湖”、“三海”之一，此外，南水北调东线调水线路纵贯苏北全境，是我国南水北调的“三线”之一，江苏水系具有典型的代表性。

结合江苏水系特点，水污染控制的基本策略可概括为“清污两制、控源导流、生态处理”。清污两制是指清污分开，形成清污两个独立系统，实行两个不同的管理体制。组建污水系统的基本思路是控源导流，控源是指对城镇生活、工业、农业和河湖内源等污染源的控制，导流是从根本上截断进入清水系统的污染负荷。将区域尾水调离敏感水域，紧密结合国情省情，易地进行生态处理。

根据上述基本策略，构建江苏区域尾水调度处理三线工程方案，包括新沂河尾水调度处理工程（北线工程）、入海水道南泓尾水调度处理工程（中线工程）、苏中苏南区域尾水调度处理方案（南线工程）。北线工程已于2000年6月全线竣工投运，中线工程也已在2003年建成，北、中两线工程及其延伸可确保南水北调东线调水水质在江苏境内免受污染，并为苏北其他清水水域提供安全保证。南线工程的战略目标是解决长江下游—太湖水系区域尾水的调度处理，它包括污水控源系统、尾水导流系统和海涂生态工程系统。南线工程的科学性和重

要性可从“五律协同”的高度进行分析。在经济、社会、技术规律的联合作用下，尾水负荷增长是必然趋势；受自然规律作用，尾水入湖势必促进藻类生长，尾水入江将加剧东海赤潮，它们均与环境目标相拮抗；而将尾水调离太湖—长江敏感区，进入海涂生态工程，在自然规律的作用下，既可促进芦苇生长，又可得以净化，实现“五律协同”。

前言

南京大学先后受江苏省环境保护厅、淮阴市环境保护局、连云港市环境保护局和江苏省科委委托,承担了苏北水环境整治总体方案研究、淮河入海水道南泓污水资源化生态工程可行性研究、新沂河污水资源化生态工程可行性研究以及苏南水污染集中控制战略方案研究四项课题任务。课题组于1993年初开始研究工作,1995年1月至1997年10月分别与主持部门签订合同。课题组在长期探索的基础上,确立了“清污两制、控源导流、生态工程”的总体思路,提出江苏区域尾水调度处理三线方案:北线即新沂河尾水调度处理工程,中线指入海水道南泓尾水调度处理工程,南线是指苏中、苏南区域尾水调度处理方案。

为解决连云港市区供水危机,江苏省政府立项并分别于1998年1月和2000年6月完成了蔷薇河送清水的一期工程和二期工程建设,主要包括一条尾水通道(新沂河北泓)、三个清污立交(以确保连云港供水水质安全),形成五级河道调蓄净化系统(江苏区域尾水调度处理北线工程),并可延伸承接沂沭泗水系城镇尾水集中完成二级和三级深度处理。经国务院批准,淮河入海水道于1998年10月28日正式动工,已于2003年建成,该工程按照清污分开的原则,设计了南北两个泓道,北泓走清水,南泓走尾水(江苏区域尾水调度处理中线工程)。江苏区域尾水北线、中线工程及其延伸既可确保南水北调东线调水水质在江苏境内免受污染,也为苏北其他清水水域提供了安全保证。

1993年11月,曲格平主任听取了课题组关于苏北水环境综合整治方案的汇报,认为这是“大手笔、新思路”。1994年,经国际专家咨询认同后,苏北水环境综合整治方案由国家计委、国家科委批准列

入中国21世纪议程首批优先行动计划。1995年元旦,南京大学10位教授上书宋健国务委员,首次明确提出“控源导流”是“淮海战役”(淮河流域水污染整治)的最佳作战方针。1995年1月26日,宋健国务委员批示:“南大几位教授的意见很有吸引力。请(淮委)水利部、环保局组织研究,可否先筹集部分资金完成一期整治可行性研究,如可行,召集四省今冬开会定案,明年实施。请酌部署。”

2000年1月,由金鉴明院士为组长的专家组评审认为:“该课题对适合我国国情的水污染控制技术的战略定位有科学而独到的见解;所提出的‘清污两制、控源导流’新思路具有创新性与开拓性,江苏北、中两线工程的建设实践已经显示出它的前瞻性与可行性;课题立意高屋建瓴,含义深邃,所提出的新思路及在江苏的实践为制定具有中国特色的水系污染控制战略提供了重要的启示。课题组构想的江苏南线工程为根本上治理长江下游—太湖水系污染有效治理方案,提出了新思路,建议国家尽快立项对南线工程进行深入的基础性研究和预可行性研究,为方案实施提供可靠科学依据。”污染控制与资源化研究国家重点实验室在2000年度科技部组织的评估中,江苏水系污染控制研究得到专家组首肯,被认为“取得了显著的社会、经济效益”。

2001年12月2日,课题组致信国务院领导同志,就太湖污染治理(南线工程)提出“清污两制、控源导流、两个市场”的建议。12月11日,国务院领导同志批示:“《建议》提出要把太湖治理作为经济、社会、技术、生态的系统工程,统筹规划,综合设计方案。这些意见有见地,有新意。请环保总局、水利部认真研究。”2002年7月17日,课题组再次致信国务院领导同志,建议国家将尾水调度处理技术作为首要的关键技术予以重点研究。8月1日,国务院领导同志再次批示:“请水利部、环保总局研究。可直接听取玉辉同志的意见。”

2002年8月19日,国家环保总局水办主任、科技司副司长、中国环境科学研究院总工程师等负责同志听取了汇报。9月5日,国家水利部副部长索丽生率水利部国际科技司司长、中国水科院副院长等有关同志,听取汇报并进行了一个多小时的座谈。索副部长认为:尾水调度处理是大手笔,概念清晰,是根治太湖流域水污染一个比较彻

底的“手术”，总体可行；并就存在的问题和如何继续深入开展研究提出了建议。

2002年10月10日，江苏省政府在无锡召开太湖水污染防治委员会会议。应会议邀请，课题组长左玉辉教授就太湖污染治理策略建议作了大会发言。季允石省长在大会总结报告中，将“抓紧研究太湖流域达标尾水出路问题”明确列入“十五”太湖治理工作重点，强调“有效解决太湖流域水污染问题，必须转变思路，从治理、保护、配置、节约等方面实施‘清污分流，控源导流’各项措施。一方面要切实加强对太湖流域水源地的保护工作；另一方面要在不对长江、东海水质造成不利影响的情况下，对处理后的污水，规划专门管网和河道，综合考虑排放去向。”

目 录

第 1 章 绪 论.....	1
1.1 区域尾水的概念及控制意义.....	1
1.2 国内外区域尾水控制概况.....	8
1.3 本研究的目的、内容和方法.....	33
第 2 章 江苏区域尾水调度处理总体方案与理论分析.....	36
2.1 江苏区域尾水调度处理总体方案.....	36
2.2 环境调控的理论基础.....	46
2.3 江苏区域尾水控制策略的理论分析.....	51
2.4 本章小结.....	61
第 3 章 江苏区域尾水调度处理苏北控制工程.....	62
3.1 新沂河尾水调度处理工程.....	62
3.2 淮河入海水道南泓尾水调度处理工程.....	88
3.3 本章小结.....	119
第 4 章 江苏区域尾水调度处理南线概念规划.....	121
4.1 研究区域概况.....	121
4.2 控源与污水处理厂建设.....	125
4.3 区域尾水负荷预测.....	131

4.4 区域尾水调度系统规划.....	136
4.5 尾水生态工程规划.....	144
4.6 综合评价.....	153
4.7 本章小结.....	168
第 5 章 结 语.....	170
5.1 主要研究结论.....	170
5.2 研究创新之处.....	172
5.3 问题与讨论.....	173
参考文献.....	174

