

王秉忱 陈曦 (主 编)

刘德明 张璇 姜广良

地下水水质模型

辽宁科学技术出版社

地下水水质模型

王秉忱 陈 曦 主 编

刘德明 张 璇 姜广良

辽宁科学技术出版社

一九八五年·沈阳

本书共有六章。基本上反映了八十年代国内地下水水质数学模型的水平。

第一章为水动力弥散的基本理论。第二章系统地推导了地下水水质模型的解析公式。第三章较详细地讨论了室内外测定弥散系数的理论、方法、步骤及弥散试验的有关问题。第四章详细地论述了地下水水质模型的有限差分及各种解法及收敛性等问题。第五章主要介绍地下水水质模型的迦辽金有限元方法。第六章以部分国内外较成功的实例介绍地下水水质模型在各方面的应用。书后附录了书中所用的某些数学知识,各种特殊函数与积分变换、矩阵代数、线代方程组的解法、矢量空间等。

本书可供水文地质专业、环境保护专业的工程技术人员、研究生、高等学校的师生参考,也可供数学和流体力学工作者参考。

地下水水质模型

Dixiashui Shuizhi Moxing

王秉忱 陈 曦 主 编
刘德明 张 璇 姜广良

辽宁科学技术出版社出版 (沈阳市南京街6段1里2号)

全国建勘东北情报站发行 东北工学院印刷厂印刷

开本: 850×1168 1/32 印张: 1 1/2 字数: 386,000

1985年6月第1版

1985年6月第1次印刷

责任编辑: 刘 红

封面设计: 秀 中

印数: 1—3,000

统一书号: 15288·153 定价: 3.80元

(委托出版)

目 录

前 言	(1)
绪 论	(5)
第一章 水动力弥散的基础理论	
§ 1 水动力弥散的基本概念	
1.1 水动力弥散作用	(13)
1.2 水动力弥散的机理	(15)
1.3 研究水动力弥散问题的空间平均方法	(17)
1.4 与水动力弥散有关的参数	(20)
§ 2 水动力弥散方程	(25)
2.1 溶液中单组分的质量守恒和扩散方程	(25)
2.2 多孔介质中的水动力弥散方程	(27)
2.3 笛卡尔坐标系中水动力弥散方程的推导一例	(28)
2.4 柱坐标系中水动力弥散方程的推导一例	(30)
2.5 水动力弥散方程的扩充	(33)
§ 3 水动力弥散系数	(36)
3.1 弥散系数	(36)
3.2 弥散系数与速度分布、分子扩散及 介质特征的关系	(37)
3.3 弥散系数的张量表达式	(40)
§ 4 水动力弥散方程在其它坐标系中的形式	(43)
4.1 柱坐标系	(43)
4.2 球坐标系	(44)
4.3 极坐标系	(44)
§ 5 水动力弥散方程的定解条件	(45)
5.1 初始条件	(45)

5.2 边界条件.....	(45)
---------------	------

第二章 地下水水质模型的解析解法

§ 1 对流扩散方程的解析解法	(48)
1.1 点源问题的基本解.....	(48)
1.2 瞬时线源与面源问题的解.....	(50)
1.3 一维均匀场流中瞬时点源、连续注入问题.....	(52)
§ 2 一维地下水水质模型的解析解法	(55)
2.1 无限域含水层中示踪剂的注入.....	(55)
2.2 半无限域含水层中示踪剂的连续注入.....	(56)
2.3 无限域含水层示中踪剂的脉冲注入.....	(60)
2.4 无限域含水层中示踪剂具有放射性衰减情况...	(62)
2.5 半无限域含水层中示踪剂具有放射性 衰减情况.....	(64)
§ 3 平面二维地下水水质模型的解析解法	(66)
3.1 示踪剂的脉冲注入.....	(66)
3.2 示踪剂的连续注入.....	(67)
§ 4 径向地下水水质模型的解析解法	(70)
§ 5 考虑吸附作用的水动力弥散问题	(85)
5.1 考虑综合吸附作用的水动力弥散问题.....	(85)
5.2 考虑顶底板岩石吸附作用的水动力弥散问题...	(88)

