doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.07.025

磁化微咸水矿化度对土壤水盐运移的影响

王全九[1,2]　许紫月[1]　单鱼洋[1]　张继红[1]

(1.西安理工大学西北旱区生态水利工程国家重点实验室培育基地,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:采用 300 mT 磁感应强度恒定磁水器对不同矿化度微咸水(0.14、2、3、4、5 g/L)进行磁化处理,并进行一维垂直土柱入渗试验,研究磁化微咸水矿化度对土壤水盐运移的影响。结果表明:微咸水磁化处理后,土壤入渗速率及湿润锋迁移速率显著降低,湿润体含水率显著提高;微咸水矿化度对磁化效果具有显著影响,磁化微咸水矿化度为 3 g/L 时,相同入渗时间累积入渗量和湿润锋深度相对减少量最大,湿润体含水率相对增加量最多。磁化微咸水入渗对 Philip 和 Green-Ampt 入渗公式参数有显著影响,相同矿化度的磁化微咸水土壤吸渗率 S、饱和导水率 K_s 及湿润锋处吸力 h_f 均小于未磁化微咸水;磁化与未磁化微咸水相对吸渗率 ΔS 及相对饱和导水率 ΔK_s 与矿化度之间均呈现较好的二次多项式关系,在矿化度为 3 g/L 时,相对吸渗率 ΔS 及相对饱和导水率 ΔK_s 均达到最大。磁化微咸水能够提高土壤持水能力,相同土层深度的土壤含水率显著增加;微咸水磁化处理后,脱盐率显著提高,土层深度 0~20 cm 磁化微咸水脱盐率均大于未磁化微咸水,矿化度为 3 g/L 的磁化微咸水磁化脱盐强度最大,相对脱盐效果更好。

关键词:磁化微咸水;矿化度;入渗特性;水盐分布

中图分类号:S121;S156.4　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2017)07-0198-09

Effect of Salinity of Magnetized Brackish Water on Salt and Water Movement

WANG Quanjiu[1,2]　XU Ziyue[1]　SHAN Yuyang[1]　ZHANG Jihong[1]

(1. *State Key Laboratory Base of Eco-hydraulic Engineering in Arid Area, 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: The physical and chemical properties of magnetized brackish water changed significantly, so irrigation with such water is likely to influence the characteristics of soil water and salt movement. The constant magnetic water device with magnetization intensity of 300 mT was used to magnetize brackish water with different salinities (0.14 g/L, 2 g/L, 3 g/L, 4 g/L and 5 g/L), and one-dimension vertical water infiltration experiment was conducted to reveal the effects of salinity of magnetized brackish water on water and salt movement in soil. Results showed that the soil infiltration rate and wetting front migration rate were decreased significantly with irrigation by magnetized brackish water, whereas the moisture content of the wetted zone was increased significantly. The salinity of brackish water had significant impact on the magnetic effect. When the salinity of brackish water was 3 g/L, the relative reductions of cumulative infiltration and wetting front depth reached the maximum, and the relative increase of moisture content of wetted zone reached the maximum at the same infiltration time. Magnetized brackish water had significant impact on the parameters of Philip and Green-Ampt formulas. The soil sorptivity S, the saturated hydraulic conductivity K_s and the wetting front suction of magnetized brackish water were all less than those of the non-magnetized brackish water. There was significantly quadratic polynomial relationship among the relative sorptivity ΔS, the relative saturated hydraulic conductivity ΔK_s and the salinity of brackish water. When the salinity of brackish water was 3 g/L, the relative sorptivity ΔS and the relative saturated hydraulic conductivity ΔK_s reached the peak value. Moreover, magnetized brackish

收稿日期:2017-03-29　修回日期:2017-05-17

基金项目:国家自然科学基金面上项目(5167090151)和国家重点研发计划项目(2016YFC0501405-4)

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 could enhance soil water retention capacity, thus the soil moisture content was increased significantly in the same soil depth. Magnetized brackish water could improve the desalination efficiency. In the soil depth of 0 ~ 20 cm, the desalination efficiency of brackish water was greater than that of the non-magnetized brackish water, and when salinity of brackish water was 3 g/L, the magnetic salinity intensity was the strongest, and the relative desalination effect turned out to be better.

Key words: magnetized brackish water; mineralization degree; infiltration characteristics; water and salt distribution

引言

随着社会经济的飞速发展和人口数量的不断增加,淡水资源匮乏已成为世界性的问题,对农业生产和生态环境都构成了严重的威胁[1]。科学合理的开发利用微咸水资源,对于缓解淡水资源短缺、扩大农业水源、抗旱增产有着极其重要的作用。然而,微咸水灌溉容易引起土壤次生盐碱化,使耕层的土壤含盐量或土壤溶液浓度超过作物的耐盐度,从而影响作物生长和产量[2-3]。因此,对微咸水的处理及科学利用,防治土壤次生盐碱化,保持土地资源的可持续发展,成为微咸水开发利用的核心问题[4]。

