

磁化—去电子水对盐渍化土壤水盐运移特征影响

李宗昱¹, 王全九^{1,2}, 张继红¹, 解江博¹, 韦开¹

(1.西安理工大学省部共建西北旱区生态水利国家重点实验室,西安 710048;

2.中国科学院水利部水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室,陕西 杨凌 712100)

摘要: 磁化与去电子等活化水处理技术在农业灌溉领域的应用受到人们广泛的关注,为了阐明磁化—去电子水入渗对土壤水盐运移的影响机制,利用自来水、去电子水、磁化水(0.4 T)、以及磁化—去电子水开展一维垂直入渗试验,研究了磁化—去电子活化水对土壤水盐运移特征及盐分淋洗效率的影响。结果表明:与对照相比,磁化—去电子活化处理能够有效促进土壤水分入渗,增加土壤含水率,降低土壤含盐量,提高灌溉水盐分淋洗效率,并且磁化—去电子水在入渗能力、土壤含水率、土壤含盐量、盐分淋洗效率较磁化或去电子方法有不同程度的提高,与去电子水相比,磁化—去电子水累积入渗量增加了 28.0%,到达入渗终点用时减少了 25.7%,15 cm 深度土层的土壤含水率增加了 7.9%,整体土壤脱盐率增加了 13.9%;与磁化水相比,磁化—去电子水累积入渗量增加了 6.7%,到达入渗终点用时减少了 12.2%,15 cm 深度土层的土壤含水率增加了 3.2%,整体土壤脱盐率增加了 4.7%。磁化—去电子水对土壤盐分淋洗有显著促进作用,并且比磁化水或去电子水的促进作用更明显,有利于为作物生长创造良好的水盐环境,为合理利用磁化—去电子水提供了参考。

关键词: 土壤入渗; 磁化水; 去电子水; 磁化—去电子活化水; 水盐运移

中图分类号: S121; S156.4

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2021)03-0290-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2021.03.040

Effect of Magnetization-De-Electronic Integrated Activation Water on Water-Salt Transport Characteristics of Salinized Soil

LI Zongyu¹, WANG Quanjiu^{1,2}, ZHANG Jihong¹, XIE Jiangbo¹, WEI Kai¹

(1.State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region of China, Xi'an University of Technology,

Xi'an 710048; 2.State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100)

Abstract: The application of activated water treatment technologies such as magnetization and de-electronic in agricultural irrigation has been widely concerned. In order to clarify the influence mechanism of magnetization-de-electronic water infiltration on soil water and salt transport, one-dimensional vertical infiltration test was conducted with tap water, magnetized water (0.4 T), de-electronic water and magnetization-de-electronic integral activation water, and the effect of magnetization-de-electronic integrated activation water on soil water and salt transport characteristics and salt leaching efficiency were studied. The results showed that compared with the control, the magnetization-de-electronic integrated activation treatment could effectively promote soil moisture infiltration, increase soil water content, reduce soil salinity, and improve the salt leaching efficiency of irrigation water. Moreover, the magnetization-de-electronic integrated activation water had different degrees of improvement in the infiltration capacity, soil water content, soil salinity, and salt leaching efficiency compared with the single magnetization or de-electronic method. Compared with de-electronic water, in the treatment of magnetization-de-electronic integrated activation water, the cumulative infiltration of increased by 28.0%, the time to reach the end of infiltration decreased by 25.7%, the soil moisture content of the 15 cm depth layer increased by 7.9%, and the overall soil desalination rate increased by 13.9%. Compared with magnetized water, in the treatment of magnetization-de-electronic integrated activation water, the cumulative infiltration increased by 6.7%, the time to reach the end of infiltration decreased by 12.2%, the

收稿日期: 2020-12-24

资助项目: 国家自然科学基金项目(41830754, 51679190); 国家重点研发计划项目(2016YFC0501405-04)

第一作者: 李宗昱(1996—), 硕士研究生, 主要从事土壤物理与养分运移研究。E-mail: lizongyu24@163.com

通信作者: 王全九(1964—), 男, 博士, 教授, 主要从事土壤物理与养分运移研究。E-mail: wquanjiu@163.com

soil moisture content of the 15 cm depth soil layer increased by 3.2%, and the overall soil desalination rate increased by 4.7%. The study results showed that magnetization-de-electronic integral activation water had a significant promotion effect on soil salt leaching, and its promotion effect was more obvious than that of magnetized water or de-electronic water, which was beneficial to create a good water and salt environment for crop growth, and provided a reference for the rational utilization of magnetization-de-electronic integral activation water.

