

中南林业科技大学学报

Journal of Central South University of Forestry & Technology

ISSN 1673-923X，CN 43-1470/S

《中南林业科技大学学报》2026年第7期

Doi:10.14067/j.cnki.1673-923X.2026.07.008

论文标题： 不同磷效率南酸枣家系幼苗对低磷胁迫的生长及生理响应

作　　者： 吴 敏，陈明皋，刘攀峰，等

收稿日期： 2025-07-26

引文格式： 吴敏,陈明皋,刘攀峰,等.不同磷效率南酸枣家系幼苗对低磷胁迫的生长及生理响应[J].中南林业科技大学学报,2026,46(7):80-89.

Wu M, Chen M G , Liu P F, et al. Growth and physiological response to low phosphorus stress in seedlings of *Choerospondias axillaris* families with different phosphorus efficiencies[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2026,46(7):80-89.

相关论文推荐

Recommended articles

南酸枣苗期耐低磷家系筛选及磷效率评价

Screening of low phosphorus tolerant families and phosphorus efficiency of *Choerospondias axillaris* at seedling stage

不同种源南酸枣花粉形态及活力分析

Analysis of pollen morphology and viability of *Choerospondias axillaris* from different provenances

南酸枣幼林配方施肥及叶片氮磷钾元素分布规律

Research on formula fertilization and distributions of nitrogen,phosphorous, potassium contents in leaves for young stand of *Choerospondias axillaris*

不同龄组南酸枣根际与非根际土壤养分特征研究

Research on soil nutrient characteristics at rhizosphere and non-rhizosphere for different age groups of *Choerospondias axillaris*

南酸枣家系叶及生理性状的研究

Study on the leaf traits of *Choerospondias axillaries* families

不同龄组南酸枣根际与非根际土壤养分特征研究

Research on soil nutrient characteristics at rhizosphere and non-rhizosphere for different age groups of *Choerospondias axillaris*

Doi:10.14067/j.cnki.1673-923x.2026.07.008 http: //qks.csuft.edu.cn

不同磷效率南酸枣家系幼苗对低磷胁迫的生长及生理响应

吴 敏[1]，陈明皋[1]，刘攀峰[2]，童 琪[3]，童方平[1]，熊振宇[1]，陈 瑞[1]，李 贵[1]
（1. 湖南省林业科学院，湖南 长沙 410004；2. 中国林业科学研究院 经济林研究所，河南 郑州 450000；
3. 贵州省植物园，贵州 贵阳 550004）

摘 要：【目的】研究不同磷效率南酸枣家系适应低磷胁迫的关键生长及生理机制，为后续培育磷高效优良南酸枣品种提供理论依据。【方法】以 2 个磷高效南酸枣家系（L56、LF001）和 2 个磷低效南酸枣家系（L44、R27）为试验材料，设正常磷（16.0 μg/g，NP）和低磷（0.2 μg/g，LP）2 个处理，开展盆栽试验，测定各家系地径、苗高、生物量、组织磷含量、根系活力以及根系酸性磷酸酶（ACP）、超氧化物歧化酶（SOD）、过氧化物酶（POD）、过氧化氢酶（CAT）、硝酸还原酶（NR）活性等生长及生理指标，分析不同磷效率南酸枣家系苗期主要形态及生理指标对低磷胁迫的响应差异。【结果】1）4 个南酸枣家系在低磷胁迫下生长均受到显著抑制，同时其根冠比、根系活力、磷利用效率（PUE）、POD 活性显著升高，ACP、NR 活性呈现降低趋势，SOD、CAT 活性均有升高趋势；各指标对低磷胁迫的响应存在显著的家系差异。2）在低磷胁迫下，家系 L56、LF001 除苗高外，其地径、根系干物质量、总干物质量等生长指标、根系活力及 ACP、SOD、NR 活性、PUE 等生理指标显著高于家系 L44、R27。3）抗氧化酶系统（SOD、POD、CAT）对低磷胁迫的响应存在明显的家系差异性：L56 呈现出极高的 SOD 活性及较高的 POD、CAT 活性；LF001 呈现出极高的 POD 活性及较高的 SOD、CAT 活性；R27 表现为较高的 POD 活性，但 SOD、CAT 活性较低；L44 则呈现出较高的 CAT 活性，但 POD、SOD 活性较低。4）相关性分析表明，南酸枣幼苗期根冠比、根系活力、抗氧化酶活性（SOD、POD、CAT）之间均呈显著正相关，NR 活性与 ACP 活性、地径、根系干物质量、地上部分干物质量等生长指标呈显著正相关。地上部分磷积累量与地上部分干物质量呈极显著正相关，但与 PUE 呈极显著负相关。【结论】家系 L56、LF001 属于“高积累、高效率”的协同高效型家系。

关键词：南酸枣；低磷胁迫；磷效率；根系活力；抗氧化酶
中图分类号：S723.1；S718.43 **文献标志码：**A **文章编号：**1673-923X(2026)07-0080-10

Growth and physiological responses to low phosphorus stress in seedlings of *Choerospondias axillaris* families with different phosphorus efficiencies

Wu Min[1], Chen Minggao[1], Liu Panfeng[2], Tong Qi[3], Tong Fangping[1], Xiong Zhenyu[1], Chen Rui[1], Li Gui[1]

(1. Hunan Academy of Forestry, Changsha 410004, Hunan, China; 2.Institute of Economic Forestry, Chinese Academy of Forestry Sciences, Zhengzhou 450000, Henan, China; 3. Guizhou Botanical Garden, Guiyang 550004, Guizhou, China)

【Objective】To investigate the key growth and physiological mechanisms underlying the adaptation of different families of *Choerospondias axillaris* to low phosphorus stress, so as to provide theoretical basis for the subsequent cultivation of high phosphorus efficiency and excellent varieties.【Method】High-phosphorus-efficient families (L56, LF001) and low-phosphorus-sensitive families (L44, R27) were selected as experimental materials. A pot experiment was conducted under two phosphorus levels: normal phosphorus (16.0 μg/g, NP) and low phosphorus (0.2 μg/g, LP). Growth and physiological indices, including ground diameter, plant height, biomass, tissue phosphorus content, root activity, the activities of acid phosphatase (ACP), superoxide dismutase (SOD), peroxidase

收稿日期（Received）：2025-07-26 **修订日期**（Revised）：2025-11-16
基金项目：国家重点研发计划项目（2024YFD220050103）；湖南省重点研发计划项目（2025AQ2003）。
第一作者：吴敏（wumin@hnlky.cn），助理研究员，硕士。
通信作者：李贵（ligui@hnlky.cn），副研究员，博士；陈瑞（chenrui@hnlky.cn），副研究员，硕士。
引文格式：吴敏 , 陈明皋 , 刘攀峰 , 等 . 不同磷效率南酸枣家系幼苗对低磷胁迫的生长及生理响应 [J]. 中南林业科技大学学报 ,2026, 46(7):80-89.
Wu M, Chen M G , Liu P F, et al. Growth and physiological response to low phosphorus stress in seedlings of *Choerospondias axillaris* families with different phosphorus efficiencies[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2026,46(7):80-89.

