

引用格式: 张磊, 李敬祖, 戚传鑫, 等. 二氧化碳摩尔分数升高与氮添加对宁夏枸杞根区土壤理化性质和酶活性的影响[J]. 浙江农林大学学报, 2025, 42(6): 1232–1242. ZHANG Lei, LI Jingzu, QI Chuanxin, et al. Effects of elevated CO₂ concentration and nitrogen addition on soil physicochemical properties and enzyme activities in the root zone of *Lycium barbarum*[J]. Journal of Zhejiang A&F University, 2025, 42(6): 1232–1242.

二氧化碳摩尔分数升高与氮添加对宁夏枸杞根区土壤理化性质和酶活性的影响

张磊¹, 李敬祖¹, 戚传鑫¹, 马亚平², 曹兵^{2,3}

(1. 宁夏大学葡萄酒与园艺学院, 宁夏银川 750021; 2. 宁夏大学林业与草业学院, 宁夏银川 750021; 3. 宁夏葡萄酒与防沙治沙职业技术学院, 宁夏银川 750001)

摘要: 【目的】探究在大气二氧化碳(CO₂)摩尔分数升高与氮添加互作下, 宁夏枸杞 *Lycium barbarum* 根区土壤主要理化指标与酶活性的变化。【方法】以4年生宁夏枸杞‘宁杞1号’ *L. barbarum* ‘Ningqi 1’盆栽植株为试验材料, 用开顶气室(open-top chamber, OTC)控制系统模拟CO₂摩尔分数升高处理[CO₂, (840±20) μmol·mol⁻¹], 同时以自然环境CO₂摩尔分数作为对照[ck, (420±20) μmol·mol⁻¹]; 设置全年氮添加量为N0(0 g·kg⁻¹)、N1(1 g·kg⁻¹)、N2(2 g·kg⁻¹) 3个水平, 测定并分析宁夏枸杞根区土壤全氮、全磷、有机质和过氧化氢酶、多酚氧化酶等指标。【结果】①CO₂摩尔分数升高和氮添加的交互作用对整个处理时期的土壤全钾、铵态氮、有效磷和速效钾质量分数有极显著影响($P<0.01$); ②CO₂摩尔分数升高处理下土壤多酚氧化酶、酸性转化酶和脲酶活性在处理120 d时较自然CO₂摩尔分数分别提升了40.58%、30.67%和36.41%, 而过氧化氢酶却降低了61.50%; ③在整个处理周期中, 土壤全钾质量分数与土壤酶活性始终保持显著的相关性($P<0.05$)。【结论】在CO₂摩尔分数升高和氮添加处理下, 宁夏枸杞根区土壤全磷、有机质质量分数及多酚氧化酶、酸性转化酶和脲酶活性呈上升趋势, 而土壤全氮质量分数和过氧化氢酶活性呈下降趋势。该研究结果可为全球气候变化背景下宁夏枸杞的适应性栽培调控提供依据。图5表1参49

关键词: 宁夏枸杞; CO₂摩尔分数; 氮添加; 有机质; 过氧化氢酶

中图分类号: S714 文献标志码: A 文章编号: 2095-0756(2025)06-1232-11

Effects of elevated CO₂ concentration and nitrogen addition on soil physicochemical properties and enzyme activities in the root zone of *Lycium barbarum*

ZHANG Lei¹, LI Jingzu¹, QI Chuanxin¹, MA Yaping², CAO Bing^{2,3}

(1. College of Enology and Horticulture, Ningxia University, Yinchuan 750021, Ningxia, China; 2. College of Forestry and Prataculture, Ningxia University, Yinchuan 750021, Niangxia, China; 3. Ningxia Technical College of Wine and Desertification Prevention, Yinchuan 750001, Ningxia, China)

Abstract: [Objective] This aim was to investigate the changes of the key physicochemical properties and enzyme activities in the rhizosphere soil of *Lycium barbarum* under the interaction effects of elevated atmospheric CO₂ concentration and nitrogen addition. [Method] The four-year old potted plants of *L. barbarum* ‘Ningqi 1’ were used as experimental materials, with the open-top chamber (OTC) control system to simulate the treatment of elevated CO₂ concentration [CO₂, (840±20) μmol·mol⁻¹], and at the same time, the

收稿日期: 2025-01-19; 修回日期: 2025-06-30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(32160393); 宁夏自然科学基金资助项目(2024AAC05038)

作者简介: 张磊(ORCID: 0009-0005-6905-8328), 从事果树生理及高效栽培研究。E-mail: a1104578973@163.com。

通信作者: 曹兵(ORCID: 0000-0002-0310-672X), 博士, 教授, 从事森林培育、经济林与林草植被恢复研究。E-mail: bingcao2006@126.com

CO₂ concentration in the natural environment was used as the control [ck, (420±20) μmol·mol⁻¹]; The treatments included three levels of nitrogen addition were set: N0 (0 g·kg⁻¹), N1 (1 g·kg⁻¹), and N2 (2 g·kg⁻¹), and the total nitrogen, total phosphorus, organic matter content, and indicators of catalase and polyphenol oxidase were measured and analyzed in the soil of the rhizosphere zone of *L. barbarum*. [Result] (1) The interaction between elevated CO₂ concentration and nitrogen addition has an extremely significant impact on soil total potassium, ammonium nitrogen, available phosphorus, and available potassium throughout the entire treatment period ($P < 0.01$); (2) After 120 days of elevated CO₂ concentration, soil polyphenol oxidase, acid invertase, and urease activities increased by 40.58%, 30.67%, and 36.41% respectively compared to ambient CO₂ concentration, while catalase activity decreased by 61.50%; (3) Significant correlations persisted between total potassium content and soil enzyme activities during the entire treatment duration. [Conclusion] Under the effects of elevated CO₂ concentration and nitrogen addition, the contents of soil total phosphorus, organic matter, polyphenol oxidase, acid invertase, and urease in the root zone of *L. barbarum* exhibited an increasing trend, while the contents of soil total nitrogen and catalase showed a decreasing trend. The results of this study provide a reference and guidance basis for the adaptive cultivation and regulation of *L. barbarum* in Ningxia under the background of global climate change. [Ch, 5 fig. 1 tab. 49 ref.]

Key words: *Lycium barbarum*; CO₂ concentration; nitrogen addition; organic matter; catalase

大气二氧化碳 (CO₂) 摩尔分数升高是引起全球气候变化的主要因素^[1]。全球平均 CO₂ 摩尔分数在 2023 年已经达 424 μmol·mol⁻¹, 预计到 21 世纪末达 700 μmol·mol⁻¹^[2-3]。CO₂ 摩尔分数升高引起温室效应, 同时也直接影响着植物的生长发育和代谢过程。作为光合作用的关键底物, CO₂ 摩尔分数变化显著影响植物的碳同化效率^[4]。已有研究表明: 高 CO₂ 摩尔分数通过提高植物光合速率与水分利用效率, 降低蒸腾作用, 促进植物生长, 影响生态系统养分元素的分配与利用, 导致植物生理代谢和果实营养品质发生变化^[5-6]。值得注意的是, 植物对高 CO₂ 摩尔分数的生理响应受氮素供应水平的显著调控^[7-8]。在氮素充足的情况下, 核酮糖-1, 5-二磷酸羧化酶/加氧酶 (Rubisco 酶) 的活性可以得到更好的维持和增强, 这对于提高植物的光合效率和促进生长具有重要意义^[9]。如在长期 CO₂ 摩尔分数升高条件下增施铵态氮或硝态氮可提升闽楠 *Phoebe bournei* 幼苗光合关键酶活性及有机物积累量, 促进闽楠幼苗的生长^[10]。在全球气候变化的背景下, 氮沉降往往与大气 CO₂ 摩尔分数的升高同时发生, 有必要开展其交互作用对植物生长发育与代谢及根区环境的影响^[11-12]。

