

磁化微咸水一维水平吸渗特征与水分运动参数分析

单鱼洋¹ 李晓菊¹ 王全九^{1,2} 马晨光¹ 张继红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: 为探明磁化微咸水的水分运动规律,通过室内一维水平土柱吸渗试验,研究了不同矿化度(0.14、2.3、4、6 g/L)磁化微咸水的水平吸渗特征及其对土壤水分运动参数的影响。结果表明:不同矿化度的磁化微咸水最终累积入渗量与湿润锋深度均显著降低,湿润体平均含水率比未磁化微咸水增加了2.03%~6.11%,磁化微咸水入渗能够增强土壤持水能力,有利于改善土壤水分分布。相对于未磁化微咸水,磁化微咸水 PHILIP 入渗模型吸渗率 S 降低了7.71%~12.11%;磁化与未磁化微咸水的饱和导水率 K_s 、相对饱和导水率 ΔK_s 均与入渗水矿化度呈现较好的二次多项式关系。微咸水经过磁化处理后,BROOKS-COREY 模型形状系数 n 相对减小,而进气吸力 h_a 相对增大;土壤非饱和导水率及其增长速率均降低,而相同土壤水吸力能够吸持的土壤含水率增加;土壤水分饱和和扩散率 D_s 与起始扩散的土壤含水率均有所增加。研究表明,磁化微咸水入渗过程中的土壤水分运动参数发生了改变,其作用效果与微咸水矿化度密切相关。

关键词: 磁化微咸水; 矿化度; 水平吸渗; 水分运动参数

中图分类号: S152 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2021)02-0266-09

OSID:



Analysis of One-dimensional Horizontal Absorption Characteristics and Water Movement Parameters of Magnetized Brackish Water

SHAN Yuyang¹ LI Xiaojun¹ WANG Quanjiu^{1,2} MA Chenguang¹ ZHANG Jihong¹ WEI Kai¹

(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: It is the basis for revealing the mechanism of the effect of magnetized brackish water on soil water movement parameters to predict the water movement of magnetized brackish water in field. A one-dimensional horizontal soil column experiment was carried out to study the horizontal absorption characteristics of magnetized brackish water with different salinities (0.14 g/L, 2 g/L, 3 g/L, 4 g/L and 6 g/L) and its influence on soil water movement parameters. The results showed that the final cumulative infiltration and the depth of wetting front of magnetized brackish water were decreased significantly, while the average moisture content of the final wetted body was increased by 2.03%~6.11%. Magnetized brackish water infiltration could increase the soil water holding capacity, which was beneficial to improve the distribution of soil moisture. The absorption rate S in PHILIP infiltration model of magnetized brackish water was 7.71%~12.11% lower than that of unmagnetized brackish water, and the relationship between saturation conductivity K_s and relative saturation conductivity ΔK_s of magnetized and unmagnetized brackish water and salinity of infiltration water was quadratic polynomial. After magnetization of brackish water, the shape coefficient n of BROOKS-COREY model was decreased relatively, while the suction h_a was increased relatively. The soil water content that can be absorbed by the same soil water suction was increased, while the unsaturated conductivity and its growth rate were decreased. The saturated diffusivity D_s and the initial diffusivity soil water content were also increased. The results showed that the soil water movement parameters were changed in the process of magnetized

收稿日期: 2020-05-25 修回日期: 2020-06-22

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(41830754)、国家自然科学基金-山东联合基金项目(U1706211)、国家自然科学基金面上项目(51679190)、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: 单鱼洋(1982—),男,讲师,主要从事盐碱地改良与微咸水高效利用研究,E-mail: syy031@126.com

brackish water infiltration, and its effect was closely related to the salinity of brackish water, which provided theoretical support and guidance for the rational use of magnetized brackish water irrigation.

Key words: magnetized brackish water; salinity; horizontal absorption; water movement parameters

0 引言

淡水资源短缺严重制约着我国农业生产力的发展。为了缓解淡水资源不足、提高水资源利用率,科学合理地开发利用微咸水已成为缓解水资源供需矛盾的重要途径之一^[1]。然而,微咸水灌溉容易引发土壤盐渍化,导致土壤结构变差,从而影响作物生长和产量^[2-3]。因此,对微咸水进行科学处理、改善微咸水理化品质,成为微咸水安全、高效利用的关键。

大量研究表明,磁化后水的理化特性发生显著改变^[4-5],其表面张力减小^[6]、粘滞系数增加^[7],磁化水理化性质的改变程度与水体中离子含量有关^[8-9]。基于对磁化水理化性质的认识,磁化水处理技术逐渐应用于农业灌溉领域。GHANATI等^[10]研究发现,磁化水灌溉可以有效提高玉米产量和品质,玉米植株籽粒中的铁与钙含量分别提高了235%和185%。MAHESHWARI等^[11]研究表明,磁化水尤其是磁化盐水能够有效提高控制环境条件下芹菜和雪豆的产量与水分生产力。SURENDRAN等^[12]研究指出,不同盐度的灌溉水经过磁化处理后对豌豆生长和产量提高均有明显的改善作用。卜东升等^[13]通过3年的大田试验研究了磁化水膜下滴灌对新疆棉田土壤脱盐效果的影响,结果表明,磁化水能够有效降低土壤含盐量、促进棉花生长发育、提高棉花产量和品质。万晓等^[14]研究发现,高矿化度灌溉水通过磁化处理后可以有效提高绒毛白蜡的光合作用,促进其生长,从而减轻盐分对植物的伤害。刘秀梅等^[15]研究表明,磁化微咸水灌溉能够改变土壤盐基离子的交换特性和离子组成,对降低土壤盐分积聚有良好的作用。虽然磁化微咸水在农业灌溉应用方面取得了诸多成果,但是对于磁化微咸水在土壤中的运动规律尚缺乏清晰的认识,这不利于磁化微咸水在农业灌溉领域的进一步应用。

