

甘蔗热带种不同基因型对低磷胁迫的响应特征

饶席兵^{1,2}, 杨丽华³, 刀静梅^{1,2}, 唐思琪^{1,2}, 韦彩艳⁴, 赵丽萍^{1,2*}

1. 热带作物生物育种全国重点实验室, 云南昆明 650205; 2. 云南省农业科学院甘蔗研究所/云南省甘蔗遗传改良重点实验室, 云南开远 661699; 3. 元江县种植业发展服务中心, 云南元江 653300; 4. 云南富宁湘桂糖业有限公司, 云南富宁 663402

摘要: 从根系形态及生理适应性角度, 探究不同基因型甘蔗热带种 (*Saccharum officinarum* L.) 对低磷胁迫的响应特征, 识别影响磷吸收的关键因素, 为通过根系塑性改良提高甘蔗养分利用效率提供理论依据。本研究以磷高效型热带种 48 Mouna、Loether 和磷低效型热带种 NC20、Badila 为研究材料, 在低磷 (0.2 $\mu\text{mol/L}$ KH_2PO_4) 和正常磷 (1000 $\mu\text{mol/L}$ KH_2PO_4) 2 种供磷水平下, 比较分析各品种的根系形态指标、耐低磷指数、根系活力及酸性磷酸酶活性等。结果表明, 低磷胁迫不同程度地抑制了各甘蔗热带种的生长发育。其中, 磷高效品种 Loether 的株高、茎干质量及整株生物量受低磷胁迫影响最小, 且根干质量和根冠比显著增加。低磷胁迫促使 Loether 和 48 Mouna 的总根长、根系总表面积、根系总体积均增加, 且 Loether 的增加幅度最为明显。绝大多数品种的比根长、比根表面积和比根体积均降低, 其中 NC20 降低幅度最大, 同时所有品种根系均出现细化。此外, 48 Mouna 和 Loether 在低磷胁迫下表现出更高的根部耐低磷指数、根系活力及获磷能力。以上研究揭示了磷高效型热带种 48 Mouna 与 Loether 能通过优化根系结构、增强磷吸收界面、维持较强根系活力及酶促适应性, 有效提升磷的吸收利用效率, 表现出较强的低磷胁迫适应能力。

关键词: 甘蔗; 热带种; 低磷胁迫; 磷效率; 根系形态; 生理响应

中图分类号: S566.1

文献标志码: A

Response Characteristics of Different *Saccharum officinarum* L. Genotypes to Low-phosphorus Stress

RAO Xibing^{1,2}, YANG Lihua³, DAO Jingmei^{1,2}, TANG Siqi^{1,2}, WEI Caiyan⁴, ZHAO Liping^{1,2*}

1. National Key Laboratory of Tropical Crops Biological Breeding, Kunming, Yunnan 650205, China; 2. Sugarcane Research Institute, Yunnan Academy of Agricultural Sciences / Yunnan Key Laboratory of Sugarcane Genetic Improvement, Kaiyuan, Yunnan 661699, China; 3. Yuanjiang County Planting Industry Development Service Center, Yuanjiang, Yunnan 653300, China; 4. Yunnan Funing Xianggui Sugar Industry Co. Ltd., Funing, Yunnan 663402, China

Abstract: Sugarcane is a globally important cash crop and bioenergy crop, playing a critical role in promoting economic development in sugarcane-producing countries. Phosphorus is an essential nutrient for plants, and low phosphorus availability in soil often constrains the quality and yield of sugarcane in China. *S. officinarum* serves as an important genetic foundation for modern sugarcane varieties. Elucidating the low-phosphorus tolerance mechanisms in phosphorus-efficient genotypes of *S. officinarum* is of significant theoretical and practical importance for screening and breeding phosphorus-efficient sugarcane varieties, improving phosphorus fertilizer utilization efficiency, and promoting the development of the sugarcane industry. The study was aimed to explore the response characteristics of different *S. officinarum* genotypes under low-phosphorus stress from the perspectives of root morphology and physiological adaptations, identify key factors affecting phosphorus absorption, and provide a theoretical basis for improving nutrient utilization efficiency in sugarcane through root plasticity modification. Phosphorus-efficient *S. officinarum* genotypes (48 Mouna

收稿日期 2025-08-29; 接受日期 2025-10-18

基金项目 国家重点研发计划项目 (No. 2022YFD2301100); 广西科技重大专项 (桂科 AA23073001); 云南省科技计划项目 (No. 202404BP090025)。

作者简介 饶席兵 (1997—), 男, 硕士, 研究实习员, 研究方向: 甘蔗遗传育种。*通信作者 (Corresponding author): 赵丽萍 (ZHAO Liping), E-mail: zlp_alyma@126.com。

and Loether) and phosphorus-inefficient genotypes (NC20 and Badila) were used in the study. Under two phosphorus supply conditions, low phosphorus ($0.2 \mu\text{mol/L KH}_2\text{PO}_4$) and normal phosphorus ($1000 \mu\text{mol/L KH}_2\text{PO}_4$), comparative analyses were conducted on root morphological indices, low-phosphorus tolerance indices, root activity, acid phosphatase activity, and other physiological characteristics of each variety. The results indicated that low-phosphorus stress could inhibit the growth and development of various sugarcane tropical varieties to different degrees. Among them, the phosphorus-efficient variety Loether was the least affected by low-phosphorus stress in terms of plant height, stem dry weight, and whole-plant biomass, while its root dry weight and root-to-shoot ratio significantly increased. Low-phosphorus stress promoted increases in total root length, total root surface area, and total root volume in both Loether and 48 Mouna, with Loether exhibiting the most pronounced increase. The specific root length, specific root surface area, and specific root volume of most varieties decreased, with NC20 showing the greatest reduction. Additionally, all varieties exhibited root thinning. Furthermore, under low-phosphorus stress, 48 Mouna and Loether demonstrated higher root low-phosphorus tolerance indices, root activity, and phosphorus acquisition capacity. In conclusion, this study reveals that the phosphorus-efficient tropical varieties 48 Mouna and Loether can better optimize root architecture, enhance phosphorus absorption interfaces, maintain strong root activity and enzymatic adaptability, effectively improve phosphorus absorption and utilization efficiency, and exhibit strong adaptability to low-phosphorus stress.

