

耐低磷山羊草基因型的筛选与鉴定

白羿雄¹, 胡秦枋¹, 张正社¹, 王小利¹, 牛娜¹, 马守才¹, 张改生¹, 张小红², 王军卫¹

(¹陕西省作物杂种优势研究与利用重点实验室/西北农林科技大学农学院, 杨凌 712100; ²西北农林科技大学生命学院, 陕西杨凌 712100)

摘要:为研究小麦近缘属种的耐低磷特性,本试验通过砂培法,以9种山羊草为供试材料,对低磷和正常供磷2个处理下山羊草苗期的相对地上部干重、相对根干重、相对生物量、相对根长、相对根冠比、相对磷积累量、相对磷吸收效率进行研究。结果表明,不同基因型山羊草对低磷胁迫的反应存在一定的差异。相关分析和主成分分析结果表明,相对地上部干重、相对根干重、相对生物量和相对磷积累量可作为耐低磷基因型山羊草筛选的指标。筛选结果表明,双角、粘果、小伞和拟斯卑尔脱山羊草为耐低磷型山羊草,尾状山羊草为磷敏感型山羊草。

关键词:耐低磷;山羊草;基因型;筛选;主成分分析

Screening and Identification for Tolerance to Low Phosphorus Stress of *Aegilops* Genotype Germplasm Resources

BAI Yi-xiong¹, HU Qin-li¹, ZHANG Zheng-she¹, WANG Xiao-li¹, NIU Na¹, MA Shou-cai¹,
ZHANG Gai-sheng¹, ZHANG Xiao-hong², WANG Jun-wei¹

(¹Key Laboratory of Crop Heterosis of Shaanxi Province/College of Agronomy, Northwest Agriculture & Forestry University, Yangling 712100; ²College of Life Sciences, Northwest Agriculture & Forestry University, Yangling 712100)

Abstract: In order to study the tolerance characteristics to low phosphorus of *Aegilops*, the experiment was carried under two P levels through sand culture methods with 9 genotypes at seedling stage. Some biologic and plant nutrient characteristics of *Aegilops* were investigated. They were stem dry weight, root dry weight, biomass, root length, root-shoot ratio, phosphorus accumulation and phosphorus uptake efficiency. The results showed that there were differences of the tolerance characteristics to low phosphorus among *Aegilops*. Correlation analysis and principal component analysis showed that stem dry weight, root dry weight, biomass and phosphorus accumulation can be used as screening indicators of the tolerance to low phosphorus of *Aegilops*. Both of the agronomic characters observation results and the comprehensive evaluation results showed that *Ae. bicornis*, *Ae. kotschyi*, *Ae. speltoides* and *Ae. umbellulata* had the tolerance characteristics to low phosphorus while *Ae. caudata* was sensitive to low phosphorus.

Key words: tolerance to low phosphorus; *Aegilops*; genotype; screening; principal component analysis

磷元素作为作物生长发育所必需的大量元素之一,几乎参与了作物所有的生命活动过程。在农业生产中,人们往往会向大田里施加过量的磷肥以达到高产的目的,但是很多研究表明,磷肥当季利用率只有5%~10%,加之作物的后效,其利用率基本不

会超过25%^[1]。由于长期施磷肥,导致大部分农田土壤的磷素含量很大,但可供作物生长发育的磷素却非常少,该现象称为遗传学缺磷^[2]。正是土壤的遗传学缺磷,而非土壤学缺磷的现象成为限制作物产量的主要因素。在世界范围内,缺磷已经成为限

收稿日期:2014-11-27 修回日期:2014-12-19 网络出版日期:2015-04-10

URL: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.4996.S.20150410.1624.014.html>

基金项目:国家“863”计划重大专项(2011AA10A106);国家自然科学基金项目(31071477,31171611,31371697);陕西省“13115”科技创新工程重大科技专项(2010ZDKG-68);2014年唐仲英作物育种基金

