

doi:10.11733/j.issn.1007-0435.2026.04.018

引用格式:马翔宇, 刘佳佳, 段博文, 等. 水磷限制对燕麦生长发育的影响及综合评价指标筛选[J]. 草地学报, 2026, 34(4): 1335—1346

MA Xiang-yu, LIU Jia-jia, DUAN Bo-wen, et al. Effects of Water and Phosphorus Limitation on Oat Growth and Development and Screening of Comprehensive Evaluation Indices[J]. Acta Agrestia Sinica, 2026, 34(4):1335—1346

水磷限制对燕麦生长发育的影响及综合评价 指标筛选

马翔宇^{1,2}, 刘佳佳^{1,2}, 段博文^{1,2}, 张琮滢^{1,2}, 胡晓炜^{1,2*}, 周青平^{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:干旱和缺磷是限制青藏高原燕麦(*Avena sativa*)生产的关键因素,为明确水磷胁迫对燕麦生长的影响及主要限制因子,筛选燕麦共同适应水磷限制的关键指标,本研究以14份燕麦品种为试验材料,通过盆栽试验设置对照(CK)、低磷胁迫(-P)、干旱胁迫(-W)和水磷复合胁迫(-W-P)处理,测定18个相关指标。结果表明:胁迫处理会显著($P<0.05$)抑制燕麦地上生物量及地上部各器官生物量、小穗数、穗粒数和磷累积量,且复合胁迫抑制程度大于单一胁迫;不同指标受各因子的影响程度不同,水分是影响燕麦生长发育的主要因子;灰色关联分析和主成分分析等方法筛选出籽粒生物量、地上生物量、小穗数、穗粒数、地下生物量、旗叶面积、全株和籽粒磷累积量是反映燕麦耐水磷胁迫能力的关键指标。本研究结果可为青藏高原燕麦抗旱耐低磷品种选育与评价提供理论依据和方法参考。

关键词:燕麦;低磷胁迫;干旱胁迫;复合胁迫

中图分类号:S603.4

文献标识码:A

文章编号:1007-0435(2026)04-1335-12

Effects of Water and Phosphorus Limitation on Oat Growth and Development and Screening of Comprehensive Evaluation Indices

MA Xiang-yu^{1,2}, LIU Jia-jia^{1,2}, DUAN Bo-wen^{1,2}, ZHANG Cong-yan^{1,2},
HU Xiao-wei^{1,2*}, ZHOU Qing-ping^{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: Drought and phosphorus deficiency are key factors limiting oat (*Avena sativa*) production in the Qinghai-Tibet Plateau. In order to elucidate the effects of water and phosphorus stress on oat growth, identify the primary limiting factors, and screen for key indicators of oats' synergistic adaptation to water and phosphorus constraints. This study utilized 14 oat cultivars in pot experiments, with treatments including a control (CK), low phosphorus stress (-P), drought stress (-W), and combined drought and low phosphorus stress (-W-P). Additionally, this experiment measured 18 indicators, including agronomic traits, biomass, and phosphorus accumulation, among others. Results indicated that stress treatment significantly suppressed oat aboveground biomass and biomass of individual aboveground organs, spikelet number, grain per spike, and phosphorus accumulation at the 0.05 level. Moreover, the degree of inhibition is greater under combined stress than under single stress. Different indicators exhibited varying degrees of susceptibility to each factor, with

收稿日期:2025-09-19;修回日期:2025-12-01

基金项目:西南民族大学引进人才项目(RQD2023006);中央高校基本科研业务费专项基金项目(自科)(ZYN2024047);青藏高原特有草种质资源创新及草地生态恢复创新团队(2024CXTD11);四川省科技项目(2024NSFSC0310)资助

作者简介:马翔宇(1999-),女,汉族,山东东营人,硕士研究生,主要从事牧草抗逆研究, E-mail:jiouyuejingzi@163.com;*通信作者 Author for correspondence, E-mail:xiaoweihu24@hotmail.com;qingzh@aliyun.com

water availability being the primary growth-limiting factor. Methods such as grey relational analysis and principal component analysis jointly identified grain biomass, aboveground biomass, spikelet number, grain per spike, belowground biomass, flag leaf area, and phosphorus accumulation in plants and grains as key indicators reflecting oats' tolerance to water and phosphorus stress. The findings of this study provide theoretical foundations and methodological guidance for the breeding and evaluation of drought-tolerant and low-phosphorus-tolerant oat cultivars on the Qinghai-Tibet Plateau.

Key words: Oats; Low phosphorus stress; Drought stress; Combined stress

燕麦(*Avena sativa*)适应性强,具有抗旱、抗寒、耐贫瘠等优点^[1-2],对青藏高原环境适应性强,是目前已知生产力最高的高寒地区牧草^[3],其饲用价值高,对缓解冷季牧草短缺、保护生态环境和促进畜牧业可持续发展有重要作用。燕麦籽粒富含 β -葡萄糖及多种微量元素,食疗保健作用显著,可有效改善“三高”、心脑血管疾病等多种健康问题^[4]。近年来,我国燕麦种植面积和产量不断增加,但仍不能满足国内需求。

青藏高原及周边地区是我国皮燕麦种植面积最大的区域,其种植面积占全国皮燕麦总面积的90%^[5]。然而,该地区燕麦产业的发展仍面临多重挑战。首先,因全球气候变暖,青藏高原干旱发生频率和强度明显增强,严重制约了燕麦品质和产量的提升^[6]。其次,磷素缺乏是限制该地区燕麦生产的另一关键因素。青藏高原地区土壤缺乏多种养分^[7],其中氮、磷含量对燕麦的影响尤为突出。与氮不同,氮可以源源不断地从大气中被获得,而磷素储量有限,且循环缓慢、极易被固定^[8],若仅依赖施肥补充磷素,不仅难以应对未来可能出现的磷资源短缺问题,还可能对青藏高原脆弱的生态环境造成破坏^[9]。此外,受地形条件限制,青藏高原耕地资源有限^[10],主要用于种植青稞、小麦等主粮作物^[11],燕麦则多种植于水肥条件较差的边际土地上。因此,在青藏高原特殊的自然与社会经济条件下,选育能高效利用水分和磷素的燕麦品种,已成为应对资源约束、推动区域农业可持续发展的关键策略。

目前,已有研究阐明干旱或低磷单一胁迫对燕麦的影响,并通过主成分分析^[12]、聚类分析^[13]等方法筛选出耐旱或耐低磷的评价指标。例如,穗部性状和产量被认为是评价燕麦成熟期抗旱性的重要指标^[14];生物量、农艺性状及磷含量常用于反映燕麦的磷利用效率与耐低磷能力^[15-16]。但关于水磷复合胁迫对燕麦的影响研究较少,评价燕麦抗旱耐低磷能力的指标也尚不明确。干旱低磷存在协同效应,干旱不利于磷素在土壤中迁移^[17],继而降低土壤中磷的有效性,影响植物对养分的吸收利用^[18];

低磷会影响作物的水分利用效率^[19],加剧干旱的不利影响。因此,水磷复合胁迫对燕麦的影响不同于单一胁迫,亟需开展系统性研究。

本研究以青藏高原主要种植的8份燕麦品种及国外引进的6份燕麦品种为试验材料,基于单一胁迫下的研究基础,系统分析水、磷单一及共同限制对燕麦农艺性状及生物量的影响,结合相对变化率、相关性分析、灰色关联分析、聚类分析及主成分分析等多种统计方法,筛选可用于燕麦抗旱耐低磷能力鉴定的关键指标,用以评估不同燕麦品种,以期对燕麦抗逆品种选育提供理论依据和方法参考。

1 材料与方法

1.1 试验地自然概况

试验于2024年4月在西南民族大学试验基地抗旱棚进行。试验地位于青海省海东市互助土族自治县(东经101.9638°,北纬36.8425°),海拔2776.66 m,年平均气温5.8℃,年平均日照时数为2581.7 h,无霜期约114 d,年降水量约为477.4 mm,年蒸发量1198.3 mm。实验土壤为栗钙土,理化性质如下:土壤全氮量1.15 g·kg⁻¹,速效氮含量108.1 mg·kg⁻¹,全磷量0.736 g·kg⁻¹,速效磷含量7.14 mg·kg⁻¹,速效钾含量9.36 mg·kg⁻¹,有机质含量19.7 g·kg⁻¹,有机碳含量11.4 g·kg⁻¹,pH值8.26。

