

叶面喷锌对甘蓝型油菜光合特性及相关生理指标的影响

邓秋红^{1,2*}, 罗刘明³

¹湖北科技学院基础医学院, 湖北 咸宁

²华中科技大学生命科学与技术学院, 湖北 武汉

³宝武集团武汉钢铁有限公司条材厂, 湖北 武汉

收稿日期: 2025年3月26日; 录用日期: 2025年5月13日; 发布日期: 2025年5月28日

摘要

本文以甘蓝型油菜为材料, 在田间栽培条件下研究了叶面喷锌对油菜叶片光合作用、叶片金属元素含量和叶片表观形态的影响。用英国生产的TPS-1型便携式光合仪测定喷锌组和对照组的油菜光合作用日变化, 并用微波消解法测定喷锌组与对照组的叶片金属元素含量。结果表明: 喷锌后的油菜叶片净光合速率和水分利用率提高, 同时油菜的蒸腾速率和气孔导度降低; 喷锌后的油菜叶片金属元素含量显著提高, 与对照组相比, Fe含量提高了321.52%, Ca含量提高了158.73%, Zn、Mn、Mg及Cu的含量分别提高了50.57%、48.51%、11.54%和0.9%; 油菜对锌的最大耐受浓度为0.3% ZnSO₄·7H₂O, 超过此浓度, 油菜的受害叶片数目增加, 叶片的受害面积增大。最后确定油菜叶面的最佳喷锌浓度为大约0.1% ZnSO₄·7H₂O。

关键词

甘蓝型油菜, 叶面喷锌, 净光合速率, 蒸腾速率, 金属元素含量

Effects of Spraying Zinc on Leaves on the Photosynthetic Characteristics and Its Related Physiological Parameters of *Brassica napus*

QiuHong Deng^{1,2*}, Liuming Luo³

¹School of Basic Medical Sciences, Hubei University of Science and Technology, Xianning Hubei

²College of Life Science and Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan Hubei

*通讯作者。

文章引用: 邓秋红, 罗刘明. 叶面喷锌对甘蓝型油菜光合特性及相关生理指标的影响[J]. 植物学研究, 2025, 14(3): 160-169. DOI: 10.12677/br.2025.143019

³General Wire Rod Mill, Wuhan Iron and Steel Co., Ltd., Baowu Group, Wuhan Hubei

Received: Mar. 26th, 2025; accepted: May 13th, 2025; published: May 28th, 2025

Abstract

In this paper, spraying zinc on leaves of *Brassica napus* was performed to investigate the effects of zinc on the photosynthetic characteristics, leaf metal content and exterior form of *Brassica napus* in the field under natural light conditions. The diurnal variations of photosynthetic characteristics in the zinc group and control group were measured by TPS-1 portable photosynthesis system made in England. Moreover, leaf metal element contents of the two groups were determined by microwave digestion method. The results revealed that spraying zinc on leaves enhanced net photosynthesis rate and water use efficiency of *Brassica napus*, and reduced transpiration rate and stomatal conductance of *Brassica napus* simultaneously. The metal element content of spraying zinc on leaves of *Brassica napus* increased significantly, compared with the control group, iron content increased by 321.52%, and Ca, Zn, Mn, Mg, and Cu content increased by 158.73%, 50.57%, 48.51%, 11.54%, and 0.9%, respectively. The maximum tolerant concentration of Zn for *Brassica napus* was 0.3% ZnSO₄·7H₂O. The number and the area of the damaged leaves increased when zinc concentration exceeded 0.3%. In conclusion, about 0.1% ZnSO₄·7H₂O was recommended as the optimal exogenous zinc concentration for *Brassica napus*.

Keywords

Brassica napus, Spraying Zinc on Leaves, Net Photosynthesis Rate, Transpiration Rate, Metal Element Content

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

锌是碳酸酐酶(Carbonic Anhydrase, CA)活性中心的金属离子, 在植物中碳酸酐酶催化 CO₂ 可逆的水合反应, 进而促进 CO₂ 向固定位点扩散[1]。自从 1926 年 Sommer 证实锌是植物正常生长发育所必需的元素以来, 锌在农业生产上的重要性越来越受到普遍关注[2]-[4]。赵宇瑛等对果树叶面喷锌的研究发现, 叶面喷锌能显著提高果树的光合速率[5]-[7]。王衍安等发现, 根外喷锌可以防治苹果缺锌小叶病的发生[8]。韩金玲等研究了不同喷锌水平对小麦叶片碳酸酐酶活性变化的影响, 发现各施锌处理的叶片 CA 活性均高于未施锌处理, 且 3 个不同施锌水平的 CA 活性略有不同[9]。汪洪等研究了不同土壤水分状况下及施锌对玉米水分代谢的影响, 结果表明: 干旱胁迫下, 施锌对玉米植株体内水分生理代谢有一定的调节作用, 但是在土壤水分供应充足时, 施锌更能增强玉米水分生理代谢, 提高水分利用效率[10]。