第一作者从事作物遗传改良与种质创新。E-mail: yixiongbai@163.com

通信作者:张小红,研究方向为作物遗传改良与种质创新。E-mail: zhkh2493@126.com

王军卫,研究方向为小麦杂种优势利用。E-mail: wjw@nwsuaf.edu.cn

制作物正常生长发育和影响作物产量的主要非生物胁迫之一。因此筛选、培育对磷吸收利用效率高的作物品种,在农业生产上具有重要意义。目前,国内对水稻^[3-5]、小麦^[6-8]、玉米^[9-10]、油菜^[11]等作物的耐低磷研究已取得了一定的进展,但对山羊草种质进行耐低磷筛选及鉴定的研究目前尚未见报道。

作为小麦的近缘属,山羊草属拥有许多抗逆基因,可对小麦相关性状的改良起重要作用^[12]。本试验用9个不同基因型山羊草为供试材料,对低磷和正常供磷2个处理下山羊草相关指标进行研究,筛

选到耐低磷山羊草基因型。通过对各指标的测量与分析,旨在找到适合山羊草苗期耐低磷基因型快速筛选的体系,进而获得耐低磷山羊草种质。该研究成果将有助于为定向改良小麦提供种质材料。

1 材料与方法

1.1 供试材料与试验设计

试验所用材料为9种山羊草(表1),该材料均由西北农林科技大学农学院小麦杂优利用课题组提供。

表1 供试山羊草种质

Table 1 The tested *Aegilops* germplasms

种质 Germplasm	染色体组 Genome	种质 Germplasm	染色体组 Genome	种质 Germplasm	染色体组 Genome
双角山羊草 <i>Ae. bicornis</i>	S ^b S ^b	拟斯卑尔脱山羊草 <i>Ae. speltoides</i>	S	易变山羊草 <i>Ae. variabilis</i>	US ^v
偏凸山羊草 <i>Ae. ventricosa</i>	DM ^v	尾状山羊草 <i>Ae. caudata</i>	C	欧山羊草 <i>Ae. biuncialis</i>	C ^u M ^b
粗厚山羊草 <i>Ae. crassa</i>	DM ^{er}	粘果山羊草 <i>Ae. kotschy</i>	C ^u M ^k	小伞山羊草 <i>Ae. umbellulata</i>	C ^u

试验根据李春燕等^[13]设置2个磷素处理水平,即低磷水平(0.05 mmol/L)和正常磷水平(1 mmol/L),各处理重复3次。营养液配方为修改后的Hoagland营养液(pH = 5.5):Ca(NO₃)₂ 1.5 mmol/L, KNO₃ 2 mmol/L, KH₂PO₄ 1 mmol/L, MgSO₄ · 7H₂O 1 mmol/L,微量元素和铁盐同Hoagland营养液。在正常的完全培养液中以1.0 mmol/L KH₂PO₄作为磷素,在缺磷培养液中以0.05 mmol/L KH₂PO₄作为磷素,并且用0.95 mmol/L KCl替代部分KH₂PO₄^[13]。

挑选子粒均匀、饱满的山羊草种子,先用9%的双氧水对种子消毒30 min,后用蒸馏水将种子冲洗干净,将其浸泡在培养皿中放入恒温(25℃)培养箱中,暗培养至露白,等出芽后转移至光照(4000 Lux)的条件下13 h/11 h(昼/夜),根据情况补充水分培养2 d,挑选长势均匀的幼苗移栽到装满石英砂的盆中,每种山羊草种4盆,每盆5株。沙培试验于2014年3—5月在西北农林科技大学农学院组织培养室进行培养。移栽初期用蒸馏水浇苗,等幼苗长到3叶期时,其中1盆用作对照组,浇灌完全营养液进行培养,另外3盆用低磷培养液进行处理,每3 d浇1次营养液,定期观察植株生长状况。

1.2 山羊草生物量的测定

在山羊草6叶期,对植株进行收获处理,按地上部与根部分开,分别装入标记好的纸袋中。将获取

部分置于烘箱内,105℃杀青30 min。随后在80℃下烘烤8 h称重,再烘烤2 h称重,当2次重量差异在1%内即可,否则再进行烘烤。相关测量指标包括地上部干重、根干重、根长、根冠比、磷积累量。用钒钼黄比色法测量植株的含磷量^[14]。根据R. A. Morris等^[15]指出的资源捕获量和利用效率的关系,磷吸收效率 = 整株吸收的磷量/根干重。