(POD), catalase (CAT) and nitrate reductase (NR) in rootswere measured to analyze the responses of morphological and physiological traits of different families to low phosphorus stress at the seedling stage.【Result】1) Under LP stress, the growth of four families was significantly inhibited, while the root-to-shoot ratio, root activity, POD activities and phosphorus use efficiency (PUE) increased significantly. ACP and NR activities showed a decreasing trend, whereas SOD and CAT activities tended to increase. The responses of these indicators to LP stress exhibited significant variation among families; 2) Under low phosphorus stress, except for seedling height, the growth indexes such as ground diameter, root dry matter mass, total dry matter mass accumulation, root activity, ACP, SOD, NR activity and PUE of family L56 and LF001 were significantly higher than those of family L44 and R27; 3) There were obvious family differences in the response of antioxidant enzyme system (SOD, POD, CAT) to low phosphorus stress: L56 showed extremely high SOD activity and high POD and CAT activity; lF001 showed extremely high POD activity and high SOD and CAT activity. R27 showed higher POD activity, but lower SOD and CAT activity. L44 showed higher CAT activity, but lower POD and SOD activity; 4) Correlation analysis showed that there was a significant positive correlation between root-shoot ratio, root activity and antioxidant enzyme activity (SOD, POD, CAT) of *Choerospondias axillaris* at seedling stage. There was a significant positive correlation between NR and ACP, ground diameter, root dry weight, aboveground part dry weight and other growth indexes. The aboveground P accumulation was significantly positively correlated with aboveground part dry matter, but significantly negatively correlated with PUE.【Conclusion】L56 and LF001 belong to the synergistic and efficient type of high accumulation and high efficiency.

Keywords: *Choerospondias axillaris*; low phosphorus stress; phosphorus efficiency; root activity; antioxidant enzymes

磷（P）是植物生长发育所必需的氮、磷、钾三大营养元素之一，同时也是构成三磷酸腺苷、磷脂和核酸等重要有机化合物的必要组分，几乎参与植物体内每一个关键生化过程[1]，如能量代谢、遗传信息传递[2-3]，细胞分裂及生长发育[4]。自然土壤中全磷含量较高，然而土壤速效磷易被铁、铝等金属离子固定[5]，导致可供植物吸收利用的有效磷十分匮乏，难以满足植株正常生长发育需求。施用磷肥虽可在一定程度上缓解土壤磷素缺乏，但施入土壤中的磷肥极易被固定、吸附或转化为难溶性磷酸盐，其利用率通常不超过25%[6-7]。因此，仅依靠增施磷肥不仅无法从根本上解决缺磷问题，还会加剧磷矿资源消耗并增大生态环境负荷[8]。植物遭受低磷胁迫时可形成多种适应策略，如通过调整根系构型、增加根系分泌物分泌量等方式提升根系对土壤磷的吸收效率[9]；亦可增强植株体内磷素的再活化与转运能力，促进磷素从衰老组织高效转移至新生发育器官，优化磷素源 - 库分配格局，进而提高植株体内磷利用效率（Phosphorus utilization efficiency，PUE）[10]。

植物在磷吸收与利用效率方面存在显著遗传变异，是开展磷效率遗传改良的重要理论依据[11-12]。探究不同磷效率基因型植株在低磷环境下的生长特征与生理响应机制，有助于挖掘其高效利用土壤磷素的内在遗传规律。根系作为直接接触土壤介质的关键器官，承担着土壤与植株间物质交换及信息传导的重要功能[13]。在低磷胁迫环境下，植物根系可率先感知胁迫信号，并对该信号进行加工、处理与传导，进而产生特异性生理响应，最终调控植株整体生长发育进程。不同树种或同一树种不同基因型，其根系对低磷胁迫的响应存在明显差异，直接影响植株对土壤磷素的获取效率[14]。因此，探明植物高效利用磷素的形态及生理生化调控机制，既是选育磷营养高效种质材料的重要理论支撑，也是植物营养逆境领域的核心研究方向。在磷高效基因型植株中，特有生理响应可显著提升植株对磷素的吸收与利用能力。低磷胁迫会诱发植物体内活性氧大量积累，进而损伤细胞膜、蛋白质、核酸等生物大分子，扰乱植株正常生理代谢功能。超氧化物歧化酶（Superoxide dismutase，SOD）、过氧化物酶（Horseradish peroxidase，POD）、过氧化氢酶（Catalase，CAT）等抗氧化酶可通过清除过量活性氧，减轻氧化损伤、维持细胞结构稳定性，从而增强植株耐低磷胁迫能力[15]。根系活力是决定根系呼吸代谢水平的重要生理指标，逆境条件下，根系活力的波动可直接改变根系呼吸代谢速率与能量供给水平，保障根系正常生理活动[16]。目前，已在大豆 *Glycine max*[17]、杉木 *Cunninghamia lanceolata*[18] 等作物与林木中开展了磷胁迫耐受性及磷效率相关研究，从根系构型、生长形态、生物量积累、抗氧化酶活性及酸性磷酸酶活性等角度，系统揭示了植物应对低磷胁迫的适应机制。研究结果表明，不同植物乃至同一物种的不同基因型之间，在磷利用效率及低磷胁迫响应机制上存在遗传差异。

南酸枣 *Choerospondias axillaris* 生长迅速、材质优良，其果实兼具药用与食用价值，是我国南方重要的珍贵乡土树种，也是针叶林林分结构优化过程中的重要树种之一。我国南方土壤普遍存在有效磷含量偏低的问题，因此提高磷利用效率已成为南酸枣培育工作的重要目标之一。前期研

究已初步筛选出不同磷效率的南酸枣家系[19]。为进一步探究其在不同磷供应条件下的生长及生理响应机制，本研究选取具有代表性的磷低效型和磷高效型南酸枣家系，系统分析不同磷效率家系南酸枣在不同供磷条件下的生长性状、细胞保护酶活性、酸性磷酸酶活性及硝酸还原酶活性等生理指标，旨在明确南酸枣磷高效利用的关键生理特征，为后续深入解析南酸枣磷高效利用分子调控机制提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料与设计

供试材料为团队前期筛选出的 4 个南酸枣家系，其中 L56、LF001 属磷高效型家系，L44、R27 属磷低效型家系。选取各家系干净饱满的种子，于 2024 年 3 月中旬进行育苗。苗圃位于浏阳市龙伏镇焦桥村（28°25′42″N，113°31′35″E），属亚热带季风湿润气候区，年平均气温 17 ℃，平均年日照时数 1 680 h，年平均无霜期 264 d，年均降水量 1 400 mm。

本研究采用盆栽试验，供试土壤取自典型石漠化山地，其土壤 pH 值为 6.1，有机质含量为 6.21 g/kg，有效磷含量为 0.2 μg/g，水解性氮含量为 17.5 μg/g。为构建试验设置的磷水平，设置正常磷（NP，16.0 μg/g）和低磷（LP，0.2 μg/g）2 个磷素水平处理[20]，每个处理 3 株，重复 3 次。对土壤进行了以下调控：低磷土壤（LP），仅通过施用尿素将水解性氮含量统一调节至 60.0 μg/g，有效磷含量保持原始低水平（0.2 μg/g）；正常磷土壤（NP），在调节水解性氮含量至 60.0 μg/g 的基础上，添加磷酸二氢钾，将有效磷含量提升至 16.0 μg/g。2024 年 4 月下旬，选取长势一致的当年生幼苗移栽至盆中，每 2 ～ 3 d 浇水 1 次，培养至 7 月进行相关指标测定。