第1章 绪论

1.1 区域尾水的概念及控制意义

1.1.1 区域尾水的概念

“尾水”的概念，最早来源于水利学，它专用于相对“引水”而言的、水力发电后的出水水流（中国大百科全书·水利学，1992）。为了使“尾水”顺畅地排向下游，水电厂房专门设置的自机组尾水管排向下的渠道，称“尾水道”（或尾水隧道、尾水渠）。

城市污水处理厂一直被认为是近现代水污染控制的主导技术，不少发达国家和地区已较早认识到污水处理厂在多种污染物质去除上的局限性，指出其出水中仍然存在的 N、P、微量有毒有机物负荷，是一个潜在的主要污染来源（Sawhill, Gary S., 1977; Brix, H., 1987; Davies, 1988; P.R.Thomas 等, 1995）。随着水污染控制研究的发展和深入，在国内城市及区域水污染控制规划中，有学者也开始关注城市污水处理厂出水存在的水质问题（李芳柏, 1998; 胡雪峰, 2002; 王丽萍, 2002）。邬扬善（1992）在主张合理利用大水体自净能力以净化污水时，较早使用污水处理厂“尾水”的说法。徐建英等（2001）认为，污水处理厂出水的 COD 负荷一般占集水区负荷的 20%~30%，BOD₅ 占 10%~20%，N、P 约占 50%~70%，强调需要集中纳入流域综合整治范畴，并正式使用“尾水”这一概念来定义污水处理厂的这种出水。同时，“尾水”的内涵和外延也在发生变化，例如，唐亮等（2002a, 2002b）认为，“城市尾水”是以污水处理厂出水为主的城市

混合污水的简称。

在国外，对“尾水”问题的研究甚多，与其相似的概念有多种，例如 treated effluent (Sawhill, Gary S., 1977; Joe Gelt 等, 1999)、treated wastewater (Schoppmann, B., 1996)、treated sewage (Szymanski, 2000)、treated wastewater effluent (Aiban, S.A. 等, 1999)、treated sewage effluent (P.R.Thomas 等, 1995; bandupala wijesinghe 等, 1996; Bellgrove, A. 等, 1997)、treated domestic wastewater (Dewettinck, T. 等, 2001) 等，其内涵基本一致，即经过一定处理的污水，主要是指通过污水系统收集并经污水处理厂处理后的城市生活及工业排水 (Joe Gelt 等, 1999)。只是，其中含 wastewater 的概念侧重指工业废水处理后的出水，而含 sewage、domestic 的概念则侧重指城镇生活污水处理后的出水。

本研究认为，在区域水污染控制中，“区域尾水”实质上是包括一个区域内虽经处理但尚未达到水环境标准的工业、生活、农业（畜禽养殖）排水。区域尾水只是一个相对原污水而言的概念，其本身在不断发展。例如，在经济欠发达地区，由于点源控制及污水处理设施建设的滞后，区域尾水大多是只经过初级处理的出水，甚至包含大量未经任何处理的原污水，在经济发达地区，区域尾水基本上都是经过较好处理（如污水二级处理厂处理、严格的工业点源控制）的出水，质量相对原污水已有较大改善。

1.1.2 区域尾水控制的意义

尾水控制的意义是与区域水污染控制紧密联系在一起。

1.1.2.1 区域水污染控制模式

随着人口总量的增多、城市规模的扩大、工业经济的发展，区域性的水污染早已成为一个世界性的问题。大量研究和实践表明，污水中污染成分正日趋复杂，污染物数量正日益增多，用单一的方法对水污染进行控制，无论在经济上还是技术上都已经远远不够，难以从根本上解决水体污染问题，必须从整体出发，自点源→城市→区域立体层面，多管齐下，综合控制。

按水污染控制的工作程序和污水处理的实际程度,系统契合、全过程的区域水污染控制可概括为“三级控制、三级标准”的完整模式(图 1-1)(徐建英等, 2001; 唐亮等, 2002a, 2002b; 左玉辉, 2002): 第一级, 源头控制, 最大限度预防和减少污染的发生与排放, 其中工业废水要达到城市污水管网的接管标准; 第二级, 城镇污水与经达标预处理的工业废水排入城市污水处理厂进行集中处理, 要满足污水处理厂的出水标准; 第三级, 对虽经处理但尚未达到水环境标准的区域尾水进行深度处理(或处置), 达到(或接近)环境标准(或相应回用水标准)后排入相应接纳水体(或回用)。在此过程中, 总量控制分三级实施, 水质标准分三级衔接。

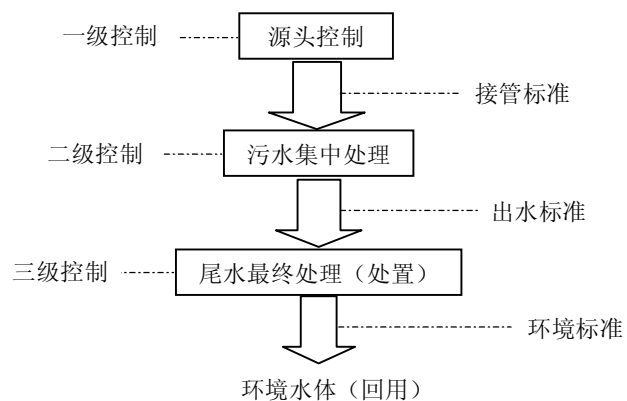


图 1-1 区域水污染控制的“三级控制、三级标准”模式

1. 第一级——源头控制（上游段）

源头控制主要是利用法律、管理、经济、技术、宣传教育等手段,对城镇污水、工业废水、农业面源、城市径流以及河湖内源等进行综合控制,防止或减少污染的发生与排放。源头控制的实质是污染预防。实践证明,污染预防要比通过“末端治理”试图根治水污染更加经济、有效,并且对于并非来自单一、可确定的水污染源,如农村面源、城市径流以及大气沉降等,“末端治理”的办法并不适用。因此,1990

年美国《污染预防法》规定:“在任何可行的情况下都要优先考虑污染的预防”。

工业废水排放量大,成分复杂,是水污染源头控制的重点。工业水污染的预防首先应当制定有利于可持续发展的产业政策和控制法规,优化产业结构,合理规划布局,积极推行清洁生产的技术和管理,努力实现经济效益、社会效益和环境效益的统一。同时,应强化工业废水的厂内处理或工业小区废水联合预处理,达标排放,确保后续深化处理环节的正常运行。例如,莱茵河流域在 1970 年代至 1990 年代的 20 多年时间里,通过推行工业“管好自己”的政策,金属污染下降了 90%以上(Julie Stauffer, 2000)。

随着城市的发展和水平的提高,在世界发达国家及我国较发达地区,城镇生活污水中部分污染指标(如 BOD_5)已逐步取代工业废水,成为区域水环境污染的最主要来源。生活污水的源头控制,主要是应从规划入手引导人口的适度集中,在满足社会经济的发展需要的同时,为生活污水的集中控制创造条件。此外,引导或强制“绿色消费”,例如节约用水,鼓励选用无磷洗衣粉(舒金华等, 1998; Mitsuru Sakamoto, 1996)等等,对减少区域水环境的污染负担也有重要作用。

对农业排水、城市径流及河湖底泥等面源污染,由于面广量多的特点,其首要任务就是控源,这是一项十分困难但又十分重要的工作。对农村地区,应贯彻“节水即节污”的指导思想,发展节水农业;高度重视畜禽粪尿的综合处理及利用,在敏感水域严格控制高密度水产养殖业发展;推广害虫的综合管理(IPM)制度,以最大限度地减少农药施用量;科学合理施肥,改善土壤肥力,认真确定农业耕作条件(例如大于 25° 的坡地应分批退耕还林还草),减少土壤侵蚀;积极截流农业污水,实现农村径流的再利用或有效处理;加强乡镇企业污染管制,因地制宜开展村镇生活污水处理,等等。在城市地区,暴雨径流所携带的大量污染物质,是加剧水体污染的一个重要原因,因此需采取多种形式及时收集和利用雨水,并适当减少城市硬质地面,增加城市绿化用地,以减少、延缓暴雨径流并去除污染。据研究,多孔铺装地面能去除暴雨水中 80%~100%的悬浮固体、20%~70%的营养物

