

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2023.01.010

# 潜水矿化度对毛细水上升高度的制约特征研究

刘佩贵, 李勇, 尚漫廷, 潘继隆

(合肥工业大学 土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009)

**摘要:**为了探究不同土壤类型矿化度对毛细水上升高度的制约特征,文章选取不同粒径砂性土与砂质壤土开展不同矿化度影响下的土壤毛细水室内柱试验研究,定量刻画了粒径与矿化度对毛细水上升高度的差异,建立了对数函数拟合模型。试验结果表明,矿化度通过改变土壤水的重力势、基质势来制约毛细水的上升高度。矿化度为0.8、15.0、50.0 g/L时,72 h中砂最大毛细水上升高度 $h_{\max}$ 分别为32.5、31.3、30.2 cm,细砂 $h_{\max}$ 分别为50.4、48.6、48.7 cm,粉砂 $h_{\max}$ 分别为72.3、76.4、76.0 cm,砂质壤土 $h_{\max}$ 分别为59.0、60.2、58.6 cm;粉砂和砂质壤土的毛细水上升速率变化波动较大,全试验周期内毛细水上升高度 $h$ 与时间 $t$ 可用三参数对数函数刻画。该研究结果揭示了矿化度对毛细水上升高度的制约特征,深化了毛细水上升高度的机理研究,可为土壤盐渍化治理、确定地下水生态水位提供技术支撑。

**关键词:**毛细水上升高度;潜水矿化度;柱试验;重力势;基质势

**中图分类号:**S152.74 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-5060(2023)01-0060-07

## Restriction characteristics of total dissolved solids on capillary water rising height

LIU Peigui, LI Yong, SHANG Manting, PAN Jilong

(School of Civil and Hydraulic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

**Abstract:** In order to explore the restriction characteristics of mineralization degree on capillary water rising height under different soil types, three kinds of sandy soil and sandy loam were selected to carry out soil capillary water test under the influence of mineralization degree by indoor column test, the difference of capillary water rising height under the influence of particle size and mineralization degree was quantitatively characterized, and the logarithmic function fitting model was proposed. The experimental results show that total dissolved solids(TDS) restricts the rising height of capillary water by changing the gravity potential and matrix potential of soil water. When TDS was 0.8, 15.0, and 50.0 g/L, after 72 hours, the maximum capillary water rising height( $h_{\max}$ ) of medium sand was 32.5, 31.3, and 30.2 cm, the  $h_{\max}$  of fine sand was 50.4, 48.6, and 48.7 cm, the  $h_{\max}$  of silt was 72.3, 76.4, and 76.0 cm, and the  $h_{\max}$  of sandy loam was 59.0, 60.2, and 58.6 cm. In terms of capillary water rising rate, the rate change of silt and sandy loam fluctuates greatly, and the relationship between capillary water rising height( $h$ ) and time( $t$ ) in the whole test cycle can be described by a three-parameter logarithmic function. The results of this study reveal the restriction characteristics of TDS on capillary water rising height, further deepen the research on the rising height of capillary water, which can provide technical support for the treatment of soil salinization and the formulation of groundwater ecological water level.

**Key words:** capillary water rising height; total dissolved solids(TDS); column test; gravity potential; matrix potential

收稿日期:2021-12-17;修回日期:2022-01-26

基金项目:安徽省自然科学基金资助项目(2208085US07)

作者简介:刘佩贵(1981—),女,山东日照人,博士,合肥工业大学副教授,硕士生导师;

尚漫廷(1980—),男,山东济宁人,博士,合肥工业大学副教授,硕士生导师,通信作者,E-mail:hfut-smt@163.com.

地下水矿化度是影响一个地区特别是干旱区生态系统健康的重要限制因素。地下水系统中的水分通过潜水蒸发进入毛细管输送<sup>[1]</sup>,矿化度过高,地下水中无机盐易上升到土壤与植物根系中,堵塞土壤中毛细管道,引发土壤盐渍化与植被衰败枯萎<sup>[2-4]</sup>。文献[5-6]通过室内试验开展了不同矿化度潜水的粉质黏土与砂性土毛细水上升试验,表明不同粒径分布条件下控制毛细水上升的主要因素不同,同时盐离子随着高盐度潜水进入包气带土壤,导致土壤结构发生改变。毛细水上升高度计算方面,文献[7]假定土体建立理想毛管模型,推导出土体内毛细水上升高度预测公式;文献[8-9]采用参数方程计算毛细水上升高度,研究周期性水位波动对毛细带水分分布的影响。已有的相关研究成果提高了毛细水上升高度计算结果的精度,为深刻揭示或探究干旱地区或干旱年份毛细水上升规律以及与植物生长<sup>[10]</sup>、土面蒸发<sup>[11]</sup>、土壤盐渍化<sup>[12]</sup>等的关系提供了有力的科学依据。但影响毛细水上升规律的因素较多,如土壤结构<sup>[13-16]</sup>、土壤类型<sup>[17-18]</sup>、水盐含量<sup>[19-20]</sup>、压实度<sup>[21]</sup>、地下水埋深<sup>[22-23]</sup>、气象因素<sup>[24]</sup>等,现有的研究大多集中在单一类型的土壤,且基本未考虑试验过程中毛细水上升速率的变化。为此本文通过构建毛细水上升物理试验装置,开展不同矿化度、不同土壤类型下的毛细水上升试验,探讨矿化度对不同粒径土壤类型毛细水上升高度的影响机制,剖析试验初期与全试验周期毛细水上升速率变化特征,为科学确定地下水生态水位、有效治理土壤盐渍化问题提供理论支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验装置

