

doi:10.11920/xnmzdk.2025.01.001

# 6 个饲用燕麦品种苗期对低磷胁迫的响应及耐低磷评价

张昌兵<sup>1</sup>, 唐梅玲<sup>2</sup>, 周洋<sup>3</sup>, 张慧丽<sup>2</sup>, 余静波<sup>2</sup>, 陈仕勇<sup>2,3</sup>

(1. 四川省草原科学研究院, 四川 成都 611731; 2. 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; 3. 西南民族大学畜牧兽医学院, 四川 成都 610041)

**摘要:**为了探讨不同燕麦品种苗期对低磷胁迫的响应, 筛选出耐低磷能力强的品种, 选用 6 个燕麦品种, 采用水培试验, 对常量磷( $1 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ )和低磷胁迫( $0.02 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ )下燕麦苗期形态及根系性状进行测定。研究表明:在低磷胁迫下, 各燕麦品种株高、茎粗、叶长、叶宽大都显著下降( $P < 0.05$ ); 除青引 1 号外, 供试品种的总根长、根系表面积大都显著增加( $P < 0.05$ ), 根体积、根直径及根系活力大都显著下降( $P < 0.05$ ); 供试品种的地上干重和植株总干重都呈现不同程度的下降; 根冠比除太阳神外都显著增加( $P < 0.05$ ); 根系的干重各品种间则表现出不同的反应, 其中青海 444 和牧王在低磷下显著增加( $P < 0.05$ ), 青引 2 号和骏马则显著下降( $P < 0.05$ )。采用综合耐低磷系数评价 6 种燕麦品种的耐低磷能力依次为: 太阳神 > 骏马 > 青引 2 号 > 牧王 > 青海 444 > 青引 1 号。

**关键词:**饲用燕麦; 低磷胁迫; 根系形态; 主成分分析

中图分类号: S543.7

文献标志码: A

文章编号: 2095-4271(2025)01-0001-07

## Response of seedling growth and root morphology of six forage oat varieties to low phosphorus stress and evaluation of low phosphorus tolerance

ZHANG Changbing<sup>1</sup>, TANG Meiling<sup>2</sup>, ZHOU Yang<sup>3</sup>, ZHANG Huili<sup>2</sup>, YU Jingbo<sup>2</sup>, CHEN Shiyong<sup>2,3</sup>

(1. Sichuan Academy of Grassland Sciences, Chengdu 611731, China; 2. Sichuan Zoige Alpine Wetland Ecosystem National Observation and Research Station, Southwest Minzu University, Chengdu 610041, China; 3. School of Animal and Veterinary Sciences, Southwest Minzu University, Chengdu 610041, China)

**Abstract:** To investigate the seedling response of various oat varieties to low phosphorus stress and to identify those with high tolerance to such conditions, six oat varieties were selected for this experiment. Hydroponic tests were employed to assess the seedling morphology and root traits of oats under normal phosphorus ( $1 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ ) and low phosphorus stress ( $0.02 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ ). The results indicated that plant height, stem thickness, leaf length, and leaf width significantly decreased ( $P < 0.05$ ) under low phosphorus stress. Conversely, total root length and root surface area increased significantly ( $P < 0.05$ ), while root volume, root diameter, and root vigor decreased significantly ( $P < 0.05$ ) in most test varieties, with the exception of Qingyin No. 1. Above-ground dry weight and total plant dry weight exhibited varying degrees of decrease, while the root-crown ratio significantly increased ( $P < 0.05$ ) except the Titan oat. The dry weight of the root system displayed different responses among the varieties; specifically, Qinghai 444 and Haymaker showed significant increases ( $P < 0.05$ ) under low phosphorus conditions, whereas Qingyin No. 2 and Cayuse experienced significant decreases ( $P < 0.05$ ). The integrated low phosphorus tolerance coefficient was utilized to evaluate the low phosphorus tolerance of the six oat varieties, revealing the following order of tolerance: Titan > Cayuse > Qingyin No. 2 > Haymaker > Qinghai 444 > Qingyin No. 1.

