

# 施用有机肥对咸水灌溉农田耕层土壤有机质及水稳性团聚体的影响

王艺乔<sup>1,2</sup>, 郑春莲<sup>2</sup>, 李科江<sup>2</sup>, 党红凯<sup>2</sup>, 曹彩云<sup>2</sup>, 马俊永<sup>2</sup>, 吴雨晴<sup>1</sup>, 张俊鹏<sup>1</sup>

(1. 山东农业大学水利土木工程学院, 山东 泰安 271018;

2. 河北省农林科学院旱作农业研究所, 河北省农作物抗旱研究重点实验室, 河北 衡水 053000)

**摘要:** 为探索施用有机肥对咸水灌溉农田耕层土壤水稳性团聚体的调控效应, 在麦玉两熟制农田咸水灌溉(1, 2, 4, 6 g/L)配施有机肥(OF)和未施有机肥(NOF)长期定位试验的基础上, 研究了 2018—2019 年不同处理对农田耕层 0—20 cm 土壤盐度( $EC_{1:5}$ )、土壤有机质(SOM)含量和水稳性团聚体稳定性的影响。结果表明: 咸水灌溉有增加耕层土壤盐度, 降低 SOM 含量和水稳性团聚体稳定性的趋势, 随灌溉水矿化度的升高, SOM 含量、 $>0.25$  mm 水稳性大团聚体质量分数( $WR_{0.25}$ )、团聚体平均重量直径(MWD)和几何平均直径(GMD)逐渐减小, 土壤  $EC_{1:5}$  和分形维数( $D_m$ )逐渐增大, 其中 4, 6 g/L 与 1 g/L 灌水处理间的差异达显著水平。增施有机肥可降低咸水灌溉农田 0—20 cm 土壤  $EC_{1:5}$ , 当灌溉水矿化度 $\geq 2$  g/L 时, OF 处理的耕层土壤  $EC_{1:5}$  较 NOF 处理降低 4.64%~48.29%; 施用有机肥显著提高农田 SOM 含量、 $WR_{0.25}$ 、MWD 和 GMD, 各灌水处理的提高幅度分别为 80.75%~127.32%, 10.36%~90.44%, 12.90%~129.11% 和 11.88%~81.57%。在该研究条件下,  $\geq 4$  g/L 咸水灌溉会显著增加土壤盐度, 降低有机质含量, 破坏土壤团粒结构, 应谨慎使用; 施用有机肥能促进耕层土壤盐分淋洗, 降低盐分对土壤环境的负面影响, 有助于实现咸水资源安全高效利用。

**关键词:** 咸水; 有机肥; 土壤盐分; 有机质; 水稳性团聚体

中图分类号: S273.4; S152.4

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2022)02-0268-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2022.02.034

## Effects of Organic Fertilizer Application on Soil Organic Matter and Water-Stable Aggregates of Plow Layer in Farmland with Saline Water Irrigation

WANG Yiqiao<sup>1,2</sup>, ZHENG Chunlian<sup>2</sup>, LI Kejiang<sup>2</sup>, DANG Hongkai<sup>2</sup>,

CAO Caiyun<sup>2</sup>, MA Junyong<sup>2</sup>, WU Yuqing<sup>1</sup>, ZHANG Junpeng<sup>1</sup>

(1. College of Water Conservancy and Civil Engineering, Shandong Agricultural University,

Tai'an, Shandong 271018; 2. Institute of Dryland Farming, Hebei Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Key Laboratory of Crop Drought Resistance Research of Hebei Province, Hengshui, Hebei 053000)

**Abstract:** It is necessary to explore the effects of saline water irrigation combined with application of organic fertilizer on water-stable aggregates of plow layer soil. In this study, a long-term saline water irrigation experiment combined with application of organic fertilizer was carried out under winter wheat-summer maize double cropping system. Treatments were set up with four irrigation water salinities (1, 2, 4, 6 g/L) and with organic fertilizer applied (OF) or not (NOF). We measured the effects of different treatments on variation of soil salinity ( $EC_{1:5}$ ), soil organic matter (SOM) content and the stability of water-stable aggregates in 0—20 cm soil layer from 2018 to 2019. The results indicated that saline water irrigation tended to increase soil salinity and decrease SOM content and the stability of water-stable aggregates. Meanwhile, with the increasing salinities of irrigation water, SOM content and the mass fraction of water-stable aggregate ( $>0.25$  mm) ( $WR_{0.25}$ ), mean weight diameter (MWD) and geometric mean diameter (GMD) decreased; on the contrary, soil  $EC_{1:5}$  and fractal dimension ( $D_m$ ) increased. In addition, there were significant differences

收稿日期: 2021-08-11

资助项目: 国家自然科学基金项目(51609248); 河北省重点研发计划项目(21327003D); 河北省农作物抗旱研究重点实验室开放基金项目

第一作者: 王艺乔(1997—), 女, 硕士研究生, 主要从事微咸水安全利用技术研究。E-mail: WangYiQiao20192021@163.com

通信作者: 张俊鹏(1983—), 男, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事节水灌溉理论与新技术研究。E-mail: jipengzhang@163.com

only between 4 g/L, 6 g/L and 1 g/L treatments. It was found that applying organic fertilizer could reduce  $EC_{1.5}$  in 0—20 cm soil layer. When the salinity of irrigation water was  $\geq 2$  g/L, the  $EC_{1.5}$  of plow layer with organic fertilizer application was 4.64%~48.29% lower than those of treatments without organic fertilizer application. Applying organic fertilizer significantly increased SOM content,  $WR_{0.25}$ , MWD and GMD, with the increases of 80.75%~127.32%, 10.36%~90.44%, 12.90%~129.11% and 11.88%~81.57%. In summary, irrigation water salinity of  $\geq 4$  g/L could significantly increase soil salinity, reduce organic matter content and destroy soil aggregate structure, so it should be used cautiously. The application of organic fertilizer could promote the salt leaching from the surface soil to the deep layer, reduce the negative impacts of salt on soil environment, and contribute to the safe and efficient utilization of saline water resources.

