



流域空间属性关联模型 (SPARROW 模型) 理论方法与应用案例

LIUYU KONGJIAN SHUXING GUANLIAN MOXING
(SPARROW MOXING) LILUN FANGFA YU
YINGYONG ANLI

徐 敏 陈 岩 赵琰鑫 王玉秋 李 雪 / 主编

中国环境出版社

流域空间属性关联模型 (SPARROW 模型)

理论方法与应用案例

徐 敏 陈 岩 赵琰鑫 王玉秋 李 雪 主编



中国环境出版社·北京

图书在版编目 (CIP) 数据

流域空间属性关联模型 (SPARROW 模型) 理论方法与应用案例/徐敏等主编. —北京: 中国环境出版社, 2013.8
ISBN 978-7-5111-1424-2

I. ①流… II. ①徐… III. ①水质监测—流域模型—研究—中国 IV. ①X832

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 073623 号
审图号: GS (2013) 1662 号

出 版 人 王新程
责任编辑 黄晓燕 侯华华
责任校对 唐丽虹
封面设计 宋 瑞

出版发行 中国环境出版社
(100062 北京市东城区广渠门内大街 16 号)
网 址: <http://www.cesp.com.cn>
电子邮箱: bjgl@cesp.com.cn
联系电话: 010-67112765 (编辑管理部)
010-67112735 (环评与监察图书出版中心)
发行热线: 010-67125803, 010-67113405 (传真)

印 刷 北京盛通印刷股份有限公司
经 销 各地新华书店
版 次 2013 年 8 月第 1 版
印 次 2013 年 8 月第 1 次印刷
开 本 787×1092 1/16
印 张 17.5
字 数 400 千字
定 价 68.00 元

【版权所有。未经许可, 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

本书编委会

主 编 徐 敏 陈 岩 赵琰鑫 王玉秋 李 雪
编 委 刘光逊 刘茂辉 李 川 卢 蔚 曹芳芳
王 东 赵 越 姚瑞华 谢阳村 马乐宽
吴悦颖 杨文杰 刘伟江 路 瑞 赵康平
孙运海

前 言

随着环境污染的日益加剧,环境问题已经成为社会热点问题,也使得环境管理逐步走向了历史的舞台。尤其是在我国,流域水环境的管理更是刻不容缓,然而,我国流域水环境的管理起步较晚,很需要一个与我国基础环境数据现状相吻合而又值得大家信赖的流域模型。流域空间属性关联模型 SPARROW (SPAtially Referenced Regressions On Watershed Attributes) 以其数据量要求适中、应用广泛、操作简便、功能多样等特点,正逐步受到国内专家、学者以及环境管理部门的青睐。

SPARROW 模型源于美国,并在美国进行了广泛而深入的应用。SPARROW 模型把流域内的污染源、影响污染物传输的空间属性与河流湖库水质联系起来,实现污染物的来源解析、传输因子的识别、水质的评估与预测等功能。该模型在 SAS 平台下运行,所需数据分为河网数据、监测数据、空间属性数据以及污染源数据 4 大类数据,输出结果包括描述模型本身的评估结果和描述模型输出数据的预测结果,借助模型的输出结果可以进行污染物空间分布分析。

本书图文并茂、翔实地介绍了 SPARROW 模型的应用案例,可以为 SPARROW 模型的研究应用者提供参考。全书共分为六章:第一章“绪论”主要介绍了流域的属性、流域的污染与管理以及流域管理的技术方法;第二章“SPARROW 模型的原理方法”简单地介绍了 SPARROW 模型的原理方法和操作,包括模型的原理、结构、功能、特点、评估、预测、输入、运行、输出等;第三章“SPARROW 模型在美国地区的应用”首先对 SPARROW 模型的应用进行了简要的概述,随后介绍了 SPARROW 模型的两个应用案例——在美国全国的应用和美国切萨皮克湾(Chesapeake Bay)的应用;第四章“SPARROW 模型输入数据在我国的获取”主要介绍了使用 ArcHydro、ArcGIS、NANI 等技术

