

再生水灌溉模式对潮土结构性质及导水性能的影响

胡廷飞, 王辉, 谭帅

(湖南农业大学水利与土木工程学院, 长沙 410128)

摘要: 为揭示再生水不同灌溉模式下土壤结构性质及导水性能的差异。通过室内模拟土柱入渗试验, 以清水灌溉为对照(CK), 研究了再生水持续灌溉(RW)、再生水—清水混合灌溉(RW-2)及再生水—清水交替灌溉(ARW)3种灌溉模式对土壤容重、总孔隙度、团聚体稳定性、入渗率及饱和导水率的影响。结果表明: 相比CK, 各处理容重呈降低趋势, 总孔隙度增加, 但差异均不显著; 再生水灌溉促进潮土 $>1\text{ mm}$ 粒级团聚体向 $<1\text{ mm}$ 粒级团聚体转化, 相比CK, 各处理 $<1\text{ mm}$ 粒级团聚体含量分别增长 $11.51\%\sim 31.22\%$; 潮土团聚体水稳定性降低; 各处理 $>0.25\text{ mm}$ 粒级团聚体含量分别降低 $2.92\%\sim 9.75\%$, 平均质量直径分别降低 $11.30\%\sim 38.38\%$, 几何平均直径分别降低 $3.93\%\sim 12.78\%$, 其中RW最为显著; 相关性分析表明, $>1\text{ mm}$ 粒级水稳性团聚体含量对潮土结构稳定性贡献最大; 再生水3种灌溉模式下潮土入渗率分别显著增长 $80.00\%\sim 260.00\%$; ARW处理潮土有效导水率上升 22.68% , 而RW和RW-2处理土壤有效导水率分别下降 14.47% 和 42.36% 。保持潮土结构性质方面以RW-2处理最好, 改善潮土导水能力方面则以ARW处理最为显著。

关键词: 再生水; 土壤结构; 灌溉模式; 团聚体

中图分类号: S274; S155

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2020)02-0146-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2020.02.021

Effect of Reclaimed Water Irrigation Modes on the Structural Properties and Hydraulic Conductivity of Tidal Soil

HU Tingfei, WANG Hui, TAN Shuai

(College of Water Resources and Civil Engineering, Hunan Agricultural University, Changsha 410128)

Abstract: In order to reveal the effect of the reclaimed water irrigation modes on tidal soil structural properties and water conductivity, an indoor simulated soil column infiltration experiment with four treatments as: fresh water irrigation (CK), reclaimed water irrigation (RW), mixed irrigation of fresh water and reclaimed water (RW-2), and alternative irrigation of fresh water and reclaimed water (ARW) was conducted to assess the effect of irrigation modes on soil bulk density, total porosity, aggregate stability, infiltration rate, and saturated hydraulic conductivity. The results showed that compared with CK, the bulk density of each treatment showed a decreasing trend and the total porosity increased, but the difference was not significant. Reclaimed water irrigation promoted the transformation of $>1\text{ mm}$ aggregates to $<1\text{ mm}$ aggregates in tidal soil. Compared with CK, the content of $<1\text{ mm}$ aggregates in each treatment increased by $11.51\%\sim 31.22\%$, respectively. The water stability of tidal soil aggregates decreased, the content of $>0.25\text{ mm}$ aggregates decreased by $2.92\%\sim 9.75\%$, the mean weight diameter decreased by $11.30\%\sim 38.38\%$, and the geometric mean diameter decreased $3.93\%\sim 12.78\%$, among which RW was the most significant. The correlation analysis showed that the higher the percentage of water-stable aggregates particle size bigger than 1 mm , the more stable of the soil structure. The soil water infiltration rate of tidal soil increased by $80.00\%\sim 260.00\%$ under three irrigation modes of reclaimed water. The effective water conductivity of ARW increased by 22.68% , while RW and RW-2 reduced by 14.47% and 42.36% , respectively. The best capacity of improving the structural properties of tidal soil was RW-2, while ARW was the most significant treatment for improving hydraulic conductivity of tidal soil.

Keywords: reclaimed water; soil structure; irrigation mode; aggregate

收稿日期: 2019-08-24

资助项目: 国家自然科学基金项目(41471185); 湖南省教育厅重点项目(15A084); 湖南省重点研发计划项目(2016JC2032)

