

基于 COMSOL 的低渗性盐土内设砂柱洗盐定量模拟^{*}

孙雪雁^{1,2} 李品芳¹ 李保国¹ 薛元霞² 邵 蕾²

(1. 中国农业大学农业部华北耕地保育重点实验室, 北京 100193; 2. 中国农业大学烟台研究院, 烟台 264670)

摘要: 滨海粘壤质盐土具有质地黏重、渗透性差等特点, 工程实践中一种有效的措施是在其土体中建构砂性土柱(简称砂柱)加速其脱盐。针对此工程措施, 基于 2-D 土壤溶质运移模型, 应用 COMSOL 软件模拟了饱和淋洗条件下 3 种类型砂柱设置的排盐效果, 并进行了定量分析。结果表明: 内设中竖砂柱、单斜对角砂柱和双斜“X”型长砂柱, 经过 24 h 淋洗后, 其淋洗效率分别是不设砂柱的 1.24、1.29 和 1.45 倍; 95% 盐分的淋出时长分别为不设砂柱的 0.88、0.83 和 0.78 倍。这说明内设砂柱能显著提高脱盐效率, 不同砂柱构建对脱盐效率也有显著影响, 3 种砂柱相比, 内设双斜“X”型长砂柱的构型最有利于盐分的淋洗, 也最节省水资源。

关键词: 滨海盐土 溶质运移 COMSOL 2-D 砂柱 数学模拟

中图分类号: S156.4⁺2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2014)07-0111-07

引言

我国渤海湾、黄河三角洲以及江苏东部的沿海地区分布着广阔的滨海盐渍土^[1], 据统计其面积为 2 万多 km²^[2], 如何对这些后备的土地资源进行科学使用与管理, 一直是土壤工作者关注的问题。由于滨海盐土具有含盐量高、养分低、地下水位埋藏浅、矿化度高、土质粘重等特点, 需要经过改良后才能利用^[3]。改良工程中, 如何使质地黏重、渗透性差的盐土快速脱盐是生产实践中最重要的关键问题。打孔注入砂性土柱(简称砂柱)工艺技术是目前工程改良实践中一种很有效的技术, 可以解决黏质低渗性盐土的难渗透问题, 达到暗管排水达不到的渗透效果^[4]。砂柱对土壤的改良应用早在 1981 年便有相关实验研究^[5], 该技术目前已经在中新天津生态城、江苏启东工业园等地进行了实践应用^[6]。但目前的工程技术都是采用内设竖砂柱的方式, 对于其他砂柱设置方式的效果比较和内在机理, 尚缺乏相关的深入研究和定量分析。

20 世纪 80 年代后, 许多学者基于室内土柱实验, 应用数值模拟的方法研究了土壤中水分和盐分一维运动的规律^[7-11], 为本研究提供了参考。但对于 2-D 土壤水盐土柱物理模拟和数值模拟的研究, 由于其问题的复杂性, 研究报道较少, 左强曾对 2-D 均质土壤排水条件下饱和和非饱和水盐运动规律进行过初步数值模拟

研究, 采用了有限单元法迭代求解^[12]。对于江苏一带的砂质滨海盐土, 张亚年曾用 HYDRUS 软件进行过暗管排水条件下水盐运移的数值模拟^[13]。

COMSOL Multiphysics 软件(原 Finite Element Modeling Laboratory)是一个基于偏微分方程的多物理场有限元分析软件, 可以用来求解线性、非线性问题, 和时间有关的稳态、瞬态问题, 以及和几何形状有关的一维、二维和三维问题。与专门针对土壤水盐模拟的软件相比, COMSOL 在处理实际问题和数值计算上适用性更广, 可模拟一些更复杂的工程设置方式。目前运用 COMSOL 软件于土壤中的计算和模拟, 主要局限于地下水和土壤水入渗的研究^[14-16], Wissmeier 将该软件应用于土壤中杀虫剂的运移模拟, 对运用 COMSOL 模拟土壤溶质运移的适用性进行了验证, 证明了该软件适于土壤溶质运移的模拟^[17]。

本文将土体中建构砂柱后的水盐运动简化成非均质 2-D 土壤水盐运动, 应用 COMSOL 软件模拟工程实践可实现的几种砂柱构型, 定量探究其加速脱盐效果, 以期对滨海盐土脱盐、控盐的工程模式进行定量评价和设计优化提供指导和依据。

1 材料与方法

1.1 土样来源及性质

盐土柱用土取自天津大港的粘壤质滨海盐土,

收稿日期: 2014-01-04 修回日期: 2014-02-18

^{*} “十二五”国家科技支撑计划资助项目(2012BAD05B02)和国际原子能机构国际联合研究计划资助项目(CRP D1.20.13-17865)

作者简介: 孙雪雁, 博士生, 中国农业大学烟台研究院讲师, 主要从事土地利用方面研究, E-mail: sxyuser@163.com

通讯作者: 李保国, 教授, 主要从事水土资源利用、土壤学研究, E-mail: libg@cau.edu.cn

考虑到砂柱用砂子时,会因两个土壤导水率相差过大而引起指流或达不到实践上的脱盐效果^[18],所以本次模拟砂柱用土选为砂壤土。两种土壤的颗粒组成(按美国制分类)见表1。

表 1 土壤容重及颗粒组成
Tab.1 Bulk density and soil particle composition

土样	容重/(g·cm ⁻³)	Cl ⁻ 质量比/(g·kg ⁻¹)	砂粒质量分数/%	粉粒质量分数/%	粘粒质量分数/%
滨海粘壤质盐土	1.3	6.453	43	27	30
砂壤土	1.5	0	60	35	5

