

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.08.030

磁化强度对磁电一体活化水土盐运移特征的影响

王全九^{1,2} 李宗昱¹ 张继红¹ 解江博¹ 韦开¹ 孙燕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处理技术能够显著提高灌溉水盐分淋洗效率。为了阐明磁化强度对磁电一体活化水土盐运移特征的影响机制,选取不同磁化强度(0, 0.1, 0.2, 0.4, 0.8 T)的磁电一体活化水进行一维垂直土柱入渗试验。结果表明,磁电一体活化水可以促进土壤水入渗,提高盐分淋洗效率,并且其效果与磁化强度紧密相关;随着磁化强度的增大,土壤水分入渗量与盐分淋洗效率呈现先增加后减小的二次函数关系,吸湿率 S 与磁化强度 H 之间同样呈现良好的二次函数关系。通过试验数据及入渗模型参数分析发现,磁化强度为 0.4 T 左右时,磁电一体活化水入渗对应的累积入渗量最大、入渗用时最短、土壤含水率最大,而含盐量最小,脱盐效果最好,故可以将 0.4 T 作为磁电一体活化水的最佳磁化强度。

关键词: 磁电一体活化水; 磁化强度; 水盐运移; 盐分淋洗

中图分类号: S121; S156.4

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2020)08-0278-07

OSID:



Effect of Magnetization Intensity on Characteristics of Soil Water and Salt Transport in Magnetization-de-electronic Activation Water

WANG Quanjiu^{1,2} LI Zongyu¹ ZHANG Jihong¹ XIE Jiangbo¹ WEI Kai¹ SUN Yan¹

(1. State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region of China, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China

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, China)

Abstract: Activation technologies such as magnetization and de-electronation can significantly improve the salt leaching efficiency of irrigation water. In order to clarify the influence mechanism of magnetization intensity on the soil water and salt transport of magnetization-de-electronic activation water, the effect of magnetization intensity on the soil water and salt transport of magnetization-de-electronic activation water was studied by a one-dimensional vertical soil column infiltration test, which was carried out at different magnetization intensities (0, 0.1 T, 0.2 T, 0.4 T and 0.8 T) magnetization-de-electronic activation water. The results showed that the magnetization-de-electronic activation water infiltration could improve the soil water infiltration capacity and salt leaching efficiency, and it was closely related to the magnetization intensity, the soil water infiltration capacity and salt leaching efficiency showed a quadratic function relationship which was increased first and then decreased with the increase of magnetization intensity. Meanwhile, the moisture absorption rate S and the magnetization intensity H also showed a good quadratic function relationship. Through the analysis of test data and the infiltration model parameters, it was found that when the magnetization intensity was about 0.4 T, the cumulative infiltration corresponding to the magnetization-de-electronic activation water infiltration was the largest, the infiltration time was the shortest, the soil water content was the largest, the salt content was the smallest, and the desalination effect was the best. Therefore, 0.4 T can be used as the optimal magnetization intensity of magnetization-de-electronic activation water.

Key words: magnetization-de-electronic activation water; magnetization intensity; water and salt transport; salt leaching

收稿日期: 2020-06-07 修回日期: 2020-06-29

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(41830754)、国家重点研发计划项目(2016YFC0501405-04)、国家自然科学基金面上项目(51679190)和陕西省博士后基金项目(2018BSHEDZZ26)

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

0 引言

我国水资源短缺,提高灌溉用水效率是实现农业高效用水的重要任务。国内众多学者从完善灌溉制度、改进灌排方式等方面开展了大量研究^[1-2],取得了良好效果。为了进一步提高灌溉水的生产能力,一些学者采用物理技术(磁化、去电子化)对淡水或微咸水进行处理,发现淡水或微咸水的表面张力、pH 值、溶解氧浓度、接触角等理化性质均发生了改变^[3-9],这些理化性质的改变可以提高灌溉水的利用效率,进一步应用在农业生产领域^[10-11]。国内外大量研究表明,利用磁化水灌溉可以加快土壤水分入渗,促进土壤上层盐分向下运移,提高盐分淋洗效率,改善土壤及作物生长环境^[12-20]。文献[21-23]通过研究活化水在农业生产领域的应用发现,利用磁化和去电子化微咸水入渗可以增加上层土壤的保水能力,促进土壤水盐运移,提高土壤脱盐率,改善作物根系生长环境,并且磁化水的入渗特征和盐分淋洗效率对不同的磁化强度有不同的响应,即随着磁化强度的增加,磁化水活化性能先增加后减小,具有良好的二次函数关系。关于去电子水在农业灌溉领域的研究较少,一些研究表明,利用去电子水灌溉可以改善作物的生长环境,提高冬小麦的生长速率和产量^[24],并且对土壤的盐分胁迫有一定的缓冲作用^[25-26]。

