

土壤及地下水污染研究综述

王 超

(河海大学水文水资源及环境学院 南京 210098)

摘要 根据污染物在土壤及地下水中迁移转化规律,分别从表土层、地下含水层及非饱和带三个方面,较系统地综述国内外对化肥、农药及污水灌溉等的研究进展、污染物在地下各水层和非饱和土壤中迁移转化研究取得的成果,指出了目前研究中存在的问题及发展趋势。

关键词 地下水 水污染 表土层 含水层 非饱和带 污染物 迁移转化

水、土壤系统是生物圈的基本结构单元,是人类社会赖以生存的不可替代的物质基础。然而,随着社会生产的迅速发展和社会人口的不断增长,人类正面临着生物圈的严重破坏和资源的匮乏。就人类对水资源的需求来说,工农业生产的飞速发展和人们生活水准的不断提高,使人们对水量和水质有更高的要求。但正是由于生产的发展和人们生活水平的提高,产生的固体、气体和液体废物量越来越多,造成地表及地下水的污染越来越严重。水污染已到了相当严重的程度。

近年来,工业化国家地下水调查研究的重点,已从地下水供给转移到地下水水质的研究上来。作为人类生产和生活的结果,地下水环境正经受着越来越多的污染冲击。工业废渣、化肥和农药、城市生活垃圾等没有哪一种不对地下水构成威胁。因此,国内外对此进行了深入的研究。

1 土壤及地下水污染研究的进展

人类开始全面认识和研究污染物在土壤及地下水中迁移转化规律的历史开始于70年代。前人根据污染物在土壤及地下水系统中的迁移途径,分别从表土层、含水层及非饱和带三个方面进行了研究,并取得了一系列成果。

1.1 污染物在表土层中迁移转化研究的进展

根据污染物的不同性质,表层土壤污染可分为以下几类:①无机废物污染(重金属及盐类);②有机废物污染(包括生物降解与生物难降解物);③化肥污染;④农药污染(包括杀虫剂、杀菌剂及除草剂);⑤污泥、矿渣和粉煤灰污染;⑥放射性物质污染;⑦寄生虫、病原菌及病毒污染。国内外专家对上述各方面都开展了大量的研究工作,尤其是重金属和有机农药污染方面受到农学家们的高度重视,对于它们在土壤-作物系统的吸附、迁移、转化、归宿和分布规律方面的研究,都取得了较大的进展。由于土壤圈的多样性,加之污染源种类繁多和污染途径的不同,以及污染物与环境各要素作用机理的千差万别。因此,几乎需对每一具体对象进行具体的研究。

1.1.1 污染灌溉与土壤污染问题的研究

城市污水未经处理盲目排放以及不合理污水灌溉常使农田生态系统的结构与功能遭受破坏,导致颗粒无收。例如,沈抚灌区1966年至1967年春,用高浓度含油污水漫灌,致使东陵区 20 hm^2 土壤毒化;北京东南郊区连续发生多次污水灌溉,致使农田庄稼失收。70年代初,我国开展了系统地调查研究和污灌区环境质量综合评价工作,并引起工业部门的重视,抓污染源的治理,使得污水

达到农灌标准。

1.1.2 污染物在表土层中迁移、转化、归宿及生态效应的研究

表土层土壤中含有大量有机质和微生物,使得各种污染物在其中发生复杂的物理、化学和生物变化。考虑到表土层较薄,国内外往往采用黑箱模型来描述污染物的迁移转化规律,但对于内部机理的研究成果不多。近年来,环境土壤学专家借助于模型试验,正在确定土壤的环境容量。美国等发达国家的专家正在进行表土层的灰箱模型研究。