和15%~80%的重金属,建设暴雨滞洪地或湿地系统,可去除约75%的悬浮物及某些有机物质和重金属(Julie Stauffer, 2000);而一种针对发展中国家的名为“自净筛”(selfcleaning screen)的构筑物可以去除雨水沟中的大部分城市垃圾(Armitage N.P.等, 1999)。此外,在外部污染负荷较高的河湖中,底泥往往也是重要的内部源,这也是不少富营养湖泊治理没能成功的重要原因,据观测,严重富营养化湖泊底泥中的磷释放可高达 $22\sim 40\text{mg P}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$,其内部负荷相当于总磷负荷的90%(Mitsuru Sakamoto, 1996)。Mayer T.等人(1999)的研究表明,一些湖沼底泥内部孔隙水(porewater)中的溶解性营养物浓度非常高($\text{P}>4.0\text{mg/L}$, $\text{N}>20\text{mg/L}$),可能是这些湖沼超富营养化(hypereutrophication)的主要原因。因此在污染严重的部分河湖地段,在配合外源根治的基础上,应对河湖底泥进行生态清淤,以彻底消除河湖内源污染。

2. 第二级——污水集中处理(中游段)

城市是人类经济、社会活动高度密集的地域,城镇生活污水、工业废水是造成水体污染的最重要来源(European Environmental Agency, 1999)。水污染控制的实践表明,水污染治理应当坚持分散与集中控制相结合,而以集中控制为主导。污水集中处理的前提,就是要重视城镇污水截流(一级导流),加强城镇污水截流管网的规划与建设,适当改造已有的雨水/污水合流系统,努力实现雨污分流,提高城镇污废水的截流率。研究表明,工业废水与城镇生活污水的合并处理,有利于降低处理成本、提高处理效果,但由于工业废水的水质成分极其复杂,必须经过必要的厂内预处理后,其水质满足规定的城市污水截流管网的接管标准。

城市污水处理厂传统的污水人工处理技术已有上百年的发展历史,这些技术方法按其作用原理可分为物理处理法、化学处理法和生物处理法三大类。由于污水中的污染物质的多样性,因此不可能用单一的处理方法去除其中的全部污染物,往往需要多种处理方法、多个处理单元有机组合,才能达到预期处理程度的要求,而处理程度又主要取决于原污水的性质、后续处理处置情况以及出水接纳水体的功能

等因素。

按污水处理深度的不同,污水处理大致可分为预处理、一级处理、二级处理和三级处理(深度处理)。污水处理厂技术成熟,占地较少,净化效果好,但工程投资及运行费用甚大。大规模地进行城市污水的集中处理,国外发达国家和地区传统上是能以较大幅度去除污水中有机污染物为主要内容的二级生物处理为主,目前国内在建或拟建的城市污水处理厂80%以上仍沿用这一模式。但有专家认为,就我国目前水污染日益加剧的趋势和现实的经济状况而言,普遍建造二级污水处理厂并不现实,建议采用一级强化(或根据需要预留二级处理用地),以尽快经济、高效地削减我国居高难下的水污染总体负荷(张忠祥等, 1998;潘碌亭等, 2003)。不少学者建议,污水集中处理应该优先采用经济价廉的天然净化处理系统,即污水生态工程(张忠祥等, 1998)。

3. 第三级——尾水最终处理(下游段)

区域尾水是经过处理但尚未达到环境标准的混合污水。一般而言,城市污水处理厂对去除常规有机物具有优势,但对引起水体富营养化的氮、磷和其他微量有毒难降解化学品的去除效果不佳。尾水并不等于清水(例如尾水中氮、磷负荷一般占原污水的60%~80%),直接排入与人类关系密切的清水水域,仍然存在极大的危险性。例如,水体中微量有毒污染问题日益引起发达国家的重视,国家环保总局《城市污水控制技术政策》也规定:“污水接纳水体为湖泊、水库、海湾等缓流水域时,为防治水体富营养化,应进行三级处理”。此外,城市污水处理厂基建投资和运行成本甚高,在经济较为落后的发展中国家,大规模普建污水处理厂存在困难,区域尾水中实际上含有大量未经任何处理的污水。因此,在排入清水环境前,加强区域尾水的最终处理处置,极为迫切。

1.1.2.2 区域尾水控制的定位及意义

(1) 区域尾水是区域水环境重要的污染来源。随着社会经济的快速发展和环境管理力度的不断加强,区域水污染负荷已经或正在实现三个集中:工业废水向工业小区集中(缘于工业企业向工业小区集

中)、生活污水向城镇集中(缘于人口向城镇集中)、城镇污废水向城市污水处理厂集中(缘于水污染集中控制力度的加强),在许多地区,尾水都成为区域水环境重要的污染源。例如,南非及加拿大的许多湖库,都受城镇和工业地区的城市污水二级处理厂所排放的尾水的影响而发生水质恶化(Mitsuru Sakamoto, 1996)。1992年,多瑙河流域氮和磷的输入量分别为825kt和105kt,其中污水处理厂出水的贡献分别均在20%~25%左右,是造成多瑙河三角洲和黑海水质恶化,富营养化征兆明显的重要原因(Somlyódy L.等, 1999)。而且,在许多经济欠发达、环境管理欠完善的地区,大量原生污废水与尾水混合排放,更加剧了区域尾水污染问题的复杂性和治理的艰巨性。

(2) 区域尾水处理是构成系统集成的区域水污染控制模式的重要环节。尾水处理属于污水的深度处理,它承担将区域污水最终转变为清水的任务,是区域水污染控制的“收官”之举。尾水处理强调实现污染的全过程控制,以确保区域水环境的长治久安。事实上,源头控制、污水集中处理、尾水最终处理构成了“三级控制”的上、中、下三个流程段,这三个流段分级衔接,共同构成一个完整、有机的水污染控制链系统,从而实现污染发生→污染消除→清水再生这样一个全过程的、从污水摇篮到清水摇篮的水污染控制。

(3) 区域尾水处理为区域污水治理分步达标提供了必要条件。例如,尾水分流与生态工程配合,即充分考虑到了水污染控制的实际,在通过分流措施确保区域主要敏感水域安全的前提下,允许控源及污水处理厂建设分步达标。在污水处理厂未能大规模普及、工业点源难以全面稳定达标的情况下,尾水生态工程可承担二、三级双重处理的任务;在社会、经济条件成熟,尾水生态工程承受的污染负荷明显下降的情况下,则只需完成尾水的三级深度处理。尾水处理这种近远期结合的弹性能力,增强了整个污水控制系统的现实适应力,避免走区域水环境“先污染、后治理”的老路。

1.2 国内外区域尾水控制概况

1.2.1 国外区域尾水控制概况

为了实现既定环境目标,从国外研究及实践来看,区域尾水控制的基本策略大致可分为人工处理、尾水分流与生态处理三大类。

1. 人工处理

尾水的人工深度处理是在常规处理(一般为二级生物处理)之后,进一步采取人工方法,去除残留在污水中的污染物质,其中包括微生物未能降解的氮、磷、有机物及其他有毒有害物质,以满足更严格的排放标准或回用要求。人工深度处理通常采用的工艺有生物除氮脱磷法(Lee D.S.等, 2001),或混凝沉淀、过滤、吸附等一些物理化学方法(Clark T.等, 1999; Rothman M.等, 1996; Donnert D.等, 1999)。这些种类繁多的人工深度处理方法,广泛应用于发达国家和地区的尾水处理实践,例如,德国的深度处理普及率达到48%,芬兰达到67%,瑞典达到88%(张杰, 2001)。

