

· 城市生态保护 ·

地下水溶质迁移规律研究概述

白福高, 刘伟江, 文 一, 陈 坚
(环境保护部环境规划院, 北京 100012)

摘要: 在地下水的相关研究中, 地下水污染、土地盐碱化、海水入侵等诸多实际问题主要的研究方法都涉及地下水溶质迁移模拟。相比地下水水流模拟的相对完善, 对溶质迁移的模拟比较薄弱且迁移过程本身复杂性较高, 目前地下水溶质迁移的研究工作还处在全面发展的阶段。总结并阐述了目前溶质迁移模拟所使用的对流迁移、对流-弥散模拟等主要数值方法, 并对这些方法的优缺点和应用实例进行总结分析。针对国内有关地下水金属迁移、胶体迁移、微生物作用、耦合作用等方面研究进行了概述, 并在参数确定、裂隙介质运移机理和多相介质条件下运移模拟可能取得的突破进行分析。

关键词: 地下水污染; 溶质迁移; 数值模拟

中图分类号: X523

文献标志码: A

An Overview of Migration Simulation of Groundwater Solute

Bai Fugao, Liu Weijiang, Wen Yi, Chen Jian
(Chinese Academy for Environmental Planning, MEP, Beijing 100012, China)

Abstract: In the studies related to groundwater, the main research methods of some practical problems such as groundwater pollution, soil salinization and seawater intrusion all involve migration simulation of groundwater solute. Migration simulation is relatively better than groundwater flow simulation, but the simulation of solute migration is rather poor and the migration process itself is quite complicated, so the study of groundwater solute migration is still in a development stage. In this paper, the main numeral methods such as convection migration and convection-diffusion simulation currently used for solute migration simulation are summarized and illustrated. Advantages and disadvantages of these methods and application cases are summed up. Domestic and foreign researches concerning metal migration of groundwater, colloid migration, microbial action and coupling are reviewed. Finally, possible breakthroughs of migration simulation are analyzed under the conditions of parameter identification, fissure medium migration mechanism and the multiphase medium.

Keywords: Groundwater Contamination; Solute Migration; Numerical Simulation

CLC number: X523

溶质迁移是水文地球化学中定量研究的核心问题。通过试验研究溶质运移一直是国内外学者重点关注的问题之一^[1], 自20世纪50年代起, 大量研究学者们就开始进行系列的一维水动力弥散试验来研究弥散系数与其它因素之间的关系。近年来, 通过对水盐机理的进一步研究, 通过使用数学模型对溶质运移、转化过程展开研究逐步趋于可能, 并在精度上有着明显突破。

1 地下水污染

地下水动态变化较快、水质的变化情况不易观测, 一旦查明地下水存在污染的情况, 那么往往污染程度已经较大, 问题较为严重, 所造成的危害也较大, 以至污染治理难度大大提升。人类生产、生活中的各种废水、废弃物都有造成地下水污染的可能。

在人类社会生活中, 地下水发挥着巨大作

收稿日期: 2015-10-20

作者简介: 白福高 (1991-), 男, 研究生。研究方向: 水文地质。E-mail: baifugao@foxmail.com

通信作者: 刘伟江 (1977-), 男, 副研究员。研究方向: 地下水污染防治。E-mail: liuwj@caep.org.cn

用,保护地下水,防止地下水污染以及对污染地下水进行修复是目前非常重要的研究课题。Darcy定律发表后很长时间内对地下水的研究都不考虑溶质迁移问题,从20世纪60年代起,Theis对污染物迁移进行理论研究,尝试运用吸附模型来模拟一些简单过程,溶质迁移理论得到初步发展^[2]。地下水中污染物的迁移情况以地下水水流场为基础,即在地下水水流模型的基础上建立地下水溶质运移模型,从而模拟出污染物在地下水中随时空的变化情况。通过对污染物在地下的运移过程建立数学模型进行数值模拟,找出其迁移规律、污染范围及浓度分布,从而为地下水资源管理和地下水污染的修复提供定量依据,保证地下水在社会经济可持续发展中发挥积极的作用^[3]。20世纪70年代起,地下水中污染物运移的数值模拟才开始有了相对系统的发展。近年来,国内外的不少研究学者在地下水污染物运移模拟方面进行了大量实验和理论研究,并逐步将地下水污染物运移模拟方法应用到实际工程问题中。

