

# 成层土中污染物迁移数值模拟及参数敏感性分析

苏振兴<sup>1,2</sup>,高文生<sup>2</sup>,杜风雷<sup>\*1,2</sup>,吴育林<sup>3</sup>,毛安琪<sup>2</sup>

(1. 建筑安全与环境国家重点实验室,北京,100013;2. 中国建筑科学研究院地基基础研究所,北京 100013;  
3. 上海勘察设计院(集团)有限公司,环境工程公司,上海 200093)

**摘要:** 随着工业化的发展,世界范围内土壤受到越来越多的污染威胁,引起大量的土壤污染事故,对人类的生存和发展构成了威胁。本文介绍了污染物迁移扩散的理论,采用了数值模拟软件 GMS 中 MODFLOW 和 MT3DMS 模拟分析污染物在成层土中迁移扩散过程。基于建立的数值模型,研究土层渗透系数、地下水位、污染物排放量以及污染源浓度等参数对污染物迁移的影响规律,研究成果具有一定的工程指导意义。

**关键词:** 环境岩土工程;污染物迁移扩散;对流左右;地下水污染;敏感性分析;数值模拟

**中图分类号:** X5;X141 **文献标识码:** A

## NUMERICAL SIMULATION AND PARAMETER SENSITIVITY ANALYSIS OF POLLUTANT MIGRATION IN STRATIFIED SOIL

SU Zhen-xin<sup>1,2</sup>,GAO Weng-sheng<sup>2</sup>,DU Feng-lei<sup>\*1,2</sup>,WU Yu-lin<sup>3</sup>,MAO An-qi<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Building Safety and Built Environment,Beijing 100013,China;

2. Institute of Foundation Research, China Building Research Academy,Beijing 100013;

3. Environmental Engineering Company of SGIDI Engineering Consulting(Group),Shanghai 200093,China)

**Abstract:** With the development of industrialization, the soil in the world is threatened by more and more pollution, which causes a large number of soil pollution accidents and poses a threat to the survival and development of human beings. In this paper, the theory of pollutant migration and diffusion is introduced in detail, and the MODFLOW and MT3DMS of GMS software are used to simulate and analyze the process of pollutant migration and diffusion in layered soil. Based on the established numerical model, the effects of soil permeability coefficient, groundwater level, pollutant discharge, and pollutant source concentration on pollutant migration are studied, which makes this research have certain engineering guiding significance.

**Key words:** environmental geotechnical engineering; pollutant migration; convection; groundwater pollution; sensitivity analysis; numerical simulation

### 1 引言

现代工业的发展极大地推进了人类文明的进程,但也带来了严重的环境污染。污染物在地下水

及土壤中的扩散实质上被视为污染物在多孔介质中的迁移,多孔介质中污染物迁移是一个复杂多过程、多作用的耦合行为。国内有较多的学者也对重金属污染物在土壤中的迁移机理进行了大量的理论和实

验研究工作,包括污染过程、迁移机理等<sup>[1-3]</sup>。对于污染物在土体中的迁移问题的解析解基本上是基于均质饱和土层的假定,如 Nielsen<sup>[4]</sup> 提出对流-弥散方程以来,对流-弥散一直是研究污染物迁移模型的经典方程。谢海建<sup>[5]</sup> 给出了层状土中污染物的一维扩散解析解,以及非线性吸附条件下的污染物在土体中的一维扩散解析解。总体而言,解析解更注重于饱和均质土层的规律性分析,缺少考虑对流作用及弥散作用的研究。近些年来,数值模拟计算也获得了广泛的推广和应用。例如, Hanks<sup>[6]</sup> 分别采用有限元法和固定网格差分法模拟分层土壤的入渗过程; Frind<sup>[7]</sup> 对天然含水层中污染物垂直于流线的水动力弥散采用有限元进行数值计算。国内学者朱学愚等<sup>[8]</sup> 采用 MT3D 和 MODFLOW 软件对山东

淄博大武水源地裂隙岩溶水中污染物运移进行数值模拟。本文基于污染物迁移扩散已有研究成果和相关理论,采用了数值模拟软件模拟分析污染物在成层土中迁移扩散过程。基于建立的数值模型,研究土层渗透系数、地下水位、污染物排放量、污染源浓度等参数对污染物迁移的影响规律,研究成果具有一定的工程指导意义。

## 2 标准数值模型建立及参数选取

如图 1 所示,为进行对比分析,本文首先建立标准数值模型,模拟场地大小为 600 m×400 m×60 m。模型土层自上向下分别为素填土、粘质粉土、粉质粘土和全风化基岩。土层参数参考詹良通等针对苏州七子山填埋场的研究成果<sup>[9]</sup>,如表 1 所示。

