

工科研究生系列教材

水环境分析及预测

雒文生 宋星原 编著



武汉水利电力大学出版社

水环境分析及预测

雒文生 宋星原 编著

武汉水利电力大学出版社

2000年·武汉

(鄂)新登字 15 号

图书在版编目(CIP)数据

水环境分析及预测/雒文生,宋星原编著. —武汉:武汉水利电力大学出版社,2000.6

ISBN 7-81063-067-9

I. 水… II. ①雒…②宋… III. ①水环境-分析②水环境-环境预测
IV. X143

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 19178 号

责任编辑:李汉保 责任校对:陈时君 封面设计:涂 驰

武汉水利电力大学出版社出版发行

(武汉市武昌东湖南路 8 号,邮编 430072)

湖北省黄冈日报社印刷厂印刷

开本:850×1168 1/32 印张:11.375 字数:306 千字

2000 年 12 月第 1 版 2000 年 12 月第 1 次印刷 印数:1-1 000 册

ISBN 7-81063-067-9/X·3 定价:15.00 元

内容提要

本书系统论述了水环境变化机理和模拟预测方法。全书共 10 章,包括污染物在水中迁移转化基本规律、水体耗氧复氧过程分析与计算、水质基本方程的解析解与数值解、水温模型、河流、河口、湖泊水库水环境数学模型及数值解、面源污染模拟预测、非确定性水质模型等内容。

本书为水文学及水资源专业的研究生教材,也可供该专业本科生学习和从事水环境保护方面的专业技术人员参考。

前 言

随着社会经济的迅速发展,人类生产和生活中向自然界排放污染物的强度也愈来愈大。这些污染物随水文循环扩散到河流、湖泊、水库、港湾和地下水,大片大片的水域受到污染,使我国本来就比较短缺的水资源更趋恶化,乃至危及人类的生存和可持续发展。因此,保护水资源和水环境已经成为当今面临的一项紧迫而长期的艰巨任务,要求我们在作水资源规划和管理时,必须及早采取各种措施,既促进经济快速增长,又使自然环境得以保护和改善,实现整个社会的可持续性发展。正是这种强烈的需要,水环境分析及预测已经成为水文水资源专业学习和研究的一项基本内容。

本书力图把污染物的迁移转化与水文循环密切结合起来,根据水资源、水环境保护的需要,系统论述地表水水质变化机理、数学建模和模拟预测方法,在介绍国内外研究成果的同时,也总结介绍本书作者近年来的一些相关成果。全书共十章,主要内容有:水环境变化的基本概念与基本理论,例如污染物在水体中的移流、扩散、弥散、吸附、解吸、沉淀、再悬浮、不同条件下的降解转化过程和反应动力学、水体复氧理论、有关参数的物理意义及确定方法、水质(包括水温)迁移转化基本方程与解算方法,这些是建立水质数学模型的基础;针对各类水体的污染特点,分别对河流、河口、湖泊与水库建立水质模型及预测;论述了模型参数值的同时估算法、降雨径流污染负荷模拟预测方法和水质随机模拟方法。

本书由雒文生、宋星原编著,其中雒文生编写第一至第五章和第九章,宋星原编写第六至第八章和第十章,并由雒文生负责统稿。本书的出版得到了武汉水利电力大学“211工程”建设基金和高等学校

博士学科点专项科研基金的资助,以及有关院校、生产单位、科研单位的支持和帮助,对此表示诚挚的感谢。

本书主要供水文学及水资源专业的研究生和大学本科生学习,同时也可供环境保护、水利水电工程、市政建设等有关部门的研究人员和技术人员参考。

编著者水平有限,错误和疏漏之处在所难免,敬请读者批评指正。

作 者

2000 年 2 月

目 录

第一章 绪论	1
第一节 水环境分析及预测的重要意义与任务	1
第二节 水文循环过程中水的污染与自净	3
第三节 水体污染物及其危害	5
第四节 水环境质量的度量与评价	11
第二章 污染物在水中的迁移转化	18
第一节 污染物在水中的迁移过程	18
第二节 天然水流的扩散系数和离散系数	25
第三节 水中有机污染物的降解与转化	35
第四节 污水生化反应动力学	43
第三章 水体的耗氧过程和复氧过程	50
第一节 水体的氧平衡	50
第二节 水体的耗氧过程	52
第三节 水体的复氧过程	60
第四节 水体耗氧、复氧参数的估算	69
第四章 水质迁移转化基本方程及其解	91
第一节 水质迁移转化基本方程	91
第二节 水质迁移转化基本方程的解析解	100
第三节 有限差分法解水质迁移转化基本方程	120
第五章 水温的模拟预测	132
第一节 概述	132
第二节 水体热交换过程	136
第三节 河流水温模型	143
第四节 湖泊、水库水温预测的经验公式法	147

