

王云超, 翟华博, 宫金良, 等. 磁场对异丙甲草胺除草剂溶液表面张力与雾滴粒径的影响规律 [J]. 华南农业大学学报, 2023, 44(2): 324-332.
WANG Yunchao, ZHAI Huabo, GONG Jinliang, et al. Effect of magnetic field on surface tension and droplet size of metolachlor herbicide solution[J]. Journal of South China Agricultural University, 2023, 44(2): 324-332.

磁场对异丙甲草胺除草剂溶液表面张力与雾滴粒径的影响规律

王云超¹, 翟华博², 宫金良¹, 张彦斐³

(1 山东理工大学 机械工程学院, 山东 淄博 255000; 2 淄川区西河镇农业农村服务中心, 山东 淄博 255161;

3 山东理工大学 农业工程与食品科学学院, 山东 淄博 255000)

摘要:【目的】研究磁化作用对除草剂溶液表面张力及除草剂喷雾雾滴粒径的影响规律, 探索新型除草剂喷雾雾滴粒径控制方法。【方法】设计磁化除草剂溶液表面张力试验和磁化喷雾雾滴粒径试验, 记录不同磁场强度和磁化时长 2 个影响因素下除草剂溶液表面张力和喷雾雾滴粒径, 观测数据变化规律; 并对数据进行拟合, 给出符合数据变化的函数关系式。【结果】在磁场强度为 50~500 mT、磁化时长为 5.0~25.0 min 范围内, 溶液表面张力和喷雾雾滴粒径均随磁场强度和磁化时长的增加呈现先下降后回升的趋势; 当磁场强度为 350 mT、磁化时长为 15.0 min 时, 表面张力和雾滴粒径下降幅度最大, 表面张力为 54.0 mN/m, 下降 14.96%, 喷雾雾滴粒径为 108.75 μm , 下降 11.20%。对表面张力数据进行拟合, 洛伦兹拟合函数的决定系数 (R^2) 为 0.816 4, 调整后 R^2 为 0.794 0, 均方根误差 (Root mean square error, RMSE) 为 1.105 9; 雾滴粒径数据拟合中, 多项式拟合函数的 R^2 为 0.833 6, 调整后 R^2 为 0.787 4, RMSE 为 2.085 7。拟合函数有意义且拟合精度较高。【结论】磁化作用并不是磁场强度越大或磁化时长越长磁化效果越好, 而是存在最佳磁化处理强度和磁化时长; 本研究给出的洛伦兹模型函数可作为除草剂溶液表面张力与磁化作用的函数关系式, 三次多项式函数可作为 350 mT 磁场强度下雾滴粒径调控模型。

关键词: 磁化处理; 异丙甲草胺; 表面张力; 雾滴粒径; 数据拟合

中图分类号: S499

文献标志码: A

文章编号: 1001-411X(2023)02-0324-09

Effect of magnetic field on surface tension and droplet size of metolachlor herbicide solution

WANG Yunchao¹, ZHAI Huabo², GONG Jinliang¹, ZHANG Yanfei³

(1 School of Mechanical Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255000, China; 2 Agricultural and Rural Service

Center of Xihe Town, Zichuan District, Zibo 255161, China; 3 School of Agricultural Engineering and

Food Science, Shandong University of Technology, Zibo 255000, China)

Abstract: 【Objective】To study the effect of magnetization on surface tension of herbicide solution and particle size of herbicide spray droplet, and explore a new control method of particle size of herbicide spray droplet. 【Method】The surface tension experiment of the magnetized herbicide solution and the particle size experiment of the magnetized spray droplet were designed to record the surface tension value of the herbicide

收稿日期: 2022-02-23 网络首发时间: 2022-11-23 17:31:19

首发网址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1110.S.20221123.0819.002.html>

作者简介: 王云超, 硕士研究生, 主要从事地面植保机器人施药系统设计研究, E-mail: 872208066@qq.com; 通信作者: 张彦斐, 教授, 博士, 主要从事生态无人农场技术研究, E-mail: 1392076@sina.com

基金项目: 山东省重点研发计划“重大科技创新工程”(2020CXGC010804); 山东省自然科学基金(ZR2021MC026); 淄博市重点研发计划“校城融合类”(2019ZBXC200)

solution and the particle size value of the spray droplet under the influence of two factors of different magnetic field intensity and magnetization duration, observe the change rule of the data, and fit the data, and give the functional relationship that conforms to the description of the data change. 【Result】 When the magnetic field intensity was 50–500 mT and magnetization duration was 5.0–25.0 min, both the surface tension of solution and the particle size of spray droplet decreased firstly and then rose with the increase of magnetic field intensity and magnetization duration. When the magnetic field intensity was 350 mT and magnetization duration was 15.0 min, the surface tension and particle size of spray droplet decreased the most. The surface tension value decreased to 54.0 mN/m with a drop rate of 14.96%, and the spray droplet size decreased to 108.75 μm with a drop rate of 11.20%. For surface tension data, the determination coefficient (R^2) of Lorentz fitting function was 0.816 4, adjusted R^2 was 0.794 0, root mean square error (RMSE) was 1.105 9; And the R^2 of polynomial fitting function for spray droplet size data was 0.833 6, adjusted R^2 was 0.787 4, RMSE was 2.085 7. The fitting function was meaningful and the fitting precision was high. 【Conclusion】 It is not that the magnetization effect will be better with the increase of magnetic field intensity or magnetization duration, but that the optimal magnetization intensity and duration exist. The Lorentz model function given in this paper can be used as the function relation between the surface tension of herbicide solution and magnetization, and the cubic polynomial function can be used as the model for controlling the particle size of fog droplets under the magnetic field intensity of 350 mT.