软件在我国 (以松花江流域为例) 获取 SPARROW 模型输入数据的方法; 第五章 “SPARROW 模型在我国松花江流域的应用研究” 主要介绍了 SPARROW 模型在松花江流域的数据输入、模型运行以及模型输出结果的分析与可视化表达, 以此可以为 SPARROW 模型在我国的应用提供技术参考; 第六章 “结论与展望” 主要对全书进行了总结, 并对 SPARROW 模型在我国的应用提出了进一步的研究方向; 附录中提供了切萨皮克湾总氮 SPARROW 模型运行程序、运行日志和操作指南。

限于作者能力和资料掌握的程度, 本书对 SPARROW 模型应用案例的介绍难免会有疏漏不当之处, 请各位读者和有关专家批评指正。

编 者

2012 年 8 月

目 录

第一章 绪 论	1
第一节 流域概述	1
第二节 流域水环境污染及管理	4
第三节 流域水环境管理的技术方法	9
第二章 SPARROW 模型的原理方法	13
第一节 模型的原理与结构	13
第二节 模型的功能与特点	31
第三节 模型的评估与预测	41
第四节 模型的输入、运行与输出	50
第三章 SPARROW 模型在美国地区的应用	53
第一节 SPARROW 模型应用概述	53
第二节 SPARROW 模型在美国全境的应用介绍	56
第三节 SPARROW 模型在美国切萨皮克湾地区应用介绍	76
第四章 SPARROW 模型输入数据在我国的获取	95
第一节 基于 ArcHydro 的数据获取	95
第二节 基于 ArcGIS 的数据获取	108
第三节 基于 NANI 的数据获取	127
第五章 SPARROW 模型在我国松花江流域的应用研究	132
第一节 松花江流域介绍	132
第二节 模型数据输入	135
第三节 模型调试与运行	151
第四节 模型结果输出与分析	157
第六章 结论与展望	197
参考文献	198

附 录	210
附录一 切萨皮克湾总氮 SPARROW 模型运行程序	210
附录二 切萨皮克湾总氮 SPARROW 模型运行日志	220
附录三 切萨皮克湾总氮 SPARROW 模型操作指南	263

第一章 绪 论

水是人类赖以生存和发展的基本条件，水环境质量的优劣直接关系到人类的生命健康。《2011 中国环境状况公报》显示：“2011 年，全国地表水总体为轻度污染。湖泊（水库）富营养化问题仍然突出”，“长江、黄河、珠江、松花江、淮河、海河、辽河、浙闽片河流、西南诸河和内陆诸河十大水系监测的 469 个国控断面中，Ⅰ～Ⅲ类、Ⅳ～Ⅴ类和劣Ⅴ类水质的断面比例分别为 61.0%、25.3%和 13.7%”。可见，我国水环境的保护和污染治理依旧任重而道远。

流域作为水环境组成的基本单元，已逐渐成为实施水环境污染防治和水环境综合管理的着手点。而流域模型以其经济性、时效性和预见性逐步成为流域水环境综合管理的重要工具之一。现在，我国在流域尺度模型方面的开发和应用还处于起步阶段，从国外引进一些应用较为成功和成熟的流域模型，并使之逐步实现中国化，不失为我国流域模型发展的一个出路。

第一节 流域概述

一、流域的定义

流域是以河流为中心被分水岭包围的区域，是一种典型的自然区域，在地域上有明确的边界范围。《辞海》中提到：“流域是指地表水及地下水分水线所包围的集水区域的总称。习惯上常指地表水的集水区域。根据地形图上的分水线，可以定出流域边界，此范围内的面积，称为流域面积。”而《中国大百科全书》中对流域的定义为：“由分水线所包围的河流集水区。”依据地理特征，流域是指水系的集水区域，是具有水文功能的连续体。依据景观生态学理论，流域是以河流为廊道，由“山地—平原—主河道/湖库”等斑块所组成的空间联合体，是人类生存的基础。

流域是由水系和坡地组成的。水系是指流域中大大小小的河流交汇形成的树枝状或网状结构。自然形成的水系多为树状结构，人工开挖形成的平原水系为网状结构。坡地是指流域中水系以外的陆域部分。一般而言，除了平原水网地区外，一个流域的水系面积约占整个流域面积的 10%，其余的则为坡地。流域内最为常见的自然现象是水循环，包括自然水循环和社会水循环。自然水循环依靠自然力完成水资源的不断更新，而社会水循环指人类为生产生活之需从天然水中取水，用过之后再返回到天然水中的人工循环。