1.1.3 农业现代化引起土壤污染问题的研究

农业现代化过程中,化肥农药的大量施用已成为土壤环境污染的最主要因素,其中,最突出的是大量超负荷氮、磷污染引起水体的“富营养化”以及硝酸根污染地下水的问题。农业部门为了提高粮食产量,广泛地研究化肥的施用时间和适合于作物生长的施用量,但很少研究化肥、农药污染物向下迁移及对地下水的影响。近年来,国外对农药引起的环境污染问题高度重视,不断淘汰对环境有害的农药,逐步推广低毒无害或生物农药。

1.2 污染物在地下水中迁移转化规律研究的进展

污染物在地下水中迁移转化的研究,主要是运用数学模拟方法进行的。应用数学模型模拟可溶性污染物在地下含水层中迁移时,需要求出浓度的时空变化规律,以预测地下水污染的瞬时动态与扩展范围,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。对地下水水质进行模拟研究所建立的数学模型就是地下水水质模型。世界上许多国家开展了此项研究,建立了预测性的地下水水质模型,其中,美国、加拿大、法国、英国、俄罗斯等发达国家建立的模型多而且成熟,并在不断改进和完善。

早在本世纪初,国外就开始应用数学模型来研究地下水问题,但把数学模型应用于地下水水质模拟研究则是 60 年代以后的事情。对孔隙介质中水动力弥散研究的详细综述则

是 1967 年由前苏联 Bel 等完成的^[1]。他们根据简化的和统计的模型来讨论各种水动力弥散理论、边界与初始条件的形成,以及弥散系数与水流速度及渗透介质几何形状关系的理论,并给出了实测资料,尤其指出了水动力弥散可由纵向弥散和横向弥散系数来表征。此后,国外针对包括二维弥散、重力分异、迁移物质与介质及地下水相互作用等问题在内的、较复杂计算图式的解析解,同时继续进行分子扩散问题的研究。Fried 在 1972 年进一步研究了经典模型与水动力弥散方程,该方程是建立在宏观孔隙介质连续的前提下的,据此认为:孔隙介质的每个无穷小单元体都是由固体物质与孔隙构成的,并提出了考虑固体物质与孔隙分界面上浓度与浓度梯度跳跃变动的新水动力弥散模型,导致水动力弥散方程中增加了补充项。至于可预测含水层中污染物浓度的复杂数学模型则仅在十几年前才由 Konikow 等人研制出来。1977 年, Wills 和 Neuman 在系列论文中提出了分散参数系统内地下水水质动态管理的通用模型。美国地质调查局在 1978 年提出的一份地下水水质模型报告可作为范例,该模型是计算地下水中不起反应的溶质浓度瞬态变化的数值模型,其计算程序是求解两个联立的偏微分方程。该模型通过联立求解地下水流方程与浓度方程来解决稳态水流和瞬态水流问题。

近年来,国外学者在地下水溶质运移理论和试验研究方面又取得了新的进展^[2,3]。对污染物迁移的弥散系数提出了与时空相关的表达式;大量的试验研究使得迁移方程中的衰减、离子交换、生物、化学反应项的系数取值更合理,考虑因素更全面;深入研究了污染物固相和液相浓度的相互转化关系,吸附条件则由平衡等温模式发展到考虑非平衡吸附模式。特别是在边界条件和初始条件设定方面,更趋于合理和全面。美国、英国、荷兰等国的期刊上^[4,5],对污染物在地下水中迁移转化的一维模型解析解方面,不断有新的成果出现。考虑到地下水资料监测的复杂和

变异性,近几年,国外对污染物迁移转化的随机模型也开始广泛地研究^[6,7],新的成果不断问世。在迁移载体水分运动方面,又发展到考虑可动水体和不可动水体等因素。

国外地下水质模拟问题的研究已取得很大进展,但也存在许多有待进一步研究的问题。特别是各类模型的系数及非均匀土壤中迁移方程还有待深入研究。污染物迁移过程的弥散、化学及生物变化的研究还不够,而且参数的确定方法还有许多问题,非定常系数方程的解析解和数值解还远远不够,以及非保守性污染物的迁移转化模型更需进一步探讨。

