

李亚宗, 张金珠, 王振华, 等. 磁化水与矿源黄腐酸钾联合应用对红枣根际土壤水盐变化和红枣产量的影响[J]. 江苏农业学报, 2024, 40(11): 2062-2072.

doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2024.11.010

磁化水与矿源黄腐酸钾联合应用对红枣根际土壤水盐变化和红枣产量的影响

李亚宗^{1,2}, 张金珠^{1,2}, 王振华^{1,2}, 李海强^{1,2}, 陈朋朋^{1,2}, 韩悦^{1,2}, 梁永辉^{1,2}

(1. 石河子大学水利建筑工程学院/现代节水灌溉兵团重点实验室/兵团农业水肥高效关键装备技术创新中心, 新疆 石河子 832000; 2. 农业农村部西北绿洲节水农业重点实验室, 新疆 石河子 832000)

摘要: 为探究南疆地区磁化水与矿源黄腐酸钾联合应用对土壤水盐分布、红枣生长发育和产量的影响, 本研究采用双因素裂区试验设计, 主因素为水磁化处理水平, 副因素为矿源黄腐酸钾施用量。结果表明, 与对照相比, 磁化水与矿源黄腐酸钾联合应用可显著提高土壤储水量、含水率和脱盐率, 磁化水与矿源黄腐酸钾联合施用对0~80 cm深度土壤盐分淋洗效果较好。当磁化水平相同时, 随着矿源黄腐酸钾施用量增加, 红枣新梢长度和新梢直径呈先增加后减小的趋势。在85 d, M2F3处理(3 000 Gs磁化水平+75 kg/hm²矿源黄腐酸钾添加水平)新梢长度和新梢直径最大, 显著高于其他处理($P < 0.05$)。并且M2F3处理红枣纵径、横径、单果重与产量表现最优。通过熵权-TOPSIS法进行综合分析评价, 水磁化处理条件下, 综合评分最优的矿源黄腐酸钾施用量为89.44 kg/hm², 水未磁化处理条件下, 综合评分最优的矿源黄腐酸钾施用量为110.60 kg/hm²。综上所述, 推荐南疆地区采用磁化水滴灌结合75 kg/hm²矿源黄腐酸钾施用的组合模式栽培红枣。本研究结果为南疆红枣高效生产和盐碱地改良提供了理论依据。

关键词: 磁化水; 矿源黄腐酸钾; 红枣; 水盐变化; 熵权-TOPSIS法

中图分类号: S655.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2024)11-2062-11

Effect of combined application of magnetized water and mineral-derived potassium fulvate on water-salt changes in red jujube rhizosphere soil and yield of red jujube

LI Yazong^{1,2}, ZHANG Jinzhu^{1,2}, WANG Zhenhua^{1,2}, LI Haiqiang^{1,2}, CHEN Pengpeng^{1,2}, HAN Yue^{1,2}, LIANG Yonghui^{1,2}

(1. College of Water Conservancy & Architectural Engineering, Shihezi University/Key Laboratory of Modern Water-Saving Irrigation of Xinjiang Production & Construction Corps/Technology Innovation Center for Agricultural Water and Fertilizer Efficiency Equipment of Xinjiang Production & Construction Corps, Shihezi 832000, China; 2. Key Laboratory of Northwest Oasis Water-Saving Agriculture, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Shihezi 832000, China)

Abstract: To explore the combined effects of magnetized water and mineral-derived potassium fulvate on soil water and

salt distribution, as well as the growth, development, and yield of red jujube in the southern Xinjiang region, a two-factor split-plot experimental design was adopted. The main factor was the level of water magnetization treatment, while the secondary factor was the application rate of mineral-derived potassium fulvate. The results showed that compared with control, the combined application of magnetized water and mineral-derived fulvate potassium could significantly in-

收稿日期: 2024-05-24

基金项目: “十四五”国家重点研发项目(2022YFD1900405); 国家自然科学基金项目(42267041); 新疆维吾尔自治区天池英才项目(CZ002304); 石河子大学项目(CXBJ202205、2022CK009)

作者简介: 李亚宗(1997-), 男, 河南新乡人, 硕士研究生, 主要从事节水灌溉理论与技术研究。(E-mail) 1906542256@qq.com

通讯作者: 张金珠, (E-mail) xjshzzjz@sina.cn

crease soil water storage capacity, water content, and desalination rate. The combined application of magnetized water and mineral-derived fulvate potassium had a better effect on salt leaching in soil at a depth of 0–80 cm. When the magnetization level was the same, as the application rate of mineral-derived fulvate potassium increased, the length and diameter of the new shoots of red jujube first increased and then decreased. At 85 days, the length and diameter of the new shoots treated with M2F3 (the level of magnetization was 3 000 Gs and the level of mineral-derived potassium fulvate application was 75 kg/hm²) were the largest, which were significantly higher than those of other treatments ($P<0.05$). In addition, the M2F3 treatment showed the best performance in terms of the longitudinal and transverse diameters, single fruit weight, and yield of red jujube. Through comprehensive analysis and evaluation using the entropy weight-TOPSIS method, the optimal application rate of mineral-derived fulvate potassium under water magnetization treatment was 89.44 kg/hm², while under non-magnetized water treatment, the optimal application rate was 110.60 kg/hm². In summary, it is recommended to adopt the combined mode of drip irrigation with magnetized water and application of 75 kg/hm² mineral-derived fulvate potassium for cultivating red jujube in southern Xinjiang. This study provides a theoretical basis for efficient production of red jujube and improvement of saline-alkali soil in southern Xinjiang.

Key words: magnetized water; mineral-derived potassium fulvate; red jujube; water-salt changes; entropy weighted-TOPSIS method

新疆是中国红枣的主要产区,2020 年新疆红枣产量达到 3.812×10^6 t,约占全国总产量的 52%^[1]。红枣产业是南疆地区支柱产业^[2],南疆红枣产量占新疆红枣产量的 70%^[3]。然而,由于在红枣种植过程中过量施用化肥以追求产量,导致土壤盐渍化和土壤肥力下降,这些土壤问题严重限制了南疆地区红枣产业的可持续发展^[4]。

近年来,一些研究者的研究结果^[5-7]表明,施用有机肥可以减轻土壤盐渍化程度^[8],提高土壤有机质含量^[9],从而实现改良土壤和提质增产的目的。传统有机肥是缓效肥料,作物当季能够吸收的营养有限,而黄腐酸作为一种液体有机肥,因其小分子量、溶解性好、易被植物吸收的优点^[10-12],在一定程度上弥补了传统有机肥的缺陷,被广泛应用于农业领域^[13-16]。孙燕等^[17]的研究结果表明,施用黄腐酸可提高土壤含水率,增强土壤保水能力,延长土壤胶体与溶液的接触时间,从而促进盐离子随水分运移至下层土壤。孟阿静等^[18]的研究结果表明,不同类型黄腐酸对红枣产量和品质均有提升作用。刘丽等^[19]发现,黄腐酸水溶肥能够促进苹果根系生长,提高叶片叶绿素的相对含量。于晟玥等^[20]的研究结果表明,在低氮胁迫下施加黄腐酸可促进小麦根系生长,提升小麦氮吸收效率。

