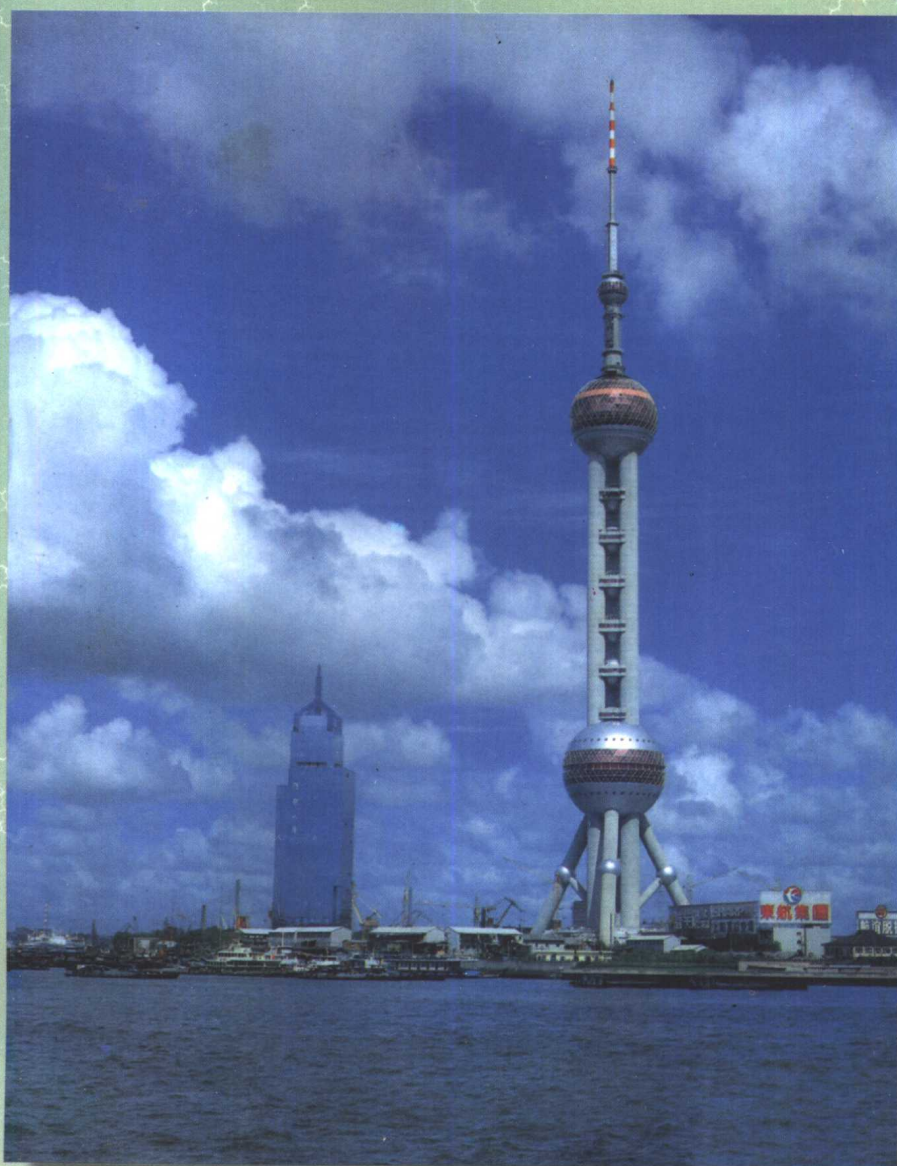


城市环境氮污染 模拟与防治

王红旗 鞠建华 著



北京师范大学出版社

城市环境氮污染 模拟与防治

王 强 著



中国环境出版社

城市环境氮污染 模拟与防治

王红旗 鞠建华 著

北京师范大学出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

城市环境氮污染模拟与防治/王红旗, 鞠建华著. —北京: 北京师范大学出版社, 1998. 5

ISBN 7-303-04438-8

I. 城… II. ①王…②鞠… III. 城市环境-氮-污染防治
IV. X511

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (98) 第 05575 号

北京师范大学出版社出版发行

(100875 北京新街口外大街 19 号)