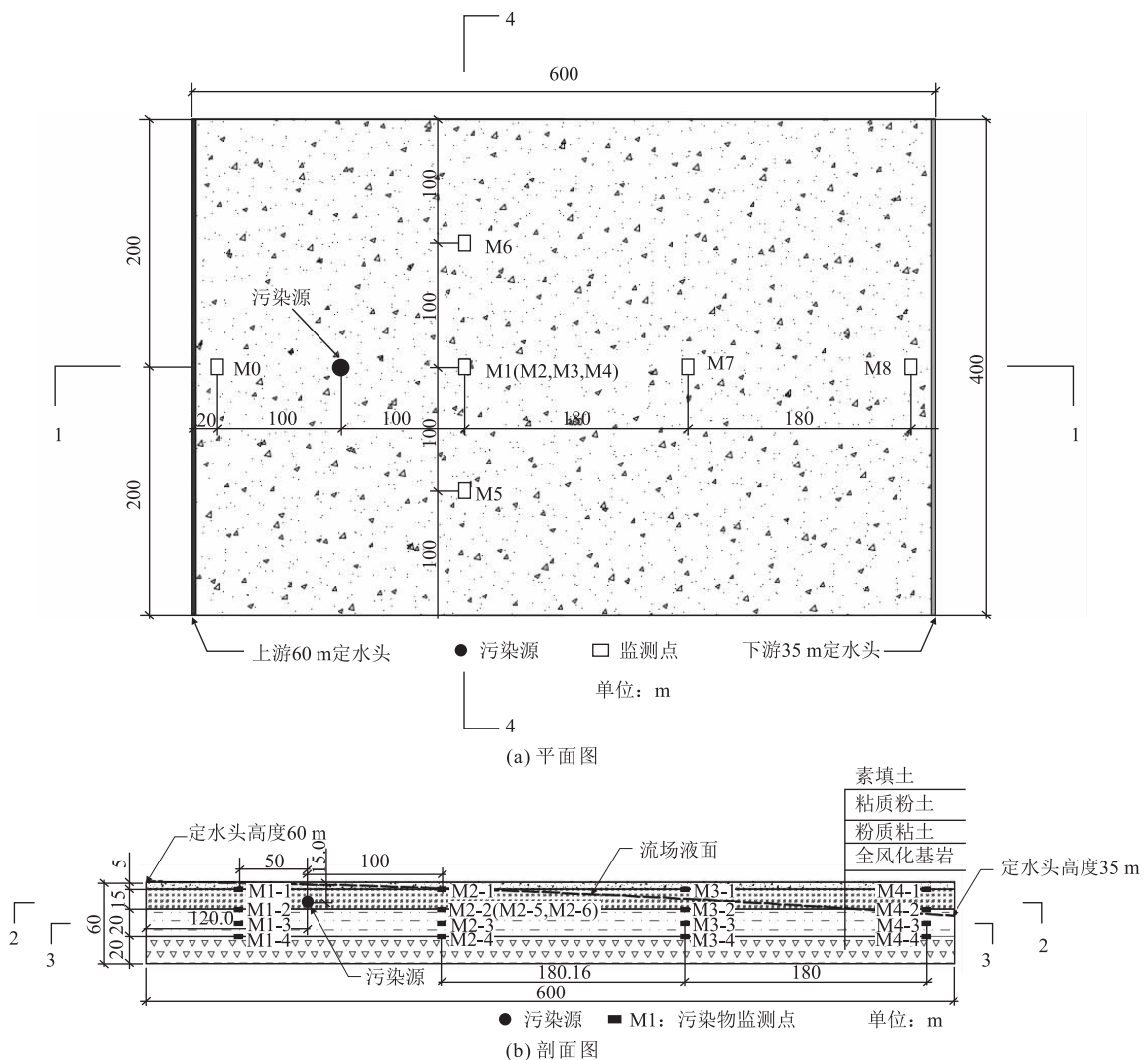


图 1 标准模型示意图

污染物选择金属铜离子,污染源采用点源形式,模拟污染源泄露或者污染企业偷排放等现实工况。污染源在距离上游 120 m,地表 15 m 深度处以每天

排放  $10\text{ m}^3$  浓度为  $100\text{ mg/l}$  的污水,如图 1 所示。在各种模型中,分别建立长度、宽度和高度方向上的污染物浓度监测点。本文采用铜离子作为代表污染

物进行分析,参照《地表水环境质量标准》(GB3838-2002)中水样中铜离子含量环境质量标准,假定将污染场地环境质量等级划分为Ⅱ类及以上,相应铜离子浓度限值为 1 mg/l。

表 1 数值模型计算参数

项目	土层			
	素填土	粉质黏土	粘质粉土	全风化基岩
厚度 m	5.0	15.0	20.0	20.0
渗透系数 cm/s	$8 \times 10^{-4}$	$1.4 \times 10^{-4}$	$2.8 \times 10^{-5}$	$1 \times 10^{-6}$
渗透系数比 $k_h/k_v$	3	3	3	3
扩散系数 $m^2/s^{-1}$	$6 \times 10^{-10}$	$3.5 \times 10^{-10}$	$2.5 \times 10^{-10}$	$1.5 \times 10^{-10}$
分布系数 ml/g	1	3	3	5
弥散度 m	2	2	1.5	1
孔隙率	0.44	0.41	0.35	0.3
干密度 $g/cm^3$	1.5	1.6	2	2.5

注:表中污染物扩散相关系数参考詹良通(2013)论文中数据,论文引用信息详见参考文献。

### 3 污染物迁移规律的分析

#### 3.1 标准模型污染物迁移规律

图 2 为标准计算模型的水头分布云图,模型两端设置了定水头边界条件,上游和下游的水头高度分别为 60 m 和 35 m。在水头差的作用下地下水形成了自左向右的稳定流场。

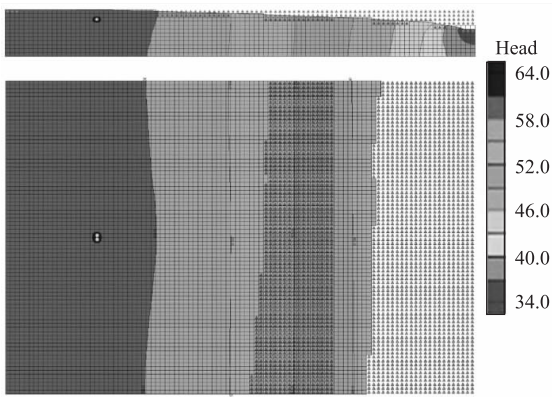


图 2 标准模型水头分布

由图 3 可知,在 100 a 模拟时间内,距离污染源 100 m 处的上游断面 1 处始终未检测到污染物。这反映污染物逆流迁移的效率低下。这和实际工程中将污染企业建在城市生活区下游的典型设计思路相契合。图 3(b)为距离污染源 100 m 处断面 2 处污染物浓度时间变化曲线,污染物离子在对流的作用下迅速向下游扩散。在 M2.1 监测点第 1 900 d(约 5 a 左右)就监测到污染物离子的侵入,其后该处污染物浓度随着时间快速增加,增长速率先快后慢,在 17 000 d(46 a 左右)达到了与污染源浓度相同的

100 g/l。随着深度的增加,污染物侵入的时间存在滞后效应。污染物侵入 M2.2 监测点的时间比 M2.1 监测点滞后约 1 600 d(4.4 a 左右)。由此可知,污染物更容易在浅层地下水及渗透系数较大的土体中迁移扩散。相对于垂直方向的监测点,位于断面 2 两侧的 M2.5 和 M2.6 监测点在 100 a 模拟期间内基本上没有检测到污染物,由此表明,污染物倾向于顺地下水流程迁移扩散,而在垂直方向和横向扩散上效率较低。随着距离污染源距离的增加,不仅污染物侵入的时间滞后,峰值降低,且其对深层地下水的侵入能力在降低。这一现象有着重要的实践意义,例如在某些地表水被污染的区域,如若加深开采地下水的深度,亦可以取得无污染的水源。图 3(d)表明污染物离子经过了约 60 a 的迁移侵入了距离污染源 460 m 的下游处地下水,污染物离子在顺流场方向上平均每年迁移扩散 7.8 m。

