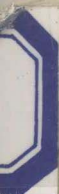


土壤物理 与生态环境建设 研究文集



邵明安 主编

陕西科学技术出版社



S152-53
1

土壤物理与生态环境建设 研究文集

主 编 邵明安
副主编 刘文兆 张佳宝 吕 军
龚元石 张兴昌

昆明理工大学图书馆
白 龙 校 区
中 文 藏 书 章



03000794638

陕西科学技术出版社

中国科学院知识创新重要方向项目“黄土区坡面生态系统中物质运移与调控”(KZCX2-411)和国家重点基础研究发展规划课题“退化生态系统重建模型与模拟”(G2000018605)资助出版。

图书在版编目(CIP)数据

土壤物理与生态环境建设研究文集/邵明安主编. —西安: 陕西科学技术出版社, 2001.7

ISBN 7-5369-3325-8

I. 土... II. ①邵...②刘...③张... III. ①土壤物理学—文集②生态环境—文集 IV. S152-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 041829 号

出 版 者 陕西科学技术出版社
西安北大街 131 号 邮编 710003
电话(029)7211894 传真(029)7218236
<http://www.snstp.com>

发 行 者 陕西科学技术出版社
电话(029)7212206 7260001

印 刷 西安昆明印刷厂

规 格 787mm×1092mm 16 开本

印 张 24

字 数 550 千字

印 数 1000

版 次 2002 年 7 月第 1 版
2002 年 7 月第 1 次印刷

定 价 58.00 元

(如有印装质量问题,请与承印厂联系调换)

前 言

生态环境建设是我国西部大开发的主要内容之一。我国西部以其生态环境的多样、特殊和脆弱性而在国家的生态环境建设中占据重要地位。1997年8月,江泽民总书记批示“再造一个山川秀美的西北地区”,为保护和开发西部揭开了新的“篇章”。1999年8月朱镕基总理在视察黄土高原时,提出了“退耕还林(草),封山绿化,个体承包,以粮代赈”的十六字生态环境建设措施,把中央开发西北的大思路和黄土高原生态环境建设落到实处。生态环境建设是涉及到自然、社会及经济等的系统工程,需要研究的问题、学科方方面面,土壤物理研究便是其中之一。在国际学术界,随着科学的飞速发展,不同学科的渗透和交叉,土壤物理研究的深度不断加大,范围不断拓宽,近年来一些对人类生存富有挑战性的重大问题,包括持续农业与环境保护等,必然与土壤物理研究联系起来。

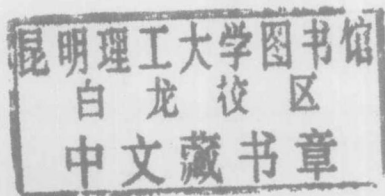
在此背景下,中国土壤学会土壤物理专业委员会与陕西省土壤学会于2000年12月18日至12月20日在陕西杨凌共同主持召开以“土壤物理研究与生态环境建设”为主题的全国第七届土壤物理学术研讨会。参加会议代表75人,分别来自全国17个省、市、自治区。共有63篇论文在大会上进行了交流。根据全体与会代表的要求,决定会后正式出版会议文集。本文集共收录55篇论文,依各自内容大致分为三部分,包括土壤物理参数测定、特征及其模拟;土壤-植物系统水分、溶质运动与节水农业;水土资源保护、利用与生态环境建设。在整体上反映了近年来我国土壤物理与生态环境建设方面的研究成果。

第七届土壤物理学术研讨会的召开和本文集的编辑出版,始终得到了我国土壤物理学界前辈专家的关心和指导。中国科学院、水利部水土保持研究所王惠琴同志在论文征集和编辑过程中做了大量工作。

关于文集上的缺点、错误和不当之处,敬请广大读者批评指正。

编 者

2001年12月于陕西杨凌



目 录

第一部分 土壤物理参数测定、特征及其模拟

非饱和土壤水与溶质迁移特征分析·····	王全九	王文焰	张建丰(2)
入渗条件下非饱和土壤溶质运移的数值模拟·····	张富仓	康绍忠	李志军(7)
应用分形理论模拟和预测土壤水分特征曲线·····	黄冠华	詹卫华	杨建国(13)
波涌灌技术要素对浑水间歇入渗影响与减渗机理研究·····			费良军(19)
土壤水分状况对土壤氮素矿化的影响·····	朱华玲	高明	魏朝富等(25)
黄土高原土壤水分状况的野外调查研究·····			胡良军 邵明安(30)
田间土壤水分空间变异性与套合结构模型·····			李子忠 龚元石(36)
甘肃景电灌区亚表层土壤的渗透性能及其影响因素·····			李小刚(44)
考虑土壤中硝态氮转化作用的传递函数模型·····			马军花 任 理(51)
冲积平原区不同质地土壤颗粒表面的分形维数·····	张世熔	黄元仿	李保国等(68)
林地土壤剖面水分垂直变化层次划分方法的研究 ·····			郭忠升 邵明安 张一平等(74)
土壤渗透率公式的研究及应用·····			李长宝(80)
福建主要旱地土壤的水分能态学特征·····	全 斌	陈健飞	郭成达(86)
人工神经网络模型在土壤水分中的应用·····	宋松柏	王新坤	周 俊等(98)
土壤水(汽)热运移研究现状综述·····			李 毅 王文焰(104)
湿地土壤养分的空间异质性的统计学研究方法·····			白军红 余国营(110)

