

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2022.07.034

氮肥溶液磁化灌溉下土壤入渗特征和水氮迁移规律研究

李佳蓓¹ 张富仓¹ 段晨晓¹ ABDELGHANY Ahmed Elsayed^{1,2} 杨玲¹ 李志军¹

(1. 西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室, 陕西杨凌 712100;
2. 国家研究中心农业生物研究所, 开罗 12622)

摘要: 为探明不同浓度氮肥溶液磁化前后土壤入渗特征和水氮迁移规律,采用恒定磁场强度 300 mT 对质量浓度分别为 0、0.4、0.7、1.1 g/L 的硝酸钾溶液进行磁化处理,以未磁化处理为对照,测定各处理溶液的电导率、pH 值、溶氧量、表面张力、累积入渗量、湿润锋运移距离和入渗后不同土壤剖面水氮迁移分布。试验结果表明:磁化处理溶液溶氧量显著提高,电导率和表面张力显著减小,并随溶液浓度变化有显著影响,但对 pH 值无显著影响。氮肥溶液磁化入渗增大了相同入渗时间内的湿润锋运移距离和累积入渗量, Philip、Green - Ampt、一维代数入渗模型拟合所得参数土壤吸渗率 S 、饱和导水率 K_s 以及有效土壤水扩散率 $\bar{D}$ 均增大,湿润峰处的土壤水吸力 S_f 、土壤水分特征曲线和非饱和导水率综合形状系数 m 均减小,增渗效果随氮肥溶液浓度增大而增大。磁化氮肥溶液可提高土壤持水能力,且随溶液浓度增大持水能力增强,一维代数入渗公式可较好描述不同磁场强度下各浓度溶液土壤入渗结束时的土壤含水率分布情况。氮肥溶液和磁化作用对土壤硝态氮含量的影响呈显著正相关关系,二者共同作用下,磁化高浓度溶液硝态氮含量最高,这有利于土壤无机氮素的保持。

关键词: 氮肥溶液; 磁化处理; 浓度; 入渗特征; 水氮运移

中图分类号: S121; S153.5 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2022)07-0316-09 OSID: 

Characteristics of Soil Infiltration and Water and Nitrogen Transport under Irrigation with Magnetized Nitrogen Fertilizer Solution

LI Jiabei¹ ZHANG Fucang¹ DUAN Chenxiao¹ ABDELGHANY Ahmed Elsayed^{1,2} YANG Ling¹ LI Zhijun¹

(1. Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid and Semiarid Areas, Ministry of Education, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China
2. Agriculture and Biological Institute, National Research Centre, Cairo 12622, Egypt)

Abstract: In order to explore the effects of nitrogen fertilizer solution on soil infiltration characteristics and water and nitrogen migration patterns before and after magnetization, a 300 mT constant magnetic field intensity was used to magnetize different potassium nitrate solution concentrations (0 g/L, 0.4 g/L, 0.7 g/L and 1.1 g/L), un-magnetized treatments were used as control, and electrical conductivity, pH value, dissolved oxygen amount, cumulative infiltration amount, and wetting front migration distance of solution under different treatments and water and nitrogen migration distribution in different soil profiles after infiltration were determined. The results showed that the amount of dissolved oxygen was significantly increased and electrical conductivity and surface tension were significantly reduced by magnetized fertilizer solution, and the change degree became more significant with the increase of fertilizer solution concentration. The cumulative infiltration amount and the wetting front migration distance within the same time were increased by magnetized fertilizer solution. Soil sorptivity rate S , soil saturated hydraulic conductivity K_s , and effective soil water diffusivity $\bar{D}$ in the Philip, Green - Ampt, and one-dimensional algebraic infiltration models were increased, while the suction S_f at the wetting peak and the soil moisture characteristic curve and comprehensive shape coefficient of unsaturated water conductivity m were reduced. The effect of increased infiltration was increased with the increase of nitrogen fertilizer solution concentration. The magnetized nitrogen fertilizer solution improved soil water

收稿日期: 2021-08-12 修回日期: 2021-09-15
基金项目: 国家自然科学基金项目(51979231)
作者简介: 李佳蓓(1996—),女,博士生,主要从事节水灌溉理论与技术研究,E-mail: 13834838476@163.com
通信作者: 张富仓(1962—),男,教授,博士生导师,主要从事节水灌溉理论与技术研究,E-mail: zhangfc@nwsuaf.edu.cn

holding capacity and it was increased with the increase of solution concentration. The one-dimensional algebraic infiltration formula could well describe the distribution of soil water content at the end of soil infiltration of each fertilizer solution concentration under different magnetic field intensities. Both the nitrogen fertilizer solution concentration and magnetization had significant positive correlations with soil nitrate content, and magnetized fertilizer solution with high concentration had the highest values under the combined effect which benefited the conservation of soil inorganic nitrogen.

Key words: nitrogen fertilizer solution; magnetization treatment; concentration; infiltration characteristics; water and nitrogen movement

0 引言

水资源短缺和肥料利用率低下是限制我国农业可持续发展的重要因素,也是长期以来农业研究的主流方向^[1]。微喷灌等水肥一体化技术的应用和保水增肥剂的创新研发作为提高水肥利用效率的阶段性成熟产物,已被农业种植者广泛使用,在此基础上如何更进一步实现已有水、肥的最大化无污染利用,值得深入探索研究。土壤入渗作为农田水循环的一个重要环节^[2],其入渗性能不仅直接反映了土壤涵养水源的能力,也间接影响着土壤水的资源化利用^[3]。近年来国内外学者在水肥入渗方面进行了大量研究^[4],特别是对于质地较重的土壤,如何提高土壤入渗性能,使有限的水肥资源入渗并更多保存至土壤,对于提高水肥利用效率和农业可持续发展有着重要意义。

