

# 氧化石墨烯—烟嘧磺隆复合除草剂 对甜玉米幼苗糖—淀粉代谢的影响

甄志华<sup>1</sup> 冯茜<sup>2</sup> 郭凯丰<sup>1</sup> 董泽辰<sup>1</sup> 王健<sup>2</sup> 梁利娜<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>唐山市农作物种子站, 063000, 河北唐山;

<sup>2</sup>河北科技师范学院农学与生物科技学院/河北省作物逆境生物学重点实验室, 066004, 河北秦皇岛)

**摘要** 为明确氧化石墨烯(GO)作为除草剂安全剂减轻烟嘧磺隆(NIF)对甜玉米药害作用的生理机制,以1对甜玉米姊妹系HK301(对NIF表现耐药)和HK320(对NIF表现敏感)为材料,清水处理为对照,研究GO-NIF纳米复合材料对甜玉米幼苗叶片糖—淀粉代谢关键酶和非酶类物质的影响。结果表明,与单独GO和NIF处理相比,GO-NIF处理显著促进了甜玉米幼苗蔗糖和淀粉的转化。HK320在GO-NIF处理7d时,根冠比、蔗糖、可溶性糖和淀粉的含量均显著高于NIF处理,分别提高了30.19%、71.80%、79.29%和67.87%。此外,与NIF处理相比,GO-NIF处理显著提高了HK320的蔗糖磷酸合酶、蔗糖合成酶、 $\alpha$ -淀粉酶和 $\beta$ -淀粉酶活性。综合评估不同药剂处理对甜玉米生理指标的影响发现, HK301的各项生理指标对NIF及GO-NIF处理的响应较为缓和且波动较小;而HK320在GO-NIF处理下表现出显著的生理调控优势,尤其在糖代谢关键酶活性与糖类物质积累方面呈现出协同增效作用。综上,GO作为NIF的安全剂,可有效促进敏感型甜玉米的糖代谢过程及糖类物质的分配与转运。

**关键词** 氧化石墨烯; 烟嘧磺隆; 甜玉米; 蔗糖代谢; 淀粉酶

我国作为第二大甜玉米生产国,随着居民生活水平提高和消费需求升级,为满足市场对甜玉米的需求,育种家们致力于培育出含糖量高的玉米新品种。然而,高含糖量的甜玉米籽粒会降低种子活力,进而导致群体冠层生长发育缓慢,使其无法克服日益严重的田间杂草竞争<sup>[1]</sup>。因此,使用除草剂控制田间杂草在甜玉米生产中具有重要的应用价值。烟嘧磺隆(nicosulfuron, NIF)是一种磺酰脲类内吸传导除草剂,通过抑制乙酰乳酸合成酶(ALS)活性干扰支链氨基酸的合成,影响植物的光合作用和糖代谢等生理过程,最终导致植物死亡<sup>[2-3]</sup>。前期研究<sup>[4-5]</sup>表明, NIF作为一种光合系统抑制剂,可以通过干扰植物的电子传递速率来破坏叶绿体结构,从而降低植物的光合能力,最终影响植物体内的物质合成与积累。植物光合作用产生的碳水化合物能够以可溶性糖的形式运输到其他器官,也可以在叶片中以可溶性糖和淀粉的形式积累,在所有组织结构和代谢中起着至关重要的作用<sup>[6-7]</sup>。Xu等<sup>[8]</sup>研究表明,蔗糖的积累以及光合通路的碳在淀粉和蔗糖之间的分配对减

轻除草剂毒性起到重要作用。陈莹等<sup>[9]</sup>通过对小叶女贞(*Ligustrum quihoui*)喷施氟吡甲禾灵、草除灵、草铵膦和滴酸草甘膦4种除草剂发现,小叶女贞可以通过调控糖—淀粉代谢稳态优先满足呼吸作用对蔗糖的需求,同时维持植物体内的渗透压以减轻除草剂对植物造成的伤害。

氧化石墨烯(graphene oxide, GO)作为一种具备多种特异性能的纳米材料,具有优异的生物相容性。GO对植物生长发育具有促进作用,例如GO会破坏番茄种子表皮,缩短种胚的吸水时间,从而加快发芽速度<sup>[10]</sup>,以及促进水稻种子的萌发和幼苗生长<sup>[11]</sup>。Peng等<sup>[12]</sup>评估了GO—阿特拉津(ATZ)对鸢尾(*Iris pseudacorus*)的毒性,结果发现GO通过提升鸢尾的光合能力减少植物体内ATZ的积累。研究<sup>[13]</sup>还发现,GO表面的官能团是ATZ吸附的优良位点。目前,尽管没有直接证据表明GO和除草剂的相互作用会增强两者对植物的毒性,但已有证据表明GO可以作为杀虫剂载体来增强接触毒性。因此,GO和除草剂之间的相互作用及其导致的植物毒性变化受到了广泛的关

作者简介:甄志华,研究方向为农作物品种选育及推广, E-mail: zhongjianzhan2009@126.com

梁利娜为通信作者,研究方向为农作物品种选育及推广, E-mail: ll890509@163.com

基金项目:河北省自然科学基金项目(C2022407026);河北省现代农业产业技术体系建设专项资金(HBCT2024020411)

收稿日期:2025-07-17;修回日期:2025-09-06;网络出版日期:2026-02-05

注。本研究以甜玉米姊妹系 HK301 和 HK320 为材料,前期进行了 GO、NIF 和 GO-NIF 的浓度筛选试验,结果表明,当 GO-NIF 喷施浓度为 80 mg/kg 时, HK320 幼苗能够正常生长,降低了 NIF 对 HK320 的毒害作用<sup>[14-15]</sup>,在此基础上继续开展 GO、NIF 及 GO-NIF 复合材料对甜玉米幼苗糖—淀粉转化途径中酶和非酶类物质的影响研究,结果将了解 GO 在除草剂中的促解毒作用以及解析 GO 诱导细胞异源解毒机制的发生机理提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