滴灌和喷灌等水肥一体化技术作为应对南疆水资源短缺及土壤盐碱化问题的重要技术,已在南疆红枣种植中得到了广泛应用^[21]。近年来,磁化水技术作为一种新型、无污染的灌溉水处理技术,受到国内外研究者的关注^[22-25]。Al-Ogaidi 等^[26]的研究结

果表明,磁化水灌溉可以提高土壤含水率。张瑞喜等^[27]的研究结果表明,磁化水灌溉可以增强对土壤盐分的淋洗效果,提高土壤的脱盐率,其中 300 mT 磁场强度处理效果最佳。Zhou 等^[28]的研究结果表明,磁化水灌溉可以改变盐渍化土壤的水盐分布,降低土壤剖面盐分含量,从而促进棉花生长。Maheshwari 等^[29]则发现,磁化水灌溉可显著提高芹菜、雪豌豆的产量与水分利用效率。

目前,研究主要集中在单一水磁化处理或者单一黄腐酸肥施用量对水、盐运移及作物生长的影响,而磁化水与矿源黄腐酸钾联合施用对基于滴灌技术栽培的红枣的影响鲜有报道,尤其是磁化水与矿源黄腐酸钾联合应用对土壤水、盐分布及作物生长和产量的具体作用机制尚不明确。因此,本研究以基于滴灌技术栽培的红枣为研究对象,系统探讨在灌溉用水磁化和未磁化的条件下,不同矿源黄腐酸钾施用量对土壤水、盐分布与红枣生长和产量的影响,以期为南疆红枣种植区磁化水与矿源黄腐酸钾联合施用技术的应用和推广提供理论依据和技术指导。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本试验于 2023 年 4 月至 10 月在新疆生产建设兵团第十四师昆玉市 224 团 5 连(79°35′27″E,35°27′06″N)进行。试验地位于塔克拉玛干沙漠南缘,气候类型属典型温带大陆性荒漠气候,该地区年均蒸发量为 3 008.9 mm,年日照总时长为 2 769.5 h,无霜期达 244 d,最大冻土深度为 0.67 m。如图 1 所

示,2023 年红枣生育期该地区平均气温为 12.2 ℃,降雨量为 108.9 mm。试验地土壤类型为沙壤土,土壤容重为 1.57 g/cm³,有机质含量为 6.17 g/kg,铵态氮含量为 0.43 mg/kg,速效磷含量为 14.26 mg/kg,有效钾含量为 38.56 mg/kg,田间持水量为 15.31%,地下水位为 3 m。

1.2 试验材料

以当地 12 年生矮化红枣为试验材料,采用宽行种植模式,行距和株距分别为 4.0 m 和 0.8 m。灌溉方式为滴灌,滴灌带布置方式为“一行两管”,滴灌带分别布置于枣树两侧 50 cm 处,滴头流量为 2.6 L/h,滴头间距为 0.3 m。试验所用肥料为矿源黄腐酸钾肥(黄腐酸含量≥80 g/L,有机质含量≥100 g/L,K₂O 含量≥15 g/L,新疆心连心有限公司产品)、尿素(N

含量 46%)、磷酸一铵(P₂O₅ 含量 61%)、磷酸二氢钾(K₂O 含量 34%),所用磁化器为 WC-1A 型磁化器(包头鑫达磁性材料厂产品)。试验期间田间管理措施与当地传统田间管理措施一致。

1.3 试验设计

首先通过磁化器对水进行磁化处理,随后将矿源黄腐酸钾溶解于磁化水中,通过滴灌带进行田间滴灌,以研究磁化水与矿源黄腐酸钾协同作用对土壤和作物的影响。灌溉、施肥制度如表 1 所示。试验设计如表 2 所示,设置 0 Gs(M1)、3 000 Gs(M2)2 个磁化水平,0 kg/hm²(F0)、15 kg/hm²(F1)、45 kg/hm²(F2)、75 kg/hm²(F3)、105 kg/hm²(F4)5 个矿源黄腐酸钾添加水平,共 10 个处理,每处理 3 次重复,共 30 个小区,每个小区面积 200 m²(4 m×50 m)。

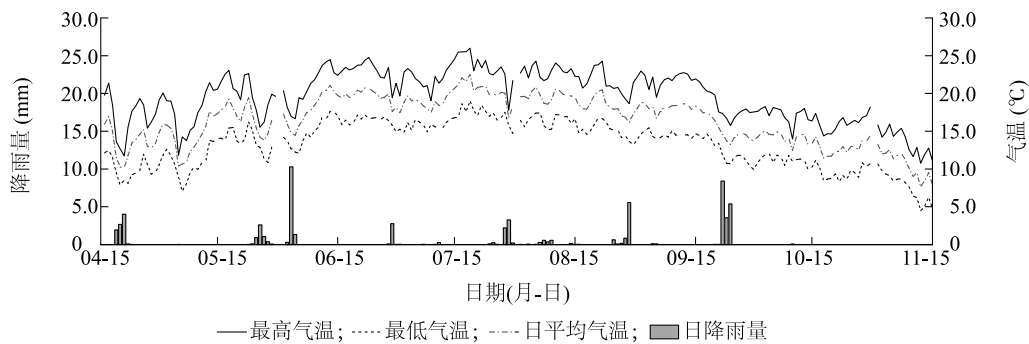


图 1 试验区气象资料(2023 年)

Fig.1 Meteorological data of the experimental area in 2023

表 1 灌溉、施肥制度

Table 1 Irrigation and fertilization system

生育时期	日期	时间 (d)	灌溉水量占全生 育期比例(%)	施肥量占全 生育期比例(%)	灌溉、施肥次数
萌芽新梢期	4 月 15 日-6 月 1 日	37	20	20	2
开花坐果期	6 月 2 日-7 月 15 日	43	30	30	3
果实膨大期	7 月 16 日-8 月 15 日	30	30	30	3
白熟期	8 月 16 日-9 月 15 日	30	20	20	2
完熟期	9 月 16 日-10 月 15 日	30	0	0	0

使用直径 5 cm 的土钻采集滴灌带下 0~20 cm 深度土壤、21~40 cm 深度土壤、41~60 cm 深度土壤、61~80 cm 深度土壤、81~100 cm 深度土壤、101~120 cm 深度土壤、121~140 cm 深度土壤,分别采集 3 个土壤样品混合为 1 个土壤样品,重复 3 次,测定土壤水分、盐分含量等土壤指标。土壤取样时间为灌溉前 24 h 和灌溉后 48 h。同时,本试验在红枣新梢萌芽 25 d 后,每隔 10 d 测量 1 次梢长和新梢

直径。在红枣成熟后,按小区进行产量测定,具体方法为:每小区随机取 5 株长势一致的枣树,称量 5 株枣树上的果实重量。同时,每个处理随机选取 15 颗红枣果实,测定果实横径、纵径和单果质量。

1.4 测定项目与方法

1.4.1 土壤水分 土壤含水率采用烘干法测定,将一部分供试土壤样品放入铝盒,及时带回实验室称重后放入烘箱,在 105 ℃ 下烘干至恒重。随后计算

土壤含水率,各处理重复3次,取平均值。

表2 试验设计

Table 2 Experimental design

处理	磁化强度 (Gs)	矿源黄腐酸钾施用量 (kg/hm ²)
M1F0	0	0
M1F1	0	15
M1F2	0	45
M1F3	0	75
M1F4	0	105
M2F0	3 000	0
M2F1	3 000	15
M2F2	3 000	45
M2F3	3 000	75
M2F4	3 000	105

