

doi:10.11733/j.issn.1007-0435.2026.05.013

引用格式:廖万奇,汪辉,王沛,等.不同燕麦品种苗期形态、生理对低磷胁迫的响应及耐低磷评价[J].草地学报,2026,34(5):1701–1716

LIAO Wan-qi, WANG Hui, WANG Pei, et al. Low Phosphorus Stress Responses of Seedling Morphology and Physiology to and Evaluation of Low Phosphorus Tolerance of Different Oat Cultivars[J]. Acta Agrestia Sinica, 2026, 34(5):1701–1716

不同燕麦品种苗期形态、生理对低磷胁迫的响应及耐低磷评价

廖万奇¹, 汪辉^{1,2}, 王沛^{1,2}, 陈有军^{1,2}, 周青平^{1,2}, 雷映霞^{1,2*}

(1. 西南民族大学草地资源学院, 四川 成都 610041; 2. 西南民族大学, 四川若尔盖高寒湿地生态系统国家野外科学观测研究站, 四川 成都 610041)

摘要:本研究旨在筛选耐低磷燕麦(*Avena sativa* L.)品种,并探讨其形态生理响应机制。以30个燕麦品种为材料,采用水培法,设置正常磷(1000 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ KH_2PO_4 , CK)和低磷(10 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ KH_2PO_4 , LP)2个处理,21天后测定形态与生理指标,并运用主成分、隶属函数及聚类分析进行综合评价。结果表明:低磷胁迫显著抑制了多数燕麦幼苗地上部生长,但促进了根系发育。生理上,低磷处理导致多数幼苗磷吸收量降低,而磷利用效率显著提高;可溶性糖含量、酸性磷酸酶与硝酸还原酶活性总体上升。通过系统评价,‘魏都蓓5号’(D=0.818)和‘晋燕17号’(D=0.643)被评定为最耐低磷型品种,而‘坝蓓18号’(D=0.341)与‘骏马’(D=0.366)为最敏感品种。本研究结果为耐低磷燕麦品种选育提供了理论依据与材料基础。

关键词:燕麦;低磷胁迫;形态指标;生理响应;耐低磷评价

中图分类号:S332.6

文献标识码:A

文章编号:1007-0435(2026)05-1701-16

Low Phosphorus Stress Responses of Seedling Morphology and Physiology to and Evaluation of Low Phosphorus Tolerance of Different Oat Cultivars

LIAO Wan-qi¹, WANG Hui^{1,2}, WANG Pei^{1,2}, CHEN You-jun^{1,2}, ZHOU Qing-ping^{1,2}, LEI Ying-xia^{1,2*}

(1. College of Grassland Resources, Southwest Minzu University, Chengdu, Sichuan Province 610041, China; 2. Sichuan Zoige Alpine Wetland Ecosystem National Observation and Research Station, Southwest Minzu University, Chengdu, Sichuan Province 610041, China)

Abstract: The aim of this study was to screen low phosphorus-tolerant oat (*Avena sativa* L.) varieties and to investigate their morphophysiological response mechanisms. Thirty oat varieties were used as materials, and two treatments of normal phosphorus (1000 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ KH_2PO_4 , CK) and low phosphorus (10 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ KH_2PO_4 , LP) were set up by hydroponics. Morphological and physiological indexes were measured after 21 days, and principal components, subordinate functions, and cluster analyses were used for the comprehensive evaluation. The results showed that low phosphorus stress significantly inhibited the aboveground growth of most oat seedlings, but promoted root development. Physiologically, low phosphorus treatment led to a decrease in phosphorus uptake and a significant increase in phosphorus utilization efficiency in most seedlings; soluble sugar content, acid phosphatase and nitrate reductase activities generally increased. Through systematic evaluation, ‘Weidu You No. 5’ (D=0.818) and ‘Jin Yan No. 17’ (D=0.643) were identified as the most low-phosphorus-tolerant varieties, whereas ‘Ba You No. 18’ (D=0.341) and ‘Jun Ma’ (D=0.366) were the most sensitive ones. The results of this study provide a theoretical basis and material foundation for the

收稿日期:2025-09-04;修回日期:2025-12-05

基金项目:农业科技重大项目(NK20220402);四川省科技计划面上项目(2024NSFSC0310);中央高校项目(ZYN2025029);西藏自治区科技计划项目(XZ202501ZY0086)资助

作者简介:廖万奇(1998-),男,汉族,四川眉山人,硕士研究生,主要从事牧草育种方向研究,E-mail:191864075@qq.com;*通信作者 Author for correspondence, E-mail:leiyinxia@hotmail.com

selection and breeding of low phosphorus tolerant oat varieties.

Key words: *Avena sativa*; Low phosphorus stress; Morphological index; Physiological response; Low-phosphorus tolerance evaluation

磷是植物生长发育所必需的大量元素,广泛参与核酸、蛋白质及磷脂等生物大分子的合成,并直接或间接调控光合作用、呼吸作用及脂肪代谢等关键生理过程^[1]。尽管土壤中总磷含量丰富,但其中绝大多数磷易与金属离子结合形成难溶性化合物,仅少数以速效磷形式存在($0.1\sim 10.0\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$),可供植物直接吸收^[2]。缺磷会显著抑制植物生长发育并降低生物量^[3],因此在农业生产中常通过增施磷肥以缓解土壤磷匮乏,提高作物产量^[4]。然而,磷肥的过量施用不仅会导致磷以难溶性磷酸盐形态(如 $\text{FePO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$)被固定,还会引起土壤酸化,抑制固氮菌等有益微生物活性;当进入淡水系统的磷浓度超过 $0.02\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,更可能引发水体富营养化与蓝藻暴发,威胁生态安全^[5]。因此,选育磷高效利用作物品种,已成为协调农业生产与生态环境保护的重要途径。近年来,基于形态与生理指标的系统评价,已在多种作物中成功应用于耐低磷种质筛选。例如,李敏等^[6]通过对37个玉米(*Zea mays* L.)品种的综合分析,筛选出3个耐低磷型材料;张景龙等^[7]筛选出了高粱(*Sorghum bicolor* L.)中的耐低磷品种“甜选7”;魏亚宵等^[8]与夏静等^[9]也分别在小麦 *Triticum aestivum* L.)与苜蓿(*Medicago sativa* L.)中筛选出了耐低磷种质。因此,通过多指标综合评价方法,可科学识别作物耐低磷能力,为磷高效育种与农业磷肥减施提供理论依据与技术支持。

燕麦(*Avena sativa* L.)属于禾本科(Poaceae)、燕麦属(*Avena*)的一年生草本植物,根据成熟时外稃是否脱落分为皮燕麦(*A. sativa* L.)和裸燕麦(*A. sativa* spp *nuda* L.),在我国西北、西南、东北及青藏高原等地广泛种植^[10]。其具有生长期短、生物量大、营养价值高等特点,鲜草与青干草均为优质饲草,裸燕麦籽粒亦富含蛋白质与脂肪,可作为粗粮食用^[11]。此外,燕麦具备较强的耐贫瘠、抗旱和抗盐碱能力,在青藏高原等生态脆弱区可作为生态修复的优良草种^[12]。磷素是影响燕麦产量与品质的关键元素,合理施磷对其生长至关重要。然而,传统依赖过量磷肥维持高产的模式,不仅破坏高原脆弱生态系统,也违背绿色农业与可持续发展理念^[13]。因此,在“双减”政策背景下,筛选耐低磷燕麦种质、降低磷肥施用量,对实现燕麦生产的生态

友好型转型具有重要意义。目前,燕麦对低磷胁迫的响应机制研究仍较薄弱,现有工作多集中于田间施肥管理。例如,丛龙丽^[14]通过调控施磷深度与用量,发现最佳组合可显著提高根系与叶片生物量;Liu等^[15]指出微咸水灌溉会改变土壤结构并抑制磷积累;耿小丽等^[16]证实施磷能提升高寒区燕麦的干草与种子产量。由此可见,目前关于燕麦应对低磷胁迫下的形态、生理响应研究,以及对于筛选和评价耐低磷燕麦种质资源的研究相对较少。

为此,本研究通过分析不同燕麦品种在低磷胁迫下的形态与生理指标差异,系统评估其磷利用效率与耐低磷能力,旨在筛选磷高效种质,为燕麦耐低磷育种及可持续生产提供理论依据与材料支撑^[17]。

1 材料与方法

1.1 试验材料

本研究采用30份不同燕麦品种为试验材料,如表1所示。

1.2 试验设计

试验于2022年12月在西南民族大学草地资源学院实验室进行。选取颗粒饱满、大小一致的燕麦种子,使用2%次氯酸钠溶液表面灭菌3~5 min,随后用蒸馏水充分冲洗。将洗净的种子置于铺有两层湿润滤纸的培养皿中,于光照培养箱内进行发芽。培养条件为:16 h光照(22°C)与8 h黑暗(16°C)交替,持续培养5~6 d。期间每日清理霉变或腐烂的种子。待幼苗长至5~6 cm后,选取长势一致的个体,转移至温室中定植。水培容器为 $40\ \text{cm}\times 60\ \text{cm}\times 15\ \text{cm}$ 的水槽,内装有Hoagland营养液,营养液每7天更换一次,并维持pH值为6.0。设置两个磷水平处理:正常磷(CK, $1000\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}\ \text{KH}_2\text{PO}_4$)与低磷(LP, $10\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}\ \text{KH}_2\text{PO}_4$)。为平衡钾离子浓度,在低磷处理中添加 $990\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}\ \text{KCl}$ 。每个燕麦品种于2种磷处理下分别设置3个定植孔(每孔10株),构成3次生物学重复。经21天胁迫处理后,进行样品采集。每个处理随机选取植株,剪取新鲜叶片,每份样品精确称取0.1 g,立即用锡纸包

表 1 供试燕麦材料名称及来源
Table 1 Name and origin of the test oats material

编号 Number	品种 Variety	来源 Source	编号 Number	品种 Variety	来源 Source
1	坝菽 18 号	河北省高寒作物研究所	16	骏马	北京正道生态科技有限公司
	Ba You No. 18	Hebei Alpine Crops Research Institute		Jun Ma	Beijing Rytway Ecological Technology Co., Ltd
2	张菽 8 号	河北省高寒作物研究所	17	莫妮卡	北京百斯特草业有限公司
	Zhang You No. 8	Hebei Alpine Crops Research Institute		Monica	Beijing Best Grass Industry Co., Ltd
3	坝菽 16 号	河北省高寒作物研究所	18	甜燕 70	青海省畜牧兽医科学院
	Ba You No. 16	Hebei Alpine Crops Research Institute		Tian Yan No. 70	Qinghai Academy of Animal Science and Veterinary Medicine
4	晋燕 18 号	山西省农业科学院	19	太阳神	北京正道生态科技有限公司
	Jin Yan No. 18	Shanxi Academy of Agricultural Sciences		Sun God	Beijing Rytway Ecological Technology Co., Ltd
5	白燕 18 号	吉林省农业科学院	20	青海 444	青海省畜牧兽医科学院
	Bai Yan No. 18	Jilin Academy of Agricultural Sciences		Qinghai No. 444	Qinghai Academy of Animal Science and Veterinary Medicine
6	青引 3 号	青海省草原工作站	21	摄政王	北京正道生态科技有限公司
	Qing Yin No. 3	Qinghai Grassland Workstation		Regent	Beijing Rytway Ecological Technology Co., Ltd
7	晋燕 17 号	山西省高寒作物研究所	22	美达	北京正道生态科技有限公司
	Jin Yan No. 17	Shanxi Alpine Crops Research Institute		Mei Da	Beijing Rytway Ecological Technology Co., Ltd
8	张菽 9 号	河北省高寒作物研究所	23	白燕 7 号	吉林省农业科学院
	Zhang You No. 9	Hebei Alpine Crops Research Institute		Bai Yan No. 7	Jilin Academy of Agricultural Sciences
9	魏都菽 5 号	山西省高寒作物研究所	24	领袖	北京正道生态科技有限公司
	Weidu You No. 5	Shanxi Alpine Crops Research Institute		Leader	Beijing Rytway Ecological Technology Co., Ltd
10	蒙燕 1 号	内蒙古农牧业科学院	25	甜燕 1 号	北京佰青源畜牧业科技发展有限公司
	Meng Yan No. 1	Inner Mongolia Academy of Agricultural & Animal Husbandry Sciences		Tian Yan No. 1	Beijing Baiqingyuan Animal Husbandry Science and Technology Development Co., Ltd.
11	青引 1 号	青海省畜牧兽医科学院	26	贝勒	北京正道生态科技有限公司
	Qing Yin No. 1	Qinghai Academy of Animal Science and Veterinary Medicine		Bei Le	Beijing Rytway Ecological Technology Co., Ltd
12	枪手	北京正道生态科技有限公司	27	青海甜燕麦	青海省畜牧兽医科学院
	Qiang Shou	Beijing Rytway Ecological Technology Co., Ltd		Qinghai sweet oat	Qinghai Academy of Animal Science and Veterinary Medicine
13	甜燕 60	青海省畜牧兽医科学院	28	牧王	北京正道生态科技有限公司
	Tian Yan No. 60	Qinghai Academy of Animal Science and Veterinary Medicine		Mu Wang	Beijing Rytway Ecological Technology Co., Ltd
14	青燕 2 号	青海省畜牧兽医科学院	29	甜燕 2 号	北京佰青源畜牧业科技发展有限公司
	Qing Yan No. 2	Qinghai Academy of Animal Science and Veterinary Medicine		Tian Yan No. 2	Beijing Baiqingyuan Animal Husbandry Science and Technology Development Co., Ltd.
15	边锋	郑州华丰草业科技有限公司	30	青燕 1 号	青海省畜牧兽医科学院
	Bian Feng	Zhenzhou Huafeng grass industry Technology Co., Ltd.		Qing Yan No. 1	Qinghai Academy of Animal Science and Veterinary Medicine