Keywords: soil infiltration; magnetized water; de-electronic water; magnetization-de-electronic integrated activation water; water and salt transport

中国是一个极度缺乏淡水资源的国家,同时西北地区土壤盐碱化和次生盐碱化问题越来越严重,严重制约着土壤可持续利用,威胁着中国的粮食安全^[1-2]。所以提高水资源的利用效率和防治土壤盐碱化是中国农业可持续发展的重要任务。活化处理水是近年来一种新型提高水资源利用效率的概念,活化处理通过改变水的理化性质,进而影响灌溉水生产力^[3-4],在农业上有非常广泛的应用前景^[5-6]。已有研究^[7-9]表明,自来水或者微咸水经过磁化处理后,水的表面张力、pH、溶解氧、接触角等理化性质均有所改变,利用磁化水灌溉可以促进土壤水盐运移,提高脱盐效率,改善作物根系生长环境,提高水肥利用效率^[10-16]。已有研究^[17-20]表明,自来水或者微咸水经过磁化或去电子化处理后其理化特性发生了改变,并且将自来水或微咸水经过磁化、去电子化处理后进行一维垂直土柱入渗试验发现,经过活化处理后的自来水或微咸水的入渗能力增强,并且提高了上层土壤的持水能力和盐分的淋洗效率。

综上所述,利用磁化水和去电子水灌溉可以促进土壤水盐运移,提高上层土壤含水率和盐分淋洗效率,对改善作物根系生长环境、促进作物养分吸收、提高作物产量以及治理盐渍化土壤有重要意义,然而,两者组合之后对土壤水盐运移和盐分淋洗是相互促进,还是相互拮抗,前人并无研究,与磁化水、去电子水相比,磁化—去电子水是否可以进一步促进土壤水

盐运移和盐分淋洗是人们比较关心的问题,也是提高灌溉水活化技术需要迫切了解的问题。因此,本文通过一维垂直土柱入渗试验,对比了磁化—去电子水与磁化水、去电子水对土壤水盐运移的影响,定量分析不同土层的淋洗盐分效率,明晰了磁化—去电子水对土壤水盐运移的影响规律,以期对磁化—去电子水灌溉合理利用提供理论支持和指导。

1 材料与方法

1.1 试验设备与材料

活化水制备系统主要由水箱、蠕动泵、管道、磁场强度为 0.4 T 的磁化器和去电子器组成(图 1)。蠕动泵采用 YT600-1J 型蠕动泵,可手动调节流速,实测最大流速 0.7 m/s,水箱实测容量 100 L,管道采用直径 25 mm 的 PVC 管。磁化器采用磁场强度为 0.4 T 的永磁磁环,去电子器采用韩国亚美华环境科技发展有限公司生产的 W600DELFL 型去电子器,去电子器的一端通过接地导线与大地相连,接地导线的电阻不超过 5 Ω。试验利用自来水通过该系统制备活化水,水箱中的自来水通过蠕动泵以 0.5 m/s 的速度由输水管进入不同的出水管,使水流垂直切割磁感线,即获得不同活化水,从装有去电子器的出水管流出的水为去电子水,从装有磁化器出水管流出的水为磁化水,从装有磁化器和去电子器出水管流出的水为磁化—去电子水,而从未装有活化处理器的水管流出的水则作为对照。

