

营养生长阶段的大豆镍胁迫响应：生长与生理特征

冯天畅, 周选泽, 戚文华*

重庆三峡科技大学, 重庆 404100

DOI:10.61369/EAE.2026030007

摘 要： 为探究营养生长阶段镍胁迫对大豆的生理毒性效应，本研究以中豆7901大豆为材料，设置土壤镍浓度0、30、60、120、240 mg/kg，测定分枝期植株生物量、叶片氧化损伤及抗氧化酶活性。结果显示：随镍浓度升高，大豆根茎叶生长受显著抑制，根在30mg/kg时重量略有上升然后随浓度进一步升高而持续下降，茎叶随浓度升高持续下降；叶片H₂O₂与MDA含量持续上升，氧化应激与膜脂过氧化加剧；SOD、CAT活性先升后降，30 mg/kg达峰值，高浓度下酶系统受损。研究表明，大豆营养生长期对镍胁迫的耐受临界浓度为30 ~ 60 mg/kg，240 mg/kg超出耐受阈值；SOD–CAT级联清除是大豆响应镍胁迫的核心抗氧化机制。本研究为耐镍大豆品种选育与农田镍污染风险评估提供理论依据。

关 键 词： 大豆；镍胁迫；抗氧化酶；生理响应

Response of Soybean to Nickel Stress during Vegetative Growth Stage: Growth and Physiological Characteristics

Feng Tianchang, Zhou Xuanze, Qi Wenhua*

Chongqing Three Gorges University, Chongqing 404100

Abstract： To investigate the physiological toxic effects of nickel stress on soybean during the vegetative growth stage, this study utilized Zhongdou 7901 soybean as the experimental material. Soil nickel concentrations were set at 0, 30, 60, 120, and 240 mg/kg to measure plant biomass, leaf oxidative damage, and antioxidant enzyme activities during the branching stage. The results showed that with increasing nickel concentration, the growth of soybean roots, stems, and leaves was significantly inhibited. The root weight slightly increased at 30 mg/kg and then continuously decreased with further increases in concentration, while stem and leaf weights continuously declined. The contents of H₂O₂ and MDA in leaves continuously increased, indicating intensified oxidative stress and membrane lipid peroxidation. The activities of SOD and CAT initially increased and then decreased, reaching their peaks at 30 mg/kg, and the enzyme system was damaged at high concentrations. The study suggests that the critical tolerance concentration of soybean during vegetative growth to nickel stress is between 30 and 60 mg/kg, with 240 mg/kg exceeding the tolerance threshold. The SOD–CAT cascade scavenging is the core antioxidant mechanism in soybean's response to nickel stress. This study provides a theoretical basis for the breeding of nickel-tolerant soybean varieties and the risk assessment of nickel pollution in farmland.

Keywords： soybean; nickel stress; antioxidant enzymes; physiological response

引言

镍（Ni）是土壤环境中广泛存在的重金属元素，既是植物生长发育所必需的微量营养元素，也是备受关注的环境污染物^[1, 2]。研究表明，工业废水灌溉、污泥农用、磷肥施用及大气沉降等人为活动会导致土壤镍污染加剧，进而影响作物生长与农产品安全^[3, 4]。镍胁迫下，过量镍在植物体内的积累会干扰养分吸收、抑制光合效率并触发氧化应激反应，进而阻碍作物生长发育，降低其产量与品质^[5]。

大豆（*Glycine max*）是全球重要的油料和蛋白质作物，对重金属胁迫较为敏感。镍对大豆兼具营养与毒害双重作用：适量镍是必需微量元素，保障脲酶活性、氮代谢与种子发育；过量则致叶片坏死、生长受抑，降低产量与品质^[6, 7]。在氧化胁迫方面，镍胁迫会诱导