第一作者: 胡廷飞(1995—), 男, 贵州盘州人, 硕士研究生, 主要从事非常规水利用与土壤斥水性研究。E-mail: 2759704595@qq.com

通信作者: 王辉(1973—), 男, 湖南古丈人, 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

再生水灌溉利用是缓解水资源短缺的重要途径^[1], 在各国水资源规划与利用中凸显出越来越重要的地位。相比常规灌溉水, 再生水中各类化学物质、悬浮固体、有机质及盐分等含量较高^[2]。各类物质随灌溉水进入土壤势必改变土壤溶液的化学组分和土壤团聚体的存在条件, 进而引起土壤结构性质的改变, 使得土壤导水性能发生变化。有研究^[3]表明, 长期再生水灌溉后, 灌溉水中固体悬浮物及各类有机质等吸附于土壤表层, 加剧地表结皮, 使得土壤容重和孔隙分布非均匀性^[4]增加, 孔隙率降低^[5-6], 从而导致土壤持水性能和导水率显著下降^[6-8]。为减轻再生水灌溉给土壤环境带来的负面效应, 研究者从灌溉频率^[9]、灌溉次数^[10]、灌溉浓度^[7,11]和灌溉模式^[12-13]等方面进行了深入探讨, 关于再生水灌溉对土壤理化性质^[5,8-9]、水力特性^[7-8]、土壤微生物^[14-15]及作物生长^[3,13]等方面的影响研究也取得了较好的成果, 但研究区域多集中于我国干旱半干旱地区。随着南方地区社会经济发展和节水城市建设理念的推行, 再生水的利用在中国亚热带地区受到越来越多的重视, 研究再生水灌溉模式对潮土结构性质及导水性能的影响对提高南方地区再生水利用率具有重要意义。但有关亚热带地区再生水灌溉对土壤结构及导水性能的影响研究鲜见报道, 其灌溉次数、灌溉浓度、灌溉模式等系列问题的不明确也在一定程度上限制了再生水的资源化利用。为此, 本文采用再生水进行模拟灌溉试验, 以清水灌溉为对照, 分析再生水不同灌溉模式(再生水持续灌溉、再生水—清水混合灌溉及再生水—清水交替灌溉)下潮土结构指标及导水性能的差异, 以期对再生水资源化利用及生态风险管控提供一定的理论依据和技术支持。

1 材料与方法

1.1 供试材料

试验土壤为中国亚热带区域内代表性的潮土, 采自湖南省东北部的岳阳市(29°03′22″N, 113°00′46″E)。取表层 0—20 cm 土壤运回实验室经自然风干、碾碎、过筛(2 mm)混合均匀后备用。其中黏粒、粉粒和砂粒占比(质量分数)分别为 38.00%, 47.00%和 15.00%, 根据国际制土壤质地分级标准可知, 土壤质地为粉黏土; 土壤初始 pH 为 5.69, 电导率(EC)为 157.05 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 。灌溉 1 年潮土基本理化性质见表 1。

试验灌溉用水取自长沙市花桥污水处理厂, 污水处理采用 A2/O 处理工艺, 日处理能力 9.57 万 m^3 。经处理后的污水水质符合国家《城市污水再生利用农田灌溉用水水质 GB 20922—2007》和《农田灌溉水质标准 GB 5084—2005》。其 pH 为 7.60 ± 0.02 , EC 为 $1\,000.13 \pm 134.75 \mu\text{S}/\text{cm}$, SO_4^{2-} 、 Cl^- 、 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、

Mg^{2+} 分别为 37.51 ± 4.67 , 38.20 ± 6.80 , 6.12 ± 1.22 , 20.58 ± 2.38 , 7.95 ± 0.27 , $5.61 \pm 0.53 \mu\text{g}/\text{L}$, SAR 为 7.92 ± 1.04 , TN、TP、TSS 和 COD 分别为 3.92 ± 1.01 , 0.79 ± 0.52 , 4.80 ± 1.02 , $39.80 \pm 7.68 \text{ mg}/\text{L}$ 。

表 1 再生水灌溉 1 年后潮土基本理化性质

灌溉模式	EC/ ($\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$)	pH	有机质质量分数/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)
CK	$34.81 \pm 4.36\text{a}$	$5.93 \pm 0.11\text{a}$	$15.65 \pm 1.41\text{a}$
RW	$123.20 \pm 27.31\text{c}$	$5.96 \pm 0.16\text{a}$	$20.11 \pm 1.75\text{b}$
RW-2	$84.32 \pm 15.47\text{b}$	$5.96 \pm 0.16\text{a}$	$17.92 \pm 0.93\text{b}$
ARW	$72.67 \pm 6.26\text{b}$	$5.95 \pm 0.14\text{a}$	$20.44 \pm 2.37\text{b}$

注:表中数据为平均值±标准差;同列不同小写字母表示不同处理间差异显著($p < 0.05$)。

1.2 试验设计

考虑到灌溉过程中降雨的介入, 且理想状态下雨水为纯净水, 因此试验采用蒸馏水灌溉作为对照(CK)。为揭示再生水不同灌溉模式下土壤结构性质及导水性能的差异, 探寻一种对潮土结构性质及水力学性能改善较好的再生水灌溉模式。试验设置再生水持续灌溉(RW), 再生水—清水混合灌溉(RW-2)和再生水—清水交替灌溉(ARW)等 3 种灌水模式。其中, RW-2 为利用蒸馏水将再生水稀释 2 倍后灌溉; ARW 为第 1 次采用再生水灌溉, 下次采用蒸馏水灌溉, 两者依次交替进行。

试验于 2017 年 3 月至 2018 年 10 月在湖南农业大学灌溉排水工程实验室进行。试验土柱由直径 26 cm、高 32 cm 的圆形培养桶制成, 桶底均匀分布直径 5 mm 的渗水小孔以避免空气封闭和让多余的水流出。装土前在桶底铺设 2 层直径 1 mm 的纱网, 而后均匀装填 5 cm 石英砂过滤层, 过滤层表面铺设 1 层直径 1 mm 纱网。按 $1.20 \text{ g}/\text{cm}^3$ 的设计容重分层(5 cm)装填土柱, 层与层之间采用毛刷进行打毛处理, 装填高度为 17 cm。土柱装填完毕后, 每个土柱分别采用 6 L 蒸馏水进行初灌, 灌水时在土壤表面放置防冲滤网, 防止灌水过程中对培养桶中的土壤造成冲刷作用。灌水后 24 h 内堵塞培养桶底孔以保证试验土样充分饱和, 而后打开培养桶底孔将土柱自然风干。试验过程中所有土柱均采用避雨措施, 防止自然降雨对试验造成干扰。