1.2 试验设计

本文在粘壤质滨海盐土土柱中设置了3种典型形式的砂柱,与空白盐土土柱进行对比,对它们的洗盐过程进行了模拟,砂柱设置方式如图1,图中,(a)

为没有砂柱的土柱,(b)为中竖砂柱,(c)为单斜对角砂柱,(d)为双斜“X”型长砂柱,左边的三维图为中竖沙柱的三维视图,蓝色部分为粘壤质盐土,黄色部分为砂壤质土柱(砂柱)。

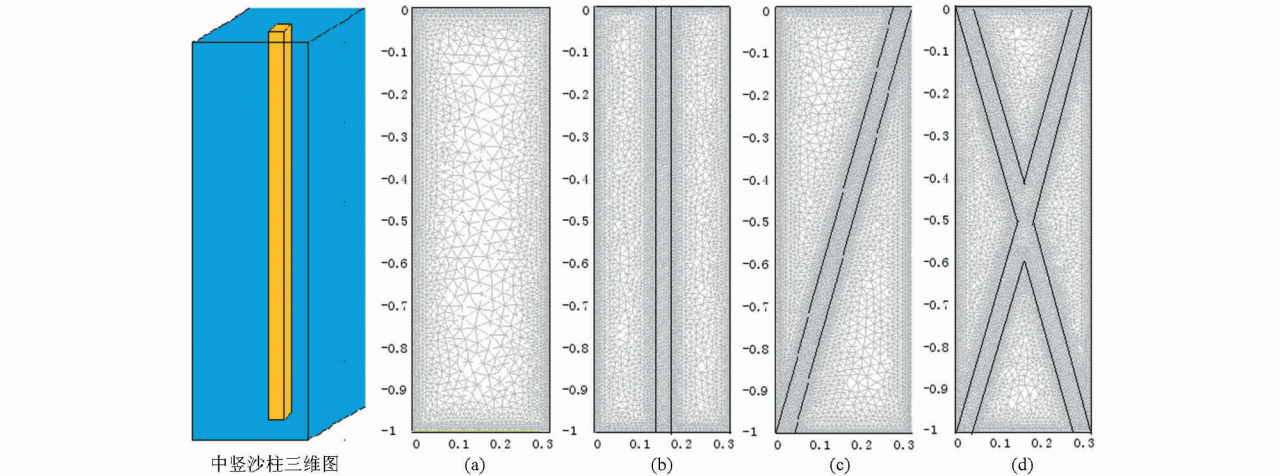


图 1 中竖沙柱三维图及4种砂柱设置情况下的网格分布图

Fig.1 Mesh mode of four types of arrangement with different sand columns and 3-D mode of vertical middle sand column

1.3 COMSOL 的适用性验证与模型原理

本研究运用 COMSOL 2-D 地球科学模块的流体流动模块和溶质运移模块,模拟的水分运动采用饱和-非饱和水流的 Richards 方程,溶质运移基于 Fick 定律的对流-弥散方程,将两个模式耦合在同一物理场中,来模拟淋洗条件下土壤水分和盐分(Cl⁻)的二维运移过程。

为了确保 COMSOL 2-D 的地球科学模块流体流动模块和溶质运移模块耦合可以用于对土壤水盐运动的模拟,首先对 Warrick 等经典的田间咸水灌溉和淡水冲洗试验、与 Frind 所列举的 2-D 地下水污染物运动问题进行了模拟计算和比较,结果表明:在合理的网格剖分下,应用 COMSOL 所得的结果与已有的实测值、解析解一致^[19-20]。由于篇幅所限,这里不再详述。

结合工程实践^[6]和便于模拟计算,模拟对象统一选为高 1 m、水平断面为边长 0.3 m 正方形的长方体盐土土体,内设砂柱的水平断面为边长 0.04 m 正方形,如图 1 所示。本模拟中所有土柱经过淹水,土壤饱和后,表层保持 2 cm 积水进行淋洗,水分在土

壤中入渗的过程属于空间三维运动,由于 3-D 问题极其复杂,将问题简化为非均质、各向同性的水盐运动二维问题来模拟,此时,土壤水分运动控制方程可表达为^[21]

$$C(h)\frac{\partial h}{\partial t}=\frac{\partial}{\partial x}\left[K(h)\frac{\partial h}{\partial x}\right]+\frac{\partial}{\partial z}\left[K(h)\left(\frac{\partial h}{\partial z}-1\right)\right]$$
(1)

其中 $C(h)=\frac{d\theta}{dh}+S_s\frac{\theta}{n}$

- 式中 h ——土壤基质势,m
 t ——时间,s
 $K(h)$ ——水力传导率,m/s
 x ——横向坐标,m
 z ——纵向坐标,m
 $C(h)$ ——贮水系数,m⁻¹
 S_s ——弹性释水系数,m⁻¹
 θ ——土壤体积含水量
 n ——土壤孔隙率

土壤淹水饱和状态下, $\frac{d\theta}{dh}=0,\theta=n$,则 $C(h)=S_s$ 。根据文献[18],土柱中粘壤质盐土的 S_s 取 $5\times$