1.2 试验材料及设计

试验材料为14份燕麦品种(表1),均由西南民族大学提供。

本试验为盆栽试验,花盆直径26 cm,高21 cm,每盆装土4.5 kg。采用水磷互作处理方式,设置2种水分处理^[20]:正常水分(W75,盆土含水量为田间持水量的75%±5%)和水分亏缺(W35,盆土含水量为田间持水量的35%±5%);设置2种磷处理^[21]:正常磷(P60,以P₂O₅计60 kg·hm⁻²)和磷不足(P0,不施磷肥),分别记为CK(对照,W75-P60),

—P(低磷胁迫, W75-P0), —W(干旱胁迫, W35-P60), —W—P(水磷复合胁迫, W35-P0), 共 4 个处理, 每个处理重复 3 次(表 2)。采用称重法控制土壤水分至生育期结束, 试验每天 8:00 进行称重补水, 水源为当地自来水, 期间随机调换花盆位置; 肥

料为过磷酸钙(12% P_2O_5)和尿素(46% N, 75 kg·hm⁻²), 全部作为种肥与盆土混匀后一次性施入。出苗后间苗, 每盆定株 5 株, 试验期间不定期除草, 及时防治病虫害, 以保证试验结果的准确性。

表 1 供试燕麦品种

Table 1 Tested oat cultivar

编号 Number	品种 Cultivar	原产地 Origin	编号 Number	品种 Cultivar	原产地 Origin
1	青海甜燕麦 <i>A. sativa</i> ‘Qinghai sweet oat’	中国 China	8	青燕 3 号 <i>A. sativa</i> ‘Qingyan No. 3’	中国 China
2	青海 444 <i>A. sativa</i> ‘Qinghai No. 444’	中国 China	9	楷模 <i>A. sativa</i> ‘Model’	加拿大 Canada
3	青引 1 号 <i>A. sativa</i> ‘Qingyin No. 1’	中国 China	10	贝利 <i>A. sativa</i> ‘Beili’	加拿大 Canada
4	青引 2 号 <i>A. sativa</i> ‘Qingyin No. 2’	中国 China	11	贝勒 <i>A. sativa</i> ‘Baler’	加拿大 Canada
5	定燕 2 号 <i>A. sativa</i> ‘Dingyan No.2’	中国 China	12	凯撒 <i>A. sativa</i> ‘Kaisa’	美国 America
6	青燕 1 号 <i>A. sativa</i> ‘Qingyan No. 1’	中国 China	13	林纳 <i>A. sativa</i> ‘Lena’	挪威 Norway
7	青燕 2 号 <i>A. sativa</i> ‘Qingyan No. 2’	中国 China	14	艾博 <i>A. sativa</i> ‘Abbott’	加拿大 Canada

表 2 试验设计

Table 2 Experimental design

编号 Number	水分处理 Water condition treatment	磷处理 Phosphorus treatment	灌溉梯度 Irrigation level	施磷 (P_2O_5) 梯度 Phosphorus (P_2O_5) level/(kg·hm ⁻²)
CK	W75	P60	75%±5%	60
—P	W75	P0	75%±5%	0
—W	W35	P60	35%±5%	60
—W—P	W35	P0	35%±5%	0

1.3 测定指标及方法

1.3.1 燕麦农艺性状及生物量的测定 参考《燕麦种质资源描述规范》^[22], 在抽穗期, 每盆随机选取 3 株燕麦植株, 用卷尺测量旗叶长、旗叶宽, 计算旗叶面积=长×宽×0.86^[23]。乳熟期用卷尺或游标卡尺测定株高、茎粗、穗下茎长和穗长, 直接计数法测定小穗数、轮层数、穗粒数。完熟期收获, 烘干至恒重后, 采用直接称重法测定地上生物量、茎叶生物量、籽粒生物量、地下生物量, 并计算千粒重。用地下生物量与地上生物量的比值计算根冠比。

1.3.2 燕麦植株磷含量的测定 将干燥样品粉碎过筛后, 用 H₂SO₄-H₂O₂ 法消煮, 间断化学分析仪通过钼蓝比色法分别测定各器官中的全磷含量并计算磷累积量, 磷累积量=干重×全磷含量^[24]。

1.4 数据处理

用 Excel 进行基础数据整理, 并计算磷累积量和相对变化率。相对变化率=(处理组指标测定值—CK 组指标测定值)÷CK 组指标测定值×100%^[25]。用灰色关联分析^[26]计算籽粒生物量与农艺性状等其他指标间的关联度, 以籽粒生物量为参

考数列, 其他指标为比较数列。用 SPSS 27.0 进行方差分析, 多重比较采用 Duncan 法, 结果用平均值±标准误表示。用 SPSS AU 进行主成分分析; 用 Origin 2022 进行相关性分析及聚类分析并绘图, 其中聚类分析以欧氏距离计算, 类平均法对相对变化率进行处理。

2 结果与分析

2.1 水磷限制对燕麦生长性状的影响

2.1.1 水磷限制对燕麦农艺性状的影响 与 CK 相比, 各处理均显著抑制了燕麦植株生长。其中, 株高在 —W 和 —W—P 处理下分别下降 16.40% 和 18.15%, 降幅显著大于 —P 处理(4.26%), 且水分缺失对株高的影响更为突出, 施磷未能显著缓解干旱导致的株高降低。茎部性状, 与 CK 相比, 茎粗在各处理下均显著降低, 且 —W—P 处理的降幅最大(21.23%), 显著低于单一胁迫。穗下茎长受水分影响更大, —W 处理较 CK 下降 35.40%, 且显著低于 —P 和 —W—P 处理。旗叶性状, 与 CK 相比, —P, —W 和 —W—P 处理下的旗叶长分别显著下降 9.77%, 8.11% 和 20.67%; 旗叶宽分别显著下降

6.00%,7.33%和14.00%;旗叶面积分别显著下降15.13%,14.49%和31.77%。而-P与-W处理间各旗叶指标无显著差异,表明单一干旱或低磷胁迫

的抑制作用相近。综上,除穗下茎长外,-W-P处理下的上述指标均显著低于其他处理,表明水磷复合胁迫具有协同作用(表3)。

表 3 水磷限制对 14 份燕麦品种农艺性状的影响

Table 3 Effects of water and phosphorus limitation on agronomic traits of 14 oat cultivars

处理 Treatment	株高 Plant height/cm	茎粗 Stem diameter/mm	穗下茎长 Stem length under spike/cm	旗叶长 Flag leaf length/cm	旗叶宽 Flag leaf width/cm	旗叶面积 Flag leaf area/cm ²
CK	94.21±0.71 ^a	5.04±0.05 ^a	22.12±0.33 ^a	16.89±0.26 ^a	1.50±0.02 ^a	21.94±0.50 ^a
-P	90.20±0.87 ^b	4.52±0.04 ^b	20.66±0.33 ^b	15.24±0.22 ^b	1.41±0.02 ^b	18.62±0.39 ^b
-W	78.76±0.68 ^c	4.42±0.04 ^b	14.29±0.31 ^d	15.52±0.25 ^b	1.39±0.01 ^b	18.76±0.44 ^b
-W-P	77.11±0.69 ^c	3.97±0.03 ^c	15.84±0.32 ^c	13.40±0.22 ^c	1.29±0.01 ^c	14.97±0.33 ^c

注:同一列中不同小写字母表示不同处理下具有显著差异($P<0.05$),下同

Note: Different lowercase letters within the same column indicate significant differences among treatments at the 0.05 level. The same as below

2.1.2 水磷限制对燕麦生物量的影响 生物量分析表明,各胁迫处理均显著抑制了生物量积累。具体而言,茎叶生物量在-P,-W和-W-P处理下分别较CK下降17.08%,23.61%和34.64%,且各处理间差异显著,表现为对水分更为敏感。籽粒生物量在-P,-W和-W-P处理下分别较CK下降了19.47%,21.58%和31.22%,但单一胁迫间差异不显著,复合胁迫显著低于单一胁迫。地下生物量