裹,投入液氮速冻,随后转移至-80℃超低温冰箱保存,用于后续磷代谢相关酶活性及渗透调节物质含量的测定。每个处理共设置 6 个样品重复。

1.3 测定指标及方法

1.3.1 形态指标 将燕麦从水培箱中完整取出,取 6 个生物学重复。用卷尺测量其株高(Plant height, PH)、根长(Root length, RL),用根系扫描仪(GXY-A-植物根系扫描仪,上海泽泉科技股份有限公司)测定总根长(Total root length, TRL)、总根表面积(Total root surface area, TRS)、总根体积(Total root volume, TRV)。随后从茎基部剪开,再进行地上部分鲜重(Aboveground fresh weight, AFW)和地下部分鲜重(Underground fresh weight, UFW)测定,而后将植株鲜样放入 105℃的烘箱中杀

青 0.5 h,再在 65℃的环境中烘干至恒重。取出测定地上部分干重(Aboveground dry weight, ADW)和地下部分干重(Underground dry weight, UDW),并计算根冠比(Root-shoot ratio, RSR)(根冠比=地下部分干重/地上部分干重)^[18]。

1.3.2 生理指标 (1)全磷含量测定和磷利用效率计算:采用硫酸-过氧化氢消化法在流动分析仪(AA3,德国)中测定植株的全磷素含量(Total phosphorus content, TPC)。磷素累积量(Phosphorus accumulation, PA)=地上部干重(ADW)×全磷含量(TPC);磷素利用效率(Phosphorus use efficiency, PE)=地上部干重(ADW)/磷素累积量(PA)。

(2)光合参数:在光照均匀一致的环境中,于低磷胁迫处理第 19 天(胁迫结束前 48 h 内)的上午 9:00-11:00,

使用 Li-6800 光合作用全自动测量系统(美国 LI-COR 公司)测定叶片光合指标,主要测定净光合速率(Net photosynthetic rate, Pn)、蒸腾速率(Evapotranspiration rate, Tr)、胞间 CO₂ 浓度(Intercellular CO₂ concentration, Ci)和气孔导度(Stomatal conductance, Gs),重复 6 次并计算平均值;叶绿素 a (Chlorophyll a, Chla)和叶绿素 b (Chlorophyll b, Chlb)含量的测定采用荧光分光光度法。

(3)磷代谢相关酶活性测定:参考张玉霞等^[19]的方法,测定硝酸还原酶(Nitrate Reductase, NR)、酸性磷酸酶(Acid phosphatase, ACP)活性。

(4)活性氧(Reactive oxygen species, ROS)含量测定:超氧阴离子(Superoxide anion, O₂⁻)含量和过氧化氢(Hydrogen peroxide, H₂O₂)含量的测定均采用微量法测定(苏州科铭生物技术有限公司 www.cominbio.com)^[20]。

(5)渗透调节物质指标测定:可溶性糖(Soluble sugar, SS)及可溶性蛋白(Soluble protein, SP)含量分别用蒽酮比色法、考马斯亮蓝法测定。

(6)游离脯氨酸(Proline, Pro)含量采用茚三酮显色法测定。

(7)丙二醛(Malondialdehyde, MDA)含量测定:采用硫代巴比妥酸法测定(苏州科铭生物技术有限公司 www.cominbio.com)。

1.4 数据分析

用 Excel 2019 对数据进行整理,用 SPSS 26.0 及 Origin 2024 软件对数据进行方差分析、相关性分析、主成分分析(Principal component analysis, PCA)以及聚类分析。分别计算株高、根长、总根长、总根表面积、总根体积、地上部和地下部的干重和鲜重以及根冠比的耐低磷系数^[21]。采用隶属函数法对燕麦苗期进行耐低磷综合评价,具体为:

$$R_{ij} = X_j / X_{ck, j} \quad (1)$$

$$F_x = a_{1j}R_{1j} + a_{2j}R_{2j} + \dots + a_{ij}R_{ij}, i, j = 1, 2, 3, \dots, n \quad (2)$$

$$Y_{ij} = (\mu_{ij} - \mu_{j, \min}) / (\mu_{j, \max} - \mu_{j, \min}) \quad (3)$$

$$P_j = W_j / \sum W_j \quad (4)$$

$$D = \sum (Y_{ij} \times P_j) \quad (5)$$

式中: R_{ij} 为第 i 个品种第 j 个评价指标相对值(下称耐低磷系数); X_j 、 $X_{ck, j}$ 分别表示低磷、正常磷下某性状测定值; F_x 表示第 j 个综合指标值, a_{ij} 表示各单一指标的特征值所对应的特征向量, R_{ij} 为各单项指标的耐低磷系数。 Y_{ij} 表示第 i 个品种第 j 个评

价指标相对值的隶属函数值; $\mu_{j, \min}$ 、 $\mu_{j, \max}$ 分别表示第 j 个评价指标相对值的最小值、最大值; P_j 、 W_j 分别表示第 j 个评价指标的权重、方差贡献率; D 为在低磷胁迫下各品种耐低磷能力的综合评价值^[22]。

2 结果与分析

2.1 低磷胁迫下各燕麦品种形态的耐低磷响应分析

耐低磷系数为相对值,相对值可消除材料间固有的差异,能准确反映不同材料的耐低磷性^[23]。结果显示:供试燕麦品种的耐低磷系数变化范围分别是株高 0.673~1.046、根长 0.803~1.383、总根长 0.205~2.118、总根表面积 0.200~2.019、总根体积 0.196~1.922、地上部鲜重 0.233~1.149、地下部鲜重 0.407~2.620、地上部干重 0.371~2.174、地下部干重 0.572~2.135、根冠比的 0.784~2.806。其中,仅‘白燕 18 号’‘甜燕 70’和‘甜燕 1 号’的株高系数大于 1。根系各项系数均小于 1 的敏感品种为‘坝蓂 18 号’‘晋燕 18 号’‘骏马’和‘白燕 7 号’。在生物量方面,‘美达’在多个指标上表现突出(地上部鲜重 1.149、干重 1.255;地下部鲜重 2.209)。“甜燕 2 号”的地下部鲜重系数最高(2.620),“白燕 18 号”的地下部干重系数最大(2.136)。“青海 444”“甜燕 1 号”等品种的根冠比系数小于 1(表 2)。

2.2 低磷胁迫对燕麦生理指标的影响

2.2.1 低磷胁迫对燕麦磷素利用与光合相关指标的影响 本研究检测了低磷胁迫下燕麦品种的磷素利用与光合生理响应。在磷素利用方面,所有供试品种的地上部全磷含量与磷积累量均显著降低,而磷利用效率则普遍大幅提升。具体而言,全磷含量降幅最大的品种为‘白燕 7 号’(87.19%)、‘坝蓂 18 号’(85.78%)和‘甜燕 2 号’(83.41%)。磷积累量下降最显著的是‘摄政王’(92.71%)、‘坝蓂 18 号’(91.25%)和‘坝蓂 16 号’(91.21%)。与之相对,‘白燕 7 号’‘坝蓂 18 号’和‘晋燕 17 号’的磷利用效率增幅突出,分别提高了 681.22%、605.38% 和 511.71%(表 3)。

在光合特性方面,品种间响应差异显著。净光合速率仅‘魏都蓂 5 号’上升 41.17%,其余均下降,其中‘贝勒’(-81.62%)与‘坝蓂 18 号’(-80.48%)降幅最大。部分品种的气体交换参数在胁迫下有所上升,如‘蒙燕 1 号’‘枪手’等 9 个品

表 2 低磷胁迫下不同燕麦品种形态指标的耐低磷系数

Table 2 Low phosphorus tolerant coefficient of each trait of different oats varieties under low phosphorus stress

品种 Variety	株高 Plant height	根长 Root length	总根长 Total root length	总根表面积 Total root surface area	总根体积 Total root volume	地上部鲜重 above ground fresh weight	地下部鲜重 Underground fresh weight	地上部干重 above ground dry weight	地下部干重 Underground dry weight	根冠比 Root-shoot ratio
1	0.829	0.803	0.205	0.200	0.196	0.500	0.536	0.616	1.064	1.728
2	0.914	1.066	1.364	1.063	0.829	0.524	1.337	0.822	1.772	2.156
3	0.851	1.065	0.983	0.868	0.765	0.396	0.357	0.506	0.894	1.767
4	0.832	0.931	0.661	0.685	0.727	0.394	0.334	0.654	1.265	1.936
5	1.087	1.026	1.376	1.153	0.965	0.873	1.277	0.840	2.136	0.700
6	0.689	1.045	0.764	0.703	0.649	0.331	0.407	0.514	0.911	1.771
7	0.908	1.056	2.205	1.788	1.443	0.626	0.664	0.780	0.945	1.212
8	0.785	1.059	1.290	1.259	1.229	0.455	1.454	0.679	1.904	2.806
9	0.910	1.360	1.605	1.190	0.880	0.644	1.053	0.778	1.666	2.140
10	0.673	0.927	1.834	1.482	1.196	0.233	0.451	0.371	0.758	2.043
11	0.807	0.784	1.814	1.077	0.639	0.599	0.640	0.722	1.069	1.480
12	0.779	0.939	1.375	1.113	0.903	0.396	0.983	0.653	1.107	1.694
13	0.893	0.889	1.388	1.158	0.962	0.533	0.871	0.723	1.336	1.848
14	0.727	1.218	1.033	0.919	0.815	0.390	0.981	0.585	1.429	2.442
15	0.970	0.902	2.118	2.019	1.922	0.689	1.057	0.946	1.511	1.597
16	0.925	0.830	0.444	0.334	0.251	0.425	0.850	0.598	0.998	1.668
17	0.897	1.274	0.828	0.784	0.754	0.503	0.855	0.574	1.075	1.874
18	1.016	1.036	0.915	0.753	0.626	0.860	1.369	1.058	1.426	1.348
19	0.971	0.838	1.822	1.641	1.483	0.843	1.366	1.043	1.463	1.403
20	0.775	0.951	1.530	1.042	0.712	0.475	0.887	0.695	0.594	0.854
21	0.836	1.114	1.300	1.215	1.150	0.321	0.756	0.428	0.767	1.793
22	0.935	1.433	1.127	1.035	0.940	1.149	2.209	1.255	1.774	1.414
23	0.903	0.972	0.569	0.488	0.419	0.714	1.397	0.739	1.131	1.530
24	0.930	1.173	1.253	1.169	1.088	0.783	1.140	0.969	1.109	1.144
25	1.046	1.140	0.686	0.639	0.597	0.673	0.782	0.706	0.572	0.810
26	0.944	1.375	0.875	0.925	0.973	0.937	0.979	2.174	1.703	0.784
27	0.899	1.330	1.451	1.237	1.045	0.733	1.901	0.962	1.896	1.971
28	0.879	1.365	1.560	1.359	1.174	0.620	1.378	0.782	1.560	1.994
29	0.858	1.076	1.272	0.987	0.755	0.658	2.620	0.822	2.135	2.599
30	0.771	1.383	1.828	1.423	1.109	1.423	1.109	0.559	1.498	0.751

种的胞间 CO₂ 浓度,‘张筱 9 号’‘晋燕 17 号’与‘魏都 莜 5 号’的蒸腾速率,以及‘魏都莜 5 号’的气孔导度。叶绿素含量变化呈现明显基因型差异。其中,‘晋燕 17 号’与‘张筱 9 号’的叶绿素 a、b 含量均表现上升;而‘牧王’‘青燕 2 号’和‘甜燕 70’的叶绿素 a 与 b 含量则均显著下降(表 4)。

表 4 低磷胁迫下不同燕麦品种各光合指标的变化

Table 4 Changes in various photosynthetic indexes of different oat varieties under low-P stress

