

# 咸水灌溉对麦—玉两熟制农田土壤水稳定性团聚体的影响

吴雨晴<sup>1,2</sup>, 郑春莲<sup>2</sup>, 李科江<sup>2</sup>, 党红凯<sup>2</sup>, 李全起<sup>1</sup>, 李树宁<sup>1</sup>, 张俊鹏<sup>1,2</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:** 为探明咸水灌溉对麦—玉两熟轮作农田土壤团聚体的影响效应, 在长期定位咸水灌溉试验(始于2006年)的基础上, 研究了不同矿化度咸水连续灌溉第13~14年农田土壤盐分( $EC_e$ )及水稳定性团聚体分布和稳定性指标的变化规律。试验设置5个灌溉水矿化度处理, 分别为1, 2, 4, 6, 8 g/L。结果表明, 0—40 cm土层土壤 $EC_e$ 随灌溉水矿化度增加而增大, 4, 6, 8 g/L灌水处理与1 g/L处理间差异达显著水平。咸水灌溉改变土壤水稳定性团聚体的粒级分布, 灌溉水矿化度 $\leq 4$  g/L时, 0—40 cm土壤水稳定性团聚体以大团聚体( $>0.25$  mm)为优势粒级, 随灌溉水矿化度增加, 大团聚体质量分数降低, 微团聚体(0.053~0.25 mm)和粉+黏团聚体( $<0.053$  mm)质量分数增大, 当灌溉水矿化度达到6 g/L时, 粉+黏团聚体占比最大。咸水灌溉降低土壤水稳定性团聚体的稳定性, 随灌溉水矿化度的增加, 土壤团聚体平均重量直径和几何平均直径减小, 分形维数增大, 但2 g/L与1 g/L灌水处理间无显著差异。在该研究灌溉制度下,  $\geq 4$  g/L咸水灌溉显著增加土壤盐分, 破坏土壤团粒结构, 应谨慎使用。

**关键词:** 咸水灌溉; 麦—玉轮作; 土壤盐分; 土壤水稳定性团聚体; 稳定性

中图分类号:S152.4; S274.3

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2021)02-0288-07

DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2021.02.038

## Effect of Saline Water Irrigation on Soil Water-stable Aggregates in Wheat-maize Crop Double Cropping System

WU Yuqing<sup>1,2</sup>, ZHENG Chunlian<sup>2</sup>, LI Kejiang<sup>2</sup>, DANG Hongkai<sup>2</sup>,

LI Quanqi<sup>1</sup>, LI Shuning<sup>1</sup>, ZHANG Junpeng<sup>1,2</sup>

(1. College of Water Conservancy and Civil Engineering, Shandong Agricultural University, Taian, Shandong 271018; 2. Hebei Key Laboratory of Crop Drought Resistance Research, Institute of Dryland Farming, Hebei Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Hengshui, Hebei 053000)

**Abstract:** In this study, a long-term saline water irrigation experiment was carried out on wheat-maize farmland since 2006, and studied the change characteristics of soil salinity ( $EC_e$ ), water-stable aggregates particle size distribution and their stability index under the condition of continuous saline water irrigation with different salinity in the 13th and 14th year (in 2018 and 2019). Five salinity levels of irrigation water were tested: 2 (T1), 4 (T2), 6 (T3), and 8 (T4), and fresh groundwater (1 g/L) was used as control treatment (CK). The salinity level from T1 to T4 was formed by mixing sea salt into the freshwater. The results showed that saline water irrigation increased soil  $EC_e$ . Compared with CK, the  $EC_e$  in the treatment of 2 g/L showed no significant difference, but a significant increase when the salinity of irrigation water beyond 4 g/L. Saline water irrigation affected the particle size distribution of soil water-stable aggregates. When the salinity of irrigation water was less than 4 g/L, the macroaggregate ( $>0.25$  mm) was the dominant particle size of soil water stable aggregates in 0—40 cm soil layer. With the increase of irrigation water salinity, the mass fraction of macroaggregate decreased, while the mass fraction of microaggregate (0.053~0.25 mm) and silt + clay aggregate ( $<0.053$  mm) increased. When the salinity of irrigation water reached 6 g/L, silt + clay aggregate was dominant in 0—40 cm soil layer. With the increase of irrigation water salinity, the average weight diameter (MWD) and geometric mean diameter (GMD) of soil aggregates decreased, while the fractal dimension ( $D_f$ )

收稿日期:2020-09-19

资助项目:国家自然科学基金项目(51609248);国家重点研发计划项目(2017YFD03009002);河南商丘农田生态系统野外科学观测研究站开放基金项目(FIRI202004-0101)

第一作者:吴雨晴(1995—),女,硕士研究生,主要从事微咸水安全利用技术研究。E-mail: wuyuqing0910@qq.com

通信作者:张俊鹏(1983—),男,博士,副教授,硕士生导师,主要从事作物水分生理与高效用水技术研究。E-mail: jpengzhang@163.com

increased, which meant that the stability of soil water stable aggregates decreased. Under this irrigation system, saline water with salinity greater than or equal to 4 g/L significantly increased soil salinity and destroyed soil aggregate structure, which should be used cautiously in the irrigation of wheat-maize crop system.