第二部分 土壤—植物系统水分、溶质运动与节水农业

节水农业中的土壤学问题与节水专家系统·····	邵明安	上官周平	刘晓东(116)
应用实测含水量剖面模拟苜蓿根系吸水特性·····	左 强	王 东	李保国(128)
桂西北幼年柑橘园土壤水分变化规律及其调控技术 ·····			李 玲 肖润林 黄 宇等(135)
根系—土壤界面养分的动态模拟模型及其进展·····			徐明岗(140)
硅肥在玉米生产中的抗旱增产作用研究·····	孙 毅	任 军	高玉山等(147)
辽宁省水稻综合节水技术体系·····			杜尧东 刘作新(152)
北京地区喷灌麦田土壤水分动态的研究·····	甄文超	赵红梅	冯利平等(158)
干旱区土壤小麦体系中重金属行为及其影响因素研究·····			南忠仁 程国栋(164)
论旱地农业中有机肥和豆科作物的农学意义·····	刘晓兰	李世清	李凤民(172)
不同土壤供肥状况下土壤溶质(磷)向根运移及根系 吸收机理模型的参数敏感性研究·····	赵书军	姚其华	陈明亮等(181)

淳化县不同立地上刺槐根系分布参数的研究	李 鹏	李占斌	赵 忠(187)
伤根对旱作玉米光合作用和水分利用效率的影响	柴世伟	刘文兆	(194)
秦岭山区干旱年份地膜小麦水分动态与产量构成	李卫军		(199)
黄土高原地区作物轮作方式产量效应模拟与优化选择研究	李 军	邵明安	王立祥(203)
不同水肥条件对小麦生长及养分吸收的影响	刘春光	翟军海	周建斌(209)
夏玉米水肥空间耦合效应研究初报	王林权	邢维芹	李生秀等(215)
土壤不同容重与干旱对玉米生长及水分利用率的影响	梁宗锁	邵明安	康绍忠(220)
红壤旱地水分调控的研究	余建来	余崇祥	刘振林等(224)
农田墒情测报及灌溉预报自动化研究与应用	李锡录	焦方顺	王 昕等(229)
植物根系中水分传输研究进展	李秧秧	邵明安	(237)
氮素营养与作物抗旱性	张雷明	上官周平	(246)
水蚀条件下土壤氮素径流流失的影响因素	张兴昌	邵明安	(253)

第三部分 水土资源保护、利用与生态环境建设

吉林省西部生态建设分区研究

I. 东部生态区	盛连喜	孙 刚(264)
----------------	-----	----------

吉林省西部生态建设分区研究

II. 中部生态区与西部生态区	孙 刚	盛连喜(268)
坡耕地水土流失特征与耕作措施研究	傅 涛	魏朝富 谢德体(273)
我国低丘红壤地区农业水资源问题与对策	吕 军	(280)
小流域土地生产力评价	王 力	吕俊杰 邵明安(287)
氮素淋失影响因素及防止途径述评	赵允格	邵明安(293)
黄土高原地区土壤持水曲线及其应用的研究	刘敏娟	董水丽 刘恩斌(301)
土壤侵蚀产沙机理及模拟模型研究进展	丁文峰	李占斌等(309)
论黄土高原水土流失与水土资源的可持续利用	李 勉	李占斌 崔灵周(317)
土壤退化研究进展	卢金伟	李占斌(323)
我国水资源持续开发利用中存在的问题及对策	董桂菊	刘文兆(329)
豫北地区水分生态环境要素演变及其意义	徐富安	赵炳梓 唐万龙(337)
金沙江干热河谷典型区(云南)土壤结构与土壤退化	官阿都	何毓蓉(346)
城市污水土地处理方法及污水灌溉联合利用的数学模型	么振东	杨金忠(352)
发展坝地高效生态农业是陕北丘陵区粮食自给的必由之路	林关石	樊红英 常晓明(359)
对西部生态环境建设中环境资源承载力的思考	邵明安	李凤民 上官周平(365)
纸坊沟流域生态农业建设过程的数量化表现	刘文兆	刘国彬 梁一民等(374)

第一部分

土壤物理参数测定、特征及其模拟

非饱和土壤水与溶质迁移特征分析

王全九^① 王文焰 张建丰

(西安理工大学水资源研究所 西安 7011048)