**Keywords:** saline water; organic fertilizer; soil salinity; organic matter; water-stable aggregates

环渤海低平原区土地资源丰富,地势低平,区域气候条件优越,适宜发展农业生产,但受地表淡水资源匮乏的制约,农业用水长期依靠抽提深层地下淡水来维系,由此造成严重的地下水超采,并引发一系列地质灾害<sup>[1]</sup>。然而,该区蕴藏着丰富的可更新浅层咸水资源却未有效利用。以黑龙港地区为例,咸水分布面积占 91.8%,总储量达  $1.59 \times 10^{10}$  m<sup>3</sup>,其中矿化度 2~5 g/L 的浅层地下咸水分布面积 67%,易开采咸水资源量达  $7 \times 10^9$  m<sup>3</sup>,但实际咸水利用量仅为 5%<sup>[2]</sup>。有研究<sup>[3]</sup>表明,若利用方法得当,咸水可代替淡水用于农业生产。

咸水灌溉在增加土壤水分的同时亦带入盐分,土壤中适量的盐分对作物生长影响不大,甚至有促进效应<sup>[4]</sup>。高聪帅等<sup>[5]</sup>研究指出,冬小麦生育期降水少且耐盐能力较强,微咸水灌溉对冬小麦有保产作用,利用夏季降水与玉米播种水可有效淋洗耕层土壤盐分,维持作物生长的安全阈值。然而,若咸水利用方法不得当,会导致土壤盐分过量累积,降低土壤水分有效性,影响作物生长发育;江晓慧等<sup>[6]</sup>研究表明,灌溉水盐分浓度  $> 150$  mmol/L 时,植物体内光合器官受损,抑制棉花正常生长。团聚体是土壤结构的重要表征指标,其稳定性能够反映土壤结构好坏以及土壤透气性、持水性和抗蚀性,对作物生长具有重要影响<sup>[7]</sup>。王纯等<sup>[8]</sup>报道指出,盐分是影响团聚体分布及稳定性的重要限制参数,盐溶液进入土壤后通过离子交换,溶解胶结剂使大团聚体破坏;吴雨晴等<sup>[9]</sup>研究表明,长期咸水灌溉有增加棉田土壤盐分、降低水稳性团聚体稳定性的趋势,其中  $< 6$  g/L 的咸水灌溉棉田土壤积盐较少,土壤水稳性团聚体破坏程度较小,但当灌溉水矿化度  $\geq 6$  g/L 时,棉田土壤盐分显著增加,水稳性团聚体稳定性指标明显降低。土壤有机质是土壤养分的重要指标,可为土壤团聚体的形成提供胶结物质。张文等<sup>[10]</sup>研究发现,咸水滴灌带入棉田土壤的盐分加快了有机质分解,土壤有机质含量随灌溉水盐度的增加而显著降低。

实现咸水资源安全利用的关键在于控制土壤盐分含量在合理范围之内,确保土壤环境不恶化。施用有机肥具有增加土壤养分和调控土壤盐分的双重作用,可有效改善土壤环境。已有研究<sup>[11]</sup>表明,长期施用有机肥能够增加土壤有机质和腐殖质含量,增强土壤团聚体稳定性,改善土壤通透性,进而促进土壤盐离子淋洗。Zhang 等<sup>[12]</sup>研究指出,施用有机肥可明显提高土壤团聚体稳定性以及与团聚体相关的有机质和腐殖酸浓度,改善土壤结构和固碳能力。以往关于咸水灌溉和施用有机肥单项因子对土壤盐分和团聚体稳定性影响的研究已有很多,但二者组合对土壤结构的影响效应鲜见报道。此外,受制于土壤水分迁移转化,咸水灌溉配施有机肥农田盐分运移过程极其复杂,致使其对土壤环境的影响具有持续性,短期研究难以揭示其影响效应。本文在麦玉两熟制农田长期定位咸水灌溉(始于 2006 年)和施用有机肥(始于 2010 年)试验的基础上,以 2018 年和 2019 年为例,研究了不同矿化度咸水灌溉下增施有机肥对农田耕层土壤盐分、有机质含量和水稳性团聚体稳定性的影响,旨在探究施用有机肥对咸水灌溉农田土壤环境的调控效应,丰富咸水安全利用技术体系,为缓解区域淡水资源危机、确保农业可持续发展提供理论支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验区概况

本研究于 2018—2019 年在位于河北省深州市护驾迟镇的河北省农林科学院旱作节水农业试验站(37°44'N, 115°47'E)进行。该站地势平坦,海拔 21 m,属于温带大陆性季风气候;多年平均气温 12.8 °C,年日照时间 2 509 h,无霜期 188 天,多年平均降水量 500 mm,70%降水集中在 7—9 月,年均蒸发量 1 785 mm。2006 年试验初始 0—20 cm 土层土壤有机质含量 12.8 g/kg,速效磷含量 17.6 mg/kg,速效钾含量 134 mg/kg,碱解氮含量 65.5 mg/kg;0—100 cm 土层土壤田间持水量为 28%,容重 1.44 g/cm<sup>3</sup>。试验区土壤类型为黏质壤性脱盐土,地下水埋深  $> 5$  m。

