

NaCl 溶液处理亚热带土壤水分特征曲线差异与模型优选

胡传旺¹ 王 辉² 武 芸² 卢佳宇² 刘 常²

(1. 湖南农业大学资源环境学院, 长沙 410128; 2. 湖南农业大学工学院, 长沙 410128)

摘要：携带大量盐分的低质水长期灌溉导致土壤存在极大的物理化学特性退化风险,为了探究盐分对土壤水分特征曲线影响的差异性,采用压力膜法对亚热带地区粘性潮土、沙性潮土、红壤、紫色土、水稻土等 5 种土壤进行室内测定,对比分析了各土壤在 0、5、10、15 g/L 等 4 个钠盐浓度水平下土壤水分特征曲线的差异,并利用 RETC 软件结合数理统计方法确定了各土壤不同钠盐浓度水平下相应的最优拟合模型。结果表明:钠盐处理均可提高各土壤的持水能力,且粘粒含量较高的土壤影响显著;钠盐处理减少了粘性潮土、沙性潮土和红壤的有效含水率,分别最大减少了 40.8%、30.5%、31.5%,却提高了紫色土、水稻土有效含水率,分别最大提高了 45.7%、28.9%。粘粒含量少或低浓度盐溶液处理的土壤水分特征曲线以 BC 模型拟合最优,而粘粒含量多且高浓度盐溶液处理的以 DP-M 模型拟合最优。

关键词：亚热带土壤；钠盐溶液；土壤水分特征曲线；模型；RETC

中图分类号：S152.7 **文献标识码：**A **文章编号：**1000-1298(2018)04-0290-07

Difference of Soil Water Characteristic Curves of Subtropical Soils with NaCl Solutions Treatments and Models Optimization

HU Chuanwang¹ WANG Hui² WU Yun² LU Jiayu² LIU Chang²

(1. College of Resources and Environment, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China

2. College of Engineering, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China)

Abstract: Long-term irrigation of low quality water carrying large amounts of salt causes a significant degradation risk of soil physicochemical properties. The determination of difference in the influence of salinity on soil water characteristic curve of five subtropical soils, such as clay fluvo aquic soil, sandy fluvo aquic soil, red soil, purple soil and paddy soil, were investigated and these soils treatments with four different NaCl solutions (0 g/L, 5 g/L, 10 g/L and 15 g/L) were prepared to obtain the soil water characteristic curves of drying processes by the pressure membrances method. The optimal models that described soil water characteristic curves of different salt concentration dealt soils were determined by RETC software and mathematical statistics method. The results showed that the sodium salt can improve the soil water holding capacity, and special significant effect for soil with high content clay. Available water contents of clay fluvo aquic soil, sandy fluvo aquic soil and red soil treated with NaCl solutions treatments were maximally reduced by 40.8%, 30.5% and 31.5%, respectively, and available water contents of purple soil and paddy soil were maximally increased by 45.7% and 28.9%, respectively. The Brooks and Corey model was the optimal model to describe the soil water characteristic curves of soils with less clay or treatments with salt solution of low concentration. The Dual – porosity – Mualem model was the optimal model for high clay content of the soils treated with salt solution of high concentration. The research results can serve as reference for the secondary salinization of soil, reclaimed water irrigation, calculation of water and salt transport in southern subtropics.

Key words: subtropical soil; sodium salt solution; soil water characteristic curve; model; RETC

收稿日期: 2017-09-11 修回日期: 2017-12-12

基金项目：国家自然科学基金项目(41471185)、湖南省教育厅科学研究重点项目(15A084)、湖南省重点研发计划项目(2016JC2032)和湖南省研究生科研创新项目(CX2017B363)

作者简介：胡传旺(1990—),男,博士生,主要从事土壤物理与农业水土环境工程研究,E-mail: huwa0460@163.com

通信作者：王辉(1973—),男,教授,博士生导师,主要从事土壤物理与农业水土环境工程研究,E-mail: wanghuisb@126.com

0 引言

土壤次生盐渍化是土壤质量状况需要关注的重要问题之一。土壤次生盐渍化越来越不容忽视,一方面,设施蔬菜土壤普遍存在肥料施用超量严重,施肥方法不当,加之温室中高温少水的特殊环境,土壤盐分显著增加,土壤次生盐渍化问题日益突出^[1];另一方面,随着经济与建设的持续性发展,淡水资源逐渐缺乏,再生水替代淡水灌溉已经成为新的发展方向。研究表明再生水灌溉会显著增加土壤的电导率或全盐量,随着灌溉时间的增加,盐分逐渐积累,最终必然会导致土壤盐化^[2],盐分会影响土壤水力性质^[3-4]。土壤盐分的运动,主要受土壤水分运行规律和盐分溶解度规律支配。因此,研究溶液盐分与土壤水力性质的关系具有重要的理论价值和实践意义。

土壤水分特征曲线是土壤水分入渗、土壤侵蚀及溶质迁移过程等研究中的重要资料^[5-6]。由于不能根据土壤的基本性质从理论上得出土壤水的基质势与土壤含水率的关系,为了分析应用的方便,常用实测结果拟合出经验关系。目前,拟合土壤水分特征曲线的模型主要有:van Genuchten 模型及其修正模型^[7], Brooks and Corey 模型^[8]、Log - Normal Distribution 模型^[9]、Dual - porosity 模型^[10]等,其中 Brook and Corey 模型和 van Genuchten 及其修正模型的应用最为广泛。众多学者已在土壤水分特征曲线的研究方法^[11-12]、影响因素^[13-14]、模型拟合分析^[15-17]等方面开展了较多研究,但对于盐分条件下的模型适宜性及拟合优度比较,国内外文献中报道较少。栗现文等^[18]以淡水及矿化度分别为 30、100、250 g/L 的水样对粉质粘土进行饱水处理,分析了高矿化度对土壤水分特征曲线的影响及拟合模型的适宜性。而关于盐分对南方亚热带地区非盐碱性的酸、粘土壤持水特性的影响及模型适用性的研究更为薄弱。为此,本文选择最为常见的钠盐,来研究分析盐分作用下粘性潮土、沙性潮土、红壤、水稻土、紫

