

# 磁化再生水对玉米幼苗生长及土壤盐分的影响

刘春成<sup>1,2,3</sup>, 荣昊<sup>4</sup>, 李中阳<sup>1,3</sup>, 胡超<sup>1,3</sup>, 曾智<sup>5</sup>, 吴海卿<sup>1,3</sup>, 王娟<sup>1,6</sup>,  
崔丙健<sup>1,3</sup>, 樊向阳<sup>1,3</sup>, 刘源<sup>1,3</sup>, 崔二苹<sup>1,3</sup>, 高峰<sup>1,3</sup>

(1. 中国农业科学院 农田灌溉研究所/农业部节水灌溉工程重点实验室, 河南 新乡 453002;

2. 中国农业科学院 研究生院, 北京 100081; 3. 中国农业科学院 河南新乡农业水土

环境野外科学观测试验站/农业水资源高效安全利用重点开放实验室, 河南 新乡 453000;

4. 中水北方勘测设计研究有限责任公司, 天津 300222; 5. 江西省水利规划设计院,

江西 南昌 330000; 6. 扬州大学 水利与能源动力工程学院, 江苏 扬州 225009)

**摘要:** 以玉米为研究对象, 进行种子萌发试验和幼苗生长试验, 研究 0、1 000、3 000、5 000、8 000 Gs 磁场强度磁化清水对玉米种子萌发的影响, 以及磁化清水、磁化再生水对玉米幼苗生长的影响, 以为再生水的安全利用提供理论依据。结果表明, 一定磁场强度(0~5 000 Gs)下, 磁化清水处理玉米种子的发芽势、发芽率、发芽指数提高, 活力指数降低; 当磁场强度达到 8 000 Gs 时, 发芽势、发芽率、发芽指数均有所降低, 活力指数与未磁化处理一致, 上述变化差异均不显著。与磁化清水相比, 磁化再生水可提高玉米幼苗株高, 但差异不显著; 与未磁化再生水相比, 磁化再生水灌溉对玉米幼苗株高前期抑制后期提高, 尤其是磁场强度 3 000 Gs 和 8 000 Gs 处理。与未磁化处理相比, 磁化清水、磁化再生水总体上均可提高玉米幼苗叶片含水率和 SOD 活性, 降低土壤斥水性, 中强度磁化再生水、磁化清水均会显著提高土壤盐分含量, 但磁化清水、磁化再生水间差异均不显著。综合分析, 磁化处理对玉米种子萌发、生长总体上有促进作用, 但磁化再生水与磁化清水处理对玉米幼苗生长的影响总体上差异不显著, 中强度磁化再生水、磁化清水会提高土壤盐分含量。

**关键词:** 再生水; 磁化水; 玉米; 萌发指标; 幼苗生长; 土壤盐分含量

**中图分类号:** S513 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-3268(2020)12-0024-09

## Effect of Magnetized Reclaimed Water on Seedling Growth of Maize and Soil Salinity

LIU Chun Cheng<sup>1,2,3</sup>, RONG Hao<sup>4</sup>, LI Zhongyang<sup>1,3</sup>, HU Chao<sup>1,3</sup>, ZENG Zhi<sup>5</sup>, WU Haiqing<sup>1,3</sup>,  
WANG Juan<sup>1,6</sup>, CUI Bingjian<sup>1,3</sup>, FAN Xiangyang<sup>1,3</sup>, LIU Yuan<sup>1,3</sup>, CUI Erping<sup>1,3</sup>, GAO Feng<sup>1,3</sup>

(1. Institute of Farmland and Irrigation, Chinese Academy of Agricultural Sciences/Key Lab of Water-Saving

Irrigation Engineering, Ministry of Agriculture, Xinxiang 453002, China; 2. Graduate School of

Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China; 3. Agriculture Water and

Soil Environmental Field Science Research Station of Xinxiang City of Henan Province/Key laboratory

of High-Efficient and Safe Utilization of Agriculture Water Resources, Chinese Academy of

Agricultural Sciences, Xinxiang 453000, China; 4. China Water Resources Beifang Investigation, Design

& Research Co., Ltd., Tianjin 300222, China; 5. Jiangxi Provincial Water Conservancy Planning and

Designing Institute, Nanchang 330000, China; 6. School of Hydraulic, Energy and Power

Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China)

收稿日期: 2020-05-27

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0403503-2, 2017YFC0403302-1); 中央级科研院所基本科研业务费专项(FIRI202001-02, FIRI202002-03)