宁夏枸杞 *Lycium barbarum* 为茄科 Solanaceae 枸杞属 *Lycium* 落叶灌木, 是典型的药食同源植物^[13], 主要分布在中国西北干旱半干旱地区^[14-15]。其果实富含生物活性化合物, 如多糖、类黄酮、类胡萝卜素、甜菜碱和氨基酸等, 在营养保健和功能性食品研发中具有重要作用^[16-17]。已有研究表明: CO₂ 摩尔分数升高可以促进宁夏枸杞果实半乳糖、葡萄糖和蔗糖积累, 显著提高糖代谢相关基因表达及相关酶活性^[18]; 长期高 CO₂ 摩尔分数处理会使根区土壤微生物总数显著增加, 促进宁夏枸杞根区土壤微生物多样性, 提高其碳源利用率, 并改变部分碳源利用类型^[19]。CO₂ 摩尔分数升高显著增加 ‘宁杞 1 号’ ‘Ningqi 1’ 根区土壤脲酶和转化酶的活性, 而长时间的 CO₂ 摩尔分数倍增可能会加剧对宁夏枸杞根区土壤微生物数量和酶活性的影响^[20]。ZHAO 等^[21] 发现混合氮添加和单氮添加对紫花苜蓿 *Medicago sativa* 土壤酶活性的影响有显著差异, 混合施氮显著提高了 3 种氧化酶的活性, 而单一硝态氮的施用对土壤脲酶活性没有明显影响。适当减少氮肥施用量有助于提高 ‘宁杞 7 号’ ‘Ningqi 7’ 土壤氮的利用率^[22], 并能通过改善土壤质量、微生物群落结构和功能促进可持续农业实践。

然而, 目前对于 CO₂ 摩尔分数升高与氮添加对宁夏枸杞根区土壤理化性质和酶活性的交互作用研究还相对不足。因此, 本研究通过模拟大气 CO₂ 摩尔分数升高处理和设置全年氮添加量, 旨在明确 CO₂ 摩尔分数升高与氮添加对宁夏枸杞根区土壤理化性质和酶活性的具体影响, 为气候变化背景下宁夏枸杞的适应性栽培提供科学依据和指导。

1 材料与方法

1.1 材料

本研究于 2024 年在宁夏大学实验农场 (106°14'22.19"N, 38°13'50.34"E) 进行, 海拔为 1 116.86 m, 属于中温带干旱气候区, 年均日照为 3 000 h, 年均气温为 8.5 ℃, 基地土壤为壤土。在开顶气室 (open-top chamber, OTC) 内选用长势一致、无病虫害的 4 年生‘宁杞 1 号’盆栽植株为试验材料。本研究在课题组前期相同处理的基础上进一步开展, 初始阶段土壤中各养分分布均匀^[23]。表 1 为土壤的基础性质。

表 1 试验处理前盆栽土壤理化性质

Table 1 Physico-chemical properties of potting soil before experimental treatments

处理	全氮/ (g·kg ⁻¹)	碱解氮/ (mg·kg ⁻¹)	全磷/ (g·kg ⁻¹)	有效磷/ (mg·kg ⁻¹)	速效钾/ (mg·kg ⁻¹)	有机质/ (g·kg ⁻¹)	pH
ck+N0	1.56±0.02 d	48.92±0.22 c	0.87±0.02 c	66.13±0.52 a	207.07±1.86 d	13.41±0.44 d	8.35±0.07 a
CO ₂ +N0	1.68±0.05 c	49.11±0.35 c	0.91±0.01 b	62.66±0.24 c	215.27±2.52 b	14.51±0.35 c	8.33±0.10 a
ck+N1	2.14±0.10 a	57.37±0.39 a	0.71±0.05 d	61.89±0.16 d	205.87±3.12 d	12.26±0.81 d	8.04±0.07 b
CO ₂ +N1	2.01±0.04 a	46.34±0.21 d	0.94±0.03 b	63.72±0.02 b	237.93±4.52 a	19.07±0.54 a	7.84±0.04 c
ck+N2	1.94±0.02 b	49.17±0.23 c	0.63±0.03 d	62.55±0.12 c	201.23±5.36 d	15.38±0.42 b	7.75±0.04 d
CO ₂ +N2	1.95±0.02 b	56.51±0.31 b	1.12±0.02 a	62.54±0.16 c	210.87±1.55 c	16.04±0.51 b	7.74±0.02 d

说明: 同列不同小写字母表示不同处理间差异显著($P<0.05$)。

1.2 试验设计

试验采用双因素设计, 以 OTC 模拟 CO₂ 摩尔分数升高处理 [CO₂, (840±20) μmol·mol⁻¹], 以自然环境 CO₂ 摩尔分数为对照 [ck, (420±20) μmol·mol⁻¹]; 设置全年氮添加量为 0 (N0)、1 (N1)、2 g·kg⁻¹ (N2) 3 个水平^[24]。选用 3 个气室进行 CO₂ 摩尔分数升高处理, 3 个气室作自然 CO₂ 摩尔分数处理; 气室内种植 9 株, 盆栽, 每盆 1 株, 每盆土壤 22 kg, 每个氮素添加量分别处理 3 株 (3 次重复), 共计 6 个气室、54 株试验植株; 气室内与大田常规水肥管理相同^[25]。

CO₂ 摩尔分数升高和氮素处理开始于 2024 年 5 月下旬, 每天 8:00—20:00 向高 CO₂ 摩尔分数气室通入 CO₂ 气体, 控制其摩尔分数在试验要求范围内; 以汉和生物普滋苗功能性氮肥为氮源, 氮质量分数 ≥ 45%, 还含有 0.2% 整合态微量元素, 以及 0.01% 的钼元素。称取 0 (N0)、88 (N1)、176 g (N2) 肥料分别溶于 18 L 水中, 得到对应质量浓度的水溶氮肥, 总计 54 L, 每个氮水平下每株枸杞灌溉 1 L。10 d 添加 1 次氮素, 至 9 月上旬完成全年添加 (共计添加 10 次)。

在枸杞盆栽区域, 以树冠投影范围为参照, 于盆栽周边均匀选取 4 个点位, 同时在植株根区附近增设 1 个点位, 利用小型土钻采集处理开始后 30、60、90、120 d 的 0~30 cm 根区土壤样品。将采集的 5 份土样混匀, 一份置于放冰袋的保温箱中带回实验室-20 ℃ 保存, 后续用于土壤酶活性测定; 另一份风干过筛用于测定土壤理化性质。

1.3 指标测定

取风干土壤, 过 0.25 和 1.00 mm 筛, 用于土壤理化性质的测定。土壤铵态氮、有效磷和速效钾采用中性、石灰性土壤铵态氮、有效磷、速效钾的测定联合浸提-比色法测定^[26]; 土壤有机质、全氮、全磷、全钾的测定方法见参考文献^[27]。

为全面表征 CO₂ 浓度升高与氮添加对土壤生态功能的协同影响, 选择与土壤碳循环、氮循环和氧化应激有关的土壤酶, 包括过氧化氢酶 (S-CAT)、多酚氧化酶 (S-PPO)、脲酶 (S-UE) 和酸性转化酶 (S-AI) 为研究对象。采用酶联免疫分析 (enzyme-linked immunosorbent assay, ELISA) 测定酶活性, 标准曲线分别为: $Y_1=4.3065X_1-0.0686$, $R_1^2=0.9984$; $Y_2=251.33X_2-15.067$, $R_2^2=0.9989$; $Y_3=45.043X_3-0.741$, $R_3^2=0.9936$; $Y_4=707.56X_4-22.491$, $R_4^2=0.9936$ 。

