

非点源污染数学模型

李怀恩 沈晋 著

西北工业大学出版社

非点源污染数学模型

李怀恩 沈 晋 著

西北工业大学出版社

1996年7月 西安

(陕) 新登字 009 号

【内容简介】 本书对非点源污染负荷定量化问题进行了系统研究。在评述非点源污染研究进展与分析非点源污染特性的基础上,建立了一套完整系统的流域非点源污染数学模型,包括流域产流模型、汇流模型、流域产污过程模型及非点源污染物迁移转化模型;然后分别利用几个不同流域的雨洪、泥沙及多种污染物监测资料对所建立的模型进行了全面检验。为便于预测应用,书中还详细地研究了模型参数的意义与单站综合方法,并提出了无资料地区的参数估计公式。

本书是国内第一本非点源污染研究方面的专著,可供从事环境水利、环境保护、水文水资源及水土保持方面的科研、工程技术人员,以及高等院校有关专业的师生参考。

非点源污染数学模型

李怀恩 沈 晋 著

责任编辑 胡梦仙

责任校对 齐随印

*

©1996 西北工业大学出版社出版发行
(710072 西安市友谊西路 127 号 电话 8492314)
全国各地新华书店经销
陕西新世纪印刷印装

ISBN 7-5612-0890-1/TP·108

开本:787×1092 毫米 1/32 印张:5.562 5 字数:116 千字
1996 年 7 月第 1 版 1996 年 7 月第 1 次印刷
印数:1—660 册 定价:10.00 元

前 言

我国的水资源短缺问题十分突出。在有些地区,水资源甚至成为影响社会经济发展的制约性因素,同时,水环境污染更加剧了水资源的供需矛盾。我国以往对集中排放废污水这类点源污染比较重视,而对另一类更为普遍的水污染,即降雨径流所引起的非点源污染则重视不够。近几年来,我们先后承担了陕西省自然科学研究计划项目“非点源污染的数学模拟及负荷模型研究”、西安理工大学博士科研基金项目“暴雨径流污染的数学模拟与预测研究”及青年科学基金项目“降雨径流污染预测方法探讨”等科研课题,集中研究了非点源污染的负荷量化问题。本书就是在总结这些课题研究成果的基础上写成的,也是李怀恩博士学位论文的主要内容。

本书共分九章,第一章综合评述了非点源污染研究进展,指出了现有模型的不足与发展趋势,简述了本书的研究思路及内容。第二章简要分析了非点源污染的特性。在前两章的基础上,第三章建立了一套完整系统的流域非点源污染数学模型,包括流域产流模型、汇流模型、产污过程模型及非点源污染物迁移模型。第四至七章分别利用几个不同流域的雨洪、泥沙及多种污染物资料对所建立的模型进行了全面的实例检验。第八章对模型参数进行了系统研究,便于模型的应用。第九章为全书的结论,并指出了须进一步研究的问题。本书全部由李怀恩执笔撰写,由沈晋定稿。

作者在开展非点源污染研究及撰写本书的过程中,得到

了许多专家、学者和同行的鼓励与支持,特别是中国环境科学研究院刘玉生研究员,西安理工大学博士导师沈冰教授,河海大学博士导师朱元牲教授,武汉水利电力大学博士导师雒文生、夏军教授,云南省水文总站的有关领导和唐一清总工程师、朱远高工程师,以及昆明市环境科学研究所辜来章高级工程师等,在此一并表示衷心感谢。

由于作者水平有限,谬误之处难免,恳请读者指正。

作 者

1996 年 2 月于西安理工大学

目 录

第一章 流域非点源污染研究进展与本书研究内容·····	1
1.1 非点源污染研究进展述评·····	1
1.2 现有模型的不足与本书研究内容·····	12
第二章 流域非点源污染特性分析·····	17
2.1 非点源污染浓度过程线的概化类型·····	17
2.2 非点源污染特性分析·····	19
第三章 流域非点源污染数学模型的建立·····	22
3.1 流域产流模型研究——几个主要产流模型的 剖析与选用·····	23
3.2 流域汇流模型的建立·····	43
3.3 流域非点源污染物产生模型(产污模型) 的研究·····	52
3.4 流域非点源污染物迁移模型的建立·····	61
3.5 小结·····	68
第四章 洪水汇流实例研究——黑河流域·····	71
4.1 流域概况及资料条件·····	71
4.2 产汇流分析计算·····	72
4.3 结果分析与结论·····	75