1.4.2 土壤盐分 取一部分供试土壤样品烘干处理后,称取10 g烘干土壤置于三角瓶中,加入50 mL蒸馏水,振荡10 min,静置15 min后取上清液过滤,用电导率仪(型号DDS-307)测定澄清液的电导率值(EC),用干燥残渣法标定土壤含盐量与电导率之间的关系,关系如公式(1)所示。

$$S=0.008EC-0.23(R^2=0.964) \quad (1)$$

式中, S 为土壤含盐量(g/kg); EC 为土壤电导率($\mu\text{S}/\text{cm}$)。

脱盐率计算公式如下:

$$p=\frac{S1-S2}{S1}\times 100\% \quad (2)$$

式中, p 为脱盐率(%); $S1$ 为生育期前土壤初始含盐量(g/kg); $S2$ 为生育期结束时土壤含盐量(g/kg)。

1.4.3 新梢长度、新梢直径 在每个小区挑选3株具有代表性的红枣植株,从红枣新梢萌芽后25 d开始,每隔10 d测量梢长和新梢直径。红枣的梢长用卷尺进行测量,新梢直径用游标卡尺进行测量,取平均值。

1.4.4 产量构成 在红枣成熟后,按小区采摘,每小区随机选取5棵枣树,采摘后称量红枣重量,并计算平均值。每个处理随机选取15颗红枣,用游标卡尺测量果实的横径、纵径,用电子秤(精度为0.01 g)测量果实的单果质量,并分别计算平均值。

1.4.5 熵权-TOPSIS法 熵权-TOPSIS法是一种结合熵权法和TOPSIS法的多目标评价分析方法,用于对多个评价对象进行综合分析排序^[29]。其步骤如下:

(1)数据标准化处理。

为了消除原始数据中量纲不同造成的影响,首先需要对数据进行标准化处理。假设有 m 个评价对象和 n 个评价指标,原始数据矩阵可以表示为 $X=(X_{ij})_{mn}$,其中 X_{ij} 表示第 i 个评价对象在第 j 个指标上的原始数据。标准化后的数据矩阵记为 $Y=(Y_{ij})_{mn}$,标准化公式如下:

正向指标:

$$Y_{ij}=\frac{X_{ij}-\min(X_{ij})}{\max(X_{ij})-\min(X_{ij})} \quad (3)$$

负向指标:

$$Y_{ij}=\frac{\min(X_{ij})-X_{ij}}{\max(X_{ij})-\min(X_{ij})} \quad (4)$$

式中, X_{ij} 表示第 i 个评价对象在第 j 个评价指标上的原始数据; Y_{ij} 表示标准化后的数据; $\max(X_{ij})$ 和 $\min(X_{ij})$ 分别表示所有评价对象在第 j 个指标上的最大值和最小值。

(2)熵权法确定客观权重。

熵值计算:

$$E_j=-K\sum_{i=1}^m p_{ij}\ln(p_{ij}) \quad (5)$$

其中,

$$p_{ij}=\frac{Y_{ij}}{\sum_{i=1}^m Y_{ij}} \quad (6)$$

$$K=\frac{1}{\ln(m)} \quad (7)$$

式中, E_j 表示第 j 个指标的熵值; p_{ij} 表示第 j 个指标下第 i 个评价对象的比重; K 为常数,用于确保熵值在0到1之间; m 为评价对象的数量。

差异性系数计算:

$$d_j=1-E_j \quad (8)$$

式中, d_j 表示第 j 个指标的差异性系数,反映该指标的信息量。

权重计算:

$$w_j=\frac{d_j}{\sum_{j=1}^n d_j} \quad (9)$$

式中, w_j 表示第 j 个指标的权重; n 为评价指标数量。

(3)构建加权标准化矩阵。

将标准化后的数据矩阵与权重矩阵结合,构建加权标准化矩阵:

$$Z_{ij}=w_j\times Y_{ij} \quad (10)$$

式中, Z_{ij} 表示加权标准化后的数据。

(4) 确定正理想解和负理想解。

正理想解:

$$Z^+ = [\max(Z_{i1}), \max(Z_{i2}), \dots, \max(Z_{in})] \quad (11)$$

负理想解:

$$Z^- = [\min(Z_{i1}), \min(Z_{i2}), \dots, \min(Z_{in})] \quad (12)$$

(5) 计算欧式空间距离。

分别计算各评价对象到正理想解和负理想解的欧式空间距离。

到正理想解的距离:

$$S_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (Z_{ij} - Z_j^+)^2} \quad (13)$$

到负理想解的距离:

$$S_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (Z_{ij} - Z_j^-)^2} \quad (14)$$

式中, S_i^+ 和 S_i^- 分别表示第 i 个评价对象到正理想解和负理想解的距离。

(6) 计算相对接近度。

相对接近度计算公式为:

$$C_i = \frac{S_i^-}{S_i^+ + S_i^-} \quad (15)$$

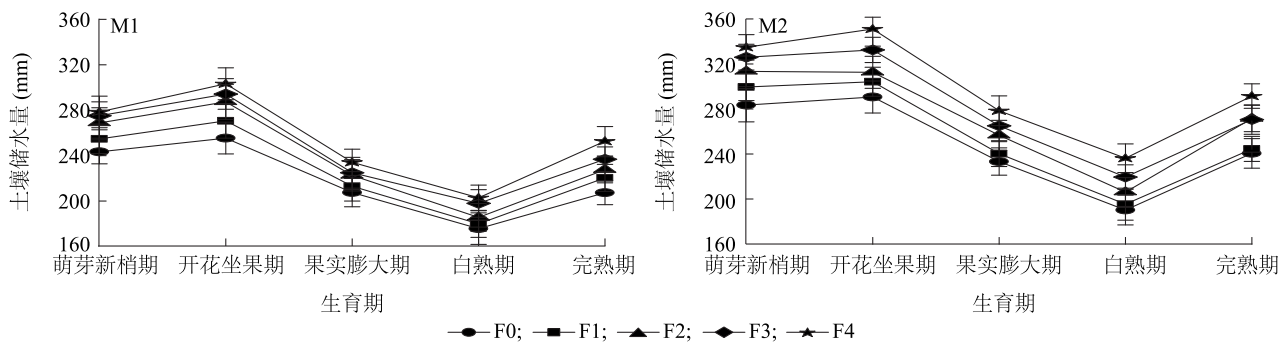
式中, C_i 表示第 i 个评价对象与正理想解的相

对接近程度。 C_i 值越接近 1, 表示评价对象的综合表现越优。

2 结果与分析

2.1 不同处理对土壤储水量、含水率的影响

如图 2 所示, 随红枣生育期的推进, 不同处理的土壤储水量均呈现出先增加、后减少、再增加的变化趋势, 在开花坐果期各处理土壤储水量最大, 在白熟期各处理土壤储水量最少。在同一生育期, 矿源黄腐酸钾施用量相同时, 滴灌水磁化处理土壤储水量显著高于滴灌水未磁化处理 ($P < 0.05$)。在新梢萌芽期和开花坐果期, 随矿源黄腐酸钾施用量的增加, 土壤储水量显著增加 ($P < 0.05$)。以开花坐果期为例进行分析, 与 M1F0 处理相比, M1F1 处理、M1F2 处理、M1F3 处理、M1F4 处理土壤储水量分别显著增加 5.91% ($P < 0.05$)、12.47% ($P < 0.05$)、15.21% ($P < 0.05$)、18.69% ($P < 0.05$); 与 M2F0 处理相比, M2F1 处理、M2F2 处理、M2F3 处理、M2F4 处理土壤储水量分别显著增加 4.67% ($P < 0.05$)、7.54% ($P < 0.05$)、14.40% ($P < 0.05$)、20.77% ($P < 0.05$)。