对不同胁迫的响应不一致:-P处理较CK显著降低17.18%,-W处理反而增加11.07%,-W-P处理与CK无显著差异。根冠比主要受水分调控,干旱条件下显著升高,磷供应状况对其影响不显著。综上,水磷复合胁迫对地上生物量的抑制具有协同作用,单一低磷或干旱胁迫对籽粒生物量的抑制作用相近,根系生物量对水分和磷的胁迫则表现出相反

表 4 水磷限制对 14 份燕麦品种生物量的影响

Table 4 Effects of water and phosphorus limitation on biomass of 14 oat cultivars

处理 Treatment	茎叶生物量 Stem and leaf biomass/ (g·pot ⁻¹)	籽粒生物量 Grain biomass/ (g·pot ⁻¹)	地上生物量 Aboveground biomass/ (g·pot ⁻¹)	地下生物量 Belowground biomass/ (g·pot ⁻¹)	根冠比 Root-shoot ratio
CK	10.42±0.22 ^a	10.89±0.25 ^a	23.28±0.43 ^a	2.62±0.07 ^b	0.11±0.00 ^b
-P	8.64±0.27 ^b	8.77±0.23 ^b	18.77±0.42 ^b	2.17±0.06 ^c	0.12±0.00 ^b
-W	7.96±0.24 ^c	8.54±0.22 ^b	18.08±0.36 ^b	2.91±0.07 ^a	0.16±0.00 ^a
-W-P	6.81±0.23 ^d	7.49±0.22 ^c	15.63±0.34 ^c	2.62±0.06 ^b	0.17±0.00 ^a

注:g·pot⁻¹为克每盆

Note:g·pot⁻¹ is grams per pot

2.1.3 水磷限制对燕麦籽粒生物量因子的影响 穗部性状分析表明,各胁迫处理显著抑制了穗部的正常发育。其中,小穗数与穗粒数对水分更为敏感,在-P,-W和-W-P处理下较CK分别下降12.02%,14.94%,22.27%和14.98%,19.98%,30.26%,且各处理间降幅差异显著,均表现为-P>-W>-W-P。穗长在-P,-W和-W-P处

理下较CK分别下降5.64%,8.69%和13.49%,-P与-W处理间无显著差异,但-W-P显著低于二者。千粒重仅对水分响应显著,在干旱条件下升高,磷供应对其无显著影响。综上,除千粒重外,水磷复合胁迫对其余穗部指标的抑制具有协同作用,穗长在单一低磷或干旱胁迫下受抑制的程度相近(表5)。

表 5 水磷限制对 14 份燕麦品种籽粒生物量因子的影响

Table 5 Effects of water and phosphorus limitation on biomass factors of 14 oat cultivars grains

处理 Treatment	轮层数 Number of whorls	小穗数 Spikelet number	穗粒数 Grain per spike	穗长 Panicle length/cm	千粒重 1000-grain weight/g
CK	5.83±0.05 ^a	20.21±0.20 ^a	35.39±0.46 ^a	17.72±0.25 ^a	34.09±0.66 ^b
-P	5.79±0.05 ^a	17.78±0.21 ^b	30.09±0.47 ^b	16.72±0.26 ^b	34.21±0.59 ^b
-W	5.78±0.05 ^a	17.19±0.21 ^c	28.32±0.49 ^c	16.18±0.21 ^b	36.04±0.77 ^a
-W-P	5.70±0.05 ^a	15.71±0.20 ^d	24.68±0.41 ^d	15.33±0.20 ^c	36.04±0.64 ^a

2.1.4 水磷限制对燕麦植株磷累积量的影响 与 CK相比,—P,—W和—W—P处理下的全株磷累积量分别显著下降21.27%,26.48%和34.26%,籽粒磷累积

量分别显著下降22.33%,27.61%和35.79%,表明单一及复合胁迫均造成磷累积量下降;—W—P处理显著低于其他,表明水磷复合胁迫加剧磷累积量的下降(表6)。

表 6 水磷限制对 14 份燕麦品种磷累积量的影响

Table 6 Effects of water and phosphorus limitation on phosphorus accumulation of 14 oat varieties

处理 Treatment	全株磷累积量 Plant phosphorus accumulation/(mg·pot ⁻¹)	籽粒磷累积量 Grain phosphorus accumulation/(mg·pot ⁻¹)
CK	43.96±1.08 ^a	34.12±1.03 ^a
—P	34.61±0.93 ^b	26.50±0.79 ^b
—W	32.32±1.05 ^b	24.70±1.07 ^b
—W—P	28.90±0.75 ^c	21.91±0.67 ^c

注:mg·pot⁻¹为毫克每盆
Note:mg·pot⁻¹ is milligrams per pot

2.1.5 水磷限制对燕麦生长发育的多因素方差分析 多因素方差结果表明(表7),品种(C)对所有测定指标均存在极显著影响($P<0.01$),水分处理(W)对除轮层数外的指标均有极显著影响($P<0.01$);磷处理(P)对除穗下茎长、轮层数和千粒重外的指标有极显著影响($P<0.01$),但W与C和P相比,具有更高

的 F 值,表明它对试验方差的影响更大,这与多重比较结果相一致(表3~表6)。在交互作用方面, $W\times P$ 对生物量指标有显著交互作用($P<0.05$); $C\times W$, $C\times P$ 和 $C\times W\times P$,在多数指标上均呈现显著交互作用($P<0.05$),仅轮层数、穗粒数和千粒重未受显著影响,反映出品种与环境之间存在复杂的调控关系。

表 7 多因素方差分析燕麦品种各指标的主效应和因子相互作用的 F 值

Table 7 F -values for the main effects and factor interactions for various variables for oat cultivars analyzed using multifactorial ANOVA

指标 Index	C	W	P	$C\times W$	$C\times P$	$W\times P$	$C\times W\times P$
株高 Plant height	163.331**	1498.139**	59.395**	3.649**	7.852**	6.133*	4.459**
茎粗 Stem diameter	29.474**	484.849**	323.756**	6.114**	5.610**	1.543	2.850**
穗下茎长 Stem length under spike	113.691**	1481.206**	0.028	13.250**	4.527**	82.229**	5.122**
旗叶长 Flag leaf length	41.399**	113.839**	157.677**	4.864**	6.860**	2.396	2.207**
旗叶宽 Flag leaf width	16.474**	92.803**	63.225**	3.585**	2.631**	0.585	1.771*
旗叶面积 Flag leaf area	24.626**	129.303**	140.282**	4.292**	6.237**	0.607	1.912*
茎叶生物量 Stem and leaf biomass	30.094**	307.037**	143.330**	3.540**	4.787**	6.717*	2.180*
籽粒生物量 Grain biomass	25.389**	224.070**	170.429**	2.898**	5.964**	19.339**	1.989*
地上生物量 Aboveground biomass	16.094**	340.183**	237.750**	3.518**	6.942**	20.801**	2.681**
地下生物量 Belowground biomass	18.582**	126.185**	124.839**	7.351**	10.357**	5.705*	3.567**
根冠比 Root-shoot ratio	13.538**	1229.663**	9.895**	8.568**	7.717**	3.102	4.138**
轮层数 Number of whorls	31.832**	2.858	2.465	1.084	2.339**	0.131	1.529
小穗数 Spikelet number	47.225**	355.714**	210.424**	3.020**	2.266**	12.397**	1.930*
穗粒数 Grain per spike	26.959**	357.917**	185.799**	3.522**	6.688**	7.530**	1.256
穗长 Panicle length	266.998**	325.418**	129.129**	6.044**	6.829**	0.752	2.082*
千粒重 1000-grain weight	188.036**	80.856**	0.078	3.951**	3.236**	0.094	1.515
籽粒磷累积量 Grain phosphorus accumulation	19.519**	198.767**	109.830**	3.730**	5.846**	23.614**	4.139**
全株磷累积量 Plant phosphorus accumulation	19.886**	258.931**	140.187**	3.683**	4.948**	30.283**	3.100**

