

施磷对谷子农艺性状、产量和磷素利用效率的影响

王丹 张毅 张宁宁 侯昌晔 严加坤*

榆林大学现代农学院 / 榆林市杂粮作物生物育种重点实验室, 中国·陕西 榆林 719000

摘要: 目的: 陕北黄土高原谷子生产普遍存在低磷胁迫、磷肥当季利用率低下的问题, 明确不同基因型谷子对磷肥的响应差异, 可为西北旱区谷子磷肥高效管理、磷高效品种筛选提供理论支撑。方法: 2023–2024 年在陕西榆林开展连续大田定位试验, 以晋谷 21 (JG)、榆谷抗 1 (YG)、齐头白 (QTB)、小黑谷 (HG) 4 个谷子品种为试验材料, 设置施磷 135 kg/hm² (+P) 与不施磷 (–P) 2 个处理, 系统研究施磷对谷子农艺性状、磷素积累分配、生物量、土壤有效磷及籽粒产量的调控效应。结果: 施磷显著提升谷子株高、茎粗、地上与根系生物量、植株磷积累量、根际土壤有效磷含量和籽粒产量。同一施磷条件下, 齐头白两年株高、茎粗均显著高于其余品种, 晋谷 21 株高最低; 施磷各品种茎粗提升 9.79%~36.44%, 榆谷抗 1 增幅最大。磷积累方面, 2023 年缺磷时齐头白整株磷积累高于榆谷抗 1, 施磷后榆谷抗 1 实现反超, 其茎部磷积累增幅达 252.67%; 2024 年无论施磷与否, 榆谷抗 1 各器官磷积累均显著高于齐头白。生物量上, 小黑谷对磷肥响应最为敏感, 2024 年施磷后地上生物量、根系生物量增幅分别达到 136.75%、165.96%; 榆谷抗 1 维持较高地上生物量水平。施磷显著提高土壤有效磷, 晋谷 21 土壤有效磷相对增幅最大 (720.24%)。产量方面, 施磷四个品种均实现增产; 2023 年晋谷 21 产量最高, 榆谷抗 1 增产 27.13%; 2024 年齐头白产量最高, 榆谷抗 1 增产幅度达 48.00%。晋谷 21、齐头白产量稳定性好, 榆谷抗 1 与小黑谷磷肥增产潜力突出。结论: 榆谷抗 1 属于磷高效利用品种, 在陕北旱区推荐搭配 135 kg/hm² 磷肥投入; 晋谷 21 适宜低磷环境稳产栽培; 齐头白形态生长优势突出; 小黑谷磷肥响应强烈但基础产量偏低, 需要配套栽培措施挖掘产量潜力。

关键词: 谷子; 磷肥; 农艺性状; 产量形成; 磷利用效率

Influences of Phosphorus Fertilization on Agronomic Characteristics, Grain Yield and Phosphorus Utilization Efficiency in Foxtail Millet

Wang Dan, Zhang Yi, Zhang Ningning, Hou Changye, Yan Jiakun*

College of Advanced Agricultural Sciences, Yulin University/Key Laboratory of Minor Cereal Crop Bio-breeding of Yulin City, China Shaanxi Yulin 719000

Abstract: Objective: Low-phosphorus stress and low phosphorus fertilizer use efficiency commonly occur in foxtail millet production on the Loess Plateau of northern Shaanxi. Clarifying the differential responses of foxtail millet genotypes to phosphorus fertilizer can provide theoretical support for efficient phosphorus fertilizer management and screening of phosphorus-efficient cultivars in arid regions of Northwest China. Method: A two-year consecutive field experiment was conducted in Yulin, Shaanxi Province from 2023 to 2024. Four foxtail millet cultivars, Jingu 21 (JG), Yugu Kang 1 (YG), Qitoubai (QTB) and Xiaoheigu (HG), were used as experimental materials. Two treatments, phosphorus application at 135 kg/hm² (+P) and no phosphorus application (–P), were set up to systematically investigate the regulatory effects of phosphorus application on agronomic traits, phosphorus accumulation and distribution, biomass, soil available phosphorus and grain yield of foxtail millet. Result: Phosphorus application significantly increased plant height, stem diameter, above-ground and root biomass, plant phosphorus accumulation, rhizosphere soil available phosphorus content and grain yield of foxtail millet. Under the same phosphorus application condition, QTB exhibited significantly higher plant height and stem diameter than other cultivars across two years, while JG had the lowest plant height. Phosphorus application increased stem diameter of all cultivars by 9.79%–36.44%, with YG showing the maximum increment. In terms of phosphorus accumulation, the whole-plant phosphorus accumulation of QTB was higher than that of YG under low-phosphorus condition in 2023, whereas YG surpassed QTB after phosphorus application, with its stem phosphorus accumulation increased by 252.67%. In 2024, phosphorus accumulation in each organ of YG was significantly higher than that of QTB regardless of phosphorus application. HG was the most sensitive