磁化水处理技术受到人们的广泛关注,国内外学者对磁化水理论和应用技术进行了深入研究,也取得了一定的进展[5-6]。大量研究表明,经过磁化处理水的理化特性发生显著改变,磁化处理后水的溶解氧明显增加,表面张力系数显著减小,pH 值和电导率变化较小[7];通过研究不同条件下磁化处理对于去离子水的物理性能的影响,OTSUKA 等[8]发现真空状态下磁化后的去离子水物理性能没有明显改变,但在空气中相同磁处理的去离子水的振动模式和电解势发生显著变化,并用接触角定量地评价了磁化处理对水的影响程度;和劲松等[9]研究表明随着磁化时间的增加,液态水缔合构造增强,黏度与^{17}O-NMR 半峰宽增加,并提出综合评价指标对磁化水的缔合构造能力进行量化表征。灌溉水理化特性的改变必然会对作物生长发育产生重要影响,微咸水磁化处理后能够明显增加棉花株高,干物质积累,提高棉花产量,二次磁化效果更好[10];磁化水灌溉对水稻生长发育、产量和品质的影响也有重要影响[11],磁化水灌溉能使水稻的有效穗数增加 4.0% ~7.9%,结实率增加 3.9% ~8.7%,产量增加 5.2% ~9.3%。王渌等[12]研究了磁化水灌溉对冬枣生长及品质的影响,结果表明磁化水灌溉能够提高冬枣叶片和果实的营养成分含量,延长果实储存时间;刘秀梅等[13]通过盆栽试验对欧美杨 I-107 进行磁化微咸水灌溉,研究发现磁化咸水处理后盐敏感植物对盐碱化生境的适应性有所提高。同时,磁化水灌溉对于减轻土壤盐分胁迫,提高土地可持续利用也具有重要意义,磁化水灌溉能有效促进土壤中阳离子和阴离子的淋洗,提高灌溉质量[14-15];张瑞喜等[16]通过室内土柱实验和田间小区滴灌相结合的方法,研究了不同磁场强度灌溉水处理(0、100、300、500 mT)对土壤淋盐作用的影响,结果表明 300 mT 磁处理水灌溉有利于将更多的盐分淋洗出土体,并指出了磁化微咸水最佳磁化强度为 300 mT。

然而,磁化微咸水入渗对土壤水盐的运移影响及其对入渗公式相关参数的影响仍需深入分析。本文采用 300 mT 磁感应强度恒定磁场对不同矿化度微咸水进行磁化处理,并基于一维垂直土柱入渗试验,比较不同矿化度的磁化微咸水和未磁化微咸水入渗特征和土壤水盐分布特征,分析磁化微咸水矿化度对土壤入渗公式参数的影响,进而明确磁化微咸水矿化度对土壤水盐的运移影响,以期为合理利用磁化微咸水灌溉提供理论依据。

1　材料与方法

1.1　试验材料

供试土样取自新疆巴州水利管理局试验站试验田(86°10′N、41°35′E,海拔高度 904.32 m),采集表层 0 ~ 20 cm 土样,土壤容重为 1.46 g/cm^3。土样经过风干、碾压,去除杂物后过 2 mm 筛后进行各种指标的测定。采用激光粒度分析仪(Mastersizer 2000 型,马尔文仪器有限公司,英国)进行机械组成测定。根据国际制土壤质地分类标准,黏粒、粉粒和砂粒体积分数分别为 3.65%、18.25%、78.10%,属于砂壤土。土壤初始体积含水率与土壤饱和体积含水率分别为 0.061、0.477 cm^3/cm^3,土壤初始含盐量为 3.78 g/kg,pH 值为 8.6。

试验所用的微咸水由氯化钠试剂(含量大于等于 99.5%,分析纯 AR)和自来水配置而成,自来水矿化度为 0.14 g/L,pH 值为 7.2,其 Cl^-、Ca^{2+}、Mg^{2+}、Na^+、K^+ 含量分别为 0.5、96.4、74.5、23.1、12.0 mg/L。设置 5 个矿化度处理,分别为 0.14、2、3、4、5 g/L,在试验前对不同矿化度微咸水进行磁化处理备用。磁化器采用 CHQ 型外置磁感应强度为 300 mT 永磁磁水器(包头鑫达磁性材料厂),有效磁场面积为 80 mm × 100 mm,永磁体采用烧结汝铁硼

制成,磁场强度经 GSG 型高斯计(长春市长城教学仪器有限公司)校对,确定为 300 mT。磁化水装置由小水箱、水泵、300 mT 永磁磁水器以及输水管道等组成,磁化处理将一定体积的微咸水置于小水箱中,利用水泵在封闭的管路中循环,如图 1 所示。循环管路的一段被置于磁化器两磁极之间(磁场强度 300 mT),并垂直于磁场切割磁感线。管路为 PVC 管(横截面积为 4.91 cm^2),调整流速为 0.5 m/s,经过磁场的管路长度为 10 cm。水流被磁场循环磁化处理,磁化时间为 3 min。

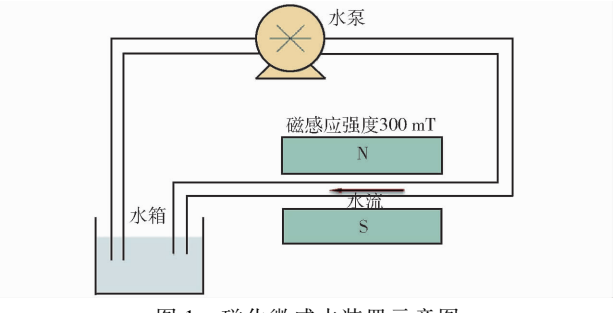

图 1 磁化微咸水装置示意图

Fig. 1 Device schematic diagram of magnetized brackish water

1.2 试验方法

试验于 2016 年 10 月 25 日在西安理工大学西北旱区生态水利工程国家重点实验室培育基地进行,采用一维垂直土柱入渗系统开展不同矿化度(0.14、2、3、4、5 g/L)的磁化微咸水(M)和未经磁化微咸水(CK)入渗试验,共计 10 个处理,磁化和未磁化处理各 5 个,每个处理重复 2 次,共计 20 个试验土柱。为了保证试验结果可靠性,在正式试验之前的预备试验中,对矿化度 2 g/L 进行了 3 次重复试验,分析结果表明,重复试验误差较小,表明试验整个操作过程基本可以保持一致性。试验系统包括试验土柱、供水设备,试验土柱采用 5 mm 厚的有机玻璃材料制成,内径 5 cm,高 45 cm(土层厚 40 cm),土柱外侧贴有 2 条刻度纸,便于湿润锋读数。供水设备为马氏瓶,其横截面积为 19.63 cm^2,高为 50 cm,用于提供稳定水头。将土样按容重 1.46 g/cm^3 分 8 层(每层 5 cm)装入土柱中,并在层与层之间打毛。装土完毕后,在土体顶部放置一张滤纸,防止入渗时对土面的冲溅。将装好的土柱水平放置在试验台上,5 个土柱为一组,20 个土柱试验分 4 组完成。试验过程中控制水头高度为 1 cm,按照先密后疏的原则分别记录各处理的入渗时间、湿润锋进程和马氏瓶水位的变化。入渗至距土柱顶部 27 cm(入渗深度约为整个土柱长度的 2/3)处立即停止供水,并迅速吸干上层积水,入渗结束后分层取样,取样深度为 3、5、10、15、20、25、27 cm。质量含水率采用烘干法((105 ± 2)℃)测定,质量含水率乘以容重得到体积含水率。将所提取的土样经过干燥、研磨后按土水质量比 1∶5浸提,利用实验室 DDS-307 型电导仪测定浸提液的电导率,通过转化获得土壤含盐量。