供试材料为 1 对甜玉米姊妹系 HK301 (对 NIF 表现耐药)和 HK320 (对 NIF 表现敏感)<sup>[4-5]</sup>,由河北科技师范学院选育。试验试剂为河南多贝化工有限公司生产的烟嘧磺隆 (40%, OF)。

### 1.2 试验地概况

试验于河北省秦皇岛市河北科技师范学院昌黎试验站 (39°25' N, 118°45' E) 进行,该地区气候属温带大陆性季风气候,年均气温 11.80 °C,降水量 527.00 mm,年均日照时数 2720 h,土壤类型为褐土。试验地土壤理化性质为全氮 1.51 g/kg、碱解氮 109.32 mg/kg、速效磷 17.32 mg/kg 和速效钾 74.35 mg/kg。

### 1.3 试验方法

2023-2024 年于试验地进行田间试验,试验采取随机区组设计,重复 3 次,小区行长 5 m,小区面积 30 m<sup>2</sup>,采用穴播,每穴 2 粒。在玉米生长至 4 叶 1 心期时进行药剂处理。使用去离子水溶解 GO 粉末,然后超声处理 40 min 以制备储备溶液。

通过稀释储备液制备 80 mg/kg 的 GO 溶液,将 GO 溶液以 1:1 的比例加入到 NIF 溶液中 (80 mg/kg=80 GO+80 NIF),用电动喷雾器分别以 80 mg/kg 的浓度喷施清水 (CK)、GO、NIF 和 GO-NIF。喷洒处理后 1、3、5 和 7 d 进行田间调查和取样。

### 1.4 测定指标与方法

1.4.1 根冠比和生物量累积比 于药剂处理后的 0、1、3、5 和 7 d 随机选取 5 株幼苗,冲洗根部,除去所有污垢,并将其分为地上部分和地下部分,放入牛皮纸袋中 105 °C 下烘干 10 min,再在 80 °C 下进一步烘干,称量计算根冠比。在药剂处理后的 0 和 7 d 随机选取 5 株幼苗,称量计算生物量累积比。

1.4.2 酶提取和分析 参考 Liu 等<sup>[16]</sup>的方法,测量蔗糖磷酸合酶 (EC 2.4.1.14, SPS) 和蔗糖合酶 (EC 2.4.1.13, SuSy) 活性。参考 Li 等<sup>[17]</sup>的方法,测定 $\alpha$ -淀粉酶 (EC 3.2.1.1) 和 $\beta$ -淀粉酶 (EC 3.2.1.2) 活性。

1.4.3 蔗糖、可溶性糖和淀粉含量 参考 Xu 等<sup>[18]</sup>的方法测定可溶性糖和蔗糖含量。参考 Kuai 等<sup>[19]</sup>的方法测定淀粉含量。

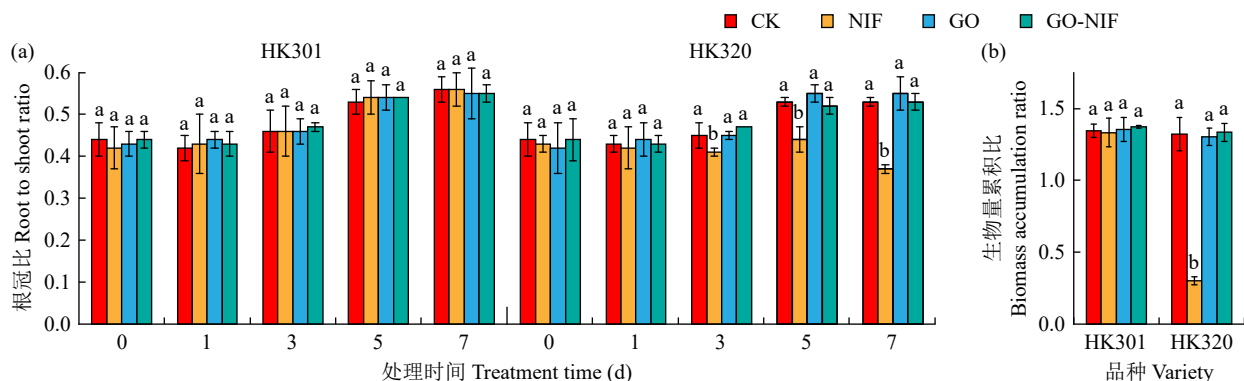
### 1.5 数据处理

采用 Microsoft Excel 进行数据整理,利用 SPSS 12.0 软件进行方差分析,采用 Origin Pro 2025 作图。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同药剂处理下甜玉米的根冠比和生物量累积比

由图 1a 可知,不同药剂处理对 2 个甜玉米自交系根冠比影响不同。随着喷药天数的增加,NIF



不同小写字母表示处理间差异显著 ( $P < 0.05$ )。下同。

Different lowercase letters indicate significant difference between treatments ( $P < 0.05$ ). The same below.