第五章 泥沙输移实例研究——岔巴沟流域	78
5.1 计算方法与结果	78
5.2 小结	81
第六章 污染物的产生与迁移实例研究 ——于桥水库穿芳峪流域	83
6.1 概述	83
6.2 分析计算	84
6.3 结果分析	87
第七章 模型在滇池流域的综合应用研究	93
7.1 滇池流域概况	93
7.2 松华坝农田试验小区研究	94
7.3 宝象河流域非点源污染研究	102
7.4 小结	122
第八章 模型参数研究	125
8.1 引言	125
8.2 模型参数的物理意义与作用分析	125
8.3 逆高斯分布模型的参数综合方法研究	128
8.4 无资料地区逆高斯分布模型参数估计方法 的探讨	147
8.5 小结	153
第九章 结论	155
参考文献	161

第一章 流域非点源污染研究进展 与本书研究内容

1.1 非点源污染研究进展述评

非点源污染及其危害,人们是在防治水污染的实践中逐渐认识到的。起初,人们一直认为集中排放废污水(点源)是造成水污染的主要原因,没有认识到非点源污染的严重后果。如美国在70年代初设想只要把废污水都经过高度处理再排入水体,就可以从根本上解决水污染问题。但实践表明,这样做只能部分解决问题,水污染问题依然存在。后来人们才逐渐认识到非点源污染的严重危害,并开展了全国性的大规模研究与控制管理工作。我国目前也存在着严重的非点源污染问题,如农田养分与农药的流失、城区径流污染、大面积的水土流失等加剧了各类水体的污染,引起湖泊水库的加速富营养化。所以有必要进一步重视并研究非点源污染及其防治问题。

1.1.1 非点源污染与负荷模型

1.1.1.1 非点源污染

非点源污染是指在降雨径流的淋溶和冲刷作用下,大气中、地面和地下的污染物进入江河、湖泊水库和海洋等水体而造成的水体污染^[1]。这里的非点源污染,一般文献中也称之

为面源污染,最常见的英文名称是 Nonpoint Source Pollution(NSP),都是相对于点源污染的叫法。从实质上看,降雨径流污染或非点源污染的提法比较贴切,因为 NSP 包括线源和面源,而“面源污染”一词的概括性不强。

与点源污染(集中排放废污水)相比较,非点源污染具有许多显著不同的特点。对此,文献[2]中介绍了 9 条描述非点源污染的一般特征。现将非点源污染的主要特点概括如下:

(1) 发生具有随机性,因为非点源污染主要受水文循环过程(主要是降雨以及降雨转化为径流的过程)的影响和支配,而降雨径流具有随机性,所以由此产生的降雨径流污染必然具有随机性。

(2) 污染物的来源和排放点不固定,排放具有间歇性,而点源排放较有规律(如随作息制度变化等)。

(3) 污染负荷的时间变化(次降雨径流过程、年降雨等)和空间(不同地点)变化幅度大。

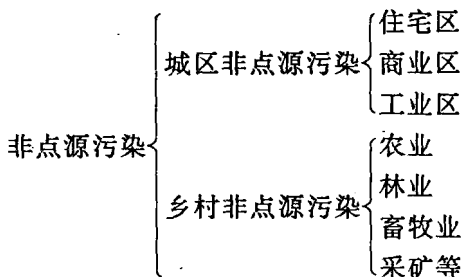
(4) 监测、控制和处理困难而复杂,这是由以上几点决定的。

影响非点源污染的因素非常复杂,但地表径流携带污染物(非点源污染的主要部分)的多少主要取决于:堆积于地表面的污染物数量和地表径流的冲刷力(流速、动能等)。前者主要受土地利用类型(即人类活动)的影响,如农业、林业、交通运输(公路、铁路、航运)业、城区、采矿、建筑工地等的污染物特性都各不相同;后者主要受降雨径流过程的影响。