用于控制灌水下限的指标主要有土壤含水量和土水势。试验随机选取 6 个土柱埋设张力计, 张力计埋在土柱中部、埋深为 10 cm。试验根据张力计测定的土水势控制土柱灌水下限。试验土壤含水量达到田间持水量时张力计读数为 10~35 kPa, 土壤含水量低于田间持水量的 60% 已为轻度干旱, 一般将此含水量作为灌溉的起点, 因此, 每次当张力计读数为 80~100 kPa 时即进行灌水。每次灌水均测定土壤稳定入渗率, 当前后 3 次土柱稳定入渗率均小于 5%

时,认为土壤结构基本稳定,终止灌水试验。灌溉持续时间 1 年,每次灌水量均为 6 L,共灌溉 8 次,单个土样灌水定额 48 L。每个处理重复 3 次。灌水试验终止后,将土柱自然风干两星期左右。各个处理均采用环刀分层(0—5,5—10,10—15 cm,简称为上层、中层和下层)取样,每层取 4 个原状土样用于土壤容重和饱和导水率的测定,其他原状土样充分混合后形成 1 个复合样品用于土壤团聚体测定。

1.3 测试项目与方法

1.3.1 土壤容重 采用环刀法测定土壤容重。利用公式(1)计算各处理间土壤孔隙度,土壤比重采用均值 2.67 g/cm^3 计算。

$$f = (1 - \frac{\rho_b}{\rho_s}) \times 100\% \quad (1)$$

式中: f 为土壤孔隙度(%); ρ_b 为土壤容重(g/cm^3); ρ_s 为土壤比重(g/cm^3)。

1.3.2 土壤团聚体组成与稳定性 采用干筛法进行预筛。取 200 g 土样用震击式标准振筛机(ZBSX—92A 型,孔径依次为 5,2,1,0.5,0.25 mm)在最大功率下振荡 5 min 后,分别得到粒径 >5 , $2 \sim 5$, $1 \sim 2$, $0.5 \sim 1$, $0.25 \sim 0.5$ 和 $<0.25 \text{ mm}$ 等 6 个级别土粒,称量各粒级土样质量。根据干筛法测定的团聚体比例,称取 50 g 土样,采用湿筛法测定团聚体水稳定性^[16],用土壤团粒分析仪(FT—3 型,孔径依次为 5,2,1,0.5,0.25 mm)以 30 次/min 频率振荡 10 min,将各粒级土样置于烘箱中烘干并称重。利用公式(2)和公式(3)分别计算各粒级团聚体及大团聚体($R_{0.25}$)百分含量,利用公式(4)和公式(5)计算土壤团聚体平均质量直径(MWD)和几何平均直径(GMD)^[16]。

$$W_i = M_i / \sum_{i=1}^n M_i \times 100\% \quad (2)$$

式中: W_i 为各粒级团聚体百分含量(%); M_i 为各粒级团聚体烘干土质量(g)。

$$R_{0.25} = M_{r>0.25} / \sum_{i=1}^n M_i \quad (3)$$

式中: $M_{r>0.25}$ 为粒径 $>0.25 \text{ mm}$ 团聚体烘干土质量(g)。

$$\text{MWD} = \sum X_i \times W_i \quad (4)$$

$$\text{GMD} = \exp \left[\sum_{i=1}^n M_i \lg X_i / \sum_{i=1}^n M_i \right] \quad (5)$$

式中: X_i 为各粒级团聚体平均直径(mm)。

1.3.3 土壤入渗率 参考双环法测定土壤入渗率,圆形培养桶对水流的约束作用消除了入渗过程中的侧向渗流,此时培养桶作用类似于内环。使用游标卡尺和秒表记录某一时段入渗水量,利用公式(6)计算土壤入渗率。

$$f(t) = \frac{Q}{At} \quad (6)$$

式中: $f(t)$ 为入渗率(cm/min); Q 为入渗水量(cm^3); A

为土柱横截面积(cm^2); t 为入渗时间(min)。

1.3.4 土壤饱和导水率 采用定水头渗透法测定。根据公式(7)计算不同土层土壤饱和导水率,根据公式(8)计算土壤有效导水率。

$$K_s = \frac{Q}{At} \cdot \frac{L}{\Delta H} \quad (7)$$

式中: K_s 为土壤饱和导水率(cm/min); ΔH 为水头高度(cm); L 为土壤厚度(cm)。

$$K_{\text{eff}} = \frac{L}{\frac{L_1}{K_1} + \frac{L_2}{K_2} + \dots + \frac{L_m}{K_m}} \quad (8)$$

式中: K_{eff} 为土壤有效饱和导水率(cm/min); K_j ($j = 1, 2, \dots, m$) 为第 j 层土壤饱和导水率(cm/min); L_j ($j = 1, 2, \dots, m$) 为第 j 层土壤厚度(cm); L 为土壤总厚度(cm)。

1.4 试验数据处理

利用 Excel 软件绘制图表。通过 SPSS 22.0 统计软件运用 LSD 法对不同处理间的差异显著性进行分析,显著性检验设定为 $p < 0.05$,采用 Pearson 方法对土壤水稳性团聚体参数进行相关性分析。表中数据为平均值土标准差。