Keywords: sugarcane; *Saccharum officinarum* L.; low phosphorus stress; phosphorus efficiency; root morphology; physiological and biochemical response

DOI: 10.3969/j.issn.1000-2561.2026.01.009

甘蔗 (*Saccharum* spp.) 是重要的糖料作物和能源作物, 分别提供了全球 80% 的食糖生产原料和 40% 的生物燃料^[1-2]。磷 (P) 作为植物必需的大量营养元素之一, 不仅是植物体内多种关键有机分子的组成成分, 还参与呼吸作用、光合作用、信号转导和能量代谢等多种生理过程^[3-4]。甘蔗对磷的吸收和利用直接影响其生长发育、产量形成和品质^[5]。然而, 我国甘蔗主产区土壤多呈酸性, 易发生磷被铁、铝氧化物固定的过程, 导致土壤有效磷含量偏低, 磷肥利用效率不高, 这已成为制约甘蔗优质高产的重要因素之一^[6-7]。热带种 (*Saccharum officinarum* L.) 是现代栽培甘蔗的重要遗传基础, 研究表明, 现代栽培甘蔗约 70%~80% 的基因组来源于热带种。该物种茎秆粗壮、含糖量高、产量潜力大, 尤其在根系发育和养分吸收能力方面具有优良的基础性状, 这使其在甘蔗遗传改良及逆境适应性研究中具有重要地位^[8]。因此, 解析磷高效热带种的耐低磷机制, 特别是其在根系形态结构与生理功能方面的响应策略, 对于筛选和培育磷高效甘蔗品种、提升磷肥利用效率以及促进甘蔗产业发展具有重要的理论与实践意义。

YAO 等^[9]研究缺磷对甘薯生长的影响, 发现低磷胁迫显著降低了其地上部和地下部生物量, 但块茎数保持不变。夏静等^[10]的研究表明, 红豆草的叶面积、叶宽和叶长等指标随低磷胁迫天数的延长显著降低。低磷胁迫下, 青稞的株高、植

株鲜/干物质质量较正常供磷条件显著下降^[11]。魏迎春等^[12]发现低磷胁迫使番茄株高、茎径、鲜/干物质积累量明显降低, 并影响其碳水化合物和蛋白质的合成。在甘蔗中, 李文宝^[13]发现低磷导致株高、茎径、叶片参数及地上/地下部生物量显著降低。乔宁阳^[14]的研究结果也显示, 低磷胁迫导致甘蔗株高、茎径和植株生物量分别降低 34.76%、29.03% 和 51.80%。同时, 根系和地上部的磷积累量分别下降 62.04% 和 82.17%。相关研究表明, 植物通过重建根系形态结构、分布方式及生理活动等多种适应性反应来应对低磷胁迫。根系作为植物感知土壤环境和吸收矿质养分的主要器官, 其生长发育和代谢状态在植物整体生理功能和产量形成中起着关键作用^[15-16]。李海波等^[17]发现低磷胁迫显著促进水稻侧根生长, PEREZ-TORRES 等^[18]也在拟南芥中也观察到了类似现象。张臻宇等^[19]发现, 低磷胁迫下燕麦的总根长、根表面积、根体积及根冠比显著提高, 且伴随酸性磷酸酶 (APase) 活性增强。低磷胁迫在抑制野生大麦地上部生长的同时, 促进了其总根长、总根表面积、总根体积等根系指标以及 SOD、POD 等生理指标的增加^[20]。柯野等^[21]的研究结果显示, 低磷胁迫下甘蔗根系总体积增大, 主根向下延伸更深, 同时浅层根系分布增多, 从而扩大其在土壤中的“觅磷”范围。据报道, 植物对低磷胁迫的响应也存在明显的基因型差异^[22-24]。例如, 磷高效棉花和玉米在缺磷条件下的根系形态与磷利用效率均优

于磷低效品种^[25-26]。赵丽萍等^[27]的研究表明,磷高效甘蔗品种在低磷条件下的根系和地上部生长表现优于一般品种。磷高效基因型甘蔗新台糖 22 号较磷低效品种云蔗 03-103 和日本 2 号对缺磷的响应更早,并表现出明显的浅根特征^[28]。谢璐^[29]也发现磷高效甘蔗品种更易优化根体积、根面积和侧根数量等参数,构建庞大根系,增加浅层根系分布密度从而提高磷吸收。还有研究表明,甘蔗的耐低磷能力与其保护酶系统的稳定性密切相关,耐性强的品种能通过提高酶活性(尤其是超氧化物歧化酶)来有效应对低磷胁迫^[30]。

鉴于磷矿资源的不可再生性及磷肥投入成本持续上升,通过遗传改良途径培育磷高效甘蔗品种,是甘蔗实现绿色、高效、可持续生产的可行措施。为了培育磷高效甘蔗品种,应从甘蔗的原始种质入手研究,深入理解热带种对低磷胁迫的响应特性及应答机制。目前,尽管已开展诸多甘蔗磷吸收相关的研究,但大多集中于现代甘蔗栽培种上,针对热带种在根系形态与生理生化方面应对低磷胁迫的系统研究较为匮乏。本研究以不同磷效率甘蔗热带种为试验材料,采用控制磷供给浓度的水培试验,从根系形态参数、根系活力及酸性磷酸酶等生理指标着手,系统探究其在低磷胁迫下的响应特性。研究旨在为磷高效甘蔗品种的培育及磷素养分高效利用提供理论依据和实践参考。

1 材料与方法

1.1 材料

试验材料为前期筛选获得的磷高效基因型甘蔗热带种 48 Mouna、Loether(路打士)和磷低效基因型 NC20、Badila(拔地拉)^[7],材料均取自国家甘蔗种质资源圃(云南开远)。

1.2 方法

1.2.1 试验设计 试验于 2024 年 10 月在云南省农业科学院甘蔗研究所(开远)科研基地温室大棚内进行,采用水培法。首先,选取甘蔗中上部健康单芽蔗段,种植于装有洗净河沙的育苗箱(80 cm×60 cm)中,并保持适宜湿度和光照条件。当幼苗长至“两叶一心”时,选择生长一致的植株移栽至内径为 24 cm、深 35 cm 的黑色塑料桶中,用 Hoagland 营养液进行培养,每桶 1 株,植株用陶粒固定。设置低磷(low phosphorus, LP, 0.2 μmol/L KH₂PO₄)与正常磷(Normal phos-

phorus, HP, 1000 μmol/L KH₂PO₄) 2 个处理,每处理设 3 次重复,每重复 5 株^[31]。培养液每 5 d 更换 1 次,期间持续通气,处理持续 90 d。