图 1 不同药剂处理对甜玉米幼苗根冠比和生物量累积比的影响

Fig.1 Effects of different pesticide treatments on root to shoot ratio and biomass accumulation ratio of sweet corn seedlings

和 GO-NIF 处理的 HK301 根冠比与 CK 处理无显著差异。相比之下，HK320 经不同药剂处理的根冠比差异显著。随着喷药时间的延长，GO-NIF 处理下 HK320 的根冠比较 CK 处理无显著差异。在药剂处理后 7 d，GO-NIF 和 GO 处理的 HK320 的根冠比与 CK 处理无显著差异，NIF 处理较 CK 处理显著降低 31.43%。由图 1b 可知，不同药剂处理的 HK301 生物量累积比无显著差异。相比之下，HK320 经不同药剂处理的生物量累积比差异显著。相较于 NIF 处理，GO-NIF 处理显著提升了 HK320 的生物量累积比，与 CK 处理无显著差异。

### 2.2 不同药剂处理下甜玉米的 SPS 活性

由图 2 可知，随着不同药剂处理时间的延长，

2 个甜玉米品种叶片的 SPS 活性变化趋势不同。与 CK 处理相比，NIF 和 GO-NIF 处理显著增加了 HK301 的 SPS 活性。与 CK 处理相比，NIF 和 GO-NIF 处理后 5 d，HK301 的 SPS 活性分别显著增加了 126.53% 和 129.18%。与 CK 处理相比，GO 处理后 5 d，HK301 的 SPS 活性无显著变化。相比之下，HK320 经 NIF 处理后，SPS 活性仅在 1 d 时高于 CK 处理，随后随着时间的增加逐渐下降。GO-NIF 处理后，HK320 的 SPS 活性随着处理时间的延长呈持续上升的趋势。在 GO-NIF 处理后 5 d，HK320 的 SPS 活性达到最大值，较 CK、GO 和 NIF 处理分别显著提高 109.40%、106.53% 和 213.83%。

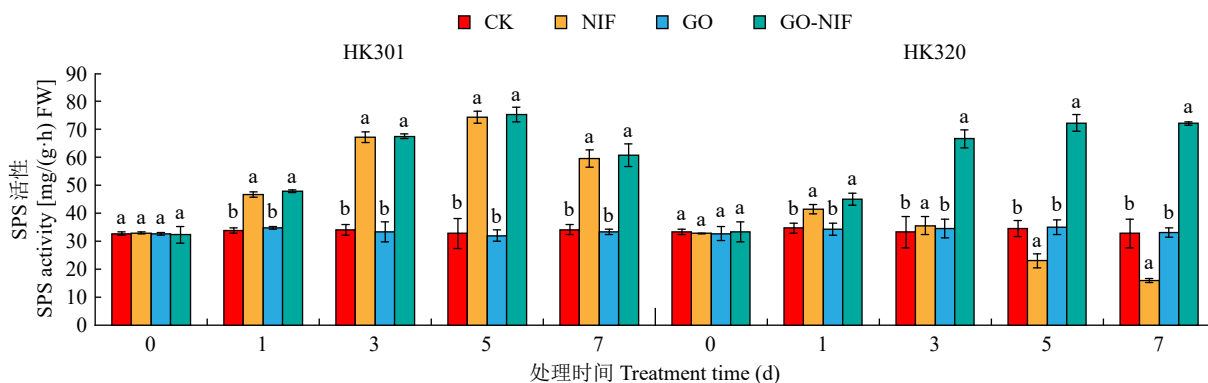


图 2 不同药剂处理对甜玉米叶片 SPS 活性的影响

Fig.2 Effects of different pesticide treatments on SPS activity in sweet corn leaves

### 2.3 不同药剂处理下甜玉米的 SuSy 活性

由图 3 可知，与 CK 处理相比，NIF 和 GO-NIF 处理均显著提高了 HK301 的 SuSy 活性。NIF 处理后 3 d，HK301 的 SuSy 活性达到最大值，随后保持在较高水平；GO-NIF 处理后 5 d，HK301 的 SuSy 活性达到最大值，较 CK 处理显著高出

33.50%。与 NIF 耐药性玉米自交系 HK301 相比，NIF 敏感性玉米自交系 HK320 在 NIF 处理后的 SuSy 活性呈持续下降趋势并显著低于 CK 处理。相比之下，GO-NIF 处理后，HK320 的 SuSy 活性均显著高于 CK 处理。在 GO-NIF 处理后 3 d，HK320 的 SuSy 活性达到最大值，较 CK、GO 和

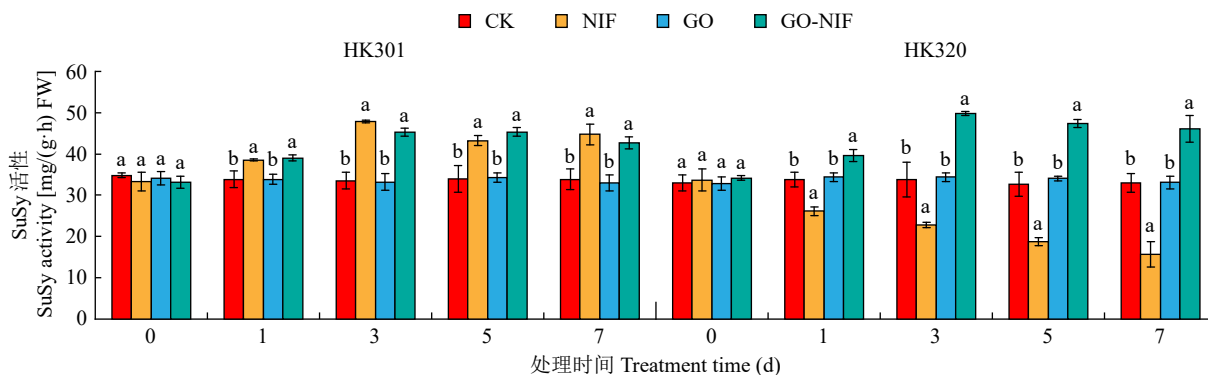


图 3 不同药剂处理对甜玉米叶片 SuSy 活性的影响

Fig.3 Effects of different pesticide treatments on SuSy activity in sweet corn leaves

NIF 处理分别显著高出 45.21%、39.18%和 153.82%。

#### 2.4 不同药剂处理下甜玉米的 $\alpha$ -淀粉酶活性

由图 4 可知, NIF 和 GO-NIF 处理均显著提高了 HK301 叶片 $\alpha$ -淀粉酶活性, 且均在处理后 5 d 达到最大值, 随后呈下降趋势, 但均高于 CK 处理。