1.3 入渗公式

为了分析磁化微咸水入渗对现有入渗公式相关参数的影响,本文采用具有物理基础的 Philip 入渗公式和 Green-Ampt 入渗公式分析磁化微咸水的入渗特性[17-18]。

PHILIP[19]基于积水入渗试验,对土壤水分运动基本方程求幂级数解,从而获得了 Philip 入渗公式,短历时入渗公式为

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

式中 I——累积入渗量,cm

S——土壤吸渗率,$cm/min^{0.5}$

t——入渗时间,min

GREEN 等[20]通过对土壤水分运动特征和土壤含水率分布的分析和概化,假定土壤湿润锋面是水平的,在湿润锋面存在一个固定不变的吸力,湿润锋面以上的土壤处于饱和状态,提出 Green-Ampt 入渗公式

$$i = K_s \frac{H + h_f + Z_f}{Z_f} \tag{2}$$

式中 i——入渗率,cm/min

K_s——土壤表征饱和导水率,cm/min

H——土壤表面积水深度,cm

h_f——湿润锋面吸力,cm

Z_f——概化湿润锋深度,cm

入渗时间较短且土壤表面积水深度较少时,积水深度所形成的压力势对土壤水分运动不会造成较大影响,因此积水深度所形成的压力势可以忽略不计,则式(2)简化为

$$i = K_s \frac{Z_f + h_f}{Z_f} \tag{3}$$

湿润锋面以上的土壤处于饱和状态,则

$$I = (\theta_s - \theta_i) Z_f \tag{4}$$

式中 θ_s——土壤饱和含水率,cm^3/cm^3

θ_i——土壤初始含水率,cm^3/cm^3

为了分析磁化微咸水对土壤入渗的影响,引入毛管理论,从理论上分析微咸水磁化处理对 Philip 和 Green-Ampt 入渗公式参数的影响。根据 WANG 等[21]的毛管束模型,土壤饱和导水率可表示为

$$K_s = \int_{\theta_r}^{\theta_s} K_h \mathrm{d}\theta = (\theta_s - \theta_r) \int_0^1 K_h \mathrm{d}S_r = \frac{n(\theta_s - \theta_r)}{2 + (m+1)n} \frac{a\sigma^2}{2\rho g \mu h_d^2} \tag{5}$$

式中　K_h——与饱和度有关的毛管导水率，cm/min

θ_r——土壤滞留含水率，cm^3/cm^3

S_r——土壤有效饱和度

m——与土壤孔隙连接性有关的参数

n——Brooks－Corey 模型形状系数，与土壤孔隙特性有关

σ——表面张力系数，kg/min^2

ρ——水的密度，kg/cm^3

μ——水动力粘滞系数，kg/(cm·min)

g——重力加速度，$kg/(cm^2 \cdot min^2)$

h_d——土壤进气吸力，cm

根据毛细管理论[22]，土壤水分的能量状态与表面张力的关系可表示为

$$h = \frac{2\sigma}{\rho g R} \tag{6}$$

式中　h——最大毛细管上升高度，cm

R——当量孔隙直径，cm

对于短历时入渗，Philip 入渗公式吸渗率 S 可以根据 Green－Ampt 入渗公式饱和导水率 K_s及概化湿润锋吸力 h_f推求，即

$$S^2 = 2K_s h_f(\theta_s - \theta_i) \tag{7}$$

2　结果与分析

2.1　磁化微咸水累积入渗量变化特征

图 2 为不同矿化度磁化与未磁化微咸水累积入渗量随入渗时间的变化。考虑到土柱填充对累积入渗量变化过程可能带来的随机误差，采用标准偏差对试验结果进行误差分析，以明确相同矿化度下磁化处理对累积入渗量的影响。由图 2 可知，累积入渗量随入渗时间的增加而逐渐增加。相同矿化度下，磁化与未磁化微咸水累积入渗量差异性极为显著($P<0.01$)，不同矿化度微咸水、磁化与不磁化处理在入渗时间相同时，累积入渗量也具有显著差异。入渗时间 240 min 时，矿化度 0.14、2、3、4、5 g/L 磁化与未磁化微咸水的累积入渗量分别为 7.70、8.77、9.12、8.40、8.07 cm 和 7.10、7.70、7.98、7.48、7.28 cm，入渗时间相同时，磁化与未磁化微咸水累积入渗量均随微咸水矿化度先增大后减小，入渗水矿化度为 3 g/L 时土壤累积入渗量最大，入渗速率最大，这与吴忠东等[23]得出的当微咸水矿化度小于 3 g/L 时，土壤入渗率与入渗水矿化度呈正相关，当矿化度为 3 g/L 时入渗率达到最大，之后随着入渗水矿化度的升高，土壤入渗率反而减小的试验结果相一致。微咸水磁化处理后，土壤入渗速率有所降低，不同矿化度下的降低幅度不同，入渗时间 240 min 时，矿化度 0.14、2、3、4、5 g/L 磁化微咸水累积入渗量相对于未磁化微咸水分别降低了 7.85%、12.19%、12.56%、10.89%、9.79%；淡水经磁化处理后，土壤入渗速率有所降低。微咸水矿化度为 3 g/L 时，累积入渗量降低幅度最大。这可能是由于淡水经磁化处理后，水的理化性质发生显著改变，表面张力减小[7]，从而导致磁化水在土壤介质中的运动速率降低；微咸水矿化度在 3 g/L 时，土壤入渗速率最大，矿化度和 Na^+ 含量共同决定了微咸水的入渗特性[23]，然而随着微咸水矿化度的增加，水中顺磁性物质数量增加，水的磁性增加[24]，磁场对水的磁化作用加强，表面张力减小，使得微咸水的入渗速率相对降低，磁化微咸水矿化度为 3 g/L 时，相同入