1.3 数据处理

为消除不同种质个体间的差异,不同种类山羊草间的相互比较用相对值,同一种山羊草的不同处理比较用绝对值^[16]。用Excel软件对数据进行处理,得出各性状的相对值,该相对值即为该基因型山羊草这一性状的耐低磷系数。相对值计算方法:性状耐低磷系数 = 低磷状态下性状值/正常供磷状态下同一性状值。

用SPSS软件对处理后数据进行相关性分析和偏相关分析以确定各性状间的相关性和偏相关性。随后利用主成分分析确定各指标对山羊草耐低磷特性的影响,通过聚类分析对不同品种山羊草的耐低磷等级进行划分。

2 结果与分析

2.1 两种磷水平下小麦苗期性状的基因型差异

数据结果表明(表2),在沙培条件下,各性状相

对值均有较大的变异系数,不同山羊草品种间在耐低磷特性上差异明显。变异系数表现为:相对根干重 > 相对磷吸收效率 > 相对生物量 > 相对地上部干重 > 相对磷积累量。这充分说明在耐低磷性状上山羊草之间存在着较大的差异。

表 2 还可以看出,双角山羊草、拟斯卑尔脱、粘

果山羊草和小伞山羊草的生物量性状耐低磷系数分别为 1.17、1.09、1.09、2.37,均大于 1,但是对应的根长性状耐低磷系数只有拟斯卑尔脱山羊草数值大于 1。这表明山羊草耐低磷机制是各项生理指标的综合反映,不能用单一指标的耐低磷系数判定该山羊草是否为耐低磷种质资源。

表 2 山羊草性状相对值的基因型变异

Table 2 Genotypic variation in relative value of *Aegilops* traits

种质 Germplasm	地上部干重 Stem dry weight	根长 Root length	根干重 Root dry weight	生物量 Biomass	根冠比 Ratio of root to shoot	磷积累量 P-accumulation	磷吸收效率 P-uptake efficiency
双角山羊草 <i>Ae. bicornis</i>	1.14	0.86	1.54	1.17	1.34	0.97	1.13
偏凸山羊草 <i>Ae. ventricosa</i>	0.77	1.61	0.87	0.78	1.14	0.76	0.47
粗厚山羊草 <i>Ae. crassa</i>	0.80	0.98	1.18	0.86	1.49	0.57	0.58
拟斯卑尔脱 <i>Ae. speltoides</i>	1.02	1.01	1.34	1.09	1.30	1.58	1.55
尾状山羊草 <i>Ae. caudata</i>	0.52	1.26	1.44	0.67	2.76	0.15	0.12
粘果山羊草 <i>Ae. kotschyi</i>	1.06	0.89	1.25	1.09	1.18	0.84	0.95
易变山羊草 <i>Ae. variabilis</i>	0.81	1.47	0.80	0.81	0.99	1.04	0.71
欧山羊草 <i>Ae. biuncialis</i>	0.66	1.24	0.93	0.71	1.42	0.92	0.74
小伞山羊草 <i>Ae. umbellulata</i>	2.17	0.94	3.52	2.37	1.62	1.06	1.12
平均值 Average	0.99	1.14	1.43	1.06	1.47	0.88	0.82
变异系数(%) CV	48.64	23.39	57.62	49.26	35.31	44.23	51.80

2.2 山羊草苗期各生长指标的相关分析

由表 3 可知,7 个生理指标之间均存在着一定的相关性。其中相对地上部干重与相对根干重和相对生物量之间的简单相关系数和偏相关系数均达到极显著;相对根干重和相对生物量之间的简单相关系数和偏相关系数极显著;相对根冠比和相对磷积累量的简单相关系数呈负显著相关;相对磷吸收效率与相对磷积累量的简单相关系数和偏相关系数有

一定的相关性;相对根长与相对根冠比和相对磷吸收效率呈正相关,与其他指标呈负相关。相关分析结果表明,相对地上部干重、相对根干重、相对生物量、相对磷积累量可作为筛选耐低磷山羊草的首选指标,相对磷利用效率可以作为参考指标。鉴于各单项指标在山羊草苗期耐低磷性中发挥着不同的作用,因此直接利用这些信息不能准确评价山羊草各基因型耐低磷特性。

