

# 水质规划法及其进展

杜宇国 叶常明

(中国科学院生态环境研究中心)

## 提 要

本文较为系统地概述了国内外水质规划法的研究现状、应用概况及今后的发展方向。

工业和城市的高度发展,使人类向河流索取的水量及排放的污染物数量均日趋增加。而近百年的污水处理实践证明,处理技术的发展和改进,并不能为污水处理带来明显的经济效益,在可以预见的将来,也不可能出现实质性的突破<sup>[1]</sup>。因此,单纯依靠大量兴建污水处理厂,不仅耗资甚巨,且不能达到预期的水质效果,必须同时考虑水体的天然自净能力,调节排污形式(包括位置和数量),调节河流使用功能等各种因素,争取以最小(较小)的投资代价获得最佳(较好)的水环境质量,统筹兼顾水体污染的控制,这就使它成为错综复杂、涉及面广的系统问题。

60年代系统工程学的兴起,推动了这方面的研究,逐渐发展成为跨学科的一个独立分支——水质规划,从而成为环境系统工程中的一个重要组成部分。

近年来,国内外的研究成果一致证明<sup>[1,2]</sup>,运用系统分析技术进行水质规划,可以节省大量的费用(包括基本建设投资和运行费用),一般都在10%以上。这对于耗资巨大的污水处理工程是一个可观的数目。在我们这样一个人口众多、经济还不很发达的国家里,利用有限的资金进行水污染控制,水质规划法就显得更加重要了。

## 一、研究现状

水质规划从60年代中期至今,经历了产生、发展及至成熟的过程,方法竞相更新。目前常用的水质规划法有以下几类:

### (一)关于确定允许排放量的水质规划

这是研究得最为成熟、应用最为广泛的一类水质规划方法。由于每个污染源所在位置的经济、技术情况各异,消除同样数量的污染物所花的代价也不尽一致。因此,各种处理程度的组合所对应的总费用是不同的。以最小的经济代价获取一定的水质,这正是水质规划所要研究的任务。其常用的数学模型可参见文献<sup>[1,3]</sup>,乃求解污染物去除率的最佳组合。这类问题的解法已经成熟,关键是将目标函数线性化,以常用线性规划或动

态规划法求解。

### (二)关于管道传输与择段排放的水质规划

某河段污染负荷过重时,有可能通过管道送走部分污水,使其排入另一段河道,以达到充分利用河段自净能力减轻污染之目的。这就是管道传输、择段排放的概念。它主要是通过污水入河流量的组合来满足水质要求。常见的规划模型见文献<sup>[3]</sup>。

这类模型多属于非线性规划,实用中常可根据具体条件及规划人员的经验,先增加一些人为规定,如规定某个污染源只能向某个河段排污等,则可大为简化求解过程。

### (三)关于污水处理量与输送量同时考虑的水质规划

这类水质规划是在各污水处理厂处理效率相同时,寻求最佳的处理水量的组合,且在目标函数中考虑不同地点间的输水费用。常见的这类模型可参见文献<sup>[1,4]</sup>。

此类模型的求解很困难,目前还只能将其化为线性规划求解。当节点较少时,可用“全部处理或全不处理”的策略简化规划模型;当节点较多时,则只能用整数规划或混合整数规划法求解。

### (四)关于区域最优化的水质规划

对于这种问题的建模及其解法,目前仍处于探索阶段。数学手段不够,计算机内存偏小以及某些因素的无法定量化,是其发展的主要障碍。该模型其实质是以上各类规划模型的综合考虑。若只涉及污水处理效率,处理规模及污水输送费用,则区域最优化水质规划模型可见文献<sup>[1,4]</sup>。上述形式的规划模型目前只有试探分解协调法来求解,如果考虑人工曝气、水量调控等,则模型更趋复杂。实际应用中,往往是固定若干个因素,只突出几个主要因素,尽可能简化模型,以利于求解。

### (五)流域污染控制的水质规划

流域规划的研究范围,是接纳水体(河流、湖泊或水库)所涉及的流域范围内的水污染控制问题。这类规划的主要目的,是确定应该达到或维持水体的水质标准,确认流域范围内应该控制的主要污染物和主要污染源,按使用功能要求和水环境质量标准确定各段水体的最大允许排污总量,最大允许排放强度和排放方式,计算出每个废水排放口的最大允许排放负荷,最终在综合考虑各种治理方案的技术、经济和环境效益的基础上,提出一个较优的或最优的水污染控制目标和实施方案。