**Keywords:** saline water irrigation; wheat-maize rotation system; soil salt; soil water-stable aggregates; stability

华北平原是我国重要的粮食产区,同时也是严重资源型缺水地区。由于地面淡水资源匮乏,华北平原深层地下水超量开采造成的地下漏斗区域面积接近其总面积的11.3%,成为世界上最大的地下水降落漏斗区<sup>[1-2]</sup>。然而,该地区浅层地下咸水分布广泛,矿化度为2~5 g/L的咸水资源天然补给量 $4.3 \times 10^9 \text{ m}^3$ ,可开采量 $2.8 \times 10^9 \text{ m}^3$ <sup>[3]</sup>。许多学者<sup>[4-6]</sup>研究指出,若利用方法得当,咸水可替代淡水用于农业灌溉。

咸水灌溉在缓解干旱的同时也将盐分带入土体,适量盐分对土壤环境和作物生长影响不大,超过一定阈值将破坏土壤结构,抑制作物生长<sup>[7-8]</sup>。团聚体作为土壤结构的基本单元和土壤肥力的重要载体,其组成和稳定性直接影响土壤性质<sup>[9-10]</sup>。已有研究<sup>[11-12]</sup>表明,咸水中化学物质增加土壤离子交换量,加速黏粒分散,并且能溶解胶结剂使大团聚体解聚<sup>[13]</sup>,导致土壤团聚结构破坏,透气性和导水能力减弱,进而抑制作物对水分和养分的吸收<sup>[14]</sup>。Zhang等<sup>[15]</sup>研究指出,采用≤7.1 dS/m的咸水畦灌对棉田土壤水稳定性团聚体破坏程度较小,未显著影响棉花产量;Bucklan等<sup>[16]</sup>研究认为,咸水灌溉降低土壤团聚体稳定性,电导率≥2 dS/m且钠吸附比≥10的灌溉水导致土壤质量恶化,不可用于农田灌溉;盛丰等<sup>[17]</sup>研究表明,适度矿化度(3.0 g/L)的灌溉水有利于抑制土壤黏粒分散,促进土壤颗粒絮凝,从而增大水稳定性团聚体稳定性,而高浓度(5.0 g/L)灌溉水使土壤黏粒分散,导致土壤团聚体破碎。可见,以往学者关于咸水灌溉对土壤团聚体影响的研究结果存在较大差异,原因是咸水灌溉农田土壤盐分运移过程极为复杂,受到灌溉水质、灌溉制度、作物类型、种植模式、土壤质地、降雨分布、太阳辐射、气温湿度等多个因素的影响,并且土壤盐分具有适量无害、过量危害性,由此导致咸水灌溉对土壤环境的影响具有持续性,短期试验研究难以揭示其影响效应<sup>[18]</sup>。鉴此,本文在麦玉一轮作农田不同矿化度咸水长期定位灌溉试验(始于2006年)的基础上,重点分析连续咸水灌溉第13~14年(2018—2019年)农田土壤盐分、土壤水稳定性团聚体粒级分布及团聚体稳定性指标的变化特征,探讨咸水灌溉对土壤团聚体的影响机制,以期为华北地区咸水资源安全利用和农业可持续发展提供理论依据和技术支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

试验在位于华北平原东北部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。平均海拔21 m,属温带大陆性季风气候,年平均气温12.8℃,年均降水量500 mm,年均蒸发量1 785 mm,年日照时间2 509 h。土壤为黏质壤性脱盐土,试验初始(2006年)土壤有机质含量为12.8 g/kg,碱解氮含量65.5 mg/kg,速效磷含量17.6 mg/kg,速效钾含量134 mg/kg;0—100 cm土层含盐量0.657 g/kg,土壤容重1.44 g/cm<sup>3</sup>,田间持水量为28%。试验区地下水埋深>5 m。

### 1.2 试验设计

本研究在不同矿化度咸水长期定位灌溉试验的基础上开展,定位试验始于2006年10月,灌水方式为畦灌。共设置4个咸水浓度水平,即2,4,6,8 g/L,分别记作T1、T2、T3、T4,以当地深井淡水(1 g/L)灌溉为对照(CK)。已有研究<sup>[19]</sup>指出,研究区浅层地下咸水是大陆盐化与海水入侵双重作用的结果,虽然水化学类型较为复杂,但整体以Na<sup>+</sup>和Cl<sup>-</sup>含量最高。因此本研究中2,4,6,8 g/L咸水由深层地下淡水掺兑海盐配置而成。海盐成分以NaCl为主,Cl<sup>-</sup>和Na<sup>+</sup>含量占可溶性盐离子量的比例分别为55.64%和34.45%,各处理灌溉水离子组成见表1。试验小区面积为57 m<sup>2</sup>(9.5 m×6 m),3次重复,随机排列。种植制度为冬小麦—夏玉米一年两熟制度,冬小麦生育期一般浇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)、起身拔节水和扬花水;夏玉米一般只浇灌蒙头水(若播种时0—20 cm土壤含水率大于田间持水量的70%,不再灌水),遇干旱年份,若拔节期0—40 cm土壤含水率低于田间持水量的60%,补灌1水。小麦和玉米的灌水定额均为60 mm。本文重点分析连续咸水灌溉第13~14年(2018—2019年)夏玉米收获时土壤盐分及土壤水稳定性团聚体状况。图1为2017—2018年和2018—2019年冬小麦—夏玉米生长季降雨分布情况,以夏玉米收获时为计算节点,2个周年的降水量分别为648.7,382.6 mm,灌水量依次为240,300 mm。

### 1.3 样品采集与分析

1.3.1 土壤样品的采集 土壤盐分:于2018年10月2日和2019年9月30日在夏玉米收获时用土钻采集各小区0—40 cm土层的土样,每10 cm分为1层,每个小区采集3个样点均匀混合后作为1次重复。

土壤水稳定性团聚体:于2018年10月2日和2019年9月30日在夏玉米收获时采集各小区0—40 cm土层的

原状土,每 10 cm 为 1 层,送回实验室风干。在采集和运输过程中尽量减少土样的扰动,避免团聚体的破坏。风

干过程中,将土样沿天然裂纹手工破碎成小块,并除去植物残体、可见根系及石块后备用。

表 1 灌溉水离子组成

灌溉水矿化度/ (g·L <sup>-1</sup> )	离子浓度/(mEq·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	1.43	1.61	0.15	10.73	5.88	1.04	7.63
2	1.71	3.19	0.18	25.62	10.32	1.11	21.45
4	2.00	4.60	0.20	56.44	16.91	1.21	47.27
6	2.33	5.78	0.23	87.84	23.34	1.31	73.58
8	2.79	6.26	0.25	119.97	30.14	1.44	100.04