cultivar to phosphorus fertilizer; its above-ground biomass and root biomass increased by 136.75% and 165.96% respectively after phosphorus application in 2024, and YG maintained a high level of above-ground biomass. Phosphorus application markedly elevated soil available phosphorus, and JG obtained the largest relative increase (720.24%). All four cultivars achieved yield increase under phosphorus application. JG had the highest grain yield in 2023, and YG increased yield by 27.13%. QTB yielded the highest in 2024, and YG showed the greatest yield-increasing amplitude of 48.00%. JG and QTB presented stable yield performance, while YG and HG possessed prominent yield-increasing potential to phosphorus fertilizer. Conclusion: Yugu Kang 1 is a phosphorus-efficient cultivar, which is recommended to cooperate with phosphorus input of 135 kg/hm² in arid areas of northern Shaanxi. Jingu 21 is suitable for stable-yield cultivation under low-phosphorus environment. Qitoubai has prominent morphological growth advantages. Xiaoheigu shows strong response to phosphorus fertilizer but low basic yield, and supporting cultivation measures are required to tap its yield potential.

Keywords: Foxtail millet; Phosphorus fertilizer; Agronomic traits; Yield formation; Phosphorus use efficiency

0 引言

磷是作物生长必需大量元素,参与能量代谢、核酸合成等生理过程,直接决定作物产量与品质^[1]。农业生产中磷肥大量投入,但土壤中磷酸盐极易被钙、铁、铝离子吸附固定,导致磷肥当季利用率普遍低于 20%^[2]。谷子作为西北干旱半干旱区特色杂粮,具备抗旱耐瘠薄特性,在区域粮食安全中占有重要地位^[3]。但黄土高原区域土壤有效磷匮乏,低磷胁迫抑制谷子株高增长、干物质积累,阻碍穗部发育与籽粒灌浆,造成产量损失^[4]。

不同谷子基因型在根系形态、干物质分配、磷吸收利用上存在显著遗传分化,为磷高效种质筛选提供基础^[5]。生产上为缓解低磷胁迫普遍盲目增施磷肥,进一步加剧资源浪费、土壤环境风险^[6]。当前针对不同谷子品种磷响应的系统研究较少,农艺性状-磷素分配-产量之间的耦合关系尚不清晰。本研究选取 4 个代表性谷子品种,设置施磷与不施磷处理开展两年大田试验,解析施磷对不同基因型谷子生长、磷素分配、土壤磷有效性及产量的影响,筛选磷高效谷子种质,为西北旱区谷子磷肥精准管理提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于 2023-2024 年在榆林大学东沙农牧种植基地(109° 50' E, 38° 21' N)开展,属于温带半干旱大陆性季风气候,年均气温 8.3 °C,年均降水量 365.7 mm,土壤为沙壤土。2023 播种前土壤基础性质:有机质 4.73 g/kg,全氮 2.0 g/kg,全磷 4.92 g/kg,有效磷 6.02 mg/kg;2024 年播种前有机质 5.52 g/kg,全氮 2.91 g/kg,全磷 4.75 g/kg,有效磷 2.53 mg/kg。2023 年前茬马铃薯,2024 年前茬大豆。

1.2 试验材料与设计

供试谷子品种:晋谷 21(JG)、榆谷抗 1(YG, 陕谷 1 号)、齐头白(QTB)、小黑谷(HG)。试验设置 2 个磷水平:施磷处理(+P)过磷酸钙(P₂O₅ 12%) 135 kg/hm²;不施磷处理(-P)不施用磷肥。各处理统一基施氮肥 180 kg/hm²(尿素, N 46.7%)、钾肥 75 kg/hm²(硫酸钾, K₂O 52.0%)。