**Keywords:** forage oat; low phosphorus stress; root morphology; principal component analysis

收稿日期: 2024-05-08

作者简介: 张昌兵(1975-), 男, 副研究员, 研究方向: 高寒牧草育种. Email: c. b. zhang@126.com

通信作者: 陈仕勇(1984-), 男, 教授, 博士, 研究方向: 高寒牧草种质创新及育种. Email: chensy@swun.edu.cn

基金项目: 国家重点研发计划课题(2017YFC0504806); 四川省“十四五”饲草育种攻关项目(2021YFYZ0013); 四川省农业科技成果转化项目(2023NZZJ0002)

磷是植物生长发育过程中不可或缺的营养元素,直接或间接地参与植物体内的各种生理和代谢过程,通过促进植株根系的形成和生长,增加作物对环境的适应能力<sup>[1]</sup>.植物苗期是植物生长发育的关键时期,也是对外界环境因子影响较为敏感的时期.植物苗期对磷素的利用效率对植株后期的生长发育具有较为重要的影响.土壤中有 80% 的磷是植物不可利用,植物只能吸收土壤中的无机磷酸盐,有些作物对其利用率甚至不到 15%<sup>[2-3]</sup>.农业上通常施用磷肥来满足植物对磷素的需求,但大部分的磷都被土壤吸附固定,通过降水沉淀转化为无效态磷,不能被作物利用,从而造成磷资源浪费<sup>[4]</sup>.土壤缺磷直接影响作物的产量与品质,土壤中可利用磷素含量过低,会影响植物的生长和发育,最后造成减产,这也成为了农业发展的重要问题.研究发现土壤缺磷会限制植物磷的活化、吸收、转运、分配及再利用,植物会通过增加根系长度、减小根直径来从而提高磷的利用率<sup>[5]</sup>.低磷胁迫下,植物还会出现光合作用受阻的情况,从而导致改变自身磷素对各器官组织的分配,改善其对自身磷的利用效率<sup>[6]</sup>.植物在低磷条件下的生长受抑制的程度不同,不同品种对磷素的吸收利用存在差异<sup>[7]</sup>.因此,从植物本身出发,发掘对磷素高效吸收利用的植物材料,成为解决土壤缺乏有效磷问题的重要突破口.

燕麦(*Avena sativa* L.)是禾本科燕麦属一年生草本植物,具有耐寒、抗旱、易栽培等优良特性,具有很高的饲用价值和营养价值.燕麦植株高大、产量高,是一种优良的粮饲兼用作物.燕麦在我国种植历史悠久且广泛种植,主要种植于内蒙古、甘肃、青海、四川、新疆等省区.燕麦具有产量高、营养价值高、易消化等优点,在畜牧养殖业中发挥了重要的作用,特别在我国的高寒地区是家畜冬春补饲的重要饲草<sup>[8]</sup>.目前对燕麦响应逆境的机制研究大多集中在盐碱<sup>[9]</sup>、干旱<sup>[10]</sup>等方面,而关于低磷等相关研究还较少.此外,随着国家对耕地资源的重视,开发利用边际土地种植牧草成为一种趋势,对资源高效利用型牧草品种的需求也快速增加,而关于饲用燕麦对磷素的吸收利用等还不明确.本研究选取国内外 6 个饲用燕麦品种为研究对象,通过不同磷水平的水培试验,测定植株地上形态、根系形态等指标,分析评价了不同品种在低磷胁迫下的生长特性,旨在筛选鉴定耐低磷胁迫的燕麦品种,

为选育耐低磷及高效利用型品种提供参考.

## 1 材料与方法

### 1.1 供试材料

本研究选用 6 个饲用燕麦品种,包括 3 个国审品种青海 444(*A. sativa* cv. Qinghai No. 444)、青引 1 号(*A. sativa* cv. Qingyin No. 1)、青引 2 号(*A. sativa* cv. Qingyin No. 2);3 个引进品种牧王(*A. sativa* cv. Haymaker)、骏马(*A. sativa* cv. Cayuse)、太阳神(*A. sativa* cv. Titan).供试品种种子均由西南民族大学牧草创新团队提供.

### 1.2 试验设计

将种子整齐均匀摆放在铺有两层滤纸的发芽盒(10 cm × 7 cm × 12 cm)中,放置恒温培养箱中.将恒温培养箱调至白天 24 °C,夜间 20 °C,每天用适量蒸馏水进行喷施,使滤纸始终保持湿润.出芽后用 1/4 营养液进行培养,待培养 10 d 后,每个品种选取长势一致的幼苗移至装有霍格兰营养液的水培箱(水培箱体积为 45 cm × 32 cm × 20 cm)于温室中培养,用海绵固定.温室温度条件为 22 °C/18 °C,湿度为 60%,光照/黑暗为 16 h/8 h,每 3 d 更换 1 次营养液并随即调换水培箱的位置.设置 2 个磷水平组,常磷 NP(1 mmol/L, KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>)和低磷 LP(0.02 mmol/L, KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>)2 个处理<sup>[11]</sup>,连续胁迫处理 14 d 后分别测定常磷与低磷条件下燕麦相关性状指标(期间氧气泵持续通气),每个指标测定 6 个生物学重复,每个重复 3 个单株.

