磷肥配施解磷菌生物有机肥对苦荞生长与磷素利用的影响

赵 佳[1] 王晓勇[1] 张轶珺[2] 裴红宾[2] 高振峰[3]

（[1]晋中学院生物科学与技术系，030619，山西晋中；[2]山西师范大学生命科学学院，030031，山西太原；
[3]山西农业大学食品学院，030031，山西太原）

摘 要 为探究解磷菌 *Bacillus vallismortis* gz4-1 生物有机肥在苦荞栽培中的减磷增效潜力，以晋荞 6 号为供试材料，采用盆栽试验，设置常规施肥（CK）、全量生物有机肥（P0）及梯度减磷 1/2（P1）、1/3（P2）、1/4（P3）、1/5（P4）配施生物有机肥处理，系统分析其对苦荞生长、生理特性、产量及磷素吸收的影响。结果表明，P3 处理显著促进苦荞花期的生长，其株高（60.08 cm）、茎粗（5.01 mm）、茎叶干重（4.25 g）、主根长（21.66 cm）、根系表面积（0.785 m^2）、根系体积（6.97 cm^3）和根系干重（0.77 g）均为处理间最大值；同时，该处理下超氧化物歧化酶（498.91 U/g）和过氧化物酶活性[67.41 U/(g·min)]较 CK 处理分别提升 26.67%和 27.04%，根系活力[0.8288 μg/(g·h)]与叶绿素含量（11.37 mg/g）分别增加 46.27%和 10.49%。产量方面，P3 处理单株粒重（3.06 g）和千粒重(15.83 g)较 CK 处理分别显著提高 27.50%和 10.54%,籽粒可溶性蛋白(15.10 mg/g)和黄酮含量(2.19%)较 CK 处理分别显著提升 24.17%和 60.76%。磷素动态分析显示，P3 处理在收获期根系、茎部和叶片磷含量较 CK 处理分别增加 23.68%、14.16%和 9.03%。综上，磷肥减量 1/4 配施 gz4-1 生物有机肥是苦荞高产优质栽培的适宜用量。

关键词 苦荞；解磷菌；减磷配施；生物有机肥；磷素利用

苦荞（*Fagopyrum tataricum*）为一年生蓼科荞麦属植物，其籽粒富含多酚类化合物等活性成分，营养价值高；作为典型的磷依赖性作物，其具有极强的环境适应性，耐寒、耐旱且耐贫瘠，可在多种复杂生境中生长，是一种集营养、药用及生态价值于一体的环境友好型杂粮作物，极具推广意义。磷是植物生长发育不可或缺的营养元素，参与能量代谢、核酸合成及细胞信号传导等关键生理过程[1-2]。然而，全球农业生产中磷肥的当季利用率普遍不足 25%，过量施用磷肥不仅造成资源浪费，还加剧了土壤板结和水体富营养化等环境问题[3-5]。黄土高原作为我国苦荞主产区，土壤有效磷含量低，传统栽培中依赖高磷投入以维持产量[6-8]。这与国家“减肥增效”的绿色农业发展战略相悖。因此，如何通过生物途径活化土壤磷素并提高磷肥利用效率成为苦荞可持续生产的关键科学问题。

近年来，解磷微生物因其能够活化土壤难溶性磷而备受关注。研究[9-11]表明，解磷菌通过分泌有机酸和磷酸酶，可将植酸钙和磷酸铁等难溶性磷转化为植物可利用形态，同时改善根际微环境。此外，生物有机肥因其兼具微生物活性与有机质缓释特性，可协同提升土壤肥力与磷素利用效率[12-14]。吴红艳等[15]将解磷菌 P623-9 与腐熟鸡粪复配制备解磷生物肥，以辣椒为供试作物开展研究，结果表明，施用该解磷生物肥可显著提高土壤养分含量，同时增加土壤中有益菌群丰度及细菌群落多样性。石磊等[16]研究表明，解磷生物有机肥通过增加玉米穗数和穗粒数改善产量构成，进而提高产量。