综上所述,通过磁化、去电子化可以改变水的物理性质,利用磁化水和去电子水进行灌溉,能够促进土壤水分入渗、提高盐分淋洗效率,增强上层土壤的保水能力。目前,活化水主要包括磁化水和去电子水^[22],关于磁化与去电子组合处理淡水或微咸水的研究尚未见报道,土壤水入渗特征及盐分淋洗效率与磁电一体活化水的磁化强度之间的关系尚不清楚。因此,本文通过一维垂直土柱入渗试验,定量分析不同磁化强度的磁电一体活化水对土壤水盐运移特征的影响,并建立磁化强度与入渗模型参数之间的关系,为磁电一体活化方法在农业生产上的应用提供理论依据和指导。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

本试验所用磁电一体灌溉水活化系统如图 1 所示,该系统主要由水箱(100 L)、蠕动泵(YT600-1J 型)、不同磁化强度的磁化器(包头鑫达磁性材料厂)、去电子器(W600DELFL 型)组成,并通过直径 25 mm PVC 管道连接而成。磁化强度设为 0.1、0.2、0.4、0.8 T,并与去电子设备构成不同磁化强度

的磁电活化系统。水箱中装满自来水,通过蠕动泵控制自来水以 0.5 m/s 的恒定流速流过装有不同磁化器和去电子器的管道,水流切割磁感线,理化性质发生改变^[7],通过去电子器时,由一根电阻不超过 5 Ω 的接地导线将水中电子导入地下^[7],得到不同磁化强度的磁电一体活化水。

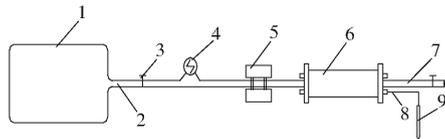


图 1 活化水制备系统示意图

Fig. 1 Schematic of activated water preparation system

1. 水箱 2. 进水管 3. 止水阀 4. 蠕动泵 5. 磁化器 6. 去电子器 7. 出水管 8. 接地导线 9. 接地铜棒

入渗系统主要包括有机玻璃土柱和马氏瓶。有机玻璃土柱内径 8 cm,高 50 cm,外侧贴有刻度纸,便于读取湿润锋运移深度。马氏瓶内径 8 cm,高 50 cm,为入渗提供稳定的入渗水头。试验用土取自新疆维吾尔自治区库尔勒地区,利用激光粒度分析仪(Mastersizer 2000 型,马尔文仪器有限公司,英国)测定土壤的机械组成,确定试验用土为砂壤土,土壤容重为 1.63 g/cm³,初始含水率为 0.01 cm³/cm³,饱和含水率为 0.35 cm³/cm³,初始含盐量为 8.8 g/kg。

1.2 试验方法与过程

试验以未处理的自来水作为对照,自来水通过不同磁化强度(0.1、0.2、0.4、0.8 T)的磁电一体灌溉水活化系统进行处理,共计 5 种入渗用水,每种水的入渗试验设置 3 次重复。将自来水和不同磁化强度的磁电一体活化水装入马氏瓶中,试验土样装入土柱中,装土高度 45 cm,装土时保证层与层之间的土样充分接触,并在土柱顶部放一张滤纸。调整马氏瓶与土柱的位置,控制入渗水头在 1 cm 左右。开始入渗试验后,利用秒表计时并记录马氏瓶中水柱高度变化和湿润锋运移深度,到达入渗终点(湿润锋运移深度达到 30 cm)时,停止计时,同时记录此时马氏瓶读数,停止供水。入渗结束,拆卸有机玻璃土柱,提取湿润体 0、5、10、15、20、25、30 cm 处的土样,用于测量土样的含水率和含盐量。