油菜是中国四大油料作物之一。目前, 我国油菜种植面积和产量都占世界油菜面积和产量的 1/3。甘蓝型油菜是十字花科芸苔属一年生草本植物, 国内有很多关于氮、磷、钾、硼等元素对油菜品质和产量的影响的研究[11]-[13], 而对油菜叶面喷锌的生理研究目前无人报道。为此, 本文就叶面喷锌对油菜光合作用及相关生理指标的影响进行了试验研究, 为探索油菜叶面喷施锌肥的指标提供理论依据和指导。

2. 材料与方法

2.1. 材料

以甘蓝型油菜为实验材料, 试验在武汉市华中科技大学生命科学与技术学院试验田进行, 土壤为半干旱型。在甘蓝型油菜的初花期选择 100 株长势基本一致的油菜为试验对象。

2.2. 试验设计

试验设 1 个对照组和 4 个喷锌组, 每组选择 20 株, 分别用 CK、W1、W2、W3、W4 表示。CK 组: 喷清水; W1 组: 喷 0.05% $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$; W2 组: 喷 0.1% $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$; W3 组: 喷 0.3% $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$; W4 组: 喷 0.5% $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 。每株喷洒 10 mL, 每组 20 株。每次喷锌或清水均在晴天上午 8:30 进行, 将液体以雾状均匀喷布在叶片的正反两面, 每 5 天喷一次, 共进行 4 次喷布实验。

2.3. 实验方法

2.3.1. 甘蓝型油菜叶片的碳酸酐酶活性的测定

分别于第 1 次喷锌后、第 2 次喷锌后、第 3 次喷锌后和第 4 次喷锌后测定不同组的叶片碳酸酐酶活性。叶片碳酸酐酶的提取方法参照 Hatch 等的方法略作修饰[14]。取田间的新鲜油菜叶片 0.5 g, 立即液氮研磨, 加 5 mL 提取缓冲液(50 mmol/L Hepes-KOH 含 10 mmol/L DTT, pH = 8.2)。12,000 rpm, 离心 10 min, 上清液储存在 0°C 待测。

碳酸酐酶活性的测定参照 Brownell 等的方法略作改进[15]。在一个 4°C 的冷冻反应室中, 加入 5 mL 测定缓冲液(20 mmol/L 巴比妥-KOH, pH = 8.3)和 0.5 mL 煮沸或未煮沸的样品液, 打开磁力搅拌器持续地搅拌使混合均匀, 再用注射器注入 4.5 mL 冰冷的 CO_2 饱和水(蒸馏水在 0°C 冰水混合物中充 CO_2 气体 1 h 获得的, 浓度大约为 70 mM)时反应开始, 测定 $\text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 \rightarrow \text{HCO}_3^- + \text{H}^+$ 过程导致的 pH 下降, 用梅特勒 pHs-320S 酸度计监测 pH 从 8.3 下降到 7.3 所需的时间。碳酸酐酶的酶活单位(U)的计算公式为: $U = 10 \times (T_0/T - 1)$, 其中 T_0 、T 分别为煮沸杀死的样品液和未煮沸的样品液测得的 pH 变化所需的时间。碳酸酐酶活性以每克新鲜叶片(或根、茎)含有的酶活单位数表示($\text{U} \cdot \text{g}^{-1}$ (FW))。所有数据均为 3 次测量的平均值。

2.3.2. 甘蓝型油菜叶光合指标的测定

采用英国 pp-system 公司生产的 TPS-1 便携式光合作用测定仪, 4 次喷锌结束后, 选择一个晴天测定 1 个 CK 组和 4 个喷锌组的光合蒸腾速率等指标的日变化, 包括净光合速率(Pn)、蒸腾速率(Tr)、气孔导度(Gs)、细胞间隙 CO_2 浓度(Ci)等的测定。水分利用率(WUE)为 Pn/Tr 计算所得[16]。每组选两片叶子, 每片叶子测定 3 组数据, 最后获得该组的各指标平均值。

2.3.3. 甘蓝型油菜叶片金属元素的测定

用微波消解法测定 CK 组与喷锌组的金属元素含量, 具体方法为: 用双蒸水洗净油菜叶片, 吸干水分, 放至烘箱 60°C 烘烤 48 h, 用玛瑙研钵研磨成粉末, 过 200 目塑料尼龙筛, 用 ETHOS-T 高压微波消解/萃取仪进行消解, 消解液稀释后定容到 10 mL。元素分析时稀释消解液至适当浓度, 用 WFX-110 原子吸收分光光度计测定其含量。喷锌 4 次后, 观察对照组和喷锌组甘蓝型油菜叶片并拍照。