作者简介：

冯天畅（1998—），女，汉族，重庆三峡科技大学，硕士。研究方向：环境生物学。

周选泽（1999—），男，汉族，重庆三峡科技大学，硕士。研究方向：环境毒理学。

通讯作者：戚文华（1982—），男，汉族，重庆三峡科技大学教授、硕士生导师，博士。主要从事药用动植物遗传与分子生物学研究。

植物体内活性氧（ROS）过量积累，导致过氧化氢（H₂O₂）含量升高和膜脂过氧化产物丙二醛（MDA）增加，同时激活超氧化物歧化酶（SOD）、过氧化氢酶（CAT）等抗氧化酶系统^[8, 9]。SOD率先将毒性极强的超氧阴离子自由基歧化为过氧化氢和氧气，CAT则立即将产生的过氧化氢分解为水和氧气。两者级联协作，清除活性氧的源头产物，阻断链式反应。SOD和CAT响应最迅速、作用最直接，是组成细胞抵抗重金属胁迫最关键的初级屏障中的两种关键酶^[10, 11]。

营养生长阶段（分枝期）是大豆植株形态建成和生物量积累的关键时期，该时期叶片的光合作用与抗氧化能力直接影响后续的生殖生长和产量形成。明确该时期镍胁迫对植株生长及抗氧化酶活性的影响，对于揭示大豆镍毒害的早期生理机制具有重要意义。因此，本研究以栽培型大豆“中豆7901”为材料，设置不同土壤镍浓度梯度（0、30、60、120、240 mg/kg），在营养生长阶段（分枝期）系统测定根茎叶鲜重、叶片H₂O₂与MDA含量以及SOD、CAT活性，旨在阐明镍胁迫下大豆的剂量响应特征，为大豆耐镍品种选育和重金属污染农田的问题解决提供理论依据。

一、镍胁迫下营养生长阶段大豆根、茎、叶的生长响应

（一）材料与方法

盆栽试验于2025年夏季在重庆三峡农业科学院玻璃温室内进行。供试大豆品种为“中豆7901”，由重庆三峡农业科学院提供；土壤为无污染过筛田园土，镍源采用氯化镍（NiCl₂）。设置5个土壤镍浓度梯度：0（对照）、30、60、120、240 mg/kg。先将氯化镍溶液均匀喷洒于土壤中，反复过筛使镍分布均匀，每盆装入1.5 kg含镍土壤。大豆种子先在无污染土壤中萌发，待幼苗长出3~4片真叶后，选取长势一致的幼苗移栽至含镍盆中，每盆2株，每组浓度15盆（共30株），此外每浓度组分种植一些多余幼苗留作备用。盆栽置于重庆三峡农业科学院玻璃温室内，采用避雨栽培以防淋雨改变土壤镍浓度，每日少量浇水避免底部渗漏，盆底加托盘。于分枝期稳定时期进行采样，每个浓度处理选取6株（3盆）长势均匀的植株。取样时，将植株完整取出，用去离子水迅速冲洗掉根部泥土，并用滤纸吸干表面水分。从中选取长势平均良好有代表性的三株大豆植株进行测量，测量指标包括根重、茎重及叶重，根、茎、叶的鲜重采用电子天平称量。测量完成后，将根、茎、叶分别装入样品袋，经液氮速冻后转移至-80℃冰箱保存，用于后续生理生化的实验。整个采样、分离及测量过程在低温环境中快速操作，以保持样品活性。

（二）结果与分析

表1：营养生长期大豆生长指标

镍的施加量（mg/kg土）	根重（g）	茎重（g）	叶重（g）
0	1.16±0.05	2.03±0.38	1.95±0.12
30	1.36±0.05	1.82±0.17	1.88±0.64
60	1.10±0.18	1.60±0.05	1.62±0.22
120	0.78±0.20	1.44±0.41	1.22±0.46
240	0.63±0.05	1.25±0.05	1.07±0.18

在营养生长阶段（分枝期），不同浓度镍胁迫对大豆根、茎、叶生物量的影响呈现明显的剂量相关性。30 mg/kg低浓度处理下，根重略有增加，表现出典型的低浓度刺激效应；而茎、叶重量持续下降。

上述结果的生理机制可从以下几方面解释。首先，根系作为直接接触镍的器官，可能通过激活代谢活性、促进细胞分裂而在低浓度时产生刺激效应，敏感度可能低于茎和叶；而高浓度镍则