1.3 入渗模型

利用 Philip 入渗模型分析不同磁化强度磁电一体活化水的入渗特征,进一步探究不同磁化强度对入渗模型参数的影响。

由于本试验是短时入渗,Philip 入渗模型^[27]的累积入渗量的表达式为

$$I = St^{0.5} \quad (1)$$

式中 I ——累积入渗量, cm
 S ——吸湿率, $\text{cm}/\text{min}^{0.5}$
 t ——入渗时间, min

2 结果与分析

2.1 磁化强度对磁电一体活化水入渗特征的影响

2.1.1 对累积入渗量的影响

图2(图中CK表示对照, DM1、DM2、DM4、DM8分别表示磁化强度为0.1、0.2、0.4、0.8 T的磁电一体活化水,下同)为不同磁化强度磁电一体活化水入渗对土壤累积入渗量的影响。由图2可知,对照和磁电一体活化水的累积入渗量均随着入渗时间的增加而增加,在入渗时间到达20 min前,对照与磁电一体活化水入渗的累积入渗量相差不大。20 min后,磁电一体活化水的累积入渗量均大于对照,在入渗时间到达210 min时,DM1、DM2、DM4、DM8对应的累积入渗量较对照增加了18.05%、29.17%、33.33%、18.06%。这是因为磁化和去电子化处理均使自来水的理化性质发生了变化^[3,7,28],提高了自来水的入渗能力^[8],而将两种活化技术结合之后自来水的理化特性同样会发生改变,甚至这种改变效应可以叠加,使得磁电一体活化水入渗时可以进入到土壤更小的孔隙中,累积入渗量增加。同时发现,入渗时间相同时,磁电一体活化水入渗的累积入渗量随着磁化强度的增加呈现先增加后减小的趋势,其中磁化强度为0.4 T的磁电一体活化水的累积入渗量最大。这说明不同的磁化强度对磁电一体活化水入渗的累积入渗量有不同的影响,可能存在最佳磁化强度的磁电一体活化水。

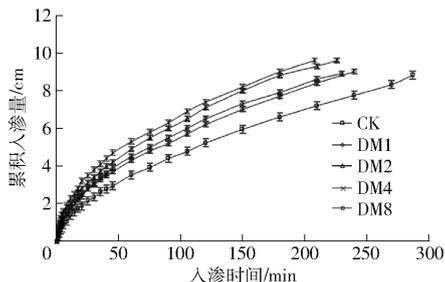


图2 不同磁化强度对累积入渗量的影响

Fig. 2 Effect of different magnetization intensities on cumulative infiltration

2.1.2 对湿润锋运移的影响

图3为不同磁化强度磁电一体活化水入渗对湿润锋运移的影响。从图中可以看出,当入渗时间到达50 min后,与对照相比,湿润锋运移到相同深度时,磁电一体活化水入渗用时明显小于对照,当达到入渗终点时(湿润锋运移深度达到30 cm),与对照相比,DM1、DM2、DM4、DM8用时减少了16.38%、

21.25%、27.53%、19.86%。这是因为自来水经过磁化或者去电子化处理后表面张力、粘度减小^[7,28],可以加快自来水入渗,提高入渗速率,而将自来水经过磁化与去电子组合处理后,理化特性同样会发生改变,故可以提高入渗速率。从试验结果可以发现,磁电一体活化水到达入渗终点的时间随着磁化强度的增加呈现先减小后增加的趋势,当磁化强度为0.4 T时,入渗用时最短,与磁化强度对累积入渗量的影响结果一致,磁电一体活化水存在最佳磁化强度。

