

再生水灌溉红壤土水力传导度变化及其模拟分析

朱晋斌¹, 王辉^{1*}, 胡传旺², 刘常¹, 陈潇岳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:【目的】研究南方地区再生水灌溉对红壤入渗特征的影响。【方法】以红壤为研究对象开展土柱模拟灌溉试验,采用再生水(RW)、稀释2倍再生水(RW-2)、稀释4倍再生水(RW-4)、稀释6倍再生水(RW-6)进行干湿交替灌溉,以蒸馏水灌溉(CK)为对照组。利用便携式入渗计进行入渗率测定,采用压力膜仪法测定土壤水分特征曲线。【结果】再生水灌溉后,土壤水力传导度(K)减小显著($P<0.05$),各处理的水力传导度分别是CK的12%(RW)、17%(RW-2)、20%(RW-4)、44%(RW-6);同一吸力下,RW和RW-2处理土壤水分的吸持能力高于CK,RW-4和RW-6处理土壤水分的吸持能力小于CK;水力传导度与形状系数 n 极显著正相关($P<0.01$),与再生水稀释倍数和残余含水率 θ_r 显著正相关($P<0.05$)。【结论】再生水灌溉会降低土壤的导水特性,一定浓度再生水可增加土壤持水性,通过稀释再生水可改善土壤的孔隙结构。

关键词:再生水; 干湿交替灌溉; 土壤; 水分特征曲线

中图分类号:S152.7

文献标志码:A

doi:10.13522/j.cnki.ggps.20180326

朱晋斌,王辉,胡传旺,等. 再生水灌溉红壤土水力传导度变化及其模拟分析[J]. 灌溉排水学报,2019,38(3):64-69.

0 引言

在我国南方地区全力推动再生水利用对于建设资源节约型、环境友好型社会具有重要的意义。再生水作为城市可利用的潜在第二水源,具有来源广泛、便于批量处理、供水稳定等优势^[1]。目前,城市再生水主要用于城市景观用水、城市杂用水、工业用水等,利用率达到20%,这在一定程度上节省了用水成本,节约了淡水资源,缓解了城市用水压力^[2]。然而,长时间利用再生水进行灌溉,各复杂成分在土壤中累积,易造成土壤矿物黏粒、土壤质地、土壤结构、土壤溶质等指标的变化,进而导致土壤水力特性的改变^[3]。国内外研究表明,长期再生水灌溉对土壤孔隙率造成影响,使土壤密实度增加,导致对营养物质的吸持能力减小以及饱和导水率、入渗速率的下降^[4-7]。与清水相比,再生水中含有较多的盐分离子,长期进行灌溉使土壤中的盐分增加,同时,盐分中含量较高的钠盐会导致土壤分散,土壤结构产生破坏,进一步影响土壤导水特性^[8]。杨树青等^[9]通过田间试验表明,土壤盐分随灌溉水浓度的增加而增加,但灌溉水浓度不宜超过灌溉临界值,否则对土壤环境造成较大影响。邵建荣等^[10]利用高、低矿化度水质进行5 a灌溉发现,将控制灌溉水总盐分和降低 Na^+ 占比结合起来可以达到降盐和防治土壤碱化的目的。上述研究初步揭示了非常规水灌溉对土壤物理特性的影响,但研究的区域主要集中在我国干旱半干旱地区,而对于我国雨水资源相对丰富的南方地区,尤其针对黏粒含量高、质地较为黏重的酸性土壤的相关研究未见报道。为此,通过土柱模拟试验,选用再生水作为灌溉水源,研究再生水累积灌溉对红壤入渗特性和持水性的影响,以期为我国南方地区再生水灌溉实践提供一定理论参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验于2016年10月—2017年12月在湖南农业大学灌溉排水实验室进行,使用湖南农业大学校区试验

收稿日期:2018-06-09

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)

作者简介:朱晋斌(1992-),男。硕士研究生,主要从事非常规水利用及水土环境研究。E-mail: 1055275983@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