1.2 试验设计

本研究在麦玉两熟制农田长期定位咸水灌溉配施有机肥试验的基础上开展。咸水定位灌溉始于 2006 年 10 月,试验小区面积为 57 m<sup>2</sup> (9.5 m×6 m),小区之间设置隔离带。依据灌溉水矿化度设置 4 个处理,分别为 1, 2,4,6 g/L,其中,1 g/L 淡水取自当地深层地下水,2,4,6 g/L 咸水使用深层地下水掺兑海盐配制而成,离子组成见表 1。每个处理 6 次重复,随机排列。2010 年 10 月开始,每个咸水灌溉处理的 3 组重复小区开始施用有机肥,另外 3 组重复不施有机肥;增施有机肥处理和不施用有机肥处理分别用 OF 和 NOF 表示。有机肥施用方案为每年冬小麦播种前施用 1 次,采取人工撒播的方式,均匀施用牛粪(有机质含量 48.4%)75 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>。各处理的灌溉制度为:冬小麦生长季灌 2~3 次水,即造墒水(若播前土壤墒情较好,即 0—20 cm 土壤含水

率大于田间持水量的 70%,不再浇造墒水)、起身拔节水 and 扬花水;夏玉米一般只浇灌蒙头水(若播种时 0—20 cm 土壤含水率大于田持的 70%,不再灌水),遇干旱年份,若灌水计划湿润层(苗期 0—40 cm、拔节期 0—60 cm)土壤含水率低于田持 60%,补灌 1 次水。灌水方式均为地面畦灌,灌水定额 60 mm,水表计量。2017—2018 年与 2018—2019 年,以夏玉米收获为时间节点的周年灌水量分别为 240,300 mm,降水量依次为 648.7,382.6 mm,逐月降雨分布情况见图 1。各小区于小麦播种前施入基肥,撒施磷酸二铵(含 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 46%和 N 18%) 450 kg/hm<sup>2</sup>和尿素(含 N 46%)150 kg/hm<sup>2</sup>,春季结合第 1 次浇水追施尿素(含 N 46%)375 kg/hm<sup>2</sup>,玉米播种时底施专用复合肥(含 N 25%,P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 8%,K<sub>2</sub>O 12%)675 kg/hm<sup>2</sup>。所有处理的农业管理措施保持一致。

表 1 灌溉水盐分特性

| 灌溉水矿化度/<br>(g·L <sup>-1</sup> ) | 灌溉水电导率/<br>(dS·m <sup>-1</sup> ) | 离子浓度/(mmol·L <sup>-1</sup> ) |                  |                |                 |                               |                               |                 |
|---------------------------------|----------------------------------|------------------------------|------------------|----------------|-----------------|-------------------------------|-------------------------------|-----------------|
|                                 |                                  | Ca <sup>2+</sup>             | Mg <sup>2+</sup> | K <sup>+</sup> | Na <sup>+</sup> | SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> | HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> | Cl <sup>-</sup> |
| 1                               | 1.3                              | 0.72                         | 0.81             | 0.15           | 10.73           | 2.94                          | 1.04                          | 7.63            |
| 2                               | 3.4                              | 0.86                         | 1.60             | 0.18           | 25.62           | 5.16                          | 1.11                          | 21.45           |
| 4                               | 7.1                              | 1.00                         | 2.30             | 0.20           | 56.44           | 8.46                          | 1.21                          | 47.27           |
| 6                               | 10.6                             | 1.17                         | 2.89             | 0.23           | 87.84           | 11.67                         | 1.31                          | 73.58           |

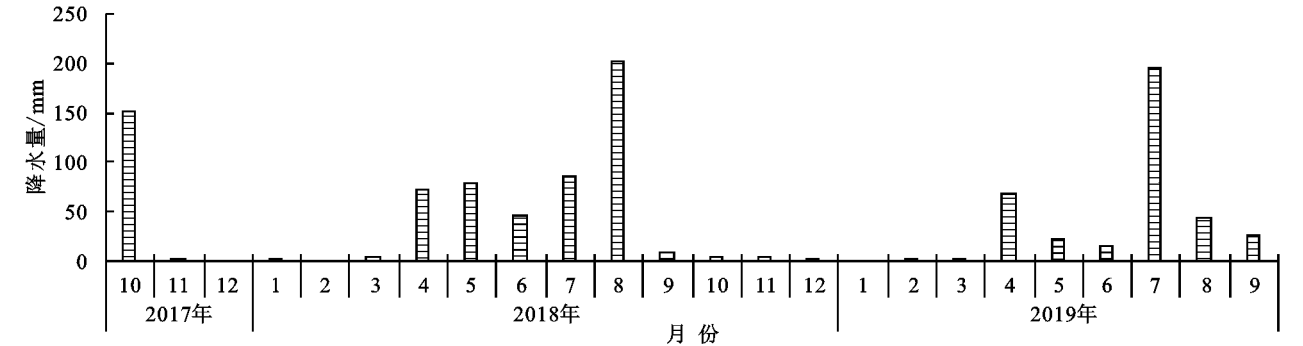


图 1 2017—2019 年冬小麦—夏玉米生长季降水逐月分布

1.3 土壤样品采集与分析

(1)土壤盐度:2018 年和 2019 年夏玉米收获期(2018 年 10 月 2 日和 2019 年 9 月 30 日),采用土钻在各小区采集耕层(0—20 cm)土样,每小区采集 3 个样点均匀混合后作为 1 次重复。土样风干后,粉碎、过筛,按土水质量比 1:5 配制悬浊液,使用 DDS—307A 型电导率仪测定电导率(EC<sub>1:5</sub>)。

(2)土壤有机质:土样采集时间及方法同土壤盐度一致,采用水合热重铬酸钾氧化—比色法测定土壤有机质含量。

(3)土壤水稳性团聚体:2018 年和 2019 年夏玉米收获期(2018 年 10 月 2 日和 2019 年 9 月 30 日),采集各小区耕层(0—20 cm)原状土壤。在采集和运输过程中尽量减少对土壤的扰动,运回实验室后,沿