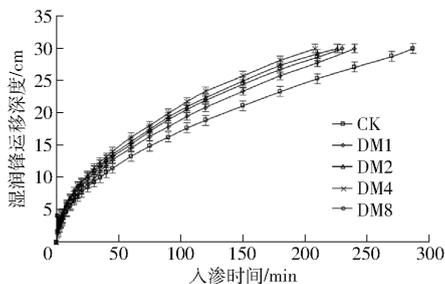


图3 不同磁化强度对湿润锋运移深度的影响

Fig. 3 Effect of different magnetization intensities on wet front migration depth

2.2 磁化强度对磁电一体活化水入渗模型参数的影响

表1为利用Philip入渗模型(式(1))对入渗数据进行拟合获得的吸湿率 S 。拟合决定系数均高于0.99,说明Philip模型的拟合结果较好。从表中可以发现,磁电一体活化水对应的吸湿率 S 均大于对照。

表1 磁电一体活化水对应的吸湿率

Tab. 1 Moisture absorption of magnetization-de-electronic activation water

磁化强度 H/T	0	0.1	0.2	0.4	0.8
吸湿率 $S/$ ($\text{cm} \cdot \text{min}^{-0.5}$)	0.484 6	0.566 7	0.671 9	0.650 0	0.570 0

表1中磁化强度 H 与吸湿率 S 之间的关系如图4所示,并对磁化强度 H 与吸湿率 S 之间的关系进行拟合,拟合结果为

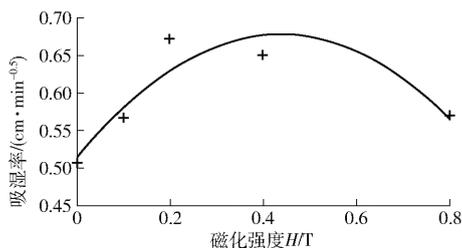
$$S = -0.854 4H^2 + 0.749 1H + 0.513 4 \quad (2)$$

拟合决定系数 $R^2 = 0.85$ 。由图4可知,吸湿率 S 随着磁化强度 H 的增加先增加后减小,最大吸湿率对应的磁化强度在0.4 T附近,根据式(2)计算,当吸湿率 S 最大时,磁化强度为0.44 T。

2.3 磁化强度对磁电一体活化水入渗土壤水分分布的影响

2.3.1 对土壤含水率分布的影响

图5为不同磁化强度磁电一体活化水入渗对土壤含水率分布的影响。从图中可以发现,土壤含水

图 4 磁化强度与吸湿率 S 的关系Fig. 4 Relationship between magnetization intensity and moisture absorption rate S

率随着入渗土层深度的增加而减小。入渗过程中,由于表层土壤存在稳定的入渗水头,长期处于过饱和状态,含水率几乎等于饱和含水率,故表层土壤的含水率差异不明显。为了分析不同情况下土壤含水率分布差异,重点分析 5 cm 深度以下的土层土壤含水率。从图中可以发现,相同土层深度磁电一体活化水对应的含水率均大于对照,与对照相比,DM1、DM2、DM4、DM8 对应的 15 cm 深度的土壤含水率增加了 3.9%、6.5%、10.1%、4.9%,土壤含水率随着磁化强度的增加呈现先增加后减小的趋势,其中 0.4 T 磁电一体活化水对应的各层土壤含水率最大。

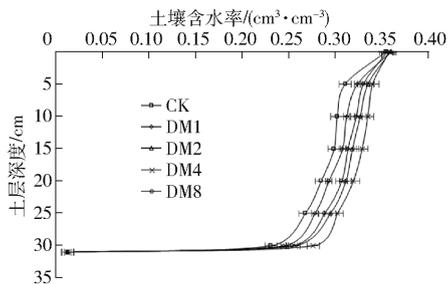


图 5 不同磁化强度对土壤含水率分布的影响

Fig. 5 Effect of different magnetization intensity on soil water content distribution