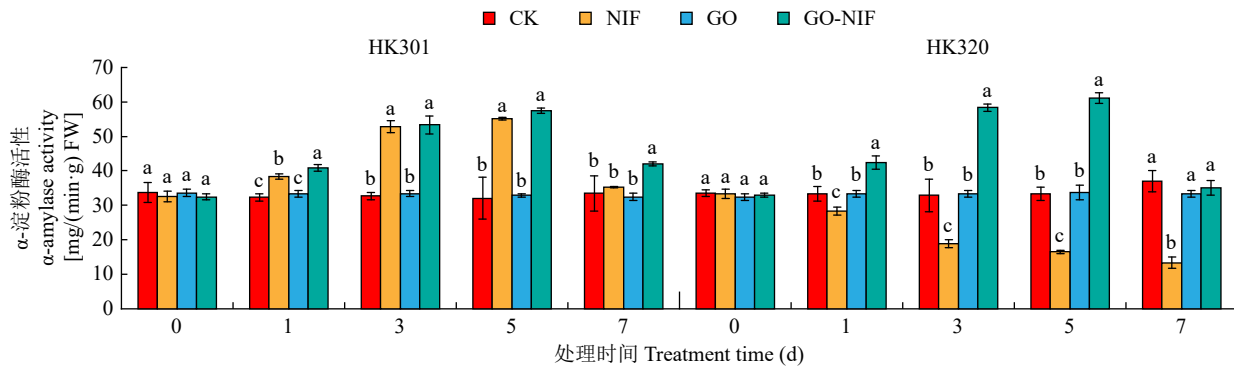


图 4 不同药剂处理对甜玉米叶片 $\alpha$ -淀粉酶活性的影响

Fig.4 Effects of different pesticide treatments on  $\alpha$ -amylase activity in sweet corn leaves

#### 2.5 不同药剂处理下甜玉米的 $\beta$ -淀粉酶活性

由图 5 可知, NIF 和 GO-NIF 处理显著提高了 HK301 叶片 $\beta$ -淀粉酶活性, 且随着处理时间的增加呈先升高后降低的趋势。与 CK 处理相比, 在 GO-NIF 处理后 3 d, HK301 的 $\beta$ -淀粉酶活性达最大值, 较 CK、GO 和 NIF 处理分别显著高出

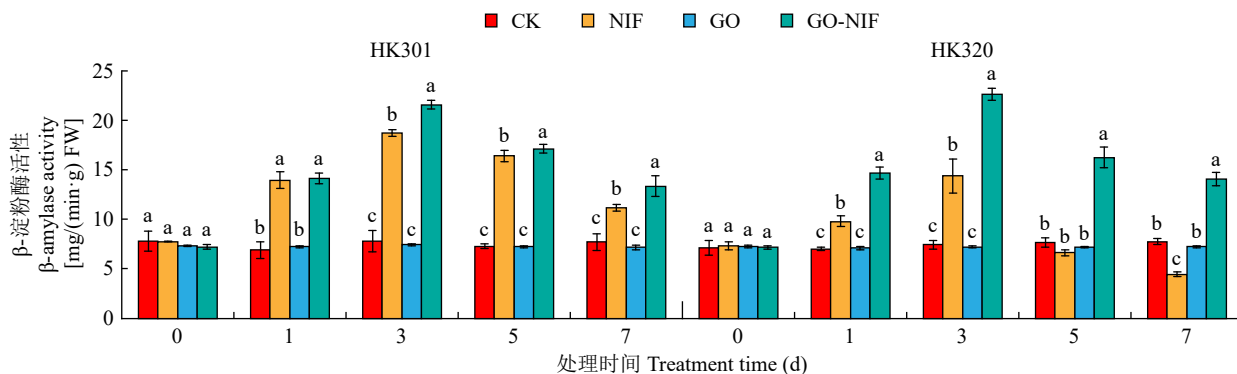


图 5 不同药剂处理对甜玉米叶片 $\beta$ -淀粉酶活性的影响

Fig.5 Effects of different pesticide treatments on  $\beta$ -amylase activity in sweet corn leaves

204.53%、213.32%和 57.48%。

#### 2.6 不同药剂处理下甜玉米的可溶性糖、蔗糖和淀粉含量

由图 6a 可知, NIF 和 GO-NIF 处理显著提升了 HK301 叶片可溶性糖含量。GO-NIF 处理后 5 d, HK301 的可溶性糖含量达到最大值, 且显著高于 CK 处理。相比于 NIF 处理, GO-NIF 处理显著提升了 HK320 叶片可溶性糖含量。在 GO-NIF 处理后 5 d, HK320 的可溶性糖含量达到最大值, 较

随着 GO-NIF 处理时间的延长, HK320 的 $\alpha$ -淀粉酶活性呈先上升后下降的趋势。在 GO-NIF 处理后 5 d, HK320 的 $\alpha$ -淀粉酶活性达到最大值, 较 CK、GO 和 NIF 处理分别显著高出 83.39%、81.07%和 269.76%。

177.15%、190.45%和 15.21%。相比之下, NIF 处理后, HK320 的 $\beta$ -淀粉酶活性在处理 3 d 时达最大值, 随后呈下降趋势。GO-NIF 处理后, HK320 的 $\beta$ -淀粉酶活性在 3 d 达到最大值, 随后保持在较高水平。在 GO-NIF 处理后 3 d, HK320 的 $\beta$ -淀粉酶活性较 CK、GO 和 NIF 处理分别显著高出

