文章编号: 1672 - 3317 (2024) 02 - 0001 - 07

微咸水灌溉下粉垄耕作土壤水盐运移特性

朱成立¹,杨花蕾¹,冯根祥^{1*},韩莉²,王策¹,翟亚明¹,冯宝平¹,赵涛¹ (1.河海大学 农业科学与工程学院,南京 210098: 2.徐州市水利工程建设管理中心, 江苏 徐州 221000)

摘 要:【目的】明确微咸水灌溉条件下粉垄耕作土壤水分入渗规律及水盐运移特征。【方法】基于室内土箱试验, 分析 3 种微咸水矿化度(0 g/L(S1)、3 g/L(S2)和 5 g/L(S3))和 2 种耕作(粉垄耕作(FL)和传统翻耕 (FG))条件下的土壤水分入渗特征和水盐运移规律。【结果】水分平均入渗速率和垂直湿润锋推进速率随着微 咸水矿化度的升高呈先增大后减小的变化趋势,水平湿润锋运移速度随着微咸水矿化度的升高而持续增加。FL 处理下的土壤水分入渗速率、湿润锋推进速率相比 FG 处理有明显提升。Kostiakov 模型可较好地拟合 2 种耕作措施 下的土壤累积入渗量与入渗时间之间的关系(R²>0.99)。灌溉后 20 d, FL 处理下的土壤含水率均小于相同微咸水 矿化度下的 FG 处理:同一耕作措施下,土壤含水率随着微咸水矿化度的升高而增加。【结论】微咸水灌溉与粉垄 耕作对土壤水分入渗、土壤湿润锋运移和土壤水盐再分布具有改善作用。与灌溉前相比,灌溉后 20 d, FL 处理下 的土壤平均脱盐率为 42.95%~55.98%, 而 FG 处理下的土壤平均脱盐率为 32.34%~43.29%。随着矿化度的增加, FL 处理下的平均土壤电导率相比 FG 处理分别下降 22.38%、18.54%和 15.68%。

关键词:微咸水灌溉;粉垄耕作;土壤水分入渗;土壤水盐动态

中图分类号: S156.4+2

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2023272



朱成立, 杨花蕾, 冯根祥, 等. 微咸水灌溉下粉垄耕作土壤水盐运移特性[J]. 灌溉排水学报, 2024, 43(2): 1-7.

ZHU Chengli, YANG Hualei, FENG Genxiang, et al. Effect of vertically rotary sub-soiling tillage and saline water irrigation on water and salt movement in soil[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2024, 43(2): 1-7.

0 引言

【研究意义】随着人地矛盾的日益突出,开发 利用盐碱地已成为保障我国粮食安全的重要途径[1]。 经长期淋洗改良后, 盐碱土含盐量可得到有效降低, 但同时也会导致土壤板结。研究表明,对淋洗改良 后的盐碱土进行深松耕有助于调节土壤水盐环境,进 而有效抑制土壤返盐[2]。我国大多数盐碱化地区的 淡水资源相对紧缺,微咸水灌溉是缓解区域淡水资 源供需矛盾的重要方式[3-5]。研究微咸水灌溉下的粉 垄耕作土壤水分入渗及水盐运移特征可为微咸水灌 溉下的农田土壤水盐调控提供理论和技术支撑。

【研究进展】粉垄耕作是农业农村部大力推广 的一种新型耕作技术,该技术利用"自走式粉垄耕 作机"上的双螺旋钻头,将土壤垂直旋磨粉碎并自 然悬浮成垄。粉垄耕作技术具有超深耕、不扰乱土

收稿日期: 2023-06-17 修回日期: 2023-08-30

基金项目: 江苏省自然科学基金青年项目(BK20200523); 国家自然科 学基金青年项目(52209051);中央高校基本科研业务费(B220202068) 作者简介:朱成立(1966-),男。教授,博士生导师,主要从事水土 资源综合规划与高效利用研究。E-mail: clz@hhu.edu.cn