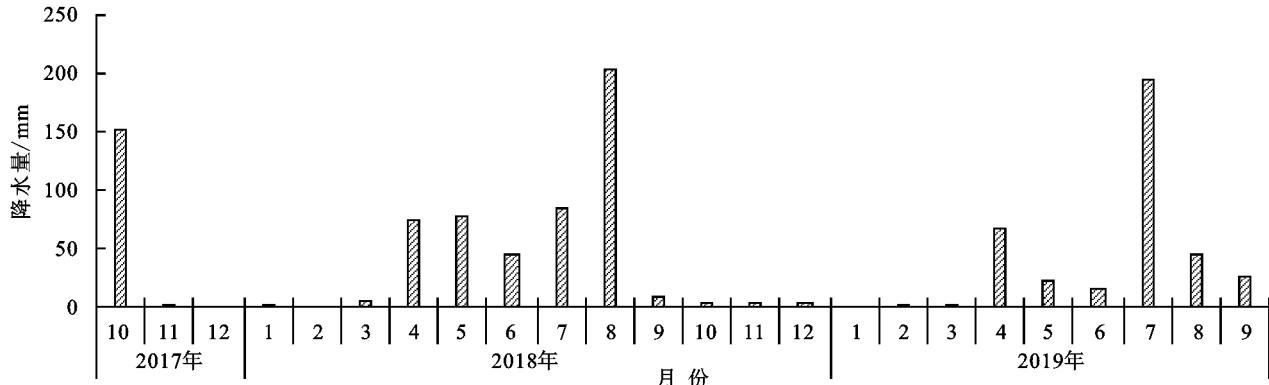


图 1 2017—2019 年小麦—玉米生长季降水逐月分布

1.3.2 测定项目与方法 土壤盐分:土壤盐分含量用饱和泥浆浸提液电导率( $EC_e$ )表示,土样风干后研磨过筛,采用 DDS-307A 型电导率仪(上海雷磁)测定土水质量比 1:5 悬浊液的电导率( $EC_{1:5}$ ),依据公式(1)计算土壤  $EC_e$ 。

土壤水稳定性团聚体:采用 TPF-100 型土壤团粒结构分析仪测定土壤水稳定性团聚体组成,测定方法为湿筛法。称取风干土样 50 g,放置套筛最上层,套筛自上而下孔径大小依次为 5,2,1,0.5,0.25,0.053 mm,于水中湿润 10 min 后振荡 10 min,筛动频率为 30 次/min。筛好后,将各级筛层团聚体收集至铝盒中,60 °C 烘干后称重。

### 1.3.3 计算方法

(1) 土壤  $EC_e$  采用课题组报道的方法<sup>[20]</sup>计算,公式为:

$$EC_e = 9.367EC_{1:5} - 0.001 \quad R^2 = 0.990 \quad (1)$$

(2) 不同粒级水稳定性团聚体的质量分数( $\omega_i$ ,%)<sup>[21]</sup>:

$$\omega_i = \frac{M_i}{M_T} \times 100\% \quad (2)$$

式中: $M_i$  为  $i$  级水稳定性团聚体质量(g); $M_T$  为水稳定性团聚体总质量(g)。本研究将水稳定性团聚体分 3 个粒级,分别为大团聚体( $>0.25$  mm)、微团聚体( $0.053\sim0.25$  mm)和粉+黏团聚体( $<0.053$  mm)<sup>[22]</sup>。

(3) 平均重量直径(MWD,mm)和几何平均直径(GMD,mm)<sup>[23]</sup>:

$$MWD = \frac{\sum_{i=1}^n (\bar{x}_i \omega_i)}{\sum_{i=1}^n \omega_i} \quad (3)$$

$$GMD = \exp \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (\bar{x}_i \omega_i)}{\sum_{i=1}^n \omega_i} \right] \quad (4)$$

式中: $\bar{x}_i$  为  $i$  级水稳定性团聚体的平均直径(mm)。

(4) 分形维数( $D$ )<sup>[24]</sup>:

$$D = 3 - \frac{\lg [M(\delta < \bar{x}_i)/M_T]}{\lg (\bar{x}_i/x_{\max})} \quad (5)$$

式中: $M(\delta < \bar{x}_i)$  为粒径  $< \bar{x}_i$  水稳定性团聚体质量(g); $x_{\max}$  为团聚体的最大直径(mm)。

