

非常规水水质对红壤水分运移参数的影响及其过程模拟

刘常¹, 王辉¹, 胡传旺², 朱晋斌¹, 万琳辉¹, 胡晨雨¹

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

摘要: 为了探究非常规水水质对亚热带红壤水分运移参数的影响, 采用蒸馏水(CK)、再生水(RW)、稀释2, 4, 6倍再生水(RW-D2、RW-D4、RW-D6)和生活污水(WW)等6种不同水质的非常规水模拟红壤水分入渗过程, 利用水平土柱吸渗法测定红壤湿润锋运移速率和水分扩散度, 应用压力膜仪法测定了土壤水分特征曲线并且借助 van Genuchten(VG)模型提取了相应的土壤残余含水量 θ_r 、土壤饱和含水量 θ_s 、 α 和 n 等特征参数值。结果表明: 不同水质入渗下红壤湿润锋运移速率、水分扩散度均存在着一定差异, 湿润锋运移速率由快到慢分别为 $V_{CK} \approx V_{RW-D2} > V_{RW-D6} \approx V_{RW-D4} > V_{WW} > V_{RW}$; 在同一含水率下 $D_{RW-D6}(\theta) > D_{RW-D4}(\theta) > D_{WW}(\theta) > D_{RW-D2}(\theta) > D_{CK}(\theta) > D_{RW}(\theta)$ 。不同水质处理对VG模型参数变化率的影响程度不同, 对 α 的影响最大, 对 θ_r 的影响最小。因此, 非常规水灌溉会降低红壤入渗速率、持水性能以及抗旱能力。

关键词: 非常规水; 红壤; 湿润锋; 水分扩散度; 土壤水分特征曲线

中图分类号: S152.7

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2017)05-0170-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2017.05.027

Impacts of Marginal Water on Water Transport Parameters of Red Soil and Its Process Simulation

LIU Chang¹, WANG Hui¹, HU Chuanwang², ZHU Jinbin¹, WAN Linhui¹, HU Chenyu¹

(1. Department of Engineering, Hunan Agricultural University, Changsha 410128;

2. Department of Resource and Environment, Hunan Agricultural University, Changsha 410128)

Abstract: For the exploration of how the marginal water influenced the subtropical red soil's water transport parameters, different infiltration experiments were carried out with distilled water (CK), reclaimed water (RW), 2 times diluted, 4 times diluted and 6 times diluted reclaimed water (RW-D2, RW-D4 and RW-D6), wastewater (WW). The horizontal soil column infiltration absorption method was adopted to measure the transport velocity of wetting front and the water diffusion degree of the red soil and the pressure membrane method was applied to measure the water characteristic curve in which van Genuchten (VG) model was used to obtain the characteristic parameters, such as residual and saturated values of the soil water content (θ_r , θ_s), α , and n . The results showed that differences existed in the transport velocity of wetting front and the water diffusion degree of the red soil under different water infiltrating condition, the law that the transport velocity of wetting front obeyed could be described as: $V_{CK} \approx V_{RW-D2} > V_{RW-D6} \approx V_{RW-D4} > V_{WW} > V_{RW}$, under the same moisture content, conclusion could be made that $D_{RW-D6}(\theta) > D_{RW-D4}(\theta) > D_{WW}(\theta) > D_{RW-D2}(\theta) > D_{CK}(\theta) > D_{RW}(\theta)$. Different water infiltrating processes had different impacts on the characteristic parameters' changing rates of the VG model, in which α was the most sensitive while θ_r was the least sensitive. Therefore marginal water could reduce infiltrating velocity, water-holding capability and drought-resistant ability of the red soil.

Keywords: reclaimed water; red soil; wetting front; water diffusion degree; soil water characteristic curve

合理地开发与利用微咸水、生活污水及再生水等非常规水对缓解淡水供需矛盾具有重要的现实意义, 已成为当今社会关注的热点。长期非常规水灌溉对土壤理化性质^[1-5]和生态环境^[6-7]的影响日趋突出, 为此国内外学者做了大量的研究工作。毕远杰等^[8]研

究表明微咸水入渗可以改变黏质土壤的结构特性, 从而提升土壤的入渗能力。杨香云等^[9]采用 KCl、KH₂PO₄、(NH₄)₂SO₄ 3种不同溶质分别配置成5种不同浓度的入渗溶液对棕壤土水分扩散度的影响展开了研究, 得出同一溶质体积含水率 θ 小于30%时,