第五节	湖泊、水库水温预测的数学模型法	151
第六章	河流水质数学模型	168
第一节	概述	168
第二节	河流一维 BOD - DO 模型	171
第三节	QUAL - II 河流水质综合模型	196
第四节	河口一维 BOD - DO 水质模型	209
第五节	河流二维 BOD - DO 水质模型	219
第七章	湖泊、水库水质数学模拟预测	228
第一节	湖泊、水库水质模拟预测的柱体扩展法	228
第二节	湖泊、水库平面二维水质模拟预测	230
第三节	湖泊、水库垂向二维水质模拟预测	241
第四节	湖泊、水库富营养化水质模型	254
第八章	水质模型的多参数同时估算法	261
第一节	概述	261
第二节	梯度搜索法估计水质模型参数值	263
第三节	水质模型多参数降维估算方法	274
第四节	步长加速法估计水质模型参数值	284
第五节	水质模型参数最优估值的评价	288
第九章	降雨径流污染预测	290
第一节	概述	290
第二节	降雨径流污染负荷预测的经验公式法	294
第三节	降雨径流污染负荷预测的单位线法	300
第四节	面源污染的流域数学物理模型	308
第十章	随机水质模拟方法	328
第一节	概述	328
第二节	河流水质随机过程模拟方法	330
第三节	河流水质随机微分方程模型方法	343
参考文献		355

第一章 绪 论

第一节 水环境分析及预测的重要意义与任务

为合理开发利用水资源,除要知道未来各地水量的时空变化外,还必须分析相应的水质情况。随着社会经济的迅速发展,人口急剧膨胀和生活水平提高,人类对河流、湖泊、水库、港湾等的污染日趋严重,严重地威胁着人类的生存和发展。正如许多科学家所预言的,如果人们在发展经济中不注意保护环境,最终将使自己失去赖以生存的环境而导致自身的毁灭。1992年6月联合国世界环境与发展大会,通过了《关于环境与发展里约热内卢宣言》,并组织各国参与制定《21世纪议程》,号召各国立即行动起来,采取有效措施,切实保护环境,以保证社会经济的可持续性发展。面对越来越严峻的污染公害,许多国家都制定了一系列关于水环境保护的法令、措施,规定工程规划和管理中,都要对水环境质量进行分析、预测和评价,使经济建设与环境保护协调发展。水环境污染,在我国也相当严重,据全国7大水系和内陆河流的110个重点河段统计,属于严重污染的已占29%,并在进一步恶化,以致出现了1994年带有流域性的淮河大面积污染灾害,其直接经济损失达1.7亿元。水环境问题已经成为制约我国经济发展的一个重要因素。吸收国外以往以牺牲环境为代价发展经济的惨痛教训,从自己的国情出发,1973年我国制定了“全面规划,合理布局,综合利用,化害为利,依靠群众,大家动手,保护环境,造福人民”的总方针,以后又制定了工程建设与环境建设同时设计、同时施工、同时投产的“三同时制度”,并在尽可能减少新污染源的同时,对老污染源积极治理。水环境分析及预测,是搞好环境评价、规