基地 0~20 cm 的红壤土作为试验材料,将供试土壤去除植物根系、石块等杂质,经风干、碾压、过筛,均匀混合后备用。经测定,土壤 EC 值为 $46.67\ \mu\text{S}/\text{cm}$, pH 为 5.01。颗粒组成为砂粒 12%,粉砂粒 32%,黏粒 56%,按照国际制土壤粒级分类标准,供试土壤属于黏土。灌溉用水将长沙市花桥污水处理厂二级出水口的水作为再生水(RW)水源,再生水 EC 值为 $1\ 659.60\ \mu\text{S}/\text{cm}$, pH 为 7.67, Na^+ 质量浓度为 $37.39\ \mu\text{g}/\text{L}$, Ca^{2+} 质量浓度为 $50.80\ \mu\text{g}/\text{L}$, Mg^{2+} 质量浓度为 $6.74\ \mu\text{g}/\text{L}$ 。经再生水灌溉后土样基本理化性质如表 1 所示。

表 1 再生水处理后土样基本理化性质

土壤成分	有机质量/($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	交换性钠量/($\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$)	pH	$EC/(\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1})$
RW	7.48	0.72	4.81	100.48
RW-2	5.64	0.68	4.92	64.38
RW-4	2.82	0.35	4.90	57.18
RW-6	3.59	0.27	5.05	52.93
CK	3.12	0.16	4.92	32.06

1.2 试验方法

1.2.1 土柱装填

试验采用直径 25 cm、高 34 cm 的 PVC 桶模拟土柱。在塑料桶底部均匀打孔,为防止土壤、细沙下漏,在土柱底部铺设 2 层纱布,之后再装填 5 cm 厚的细沙层。经测定,土壤初始体积含水率为 0.57%,设定装填体积质量为 $1.05\ \text{g}/\text{cm}^3$,土壤装填总质量为 8.8 kg。为防止因装填不均匀而对试验结果造成影响,采用分层(3 cm 每层)填装土柱的方法,层与层之间打毛处理。

1.2.2 灌溉设计

为筛选出适宜的再生水灌溉浓度,将取自污水处理厂的再生水设置不同浓度进行灌溉,分别是:再生水(RW)、稀释 2 倍再生水(RW-2)、稀释 4 倍再生水(RW-4)、稀释 6 倍再生水(RW-6),蒸馏水处理为 CK,每种处理设置 3 个重复。灌水试验开始前,每个土柱均采用蒸馏水进行初灌,使土壤初步沉积稳定。入渗完成后,将土柱进行自然风干,待张力计读数达到 80 kPa 时进行灌溉,每个样品单次灌溉水量 6 L,使用同一种水质灌溉水进行干湿循环连续性地灌溉,灌溉持续时间 1 a,共灌溉 11 次,单个土样灌溉总量 66 L。灌水时在土壤表面放置防冲滤网,防止灌水过程中对塑料桶中的土壤造成冲刷作用,导致土壤表层结构破坏,从而影响试验结果。

1.2.3 测试原理

累积入渗量和水力传导度采用便携式入渗计(Mini Disk Infiltrometer)测定。当张力计压力表值达到 80 kPa 时,使用便携式入渗计进行入渗率的测试。入渗水为自来水,水温 $15\sim 20\ ^\circ\text{C}$ 。为消除入渗负压的影响,设置入渗负压为 1 cm 水头。大量田间试验表明,采用便携式入渗计测定入渗,一般可在 240 s 内达到稳定,因此以入渗 240 s 的累积入渗量作为反映土壤入渗能力的指标,每隔 30 s 记录 1 次数据。水力传导度测试方法参考文献[11]。

水力传导度的计算要求先采用 Philip 模型,如式(1):

$$I=S_1\sqrt{t}+ct, \tag{1}$$

式中: I 为累积入渗量(cm); t 为入渗时间(s); S_1 为与土壤吸渗性有关的系数($\text{cm}/\text{s}^{0.5}$); c 为与土壤水力传导度有关的系数(cm/s)。

水力传导度计算公式为:

$$k=\frac{C}{A}, \tag{2}$$

式中: c 为与土壤水力传导度有关的系数; A 为给定土壤质地前提下与 van Genuchten 方程有关的一个参数,与 Mini Disk Infiltrometer 的入渗负压和入渗盘半径有关。