3. 结果与分析

3.1. 外源锌对甘蓝型油菜叶片碳酸酐酶活性的影响

四次测定甘蓝型油菜叶片 CA 活性后发现: CA 活性大小有波动, 可能与测定当天的气候环境有关,

但是总的趋势是 W3 组的 CA 活性一直都是最高的, 而其余几组 CA 活性较低(图 1)。说明 W3 组的喷锌处理显著提高了油菜叶片的 CA 活性, 其次是 W2 组、W1 组, CK 组和 W4 组的 CA 活性大小相当。

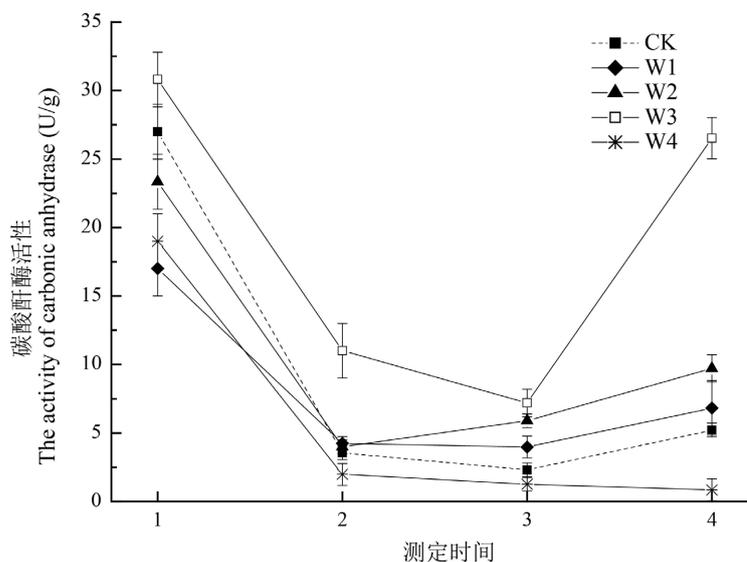


Figure 1. Effects of different concentrations of zinc on CA activity of leaf in *B. napus*
图 1. 不同浓度的锌对甘蓝型油菜叶片 CA 活性的影响

3.2. 外源锌对甘蓝型油菜光合作用的影响

3.2.1. 锌对甘蓝型油菜净光合速率的影响

净光合速率的日变化趋势如图 2 所示: 除 W4 组的净光合速率日变化呈现单峰曲线外, 其余组的净光合速率均呈现明显的双峰曲线, W3 组的净光合速率高于其他组。W3 组的净光合速率在 12:00 出现最高峰(29.45 $\mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)。CK 组与 4 个喷锌组的净光合速率相比, 差异不显著。这表明: 对甘蓝型油菜叶面喷施适当浓度的锌肥可以提高净光合速率, 有利于碳水化合物的积累, 对油菜的生长和产量的提高具有重要的意义。

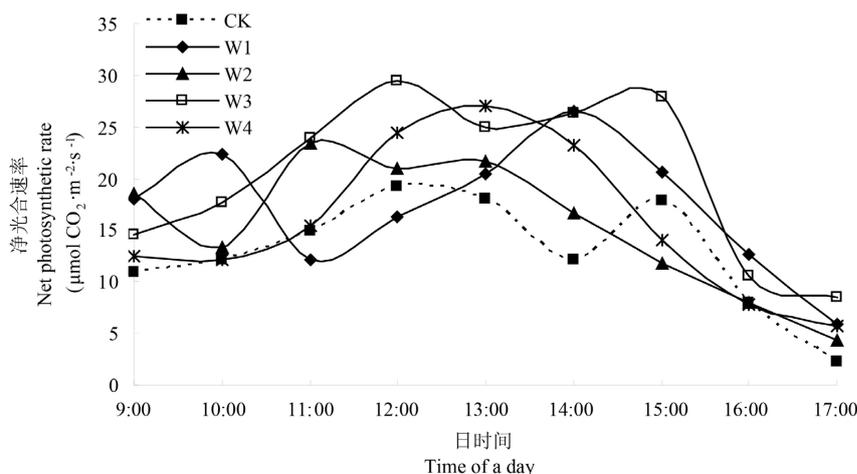


Figure 2. Effects of different concentrations of zinc on diurnal variation of net photosynthetic rate in *Brassica napus*
图 2. 不同浓度的锌对甘蓝型油菜净光合速率日变化的影响

3.2.2. 锌对甘蓝型油菜蒸腾速率的影响

5个组油菜的蒸腾速率日变化曲线基本呈“单峰型”，一天之中在13:00~15:00的蒸腾速率最高，CK组的峰值出现在14:00，其余组的峰值出现在13:00或15:00。甘蓝型油菜属于“非蒸腾午休型”植物。CK组在11:00还出现一个次高峰。在12:00以前CK组的蒸腾速率略低于其他4组，但在12:00以后CK组的蒸腾速率显著高于其他4组，在15:00以后CK组的蒸腾速率与其他4组持平。除了CK组外，其余4组的蒸腾速率日变化很平缓，没有骤升骤降。总的来讲，叶面喷锌可以大大减少14:00的蒸腾速率，一天中的气温在14:00达到最高，油菜叶片蒸腾速率的降低可以避免水分过分地蒸发散失，可以有效保护植物的组织受害，使油菜具有较好的耐受性和节水性。