本课题组前期分离筛选出 1 株解磷功能菌 *Bacillus vallismortis* gz4-1，具有高效降解有机磷的能力，其分泌的柠檬酸和草酸等有机酸可降低根际 pH，促进难溶性磷的释放[17-18]。前期研究多聚焦于解磷菌与秸秆的单一配施效应，而对生物有机肥制备工艺及其与梯度减磷配施生物有机肥的系统研究仍显不足。基于此，本研究通过盆栽试验系统探究磷肥减量配施生物有机肥对苦荞生长发育、生理特性及产量品质的影响，重点分析不同生育期根系形态、抗氧化酶活性及磷素分配模式的动态变化，揭示解磷菌生物有机肥的缓释效应与苦荞磷素需求规律的匹配机制。研究结果将为苦荞绿色高效施肥技术的开发提供理论支撑，同时为其他磷依赖性作物的养分管理提供参考。

作者简介：赵佳，主要从事微生物发酵研究，E-mail：zhaojia.00@163.com
高振峰为通信作者，主要从事微生物发酵研究，E-mail：815336057@qq.com
基金项目：山西省自然科学研究面上项目“新型生物有机肥对苦荞节磷栽培的影响”（202403021211049）
收稿日期：2025-06-16；修回日期：2025-09-05；网络出版日期：2025-10-29

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试菌株 *Bacillus vallismortis* gz4-1 和苦荞品种“晋荞 6 号”均由山西农业大学提供；小麦秸秆由江苏苏锐秸秆加工厂提供；菜籽饼由四川碾山榨油坊提供；麦麸由江苏徐州华升面粉厂提供；发酵羊粪肥由沈阳贝农生物科技有限公司提供；尿素由天津众联化学试剂有限公司提供；过磷酸钙由云南祥丰实业集团有限公司提供；氯化钾由山东省寿光市鼎昊经贸有限公司提供。

1.2 试验方法

1.2.1 *解磷菌 gz4-1 生物有机肥的制备* 挑取 1 环采用−80 ℃甘油法保存的 *Bacillus vallismortis* gz4-1 菌株，于新鲜的 Nutrient Agar（NA）平板上进行划线操作，置于 28 ℃恒温环境中培养 48 h，随后在 NA 液体培养基中 28 ℃恒温环境中进行扩繁，至菌体浓度达到 1.0×10^6 CFU/mL 时作为发酵菌剂。将制备好的液体发酵剂按 1%（v/w）的接种量，接入发酵基质中，基质配比为小麦秸秆∶菜籽饼∶发酵羊粪肥∶麦麸=37∶6∶10∶5（w/w），基质含水量 60%，发酵温度为 30 ℃，发酵时间 11 d，制成解磷菌 gz4-1 生物有机肥。

1.2.2 *盆栽试验* 试验于 2023 年 4−7 月在山西省太原市山西师范大学防雨棚内进行，采用 30 cm×25 cm×30 cm（内径×底径×高度）的聚乙烯营养钵进行栽培试验。栽培基质各理化指标为全氮 34.12 mg/kg、速效磷 13.91 mg/kg、速效钾 96.92 mg/kg，每盆装填基质质量为 10 kg。供试化肥包括尿素（N 46%）、过磷酸钙（P_2O_5 15%）及氯化钾（K_2O 52%），生物有机肥为自主研发的解磷菌 gz4-1 生物有机肥。选取籽粒饱满度一致、形态均匀且无病理特征的晋荞 6 号苦荞种子，经 30 s H_2O_2 表面灭菌后，采用蒸馏水冲洗 3 次，室温浸种 24 h 促进胚萌发后实施单粒精量播种，于 4 月 3 日每盆等距播种 15 粒。播种后实施常规水分管理，首片真叶完全展开后实施间苗，定植密度为每盆 6 株。

试验设置 6 个处理组：常规化肥（CK）、全量生物有机肥（P0）和梯度减磷 1/2（P1）、1/3（P2）、1/4（P3）、1/5（P4）配施生物有机肥处理（表 1）。生物有机肥施用量为 15.00 g/kg，常规化肥配比为尿素 0.43 g/kg、过磷酸钙 0.95 g/kg 和氯化钾 0.35 g/kg。栽培管理参照郝亚妮等[19]建立的盆栽试验管理规程，于苗期（5 月 10 日）、花期（6 月 1 日）和收获期（7 月 5 日）取样并测量植株的表型参数、生理指标及产量构成因素。收获期测定籽粒可溶性蛋白及总黄酮含量，各处理设置 6 次生物学重复。