作者简介: 刘春成(1986-), 男, 安徽界首人, 在读博士研究生, 研究方向: 非常规农业水资源安全利用。

E-mail: liuchuncheng986@sohu.com

通信作者: 高峰(1963-), 男, 河南驻马店人, 研究员, 博士, 主要从事非常规农业水资源安全利用研究。

E-mail: gfyx@sina.com

**Abstract:** Taking maize as research material, maize germination test and seedling growth experiment were carried out, the effects of magnetized clear water with five different magnetic field intensities of 0, 1 000, 3 000, 5 000, 8 000 Gs on maize germination were studied, and the effects of magnetized reclaimed water irrigation with five different magnetic field intensities of 0, 1 000, 3 000, 5 000, 8 000 Gs on maize seedling growth were also studied with magnetized clear irrigation as the control, so as to provide the theoretical basis for the safe utilization of reclaimed water. The results showed that the germination energy, germination rate and germination index of maize seeds increased with the increase of magnetic field intensity 0—5 000 Gs, and the vigor index gradually decreased, but when the magnetic field intensity reached 8 000 Gs, the germination energy, germination rate and germination index started to reduce, and the vigor index was basically the same as that of the non-magnetized treatment, but the above differences were not significant. Compared with magnetized clear water irrigation, magnetized reclaimed water irrigation could increase the height of maize seedling, but there was not significant difference. Compared with non-magnetized reclaimed water, magnetized reclaimed water could inhibit the increase of plant height to a certain extent in the early stage of maize seedlings growth, but promote the increase of plant height in the later stage of seedling growth, especially the treatments with magnetic field intensities of 3 000 Gs and 8 000 Gs. Compared with non-magnetized treatment, on the whole, magnetized reclaimed water irrigation and magnetized clear water irrigation could increase the moisture content and SOD activity of maize seedling leaves, and decrease soil water repellency; medium-intensity magnetized reclaimed water irrigation and magnetized clean water irrigation both tended to significantly increase soil salinity, but there was no significant difference between magnetized reclaimed water treatment and magnetized clean water treatment. After comprehensive analysis, magnetized water could improve maize seed germination and seedling growth on the whole, but there was no significant difference in enhancement of maize seedling growth between magnetized reclaimed water treatment and magnetized clear water treatment, and medium-intensity magnetized reclaimed water irrigation and magnetized clean water irrigation both increased soil salinity.

**Key words:** Reclaimed water; Magnetized water; Maize; Germination index; Seedling growth; Soil salinity

我国淡水等常规水资源短缺,但再生水等非常规水资源丰富,合理开发利用再生水等非常规水资源具有重要意义。再生水中的养分有部分替代肥料的作用,可以降低肥料成本进而减少环境污染<sup>[1]</sup>,短期灌溉有利于植物的生长且不会造成土壤重金属污染<sup>[2]</sup>,但长期灌溉对植物生长的促进作用不明显,甚至会抑制部分植物的生长且重金属会严重损坏土壤质量<sup>[3]</sup>。再生水灌溉后,小麦根中重金属积累最多,茎叶次之,穗中最少<sup>[4]</sup>。此外,再生水中可能的新兴污染物在土壤<sup>[5-6]</sup>、根系<sup>[7]</sup>累积,进而转移到叶片和果实<sup>[8-9]</sup>,同时也有污染地下水的风险<sup>[10-11]</sup>。因此,再生水的安全利用成为缓解水资源短缺和农业可持续发展的热点问题。

生物磁学是一门涉及多学科的边缘学科,与医学、工业、农牧渔业、环境保护等学科密切相关。近年来,随着生物磁学的不断发展,磁化水在农业中的应用成为研究的热点之一。作为一种新的水处理技术,磁化水在农业生产领域中的应用潜力巨

大<sup>[12-13]</sup>。磁化水包括静态磁化水和动态磁化水,前者是将水静置于磁场中一定时间,后者是水分以一定的流速经过磁场。磁化水的理化性质诸如 pH 值<sup>[14]</sup>、溶解氧 (Dissolved oxygen, DO)<sup>[15]</sup>、表面张力<sup>[14,16]</sup>、电导率 (Electrical conductance, EC)<sup>[15]</sup>、化学位移、缔合度<sup>[17-18]</sup>等较未磁化前具有一些有益的变化。水经过磁场作用后,有利于某混合菌种的生长,进而通过生物吸附法去除重金属废水中的铜<sup>[19]</sup>,磁化水灌溉能有效降低土壤含盐量<sup>[20]</sup>,为再生水中的重金属和盐分等潜在危害因子的处理指明了方向。研究表明,磁化水浸种可以促进水稻、大豆、玉米种子萌发和早期生长<sup>[21]</sup>;磁化水灌溉有利于促进番茄生长发育和抗氧化系统酶活性<sup>[22]</sup>;磁化水灌溉能够提高 0~20 cm 土层土壤含水率,降低深层土壤含水率,具有良好的洗盐效果<sup>[20]</sup>;王录等<sup>[23]</sup>研究也表明,磁化水灌溉后盐渍化土壤盐分显著降低,具有明显的脱盐效果。目前,关于磁化水的研究多集中于普通磁化水的理化性质<sup>[14-18]</sup>及其对作物

种子萌发<sup>[21]</sup>、生长发育<sup>[22]</sup>和盐渍化土壤治理<sup>[20]</sup>等方面。然而,磁化再生水方面的研究尚未有报道。为此,研究磁化水对玉米种子萌发及磁化再生水对玉米幼苗生长发育和土壤盐分的影响,为磁化再生水灌溉技术在再生水安全利用方面提供一定理论依据。

## 1 材料和方法

### 1.1 试验地概况及试验材料

试验于 2019 年 8 月在河南省中国农业科学院新乡农业水土环境野外科学观测试验站温室大棚进行。该站地处北纬 35°19′、东经 113°53′,海拔 73.2 m,年均气温为 14.1 ℃,多年平均年降水量和蒸发量分别为 588 mm 和 2 000 mm,无霜期为 210 d,多年平均年日照时间为 2 398 h。

供试土壤取自河南省中国农业科学院新乡农业水土环境野外科学观测试验站耕层 0~20 cm,土壤质地为砂壤土,土壤容重为 1.40 g/cm<sup>3</sup>,田间持水率(质量)为 23.02%,土壤浸提液 EC 为 595.7 μS/cm,有机质(Organic matter,OM)含量为 26.6 g/kg。供试土壤经风干、碾碎、过 2 mm 筛后备用。

玉米品种为裕丰 303,由北京联创种业股份有限公司生产。

### 1.2 试验设计

对于玉米种子萌发试验,设 5 种磁化强度,分别为 0、1 000、3 000、5 000、8 000 Gs,分别记为 0、1、2、3、4,共计 5 个处理,3 次重复。灌溉水为清水(Q),取自当地地下水。每个处理精选 50 粒玉米种子,在基质培养盆中培养,每隔 1 d 浇 1 次水以保证基质湿润,各处理浇水量相同,每处理 3 个重复。