第三章 水质参数的测定

§ 1 测定弥散系数的步骤	(91)
§ 2 弥散系数测定对示踪剂的要求	(92)
2.1 示踪剂的种类.....	(92)
2.2 分配系数.....	(94)
2.3 示踪剂的选择.....	(96)
§ 3 弥散系数测定对水文地质条件的要求	(97)

3.1	地层、岩性	(97)
3.2	地下水特征	(97)
3.3	试验井组	(98)
§ 4	弥散系数的实验室测定	(99)
4.1	实验要求与条件	(99)
4.2	实验装置	(99)
4.3	实验方法和步骤	(108)
§ 5	吸附参数的实验室测定	(102)
§ 6	弥散系数的野外测定	(105)
6.1	准备工作	(105)
6.2	示踪剂溶液的配制	(105)
6.3	试验方法、步骤	(106)
§ 7	弥散系数的计算	(108)
7.1	解析公式法 (直接法)	(109)
7.2	解析公式法 (间接法)	(116)
7.3	标准曲线对比法	(117)
§ 8	弥散试验的成果分析	(119)
8.1	理想示踪剂条件下的水动力弥散方程	(120)
8.2	对含水层中示踪剂弥散运移的分析	(120)
§ 9	地下水平均实际流速的测定	(126)
9.1	单井法	(126)
9.2	多井法	(128)

第四章 地下水质模型的有限差分解法

§ 1	引言	(120)
§ 2	差分的概念	(129)
§ 3	一维地下水质模型的差分解法	(138)
3.1	四点显式法	(133)
3.2	四点隐式法	(132)

3.3	六点对称格式	(142)
3.4	差分格式的稳定性	(144)
3.5	求稳定性条件的方法	(153)
3.6	其它的二层格式	(160)
3.7	三层格式	(161)
3.8	“显隐”和“隐显”格式	(164)
3.9	计算实例	(166)
3.10	变系数问题	(174)
3.11	低阶项的影响	(176)
3.12	一维地下水水质模型小结	(178)
§ 4	二维地下水水质模型的差分解法	(178)
4.1	显示方法	(179)
4.2	隐式方法	(180)
4.3	六点对称格式	(181)
4.4	交替方向隐式方法	(182)
4.5	计算实例	(184)
4.6	其它的分数步长法	(195)
4.7	局部一维法	(197)
4.8	分裂法	(200)
4.9	考虑源汇项的二维流场、二维弥散的地下水水质模型的分裂解法	(202)

第五章 地下水水质模型的有限单元解法

§ 1	引言	(212)
§ 2	变分原理与变分方程	(216)
2.1	泛函与变分	(216)
2.2	变分方程与欧拉方程	(228)
2.3	基于变分原理的有限元方法	(220)
§ 3	区域剖分与分片线性插值	(221)

3.1	二维区域的三角剖分	(222)
3.2	与三角剖分相应的分片线性插值	(224)
3.3	三角形单元上的线性插值函数	(225)
3.4	线元上的线性插值	(230)
3.5	数值积分	(232)
§ 4	二维稳定渗流问题的有限元解法	(235)
4.1	变分原理与变分方程	(236)
4.2	方程的离散化	(239)
4.3	单元分析	(244)
4.4	总体合成	(247)
4.5	线性代数方程组的解法	(248)
§ 5	二维非稳定渗流问题的有限元解法	(249)
5.1	等价的变分方程	(250)
5.2	承压水渗流问题的解法	(251)
5.3	潜水渗流问题的解法	(257)
§ 6	井点问题的处理	(260)
6.1	线性处理	(260)
6.2	奇点折出法	(264)
6.3	对数插值法	(267)
§ 7	二维地下水水质模型的有限元解法	(276)
7.1	变分方程	(278)
7.2	剖分与分片线性插值	(279)
7.3	变分方程的离散化	(280)
7.4	单元分析	(281)
7.5	总体合成	(284)
7.6	常微分方程组的解法	(284)
7.7	线性代数方程组的解法	(285)
7.8	浓度的精度说明	(285)
§ 8	解二维水质模型的函数磨光法与样条函数插值法	(286)