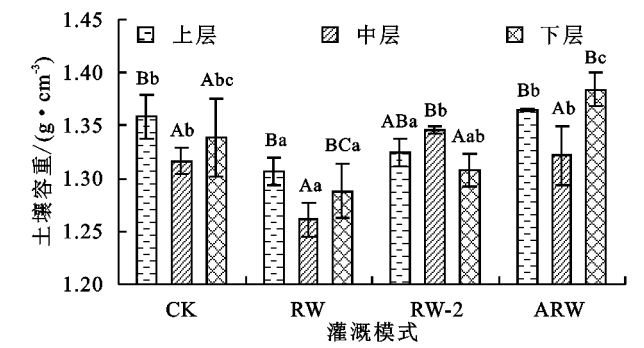
2 结果与分析

2.1 再生水灌溉模式对潮土容重和孔隙度影响

2.1.1 再生水灌溉模式对潮土容重的影响 再生水 3 种灌溉模式下潮土容重变化明显(图 1)。从土层深度看,CK、RW 和 ARW 处理潮土容重均表现为上、下层高,中层低,RW—2 则相反。各处理中层潮土容重与上、下层差异性均显著($p < 0.05$),上层与下层差异不显著。从灌溉模式看,CK、RW、RW—2 和 ARW 处理土柱 0—15 cm 平均容重分别为 1.34, 1.29, 1.33, 1.36 g/cm^3 , RW 处理最低,相比初始容重(1.20 g/cm^3),多次灌溉后各处理平均容重分别增长 11.67%, 7.50%, 10.83% 和 13.33%。说明多次灌溉使得潮土容重增加,土柱变得紧实。相比 CK,各处理潮土平均容重呈降低趋势,其中以 RW 处理最为明显,降低 3.88%,但差异性不显著。

2.1.2 再生水灌溉模式对潮土总孔隙度的影响 3 种灌溉模式下潮土总孔隙度随土层变化特征与容重呈相反趋势(图 2)。CK、RW 和 ARW 处理潮土总孔隙度表现为上、下层低,中层高,RW—2 则相反。各处理中层总孔隙度与上、下层差异性均显著($p < 0.05$),上层与下层之间差异不显著。从灌溉模式看,CK、RW、RW—2 和 ARW 处理土柱 0—15 cm 平均总孔隙度分别为 49.90%, 51.86%, 50.34% 和 49.18%, ARW 处理最低,相比土壤初始总孔隙度(55.06%),各处理总孔隙度分别降低 10.33%, 6.16%, 9.37% 和 11.95%。相比 CK, RW 处

理潮土平均总孔隙度呈增加趋势(上升 3.93%),ARW 处理则降低 1.47%,但差异性均不显著。



注:图中不同大写字母表示同一处理不同土层差异显著($p < 0.05$);不同小写字母表示相同土层不同处理差异显著($p < 0.05$)。下同。

图 1 再生水不同灌溉模式下潮土容重特征

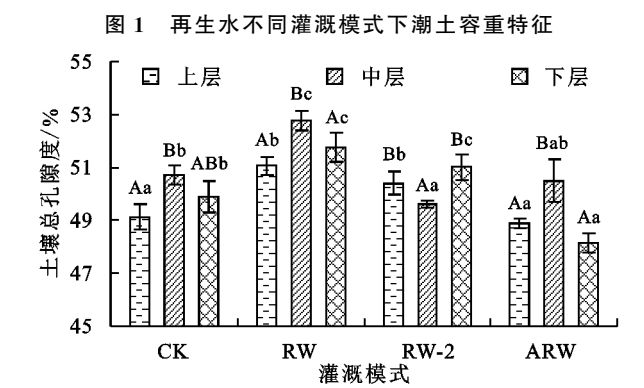


图 2 再生水不同灌溉模式下潮土总孔隙度

2.2 再生水灌溉模式对潮土团聚体特征影响

2.2.1 不同灌溉模式下潮土团聚体组成 土壤水稳性团聚体含量反映土壤潜在的抗蚀能力。从图 3 可以看出,CK、RW、RW-2 和 ARW 处理下水稳性团聚体均以 <1 mm 粒级团聚体为主,3 个土层不同灌溉模式下 <1 mm 粒级团聚体总量分别为 53.07%~66.90%, 69.04%~87.83%, 67.11%~69.81% 和 68.97%~75.63%,相比 CK,0—15 cm 土层 <1 mm 粒级团聚体含量分别增长 31.22%,11.51%和 18.08%。方差分析表明,相比 CK, <1 mm 粒级团聚体含量除 RW 处理差异显著外($p < 0.05$),RW-2 和 ARW 处理均无显著差异。

图 3 和表 2 反映了 3 种灌溉模式下潮土 $R_{0.25}$ 特征。从土层深度看,相比上层土壤,CK 处理中层土壤 $R_{0.25}$ 增长 3.58%,下层降低 1.97%;RW 和 ARW 处理 $R_{0.25}$ 随土层深度增加分别增长 12.71%~20.09%和 27.98%~29.12%。而 RW-2 处理 $R_{0.25}$ 随土层深度增加分别下降 0.03%~3.45%;方差分析表明,CK 和 RW-2 处理上、中、下层 $R_{0.25}$ 均无显著差异;ARW 和 RW 处理上层土壤 $R_{0.25}$ 与中、下层之间差异显著($p < 0.05$)。这表明 CK 和 RW-2 处理下,0—15 cm 土壤剖面 >0.25 mm 粒级水稳性团聚体分布较为均匀,ARW 和 RW 处理增加了潮土结构的不均匀性。从灌溉模式看,0—15 cm 土层中,

RW、RW-2 和 ARW 处理 $R_{0.25}$ 平均值相比 CK 分别降低 5.51%,2.92%和 9.75%,除 ARW 处理差异显著($p < 0.05$)外,其他处理差异性均不显著。表明在再生水灌溉背景下潮土 >0.25 mm 粒级水稳性团聚体含量有减少的趋势,减少程度表现为 $ARW > RW > RW-2$ 。

