doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.02.032

磁场强度对磁化水入渗和土壤水盐运移特征的影响

王全九[1,2]　解江博[1]　张继红[1]　韦　开[1]　孙　燕[1]　李宗昱[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: 为探明不同磁场强度对磁化水土壤水盐运移规律的影响,揭示磁化水淋盐增效机理,进行了室内一维垂直土柱入渗试验,研究了 0、0.1、0.2、0.3、0.5 T 磁场强度磁化水对土壤水盐运移特征的影响。结果表明:经磁化处理后,土壤水分入渗速率与湿润锋运移速率均有所降低,而上层土壤湿润体水分含量增加;随着磁场强度的增加,累积入渗量呈现先减后增的变化趋势,在磁场强度为 0.3 T 时,累积入渗量减少幅度最大。磁场强度对磁化水土壤入渗参数具有显著影响,入渗模型吸渗率和饱和导水率与磁场强度之间存在较好的二次多项式关系,在磁场强度为 0.28 T 时,吸渗率和饱和导水率均达到最小值。磁化水入渗能够提高水分在上层土壤中的滞留时间,提高上层土壤含水率,降低深层土壤水分入渗量;经磁化处理后,单位水体盐分淋洗量增加,脱盐率和脱盐强度显著提高,在磁场强度为 0.3 T 时磁化水盐分淋洗效果最好。研究表明,磁场强度显著影响磁化水入渗和土壤水盐运移特征。

关键词: 磁化水; 磁场强度; 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)02-0292-07　　**OSID**:

Effects of Magnetic Field Strength on Magnetized Water Infiltration and Soil Water and Salt Movement

WANG Quanjiu[1,2]　XIE Jiangbo[1]　ZHANG Jihong[1]　WEI Kai[1]　SUN Yan[1]　LI Zongyu[1]

(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*, *Ministry of Water Resources*, *Chinese Academy of Sciences*, *Yangling*, *Shaanxi* 712100, *China*)

Abstract: Magnetized water may improve the soil salt leaching efficiency. It is the basis for revealing the mechanism of salt leaching by magnetized water to explore the influence of magnetized water under different magnetic field intensity on the movement of soil water and salt. The effects of magnetized water with 0 T, 0.1 T, 0.2 T, 0.3 T and 0.5 T magnetic field intensity on the characteristics of soil water and salt transport were studied through one-dimensional vertical soil column infiltration test in the laboratory. The results showed that the soil water infiltration rate and the wetting front migration rate were decreased with irrigation by magnetized water, while the moisture content of the upper soil wetted zone was increased. With the increase of magnetic field intensity, the cumulative infiltration amount showed decreasing trend initially and then increasing. The cumulative infiltration amount was decreased the most when the magnetic field intensity was 0.3 T. Moreover, the magnetic field intensity had a significant influence on the soil water infiltration parameters under the condition of magnetized water infiltration. The soil sorptivity S and saturated hydraulic conductivity K_s of the infiltration model showed the quadratic polynomial relationship with the magnetic field intensity, respectively. When the magnetic field intensity was 0.28 T, both the soil sorptivity S and the saturated hydraulic conductivity K_s were minimized. In addition, magnetized water infiltration could increase the retention time of water in the upper soil, increase the water content of the upper layer soil, and reduce the water infiltration of deep soil. After the magnetization treatment, the salt leaching amount in unit volume of water was increased, and the desalination rate and magnetization desalination intensity were significantly improved. The magnetized

收稿日期: 2019-09-19　修回日期: 2019-10-29

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51679190)、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)和新疆维吾尔自治区重大科技专项(2016A03008)

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

water had the best effect on salt leaching when the magnetic field intensity was 0.3 T. The results showed that the magnetic field intensity could significantly affect the characteristics of magnetized water infiltration and soil water and salt transport, which provided theoretical support and guidance for rational use of magnetized water in agricultural irrigation.

Key words: magnetized water; magnetic field intensity; water and salt movement; salt leaching

0　引言

我国是农业大国,由于不合理的农业活动,土地质量下降问题变得日益严峻[1],土壤盐碱化和次生盐碱化日趋严重[2-3]。一方面,由于自然因素导致我国西北干旱地区盐碱土大面积分布;另一方面,在农业生产中,由于缺乏科学的管理与指导,灌溉不当,导致许多灌区土壤发生次生盐碱化[4-5]。土壤盐碱化问题严重制约着农田的持续利用,对我国粮食安全构成了严重威胁[6-7]。因此,土壤盐碱化的防治成为农业可持续发展的重要命题。