8.1	区域的矩形剖分与双线性插值	(286)
8.2	矩形单元上的双线性插值基函数	(288)
8.3	函数磨光与 B -样条函数	(292)
8.4	相应于矩形剖分的渗流问题解法	(294)
8.5	函数磨光法	(296)
8.6	样条插值法	(298)
§ 9	实 例	(302)
9.1	压缩存贮技术	(303)
9.2	程序中主要符号的说明	(305)
9.3	程 序	(307)

第六章 地下水水质模型的类型与应用

§ 1	对流—弥散型地下水水质模型	(317)
1.1	示踪剂情形	(318)
1.2	一般情形	(320)
§ 2	纯对流型地下水水质模型	(322)
2.1	用渗流方程预测污染的发展	(323)
2.2	地下水流方程与地下水水质方程耦合的方法	(324)
§ 3	集中参数型地下水水质模型	(327)
§ 4	地下水水质模型应用的一般过程	(328)
4.1	确定目标和任务	(328)
4.2	环境水文地质调查	(330)
4.3	地下水水质模型的选择	(333)
4.4	现场试验与地下水水质模型的建立	(334)
4.5	编制程序与数据整理	(335)
4.6	模型的检验及模型的运转	(336)
§ 5	地下水水质模型的应用	(336)
5.1	河流、沟渠对地下水的污染	(336)
5.2	水源地污染的预测	(339)

5.3	垂向补给条件下的地下水污染模拟与预测.....	(546)
5.4	废渣、废物的污染问题.....	(555)
5.5	海水入侵问题.....	(560)
5.6	地下水的人工回灌问题.....	(563)
5.7	地下水管理决策方案问题.....	(565)

附录A 解析解法的某些预备知识

§ 1	Γ 函数与误差函数	(567)
§ 2	贝塞尔函数	(569)
§ 3	δ 一函数	(579)
§ 4	付里叶变换	(582)
§ 5	拉普拉斯变换	(594)
§ 6	拉氏变换的反演定理与展开定理	(405)

附录B 数值解法的某些预备知识

§ 1	矩阵代数	(412)
§ 2	分段线性插值及三次样条插值	(422)
§ 3	线性代数方程组的数值解法	(430)
§ 4	方程求根	(436)
	主要参考文献	(441)

前 言

地下水资源的合理开采利用、保护与管理是水环境保护工作的中心内容，也是现代水文地质学的基本理论研究课题与水文地质勘察实践的重要环节。这个问题有重要的国民经济意义，是因为地下水资源勘察与评价的目的，即在于技术经济上合理开发利用这种水资源，保护生态环境，保证国家生产建设与人民生活的长期需要。

解放后这些年来，我国水文地质勘察工作取得了很大成绩，建立了各种类型的水源地，基本上满足了当时当地的需要。但是，由于主客观方面的原因未能做到合理开发利用，未能保护与管理好地下水资源，所造成的地下水公害已达到比较严重的程度，不但满足不了四化建设与人民生活的正常需要，而且已对我国城市环境与人体健康构成灾害性后果与潜在威胁，必须引起足够重视。

党的十一届三中全会以来，党中央和国务院作出许多保护环境和资源的重要指示和决定。我国主管部门的有关领导同志提出，为实现2000年的我国环境建设战略目标，应把解决好工业污染问题和自然生态平衡，尤其是农、林、水系统的问题作为我国环境建设的战略重点，并要搞好环境预测，制订与认真实施环境规划。其中，水资源的保护与利用应成为一项重大国策，因为水是一种基本的环境因素，也是重要的资源。它的开发利用与保护情况如何，不仅关系到工农业生产的发展，而且直接关系到人民生活 and 整个国民经济建设事业的发展。因此，保护水资源，防止水质污染，是国民经济建设方针的一项重要内容。应该看到，无论在水资源污染的防治，还是在水资源的合理开发利用上，地下水资源都占有相当的比重。