## 1.4 数据处理

采用 Excel 2016 和 DPS 数据处理系统进行数据处理和分析。多重比较采用 LSD 法,显著水平为 0.05。

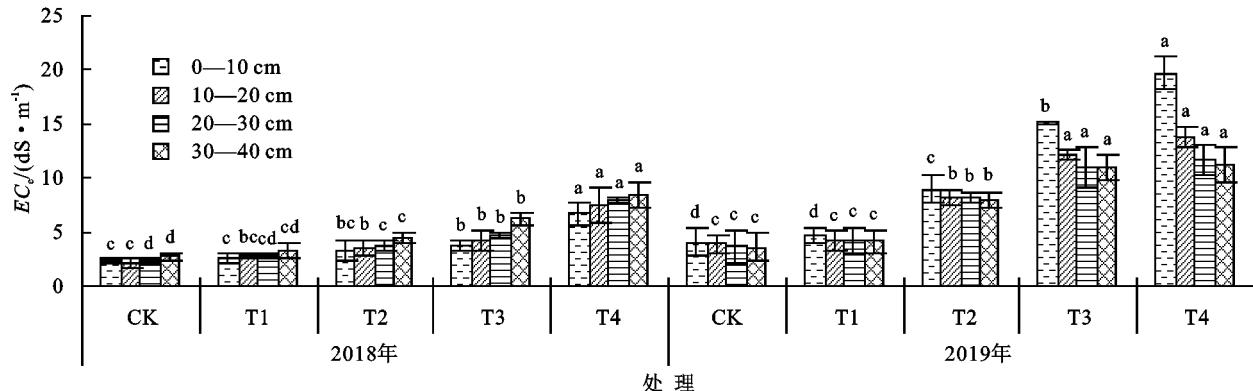
## 2 结果与分析

### 2.1 咸水灌溉对农田土壤盐分的影响

由图 2 可见,土壤  $EC_e$  随灌溉水矿化度的增加而增大,与 CK 相比,2018 年 T1、T2、T3、T4 处理 0—40 cm 土层平均  $EC_e$  分别增加 20.7%,54.4%,96.9%,220.0%,2019 年依次增加 13.0%,118.8%,224.6%,271.6%,其中,T2、T3、T4 与 CK 处理间差异达显著水平。同一矿化度灌溉水处理下,2018 年土壤  $EC_e$  随土层深度的增加呈上升趋势,以 T2 处理为例,10—20,20—30,30—40 cm 土层较 0—10 cm 土层土壤  $EC_e$  分别增加 7.6%,13.9%,36.6%;然而,2019 年与之相反,以 T4 处理为例,10—20,20—30,30—40 cm 土层较 0—10 cm 土层土壤  $EC_e$  依次降低 30.1%,40.5%,42.7%。

年际间,2019年土壤 $EC_e$ 明显高于2018年。与2018年相比,2019年夏玉米收获时CK、T1、T2、T3、

T4处理0—40 cm土层土壤 $EC_e$ 分别增加58.5%、48.4%、124.6%、161.4%、84.0%。



注:同一土层不同小写字母表示处理间差异显著( $P<0.05$ )。

图2 2018—2019年不同灌水处理农田土壤盐分

## 2.2 咸水灌溉对农田土壤水稳定性团聚体粒级分布的影响

从图3可以看出,灌溉水矿化度 $\leq 4 \text{ g/L}$ 时,0—40 cm土层土壤水稳定性团聚体以大团聚体( $>0.25 \text{ mm}$ )为优势粒级,以T1处理为例,2018年和2019年0—40 cm土层大团聚体平均质量分数分别为39.0%和49.0%。随灌溉水矿化度的增加,大团聚体质量分数降低,与CK处理相比,2018年T1、T2、T3、T4处理0—40 cm土层大团聚体平均质量分数分别降低12.3%,21.9%,38.8%,51.53%,2019年依次降低

4.9%,16.5%,30.2%,40.9%。微团聚体( $0.053\sim0.25 \text{ mm}$ )和粉+黏团聚体( $<0.053 \text{ mm}$ )质量分数随灌溉水矿化度的增加呈上升趋势,当灌溉水矿化度达到 $6 \text{ g/L}$ 时,0—40 cm土层水稳定性团聚体以粉+黏团聚体占优势。同一灌溉水矿化度处理下土壤大团聚体质量分数随土层深度的增加先减小后增大,20—30 cm土层最低,粉+黏团聚体质量分数随土层变化趋势与之相反。年际间,同一灌溉水矿化度处理下2019年大团聚质量分数高于2018年,微团聚体和粉+黏团聚体质量分数整体低于2018年。