摘 要 根据实验资料,分析了土壤水分运动参数与溶质迁移参数间关系,同时对通量浓度与体积浓度间关系进行了比较分析,并利用仅考虑对流作用对氯离子含量进行了计算,结果表明在示踪元素进行入渗过程中,对流作用呈现起作用,而弥散作用较小。

关键词 土壤水分 土壤溶质 浓度

Analysis of Features for Unsaturated Soil Water and Solute Transport

Wang Quan-jiu Wang Wen-yan Zhang Jian-feng

(Xi'an University of Technology, Xi'an 710048)

Abstract According to experimental data, the relation of soil hydraulic parameters and solute transfer parameter is analyzed, and the solute flux concentration is compared with the volume concentration. Moreover, the solute content is calculated based on the convection process. These results mentioned above indicate that the convection plays an important role in the special solute transfer process.

Key words soil water soil solute concentration

随着农业生产的发展和农业科学技术水平的提高,农田合理施肥与灌溉,有效防治土壤次生盐碱化,防治农药、化肥及废水灌溉所引起土壤和地下水的污染,以及控制土壤溶质随地表径流迁移所引起水环境污染和土地生产力降低,已成为土地资源可持续利用和生态环境建设的重要内容。对于这些问题的研究涉及土壤水与溶质迁移机制,国内外学者就此问题进行了大量研究,提出了多种模型描述非饱和土壤水与溶质迁移过程。目前从物理过程角度描述土壤水与溶质迁移过程的模型主要是 Richard 方程和对流弥散方程,并且常采用数值计算方法来求解这一偏微分方程组。而非饱和土壤水分与溶质迁移基本参数是进行数值计算的基础。本文通过对土壤水分与溶质迁移过程分析,探讨非饱和土壤水分与溶质迁移参数间关系,为进一步寻求简单方法确定相关迁移参数提供指导。

① * 王全九,博士、博士后,教授,西安理工大学水资源所副所长。本项目属霍英东教育基金资助项目。

1 研究土壤物理特征与水分运动参数

根据甘肃秦王川土壤自然分布特点,选取 4 个典型实验点作为研究对象,即为下漫水滩、庄家窑、五墩子、周家庄。经颗粒分析和依据国际分类标准对四土壤进行分类,如表 1 所列。

表 1 试验土壤分类

试验点	下漫水滩	庄家窑	五墩子	周家庄
分类	粉沙质壤土	粉沙质壤土	粉沙质壤土	黏壤土

利用张力计测定了土壤水分特征曲线,具体测定过程见文献^[1,2],利用 $S = A\theta V^B$ 对特征曲线进行拟合,结果如表 2 所列。

表 2 土壤水分特征曲线拟合结果

试验点	下漫水滩	庄家窑	五墩子	周家庄
系数	A B	1.8108 -3.723	1.6138 -3.8634	2.5672 -3.4790
				1.3227 -3.6918

为了比较试验点土壤导水能力,在文献 2 中计算了 Brooks - corey(1964)所提出的土壤水分特征曲线与非饱和土壤导水率关系式中系数(N),计算结果列在表 3 中。

表 3 各试验点 N 值(10^{-5})

试验点	下漫水滩	庄家窑	五墩子	周家庄
N	8.9992	6.2930	7.3968	14.9323

利用瞬时剖面法计算了土壤非饱和导水率[详见文献 1、2] ($k = k_s G^\alpha$, 其中 k 为非饱和导水率, k_s 为饱和导水率, G 为饱和度, α 为系数),结果列于表 4。

表 4 非饱和土壤导水率参数

试验点	下漫水滩	庄家窑	五墩子	周家庄
K_s	0.16101	0.03277	0.06561	0.44687
α	4.09165	4.85499	3.72249	4.70032

2 水动力弥散系数

土壤溶质迁移基本方程表示为

$$\frac{\partial \theta c}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z}[\theta D \frac{\partial c}{\partial z} - qc]$$
 (1)

式中: θ 为土壤水分含量, c 土壤溶质体积浓度, t 为时间, z 为垂直坐标, D 为水动力弥散系数, q 为水分通量。根据测定水动力弥散系数的瞬时剖面法原理^[3],以氯离子为示踪元素,在积水入渗结束后,提取两个水分和氯离子含量剖面,并以此计算了土壤水动力弥散系数。由于弥散系数是孔隙水流速的线形函数,即:

$$D = \lambda v$$
 (2)