我国地下水资源的污染状况是严重的，而且有日益蔓延发展的趋势（详见绪论）。实践证明，地下水污染一旦形成，是难以有效治理

的，在有些情况下即使投入高额资金也常常事倍功半或收效甚微。必须着眼于防治及控制地下水污染范围的扩展。故应基于防患于未然观点，预测地下水环境的未来变化趋势，提出防止其进一步恶化与改善环境质量的技术对策。

在我国环境影响评价理论与实际工作中，把地下水环境影响预测和评价作为一个独立部分来开展，是因为在人类生产活动（包括开发建设工程项目）的影响下，地下水环境发生一系列显著变化，造成地下水公害，从而产生了对其危害程度进行预测和评价的必要性。它与已在我国开展的环境质量评价工作相比较，具有更大的现实意义。环境质量评价是对环境现状（如地下水污染现状等）的认识，但今后地下水环境变化的趋势如何，则是人们极为关切的问题，以便及时有效地针对这种趋势采取相应对策，达到保护环境的根本目的。因此，地下水环境影响预测和评价是当前我国亟待大力开展的工作，而地下水水质模型则是地下水水质预测和评价的重要手段与研究内容。

此外，从水文地质勘察工作角度来看，地下水资源评价是水文地质勘察工作的重要组成部分。而地下水资源评价则包括地下水量计算评价与地下水水质分析评价两方面内容。当前，国内外在地下水资源量的计算评价实践中，已积累了比较丰富的经验，针对多种水文地质条件建立了大量的地下水量模型，从理论到方法上已为许多水文地质工作者所掌握及熟悉运用。而地下水水质模型的建立与应用却远非如此。因此，在我国水文地质及环境保护工作者及有关科学技术人员当中介绍地下水水质模型的理论及其应用，是极其必要的。

全书除前言及绪论外由六章组成。第一章为地下水水质模型的基础理论部分，较详细介绍水动力弥散的现象和机理，与水动力弥散有关的流体参数，介质参数，并重点讨论了控制水动力弥散作用的弥散系数的张量性质及各种条件下的标量表达式，水动力弥散方程的建立与定解条件的确定等内容，第二章为地下水水质模型的解析解法，系统地推导了国外现存的各种条件下的解析公式，并分别给出了无量纲形式解，为简单条件下的水质预测及局部范围弥散系数的计算提供理论

基础，第三章为弥散系数的确定，讨论了室内外测定弥散系数的理论、方法、步骤及示踪剂注入试验（即弥散试验）的有关技术问题，其中包括弥散试验对示踪剂的要求，对水文地质条件的要求，试验规模，试验井孔的布设原则，试验所需仪器设备等，最后给出了弥散系数的计算方法，且结合国内外的发展趋势，对标准曲线量板法做了详细介绍。此外，为对不同流场，不同注入示踪剂方式下的弥散试验的成果进行解释，本节中还详述了它们之间的内在联系及精度比较，这对简化试验及正确地选择现存解析公式，无疑是很有效的。第四章为地下水质模型的有限差分解法，详细、深入地讨论了一、二维水动力弥散方程的各种格式，解法及其收敛性、稳定性，文中打破常规，提出了很多独特解法，值得借鉴。此外，文中还列举了一些实例，并给出了计算机程序，第五章为地下水质模型的有限单元解法，考虑到迦辽金有限元法应用的广泛性，大多数读者对解水量模型的迦辽金法较为熟悉及水质模型与水量模型求解的相似性，文中采用由水量模型向水质模型过渡的方法。此外，为克服以对流为主条件下，采用线性插值会造成流速通过边界的不连续问题，还重点介绍了磨光函数法与三次样条函数插值法。