Key words: Magnetized treatment; Metolachlor; Surface tension; Droplet size; Data fitting

生物磁学 (Biomagnetism) 是生物学和磁学相互交叉的一门新型学科, 主要探究生物磁效应及磁现象、外磁场对生物体的影响^[1-2]。生物磁学方向的研究已吸引了众多领域相关专家的高度关注。生物磁学目前已经普遍应用于环境保护工程、农业、林业等许多领域, 且已取得巨大的收益, 其中, 在农、林业领域采用最多的为磁化水^[3]。磁化水是指以一定的流速通过磁场, 受磁力线切割使自身的理化性质发生变化的水或水溶液^[4-6]。

在磁化水性质方面, Cai 等^[7] 和 Lee 等^[8] 研究了磁场对水溶液表面张力的影响, 结果表明磁化作用使水溶液表面张力降低, 在 1 T 磁场强度下磁化时间从 1 min 增加到 13 min 时, 水溶液表面张力从 68.5 mN/m 下降到 62.5 mN/m。对矿井水、纯水和自来水在不同磁场强度及不同磁化时长下表面张力的变化规律进行研究, 发现并不是磁场强度越大或磁化时间越长磁化效果就越好, 而是存在最佳磁场强度和最佳磁化时间; 在不同的磁场强度下, 表面张力随磁化时间的延长呈先减小后增加的趋势, 在磁场强度为 300 mT、磁化时间为 15 min 时表面张力下降幅度最大, 为 25%^[9-12]。Toledo 等^[13] 和 Wang 等^[14] 研究了磁场强度为 270、530 mT, 磁化时长为 20、40、60 min 条件下自来水表面张力变化情况, 通过与未磁化自来水的表面张力进行对比, 发现经磁化后自来水的表面张力均有所减小。

上述研究均是针对磁化作用对自来水、纯水或矿井水表面张力的影响进行的, 当前相关领域鲜见在磁化作用对除草剂或其他植保药剂表面张力的影响方向展开研究。药液表面张力与喷雾雾滴粒径呈密切的正相关关系^[15-16], 目前磁化作用对除草剂溶液喷雾雾滴粒径影响的研究较少。

本文通过磁化除草剂溶液表面张力试验和磁化喷雾雾滴粒径试验, 研究磁化作用对除草剂溶液表面张力与除草剂喷雾雾滴粒径的影响, 分别给出表面张力、雾滴粒径与磁场强度和磁化时间的二元函数, 为研究磁化除草剂机理提供理论参考; 并使用固定磁场强度调整磁化时长, 给出控制除草剂喷雾雾滴粒径的函数关系式, 为控制除草剂喷雾雾滴粒径提供新的参考方法。

1 材料与方法

1.1 试验设备

表面张力仪 (本创仪器, BCZ-600, 测试范围: 0~200 mN/m, 准确度: ± 0.02 mN/m, 山东省淄博市); 程控功率电流源 (北京翠海佳诚, F2031, 有效输出电压范围: 0~60 V, 输出电流范围: -5~5 A, 高步进分辨率: 0.1 mA, 北京市); 数字高斯计 (北京翠海佳诚, H-1600, 读数精度: $\pm 2\%$, 分辨率: 0.000 01 mT, 北京市); 双轭双调气隙电磁铁 (北京翠海佳诚, CH-50, 极面直径: 50 mm, 磁极间隙: 0~80 mm, 最大磁

场强度: 1 T, 北京市); 激光粒度分析仪 (欧美可, DP-02, 测试范围: 1~1 500 μm , 重复性误差: <3%, 单次测试时长: 1~2 min, 独立探测单元数: 48, 光源: He-Ne 激光器, 光源波长: 0.632 8 μm , 北京市); 隔膜泵 (额定工作电压: 12 V, 额定功率: 60 W, 最大工作压力: 0.8 MPa, 流量: 5 L/min); 可调直流稳压电源 (迈胜, MS305D, 显示精度: 3 位数字显示, 可调电压范围: 0~30 V, 可调电流范围: 0~5 A, 广东省); 压力表 (伊莱科, YTN-60, 量程: 0~1 MPa, 刻度: 0.02 MPa, 精度: $\pm 2.5\%$, 浙江省); F110-01 型植保雾化喷头; 烧杯; 玻璃器皿等。

1.2 磁化除草剂溶液表面张力试验设计

Esmailnezhad 等^[17]研究表明, 水溶液表面张力随液体温度的升高逐渐减小, 因此在试验过程中保持试验环境温度为 26 $^{\circ}\text{C}$ 。按照除草剂与自来水 1:300 的体积比配置异丙甲草胺除草剂溶液。设定最短磁化时间为 5.0 min, 最长磁化时间为 25.0 min, 以 5 min 为公差进行递增磁化, 实际磁化时长可根据试验结果进行细化调整, 试验中实际磁化时长见表 1, 试验共分 11 组处理, 处理 1 为对照组, 处理 2~11 为试验组, 共 48 组试验, 每组试验重复 4 次。处理 1 用塑料烧杯量取 40 mL 溶液, 使用表面张力仪 (图 1) 按照仪器使用方法^[12]测未磁化状态下溶液的表面张力, 测试结果显示在仪器屏幕上, 为保证数据准确性, 重复测 3 次取平均值, 为 63.5 mN/m, 当作对照值。处理 2~11 均使用静态磁化处理, 以处理 2 为例, 调整程控功率电流源使两磁极间磁场强度为 50 mT, 量取 40 mL 溶液置于塑