试验采用完全随机区组设计,3 次重复,小区面积 3 m×5 m。2023-05-05、2024-05-10 播种,行距 50 cm,3-5 叶期人工间苗,株距 7-8 cm,滴灌补水消除水分胁迫,谷子生理成熟后收获。

1.3 测定项目与方法

农艺性状:抽穗期每小区选取 10 株代表性植株测定株高、茎粗。

植株生物量与磷含量:开花期、收获期每小区选取长势一致植株,分离叶片、茎秆、穗、根系;105 °C杀青 30 min,80 °C烘干至恒重测定各器官干物质重量。植株样品浓硫酸-过氧化氢消煮,钼锑抗比色法测定植株磷含量。

土壤有效磷:开花期采集 0-30 cm 根际混合土样,NaHCO₃ 浸提-钼锑抗比色法测定土壤有效磷。

籽粒产量:每小区划定 1 m² 样方,收割脱粒测产,换算公顷产量;磷肥农学利用率=(施磷产量-不施磷产量)/磷肥投入量。

1.4 数据处理与统计分析

使用 SPSS 24 开展方差分析, LSD 法多重比较(P<0.05); Origin24、GraphPad Prism9.5 绘图。

2 结果与分析

2.1 施磷对谷子农艺性状的影响

施磷显著促进谷子株高生长,品种间存在显著差异。

两年均表现齐头白株高最大, 晋谷 21 株高最低。2023 不施磷齐头白株高 137.7 cm, 施磷后增至 149.03 cm, 提升 8.34%; 晋谷 21 不施磷株高仅 108.87 cm。2024 年规律与 2023 年保持一致, 施磷后小黑谷株高增幅最大达 10.43%, 晋谷 21 增幅仅 3.30%。

施磷显著提高各品种茎粗, 增幅区间 9.79%–36.44%。2023 年榆谷抗 1 茎粗增幅最高 (36.44%), 齐头白施磷前后茎粗均为最高 (10.58 mm); 晋谷 21 茎粗绝对值最低。2024 年施磷处理下除齐头白外, 其余品种茎粗差异不显著, 充足磷供应能够弱化基因型带来茎粗形态差异。

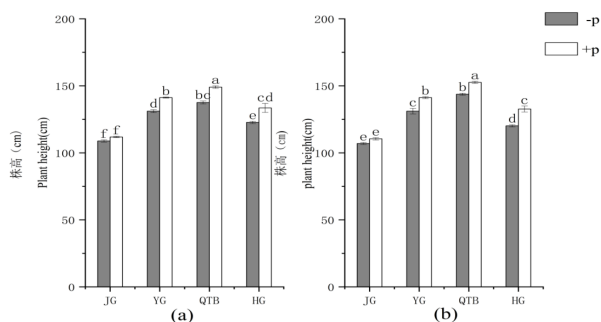


图 1 施磷对谷子株高的影响

注: (a)、(b) 分别为 2023 年和 2024 年, 不同字母代表显著性差异 ($P < 0.05$), 下同

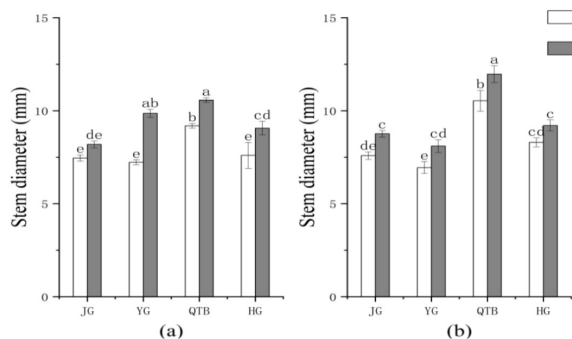


图 2 施磷对谷子茎粗的影响

2.2 施磷对谷子磷积累分配的影响

选取榆谷抗 1、齐头白解析器官磷积累差异。2023 年不施磷条件下齐头白整株磷积累量 4.31 mg/g 高于榆谷抗 1 的 3.99 mg/g, 齐头白叶、茎、穗磷积累占优, 榆谷抗 1 根系磷积累显著更高。施磷后榆谷抗 1 整株磷积累 5.44 mg/g 反超齐头白 4.99 mg/g, 榆谷抗 1 茎部磷积累增幅高达 252.67%。