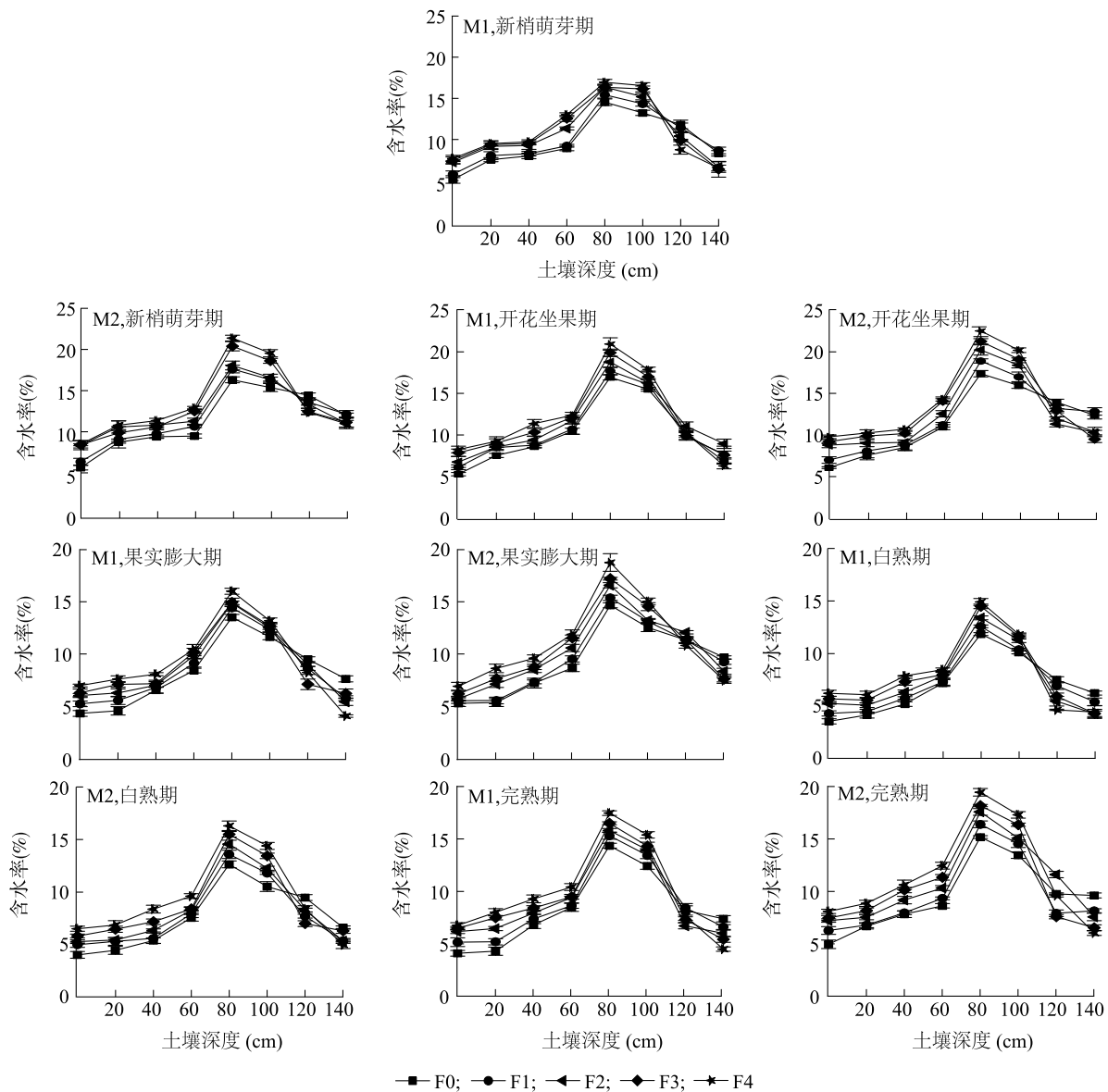
M1: 磁化强度 0 Gs; M2: 磁化强度 3 000 Gs; F0: 矿源黄腐酸钾施用量 0 kg/hm²; F1: 矿源黄腐酸钾施用量 15 kg/hm²; F2: 矿源黄腐酸钾施用量 45 kg/hm²; F3: 矿源黄腐酸钾施用量 75 kg/hm²; F4: 矿源黄腐酸钾施用量 105 kg/hm²。

图 2 不同处理土壤储水量变化情况

Fig.2 Changes in soil water storage under different treatments

由图 3 可知, 在各生育期, 各处理 0~140 cm 深度土壤含水率变化趋势基本一致, 整体呈现出先增加、后减少的趋势。各处理 80~100 cm 深度土壤含水率最高。磁化水平相同时, 随着矿源黄腐酸钾施用量的增加, 土壤含水率显著增加 ($P < 0.05$), 矿源黄腐酸钾施用量相同时, 滴灌水磁化处理土壤含水率显著高于未磁化处理 ($P < 0.05$)。以开花坐果期为例进行分析, 与 M1F0 处理相比,

M1F1 处理、M1F2 处理、M1F3 处理、M1F4 处理 0~140 cm 平均每个深度的土壤含水率分别显著增加 3.64% ($P < 0.05$)、11.09% ($P < 0.05$)、13.79% ($P < 0.05$)、17.24% ($P < 0.05$); 与 M2F0 处理相比, M2F1 处理、M2F2 处理、M2F3 处理、M2F4 处理 0~140 cm 平均每个深度的土壤含水率分别显著增加 4.24% ($P < 0.05$)、7.55% ($P < 0.05$)、14.44% ($P < 0.05$)、18.79% ($P < 0.05$)。



M1:磁化强度 0 Gs;M2:磁化强度3 000 Gs;F0:矿源黄腐酸钾施用量 0 kg/hm²;F1:矿源黄腐酸钾施用量 15 kg/hm²;F2:矿源黄腐酸钾施用量 45 kg/hm²;F3:矿源黄腐酸钾施用量 75 kg/hm²;F4:矿源黄腐酸钾施用量 105 kg/hm²。