1.2 测定指标及方法

1.2.1 生长指标测定

采用直尺（精度 0.1 cm）测量苗高，游标卡尺（精度 0.05 cm）测量地径。随后将植株分为地上和根系 2 部分进行收获。样品置于烘箱中，先于 105 ℃杀青 60 min，再调整至 65 ℃烘干至恒定质量后分别称其干质量，计算单株总干物质量与根冠比。其中，总干物质量为根系干物质量与地上干物质量之和；根冠比为根系干物质量与地上干物质量之比。

1.2.2 植株磷含量和磷利用效率测定

将干燥的植株样品粉碎并过 0.5 mm 孔径筛，充分混匀后称取 0.5 g 待测样品，采用 H_2SO_4-H_2O_2 消煮法消解样品，通过钼蓝比色法测定南酸枣磷含量。磷利用效率（PUE）为干物质量与磷积累量之比。

1.2.3 生理生化指标测定

按单株采集根系鲜样 5 g，送至普奈斯检测技术有限公司进行检测。各酶活性测定方法如下：根系活力采用 TTC（氯化三苯基四氮唑）还原法测定，超氧化物歧化酶（SOD）活性采用黄嘌呤氧化酶耦联法测定，过氧化物酶（POD）活性采用愈创木酚法测定，过氧化氢酶（CAT）活性采用钼酸铵比色法测定，酸性磷酸酶（Acid phosphatase，ACP）活性采用磷酸苯二钠法测定，硝酸还原酶（Nitrate reductase，NR）活性采用比色法测定。所有酶活性及根系活力结果均以每克鲜样品所含的酶活力单位表示。

1.3 数据统计与分析

各指标耐低磷系数（α）采用低磷处理下的指标平均值与正常磷处理下的指标平均值之比进行计算。运用 WPS、Excel 2019 软件统计试验数据，采用 T 检验法判定 NP、LP 处理水平数据间的差异显著性，并利用 Origin 2021 软件绘制分析图。

2 结果与分析

2.1 不同磷效率南酸枣家系形态指标和生物量差异

由图 1 和表 1 可知，在正常磷供应下，南酸枣生长相对旺盛，地径为 10.53 ～ 13.37 mm，苗高为 27.67 ～ 43.33 cm，总干物质量为 31.03 ～ 44.13 g；在低磷胁迫条件下，其地径为 4.43 ～ 9.80 mm，苗高为 16.33 ～ 21.17 cm，总干物质量为 6.83 ～ 20.40 g。

在低磷胁迫下，各家系生长均受到抑制（图 1），其抑制程度在不同家系之间存在一定的差异性（表 1）。4 个南酸枣家系在低磷胁迫下，其苗高未表现出显著差异；然而，在地径、根系干物质量、地上干物质量以及总干物质量等指标上，家系 L56 和 LF001 的值显著大于家系 L44 和 R27。在生物量分配上，低磷胁迫诱导了根冠比的显著升高，其中 L56 在低磷胁迫下根冠比达 1.26，显著大于家系 L44 和 R27；LF001 的根冠比显著大于家系

L44，但与 L56、R27 无显著差异。相比之下，L44 的形态指标受抑制最为严重，其地径、根系干物质量、地上干物质量、总干物质量及根冠比均显著小于 L56 和 LF001。除根冠比和地径外，其他各项指标的 α 值由大到小均为 LF001、L56、R27、L44。

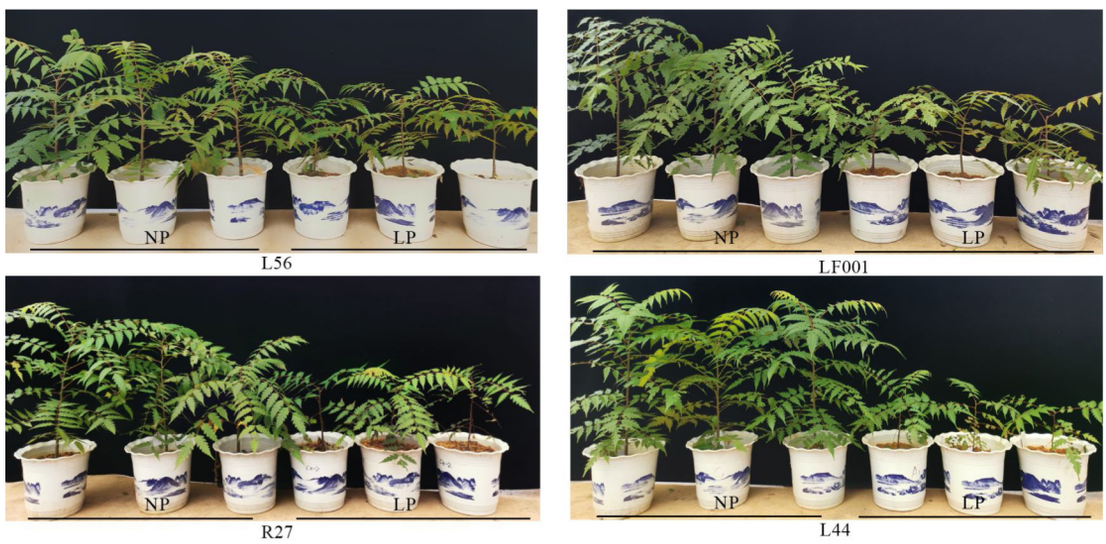


图 1　各南酸枣家系生长性状
Fig. 1　Growth traits of *C. axillaris* family seedlings

表 1　各南酸枣家系生长性状特征值 †
Table 1　Characteristics of growth traits in *C. axillaris* varieties families at seedling stage

家系 Family	地径 Ground diameter			苗高 Seedling height			根系干物质量 Root dry biomass		
	LP /mm	NP /mm	α	LP /cm	NP /cm	α	LP /g	NP /g	α
L44	4.43±1.16 bB	12.23±0.62 aA	0.36	16.33±2.19 aB	43.33±2.19 aA	0.38	3.50±0.35 dB	17.17±2.56 abA	0.20
R27	5.97±0.12 bB	10.53±0.99 aA	0.57	18.33±0.88 aB	31.67±2.03 bA	0.58	6.70±0.26 cB	12.97±0.69 bA	0.52
L56	9.80±0.21 aB	13.37±0.47 aA	0.73	21.17±1.48 aB	33.67±1.33 bA	0.63	11.37±0.47 aB	20.17±0.84 aA	0.56
LF001	8.30±0.25 aB	11.67±0.60 aA	0.71	19.00±0.58 aB	27.67±0.88 bA	0.69	9.87±0.15 bB	16.70±0.96 abA	0.59
家系 Family	地上干物质量 Shoot dry biomass			总干物质量 Total dry biomass			根冠比 Ratio of root to shoot		
	LP /g	NP /g	α	LP /g	NP /g	α	LP	NP	α
L44	3.33±0.38 cB	24.40±1.79 aA	0.14	6.83±0.73 dB	41.57±4.33 abA	0.16	1.05±0.03 cA	0.70±0.05 bB	1.50
R27	6.10±0.12 bB	18.07±0.90 bA	0.34	12.80±0.38 cB	31.03±1.59 bA	0.41	1.10±0.02 bcA	0.72±0.01 bB	1.53
L56	9.03±0.39 aB	23.97±1.28 aA	0.38	20.40±0.84 aB	44.13±2.11 aA	0.46	1.26±0.03 aA	0.84±0.01 aB	1.50
LF001	8.27±0.33 aB	20.2±0.58 abA	0.41	18.13±0.34 bB	36.90±1.51 abA	0.49	1.20±0.05 abA	0.83±0.03 aB	1.45

† 同列不同小写字母表示同一处理下不同家系间差异显著（$P < 0.05$），同行不同大写字母表示同一家系同指标不同处理间差异显著（$P < 0.05$）。下同。Different lowercase letters in the same column indicate significant difference among different families under the same treatment at 0.05 level. Different capital letters in the same line indicate significant difference among different treatments of the same family at 0.05 level. The same below.