收稿日期: 2017-04-20

资助项目: 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)

第一作者: 刘常(1992—), 女, 硕士研究生, 主要从事农业水土环境研究。E-mail: 741066415@qq.com

通信作者: 王辉(1973—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事农业水土与环境工程研究。E-mail: wanghuisb@126.com

土壤水分扩散度随浓度降低而增大。唐胜强等^[10]研究发现微咸水入渗可以增大围垦区粉砂土、黄棕壤土的入渗能力,且对黄棕壤土的影响更为显著。As-souline 等^[11]研究表明长期再生水灌溉下黏土饱和和导水率、入渗速率较清水灌溉均有所下降。目前,关于非常规水灌溉对土壤水力性质的影响研究多集中于干旱或半干旱地区土壤,而对亚热带地区酸性壤土的研究相对较少。红壤是亚热带地区重要的土壤资源,黏、酸、瘦、缺磷等特性对土壤入渗及溶质迁移等过程具有十分重要的影响。龚恩磊等^[12]研究表明在硫酸型弱酸溶液($\text{pH} \geq 3$)作用下红壤水分入渗能力呈增大趋势,土壤持水能力降低;而当酸性溶液($\text{pH} < 3$)作用时,红壤入渗、持水能力呈相反趋势。胡传旺等^[13]利用工业盐分别配制不同浓度的钠盐溶液作为入渗溶液,指出湿润锋推进速度随钠盐质量浓度的增加而减慢,土壤水分扩散度亦呈减小趋势。然而,非常规水成分十分复杂,只研究非常规水中某一成分对红壤水分运移参数的影响与实际非常规水灌溉利用过程中对红壤水分运移参数的影响存在着未知的差异。灌溉水质、受纳土壤的不同性质对土壤水分运移参数的影响十分复杂^[14-15]。为此,本文选用非常规水

作为入渗溶液,研究其对亚热带地区典型红壤水分运移参数的影响,旨在探究非常规水灌溉下亚热带红壤入渗特性及贮蓄水能力的变化规律,为非常规水在亚热带地区的合理利用提供科学参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验土壤取自湖南农业大学校园周边试验基地。试验土样先去除植物根系、石块等杂质,经风干、碾压、筛分、均匀混合后,利用比重法测定土壤颗粒组成。其中粒径大于 0.02 mm 的土壤颗粒含量为 48.17%,0.002~0.02 mm 的土壤颗粒含量为 21.75%,小于 0.002 mm 的土壤颗粒含量为 30.08%,按照国际制土壤质地分级标准,供试土样质地属于壤土。试验灌溉用水采用长沙市花桥污水处理厂二级出水作为再生水(RW)水源;为了揭示水体化学成分相同、浓度梯度不同的再生水对红壤水分运移参数的影响,利用蒸馏水将再生水稀释成 2,4,6 倍再生水水样(RW-D2、RW-D4、RW-D6);采取湖南农业大学校区生活污水排污口出水作为生活污水(WW)水源,蒸馏水(CK)为对照。供试水样的基本理化性质见表 1。

表 1 试验水样基本理化性质

入渗溶液	pH	EC/ ($\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$)	$\text{SO}_4^{2-}/$ ($\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)	$\text{Cl}^{-}/$ ($\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)	$\text{K}^{+}/$ ($\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)	$\text{Na}^{+}/$ ($\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)	$\text{Ca}^{2+}/$ ($\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)	$\text{Mg}^{2+}/$ ($\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)	SAR
WW	7.43	546.90	972.94	14.89	5.99	8.38	25.16	5.60	2.14
RW-D6	7.18	742.20	300.57	14.89	5.04	8.20	12.14	1.51	3.14
RW-D4	7.27	909.00	495.20	16.31	6.04	11.22	16.65	2.11	3.66
RW-D2	7.39	1394.90	3644.73	29.07	6.49	18.40	26.30	3.43	4.77
RW	7.67	1659.60	4830.23	48.92	12.27	37.39	50.80	6.74	6.97