通信作者: 冯根祥(1988-), 男。副教授,硕士生导师,主要从事灌溉 排水理论与技术研究。E-mail: fenggx@hhu.edu.cn

©《灌溉排水学报》编辑部,开放获取 CC BY-NC-ND 协议

壤结构、增加土壤孔隙度等特点,在改善土壤物理 结构、激活土壤养分和微生物活性等方面具有良好 的效果[6]。研究发现,粉垄耕作可以促进盐分向深 层土壤迁移并抑制土壤返盐[7];同时,粉垄耕作能 够改善土壤理化性质,显著降低土壤可溶性盐量和 土壤体积质量、增加土壤孔隙度、有机质量和水稳 性团聚体量[8],促进水分下渗,提高土壤水分调蓄 能力[9]。适当灌水定额条件下的粉垄耕作可降低土 壤体积质量,对土壤水盐调控效果相比传统翻耕更 为明显[10]。微咸水灌溉条件下的土壤水盐环境调控 对于保障土壤质量至关重要[11]。土壤水分入渗是影 响土壤水盐运移的关键过程[12-13],微咸水灌溉下的 土壤孔隙度、水稳性团聚体明显高于淡水灌溉[14], 表明微咸水灌溉会改变土壤结构, 从而影响土壤水 盐运移过程。与微咸水灌溉相比, 粉垄耕作会显著 改变耕作层的土壤结构。【切入点】由此可见,微 咸水灌溉和粉垄耕作均会对土壤水分入渗和盐分运 移造成影响。然而,针对微咸水灌溉条件下的粉垄 耕作土壤水盐运移过程的研究相对较少。【拟解决 的关键问题】鉴于此,本研究基于室内土箱试验, 分析 3 种微咸水矿化度和 2 种耕作条件下的土壤水 分入渗特性和土壤水盐运移规律,研究结果可为微

咸水灌溉下的农田土壤水盐调控提供理论支撑。

1 材料与方法

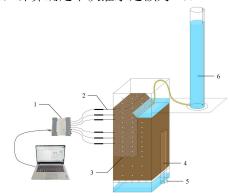
1.1 试验区概况

试验于 2022 年 8—10 月在河海大学节水园内进行。试验区地处亚热带湿润季风型气候区,多年平均气温为 15.7 ℃,试验期间最高气温为 43 ℃,最低气温为 6 ℃。全年降水时间约为 120 d,无霜期为 240 d,年平均降水量约为 1 021.3 mm,年平均蒸发量约为 900 mm,日照时间约为 2 200 h。供试土壤取自江苏省东台市滨海垦区,土壤颗粒组成为砂粒(0.02~2 mm) 24.5% 、粉粒(0.002~0.02 mm) 72.6%、黏粒(0~0.002 mm) 2.9%。土壤盐分组成以氯化钠(NaCl)为主,土壤平均含盐量为(4.0±0.10)g/kg^[15]。试验区盐碱土经多年改良后,土壤电导率为 525 μ S/cm,pH 值为 8.1,体积质量为 1.35 g/cm³,田间体积持水率为 34.26%。

1.2 试验设计

试验装置由供水设备、土壤水盐监测设备和土 箱组成(图1)。供水设备为马氏瓶,马氏瓶内径 为 15 cm、高度为 100 cm, 外壁贴有标尺, 以记录 水分入渗量;土壤水盐监测设备为便携式土壤水盐 监测系统(TDR-MUX,波兰),试验前对其进行水 盐标定,以保证观测精度: 土箱由 8 mm 壁厚的长 方体有机玻璃板制成,土箱内部长×宽×高为 40 cm×40 cm×90 cm。于土箱正面设置 3 列采集孔,每 列 15个, 孔径均为 1 cm。其中, 水平方向采集孔间 距为 10 cm, 垂直方向采集孔按照先密后疏的原则设 置: 从距箱口 5 cm 处开始, 每隔 5 cm 设置 1 个数 据采集孔,从第 13 个采集孔开始每隔 10 cm 设 1 个 采集孔。灌水过程中用橡胶塞封堵数据采集孔,数 据观测过程中取出橡胶塞,采用土壤水盐监测设备 进行数据观测。玻璃柱底部设有厚度为 10 cm 的隔 水层,隔水层与玻璃柱之间为厚度 2 cm、长、宽均 为 40 cm 的带孔隔板, 过水孔的孔径为 1 cm, 孔间 距为 7 cm。隔水层左侧连接地下水位观测柱,长、 宽、高分别为 3.5、3.0、53.0 cm。