品种 Cultivar	净光合速率 Pn/(mol·m ⁻² ·h ⁻¹)		变化趋势 Changing trends/%	胞间 CO ₂ 浓度 Ci/(μmol·m ⁻² ·s ⁻¹)		变化趋势 Changing trends/%	蒸腾速率 Tr/(mmol·m ⁻² ·s ⁻¹)		变化趋势 Changing trends/%
	CK	LP		CK	LP		CK	LP	
1	11.27±0.12 ^a	2.20±0.09 ^b	-80.48	281.23±1.94 ^a	210.18±3.73 ^b	-25.26	14.76±0.10 ^a	4.19±0.18 ^b	-71.61
2	12.27±0.14 ^a	10.07±0.22 ^a	-17.93	292.45±0.84 ^a	256.53±13.72 ^b	-12.28	9.94±0.11 ^a	11.57±1.17 ^b	16.40
3	12.51±0.22 ^a	3.91±0.08 ^b	-68.75	274.37±2.01 ^a	273.52±1.00 ^a	-0.31	16.30±0.02 ^a	4.84±0.07 ^b	-70.31
4	11.57±0.37 ^a	5.92±0.31 ^b	-48.83	290.06±2.62 ^a	253.21±9.13 ^b	-12.70	9.98±0.19 ^a	6.57±0.23 ^b	-34.17
5	12.50±0.26 ^a	0.87±0.05 ^b	-93.04	293.98±1.53 ^a	204.96±17.07 ^b	-30.28	14.74±0.06 ^a	1.74±0.21 ^b	-88.20
6	7.17±0.05 ^a	3.10±0.06 ^b	-56.76	246.73±2.20 ^a	239.73±15.24 ^a	-2.84	10.99±0.10 ^a	5.31±0.60 ^b	-51.68
7	7.23±0.12 ^a	5.56±0.28 ^b	-23.10	285.18±9.29 ^a	250.11±4.18 ^b	-12.30	6.25±0.56 ^a	6.38±0.07 ^a	2.08
8	9.64±0.23 ^a	6.74±0.11 ^b	-30.08	291.09±15.90 ^a	257.70±5.02 ^b	-11.47	8.69±1.35 ^a	7.46±0.20 ^a	-14.15
9	8.38±0.17 ^a	11.83±0.40 ^b	41.17	313.23±2.29 ^a	287.89±1.20 ^b	-8.09	4.81±0.04 ^a	10.33±0.05 ^b	114.76
10	12.07±0.30 ^a	8.66±0.41 ^b	-28.25	266.27±3.58 ^a	267.12±4.11 ^a	0.32	12.76±0.19 ^a	8.57±0.12 ^b	-32.84
11	15.20±0.38 ^a	4.50±0.09 ^b	-70.39	277.64±2.92 ^a	219.00±22.69 ^b	-21.12	16.21±0.25 ^a	5.74±0.47 ^b	-64.59
12	15.22±0.30 ^a	3.10±0.28 ^b	-79.63	278.55±1.46 ^a	284.09±11.62 ^a	1.99	15.36±0.06 ^a	2.27±0.08 ^b	-85.22
13	12.59±0.29 ^a	7.18±0.18 ^b	-42.97	264.24±5.33 ^a	321.84±1.61 ^b	21.80	15.11±0.23 ^a	4.07±0.12 ^b	-73.06
14	11.66±0.16 ^a	6.17±0.05 ^b	-47.08	247.61±4.76 ^a	266.53±2.70 ^b	7.64	18.5±0.16 ^a	8.42±0.20 ^b	-54.49

续表 4

品种 Cultivar	净光合速率		变化趋势 Changing trends/%	胞间 CO ₂ 浓度		变化趋势 Changing trends/%	蒸腾速率		变化趋势 Changing trends/%
	Pn/(mol·m ⁻² ·h ⁻¹)			Ci/(μmol·m ⁻² ·s ⁻¹)			Tr/(mmol·m ⁻² ·s ⁻¹)		
	CK	LP		CK	LP		CK	LP	
15	8.42±0.28 ^a	5.42±0.07 ^b	-35.63	244.59±2.06 ^a	264.56±4.00 ^b	8.16	10.54±0.10 ^a	5.01±0.10 ^b	-52.47
16	9.87±0.12 ^a	2.20±0.19 ^b	-77.71	250.25±0.92 ^a	207.49±13.67 ^b	-17.09	15.70±0.13 ^a	4.48±0.54 ^b	-71.46
17	12.05±0.09 ^a	4.59±0.12 ^b	-61.91	266.81±4.80 ^a	250.61±4.66 ^b	-6.07	16.24±0.27 ^a	7.07±0.47 ^b	-56.47
18	13.51±0.29 ^a	4.04±0.03 ^b	-70.10	274.42±0.46 ^a	287.15±5.73 ^b	4.64	13.95±0.06 ^a	3.50±0.14 ^b	-74.91
19	8.45±0.45 ^a	5.16±0.25 ^b	-38.93	275.55±1.65 ^a	310.70±2.23 ^b	12.76	8.66±0.27 ^a	3.29±0.02 ^b	-62.01
20	11.29±0.22 ^a	8.94±0.10 ^b	-20.81	258.79±0.67 ^a	306.35±1.90 ^b	18.38	13.04±0.13 ^a	6.25±0.09 ^b	-52.07
21	18.20±0.16 ^a	13.22±0.06 ^b	-27.36	303.00±2.37 ^a	291.26±0.54 ^a	-3.87	16.23±0.34 ^a	12.50±0.12 ^b	-22.98
22	14.57±0.22 ^a	6.86±0.12 ^b	-52.92	288.67±0.32 ^a	246.28±7.54 ^b	-14.68	13.49±0.11 ^a	8.41±0.51 ^b	-37.66
23	13.59±0.32 ^a	6.97±0.26 ^b	-48.71	279.15±2.03 ^a	299.64±5.55 ^b	7.34	14.78±0.18 ^a	5.66±0.29 ^b	-61.71
24	16.20±0.41 ^a	7.61±0.15 ^b	-53.02	294.60±2.89 ^a	289.53±6.72 ^a	-1.72	15.10±0.30 ^a	5.84±0.39 ^b	-61.32
25	12.45±0.11 ^a	7.07±0.29 ^b	-43.21	285.70±4.57 ^a	261.64±7.82 ^b	-8.42	12.57±0.26 ^a	7.25±0.48 ^b	-42.32
26	14.80±0.20 ^a	2.72±0.02 ^b	-81.62	271.49±2.88 ^a	225.69±9.44 ^b	-16.87	20.63±0.18 ^a	4.65±0.21 ^b	-77.46
27	17.70±0.06 ^a	4.03±0.24 ^b	-77.23	302.31±0.71 ^a	212.94±28.38 ^b	-29.56	13.50±0.28 ^a	6.22±1.13 ^b	-53.93
28	13.13±0.64 ^a	3.79±0.12 ^b	-71.13	266.99±4.72 ^a	231.00±5.94 ^b	-13.48	19.36±0.34 ^a	5.98±0.11 ^b	-69.11
29	10.04±0.13 ^a	3.15±0.30 ^b	-68.63	295.60±2.42 ^a	252.91±6.16 ^b	-14.44	11.15±0.16 ^a	4.86±0.46 ^b	-56.41
30	16.30±0.32 ^a	4.80±0.96 ^b	-70.55	280.07±2.96 ^a	248.46±34.83 ^b	-11.29	16.21±0.43 ^a	5.73±1.30 ^b	-64.65

品种 Cultivar	气孔导度		变化趋势 Changing trends/%	叶绿素 a 含量		变化趋势 Changing trends/%	叶绿素 b 含量		变化趋势 Changing trends/%
	Gs/(mol·m ⁻² ·s ⁻¹)			Chla/(mg·g ⁻¹)			Chlb/(mg·g ⁻¹)		
	CK	LP		CK	LP		CK	LP	
1	0.22±0.00 ^a	0.04±0.00 ^b	-81.82	2.45±0.67 ^a	1.56±0.36 ^b	-36.47	0.71±0.18 ^a	0.46±0.11 ^b	-34.73
2	0.18±0.00 ^a	0.15±0.01 ^a	-16.67	1.87±0.18 ^a	1.61±0.50 ^a	-14.00	0.63±0.03 ^a	0.62±0.22 ^a	-2.67
3	0.23±0.00 ^a	0.07±0.00 ^b	-69.57	2.33±0.42 ^a	1.94±0.36 ^b	-16.63	0.93±0.15 ^a	0.64±0.15 ^b	-31.75
4	0.17±0.00 ^a	0.08±0.00 ^b	-52.94	1.96±0.27 ^a	1.65±0.35 ^a	-15.93	0.70±0.10 ^a	0.81±0.30 ^b	15.62
5	0.25±0.00 ^a	0.02±0.00 ^b	-92.00	1.65±0.28 ^a	1.74±0.11 ^a	5.84	0.54±0.09 ^a	0.54±0.04 ^a	0.36
6	0.12±0.00 ^a	0.06±0.00 ^b	-50.00	2.21±0.39 ^a	1.53±0.27 ^b	-30.85	0.77±0.15 ^a	0.48±0.10 ^b	-36.70
7	0.10±0.00 ^a	0.08±0.00 ^a	-20.00	1.32±0.12 ^a	1.83±0.36 ^b	38.82	0.41±0.05 ^a	0.69±0.16 ^b	66.37
8	0.15±0.01 ^a	0.09±0.00 ^b	-40.00	1.51±0.72 ^a	2.40±0.77 ^b	59.22	0.51±0.27 ^a	0.78±0.26 ^b	52.49
9	0.11±0.00 ^a	0.17±0.00 ^b	54.55	1.72±0.30 ^a	1.75±0.13 ^a	1.36	0.58±0.15 ^a	0.64±0.05 ^a	10.79
10	0.18±0.00 ^a	0.12±0.01 ^b	-33.33	2.00±1.73 ^a	1.22±0.27 ^b	-39.37	0.42±0.55 ^a	0.40±0.09 ^a	-6.80
11	0.25±0.00 ^a	0.06±0.00 ^b	-76.00	1.60±0.22 ^a	1.31±0.42 ^b	-18.50	0.58±0.15 ^a	0.43±0.17 ^b	-25.13
12	0.24±0.00 ^a	0.04±0.00 ^b	-83.33	1.56±0.54 ^a	1.44±1.01 ^a	-7.65	0.50±0.17 ^a	0.58±0.41 ^a	15.35
13	0.21±0.01 ^a	0.10±0.00 ^b	-52.38	1.13±0.13 ^a	1.28±0.18 ^a	14.15	0.38±0.06 ^a	0.44±0.06 ^a	17.53
14	0.21±0.01 ^a	0.11±0.00 ^b	-47.62	1.94±0.40 ^a	1.16±0.29 ^b	-39.96	0.96±0.28 ^a	0.35±0.09 ^b	-63.93
15	0.12±0.00 ^a	0.07±0.00 ^b	-41.67	1.85±0.31 ^a	1.82±0.20 ^a	-1.82	0.71±0.18 ^a	0.75±0.15 ^a	6.35
16	0.18±0.00 ^a	0.04±0.00 ^b	-77.78	1.83±0.13 ^a	1.25±0.36 ^b	-31.68	0.64±0.06 ^a	0.41±0.15 ^b	-36.90
17	0.22±0.01 ^a	0.08±0.00 ^b	-63.64	2.02±0.23 ^a	1.90±0.29 ^a	-6.20	0.66±0.11 ^a	0.64±0.16 ^a	-2.73
18	0.21±0.00 ^a	0.06±0.00 ^b	-71.43	1.72±0.39 ^a	0.97±0.12 ^b	-43.71	0.64±0.13 ^a	0.33±0.07 ^b	-48.49
19	0.13±0.01 ^a	0.07±0.00 ^b	-46.15	1.49±0.29 ^a	1.18±0.13 ^a	-20.63	0.50±0.09 ^a	0.38±0.07 ^b	-23.85
20	0.17±0.00 ^a	0.13±0.00 ^a	-23.53	1.64±0.19 ^a	1.02±0.18 ^b	-37.62	0.65±0.13 ^a	0.35±0.08 ^b	-46.72
21	0.33±0.00 ^a	0.22±0.00 ^b	-33.33	1.28±0.31 ^a	1.46±0.42 ^a	14.01	0.40±0.10 ^a	0.53±0.21 ^b	32.71
22	0.23±0.00 ^a	0.10±0.00 ^b	-56.52	1.97±0.15 ^a	2.03±0.33 ^a	2.86	0.63±0.09 ^a	0.77±0.10 ^a	22.42
23	0.23±0.00 ^a	0.11±0.00 ^b	-52.17	1.75±0.37 ^a	2.23±0.17 ^b	27.19	0.72±0.24 ^a	0.90±0.19 ^b	25.47
24	0.28±0.00 ^a	0.10±0.00 ^b	-64.29	1.70±0.34 ^a	1.81±0.54 ^a	6.69	0.65±0.11 ^a	0.76±0.31 ^b	17.22
25	0.21±0.00 ^a	0.09±0.00 ^b	-57.14	1.74±0.35 ^a	1.88±0.32 ^a	7.87	0.59±0.12 ^a	0.75±0.15 ^b	27.51
26	0.29±0.01 ^a	0.05±0.00 ^b	-82.76	1.75±0.56 ^a	2.12±0.21 ^b	21.03	0.64±0.24 ^a	0.67±0.06 ^a	5.06
27	0.27±0.00 ^a	0.06±0.00 ^b	-77.78	1.72±0.21 ^a	1.33±0.06 ^b	-22.95	0.73±0.23 ^a	0.43±0.01 ^b	-40.59
28	0.26±0.02 ^a	0.06±0.00 ^b	-76.92	1.99±0.34 ^a	0.99±0.50 ^b	-50.42	0.76±0.13 ^a	0.33±0.20 ^b	-56.83
29	0.19±0.00 ^a	0.06±0.01 ^b	-68.42	1.88±0.38 ^a	1.20±0.53 ^b	-36.36	0.61±0.16 ^a	0.36±0.18 ^b	-41.05
30	0.26±0.00 ^a	0.07±0.01 ^b	-81.82	2.65±2.19 ^a	1.74±0.30 ^b	-34.35	0.46±0.75 ^a	0.60±0.13 ^a	29.39