10^{-5} m^{-1} , 砂柱砂壤土的 S_s 取 $1.3 \times 10^{-5} \text{ m}^{-1}$ 。

溶质运移的控制方程可表达为^[19]

$$\frac{\partial(\theta c)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\theta D_{xx} \frac{\partial c}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\theta D_{zz} \frac{\partial c}{\partial z} \right) - \frac{\partial \theta c v_x}{\partial x} - \frac{\partial \theta c v_z}{\partial z} \quad (2)$$

式中 c ——溶质质量浓度, kg/m^3

D_{xx} —— x 向扩散系数

D_{zz} —— z 向扩散系数

v_x ——横向平均流速, m/s

v_z ——纵向平均流速, m/s

假设平均流速方向与 z 轴方向一致, 则^[19-20]

$$D_{xx} = \alpha_L v + D_{mL} \tau_L$$

$$D_{zz} = \alpha_T v + D_{mL} \tau_L$$

其中 $v = \sqrt{v_x^2 + v_z^2}$

式中 α_T ——纵向弥散度

α_L ——横向弥散度

v ——平均流速, m/s

D_{mL} ——氯离子在纯水水中的扩散系数, 本文取 $1.296 \text{ cm}^2/\text{d}$ ^[23]

τ_L ——曲折因子

1.4 模型参数

根据 COMSOL 模型模拟需要, 对土壤水分特征曲线参数进行拟合, 土壤水分特性曲线 $\theta(h)$ 可用 van Genuchten 模型来表示, 即

$$\theta(h) = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{(1 + |ah|^n)^m} \quad (3)$$

式中 θ_r ——残余土壤体积含水率

θ_s ——饱和土壤体积含水率

a 、 n 、 m ——土壤水分特征曲线的形状参数,

$$m = 1 - 1/n, n > 1$$

根据表 1 土壤容重及颗粒组成, 采用 ROSETTA 软件拟合了两种土壤的水力学参数, 结果见表 2, 其中 K_s 为土壤饱和导水率。

表 2 土壤水盐运动特性参数^[12,23]

Tab.2 Hydraulic parameters of the soil columns

土壤质地	θ_s	θ_r	a/cm^{-1}	n	l	$K_s/(\text{cm} \cdot \text{d}^{-1})$	τ_L	α_T/m	α_L/m
滨海粘壤质盐土	0.460 6	0.080 4	0.014	1.433 7	0.5	20.01	0.7	0.005	0.002
砂壤土	0.354 5	0.031 9	0.030 4	1.420 3	0.5	45.54	0.5	0.05	0.01

1.5 定解条件的确定

在整个模拟过程中, 模拟对象均为高 1 m、水平断面为边长 0.3 m 正方形的长方体盐土土体, 土柱填充土壤为滨海粘壤质盐土, 方砂柱的土壤为砂壤土, 方砂柱的水平断面为边长 0.04 m 正方形, 土柱下端接地下水通暗管排水, 地下水质量浓度为 0.1 g/L。本模拟中所有土柱先淹水饱和后再淋洗盐分, 模拟初始含水率均为饱和含水率, 表层保持 0.02 m 积水进行淡水淋洗。

上述定解条件的数学表达式如下:

(1) 水分运动定解问题

粘壤质盐土土体部分, 简称 C:

水流方程初始条件为 $h_c(x, z, 0) = 0 \text{ m}$ 。

上边界条件为 $h_c(x, 0, t) = 0.02 \text{ m}$ 。

下边界条件为 $h_c(x, -1, t) = 0 \text{ m}$ 。

内设砂柱部分, 简称 S:

水流方程初始条件为 $h_s(x, z, 0) = 0 \text{ m}$ 。

上下边界条件由砂柱位置决定, 砂柱上下边界位置与土柱上下边界位置相同时, 上边界条件为 $h_s(x, 0, t) = 0.02 \text{ m}$ 。下边界条件为 $h_s(x, -1, t) = 0 \text{ m}$ 。

砂柱上下边界位置低于或高于土柱上下边界位置时, 砂柱上下边界设为内部连续边界。

(2) 溶质(Cl^-)运移定解问题

初始条件为 $c(x, z, 0) = 8.389 \text{ kg}/\text{m}^3$ 。

上边界为盐通量 $J = 0 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。

下边界为 $c(x, -1, t) = 0 \text{ kg}/\text{m}^3$ 。

1.6 网格剖分

COMSOL Multiphysics 的网格剖分功能可以创建自由网格、边界层网格等。利用其网格剖分工具和方法, 可以生成三角形和四边形(2D)网格, 自动建立一致性的网格。当模拟的对象是由不同材料组成时, 边界的一致性网格对得到精确解是非常重要的, COMSOL 的网格剖分可以使通过界面的解分量及其通量连续。4 种设置方式的网格模式详见 1.2 节中图 1, 在粗和细两种质地土壤边界处的网格密度均加密到 0.005 m, 因此保证了整个模拟的可靠性, 4 种设置方式的网格局部放大图见图 2。

4 种设置情况下的网格剖分具体参数详见表 3。

2 结果及分析

图 3、图 4 和图 5 比较了 4 种设置情况下, 经淋洗 12 h、24 h 和 36 h 后, 土柱中的 Cl^- 离子浓度分布状况。表 4 列出了 4 种配置条件下不同时间的盐分淋出量及百分比。