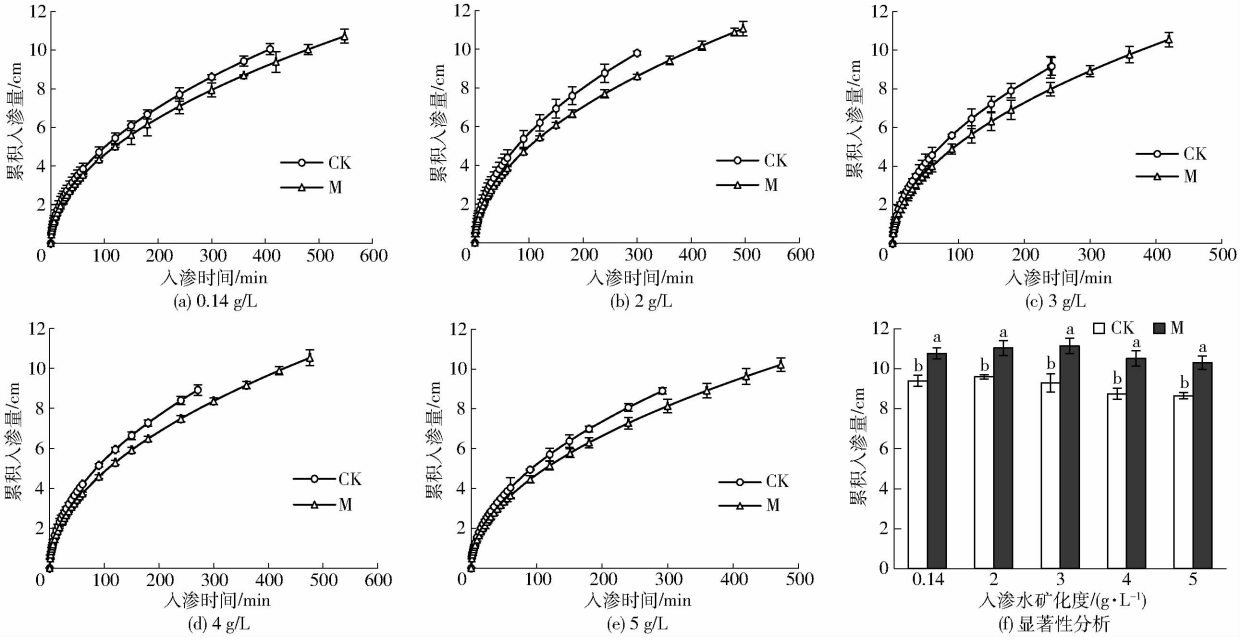

图 2　磁化与未磁化微咸水累积入渗量变化特征

Fig. 2　Cumulative infiltration variation characteristics of magnetized and non-magnetized brackish water

渗时间累积入渗量降低幅度最大。

2.2 磁化微咸水对湿润锋运移的影响

图 3 为不同矿化度磁化与未磁化微咸水湿润锋随入渗时间的变化。考虑到土柱填充对湿润锋运移变化过程可能带来的随机误差,采用标准偏差对试验结果进行误差分析,以明确相同矿化度下磁化处理对湿润锋运移的影响。由图 3 可知,湿润锋运移深度随入渗时间的增加而逐渐增加,变化规律与累积入渗量一致。相同矿化度下,磁化与未磁化处理达到相同湿润锋深度所需要的时间差异性极为显著($P<0.01$),不同矿化度磁化微咸水入渗时间相同时湿润锋推进距离也具有显著差异。入渗结束时,矿化度 0.14、2、3、4、5 g/L 磁化微咸水相对于未磁化微咸水入渗时间分别增加了 33.99%、65.33%、91.65%、75.65%、61.99%。这表明磁化微咸水表面张力的减小不同程度地降低了磁化微咸水湿润锋的推进速度[7]。入渗结束时,矿化度 0.14、2、3、4、5 g/L 磁化与未磁化微咸水湿润体平均含水率分别为 0.372、0.363、0.339、0.331、0.330 cm^3/cm^3 和 0.400、0.410、0.410、0.390、0.379 cm^3/cm^3,磁化微咸水湿润体平均含水率相对于未磁化微咸水分别增加了 2.48、4.69、7.11、5.98、4.89 个百分点。这是由于磁化微咸水水分子间距离增大,造成部分氢键变弱甚至断裂,使大的缔合态水分子团簇结构分散成自由单体和二聚体分子[25],更多的水分进入土壤小孔隙,水分流通路径相对延长,湿润锋向下层土壤的推进速度降低,更多的水分滞留在土壤小孔隙中,从而提高了土壤含水率。