表 3 低磷胁迫下不同燕麦品种磷相关指标及其变化趋势

Table 3 Phosphorus-Related indicators and their trends among different oat varieties under low phosphorus stress

品种 Cultivar	全磷含量 TPC/(mg·g ⁻¹)		变化趋势 Changing trends/%	磷积累量 PA/mg		变化趋势 Changing trends/%	磷利用率 PE/%		变化趋势 Changing trends/%
	CK	LP		CK	LP		CK	LP	
1	9.28±0.04 ^a	1.32±0.10 ^b	-85.78	0.84±0.00 ^a	0.07±0.01 ^b	-91.25	0.11±0.00 ^a	0.76±0.06 ^b	605.38
2	6.09±0.75 ^a	1.54±0.64 ^b	-74.77	0.93±0.11 ^a	0.19±0.08 ^b	-79.26	0.17±0.02 ^a	0.71±0.3 ^b	331.12
3	9.16±0.02 ^a	1.59±0.07 ^b	-82.63	1.35±0.00 ^a	0.12±0.01 ^b	-91.21	0.11±0.00 ^a	0.63±0.03 ^b	476.19
4	8.46±0.00 ^a	2.04±0.10 ^b	-75.85	1.95±0.00 ^a	0.31±0.02 ^b	-84.22	0.12±0.00 ^a	0.49±0.02 ^b	314.64
5	8.98±0.02 ^a	1.55±0.03 ^b	-82.80	1.13±0.00 ^a	0.60±0.01 ^b	-47.49	0.11±0.00 ^a	0.65±0.01 ^b	481.67
6	7.99±0.09 ^a	1.75±0.03 ^b	-78.15	1.38±0.02 ^a	0.16±0.00 ^b	-88.77	0.13±0.00 ^a	0.57±0.01 ^b	357.83
7	8.25±0.26 ^a	1.48±0.62 ^b	-82.09	1.81±0.06 ^a	0.25±0.11 ^b	-86.03	0.12±0.00 ^a	0.74±0.31 ^b	511.71
8	8.49±0.08 ^a	1.96±0.02 ^b	-76.89	1.64±0.01 ^a	0.26±0.00 ^b	-84.32	0.12±0.00 ^a	0.51±0.00 ^b	332.68
9	8.13±0.05 ^a	1.38±0.00 ^b	-82.99	1.26±0.01 ^a	0.17±0.00 ^b	-86.76	0.12±0.00 ^a	0.72±0.00 ^b	487.57
10	2.90±0.86 ^a	1.66±0.13 ^b	-42.64	1.07±0.32 ^a	0.23±0.02 ^b	-78.70	0.36±0.11 ^a	0.60±0.05 ^b	67.15
11	9.75±0.06 ^a	1.86±0.07 ^b	-80.90	2.88±0.02 ^a	0.40±0.01 ^b	-86.21	0.10±0.00 ^a	0.54±0.02 ^b	424.07
12	8.00±0.06 ^a	1.94±0.12 ^b	-75.78	1.60±0.01 ^a	0.25±0.02 ^b	-84.18	0.12±0.00 ^a	0.52±0.03 ^b	313.85
13	9.15±0.14 ^a	2.47±0.04 ^b	-72.99	2.15±0.03 ^a	0.42±0.01 ^b	-80.47	0.11±0.00 ^a	0.40±0.01 ^b	270.17
14	8.10±0.05 ^a	1.75±0.07 ^b	-78.37	2.91±0.02 ^a	0.37±0.02 ^b	-87.34	0.12±0.00 ^a	0.57±0.02 ^b	362.80
15	9.04±0.07 ^a	1.59±0.08 ^b	-82.45	1.35±0.01 ^a	0.22±0.01 ^b	-83.39	0.11±0.00 ^a	0.63±0.03 ^b	470.55
16	7.80±0.24 ^a	1.55±0.06 ^b	-80.09	1.22±0.04 ^a	0.15±0.01 ^b	-88.08	0.13±0.00 ^a	0.64±0.03 ^b	402.50
17	6.33±4.78 ^a	1.44±0.08 ^b	-77.25	1.05±0.80 ^a	0.14±0.01 ^b	-86.94	0.22±0.17 ^a	0.70±0.04 ^b	214.48
18	8.60±0.98 ^a	1.72±0.03 ^b	-79.95	1.14±0.13 ^a	0.24±0.00 ^b	-78.79	0.12±0.01 ^a	0.58±0.01 ^b	395.64
19	3.65±0.13 ^a	2.93±0.02 ^b	-19.72	0.64±0.02 ^a	0.53±0.00 ^a	-16.27	0.27±0.01 ^a	0.34±0.00 ^b	24.47
20	7.33±0.26 ^a	1.55±0.10 ^b	-78.84	2.50±0.09 ^a	0.37±0.02 ^b	-85.29	0.14±0.00 ^a	0.65±0.04 ^b	373.21
21	10.17±0.19 ^a	1.73±0.03 ^b	-82.96	2.84±0.05 ^a	0.21±0.00 ^b	-92.71	0.10±0.00 ^a	0.58±0.01 ^b	486.69
22	3.20±0.12 ^a	1.20±0.15 ^b	-62.56	0.45±0.02 ^a	0.21±0.03 ^a	-52.99	0.31±0.01 ^a	0.84±0.11 ^b	169.16
23	9.39±0.16 ^a	1.20±0.04 ^b	-87.19	2.10±0.04 ^a	0.20±0.01 ^b	-90.54	0.11±0.00 ^a	0.83±0.03 ^b	681.22
24	6.30±4.51 ^a	1.68±0.07 ^b	-73.40	1.11±0.80 ^a	0.29±0.01 ^b	-74.23	0.21±0.15 ^a	0.60±0.02 ^b	179.73
25	8.00±0.15 ^a	1.83±0.05 ^b	-77.07	2.17±0.04 ^a	0.35±0.01 ^b	-83.81	0.13±0.00 ^a	0.55±0.01 ^b	336.32
26	8.83±0.02 ^a	1.67±0.05 ^b	-81.12	2.37±0.01 ^a	0.97±0.03 ^b	-58.95	0.11±0.00 ^a	0.60±0.02 ^b	429.86
27	9.80±0.17 ^a	1.65±0.04 ^b	-83.20	1.79±0.03 ^a	0.29±0.01 ^b	-83.84	0.10±0.00 ^a	0.61±0.01 ^b	495.00
28	3.13±0.14 ^a	1.79±0.02 ^b	-42.96	1.19±0.05 ^a	0.53±0.01 ^b	-55.36	0.32±0.01 ^a	0.56±0.01 ^b	75.14
29	8.92±0.08 ^a	1.48±0.06 ^b	-83.41	2.05±0.02 ^a	0.28±0.01 ^b	-86.37	0.11±0.00 ^a	0.68±0.03 ^b	503.48
30	8.38±0.07 ^a	1.86±0.03 ^b	-77.79	2.23±0.02 ^a	0.37±0.01 ^b	-83.33	0.12±0.00 ^a	0.54±0.01 ^b	350.21

注: CK为对照, LP为低磷处理, 不同小写字母代表同一品种在2种磷浓度处理下差异显著性, $P<0.05$, 表中变化趋势为低磷数据与全磷数据的差值/全磷数据, 下同

Note: CK is the control, LP is the low phosphorus treatment, different lowercase letters represent the significance of the difference between the same variety under the 2 phosphorus concentration treatments, $P<0.05$, the trend in the table is the difference between the low phosphorus data and the whole phosphorus data/whole phosphorus data, the same as below

2.2.2 低磷胁迫下燕麦各品种磷代谢相关酶活性与活性氧含量变化 在低磷胁迫下, 与CK相比, 供试燕麦大多数品种的ACP活性呈现不同程度的上升趋势(图1A), 其中‘甜燕70’增幅最大(+380.81%), 其次为‘甜燕60’(+86.14%)。‘坝莜18号’‘张莜9号’等8个品种的ACP活性有所下降, 以‘坝莜18号’降幅最显著(-35.45%)。NR活性多数上升(图1B), 以‘青海甜燕麦’(+280.71%)、‘青引3号’(+276.56%)和‘晋燕17号’(+184.11%)增幅最大。仅‘坝莜16号’‘青燕2号’和‘甜燕1号’的NR活性下降, 其中‘青燕2号’降幅为-56.90%。

与CK处理相比, 所有供试燕麦大多数品种的 O_2^- 含量呈现上升趋势(图1C), ‘晋燕18号’(+189.55%)、‘枪手’(+169.07%)和‘蒙燕1号’(+158.64%)增幅最高; 而‘坝莜18号’‘青海444’等7个品种的含量下降, 其中‘青海444’降幅最大(-71.13%)。大多数品种的 H_2O_2 含量变化呈上升趋势(图1D), ‘太阳神’(+269.01%)、‘张莜9号’(+262.56%)和‘青海444’(+249.67%)增幅最为显著; 仅‘牧王’‘甜燕2号’等少数品种含量略有下降。

2.2.3 渗透调节物质、脯氨酸与丙二醛含量在低磷胁迫下的变化 在低磷胁迫下, SS含量普遍显著

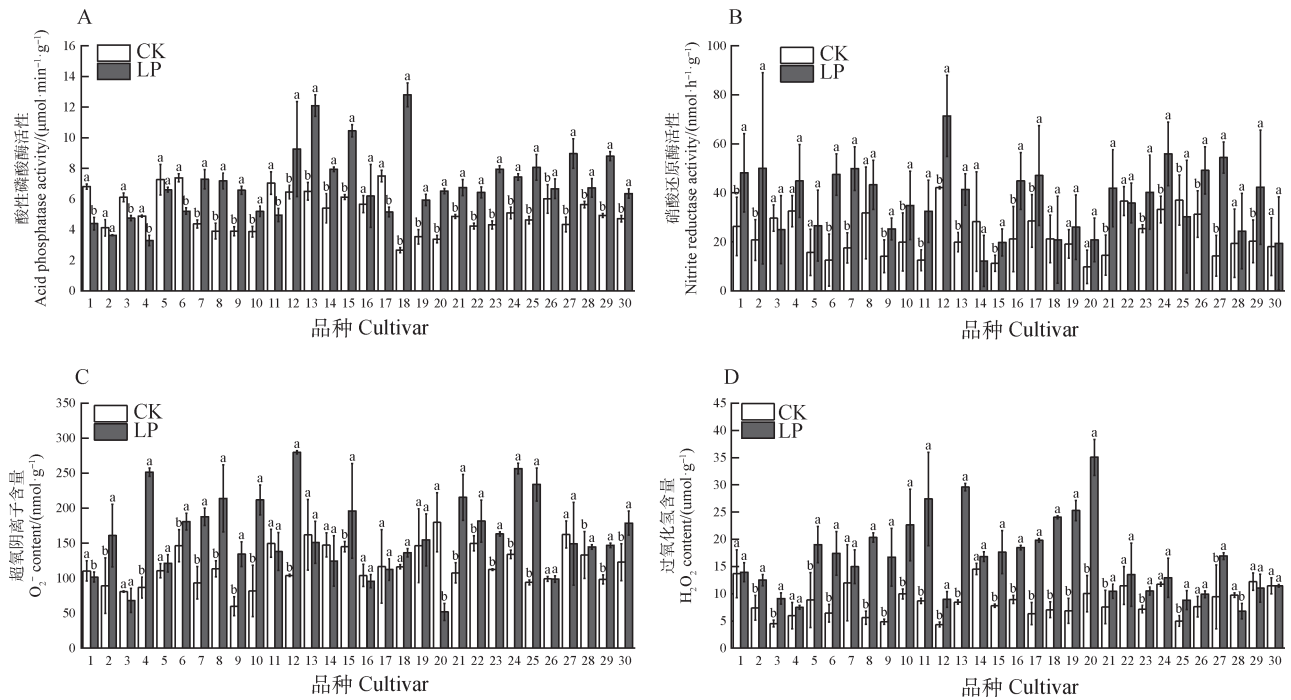


图1 不同燕麦品种在低磷胁迫下相关酶活性与活性氧含量的变化

Fig. 1 Changes in enzyme activity and reactive oxygen species content in different oat varieties under low phosphorus stress

注:A酸性磷酸酶活性;B硝酸还原酶活性;C超氧阴离子含量;D过氧化氢含量;不同小写字母代表同一品种在2种磷浓度处理下差异显著性, $P < 0.05$,下同

Note: A, ACP activity; B, Nr activity; C, $\text{O}_2^{\cdot -}$ content; D, H_2O_2 content. Different lower-case letters represent significant ($P < 0.05$) differences between the same variety under the two phosphorus concentration treatments, the same as below