划、治理和管理的基础性工作,预测成果是否可靠,将直接影响环境保护工作的成败,显见该门学科在环境保护中具有非常重要的意义。

环境是相对于一个主体事物周围的各种因素及其状态特征的总和。对于环境科学来说,人是主宰世界的主体,所研究的是围绕人类生存、发展的环境,包括自然环境和社会环境。自然环境是指包围地球表层的大气圈、水圈、岩石圈和生物圈构成的各种自然因素及其状态的总和。社会环境则是指人类社会经济、政治、文化等所创造的环境,是社会诸因素及其状态的总和。水环境是自然环境的一个重要组成部分,指自然界各类水体,如河流、湖泊、水库、海洋、地下水、空中水等的数量、质量状态的总和,水量方面,如降水、蒸发、下渗、径流等的变化,是水文学研究的主要对象;水质方面,如泥沙、水温、溶解氧、水中有机物、无机物、重金属、水生生物等的变化,是水环境科学主要研究的对象。水是水中各种物质的载体,水质状态与水量密切相关,例如丰水期一般水质较好,枯水期污染往往加重。因为水环境科学总是将二者作为一个整体来研究的,只是目标更集中在水质变化上,所以也往往把水环境和水质作为同义语来看待。本书所指的水环境就主要是把水量状态作为已知条件,研究水环境质量变化。

水环境分析及预测,是在研究河流、湖泊、水库、海洋等水体的水质变化机理和规律基础上,建立水环境模拟预测模型,根据将来的排污、水文气象等条件,对未来水环境状态进行预测的一门科学。其主要内容有:水体在水文循环中的污染与自净,污染物在水体中迁移转化的基本规律,水体的耗氧过程和复氧过程,污染物在水中的迁移转化方程,水体温度数学模型,河流与河口的水质数学模型,湖泊水库水质数学模型,水质模型的参数估计,面源污染分析等。而地下水污染将在地下水文学中论述。下面举例说明为什么要建立水质模型和进行水质预测,以及如何预测。某河段由于上游工厂排污越来越多,有机物污染严重,需要修建污水处理厂对污水进行处理。在建厂之前,必须回答处理厂最好应建在何处?规模应多大?对污水处理应达到何种程度?为回答这些问题,显然首先要建立该河段的生化需

氧量模型和溶解氧模型,针对排污量的大小,预测不同的处理厂位置、规模和处理程度时河流的溶解氧状况,然后通过分析比较,求得最优的处理厂位置、规模和处理程度,为水污染防治规划和管理提供依据。总结以往的经验,水环境分析及预测的基本程序是:①针对要解决的水环境问题,收集有关的水文、气象、水质等观测、实验资料 and 污染负荷情况;②根据被模拟水质的物理、化学、生物变化规律,建立反映模拟物质与其有关因素间相互联系的数学方程组,称之为模型结构;③在模型中将包括一些参数,如有机物的降解系数,需通过收集的资料把它们优选出来,称率定模型参数;④用第②、③步建立的模型,由率定模型参数时未曾用过的观测数据,检验模型对水质状态的模拟能力,称模型检验。若率定和检验都符合要求,所建模型就可以应用了;否则,应检查原因,改进模型,直至满意;⑤使用建立的模型进行不同排污情况下的水质计算,称水质预测。以上各个环节中的核心问题是建立合乎要求的水环境模型,这将是以后要研究的中心问题。

第二节 水文循环过程中水的污染与自净

地球上的水在太阳辐射作用下,不停地从水面、陆面和植物表面蒸发,化为水汽上升到高空,然后被气流带到其它地区,在适当的条件下凝结,形成降水,降落到地面上,然后在重力作用下,一部分渗入地下转化为土壤水和地下径流,一部分形成地表径流,汇入江河、湖泊,除蒸发外,最后都将回归大海。自然界中水的这种不断蒸发、输送、凝结、降水、产流、汇流的往复循环,即蒸发→降水→径流→蒸发...,称为水文循环,或自然界的水分循环。在水文循环中,水与各种各样的物质接触,使那些物质混入或溶入其中,并经历着不断的物理、化学、生物等变化过程。水体中存在着种类繁多的不同物质,当某些物质超过一定限度,危害人类生存和生态平衡,影响水的用途时,称水体受到了污染。水体中存在的可能造成污染的物质称作污