土壤水分特征曲线采用压力膜仪法测定。使用环刀采集经再生水灌溉 1 a 后的原状红壤土,先将准备好的土样称质量并测定初始含水率,再将土样浸泡在不同稀释倍数再生水中,浸泡 24 h 使土样充分饱和后放入压力室内加压,在 7 kPa 压力下进行测试,土样受压后随即有水自饮水管中流出,待压力室内水流不再流出时,即认为达到平衡,之后对土样称质量。称量后将土样放入压力室继续加压,并在 33、60、110、218、465、872、1 500 kPa 压力下重复上述步骤,完成 1 500 kPa 压力测试后,结束试验。最后将得到的压力值和含水率进行水分特征曲线的拟合。孔隙分布比例则是依据水分特征曲线数据来计算当量孔径。

1.3 数据处理与分析

采用 Excel 2007 对数据进行初步处理;使用 SPSS 21.0 进行相关性分析,并采用单因素方差分析(One-

way ANOVA)检验显著性差异。

2 结果与分析

2.1 再生水灌溉下红壤土累积入渗量分析

累积入渗量是指在一定入渗时间内入渗水量的大小,是衡量土壤入渗能力的重要参数指标。由图1可知,在整个入渗过程中,随着入渗时间的增大,累积入渗量逐渐增大。在入渗初期,各处理之间的累积入渗量相差不大,再生水对累积入渗量的影响还比较微弱。但随着入渗过程的进行,尤其是在16 s以后的同一入渗历时,再生水对累积入渗量影响增强且差异明显,在210 s入渗结束后,与CK对比,累积入渗量分别减小了85.71%(RW)、81.63%(RW-2)、69.39%(RW-4)、40.82%(RW-6)。随着入渗时间的增大,入渗曲线斜率都有所增大,且随着再生水稀释倍数的增加,斜率增长更快,各处理由大到小依次为CK、RW-6、RW-4、RW-2、RW处理。由此可知,随着稀释倍数的增大,再生水对土壤水分的入渗影响越小。

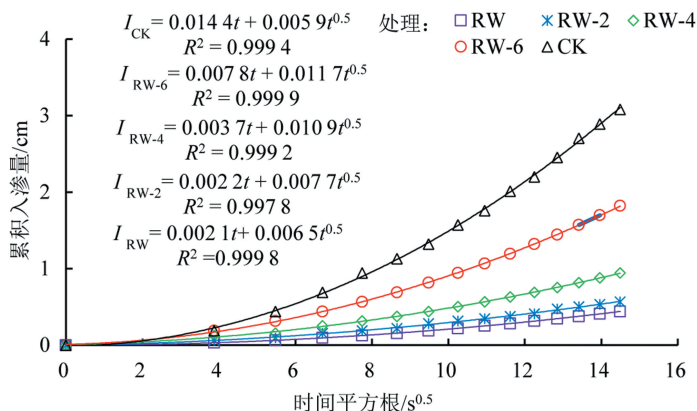


图1 不同稀释倍数再生水处理对土壤累积入渗量的影响

为了定量分析不同再生水浓度灌溉对红壤入渗特征的影响,采用式(1)进行拟合,结果如图1所示。由图1可知,拟合决定系数 R^2 均在0.99以上,这说明拟合精度高。再生水稀释倍数越高,系数 c 越高。系数 S_1 在再生水灌溉下明显高于蒸馏水灌溉,分别增长10.16%(RW)、30.51%(RW-2)、84.75%(RW-4)、98.30%(RW-6)。这是因为土壤在再生水长期灌溉下,再生水中含有的大量碱性阳离子 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 与土壤中的酸性阴离子形成固体物质从而阻塞了孔隙,大孔隙逐渐变小,中等孔隙变成小孔隙,小孔隙变成更小的孔隙或者被堵塞,土壤的导水性也就相应减小。再生水浓度越大,土壤孔隙的变化越明显,大中孔隙减少,所以RW的导水率最低。土壤吸渗是在土壤基质势的作用下土壤水分进行运动的现象。长期再生水灌溉下,土壤中盐分离子不断增加,孔隙逐渐减小,土壤吸渗作用增加。随着稀释倍数的减小,土壤的吸渗通道反而被 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 形成的固体物质堵塞^[12],且随着离子物质的量浓度越高,限制的作用越大,因此,RW的吸渗率反而最小。