第六章为地下水质模型的应用。本章重点介绍水质模型应用的一般过程，并以国内外部分实例讨论了它在城市厂矿供水水源地地下水污染趋势的预测，废渣废物的堆放，滨海含水层的海水入侵，人工回灌条件下对地下水质的影响以及在地下水资源管理模型中的几方面的应用。

对上述内容，我们虽然在主观上想把本书编好，但是由于我们的能力有限，加上时间短及资料不足等原因，致使在内容上可能存在不少的缺点和错误，我们衷心希望读者提出批评、改进意见，以便提高它的质量。

本书的前言由王秉忱编写，绪论由王秉忱、陈曦共同编写，第一、三、六章由陈曦编写，第二章及附录A由姜广良编写，第四章由刘德明编写，第五章由张璇编写，附录B由邹积斌编写。最后由王秉

忱和陈曦对全书进行统编。

本书的编写得到了刘金山、林学钰、杨天行、林绍志、宁有义、张振国与哈乃升等同志的支持，杨维同志也为本书提供大量国外资料，在此一并致谢。

编 者

一九八四年九月

绪 论

地下水质模拟乃是应用数学模拟方法研究地下水中可溶物质弥散运移时,其浓度的时空变化规律,以预测污染地下水的瞬时状态与扩展范围,为制定合理有效的地下水污染防治措施,选择最佳治理方案提供科学依据。地下水质模型就是对地下水质进行模拟研究建立的数学模型。地下水模拟方法也用来研究地下热流的运移,以解决地热资源勘察与评价的问题,故地下水模型包括物质运移模型与热运移模型两种。

据截止于 1978 年的情报信息,世界上已有不多的几个国家开展了地下水模拟研究,建立了预测性的地下水质模型。其中,美国已建立 22 个物质运移模型和 5 个热运移模型;法国建立了 5 个物质运移模型与 4 个热运移模型。下列国家则仅建立了物质运移模型:以色列 7 个;英国 2 个;加拿大 2 个;西德 1 个,日本正在建立中。1978 年以后,有些国家继续进行此项研究,取得一定成果。

近年来,由于城市和厂矿的污水和废水大量排放,废渣和废物的大量堆放以及农业上化肥和农药的广泛使用,使得国内外许多地区的地下水遭到了不同程度的污染。事实证明,地下水一经污染便很难消除,因此我们应采取“以防为主,防治结合”的方针,故应高度重视地下水水质的监测和预报工作,并以此为依据采取各种措施保护和改善地下水的水质。

当前地下水污染已成为全球性的环境问题。美国、日本、苏联等国家地下水的污染已相当严重。我国和其它国家也很突出。如果不采取积极措施进行控制和治理,地下水污染可能蔓延到整个地下水圈。有人预测,到公元 2000 年全世界每年排放的污水将达 6090 立方公里,而为把全部污水稀释到无害化的程度,将耗尽地球上全部的淡水资源。

水环境污染在我国环境保护工作中是一个突出问题。随着工业生产的增长和城市规模的扩大与发展,排向江河、湖泊的污水量不断增加。目前,全国每天排放污水约 9170 万吨,其中工业排放的废水约 7210 万吨,城市生活排放的污水约 1960 万吨。由于现有的污水净化处理水平很低,工业废水处理率只有 15%,有 71% 的工业废水不符合国家规定的排放标准,带入大量的有毒、有害污染物质,排放到自然水体,造成了水体污染,破坏了生态平衡。我国有流域面积 100 平方公里以上的河流 5375 条,据对有监测资料的 1200 条主要河流或河段分析,受到不同程度污染的有 850 条,约占 70%,其中严重污染的有 230 条,约占 19%。城市区域的河流和流经城市区域的河段,几乎都受到污染。据对有监测资料的 31 个主要湖泊,水库的分析,除官厅水库、鄱阳湖、洪湖等少数地表水体未受明显污染外,太湖、洞庭湖、东湖等许多著名湖泊,都受到不同程度的污染。地下水污染的情况也是严重的。据对 47 个城市的地下水水质资料分析,有 43 个城市的地下水受污染,北方城市的地下水则受到严重污染。从我国水环境污染的总体情况来看,目前大多数地区是被有机质污染,少数地区受到汞、镉等重金属和有毒物质的污染,在不少地区已经危及饮用水源。水环境污染已对人民身体健康、工农业及渔业生产和旅游事业的发展造成了危害。