磁化水处理技术作为一种新的灌溉水处理技术,在农业领域展现出巨大的应用前景[8-9]。大量研究表明,普通水经过磁化处理之后,水的溶解度、pH 值、表面张力、溶氧量、电导率、缔合度等理化性质发生了改变[10-14]。磁化水灌溉能有效降低土壤含盐量,这为盐碱地的改良与防治指明了新的方向。磁化水对土壤水盐运移的影响已经从田间试验和室内试验两个方面得到了证实。卜东升等[15]利用膜下滴灌的方法研究磁化水对土壤脱盐的影响,结果表明,磁化水能够有效降低土壤含盐量,并且指出,磁化水滴灌脱盐碱效果具有较好的重演性。王洪波等[16]通过田间试验发现,磁化水滴灌对土壤盐分的淋洗有加速作用,能够有效降低土壤耕作层的盐分,并促进植物对土壤养分的吸收利用。一些研究结果表明,磁化水灌溉能够显著提高对 Cl^-、Na^+ 的淋洗效果,并指出二次磁化效果更好[17]。王渌等[18]以黄河三角洲盐渍化土壤为研究对象,探究了磁化水灌溉对其生化性质的影响,发现磁化水灌溉土壤含盐量显著降低,具有明显的脱盐效果。张瑞喜等[19]通过室内土柱试验表明,磁化水入渗能够促进土壤盐分向下迁移,利用磁化水灌溉有利于将更多盐分淋洗出土体。综上所述,磁化水灌溉可以有效促进土壤盐分的淋洗,在改善作物根系盐分胁迫和提高根系养分吸收能力方面具有良好的作用,这对盐碱地的改良与防治和作物根系生长环境的调控都具有十分重要的意义。然而,不同磁场强度的磁化水对土壤水盐运移特征的影响,以及磁化水入渗模型参数与磁场强度之间的定量关系尚不明确。因此,本文通过一维垂直土柱入渗试验,分析不同磁场强度对土壤水盐运移的影响,建立磁场强度与入渗模型参数之间的关系,定量分析其对不同土层脱盐效果的影响,以期为磁化水灌溉的合理利用提供理论支持和指导。

1　材料与方法

1.1　试验系统与材料

根据试验需要构建磁化水制备系统,主要由水源、水箱、水泵、压力表、磁化器等通过管道连接而成,如图 1 所示。试验水源为自来水,水箱容量为 60 L,水泵为涡旋式自吸水泵,额定功率 0.75 kW,压力表量程 0 ~ 0.6 MPa,管道采用横截面积为 4.91 cm^2 的 PVC 管。磁化器采用包头鑫达磁性材料厂生产的 4 种不同磁场强度的 CHQ 型外置永磁磁化器,永磁体采用烧结汝铁硼制成,磁化器磁场强度经 HT20 型数字特斯拉计校对,分别为 0.1、0.2、0.3、0.5 T。制备磁化水时将磁化器固定在回水管道外壁,调节管道水流流速为 1 m/s,通过控制循环回水时间为 30 min,水体流经磁化器时多次垂直切割磁感线,保证有效磁化次数 10 次以上。

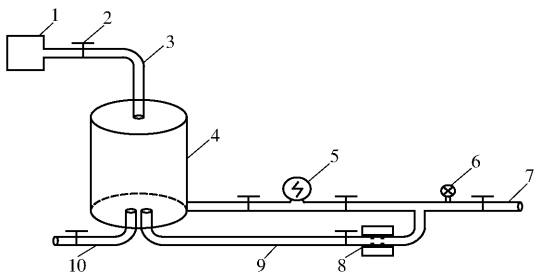


图 1　磁化水制备装置示意图

Fig. 1　Device schematic of magnetized water

1. 水源　2. 阀门　3. 进水管　4. 水箱　5. 水泵　6. 压力表　7. 出水管　8. 磁化器　9. 回水管　10. 排水管

供试土样为新疆维吾尔自治区昌吉市农田表层 0 ~ 20 cm 盐碱土,将土壤自然晾干、碾压后过 2 mm 筛备用。利用激光粒度分析仪(Mastersizer 2000 型,马尔文仪器有限公司,英国)进行机械组成测定,土样黏粒、粉粒和砂粒体积分数分别为 8.00%、41.24%、50.76%,采用国际制土壤质地三角形对土壤质地进行分类,确定试验用土为壤土。土壤容重为 1.35 g/cm^3,初始体积含水率与土壤饱和体积含水率分别为 0.02、0.47 cm^3/cm^3,土壤初始含盐量为 3.52 g/kg。

