

doi:10.11733/j.issn.1007-0435.2026.02.002

引用格式:冯恣萱,许紫莹,马红艳,等.磷添加对不同品种苜蓿生物量及根系可塑性的影响[J].草地学报,2026,34(2):392—402

FENG Zi-xuan, XU Zi-ying, MA Hong-yan, et al. Effects of Phosphorus Addition on Biomass and Root Plasticity of Different Alfalfa Varieties[J]. Acta Agrestia Sinica, 2026, 34(2):392—402

磷添加对不同品种苜蓿生物量及根系可塑性的影响

冯恣萱,许紫莹,马红艳,荆晶莹*

(中国农业大学草业科学与技术学院,北京 100193)

摘要:为研究苜蓿根系形态的可塑性对不同磷供应强度的响应,选取30个不同的紫花苜蓿(*Medicago sativa* L.)品种和1个黄花苜蓿(*Medicago falcata* L.)品种,分别设置 P_5 ($5\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}\text{ KH}_2\text{PO}_4$)、 P_{20} ($20\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}\text{ KH}_2\text{PO}_4$)和 P_{50} ($50\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}\text{ KH}_2\text{PO}_4$)三个水平的磷添加处理,通过测定31个品种苜蓿的地上、地下生物量及根系形态指标,明确不同品种的苜蓿响应不同磷添加水平的差异,以期筛选出耐低磷的磷高效苜蓿品种。结果表明, P_5 处理下苜蓿地上和地下生物量最低,随着供磷量的增加,苜蓿的地上生物量显著提高,在 P_{50} 处理下最高。在 P_{20} 和 P_{50} 处理下,苜蓿的根系生物量显著高于 P_5 处理,而根系形态在不同品种间差异显著。其中‘旱地’‘阿尔冈金’‘Magna Graze II’‘龙牧801’在低磷水平下较其他品种生物量高,且根长、根体积、根表面积以及根直径表现出更强的可塑性,为极耐低磷的磷高效品种。研究结果为苜蓿的合理栽培、磷肥利用率的提高提供科学依据。

关键词:磷水平;苜蓿;根系形态;磷高效品种

中图分类号:S541

文献标识码:A

文章编号:1007-0435(2026)02-0392-11

Effects of Phosphorus Addition on Biomass and Root Plasticity of Different Alfalfa Varieties

FENG Zi-xuan, XU Zi-ying, MA Hong-yan, JING Jing-ying*

(College of Grassland Science and Technology, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

Abstract: To investigate the responses of alfalfa root morphological traits to phosphorus supply, a total of 31 plant materials were selected comprising 30 varieties of *Medicago sativa* L. and one variety of *Medicago falcata* L., and three levels of phosphorus addition treatments were set up at P_5 ($5\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}\text{ KH}_2\text{PO}_4$), P_{20} ($20\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}\text{ KH}_2\text{PO}_4$), and P_{50} ($50\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}\text{ KH}_2\text{PO}_4$). To screen low phosphorus tolerant alfalfa varieties with high phosphorus use efficiency, we measured the aboveground and belowground biomass and root morphological indices for the 31 alfalfa varieties. The results indicated that the aboveground and belowground biomass of alfalfa were lowest under P_5 treatment. With increasing phosphorus supply, the aboveground biomass of alfalfa significantly increased, reaching its highest level under the P_{50} treatment. Under the P_{20} and P_{50} treatments, the root biomass of alfalfa was significantly higher than that under P_5 , but there was no significant difference between P_{20} and P_{50} . However, the root morphology showed significant variation among different varieties. Among them, ‘HD’ ‘Algonquin’ ‘Magna Graze II’ and ‘Longmu 801’ had higher biomass than other varieties, and exhibited greater root morphological plasticity with higher root length, root volume, root surface area, and root diameter, which demonstrated tolerance to low phosphorus condition. The results provide a scientific basis for optimizing alfalfa cultivation and improving phosphorus fertilizer utilization efficiency.

Key words: Phosphorus level; Alfalfa; Root morphology; Phosphorus-efficient varieties

收稿日期:2025-04-11;修回日期:2025-06-06

基金项目:中法农业生态—农业绿色发展国际联合实验室项目(2024YFE0105000)资助

作者简介:冯恣萱(2002-),女,汉族,四川成都人,硕士研究生,主要从事草地生产与利用研究, E-mail:15228827090@163.com;*通信作者
Author for correspondence, E-mail:jingying.jing@cau.edu.cn

苜蓿是一种多年生优质豆科牧草,因其蛋白含量高、产草量高而有着“牧草之王”的美称^[1]。我国苜蓿栽培历史悠久,苜蓿广泛分布于西北、华北、东北等地^[2],因其饲喂价值高、适应能力强,适宜在全国范围内大面积种植^[3],对畜牧业的发展有着极其重要的意义。磷是植物生长发育必不可少的大量营养元素之一,约占植物干重的 0.2%,不仅是核酸、磷脂和 ATP 等关键分子的组成成分,还参与控制酶反应和一些代谢途径的调节^[4]。土壤中的磷分为有机磷和无机磷两种形式^[5],而大部分以有机磷的形式存在,有机磷很难被苜蓿直接吸收利用,导致土壤中有效磷含量低,限制了苜蓿对磷素的吸收^[6],进而影响其产量和营养品质。研究发现,合理施磷肥可以显著提高作物产量^[7],但磷肥的大量使用仍旧有很多局限性。首先,磷肥的持续施用会对环境造成污染,造成水体富营养化等^[8];其次,磷肥利用效率低,持续大量使用会增加农民经济负担^[9];此外,合成磷肥的磷矿是不可再生资源,我国面临着磷资源枯竭的挑战^[10]。因此,探索植物磷高效利用机制迫在眉睫。

植物在应对低磷胁迫时,会采取不同的策略来提高磷吸收和利用效率^[11-13]。它们可以通过降低自身的磷需求、优化磷分配以及增加磷的停留时间来提高自身的磷利用效率^[14]。对苜蓿生产而言,磷是关键的营养元素,能够增加苜蓿的蛋白质含量^[15],Berg 等^[16]的研究中指出,磷肥的施用对苜蓿生物量的增加具有明显的促进作用,并且能够促进苜蓿根系的伸长^[17]。土壤中有效磷含量升高或降低会导致苜蓿根系形态发生变化,Sun 等^[18]的研究证实根体积是影响苜蓿磷吸收的关键根系性状,潘新雅等^[19]对 6 个紫花苜蓿品种的研究发现根系形态结构对低磷胁迫的响应在不同基因型紫花苜蓿之间存在差异,其中‘赛迪’在低磷胁迫下的磷利用效率增加,而其余五个品种都降低。马红^[20]对 6 个品种的苜蓿在不同磷水平下的研究中发现不同品种苜蓿的根系形态指标最大值和最小值在不同磷水平下出现,且品种之间存在差异。然而,不同品种的苜蓿对磷供应强度的响应差异尚不明确,也缺乏低磷胁迫下各品种生物量和根系形态性状差异的研究,这类研究对于筛选适于低磷条件种植的苜蓿品种至关重要。

为了进一步探索不同品种苜蓿响应不同磷供应水平的差异,提高种植系统的磷素获取和利用效率,通过适宜品种的栽培解决饲草生产中磷缺乏的

问题,本研究通过对 30 个紫花苜蓿 (*Medicago sativa* L.) 品种和 1 个黄花苜蓿 (*Medicago falcata* L.) 品种在三种磷水平下根系形态特性进行研究,旨在筛选出磷高效苜蓿品种,为后续在磷素限制地区种植苜蓿和选育高效品种提供理论基础和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试材料为 30 个紫花苜蓿品种以及 1 个黄花苜蓿品种。相关信息如表 1 所示。