莱茵河(Rhine)一直被认为是国际合作治理跨境水系污染成功的典范。莱茵河是世界著名的人口、产业和城市密集带(刘健, 1998),沿途流经瑞士、法国、德国和荷兰,域内有康斯坦茨、巴塞尔、路德维希港、美茵茨、法兰克福、科隆、杜伊斯堡、鹿特丹等重要城市,有巴塞尔—米卢斯—弗莱堡、斯特拉斯堡、莱茵—内卡、莱茵—美茵、科隆—鲁尔和鹿特丹—欧洲港等6座工业区,农业、航运也很发达(黄真理, 2000; 姜彤, 2002; ICPR, 2002; Malle, KG, 1996)。自19世纪末以来,伴随着人口增长、经济增长尤其是工业化浪潮,莱茵河水质逐渐恶化,1960~1970年代初,中欧经济复苏时期,污染达到高峰,莱茵河因此被称为“欧洲最传奇的下水道”(Malle, KG, 1996; Conference of Rhine Ministers, 2001; Julie Stauffer, 2000; 姜彤, 2002)。莱茵河流域的治理,经过了沿线各国长期协调的艰苦历程(C. Diepernk, 2000),其根本举措就是大规模建设污水处理厂,1973

—1981年间污水的集中处理率由30%上升到80%以上。但是,莱茵河“变清”的目标并未完全实现,莱茵河在流速减缓的荷兰境内,入河尾水中的氮和磷,导致严重的富营养化,藻类爆发,严重影响航运和城市供水,而且,1988年德国北海发生环境灾难事件,大片藻类覆盖北海海滩,调查显示近1/3的污染负荷来自莱茵河。为了保护莱茵河及北海生态系统,莱茵河水质目标不得不更加严格,其重点就是加强对尾水中氮磷等营养物质的控制,投巨资解决城市污水处理厂的除磷、脱氮工作,防止北海和莱茵河局部地区富营养化的发生。目前,莱茵河流域三级污水处理厂的服务人口已达到95%以上,配合无磷洗涤剂的使用,稳定地减少了河中的磷(ICPR, 2001),但氮的水平还没有显著下降(European Environmental Agency, 1999)。

泰晤士河(Thames)现在被普遍认为是世界上流经首都城市的水质最好的河,也是世界上依靠人工处理方式实现水质返清的又一成功案例(Y. De Garis, 2002)。1800—1850年,伦敦人口由100万增至275万,城市生活污水大量增加,这些污水未经任何处理,直接排入泰晤士河,到1858年,伦敦到处都是 H_2S 难闻的气味。1887—1891年,在Beckton和Crossness排污口建立了城市污水处理厂,采取投加石灰及铁盐进行沉淀的一级强化处理工艺,以减少污染物负荷量。到1930年代末,伦敦的人口已经超过800万,随之而来的是泰晤士河水质的迅速恶化,1950年,河水达到了完全缺氧的程度,其中最主要的污染来源就是Beckton和Crossness污水处理厂的出流尾水,这两个排污口自从1880年代引进化学沉淀污水处理技术以来,一直没有进行过技术革新,由于该种工艺只能将 BOD_5 的浓度降到200mg/L左右,每天150万 m^3 的城市尾水仍使泰晤士河不堪重负。1959—1963年,污水处理厂被改建成活性污泥法,实现完全的二级污水处理。随着公众水环境质量要求的提高,1967—1974年,污水处理厂不得不又进行了技术改造,增加了具有脱氮功能的三级处理工艺。逐渐提高的尾水人工处理程度,花费了大量时间,泰晤士河整治工作前后长达120多年,也耗费了巨额资金,前后总花费达数十亿美元。

对尾水进行人工深度处理的控制策略,更多地应用于湖泊的治理。瑞士苏黎世湖,被认为是世界上采用化学除磷工艺进行尾水深度处理并获得成功的第一个湖泊(Ambül, 1981)。湖泊底泥资料表明,该湖富营养化始于1880年代前后。从人口稠密的苏黎世市以及沿岸旅游业污水导致了湖泊富营养化加深,并于1960年代达到顶峰。磷浓度在1950年前还不到 $30\mu g/L$,但从1955—1967年却上升到了 $90\mu g/L$,湖泊底层和均温层均处于缺氧状态。为了改善水质,在流域内新建了污水处理厂,目前,大部分城镇生活及工业尾水都得到了有效处理。采用铁或铝盐进行磷沉淀处理后,磷浓度下降了85%以上,总磷负荷从1960年的 $5.5g/(m^2 \cdot a)$ 降到了1980年的 $1.9g/(m^2 \cdot a)$ (Mitsuru Sakamoto, 1996)。

Mjøsa湖是挪威最大的湖泊,1970年代出现了富营养化,区域调查结果显示,64%的磷负荷来自湖泊周围的城镇生活及工业排水,36%来自面源。根据行动计划(Holtan, 1981),环湖新建了42座污水处理厂,到1980年底,在人口密集的新城区,污水处理厂的服务人口达到91%,磷浓度降低了90%。欧洲的其他国家如瑞典,自1968年起也大规模新建或改建了具有化学除磷功能的高级污水处理厂,到1980年代初,总服务人口超过90%。在三级处理改善污水处理效果后,从污水厂排入Boren湖和Ekoln湖的总磷浓度有大幅度下降,湖水磷浓度则下降了80%以上(Mitsuru Sakamoto, 1996)。

为解决湖库的污染富营养问题,德国甚至对受污染的入湖(库)河流进行人工处理(张忠祥等,1998)。波恩附近的Wahnbach除磷厂,就是对进入水源水库的河水采用物化法除磷,工艺流程包括:投加铁盐和聚合电解质,继之以砂滤池或复合砂滤池,出水含磷量 $30\mu g/L$ 。柏林市为防止该市Tegel湖富营养化,兴建了Tegel除磷厂,进湖的河水流量平均 $2.53m^3/s$,最高 $5.5m^3/s$,该厂处理能力为50万 m^3/d ,除磷后进入Tegel湖的河流含磷浓度 $<30\mu g/L$,有效地防止了湖泊的富营养化。

此外,尾水的人工处理还应用于世界上某些严重缺水的经济发达地区或城市,用以回收和利用深度处理的出水(Spencer等,

2000)。这方面工作最著名的首推以色列的 Dan 地区工程 (Takashi Asano, 1996)。该工程通过两段最高级的处理工艺处理该国最大的城市区——Tel Aviv 都市区的城市尾水。首先, 包括在两组并列的兼性氧化塘中进行生物处理, 高石灰-镁法工艺进行化学处理, 紧接着, 高 pH 值的出水在磨料池中停留, 主要进行脱氨洗涤及自然再碳酸化。绝大部分出水在土壤-蓄水层系统中经过进一步处理和长时间的停留后, 泵入回收井用于供给非饮用水用途, 主要是不受限制地用于农作物灌溉。

从国外河湖治理的研究实践来看, 尾水人工处理主要具有如下一些特点:

(1) 工艺复杂, 技术难度大, 管理要求高。尾水人工处理基本上都属于就地控制, 即强调在污染发生地解决尾水遗留的所有问题, 例如在欧洲各国及美国东部各州, 均有立法禁止污染的转移或“转嫁”。因应尾水深度处理的需要, 发达国家和地区为了实现区域尾水中特定污染物的去除, 深度处理工艺层出不穷、越来越多, 如针对除磷, 有各种以除磷菌聚磷-释放磷为基础的各种生物除磷法 (Nam H.U.等, 2000; Su J.L.等, 1997), 有投加石灰、投加铝盐、投加铁盐等物理-化学法 (Donnert D.等, 1999; Nurdogan Y.等, 1995), 针对脱氮, 有以硝化-反硝化为基础的各种生物脱氮法 (Wittgren H.B.等, 1995; Aesoy, A., 1998; Ekama G.A.等, 1999)、吹脱法、折点氯化法、选择性离子交换法、膜过滤法等 (Bilstad T., 1995; Aguilar M.I.等, 2002), 针对有机物的去除, 有颗粒活性炭吸附、臭氧氧化法、膜过滤法等 (Duranceau, 2000; Urfer D.等, 1997), 针对无机物, 有离子交换法、电渗析、反渗透等等 (中国大百科全书·环境科学, 1983), 随着人们对环境中多种污染物质性质认识的深入, 要求进行深度处理的压力也必将越来越大。各种工艺所产生的出水水质各不相同, 适用的场合也大不一样, 而且对操作人员的技术水平和管理能力要求甚高。