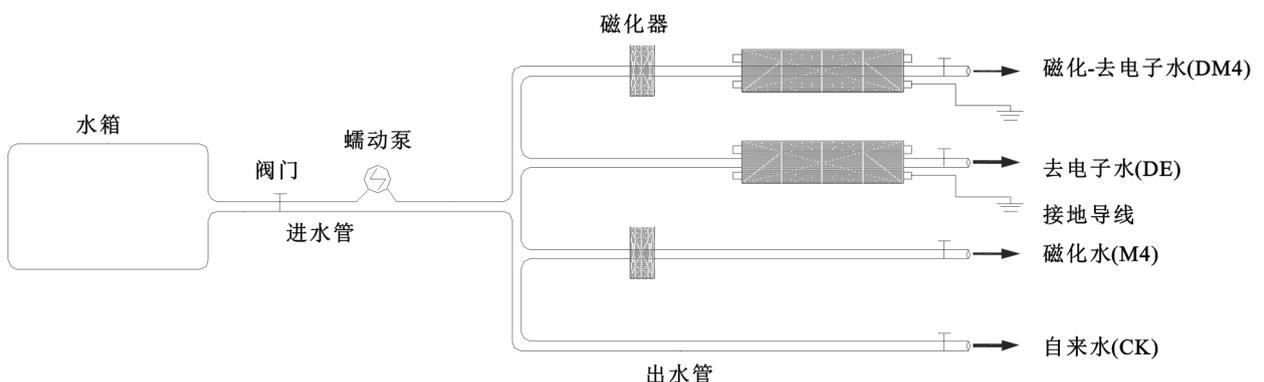


图 1 活化水制备设备示意

试验用土来自新疆库尔勒,将土壤自然晾干、碾压,过 2 mm 筛后测定试验土壤指标。通过激光粒度

分析仪测定土壤的机械组成,土壤的黏粒、粉粒和砂粒体积分数分别为 2.17%,12.55%,85.28%,根据国

际土壤质地分类法,确定供试土壤为砂壤土。土壤初始含盐量为 8.8 g/kg,属于中度盐渍土,土壤容重为 1.63 g/cm³,土壤初始含水率为 0.01 cm³/cm³,饱和含水率为 0.35 cm³/cm³。

自来水矿化度为 0.14 g/L, pH 为 7.2, Cl⁻、Ca²⁺、Mg²⁺、Na⁺、K⁺ 的浓度分别为 0.5, 96.4, 74.5, 23.1, 12.0 mg/L, 自来水的矿化度较低,对活化效果的影响可以忽略。

1.2 试验方法与过程

试验于 2019 年 4 月在西安理工大学省部共建西北旱区生态水利国家重点实验室进行。一维垂直土柱入渗试验系统主要包括马氏瓶、有机玻璃土柱。有机玻璃土柱内径 8 cm,高 50 cm。将风干土壤过 2 mm 筛后搅拌均匀,装入有机玻璃土柱中,每 5 cm 装 1 层土,层与层之间打毛连接,土层深度共 45 cm,在最上层土壤表面放 1 张滤纸,防止入渗水流冲散土壤。土柱装完后分别用自来水(CK)、0.4 T 磁化水(M4)、去电子水(DE)、0.4 T 磁化一去电子水(DM4)进行入渗,每种水的入渗试验设置 3 次重复。在试验过程中,记录马氏瓶中水柱高度和土柱中湿润锋运移距离,采取先密后疏的原则记录数据。当湿润锋运移深度达到 30 cm 时,停止计时,记录此时马氏瓶读数,停止供水。

1.3 测定指标与方法

入渗结束后,马氏瓶水位差与稳定入渗水头的差值为累积入渗量,用水柱高度表示(cm);土柱湿润锋运移的深度为湿润锋运移深度(cm);将土柱底座拆下,在不同土柱的湿润体的 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30 cm 深度处取土样,每个土样取土深度为 1 cm,利用烘干

法测量土壤含水率,取烘干后的土样 18 g 和 90 mL 纯水混合,静置 8 h 后测量电导率和含盐量。

1.4 数据处理与统计分析

利用 Microsoft Excel 2016 软件进行数据处理及制图,利用 SPSS 25 中的 LSD 法进行方差分析,数据处理显著水平均为 $\alpha=0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 磁化一去电子水入渗特征