### 1.3 测定项目与方法

植株形态:每个处理取 3 株长势一致的植株材料,使用直尺测量株高和叶长,用游标卡尺测量叶宽.地上、地下生物量分别将地上、地下部分植株在 105 °C 下烘干 15 min 后,65 °C 下烘干到恒重,分别称重测定.

根系形态:利用 EPSON Expression 扫描仪对植物根系指标进行测定,根系扫描后经过 Win RHIZO 根系分析系统软件分析根系图像,最终根据分析结果获得根系总长度、根表面积、根平均直径和根体积等指标.

根系活力:采用 TTC 法测定<sup>[12]</sup>.

根冠比:根冠比 = 地上部干重/地上部干重.

耐低磷系数:耐低磷系数 = 低磷处理时测定值/常磷处理测定值.

采用耐低磷性综合评价值 *D* 值进行耐低磷综合

评价,计算如下:

各指标的隶属函数值:

$$\mu(X_j) = \frac{(X_j - X_{min})}{(X_{max} - X_{min})} \quad (1)$$

$X_j$  为第  $j$  项指标值,  $X_{min}$  为第  $j$  项指标的最小值,  $X_{max}$  为第  $j$  项指标的最大值,如某一指标与耐低磷呈现出负的相关,就利用反隶属函数计算其耐低磷隶属函数值.

不同指标权重  $W_j$  :

$$W_j = \frac{V_j}{\sum_{j=1}^n V_j} \quad (2)$$

$W_j$  表示第  $j$  项指标的权重,  $V_j$  为各品种第  $j$  个综合指标贡献率.

耐低磷综合评价值:

$$D = \sum_{j=1}^n [\mu(X_j) \times W_j] \quad (3)$$

$D$  表示各材料耐低磷性综合评价值,  $D$  值越大表明耐低磷能力越强.

## 1.4 数据分析

本研究数据采用 SPSS 26.0 进行主成分分析和差异显著性分析, Origin 8.6 软件进行图的绘制.

## 2 结果分析

### 2.1 不同磷水平下燕麦品种各指标的变异情况

如表 1 所示,常磷浓度条件下,根系总长度的变异幅度最大(65.51%),叶宽的变异幅度最小(8.08%),根冠比变异幅度大于 50%,总投影面积、总根表面积、根体积、干重、地下部干重、根系活力变异幅度介于 20%~50% 之间,其余指标变异幅度均小于 20%. 这说明常磷条件下不同品种燕麦在根系总长度、根冠比变异比较明显,而茎粗、株高、叶宽等差异较小. 相比于低磷浓度组变异幅度没有超过 50% 的,变异幅度最大的是根体积,变异程度较小的有株高、叶长、茎粗这 3 个指标. 这说明低磷条件对不同品种燕麦根体积、根系总长度等影响比较明显,对茎粗、叶长、株高等影响程度较小.

表 1 不同磷水平下燕麦苗期性状变异程度

Table 1 Extent of variation in seedling traits of oat under different phosphorus levels

指标 Indicators	常磷 Normal phosphorus			低磷 Low phosphorus		
	均值 Mean	标准差 SD	变异系数 CV(%)	均值 Mean	标准差 SD	变异系数 CV(%)
根系总长度 Total root length(cm)	471.089	241.412	65.510	368.492	146.236	39.690
总投影表面积 root projection area(cm <sup>2</sup> )	14.208	5.739	41.070	13.974	5.467	39.120
总根表面积 root surface area(cm <sup>2</sup> )	44.653	18.033	41.090	43.882	17.152	39.090
根系平均直径 root diameter(mm)	0.326	0.063	16.450	0.383	0.088	22.930
根体积 root volume(cm <sup>3</sup> )	0.350	0.119	28.320	0.420	0.173	41.310
总干重 Total dry weight(g)	0.158	0.062	26.620	0.231	0.061	26.250
地上部干重 Shoot dry weight(g)	0.075	0.028	18.830	0.149	0.038	25.600
根系干重 Root dry weight(g)	0.082	0.031	38.750	0.080	0.028	35.010
株高 Plant height(cm)	31.835	4.256	9.990	42.583	3.994	9.380
叶长 Leaf length(cm)	23.948	3.377	10.420	32.395	4.999	15.430
茎粗 Stem diameter(mm)	2.240	0.401	13.730	2.923	0.477	16.310
叶宽 Leaf width(mm)	6.197	0.701	8.080	8.671	2.220	25.610
根系活力 Root vigor	268.701	164.752	42.170	390.689	134.118	34.330
根冠比 Root/shoot ratio	1.118	0.303	54.250	0.559	0.199	35.690