二、流域的功能

流域的功能有以下几点:

(1) 涵养水源。流域可以截留大量的降水,并使之存储在地下成为地下水,即可以为流域的各种生物提供水源,同时还可以减轻洪涝灾害,满足河流的生态需求,进而形成多姿多彩的生态结构。

(2) 水体净化。流域为河流的流动提供了基础条件,在水的流动过程中,通过物理、化学、生物作用可以降解水中的污染物,从而使水体变得清洁。

(3) 保持近地大气层热量平衡。地球接受太阳辐射的大量热量,使得近地层温度升高,而这些热量主要通过水分的蒸发而消耗,进而保持近地大气层的热量平衡,维持适合人类和其他生物生存的温度。

(4) 维持生态系统功能。流域中包含了丰富的水体,孕育了丰富的生态系统,这些生态系统可以通过生物间的关系维持生物物种的不断繁衍和进化,并保持生态系统的稳定性。

(5) 维护人类社会的发展。流域为人类社会的发展提供了各种资源,保障了人类文明社会出现以来数千年的不断进步和发展,同时也形成了文化资源、景观资源等。

三、流域的特点

流域的特点有以下几点:

(1) 整体性和关联性。在流域中,其内的各种自然要素(山川、河流、湖库、湿地、平原等)密切地联系在了一起,同时在河流网络的连通下,上中下游、干支流各地区间的相互制约、相互影响也很显著。例如,如果上游过度开垦土地、乱砍滥伐、破坏植被,造成水土流失,不仅使当地农林牧业和生态环境遭到破坏,还会使河道淤积抬高,招致洪水泛滥,威胁中下游地区人民生命财产的安全和广大地区的经济建设。同样,在水资源缺乏的干旱、半干旱流域,如果上中游筑坝修库,过量取水,就会危及下游的灌溉乃至工业、城镇用水,影响生产的发展和生活的需要。

(2) 区段性和差异性。流域特别是大流域,往往地域跨度大,构成巨大横向纬度带或纵向经度带。上中下游和干支流在自然条件、自然资源、地理位置、经济技术基础和历史背景等方面均有较大不同,表现出流域的区段性、差异性和复杂性。我国长江和黄河两大流域横贯东西,跨越东、中、西三大地带,存在着两个互为逆向的梯度差。一是资源占有量或枯竭程度的梯度系列,包括矿藏、水能、森林、土地资源等;二是经济实力和经济发展水平的梯度,包括资金、技术、劳动力素质、产业结构层次等。从上游到下游,资源的拥有量越来越少,而社会经济发展水平则越来越高,形成了资源分布重心偏西,生产能力、经济要素分布偏东的“双重错位”现象。

(3) 层次性和网络性。流域是一个多层次的网络系统,由多级干支流组成。一个流域可以划分为许多小流域,小流域还可以划分成更小的流域,直到最小的支流或小溪为止。由此形成小流域生态经济系统,各支流生态经济系统,上游、中游、下游生态经济系统,全流域生态经济系统等。

(4) 开放性和耗散性。流域是一种开放型的耗散结构系统,内部子系统间协同配合,同时系统内外进行大量的人、财、物、信息交换,具有很大的协同力,形成一个“活”的、

有生命力、越来越高级和越来越兴旺发达的耗散型结构经济系统。

四、流域空间属性

(一) 水文要素

水文要素决定了水体的结构(河网结构)及变化程度(流量流速等),构成了整个流域的水体基底条件。

1. 河网结构

河网是污染物的载体,并且直接导致了污染物在流域内的传输。数字化的河网更是流域模型的基础要素。表征河网的基本属性包括:河段编码、上游节点编码、下游节点编码、分流比例、河段类型、河段级别、河段长度、是否为起始河段、河段子流域面积等。同一流域内,所选河段级别不同以及数据精细程度不同,可能有不同的河段拓扑结构。随着GIS技术的进步、数据量的翔实,可以得到更细致的河网结构,从而进行更精细的模型模拟。