图 4 分别选取了距离地表 2.5 m、12.5 m、22.5 m 和 32.5 m 深度处和污染源横断面不同时间污染物离子空间分布曲线。其中,图 4(a)、(b)、(c)和 (d)的横坐标为以标准模型上游左端为起点,右端下游为终点的距离尺度,纵坐标为污染物浓度,5 条曲线分别为 5 个不同时间段的浓度分布。分析图 4(a)可知,由于流场在第一层土体中仅仅分布在纵向 0~190 m 范围内,因此污染物在第一层土体中也仅分布在此范围内,从图中数据分布曲线可以看出随着时间的推移,污染物的扩散范围越来越大,各点浓度也越来越高,但污染物向右扩散(顺流)的能力明显强于向左扩散(逆流)。在标准模型中,污染物的逆流极限扩散范围约为 36 m。左侧逆流方向上,各个时间段的浓度相对于峰值浓度均有所下降,并在极限扩散范围(80 m 处)降为零。而在顺流方向上 3 个月、5 a 和 10 a 的分布曲线相对于峰值浓度均有所降低,但 50 a 和 100 a 的浓度分布并没下降反而略有增加。造成这样的原因主要是污染源的相对位置。由于污染源设在第一层土体下方,而污染物由于受到对流作用,在水平方向上扩散效率高于垂直方向,因此一定程度上造成了第一层土体中污染物浓度峰值后移的情形。

图 4(b)为污染物离子在 12.5 m 深度处的空间分布曲线,12.5 m 深度范围内,地下水流场仅在纵向 0~460 m 有分布,因此污染物的在 12.5 m 深度中的纵向污染范围局限在 0~460 m 之间。由于污染源的深度设在 12.5 m 处,由图可知,在 116 m 横坐标处(即污染源处)污染物浓度在 3 个月期间就达到了 96 g/l,接近污染源的初始浓度。随着时间的