1.2 试验方法

本次试验于 2016 年 3—5 月在湖南农业大学灌溉排水工程实验室和水文过程模拟实验室进行,每组试验重复 3 次。

(1)红壤湿润锋运移速率及水分扩散度采用一维水平土柱吸渗法测定。试验选用 10 节长为 4 cm,内径为 5 cm 的有机玻璃管组成试验土柱,采用马氏瓶供水,马氏瓶的发泡点与土柱中心线处于同一水平面上。为了保证填装土壤的均匀性,试验采用分层装填的方法,每 2 cm 为一层,层与层之间的接触面须进行打毛处理,填装土壤容重为 $1.2 \text{ g}/\text{cm}^3$,初始含水率为 0.47%。湿润锋运移距离每间隔 4 cm 处时,记录湿润锋运移时间,当运移距离达到 36 cm 处时,供水试验结束并迅速小心地分节拆卸有机玻璃管土柱,在各节土柱剖面取土样,用烘干法测量剖面各点的土壤含水量。

(2)土壤水分特征曲线采用压力膜仪法测定。将备好的土壤称重并测定初始含水率,再将准备好的土样浸泡在不同水质中,水面高度略低于土壤表面,浸

泡 12~24 h 使土样充分饱和后放入压力室内加压,土壤受压后,随即有水自引水管中流出,等到水不再流出时,即认为达到平衡。此时关闭进气阀打开压力室,分别对各个土样称重,称重后将土样放入压力室再继续加压,并重复上面的操作,当压力室内压力值接近最大值 1 500 kPa 时,结束试验。最后计算得出在各个压力等级下的土壤含水量,用各含水量和所对应施加的压力做出土壤水分特征曲线^[16]。

1.3 数据处理与分析

采用 Excel、SPSS 21 和 RETC 软件进行数据处理和分析。

2 结果与分析

2.1 不同水质入渗对红壤湿润锋运移速率的影响

湿润锋为入渗过程中土壤湿润区的前沿,指示水分入渗的最大深度。湿润锋运移速率的快慢也就是土壤中水分运动的快慢,在水平一维土柱入渗过程中,水体中盐离子、以及悬浮的颗粒物质与土壤胶体颗粒发生作用导致土壤的孔隙结构发生变化,进而

影响了土壤的入渗过程^[17]。由图 1 可知,不同水质入渗下土壤湿润锋的运移状况差异较大。入渗初期,不同水质入渗下红壤湿润锋运移速率均增长较快,当入渗持续一段时间后,湿润锋的运移速率逐渐减小。在湿润锋运移距离达到 15 cm 之前,不同水质入渗下湿润锋运移速率相差甚微。但由于不同水质含盐分离离子、SAR 与 EC 等不同,因而对土壤入渗过程产生不同的影响,入渗时间越长,湿润锋运移速率差异越明显,RW 与 CK 之间差异显著($p<0.05$)。经过相同的入渗时间,采用非常规水入渗时湿润锋推进深度均小于 CK。入渗开始 200 min 后,CK 组湿润锋推进深度为 36.54 cm,WW、RW 湿润锋推进深度分别为 30.41、23.74 cm,较 CK 入渗分别减小 16.8%和 35.0%。产生这种差异的原因可能是由于 RW、WW 基本理化性质中 SAR 差异显著,RW 中 SAR 比 WW 高 2.24 倍,SAR 的增加意味着水中 Na^+ 数量增加, Na^+ 使土壤胶体分散度加大以及黏粒扩张明显,进而影响土壤团粒结构,使得土壤导水能力降低,入渗率减缓,导致湿润锋推进距离减小^[16]。RW 钠吸附比值大于 WW,故 RW 入渗速率较 WW 下降幅度大。对于再生水而言,RW-D2 入渗速率与 CK 基本相等,RW-D4、RW-D6 入渗规律基本相似。入渗开始 200 min 后,RW-D4、RW-D6 入渗下湿润锋推进深度分别为 30.73、31.69 cm,与 CK 相比湿润锋推进深度分别减小了 15.9%和 13.3%。与前文推理出现分歧的原因可能在于随着再生水稀释倍数的增加,入渗水质中盐离子含量并没有按照相应的稀释倍数递减,不同入渗水质中离子浓度不同,且各离子对入渗速率产生的影响也不同。土壤中移动较快的 Cl^- 在水分入渗过程中绝大多数会随湿润锋一起移动,在锋面上形成较高的溶质势梯度,促进水分前进的速率,而移动较慢的 SO_4^{2-} 和 CO_3^{2-} 则相反,不仅不会在湿润锋面上形成较高的溶质势,相反会因离子移动较慢,和土壤中其他 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 结合,因而限制了其他离子的扩散^[18]。且 RW-D2 中 EC 相对于 RW-D4、RW-D6 分别增长了 87.9%、53.5%,而 SAR 却只增加了 51.9%、23.3%。随着水质中 EC 的增加,扩散双电子层向黏粒表面压缩,将降低土壤颗粒间的排斥力,使土壤粒子的物理稳定性下降,增强了土壤胶体的絮凝作用,为团聚体形成创造条件,大孔隙数量随之增多,因而导水率有所提高。