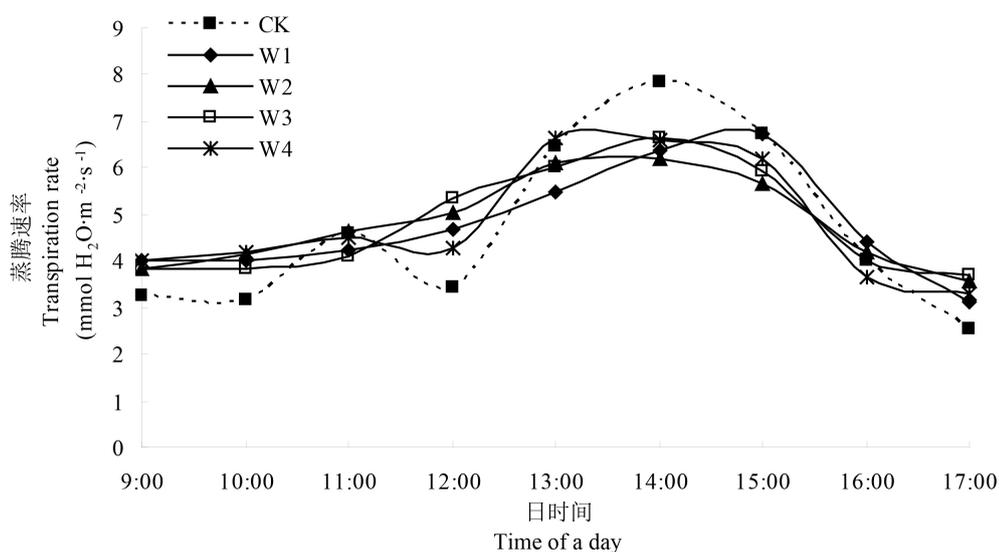


Figure 3. Effects of different concentrations of zinc on diurnal variation of transpiration rate in *Brassica napus*
图 3. 不同浓度的锌对甘蓝型油菜蒸腾速率日变化的影响

3.2.3. 锌对甘蓝型油菜气孔导度的影响

气孔导度是植物气孔传导 CO_2 和水汽的能力，气孔导度越大，代表气孔开闭程度越大，反之，气孔阻力越大，气孔开闭程度越小。植物通过改变气孔的开度等方式来控制与外界的 CO_2 和水汽交换，从而调节光合速率和蒸腾速率，以适应不同的环境条件，特别是土壤供水状况和空气湿润程度。所以气孔导度对环境因子的变化十分敏感，凡是影响植物光合作用和叶片水分状况的各种因素都有可能对气孔导度造成影响。气孔导度在光合速率日变化中所起的作用是直接而明显的，它直接影响植物的光合速率[17]。叶片气孔导度测定表明，5个组的气孔导度与蒸腾速率的日变化趋势基本一致，呈平行变化趋势。14:00出现峰值，除此之外，其余时间W1~W4组的气孔导度都大于CK组。气孔导度的日变化与蒸腾速率的日变化呈现极显著正相关。叶面喷锌使油菜叶片14:00的气孔导度明显减小(图4)，气孔导度减小反映了气孔的开度减小，进出气孔的水汽变少，从而导致所有喷锌组油菜14:00的蒸腾速率的降低(图3)。

3.2.4. 锌对甘蓝型油菜胞间二氧化碳浓度的影响

CO_2 是植物进行光合作用的主要原料之一， CO_2 主要通过叶片表面的气孔进入叶子。由图5可以看出，4个喷锌组与CK组的胞间 CO_2 浓度(Ci)日变化趋势大体一致。Ci的日变化与净光合速率日变化正好相反：W3组的胞间 CO_2 浓度在全天都是5个组中最低的，而W3组的净光合速率在全天都是5个组中最高。胞间 CO_2 浓度的日变化与净光合速率日变化大致相反，因为净光合速率较大时，固定的 CO_2 较