## 2.2 不同磷水平下燕麦苗期地上部形态特征

如图 1 所示,6 个燕麦品种中,在低磷胁迫下,除品种太阳神的叶长和叶宽无显著差异以外,其他各品种的指标在低磷胁迫下与常磷环境下的差异显著 ( $P < 0.05$ ). 在常磷处理下,太阳神的各形态指标指数均显著低于其余 5 个品种. 在低磷处理中,骏马的叶长最高,青引 1 号的叶长最低,与其余 5 个品种相

比均具有显著差异 ( $P < 0.05$ ). 与常磷处理相比,除品种太阳神的叶长和叶宽无显著差异以外,其余各燕麦品种的形态指标均都呈现出显著下降的趋势 ( $P < 0.05$ ),其中青引 1 号叶长、茎粗和株高受抑制较为明显,分别下降了 41.9%、31.5% 和 41.4%;青引 2 号、青海 444、太阳神、牧王、骏马的茎粗分别下降了 20.1%、22.0%、15.2%、25.5%、34.5% ( $P < 0.05$ ).

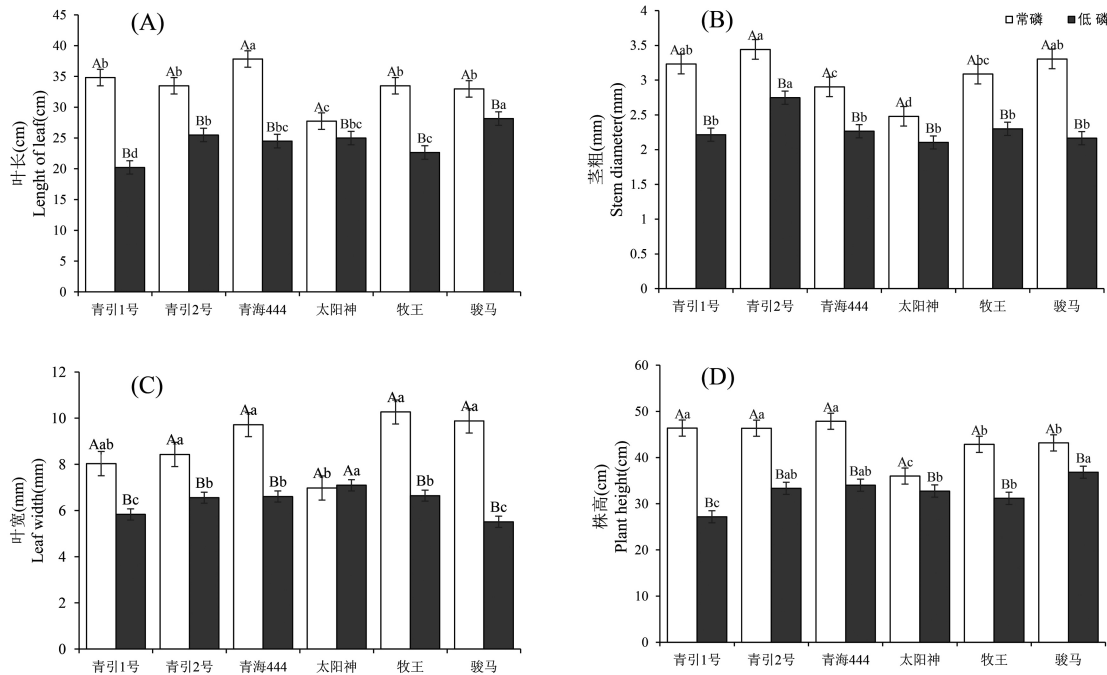


图 1 不同磷水平对燕麦地上部形态的影响

Fig. 1 Effects of different phosphorus levels on the aboveground morphology of oats