为了定量分析不同水质入渗条件下湿润锋变化过程,采用幂函数对湿润锋变化过程进行回归分析,具体表示为:

$$X=\mu T^{\lambda}$$

(1)

式中: X 为湿润锋运移距离(cm); T 为时间(min); μ 、

λ 为参数,拟合结果见表 2。拟合系数 R^2 在 0.99 以上,说明拟合结果能够较好的反映实际情况,其中参数 μ 随着再生水稀释倍数的增加而增大,参数 λ 与再生水稀释倍数之间无明显规律。

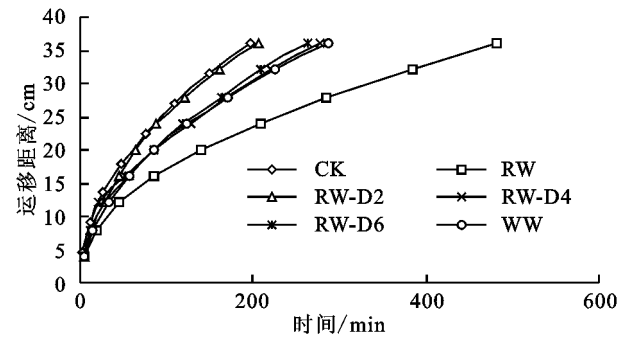


图 1 不同水质入渗下红壤湿润锋随时间运移关系

表 2 拟合参数

拟合参数	RW	RW-D2	RW-D4	RW-D6	WW	CK
μ	1.837	1.865	2.007	2.229	2.007	2.639
λ	0.483	0.563	0.515	0.501	0.513	0.496
R^2	0.998	0.998	0.999	0.992	0.999	0.999

2.2 不同水质入渗对红壤水分扩散度的影响

土壤水分扩散度是表征土壤水动力学的重要参数之一,它反映了土壤的孔隙度、空隙大小分布以及导水性能,并影响着土壤中水分运动的状况^[19]。由图 2 可知,红壤水分扩散度随土柱剖面体积含水率的增大而增加,且其增加的速率亦随体积含水率的增大而上升。当含水率小于 $0.35\text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 时,土壤水分扩散主要以水汽运动为主, $D(\theta)$ 随土壤含水率的升高而增加缓慢,由于水分主要在小孔隙中运动,土壤溶液的黏滞性对水分扩散度的影响较弱,故红壤在不同水质入渗下,其水分扩散度没有产生明显的变化;当含水率高于 $0.35\text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 时, $D(\theta)$ 随土壤含水率的升高而急剧增加,土壤含水率的增高将导致土壤中水分扩散曲折率变小,将有利于水分扩散运动的进行,土壤水分扩散度也随之增大,且由于水分主要在大孔隙中运动,土壤溶液的黏滞性对水分扩散度的影响起决定性作用,同一含水率下,红壤在不同水质入渗下水分扩散度存在一定差异性, $D_{\text{RW-D6}}(\theta)>D_{\text{RW-D4}}(\theta)>D_{\text{WW}}(\theta)>D_{\text{RW-D2}}(\theta)>D_{\text{CK}}(\theta)>D_{\text{RW}}(\theta)$,且随着含水率的增加,再生水稀释倍数越高,水分扩散度增大速率越快,RW-D6 与 RW 之间差异最为显著($p<0.05$)。产生这种现象的原因可能是再生水稀释倍数越高,水中离子浓度越低,继而导致土壤溶液浓度也越低,土壤溶液的粘滞性越弱,水分扩散度增长速率越快。而 WW 中主要离子浓度处于 RW-D4 和 RW-D2 之间,故 WW 水分入渗下红壤水分扩散速率也处于之间。