色土等 5 种不同类型土壤的水分特征曲线的差异及比较各经验模型对土壤水分特征曲线的拟合优度,以期改善南方亚热带地区土壤次生盐渍化及进一步研究亚热带地区低质水灌溉及水、盐运移提供一定科学参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于我国亚热带地区,研究区域范围包括 105°~114° E, 28°~30° N。研究区年平均降雨量 1 000~2 000 mm,年平均气温 16~18℃,均属于典型的亚热带湿润季风气候,干湿季节明显。地貌类型包括冲积平原(湖南岳阳市)、丘陵坡地(湖南长沙市)、西南山地(重庆永川区和巴南区),涵盖了我国亚热带地区中、西部不同区域的代表性地貌类型和主要的地带性与非地带性土壤。

1.2 材料

1.2.1 供试土壤

本试验土壤为研究区域内代表性的粘性潮土、沙性潮土、红壤、紫色土以及水稻土,分别取自湖南省岳阳市(112°43'42" E, 29°17'55" N)、湖南省岳阳市(112°43'47" E, 29°18'05" N)、湖南省长沙市(113°16'46" E, 28°32'49" N)、重庆市永川区(105°53'59" E, 29°23'39" N)、重庆市巴南区(106°52'49" E, 29°38'25" N)等地,主要土地利用方式为旱地和水田。利用随机、多点(10 个点)法采集表层 0~20 cm 土样,自然风干,除去根、石块等杂物,磨碎过 2 mm 筛,充分混匀后备用。供试土壤的理化性质见表 1。其中土壤机械组成采用吸管法测定;土壤 pH 值采用酸度计法测定;有机质含量采用重铬酸钾外加热容量法测定;交换性钙镁含量采用原子吸收法测定;交换性铁铝含量采用光度法测定。

1.2.2 供试水样

试验水样为蒸馏水及其与 NaCl 颗粒配制成质量浓度为 5、10、15 g/L 的溶液,其电导率分别为 9.08、17.25、25.06 dS/m。

表 1 供试土壤理化性质
Tab.1 Physicochemical properties of tested soils

土壤类型	颗粒组成/%			质地	pH 值	有机质 质量比/ (g·kg ⁻¹)	交换性铁 质量比/ (g·kg ⁻¹)	交换性铝 质量比/ (g·kg ⁻¹)	交换性钙 质量比/ (g·kg ⁻¹)	交换性镁 质量比/ (g·kg ⁻¹)
	0.05 ~ 2 mm	0.002 ~ 0.05 mm	0 ~ 0.002 mm							
粘性潮土	35.75	43.53	20.73	粘壤土	8.27	16.1	7.28	0.33	1 957.5	183.8
沙性潮土	35.62	53.29	11.08	粉砂壤土	8.41	10.1	5.95	0.24	2 726.0	194.2
红壤	38.86	31.04	30.10	壤质粘土	5.30	11.9	11.46	0.56	754.0	58.0
水稻土	46.12	36.10	17.79	粘壤土	4.93	18.6	3.54	0.23	2 166.0	93.0
紫色土	35.19	31.93	32.87	壤质粘土	4.08	35.6	8.12	0.55	1 148.5	13.5

1.3 水分特征曲线测定方法及拟合模型

1.3.1 测定方法

试验于2016年9月—2017年1月在湖南农业大学土壤水动力实验室进行。采用美国 SOIL MOISTURE 公司生产的压力膜仪测定土壤的水分特征曲线。将备好的土样称量并测定初始含水率,以 1.20 g/cm³ 的干容重均匀装入样品环,所用样品环内径为 5 cm,高 1 cm。然后将制备好的样品环置于蒸馏水及钠盐溶液中历时 24 h 使土样充分饱和,饱和后置于压力膜仪内分别在 3、6、10、20、30、70、160、400、700、1 100、1 500 kPa 压力下进行脱水测试。每一个压力下出水管不再流出液体时达到平衡(一般 0~100 kPa 时,1~2 d 到达平衡;100~1 000 kPa 时,3~4 d 到达平衡;高于 1 000 kPa 时,5~6 d 达到平衡),此时打开压力膜仪,称取样品的质量,计算出此压力下的土壤含水率,用各含水率与所对应施加的压力做出土壤水分特征曲线。

1.3.2 拟合模型

van Genuchten 模型及其修正模型(简称 VG 模型)

$$\theta(h) = \begin{cases} \theta_r + (\theta_s - \theta_r)(1 + |\alpha h|^n)^{-m} & (h < 0) \\ \theta_s & (h \geq 0) \end{cases} \quad (1)$$

式中 θ_s ——土壤饱和和体积含水率
 θ_r ——残余土壤体积含水率
 h ——负压,cm
 α ——进气值的倒数
 m,n ——土壤孔隙尺寸分布参数,不相关或 $m = 1 - 1/n$ 或 $m = 1 - 2/n$

α,m,n 均是反映土壤水分特征曲线形态的经验参数。

Brooks and Corey 模型(简称 BC 模型)

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \begin{cases} (\alpha h)^{-\lambda} & (\alpha h > 1) \\ 1 & (\alpha h \leq 1) \end{cases} \quad (2)$$