干扰细胞分裂和伸长，导致根系生长受阻。其次，茎可能对镍毒性的敏感性较高，低浓度镍即可干扰茎尖细胞伸长与维管组织发育，从而抑制茎的生物量积累。叶片对镍胁迫的高敏感性则可能源于镍干扰叶绿素合成、破坏光合电子传递链，从而抑制光合产物的积累。此外，本研究还观察到240 mg/kg处理下出现植株死亡现象，30株有8株死亡（死亡率27%），进一步印证该浓度已超出营养生长阶段大豆的耐受阈值。

（三）结论

本研究通过盆栽控制实验，系统分析了营养生长阶段（分枝期）不同浓度镍胁迫（0、30、60、120、240 mg/kg）对大豆根、茎、叶生物量的影响，得出以下结论：

镍胁迫对大豆生长的影响呈现明显的剂量效应规律。30~60 mg/kg是营养生长阶段大豆对镍胁迫的临界耐受浓度，各指标虽均下降但植株仍能维持基本生长。当镍浓度达到120 mg/kg及以上时，根、茎、叶生物量均受到显著抑制；240 mg/kg高浓度处理下，根重、茎重、叶重较对照均有显著降低，且出现植株死亡现象，植株死亡率达27%，表明该浓度已超出大豆的耐受范围，导致生长不可逆损伤。

综上所述，营养生长阶段大豆根、茎、叶生物量可作为镍胁迫响应的敏感表型指标，其明确的剂量效应阈值（30~60 mg/kg抑制、240 mg/kg致死）为后续抗氧化酶活性研究提供了重要的表型依据，也为大豆耐镍品种筛选和农田镍污染风险评估提供了参考。

二、镍胁迫对叶片氧化损伤及抗氧化酶活性的影响

（一）材料与方法

取用上一步收集保存好的大豆植物样本，用试剂盒进行实验。过氧化氢（H₂O₂）含量测定试剂盒、丙二醛（MDA）含量测定试剂盒、超氧化物歧化酶（SOD）活性测定试剂盒、过氧化氢酶（CAT）活性测定试剂盒均购自南京建成生物工程研究所。

主要仪器包括紫外分光光度计、多功能酶标仪、高速冷冻离心机、恒温水浴箱等。在收集好的叶片样本中选取三组生物学重复样品一起用液氮充分研磨成细粉，粉末充分混合，称取粉末样品0.1 g，加入预冷的缓冲液，冰浴条件下充分匀浆。按照试剂盒说明书的步骤进行各项指标测定，设置三组技术重复，全程严格

在低温条件下转移和进行。

(二) 结果与分析

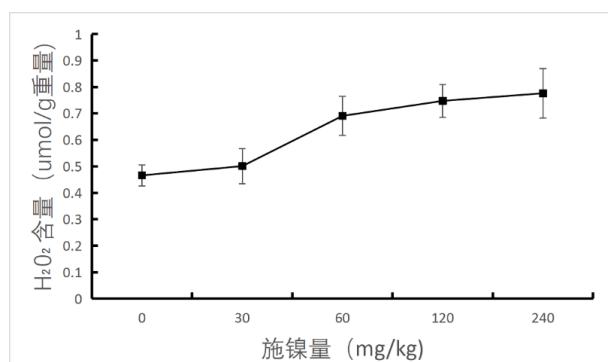


图1 镍胁迫下营养生长期大豆叶片 H₂O₂ 含量的变化

在正常生理条件下, H₂O₂ 作为信号分子参与植物生长发育和防御反应调控。但重金属胁迫会诱导植物细胞中活性氧 (ROS) 大量产生, H₂O₂ 含量显著升高^[12]。过量的 H₂O₂ 会攻击蛋白质、脂质和核酸, 导致细胞代谢紊乱。H₂O₂ 含量高低直接反映植物体内氧化胁迫的严重程度, 是判断抗氧化系统是否失衡的重要参数。