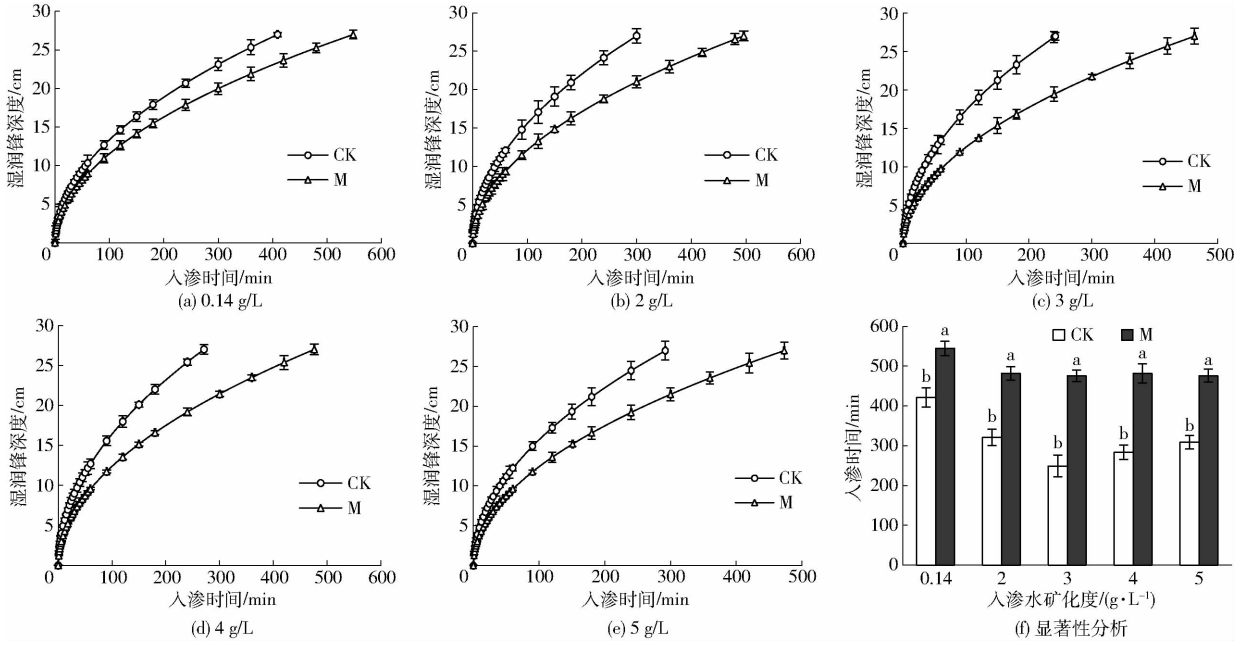

图 3 磁化与未磁化微咸水湿润锋运移变化特征

Fig. 3 Variation characteristics of wetting front transport of magnetized and non-magnetized brackish water

2.3 磁化微咸水对土壤入渗公式参数的影响

利用 Philip 和 Green - Ampt 入渗公式对实测入渗数据进行拟合,结果见表 1。Philip 和 Green - Ampt 入渗公式拟合效果均较好,决定系数均能达到 0.96 以上。对于 Philip 公式,磁化微咸水吸渗率 S 随矿化度的增加先增大后减小,且均小于同一矿化度未磁化微咸水吸渗率;对于 Green - Ampt 公式,随着矿化度的增加,磁化微咸水饱和导水率 K_s 先增大后减小,湿润锋处的吸力 h_f 则呈现相反的趋势,先减小后增大,同一矿化度下磁化微咸水饱和导水率 K_s 和湿润锋处的吸力 h_f 均小于未磁化微咸水。

大量研究表明,水经过磁化处理后,氢键断裂,分子间作用力减弱,水的表面张力减小[7,22-23]。如土壤结构及孔隙特性不变条件下,入渗水表面张力的减小是导致土壤入渗速率降低的重要原因。当入渗水表面张力减小时,由式(5)~(7)可知,Green - Ampt 入渗公式参数饱和导水率 K_s 减小,土壤最大毛细管上升高度 h 降低,从而导致湿润锋吸力 h_f 减小,Philip 入渗公式吸渗率 S 也随之减小。这一结论定性地解释了磁化水入渗后,Philip 入渗公式吸渗率 S、Green - Ampt 入渗公式参数饱和导水率 K_s 和概化湿润锋吸力 h_f 减小的原因。

进一步分析磁化微咸水矿化度对 Philip 和 Green - Ampt 公式参数的影响程度,首先确定未磁化微咸水吸渗率 S 及饱和导水率 K_s 与矿化度 C 之间的关系,如图 4 所示。S 及 K_s 随 C 的增加均呈现先增大后减小的趋势,当微咸水矿化度为 3 g/L 时,S 及 K_s 均取得最大值。

表 1　入渗公式参数拟合结果

Tab. 1　Fitting result of parameters of infiltration formulas

入渗公式	参数	处理	矿化度/(g·L⁻¹)				
			0.14	2	3	4	5
Philip 公式	吸渗率 S/(cm·min$^{-0.5}$)	CK	0.497	0.566	0.589	0.542	0.521
		M	0.458	0.497	0.515	0.483	0.470
	决定系数 R^2	CK	0.97	0.98	0.97	0.98	0.97
		M	0.98	0.98	0.98	0.99	0.97
Green－Ampt 公式	饱和导水率 K_s/(cm·min^{-1})	CK	0.005 7	0.009 6	0.012 3	0.009 2	0.007 4
		M	0.005 1	0.007 6	0.009 2	0.007 4	0.006 1
	湿润锋处的吸力 h_f/cm	CK	80.43	56.95	46.02	55.63	67.20
		M	68.96	45.85	35.47	42.96	54.71
	决定系数 R^2	CK	0.98	0.99	0.96	0.99	0.99
		M	0.99	0.97	0.99	0.98	0.98

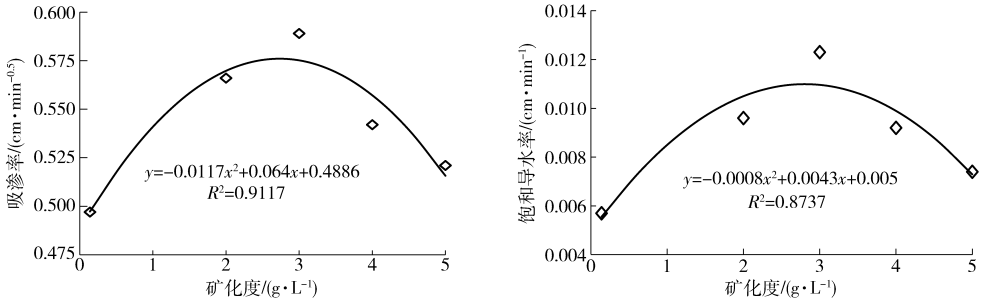

图 4　微咸水矿化度对吸渗率和饱和导水率的影响

Fig. 4　Effects of salinity of brackish water on sorptivity and saturated hydraulic conductivity