近年来,研究者尝试通过室内土柱试验来揭示磁化微咸水在土壤中的运动状况。VLADIMIR^[16]通过大型室内垂直土柱试验发现,磁化水入渗能够将土壤上层盐分向下淋洗,降低了土壤中盐分累积速率。王全九等^[17-18]通过大量室内一维垂直积水入渗试验发现,微咸水经过磁化处理后土壤入渗速率及湿润锋迁移速率显著降低,矿化度与磁场强度均对入渗模型参数有显著影响,磁化微咸水盐分淋洗效应在磁场强度为300 mT时最佳。为了进一步了

解磁化微咸水在田间的水分运动状况,有必要对磁化微咸水入渗下的土壤水分特征曲线、非饱和导水率曲线及非饱和扩散率曲线等土壤水分运动参数进行深入研究。WANG等^[19-20]提出了采用水平吸渗数据推求土壤水分动力参数的方法,这为获得磁化微咸水入渗下的土壤水分运动参数提供了便利。本文采用300 mT磁感应强度恒定磁场对不同矿化度(0.14、2、3、4、6 g/L)微咸水进行磁化处理,并基于一维水平土柱吸渗试验,比较不同矿化度磁化与未磁化微咸水水平吸渗与土壤含水率分布特征,分析磁化微咸水矿化度对入渗模型参数、饱和导水率及土壤水分运动参数的影响,研究磁化微咸水入渗下的土壤水分运动特性,为磁化微咸水灌溉技术的合理利用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试土样取自陕西省渭南市富平县卤泊滩(34°42'N,108°57'E),采集深度为0~20 cm的耕作层。将土样碾压、风干,去除杂物且过2 mm筛后备用。采用激光粒度分析仪(Mastersizer2000型,马尔文仪器有限公司,英国)测定土壤机械组成,黏粒、粉粒和砂粒体积分数分别为8.37%、49.98%、41.65%,土壤质地为粉壤土(国际制土壤质地分类标准)。环刀法测定土壤容重为1.46 g/cm³,土壤初始体积含水率与土壤饱和体积含水率分别为0.033、0.420 cm³/cm³,pH值为8.4。

试验所用微咸水由自来水和氯化钠配置而成,自来水矿化度为0.14 g/L,pH值为7.2。设置5个矿化度处理,分别为0.14、2、3、4、6 g/L。采用王全九等^[17]所述的磁化水装置(磁化器磁场强度为300 mT)与磁化方法对不同矿化度微咸水进行磁化处理,并移入马氏瓶内待用。

1.2 试验方法

试验于2019年6月6日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,采用一维水平土柱吸渗系统开展不同矿化度(0.14、2、3、4、6 g/L)的非磁化微咸水(CK)与磁化微咸水(M)入渗试验,共计10个处理,每个处理进行3次重复,总计30个水平土柱试验。一维水平土柱吸渗系统(图1)由马氏瓶和水平土柱两部分构成,而水平土柱由水室和土室两部分构成。马氏瓶直径为

5 cm, 高为 50 cm, 用于补充水室。水室内径为 8 cm, 长为 10 cm, 前端设有进水阀, 上端设有加水阀, 下端设有排水阀。土室与水室内径相同, 长为 50 cm, 上部每隔 5 cm 设置一个取土孔, 取土孔直径为 1.5 cm。装土柱时, 先用橡皮塞将土室取土孔塞紧, 然后将土样按容重 1.46 g/cm^3 、每 5 cm 一层分层装入土室, 并将层与层之间打毛, 避免出现分层现象。装土完毕后, 在土体顶部放置一张滤纸, 然后通过带孔法兰盘将土室和水室紧密连为一体。组装好的水平土柱放置在水平试验台上, 调整工作台高度, 使马氏瓶出水口与水室前端进水阀在同一水平上, 然后通过乳胶管相连接。吸渗试验以 5 个土柱为一组, 30 个土柱试验分 6 组完成。试验开始时, 通过加水阀在水室内蓄满水, 在整个截面上为土室供水, 同时打开马氏瓶出水管止水夹及时补充水室, 保持吸渗的过程中水室始终充满水。采用秒表按照先密后疏的原则分别记录各处理的入渗时间、湿润锋运移位置和马氏瓶水位的变化。本试验控制吸渗时间相同, 各处理均在入渗 900 min 后停止供水, 并迅速打开出水阀将水室中的积水放出, 依据实际入渗深度从上侧取土孔处分层取出土样测定对应的含水率。

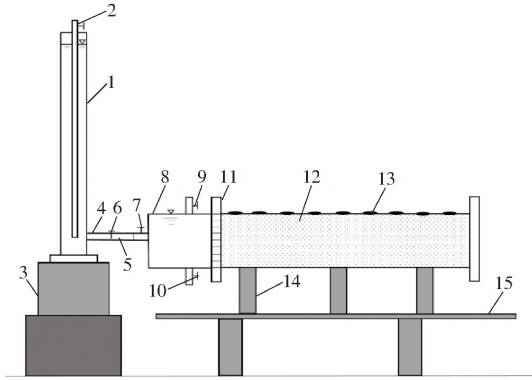


图1 一维水平吸渗土柱系统

Fig. 1 One-dimensional horizontal absorption soil column system

1. 马氏瓶 2. 进水口 3. 升降台 4. 出水口 5. 乳胶管 6. 止水夹 7. 进水阀 8. 水室 9. 加水阀 10. 排水阀 11. 带孔法兰盘 12. 土室 13. 取土孔 14. 土柱支架 15. 试验平台