注: *在0.05水平上显著相关, **在0.01水平上极显著相关。品种(C);水分处理(W);磷处理(P),下同

Note: * Significant correlation at 0.05 level, ** extremely significant correlation at 0.01 level. Cultivar(C); Water condition(W); P treatment(P). The same as below

2.2 水磷限制下各指标与籽粒生物量的相关性分析和灰色关联分析

为深入探究水磷限制条件下各指标与籽粒生物量之间的关系,本研究进行了相关性和灰色关联分析。籽粒生物量与12个指标存在显著正相关关系(图1)。基于上述结果进行灰色关联分析,与燕

麦籽粒生物量关联度较高的是地上生物量、穗粒数、茎叶生物量、全株磷累积量、旗叶面积和籽粒磷累积量,其关联度均大于0.9,表明这些指标与籽粒生物量之间具有极强关联性,可作为评价燕麦在水磷限制下产量形成能力的重要参考依据(表8)。

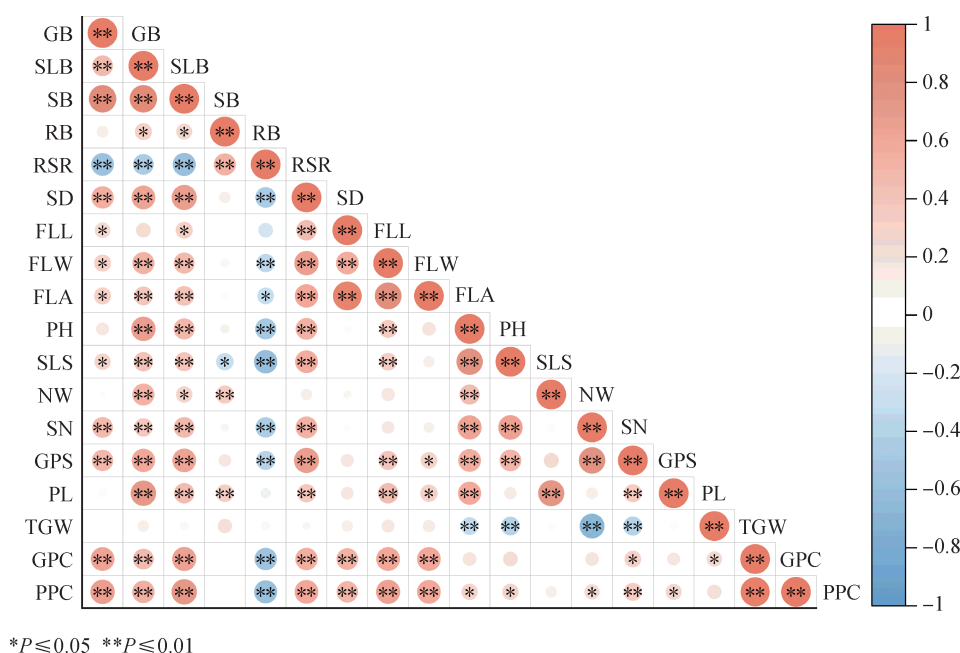


图 1 水磷限制下各指标间相关性分析

Fig. 1 The correlation analysis among various indicators under water and phosphorus limitation

注:GB为籽粒生物量;SLB为茎叶生物量;SB为地上生物量;RB为地下生物量;RSR为根冠比;SD为茎粗;FLL为旗叶长;FLW为旗叶宽;FLA为旗叶面积;PH为株高;SLS为穗下茎长;NW为轮层数;SN为小穗数;GPS为穗粒数;PL为穗长;TGW为千粒重;GPC为籽粒磷累积量;PPC为全株磷累积量

Note: GB represents grain biomass; SLB represents stem and leaf biomass; SB represents aboveground biomass; RB represents belowground biomass; RSR represents root-shoot ratio; SD represents stem diameter; FLL represents flag leaf length; FLW represents flag leaf width; FLA represents flag leaf area; PH represents plant height; SLS represents stem length under spike; NW represents number of whorls; SN represents spikelet number; GPS represents grain per spike; PL represents panicle length; TGW represents 1000-grain weight; GPC represents grain phosphorus accumulation; PPC represents plant phosphorus accumulation

表 8 水磷限制下各性状与籽粒生物量的灰色关联度及排序

Table 8 Grey correlation coefficients and rankings of traits and grain biomass under water and phosphorus limitation

指标 Index	关联度 Correlation degree	关联序 Correlative order
地上生物量 Aboveground biomass	0.985	1
穗粒数 Grain per spike	0.964	2
茎叶生物量 Stem and leaf biomass	0.955	3
全株磷累积量 Plant phosphorus accumulation	0.944	4
旗叶面积 Flag leaf area	0.935	5
籽粒磷累积量 Grain phosphorus accumulation	0.925	6
小穗数 Spikelet number	0.881	7
穗下茎长 Stem length under spike	0.860	8
茎粗 Stem diameter	0.858	9
旗叶长 Flag leaf length	0.837	10
旗叶宽 Flag leaf width	0.794	11
根冠比 Root-shoot ratio	0.591	12

2.3 水磷限制下主要农艺与生物量性状的主成分分析

植物抗逆研究中,相对变化率常用于评估各性状对胁迫的敏感程度,其绝对值越大,表明该性状对胁迫越敏感。本研究基于18个指标在胁迫处理

下的相对变化率进行聚类分析,选择出14个敏感指标(A,B,C,图2)用于后续主成分分析。

主成分分析结果表明,前4个主成分的累计贡献率达92.224%,能够较好地反映原始变量的绝大部分信息。其中,第Ⅰ主成分贡献率为62.988%,地上生物量、小穗数和穗粒数的载荷系数较大,综合体现了燕麦生物量积累与穗部发育状况;第Ⅱ主成分贡献率为14.345%,地下生物量和根冠比载荷较大,可以反映出根系生长状况;第Ⅲ主成分贡献率为8.544%,旗叶长和旗叶面积载荷较大,反映旗叶生长状况;第Ⅳ主成分贡献率为6.347%,全株和籽粒磷累积量载荷较大,可以反映植株的磷素利用情况。综上,生物量积累与穗部发育、根系、旗叶及磷素利用指标与燕麦抗旱耐低磷能力密切相关(表9)。

综合2.2分析结果表明,籽粒生物量、地上生物量、小穗数、穗粒数、地下生物量、旗叶面积、全株和籽粒磷累积量这8个指标能够客观反映燕麦耐水磷胁迫的能力,可作为评价燕麦共同适应水磷限制的主要指标。