1.4 数据处理与分析

采用 Excel 2019 进行数据整理, 使用 SPSS 26.0 和 Origin 2024b 对数据进行显著性检验和方差分析 ($P<0.05$), 试验数据用平均值±标准误表示。

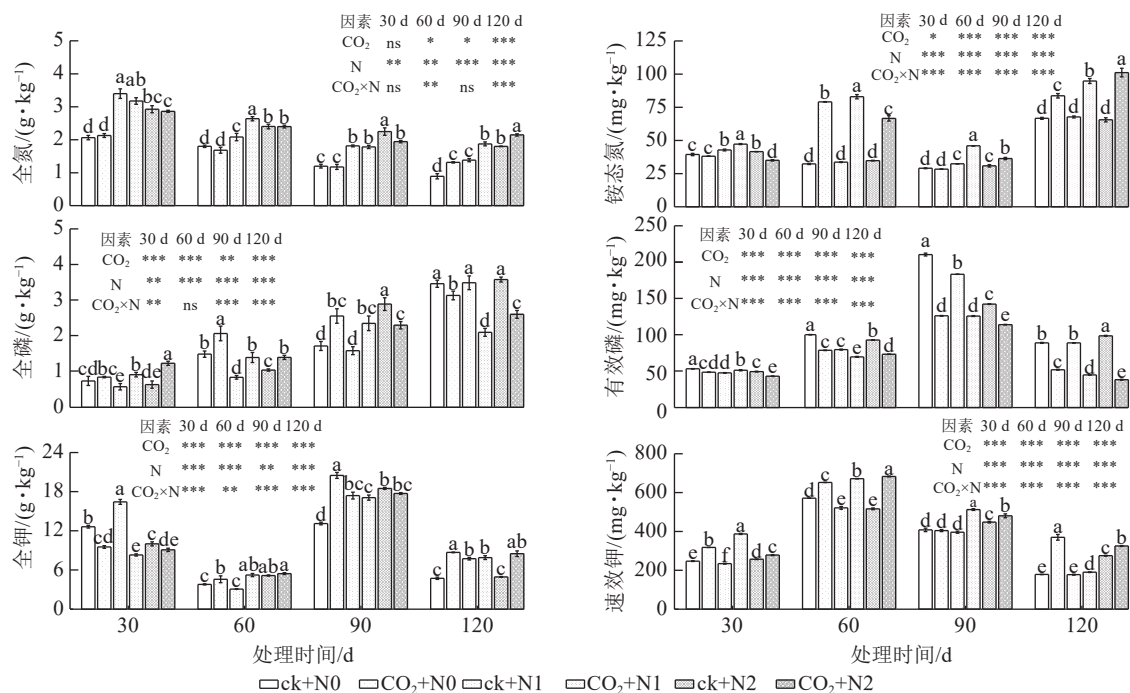
2 结果与分析

2.1 CO₂ 摩尔分数升高和氮添加对宁夏枸杞根区土壤大量元素养分的影响

如图 1 所示：在处理 30、60、90、120 d 时，全氮的平均质量分数分别为 2.76、2.17、1.69 和 1.57 g·kg⁻¹，总体呈下降趋势。处理 30 d 时，土壤中全氮质量分数 N1 处理显著高于 N0 和 N2 ($P<0.05$)；处理 120 d 时，在 N0~N2 同等施氮量情况下，CO₂ 摩尔分数升高处理全氮的质量分数均值较自然 CO₂ 处理分别提升了 47.6%、35.6% 和 19.3%。不同处理天数全磷的均值质量分数分别为 0.82、1.36、2.22 和 3.04 g·kg⁻¹，在处理 120 d 时达到峰值。在处理 120 d 时，自然 CO₂ 处理下，3 种氮处理间的全磷质量分数无显著差异，且显著高于 CO₂ 升高处理 ($P<0.05$)。全钾质量分数呈先降低再升高，最后再降低的趋势，在处理 90 d 时，CO₂+N0 处理下的全钾质量分数显著高于其他 5 个处理 ($P<0.05$)；但在 N1 和 N2 处理下，不同 CO₂ 摩尔分数处理间无显著差异。方差分析结果显示：CO₂ 与氮添加互作对处理 60 和 120 d 的全氮质量分数有极显著影响 (分别为 $P<0.01$ 和 $P<0.001$)。CO₂ 和氮添加互作极显著影响处理 30、90 和 120 d 全磷质量分数 (分别为 $P<0.01$ 、 $P<0.001$ 和 $P<0.001$)。在 4 个处理时间，CO₂ 和氮添加互作对全钾质量分数影响显著 (60 d 时 $P<0.01$ ，其余 $P<0.001$)。从整体影响情况分析，土壤中全氮、全磷和全钾质量分数不仅受 CO₂ 摩尔分数升高、氮添加单一因素的作用，两者之间的交互作用也会对这些土壤养分产生调控效应。

2.2 CO₂ 摩尔分数升高和氮添加对宁夏枸杞根区土壤速效养分的影响

如图 1 所示：在处理 30 d 时，CO₂+N2 处理下的土壤中铵态氮质量分数相较于 ck+N2 处理显著降低 ($P<0.05$)；但后期 CO₂ 摩尔分数升高反而促使铵态氮的质量分数增加，处理 120 d 时铵态氮质量分数均值较 30 d 增加了 96.42%。有效磷质量分数整体呈先升高后下降的变化趋势。在处理 30 d 时，CO₂+N1 处理下有效磷质量分数高于 ck+N1，而在其他时期，CO₂ 摩尔分数升高会显著降低土壤中有效磷质量分数。120 d 时，CO₂ 摩尔分数升高处理下有效磷质量分数较自然 CO₂ 处理分别降低了 41.5%、49.6% 和 61.2%。不同处理天数速效钾的质量分数分别为 286.99、603.35、442.03 和 252.78 mg·kg⁻¹。在整个处理过程，CO₂ 摩尔分数升高处理下速效钾的质量分数显著高于自然 CO₂ 处理 ($P<0.05$)。在处理 60 d 时，CO₂ 摩尔分数升高处理并增施氮肥可以有效促进土壤中速效钾的质量分数，其中 CO₂+N2 和



不同小写字母表示不同处理之间存在显著差异 ($P<0.05$)。子图例显示混合效应ANOVA P 值，* $P<0.05$ ，** $P<0.01$ ，*** $P<0.001$ ，ns表示差异不显著。

图 1 CO₂ 摩尔分数升高和氮添加处理下宁夏枸杞根区土壤大量元素和速效养分质量分数比较

Figure 1 Comparison of soil major elements in the root zone of *L. barbarum* under elevated CO₂ concentration and nitrogen addition treatments

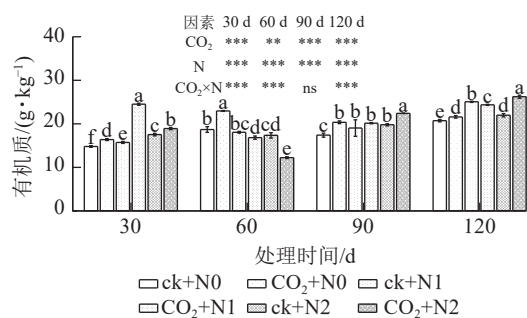
CO₂+N1 处理较 CO₂+N0 处理速效钾质量分数分别增加了 21.1% 和 18.9%。方差分析表明: CO₂ 摩尔分数升高与氮添加的互作在整个处理时期对铵态氮、有效磷和速效钾质量分数均产生了极显著影响 ($P<0.001$)。