2.2.2 不同灌溉模式下潮土团聚体水稳定性 从表 2 可以看出,3 种灌溉模式下潮土 MWD 和 GMD 存在差异。从土层深度来看,与上层土壤 MWD 相比,CK 和 RW-2 处理随土层深度增加分别降低 19.80%~24.69%和 10.80%~15.85%,RW 和 ARW 处理分别增长 5.82%~55.75%和 18.58%~20.61%。各处理不同土层之间 MWD 差异性均显著($p < 0.05$)。与上层土壤 GMD 相比,CK、RW 和 ARW 处理土壤 GMD 分别增长 0.37%,10.06%~24.84%和 13.94%~16.34%,RW-2 处理中、下层则分别降低 3.35%和 5.95%。除 CK 处理不同土层 GMD 无显著差异外,其他处理不同土层之间差异均显著($p < 0.05$)。从灌溉模式看,0—15 cm 土层各处理 MWD 和 GMD 平均值均表现为 $CK > RW-2 > ARW > RW$,相比 CK,各处理 MWD 依次降低 11.30%,22.95%和 38.38%,GMD 分别降低 3.93%,9.79%和 12.78%。方差分析表明,除 RW-2 处理 MWD 和 GMD 相比 CK 无显著差异外,其他处理差异性均显著($p < 0.05$)。

2.2.3 不同灌溉模式下潮土团聚体组成与稳定性的相关性分析 为评价土壤团聚体数量组成对土壤结构稳定性的贡献,对土壤水稳性团聚体各参数进行相关性分析(表 3)。 <0.25 mm 粒级水稳性团聚体含量与 MWD、GMD 和 $R_{0.25}$ 均呈极显著负相关($p < 0.01$), >1 mm 粒级水稳性团聚体含量与 MWD、GMD 和 $R_{0.25}$ 均呈极显著正相关($p < 0.01$),这表明 >1 mm 粒级水稳性团聚体含量对土壤结构稳定性的贡献最大。MWD、GMD 和 $R_{0.25}$ 之间均呈极显著正相关($p < 0.01$),表明 MWD、GMD 和 $R_{0.25}$ 等 3 项指标在表征土壤团聚体水稳性的过程中具有一致性,当土壤 $R_{0.25}$ 升高时,土壤水稳性团聚体的稳定性指标 MWD 和 GMD 增大;反之,MWD 和 GMD 则减小。

2.3 潮土入渗率和饱和导水率变化

2.3.1 潮土入渗率演变特征 模拟灌溉试验开始前,每个土柱均用定量蒸馏水进行初灌,初始状态一致。多次灌水后,潮土入渗率迅速衰退,后随灌水量增加逐渐趋于稳定(图 4)。第 1 次灌水后,各处理潮土入渗率相比前一状态入渗率分别衰减 15.70%~72.40%,其中以 RW-2 处理最为明显;第 2 次灌水后,各处理入渗率分别衰减 48.90%~88.10%,其中以 CK 处理最为显著。第 6 次灌水后,CK、RW 和 RW-2 处理入渗率趋于稳定,分别为 0.005,0.009,0.014 mm/min。ARW 处理入渗率呈“W 形”周期性

变化,再生水入渗时,潮土入渗率降低,清水入渗时,入渗率增加,两者交替出现,其平均入渗率最高,为 0.018 mm/min。相比 CK,入渗率趋于稳定时,RW、

RW-2 和 ARW 处理入渗率分别显著增长 80.00%, 180.00%和 260.00%,表明再生水灌溉条件下潮土入渗率增加,且 ARW 处理增长幅度最大。