式中 S_e ——饱和度 θ ——土壤体积含水率
 λ ——土壤孔隙尺寸分布参数,决定土壤水分特征曲线的斜率

Log - Normal Distribution 模型(简称 LND 模型)

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \begin{cases} \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{\ln(\alpha h)}{\sqrt{2n}} \right) & (h > 0) \\ 1 & (h \leq 0) \end{cases} \quad (3)$$

Dual Porosity 模型(简称 DP 模型)

$$S_e = w_1 [1 + (\alpha_1 h)^{n_1}]^{-m_1} + w_2 [1 + (\alpha_2 h)^{n_2}]^{-m_2} \quad (4)$$

式中 w_1,w_2 ——2 个区域的权重因子

α_1,α_2 ——各自区域进气值的倒数

m_1,n_1,m_2,n_2 ——土壤孔隙尺寸分布参数

$\alpha_1,m_1,n_1,\alpha_2,m_2,n_2$ 是 2 个区域的经验参数。

美国国家盐改中心提供的 RETC 软件^[19]中包含了不同土壤水分特征曲线模型,用以拟合实测试验数据,分析或预测非饱和土壤的水力性质。软件在选择水分特征曲线模型时,需要选择不同的求解土壤非饱和导水率的 Mualem^[20]或 Burdine^[21]模型。与 Mualem 模型对应的有 VG 模型(m 与 n 不相关或 $m = 1 - 1/n$)、BC 模型、DP 模型及 LND 模型;与 Burdine 模型对应的有 VG 模型(m 与 n 不相关或 $m = 1 - 2/n$)及 BC 模型。因此,描述土壤水力参数的模型组合共有 8 种,对应简写为:VG - M(m,n)、VG - B(m,n)、VG - M($m,1/n$)、VG - B($m,2/n$)、BC - M、BC - B、LND - M、DP - M。

1.4 数据分析

数据处理采用 Excel 2003、SPSS 21 进行数理统计分析,利用 Origin 8.5 绘制相应的图,应用 RETC 软件拟合模型参数。

2 结果与分析

2.1 钠盐浓度处理下土壤持水性差异

图 1 为不同浓度钠盐处理下亚热带土壤水分特征曲线。由图 1 可知,不同土壤类型及钠盐溶液组合条件下,各土壤持水性在钠盐溶液处理下均增加,但增加程度存在差异。CHAUDHARIS 等^[22]将土壤基质势吸力 33~1 500 kPa 之间所吸持的水分定义为有效含水率,即能够被作物吸收和利用的水分,土壤基质势吸力为 1 500 kPa 时所对应的含水率称为残留水,即凋萎系数,该部分水很难被作物所利用,以下从土壤有效含水率和凋萎系数来对比分析各土壤在不同钠盐浓度下持水性的差异。

对于碱性潮土而言,粘性潮土(图 1a)和沙性潮土(图 1b)水分特征曲线整体变化趋势相似,二者在低吸力阶段,各处理下持水能力差异较小。高吸力阶段,随着钠盐质量浓度的增大,粘性潮土持水能力增强,5、10、15 g/L 处理下,土壤凋萎系数较蒸馏水处理依次提高 14.4%、24.6%、45.6%;沙性潮土持水性也有提高,但质量浓度(5、10、15 g/L)差异对其影响不大,凋萎系数分别提高 19.6%、20.0%、22.5%。随着钠盐质量浓度的升高,粘性潮土水分特征曲线逐渐变陡,说明有效含水率随钠盐质量浓度升高而逐渐减小,较对照组依次减小 14.7%、15.8%、40.8%。沙性潮土在各处理下有效含水率依次为 11.8%、8.8%、8.8%、8.2%。钠盐溶液作

用下,土壤的扩散双电子层向粘粒表面压缩,土壤颗粒之间的排斥力降低,溶液质量浓度对土壤的影响主要表现为粘粒的絮凝作用,这样有助于形成团粒结构,导致土壤孔隙增多,使得土壤持水能力增强。另一方面,土壤脱湿过程中,土壤由大孔隙排水转换为小孔隙排水,孔隙表面的水分仅能靠蒸发散失,盐分在土壤中积累,土壤孔隙中大孔隙逐渐变小,中等孔隙变为小孔隙,细小孔隙变得更小或被封堵,土壤持水能力大大增强,因此高吸力段土壤的持水性增加较大。随着钠盐质量浓度的增加,土壤中的 Na^+ 数量也相应增加,引起土壤颗粒的膨胀和分散,被分散的粘粒会引起土壤孔隙的堵塞,亦会改变孔隙大小分配。沙性潮土所含的粘粒较少,因此钠盐溶液质量浓度增大后,其受钠盐膨胀和分散作用较弱,土壤持水能力增幅较小。

对于酸性土壤红壤、紫色土、水稻土而言,三者在钠盐处理下土壤持水能力均增加,但各土壤具有一定差异。红壤在各处理下持水性增加,15 g/L 处理在中低吸力段(小于 100 kPa)含水率小于 10 g/L 处理,而高吸力段 15 g/L 处理下土壤含水率大于 10 g/L 处理(图 1c),分析认为,红壤所具有的粘粒含量较