2.3 CO₂ 摩尔分数升高和氮添加对宁夏枸杞根区土壤有机质的影响

图 2 表明: 在处理 30、60、90、120 d 时, 有机质平均质量分数分别为 17.92、17.63、19.81 和 23.27 g·kg⁻¹, 随处理时间整体呈升高趋势。其中, 在处理 30 d 时, 在 N0、N1、N2 施氮量下, CO₂ 摩尔分数升高处理有机质质量分数较自然 CO₂ 处理分别增加了 10.6%、56.0% 和 8.0%。而在处理 90 和 120 d 时, 增加 CO₂ 摩尔分数会显著提升 N2 处理有机质质量分数, 且显著高于其他 5 个处理 ($P<0.05$)。经方差分析可知: CO₂ 和氮添加处理间的交互作用对处理 30、60 和 120 d 时有机质的质量分数均存在极显著影响 ($P<0.001$)。

2.4 CO₂ 摩尔分数升高和氮添加对宁夏枸杞根区土壤 pH 的影响

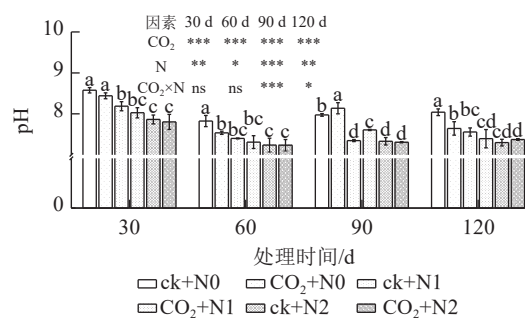
如图 3 所示: 在处理 30、60 和 120 d 时, 随着氮添加的增加土壤 pH 呈下降趋势, 且 CO₂ 摩尔分数升高处理低于自然 CO₂ 处理。但在处理 90 d 时, CO₂ 摩尔分数升高下 N0 和 N1 处理的土壤 pH 显著高于自然 CO₂ 处理 ($P<0.05$)。方差分析显示: CO₂ 和氮添加处理的交互作用对处理 90 和 120 d 的土壤 pH 有显著影响 ($P<0.05$)。



不同小写字母表示不同处理之间存在显著差异 ($P<0.05$)。子图例显示混合效应ANOVA P 值, * $P<0.05$, ** $P<0.01$, *** $P<0.001$, ns 表示差异不显著。

图 2 CO₂ 摩尔分数升高和氮添加处理下宁夏枸杞根区土壤有机质质量分数比较

Figure 2 Comparison of soil organic matter content in root zone of *L. barbarum* under elevated CO₂ concentration and nitrogen addition treatments



不同小写字母表示不同处理之间存在显著差异 ($P<0.05$)。子图例显示混合效应ANOVA P 值, * $P<0.05$, ** $P<0.01$, *** $P<0.001$, ns 表示差异不显著。

图 3 CO₂ 摩尔分数升高和氮添加处理下宁夏枸杞根区土壤 pH 比较

Figure 3 Comparison of soil pH content in root zone of *L. barbarum* under elevated CO₂ concentration and nitrogen addition treatments

2.5 CO₂ 摩尔分数升高和氮添加对宁夏枸杞根区土壤酶活性的影响

由图 4 可知: CO₂ 摩尔分数升高处理下, 过氧化氢酶活性随处理时间增加呈现显著下降趋势 ($P<0.05$), 在处理 120 d 时, 在 N0~N2 添加量下其活性较自然 CO₂ 处理分别降低了 59.5%、63.8% 和 62.2%。在 CO₂ 摩尔分数升高和氮添加处理下多酚氧化酶的活性显著升高 ($P<0.05$)。在处理 30、60 和 90 d 时, 自然 CO₂ 处理下不同氮素水平对多酚氧化酶的活性无显著影响, 而在处理 120 d 时, N1 处理多酚氧化酶的活性较 N0 和 N2 处理显著降低 ($P<0.05$)。方差分析表明: CO₂ 和氮添加交互作用对处理 30、60 和 120 d 的过氧化氢酶活性有极显著影响 (分别为 $P<0.01$ 、 $P<0.001$ 和 $P<0.01$); 对处理 60、90 d 的多酚氧化酶的活性有显著影响 ($P<0.05$), 对处理 120 d 的多酚氧化酶活性有极显著影响 ($P<0.001$)。交互作用结果表明两者可能通过协同作用影响土壤微生物和酶的活性。

CO₂ 摩尔分数升高处理显著增加了根区土壤酸性转化酶和脲酶的活性 ($P<0.05$)。不同处理天数酸性转化酶的活性均值分别为 0.45、0.52、0.59 和 0.64 $\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$ 。在处理 30 d 时, CO₂+N1 处理酸性转化酶的活性显著低于 CO₂+N0 和 CO₂+N2 处理 ($P<0.05$)。处理 120 d 时, 酸性转化酶活性较 30 d 上升了 42.22%。不同处理天数脲酶的活性均值分别为 6.27、7.40、8.69 和 9.46 $\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$ 。在处理 90 d 时, 在自然 CO₂ 处理下, 脲酶活性由强到弱依次为 N1、N2、N0, 而 CO₂+N1 处理下脲酶活性分别较

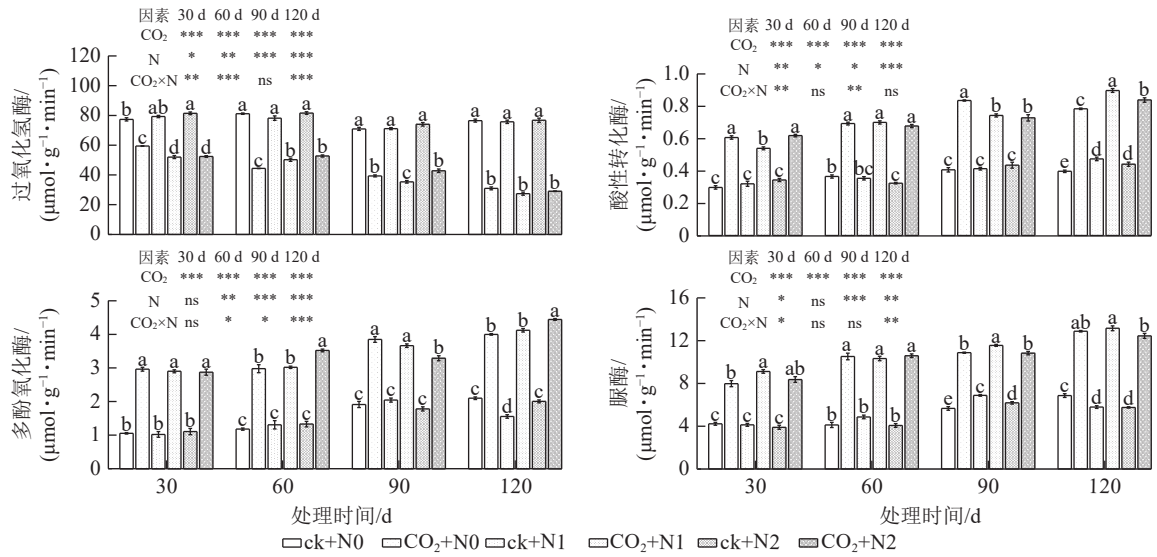


图 4 CO_2 摩尔分数升高和氮添加处理下宁夏枸杞根区土壤酶活性比较

Figure 4 Comparison of soil enzyme activities in the root zone of *L. barbarum* under elevated CO_2 concentration and nitrogen addition treatments