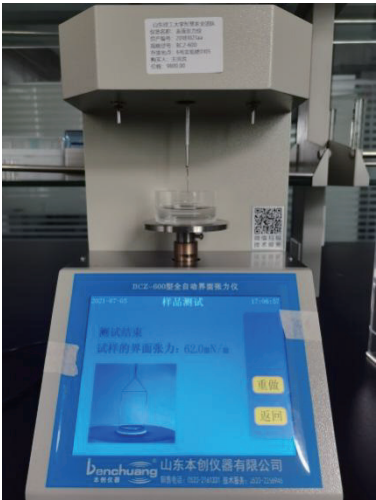


图 1 表面张力仪
Fig. 1 Surface tension instrument

料烧杯中, 将烧杯夹紧于双轭双调气隙电磁铁两磁极中间进行磁化处理, 如图 2 所示。磁化水表面张力状态约能保持 25 min^[12, 18], 为确保所有试验组各变量一致, 磁化完毕后立即用表面张力仪测试溶液表面张力并记录数据。之后每个处理的磁场强度递增 50 mT, 且各处理的操作步骤参照处理 2 进行。

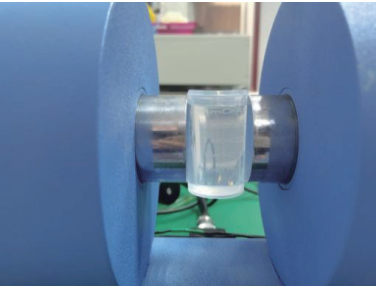


图 2 静态磁化
Fig. 2 Static magnetization

表 1 磁化除草剂溶液表面张力试验设计表
Table 1 Test program list of surface tension of magnetized pesticide solution

处理编号 No. of treatment	磁场强度/mT Magnetic field intensity	磁化时间/min Magnetization time
1	0	
2	50	5.0、10.0、15.0、17.5、20.0
3	100	5.0、10.0、15.0、20.0、25.0
4	150	5.0、10.0、15.0、20.0、25.0
5	200	5.0、10.0、15.0、17.5、20.0
6	250	5.0、10.0、15.0、17.5、20.0
7	300	5.0、10.0、15.0、17.5、20.0
8	350	5.0、10.0、15.0、17.5、20.0
9	400	5.0、10.0、12.5、15.0
10	450	5.0、10.0、12.5、15.0
11	500	5.0、10.0、12.5、15.0

1.3 磁化除草剂溶液雾滴粒径试验设计

喷施压力是影响喷雾雾滴粒径的关键因素^[19-20], 试验中通过手动调整隔膜泵调压螺丝, 设定喷施压力为 0.3 MPa, 使用稳压电源供给隔膜泵稳定的 12 V 额定工作电压, 确保所有试验组喷施压力一致; 扇形喷面不同位置的雾滴粒径也有较大差别^[21], 所有试验组雾滴粒径测试点设定为扇形喷面对称中心线上距离喷头 40 cm 处。试验环境温度保持为 26 $^{\circ}\text{C}$, 喷施系统管长 (磁极至雾化喷头水管长度) 设为 1 m, 按照除草剂与自来水 1:300 的体积比配置试验溶液。

由于静态磁化单次最多磁化 50 mL 溶液, 而单次喷雾雾滴粒径测试过程使用溶液量为 1 L 左右, 因此, 所有试验组使用的溶液均参照常规方式以一定流速通过磁场进行磁化^[22]。为增加磁化效果, 使

用多排管和循环磁化方式对溶液进行增效磁化, 为避免雾滴粒径测试过程中出现溶液量不足的现象, 设定单次循环磁化溶液量为 3 L, 增效磁化装置如图 3 所示。磁化除草剂雾滴粒径试验设计同表 1, 循环磁化时长与静态磁化时长对应一致, 对照组与试验组共 48 组试验。处理 1 不进行磁化处理, 用雾滴粒径仪重复测 3 次取平均值, 为 122.47 μm , 当作

对照值, 试验中以体积中值直径 (Volume median diameter, VMD) 表示雾滴直径。处理 2 设置磁场强度为 50 mT, 循环磁化完毕后立即用激光粒度仪测磁化后溶液喷雾雾滴粒径并记录数据。之后每个处理磁场强度递增 50 mT, 操作步骤参照处理 2 进行。磁化溶液雾滴粒径测试系统如图 4 所示。