(2) 基建投资和运行费用高昂。尾水深度处理的基建与运行费用一般约为相同规模二级处理厂的 2~3 倍 (表 1-1) (张忠祥等, 1998), 能源和物料消耗甚大, 因此其发展和推广应用受到限制,

较少大规模的使用, 基本都限于发达国家和地区, 发展中国家则鲜见报道。例如, 美国 1972 年用于污水人工处理的电耗占全国总发电量的 1.8%, 约占生产用电耗的 20%, 每年用于污染处理的能量相当于 1 亿桶原油 (左玉辉, 1985)。在莱茵河流域高级污水处理厂的建设中, 仅德国政府在 1970 年代就耗资 600 亿马克 (F.皮尔斯, 1994), 人工除磷耗费达每吨 5 万德国马克 (张忠祥等, 1998), 目前德国居民单位用水所缴纳的污水处理费是一般用水费的 3 倍多 (刘仲桂, 2002), 而德国水环境要达到现有的水质标准, 各项投资尚需 3 000 亿美元, 按目前的投资水平, 要 40 年才能完成 (王真, 2002)。

表 1-1 污水/尾水不同处理工艺组合的相对费用比较

处理工艺组合	基建费用	运行费用	总费用
一级处理	1.0	1.0	1.0
一级强化	1.29~1.63	1.12~1.46	1.22~1.44
二级生物处理	2.32~2.49	1.56~1.71	2.05~2.07
一级强化+生物处理	2.81~3.06	2.04~2.42	2.64~2.78
脱氮处理	2.81~3.06	2.04~2.42	2.64~2.78
脱氮+过滤	3.63~3.68	3.73~2.75	3.22~3.27
脱氮+投加石灰+过滤	5.31~5.48	5.37~5.42	5.33~5.45
脱氮+过滤+活性炭过滤	4.68~4.69	3.06~3.67	4.36~4.44
脱氮+投加石灰+过滤+活性炭吸附	5.81~6.21	6.59~6.88	6.36~6.44
脱氮+投加石灰+过滤+活性炭吸附及反渗透	8.06~8.16	12.20~12.50	10.0

(3) 微量有毒有机污染问题值得重视。通过尾水人工深度处理对某些微量有毒有机物去除能力有限, 出水就地排放或简单回用, 仍具有潜在的危险。在尾水人工深度处理回用中, 非饮用水的直接重复利用在美国和世界各国都是补充公众供水的主要方案选择 (Takashi Asano, 1996), 利用城市尾水来补充饮用供水的不足, 如果不是在极其紧急的情况下, 一般不应予以考虑, 或不应允许, 因为今天的饮用水重复利用会影响到长期的健康问题, 其原因可能是人们吸收了水中有机和无机污染物, 即使水经过最先进的的方法处理时, 这些污染物仍

会存在,而且目前的饮用水标准是根据对未受污染的淡水资源进行试验得到的,尽管鉴别水中污染物的分析方法取得了长足的进步,但只能识别出小部分污染物的存在,这样对取自污染严重水源的饮用水制定可接受的质量标准的努力已证明是失败的(Takashi Asano, 1996)。在区域水污染控制中,莱茵河行动计划(RAP)确定了“优先治理的污染物质的清单”共45种,包括重金属如汞、铅、氮、磷和其他一些主要的有机物,要求在1995年达到50%~70%的消减率(ICPR, 2001),在许多情况下这些目标已经达到,但留下的大多数污染物却被证明是更难啃的骨头,河中的2000多种化学污染物多数仅仅是被人所知道而已,人们只能例行公事地监测而别无办法,“污染这么扩散意味着我们对莱茵河行动计划中数目可观的化学物质规定限度无能为力”(F.皮尔斯, 1994)。而由于重金属和微量有毒有机污染,在荷兰传统疏浚用于农田的底泥,不得而被列为危险废物而置于专用倾倒场(F.皮尔斯, 1994)。作为世界上最大的淡水生态系统,五大湖地区常规的有机污染及磷等营养物质的控制已获成功,但在当前却面临着长效有机化学品和金属这两个最大的问题(Julie Stauffer, 2000)。这些污染物质在动物体内不断累积、放大,致使五大湖的水禽在1970年代成为世界上遭受污染最严重的动物。如今,由于控源的加强,这种状况已得到改善,但肿瘤、出生缺陷和繁殖问题仍困扰着不少鱼类。五大湖中很多长寿命的食鱼动物也仍然受到有毒化学品的影响,人们记录到该流域10种食鱼幼鸟有出生缺陷问题,例如密执安湖绿湾的鹈鹕幼鸟长交叉嘴的比例比正常情况高出22~87倍。作为全湖污染指示生物的鲱鱼鸥,也一直存在体质不佳、繁殖问题以及种群规模减小等问题。1970年代初,鲱鱼鸥蛋里多氯联苯的浓度曾达到水中可测浓度的数百万倍。尽管目前这种状况已有缓解,但野生动物面临的威胁依然存在,例如生活在圣劳伦斯河中的白鲸,就是地球上遭受污染最严重的动物之一,它们体内充满滴滴涕、多氯联苯和重金属,并被癌症所困扰,当它们死后,其尸体被法定为危险废物。正如皇家多伦多滨水区未来委员会恰如其分地指出:“我们制定的水质标准不是为了保护以胡瓜鱼为食的鸥,或保护食用(以胡瓜鱼为食的)鳟鱼的

人”。可见,随着污染的蔓延,就地依靠人工逐源(污染源)、逐物(污染物)的处理办法,要真正实现水环境的长治久安,将是一个漫长而艰苦的历史过程,付出的精力和财力无疑也是巨大的。

2. 尾水分流

尾水分流,是指为保护重点湖库或河段的需要,将沿线尾水调离敏感水域,集中输送至自净能力较大的江河湖海,进行最终处置的一项水污染控制措施。由于水污染的蔓延,即使对城市污水进行一定处理之后排放,城市区域周边水环境往往也已不堪重负,因此,世界不少国家和地区都逐渐将尾水分流处理或直接排江排湖排海,作为最终解决区域尾水污染问题的一条出路。

不少发达国家和地区在利用人工处理措施进行尾水处理时,也有配合实施尾水分流的做法。例如,与泰晤士河平行铺设南北两条大型的下水道,全长161km,其作用是将伦敦市区注入泰晤士河的尾水/污水拦截下来,并将它们输送到下游距市区中心东面25km的Beckton和Crossness,经处理后,出水在退潮时排入河口(Y.De Garis, 2002)。瑞典的Norrвикен湖多年来一直受纳城镇生活污水和工业废水,在1969年把污水全部分流到新建的污水处理厂以前,富营养化严重(Mitsuru Sakamoto, 1996)。在截断入湖污水后,监测表明,氮磷浓度均发生显著下降,水质迅速好转。德国巴伐利亚湖,通过环湖截流管网将沿湖入流污水输送到污水处理厂进行处理后,该湖P含量平均降到20 $\mu\text{g/L}$ 以下,属低营养态(张忠祥等, 1998)。

华盛顿湖(Lake Washington)通常被认为是富营养化成功修复的一个典型范例(Mitsuru Sakamoto, 1996)。华盛顿湖最早是贫营养的。但随着西雅图快速的人口增长,华盛顿湖承接了越来越多的城市原生污水。1930年代后期,建成了早期的污水分流系统,但从1941年开始,位于各入湖口的污水二级处理厂的大量尾水越来越多地进入湖泊,导致华盛顿湖污染再次加重,此外从周边化粪池和其他来源也额外带来了一部分污水负荷。这些污水处理厂尾水对湖泊TP的贡献比例,1957年占56%,1963年达75%,导致藻类生物量急剧增加。为了恢复湖泊水环境,历时5年建成了华盛顿湖尾水分流工程,到1968