表 1 供试苜蓿品种信息
Table 1 Varieties used in the experiment

品种编号 Number	品种名称 Name	品种缩写 Abbreviation	品种来源 Origin
1	敖汉 Aohan	AH	中国 China
2	甘农 3 号 Gannong No.3	Gn3	中国 China
3	甘农 4 号 Gannong No.4	Gn4	中国 China
4	准格尔 Neimeng Zhungeer	ZGE	中国 China
5	甘农 9 号 Gannong No.9	Gn9	中国 China
6	甘农 5 号 Gannong No.5	Gn5	中国 China
7	龙牧 803 Longmu 803	803	中国 China
8	农菁 1 号 Nongjing No.1	Nj1	中国 China
9	公农 2 号 Gongnong No.2	Ggn2	中国 China
10	龙牧 806 Longmu 806	806	中国 China
11	皇冠 Phabulous	HG	美国 USA
12	中苜 1 号 Zhongmu No.1	ZM1	中国 China
13	巨能 7 Magnum 7	JN7	美国 USA
14	中苜 4 号 Zhongmu No.4	ZM4	中国 China
15	清水苜蓿 Qingshui	qsmx	中国 China
16	3010	3010	阿拉伯联合酋长国 UAE
17	中苜 3 号 Zhongmu No.3	ZM3	中国 China
18	东苜 1 号 Dongmu No.1	DM1	中国 China
19	WL343HQ	WL343	美国 USA
20	三得利 Sanditi	sdl	美国 USA
21	WL354HQ	WL354	美国 USA
22	4030	4030	加拿大 Canada
23	阿尔冈金 Algonguin	argj	加拿大 Canada
24	黄花苜蓿 Sickle alfalfa	HHmx	中国 China
25	驯鹿 AC Caribou	xl	加拿大 Canada
26	腾格里 Tenggeli	tgl	中国 China
27	龙牧 801 Longmu 801	801	中国 China
28	Magna Graze II	MG	美国 USA
29	旱地 Rambler	HD	美国 USA
30	斯贝德 Spyder	sbd	中国 China
31	赛迪 5 号 Sardi 5	SD	澳大利亚 Australia

1.2 试验设计

本次试验采用盆栽试验,土壤为河北曲周实验站的农田土壤,原土 P 含量为 4.25 mg·kg⁻¹,沙子为洗净晒干后的河沙。使用前均风干,过 2 mm 筛。

将沙与土按2:8的比例混合,采用容积为1 L的塑料盆为试验容器,每盆装土1 kg。供试材料包括30个紫花苜蓿品种和1个黄花苜蓿品种,为探究不同品种苜蓿根系性状对磷胁迫的响应,设置从低磷到常磷3个梯度的磷处理,分别为 P_5 ($5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ KH}_2\text{PO}_4$)、 P_{20} ($20 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ KH}_2\text{PO}_4$)、 P_{50} ($50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ KH}_2\text{PO}_4$),其中 P_{50} 为正常磷供应量^[21]。共计93个处理,每个处理4次重复,共计372盆。植物生长所需其他养分含量参照Wen等^[22]的方法确定,试验于中国农业大学日光温室进行。 P_5 、 P_{20} 、 P_{50} 均以 KH_2PO_4 溶液形式加入,不同磷添加后的钾差异由 KCl 溶液补齐。播种前,所有花盆都要浇水,在温室中静置,以达到土壤养分平衡。

播种前先将苜蓿种子在30% H_2O_2 溶液中浸泡消毒5分钟,用去离子水冲洗3次,均匀放在湿润的滤纸上置于25℃恒温培养箱,培养至露白时挑选发芽强壮均一的种子盆中,每盆种20颗,用牛皮纸遮阳一天,防止小苗被晒死。播种一周后,在长出两片真叶时,每盆留下5株长势均一强壮的幼苗。每周调换盆栽位置,减小环境因素的影响。试验期间用去离子水补充水分,通过称重将土壤含水量保持在田间持水量的60%,播种110天后收获植株。

1.3 测定指标及方法

生物量测定:将植株茎基部剪断,茎叶部分放于牛皮纸袋105℃杀青30 min后60~65℃下烘干72 h至恒重得到地上部生物量。把根系从土壤中小心完整取出,轻轻抖落大块土壤,将土壤中主根系和其他肉眼可见的碎根用镊子取出,并过2 mm筛以确保根系尽可能收集完全,然后将根系置于-20℃冰箱中保存,用于后续指标的测定。根系扫描后于60~65℃下烘干72 h至恒重,称量根干重,得到单株根系生物量数据。

根系指标的测定:用Epson Perfection V800 Photo扫描仪于600dpi进行扫描,用WinRhizo根系分析软件分析根系总长度(Total root length, TRL)、根系总表面积(Root surface area, RSA)和平均根系直径(Root diameter, RD)等参数,计算总根系的比根长(Specific root length, SRL)、根组织密度(Root tissue density, RTD)等相关指标。

1.4 数据处理与统计分析

采用Microsoft Excel 2010进行原始数据的整

理,运用SPSS 27.0进行数据统计分析。采用双因素方差分析(Two-Way ANOVA)检验不同磷水平处理方式下不同苜蓿品种的生物量和根系形态指标之间的差异($P < 0.05$),采用单因素方差分析(One-Way ANOVA)检验不同磷水平下苜蓿的地上部和地下部干重的差异。采用隶属函数法对31个苜蓿品种进行耐低磷综合评价,利用Origin软件通过层次聚类的方法进行聚类分析,将31个供试苜蓿品种和3个磷水平共93个处理根据生物量和根系形态指标进行归类,利用Origin软件作图。

隶属函数值计算公式如下^[23]:

$$\mu(X_i) = (X_i - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min}) \quad (1)$$

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

$$D = \sum_{i=1}^n [\mu(X_i) \times W_j], i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

X_i 为某一指标测定值, $X_{\max}$ 和 $X_{\min}$ 分别为某一指标的最大值和最小值, $\mu(X_i)$ 表示第 j 个综合指标的隶属函数值, P_j 代表经主成分分析所得各个苜蓿品种的第 j 个综合指标的贡献率, W_j 表示第 j 个综合指标的权重。 D 值为各个苜蓿品种在磷胁迫条件下由综合指标评价所得的耐低磷性能综合评价值。

2 结果与分析

2.1 不同磷添加处理对苜蓿生物量的影响

磷处理显著影响了不同苜蓿品种地上部分干重和地下部干重($P < 0.001$),且二者交互作用也对植株地上部分和地下部分干重都产生显著影响($P < 0.001$)(表2,图1)。

P_{50} 处理下的地上部干重显著高于 P_{20} 和 P_5 处理($P < 0.05$),且 P_{20} 处理下的地上部干重显著高于 P_5 处理($P < 0.05$)(图1a)。在 P_5 处理下,‘argj’‘3010’‘HD’‘MG’的地上部生物量较高,其中‘argj’的地上部干重最大,为 $1.005 \text{ g} \cdot \text{plot}^{-1}$,而‘Gn9’‘Gn4’‘ZGE’‘Gn5’的地上部干重较低,其中‘Gn9’的地上部干重最小,为 $0.11 \text{ g} \cdot \text{plot}^{-1}$ 。 P_{20} 处理下,‘argj’‘3010’‘803’‘SD’的地上部干重较高,其中‘argj’的地上部干重最大,为 $1.86 \text{ g} \cdot \text{plot}^{-1}$,‘qsmx’‘sbd’‘801’‘WL354’地下部生物量较低,其中‘qsmx’的地下部干重最小,为 $0.86 \text{ g} \cdot \text{plot}^{-1}$ 。 P_{50} 处理下不同品种之间存在显著差异,‘HG’‘sbd’‘MG’‘ZM3’的地上部生物量较高,‘xjdy’‘Ggn3’‘WL354’‘Gn3’