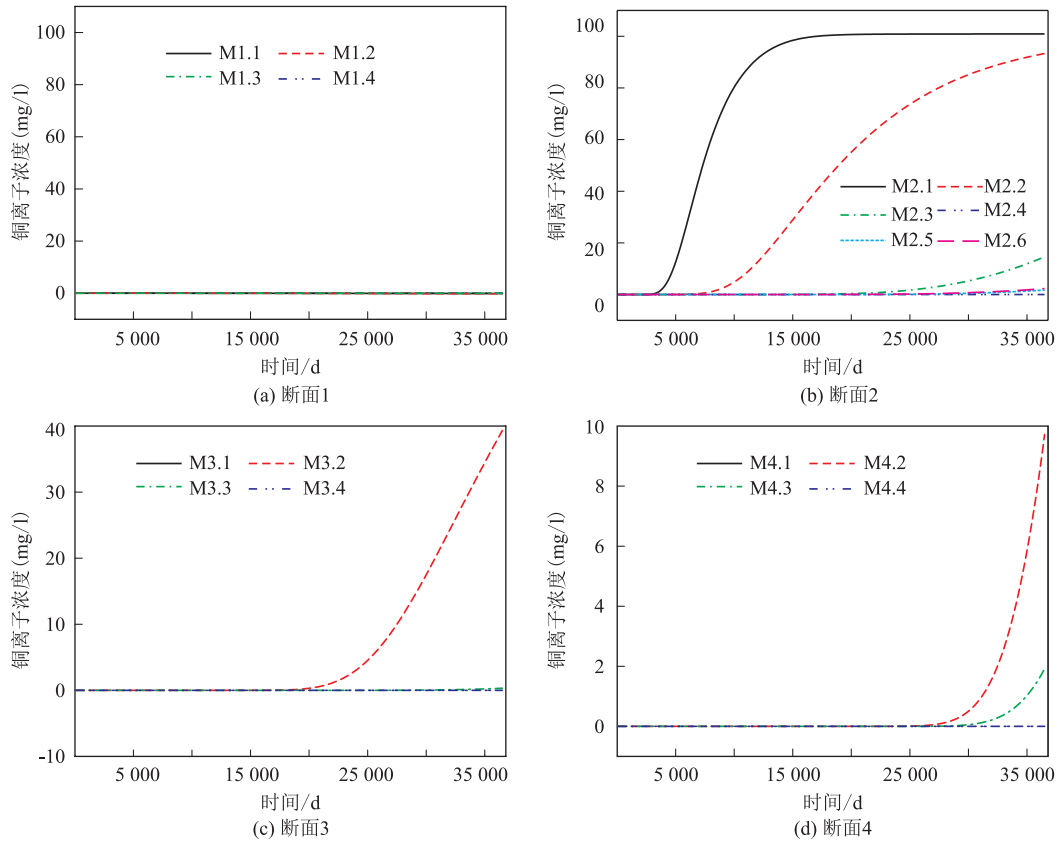


图3 污染物迁移时间变化

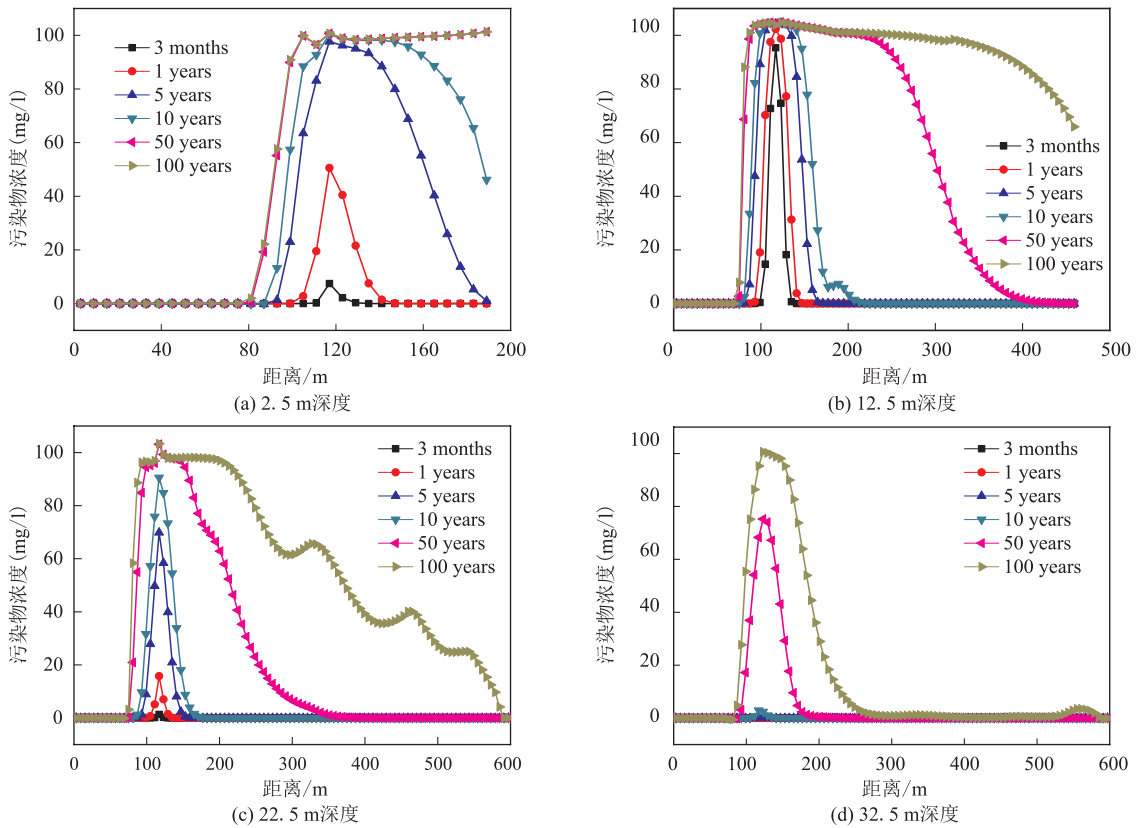


图4 污染物迁移空间分布

推移,污染源处的污染物峰值浓度逐渐增高,并最终达到 105 g/l,高于污染源的初始浓度。这一现象在第 100 a 污染物浓度空间分布尤为明显,如图 4(b)所示,第 100 a 污染物空间分布曲线在 116 m 处(污染源)左右各 30 m 范围内的污染物浓度普遍高于污染源的初始浓度,造成这一现象的主要原因是由于污染源不断的释放污染物离子,但同时污染物离子迁移扩散需要一定的时间,由此造成了污染物离子在污染源附近聚集浓缩。

图 4(c)和(d)分别为污染物离子在 22.5 m 和 32.5 m 深度处的空间分布曲线,可以发现,随着深度的增加,污染物的扩散的效率更低,污染的空间范围更小,这一方面是由于更深的土层距离污染源更远,受污染的程度相应较低,另一方面,由于在随着深度的增加,土体的渗透系数和孔隙比不断减小,污染物迁移的阻力较大,同时垂直方向上的污染物扩散逊于具有稳定渗流场的水平扩散迁移,从而造成了更深土体中污染物离子迁移扩散效率较低。

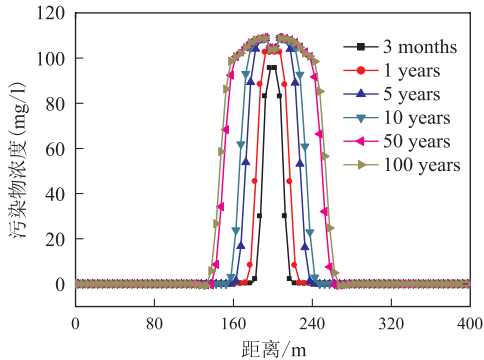


图 5 标准模型水头分布

图 5 为污染物处横断面污染物离子浓度分布图,由图可知,污染物浓度以污染源为中心垂直对称分布,由图可知 50 a 和 100 a 污染源处的污染物峰值可达 110 g/l,比初始浓度增加了 10%。与逆流扩散相同,当污染物向两侧扩散时,也同样存在一个扩散极限,极限扩散范围约为左右各 150 m。由此可知,污染物迁移扩散主要受对流的影响,而在逆流或垂直于流场方向上迁移扩散效率较低,且一般存在极限扩散范围。

图 6 和图 7 分别为选取标准模型中 1 a、50 a 及 100 a 污染物迁移扩散的纵断面(1-1 截面)和横断面(污染源处)云图。红色范围内表示为污染物离子大于 1 mg/l 的区域,亦即污染区域。由图 6 可知,污染物初期向着各个方向迁移扩散,但迁移扩散的力度各不相同,从而形成污染区域左粗右细的勺型分布。本次模拟污染物最终迁移扩散至下游定水头

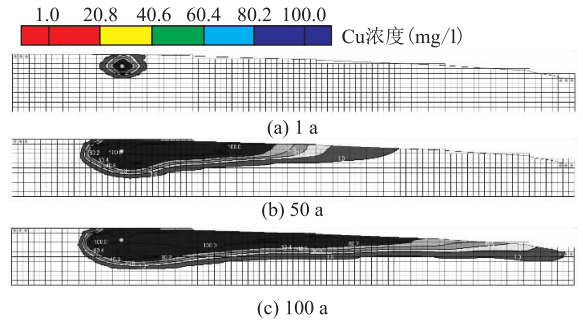


图 6 污染物迁移纵断面云图

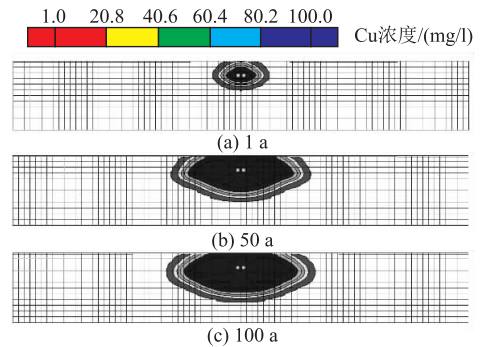


图 7 污染物迁移横截面云图

处,除了上游部分区域,基本上污染了整个场地。图 7 为污染源处横断面迁移扩散分布云图,其不仅表明了污染物在横向方向的扩散极限范围,同时也可以发现,污染物在 100 a 的时间内,仅仅进入渗透系数为  $1 \times 10^{-6}$  cm/s 全风化基岩约 2.5 m 左右,为防渗帷幕的设计提供了借鉴。

### 3.2 水头对污染物迁移的影响

从上文的分析中可以发现,对流作用在离子扩散中起到了主要作用。为对比分析对流对离子扩散的影响,分别建立 3 个不同水头高度的数值模型,如表 2 所示。3 个模型上游水头高度均为 60 m,不同的水头差通过调整下游水头高度得以实现。其中 A 为标准水头,上下游水头差为 25 m, B 为中水头,下游水头高度 50 m,水头差为 10 m,而 C 模型上下游没有水头差。

表 2 不同水头高度的数值模型

模型	A	B	C
水头差	标准水头差/25 m	中水头差/10 m	无水头差/0 m

图 8 分别为模型 A、B 和 C 在断面 1、2、3 和 4 上监测到的污染物浓度随时间的变化曲线,从图 8 (a)中可以发现,由于 C 模型没有水头差,污染物离子同时向左右端迁移扩散,很快到达监测截面 1, CM1.1 监测点在 2 487 d(6.8 a)就监测到污染物离

