

水污染防治规划 原理与方法

程声通 著

SHUIWURAN
FANGZHI GUIHUA YUANLI
YU FANGFA



化学工业出版社

水污染防治规划 原理与方法

程声通 著 SHUIWURAN
FANGZHI GUIHUA YUANLI
YU FANGFA



化学工业出版社

· 北京 ·

本书归纳和整理了近 30 年或更长一段时期里国内外在水污染防治规划方面的理论和技术,提出了以“一个中心、两个基本点”为核心的水污染防治规划的基本方法学和技术路线,并对水污染防治的适用技术进行了评述和推介。

本书将水污染防治规划的内容归纳为八章,较全面地论述了规划的原理、方法和过程,包括总论、功能区划、环境容量、污染源解析、水质模型、水污染防治方案、情景与决策分析、规划实施与案例;在理论探讨和方法学研究的同时,还引用了丰富的数据和资料。

本书可供环境科学与工程、规划与管理学领域的工程技术人员、规划及管理人员使用,也可供高等院校相关专业师生参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

水污染防治规划原理与方法/程声通著. —北京:化学工业出版社, 2010. 5

ISBN 978-7-122-08021-9

I. 水… II. 程… III. 水污染-污染防治 IV. X52

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 049540 号

责任编辑:刘兴春

文字编辑:汲永臻

责任校对:周梦华

装帧设计:郭 佳

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印 装:北京白帆印务有限公司

787mm×1092mm 1/16 印张 20 $\frac{1}{2}$ 字数 505 千字 2010 年 6 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询:010-64518888 (传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价: 86.00 元

版权所有 违者必究



本书归纳和整理了近 30 年或更长一段时期里国内外在水污染防治规划方面的理论和技术,提出了以“一个中心、两个基本点”为核心的水污染防治规划的基本方法学和技术路线,并对水污染防治的适用技术进行了评述和推介。这里所说的一个中心是:一切以保护和改善水环境质量为中心。两个基本点是:以水环境质量为目标的污染物总量控制技术和以合作博弈为基础的情景分析方法。

错综复杂的社会经济万象和盘根错节的自然环境条件决定了水污染防治规划是一件非常难做的事情,其难点除了理论、技术层面,还有很多政策和管理层面的问题。本书对其中一些问题进行了探索,还有更多的问题需要些时日才能解决。这里,就有关水污染防治规划的几个关键问题,与各位读者共商。

一、做好水污染防治规划是政府部门的一项法律责任

水污染防治规划是政府部门为了实现预期的水环境质量目标,在国家环境保护法律和法规的框架下,对未来一段时期内将要采取的工程和非工程措施作出的安排,并对实施过程进行监控和后评估。

我国的水污染防治规划伴随环境保护事业的发展走过了 30 多个年头,1980 年,“第一松花江水质规划”标志着这一新生事物在我国的诞生,随后“鸭绿江下游水污染控制规划”、“图们江水质规划”、“沱江水环境容量研究”相继出台。

完成于 20 世纪 80 年代初期的这些项目,在理论上、技术上和可操作性上都存在这样或那样的问题,但这毕竟是一个开端。这些项目都有一个共同的特点:力求以水体对污染物的承受能力为基点,探讨对污染物的总量控制。总量控制的表达方式通常是“水质断面达标”,其规划过程有的采用最优化分析方法,有的采用方案比较分析方法。这些项目基本上都属于研究课题,距实际应用尚远。

由于决策上的重要性,水污染防治规划研究得到重视,“九五”期间有若干个项目被列入国家级研究领域。随着水环境质量和污染物排放标准的日益完善,水污染防治规划在方法学上和技术上也有了长足进步。1984 年,《水污染防治法》的颁布,明确了水污染防治规划的法律地位,在随后颁布的实施细则中又明确提出“水体的环境功能要求”,国家环保总局在全国范围开始了水环境功能区划的工作。水环境功能区的提出,对于探索前行的水污染防治规划无疑是雪中送炭。此前的规划,因为系统庞大、内容复杂,在方法学上和实用性上都存在一些难以解决的问题。“功能区”的概念提出以后,使得原本复杂的流域大系统有可能被分解成一个一个较小的功能区,有利于在规划中分而治之,既降低了规划的难度,也提高了规划的可操作性和可实施性。

从第十个五年计划开始,水污染防治规划被列为我国各级政府的业务范畴,按照水污染防治法展开规划。水污染防治规划的主体是各级政府的相关部门,各部门之间的理解与合

作，关乎规划及其实施的成败。目前，在水污染防治方面还存在一些不协调的因素，如“水环境功能区”与“水功能区”之争，水环境监测的权力与义务分配，污染源的有效管理等，它们的出现并不奇怪，是历史的产物，但是这些已经对水污染防治产生了消极的影响，期待有关部门能够通过协商互谅，尽快解决好这些问题。

二、水污染防治规划中，“总量”的概念需要回归

1995年，我国提出了“目标总量”的概念，而将先前以水质为目标的污染物允许排放总量称为“容量总量”。所谓目标总量就是在基准年污染物排放总量的基础上，按照某个百分数确定目标年的污染物削减量。1996年9月，国务院在批复《国家环境保护“九五”计划和2010年远景目标》时，原则同意了《“九五”期间全国主要污染物总量控制计划》，同时要求：要根据不同时期、不同地区的情况抓紧制定总量控制指标体系和管理办法，建立定期公布制度^①。这标志着污染物排放总量控制制度的正式建立。在其后的“十五”和“十一五”期间，全国环保系统全面贯彻执行“目标总量”控制制度。

环境容量估算是环境规划中的难题，在学术界和管理人员中认识差异很大。目标总量的提出可以回避难以确定的环境容量问题的困扰，在环境管理上不失为一个操作性较强的方法。但是将目标总量作为水污染防治规划的目标可能有失偏颇，“就污染源谈污染源”的结果是放弃了对规划中最最重要的水陆响应关系的求证，使“水污染防治规划”蜕变为“污染源治理规划”，从而放弃了对水质目标的追求，而规划中所列的水质目标一项形同虚设。