染物。从水文循环的过程可知,水体的污染可以发生在水文循环的各个环节上。例如降水形成中,若 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 等溶入过多,使 pH 值低于 5.6,则可导致酸雨;沿河流有大量的工厂废水和城镇生活污水排入,可能形成局部河段或整条河流污染;挟带过多的氮(N)、磷(P)等植物营养素的农田径流进入湖泊和水库,长期富集时,可能出现富营养化污染;地面污水大量渗入地下,可使地下水污染。从水文循环中还可看到,引起水体污染的原因,基本上可分为两大类:一类是由于自然地理因素引起的,称自然污染;另一类是人为因素引起的,称人为污染。前者指特殊的地质构造或其它自然条件,使一个地区的某些化学元素富集(如存在铀矿、砷矿、汞矿等),或天然植物在腐烂过程中产生某些有毒物质等,地面地下径流将这些元素大量带入河流、湖泊。后者指由于人类活动造成的污染,如大量的工业废水不加处理而直接排放,农药、化肥随降雨径流进入水体等。二者相比,后者的影响是主要的,是水污染防治的主要对象。

污染物一方面在水文循环中进入水体和发生演变,另一方面在运动中自然地减少、消失或无害化,称自净。水的污染浓度自然降低而恢复到较清洁的能力,称水的自净能力。当水体的自净能力大于污染物进入水体的强度时,水质将不断得到改善,趋于良好状态;反之,水质将恶化,严重者将导致污染。在满足水体规定的环境质量标准下,每年允许的最大纳污量,称环境容量。当水体每年接收的污染物不超过这一数量时,由于自净作用将不会导致污染;否则,则需对过量的排污予以处理。

水体自净是一个物理、化学、生物作用的极其复杂的过程。物理净化过程,是指污染物在水体中混合、稀释、沉淀、吸附、凝聚、向大气挥发和病菌死亡等物理作用下使污染浓度降低的现象,例如污水排入河流后,在下游不远的地方污染浓度会大大降低,就主要是混合、稀释的结果。化学净化过程,是指污染物在水中由于分解和化合、氧化与还原、酸碱反应等化学作用下,致使污染浓度降低或毒性丧失的现象,例如水在流动中大气里的氧气不断溶入,使铁锰等离子氧化成

难溶的盐类而沉淀,从而减少了它们在水中的含量。生物净化过程,是水体内的微生物群,在它们分泌的各种酶的作用下,使污染物发生分解和转化为无害物质的现象,例如有机物在细菌作用下,部分转化为菌体,部分转化为无机物;接着细菌又成为水中原生动物的食料,原生动物又成为后生动物、高等水生动物的食品,无机物为植物吸收,这样有机物便逐步转化为无机物和高等水生生物,达到无害化,从而起到净化作用。污水处理厂,就是依据水体的自净规律,人为地在一个很小的范围内营造一套有利于水体自净的优良条件,使污水在很短的时间内得以净化。

第三节 水体污染物及其危害

一、水体污染物分类与来源

进入水体的污染物种类繁多,危害各异,其分类方法依不同的要求可有多种。按污染的属性进行分类,可归纳为物理性污染、化学性污染和生物性污染,其主要污染物、污染的危害标志及污染物的来源部门、场所,如表 1-1 所示。按污染源的分布状况分类,可分为点源污染和非点源污染。点源污染主要指工业废水和城镇生活污水,它们均有固定的排放口;非点源污染主要指来自流域广大面积上的降雨径流污染,如农药、化肥污染,也常称面源污染。

二、水污染的危害

水污染物能使水体发生物理性、化学性和生物性的危害。所谓物理性危害,指恶化感官性状,减弱浮游植物的光合作用,以及热污染、放射性污染带来的一系列不良影响;化学性危害是指化学物质降低水体自净能力,毒害动植物,破坏生态系统平衡,引起某些疾病和遗传变异,腐蚀工程设施等;生物性危害,主要指病原微生物随水传播,造成疾病蔓延。下面按水污染的危害特点作一简要介绍。