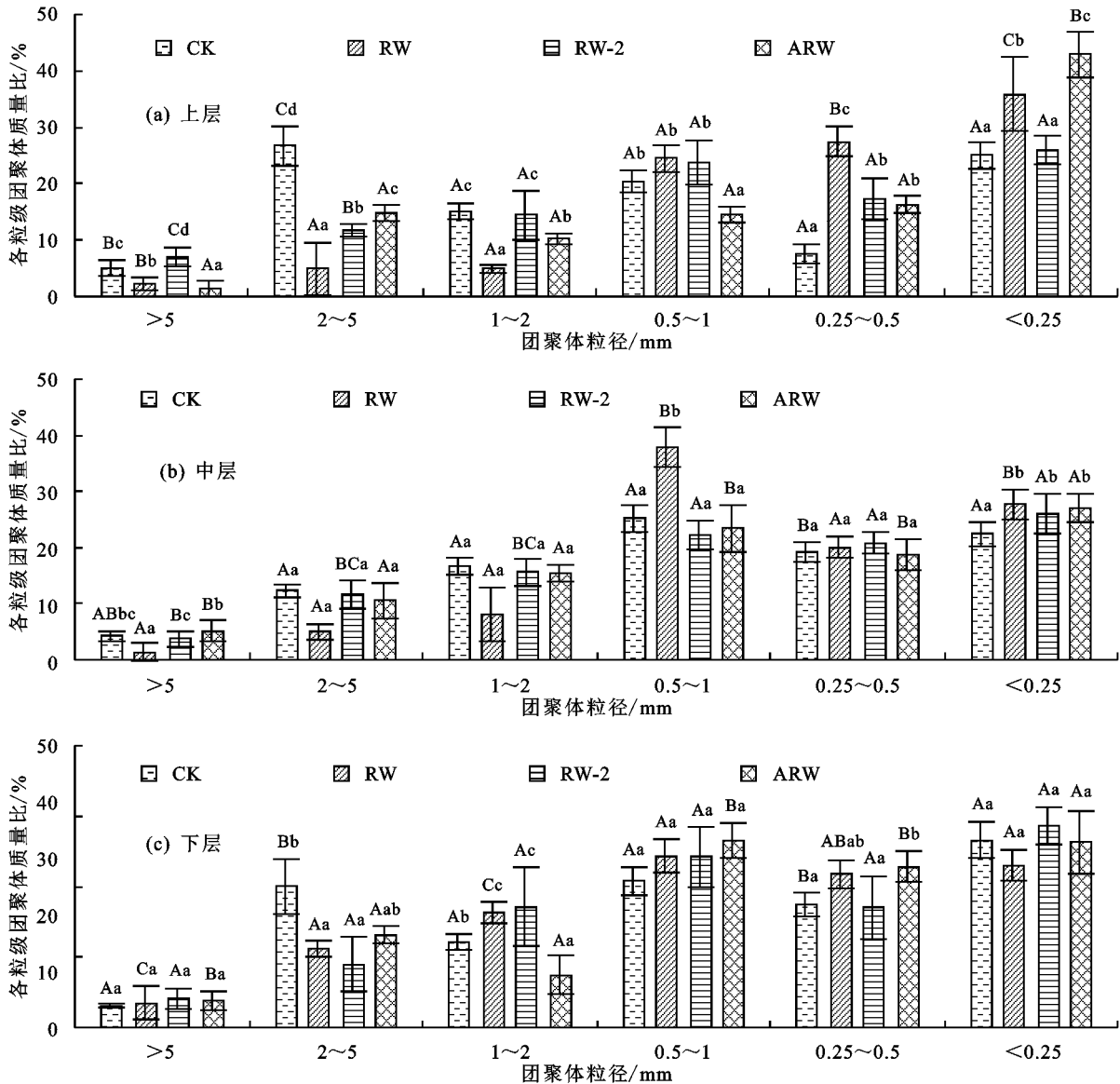


图 3 再生水不同灌溉模式下不同土层各粒级潮土水稳性团聚体含量

表 2 不同灌溉模式下潮土团聚体 MWD、GMD 和 $R_{0.25}$

土层	灌溉	平均质量直径	几何平均直径	
深度	模式	MWD/mm	GMD/mm	$R_{0.25}$
上层	CK	1.697 ± 0.04Bd	0.812±0.01Ab	74.892 ± 3.23Ac
	RW	0.739 ± 0.01Aa	0.636±0.01Aa	64.130 ± 2.29Ab
	RW-2	1.407 ± 0.03Cc	0.807±0.02Bb	73.955 ± 3.65Ac
	ARW	0.985 ± 0.04Ab	0.667±0.02Aa	57.085 ± 4.92Aa
中层	CK	1.278 ± 0.15Ab	0.815±0.02Ac	77.570 ± 0.00Ab
	RW	0.782 ± 0.05Aa	0.700±0.00Ba	72.280 ± 2.64Ba
	RW-2	1.255 ± 0.01Bb	0.780±0.01ABb	73.930 ± 0.27Aa
	ARW	1.188 ± 0.13Bb	0.776±0.02Bb	73.055 ± 0.36Ba
下层	CK	1.361 ± 0.13Aa	0.815±0.07Aa	73.415 ± 8.63Aa
	RW	1.151 ± 0.01Ba	0.794±0.04Ca	77.015 ± 0.12Ca
	RW-2	1.184 ± 0.15Aa	0.759±0.00Aa	71.405 ± 1.46Aa
	ARW	1.168 ± 0.06Ba	0.760±0.00Ba	73.715 ± 0.17Ba

注:同列不同大写字母表示同一处理不同土层差异显著($p<0.05$);
同列不同小写字母表示相同土层不同处理差异显著($p<0.05$)。

2.3.2 潮土饱和导水率变化特征 再生水 3 种灌溉模式下潮土饱和导水率变化特征见图 5。从土层深度看,RW 处理饱和导水率随土层深度增加而增加,下层饱和导水率最大,相比上,中层差异性显著($p<0.05$);RW-2 和 ARW 处理均以上层土壤饱和导水率最大,且与中、下层相比差异性均显著($p<0.05$);而 CK 处理饱和导水率最大值出现在中层,相比上、下层差异性显著($p<0.05$)。从灌溉模式看,0—15 cm 土层中,相比 CK,RW 和 RW-2 处理土壤有效导水率分别下降 14.47%和 42.36%,ARW 处理则上升 22.68%。方差分析表明,除 RW-2 处理差异性显著外($p<0.05$),其他处理差异均不显著。