‘HHmx’‘sdl’地上生物量较低(图 1c)。

P₅处理下苜蓿的地下部干重显著低于 P₂₀和 P₅₀处理($P<0.05$),但 P₂₀处理和 P₅₀处理下的苜蓿地下部干重没有显著差异(图 1b)。P₅处理下‘HD’‘MG’‘801’‘argj’的地下部干重较高,其中‘HD’的地下部干重最大,为 0.99 g·plot⁻¹。P₂₀处理下‘SD’‘4030’‘3010’‘xl’的地下部干重较高,其中‘SD’的地下部干

重最大,为 1.63 g·plot⁻¹,‘qsmx’‘801’‘JN7’‘HG’的地下部干重较低,其中‘qsmx’的地下部干重最小,为 0.49 g·plot⁻¹。P₅₀处理下地下部干重较高的品种有‘ZM1’‘Ggn2’‘MG’‘ZM3’,其中‘ZM1’的地下部干重最大,为 1.48 g·plot⁻¹,而‘WL354’‘HHmx’‘qsmx’‘sdl’的地下部干重则较低,其中‘WL354’的地下部干重最小,为 0.71 g·plot⁻¹(图 1d)。

表 2 磷素水平和品种对苜蓿生物量的双因素方差分析

Table 2 Results of two-way ANOVA for dry mass among 31 alfalfa species and three soil phosphorus (P) treatments

指标 Index	磷处理 P treatment			品种 Variety			品种×磷处理 Variety×P treatment		
	df	F	P	df	F	P	df	F	P
地上部分干重 Shoot dry mass	2	732.216	<0.001	30	3.478	<0.001	60	1.972	<0.001
地下部分干重 Root dry mass	2	248.553	<0.001	30	3.298	<0.001	60	2.541	<0.001

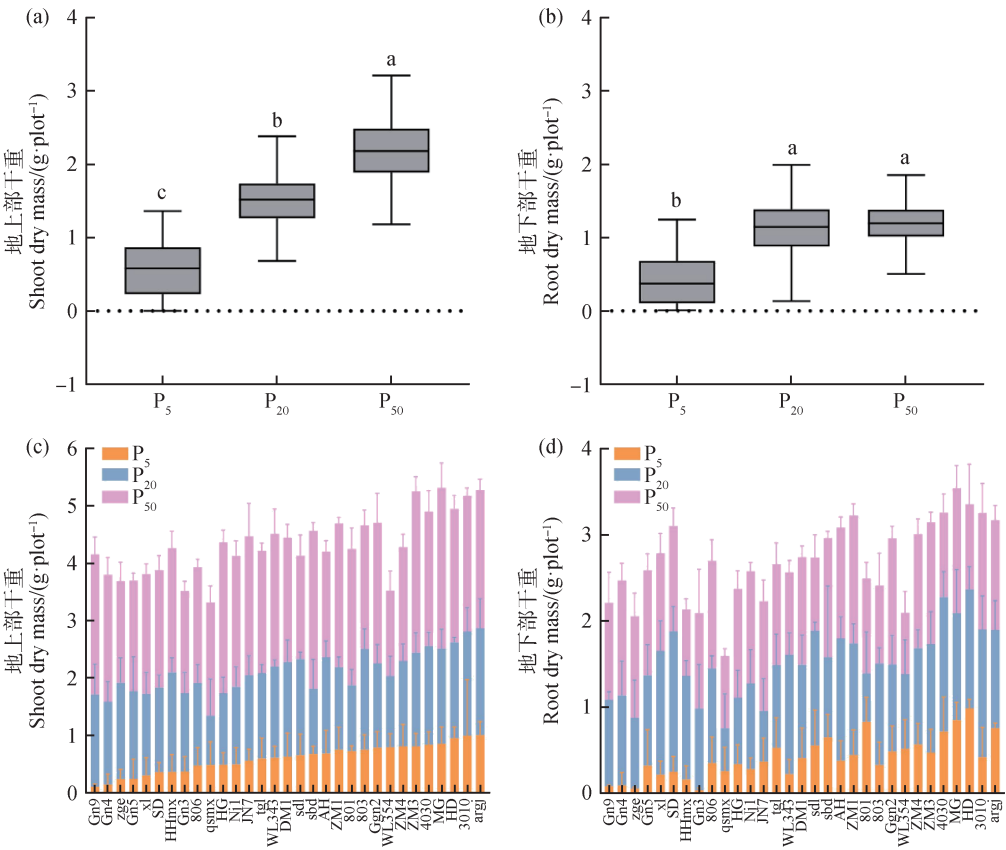


图 1 31 个苜蓿品种地上和地下生物量

Fig. 1 The shoot and root dry mass of 31 alfalfa cultivars

注: P₅表示 5 mg·kg⁻¹ KH₂PO₄ 的磷水平处理, P₂₀表示 20 mg·kg⁻¹ KH₂PO₄ 的磷水平处理, P₅₀表示 50 mg·kg⁻¹ KH₂PO₄ 的磷水平处理,下同。不同小写字母表示三个不同磷水平下苜蓿的生物量差异显著($P<0.05$)

Note: P₅ is the treatment of 5 mg·kg⁻¹ KH₂PO₄, P₂₀ is the treatment of 20 mg·kg⁻¹ KH₂PO₄, P₅₀ is the treatment of 50 mg·kg⁻¹ KH₂PO₄, the same as below. Different lowercase letters indicate significant differences between the biomass of alfalfa was significantly different under three different phosphorus levels at the 0.05 level

2.2 不同磷添加处理对苜蓿根系形态的影响

对不同磷水平下 31 个苜蓿品种的 7 个相关性状进行双因素方差分析(表 3),发现磷处理对根冠比、根长、根表面积、根直径、根体积均有着显著影响

($P<0.001$),但是根组织密度、比根长不受磷处理的影响。品种及其和磷处理的交互作用显著影响根长和根表面积($P<0.05$),其他根系性状品种间差异不显著且不受双因素交互作用的显著影响。

表 3 磷素水平和不同品种对苜蓿根系性状影响的方差分析

Table 3 Analysis of variance on the effects of phosphorus levels and varieties on root traits of alfalfa

根属性 Traits	磷处理 P treatment			品种 Variety			品种×磷处理 Variety×P treatment		
	df	F	P	df	F	P	df	F	P
根冠比 Root shoot ratio	2	9.476	<0.001	30	0.597	0.955	60	0.573	0.995
根长 Root length	2	279.726	<0.001	30	3.452	<0.001	60	2.234	<0.001
根表面积 Root surface area	2	190.844	<0.001	30	2.705	<0.001	60	2.049	<0.001
根直径 Root diameter	2	11.285	<0.001	30	1.841	0.006	60	1.443	0.027
根体积 Root volume	2	44.783	<0.001	30	1.394	0.089	60	1.174	0.197
根组织密度 Root tissue density	2	0.140	0.870	30	0.782	0.788	60	0.784	0.871
比根长 Specific root length	2	3.421	0.034	30	1.054	0.395	60	1.195	0.172