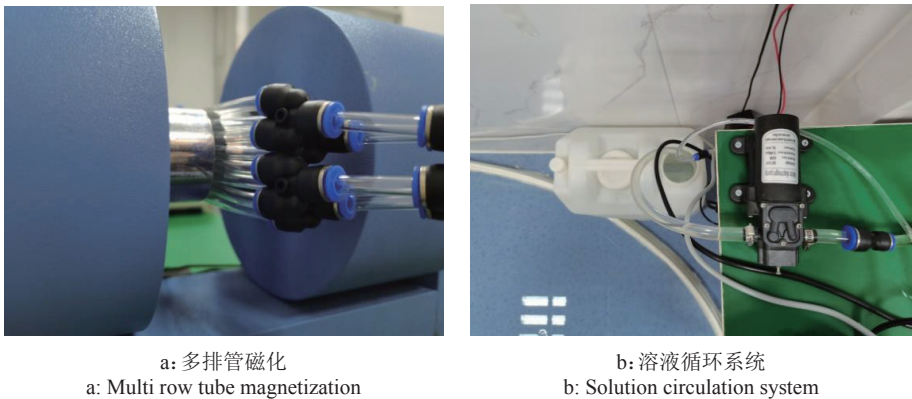


图 3 增效磁化装置
Fig. 3 Magnetization enhancement instrument

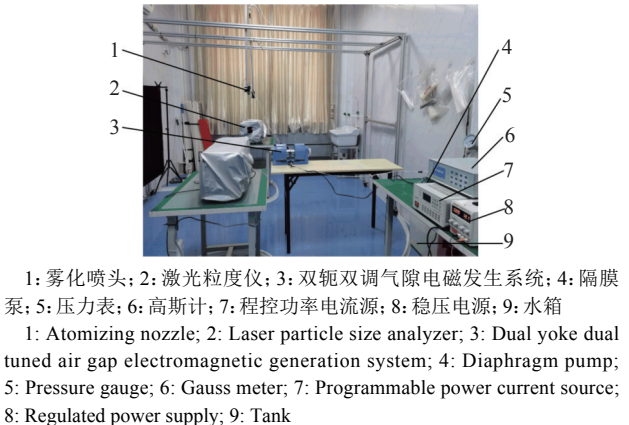


图 4 磁化溶液雾滴粒径测试系统
Fig. 4 Particle size measurement system for droplets of magnetized solution

2 结果与分析

2.1 磁化除草剂溶液表面张力

为了直观地分析磁场强度和磁化时长 2 个因素共同作用对除草剂溶液表面张力的影响规律, 建立以磁场强度和磁化时长为自变量、以溶液表面张力为因变量的二元函数, 使用 OriginPro 2018 绘制磁场强度和磁化时长对表面张力影响规律的空间曲面分布图 (图 5)。由图 5 可以看出, 磁场强度和磁化时长对溶液表面张力影响规律的空间曲面分布图呈峰值为负值的高斯空间分布规律, 即空心圆锥面分布, 这说明并不是磁场强度越大或者磁化时

间越长, 除草剂溶液的表面张力就越小, 而是存在处理效果最佳的磁场强度和磁化时长。磁化除草剂溶液表面张力试验结果见表 2。当磁场强度为 350 mT、磁化时长为 15.0 min 时, 除草剂溶液表面张力值最小, 为 54.0 mN/m, 下降 14.96%, 磁化效果最佳。

2.2 磁化除草剂溶液表面张力拟合

为了进一步分析并预测试验中未涉及到的磁场强度和磁化时长对除草剂溶液表面张力的影响, 以及给出符合描述表面张力随磁场强度和磁化时长变化的函数关系, 使用 OriginPro 2018 非线性曲面拟合功能分别对磁化除草剂溶液表面张力数据

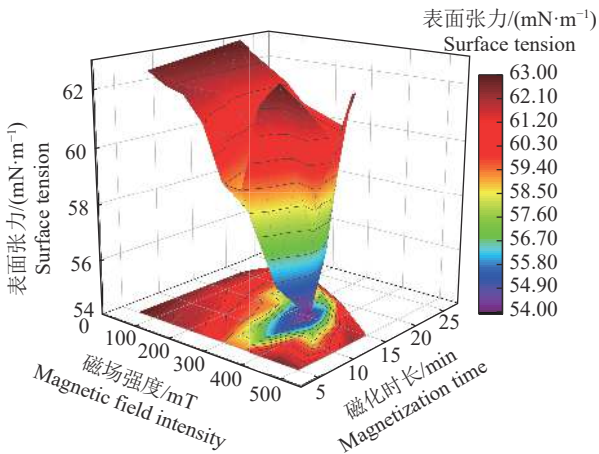


图 5 磁化除草剂溶液表面张力图
Fig. 5 Surface tension distribution diagram of magnetized herbicide solution

表 2 磁化除草剂溶液表面张力试验结果

Table 2 Results of surface tension test of magnetized herbicide solution

磁场强度/mT Magnetic field intensity	磁化时长/min Magnetization time	表面张力/(mN·m ⁻¹) Surface tension	磁场强度/mT Magnetic field intensity	磁化时长/min Magnetization time	表面张力/(mN·m ⁻¹) Surface tension
50	5.0	63.2	250	20.0	60.3
50	10.0	62.8	300	5.0	59.5
50	15.0	62.3	300	10.0	57.6
50	17.5	62.7	300	15.0	55.2
50	20.0	63.0	300	17.5	56.3
100	5.0	62.7	300	20.0	57.5
100	10.0	61.9	350	5.0	59.4
100	15.0	61.4	350	10.0	55.6
100	20.0	61.1	350	15.0	54.0
100	25.0	61.3	350	17.5	56.2
150	5.0	62.3	350	20.0	60.5
150	10.0	61.9	400	5.0	62.2
150	15.0	60.8	400	10.0	59.6
150	20.0	60.2	400	12.5	57.2
150	25.0	60.6	400	15.0	57.9
200	5.0	62.1	450	5.0	63.0
200	10.0	60.5	450	10.0	59.0
200	15.0	59.7	450	12.5	60.4
200	17.5	58.6	450	15.0	62.1
200	20.0	58.9	500	5.0	62.5
250	5.0	61.3	500	10.0	60.9
250	10.0	59.7	500	12.5	62.4
250	15.0	59.2	500	15.0	61.7
250	17.5	57.7			

进行最小二乘法多项式拟合、高斯拟合和洛伦兹拟合，函数关系式分别为公式 (1)(2)(3)。

$$z = z_0 + A_1x + A_2x^2 + A_3x^3 + A_4x^4 + A_5x^5 + B_1y + B_2y^2 + B_3y^3 + B_4y^4 + B_5y^5, \tag{1}$$

式中， z 表示溶液表面张力， z_0 表示零点偏移量， x 表示磁场强度， y 表示磁化时长， $A_1\sim A_5$ 分别为 $x\sim x^5$ 的系数， $B_1\sim B_5$ 分别为 $y\sim y^5$ 的系数。

$$z = z_0 + A \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left(\frac{x - x_c}{w_1} \right)^2 - \frac{1}{2} \left(\frac{y - y_c}{w_2} \right)^2 \right\}, \tag{2}$$