表 1-1 水污染类型、污染物、污染标志及来源

污染类型		污 染 物	污 染 标 志	废 水 来 源
物理性污染	热污染	热的冷却水	升温、缺氧或气体过饱和、热、富营养化	火电、冶金、石油、化工等工业
	放射性污染	铀、钚、镭、铯等	放射性沾污	核研究生产、试验、医疗、核电站
	表现污染	水的混浊度	混浊	地表径流、农田排水、生活污水、大坝冲沙、工业废水
		水 色	腐殖质、色素、染料、铁、锰	染 色
水 臭		酚、氨、胺、硫醇、硫化氢	恶 臭	污水、食品、制革、炼油、化工、农肥
化学性污染	酸碱污染	无机或有机的酸、碱物质	pH 异常	矿山、石油、化工、化肥、造纸、电镀、酸洗工业、酸雨
	重金属污染	汞、镉、铬、铜、铅、锌等	毒 性	矿山、冶金、电镀、仪表、颜料等工业
	非金属污染	砷、氰、氟、硫、硒等	毒 性	化工、火电站、农药、化肥等工业
	耗氧有机物污染	糖类、蛋白质、油脂、木质素等	耗氧,进而引起缺氧	食品、纺织、造纸、制革、化工等工业、生活污水、农田排水
	农药污染	有机氯农药、多氯联苯、有机磷农药	严重时水中生物大量死亡	农药、化工、炼油等工业、农田排水
	易分解有机物污染	酚类、苯、醛等	耗氧、异味、毒性	制革、炼油、化工、煤矿、化肥等工业污水及地面径流
	油类污染	石油及其制品	漂浮和乳化、增加水色、毒性	石油开采、炼油、油轮等
生物性污染	病原菌污染	病菌、虫卵、病毒	水体带菌、传染疾病	医院、屠宰、畜牧、制革等工业、生活污水、地面径流
	霉菌污染	霉菌毒素	毒性、致癌	制药、酿造、食品、制革等工业
	藻类污染	无机和有机氮、磷	富营养化,恶臭	化肥、化工、食品等工业、生活污水、农田排水

(一)耗氧有机物污染

耗氧有机物主要来自工业废水和生活污水中的碳水化合物、蛋白质、脂肪、木质素等,在微生物作用下氧化分解为 CO_2 、 H_2O 、 NO_3^- 、 N 等的过程中,不断消耗水中的溶解氧,故称耗氧有机物。这类物质绝大多数无毒,但消耗溶解氧过多时,将造成水体缺氧,致使鱼类等水生生物窒息而死亡。例如一般鱼类生存的溶解氧临界值为 $3 \sim 4 \text{ mg/L}$,水体的溶解氧低于此值时,就会危及鱼类的生存。当水体中的氧耗尽时,有机物将在厌氧微生物作用下分解,产生甲烷、氨、硫化氢等有毒物质,使水变黑发臭,令人厌恶。

有机物分解释放出的营养素 N 、 P 等,会引起湖泊水库等流速缓慢的水体富营养化,使藻类、水草等大量生长,并形成泡沫、浮垢,覆盖湖面,阻止水体复氧,引起水体浑浊、恶臭等。大量藻类、水草死亡后沉入湖底,久而久之,将导致湖泊的淤塞和沼泽化,破坏生态平衡。

有的耗氧有机物,如酚、苯、醛等本身就有毒性。酚污染的水有令人厌恶的药味,对神经系统危害较大,高浓度酚可引起急性中毒,以至昏迷而死亡;慢性中毒引起头昏、头痛等。酚可在鱼体富集,产生不良气味,并抑制鱼卵胚胎发育。苯胺是重要化工原料,受苯胺污染的水和空气,对神经系统有刺激作用,长期接触可影响肝功能并易患膀胱、前列腺和尿道等疾病。甲醛污染的水和空气对粘膜有强烈的刺激作用,它还是一种可疑的致癌物质。

(二)可溶性盐类和酸、碱物质污染

碳酸盐类、硝酸盐类、磷酸盐类等,存在于大部分的工业废水和天然水中,它能使水变硬,在输水管道内结成水垢,降低输水能力;尤其容易产生锅垢,降低热效率,甚至造成锅炉炸裂。硬水会影响纺织品的染色,以及啤酒酿造及食品罐头产品质量。

受酸性物质污染的水,如酸雨,可直接损害各种植物的叶面腊质层,使大片大片的植物逐渐枯萎而死;可使土壤酸化,导致钙、镁、磷、钾等营养元素淋失,陆生生态遭受破坏;使湖泊酸化,当 pH 值低于 4.5 时,将危及鱼类生存;腐蚀金属器具、文物和建筑物等。工厂排