此外,大气污染对雨水污染物也有影响^[3];土壤中的污染物在降雨过程中向地表径流的迁移也是一个重要来源之

—[4,5]。

为了研究的方便,一般按土地利用类型对非点源污染分类如下:



这样分类的目的有两点:一是便于认识各类非点源污染的规律,建立数学模型和估算污染负荷供水质规划应用;二是针对不同的对象采取不同的控制措施以减轻非点源污染的危害。

1.1.1.2 非点源污染负荷模型

由前述非点源污染的概念、形成过程和特点来看,非点源污染与自然界的循环密切相关。所以水文模型(特别是降雨径流模型)在非点源污染研究中得到广泛应用,包括用水文模型推求径流过程和借用水文学中的某些概念和方法推求非点源污染负荷等。

污染物在径流形成过程中的迁移和转化是很复杂的,为了有效地防治和控制降雨径流污染,必须对这个复杂过程进行分析研究,并估算随径流输出的污染物数量。基本研究方法有两类,即实验方法和利用数学模型进行模拟和预测。研究非点源污染须要同步监测降雨、径流和水质变化过程,其费用昂

贵,并且短期监测资料也不可能满足水质控制和管理工作的需要,所以数学模拟是研究降雨径流污染的最常用方法,而很少单独使用实验方法,当然数学模型的建立要以实测资料为基础。这里简要介绍有关非点源污染负荷模型的基本概念。

1. 模型结构

完整的非点源污染模型一般由四个子模型构成,如图1.1所示^[6]。

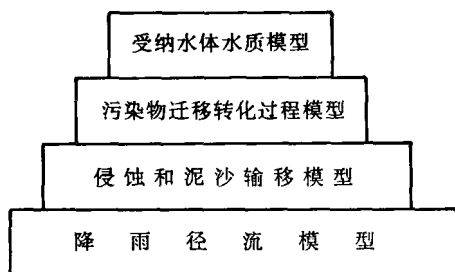


图 1.1 非点源污染子模型系统

降雨径流子模型用来解决各类流域的产汇流问题,即推求流量过程线和径流量。它是整个研究的基础,因为降雨径流过程是形成非点源污染的直接动力。

侵蚀和泥沙输移子模型研究流域产沙及河流输沙问题,泥沙本身不仅是一种重要的非点源污染物,而且它还能吸附或挟带许多其它污染物(如 P, N 和重金属等)。

污染物迁移转化过程子模型确定污染物(液态和固态)在径流形成过程中的转化和输移过程,几乎涉及化学的所有领域,是非点源污染研究的核心内容。

受纳水体水质模型研究非点源污染负荷对受纳水体的影响,是进行非点源污染研究的目的。

以上是一般情况,各个模型具体包括的内容有所不同。现有模型多数都未将受纳水体水质模型包括在内,因为各种水体(特别是河流)的水质模型研究的历史要比非点源污染模型长,也成熟得多,只要能将进入水体的非点源污染负荷过程预测出来,就可选用合适的水质模型来研究其影响。

2. 模型分类

70年代以来,国外提出了许多非点源污染模型,国内在80年代以来也提出了一些这方面的模型。对这些模型,有不同的分类方法,这里介绍两种分法。

(1)按降雨径流子模型的复杂程度分类:这是 Jolankai 建议的分类方法^[6],具体分为如下三类:

第一类是以水文学中的推理公式法为基础的模型。这类模型的降雨径流子模型的范围是从最简单的径流系数法到美国土壤保持局的 SCS 法。

第二类是以水文学中的时段单位线或瞬时单位线概念为基础的模型。可分为两种情况:一是降雨径流子模型采用单位线法进行汇流计算,即用时段或瞬时单位线推求流量过程线;二是用时段或瞬时单位线法推求非点源污染负荷过程线。