2.2　不同磷效率南酸枣家系磷积累量和磷利用效率的差异

低磷胁迫下（表 2），各家系南酸枣地上部分磷含量及磷积累量显著降低，但其 PUE 显著提高。低磷胁迫下，L56、LF001 地上部分磷含量低，均为 0.39 mg/g，显著低于 L44、R27；L56、LF001 地上部分磷积累量分别为 3.52、3.23 mg/ 株，显著高于 L44 和 R27；L44 地上部分磷积累量最低，仅有 1.52 mg/ 株，显著低于其他 3 个家系；PUE 从高到低依次为 L56、LF001、R27、L44，其中 L44 的 PUE 为 2.20 g/mg，显著低于其他 3 个家系。

在正常磷供应条件下（表 2），R27 地上部分磷含量最高，为 1.19 mg/g，显著高于其他 3 个家系；各家系地上部分磷积累量无显著差异；R27 的 PUE 最低，仅 0.84 g/mg，显著低于其他 3 个家系，L44、L56、LF001 之间的 PUE 无显著差异。

2.3　根系活力及酸性磷酸酶活性的差异分析

低磷胁迫显著提高了各家系南酸枣的根系活力，但增幅在不同家系之间存在差异（图 2）。在正常磷供应条件下，L44 的根系活力最大，为 92.73 U/g；LF001 的根系活力最小，仅为 67.62 U/g，显著低于其他 3 个家系。在低磷胁迫下，L56 的根

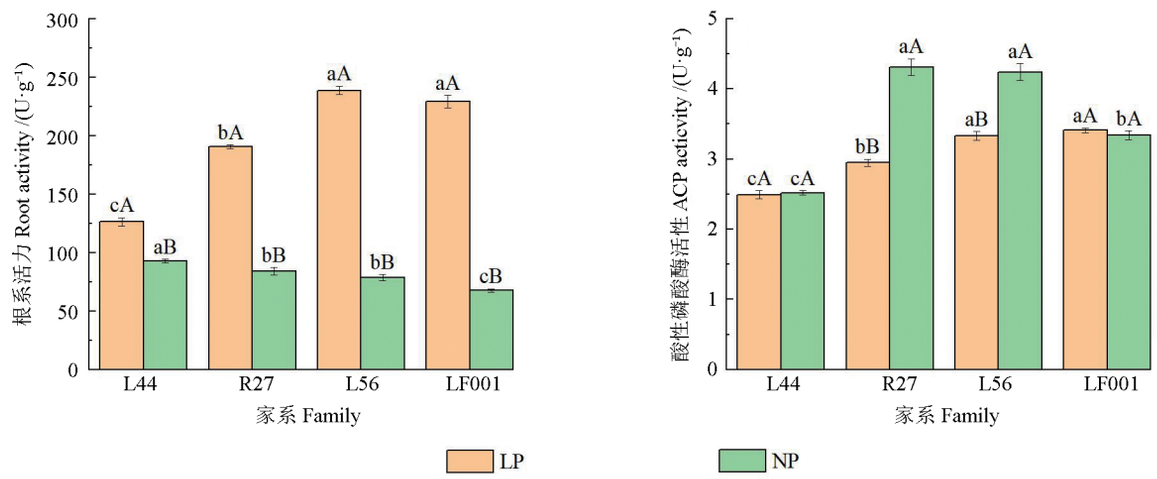
系活力高达238.67 U/g，其次为LF001（229.20 U/g），显著高于 L44、R27；L44 的根系活力显著低于其他 3 个家系。

在正常磷条件下（图 2），R27 和 L56 的 ACP 活性分别为 4.31、4.24 U/g，显著高于 L44 和 LF001。与正常磷条件相比，低磷胁迫条件下 R27 和 L56 的 ACP 活性显著下降，而 L44 和 LF001 的 ACP 活性则基本保持稳定。在低磷胁迫条件下，L56 和 LF001 仍保持相对较高的 ACP 活性；LF001 的 ACP 活性最高，为 3.41 U/g，其次为 L56，显著高于 L44 和 R27；L44 的 ACP 活性显著低于其他 3 个家系。

表 2　各南酸枣家系磷积累量及磷利用效率

Table 2　Phosphorus accumulation and phosphorus use efficiency of *C. axillaris* families

家系 Family	地上部分磷含量 Shoot P content /(mg·g^{-1})		地上部分磷积累量 Shoot P accumulation /(mg·株$^{-1}$)		磷利用效率 Phosphorus use efficiency /(g·mg^{-1})	
	LP	NP	LP	NP	LP	NP
L44	0.46±0.01 aB	0.88±0.05 bA	1.52±0.17 cB	21.51±2.83 aA	2.20±0.05 cA	1.15±0.06 aB
R27	0.43±0.01 bB	1.19±0.03 aA	2.59±0.10 bB	21.44±1.20 aA	2.36±0.05 bA	0.84±0.02 bB
L56	0.39±0.01 cB	0.97±0.03 bA	3.52±0.17 aB	23.21±0.78 aA	2.57±0.03 aA	1.03±0.03 aB
LF001	0.39±0.01 cB	1.01±0.06 bA	3.23±0.14 aB	20.47±1.81 aA	2.56±0.03 aA	1.00±0.06 aB



不同小写字母表示同一处理下不同家系间差异显著（$P < 0.05$），不同大写字母表示同一家系不同处理间差异显著（$P < 0.05$）。下同。
Different lowercase letters indicate significantly difference among different families under the same treatment at 0.05 level. Different capital letters indicate significant difference among different treatments of the same family at 0.05 level. The same below.