采用定水头法测定不同矿化度磁化微咸水入渗下的土壤饱和导水率。选用直径为 8 cm、高为 20 cm 的较短的有机玻璃土柱, 在土柱底部填放纱布和滤纸, 防止土壤颗粒流失堵塞出流孔口, 同样按土壤容重 1.46 g/cm^3 、每 5 cm 一层分层装入土柱中, 装土高度 10 cm。先将土柱置于不同矿化度磁化微咸水中充分饱和, 然后控制水头 3 cm 左右, 打开出流阀, 记录一定时间段内的渗透水量, 各试验重复 3 次。

1.3 基本原理

PHILIP^[21] 水平一维吸渗公式累积入渗量可表示为

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

式中 I ——累积入渗量, cm

S ——土壤吸渗率, $\text{cm/min}^{0.5}$

t ——入渗时间, min

土壤水分运动参数是模拟和预测土壤水分运动的基础, BROOKS 等^[22] 提出的土壤水分特征曲线和土壤非饱和导水率的表达式为

$$S_e = \begin{cases} \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left(\frac{h_d}{h}\right)^n & (h \geq h_d) \\ 1 & (h < h_d) \end{cases} \quad (2)$$

$$K(h) = K_s \left(\frac{h_d}{h}\right)^m = K_s S_e^{\frac{m}{n}} \quad (3)$$

$$m = 3n + 2$$

式中 S_e ——土壤有效饱和度

θ ——土壤含水率, cm^3/cm^3

θ_r ——土壤滞留含水率, 当土壤初始含水率较低时, 认为滞留含水率与初始含水率相等, cm^3/cm^3

θ_s ——土壤饱和含水率, cm^3/cm^3

h ——土壤水吸力, cm

h_d ——进气吸力, cm

n ——形状系数

$K(h)$ ——土壤非饱和导水率, cm/min

K_s ——土壤饱和导水率, cm/min

m ——经验系数

水平一维土壤水分运动基本方程与定解条件可表示为

$$\begin{cases} \frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) \\ \theta(x, 0) = \theta_i \\ \theta(0, t) = \theta_s \\ \theta(\infty, t) = \theta_i \end{cases} \quad (4)$$

式中 x ——水平距离, cm

$D(\theta)$ ——非饱和土壤水分扩散率, cm^2/min

θ_i ——土壤初始含水率, cm^3/cm^3

WANG 等^[19] 提出了根据水平吸渗试验资料推求 BROOKS - COREY 模型参数的方法, 计算式为

$$n = \sqrt{\frac{\theta_s - \theta_r}{A_1 + \theta_i - \theta_r}} - 1 \quad (5)$$

$$h_d = \frac{A_2}{anK_s} \quad (6)$$

式中 a ——参数, 当初始含水率很小时, 近似为 1

A_1 和 A_2 可以由水平吸渗过程中的累积入渗量 I 、入渗率 i 与湿润锋深度 x_f 拟合获得,即

$$I=A_1x_f \tag{7}$$

$$i=A_2/x_f \tag{8}$$

WANG等^[20]提出了根据水平吸渗试验资料推求非饱和土壤水分扩散率的简单方法,计算式为

$$D(\theta)=D_s\left(\frac{\theta-\theta_r}{\theta_s-\theta_r}\right)^L \tag{9}$$

其中
$$D_s=\frac{A_1A_2}{(\theta_s-\theta_i)(\theta_s-\theta_i-A_1)} \tag{10}$$

$$L=\frac{A_1}{\theta_s-\theta_i-A_1}-1 \tag{11}$$

式中 D_s ——土壤水分饱和扩散率,cm²/min
 L ——扩散率系数

2 结果与分析

2.1 不同矿化度磁化微咸水对土壤入渗特征的影响

图2(图中不同小写字母表示同一入渗水矿化度下磁化与非磁化处理间差异显著($P<0.05$))为入渗结束时(900 min)不同矿化度磁化与未磁化微咸水的最终累积入渗量与湿润锋深度。由图2a可知,磁化与未磁化微咸水最终累积入渗量均随着入渗水矿化度先增大后减小,入渗水矿化度为3 g/L时最终累积入渗量最大,相比淡水(0.14 g/L)增加了18.81%。相同矿化度下,磁化与未磁化微咸水最终累积入渗量差异性显著($P<0.05$),矿化度0.14、2、3、4、6 g/L磁化微咸水最终累积入渗量相对于未磁化微咸水分别降低了7.72%、11.50%、12.10%、10.56%、9.85%。由图2b可知,最终湿润

锋深度也随着入渗水矿化度先增大后减小,入渗水矿化度为3 g/L时最终湿润锋深度最大。相同矿化度下,磁化与未磁化达到最终湿润锋深度差异性显著($P<0.05$),矿化度0.14、2、3、4、6 g/L磁化微咸水相对于未磁化微咸水最终湿润锋深度分别降低了9.56%、13.76%、17.17%、14.07%、12.94%。以上表明,入渗水矿化度增加能够在一定程度上增加土壤入渗速率,而磁化处理不同程度地降低了微咸水的入渗速率与湿润锋推进速度,且其作用效果与微咸水矿化度有关,这与王全九等^[17]不同矿化度磁化微咸水垂直一维积水入渗的累积入渗量与湿润锋变化特征一致。其原因主要是微咸水矿化度在一定程度导致扩散双电子层向黏粒表面压缩,土壤颗粒之间的排斥力降低,促进颗粒间絮凝与团聚体形成,增加了土壤孔隙数量,进而加快水分入渗^[23];入渗水经过磁化处理后,表面张力减小^[24],粘滞系数增加^[25],从而降低了土壤的导水性能^[17],湿润锋的推进速度也随之降低,而随着入渗水矿化度的增加,水中顺磁性物质数量的增加强化了磁场对入渗水的作用^[8]。入渗结束时(900 min),矿化度0.14、2、3、4、6 g/L磁化与未磁化微咸水,湿润体平均含水率分别为0.363 3、0.367 4、0.358 0、0.363 8、0.361 8 cm³/cm³和0.370 7、0.377 0、0.379 9、0.378 6、0.374 6 cm³/cm³,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2.03%、2.62%、6.11%、4.08%、3.55%。这是由于磁化处理导致入渗水的缔合态水分子团簇结构分散成自由单体和二聚体分子^[6,26],更多的水分进入土壤小孔隙,从而提高了湿润体含水率。