试验设置灌溉水矿化度和耕作方式 2 个因素。 其中,灌溉水矿化度设置 3 个水平,分别为 0 g/L (S1)、3 g/L(S2)和 5 g/L(S3)。耕作方式为粉 垄耕作(FL)和传统翻耕(FG)。试验共计 6 个处 理,每个处理重复 3 次,详见表 1。采集的盐渍土样 经自然风干后,按照 1.35 g/cm³的田间体积质量均匀 装入土柱。土柱底部铺垫无纺布以防止土壤流失。 粉垄耕作(FL)是在原状土柱基础上采用手持地面 螺旋钻头将土壤旋削 40 cm,旋削完成后采用刮片修 整以形成半个平整垄沟,其中灌水沟底宽为 15 cm,沟深为 10 cm,边坡系数为 1,粉垄带底宽为 25 cm;传统翻耕(FG)深度为 20 cm,同样采用刮片修正形成相同规格的垄沟。灌溉水根据 0、3、5 g/L 的盐分浓度梯度,采用 NaCl 和淡水混合配制。试验采用马氏瓶定水头灌水 1 次,灌水入渗时控制定水头 5 cm,按照计划湿润层深度 60 cm 和田间持水率的控制要求,计算确定单次灌水定额为 107 mm。



注 1.TDR-MUX; 2.传感器; 3.测量孔; 4.地下水位观测柱; 5.排水孔; 6.马氏瓶。

图1 试验装置示意

Fig.1 Schematic diagram of experimental device

表1 试验设计

Tab.1 Design of experiment

	C	1
处理	耕作方式	灌水矿化度/(g·L-1)
FL1	粉垄 (FL)	0 (S1)
FL2	粉垄 (FL)	3 (S2)
FL3	粉垄 (FL)	5 (S3)
FG1	翻耕 (FG)	0 (S1)
FG2	翻耕 (FG)	3 (S2)
FG3	翻耕 (FG)	5 (S3)

1.3 指标测定及数据分析

土壤水分累积入渗量与湿润锋观测:在土壤水分入渗过程中,分别按照 60、120、300、600 s 的时间间隔记录马氏瓶液面高度和土壤湿润锋推进距离。其中,累积入渗量通过马氏瓶液面刻度换算得到,湿润锋推进距离由土箱上粘贴的刻度尺读出。土壤水盐数据:使用 TDR-MUX 土壤水盐监测系统在预留数据采集孔处测定土壤表面、10、20、30、40、50 cm 深度处的土壤电导率及土壤含水率,数据采集时间分别为灌水结束后的 1 h、 2 d 和 20 d。

数据分析:采用 Excel 软件进行数据分析,采用 SPSS 20 进行方差分析。

2 结果与分析

2.1 灌溉水矿化度及耕作方式对土壤水分入渗特性的 影响

由图 2 可知,粉垄耕作与传统翻耕处理下的土壤水分入渗速率均呈先快后慢的变化趋势。FL1、

FL2、FL3 处理的入渗历时分别为 147、111 min 和 120 min, FG1、FG2、FG3 处理的入渗历时分别为 161、131 min 和 141 min。相同耕作方式下, 土壤累积入渗量随灌溉水矿化度的升高呈先增加后减小的变化趋势,相同时刻 S2 处理的累积入渗量最大, S1 处理的累积入渗量最小。相同灌溉水矿化度下,粉垄耕作处理下的累积入渗量均高于传统翻耕处理,且 S1、S2、S3 处理下的 FL 处理入渗历时相比 FG 处理分别减少了 8.70%、15.27%和 14.89%。

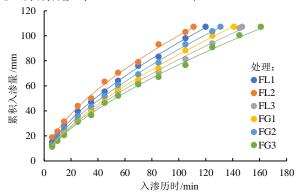
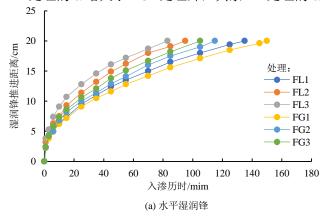


图 2 累积入渗量与入渗历时之间的关系曲线

Fig.2 Relationship curve between cumulative infiltration amount and infiltration duration

为定量分析灌溉水矿化度与耕作方式对入渗特征的影响,采用 Kostiakov 模型对累积入渗量进行拟合。由表 2 可知,相同耕作方式下,入渗系数(K)随着灌溉水矿化度的增加先增大后减小,入渗指数(α)随着灌溉水矿化度的增加先减小后增大;相同灌水矿化度下,FL 处理下的 K 均大于 FG 处理,除FL1 处理的 α 略大于 FG1 处理外,其余 FL 处理的 α



均小于 FG 处理。

表 2 累积入渗量拟合结果

Tab.2 Fitting results of cumulative infiltration

	•		
处理	K	а	R^2
FL1	3.438	0.686	0.998 8
FL2	5.909	0.616	0.998 4
FL3	4.627	0.655	0.999 4
FG1	3.320	0.683	0.998 5
FG2	4.100	0.669	0.999 4
FG3	3.644	0.683	0.998 8