注:不同大写字母表示同一品种不同浓度处理间差异达到显著水平 ( $P < 0.05$ );  
不同小写字母表示同一浓度处理下不同品种间差异达到显著水平 ( $P < 0.05$ ). 下同

## 2.3 不同磷水平下燕麦苗期根系形态特征

如图 2 所示,常磷处理下,太阳神的根系形态指标除根系直径和根系活力指数较高以外,其他各指标均显著低于其他品种 ( $P < 0.05$ ). 低磷处理下,燕麦的根系长度、根系投影面积最大和最小的品种分别为青海 444 和太阳神,根系直径和根系活力指数最大和最小的品种分别为青引 1 号和太阳神. 与常磷相比,低磷胁迫下,除青引 1 号外,5 个品种的总根长都呈显著增加的趋势 ( $P < 0.05$ ),其中青海 444 和牧王的增幅分别达到 101.4% 和 78.4%. 在低磷下,根系投影面积和根系表面积指标的变化趋势一致,其中青引 1 号显著下降,其余品种呈现增加趋势,其中青海 444

的增幅均为最大. 低磷下各燕麦品种的根体积均呈现下降趋势,其中仅有牧王降幅达到显著 ( $P < 0.05$ ). 低磷胁迫下除青引 1 号,其余 5 个品种的根系直径显著降低 ( $P < 0.05$ ),其中太阳神的根平均直径下降幅度最大,达到了 36.6%. 除青引 1 号外,其余 5 个品种在低磷胁迫下根系活力都显著低于常磷水平 ( $P < 0.05$ ),其中骏马下降幅度最大,达到了 60.04%;青引 1 号的根系活力在常磷和低磷水平下都显著大于其他 5 个品种 ( $P < 0.05$ ). 低磷胁迫对不同品种燕麦的根系指标的影响不同,低磷环境抑制了燕麦根系体积的生长,增加了燕麦根系的总根系长度和表面积等指标.

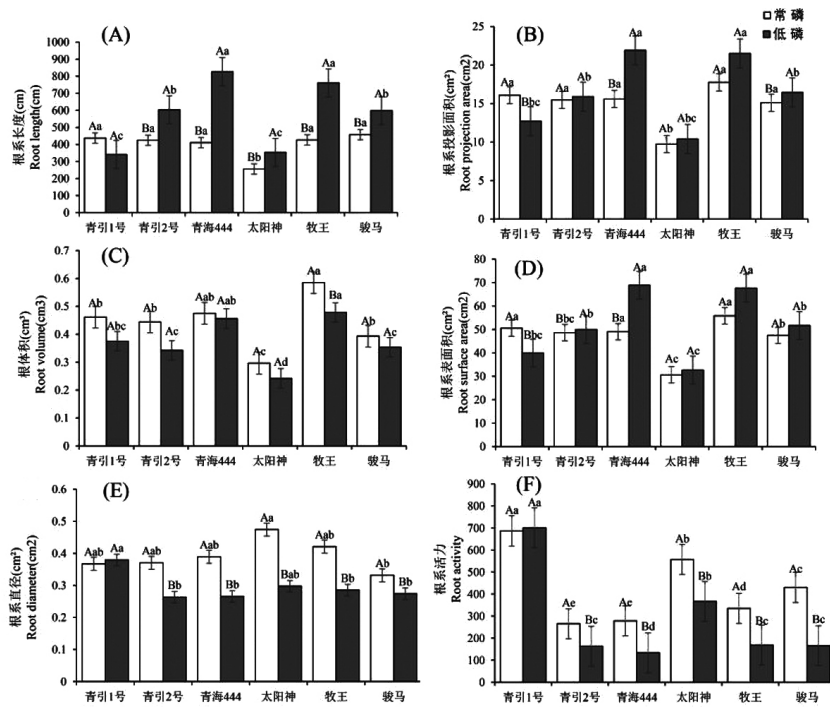


图 2 不同磷水平对燕麦根系的影响

Fig. 2 Effects of different phosphorus levels on oat root system

2.4 不同磷水平下燕麦苗期的生物量

如图 3 所示,在常磷处理中,太阳神的地上部干重、根系干重和干重均最低,而根冠比则最高,青引 2 号的地上部干重和干重均最高,而根冠比则最低.在低磷胁迫下,青海 444 的生物量指数均较高,而太阳神其指数均较低.低磷胁迫下,6 个品种燕麦的地上部干重、全株干重与常磷相比显著下降 ( $P < 0.05$ ),且青引 2 号降低的幅度最大,分别是 68.57% 和

54.99%. 与常磷相比,低磷胁迫下 6 个品种燕麦的地下部干重的表现不同,青海 444 和牧王的地下部干重与常磷相比显著升高 ( $P < 0.05$ ),青引 1 号和太阳神无显著变化,而青引 2 号和骏马显著下降 ( $P < 0.05$ ).在低磷胁迫下,除太阳神外,其余 5 个品种的根冠比都显著增加 ( $P < 0.05$ ),增幅最大的是牧王,达到了 72.30%.