诚然，水环境容量和允许排放量的计算在实际上会遇到很大困难，但水污染防治规划不能因此放弃追求水质目标。在水环境功能区的概念提出以后，水环境容量的估算变得较为简化。最近10年中，很多学者和技术人员一直在孜孜不倦地钻研，环境容量和允许排放量估算的方法学和技术都前进了一大步。

另一方面，污染源也是困扰规划的一大难题，不能期望每一次规划中都去调查污染源状况，要靠平时积累。由于种种原因，环境管理中存在多个渠道收集和统计污染源的数据，但是真正过硬的数据却很少。用一些并不可靠的数据协调出一个“目标总量”，显然也是不可靠的。

环境保护的目的就是保护环境，水污染防治规划是环境保护的纲领性内容，有必要回归到以环境质量为基础的总量控制轨道。对于规划中，同时也是管理中的两大问题——污染源和环境容量，需要加大研究和管理的力度，下决心弄个明白。污染源和环境容量都具有复杂性和时变性的特点，必须实行长期、动态调查和管理。

三、水污染防治规划要分清层次

以往的水污染控制规划层次不够清楚，规划实施的责任主体不够明确，因此难以落实。对于水污染防治规划这样庞大、复杂的系统，从一级流域直插污染源的规划方式值得商榷。任何一个复杂的大系统都是由若干个简单或相对简单的小系统组成的，需要分清层次逐层向下分解，在解决了一个一个具体问题后，再一步一步向上反馈和综合。在低层次解决具体问题，在高层次协调低层次之间的矛盾，这是解决大系统问题的分解协调原理。

就水污染防治系统来说，将其分解成流域系统和功能区（或行政区）系统是较为合理的选择。流域系统的主要任务是解决跨行政区的水环境功能区划问题；而功能区（或行政区）

^① 国务院，关于国家环境保护“九五”计划和2010年远景目标的批复，环境工作通讯，1996，225（10）：2。

主要解决水污染防治的治理规划和设施规划问题。当然，流域也有大小、层次之分，在划分功能区时也需要从上到下逐级分解，然后从下至上进行协调。不同级别的跨行政区的流域功能区划问题，由相应的政府有关主管部门牵头解决，功能区的水污染防治问题由所辖行政区政府有关主管部门牵头解决。功能区（行政区）在解决问题的过程中遇到难以解决的外部矛盾时，提请主管流域功能区划的有关部门协调。将水污染防治规划分解成流域和功能区（或行政区）两个子系统，符合我国现行的行政体制，有利于开展工作，有利于规划的落实；也有利于发挥各个层次的政府主管部门的功能和特长。

四、攻克技术难关

做好水污染防治规划，还存在一些技术难题，需要国家有关部门组织力量进行研究，形成比较规范的技术体系。这些技术主要有：①环境容量和污染物允许排放量的估算；②水质模型的实用化及水质模型参数的确定；③水污染源的动态管理和预测，包括符合国情和地情的点源和面源的污染物排放系数的确定；④可操作的污染物允许排放量的公平、合理分配技术和方法；⑤对水污染防治的效果评价，包括环境评价、经济评价和社会评价；⑥其他。

水污染防治规划涉及“天地生”、“数理化”和各种工程技术领域，几乎无所不包，本书所涉猎的仅是沧海一粟。笔者以为，水污染防治不属于精确科学的范畴，在选择技术方法时要注意“费效比”问题，不必为了追求一项精密技术而不惜工本；技术的可行性、适用性和成熟性应该放到优先位置。与此相对应的是，对水质目标的达标考核需要引入新的概念，例如，用“达标率”取代“一票否决”的评价方法。

与水污染防治规划一样，无论理论还是方法，本书在很多方面都很不成熟，笔者在写作过程中，时时为方法学的不规范和数据的支离破碎所困扰。在这样的背景下，本书的撰写目的旨在引起学界对水污染防治规划编制的理论、方法和技术的重视和兴趣，引起各方的争鸣，推动水污染防治规划和水环境保护的发展，年复一年重复没有实际效果的“规划”，既是对资源的浪费，又延误了水环境保护的进展，是到了改变这种状况的时候了。

五、关键词

在阅读本书时，请读者关注以下关键词或关键词组，它们如同一排排骨架，支撑着水污染防治规划的大厦，也是本书写作的脉络，对它们的认知和诠释就是对水污染防治规划的理解和升华。本书主要的关键词组有：

水污染防治规划、水污染控制规划、水质规划、流域水污染控制规划、水环境规划；

最优规划法、公平规划法、情景分析法；

河流水质模型、河口水质模型、海湾水质模型、面源模型、解析模型、数值模型、矩阵模型；

水环境功能区、水功能区、水污染控制区、混合区、水污染控制单元；

水环境容量、水环境纳污能力、允许纳污量、允许排放量；

公平性、有效性、公平分配、最优化分配、合作博弈分配、排污权交易；

点污染源、线源污染、面源污染、非点源污染、内源污染、大气沉降污染；

排污系数、排放系数、入河系数；

污染物产生量、污染物发生量、污染物入河量；

水污染防治方案、初始方案、可行方案、非劣方案、备选方案、推荐方案；

环境影响分析、经济影响分析、社会影响分析；

决策分析、费用效益分析、多目标分析、层次分析、多准则决策分析。

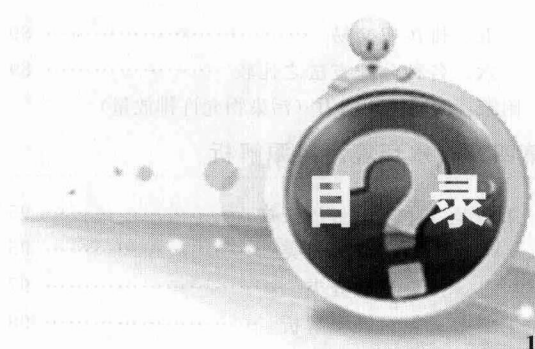
本书的观点和内容仅是一家之见，由于时间仓促，某些部分未及仔细推敲。对于写作中的不妥之处欢迎批评指正；不同的见解和观点欢迎探讨。