自 20 世纪 60 年代开始,磁处理作为一项新型水处理技术,以其可持续且不破化生态环境的灌溉特点受到了国内外学者的广泛关注,特别是近年来,关于磁化水理论和应用技术的相关研究已取得了较大进展^[5-7],研究表明磁处理通过改变液体表面张力、溶氧量、pH 值等理化性质^[8-10],进而对土壤入渗性能、水盐肥的运移和保持、土壤结构的改善以及作物的生长发育产生重要影响。KHOSHRAVESH 等^[11]研究表明磁化水可有效提高粘质土壤的入渗性能和土壤水分分布。张瑞喜等^[12]研究表明磁化水可加快盐渍化土壤水分向下运移,磁场强度为 300 mT 时土壤含水率和盐分淋洗量达到最大。王全九等^[10,13-14]研究提出以表面张力相对减少量作为微咸水磁化效果的定量评价标准,且磁化效果与磁场强度和矿化度有关,磁化微咸水灌溉土壤同样具有明显脱盐效果^[15-16],并能有效提高土壤有机碳、氮含量,改善土壤盐基离子的交换特性和离子组成^[17],提高土壤矿质养分有效化程度^[18],增强土壤养分固定能力。除此之外,磁处理灌溉在改善土壤孔隙结构^[19],促进作物种子萌发和生长发育^[20-21],提高作物产量和品质方面也发挥着重要作用^[21]。

磁化水作为一项新型水处理技术,目前国内外

的研究重点主要集中在磁化水和磁化微咸水对土壤水、盐运移的影响,考虑到我国灌溉与施肥相结合的实际情况,研究水肥同时磁化对氮素运移转化和水肥耦合效应的影响将是一个新的研究方向,特别是对粘质土壤而言,目前尚未见到磁化水肥方面的研究报道。因此,本文拟采用恒定磁场强度 300 mT 对不同浓度氮肥溶液进行磁化处理,测定不同浓度磁化和未磁化氮肥溶液理化性质,开展土壤一维垂直入渗试验,研究磁化肥水灌溉对土壤入渗特征、模型参数变化以及水氮运移的影响,以期为磁处理技术在农田施肥灌溉模式中的应用提供理论依据和技术指导。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试土样采自西北农林科技大学节水灌溉试验站(108°24'E,34°20'N)耕层土壤(0~30 cm),待土样风干,碾压、去除杂物,过 2 mm 筛后混合均匀以备。采用 MS2000 型激光粒度分析仪测定土壤颗粒组成,其中黏粒($0 < d \leq 0.002$ mm, d 为粒径)、粉粒($0.002 < d \leq 0.02$ mm)和砂粒($0.02 < d \leq 2$ mm)占比分别为 23.05%、40.37% 和 36.58% (体积分数),按国际制土壤质地分类标准归类为粘壤土。风干土体含水率为 2.3%,饱和体含水率为 52.59%,硝态氮含量本底值为 9.87 mg/kg。

1.2 试验设计

试验于 2020 年 5 月在西北农林科技大学旱区节水农业研究院实验室进行,试验选用易溶于水且具有稳定物理化学性质的硝酸钾作为供试肥料,配置质量浓度分别为 0 g/L (T0)、0.4 g/L (T1)、0.7 g/L (T2)、1.1 g/L (T3) 的硝酸钾溶液,采用一维垂直土柱开展不同浓度氮肥溶液在 M1 (磁化) 和 M0 (未磁化) 条件下的积水入渗试验,积水深度为 2 cm,共计 8 个处理,每个处理 5 次重复。

1.3 试验装置与方法

试验装置由磁化系统和土壤入渗系统组成。磁化系统由水箱、水泵和磁化器通过管道连接而成。水箱容积为 8 L,水泵采用创锐 BG600-S/YZ35-13

型大流量变频可调速蠕动泵,磁化器采用包头鑫达磁性材料厂生产的 CHQ 型外置永磁磁铁,以管径 9.6 mm 的硅胶管连接,通过木块调整管道位置及磁铁 NS 极间距,确保水流垂直切割磁感线且管道中心处磁场强度为 300 mT 左右,内壁磁场强度浮动范围小于 30 mT,设计流速为 0.5 m/s,控制循环回水时间为 30 min。土壤入渗系统包括土柱和供水装置,试验土柱为内径 6 cm、高 50 cm 的透明有机玻璃制品,外壁贴有标尺,用于定时记录湿润锋变化情况,距土柱顶端 15 cm 处每隔 5 cm 开设取样孔,底部开设通气孔并铺设 5 cm 厚砾石层,与土层以滤纸隔开,以容重 1.35 g/cm³ 分 8 层(每层 5 cm)装入土柱,层与层之间打毛衔接。试验供水装置为马氏瓶,内径 6 cm,高 46 cm,外壁贴有标尺,用来记录和控制入渗水量,提供稳定水头高度为 2 cm,土柱入渗总高度为 31.5 cm。

实验室控制温度为(23±2)℃,电导率和 pH 值分别采用雷磁 DDS-307 型电导率仪和雷磁 PHSJ-4A 型 pH 计进行测定,溶氧量采用上海泽泉科技股份有限公司生产的光纤测氧仪测定,表面张力系数采用复旦天欣科教有限公司生产的 FO-N8T-1 型液体表面张力测定仪测定,每组试验重复 3 次,取其平均值进行分析。入渗试验用秒表计时,按由密及疏的时间间隔分别记录马氏瓶水位和土柱湿润锋深度,计算得相应时间下累积入渗量和湿润锋运移距离。入渗结束后立刻从取样孔进行取样,分别测定不同高度处土壤样品的质量含水率、硝态氮含量和盐分含量。采用干燥法测定土壤含水率,采用德国 SEAL 公司的 AA3 型流动分析仪测定土壤硝态氮含量。

1.4 数据分析与处理

采用 Microsoft Excel 2010、IBM SPSS Statistics 22、SigmaPlot 14 统计分析软件进行数据处理、分析和图形绘制。通过入渗模型对土壤入渗过程进行定量评价,根据前人研究,分别选取 Philip、一维代数以及 Green-Ampt 3 个入渗模型对磁化氮肥溶液入渗过程进行拟合分析^[22-24],评价淡水入渗模型在磁化氮肥溶液入渗条件下的适用性,研究磁化氮肥溶液对各入渗模型参数的影响以及模型互推参数的精确性。

(1) Philip 入渗模型,当入渗历时较短且土壤基质势在土壤水分入渗过程占主导时,Philip 入渗模型可简化为^[22]

$$I = St^{0.5}$$

(1)

式中 I ——累积入渗量,cm

t ——入渗时间,min

S ——土壤吸渗率,cm/min^{0.5}

(2) 一维代数入渗模型,由土壤水分运动方程推理所得,公式为^[23]

$$I = Z_f(\theta_r - \theta_s) \frac{1}{1 + m} + (\theta_r - \theta_s) Z_f$$

(2)