累积入渗量随入渗时间的变化过程,即累积入渗量在马氏瓶中的水位变化量,用水柱高度表示(cm)。由图 2a 可知,累积入渗量随着入渗时间的增加而增加,当入渗时间达到 20 min 左右时,不同活化水对应的累积入渗量开始出现明显的差别。入渗时间相同时,DE、M4、DM4 的累积入渗量均大于 CK,其中 DM4 对应的累积入渗量最大。当入渗用时为 210 min 时,与 DE 相比,DM4 对应的累积入渗量增加了 28.0%,差异显著($P<0.05$);与 M4 相比,DM4 的累积入渗量增加了 6.7%,差异显著($P<0.05$),可以看出磁化一去电子处理相比于磁化或去电子化更能促进土壤水入渗。由图 2b 可知,不同活化水入渗对湿润锋运移的影响,当入渗时间到达 50 min 左右时,不同入渗水对应的湿润锋运移速度开始出现明显的差别。湿润锋运移深度相同时,DE、M4、DM4 对应的用时均小于 CK,其中 DM4 对应的入渗用时最小。入渗结束时(湿润锋运移深度达到 30 cm),与 DE 相比,DM4 对应的用时减少了 25.7%,差异显著($P<0.05$);与 M4 相比,DM4 对应的用时减少了 12.2%,差异显著($P<0.05$),这说明了磁化一去电子水对应的入渗时间相比于磁化水或去电子水更快。

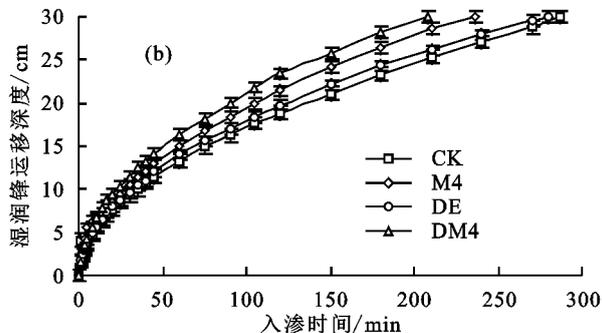
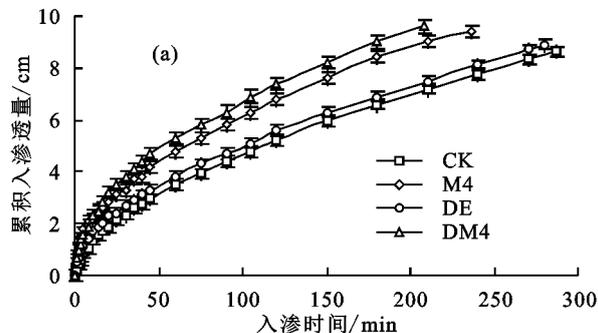


图 2 不同活化水对入渗特征的影响

2.2 磁化一去电子水入渗水盐分布

2.2.1 土壤含水率分布 由图 3 可知,不同活化水入渗情况下,土壤含水率分布随着土层深度的增加,土壤含水率逐渐减小。0—5 cm 表层土壤由于入渗时表层存在积水,处于过饱和状态,导致含水率略大于供试土壤饱和含水率,且数值大致相同,不同处理间无显著差异($P>0.05$),故选择 5 cm 以下深度土层土壤含水率变化情况进行分析。从图 3 可以发现,

5 cm 以下的同一深度土层,DE、M4、DM4 入渗对应的土壤含水率均大于对照,其中 DM4 对应的同一土层含水率最大,与 DE、M4 相比,DM4 对应的 15 cm 土层深度土壤含水率分别增加了 7.9%, 3.2%, 差异显著($P<0.05$),这表明自来水经过活化处理后入渗可以提高上层土壤的含水率,而与 M4、DE 相比,DM4 对应的上层土壤含水率更高,湿润体的保水能力更好。