表 1 不同处理的肥料添加量

Table 1 Fertilizer addition of different treatments g

处理 Treatment	尿素 Urea	过磷酸钙 Calcium superphosphate	氯化钾 Potassium chloride	生物有机肥 Bio-organic fertilizer
CK	4.30	9.50	3.50	0.00
P0	0.00	0.00	0.00	150.00
P1	4.30	4.75	3.50	150.00
P2	4.30	6.34	3.50	150.00
P3	4.30	7.13	3.50	150.00
P4	4.30	7.60	3.50	150.00

1.3 测定项目与方法

不同生育期每个处理随机选取 3 株苦荞植株，取样前用蒸馏水浸润盆土，而后慢慢分离出带土苦荞根系，取出整株苦荞并用蒸馏水冲洗干净，迅速带回实验室用于测定相关指标。采用直尺测量株高和主根长；采用游标卡尺测量茎粗；采用 LI-3000C 便携式叶面仪测定叶面积[20]；采用 Delta-T SCAN 根系分析系统（英国）测定根表面积和根体积[21]；在 105 ℃条件下杀青 30 min，而后 75 ℃条件下烘干至恒重，采用电子天平称量测定根干重和茎叶干重；采用科学计数法记录花序数；采用核黄素法[22-23]测定根系超氧化物歧化酶（SOD）活性；采用愈创木酚比色法测定过氧化物酶（POD）活性[24-25]；采用氯化三苯基四氮唑（TTC）法[26]测定根系活力；采用丙酮浸提法[27-28]测定叶绿素含量；采用流动注射分析系统测定植株磷含量[29]；采用称重法测定单株粒重和千粒重；采用考马斯亮蓝法[30-31]测定蛋白质含量；采用 $AlCl_3$ 分光光度法[32]测定黄酮含量。

2 结果与分析

2.1 磷肥减量配施 gz4-1 生物有机肥对苦荞不同时期生长的影响

2.1.1 *对苦荞地上部生长的影响* 与 CK 处理相比，磷肥减量配施 gz4-1 生物有机肥对苦荞幼苗期地上部生长指标具有调控效应（表 2）。P1 处理

相比其他处理幼苗地上部促生效果最为显著，其株高（22.50 cm）、茎粗（2.40 mm）、叶面积（8.22 cm^2）和茎叶干重（0.69 g）较 CK 处理均有显著提升。然而，P0 处理虽在株高（21.09 cm）、茎粗（2.24 mm）、叶面积（7.45 cm^2）和茎叶干重（0.61 g）方面较 CK 处理有显著提高，但整体表现不如 P1 处理。P3 处理的株高（20.03 cm）和茎粗（1.98 mm）与 CK 处理仍维持显著差异，但叶面积和茎叶干重与 CK 无显著差异。P2 和 P4 处理各生长参数与 CK 相比均未呈现显著差异。

表 2　磷肥减量配施 gz4-1 生物有机肥对苗期苦荞地上部生长指标的影响

Table 2　Effects of reduced phosphate fertilizer combined with gz4-1 bio-organic fertilizer on aboveground growth parameters of *F. tataricum* at seedling stage

处理 Treatment	株高 Plant height (cm)	茎粗 Stem diameter (mm)	叶面积 Leaf area (cm^2)	茎叶干重 Stem-leaf dry weight (g)
CK	17.86±0.08c	1.34±0.09e	6.04±0.08d	0.51±0.08c
P0	21.09±0.02b	2.24±0.09b	7.45±0.10b	0.61±0.02b
P1	22.50±0.02a	2.40±0.02a	8.22±0.09a	0.69±0.05a
P2	16.80±0.03d	1.27±0.06e	5.96±0.15e	0.48±0.04c
P3	20.03±0.05b	1.98±0.04c	6.39±0.42c	0.55±0.05c
P4	18.43±0.11c	1.63±0.08d	6.17±0.06d	0.52±0.04c

同列不同小写字母表示处理间差异显著（$P < 0.05$）。下同。
Different lowercase letters in the same column indicate significant differences among treatments ($P < 0.05$). The same below.