2.2 灌溉水矿化度及耕作方式对湿润锋推进过程的 影响

由图 3 (a) 可知,相同耕作方式下的水平湿润 锋推进距离随着灌溉水矿化度的升高而增大,水平 湿润锋到达土柱边壁时, FL2、FL3 处理相比 FL1 处 理的入渗历时分别缩短了 29.63%、38.52%, 而 FG2、 FG3 处理相比 FG1 处理分别缩短了 23.33%和 30%。 相同微咸水矿化度下,同一时刻 FL 处理水平湿润锋 推进距离均大于 FG 处理。微咸水浓度升高对 2 种耕 作措施下的水平湿润锋推进均有促进作用, 而粉垄 耕作处理较翻耕处理的湿润锋推进速度提升更为明 显。由图 3 (b) 可知,相同耕作方式下,垂直湿润 锋推进距离随着灌溉水矿化度的升高呈先增大后减 小的变化趋势。相同微咸水浓度下, 粉垄耕作处理 下的垂直湿润锋推进距离大于传统翻耕处理。FL1、 FL2、FL3 处理的垂直湿润锋平均推进速率相比 FG1、 FG2、FG3 处理分别提高了 18.65%、24.40%和 32.71%。

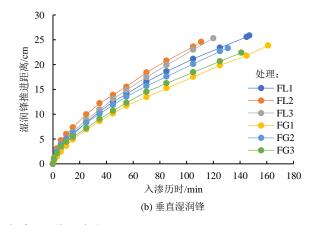


图 3 不同灌水矿化度与耕作方式对湿润锋运移的影响

Fig.3 Effects of different irrigation salinity and tillage methods on wetting front migration

2.3 灌溉水矿化度及耕作方式对土壤水盐再分布的 影响

由图 4 (a) 可知,灌溉 1 h 后,相同灌溉水矿 化度下,FL 处理与 FG 处理的土壤含水率均在 20 cm 深度处达到峰值,FG 处理下的土壤含水率均大于 FL 处理。FL1 处理和 FL2 处理在 25~50 cm 土层

的土壤含水率均大于 FG 处理,而 FL3 处理在 28~50 cm 土层的土壤含水率略大于 FG 处理。由图 4 (b) 可知,灌溉 2 d 后,各处理土壤含水率在 0~50 cm 土层均呈先减小后增加再减小的趋势。其中,FL 处理下的土壤含水率在 30 cm 深度处达到峰值。FG 处理下的土壤含水率最大值出现在 20 cm 深度处。由图 4

(c) 可知,灌溉 20 d后,各处理土壤含水率相比灌溉后 2 d均有所下降。由表 3 可知,随着时间推移,不同耕作方式下的土壤含水率差异逐渐缩小;不同

灌溉水矿化度下,3个时期的土壤含水率差异均不显著。耕作方式与灌溉水矿化度的交互作用对土壤含水率无显著影响。

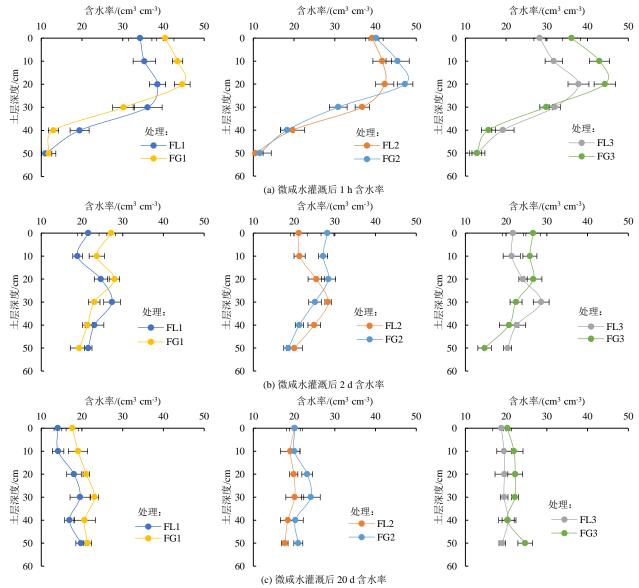


图 4 不同灌溉水矿化度与耕作方式对土壤含水率的影响

Fig.4 Effects of different irrigation salinity and tillage methods on soil moisture content