$\text{CO}_2 + \text{N}_0$ 和 $\text{CO}_2 + \text{N}_2$ 分别增加了 6.3% 和 6.7%。方差分析表明：在处理 30 和 90 d 时， CO_2 和氮添加交互作用对酸性转化酶的活性有极显著影响 ($P < 0.01$)； CO_2 和氮添加交互作用对 30 和 120 d 的脲酶活性分别有显著 ($P < 0.05$) 和极显著影响 ($P < 0.01$)。

2.6 Spearman 相关性分析

Spearman 相关性分析 (图 5) 发现：不同处理天数土壤理化指标与酶活性的相关性呈现多样化特征。在 CO_2 摩尔分数升高和氮添加处理 30 d 时，全磷、速效钾和有机质与土壤多酚氧化酶、酸性转化酶和脲酶呈显著正相关，而与过氧化氢酶呈极显著负相关；至 60 d，土壤铵态氮和速效钾与多酚氧化酶、酸

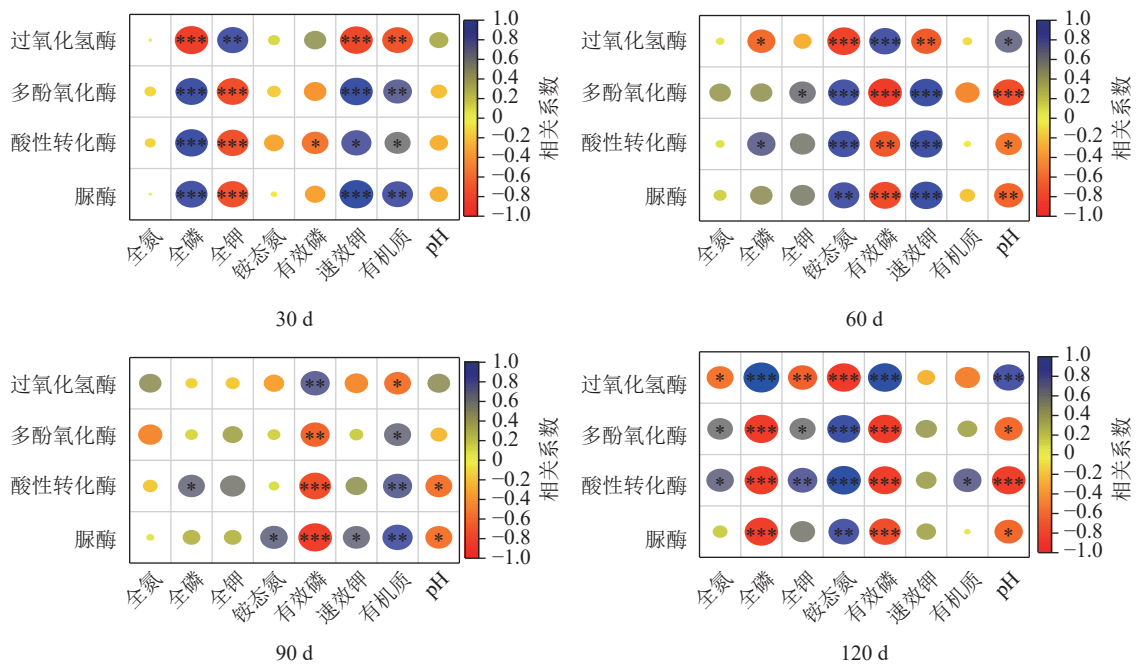


图 5 CO_2 摩尔分数升高和氮添加处理下宁夏枸杞根区土壤理化性质和土壤酶活性的 Spearman 相关分析

Figure 5 Spearman's correlation analysis of soil physicochemical properties and soil enzyme activities in the root zone of *L. barbarum* under elevated CO_2 concentration and nitrogen addition treatments

性转化酶和脲酶呈显著正相关,与土壤过氧化氢酶呈显著负相关,而有效磷和pH与4种酶活性的相关性土壤铵态氮等恰好相反;到90 d,只有全磷、铵态氮、有效磷、速效钾、有机质和pH与部分或所有酶有相关性外,其余都无相关性;处理120 d,除速效钾外,其余理化指标与4种酶都有显著关系。

3 讨论

3.1 CO₂ 摩尔分数升高和氮添加对土壤理化性质的影响

作为全球变化的两大驱动因子,大气CO₂摩尔分数升高以及氮添加对植物养分的吸收、分配和循环过程有着显著影响^[28]。CO₂摩尔分数升高和氮添加可以交互调节关键的土壤过程,如氮循环和土壤有机质分解^[29]。本研究中,在CO₂摩尔分数升高和氮添加处理下,宁夏枸杞根区土壤各养分指标均受到CO₂和氮添加交互作用的影响,这种交互作用不仅能加速土壤养分循环,还能提高土壤微生物多样性,在处理最后阶段,CO₂摩尔分数升高处理下土壤的全氮、铵态氮、全钾、速效钾和有机质含量显著高于自然CO₂处理,然而,却对全磷和有效磷的吸收产生了抑制作用。大气CO₂摩尔分数升高与外源氮对生态系统的影响并非孤立,两者共同促进植物地上部及根系生长,其互作还可能通过改变土壤微生物群落结构和植物根系分泌物等途径,进一步对土壤肥力和生态功能产生影响^[5]。为满足自身生长、代谢等生理活动需求,植物会持续从根区土壤中摄取更多的磷元素。有研究发现:在相同氮沉降下,0~10 cm土层土壤速效磷随着CO₂摩尔分数的增加呈先增后减的趋势^[30]。本研究发现:在CO₂摩尔分数升高和氮添加下,有效磷同样为先增加后降低的趋势。本研究在处理60 d时CO₂+N₂有机质含量显著低于ck+N₂这一反常现象,可能源于植物-土壤的反馈调节,高CO₂摩尔分数下过量氮素减少了根系分泌物中低分子量有机酸的分泌量,而有机酸可络合稳定土壤有机质^[31]。此外,这也与该处理下多酚氧化酶活性显著增加的结果相印证^[32]。也有研究表明:持续增加的氮素会促进蛋白质和叶绿素合成以及植物根系分泌物增加^[33],加之CO₂摩尔分数升高,两者协同促进植物生长,使植物光合产物、生物量增加,最终导致土壤有机质含量上升。在CO₂摩尔分数升高的N₀和N₁处理下,经过90 d,土壤微生物群落结构可能发生了明显改变^[34],一些能够产生碱性代谢产物的微生物活性增强,使土壤pH升高。当长期处于高CO₂处理且氮添加的环境时,土壤微生物群落结构和功能会发生变化^[35],使得具有解钾作用的微生物数量或活性发生变化,且后期植株生长量增加,最终致使土壤全钾和速效钾含量降低。基于上述研究结果,在未来宁夏枸杞的种植实践中,应紧密结合作物不同生长阶段的养分需求状况,实现精准配方施肥,为区域生态保护和农业可持续发展提供坚实的科学依据。