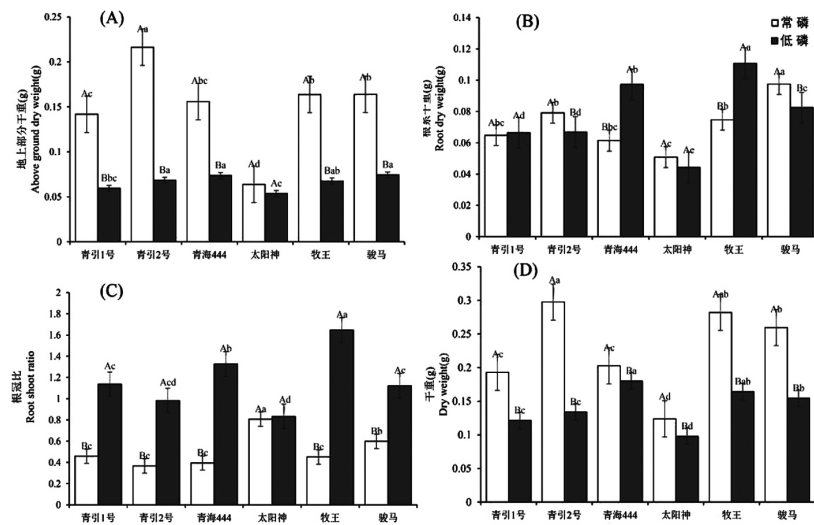


图 3 不同磷水平对燕麦生物量的影响

Fig. 3 Effects of different phosphorus levels on oat biomass

## 2.5 不同燕麦品种耐低磷能力的主成分分析及耐低磷能力综合评价

主成分分析可以将存在相关关系的多个变量转化成几个新的综合变量,综合变量可反映原有多个变量的主要信息,从而可以综合、科学地评价植物的抗逆特性.本研究将 14 个指标的耐低磷系数进行主成分分析,如图 4 所示,以便准确地评价不同燕麦品种的低磷胁迫的反应机制.第 1 主成分的贡献率为 41.7%,载荷较高的是根系总长度、总投影表面积、总

根表面积,反映了根系形态因子.第 2 主成分贡献率为 28.3%,载荷较高的是整株干重、地上部分干重,反映了生物量因子.综合主成分分析结果,得出根系形态因子和生物量因子可作为燕麦苗期耐低磷性的评价指标.利用隶属函数公式可计算出 6 个燕麦品种的耐低磷性综合评价值  $D$  值,并用  $D$  值大小对其耐低磷性进行排序,结果为:太阳神(0.604 4) > 骏马(0.553 6) > 青引 2 号(0.486 0) > 牧王(0.479 4) > 青海 444(0.463 4) > 青引 1 号(0.429 5).