为研究矿化度对砂性土与砂质壤土的毛细水上升规律的影响,本试验设计了一套室内土柱模拟装置,如图 1 所示。装置主体由亚克力管、刻度尺、盛水托盘、补水装置、支架组成,亚克力管长 1 500 mm,内径 50 mm,厚度 3 mm;试验时土柱垂直插入盛水托盘中,并按设定时间记录数据。

试验期间随着土柱内毛细水上升高度的增加,托盘内的水位将会降低,为保证潜水水位埋深恒定不变,根据水量连通原理设计了一个补水装置。将 550 g/L 补水瓶进行改装(补水瓶的容积大于盛水托盘水量的消耗量),瓶口开一个 30°的缺口,深度在 15 mm 左右,装满水后倒扣在盛水托盘水面上,并固定在支架上,在一个大气压作用

下瓶口与液面齐平。若盛水托盘中水位下降,则补水瓶中的水在重力作用下自由补充到盛水托盘中,等托盘中液面回到原来高度,瓶口与液面空隙被封闭,补水停止。

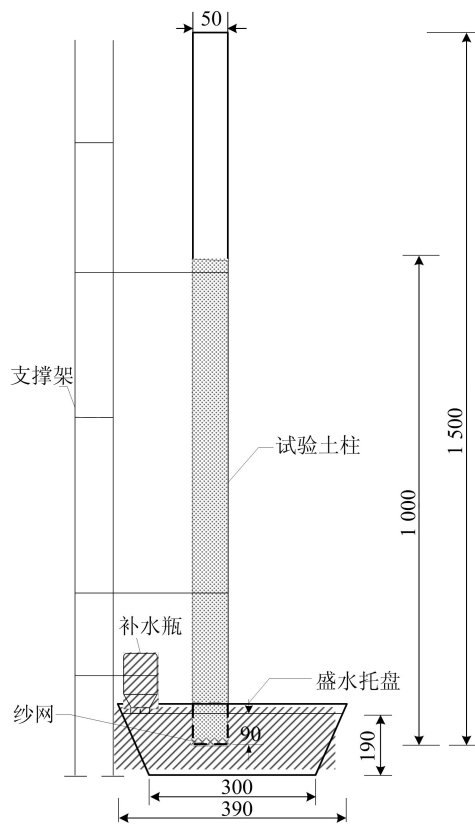


图 1 试验装置

### 1.2 试验方案与方法

本试验重在探讨不同土壤类型下矿化度对毛细水上升高度的影响,为了便于比对分析试验结果,在合肥工业大学土壤实验室进行了土柱模拟试验,试验土样分别经取样、烘干、筛分后,选取中砂、细砂、粉砂、砂质壤土 4 种均质试验材料。

根据美国农业部土壤质地划分标准,砂质壤土的颗粒组成分别为砂粒 70%、粉粒 20%和黏粒 10%。所有试验均在自然环境下进行,室温 25 °C 左右。

结合前期开展的多次对比试验,得到淡水与微咸水、咸水在毛细水上升高度及规律总体上差别微小,为提高数据分析的合理性和可靠性,本次在确定矿化度时选取了盐水和卤水,淡水作为对照试验。

根据文献[25],采用 NaCl 分别配制矿化度为 0.8、15.0、50.0 g/L 3 个不同大小的地下水溶液,与土壤类型组合,本次共设置 12 组试验对比方案,试验方案和参数见表 1 所列。

表 1 试验方案及参数

土壤类型	粒径/mm	分组	矿化度/(g·L <sup>-1</sup> )
中砂	0.250~0.450	A1	0.8
		A2	15.0
		A3	50.0
细砂	0.125~0.212	B1	0.8
		B2	15.0
		B3	50.0
粉砂	0.075	C1	0.8
		C2	15.0
		C3	50.0
砂质壤土	0.450~0.600	D1	0.8
		D2	15.0
		D3	50.0