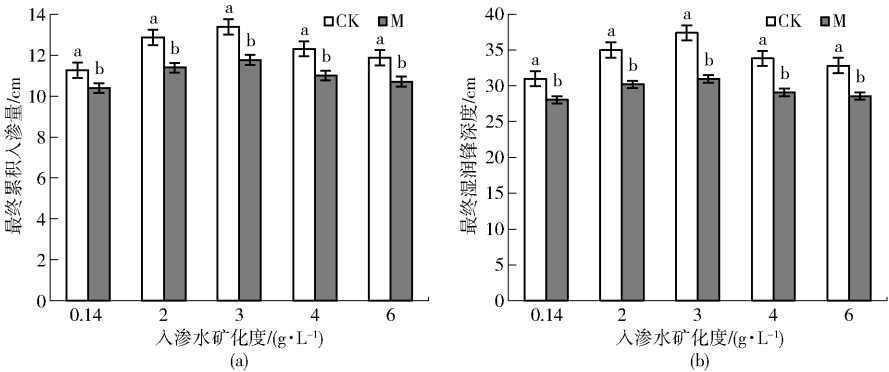


图2 磁化与非磁化微咸水入渗的最终累积入渗量与湿润锋深度

Fig.2 Final cumulative infiltration amount and wetting front depth of magnetized and unmagnetized brackish water infiltration

2.2 不同矿化度磁化微咸水对土壤含水率分布的影响

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如图3所示。由图可以看出,随着水平距离的增加,土壤含水率逐渐减小。在水平吸

渗过程中,由于土体前端与水室相接,导致前端3~5 cm土壤含水率处于饱和或近饱和状态。入渗结束后不同矿化度、磁化与未磁化微咸水中间土层含水率差异显著,且不同水平距离土壤含水率分布情况不同。在水平距离0~25 cm,磁化处理对应的土

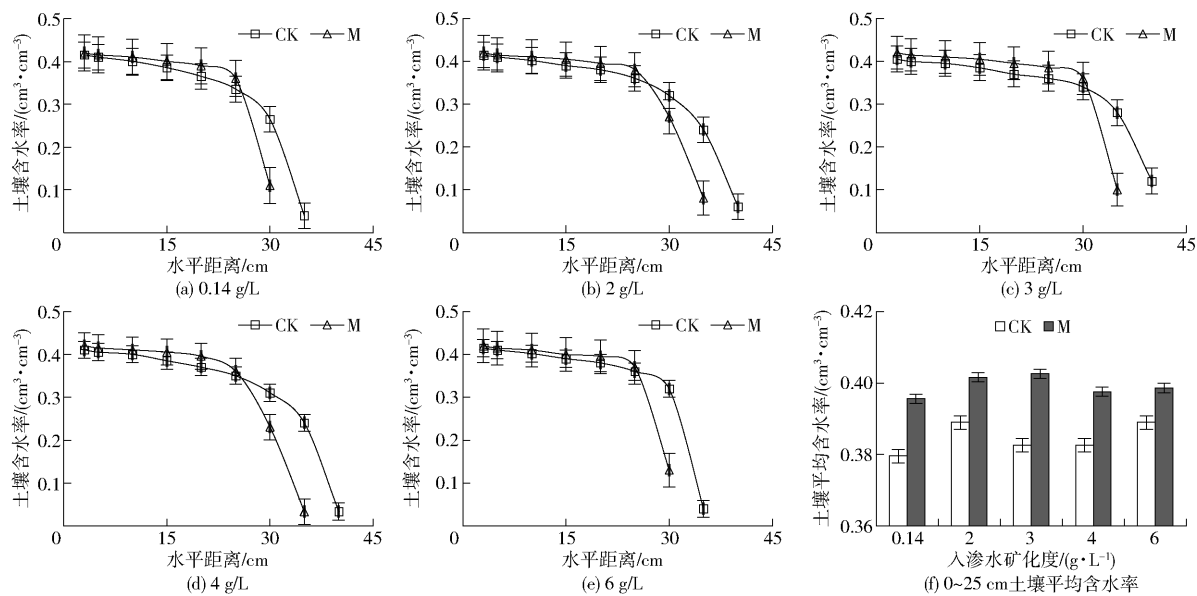


图3 磁化与非磁化微咸水入渗下的土壤含水率分布

Fig.3 Distributions of soil water content under magnetized and unmagnetized brackish water infiltration

壤含水率大于未磁化处理,水平距离大于 25 cm,未磁化处理土壤含水率逐渐接近并大于磁化处理土壤含水率。对比不同处理水平距离 0 ~ 25 cm 土壤平均含水率,矿化度 0.14、2、3、4、6 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 4.21%、3.24%、5.23%、3.92%、2.47%。这一方面是由于磁化处理增加了入渗水黏度^[25],导致水分在前部土壤中滞留时间增加,进入后面土壤的水分减少;另一方面是由于微咸水经过磁化处理后,缔合态水分子团簇结构变得更加分散^[6,26],使水分子能够进入并湿润更小土壤孔隙。