2 地下水溶质迁移及影响因素研究

目前地下水溶质迁移的研究工作还处在全面发展的阶段。地下水溶质迁移影响因素的研究也是近代学者们主要的研究内容之一。具体情况分述如下。

2.1 敏感性分析

地下水溶质迁移模拟结果的影响问题,越来越受到研究学者们关注和重视。在用数值法进行地下水溶质迁移模拟时,渗透系数、孔隙度、弥散度均为重要的参数。渗透系数是表征含水层渗透能力的指标,对溶质迁移有重要影响^[4]。弥散作用对溶质在地下水中的扩散可以产生重大影响,在地下水流速较小、对流作用不太强烈时,弥散作用表现的更为重要。此外,对流作用中的一个关键性参数是孔隙度,当溶质在含水层介质中迁移时,孔隙度的较小变化将会对地下水流速和溶质迁移产生较大影响。

国内研究学者李木子等^[5]用局部分析法中的因子变换法,对3种参数(渗透系数、孔隙度、

弥散度)分别做相同幅度的变化,分析它们对溶质迁移模拟结果的影响情况。结果显示参数值的设置对溶质迁移计算结果影响巨大。由于水文地质条件的复杂性及资料的有限性,提高地下水中溶质迁移模型的精度,对参数进行敏感性分析显得至关重要。

2.2 吸附和微生物降解作用

吸附作用是地下水溶质迁移过程中自然衰减的主要作用之一,吸附作用影响着污染物在地下水中的流动性和滞留性。生物降解作用也是特征污染物在地下水迁移过程中主要的自然衰减作用之一。近年来,国内外对吸附和微生物降解作用的研究越来越多。

利用微生物从水溶剂中富集、分离特殊离子的方法称为生物吸附法,最早是由Ruchhoft提出,Ruchhoft利用活性污泥为吸附剂成功去除了废水中的Pu²³⁹。在此之后,国内外诸多研究学者围绕生物吸附剂进行了广泛而深入的研究。最初的吸附剂以微生物为主,主要是原核微生物中的细菌、放线菌,真核微生物中的酵母菌、霉菌等。但近年来,生物吸附剂已不仅限于微生物的范围,目前来说,吸附剂可以是无生命特性的动植物碎片,也可以是有生命特性植物系统。例如有机物类吸附剂有纤维素、淀粉、壳聚糖等;细菌类吸附剂有枯草杆菌、地衣型芽孢杆菌、氰菌等;动植物碎片类吸附剂有螃蟹壳、金钟柏、稻壳、花生壳粉、红树叶碎屑等;植物系统类吸附剂有大麦、香蒲、凤眼莲、红树、加拿大杨等。总之,吸附剂的种类繁多,吸附功能和效果也各有不同,在进行吸附剂的选用过程中,应根据吸附目的的不同按照相应要求适当选取。

2.3 胶体的形成及其对地下水溶质迁移的影响

地下水系统中,胶体的存在较为广泛,可分为天然无机胶体和天然有机胶体两大类型。针对胶体对地下水溶质迁移的影响研究,有关研究学者修正了传统的两相系统模型,将胶体相这一新的相态引入到了系统中。使常规的固—液两相的地下水系统变为了一种包括液—固—胶体相的三相系统。胶体的形成,对地下水中的污染物、特

别是低溶解度污染物迁移的促进作用在很多研究方面得到了证实。周皓等^[6]在研究胶体对放射性核素的迁移影响中指出:若地下水系统中存在有利于胶体形成的物理、化学条件,则形成的胶体会对污染物的迁移产生正面或负面的影响,使地下水中污染物的迁移速度受到显著影响。相反,若地下水系统中的物理、化学条件不允许,则地下水中将很难形成胶体,这时地下水中污染物的迁移与胶体无关。