图3 不同深度土壤含水率变化情况

Fig.3 Changes in soil water content at different depths

2.2 不同处理对土壤含盐量的影响

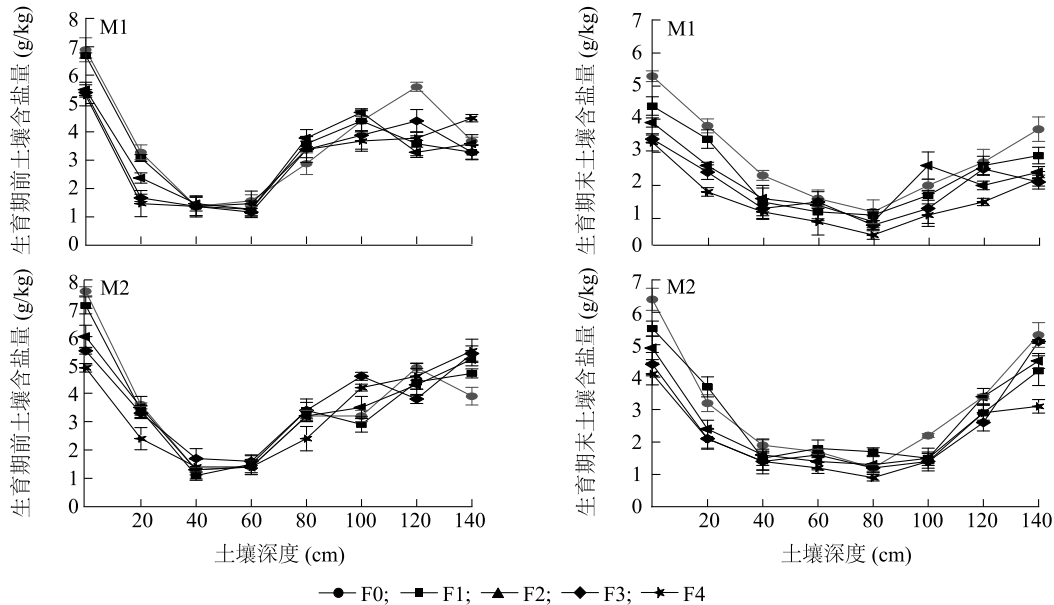
不同处理改变了土壤水分分布,同时也改变了土壤盐分分布。如图4所示,土壤表层(0~20 cm)盐分含量较高,土壤盐分呈现表聚现象。生育期前,在0~40 cm土壤深度,随着土壤深度增加,土壤盐分含量逐渐降低。生育期末,在0~80 cm土壤深度,随着土壤深度增加,土壤盐分含量逐渐降低。

如图5所示,磁化水平相同时,生育期前土壤含盐量显著高于生育期末($P<0.05$)。生育期末,磁化

水平相同时,土壤含盐量随着矿源黄腐酸钾施用量增加显著降低($P<0.05$)。磁化水平相同时,土壤含盐量差值随着矿源黄腐酸钾施用量增加呈上升趋势。

如表3所示,当磁化水平相同时,随着矿源黄腐酸钾施用量的提高,土壤脱盐率显著提高($P<0.05$)。矿源黄腐酸钾施用量相同时,水磁化处理土壤脱盐率显著高于水未磁化处理($P<0.05$)。由此可知,灌溉水经过磁化处理后,能大幅提高土壤脱

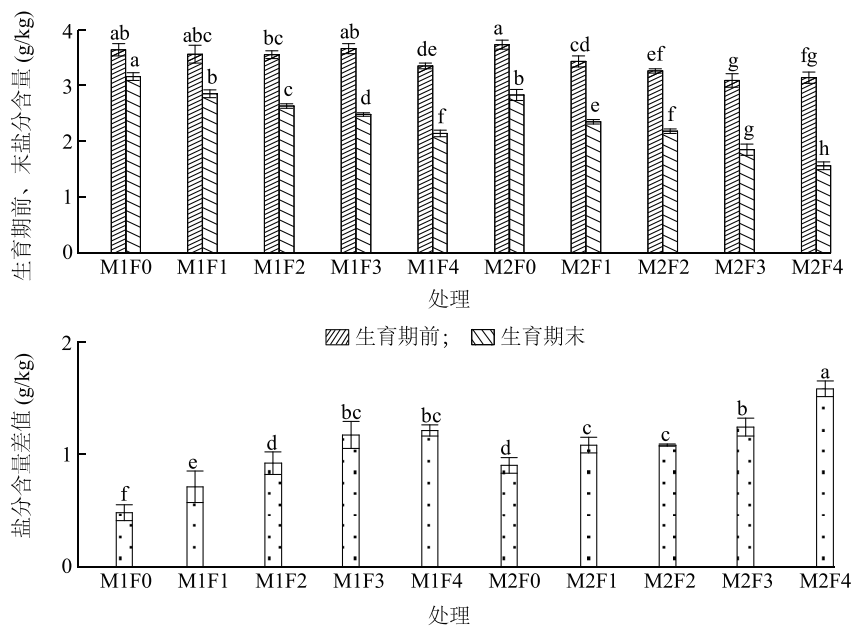
盐率。水磁化处理下,当矿源黄腐酸钾施用量为 105 kg/hm²时,土壤脱盐率达到最大值,为 43.69%。



M1:磁化强度 0 Gs;M2:磁化强度 3 000 Gs;F0:矿源黄腐酸钾施用量 0 kg/hm²;F1:矿源黄腐酸钾施用量 15 kg/hm²;F2:矿源黄腐酸钾施用量 45 kg/hm²;F3:矿源黄腐酸钾施用量 75 kg/hm²;F4:矿源黄腐酸钾施用量 105 kg/hm²。

图 4 不同处理下土壤含盐量变化情况

Fig.4 Changes in soil salinity under different treatments



M1:磁化强度 0 Gs;M2:磁化强度 3 000 Gs;F0:矿源黄腐酸钾施用量 0 kg/hm²;F1:矿源黄腐酸钾施用量 15 kg/hm²;F2:矿源黄腐酸钾施用量 45 kg/hm²;F3:矿源黄腐酸钾施用量 75 kg/hm²;F4:矿源黄腐酸钾施用量 105 kg/hm²。同一生育时期图柱上不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。

图 5 不同时期土壤含盐量及含盐量差值

Fig.5 Soil salinity and salinity difference in different periods

2.3 不同处理对红枣生长发育的影响

如图 6 所示,随着矿源黄腐酸钾施用量的增加,

新梢长度与新梢直径呈现先增加后减小的趋势。随着生育期的推进,不同处理新梢长度与新梢直径的

表3 不同处理土壤盐分变化情况

Table 3 Changes in soil salinity under different treatments

处理	初始含盐量 (g/kg)	盐分变化量 (g/kg)	脱盐率 (%)
M1F0	3.64a	-0.48a	13.06g
M1F1	3.56a	-0.71a	20.00f
M1F2	3.55a	-0.93a	26.06e
M1F3	3.66a	-1.19a	32.42d
M1F4	3.31a	-1.18a	35.47c
M2F0	3.73a	-0.89a	23.83e
M2F1	3.43a	-1.08a	31.39d
M2F2	3.20a	-1.21a	37.89d
M2F3	3.05a	-1.24a	40.57b
M2F4	2.78a	-1.21a	43.69a