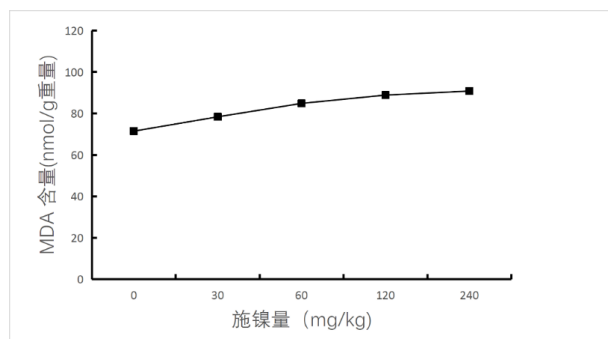


图2 镍胁迫下营养生长期大豆叶片 MDA 含量的变化

MDA 是多不饱和脂肪酸受到 ROS 攻击后发生链式过氧化反应的主要产物, 其含量变化可定量反映细胞膜脂过氧化的程度。MDA 积累越多, 表明膜结构受损越严重, 膜透性增加, 细胞被破坏, 进而影响正常生理功能。因此 MDA 常被用作评估重金属毒害下细胞膜完整性的关键指标^[13]。

如图1、2所示, 在分枝期, 大豆叶片中过氧化氢 (H₂O₂) 和丙二醛 (MDA) 含量均随镍处理浓度升高呈持续上升趋势。此结果表明镍胁迫诱导叶片活性氧积累加剧, 膜脂过氧化程度随浓度升高而加深。

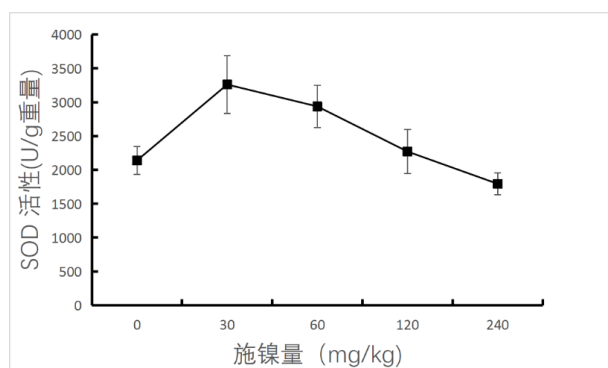


图3 镍胁迫下营养生长期大豆叶片 SOD 活性的变化

两种抗氧化酶活性均呈现“先升后降”的变化趋势。超氧化物歧化酶 (Superoxide dismutase, SOD) 是植物抗氧化防御系统的核心酶类之一。在重金属胁迫下, 植物体内会大量产生超氧阴离子自由基, 过量积累的自由基会攻击蛋白质、脂质和 DNA, 导致细胞代谢紊乱。SOD 通过催化歧化反应, 将高毒性的自由基转化为毒性相对较低的过氧化氢 (H₂O₂) 和氧气 (O₂), 从而阻断自由基链式反应的起始步骤^[14, 15]。SOD 活性的维持是植物耐受非生物胁迫的关键因素之一^[15]。如图3所示, SOD 活性在 30 mg/kg 处理下达到峰值, 随后逐渐下降, 240 mg/kg 时达到最低值。

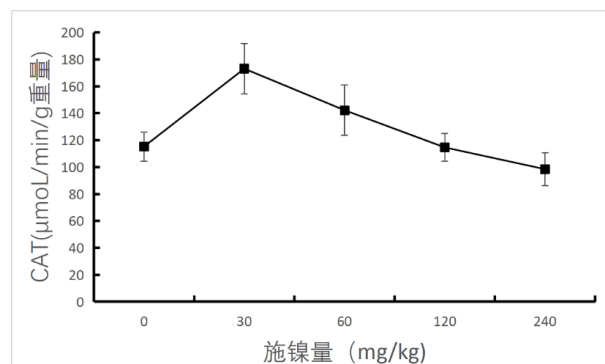


图4 镍胁迫下营养生长期大豆叶片 CAT 活性的变化

过氧化氢酶 (Catalase, CAT) 是植物抗氧化系统中负责清除过氧化氢 (H₂O₂) 的关键酶。在重金属胁迫下, 植物细胞中的超氧阴离子被超氧化物歧化酶 (SOD) 歧化为 H₂O₂ 和 O₂, 但 H₂O₂ 本身仍具有较强氧化性, 可攻击叶绿体、线粒体等细胞器生成自由基。CAT 主要定位于过氧化物酶体, 能够将 H₂O₂ 直接分解为水和氧气, 因此能在高浓度 H₂O₂ 条件下发挥高效的清除作用^[16]。CAT 反应速率极高, 尤其适用于清除大量积累的 H₂O₂。如图4所示, CAT 的活性变化趋势和 SOD 一致, 在 30 mg/kg 处理下达到峰值, 240 mg/kg 时降到最低。