3 讨论

相比 CK,再生水 3 种灌溉模式下潮土容重呈减

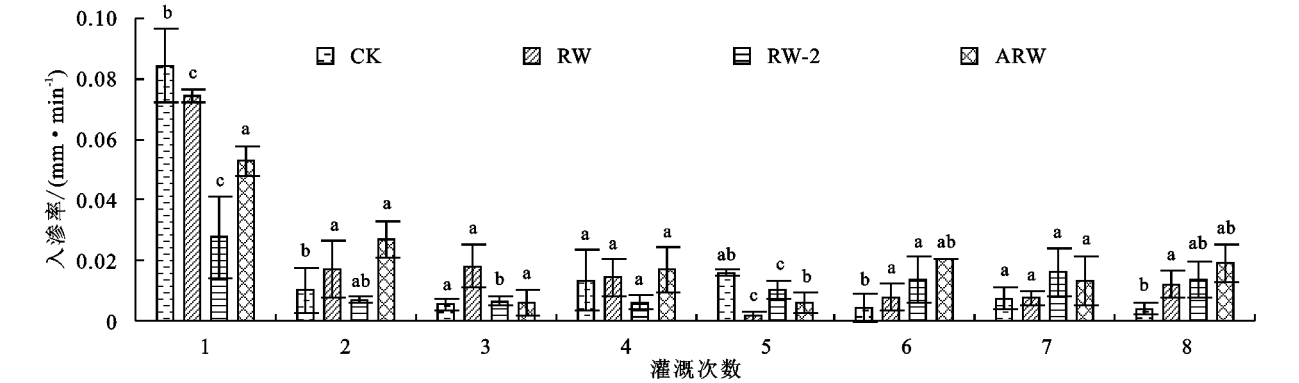
小趋势(图 1),总孔隙度增加(图 2),表明再生水灌溉可改善土壤通气状况和透水性能,这与多数研究^[5]相似。这主要与潮土有机质质量分数有关,再生水中含有较高浓度的悬浮物及有机质等,灌溉时给土壤输入一定量的有机碳源,使得再生水 3 种灌溉模式下潮土有机质质量分数显著增长(表 1)。而土壤有机质是形成土

壤团聚体的重要胶结物质,土壤中有有机碳质量分数增长会促进土壤较大粒级团聚体的形成^[17],使得再生水 3 种灌溉模式下潮土容重降低。其次,再生水中的悬浮无机固体及有机质等随灌溉水进入土壤,在地表和土壤孔隙中沉淀累积形成一层致密的不(难)透土层^[6],使得上层土壤孔隙度减小和容重增大。

表 3 各粒级水稳性团聚体百分含量与稳定性的相关性分析

项目	>5 mm	2~5 mm	1~2 mm	0.5~1 mm	0.25~0.5 mm	<0.25 mm	$R_{0.25}$	MWD	GMD
>5 mm	1	0.183	0.508**	-0.138	-0.237	-0.478**	0.478**	0.725**	0.632**
2~5 mm		1	0.177	-0.482**	-0.674**	-0.124	0.124	0.774**	0.555**
1~2 mm			1	-0.230	-0.427*	-0.473**	0.471**	0.575**	0.643**
0.5~1 mm				1	0.263	-0.497**	0.498**	-0.315	0.039
0.25~0.5 mm					1	0.020	-0.019	-0.636**	-0.430*
<0.25 mm						1	-1.000**	-0.526**	-0.827**
$R_{0.25}$							1	0.525**	0.827**
MWD								1	0.873**
GMD									1

注: * 表示 $p<0.05$ 水平上差异显著; ** 表示 $p<0.0$ 水平上差异显著; $N=36$ 。



注: 正式试验时, ARW 第 1 次灌水采用再生水浇灌。

图 4 再生水不同灌溉模式下潮土入渗率演变特征

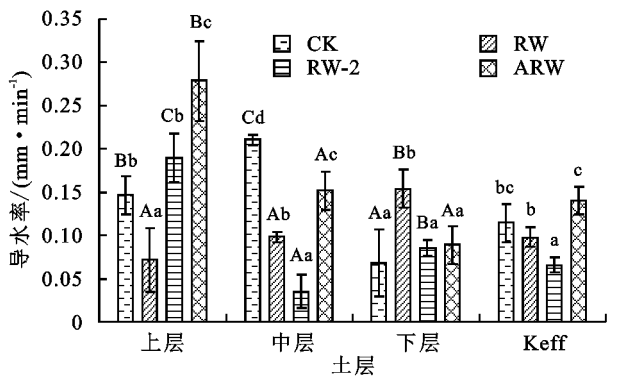


图 5 再生水不同灌溉模式下潮土饱和导水率及有效导水率
土壤颗粒的大小和分布状况决定土壤结构的优劣。图 3 和表 2 可以看出,再生水灌溉影响潮土水稳性团聚体含量及粒径组成,使得潮土结构性质发生改变。相比 CK, RW、RW-2 和 ARW 处理下潮土<1 mm 粒级团聚体含量均呈现不同程度增长趋势,且 RW 处理差异性显著($p<0.05$)。这主要与土壤盐分含量有关。盐分进入土壤会作用于土壤团聚体胶结

物质,使得胶结剂发生糊化由凝胶变为溶胶,土壤胶结剂被软化溶解后,土壤团聚体遭到破坏,水稳性降低;当盐离子与土壤胶结剂反应过程结束后,继续与土壤黏粒发生水化膨胀作用,引起土柱不平衡膨胀和收缩,使得团聚的土壤颗粒之间被撕裂,造成潮土较小粒级团聚体含量增加。由表 1 可知,相比 CK,再生水 3 种灌溉模式下潮土 EC 值分别显著增长 40.19%~253.91%, RW、RW-2 和 ARW 处理中较高的盐分含量会导致潮土结构破坏,促进潮土较大粒级团聚体(>1 mm)向较小粒级团聚体(<1 mm)转化,使得 3 种灌溉模式下潮土<1 mm 粒级团聚体含量增长。相关性分析表明,>1 mm 粒级水稳性团聚体含量与 GMD 和 MWD 呈极显著正相关($p<0.01$),这与韩新生等^[18]研究结果相似,表明提高潮土>1 mm 粒级水稳性团聚体含量有利于提高潮土结构稳定性和抗侵蚀能力。