近年来,针对胶体的研究,深度越来越大,范围也越来越广。然而,胶体在地下水中所表现出来的具体性质却不够深入,在地下水中的胶体研究领域仍然有诸多问题需要解决,需进一步研究和发展。

3 地下水中特殊组分溶质迁移规律研究

3.1 重金属在地下水中的迁移

重金属对土壤环境的危害主要决定于重金属的存在形态,所以分析重金属在污染土壤中的存在形态是很有必要的^[7]。重金属在土壤地下水一般会呈现5种形态,即可交换态、铁氧化态、锰氧化态、碳酸盐态、硫化物形态^[8]。

重金属随着大气降水不断下渗,形成重金属溶液,重金属溶液在下渗过程中伴随着纵向迁移扩散。重金属溶液进入土壤地下水中后,会发生一系列的物理和化学变化,土壤地下水中的重金属在一定的条件下将连续不断地进行溶解沉淀、吸附与解吸、络合与解离,氧化与还原等其他反应,进而重金属在土壤地下水中的空间位置以及形态特征都将发生变化。

李志强等^[9]对重金属铀在地下水中的迁移进行了模拟研究,运用美国地质调查局的水文地球化学的PHREEQC-II模拟软件,针对地下水中的铀元素进行了分析,并建立了研究区内地下水中铀元素迁移的维溶质运移模型。指出了pH值对溶液中铀元素的存在形式有很大的影响,铀元素存在形式的不同又将影响铀元素在地下水中的迁移形式。

史维浚等^[10]针对砂岩型铀矿地勘过程的溶质

迁移机理进行了探索研究,他们讨论了溶质迁移、溶质迁移面和特征性溶质迁移面的概念,以及研究溶质迁移的方法和实例,为重金属在地下水中的迁移规律研究奠定了基础。

3.2 石油类污染物在地下水中的迁移

石油类污染物对地下水的污染越来越被人们重视,石油的开采、冶炼、使用和运输过程都有可能造成土壤地下水的污染。此外,含石油类污染物废水的排放、灌溉等也将引起一系列的污染问题。石油类污染物进入土壤地下水之中后,同重金属相似,也会发生一系列的物理化学变化,以至对土壤地下水环境造成严重污染。

目前,国内外针对石油类污染物的研究已不仅仅集中在试验和治理阶段。郑西来等^[11]利用氯化钠作为示踪剂来测定含水层的弥散系数,并根据实测的溶解油吸附等温曲线确定了含水介质对石油污染物的阻滞系数,进而将反应性石油污染物在地下水中的迁移转形式转化为示踪剂的对流—弥散迁移和溶解油在水相与固相之间的转移叠加。通过该方法评价了石油污染物对地下水的影响。

薛强等^[12]对地下环境系统中石油污染物运移的多相流数值模型进行了深入研究,在综合考虑了石油污染物质在地下水系统中存在扩散、吸附、解吸界面间分配以及微生物降解等作用的前提下,建立了有机污染物在多孔介质中迁移转化的多相流动力学模型,采用特征隐式压力显式饱和度方法和有限差分方法对耦合模型进行了数值离散,并编制了计算程序,利用该程序对石油污染物在地下环境系统中运移机制进行量化研究。研究结果指出:石油污染物在地表发生泄漏以后,将在重力和毛细力的共同作用下,产生纵向和垂向的位移。而在污染物迁移到地下毛细管区之后,其向下的迁移运动将整体受到毛细张力的阻碍作用。