本书广采博纳，所引用资料和数据来源，除了笔者参与和主持的项目外，还有一些引用自国内外的文献，其中有些内容未必完全符合当地的实际条件；有一些因为时过境迁，与现状可能不完全吻合，本书引用它们仅是出于方法学上的考虑，如果出现上述情况，还请读者见谅。

本书写作过程中，承蒙贾海峰、曾维华、徐明德和苏保林提供宝贵资料，为本书提供素材的还有王少平、信昆仑、荆平、姚荣、邓义祥、胡远安、王建平、郭茹、赵冬泉、欧志丹、龙瀛、董南、李纪宏、谭斌、郭羽、唐颖、李京峰等，仅此表示感谢。书中还引用了多位作者的数据和研究成果，也在此表示衷心感谢。

著者

2010 年 1 月



目录

第一章 拯救水环境 规划先行

1

第一节 水的反思	1	二、规划原则	25
一、水——人类文明的摇篮	1	三、规划依据	29
二、以怨报德，水污染积重难返	3	第四节 规划基本原理	32
第二节 水污染防治任重道远	10	一、大系统分解协调	32
一、水污染防治系统的组成	10	二、水环境承载力与水环境容量	34
二、规划的任务与目标	12	三、污染物总量控制	36
三、规划的一般方法	13	四、分散处理与集中处理	36
四、规划的类型与技术路线	16	五、“全部处理”或“全不处理”	38
第三节 水污染防治规划的依据	20	参考文献	40
一、规划要素	20		

第二章 水环境功能区与污染控制区

41

第一节 概述	41	五、海域水环境功能区	49
一、“水环境功能区”与“水功能区”	41	六、功能区目标可达性分析	50
二、各行其道，不利管理	42	第三节 水污染控制区	55
三、“联合区划，各自命名”值得提倡	43	一、定义	55
第二节 水环境功能区与水环境功能区划	44	二、控制区边界与小流域识别	55
一、定义与特征	44	三、饮用水水源保护区	56
二、功能区划分的原则	44	四、污染控制区与行政区	57
三、功能区划分的方法与过程	46	参考文献	57
四、功能区分类	48		

第三章 环境容量与允许排放量

58

第一节 概述	58	一、纳污能力与混合区	66
一、水环境质量与污染物排放的响应	58	二、河流纳污能力	66
二、从环境容量到允许排放量	59	三、湖泊水库纳污能力	70
第二节 水环境容量	59	四、河口纳污能力	72
一、基本概念	59	五、海域的纳污能力	72
二、环境容量的特征	60	第四节 允许纳污量与允许排放量	72
三、河流水环境容量	61	第五节 污染物允许排放量的分配	73
四、湖泊水库的环境容量	62	一、分配的原则	73
五、河口水环境容量	62	二、最优化方法	75
六、海域的环境容量	63	三、公平分配法	78
第三节 水体的纳污能力	66	四、合作博弈	85

五、排污权交易	89	算例	91
六、各种分配方法之比较	89	参考文献	93
附录：河流纳污能力（污染物允许排放量）			
第四章 水环境污染源解析	95		
第一节 污染源与污染物	95	一、陆地面污染源的特征	117
一、污染源及其分类	95	二、陆地面源发生量估算	118
二、污染物的分类	97	三、陆地面源污染物入河量估算	125
第二节 点污染源解析	98	第五节 大气干湿沉降与水体内源污染	128
一、点污染源的特征	98	一、水污染物的大气沉降	128
二、工业污染源解析	98	二、污染物在底泥中的积累与释放	130
三、城市生活污染源解析	101	三、投料网箱养殖污染	131
四、农村（业）点污染源解析	101	第六节 面污染源参数调查	133
五、交通污染源	104	一、流域地形及土地利用识别	133
第三节 点污染源预测	104	二、社会经济调查	136
一、废水量预测	105	三、现场试验	137
二、污染物排放量预测	114	附录：污染源估算算例	137
第四节 陆地面污染源估算	117	参考文献	141
第五章 水环境质量数学模型	143		
第一节 基本水质问题	143	第四节 二维河流水质模型	164
一、污染物在水环境中的混合过程	143	一、解析模型	164
二、生物化学分解	146	二、正交曲线坐标水质模型	165
三、大气复氧	147	第五节 河口水质模型	167
四、光合作用	148	一、河口水质特征	167
五、藻类的呼吸	148	二、一维解析模型	167
六、底栖动物和沉淀物耗氧	149	三、一维有限段模型	168
第二节 湖泊水库水质模型	149	第六节 海湾水质模型	169
一、湖泊水库的水质特征	149	一、近区模型	170
二、完全混合模型	150	二、过渡区模型	171
三、湖泊模型中的参数	152	三、远区模型	172
四、湖泊叶绿素浓度与营养物质的 关系	153	第七节 面源模型	174
五、湖泊的营养水平判别	153	一、概述	174
六、湖泊水库的生态系统模型	154	二、黑箱模型与灰箱模型	175
第三节 一维河流水质模型	157	三、面源污染的发生与迁移	175
一、河流的概化	157	四、黑箱模型	176
二、单一河段水质模型	158	五、灰箱模型	177
三、串联反应器模型	160	六、集中参数模型与分散参数模型	180
四、多河段水质模型	161	七、常用面源模型简介	180
五、含支流的河流矩阵模型	164	参考文献	184
第六章 水污染防治方案的建立	186		
第一节 点源污染防治的备用技术	186	一、城市污水处理	186

