

不同水源磁化处理对生菜光合和矿质元素及产量的影响

王晓帆^{1,2}, 吴勇³, 张钟莉莉², 郭瑞², 王丽学^{1*}

(1.沈阳农业大学 水利学院, 沈阳 110161; 2.北京农业信息技术研究中心, 北京 100097;

3.全国农业技术推广服务中心, 北京 100125)

摘要:【目的】探究不同水源磁化处理对生菜光合特性等生理生化及产量的影响。【方法】在日光温室条件下, 以意大利生菜为供试对象, 采用随机区组设计, 设置2个因素: 磁化(M)和灌溉水源(T), 磁化设置未磁化处理(M0)和磁化处理(M1)2个水平, 灌溉水源设置淡水(T1)、再生水(T2)、微咸水(T3)3个水平, 共6个处理。通过盆栽试验研究了3种水源磁化处理对生菜净光合速率、抗氧化酶活性、矿质元素及产量等的影响。【结果】不同水源磁化处理灌溉效果有所差异。生长中期, M1T1、M1T2处理分别较M0T1、M0T2处理的净光合速率显著提高11.16%、14.73%。3种水源磁化处理灌溉的超氧化物歧化酶、过氧化物酶、过氧化氢酶活性显著提高12.77%~23.09%。M1T1、M1T2处理分别较M0T1、M0T2处理的生菜叶片氮质量分数显著提高7.71%、6.83%, 生菜产量分别显著提高9.42%、10.15%, 但M1T3与M0T3处理的生菜产量无显著差异。不同水源磁化处理的生菜叶片P、Ca、Mg、Na、K质量分数有不同程度的提高, 水分利用效率提高5.03%~11.65%。【结论】磁化水灌溉有利于生菜光合等生理生化活动, 提高产量和水分利用效率, 淡水和再生水磁化效果优于微咸水。

关键词: 磁化水; 生菜; 光合特性; 矿质元素; 产量; 水分利用效率

中图分类号: S121; S636.2

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2020378

OSID:



王晓帆, 吴勇, 张钟莉莉, 等. 不同水源磁化处理对生菜光合和矿质元素及产量的影响[J]. 灌溉排水学报, 2021, 40(3): 40-47.

WANG Xiaofan, WU Yong, ZHANG ZHONG Lili, et al. Effects of Magnetization Irrigation on Photosynthesis, Mineral Elements and Yield of Lettuce Vary with Water Sources[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2021, 40(3): 40-47.

0 引言

【研究意义】随着社会发展, 我国农产品需求日益增长, 国家农产品安全与水土资源约束的矛盾日益尖锐, 提高农业水土资源的高效利用是实现农业可持续发展的重要举措^[1]。除了对传统的节水技术深入研究外, 农业节水研究还向磁场、激光等更广泛的领域拓展, 其中磁化水技术受到越来越多学者的关注。

【研究进展】水通过磁场后性能发生改变, 成为磁化水^[2-4]。对磁化水的研究始于20世纪40年代, Vermeiren首先发现磁化水能抑制水垢的形成, 并获得专利^[5]。目前对磁化水的研究已涉及工业、农业、医学等多个领域^[6-8]。磁化水在农业生产上的应用主要为磁化水灌溉, 磁化水灌溉能够提高土壤和作物体内的酶活性^[9-10], 影响作物光合效率^[11]。韦业等^[12]研究

发现, 磁化水灌溉显著提高葡萄叶片的净光合速率, 而蒸腾速率无显著差异, 表明磁化水处理下的植株光合性能提高, 有利于植物有机物的合成累积。磁化水灌溉能够提高作物矿质元素质量分数和产量^[13-15]。El-Shafik等^[16]通过2a不同占比的农业排水和淡水交替灌溉研究表明, 磁化水灌溉的番茄产量2a分别显著提高7.71%、8.59%。彭遥等^[17]研究发现, 田间小区滴灌条件下, 磁化水灌溉不仅提高了棉花产量, 同时水分利用效率提高了8.4%~12.9%。

【切入点】我国非常规水资源储量丰富, 2015年全国微咸水可利用量为 $8.78 \times 10^9 \text{ m}^3$, 再生水可利用量为 $3.67 \times 10^{10} \text{ m}^3$, 其中用于农业灌溉的微咸水和再生水量高达 $1.25 \times 10^9 \text{ m}^3$ ^[18]。缓解水资源短缺要做到开源与节流并重, 在大力发展农业节水的同时, 我国鼓励开发利用微咸水和再生水资源^[19-20]。磁化水灌溉在农业生产中的研究, 水源主要以淡水为主, 对再生水和微咸水的磁化处理灌溉研究较少, 磁化处理是直接对水产生改变效应, 对不同水源影响效应有所差异, 有必要研究不同水源的磁化处理灌溉对作物的影

收稿日期: 2020-07-10

基金项目: 北京市农林科学院创新能力建设项目(KJCX20180704, KJCX20200430)