增加(图2A),其中‘牧王’(+360.35%)、‘坝莪18号’(+309.80%)和‘甜燕2号’(+215.93%)增幅最大;仅‘边锋’和‘张莪9号’含量下降。SP含量变化趋势存在明显品种差异(图2B)。“太阳神”(+165.51%)和‘甜燕60’(+139.23%)增幅最大;而‘晋燕17号’‘白燕7号’等4个品种的含量则显著降低(降幅>31%)。

Pro含量呈现不同变化方向(图2C)。含量显著上升的品种中,‘甜燕70’(+168.62%)和‘甜燕60’(+118.33%)增幅最高;含量显著下降的品种则以‘白燕18号’(-44.23%)和‘边锋’(-26.42%)最为明显。MDA含量多数品种上升(图2D),其中‘张莪8号’(+82.24%)、‘魏都莪5号’(+75.80%)和‘青燕1号’(+67.94%)增幅最为显著;仅‘青燕2号’和‘领袖’的含量显著下降。

2.3 各指标耐低磷系数相关性分析

PH和AFW、ADW;TRL和TRS、TRV;AFW和UFW、ADW、PA;Pn和Tr、Gs; $\text{O}_2^{\cdot -}$ 和ACP、Chlb呈极显著正相关($P < 0.001$);另外,TPC和PE;SS和 H_2O_2 之间呈极显著负相关($P < 0.001$),低磷胁迫

下燕麦苗期各指标间均存在着不同程度的相关性,因此可选择主要指标来评价燕麦种质的耐低磷性(图3)。

2.4 主成分分析

为优化分析流程并揭示变量间的潜在关联,研究基于30份燕麦种质各单项指标的耐低磷系数,采用主成分分析法(PCA)进行数据降维和特征提取。将8个特征值大于1的成分作为主成分,其特征值分别为4.94,4.66,3.42,2.46,2.10,1.72,1.52,1.14。方差贡献率为18.31%,17.27%,12.68%,9.09%,7.79%,6.36%,5.64%,4.23%。累积方差贡献率达81.36%(图4A、表5)。因此,主成分提取效果很好,涵盖了所有指标的大部分信息,整体归纳性好、综合反应性强,可将其作为燕麦耐低磷种质评价筛选的综合指标。主成分1的投影面积主要由Pn,Ci,Tr,Gs,Chla,Chlb和 $\text{O}_2^{\cdot -}$ 含量组成,可归结为光合因子,主成分2主要由PH,RL,TRL,TRS,TRV,AFW,ADW,UFW和UDW组成,可归结为形态因子(图4B)。

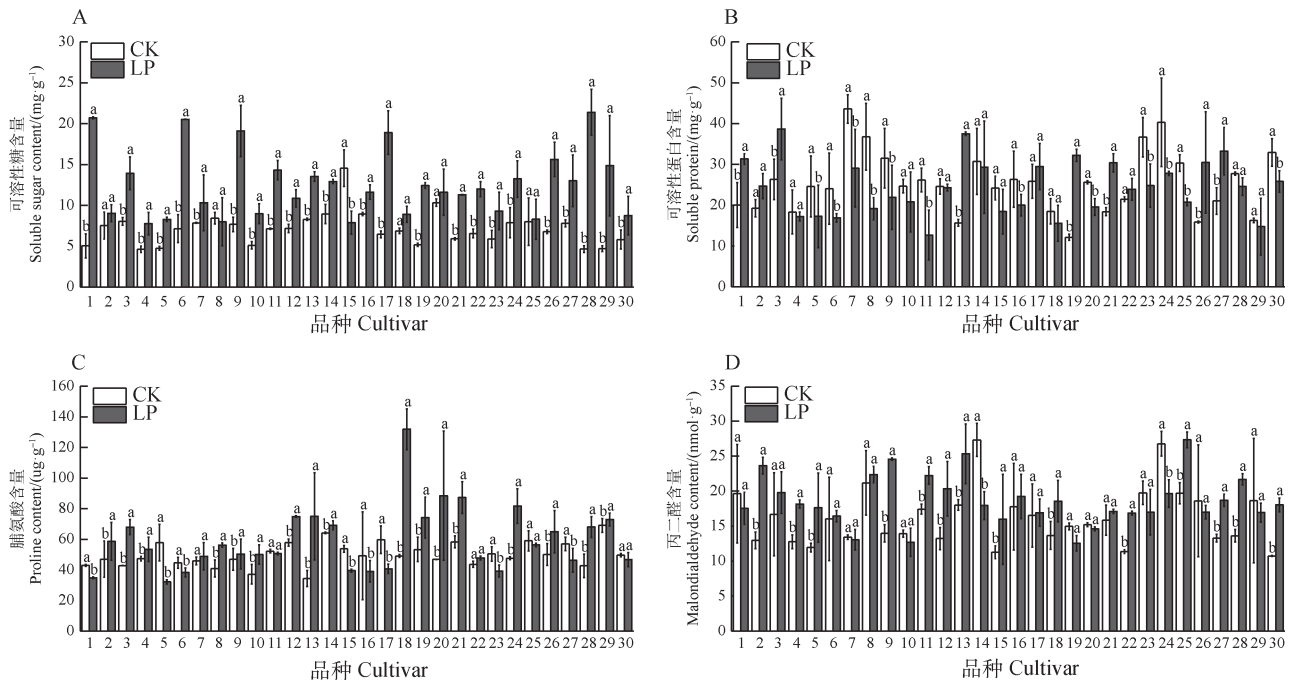


图2 不同燕麦品种在低磷胁迫下渗透调节物质、脯氨酸与丙二醛含量的变化

Fig. 2 Changes in osmoregulatory substances, proline, and malondialdehyde content in different oat varieties under low phosphorus stress

注:A可溶性糖含量;B可溶性蛋白含量;C脯氨酸含量;D丙二醛含量

Note: A, SS content; B, SP content; C, Pro content; D, MDA content

2.5 隶属函数分析及综合评价

根据公式计算出各品种的 D 值,其中 D 值大小可反应该品种耐性强弱。根据 D 值排序,对苗期燕麦进行耐低磷性综合评价(表6),其中排名前五位的品种耐低磷性较好,分别是:‘魏都莜5号’(0.828) > ‘晋燕17号’(0.643) > ‘张莜8号’(0.615) > ‘张莜9号’(0.602) > ‘美达’(0.578);而排名最末的五位的品种耐低磷性较差,分别是:‘坝莜18号’(0.341) < ‘骏马’(0.372) < ‘青燕2号’(<0.399) < ‘枪手’(0.405) < ‘坝莜16号’(0.410)。

2.6 耐低磷性聚类分析

基于不同燕麦品种的磷素利用效率等相关的综合评价价值,以欧氏距离平方计算,最长距离法对耐低磷系数进行聚类分析,获得30份燕麦品种的聚类关系图,聚类结果可将30份供试燕麦品种分为3类,第Ⅰ类材料包括‘太阳神’‘青燕1号’‘牧王’‘甜燕2号’‘青海甜燕麦’‘贝勒’‘美达’‘白燕18号’,第Ⅱ类材料包括‘边锋’‘美达’‘晋燕17号’‘张莜9号’‘魏都莜5号’‘张莜8号’;第Ⅲ类材料包括‘甜燕1号’‘领袖’‘白燕7号’‘甜燕70’‘甜燕60’‘蒙燕

1号’‘枪手’‘晋燕18号’‘青海444’‘青引1号’‘青引3号’‘青燕2号’‘莫妮卡’‘坝莜16号’‘骏马’‘坝莜18号’。3个类型的燕麦 D 值均值大小为Ⅱ(0.636) > Ⅰ(0.498) > Ⅲ(0.447),表明3类燕麦在低磷胁迫下的耐受程度不同,因此将Ⅱ、Ⅰ和Ⅲ划分为耐低磷型、磷中效型和低磷敏感型(图5)。

3 讨论

3.1 燕麦形态特征对低磷胁迫的响应

植物面临磷匮乏时,通常会采取地下部优先生长的生存策略^[24]。本研究,低磷胁迫下燕麦的地上部生物量(AFW, ADW)受到抑制,而RL、TRS及RSR显著增加,这与在大豆(*Glycine max* L.)、玉米等作物中的发现一致^[25-26]。林雁等^[25]的研究表明,与正常磷水平相比,低磷处理降低了大豆地上部生物量,ADW降低35%,因磷缺乏抑制叶片扩展和核酮糖-1,5-二磷酸羧化酶(Rubisco酶)活性;于霆等^[26]在低磷条件下发现玉米苗期RSR上升14.32%,通过增强蔗糖合成酶活性调控碳源分配。由此可见,耐性品种能够高效地将碳资源用于根系的构建,形成更发达的根系结构,以此更好的适应

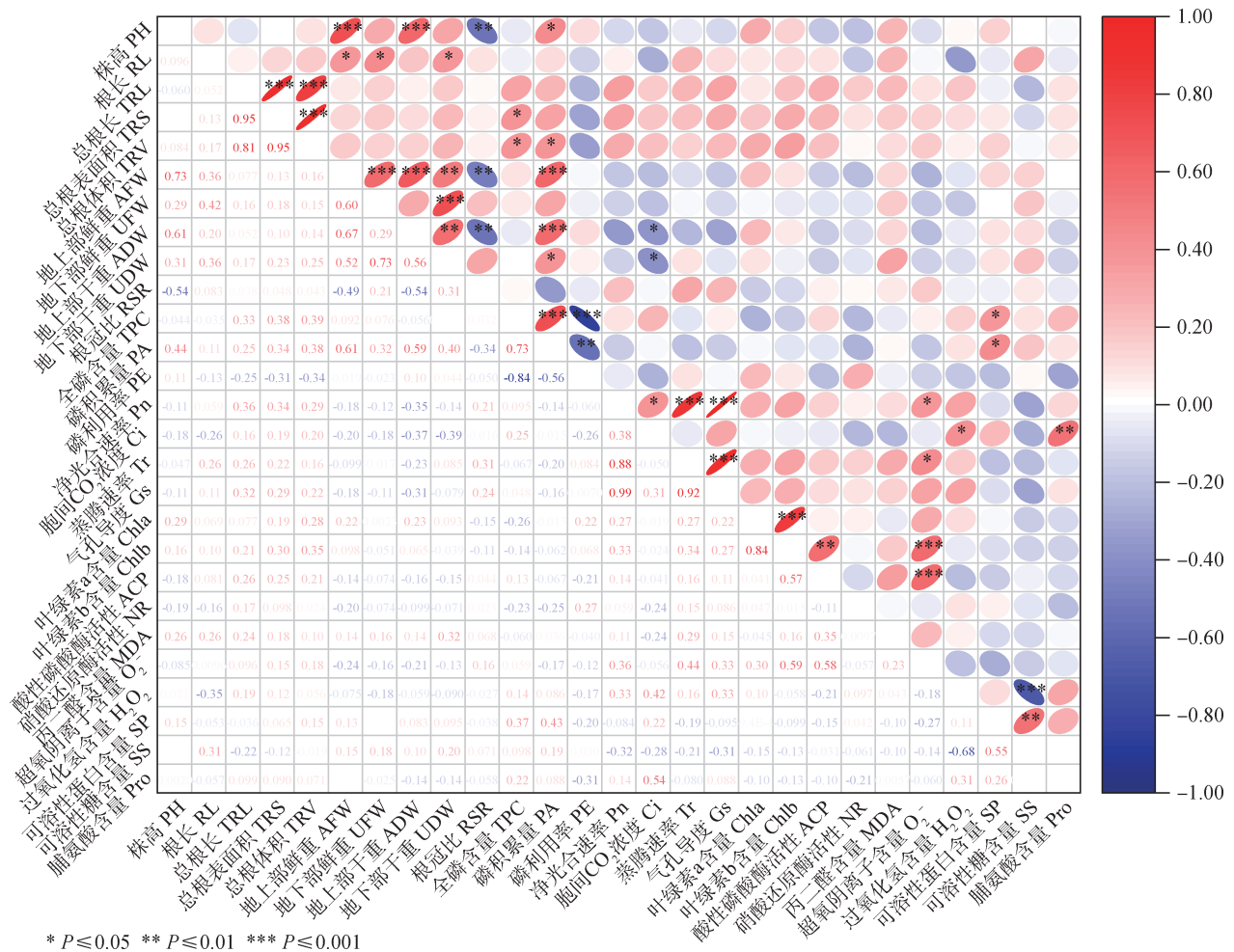


图3 低磷胁迫下不同燕麦品种各指标相关性分析

Fig. 3 Correlation analysis of various indexes of different oat varieties under low phosphorus stress

注: *表示在 $P < 0.05$ 水平显著相关, **表示在 $P < 0.01$ 水平极显著相关, ***表示在 $P < 0.001$ 水平极显著相关Note: * means significant correlation at the level of $P < 0.05$, ** means extremely significant correlation at the level of $P < 0.01$. *** means extremely significant correlation at the level of $P < 0.001$