图 2　各南酸枣家系根系活力和 ACP 活性

Fig. 2　Root activity and ACP acticvity of *C. axillaris* families under different phosphorus levels

2.4　根系抗氧化酶活性的差异分析

各家系南酸枣的抗氧化酶 SOD、POD 和 CAT 活性在低磷胁迫下均表现出不同程度的提高（图 3）。在低磷胁迫条件下，不同家系之间的 SOD 活性变化呈现出显著的差异性，其中 L56、LF001 的 SOD 活性分别为 2 212.25、1 911.32 U/g，显著高于其在正常磷条件下的 SOD 活性；L44、R27 在 2 个供磷条件下 SOD 活性无显著差异。

在低磷胁迫下，4 个不同磷效率南酸枣家系 POD 活性显著提高，其中 LF001 的 POD 活性最高，达 3 173.64 U/g，显著高于其他 3 个家系，其次为 R27、L56；L44 的 POD 活性为 1 698.89 U/g，显著低于其他 3 个家系。

L56 和 LF001 在低磷条件下的 CAT 活性略高于正常磷条件下的 CAT 活性，但两者间无显著差异；L44、R27 在低磷条件下的 CAT 活性显著高于其在正常磷条件下的 CAT 活性。在低磷胁迫下，L56、LF001、L44 的 CAT 活性无显著性差异，R27 的 CAT 活性为 185.41 U/g，显著低于 L56 和 L44。

2.5　根系氮代谢相关酶活性的差异分析

在低磷胁迫下（图 4），各家系南酸枣 NR 活性均有所降低，但 L56、LF001 在低磷胁迫下仍维持了相对较高的 NR 活性；LF001 的 NR 活性最高，达 7.02 U/g，其次是 L56，为 6.57 U/g；R27 的 NR 活性仅为 4.59 U/g，显著低于其他 3 个家系。这一结果表明，L56 和 LF001 在低磷胁迫下仍能维持较强的氮同化能力，反映了植物体内较高的氮磷营养协同水平。

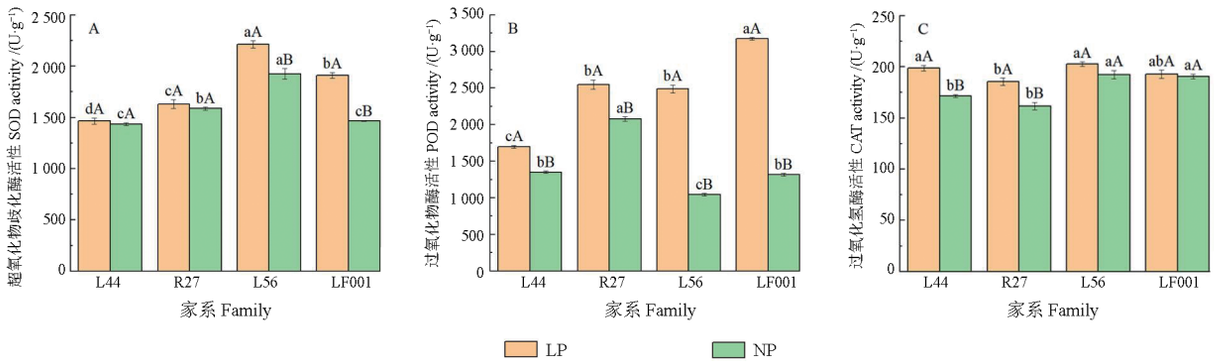


图 3　各南酸枣家系 SOD、POD 和 CAT 活性
Fig. 3　Activities of SOD, POD and CAT of *C. axillaris* families

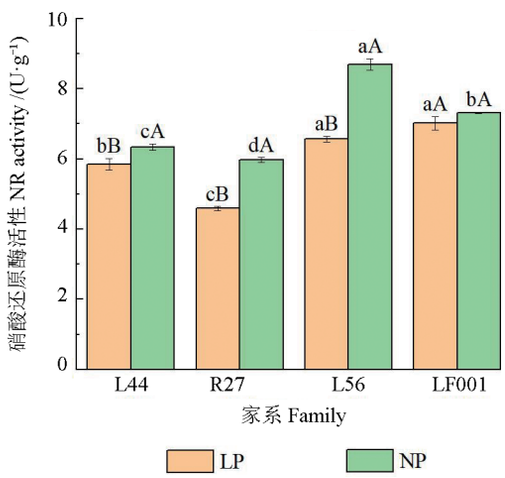


图 4　各南酸枣家系根系硝酸还原酶活性
Fig. 4　NR activity of *C. axillaris* families

2.6　南酸枣生长及生理指标相关性分析

对各家系南酸枣在不同磷条件下的多项生长、生理指标进行相关性分析（图 5），结果显示根系活力与抗氧化酶（SOD、POD、CAT）活性均呈显著正相关，其中与 POD 活性的相关性最强（r=0.87），表明根系代谢活性与抗氧化保护机制协同增强；同时根系活力与地径、苗高、根系干物质量及地上部分干物质量均呈显著负相关，表明能量向防御性代谢倾斜可能抑制了生物量的积累。NR 活性与地径、地上部分干物质量、根系干物质量等生长指标呈显著正相关（$r \geqslant 0.58$），同时与 ACP 活性及地上部分磷积累量呈显著正相关，表明氮磷协同代谢效率对植物生物量积累具有重要推动作用。

地上部分磷积累量与地径呈极显著正相关（r=0.82），但与磷利用效率呈极显著负相关（r=−0.96），表明高的磷积累量并不等同于高的磷利用效率。根冠比与磷利用效率呈极显著正相关（r=0.92），表明更大的根系分配比例有助于提升南酸枣磷利用效率。此外，根冠比与 SOD 活性、POD 活性、CAT 活性呈显著正相关，表明根系发育与抗逆能力协同增强，有助于植物在胁迫条件下维持磷的高效利用。