式中: v 为孔隙水平均流速, λ 为弥散度。根据测定和计算的水动力弥散系数和孔隙水平均流速,计算了弥散度,结果如表 5 所示。

表 5 各试验点弥散度

试验点	下漫水滩	庄家窑	五墩子	周家庄
弥散度(cm)	14.436	5.0169	8.1468	19.154

3 弥散度与参数 N 和饱和导水率间关系

为了寻求弥散度与参数 N 之间关系,便于利用土壤水分特征曲线,来获取弥散度,从而减少由于获取参数而耗时耗力,将弥散度与 N 间关系点绘在图 1 上。

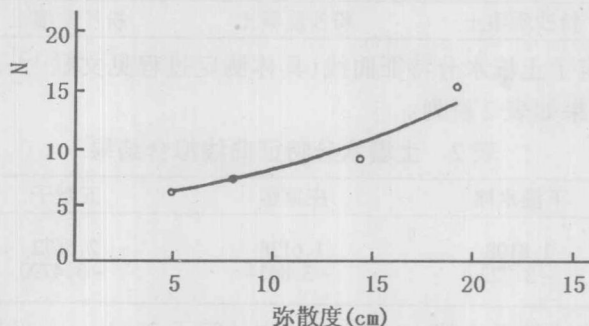


图 1 N 与弥散度关系

利用指数函数对其进行拟合,结果如下

$$N = 4.5669 \exp(0.057\lambda) \quad (3)$$

$$R^2 = 0.9265 \quad (4)$$

由图 1 和式(3)可知, N 与弥散度存在良好的指数关系,此如果获得 N 就可得到弥散度,因此可以利用土壤水分特征曲线来获得弥散度。

对于特定的土壤而言,就有特定的饱和导水率和弥散度,因此两者同样应存在一定关系,将四种土壤的弥散度和饱和导水率关系点绘在图 2 上。并利用指数函数对两者关系进行拟合,结果如下。

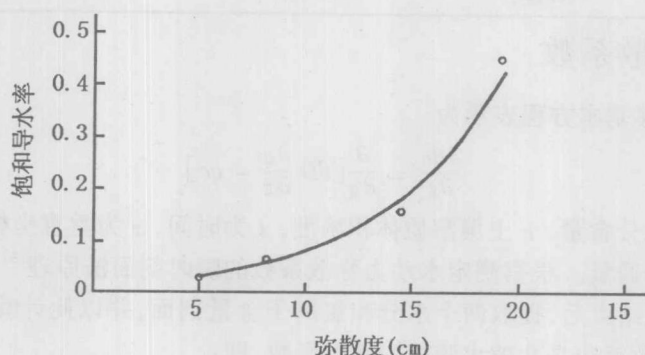


图 2 弥散度与饱和导水率间关系

由图 2 和式(4)可知,弥散度与饱和导水率间也存在良好的指数关系。因此可以根据

饱和导水率来确定弥散度。

4 土壤溶质迁移特征分析

根据对流弥散理论,土壤溶质的通量方程可以表示为:

$$J = -D\theta \frac{\partial c}{\partial z} + qc \quad (5)$$

式中: J 为溶质通量。将式(5)变换为:

$$c_j = -\lambda \frac{\partial c}{\partial z} + c \quad (6)$$

式中: $c_j = J/q$ 为通量浓度。为了分析通量浓度与体积浓度间关系,就周家庄通量浓度与体积平均浓度进行了计算,如图3所示。

由图可见,通量浓度几乎为一常数,说明在示踪元素进行入渗过程中,弥散作用较小。而对流作用起主要作用。为了证明这一点,仅考虑对流作用计算土壤氯离子含量分布,具体计算公式为:

$$s = \theta \times c_0 \times W_0 / \gamma_d \quad (7)$$

式中: s 为氯离子含量, c_0 为示踪浓度, W_0

为氯离子分子量, γ_d 为土壤干溶重, θ 为土壤含水量。利用式(7)计算了土壤氯离子含量分布,如图4所示。由图4可知,水动力弥散所起的作用远小于对流作用。



图3 通量浓度与体积浓度间的关系

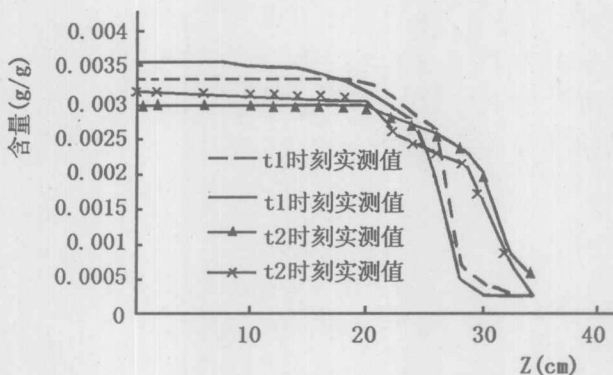


图4 土壤氯离子含量

5 小结

根据实测土壤水分与溶质迁移参数,分析了各参数之间函数关系。通过计算土壤通量浓度和体积浓度,并比较两者关系,同时分析了水动力弥散作用。分析结果表明水动力弥散作用远小于对流作用。