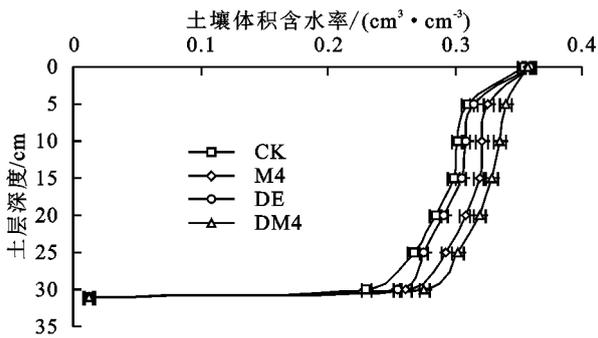


图3 不同活化水入渗对土壤体积含水率分布的影响

2.2.2 土壤盐分分布 由图4可知,不同活化水入渗对土壤盐分分布总体影响基本一致,表层土壤的含盐量最低,随着土层深度增加,土壤的含盐量逐渐增加。土壤脱盐区与积盐区的分界线在22 cm处。在5~22 cm的脱盐区,土层深度相同时,DE、M4、DM4对应的土壤含盐量均小于CK,DM4对应的含盐量小于DE和M4,这表明DE、M4、DM4入渗均可以减少土壤含盐量,并且DM4对应的相同土层含盐量最低。而在22 cm以下的积盐区,不同活化水对应的同一土层土壤含盐量变化规律与脱盐区相反,DE、M4、DM4对应的土壤含盐量均大于对照,其中DM4对应的相同土层含盐量最大,这是因为在脱盐区活化水淋洗带走的盐分大于对照,在脱盐区带走的盐分越多,对应的在积盐区累积的盐分越多,故在积盐区的土壤含盐量变化规律与脱盐区相反。

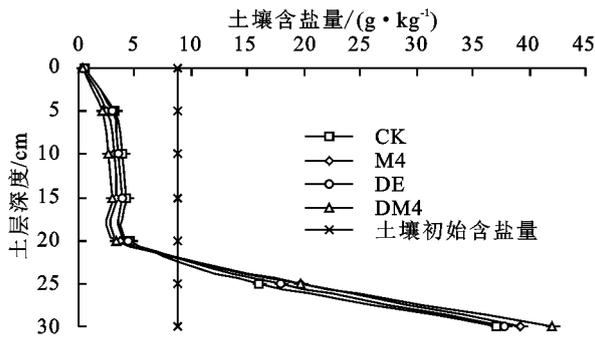


图4 不同活化水入渗土壤盐分分布规律

2.3 磁化—去电子水入渗土壤滞留盐分浓度

由于不同活化水入渗对土壤的含水率、含盐量的影响不同,故其对土壤中滞留盐分的浓度影响也不同。将入渗过后每层土壤的含盐量与该层土壤的含水率的比值定义为每层土壤的滞留盐分浓度(g/L),将供试土壤的总含盐量与累积入渗量的比值定义为平均土壤盐分浓度(g/L)。从图5可以发现,土壤滞留盐分浓度随着土层深度的增加而增加,与含盐量的变化规律基本一致。图5中竖线表示平均土壤盐分浓度,竖线左侧各曲线对应的土壤滞留盐分浓度均小于平均土壤盐分浓度,右侧各曲线对应的土壤滞留盐分浓度均大于平均土壤盐分浓度,竖线与各曲线的交

点大致在21 cm处,故将21 cm定义为土壤积盐区与脱盐区的分界线,21 cm以上土层为脱盐区,21 cm以下土层为积盐区。由于积盐区的浓度变化相差不大,故只分析脱盐区盐分浓度变化规律。土层深度相同时,DE、M4、DM4对应的土壤滞留盐分浓度均小于对照,其中DM4对应的土壤滞留盐分浓度最小,分析10—15 cm深度土层土壤滞留盐分浓度,与DE、M4相比,DM4对应的土壤滞留盐分浓度分别减小了29.1%,15.2%,差异显著($P < 0.05$),这表明DE、M4、DM4入渗可以降低上层土壤的滞留盐分浓度,其中DM4入渗的效果最好,可以为作物创造更适宜生长的根区环境。