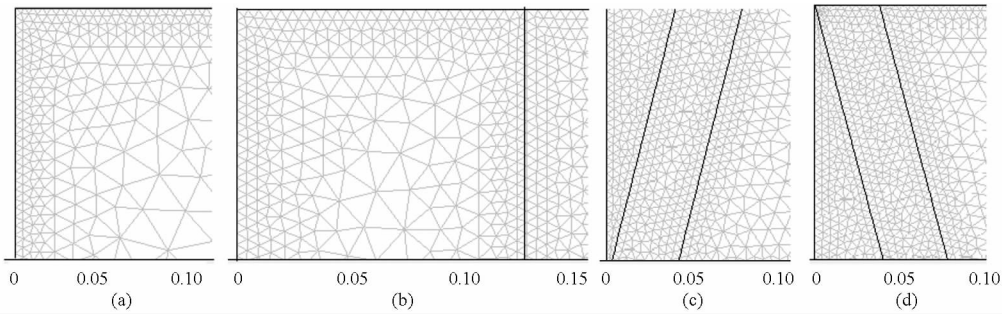


图 2 4 种设置情况下的网格局部放大图

Fig.2 Partial enlarged mesh detail of 4 types of arrangement

(a) 没有砂柱 (b) 内设中竖砂柱 (c) 内设单斜对角砂柱 (d) 内设双斜“X”型长砂柱

表 3 4 种设置情况下的网格剖分参数

Tab.3 Mesh parameters of four types of arrangement

参数	无砂柱	中竖砂柱	单斜对角 砂柱	双斜“X” 型长砂柱
自由度数目	24 866	50 554	49 170	68 582
网格点数	3 239	6 450	6 279	8 707
单元数	5 956	12 378	12 028	16 878
三角形数	5 956	12 378	12 028	16 878
四边形数	0	0	0	0
边界单元数	520	920	948	1 316
端点单元数	4	8	6	12
最小单元质量	0. 852 4	0. 837 9	0. 422 3	0. 422 2
单元面积比	0. 010 5	0. 037 6	0. 002 2	0. 003 0

从图 3 可以看出:经过 12 h 淋洗后,不设砂柱、内设中竖砂柱、内设单斜对角砂柱、内设双斜“X”型砂柱的土柱盐分淋出量分别为各自盐土含盐总量的 22%、29%、29%、33%,内设中竖砂柱、内设单斜对角砂柱、内设双斜“X”型砂柱的土柱淋洗效率分别为不设砂柱的 1.32、1.32 和 1.50 倍。从图 4 可以看出:经过 24 h 淋洗后,各土柱盐分淋出量分别为各自盐土含盐总量的 42%、52%、54% 和 61%,内设

中竖砂柱、内设单斜对角砂柱、内设双斜“X”型砂柱的土柱盐分淋洗效率分别为不设砂柱的 1.24、1.29 和 1.45 倍。从图 5 可以看出:经过 36 h 淋洗后,各土柱的盐分淋出量分别为各自盐土含盐总量的 61%、73%、77% 和 84%,内设中竖砂柱、内设单斜对角砂柱、内设双斜“X”型砂柱的土柱的淋洗效率分别为不设砂柱的 1.20、1.26 和 1.38 倍。

因此,综合以上数据,在内设中竖砂柱、内设单斜对角砂柱、内设双斜“X”型砂柱 3 种砂柱设置方式中,双斜“X”型长砂柱的构型设置最有利于盐分的淋洗。

图 6 为各土柱随淋洗时间的变化,底层截面的盐分累计通量与各自盐土初始盐分总量的比值变化图,可以定量地判断各设置中盐分淋出量随时间的变化。图 1 所示各土柱剖面中,各自盐土的初始总量分别为 8.389、7.27、7.27 和 6.152 kg/m²,由图 6 可以看出:同时间下内设双斜“X”型砂柱的土柱盐分淋洗效率是最高的,内设单斜对角砂柱的土柱次之,内设中竖砂柱的土柱第三,三者盐分淋洗效率均高于不设砂柱的土柱。