CK、GO 和 NIF 处理分别显著高出 85.65%、75.20%和 3.26%。

由图 6b 可知, 经 NIF 和 GO-NIF 处理显著提高了 HK301 叶片的蔗糖含量, 且随着时间的增加均呈先升高后降低的趋势。与 CK 处理相比, 在 GO-NIF 处理后 1、3、5 和 7 d, HK301 的蔗糖含量分别显著提高了 19.23%、121.49%、136.36%和 96.68%。GO-NIF 处理显著提高了 HK320 的蔗糖含量。在 GO-NIF 处理后 5 d, HK320 的蔗糖含量

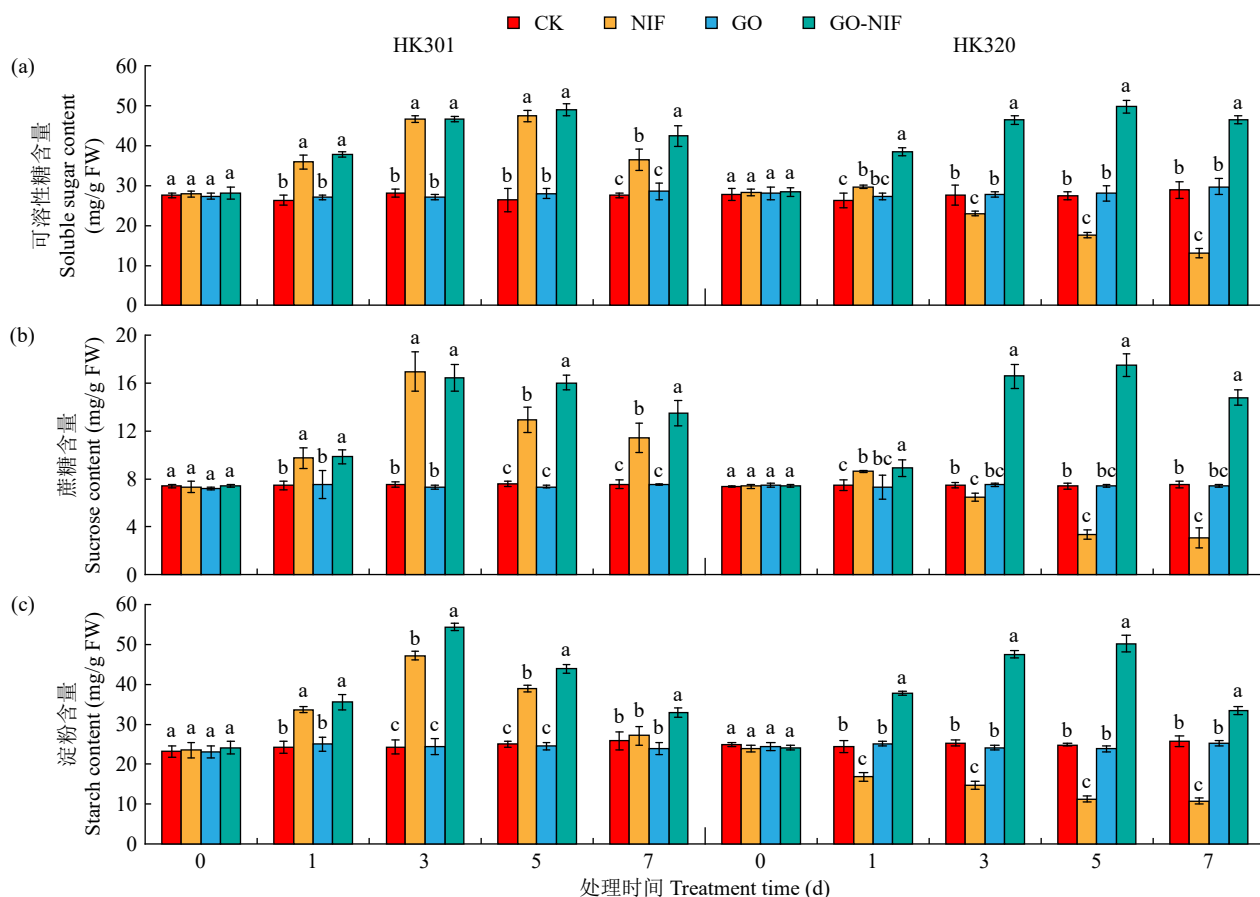


图 6 不同药剂处理对甜玉米幼苗叶片可溶性糖、蔗糖和淀粉含量的影响

Fig.6 Effects of different pesticide treatments on soluble sugar, sucrose, and starch contents in sweet corn seedlings

达到最大值，较 CK、GO 和 NIF 处理分别显著高出 136.36%、135.39%和 421.36%。

由图 6c 可知，与 CK 处理相比，NIF 和 GO-NIF 处理均显著提高了 HK301 的淀粉含量。NIF 和 GO-NIF 处理后 3 d，HK301 的淀粉含量均达到最大值。与 CK 处理相比，GO-NIF 处理后 3 d，HK301 的淀粉含量显著提高了 101.90%。与 HK301 相比，