(三) 结论

营养生长期 (分枝期) 大豆叶片对镍胁迫的氧化应激响应呈现出先激活后受损的特征。在 30 mg/kg 低浓度镍处理下, 叶片 SOD 和 CAT 活性均达到峰值, 表明抗氧化系统被有效激活以清除过量活性氧, 叶片尚能维持氧化还原平衡。当镍浓度升至 60 mg/kg 时, SOD 和 CAT 活性开始下降但降幅有限, H₂O₂ 和 MDA 持续上升但仍处于可控范围, 30~60 mg/kg 浓度可视为大豆叶片抗氧化系统从激活转向抑制、从可逆损伤走向不可逆损伤的临界范围。当镍浓度达到 120~240 mg/kg 时, 两种抗氧化酶活性均继续显著下降, 其中 240 mg/kg 处理下 SOD 和 CAT 活性都低于空白对照组, 与此同时 H₂O₂ 和 MDA 含量升至最高值, 这表明抗氧化系统已严重受损, 活性氧清除能力不足以抵消其产生速率, 导致严重的膜脂过氧化损伤。综合生长与生理指标, 营养生长期大豆叶片对镍胁迫的耐受临界浓度约为 30~60 mg/kg, 超过此浓度范围将引发不可逆的氧化损伤, 而 240 mg/kg 已超出其生理耐受阈值。

三、讨论

本研究结果表明，营养生长阶段大豆对镍胁迫的响应呈现“低促高抑”的剂量效应规律，其生理机制主要体现为抗氧化酶系统（SOD–CAT 级联清除通路）的应激激活与随后的功能受损。SOD 与 CAT 的协同变化充分体现了它们作为植物抗氧化第一道防线的核心作用。在重金属胁迫下，SOD 先将超氧阴离子歧化为 H_2O_2 ，CAT 随即将其分解为 H_2O 和 O_2 ，形成高效的级联清除通路。这一协同机制的优势在于：SOD 反应速率快但产物仍有毒性，而 CAT 可快速清除 H_2O_2 ，两者协同合作，阻断了活性氧的链式反应。在低浓度（30 mg/kg）镍处理下，根重略有增加，叶片 SOD 和 CAT 活性显著升高，这与已有研究在大豆幼苗中发现的低浓度镍刺激生长、高浓度加剧膜脂氧化的结果一致，说明适量镍可能激活代谢酶活性^[17, 18]。相比之下，茎叶生物量在

30 mg/kg 时已开始下降，表明茎叶对镍胁迫的敏感性可能高于根系。然而，当镍浓度超过 60 mg/kg 后，SOD 和 CAT 活性开始下降， H_2O_2 和 MDA 持续积累，表明镍离子已对酶蛋白结构造成损伤。有研究指出，重金属诱导的 H_2O_2 不仅是毒性分子，也可作为信号分子调控抗氧化酶基因表达，但当其积累超过阈值时会导致叶绿体降解和光合电子传递链受损^[19]。 H_2O_2 反映了氧化胁迫的强度，而 MDA 则定量显示了胁迫造成的膜损伤后果。当镍浓度大于等于 60 mg/kg 时，两种酶活性同步下降， H_2O_2 和 MDA 持续积累，说明第一道防线的受损是导致膜脂过氧化损伤和细胞损伤的关键原因。本研究中 240 mg/kg 处理下植株出现死亡，死亡率达 27%，叶片 H_2O_2 、MDA 含量升至最高，印证了这一现象的存在。综上，大豆营养生长阶段对镍胁迫的耐受性主要依赖于 SOD–CAT 级联通路的有效协同，其临界浓度在 30~60 mg/kg 之间，这为大豆耐镍品种筛选和农田镍污染风险预警提供了生理学依据。