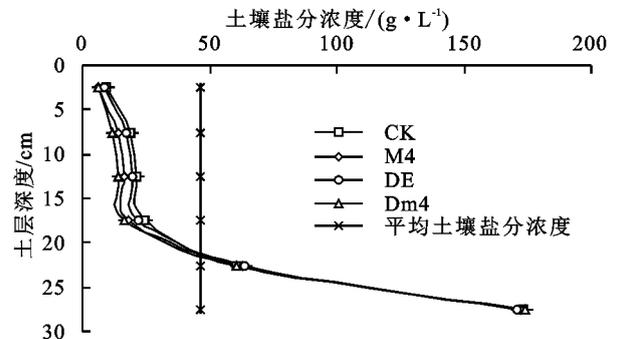


图5 不同活化水入渗土壤滞留盐分浓度分布规律

2.4 磁化—去电子水入渗盐分淋洗效果

将脱盐区的初始含盐量和入渗后的脱盐区土壤含盐量的差值与初始含盐量的百分比定义为脱盐率^[21]。DE、M4、DM4对应的脱盐率分别为63.5%,69.1%,72.3%,均大于CK(61.0%),其中DM4对应的脱盐率最大,与DE、M4相比,DM4的脱盐率分别增加了13.9%,4.7%,差异显著($P < 0.05$),可以发现,相比于DE和M4,DM4的脱盐率更高,淋洗盐分的效果更好,这对于盐渍化土壤的治理有重大的意义。

脱盐区某一土层中被淋洗的盐分总量与透过该土层的总入渗水量的比值称为盐分淋洗效率(g/L),盐分淋洗效率有效反映了单位入渗水体携带盐分的能力。由表1可知,0—5 cm的表层土壤的DE、M4、DM4对应盐分淋洗效率与CK相差不大,差异不显著($P > 0.05$),这是由于表层土壤在入渗过程中处于过饱和状态,而表层土壤的含盐量相同,向下淋洗的盐分基本一致,故不同处理对应的盐分淋洗效率差异性不显著。分析5 cm以下深度土层可以发现,土层深度相同时,多数土层的DE对应的盐分淋洗效率与CK相比差异并不显著,而M4、DM4对应的盐分淋洗效率均大于CK,其中DM4对应的盐分淋洗效率最大,分析整个脱盐区0—20 cm土层的盐分淋洗效率得到的结果一致,即DM4对应的盐分淋洗效率最大。

表 1 脱盐区盐分淋洗效率 单位:g/L

土层深度/cm	CK	DE	M4	DM4
0—5	7.9a	7.8a	7.9a	7.8a
5—10	7.7c	7.8c	8.1b	8.3a
10—15	9.6d	9.8c	10.1b	10.5a
15—20	13.8c	13.9c	14.9b	15.2a
0—20	66.5c	66.3c	68.5b	69.6a

注:表中同一行数后不同小写字母表示不同处理间差异达显著水平($P<0.05$)。

3 讨论

土壤入渗及水盐分布对盐渍土改良和作物的生长起着至关重要的作用,本文研究了磁化—去电子水对土壤入渗特征及水盐运移的影响,并进一步分析了对盐渍土的盐分淋洗效果,结果显示,DE 和 M4 可以促进土壤水分入渗和盐分淋洗,这与大部分活化水入渗结果^[10-11,15,21]相似,可能是由于自来水经过磁化、去电子化处理后表面张力、黏度等理化特性发生了改变^[7-9,19,22-24],加快了土壤水分入渗,促进了盐分淋洗,值得研究的是 DM4 同样可以促进土壤水分入渗和盐分淋洗,并且与 DE、M4 相比,这种促进作用得到了进一步的增强,这同样可能是因为入渗水经过磁化处理后,表面张力、黏度、溶解度等理化特性改变^[7-9,22-24],同时经过去电子化处理后,表面张力、黏度、溶解度等特性的改变得到叠加,导致累积入渗量增加,进而在累积入渗量和溶解度共同的作用下,使得盐渍土中的盐分被大量淋洗至积盐区。但是,磁化和去电子组合的增强作用并不是简单的线性增加,与磁化强度、去电子器、水的种类、温度、土壤质地均相关,所以这种增强作用可能是一种复杂的关系,关于磁化—去电子水作用的机理需要后续进一步的探究。