北京昌平兴华印刷厂印刷 全国新华书店经销

开本: 787×1092 1/16 印张: 11 字数: 247 千

1998 年 5 月北京第 1 版 1998 年 5 月北京第 1 次印刷

印数: 1~3 000 册

定价: 13.80 元

序

环境与人类息息相关，它孕育了人类，供我们生存、繁衍和创造了现代文明。然而由于人类活动日益增强，人类生存环境逐渐恶化，全球性环境问题日趋严重。大气污染加剧、酸雨范围扩大、淡水资源短缺、水土流失和沙漠化面积扩大、森林资源锐减、野生动植物物种减少、臭氧层耗损、有害废物扩散和全球气候变暖等问题，给人类生存与发展构成了严重威胁。爱护地球，保护和改善人类生存环境已成为当今社会最艰巨而重大的任务。

城市环境是人类集中居住的地区，是一个规模庞大、结构复杂、功能综合、因素众多的综合生态系统。伴随城市的发展，城市“三废”不断地向大气、土壤、江河及地下水体排放并在环境介质中迁移、转化、弥散，发生一系列的物理化学、生物化学反应，使城市生态系统及其周边环境恶化。本书作者以环境模拟与污染控制国家重点实验室、农业部土壤和水重点实验室、地矿部环境地质重点实验室为依托，以土、水介质中污染物质转化迁移过程为主体，开展了大量的物理模拟试验、污染物化学动力学转化实验、冬小麦生长条件下土壤中氮净化实验。在充分揭示污染物与水土介质中物质与能量传输机制基础上，建立了综合地表水、土壤水、地下水和植物中氮循环计算联合模拟模型。作者从整体的角度综合研究氮污染质从土壤到地下水，从土壤到作物根系间产生的复杂的物理化学、生物化学、水动力弥散过程，为农田氮素控制、城市规划和城市污染防治工作提供了可借鉴的模拟分析方法。

本书凝聚了多个重点项目研究成果的精华，展现了青年科技工作者王红旗博士近五六年的研究思路和跨学科研究的学术思想与创新精神。这是对环境科学领域多学科交叉研究的一次有益尝试。虽然文中还存在一些不足，许多模型尚在探索之中，但本书的出版将能够起到抛砖引玉的作用，让更多的青年学者共同探索环境科学领域的奥秘和规律，去保护人类的生存环境，造福子孙后代。

中国科学院院士
中国工程院院士

石光脊

1997年9月

序

半个世纪以来,社会生产力和科学技术突飞猛进,工业和城市发展带来的负面影响使在许多地方造成生态平衡的破坏和严重的环境污染。这些问题已引起了世界各国的普遍关注。保护生态环境已成为当今世界上刻不容缓的重大研究课题。

本书作者选择城市环境污染与防治为主题,以城市生态系统中的物流和能流平衡为主体,开展了一系列城市“三废”排放对地质环境影响的实体模拟试验和数值模拟计算;运用联合运移模型对城市环境中氮污染过程进行了模拟分析,取得了许多有见地的研究成果。

本书是在综合国家攀登计划项目、“八五”地矿部重点攻关项目、地质行业基金项目、地矿部开放实验室资助项目等几个研究课题的环境地质成果基础上撰写而成;凝聚了作者及其课题组全体人员近年来潜心钻研,不断推陈出新和经验总结的研究精华;内容新颖,充分表现了多学科交叉、联合攻关的思想;是一本很值得推荐给从事或关心环境地质与环境科学工作者一读的书。

在此书即将出版之际,特作此序,衷心祝愿环境地质领域的青年科学工作者能够充满生机、不断创新、攀登科学高峰;并在为国民经济发展和人们健康服务的事业中做出更大的贡献。

国际水文地质学家协会 (IAH) 副主席
IAH 中国国家委员会主席



1997 年 10 月

前 言

自有人类社会以来,人类通过生产和消费活动,一方面向自然界取得生存资料,另一方面又将经过改造和使用过的自然物和各种废弃物还给自然界,从而参与了自然界的物质循环和能量交换。

城市是人类聚居形式的一个主要发展阶段,是一个复杂的地域综合体。城市化是生产力发展,特别是工业化的一个必然趋势。伴随城市化的发展,无疑地会带来一系列新的问题,环境问题是其中重要而突出的问题之一。人类在城市中生活、生产消耗大量的能源和资源的同时,产生了大量的“三废”污染物,严重地污染和破坏了环境生态系统。烟尘、二氧化碳、光化学烟雾、生活污水、各种工业废水、城市生活垃圾、工业废渣和建筑废弃物、城市噪声等环境污染问题,从气、液、固三个不同角度在人类生存的城市中不断发生、侵害着人类的健康和生存环境。