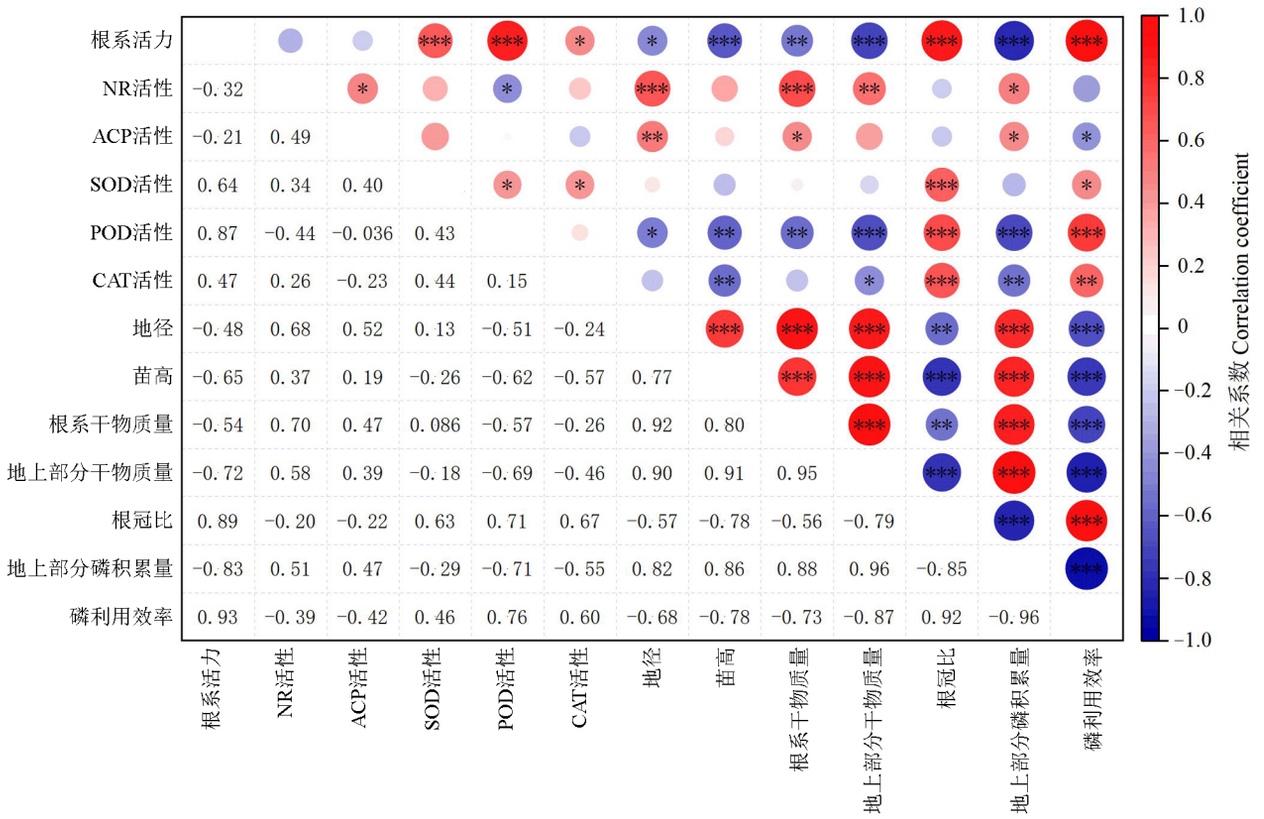
3　讨　论

3.1　不同磷效率南酸枣家系形态及生物量对低磷胁迫的响应

本研究发现，低磷胁迫下，各家系南酸枣生长均受到抑制，且根冠比显著升高。这是植物对养分胁迫的典型适应策略：低磷信号可诱导光合碳同化物向根系优先分配，植物通过将更多光合产物分配至根系，扩大根系表面积，以增强在贫瘠土壤中获取磷素的能力[21]。低磷胁迫下，L56 与 LF001 根冠比更大，表明二者更倾向于将资源分配至根系，从而为其高效磷吸收奠定了形态学基础。这一结果与大豆[17]、杉木[18]等的研究结论一致，即磷高效基因型通常具有更大的根系生物量与更高的根冠比。在低磷条件下，除苗高外，L56 和 LF001 在地径生长、根系干物质量及总干物质量积累方面均显著优于 L44 和 R27，说明南酸枣在低磷胁迫下，地上部生长以主干增粗为主，以此提升养分运输与物质储存能力，这也是其成为磷高效基因型的重要形态学特征之一。

3.2　不同磷效率南酸枣家系磷利用效率的差异

低磷胁迫显著提高了各家系南酸枣的磷利用效率。其中，L56 和 LF001 的 PUE 显著高于 L44 和 R27，表明磷高效家系可更高效地利用体内吸收的磷素。磷利用效率的差异是导致不同家系干物质积累差异的主要原因，也是区分植株磷效率高低的重要指标[22]。无机磷酸盐在植物体内的转运与再分配是一个较为复杂的过程。磷高效家系可有效调控液泡中无机磷向外转运，维持植株体



* 表示 $P \leqslant 0.05$；** 表示 $P \leqslant 0.01$；*** 表示 $P \leqslant 0.001$。* indicates $P \leqslant 0.05$；** indicates $P \leqslant 0.01$；*** indicates $P \leqslant 0.001$.

图 5 南酸枣生长及生理指标相关性分析

Fig. 5 Correlation analysis of growth and physiology indexes in *C. axillaris*

内磷素稳态，保障生长所需的磷供给[23]；同时优先将磷分配至幼嫩组织等生长旺盛部位，进而提高磷利用效率[24-25]。这种高效的磷利用策略，使其在磷供应受限条件下仍能维持较高的生长量。

3.3 不同磷效率南酸枣家系根系活性及酸性磷酸酶对低磷胁迫的响应

根系活力可反映根系对水分及无机离子的主动吸收能力。较高的根系活力意味着根系细胞代谢旺盛、呼吸作用较强，能够为磷素的主动吸收、转运及细胞修复提供充足的能量。在低磷胁迫下，各家系南酸枣根系活力均显著升高，其中 L56 和 LF001 保持了较高的根系代谢活力，其根系活力显著高于 L44 和 R27。而 L44 的根系活力显著低于其他 3 个家系。由此表明根系活力可作为评价其磷素吸收能力强弱的关键生理指标。该结果与赵泓凯等[26]的研究结论一致，即植物根系生长状况与活力直接影响地上部生长及营养状况。

在低磷胁迫下，各家系南酸枣酸性磷酸酶（ACP）活性整体呈下降趋势，这与部分已有研究结果不一致。其原因可能与本试验的胁迫强度有关：在本研究所设置的严重低磷胁迫条件下，南酸枣可能倾向于将有限的能量与资源优先分配至更直接的磷吸收相关途径，如提升根系活力或增加根系生物量。LF001 与 L56 在低磷条件下仍保持相对较高的 ACP 活性，且显著高于 L44 和 R27。该结果与前人在其他作物上的研究结论一致，即磷高效基因型通常具有较高的基础酸性磷酸酶水平，使其在低磷环境中仍能维持潜在的有机磷利用能力[27]。

3.4 不同磷效率南酸枣家系抗氧化酶对低磷胁迫的响应

低磷胁迫作为一种非生物胁迫，可激活南酸枣的抗氧化酶系统，使其 SOD、POD、CAT 活性均有不同程度提升，以此维持细胞稳定性，进而增强植株抗逆能力[15]。低磷胁迫下，L56 与 LF001 的 SOD 活性显著升高；SOD 作为植物抗氧化系统的关键酶，其活性水平直接影响体内活性氧稳态[28]。同时，LF001 的 POD 活性显著高于其他家系，这可能表明 LF001 受到的过氧化胁迫程度更高，因而需要启动更强的 POD 清除系统以缓解氧化损伤。相比之下，低磷胁迫下 CAT 活性在各家系间的变化幅度相对较小。

在低磷胁迫下，L56 的 SOD、POD、CAT 活性整体处于较高水平。植株异常升高的 SOD 活性

与较高的POD、CAT活性协同作用，可高效清除超氧阴离子自由基（O_2^-）和过氧化氢（H_2O_2），维持氧化平衡[28]。LF001则表现出异常高的POD活性与较高的SOD活性，其大幅升高的POD活性可能暗示植株受到更严重的过氧化胁迫。这种被动式高强度防御会消耗更多能量，在一定程度上抑制生长，这也可能是其生物量积累略低于L56的原因之一。L44与R27抵御低磷胁迫的方式则更依赖于协同提升POD和CAT活性。本研究表明，不同磷效率南酸枣家系对低磷胁迫的生理响应存在明显差异，同一植物不同基因型在低磷环境下的响应分化，与其抗逆遗传背景及适应机制密切相关[29]。

3.5 不同磷效率南酸枣家系硝酸还原酶应对低磷胁迫的响应

在低磷胁迫下，各家系南酸枣硝酸还原酶（NR）活性均有所下降，该变化趋势与关于杉木等已有研究结果一致[30]。其原因可能与低磷胁迫抑制了NO_3^-的转运及同化过程[31]。旺盛的氮同化作用可持续合成蛋白质、酶及核酸等含氮物质，对维持根系活力、抗氧化酶等整个低磷胁迫响应系统的正常运转具有重要作用[32]。本研究中，L56与LF001在低磷胁迫下仍保持较高的NR活性，表明二者在低磷环境中具备较强的氮-磷代谢协同调控能力，而氮磷营养的协同优化更有利于苗木生长及生物量积累[33]。R27则可能采取了不同的适应策略：其较低的NR活性与较高的磷利用效率并存，表明该家系更倾向于通过体内现有养分的循环再利用适应低磷环境。通过遗传改良实现氮磷养分高效利用与抗逆性协同提升，是未来植物营养研究的重要方向[34]。