式中， A 表示模型峰值高度， x_c 与 y_c 表示模型峰中心位置， w_1 与 w_2 表示模型峰宽度。

$$z = z_0 + \frac{A}{\left[1 + \left(\frac{x - x_c}{w_1} \right)^2 \right] \left[1 + \left(\frac{y - y_c}{w_2} \right)^2 \right]}. \tag{3}$$

多项式拟合模型的参数 (平均值 $\pm$ 标准误) 如下所示： $z_0 = 116.16 \pm 43.94$ ， $A_1 = -0.23 \pm 0.10$ ， $A_2 = 0.002 \pm 0.001$ ， $A_3 = (-1.19 \pm 0.45) \times 10^{-5}$ ，

$A_4 = (2.25 \pm 0.88) \times 10^{-8}$ ， $A_5 = (-1.91 \pm 0.64) \times 10^{-11}$ ， $B_1 = -19.950 \pm 19.724 \ 9$ ， $B_2 = 3.22 \pm 3.21$ ， $B_3 = -0.24 \pm 0.24$ ， $B_4 = 0.009 \pm 0.008$ ， $B_5 = (-1.22 \pm 1.30) \times 10^{-4}$ 。表 3 为高斯拟合模型和洛伦兹拟合模型参数，表 4 为溶液表面张力 3 种拟合曲线的统计量。由表 4 可以看出，3 种拟合方式的决定系数 (R^2) 均大于 0.79，调整后 R^2 (Adjusted R^2) 均大于 0.73，这说明拟合函数有意义，且均方根误差 (Root mean square error, RMSE) 都小于 1.5。3 种拟合模型均能够描述磁场强度和磁化时长对除草剂溶液表面张力的影响，但相比较于其他 2 种拟合方式，洛伦兹拟合 R^2 为 0.816 4，调整后 R^2 为 0.794 0，两者均大于其他 2 种拟合方式， R^2 与调整后 R^2 越大，说明拟合效果越好；RMSE 为 1.105 9，均小于其他 2 种拟合方式，RMSE 越小，说明预测模型描述试验数据越精确。

结合观测 3 种拟合模型的曲面图，得出洛伦兹拟合模型最优 (图 6)。除草剂溶液表面张力与磁场

表 3 高斯拟合模型和洛伦兹拟合模型参数¹⁾

Table 3 Parameters of Gaussian fitting model and Lorentz fitting model

模型 Model	z_0	A	x_c	w_1	y_c	w_2
高斯拟合 Gaussian fitting	62.10±0.29	-7.39±0.64	321.61±6.22	77.98±8.13	14.03±0.47	5.30 ±0.64
洛伦兹拟合 Lorentz fitting	62.69±0.40	-8.65±0.78	323.40±5.71	85.23±13.64	14.16±0.49	6.78 ±1.13

1)表中数据为平均值±标准误; z_0 : 零点偏移量, A : 模型峰值高度, x_c : 模型峰 x 轴中心位置坐标值, w_1 : x 轴方向模型峰宽度, y_c : 模型峰 y 轴中心位置坐标值, w_2 : y 轴方向模型峰宽度

1) Data in the table are mean ± standard error; z_0 : Zero offset, A : Model peak height, x_c : Coordinate value of model peak x -axis central position, w_1 : Width of model peak in x -axis direction, y_c : Coordinate value of model peak y -axis central position, w_2 : Width of model peak in y -axis direction

表 4 表面张力拟合曲线统计量

Table 4 Fitting curve statistics of surface tension

模型 Model	均方根误差 RMSE	决定系数 R^2	调整后 R^2 Adjusted R^2	迭代次数 Iterations	拟合状态 Fitting state
多项式拟合 Polynomial fitting	1.412 6	0.794 1	0.736 9	10	拟合 Fitting
高斯拟合 Gaussian fitting	1.148 5	0.809 4	0.786 1	14	拟合 Fitting
洛伦兹拟合 Lorentz fitting	1.105 9	0.816 4	0.794 0	12	拟合 Fitting