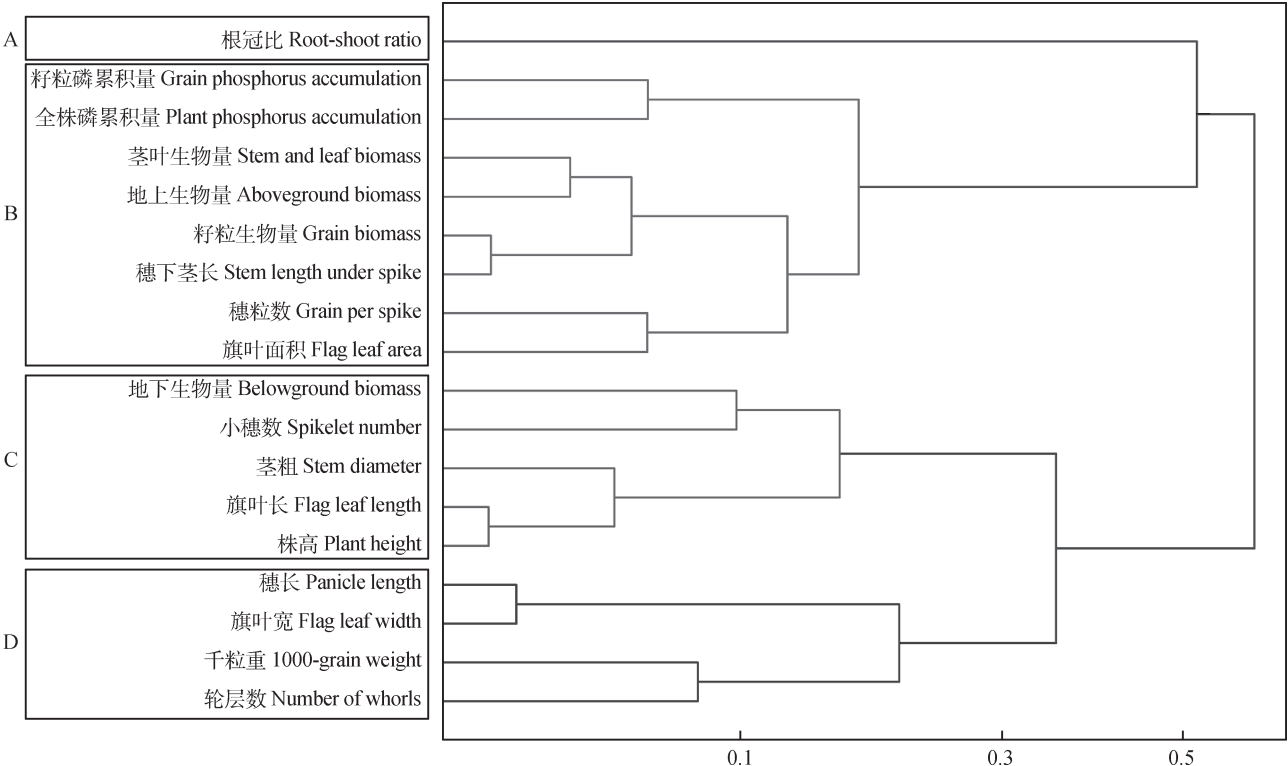


图 2 水磷限制下 18 个指标相对变化率聚类分析

Fig. 2 Cluster analysis of relative change rates for 18 indicators under water and phosphorus limitation

注: A 为高敏感指标; B 为中敏感指标; C 为低敏感指标; D 为不敏感指标

Note: A represents highly sensitive indicator; B represents moderately sensitive indicator; C represents lowly sensitive indicator; D represents insensitive indicator

表 9 供试燕麦各指标的主成分分析

Table 9 Principal components analysis of various indicators for the tested oats

指标 Index	载荷系数 PCA loading			
	I	II	III	IV
地上生物量 Aboveground biomass	0.916	0.178	0.298	0.045
小穗数 Spikelet number	0.902	−0.008	0.140	−0.075
穗粒数 Grain per spike	0.892	0.137	0.125	−0.176
株高 Plant height	0.884	−0.307	0.070	−0.225
籽粒生物量 Grain biomass	0.878	0.309	0.171	0.080
茎叶生物量 Stem and leaf biomass	0.878	0.024	0.361	0.017
茎粗 Stem diameter	0.857	0.272	0.025	−0.196
全株磷积累量 Plant phosphorus accumulation	0.830	−0.093	−0.092	0.520
穗下茎长 Stem length under spike	0.793	−0.379	0.019	−0.263
籽粒磷积累量 Grain phosphorus accumulation	0.740	−0.164	−0.174	0.612
根冠比 Root-shoot ratio	−0.738	0.626	0.031	0.054
旗叶面积 Flag leaf area	0.700	0.334	−0.596	−0.136
旗叶长 Flag leaf length	0.640	0.370	−0.652	−0.111
地下生物量 Belowground biomass	−0.044	0.935	0.295	0.082
特征值 Eigen value	8.818	2.008	1.196	0.889
贡献率 Contribution/%	62.988	14.345	8.544	6.347
累积贡献率 Cumulative Contribution/%	62.988	77.333	85.877	92.224
权重 Weight/%	68.30	15.55	9.26	6.88

3 讨论

3.1 干旱胁迫对燕麦生长发育及生物量的影响

水分是植物生长不可或缺的因素,干旱胁迫会显著抑制植物正常生长,导致形态特征改变^[27]。本试验表明,干旱胁迫后燕麦的株高、茎粗、穗下茎长及旗叶相关指标均普遍下降,这被认为是干旱胁迫抑制了燕麦细胞的有丝分裂和伸长过程^[28],进而影响整体形态构建。产量及产量构成因子也是评价燕麦抗旱性的重要指标^[29]。本试验中,干旱胁迫显著抑制了燕麦地上生物量及穗部发育,但增加地下生物量和根冠比,表明燕麦可能通过优化生物量分配,即增强根系扩展以提高水分吸收,并抑制地上部生长以降低蒸腾损耗,来维持水分平衡^[30-31]。本试验中千粒重在干旱胁迫下显著增加,但其与抗旱性关联不大,这与前人研究不同^[32],推测原因可能与光合产物向籽粒的集中分配^[33]及产量因子的补偿效应^[34]有关。此外,干旱胁迫对轮层数无显著影响,表明该性状较稳定,受环境影响小,这可能与燕麦遗传特性有关^[35]。

3.2 低磷胁迫对燕麦生长发育及生物量的影响

磷是植物生长发育的关键养分。本研究中株高、茎粗、穗下茎长和旗叶指标在低磷胁迫下均显著降低,表明胁迫影响燕麦的生长发育。此外,缺磷对小穗数、穗粒数及穗长产生明显限制,这与前人研究结论一致,磷素直接参与光合作用中的光合磷酸化和碳水化合物的合成与运转,缺磷会影响穗部的正常发育和成熟,最终限制干物质的积累^[36]。值得注意的是,本试验中千粒重在不同磷水平下并未出现显著差异,这可能与施氮量的干扰有关。有学者指出,低氮条件下施磷会增加燕麦千粒重^[37],也有研究表明,氮磷配施下,氮肥对燕麦千粒重的影响显著,而磷肥的影响并不显著^[38]。因此,本研究中千粒重对低磷胁迫的响应不显著,反映出燕麦籽粒灌浆过程受氮磷互作的复合调控。此外,燕麦轮层数在不同磷处理下保持稳定,未发生显著变化,进一步表明该性状受环境影响较小,可能主要由遗传背景所控制。

3.3 水磷共同限制对燕麦的影响

燕麦种植地区普遍面临干旱与低磷并存的胁迫困境^[39],探究水磷复合胁迫对燕麦的影响有重要

意义。复合胁迫对植物的影响并非单一胁迫的简单叠加,而是多种因素相互作用产生的协同或拮抗作用^[40]。本研究发现,单一干旱或低磷胁迫均显著降低了燕麦籽粒及全株的磷累积量,而复合胁迫则表现出协同作用,抑制较单一胁迫强,表明养分的吸收与转运过程受到了协同抑制。研究中的多数测定指标与磷累积量在复合胁迫下的变化趋势类似,干旱和低磷胁迫效应互相强化^[41]。这表明植物在应对水磷复合胁迫时可能出现了多生理层面的交叉失调:(1)在光合层面,水磷复合胁迫造成叶绿素含量下降程度大于单一胁迫^[42],对光合损伤更大;(2)在生理保护层面,植株通过激活抗氧化系统和合成渗透调节物质缓解氧化损伤,但复合胁迫能通过干扰离子(如 Na^+ , K^+)稳态和破坏植物激素平衡,抑制调节物质合成,导致保护性生理响应失效^[43];(3)在养分吸收利用方面,复合胁迫对根系功能产生协同抑制,例如,高亲和磷转运基因 *PHT1* 的表达量较单一胁迫显著下降,从而阻碍磷的吸收与转运^[44];(4)此外,资源竞争与分配冲突也是协同抑制的重要原因,水磷复合胁迫下,植物根系需维持细胞膨胀与渗透调节以保证水分吸收^[45],同时还需分泌酸性磷酸酶来提升磷的可利用性^[15],二者竞争有限资源,导致根系资源分配策略失衡。值得注意的是,干旱低磷复合胁迫对穗下茎伸长的抑制较单一胁迫有所缓解,表现为拮抗作用。这反映了植物在复合胁迫下触发的资源权衡与再分配策略^[46],植物面临复合胁迫时有更大的生理损伤和生长抑制,优先将更多的干物质向穗部转运,使穗下茎间接受益,获得更多营养供给,从而在一定程度上维持了细胞的膨压与伸长能力,导致其节间长度相对增加^[47-48]。