当前,我国环境污染和生态破坏已相当严重,以城市为中心的环境污染仍在发展,并急剧向农村蔓延;生态破坏的范围在扩大,程度在加剧;环境污染事故不断发生;已造成了严重的环境危害和经济损失。

近些年来,针对城市环境污染与生态破坏的一系列问题,人们更加注重城市的结构体系规划、城市生态系统中物流和能流的平衡,以改善城市空间环境,确保城市的可持续发展。本书就是在这种指导思想基础上,结合地矿部“八五”科技攻关项目(85-01-008)、地质行业基金项目(地92017)、地矿部环境地质重点实验室项目(K9102)、国家攀登计划项目“主要作物高产高效抗逆生理基础的研究”中的部分研究成果撰写而成。全书分上下两篇共九章,分别论述了城市环境中氮污染质循环转化机理、污水淋滤条件下氮污染质转化迁移物理模拟试验,提出了联合地表水、土壤水、地下水、植物水中氮素循环模拟计算方法;并用提出的联合迁移模型对城市生活垃圾场垃圾淋滤水对地质环境影响过程和城市生活污水灌溉条件下氮污染质在土壤-作物系统中作物吸收和土壤中氮素净化过程进行模拟分析和应用,同时对相应城市污水排放和生活垃圾堆放条件下如何防治或减少城市环境污染,提出一些初步的方案和模拟分析结果。为进一步开展城市规划和城市污染防治工程提供可借鉴的模拟分析方法。

本书是在许许多多老先生的指导和课题组其他同志共同合作研究下完成的。这里要特别指出的是地矿部水文地质工程地质研究所所长费瑾研究员,北京农业大学校长石元春教授,北京农业大学李韵珠教授,中国地质大学田开铭教授,北京师范大学环境科学研究所赵俊琳教授等为本书撰写和相应课题的完成付出了艰辛的劳动。从课题设计、模拟试验、模拟计算,到研究成果的编写都渗透着先生们的心血和教诲。值此书出版之际,谨向各位先生和所有帮助、参与此项工作的人们致以最诚挚的谢意。

环境科学是一门新兴学科，城市环境中氮污染质模拟亦属新作，文中一定会存在不少缺点和错误，敬请指正。

作 者

1997 年 5 月

目 录

上篇 模拟试验与模拟计算方法

第 1 章 城市环境氮循环与氮转化机理	(1)
1.1 有机氮的矿化作用	(1)
1.2 硝化作用	(2)
1.3 反硝化作用	(3)
第 2 章 污水淋滤条件下氮污染质转化迁移物理模拟试验	(4)
2.1 污水淋滤物理模拟试验	(4)
2.2 模拟试验结果与讨论	(6)
第 3 章 城市地质环境系统中渗流数值模型与模拟	(13)
3.1 饱和-非饱和土层水流运移联合数学模型	(13)
3.2 求解饱和-非饱和土层水流运移联合数学模型的数值方法	(17)
第 4 章 城市地质环境系统中氮污染动态数值模型与模拟	(22)
4.1 氮转化化学动力学过程及其在对流-水动力弥散方程中的应用	(22)
4.2 饱和-非饱和土层氮转化迁移联合数学模型	(28)
4.3 求解饱和-非饱和土层氮转化迁移水动力弥散方程的数值方法	(34)
第 5 章 饱和-非饱和土层水流运移及氮化合物转化迁移模拟计算	(42)
5.1 数值计算参数的确定	(42)
5.2 水流运移联合数学模型的数值计算	(59)
5.3 氮转化迁移联合数学模型的数值计算	(66)
5.4 预测期计算结果与实测结果比较及计算精度分析	(73)
上篇小结	(76)

下篇 模拟模型的应用与实践

第 6 章 上海老港垃圾堆放场垃圾堆放对地质环境影响的模拟分析	(78)
6.1 老港垃圾堆放场模拟模型的地质结构概化及基础条件分析	(78)
6.2 老港垃圾堆放场污染质迁移转化联合数学模型及其计算参数的确定	(88)
6.3 老港垃圾堆放场垃圾堆放对地质环境影响效应模拟计算与分析	(96)
第 7 章 控制城市垃圾堆放土—水污染的最佳途径与环境模式	(102)
7.1 浦东沿海条件下建设垃圾场土—水污染控制的可能性和有利条件	(102)