二、工业废水处理	192	第四节 水污染防治其他备用技术	220
三、畜禽养殖场的废水处理	194	一、跨流域（境）调水	220
四、污（废）水深度处理	195	二、择地排放	221
第二节 面源污染防治备用技术	204	三、“禁磷”、“限磷”	222
一、农村面源治理	204	四、监测预警	224
二、城市面源控制	210	第五节 水污染防治方案的生成	224
三、面源污染的综合治理-BMPs	212	一、方案生成的原则	224
四、底泥污染治理	214	二、方案生成的方法	226
第三节 节水减排技术	216	三、初始排污权分配策略考量	228
一、城市污水回用	216	四、方案生成的过程	230
二、工业节水	218	五、生成规划方案的约束条件	231
三、农业节水减排	220	参考文献	234
第七章 水污染防治规划的情景分析与决策分析	235		
第一节 情景分析概述	235	第三节 决策分析概述	251
一、概念与特点	235	一、决策与对策	251
二、情景分析的体系框架	235	二、决策分析的阶段	252
三、情景分析的步骤	236	三、决策分析的层次	253
四、情景分析的局限性	237	四、决策分析工具	254
五、情景分析与水污染防治规划	237	第四节 水污染防治规划决策分析方法	258
第二节 备选方案的全面评比	238	一、费用-效益分析	258
一、方案评比过程	238	二、多目标规划	263
二、水生态-环境影响分析	239	三、层次分析方法	268
三、经济影响分析	242	四、多准则决策分析（SMAT）	272
四、社会影响分析	247	参考文献	276
第八章 规划的编制、实施与案例分析	278		
第一节 规划编制与审批	278	五、鸭绿江下游水污染控制规划	288
一、编制阶段	278	六、沱江（内江段）水污染物总量	
二、组织	279	控制	292
三、审批	279	七、淮河水污染防治规划	
四、公众参与	280	（1995~2000）	293
第二节 规划实施与保障机制	280	八、赣江流域水污染控制规划	
一、流域协调机制	280	（2001~2010）	295
二、修订环境标准	280	九、佛山市水资源保护与水污染控制规划	
三、修订排污费征收办法	282	（2003~2020）	300
四、加强水质监测和污染源监测	283	十、太湖流域水污染防治规划	
五、公众参与	283	（2006~2010）	304
第三节 水污染防治及其规划案例	284	十一、南海区水环境保护规划	306
一、泰晤士河水污染控制	284	十二、美国 TMDL 计划	309
二、特拉华河口水污染控制规划	285	案例述评	313
三、琵琶湖的污染防治	286	参考文献	315
四、第一松花江水质规划	287		



第一章

拯救水环境 规划先行

第一节 水的反思

一、水——人类文明的摇篮

水是人类文明的摇篮，是人类文化诞生和发展的基础。水循环过程孕育了丰富多彩的生态系统，为人类文明的萌芽和发展创造了必要的条件。人类文明就是在水的哺育和营养下发展和渐进的。

（一）两河文明

公元前 4000 年以前，底格里斯河与幼发拉底河流域丰饶的美索不达尼亚盆地孕育了人类早期的游牧社会和农业社会，建立了早期的国家形式，发明了人类最早的楔形文字；制订了现代历法的雏形——太阳历；在数学上使用沿用至今的十进制和六十进制；城市建设和商业贸易也很发达。

（二）尼罗河文明

生活在丰饶的尼罗河两岸的古埃及人创造了最古老的拼音字母，成为西方拼音文字的基础，是对世界文明的重大贡献。古埃及人不仅很早就采用了十进制记数法，还初步掌握了分数的概念；在几何学方面，埃及人已经知道如何计算圆、矩形、三角形和梯形的面积，以及立方体、箱体和柱体的体积；大地测量学也很发达。古埃及在医学上也取得很高的成就，有很细的医术分工，解剖学、美容术及工艺品的制造技术都很高超。

（三）印度河文明

在印度河流域发现的马亨佐达摩遗迹和哈拉巴遗迹，标志着古印度城市建设与住宅建筑的高度成就。据考证，遗址始建于 5000 年以前甚至更早的年代。市区有四通八达的街道，房屋的建材是烧制过的砖块。最令考古学家惊异的是完整的排水系统：二楼冲洗式厕所的水可经由墙壁中的土制管道排至地下下水道，有的楼房还建有倾倒垃圾的管道。从各家流出的污水在屋外蓄水槽内沉淀以后再流入犹如暗渠的地下水道；地下水道纵横交错，遍布整个城市。印度河流域还是佛教的发源地，东亚的广大地区深受佛教经典的影响。

（四）黄河文明

黄河是中华民族的母亲河，黄河流域辽阔的平原和丰饶的物产为中华民族的发展奠定了基础。黄河流域水患频繁，自然条件恶劣，造就了中华民族坚韧顽强的性格。黄河文明将人类的农业文明发展到了登峰造极的地步，在人类文明的发展史上独树一帜。