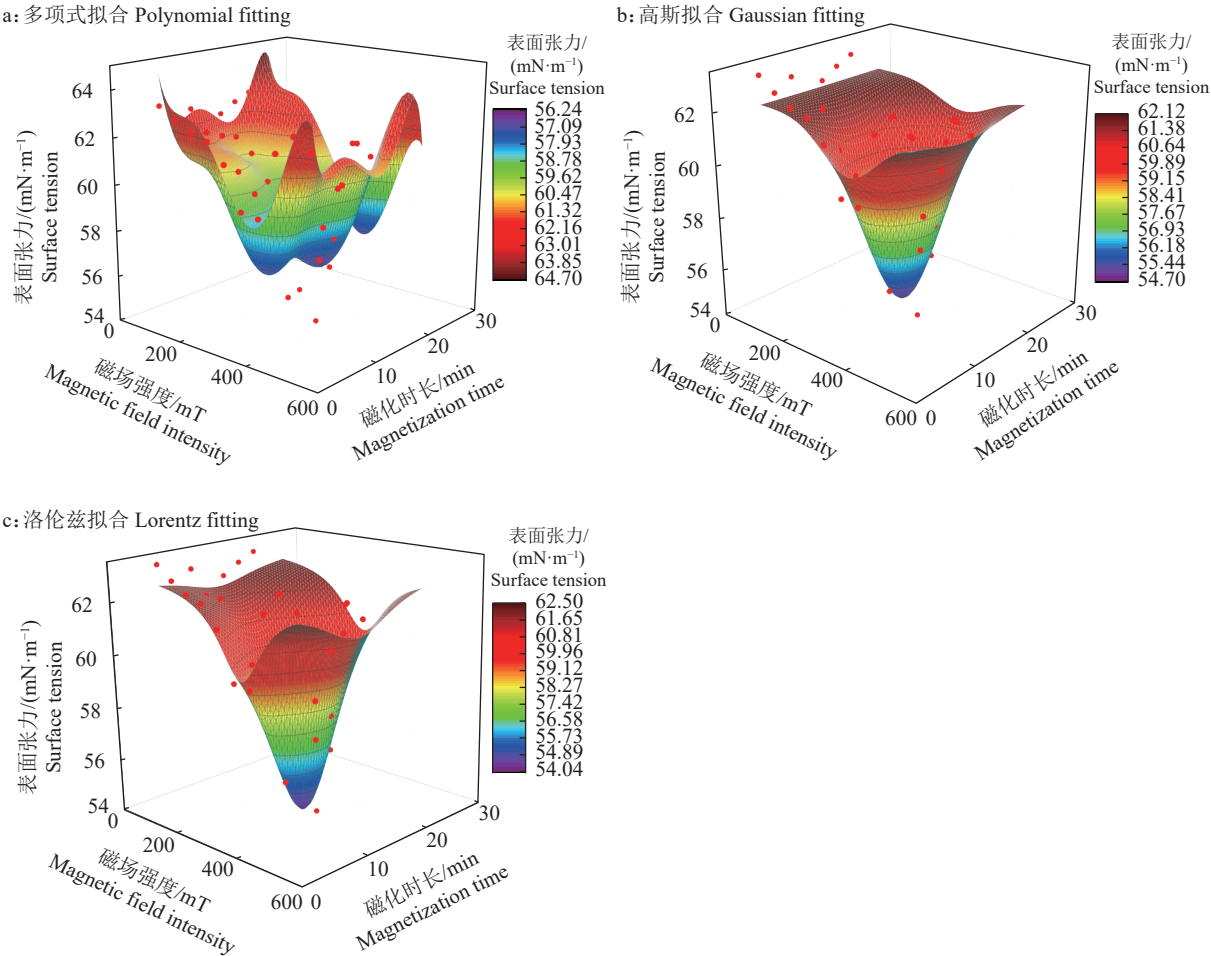


图 6 磁化除草剂溶液表面张力拟合曲面

Fig. 6 Surface tension fitting surface of magnetized herbicide solution

强度和磁化时长的关系式见公式 (4), 为研究磁化作用对除草剂溶液表面张力的影响提供理论参考。

$$\sigma = 62.69 - \frac{8.65}{\left[1 + \left(\frac{H - 323.40}{85.23}\right)^2\right] \left[1 + \left(\frac{t - 14.16}{6.78}\right)^2\right]}, \quad (4)$$

式中, σ 为表面张力, H 为磁场强度, t 为磁化时长。

2.3 磁化除草剂溶液雾滴粒径

在不同磁场强度和不同磁化时长共同影响下除草剂溶液喷雾雾滴粒径分布见图 7。磁化除草剂溶液雾滴粒径试验结果见表 5。当磁场强度为 350 mT、循环磁化时长为 15.0 min 时, 喷雾雾滴粒径达到最小值, 为 108.75 μm , 下降 11.20%。多数试验证明单个雾滴所产生的影响远大于其本身的粒径范围, 在符合除草剂最佳生物粒径 (100~300 μm) 要求的同时, 减小雾滴粒径可以减少农药使用量^[23-24]。与磁化除草剂溶液表面张力变化趋势对比, 在 50~500 mT 磁场范围内, 表面张力与雾滴粒径均随磁化时长的

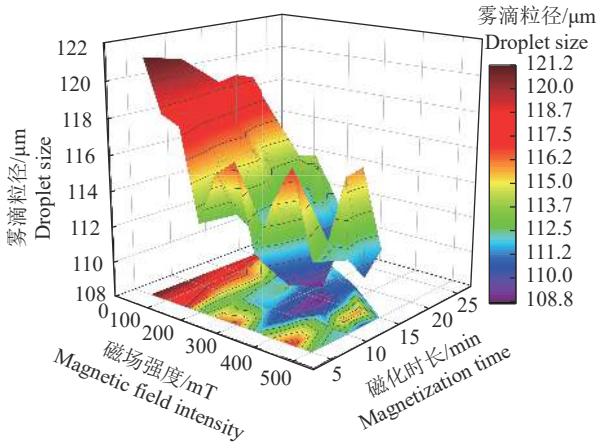


图 7 磁化除草剂溶液喷雾雾滴粒径图

Fig. 7 Droplet size distribution diagram of magnetized herbicide solution

增加呈现先下降后回升的趋势, 两者总体变化趋势一致, 但变化率不同, 这可能是磁化方式和磁化溶液量不同导致的。该结果同样表明并不是磁化处理时间越长或磁场强度越大, 喷雾的雾滴粒径就越