1.2.2 指标测定 处理 90 d 后,各品种每个重复选取 5 株植株的根系,用去离子水冲洗根部并吸干表面水分。根系按单根分开,整齐摆放于根盘上,使用 Epson Expression 4990 型扫描仪进行扫描,利用 WinRHIZO Pro 2012b(Reagent Instruments 公司,加拿大)软件对扫描的根系图片进行分析。根系和地上部样品于 105 °C 预烘 30 min,再于 70 °C 恒温干燥至恒重后称量干质量,将干样粉碎过筛, H₂SO₄-H₂O₂ 消解后通过钼锑抗比色法测定样品的磷含量^[32]。根系活力和酸性磷酸酶活性分别参照赵丽萍等^[33]、林启美等^[34]的方法测定。各指标处理前后的相对值(relative value, RV)和耐低磷指数(low phosphorus tolerance indexes, LPT)计算公式如下:

$$LPT = \frac{X_i}{CK_i} \quad (1)$$

$$RV = \frac{X_i - CK_i}{CK_i} \times 100\% \quad (2)$$

式中, X_i 和 CK_i 分别代表在低磷和正常磷下的测定值。

1.3 数据处理

利用 Microsoft Excel 2010、SPSS 21.0 软件进行数据整理和统计分析,采用 LSD 方法检验组间差异的显著性($P < 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 低磷胁迫对不同基因型甘蔗热带种生物量及根冠比的影响

如表 1 和表 2 所示,不同基因型甘蔗对低磷胁迫响应差异明显,Badila 受低磷胁迫的抑制最严重,与正常磷条件相比,株高、茎干质量和整株干物质质量分别下降了 38.21%、49.66% 和 49.46%,且 3 个指标测定值显著低于 48 Mouna、NC20 和 Loether; Loether 受低磷胁迫影响最小,这 3 个指标仅小幅度下降。Badila 的根干质量在低磷胁迫下降低,且显著低于 48 Mouna 和 Loether,而其余 3 个品种的根干质量均有不同程度增加,以 48 Mouna 和 Loether 的增幅最为突出,分别为 33.23% 和 139.32%。值得注意的是,48 Mouna 的株高、根干质量、茎干质量和整株干物质质量在各处理下始终居首,且茎干质量和整株

表 1 不同磷水平下不同磷效率甘蔗热带种的株高和干物质积累量
Tab. 1 Plant height and dry matter accumulation measured in *S. officinarum* genotypes with contrasting phosphorus efficiency under different phosphorus supply levels

品种 Variety	株高		RV/%	根干质量		RV/%	茎干质量		RV/%
	Plant height/cm			Root dry weight/g			Stem dry weight/g		
	LP	HP		LP	HP		LP	HP	
48 Mouna	91.33 ^a	118.11 ^a	−22.68	22.29 ^a	16.73 ^a	33.23	121.60 ^a	143.49 ^a	−15.26
NC20	81.67 ^a	105.33 ^a	−22.46	13.32 ^{bc}	12.60 ^b	5.71	94.49 ^b	96.01 ^c	−1.59
Badila	46.67 ^b	75.53 ^b	−38.21	9.74 ^c	18.82 ^a	−48.25	57.21 ^d	113.65 ^b	−49.66
Loether	82.00 ^a	83.00 ^b	−1.20	17.71 ^{ab}	7.40 ^c	139.32	77.88 ^c	88.74 ^c	−12.24
均值	75.42	95.49	−21.02	15.76	13.72	14.87	87.79	110.47	−20.53

注：同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著（ $P<0.05$ ）。
Note: Different lowercase letters after the same column of data indicate significant difference among treatments ($P<0.05$).

表 2 不同磷水平下不同磷效率甘蔗热带种干物质积累量和根冠比
Tab. 2 Dry matter accumulation and root-shoot ratio of *S. officinarum* genotypes with different phosphorus efficiency under different phosphorus levels

品种 Variety	整株干质量		RV/%	根冠比		RV/%
	Total plant dry weight/g			Root shoot ratio		
	LP	HP		LP	HP	
48 Mouna	143.89 ^a	160.22 ^a	−10.19	0.18 ^{ab}	0.11 ^b	63.64
NC20	107.81 ^b	109.95 ^c	−1.95	0.14 ^b	0.13 ^b	7.69
Badila	66.95 ^c	132.47 ^b	−49.46	0.17 ^b	0.16 ^a	6.25
Loether	95.59 ^b	96.14 ^c	−0.57	0.23 ^a	0.08 ^c	187.50
均值	103.56	124.70	−16.95	0.18	0.12	50.00

注：同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著（ $P<0.05$ ）。
Note: Different lowercase letters after the same column of data indicate significant difference among treatments ($P<0.05$).

干物质质量显著高于其他 3 个品种。此外，低磷胁迫促使所有品种的根冠比增加，Loether 的增幅最大(187.50%),根冠比显著高于 NC20 和 Badila, 这表明 Loether 在低磷环境下具备更强的根系生长优势。

2.2 低磷胁迫对不同基因型甘蔗热带种磷吸收与积累的影响

所有甘蔗品种的叶和根部磷积累量均在低磷胁迫下降低（表 3）。其中，48 Mouna 和 Loether 的叶片磷积累量降幅最大（分别为 72.73%和 88.89%），而根部磷积累量降幅最小（分别为 4.76%和 4.55%）。正常磷条件下，各品种间的叶和根磷积累量无显著差异，低磷胁迫促使 48 Mouna 和 Loether 的叶片磷积累量显著低于 NC20 和 Badila, 根部磷积累量差异不明显。此外，NC20 和 Badila 的叶片耐低磷指数最高，且显著高于 48 Mouna 和 Loether；48 Mouna 和 Loether 则根部耐低磷指数最高，分别为 0.94 和 0.95。这些结果表明，磷高效型热带种在低磷条件下更倾向于优先