HK320 在 NIF 处理后的淀粉含量呈持续下降的趋势，且显著低于 CK 处理。相比之下，GO-NIF 处理后，HK320 的淀粉含量均显著高于 CK 处理。

### 2.7 不同药剂处理下甜玉米的生理指标综合评价

为综合评估不同药剂处理对甜玉米生理指标的影响，将生理数据进行 Z-Score 标准化处理。结果（图 7）表明，耐药性玉米品种 HK301 的各项生

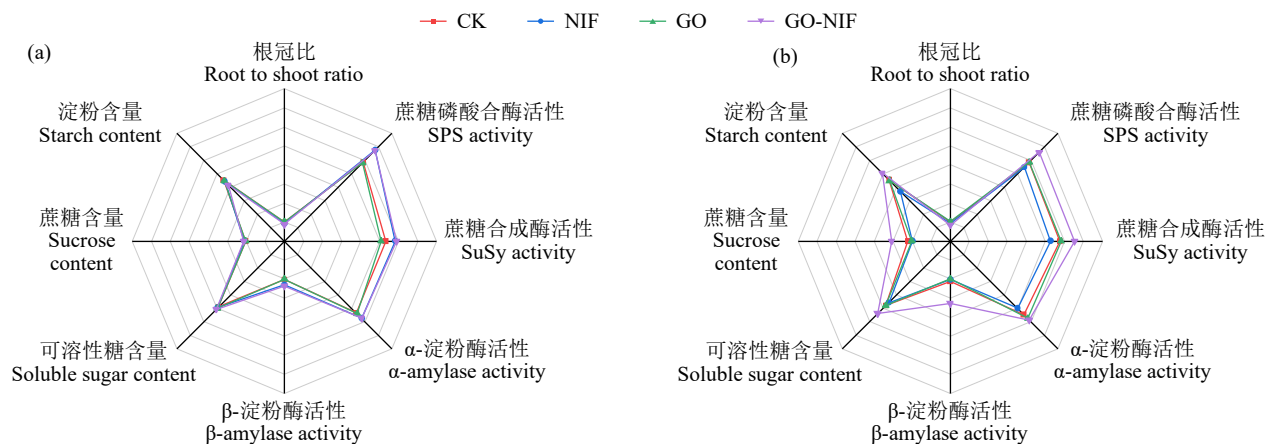


图 7 不同药剂处理对 HK301(a)和 HK320(b)生理指标的综合评估

Fig.7 Comprehensive evaluation of different pesticide treatments on physiological indicators of HK301 (a) and HK320 (b)

理指标对 NIF 及 GO-NIF 的响应相对缓和, 变化幅度较小。具体而言, 在单独使用 NIF 以及 GO-NIF 处理时, HK301 的 SPS、SuSy、 $\alpha$ -淀粉酶及  $\beta$ -淀粉酶活性, 以及淀粉、蔗糖和可溶性糖含量等指标波动均不显著。这表明 HK301 可能具备更高效的解毒机制或代谢调节途径, 从而在一定程度上限制 NIF 对玉米糖代谢过程的干扰。相比之下, HK320 对不同药剂的响应更为明显。与单独使用 NIF 相比, GO-NIF 处理能够显著提升 HK320 的多个生理指标, 包括 SPS 活性、SuSy 活性、 $\alpha$ -淀粉酶活性、 $\beta$ -淀粉酶活性, 以及淀粉、蔗糖和可溶性糖含量。这一结果说明, GO 作为 NIF 的安全剂, 可有效促进敏感型甜玉米的糖代谢过程及糖类物质的分配与转运。

### 3 讨论

NIF 作为玉米苗后除草剂已应用近 30 年, 但部分甜玉米和糯玉米品种受到 NIF 药害作用屡见报道<sup>[20-21]</sup>, 因此提高 NIF 在甜玉米中的耐药性已成为近年来的研究热点。本课题组前期研究<sup>[15]</sup>表明, 将 GO 作为安全剂与 NIF 复合能有效提高甜玉米对除草剂的耐药性。NIF 胁迫下玉米叶片净光合速率下降,  $C_4$  途径发生变化<sup>[22-23]</sup>, 最终影响植物的生长速率和生物量<sup>[18]</sup>。本研究表明, 随着喷施天数的增加, 与 HK301 相比, NIF 处理显著降低了 HK320 的根冠比和生物量累积比。相比之下, GO-NIF 处理能保持 HK320 的根冠比和生物量累积比, 维持 HK320 正常的生长发育, 表明 GO 作为 NIF 的安全剂, 可以提高 HK320 的根冠比和生物量累积比, 有效减少 NIF 对植物造成的根系损伤, 保持有效的根系增加对土壤水分和养分的吸收, 提高玉米幼苗对 NIF 的耐药性。

糖-淀粉代谢为整个生物代谢的中心, 影响着植物光合、呼吸、抗性和信号传导等诸多生理反应过程。多数除草剂通过破坏叶绿素和影响糖-淀粉转运代谢过程而抑制或破坏植物生长发育<sup>[24]</sup>。

Wang 等<sup>[2]</sup>研究发现 NIF 胁迫降低了植物的光合作用, 限制了植物体内碳水化合物的供应, 导致玉米在 NIF 胁迫下生长受限, 生理和代谢活动降低。SPS 是植物体内蔗糖合成和积累的关键酶。Verma 等<sup>[25]</sup>研究表明 SPS 活性影响蔗糖和淀粉的合成。

本研究中, 与 NIF 处理相比, GO-NIF 处理显著提高了敏感性自交系 HK320 的 SPS 活性。GO-NIF 处理后, HK320 叶片 SPS 活性提升可能与可溶性糖和蔗糖含量的增加有关。Chen 等<sup>[26]</sup>研究表明, 非还原糖含量的升高与 SPS 活性和转录直接相关。本研究结果表明, GO-NIF 处理可以有效提高 HK320 对 SPS 活性, 减少 NIF 对糖代谢途径造成的损伤。

蔗糖是大多数植物中主要的碳水化合物, 而 SuSy 作为一种催化蔗糖合成与分解的双向酶, 其活性的变化对植物生长来说至关重要<sup>[27]</sup>。本研究表明, NIF 处理后, 与 HK301 相比, HK320 的 SuSy 活性随着胁迫时间的延长而下降, 可溶性糖和蔗糖的含量降低。相比之下, 相较于 NIF 处理, GO-NIF 处理后 HK320 叶片 SuSy 活性显著上升, 可溶性糖和蔗糖含量也显著增加, 说明 GO 可以缓解 NIF 对 SuSy 活性的损伤从而促进糖的转化。