作者简介: 王晓帆(1994-), 男, 硕士研究生, 主要从事节水灌溉及区域水资源高效利用研究。E-mail: wangxiaofan09@163.com

通信作者: 王丽学(1964-), 女, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事水土资源开发利用与管理研究。E-mail: wlx1964@163.com

响效应。目前磁化水灌溉的研究主要集中于对土壤水盐运移、作物生长发育和产量等表观结果^[21]，缺乏对作物光合等生理活动的研究。蔬菜作为需水量较大且对水分敏感的一类作物，适宜作为磁化水灌溉的供试对象，生菜是叶菜类蔬菜的典型代表，营养丰富，兼具一定的保健价值和药用价值，近年来栽培规模迅速增长。【拟解决的关键问题】本研究通过盆栽试验研究不同水源磁化处理灌溉对生菜光合特性、抗氧化酶活性、矿质元素和产量的影响，以期从作物生理生化方面研究磁化水灌溉对作物产量的影响效应。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验于 2019 年 10 月—2020 年 1 月在北京昌平区小汤山镇小汤山国家精准农业试验基地日光温室内进行。试验期间日光温室平均温度为 16.84 °C，平均湿度为 72.79%，温湿度变化如图 1。土壤取自基地农田 0~20 cm 的土层，为粉砂质壤土，自然风干后粉碎过 2 mm 筛，土壤理化性质见表 1。试验所用塑料盆内径 28 cm，盆高 23 cm。每盆装有 10 kg 风干土，一次性分别施用尿素（含 N 46%）、磷酸二胺（含 N 12%，P₂O₅ 42%）、硫酸钾（含 K₂O 52%）1.96、1.91、1.92 g 作为底肥，并与土壤搅拌均匀，生育期内不追肥。淡水取自日光温室水管中，总氮、总磷、氯化物质量浓度分别为 6.25、0.12、35.73 mg/L，再生水采用北京碧水再生水厂处理的二级出水，符合《城市污水再生利用农田灌溉用水水质》标准，总氮、总磷、氯化物质量浓度分别为 13.41、0.58、92.60 mg/L，向淡水中添加 2 g/L 氯化钠（分析纯）制备微咸水（矿化度 2.46 g/L）。试验品种为意大利生菜，磁化设备采用上海宣通公司生产的 Act 型磁化器，磁化器形成静态磁场，当灌溉水以垂直方向流经该磁场时，水分子产生共振，瞬时形成磁化水。灌溉时，采用 50 L 水桶供应灌溉水，750 W 增压泵增压，使得灌溉水以 2.2 m³/h 的流量通过直径为 32 mm 的 PVC 水管，制得磁化水，为保证磁化效果，磁化时间 5 min，使得水流循环 5~6 次，磁化器示意如图 2。

表 1 土壤理化性质

Table 1 Physical and chemical properties of soil

体积质量/ (g cm ⁻³)	田间持水率/ (cm ³ cm ⁻³)	饱和含水率/ (cm ³ cm ⁻³)	EC/ (mS m ⁻¹)	pH 值	有机质量/ (g kg ⁻¹)	全氮量/ (g kg ⁻¹)	铵态氮量/ (mg kg ⁻¹)	硝态氮量/ (mg kg ⁻¹)	有效磷量/ (mg kg ⁻¹)	速效钾量/ (mg kg ⁻¹)
1.42	27.99	47.61	7.20	7.66	23.00	1.18	16.60	9.80	13.40	147.00

注 土壤养分未添加底肥测定的值。

1.3 项目测定与分析方法

1.3.1 光合速率与蒸腾速率

每个生育期，采用美国 PP Systems 公司生产的

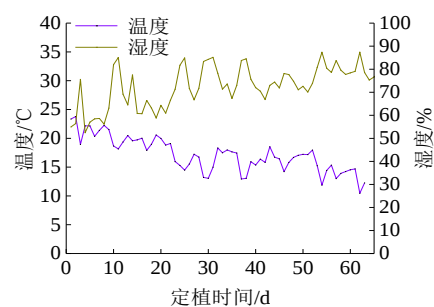


图 1 空气温湿度变化

Fig.1 Changes of air temperature and humidity

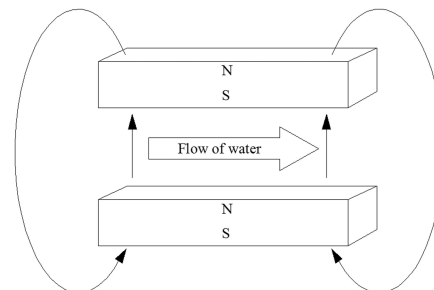


图 2 磁化器示意

Fig.2 A schematic view of the magnetizer

1.2 试验设计

试验设置 2 个因素：磁化 (M) 和灌溉水源 (T)，采用随机区组设计。磁化设置未磁化处理 (M0) 和磁化处理 (M1) 2 个水平，灌溉水源设置淡水 (T1)、再生水 (T2)、微咸水 (T3) 3 个水平，共 6 个处理组合，分别为未磁化淡水灌溉 (M0T1)、未磁化再生水灌溉 (M0T2)、未磁化微咸水灌溉 (M0T3)、磁化淡水灌溉 (M1T1)、磁化再生水灌溉 (M1T2)、磁化微咸水灌溉 (M1T3)，每个处理重复 3 次。