本研究发现,优化水分或磷素供应条件均可缓解水磷复合胁迫对燕麦的协同抑制作用。但水磷限制导致燕麦农艺性状、生物量及磷累积量发生负变化,更多是由于水分不足,燕麦对水分更为敏感,因此在水磷复合胁迫下,优先保障水分供给是更为关键的管理措施。这可能是由于:(1)在光合层面,尽管气孔因素(干旱胁迫)和非气孔因素(低磷胁迫)均会引起叶片光合速率降低,但在水磷复合胁迫下光合抑制主要表现为非气孔因素主导,表明干旱胁迫对光合系统损伤更大^[42];(2)在生长发育层面,磷素主要作用于植物的营养生长过程,而水分则直接调控生殖生长阶段的顺利进行^[49],因此水分

亏缺对最终产量形成的负面影响更为直接和严重;(3)水分状况深刻影响磷在土壤中的扩散速率及根系的吸收能力,间接决定了磷的有效性。因此,燕麦生长发育的主要驱动因子是水,改善水分状况可在一定程度上缓解低磷胁迫,从而起到“以水促肥”的作用^[50]。

3.4 燕麦共同适应水磷胁迫指标的筛选

抗逆指标筛选是燕麦抗逆选育的重要基础。本研究发现在不同胁迫条件下,燕麦各项指标呈现出多样化的响应差异,揭示了干旱、低磷及水磷共同限制环境下植物适应的多样性及其潜在的遗传基础。以往研究多聚焦于单一胁迫下的抗逆性评价,常采用相关性分析、灰色关联分析、聚类分析及主成分分析等方法^[12-13,51-52],对燕麦苗期的生理参数^[53]、根系形态及生长指标^[54-55]进行测定,以探讨其耐旱或耐低磷能力。然而,仅基于苗期在单一胁迫下进行抗逆指标鉴定存在一定局限:(1)苗期抗逆性与生育后期缺乏一致性^[56];(2)评价作物抗逆能力,产量及其构成因子是不可或缺的依据^[32];(3)植物生长通常面临各种复合胁迫,较单一胁迫更复杂^[57],因此本研究将评价尺度从苗期转向成熟期,重点考察籽粒生物量及相关性状,以更直接地反映燕麦在多种胁迫下的实际抗逆能力。相关性分析表明,地上生物量、穗粒数、茎叶生物量、全株磷累积量和籽粒磷累积量与籽粒生物量均显著相关,进一步的灰色关联分析也验证了这些指标与籽粒生物量之间的密切关系,并表明它们对籽粒生物量的影响最大,可作为评价燕麦在水磷胁迫下抗逆能力的关键参数。然而,相关性分析同时揭示了指标之间存在信息冗余,采用主成分分析,可以消除各指标间的相关影响,排除次要指标的干扰^[58],提高分析的准确性。主成分分析结果表明,14个水磷敏感的指标可简化为4个主成分,代表92.224%的信息,筛选出生物量积累与穗部发育、根系、旗叶和磷素利用4个综合指标。

虽然主成分分析与相关性、灰色关联分析在方法侧重上有所不同,但一致地将生物量积累、穗部发育、磷素利用等指标识别为反映燕麦抗旱耐低磷能力的核心因素。不同分析方法得出的结论相互印证,证明了本研究结论的可靠性。本实验仅对燕麦抗旱耐低磷特性进行研究,未系统测定气孔导度、光合速率、渗透调节物质(如脯氨酸、可溶性糖)

以及抗氧化酶活性等生理参数,尚无法阐明水磷限制下的具体生理调控机制。因此,未来应加强燕麦对水磷限制的响应规律研究,深入揭示其抗逆机制的形成基础。综上,通过对18个单项指标进行相关性、灰色关联分析和主成分分析,综合筛选出8个关键指标——籽粒生物量、地上生物量、小穗数、穗粒数、地下生物量、旗叶面积、全株和籽粒磷累积量。这些指标能够系统、准确地反映燕麦在干旱、低磷及水磷复合胁迫下的抗逆能力,为后续的抗旱耐低磷燕麦品种选育提供了坚实的表型依据。

4 结论

水磷限制对燕麦生长性状、磷的累积以及产量参数等方面产生抑制,且在水磷共同限制下更显著($P<0.05$),这种抑制更多是由土壤中水分条件缺乏而不是土壤中磷浓度低造成的。通过综合分析筛选出籽粒生物量、地上生物量、小穗数、穗粒数、地下生物量、旗叶面积、全株和籽粒磷累积量反映燕麦抗旱耐低磷能力,为进一步研究水磷高效利用燕麦材料的高效利用机制提供了参考。

参考文献

- [1] OBOUR A K, HOLMAN J D, SCHLEGEL A J. Seeding rate and nitrogen application effects on oat forage yield and nutritive value[J]. *Journal of Plant Nutrition*, 2019, 42(13):1452-1460
- [2] 叶雪玲,甘圳,万燕,等. 饲用燕麦育种研究进展与展望[J]. *草业学报*, 2023, 32(2):160-177
YE X L, GAN Z, WAN Y, et al. Advances and perspectives in forage oat breeding[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2023, 32(2):160-177
- [3] 陶自为. 青藏高原人工草地群落结构对生态系统功能的影响研究[D]. 兰州:兰州大学, 2022:42
TAO Z W. Effects of artificial pasture community structure on ecosystem function in Qinghai-Tibet Plateau [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2022:42
- [4] 周青平,胡晓炜,汪辉,等. 燕麦在维护国家粮食安全中的重要作用[J]. *草业学报*, 2024, 33(10):171-182
ZHOU Q P, HU X W, WANG H, et al. The important role of oat in reinforcing the foundation of food security[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2024, 33(10):171-182
- [5] 陈季贵,王晓力,朱新强,等. 青藏高原农牧交错区燕麦种植品种筛选[J]. *中兽医医药杂志*, 2018, 37(1):65-68
CHEN J G, WANG X L, ZHU X Q, et al. Screening of *Avena sativa* varieties suitable for agro-pastoral ecotone in Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *Journal of Traditional Chinese Veterinary Medicine*, 2018, 37(1):65-68