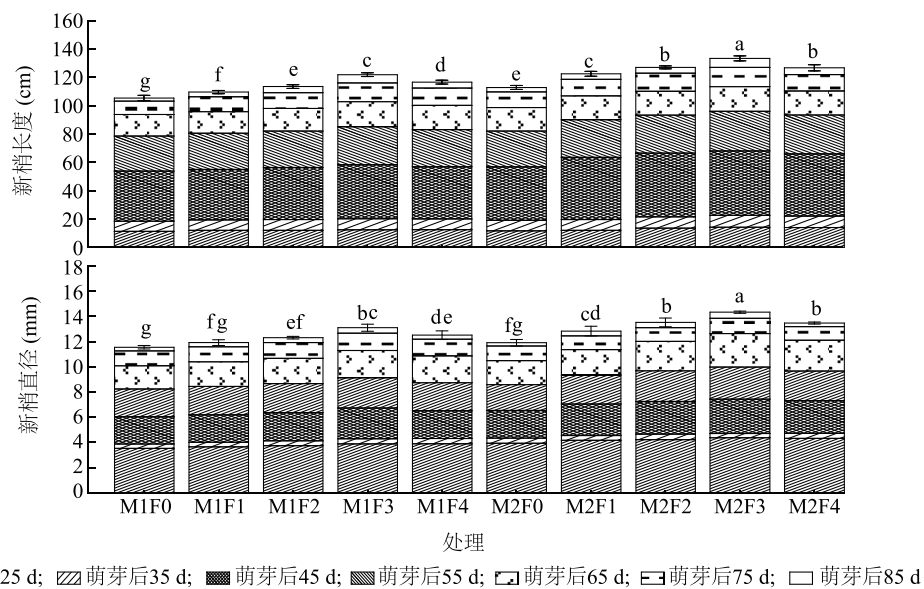
M1:磁化强度 0 Gs;M2:磁化强度 3 000 Gs;F0:矿源黄腐酸钾施用量 0 kg/hm²;F1:矿源黄腐酸钾施用量 15 kg/hm²;F2:矿源黄腐酸钾施用量 45 kg/hm²;F3:矿源黄腐酸钾施用量 75 kg/hm²;F4:矿源黄腐酸钾施用量 105 kg/hm²。同一列数据后不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$)。

增长幅度均在萌芽后35~45 d达到最大值。在 85 d,与 M1F0 处理相比,M1F1 处理、M1F2 处理、M1F3 处理、M1F4 处理新梢长度分别显著增加 3.97% ($P<0.05$)、7.66% ($P<0.05$)、15.60% ($P<0.05$)、

10.61% ($P<0.05$)、M1F1 处理、M1F2 处理、M1F3 处理、M1F4 处理新梢直径分别显著增加 3.20% ($P<0.05$)、6.58% ($P<0.05$)、13.39% ($P<0.05$)、8.00% ($P<0.05$)。在 85 d,与 M1F0 处理相比,M2F1 处理、M2F2 处理、M2F3 处理、M2F4 处理新梢长度分别显著增加 16.20% ($P<0.05$)、20.51% ($P<0.05$)、26.50%、20.23% ($P<0.05$)、M2F1 处理、M2F2 处理、M2F3 处理、M2F4 处理新梢直径分别显著增加 11.05% ($P<0.05$)、16.99% ($P<0.05$)、24.03% ($P<0.05$)、16.56% ($P<0.05$)。

2.4 不同处理对红枣产量的影响

如表 4 所示,相同磁化水平下,随矿源黄腐酸钾施用量的增加,红枣纵径、横径、单果重与产量呈现先增加后减少的趋势。与 M1F0 处理相比,M1F2 处理、M1F3 处理、M1F4 处理的红枣产量分别显著提高 12.52% ($P<0.05$)、23.53% ($P<0.05$)、18.24% ($P<0.05$);与 M2F0 处理相比,M2F1 处理、M2F2 处理、M2F3 处理、M2F4 处理红枣产量分别显著提高 14.24% ($P<0.05$)、23.65% ($P<0.05$)、30.09% ($P<0.05$)、24.22% ($P<0.05$)。其中,M2F3 处理红枣纵径、横径、单果重与产量表现最优。



M1:磁化强度 0 Gs;M2:磁化强度 3 000 Gs;F0:矿源黄腐酸钾施用量 0 kg/hm²;F1:矿源黄腐酸钾施用量 15 kg/hm²;F2:矿源黄腐酸钾施用量 45 kg/hm²;F3:矿源黄腐酸钾施用量 75 kg/hm²;F4:矿源黄腐酸钾施用量 105 kg/hm²。图柱上不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$)。

图6 不同处理红枣新梢长度、新梢直径

Fig.6 Length and diameter of new shoots of red jujube under different treatments

2.5 基于熵权-TOPSIS 法对应用效果的综合评价

选取红枣生育期末土壤含盐量、土壤脱盐率、新

梢长度、新梢直径、果实纵径、果实横径、单果重和产量作为评价指标,通过熵权-TOPSIS 计算各评价对

象到正理想解和负理想解的欧式空间距离,最终得到不同处理的综合得分和排名。如表 5 所示,综合得分最高的为 M2F3 处理,其次是 M2F4 处理和 M2F2 处理。分析结果表明,不同处理对红枣土壤脱盐率、生长和产量具有积极影响。矿源黄腐酸钾

施用量与综合评价得分的拟合曲线如图 7 所示,水磁化处理下,综合评分最优的矿源黄腐酸钾施用量为 89.44 kg/hm²;水未磁化处理下,综合评分最优的矿源黄腐酸钾施用量为 110.60 kg/hm²。

表 4 不同处理红枣产量

Table 4 Yield of red jujubes under different treatments

处理	纵径 (mm)	横径 (mm)	单果重 (g)	产量 (kg/hm ²)
M1F0	47.46±1.12f	35.44±1.08e	15.38±0.74f	9 270.93±614.97d
M1F1	48.33±1.75ef	35.79±1.58de	15.66±1.00f	9 605.93±367.32cd
M1F2	50.61±1.42de	36.30±1.15de	16.75±0.58ef	10 431.74±861.39c
M1F3	53.17±0.52cd	39.69±0.45ab	18.70±1.49cd	11 452.33±742.04b
M1F4	51.28±1.48cde	38.63±1.35c	18.25±1.27cde	10 961.51±549.62b
M2F0	48.70±1.74ef	35.78±1.24de	15.93±0.52f	9 683.84±369.79cd
M2F1	52.84±1.93cd	37.14±0.85cde	17.09±0.46def	11 062.79±555.22b
M2F2	54.19±2.66bc	37.69±1.06cd	19.51±1.70bc	11 974.30±486.53a
M2F3	57.60±2.18a	40.34±1.38a	21.38±0.31a	12 597.56±352.91a
M2F4	56.73±1.31ab	39.80±0.75a	20.60±0.46ab	12 028.84±411.73a

M1:磁化强度 0 Gs;M2:磁化强度 3 000 Gs;F0:矿源黄腐酸钾施用量 0 kg/hm²;F1:矿源黄腐酸钾施用量 15 kg/hm²;F2:矿源黄腐酸钾施用量 45 kg/hm²;F3:矿源黄腐酸钾施用量 75 kg/hm²;F4:矿源黄腐酸钾施用量 105 kg/hm²。同一列数据后不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$)。

表 5 加权标准化矩阵及不同处理综合得分

Table 5 Weight normalization matrix and comprehensive scores of different treatments