与 CK 处理相比，磷肥减量配施 gz4-1 生物有机肥对苦荞花期地上部生长指标具有调控效应（表 3）。P3 处理的幼苗地上部促生效果最为显著，其株高（60.08 cm）、茎粗（5.01 mm）和茎叶干重（4.25 g）均为最高值。P1 处理的苦荞植株只有叶面积（14.00 cm^2）为所有处理中的最大值，整体表现不如 P3 处理。

表 3　磷肥减量配施 gz4-1 生物有机肥对花期苦荞地上部生长指标的影响

Table 3　Effects of reduced phosphate fertilizer combined with gz4-1 bio-organic fertilizer on aboveground growth parameters of *F. tataricum* at flowering stage

处理 Treatment	株高 Plant height (cm)	茎粗 Stem diameter (mm)	叶面积 Leaf area (cm^2)	茎叶干重 Stem-leaf dry weight (g)
CK	52.73±0.08d	4.18±0.03d	12.23±0.19d	3.34±0.07d
P0	50.78±0.05e	4.06±0.03e	12.06±0.62e	3.13±0.07e
P1	56.84±0.06b	4.59±0.03b	14.00±0.92a	3.91±0.03b
P2	54.78±0.04c	4.37±0.04c	13.16±1.27c	3.62±0.11c
P3	60.08±0.09a	5.01±0.09a	13.55±0.51b	4.25±0.09a
P4	49.22±0.06f	3.85±0.07f	11.89±0.74e	2.94±0.04f

2.1.2　对苦荞根系生长的影响　与 CK 处理相比，磷肥减量配施 gz4-1 生物有机肥对苦荞幼苗期根系生长指标同样具有调控效应（表 4）。P1 处理的幼苗根系促生效果最为显著，其主根长（16.33 cm）、根表面积（0.324 m^2）、根体积（3.56 cm^3）和根干重（0.24 g）较 CK 处理均有显著提升。P0 和 P3 处理的主根长（14.94、13.06 cm）、根表面积（0.309、0.275 m^2）、根体积（3.24、3.22 cm^3）和根干重（0.20、0.17 g）较 CK 有显著提高，但整体表现低于 P1 处理。

表 4　磷肥减量配施 gz4-1 生物有机肥对苗期苦荞根系生长指标的影响

Table 4　Effects of reduced phosphate fertilizer combined with gz4-1 bio-organic fertilizer on root growth parameters of *F. tataricum* at seedling stage

处理 Treatment	主根长 Main root length (cm)	根表面积 Root surface area (m^2)	根体积 Root volume (cm^3)	根干重 Root dry weight (g)
CK	11.68±0.02d	0.254±0.004c	2.86±0.11c	0.13±0.01d
P0	14.94±0.01b	0.309±0.004a	3.24±0.14b	0.20±0.01b
P1	16.33±0.05a	0.324±0.013a	3.56±0.08a	0.24±0.01a
P2	11.06±0.02d	0.207±0.007e	2.46±0.08d	0.08±0.01e
P3	13.06±0.05c	0.275±0.012b	3.22±0.11b	0.17±0.01c
P4	11.41±0.01d	0.229±0.012d	2.68±0.03c	0.10±0.01e

与 CK 处理相比，磷肥减量配施 gz4-1 生物有机肥对苦荞花期根系生长指标同样具有调控效应（表 5）。P3 处理相较于其他处理对苦荞花期根系的促生效果最优，其主根长（21.66 cm）、根表面积（0.785 m^2）、根体积（6.97 cm^3）和根干重（0.77 g）均达到峰值。P1 处理在主根长（19.63 cm）、根表面积（0.756 m^2）、根体积（6.56 cm^3）和根干重（0.71 g）方面较 CK 有显著提高，但整体表现低于 P3 处理。

