考虑尿素浓度对 SWCC 影响的 VG 模型

田东方,余东华

(三峡大学 水利与环境学院, 湖北 宜昌 443002)

摘要:利用 Tempe 压力膜仪,进行了不同浓度尿素溶液的土-水特征曲线(SWCC)试验,得出了不同 SWCC 的 Van Genuchten(VG)拟合模型。结合各 VG 模型,采用线性回归分析,确定了模型中各参数与尿素浓度的关系, 进而建立了能够考虑尿素浓度影响的 VG 模型。所得模型中各参数拟合相关度均较高。由所建模型可知,尿素 浓度对参数 α影响较小,而对参数 n影响较大;浓度越大,参数 α越小,而参数 n 越大。所得结果弥补了其他方 法不能考虑尿素浓度对 SWCC 的影响,对补充和发展 SWCC 试验和理论具有一定的意义。所建 SWCC 模型未 考虑尿素浓度对溶质吸力的影响,也未开展尿素溶液对土体 SWCC 影响机理研究;这两方面有待以后的工作进 一步研究。

关键 词:尿素浓度;SWCC;VG模型;压力膜仪

中图分类号: P338

文章编号: 1009-640X(2014)04-0065-05

随着灌溉、降雨的发生,大量使用的氮肥、农药将随着地下水的运动而迁移,对地下水环境造成了不同湿度的污染。因此,研究氮肥等溶液在土壤中的渗流规律,是地下水污染预测以及地下水环境有效防护措施研究的基础。

文献标志码:A

目前,地下水渗流的数学模型多采用 Richards 方程描述^[1],常借助数值方法求解。若要模拟非饱和流动 过程,还需确定土-水特征曲线(SWCC)这一重要参数^[1-4]。

对 SWCC 的研究一直是一个难点和热点问题,国内外学者开展了大量研究工作。如 M. T. Van Genuchten^[4]和 D. G. Fredlund^[5-6]等学者提出了 SWCC 拟合数学模型;卢应发等^[7]从土体内部结构探讨了 SWCC 的特征;徐炎兵和王世梅等^[8-9]则探讨了外部条件对 SWCC 的影响。影响 SWCC 的因素很多,如土体 的孔隙结构、颗粒分布等,水中溶质也有一定的影响,如会引起溶质吸力。王利莉^[10]、于沉香^[11]、孙德安^[12] 等分别对盐渍土的 SWCC 进行了试验研究,其研究成果能在一定程度上反映盐溶液对 SWCC 的影响,但均 未定量给出盐溶液浓度的影响。

尿素作为最主要的氮肥,若能考虑不同尿素浓度对 SWCC 的影响,无疑可以提高尿素溶液渗流模拟的 精度。尽管人们对 SWCC 做了大量研究,但在笔者所查文献中,还未见考虑了尿素浓度影响的 SWCC 研究 报道。为此,开展了6种不同浓度尿素溶液的 SWCC 试验,采用 VG 模型拟合试验结果。然后,将模型中的 参数分别与尿素浓度进行线性回归,得到考虑尿素浓度影响的 VG 模型。

1 土-水特征曲线试验及结果

试验所用试样均取自湖北宜昌,土样的基本性状为黏粒含量29.5%,粉粒含量44.8%。其物性指标为:

收稿日期: 2014-01-15

- 基金项目:国家自然科学基金青年基金资助项目(NO.41302275);湖北省教育厅科学技术研究计划优秀中青年人才项目 (NO. Q20111206)
- 作者简介:田东方(1979-),男,河南林州人,副教授,博士研究生,主要从事边坡渗流、稳定性数值模拟研究。 E-mail:tdf_2005@163.com

相关度 R 0.999 8 0.997 2 0.995 9

液限 31.6%, 塑限 25.1, 塑性指数 16.5, 密度 1.90 g/cm3, 初始含水率 22.3%。

土样经风干碾碎后过 2 mm 筛,制样干密度控制为 1.50 g/cm³,采用击样法一次成形,制成高 2 cm,直径

6.18 cm 重塑样,之后采用真空饱和法进行饱和,抽气时间控制为4h,试样在真空下分别浸泡在质量浓度为0,5%,10%,15%,20%和25%等6种不同浓度的尿素溶液中,时间控制为10h。

采用 Tempe 压力膜仪,在 20℃恒温控制条件下进行土 样的土-水特征曲线(SWCC)试验。基质吸力的量测从 0~ 300 kPa,分 0,50,80,100,150,200 和 300 kPa 共 7 个压力水 平施加。用连续称重法计算含水量,所得试验数据见图 1。

从试验数据来看,尿素浓度对 SWCC 有一定影响。吸力 较低时,影响较大;随着吸力的增大,影响逐渐减小。

Tab. 1



2 试验数据拟合

浓

土-水特征曲线模型有很多,其中 Van Genuchten 模型(简称 VG 模型)应用较广泛,表达式如下:

$$\theta = \theta_{\rm r} + \frac{\theta_{\rm s} - \theta_{\rm r}}{\left[1 + (\alpha\psi)^n\right]^m} \tag{1}$$