多,15 g/L 处理下钠离子使土壤粘粒发生膨胀和分散作用,对土壤的破坏作用较强,土壤大孔隙减少,小孔隙增多,因而高吸力段,其持水能力高于 10 g/L 处理。图 1d 所示钠盐处理使紫色土持水性增加,各浓度下土壤凋萎系数分别为 0.190、0.211、0.227、0.247,质量浓度越高,持水能力越强。图 1e 所示水稻土在钠盐处理下土壤持水能力增大,低吸力段(小于 10 kPa)土壤持水能力差异较小,随吸力(进气值)的增加(大于 10 kPa),土壤持水能力差异变大,持水能力由大到小依次为 10、15、5、0 g/L 处理,说明钠盐质量浓度为 10 g/L 时对水稻土孔隙的影响程度最大。钠盐会使红壤有效含水率减少,10 g/L 处理有效含水率减少最多,为 31.5%。紫色土在各处理下的有效含水率分别为 10.2%、9.3%、13.2%、14.8%,10、15 g/L 处理下土壤有效含水率较蒸馏水分别增加 30.2%、45.7%。可能是紫色土粘粒和有机质含量多,土壤受钠盐浓度的絮凝作用较强,使得土壤大孔隙增加。水稻土由于本身所具有的有效孔隙较多,因而在各处理下有效含水率较多,分别为 12.1%、12.1%、15.6%、15.4%。

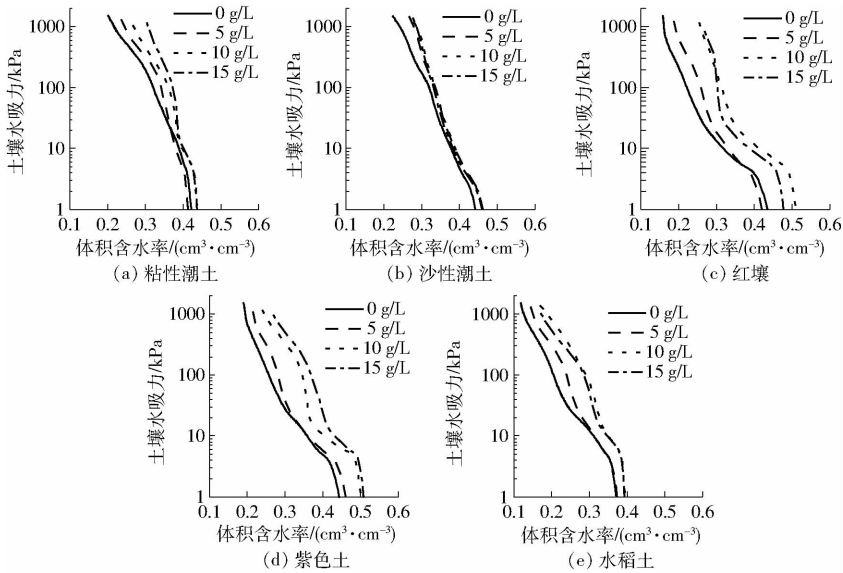


图 1 不同浓度钠盐处理土壤水分特征曲线

Fig. 1 Soil water characteristic curves with different concentrations of sodium salt solution

2.2 钠盐浓度处理下土壤当量孔径分布

为了进一步分析土壤水溶液质量浓度对水分特征曲线的影响,试验测得各土壤在各处理条件下的水分特征曲线如图 1 所示。若将土壤中的孔隙设想为各种孔径的圆形毛管,那么土壤水吸力 s 和毛管直径 d 的关系可表示为

$$s = 4\tau / d \tag{5}$$

式中 τ ——水的表面张力系数,室温条件下一般取 $7.5 \times 10^{-4} \text{ N/cm}$

若吸力 s 的单位为 Pa,当量孔径 d 以毫米计,则当量孔径 d 与吸力 s 的关系可以用 $d = 300/s$ 表示。浓度对当量孔径的影响可以忽略^[18]。将土壤水吸力单位换算为 Pa,根据式(5)计算出当量孔径,就可以反映不同处理土壤中孔隙的分布。若土壤含水率 θ_1 对应的当量孔径为 d_1 ,含水率 θ_2 对应的当量孔径为 d_2 ,则土壤中孔径在 d_2 与 d_1 之间的孔隙所占体积与孔隙总体积之比为 $(\theta_1 - \theta_2) / \theta_s$ (其中 $\theta_1 > \theta_2$)。因此,可根据各处理土壤孔隙分布状况,分析不同处

理土壤水分特征曲线的变化。

根据有效含水率的基质势吸力区间为 33 ~ 1 500 kPa,对应的当量孔径区间为 0.000 2 ~ 0.009 mm,为了便于分析,将当量孔径 0.009 mm 以上的孔隙称为大孔隙,其中所含的水能够在重力作用下排走;当量孔径区间为 0.000 2 ~ 0.009 mm 的孔隙称为有效孔隙,其中的水分能够被植物所利用;当量孔径小于 0.000 2 mm 的孔隙称为微小孔隙,其孔隙中所含的水分难以被植物利用。由图 2 可知,除沙性潮土外其余土壤在 NaCl 溶液处理下土壤的大孔隙含量(当量孔径大于 0.009 mm)均小于 0 g/L 处理,且随着盐浓度的增加,大孔隙所占的比例逐渐减小,溶液

质量浓度升至 15 g/L 时,粘性潮土、红壤、紫色土、水稻土大孔隙所占比例较 0 g/L 处理分别降低 14%、17%、12%、12%,沙性潮土有微小增加,提高 4%。而各处理下土的微小孔隙(当量孔径小于 0.000 2 mm)均随处理液质量浓度增加而增加。说明盐溶液会使土壤大孔隙含量减少,微小孔隙含量增加,土壤持水性增强。其中粘性潮土、沙性潮土、红壤的有效孔隙(当量孔径 0.000 2 ~ 0.009 mm)含量在盐溶液作用下有所减小,紫色土和水稻土则在较高质量浓度溶液(大于 10 g/L)作用下有效孔隙含量增加。说明盐溶液会降低粘性潮土、沙性潮土、红壤有效含水率,提升紫色土和水稻土有效含水率。