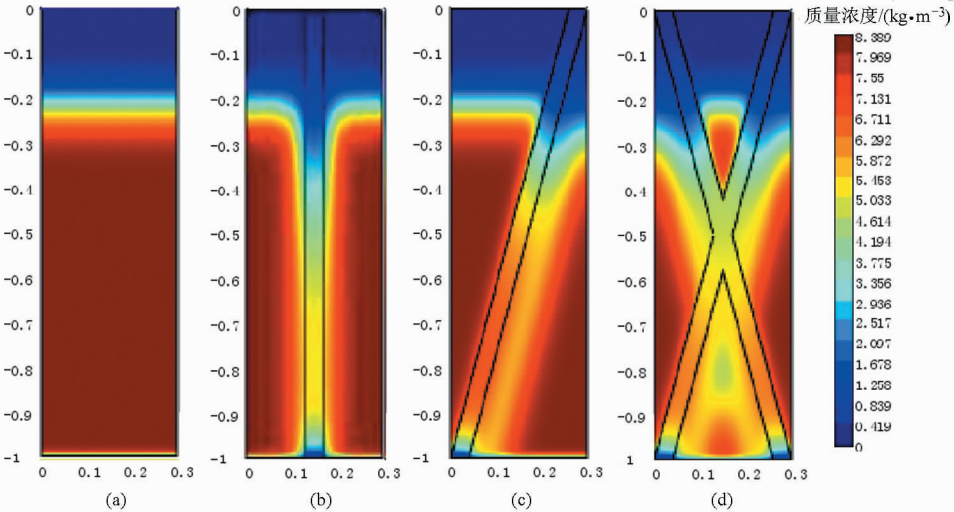


图 3 12 h 淋洗后土柱剖面 Cl⁻ 离子浓度分布状况图

Fig.3 Concentration distribution of Cl⁻ in soil columns after 12 h leaching

(a) 没有砂柱 (b) 内设中竖砂柱 (c) 内设单斜对角砂柱 (d) 内设双斜“X”型长砂柱

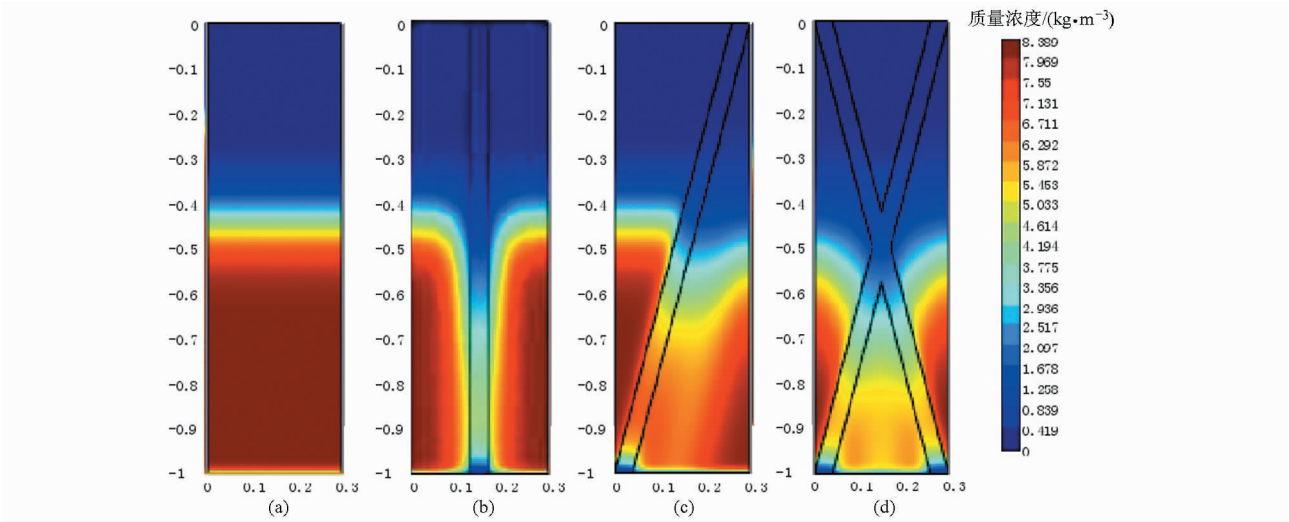


图 4 24 h 淋洗后土柱剖面 Cl^- 离子浓度分布状况图

Fig. 4 Concentration distribution of Cl^- in the soil columns after 24 h leaching

(a) 没有砂柱 (b) 内设中竖砂柱 (c) 内设单斜对角砂柱 (d) 内设双斜“X”型长砂柱

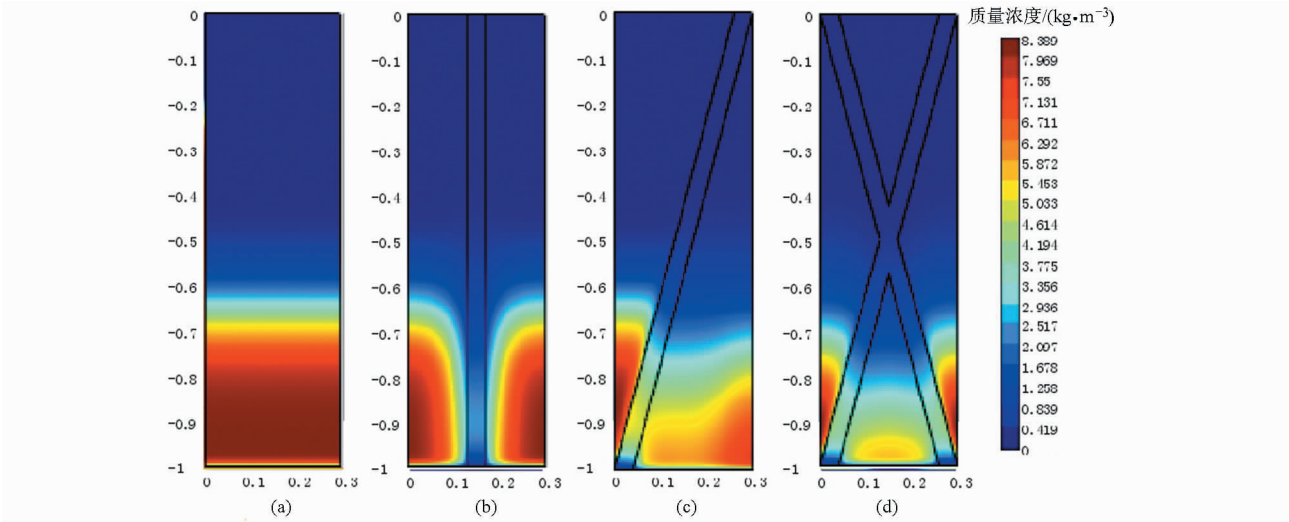


图 5 36 h 淋洗后土柱剖面 Cl^- 离子浓度分布状况图

Fig. 5 Concentration distribution of Cl^- in the soil columns after 36 h leaching