3.6 南酸枣在不同磷条件下生长及生理指标相关性

研究发现，各家系南酸枣根系活力与SOD、POD、CAT等抗氧化酶活性呈显著正相关。在逆境条件下，植物根系可通过增强呼吸代谢为生理活动提供能量，同时激活抗氧化酶系统以清除过量活性氧，维持细胞稳态，进而适应低磷胁迫[35]。根系活力、抗氧化酶活性与地径、苗高及生物量积累呈显著负相关，表明在低磷胁迫下，南酸枣会将更多碳源与能量分配至抗逆防御相关生理过程，从而减少用于生物量构建的资源投入。南酸枣磷积累量与磷利用效率呈极显著负相关，表明磷吸收与磷利用是2个相对独立的生理过程。因此，在育种与栽培实践中，在提升磷吸收效率的同时，应更加注重优化磷素在植株体内的转运与再利用效率。

4 结 论

低磷胁迫显著提升了南酸枣的磷利用效率，但不同磷效率家系南酸枣在磷吸收与利用策略上呈现出明显分化。1）家系L56、LF001属于“高积累、高效率”的协同适应型，主要通过“开源-节流-维稳-协同”的整体策略实现磷高效利用。在低磷信号的诱导下，2个家系优先将光合产物分配至根系，从形态层面实现“开源”效应；在生理层面上，通过提升根系活力增强磷活化能力，并维持较高的ACP活性，以保障有机磷利用潜力。同时，通过协同增强SOD与POD活性，有效缓解低磷引发的氧化损伤，保障其在逆境下的正常生长；此外，较高的NR活性能促进氮磷代谢协同，使植株在低磷胁迫下维持较高的磷利用效率，实现其显著的生存与生长优势。2）家系R27表现为“较低积累、较高效率”的特征。3）家系L44则呈现为“低积累、低效率”的磷低效特征，其在生物量分配或生理代谢等环节存在一定局限，导致低磷适应性响应不足。

本研究从形态及生理层面解析了南酸枣对低磷胁迫的响应机制，结果表明其磷高效家系主要通过促进根系生长与增强代谢活性来适应磷胁迫环境，而非诱导ACP活性。这一适应策略与多数植物的典型反应存在一定差异，为今后选育适宜低磷环境的南酸枣品种提供了重要的理论依据。

参考文献：

[1] Lambers H. Phosphorus acquisition and utilization in plants[J]. Annual Review of Plant Biology,2022,73:17-42.

[2] Yuan H, Liu D. Signaling components involved in plant responses to phosphate starvation[J]. Journal of Integrative Plant Biology,2008,50(7):849-859.

[3] Bhadouria J, Giri J. Purple acid phosphatases: roles in phosphate utilization and new emerging functions[J]. Plant Cell Reports, 2022,41:33-51.

[4] Preuss M L, Schmitz A J, Thole J M, et al. A role for the RabA4b effector protein PI-4Kβ1 in polarized expansion of root hair cells in *Arabidopsis thaliana*[J].The Journal of Cell Biology, 2006,172(7):991-998.

[5] 张新明，李华兴，刘远金. 磷酸盐在土壤中吸附与解吸研究进展[J]. 土壤与环境，2001,10(1):77-80.
Zhang X M, Li H X, Liu Y J. Study progress of phosphate

adsorption and desorption in soils[J]. Soil and Environmental Sciences,2001,10(1):77-80.

[6] Vance C P, Uhde-Stone C, Allan D L. Phosphorus acquisition and use: critical adaptations by plants for securing a nonrenewable resource[J]. New Phytologist,2003,157:423-447.

[7] Zhou T, Du Y L, Ahmed S, et al. Genotypic differences in phosphorus efficiency and the performance of physiological characteristics in response to low phosphorus stress of soybean in southwest of China[J]. Frontiers in Plant Science,2016,7:1776.

[8] 黄国勤 , 王兴祥 , 钱海燕 , 等 . 施用化肥对农业生态环境的负面影响及对策 [J]. 生态环境 ,2004,13(4):656-660.
Huang G Q, Wang X X, Qian H Y, et al. Negative impact of inorganic fertilizes application on agricultural environment and its countermeasures[J]. Ecology and Environment,2004,13(4):656-660.

[9] Ham B K, Chen J Y, Yan Y, et al. Insights into plant phosphate sensing and signaling[J]. Current Opinion in Biotechnology, 2018,49:1-9.

[10] Dissanayaka D M S B, Plaxton W C, Lambers H, et al. Molecular mechanisms underpinning phosphorus-use efficiency in rice[J]. Plant, Cell & Environment,2018,41(7):1483-1496.

[11] 管玉霞 , 王军辉 , 张守攻 , 等 . 林木营养性状的研究进展与展望 [J]. 西北农林科技大学学报 (自然科学版),2006,34(1): 51-55.
Guan Y X, Wang J H, Zhang S G, et al. Research progress and prospect on nutrient characteristics of forest tree[J]. Journal of Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry (Natural Sciences Edition),2006,34(1):51-55.

[12] Bayuelo-Jiménez J S, Gallardo-Valdéz M, Pérez-Decelis V A, et al. Genotypic variation for root traits of maize (*Zea mays* L.) from the Purhepecha plateau under contrasting phosphorus availability[J]. Field Crops Research,2011,121:350-362.

[13] Ding N, Huertas R, Torres-Jerez I, et al. Transcriptional, metabolic, physiological and developmental responses of switchgrass to phosphorus limitation[J]. Plant, Cell & Environment, 2020,44:186-202.

[14] 宋豪威 , 洪慧滨 , 陈思路 , 等 . 磷添加对米槠和杉木及其混合细根分解的影响 [J]. 森林与环境学报 ,2021,41(1):1-9.
Song H W, Hong H B, Chen S L, et al. Effects of phosphorus addition on fine root decomposition of *Castanopsis carlesii*, *Cunninghamia lanceolata* and mixed[J]. Journal of Forest and Environment, 2021,41(1):1-9.

[15] 徐明睿 , 王晓娟 , 杨亚莉 , 等 . 基于转录组学分析辣椒对磷营养逆境的响应 [J]. 中国农业科学 ,2024,57(14):2827-2846.
Xu M R, Wang X J, Yang Y L, et al. Transcriptomics-based analysis of pepper responses to phosphorus nutritional stress[J]. Scientia Agricultura Sinica,2024,57(14):2827-2846.

[16] 康云艳 , 郭世荣 , 段九菊 . 根际低氧胁迫对黄瓜幼苗根系呼吸代谢的影响 [J]. 应用生态学报 ,2008,19(3):583-587.
Kang Y Y, Guo S R, Duan J J. Effects of root zone hypoxia on respiratory metabolism of cucumber seedlings roots[J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2008,19(3):583-587.