2.2 再生水灌溉下红壤土水力传导度分析

水力传导度是土壤入渗能力的重要参数,是土壤入渗达到稳定值时的入渗率,是评价土壤入渗性能的关键指标。由表2可以得出,再生水灌溉的土壤水力传导度最低,为1.402 cm/h;再生水灌溉下,RW-6处理的土壤水力传导度最高,达到5.164 cm/h;随着再生水稀释倍数的增大,土壤水力传导度呈现不断增长的趋势;与CK相比,各处理的水力传导度分别是CK的0.12倍(RW)、0.17倍(RW-2)、0.20倍(RW-4)、0.44倍(RW-6)。RW、RW-2、RW-4、RW-6处理的土壤水力传导度均明显低于CK的($P < 0.05$),RW与RW-6差异显著($P < 0.05$)。

表2 不同质量浓度再生水灌溉下红壤土水力传导度值

处理	RW	RW-2	RW-4	RW-6	CK
水力传导度 $K/(cm \cdot h^{-1})$	1.402 a	1.998 ab	2.334 ab	5.164 b	11.749 c

注 相同字母表示不同浓度再生水处理后土壤之间水力传导度值差异不显著($P < 0.05$)。

2.3 再生水灌溉下红壤土水分特征曲线及模拟

分析再生水持续灌溉1 a后土壤水分特征曲线发现不同水质处理对土壤结构产生不同程度影响。如图2所示,在试验吸力变化范围内,各曲线在形态上大体平行,因此不同处理比水容量(单位基质势变化引起的含水率变化)相近,局部差异表现为不同稀释倍数对土壤结构的影响规律不同。同一吸力下,RW和RW-2处理土壤水分的吸持能力明显高于CK,RW-4和RW-6处理土壤水分的吸持能力小于CK。

采用 van Genuchten 模型拟合土壤水分特征曲线,如图2和表3所示。曲线具有很好的拟合效果,其 R^2 值均在0.996以上,残差平方和均在0.000 24以下。模型可表示为:

$$\theta(h)=\begin{cases} \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{\left(1 + |\alpha h|^n\right)^m} & h < 0 \\ \theta_s & h \geq 0 \end{cases}, \quad (3)$$

式中： θ_r 为土壤残余含水率(cm^3/cm^3)； θ_s 为土壤饱和体积含水率(cm^3/cm^3)； h 为负压(cm)； α 为进气值倒数； m 、 n 为土壤孔隙形状系数， $m=1-1/n$ 。

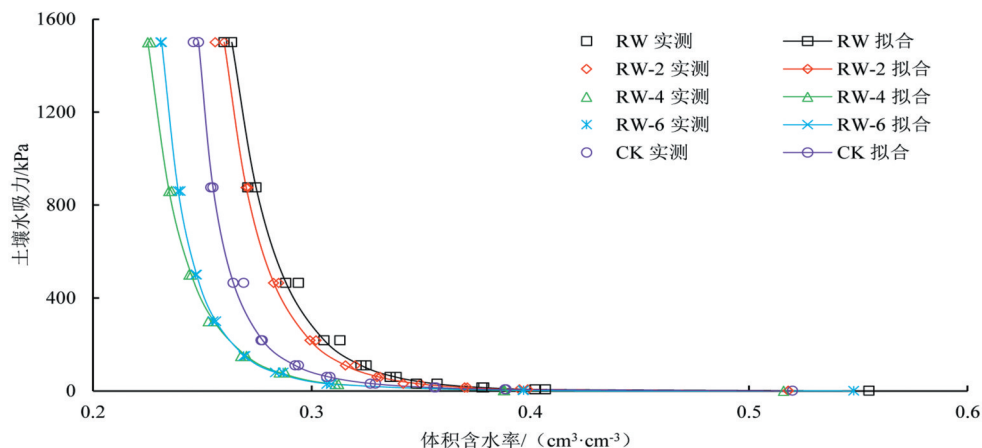


图2 红壤土水分特征曲线

由表3可知，残余含水率 θ_r 随再生水稀释倍数的提高呈增加趋势，饱和含水率 θ_s 与再生水稀释倍数无明显关系，其中RW处理最高，其次为RW-6，形状系数 n 随再生水稀释倍数增加而增大。可知不同稀释倍数再生水灌溉会不同程度地改变土壤孔隙特征，对应的水分持留能力也表现不同，其中RW以及RW-2处理会提高土壤持水能力。