表 3 土壤含水率双因素方差分析结果

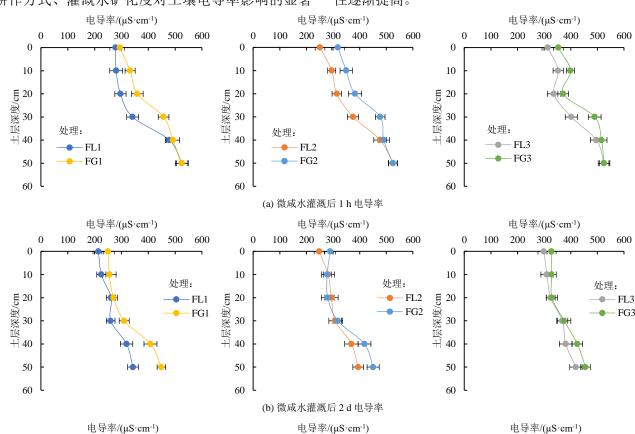
Tab.3 Results of two-factor variance analysis of soil moisture content

因素 ——	灌溉	灌溉后 1 h		灌溉后 2 d		灌溉后 20 d	
	P	F	P	F	P	F	
灌水矿化度	0.130 065	2.429 293	0.418 617	0.937 160	0.375 048	1.065 401	
耕作方式	0.003 305	13.348 590	0.018 259	7.454 175	0.072 060	3.890 198	
交互	0.175 897	2.015 698	0.611 747	0.512 123	0.252 862	1.545 198	

注 P<0.01 表示在 0.01 水平上差异极显著, P<0.05 表示在 0.05 水平上差异显著。

由图 5 (a) 可知, 微咸水灌溉后 1 h, 相同灌溉 水矿化度下, FL 处理的土壤电导率均低于 FG 处理, 其中 FL2 处理在 0~50 cm 土层的平均土壤电导率比 FG2 降低了 12.73%。由图 5 (b) 可知, 微咸水灌溉 2 d 后, FL1、FL2 处理和 FL3 处理在 0~50 cm 土层的平均电导率相比灌溉后 1 h 下降了 48.50%、39.88%和 33.28%,而 FG1、FG2 处理和 FG3 处理在 0~50

cm 土层的平均电导率相比灌溉后 1 h 则分别下降了 38.34%、35.44%和 28.87%。由图 5 (c)可知,微咸 水灌溉后 20 d,与初始土壤电导率(525 μS/cm)相 比,FL1、FL2 处理和 FL3 处理在 0~50 cm 土层的平均电导率下降了 55.98%、48.88%和 42.95%,而 FG1、FG2 处理和 FG3 处理则分别下降了 43.29%、37.25%和 32.34%。由表 4 可知,随着时间的推移,



耕作方式、灌溉水矿化度对土壤电导率影响的显著 性逐渐提高。

图 5 不同灌水矿化度与耕作方式对土壤含盐量的影响

(c) 微咸水灌溉后 20 d 电导率

200 300 400

处理:

FL2

FG2

Fig.5 Effects of different irrigation salinity and tillage methods on soil salt content

表 4 土壤电导率双因素方差分析结果

灌溉后 1 h 灌溉后2d 灌溉后 20 d 因素 P F P 灌水矿化度 0.188 573 1.923 274 0.032 489 4.621 740 0.027 712 4.907 046 耕作方式 0.165 177 2.184 388 0.000 137 30.191 430 0.130 000 78.501 500 0.969 643 0.030 907 0.226 982 1.682 208 0.010 66 6.789 663

Tab.4 Results of two-factor variance analysis of soil conductivity

注 P<0.01 表示在 0.01 水平上差异极显著,P<0.05 表示在 0.05 水平上差异显著。

3 讨论

微咸水灌溉与粉垄耕作对土壤水分入渗和湿润锋推进过程均具有促进作用。随着灌溉水矿化度的增加,土壤钠盐量增加,土壤通气孔隙数量增加,导致土壤持水性能减弱^[16]。史晓楠等^[17]发现,土壤盐分浓度的提高有利于促进土壤颗粒的絮凝,有助于团粒结构形成,使土壤大孔隙数量增加,在增强

200 300 400

500

-FL1

FG1

处理:

0

10

50

型/ 多 3′ 3′

100

0

10

m20 数数当 40

50

60

土壤渗透性能的同时,也会降低其保水性能。本研究表明,微咸水灌溉条件下的土壤水分累积入渗量和湿润锋均高于淡水灌溉,这与王全九等^[18]的研究结论相符。相比传统翻耕,粉垄耕作条件下的土壤更加疏松深厚,易于调用深层土壤水分^[19]。本研究表明,FL 处理下的土壤水分在早期入渗速度较快,但后续保水能力低于 FG 处理,导致 FL 处理整体土壤含水率低于 FG 处理,这与耕作深度有关。粉垄耕

100 200 300 400

0

10

20

30 40

50

60

土层深度/cm

500 600

处理:

-FG3

作条件下, 耕作深度越深, 土壤水分调蓄能力越强, 水分下渗越快[19],翻耕条件下也存在类似的研究结 果[20]。邢旭光等[21]研究表明,不同盐分离子对土壤 持水性能及土壤失水过程中的轴向收缩和裂隙水平 具有不同的影响。微咸水灌溉引入的钠离子与土壤 本身盐分离子发生相互作用,改变了土壤结构与团 聚体组成,进而提升了土壤持水能力[22]。因此,在 土壤水分再分布时期, 5 g/L 和 3 g/L 灌溉水矿化度 处理下的土壤含水率高于淡水灌溉处理。本试验侧 重于对比微咸水灌溉条件下粉垄耕作对土壤水盐运 移过程的影响,将 0~50 cm 土层作为主要观测区域, 未监测 50 cm 以下区域。但根据盐随水去的特性, 本试验灌水计划湿润层深度为 60 cm, 可以据此推断 在 50~60 cm 土层是土壤的主要积盐区域。粉垄耕作 相比传统翻耕进一步降低了 0~50 cm 土层的土壤含 盐量,翻耕条件下的微咸水灌溉会导致灌水后期出 现返盐现象, 而粉垄耕作条件下的微咸水灌溉处理 没有出现返盐现象,这与韦本辉等[7]的研究结果一 致。粉垄耕作打破了土壤犁底层,增大了土壤孔隙, 有利于土壤盐分的淋洗,根据盐随水去的规律,土 壤中的可溶性盐离子随水向深层运移, 同时粉垄耕 作破坏了土壤毛管通道,降低了土壤返盐作用。

4 结 论

- 1) 微咸水灌溉与粉垄耕作均能促进土壤水分入 渗,灌溉水矿化度为3 g/L 的粉垄耕作土壤水分入渗 效果最佳。
- 2) 粉垄耕作条件下,灌溉水矿化度为 5 g/L 下的土壤水平方向湿润锋运移速度最快,而灌溉水矿化度为 3 g/L 下的土壤垂直方向湿润锋运移速度最快。
- 3)粉垄耕作在灌溉前期能够提高盐分淋洗速度,整个灌溉过程的脱盐效果也较传统翻耕更为突出, 且未出现明显的返盐现象。

(作者声明本文无实际或潜在利益冲突)

参考文献:

- [1] 康绍忠, 霍再林, 李万红. 旱区农业高效用水及生态环境效应研究现状与展望[J]. 中国科学基金, 2016, 30(3): 208-212.
 - KANG Shaozhong, HUO Zailin, LI Wanhong. High-efficient water use and eco-environmental impacts in agriculture in arid regions: Advance and future strategies[J]. Bulletin of National Natural Science Foundation of China. 2016. 30(3): 208-212.
- [2] 石伟业,何文寿,李惠霞,等. 粉垄耕作对土壤理化性质和水稻生长及产量的影响[J]. 江苏农业科学, 2023, 51(1): 232-238.
 - SHI Weiye, HE Wenshou, LI Huixia, et al. Effects of silt ridge tillage on soil physicochemical properties and rice growth and yield[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2023, 51(1): 232-238.
- [3] 马文军,程琴娟,李良涛,等. 微咸水灌溉下土壤水盐动态及对作物产量的影响[J]. 农业工程学报, 2010, 26(1): 73-80.