3.3 淋溶液在地下水中的迁移

石淋溶液在土壤地下水中的迁移严重影响了地下水水质,对人类的身体健康构成了一定威胁。石淋溶液在土壤地下水中的迁移受各种物理、化学和生物作用的影响,包括对流、弥散、

扩散、吸附、溶解等复杂过程。一般情况,石淋溶液在土壤地下水中的迁移主要应用对流—弥散模型。

孙可明等^[13]就淋溶液在地下水中的迁移进行了模拟研究,研究了煤矸石在降水淋溶和地下水迁移条件下,污染物在地下土层和岩层内的迁移规律。通过对阜新新邱南露天矿矸石山淋溶液中主要污染物离子(Ca^{2+} 和 Mg^{2+})迁移规律的数值模拟,得到特征截面的污染物浓度变化曲线和地下水迁移的水头压力曲线并指出淋溶液在地下迁移是对流和弥散共同作用的结果。在岩石层内煤矸石淋溶液的运动主要是随地下水的迁移而扩散,而在土层内污染物则主要是在重力和降水作用下进行垂向的迁移。

4 总结

地下水溶质运移在人类生产和生活方面起着举足轻重的作用,渐渐地地下水溶质运移问题已成为了对未来发展有着关键影响的水土、环境问题。目前,我国地下水溶质运移的研究已经取得了很好的发展,但现有的溶质运移模型大多缺乏一定的可复制和代表性。

随着《环境影响评价技术导则——地下水环境》(HJ610-2011)的实施,建设项目的地下水环境影响评价越来越得到人们的重视,包括地铁及隧道工程、矿井工程、油气田开发工程和垃圾填埋场建设工程在内的建设项目均开始着手进行地下水环境影响评价,数值模拟技术作为一种评价方法在工作中起着至关重要的作用。但数值模拟技术在环境影响评价中的应用还存在着很多问题。由于我国地下水环境影响评价起步较晚,部分地区水文地质资料缺乏,无法对建设项目采

用数值模拟技术进行环境影响评价。由于各地的地质条件的差异很大,现成的软件可能无法对建设项目场地做出合适的模拟,因此需要自行编程以适应复杂的水文地质条件,这通常是比较困难的。

另一方面,国内外针对地下水溶质运移模拟研究大多停留在饱和流的条件下,而在非饱和流的研究方面,因其本身的复杂性,参数确定的拘束性等导致其研究成果未能取得重大突破,因此,非饱和流的溶质运移模拟仍需我们进行深入研究和求解。

参考文献

- [1]王锦国,周志芳.裂隙介质溶质运移实验研究[J].岩石力学与工程学报,2005,24(5):829-834.
- [2]魏恒,肖洪浪.地下水溶质迁移模拟研究进展[J].冰川冻土,2013,35(6):1582-1589.
- [3]薛红琴.地下水溶质运移模型应用研究现状与发展[J].勘察科学技术,2008(6):17-22.
- [4]郑西来,钱会,杨喜成.地下水含水介质的弥散度测定[J].西安工程学院学报,1998,20(4):33-36.
- [5]李木子,翟远征.地下水溶质迁移数值模型中的参数敏感性分析[J].南水北调与水利科技,2014,12(3):133-137.
- [6]周皓.地下水中胶体形成机理及对污染物迁移的影响[J].西部探矿工程,2008(11):68-72.
- [7]卢彬.重金属污染物在土壤中迁移规律及修复技术研究[J].环境科学与管理,2014,39(9):109-112.
- [8]骆永明.污染土壤修复技术研究现状与趋势[J].化学进展,2009,21(2/3):558-565.
- [9]李志强.某核废物处置场地地下水中铀元素迁移模拟研究[D].成都:成都理工大学,2009.
- [10]史维浚,高柏,王国华.砂岩型铀矿地浸过程中的溶质迁移机理[J].华东理工学院学报,2004,27(1):24-32.
- [11]郑西来,刘孝义.地下水中石油污染物运移的耦合模型及其应用研究[J].工程勘察,1999(2):37-41.
- [12]薛强,梁冰.石油污染物在地下环境系统中运移的多相流数值模型[D].阜新:辽宁工程技术大学,2005.
- [13]孙可明,李凯.煤矸石淋溶液地下迁移规律的模拟研究[J].水资源与水工程学报,2010,21(2):46-48.