多, 引起胞间 CO_2 浓度降低。

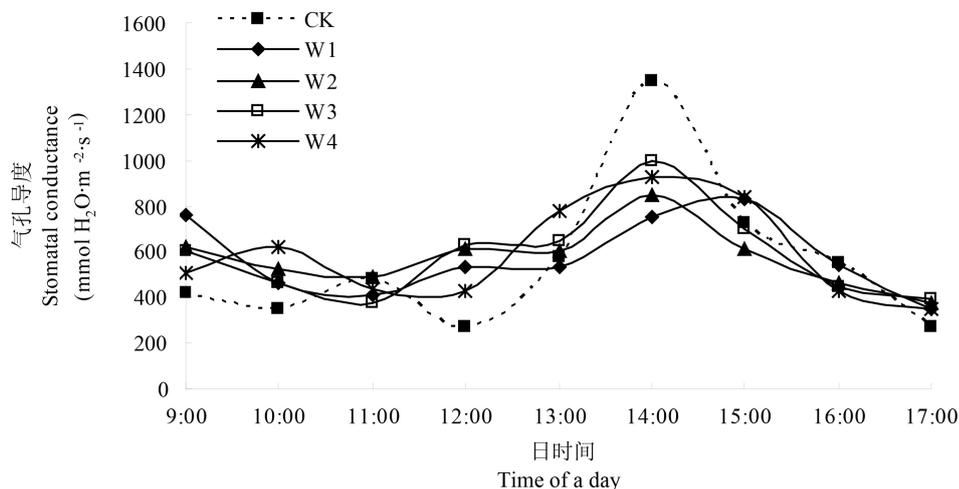


Figure 4. Effects of different concentrations of zinc on diurnal variation of stomatal conductance in *Brassica napus*

图 4. 不同浓度的锌对甘蓝型油菜气孔导度日变化的影响

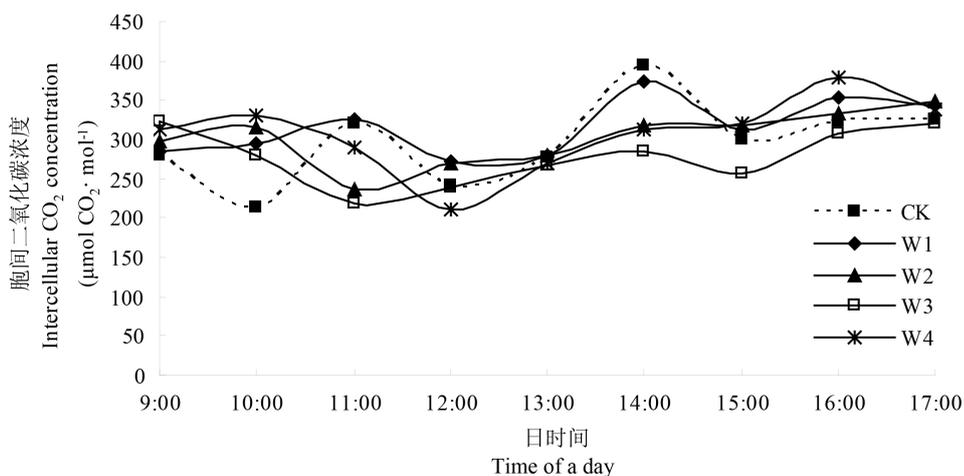


Figure 5. Effects of different concentrations of zinc on diurnal variation of intercellular CO_2 concentration in *Brassica napus*

图 5. 不同浓度的锌对甘蓝型油菜胞间二氧化碳浓度日变化的影响

3.2.5. 锌对甘蓝型油菜水分利用率的影响

植物的水分利用率(WUE)是光合速率与蒸腾速率的比值, 它实质上反映了植物消耗每单位重量水分所固定的 CO_2 的数量, 反映了植物耗水与干物质生产之间的关系[18]。甘蓝型油菜的水分利用率日变化呈现先上升后下降的总趋势。W3 组的水分利用率明显高于其他组, 水分利用率的日平均值大小顺序为: $\text{W3} > \text{W1} > \text{W4} > \text{W2} > \text{CK}$ 。CK 组的水分利用率最低。说明叶面喷锌明显提高了油菜的水分利用率。

3.3. 叶面喷锌对油菜叶片表观形态的影响

第 4 次喷锌后观察发现: 喷 0.3% $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ (W3 组)和 0.5% $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ (W4 组)的油菜下部位的叶片均出现不同程度的锈斑, 且随着喷锌浓度的增加, 锈斑面积增大。这种迹象表明: 油菜对锌的最大