## 二、应用概况

水质规划的出现及其发展,是环境工程与系统工程相结合的产物,它表明科学的规划论思想、先进的系统分析方法在环境工程中的应用,使得人类对河流污染控制的认识产生了一次飞跃。

西方国家如美国、英国、西德等,在其雄厚的经济条件的支持下,率先研制和使用水质规划方法。例如,美国纽约州长岛某镇,对污水处理系统进行了水质规划,对于原镇的一组(25个)废水处理厂,从其中可供选择的60万种方案中,应用优化模型,找出了最佳方案,效果很好<sup>[5]</sup>。

1972年,A. O. Converse<sup>[2]</sup>对美国新英格兰州的Merrimack河进行了最优规划,将18个潜在的污水处理厂优化为4个,节省了大笔投资。

美国特拉华河水质规划,是该领域最著名的应用实例。特拉华河流经费城等四座城市,全长590km,河口段长135km,该河在未受污染之前水质很好,盛产鲟鱼。20世纪以来,由于受到严重污染,年捕鱼量由1900年的13000t下降至1964年的40t,河水中的DO最低值在1mg/l以下,大量死鱼漂浮水面,大肠杆菌达10000个/m<sup>3</sup>,严重威胁着沿岸2100万人口的生活和健康。1964年,经美国总统约翰·肯尼迪批准,成立了“特拉华河流域综合治理委员会”,他们对河流的污染源和污染现状进行全面的调查和评价,认为要治理这条河流,必须控制和消除河中的有机污染物,提高河水中的DO水平。为此,根据河流各河段的污染现状和不同的要求,将整个河流分成5个区,规定各区有不同的水质标准。为了达到这个水质标准,他们利用水质规划法提出了一个投资少、收益大、技术合理的治理方案。其中包括污染物排放标准和各地污水处理的任务分配。从1968年起,他们开始实施治理措施,到1973年基本完成治理项目。1975年,该河的水质就达到了要求的标准。<sup>[6]</sup>

我国是一个疆域辽阔,水系众多的国家,随着工农业的发展,水体污染也日趋严重。在当今水资源缺乏的年代,消除污染,改善和提高河流水质就显得非常重要。为此,我们先后进行了松花江、湘江、黄浦江、鸭绿江、沱江等河流的水质规划,并取得了很多有益的经验。其中以松花江的水质规划工作较为典型<sup>[7]</sup>。

松花江是我国北方最大的平原河流,它在冰封枯水期的DO只有1mg/l,造成鱼类大量死亡。经调查和监测发现,生物可降解的有机污染物是导致水质恶化的主要原因。由于松花江沿岸有哈尔滨市等几大污染源,且排放的污水中含有大量的悬浮可沉有机物。所以,将松花江分成12个稳态均匀河段,应用修正的S-P模型,建立了水质改善程度与排污削减率之间的相互关系,进而明确了各河段的最大要求削减量,在综合考虑了时间、技术、经济、社会和环境诸因素后,选定了一组可行的DO分布及对应的各排污口最优削减率。规划结果表明,使松花江水质达到预定目标,按最优规划需处理费用1.3亿元,比排放口均匀处理节省近一倍资金。这显然是充分利用了河流自净能力的缘故。

从水质规划法发展的历史来看,它已经进入到实用性阶段,并在实用中不断发展,不断完善。如何尽快推广应用河流水质规划方法,使保护水体,维护良好的水环境质量工作,建立在更加科学、合理和主动的基础上,将是我们水质规划工作者面临的任务。

### 三、水质规划的发展方向

目前,大多数水质规划方案是针对单一的消除污染技术(如沿河设置废水处理厂)来进行的,因此采用线性规划或动态规划模型能得出其最优解。但是,著名的水质管理经济学者Davis和Kneese却指出:在水质规划中,应结合多种消除污染技术进行研究,对于这种问题,上述两种规划方法(线性、动态)就受到限制。为此,J.R.Mcnamara发展了一种求解此类问题的几何规划方法,它可以评价、选择各种消除污染的技术(包括废水处理、废水截流、河流流量调节、河流人工曝气等),从而得到整体最小费用,并可为整个工程的具体设计提供准则和技术要求。这种规划模型主要包括以下三个内容:

1. 将系统各河段的水质表示成不等式约束;
2. 将系统的决策变量表示为技术或法规的约束;