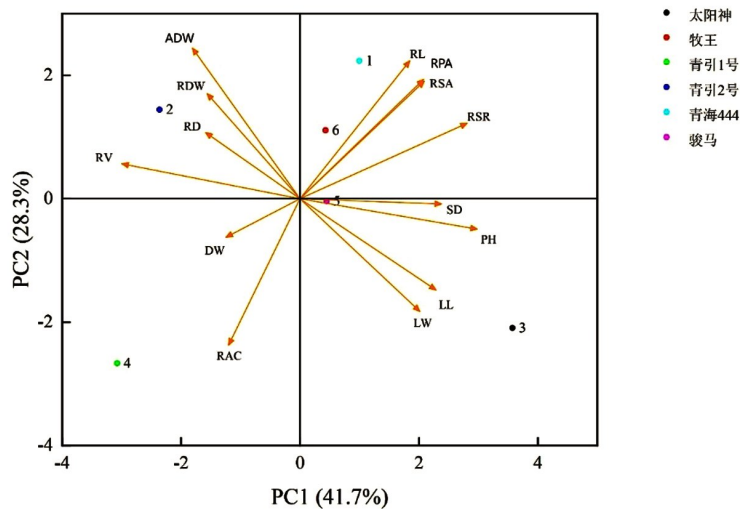


图 4 6 个燕麦品种与性状因子的 PCA 分析

Fig. 4 PCA Analysis of six oat varieties and their trait factors

RL:根系总长度 Root length;RPA:根系投影面积 Root projection area;RSA:总根系表面积 Root surface area;  
RD:根系平均直径 Root diameter;RV:根体积 Root volume;DW:干重 Dry weight;ADW:地上部干重 Aboveground dry weight;  
RDW:根系干重 Root dry weight;PH:株高 Plant height;LL:叶长 Length of leaf;SD:茎粗 Stem diameter;LW:叶宽 Leaf width;  
RAC:根系活力 Root activity;RSR:根冠比 Root-shoot ratio

## 3 讨论

磷是植物生长发育所必需的矿质营养元素之一,是植物的主要构成部分,直接或间接地参与能量传递、信号转导、光合作用、呼吸作用等一系列生理和代谢过程<sup>[13-14]</sup>.研究发现低磷胁迫抑制了水稻(*Oryza sativa*)的叶长和叶宽<sup>[15]</sup>,使红豆草(*Onobrychis viciifolia*)的株高、叶面积明显下降<sup>[16]</sup>,也能使玉米(*Zea mays*)的株高、茎粗、叶片数显著降低<sup>[17]</sup>.本研究也有相似发现,低磷胁迫抑制了燕麦幼苗的地上部生长,使株高、茎粗、叶长、叶面积指数都有不同程度的降低.这说明磷缺乏会影响植物生理代谢和干物质积累,低磷在一定程度上抑制了燕麦幼苗形态性状的生长<sup>[18]</sup>.

生物量的改变是植物应对逆境的综合响应.前人

通过对大豆(*Glycine max*)<sup>[19]</sup>、小麦(*Triticum aestivum*)<sup>[20]</sup>、高粱(*Sorghum bicolor*)<sup>[21]</sup>等植物苗期耐低磷能力的研究中发现,地上部生物量可作为植物低磷耐力的关键指标,耐低磷幼苗在低磷胁迫下仍能维持较高的地上部生物量.本研究发现,低磷胁迫降低了燕麦的地上部干重、全株干重,而太阳神其指数降幅相对较小.这表明低磷降低了燕麦幼苗的干重,但抑制程度在不同品种之间表现不同,耐低磷品种的降低幅度变化较小.调节根冠比是植物应对低磷胁迫的普遍策略.除太阳神外,在低磷胁迫下,燕麦的根冠比均增加显著,说明燕麦幼苗在低磷条件胁迫时,会通过增加根冠比以此来提高根部的吸收率,以确保植株获得足够的磷素来维持其生长发育<sup>[22]</sup>.

根的功能性和其可塑性是植物吸收磷的关键。前人研究发现,低磷胁迫下紫花苜蓿 (*Medicago sativa*)<sup>[23]</sup>、水稻<sup>[24]</sup>等的根长、根面积及根数量、侧根数量与常磷环境下相比都有不同程度的增加。本研究中,低磷胁迫下燕麦幼苗的根系长度、根系总投影面积和总根表面积都有所增加。这主要是因为低磷胁迫下,燕麦通过增加根系系数,以此扩大根系与养分的接触面积,从而提高对磷的吸收力,以此来应对低磷胁迫。植物的根系活力反映了植物根部的生命力和适应环境的能力,与植物的磷素等吸收效率之间密切相关<sup>[25]</sup>。本研究发现,除青引 1 号外,低磷导致燕麦幼苗根系活力显著下降,表明低磷限制影响了燕麦幼苗根系活力,影响了其对水分和养分的吸收;但其中青引 1 号的根系活力在低磷胁迫下没有变化,表明其根系活力对磷素的变化响应不敏感。

## 4 结论

燕麦幼苗通过增加其根系长度、投影面积、表面积、根系干重和根冠比来适应低磷的胁迫,其株高、叶长、叶宽、茎粗、地上部干重和全株干重等指标受到了明显抑制。供试燕麦材料的苗期耐低磷能力的强弱依次为:太阳神 > 骏马 > 青引 2 号 > 牧王 > 青海 444 > 青引 1 号。