参考文献

- 1 王全九,王文焰等. 田间非饱和土壤水分运动参数测定. 农业工程学报. 1998, 14: 149 ~ 153
- 2 王全九等. 非饱和土壤导水特性分析. 土壤侵蚀与水土保持学报. 1998, 4(6): 16 ~ 22
- 3 贾大林,张效先. 多孔介质中弥散参数的“瞬时剖面”求法. 土壤学报, 1987

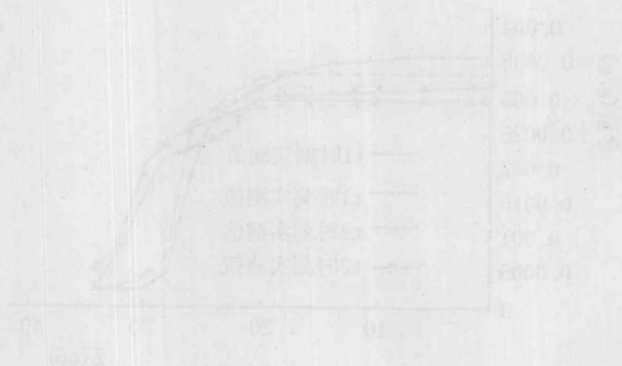


图 2 不同土质土壤的水含量比

入渗条件下非饱和土壤溶质运移的数值模拟^①

张富仓 康绍忠 李志军

(西北农林科技大学、教育部旱区农业水土工程重点实验室,陕西杨凌,712100)

摘 要 基于测定两种不同质地的土壤非饱和水平入渗条件下水分和溶质运移参数,采用差分离散和预报校正计算方法,给出了模拟入渗条件下非饱和土壤溶质运移的一种数值方法。对不同质地、容重、浓度条件下的水平入渗土柱的水分和溶质分布进行了数值模拟,与实测资料对比分析表明,数值分析的方法对土壤溶质运移的模拟是适用和有效的。

关键词 入渗 溶质 数值模拟

Numerical Simulation of Solute Transport in Unsaturated Soil Under Infiltration Condition

Zhang Fu-cang Kang Shao-zhong Li Zhi-jun

(Key Lab of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid and Semiarid Area,
Northwest Sci-tech University of Agriculture and Forestry, Yangling, Shaanxi 712100)

Abstract A numerical algorithm for modeling solute transfer in unsaturated soil was developed based on measuring soil water and solute movement parameters in two soils under horizontal infiltration condition. The algorithm based on the finite-difference discrimination carried out the calculation of time stages by the Prediction-Correction methods. A numerical simulation was conducted on water and solute movement in unsaturated infiltration experiments with two kinds of soil texture, three-soil bulk density and three-solution solute concentration. It shows by comparison between measured and simulated results that numerical analysis method for simulation water and solute movements in unsaturated soil is valid and available.

Key words infiltration solute numerical simulation

资源和环境,是当今社会普遍关注的问题,水和溶质在土壤中的迁移问题已经成为当今世界的研究热点。在黄土地区,气候干旱,水资源缺乏,土壤盐碱化是其主要资源和环境特征。其中水分条件是限制土壤生产力提高的主要因素,由于不良的灌溉及不合理的

^① 国家杰出青年基金资助项目(49725102)。

灌溉措施以及不合理的施肥导致土壤水环境的污染,从而使土壤发生次生盐碱化和土壤污染,成为农业发展的另一个突出障碍,由此而导致土壤生态系统的环境恶化,为了防止水质的恶化、土壤的污染,必须制定有效的防治规划,采用合理的措施。为此,需要研究溶质在土壤中(非饱和区和饱和区)的运移规律,以便对土壤中溶质的时空分布和变化进行预测预报。本文采用数值方法定量模拟了非饱和土壤入渗条件下水和溶质的运移规律,以探求数值方法的可能性和适用性。

1 入渗条件下非饱和土壤溶质运移的数学模型和数值方法

1.1 入渗条件下非饱和土壤溶质运移的数学模型

描述非饱和土壤一维溶质运移的基本方程为:

$$\frac{\partial(\theta c)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} [D_{sh}(\theta) \frac{\partial c}{\partial x}] - \frac{\partial(qc)}{\partial x} \quad (1)$$

式中: $c(x, t)$ 为土壤溶液浓度 [$\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$]; $\theta(x, t)$ 为土壤容积含量 [$\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$]; $D_{sh}(\theta)$ 为水动力弥散系数 [$\text{cm}^2 \cdot \text{min}^{-1}$]; $q(x, t)$ 为水分通量 [$\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$], t 为时间坐标 [min]。

土壤含水率 $\theta(x, t)$ 除满足溶质运移基本方程(1)外,还应满足非饱和土壤水分运动的基本方程:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} [D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial x}] + \frac{\partial K(\theta)}{\partial x} \quad (2)$$