原状土的自然剖面结构剥成 1 cm 左右的小块,将土样剔除杂质,自然风干。采用湿筛法对土壤水稳性团聚体组成进行分级。称取 50 g 土样,放置于 TPF—100 型土壤团粒结构分析仪套筛的最上层,将样品浸润 10 min 后振荡 10 min,土样依次过 5,2,1,0.5,0.25,0.053 mm 筛网,湿筛结束后,将筛层各粒级团聚体分别冲洗入铝盒中,60 ℃烘干后称重。本研究采用水稳性大团聚体质量分数(WR<sub>0.25</sub>,%)、平均重量直径(MWD,mm)、几何平均直径(GMD,mm)和质量分形维数(D<sub>m</sub>)4 个指标来表征土壤水稳性团聚体的稳定性,计算公式<sup>[13]</sup>为:

$$WR_{0.25} = \frac{M_{i>0.25}}{M_T} \times 100\%$$

(1)

$$MWD = \frac{\sum_{i=1}^n (w_i \overline{d_i})}{\sum_{i=1}^n w_i}$$

(2)

$$\text{GMD}=\exp\left[\frac{\sum_{i=1}^n\left(w_i\ln\overline{d_i}\right)}{\sum_{i=1}^nw_i}\right]$$

(3)

$$D_m=3-\frac{\lg\left[M\left(\delta<\overline{d_i}\right)/M_T\right]}{\lg\left(\overline{d_i}/d_{\max}\right)}$$

(4)

式中: $M_{i>0.25}$ 为直径 $>0.25\text{ mm}$ 水稳性团聚体质量(g); $M_T$ 为团聚体总质量(g); $w_i$ 为各粒级水稳性团聚体质量占团聚体总质量的百分比(%); $\overline{d_i}$ 为 $d_i$ 与 $d_{i+1}$ 两筛分粒级间粒径的算数平均值(mm); $M(\delta<\overline{d_i})$ 为粒径 $<\overline{d_i}$ 的水稳性团聚体质量(g); $d_{\max}$ 为团聚体的最大粒径(mm)。

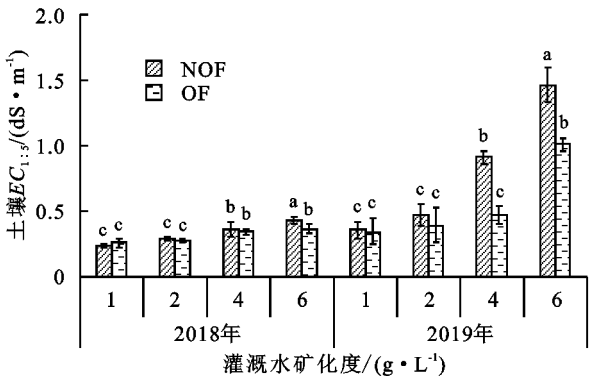
1.4 数据处理与分析

采用 Microsoft Office 2016 和 SPSS 25.0 软件进行数据处理与分析,不同处理之间采用最小显著差异法(LSD)进行多重比较,显著性水平为  $P=0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 咸水灌溉配施有机肥对土壤盐度的影响

图 2 为 2018 年和 2019 年夏玉米收获时各处理农田 0—20 cm 土层土壤盐度( $EC_{1:5}$ )。从图 2 可以看出,同一施肥条件下土壤  $EC_{1:5}$  随着灌溉水矿化度的增加而增大,以未施有机肥为例,与 1 g/L 处理相比,2018 年 2,4,6 g/L 处理的土壤  $EC_{1:5}$  分别增加 19.41%,49.00%,78.85%;2019 年依次增加 11.86%,114.59%,243.52%,其中,4,6 g/L 与 1 g/L 处理间的差异达显著水平。增施有机肥有降低咸水灌溉农田土壤盐度的趋势,与不施有机肥相比,施用有机肥条件下 2018 年 2,4,6 g/L 灌水处理土壤  $EC_{1:5}$  分别降低 4.86%,4.64%,15.28%;2019 年依次降低 17.53%,48.29%,30.99%。年际之间,2019 年各处理耕层土壤  $EC_{1:5}$  均高于 2018 年,NOF 和 OF 处理的增幅分别为 65.92%~240.19%和 38.32%~177.09%。



注:同一年份不同小写字母表示处理之间差异显著( $P<0.05$ )。下同。

图 2 2018—2019 年夏玉米收获时不同处理农田 0—20 cm 土壤盐度

2.2 咸水灌溉配施有机肥对土壤有机质含量的影响

由图 3 可知,NOF 和 OF 条件下,SOM 含量均呈现

随灌溉水矿化度增加而减小的趋势。以 NOF 处理为例,与 1 g/L 相比,2018 年 2,4,6 g/L 灌水处理农田土壤有机质含量分别降低 6.98%,10.97%,18.09%;2019 年依次降低 9.75%,15.87%,22.29%,其中,4,6 g/L 与 1 g/L 灌水处理间的差异达显著水平。施用有机肥可显著增加耕层 SOM 含量,与 NOF 相比,OF 条件下 2018 年 1,2,4,6 g/L 灌水处理 SOM 含量分别增加 80.75%,86.7%,88.91%,101.25%;2019 年依次增加 97.41%,112.33%,115.25%,127.32%。与 NOF 条件下 1 g/L 处理相比,OF 条件下所有灌水处理 SOM 含量均显著增加。年际间,2019 年各处理 SOM 含量较 2018 年均有所降低,NOF 和 OF 处理的降低幅度分别为 25.34%~29.45%和 17.62%~20.00%。