为反映磁化微咸水矿化度对土壤吸渗率和饱和导水率的影响程度，将同一矿化度下磁化与未磁化微咸水吸渗率之差与未磁化微咸水吸渗率的比值定义为相对吸渗率，用 ΔS 表示；将磁化水饱和导水率与未磁化水饱和导水率之差与未磁化微咸水饱和导水率的比值定义为相对饱和导水率，用 ΔK_s 表示。图 5 为磁化微咸水相对吸渗率 ΔS 及相对饱和导水率 ΔK_s 随矿化度 C 之间的变化。由图 5 可知，ΔS 及 ΔK_s 随 C 均呈现先增大后减小的趋势，采用二项式分别进行拟合，拟合结果显示，两者与矿化度之间均呈现较好的二次多项式关系。

随着入渗水矿化度的升高，离子数量增加，微咸水磁化效果显著增加，磁化水对于土壤吸渗率和饱和导水率的影响也显著增大，相对吸渗率和相对饱和导水率均在矿化度为 3 g/L 时达到峰值；当矿化度大于 3 g/L 时，磁化效果逐渐降低，说明磁化效果与水体的离子含量有关，300 mT 磁化处理对高矿化度的微咸水具有一定局限性，可考虑对矿化度大于 3 g/L 的灌溉水进行多次磁化或增大磁场强度处理，增加微咸水磁化效果。

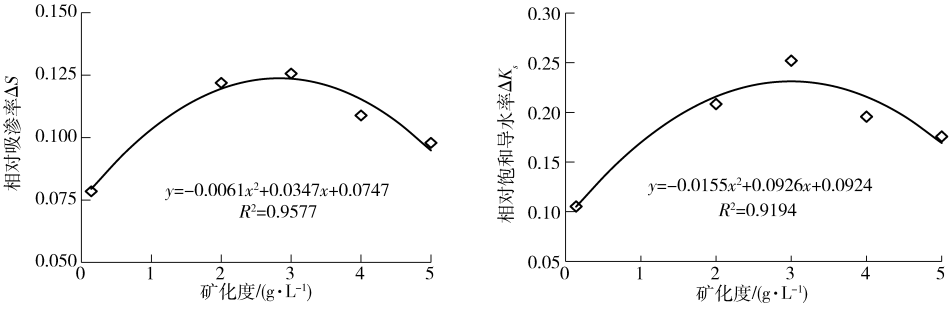

图 5　磁化微咸水矿化度对相对吸渗率和相对饱和导水率的影响

Fig. 5　Effects of salinity of magnetized brackish water on relative sorptivity and relative saturated hydraulic conductivity

利用式(7)对比分析磁化微咸水入渗条件下 Philip 公式和 Green－Ampt 公式参数间互相转换的关系，结果见表 2。2 个入渗公式参数中 S 和 $K_s h_f$ 均随 C 的增加先增大后减小，且在 3 g/L 时达到最大值，与 2 个入渗公式的拟合值规律一致。但 S 的计算值均显著大于拟合值，$K_s h_f$ 的计算值均明显小于

拟合值。说明磁化微咸水入渗条件下,通过式(7)进行 Philip 公式和 Green - Ampt 公式参数互推具有一定误差。这是由于微咸水磁化处理一方面改变了微咸水理化性质,进而改变了微咸水的土壤中的流动特性;另一方面磁化微咸水盐分离子与土壤胶体相互作用,影响了土壤结构,致使入渗公式参数变化显著,从而降低了 Philip 公式和 Green - Ampt 公式参数互相推求的精度。

表 2 磁化微咸水入渗条件下 2 个入渗公式参数的拟合值和计算值

Tab. 2 Fitted and calculated values of two infiltration formulas parameters for magnetized brackish water infiltration

参数	矿化度/(g·L^{-1})									
	0.14		2		3		4		5	
	S/(cm·min$^{-0.5}$)	K_sh_f/(cm^2·min^{-1})	S/(cm·min$^{-0.5}$)	K_sh_f/(cm^2·min^{-1})	S/(cm·min$^{-0.5}$)	K_sh_f/(cm^2·min^{-1})	S/(cm·min$^{-0.5}$)	K_sh_f/(cm^2·min^{-1})	S/(cm·min$^{-0.5}$)	K_sh_f/(cm^2·min^{-1})
拟合值	0.448	0.284	0.517	0.377	0.515	0.412	0.483	0.359	0.460	0.318
计算值	0.485	0.243	0.558	0.323	0.584	0.320	0.545	0.282	0.513	0.256
相对误差/%	18	-28	8	-14	1	-2	6	-11	12	-20

2.4 磁化微咸水对土壤含水率分布的影响

图 6 为不同矿化度磁化与未磁化微咸水在入渗结束后土壤剖面含水率。由图 6 可知,入渗结束后不同矿化度磁化与未磁化微咸水表层土壤含水率差异显著;25 cm 深度处,矿化度 0.14、2、3、4、5 g/L 磁化微咸水相对于未磁化微咸水土壤含水率分别增加了 18.40%、28.34%、59.12%、40.32%、27.44%。这是由于微咸水经过磁化处理后,较大的缔合态水分子团簇结构分散成自由单体和二聚体分子[25],水分子便于湿润和通过小孔隙运移。因此,在相同的土层深度,磁化微咸水入渗土壤具有较高的土壤含水率。由此可见,磁化微咸水入渗能够增加土壤的持水能力,使较多的水分储存在作物根系上层,有利于作物根系对水分的吸收。