3.2 CO₂ 摩尔分数升高和氮添加对土壤酶活性的影响

土壤酶活性的强弱与土壤内生物代谢和物质转化速度有关,可反映土壤环境质量和土壤微生物多样性^[36-37]。本研究中,在CO₂摩尔分数升高和氮添加处理下,宁夏枸杞根区土壤过氧化氢酶、多酚氧化酶、酸性转化酶和脲酶的活性呈现不同的趋势。具体表现为CO₂摩尔分数升高和氮添加显著促进了多酚氧化酶、酸性转化酶和脲酶的活性,而过氧化氢酶活性则呈现下降的趋势。此外,CO₂和氮添加的交互作用对4种酶的活性在不同时间点产生显著影响,这反映了土壤生态系统在应对环境变化时的复杂响应机制。在本研究中,高摩尔分数CO₂和充足的氮素为微生物提供了丰富的碳源和氮源,而研究发现多酚氧化酶、酸性转化酶和脲酶与微生物的碳氮代谢密切相关^[38],这解释了其活性增加的原因。相关研究显示:在高CO₂环境下,红豆树 *Ormosia hosiei* 幼苗叶片中Rubisco酶羧化效率的提升会抑制光呼吸^[39],叶片中H₂O₂的主要生成途径受到抑制,使得土壤中过氧化氢酶含量降低。施氮对土壤过氧化氢酶活性具有抑制作用的研究也有报道^[40],这些综合原因可能最终导致过氧化氢酶活性呈现下降趋势。有研究表明^[41]:在氮肥处理下,土壤脲酶的活性会随着CO₂摩尔分数升高而显著增加。CO₂摩尔分数变化对土壤中的多酚氧化酶也有着重要影响。由于多酚氧化酶的活性与土壤腐质化程度呈正相关^[42],高摩尔分数CO₂会导致土壤腐质化程度加速,进而使多酚氧化酶的活性增加。究其原因,CO₂增加会显著促使植株及根系生物量的增长,同时根系分泌物种类与数量发生改变,而土壤酶活性的提升与植物根系分泌物的增多有着显著的关联性^[43]。

3.3 CO₂ 摩尔分数升高和氮添加下土壤理化性质和酶活性的相关性分析

在CO₂摩尔分数升高与氮添加的交互影响下,部分时段或整个处理周期内,各项理化指标与土壤过

氧化氢酶、多酚氧化酶、酸性转化酶以及脲酶之间均呈现显著乃至极显著的相关性。就土壤全氮而言,直至处理 120 d 时才与土壤酶活性建立起相关性,这可能是由于处理前期土壤具备一定的缓冲能力,使得土壤全氮的变化未能直接作用于酶活性^[44-45]。在前期,土壤全磷与过氧化氢酶呈现极显著负相关,到了后期,两者转为极显著正相关;而对于其他 3 种酶,其与土壤全磷的相关性在处理前后与过氧化氢酶的情况恰好相反,这或许是由于过多的氮添加导致土壤中氮钾比例失衡,微生物为适应此变化而抑制相关代谢途径^[46],导致其分泌的酶减少,最终使其变为负相关。土壤有效磷在处理 60 d 及后续阶段,与过氧化氢酶、多酚氧化酶、酸性转化酶和脲酶呈极显著的正相关或负相关,可能是受有效磷调节的相关基因被激活或强化^[47],从而推动了更多酶的合成与分泌。速效钾在处理 30 和 60 d 时,与多酚氧化酶、酸性转化酶、脲酶呈显著正相关,与过氧化氢酶呈显著负相关。在 CO₂ 摩尔分数升高与氮添加处理下,有机质与酶活性相关性持续变动,这可能源于土壤微生物代谢的转变或微生物群落向其他生态位的迁移^[48-49],确切原因仍有待进一步深入探究。

4 结论

在本研究中,宁夏枸杞根区土壤的理化性质和酶活性均受到 CO₂ 摩尔分数升高与氮添加交互作用的显著影响。其中,土壤全磷含量与有机质含量随处理时间展现出上升态势。同时,土壤中多酚氧化酶、酸性转化酶以及脲酶的活性随着 CO₂ 摩尔分数的升高呈现出显著的上升趋势。然而过氧化氢酶的活性却在 CO₂ 摩尔分数升高与氮添加的共同作用下受到抑制,呈现出下降趋势。并且在部分或整个处理周期内,所有土壤理化指标均与土壤酶活性表现出显著甚至极显著的相关性,表明两者间存在相互促进作用,说明土壤理化性质的改善可以提升宁夏枸杞根区土壤酶活性。

5 参考文献

- [1] NUNES L J R. The rising threat of atmospheric CO₂: a review on the causes, impacts, and mitigation strategies[J/OL]. *Environments*, 2023, **10**(4): 66[2025-01-01]. DOI: [10.3390/environments10040066](https://doi.org/10.3390/environments10040066).
- [2] SOARES J C, OSÓRIO H, PINTADO M, *et al.* Effect of the interaction between elevated carbon dioxide and iron limitation on proteomic profiling of soybean[J/OL]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2022, **23**(21): 13632[2025-01-01]. DOI: [10.3390/ijms232113632](https://doi.org/10.3390/ijms232113632).
- [3] ZHU Chunwu, LANGLEY J A, ZISKA L H, *et al.* Accelerated sea-level rise is suppressing CO₂ stimulation of tidal marsh productivity: a 33-year study[J/OL]. *Science Advances*, 2022, **8**(20): eabn0054[2025-01-01]. DOI: [10.1126/sciadv.abn0054](https://doi.org/10.1126/sciadv.abn0054).
- [4] YOON Y E, CHO H M, BAE D W, *et al.* Erythromycin treatment of *Brassica campestris* seedlings impacts the photosynthetic and protein synthesis pathways[J/OL]. *Life*, 2020, **10**(12): 311[2025-01-01]. DOI: [10.3390/life10120311](https://doi.org/10.3390/life10120311).
- [5] 韩米雪, 郁红艳, 刘潘洋, 等. 大气二氧化碳摩尔分数升高对土壤有机碳稳定性的影响[J]. *浙江农林大学学报*, 2021, **38**(5): 963-972.
HAN Mixue, YU Hongyan, LIU Panyang, *et al.* Effects of the mole fraction of elevated atmospheric CO₂ on soil organic carbon stability [J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2021, **38**(5): 963-972.
- [6] 彭海兰, 姬拉拉, 黄兴敏, 等. CO₂ 浓度升高与施氮对薏苡苗期营养元素吸收运输的影响[J]. *核农学报*, 2022, **36**(12): 2482-2489.
PENG Hailan, JI Lala, HUANG Xingmin, *et al.* Effects of elevated CO₂ concentration and nitrogen application on nutrient absorption and transportation in *Coix lacryma-jobi* seedling stage [J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2022, **36**(12): 2482-2489.
- [7] 许爱云, 秦一彤, 张原红, 等. 短期氮添加下 CO₂ 浓度升高对蒙古冰草生长的影响[J]. *草地学报*, 2025, **33**(4): 1211-1217.
XU Aiyun, QIN Yitong, ZHANG Yuanhong, *et al.* Effects of elevated CO₂ concentration on the growth of *Agropyron mongolicum* under short-term nitrogen addition scenario [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2025, **33**(4): 1211-1217.
- [8] CUI Erqian, XIA Jianyang, LUO Yiqi. Nitrogen use strategy drives interspecific differences in plant photosynthetic CO₂ acclimation [J]. *Global Change Biology*, 2023, **29**(13): 3667-3677.