采用分层装填方案装填试验柱,装填前称量试验柱质量,装填时每隔 25 cm 进行一次压实,压实采用压实锤按照砂性土与砂质壤土天然密度进行锤实,装填深度合计 100 cm,共进行 4 次压实,装填完成后再称质量,验算装入土样质量后计算密度是否符合要求,若符合,则静置 12 h 再启用。

试验开始前先将所有试验柱固定,再将盛水托盘从底部抬升至浸没试验柱 9 cm,随后固定补水瓶,当浸没试验柱内土壤含水率达到饱和,土壤

水上升至盛水托盘液面时开始计时。前 30 min 内每隔 1 min 读取均匀布设在试验柱外壁的 3 条刻度尺高度数据;30~60 min 每隔 5 min 记录 1 组数据;1~12 h 每隔 1 h 记录 1 组数据;24~72 h 每隔 24 h 记录 1 组数据。取 3 条刻度尺数据的平均值,平均值减去浸没深度即为该时刻毛细水上升高度。

## 2 结果与分析

试验期间对土的粒度与矿物成分、水溶液化学成分及浓度、压实度、温度、渗透系数等影响因素进行统一性控制。同时,为了排除试验随机因素影响,试验过程中随机选了中砂 0.8 g/L 组进行重复试验。试验结果表明该组重复试验结果良好,偏差较小,随机影响效果不显著,认为本试验数据是可靠的。