表3 水分特征曲线 van Genuchten模型拟合参数

处理类型	θ_r	θ_s	α	n	残差平方和SSQ	R^2
RW	0.046 9	0.555 0	0.661 5	1.092 4	0.000 24	0.996 4
RW-2	0.107 8	0.518 1	0.270 6	1.119 1	0.000 13	0.997 5
RW-4	0.094 6	0.515 9	0.568 8	1.129 2	0.000 03	0.999 6
RW-6	0.167 4	0.548 0	0.419 7	1.203 3	0.000 02	0.999 8
CK	0.207 3	0.520 0	0.091 6	1.280 6	0.000 04	0.999 3

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_2 和毛管直径 d 的关系可表示为^[13]：

$$S_2 = 4\tau/d, \quad (4)$$

式中： τ 为水的表面张力系数，室温条件下一般取 $75 \times 10^{-5} \text{ N/cm}$ ； d 为当量孔径(mm)。若吸力 S_2 的单位为Pa，当量孔径 d 以毫米计，则当量孔径 d 与吸力 S_2 的关系可以用 $d=300/S_2$ 表示。质量浓度对当量孔径的影响可以忽略^[14]。将土壤水吸力单位换算为Pa，根据式(4)计算出当量孔径，就可反映不同处理土壤中孔隙大小的分布。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，可根据各不同质量浓度再生水处理土壤孔隙大小的分布状况，分析不同处理土壤水分特征曲线的变化。CHAUDHARI S K等^[15]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分，即凋萎系数。根据有效含水率的基质势吸力区间，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，其孔隙中所含的水量难以被植物利用^[13]。计算可得

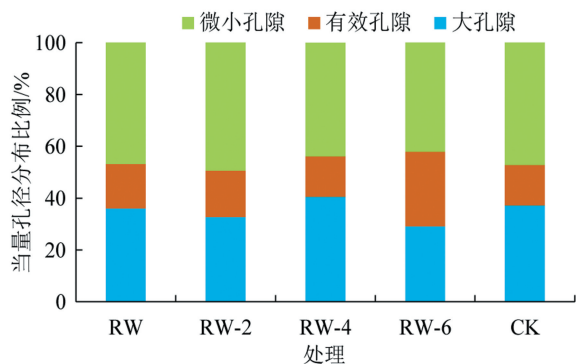


图3 红壤土当量孔径分布比例

红壤当量孔径分布状况,如图3所示。由图3可知,RW、RW-2、RW-4处理与CK处理土壤有效孔隙(当量孔径区间为0.000 2~0.009 mm)所占比例16%差异不明显,但在RW-6处理下土壤有效孔隙所占比例与CK产生有明显的差异,比CK高13%。随再生水稀释倍数增加,土壤微小孔隙所占比例有减小的趋势,说明合理稀释的再生水灌溉将使土壤形成较好的孔隙结构。

2.4 再生水灌溉下红壤土水力传导度与水分特征曲线参数的相关性分析

为了进一步分析各水力参数的关系,选取入渗指标水力传导度和红壤水分特征曲线拟合参数 θ_r 、 θ_s 、 α 、 n 及大小孔隙、有效孔隙、稀释倍数进行相关性分析,结果如表4所示。由表4可知,水力传导度与形状系数 n 极显著正相关($P<0.01$),与再生水稀释倍数和残余含水率 θ_r 显著正相关($P<0.05$),与有效孔隙正相关,与大孔隙、微小孔隙、饱和含水率 θ_s 、进气值倒数 α 负相关,但未具有显著性。说明土壤入渗特性与土壤孔隙分布、土壤入渗水质有一定关系,其中入渗水质累积灌溉作用下将使土壤孔隙结构发生改变,从而影响土壤入渗特性的变化。

表4 水力传导度与红壤土水分特征曲线参数的相关性

入渗指标	稀释倍数	大孔隙	有效孔隙	微小孔隙	θ_r	θ_s	α	n
水力传导度	0.907 [*]	-0.150	0.211	-0.180	0.932 [*]	-0.068	-0.708	0.988 ^{**}