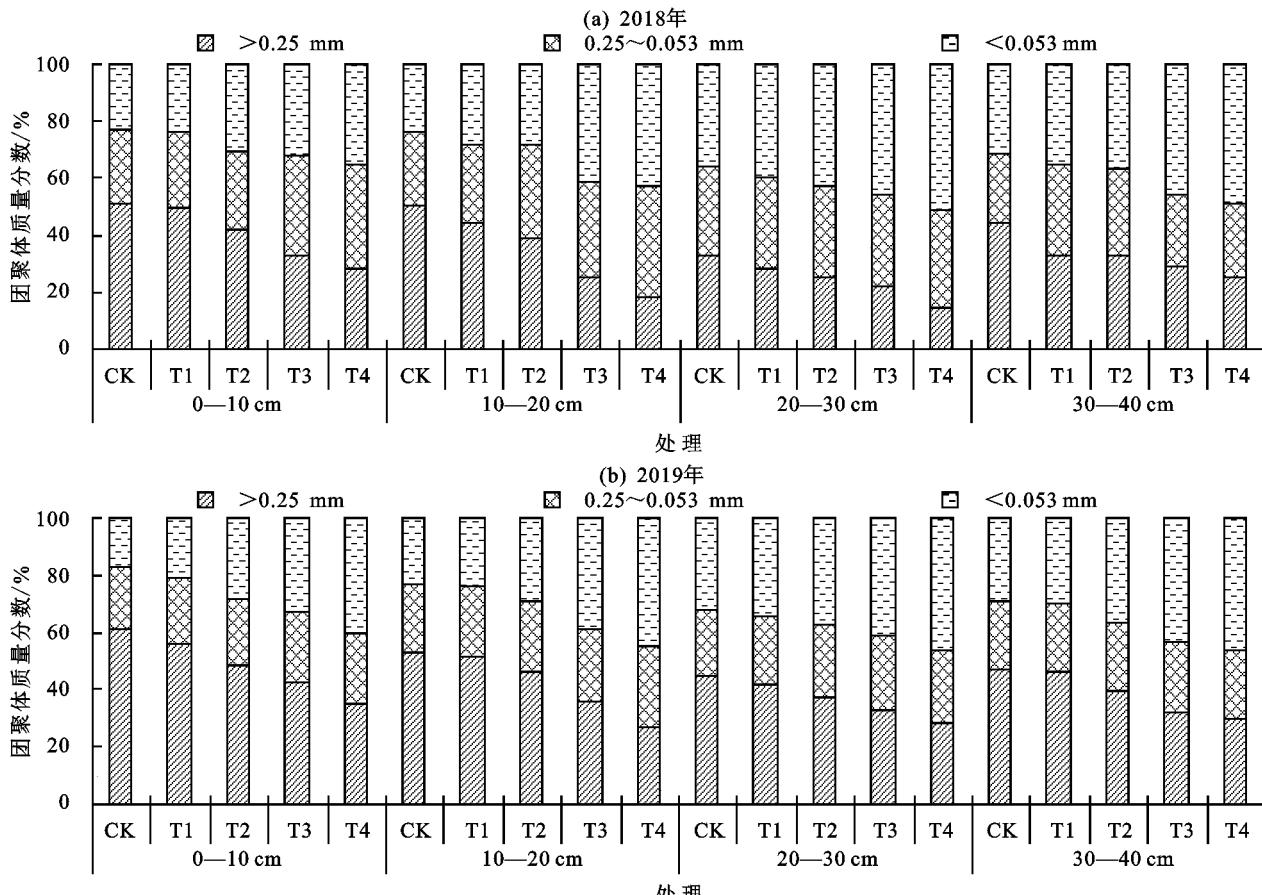


图3 2018—2019年不同灌水处理农田土壤水稳定性团聚体粒级分布

### 2.3 咸水灌溉对农田土壤水稳定性团聚体稳定性的影响

从表 2 可以看出, MWD 和 GMD 随灌溉水矿化度的增加均呈下降趋势。以 0—40 cm 土层土壤水稳定性团聚体 MWD 为例,与 CK 处理相比,2018 年 T1、T2、T3、T4 处理分别降低 7.7%、13.5%、26.9%、40.2%, 其中,T3 和 T4 与 CK 处理间差异显著;2019 年 T1~T4 处理依次降低 8.9%, 22.7%, 32.6%, 43.3%, T2、T3、T4 与 CK 处理间差异均达显著水平。年际间, 2019 年各处理土壤水稳定性团聚体的 MWD 和 GMD 整体高于 2018 年。

### 2.4 咸水灌溉对农田土壤水稳定性团聚体分形维数的影响

从图 4 可以看出, 咸水灌溉有增大土壤水稳定性团聚体  $D$  的趋势。以 10—20 cm 土层为例,与 CK 相比,2018 年和 2019 年 T1、T2、T3、T4 处理土壤水稳定性团聚体  $D$  分别降低 4.0%, 5.3%, 7.4%, 10.8% 和 2.6%, 6.1%, 10.6%, 16.4%。除 T4 外, 各处理的  $D$  值随土层深度增加呈“S”形变化趋势, 均以 20—30 cm 土层的  $D$  值最大。年际间, 2019 年各处理的土壤水稳定性团聚体  $D$  整体小于 2018 年。

### 2.5 土壤盐分、水稳定性团聚体粒级及稳定性指标的相关分析

表 3 为 2018—2019 年各处理 0—40 cm 土层平均土壤盐分、水稳定性团聚体组成及稳定性指标的相关分析。由表 3 可知, 土壤  $EC_e$  与大团聚体质量分数、

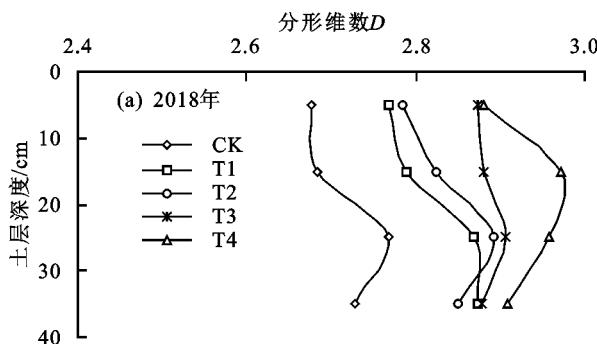


图 4 2018—2019 年不同灌水处理农田土壤水稳定性团聚体分形维数

## 3 讨论

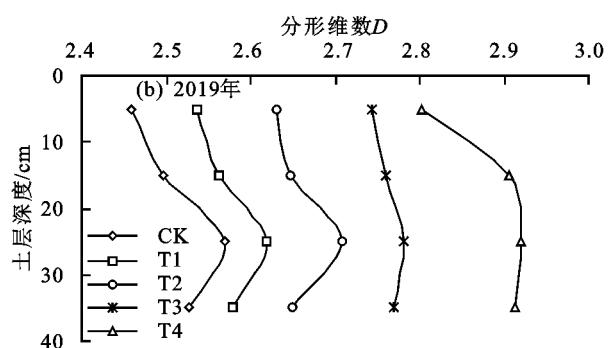
咸水灌溉具有两面性, 在增加土壤湿度的同时, 也带入盐分。本研究中麦—玉两熟农田土壤  $EC_e$  随灌溉水矿化度的增加而增大, 当灌溉水矿化度  $\geq 4 \text{ g/L}$  时, 土壤  $EC_e$  显著高于 CK。盐随水走, 土壤盐分在土层中分布主要受灌溉、降雨、蒸发蒸腾等因素影响, 2018 年夏玉米收获时土壤  $EC_e$  随土层深度的增加呈上升趋势, 2019 年与之相反, 原因是 2019 年降雨较少, 土壤蒸发致使盐分表聚。年际间, 2018 年夏玉米收获时 0—40 cm 土层土壤  $EC_e$  整体低于 2019 年, 这是因为 2018 年夏玉米生长季比 2019 年少灌 1 水, 灌

MWD、GMD 均呈显著负相关, 与粉+黏团聚体质量分数、 $D$  呈显著正相关。对水稳定性团聚体各指标而言, 大团聚体质量分数、MWD、GMD 之间呈显著正相关, 且均与与粉+黏团聚体、 $D$  呈显著负相关。

表 2 2018—2019 年不同灌水处理农田土壤水稳定性团聚体的稳定性指标

土层 深度/cm	处理	2018 年		2019 年	
		MWD/mm	GMD/mm	MWD/mm	GMD/mm
0—10	CK	0.39a	0.22a	0.61a	0.28a
	T1	0.38a	0.21a	0.57ab	0.26a
	T2	0.36a	0.19ab	0.44bc	0.24ab
	T3	0.30b	0.16bc	0.40cd	0.21b
10—20	T4	0.26c	0.14c	0.34d	0.15c
	CK	0.37a	0.21a	0.58a	0.27a
	T1	0.34ab	0.19a	0.52ab	0.25a
	T2	0.32b	0.18a	0.43b	0.22b
20—30	T3	0.25c	0.14b	0.37b	0.19b
	T4	0.20d	0.11c	0.31c	0.15c
	CK	0.29a	0.16a	0.46a	0.22a
	T1	0.27ab	0.15ab	0.41ab	0.20ab
30—40	T2	0.24bc	0.13b	0.37bc	0.18bc
	T3	0.22c	0.13b	0.33c	0.16cd
	T4	0.16d	0.10c	0.25d	0.14d
	CK	0.32a	0.17a	0.48a	0.23a
40—50	T1	0.28ab	0.15ab	0.43ab	0.21ab
	T2	0.27ab	0.15ab	0.40b	0.19b
	T3	0.24bc	0.14b	0.33c	0.16c
	T4	0.20c	0.12c	0.30c	0.15c