表 3 不同种类山羊草各项性状指标相对值的相关系数

Table 3 Correlation matrix of every single tolerant low-P index

	地上部干重 Stem dry weight	根长 Root length	根干重 Root dry weight	生物量 Biomass	根冠比 Ratio of root to shoot	磷积累量 P-accumulation	磷吸收效率 P-uptake efficiency
地上部干重 Stem dry weight	1.00	-0.16	0.95**	0.99**	-0.44	0.73	0.74
根长 Root length	-0.50	1.00	-0.11	-0.14	0.11	-0.24	0.60
根干重 Root dry weight	0.92**	-0.49	1.00	0.97**	-0.13	-0.68	-0.79*
生物量 Biomass	0.99**	-0.51	0.95**	1.00	-0.35	0.63	-0.40
根冠比 Ratio of root to shoot	-0.15	-0.06	0.26	-0.05	1.00	-0.71*	-0.76*
磷积累量 P-accumulation	0.42	-0.21	0.14	0.36	-0.67*	1.00	0.49
磷吸收效率 P-uptake efficiency	-0.36	0.56	-0.61	-0.43	-0.64	0.37	1.00

* 和 ** 分别代表在 0.05、0.01 水平上相关性显著。左下角为简单相关系数,右上角为偏相关系数

* showed significant difference at 5%, ** showed significant difference at 1%. Bottom right corner was coefficient of simple correlation. Bottom left corner was partial correlation coefficient

2.3 山羊草耐低磷基因型的筛选指标

对 7 个筛选指标进行主成分分析,列于前 2 个综合指标的方差贡献率分别为 52.45%、31.26%,

累计贡献率为 83.71%,其余可忽略不计,这样就把原来 7 个单项指标转化为 2 个新的相互独立的综合指标(表 4),分别定义为第 1 和第 2 主成分。

表 4 山羊草各指标的系数与贡献率

Table 4 Correlation of comprehensive indexes and their contribution

指标 Index	主成分 1	主成分 2	各指标权重(%)	挑选指标权重(%)
	Principal component 1	Principal component 2	Index weight	Selected index weight
地上部干重 Stem dry weight	0.49	0.19	31.52	28
根长 Root length	-0.36	0.03	-17.84	
根干重 Root dry weight	0.50	-0.07	24.19	22
生物量 Biomass	0.50	0.13	30.27	27
根冠比 Ratio of root to shoot	0.07	-0.62	-15.97	
磷积累量 P-accumulation	0.14	0.59	25.48	23
磷吸收效率 P-uptake efficiency	-0.33	0.46	-3.10	
方差贡献率(%) Variance contribution rate	52.45	31.26		
累积贡献率(%) Accumulative contribution rate	52.45	83.71		

在第 1 主成分中,相对根干重、相对生物量和相对地上部干重在 7 个指标中所占的权重较大,其中相对根干重权重和相对生物量权重最大为 0.50,相对地上部干重特征向量为 0.49。表明在低磷胁迫下,山羊草通过促进根系的生长,以满足地上部分对水分和矿物质的需求。地上部分生长促使地上部分同化作用加强,其分配给地下部分的营养物质增多,促进了根系的发育,使得相对地上部干重和根干重增加,进而致使其体内的生物量增加。该主成分可主要概括为植株中根系和茎秆对低磷环境的适应性。

在第 2 主成分中相对磷积累量和相对磷吸收效率的权重最大,其中相对磷积累量权重为 0.59,相对磷吸收效率权重为 0.46(表 4)。表明在低磷条件下山羊草通过增加磷吸收效率,促使其体内的磷积累量增加,进而来适应低磷胁迫。此主成分可概括为植株体内营养元素对低磷条件的适应性。

2.4 不同种类山羊草耐低磷基因型的鉴定结果

利用主成分分析可将 7 个候选的耐低磷单项指标转化为 2 个新的相互独立的耐低磷综合指标。各耐低磷指标在耐低磷总指标中的权重和其对应指标数值的乘积能反应该指标的耐低磷综合指数。同一基因型各指标的耐低磷综合指数之和为该基因型山羊草的耐低磷综合指数。主成分分析结果显示,地上部干重、根干重、生物量、磷积累量的权重为正(该指标与耐低磷特性呈正相关),且其所占比重均较大,故其可作为耐低磷山羊草基因型的筛选指