方程(2)中符号含义同前。若 x 为水平坐标,则(2)式右端无第二项。

若考虑水平入渗下的土壤水分运动及溶质运移,故有定解如下:

$$\text{初始条件} \begin{cases} \theta(x, 0) = \theta_0 \\ c(x, 0) = c_0 \end{cases} \quad (t = 0, 0 \leq x \leq L) \quad (3)$$

$$\text{边界条件} \begin{cases} \theta(0, t) = \theta_s \\ c(0, t) = c_s \\ \theta(L, t) = \theta_0 \\ c(L, t) = c_0 \end{cases} \quad \begin{matrix} (x = 0, 0 < t \leq T) \\ (x = L, 0 < t \leq T) \end{matrix} \quad (4)$$

式中: θ_0 、 c_0 分别是初始土壤含水率及初始溶质浓度, θ_s 、 c_s 分别是入水端 ($x = 0$) 的含水率及溶质浓度, L 、 T 分别是空间及时间变化的上限。

上述基本方程(1)、(2)及定解条件(3)、(4)构成非饱和土壤一维溶质运移问题的数学模型。方程(1)和(2)是关于两个未知变量 $\theta(x, t)$ 和 $c(x, t)$ 的联立方程,说明土壤中溶质运移与水分运动是相互关联的。但在黏性土壤中,溶质浓度对水分运动的影响一般可忽略不计^[1],因此基本方程(2)和(1)的联立求解可简化为依次独立求解。

1.2 数值方法

1.2.1 差分方程的建立

数值求解基本方程(2),通过积分

$$V = \int_{\theta_0}^{\theta} D(\theta) d\theta \quad (5)$$

将方程(2)转化为拟线性方程

$$\frac{\partial V}{\partial t} = f_1(V) \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + f_2(V) \frac{\partial v}{\partial x} \quad (6)$$

其中:

$$\begin{cases} f_1(V) = a \cdot e^{b \cdot g(v)} \\ f_2 = (c \cdot d) e^{(d-1)g(v)} \\ g(V) = \ln[(V - \mu)/r]/(b + 1) \\ r = a/(b + 1) \\ \mu = -r\theta_0^{(b-1)} \end{cases} \quad (7)$$

对方程(6)建立四点隐格式及加权平均格式联合运用的有限差分算法。这两个格式都是收敛且绝对稳定的^[1]。溶质运移方程(1)求解则有相当难度。数学上方程(1)是双曲型与抛物型的结合,在物理机制上又是对流作用与水动力弥散作用的混合,因此一般的差分法在对流作用占主导地位时容易产生由数值误差引起的所谓“数值弥散”^[2]。所以,本文采用了数值稳定性较好、计算精度较高切不易产生数值弥散的 Bresler 差分法^[3]。

1.2.2 水分运动方程的求解

预算法(四点隐格式):

$$\frac{V_i^{j-\frac{1}{2}} - V_i^j}{dt/2} = f_1(V_i^j) \left[\frac{V_{i+1}^{j-\frac{1}{2}} - 2V_i^{j-\frac{1}{2}} + V_{i-1}^{j-\frac{1}{2}}}{(dx)^2} \right] + f_2(V_i^j) \left[\frac{V_{i+1}^{j-\frac{1}{2}} - V_{i-1}^{j-\frac{1}{2}}}{2dx} \right] \quad (8)$$

校正算法(加权平均格式):

$$\begin{aligned} \frac{V_i^{j-1} - V_i^j}{dt} = & f_1(V_i^{j-\frac{1}{2}}) \cdot \frac{1}{2} \left[\frac{V_{i+1}^j - 2V_i^j + V_{i-1}^j}{d(x)^2} + \frac{V_{i+1}^{j-1} - 2V_i^{j-1} + V_{i-1}^{j-1}}{(dx)^2} \right] \\ & + f_2[V_j - \frac{1}{2}] \cdot \frac{1}{2} \left[\frac{V_{i+1}^j - V_{i-1}^j}{2dx} + \frac{V_{i+1}^{j-1} - V_{i-1}^{j-1}}{2dx} \right] \end{aligned} \quad (9)$$

式中: $f_1(V_i^j) = a \cdot e^{b \cdot g(V_i^j)}$; $f_2(V_i^j) = (c \cdot d) \cdot e^{(d-1) \cdot g(V_i^j)}$; $g(V_i^j) = \ln[(V_i^j - u)/r]/(b + 1)$; $r = a/(b + 1)$; $u = -r\theta_0^{b+1}$; $n = [L/dx]$; $m = [T/dx]$, $j = 0, 1, 2, \dots, n - 1$