2.3 不同矿化度磁化微咸水对入渗模型参数与土壤饱和和导水率的影响

利用 PHILIP 入渗模型对累积入渗量与入渗时间的关系进行拟合,结果见表 1。PHILIP 入渗模型对磁化与非磁化微咸水入渗过程拟合效果很好,决定系数不小于 0.972。吸渗率 S 反映基质势梯度对土壤入渗的影响,磁化微咸水吸渗率 S 随矿化度的增加先增大后减少,且均小于同一矿化度未磁化微

表1 PHILIP 入渗模型参数拟合结果

Tab.1 Fitting results of PHILIP infiltration model parameters

参数	处理	入渗水矿化度/(g·L ⁻¹)				
		0.14	2	3	4	6
吸渗率 S /(cm·min ^{-0.5})	CK	0.376	0.429	0.446	0.410	0.396
	M	0.347	0.380	0.392	0.367	0.357
决定系数 R^2	CK	0.983	0.976	0.974	0.978	0.985
	M	0.975	0.991	0.987	0.993	0.972

咸水吸渗率,矿化度 0.14、2、3、4、6 g/L 磁化微咸水相对于未磁化微咸水吸渗率 S 分别降低了 7.71%、11.42%、12.11%、10.49%、9.85%。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,而磁化处理后入渗水表面张力减小是导致土壤吸渗率 S 降低的重要原因。

实测的未磁化微咸水饱和和导水率 K_s 与矿化度 C 之间的关系见图 4a。由图 4a 可以看出,与吸渗率 S 的变化规律相似,随着入渗水矿化度的增加,饱和和导水率 K_s 先增大后减小,当微咸水矿化度为 3 g/L 时,

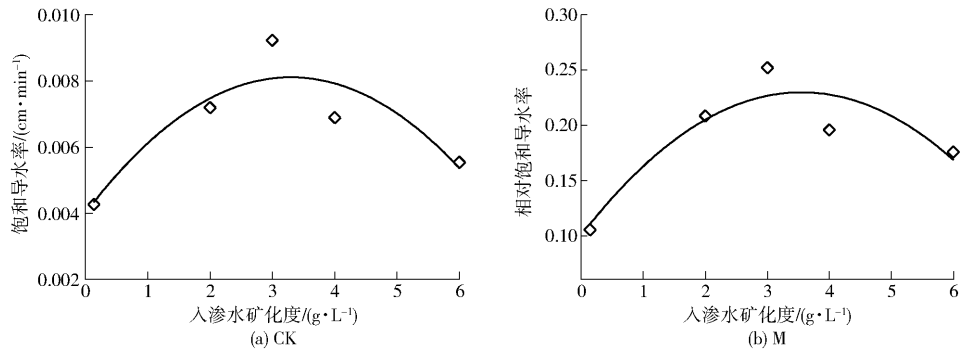


图4 磁化与非磁化微咸水饱和和导水率与相对饱和和导水率变化曲线

Fig.4 Saturation conductivity and relative saturation conductivity of magnetized and unmagnetized brackish water

K_s 取得最大值。采用二项式进行拟合,拟合方程为

$$K_s = -0.0004C^2 + 0.0025C + 0.004$$
$$(R^2 = 0.8204) \tag{12}$$

采用相对饱和导水率 ΔK_s 分析磁化微咸水矿化度对土壤饱和导水率的影响程度。由图 4b 可知,相对饱和导水率 ΔK_s 随 C 也呈现先增大后减小的趋势,采用二项式进行拟合,拟合结果显示,相对饱和导水率 ΔK_s 同矿化度之间呈现较好的二次多项式关系,拟合方程为

$$\Delta K_s = -0.0155C^2 + 0.0926C + 0.0924$$
$$(R^2 = 0.9194) \tag{13}$$

根据式(12)可知,随着入渗水矿化度的升高,磁化处理对于土壤饱和导水率的影响也逐渐增大,当矿化度大于 3 g/L 时,磁化效果逐渐降低。这一实测结果验证王全九等^[17] 根据垂直一维积水入渗数据推求所得的不同矿化度磁化微咸水饱和导水率变化规律。

2.4 不同矿化度磁化微咸水入渗对 BROOKS – COREY 模型参数的影响

根据水平吸渗试验数据,利用式(7)、(8)对系数 A_1 、 A_2 进行拟合,结果如表 2 所示。拟合结果较好,拟合决定系数均不小于 0.957。磁化微咸水的系数 A_1 均大于未磁化微咸水,而系数 A_2 均小于未磁化水。由此可知,入渗相同距离时,磁化微咸水的累积入渗量大于未磁化水,而入渗速率小于未磁化水,这与磁化与非磁化微咸水累积入渗量和湿润锋变化

规律一致。

将拟合的 A_1 、 A_2 和实测的饱和导水率 K_s 代入式(5)、(6),推求出形状系数 n 、进气吸力 h_d 与经验系数 m ,结果如表 3 所示。不同矿化度磁化与未磁化微咸水入渗条件下,形状系数 n 随着矿化度增加呈现先增大后减小的趋势。入渗水矿化度为 3 g/L 时形状系数 n 相对淡水(0.14 g/L)降低了 10.69%,而进气吸力 h_d 变化趋势正好相反,进气吸力 h_d 相对增加了 33.97%。微咸水经过磁化处理后,形状系数 n 相对减小,幅度为 19.24% ~ 52.31%,而进气吸力 h_d 相对增大,幅度为 22.52% ~ 48.94%。由此可见,入渗水理化特性的变化能够对土壤水分运动参数产生重要影响。