7.2	浦东沿海条件下垃圾场建设的具体设想和构思	(103)
7.3	各设计方案下垃圾场污染物排泄去向及水动力条件控制模拟计算	(105)
第8章	城市生活污水灌溉条件下土壤—作物系统中氮污染质循环转化模型与模拟	(107)
8.1	综述	(107)
8.2	冬小麦根系对土壤中水氮吸收物理模拟试验及模拟试验分析	(109)
8.3	土壤—作物系统中水氮运移转化吸收联合数学模型	(118)
8.4	模拟计算参数的确定及模型的检验	(131)
8.5	土壤—作物系统中水氮运移吸收模拟计算分析及联合模型检验	(141)
第9章	不同水氮条件对冬小麦生长影响和土壤中氮素净化规律模拟分析	(148)
9.1	不同水氮处理的设计及预测模型与参数	(148)
9.2	不同水氮处理对冬小麦生长和根系吸水、吸氮规律的影响	(150)
下篇小结		(154)
主要参考文献		(157)

上篇 模拟试验与模拟计算方法

第1章 城市环境氮循环及氮转化机理

饱和-非饱和土层中,溶解氮主要有 NO_3^- 、 NH_4^+ 、 NO_2^- 、 NH_3 、 N_2 、 N_2O 和有机氮(包括蛋白质类、核酸类、嘌呤类等)。 NO_3^- 、 NH_4^+ 、 NO_2^- 以离子的形式存在, NH_3 、 N_2 、 N_2O 以溶解气体的形式存在,而有机氮则赋存于水中的有机质内。

地质环境氮污染源主要可分成六大类,其中以城市、农业、工业三种来源为主。城市污染源主要包括污水管渗漏、污水排泄、污泥、城市路面径流、固体废料、废渣、生活垃圾堆放、草地施肥等;农业污染源主要有化学肥料和农家肥的使用、农业区植物贮存堆积物以及作物的腾发和灌溉冲洗带来的土壤溶解物质等;工业污染源更是种类繁多,许多工业废物中都含有氮,例如生产啤酒的废水、化工厂的废水等等;除了三大污染源以外,还有像酸雨、无污水管道地区的化粪池和污水渗池等。

氮素受到许多转化作用,包括有机的、无机的、挥发性化合物的转化。这些转化作用常常同时存在,有时还会出现相反的作用过程。图1-1清楚地展现了氮在环境中的转化循环过程。在氮素矿质化方面,土壤中大量贮存的有机化合物被分解并转化为植物可利用的无机离子——铵和硝酸盐。微生物的矿质化作用,造成蛋白质、多肽、氨基酸、核酸和其他有机化合物的降解。氮素一旦成为硝态氮,可以以几种方式从土壤中消失。因为它在土壤溶液中的溶解性,硝酸盐容易向下迁移,弥散到地下水层,从而污染地下水;硝酸盐和铵亦可为满足植被的营养需要而被消耗;在土壤其它封闭的循环中由于反硝化作用而造成生物学损失,最终形成 N_2 。总之氮的固氮作用、矿化作用、铵化作用、硝化作用、反硝化作用、土体吸附作用、脱氮作用等生物化学作用以及非生物化学损耗等构成了一个完整的土水体系中的氮循环。