表 5　磷肥减量配施 gz4-1 生物有机肥对花期苦荞根系生长指标的影响

Table 5　Effects of reduced phosphate fertilizer combined with gz4-1 bio-organic fertilizer on root growth parameters of *F. tataricum* at flowering stage

处理 Treatment	主根长 Main root length (cm)	根表面积 Root surface area (m^2)	根体积 Root volume (cm^3)	根干重 Root dry weight (g)
CK	18.12±0.04c	0.733±0.003c	6.34±0.06d	0.64±0.02c
P0	17.25±0.04c	0.704±0.011d	6.21±0.04e	0.58±0.01e
P1	19.63±0.03b	0.756±0.006b	6.56±0.07c	0.71±0.03b
P2	20.18±0.02b	0.754±0.004b	6.76±0.04b	0.61±0.01d
P3	21.66±0.09a	0.785±0.007a	6.97±0.08a	0.77±0.01a
P4	16.36±0.02d	0.672±0.004e	6.01±0.03f	0.55±0.02e

2.2 磷肥减量配施 gz4-1 生物有机肥对不同时期苦荞生理生化指标的影响

2.2.1 对苦荞根系 SOD 和 POD 活性的影响 由表 6 可知，SOD 活性在苗期各处理的排序为 P1＞P0＞P4＞P3＞CK＞P2，P1 处理最高，比 CK 高出 56.55%，P2 处理最低，比 CK 降低 8.16%；花期 SOD 活性各处理的排序为 P3＞P2＞P1＞CK＞P0＞P4，P3 处理最高，比 CK 高出 26.67%，P4 处理最低，比 CK 降低 12.38%。POD 活性在苗期各处理的排序为 P0＞P1＞P3＞CK＞P4＞P2，P0 处理最高，比 CK 高出 27.88%；花期 POD 活性各处理的排序为 P3＞P2＞P1＞CK＞P0＞P4，P3 处理最高，比 CK 高出 27.04%，P4 处理最低，比 CK 降低 18.28%。

表 6 磷肥减量配施 gz4-1 生物有机肥对不同时期苦荞根系 SOD、POD 活性的影响

Table 6 Effects of reduced phosphate fertilizer combined with gz4-1 bio-organic fertilizer on root SOD and POD activities of *F. tataricum* at different growth stages

处理 Treatment	SOD 活性 SOD activity (U/g)		POD 活性 POD activity [U/(g·min)]	
	苗期 Seedling stage	花期 Flowering stage	苗期 Seedling stage	花期 Flowering stage
CK	233.81±5.78c	393.86±6.19c	25.82±0.50bc	53.06±1.44c
P0	305.37±7.94b	377.24±5.90cd	33.02±1.37a	48.57±0.81cd
P1	366.05±7.29a	424.93±6.54bc	30.01±1.38ab	59.81±0.73b
P2	214.72±6.45cd	455.56±4.56b	20.81±0.68c	63.58±0.76ab
P3	245.04±6.57c	498.91±9.03a	27.19±0.53b	67.41±0.87a
P4	274.57±7.61bc	345.09±6.91d	22.47±0.43bc	43.36±0.50d

2.2.2 对苦荞根系活力、叶绿素含量的影响 由表 7 可知，苦荞根系活力在苗期各处理的排序为 P1＞P0＞P3＞CK＞P2＞P4，P1 处理最高，比 CK 高出 22.22%，P4 处理最低，比 CK 降低 19.50%；花期根系活力各处理的排序为 P2＞P3＞P1＞P0＞CK＞P4，P2 处理最高，比 CK 高出 47.59%，P4 处理最低，比 CK 降低 27.03%。苦荞叶绿素含量在苗期各处理的排序为 P1＞P0＞P3＞CK＞P2＞P4，P1 处理最高，比 CK 高出 20.87%，P4 处理最低，比 CK 降低 13.59%；花期叶绿素含量各处理的排序为 P3＞P2＞P1＞P0＞CK＞P4，P3 处理最高，比 CK 高出 10.49%，P4 处理最低，比 CK 降低 7.96%。