2024 年无论施磷与否, 榆谷抗 1 各器官磷积累均显著高于齐头白。不施磷榆谷抗 1 整株磷积累 5.11 mg/g, 施磷达到 8.13 mg/g; 齐头白施磷后整株磷积累 6.28 mg/g。榆谷抗 1 表现为缺磷条件优先将磷分配至根系, 磷充足时大量向地上茎秆转运的磷分配策略。

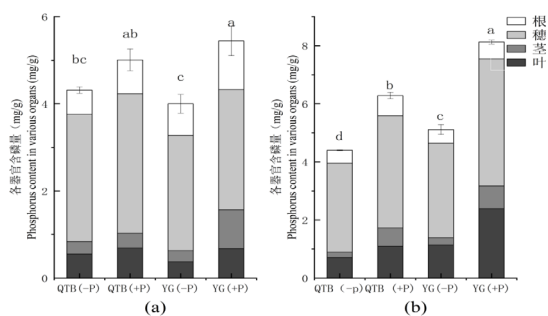


图 3 施磷对谷子不同器官含磷量的影响

2.3 施磷对谷子生物量的影响

施磷显著提高谷子地上部与根系生物量, 不同品种响应幅度差异明显。2023 开花期施磷后榆谷抗 1 地上生物量最高 (34.42 g / 株); 小黑谷根系生物量增幅最大, 达 263.40%, 但绝对值仍然偏低。2024 年小黑谷对磷肥响应最为强烈, 施磷后地上生物量提升 136.75%, 根系生物量提升 165.96%; 榆谷抗 1 地上生物量维持最高水平。总体来看榆谷抗 1 生物量绝对积累能力强, 小黑谷属于磷肥敏感型品种, 缺磷生长受强烈抑制, 供磷充足后出现强烈代偿性生长。

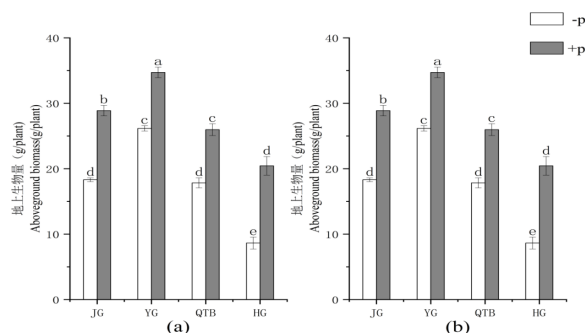


图 4 施磷对谷子地上部分生物量的影响

注: (a) 分别为 2023 年开花期, (b) 分别为 2024 年开花期; 不同字母代表显著性差异 ($P < 0.05$)

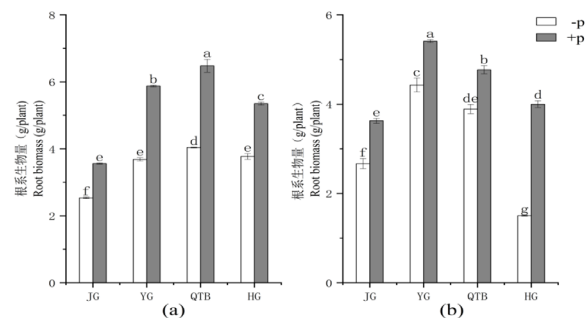


图 5 施磷对谷子根系生物量的影响

注: a 分别表示 2023 年的花期, b 分别表示 2024 年的花期 (下同); 不同字母表示有显著差异 ($P < 0.05$)

2.4 施磷对土壤有效磷含量的影响

施磷显著提升根际土壤有效磷含量, 品种间根际磷活

表 1

	PT	SD	SDM	RDM	TN	TP	OM	AP	AN	URE	YLD
PT	1										
SD	.701**	1									
SDM	0.089	0.198	1								
RDM	.740**	.623**	.556*	1							
TN	0.076	-0.063	-.553*	-0.02	1						
TP	0.166	0.17	-0.333	0.221	.921**	1					
OM	0.087	-0.031	-0.352	0.083	.941**	.890**	1				
AP	0.415	0.448	-0.039	0.495	.683**	.840**	.693**	1			
AN	0.185	0.21	-0.026	0.323	.616*	.766**	.595*	.840**	1		
URE	0.424	0.276	-0.059	.511*	.735**	.818**	.763**	.830**	.789**	1	
SC	0.044	0.184	-0.206	0.211	.713**	.845**	.671**	.796**	.885**	.784**	
CAT	-0.099	0.308	0.425	0.329	0.219	0.42	0.322	.648**	.587*	0.448	
YLD	0.096	0.268	.828**	0.432	-0.326	-0.092	-0.135	0.047	0.123	0.099	1