2019 年 11 月 26 日，选用长势相同的 6 叶 1 心期生菜定植，每盆 1 株，全生育期 69 d，划分为生长前期、中期、后期，每个时期 23 d 左右。意大利生菜喜湿，为保证生长期土壤水分充足，设置田间持水率的 80% 为灌水下限，田间持水率的 95% 为灌水上限，通过称质量法计算盆栽的土壤含水率，当土壤含水率降低到灌水下限时，进行灌水使土壤含水率达到灌水上限。

CIRAS-3 型光合仪，选择晴朗天气的 09:00—11:00，选取从上往下的第二片完全展开叶测定生菜叶片的净光合速率和蒸腾速率。

1.3.2 抗氧化酶活性

生菜收获时,选取从上往下的第1片完全展开叶的相同部位0.5 g,分3次(2、2、1 mL)共加入5 mL, 0.05 mol/L的磷酸缓冲溶液(pH值7.8)研磨、冲洗,于离心机中以4 000 r/min离心20 min,上清液用于测定抗氧化酶活性。超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)、过氧化氢酶(CAT)测定分别采用氮蓝四唑法^[22]、愈创木酚法^[22]、H₂O₂紫外吸收法^[23]。

1.3.3 叶片矿质元素

全氮采用凯氏定氮法;全磷、全钾、全钠、全钙、全镁测定采用电感耦合等离子发射光谱仪法(ICP—OES)。

1.3.4 产量

收获时,将生菜从根茎处断开,去离子水洗净根部并用吸水纸吸干,先用电子秤称量地上部和地下部的鲜质量,然后在105℃干燥箱中杀青15 min,60℃干燥至质量恒定后测定其干质量。

1.3.5 耗水量和水分利用效率

每日08:00采用电子秤测定塑料盆质量,按照灌水上、下限进行灌水,记录数据,次日同一时间称质量,二者差值为日耗水量(若有灌水,日耗水量为当日塑料盆质量加灌水量与次日盆质量差值),水分利用效率(WUE)=生菜产量/全生育期耗水量。

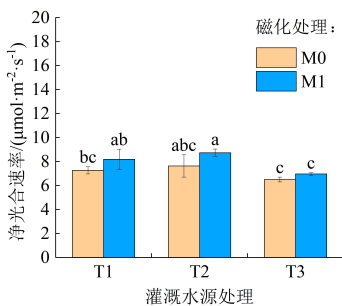
1.4 数据分析

数据处理采用Microsoft Excel 2010,图表绘制采用Origin 2017软件,统计分析采用DPS7.05软件,多重比较采用Duncan新复极差法。

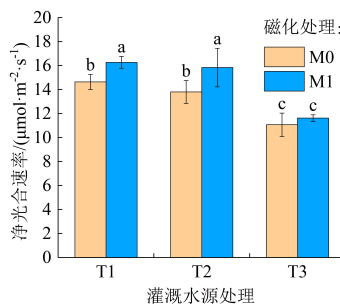
2 结果与分析

2.1 生菜光合速率与蒸腾速率分析

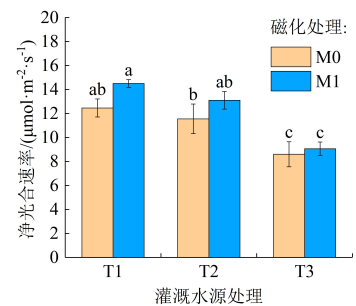
由图3可知,不同水源磁化处理后灌溉,净光合速率提高,且总体呈现生长中期净光合速率最大,生长后期净光合速率居中,生长前期净光合速率最小。生长前期与后期,3种水源磁化处理灌溉均提高了生菜净光合速率,但差异不显著;生长中期,M1T1、M1T2处理与M0T1、M0T2处理相比,生菜净光合速率分别显著提高11.16%、14.73%,M1T3处理较M0T3处理的生菜净光合速率提高4.97%,但差异不显著。除生长前期,M0T1处理较M0T2和M0T3处理的净光合速率无显著差异外,不同生长时期,微咸水较淡水和再生水灌溉的净光合速率显著降低20.16%~31.72%。与淡水和再生水相比,微咸水显著抑制生菜的净光合速率。由图4可知,不同水源磁化处理灌溉的生菜蒸腾速率有所提高,其中生长前期和中期,M1T2处理较M0T2处理的生菜蒸腾速率分别显著提高18.35%、23.57%。微咸水处理的生菜蒸腾速率较淡水和再生水处理降低,且随着生育期的推进,微咸水处理对蒸腾速率的抑制作用逐步增大。