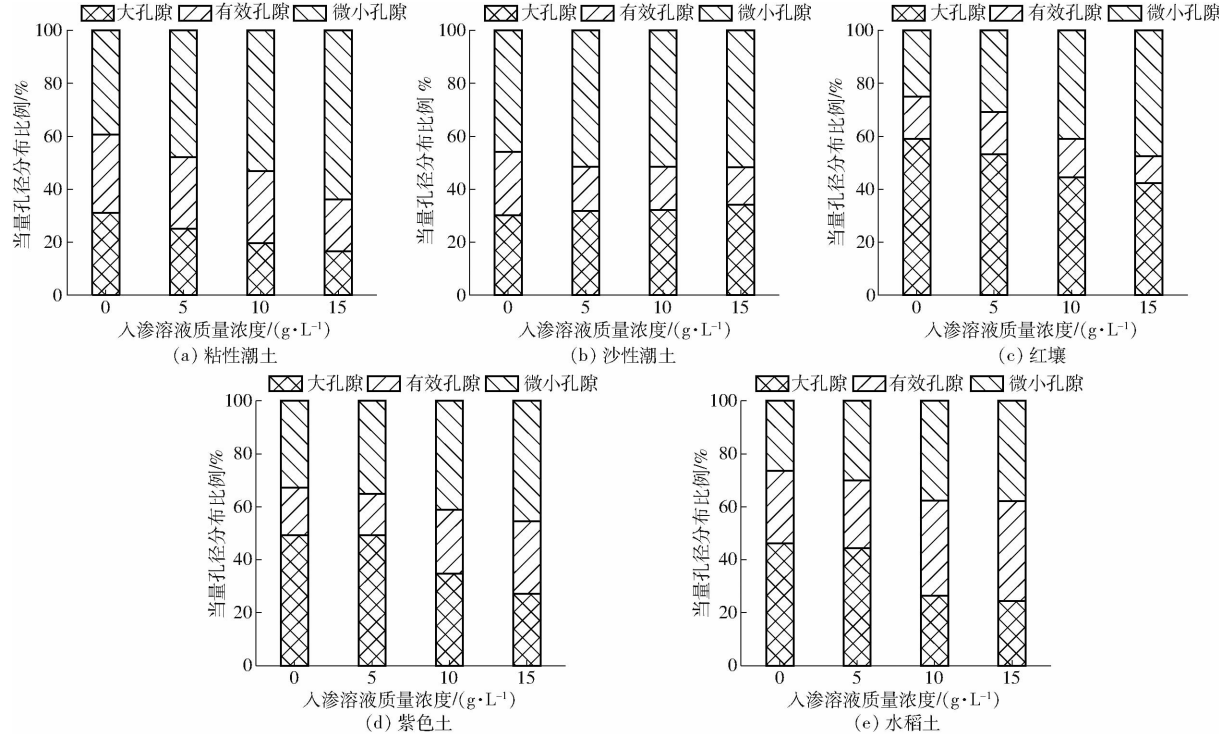


图 2 各处理土壤当量孔径分布比例

Fig. 2 Equivalent diameter distributions of soil pore under different treatments

2.3 土壤当量孔径分布与盐浓度及土壤理化性质的相关性

为了更准确了解各处理下当量孔径分布比例与处理液质量浓度及土壤理化性质之间的相关程度,利用 SPSS 统计软件对其进行相关分析。由表 2 可知,土壤大孔隙(当量孔径大于 0.009 mm)含量与溶液质量浓度、粉粒含量、pH 值、交换性钙含量、交换性镁含量呈显著负相关,与粘粒含量、交换性铁含量、交换性铝含量呈显著正相关,其中与交换性钙含量、交换性镁含量的相关程度最高;微小孔隙与溶液浓度、粉粒含量、pH 值、交换性镁含量呈极显著正相关,与砂粒含量呈显著负相关;有效孔隙仅与砂粒含量呈显著正相关与交换性铁含量极显著负相关、与交换性铝含量显著负相关;土壤孔隙与有机质含量

的相关性不显著。说明土壤水分特征曲线不仅与土壤物理特性有关,同时也受土壤的化学物质所影响,在 NaCl 溶液处理下粘粒膨胀、离子交换等作用产生,改变土壤孔隙分布,影响土壤持水性。

2.4 钠盐浓度处理下最优土壤水分特征曲线模型拟合

应用 RETC 软件中的不同模型对各实测土壤水分特征曲线进行拟合,确定各质量浓度下土壤水分特征曲线模型参数,并通过模型计算出实测土壤水吸力所对应的含水率,与实测值对比,各处理不同模型均具有良好的显著性($P < 0.01$),其中大部分模型拟合结果的决定系数 R^2 均高于 0.95,残差平方和(SSQ)均小于 0.005, F 值均大于 200,因此,其拟合模型均能较好地拟合实测数据。钠盐质量浓度处理

表 2 当量孔径分布比例统计分析

Tab.2 Statistical analysis of equivalent diameter distributions of soil pore

当量孔径/mm	盐浓度	砂粒 含量	粉粒 含量	粘粒 含量	pH 值	有机质 含量	交换性 铁含量	交换性 铝含量	交换性 钙含量	交换性 镁含量
> 0.009 (大孔隙)	-0.507 *	0.141	-0.527 *	0.474 *	-0.540 *	0.082	0.460 *	0.536 *	-0.564 **	-0.589 **
0.000 2~0.009 (有效孔隙)	0.002	0.493 *	-0.011	-0.241	-0.078	0.202	-0.667 **	-0.482 *	0.343	0.092
0~0.000 2 (微小孔隙)	0.589 **	-0.532 *	0.621 **	-0.372	0.688 **	-0.246	-0.038	-0.263	0.401	0.618 **