出的酸性废水,使水体酸化,影响游泳、划船等娱乐性活动,使水体失去灌溉、养殖价值。

许多工业,如肥皂厂、染料厂、橡胶再制厂、造纸厂及皮革厂排出的含氢氧化钠的废水,将影响水体的碱性和 pH 值。水中含氢氧化钠的量即使低于 25 mg/L,亦会使鱼致死。锅炉用水含碱时,因腐蚀会引起管子碎裂。长期应用 pH 值大于 9 的水灌溉,可使水稻烂秧、蔬菜死亡,土壤板结。其它如发酵速率、烘烤面包的质量、饮料的品味、啤酒酿造中的酵母菌活性等,都会因水的 pH 值而受影响。

(三)重金属污染

比重达 4.0 以上的金属元素,常称之为重金属。工厂和矿山废水中常含有某些重金属,如汞、镉、铅、铬、铜、锌等。这些金属及其化合物非常稳定,极难降解,尽管在水中的浓度很低,也会因在食物链的传递中不断浓缩,而最终给人类带来严重疾病。例如无机汞可在生物体中转化为毒性很强的有机汞(甲基汞),损害人体细胞内的酶系统蛋白质的巯基,引起中枢神经系统障碍。中毒者出现小脑性运动神经失调、语言障碍、视野缩小等症状。日本著名的水俣病就是长期食用受甲基汞污染的鱼贝所引起。长期接触低浓度镉的化合物,容易引起肺气肿、肾病和骨痛病。镉在骨骼中蓄积,可使骨质疏松变形,导致骨痛病。铅中毒表现为多发性神经炎,头晕、头痛、乏力,还可造成心肌损伤。重金属中有些是人们必需的微量元素,但摄入过量,又会引起严重疾病。例如铜是人体必不可少的,但长期饮用含铜高的水($> 100 \text{ mg/L}$)可引起肝硬化。

(四)有毒化学品污染

有毒化学品包括有机的和无机的,它们即使在很低的浓度下,对鱼类和水中微生物也有很强的毒性。如硫酸铜浓度 $0.1 \sim 0.2 \text{ mg/L}$ 、氰化物(以 CN 计)浓度 $0.04 \sim 0.1 \text{ mg/L}$ 以上时即可使鱼致死。农药是面源污染中最常遇到的一类有毒化学品。为防治农业病虫害,有些地方大量使用农药,如滴滴涕、六六六、对硫磷、内吸磷、砷化物等,许多化学性能比较稳定,不易分解消失,可长期残留在土壤和作物

上,经雨水冲刷进入水体,危害水生生物的生长和生存。

(五)悬浮固体

水中悬浮固体主要来自垦荒、农田、采矿、建筑引起的水土流失,以及工厂排放废水和生活污水等,它不仅淤塞河道,妨碍航运,造成洪水泛滥,而且妨碍水资源利用,污染水环境。悬浮物能够截断光线,妨碍水生植物的光合作用,并能伤害鱼鳃,浓度大时可使鱼类死亡。悬浮物沉积到水底,会将鱼的产卵场覆盖,妨碍鱼类繁殖。

(六)油类污染

油污染是水质污染的一个重要方面,近年来愈来愈引起人们的重视。污染水体的油主要来自油船、输油管和海上油井事故,船只的压舱水、洗舱水和船底废水,油厂、船厂等排放的废水,以及各种机械洒漏在地面上的油脂经雨水带入水域。

石油中含有数千种化合物,主要是烷烃、烯烃和芳香烃等碳氢化合物。油品进入水体后,先成浮油,后成油膜和乳化油。油膜在水面上扩展和漂浮,有一定的毒性和产生难闻的气味,会阻碍水分蒸发和氧气溶入水体,危及鱼类及鸟类生存,破坏渔场、海产养殖场及鱼的繁殖场所,影响水资源利用价值,包括降低游览娱乐价值。石油在水体中可经过光化学氧化作用和生物氧化作用而分解,产生多种化合物,甚至有一些是致癌物质。

(七)热污染

热污染是一种能量污染。热电厂、核电厂、钢铁厂、焦化厂等的冷却水是热污染的主要来源。这种温度升高的水排放到天然水体后,引起水体温度过高,形成热污染。水温过高可产生一些不良的影响和危害:

1. 水温增高,会降低水的饱和溶解氧浓度,同时促使水中有机物加速分解,增加氧的消耗,从而使水体的溶解氧降低。

2. 水温过高,会破坏生态平衡的温度环境条件,加速某些细菌、藻类、水草的繁殖,厌氧发酵,可能导致水体的恶臭现象。