表3 BROOKS – COREY 模型参数反推结果
Tab.3 Reversed results of BROOKS – COREY

		model parameters				
参数	处理	矿化度/(g·L ⁻¹)				
		0.14	2	3	4	6
n	CK	0.257	0.261	0.285	0.251	0.263
	M	0.208	0.163	0.136	0.154	0.179
h_d /cm	CK	18.19	20.22	24.38	23.64	21.94
	M	22.66	28.01	36.31	30.36	26.88
m	CK	2.771	2.783	2.854	2.754	2.788
	M	2.623	2.489	2.407	2.463	2.537

为了更清楚地显示磁化与未磁化微咸水入渗下土壤水分运动特性,将反推的形状系数 n 、进气吸力 h_d 与经验系数 m 代入式(2)、(3),得到矿化度 0.14、3、6 g/L 磁化与未磁化微咸水入渗下土壤水分特征曲线(图 5)与非饱和导水率曲线(图 6)。由图 5 可以看出,土壤水吸力随着土壤含水率的增加迅速降低,磁化微咸水的土壤水分特征曲线相比未磁化微咸水更陡,相同土壤水吸力能够吸持更多的磁化微咸水,当土壤水吸力为 800 cm 时,矿化度 0.14、3、6 g/L 磁化微咸水土壤含水率相比未磁化微咸水增加 22.22%、45.00%、33.33%,这与入渗结束后土壤含水率的分布情况一致。说明在土壤质地相同时,磁化微咸水理化特性的变化也能够有一定

表2 系数 A_1 和 A_2 拟合结果
Tab.2 Fitting results of coefficient A_1 and A_2

参数	处理	矿化度/(g·L ⁻¹)				
		0.14	2	3	4	6
A_1	CK	0.363	0.367	0.358	0.364	0.362
	M	0.371	0.377	0.380	0.378	0.375
R^2	CK	0.987	0.990	0.983	0.992	0.988
	M	0.985	0.991	0.994	0.995	0.990
A_2	CK	0.020	0.038	0.064	0.041	0.032
	M	0.018	0.026	0.034	0.026	0.022
R^2	CK	0.958	0.967	0.973	0.966	0.972
	M	0.964	0.971	0.957	0.971	0.976

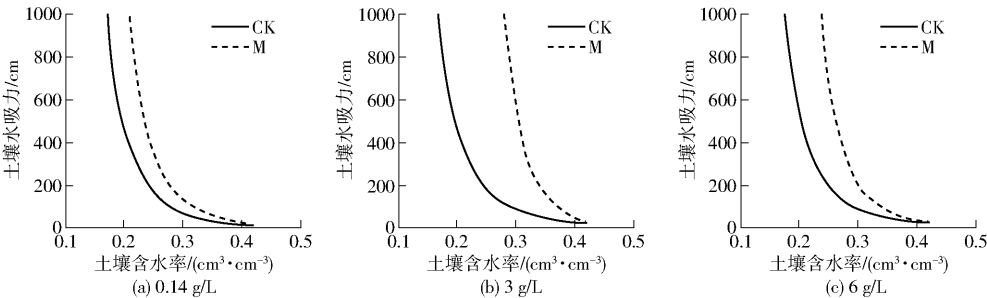


图5 磁化与非磁化微咸水入渗下土壤水分特征曲线

Fig.5 Soil water characteristic curves under magnetized and unmagnetized brackish water infiltration

程度上增加土壤水吸力。由图6可以看出,土壤非饱和导水率随着土壤含水率的增加迅速增加,在土壤未达到饱和前,磁化微咸水的土壤非饱和导水率

均低于未磁化水,且其增长速率也小于未磁化微咸水,这是磁化微咸水最终累积入渗量小于未磁化微咸水最终累积入渗量的原因。

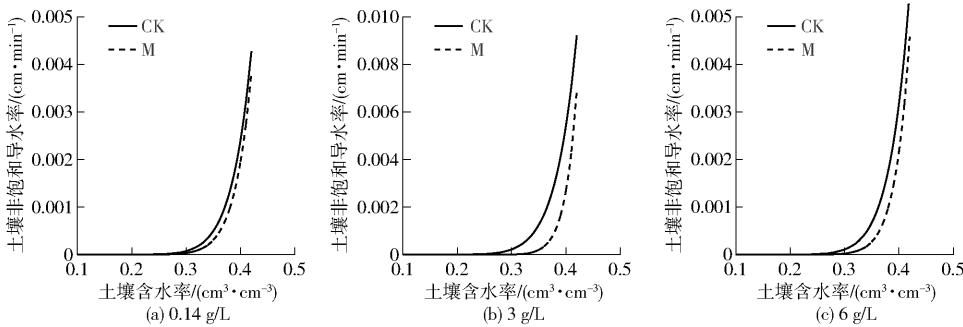


图6 磁化与非磁化微咸水入渗下土壤非饱和导水率曲线

Fig. 6 Soil unsaturated hydraulic conductivity curves under magnetized and unmagnetized brackish water infiltration

2.5 不同矿化度磁化微咸水对土壤水分扩散率的影响

将 A_1 、 A_2 代入式(10)、(11),推求出土壤水分饱和和扩散率 D_s 和系数 L ,结果见表4。不同矿化度磁化与未磁化微咸水平吸渗条件下,土壤水分饱和和扩散率 D_s 随着矿化度增加呈现先增大后减小的趋势,入渗水矿化度为3 g/L时土壤水分饱和和扩散率 D_s 相对淡水(0.14 g/L)增加了161.18%。微咸水经过磁化处理后,土壤饱和扩散率 D_s 相对增加,幅度为37.98%~133.61%。这说明入渗水理化特性的变化对土壤水分的扩散过程具有重要影响。