第三类是以水文数学模型为基础的非点源污染数学模型。这类模型大都属于机理模型,即试图详尽地描述非点源污染的物理、化学和生物过程。

这三类模型都已广泛应用,且各有特点及适用条件。第一类模型的特点是简单实用,对资料要求不高;第三类模型可对非点源污染的主要过程进行详细模拟,具有预测功能,但需要

较多的实测资料;第二类方法介于二者之间。Zingales 等^[7]认为,只要有可靠的长期监测资料,任一方法都能满足技术上的精度要求。

(2) 按照对研究区域(流域)的处理方法分类:有如下两类:

集总参数模型:把研究区域作为一个整体来考虑,在有关特性均匀一致条件下建立的模型。

分散参数模型:将研究区域划分成较小的具有均一特性的单元,然后对每个单元分别进行模拟,通过叠加的方法得到流域总输出。

3. 模型的可靠性与适用性

我们知道,数学模型只能近似反映和模拟实际发生的复杂物理、化学和生物过程,所以模型的准确性和可靠性是有限的。文献[2]中给出了非点源污染模型的可靠性与可能误差图(见图 1.2)。该图表明,最准确的模型是模拟小型的均匀不透水流域的水文子模型,误差约为百分之几。降雨径流子模型的可靠性最好,可能误差最小,而土壤侵蚀和泥沙输移子模型次之,污染物转化过程子模型最差(大流域非点源水质模型的误差可达一个数量级以上)。

由前述各子模型的作用与相互关系知,水文子模型和侵蚀子模型的误差都会向其下一级子模型转移。所以建立和检验非点源污染模型的顺序是:水文子模型→侵蚀子模型→水质子模型。

尽管非点源污染模型的精度和可靠性有限,但还必须把模型作为规划的工具,而不能凭经验办事。对此,文献[2]中总结了 8 条理由,其要点为:模型可以预测规划措施对水质和

污染负荷的影响；可以了解由非点源产生污染的过程；可以根据用户的具体要求，提出多种方案，研究不同的防治对策和控制措施并评价它们的影响；可用来分析和模拟一些极端情况；可用来估计和分析不同规划目标的利弊；随着模拟技术的不断发展和对模拟过程的逐步深入了解，模型本身也会不断完善。

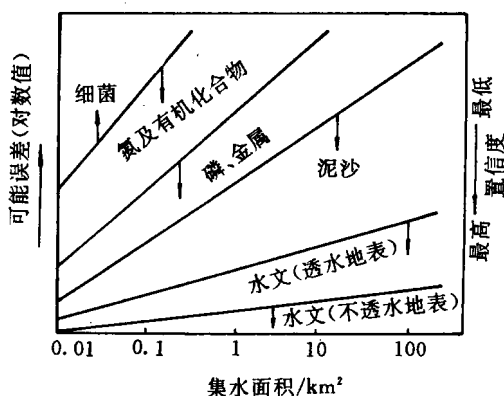


图 1.2 非点源污染模型的可靠性与可能误差

4. 模型输入资料

虽然各类模型的功能和复杂程度各不相同，但它们对输入资料的一些基本要求是相同的，并可大致地分为下述三类^[2]：

(1) 系统参数：即表示系统物理状态的参数，包括流域大小、小区划分(把研究流域划分成均一的子流域)、各小区的不透水性、坡度、直接汇入河道的不透水面积所占的比例、最大

地表蓄水量(注蓄加截留储存)、土壤特性(包括质地、渗透性、可侵蚀性及组分)、作物与植被、路缘密度或街道边沟长度、下水道系统或天然排水特性等。

(2) 状态变量:即影响系统状态的资料,包括环境温度、反应速率系数、吸附与解吸系数、作物生长阶段、垃圾的日累积速度、交通流量与速度、污染物效率因子、太阳辐射等。

(3) 输入变量:包括降雨、大气降尘、蒸发速率等。

上述资料中,有关土地利用情况的资料可由地图、航空照片或卫星遥感资料获得。

值得提出的是,收集上述资料的工作量是很大的。这包括两方面的工作:一是收集现有资料,如有关主管部门的常规观测并定期刊布的资料(水文年鉴、水质年鉴等);二是现场调查和监测,因为现有资料常常不能满足要求。所以,常常出现收集资料的费用超过建立和运转模型的费用情况。