式中 m ——土壤水分特征曲线和非饱和导水率综合形状系数

θ_r ——土壤饱和体积含水率,cm³/cm³

θ_s ——土壤滞留体积含水率,cm³/cm³

Z_f ——湿润锋运移深度,cm

当供试土壤含水率较小时,可认为 $\theta_s = \theta_i$,式(2)简化为

$$I = Z_f \frac{\theta_r - \theta_i}{1 + m}$$

(3)

式中 θ_i ——土壤初始体积含水率,cm³/cm³

利用一维代数入渗模型推求土壤含水率分布公式为

$$\theta = \left(1 - \frac{Z}{Z_f}\right)^\alpha (\theta_r - \theta_i) + \theta_i$$

(4)

式中 θ ——所求任意深度处土壤含水率,cm³/cm³

Z ——观测点与土柱表面的垂直距离,cm

(3) Green-Ampt 入渗模型,在入渗水头较小、入渗时间较短且仅考虑土壤基质势的情况下 Green-Ampt 模型可简化为^[24]

$$I_t = K_s \frac{S_f}{Z_f}$$

(5)

式中 I_t —— t 时刻下的入渗率,cm/min

K_s ——饱和导水率,cm/min

S_f ——湿润锋处的土壤水吸力,cm

根据水量平衡原理,此时的湿润锋深度为累积入渗量概化湿润峰深度 Z'_f (cm),即

$$Z'_f = \frac{I}{\theta_r - \theta_i}$$

(6)

已知,累积入渗量对于时间的导数即是相应时间下土壤水分入渗速率,联立式(5)、(6)可得入渗时间与概化湿润峰深度之间的关系为

$$t = \frac{\theta_r - \theta_i}{K_s} \left(Z'_f - S_f \ln \frac{Z'_f + S_f}{S_f} \right)$$

(7)

联立式(6)、(7)可得入渗时间与累积入渗量的关系为

$$t = \frac{I - S_f(\theta_r - \theta_i) \ln \left(1 + \frac{I}{(\theta_r - \theta_i) S_f} \right)}{K_s}$$

(8)

根据短历时入渗特性,联立式(1)、(8)使累积入渗量相等,可得到 Philip 与 Green-Ampt 入渗模型互推公式为

$$S^2 = 2K_s S_f (\theta_r - \theta_i)$$

(9)

雷志栋等^[25]定义有效土壤水扩散率 $\overline{D}$ (cm^2/min) 可以用 Green - Ampt 入渗公式的拟合所得参数间接求得,即

$$\overline{D} = \frac{K_s S_f}{\theta_r - \theta_i}$$

(10)

2 结果与分析

2.1 磁化对不同浓度氮肥溶液理化性质的影响

由表 1 可知,氮肥溶液浓度和磁化作用对液体电导率、溶氧量和表面张力系数均有显著影响,二者交互作用对电导率影响显著,其他指标影响均不显著。在本试验条件下,磁化较未磁化氮肥溶液电导率显著降低了 4.97% ~ 6.88%,不同浓度氮肥溶液 pH 值略有减小,但影响并不显著,T0、T1、T2、T3 水平氮肥溶液磁化后溶氧量分别显著增加 8.51%、8.95%、10.46% 和 11.05%,表面张力系数分别显著减小 12.47%、12.63%、12.69% 和 13.08%,氮肥溶液磁化后溶氧量增量和表面张力系数减量均与溶液浓度呈正相关关系。

表 1 不同浓度氮肥溶液磁化前后理化性质
Tab.1 Physicochemical properties of nitrogen fertilizer solution with different concentrations before and after magnetization

处理	电导率/ ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)	pH 值	溶氧量/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	表面张力系数/ ($\text{mN}\cdot\text{m}^{-1}$)	
M0T0	218 ^g	7.62 ^a	8.357 ^b	75.487 ^b	
M0T1	764 ^e	7.50 ^{ab}	8.245 ^{bc}	75.832 ^b	
M0T2	1 148 ^c	7.57 ^{ab}	8.107 ^c	76.131 ^b	
M0T3	1 644 ^a	7.55 ^{ab}	8.027 ^c	77.939 ^a	
M1T0	203 ^g	7.57 ^{ab}	9.068 ^a	66.037 ^c	
M1T1	726 ^f	7.44 ^b	8.983 ^a	66.257 ^d	
M1T2	1 090 ^d	7.48 ^{ab}	8.955 ^a	66.469 ^d	
M1T3	1 558 ^b	7.46 ^b	8.914 ^a	67.746 ^c	
M	44.85 ^{**}	3.86	232.00 ^{**}	1 418.34 ^{**}	
F	T	9 294.77 ^{**}	2.04	3.96 [*]	16.52 ^{**}
M × T	4.64 [*]	0.08	0.70	0.59	

注:同列不同小写字母表示显著性差异,*表示达到显著水平($P < 0.05$),**表示达到极显著水平($P < 0.01$),下同。

2.2 磁化氮肥溶液对土壤入渗特征的影响

由图 1 可知,各处理湿润锋运移距离均随时间增加呈现前期快后期慢的增大趋势。在入渗 200 min 时,T1、T2、T3 水平磁化前后湿润锋运移距离较 T0 水平分别增大了 6.45%、7.55%、17.95% 和 7.13%、15.36%、27.23%,说明在相同磁化条件下湿润锋运移距离随溶液浓度的增大而增大。磁化 T0、T1、T2、T3 水平较未磁化处理土壤湿润锋运移距离分别增大了 6.81%、7.49%、14.56% 和 15.20%,氮肥溶液磁化入渗增大了湿润锋运移距离,且增大