1.2 试验方法

试验于 2018 年 5 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,采用一维垂直土柱入渗系统开展不同磁场强度(0、0.1、0.2、0.3、0.5 T)的磁化水入渗试验,共计 5 个处理,每个处理3 次重复,共计 15 个试验土柱。其中0 为不磁化处理,作为试验对照(CK)。试验系统主要包括有机玻璃土柱、马氏瓶、固定支架。有机玻璃土柱高为 45 cm,内径为 5 cm。马氏瓶主要为试验提供稳定的入渗水头,磁化水装入马氏瓶中备用。试验土柱容重为 1.35 g/cm^3,将扰动土搅拌均匀分层装入土柱中,并在层与层之间打毛衔接,土层深度为 43 cm。

试验中调整马氏瓶与土柱的位置,控制试验水头深度在 1 ~ 2 cm 之间。试验开始时利用秒表计时,并按照先密后疏的原则定时记录马氏瓶水位和土柱湿润锋深度。当湿润锋深度到达 28 cm 时,停止供水,同时用吸管吸出表面积水,并将土柱从底部拆开,去除水分未入渗到的部分干土,再按照 0、5、10、15、20、25、27 cm 的深度分层取土,放入提前准备好的铝盒。采用干燥法((105 ± 5)℃)测定土壤质量含水率,乘以土壤容重即可得到土壤体积含水率。将干燥后的土样进行研磨并按照 1∶5 土水质量比进行浸提,将浸提液静置 8 h 后利用 DDS - 307 型电导仪测定其电导率,通过转换即可得到土壤含盐量。

1.3 入渗模型

为了研究磁场强度对土壤入渗模型参数的影响,利用 Philip 入渗模型和 Kostiakov 入渗模型对不同磁场强度磁化水的入渗特性进行分析,由于本研究入渗深度和时间较短,两模型中仅考虑吸渗作用,忽略重力的影响。

对于一维垂直土柱入渗,短历时 Philip 入渗模型[20]的累积入渗量表达式为

$$I = St^{0.5} \tag{1}$$

式中 I——累积入渗量,cm

S——吸渗率,cm/min$^{0.5}$

t——入渗时间,min

在短历时入渗条件下,利用 Kostiakov 入渗模型[21]对累积入渗量与时间进行拟合,其表达式为

$$I = mt^n \tag{2}$$

式中 m、n——拟合系数

饱和导水率采用 SU 等[22]提出的基于 Kostiakov 入渗模型的推导方法,即

$$K_s = \frac{m}{\frac{1-n}{2n-1} + 0.38} \tag{3}$$

式中 K_s——饱和导水率,cm/min

2 结果与分析

2.1 磁场强度对磁化水入渗特征的影响

图 2a 显示了不同磁场强度条件下磁化水累积入渗量随时间的变化情况。由图 2a 可以看出,各处理对应累积入渗量均随入渗时间增加而增加。入渗初期,不同处理的累积入渗量差异较小。随着入渗时间的增加,在 60 min 后,不同处理之间的累积入渗量开始出现差异,在相同入渗时间下,磁化处理的累积入渗量均小于对照处理,在入渗 480 min 后,与对照处理相比,0.1、0.2、0.3、0.5 T 磁化处理的累积入渗量分别减少了 13.3%、19.0%、25.7%、7.6%。当到达最终的入渗深度(28 cm)时,磁化水入渗用时较对照处理有所增加,而累积入渗量相对减少。这主要是因为自来水经过磁化处理之后表面张力减小,相应的土壤导水性能降低[23],从而导致入渗水进入土体的速度减慢,累积入渗量减少。累积入渗量随磁化水磁场强度的增大呈现先减小后增大的趋势,磁场强度为 0.3 T 时,累积入渗量降低幅度最大,说明土壤入渗对磁化水磁场强度具有不同的响应。图 2b 显示了不同磁场强度磁化水入渗条件下湿润锋的运移情况。由图 2b 可知,湿润锋深度随入渗时间的变化与累积入渗量基本一致。磁化处理湿