为了更清楚地显示磁化与未磁化微咸水入渗下

土壤水分扩散特征,将表4中的土壤水分饱和和扩散率 D_s 和系数 L 代入式(9),得到矿化度0.14、3、6 g/L磁化与未磁化微咸水入渗下土壤水分非饱和和扩散率(图7)。由图7可以看出,只有达到一定的土壤含水率,土壤水分才会开始扩散,土壤水分扩散率随含水率增大而逐渐增大,高含水率下的扩散率远大于低含水率下的扩散率。磁化微咸水土壤水分开始扩散的含水率大于未磁化微咸水,矿化度0.14、3、6 g/L磁化与未磁化微咸水入渗下土壤水分开始扩散的含水率分别为0.230 4、0.191 7、0.223 4 cm³/cm³和0.315 4、0.332 8、0.321 6 cm³/cm³。这主要是因为土壤水分吸渗过程中,渗入土壤的水分首先要满足土壤颗粒表面所吸持的膜状水,其次要进入土壤细小孔隙,然后才成为自由水向前扩散^[23]。入渗水经过磁化处理后,水分子团簇结构更加分散^[6,26],能够充分进入土壤小孔隙。只有当土壤小孔隙充分填满,达到较高的土壤含水率时,磁化微咸水才能够向前扩散,这就进一步解释了磁化微咸水最终湿润锋深度小于未磁化微咸水。

表4 土壤水分饱和和扩散率 D_s 与系数 L

Tab.4 Soil saturated diffusivity D_s and parameter L

参数	处理	入渗水矿化度/(g·L ⁻¹)				
		0.14	2	3	4	6
$D_s/(cm^2 \cdot min^{-1})$	CK	0.782	1.802	2.042	1.677	1.197
	M	1.078	2.533	4.769	2.822	1.776
L	CK	14.13	17.35	11.34	14.83	13.48
	M	22.19	36.70	53.29	41.00	30.25

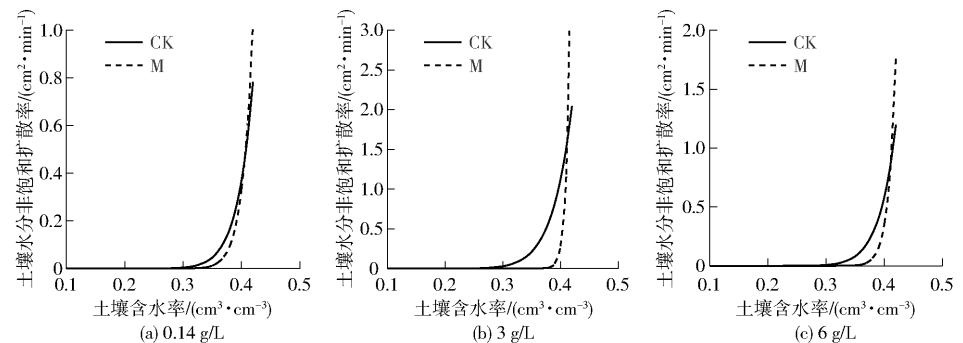


图7 磁化与非磁化微咸水入渗下土壤水分非饱和和扩散率曲线

Fig. 7 Soil unsaturated diffusivity curves under magnetized and unmagnetized brackish water infiltration

3 结论

(1)磁化微咸水的土壤水分入渗速率及湿润锋

运移速率显著降低,最终累积入渗量与湿润锋深度均小于未磁化微咸水,而湿润体平均含水率显著提高,矿化度0.14、2、3、4、6 g/L磁化微咸水相对于未

磁化微咸水的土壤湿润体平均含水率分别增加了 2.03%、2.62%、6.11%、4.08%、3.55%;磁化微咸水入渗能够增强土壤持水能力,有利于改善土壤水分分布,不同矿化度磁化微咸水在水平距离 0 ~ 25 cm 的土壤平均含水率相对于未磁化微咸水增加了 2.47% ~ 5.23%。

(2)磁化微咸水处理对 PHILIP 入渗模型参数影响显著,相对于未磁化微咸水,不同矿化度磁化微咸水吸渗率 S 降低了 7.71% ~ 12.11%;磁化与未磁化微咸水饱和导水率 K_s 、相对饱和导水率 ΔK_s 均与入渗水矿化度呈现较好的二次多项式关系,在矿

化度为 3 g/L 时,饱和导水率 K_s 和相对饱和导水率 ΔK_s 均达到最大。

(3)磁化微咸水处理对 BROOKS - COREY 模型参数影响显著,微咸水经过磁化处理后,形状系数 n 相对减小了 19.24% ~ 52.31%,而进气吸力 h_a 相对增大了 22.52% ~ 48.94%;磁化微咸水土壤水分特征曲线比未磁化微咸水更陡,磁化微咸水的土壤非饱和导水率及其增长速率均低于未磁化水;微咸水经过磁化处理后,土壤水分饱和和扩散率 D_s 相对增加了 37.98% ~ 133.61%,土壤水分开始扩散的含水率也有所增加。