- [9] OFORI-AMANFO K K, KLEM K, VESELÁ B, *et al.* The effect of elevated CO₂ on photosynthesis is modulated by nitrogen supply and reduced water availability in *Picea abies* [J]. *Tree Physiology*, 2023, **43**(6): 925–937.
- [10] 王晓, 韦小丽, 吴高殷, 等. CO₂ 浓度升高条件下不同氮素供应对闽楠幼苗光合特性及生长的影响[J]. *林业科学*, 2021, **57**(4): 173–181.
WANG Xiao, WEI Xiaoli, WU Gaoyin, *et al.* Effects of different nitrogen forms and supply on photosynthetic characteristics and growth of *Phoebe bournei* seedlings under elevated CO₂ concentration [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2021, **57**(4): 173–181.
- [11] REICH P B, HOBBIIE S E, LEE T D, *et al.* Synergistic effects of four climate change drivers on terrestrial carbon cycling [J]. *Nature Geoscience*, 2020, **13**(12): 787–793.
- [12] PASTORE M A, HOBBIIE S E, REICH P B. Sensitivity of grassland carbon pools to plant diversity, elevated CO₂, and soil nitrogen addition over 19 years[J/OL]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2021, **118**(17): e2016965118[2025-01-01]. DOI: [10.1073/pnas.2016965118](https://doi.org/10.1073/pnas.2016965118).
- [13] 马冲, 马亚平, 冯学瑞, 等. CO₂ 浓度升高对宁夏枸杞不同器官中生物活性物质含量的影响[J]. *西北农业学报*, 2024, **33**(3): 521–531.
MA Chong, MA Yaping, FENG Xuerui, *et al.* Effect of increasing CO₂ concentration on content of bioactive substances in different organs of *Lycium barbarum* L. [J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2024, **33**(3): 521–531.
- [14] 赵建华, 李浩霞, 尹跃, 等. 4 种枸杞果实发育过程中糖积累与蔗糖代谢酶的关系[J]. *浙江农林大学学报*, 2016, **33**(6): 1025–1032.
ZHAO Jianhua, LI Haoxia, YIN Yue, *et al.* Sugar accumulation and sucrose-metabolizing enzyme activities in four *Lycium* species during fruit development [J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2016, **33**(6): 1025–1032.
- [15] 刘德帅, 袁苗, 冯美, 等. 不同采收期宁夏枸杞果实品质差异及抗氧化特性分析[J]. *植物生理学报*, 2024, **60**(5): 837–849.
LIU Deshuai, YUAN Miao, FENG Mei, *et al.* Study on the quality differences and antioxidant properties of *Lycium barbarum* fruits at different harvesting periods [J]. *Plant Physiology Journal*, 2024, **60**(5): 837–849.
- [16] VIDOVIĆ B B, MILINČIĆ D D, MARČETIĆ M D, *et al.* Health benefits and applications of goji berries in functional food products development: a review[J/OL]. *Antioxidants*, 2022, **11**(2): 248[2025-01-01]. DOI: [10.3390/antiox11020248](https://doi.org/10.3390/antiox11020248).
- [17] ZHANG Yahong, QIN Jiaqi, WANG Yan, *et al.* Levels and health risk assessment of pesticides and metals in *Lycium barbarum* L. from different sources in Ningxia, China[J/OL]. *Scientific Reports*, 2022, **12**(1): 561[2025-01-01]. DOI: [10.1038/s41598-021-04599-5](https://doi.org/10.1038/s41598-021-04599-5).
- [18] 冯学瑞, 马亚平, 刘佳欣, 等. CO₂ 浓度升高处理下宁夏枸杞糖代谢相关酶及基因表达分析[J]. *林业科学*, 2024, **60**(3): 10–21.
FENG Xuerui, MA Yaping, LIU Jiaxin, *et al.* Analysis of enzyme and gene expression related to sugar metabolism in *Lycium barbarum* under elevated CO₂ concentration treatment [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2024, **60**(3): 10–21.
- [19] 谢云. 大气 CO₂ 浓度升高对宁夏枸杞根区土壤酶活性及微生物群落特征的影响[D]. 银川: 宁夏大学, 2021.
XIE Yun. *Elevated CO₂ Concentration on Soil Enzyme Activities and Microbial Community Characteristics in the Root Zone of Lycium barbarum L.* [D]. Yinchuan: Ningxia University, 2021.
- [20] 谢云, 郭芳芸, 曹兵. 大气 CO₂ 浓度倍增对宁夏枸杞根区土壤微生物与酶活性的影响[J]. *中国农学通报*, 2021, **37**(3): 90–97.
XIE Yun, GUO Fangyun, CAO Bing. Elevated CO₂ concentrations: effects on soil microbial quantity and enzyme activity in root zone of *Lycium barbarum* [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2021, **37**(3): 90–97.
- [21] ZHAO Yi, WANG Yuqiang, SUN Shengnan, *et al.* Different forms and proportions of exogenous nitrogen promote the growth of alfalfa by increasing soil enzyme activity[J/OL]. *Plants*, 2022, **11**(8): 1057[2025-01-01]. DOI: [10.3390/plants11081057](https://doi.org/10.3390/plants11081057).
- [22] LIANG Xiaojie, AN Wei, LI Yuekun, *et al.* Impact of different rates of nitrogen supplementation on soil physicochemical properties and microbial diversity in goji berry [J]. *Phyton*, 2024, **93**(3): 467–486.
- [23] 马冲. CO₂ 浓度升高与氮添加对宁夏枸杞光合特性及主要果实品质的影响[D]. 银川: 宁夏大学, 2023.
MA Chong. *Effects of Elevated CO₂ Concentration and Nitrogen Addition on Photosynthetic Characteristics and Main Fruit Quality of Lycium barbarum in Ningxia* [D]. Yinchuan: Ningxia University, 2023.