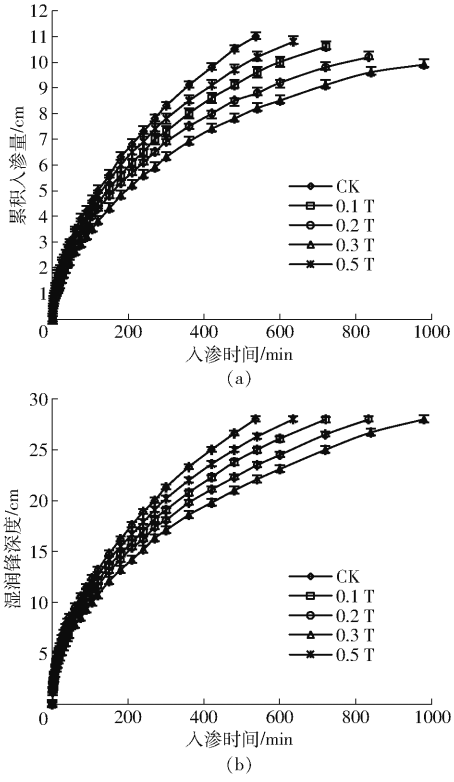


图 2 磁场强度对磁化水入渗过程的影响

Fig. 2 Effect of magnetic field intensity on magnetized water infiltration process

润锋运移速率均小于对照处理。入渗 480 min 后，与对照处理相比，0.1、0.2、0.3、0.5 T 磁化处理的湿润锋深度分别减少了 10.5%、16.2%、21.1%、6%。入渗结束时（湿润锋深度为 28 cm），0.1、0.2、0.3、0.5 T 磁化处理的入渗时间相比于对照处理分别增加了 34.5%、55.6%、82.8%、18.5%，表明磁化处理不同程度地降低了水体在土壤中的运移速率。与对照处理相比，在相同时间下磁化处理的累积入渗量和湿润锋深度均有所减小。这是因为磁化处理水体的表面张力减小[24]，水分在土壤中流动速度减慢，从而导致水分入渗速率降低、累积入渗量减少。而不同磁场强度磁化水入渗过程存在明显差异，这可能是由于不同磁场强度处理对水体的理化性质的影响程度不同所致，磁场强度为 0.3 T 时，其影响程度最大[14]，因此在 0.3 T 时累积入渗量减小幅度最大。

2.2　磁场强度对入渗模型参数的影响

利用一维垂直积水入渗的 Philip 入渗模型（式(1)）和 Kostiakov 入渗模型（式(2)）对入渗数据进行处理，分别得到不同磁场强度对应的吸渗率 S 和 m、n，并利用式(3)推算出饱和导水率 K_s。不同入渗模型拟合的决定系数均高于 0.99，说明模型的拟合效果很好。

对于 Philip 入渗模型，吸渗率 S 反映土壤依靠基质势对土壤水分运动作用的能力[25]。随着磁场强度的增加，吸渗率 S 呈现先减小后增大的变化趋势，磁化处理对应的 S 均小于对照处理。这说明磁化处理能够降低土壤水分入渗能力，这与磁化水对土壤水分入渗过程的影响结果一致。对磁场强度 H 和吸渗率 S 进行拟合，结果如图 3a 所示，拟合决定系数 R^2 为 0.95，两者间存在较好的二次多项式关系，拟合公式为

$$S = 1.542\,7H^2 - 0.849\,7H + 0.475\,5 \qquad (4)$$

根据拟合公式可以求得当磁场强度为 0.28 T 时，吸渗率 S 取得最小值。

饱和导水率 K_s 是表征孔隙介质透水性能的综合系数，反映不同条件对土壤水分入渗性能的影响[26]。通过 Kostiakov 入渗模型参数 m 和 n 所求得的饱和导水率 K_s 随磁场强度的增加呈现出先减小后增大的趋势，与吸渗率 S 的变化趋势一致。磁化处理对应的 K_s 值均小于对照处理，在磁场强度为 0.3 T 时取得最小值。对磁场强度 H 和饱和导水率 K_s 进行拟合，如图 3b 所示，拟合决定系数 R^2 为 0.87，两者间存在较好的二次多项式关系，拟合公式为

$$K_s = 0.296\,7H^2 - 0.168\,2H + 0.049\,7 \qquad (5)$$

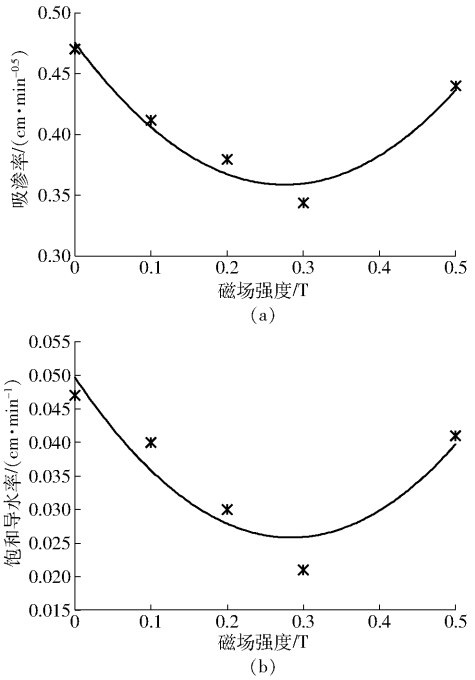


图 3　磁场强度对吸渗率和饱和导水率的影响

Fig. 3　Effect of magnetic field intensity on soil sorptivity and saturated hydraulic conductivity