31 个苜蓿品种根系性状在不同的磷水平下存在种间差异(图 2)。苜蓿的根冠比在三个磷处理下表现出显著差异,在 P_5 处理下根冠比的变异范围为 0.30~2.84, 其中‘Gn4’‘Gn5’‘SD’‘806’‘tgi’‘DM1’等品种在低磷条件 P_5 时的根冠比较大, P_{20} 处理下的根冠比变异范围为 0.40~1.08, P_{50} 处理下根冠比的变异范围为 0.40~0.70(图 2a)。根长在三个磷处理下均表现出显著差异,在 P_5 处理下苜蓿根长的变异范围为 7.38~62.27 m, 其中‘HD’‘argj’‘MG’‘801’‘Ggn2’‘sdl’的较长,在 P_{20} 处理下变异范围为 40.03~89.63 m, 在 P_{50} 处理下为 48.80~120.67 m(图 2b)。根体积在三个水平的磷处理下呈现显著差异, P_5 处理时,根体积的变异范围为 0.23~4.09 cm^3 , ‘DM1’‘HD’‘WL343’等品种的根体积在 P_5 处理时表现较好, P_{20} 处理下,根体积的变异范围为 2.30~11.59 cm^3 , 在 P_{50} 处理下,根体积的变异范围为 2.60~5.70(图 2c)。根表面积在 P_5 处理下的变异范围为 5.33~532.89 cm^2 , 且‘HD’‘MG’‘801’‘argj’‘sdl’‘4030’的根表面积在 P_5 处理下较大, P_{20} 处理下的变异范围为 349.56~815.99 cm^2 , P_{50} 处理下的变异范围为 375.66~845.96 cm^2 (图 2d)。不同品种的根直径在 P_5 处理下的变异范围为 0.06~2.03 cm, 其中‘HD’‘803’‘sdl’‘tgi’‘801’‘DM1’‘MG’在 P_5 处理下的根直径较大, P_{20} 处理下的变异范围为 0.74~2.03 cm, 在 P_{50} 处理下的变异范围为 0.84~1.81 cm(图 2e)。

2.3 不同磷水平下根系性状间的相关性

对 31 个苜蓿品种的 5 个根系性状和地上、地下部生物量进行相关性分析(图 3),发现在 P_5 处理下,地上部生物量与根干重呈极显著正相关($P<0.001$),与根长、根表面积呈显著正相关($P<0.05$);根干重与根长、根表面积、根直径呈极显著正相关($P<0.001$);根长与根表面积、根直径呈极

显著正相关($P<0.001$);根表面积与根直径呈极显著正相关($P<0.001$)(图 3a)。在 P_{20} 处理下,地上部干重与除根组织密度之外的根系性状都呈极显著正相关($P<0.001$),地下部生物量与根长、根表面积、根直径呈极显著正相关($P<0.001$),与根组织密度呈显著正相关($P<0.05$);根长与根组织密度呈显著正相关关系($P<0.05$)(图 3b)。在 P_{50} 处理下,地上部生物量与地下部干重呈极显著正相关($P<0.001$),与根长和根表面积呈显著正相关($P<0.05$);根干重与根长、根表面积呈极显著正相关($P<0.001$),与根直径、根组织密度呈显著正相关($P<0.05$);根长与根表面积、根直径呈极显著正相关($P<0.05$);根表面积与根直径呈极显著正相关($P<0.001$)(图 3c)。

2.4 不同苜蓿品种根系性状聚类分析及综合评价

2.4.1 磷胁迫下不同苜蓿品种根系性状聚类分析 由图 4 可知,在 P_5 低磷条件下对 31 个不同苜蓿品种进行聚类分析主要分为 5 个类群,分别标记为 I, II, III, IV, V 类。第 I 类包括‘Gn3’‘Gn9’‘Gn4’‘zge’这 4 个品种,该类群的六个生长指标和根系形态指标都表现极低;第 II 类为‘WL343’,该品种地上生物量、地下生物量、根表面积、根组织密度、根体积都表现适中,根长较长;第 III 类包括 8 个苜蓿品种,分别为‘Gn5’‘Nj1’‘806’‘qsmx’‘HG’‘HHmx’‘xl’‘SD’,该类群中地下生物量、根长、根表面积、根组织密度和根体积较低。第 I, II, III 类群的苜蓿品种都属于不耐低磷的磷低效品种。第 IV 类群包括 14 个苜蓿品种,分别为‘AH’‘JN7’‘DM1’‘3010’‘803’‘Ggn2’‘ZM1’‘WL354’‘tgi’‘ZM4’‘sdl’‘4030’‘sbd’‘ZM3’,该类群的地下生物量、根长、根表面积、根组织密度和根体积较高,地上生物量适中,属于较耐低磷的磷中效品种。第 V 类包含‘HD’‘argj’‘801’‘MG’这 4 个苜蓿品种,该类群所有的生长指