- [24] 马冲, 陆晖, 李运毛, 等. 模拟大气 CO₂ 浓度升高与氮添加对宁夏枸杞生长及光合特性的影响[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2024, **48**(4): 209–218.
MA Chong, LU Hui, LI Yunmao, *et al.* Effects of elevated CO₂ concentration and nitrogen addition in simulated atmosphere on growth and photosynthetic characteristics of *Lycium barbarum* [J]. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition)*, 2024, **48**(4): 209–218.
- [25] 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 Instruction of Plant Physiology*[M]. 4th ed. Beijing: Higher Education Press, 2009.
- [26] 中华人民共和国农业部. 中性、石灰性土壤铵态氮、有效磷、速效钾的测定联合浸提——比色法: NY/T 1848—2010[Z]. 北京: 中国农业出版社, 2010.
Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic China. *Method for Determination of Ammonium Nitrogen, Available Phosphorus and Rapidly-available Potassium in Neutrality or Calcareous Soil Universal Extract-colorimetric Method: NY/T 1848—2010* [Z]. Beijing: China Agriculture Press, 2010.
- [27] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
BAO Shidan. *Soil and Agricultural Chemistry Analysis*[M]. 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2000.
- [28] HUANG Wenjuan, HOULTON B Z, MARKLEIN A R, *et al.* Plant stoichiometric responses to elevated CO₂ vary with nitrogen and phosphorus inputs: evidence from a global-scale meta-analysis[J/OL]. *Scientific Reports*, 2015, **5**: 18225[2025-01-01]. DOI: [10.1038/srep18225](https://doi.org/10.1038/srep18225).
- [29] XU Qiufeng, LU Jiayu, DIJKSTRA F A, *et al.* Elevated CO₂ and nitrogen interactively affect the rhizosphere priming effect of *Cunninghamia lanceolata*[J/OL]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2023, **187**: 109219[2025-01-01]. DOI: [10.1016/j.soilbio.2023.109219](https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2023.109219).
- [30] 张继舟, 倪红伟, 王建波, 等. 氮沉降和 CO₂ 浓度增加对土壤磷素含量的影响[J]. 中国农学通报, 2013, **29**(17): 182–187.
ZHANG Jizhou, NI Hongwei, WANG Jianbo, *et al.* Effects of nitrogen deposition and elevated CO₂ concentration on soil phosphorus content [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2013, **29**(17): 182–187.
- [31] 苏立城, 陈晓珊, 罗志忠, 等. 氮添加对森林土壤有机碳库固存及 CO₂ 排放的影响研究进展[J]. 生态学报, 2024, **44**(7): 2717–2733.
SU Licheng, CHEN Xiaoshan, LUO Zhizhong, *et al.* Effects of nitrogen addition on the organic carbon sequestration and CO₂ emissions in forest soils: a review [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, **44**(7): 2717–2733.
- [32] WANG Ziwei, MA Shuqin, HU Yang, *et al.* Links between chemical composition of soil organic matter and soil enzyme activity in alpine grassland ecosystems of the Tibetan Plateau[J/OL]. *Catena*, 2022, **218**: 106565[2025-01-01]. DOI: [10.1016/j.catena.2022.106565](https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106565).
- [33] 顾嘉怡, 吕欣平, 周宇琨, 等. 水稻根系分泌物对氮素吸收利用的影响研究进展[J]. 杂交水稻, 2024, **39**(4): 9–15.
GU Jiayi, LÜ Xinping, ZHOU Yukun, *et al.* Research progress on the effects of root exudates on nitrogen uptake and utilization in rice [J]. *Hybrid Rice*, 2024, **39**(4): 9–15.
- [34] TARIQ M, LIU Yuexian, RIZWAN A, *et al.* Impact of elevated CO₂ on soil microbiota: a meta-analytical review of carbon and nitrogen metabolism[J/OL]. *Science of the Total Environment*, 2024, **950**: 175354[2025-01-01]. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2024.175354](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.175354).
- [35] KIPROTICH K, MUEMA E, WEKESA C, *et al.* Unveiling the roles, mechanisms and prospects of soil microbial communities in sustainable agriculture[J/OL]. *Discover Soil*, 2025, **2**(1): 10[2025-01-01]. DOI: [10.1007/s44378-025-00037-4](https://doi.org/10.1007/s44378-025-00037-4).
- [36] JING Yulin, ZHANG Yuhu, HAN I, *et al.* Effects of different straw biochars on soil organic carbon, nitrogen, available phosphorus, and enzyme activity in paddy soil[J/OL]. *Scientific Reports*, 2020, **10**(1): 8837[2025-01-01]. DOI: [10.1038/s41598-020-65796-2](https://doi.org/10.1038/s41598-020-65796-2).
- [37] 颜顾浙, 方伟, 卢络天, 等. 土壤酶活性对不同植物连作的差异响应[J]. 浙江农林大学学报, 2023, **40**(3): 520–530.
YAN Guzhe, FANG Wei, LU Luotian, *et al.* Differential response of soil enzyme activity to continuous cropping of different plants [J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2023, **40**(3): 520–530.
- [38] GU Y, WANG P, KONG C H. Urease, invertase, dehydrogenase and polyphenoloxidase activities in paddy soil influenced by allelopathic rice variety [J]. *European Journal of Soil Biology*, 2009, **45**(5/6): 436–441.

- [39] 韦忆. 升高 CO₂ 浓度和干旱胁迫对红豆树幼苗生理生化的影响[D]. 贵阳: 贵州大学, 2023.
WEI Yi. *Effects of Increasing CO₂ Concentration and Drought Stress on Physiology and Biochemistry of Adzuki Bean Seedlings*[D]. Guiyang: Guizhou University, 2023.
- [40] HAN Bing, CHEN Weiqing, JIAO Yongqiang, *et al.* Effects of nitrogen fertilizer application on soil properties and arsenic mobilization in paddy soil[J/OL]. *Sustainability*, 2024, **16**(13): 5565[2025-01-01]. DOI: [10.3390/su16135565](https://doi.org/10.3390/su16135565).
- [41] 王顺, 尹娟, 张海军, 等. 不同水氮处理对马铃薯土壤酶活性和产量的影响[J]. *节水灌溉*, 2021(8): 67–73.
WANG Shun, YIN Juan, ZHANG Haijun, *et al.* Effects of different water and nitrogen treatments on soil enzyme activity and yield of potato [J]. *Water Saving Irrigation*, 2021(8): 67–73.
- [42] 董冬, 施翠娥, 颜守保, 等. 大气 CO₂、O₃ 升高对非污染土壤酶活性和微生物量的影响[J]. *北方园艺*, 2019(12): 92–99.
DONG Dong, SHI Cui'e, YAN Shoubao, *et al.* Effects of elevated atmospheric CO₂ and O₃ on soil enzyme activities and microbial biomass of phenanthrene polluted soil [J]. *Northern Horticulture*, 2019(12): 92–99.
- [43] 康红梅, 李花花, 徐当会, 等. 大气 CO₂ 浓度及温度升高对高山灌木鬼箭锦鸡儿 (*Caragana jubata*) 生长及抗氧化系统的影响[J]. *生态学报*, 2020, **40**(1): 367–376.
KANG Hongmei, LI Huahua, XU Danghui, *et al.* Effects of elevated CO₂ and temperature on *Caragana jubata* (Alpine shrub) growth and antioxidant systems [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, **40**(1): 367–376.
- [44] BAO Yong, GAO Ying, *et al.* Relationships between carbon and nitrogen contents and enzyme activities in soil of three typical subtropical forests in China [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2018, **42**(4): 508–516.
- [45] 李文慧, 王继涛, 安明远, 等. 蚯蚓原位堆肥与不同比例生物炭对基质理化性质及番茄品质的作用研究[J]. *核农学报*, 2024, **38**(5): 943–954.
LI Wenhui, WANG Jitao, AN Mingyuan, *et al.* A study on the effects of *in situ* vermicomposting with different ratios of biochar on physicochemical properties of substrate and tomato quality [J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2024, **38**(5): 943–954.
- [46] 王晨, 赵雨佳, 李春, 等. 动态转录调控微生物代谢途径研究进展[J]. *化工进展*, 2019, **38**(9): 4238–4246.
WANG Chen, ZHAO Yujia, LI Chun, *et al.* Advances in dynamic transcriptional regulation of microbial metabolic pathways [J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2019, **38**(9): 4238–4246.
- [47] 刘志中, 陈汉章. 园林植物磷胁迫下根系适应性研究[J]. *河北北方学院学报 (自然科学版)*, 2022, **38**(7): 30–37.
LIU Zhizhong, CHEN Hanzhang. Root adaptability of garden plants under phosphorus stress [J]. *Journal of Hebei North University (Natural Science Edition)*, 2022, **38**(7): 30–37.
- [48] 刁婵, 鲁显楷, 田静, 等. 长期氮添加对亚热带森林土壤微生物碳源代谢多样性的影响[J]. *生态学报*, 2019, **39**(18): 6622–6630.
DIAO Chan, LU Xiankai, TIAN Jing, *et al.* Effects of long-term nitrogen addition on the metabolic diversity of microbial carbon sources in subtropical forest soils [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, **39**(18): 6622–6630.
- [49] 彭思利, 张鑫, 武仁杰, 等. 杨树人工林土壤丛枝菌根真菌群落对氮添加的季节性动态响应[J]. *浙江农林大学学报*, 2023, **40**(4): 792–800.
PENG Sili, ZHANG Xin, WU Renjie, *et al.* Seasonal dynamic responses of soil arbuscular mycorrhizal fungal community to nitrogen additions in a poplar plantation [J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2023, **40**(4): 792–800.