2. 流量流速

河段的流量是流域污染物负荷的重要影响因子。一方面由降水产生的径流将非点源污染物带入河段,另一方面大流量的汇水增加了河段中水的体积,可能有一定的稀释作用。

河段流速除河段长度即该河段的水力保留时间。水力保留时间是影响污染物在河段传输过程中降解的重要影响因素。由于很多模型模拟中,将污染物降解近似假设为一级反应,水力保留时间几乎是降解量的唯一影响因子。

(二) 气象要素

气象要素是流域水力变化、输送的主要驱动力。结合文献研究以及数据获取可行性,把温度和降水作为代表性气象要素。

1. 温度

温度是影响化学反应动力学参数和热力学状态的重要因子,对污染物在流域中的沉降、蒸发、生物反应等地球化学行为有重要影响。如温度升高可加快总氮的固定,对总氮在流域中的传输呈明显负相关;溶解氧、高锰酸盐指数与温度呈负相关;此外,温度变化可引起风的变化,而风是河流的重要驱动力,所以温度是模型架构中的重要因子,然而有时模拟流域面积较小时,由于子流域间温度差异不明显,可能导致温度系数不具有统计学显著性。

2. 降水

降水是流域内地表径流的重要来源,是非点源污染的主要入河途径。国外模型研究表明,降水强度与总氮的传输呈正相关,与总有机碳(TOC)传输亦呈正相关;我国研究也证实在降水较多的丰水期,化学需氧量(COD)浓度较高。此外,在某些地区,降水中的污染物(如氮的湿沉降)也是影响较大的污染源之一。

(三) 地形要素

地形要素中的代表性指标为坡度和坡向。坡度是地面特定区域高度变化比率的量度,描述地形斜坡的倾斜程度;坡向为该点切平面上沿最大倾斜方向的矢量在水平面上的投影

方向,反映了斜坡所面对的方向。坡度代表了形成径流的难易程度,有文献表明,坡度与总氮传输呈正相关,与 TOC 传输呈负相关;坡向反映了该区域的汇水方向,对水流方向确定、汇流量的计算有重要意义。

(四) 下垫面要素

1. 土壤类别

土壤类别是在深入研究聚合土体发生发育、土壤系统发育与演替规律的基础上,根据土壤不同发育阶段所形成的性状和特征,对土壤圈中的各异聚合土体所做的科学区分。不同类别的土壤在粒径构成、物理化学成分、水分保持能力、渗透性等方面体现出不同的特征,而上述诸方面是污染物迁移转化的影响因子,如土壤渗透性对总氮及 TOC 的传输均呈显著的负相关,所以,土壤类别是污染物传输的重要影响因素。

2. 土地利用类型

土地利用类型指的是土地利用方式相同的土地资源单元,是根据土地利用的地域差异划分的,是反映土地用途、性质及其分布规律的基本地域单位。我国土地利用类型大体分为耕地、林地、草地、水域、城市用地、其他用地 6 大类。国内外案例研究表明,土地利用类型对污染物的影响是明显的,而且不同土地利用类型显示出不同程度的作用,如湿地对总氮有很强的“过滤”作用,可降低其传输。在一些流域模型中,土地利用类型的比例可以作为污染源来考虑,如 TOC 的模拟中,认为湿地贡献率最高,余下依次是城市用地、混合林地、耕地等。遥感技术的进步,为大流域的土地利用类型数据的提取和更新提供了极大的便利,与土壤类别相比,土地利用类型具有更精细的数据,使其越来越成为流域水环境分析与模拟的备选因子。

第二节 流域水环境污染及管理

人类历史上最重要的事件多发生在河流的两岸。在埃塞俄比亚阿瓦什河(Awash River)发现了我们最早的人类祖先化石残骸。大约在公元前 3 000 年,在尼罗河、底格里斯河—幼发拉底河、黄河和印度河 4 大流域,出现了人类最初的文明。正因为流域与人类的关系如此密切,所以才导致了人类与流域之间的相互影响。当初人们只是适当地索取流域各种资源,但当我们的入口超过了流域的承载力时,人们的索取便变成了对流域的一种伤害,表现最为突出的就是流域的水环境污染。尤其是我国,近几十年一直处在经济高速发展时期,经济繁荣的背后却是流域污染的不断加剧,而流域的污染也严重威胁到了经济的健康发展,如何对待经济发展和环境保护的矛盾问题,已经成为我国不得不面临的难题。