### 2.1 相同粒径不同矿化度毛细水上升差异

根据试验观测数据得到了 3 个不同潜水矿化度下,中砂、细砂、粉砂、砂质壤土的毛细水上升高度,如图 2 所示。

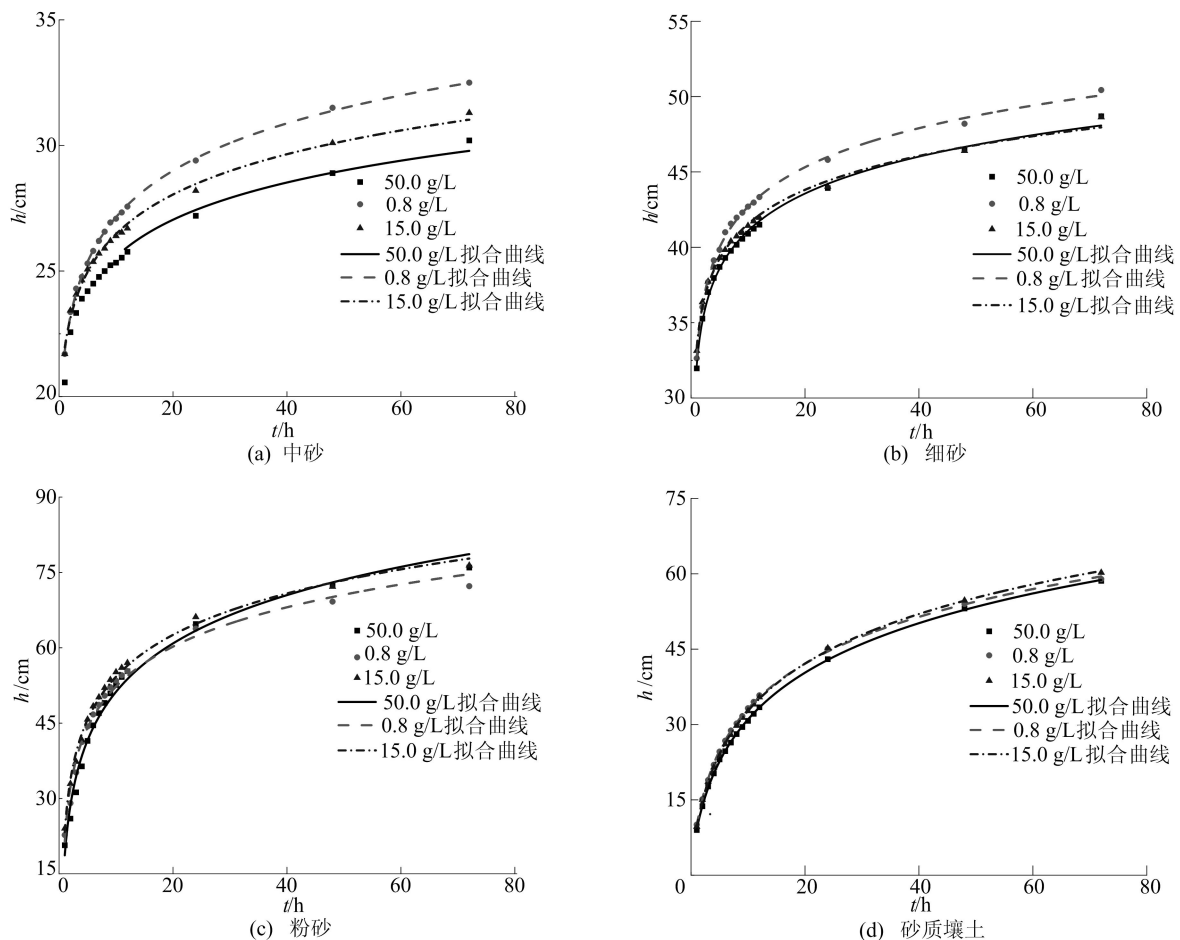


图 2 各试验组毛细水上升高度曲线

从图 2a 可以看出,矿化度为 0.8、15.0、50.0 g/L 时,中砂组 1 min 毛细水上升高度分别为 4.1、4.1、3.5 cm;最大毛细上升高度( $h_{\max}$ )分别为 32.5、31.3、30.2 cm,矿化度为 50.0 g/L 时毛细水上升速率减缓,最大毛细上升高度也较矿化度为 0.8 g/L 时减小了 2.3 cm,毛细上升高度减小幅度达 7.1%。

从图 2b 可以看出,细砂组 1 min 毛细水上升高度分别为 4.0、4.7、4.7 cm; $h_{\max}$  分别为 50.4、48.6、48.7 cm。矿化度由 15.0 g/L 增大至 50.0 g/L,矿化度增大了 3.33 倍,而 1 min 内的毛细水上升速率和  $h_{\max}$  增加幅度不明显,但与矿化度为 0.8 g/L 相比, $h_{\max}$  分别降低了 1.8、1.7 cm,降低幅度为 3.5%、3.4%。对比中砂组,1 min 内上升速率增加。

从图 2c 可以看出,粉砂组 1 min 毛细水上升高度分别为 1.1、1.2、0.9 cm; $h_{\max}$  分别为 72.3、76.4、76.0 cm。矿化度为 15.0、50.0 g/L 的  $h_{\max}$  较矿化度为 0.8 g/L 时分别增加了 4.1、3.7 cm,增加幅度分别达 5.7%、5.1%。

从图 2d 可以看出,砂质壤土组 1 min 毛细水上升高度分别为 0.2、0.2、0 cm, $h_{\max}$  分别为 59.0、60.2、58.6 cm,毛细水上升高度变化规律与粉砂组相似,均表现为随着矿化度的升高,最大毛细水上升高度呈先增大后降低的现象。统计相同粒径不同矿化度的毛细水上升高度,见表 2 所列。

中砂矿化度越高,1 min 内上升高度越小, $h_{\max}$  越小;细砂的  $h_{\max}$  受矿化度制约特征与中砂具有相似性,但随着粒径变小,在 1 min 内的上升速率变化出现矿化度升高,上升速率增加的特点,同时 15.0 g/L 与 50.0 g/L 在  $h_{\max}$  上接近重合;对于粉砂与砂质壤土,矿化度升高,1 min 内毛细水上升速率较小, $h_{\max}$  随着矿化度升高先增大后降低。以上试验结果表明,矿化度对毛细水上升的速率与高度均存在明显制约作用,这种制约作用是通过改变土壤具有的水势实现的。

表 2 不同矿化度毛细水上升高度 单位: cm

土壤类型	0.8 g/L		15.0 g/L		50.0 g/L	
	1 min	72 h	1 min	72 h	1 min	72 h
中砂	4.1	32.5	4.1	31.3	3.5	30.2
细砂	4.0	50.4	4.7	48.6	4.7	48.7
粉砂	1.1	72.3	1.2	76.4	0.9	76.0
砂质壤土	0.2	59.0	0.2	60.2	0	58.6

对试验数据进行拟合得到,砂性土与砂质壤

土的毛细水上升高度  $h$  与时间  $t$  在 72 h 全试验周期内均呈对数函数关系,见表 3 所列。已有的研究成果中多用幂函数( $h=at^b$ )来刻画<sup>[5,26-27]</sup>,但本试验采用三参数对数函数拟合  $R^2$  均在 0.98 以上,拟合精度较高。以矿化度为 0.8 g/L 的细砂组为例,幂函数与对数函数拟合结果如图 3 所示,1 h 时对数函数与幂函数拟合的残差分别为 0.041、-1.530;48 h 时残差分别为 -0.378、-0.799;72 h 时残差分别为 0.351、-0.452。拟合对比结果表明,对数函数拟合结果在试验前期与后期拟合效果均优于幂函数。