(a) 没有砂柱 (b) 内设中竖砂柱 (c) 内设单斜对角砂柱 (d) 内设双斜“X”型长砂柱

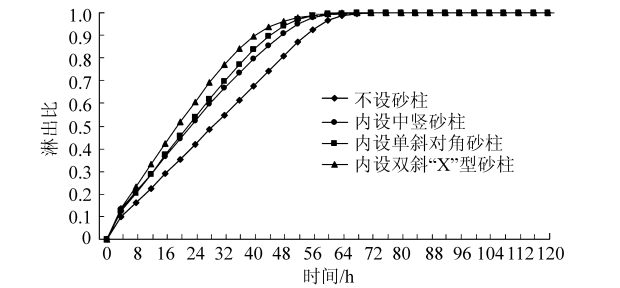


图 6 底层盐分累计通量随淋洗时间变化图

Fig. 6 Outward flux change of Cl^- ratio with leaching time in four types of arrangement

图 7 为各个土柱随淋洗时间的变化,二维剖面盐分淋出比与水通量的比率变化图。盐土中水的流速为 $2.362 \times 10^{-6} \text{ m/s}$, 纯砂土中水的流速为 $5.376 \times 10^{-6} \text{ m/s}$, 各个土柱的二维剖面中水的通量分别为 6.96×10^{-7} 、 8.14×10^{-7} 、 8.14×10^{-7} 、

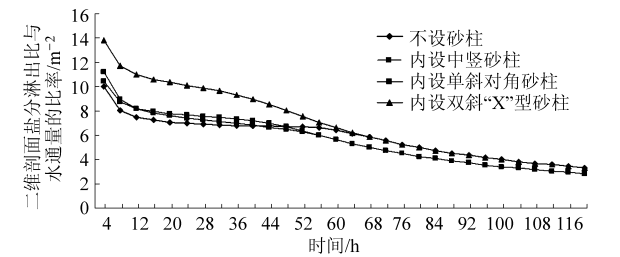


图 7 二维剖面盐分淋出比与淋洗水通量的比率随淋洗时间变化图

Fig. 7 Ratio of Cl^- outward flux ratio and water outward flux with leaching time in four types of arrangement

$9.32 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ 。由图 7 可衡量出,60 h 之前,内设双斜“X”型砂柱的方式的水资源利用效率是最佳的。

表 4 为每种情形下,当淋出的盐分分别达到 0.50、0.75、0.95 时所用时间。各土柱的 50% 盐分

淋出时长分别为 31、23、22、19 h,内设中竖砂柱、内设单斜对角砂柱、内设双斜“X”型砂柱比不设砂柱分别节省时间 8、9、12 h,淋出比与水通量的比率分别为 6.652、7.418、7.756、7.843 m⁻²;各土柱的 75% 盐分的淋出时长分别为 45、37、35、31 h;内设中竖砂柱、内设单斜对角砂柱、内设双斜“X”型砂柱比

不设砂柱分别节省时间 8、10、14 h,淋出比与水通量的比率分别为 6.437、6.917、7.313、7.211 m⁻²;各土柱的 95% 盐分的淋出时长分别为 59、52、49、46 h,内设中竖砂柱、内设单斜对角砂柱、内设双斜“X”型砂柱比不设砂柱分别节省 7、10、13 h,淋出比与水通量的比率分别为 6.426、6.234、6.616、6.155 m⁻²。

表 4 4 种配置条件下 0.50、0.75、0.95 盐分淋出效率比较

淋出比	不设砂柱		内设中竖砂柱		内设单斜对角砂柱		内设双斜“X”型砂柱	
	时长/	水通量与淋出比	时长/	水通量与淋出比	时长/	水通量与淋出比	时长/	水通量与淋出比
	h	的比率/m ²	h	的比率/m ²	h	的比率/m ²	h	的比率/m ²
0.50	31	0.155 347	23	0.134 798	22	0.128 938	19	0.127 498
0.75	45	0.150 336	37	0.144 566	35	0.136 752	31	0.138 682
0.95	59	0.155 611	52	0.160 401	49	0.151 147	46	0.162 462

综合以上数据结果,表明:双斜“X”型长砂柱和单斜砂柱对盐分的淋洗效果提高较明显,水资源利用效率也更佳。原因如下:

根据土壤溶质运移规律^[19-20],氯离子的运动是对流和水动力弥散(包括扩散和机械弥散)物理过程综合作用的结果。对流的主要影响因素是水流的流速,从表 2 可以看出,砂柱的纵向导水率 45.54 cm/d(5.27 × 10⁻⁶ m/s)明显高于盐土的导水率 20.01 cm/d(2.32 × 10⁻⁶ m/s),从 COMSOL 模拟结果可以看出,纯盐土中水的流速低于纯砂土中水的流速,所以砂柱中氯离子的对流明显高于盐土中氯离子的对流。

通过对水势场和相应流速场的分析,在中竖砂柱设置中,同一水平线上的砂柱和盐土中的水压相同,因此斜向压力分量为零,土柱水流和砂柱水流均为纵向,砂柱和土柱之间水分交换近似为零。在单斜对角砂柱和双斜“X”型长砂柱中,砂柱中水分流动较快,同水平线上砂柱水压低于盐土的水压,因此在边界处水不断从盐土流向砂柱。