注：PT，株高；SD，茎粗；SDM，地上生物量；RDM，根系生物量；TN，土壤全氮；TP，土壤全磷；OM，土壤有机质；AP，土壤有效磷；AN，土壤碱解氮；URE，脲酶；SC，蔗糖酶；CAT，过氧化氢酶；YLD，产量。

化能力存在差异。2023 施磷后小黑谷小区土壤有效磷最高，达到 4.90 mg/kg；2024 年榆谷抗 1 小区土壤有效磷含量最高（10.47 mg/kg）；晋谷 21 土壤有效磷相对增幅最大（720.24%），但绝对含量依旧较低。不施磷条件榆谷抗 1 土壤有效磷也显著高于其他品种，说明榆谷抗 1 具备较强根际磷活化能力，可以调动土壤固有磷源供给植株生长。

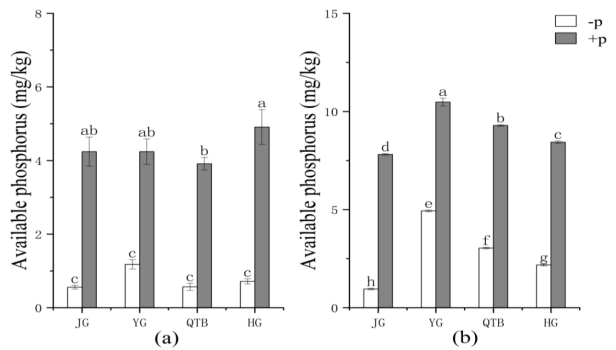


图 6 施磷对谷子土壤有效磷含量的影响

注：a 分别为 2023 年开花期，b 分别为 2024 年开花期

2.5 施磷对谷子籽粒产量的影响

施磷处理四个谷子品种均实现增产，但增产幅度存在基因型差异。2023 年晋谷 21 不施磷产量 5103.33 kg/hm²，在低磷环境保持最高产量，施磷增产幅度仅 10.97%；榆谷抗 1 增产 27.13%，增产效应显著。2024 年齐头白不施磷产量最高（5428.40 kg/hm²），榆谷抗 1 施磷增产幅度达到 48.00%，为所有品种最高；小黑谷基础产量最低，但施磷增产 27.91%。

综合两年结果：晋谷 21、齐头白稳产性强，在缺磷条件下仍可维持较高产量；榆谷抗 1 磷肥增产潜力突出；小黑谷对磷肥高度敏感，但遗传基础产量水平受限。

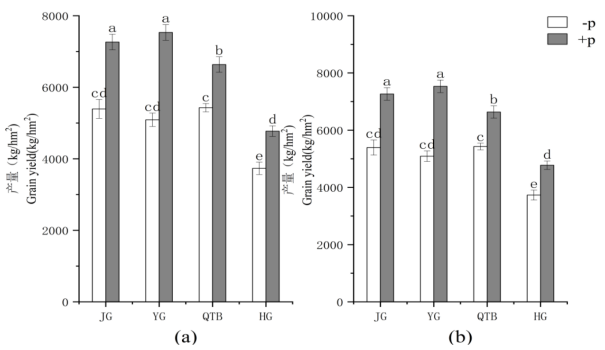


图 7 施磷对谷子产量的影响

3 讨论

3.1 施磷对谷子农艺性状的调控效应

磷肥供应改善植株碳氮代谢，促进株高、茎粗生长，但不同基因型响应分化显著。齐头白本身遗传基础生长势强，两年株高茎粗均处于最高水平；晋谷 21 株高受遗传背景限制，施磷之后增长幅度有限。本研究发现充足施磷条件下品种间茎粗差异缩小，说明磷素供给可以补偿部分基因型生长劣势，弱化遗传带来形态差异，这与前人研究存在一定区别。榆谷抗 1 茎粗对磷肥响应最敏感，施磷后茎粗大幅提升，有利于构建健壮植株群体，为后期高产打下形态基础。