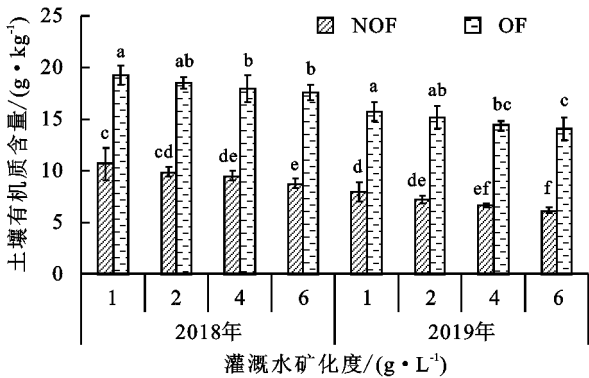


图 3 2018—2019 年夏玉米收获时不同处理农田 0—20 cm 土壤有机质含量

2.3 咸水灌溉配施有机肥对土壤水稳性团聚体的影响

从表 2 可以看出,同一施肥条件下, $WR_{0.25}$ 、MWD 和 GMD 均随着灌溉水矿化度增加而降低, $D_m$  呈现相反趋势。以 NOF 处理为例,与 1 g/L 相比,2018 年和 2019 年 2,4,6 g/L 灌水农田土壤  $WR_{0.25}$  分别降低 6.65%~53.96%和 5.76%~31.39%,MWD 分别减小 7.46%~50.06%和 8.31%~33.68%,GMD 分别下降 5.50%~45.94%和 3.20%~26.52%, $D_m$  则分别增大 3.70%~7.39%和 0.84%~4.87%,其中 4,6 g/L 与 1 g/L 处理间的差异达到显著水平。不同灌水处理下,施用有机肥可显著增加土壤  $WR_{0.25}$ 、MWD 和 GMD,降低  $D_m$ 。与 NOF 相比,2018 年和 2019 年 OF 条件下各处理的  $WR_{0.25}$  分别增加 12.38%~90.44%和 10.36%~28.56%,MWD 分别提高 50.78%~129.11%和 12.90%~31.84%,GMD 分别增大 30.75%~81.57%和 11.88%~22.87%, $D_m$  分别下降 1.42%~4.59%和 0.47%~2.18%。与 NOF 条件下 1 g/L 灌水处理土壤团聚体稳定性指标相比,OF 条件下仅 6 g/L 处理显著下降。年际间,2019 年各灌水处理土壤水稳性大团聚数量和稳定性指标整体上优于 2018 年。

统计分析结果显示,2018 年施用有机肥对土壤  $WR_{0.25}$  和  $D_m$  的影响达到显著水平,对 MWD、GMD

的影响达到极显著水平;灌溉水矿化度对  $WR_{0.25}$  和  $D_m$  无显著影响,但其对 MWD、GMD 有显著影响;施用有机肥与灌溉水矿化度交互作用对团聚体各指标的影响均达到显著水平。2019 年,施用有机肥对耕

层土壤  $WR_{0.25}$ 、MWD 和 GMD 均有极显著影响,对  $D_m$  有显著影响;灌溉水矿化度对土壤 MWD 具有极显著影响,对  $WR_{0.25}$ 、GMD 和  $D_m$  有显著影响;二者交互对土壤团聚体各项指标的影响均不显著。

表 2 2018—2019 年夏玉米收获时不同处理农田 0—20 cm 土壤水稳性大团聚体质量分数及稳定性指标

| 年份   | 处理    | 灌溉水矿化度/<br>( $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ ) | $WR_{0.25}/\%$ | MWD/mm      | GMD/mm      | $D_m$       |
|------|-------|-----------------------------------------------|----------------|-------------|-------------|-------------|
| 2018 | NOF   | 1                                             | 50.57±7.74bc   | 0.38±0.01d  | 0.21±0.03d  | 2.68±0.04ef |
|      |       | 2                                             | 47.21±5.65cd   | 0.35±0.04de | 0.20±0.02de | 2.78±0.06bc |
|      |       | 4                                             | 40.56±6.42e    | 0.34±0.03e  | 0.19±0.01e  | 2.80±0.03b  |
|      |       | 6                                             | 23.28±6.57f    | 0.19±0.02f  | 0.12±0.01f  | 2.88±0.06a  |
|      | OF    | 1                                             | 58.43±1.65a    | 0.59±0.03a  | 0.30±0.02a  | 2.64±0.02f  |
|      |       | 2                                             | 53.05±1.04ab   | 0.53±0.03b  | 0.26±0.01b  | 2.68±0.01ef |
|      |       | 4                                             | 50.39±2.04bc   | 0.51±0.02b  | 0.24±0.01c  | 2.71±0.02de |
|      |       | 6                                             | 44.34±1.08de   | 0.44±0.01c  | 0.21±0.01d  | 2.75±0.01cd |
|      | NOF   | 1                                             | 57.20±3.06bc   | 0.59±0.02b  | 0.28±0.01c  | 2.65±0.02cd |
|      |       | 2                                             | 53.91±1.6cd    | 0.54±0.03c  | 0.27±0.02c  | 2.67±0.03c  |
|      |       | 4                                             | 47.35±2.80e    | 0.43±0.06e  | 0.23±0.01d  | 2.71±0.03b  |
|      |       | 6                                             | 39.24±6.88f    | 0.39±0.05e  | 0.20±0.04e  | 2.78±0.06a  |
| 2019 | OF    | 1                                             | 63.66±3.22a    | 0.68±0.03a  | 0.34±0.02a  | 2.62±0.02d  |
|      |       | 2                                             | 59.49±1.98b    | 0.62±0.02b  | 0.30±0.01ab | 2.66±0.02c  |
|      |       | 4                                             | 57.24±2.41bc   | 0.57±0.03bc | 0.28±0.01bc | 2.67±0.02c  |
|      |       | 6                                             | 50.45±2.21de   | 0.50±0.04d  | 0.24±0.01d  | 2.72±0.01b  |
|      | 显著性检验 | 有机肥(O)                                        | 10.743*        | 157.825**   | 70.803**    | 21.996*     |
|      |       | 灌溉水矿化度(S)                                     | 6.863          | 20.726*     | 20.066*     | 10.153      |
|      |       | O×S                                           | 5.991*         | 4.736*      | 3.747*      | 2.508*      |
|      |       | 有机肥(O)                                        | 37.948**       | 48.513**    | 39.853**    | 23.538*     |
|      | (F 值) | 灌溉水矿化度(S)                                     | 24.79*         | 33.693**    | 27.258*     | 13.053*     |
|      |       | O×S                                           | 1.886          | 1.84        | 1.658       | 1.269       |
|      |       |                                               |                |             |             |             |
|      |       |                                               |                |             |             |             |