2.3.2 对土壤盐分分布的影响

图 6 为不同磁化强度磁电一体活化水入渗对不同土层含盐量分布的影响。从图中可以发现,不同土层盐分分布的趋势基本一致,表层土壤的含盐量基本接近于 0,随着入渗的进行,土层深度越深,土壤的含盐量越高。图中竖线表示供试土壤初始含盐量,竖线左侧为脱盐区,竖线右侧为积盐区,脱盐区与积盐区的分界线大致在土层深度 22 cm 处。在土层深度为 5~22 cm 的脱盐区,磁电一体活化水对应的同一深度土壤含盐量均小于对照。分析 15 cm 处的土壤含盐量,与对照相比,DM1、DM2、DM4、DM8 对应的土壤含盐量减少了 13.8%、6.6%、27.1%、19.7%,其中磁化强度 0.4 T 对应的土壤含盐量最小。而在积盐区同一土层土壤含盐量与脱盐区相反,磁电一体活化水对应的同一土层土壤含盐量均大于对照,其中磁化强度 0.4 T 对应的土壤含盐量

最大。这是由于入渗过程中上层土壤的盐分溶于水中,随着入渗的进行将上层土壤的盐分淋洗,使大量的盐分聚集于积盐区,而磁电一体活化水由于磁化和去电子化的作用,水的表面张力、粘度等理化特性发生了改变^[3,7-8],大的缔合水分子集团变为小的缔合水分子集团^[29],使得水分能够进入土壤更小的孔隙中,淋洗的盐分比对照更多,故在脱盐区磁电一体活化水淋洗的盐分越多,则在积盐区积累的盐分也越多。分析湿润锋处土壤含盐量可以发现,不同处理水入渗在湿润锋的含盐量差异明显,与对照相比,DM1、DM2、DM4、DM8 对应的湿润锋处的含盐量增加了 10.3%、8.1%、13.5%、4.7%,其中磁化强度为 0.4 T 时对应的湿润锋处的含盐量最大,这与脱盐区分析的结果一致。

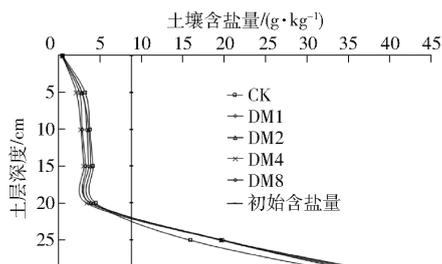


图 6 不同磁化强度对土壤盐分分布的影响

Fig. 6 Effect of different magnetization intensity on soil salt distribution

2.4 磁化强度对土壤滞留盐分浓度的影响

为进一步阐明不同磁化强度磁电一体活化水对土壤盐运移的影响,分析不同磁化强度磁电一体活化水对应的土壤滞留盐分浓度变化特征。土壤滞留盐分浓度是指入渗结束后某层土壤的含盐量与该层土壤含水率的比值,而整个湿润体的含盐量与总入渗量的比值定义为平均土壤盐分浓度。图 7 为不同入渗水对应的土壤滞留盐分浓度(图中竖线代表土壤初始盐分浓度)。从图中可以看出,竖线左侧脱盐区的土壤滞留盐分浓度有明显的差别,土层深度相同时,磁电一体活化水对应的滞留盐分浓度均小于对照,分析 10~15 cm 深度处的土壤滞留盐分浓度,与对照相比,DM1、DM2、DM4、DM8 对应的土壤滞留盐分浓度减小了 15.2%、11.9%、34.9%、26.1%,可以发现磁化强度对磁电一体活化水入渗的土壤滞留盐分浓度有显著的影响,磁化强度为 0.4 T 时对应的土壤滞留盐分浓度最小。

2.5 磁化强度对土壤盐分淋洗效果的影响

图 8(图中不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$))为不同磁化强度下磁电一体活化水下的土壤脱盐率。从图中可以看出,不同磁电一体活化水对应的土壤脱盐率均大于对照,并且随着磁化

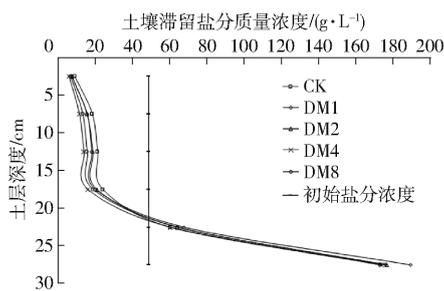


图7 不同磁化强度对土壤滞留盐分浓度的影响

Fig. 7 Effect of different magnetization intensity on soil retained salt concentration