处理	含盐量 (g/kg)	脱盐率 (%)	新梢长度 (cm)	新梢直径 (mm)	纵径 (mm)	横径 (mm)	单果重 (g)	产量 (kg/hm ²)	S_i^+	S_i^-	S_i	R
M1F0	0.000 1	0.000 1	0.000 1	0.000 1	0.000 1	0.000 2	0.000 2	0.000 1	0.360 8	0.000 0	0.000 0	10
M1F1	0.019 7	0.016 7	0.015 7	0.016 6	0.011 6	0.012 0	0.007 7	0.012 5	0.324 2	0.040 7	0.111 6	9
M1F2	0.033 5	0.031 1	0.030 3	0.034 0	0.041 6	0.029 2	0.036 7	0.043 0	0.264 9	0.099 3	0.272 7	7
M1F3	0.042 9	0.046 0	0.061 6	0.069 0	0.075 3	0.143 4	0.088 4	0.080 7	0.144 6	0.230 0	0.613 9	4
M1F4	0.064 7	0.055 9	0.041 9	0.042 6	0.050 4	0.107 7	0.076 5	0.062 6	0.184 0	0.186 2	0.503 0	5
M2F0	0.021 0	0.026 7	0.027 7	0.016 1	0.016 5	0.011 6	0.014 9	0.015 4	0.312 8	0.054 9	0.149 4	8
M2F1	0.051 4	0.044 6	0.063 9	0.057 0	0.071 0	0.057 5	0.045 7	0.066 3	0.206 0	0.163 3	0.442 2	6
M2F2	0.062 2	0.048 7	0.080 9	0.087 5	0.088 8	0.076 0	0.110 1	0.100 0	0.134 4	0.236 7	0.637 8	3
M2F3	0.082 6	0.065 3	0.104 5	0.123 7	0.133 7	0.165 3	0.160 0	0.123 0	0.030 6	0.350 7	0.919 7	1
M2F4	0.100 8	0.090 0	0.079 8	0.085 3	0.122 2	0.147 1	0.139 0	0.102 0	0.058 6	0.313 0	0.842 4	2

M1:磁化强度 0 Gs;M2:磁化强度 3 000 Gs;F0:矿源黄腐酸钾施用量 0 kg/hm²;F1:矿源黄腐酸钾施用量 15 kg/hm²;F2:矿源黄腐酸钾施用量 45 kg/hm²;F3:矿源黄腐酸钾施用量 75 kg/hm²;F4:矿源黄腐酸钾施用量 105 kg/hm²。 S_i^+ 表示第 i 个评价对象到正理想解距离; S_i^- 表示第 i 个评价对象到负理想解距离; S_i 表示综合得分; R 表示综合排名。

3 讨论

本研究结果表明,磁化水与矿源黄腐酸钾联合应用能够提高土壤含水率和土壤脱盐率。这主要是因为磁化后液体分子物理性质的改变,磁化处理使液体分子的氢键断裂,范德华力减弱,大型水分子簇解离形成小型缔合水分子簇及单个水分子^[24,30],从而增强了水分子在土壤微孔隙中的填充作用,使液体分子

更易渗入土壤微孔^[31],进而提高土壤含水率。同时土壤含水率的提高促进了盐分的溶解与扩散,盐分随水流下移,土壤脱盐率显著提高^[32]。孙燕等^[17]的研究结果表明,施用黄腐酸可提高土壤含水率,为土壤胶体离子吸附和置换提供条件,促进盐离子随水分渗入下层土壤,与本研究结论一致。此外,水磁化处理也可改变水的活性,如提高溶解度、反应速率等^[33]。且矿源黄腐酸钾具有较大的盐基交换容量,能够降低

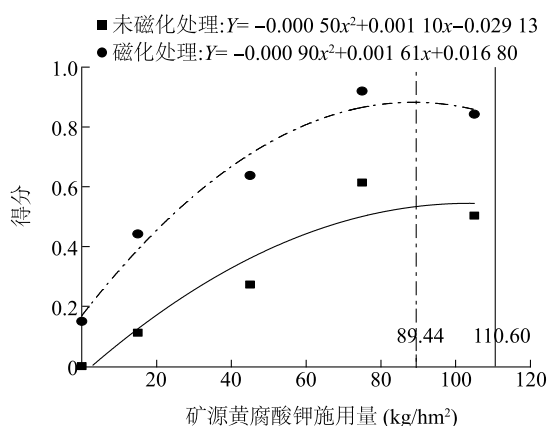


图7 矿源黄腐酸钾施用量与综合评价得分的拟合曲线

Fig.7 Fitting curve of mineral-derived potassium fulvate and the comprehensive evaluation score

土壤盐分浓度并提升土壤脱盐率^[34]。

本研究结果还表明,磁化水与矿源黄腐酸钾联合应用可显著提高红枣新梢长度、新梢直径和红枣产量。磁化水滴灌作为一种高效、环保的灌溉水处理技术,通过改变水的物理性质促进作物的生长,从而对作物产量产生积极影响^[28],且黄腐酸作为腐殖酸中活性最强、分子量最小的组分,可提高土壤肥力,促进作物生长并提高产量^[35-36]。马怡璠等^[37]和李佳蓓等^[38]的研究结果表明,磁化水可提高氮肥溶液的渗透性能,提高土壤胶体对养分的固持能力,增加土壤中硝态氮含量,从而促进作物根系对土壤养分的吸收。彭玲等^[39]的研究结果表明,黄腐酸肥料含有细胞激肽酶类生物刺激素,可促进植物蛋白质合成和细胞伸长,此外,施用黄腐酸肥料能够稳定土壤氮素浓度,保证作物根系的氮素供应,从而显著提高作物产量。这与本研究结论相同。

周文阳^[40]研究发现,随着矿源黄腐酸钾施用量的增加,苹果的品质和产量也随之增加,呈正相关关系。本研究结果表明,水磁化水平相同时,红枣新梢长度、新梢直径和红枣产量整体上随矿源黄腐酸钾施用量的增加呈现先增大后减小的趋势。产生这种现象的主要原因是,磁化水与矿源黄腐酸钾联合应用提高了土壤含水率、降低了土壤含盐量,从而促进根系对养分的吸收,而过量的矿源黄腐酸钾会堆积在根系表面,阻碍了根系对水分的正常吸收^[41]。通过熵权-TOPSIS法对土壤生育期末含盐量、土壤脱盐率、红枣产量等多项指标进行综合分析,结果表明,水磁化处理条件下,综合评分最优的矿源黄腐酸钾施用量为

89.44 kg/hm²,水未磁化处理条件下,综合评分最优的矿源黄腐酸钾施用量为 110.60 kg/hm²。

4 结论

本研究结论如下:(1)磁化水与矿源黄腐酸钾联合施用提高了土壤储水量、含水率和脱盐率,其中 M2F4 处理脱盐率显著高于其他处理;(2)磁化水与矿源黄腐酸钾联合施用有助于促进红枣生长,提高红枣产量,其中 M2F3 处理新梢长度和新梢直径最大,显著高于其他处理($P < 0.05$)。同时 M2F3 处理红枣纵径、横径、单果重与产量表现最优。(3)通过熵权-TOPSIS法进行综合分析评价,水磁化处理条件下,综合评分最优的矿源黄腐酸钾施用量为 89.44 kg/hm²,水未磁化处理条件下,综合评分最优的矿源黄腐酸钾施用量为 110.60 kg/hm²。综合以上结论,推荐南疆地区采用磁化水滴灌结合 75 kg/hm²矿源黄腐酸钾施用的组合模式栽培红枣。