维持根部磷积累，从而增强其磷吸收功能，反映了其适应策略的差异。

2.3 低磷胁迫对不同基因型甘蔗热带种生理指标的影响

由表 4 可知，正常磷条件下，各甘蔗品种的根系活力差异不显著。低磷胁迫导致所有品种的根系活力均受到抑制，且不同磷效率品种间差异明显，48 Mouna 和 Loether 受抑制程度最小，较正常磷条件分别仅下降 28.23%和 17.88%，显著高于 NC20 和 Badila，表现出较强的根系代谢适应能力。在酸性磷酸酶活性方面，低磷胁迫下，NC20 和 Loether 的叶酸性磷酸酶活性降低，而 48 Mouna 和 Badila 的叶酸性磷酸酶活性升高,Badila 在各处理下叶酸性磷酸酶活性始终最高。所有品种的根酸性磷酸酶活性均在低磷胁迫下降低，其中 48 Mouna（90.44%）和 Loether（93.45%）降幅最大，显著低于 NC20 和 Badila，这表明磷高效型热带种在低磷环境下减少对磷酸酶途径的依赖，转而通过其他机制提高磷的获取效率。

表 3 不同基因型热带种磷积累量与耐低磷指数

Tab. 3 Phosphorus accumulation and low phosphorus tolerance coefficient of different *S. officinarum* genotypes

品种 Variety	叶 Leaf/g		RV/%	LPT	根 Root/g		RV/%	LPT
	LP	HP			LP	HP		
48 Mouna	0.03 ^b	0.11 ^a	-72.73	0.27 ^b	0.20 ^a	0.21 ^a	-4.76	0.94 ^a
NC20	0.10 ^a	0.11 ^a	-9.11	0.91 ^a	0.21 ^a	0.25 ^a	-16.00	0.83 ^a
Badila	0.08 ^a	0.10 ^a	-20.00	0.80 ^a	0.18 ^a	0.22 ^a	-18.18	0.82 ^a
Loether	0.01 ^b	0.09 ^a	-88.89	0.11 ^b	0.21 ^a	0.22 ^a	-4.55	0.95 ^a
均值	0.06	0.10	-40.00	0.53	0.20	0.22	-9.09	0.91

注：同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著（ $P<0.05$ ）。
Note: Different lowercase letters after the same column of data indicate significant difference among treatments ($P<0.05$).

表 4 低磷胁迫下不同磷效率甘蔗热带种的生理指标变化

Tab. 4 Changes of physiological indexes of *S. officinarum* with different phosphorus efficiency under low phosphorus stress

品种 Variety	根系活力 Root ctivity		RV/%	酸性磷酸酶（叶） Acid phosphatase (Leaf)		RV/%	酸性磷酸酶（根） Acid phosphatase (Root)		RV/%
	LP	HP		LP	HP		LP	HP	
48 Mouna	82.41 ^a	114.82 ^a	−28.23	121.08 ^a	69.59 ^b	73.99	1.45 ^c	15.16 ^b	−90.44
NC20	47.97 ^b	121.69 ^a	−60.58	54.23 ^b	65.65 ^b	−17.39	15.54 ^a	18.10 ^a	−14.14
Badila	48.69 ^b	124.75 ^a	−60.97	148.11 ^a	92.83 ^a	59.55	7.57 ^b	15.57 ^b	−51.38
Loether	88.35 ^a	107.59 ^a	−17.88	54.81 ^b	83.98 ^{ab}	−34.73	1.24 ^c	18.93 ^a	−93.45
均值	66.86	117.21	−42.96	94.56	78.02	21.19	6.45	19.65	−67.18

注：同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著（ $P<0.05$ ）。
Note: Different lowercase letters after the same column of data indicate significant difference among treatments ($P<0.05$).

2.4 低磷胁迫对不同基因型甘蔗热带种根系形态指标的影响

如表 5 和表 6 结果显示，低磷胁迫诱导甘蔗根系形态发生明显的可塑性变化。在正常磷条件下，Badila 的总根长、根系总表面积和根系总体积均显著高于 48 Mouna、NC20 和 Loether。低磷胁迫下,Badila 的这 3 个指标均降低,而 48 Mouna 和 Loether 则均增加,NC20 的总根长和根系总表面积增加,但其根系总体积降低；其中 48 Mouna 的值最高,且显著高于其他品种,Loether 的增幅

最为突出，总根长、根系总表面积和根系总体积分别增加了 166.47%、133.13%和 104.91%。低磷胁迫促使 Badila 的比根长、比根表面积和比根体积均增加，而 NC20 和 Loether 则呈相反趋势，此外，48 Mouna 的比根表面积和比根体积也出现降低。其中，NC20 下降的幅度最大，比根长、比根表面积和比根体积分别降低 1.46%、21.70%和 33.81%。所有品种的根系平均直径均在低磷胁迫下减小。上述结果说明，在低磷条件下通过增加根系规模、调节根构型以提高对有限磷资源的

表 5 低磷胁迫下不同基因型甘蔗热带种的根系形态参数变化

Tab. 5 Changes of root morphological parameters of different genotypes of *S. officinarum* under low phosphorus stress

品种 Variety	总根长		RV/%	根系总表面积		RV/%	根系总体积		RV/%
	Total root length/cm			Root surface area/cm ²			Total root volume/cm ³		
	LP	HP		LP	HP		LP	HP	
48 Mouna	40 225.97 ^a	24 133.52 ^b	66.68	6181.11 ^a	4542.68 ^b	36.07	78.55 ^a	70.81 ^{bc}	10.93
NC20	27 675.11 ^b	21 189.31 ^b	30.61	4112.26 ^b	3972.61 ^b	3.52	53.76 ^b	60.72 ^b	-11.46
Badila	27 913.33 ^b	39 237.81 ^a	-28.86	4150.79 ^b	6385.61 ^a	-34.99	50.34 ^b	80.36 ^a	-37.36
Loether	27 399.39 ^b	10 282.27 ^c	166.47	4140.39 ^b	1776.01 ^b	133.13	51.29 ^b	25.03 ^c	104.91
均值	30 803.45	23 710.73	29.91	4646.14	4169.23	11.44	58.49	59.23	-1.25

注：同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著（ $P<0.05$ ）。
Note: Different lowercase letters after the same column of data indicate significant difference among treatments ($P<0.05$).