强度的增加,磁电一体活化水对应的脱盐率呈现先增加后减小的趋势,磁化强度为0.4 T时磁电一体活化水对应的脱盐率最高。与对照相比,DM1、DM2、DM4、DM8对应的土壤脱盐率增加了8.2%、10.3%、18.5%、13.1%。

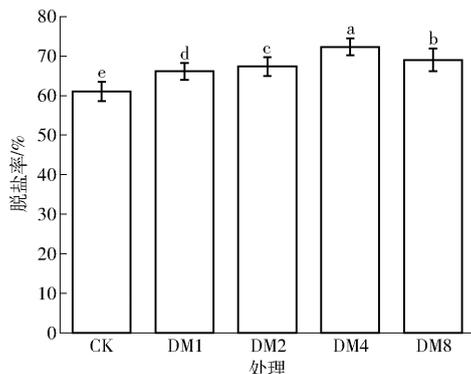


图8 不同入渗水下的脱盐率

Fig. 8 Desalting rate corresponding to different infiltration water

为了进一步分析磁化强度对磁电一体活化水淋洗盐分效果的影响,定义脱盐区某一土层中被淋洗的盐分总量与通过该土层总水量的比值为盐分淋洗效率,单位为g/L。表2为不同磁化强度磁电一体活化水对应的不同土层盐分淋洗效率,0~5 cm深度土壤的盐分淋洗效率差异不显著($P > 0.05$)。这是因为不同磁化强度的磁电一体活化水通过表层土壤的总水量相差不大,致使表层土壤含水率均接近饱和,盐分向下淋洗总量接近,盐分淋洗效率接近甚至小于对照。与对照相比,不同磁化强度磁电一体活化水对应土层深度在5 cm以下的盐分淋洗效率均增大。分析整个脱盐区(0~20 cm)盐分淋洗效率,与对照相比,DM1、DM2、DM4、DM8对应的整体盐分淋洗效率增加了4.2%、2.6%、4.7%、3.8%,0.4 T磁电一体活化水对应的盐分淋洗效率最大。

2.6 磁电一体活化水在农业灌溉领域的实用价值及经济效益分析

通过以上分析可以发现,磁电一体活化水可以

表2 盐分淋洗效率

Tab. 2 Salt leaching efficiency		g/L				
土层深度/cm	CK	DM1	DM2	DM4	DM8	
0~5	7.9 ^a	7.9 ^a	7.9 ^a	7.8 ^a	7.8 ^a	
5~10	7.7 ^c	8.0 ^b	8.1 ^b	8.3 ^a	8.3 ^a	
10~15	9.6 ^c	10.2 ^b	10.2 ^b	10.5 ^a	10.6 ^a	
15~20	13.8 ^d	15.1 ^b	14.5 ^c	15.2 ^a	14.8 ^c	
0~20	66.5 ^d	69.3 ^b	68.2 ^d	69.6 ^a	69.0 ^c	

注:同一行不同字母表示处理间差异达显著水平($P < 0.05$)。

显著提高土壤水分入渗能力和盐分淋洗效率,与对照相比,磁电一体活化水对应的累积入渗量增加了18.05%~33.3%,入渗用时减少了16.38%~27.53%,同一土层含水率增加了3.9%~10.1%,脱盐区同一土层含盐量减少了6.6%~27.1%,脱盐区同一土层滞留盐分浓度减少了11.9%~34.9%,脱盐率增加了8.2%~18.5%,脱盐区盐分淋洗效率增加了2.6%~4.7%。与传统灌溉水相比,利用磁电一体活化水压盐治理盐碱土可以提高水的利用效率,达到节约用水的效果;利用磁电一体活化水灌溉,土壤含水率高,含盐量低,可以为作物创造更适宜的根区土壤环境。磁电一体活化水制备方法简单,成本较低,只需在灌溉水源处增设活化水制备设备,具有很强的实用价值和经济效益,故磁电一体活化水在盐碱地治理和农业灌溉领域有非常大的应用前景。