对于玉米幼苗生长试验,设 2 种水源和 5 种磁化强度,共计 10 个处理。灌溉水源包括再生水(Z)和清水(Q),再生水取自河南省新乡市骆驼湾生活污水处理厂,该污水处理厂采用的工艺为 A/O 处理,污水处理后水质符合《农田灌溉水质标准》(GB 5084—2005),清水取自当地地下水,再生水和清水水质指标如表 1 所示。磁化强度包括 5 个水平,分别为 0、1 000、3 000、5 000、8 000 Gs,分别记为 0、1、2、3、4。供试土壤按容重 1.40 g/cm<sup>3</sup> 装入盆中(上口口径 21 cm、下口径 14 cm、高 16 cm),每盆装土 3.75 kg。于 7 月 30 日将玉米种子播种于盆中进行苗期试验,每个处理 3 个重复。前期每隔 2 d 灌 1 次水,后期随着玉米幼苗耗水增加,缩短灌水间隔,每 1~2 d 灌 1 次水,各处理每次灌水量均相同。于 8 月 23 日取土样和植株样品进行分析。

表 1 2 种水源水质指标

Tab. 1 Water quality indices of two kinds of water sources

水源 Water source	pH	EC/(μS/cm)	化学需氧量/ (mg/L) Chemical oxygen demand	铵态氮含量/ (mg/L) Ammonium nitrogen content	总磷含量/ (mg/L) Total phosphorus content	铜含量/ (mg/L) Cu content	锌含量/ (mg/L) Zn content	铅含量/ (mg/L) Pb content	镉含量/ (mg/L) Cd content
清水 Clear water	7.08~7.35	786~815	<15	0.02~0.03	0.04~0.09	<0.009	<0.001	<0.001	<0.000 1
再生水 Reclaimed water	7.88~8.31	1 884~2 510	15~93	0.12~0.20	0.33~0.67	<0.009	0.008~0.013	<0.001	<0.000 1

### 1.3 测定项目及方法

1.3.1 种子萌发指标 种子发芽期间,每天记录 1 次发芽情况,处理 3 d 时统计发芽势(Germination energy,GE<sub>3</sub>),7 d 时统计发芽率(Germination rate,GR<sub>7</sub>),并计算发芽指数(Germination index,GI)和活力指数(Vigor index,VI),计算公式为:

$$GE_3 = G_3 / N \quad (1)$$

$$GR_7 = G_7 / N \quad (2)$$

$$GI = \sum G_i / D_i \quad (3)$$

$$VI = GI \times m \quad (4)$$

式中:G<sub>3</sub>、G<sub>i</sub>、G<sub>7</sub> 分别为前 3、i、7 d 的发芽种子数量;N 为供试种子数量;m 为处理 7 d 时的幼苗单

株质量;D<sub>i</sub> 为发芽天数。

1.3.2 幼苗生长指标 玉米幼苗生长期,从 2019 年 8 月 8 日开始,每隔 2 d 采用直尺测量幼苗株高(地面到所有叶片自然伸展时的最高处)。8 月 21 日,采用叶绿素测定仪(TYS-B)测定叶片 SPAD 值和叶温。8 月 23 日,利用无菌刀片分别采集玉米地上部、地下部及叶片,称量鲜质量,然后迅速于 105 ℃ 杀青 10 min,于 75 ℃ 烘干至恒质量,称其干质量,测定地上部、地下部生物量和叶片含水率;并利用超氧化物歧化酶(Superoxide dismutase,SOD)活性检测试剂盒(索莱宝,北京)检测叶片 SOD 活性。

1.3.3 土壤理化性质 8 月 23 日,采集土壤样品,

土壤样品风干、磨碎、过筛(2 mm)后,按照土水比( $m:V$ )1:5 配置土壤浸提液,中速(约 100 r/min)振荡 30 min 后静置 24 h,采用电导率仪测定土壤浸提液 EC;采用低温外热重铬酸钾氧化-比色法测定土壤 OM 含量;采用滴水穿透时间法测定土壤斥水性,以土壤滴水穿透时间(Water drop penetration time, WDPT)表示。

#### 1.4 数据分析

采用 Excel 2010 和 SPSS 25.0 进行数据统计分析,采用 LSD 法进行多重比较。

## 2 结果与分析

### 2.1 磁化清水对玉米种子萌发的影响

从表 2 可以看出,一定磁场强度(0~5 000 Gs)下,玉米种子的  $GE_3$ 、 $GR_7$ 、 $GI$  随着磁场强度的增强而提高,但当磁场强度超过该范围达到 8 000 Gs 时, $GE_3$ 、 $GR_7$ 、 $GI$  均有所降低,但处理间差异均不显著[除了  $GI$  在  $Q_2$ 、 $Q_4$  处理间差异显著( $P<0.05$ )外]。磁化水处理后,随着磁场强度(0~5 000 Gs)的增加,玉米种子 VI 逐渐降低,且在磁场强度 5 000 Gs 时与未磁化处理间差异达到显著水平;但是,当磁场强度达到 8 000 Gs 时,与未磁化处理相

同。综合考虑,本试验条件下,磁化水对基质培养种子萌发没有显著影响。

### 2.2 磁化再生水和磁化清水对玉米幼苗生长的影响

2.2.1 株高 从表 3 可以看出,不论是清水还是再生水,同一取样时期,磁化处理玉米幼苗株高与未磁化处理间没有显著差异,且不同磁化强度处理间也没有显著差异。相同磁场强度条件下,总体上再生水灌溉后玉米幼苗株高较清水灌溉有所增加,且在磁场强度 8 000 Gs 时差异达到显著水平(8 月 11 日除外),在 8 月 8 日、14 日达到了极显著水平;磁场强度 3 000 Gs 时,玉米幼苗株高在 8 月 11 日及 8 月 17 日后差异达到显著水平,其他磁场强度差异不显著。