表 6 低磷胁迫下不同基因型甘蔗热带种的根系形态参数变化
Tab. 6 Changes of root morphological parameters of different genotypes of *S. officinarum* under low phosphorus stress

品 种 Variety	比根长 Specific root length		RV/%	比根表面积 Specific root sur- face area		RV/%	比根体积 Specific root volume		RV/%	平均根系直径 Average root diameter/mm		RV/%
	LP	HP		LP	HP		LP	HP		LP	HP	
48 Mouna	1836.23 ^b	1636.98 ^{ab}	12.17	284.37 ^b	307.72 ^{ab}	−7.59	3.64 ^b	4.79 ^{ab}	−24.01	0.49 ^a	0.56 ^a	−12.50
NC20	1906.18 ^b	1934.38 ^{ab}	−1.46	285.22 ^b	364.27 ^a	−21.70	3.70 ^b	5.59 ^a	−33.81	0.53 ^a	0.61 ^a	−13.11
Badila	2649.91 ^a	2097.54 ^a	26.33	394.04 ^a	340.25 ^{ab}	15.81	4.78 ^a	4.30 ^{ab}	11.16	0.49 ^a	0.53 ^a	−7.55
Loether	1475.82 ^c	1489.08 ^c	−0.89	224.58 ^b	258.46 ^b	−13.11	2.79 ^b	3.66 ^b	−23.77	0.50 ^a	0.55 ^a	−9.09
均值	1967.04	1789.50	9.92	297.05	317.67	−6.49	3.73	4.58	−18.56	0.50	0.56	−10.71

注：同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著（ $P<0.05$ ）。
Note: Different lowercase letters after the same column of data indicate significant difference among treatments ($P<0.05$).

捕获能力，是其重要的适应性策略之一。

3 讨论

磷是植物生长发育所必需的重要矿质元素，缺磷会严重抑制植物的形态建成与生理代谢^[35]。众多研究报道，低磷胁迫会导致甘蔗的株高、叶面积、有效茎数、干物质等产量性状下降^[36]。本研究结果也显示，低磷胁迫使甘蔗株高、茎干质量和整株干物质质量显著下降。同时，不同基因型对低磷胁迫的响应存在差异，磷低效型甘蔗热带种受抑制程度最为显著，这与刘灵等^[37]在大豆中关于基因型差异性的研究结果相一致。磷高效型作物通常具有更强的根系构型调节能力，从而增强对低磷环境的适应性^[38-39]。龚丝雨等^[40]研究发现磷高效基因型烟草在低磷条件下表现出更强的耐低磷性，具有更大的主根长度和根系干质量。本研究中，磷高效型品种 48 Mouna 和 Loether 在低磷条件下表现出更强的根系形态可塑性，其总根长、根表面积和根体积均显著增加，根冠比升高，这表明其通过地上-地下部协调分配机制增强了地下部的磷吸收功能，此类响应机制是磷高效品种的重要特征，有助于维持低磷养分供应下的正常生长发育。易科等^[41]的研究中，低磷胁迫使磷高效型甘蔗品种新台糖 22 号的比根表面积、比根体积和比根尖数均较正常磷条件极显著增加，与本研究 NC20、48 Mouna 和 Loether 的比根表面积和比根体积降低存在差异，这种差异可能与甘蔗基因型不同导致的根系结构特征、能量分配优先级以及遗传背景差异有关。

低磷条件下的磷积累量水平反映了植物吸磷能力与再利用效率的综合效能。本研究发现，磷高效甘蔗热带种在低磷胁迫下，其根部磷积累量

和耐低磷系数均高于磷低效品种，然而，叶部磷的积累趋势却与根部相反，显著下降，且下降幅度显著大于磷低效品种。这种现象可能源于磷高效型品种在低磷条件下产生“根优先供磷”策略，即在总体磷积累量降低的前提下，优先维持根部磷含量，这是植物对磷资源有限条件的一种适应性再分配策略，以保障关键器官（如根系）持续发挥吸收功能，进而提高整体磷利用效率，在小麦、玉米、水稻等作物中也有类似报道^[42]。

根系活力是衡量根系吸收和代谢功能强弱的重要指标，对植物逆境适应性和养分利用效率具有关键意义^[43]。本研究中，磷高效型热带种在低磷处理下仍维持较高的根系活力，表明其具有良好的磷逆境适应能力，与何蓉等^[44]在紫花苜蓿中的研究结果一致。除重塑根系形态外，植物还能通过调节一系列生理生化反应来应对低磷逆境，酸性磷酸酶活性的改变是植物响应低磷胁迫的一个标志性生理反应。张丽梅等^[45]的研究表明，不同基因型玉米在低磷环境下叶片酸性磷酸酶活性均升高。而本研究中，48 Mouna 和 Badila 的叶片酸性磷酸酶活性在低磷胁迫下升高，但另外 2 个品种却出现下降，推测是由于低磷条件伴随活性氧积累，损伤叶绿体，导致酶构象改变而失活，进而引发磷代谢紊乱。值得注意的是，所有甘蔗热带种根部酸性磷酸酶活性均下降，尤其是磷高效基因型下降更为明显，这一现象可能反映了其在低磷胁迫下通过减少对酸性磷酸酶的依赖，转而激活如有机酸分泌等更高效的磷活化途径，从而维持对磷的吸收利用^[46]。本研究所用甘蔗材料均为热带种，该种质在现代甘蔗栽培种中贡献了 70%~80% 的遗传背景，也是当前品种选育的重要亲本资源，在本研究中的稳定表现进一步证实了

其在磷效率性状方面的潜力,表明该种质资源在未来磷高效甘蔗品种选育和基础机制研究中具有广泛的应用前景。

4 结论

本研究以 4 个不同磷效率甘蔗热带种为试验材料,系统分析了它们在低磷胁迫下的根系形态及相关生理响应特性。磷高效型热带种 Loether 和 48 Mouna 表现出更强的耐低磷性,能通过重塑根系构型,形成高效的磷吸收界面,增强对低磷环境的资源获取能力,维持较高的根系活力,优化酸性磷酸酶活性,并减少磷代谢能耗,从而更高效地促进磷吸收利用,以应对低磷逆境。以上结果为磷高效甘蔗品种选育及磷素科学管理提供重要的理论依据和实践参考。