幅度与溶液浓度呈正相关关系。在氮肥溶液和磁化处理的交互作用下,达到相同湿润锋高度(31.5 cm 时),M0T0 所需时间最长,M1T3 所需时间最短。

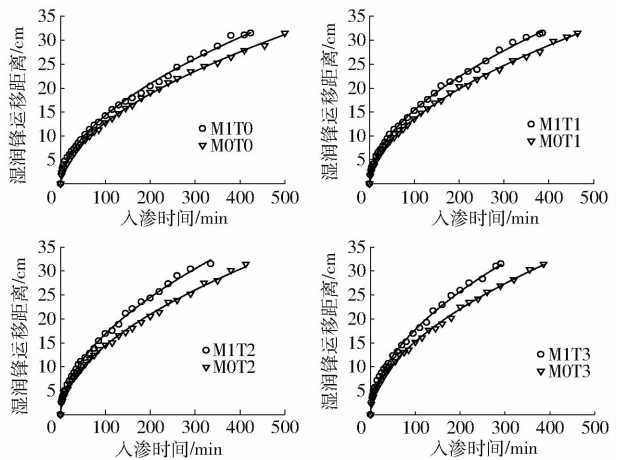


图 1 不同浓度氮肥溶液磁化前后湿润锋运移距离
随时间变化曲线

Fig.1 Variation curves of wetting front distance with time of nitrogen fertilizer solution with different concentrations before and after magnetization

由图 2 可知,累积入渗量整体变化规律与湿润锋运移距离相似。相同磁化条件下,累积入渗量随溶液浓度增大而增大。在入渗 200 min 时,磁化 T0、T1、T2、T3 水平氮肥溶液累积入渗量较未磁化处理分别增加了 13.70%、20.25%、23.81% 和 23.86%,磁化使土壤水分入渗加快,且加快作用随溶液浓度增大不断增强。相同入渗历时下,各处理累积入渗量从小到大依次为 M0T0、M0T1、M1T0、M0T2、M0T3、M1T2、M1T3,磁化高浓度氮肥溶液水分运移最快,在入渗 200 min 时,与处理 M0T0 相比,其他各

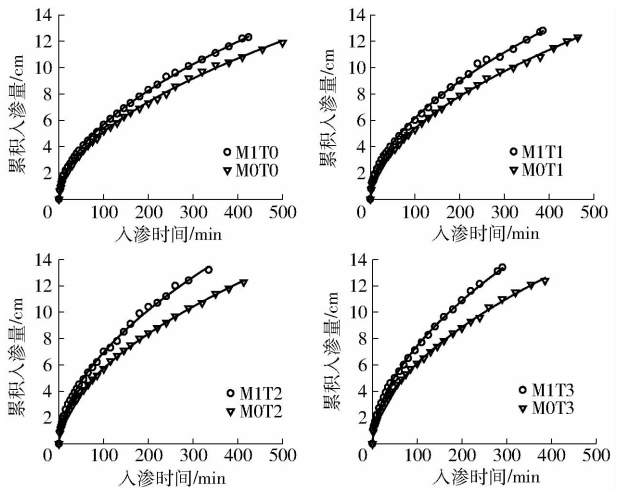


图 2 不同浓度氮肥溶液磁化前后累积入渗量
随时间变化曲线

Fig.2 Variation curves of cumulative infiltration with time of nitrogen fertilizer solution with different concentrations before and after magnetization

处理累积入渗量增加了 14.47% ~ 53.63%。

2.3 磁化氮肥溶液入渗模型分析与模型参数比较

表 2 为 Philip、一维代数以及 Green - Ampt 入渗模型参数拟合结果,决定系数均在 0.98 以上,说明 3 个模型均可很好地描述不同时间下累积入渗量变化过程。同磁化条件下,Philip 公式中 S 以及 Green - Ampt 公式中 K_s 、 $\bar{D}$ 随氮肥溶液浓度增大而增大,一

维代数公式中 m 以及 Green - Ampt 公式中 S_f 则随溶液浓度增大而有所减小。同浓度条件下,磁化氮肥溶液 S 、 K_s 以及 $\bar{D}$ 较未磁化溶液有所增大, S_f 和 m 有所减小,模型参数的一系列变化表明受溶液浓度和磁化作用的影响,土壤水分运移加快,透水入渗性能提高,这与累积入渗量和湿润锋运移距离的反映结果相同。

表 2 3 种入渗模型拟合分析结果
Tab.2 Analysis results of three models

磁化处理	氮肥溶液 质量浓度/ ($\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)	Philip 模型		一维代数模型		Green - Ampt 模型			
		$S/$ ($\text{cm}\cdot\text{min}^{-0.5}$)	R^2	m	R^2	$K_s/$ ($\text{cm}\cdot\text{min}^{-1}$)	S_f/cm	$\bar{D}/$ ($\text{cm}^2\cdot\text{min}^{-1}$)	R^2
未磁化	0	0.526	0.997	0.283	0.998	0.002 9	83.713	0.483	0.999
	0.4	0.557	0.997	0.276	0.999	0.003 5	75.408	0.525	0.999
	0.7	0.592	0.996	0.256	0.997	0.004 3	69.775	0.597	0.996
	1.1	0.625	0.997	0.252	0.998	0.004 8	69.770	0.666	0.999
磁化	0	0.586	0.997	0.277	0.997	0.004 2	68.771	0.575	0.999
	0.4	0.634	0.996	0.256	0.997	0.005 8	56.282	0.649	0.998
	0.7	0.711	0.995	0.249	0.997	0.007 3	56.725	0.824	0.997
	1.1	0.759	0.996	0.201	0.989	0.010 5	41.879	0.875	0.987

为进一步明确溶液浓度对入渗模型参数的影响程度,以同浓度氮肥溶液磁化前后模型参数的差值占未磁化的百分比作为衡量标准,计算各浓度氮肥溶液在磁化前后模型参数的相对变化率(图 3)。结果显示, S 、 K_s 、 $\bar{D}$ 相对变化率均为正值且与氮肥溶液浓度整体呈正比例变化,说明磁化后 S 、 K_s 和 $\bar{D}$ 的增大程度整体随氮肥溶液浓度增大而增大; m 和 S_f 相对变化率均为负值且与氮肥溶液浓度之间呈反比例变化,说明 m 、 S_f 磁化后的减小作用随氮肥溶液浓度增大逐渐加强。

利用式(9)对 Philip 和 Green - Ampt 入渗模型参数互相推求,结果如表 3 所示,各处理 S 、 K_s 、 S_f 的拟合值与计算值变化趋势一致,但具体表现有所不同,吸渗率 S 的计算值显著小于拟合值,相对误差绝对值不大于 12%,因此在氮肥溶液或磁场的作用下,已知 Green - Ampt 模型参数 K_s 、 S_f 可对 Philip 入渗公式的吸渗率 S 进行推求。各处理间 K_s 、 S_f 的计算值显