子的侵入,随后污染物浓度快速增长,并在 17 197 d 到达 100 g/l 的浓度值,CM1. 1 的峰值浓度为 102. 5 g/l,略高于污染源的初始注入浓度。CM1. 2 和 CM1. 3 监测点同样监测到污染物的侵入,但随着深度的增加,污染物侵入的时间滞后,同时峰值浓度也相应降低。由于水头差的存在,如在 BM1. 1、BM1. 2 和 BM1. 3 所示,污染物侵入上游的能力在大幅度降低,100 a 内造成断面 1 的最大污染物浓度值小于 10 g/l,而在标准模型 A 中,没有监测到污染物的侵入,由此可知,水头差是污染物离子迁移扩散的最主要的推动力,污染物在土体中的扩散作用小于对流作用,其对上游的扩散侵入能力随着流场水

力梯度的提高而大幅度降低,以至于完全失去对上游的侵入能力。

图 8(b)为下游监测断面 2 处各模型污染物浓度随时间的变化图,不同于上游监测断面 1 处的表现,监测断面 2 处呈现出完全不同的分布特征,标准模型 A(水头差最大)在污染物侵入时间和侵入力度上完全超出模型 B 和 C,标准模型 A 中 AM2. 1、AM2. 2 和 AM2. 3 三点先后监测出污染物后,其他模型中才逐渐监测到污染物离子。且可以发现,高水头差在逆流方向阻碍了污染物离子的扩散,但在顺流方向上可以推动污染物离子迁移至更大的范围。

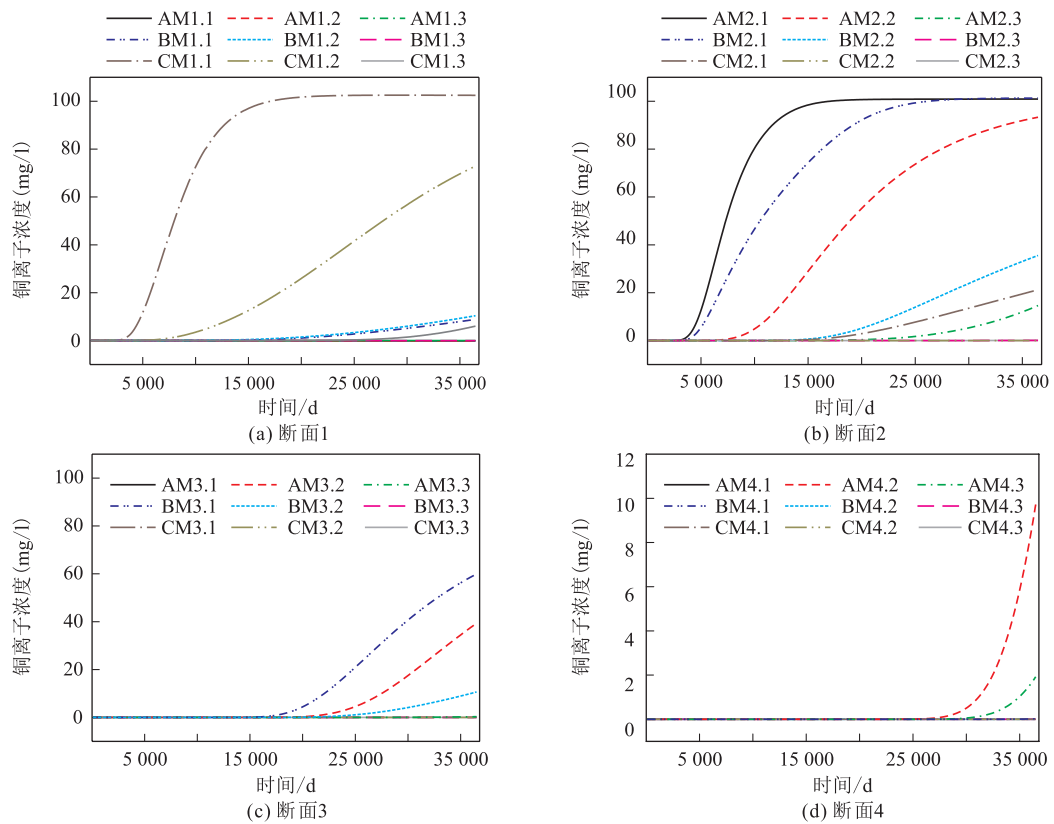


图 8 不同水头差模型污染物迁移时间变化

图 9 分别为模型 B 和 C 污染物离子 100 a 迁移范围云图,模型 B 污染范围基本和标准模型相同,只是污染的范围相对较小,在 100 a 模拟期间,尚未污染到下游定水头区域,而模型 C 由于假设的无水头,污染物离子同时向两边扩散,很快就侵入到了上游定水头区域,由于部分污染物向右扩散,同时没有水头差的推动,污染物向左扩散乏力,污染的范围远远小于模型 A 和模型 B。

### 3.3 渗透性对污染物迁移的影响

土层渗透系数对流场分布有着重要的影响,参考上文仍建立 3 个模型,如表 3 所示。其中 A 模型

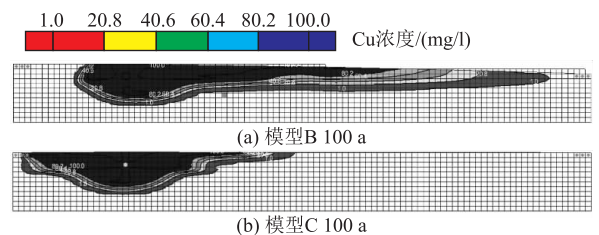


图 9 污染物离子 100 a 迁移范围(不同水头)

为标准模型,B 模型为高渗透性模型,除第四层全风化基岩,上面 3 个土层的渗透系数分布为 A 模型的 3 倍。C 模型为低渗透性模型,素填土、粉质粘土和

粘质粉土的水平渗透分布为标准模型的 1/3。各个模型各土层的竖向渗透系数分别为相应水平渗透系数的 1/3。

表 3 不同渗透性数值模型参数

模型	A	B	C
素填土	$8.0 \times 10^{-4}$	$2.4 \times 10^{-3}$	$2.67 \times 10^{-4}$
粉质粘土	$1.4 \times 10^{-4}$	$4.2 \times 10^{-4}$	$4.67 \times 10^{-5}$
粘质粉土	$2.8 \times 10^{-5}$	$8.4 \times 10^{-5}$	$9.33 \times 10^{-6}$
全风化基岩	$1.0 \times 10^{-6}$	$1.0 \times 10^{-6}$	$1.0 \times 10^{-6}$

备注:上述 3 个模型中的渗透系数均为水平渗透系数,单位为 cm/s,水平渗透性与竖向渗透系数比值为 3。

图 10(a)表明标准模型 A 和高渗透性模型 B 在逆流断面 1 上完全没有出现污染物离子。而低渗透模型 C 中却在 CM1.1 和 CM1.2 监测点处监测到了污染物的存在,且 CM1.1 点在第 25 000 d 就达到了污染源的初始浓度。由此可见水头差和结合渗透性会对污染物离子的迁移扩散产生重要的影响,在高渗透性模型中,污染物倾向于顺流扩散,而在逆流方向上扩散缓慢,并存在极限扩散距离。在低渗透模型中,污染物虽然仍然以顺流方向扩散为主,但在逆流方向上的扩散能力在提高。