标。山羊草基因型耐低磷综合指数 = $0.28 \times$ 地上部干重耐低磷系数 + $0.22 \times$ 根干重的耐低磷系数 + $0.22 \times$ 生物量的耐低磷系数 + $0.23 \times$ 磷积累量的耐低磷系数,其中数值越高,表示其越耐低磷。各挑选指标的耐低磷综合指数之和可反映该基因型山羊草的耐低磷程度,其中耐低磷指数的值越高,表明其越耐低磷,反之亦然。

在沙培试验中,根据上述耐低磷综合指数的计算方法对参试的 9 个品种先进行聚类分析,后用刘亚等^[5]的分级标准对山羊草基因型进一步分级。通过该计算方法可对 9 种山羊草种质的耐低磷特性进行排序,其中小伞山羊草的综合指数最高(表 5)表明其耐低磷能力最强;尾状山羊草的综合指数最低,表明其耐低磷能力弱。聚类分析结果(图 1)表明,可将 9 种基因型划分为 3 类,第 1 类为小伞山羊草,其耐低磷能力最强;第 2 类为拟斯卑尔脱山羊草、粘果山羊草和双角山羊草;第 3 类为其他山羊草。聚类分析有助于对山羊草耐低磷基因型进行系统分类,但其不能界定耐低磷的标准,故还需利用分级标准进行细化分级。分级结果表明(表 5),其中 4 种山羊草属 1 级,为耐低磷型,包括粘果山羊草、拟斯卑尔脱山羊草、双角山羊草和小伞山羊草,其包含聚类分析中的第 1 类和第 2 类山羊草;2 种山羊草属 3 级,为中间型品种,包括易变山羊草和粗厚山羊草;2 种山羊草属 5 级,为磷相对敏感型,包括偏凸山羊草、欧山羊草;尾状山羊草属 7 级,为磷敏感型。

表5 山羊草材料耐低磷等级的划分

Table 5 Synthetic indexes of *Aegilops* resources for tolerance to low-phosphorus

等级	耐低磷力(- P/CK × 100 %)	种类数	山羊草耐低磷综合指数
Level	Tolerance to low-P ability	Species number	Comprehensive index
1	>95%	4	双角山羊草(1.20)、粘果山羊草(1.06)、拟斯卑尔脱(1.24)、小伞山羊草(2.27)
3	94% ~ 85%	2	易变山羊草(0.86)、粗厚山羊草(0.85)
5	85% ~ 75%	2	偏凸山羊草(0.79)、欧山羊草(0.79)
7	74% ~ 65%	1	尾状山羊草(0.68)
9	<65%	0	-

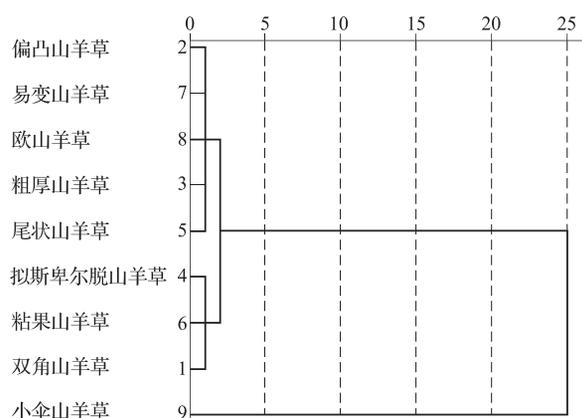
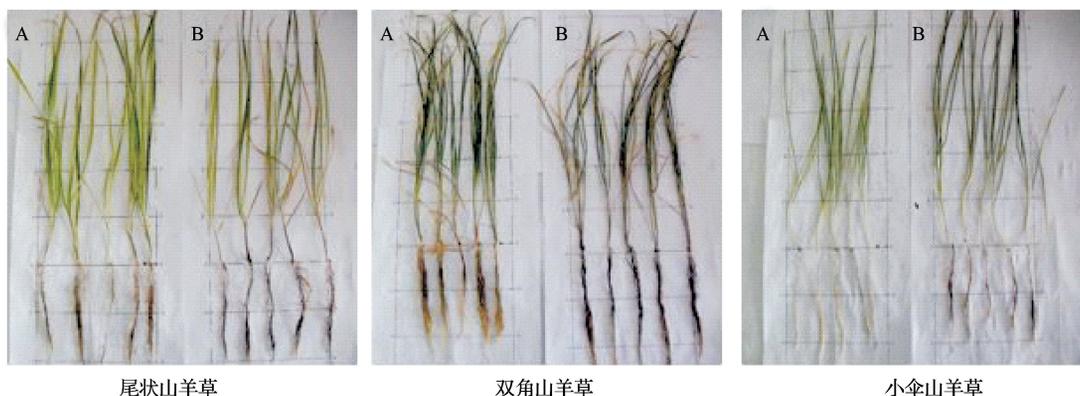