一、流域水环境污染

我国现阶段水环境污染具有特殊性质。一方面以氮、磷、重金属等为代表的传统污染物尚未得到有效控制,在某些地区污染形势甚至有进一步恶化的可能;另一方面以药物与个人护理品(Pharmaceuticals and Personal Care Products, PPCPs)、内分泌干扰物(Endocrine Disrupting Chemicals/Compounds, EDCs)等为代表的新型污染物正持续进入水环境中,与

传统污染物共同构成复杂的复合污染体系。区域发展不平衡、不同地区产业结构差异较大、多种污染形式并存的现状导致我国水环境管理、治理难度较大。

目前我国水环境状况表现为以下两个方面：

(1) 我国水环境总体形势依然严峻。《2011 中国环境状况公报》所显示的 7 大水系环境情况如下：“长江水系水质总体良好，94 个国控断面中，Ⅰ～Ⅲ类、Ⅳ～Ⅴ类和劣Ⅴ类水质断面比例分别为 80.9%、13.8%和 5.3%；黄河水系总体为轻度污染，主要污染指标为氨氮、化学需氧量和五日生化需氧量，43 个国控断面中，Ⅰ～Ⅲ类、Ⅳ～Ⅴ类和劣Ⅴ类水质断面比例分别为 69.8%、11.6%和 18.6%；珠江水系水质总体良好，33 个国控断面中，Ⅰ～Ⅲ类、Ⅳ～Ⅴ类和劣Ⅴ类水质断面比例分别为 84.8%、12.2%和 3.0%；松花江水系总体为轻度污染，主要污染指标为高锰酸盐指数、总磷和五日生化需氧量，42 个国控断面中，Ⅰ～Ⅲ类、Ⅳ～Ⅴ类和劣Ⅴ类水质断面比例分别为 45.2%、40.5%和 14.3%；淮河水系总体为轻度污染，主要污染指标为化学需氧量、总磷和五日生化需氧量，86 个国控断面中，Ⅰ～Ⅲ类、Ⅳ～Ⅴ类和劣Ⅴ类水质断面比例分别为 41.9%、43.0%和 15.1%；海河水系总体为中度污染，主要污染指标为化学需氧量、五日生化需氧量和总磷，63 个国控断面中，Ⅰ～Ⅲ类、Ⅳ～Ⅴ类和劣Ⅴ类水质断面比例分别为 31.7%、30.2%和 38.1%；辽河总体为轻度污染，主要污染指标为五日生化需氧量、石油类和氨氮，37 个国控断面中，Ⅰ～Ⅲ类、Ⅳ～Ⅴ类和劣Ⅴ类水质断面比例分别为 40.5%、48.7%和 10.8%。”因此，总体来看我国水环境保护和水污染治理的任务依然很重。

(2) 突发性水环境污染事件时有发生。近年来发生的部分影响较大的水环境污染事件见表 1-1。水环境问题不断地刺激着公众的神经，同时水环境保护得到了国家的日益重视，与自然环境和谐相处的科学发展观亦应运而生，我国水环境保护的理念也正在与发达国家保持同步。

表 1-1 近年来重大水环境事件概览

年份	地点	原因	后果
2005	吉林、黑龙江	新苯胺装置发生爆炸	松花江水污染
2006	广东吴川	企业非法排污	大量鱼虾死亡，威胁 4 万人饮用水
2007	太湖	蓝藻暴发	城市自来水严重异味
2008	湖南怀化	硫酸厂排污污染地下水	65 人中毒
2009	内蒙古赤峰	供水污染	4 300 多居民受影响
2010	福建汀江	紫金矿业酮酸水泄漏	汀江部分水域严重重金属污染
2011	云南曲靖	大量铬渣倒入水库	铬严重超标，当地大批牲畜死亡

二、流域水环境管理

流域包括一个水系干流和支流流过的整个地区，它涉及一个完整的水系，以及与之密切相关的地下水、土壤、大气等环境要素。流域环境的复杂性客观上要求对流域进行统一管理。流域管理是一个复杂的过程，涉及工业、农业、畜牧业等各行各业与水土资源开发和利用有关的领域和部门，目的是为了充分发挥流域自然资源的生态效益、经济效益和社会效益。流域水环境管理就是在全面规划的基础上，以流域为单元，合理安排各行业用地