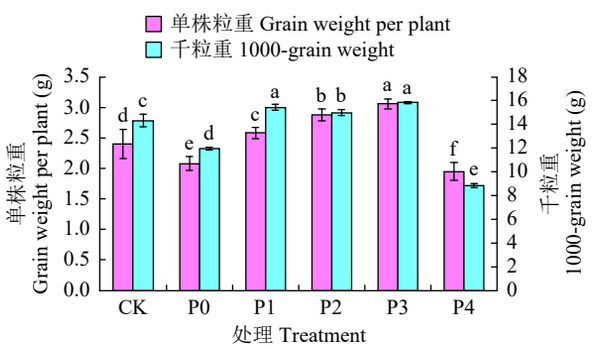
表 7 磷肥减量配施 gz4-1 生物有机肥对不同时期苦荞根系活力、叶绿素含量的影响

Table 7 Effects of reduced phosphate fertilizer combined with gz4-1 bio-organic fertilizer on root vigor and chlorophyll content of *F. tataricum* at different growth stages

处理 Treatment	根系活力 Root vigor [μg/(g·h)]		叶绿素含量 Chlorophyll content (mg/g)	
	苗期 Seedling stage	花期 Flowering stage	苗期 Seedling stage	花期 Flowering stage
CK	0.2733±0.0047b	0.5666±0.0075d	6.18±0.07c	10.29±0.42ab
P0	0.3166±0.0045ab	0.6366±0.0033c	7.21±0.06ab	10.35±0.37ab
P1	0.3333±0.0050a	0.7835±0.0041b	7.47±0.07a	10.67±0.17ab
P2	0.2466±0.0047c	0.8363±0.0020a	5.93±0.10cd	11.12±0.16a
P3	0.2866±0.0043b	0.8288±0.0026a	6.93±0.07b	11.37±0.29a
P4	0.2200±0.0081c	0.4134±0.0041e	5.34±0.09d	9.47±0.16b

2.3 磷肥减量配施 gz4-1 生物有机肥对苦荞产量构成因素和品质的影响

2.3.1 对苦荞产量构成因素的影响 如图 1 所示，苦荞单株粒重各处理的排序为 P3＞P2＞P1＞CK＞P0＞P4，其中 P3 处理最高（3.06 g），比 CK 高出 27.50%；P4 处理最低（1.95 g），比 CK 降低 18.75%。苦荞千粒重各处理的排序为 P3＞P1＞P2＞CK＞P0＞P4，P3 处理最高，比 CK 高出 26.67%，P4 处理最低，比 CK 降低 12.38%。



不同小写字母表示处理间差异显著（$P < 0.05$）。下同。

Different lowercase letters indicate significant differences among treatments ($P < 0.05$). The same below.

图 1 磷肥减量配施 gz4-1 生物有机肥对苦荞产量构成因素的影响

Fig.1 Effects of reduced phosphate fertilizer combined with gz4-1 bio-organic fertilizer on yield components of *F. tataricum*

＞P4，P3 处理最高（15.83 g），比 CK 高出 10.54%；P4 处理最低（8.84 g），比 CK 降低 38.26%。

2.3.2　对苦荞品质的影响　如图 2 所示，磷肥减量配施 gz4-1 生物有机肥对苦荞籽粒可溶性蛋白和黄酮含量影响的变化趋势大体一致，各处理含量排序均为 P3＞P2＞P1＞CK＞P4＞P0。具体表现为 P3、P2 和 P1 处理的可溶性蛋白和黄酮含量高于 CK，其中 P3 处理最高，分别为 15.10 mg/g 和 2.19%；P4 和 P0 处理的可溶性蛋白和黄酮含量低于 CK，其中 P0 处理最低，分别为 10.76 mg/g 和 1.13%。整体而言，P3 处理对苦荞籽粒中的可溶性蛋白与黄酮含量提升作用最为显著。