低磷环境。

3.2 燕麦磷利用与光合特性对低磷胁迫的响应

低磷胁迫普遍诱导了燕麦PE的升高,但品种间差异显著。其中,耐低磷品种(如‘魏都莪5号’、‘晋燕17号’)的表现尤为突出,其PE值分别达到对照的6倍和6.17倍,而磷敏感品种(如‘骏马’‘青燕2号’),其PE值仅是对照的5.02倍和4.62倍。伊霞^[27]研究指出,在低磷胁迫下,燕麦通过增加根长、根干重等形态变化及提高酸性磷酸酶活性等生理响应来适应胁迫。耐性品种PE提升幅度比敏感品种高出约20%~30%,证明具备更高效的磷调控能力。

低磷胁迫导致多数燕麦品种的Pn、Tr与Gs下

降,而Ci保持稳定,表明光合抑制主要源于气孔限制^[28]。敏感品种如‘坝芑18号’与‘骏马’的Pn降幅超过75%,表现出严重的光合抑制;而耐性品种‘魏都莪5号’的Pn、Tr和Gs均显著升高。这种差异可能源于在磷吸收与利用效率上的不同,耐低磷品种通常具备更高效的磷活化与转运系统,从而保障ATP、NADPH等能量物质的合成,支持光合作用的正常运作与气孔开放^[29]。夏静等^[30]在研究低磷胁迫对不同根型苜蓿光合作用的影响时发现,Pn、Tr、Gs均显著下降;秦成等^[31]也报道了绿豆(*Vigna radiata* L.)幼苗在低磷条件下Pn与Gs同步降低的现象。进一步证实气孔限制是作物在低磷胁迫初期的共同响应策略。

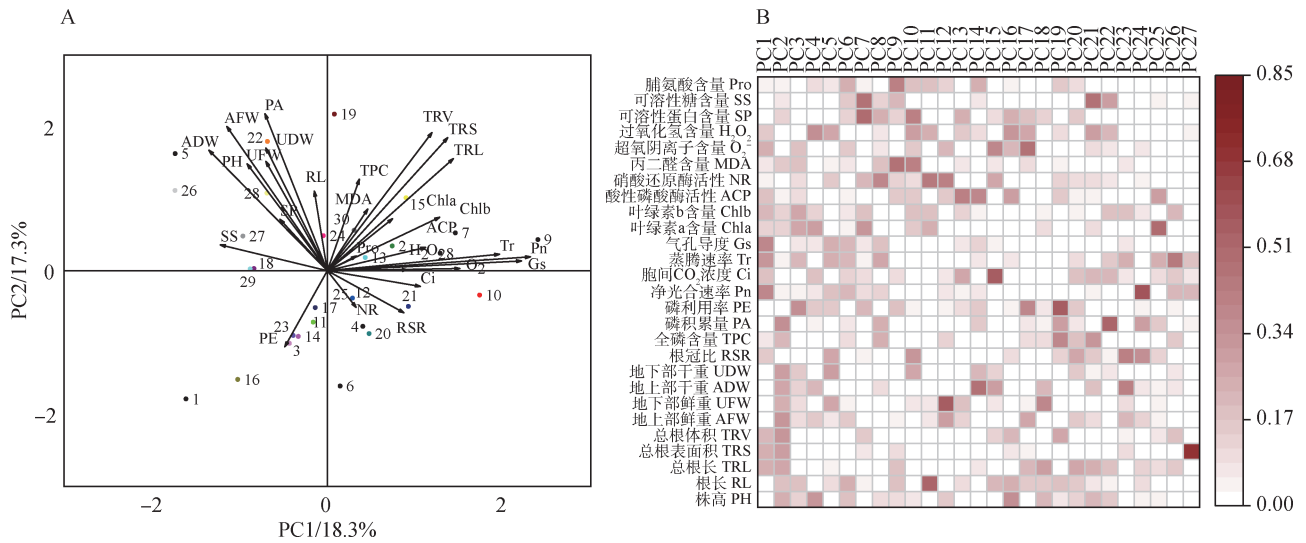


图4 各指标主成分分析

Fig. 4 Principal component analysis of indicators

注: A 各指标耐低磷系数及品种主成分散点图; B 不同磷处理下供试燕麦品种各综合指标累计贡献率

Note: A Principal component dispersion points of low phosphorus tolerance index; B Coefficient and contribution rate of comprehensive index under different phosphorus levels of oat at seedling stage

3.3 燕麦磷代谢相关酶活性、活性氧含量变化在低磷胁迫下的响应

为应对低磷胁迫引发的内部磷匮乏,植物通过提升 ACP 活性以活化体内有机磷库,形成了节流的适应机制^[32]。本研究发现,耐低磷品种(如‘边锋’、‘魏都莜 5 号’和‘张莜 9 号’)的 ACP 活性显著升高,而敏感品种(如‘坝莜 16 号’、‘莫妮卡’和‘青引 3 号’)则呈现活性降低趋势。李靖怡^[33]在水稻研究中发现,酸性磷酸酶 OsACP1 受低磷胁迫特异性诱导表达,其活性升高有助于通过代谢磷酸乙醇胺等有机磷来维持细胞磷稳态。由此可见,耐低磷品种通过的磷信号感知,启动以 ACP 为核心的内部磷活化程序,挖掘体内的有机磷库。因此,低磷胁迫下 ACP 活性的变化,是评价燕麦耐低磷能力的一个重要生理指标。

同时, NR 是氮代谢的限速酶,其活性上升反映了低磷条件下氮磷代谢的紧密互作^[34]。低磷胁迫下大多数燕麦品种的 NR 活性显著升高,其中耐低磷品种‘张莜 8 号’和‘晋燕 17 号’增幅突出;而磷敏感品种‘坝莜 16 号’和‘青燕 2 号’则显著下降。耐低磷品种具备更为发达的根系、更高的磷吸收与再利用效率。相反,磷敏感品种的能量代谢系统在低磷胁迫下受损,磷的缺乏直接限制了 ATP 的合成,导致其无法支撑 NR 这一高耗能的酶促反应, NR 活性因而被迫下降。Sagwal 等^[35]研究发现,磷酸盐 (Pi) 的供应状况可直接调节 NR 活性。这一现象揭

示了植物在面对低磷胁迫时,其内部磷代谢和氮代谢的相互调控,是决定其耐性强弱的关键所在。

低磷胁迫下 ROS 的积累是植物遭受氧化胁迫的标志^[36],然而本研究中不同燕麦品种在 O₂⁻ 和 H₂O₂ 积累存在差异。其中耐低磷品种(‘张莜 8 号’、‘魏都莜 5 号’、‘晋燕 17 号’等)的 O₂⁻ 含量显著上升,而敏感品种(‘坝莜 18 号’、‘骏马’、‘坝莜 16 号’等)的 O₂⁻ 含量显著降低;另外耐低磷品种(‘张莜 8 号’和‘魏都莜 5 号’等)的 H₂O₂ 含量显著上升,而磷敏感品种(‘坝莜 18 号’和‘青燕 2 号’)的 H₂O₂ 含量变化不显著。王伟伟^[37]研究发现,磷高效燕麦品种 V7 在低磷条件下不仅生物量和磷吸收能力更高,其根系酸性磷酸酶活性和有机酸分泌量也显著优于磷敏感品种。因此,耐低磷品种可能通过调控其根系形态建成、磷代谢相关酶活性及抗氧化系统,从而建立了全面的抗逆性。

ROS 的过量积累会引发膜脂过氧化^[38]。MDA 作为其关键终产物,在耐低磷品种中(‘张莜 9 号’、‘魏都莜 5 号’和‘边锋’)含量剧增,而在磷敏感品种(‘坝莜 18 号’、‘骏马’、‘坝莜 16 号’等)中变化不显著。部分耐低磷型品种的 MDA 含量显著升高,这揭示了其积极的胁迫响应策略。Lin 等^[39]研究发现,低磷胁迫会引发植物细胞能量代谢的紊乱,同时, Wen 等^[40]发现,植物也会通过膜脂重塑等机制来应对磷胁迫。我们推测,耐低磷品种高的代谢活动导致 ROS 副产物增加,从而引发更显著的膜脂过

表 5 各综合指标系数及贡献率

Table 5 Coefficients and proportion rates of various comprehensive indicators

变量 Variable	主成分 1 Principal Component 1	主成分 2 Principal component 2	主成分 3 Principal component 3	主成分 4 Principal component 4	主成分 5 Principal component 5	主成分 6 Principal component 6	主成分 7 Principal component 7	主成分 8 Principal component 8
株高 PH	-0.15	0.25	0.14	0.31	0.00	0.17	-0.06	0.09
根长 RL	-0.02	0.18	0.18	-0.25	0.10	0.24	0.03	-0.11
总根长 TRL	0.24	0.26	-0.08	-0.05	0.03	-0.39	-0.04	-0.07
总根表面积 TRS	0.23	0.31	-0.08	-0.06	-0.02	-0.35	0.06	-0.12
总根体积 TRV	0.20	0.32	-0.08	-0.05	-0.07	-0.28	0.16	-0.15
地上部鲜重 AFW	-0.19	0.33	0.10	0.17	0.07	0.14	-0.03	-0.05
地下部鲜重 UFW	-0.12	0.25	0.11	-0.19	0.27	0.04	-0.06	-0.30
地上部干重 ADW	-0.22	0.28	0.14	0.20	-0.01	-0.07	-0.06	0.09
地下部干重 UDW	-0.12	0.28	0.17	-0.17	0.30	-0.03	-0.05	-0.11
根冠比 RSR	0.15	-0.10	0.01	-0.43	0.26	0.01	0.04	-0.19
全磷含量 TPC	0.06	0.21	-0.38	-0.15	-0.11	0.09	-0.07	0.25
磷积累量 PA	-0.12	0.36	-0.20	0.04	-0.06	0.07	-0.03	0.25
磷利用率 PE	-0.08	-0.18	0.35	0.16	0.16	-0.15	0.20	-0.11
净光合速率 Pn	0.39	0.03	0.03	0.08	0.20	0.21	0.11	0.12
胞间 CO ₂ 浓度 Ci	0.18	-0.04	-0.34	0.19	0.02	0.14	0.11	-0.36
蒸腾速率 Tr	0.33	0.04	0.21	-0.03	0.24	0.21	0.04	0.26
气孔导度 Gs	0.37	0.02	0.06	0.06	0.25	0.22	0.08	0.17
叶绿素 a 含量 Chla	0.12	0.12	0.26	0.29	-0.14	0.03	0.33	-0.18
叶绿素 b 含量 Chlb	0.21	0.12	0.27	0.13	-0.35	0.06	0.17	-0.13
酸性磷酸酶活性 ACP	0.19	0.05	0.10	-0.20	-0.43	0.03	-0.18	0.01
硝酸还原酶活性 NR	0.05	-0.09	0.10	0.02	0.15	-0.45	0.21	0.39
丙二醛含量 MDA	0.08	0.14	0.17	-0.10	0.04	0.07	-0.38	0.18
超氧阴离子含量 O ₂ ⁻	0.25	0.01	0.17	-0.11	-0.33	0.16	-0.09	0.06
过氧化氢含量 H ₂ O ₂	0.15	0.00	-0.20	0.36	0.26	-0.05	-0.19	0.06
可溶性蛋白含量 SP	-0.09	0.12	-0.24	-0.01	0.02	0.12	0.49	0.24
可溶性糖含量 SS	-0.20	0.06	0.00	-0.33	-0.09	0.15	0.48	0.12
脯氨酸含量 Pro	0.06	0.03	-0.29	0.10	0.06	0.25	0.04	-0.31
特征值 Eigenvalues	4.94	4.66	3.42	2.46	2.10	1.72	1.52	1.14
贡献率 contribution rate/%	18.31	17.27	12.68	9.09	7.79	6.36	5.64	4.23
累积贡献率 Cumulative contribution rate/%	18.31	35.58	48.25	57.35	65.14	71.49	77.13	81.36

氧化,导致MDA含量的剧增。

3.4 燕麦渗透调节物质和脯氨酸变化在低磷胁迫下的响应

SS是重要的渗透调节物质^[41]。本研究中,除耐低磷品种‘边锋’的SS含量显著下降外,其余品种的SS均增加;SP含量普遍受到抑制,其中耐低磷品种(‘魏都莪5号’‘张莪9号’‘晋燕17号’和‘边锋’)的SP含量显著下降,磷敏感品种(‘坝莪18号’‘坝莪16号’等)的SP含量显著增加。Yadav等^[42]在番茄等作物的研究中发现,在应对干旱胁迫时,碳资源有向可溶性糖等渗透调节物质倾斜的策略。耐

低磷品种通过主动下调SP合成而将更多的碳资源用于SS的积累,体现出耐低磷品种具有高效的资源调配能力。而唯一的例外边锋可能采取了不同的碳投资策略,值得进一步研究。王林杰等^[43]研究发现,磷敏感基因型在胁迫下会出现代谢紊乱和无效蛋白积累的现象。因此,低磷胁迫下SP的下降,在某些情况下可能是一种主动的、适应性的生理调控。本研究观察到,耐低磷品种(‘魏都莪5号’‘张莪8号’和‘张莪9号’等)的Pro含量显著增加,而磷敏感品种(‘坝莪18号’‘骏马’和‘莫妮卡’等)的Pro含量显著降低。Liu等^[44]研究指出,在低磷胁迫条件下,生物体可能面临能量(ATP)合成受限的压