用水，因地制宜地采取综合管理措施，保护、改良和利用水土资源。

（一）国外流域水环境管理

1. 美国水环境保护发展历程

美国水环境管理政策形成的历史，体现了各种复杂的相互作用因素对水环境和人民的影响。今天水环境政策的形成基于过去政策和发展的历程，受控于经济、政治和公众意识等多方面因素，对我国水环境管理政策的制定有借鉴意义。

美国水环境管理发展的历程及重要节点见表 1-2。

表 1-2 美国水环境管理发展的历程及重要节点

发展阶段	重要节点	
	时间	代表性事件
起步阶段 (1948—1969)	1948	首部《水污染防治法》，联邦开始资助州管理，实施合作行动
	1956 1961	分别修订《水污染防治法》，增加财政支持，州规划由联邦审批
	1965	《水质法案》要求各州制订水质标准，实施基于水质的排放限制
	1972	《清洁水法》赋予联邦管理水体的权力，主要实施基于技术的排放限制（NPDES），联邦技术和资金支持并监督州管理
发展阶段 (1970—1990)	1974	《安全饮用水法》颁布，要求联邦制定两级的饮用水标准，进行研究和管制可能污染饮用水的行为
	1977	《清洁水法》修订，增加有毒污染物、前处理计划
	1986	《安全饮用水法》修订，细化饮用水标准，并要求各州实施井源保护计划
	1987	《水质法案》修订，要求各州制订非点源计划，提倡实施基于水质的管理计划（TMDL），实施清洁水循环基金计划，为各州提供贷款
	1996	《安全饮用水法》修订，提出水源保护计划、污染物更新清单制度，并拓展公众参与
成熟阶段 (1990 年至今)	1998	提出清洁水行动计划，正式推广流域管理，继续非点源治理，拓展公民知情权
	2001—	国家水资源（湖泊）调查及评估项目

由表 1-2 可见，美国的水环境管理以两大水法体系为支撑，以水质标准为基础，由相对分散的点源治理走向流域管理。同时，美国有较完备的技术、基金、法律保障体系：

- 基于模型的日最大负荷量计划实施与评估工具、敏感性判定工具、水源地划分工具及潜在污染源清单工具等使美国水源地保护和治理工作具有相当高的技术可靠性和实际可操作性；
- EPA 饮用水源地专款、安全饮用水法基金、清洁饮用水法基金、污染防治专款、州环境保护基金等多项专项拨款和基金集成赞助方式为水环境保护提供充足的资金保障；
- 以清洁水法和安全饮用水法为基础的法律体系赋予了环保部门强大行政权力，明确了法律责任，保障水环境保护工作顺利进行。

2. 欧洲水环境保护发展历程

由于欧洲国家面积相对较小，同一条河流流经多个国家的现象比较普遍，20 世纪以来，由水环境污染导致的国家之间冲突的现象也时有发生。20 世纪 60 年代以来，欧共体（90 年代为“欧盟”）组织实施了历次环境行动规划以及颁布了一系列法律、指令，协调各成员国之间的关系，使水域利益相关各国经过“冲突—协商—合作”的过程达成共识，实现了跨国的水环境管理。欧洲的水环境保护发展历程对我国跨行政区的水环境管理有很好的借鉴意义。