表 5 磁化除草剂溶液雾滴粒径测试结果

Table 5 Test results of aerosol droplet size of magnetized herbicide solution

磁场强度/mT	磁化时长/min	雾滴粒径/ μm	磁场强度/mT	磁化时长/min	雾滴粒径/ μm
Magnetic field intensity	Magnetization time	Droplet size	Magnetic field intensity	Magnetization time	Droplet size
50	5.0	121.19	250	20.0	113.37
50	10.0	120.71	300	5.0	116.74
50	15.0	119.03	300	10.0	111.43
50	17.5	119.24	300	15.0	110.35
50	20.0	118.88	300	17.5	111.02
100	5.0	118.37	300	20.0	111.20
100	10.0	117.96	350	5.0	112.16
100	15.0	116.99	350	10.0	109.65
100	20.0	114.07	350	15.0	108.75
100	25.0	113.86	350	17.5	110.67
150	5.0	117.91	350	20.0	110.68
150	10.0	115.44	400	5.0	115.03
150	15.0	115.55	400	10.0	113.30
150	20.0	112.47	400	12.5	110.94
150	25.0	114.12	400	15.0	111.60
200	5.0	112.93	450	5.0	117.16
200	10.0	112.72	450	10.0	112.68
200	15.0	112.33	450	12.5	115.71
200	17.5	111.29	450	15.0	115.97
200	20.0	111.07	500	5.0	112.65
250	5.0	115.87	500	10.0	111.98
250	10.0	111.98	500	12.5	110.63
250	15.0	112.51	500	15.0	111.77
250	17.5	111.32			

小, 而是存在处理效果最佳的磁场强度和磁化时长。

2.4 磁化除草剂溶液雾滴粒径分布拟合及模型验证

为直观地分析雾滴粒径变化情况, 参照“2.2”表面张力数据拟合方法对喷雾雾滴粒径进行多项式拟合、高斯拟合和洛伦兹拟合, 但高斯拟合与洛伦兹拟合在达到最大迭代次数之后拟合结果仍不收敛, 所以采用多项式拟合模型。多项式拟合结果中, R^2 为 0.833 6, 调整后 R^2 为 0.787 4, RMSE 为 2.085 7, 这说明拟合函数有意义且拟合程度较高, 公式 (5) 为除草剂喷雾雾滴粒径与磁场强度和磁化时长的函数关系式, 图 8 为磁化除草剂溶液雾滴粒径拟合曲面。

$$D=116.16-0.23H+2.00^{-3}H^2-1.19^{-5}H^3+2.25^{-8}H^4-1.91^{-11}H^5-19.95t+3.22t^2-0.24t^3+9t^4-1.22^{-4}t^5,$$

(5)

式中, D 为雾滴粒径。

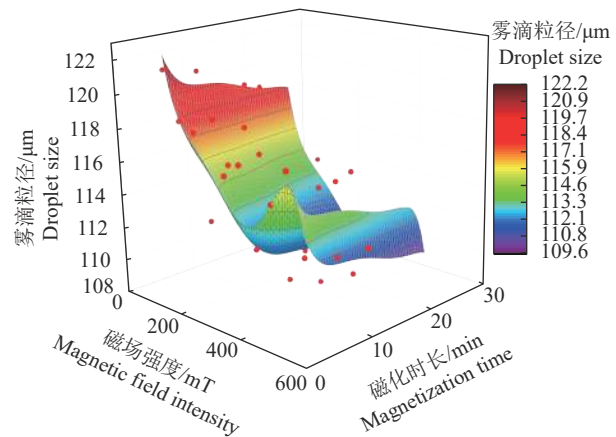


图 8 磁化除草剂溶液雾滴粒径拟合曲面
Fig. 8 Fitting surface of fog droplet size of magnetized herbicide solution

为方便高效地达到利用磁化方式控制喷雾雾滴粒径的目的, 经“2.3”分析, 当磁场强度为 350 mT 时, 随着磁化时长的变化, 雾滴粒径变化范围最大, 因此以固定磁场强度调整磁化时长的方式控制喷雾雾滴粒径。对磁场强度为 350 mT 时雾滴粒径随磁化时长变化的数据进行三次多项式拟合, 拟合结果中, R^2 为 0.990 5, 调整后 R^2 为 0.977 4, RMSE 为 1.162 3。三次多项式函数 (6) 可作为 350 mT 磁场强度下雾滴粒径调控模型, 图 9 为磁化时长与雾滴粒径拟合曲线。

$$D=122.400\,0-2.836\,3t+0.188\,3t^2-0.003\,8t^3。$$

(6)

为验证 350 mT 磁场强度时雾滴粒径调控模型的实际应用价值, 参考磁化除草剂溶液雾滴粒径的试验设计, 在磁场强度为 350 mT 前提下, 对除草剂

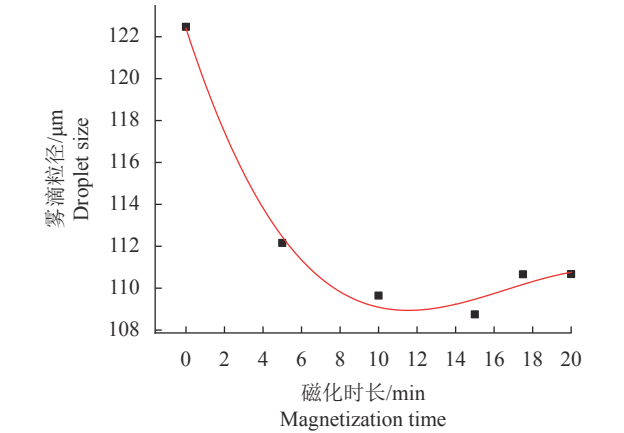


图 9 磁化时长与雾滴粒径拟合曲线
Fig. 9 Fitting curve of magnetization time and fog droplet size

溶液分别循环磁化 5.0、10.0、15.0、20.0 min, 实测雾滴粒径与模型理论雾滴粒径见表 6, 经过分析, 实测值与理论值相对误差均小于 1%, 此模型具有实际应用价值。

表 6 模型验证分析			
Table 6 Model validation analysis			
磁化时长/min Magnetization time	实测雾滴 粒径/μm Measured droplet size	理论雾滴 粒径/μm Theoretical droplet size	相对误差/% Relative error
5.0	113.22	112.45	0.68
10.0	110.16	109.07	0.99
15.0	108.54	109.39	0.78
20.0	110.78	110.59	0.17