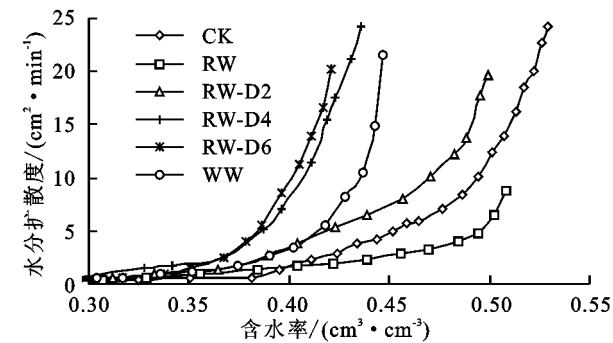


图 2 水分扩散度与含水率关系曲线

为了定量分析不同水质入渗下红壤的水分扩散度与含水率之间的相关性。采用多种曲线对红壤水分扩散度与含水率之间的关系进行拟合,拟合分析结果表明指数函数的拟合效果最好,其拟合系数 R^2 均在 0.85 以上,具体表示为:

$$D(\theta)=\gamma e^{\beta \theta} \quad (2)$$

式中: $D(\theta)$ 为水分扩散度 (cm^2/min); θ 为含水率 (cm^3/cm^3); γ 、 β 为参数,无量纲。拟合结果见表 3。

由表 3 可知,溶液中再生水所占比例越高, γ 系数数值越大,系数值 β 越小。拟合系数中 γ 与 β 间的关系可以用二次多项式表示:

$$\gamma=0.0015 \beta^2-0.053 \beta+0.4403 \quad (3)$$

相关系数 R^2 达到了 0.9 以上,说明相关程度很好,水分扩散度进一步可以表示为:

$$D(\theta)=(0.0015 \beta^2-0.053 \beta+0.4403) e^{\beta \theta} \quad (4)$$

这一结果对进一步研究红壤水分扩散度的变化规律具有一定的价值。

表 3 拟合参数

拟合参数	CK	RW	RW-D2	RW-D4	RW-D6	WW
γ	0.001	0.056	0.012	0.005	0.001	0.009
β	18.444	10.550	13.386	14.551	20.095	15.660
R^2	0.993	0.859	0.983	0.951	0.873	0.949

2.3 不同水质处理对红壤水分特征曲线的影响

土壤水分特征曲线亦称土壤持水曲线,是指土壤水分基质势与含水量之间的关系曲线,它表征了土壤的持水特性。因此,土壤水分特征曲线的确定对研究土壤物理性质和土壤水分变化过程具有极其重要的作用^[20-21]。土壤结构对土壤水分特征曲线的影响主要体现在土壤内部空隙大小及分布规律。试验土样均为装填土,孔隙分布较为均匀,但经过不同水质处理后土壤结构发生了变化,非常规水不同水质对红壤水分特征曲线有着不同程度的影响。由图 3 可知,土壤脱湿过程中曲线较为平缓,这是因为低吸力阶段的土壤水分主要由大孔隙保持,较小的吸力变化能够引起较大的含水率变化;随着吸力增大,水分由小孔隙保持,脱水过程越发艰难,故曲线变得陡直。总体来说,6 种不同水质处理表现相同,当含水率高于 0.45

cm^3/cm^3 时,即在低吸力阶段,红壤主要通过大孔隙排水,不同水质对土壤水分特征曲线的影响较小,各土壤水分特征曲线基本重合;当含水率低于 0.45 cm^3/cm^3 时,即红壤由低吸力阶段大孔隙排水向高吸力阶段小孔隙排水转变,5 种非常规水处理都与 CK 存在着一定的差异,非常规水处理下使土壤水分特征曲线依次往左移动,水分特征曲线越往左移动,持水性能越弱,即在同等压力作用下土壤所能保持的水量越少。按照向左偏移的程度排序,6 种水质处理的顺序为 $\text{RW} > \text{RW-D2} > \text{RW-D4} > \text{RW-D6} > \text{WW} > \text{CK}$ 。由此可知,随着再生水稀释倍数越低,红壤持水性能越弱, RW-D2 、 RW-D4 水分特征曲线接近重合。出现这种现象的原因可能是非常规水中含有大量的离子及悬浮物等物质,使得土壤孔隙结构发生变化,降低了其持水性。

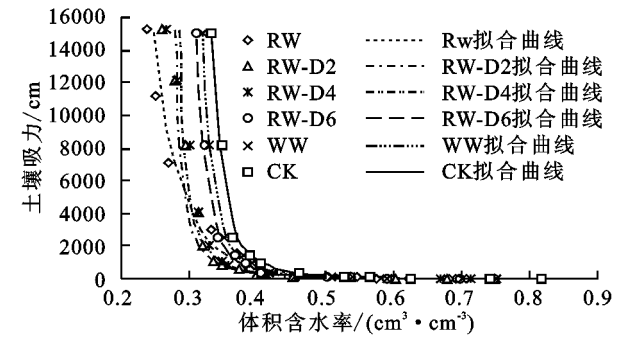


图 3 非常规水水质对红壤水分特征曲线的影响

美国盐改中心提供的 RETC 土壤软件中包含 8 种不同土壤水分特征曲线模型,其中 VG 模型与实测数据曲线相似程度高,参数意义明确而受到广泛运用^[22]。采用 VG 模型拟合土壤水分特征曲线,模型可表示为:

$$\theta(h)=\begin{cases} \theta_r+\frac{\theta_s-\theta_r}{[1+|\alpha h|^n]^m} & h \leq 0 \\ \theta_s & h \geq 0 \end{cases} \quad (5)$$