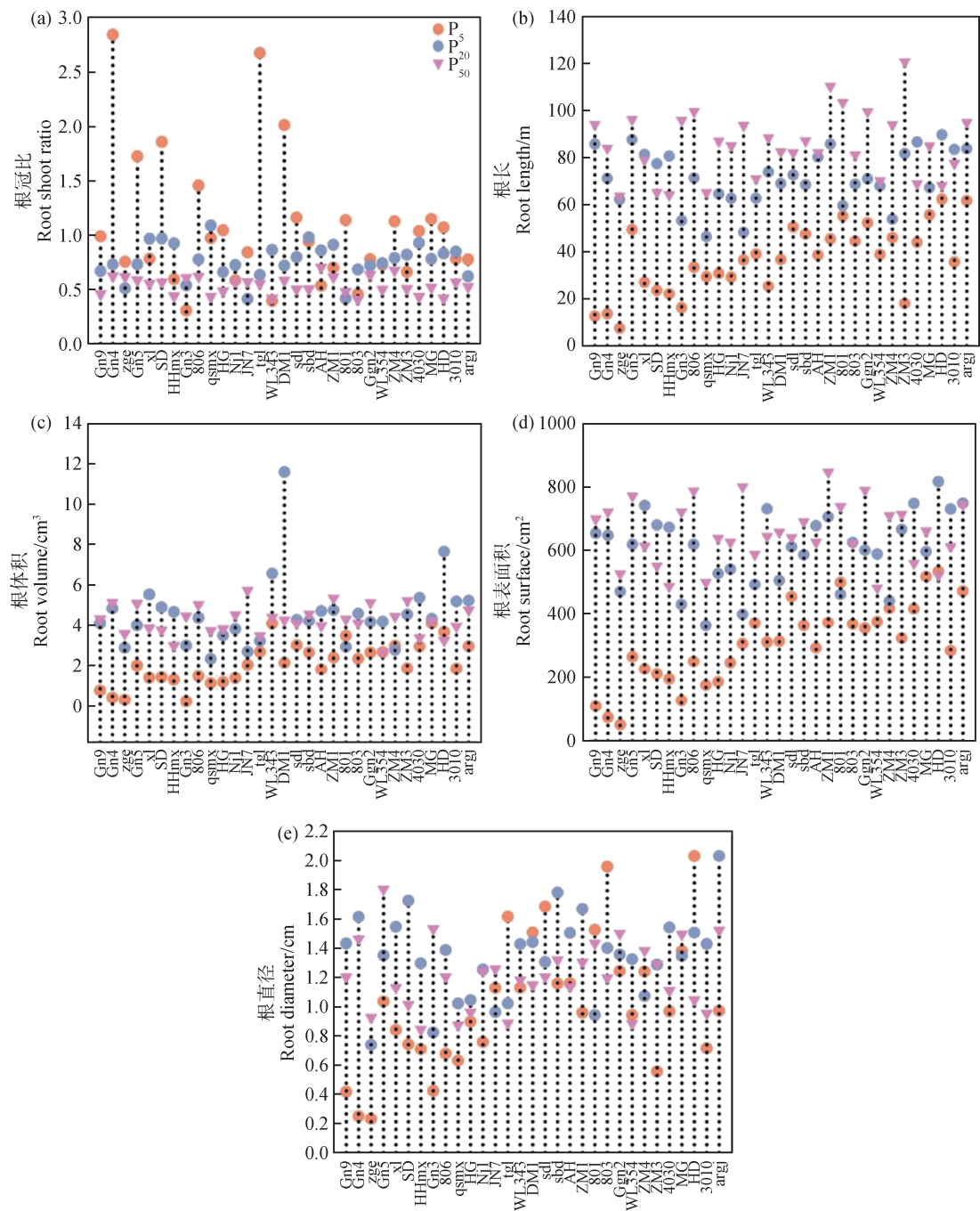


图 2 不同磷处理下 31 个苜蓿品种的根冠比、根长、根体积、根表面积和根直径

Fig. 2 Root shoot ratio, root length, root volume, root surface area and root diameter of 31 alfalfa varieties under different phosphorus treatments

标表现最好,属于极耐低磷的磷高效品种。以根系形态指标进行聚类分析主要分为三类,其中地上生物量为一个类群,地下生物量、根长、根表面积、根组织密度为一个类群,根体积为第三个类群。

2.4.2 磷胁迫下不同苜蓿品种根系性状综合评价

根据 6 个主成分因子的贡献率大小,利用公式

计算所有指标的权重,根据所有函数值的隶属函数值和权重大小,利用公式计算出不同品种苜蓿在磷胁迫下的综合评价 D 值,并根据 D 值大小对其耐低磷能力进行评价,其中耐低磷能力较强的前八个品种依次为‘HD’‘argj’‘MG’‘801’‘803’‘4030’‘sbd’‘ZM3’。

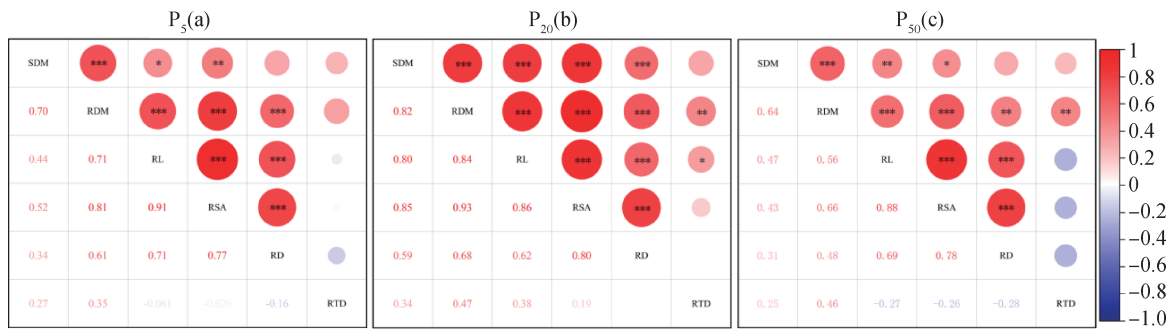


图3 在不同磷处理下苜蓿不同性状间的相关性

Fig. 3 Correlation between different forms of alfalfa under different phosphorus treatments

注:SDM表示地上部干重;RDM表示地下部干重;RL表示根长;RSA表示根表面积;RD表示根直径;RTD表示根组织密度;*,**和***分别代表 $P<0.05$, $P<0.01$ 和 $P<0.001$

Note:SDM stands for shoot dry mass; RDM stands for root dry mass; RL stands for root length; RSA stands for root surface area; RD stands for root diameter; RTD stands for root tissue density; *, ** and *** stands for $P<0.05$, $P<0.01$ and $P<0.001$, respectively

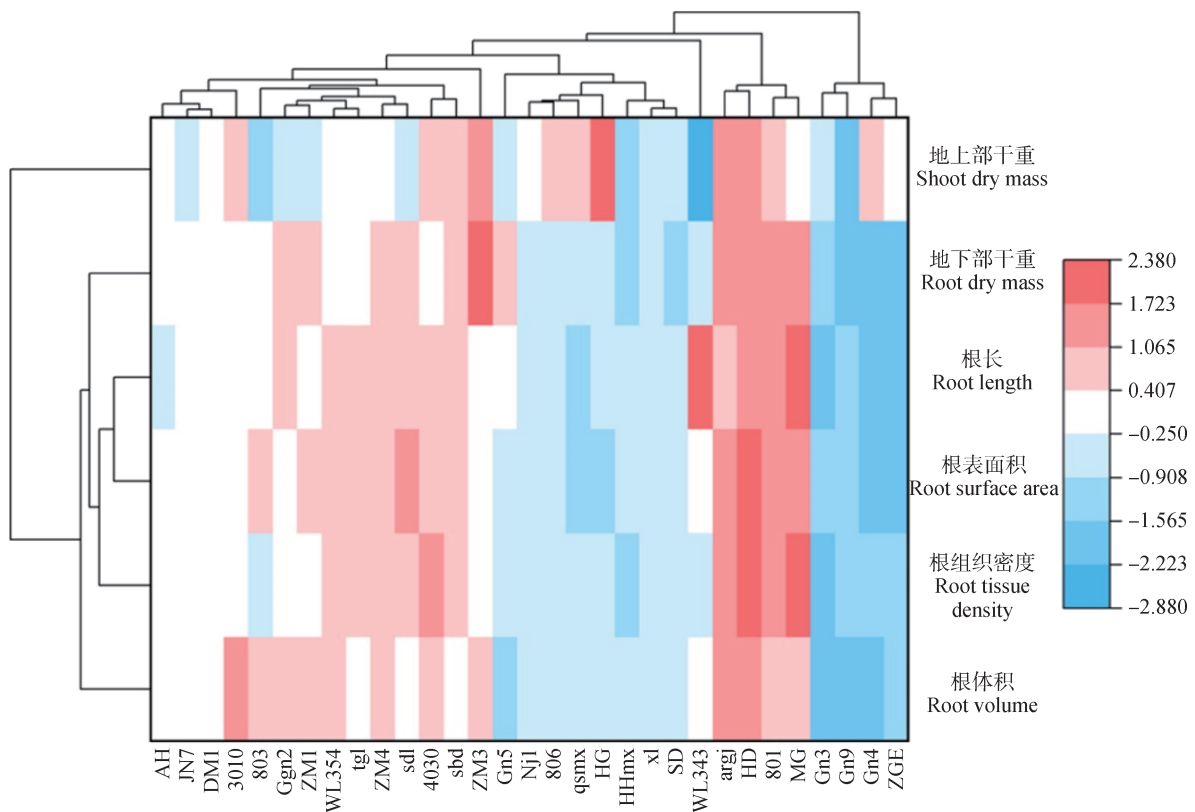


图4 P₅处理下不同苜蓿品种根系形态聚类分析热图

Fig. 4 Heat map of root morphology cluster analysis of different alfalfa varieties under phosphorus stress