我国对地下水质模型的研究起步很晚^[1],直到1980年才开始这项工作。北京市环境保护研究所等单位建立了我国第一个地下水质模型,采用食盐、荧光染料及放射性示踪剂在野外实测了弥散系数,得到了我国首批弥散系数野外观测资料。随后,许多地质研究部门也开展了研究,由于受到技术条件的限制,并没有取得突破性进展,与国外的差距很大,尤其关于非保守性污染物的迁移转化方面的研究更少。

1.3 污染物在非饱和土壤中迁移转化规律研究的进展

人类对污染物在非饱和土壤(包气带)中迁移转化规律的研究远晚于表土层和含水层的研究。由于受行业和研究区域的影响,土壤学科和农业部门多从作物生长角度出发,研究污染物在表土层对作物和土壤结构的影响,基本上不考虑污染物向下迁移问题。而一般水文地质工作者,则往往侧重于研究污染物在地下含水层中的迁移转化。至于污染物在非饱和带迁移转化问题,长期处于无人过问的状态,这正是很多地下水污染的研究无法深入、污染得不到控制的关键所在。近年来,国内外一些学者已开始对非饱和带污染物迁移转化问题进行研究,这一良好势头必将推动地下水污染研究工作的深入。当然,这也会使原本难度较大的研究工作增加新的困难。

近年来,国外对污染物在非饱和土壤中迁移转化的研究相当重视,把它作为研究地下水污染问题的突破口。80年代初期,美国、英国等西方发达国家,在研究非饱和带水分运动的基础上,开始研究污染物在非饱和带土壤中的迁移规律^[8,9]。通过大量的室内及野外土柱试验,确定了非饱和带垂向一维弥散系数和衰减系数,这阶段的示踪剂大都采用的是盐类或保守性物质。此后,随着研究工作的深入,逐步开始研究重金属在非饱和带的迁移转化规律,考虑土壤液相和固相浓度的分配系数,并借助于 Henry, Freundlich 和 Langmuir 的等温吸附模式来表示液相和固相浓度吸附和解吸的关系,现在又研究非平衡吸附和解吸问题。在弥散系数方面, Pickens 和 Grisak 又将恒定常数,扩展为随时空变化的动态参数。在土壤介质结构方面,由结构不变的刚性体,发展为研究可变的介质体;由均质土壤研究到分层土壤。在土壤水分运动方面,由非饱和带的平均孔隙速度发展到研究可动水体和不可动水体,并综合考虑水、气、污染物及土壤四者之间相互作用关系。在数学模型求解方面也在不断发展,由非饱和带的简单解析解发展到复杂因素的数值解,求解的初始条件和边界条件也在不断改进,使之更加接近于污染物迁移的实际情况。

我国对污染物在非饱和土壤中迁移转化的研究已开始重视起来,清华大学^[10],武汉水利电力大学^[11]、中国科学院等高校和科研单位,对非饱和带溶质运移的研究也取得了一些成果。在五毒物质及盐份在土壤非饱和带迁移转化研究方面,取得了许多有价值的成果。河海大学水资源开发利用国家专业实验室利用具有国际先进水平的仪器设备正在深入研究非饱和土壤中污染物迁移转化规律,并已取得了许多初步成果。

国内外对污染物在非饱和土壤中迁移转化的研究已取得了许多有价值的试验资料和理论分析成果,为今后进一步研究奠定了基础。但是,从总体上来说,目前的研究仍处

于初步阶段, 还存在以下问题有待于进一步深入研究: ①污染物在非饱和土壤中迁移转化机理尚未掌握, 已开展的室内试验和野外试验还有许多不完善之处; ②目前还没有一个成熟的可以较好应用的预测模型; ③参数率定方法和量值还未摸清; ④对非保守性污染物, 特别是对地下水危害最大的化肥、农药污染物在非饱和带的化学、生物变化的规律还不清楚; ⑤理论分析由于受资料的限制还很全面, 等等。