参 考 文 献

- [1] 王全九,单鱼洋. 微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. WANG Quanjiu, SHAN Yuyang. Research progress on brackish water irrigation and soil water and salt regulation[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 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. (in Chinese)
- [2] LIU B, WANG S, KONG X, et al. Modeling and assessing feasibility of long-term brackish water irrigation in vertically homogeneous and heterogeneous cultivated lowland in the North China Plain[J]. Agricultural Water Management, 2019, 211(45): 98 - 110.
- [3] 周立峰,杨荣,冯浩. 微咸水膜下滴灌对盐碱化农田土壤斥水特征的影响[J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(7): 322 - 332. ZHOU Lifeng, YANG Rong, FENG Hao. Effect of mulched drip irrigation with brackish saline water on soil water repellency characteristics of saline-alkali field[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(7): 322 - 332. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190735&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.07.035. (in Chinese)
- [4] PANG X F, DENG B, TANG B. Influences of magnetic field on macroscopic properties of water[J]. Modern Physics Letters B, 2012, 26(11): 1250069.
- [5] GHORBANI S, SHARIFI S, DE B J, et al. Using statistical analysis and laboratory testing to evaluate the effect of magnetized water on the stability of foaming agents and foam concrete[J]. Construction and Building Materials, 2019, 207: 28 - 40.
- [6] MOOSAVI F, GHOLIZADEH M. Magnetic effects on the solvent properties investigated by molecular dynamics simulation[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2014, 354: 239 - 247.
- [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] GABRIELLI C, JAOUHARI R, MAURIN G, et al. Magnetic water treatment for scale prevention[J]. Water Research, 2001, 35(13): 3249 - 3259.
- [9] HOLYSZ L, SZCZES A, CHIBOWSKI E. Effects of a static magnetic field on water and electrolyte solutions[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2007, 316(2): 996 - 1002.
- [10] GHANATI F, MOHAMADALIKHANI S, SOLEIMANI M, et al. Change of growth pattern, metabolism, and quality and quantity of maize plants after irrigation with magnetically treated water[J]. Electromagnetic Biology and Medicine, 2015, 34(3): 211 - 215.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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)
- [14] 万晓,刘秀梅,王华田,等. 高矿化度灌溉水磁化处理对绒毛白蜡生理特性及生长的影响[J]. 林业科学, 2016, 52(2): 120 - 126. WAN Xiao, LIU Xiumei, WANG Huatian, et al. Effect of magnetic treatment of salty irrigation water on physiological and growth characteristics of potted *Fraxinus velutina* seedlings[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2016, 52(2): 120 - 126. (in Chinese)
- [15] 刘秀梅,王泳,王华田,等. 磁化微咸水灌溉对土壤交换性盐基离子组成的影响[J]. 水土保持学报, 2016, 30(2): 266 - 271. LIU Xiumei, WANG Lu, WANG Huatian, et al. Effects of magnetized brackish water irrigation on composition of soil exchangeable salt base ions[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2016, 30(2): 266 - 271. (in Chinese)

- [16] VLADIMIR Z. The impact of magnetic water treatment on salt distribution in a large unsaturated soil column[J]. *International Soil and Water Conservation Research*, 2017, 5(4): 253–257.
- [17] 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 magnetized brackish water salinity on soil water and salt 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)
- [18] 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)
- [19] WANG Q J, HORTON R, SHAO M A. Horizontal infiltration method for determining Brooks–Corey model parameters[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2002, 66(6): 1733–1739.
- [20] WANG Q J, SHAO M A, HORTON R. A simple method for estimating water diffusivity of unsaturated soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2004, 68(3): 713–718.
- [21] PHILIP J R. The theory of infiltration:1. The infiltration equation and its solution[J]. *Soil Science*, 1957, 83(5): 345–357.
- [22] BROOKS R H, COREY A T. Hydraulic properties of porous media[M]. *Hydrol Pap.* 3. Fort Collins: Colorado State University, 1964.
- [23] 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)
- [24] PANG X F. The experimental evidences of the magnetism of water by magnetic-field treatment[J]. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2014, 24(5): 1–6.
- [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, 888(1–3): 409–415.
- [26] CAI R, YANG H, 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.

(上接第 217 页)

- [18] GOVINDARAJAN K N, LAUREN M G, JEYAMKONDAN S, et al. Visible/near-infrared hyperspectral imaging for beef tenderness prediction[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2008, 64(2): 225–233.
- [19] 张雪威. 基于设施蔬菜营养信息的水肥调控方法及应用研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2019.
ZHANG Xuewei. Study on water and fertilizer regulation method and application based on nutrition information of facility vegetables[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2019. (in Chinese)
- [20] QING J H, HAI L W, CHEN B C, et al. An ensemble of Monte Carlo uninformative variable elimination for wavelength selection[J]. *Analytica Chimica Acta*, 2008, 612(2): 121–125.
- [21] TIBSHIRANI R. Regression shrinkage and selection via the lasso[J]. *Journal of the Royal Statistical Society. Series B (Methodological)*, 1996, 58(1): 267–288.
- [22] 韩建, 李雨昭, 曹志民, 等. SPA–PLS 的高含水原油近红外光谱含水率分析[J]. *光谱学与光谱分析*, 2019, 39(11): 3452–3458.
HAN Jian, LI Yuzhao, CAO Zhimin, et al. Water content prediction for high water-cut crude oil based on SPA–PLS using near infrared spectroscopy[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2019, 39(11): 3452–3458. (in Chinese)
- [23] 吴静珠, 王一鸣, 张小超, 等. 近红外光谱分析中定标集样品挑选方法研究[J]. *农业机械学报*, 2006, 37(4): 86–88, 107.
WU Jingzhu, WANG Yiming, ZHANG Xiaochao, et al. Study on algorithms of selection of representative samples for calibration in near infrared spectroscopy analysis[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2006, 37(4): 86–88, 107. (in Chinese)
- [24] 郭志明, 赵春江, 黄文倩, 等. 苹果糖度高光谱图像可视化预测的光强度校正方法[J/OL]. *农业机械学报*, 2015, 46(7): 227–232.
GUO Zhiming, ZHAO Chunjiang, HUANG Wenqian, et al. Intensity correction of visualized prediction for sugar content in apple using hyperspectral imaging[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(7): 227–232. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20150733&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.07.033. (in Chinese)
- [25] 第五鹏瑶, 卞希慧, 王姿方, 等. 光谱预处理方法选择研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2019, 39(9): 2800–2806.
DIWU Pengyao, BIAN Xihui, WANG Zifang, et al. Study on the selection of spectral preprocessing methods[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2019, 39(9): 2800–2806. (in Chinese)