4 结论

(1)去电子水、磁化水、磁化—去电子水均可以促进土壤水分入渗,并且磁化—去电子水对土壤入渗的促进作用优于磁化水和去电子水:当入渗用时为 210 min 时,与 DE 相比,DM4 对应的累积入渗量增加了 28.0%,与 M4 相比,DM4 的累积入渗量增加了 6.7%;入渗结束时,与 DE 相比,DM4 对应的用时减少了 25.7%,与 M4 相比,DM4 对应的用时减少了 12.2%。

(2)去电子水、磁化水、磁化—去电子水入渗具有良好的盐分淋洗效果,能够为作物创造适宜根区土壤环境,可以提高上层土壤的含水率、降低上层土壤的含盐量和滞留盐分浓度,提高脱盐率,并且磁化—去电子水对应的上述效果优于磁化水和去电子水:当土层深度为 15 cm 时,与 DE、M4 相比,DM4 对应的土壤含水率分别增加了 7.9%,3.2%;当土层深度为 10—15 cm 时,与 DE、M4 相比,DM4 对应的土壤滞

留盐分浓度减小了 29.1%,15.2%;与 DE、M4 相比,DM4 的脱盐率分别增加了 13.9%,4.7%。

参考文献:

- [1] 吴流通.我国土壤质量及土壤资源的可持续利用分析[J].南方农业,2018,12(24):169-170.
- [2] 周健民.浅谈我国土壤质量变化与耕地资源可持续利用[J].中国科学院院刊,2015,30(4):459-467.
- [3] 朱练峰,张均华,禹盛苗,等.磁化水灌溉促进水稻生长发育提高产量和品质[J].农业工程学报,2014,30(19):107-114.
- [4] 王艳会,赵国庆,王全九,等.去电子水灌溉对冬小麦生长及其水分利用的影响[J].农业环境科学学报,2020,39(5):953-963.
- [5] 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.
- [6] Ali Y, Samaneh 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.
- [7] Pang X F, Deng B. The changes of macroscopic features and microscopic structures of water under influence of magnetic field [J].Physical B: Physics of Condensed Matter,2008,403(19/20):3571-3577.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 张瑞喜,王卫兵,褚贵新.磁化水在盐渍化土壤中的入渗和淋洗效应[J].中国农业科学,2014,47(8):1634-1641.
- [11] 张瑞喜,褚贵新,王卫兵,等.滴灌条件下磁化水对土壤淋盐作用的初步研究[J].新疆农业科学,2013,50(9):1656-1661.
- [12] Mohamed A I, Ebead B M. Effect of magnetic treated irrigation water on salt removal from a sandy soil and on the availability of certain nutrients[J].International Journal of Engineering,2013,2(2):36-44.
- [13] 王洪波,乔木,周生斌,等.土壤盐分及甜菜产量对磁化水滴灌的响应[J].干旱区资源与环境,2018,32(3):158-163.
- [14] 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.
- [15] 卜东升,奉文贵,蔡利华,等.磁化水膜下滴灌对新疆棉田土壤脱盐效果的影响[J].农业工程学报,2010,26(增刊2):163-166.
- [16] 王录,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.
- [17] 王全九,孙燕,宁松瑞,等.活化灌溉水对土壤理化性质和作物生长影响途径剖析[J].地球科学进展,2019,34(6):660-670.