3 结论

(1)磁电一体活化水可以促进土壤水分入渗,并且对磁化强度有不同的响应。与对照相比,磁电一体活化水的累积入渗量显著增加,入渗用时显著缩短,入渗时间相同时,累积入渗量随着磁化强度的增加呈先增加后减小的趋势,入渗结束时随着磁化强度的增加呈先减小后增加的趋势,磁化强度为0.4 T时累积入渗量最大、入渗用时最短。

(2)磁电一体活化水对应的吸湿率 S 均大于对照,并且随着磁化强度 H 的增加,吸湿率 S 呈现先增加后减小的趋势。建立了吸湿率 S 与磁化强度 H 之间的拟合公式,得出磁化强度为0.44 T时的磁电一体活化水吸湿率最大。

(3)磁电一体活化水入渗可以提高土壤盐分的淋洗效率,并且适当的磁化强度可以提高磁电一体活化水的利用效率。与对照相比,磁电一体活化水入渗对应的含水率增加,含盐量和土壤滞留盐分浓度降低,脱盐率与盐分淋洗效率增大,且脱盐率随着磁化强度的增加呈现先增大后减小的规律。研究表明,磁化强度为0.4 T时,磁电一体活化水的含水

率、脱盐率、盐分淋洗效率达到最大,含盐量和土壤滞留盐分浓度最低。

(4)磁电一体活化水在农业领域有非常大的应用潜力。与传统大水压盐治理盐碱土相比,磁电一体活化水压盐可以提高水分利用效率,达到节约用

水的效果,缓解我国淡水资源短缺的问题;与传统灌溉水相比,磁电一体活化水灌溉的土壤含水率更高,根区土壤盐分浓度更低,为作物创造更加良好的生长环境。磁电一体活化水的制备成本较低,方法简单,具有良好的实用价值。

参 考 文 献

- [1] 丁锐钦,丁亨,裴雪霞,等.不同年份下播期对旱地小麦产量及水分利用率的影响[J].山西农业科学,2013,41(4):342-344,350.
DING Ruiqin,DING Heng,PEI Xuexia,et al. Effect of sowing date on dry land wheat yield and water use efficiency in different years[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2013,41(4): 342-344,350. (in Chinese)
- [2] 段爱旺,张寄阳.中国灌溉农田粮食作物水分利用效率的研究[J].农业工程学报,2000,16(4):41-44.
DUAN Aiwang,ZHANG Jiyang. Water use efficiency of grain crops in irrigated farmland in China[J]. Transactions of the CSAE,2000,16(4):41-44. (in Chinese)
- [3] 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 Zhenrui,ZHAO Yajun,CHENG Fengling,et al. Magnetization mechanism of magnetized water[J]. Acta Physica Sinica, 2011,60(6):432-439. (in Chinese)
- [4] 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.
HE Jinsong,QI Fanyu,PEI Luowei,et al. Integrated index assessing effect of magnetic treatment on liquid water's associative structure[J]. Transactions of the CSAE, 2014,30(21): 293-300. (in Chinese)
- [5] HOLYSZ L,CHIBOWSKI M,CHIBOWSKI E. Time-dependent changes of zeta potential and other parameters of in situ calcium carbonate due to magnetic field treatment[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects,2002,208(1-3):231-240.
- [6] CAI R,YANG R,HE J,et al. The effects of magnetic fields on water molecular hydrogen bonds[J]. Journal of Molecular Structure,2009,938(1-3):15-19.
- [7] 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 Quanjiu,ZHANG Jihong,MEN Qi,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. (in Chinese)
- [8] 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.
WANG Quanjiu,XU Ziyue,SHAN Yuyang,et al. Effect of salinity of de-electronic brackish water on characteristics of water and salt movement in soil[J]. Transactions of the CSAE,2018,34(4):125-132. (in Chinese)
- [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.
YANG Ming,LIU Wei,XU Gelian. Study of the influence of magnetizing to water's properties[J]. Chemical Industry Times, 2007,21(6):14-17. (in Chinese)
- [10] 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.
- [11] 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 Sheng,ZHANG Ruixi,CHU Guixin,et al. Effects of magnetized water in agriculture [J]. Agricultural Engineering, 2012,2(6):44-48. (in Chinese)
- [12] 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.
ZHU Lianfeng,ZHANG Junhua,YU Shengmiao,et al. Magnetized water irrigation enhanced rice growth and development, improved yield and quality [J]. Transactions of the CSAE,2014,30(19):107-114. (in Chinese)
- [13] 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.
ZHANG Ruixi,WANG Weibing,CHU Guixin. Impacts of magnetized water irrigation on soil infiltration and soil salt leaching [J]. Scientia Agricultura Sinica,2014,47(8):1634-1641. (in Chinese)
- [14] 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.
ZHANG Ruixi,CHU Guixin,WANG Weibing,et al. Effects of magnetized water on salt leaching under drip irrigation condition [J]. Xinjiang Agricultural Sciences,2013,50(9):1656-1661. (in Chinese)
- [15] 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.
- [16] 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.
WANG Hongbo,QIAO Mu,ZHOU Shengbin,et al. Response of soil salt and sugar beet yield to magnetized water drip irrigation