耐受浓度为 0.3%, 当锌浓度达到 0.3%, 叶片表面开始出现病斑, 超过此浓度, 油菜的受害叶片数目增加, 叶片的受害面积增大。

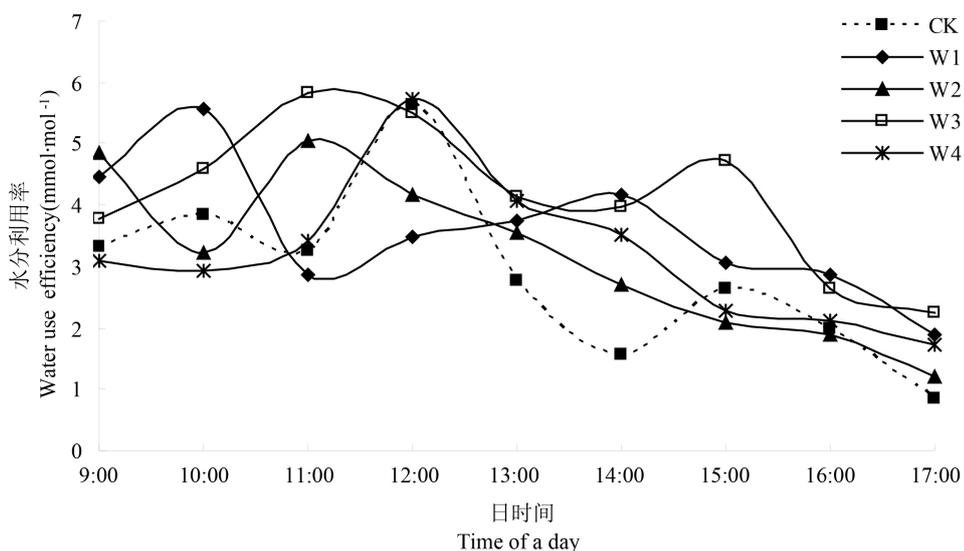


Figure 6. Effects of different concentrations of zinc on diurnal variation of water use efficiency in *Brassica napus*

图 6. 不同浓度的锌对甘蓝型油菜水分利用率日变化的影响



Figure 7. Leaves of control group and zinc group of *Brassica napus*

图 7. 对照组与喷锌组甘蓝型油菜的叶片

3.4. 叶面喷锌对油菜叶片金属元素含量的影响

综合图 1~7 的结果, 本研究认为约 0.1% $ZnSO_4 \cdot 7H_2O$ 为油菜最佳的叶面喷锌浓度。为进一步验证本结论, 取 CK 组与 W2 组(0.1% $ZnSO_4 \cdot 7H_2O$)的功能叶片, 运用微波消解法测定两组油菜叶片内金属元素(Ca、Cu、Mg、Mn、Fe、Zn)含量。如图 8 所示, CK 组油菜叶片金属元素含量大小顺序为 $Mg > Ca > Zn > Fe > Cu > Mn$, W2 组油菜叶片金属元素含量大小顺序为 $Mg > Ca > Fe > Zn > Cu > Mn$ 。叶面喷锌后的油菜叶片金属元素含量都有显著提高: Fe 含量为 1.7 mg/g, 与 CK 组相比提高了 321.52%; Ca 含量为 3.466

mg/g, 与 CK 组相比提高了 158.73%; 同时, Zn、Mn、Mg 及 Cu 的含量分别提高了 50.57%、48.51%、11.54%、0.9%。

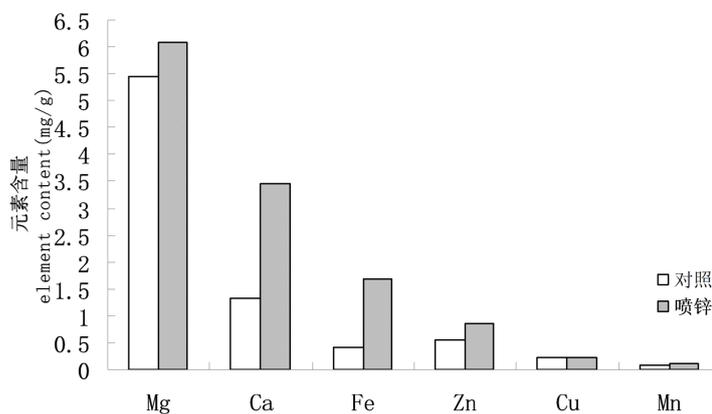


Figure 8. Leaf metal element contents of control group and zinc group of *Brassica napus*

图 8. 对照组与喷锌组甘蓝型油菜的叶片金属元素含量

4. 讨论

锌不仅是许多金属酶的组成成分, 还是许多酶的辅助因子[19]。锌是碳酸酐酶活性中心的金属离子, 碳酸酐酶主要存在于高等植物的叶绿体中, 催化 H_2CO_3 分解成 CO_2 和 H_2O 的可逆反应, 帮助细胞内的 CO_2 转移到 1,5-二磷酸核酮糖羧化酶/加氧酶(Rubisco)的催化位点, 从而促进 Rubisco 对底物 CO_2 的利用, 进而促进光合作用[20]。喷锌后的油菜叶片锌元素含量提高了 50.57%, 外源锌的添加导致油菜叶片中的碳酸酐酶活性升高, 进而提高了净光合速率。