参考文献:

- [1] 郭慧静,金新文,沈从举,等. 新疆红枣产业现状及前景展望[J]. 华中农业大学学报,2023,42(5):35-41.
- [2] 包艳丽,程红梅,张利召. 新疆红枣产业发展研究[J]. 农村经济与科技,2022,33(1):145-146,152.
- [3] 邓 岚,周正立,赵 航,等. 滴灌水温对土壤和骏枣树体养分含量的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版),2023,51(1):139-145.
- [4] 张健利,王振华,陈 睿,等. 水肥互作对滴灌红枣产量、品质与土壤养分的影响[J]. 浙江农业学报,2022,34(11):2428-2437.
- [5] HAMID Y, TANG L, HUSSAIN B, et al. Organic soil additives for the remediation of cadmium contaminated soils and their impact on the soil-plant system: a review[J]. Science of the Total Environment, 2020, 707(10):121-136.
- [6] 段晨晓,李佳蓓,吴淑芳,等. 有机无机肥配施对西北地区不同土壤类型氮素矿化的影响[J]. 农业机械学报,2024,68(3):1-17.
- [7] LI R, TAO R, LING N, et al. Chemical, organic and bio-fertilizer management practices effect on soil physicochemical property and antagonistic bacteria abundance of a cotton field: implications for soil biological quality[J]. Soil & Tillage Research, 2017, 167:30-38.
- [8] 郭慧婷,高 静,张 强,等. 有机肥对我国酸性和碱性土壤 pH 的影响差异及原因[J]. 应用与环境生物学报,2024,30(1):1-14.
- [9] 谢钧宇,张慧芳,罗云琪,等. 连续 7 年施有机肥和化肥提高复垦土壤上玉米产量的驱动因子[J]. 农业工程学报,2024,40

- (1):1-11.
- [10] 杨玉明. 矿源黄腐酸钾与生化黄腐酸钾生产工艺对比分析[J]. 盐科学与化工, 2022, 51(10): 8-10.
- [11] NARDI S, PIZZEGHELLO D, MUSCOLO A, et al. Physiological effects of humic substances on higher plants[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2002, 34(11): 1527-1536.
- [12] LI Z L, LIU Z G, ZHANG M, et al. The combined application of controlled-release urea and fulvic acid improved the soil nutrient supply and maize yield[J]. Archives of Agronomy and Soil Science, 2021, 67(5): 633-646.
- [13] 王潇潇, 伍宏, 陈思衡, 等. 黄腐酸对水稻幼苗根系生长的影响及其与生长素的关系[J]. 西北植物学报, 2022, 42(5): 811-818.
- [14] 刘小媛, 杨劲松, 姚荣江. 化肥减量配施黄腐酸降低盐渍农田NaCl含量提高氮磷养分有效性的协同效应[J]. 植物营养与肥料学报, 2021, 27(8): 1339-1350.
- [15] QIU C, SUN J H, SHEN J Z, et al. Fulvic acid enhances drought resistance in tea plants by regulating the starch and sucrose metabolism and certain secondary metabolism[J]. Journal of Proteomics, 2021, 247(9): 104-117.
- [16] LIU X Y, YANG J S, TAO J Y, et al. Elucidating the effect and interaction mechanism of fulvic acid and nitrogen fertilizer application on phosphorus availability in a salt-affected soil[J]. Journal of Soils and Sediments, 2021, 21(7): 2525-2539.
- [17] 孙燕, 吴建鑫, 曲植, 等. 生化黄腐酸对不同质地苏打盐碱土水盐运移特征的影响[J]. 农业工程学报, 2023, 39(22): 74-84.
- [18] 孟阿静, 邵华伟, 唐蕾, 等. 施用不同类型黄腐酸对塔里木盆地密植骏枣产量和品质的影响[J]. 西北农业学报, 2022, 31(10): 1357-1364.
- [19] 刘丽, 魏志峰, 石彩云, 等. 海藻水溶肥和黄腐酸水溶肥对富士苹果树体生长及果实品质的影响[J]. 果树学报, 2023, 40(5): 893-901.
- [20] 于晟玥, 牛银星, 王泽平, 等. 黄腐酸添加量对低氮胁迫下小麦生长和根系形态的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2023, 29(2): 323-333.
- [21] 王振华, 扁青永, 李文昊, 等. 新疆沙区成龄红枣水肥一体化滴灌的水肥适宜用量[J]. 农业工程学报, 2018, 34(11): 96-104.
- [22] 宁松瑞, 赵雪, 姬美玥, 等. 脱硫石膏和磁化水对盐碱胁迫芥麦光合特性的影响[J]. 农业机械学报, 2020, 51(10): 310-317.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] KHOSHRAVESH 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.
- [26] 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: 70-77.
- [27] 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.
- [28] ZHOU B B, YANG L, CHEN X P, et al. Effect of magnetic water irrigation on the improvement of salinized soil and cotton growth in Xinjiang[J]. Agricultural Water Management, 2021, 248(4): 106784.
- [29] 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.
- [30] 和幼松, 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.
- [31] OTSUKA I, OZEKI S. Does magnetic treatment of water change its properties? [J]. Journal of Physical Chemistry B, 2006, 110(4): 1509-1512.
- [32] 韦开, 张继红, 王全九, 等. 磁化微咸水及石膏改良对土壤水盐运移的影响[J]. 农业工程学报, 2022, 38(1): 125-131.
- [33] 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.
- [34] 陈海宁, 高文胜, 郑磊, 等. 硅钙钾镁肥与黄腐酸钾配施对酸化果园土壤化学性质及苹果产量和品质的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2023(3): 82-87.
- [35] 高伟, 李明悦, 杨军, 等. 黄腐酸钾不同用量对番茄产量、品质及土壤理化性质的影响[J]. 腐植酸, 2018(5): 45.
- [36] 窦彦鑫, 续海红, 杨凯, 等. 黄腐酸在果树生产中的应用[J]. 现代园艺, 2021, 44(22): 32-34.
- [37] 马怡璠, 吕德生, 王振华, 等. 磁耦耦合对膜下滴灌加工番茄产量及水肥利用效率的影响[J]. 干旱区研究, 2023, 40(11): 1855-1864.
- [38] 李佳蓓, 张富仓, 段晨晓, 等. 氮肥溶液磁化灌溉下土壤入渗特征和水氮迁移规律研究[J]. 农业机械学报, 2022, 53(7): 316-324.
- [39] 彭玲, 刘晓霞, 何流, 等. 不同黄腐酸用量对‘红将军’苹果产量、品质和¹⁵N-尿素去向的影响[J]. 应用生态学报, 2018, 29(5): 1412-1420.
- [40] 周文阳. 矿物源黄腐酸钾在苹果上适宜施用量的研究[J]. 腐植酸, 2022(6): 44-47.
- [41] OLAETXEA M, MORA V, BACAICOA E, et al. Abscisis acid regulation of root hydraulic conductivity and aquaporin gene expression is crucial to the plant shoot growth enhancement caused by rhizosphere humic acids[J]. Plant Physiology, 2015, 169(4): 2587-2596.

(责任编辑:成纾寒)