注: 同一土层同列不同小写字母表示处理间差异显著 ( $P < 0.05$ )。



溉定额小、带入土壤的盐分少, 并且降雨量较大, 对表层土壤盐分进行淋洗。

团聚体是土壤结构的重要物质基础, 其粒级分布是衡量土壤物理质量的重要指标。本研究发现, 咸水灌溉改变土壤水稳定性团聚体的粒级分布, 整体来看, 灌溉水矿化度  $\leq 4 \text{ g/L}$  时, 0—40 cm 土壤水稳定性团聚体以大团聚体 ( $> 0.25 \text{ mm}$ ) 为优势粒级, 随灌溉水矿化度的增加, 大团聚体质量分数降低。究其原因是咸水中的化学物质随灌溉进入土壤, 通过离子交换和阳离子桥作用改变土壤胶体的离子组成, 如  $\text{Na}^+$  可以代替黏土矿物颗粒中的  $\text{Ca}^{2+}$  和吸附在土壤颗粒表面或者团聚体层间的  $\text{Mg}^{2+}$  等土壤黏合剂, 引起土壤颗

粒的膨胀与分散<sup>[25-26]</sup>;另一方面,腐殖质等有机物、微生物分泌物和真菌菌丝等都是团聚体形成的重要胶结剂<sup>[27-28]</sup>,咸水灌溉可降低土壤微生物群落结构和活性,减少有机物的积累<sup>[29-30]</sup>,进而间接影响团聚体的胶结复合。

与2019年相比,相同灌溉水矿化度处理下,2018

表3 2018—2019年土壤盐分、水稳定性团聚体粒级及稳定性指标的相关分析

年份	项目	EC <sub>e</sub>	大团聚体质量分数	微团聚体质量分数	粉+黏团聚体质量分数	MWD	GMD	D
	EC <sub>e</sub>	1	-0.92**	0.71	0.94**	-0.97**	-0.95**	0.98**
	大团聚体质量分数		1	-0.87*	-0.98**	0.99**	0.99**	-0.94**
	微团聚体质量分数			1	0.77	-0.80	-0.82	0.81
2018	粉+黏团聚体质量分数				1	-0.97**	-0.97**	0.89*
	MWD					1	0.99**	-0.92**
	GMD						1	-0.92**
	D							1
	EC <sub>e</sub>	1	-0.91**	0.68	0.87*	-0.96**	-0.95**	0.92**
	大团聚体质量分数		1	-0.69	-0.96**	0.92**	0.93**	-0.91**
	微团聚体质量分数			1	0.61	-0.72	-0.73	0.56
2019	粉+黏团聚体质量分数				1	-0.92**	-0.93**	0.90*
	MWD					1	0.99**	-0.98**
	GMD						1	-0.91**
	D							1

注: \*、\* 分别表示在 0.01, 0.05 水平(双侧)上显著相关。

土壤水稳定性团聚体平均重量直径(MWD)和几何平均直径(GMD)是反映团聚体组成的综合参数,也是评价团聚体稳定性的重要指标,其值越大,团聚体稳定性越强,土壤结构越好<sup>[32-33]</sup>。本研究结果显示,MWD 和 GMD 均随灌溉水矿化度的增加而减小,说明咸水灌溉降低土壤水稳定性团聚体的稳定性,这与已有研究结论<sup>[34]</sup>一致。但 2,4 g/L 微咸水灌溉未对土壤团聚体稳定性产生明显影响。通过 2 年对比可知,2019 年各处理的 MWD 和 GMD 随灌溉水矿化度增加的降幅大于 2018 年,究其原因是 2019 年夏玉米生长季比 2018 年多灌 1 水,带入土壤的盐分多,团聚体结构破坏较严重。

水稳定性团聚体分形维数(D)是反映土壤结构几何形状的参数,D 越小,表示土壤分散度越小,土壤稳定性越强<sup>[35]</sup>。本研究表明,0—40 cm 土层水稳定性团聚体 D 随灌水矿化度的增加而增大,这是因为咸水灌溉导致土壤大团聚体膨胀并分散,微团聚体和粉+黏团聚体质量分数增加,土壤分散度增大,土壤结构变差。D 随土层深度的增加呈“S”变化,20—30 cm 土层的 D 最大,原因是每年冬小麦播种前均会对试验田进行旋耕,旋耕深度约 12~15 cm,耕作层以下土壤被压实,形成厚度约 5~7 cm 的犁底层,破坏团聚体结构,土壤稳定性降低<sup>[36-37]</sup>。

团聚体粒级分布、MWD、GMD 和 D 均可表征土

年土壤大团聚体质量分数小,微团聚体质量分数大,这可能是由于 2018 年取样时间为夏玉米收获完成后,受到机械碾压等因素的影响,土壤团聚结构遭到破坏,大团聚体在物理扰动下破碎<sup>[31]</sup>,而 2019 年取样时间在夏玉米收获开始前,田间未受到机械碾压的影响。

壤水稳定性团聚体稳定性程度。本研究发现,麦—玉两熟农田 0—40 cm 土层土壤盐分与大团聚体质量分数呈显著负相关,与粉+黏团聚体质量分数呈显著正相关,但王纯等<sup>[13]</sup>研究认为,高潮滩土壤粉+黏团聚体和大团聚体含量均与盐分呈正相关,出现差异的原因可能是土壤质地与灌溉水质不同。从土壤盐分与水稳定性团聚体稳定性指标的相关分析来看,0—40 cm 土层土壤盐分与 MWD、GMD 均呈显著负相关,与 D 呈显著正相关,这与以往研究<sup>[13,38]</sup>结论类似。