年从污水处理厂排入湖泊的尾水负荷降至零。营养物入湖数据显示,尾水分流之后,年均 TP 负荷仅为 1962—1966 年的 40%左右,尽管相应的 TN 值仍有 90%。随着入湖 TP 负荷的急剧降低,湖中 TP、颗粒 P、浮游植物、藻青菌比例随之逐步降低。到 1975 年,湖泊被认为已从富营养化中恢复过来。

国外尾水分流的方法,更多是见于城市尾水的排江或排海处置,其中尤以美国东西海岸滨海城市的尾水排海规模最大(张忠祥等,1998)。截至 1990 年,美国滨海城镇共建设有 1 400 余座城市污水处理厂,每天产生的尾水总量达 3 750 万 m^3 ,其中约 85%的城镇尾水排入海湾、河口或海口,以保护城市河流或湖泊水质。此外,还有 1 300 余家工业企业,每天将 4 238 万 m^3 的尾水排入海域。有代表性的城市是美国东部港口城市一波士顿,市内有三条河流穿过,为了保证市区水环境,在 Natisland 和 Deerisland 修建了庞大的城市污水处理厂,其中 Deerisland 污水处理厂处理能力为 476 万 m^3/d ,1991 年为一级处理,1999 年改造为二级处理(并正考虑是否需要扩建脱氮处理工艺)。为避免污水处理厂尾水危及地表水环境,在波士顿以东海域修建了排放口设施,距岸 15.2km,放流管长度 2 000m,潜水深度 100m,并设多孔扩散器,是目前世界上最长的尾水排放入海系统。

尾水分流是以严格保护敏感水体为决策目标的定位,在严格控制尾水排放影响范围,达到规定的环境标准,不影响接纳水域的水质目标、使用功能和生态平衡的前提下,采取科学的工程系统,利用大水体自净能力解决区域尾水出路问题的一项工程技术措施。总结国外的研究及实践,科学的尾水分流措施应满足以下要求:

(1) 分流的尾水应经过必要的处理。尾水分流的形成和发展已有较长的历史,早期的尾水并不进行任何预处理,而是直接将原生污水通过管道进行岸边或近岸水下排放。但事实证明,不是含有任何污染物的尾水都可以进行分流的。尾水分流的直接目的是为了改善与人类关系密切的水域质量,节约尾水深度处理的费用,同时保证尾水接纳水环境的生态功能平衡,因此,对生态环境有毒有害的污染物(如营养物、重金属、难降解有毒有机物、放射性物质、悬浮物等),必须按

规定要求预先加以去除。例如,在人口密集、工业程度很高的美国德拉华流域,1950 年代区域尾水约有一半未经有效处理直排入河,导致河流污染严重,并影响到河口水域水质(张忠祥等,1998)。从保证接纳水域长远安全的角度考虑,即使是尾水排海,也应当按照当前最高级别的尾水处理技术进行规划和建设,如果经济上确有困难,可以分期实施。华盛顿位于波托马克河东岸,该河接近海口,水量甚大,从 19 世纪以来,该市的污水都是通过雨水管集中入河,但随着人口增长,污染负荷大幅上升,1935 年兴建了一级处理厂,1949 年以后又不得不扩建了二级污水处理厂,服务人口 100 万(邬扬善,1992)。纽约是美国第一大城市,其污水均通过排海工程进入纽约湾,为了加强污水处理,先后建设了 14 座污水处理厂,其中 9 座为一级处理,5 座为二级处理,处理能力 620 万 m^3/d ,1990 年代后,随着海洋环境保护要求的提高,先后将两座一级处理厂升级为二级处理厂,并将余下的 7 座一级处理改为化学强化一级处理,即增加投加化学絮凝剂的沉淀处理,基本保证了海湾水质良好(张忠祥等,1998)。由于各地情况迥异,尾水分流的具体措施和对策也各不一样,但总结起来,坚持严格的尾水水质标准,努力实现目标水体和接纳水体保护的双赢,这一点却是共同的,也是最重要的。

(2) 尾水的分流应科学实施。首先,不是任何水域都适于尾水分流,一般应选用次敏感的大环境水体作为接纳水域。例如,在 20 世纪初,为处理五大湖地区污染所导致的一系列危机事件(Brown 等,1996),城市当局选择了目光短浅的解决办法,将城市尾水排放口向伊利湖中进一步延伸,使其远离饮用水取水口,到 20 世纪中期,富营养化成为一个极其严重的问题,到 1960 年代,伊利湖充斥着蓝绿藻,死鱼漂浮在湖面上,湖滨被大量腐烂的岩生刚毛藻覆盖,氧浓度骤降,水生动物很快灭绝,一些科学家甚至宣布该湖为“生态死湖”(Julie Stauffer, 2000)。其次,不是任何地点都可以进行尾水分流。一般不宜在近岸排放,而应离岸处置,其目的一是为了保护与人类关系密切的近岸水环境质量,二是远离岸边可以达到足够的水深,以利尾水与周边水体的尽快混合和稀释。国外设置排放口水域的水深大多

在10~30 m之间,最深的达120 m,少数在5~10 m之间,而且排放口尽量选择在水深、流急、交换能力强的水域。例如,美国城镇尾水排海规模浩大的重要条件就是其具有广阔的近岸深水海域,其中圣地亚哥排放口水深60m,波士顿排放口水深则达100m(张忠祥等,1998)。此外,尾水放流管、扩散器的设计和铺设,也应进行科学的论证。

总之,尾水分流的形成和发展已有较长的历史,1930年代,尾水分流及江河湖海处置逐渐成为一项成熟的系统工程,1960年代以后,则逐渐形成了现代尾水江河湖海处置的基本模式:尾水经一级处理后,通过水底放流管,采用喷口密排型或疏排型扩散器排放(王超,1998)。目前,尾水分流与江河湖海处置已出现了不少特大型(尾水超过百万t/d)、超长管(放流管长度超过10km)、超水深(水深超过50m甚至100m)、高标准(尾水经过二级处理甚至脱氮除磷)工程。

尾水分流与江河湖海处置技术已日趋成熟,其突出的优点是通过截断进入敏感目标水体的污染负荷,配合其他控制措施,可确保水体迅速“返清”,并为点源控制与城市污水处理厂的建设,争取了更多的时间和空间。但在单纯的尾水分流只是改变了污染的空间分布,其本身并没有实现污染物质的消除,而且在对接纳水体生态系统的潜在长期影响、尾水分流与城市水污染治理之间的环境与经济效益分析等方面有待深入研究。例如,美国近海一些海域已发现铅、DDT、PCBs等毒物对鱼、贝类造成危害(张忠祥等,1998)。因此,单纯的尾水分流仍需慎重决策,与其他处理方式的有机结合是其发展的方向。

3. 生态处理

尾水生态处理是依赖水、土壤、细菌、高等植物和阳光等基本的自然要素,利用土壤-微生物-植物系统的自我调控机制和综合自净能力,完成尾水的深度处理,同时通过对尾水中水分和营养物的综合利用,实现尾水无害化和资源化再利用。

尾水生态处理的主要类型包括稳定塘系统和土地处理系统(P. Aarne Vesilind等,1994)。稳定塘也称污水塘或氧化塘,它对尾水的净化同生物处理法对污水的净化过程相似,主要包括好氧过程和厌氧