根据拟合公式可以求得当磁场强度为 0.28 T 时，饱和导水率 K_s 取得最小值。

2.3　磁场强度对土壤水盐分布的影响

不同磁场强度磁化水入渗条件下，土壤体积含水率变化情况如图 4a 所示。由图可以看出，随着土层深度的增加，土壤含水率逐渐减小。在入渗过程中，土体上部有 1～2 cm 积水，导致表层土壤含水率处于饱和状态，湿润锋以下土壤仍为初始含水率。不同深度土壤含水率分布情况不同，深度在 0～15 cm 时，磁化处理对应土壤含水率均大于对照处理，随着磁场强度的增加含水率呈先增大后减小的变化趋势，磁场强度为 0.3 T 时含水率最大，与对照处理相比，在 5、10、15 cm 处土壤含水率分别增加了 2.2%、4.7%、2.4%。在深度大于 20 cm 时呈现出与上层相反的情况，磁化处理对应土壤含水率均小于对照处理。这主要是因为磁化处理使得水体黏度增加[25]，当土壤上层含水率较大时，水分在土壤中流动速度减慢，从而导致大量水分在上层土壤中的滞留时间增加，进入下层土壤的水分减少。

不同磁场强度磁化水入渗条件下，土壤含盐量变化情况如图 4b 所示。由图可以看出，在土壤水分入渗过程中，上层土壤中的盐分溶入水中并随着水流的入渗向下迁移，使得大量盐分聚集在湿润锋附近，土壤剖面呈现出上层脱盐、下层积盐的现象。土层深度在 0～10 cm 处脱盐效果明显，土壤含盐量分布几乎与初始含盐量分布平行，从 10 cm 开始，随着深度的增加，土壤含盐量逐渐接近初始含盐量，土层

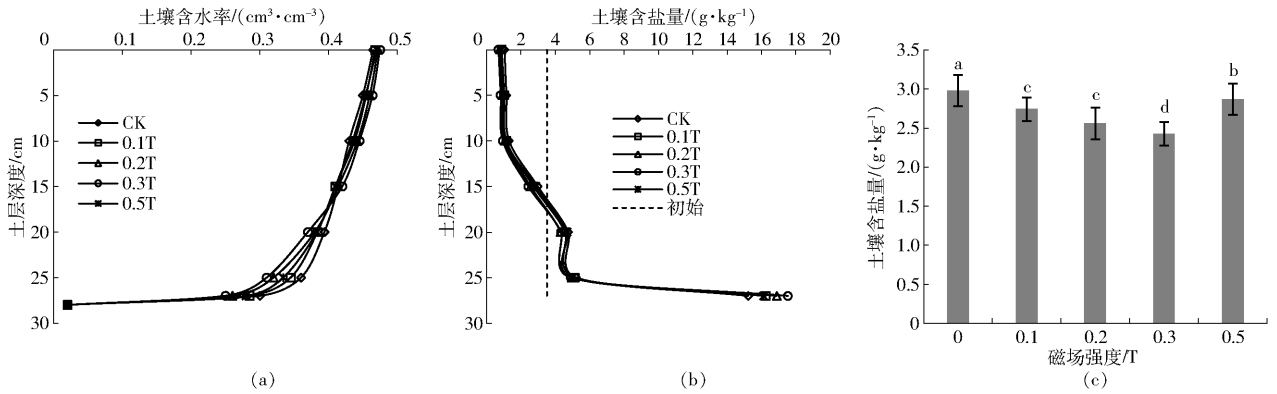


图 4 磁化水入渗对土壤含水率和含盐量的影响

Fig. 4 Effect of magnetized water infiltration on soil water content and salinity