3 讨论

3.1 不同磷处理对苜蓿生物量的影响

本试验结果表明,苜蓿地上生物量受外源磷添加的显著影响。随着磷供应水平升高,苜蓿地上生物量显著增加。这与张家铨等^[24]在三种不同的磷处理下对苜蓿及其他科的物种对磷胁迫的响应研究中所得到的结果一致,即低磷处理显著降低苜蓿

的地上、地下生物量。姚瑞^[25]在三个水平的易溶磷处理下对22个不同基因型苜蓿的研究中发现,低磷胁迫下所有品种的地上和地下生物量都显著降低,但该试验中植物的根质量比在不同的基因型之间没有出现分化,而本研究中根冠比在不同品种的苜蓿之间存在显著的差异,这表明磷的供应对苜蓿的生长具有显著的影响且依赖于品种。

由于土壤对磷酸盐的吸附和固定^[26],磷在自然

表 4 磷胁迫下不同品种苜蓿根系形态指标的综合评价

Table 4 The Comprehensive evaluation of root morphological indexes of different alfalfa varieties underphosphorus stress

品种 Variety	综合评价值 Comprehensive value	排序 Order
HD	0.908	1
argj	0.760	2
801	0.745	3
MG	0.720	4
4030	0.667	5
sbd	0.644	6
ZM3	0.641	7
sdl	0.622	8
ZM4	0.598	9
tgl	0.574	10
Ggn2	0.572	11
3010	0.560	12
WL354	0.546	13
803	0.538	14
HG	0.533	15
ZM1	0.532	16
DM1	0.532	17
AH	0.526	18
JN7	0.471	19
806	0.470	20
qsmx	0.417	21
Njl	0.412	22
Gn5	0.401	23
SD	0.332	24
xl	0.322	25
Gn4	0.276	26
WL343	0.273	27
HHmx	0.244	28
ZGE	0.224	29
Gn3	0.184	30
Gn9	0.110	31

生态系统和农业生态系统中是限制初级生产力的重要营养元素^[22]。植物以无机磷的形式从土壤中获取磷,而无机磷与土壤中存在的金属阳离子(如 Al^{3+} , Ca^{2+} , Fe^{3+} 等)形成较强的离子相互作用,导致不可利用形态^[27]的形成,当土壤中有效磷的含量有限时,植物会对磷添加表现出积极的生长反应^[19],这与本研究中生物量随磷水平增加而升高的趋势相符。地下生物量对磷添加的响应与地上部相似,即 P_{50} 和 P_{20} 处理下的地下生物量显著高于 P_5 处理,而 P_{20} 和 P_{50} 处理下的地下部生物量则不存在显著差异。这一现象表明,在磷有效性较低条件下,植物可能通过向地下分配碳来获取更多的磷。Pang等^[28]在对豆科植物四种不同磷源供应处理的研究中发现,将 $FePO_4$ 作为磷源供应时,有效磷含量极

低,此处理下的地下生物量显著低于其余三种磷供应形式。此外,Li等^[29]通过三种不同的磷源供应对甘蓝型油菜生长影响的研究发现,在ATP这类难溶性有机磷供应下,磷源无法提供足够的有效磷进而产生磷胁迫,苜蓿的根干重显著低于正常水溶性磷供应时植物的根干重。

本研究对 31 个不同苜蓿品种的结果表明,低磷条件下地上部生物量较高的有‘argj’‘3010’‘HD’‘MG’‘4030’‘ZM3’‘ZM4’‘Ggn2’‘803’‘801’;地下部干重较高的品种有‘3010’‘HD’‘MG’‘801’‘803’‘argj’‘4030’,且随着磷水平的提高,苜蓿地上部和根系生物量显著增大。潘新雅等^[19]的研究结果也表明,低磷条件下除“赛迪”外,其余五个苜蓿品种的根干重和地上部干重均显著降低,这是因为缺磷会降低植物光合速率^[15]、抑制新陈代谢,导致植株发育缓慢,叶片变小等,从而降低生物量。耐低磷的品种在低磷条件下能更好地生长^[30],即在低磷条件下其能够维持较高的生物量,表现出对低磷胁迫的适应性。

3.2 苜蓿根系性状变异与磷胁迫的关系

根系形态和解剖结构特征的可塑性变化与植株磷效率密切相关^[19]。本研究结果表明,31 个不同基因型的苜蓿根系形态变异对低磷胁迫的响应不同。 P_5 处理下,苜蓿的根冠比相较于 P_{20} 和 P_{50} 处理显著增加,其中‘Gn4’‘Gn5’‘SD’‘806’‘tgl’‘DM1’的根冠比在 P_5 低磷供应下显著高于其他品种。生物量分配的改变是植物对养分限制最重要的响应^[31-33],植物在低磷供应下根冠比的增加被认为是磷胁迫的一种适应^[34]。‘sbd’‘HD’‘MG’‘801’‘argj’‘sdl’‘Ggn2’的根长在 P_5 低磷处理下高于其它品种。根长对磷的吸收至关重要^[28],Wang等^[35]在对 20 个不同基因型的小麦的研究中发现高磷敏感基因型的植物会表现出较高的根长和根冠比。性状的共变异表明了不同环境条件下植物所选择的适应策略^[36],因此根长和根冠比的高低可以作为筛选耐低磷品种时的重要指标。在本研究中,‘HD’‘MG’‘801’‘argj’‘sdl’‘4030’‘ZM4’的根表面积较大,‘HD’‘MG’‘801’‘tgl’‘DM1’‘803’的根直径较大,姚瑞^[25]发现在低磷胁迫下,苜蓿磷高效品种的总根表面积和根直径大于磷低效品种,这表明根表面积或根直径的大小也可作为衡量苜蓿品种是否耐低磷的依据。在低磷条件下,大多数根系

性状与根系直径之间有很强的相关性^[22]。本研究结果中,根直径与根表面积在 P_5 和 P_{20} 条件下均存在极显著正相关关系,而与根组织密度未呈现显著的相关关系。这与Kramer等^[32]的研究结论不同,Kramer等认为较高的根系生长速率与较低的根组织密度有关,而与根系直径无关,这种差异可能是因为苜蓿与禾本科相比生长速率较慢且根系较粗^[37],其根系可能更依赖于分泌物或通过菌根途径获取磷,因此在低磷条件下,苜蓿也无需通过根组织密度的降低来抵消根系的建构成本^[35],所以根直径与根组织密度的相关性不大。另外,维管植物与菌根真菌能够形成共生体,经典的根经济学谱系认为较粗的根系代表植物选择利用与菌根的共生关系在磷缺乏的环境下进行资源的获取,较大的根表面积有助于提高菌根的定植率^[38],对于耐低磷的苜蓿品种而言,较大的根直径和根表面积是植物根系形态对磷胁迫的响应。

根系形态和分布决定了植物对土壤水分和养分的吸收和利用,对促进植物磷的吸收具有重要作用。在缺磷条件下植物通过长期进化改变根系形态等策略来提高磷的吸收能力,从而提高对磷胁迫的耐受性^[39]。本研究发现,根长、根表面积、根直径等根系形态指标在不同磷水平下均存在显著差异,在低磷处理下,苜蓿的根长、根表面积以及根体积均低于高磷处理。这一结果与高艳等^[40]在对苜蓿的磷胁迫研究中的结果一致,但栗振义等^[41]在不同品种紫花苜蓿对磷胁迫的响应研究中发现‘敖汉’等品种通过增大根系来适应低磷环境,因此低磷条件下的根长和根表面积大于正常供磷处理。在低磷条件下,具有较长根长、较大根表面积和根直径的品种往往能够更好地吸收和利用土壤中的磷素,从而维持较高的生物量。然而植物对资源吸收的策略存在多个维度,例如本研究中,‘3010’品种的生物量在 P_{20} 处理下较高,但其根冠比和总根长的表现并不突出,磷胁迫条件除了显著影响苜蓿的根系形态之外,对根系分泌物的释放也有显著影响,因此该品种可能是主要通过释放更多的磷酸酶、羧酸盐等来获取更多的有效磷。