黄河文明的形成期大体在公元前 4000 年至公元前 2000 年之间，这时邦国林立，出现了

城郭，农业生产社会化，手工业专门化，礼制规范化；贫富分化，阶级产生，文化艺术也有长足的发展。这时的黄河文明处于大交融的形成时期，可以称为邦国文明，也可以说是华夏文明的初级阶段。夏商周三代是黄河文明的发展阶段，在这一历史阶段，出现了父传子、家天下政权体制，形成了比较成熟的国家机构，制定了比较完善的礼乐制度，出现了比较规范的文字，科学技术、农业、手工业和商业贸易飞速发展，划时代的青铜文化闻名中外。影响中国几千年的道、儒、墨、法、兵、名等学派如雨后春笋般在河洛地区涌向社会，开创了中国学术界百家争鸣的黄金时代，当时所形成的学术思想至今还在影响着中华民族的发展进程。从秦汉到唐宋，是黄河文明的兴盛期，秦始皇统一六国，废封建，立郡县，车同轨，书同文，统一度量衡。中央集权的国体沿袭 2000 余年，期间得到不断的巩固和发展。先秦时期的儒家、道家等学说，在历代王朝都得到继承和发扬光大。天象历法、农学、地学、医学、水利、机械、建筑、冶炼、陶瓷、酿造、纺织、造纸、活字印刷等科学技术，都创造了历史奇迹；汉赋、唐诗、宋词、元曲以及书法、绘画、雕塑等，都攀登上文化艺术的高峰；尤其是四大发明（造纸、火药、指南针与活版印刷），对现代科学技术的发展有着不可估量的作用。留传后世的各类史书浩如烟海，记载了古往今来王朝兴替以及社会、经济发展的历史，是世界文化宝库。

（五）现代文明

如果说，人类文明的萌芽得益于流域提供的丰饶资源，是一种自然进化的过程，现代文明的出现则是人类主动向大自然的索取。现代文明的主要标志是社会化的大生产和大市场。物流和交通运输是现代文明的必要条件，为人类提供生活和生产资源的河流与河口港湾成了天然的运输孔道和商品的集散地，《清明上河图》记载的就是依托河流的商品经济发展初期的盛况。公元 16 世纪以后，起源于英国的工业革命，导致生产的飞速发展和财富的大量积累，制造业的发展需要寻找新的原料产地和开拓产品销售市场，促进了交通运输业，特别是海上交通的繁荣，许多河口地区逐渐发展成为世界上最繁华的大都会。

16 世纪以前，泰晤士河两岸以及英国其他地区还是广袤的农田和牧场。工业革命初期，水力是发展工业的主要动力，河流两岸成了首先开发的区域。蒸汽机的发明和应用，加速了工业革命的进程，伦敦的机械制造业、化学工业、金属加工业飞速发展。为了满足贸易与航海的需求，伦敦成了世界上最繁忙的港口，货物进出口量几乎占到世界的 1/3。随着工业和运输业的发展，伦敦的人口迅速膨胀，仅 19 世纪上半叶，伦敦的人口就从 100 万增加到 275 万。英国的主要工业基地曼彻斯特则在艾尔克河与梅德洛克河两岸建立了发达的纺织业、化学工业、机械制造业和造纸业等。

继英国工业革命以后，18 世纪的欧洲大陆开始了第二次工业革命，大批依托河流、海湾的城市雨后春笋般出现，如法国巴黎、马赛，德国的柏林、汉堡等。1861 年南北战争之后，美国开始了所谓的第三次工业革命，经济发展一日千里，纽约、费城、芝加哥等世界级城市出现在地球的西方。

依托大江大河和港口是近代经济发展的模式。我国的发展进程也不例外，近代的经济主要发展集中在长江流域和珠江流域。鸦片战争以前，长江流域还是遍布的农田和渔村，在洋务运动以后，上海、武汉等港口城市首当其冲，建立了实际意义上的现代工业，特别是上海，在短短几十年内发展成为工业、商业、贸易发达的城市，成为中国经济的龙头。上海的优势是依托广大的长江流域腹地和便捷的海上交通条件。改革开放以后，珠江三角洲异军突起，成为中国经济发展的窗口，以占全国 0.4% 的面积，创造了全国 9.7% 的 GDP（2008

年); 20 世纪 90 年代以后, 上海及长江三角洲的发展步入快车道, 2008 年, 长三角的 GDP 总量占同年全国的 20%。

珠江三角洲和长江三角洲是依托流域取得经济快速发展的例子。肥沃的土地和良好的灌溉条件提供了丰厚的农产品, 创造了优良的生活环境和人文环境, 为发展工业、服务业奠定了基础。广袤的腹地是资源、人才和劳动力的大后方, 便捷的海陆交通提供了原材料输入和产品输出的通道。这些使得三角洲地区成为财富和人口聚集的场所, 导致城市的发展和城市群的产生。

世界上任何地方, 人们都将哺育一方文明的河流称为“生命之河”、“母亲河”, 反映了人们对于大自然的感恩之情。

在一个很长的历史时期里, 手工操作一直是人类社会的主要劳动方式, 生产力水平低下, 大自然提供了充足的资源, 足以维持人类社会的再生产和缓慢、持续的发展; 大自然的自净作用完全可以净化人类社会产生的废弃物。自然环境常用常新, 人类社会生生不息。这时, 人类还没有完全脱离“自然人”的特征, 基本上还在接受大自然的赏赐和馈赠, 人与自然的关系是“量入为出, 永续利用”, 人类对于自然没有更多的非分之想, 人与自然能够和谐共处。

工业革命以后, 机器代替人工, 大工业取代了手工业, 生产规模和生产效率极大提高, 人类逐渐从“自然人”转变成“自由人”, 人类不再满足于大自然的恩赐, 而是不断地向大自然索取。随着生产力的提高, 人与自然的关系发生了微妙的变化, 从被动的与自然抗争变为主动地支配和掠夺大自然, 在与自然斗争中取得了一个又一个的胜利, 使得人类的头脑逐渐膨胀, “人定胜天”成了时髦的口号。无休无止的索取和掠夺, 藐视大自然的权威, 将自己置身于大自然的对立面, 使得我们所居住的地球百孔千疮, 而首当其冲的是河流水质的污染和流域生态与景观的破坏。

人们对“母亲河”的忘恩负义到了无以复加的地步。

二、以怨报德, 水污染积重难返

阳光、空气和水是人类赖以生存的须臾不可或缺的自然资源。人们从地面、从地下、从海洋汲取大量的水资源, 同时又将用过以后被污染了的水“回馈”到大自然, 以水作为载体, 将各种各样的废弃材料注入水体, 把河流变成了公共下水道, 把湖泊和海洋变成纳污的水池, 导致了水体的污染和水环境的破坏。