本研究显示, 叶面喷锌能提高甘蓝型油菜的光合有效辐射、净光合速率和水分利用率。太阳辐射中能被绿色植物用来进行光合作用的那部分能量称为光合有效辐射(PAR), 直接影响植物的光合作用, PAR 的增加伴随着净光合速率的提高。C₃ 植物在高温、高光强天气条件有明显的“午休”现象, 油菜也不例外。但对于不同的植物来说, 引起光合“午休”的原因有可能不同。据报道, 引起植物叶片净光合速率午间降低的自身因素有气孔的部分关闭(气孔限制)和叶肉细胞的活性下降(非气孔限制)两类, 前者使胞间 CO_2 浓度降低, 而后者使胞间 CO_2 浓度增高[21][22]。本实验中几个组的油菜没有出现明显的光合“午休”现象, 但是, 与对照组相比, 叶面喷锌使油菜叶片 14:00 的气孔导度、胞间 CO_2 浓度、蒸腾速率都明显降低。油菜没有出现明显光合“午休”现象可能是因为春季(3月28日测定的数据)光照和温度等条件较温和。水分利用效率是植被光合、蒸腾特性的综合反映, 也是植物抗旱策略的重要组成成分[23]。许多研究表明, 适度的干旱胁迫能使植物的水分利用率提高[24]-[27]。Bagci 等认为, 在干旱条件下, 如果植物体内锌缺乏, 则更容易遭遇旱灾, 而且干旱后单纯的灌溉并不足以获得令人满意的作物产量。植物干旱后, 只有充分供应锌再灌溉水才能获得很好的产量。他还提出: 一个地区的植物要想高效地利用水分, 很大程度上依赖于植物体内锌的营养状况[28]。喷适度的锌使油菜的水分利用效率提高, 可以使油菜具备一定的抗旱性。

锌在作物生物量的形成过程中起着重要作用。Ruano 等报道, 水培条件下生长的豆类植物如果溶液中含过多的锌会使植物的生物量合成受到抑制[29][30]。喷 0.05% 和 0.1% $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 不但能提高油菜的净光合速率, 而且油菜叶片没有出现受害症状, 其余 2 个喷锌组的锌浓度偏高造成油菜生物量合成受阻, 出现锌中毒症状。锌还是叶绿素形成所必需的, Hu 和 Sparks 证明, 美洲山核桃树的叶片在锌缺乏时叶绿

素含量下降[31]。另有文献表明, 喷锌能显著提高植物的叶绿素含量、可溶性糖含量和蛋白质含量[7]。

实验中还发现, 喷 0.1% $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 可以明显使油菜茎秆粗壮而不易倒伏。总之, 0.1% $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 不仅提高了油菜的净光合速率, 同时还可提高叶绿素含量、可溶性糖含量和蛋白质含量, 进而增加油菜的生物量, 有助于油菜的高产和质优。最后确定大约 0.1% $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 为油菜最佳的喷锌浓度。