2 研究中存在的问题与发展趋势

2.1 研究中存在的问题

纵观国内外对土壤及地下水污染的研究现状, 主要存在以下几方面的不足: ①在考虑污染物迁移转化的模型中, 单元层模型多, 整体性模型少; ②在单元层模型中, 研究性的模型多, 应用性的模型少; ③现有的模型从应用角度来衡量, 过分理想化, 应用时精度难以达到要求; ④在应用性模型中, 经验参数多, 考虑污染物迁移转化的机理因素较少, 如表土层的黑箱模型; ⑤对表土层所进行的盆栽试验, 大多数还是静态试验, 往往不研究污染物浓度与植物生长的关系, 更少考虑污染物向下迁移问题; ⑥对污染物在非饱和带迁移转化的试验和理论研究还很不成熟; ⑦污染物在含水层中迁移转化模型, 对实测资料依赖程度太高, 较难推广应用; ⑧在已有的理论分析和试验资料中, 保守性污染物研究较多, 而非保守性污染物研究较少; ⑨在试验研究中, 整体性物模太少, 已开展的土柱试验因尺度较小而缺乏代表性, 土槽试验开展很少; ⑩确定性模型较多, 随机性模型较少。

2.2 发展趋势

近年来, 对污染物在土壤及地下水中迁移转化研究的趋势主要表现为: ①建立以污染物迁移转化机理为基础, 适合地下水环境评价分析的预报模型; ②重点加强非饱和带迁移转化机理的研究, 特别是复合型污染物迁移转化机理研究; ③研究化肥、农药和污水

灌溉等面源污染物对地下水的影响及控制技术措施; ④建立表土层、非饱和带及地下含水层整体数学模型, 探求各阶段参数的率定方法; ⑤研究点源污染物下渗的三维数学模型求解方法及数值模拟技术; ⑥污染物在土壤及地下水中迁移转化随机模型的研究; ⑦定性和定量评价人类活动对土壤及地下水资源的影响(水质和水量); ⑧探求各种条件下模型参数的变化规律。

参考文献

- 1 王秉忱, 杨天行, 王宝金等. 地下水污染-地下水水质模拟方法. 北京: 北京师范大学出版社, 1985
- 2 Garve G, Freeze R A. Theoretical analysis of the role of groundwater flow in the genesis ore deposits I mathematical and numerical model. *Am J Sci*, 1984, 284: 1085~112
- 3 Refsgaard A et al. Three dimensional modeling of groundwater flow and solute transport. *J Cot Tran*, 1991
- 4 Barry D A, Sposito G. Analytical solution of a convection-dispersion model with time-dependent transport coefficients. *Water Resource Res*, 1989, 25: 2407~2416
- 5 Yates S A. An analytical solution for one-dimensional transport in heterogeneous porous media. *Water Resour Res*, 1990, 26: 2331~2338
- 6 Smith L F W, Schwartz M. Mass transport in a stochastic analysis of macroscopic dispersion. *Water Resour Res*, 1980, 16(2): 303~313
- 7 Rubin Y. Stochastic modeling of macrodispersion in heterogeneous porous media. *Water Resour Res*, 1990, 26(1): 133~141
- 8 Dagan G, Bresler E. Solute transport in unsaturated heterogeneous soil at field scale I. Theong. *Soil Soc Am J*, 1979, 43: 461~467
- 9 Gureghion A B, Ward D S, Cleary R W. Simultaneous transport of water and reacting solute through multilayered soils under transient unsaturated flow conditions. *J Hydrol*, 1979, 41: 253~278
- 10 刘兆昌, 聂永丰, 张兰生等. 重金属污染物在下包气带饱和水条件下迁移转化的研究. *环境科学学报*, 1990, 10(2): 162~172
- 11 杨金忠. 一维饱和与非饱和水动力弥散的实验研究. *水利学报*, 1986, 3: 10~20

(收稿日期: 1995-12-28)