3.3 不同品种苜蓿对磷胁迫的响应差异

在 P_5 条件下,‘HD’‘argj’‘MG’‘801’‘4030’和‘sbd’等品种表现出较大的地下生物量、根长、根表面积和根组织密度,表明这类品种能通过磷胁迫下

根系形态的变异将较多的同化物分配给植物地下的根系,并降低低磷胁迫对生物量的负面影响^[42]。这些品种在形态型策略方面的可塑性更强,能更好地适应低磷环境。而另一些品种如‘Gn9’‘Gn3’‘zge’‘Gn4’和‘xl’等,在 P_5 条件下的地上生物量和地下生物量均较低,表现出对低磷胁迫的敏感性。这种差异可能与不同品种苜蓿的根系形态结构、磷吸收利用机制以及遗传背景有关。在聚类分析中,按苜蓿生物量和根系形态差异将31个苜蓿品种分为5大类,其中,‘HD’‘argj’‘MG’和‘801’品种被归为极耐低磷型品种,这些品种在磷胁迫条件下具有较高的地上和地下生物量,且在根长、根表面积、根组织密度等根系形态可塑性方面均表现较优异。隶属函数分析结果表明,31个不同基因型的苜蓿品种在磷胁迫下‘HD’的性状最优良,综合排名最高,‘Gn9’和‘Gn3’的根系形态性状较差,综合排序均较低。聚类分析与综合分析的结果均表明‘HD’‘argj’‘MG’‘801’为磷高效品种。此外,根系形态虽然是衡量磷高效苜蓿品种的重要指标,但仅在根系形态上进行分析并不能完全阐明不同苜蓿品种对低磷胁迫耐受性的差异,根系的变异在形态性状或生理性状等多个维度上均会发生^[43]。因此,未来的研究还需结合其生理特性来进行综合评价。

4 结论

综上所述,本研究中不同苜蓿品种生物量和根系形态在相同磷水平和同一苜蓿品种在不同磷水平下都存在显著差异,随着磷水平的降低,耐低磷的苜蓿品种根冠比、根长、根直径、根表面积均大于不耐低磷的品种。根据不同品种生物量和根系形态在低磷条件下的响应,将‘HD’‘MG’‘801’‘argj’四个品种归类为磷高效品种,这些品种相较于其余品种有着较突出的根系形态性状,能在低磷胁迫下保持良好的生长性状,较适合在土壤中有效磷含量低的地区种植。本研究重点关注了苜蓿苗期根系形态性状对低磷的响应,基于田间试验的苜蓿在不同生育期对低磷的响应仍需要进一步研究,为后续苜蓿在磷素限制地区的种植和高效品种的选育提供研究基础。

参考文献

- [1] 南志标. 锈病对紫花苜蓿营养成分的影响[J]. 中国草原与牧草, 1985, 2(3): 33-36

- NAN Z B. Effect of rust on nutritional components of alfalfa[J]. Pratacultural Science, 1985, 2(3):33-36
- [2] 罗中, 崔乃然. 新疆豆科牧草植物种质资源[J]. 八一农学院学报, 1984, 7(1):38-49
- LUO Z, CUI N R. Germplasm resources of leguminous forage plants in Xinjiang[J]. Journal of Xinjiang Agricultural University, 1984, 7(1):38-49
- [3] 张红梅, 刘铁军, 连翊仙, 等. 紫花苜蓿裹包青贮饲料发展前景分析[J]. 粮食与饲料工业, 2023(2):51-53
- ZHANG H M, LIU T J, LIAN Y X, et al. Analysis on the development prospects of alfalfa wrapping package silage[J]. Cereal & Feed Industry, 2023(2):51-53
- [4] SCHACHTMAN D P, REID R J, AYLING S M. Phosphorus uptake by plants: from soil to cell[J]. Plant Physiology, 1998, 116(2):447-453
- [5] 雷宏叔. 植物的磷素营养[J]. 植物生理学通讯, 1958(1):1-14
- LEI H C. Phosphorus Nutrition of Plants[J]. Plant Physiology Journal, 1958(1):1-14
- [6] HARRISON A, 何念祖. 土壤有机磷——文献述评[J]. 土壤学进展, 1990, 18(4):11-19, 5
- HARRISON A, HE N Z. Soil organic phosphorus—literature review[J]. Progress in Soil Science, 1990, 18(4):11-19, 5
- [7] 刘忠国, 高凯, 黄佳媛, 等. 施磷水平对紫花苜蓿产量和品质的影响[J]. 内蒙古民族大学学报(自然科学版), 2023, 38(2):157-163
- LIU Z G, GAO K, HUANG J Y, et al. Effects of phosphorus application level on yield and quality of alfalfa[J]. Journal of Inner Mongolia Minzu University (Natural Sciences), 2023, 38(2):157-163
- [8] LI X Y, YANG L B, YAN W J. Model analysis of dissolved inorganic phosphorus exports from the Yangtze River to the estuary[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2011, 90(1):157-170
- [9] 张静, 尹飞虎, 李光永. 农田磷肥的有效性研究进展与发展趋势[J]. 新疆农垦科技, 2015, 38(7):57-60
- ZHANG J, YIN F H, LI G Y. Research progress and development trend of availability of phosphate fertilizer in farmland[J]. Xinjiang Farm Research of Science and Technology, 2015, 38(7):57-60
- [10] 朱干宇, 孟子衡, 李会泉, 等. 磷资源高效利用制备磷酸技术现状探讨[J]. 磷肥与复肥, 2023, 38(07):24-30, 35
- ZHU G Y, MENG Z H, LI H Q, et al. Current status of phosphoric acid preparation technology for efficient utilization of phosphorus resources[J]. Phosphate & Compound Fertilizer, 2023, 38(07):24-30, 35
- [11] BATES T R, LYNCH J P. The efficiency of *Arabidopsis thaliana* (Brassicaceae) root hairs in phosphorus acquisition[J]. American Journal of Botany, 2000, 87(7):964-970
- [12] JANSÁ J, MOZAFAR A, FROSSARD E. Phosphorus acquisition strategies within arbuscular mycorrhizal fungal community of a single field site[J]. Plant and Soil, 2005, 276(1):163-176
- [13] SHANE M W, CRAMER M D, FUNAYAMA-NOGUCHI S, et al. Developmental physiology of cluster-root carboxylate synthesis and exudation in harsh *Hakea*. Expression of phosphoenolpyruvate carboxylase and the alternative oxidase[J]. Plant Physiology, 2004, 135(1):549-560
- [14] REICHERT T, RAMMIG A, FUCHSLUEGER L, et al. Plant phosphorus-use and-acquisition strategies in Amazonia[J]. New Phytologist, 2022, 234(4):1126-1143
- [15] YU Q S, NI X F, CHENG X L, et al. Foliar phosphorus allocation and photosynthesis reveal plants' adaptative strategies to phosphorus limitation in tropical forests at different successional stages[J]. Science of The Total Environment, 2022, 846:157456
- [16] BERG W K, CUNNINGHAM S M, BROUDER S M, et al. Influence of phosphorus and potassium on alfalfa yield and yield components[J]. Crop Science, 2005, 45(1):297-304
- [17] RICHARDSON A E, SIMPSON R J. Soil microorganisms mediating phosphorus availability update on microbial phosphorus[J]. Plant Physiology, 2011, 156(3):989-996
- [18] SUN B R, GAO Y Z, WU X, et al. The relative contributions of pH, organic anions, and phosphatase to rhizosphere soil phosphorus mobilization and crop phosphorus uptake in maize/alfalfa polyculture[J]. Plant and Soil, 2020, 447(1):117-133
- [19] 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
- PAN X Y, LI J B, CHEN Y, et al. Response of root morphology and anatomical structure of six alfalfa cultivars to phosphorus deficiency[J]. Acta Agrestia Sinica, 2021, 29(11):2494-2504
- [20] 马红. 供磷水平对不同磷效率品种苜蓿生长和根系特征的影响[D]. 乌鲁木齐:新疆农业大学, 2021:16-17
- MA H. Effect of different phosphorus supply levels on root characteristics and growth of alfalfa varieties with different phosphorus efficiency[D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2021:16-17
- [21] WEN Z H, PANG J Y, TUEUX G, et al. Contrasting patterns in biomass allocation, root morphology and mycorrhizal symbiosis for phosphorus acquisition among 20 chickpea genotypes with different amounts of rhizosphere carboxylates[J]. Functional Ecology, 2020, 34(7):1311-1324
- [22] WEN Z H, LI H B, SHEN Q, et al. Tradeoffs among root morphology, exudation and mycorrhizal symbioses for phosphorus-acquisition strategies of 16 crop species[J]. New Phytologist, 2019, 223(2):882-895
- [23] 杨春婷, 张永清, 马星星, 等. 苦荞耐低磷基因型筛选及评价指标的鉴定[J]. 应用生态学报, 2018, 29(9):2997-3007
- YANG C T, ZHANG Y Q, MA X X, et al. Screening genotypes and identifying indicators of different *Fagopyrum tataricum* varieties with low phosphorus tolerance[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2018, 29(9):2997-3007
- [24] 张家铤, 韩飞, 夏蕾, 等. 四种草本植物生长性状和根性状对