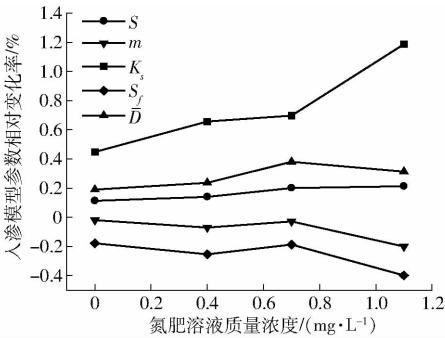


图 3 不同浓度氮肥溶液磁化前后入渗模型参数
相对变化率

Fig.3 Variations of infiltration model parameter indexes
relative to nitrogen fertilizer solution with different
concentrations before and after magnetization

著大于拟合值,未磁化条件下相对误差不大于 17%,磁化条件下相对误差最大为 30%,氮肥溶液磁化入渗条件下,Philip 和 Green - Ampt 入渗模型参数互推精度有所降低。

表 3 Philip 与 Green - Ampt 入渗公式参数互推结果

Tab.3 Extrapolation results of parameters of Philip and Green - Ampt infiltration formulas

模型参数		氮肥溶液质量浓度/(g·L ⁻¹)							
		未磁化				磁化			
		0	0.4	0.7	1.1	0	0.4	0.7	1.1
S	拟合值/(cm·min ^{-0.5})	0.526	0.557	0.592	0.625	0.586	0.634	0.711	0.759
	计算值/(cm·min ^{-0.5})	0.494	0.515	0.549	0.580	0.539	0.573	0.645	0.665
	相对误差/%	-6	-7	-7	-7	-8	-10	-9	-12
K _s S _f	拟合值/(cm ² ·min ⁻¹)	0.243	0.264	0.300	0.335	0.289	0.326	0.414	0.440
	计算值/(cm ² ·min ⁻¹)	0.275	0.308	0.349	0.389	0.341	0.400	0.503	0.572
	相对误差/%	13	17	16	16	18	23	21	30

2.4 磁化氮肥溶液对土壤水氮运移特征的影响

由图 4 可知,各处理含水率分布随入渗深度增加而不断减少,在达到相同湿润锋高度时,未磁化氮肥溶液在土层深度 15 cm 以上含水率分布受溶液浓度影响不大,后随累积入渗量增加,15 cm 以下含水率分布随溶液浓度增大而逐渐增大,磁化各浓度含水率分布情况与之相同。不同浓度氮肥溶液磁化后含水率分布存在差异,在剖面深度 15 cm 处,T0、T1、T2、T3 水平磁化较未磁化分别增大了 4.64%、6.64%、9.49% 和 10.15%,在氮肥溶液和磁场的共同作用下,M1T3 处理含水率最大,较 M0T0 增大了 13.66%。

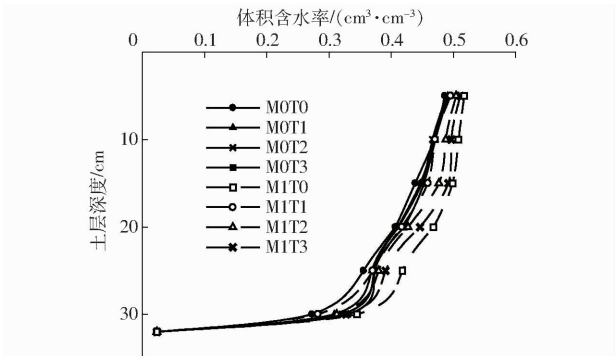


图 4 不同浓度氮肥溶液磁化前后土壤含水率分布特征
Fig. 4 Distribution characteristics of soil water content of nitrogen fertilizer solution with different concentrations before and after magnetization

用所求形状系数 m 反推土壤含水率,其理论值与实测值之间的关系如图 5 所示。各处理含水率理论值整体均略小于其实测值,对各处理土壤含水率进行平均绝对误差分析可知,未磁化条件下含水率平均绝对误差为 $0.0110 \sim 0.0166 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$,磁化条件下随氮肥溶液浓度增大平均绝对误差分别为

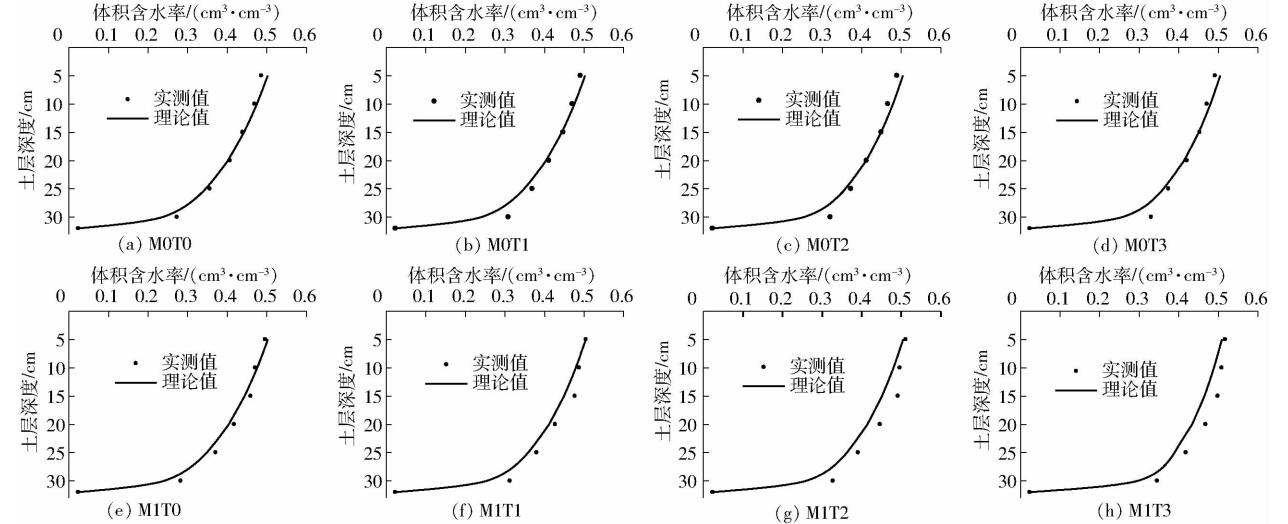


图 5 不同浓度氮肥溶液磁化前后土壤含水率理论值与实测值

Fig. 5 Theoretical and measured values of soil water content of nitrogen fertilizer solution with different concentrations before and after magnetization