过程。稳定塘分好氧塘、兼性塘和厌氧塘,其中兼性塘的顶层以好氧过程为主,好氧细菌和真菌将有机物质分解成二氧化碳和水,二氧化碳以及稳定塘中的氮、磷和有机物则被藻类所利用,底层一般以厌氧过程为主,厌氧菌将有机物质分解为甲烷和二氧化碳。土地处理系统则是利用土地以及其中的微生物和植物根系对污染物的净化能力来净化尾水,同时利用其中的水分和肥分促进农作物、牧草或林木生长,尾水中的污染物在土地处理系统中通过多种过程去除,包括土壤的过滤截留,物理和化学的吸附,化学分解和沉淀,植物和微生物的摄取,微生物氧化降解以及蒸发等,包括慢速渗滤、快速渗滤、地表漫流、人工湿地等工艺。

生态工程广泛应用于原污水、一级尾水处理,或尾水深度二级处理甚至三级处理的研究和实践。澳大利亚墨尔本的生态工程(威里比农场)就是一个成功的范例(Julie Stauffer, 2000)。该工程占地 109.35km^2 ,接纳经预处理的墨尔本市尾水,处理规模44万 m^3/d ,始建于1897年,并一直成功运行至今。该工程采用了慢速处理、表面径流和氧化塘三种工艺,在蒸发率高和需要灌溉的春末、夏季、秋季使用慢速处理,在蒸发率低和不需要灌溉的冬季使用表面径流,好氧及厌氧塘则全年运行,以缓冲尾水入流变化的冲击。该系统能高效去除营养物、悬浮固体、有机物及重金属(表1-2)。该农场分成许多放牧区,每个牧区灌溉1~2d,接着干燥5~8d,牲畜吃草10~14d,饲养的2.2万头牛和3万只羊,每年均带来很高的经济收入。

表 1-2 澳大利亚墨尔本生态工程尾水净化性能数据

污染物	BOD	SS	N	P	Zn	Cu	Pb	Cr	Cd	Hg	Ni
去除率 (%)	99	98	95	95	95	95	95	90	85	85	75

美国密执安州 Muskegon 县的尾水生态工程,也是同步完成城市尾水二级处理与三级处理的一个典型(左玉辉,1985)。该工程尾水处理规模 12 万~16 万 m³/d,其中工业排水 60%,生活排水占 40%。基本流程是:尾水进入曝气氧化塘(占地 9.6hm²),停留 1.5d 后排入贮存塘(占地 340hm²,容积 1 900 万 m³),出水经加氯后喷灌(土地 4 000 hm²),最终排入密执安湖。净化效果显著,原水 BOD 205mg/L,最终出水 2.2mg/L,原水大肠杆菌 10 000 个/ml,最终出水 0~440 个/ml,其他指标如 SS、TN 去除率分别达到 92%和 70%,主要水质指标达到地表水二类。

由于生态工程对尾水具有良好的深度处理能力,随着环境质量要求的日益苛刻,美国不少城市和地区都利用人工湿地处理城市尾水,以达到清洁水的水质标准。美国俄勒冈州 Cannon Beach 市的城市尾水,就是利用现有 6 hm²的森林湿地对尾水进行最终处理。该系统 1984 年 6 月正式投入使用,运行流程是:氧化塘→氯消毒→湿地,尾水在湿地系统深约 30cm,停留 10~14d,最终出水约 25%~50%排进附近 Ecola 河,其余均发生蒸腾和渗透。系统运行效果超出预期。1984 年,氧化塘出水 BOD 与 TSS 分别为 27mg/L、51mg/L,而湿地出水 BOD 与 TSS 分别达到了 6mg/L、11mg/L,甚至低于 Ecola 河背景值(BOD=6mg/L, TSS=13mg/L)。到了 1991 年,湿地出水的 BOD 平均仅有 3mg/L,而 TSS 的浓度在 1990 年和 1991 年分别只有 2mg/L 与 5mg/L,远优于清洁水二类水质标准。整个系统只有正式员工 3 人,其中 2 人为周末义工或夏季实习生。市政当局 1992—1993 年对该工程的财政预算为 60 万美元,而实际运行费用总共才是这个数字的 12%(Michael B. Cook 等, 1993)。

佛罗里达州的 Lakeland 市紧临 Banana 湖,该城的 Glendale 污

水处理厂(二级处理+滴流过滤)和北边污水处理厂日处理能力分别达到 4.9 万 m³和 1.8 万 m³,服务于该市的 7.9 万人口以及附近 Polk 县的部分人口。由于公众日益提高的环境要求,当局发布了限期停止向 Banana 湖排放尾水的命令。该城对污水处理厂尾水处置多方案进行了评估,结论是利用人工湿地对其尾水进行深度处理是最经济有效的办法。为此,建设了占地 567hm²的湿地处理系统,基建投资 668 万美元,其中湿地 310 万,管道 280 万,泵站 78 万。该系统最初的设计目标是使尾水处理后出水水质超过二类标准,而在最初运行的 4 年里,仅通过湿地系统 2 个单元格进行处理后,出水中 BOD 3.12mg/L、TSS 4.70mg/L、TN 1.99mg/L、TP 4.22mg/L,比背景水质标准还要低,超出了人们的预料。湿地系统同时还为各种野生动物提供了优越的栖息环境,湿地的 5、6、7 单元格有很多白嘴鸭、白鹈鹕、鸬鹚、美洲蛇鸟、白朱鹭、白鹭、苍鹭,而且在湿地的边界地区还有不少美洲野猫和水獭出没(Michael B. Cook 等, 1993)。

尾水生态工程在流域治理中,也有一定的应用。例如,1970 年代早期,为了进一步改善加利福尼亚 Marin 县 Las Gallinas 流域的环境质量,减轻 Miller 河以及海湾的污染压力,当地制定了一整套区域尾水处理方案,该工程是一个 156hm²的联合处理系统,包括 16hm²的贮存塘、81hm²的灌溉牧场系统、4hm²的盐沼泽—土地灌溉系统和 8hm²的淡水湿地。集流尾水经该系统处理后,尾水中的有机物被去除了 95%,Las Gallinas 流域最后的出水优于清洁水二级水质标准,1992 年平均每天产生 1.23 万 m³的出水被排入 Miller 河和海湾。该区域大量的动植物吸引了许多游人,并成为鸟类学家观察鸟居住及迁徙活动的理想场所,观测数据显示,该系统已有鸟类 147 种,并且逐渐成为鸬鹚最喜欢的栖息地(Michael B. Cook 等, 1993)。

此外,还有将生态处理的方法施用于河流及湖泊内部(建立河流/湖泊生态工程)的一些研究,即通过营造天然或人工河湖湿地(沼泽、水生植物区等),利用沉淀、脱氮和生物摄取等过程改善河湖水水质(Fleischer 等, 1991; Mitsch, 1994)。美国河道湿地研究结果表明,湿地系统的截 P 能力为 1~4g/(m²·a)(Mitsch, 1994)。但研究也

表明,这种湿地系统对营养物的去除作用是十分有限的,一般仅用于减轻面源污染的入流负荷(Mitsuru Sakamoto, 1996)。

从国外尾水处理实践来看,生态处理具有如下一些特点:

(1) 净化效率较高。从大量研究和实践来看,尾水生态处理的净化效率较高、运行效果稳定,处理原污水的效果通常优于常规二级处理(Loehr等, 1979; Feigin等, 1991),处理污水处理厂尾水的效果可以达到三级深度处理水平,甚至化污为清,达到地表水水质标准(Michael B. Cook等, 1993),这在荷兰、澳大利亚等国的示范研究中也基本得到证实(P.R.Thomas等, 1995; Schreijer,M等, 1997)。值得指出的是,所有的生态系统对多种有机化学品,如多氯联苯、氯苯、萘等优先控制污染物的净化效果都相当显著,见表1-3(Honachefsky, 1991; 高拯民等, 1991; Reed等, 1995; 张忠祥等, 1998; Julie Stauffer, 2000)。

表1-3 几种主要的生态处理工艺与人工深度处理技术的净化效果比较(%)