- [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*,2018,32(3): 158 – 163. (in Chinese)
- [17] 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 Hongbo,WANG Chengfu,WU Xu,et al. Effects of drip irrigation with different magnetic water on soil salinity,maize yield and quality [J]. *Soils*,2018,50(4): 762 – 768. (in Chinese)
- [18] 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(14): 163 – 166.
PU Dongsheng,FENG Wengui,CAI Lihua,et al. Effects of magnetization water on desalination in cotton farmland of under-film dripping irrigation in Xinjiang Province [J]. *Transactions of the CSAE*,2010,26(14): 163 – 166. (in Chinese)
- [19] 乔国庆,唐诚,王卫兵,等. 棉田磁化水灌溉脱盐作用及促生效果示范[J]. *新疆农垦科技*, 2014,37(6): 50 – 52.
- [20] 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 Lu,GUO Jianyao,LIU Xiumei,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. (in Chinese)
- [21] 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.
WANG Quanjiu,SUN Yan,NING Songrui. et al. Effects of activated irrigation water on soil physicochemical properties and crop growth and analysis of the probable pathway [J]. *Advances in Earth Science*,2019,34(6): 660 – 670. (in Chinese)
- [22] 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.
MU Yan,ZHAO Guoqing,ZHAO Qiaoqiao,et al. Advances in the application of activated water irrigation [J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*,2019,36(4): 403 – 411. (in Chinese)
- [23] 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/OL]. *农业机械学报*,2020,51(2): 292 – 298.
WANG Quanjiu,XIE Jiangbo,ZHANG Jihong,et al. Effects of magnetic field strength on magnetized water infiltration and soil water and salt movement [J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*,2020,51(2):292 – 298. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2002032&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.02.032. (in Chinese)
- [24] 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.
WANG Yanhui,ZHAO Guoqing,WANG Quanjiu,et al. Effects of irrigation with de-electronic water on growth and water use of winter wheat[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020,39(5):953 – 963. (in Chinese)
- [25] 韦开. 去电子微咸水膜下滴灌水盐运移及棉花生长特征研究[D]. 西安:西安理工大学,2018.
WEI Kai. Research on soil water-salt distribution and cotton growth characteristics using de-electronic brackish water drip irrigation with plastic mulch[D]. Xi'an:Xi'an University of Technology,2018. (in Chinese)
- [26] 陈勇. 活化微咸水膜下滴灌下施氮量对棉花生长影响的试验研究[D]. 西安:西安理工大学,2018.
CHEN Yong. Experimental study on the effect of nitrogen application rate on cotton growth under drip irrigation under activated brackish water film[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology,2018. (in Chinese)
- [27] PHILIP J R. The theory of infiltration: 1. The infiltration equation and its solution[J]. *Soil Science*,1957,83(5): 345 – 358.
- [28] 张立红. 磁化水灌溉促进作物增产机理的 MD 模拟研究[J]. *青岛大学学报(自然科学版)*,2005,18(1): 58 – 62.
- [29] 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.
LI Yantao,XUE Yongjin. Magnetic treatment and its applications to water systems[J]. *Industrial Water Treatment*,2007,27(11):11 – 15. (in Chinese)