以上各式中, dt, dx 分别是空间和时间方向上的离散步长, m, n 分别是两个方向上的节点数; V_i^j 代表中间变量 $V(x, t)$ 在节点 (idx, jdt) 上的值; $V_i^{j-\frac{1}{2}}$ 是中间变量 $V(x, t)$ 在节点 $[idx, (j + \frac{1}{2})dx]$ 上的值; a, b, c, d 是 $D(\theta)$ 及 $K(\theta)$ 的四个非线性参数。

通过上述预估,校正两步计算得到中间变量 V_i^{j+1} 之后则得到非饱和土壤一维水分运动的土壤含水率:

$$\theta_i^{j+1} = e^{g(V_i^{j+1})} (j = 0, 1, 2, \dots, m; i = 1, 2, \dots, n - 1) \quad (10)$$

1.2.3 溶质运移基本方程的求解

求解溶质运移基本方程(1)采用六点隐格式(B算法)法。按差分格式(8), (9)及B算法在每个时间段 $[t_j, t_{j+1}]$ 上容易得到三组 $(n - 1)$ 阶的线性代数方程组,其系数阵均为三对角阵,用“追赶法”依次解之,得到非饱和土壤中含水率变化 $\theta(x, t)$ 及溶质运移动态 $C(x, t)$ 的数值解答 θ_i^{-1} 及 C_i^{j+1} ($j = 0, 1, 2, \dots, n - 1$)。

2 入渗条件下非饱和土壤溶质运移的模拟实验

入渗条件下非饱和土壤溶质运移的模拟实验是在每 1cm 分割有机玻璃水平土柱中进行的,柱长为 20cm,内径 5.8cm,由固定夹固定,入渗溶液由马氏瓶控制一定水位,进水高度处于水平土柱的下限,进入端有滤纸与土壤接触。入渗溶液为 NaCl 溶液,试验设计为半无限土柱。

供试土壤采自西北农林科技大学节水灌溉试验站撙土和内蒙古翁牛特旗敖包小流域的栗钙土的耕作层土壤,两种土壤的质地分别为重壤土和轻壤土。土样风干,磨细过 1mm 筛,按一定容重装填为风干土,供试土壤含水率用烘干法测定,氯离子(Cl^-)含量用 5:1 水土比浸提土壤,用离子色谱仪测定。

试验除了 2 种不同质地的土壤外,还设置三种不同土壤容重,分别为 1.2、1.3 和 1.4 g/cm^3 ,以及 3 种不同浓度的氯离子(Cl^-),浓度分别为 10、50 和 100 $\mu\text{g}/\text{ml}$ 。根据水平土柱法测定土壤水分扩散率 $D(\theta)$ 和土壤溶质水动力弥散系数 $D_{sh}(\theta)$ 的原理^[4],当半无限土柱的水平入渗停止时,测出土柱的含水率分布和盐分浓度分布,用相关公式计算出 $D(\theta)$ 和 $D_{sh}(\theta)$ 。试验结果显示 $D(\theta)$ 和 $D_{sh}(\theta)$ 均与土壤含水率 θ 成指数关系,其表达式分别为 $D(\theta) = a\theta^b$ 和 $D_{sh}(\theta) = c\theta^d$,土壤非饱和导水率 $K(\theta)$ 用一步出流法获得^[5],其表达式为 $K(\theta) = e\theta^f$,以上各式中 a, b, c, d, e, f 是由土样试验确定的参数。

3 数值模拟结果与分析

应用上述算法对 2 种不同质地土壤在不同土壤容重和浓度溶液水平入渗条件下土柱含水率和溶质浓度进行了数值模拟。对实测结果和模拟结果进行了如下比较。

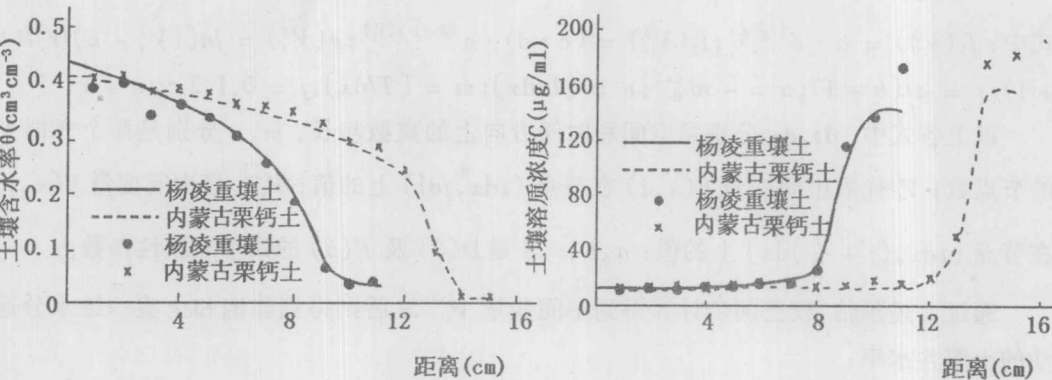


图 1 不同质地土壤水分实测值和计算值的比较 图 2 不同质地土壤溶质浓度实测值和计算值的比较

3.1 不同质地土壤的比较

两种质地的土壤,砂壤土(内蒙古)和重壤土(杨凌)以 1.3 g/cm^3 的容重装填,用 10 $\mu\text{g}/\text{ml}$ 的 NaCl 溶液作为入渗溶液时,土柱中土壤水分和溶质浓度的分布状况如图 1 和图 2 所示。图中实线和虚线为用方程(1)及实测的土壤导水参数计算的结果,标号为不同