此外,随着时间的延长,玉米幼苗株高逐渐增高,且不论是否经过磁化作用,再生水灌溉玉米幼苗株高整体上较清水灌溉高。对于清水,玉米幼苗期内,磁场强度 5 000 Gs 处理后玉米幼苗株高整体高于其他处理;对于再生水,前期磁化处理会在一定程度上抑制玉米幼苗株高的增加,但是后期磁化处理株高增幅有所提高,尤其是磁场强度 3 000 Gs 和 8 000 Gs,说明磁化再生水可能对玉米幼苗具有“后期补偿生长效应”。

表 2 磁化清水对玉米种子萌发的影响

Tab. 2 Effect of magnetized clear water on germination of maize seeds

处理 Treatment	$GE_3/\%$	$GR_7/\%$	$GI$	VI
$Q_0$	94.7±1.2a	97.3±2.3a	21.3±0.4ab	32.2±3.9a
$Q_1$	95.3±1.2a	98.7±2.3a	21.6±0.4ab	31.8±3.1a
$Q_2$	97.3±2.3a	97.3±2.3a	21.9±0.6a	28.3±2.2ab
$Q_3$	95.3±2.3a	98.0±2.0a	21.7±0.4ab	25.9±2.4b
$Q_4$	92.0±3.5a	96.0±4.0a	21.0±0.6b	32.2±2.5a

注:同列数据后不同小写字母表示 0.05 水平下处理间差异显著,下同。

Note: The different lowercase letters after data within a column mean significant differences among different treatments at 0.05 level, the same below.

表 3 磁化再生水和磁化清水条件下玉米幼苗的株高

Tab. 3 Height of maize seedling under irrigation with magnetized reclaimed water and magnetized clear water

处理 Treatment	08-08	08-11	08-14	08-17	08-20
$Q_0$	27.0±1.0bAB	40.5±2.2abA	46.3±4.3bB	48.3±2.4bB	50.8±2.8bB
$Q_1$	27.9±0.9bAB	39.9±0.6abA	45.8±2.0bB	49.1±1.5bB	50.3±0.8bB
$Q_2$	27.4±1.8bAB	38.6±2.7bA	46.2±1.1bB	49.4±1.0bB	51.5±1.0bAB
$Q_3$	29.7±2.9abAB	42.1±1.8abA	48.5±0.2abAB	51.2±1.2abAB	52.8±1.5abAB
$Q_4$	25.1±1.8bB	39.8±2.6abA	45.7±2.4bB	49.6±1.0bB	51.6±1.1bAB
$Z_0$	32.8±2.7aA	42.5±1.7aA	50.4±4.9abAB	53.0±1.7abAB	53.4±1.2abAB
$Z_1$	30.6±5.9abAB	42.2±3.4abA	48.6±3.5abAB	51.7±2.6abAB	53.4±1.0abAB
$Z_2$	30.1±3.1abAB	42.7±2.2aA	48.8±2.3abAB	53.7±4.4aAB	55.3±3.7aA
$Z_3$	30.3±2.2abAB	42.6±1.0aA	49.9±0.8abAB	52.9±1.9abAB	53.8±1.9abAB
$Z_4$	32.2±2.9aA	42.3±1.5aA	52.7±1.6aA	54.7±1.2aA	54.8±1.4aAB

注:同列数据后不同大写字母表示 0.01 水平下处理间差异极显著,下同。

Note: The different uppercase letters after data within a column mean significant differences among different treatments at 0.01 level, the same below.

2.2.2 叶片含水率、叶温、SPAD 值 从表 4 可以看出,对于清水,磁化后灌溉能够提高玉米幼苗叶片含水率,但是差异不显著,且随着磁场强度的增强,总体呈上升趋势。对于再生水,磁化后灌溉也能够提高玉米幼苗叶片含水率,但差异不显著;同时随着磁场强度的增强,叶片含水率变化没有明显的趋势。磁场强度一定时,再生水灌溉处理玉米幼苗叶片含水率低于清水灌溉处理,但差异不显著。可见,磁化作用能够提高玉米幼苗叶片含水率。

对于玉米幼苗叶温来说,清水磁化后灌溉降低了叶温且差异极显著,但不同磁场强度处理间叶温差异不显著,且没有明显规律;再生水磁化后灌溉叶温与未磁化处理间差异不显著,且不同磁场强度处

理间亦无明显规律;磁场强度一定时,再生水灌溉处理和清水灌溉处理间叶温没有显著差异,但未磁化处理时再生水灌溉可极显著降低叶温。可见,清水磁化后可以降低玉米幼苗叶温,但是再生水磁化后对叶温无影响。

对于玉米幼苗叶片 SPAD 值来说,除磁场强度 3 000 Gs 处理外,清水磁化后灌溉总体上可以提高叶片 SPAD 值,但差异不显著,不同磁场强度间无明显规律;再生水磁化处理与清水磁化处理的变化规律类似;磁场强度一定时,再生水灌溉处理和清水灌溉处理间 SPAD 值没有显著差异(磁场强度 1 000 Gs 处理外)。可见,清水磁化后对 SPAD 值具有微弱的提升作用,但是再生水磁化后无明显趋势。

表 4 磁化再生水和磁化清水条件下玉米幼苗叶片含水率、叶温和 SPAD 值  
Tab.4 Water content,temperatures and SPAD value of maize seedling leaf under irrigation with magnetized reclaimed water and magnetized clear water