影响氯离子运移的另外一个因素是盐分浓度差和水动力弥散,水动力弥散是土壤水微观流速变化而引起的溶质的弥散,从溶质运移控制方程(2)可以看出,溶质的弥散强度与曲折因子 τ_L 、纵向弥散度 α_T 、横向弥散度 α_L 呈正相关关系,表 2 中砂土的 τ_L 值、 α_T 值、 α_L 值均高于盐土的值,所以砂柱中氯离子的水动力弥散强度明显高于盐土中氯离子的水动力弥散强度。从模拟过程中的速度场和盐分浓度场动态变化分析可知,单斜对角砂柱和双斜“X”型长砂柱的设置与中竖砂柱设置相比,会有更多的盐分从盐土中向砂柱中运动。

综合盐分的对流和水动力弥散作用,再加上砂柱的形态设置和大小的不同,就会导致图 6 所示的

结果:

(1)经过 12 h 淋洗后,不设砂柱、内设中竖砂柱、单斜对角砂柱和双斜“X”型长砂柱的盐分淋出量分别为各自盐土含盐总量的 22%、29%、29%、33%,后 3 种砂柱设置方式的 12 h 盐分淋洗效率分别为不设砂柱的 1.32、1.32 和 1.50 倍;经过 24 h 淋洗后,4 种设置的盐分淋出量分别为各自盐土含盐总量的 42%、52%、54%和 61%,后 3 种砂柱设置方式的 24 h 淋洗效率分别为不设砂柱的 1.24、1.29 和 1.45 倍;经过 36 h 淋洗后,4 种设置的盐分淋出量分别为各自盐土含盐总量的 61%、73%、77%和 84%,后 3 种砂柱设置方式的 36 h 淋洗效率分别为不设砂柱的 1.20、1.26 和 1.38 倍。

(2)不设砂柱、内设中竖砂柱、单斜对角砂柱和双斜“X”型长砂柱 4 种设置的 50% 盐分淋出时长分别为 31、23、22 和 19 h,后 3 种砂柱设置比不设砂柱分别节省时间 8、9、12 h;4 种设置的 75% 盐分的淋出时长分别为 45、37、35、31 h,后 3 种砂柱设置比不设砂柱分别节省淋洗时间 8、10、14 h;4 种设置的 95% 盐分的淋出时长分别为 59、52、49、46 h,后 3 种砂柱设置比不设砂柱分别节省淋洗时间 7、10、13 h。

3 结论

(1)盐土内设砂柱可促进盐土的水盐运移,有利于提高盐分的淋洗效率,其效果受砂柱的角度和位置影响,目前中竖砂柱、单斜对角砂柱和“X”型长砂柱 3 种砂柱设置方式中,双斜“X”型长砂柱的构型最有利于盐分的淋洗,单斜对角砂柱次之,中竖砂柱的效率比不设砂柱稍好,但不及单斜对角砂柱和双斜“X”型长砂柱。

(2)本模拟条件下,经过 24 h 淋洗后,不设砂柱、内设中竖砂柱、单斜对角砂柱和双斜“X”型长砂

柱 4 种设置的盐分淋出量分别为各自盐土含盐总量的 42%、52%、54% 和 61%；4 种处理下 75% 盐分的淋出时长分别为 45、37、35、31 h。

(3) 结合盐分淋洗效率、相同盐分淋出比下的水资源利用效率两种因素来综合考虑, 双斜“X”型砂柱的设置方式是最佳的设置。

参 考 文 献

1 徐攸在. 盐渍土地基[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1993: 1 – 10.

2 王遵亲. 中国盐渍土[M]. 北京: 科学出版社, 1993.

3 王晓洋, 陈效民, 李孝良, 等. 不同改良剂与石膏配施对滨海盐渍土的改良效果研究[J]. 水土保持通报, 2012, 32(3): 128 – 132.

Wang Xiaoyang, Chen Xiaomin, Li Xiaoliang, et al. Improvement effects of combined application of different amendments and gypsum on a coastal saline soil[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2012, 32(3): 128 – 132. (in Chinese)

4 张博, 马晨, 马履一, 等. 盐土改良中砂柱的作用机理研究[J]. 农业机械学报, 2013, 44(6): 122 – 127, 214.

Zhang Bo, Ma Chen, Ma Lüyi, et al. Mechanism of sand column in improving coastal saline soil[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(6): 122 – 127, 214. (in Chinese)

5 El-Asswad R M, Hoff D J Taylor. Increasing productivity of saline soil by profile modification [C]. 73rd Annual Meeting, American Society of Agronomy, 1981: 211.

6 刘太祥, 毛建华, 马履一, 等. 中国盐碱滩地生态综合改良与植被构建技术[M]. 天津: 天津科技出版社, 2011.

7 邵伟, 冯杰, 张小娜, 等. 两域模型在原状土柱水盐运移模拟中的应用比较[J]. 水电能源科学, 2010, 28(12): 13 – 16.

Shao Wei, Feng Jie, Zhang Xiaona, et al. Comparison application of two – domain model to water and solute transport in undisturbed soil column[J]. Water Resources and Power, 2010, 28(12): 13 – 16. (in Chinese)

8 郭向红, 孙西欢, 马娟娟. 降雨灌溉蒸发条件下苹果园土壤水分运动数值模拟[J]. 农业机械学报, 2009, 40(11): 68 – 73.

Guo Xianghong, Sun Xihuan, Ma Juanjuan. Numerical simulation for root zone soil moisture movement of apple orchard under rainfall-irrigation-evaporation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(11): 68 – 73. (in Chinese)

9 吴忠东, 王全九. 入渗水矿化度对土壤入渗特征和离子迁移特性的影响[J]. 农业机械学报, 2010, 41(7): 64 – 69.