从脱盐区向积盐区过渡,脱盐与积盐的分界线在 17 cm 左右。深度在 15 ~ 27 cm 之间不同处理方式对应的土壤含盐量有较大差异。对不同深度的土壤含盐量进行分析,土层深度为 0、5、10 cm 时的土壤含盐量均较低且较为接近,15 cm 土层土壤含盐量相较于上层土壤明显增多,接近土壤初始含盐量。不同处理方式的脱盐效果存在差异,在同一土层深度,与对照处理相比,随着磁场强度的增加,土壤含盐量总体上呈现出先降低后升高的趋势。在 15 cm 处,对照处理和 0.1、0.2、0.3、0.5 T 磁化处理对应的土壤含盐量分别为 2.98、2.74、2.56、2.43、2.87 g/kg(图 4c,图中不同字母表示处理间差异达显著水平($P < 0.05$)),磁化处理与对照处理相比分别降低了 8.1%、14.1%、18.5%、3.7%。对湿润锋处的土壤含盐量进行分析可知,不同处理方式的积盐效果存在明显差异,其中对照处理的积盐量最小,0.3 T 磁化处理的积盐量最大。对照处理和 0.1、0.2、0.3、0.5 T 磁化处理对应的土壤含盐量分别为 15.23、16.25、16.89、17.53、16.12 g/kg,磁化处理与对照处理相比分别增加了 6.7%、10.9%、15.1%、5.8%,这与脱盐区的分析结果一致。

2.4 磁场强度对土壤滞留盐分浓度的影响

入渗结束时,由于磁化水对土壤盐分的淋洗效果不同,而且不同处理之间土壤含水率也存在差异,因此磁化处理对土壤中盐分质量浓度也有一定的影响。不同磁场强度条件下土壤盐分浓度变化情况如图 5 所示,由图可以看出,土壤盐分浓度变化趋势与土壤含盐量变化趋势基本一致,随着土层深度的增加,土壤盐分浓度逐渐增加。在脱盐区同一土层深度下,磁化处理的土壤盐分浓度均小于对照处理,磁化水入渗降低了脱盐区土壤盐分浓度,这对降低盐碱化土壤对作物根系的盐分胁迫具有十分重要的作用。

2.5 磁场强度对土壤盐分淋洗效果的影响

将脱盐区某一土层厚度的初始含盐量 S_0 与入渗后的土壤含盐量 S_1 的差值占初始含盐量的百分比定义为脱盐率 D_r,即

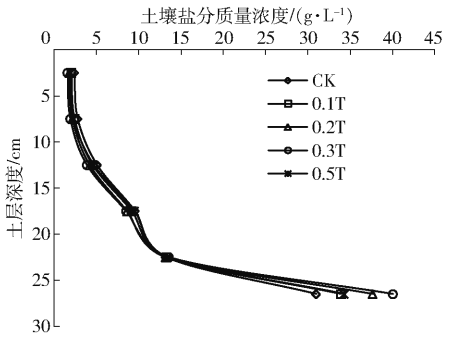


图 5 磁化水入渗对土壤盐分质量浓度的影响

Fig. 5 Effect of magnetized water infiltration on soil salt concentration

$$D_r = \frac{S_0 - S_1}{S_0} \times 100\% \tag{6}$$

将磁化处理脱盐率 D_{rm} 与对照处理脱盐率 D_{rck} 的差值占对照处理脱盐率百分比定义为磁化脱盐强度 D_i,即

$$D_i = \frac{D_{rm} - D_{rck}}{D_{rck}} \times 100\% \tag{7}$$

将脱盐区某一土层中被淋洗的盐分总量 S_t 与透过这一土层的总水量 W 的比值定义为淋洗效率 L_e,即

$$L_e = \frac{S_t}{W} \tag{8}$$

脱盐区不同深度的脱盐率和磁化脱盐强度以及不同土层淋洗效率见表 1。由表可以看出,土层深度在 0 ~ 10 cm 之间的脱盐效果明显,脱盐率均在 65% 以上,但是在 10 ~ 15 cm 处脱盐率发生骤减,脱盐率最大值为 51.99%。对同一土层深度的脱盐率进行分析可以看出,磁化水的脱盐率均大于对照处理,这说明磁化处理对土壤上层的脱盐效果明显。随着磁场强度的增加,脱盐率呈现先增后减的趋势,0.3 T 磁化处理脱盐率最大,这与张瑞喜等[19]得出

的 0.3 T 磁化处理有利于将更多的盐分淋洗出土体的结果相一致。不同磁场强度处理脱盐效果总体上由大到小依次为 0.3 T、0.2 T、0.5 T、0.1 T、CK。磁化脱盐强度随着土层深度的增加而增加，由此可以看出磁化水具有较好的脱盐效果。不同土层深度淋洗效率不同，由表可以看出 5 ~ 10 cm 土层淋洗效率总体上大于其他两层。在同一土层中，磁化处理对应的淋洗效率均大于对照处理，并随着磁场强度的增加呈现先增加后减小的变化趋势，这一现象说明单位体积磁化水淋洗盐分的能力增大。