处理 Treatment	叶片含水率/% Leaf water content	叶温/℃ Leaf temperature	SPAD 值 SPAD value
Q0	83.59±0.44abAB	28.10±0.44aA	35.39±1.22abA
Q1	84.45±0.08abAB	27.33±0.06bcB	37.93±1.55aA
Q2	84.57±0.73abAB	27.36±0.04bcB	34.33±1.03bA
Q3	84.29±1.88abAB	27.23±0.14bcB	36.56±1.97abA
Q4	84.83±0.57aA	27.25±0.05bcB	36.64±2.30abA
Z0	82.43±1.57bB	27.23±0.07bcB	35.39±0.40abA
Z1	83.12±0.47bAB	27.18±0.12bcB	34.27±0.63bA
Z2	82.64±0.65bB	27.52±0.37bB	36.54±1.07abA
Z3	83.79±0.38abAB	27.16±0.20cB	36.01±2.81abA
Z4	83.58±0.12abAB	27.34±0.09bcB	34.87±1.69bA

2.2.3 生物量 从表 5 可以看出,对于清水,磁化后灌溉处理玉米幼苗地上部鲜质量、干质量均增加,但差异不显著;地下部鲜质量、干质量总体均下降,但差异不显著。对于再生水,磁化后灌溉处理能够提高玉米幼苗地上部鲜质量、地下部的鲜质量和干质量,但差异不显著(磁场强度 5 000 Gs 处理地下

部干质量除外),降低了地上部干质量,但差异不显著(磁场强度 8 000 Gs 处理除外)。磁场强度一定时,总体上再生水灌溉处理较清水灌溉处理能够提高地上部生物量(鲜质量、干质量),降低了地下部生物量(鲜质量、干质量),但趋势不明显(未磁化处理地上部和地下部的干质量除外)。综上,磁化再生

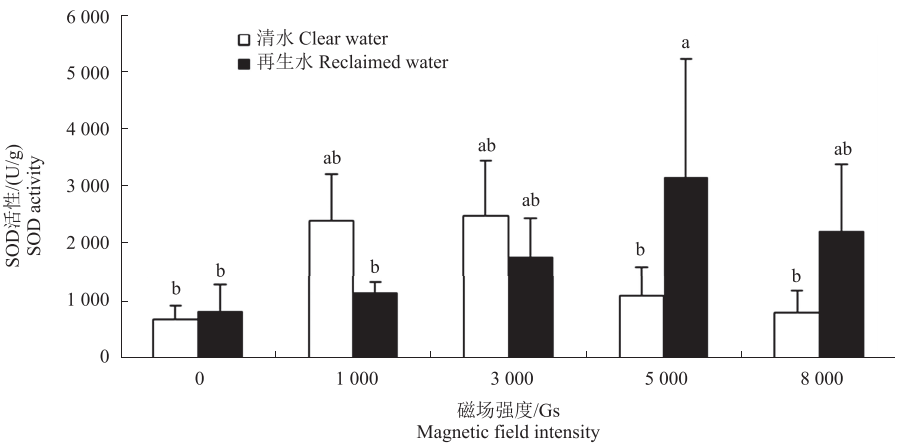
表 5 磁化再生水和磁化清水条件下玉米幼苗生物量  
Tab.5 Biomass of maize seedling under irrigation with magnetized reclaimed water and magnetized clear water g

处理 Treatment	地上部 Aboveground part		地下部 Underground part	
	鲜质量 Fresh weight	干质量 Dry weight	鲜质量 Fresh weight	干质量 Dry weight
Q <sub>0</sub>	5.78±0.78bA	1.36±0.20bB	2.37±0.68abA	0.57±0.22abA
Q <sub>1</sub>	6.42±0.52abA	1.54±0.24bB	2.73±1.37aA	0.49±0.37abA
Q <sub>2</sub>	5.85±1.20bA	1.73±0.34bAB	2.28±0.32abA	0.48±0.10abA
Q <sub>3</sub>	6.46±1.38abA	1.70±0.76bAB	1.89±0.49abA	0.44±0.20abA
Q <sub>4</sub>	6.80±0.74abA	2.09±0.37abAB	1.77±0.41abA	0.33±0.22abA
Z <sub>0</sub>	6.54±1.17abA	2.66±0.43aA	1.46±0.33bA	0.21±0.08bA
Z <sub>1</sub>	6.59±1.18abA	2.17±0.52abAB	1.83±0.46abA	0.27±0.13bA
Z <sub>2</sub>	7.25±1.14abA	2.21±0.57abAB	2.12±0.26abA	0.28±0.07bA
Z <sub>3</sub>	8.01±0.18aA	2.26±0.20abAB	2.11±0.23abA	0.64±0.33aA
Z <sub>4</sub>	7.21±0.80abA	1.57±0.22bB	1.71±0.25bA	0.38±0.05abA

水灌溉对玉米幼苗地上部鲜质量及地下部鲜、干质量均有提升作用,磁化清水对玉米幼苗地上部生物量有提升作用。

2.2.4 SOD 活性 从图 1 可以看出,对于清水,磁化灌溉能够提高玉米幼苗叶片 SOD 活性,但差异不显著;随着磁场强度的增强,玉米幼苗叶片 SOD 活性先升高后降低,以磁场强度 3 000 Gs 时最高。对于再生水,除了磁场强度 5 000 Gs 处理玉米幼苗叶片 SOD 活性显著高于未磁化处理外,其他磁场强度处理也能够提高玉米幼苗叶片 SOD 活性,但差异不

显著;随着磁场强度的增强,玉米幼苗叶片 SOD 活性先升高后降低,以磁场强度 5 000 Gs 时最高。磁场强度为 0、5 000、8 000 Gs 时,磁化再生水处理叶片 SOD 活性高于磁化清水处理,其中磁强强度 5 000 Gs 差异显著;而磁场强度 1 000、3 000 Gs 时,磁化清水处理叶片 SOD 活性高于磁化再生水,但差异不显著。可见,一定磁化强度处理均能够提高清水和再生水灌溉的玉米幼苗叶片 SOD 活性,且再生水较清水需要更强的磁场强度。