Wu Zhongdong, Wang Quanjiu. Effect on both soil infiltration characteristics and ion mobility features by mineralization degree of infiltration water [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(7): 64 – 69. (in Chinese)

10 吴忠东, 王全九. 微咸水入渗水量对土壤水盐运移特征的影响[J]. 农业机械学报, 2010, 41(11): 67 – 71.

Wu Zhongdong, Wang Quanjiu. Effect on characteristics of soil water and salt movement about saline water infiltration with different infiltration amount[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(11): 67 – 71. (in Chinese)

11 胡克林, 李保国, 黄元仿. 农田尺度下土体硝酸盐淋失的随机模拟及其风险性评价[J]. 土壤学报, 2005, 42(6): 909 – 915.

Hu Kelin, Li Baoguo, Huang Yuanfang. Stochastic simulation and risk assessment of nitrate leaching at field scale[J]. Acta Pedologica Sinica, 2005, 42(6): 909 – 915. (in Chinese)

12 左强. 排水条件下饱和和非饱和水盐运动规律研究[D]. 武汉: 武汉水利电力学院, 1991.

Zuo Qiang. Study on water and salt movement under drainage condition of saturated and unsaturated [D]. Wuhan: Wuhan University, 1991. (in Chinese)

13 张亚年. 暗管排水条件下土壤水盐运移特征及数值模拟[D]. 武汉: 中国地质大学, 2011.

Zhang Yanian. Study on the flow and solute transport in the saline soil with subsurface drainage [D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2011. (in Chinese)

14 Cornelia Andreea Ciutoreanu. COMSOL modeling for a water infiltration problem in an unsaturated medium [J]. Ovidius University, 2009, 17(3): 87 – 98.

15 Stefano Lazzari, Antonella Priarone, Enzo Zanchini. Long-term performance of BHE (borehole heat exchanger) fields with negligible groundwater movement [J]. Energy, 2010, 35(12): 4966 – 4974.

16 Ouerdachi L, Boutaghane H, Hafsi R. Modeling of underground dams application to planning in the semi arid areas[J]. Energy Procedia, 2012, 18: 426 – 437.

17 Wissmeier L, Barry D A. Simulation tool for variably saturated flow with comprehensive geochemical reactions in two and three-dimensional domains[J]. Environmental Modelling & Software, 2011, 26(2): 210 – 218.

18 史文娟, 汪志荣, 沈冰. 夹砂层土壤水盐运移实验研究[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2010.

19 李韵珠, 李保国. 土壤溶质运移[M]. 北京: 科学出版社, 1998.

20 Bresler E. Saline and sodic soils: principles-dynamics-modeling[M]. New York: Springer-Verlag, 1982.

21 雷志栋, 杨诗秀, 谢森传. 土壤水动力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1988.

22 任伯帜, 熊正为. 水资源利用与保护[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007.

23 石元春, 李韵珠, 陆锦文. 盐渍土的水盐运动[M]. 北京: 北京农业大学出版社, 1986.

Abstract: In order to define the spatial distribution of soil air permeability and do correlation analysis of its impact factors in basin scale, researches in Jinghui irrigation district at the middle of Shaanxi province were made. Based on the spatial analysis function of geographic information systems, the results show that the optimal fitting model for air permeability is an exponential model, and the statistical method is suitable to simulate the spatial structure and variation characteristics of soil air permeability. The bulk density, saturated moisture content, saturated degree and soil air permeability's spatial autocorrelation $C/(C + C_0)$ are all greater than 0.9. It shows the spatial heterogeneity induced by the autocorrelation has a strong degree in the spatial heterogeneity of the study scale. Recommend sampling distances of air permeability is 7.5 km. Significant correlation is found between bulk density and soil air permeability, and the absolute value of Pearson correlation coefficient is 0.595. High correlation is found between soil air permeability and saturated degree, and the absolute value of Pearson correlation coefficient is 0.959. The bulk density and the saturated degree are proved to be the main impact factors by interactive correlation analysis between air permeability and soil physical parameters. The influence ranges of bulk density and soil saturation degree on air permeability are both from -20 km to 20 km at 95% confidence level.

Key words: Soil air permeability Spatial variability Basin scale Impact factors Interactive correlation analysis

(上接第 117 页)

Simulation of Salt Leaching in Coastal Saline Soil Denoting Sand Columns Based on COMSOL

Sun Xueyan^{1,2} Li Pinfang¹ Li Baoguo¹ Xue Yuanxia² Shao Lei²

(1. *Key Laboratory of Arable Land Conservation (North China), Ministry of Agriculture, China Agricultural University, Beijing 100193, China*
2. *Yantai Research Institute, China Agricultural University, Yantai 264670, China*)

Abstract: Based on COMSOL (3.5), two-dimensional transient cross-sectional models were used to investigate water and solute transport in the soil column coupled with variable sand column forms, with “a” denoting no sand column, “b” with one vertical middle sand column, “c” with one long slanged sand column, “d” with two long slanged X-shaped sand columns. The results showed that sand column obviously increased the transport efficiency of water and salt, which may attribute to the higher hydraulic conductivity and higher diffusion coefficients in sand columns than clay-loam coastal saline. The efficiency of sand column depends on its position and its angle accordingly. The slanted columns were overall superior to the vertical ones in transport efficiency. Generally, “d” is the best type, “c” is the second best and “b” is the third, according to the efficiency of salt leaching and the efficiency of the utilization of water resources.

Key words: Coastal saline Solute transport COMSOL 2-D Sand column Mathematical simulation