参考文献

- [1] ASHWIN N J, CHAKRAVARTHI M, NERKAR G, MANOJ V M, DHARSHINI S, SUBRAMONIAN N, PREMACHANDRAN M N, ARUN K R, KRISHNA S K, HEMAPRABHA G, RAM B, APPEND C. Overexpression of expansin *EaEXPA1*, a cell wall loosening protein enhances drought tolerance in sugarcane[J]. *Industrial Crops and Products*, 2021, 159: 113035.
- [2] ASLAM U, TABASSUM B, NASIR I A, KHAN A, HUSNAIN T. A virus-derived short hairpin RNA confers resistance against sugarcane mosaic virus in transgenic sugarcane[J]. *Transgenic Research*, 2018, 27(2): 203-210.
- [3] CONG W F, SURIYAGODA L D B, LAMBERS H. Tightening the phosphorus cycle through phosphorus-efficient crop genotypes[J]. *Trends in Plant Science*, 2020, 25(10): 967-975.
- [4] UEDA Y, SAKURABA Y, YANAGISAWA S. Environmental control of phosphorus acquisition: a piece of the molecular framework underlying nutritional homeostasis[J]. *Plant and Cell Physiology*, 2021, 62(4): 573-581.
- [5] ZAMBROSI F C B, RIBEIRO R V, MARCHIORI P E R, CANTARELLA H, LANDELL M G A. Sugarcane performance under phosphorus deficiency: physiological responses and genotypic variation[J]. *Plant and Soil*, 2015, 386(1): 273-283.
- [6] SOLTANGHEISI A, HAYGARTH P M, PAVINATO P S, CHERUBIN M R, TELES A P B, BORDONAL R D O, CARVAIHO J L N, WITHERS P J A, MARTINELLI L A. Long term sugarcane straw removal affects soil phosphorus dynamics[J]. *Soil Tillage Research*, 2021, 208: 104898.
- [7] 郭家文, 刀静梅, 樊仙, 张跃彬, 刘少春. 甘蔗磷高效种质资源的筛选[J]. *土壤与作物*, 2012, 1(4): 248-254.
- GUO J W, DAO J M, FAN X, ZHANG Y B, LIU S C. Genotype screening of high phosphorus use efficiency in sugarcane germplasm resources[J]. *Soils and Crops*, 2012, 1(4): 248-254. (in Chinese)
- [8] ZHANG J, SHARMA A, YU Q, WANG J, LI L, ZHU L, ZHANG X, CHEN Y, MING R. Comparative structural analysis of Bru1 region homeologs in *Saccharum spontaneum* and *S. officinarum*[J]. *BMC Genomics*, 2016, 17: 446.
- [9] YAO Z, LUO Z, ZOU H, YANG Y, JIANG B, HUANG L, WANG Z. Molecular mechanisms underlying sweet potato (*Ipomoea batatas*) responses to phosphorus deficiency[J]. *Agronomy*, 2025, 15: 1745.
- [10] 夏静, 陈洁, 南丽丽, 汪堃, 马彪, 姚宇恒. 低磷胁迫对耐低磷和磷敏感红豆草形态和根系解剖结构的影响[J]. *草原与草坪*, 2025, 45(3): 116-123.
- XIA J, CHEN J, NAN L L, WANG K, MA B, YAO Y H. Effects of low phosphorus stress on morphology and root anatomical structure of low phosphorus-tolerant and phosphorus-sensitive *Onobrychis viciifolia*[J]. *Grassland and Turf*, 2025, 45(3): 116-123. (in Chinese)
- [11] 安立昆, 王子傲, 崔永梅, 白羿雄, 海琪, 娘毛吉, 吴昆仑. 低磷胁迫对 8 个青稞品种苗期关键农艺性状的影响[J]. *湖南农业科学*, 2025(2): 1-6.
- ANG L K, WANG Z A, CUI Y M, BAI Y X, HAI Q, NIANG M J, WU K L. Low phosphorus stress affects key agronomic traits in seedlings of 8 hullless barley varieties[J]. *Hunan Agricultural Sciences*, 2025(2): 1-6. (in Chinese)
- [12] 魏迎春, 吕令华, 李品, 刘磊, 李昆仑, 张中起. 低磷对番茄农艺性状及生理特性的影响[J]. *种子科技*, 2025, 43(3): 16-19.
- WEI Y C, LYU L H, LI P, LIU L, LI K L, ZHANG Z Q. Effects of low phosphorus on agronomic traits and physiological characteristics of tomato[J]. *Seed Science & Technology*, 2025, 43(3): 16-19. (in Chinese)
- [13] 李文宝. 甘蔗营养高效利用种质资源筛选研究[D]. 南宁: 广西大学, 2011.
- LI W B. Screening for higher nutrients use efficiency of sugarcane germplasm[D]. Nanning: Guangxi University, 2011. (in Chinese)
- [14] 乔宁阳. 甘蔗高效获取磷的根系形态及生理策略与施磷调控[D]. 重庆: 西南大学, 2024.