图1 各基因型的聚类分析图

Fig. 1 Cluster analysis of each variety

2.5 山羊草苗期耐低磷性状的观察结果

植物若缺少磷,会表现出植株红色或紫色,茎短而细,基部叶片变黄,开花期推迟,种子小且不饱满等缺素症状^[18]。通过对山羊草表型的观察发现,低磷处理下小伞山羊草、拟斯卑尔脱山羊草、双角山羊草、粘果山羊草根系变化为侧根增多,根毛增加,或是根长变长;茎秆变粗,部分老叶尖端枯黄,新叶呈深绿色。由此可知,可能由于这4种山羊草存在某种耐低磷机制,使得在低磷条件下激发了其某种耐低磷机制,促进其生长。与对照组相比,尾状山羊草的处理组的植株瘦弱,植株十分矮小,叶片数明显减少,老叶枯黄,茎部很细,呈紫色,根部短小发黑(图2)。



尾状山羊草

双角山羊草

小伞山羊草

A 为正常供磷条件下的山羊草;B 为低磷处理条件的山羊草

A: *Aegilops* with normal phosphorus treatment, B: *Aegilops* with low phosphorus treatment

图2 部分山羊草农艺性状的观察结果

Fig. 2 The results of *Aegilops* agronomic traits for tolerance to low-phosphorus

分析结果表明,山羊草中农艺性状观察结果和基因型筛选结果一致,故其筛选指标可信。由此可认为,相对地上部干重、相对根干重、相对生物量可以作为小麦苗期耐低磷基因型快速筛选的指标。

3 讨论

3.1 苗期耐低磷种质资源的鉴定指标

获得典型材料是进行山羊草耐低磷遗传学研究

和利用山羊草进行小麦品种选育工作的前提。因而,建立合适的筛选指标和筛选方法对耐低磷山羊草材料的评价至关重要。目前,关于植物耐低磷基因型种质筛选及评价尚无统一的标准^[16]。孔新忠等^[7]经过试验证明:相对生物量、根冠比和根部结构特征等形态可以作为重要指标筛选出耐低磷小麦品种。李春艳等^[13]研究发现,地上部干重、根干重、根数和植株磷积累量可作为小麦苗期耐低磷基因型

快速筛选的指标。其中地上部干重与植株的磷积累量相关系数最高,是影响小麦的磷积累量重要性状。潘晓华等^[17]研究发现,耐低磷水稻品种的磷营养效率主要表现在磷的吸收能力,而不是磷素的分配和利用效率。张丽梅等^[10]研究表明,不同玉米自交系耐低磷的内在机制不同,玉米自交系的耐低磷程度与磷吸收效率呈显著正相关,与磷利用效率相关不显著。本研究认为,考察的7个指标的耐低磷系数基因型间变异较大,表明山羊草耐低磷机制是各项生理指标的综合反映,不能用单一指标的耐低磷系数判定。利用主成分分析可将7个候选的耐低磷单项指标转化为2个新的相互独立的耐低磷综合指标,各耐低磷指标在耐低磷总指标中的权重和其对应指标的数值的乘积能反映该指标的耐低磷综合指数,故采用耐低磷综合指数可作为山羊草苗期耐低磷基因型快速筛选的指标。利用此方法,本研究筛选到粘果山羊草、拟斯卑尔脱山羊草、双角山羊草和小伞山羊草为耐低磷基因型,特别是小伞山羊草的耐低磷综合指数最高,并且山羊草中农艺性状观察结果和基因型筛选结果一致,说明其筛选指标可信。