表 3 各试验组毛细水上升曲线拟合函数

土壤类型	矿化度/ (g·L <sup>-1</sup> )	拟合函数	R <sup>2</sup>
中砂	0.8	$h=20.612+2.773\ln(t+0.546)$	0.998
	15.0	$h=20.906+2.362\ln(t+0.562)$	0.993
	50.0	$h=20.591+2.149\ln(t+0.127)$	0.988
细砂	0.8	$h=34.348+3.683\ln(t-0.379)$	0.997
	15.0	$h=34.218+3.216\ln(t-0.241)$	0.994
	50.0	$h=33.100+3.507\ln(t-0.239)$	0.995
粉砂	0.8	$h=27.120+11.129\ln(t-0.404)$	0.985
	15.0	$h=27.507+11.764\ln(t-0.299)$	0.994
	50.0	$h=19.411+13.850\ln(t-0.051)$	0.985
砂质壤土	0.8	$h=-0.458+13.963\ln(t+1.080)$	0.999
	15.0	$h=-3.821+14.985\ln(t+1.460)$	0.999
	50.0	$h=-6.283+15.126\ln(t+1.770)$	0.999

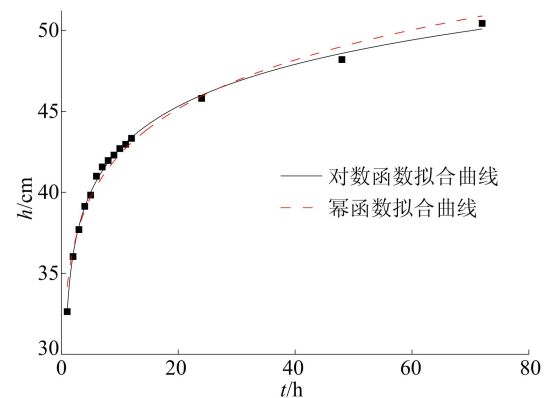


图 3 细砂 0.8 g/L 组幂函数与对数函数拟合对比

### 2.2 相同矿化度不同粒径毛细水上升差异

矿化度相同时,不同粒径砂性土与砂质壤土毛细水上升曲线如图 4 所示。从图 4 可以看出,相同矿化度时,毛细水最大上升高度由大到小依次为粉砂、砂质壤土、细砂、中砂,但不同粒径砂性土与砂质壤土的毛细水上升规律呈现不同的特征。矿化度为 0.8 g/L 时,粉砂、砂质壤土、细砂、中砂的  $h_{\max}$  分别为 72.3、59.0、50.4、32.5 cm。粉砂、砂

质壤土、细砂的  $h_{\max}$  与中砂的高度差分别为 39.8、26.5、17.9 cm, 是中砂毛细水最大上升高度的 122.5%、81.5%、55.1%; 矿化度增大至 15.0 g/L 时, 粉砂、砂质壤土、细砂、中砂的  $h_{\max}$  分别为 76.4、60.2、48.6、31.3 cm, 粉砂、砂质壤土、细砂的毛细水最大上升高度与中砂的高度差分别为 45.1、28.9、17.3 cm, 是中砂毛细水最大上升高度的 144.1%、92.3%、55.3%; 矿化度为 50.0 g/L 时, 粉砂、砂质壤土、细砂、中砂的  $h_{\max}$  分别为 76.0、58.6、48.7、30.2 cm, 粉砂、砂质壤土、细砂的  $h_{\max}$  与中砂的高度差分别为 45.8、28.4、18.5 cm, 是中砂毛细水最大上升高度的 151.6%、94.0%、61.3%。综上可以得到, 不同粒径的砂性土与砂质壤土在相同矿化度下的最大毛细水上升高度相差较大。

对图 4 的毛细水上升曲线求一阶导数, 得到不同土壤类型的毛细水上升速率曲线, 取试验前 60 min 的速率如图 5 所示。砂性土与砂质壤土的毛细水上升速率变化趋势为先迅速降低、后平缓降低、最终趋于 0 的特征, 但不同粒径的砂性土与砂质壤土亦有其不同点, 细砂试验初期的上升速率最快, 然后是中砂, 这 2 种粒径的砂性土初期上

升速率在 2~3 cm/min 之间。其次是粉砂, 初期上升速率在 0.6~1.2 cm/min 之间。最后是砂质壤土, 初期上升速率在 0.2~0.5 cm/min 之间。细砂的初期上升速率大于中砂, 分析原因可能是由于试验细砂与中砂的粒径相差较小, 导致较高的基质势增大了毛细水上升速率, 但是中砂的毛细水上升速率衰减较快。粒径越大, 砂性土毛细水上升速率衰减越快, 速率趋于 0 的时间最短, 砂质壤土中黏粒、粉粒的存在会制约毛细水的上升速率, 导致毛细水上升速率初期小且速率曲线更为平缓, 趋于 0 的时间更长。