淀粉是植物中储存能量的重要化合物,  $\alpha$ -淀粉酶和  $\beta$ -淀粉酶能迅速地将淀粉转化为糖, 从而影响植物体内代谢平衡<sup>[28-29]</sup>。Zhang 等<sup>[30]</sup>研究表明, 褪黑素上调了盐胁迫下黄瓜种子中  $\alpha$ -淀粉酶和  $\beta$ -淀粉酶活性, 促进了黄瓜种子中淀粉的分解代谢。本研究结果表明, 与 HK301 相比, NIF 处理显著降低了 HK320 叶片中淀粉的含量。此外, NIF 胁迫下 HK320 叶片  $\alpha$ -淀粉酶和  $\beta$ -淀粉酶的活性也随着胁迫时间的延长而降低。相比之下, GO-NIF 处理显著提高了 HK320 叶片的淀粉含量及  $\alpha$ -淀粉酶活性和  $\beta$ -淀粉酶活性。试验结果表明 GO 的介入提高了遭 NIF 胁迫的 HK320  $\alpha$ -淀粉酶和  $\beta$ -淀粉酶活性, 进而促进淀粉的分解。本研究为了解 GO 作为 NIF 安全剂促进甜玉米幼苗中糖—淀粉的动态转化提供了重要理论依据, 研究结果不仅为传统农药剂型的改良提供了新思路, 同时也为新型农药制剂的应用提供了理论参考。

### 4 结论

单独 GO 处理对甜玉米自交系幼苗的生长无显著影响, 与单独 NIF 处理相比, GO 作为 NIF 的安全剂能增强 NIF 敏感甜玉米自交系 HK320 对 NIF 的耐药性。GO-NIF 处理能有效提高 HK320 的根冠比和生物累积量之比。NIF 处理显著影响甜

玉米幼苗的糖代谢过程及糖的分配和转运，而 GO-NIF 处理后，HK320 叶片中 SPS 活性、SuSy 活性、 $\alpha$ -淀粉酶活性、 $\beta$ -淀粉酶活性、淀粉含量、蔗糖含量和可溶性糖含量显著增加。生理指标综合评价结果表明，GO 作为 NIF 的安全剂可有效缓解 NIF 引起的糖代谢紊乱，并通过促进关键酶活性和糖积累增强敏感性甜玉米的耐药性。

#### 参考文献

- [1] 蒙彦宇, 王健, 李云, 等. 烟嘧磺隆对甜玉米糖酵解和三羧酸循环途径中关键物质的影响. 江苏农业科学, 2022, 50(21): 115-121.
- [2] Wang J, Zhong X M, Li F H, et al. Effects of nicosulfuron on growth, oxidative damage, and the ascorbate-glutathione pathway in paired nearly isogenic lines of waxy maize (*Zea mays* L.). Pesticide Biochemistry and Physiology, 2018, 145: 108-117.
- [3] 王健, 钟雪梅, 吕香玲, 等. 不同品种玉米对烟嘧磺隆的耐药性研究进展. 农药学报, 2016, 18(3): 282-290.
- [4] Wu Z X, Xu N W, Yang M, et al. Responses of photosynthesis, antioxidant enzymes, and related gene expression to nicosulfuron stress in sweet maize (*Zea mays* L.). Environmental Science and Pollution Research, 2022, 29(25): 37248-37265.
- [5] 杨敏, 李向岭, 韩金玲, 等. 烟嘧磺隆胁迫对甜玉米幼苗活性氧积累、抗氧化系统及相关基因表达的影响. 核农学报, 2021, 35(9): 2182-2193.
- [6] Prabal D P D, Paulin S P S, Biswas A K. Regulation of growth, antioxidants and sugar metabolism in rice (*Oryza sativa* L.) seedlings by NaCl and its reversal by silicon. American Journal of Plant Sciences, 2016, 7: 623-638.
- [7] Zhou R, Sicher R C, Quebedeaux B. Apple leaf sucrose-phosphate synthase is inhibited by sorbitol-6-phosphate. Functional Plant Biology, 2002, 29(5): 569-574.
- [8] Xu N W, Wu Z X, Li X L, et al. Effects of nicosulfuron on plant growth and sugar metabolism in sweet maize (*Zea mays* L.). PLoS ONE, 2022, 17(10): e0276606.
- [9] 陈莹, 兰芳, 刘金平, 等. 除草剂种类对日本菟丝子和小叶女贞生理代谢和抗氧化酶系统的影响. 西南林业大学学报, 2023, 43(4): 59-67.
- [10] Zhang M, Gao B, Chen J J, et al. Effects of graphene on seed germination and seedling growth. Journal of Nanoparticle Research, 2015, 17(2): 78.
- [11] Yin L Y, Wang Z, Wang S G, et al. Effects of graphene oxide and/or Cd<sup>2+</sup> on seed germination, seedling growth, and uptake to Cd<sup>2+</sup> in solution culture. Water, Air, and Soil Pollution, 2018, 229(5): 151.
- [12] Peng L, Xie D Y, Li C, et al. Effects of graphene oxide on atrazine phytotoxicity effects of graphene oxide on photosynthetic response of iris pseudacorus to atrazine stress and accumulation of atrazine in the plant. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 2022, 108(6): 1033-1038.
- [13] Li X, Wang Q Y, Wang X P, et al. Synergistic effects of graphene oxide and pesticides on fall armyworm, *spodoptera frugiperda*. Nanomaterials, 2022, 12(22): 3985-3985.
- [14] Wang J, Zhong X M, Lv X L, et al. Photosynthesis and physiology responses of paired near-isogenic lines in waxy maize (*Zea mays* L.) to nicosulfuron. Photosynthetica, 2018, 56(4): 1059-1068.
- [15] Wang J, Fan Y Y, Liang L N, et al. GO promotes detoxification of nicosulfuron in sweet corn by enhancing photosynthesis, chlorophyll fluorescence parameters, and antioxidant enzyme activity. Scientific Reports, 2024, 14(1): 21213.
- [16] Liu J R, Ma Y N, Lv F J, et al. Changes of sucrose metabolism in leaf subtending to cotton boll under cool temperature due to late planting. Field Crops Research, 2013, 144: 200-211.
- [17] Li X N, Jiang H D, Liu F L, et al. Induction of chilling tolerance in wheat during germination by pre-soaking seed with nitric oxide and gibberellin. Plant Growth Regulation, 2013, 71(1): 31-40.
- [18] Xu W, Cui K, Xu A H, et al. Drought stress condition increases root to shoot ratio via alteration of carbohydrate partitioning and enzymatic activity in rice seedlings. Acta Physiologiae Plantarum, 2015, 37(2): 9.
- [19] Kuai J, Liu Z W, Wang Y H, et al. Waterlogging during flowering and boll forming stages affects sucrose metabolism in the leaves subtending the cotton boll and its relationship with boll weight. Plant Science, 2014, 223: 79-98.
- [20] Cutulle M A, Armel G R, Kopsell D A, et al. Several pesticides influence the nutritional content of sweet corn. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2018, 66(12): 3086-3092.
- [21] 吕香玲, 鲁俊田, 李致闻, 等. 糯玉米对烟嘧磺隆除草剂的抗性研究. 玉米科学, 2011, 19(4): 17-21.
- [22] Wang J, Gao H, Guo Z Q, et al. Adaptation responses in C<sub>4</sub> photosynthesis of sweet maize (*Zea mays* L.) exposed to nicosulfuron. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2021, 214: 112096.
- [23] Wu Z X, Wang J, Lin X H, et al. Nicosulfuron stress on the glyoxalase system and endogenous hormone content in sweet maize seedlings. Environmental Science and Pollution Research, 2023, 30(17): 49290-49300.
- [24] 凌进. 草铵膦、百草枯、草甘膦对非耕地杂草的防效比较. 农药, 2014, 53(8): 613-615.
- [25] Verma A K, Upadhyay S K, Verma P C, et al. Functional analysis of sucrose phosphate synthase (SPS) and sucrose synthase (SS) in sugarcane (*Saccharum*) cultivars. Plant Biology, 2011, 13(2): 325-332.
- [26] Chen T, Pei H J, Zhang Y F, et al. Seasonal changes in non-structural carbohydrates and sucrose metabolism enzymes in two *Sabina* species. Acta Physiologiae Plantarum, 2012, 34(1): 173-180.
- [27] 杨国志, 张明方. 植物蔗糖代谢参与酶的表达及调控. 北方园艺, 2006(5): 45-47.
- [28] Wei X F, Huang W Q, Han Y, et al. Allosteric mechanism of synergistic effect in  $\alpha$ - and  $\beta$ -amylase mixtures. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 280(Pt3): 135653.
- [29] Dong S Y, Beckles D M. Dynamic changes in the starch-sugar interconversion within plant source and sink tissues promote a better abiotic stress response. Journal of Plant Physiology, 2019, 234/235: 80-93.
- [30] Zhang J R, Zeng B J, Mao Y W, et al. Melatonin alleviates aluminium toxicity through modulating antioxidative enzymes and enhancing organic acid anion exudation in soybean. Functional Plant Biology, 2017, 44(10): 961-968.