注:表中数据为平均值±标准差;同一年份同列不同小写字母表示处理之间差异显著( $P<0.05$ );\*表示  $P<0.05$ ;\*\*表示  $P<0.01$ 。下同。

2.4 咸水灌溉农田土壤水稳性团聚体稳定性指标与盐分和有机质的相关性分析

从表 3 可以看出,2018 年 2 种施肥模式下土壤 SOM、 $WR_{0.25}$ 、MWD 和 GMD 与  $EC_{1:5}$  均呈显著负相关关系,土壤  $D_m$  与  $EC_{1:5}$  呈显著正相关关系;与 NOF 相比,OF 条件下土壤 SOM、 $WR_{0.25}$ 、MWD、GMD 和  $D_m$  等指标与  $EC_{1:5}$  之间的相关系数均有所降低。2019 年 NOF 条件下土壤 SOM、 $WR_{0.25}$ 、MWD 和 GMD 与  $EC_{1:5}$

均呈显著或极显著负相关关系,土壤  $D_m$  与  $EC_{1:5}$  呈显著正相关关系;与 NOF 相比,OF 条件下土壤有机质含量及水稳性团聚体各项指标与  $EC_{1:5}$  间的相关系数均明显下降,其中仅土壤  $WR_{0.25}$  与  $EC_{1:5}$  之间的相关性显著。2018 年和 2019 年,2 种施肥模式下土壤  $WR_{0.25}$ 、MWD、GMD 和  $D_m$  与 SOM 均具有显著或极显著相关性;与 NOF 相比,OF 条件下土壤团聚体各项指标与 SOM 之间的相关系数有所增加(2018 年  $D_m$  除外)。

表 3 不同灌水处理农田 0—20 cm 土壤  $EC_{1:5}$ 、SOM 及团聚体各指标间的相关关系

| 年份   | 处理  | 指标         | $EC_{1:5}$ | SOM      | $WR_{0.25}$ | MWD     | GMD      | $D_m$    |
|------|-----|------------|------------|----------|-------------|---------|----------|----------|
| 2018 | NOF | $EC_{1:5}$ | 1          | −0.987** | −0.962*     | −0.915* | −0.931*  | 0.958*   |
|      |     | SOM        |            | 1        | 0.945*      | 0.912*  | 0.920*   | −0.982** |
|      | OF  | $EC_{1:5}$ | 1          | −0.946*  | −0.922*     | −0.896* | −0.928*  | 0.949*   |
|      |     | SOM        |            | 1        | 0.972**     | 0.950** | 0.981**  | −0.933*  |
| 2019 | NOF | $EC_{1:5}$ | 1          | −0.911*  | −0.991**    | −0.940* | −0.990** | 0.974*   |
|      |     | SOM        |            | 1        | 0.918*      | 0.969*  | 0.946*   | −0.920*  |
|      | OF  | $EC_{1:5}$ | 1          | −0.791   | −0.923*     | −0.866  | −0.870   | 0.874    |
|      |     | SOM        |            | 1        | 0.940*      | 0.970*  | 0.956*   | −0.950*  |

### 3 讨论

咸水灌溉可改变土壤盐度,本研究中,与 1 g/L 相比,2 g/L 灌水处理耕层土壤  $EC_{1:5}$  无显著变化,4 g/L 和 6 g/L 处理显著增加,Liu 等<sup>[14]</sup> 基于棉花长期咸水灌溉得到与之相似结论。究其原因是适量浓度咸水灌溉带入土壤的盐分可通过降雨淋洗实现补排平衡,但当灌溉水矿化度超过一定限度,带入土壤盐分过多,降雨无法充分淋洗将产生盐分累积。施用有机肥可有效调控土壤盐度,当灌溉水矿化度 $\geq 2$  g/L 时,OF 处理的土壤  $EC_{1:5}$  低于 NOF 处理,原因是增施有机肥能改善土体结构,提高土壤渗透性,可增强灌溉和降水对盐分的淋溶作用,促进耕层土壤脱盐<sup>[15]</sup>。土壤盐分迁移机制非常复杂,年际间存在较大差异,2019 年各处理土壤  $EC_{1:5}$  均明显高于 2018 年,原因是 2019 年干旱少雨,在夏玉米生育期间补灌了 1 次咸水,带入土壤的盐分增多,加之干旱导致土壤蒸发较为强烈,致使各处理耕层土壤盐度相对较高。