1.1 有机氮的矿化作用

矿化作用可分为二个阶段。第一阶段是氨基化阶段,或称氨基化作用。在这一阶段里,复杂的含氮有机质通过微生物酶的一系列作用逐步形成含氨基的简单有机化合物。以

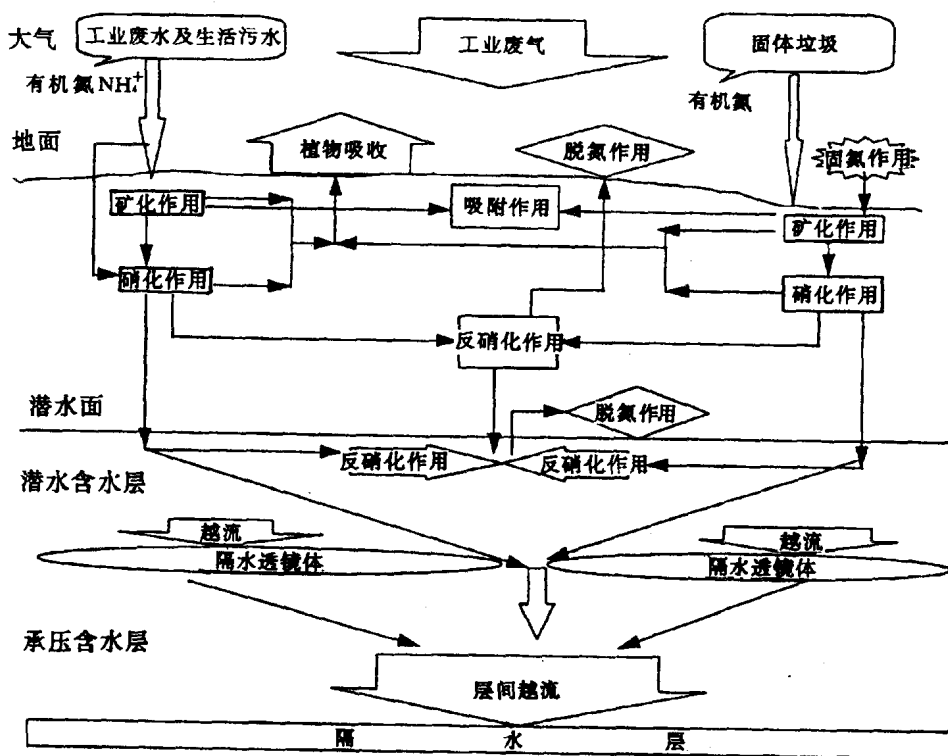
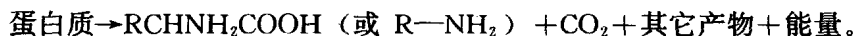


图 1-1 城市环境系统中氮的循环

蛋白质为例，其简单形式表示式如下：



第二阶段是铵化阶段，或称铵化作用。在这阶段里，各种简单的氨基化合物分解成氨，同时还可能产生有机酸、醇、醛等较简单的中间产物。举例说明如下：

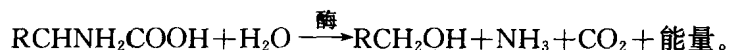
(1) 在充分通气条件下：



(2) 在厌气条件下：



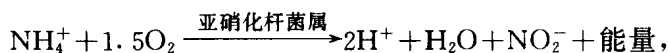
(3) 一般水解作用：



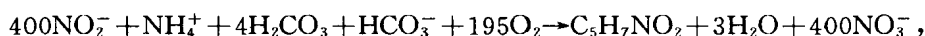
1.2 硝化作用

硝化作用分为两个阶段。第一阶段是 NH_4^+ 在亚硝化杆菌属作用下氧化成 NO_2^- ，第

二阶段是 NO_2^- 在硝化杆菌属的作用下氧化成 NO_3^- ，即：



假定细菌细胞的分子式为 $\text{C}_5\text{H}_7\text{NO}_2$ ，细菌细胞合成所需的碳源为 HCO_3^- ，则细菌细胞合成及 NH_4^+ 和 NO_2^- 氧化表示式可写成：