参考文献

- [1] 王鹏新. 土壤和植物中的镍及其相互关系 [J]. 农业环境科学学报, 1993, (5): 213–6, 2.
- [2] KUMAR A, JIGYASU D K, SUBRAHMANYAM G, et al. Nickel in terrestrial biota: Comprehensive review on contamination, toxicity, tolerance and its remediation approaches [J]. Chemosphere, 2021, 275: 129996.
- [3] 闫巧俐, 华震宇, 何伟忠, 等. 枣果中重金属镍来源途径探究 [J]. 食品与机械, 2023, (1): 95–9.
- [4] 崔德杰, 张玉龙. 土壤重金属污染现状与修复技术研究进展 [J]. 土壤通报, 2004, 35(003): 366–70.
- [5] REHMAN M, ALI B, SALAM A, 等. Nickel Stress Modulates Growth Dynamics, Disrupts Redox Homeostasis, and Induces Ultrastructural Damage in Maize [J]. Crop Design, 2025: 100122.
- [6] 刘国栋. 植物营养元素—Ni [J]. 植物营养与肥料学报, 2001, 7(1): 103–8.
- [7] DE PAULA CORREIA D V, RODAK B W, MACHADO H A, et al. Beneficial or detrimental? How nickel application alters the ionome of soybean plants [J]. Plant Science, 2024, 349: 112274.
- [8] SADEGHIPOUR O. Chitosan application improves nickel toxicity tolerance in soybean [J]. Journal of Soil Science and Plant Nutrition, 2021, 21(3): 2096–104.
- [9] HU Z-Y, DENG X-B, PENG X-X, et al. Effects of external calcium on activities of antioxidant enzymes and membrane lipid peroxidation in rice seedlings under nickel stress [J]. Chinese Journal of Rice Science, 2007, 21(4): 367.
- [10] JOMOVA K, ALOMAR S Y, ALWASEL S H, et al. Several lines of antioxidant defense against oxidative stress: antioxidant enzymes, nanomaterials with multiple enzyme-mimicking activities, and low-molecular-weight antioxidants [J]. Archives of toxicology, 2024, 98(5): 1323–67.
- [11] SHENG Y, ABREU I A, CABELLI D E, et al. Superoxide dismutases and superoxide reductases [J]. Chemical reviews, 2014, 114(7): 3854–918.
- [12] NAZIR F, FARIDUDDIN Q, KHAN T A. Hydrogen peroxide as a signalling molecule in plants and its crosstalk with other plant growth regulators under heavy metal stress [J]. Chemosphere, 2020, 252: 126486.
- [13] AYALA A, MUÑOZ M F, ARGÜELLES S. Lipid peroxidation: production, metabolism, and signaling mechanisms of malondialdehyde and 4-hydroxy-2-nonenal [J]. Oxidative medicine and cellular longevity, 2014, 2014(1): 360438.
- [14] ALSCHER R G, ERTURK N, HEATH L S. Role of superoxide dismutases (SODs) in controlling oxidative stress in plants [J]. Journal of experimental botany, 2002, 53(372): 1331–41.
- [15] GILL S S, ANJUM N A, GILL R, et al. Superoxide dismutase—mentor of abiotic stress tolerance in crop plants [J]. Environmental science and pollution research, 2015, 22(14): 10375–94.
- [16] MHAMDI A, QUEVAL G, CHAOUCH S, et al. Catalase function in plants: a focus on Arabidopsis mutants as stress-mimic models [J]. Journal of experimental botany, 2010, 61(15): 4197–220.
- [17] 王启明. 镍对大豆种子萌发和膜脂过氧化作用及体内保护酶活性的影响 [J]. 种子, 2006, 25(7): 9–12.
- [18] 赵娜. 镍胁迫对玉米、大豆苗期生长及生理特性的影响 [D]. 吉林农业大学, 2011.
- [19] CUYPERS A, HENDRIX S, AMARAL DOS REIS R, et al. Hydrogen peroxide, signaling in disguise during metal phytotoxicity [J]. Frontiers in Plant Science, 2016, 7: 470.