表 1　不同磁场强度的脱盐率、磁化脱盐强度和淋洗效率

Tab. 1　Desalination rate, magnetization desalination intensity and leaching efficiency of different magnetic field strengths

土层深度/cm	磁场强度/T	脱盐率/%	磁化脱盐强度/%	淋洗效率/(g·L^{-1})
0 ~ 5	0	68.89^{e}		1.38^{c}
	0.1	72.87^{d}	5.77^{d}	1.49^{b}
	0.2	75.71^{b}	9.90^{b}	1.67^{b}
	0.3	78.55^{a}	14.02^{a}	1.81^{a}
	0.5	73.44^{c}	6.60^{c}	1.50^{b}
5 ~ 10	0	65.06^{d}		1.71^{d}
	0.1	68.89^{c}	5.90^{d}	1.88^{c}
	0.2	71.73^{b}	10.26^{b}	2.17^{b}
	0.3	74.86^{a}	15.07^{a}	2.40^{a}
	0.5	70.31^{c}	8.08^{c}	1.91^{c}
10 ~ 15	0	39.06^{e}		1.46^{d}
	0.1	44.60^{c}	14.18^{c}	1.77^{c}
	0.2	48.44^{b}	24.00^{b}	2.26^{b}
	0.3	51.99^{a}	33.09^{a}	2.68^{a}
	0.5	43.47^{d}	11.27^{d}	1.72^{c}
0 ~ 15	0	57.67^{d}		6.48^{d}
	0.1	62.12^{c}	7.72^{c}	7.39^{c}
	0.2	65.29^{b}	13.22^{b}	9.13^{b}
	0.3	68.47^{a}	18.72^{a}	10.58^{a}
	0.5	62.41^{c}	8.21^{c}	7.40^{c}

注：同一列不同字母表示处理间差异达显著水平（$P<0.05$）。

结合不同磁场强度磁化水累积入渗量和湿润锋深度的变化情况综合分析可知，磁化处理降低了水体的表面张力和黏度[10,24]，使得水分在土壤中流动速度减慢，土壤导水性能降低，吸渗率 S 和饱和导水率 K_s 也相应减小，导致水分入渗速率降低、累积入渗量减少。土壤水分运动速度的减慢增加了水分在土壤上层的滞留时间，因此土壤剖面含水率呈现出上大下小的现象，这有利于土壤水分更多地储存在作物根系层中，并且能够有效地减小深层渗漏。同时水分滞留时间增加，对土壤盐分的淋洗也起到了一定的作用，这是因为水分滞留时间变长，土壤中盐分与水分的反应时间也相应增加，有利于土壤盐分溶解扩散至水体中，由于 0.3 T 磁化处理对水分入渗的影响最为显著，因此在磁场强度为 0.3 T 时表现出最好的脱盐效果。而且磁化处理改变了水的活性[14]（即与其他物质的作用能力，如溶解度、反应速率等），使得单位体积磁化水溶解盐分的能力增强，这对土壤盐分的淋洗具有重要意义。

3　结论

（1）磁场强度对土壤水分运移有明显影响，磁化水入渗速率和湿润锋运移速率显著降低；在相同入渗时间下，随着磁场强度的增加，累积入渗量呈现先减少、后增大的变化趋势，磁场强度为 0.3 T 时，累积入渗量减小幅度最大。

（2）利用 Philip 入渗模型和 Kostiakov 入渗模型及推导公式对吸渗率 S 和饱和导水率 K_s 进行拟合，并建立其与磁场强度之间的关系，发现水分运动参数与磁场强度之间存在较好的二次多项式关系，利用拟合公式求得磁场强度在 0.28 T 左右时，对吸渗率 S 和饱和导水率 K_s 影响最大。

（3）磁化水入渗能够增加土壤上层土壤含水率，降低深层土壤的水分入渗量；磁化水入渗具有良好的洗盐效果，单位体积磁化水淋洗盐分的能力增大，而且洗盐效果与土壤水分入渗速率无关，说明磁化水活性增强，溶解盐分的能力提高。脱盐率和淋洗效率均随着磁场强度的增大呈现先增、后减的趋势，磁场强度为 0.3 T 时脱盐率和淋洗效率达到最大，淋洗盐分的效果最好。

参　考　文　献

[1] 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.
ZHOU Jianmin. Evolution of soil quality and sustainable use of soil resources in China[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences，2015，30(4)：459 - 467. (in Chinese)

[2] 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.