## 4 结论

(1)麦—玉两熟轮作农田 0—40 cm 土层土壤盐分随灌溉水矿化度的增加而增大,其中 4,6,8 g/L 灌水处理与 1 g/L 处理间差异达显著水平。

(2)咸水灌溉改变土壤水稳定性团聚体的粒级分布,随灌溉水矿化度的增加,0—40 cm 土层土壤大团聚体( $>0.25$  mm)质量分数逐渐降低,而粉+黏团聚体( $<0.053$  mm)质量分数呈增加趋势。当灌溉水矿化度 $\leq 4$  g/L 时,土壤水稳定性团聚体以大团聚体为优势粒级,当灌溉水矿化度 $\geq 6$  g/L 时,土壤水稳定性团聚体以粉+黏团聚体占比最大。

(3)咸水灌溉有降低土壤水稳定性团聚体稳定性的趋势,当灌溉水矿化度 $\geq 4$  g/L 时,0—40 cm 土层土壤团聚体平均重量直径和几何平均直径显著降低,分形维数明显增大。

综上,在本研究灌溉制度下, $\geq 4 \text{ g/L}$  咸水灌溉会显著增加土壤盐分,破坏土壤团粒结构,存在恶化土壤质量的风险,建议试验区麦—玉两熟制农田咸水灌溉的矿化度阈值不宜超过 $4 \text{ g/L}$ 。

## 参考文献:

- [1] 艾慧,郭得恩.地下水超采威胁华北平原[J].生态经济,2018,34(8):10-13.
- [2] 成升魁,鲁春霞,郭金花,等.中国农业资源环境透视:问题与建议[J].科技导报,2018,36(11):13-21.
- [3] 胡雅琪,吴文勇.中国农业非常规水资源灌溉现状与发展策略[J].中国工程科学,2018,20(5):69-76.
- [4] 张俊鹏,冯棣,曹彩云,等.咸水灌溉对棉花耗水特性和水分利用效率的影响[J].农业机械学报,2016,47(6):107-112.
- [5] 郭丽,郑春莲,曹彩云,等.长期咸水灌溉对小麦光合特性与土壤盐分的影响[J].农业机械学报,2017,48(1):183-190.
- [6] Zhang A Q, Zheng C L, Li K J, et al. Variation of soil salt and cotton responses to drip irrigation with saline water in the Low Plain around the BoHai Sea in China [J]. Irrigation and Drainage, 2020, 69: 448-459.
- [7] 杨培岭,王瑜,任树梅,等.咸淡水交替灌溉下土壤水盐分布与玉米吸水规律研究[J].农业机械学报,2020,51(6):273-281.
- [8] 冯棣,张俊鹏,孙池涛,等.长期咸水灌溉对土壤理化性质和土壤酶活性的影响[J].水土保持学报,2014,28(3):171-176.
- [9] Shinjo H, Fujita H, Gintzburger G, et al. Soil aggregate stability under different landscapes and vegetation types in a semiarid area in northeastern Syria [J]. Soil Science and Plant Nutrition, 2000, 46(1): 229-240.
- [10] 张少宏,付鑫,IHSAN M,等.秸秆和地膜覆盖对黄土高原旱作小麦田土壤团聚体氮组分的影响[J].水土保持学报,2020,34(1):236-241.
- [11] 牛君仿,冯俊霞,路杨,等.咸水安全利用农田调控技术措施研究进展[J].中国生态农业学报,2016,24(8):1005-1015.
- [12] 曾路生,高岩,李俊良,等.寿光大棚土壤团聚体中交换性盐基离子组成与土壤团聚性关系[J].水土保持学报,2011,25(5):224-228,233.
- [13] 王纯,陈晓旋,陈优阳,等.水盐梯度对闽江河口湿地土壤水稳定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.
- [14] Tedeschi A, Aquila R D. Effects of irrigation with saline waters, at different concentrations, on soil physical and chemical characteristics[J]. Agricultural Water Management, 2005, 77(1/3): 308-322.
- [15] 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.
- [16] Buckland G D, Rodney Bennett D, Mikalson D E, et al. Soil salinization and sodication from alternate irrigations with saline-sodic water and simulated rain[J]. Canadian Journal of Soil Science, 2002, 82(3): 297-309.
- [17] 盛丰,张敏,薛如霞,等.灌溉水中盐分对土壤结构性质及水流运动特征的影响[J].水利学报,2019,50(3):346-355.
- [18] 郑春莲,冯棣,李科江,等.咸水沟灌对土壤水盐变化与棉花生长及产量的影响[J].农业工程学报,2020,36(13):92-101.
- [19] 周晓妮,刘少玉,王哲,等.华北平原典型区浅层地下水化学特征及可利用性分析:以衡水为例[J].水科学与工程技术,2008(2):56-59.
- [20] 张俊鹏.咸水灌溉覆膜棉田水盐运移规律及耦合模拟[D].北京:中国农业科学院,2015.
- [21] 周虎,吕贻忠,杨志臣,等.保护性耕作对华北平原土壤团聚体特征的影响[J].中国农业科学,2007,40(9):1973-1979.
- [22] Denef K, Six J. Contributions of incorporated residue and living roots to aggregate-associated and microbial carbon in two soils with different clay mineralogy[J]. European Journal of Soil Science, 2006, 57(6): 774-786.
- [23] Katza J, Thompson A H. Fractal sandstone pores: Implications for conductivity and pore formation[J]. Physical Review Letters, 1985, 54(3): 1325-1328.
- [24] 杨培岭,罗远培.用粒径的重量分布表征的土壤分形特征[J].科学通报,1993,38(20):1896-1899.
- [25] 吴忠东,王全九.入渗水矿化度对土壤入渗特征和离子迁移特性的影响[J].农业机械学报,2010,41(7):64-69,75.
- [26] Huang C H, Xue X, Wang T, et al. Effects of saline water irrigation on soil properties in northwest China [J]. Environmental Earth Sciences, 2011, 63(4): 701-708.
- [27] Gupta V V S R, Germida J J. Soil aggregation: Influence on microbial biomass and implications for biological processes[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2015, 80: A3-A9.
- [28] Zhang S L, Wang R J, Yang X Y, et al. Soil aggregation and aggregating agents as affected by long term contrasting management of an Anthrosol[J]. Scientific Reports, 2016, 6: 1-11.
- [29] Singh K. Microbial and enzyme activities of saline and sodic soils [J]. Land Degradation and Development, 2016, 27: 706-718.
- [30] Morrissey E M, Gillespie J L, Morina J C, et al. Salinity affects microbial activity and soil organic matter content in tidal wetlands[J]. Global Change Biology, 2014, 20(4): 1351-1362.