注: * 和 ** 表示在 $P<0.05$ 和 $P<0.01$ 水平下显著。

下各土壤水分特征曲线的模型拟合效果存在差异,分析可得其最优拟合模型:①粘性潮土在 0 g/L 处理下,LND-M 模型对应的决定系数最大、残差平方和最小、 F 值最大,故拟合效果最优;在 5、10、15 g/L 处理下,DP-M 模型拟合效果最优。粘性潮土在各处理下,VG-B(m,n)模型对其拟合效果均最差。②沙性潮土在各处理下,BC-M 与 BC-B 模型拟合效果最优,其相关系数最大、残差平方和最小、 F 值最大;二者对各处理土壤水分特征曲线拟合无明显差异,VG-B(m,n)模型拟合效果最差。③红壤在 0、5、10 g/L 处理下,BC-M 与 BC-B 模型拟合效果最

优,其相关系数最大、残差平方和最小、 F 值最大,在 15 g/L 处理下,DP-M 模型拟合效果最优;在各溶液处理下 LND-M 模型拟合效果最差。④紫色土和水稻土在 0、5 g/L 处理下,BC-M 与 BC-B 模型拟合效果最优,在 10、15 g/L 处理下,DP-M 模型拟合效果最优;各处理下 VG-B(m,n)模型拟合效果均最差。各土壤水分特征曲线最优拟合模型的拟合参数见表 3。

不同处理最优模型拟合效果见图 3。Mualem 或 Burdine 模型结合的 BC 模型对不同质量浓度处理土壤水分特征曲线拟合无明显差异,对于单个处理中存在最优模型为 BC-M 和 BC-B 模型的,图 3

表 3 各处理土壤水分特征曲线最优模型的拟合参数

Tab.3 Fitting parameters of optimal model of soil water characteristic curve under different treatments

土壤类型	0 g/L				5 g/L				10 g/L				15 g/L			
	θ_r	θ_s	α	n	θ_r	θ_s	α	n	θ_r	θ_s	α	n	θ_r	θ_s	α	n
粘性潮土	0	0.510	4.532	5.195	0.190	0.459	0	2.004	0.224	0.471	0	2.002	0.256	0.461	0	1.733
沙性潮土	0	0.489	0.158	0.091	0.181	0.521	0.189	0.161	0.214	0.512	0.152	0.188	0.241	0.530	0.189	0.236
红壤	0.136	0.627	0.102	0.410	0.145	0.598	0.183	0.292	0.236	0.605	0.053	0.427	0.270	0.540	0.017	2.411
紫色土	0.143	0.578	0.101	0.301	0.191	0.600	0.092	0.374	0.043	0.559	0	1.504	0.135	0.554	0	1.525
水稻土	0	0.448	0.078	0.185	0	0.473	0.144	0.150	0.116	0.438	0	1.793	0.133	0.425	0	2.075

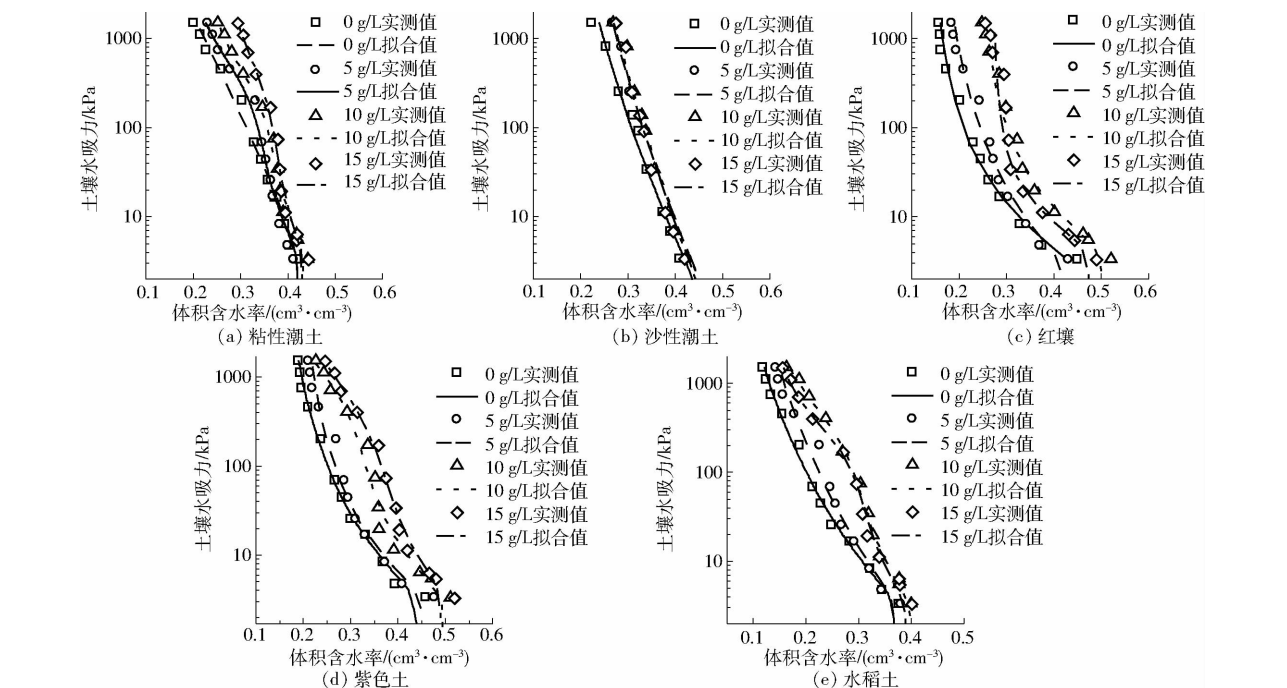


图 3 不同处理最优土壤水分特征曲线模型拟合效果

Fig.3 Optimal model fitting effects of soil water characteristic curve under different treatments