- 磷添加的响应策略[J]. 中国草地学报, 2023, 45(1):43-52
- ZHANG J Y, HAN F, XIA L, et al. The response strategies of growth and root traits to phosphorus addition in four herbaceous plants[J]. Chinese Journal of Grassland, 2023, 45(1):43-52
- [25] 姚瑞. 不同磷效率紫花苜蓿基因型的磷获取策略差异研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2023, 15-17
- YAO R. Differences in acquisition strategies between different phosphorus efficient alfalfa genotypes [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2023, 15-17
- [26] SHEN J B, YUAN L X, ZHANG J L, et al. Phosphorus dynamics: from soil to plant[J]. Plant Physiology, 2011, 156(3):997-1005
- [27] CHEN Z C, LIAO H. Organic acid anions: an effective defensive weapon for plants against aluminum toxicity and phosphorus deficiency in acidic soils [J]. Journal of Genetics and Genomics, 2016, 43(11):631-638
- [28] PANG J Y, YANG J Y, LAMBERS H, et al. Physiological and morphological adaptations of herbaceous perennial legumes allow differential access to sources of varying soluble phosphate[J]. Physiologia Plantarum, 2015, 154(4):511-525
- [29] LI H, WANG C, ZHANG B B, et al. Trade-offs between root-secreted acid phosphatase and root morphology traits, and their contribution to phosphorus acquisition in *Brassica napus* [J]. Physiologia Plantarum, 2024, 176(2):e14247
- [30] ABEBE A T, ADEWALE S, CHIGEZA G, et al. Diallel analysis of soybean (*Glycine max* L.) for biomass yield and root characteristics under low phosphorus soil conditions in Western Ethiopia[J]. PLoS One, 2023, 18(2):e0281075
- [31] FRESCHET G T, SWART E M, CORNELISSEN J H C. Integrated plant phenotypic responses to contrasting above- and below-ground resources: key roles of specific leaf area and root mass fraction[J]. New Phytologist, 2015, 206(4):1247-1260
- [32] KRAMER-WALTER K R, BELLINGHAM P J, MILLAR T R, et al. Root traits are multidimensional: specific root length is independent from root tissue density and the plant economic spectrum[J]. Journal of Ecology, 2016, 104(5):1299-1310
- [33] WANG X X, LI H B, CHU Q, et al. Mycorrhizal impacts on root trait plasticity of six maize varieties along a phosphorus supply gradient[J]. Plant and Soil, 2020, 448(1):71-86
- [34] LAMBERS H, SHANE M W, CRAMER M D, et al. Root structure and functioning for efficient acquisition of phosphorus: matching morphological and physiological traits[J]. Annals of Botany, 2006, 98(4):693-713
- [35] WANG X X, ZHANG J Q, WANG H, et al. Plasticity and co-variation of root traits govern differential phosphorus acquisition among 20 wheat genotypes [J]. Oikos, 2023, 2023(1):oki.08606
- [36] MESSIER J, LECHOWICZ M J, MCGILL B J, et al. Inter-specific integration of trait dimensions at local scales: the plant phenotype as an integrated network[J]. Journal of Ecology, 2017, 105(6):1775-1790
- [37] WEN Z H, WHITE P J, SHEN J B, et al. Linking root exudation to belowground economic traits for resource acquisition[J]. New Phytologist, 2022, 233(4):1620-1635
- [38] GUO Z J, MIAO W H, LYU Y M, et al. Soil fungi lead to stronger 'diminishing returns' in fine-root length versus mass allometry towards earlier successional tropical forests[J]. Functional Ecology, 2024, 38(11):2406-2420
- [39] 夏静, 南丽丽, 汪堃, 等. 低磷胁迫对不同根型苜蓿根系生长及根际细菌的影响[J]. 中国草地学报, 2024, 46(6):86-94
- XIA J, NAN L L, WANG K, et al. Effects of low phosphorus stress on root growth and rhizosphere bacteria of different root types alfalfa [J]. Chinese Journal of Grassland, 2024, 46(6):86-94
- [40] 高艳, 田秋英, 石凤翎, 等. 黄花苜蓿与蒺藜苜蓿对土壤低磷胁迫适应策略的比较研究[J]. 植物生态学报, 2011, 35(6):632-640
- GAO Y, TIAN Q Y, SHI F L, et al. Comparative studies on adaptive strategies of *Medicago falcata* and *M. Truncatula* to phosphorus deficiency in soil[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2011, 35(6):632-640
- [41] 栗振义, 张琦蕊, 全宗永, 等. 不同紫花苜蓿品种对低磷环境的形态与生理响应分析[J]. 中国农业科学, 2017, 50(20):3898-3907
- LI Z Y, ZHANG Q X, TONG Z Y, et al. Analysis of morphological and physiological responses to low pi stress in different alfalfas [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2017, 50(20):3898-3907
- [42] 任立飞, 张文浩, 李衍素. 低磷胁迫对黄花苜蓿生理特性的影响[J]. 草业学报, 2012, 21(3):242-249
- REN L F, ZHANG W H, LI Y S. Effect of phosphorus deficiency on physiological properties of *Medicago falcata* [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2012, 21(3):242-249
- [43] KONG D L, MA C G, ZHANG Q, et al. Leading dimensions in absorptive root trait variation across 96 subtropical forest species[J]. New Phytologist, 2014, 203(3):863-872

(责任编辑 闵芝智)