- 保持学报,2018,32(5):240-245.
- [16] 郑利芳,吴三鼎,党廷辉.不同施肥模式对春玉米产量、水分利用效率及硝态氮残留的影响[J].水土保持学报,2019,32(4):224-230.
- [17] Qu B C, Zhou J T, Xiang X M, et al. Adsorption behavior of Azo Dye C. I. Acid Red 14 in aqueous solution on surface soils[J]. Journal of Environmental Sciences, 2008, 20(6): 704-709.
- [18] 郝长红,颜丽,梁文婷,等.天然沸石负载氧化镁对氮磷吸附解吸特性的影响[J].中国土壤与肥料,2010(5):45-49.
- [19] Schick J, Caulet P, Paillaud J L, et al. Batch-wise nitrate removal from water on a surfactant-modified zeolite[J]. Microporous and Mesoporous Materials, 2010, 132(3):395-400.
- [20] Bowman R S. Applications of surfactant-modified zeolites to environmental remediation[J]. Microporous and Mesoporous Materials, 2003, 61(1/2/3):43-56.
- [21] 周旋,吴良欢,董春华,等.氮肥配施生化抑制剂组合对黄泥田土壤氮素淋溶特征的影响[J].生态学报,2019,39(5):324-334.
- [22] Cheng H M, Zhu Q, Xing Z P. Adsorption of ammonia nitrogen in low temperature domestic wastewater by modification bentonite[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 233:720-730.
- [23] Ding Y, Liu Y X, Wu W X, et al. Evaluation of Biochar Effects on Nitrogen Retention and Leaching in Multi-Layered Soil Columns[J]. Water Air Soil Pollut, 2010, 213(1):47-55.
- [24] 张晨阳,张富仓,郭金金,等.缓释氮肥与尿素掺施比例对冬小麦产量及氮素吸收利用的影响[J].植物营养与肥料学报,2020,26(4):669-680.
- [25] 马媛媛,戴显庆,彭绍好,等.天然沸石对松嫩平原黑钙土理化性质和保水能力的影响[J].北京林业大学学报,2018,40(2):51-57.

(上接第 294 页)

- [31] 张丽娜, Asenso E, 张陆勇, 等.耕作方式对旱地红壤物理特性的影响[J].水土保持研究,2018,25(3):46-50.
- [32] Hbiekou C, Martius C, Khamzina A, et al. Reducing topsoil salinity and raising carbon stocks through afforestation in Khorezm, Uzbekistan[J]. Journal of Arid Environments, 2011, 75(2):146-155.
- [33] Zhang B, Horn R. Mechanisms of aggregate stabilization in Ultisols from subtropical China[J]. Geoderma, 2001, 99(1):123-145.
- [34] 袁德玲,张玉龙,唐首锋,等.不同灌溉方式对保护地土壤水稳定性团聚体的影响[J].水土保持学报,2009,23(3):125-128,134.

(上接第 302 页)

- [17] 徐欢,王芳芳,李婷,等.冻融交替对土壤氮素循环关键过程的影响与机制研究进展[J].生态学报,2020,40(10):3168-3182.
- [18] 陈哲,杨世琦,张晴雯,周华坤,井新,张爱平,韩瑞芸,杨正礼.冻融对土壤氮素损失及有效性的影响[J].生态学报,2016,36(4):1083-1094.
- [19] Wagner-Riddle C, Congreves K A, Abalos D, et al. Globally important nitrous oxide emissions from crop-lands induced by freeze-thaw cycles[J]. Nature Geoscience, 2017, 10(4):279-283.
- [20] 陈祯.土壤容重变化与土壤水分状况和土壤水分检测的关系研究[J].节水灌溉,2010(12):47-50.
- [21] Yu X F, Zou Y C, Jiang M, et al. Response of soil

- [35] 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定性团聚体稳定性影响[J].自然资源学报,2016,31(9):1564-1576.
- [36] Wang Q J, Lu C Y, Li H W, et al. The effects of no-tillage with subsoiling on soil properties and maize yield: 12-Year experiment on alkaline soils of Northeast China[J]. Soil and Tillage Research, 2014, 137:43-49.
- [37] 翟振,李玉义,郭建军,等.耕深对土壤物理性质及小麦—玉米产量的影响[J].农业工程学报,2017,33(11):115-123.
- [38] 刘美龄,叶勇,曹长青,等.海南东寨港红树林土壤粒径分布的分形特征及其影响因素[J].生态学杂志,2008,27(9):1557-1561.

- constituents to freeze-thaw cycles in wetland soil solution[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2011, 43 (6): 1308-1320.
- [22] 范昊明,靳丽,周丽丽,等.冻融循环作用对黑土有效磷含量变化的影响[J].水土保持通报,2015,35(3):18-22.
- [23] 王观竹.冻融条件下施加生物质炭对东北黑土中氮素淋失的影响[D].长春:吉林大学,2015.
- [24] Bing H, He P. Experimental investigations on the influence of cyclical freezing and thawing on physical and mechanical properties of saline soil[J]. Environmental Earth Sciences, 2011, 64(2):431-436.
- [25] 冯惠妍,陈争光,蔡月芹.RBF 神经网络的土壤养分肥力评价研究[J].黑龙江八一农垦大学学报,2015,27(4):99-102.