不同小写字母表示在 0.05 水平下处理间差异显著

The different lowercase letters mean significant differences among different treatments at 0.05 level

图 1 磁化再生水和磁化清水对玉米幼苗叶片 SOD 活性的影响

Fig.1 Effects of magnetized reclaimed water and magnetized clear water on SOD activities of leaf of maize seedling

2.3 磁化再生水和磁化清水对土壤理化性质的影响

2.3.1 EC 和 OM 含量 从表 6 可以看出,对于土壤浸提液 EC 来说,磁化清水处理玉米苗期土壤浸提液 EC 有所增加,但差异不显著,且不同磁化强度处理间也没有显著差异。磁化再生水处理玉米苗期土壤浸提液 EC 亦有所增加;随着磁场强度的增强,EC 先增大后降低,磁场强度 3 000 Gs 处理最高,显

著高于除磁场强度 5 000 Gs 外的其他处理,其他处理间差异均不显著。相同磁场强度条件下,再生水和清水灌溉后,总体上再生水灌溉处理土壤浸提液 EC 较清水灌溉处理有所降低,且在磁场强度 8 000 Gs 时差异达到显著水平,其他磁场强度处理差异不显著。可见,苗期低磁化强度再生水灌溉对土壤盐分没有显著影响,但是中强度磁化再生水和磁化清水均有提高土壤盐分的趋势。

表 6 磁化再生水和磁化清水条件下土壤 EC、OM 和 WDPT

Tab.6 EC,OM contents and WDPT of soil under irrigation with magnetized reclaimed water and magnetized clear water

处理 Treatment	EC/( $\mu$ S/cm)	OM/%	WDPT/s
Q <sub>0</sub>	868.3 $\pm$ 304.4abAB	2.61 $\pm$ 0.20aA	0.76 $\pm$ 0.19aA
Q <sub>1</sub>	872.0 $\pm$ 295.5abAB	2.58 $\pm$ 0.22aA	0.34 $\pm$ 0.12bB
Q <sub>2</sub>	1 153.7 $\pm$ 57.5aA	2.53 $\pm$ 0.26aA	0.35 $\pm$ 0.04bB
Q <sub>3</sub>	925.0 $\pm$ 286.9abAB	2.37 $\pm$ 0.04aA	0.27 $\pm$ 0.04bB
Q <sub>4</sub>	1 089.3 $\pm$ 50.6aAB	2.54 $\pm$ 0.30aA	0.27 $\pm$ 0.03bB
Z <sub>0</sub>	537.7 $\pm$ 31.2bB	2.43 $\pm$ 0.19aA	0.44 $\pm$ 0.02bB
Z <sub>1</sub>	706.7 $\pm$ 230.5bAB	2.66 $\pm$ 0.30aA	0.43 $\pm$ 0.07bB
Z <sub>2</sub>	1 095.0 $\pm$ 117.9aAB	2.23 $\pm$ 0.80aA	0.32 $\pm$ 0.12bB
Z <sub>3</sub>	1 004.3 $\pm$ 25.3abAB	2.70 $\pm$ 0.22aA	0.45 $\pm$ 0.22bB
Z <sub>4</sub>	659.3 $\pm$ 294.4bB	2.69 $\pm$ 0.05aA	0.35 $\pm$ 0.04bB

对于土壤 OM 含量来说,磁化清水处理玉米苗期土壤 OM 含量有所降低,但差异不显著,且不同磁化强度处理间也没有显著差异。磁化再生水处理玉米苗期土壤 OM 含量总体上有所增加,但随着磁场强度的增强 OM 含量变化趋势不明显,处理间差异不显著。相同磁场强度条件下,再生水和清水处理间土壤 OM 含量差异不显著,未磁化处理时,再生水处理低于清水处理;但是磁化后,再生水处理高于清水处理(磁场强度 3 000 Gs 处理除外)。可见,再生水灌溉稍微降低玉米苗期土壤 OM,但是磁化再生水有提高土壤 OM 含量的趋势。

2.3.2 WDPT 土壤斥水性是指水分不能或很难湿润土壤颗粒表面的物理现象<sup>[24]</sup>。土壤斥水性会导致土壤水分分布不均,引起土壤表层干燥易形成水土流失,加强降雨或灌水后地表径流和土壤侵蚀,进而不利于作物的生长发育<sup>[25]</sup>。土壤斥水性的强弱程度一般用 WDPT 表征,当 WDPT>5 s 时,认为土壤存在斥水性。从表 6 可以看出,不论是清水还是再生水,磁化后苗期灌溉没有产生土壤斥水性,WDPT 均远小于 5 s。但是,磁化清水和磁化再生水灌溉均有降低土壤 WDPT 的趋势,降低幅度以磁化清水更大。

### 3 结论与讨论

本研究发现,与未磁化清水相比,磁化 1 000~5 000 Gs 清水处理玉米种子的 GE<sub>3</sub>、GR<sub>7</sub>、GI 提高,VI 降低,但当磁场强度达到 8 000 Gs 时,GE<sub>3</sub>、GR<sub>7</sub>、GI 均有所降低,VI 有所升高,但处理间差异总体上均不显著。综合考虑 GE<sub>3</sub>、GR<sub>7</sub>、GI、VI 指标,本试验条件下磁化清水对基质培养种子萌发没有显著影响,这与前人研究结果<sup>[20]</sup>不同,一方面可能是本试验中采用的是磁化清水灌溉而不是磁化清水浸泡,另一方面可能与本试验采用基质培养有关,基质养分充足,养分的作用可能掩盖了磁化清水的作用。本研究还发现,与未磁化处理相比,磁化清水有利于玉米幼苗后期的生长,其中磁场强度 5 000 Gs 磁化后表现最突出,高于其他处理,这与王洪波等<sup>[26]</sup>研究结果类似;磁化再生水处理玉米幼苗株高在前期受到一定的抑制作用,但在后期有促进作用,具有一定的“后期补偿生长效应”,且不论是否经过磁化作用,再生水处理玉米幼苗株高整体上较清水处理高。