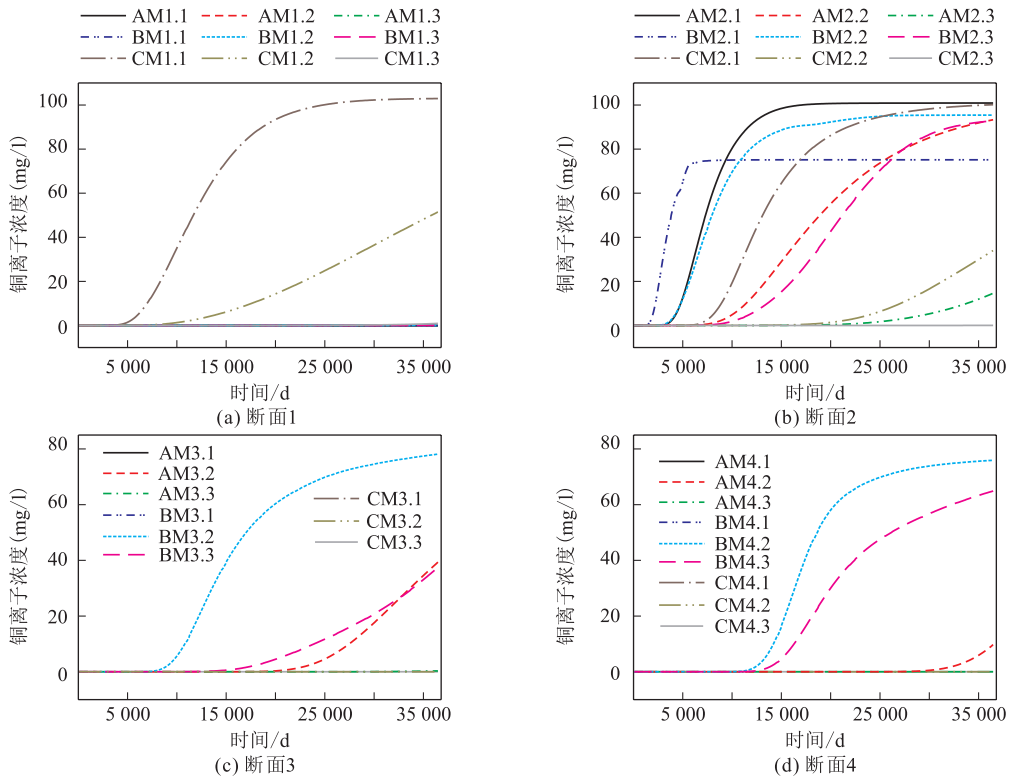


图 10 不同渗透特性模型的污染物浓度随时间变化

图 10(b)为污染物下游监测断面 2 处污染物离子浓度变化图,总体的规律基本与前文相同,但一个显著的差异为高渗透性模型中 BM2.1 的离子浓度变化异常,该点在所有监测点中第一个监测到污染物离子的侵入并随时间直线上升,然后当污染物离子浓度到达 75.1 g/l 时,便不再增长,而在标准模型和低渗透性模型中 BM2.1 点均增长到 100 g/l。在高渗透性模型中,由于各土层(除全风化基岩)的渗透系数均为标准模型的 3 倍,污染物离子在各个土层中迁移扩散的能力均得到了提高,又因为污染物注入井存在一定的埋深,因此污染物迁移扩散主要沿着流场自上游往下游存在一定的偏角斜方向迁移,而顶层土体由于渗透系数大很难聚集污染物离

子,同时污染物向上迁移的阻力较大,从而导致了高渗透性模型 CM2.1 点处的峰值浓度未达到 100 g/a。

图 10(c)和(d)分别为截面 3 和 4 上监测到的污染物浓度变化图,从图中可以发现高渗透性模型中污染物离子扩散的速率和污染的范围均远远超过标准模型和低渗透性模型,在高渗透性模型中,污染物离子在第 10 800 d 就侵入到下游区域,由此可见渗透系数对污染物迁移扩散影响非常大。由此可知在以砂土、碎石土为主高渗透性的区域一旦出现污染,其迁移扩散非常迅速,而在以粘土、粉土为主的低渗透系数的区域,污染物的迁移扩散相对缓慢,如若没有地表径流输送污染物,其污染的范围相对较

小且可控。图 11 为 A、B 和 C 模型 50 a 和 100 a 污染物离子迁移扩散空间分布图。图 12 为模型 B 和 C 污染物离子 100 a 迁移范围云图。

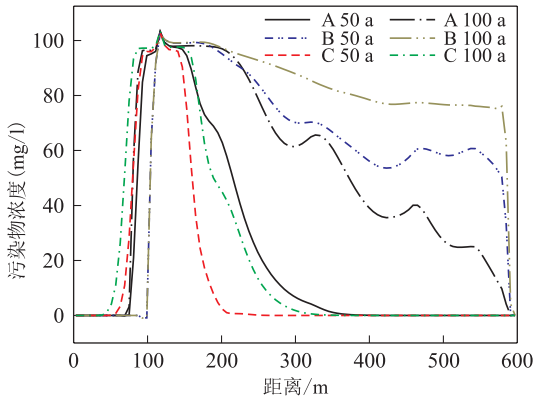


图 11 不同渗透特性污染物浓度随距污染源距离的变化

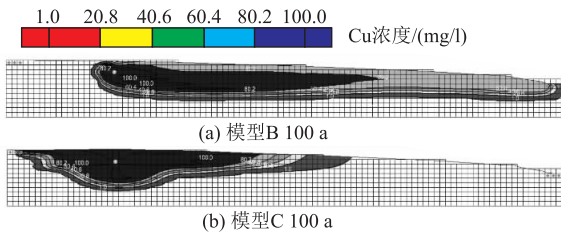


图 12 污染物离子 100 a 迁移范围(不同渗透性)

### 3.4 排放量对污染物迁移的影响

污染源的排放量也对污染物的迁移扩散起作用,一方面高排放量增加了污染物离子的总量,另一

方面高排放量影响污染物附件的水头,改变局部的流场分布,从而促进污染物离子的迁移扩散。为研究污染源处排放量对污染物离子迁移扩散的影响,建立如表 4 所示的 3 个模型。

表 4 不同模型污染源排放量

模型	A	B	C
排放量	标准排放 /10 m <sup>3</sup> · d <sup>-1</sup>	低排放量 /5 m <sup>3</sup> · d <sup>-1</sup>	高排放量 /20 m <sup>3</sup> · d <sup>-1</sup>