有机质作为土壤肥力的重要物质基础,是衡量土壤质量的重要指标之一。本研究中,农田耕层 SOM 含量随着灌溉水矿化度增加和灌水次数增多呈现下降的趋势,SOM 含量与土壤  $EC_{1:5}$  呈显著负相关关系,刘文全等<sup>[16]</sup> 研究得到与之相同的结论。出现这种情况的原因是,咸水灌溉导致土壤盐度升高,破坏土壤团粒结构,减弱土壤对有机质固定和储存的能力;同时,作物生长受抑,地上部凋落物、秸秆等有机质来源减少<sup>[17]</sup>。有机肥中富含有机质,研究表明,增施有机肥可显著提高各灌水处理耕层 SOM 含量。究其原因,一是施用有机肥增加了外源有机物的直接输入量,二是施用有机肥可改善土壤环境,来自作物残留物和根系分泌物的碳源增加,有机质的输入量大于输出量<sup>[18]</sup>。年际间,2019 年有机质含量整体低于 2018 年,原因是 2019 年多灌 1 水带入土壤盐分多,作物受到干旱和盐分胁迫双重影响,生长发育差,王国栋等<sup>[19]</sup> 对干旱地区棉田土壤的研究得到与之相似的结果。与 2006 年试验初始时相比,2018 年和 2019 年夏玉米收获时 NOF 条件下各处理的耕层土壤有机质含量均明显降低,这主要是长期单施化肥和连续多年咸水灌溉作用的结果;但 OF 条件下各处理的土壤有机质含量均有所增加,说明增施有机肥可有效缓解长期灌溉咸水和施用化肥对土壤有机质产生的负面影响,保持甚至提高土壤肥力。

土壤团聚体是土壤养分的储存库,也是土壤结构的基本组成单元,团聚体的稳定性常用  $WR_{0.25}$ 、MWD、GMD 以及  $D_m$  等指标来评价, $WR_{0.25}$ 、MWD 和 GMD 越大, $D_m$  值越小,表征土壤团聚体稳定性越

强<sup>[13]</sup>。诸多研究<sup>[20-21]</sup> 表明,咸水灌溉破坏土壤团粒结构。本研究中, $WR_{0.25}$ 、MWD、GMD 随着灌溉水矿化度的升高均呈减小趋势, $D_m$  值呈增大趋势,当灌溉水矿化度 $\geq 4$  g/L 时,团聚体稳定性指标显著下降,这与吴雨晴等<sup>[22]</sup> 研究得出的结论相似。原因是灌溉咸水中  $Na^+$  占绝对优势,土壤胶体上吸附的交换性  $Na^+$  含量增加使胶体的电动电位增加,引起土壤团聚体的破碎与分散等物理变化,进而降低土壤团聚体的稳定性<sup>[23]</sup>。施用有机肥能够增加土壤活性有机碳含量,促进团聚体的形成和稳定。本研究结果显示,相同矿化度咸水灌溉条件下 OF 处理的耕层土壤团聚体稳定性指标显著优于 NOF 处理。其原因在于有机肥不仅能够增加土壤中纤维素、多糖、腐殖酸等大分子有机组分,为土壤团聚体的形成提供胶结物质,还可为微生物提供营养基质,而微生物在团聚体的形成和稳定中发挥重要作用<sup>[24]</sup>。本研究中,灌溉水矿化度和有机肥均对土壤团聚体稳定性指标产生重要影响,但前者的影响效应为负面,而后者是正面,其影响作用力为有机肥 $>$ 灌溉水矿化度 $>$ 二者互作。统计分析结果表明,NOF 条件下耕层 SOM 含量、 $WR_{0.25}$ 、MWD、GMD 和  $D_m$  与土壤  $EC_{1:5}$  之间,以及  $WR_{0.25}$ 、MWD、GMD 和  $D_m$  与 SOM 含量之间均呈现显著或极显著相关性,相比之下,OF 条件下土壤有机质含量和团聚体稳定性指标与土壤盐度间的相关性有所降低,而团聚体稳定性指标与有机质含量间的相关性升高。这进一步说明施用有机肥可减弱咸水灌溉带入盐分对土壤水稳性团聚体稳定性的不利影响,增强团聚体稳定性。年际之间,与 2018 年相比,2019 年各处理耕层土壤  $EC_{1:5}$  增加,SOM 含量降低,但土壤水稳性团聚体稳定性指标却有所提升,原因是土壤团聚体稳定性除受土壤盐分和 SOM 含量影响外还是,还受到取样时间、生产活动等因素的影响,2019 年取样时间是夏玉米收获开始之前,耕层土壤未受到机械碾压等因素的影响,而 2018 年的取样时间是在玉米收获后,机械碾压对大团聚体的数量及稳定性造成一定程度的破坏<sup>[25]</sup>。

### 4 结论

(1)麦玉两熟制农田连续多年咸水灌溉条件下,夏玉米收获时耕层土壤  $EC_{1:5}$  随灌溉水矿化度的增加而增大,且 4,6 g/L 与 1 g/L 处理间的差异达显著水平;施用有机肥可促进咸水灌溉农田土壤盐分淋洗,降低耕层土壤盐度,4,6 g/L 灌水处理尤为明显。

(2)土壤有机质含量随灌溉水矿化度的增加呈降低趋势,与 1 g/L 处理相比,4,6 g/L 灌水处理显著降低;施用有机肥可显著增加各处理耕层土壤有机质含量,1,2,4,

6 g/L 灌水处理的增加幅度分别为 80.75%~97.41%, 86.7%~112.33%, 88.91%~115.25%, 101.25%~127.32%。

(3) 咸水灌溉有降低耕层土壤水稳性团聚体稳定性的趋势, 随灌溉水矿化度的升高,  $>0.25$  mm 水稳性大团聚体质量分数、团聚体平均重量直径和几何平均直径逐渐减小, 分形维数逐渐增大, 其中 4, 6 g/L 与 1 g/L 灌水处理间的差异达显著水平。施用有机肥可显著提高各灌水处理的土壤团聚体稳定性指标。综上, 在本研究条件下,  $\geq 4$  g/L 咸水灌溉会显著增加土壤盐分, 降低土壤有机质含量, 破坏土壤团粒结构, 存在恶化土壤质量的风险; 配施有机肥能有效降低咸水灌溉对土壤环境产生的不利影响, 增大咸水的利用范围。建议试验区麦玉两熟制农田施用有机肥和不施有机肥条件下咸水灌溉的矿化度阈值分别为 4, 2 g/L。