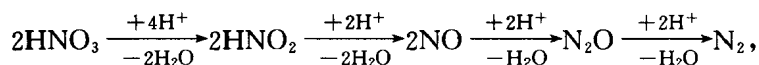
将二式合并，则



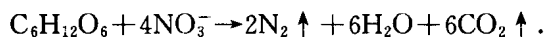
1.3 反硝化作用

参与反硝化作用的细菌有自养和异养二种类型，但以异养型为主。其细胞合成所需的能量主要来自于有机源，适宜于厌氧环境。

NO_3^- -N 的生物还原过程有一系列的中间产物： NO_2^- 、 NO 、 N_2O 、 N_2 ，其表示式可写为：



假定碳源为葡萄糖 $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$ ，则反硝化作用可以表述为：



总之，氮转化是一个复杂过程，本文的以后章节将详细讨论硝化、反硝化、吸附等几个主要氮转化作用的化学动力学过程。通过各种氮转化速度常数来定量描述。

第2章 污水淋滤条件下氮污染质转化迁移 物理模拟试验

溶质在多孔介质中的运动是一个复杂的物理化学过程,运动过程中溶质在介质中的分布特点受流体性质、溶质性质和多孔介质性质等因素的影响,在非饱和土层中,又受到水分分布特征的制约使得溶质运移极为复杂。随着工农业的迅速发展,城市“三废”排放日益增多,农业化肥、农家肥、农药的使用更为普遍,使各形各式的污染物不断地污染地质环境,这迫使人们对多孔介质中(尤其是非饱和土层中)的溶质运移进行深入地研究。由于影响溶质运移的因素较多,笔者力图将各因素分开,分别进行单因素研究,再综合各因素进行综合研究。考虑污染物的成分复杂,本次试验主要考虑生活污水中较为简单的污染质 Cl^- 和各组氮化合物在饱和-非饱和土层中生物化学转化、土壤吸附-解吸或离子交换和水动力弥散。为寻求定量描述饱和-非饱和土层污染质运移规律的计算方法提供基础资料。

2.1 污水淋滤物理模拟试验

2.1.1 试验装置

整个试验装置高 3.0m,长 3.6m,宽 1.2m(图 2-1)。试验共分为二个区,即饱和试验区和非饱和试验区,可进行六种监测和控制。

(1) 非饱和区基质势监测 非饱和区是试验装置的圆柱部分,用粘壤土充填,土体直径 1.2m,与下部饱和区连通。粘壤土取之石家庄市郊区田间 50cm 以下土层中。整个非饱和带厚 2.0m,负压计安装的垂向间距为 10cm~20cm,共安装负压计 15 支,负压计长 50cm,其中埋入土中 35cm。用 WM-1 型负压计水银槽观测板作为记录装置。

(2) 饱和区测压水头监测及进水、出水水头的控制缓冲区 饱和区土体长 3.6m,高 1.0m,厚 1.2m,是试验装置的水平土柱部分,装置内用滹沱河石家庄段沙滩中的粉细砂充填。两头分别用 20cm 宽、1.0m×1.2m 过水面积的砂砾石层作为进出水缓冲区。砂砾石与粉细砂交接处用 2 层 120 目铜丝网和打有 10 000 多个小孔的钢板相隔,以防砂土流失。测压管间距为 40cm,共 8 个测压水头观测网点。用以监测地下水位。

(3) 饱和-非饱和区溶质监测 本次试验采用地矿部环境地质开放研究实验室研制的非饱和区土壤水取样器和饱和区定位定深采样器。土壤水取样器和地下水定位定深采样器安装的垂直间距和水平间距分别与负压计和测压管的埋设相同,定时用真空泵和多道