0.0151 、 0.0188 、 0.0273 、 $0.0249 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$,误差均大于同浓度未磁化溶液,但一维代数入渗模型仍可很好地描述不同磁场强度下各浓度溶液土壤入渗结束时的土壤含水率分布情况。

由图 6 可知,各处理硝态氮含量分布情况大致相同,在土层深度 25 cm 以上硝态氮含量基本不变或以缓慢速度略有减小,因此可取其平均值进行差异性分析,结果如图 7 所示(图中不同小写字母表示处理间差异显著, $P < 0.05$),并于 30 cm 湿润锋附近急剧增加,这是由于硝态氮在对流与机械弥散的作用下随水分不断下移,后因含水率在湿润锋附近骤减导致对流作用减弱,上层硝态氮淋洗至此从而出现峰值。各处理硝态氮的具体分布情况有所不同,结合图 6、7 分析可知,T1、T2、T3 水平磁化前后硝态氮平均含量较 T0 分别增多了 11.87、19.81、22.15 mg/kg 和 7.75、12.70、16.95 mg/kg,相同磁化条件,硝态氮平均含量随氮肥溶液浓度增大呈显著增大趋势($P < 0.01$),这是因为硝酸钾氮肥溶液可直接补充土壤硝态氮,溶液浓度越高,留存湿润体内的硝态氮也就越多。T0、T1、T2、T3 水平氮肥溶液磁化入渗,土壤硝态氮含量分别提升了 385.29%、129.98%、81.51% 和 66.05%,相同浓度磁化条件下硝态氮含量均大于未磁化条件,磁化作用对氮肥溶液硝态氮平均含量有极显著影响($P < 0.01$)。

3 讨论

多项研究表明,磁化处理溶液理化性质的变化源于水分子氢键的变弱或断裂^[26-27],氮肥溶液磁处理后溶氧量显著提高,电导率和表面张力系数显著减小,并随溶液浓度变化有显著影响,但对 pH 值无

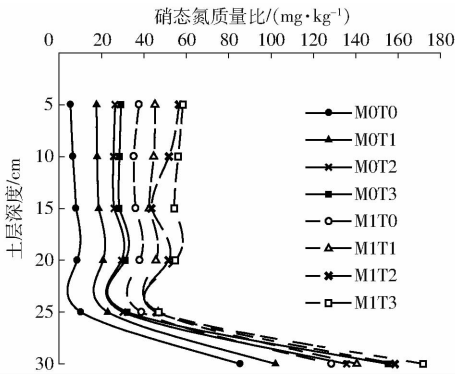


图 6 不同浓度氮肥溶液磁化前后土壤 NO_3^- -N 含量分布特征

Fig. 6 Distribution characteristics of soil NO_3^- -N of fertilizer solution with different concentrations before and after magnetization

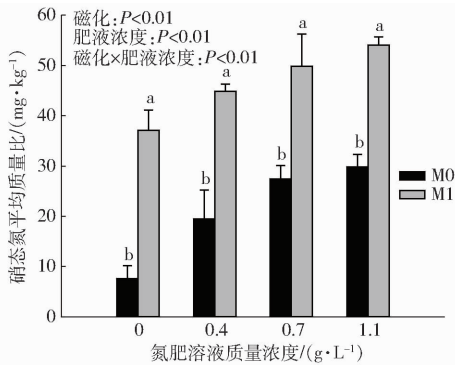


图 7 不同浓度氮肥溶液磁化前后土壤 NO_3^- -N 显著性分析

Fig. 7 Significant test of soil NO_3^- -N fertilizer solution with different concentrations before and after magnetization

显著影响,反映到对土壤入渗特征的影响,试验结果表明在氮肥溶液加快土壤水分入渗的基础上,磁处理进一步增大了相同入渗时间内的湿润锋迁移距离和累积入渗量,这与张瑞喜等^[12]的研究结果相似。此外,Philip、一维代数以及 Green - Ampt 入渗模型在磁化氮肥溶液条件下的拟合度依然很高,与未磁化溶液相比,模型参数 S 、 K_s 、 $\overline{D}$ 有所增大, S_f 、 m 有所减小,且变化程度随溶液浓度增大而增大,但 Philip 与 Green - Ampt 模型参数的互推精度有所降低。多项研究认为,淡水、微咸水经磁化处理后理化性质的改变是影响该土壤液体入渗过程以及模型参数变化的主要原因^[12-14],赵振保^[28]、和劲松等^[29]认为当液体表面张力减小时,分子从液体内部移至表面的功能变化减小,磁化后的液体分子更易铺展,同时减小了土壤与液滴的接触角,导致液体湿润范围增大,湿润能力增强。此外,液体磁化后溶氧量的增加使土壤湿润区和未湿润区的氧气浓度差增大,该浓度差在推动氧气扩散的同时促进了土壤水分运移,且在一定溶氧量范围内水分运移速率随溶氧量的增大

而增大^[30]。有研究表明液体经磁化后的溶解度有所增大^[9,31],以土壤盐分为例,盐分过高易造成土壤板结硬化,透水性变差^[19],参考溶氧量变化对水分运移的影响过程,通过对土壤盐分的溶解和淋洗,从而可带动水分进一步向下迁移。虽然本试验没有对土壤结构展开相关研究,但大量研究表明,采用磁化水浇灌土壤,可以增大土壤孔隙,增加孔隙以及微团聚体数量^[19,32-34],改善土壤物理性质,从而提供更多水分入渗通道,加速土壤水分运移。除此之外,本试验研究结果与前人研究不尽相同,AL-OGAIDI 等^[34]研究发现磁化水滴灌可以提高均匀土壤剖面的表面湿润半径,减小垂直湿润深度,这可能是因为磁处理条件的不同导致了液体理化性质的不同变化^[8-10,26,28,35-36],进而造成了入渗性能的差异,另一方面由于灌溉方式的不同,大田滴灌较一维垂直入渗边界范围增大,表面张力减小在于液-固界面夹角的减小^[26,37],液滴横向湿润范围不受限制,从而使横向湿润半径增大,纵向湿润深度减小。王全九等^[13-14]研究结果表明,即使在磁化后溶液理化性质变化相似的基础上,入渗试验结果也可能有所不同,由于土壤入渗性能受多种因素影响,当土壤所含微生物较多时,液体经磁化后灌溉导致土壤微生物活性增强,生物膜的大量增多阻塞了土壤部分孔隙,从而对土壤水分入渗起到了一定阻碍作用^[38]。