污染物离子时间迁移扩散曲线表明高注入量的模型 C 逆流扩散的能力得到了提高,如图 13(a)所示,在监测断面 1 处,标准模型和低注入量模型在整个 100 a 监测期内均未检测到污染物离子,但在 20 m<sup>3</sup>/d 的高注入量模型中,CM1.1 点在第 4 700 d 即可检测到污染物离子的侵入,并且污染物离子浓度逐渐上升最终可达到污染源的初始浓度,更远处的 CM1.2 在 7 760 d 监测到污染物离子,最终浓度约为 38 g/l,由此可见随着注入量的提高,污染物逆流扩散的能力得到了显著提高,污染的范围更广。

监测断面 2 处的污染物离子时间迁移扩散曲线随注入量的高低呈明显的层次分布,各个监测点所监测到污染物离子先后次序随注入量的提高而不断提前,高注入量的离子迁移扩散速度最快,其次为标准注入量 B,最后为低注入量 C。同一时间同一监测点不同模型的污染物离子浓度随着注入量的提高

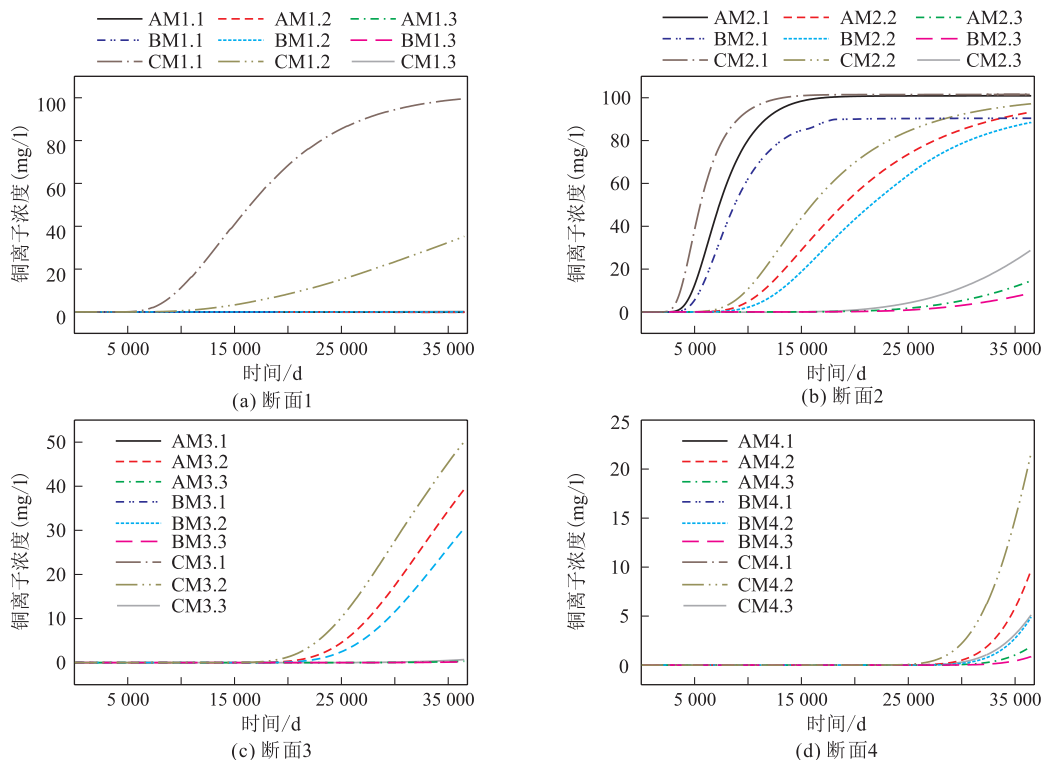


图 13 不同排放量模型的污染物浓度随时间变化关系

而提高,不同监测点随着深度的增加而污染物离子浓度不断减小。断面 3 和断面 4 仍有着相同的规律,且越远处的监测断面所监测到的污染物峰值浓度不断减小,污染程度也随之降低。图 14 和图 15 反映了各模型第 50 a 和 100 a 的污染物离子浓度的空间分布曲线,从图中可以看出,高注入量的模型在逆流和顺流方向上的迁移扩散能力均得到了提高,污染范围更大,污染程度更严重。

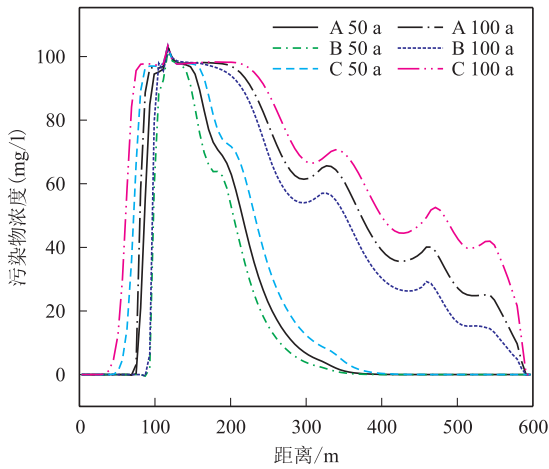


图 14 不同排放量污染物浓度随距污染源距离变化

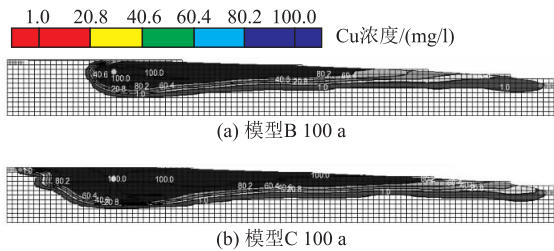


图 15 污染物离子 100 a 迁移范围(不同排放量)

### 3.5 污染物浓度对污染物迁移的影响

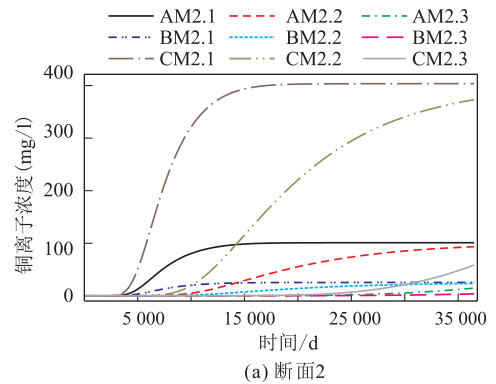
与改变污染物排放量不同,污染物浓度的改变并不影响初始水头的分布,即并不改变污染物迁移扩散中的对流作用。浓度的改变主要在两个方面影响污染物离子的迁移扩散,一方面随着浓度的提高,单位体积内的污染物离子含量增加,在同样注入量情况下,污染物离子的量越高,另一方面浓度的提高提高了污染物离子弥散扩散的效应,促进污染物离子的迁移扩散。为探讨污染物离子浓度对污染物迁移扩散的影响,建立了 3 个污染物排放浓度模型,如表 5 所示,其污染物的排放浓度分别为 100 g/l、25 g/l 和 400 g/l。