式中: θ 为体积含水率, θ_r 为残余体积含水率; θ_s 为饱和体积含水率; α, m, n 为待拟合参数,m=1-1/n; ψ 为基 质吸力(kPa)。

根据试验结果可知,各尿素质量浓度下 VG 模型中的参数 θ_s 几乎相等(见表1)。在本文中取各尿素浓度下 θ_s 的算术平均值为 0.415,不再拟合。其他参数的拟合结果见表 1。

表 1 各尿素质量浓度对应的 VG 模型参数

Parameters of VG model of different urea concentrations

度	α	n	$ heta_{ m r}$	相关度 R	浓度	α	n	$ heta_{ m r}$
0%	0.010.0	1 113 7	0.000	0 000 1	10%	0.005.5	1 183 0	0.008

	25%	0.010 0	1.1137	0.099	0.9991	10%	0.005 5	1.183 0	0.098	0.999
	20%	0.008 1	1.168 5	0.100	0.999 2	5%	0.002 9	1.231 8	0.103	0.997
	15%	0.008 2	1.164 6	0.101	0.9997	0	0.002 7	1.229 3	0.101	0.995
1										

3 考虑尿素质量浓度影响的 VG 模型

由表 1 可知,不同尿素浓度 VG 模型的参数中, θ_s 可取 0.415, θ_r 可取 0.1; 而变化较大的是 α 和 n_o 因此,下面采用线性回归,确定参数 α 和 n 与尿素浓度之间的关系。

图 2 和 3 分别给出了参数 α 和 n 与尿素浓度 c 之间的规律以及线性回归示意图。线性回归方程如式 (2) 和(3),相关度分别为 R=0.927 和 0.869:

$$\alpha = -0.031 \ 3c + 0.010 \ 1 \tag{2}$$

$$n = 0.449c + 1.126 \tag{3}$$

将式(2)和(3)代入式(1),可得考虑尿素浓度影响的 VG 模型,即式(4);图 4 为基于该 VG 模型的土-水特征曲面。

$$\theta = 0.1 + \frac{0.315}{\left[1 + A(c,\psi)^{B(c)}\right]^{\left(1 - \frac{1}{B(c)}\right)}}$$
(4)

$$A(c,\psi) = (-0.031 \ 3c + 0.010 \ 1)\psi, \quad B(c) = 0.449c + 1.126$$



4 算 例

应用文献[13]建立的降雨入渗与坡面径流联合求解模型,对土柱垂直入渗过程进行数值模拟,对应于 雨水降到地表,迅速和土中尿素混合为不同浓度(0,10%,25%)的溶液,然后入渗的过程。当然,更精确的 做法应是考虑尿素浓度场和渗流场的耦合,但本文目的在于初步揭示尿素浓度对入渗规律影响,为后续研究 提供一定参考。

4.1 计算模型及参数

SWCC 根据式(4)确定;渗透性函数根据式(5)并结合式(2),(4)来确定。

 $K(S_{a}) = K_{a}S_{a}^{l} [1 - (1 - S_{a}^{1/m})^{m}]^{2}$ (5)

式中: K_s 为饱和渗透系数; $S_s = (\theta - \theta_r)(\theta_s - \theta_r);l$ 为与孔隙连通性有关的参数,可取 0. 5^[14]; $m = 1 - 1/n_s$

本次试验只测定了土样的饱和渗透系数为1.16×10⁻⁴ cm/s,未测定不同尿素浓度溶液的饱和渗透系数, 因此在计算时,式(5)中的 K_{\circ} 均取1.16×10⁻⁴ cm/s_o

计算土柱长、宽均为1m,高5m。有限元网格长、宽均为1m;网格高度从第1层的0.075m开始,按 1.05倍递增,共30个单元,124个节点。边界条件为;土柱顶面为降雨边界,强度20 mm/h;四周及底部为不 透水边界。初始条件按体积含水率为0.3考虑。计算时间10h。

4.2 计算结果及分析

尿素质量浓度不同,地表饱和时间就不同,当尿素质量浓度为0,饱和时间约为4 min;浓度为10% 时约 为5 min;浓度为25%时约为7 min。可见尿素浓度越高,需要饱和的时间越长。

各浓度情况下,不同时刻土体体积含水率随深度变化分别图5。可见,尿素溶液入渗过程同样具有明显 的湿润锋面,尿素质量浓度大,则锋面相对平缓。



Fig. 5 Variation of volumetric water content with depth

图 6 给出了不同浓度溶液在同一时刻的体积含水率沿深度变化规律。由图可知,在入渗开始阶段,差别 不大;但随着时间推移,浓度对入渗的影响越见明显。在 *t* = 10 h 时,高浓度尿素溶液湿润锋面深度明显大于 低浓度的。



5 结 语

通过不同浓度尿素溶液的 SWCC 试验,以 VG 模型为基础,采用线性回归分析,得到 VG 模型中参数 α 和 n 与尿素浓度的关系,从而建立了考虑尿素浓度影响的土-水特征曲线模型。由所建模型可知,尿素浓度 对参数 α 影响较小,而对参数 n 影响较大;浓度越大,则参数 α 越小,参数 n 越大。所建模型可为尿素溶液在 土壤中运移的数值模拟提供计算参数,为进一步评价和预测地下水环境提供更加精准的依据。