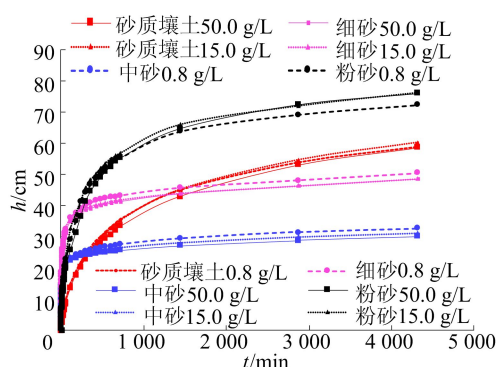


图 4 不同土壤类型毛细水上升曲线

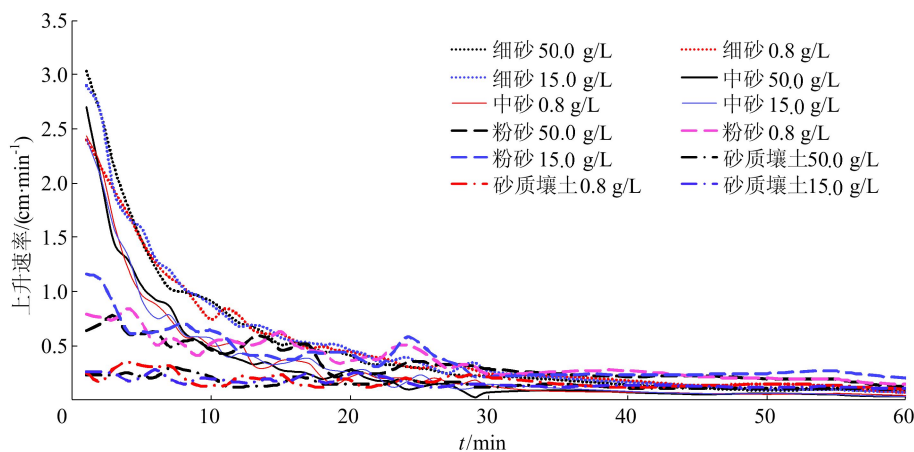


图 5 不同土壤类型 0~60 min 毛细水上升速率曲线

矿化度为 0.8、15.0、50.0 g/L 时, 中砂组在试验初期最大毛细水上升速率分别为 2.4、2.4、2.7 cm/min, 细砂组分别为 2.4、2.9、3.3 cm/min。毛细水上升速率变化呈矿化度增大、毛细水初期上升速率随之增大、同时衰减越快的特征。粉砂和砂质壤土由于粒径小、土壤结构复杂, 毛细水速率波动变化较大。计算基于粉砂样本总体方差分别为 0.058 67、0.077 86、0.047 93, 砂质壤土样本总体方差分别为 0.008 13、0.006 51、0.006 27。

对比各样本方差数据, 粉砂的速率波动随着矿化度增大呈先增大、后减小趋势, 而砂质壤土速率波动随矿化度增大而减小。

### 2.3 影响机制分析

土水势包括基质势、重力势、溶质势、温度势、气压势等势能<sup>[28-32]</sup>。试验柱内的毛细水运动受能量梯度驱使, 水分运动速度较小, 可忽略动能影响; 本试验在室内 25 °C 左右的环境中进行, 室温影响以及土壤中的温度变化微小, 忽略温度、室内

气压及土体气压的影响;试验柱内不存在半透膜,溶质势可以忽略。故矿化度对毛细水上升的影响机制分析主要从重力势与基质势 2 个方面展开<sup>[33]</sup>。

当土壤类型为中砂时,矿化度对毛细水上升的影响主要表现为重力势的改变。潜水矿化度越大,密度越大,毛细水具有的重力势能就越大,毛细水上升需克服的重力做功就越多。中砂由于粒径相对较大,孔隙率大,毛细水上升过程中克服的阻力相对较小,导致中砂毛细水上升速率初期速率较大,但衰减最快,在矿化度影响下,毛细水最大上升高度减小。

当土壤类型为细砂时,矿化度对毛细水上升的影响表现为重力势和基质势的改变。随着矿化度升高,15.0、50.0 g/L 在 1 min 上升高度相同,比 0.8 g/L 处高了 0.7 cm,这是由于尽管 15.0、50.0 g/L 处的毛细水重力势能大,但由于试验初期基质势占据主导作用,导致 1 min 的毛细水上升高度高于 0.8 g/L 组。但随着毛细水不断上升,重力势逐渐起主导作用,致使试验结束时毛细水最大上升高度低于 0.8 g/L。