研究表明氮肥溶液和磁化处理均可以提高入渗结束后土壤的水氮含量,水氮含量随溶液浓度增大而增大。磁化氮肥溶液提高土壤含水率的原因可能是受液体分子磁化后氢键断裂以及范德华力变弱的影响,使原以氢键形式缔合的大型水分子簇变小,与部分离子发生反应的水分子得到释放^[39],从而形成了较多小型缔合水分子簇及单个水分子^[28,31],加强了水分子在相同土壤体积内小空隙的填充作用,并伴之液-固界面接触角的减小,液体分子更易进入土壤微孔^[37],土壤含水率得到提升。受氮肥溶液磁化后理化性质的变化以及磁场对土壤结构改善的影响,一维代数入渗公式在推算磁化氮肥溶液土壤含水率分布时精度有所降低,但整体可较好描述土壤含水率分布情况。氮肥溶液浓度和磁化作用对土壤硝态氮含量的影响呈正相关,但与磁化各浓度溶液入渗指标及含水率分布情况不同的是,清水磁化前后硝态氮含量增幅最大且上层土壤平均硝态氮含量大于土壤本底值,推测可能是因为磁化水酸碱度的降低、溶氧量的增加以及土壤酶活性的增强为土壤微生物反应创造了大量有利条件^[34,40],微生物活性增强^[41],从而导致即使在历时较短的入渗过程也有部分硝化反应发生,提高了土壤硝态氮供给能力,另

一方面液体经磁化后电子运动状态的改变使土壤对硝酸根的排斥作用减弱^[41-42],外加磁化水灌溉对土壤结构的改善,有效提高了土壤胶体对养分的固持能力^[17-18,43],从而增大了土壤上层硝态氮含量。此外,氮肥溶液经磁化后硝态氮含量的增加除上述原因外,变小的水分子簇也会携带部分肥液分子对土壤微孔进行填充,从而使硝态氮含量增大。综合可知,磁化氮肥溶液提高了硝态氮在土壤中的供给能力和固持能力。

水肥同时磁化对土壤入渗性能及水氮迁移过程的试验研究结果为农田高效灌溉施肥开辟了新的应用方向,通过科学设置磁化参数将磁化技术与水肥一体化农田节水技术相结合,不仅能够进一步开发资源潜能,提高水肥利用效率,节约成本,提高收益,同时磁化作为践行农业可持续发展的一门新技术,对建设资源节约型、环境友好型农业生产体系具有重要意义。

4 结论

(1)氮肥溶液磁化后电导率和表面张力系数显

著减小,溶氧量显著提高,溶氧量和表面张力系数相对变化率随溶液质量浓度增大而增大,pH 值略有减小,但影响并不显著。

(2)氮肥溶液和磁化作用均能够加快土壤水分向下运移,且磁化效果与溶液浓度成正相关变化。磁化条件下 Philip、一维代数以及 Green - Ampt 入渗模型拟合所得吸渗率 S 、饱和导水率 K_s 以及有效土壤水扩散率 $\bar{D}$ 较未磁化溶液有所增大,土壤水分特征曲线和非饱和导水率综合形状系数 m 和湿润锋处的土壤水吸力 S_f 有所降低,磁化前后模型参数相对变化率随溶液浓度增大而增大。Philip 和 Green - Ampt 淡水入渗模型在磁化氮肥溶液条件下依然适用,但两模型参数互推过程存在较大误差。

(3)氮肥溶液和磁化作用均可提高入渗结束后土壤含水率,且在磁化作用下含水率增量随溶液浓度增大而增大,一维代数入渗公式可较好地描述不同磁场强度下各浓度溶液土壤入渗结束时的土壤含水率分布情况。氮肥溶液和磁化作用均可显著提高入渗结束后土壤硝态氮含量,磁化条件下硝态氮含量随溶液浓度增大而增大,这有利于土壤无机氮素的保持。

参 考 文 献

[1] 赵吉红. 水肥一体化技术应用中存在的问题及解决对策[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2015.
ZHAO Jihong. The problems and solutions in the adaption of fertigation technology[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2015. (in Chinese)

[2] 樊毅. 土壤水分入渗的影响因素概述[C]//节水农业技术创新与生物节水交流研讨会,2010:5-7.

[3] 吕刚,吴祥云. 土壤入渗特性影响因素研究综述[J]. 中国农学通报,2008,24(7):494-499.
LÜ Gang, WU Xiangyun. Review on influential factors of soil infiltration characteristics[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2008, 24(7):494-499. (in Chinese)

[4] 李雪转,樊贵盛,王雪,等. 影响土壤入渗积水时间因素的试验[J]. 农业工程学报,2009,25(9):27-31.
LI Xuezhuan, FAN Guisheng, WANG Xue, et al. Experiments on factors affecting ponding time under soil infiltration conditions [J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(9):27-31. (in Chinese)

[5] 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)

[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] ESMAEILNEZHAD E, CHOI H J, SCHAFFIE M, et al. Characteristics and applications of magnetized water as a green technology[J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 161:908-921.

[8] HOLYSZ L, SZCZES A, CHIBOWSKI E, et al. Effects of a static magnetic field on water and electrolyte solutions[J]. Journal of Colloid Interface Science, 2007, 316(2):996-1002.

[9] 朱元保,颜流水,曹祉祥,等. 磁化水的物理化学性能[J]. 湖南大学学报(自然科学版),1999,26(1):21-25.
ZHU Yuanbao, YAN Liushui, CAO Zhixiang, et al. Physical and chemical properties of magnetized water[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences Edition), 1999, 26(1):21-25. (in Chinese)

[10] 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. Experimental 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)

[11] KHOSRAVESH M, MOSTAFAZADEH-FARD B, MOUSAVI S F, et al. Effects of magnetized water on the distribution pattern of soil water with respect to time in trickle irrigation[J]. Soil Use and Management, 2011, 27(4):515-522.