1.1.2 非点源污染模型研究进展综述

人类开始全面认识和研究非点源污染的历史并不长,主要是 70 年代以来的事。当然,在 70 年代以前,人们对非点源污染已逐渐有所认识并开始进行研究,但这个时期的研究多局限于现象的因果分析,而量化分析则寥寥无几^[8]。通过大量的调查使人们逐渐认识到:单纯的点源控制还不能从根本上改善水质。在 60 年代,农药对水生生态系统的影响受到极大的关注,人们开始观察到农业非点源污染的潜在危害,但还缺乏定量评价其影响的方法。这就促使人们转向量化研究,如美国加州的 Hydrocomp 公司开始为 EPA(美国环保局)研制农药输移和径流模型(PTR),以及最初(1971 年)的

城市暴雨水管理模型(SWMM)等。众所周知,土壤侵蚀是一类重要的非点源污染,并且对其研究在70年代以前就取得了长足进展,定量计算方法业已相当成熟,但研究的角度并不是从非点源污染问题出发的,当然这方面的研究成果为开展全面的非点源污染研究打下了良好的基础。

1972年美国水污染控制法修正案的制订标志着非点源污染研究的重大转折。这项法律明确规定^[2],在制订水污染防治规划时,必须同时包括点源和非点源防治规划。这项法律的通过,极大地促进了美国非点源污染研究的开展,如70年代美国在全国范围内开展的大规模的非点源污染的调查和研究工作,提出了一些有影响的非点源污染模型。

非点源污染与湖泊富营养化的发生有密切关系,这是非点源污染研究逐步受到重视的另一个重要原因^[8]。如美国于1972年开始进行的全国富营养化调查,选择了近千个典型的非点源污染流域,详细研究了流域土地利用情况,力图探索全国范围内的土地利用—营养负荷—富营养化关系,从而建立一种利用“宏观”流域特征来估算水体营养水平的定量化方法。此外,美国和加拿大联合开展的土地利用与五大湖水质污染关系的项目,研究了各种单一土地利用类型的单位面积污染负荷,探讨了多种影响因子(地形、土地利用程度、肥料、农药、气候条件等)对污染负荷的影响。总之,70年代初期的研究主要侧重于非点源污染的“宏观”特征分析,以及比较点源和非点源的相对比重。

70年代中期,是非点源模型大发展的时期,很多模型相继问世^[2,8~10]。例如,Hydrocomp公司的非点源污染系列模型PTR—HSP—ARM—NPS,以及其他研究者开发的

STORM, ACTMO, UTM, LANDRUN 等。这些模型大都属于前述第三类模型,即以水文数学模型为基础的非点源污染模型。在非点源污染管理方面,这个时期逐步形成和使用最佳管理措施 BMPs(Best Management Practices)来控制和管理非点源污染。

总之,从 70 年代初期到中期,非点源污染研究取得了两方面的重要进展:一是从简单的经验统计分析提高到复杂的机理模型分析;二是从长期平均负荷输出或单场暴雨分析上升到连续的时间序列响应分析。这些模型虽然经过了一些实测数据的检验并得到有限的应用^[9~15],但它们往往对各种资源(计算机、数据、费用和用户素质等)的要求很高,大多数模型只能适用于很小的集水面积。显然,这些都与非点源污染的广泛性格格不入,从而限制了这些模型的推广和应用。

由于存在上述问题,所以在 70 年代后期,特别是进入 80 年代以来,研究的重点主要转向如何把已有模型应用到非点源污染的管理中去,开发新的实用模型,非点源污染的控制与管理措施的研究与广泛实施等,并注意了经济效益分析。这一时期国外提出的有代表性的模型有:ANSWERS(Areal Nonpoint Source Watershed Environment Response Simulation)^[16],CREAMS(Chemicals, Runoff, and Erosion from Agricultural Management Systems)^[17]和 AGNPS(Agricultural Nonpoint Source)^[18]等。这几个模型都得到了不同程度的应用^[19~22]。此外,随着计算机技术的发展,非点源污染研究也开始使用地理信息系统(GIS)方法^[23]。

在实用模型研究中,值得提出的是单位线类模型,即前述第二类模型^[24]。1978 年,德意志联邦共和国的 Verworn 把