本研究发现,磁化清水和磁化再生水灌溉均能提高玉米幼苗叶片含水率,但不同磁场强度磁化再

生水处理间没有显著差异,说明叶片细胞的水分状况受磁化作用的影响较小。此外,磁化清水灌溉可以微弱提升叶片 SPAD 值,但是磁化再生水灌溉对 SPAD 值无明显规律,说明叶绿素含量受磁化作用的影响也较小。这与邱念伟等<sup>[27]</sup>的研究结果类似。SPAD 值的变化,也说明了磁化清水和磁化再生水灌溉对叶片光合作用的影响较小,进而决定了对植株生物量的影响也较小,本试验结果也证实了玉米幼苗生物量基本不受磁化作用的影响。这与郑世英等<sup>[28]</sup>研究结果不一致,可能和作物类型或磁场处理时间有关。磁化清水处理可以提高玉米幼苗 SOD 活性,这与张佳等<sup>[22]</sup>研究结果类似,而磁化再生水灌溉同样可以提高玉米幼苗叶片 SOD 活性,且较清水需要更强的磁场。这可能是由于再生水水质成分较为复杂导致的。

本研究发现,磁化清水灌溉和磁化再生水灌溉后土壤含盐量略有升高但差异不显著,这与王涿等<sup>[23]</sup>研究结果不一致,原因在于本试验所取土样是混合土样,而不是分层取样。磁化清水灌溉和磁化再生水灌溉均可以降低土壤 WDPT,且磁化清水灌溉的降幅更大,这是因为再生水灌溉可能会引起土壤斥水性<sup>[29]</sup>,故而 WDPT 的降幅小于磁化清水灌溉。综上,本试验条件下,玉米苗期再生水灌溉对土壤盐分没有显著影响,但是中强度磁化再生水和磁化清水灌溉均有提高土壤盐分的趋势,且磁化再生水灌溉可以缓解再生水灌溉引发的土壤斥水性。

#### 参考文献:

- [1] ÁLVAREZ-GARCÍA M, URRESTARAZU M, GUIL-GUERRERO J L, et al. Effect of fertigation using fish production wastewater on *Pelargonium* x zonale growth and nutrient content[J]. *Agricultural Water Management*, 2019, 223: 105726.
- [2] 韩洋,李平,齐学斌,等.再生水不同灌水水平对土壤酶活性及耐热大肠菌群分布的影响[J]. *环境科学*, 2018, 39(9): 4366-4374.  
HAN Y, LI P, QI X B, et al. Effects of different levels of irrigation with reclaimed water on soil enzyme activity and distribution of thermotolerant coliforms[J]. *Environmental Science*, 2018, 39(9): 4366-4374.
- [3] BHATTACHARYYA P, TRIPATHY S, CHAKRABARTI K, et al. Fractionation and bioavailability of metals and their impacts on microbial properties in sewage irrigated soil[J]. *Chemosphere*, 2008, 72(4): 543-550.