3 结论与讨论

1) 在 0~500 mT 磁场强度范围内, 当磁场强度为 350 mT、磁化时间为 15.0 min 时, 表面张力最小, 为 54.0 mN/m, 下降 14.96%; 喷雾雾滴粒径最小, 为 108.75 μm, 下降 11.20%。溶液表面张力和喷雾雾滴粒径随磁场强度和磁化时长的增加均呈现先下降后回升的趋势, 表明只有在特定磁场强度和磁化时长范围内磁化效果才最佳。

2) 对磁化除草剂溶液表面张力和喷雾雾滴粒径进行拟合处理, 洛伦兹拟合模型最符合除草剂溶液表面张力受磁场强度和磁化时长影响的变化规律, 以洛伦兹模型函数作为表面张力与磁场强度和磁化时长的函数关系式; 多项式拟合模型能有效描述除草剂溶液喷雾雾滴粒径受磁场强度和磁化时长影响的变化规律, 以固定磁场强度调整磁化时长的方法给出了 350 mT 磁场下调控喷雾雾滴粒径的函

数关系式。

3) 除草剂溶液经磁化作用后, 其喷雾雾滴粒径可由 122.47 μm 下降到 108.75 μm , 下降 11.20%, 有效减小雾滴粒径且符合最佳生物雾滴粒径要求, 为除草剂溶液喷施作业中雾化特性控制提供新的参考。

喷施压力、喷头型号、磁化溶液量等多种因素都可能对磁化效果产生影响, 在后续研究中应尽可能建立有多影响因素参数的函数关系式; 除此之外, 磁化作用通过影响除草剂溶液表面张力而间接影响雾滴粒径, 可通过研究表面张力与雾滴粒径关系模型来优化磁化作用与雾滴粒径的函数关系式。

参考文献:

[1] 张东彦, 兰玉彬, 陈立平, 等. 中国农业航空施药技术研究进展与展望[J]. *农业机械学报*, 2014, 45(10): 53-59.

[2] 李莲芝, 阎志平. 生物磁学在农业上的应用现状刍议[J]. *河南农业大学学报*, 1991(3): 325-332.

[3] IM C H, JUN S C, SEKIHARA K. Recent advances in biomagnetism and its applications[J]. *Biomedical Engineering Letters*, 2017, 7(3): 183-184.

[4] 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.

[5] ZHOU Q, QIN B T, WANG F, et al. Experimental investigation on the performance of a novel magnetized apparatus used to improve the dust wetting features of surfactant-magnetized water[J]. *Powder Technology*, 2019, 354: 149-157.

[6] 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.

[7] CAI R, YANG H W, HE J S, et al. The effects of magnetic fields on water molecular hydrogen bonds[J]. *Journal of Molecular Structure*, 2009, 938(1/2/3): 15-19.

[8] LEE S H, JEON S I, KIM Y S, et al. Changes in the electrical conductivity, infrared absorption, and surface tension of partially-degassed and magnetically-treated water[J]. *Journal of Molecular Liquids*, 2013, 187: 230-237.

[9] MOOSA G M, KHULAEF J H, KHRAIBT A C, et al. Effect of magnetic water on physical properties of different kind of water, and studying its ability to dissolving kidney stone[J]. *Journal of Natural Sciences Research*, 2015, 5(18): 85-94.

[10] HUO Z F, ZHAO Q, ZHANG Y H. Experimental study on effects of magnetization on surface tension of

water[J]. *Procedia Engineering*, 2011, 26: 501-505.

[11] LIU J S, CAO Y. Experimental study on the surface tension of magnetized water[J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2021, 121: 105091. doi: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2020.105091.

[12] 聂百胜, 丁翠, 李祥春, 等. 磁场对矿井水表面张力影响规律的实验研究[J]. *中国矿业大学学报*, 2013, 42(1): 19-23.

[13] 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(1/2/3): 409-415.

[14] WANG Y F, ZHANG B, GONG Z B, et al. The effect of a static magnetic field on the hydrogen bonding in water using frictional experiments[J]. *Journal of Molecular Structure*, 2013, 1052: 102-104.

[15] 王玲, 兰玉彬, HOFFMANN W C, 等. 微型无人机低空变量喷药系统设计与雾滴沉积规律研究[J]. *农业机械学报*, 2016, 47(1): 15-22.

[16] 文晟, 兰玉彬, 张建桃, 等. 农用无人机超低容量旋流喷嘴的雾化特性分析与试验[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(20): 85-93.

[17] 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.

[18] 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.

[19] 郑志雄, 薛秀云, 宋淑然, 等. 基于 PDA 系统单喷嘴雾滴参数的试验研究[J]. *农机化研究*, 2021, 43(2): 110-117.

[20] 代秋芳, 洪添胜, 宋淑然, 等. 压力及孔径对管道喷雾空心圆锥雾喷头雾滴参数的影响[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(15): 97-103.

[21] 王双双, 何雄奎, 宋坚利, 等. 农用喷头雾化粒径测试方法比较及分布函数拟合[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(20): 34-42.

[22] 秦波涛, 周刚, 周群, 等. 煤矿综采工作面活性磁化水喷雾降尘技术体系与应用[J]. *煤炭学报*, 2021, 46(12): 3891-3901.

[23] 袁会珠, 王国宾. 雾滴大小和覆盖密度与农药防治效果的关系[J]. *植物保护*, 2015, 41(6): 9-16.

[24] 兰玉彬, 彭瑾, 金济. 农药喷雾粒径的研究现状与发展[J]. *华南农业大学学报*, 2016, 37(6): 1-9.

【责任编辑 李庆玲】