式中: θ_r 为土壤残余含水量 (cm^3/cm^3); θ_s 为土壤饱和和体积含水量 (cm^3/cm^3); h 为负压 ($\text{cm H}_2\text{O}$); α 为进气值倒数; m 、 n 为土壤孔隙分布参数, $m=1-1/n$ 。

由图 3 可知,供试土壤在 6 种不同水质入渗条件下,各土壤水分特征曲线的实测值与 RETC 软件拟合值有较高的吻合程度。为了分析不同水质之间的差异,本试验以实测的各水质处理下红壤水分特征曲线为真值,计算其与 RETC 软件拟合值之间的残差平方和,CK、RW、RW-D2、RW-D4、RW-D6、WW 6 种不同水质处理下红壤水分特征曲线的残差平方和分别为 0.000 2,0.002 2,0.001 7,0.001 3,0.000 6,0.000 6,其值都较小,基本都趋于 0,且相关系数 R^2 均在 0.99 以上,则说明拟合的适应程度好,拟合精度高,拟合参数见表 4。

表 4 不同水质下土壤水分特征曲线拟合参数

入渗溶液	θ_r	θ_s	α	m	n	R^2
CK	0.283	0.817	0.094	0.247	1.328	0.999
RW	0.251	0.702	0.061	0.133	1.530	0.993
RW-D2	0.258	0.747	0.037	0.332	1.498	0.995
RW-D4	0.259	0.718	0.034	0.316	1.463	0.995
RW-D6	0.278	0.748	0.065	0.276	1.382	0.998
WW	0.283	0.752	0.071	0.265	1.328	0.997

由表 4 可知,非常规水水质对土壤水分特征曲线参数 θ_r 、 θ_s 、 α 和 n 值均有一定的影响。不同水质处理下红壤水分特征曲线参数 θ_r 、 θ_s 、 α 和 n 值各不同,为了更加直观地理解非常规水不同水质对 VG 模型各参数的影响程度,以蒸馏水为对照基准,求得各参数 (θ_r 、 θ_s 、 α 和 n) 的变化率。由图 4 可知,非常规水不同水质对土壤水分特征曲线参数变化率的影响程度不一,其中对参数 α 影响尤为显著,其次是 θ_s 、 n 和 θ_r 。参数值 α 为进气值的倒数,RW 对参数值 α 的影响大于 WW,且随着再生水稀释倍数的增加,参数值 α 的变化率呈先增加后降低的趋势,RW-D4 处理下参数 α 的变化率最大。参数 θ_r 和 θ_s 变化率规律一致,WW 处理下 θ_r 和 θ_s 参数变化率最小,RW 处理下参数 θ_r 和 θ_s 变化率最大且随着再生水稀释倍数的增加 θ_r 和 θ_s 参数变化率呈下降趋势。由于参数 θ_r 和 θ_s 变化率均为负值,表明非常规水不同水质处理下红壤残余含水量、饱和含水量都较对照组蒸馏水有所降低,是土壤团聚作用被破坏的表现^[23]。参数 n 为水分特征曲线的斜率,反映土壤可释放出供给作物吸水量的速率指标,可表明土壤抗旱能力的强弱。由图 4 可知,参数 n 的变化率均为正值,说明非常规水不同水质处理下均提高了土壤释水速率,使得土壤抗旱

能力不同程度地降低。WW 处理下参数 n 的变化率最小,RW 处理下参数 n 变化率最大,且随着再生水稀释倍数的增加参数 n 变化率呈下降趋势。这表明非常规水不同水质处理下会降低红壤抗旱能力,RW 处理下红壤抗旱能力最差,但随着再生水稀释倍数的增加红壤的抗旱能力也随之提高,WW 处理下对红壤抗旱能力的影响最小。