### 3. 将不同决策变量对费用的影响表示成系统的目标函数。

水质规划的主要目标是在最小的费用下获得最佳水质。在水质规划中所使用的主要工具是由系统分析得到的模型，而建立该模型的基础却是水污染动力学。因此，水污染动力学中有关污染物在水环境中的降解机制、反应级数的确定、以及各种影响因素的定量描述等，都对水质规划的发展有着制约作用。从水质规划理论的发展历史来看，历次水污染动力学理论的发展，都导致了水质规划理论准确性和实用性的进步。

传统的种种已趋成熟的最优方法大多只考虑单一目标优化问题，这适用于规划的优劣只须考虑某个主要指标的情况。但是，实际的水环境问题，常常需要同时考虑水环境容量、污水治理费用、水资源的合理利用等多个目标。因此，从70年代中期起，多目标规划被引入到水质规划中来。近十几年来，有许多学者对多目标规划问题进行了大量的研究和探索，提出了各种类型的求解技术，如效用最优化模型、罚款模型、目标规划模型、约束模型、递推模型、最小——最大模型、Pareto模型等。但是，在多目标规划中，规划人员需要依据各种参数或权系数进行计算。由于这些参数或权系数的不确定性和人为性，致使规划的结果亦含有某种不确定性。因此，如何使这些参数或权系数在水质规划中更加客观化，更加趋于实用化，将是今后水质规划工作的一个重要方面。

80年代后期，许多水质规划学者将“可靠性分析”引入水质规划模型中<sup>[8,9]</sup>，他们认为河流的水质是易变动的，这一方面是由于河流水文条件在年内或年际都是变化的，在雨洪时期变动更为显著，河流的水文条件存在着周期性和随机性的对立统一；另一方面是由于河流污染来源的不稳定性，例如“面源”中，农药和化肥的施放涉及农作物分布、季节和管理等都是变化的；“点源”中，工业和生活污水的排放也是变化的，存在着随机性。因此，水质规划采用定量标准时，就特别需要注意河流水质不同特征参数的自然概率。

流域内河水污染的减轻，除有赖于河道的天然自净能力外，在人工方面则有赖于系统内各污水处理厂的运转及排放标准。而废水处理的可靠性(稳定性)是和投资费用有关的。当然，废水处理的不可靠性原因很多，但核心问题是河流水文条件的变动性和投资费用及管理水平的限制。因此，可靠性分析要解决以下三个问题：(1)投资费用最小；(2)保持满意的最佳水质控制水平；(3)提出各污水处理厂的运转方案。由此得出的费用函数为目标函数，以下式为约束条件的水质规划方程：

$$P\{f(Q_1, \dots, y_1, \dots, q_1, \dots, x_1, \dots) \leq L_{max}\} \geq \alpha$$

式中： $Q_1, y_1$ 为上游来水的水量和水质； $q_1, x_1$ 为处理厂的排水量和排放水水质； $f$ 表示总控制点的 $BOD_5$ 函数； $L_{max}$ 为控制点的最大允许 $BOD_5$ ； $\alpha$ 表示控制点水质的可靠性要求。

如果从水质规划的实际情况出发，我们会发现：规划的目标和约束条件的边界都不十分清晰，其规划目标有一定的弹性，约束条件也不十分严格。如我国规划到公元2000年水质保护目标规定“大江大河流经城市河段达到三级至四级标准”，这一目标就具有很大弹性，即称之为模糊性。由于目标模糊，与其相关的污染物的削减率、治理费用投资等，也必然是模糊的。因此，要解决这个问题，使用环境模糊规划法，建立规划模型会更符合客观实际，其规划结果更具有实际意义<sup>[9,10]</sup>。

近几年来,水质规划的形式也日益完善,如美国康纳尔大学的 Peter N. French 等人<sup>[11]</sup>。利用计算机图形法进行水质规划(水资源规划),他们对水质规划的理论并没有做出什么贡献,但却使水质规划以崭新的面貌呈现在人们面前。他们的基本出发点是:认为传统的水质规划法输入数据和准备数据都很麻烦,且其结果的解释也不直观,如果用计算机图形法输入输出,则可解决上述困难,且大大增加人机对话的能力。康纳尔大学已经利用这种技术进行了水质预测和水质管理等4个规划问题。科学家们预计,这种省时省力的方法将会吸引更多的规划机构,使之能在更复杂的规划问题中大显身手。