欧洲水环境保护发展历程见表 1-3。

表 1-3 欧洲水环境保护发展的历程

发展阶段	重要节点	
	时间	事件
萌芽阶段 (20 世纪 60 年代)	1956	英国的《清洁饮用水法》，“末端治理”
	1964	法国《水法》，“末端治理”
起步阶段（20 世纪 70 年代至 80 年代中期）	70 年代至 80 年代前期	欧洲水环境法的制定以欧共体第一、第二和第三环境行动计划的内容为指导，提出重视污染预防工作，强调共同体在环境领域应发挥国际作用，将水污染置于环境保护的首位
	1976—1980	颁布了 7 个水法指令，对各行业的用水制定了标准，涵盖了从化学污染物到微生物参数的各种水质标准
发展阶段（20 世纪 80 年代后期至 90 年代初）	80 年代中期至 90 年代初	以欧共体第四个环境行动计划内容为指导，规划使用多种介质方法、直接针对污染源的方法等对待污染，并建立严格的环境标准
	90 年代	欧盟水法的 3 个指令目标是控制城市废水、工业排污和农田排污的影响。这些指令的出台掀起了修建污水处理热的热潮，同时也对工业污染排放采取严格的许可证制度并征收污染排放费
成熟阶段（20 世纪 90 年代中期至今）		欧盟第五和第六个环境行动计划确定可持续发展环境目标。为解决日益严重的水环境问题，改善现有环境指令的局限性，整合各指令建立了新的欧盟水框架指令（WFD）。WFD 其主要目标是通过一个流域管理制度，到 2015 年时使欧洲水体达到“良好状态”的目的

由表 1-3 可见，欧洲水环境管理走过了由“末端治理”到流域管理的历程，建立了以全流域生态学水质“良好”为核心目标的跨行政区域饮用水管理与协调模式。在此期间，一系列法规、指令的颁布，以及合理的环境标准（如饮用水源地地表水指令规定了 46 种监测指标，并对每一指标制定了 A1、A2、A3 的三级标准，每一级标准分别包含了非约束性的指导控制值和约束性的强制控制值两档；制定了在发生自然灾害等特殊极端条件下的应急标准，对某些指标在特殊条件下可以免除强制控制。三级两档的多尺度标准和直接针对各指标的多因素豁免制度适应多区域、非均衡复杂水体管理需求）起到了很重要的支撑作用。

（二）我国流域水环境管理

我国流域水环境管理目前尚处于发展阶段，与美国和欧洲相比，我国水环境管理起步

较晚,大体分为以下3个阶段:

(1) 萌芽阶段(20世纪80年代以前)。20世纪50年代及60年代,国家的主要目标为恢复和发展生产力,经济建设,尤其是发展工业成为主要工作。然而,“大跃进”的战略以及一味追求“高产值”而大办工业特别是“五小”企业的举措,使水环境问题开始产生并发展。20世纪70年代,水环境问题逐渐引起国家的关注。1973年,首个环保标准《工业“三废”排放试行标准》试行实施;1979年,环保领域的第一部法律《环境保护法(试行)》颁布施行,确立了国家环境保护的基本方针和政策。

(2) 起步阶段(20世纪80年代及90年代前期)。此阶段是我国经济社会形势发展相当好的一个时期,我国水污染防治工作也得到了快速发展。1984年颁发的《水污染防治法》是水污染方面的专业性法律,使我国水污染防治工作有了坚实的法制基础。大量综合性标准及多个工业行业排放标准的颁布实施,初步构建了水环境保护的法规体系。1992年联合国环境与发展大会后,我国政府秉承“可持续发展”思想,率先制订了可持续发展行动计划——《中国21世纪议程》,确立了中国的可持续发展战略。但是,这个历史时期我国的水污染防治工作偏重于工业污染防治,城市生活污水处理和流域区域污染源的综合防治尚未受到重视。

(3) 发展阶段(20世纪90年代后期至今)。进入21世纪后,我国发布了《国务院关于落实科学发展观 加强环境保护的决定》,强调要把环境保护摆在更重要的战略位置,统筹考虑社会经济、人口、资源与环境保护发展的关系。2006年第六次全国环境保护大会针对经济发展与环境保护的关系,提出了新形势下的环保工作关键是要加快实现“三个转变”,反映出我国政府对经济社会发展与环境保护的关系有了深刻的认识。2008年提出了“让江河湖泊休养生息、恢复生机”。

此阶段是我国流域水污染防治规划制度产生和发展的时期。1994年以治理淮河为先导,开展了“三河、三湖”重点流域的水污染防治,并制定了重点流域水污染防治“九五”计划。截至目前,除“三河、三湖”外,三峡库区及其上游、松花江和黄河中上游等流域相继被列入重点流域范围,并已经历了3个“五年”计划,以城市污水处理厂建设等一批水污染治理项目为依托,以化学需氧量总量控制为抓手,重点突出饮用水源、跨界水体等敏感地区水污染防治工作,明确地方政府对当地水环境负责。我国在“十二五”规划中明确指出:“继续推进重点流域和区域水污染防治”,基于流域的水环境综合管理是我国水环境管理的发展方向。