处理实测的土壤含水量和溶质浓度,从图可以看出,土壤质地越轻,入渗越快,相应到达一定入渗距离土壤含水率越高,数值模拟计算与实测结果符合很好。

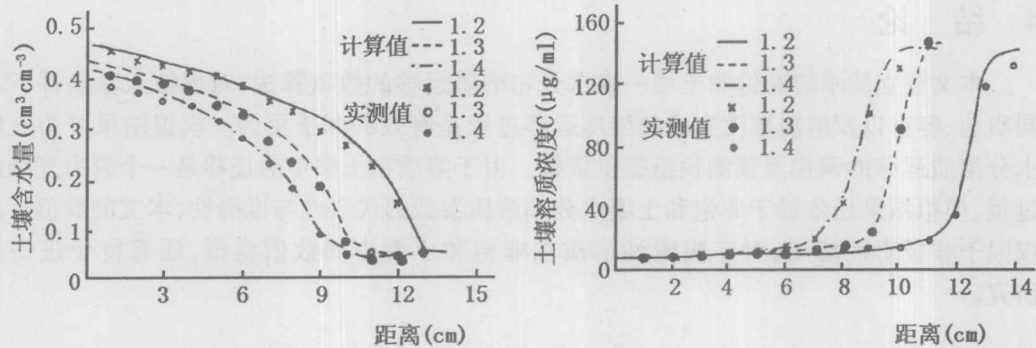
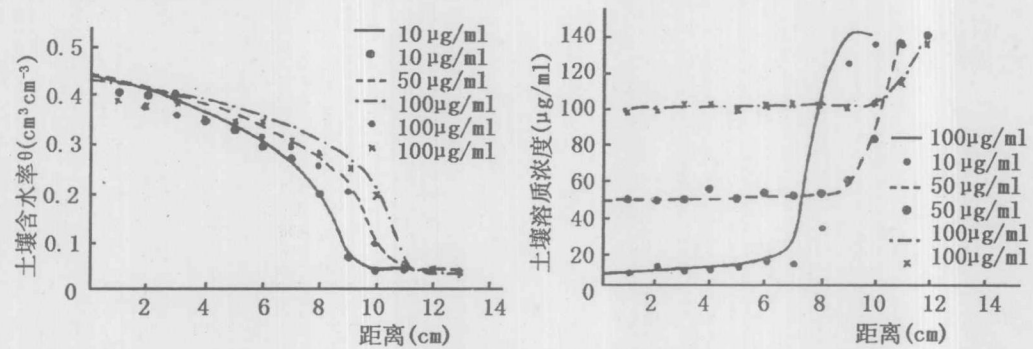


图3 不同容重下土壤水分实测值和计算值的比较 图4 不同容重下土壤溶质浓度实测值和计算值的比较

3.2 不同土壤容重的比较

图3和图4为非饱和水平入渗条件下杨凌重壤土在不同装土容重下的土壤水分和溶质浓度的分布状况。从图可以看出,入渗实验表明,随着入渗距离的增加,土壤含水率逐渐减小,且随着装土容重的增加,土壤含水率逐渐降低。土壤溶质浓度的变化随着土壤含水量的变化呈相应规律性的变化。用以上的求解方法得到的土壤含水率与土壤溶质浓度的计算值与实测值符合较好,说明以上的数值计算方法是可行的。



5 不同溶质浓度土壤水分实测值和计算值的比较 图6 不同盐浓度土壤溶质实测值和计算值的比较

3.3 不同溶质溶液的比较

实验选择了三种不同浓度的 NaCl 溶液进行水平入渗,实测的土壤含水率和 Cl^- 浓度的分布如图5和图6所示。由图可知,入渗溶液浓度的大小对土柱的含水率的分布产生一定的影响,在水平入渗条件下,在靠近水源的土壤(高含水率的土壤),溶质浓度对土壤含水率的影响较小;在远离水源的土壤(低含水率的土壤),溶质浓度对土壤含水率的影响较大,表现为低浓度的溶液土壤含水率相对较低。由于本文中未考虑水分运动方程和溶质运移方程的相互作用,仅考虑不同浓度的溶液入渗时,土壤水分扩散率和水动力弥散系数的差异,因此,土壤含水率的计算结果较能反映实测的土壤含水率,特别是在土壤含水