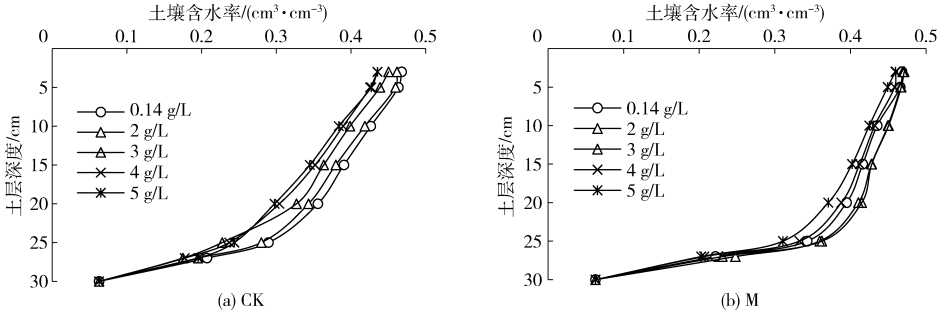

图 6 磁化与未磁化微咸水土壤剖面含水率分布特征

Fig. 6 Distribution characteristics of magnetized and non-magnetized brackish water infiltration

2.5 磁化微咸水对土壤含盐量分布的影响

以 0.14 g/L 的淡水和 3 g/L 的微咸水为例,不同土层土壤含盐量分布情况如图 7 所示。土壤剖面含盐量随入渗水矿化度的增大而增大,土壤盐分随土壤水分由上至下迁移,并在湿润锋附近累积,造成了上层脱盐、下层积盐的现象。土层深度 0 ~ 20 cm 相同矿化度下的磁化微咸水的土壤含盐量均小于未磁化微咸水,说明磁化微咸水能够有效地淋洗土壤中的盐分。土层深度大于 20 cm 时,相同矿化度下磁化微咸水的土壤含盐量均开始大于未磁化微咸水,在 27 cm 处积盐效果有明显差异。为比较分析不同矿化度磁化微咸水入渗对土壤含盐量分布的影响,将一定土层深度初始含盐量与入渗后盐分总量的差值与初始含盐量的比值定义为脱盐率;将相同矿化度磁化与未磁化微咸水脱盐率的差值与未磁化微咸水脱盐率比值定义为磁化脱盐强度。不同矿化

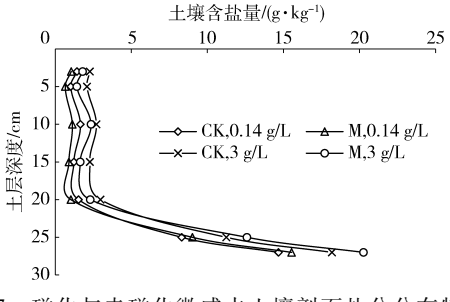

图 7 磁化与未磁化微咸水土壤剖面盐分分布特征

Fig. 7 Distribution characteristic of salt content in soil profile for magnetized and non-magnetized brackish water infiltration

度磁化与未磁化微咸水 0 ~ 20 cm 土层脱盐率见表 3。由表 3 可知,淡水脱盐率最佳,随着矿化度的增大,土壤脱盐率显著降低,这是因为微咸水入渗本身带有一定盐分,提高了土壤含盐量,造成盐分积累。相同矿化度下的磁化微咸水脱盐率均大于未磁化微咸水,矿化度 0.14、2、3、4、5 g/L 磁化微咸水的

磁化脱盐强度分别为 17.1%、23.0%、40.9%、21.2%、27.3%，矿化度为 3 g/L 时，磁化脱盐强度最大，相对盐分淋洗效果最佳。由此可见，磁化微咸水处理能够提高土壤盐分淋洗效果，提高微咸水利用率。

表 3　磁化与未磁化微咸水灌溉对 0 ~ 20 cm 土层脱盐率的影响

Tab. 3　Effects of magnetized and non-magnetized brackish water irrigation on desalting efficiency in 0 ~ 20 cm soil layers　%

处理	矿化度/(g·L^{-1})				
	0.14	2	3	4	5
CK	64.4	48.7	35.9	30.6	15.0
M	75.4	59.9	50.6	37.1	19.1
脱盐率增加量	11.0	11.2	14.7	6.5	4.1

3　结论

（1）微咸水磁化处理后，土壤水分入渗速率及湿润锋运移速率显著降低，湿润体含水率显著提高；微咸水矿化度对磁化效果具有显著影响，磁化微咸水矿化度为 3 g/L 时，相同入渗时间累积入渗量和湿润锋深度相对减少量最大，湿润体含水率相对增加量最多。入渗时间 240 min 时，累积入渗量相对减少了 12.56%，达到相同湿润锋所用入渗时间相对增加了 91.65%，湿润体含水率相对增加了 7.11%。

（2）磁化微咸水处理对 Philip 和 Green - Ampt 入渗公式参数影响显著，相同矿化度的磁化微咸水土壤吸渗率 S、饱和导水率 K_s 及湿润锋处吸力 h_f 均小于未磁化微咸水；S 及 K_s 随矿化度 C 的增加均呈现先增大后减小的趋势；磁化与未磁化微咸水相对吸渗率 ΔS 及相对饱和导水率 ΔK_s 与矿化度之间均呈现较好的二次多项式关系，在矿化度为 3 g/L 时，相对吸渗率 ΔS 及相对饱和导水率 ΔK_s 均达到最大。

（3）磁化微咸水入渗能增加土壤持水能力，相同土层深度的土壤体积含水率显著增加，25 cm 土层深度，矿化度 0.14、2、3、4、5 g/L 磁化微咸水相对于未磁化微咸水土壤含水率分别增加了 18.40%、28.34%、59.12%、40.32%、27.44%；微咸水磁化处理后，脱盐率显著提高，土层深度 0 ~ 20 cm 相同矿化度下的磁化微咸水脱盐率均大于未磁化微咸水，矿化度 0.14、2、3、4、5 g/L 磁化微咸水的磁化脱盐强度分别为 17.1%、23.0%、40.9%、21.2%、27.3%；矿化度为 3 g/L 时，磁化脱盐强度最大，相对盐分淋洗效果最佳。