- QIAO N Y. Root morphological and physiological strategies for efficient phosphorus acquisition and phosphorus application regulation in sugarcane[D]. Chongqing: Southwest University, 2024. (in Chinese)
- [15] PERET B, DESNOS T, JOST R, KANNO S, BERKOWITZ O, NUSSAUME L. Root architecture responses: in search of phosphate[J]. *Plant Physiology*, 2014, 166(4): 1713-1723.
- [16] 许仙菊, 张永春. 植物耐低磷胁迫的根系适应性机制研究进展[J]. *江苏农业学报*, 2018, 34(6): 1425-1429.
- XU X J, ZHANG Y C. Research progress on the root adaptation mechanism of plants under low phosphorus stress[J]. *Jiangsu Journal of Agricultural Sciences*, 2018, 34(6): 1425-1429. (in Chinese)
- [17] 李海波, 夏铭, 吴平. 低磷胁迫对水稻苗期侧根生长及养分吸收的影响[J]. *植物学报*, 2001(11): 1154-1160.
- LI H B, XIA M, WU P. Effect of phosphorus deficiency stress on rice lateral root growth and nutrient absorption[J]. *Journal of Integrative Plant Biology*, 2001(11): 1154-1160. (in Chinese)
- [18] PEREZ-TORRES C A, LOPEZ-BUCIO J, CRUZ-RAMIREZ A, IBARRA-LACLETTE E, DHARMASIRI S, ESTELLE M, HERRERA-ETRELLA L. Phosphate availability alters lateral root development in *Arabidopsis* by modulating auxin sensitivity via a mechanism involving the TIR1 auxin receptor[J]. *Plant Cell*, 2008, 20(12): 3258-3272.
- [19] 张臻宇, 纪明雪, 崔浩宇, 王应东, 杨洋, 齐冰洁. 不同磷效率燕麦品种苗期耐低磷胁迫差异分析[J/OL]. *分子植物育种*, (2025-03-06)[2025-08-20]. <https://link.cnki.net/urlid/46.1068.S.20250306.1134.002>.
- ZHANG Z Y, JI M X, CUI H Y, WANG Y D, YANG Y, QI B J. Analysis on difference in resistance to low phosphorus stress at oat seedlings with different phosphorus efficiencies[J/OL]. *Molecular Plant Breeding*, (2025-03-06)[2025-08-20]. <https://link.cnki.net/urlid/46.1068.S.20250306.1134.002>. (in Chinese)
- [20] 王晓澜, 乔云祥, 王艳彩, 赵奥尼, 冯西博, 何燕. 高原低磷胁迫下野生大麦苗期生理响应及优异种质筛选[J/OL]. *江苏农业科学*, (2025-06-26)[2025-08-21]. <https://link.cnki.net/urlid/32.1214.S.20250625.1924.016>.
- WANG X L, QIAO Y X, WANG Y C, ZHAO A N, FENG X B, HE Y. Physiological response and excellent germplasm screening of wild barley at seedling stage under low phosphorus stress in plateau[J/OL]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, (2025-06-26) [2025-08-21]. <https://link.cnki.net/urlid/32.1214.S.20250625.1924.016>. (in Chinese)
- [21] 柯野, 谢璐, 蓝林, 潘俊臣, 唐新莲. 甘蔗幼苗对难溶性磷的吸收及其根系对低磷胁迫的响应[J]. *广西植物*, 2019, 39(12): 1673-1680.
- KE Y, XIE L, LAN L, PAN J C, TANG X L. Absorption of poorly soluble phosphorus by sugarcane seedlings and its response to low phosphorus stress[J]. *Guihaia*, 2019, 39(12): 1673-1680. (in Chinese)
- [22] 乔振江, 蔡昆争, 骆世明. 低磷和干旱胁迫对大豆植株干物质积累及磷效率的影响[J]. *生态学报*, 2011, 31(19): 5578-5587.
- QIAO Z J, CAI K J, LUO S M. Interactive effects of low phosphorus and drought stress on dry matter accumulation and phosphorus efficiency of soybean plants[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(19): 5578-5587. (in Chinese)
- [23] 杨青, 张一, 周志春, 丰忠平. 低磷胁迫下不同种源马尾松的根构型与磷效率[J]. *应用生态学报*, 2012, 23(9): 2339-2345.
- YANG Q, ZHANG Y, ZHOU Z C, FENG Z P. Root architecture and phosphorus efficiency of different provenance *Pinus massoniana* under low phosphorous stress[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2012, 23(9): 2339-2345. (in Chinese)
- [24] 夏龙飞, 易科, 张木清, 黄有总, 刘平武, 赵尊康, 黎晓峰, 顾明华. 甘蔗磷效率基因型差异及磷高效基因型筛选研究[J]. *热带作物学报*, 2017, 38(5): 873-880.
- XIA L F, YI K, ZHANG M Q, HUANG Y Z, LIU P W, ZHAO Z K, LI X F, GU M H. Genotypic differences of phosphorus efficiency and screening of phosphorus efficient cultivars in sugarcane[J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2017, 38(5): 873-880. (in Chinese)
- [25] 陈波浪, 盛建东, 蒋平安, 李卫华, 王靓. 不同基因型棉花磷效率特征及其根系形态的差异[J]. *棉花学报*, 2014, 26(6): 506-512.
- CHEN B L, SHEN J D, JIANG P A, LI W H, WANG J. Differences of phosphorus efficiency characteristics and root morphology between two cotton genotypes[J]. *Cotton Science*, 2014, 26(6): 506-512. (in Chinese)
- [26] 黄卓娆, 程艳波, 黄华, 吴意, 江炳志, 年海. 不同类型玉米品种耐低磷评价[J]. *安徽农业科学*, 2021, 49(5): 158-161.
- HUANG Z R, CHENG Y B, HUANG H, WU Y, JIANG B Z, NIAN H. Study on the response of maize varieties to phosphorus deficiency[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2021, 49(5): 158-161. (in Chinese)
- [27] 赵丽萍, 刘家勇, 咎逢刚, 赵培方, 赵俊, 朱建荣, 杨昆,