- MA Wenjun, CHENG Qinjuan, LI Liangtao, et al. Effect of slight saline water irrigation on soil salinity and yield of crop[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2010, 26(1): 73-80.
- [4] KONDASH A J, REDMON J H, LAMBERTINI E, et al. The impact of using low-saline oilfield produced water for irrigation on water and soil quality in California[J]. Science of the Total Environment, 2020, 733: 139 392.
- [5] AFZAL M, BATTILANI A, SOLIMANDO D, et al. Improving water resources management using different irrigation strategies and water qualities: Field and modelling study[J]. Agricultural Water Management, 2016, 176: 40-54.
- [6] 韦本辉, 申章佑, 周佳, 等. 粉垄改造利用盐碱地效果初探[J]. 中国农业科技导报, 2017, 19(10): 107-112.
 - WEI Benhui, SHEN Zhangyou, ZHOU Jia, et al. Initial exploration on effect of saline-alkali land rebuilding and utilization by fenlong[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2017, 19(10): 107-112.
- [7] 韦本辉, 申章佑, 周佳, 等. 粉垄耕作改良盐碱地效果及机理[J]. 土壤, 2020, 52(4): 699-703.
 - WEI Benhui, SHEN Zhangyou, ZHOU Jia, et al. Study on effect and mechanism of improving saline-alkali soil by fenlong tillage[J]. Soils, 2020, 52(4): 699-703.
- [8] 杨博, 屈忠义, 孙慧慧, 等. 粉垄耕作对河套灌区盐碱地土壤性质的影响[J]. 灌溉排水学报, 2020, 39(8): 52-59.
 - YANG Bo, QU Zhongyi, SUN Huihui, et al. The effect of smash-ridging cultivation on properties of saline-alkali soil in Hetao irrigation district[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2020, 39(8): 52-59.
- [9] ZHAI Lichao, XU Ping, ZHANG Zhengbin, et al. Effects of deep vertical rotary tillage on dry matter accumulation and grain yield of summer maize in the Huang-Huai-Hai Plain of China[J]. Soil and Tillage Research, 2017, 170: 167-174.
- [10] 曹明海, 刘洪光, 王刚, 等. 不同粉垄深度和春灌灌水量对土壤水盐运移规律影响研究[J]. 节水灌溉, 2022(2): 13-20.
 - CAO Minghai, LIU Hongguang, WANG Gang, et al. Effects of different powder ridge depth and spring irrigation amount on soil water and salt transport[J]. Water Saving Irrigation, 2022(2): 13-20.
- [11] 马中昇, 谭军利, 魏童. 中国微咸水利用的地区和作物适应性研究进展[J]. 灌溉排水学报, 2019, 38(3): 70-75.
 - MA Zhongsheng, TAN Junli, WEI Tong. The variation of salt-tolerance of crops in different regions irrigated with brackish water in China[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2019, 38(3): 70-75.
- [12] 马海燕, 王昕, 张展羽, 等. 基于 HYDRUS-3D 的微咸水膜孔沟灌水 盐分布数值模拟[J]. 农业机械学报, 2015, 46(2): 137-145.
 - MA Haiyan, WANG Xin, ZHANG Zhanyu, et al. Numerical simulation of water-salt distribution under brackish water film hole furrow irrigation based on HYDRUS-3D model[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(2): 137-145.
- [13] CHENG Qiang, XU Qiang, CHENG Xianglin, et al. In-situ estimation of unsaturated hydraulic conductivity in freezing soil using improved field data and inverse numerical modeling[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2019, 279: 107 746.
- [14] 黄明逸, 张展羽, 翟亚明, 等. 咸淡交替灌溉下生物炭对滨海盐渍土及 玉米产量的影响[J]. 农业工程学报, 2020, 36(21): 88-96.
 - HUANG Mingyi, ZHANG Zhanyu, ZHAI Yaming, et al. Effects of biochar on coastal saline soil and maize yield under alternate irrigation with brackish and freshwater[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(21): 88-96.
- [15] 郭相平, 杨泊, 王振昌, 等. 秸秆隔层对滨海盐渍土水盐运移影响[J]. 灌溉排水学报, 2016, 35(5): 22-27.
 - GUO Xiangping, YANG Bo, WANG Zhenchang, et al. Influence of straw interlayer on the water and salt movement of costal saline soil[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2016, 35(5): 22-27.