本文所建 SWCC 模型未考虑尿素浓度对溶质吸力的影响,也未开展尿素溶液对土体 SWCC 影响的机理研究;这两方面的问题有待以后进一步探索。

参考文 献:

- [1] RICHARDS L A. Capillary conduction of liquids through porous mediums [J]. Physics, 1931, 1: 318-333.
- [2]张培文,刘德富,黄达海,等.饱和-非饱和非稳定渗流数值模拟[J]. 岩土力学,2003,24(6):927-930. (ZHANG Peiwen, LIU De-fu, HUANG Da-hai, et al. Saturated-unsaturated unsteady seepage flow numerical simulation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, 24(6):927-930. (in Chinese))
- [3] 田东方,刘德富,王世梅,等. 土质边坡非饱和渗流场与应力场耦合数值分析[J]. 岩土力学,2009,30(3):810-814.
 (TIAN Dong-fang, LIU De-fu, WANG Shi-mei. Coupling numerical analysis of unsaturated seepage and stress fields for soil slope[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(3):810-814. (in Chinese))
- [4] VAN GENUCHTEN M T. A closed form equation for prediction the hydraulic conductivity of unsaturated soils [J]. Soil Science Society of America Journal, 1980, 44(5): 892-898.
- [5] FREDLUND D G, XING A. Equations for the soil-water characteristic curve [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1994, 31(4): 521-532.
- [6] FREDLUND D G, XING A, HUANG S. Predicting the permeability function for unsaturated soils using the soil-water characteristic curve[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1994, 31(4): 533-546.
- [7] 卢应发,陈高峰,罗先启,等. 土-水特征曲线及其相关性研究[J]. 岩土力学,2008,29(9):2481-2486. (LU Ying-fa, CHEN Gao-feng, LUO Xian-qi, et al. A study of soil-water characteristical curve and its influential factors[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(9):2481-2486. (in Chinese))
- [8] 徐炎兵,韦昌富,陈辉,等.任意干湿路径下非饱和岩土介质的土水特征关系模型[J]. 岩石力学与工程学报,2008,27 (5):1046-1052. (XU Yan-bing, WEI Chang-fu, CHEN Hui, et al. The relationship between soil water characteristic model for unsaturated geotechnical materials under arbitrary drying-wetting paths[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(5): 1046-1052. (in Chinese))

- [9] 王世梅, 刘德富, 谈云志, 等. 某滑坡土体土-水特征曲线试验研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(10): 2651-2654. (WANG Shi-mei, LIU De-fu, TAN Yun-zhi, et al. A landslide on soil water characteristic curve test[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(10): 2651-2654. (in Chinese))
- [10] 王利莉, 党进谦, 杨晓松. 盐渍土土水特征曲线的研究[J]. 工程勘察, 2009, 37(2): 19-23. (WANG Li-li, DANG Jinqian, YANG Xiao-song. The research of soil water characteristic curves of saline soil [J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2009, 37(2): 19-23. (in Chinese))
- [11] 于沉香,张虎元,王志硕,等. 盐渍土土水特征曲线测试及预测[J]. 水文地质工程地质,2013,40(2):113-118. (YU Chen-xiang, ZHANG Hu-yuan, WANG Zhi-shuo, et al. Test and prediction of SWCC of saline soil[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2013, 40(2):113-118. (in Chinese))
- [12] 孙德安,张谨绎,宋国森. 氯盐渍土土-水特征曲线的试验研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(4): 955-960. (SUN De-an, ZHANG Jin-yi, SONG Guo-seng. Experimental study of soil-water characteristic curve of chlorine saline soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(4): 955-960. (in Chinese))
- [13] TIAN Dong-fang, LIU De-fu. A new integrated surface and subsurface flows model and its verification [J]. Applied Mathematical Modelling, 2011, 35: 3574-3586.
- [14] MUALEM Y. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media[J]. Water Resource Research, 1976, 12: 513-522.

A VG model considering influence of urea concentration on SWCC

TIAN Dong-fang, YU Dong-hua

(College of Hydraulic & Environmental Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002, China)

Abstract: The experimental studies of the soil-water characteristics curves (SWCC) have been carried out using different urea concentrations, with Tempe pressure membrane apparatus. And the experimental results are fitted by Van Genuchten (VG) model. Based on these VG models, the relationships between parameters of VG models and the urea concentration are obtained by linear regression. Finally, a new VG model considering the impacts of the urea concentration on SWCC is established in the experimental studies. The new model shows that the urea concentration effects parameter n is larger than a parameter α ; the higher the urea concentration is, the smaller the parameter α is and the larger the parameter n is. The studies have made up for the deficiency of other methods which can not consider the urea concentration, and are very significant for the supplement and development of the theory and the experimental methods of SWCC. SWCC model developed by the authors does not consider the effects of the urea concentration upon the solute suction, nor the influence mechanism of the urea colution on the soil-water characteristics curves. The two issues have to be further studied in the future.

Key words: urea concentration; soil-water characteristics curves (SWCC); VG model; membrane apparatus