当土壤类型为粉砂时,1 min 上升高度在 0.9~1.2 cm 之间,上升高度明显低于中砂与细砂组,这是由于所采用的试验砂粒径均为 200 目、杂质少、纯度高,导致孔隙率小,阻力增大,极小的粒径对毛细水上升产生了阻碍作用。毛细水最大上升高度由大到小依次为 15.0、50.0、0.8 g/L,分析原因是由于在此粒径下,随着毛细水上升,盐分在颗粒壁积聚,致使毛细管道直径减小,对毛细水产生了很强的“基质吸力”,基质势高,重力势作用相对降低,表现为矿化度增大至 15.0 g/L 时毛细水上升高度大于 0.8 g/L 组。试验结束后,取粉砂样置于高倍显微镜下观察,粉砂不同矿化度取样照片如图 6 所示。对比图 6a、图 6b 可以看出,0.8 g/L 组存在较多孔隙(白色区域),盐分可以通过孔隙向上传输。当矿化度增大至 15.0 g/L 时,有盐析出现象,盐分附着在部分孔隙通道表面,减小了孔隙通道直径,此时毛细水基质势增强。矿化度继续增大至 50.0 g/L 时,析出的盐分增多,从图 6c 可以看出,土体中部分孔隙通道被盐分完成填满,孔隙被堵塞,重力势增大,毛细水上升高度受到抑制,毛细水上升高度表现出 50.0 g/L 组小于 15.0 g/L 组。

当土壤类型为砂质壤土,矿化度为 0.8、15.0 g/L 时,1 min 上升高度均为 0.2 cm,

50.0 g/L 时毛细水上升高度几乎为 0,明显低于其他 3 组砂性土的上升高度,这主要是由于砂质壤土的土壤结构不同于砂性土,存在 10% 的黏粒与 20% 的粉粒,导致砂质壤土的透水性变弱,随着毛细水上升,土壤含水率增大,土壤黏结,增大了土壤的不透水性。毛细水最大上升高度由大到小依次为 15.0、0.8、50.0 g/L,分析原因是粉粒和黏粒在一定程度上增大了基质势,但重力势的影响随着矿化度升高不断增大,且在后期趋于主导地位。

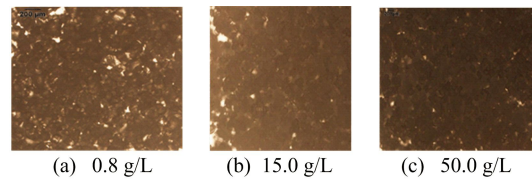


图 6 粉砂不同矿化度取样照片

### 3 结 论

本文基于室内试验开展了矿化度对毛细水上升规律与制约特征的研究,试验结果表明,矿化度对土壤毛细水上升的高度与速率均存在明显的制约作用,产生制约作用的原因主要是在于不同土壤的重力势、基质势不同。具体表现为粒径越大的土壤,矿化度越高,毛细水上升高度越小,初期上升速率越大,但速率衰减越快;粒径越小、结构更复杂的土壤,毛细水速率波动变化随矿化度的变化而变化。矿化度、土壤粒径与结构对均质砂性土与砂质壤土毛细水上升的影响起主要控制作用。

毛细水上升高度与时间可以用三参数对数函数关系表示,其拟合精度优于幂函数。上升速率方面,砂性土粒径越大,毛细水上升速率衰减越快,速率趋于 0 的时间最短。同时,砂质壤土中黏粒、粉粒的存在会影响毛细水的上升速率,导致毛细水上升速率不仅在初期慢且速率曲线波动较大,趋于 0 的时间更长。

粒径越小,基质势的作用强,在小粒径范围内存在明显的特征表现。内部孔隙越小,毛细管力越大,毛细润湿峰上移迅速,同样时间间隔内,上升距离较大,且在试验结束时的高度也远远高于大粒径土壤毛细水上升高度;粒径越大,重力势表现更加明显,尤其在试验后期,重力的影响作用不可忽略,本次试验矿化度范围在 0.8~50.0 g/L