- [4] 冯绍元,邵洪波,黄冠华. 重金属在小麦作物体中残留特征的田间试验研究[J]. 农业工程学报, 2002, 18(4): 113-115.
- FENG S Y, SHAO H B, HUANG G H. Field experimental study on the residue of heavy metal in wheat crop[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2002, 18(4): 113-115.
- [5] DURÁN-ÁLVAREZ J C, BECERRIL-BRAVO E, SILVACASTRO V, *et al.* The analysis of a group of acidic pharmaceuticals, carbamazepine, and potential endocrine disrupting compounds in wastewater irrigated soils by gas chromatography-mass spectrometry[J]. Talanta, 2009, 78(3): 1159-1166.
- [6] GIBSON R, DURÁN-ÁLVAREZ J C, ESTRADA K L, *et al.* Accumulation and leaching potential of some pharmaceuticals and potential endocrine disruptors in soils irrigated with wastewater in the tula valley, mexico[J]. Chemosphere, 2010, 81(11): 1437-1445.
- [7] MILLER E L, NASON S L, KARTHIKEYAN K G, *et al.* Root uptake of pharmaceutical and personal care product ingredients[J]. Environmental Science & Technology, 2015, 50(2): 525-541.
- [8] GOLDSTEIN M, SHENKER M, CHEFETZ B. Insights into the uptake processes of wastewater-borne pharmaceuticals by vegetables[J]. Environmental Science & Technology, 2014, 48(10): 5593-5600.
- [9] CHRISTOU A, AGÜERA A, BAYONA J M, *et al.* The potential implications of reclaimed wastewater reuse for irrigation on the agricultural environment: The knowns and unknowns of the fate of antibiotics and antibiotic resistant bacteria and resistance genes: A review[J]. Water Research, 2017, 123: 448-467.
- [10] SIEMENS J, HUSCHEK G, SIEBE C, *et al.* Concentrations and mobility of human pharmaceuticals in the world's largest wastewater irrigation system, mexico city-meizquitil valley[J]. Water Research, 2008, 42(8/9): 2124-2134.
- [11] LESSER L E, MORA A, MOREAU C, *et al.* Survey of 218 organic contaminants in groundwater derived from the world's largest untreated wastewater irrigation system; Mezquitil valley, mexico[J]. Chemosphere, 2018, 198: 510-521.
- [12] ALI Y, SAMANEHAMANEH R, KAVAKEBIAN F. Applications of magnetic water technology in farming and agriculture development: A review of recent advances[J]. Current World Environment, 2014, 9(3): 695-703.
- [13] 周胜, 张瑞喜, 褚贵新, 等. 磁化水在农业上的应用[J]. 农业工程, 2012, 2(6): 44-48.
- ZHOU S, ZHANG R X, CHU G X, *et al.* Effects of magnetized water in agriculture[J]. Agricultural Engineering, 2012, 2(6): 44-48.
- [14] 杨明, 刘伟, 徐革联. 磁化对水的性质影响的研究[J]. 化工时刊, 2007, 21(6): 14-17.
- YANG M, LIU W, XU G L. Study of the influence of magnetizing to water's properties[J]. Chemical Industry Times, 2007, 21(6): 14-17.
- [15] 王全九, 张继红, 门旗, 等. 磁化或电离化微咸水理化特性试验[J]. 农业工程学报, 2016, 32(10): 60-66.
- WANG Q J, ZHANG J H, MEN Q, *et al.* Experiment on physical and chemical characteristics of activated brackish water by magnetization or ionization[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(10): 60-66.
- [16] 丁振瑞, 赵亚军, 陈凤玲, 等. 磁化水的磁化机理研究[J]. 物理学报, 2011, 60(6): 432-439.
- DING Z R, ZHAO Y J, CHEN F L, *et al.* Magnetization mechanism of magnetized water[J]. Acta Physica Sinica, 2011, 60(6): 432-439.
- [17] 曾锦川. 磁场处理对于水缔合度的影响[J]. 华侨大学学报, 1981(1): 36-43.
- ZENG J C. Effect of magnetic field treatment on the degree of water association[J]. Journal of Huaqiao University(Natural Science), 1981(1): 36-43.
- [18] 余细红, 向亚林. 关于磁化水农业应用的综述[J]. 安徽农学通报, 2008, 14(6): 50-51, 39.
- YU X H, XIANG Y L. Review on the application of magnetized water agriculture[J]. Anhui Agricultural Science Bulletin, 2008, 14(6): 50-51, 39.
- [19] 涂宁宇, 许燕滨, 张子间, 等. 磁场对重金属废水生物吸附效果的影响[J]. 江苏化工, 2004, 32(1): 40-42, 56.
- TU N Y, XU Y B, ZHANG Z J, *et al.* Effect of magnetic field on the biosorption of waste water within heavy metals[J]. Jiangsu Chemical Industry, 2004, 32(1): 40-42, 56.
- [20] 王全九, 解江博, 张继红, 等. 磁场强度对磁化水入渗和土壤水盐运移特征的影响[J]. 农业机械学报,

- 2020, 51(2): 292-298.
- WANG Q J, XIE J B, ZHANG J H, *et al.* Effects of magnetic field strength on magnetized water infiltration and soil water and salt movement [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(2): 292-298.
- [21] 周先容, 何士敏, 向邓云. 磁化水处理大豆·玉米和水稻种子的生物学效应[J]. 安徽农业科学, 2008, 36(17): 7113-7115.
- ZHOU X R, HE S M, XIANG D Y. Biology effect of magnetized water on the seeds of soybean, maize and rice [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2008, 36(17): 7113-7115.
- [22] 张佳, 李海平, 李灵芝, 等. 磁化水灌溉对番茄生长及生理特性的影响[J]. 农业工程, 2018, 8(1): 108-112.
- ZHANG J, LI H P, LI L Z, *et al.* Effects of magnetized water irrigation on growth and physiological characteristics of tomato [J]. Agricultural Engineering, 2018, 8(1): 108-112.
- [23] 王淦, 郭建曜, 刘秀梅, 等. 磁化水灌溉对盐渍化土壤生化性质的影响[J]. 核农学报, 2018, 32(1): 150-156.
- WANG L, GUO J Y, LIU X M, *et al.* Effects of irrigation with magnetized salty water on biochemical properties of salty soil [J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2018, 32(1): 150-156.
- [24] 杨邦杰, P. S. Blackwell, D. F. Nicholson. 土壤斥水性引起的土地退化、调查方法与改良措施研究[J]. 环境科学, 1994, 15(4): 88-90.
- YANG B J, BLACKWELL P S, NICHOLSON D F. Study on land degradation, investigation methods and improvement measures reduced by soil water repellency [J]. Environmental Science, 1994, 15(4): 88-90.
- [25] DEKKER L W, JUNGRIUS P D. Water repellency in the dunes with special reference to the Netherlands [J]. Catena, 1990, 18: 173-183.
- [26] 王洪波, 王成福, 吴旭, 等. 磁化水滴灌对土壤盐分及玉米产量品质的影响[J]. 土壤, 2018, 50(4): 762-768.
- WANG H B, WANG C F, WU X, *et al.* Effects of drip irrigation with different magnetic water on soil salinity, maize yield and quality [J]. Soils, 2018, 50(4): 762-768.
- [27] 邱念伟, 谭廷鸿, 戴华, 等. 磁化水对小麦种子萌发、幼苗生长和生理特性的生物学效应[J]. 植物生理学报, 2011, 47(8): 803-810.
- QIU N W, TAN T H, DAI H, *et al.* Biological effects of magnetized water on seed germination, seedling growth and physiological characteristics of wheat [J]. Plant Physiology Journal, 2011, 47(8): 803-810.
- [28] 郑世英, 徐建. 磁处理对小麦种子萌发及光合特性的影响[J]. 麦类作物学报, 2010, 30(1): 79-82.
- ZHENG S Y, XU J. Effect of magnetic treatment on seed germination and photosynthetic characteristics of wheat [J]. Journal of Triticeae Crops, 2010, 30(1): 79-82.
- [29] 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.
- SHANG Y L, LI Y, ZHU D L. Effects of reclaimed water irrigation on soil water repellency [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(21): 89-97.