(一) 水污染概况

英国是现代工业文明的发源地, 也是最早出现水污染公害的国家。泰晤士河被称为英格兰的母亲河, 是 15~16 世纪英国工业发展最集中的地区。随着经济的发展和人口的集中, 泰晤士河除了提供丰富的水资源, 还承担了输送沿岸城镇排放的污水和污染物的任务, 这使得径流量本来就不大的泰晤士河逐渐显得力不从心。到了 19 世纪中叶, 仅伦敦市的人口已经达到 275 万; 纺织工业、化学工业、造纸业、机器制造业蓬勃兴起。大量的生活污水和工业废水未经任何处理, 直接排入河道, 泰晤士河穿过市区的河段及其下游河段都受到严重污染。19 世纪中叶, 伦敦到处是难闻的硫化氢气味。后来, 在泰晤士河两岸修建了污水截流管道, 将市区的污水输送到下游几十公里处的 Beckton 和 Crossness, 暂时缓解了泰晤士河伦敦段的污染。进入 20 世纪, 伦敦的人口激增, 到 30 年代末, 人口已经超过 800 万。随之而来的是泰晤士河水质的再次急速恶化, 位于 Beckton 和 Crossness 的两个集中的排污口每天排放的 BOD_5 负荷达 300 多吨, 致使河水出现完全的缺氧状态, 除了鳗鱼, 没有鱼类能在

此生存。

恩格斯的《英国工人阶级生活状况》^[1]写在英国工业革命取得辉煌成就的1845年，恩格斯对当时的水环境污染有过深刻的描写。他在写到流经利兹的艾尔河时说，“这条河像一切流经工业城市的河流一样，流入城市的时候是清澈见底的，而在城市另一端流出的时候却又黑又臭，被各色各样的脏东西弄得污浊不堪了”；离利兹仅7英里的布莱得弗德“位于几个河谷的交叉点上，靠近一条黑得像柏油似的发臭的小河”。流经曼彻斯特的两条小河——艾尔克河与梅德洛克河的污染状况亦十分严重。

莱茵河是欧洲一条流经多个国家的河流。莱茵河发源于德国西南部，流经瑞士、法国、卢森堡、荷兰等国注入北海。第二次世界大战结束后，德国开始了大规模的重建工作，蕴涵德国煤矿资源78%的鲁尔区成为了德国重建的“动力工厂”。大批能源、化工、冶炼企业和城市向莱茵河索取大量的工业与生活用水，同时又将大量的污废水排进莱茵河。一时间，莱茵河承受了“生命中不能承受之重”，不仅河水水质急剧恶化，而且周边生态也遭到了几乎是毁灭性的打击。20世纪70年代，德国美茵河汇入莱茵河的河口至科隆约200km的河段中，鱼类完全消失，局部地区水中溶解氧几乎为零！这条横贯欧洲流经7个国家的莱茵河被冠之以诸如“欧洲下水道”、“欧洲之厕所”等一堆恶名。

伊利湖是北美洲五大湖之一，面积5.5万平方公里，曾经是景美鱼丰的观光旅游胜地。由于沿岸美国和加拿大城市工业的发展和人口的扩张，20世纪60~70年代出现了严重的富营养化，厚厚的藻被覆盖湖面，死鱼随处可见，被称为“北美的死海”，“用作浇地太浓，用作耕地太稀”，饮用水的嗅和味都受到严重影响。主要原因是磷的过度排放，有机污染和化学品污染也很严重。20世纪60年代末，美、加联合着手伊利湖的治理；1972年制定了《大湖区管理协议》；1977年通过了限制含磷洗涤剂的法案；80年代末，两国成立了《大湖区管理委员会》。制定了水质指标体系，禁止排放有毒有害物质；控制城市、工业和农业污染；建设了大量环境工程。污染负荷大大减少，磷浓度已接近目标水平，溶解氧浓度则显著提高，底栖和浮游生物群落逐渐恢复。

我国自20世纪80年代以后，经济快速发展，水环境保护工作也取得很多成就，但水污染却日趋严重。根据2009年发布的环境状况公报，2008年，全国废水排放总量为572.0亿吨，比上年增加2.7%；化学需氧量排放量为1320.7万吨，比上年下降4.4%；氨氮排放量为127.0万吨，比上年下降4.0%。

2008年，全国七大水系水质总体为中度污染，浙闽区河流水质为轻度污染，西北诸河水质为优，西南诸河水质良好，湖泊（水库）富营养化问题突出。

长江、黄河、珠江、松花江、淮河、海河和辽河七大水系水质总体与上年持平。200条河流409个断面中，Ⅰ~Ⅲ类、Ⅳ~Ⅴ类和劣Ⅴ类水质的断面比例分别为55.0%、24.2%和20.8%。其中，珠江、长江水质总体良好，松花江为轻度污染，黄河、淮河、辽河为中度污染，海河为重度污染。

28个国控重点湖（库）中，满足Ⅱ类水质的4个，占14.3%；Ⅲ类的2个，占7.1%；Ⅳ类的6个，占21.4%；Ⅴ类的5个，占17.9%；劣Ⅴ类的11个，占39.3%。主要污染指标为总氮和总磷。在监测营养状态的26个湖（库）中，重度富营养的1个，占3.8%；中度富营养的5个，占19.2%；轻度富营养的6个，占23.0%。