(a) 前期



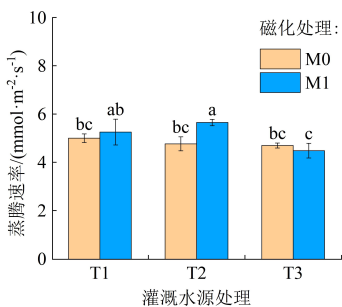
(b) 中期



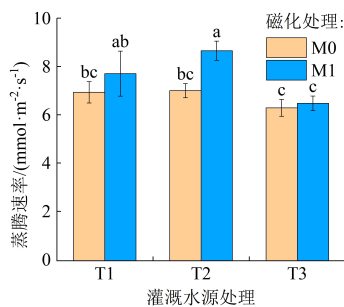
(c) 后期

图3 生菜净光合速率

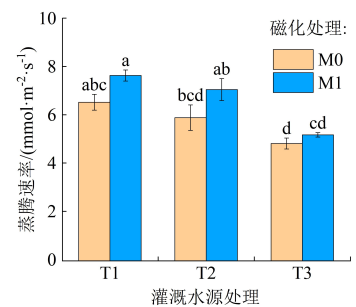
Fig.3 Net photosynthetic rate of lettuce



(a) 前期



(b) 中期



(c) 后期

图4 生菜蒸腾速率

Fig.4 Transpiration rate of lettuce of lettuce

2.2 生菜抗氧化酶活性分析

由表 2 可知，不同水源磁化处理后灌溉，SOD、POD、CAT 活性提高，M1T1 处理较 M0T1 处理分别显著提高 18.08%、20.97%、22.54%，M1T2 处理较 M0T2 处理分别显著提高 12.77%、18.14%、23.09%，M1T3 处理较 M0T3 处理分别显著提高 14.68%、16.99%、18.55%。未磁化处理下，微咸水较淡水、再生水灌溉的 SOD 和 POD 活性分别显著降低 12.20%、15.57%和 14.74%、14.14%；磁化处理下，微咸水较再生水灌溉的 SOD 活性显著降低 6.95%，微咸水较淡水、再生水灌溉的 POD 活性显著降低 6.48%、7.86%。微咸水与淡水、再生水灌溉的 CAT 活性无显著差异。

2.3 生菜叶片矿质元素分析

由表 3 可知，不同水源磁化处理后灌溉，生菜叶片氮质量分数提高，M1T1、M1T2 处理与 M0T1、M0T2 处理相比，生菜叶片氮质量分数分别显著提高 7.71%、6.83%，M1T3 处理较 M0T3 处理，生菜叶片氮质量分数提高 3.75%。M1T2、M0T3 处理下的氮质量分数分别为最大和最小处理，最大处理较最小处理显著提高 15.96%。不同水源磁化处理灌溉，生菜叶

片 P、Ca、Mg、Na、K 质量分数有不同程度的提高，但无显著差异。P、K、Mg 质量分数最大处理均为 M1T1，分别为 7.03、61.12、2.95 g/kg，较最小处理分别显著提高 20.17%、7.74%、26.61%；Ca、Na 质量分数最大处理均为 M1T3 处理，最小处理为 M0T1，M1T3 处理较 M0T1 处理分别显著提高 13.03%、92.71%。微咸水与淡水、再生水灌溉相比，N、P、Mg 质量分数有所降低，K、Ca 质量分数有所提高，Na 质量分数显著提高。

表 2 生菜抗氧化酶活性

处理	SOD/ (U g ⁻¹)	POD/ (U g ⁻¹ min ⁻¹)	CAT/ (U g ⁻¹ min ⁻¹)
M0T1	259.14±11.08b	378.33±8.79cd	35.50±0.18b
M1T1	305.99±6.74a	457.67±11.41a	43.50±0.46a
M0T2	269.46±4.45b	393.17±7.82c	33.17±0.23b
M1T2	303.87±5.58a	464.50±11.63a	40.83±0.21a
M0T3	227.51±12.62c	365.83±14.27d	34.67±0.16b
M1T3	260.90±3.80b	428.00±23.15b	41.10±0.32a

注 不同小写字母表示同列数据存在显著性差异（P<0.05），下同。

表 3 生菜叶片矿质元素

处理	N	P	K	Ca	Mg	Na
M0T1	31.76±1.38bc	6.38±0.22abc	57.94±1.27ab	5.91±0.23b	2.62±0.22bc	1.92±0.26b
M1T1	34.21±2.49a	7.03±0.31a	61.12±0.98a	6.32±0.19ab	2.95±0.20a	2.07±0.32b
M0T2	33.25±2.05b	6.89±0.29ab	56.73±1.90b	6.26±0.10ab	2.46±0.12bc	2.25±0.08b
M1T2	35.52±1.03a	6.55±0.28ab	59.25±1.25ab	6.53±0.35a	2.67±0.14ab	2.18±0.17b
M0T3	30.63±0.92c	5.85±0.57c	58.40±2.08ab	6.54±0.28a	2.33±0.08c	3.61±0.29a
M1T3	31.78±1.40bc	6.26±0.35bc	59.97±0.35ab	6.68±0.09a	2.58±0.16bc	3.70±0.22a