- [16] 常凯, 邢旭光. 不同钠质化程度土壤水分特征曲线及土体收缩特征[J]. 灌溉排水学报, 2021, 40(10): 131-136, 144.
 - CHANG Kai, XING Xuguang. Water characteristic curve and shrinkage characteristics of different sodification degree[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2021, 40(10): 131-136, 144.
- [17] 史晓楠, 王全九, 巨龙. 微咸水入渗条件下 Philip 模型与 Green-Ampt 模型参数的对比分析[J]. 土壤学报, 2007, 44(2): 360-363. SHI Xiaonan, WANG Quanjiu, JU Long. Parameters of Philip and
 - green-ampt models for soils infiltrated with brackish water[J]. Acta Pedologica Sinica, 2007, 44(2): 360-363.
- [18] 王全九,单鱼洋. 微咸水灌溉与土壤水盐调控研究进展[J]. 农业机械 学报, 2015, 46(12): 117-126.
 - WANG Quanjiu, SHAN Yuyang. Review of research development on water and soil regulation with brackish water irrigation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(12): 117-126.
- [19] 李轶冰, 逢焕成, 杨雪, 等. 粉垄耕作对黄淮海北部土壤水分及其利用 效率的影响[J]. 生态学报, 2013, 33(23): 7 478-7 486.
 - LI Yibing, PANG Huancheng, YANG Xue, et al. Effects of deep vertically rotary tillage on soil water and water use efficiency in

- Northern China's Huang-Huai-Hai Region[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(23): 7 478-7 486.
- [20] 孙仕军, 闫瀛, 张旭东, 等. 不同耕作深度对玉米田间土壤水分和生长 状况的影响[J]. 沈阳农业大学学报, 2010, 41(4): 458-462. SUN Shijun, YAN Ying, ZHANG Xudong, et al. Effect of plowing
 - depth on soil moisture and plant growth status in maize field[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2010, 41(4): 458-462.
- [21] 邢旭光,马孝义,康端刚. 盐阳离子类型及浓度对土壤持水及干缩开裂的作用效果[J]. 农业工程学报, 2016, 32(9): 115-122.
 - XING Xuguang, MA Xiaoyi, KANG Duangang. Impacts of type and concentration of salt cations on soil water retention and desiccation cracking[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(9): 115-122.
- [22] 李青峰, 邢旭光, 马孝义. 盐基离子对土壤持水及收缩特性的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2018, 36(2): 107-112.
 - LI Qingfeng, XING Xuguang, MA Xiaoyi. Effects of anions and cations on soil water retention and shrinkage behavior during dehydration process[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2018, 36(2): 107-112.

Effect of vertically rotary sub-soiling tillage and saline water irrigation on water and salt movement in soil

ZHU Chengli¹, YANG Hualei¹, FENG Genxiang^{1*}, HAN Li², WANG Ce¹, ZHAI Yaming¹, FENG Baoping¹, ZHAO Tao¹

- (1. College of Agricultural Science and Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;
- 2. Xuzhou Water Conservancy Engineering Construction Management Center, Xuzhou 221000, China)

Abstract: [Objective] Vertically rotary sub-soiling tillage is a new cultivation method to improve soil water storage. In this study, the effect of its combination with saline water irrigation on water and salt movement in soil were studied. [Method] The experiment was conducted in a laboratory. It consisted of three salinity treatments with salt concentration of the irrigation water being 0 g/L (S1), 3 g/L (S2), and 5 g/L (S3) respectively, and two tillage treatments: conventional tillage (FG) and vertically rotary sub-soiling tillage (FL). For each treatment, we measured the movement of water and salt in the soil. [Result] With the increase in irrigation water salinity, regardless of tillage, irrigation water infiltration rate and advancing rate of the wetting front in the vertical direction both increased first followed by a decline, while the advancing rate in the horizontal wetting front increased steadily. Compared to FG, FL reduced the infiltration time by 8.70, 15.27 and 14.89%, and the advancing time of the horizontal wetting front by 10.00, 17.39 and 20.95%, respectively, for salinity treatment S1, S2 and S3. The Kostiakov model accurately described the relationship between the cumulative infiltration and infiltration time for the two tillage treatments with $R^2>0.99$. After 20 days since irrigation, the soil moisture content in FL was lower than that in FG when irrigation water salinity was the same, while under the same tillage, the soil moisture content increased with irrigation water salinity, despite at insignificant levels. After 20 days since irrigation, soil desalination rate in FL was 42.95%-55.98%, compared to 32.34%-43.29% in FL. It was also found that for salinity treatment S1, S2 and S3, the average soil salinity in FL decreased by 22.38%, 18.54% and 15.68%, respectively, compared to those in FG. [Conclusion] Saline water irrigation combined with vertically rotary sub-soiling tillage improves irrigation water infiltration, advancing of wetting fronts, as well as soil desalination. For all treatments we compared, vertically rotary sub-soiling tillage combined with an irrigation water salinity of 3 g/L is optimal.

Key words: brackish water irrigation; smash-ridging cultivation; soil water infiltration; soil water and salt dynamics

责任编辑: 韩 洋