基金项目

本项目受湖北省教育厅科学研究计划项目指导性项目(项目编号: B2023164)和湖北科技学院博士启动项目(项目编号: BK1402)资助。

参考文献

- [1] Guliev, N.M., Bajramov, S.H.M. and Aliev, D.A. (1992) Functional Organization of Carbonic Anhydrase in Higher Plants. *Soviet Plant Physiology*, **39**, 537-544.
- [2] 韩金玲, 李雁鸣, 马春英. 锌对作物生长发育及产量的影响[J]. 河北科技师范学院学报, 2004, 18(4): 72-75.
- [3] 韩燕来, 霍晓婷, 徐本生, 等. 喷锌对油菜锌含量及产量的影响[J]. 长江蔬菜, 2000(6): 27-29.
- [4] 胡明方, 文启凯, 田长彦. 作物锌素营养研究进展与展望[J]. 新疆农业科学, 1997(5): 214-216.
- [5] Barden, J.A. (1971) Factors Affecting the Determination of Net Photosynthesis of Apple Leaves. *HortScience*, **6**, 448-451. <https://doi.org/10.21273/hortsci.6.5.448>
- [6] 赵宇瑛, 韩慧军. 叶面喷锌对富士苹果树光合速率的影响[J]. 湖北农学院学报, 2002, 22(4): 324-326.
- [7] 赵宇瑛, 谢楷模. 叶面喷锌对椪柑部分生理指标的影响[J]. 湖北农业科学, 2004(6): 63-64.
- [8] 王衍安, 范伟国, 李玲, 等. 落叶前根外喷锌防治苹果小叶病研究[J]. 果树学报, 2001, 18(4): 246-247.
- [9] 韩金玲, 李雁鸣, 马春英. 锌对冬小麦叶片碳酸酐酶活性的影响[J]. 华北农学报, 2003, 18(2): 21-25.
- [10] 汪洪, 金继运, 周卫. 不同土壤水分供应与施锌对玉米水分代谢的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2004, 10(4): 367-373.
- [11] 娄运生, 杨玉爱. 氮磷钾、硼水平对不同基因型油菜硼吸收及某些生物学性状的影响[J]. 应用生态学报, 2001, 12(2): 213-217.
- [12] 周建新, 罗敏. 氮、磷、钾、硼肥不同配方对油菜产量的影响[J]. 耕作与栽培, 2002(1): 58-60.
- [13] 李志玉, 廖星, 涂学文, 郭庆元. 氮、磷、钾、硼配合对油菜品种产量、品质的影响[J]. 湖北农业科学, 2003(6): 33-37.
- [14] Hatch, M.D. and Burnell, J.N. (1990) Carbonic Anhydrase Activity in Leaves and Its Role in the First Step of C_4 Photosynthesis. *Plant Physiology*, **93**, 825-828. <https://doi.org/10.1104/pp.93.2.825>
- [15] Brownell, P., Bielig, L. and Grof, C. (1991) Increased Carbonic Anhydrase Activity in Leaves of Sodium-Deficient C_4 Plants. *Functional Plant Biology*, **18**, 589-592. <https://doi.org/10.1071/pp9910589>
- [16] 曲桂敏, 沈向. 不同品种苹果树水分利用效率及有关参数的日变化. 果树科学, 2000, 17(1): 7-11.
- [17] 姚庆群, 张振文, 谢贵水. 橡胶净光合速率及其影响因子日变化研究[J]. 热带农业科学, 2006, 26(5): 1-4.
- [18] 李菁, 刘应迪, 陈功锡, 等. 腊梅光合与蒸腾速率日变化的初步研究[J]. 广西植物, 2000, 20(1): 52-58.
- [19] Bowler, C., Van Camp, W., Van Montagu, M., Inzé, D. and Asada, K. (1994) Superoxide Dismutase in Plants. *Critical Reviews in Plant Sciences*, **13**, 199-218. <https://doi.org/10.1080/07352689409701914>
- [20] Fabre, N., Reiter, I.M., Becuwe-Linka, N., Genty, B. and Rumeau, D. (2007) Characterization and Expression Analysis of Genes Encoding α and β Carbonic Anhydrases in *Arabidopsis*. *Plant, Cell & Environment*, **30**, 617-629. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.2007.01651.x>
- [21] 许大全. 光合作用气孔限制分析中的一些问题[J]. 植物生理学通讯, 1997, 33(4): 241-244.
- [22] 许大全, 沈允钢. 植物光合作用效率的日变化[J]. 植物生理学报, 1997, 23(4): 410-416.
- [23] Steduto, P., Katerji, N., Puertos-Molina, H., Unlu, M., Mastrorilli, M. and Rana, G. (1997) Water-Use Efficiency of Sweet Sorghum under Water Stress Conditions Gas-Exchange Investigations at Leaf and Canopy Scales. *Field Crops Research*, **54**, 221-234. [https://doi.org/10.1016/s0378-4290\(97\)00050-6](https://doi.org/10.1016/s0378-4290(97)00050-6)
- [24] Heitholt, J.J. (1989) Water Use Efficiency and Dry Matter Distribution in Nitrogen- and Water-Stressed Winter Wheat.

-
- Agronomy Journal*, **81**, 464-469. <https://doi.org/10.2134/agronj1989.00021962008100030014x>
- [25] 王海珍, 韩蕊莲, 梁宗锁, 等. 土壤干旱对辽东栎、大叶细裂槭幼苗生长及水分利用的影响[J]. 西北植物学报, 2003, 23(8): 1377-1382.
- [26] 刘淑明, 王得祥, 孙长忠. 干旱胁迫下雪松土壤水分及生理特性的研究[J]. 西北植物学报, 2004, 24(11): 2057-2060.
- [27] 郑淑霞, 上官周平. 8种阔叶树种叶片气体交换特征和叶绿素荧光特性比较[J]. 生态学报, 2006, 26(4): 1080-1087.
- [28] Bağcı, S.A., Ekiz, H., Yılmaz, A. and Cakmak, I. (2007) Effects of Zinc Deficiency and Drought on Grain Yield of Field-Grown Wheat Cultivars in Central Anatolia. *Journal of Agronomy and Crop Science*, **193**, 198-206. <https://doi.org/10.1111/j.1439-037x.2007.00256.x>
- [29] Ruano, A., Barceló, J. and Poschenrieder, C. (1987) Zinc Toxicity-Induced Variation of Mineral Element Composition in Hydroponically Grown Bush Bean Plants. *Journal of Plant Nutrition*, **10**, 373-384. <https://doi.org/10.1080/01904168709363579>
- [30] Ruano, A., Poschenrieder, C. and Barceló, J. (1988) Growth and Biomass Partitioning in Zinc-Toxic Bush Beans. *Journal of Plant Nutrition*, **11**, 577-588. <https://doi.org/10.1080/01904168809363824>
- [31] Hu, H. and Sparks, D. (1991) Zinc Deficiency Inhibits Chlorophyll Synthesis and Gas Exchange in 'Stuart' Pecan. *HortScience*, **26**, 267-268. <https://doi.org/10.21273/hortsci.26.3.267>