3.2 不同基因型谷子磷吸收分配与根际磷活化特性

作物磷积累与器官分配策略是磷效率重要评判指标。本研究发现榆谷抗 1 存在独特磷分配策略：低磷胁迫下优先保障根系磷积累，强化根系吸收能力；磷肥充足后大量磷向茎秆转运，支撑地上生物量快速扩张。2024 年无论是否施磷榆谷抗 1 各器官磷积累均高于齐头白，表明其磷吸收能力更强。同时榆谷抗 1 根际土壤有效磷含量更高，推

测该品种根系分泌有机酸、酸性磷酸酶能力更强,活化土壤难溶磷,这是其磷高效重要机制,还需要后续根际代谢组、根系生理试验进一步验证。齐头白在缺磷环境下地上部磷积累占优,但磷肥投入之后响应幅度有限;小黑谷磷肥代偿生长强烈,但基础生物量不足;晋谷 21 植株磷积累绝对值不高,但土壤有效磷相对增幅巨大,暗示其根际环境对磷肥输入反应强烈。

3.3 施磷对生物量、产量形成的影响及品种利用策略

干物质积累是产量形成物质基础。榆谷抗 1 兼具高生物量积累和高增产幅度,属于磷高效品种;小黑谷施磷之后生物量增幅极高,但是缺磷生长严重受抑,属于磷肥敏感型,必须依靠磷肥投入才能释放生长潜力;晋谷 21 低磷条件依然维持较高产量,稳产优势突出,适合低投入栽培模式;齐头白农艺形态优良,产量稳定,但磷肥增产潜力不及榆谷抗 1。

两年试验之间存在一定结果波动,主要来自年际气候差异、土壤本底空间异质性;本试验只在开花期开展生物量取样,缺少拔节、灌浆期动态数据;未直接测定根系形态、根系分泌物指标,部分机理仅为推论。后续需要开展多年多点试验,结合根系生理、根际微生物解析谷子磷效率内在机理。

4 结语

陕北黄土高原旱区条件下,135 kg/hm² 施磷水平能够显著改善谷子农艺性状,提升生物量积累、植株磷积累、土壤有效磷含量,实现谷子增产。不同基因型谷子磷响应存在显著遗传差异:榆谷抗 1 (YG) 磷吸收能力强,磷肥增产潜力最大,为磷高效优选品种,适合磷肥投入条件推广应用;晋谷 21 (JG) 耐低磷,缺磷环境稳产能力强;齐头白 (QTB) 株高茎粗形态优势突出,产量稳定,磷肥响

应幅度有限;小黑谷 (HG) 对磷肥高度敏感,施磷代偿生长明显,但基础产量偏低,需要配套栽培技术改良根系发育突破产量瓶颈。综合来看,陕北旱区谷子生产优先选用榆谷抗 1,配套 135 kg/hm² 磷肥,可以兼顾谷子籽粒产量提升与磷肥资源高效利用。

参考文献:

[1] 昂叶菲,郭悦,陈慧颖等.植物磷营养与非生物胁迫的互作机理及其在农业上的潜在应用[J].植物营养与肥料学报,2023,29 (12):23452359.

[2] Liu X, Wu C, Wang Z, et al. A global synthesis on the rational management practices for enhancing phosphorus use efficiency in agricultural systems [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2025, 381:109408.

[3] Majeed A, Khan M B, Dawood A, et al. Phosphorus application improved grain yield, phosphorus use efficiency and economic returns of different pearl millet genotypes grown on alkaline soil [J]. Journal of soil science and plant nutrition, 2025, 25 (1):382392.

[4] 赵绍兴,赵玲,张皓珊等.谷子苗期对不同干旱胁迫的生理响应 [J].山西农业科学,2024,52 (5):812818.

[5] 徐纪明,陆宏,吴忠长等.作物磷高效遗传改良与生物安全研究进展[J].农业生物技术学报,2024,32(08):1909-1922.

作者简介:王丹,女,汉族,陕西绥德人,硕士研究生,研究方向:主要从事谷子种质资源与高效栽培相关研究工作。

* 通讯作者:严加坤(1988.04-),男,汉族,山东临沂人,理学博士,副教授,研究方向:主要从事植物科学相关研究工作。