纵观水质规划的历史,我们会发现在众多的水质规划内容中,唯独缺少非点源污染的水质规划问题,且能看出不论从理论上还是实用上,这部分内容都还不够成熟。

此外,水质规划还要受系统内经济、政治、社会风俗习惯等的影响,并不单纯是一个抽象的数学最优问题,它的有效性(即是否符合实际),在很大程度上取决于观测资料的质量及规划方案的具体实施过程,两者相辅相成,缺一不可。前者是自水质规划有史以来一直强调的问题,但直至今日,国内外有关这方面的成果仍未尽如人意,后者是水质规划发展到一定阶段才逐渐暴露出来的问题。Fiering等人<sup>[12]</sup>在对若干环保机构、专业人员及大量文献调研的基础上指出:各种模拟、优化技术在运用于水环境规划和管理时遇到了极大的障碍,其原因主要是规划者与决策者相脱离,相当多的规划人员提出的规划方案似只能在同行间进行技术交流,而很难由决策者采取有效的、可操作的行动。为了解决这一矛盾,使丰富的模型和优化技术能在实际中得到充分的应用,就必须调整这种规划——决策的关系,创立一种规划者——管理者——决策者能够相互沟通、相互理解、共同使用的规划程序。为此, Santos<sup>[13]</sup>等人于1987年决定着手开发具有交互式图形功能的 CAP 系统(Computer Aid Planning)以利用图形这种大众化语言,来达到上述目的。

从我国水质规划发展的实际情况来看,前些年的主要精力都放在了模型数据的准确度上,而较少考虑到方案与实际相脱节的情况。通盘考虑,我国今后的水质规划工作似应从以下几个方面进行:(1)基于国内现有的规划模型大都是从国外引入的,从我国的环保历史、监测水平及计算机设备普及程度来看,如何在符合国情的条件下简化或改进原有模型,将是国内水质规划领域中的一个重要发展方向;(2)在规划中建立和完善有关有毒有害物质的水质约束条件;(3)搞好全国范围内的水质监测及数据管理,为水质规划提供必要的资料;(4)着力于培养合格的水质规划人员,将其发展的可操作的水质规划技术及结果推荐、介绍给决策者;(5)建立规划对决策的跟踪服务体制,即当决策者按既定的规划方案实施时,规划者有义务进行跟踪指导直至实现预定目标;(6)集结少部分人才致力于研究和开发先进的水质规划技术、工具,以赶上世界先进水平。

总之,水质规划涉及到河流治理中的几乎所有方面,内容丰富而广博。今天它已与水资源规划、土地资源规划和城市发展规划等结为一个整体,成为一个复杂的、包含决策过程的多目标、多用途、多目的的系统工程问题。此外,线性规划、二次规划、几何规划、动态规划、非线性规划和网络、图论等基础数学理论及计算机应用的发展,都将会促进水质规划工作进入更准确、更实用的新阶段。

## 参 考 文 献

- [1] 付国伟, 程声通编. 水污染控制系统规划. 清华大学出版社, 1985, 1
- [2] Converse A O. Optimal number and location of treatment plants. *J WPCE*, 1972,(44):1692
- [3] 朱仲平. 水质规划的建立. 环境科学, 1981, (1)
- [4] 左玉辉编. 环境系统工程导论. 南京大学出版社, 1985, 89
- [5] Stiff M J. River pollution control. Eluis Horwood Limited, 1980, 335
- [6] Cecil H, J Hull. Delaware River Basin Water Resources Management. *J Water Resources Planning and Management Div. Proc of the ASCE*, 1978, 104(1)
- [7] 孟繁坚, 杨汝均编. 环境系统工程导论. 轻工业出版社, 1987, 299
- [8] Wen sen Chu et al. Numerical modeling of tide and current in Central Puget Sound: comparison of a three-dimension and a depth-averaged model. *Wat Resour Res*, 1989, 25(4): 721~734.
- [9] 陈治谏. 模糊最优方法在河流水质规划中的应用. 中国环境科学, 1989, 9(1)
- [10] 于连生等. 环境规划研究和中国 2000 年环境保护目标研究. 环境科学研究 (RES), 1989, 6
- [11] French P N. Water resources planning using computer graphics. *J Wat Res Planning and Management Div*, 1979, 105
- [12] Fiering M B. Use of system analysis in water management. *WRR*, 1986, 22(9)
- [13] Santos M A. Water resources planning — A research program. *Water Science Technology*, 1987, 19(9): 119~124

## Water Quality Planning and Its Evolution

Du Yuguo    Ye Changming

*(Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences)*

## Abstract

This paper summarizes the current situation, applications and evolution of water-quality planning in the recent years.