参　考　文　献

1　毕远杰，王全九，雪静. 淡水与微咸水入渗特性对比分析[J]. 农业机械学报，2010，41(7)：70 - 75.
BI Yuanjie，WANG Quanjiu，XUE Jing. Infiltration characteristic contrast analysis of fresh water and saline water[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2010，41(7)：70 - 75.（in Chinese）

2　王全九，单鱼洋. 咸水灌溉与土壤水盐调控研究进展[J/OL]. 农业机械学报，2015，46(12)：117 - 126. http：//www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20151217&journal_id = jcsam. DOI：10.6041/j.issn.1000-1298.2015.12.017.
WANG Quanjiu，SHAN Yuyang. Review of research development on water and soil regulation with brackish water irrigation[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2015，46(12)：117 - 126.（in Chinese）

3　张珂萌，牛文全，汪有科，等. 微咸水微润灌溉下土壤水盐运移特性研究[J/OL]. 农业机械学报，2017，48(1)：175 - 182. http：//www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20170123&journal_id = jcsam. DOI：10.6041/j.issn.1000-1298.2017.01.023.
ZHANG Kemeng，NIU Wenquan，WANG Youke，et al. Characteristics of water and salt movement in soil under moistube irrigation with brackish water[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2017，48(1)：175 - 182.（in Chinese）

4　徐秉信，李如意，武东波，等. 微咸水的利用现状和研究进展[J]. 安徽农业科学，2013，41(36)：13914 - 13916.
XU Bingxin，LI Ruyi，WU Dongbo，et al. Utilization status and research progress of brackish water[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences，2013，41(36)：13914 - 13916.（in Chinese）

5　GHAURI S A，ANSARI M S. Increase of water viscosity under the influence of magnetic field[J]. Journal of Applied Physics，2006，100(6)：066101 - 066102.

6　王艳红，杨小刚. 磁化水处理技术及其在农业上的应用[J]. 农业工程，2014，4(5)：74 - 77.
WANG Yanhong，YANG Xiaogang. Magnetized water treatment technology and its application in agriculture[J]. Agricultural Engineering，2014，4(5)：74 - 77.（in Chinese）

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　OTSUKA I，OZEKI S. Does magnetic treatment of water change its properties?[J]. Journal of Physical Chemistry B，2006，110(4)：1509 - 1512.

9 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)

10 祁通, 孙阳迅, 刘易, 等. 磁化微咸水对滴灌棉花生长及产量的影响[J]. 新疆农业科学, 2015, 52(7):1322 - 1327.
QI Tong, SUN Yangxun, LIU Yi, et al. Influence of magnetized saline water irrigation on cotton growth and yield under drip irrigation[J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2015, 52(7):1322 - 1327. (in Chinese)

11 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)

12 王渌, 郭建曜, 刘秀梅, 等. 磁化水灌溉对冬枣生长及品质的影响[J]. 园艺学报, 2016, 43(4):653 - 662.
WANG Lu, GUO Jianyao, LIU Xiumei, et al. Effects of magnetized water irrigation on growth and quality of *Ziziphus jujuba* 'Dongzao'[J]. Acta Horticulturae Sinica, 2016, 43(4):653 - 662. (in Chinese)

13 刘秀梅, 王华田, 王延平, 等. 磁化微咸水灌溉促进欧美杨 I - 107 生长及其光合特性分析[J]. 农业工程学报, 2016, 32(增刊 1):1 - 7.
LIU Xiumei, WANG Huatian, WANG Yanping, et al. Analysis of magnetic salinity water irrigation promoting growth and photosynthetic characterisitcs of *Populus* × *euramericanna* 'Neva'[J]. Transactions of the CSAE, 2016,32(Supp. 1):1 - 7. (in Chinese)

14 MOSTAFAZADEH-FARD B, KHOSHRAVESH M, MOUSAVI S F, et al. Effects of magnetized water on soil chemical components underneath trickle irrigation[J]. Journal of Irrigation & Drainage Engineering, 2012, 138(12):1075 - 1081.

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 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)

17 唐胜强, 佘冬立. 灌溉水质对土壤饱和导水率和入渗特性的影响[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(10):108 - 114. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20161015&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.10.015.
TANG Shengqiang, SHE Dongli. Influence of water quality on soil saturated hydraulic conductivity and infiltration properties[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(10):108 - 114. (in Chinese)

18 王全九, 邵明安, 郑纪勇. 土壤中水分运动与溶质迁移[M]. 北京:水利水电出版社,2007:20.

19 PHILIP J R. The theory of infiltration:1. the infiltration equation and its solution[J]. Soil Science, 1957, 83(5):345 - 357.

20 GREEN W H, AMPT G A. Studies on soil physics[J]. The Journal of Agricultural Science, 1911,4(1):1 - 24.

21 WANG Quanjiu, HORTON R, LEE J, et al. A simple model relating soil water characteristic curve and soil solute breakthrough curve [J]. Soil Science, 2002, 167(7):436 - 443.

22 PROKHOROV V A. Refinement of Rayleigh's equation for calculation of surface tension of a liquid from its capillary rise height [J]. Colloids & Surfaces A: Physicochemical & Engineering Aspects, 1996, 116(3):309 - 316.

23 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.
WU Zhongdong, WANG Quanjiu. Effect on both soil infiltration characteristics and ion mobility features by mineralization degree of infiltration water[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2010, 41(7):64 - 69. (in Chinese)

24 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)

25 TOLEDO E J L, RAMALHO T C, MAGRIOTIS Z M. Influence of magnetic field on physical-chemical properties of the liquid water: insights from experimental and theoretical models[J]. Journal of Molecular Structure, 2008, 873(1 - 3):409 - 415.