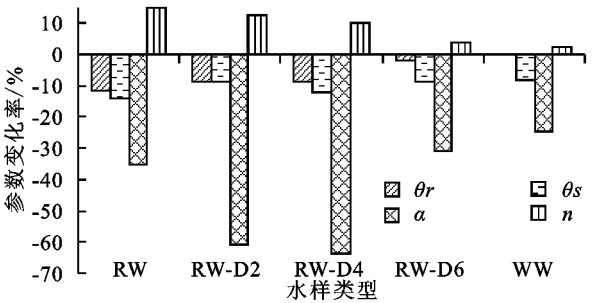


图 4 非常规水水质对红壤水分特征曲线参数变化率的影响

2.4 入渗水质的基本化学性质与水分运移参数的相关性分析

为了进一步分析不同入渗水质的基本化学性质对红壤水分运移参数的影响,选取了入渗水质中 6 个基本化学指标与红壤水分运移速率、水分扩散率 D (θ) 拟合公式 4 中的参数 β 以及土壤水分特征曲线拟合参数 n 、 α 、 θ_r 和 θ_s 等水分运移参数之间进行相关性分析。由表 5 可知,湿润锋运移速率与水质中 K^+ 的相关性达显著性水平,呈显著正相关关系,由此可得,入渗水质中对湿润锋运移速率影响最大的可能是 K^+ 。水分扩散率中拟合公式中参数 β 、水分特征曲线参数 α 、 θ_s 与 6 种基本化学性质之间都不存在显著相关性。水分特征曲线参数 n 、 θ_r 分别与 EC 、 SAR 呈显著正相关关系,表明入渗水质中 EC 和 SAR 值对红壤释水速率及抗旱能力有较大影响。

表 5 入渗水质的基本化学性质与水分运移参数之间的相关矩阵

测定项目	EC	pH	SAR	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	K ⁺	运移速率	β	n	α	θ_r	θ_s
EC	1											
pH	-0.01	1										
SAR	0.97**	0.09	1									
Cl ⁻	0.93*	0.12	0.96**	1								
SO ₄ ²⁻	0.93*	-0.01	0.89*	0.95*	1							
K ⁺	0.80	0.09	0.89*	0.95*	0.83	1						
运移速率	0.51	0.24	0.68	0.76	0.54	0.91*	1					
β	-0.79	0.48	-0.77	-0.81	-0.83	-0.81	-0.57	1				
n	0.94*	-0.18	0.91*	0.79	0.77	0.67	0.40	-0.75	1			
α	-0.34	0.65	-0.21	-0.01	-0.10	0.13	0.38	0.31	-0.59	1		
θ_r	-0.90*	0.31	-0.88*	-0.76	-0.73	-0.68	-0.43	0.80	-0.99**	0.63	1	
θ_s	-0.64	0.14	-0.76	-0.69	-0.48	-0.80	-0.80	0.68	-0.72	0.22	0.78	1

注: * 表示相关性达显著性水平 ($p < 0.05$); ** 表示相关性达极显著水平 ($p < 0.01$)。

3 结论

(1)水质对红壤湿润锋运移速率具有明显的影响。6 种不同水质作用下,湿润锋运移速率由快到慢

分别为 $V_{CK} \approx V_{RW-D2} > V_{RW-D6} \approx V_{RW-D4} > V_{WW} > V_{RW}$ 。蒸馏水(CK)入渗下湿润锋运移速率最快,与稀释 2 倍再生水(RW-D2)之间差异不明显,但与其

他4种入渗水质间差异明显,且与再生水(RW)差异最为显著($p < 0.05$)。因此,非常规水会降低红壤入渗速率,再生水对红壤入渗过程的影响最大。

(2)不同水质入渗下,当含水率高于 $0.35 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 时,红壤水分扩散度存在一定的差异,在同一含水率下, $D_{\text{RW-D6}}(\theta) > D_{\text{RW-D4}}(\theta) > D_{\text{WW}}(\theta) > D_{\text{RW-D2}}(\theta) > D_{\text{CK}}(\theta) > D_{\text{RW}}(\theta)$,且随着含水率的增加,再生水稀释倍数越高,水分扩散度增长速率越快。土壤水分扩散度与含水率之间具有良好的指数函数关系,相关系数均达到了0.85以上。