阀控制装置真空取样,用以测定水中的化学组分和 pH、 E_h 值。

(4) 饱和-非饱和区水分含量监测 采用英国生产的中子水分测定仪和监控测管,按垂直间距 10cm 顺次定时监测水分含量。

(5) 灌水控水装置

(6) 饱和区进水、出水控水装置 为了使饱和含水层有一个稳定的进水水位,本次试验采用三级控水的方式调控进水地下水水位,克服了自来水水压不稳定造成的水头波动。

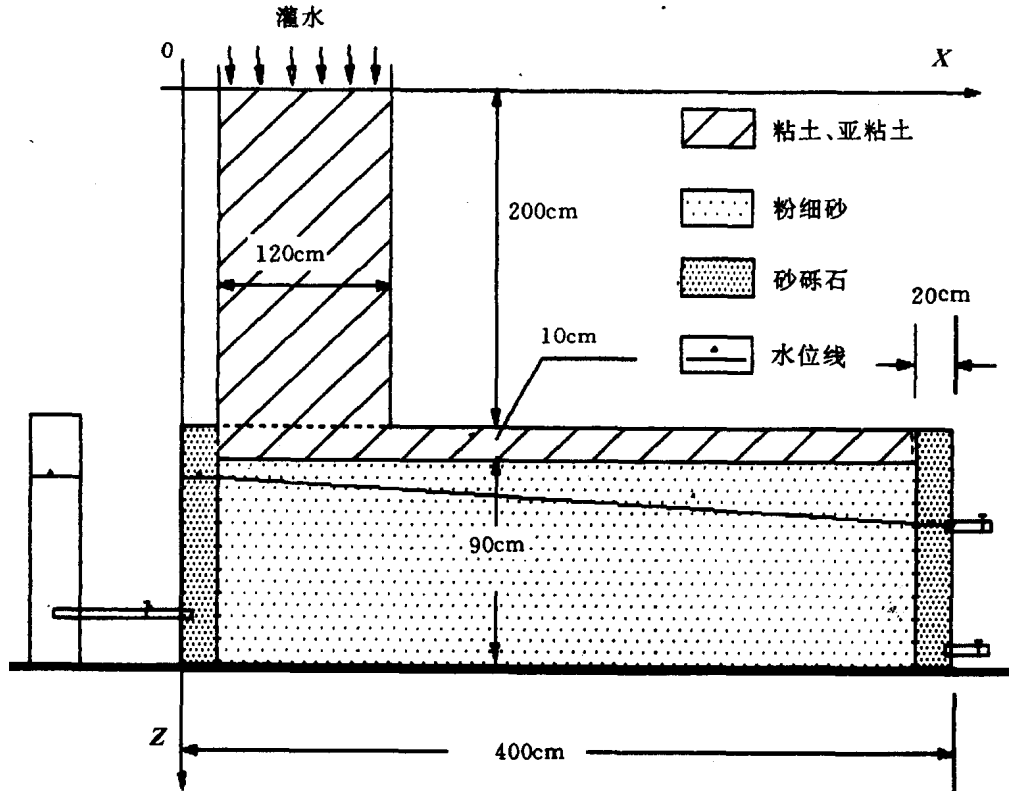


图 2-1 模拟试验条件概况示意图

2.1.2 试验过程

1992年4月9日上午9:30正式淋滤试验开始,用 NH_4Cl 固体试剂、自来水配成 NH_4^+ 浓度为1800.00mg/L的灌溉污水,通过供水装置,定水头补给回灌到试验装置的非饱和土层表面,开始稳定状态的淋滤试验。灌水2天,共灌水277.26mm。土柱全剖面体积含水量稳定在35.0%左右,淋滤停止。上部覆盖塑料薄膜,开始再分布,直到6月22日开始新灌水为止,第一轮再分布结束。6月22日上午9:30开始用 NH_4^+ 浓度为285mg/L的污水灌溉,日灌水量138.8mm,再重新覆盖塑料薄膜,开始新一轮再分布。从7月28日开始一直到9月9日,关闭饱和含水层进水口,形成隔水边界,土壤表层采用间歇性灌水,每隔1~2天灌水35mm左右,灌水 NH_4^+ 浓度在50~145mg/L。9月10

日以后又开始新一轮再分布。灌水时间、灌水量和灌水离子浓度见表 2-1。灌水期间每天监测中子仪、负压计、测压水头及饱和含水层出水量,定时观测 E_h 和 pH,定时取样化验各离子成分,及时抓住试验动态,以保证试验的顺利进行。