## 参考文献

- [1] 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.
- [2] MIRANDA D, FISCHER G, ULRICHS C. The influence of arbuscular mycorrhizal colonization on the growth parameters of cape gooseberry (*Physalis peruviana* L.) plants grown in a saline soil[J]. Journal of Soil Science and Plant Nutrition,2011,11(2):18-30.
- [3] 李生秀. 植物营养与肥料学科的现状与展望[J]. 植物营养与肥料学报,1999(3):193-205.
- [4] REN P, MA X, LI B, et al. Identification and selection of low-phosphate-tolerant germplasm in barley (*Hordeum vulgare* L.) [J]. Soil Science and Plant Nutrition,2016,62(5-6):471-480.
- [5] HU D, KHAN I U, WANG J, et al. Invasive wedelia trilobata performs better than its native congener in various forms of phosphorous in different growth stages [J]. Plants,2023,12(17):3051.
- [6] TIMLIN D J, NAIDU T C M, FLEISHER D H, et al. Quantitative effects of phosphorus on maize canopy photosynthesis and biomass [J]. Crop Science,2017,57(6):3156-3169.
- [7] MENG X, LIU N, ZHANG L, et al. Genotypic differences in phosphorus uptake and utilization of watermelon under low phosphorus stress [J]. Journal of Plant Nutrition,2014,37(2):312-326.
- [8] 杨晶,刘文辉,梁国玲,等. 高寒地区不同燕麦品系抗倒伏相关性状分析[J]. 草业学报,2020,29(12):50-60.
- [9] 刘建新,刘瑞瑞,刘秀丽,等. 盐碱胁迫下外源硫化氢对裸燕麦叶片氨基酸代谢过程的影响[J]. 草业学报,2023,32(2):119-130.
- [10] 金祎婷,刘文辉,刘凯强,等. 全生育期干旱胁迫对‘青燕 1 号’燕麦叶绿素荧光参数的影响[J]. 草业学报,2022,31(6):112-126.
- [11] 张慧丽,叶莉,周洋,等. 不同供磷水平对饲用燕麦幼苗生长发育的影响[J]. 草学,2023(2):27-31.
- [12] 朱秀云,梁梦,马玉. 根系活力的测定(TTC 法)实验综述报告[J]. 广东化工,2020,47(6):211-212.
- [13] 王枫,王玉凤,许晓萱,等. 低磷胁迫下玉米幼苗生理响应及相关基因表达研究[J]. 玉米科学,2021,29(1):77-84.
- [14] WANG Z Q, HUANG H, DENG J M, et al. Scaling the respiratory metabolism to phosphorus relationship in plant seedlings [J]. Scientific Reports,2015,5:16377.
- [15] 余冰雨,邢媛,王泽港,等. OsGRF1 基因在水稻形态和生理响应低磷胁迫中的作用研究[J]. 扬州大学学报(农业与生命科学版),2023,44(1):8-20+28.
- [16] 陈洁,南丽丽,汪堃,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.
- [17] 刘小龙,张新疆,危常州,等. 不同磷水平土壤上磷启动肥对玉米生长效应的研究[J]. 中国土壤与肥料,2022(10):156-162.
- [18] 陈雯彬,欧阳泽怡,欧阳硕龙,等. 低磷胁迫对植物生长及生理特性影响的研究进展[J]. 湖南林业科技,2020,47(3):132-136+146.
- [19] 王晶琴,石贵阳,杨松花,等. 不同基因型大豆苗期耐低磷性鉴定及指标筛选[J]. 福建农业学报,2022,37(6):702-711.
- [20] 蒲子天,张弛,张佳崎,等. 供磷水平对苗期小麦地上和地下部性状关联性的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2022,28(9):1594-1602.
- [21] 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.
- [22] KUMAR A, SHAHBAZ M, KOIRALA M, et al. Root trait plasticity and plant nutrient acquisition in phosphorus limited soil [J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science,2019,182(6):945-952.
- [23] 潘新雅,李军保,陈阳,等. 6 个紫花苜蓿品种根系形态结构对低磷胁迫的响应[J]. 草地学报,2021,29(11):2494-2504.
- [24] 苑义川,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.
- [25] WEI H, HU L, ZHU Y, et al. Different characteristics of nutrient absorption and utilization between inbred japonica super rice and inter-sub-specific hybrid super rice [J]. Field Crops Research,2018,218:88-96.

(责任编辑:和力新,殷锋,付强,张阳,肖丽;英文编辑:周序林,郑玉才)