3.2 利用普通小麦野生近缘物种基因组中的有关基因改良普通小麦的耐低磷胁迫特性

小麦野生近缘物种是改良普通小麦品种特性最好的基因库。小麦由野生型向栽培型演化过程中,由于人类的选择性育种,许多适应生存环境的基因逐渐减弱甚至丢失,其中之一就是耐低磷胁迫的能力。目前控制该性状的基因主要分布小麦野生近缘物种中。刘建中等^[18]研究表明普通小麦与长穗偃麦草的易位系小偃6号品种能高效活化土壤中难溶性磷,具有良好的耐低磷胁迫特性。陈为序等^[19]研究表明烟农15与中间偃麦草杂交、回交后代获得的小麦品种山农0095根系生理功能较强,能够适应低磷胁迫,推测耐低磷胁迫的能力可能与其携有中间偃麦草的耐低磷基因有关。

因此根据本试验结果,在低磷条件下小伞山羊草各项指标均显著大于正常供磷条件下筛选指标,且其耐低磷综合指数为2.27(表5),远大于其他供试山羊草基因型,故认为小伞山羊草体内具有较强的耐低磷胁迫特性的有关基因,其在小麦耐低磷育种中可以加以利用。

参考文献

- [1] 王庆仁,李继云,李振声. 植物高效利用土壤难溶态磷研究动态及展望[J]. 植物营养与肥料学报,1998,4(2):107-116
- [2] 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,1999,5(3):193-205
- [3] 高方远,陆贤军,任光俊,等. 水稻耐低磷种质的苗期筛选与鉴定[J]. 作物学报,2006,32(8):1151-1155
- [4] 郭再华,贺立源,张启发,等. 水稻耐低磷种质资源的筛选、鉴定指标[J]. 作物学报,2005,31(1):65-69
- [5] 刘亚,李自超,米国华,等. 水稻耐低磷种质的筛选与鉴定[J]. 作物学报,2005,31(2):238-242
- [6] 郑金凤,米少艳,李存东,等. 小麦代换系耐低磷生理性状的主成分分析及综合评价[J]. 中国农业科学,2013,46(10):1984-1993
- [7] 孔新忠,杨丽丽,马正强,等. 小麦耐低磷基因型的筛选[J]. 麦类作物学报,2010,30(4):1984-1993
- [8] 柳鹏,王仕稳,邓西平,等. 硬粒小麦-粗山羊草人工合成小麦的磷效率研究[J]. 麦类作物学报,2014,34(3):332-339
- [9] 张吉海,高世斌,潘光堂,等. 玉米耐低磷种质资源的筛选与鉴定[J]. 植物遗传资源学报,2008,9(3):335-339
- [10] 张丽梅,贺立源,李建生,等. 玉米自交系耐低磷材料苗期筛选研究[J]. 中国农业科学,2004,37(12):1955-1959
- [11] 廖星,李志玉,王江薇,等. 甘蓝型油菜耐缺磷种质筛选指标的研究[J]. 中国农业科学,1999,32(S):107-111
- [12] 杨英仓,徐如宏,任明见,等. 山羊草基因组及其在小麦改良中的应用研究进展[J]. 种子,2004,23(5):37-40
- [13] 李春艳,马龙,李诚,等. 新疆冬小麦苗期耐低磷指标的筛选[J]. 麦类作物学报,2013,33(1):137-140
- [14] 李莉梅,郭荣发. 耐低磷水稻基因型筛选评价指标[J]. 西北农业学报,2013,22(2):30-34
- [15] Morris R A, Garrity D P. Resource capture and utilization in intercropping: Non-nitrogen nutrients [J]. Field Crops Res, 1993, 1016:319-334
- [16] 严小龙,张复锁. 植物营养遗传学[M]. 北京:中国农业出版社,1997:106-118
- [17] 潘晓华,刘水英,李锋,等. 低磷胁迫对不同水稻品种幼苗生长和磷效率的影响[J]. 江西农业大学学报:自然科学版,2002,24(3):297-300
- [18] 刘建中,李玉京,李滨,等. 不同生产时期小麦品种有效利用土壤潜在磷特性的鉴定[J]. 作物学报,1999,25(5):560-564
- [19] 陈为序,李瑶,李太强,等. 小偃麦种质系山农0095耐低磷胁迫特性研究[J]. 麦类作物学报,2013,33(4):765-770