- [6] 潘开文,王学经,唐亚伟,等. 青藏高原农田生态系统与粮食安全科学考察研究专题进展(二)[J]. 应用与环境生物学报, 2024,30(6):1055-1063
PAN K W, WANG X J, TANG Y W, et al. Progress of the scientific expedition and research on farmland ecosystem and food security in Qinghai-Xizang Plateau (II)[J]. Chinese Journal of Applied & Environmental Biology, 2024,30(6):1055-1063
- [7] 雷涵博,祝培甜,侯怡爽. 青藏高原耕地保护现状与问题研究[J]. 自然资源情报, 2024(5):1-6
LEI H B, ZHU P T, HOU Y S. Research on current situation and problems of farmland protection in the Qinghai-Tibet Plateau[J]. Natural Resources Information, 2024(5):1-6
- [8] CUI Y X, BING H J, FANG L C, et al. Extracellular enzyme stoichiometry reveals the carbon and phosphorus limitations of microbial metabolisms in the rhizosphere and bulk soils in alpine ecosystems[J]. Plant and Soil, 2021,458(1):7-20
- [9] KHAN F, SIDDIQUE A B, SHABALA S, et al. Phosphorus plays key roles in regulating plants' physiological responses to abiotic stresses[J]. Plants, 2023,12(15):2861
- [10] 魏慧,吕昌河,尹旭. 青藏高原耕地的空间分异及其影响因素[J]. 地理科学, 2023,43(3):379-387
WEI H, LYU C H, YIN X. Spatial differentiation of farmland and influencing factors on the Qinghai-Tibet Plateau[J]. Scientia Geographica Sinica, 2023,43(3):379-387
- [11] 蒋怡,舒洪涛,董秀春,等. 西藏粮食主产区典型作物空间格局分析[J]. 西南农业学报, 2025,38(6):1305-1316
JIANG Y, SHU H T, DONG X C, et al. Analysis of spatial pattern of typical crops in main grain producing areas of Xizang[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2025,38(6):1305-1316
- [12] 成娟娟,袁高鹏,何影,等. 西瓜苗期抗旱性评价及鉴定体系的初步建立[J]. 中国瓜菜, 2025,38(6):91-100
CHENG J J, YUAN G P, HE Y, et al. Preliminary establishment of a system for evaluating and characterizing drought resistance in watermelon seedling[J]. China Cucurbits and Vegetables, 2025,38(6):91-100
- [13] ZOU J, HU W, LI Y X, et al. Screening of drought resistance indices and evaluation of drought resistance in cotton (*Gossypium hirsutum* L.) [J]. Journal of Integrative Agriculture, 2020,19(2):495-508
- [14] 费楠. 燕麦抗旱种质资源鉴定及其响应干旱胁迫的抗氧化防御机制[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学, 2024:33
FEI N. Identification of drought resistant oat germplasm resources and its antioxidant defense mechanisms in response to drought stress[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2024:33
- [15] 张臻宇,纪明雪,崔浩宇,等. 不同磷效率燕麦品种苗期耐低磷胁迫差异分析[EB/OL]. <https://link.cnki.net/urlid/46.1068.S.20250306.1134.002,2025-03-06/2025-09-02>
ZHANG Z Y, JI M X, CUI H Y, et al. Analysis on difference in resistance to low phosphorus stress at oat seedlings with different phosphorus efficiencies[J/OL]. <https://link.cnki.net/urlid/46.1068.S.20250306.1134.002,2025-03-06/2025-09-02>
- [16] 贺鑫,齐冰洁,王敏,等. 低磷胁迫下燕麦不同磷效率品种生物量及磷素营养的差异[J]. 分子植物育种, 2019,17(22):7482-7487
HE X, QI B J, WANG M, et al. Differences in biomass and phosphorus nutrition of oats with different phosphorus efficiency under low phosphorus stress[J]. Molecular Plant Breeding, 2019,17(22):7482-7487
- [17] MAI W X, XUE X R, FENG G, et al. Can optimization of phosphorus input lead to high productivity and high phosphorus use efficiency of cotton through maximization of root/mycorrhizal efficiency in phosphorus acquisition? [J]. Field Crops Research, 2018,216:100-108
- [18] 李婕娜,冯甘霖,庞晓攀,等. 水磷配施对紫花苜蓿叶片特征及氮磷计量比的影响[J]. 草地学报, 2024,32(8):2484-2497
LI J N, FENG G L, PANG X P, et al. The impact of combined application of water and phosphorus on leaf characteristics and stoichiometric ratio of N, P in *Medicago sativa*[J]. Acta Agrestia Sinica, 2024,32(8):2484-2497
- [19] 李婕娜,冯甘霖,刘慧霞,等. 灌水量和施磷量互作对紫花苜蓿水分利用效率的调控效应[EB/OL]. <https://link.cnki.net/urlid/62.1069.S.20250724.1102.005,2025-07-24/2025-09-02>
LI J N, FENG G L, LIU H X, et al. The response of irrigation volume and phosphorus application amount to water use efficiency of alfalfa[J/OL]. <https://link.cnki.net/urlid/62.1069.S.20250724.1102.005,2025-07-24/2025-09-02>
- [20] 王晓雪,李越,张斌,等. 干旱胁迫及复水对燕麦根系生长及生理特性的影响[J]. 草地学报, 2020,28(6):1588-1596
WANG X X, LI Y, ZHANG B, et al. Effects of drought stress and rehydration on root growth and physiological characteristics of oats[J]. Acta Agrestia Sinica, 2020,28(6):1588-1596
- [21] 起惠芳,刘文辉,刘凯强,等. 青藏高原氮磷钾肥施用对‘青引1号’燕麦生物量积累的影响[J]. 西北农业学报, 2024,33(6):1049-1060
QI H F, LIU W H, LIU K Q, et al. Effects of nitrogen, phosphorus and potassium fertilizer application on biomass accumulation of oats ‘qingyin No. 1’ on Qinghai-Tibet Plateau[J]. Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica, 2024,33(6):1049-1060
- [22] 郑殿升,王晓鸣,张京. 燕麦种质资源描述规范和数据标准[M]. 北京:中国农业出版社, 2006:11-19
ZHENG D S, WANG X M, ZHANG J. Descriptors and Data Standard for Oat (*Avena* spp.) [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2006:11-19
ZHENG D S, WANG X M, ZHANG J. Descriptors and Data Standard for Oat (*Avena* spp.) [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2006:11-19
- [23] 蔡天革,李洋洋,姜雪,等. 不同氮锌水平对燕麦生长特性和品质的影响[J]. 沈阳大学学报(自然科学版), 2024,36(2):104-111
CAI T G, LI Y Y, JIANG X, et al. Effects of different nitrogen and zinc levels on growth characteristics and quality of oats[J].

- Journal of Shenyang University (Natural Science), 2024, 36(2):104-111
- [24] 余静波,张慧丽,李进,等. 38份饲用燕麦品种苗期磷利用率综合评价[J]. 草业学报,2024,33(11):161-171
YU J B, ZHANG H L, LI J, et al. A multi-trait evaluation of phosphorus efficiency of 38 forage oat cultivars at the seedling stage[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2024, 33(11):161-171
- [25] 胡永光,郑家棕,潘庆民,等. 水分胁迫对茶树幼苗光合特性与叶绿素荧光参数的影响[J]. 排灌机械工程学报, 2025, 43(8):826-832
HU Y G, ZHENG J L, PAN Q M, et al. Effects of water stress on photosynthetic characteristics and chlorophyll fluorescence parameters of tea seedlings[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2025, 43(8):826-832
- [26] 李懿洋. 甘肃省产业结构与经济增长的灰色关联分析[J]. 企业经济, 2011, 30(5):20-23
LI Y Y. Grey correlation analysis of industrial structure and economic growth in Gansu province[J]. Enterprise Economy, 2011, 30(5):20-23
- [27] 单云鹏,陈新慧,万平,等. 小豆种质资源苗期抗旱性评价及抗旱资源筛选[J]. 植物遗传资源学报, 2019, 20(5):1151-1159
SHAN Y P, CHEN X H, WAN P, et al. Drought resistance evaluation of adzuki bean germplasm at seedling stage and screening of the drought-resistant resources [J]. Journal of Plant Genetic Resources, 2019, 20(5):1151-1159
- [28] 胡鑫隆,封盼岑,赵璐莹,等. 大田喷施ABA制剂提高冬小麦水分利用效率及产量[J]. 农业工程学报, 2025, 41(12):114-122
HU X L, FENG P C, ZHAO L Y, et al. Exogenous ABA improves water use efficiency and yield of field grown
- [29] DUGGAN B L, DOMITRUK D R, FOWLER D B. Yield component variation in winter wheat grown under drought stress[J]. Canadian Journal of Plant Science, 2000, 80(4):739-745
- [30] FERNÁNDEZ R J, WANG M B, REYNOLDS J F. Do morphological changes mediate plant responses to water stress? A steady-state experiment with two *C₄* grasses[J]. The New Phytologist, 2002, 155(1):79-88
- [31] 王鑫,余新晓,贾国栋,等. 不同土壤水分条件下侧柏幼苗的生理活动及氮素分配策略[J]. 水土保持学报, 2020, 34(3):311-317
WANG X, YU X X, JIA G D, et al. Physiological activities and nitrogen allocation strategies of *Platycladus orientalis* seedlings under different soil water conditions [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020, 34(3):311-317
- [32] 刘凯强,刘文辉,贾志锋,等. 干旱胁迫对‘青燕1号’燕麦产量及干物质积累与分配的影响[J]. 草业学报, 2021, 30(3):177-188
LIU K Q, LIU W H, JIA Z F, et al. Effects of drought stress on yield and dry matter accumulation and distribution of *Avena sativa* cv. Qingyan No. 1[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2021, 30(3):177-188
- [33] 谷艳芳,丁圣彦,高志英,等. 干旱胁迫下冬小麦光合产物分配格局及其与产量的关系[J]. 生态学报, 2010, 30(5):1167-1173
GU Y F, DING S Y, GAO Z Y, et al. The pattern of photosynthate partitioning in drought-stressed winter wheat and its relationship with yield [J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(5):1167-1173
- [34] 赵明,李建国,张宾,等. 论作物高产挖潜的补偿机制[J]. 作物学报, 2006, 32(10):1566-1573
ZHAO M, LI J G, ZHANG B, et al. The compensatory mechanism in exploring crop production potential [J]. Acta Agronomica Sinica, 2006, 32(10):1566-1573
- [35] 唐有林,王蕾,王寒冬,等. 燕麦种质资源表型多样性及综合评价[J]. 应用与环境生物学报, 2024, 30(6):1236-1244
TANG Y L, WANG L, WANG H D, et al. Phenotypic diversity analysis and comprehensive evaluation of oat germplasms [J]. Chinese Journal of Applied & Environmental Biology, 2024, 30(6):1236-1244
- [36] 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, 2023:12-13
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 Minzu University, 2023:12-13
- [37] 周青平,贾志锋,韩志林,等. 氮、磷肥对裸燕麦子粒产量和 β -葡聚糖含量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2008, 14(5):956-960
ZHOU Q P, JIA Z F, HAN Z L, et al. Effects of nitrogen and phosphorus on seed yield and β -glucan content of naked oat [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2008, 14(5):956-960
- [38] 王军萍. 不同施肥配比对青引1号燕麦(*Avena sativa* L. cv. Qingyin No. 1)生产性能和品质的影响[D]. 西宁:青海大学, 2009:19
WANG J P. Effects of different fertilizer ration on productivity and quality of *Avena sativa* L. cv. Qingyin No. 1 [D]. Xining: Qinghai University, 2009:19
- [39] 李谦. 燕麦主产区增产潜力与水肥优化模型研究[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学, 2021:7-8
LI Q. Study on increased yield potential, and optimization of water and fertilizer model under oat production in four main regions in China [D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2021:7-8
- [40] 王慧鑫. 冻融与镉/铜复合胁迫下外源 γ -氨基丁酸对黑麦幼苗的生理影响[D]. 长春:吉林大学, 2025:6
WANG H X. Physiological effects of exogenous γ -aminobutyric acid on rye seedlings under combined freeze-thaw and cadmium/copper stress [D]. Changchun: Jilin University, 2025:6
- [41] 张士功,刘国栋,窦玉清,等. 低磷和干旱胁迫对小麦生长发育影响的研究初探[J]. 西北植物学报, 2002, 22(3):574-578
ZHANG S G, LIU G D, DOU Y Q, et al. Effects of low-phosphorus and drought stresses on growth of wheat (*Triticum aestivum*) [J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2002, 22