[12] 张瑞喜,王卫兵,褚贵新,等. 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, et al. Impacts of magnetized water irrigation on soil infiltration and soil salt leaching[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2014, 47(8):1634-1641. (in Chinese)

[13] 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]. 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]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2017,48(7):198-206. (in Chinese)

[14] 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 Quanjiu, XIE Jiangbo, ZHANG Jihong, 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. (in Chinese)

[15] 丁倩. 磁化微咸水膜下滴灌土壤水盐分布及棉花生长特征研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2018.
DING Qian. Study on soil water and salt distribution and cotton growth characteristics of drip irrigation with film under magnetized brackish water[D]. Xi'an: Xian University of Technology, 2018. (in Chinese)

[16] HILAL M H. Application of magnetic technologies in desert agriculture. II -effect of magnetic treatments of irrigation water on salt distribution in olive and citrus fields and induced changes of ionic balance in soil and plant[J]. Egyptian Journal of Soil Science, 2000, 40(3):423 - 435.

[17] 刘秀梅, 郭建曜, 朱红, 等. 磁化微咸水灌溉对土壤养分特征的影响[C] // 中国环境科学学会学术年会, 2016:3725 - 3733.

[18] 王淦, 郭建曜, 毕思圣, 等. 磁化咸水灌溉对葡萄生长和土壤矿质养分的影响[J]. 果树学报, 2019, 36(12):1683 - 1692.
WANG Lu, GUO Jianyao, BI Sisheng, et al. Effects of irrigation with magnetized saline water on *Vitis vinifera* growth and soil mineral nutrients[J]. Journal of Fruit Science, 2019, 36(12):1683 - 1692. (in Chinese)

[19] MOUSSA M, HALLAIRE V, MICHOT D, et al. Micro- and macrostructure changes of soil under irrigation with electromagnetically treated water[J]. Soil Tillage Research, 2020, 203:104690.

[20] 何兴华, 程昌明, 陈杰, 等. 磁化水对作物种子的生物效应研究[J]. 西南农业大学学报, 2003, 25(2):120 - 122.
HE Xinghua, CHENG Changming, CHEN Jie, et al. Biological effects of magnetized water for crops seeds[J]. Journal of Southwest Agricultural University, 2003, 25(2):120 - 122. (in Chinese)

[21] 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)

[22] PHILIP J R. The theory of infiltration:1. The infiltration equation and its solution[J]. Soil Science, 1957, 83(5):345 - 358.

[23] 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.

[24] WANG Q, HORTON R, SHAO M. Algebraic model for one-dimensional infiltration and soil water distribution[J]. Soil Science, 2003, 168(10):671 - 676.

[25] 雷志栋, 杨诗秀, 谢森传. 土壤水动力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1988.

[26] 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 Phys. Sin. 2011, 60(6):432 - 439. (in Chinese)

[27] TOLEDO E, 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, 888(1 - 3):409 - 415.

[28] 赵振保. 磁化水的理化特性及其煤层注水增注机制[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2008, 27(2):192 - 194.
ZHAO Zhenbao. Physicochemical properties of magnetized water and coal seam injection mechanism[J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science), 2008, 27(2):192 - 194. (in Chinese)

[29] 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 associativ structure[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(21):293 - 300. (in Chinese)

[30] 孙燕, 朱梦杰, 王全九, 等. 加氧微咸水溶氧量对土壤水盐运移特征的影响[J]. 农业机械学报, 2019, 50(6):299 - 305.
SUN Yan, ZHU Mengjie, WANG Quanjiu, et al. Effect of dissolved oxygen content of oxygenated brackish water on soil water and salt transport[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(6):299 - 305. (in Chinese)

[31] YADOLLAHPOUR A, RASHIDI S. Effects of magnetic treatment of irrigation water on the quality of soil: a comprehensive review[J]. Indo American Journal of Pharmaceutical Sciences, 2017, 4(5):1125 - 1129.

[32] 张富仓, 张一平, 白锦麟, 等. 磁场对壤土理化性质影响的研究[J]. 西北农业学报, 1992, 1(3):46 - 48.
ZHANG Fucang, ZHANG Yiping, BAI Jinlin, et al. Studies on effect of magnetic treatment on lou soil physico-chemical properties[J]. Acta Agriculturae Borealisinica Sinica, 1992, 1(3):46 - 48. (in Chinese)

[33] 敬如岩. 磁化水灌溉对设施蔬菜土壤和蔬菜品质的影响[D]. 泰安: 山东农业大学, 2018.
JING Ruyan. Effect of magnetic water irrigation on vegetables soil and quality of vegetables under facility[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2018. (in Chinese)

[34] AL-OGAIDI A A M, WAYAYOK A, ROWSHON M K, et al. The influence of magnetized water on soil water dynamics under drip irrigation systems[J]. Agricultural Water Management, 2017, 180(14):70 - 77.

[35] 赵善宇. 磁化水混凝土性能研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2005.
ZHAO Shanyu. Research on the properties of concrete with magnetic water[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2005. (in Chinese)

[36] 张伟伟, 张志峰, 薄华涛, 等. 磁化水性能的时效性研究[J]. 机电工程技术, 2020, 49(2):71 - 73.
ZHANG Weiwei, ZHANG Zhifeng, BO Huatao, et al. Study on the timeliness of performance of magnetized water[J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2020, 49(2):71 - 73. (in Chinese)

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

[38] MAGESAN G N, WILLIAMSON J C, YEATES G W, et al. Wastewater C: N ratio effects on soil hydraulic conductivity and potential mechanisms for recovery[J]. Bioresource Technology, 2000, 71(1):21 - 27.

[39] SURENDRAN U, SANDEEP O, JOSEPH E J. The impacts of magnetic treatment of irrigation water on plant, water and soil characteristics[J]. Agricultural Water Management, 2016, 178:21 - 29.

[40] MAHESHWARI B L, GREWAL H S. Magnetic treatment of irrigation water: its effects on vegetable crop yield and water productivity[J]. Agricultural Water Management, 2009, 96(8):1229 - 1236.

[41] 朱红. 磁化处理对咸水灌溉和施氮条件下‘夏黑’葡萄生长和生理特性的影响[D]. 泰安: 山东农业大学, 2018.
ZHU Hong. The effects of magnetization treatment on growth and physiological characteristics of *Vitis vinifera* × *V. labrusca* ‘Summer black’ under saline water irrigation and nitrogen application[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2018. (in Chinese)

[42] 克拉辛, 毛钜凡. 磁化水[M]. 北京: 计量出版社, 1982.

[43] 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)