表 6 各品种综合指标值、隶属函数值、权重、D 值及排序

Table 6 Composite index value, affiliation function value, weight, D-value and ranking of varieties

品种 Cultivar	F_1	F_2	F_3	F_4	F_5	F_6	F_7	F_8	$Y_{/x1}$	$Y_{/x2}$	$Y_{/x3}$	$Y_{/x4}$	$Y_{/x5}$	$Y_{/x6}$	$Y_{/x7}$	$Y_{/x8}$	D 值 D values	耐低磷排序 Low phosphorus tolerance ranking
1	-1.61	-1.78	0.29	-0.58	-0.37	0.39	1.24	1.34	0.03	0.00	0.71	0.42	0.32	0.64	0.72	0.94	0.341	30
2	0.74	0.34	0.68	-0.74	0.94	0.64	-0.15	1.31	0.60	0.54	0.80	0.37	0.65	0.71	0.38	0.93	0.607	3
3	-0.43	-1.01	-0.65	0.21	0.03	0.33	0.48	-0.68	0.32	0.20	0.50	0.64	0.42	0.62	0.54	0.34	0.405	25
4	0.40	-0.78	0.47	-0.69	-1.46	0.97	-0.48	0.82	0.52	0.25	0.75	0.39	0.04	0.80	0.30	0.79	0.456	18
5	-1.73	1.63	1.28	1.51	-0.31	-1.30	-1.42	0.80	0.00	0.86	0.93	1.00	0.33	0.18	0.07	0.78	0.522	12
6	0.15	-1.60	-0.37	0.00	0.49	-1.13	-0.25	1.22	0.46	0.05	0.57	0.58	0.54	0.23	0.36	0.91	0.405	26
7	1.46	0.53	1.17	0.79	-0.97	-1.38	1.40	0.07	0.77	0.58	0.91	0.80	0.16	0.16	0.76	0.56	0.634	2
8	1.29	0.24	0.68	0.15	0.67	-0.08	0.12	-1.81	0.73	0.51	0.80	0.62	0.58	0.51	0.45	0.00	0.594	4
9	2.40	0.43	1.60	0.30	2.29	1.72	-0.58	1.42	1.00	0.56	1.00	0.66	1.00	1.00	0.27	0.97	0.818	1
10	1.73	-0.34	-1.53	-1.16	-1.38	-0.48	-0.74	0.68	0.84	0.36	0.31	0.26	0.06	0.40	0.24	0.74	0.436	20
11	-0.16	-0.72	-0.07	0.72	0.26	-1.96	-1.25	0.59	0.38	0.27	0.63	0.78	0.48	0.00	0.11	0.72	0.416	23
12	0.29	-0.38	-0.18	-0.33	-1.48	-0.51	-0.77	-0.72	0.49	0.35	0.61	0.49	0.03	0.39	0.23	0.33	0.399	27
13	0.43	0.18	-1.33	0.98	0.23	0.33	1.28	-0.67	0.52	0.50	0.35	0.85	0.47	0.62	0.73	0.34	0.537	9
14	-0.33	-0.91	-0.83	-1.14	1.23	0.50	0.57	-1.41	0.34	0.22	0.46	0.26	0.73	0.67	0.56	0.12	0.394	28
15	0.90	1.01	0.19	0.65	0.06	-1.95	-0.05	-1.07	0.64	0.71	0.69	0.76	0.43	0.00	0.40	0.22	0.564	7
16	-1.02	-1.51	0.03	0.37	0.09	-0.07	-0.94	0.90	0.17	0.07	0.66	0.68	0.43	0.51	0.19	0.81	0.366	29
17	-0.14	-0.51	-0.14	0.17	0.05	0.29	-0.31	0.08	0.39	0.32	0.62	0.63	0.43	0.61	0.34	0.57	0.461	17
18	-0.83	0.03	-0.85	1.24	0.90	1.18	-1.70	-1.44	0.22	0.46	0.46	0.92	0.64	0.85	0.00	0.11	0.455	19
19	0.08	2.18	-2.93	0.60	0.05	0.21	0.78	1.54	0.44	1.00	0.00	0.75	0.43	0.59	0.61	1.00	0.576	5
20	0.48	-0.88	-1.46	1.47	1.10	-0.30	-0.38	-0.33	0.53	0.23	0.32	0.99	0.69	0.45	0.32	0.44	0.479	16
21	0.92	-0.50	0.35	-0.28	-0.63	-0.09	2.37	0.32	0.64	0.32	0.72	0.50	0.25	0.51	1.00	0.64	0.547	8
22	-0.68	1.80	0.56	-0.63	-0.13	1.53	-0.34	-0.16	0.25	0.90	0.77	0.40	0.38	0.95	0.33	0.49	0.570	6
23	-0.39	-0.90	1.07	1.11	-0.16	0.68	0.67	-1.24	0.33	0.22	0.88	0.89	0.37	0.72	0.58	0.17	0.496	13
24	-0.04	0.49	-0.17	0.40	-1.13	0.44	0.32	-0.97	0.41	0.57	0.61	0.69	0.12	0.65	0.50	0.25	0.494	14
25	0.05	-0.30	0.79	1.12	-1.61	1.71	-0.91	0.45	0.43	0.38	0.82	0.89	0.00	1.00	0.19	0.67	0.526	10
26	-1.73	1.12	0.48	0.55	-0.57	0.55	1.96	0.27	0.00	0.73	0.75	0.73	0.27	0.68	0.90	0.62	0.523	11
27	-0.96	0.48	0.81	-1.01	1.59	-1.64	0.66	0.80	0.19	0.57	0.83	0.30	0.82	0.09	0.58	0.78	0.488	15
28	-0.69	1.08	-1.18	-2.08	0.16	0.31	-0.72	0.32	0.25	0.72	0.39	0.00	0.45	0.62	0.24	0.64	0.411	24
29	-0.88	0.02	0.61	-1.68	1.44	-0.45	0.28	-1.29	0.21	0.46	0.78	0.11	0.78	0.41	0.49	0.16	0.426	21
30	0.31	0.56	0.65	-2.02	-1.38	-0.46	-1.15	-1.14	0.49	0.59	0.79	0.02	0.06	0.41	0.13	0.20	0.416	22
权重 Weight/%	0.23	0.21	0.16	0.11	0.10	0.08	0.07	0.05										

力。敏感品种 Pro 含量的下降,可能是合成所需 ATP 的下降而造成的。因此,脯氨酸的积累能力可作为筛选耐低磷品种的一个可靠的生理指标。

综上,各燕麦在低磷胁迫下会表现出一系列形态和生理特征上的响应,通过根系形态、磷的吸收利用、渗透调节物质积累及抗氧化系统激活等协同机制适应低磷胁迫,但各品种的差异显著影响其耐性表现,为耐低磷品种选育提供了关键的形态和生理基础。

4 结论

低磷胁迫下,燕麦地上部生长及光合能力受到抑制,但其通过提高磷利用效率、增强根系发育以及调节关键酶活性和渗透物质含量,形成综合适应机制。耐低磷品种在碳资源分配、磷利用效率及抗氧化等方面具有显著优势,而敏感品种在上述环节存在缺陷。综合评价表明,‘魏都莜 5 号’和‘晋燕 17 号’为耐低磷性最强的品种,‘坝莜 18 号’和‘骏马’为最敏感品种。

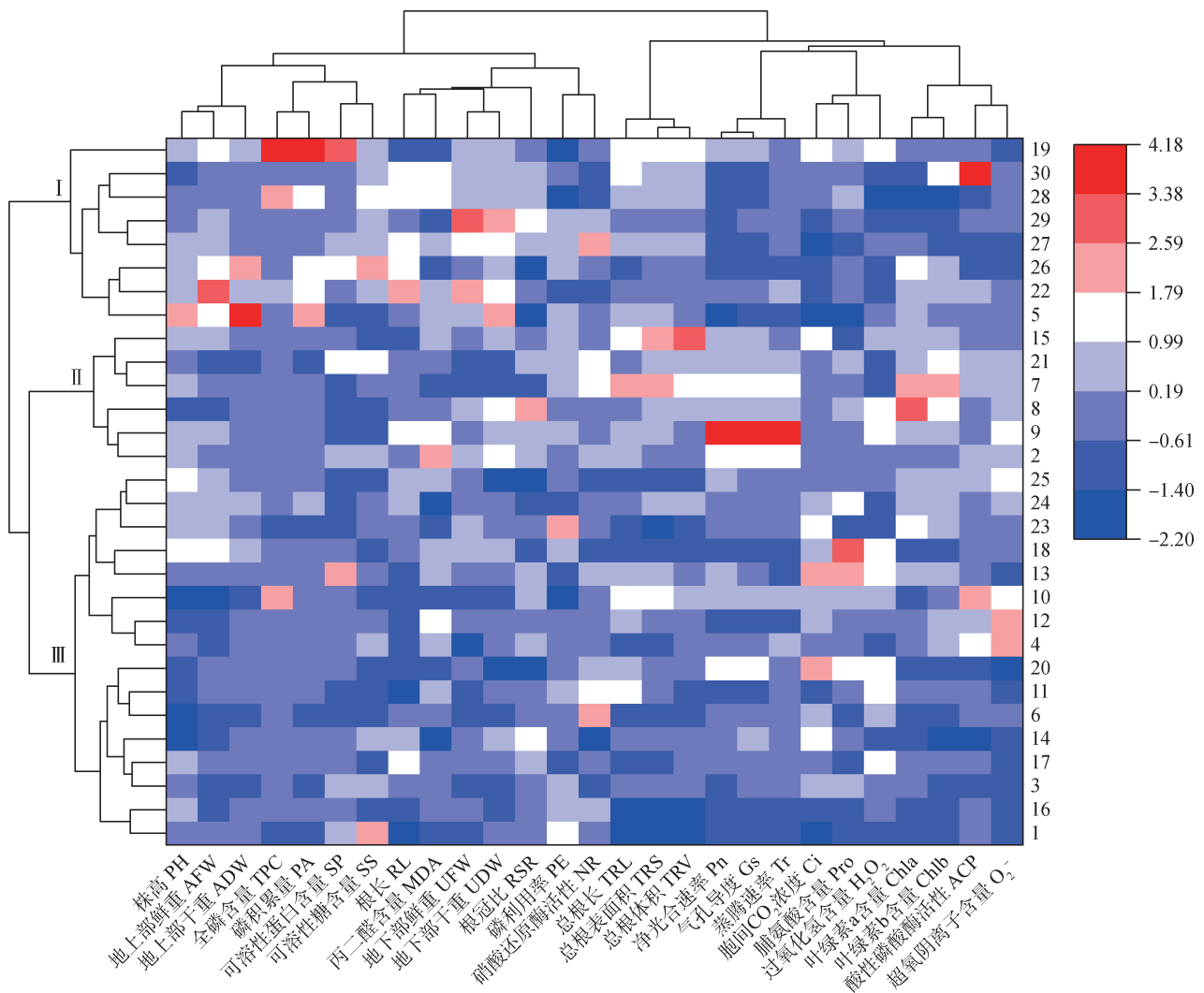


图5 30个燕麦品种耐低磷性聚类分析

Fig. 5 Cluster analysis of 30 oat varieties for low phosphorus tolerance

参考文献

- [1] 原梦,赵峥艳,李雪林,等. 低磷胁迫下不同基因型棉花生理和形态的响应差异[J]. 种子,2019,38(4):20-23,30
YUAN M,ZHAO Z Y,LI X L,et al. Physiology and morphological characteristics among different cotton genotypes in response to low phosphorus stress[J]. Seed,2019,38(4):20-23,30
- [2] 冯廷旭,林伟山,向雪梅,等. 三江源区适宜的小黑麦和饲用豌豆混播比例及施肥方法[J]. 植物营养与肥料学报,2024,30(8):1539-1553
FENG T X,LIN W S,XIANG X M,et al. Optimum fertilization method and mixed seeding ratio of *Triticale/Pisum sativa* in grassland of Sanjiangyuan area[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers,2024,30(8):1539-1553
- [3] 张绮芯. 低磷胁迫下苜蓿生理生态特性研究[D]. 兰州:兰州大学,2017:1-2
ZHANG Q X. A study on eco-physiological characteristics of alfalfa under low phosphorus stress [D]. Lanzhou: Lanzhou University,2017:1-2
- [4] HU H M,WANG Y K,ZHONG H X,et al. Functional analysis of ZmPHR1 and ZmPHR2 under low-phosphate stress in maize[J]. Molecular Breeding,2024,44(10):69
- [5] ZHU X Y,WANG J,ZHANG Q Q,et al. Effects of long-term non-application of phosphorus fertilizer on bacterial community structure and metabolite profiles of sweetpotato rhizosphere [J]. Journal of Soil Science and Plant Nutrition,2023,23(3):3575-3585
- [6] 李敏,时振坤,晁召飞,等. 玉米苗期耐低磷种质筛选及综合评价[J]. 河南科技学院学报(自然科学版),2024,52(6):9-15,22
LI M,SHI Z K,CHAO Z F,et al. Screening and comprehensive evaluation of maize germplasm with low phosphorus tolerance at seedling stage [J]. Journal of Henan Institute of Science and Technology (Natural Sciences Edition),2024,52(6):9-15,22
- [7] 张景龙,沈益新,刘信宝,等. 高粱苗期耐低磷能力的综合评价及代表性评价指标筛选[J]. 草地学报,2024,32(1):179-187
ZHANG J L,SHEN Y X,LIU X B,et al. Comprehensive evaluation of low phosphorus tolerance and screening of representative evaluation indexes at sorghum seedling [J]. Acta Agrestia Sinica,2024,32(1):179-187