经历了这3个阶段,我国在流域水环境管理方面做的工作主要可以归结为以下3点:

① 先后恢复或成立了长江水利委员会、黄河水利委员会、淮河水利委员会、珠江水利委员会、海河水利委员会、松辽水利委员会和太湖流域管理局7大流域机构;② 出台了《中华人民共和国水污染防治法》《中华人民共和国水法》等多部体现流域管理的思想的法律;③ 制定了一系列的流域规划,逐步将现代科学技术应用于管理之中,以科技进步来促进流域水资源与水环境管理工作。

然而与国外具有成功经验的国家相比,我国流域水环境管理尚面临着诸多的困难,这些困难可以归结为以下两个方面:① 管理体制方面。缺乏统一管理机制,与经济发展不适应。水环境管理体制的主要机构性问题是水资源管理与水污染控制的分离,以及有关国家与地方部门的条块分割,特别是行政上的划分将一个完整的流域人为分开。② 技术方法方

面。流域关键要素信息采集、发掘与共享。由于我国国土面积辽阔,发展又不平衡,导致信息采集方法尚不普及,很多地区缺乏流域要素的资料;有资料的地区也面临着资料不全、信息点位稀疏和资料代表性不强等问题。同时用于处理遥感等大信息量数据的数据挖掘方法尚不成熟,使部分数据不能高效利用。

流域决策支持模型的开发与应用。流域水环境管理,涉及多学科信息的综合和集成,需要适宜的模型提供决策支持。目前国外已有一些模型的应用案例,然而国外模型在我国的适用性以及推广的可行性均是亟须解决的问题。

第三节 流域水环境管理的技术方法

国外的发展历程表明,基于流域的水环境管理是必然的发展趋势。而我国的流域水环境管理亟须可行性、适用性、科学性兼顾的支持技术和方法。总体来说,应用于流域水环境分析、管理的方法分为模型方法与非模型方法两大类。

一、非模型方法

非模型方法通常是对流域和受纳水体过程更简化的表示,在应用上通常需要较少的努力、时间和经验。

预先使用非模型方法对流域水环境状况进行评估、对主要影响因子进行经验性识别,可以为建模提供重要参考。在流域资料相对缺乏的地区,利用非模型方法进行环境状态表征,主要环境过程及影响因子分析等研究就显得尤为重要。

20 世纪 80 年代及其以前,应用广泛的非模型方法为相关分析、回归分析等,通过建立水质指标之间、水质与部分污染源数据之间的较简单的响应关系反映流域的水环境状况。随着计算机技术的发展,20 世纪 90 年代,主成分分析、因子分析、时间序列分析等多元统计分析技术得到广泛应用,海量数据的降维降噪,有利于主要环境因子和环境过程的更明确的揭示。进入 21 世纪,遥感技术提供了大量的数据,地理信息系统(GIS)的快速发展和普及,使更多、更精细的流域信息的获取成为了可能,如流域土地利用类型分布,经过监测点位数据的空间插值得到流域气象状况,通过建立水质与土地利用类型等流域要素的响应关系,揭示了流域水环境状况的空间联系。

相关学科和技术的革新带动了非模型方法的创新与发展,促进其更广泛地应用。美国目前实行的 TMDL 计划中,采用了基于环境数据的统计分析或基于土地的过程的经验计算等非模型方法。尽管非模型方法不能展现各污染源与区段之间的定量联系,但通过了解流域内所有污染源的贡献和影响,仍然可以得到较全面的情况。此外,对于尚未明确其环境行为、已知信息不足以满足建模条件的污染物,以及综合考虑建模的工作量、成本等因素,采用非模型方法进行分析是相对更可行的方法。

目前,采用多元数学统计方法对水质进行评估分析,是国内外比较通用的方法。广泛采用的数学统计方法有聚类分析、主成分分析、因子分析等。

(1) 聚类分析。聚类分析是一种探索性的模式识别技术,根据观测对象之间的相似程度,逐次聚类,达到物以类聚的目的。其本质是人们希望借助计算机将具有相似的属性或