中选择 BC-M 模型拟合。对比各模型,BC 模型在 0、5 g/L 处理下对亚热带沙性潮土、红壤、紫色土、水稻土的拟合效果较稳定,而 15 g/L 处理下则 DP-M 模型对亚热带土壤拟合效果最优,与栗现文等^[18]研究存在一定差异。VG-B(m, n)模型在粘性潮土、沙性潮土、紫色土、水稻土中拟合效果最差,红壤中 LMD-M 模型拟合效果最差。就笼统分类而言,文中所述模型均为唯象模型,目前尚无圆满的数学模型可以从机理上全面描述土壤水分特征曲线^[23],故不同模型对各处理的适用性,从机理上解释也就较为困难。

3 结 论

(1) 钠盐溶液会提高各土壤的持水性,高质量浓度钠盐(10、15 g/L)使紫色土和水稻土有效含水率增加,二者在各处理下分别最大提高 45.7%、28.9%,减少粘性潮土、沙性潮土、红壤有效含水率,分别最大减少 40.8%、30.5%、31.5%,粘粒含量高

的土壤受钠盐的影响较大。

(2) 土壤持水特性变化与土壤物理化学特性关系密切。土壤水分特征曲线不仅与土壤物理特性有关,同时也受土壤的化学物质所影响,在盐溶液处理下粘粒膨胀、离子交换等作用产生,引起土壤孔隙大小分布发生改变,使土壤持水性产生差异。

(3) 通过对土壤水分特征曲线模型拟合值与实测值进行线性回归,分析其拟合统计特征值(决定系数 R^2 、残差平方和 SSQ、 F 值、 P 值),确定了各土壤不同处理的最优拟合模型:粘性潮土蒸馏水处理下最优模型为 LND-M 模型,5、10、15 g/L 处理的最优模型为 DP-M 模型;沙性潮土在各处理下以 BC-M 模型和 BC-B 模型为最优;红壤 0、5、10 g/L 处理最优模型为 BC-M 模型和 BC-B 模型,15 g/L 处理为 DP-M 模型;紫色土和水稻土 0、5 g/L 处理最优模型为 BC-M 模型和 BC-B 模型,10、15 g/L 处理最优模型为 DP-M 模型。

参 考 文 献

- 1 黄绍文,王玉军,金继运,等. 我国主要菜区土壤盐分、酸碱性和肥力状况[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(4):906-918.
HUANG Shaowen, WANG Yujun, JIN Jiyun, et al. Status of salinity, pH and nutrients in soils in main vegetable production regions in China[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2011, 17(4):906-918. (in Chinese)
- 2 BELTRAO J, COSTA M, ROSADO V, et al. New techniques to control salinity-waste water reuse interactions in golf courses of the Mediterranean regions[J]. Journal of Advanced Nursing, 2003, 71(4):718-734.
- 3 唐胜强,余冬立. 灌溉水质对土壤饱和导水率和入渗特性的影响[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(10):108-114. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20161015&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.10.015.
TANG Shengqiang, SHE Dongli. Influence of water quality on soil saturated hydraulic conductivity and infiltration properties[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(10):108-114. (in Chinese)
- 4 张珂萌,牛文全,汪有科,等. 微咸水微润灌溉下土壤水盐运移特性研究[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(1):175-182. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20170123&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.01.023.
ZHANG Kemeng, NIU Wenquan, WANG Youke, et al. Characteristics of water and salt movement in soil under moistube-irrigation with brackish water[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(1):175-182. (in Chinese)
- 5 ZHAI Q, RAHARDJO H. Determination of soil-water characteristic curve variables [J]. Computers and Geotechnics, 2012, 42(1):37-43.
- 6 张磊,齐瑞鹏,张应龙,等. 砒砂岩风化物对土壤水分特征曲线及蒸发的影响[J]. 土壤学报, 2015, 52(1):77-86.
ZHANG Lei, QI Ruipeng, ZHANG Yinglong, et al. Effects of amendment of aeolian sandy soil and loess with soft sandstone on soil water retention curve evaporation[J]. Acta Pedologica Sinica, 2015, 52(1):77-86. (in Chinese)
- 7 VAN GENUCHTEN M T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils [J]. Soil Science Society America Journal, 1980, 44(5):892-898.
- 8 BROOKS R H, COREY A T. Hydraulic properties of porous media [R]. Hydrology Paper 3, Colorado State University, Fort Collins, 1964.
- 9 KOSUGI K. Lognormal distribution model for unsaturated soil hydraulic properties [J]. Water Resources Research, 1996, 32(9):2697-2703.
- 10 DURNER W. Hydraulic conductivity estimation for soils with heterogeneous pore structure [J]. Water Resources Research, 1994, 30(2):211-223.
- 11 程冬兵,蔡崇法,彭艳平,等. 根据土壤粒径分形估计紫色土水分特征曲线[J]. 土壤学报, 2009, 46(1):30-36.
CHENG Dongbing, CAI Chongfa, PENG Yanping, et al. Estimating soil water retention curve based on fractal dimension of soil particle size distribution of purple soil [J]. Acta Pedologica Sinica, 2009, 46(1):30-36. (in Chinese)
- 12 张均华,刘建立,张佳宝. 估计太湖地区水稻土水分特征曲线的物理-经验方法研究[J]. 土壤学报, 2011, 48(2):269-276.
ZHANG Junhua, LIU Jianli, ZHANG Jiabao. Physico-empirical methods for estimating soil water retention curve of paddy soil in Taihu Lake area [J]. Acta Pedologica Sinica, 2011, 48(2):269-276. (in Chinese)