随着环境污染的日趋严重和地下水开采强度的加剧,城市地下水的总硬度、总矿化度不断增高,甚至水化学类型亦随之发生变化,这是我国城市地下水污染问题中最普遍的现象。据 1984 年统计的 29 个城市,均程度不同地存在这个问题。有的城市上述指标增长速度较快,长春市工业区 1976~1980 年,总硬度升高近 11 度(德国度,下同),居民稠密区上升了 8.3 度。1982 年第四系浅层地下水总硬度已达 63 度,超标面积为 20 平方公里。吉林市总硬度高达 89 度,超标面积达 36.9 平方公里。四平市总硬度达 93 度,超标面积 11.6 平方公里。北京市自七十年代以来,总硬度急剧上升,到 1978 年,水源一、四、七厂绝大多数供水井总硬度超标,最高达 40 度以上,超标面积

由 1965 年的 93 平方公里猛增至 230 平方公里。济南市素有“泉城”之称，地下水污染虽较轻，但从 1958 年到 1980 年总硬度也增加了 1~3 度。趵突泉的 Cl^- 、 SO_4^{2-} 增加一倍以上，黑虎泉增加近两倍。包头市潜水总硬度超标率为 42.4%，最高超标 3.3 倍。西安市潜水总硬度超标面积约 180~250 平方公里，大于 40 度的有 45~54 平方公里，至 1980 年西安市城区和近郊区总矿化度大于 1.0 克/升的面积达 121 平方公里，大于 1.5 克/升的达 32 平方公里，最高到 2.59 克/升。兰州市马滩水源地 1982 年总硬度超标的供水井为 12 眼，占总井数 40%，最高到 123.5 度，矿化度最高者已达 2.02 克/升。沈阳市市内中心区地下水硬度超过 25 度的面积已达 30 平方公里。此外，我国南方的一些城市也出现类似现象，如上海、常州、桂林、遵义等城市的地下水总硬度和总矿化度也逐年升高。

由于污染地下水的常量组分不断增加，改变了地下水化学成分的配比关系，致使地下水水化学类型发生了变化，大多数城市地下水由原来的重碳酸盐型逐渐向硫酸盐和氯化物型变化，甚至出现复杂的水化学类型。

城市地下水由于受到工业废水、废渣的污染，普遍检出酚、氰、六价铬、砷、镉、汞、铅等有害物质。有的城市单项或多项污染物超标，含量之高令人触目惊心。哈尔滨、齐齐哈尔市潜水和承压水都受到严重污染，酚、氨、氮皆超标，哈尔滨市酚最高检出值 0.59 毫克/升，超标 295 倍。齐齐哈尔市超标 4 倍。牡丹江市超标 20~100 倍。长春市浅层地下水酚含量达 0.03 毫克/升，超标 14 倍。吉林市超标面积 91.5 平方公里，长春市 40 平方公里，此外这两个城市的铅、六价铬、氰化物也超标。沈阳市浑河两侧油、COD、酚污染宽度达 500~1000 米，其中油含量 0.048 毫克/升，超标 47 倍，全市 420 眼水井中有 78% 不符合饮用水标准，其中以李官堡水源为重，据 82 年 4 月 20 日 14 号井化验资料，硝酸氮含量达 14.5 毫克/升，超标 144 倍；锰含量达 3.5 毫克/升，超标 34 倍；酚含量达 0.055 毫克/升，超标 26.5 倍。铁含量达 3.8 毫克/升，超标 11.6 倍，北京市地下水受到