(3)非常规水水质将减弱红壤的持水性能,降低红壤抗旱能力,再生水对红壤的持水性能以及抗旱能力影响最大,生活污水处理下影响较小。

再生水、生活污水等非常规水中所含物理颗粒、化学成分、微生物种类多样,因而对土壤水分运移过程的影响因素也十分复杂。本次试验只测定了入渗水质的基本化学性质,还有一些化学指标可能也会对土壤水分运移产生不同程度的影响,这还有待进一步研究。且非常规水对土壤的影响是个长期的过程,仍需对非常规水长期灌溉对土壤物理化学特征及微生物环境的影响展开深入研究。

参考文献:

- [1] 李河,史海滨,李仙岳,等. 建筑回填土中再生水灌溉对草坪草生长及土壤理化性质的影响[J]. 水土保持学报, 2016,30(5):171-176.
- [2] Rezapour S, Samadi A. Soil quality response to long-term wastewater irrigation in Inceptisols from a semi-arid environment[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2011,91(3):269-280.
- [3] Bedbabis S, Ben R B, Boukhris M, et al. Effect of irrigation with treated wastewater on soil chemical properties and infiltration rate[J]. Journal of Environmental Management, 2014,133(1):45-50.
- [4] Schacht K, Marschner B. Treated wastewater irrigation effects on soil hydraulic conductivity and aggregate stability of loamy soils in Israel[J]. Journal of Hydrology and Hydromechanics, 2015,63(1):59-66.
- [5] Goncharenko A M, Garanovich I L. Impact of field application of treated wastewater on hydraulic properties of vertisols[J]. Water, Air, Soil Pollution, 2007, 184(1):347-353.
- [6] 吴文勇,刘洪禄,陈鸿汉,等. 再生水灌区调蓄工程对地下水盐分的影响[J]. 农业工程学报, 2009,25(12):22-25.
- [7] 王贵玲,蔺文静. 污水灌溉对土壤的污染及其整治[J]. 农业环境科学学报, 2003,22(2):163-166.
- [8] 毕远杰,王全九,雪静. 淡水与微咸水入渗特性对比分析[J]. 农业机械学报, 2010,41(7):70-75.
- [9] 杨香云,陈晓飞,丁家丽,等. 溶质种类和溶度对棕壤土水分扩散率的影响[J]. 灌溉排水学报, 2004,23(3):45-48.
- [10] 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]. 农业机械学报, 2016,47(10):108-114.
- [11] Assouline S, Narkis K. Effects of long-term irrigation with treated wastewater on the hydraulic properties of a clayey soil[J]. Water Resources Research, 2011, 47(8):2924-2930.
- [12] 龚恩磊,王辉,胡传旺,等. 酸性溶液对红壤水分入渗特征影响及其模拟研究[J]. 水土保持学报, 2015,29(1):48-51.
- [13] 胡传旺,王辉,张真,等. 钠盐离子对黏性红壤水力特征的影响及其模拟[J]. 灌溉排水学报, 2015,34(8):49-52.
- [14] Viviani G, Iovino M. Wastewater reuse effects on soil hydraulic conductivity[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2004,130(6):476-484.
- [15] 吉恒莹,邵明安,贾小旭. 水质对层状土壤入渗过程的影响[J]. 农业机械学报, 2016,47(7):183-188.
- [16] 宋孝玉,李亚娟,李怀有,等. 土壤水分特征曲线单一参数模型的建立及应用[J]. 农业工程学报, 2008, 24(12):12-15.
- [17] 邵明安,王全九,黄明斌. 土壤物理学[M]. 北京:高等教育出版社, 2006.
- [18] 郭全恩,王益权,马忠明,等. 溶质类型与矿化度对土壤水分扩散率的影响[J]. 干旱区地理, 2011,34(1):90-94.
- [19] 雷志栋,杨诗秀,谢传森. 土壤水动力学[M]. 北京:清华大学出版社, 1988.
- [20] 姚姣转,刘廷玺,王天帅,等. 科尔沁沙地土壤水分特征曲线传递函数的构建与评估[J]. 农业工程学报, 2014, 30(20):98-108.
- [21] 张露,王益权,韩霖昌,等. 基于 van Genuchten 模型的渭北苹果园土壤水分能量特征分析[J]. 农业工程学报, 2016,32(19):120-126.
- [22] Ghanbarian-Alavijeh B, Liaghat A, Genuchten M T V. Estimation of the van Genuchten soil water retention properties from soil textural data[J]. Pedosphere, 2010,20(4):456-465.
- [23] 郭全恩,王益权,南丽丽,等. 溶质类型与矿化度对土壤持水特性的影响[J]. 土壤通报, 2014,45(2):340-344.