从地域上看，水质较好的水域主要分布在河流的上游或人烟稀少的地方，流经城市或工业区的河流与湖泊都受到较重的污染。



（二）水污染特征

1. 污染影响地域广

水污染的地域范围与污染地点和污染强度有关，遭受污染的地点越是靠近流域上游、污染源强越大，污染影响的范围就越大。泰晤士河污染最为严重的时候，河水污染绵延上百公里；多瑙河的污染涉及多个国家，成为名副其实的国际污染河流；我国淮河几乎所有支流都受到严重污染，其影响范围几乎遍及整个流域（淮河流域面积 270000km²），干流水质污染物超标也很严重；辽河、海河以及太湖、巢湖和滇池流域的污染也是全局性的。

2. 污染持续时间长

由于水污染的成因、污染源和污染机理非常复杂，水污染，特别是流域性污染一旦形成，消除就非常困难，水质改善与污染源治理之间还有一个滞后过程。

泰晤士河的治理起始于 19 世纪中叶，1858 年，伦敦市规划在泰晤士河的南北两岸修建污水截流管道，到 1875 年基本建成，污水被输送到泰晤士河下游的 Beckton（北岸）和 Crossness（南岸）两个集中排放口，伦敦附近泰晤士河的水质有所改善。1887~1891 年间，在排放口附近建设污水处理厂，采用了化学沉淀法（石灰和铁盐）。由于处理程度低，处理后污水的生化需氧量（BOD）仍然很高，在潮汐作用下，污水在河口范围长期回荡，环境条件没有得到根本改善。第一次世界大战以后，伦敦的人口激增，随之而来的是泰晤士河水质的快速恶化，长达 30 公里的感潮河段完全缺氧。第二次世界大战以后，人们在泰晤士河的治理上达成共识：将恢复泰晤士河的生态功能作为环境治理的目标，必须满足鱼类回游对水质的要求，这就需要将当时的污染物排放总量削减 75%。应该说，将恢复河流的生态功能作为污染治理的目标，在河流环境治理上是一个革命性的观念转变。于是，伦敦市对原有的污水处理厂进行改建和扩建，采用活性污泥法替代原先的物理化学方法，大大提高了污水处理效率，并增加了污水脱氮工艺。几个阶段的改造过程持续到 1974 年。其后几年里，河水水质得以改善，出现了大型水生生物和鱼类。从 1858 年开始，到基本上恢复河流功能，泰晤士河的治理用了大约 120 年的时间。

上海市的母亲河苏州河的污染始于 20 世纪初，至 20 世纪 40~50 年代，河水开始发黑发臭，成为上海的“心腹之患”。90 年代开始，上海市采用污水截流、导流、增加稀释水流量、底泥清理、河道曝气等一系列措施，对苏州河进行综合治理，水质得到初步改善，河流景观得到一定程度的恢复。当然，如果将恢复生态功能列为治理目标，苏州河的治理还存在很大差距，水环境治理仍然任重道远。

20 世纪 60 年代时，淮河的水质还能够满足作为生活饮用水水源的要求。70 年代以后水质迅速变坏，到 90 年代大部分河段已经不能作为饮用水水源，20~30 年间，淮河的水质发生了质的变化。淮河两岸流传着这样一首歌谣：“50 年代淘米洗菜，60 年代洗衣灌溉，70 年代水质败坏，80 年代鱼虾绝代，90 年代拉稀生癌……”1994 年 7 月，淮河爆发了震惊国内外的流域性水污染事件，常年集聚在支流河道里的数亿吨污水在短时间内倾斜而下，淮河中下游的水质遭受严重污染，鱼虾养殖业几乎全军覆没，在长达几十天的时间里，居民的生活饮用水需要从外地用罐车输送，水介质传染病爆发。1994 年 7 月淮河污染爆发以后，中央和地方都痛下决心，投入财力物力，加强水污染治理，期望淮河水质能够在 2000 年变清。但是，进入 21 世纪以后，淮河水质非但没有变清，由于长期污染，淮河流域的生态系统进一步退化。2004 年，几乎与十年前同样的一场环境灾难再次降临淮河流域，说明流域水环境治理绝非易事，需要有长期的水污染防治战略规划和脚踏实地的治理措施。更为严重的问

题是，由于长期的水环境污染，导致流域的地下水水质逐步恶化，已经对以地下水为生活饮用水水源的广大居民的健康形成严重威胁，如果地下水污染进一步大面积恶化，居住在当地的数千万居民将无路可退，一场环境污染酿成的悲剧将难以避免。

3. 水质变化的季节性

对于一个水体，枯水期的水质污染主要来源于点源，丰水期则来源于点源和面源。相对于水文的季节性变化来说，点源污染物的排放在一年的时间周期内的排放比较稳定，水质的季节性变化的主要原因是降水及由降水引起的河流水文条件和面源污染物流失量的变化。如果将水质变化大致分为丰水期和枯水期，水文条件的周期性变化导致的水质变化有可能出现两种结果。①丰水期的水质优于枯水期。当流域的工农业生产发达、人口众多，但点污染源的治理设施和管理水平相对落后时，河流水质污染严重，降雨形成的地面径流有可能降低河流的污染程度，其表现就是丰水期的水质优于枯水期。②丰水期的水质劣于枯水期。当流域的工农业不够发达，点污染源排放很少时，平时河流水质比较好，地面径流带来的面源污染可能会导致水质下降。另外一种情况是：一个地区的经济很发达，但是点源的治理水平较高，面源治理相对滞后，枯水期的水体水质良好，地面径流带来的面源污染物有可能使得丰水期的水质恶化。

我国的经济发展处在现代化的初中期，工业经济持续高速发展，特别是第二产业的迅猛增长以及人口的不断聚集，导致城镇工业废水和生活污水的快速增长，污废水治理设施建设相对滞后，且管理水平跟不上，大多数流域（特别是流经城市的河段）的污染属于第一种类型，即河流的水质常年处于较差状态，当前流域水质改善的主要的目标是治理工业和城镇点源污染。随着经济的持续发展，农业、牧业、小型工商业在全国星罗棋布，化肥、农药的使用量激增，同时随着农村居民生活水平的提高，农村用水量和污水量也在持续增长，这些都会导致面源污染物流失量的增长。因此对面源的防治不能放松。