注 *在0.05水平(双侧)上显著相关,**在0.01水平(双侧)上显著相关。

3 讨 论

本研究发现,灌溉再生水对红壤入渗能力具有减弱的作用,这不仅与再生水中含有的盐分有关,也与土壤有机质量、孔隙结构关系密切。一方面,再生水中 EC 值较高,说明含有大量的盐分离子,盐分离子对土壤的影响主要表现为黏粒的絮凝作用。长时间段的再生水灌溉,大量的盐分离子进入土壤,导致土壤的扩散双电子层向黏粒表面压缩,土壤颗粒之间的排斥力降低,这样就有助于团粒结构的形成,土壤孔隙就增多^[16]。虽然再生水有助于土壤孔隙的增加,但是主要形成的孔隙并非大孔隙。在土壤水分蒸发过程中,孔隙表面的水分会散失,导致盐分在土壤中累积,土壤中的大孔隙逐渐变小甚至堵塞,土壤导水能力自然就降低^[17]。另外一方面,随着再生水稀释倍数的减小,土壤中的 Na^+ 量是相应增加的, Na^+ 容易导致土壤分散,被分散的黏粒引起了孔隙的堵塞,这将改变土壤孔隙的大小分配,这在Bardhan等^[3]的研究中也得到了验证。并且土壤在积盐过程中,胶体表面吸附有一定数量的交换性钠,但因土壤溶液中的可溶性盐浓度较高,阻止交换性钠的水解,所以土壤的 pH 变化不大^[18]。而大量的钠离子与土壤胶体吸附的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 进行了交换,导致 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 的释放,继而与相应的阴离子形成难溶物质阻塞孔隙,对土壤的入渗起到一定的减弱作用^[12]。再者,再生水灌溉后,土壤有机质量得到提高,这对土壤团聚体的形成起到胶结作用,土壤团粒结构体数量会得到增加,假如按照李雪转等^[19]指出的“有机质量高的土壤,土壤结构状况好,中等孔隙要增多;相反,有机质量低的土壤,结构状况不好,大孔隙和小孔隙增多”的观点来说,再生水稀释倍数越小,土壤有机质量越多,土壤孔隙结构越好,对应的土壤导水性应该要较好,但是实际上却与这种观点出现偏差,可能的原因是在再生水的灌溉过程中,通过离子水化作用、土粒内空气压力、膨胀作用以及胶结物质在水中的溶解性导致了团聚体的破裂,进而使土壤孔径产生了一定的变化,对土壤孔隙结构影响明显。所以,通过土壤水分特征曲线推导出来的当量孔径并不能完全表明再生水灌溉导致了土壤孔径的增大。

4 结 论

- 1)再生水灌溉对红壤土的入渗性能具有明显的影响。不同质量浓度再生水处理的水力传导度、累积入渗量差异比较大,呈现的大小关系是: $K_{RW}<K_{RW-2}<K_{RW-4}<K_{RW-6}<K_{CK}$, $I_{RW}<I_{RW-2}<I_{RW-4}<I_{RW-6}<I_{CK}$ 。与土壤吸渗率有关的系数 S_i 值在再生水灌溉下明显高于蒸馏水灌溉,分别增长10.16%(RW)、30.51%(RW-2)、84.75%(RW-4)、98.30%(RW-6)。
- 2)稀释一定倍数的再生水可以改变红壤土的水分吸持性能。同一吸力下,RW和RW-2处理土壤水分的吸持能力明显高于CK,RW-4和RW-6处理土壤水分的吸持能力小于CK。
- 3)水力传导度与稀释倍数、土壤水分特征曲线相关参数的相关性分析表明:水力传导度与形状系数 n 呈极显著正相关关系($P<0.01$),与再生水稀释倍数和残余含水率 θ_r 呈显著正相关关系($P<0.05$),与有效孔隙正相关,与大孔隙、微小孔隙、饱和含水率 θ_s 、进气值 α 负相关。

致谢:非常感谢胡传旺师兄在论文写作上的指导和课题组同学在试验过程中给予的帮助!

参考文献:

- [1] 李竞,马红霞,郑恩峰. 再生水灌溉对园林植物叶片生理及根际土壤特性的影响[J]. 水土保持研究, 2017, 24(4):70-76.
- [2] 张云,崔树彬,胡惠方,等. 南方地区再生水利用可行性及关键问题探讨[J]. 南水北调与水利科技, 2011, 9(1):122-125.
- [3] BARDHAN G, RUSSO D, GOLDSTEIN D, et al. Changes in the hydraulic properties of a clay soil under long-term irrigation with treated wastewater [J]. Geoderma, 2016, 264:1-9.
- [4] 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.
- [5] WANG Z, CHANG A C, WU L, et al. Assessing the soil quality of long-term reclaimed wastewater-irrigated cropland[J]. Geoderma, 2003, 114(3):261-278.
- [6] 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):2 924-2 930.
- [7] 李中阳,樊向阳,齐学斌,等. 再生水灌溉对施用不同磷肥的茄子生长及品质影响[J]. 灌溉排水学报, 2014, 33(6):6-9.
- [8] 商放泽,任树梅,邹添,等. 再生水及盐溶液入渗与蒸发对土壤水盐及碱性的影响[J]. 农业工程学报, 2013, 29(14):120-129.
- [9] 杨树青,杨金忠,史海滨. 不同作物种植条件下微咸水灌溉的土壤环境效应试验研究[J]. 灌溉排水学报, 2007, 26(6):55-58,62.
- [10] 邵建荣,张凤华,董艳,等. 干旱区微咸水滴灌条件下典型土壤盐碱化影响因素研究[J]. 干旱地区农业研究, 2015, 33(6):216-221.
- [11] ZHANG R. Determination of soil sorptivity and hydraulic conductivity from the disk infiltrometer[J]. Soil Science Society of America Journal, 1997, 61(4):1 024-1 030.
- [12] 刘常,王辉,胡传旺,等. 非常规水水质对土壤水分运移参数的影响及其过程模拟[J]. 水土保持学报, 2017, 31(5):170-175.
- [13] 胡传旺,王辉,武芸,等. NaCl溶液处理亚热带土壤水分特征曲线差异与模型优选[J]. 农业机械学报, 2018, 49(4):290-296, 329.
- [14] 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.
- [15] CHAUDHARI S K, SOMAWANSHI R B. Effect of water quality on moisture retention in soil of different texture[J]. Journal Agricultural Physics, 2007, 7(1): 20-26.
- [16] 张刚,余冬立,傅瑜,等. 入渗水水质对土壤导水特性影响的试验研究[J]. 水土保持学报, 2017, 31(4):64-68.
- [17] 莫斌,陈晓燕,杨以翠,等. 不同土地利用类型土壤入渗性能及其影响因素研究[J]. 水土保持研究, 2016, 23(1):13-17.
- [18] 王全九,徐益敏,王金栋,等. 咸水与微咸水在农业灌溉中的应用[J]. 灌溉排水, 2002, 21(4):73-77.
- [19] 李雪转,樊贵盛. 土壤有机质含量对土壤入渗能力及参数影响的试验研究[J]. 农业工程学报, 2006, 22(3):188-190.

The Change in Hydraulic Conductivity of Red Soil Irrigated with Treated Wastewater

ZHU Jinbin¹, WANG Hui^{1*}, HU Chuanwang², LIU Chang¹, CHEN Xiaoyue¹

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

2.College of Resources and Environment, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China)

Abstract: 【Objective】 Soil hydraulic properties are affected by many physical and biological factors and this paper presents the results of a study on the change in hydraulic conductivity of red soil irrigated with reclaimed wastewater in subtropical region in southern China. **【Method】** The red soil was packed into columns, and each column was then irrigated with reclaimed wastewater (RW), and diluted reclaimed wastewater at 2:1 ratio (RW-2), 4:1 ratio (RW-4) and 6:1 ratio (RW-6), respectively. The control was freshwater irrigation (CK). The infiltration rate in each soil column was determined using the Mini Disk Infiltrometer, and the soil water characteristic curve was measured using the pressure plate apparatus. **【Result】** Compared to CK, irrigation with reclaimed and diluted reclaimed wastewater reduced soil hydraulic conductivity ($P<0.05$) by 12% (RW), 17% (RW-2), 20% (RW-4), and 44% (RW-6). Compared to CK, RW and RW-2 increased capacity of the soil to hold water, while RW-4 and RW-6 reduced the ability of the soil to hold water. Analysis indicated that the hydraulic conductivity was positively correlated with the van Genuchten parameters n and the residual water content θ_r ($P<0.01$), as well as the dilution level ($P<0.05$). **【Conclusion】** Irrigation with reclaimed water reduced the hydraulic conductivity of the red soil but its effect on the ability of soil to hold water depended on the dilution level, indicating that the soil pore structure can be manipulated by changing dilution level of the reclaimed water.

Key words: reclaimed water; wet and dry alternate irrigation; soil; soil water characteristic curve

责任编辑:赵宇龙