[17] 杨通黎 , 杨松花 , 王晶琴 , 等 . 不同大豆品种幼苗对低磷胁迫的生理响应及综合评价 [J]. 南方农业学报 ,2024,55(2):451-459.
Yang T L, Yang S H, Wang J Q, et al. Physiological responses of different varieties of soybean to low phosphorus stress and comprehensive evaluation[J]. Journal of Southern Agriculture, 2024,55(2):451-459.

[18] 吴文景 , 汪攀 , 陈奶莲 , 等 . 低磷胁迫下不同杉木家系根系觅磷能力分析 [J]. 福建农林大学学报 (自然科学版), 2019,48(2):174-181.
Wu W J, Wang P, Chen N L, et al. Root foraging ability for phosphorus of different Chinese fir family seedlings under low phosphorus supply[J]. Journal of Fujian Agriculture and Forestry University (Natural Science Edition),2019,48(2):174-181.

[19] 吴敏 , 陈瑞 , 李贵 , 等 . 南酸枣苗期耐低磷家系筛选及磷效率评价 [J]. 中南林业科技大学学报 ,2025,45(3):107-117.
Wu M, Chen R, Li G, et al. Screening of low phosphorus tolerant families and phosphorus efficiency of *Choerospondias axillaris* at seedling stage[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2025,45(3):107-117.

[20] 吴敏 , 陈瑞 , 童方平 , 等 . 不同磷水平对南酸枣苗期生长的影响 [J]. 湖南林业科技 ,2024,51(6):36-41.
Wu M, Chen R, Tong F P, et al. Effects of phosphorus levels on seedling growth of *Choerospondias axillaris*[J]. Hunan Forestry Science & Technology,2024,51(6):36-41.

[21] Dixon M, Simonne E, Obreza T, et al. Crop response to low phosphorus bioavailability with a focus on tomato[J]. Agronomy, 2020,10:617.

[22] 陈燕玲 , 王宁 , 石磊 . 甘蓝型油菜自然群体苗期磷效率分析及磷高效优异种质筛选 [J]. 中国油料作物学报 , 2023,45(1): 56-62.
Chen Y L, Wang N, Shi L. Analysis of phosphorus efficiency and screening of P-efficient germplasm on natural population of oilseed rape (*Brassica napus*) at seedling stage[J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences,2023,45(1):56-62.

[23] Xu L, Zhao H Y, Wan R J, et al. Identification of vacuolar phosphate efflux transporters in land plants[J]. Nature Plants, 2019,5(1):84-94.

[24] Chang M X, Gu M, Xia Y W, et al. OsPHT1;3 mediates uptake, translocation, and remobilization of phosphate under extremely low phosphate regimes[J]. Plant Physiology,2019,179(2):656-670.

[25] 孙艳 , 洪婉婷 , 韩阳 , 等 . 植物内部磷循环利用提高磷效率的研究进展 [J]. 植物营养与肥料学报 ,2021,27(12):2216-2228.
Sun Y, Hong W T, Han Y, et al. Targeting internal phosphorus re-utilization to improve plant phosphorus use efficiency[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers,2021,27(12):2216-2228.

[26] 赵泓凯 , 张潇屹 , 曾慧云 , 等 . 土壤调理剂对土壤理化性状及不结球白菜生理特性的影响 [J]. 华北农学报 ,2021,36(增刊 1): 312-319.
Zhao H K, Zhang X Y, Zeng H Y, et al. The effects of soil conditioner on the soil physicochemical properties and biological characteristics of non-heading Chinese cabbage[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica,2021,36(S1):312-319.

[27] 董蓉娇 , 彭进乔 , 尹元萍 , 等 . 低磷胁迫条件下大豆磷高效近等基因系相关酶活性的变化 [J]. 西南农业学报 ,2022,35(6): 1289-1294.
Dong R J, Peng J Q, Yin Y P, et al. Changes of enzyme activities of near isogenic lines with high phosphorus-use efficiency under low phosphorus stress in soybean[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences,2022,35(6):1289-1294.

[28] 于姣妲 , 李莹 , 殷丹阳 , 等 . 杉木对低磷胁迫的响应和生理适应机制 [J]. 林业科学研究 ,2017,30(4):566-575.
Yu J D, Li Y, Yin D Y, et al. Response and physiological mechanism of Chinese fir to low phosphorus stress[J]. Forest Research, 2017,30(4):566-575.

[29] 苑乂川 , 陈小雨 , 李明明 , 等 . 谷子苗期耐低磷种质筛选及其根系保护酶系统对低磷胁迫的响应 [J]. 作物学报 ,2019,45(4): 601-612.
Yuan Y C, Chen X Y, Li M M, et al. Screening of germplasm tolerant to low phosphorus of seedling stage and response of root protective enzymes to low phosphorus in foxtail millet[J]. Acta Agronomica Sinica,2019,45(4):601-612.

[30] 陈海姝 , 陈婉婷 , 林雅雯 , 等 . 低磷胁迫下杉木根系对硝态氮的响应 [J]. 西南林业大学学报 (自然科学),2025,45(3):7-18.
Chen H S, Chen W T, Lin Y W, et al. Response of *Cunninghamia lanceolata* roots to nitrate nitrogen addition under phosphorus starvation[J]. Journal of Southwest Forestry University (Natural Sciences),2025,45(3):7-18.

[31] 师慧丽 . 欧美杨和美洲黑杨的氮代谢差异及施硅、低磷对氮代谢的影响 [D]. 杨凌 : 西北农林科技大学 ,2018:23-24.
Shi H L. Nitrogen metabolism of *Populus euramericana* and *Populus deltoides* and effect of silicon supply and phosphorus deficiency on nitrogen metabolism[D]. Yangling: Northwest A & F University,2018:23-24.

[32] 李仍媛 , 张鹤 , 蒋春姬 , 等 . 开花下针期干旱胁迫对花生氮代谢的影响 [J]. 中国油料作物学报 ,2023,45(5):988-995.
Li R Y, Zhang H, Jiang C J, et al. Effects of drought stress on nitrogen metabolism at anthesis stage of peanut[J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences,2023,45(5):988-995.

[33] 孔迪 , 许玉兰 . 叶面施氮磷肥对云南松生长与生物量分配的影响 [J]. 中南林业科技大学学报 ,2025,45(10):77-85.
Kong D, Xu Y L. Effects of foliar nitrogen and phosphorus fertilization on growth, biomass distribution of *Pinus yunnanensis*[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2025,45(10):77-85.

[34] 储成才 , 王毅 , 王二涛 . 植物氮磷钾养分高效利用研究现状与展望 [J]. 中国科学 : 生命科学 ,2021,51(10):1415-1423.
Chu C C, Wang Y, Wang E T. Improving the utilization efficiency of nitrogen, phosphorus and potassium: current situation and future perspectives (in Chinese)[J]. Scientia Sinica (Vitae),2021,51(10): 1415-1423.

[35] 魏湜 , 罗宁 , 李晶 , 等 . 低温胁迫下玉米苗期根系保护酶活性及内源激素变化 [J]. 东北农业大学学报 ,2014,45(9):1-8.
Wei S, Luo N, Li J, et al. Change of the root protective enzyme activities and endogenous hormones of maize seedling under low-temperature stress[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2014,45(9):1-8.

[本文编校：张雨朦]