图 16 为 A、B 和 C 在断面 2、3 和 4 上监测到的污染物浓度随时间的变化曲线。随着污染物浓度的提高,污染物离子迁移扩散的速度提高,高浓度的 C

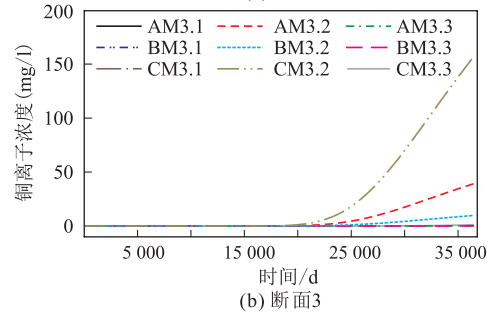
模型 CM2.1 在第 3 200 d 即可监测到污染物离子,而标准浓度的 A 模型(100 g/l)和低浓度排放的 C 模型首次监测到污染物的时间分别为 3 740 d 和 4 200 d。除了在时间上,高浓度排放模型污染物扩散在速度和污染深度上均强于模型 A 和 B。结合图 17 和图 18 可以发现,随着污染物浓度的提高,污染的范围更大,污染程度更为严重。

表 5 三个模型污染物排放浓度值

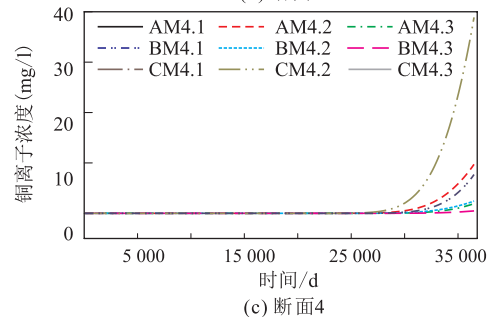
模型	A	B	C
排放量	标准浓度 /100 g · l <sup>-1</sup>	低浓度 /25 g · l <sup>-1</sup>	高浓度 /400 g · l <sup>-1</sup>



(a) 断面2



(b) 断面3



(c) 断面4

图 16 不同污染源浓度模型所得污染物浓度随时间变化示意图

## 4 结论

本文主要在污染物离子在成层土中的迁移扩散规律方面展开了对比分析研究。结论总结如下:

(1) 污染物离子在土壤及地下水中的迁移实际上属于污染物在多孔介质中的迁移,多孔介质中污染物的迁移机制包括对流、扩散、机械弥散 3 个方

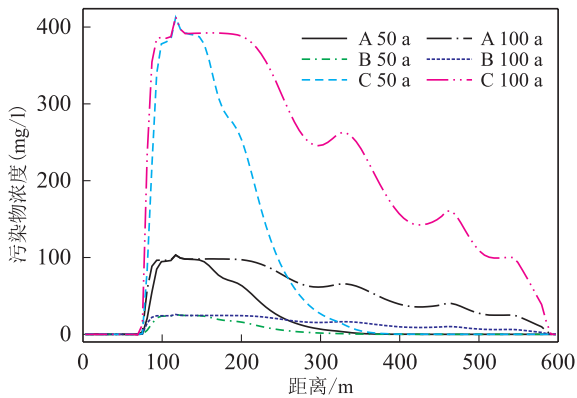


图 17 不同污染源浓度污染物浓度随距污染源距离的关系

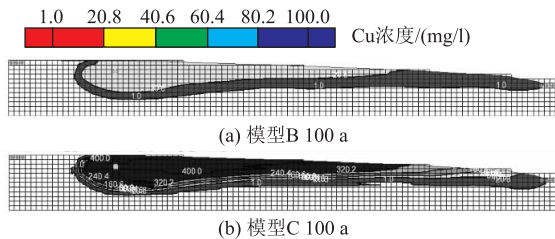


图 18 污染物离子 100 a 迁移范围(不同污染物浓度)

面,其中对流作用起到主导作用。

(2) 污染物的迁移扩散受到水力梯度、土层渗透性、污染源排放量和污染源浓度等因素影响,而水力梯度、土层渗透性等是因为改变土层中的流场分布从而影响污染物离子的迁移扩散。

(3) 模拟结果表明污染物在全风化基岩中扩散

效率低,建议在治理污染物场地时,考虑将防渗帷幕嵌入渗透系数较小的土层中。

(4) 污染物离子在逆流或垂直于流场方向上迁移扩散效率较低,污染能力相对较低,且存在极限扩散范围。

#### 参考文献

- [1] 作彦卿. 多孔介质污染物迁移动力学[M]. 上海交通大学出版社,2007.
- [2] 张洋. 重金属污染物在多孔介质中的迁移模型与仿真[D]. 重庆大学,2012.
- [3] 李华伟,白冰,王梦恕,等. 渗透作用下多孔介质中循环浓度污染物的迁移过程研究[J]. 岩土力学,2015,36(5):1306-1312.
- [4] D. R Nielsen, J. W. Biggar. Miscible displacement in soils: I. Experimental Soil Science Society of America Journal [J]. 1961,25(1):1-5.
- [5] 谢海建. 成层介质污染物的运移机理及衬垫系统防污性能研究[D]. 浙江大学建工学院,浙江大学,2008.
- [6] Hanks, J, Ritchie, J. T. America; Soil Science Society of America[M]. Modeling plant and soil systems,1991.
- [7] Find, EO. The principal direction technique: A new approach to groundwater contaminant transport modeling[J]. Water Resources Research, 1982, 13(2):25-42.
- [8] 朱学愚,刘建立. 山东淄博市大武水源地裂隙岩溶水中污染物运移的数值研究[J]. 地学前缘,2001,(1):172-179.
- [9] 詹良通,刘伟,曾兴. 垃圾填埋场污染物击穿竖向防渗帷幕时间的影响因素分析及设计厚度的简化计算公式[J]. 岩土工程学报,2013,35(11):1988-1996.

作者简介: 苏振兴(1963—),男,高级工程师,注册岩土工程师,长期从事岩土工程勘察、岩土工程设计。E-mail:szx5918@126.com

通讯作者: 杜风雷(1990—),男,工程师,硕士,岩土工程,主要从事岩土工程领域的设计咨询工作。E-mail:fengww623@outlook.com