- (3):574-578
- [42] 余利平. 干旱与低磷双重胁迫对冬油菜光合作用的影响[D]. 北京:中国农业科学院,2009:33
YU L P. Effects of drought and phosphorus deficiency on photosynthesis of winter rape [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences,2009:33
- [43] 张茹艳. 马铃薯响应干旱-碱性盐复合胁迫机制研究[D]. 兰州:甘肃农业大学,2025:61
ZHANG R Y. Mechanisms of potato response to drought-alkaline salt combined stresses [D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University,2025:61
- [44] 于人杰. 响应低磷干旱胁迫磷转运蛋白基因在大豆组织中的表达及功能分析[D]. 长春:吉林农业大学,2019:40-41
YU R J. Expression and functional analysis of phosphorus transporter genes responding to low phosphorus and drought stress in soybean tissues[D]. Changchun: Jilin Agricultural University,2019:40-41
- [45] 苗青霞,方燕,陈应龙. 小麦根系特征对干旱胁迫的响应[J]. 植物学报,2019,54(5):652-661
MIAO Q X, FANG Y, CHEN Y L. Studies in the responses of wheat root traits to drought stress [J]. Chinese Bulletin of Botany,2019,54(5):652-661
- [46] SUZUKI N, RIVERO R M, SHULAEV V, et al. Abiotic and biotic stress combinations[J]. New Phytologist,2014,203(1):32-43
- [47] GUPTA A K, KAUR K, KAUR N. Stem reserve mobilization and sink activity in wheat under drought conditions[J]. American Journal of Plant Sciences,2011,2(1):70-77
- [48] LI Q, YE Y C, WANG D M, et al. Temporal dynamics of pre-flowering dry matter remobilization and post-flowering photosynthetic compensation in wheat under combined high temperature and drought stress[J]. Plant Growth Regulation,2025,105(4):1307-1321
- [49] 胡俊杰. 水磷调控冬小麦生长及磷素利用的微生态机制[D]. 郑州:河南农业大学,2025:33
HU J J. Microecological mechanisms of water and phosphorus regulation on winter wheat growth and phosphorus utilization [D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University,2025:33
- [50] 于洲海,孙西欢,马娟娟,等. 作物水肥耦合效应的研究综述[J]. 山西水利,2009,25(6):45-47,50
YU Z H, SUN X H, MA J J, et al. Summary of research on coupling effect of crop water and fertilizer [J]. Shanxi Water Resources,2009,25(6):45-47,50
- [51] 黄小芳,石培礼,余成群,等. 非生物胁迫下牧草抗逆性研究进展[J]. 草地学报,2023,31(5):1293-1301
HUANG X F, SHI P L, YU C Q, et al. A review of abiotic stress resistance of forages [J]. Acta Agrestia Sinica,2023,31(5):1293-1301
- [52] 孙丰磊,曲延英,陈全家,等. 棉花抗旱相关指标综合评价及灰色关联分析[J]. 干旱地区农业研究,2019,37(1):233-239
SUN F L, QU Y Y, CHEN Q J, et al. Comprehensive evaluation of cotton drought tolerance indexes and gray relational analysis [J]. Agricultural Research in the Arid Areas,2019,37(1):233-239
- [53] 张国辉,陈彩锦,张尚沛,等. 不同饲用燕麦品种苗期生理抗旱性鉴定评价[J]. 饲料研究,2022,45(23):62-67
ZHANG G H, CHEN C J, ZHANG S P, et al. Identification and evaluation of physiological drought resistance of different forage oat varieties at seedling stage [J]. Feed Research,2022,45(23):62-67
- [54] 赵小娜,高志昊,王斌,等. 15份饲用型燕麦种质材料苗期抗旱性比较与评价[J]. 草地学报,2023,31(12):3734-3743
ZHAO X N, GAO Z H, WANG B, et al. Comparison and evaluation of drought resistance of 15 forage-type oat germplasm materials at seedling stage [J]. Acta Agrestia Sinica,2023,31(12):3734-3743
- [55] 张昌兵,唐梅玲,周洋,等. 6个饲用燕麦品种苗期对低磷胁迫的响应及耐低磷评价[J]. 西南民族大学学报(自然科学版),2025,51(1):1-7
ZHANG C B, TANG M L, ZHOU Y, et al. Response of seedling growth and root morphology of six forage oat varieties to low phosphorus stress and evaluation of low phosphorus tolerance [J]. Journal of Southwest Minzu University (Natural Science Edition),2025,51(1):1-7
- [56] 卫云宗,刘新月,张久刚. 小麦苗期抗旱类型研究[J]. 中国生态农业学报,2008,16(6):1409-1412
WEI Y Z, LIU X Y, ZHANG J G. Types of drought resistance of wheat at seedling stage [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture,2008,16(6):1409-1412
- [57] JIANG Z, VAN ZANTEN M, SASIDHARAN R. Mechanisms of plant acclimation to multiple abiotic stresses [J]. Communications Biology,2025,8:655
- [58] 李翠,杨志臣,国宸嘉,等. 22份花花柴种质资源耐盐性评价与鉴定[J]. 草地学报,2025,33(10):3353-3361
LI C, YANG Z C, GUO C J, et al. Evaluation and identification of salt tolerance of 22 *Karelinia caspia* germplasm [J]. Acta Agrestia Sinica,2025,33(10):3353-3361

(责任编辑 彭露茜)