- 覃伟, 姚丽, 夏红明, 陈学宽, 吴才文. 磷素对不同基因型甘蔗生长的影响[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2015, 41(6): 590-594.
- ZHAO L P, LIU J Y, ZAN F G, ZHAO P F, ZHAO J, ZHU J R, YANG K, QIN W, YAO L, XIA H M, CHEN X K, WU C W. Effects of phosphorus on the growth of different genotypes of sugarcane[J]. Journal of Hunan Agricultural University (Natural Sciences), 2015, 41(6): 590-594. (in Chinese)
- [28] YI K, LI X, CHEN D, YANG S, LIU Y, TANG X, LING G, ZHAO Z. Shallower root spatial distribution induced by phosphorus deficiency contributes to topsoil foraging and low phosphorus adaption in sugarcane (*Saccharum officinarum* L.)[J]. Frontiers in Plant Science, 2022, 15(12): 797635.
- [29] 谢璐. 甘蔗高效吸收利用磷的根系形态及构型机理初探[D]. 南宁: 广西大学, 2019.
- XIE L. Preliminary study on root morphology and configuration mechanism of phosphorus efficient absorption and utilization in sugarcane[D]. Nanning: Guangxi University, 2019. (in Chinese)
- [30] 黄小凤, 谭中文, 梁计南, 曾宪录, 陈勇生. 缺磷胁迫下甘蔗幼苗和愈伤组织保护酶活性的变化[J]. 甘蔗糖业, 2005(2): 15-21.
- HUANG X F, TAN Z W, LIANG J N, ZENG X L, CHEN Y S. Changes of activities of protective enzymes in sugarcane seedlings and callus under phosphorus[J]. Sugarcane and Canesugar, 2005(2): 15-21. (in Chinese)
- [31] 赵丽萍, 刘家勇, 咎逢刚, 夏红明, 覃伟, 赵培方. 磷对 3 个甘蔗品种(系)根系形态及磷效率的影响[J]. 云南农业大学学报(自然科学), 2016, 31(6): 1120-1126.
- ZHAO L P, LIU J Y, ZAN F G, XIA H M, QIN W, ZHAO P F. Effects of phosphorus on root morphology and phosphorus efficiency of three sugarcane varieties[J]. Journal of Yunnan Agricultural University (Natural Science), 2016, 31(6): 1120-1126. (in Chinese)
- [32] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- LU R K. Soil agrochemical analysis method[M]. Beijing: China Agricultural Publishing House, 2000. (in Chinese)
- [33] 赵丽萍, 刘家勇, 赵培方, 咎逢刚, 赵俊, 姚丽, 杨昆, 李纯佳, 吴才文. 营养液 pH 对甘蔗实生苗生长的影响[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2014, 40(2): 122-126.
- ZHAO L P, LIU J Y, ZHAO P F, ZAN F G, ZHAO J, YAO L, YANG K, LI C J, WU C W. Effects of nutrient solution pH on the growth of different combinations seedlings of sugarcane[J]. Journal of Hunan Agricultural University (Natural Sciences), 2014, 40(2): 122-126. (in Chinese)
- [34] 林启美, 黄德明. 应用酸性磷酸酶进行番茄磷素诊断[J]. 华北农学报, 1991(2): 78-83.
- LIN Q M, HUANG D M. Evaluation of an acid phosphatase assay for detection of phosphorus deficiency in tomato leaves[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 1991(2): 78-83. (in Chinese)
- [35] 金剑, 王光华, 刘晓冰, 陈雪丽, 李兴国. 不同施磷量对大豆苗期根系形态性状的影响[J]. 大豆科学, 2006(4): 360-364.
- JIN J, WANG G H, LIU X B, CHEN X L, LI X G. Effect of different phosphorus regimes on root morphological characteristics of soybean seedling[J]. Soybean Science, 2006(4): 360-364. (in Chinese)
- [36] 柯野, 谢璐, 蓝林, 唐新莲. 低磷胁迫对甘蔗幼苗生长和生理特性的影响[J]. 江苏农业科学, 2019, 47(20): 114-118.
- KE Y, XIE L, LAN L, TANG X L. Effects of low phosphorus stress on growth and physiological characteristics of sugarcane seedlings[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2019, 47(20): 114-118. (in Chinese)
- [37] 刘灵, 廖红, 王秀荣, 严小龙. 不同根构型大豆对低磷的适应性变化及其与磷效率的关系[J]. 中国农业科学, 2008(4): 1089-1099.
- LIU L, LIAO H, WANG X R, YAN X L. Adaptive changes of soybean genotypes with different root architectures to low phosphorus availability as related to phosphorus efficiency[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2008(4): 1089-1099. (in Chinese)
- [38] YANG M, DING G D, SHI L, FENG J, XU F S, MENG J L. Quantitative trait loci for root morphology in response to low phosphorus stress in Brassica napus[J]. Theoretical and Applied Genetics, 2010, 121(1): 181-193.
- [39] 郑超, 李奇伟, 黄振瑞, 敖俊华, 刘可星. 磷水平对不同基因型甘蔗苗期根系性状的影响[J]. 热带农业科学, 2015, 35(2): 1-7.
- ZHENG C, LI Q W, HUANG Z R, AO J H, LIU K X. Effect of phosphorus level on sugarcane root-system traits at its seedling stage[J]. Chinese Journal of Tropical Agriculture, 2015, 35(2): 1-7. (in Chinese)
- [40] 龚丝雨, 梁喜欢, 杨帅强, 张世川, 朱肖文, 刘齐元. 低磷胁迫对不同磷效率基因型烟草苗期生长及生理特征的影响[J]. 核农学报, 2019, 339(6): 1217-1224.
- GONG S Y, LIANG X H, YANG S Q, ZHANG S C, ZHU X W, LIU Q Y. Effect on growth and physiological characteristics of tobacco genotypes with different p-efficiency at seed-

- ling stage under low-phosphorus stress[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2019, 33(6): 1217-1224. (in Chinese)
- [41] 易科, 杨曙, 孔吴俊, 陈迪文, 谢璐, 唐新莲, 黎晓峰, 赵尊康. 基于根系形态及空间分布的甘蔗磷高效吸收特征分析[J]. 江西农业大学学报, 2022, 44(6): 1362-1372.
- YI K, YANG S, KONG W J, CHEN D W, XIE L, TANG X L, LI X F, ZHAO Z K. Analysis of efficient phosphorus absorption characteristic based on root morphology and spatial distribution in sugarcane[J]. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis, 2022, 44(6): 1362-1372. (in Chinese)
- [42] 陈颖慧, 余冰雨, 葛才林, 王泽港. 作物耐低磷机制研究进展[J]. 安徽农业科学, 2024, 52(8): 1-5.
- CHEN Y H, SHE B Y, GE C L, WANG Z G. Research progress on mechanism of low phosphorus tolerance in crops[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2024, 52(8): 1-5. (in Chinese)
- [43] ONANUGA A, JIANG P, ADI S. Effect of phytohormones, phosphorus and potassium on cotton varieties (*Gossypium hirsutum*) root growth and root activity grown in hydroponic nutrient solution[J]. Journal of Agricultural Science, 2012, 4(3): 93.
- [44] 何蓉, 南丽丽, 任孟雨, 郭佳雨, 王利群, 马香香. 25 份紫花苜蓿种质苗期耐低磷评价[J/OL]. 草原与草坪, (2025-05-09) [2025-08-10]. <https://link.cnki.net/urlid/62.1156.s.20250-508.1825.008>.
- HE R, NAN L L, REN M Y, GUO J Y, WANG L Q, MA X X. Evaluation of low phosphorus tolerance in the seedling stage of 25 alfalfa germplasms[J/OL]. Grassland and Turf, (2025-05-09)[2025-08-10]. <https://link.cnki.net/urlid/62.1156.s.20250508.1825.008>. (in Chinese)
- [45] 张丽梅, 郭再华, 张琳, 贺立源. 缺磷对不同耐低磷玉米基因型酸性磷酸酶活性的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(4): 898-910.
- ZHANG L M, GUO Z H, ZHANG L, HE L Y. Effects of phosphate deficiency on acid phosphatase activities of different maize genotypes tolerant to low- p stress[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2015, 21(4): 898-910. (in Chinese)
- [46] HAN M, CHEN Y, LI R, YU M, FU L, LI S, SU J, ZHU B. Root phosphatase activity aligns with the collaboration gradient of the root economics space[J]. New Phytologist, 2022, 234(3): 837-849.