之间,且只选择了 3 种矿化度试验,根据后续试验和模拟的初步结果,矿化度的影响存在一个阈值,确定阈值大小将是进一步的研究方向。

### [参 考 文 献]

- [1] 党学亚,卢娜,顾小凡,等.柴达木盆地生态植被的地下水阈值[J].水文地质工程地质,2019,46(3):1-8.
- [2] ZHOU M H, BUTTERBACHBAHL K, VERECKEN H, et al. A meta-analysis of soil salinization effects on nitrogen-pools, cycles and fluxes in coastal ecosystems[J]. *Global Change Biology*, 2017, 23(3):1338-1352.
- [3] LI Q F, XI M, WANG Q G, et al. Characterization of soil salinization in typical estuarine area of the Jiaozhou Bay, China[J]. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 2018, 103:51-61.
- [4] 宋战超,夏江宝,赵西梅,等.不同地下水矿化度条件下怪柳土柱的水盐分布特征[J].中国水土保持科学,2016,14(2):41-48.
- [5] 栗现文,周金龙,周念清,等.潜水高矿化度对粉质粘土毛细水上升的影响[J].干旱区资源与环境,2016,30(7):192-196.
- [6] 栗现文,周金龙,赵玉杰,等.高矿化度对砂性土毛细水上升影响[J].农业工程学报,2011,27(8):84-89.
- [7] 肖红宇,刘明寿,彭鹏程,等.基于黏性土分形特征的毛细水上升高度研究[J].水文地质工程地质,2016,43(6):48-52.
- [8] WU Y, LIU T, PAREDES P, et al. Water use by a ground-water dependent maize in a semi-arid region of Inner Mongolia: evapotranspiration partitioning and capillary rise[J]. *Agricultural Water Management*, 2015, 152:222-232.
- [9] IGLAUER S, MUGGERIDGE A. The impact of tides on the capillary transition zone [J]. *Transport in Porous Media*, 2013, 97(1):87-103.
- [10] RICHARDS J H, CALDWELL M M. Hydraulic lift: substantial nocturnal water transport between soil layers by *artemisia tridentata* roots [J]. *Oecologia*, 1987, 73(4):486-489.
- [11] YANG T T, ALA M, GUAN D X, et al. The effects of groundwater depth on the soil evaporation in horqin sandy land, China [J]. *Chinese Geographical Science*, 2021, 31(4):727-734.
- [12] IBRAKHIMOV M, KHAMZIN A, FORKUSTA I, et al. Groundwater table and salinity: spatial and temporal distribution and influence on soil salinization in khorezm region (Uzbekistan, Aral Sea Basin) [J]. *Irrigation and Drainage Systems*, 2007, 21(3/4):219-236.
- [13] 钟韵,费良军,傅渝亮,等.多因素影响下土壤上升毛细水运动特性 HYDRUS 模拟及验证[J].农业工程学报,2018,34(5):83-89.
- [14] 王中翰,柴金义,张宏.层状构造土体中毛细水上升的试验研究[J].内蒙古大学学报(自然科学版),2021,52(2):192-197.
- [15] 刘迪,卢才武,连民杰,等.基于粒径效应影响的尾矿毛细特性试验[J].中国有色金属学报,2020,30(11):2746-2757.
- [16] 杨海华,吕秋丽,杨武,等.利用柱状换土毛细作用提升地下水实现胡杨自我恢复的探索研究[J].节水灌溉,2020(12):51-56.
- [17] 李鹏,潘英华,何福红,等.黄河三角洲湿地土壤毛管水运动特性研究[J].中国农业气象,2017,38(6):378-387.
- [18] 胡明鉴,张晨阳,崔翔,等.钙质砂中毛细水高度与影响因素试验研究[J].岩土力学,2019,40(11):4157-4164.
- [19] 樊丽琴,李磊,吴霞.银北高水位盐碱地土壤盐分与地下水特征关系分析[J].节水灌溉,2019(6):55-59.
- [20] NAGY E, DEAKA J. Investigation of water capillary rise in soil columns made from clay mineral mixtures pretreated with cationic surfactants[J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2013, 44(1/2/3/4):749-757.
- [21] 姜璐莎.非饱和压实黄土毛细水迁移规律试验研究[D].兰州:兰州大学,2019.
- [22] 王夏伟.毛细水对开封城墙的破坏研究[D].郑州:河南大学,2020.
- [23] 刘伟佳,吴军虎,裴青宝,等.不同地下水埋深条件下均质土壤毛管上升水运动特性试验研究[J].水资源与水工程学报,2010,21(1):67-70.
- [24] 章育才,田亚坤,张志军,等.温度和气压对某金属矿山尾矿坝中毛细水上升规律的影响[J].中国有色金属学报,2017,27(5):1016-1022.
- [25] 中国地质调查局.水文地质手册[M].2版.北京:地质出版社,2012.
- [26] 袁玉卿,王晶晶,王祎沛,等.毛细水对粉砂土路基边坡稳定性影响研究[J].河南大学学报(自然科学版),2019,49(2):218-226.
- [27] 邓改革,何建国,康宁波.基于多物理场耦合的毛细水高度研究[J].水土保持研究,2021,28(4):136-141.
- [28] CHENG H L, ZHANG F C, LI M, et al. Effects of soil matrix potential regulation at various growth states on cotton growth and soil water and salt distribution[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2021, 32(1):211-221.
- [29] 岳彩坤.重力势作用下非饱和黄土水分迁移试验研究[J].西部探矿工程,2014,26(3):1-5.
- [30] FUJIMAKI H, SHIMANO T, INOUE M, et al. Effect of a salt crust on evaporation from a bare saline soil[J]. *Vadose Zone Journal*, 2006, 5(4):1246-1256.
- [31] NOVICK K A, KONINGS A G, GENTINE P. Beyond soil water potential: an expanded view on isohydrality including land-atmosphere interactions and phenology[J]. *Plant, Cell & Environment*, 2019, 42(6):1802-1815.
- [32] 景卫华,贾忠华,罗纨.总水势概念的定义、计算及应用条件[J].农业工程学报,2008(2):27-32.
- [33] 贾瑞亮.干旱区高盐度潜水蒸发规律及数值模拟研究[D].乌鲁木齐:新疆农业大学,2015.

(责任编辑 张 镛)