- 20 许继军,杨大文.基于分布式水文模拟的干旱评估预报模型研究[J].水利学报,2010,41(6):739-747.
XU Jijun, YANG Dawen. New model for drought estimation and prediction based on distributed hydrological simulation[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, 41(6): 739-747. (in Chinese)
- 21 徐静,任立良,刘晓帆,等.基于双源蒸散与混合产流的Palmer旱度模式构建及应用[J].水利学报,2012,43(5):545-553.
XU Jing, REN Liliang, LIU Xiaofan, et al. Establishment of Palmer drought severity model based on two-source potential evapotranspiration and hybrid runoff model[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2012, 43(5): 545-553. (in Chinese)
- 22 杨扬,安顺清,刘巍巍,等.帕尔默旱度指数方法在全国实时旱情监视中的应用[J].水科学进展,2007,18(1):52-57.
YANG Yang, AN Shunqing, LIU Weiwei, et al. Application of Palmer drought severity index method to real time drought survey in China[J]. Advances in Water Science, 2007, 18(1): 52-57. (in Chinese)
- 23 FREEZE R A, HARLAN R L. Blueprint of a physically-based digitally-simulated hydrologic response model[J]. Journal of Hydrology, 1969, 9(3): 237-258.
- 24 彭世彰,艾丽坤,和玉璞,等.稻田灌排耦合的水稻需水规律研究[J].水利学报,2014,45(3):320-325.
PENG Shizhang, AI Likun, HE Yupu, et al. Effect of irrigation and drainage coupling management on rice water requirement[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, 45(3): 320-325. (in Chinese)
- 25 朱士江,孙爱华,张忠学.三江平原不同灌溉模式水稻需水规律及水分利用效率试验研究[J].节水灌溉,2009(11):12-14.
- 26 王韶华,刘文朝,刘群昌.三江平原农业需水量及适宜水稻种植面积的研究[J].农业工程学报,2004,20(4):50-53.
- 27 赵永刚.石羊河流域农业需水量预测及水资源优化配置研究[D].杨凌:西北农林科技大学,2011.
ZHAO Yonggang. Agricultural water demand prediction and optimal allocation of water resources in the Shiyang River Basin[D]. Yangling: Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry, 2011. (in Chinese)
- 28 姚晓军,张晓,孙美平,等.1960—2010年中国西北地区水分盈亏量时空特征[J].地理研究,2013,32(4):607-616.
YAO Xiaojun, ZHANG Xiao, SUN Meiping, et al. Spatial-temporal characteristics of water deficit in Northwest China from 1960 to 2010[J]. Geographical Research, 2013, 32(4): 607-616. (in Chinese)
- ~~~~~

(上接第296页)

- 13 THYAGARAJ T, RAO S M. Influence of osmotic suction on the soil water characteristic curves of compacted expansive clay[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2010, 136(12): 1695-1702.
- 14 刘继龙,马孝义,张振华.不同土层土壤水分特征曲线的空间变异及其影响因素[J].农业机械学报,2010,41(1):46-52.
LIU Jilong, MA Xiaoyi, ZHANG Zhenhua. Spatial variability of soil water retention curve in different soil layers and its affecting factors[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(1): 46-52. (in Chinese)
- 15 邓羽松,丁树文,刘辰明,等.鄂东南花岗岩崩岗崩壁土壤水分特征研究[J].水土保持学报,2015,29(4):132-137.
DENG Yusong, DING Shuwen, LIU Chenming, et al. Soil moisture characteristics of collapsing gully wall in granite area of Southeastern Hubei[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2015, 29(4): 132-137. (in Chinese)
- 16 RAVICHANDRAN N, KRISHNAPILLAI S H. A flexible model for moisture-suction relationship for unsaturated soils and its application[J]. International Journal of Geosciences, 2011, 2(3): 204-213.
- 17 郑健,王燕,蔡焕杰,等.植物混掺土壤水分特征曲线及拟合模型分析[J/OL].农业机械学报,2014,45(5):107-112.
http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20140517&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2014.05.017.
ZHENG Jian, WANG Yan, CAI Huanjie, et al. Soil-water characteristic curves of soil with plant additive and analyses of the fitting models[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(5): 107-112. (in Chinese)
- 18 栗现文,周金龙,靳孟贵,等.高矿化度土壤水分特征曲线及拟合模型适宜性[J].农业工程学报,2012,28(13):135-141.
LI Xianwen, ZHOU Jinlong, JIN Menggui, et al. Soil-water characteristic curves of high-TDS and suitability of fitting models[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(13): 135-141. (in Chinese)
- 19 VAN GENUCHTEN M T, LEIJ F J, YATES S R. The RETC code for quantifying the hydraulic functions of unsaturated soils[R]. EPA Report 600/2-91/065, U. S. Salinity Laboratory, USDA, ARS, Riverside, California, 1991.
- 20 MUALEM Y. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media[J]. Water Resources Research, 1976, 12(3): 513-522.
- 21 BURDINE N T. Relative permeability calculations from pore-size distribution data[J]. Journal of Petroleum Technology, 1953, 5(3): 71-78.
- 22 CHAUDHARIS K, SOMAWANSHI R B. Effect of water quality on moisture retention in soil of different texture[J]. Journal of Agricultural Physics, 2007, 7(1): 20-26.
- 23 王宇,吴刚.一种基于物理化学基础分析的土水特征曲线模型[J].岩土工程学报,2008,30(9):1282-1290.
WANG Yu, WU Gang. Understanding and modelling soil-water characteristic curves[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(9): 1282-1290. (in Chinese)