污染物质	慢速渗滤(SR)	快速渗滤(RI)	地表漫流(OF)	人工深度处理
生化需氧量	80~99	85~99	>92	>95
化学需氧量	80~95	>50	>80	>80
悬浮物	80~99	>98	>92	>94
总磷	80~99	60~99	40~80	80~97
总氮	80~99	0~80	70~90	20~40
微生物	90~95	>98	>98	>98
重金属	>95	50~95	>50	40~89
有机化学品	>99	>96	>88	>85

(2) 基建及运行费用较低。实践表明,生态工程充分利用区域内的废地、荒地、低产坡地或坑、塘、洼、淀、滩涂等生态用地,基建投资省,运行费用低,其基建投资一般为人工深度处理的10%~20%,而单位运行费用仅为5%~10%左右。例如,墨尔本尾水生态工程,用于购地和基建投资约1亿澳元,运行费0.024澳元/m³(左玉辉, 1985),基建及运行费用大约分别是三级处理(生物处理+脱氮除磷工

艺)的1/5和1/12。美国Muskegon尾水生态工程,收入可以抵消支出的1/3强,每立方米尾水的处理运行费用仅3.3美分(左玉辉, 1985)。而且,尾水生态工程对进水预处理的水平要求一般不高,按照USEPA建立的污水预处理指标,由于公众进入生态处理用地的程度低,地表漫流和湿地处理系统仅要求格筛作为预处理,一级处理或一级强化作为快速渗滤和慢速渗滤系统的预处理也是可以接受的(里德,克赖茨, 1989)。USEPA曾选择四个快速渗滤工艺进行对比试验,其中两个接纳一级处理后的尾水,另两个接纳二级处理尾水,经过20多年的长期考验,效果良好(左玉辉, 1985)。生态工程的这种稳定性,为缓解某些地区水污染控制投入困难提供了可能。

(3) 有一定综合效益。尾水生态工程系统管理方便、运行可靠,只要不超过系统的容纳、缓冲和净化能力,可保证常年、终年运行。而且,生态工程的基本思想是尾水净化与资源化相结合,尾水中水资源与养分资源的合理利用,有助于场地中林、竹、草等非食品性植物(在严格水质控制下也常适用于农作物)的生长,通过高效、良性的生态循环系统的建立,可带来较高的经济效益。例如美国印第安纳州的亨利城,尾水灌溉使玉米产量提高120%,大麦产量提高163%(左玉辉, 1985)。尾水的这种资源性特征,在资源性缺水和土地贫瘠地区意义则更加突出。

不足的是,生态工程在少数情况下可能出现净化效果不稳定、环境卫生不理想等问题,其主要原因是设计不当、带毒超标或盲目施灌(左玉辉, 1985; Julie Stauffer, 2000)。更主要的是,利用生态系统处理尾水通常需要更多的停留时间和占用较大的空间,这在乡村地区可能不成问题,但在土地非常宝贵的大中城市则是一大障碍。用地紧张在很大程度上限制了尾水生态工程的大规模应用,例如,在欧美发达国家和地区,生态工程目前更多地仅应用于小城镇或村庄的尾水处理,著名的澳大利亚墨尔本地处理系统近年也不断受到城市发展的蚕食(Julie Stauffer, 2000)。因此,在大区域层面上,将尾水分流与生态处理相结合,即在将尾水调离敏感城区或水域的基础上,易地择址进行集中生态处理,可能是一个重要的发展方向。

1.2.2 国内区域尾水控制概况

从我国水污染控制的国情来看,点源控制力度参差不齐,集中控制设施严重滞后(钱易,2001),区域尾水实际上是由少数经过二级处理、部分经过初级处理、大部分未经任何处理的污废水组成。因此,我国尾水控制在很大程度上是与原污水的治理结合在一起的,从区域水污染控制的角度,其基本策略大致也可分为人工处理、尾水分流与生态处理三大类。

1. 人工处理

大规模利用人工技术处理城市尾水(工业废水及生活污水),是我国借鉴国外发达国家进行水污染控制的主导思想。我国城市污水处理厂的建设,因为经济承受能力的制约,进展一直较为缓慢。1978年,城市污水处理率1.4%,1980年甚至降至1.1%,1990年达到3.4%(张忠祥等,1998)。以后受国家环境政策的强制及经济政策(扩大内需)的拉动,城市污水处理厂建设步伐明显加快,截至2000年底,城市污水日处理率攀升到34.2%,建成城市污水处理厂427座,总处理能力3100万 m^3/d ,其中二级生化处理厂282座,污水生化处理总规模1475万 m^3/d (李军,2002)。污水处理的主要工艺为传统活性污泥法,其他A/B法、A/O法、 A^2/O 法、CASS法、SBR法、氧化沟法等也有应用(朱雁伯,2000)。

在尾水人工深度处理的研究和尝试方面,我国目前还仅处在起步阶段,数量不多,规模较小,而且主要集中在我国北方地区,目的是为了实尾水回用,缓解城市供水危机。例如,1992年,在大连市春柳河污水处理厂扩建完成了尾水深度处理工程,它将该污水厂的二级出水,再经混凝、沉淀、过滤、消毒的三级处理后,回用于工业冷却水或城市杂用水。该工程处理规模1万 m^3/d ,主要送红星化工厂、煤气厂、电厂等作工艺用水或冷却水,运行10年来,效果良好(周律,2002)。

太原市杨家堡污水处理厂(二级生化处理)开展的尾水深度处理试验也是华北地区最大的工程之一。该工艺以生物陶粒接触氧化法和

过滤单元为主体,对杨家堡污水厂尾水进行深度处理,去除水中残余的悬浮固体,再加氯杀菌,出水水质设计指标: $\text{COD}\leq 30\text{mg/L}$, $\text{BOD}_5\leq 10\text{mg/L}$, $\text{SS}\leq 5\text{mg/L}$,浊度 ≤ 5 度,色度 ≤ 15 度(中国环境与发展国际合作委员会,1997)。该工程一期工程已于2001年11月试运行,总投资2538万元,处理能力2.4万 m^3/d ,目前实际运行规模1.2万 m^3/d ,通过穿汾河管道,输往太原化工集团公司作循环冷却水的补充水源(王晋宇,2002)。

我国广州大坦沙污水厂、天津纪庄子污水厂等都进行了(或部分进行了)生物脱氮或脱磷处理的尝试(秦惠琛,1990;王士平,2000),取得了一定效果。但大规模地对尾水进行脱氮脱磷的深度处理,我国目前尚未真正付诸实施。

2. 尾水分流

为了控制城市地区日益恶化的水环境质量,我国不少地区在城市环境综合整治中,逐步研究开展了城市尾水(污水)的截流分流工作,实践表明,这些措施对迅速改善城市水环境质量具有明显成效。

桂林市桂湖、榕湖、杉湖环境综合整治工程是尾水分流成功的一个典型。过去,由于桂湖、榕湖、杉湖没有清洁水源补充,沿岸城区生活污水、工业废水大量排入,加上湖底淤泥多年未清,造成三湖水水质严重恶化。整治工程的基本举措是通过近18km的环湖截流管道,配合污水泵站,将城区入湖尾水2万 m^3/d 全部调离湖区。同时,采取远距离管道输送技术,将三湖中60万 m^3 底泥输送到市郊专门堆放场进行综合处理,并通过7.8km的引水入湖工程,从漓江市区段上游引水进入内湖,丰水期平均流量2.5 m^3/s ,实现湖水水体每16d交换一次。通过环境综合整治,引水入湖和内湖水水质分别达到地表水环境质量II类和III类标准,市区水环境得到根本改善(桂林市环境保护局,2002;黎运葵,2002)。

上海市的水污染控制则采取污水就地处理为辅、尾水集中外排为主的做法(上海市苏州河综合整治建设有限公司,2000)。从1970年代起,陆续建设了若干尾水集中外排工程,如西区输送干线(西干线)、南区输送干线、上海市合流污水治理一期二期工程、吴泾—闵行污水