#### 参考文献:

- [1] 张喜英, 刘小京, 陈素英, 等. 环渤海低平原农田多水源高效利用机理和技术研究[J]. 中国生态农业学报, 2016, 24(8): 995-1004.
- [2] 刘小京, 张喜英. 农田多水源高效利用理论与实践[M]. 石家庄: 河北科学技术出版社, 2018.
- [3] Zhang A Q, Zheng C L, Li K J, et al. Responses of soil water-salt variation and cotton growth to drip irrigation with saline water in the low plain near the Bohai Sea[J]. Irrigation and Drainage, 2020, 69(3): 448-459.
- [4] Yang G, Li F D, Tian L J, et al. Soil physicochemical properties and cotton (*Gossypium hirsutum* L.) yield under brackish water mulched drip irrigation[J]. Soil and Tillage Research, 2020, 199: 1-10.
- [5] 高聪帅, 邵立威, 闫宗正, 等. 不同矿化度微咸水灌溉冬小麦对下季作物产量和周年土壤盐分平衡的影响[J]. 中国生态农业学报, 2021, 29(5): 809-820.
- [6] 江晓慧, 高阳, 王广帅, 等. 基于 FvCB 模型分析盐分胁迫对棉花叶片光合作用的影响[J]. 应用生态学报, 2020, 31(5): 1653-1659.
- [7] Dou Y P, Yang Y, An S S, et al. Effects of different vegetation restoration measures on soil aggregate stability and erodibility on the Loess Plateau, China[J]. Catena, 2019, 185: 1-9.
- [8] 王纯, 陈晓旋, 陈优阳, 等. 水盐梯度对闽江河口湿地土壤水稳性团聚体分布及稳定性的影响[J]. 环境科学学报, 2019, 39(9): 3117-3125.
- [9] 吴雨晴, 郑春莲, 孙景生, 等. 长期咸水灌溉对棉田土壤水稳性团聚体的影响[J]. 灌溉排水学报, 2020, 39(9): 58-64, 107.
- [10] 张文, 周广威, 闵伟, 等. 长期咸水滴灌对棉花产量、土壤理化性质和  $N_2O$  排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(8): 1583-1590.
- [11] Abiven S, Menasseri S, Chenu C. The effects of organic inputs over time on soil aggregate stability - A literature analysis[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2009, 41(1): 1-12.
- [12] Zhang J J, Wei Y X, Liu J Z, et al. Effects of maize straw and its biochar application on organic and humic carbon in water-stable aggregates of a Mollisol in Northeast China: A five-year field experiment[J]. Soil and Tillage Research, 2019, 190: 1-9.
- [13] 刘梦云, 吴健利, 刘丽雯, 等. 黄土台塬土地利用方式对土壤水稳性团聚体稳定性影响[J]. 自然资源学报, 2016, 31(9): 1564-1576.
- [14] Liu M L, Wang C, Liu X L, et al. Saline-alkali soil applied with vermicompost and humic acid fertilizer improved macroaggregate microstructure to enhance salt leaching and inhibit nitrogen losses[J]. Applied Soil Ecology, 2020, 156: 1-9.
- [15] 魏圆云, 崔丽娟, 张曼胤, 等. 土壤有机碳矿化激发效应的微生物机制研究进展[J]. 生态学杂志, 2019, 38(4): 1202-1211.
- [16] 刘文全, 卢芳, 徐兴永, 等. 废弃盐田复垦利用后土壤盐分与有机质含量空间变异特征[J]. 生态学报, 2018, 38(4): 1311-1319.
- [17] 谢军, 赵亚南, 陈轩敬, 等. 长期不同施肥对土壤溶解性有机质含量及其结构特征的影响[J]. 光谱学与光谱分析, 2018, 38(7): 2250-2255.
- [18] Li T T, Zhang Y L, Bei S K, et al. Contrasting impacts of manure and inorganic fertilizer applications for nine years on soil organic carbon and its labile fractions in bulk soil and soil aggregates[J]. Catena, 2020, 194: 1-12.
- [19] 王国栋, 褚贵新, 刘瑜, 等. 干旱绿洲长期微咸地下水灌溉对棉田土壤微生物量影响[J]. 农业工程学报, 2009, 25(11): 44-48.
- [20] Zhang A Q, Li K J, Sun J S, et al. Effects of a 10-year irrigation with saline water on soil physico-chemical properties and cotton production[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020, 75(5): 629-639.
- [21] Huang C H, Xue X, Wang T, et al. Effects of saline water irrigation on soil properties in northwest[J]. Environmental Earth Sciences, 2011, 63(4): 701-708.
- [22] 吴雨晴, 郑春莲, 李科江, 等. 咸水灌溉对麦一玉两熟制农田土壤水稳性团聚体的影响[J]. 水土保持学报, 2021, 35(2): 288-294, 308.
- [23] Li J S, Gao Y M, Zhang X Y, et al. Comprehensive comparison of different saline water irrigation strategies for tomato production: Soil properties, plant growth, fruit yield and fruit quality[J]. Agricultural Water Management, 2019, 213: 521-533.
- [24] 廖超林, 黎丽娜, 谢丽华, 等. 增减施有机肥对红壤性水稻土团聚体稳定性及胶结物的影响[J]. 土壤学报, 2021, 58(4): 978-988.
- [25] 卢倩倩, 王恩姮, 陈祥伟. 模拟机械压实对黑土微团聚体组成及稳定性的影响[J]. 农业工程学报, 2015, 31(11): 54-59.