表 4 生菜产量和水分利用效率

处理	鲜质量/g		干质量/g		水分利用效率/(kg·m ⁻³)
	地上部	地下部	地上部	地下部	
M0T1	362.66±28.30b	17.61±0.62bc	23.71±1.85abc	2.01±0.34cd	44.24±2.80b
M1T1	396.82±21.74a	19.71±1.42ab	26.10±0.86a	2.53±0.21ab	47.98±2.41a
M0T2	353.21±12.04b	18.15±0.71bc	22.05±1.09bcd	2.26±0.17bc	43.35±2.07b
M1T2	389.06±24.65a	21.61±1.86a	25.61±1.22ab	2.72±0.19a	48.40±3.23a
M0T3	297.37±16.76c	16.46±0.49c	19.88±0.73d	1.68±0.24d	40.13±1.66c
M1T3	309.10±10.55c	18.50±0.58bc	21.56±0.64cd	1.94±0.10cd	42.15±1.05bc

2.4 生菜产量及水分利用效率分析

由表 4 可知，与 M0T1、M0T2 处理相比，M1T1、M1T2 处理生菜地上部鲜质量（产量）分别显著提高 9.42%、10.15%，M1T3 处理较 M0T3 处理生菜产量提高了 3.94%，M1T2 处理较 M0T2 处理生菜地下部鲜质量显著提高 19.06%，不同水源磁化处理后灌溉

的地上部干质量无显著差异，M1T1、M1T2 处理较 M0T1、M0T2 处理的生菜地下部干质量分别显著提高 25.87%、20.35%，水分利用效率分别显著提高 8.45%、11.65%。M1T3 处理较 M0T3 处理的生菜地下部干质量无显著差异，水分利用效率提高 5.03%。所有处理中水分利用效率最大 M1T2 处理（48.40

kg/m³) 较最小 M0T3 处理 (40.13 kg/m³), 显著提高 20.61%。

产量和地上部干质量最大处理均为 M1T1 处理, 最小处理均为 M0T3 处理, M1T1 处理较 M0T3 处理的产量和地上部干质量分别显著提高 33.44%、31.29%; 生菜地下部鲜质量和水分利用效率最大处理均为 M1T2 处理, 最小处理均为 M0T3 处理, M1T2 处理较 M0T3 处理显著提高 31.29%、20.61%。

3 讨论

植物的光合作用为自身生长发育提供有机物, 研究表明磁化水灌溉可以提高植物的光合作用^[24]。本研究发现, 生菜生长前期磁化水灌溉的净光合速率有所提高, 但未呈显著差异; 生菜生长中期, 磁化处理显著提高了生菜的净光合速率; 生长后期, 磁化水灌溉较未磁化水灌溉, 净光合速率无显著差异, 可能是生长前期磁化水灌溉处理时间较短, 随着处理时间的增长, 磁化水灌溉对生菜净光合速率的促进效果在生菜新陈代谢最旺盛的生长中期得以体现, 而在作物成熟后, 磁化水灌溉对生菜的促进效果降低^[25]。微咸水较淡水与再生水灌溉的生菜净光合速率显著降低, 因为微咸水灌溉提高土壤中 Na⁺ 量, 过高的 Na⁺ 会对植物的光合色素产生迫害作用, 降低植物的净光合速率^[26]。

植物体内的活性酶对生长发育有着重要的调节作用, 其中抗氧化酶 SOD、POD、CAT 相互协同, 抵御活性氧对植物的毒害^[27]。张佳等^[29]研究发现, 在番茄幼苗期和开花期, 磁化水灌溉的番茄叶片超氧化物歧化酶、过氧化物酶及过氧化氢酶活性提高, 表明磁化水灌溉提高了番茄的抗氧化能力。刘璇等^[30]研究亦发现, 在重金属胁迫下, 磁化水灌溉较未磁化水灌溉, 提高了玉米叶片的超氧化物歧化酶和过氧化氢酶活性。本研究中, 3 种水源磁化处理较未磁化处理灌溉, SOD、POD、CAT 活性显著提高, 在未磁化处理和磁化处理下, 微咸水较淡水、再生水灌溉的生菜叶片超氧化物歧化酶和过氧化物酶活性降低, 这与人研究结果基本一致^[31], 表明磁化水灌溉能够增强植物的抗氧化防御机制。