## Effects of Graphene Oxide on Sugar-Starch Metabolism in Sweet Corn Seedlings under Nicosulfuron Stress

Zhen Zhihua<sup>1</sup>, Feng Xi<sup>2</sup>, Guo Kaifeng<sup>1</sup>, Dong Zechen<sup>1</sup>, Wang Jian<sup>2</sup>, Liang Lina<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>Crop Seeds Station of Tangshan, Tangshan 063000, Hebei, China; <sup>2</sup>College of Agronomy and Biotechnology, Hebei Normal University of Science and Technology / Hebei Key Laboratory of Crop Stress Biology, Qinhuangdao 066004, Hebei, China)

**Abstract** To clarify the physiological mechanism of graphene oxide (GO) acting as a herbicide safener to alleviate the phytotoxicity of nicosulfuron (NIF) on sweet corn, a pair of sweet corn sister lines, HK301 (NIF-tolerant) and HK320 (NIF-sensitive), were used as experimental materials. Using water treatment as a control, the effects of GO-NIF nanocomposite on key enzymes and non-enzymatic substances involved in sugar-starch metabolism in the leaves of sweet corn seedlings were investigated. The results showed that GO-NIF treatment significantly promoted the conversion of sucrose and starch in sweet corn seedlings compared with GO and NIF treatments alone. In HK320, the root to shoot ratio and the contents of sucrose, soluble sugar, and starch under GO-NIF treatment were significantly higher than those under NIF treatment at seven days after treatment, increasing by 30.19%, 71.80%, 79.29%, and 67.87%, respectively. Furthermore, compared with NIF treatment, GO-NIF treatment significantly increased the activities of sucrose phosphate synthase, sucrose synthase,  $\alpha$ -amylase, and  $\beta$ -amylase in HK320. A comprehensive evaluation of the effects of different treatments on physiological indicators revealed that HK301 exhibited moderate responses and minimal fluctuations under both NIF and GO-NIF treatments. In contrast, HK320 showed significant physiological regulatory advantages under GO-NIF treatment, particularly manifesting a synergistic enhancement in key enzyme activities of sugar metabolism and the accumulation of saccharides. In conclusion, GO as a safener for NIF can effectively promote the sugar metabolism process as well as the distribution and transport of saccharides in sensitive sweet corn.

**Key words** Graphene oxide; Nicosulfuron; Sweet corn; Sucrose metabolism; Amylase