多次灌水后,潮土入渗率迅速衰退,后随灌水的次

数增加逐渐趋于稳定(图 4)。这主要受潮土容重变化的影响,相比初始状态,多次灌水促进潮土较大粒级团聚体($>1\text{ mm}$)向较小粒级团聚体($<1\text{ mm}$)转化,使得潮土容重相比初始容重增长 $7.50\%\sim 13.33\%$,导致潮土入渗率迅速衰退。随灌水次数增加,潮土容重趋于稳定,第 8 次灌水后,再生水 3 种灌溉模式下潮土容重均小于 CK 处理(图 1),使得 RW、RW-2 和 ARW 处理下入渗率显著增长(图 4)。有研究^[5]表明,土壤容重越小,孔隙度越高,饱和导水率越大,由图 1、图 2 和图 5 可以看出,ARW 处理与前人研究结果相似,但 RW 和 RW-2 处理土壤容重降低,总孔隙度增加,有效饱和导水率却分别降低 14.47% 和 42.36% 。除土壤容重和孔隙度外,土壤有机质、水稳性大团聚体、粉粒和黏粒含量等都可能成为影响饱和导水率的主要因素^[19]。多种因素共同作用可能导致 RW 和 RW-2 处理饱和导水率发生变化,其具体原因有待进一步深入研究。

4 结论

(1)相比初始状态,多次灌水使得潮土容重分别增加 $7.50\%\sim 13.33\%$,总孔隙度降低 $6.16\%\sim 11.95\%$ 。相比 CK,再生水灌溉降低潮土容重,使得潮土总孔隙度增加,但差异性均不显著。

(2)再生水灌溉促进潮土 $>1\text{ mm}$ 粒级团聚体向 $<1\text{ mm}$ 粒级团聚体转化,降低潮土团聚体水稳定性。其中以 RW 处理最为显著($p<0.05$)。相关性分析表明, $>1\text{ mm}$ 粒级水稳性团聚体含量对潮土结构稳定性的贡献最大。

(3)再生水 3 种灌溉模式均能促进潮土水分入渗,且以 ARW 处理最为显著。ARW 处理潮土有效导水率上升 22.68% ,而 RW 和 RW-2 处理有效导水率分别降低 14.47% 和 42.36% 。保持潮土结构性方面以 RW-2 处理最好,改善潮土导水能力方面则以 ARW 处理最为显著。

参考文献:

- [1] Lu S B, Wang J H, Liang P. Study on the effects of irrigation with reclaimed water on the content and distribution of heavy metals in soil[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2016, 13 (3):298-307.
- [2] Sou M Y, Mermoud A, Yacouba H, et al. Impacts of irrigation with industrial treated wastewater on soil properties[J]. Geoderma, 2013, 200/201(6):31-39.
- [3] 王志超,史海滨,李仙岳,等.回填土下再生水灌溉对玉米生长及土壤理化性质的影响[J].水土保持学报,2016, 30(1):196-202,277.
- [4] 管孝艳,杨培岭,李柳,等.长期再生水灌溉后土壤孔隙分布的多重分形特征[J].排灌机械工程学报,2018,36 (11):1163-1167.
- [5] Al Omron A M, El-Maghraby S E, Nadeem M E A, et al. Long term effect of irrigation with the treated sewage effluent on some soil properties of Al-Hassa Governorate, Saudi Arabia[J]. Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences, 2012, 11(1):15-18.
- [6] Bedbabis S, Rouina B B, Boukhris M, et al. Effect of irrigation with treated wastewater on soil chemical properties and infiltration rate[J]. Journal of Environmental Management, 2014, 133:45-50.
- [7] 刘常,王辉,胡传旺,等.非常规水水质对红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.
- [8] 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 (A):1-9.
- [9] 盛丰,张敏,薛如霞,等.灌溉水中盐分对土壤结构性及水流运动特征的影响[J].水利学报,2019,50(3):346-355.
- [10] 商艳玲,李毅,朱德兰.再生水灌溉对土壤斥水性的影响[J].农业工程学报,2012,28(21):89-97.
- [11] 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.
- [12] 胡廷飞,王辉,胡传旺,等.灌溉水质和灌水方式对红壤斥水性及其理化性质的影响[J].排灌机械工程学报, 2018,36(8):651-655,661.
- [13] 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.
- [14] 郭魏,齐学斌,李平,等.不同施氮水平下再生水灌溉对土壤细菌群落结构影响研究[J].环境科学学报,2017, 37(1):280-287.
- [15] 崔丙健,高峰,胡超,等.不同再生水灌溉方式对土壤—辣椒系统中细菌群落多样性及病原菌丰度的影响[J/OL].环境科学:1-17[2019-07-15].
- [16] Hillel D. Environmental soil physics[M]. Academic Press, 1998:284-284.
- [17] 王子龙,胡斐南,赵勇钢,等.土壤胶结物质分布特征及其对黄土大团聚体稳定性的影响[J].水土保持学报, 2016,30(5):331-336.
- [18] 韩新生,马璠,郭永忠,等.土地利用方式对表层土壤水稳性团聚体的影响[J].干旱区资源与环境,2018,32 (2):114-120.
- [19] Fu T, Chen H, Zhang W, et al. Spatial variability of surface soil saturated hydraulic conductivity in a small karst catchment of southwest China[J]. Environmental Earth Sciences, 2015, 74(3):2381-2391.