表 2-1 灌水时间、灌水量、离子浓度一览表

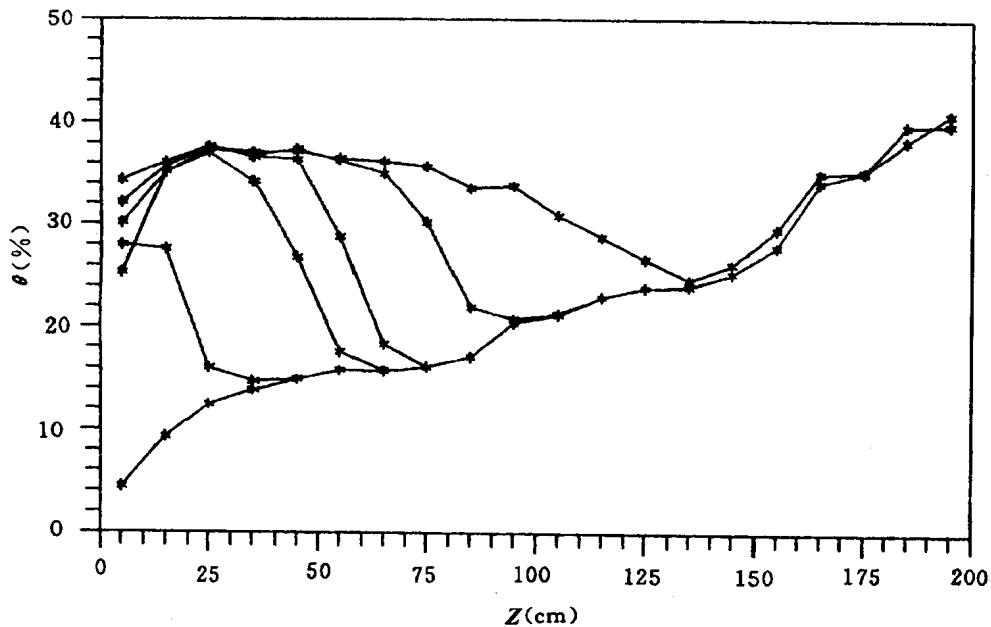
灌水时间 1992 年	灌水量 (mm)	Cl^- (mg/L)	NH_4^+ (mg/L)	NO_3^- (mg/L)	NO_2^- (mg/L)
4 月 9 日	208.20	3801.00	1800.00	8.00	0.077
4 月 10 日	69.44	3801.00	1800.00	8.00	0.077
6 月 22 日	138.88	885.34	285.00	4.00	0.044
7 月 28 日	69.44	442.67	145.00	4.00	0.044
7 月 29 日	69.44	442.67	145.00	4.00	0.044
7 月 31 日	35.00	442.67	145.00	4.00	0.044
8 月 3 日	35.00	442.67	145.00	4.00	0.044
8 月 4 日	35.00	442.67	145.00	4.00	0.044
8 月 6 日	35.00	442.67	145.00	4.00	0.044
8 月 8 日	35.00	442.67	145.00	4.00	0.044
8 月 10 日	40.00	201.57	70.50	4.50	0.051
8 月 13 日	35.00	221.89	72.50	4.80	0.051
8 月 20 日	40.00	221.89	72.50	4.80	0.052
8 月 22 日	26.00	200.00	60.50	4.50	0.048
8 月 24 日	35.00	196.89	50.50	4.00	0.046
8 月 28 日	35.00	442.67	145.00	4.00	0.044
8 月 30 日	35.00	442.67	145.00	4.00	0.044
9 月 3 日	38.00	440.67	140.00	4.00	0.044
9 月 7 日	35.00	442.67	145.00	4.00	0.044

2.2 模拟试验结果与讨论

2.2.1 高浓度污水淋滤、水分再分布分子扩散弥散试验

通过进行高浓度 (NH_4^+ 浓度为 1 800.00mg/L) 污水灌溉,并迅速覆盖进行长时间的水分再分布和污染质弥散,来分析和研究一次性高浓度、高强度氯、氮污染对地质环境的影响以及过程。

灌水初期,湿润峰的变化较快,图 2-2、图 2-3 分别用含水量分布变化剖面 and 土水势分布变化剖面显示了不同时间湿润峰变化规律。溶解性离子随着水流向下迁移,例如 Cl^- 的运移与水流运移具有明显的一致性。然而有些离子受吸附作用的影响,并不是随着水流运移而迅速地向下迁移,只是滞留在土壤表层。 NH_4^+ 即是如此,在土壤吸附作用的影响下,向下迁移甚微,到第一次灌水结束,仅仅向下迁移 30~40cm。受 NH_4^+ 分布的制约, NO_3^- 、 NO_2^- 离子在强对流期,尚无高浓度分布,待到灌水停水以后,在硝化作用下, NO_3^- 、 NO_2^- 浓度逐渐增大,此时水流运移减缓并趋于停止,离子只有受分子扩散作用向低浓度区弥散。图 2-4 显示了 NH_4^+ 、 NO_3^- 、 NO_2^- 离子在该试验阶段不同时间的浓度分布变化剖面。从试验结果可见,这些离子弥散速度很小,该阶段试验时间 2 个多月, NO_3^- 的弥散距离也只有 80cm, NH_4^+ 仅有 45cm (包括灌水期对流作用向下迁移距离)。这说明在包气带表层污染影响地下水和地质环境的最大因素是水的对流,一旦受污染,在有强补给水源时,污染速度较快、范围较大,否则较慢、较小。



A 灌水期