- [8] 魏亚宵,汪军成,姚立蓉,等. 小麦耐低磷基因型的鉴定和筛选[J]. 甘肃农业大学学报,2023,58(2):51-57,67
WEI Y X, WANG J C, YAO L R, et al. Identification and screening of wheat genotypes with low phosphorus tolerance[J]. Journal of Gansu Agricultural University, 2023, 58(2): 51-57, 67
- [9] 夏静,南丽丽,陈洁,等. 低磷胁迫下不同根型苜蓿形态及生理响应[J]. 中国草地学报,2023,45(10):58-67
XIA J, NAN L L, CHEN J, et al. Morphological and physiological responses of different root types of alfalfa under low phosphorus stress[J]. Chinese Journal of Grassland, 2023, 45(10): 58-67
- [10] 刘晓霞,安雯,李琳,等. 饲用燕麦重要农艺性状的全基因组关联分析和候选基因预测[J]. 草地学报,2025,33(11):3526-3539
LIU X X, AN W, LI L, et al. Genome-wide association analysis and candidate gene prediction of important agronomic traits of forage oat[J]. Acta Agrestia Sinica, 2025, 33(11): 3526-3539
- [11] 刘欣悦,王杰,张海娟,等. 施用复合微生物菌剂对燕麦生长和根系发育的影响[J]. 草地学报,2025,33(7):2357-2367
LIU X Y, WANG J, ZHANG H J, et al. Effects of application of compound microbial inoculants on oat growth and root development in Qaidam Basin[J]. Acta Agrestia Sinica, 2025, 33(7): 2357-2367
- [12] 金增辉. 燕麦膳食纤维及其食品的开发[J]. 粮食加工, 2020, 45(6): 57-61
JIN Z H. Development of oat dietary fiber and its food[J]. Grain Processing, 2020, 45(6): 57-61
- [13] 安乐乐. 不同粗饲料来源饲料对牦牛犊牛肠道功能和微生物区系的影响[D]. 西宁:青海大学,2024:1-3
AN L L. Effects of different roughage sources in diet on intestinal function and microbiota of yak calves[D]. Xining: Qinghai University, 2024: 1-3
- [14] 丛龙丽. 磷添加对科尔沁沙地饲用燕麦生产性能、根系特征及光合特性的影响[D]. 通辽:内蒙古民族大学,2023:2-3
CONG L L. Effectss of phosphorus addition on production performance, root characteristics and photosynthetic characteristics of oats for feed oats in horqin sandy land[D]. Tongliao: Inner Mongolia University for the Nationalities, 2023: 2-3
- [15] LIU T, XIA L H, DONG X L, et al. Saline water concentration determines the reduction pathway for oat phosphorus absorption[J]. Agricultural Water Management, 2025, 307: 109236
- [16] 耿小丽,武慧娟,付萍,等. 磷肥对甘肃临夏地区燕麦干草及种子生产的影响[J]. 草地学报,2023,31(3):813-818
GENG X L, WU H J, FU P, et al. Effect of phosphate fertilizer on seed and hay yield of *Avena sativa* in Linxia of Gansu Province[J]. Acta Agrestia Sinica, 2023, 31(3): 813-818
- [17] 罗颖,李聪,王沛,等. 低氮胁迫下不同皮燕麦品种早期的响应研究及耐低氮性综合评价[J]. 草业学报,2024,33(2):164-184
LUO Y, LI C, WANG P, et al. Responses of different oat cultivars to low-nitrogen stress[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2024, 33(2): 164-184
- [18] 杨再强,韩冬,王学林,等. 寒潮过程中4个茶树品种光合特性和保护酶活性变化及品种间差异[J]. 生态学报,2016,36(3):629-641
YANG Z Q, HAN D, WANG X L, et al. Changes in photosynthetic parameters and antioxidant enzymatic activity of four tea varieties during a cold wave[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(3): 629-641
- [19] 唐玉婷,张庆昕,张玉霞,等. 施氮对不同饲用燕麦品种延缓衰老的差异分析[J]. 内蒙古民族大学学报(自然科学版), 2024, 39(3): 19-24
TANG Y T, ZHANG Q X, ZHANG Y X, et al. Difference analysis of nitrogen application on anti-aging of different forage oat varieties[J]. Journal of Inner Mongolia Minzu University (Natural Sciences Edition), 2024, 39(3): 19-24
- [20] 王丽霞. 茶树对氟的富集及其生理响应机制研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2014:26-27
WANG L X. Fluoride accumulation in tea plant and its physiological response mechanism[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2014: 26-27
- [21] 张贵弟. 玉米磷高效利用种质资源的鉴定以及相关性状的全基因组关联分析[D]. 雅安:四川农业大学,2024:2-4
ZHANG G D. Identification of efficient utilization of phosphorus in maize germplasm resources and genome-wide association study of related traits[D]. Yaan: Sichuan Agricultural University, 2024: 2-4
- [22] 朱晓亚,张强强,于永超,等. 甘薯苗期耐低磷基因型筛选及磷效率综合评价[J]. 江苏师范大学学报(自然科学版),2023, 41(1):27-31,2
ZHU X Y, ZHANG Q Q, YU Y C, et al. Screening of low phosphorus tolerance genotypes and comprehensive evaluation of phosphorus efficiency in sweetpotato at seedling stage[J]. Journal of Jiangsu Normal University (Natural Science Edition), 2023, 41(1): 27-31, 2
- [23] 陈洁,南丽丽,汪莹,等. 低磷胁迫对红豆草光合、叶绿素荧光及内源激素的影响[J]. 草地学报,2023,31(1):112-119
CHEN J, NAN L L, WANG K, et al. Effects of low phosphorus stress on photosynthesis, chlorophyll fluorescence and endogenous hormones of sainfoin[J]. Acta Agrestia Sinica, 2023, 31(1): 112-119
- [24] 周富城,范佳豪,翟士运,等. 234份芥菜型油菜种质苗期耐低磷性综合评价[J]. 植物遗传资源学报,2025,26(12):2314-2326
ZHOU F C, FAN J H, ZHAI S Y, et al. Comprehensive Evaluation of Low Phosphorus Tolerance of 234 *Brassica juncea* Germplasms at Seedling Stage[J]. Journal of Plant Genetic Resource, 2025, 26(12): 2314-2326
- [25] 林雁. 低磷调控大豆根系细胞壁蛋白的鉴定及GmPAP1-like的功能初探[D]. 广州:华南农业大学,2018:36-38
LIN Y. Identification of phosphate starvation regulated cell wall proteins in soybean roots and functional characterization of GmPAP1-like[D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2018: 36-38
- [26] 于霆. 玉米苗期耐低磷种质资源鉴定与全基因组关联分析[D]. 雅安:四川农业大学,2024:44-46
YU T. Identification and genome-wide association study of

- maize germplasm resources for low phosphorus tolerance in seedlings[D]. Yaan: Sichuan Agricultural University, 2024: 44-46
- [27] 伊霞. 燕麦、玉米对养分供应响应的基因型差异[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2011: 11-14
YI X. Genotypic difference of oats and maize in response to nutrition-supply[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2011: 11-14
- [28] 齐红志, 马俊峰, 段俊枝, 等. 高温干旱复合胁迫对玉米器官发育、生理功能和产量形成的影响研究进展[J]. 江苏农业学报, 2025, 41(6): 1240-1248
QI H Z, MA J F, DUAN J Z, et al. Research progress on effects of combined heat and drought stress on organ development, physiological function and yield formation of maize[J]. Jiangsu Journal of Agricultural Sciences, 2025, 41(6): 1240-1248
- [29] 赵浩. 不同耐低磷性水稻对低磷胁迫的响应差异研究[D]. 绵阳: 西南科技大学, 2024: 39-41
ZHAO H. Study on the difference of response to low phosphorus stress in rice with different tolerance to low phosphorus [D]. Mianyang: Southwest University of Science and Technology, 2024: 39-41
- [30] 夏静, 南丽丽, 陈洁, 等. 低磷胁迫对不同根型苜蓿光合及叶绿素荧光特性的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2024, 42(1): 169-176
XIA J, NAN L L, CHEN J, et al. Effects of low phosphorus stress on photosynthetic and chlorophyll fluorescence characteristics of alfalfa with different root types [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2024, 42(1): 169-176
- [31] 秦成, 申洁, 祁茂冬, 等. 氯化镧对低磷胁迫下绿豆生理特性及相关基因表达的影响[J]. 江苏农业科学, 2023, 51(8): 105-110
QIN C, SHEN J, QI M D, et al. Impacts of lanthanum chloride on physiological characteristics and gene expression of mung bean under low phosphorus stress[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2023, 51(8): 105-110
- [32] 王晓澜, 乔云祥, 王艳彩, 等. 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]. 江苏农业科学, 2026, 54(3): 72-80
WANG X L, QIAO Y X, WANG Y C, et al. Physiological responses and excellent germplasm screening of wild barley at seedling stage under low phosphorus stress in plateau [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2026, 54(3): 72-80
- [33] 李靖怡. 酸性磷酸酶 OsACP1 在水稻缺磷适应性中的功能研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2020: 50-53
LI J Y. Function analysis of acid phosphatase 1 (OsACP1) in pi stress adaptation of rice [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2020: 50-53
- [34] 杨光. 氮磷互作对大豆根系天冬氨酸合成代谢的影响[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2024: 43-46
YANG G. Effects of nitrogen and phosphorus interaction on aspartate anabolism in soybean roots [D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2024: 43-46
- [35] SAGWAL V, KUMAR U, SIHAG P, et al. Physiological traits and expression profile of genes associated with nitrogen and phosphorous use efficiency in wheat[J]. Molecular Biology Reports, 2023, 50(6): 5091-5103
- [36] 陈晨. 低磷耐受差异基因型苕麻响应低磷胁迫的生理及分子机理[D]. 武汉: 华中农业大学, 2024: 113-115
CHEN C. Physiological and molecular mechanisms of different genotypes of ramie with low phosphorus tolerance in response to phosphorus deficiency [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2024: 113-115
- [37] 王伟伟. 低磷胁迫下不同磷效率燕麦品种根系分泌物的差异[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2017: 23-25
WANG W W. Differences in root exudates of oat cultivars with different P efficiency under low phosphorus stress [D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2017: 23-25
- [38] 黄丽霞, 张卫卫, 甄一越, 等. 盐胁迫下苦荞萌发期耐盐碱性评价及种质筛选[J]. 作物学报, 2026, 52(2): 459-479
HUANG L X, ZHANG W W, ZHEN Y Y, et al. Evaluation of salt-alkaline tolerance and germplasm screening of tartary buckwheat during germination under salt stress [J]. Acta Agonomica Sinica, 2026, 52(2): 459-479
- [39] LIN J B, LI X S, LU K L, et al. Low phosphorus causes hepatic energy metabolism disorder through dynamin-related protein 1 - mediated mitochondrial fission in fish [J]. The Journal of Nutrition, 2025, 155(1): 132-152
- [40] WEN J, CHAI X D, HUANG X S, et al. *PjPAH1-1* gene enhances plant tolerance to low phosphate stress by modulating cell membrane lipid remodeling [J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2025, 221: 109593
- [41] 何蓉, 南丽丽, 郭佳雨, 等. 外源褪黑素对低磷胁迫下紫花苜蓿生长及生理特性的影响[J]. 草地学报, 2026, 34(2): 632-642
HE R, NAN L L, GUO J Y, et al. Effects of exogenous melatonin on growth and physiological characteristics of alfalfa under low phosphorus stress [J]. Acta Agrestia Sinica, 2026, 34(2): 632-642
- [42] YADAV P K, BHUJEL P, BHANDARI N, et al. Screening tomato genotypes for early-stage drought tolerance using polyethylene glycol-induced osmotic stress [J]. BMC Plant Biology, 2025, 25(1): 1476
- [43] 王林杰, 邹晓燕, 董荣书, 等. 不同柱花草种质耐低磷综合评价及低磷响应基因挖掘[J]. 中国科学: 生命科学, 2024, 54(10): 1988-2002
WANG L J, ZOU X Y, DONG R S, et al. Evaluation of low phosphorus tolerance and identification of low phosphorus responsive genes in various *Stylosanthes guianensis* accessions [J]. Scientia Sinica (Vita), 2024, 54(10): 1988-2002
- [44] LIU X, DUAN L Q, SONG J M. Phosphorus limitation induces membrane lipid remodeling in aquatic phytoplankton [J]. Marine Environmental Research, 2025, 212: 107526

(责任编辑 彭露茜)