植物矿质营养是植物维持生长代谢的需要而吸收或利用的无机营养元素, 对植物生长生理有重要作用, 磁化水灌溉可以影响作物的矿质元素吸收^[32]。Maheshwari 等^[33]研究表明, 磁化水灌溉的芹菜 P、Ca 质量分数显著提高。本研究发现磁化水灌溉提高了生菜叶片的 N、K、Ca、Mg 质量分数, 有助于良好品质的形成。微咸水灌溉的生菜叶片氮、磷质量分数较淡水和再生水灌溉降低, 表明微咸水灌溉抑制了

生菜对土壤中氮素和磷素的吸收。钠元素是植物的必需元素, 但过高的钠质量浓度对植物的生长产生胁迫作用。淡水和再生水磁化处理灌溉, 促进生菜根系生长, 进而提高生菜产量。生菜是一种耐盐度较低的蔬菜, 可能是本研究中所用微咸水对生菜产生了较重的盐胁迫, 导致微咸水磁化处理灌溉的效果降低。同时在本研究中, 未磁化处理和磁化处理下, 再生水较淡水灌溉并没有显著提高生菜的产量, 原因是再生水中氮素质量浓度与淡水相比, 无显著的差异, Blum^[34]研究发现, 利用不同氮素质量浓度的再生水灌溉时, 当氮素质量浓度小于 12 g/L 时, 对作物的生物量无显著影响。Maheshwari 等^[33]研究还表明, 3.0 g/L 微咸水磁化处理灌溉后, 芹菜产量提高, 表明磁化水灌溉的效果与试验作物有关。作物产量与光合作用密切相关, 水分直接参与作物的光合作用, 又是生理活动中物质运输的媒介, 同时光合效率与作物叶片氮素等必需元素, 参与光合作用的酶活性等有关^[35-36]。本研究中, 磁化水灌溉提高了生菜叶片的光合效率和矿质元素质量分数, 有利于植物有机物的累积, 这可能是磁化水灌溉对作物产量和水分利用效率的一个重要影响途径。

4 结论

1) 3 种水源磁化处理灌溉可以提高生菜净光合速率, 叶片抗氧化酶活性显著提高 12.77%~23.09%, 增强了生菜抗氧化防御机制。

2) 磁化处理提高生菜叶片的矿质元素质量分数, 其中淡水和再生水磁化处理灌溉, 生菜叶片氮质量分数分别显著提高 7.71%、6.83%, 产量和水分利用效率均显著提高。微咸水较淡水和再生水灌溉的生菜产量显著降低, 淡水和再生水磁化处理效果优于微咸水。

参考文献:

- [1] 易小燕, 吴勇, 尹昌斌, 等. 以色列水土资源高效利用经验对我国农业绿色发展的启示[J]. 中国农业资源与区划, 2018, 39(10): 37-42, 77.
YI Xiaoyan, WU Yong, YIN Changbin, et al. The enlightenment of Israel's efficient utilization of land and water resources to the green development of agriculture in China[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2018, 39(10): 37-42, 77.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] VERMEIREN T. Magnetic treatment of liquids for scale and corrosion prevention[J]. Anti-Corrosion Methods and Materials, 1958, 5(7): 215-219.
- [6] SILVA J A T D, DOBRANSZKI J. Impact of magnetic water on plant growth[J]. Environmental and Experimental Biology, 2014, 12(1): 137-142.
- [7] SIMONIĆ M, URBANCL D. Alternating magnetic field influence on scaling in pump diffusers[J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 156: 445-450.
- [8] AWAD M A, HINDI A A, AL-WOhiby N, et al. Magnetic treatment of water: Properties and prevention of the growth of bacteria[J]. Journal of Computational and Theoretical Nanoscience, 2018, 15(4): 1 312-1 319.
- [9] 王录, 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.
- [10] 毕思圣. 磁化水灌溉对桑树硬枝扦插生根的影响[D]. 泰安: 山东农业大学, 2018.
BI Sisheng. Effect of magnetized water on hardwood cutting rooting of *Morus alba*[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2018.
- [11] 张瑛, 刘秀梅, 张志浩, 等. 磁化水处理对锦肋迫下欧美杨幼苗光合及生长特性的影响[J]. 中国生态农业学报, 2019, 27(2): 305-313.
ZHANG Ying, LIU Xiumei, ZHANG Zhihao, et al. Effect of magnetized water treatment on photosynthetic and growth characteristics of *Populus×euramericanna* ‘Neva’ seedlings under exogenous cadmium stress[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2019, 27(2): 305-313.
- [12] 韦业, 王录, 朱红, 等. 施氮条件下磁化水灌溉对葡萄生长和光合特性的影响[J]. 核农学报, 2020, 34(4): 849-859.
WEI Ye, WANG Lu, ZHU Hong, et al. Effects of magnetized water irrigation on growth and photosynthetic characteristics of grape under nitrogen application[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2020, 34(4): 849-859.
- [13] 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.
- [14] 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 Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(19): 107-114.
- [15] GREWAL H S, MAHESHWARI B L. Magnetic treatment of irrigation water and snow pea and chickpea seeds enhances early growth and nutrient contents of seedlings[J]. Bioelectromagnetics, 2011, 32(1): 58-65.
- [16] EL-SHAFIK EL-ZAWILY A, MELEHA M, EL-SAWY M, et al. Application of magnetic field improves growth, yield and fruit quality of tomato irrigated alternatively by fresh and agricultural drainage water[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2019, 181: 248-254.
- [17] 彭遥, 周蓓蓓, 张继红, 等. 磁化水膜下滴灌对棉田水盐分布特征及棉花生长特性的影响[J]. 水土保持学报, 2019, 33(5): 334-342, 357.
PENG Yao, ZHOU Beibei, ZHANG Jihong, et al. Effects of mulched drip irrigation with magnetized water on soil water-salt distribution and growth characteristics of cotton[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2019, 33(5): 334-342, 357.
- [18] 胡雅琪, 吴文勇. 中国农业非常规水资源灌溉现状与发展策略[J]. 中国工程科学, 2018, 20(5): 69-76.
HU Yaqi, WU Wenyong. Review and development strategy of irrigation with unconventional water resources in China[J]. Strategic Study of CAE, 2018, 20(5): 69-76.
- [19] 马中昇, 谭军利, 魏童. 中国微咸水利用的地区和作物适应性研究进展[J]. 灌溉排水学报, 2019, 38(3): 70-75.
MA Zhongsheng, TAN Junli, WEI Tong. The variation of salt-tolerance of crops in different regions irrigated with brackish water in China[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2019, 38(3): 70-75.
- [20] 崔丙健, 高峰, 胡超, 等. 非常规水资源农业利用现状及研究进展[J]. 灌溉排水学报, 2019, 38(7): 60-68.
CUI Binjian, GAO Feng, HU Chao, et al. The use of brackish and reclaimed waste water in agriculture: a review[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2019, 38(7): 60-68.
- [21] 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): 1 634-1 641.
ZHANG Ruixi, WANG Weibing, CHU Guixin. Impacts of magnetized water irrigation on soil infiltration and soil salt leaching[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2014, 47(8): 1 634-1 641.
- [22] 王学奎. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 2版. 北京: 高等教育出版社, 2006.
WANG Xuekui. Principles and techniques of plant physiological biochemical experiment[M]. Version 2. Beijing: Higher Education Press, 2006.
- [23] 张志良, 瞿伟菁, 李小方. 植物生理学实验指导[M]. 4版. 北京: 高等教育出版社, 2009.
ZHANG Zhiliang, QU Weijing, LI Xiaofang. Experimental guidance

- for plant physiology[M]. Version 4. Beijing: Higher Education Press, 2009.
- [24] 王文明, 姜益娟, 郑德明, 等. 磁化水滴灌对枣树光合作用与蒸腾作用的影响[J]. 新疆农业科学, 2010, 47(12): 2 421-2 425.
- WANG Wenming, JIANG Yijuan, ZHENG Deming, et al. Influence of magnetization water irrigation on photosynthesis and transpiration of jujube tree[J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2010, 47(12): 2 421-2 425.
- [25] ALI Y, SAMANEH R, KAVAKEBIAN F. Applications of magnetic water technology in farming and agriculture development: a review of recent advances[J]. Current World Environment, 2014, 9(3): 695-703.
- [26] JAMES R A, MUNNS R, VON CAEMMERER S, et al. Photosynthetic capacity is related to the cellular and subcellular partitioning of Na^+ , K^+ and Cl^- in salt-affected barley and durum wheat[J]. Plant Cell Environment, 2006, 29(12): 2 185-2 197.
- [27] LIU Xiumei, WANG Huatian, WANG Yanping, et al. Analysis of magnetic salinity water irrigation promoting growth and photosynthetic characteristics of *Populus × euramericana* 'Neva'[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(S1): 1-7.
- [28] 马欢欢, 高峰, 樊向阳, 等. 锌对镉胁迫下黄菖蒲抗氧化酶系统及富集镉的影响[J]. 灌溉排水学报, 2020, 39(11): 104-111.
- MA Huanhuan, GAO Feng, FAN Xiangyang, et al. The effects of Zn on antioxidant enzymes and accumulation of cadmium in *Iris Pseudacorus* under Cd stress[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2020, 39(11): 104-111.
- [29] 张佳, 李海平, 李灵芝, 等. 磁化水灌溉对番茄生长及生理特性的影响[J]. 农业工程, 2018, 8(1): 108-112.
- ZHANG Jia, LI Haiping, LI Lingzhi, et al. Effects of magnetized water irrigation on growth and physiological characteristics of tomato[J]. Agricultural Engineering, 2018, 8(1): 108-112.
- [30] 刘璇, 张婷婷, 黄馨瑶, 等. 磁化水对玉米耐受重金属镉的影响[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2008, 47(S2): 278-281.
- LIU Xuan, ZHANG Tingting, HUANG Xinyao, et al. Magnetic water improve the tolerance of corn to Cd ion[J]. Journal of Xiamen University (Natural Science), 2008, 47(S2): 278-281.
- [31] 董元杰, 陈为峰, 王文超, 等. 不同 NaCl 浓度微咸水灌溉对棉花幼苗生理特性的影响[J]. 土壤, 2017, 49(6): 1 140-1 145.
- DONG Yuanjie, CHEN Weifeng, WANG Wenchao, et al. Effects of brackish water irrigation under different NaCl concentrations on physiological characteristics of cotton seedlings[J]. Soils, 2017, 49(6): 1 140-1 145.
- [32] 王洪波, 王成福, 吴旭, 等. 磁化水滴灌对土壤盐分及玉米产量品质的影响[J]. 土壤, 2018, 50(4): 762-768.
- WANG Hongbo, WANG Chengfu, WU Xu, et al. Effects of drip irrigation with different magnetic water on soil salinity, maize yield and quality[J]. Soils, 2018, 50(4): 762-768.
- [33] 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): 1 229-1 236.
- [34] BLUM J, MELFI A J, MONTES C R, et al. Nitrogen and phosphorus leaching in a tropical Brazilian soil cropped with sugarcane and irrigated with treated sewage effluent[J]. Agricultural Water Management, 2013, 117: 115-122.
- [35] 冯晓钰, 周广胜. 夏玉米叶片水分变化与光合作用和土壤水分的关系[J]. 生态学报, 2018, 38(1): 177-185.
- FENG Xiaoyu, ZHOU Guangsheng. Relationship of leaf water content with photosynthesis and soil water content in summer maize[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(1): 177-185.
- [36] 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.