[3] 张学雷，龚子同. 人为诱导下中国的土壤退化问题[J]. 生态环境学报，2003，12(3)：317 - 321.
ZHANG Xuelei，GONG Zitong. Human-induced soil degradation in China[J]. Ecology and Environment，2003，12(3)：317 - 321. (in Chinese)

[4] 张鹏辉，侯宪东，王健. 新疆地区盐碱地成因及治理措施[J]. 现代农业科技，2017(24)：178 - 180.
ZHANG Penghui，HOU Xiandong，WANG Jian. Causes and amelioration measures of saline-alkali land in Xinjiang region[J]. Modern Agricultural Science and Technology，2017(24)：178 - 180. (in Chinese)

[5] 邵华伟,孙九胜,胡伟,等. 新疆盐碱地分布特点和成因及改良利用技术研究进展[J]. 黑龙江农业科学,2014(11):160 - 164.
SHAO Huawei, SUN Jiusheng, HU Wei, et al. Research progress on distribution characteristics causes and improved utilization technology of saline-alkali land in Xinjiang[J]. Heilongjiang Agricultural Sciences, 2014(11):160 - 164. (in Chinese)
[6] 罗毅. 干旱区绿洲滴灌对土壤盐碱化的长期影响[J]. 中国科学(地球科学),2014,44(8):1679 - 1688.
[7] 毛海涛,黄庆豪,龙顺江,等. 土壤盐渍化治理防护毯的研发及试验[J]. 农业工程学报,2015,31(17):121 - 127.
MAO Haitao, HUANG Qinghao, LONG Shunjiang, et al. Development and experiment on protective blanket for soil salination control[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(17):121 - 127. (in Chinese)
[8] 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.
[9] 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)
[10] 曾锦川. 磁场处理对于水缔合度的影响[J]. 华侨大学学报,1981,2(1):36 - 43.
[11] 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)
[12] 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, CHEN Fengling, et al. Magnetization mechanism of magnetized water[J]. Acta Physica Sinica, 2011, 60(6):432 - 439. (in Chinese)
[13] 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.
LIU Zhichao, SONG Wenya, YAN Longfei, et al. Experimental investagation on dissolving ability and atomization characteristics of magnetized water[J]. Science Technology and Engineering, 2015, 15(19):102 - 105. (in Chinese)
[14] 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)
[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.
BU Dongsheng, FENG Wengui, CAI Lihua, et al. Effects of magnetization water on desalinization in cotton farmland of under-film dripping irrigation in Xinjiang Province[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(Supp. 2):163 - 166. (in Chinese)
[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(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(3):158 - 163. (in Chinese)
[17] 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 underdrip irrigation condition [J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2013, 50(9):1656 - 1661. (in Chinese)
[18] 王渌,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)
[19] 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)
[20] PHILIP J R. The theory of infiltration: 1. the infiltration equation and its solution [J]. Soil Science, 1957, 83(5):345 - 357.
[21] KOSTIAKOV A N. On the dynamics of the coefficient of water percolation in soils and the necessity of studying it from the dynamic point of view for the purposes of amelioration[J]. Trans. Sixth Comm. Int. Soc. Soil Sci., 1932, 1:7 - 21.
[22] SU L J, WANG Q J, SHAN Y Y, et al. Estimating soil saturated hydraulic conductivity using the Kostiakov and Philip infiltration equations[J]. Soil Science Society of America Journal, 2016, 80(6):1463 - 1475.
[23] 王全九,许紫月,单鱼洋,等. 磁化微咸水矿化度对土壤水盐运移的影响[J/OL]. 农业机械学报,2017,48(7):198 - 206.
WANG Quanjiu, XU Ziyue, SHAN Yuyang, et al. Effect of salinity of magnetized brackish water on salt and water movement[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(7): 198 - 206. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20170725&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.07.025. (in Chinese)
[24] 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' sassociative structure[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(21):293 - 300. (in Chinese)
[25] 付秋萍,王全九,樊军. 盘式吸渗仪吸渗率计算方法比较[J]. 农业机械学报,2009,40(9):56 - 62.
FU Qiuping, WANG Quanjiu, FAN Jun. Comparison among permeability methods of disc infiltrometer[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(9):56 - 62. (in Chinese)
[26] 孙美,张晓琳,冯绍元,等. 基于交叉验证的农田土壤饱和导水率传递函数研究[J/OL]. 农业机械学报,2014,45(10):147 - 152.
SUN Mei, ZHANG Xiaolin, FENG Shaoyuan, et al. Pedo transfer function for saturated hydraulic conductivity of agricultural soil based on cross-validation[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(10):147 - 152. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20141023&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.10.023. (in Chinese)