某些大型或超大型河流流经地区的经度或纬度差别较大，造成上下游之间的气象条件差异可能较大，当某些河段处于枯水期，上游某些地区可能已经进入丰水期，那么该河段的水质也有可能受到上游地区面源的影响。

对于湖泊和水库，特别是大中型湖泊和水库，由于其水文特点，水流在湖泊、水库中的停留时间较长，丰水期和枯水期污染物的积累与混合，使得水质变化的季节性特征不如河流中那么显著，也正因为如此，在对湖泊和水库进行水污染防治规划和管理时，点源污染物和面源污染物必须同时予以考虑。

4. 污染类型复杂

由于周边的经济结构复杂和人口大量聚居，流域污染存在多种多样的类型。一般来说，地域范围越广，所包含的污染类型越多，污染的综合性越高。按照污染物的性质，水体污染大体上可以分为下述几类。

（1）物理性污染 最典型的物理性污染是热污染和泥沙污染。在自然状态下，一个流域在一定的空间、时间范围内，水温的变化具有一定的规律，在这样的规律下形成了特定的生态系统，特别是水生生物的繁衍生息和新陈代谢，与水温的变化密切相关。热污染的原因主要是热电站等的冷却水排放，大量的废热排入河流，引起水温的变化。水温的变化会导致水生生态系统的变化，特别是对于珍稀水生生物的产卵、孵化和育苗影响更大。采用直流方式冷却发电机组的火力发电厂及其他生产工艺的冷却设备是热污染的主要污染源。

泥沙污染也是最常见的流域污染之一，泥沙污染的主要原因是植被的缺失和破坏，导致



降水冲刷并携带大量泥沙入河。黄河是世界上泥沙污染最为严重的河流，每年由黄河输送入海的泥沙量高达 10.8 亿吨，河水的平均含沙量达到 $25.4\text{kg}/\text{m}^3$ 。泥沙污染的最直接后果是河床上升、航道阻塞，也会引起水生生态系统的改变。

放射性污染是物理污染的另一种类型。放射性可能来自自然因素，也可能来自人为污染。放射性物质产生的电离辐射可以对人的体表产生照射，也可以通过食物和呼吸系统进入体内，产生内照射。很多放射性的半衰期很长，其危害特别严重。放射性损伤包括皮肤灼伤、皮炎、皮癌、白血病、再生性障碍性贫血，以及骨癌、肺癌等。除天然原因外，放射性污染的主要来源可能是核电站事故、医疗及研究单位等的放射性废水排放，也可能来自核武器的使用。由于其使用特点，放射性污染一般属于局地性污染；污染一旦发生，持续时间将很长。1986 年发生于苏联乌克兰境内的切尔诺贝利核电站泄露事件就是典型的例子。

(2) 无机物污染 无机物污染的种类很多，最常见者为矿物油类污染，无机酸、碱、盐类污染和重金属类污染。

矿物油以漂浮或乳化的形式存在于水中。矿物油污染不仅影响水面景观，阻碍水体复氧和影响光照，还会影响水生动植物的正常呼吸和运动，以至于窒息和死亡。矿物油污染主要来源于含油工业废水、船舶油料渗漏和压舱水的排放。

绝大多数天然水体中水的酸碱度处于平衡状态，pH 接近中性，适宜水生生态系统的正常运行。酸性或碱性废水的排放会破坏水体的酸碱平衡，影响水体的使用功能、影响水中金属的存在形态和水生生态系统的平衡。酸污染的主要来源是金属加工厂的酸洗废水、矿山的选矿废水、电镀废水，以及大气的酸沉降等；碱性废水主要来源于造纸废水、化工废水等。

污染水体的无机盐的种类繁多，除了重金属盐类以外，氰化物（如氰化钾、氰化钠等）的毒性极强；此外，硫化物、卤族元素化合物也都是强污染物。

重金属污染是水污染中最早引起人们重视并得到较好治理的污染。许多重金属是人体生长必需的元素，但是过多的重金属积累会对人体的呼吸器官、消化系统、神经系统、骨骼等产生损伤，甚至导致癌症。汞、镉、铬、铅、砷等是危害较为严重的几种重金属。重金属污染主要源自矿山、冶炼、化工、机械等行业排放的污水。

(3) 有机物污染 有机物污染是最普遍的污染类型，可以分为一般有机物污染和有毒有机物污染。

一般有机物包括含碳有机物和含氮有机物两大类，废水中最常见的有机污染物包括碳水化合物和蛋白质。碳水化合物被氧化以后生成二氧化碳和水，对水质的影响主要是消耗水中的溶解氧。蛋白质被水解以后生成氨氮，并进一步被氧化成亚硝酸盐和硝酸盐，蛋白质对水体的影响除了消耗水中的溶解氧，还增加水中营养物氮的含量，导致水体的富营养化，同时，氨氮氧化过程的中间产物亚硝酸盐是不稳定物质，有致癌作用。一般有机污染的主要来源是集中排放的生活污水、食品、化学工业废水以及来自面污染源的径流。磷是另一种受到广泛关注的营养物质，存在于自然界中的磷比较少，往往成为水体富营养化的制约因素，由于工业废水和生活污水，特别是农田排水中含有丰富的磷，致使水体富营养化的进程大大加速。有数据表明，全世界发生富营养化的水体数量与全世界的化肥（特别是磷肥）产量正相关。

有毒有机物是指对生物或人类能够产生直接毒害或毒性特别严重的一类有机污染物。一般的有机物对于人体健康并不具有毒性，或不至于引起人体直接中毒。但某些有机物对生命或人体健康具有很大的危害，例如致癌、致畸、致突变的“三致物质”，它们被通称为有毒