Effects of Magnetization Irrigation on Photosynthesis, Mineral Elements and Yield of Lettuce Vary with Water Sources

WANG Xiaofan^{1,2}, WU Yong³, ZHANG ZHONG Lili², GUO Rui², WANG Lixue^{1*}

(1. College of Water Conservancy, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110161, China;

2. Beijing Research Center for Information Technology in Agriculture, Beijing 100097, China;

3. National Agro-Tech Extension and Service Center, Beijing 100125, China)

Abstract: 【Background and Objective】Magnetizing the water prior to irrigation is a new technology developed over the past decades in China. The objective of this paper is to investigate how different irrigation water sources alter the effects of the magnetization on photosynthesis, physiological and biochemical characteristics, as well as the yield of lettuce. 【Method】The experiment was conducted in a solar greenhouse with the Italian lettuce taken as the model plant. It consisted of non-magnetization (M0) and magnetization (M1); added to these are three irrigation water sources: fresh water (T1), reclaimed water (T2) and saline water (T3). Overall, there were six treatments which were arranged in the greenhouse by a randomized block design. For each treatment, we measured the net photosynthetic rate, transpiration rate, antioxidant enzyme activity, mineral element, yield and water use efficiency of the lettuce.

【Result】Effects of the three water sources after magnetization on crop growth were different. For a given water source, there was no significant difference in the net photosynthetic rate between magnetization and non-magnetization in the early and late growth stage, but in the middle growth stage the magnetized fresh water and the reclaimed water increased the net photosynthetic rate of the crop by 11.16% and 14.73%, respectively. Saline water irrigation reduced the net photosynthetic rate at significant level, and there was no significant difference in net photosynthetic rate between the fresh water and reclaimed water irrigation. Magnetizing the fresh water, reclaimed and saline water increased the transpiration rate, despite not at significant, but they significantly boosted the activities of SOD by 18.08%, 12.77% and 14.68% respectively, the activities of POD by 20.97%, 18.14% and 16.99% respectively, and the activities of CAT by 22.54%, 23.09% and 18.55% respectively. In the meantime, magnetizing the fresh water and the reclaimed water increased the total nitrogen in the lettuce leaves by 7.71% and 6.83%, respectively. Magnetization also altered the content of P, Ca, Mg, Na and K in the leaves, with the alterations varying with water sources. For yield, magnetizing the fresh and the reclaimed water increased the yield by 9.42% and 10.15% at significant level, respectively, magnetizing the saline water did not lead to a noticeable change in the yield. M1T1 was most effective in improving yield and the above-ground dry mass, whereas M0T3 was the least effective. Compared with M0T3, M1T1 increased the yield and the above-ground dry mass by 33.44% and 31.29%, respectively. Depending on water sources, magnetization could also increase water use efficiency by 5.03%~11.65%. 【Conclusion】Magnetizing the water in irrigating lettuce was beneficial to its physiological and biochemical activities such as photosynthesis and antioxidant enzyme activity, thereby increasing yield and water use efficiency. But the improvement depends on water sources. In our study, magnetizing the fresh water and the reclaimed water was more effective than the saline water.

Key words: magnetized irrigation; lettuce; photosynthetic characteristic; mineral element; yield; water use efficiency

责任编辑：陆红飞