- [18] 穆艳,赵国庆,赵巧巧,等.活化水灌溉在农业生产中的应用研究进展[J].农业资源与环境学报,2019,36(4):403-411.
- [19] 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.
- [20] 王全九,许紫月,单鱼洋,等.去电子处理微咸水矿化度对土壤水盐运移特征的影响[J].农业工程学报,2018,34(4):125-132.
- [21] 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.
- [22] 和劲松,祁凡雨,裴洛伟,等.磁场处理对液态水缔合结构影响的综合评价指标[J].农业工程学报,2014,30(21):293-300.
- [23] 李言涛,薛永金.水系统的磁化处理技术及其应用[J].工业水处理,2007,27(11):11-15.
- [24] 刘志超,宋稳亚,闫龙飞,等.磁化水溶解度及雾化特性实验研究[J].科学技术与工程,2015,15(19):102-105.
- (上接第289页)
- [8] Hong J D, Cameron K C. Inhibition of ammonium oxidation by a liquid formulation of 3,4-Dimethylpyrazole phosphate (DMPP) compared with a dicyandiamide (DCD) solution in six new Zealand grazed grassland soils [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2011, 11(6): 1032-1039.
- [9] 王静,王允青,张凤芝,等.脲酶/硝化抑制剂对沿淮平原水稻产量、氮肥利用率及稻田氮素的影响[J].水土保持学报,2019,33(5):211-216.
- [10] 毛新伟,程敏,徐秋芳,等.硝化抑制剂对毛竹林土壤 N_2O 排放和氨氧化微生物的影响[J].土壤学报,2016,53(6):1528-1540.
- [11] 赖晶晶,兰婷,王启,等.硝化抑制剂对紫色土硝化作用及 N_2O 排放的影响[J].农业环境科学学报,2019,38(6):1420-1428.
- [12] Pfab H, Palmer I, Buegger F, et al. Influence of a nitrification inhibitor and of placed N-fertilization on N_2O fluxes from a vegetable cropped loamy soil [J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2012, 150(3): 91-101.
- [13] Ruser R, Schulz R. The effect of nitrification inhibitors on the nitrous oxide (N_2O) release from agricultural soils: A review [J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2015, 178(2): 171-188.
- [14] Azam F, Benckiser G, Müller C, et al. Release, movement and recovery of 3,4-dimethylpyrazole phosphate (DMPP), ammonium, and nitrate from stabilized nitrogen fertilizer granules in a silty clay soil under laboratory conditions [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2001, 34(2): 118-125.
- [15] 石美,张妹婷,沈锋,等.石灰性土壤中不同硝化抑制剂的抑制效果及其对亚硝态氮累积的影响[J].中国农业科学,2011,44(3):500-506.
- [16] 王雪薇,刘涛,褚贵新.三种硝化抑制剂抑制土壤硝化作用比较及用量研究[J].植物营养与肥料学报,2017,23(1):54-61.
- [17] 张春楠,张瑞芳,王鑫鑫,等.硝化抑制剂和微生物菌剂对甜瓜产量及氮素利用的影响[J].水土保持学报,2020,34(6):281-287,293.
- [18] Cookson W R, Cornforth I S. Dicyandiamide slows nitrification in dairy cattle urine patches: Effects on soil solution composition, soil pH and pasture yield [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2002, 34(10): 1461-1465.
- [19] 谢立勇,叶丹丹,张贺,等.旱地土壤温室气体排放影响因素及减排增汇措施分析[J].中国农业气象,2011,32(4):481-487.
- [20] Kou Y P, Wei K, Chen G X, et al. Effects of 3,4-dimethylpyrazole phosphate and dicyandiamide on nitrous oxide emission in a greenhouse vegetable soil [J]. *Plant, Soil and Environment*, 2015, 61(1): 29-35.
- [21] Gilsanz C, Báez D, Misselbrook T H, et al. Development of emission factors and efficiency of two nitrification inhibitors, DCD and DMPP [J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2016, 216: 1-8.
- [22] 季加敏,喻瑶,陆星,等.肥料添加剂降低 N_2O 排放的效果与机理[J].植物营养与肥料学报,2012,18(6):1434-1440.
- [23] 傅涛,倪九派,魏朝富,等.双氰胺在四川3种主要土壤上的硝化抑制作用[J].生态环境学报,2001,10(3):210-213.
- [24] 李明峰,董云社,齐玉春,等.农垦对温带草地生态系统 CO_2 、 CH_4 、 N_2O 通量的影响[J].中国农业科学,2004,37(12):1960-1965.