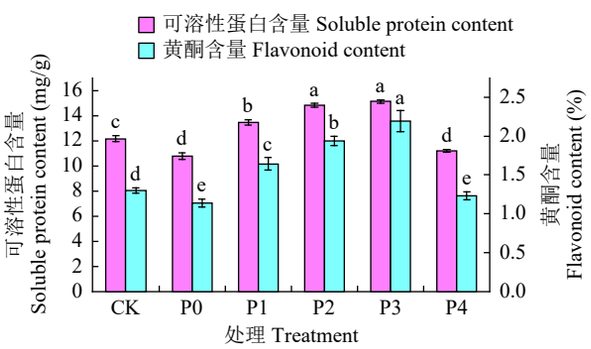


图 2　磷肥减量配施 gz4-1 生物有机肥对苦荞品质的影响

Fig.2　Effects of reduced phosphate fertilizer combined with gz4-1 bio-organic fertilizer on quality of *F. tataricum*

2.4　磷肥减量配施 gz4-1 生物有机肥对苦荞不同组织部位磷含量的影响

2.4.1　对苦荞根系磷含量的影响　如表 8 所示，各处理对根系磷含量的影响表现为苗期＜花期＜收获期。具体而言，苗期 P1 处理下苦荞根系磷含量最高，比 CK 高 44.24%，而 P2 处理下苦荞根系磷含量最低，比 CK 低 13.27%；花期 P1 和 P3 处理下苦荞根系磷含量高于 CK，分别为 1.81 和 1.90 mg/g，P4 处理最低（1.41 mg/g）；收获期 P1、P2 和 P3 处理下苦荞根系磷含量高于 CK，其中 P3 处理最高（2.35 mg/g），而 P4 处理最低（1.56 mg/g）。总体来看，P1 和 P3 处理下苦荞各生长周期根系磷含量均显著高于 CK。

表 8　磷肥减量配施 gz4-1 生物有机肥对苦荞不同生长时期根系磷含量的影响

Table 8　Effects of reduced phosphate fertilizer combined with gz4-1 bio-organic fertilizer on root phosphorus content of *F. tataricum* at different growth stages　mg/g

处理 Treatment	苗期 Seedling stage	花期 Flowering stage	收获期 Harvest stage
CK	1.13±0.08cd	1.64±0.04c	1.90±0.03b
P0	1.33±0.06b	1.50±0.02d	1.74±0.08bc
P1	1.63±0.04a	1.81±0.04b	2.27±0.04a
P2	0.98±0.12d	1.61±0.02c	2.16±0.13a
P3	1.28±0.06b	1.90±0.02a	2.35±0.12a
P4	1.21±0.02bc	1.41±0.02e	1.56±0.06c

2.4.2　对苦荞茎部磷含量的影响　由表 9 可以看出，所有处理下苦荞茎部磷含量随生长时期的增长而提高。苗期 P1 处理下苦荞茎部磷含量最高，比 CK 高 39.21%，而 P2 处理下苦荞茎部磷含量最低，比 CK 低 8.82%；花期 P1 和 P3 处理下苦荞茎部磷含量显著高于 CK，分别为 2.32 和 2.61 mg/g，P4 处理最低（1.55 mg/g）；收获期 P1、P2 和 P3 处理下苦荞茎部磷含量高于 CK，其中 P3 处理最高（2.66 mg/g），P4 处理最低（1.84 mg/g）。总体来看，P1 和 P3 处理下苦荞各生长周期茎部磷含量均显著高于 CK。

表 9　磷肥减量配施 gz4-1 生物有机肥对苦荞不同生长时期茎部磷含量的影响

Table 9　Effects of reduced phosphate fertilizer combined with gz4-1 bio-organic fertilizer on stem phosphorus content of *F. tataricum* at different growth stages　mg/g

处理 Treatment	苗期 Seedling stage	花期 Flowering stage	收获期 Harvest stage
CK	1.02±0.10cd	2.03±0.09c	2.33±0.16c
P0	1.11±0.07bc	1.79±0.04d	2.04±0.08d
P1	1.42±0.03a	2.32±0.12b	2.53±0.06ab
P2	0.93±0.02d	2.07±0.03c	2.41±0.06bc
P3	1.20±0.06b	2.61±0.08a	2.66±0.03a
P4	1.14±0.06bc	1.55±0.08e	1.84±0.11e

2.4.3　对苦荞叶片磷含量的影响　如表 10 所示，各处理苦荞叶片磷含量与生长时期呈正相关。苗期 P1 处理下苦荞叶片磷含量最高，比 CK 高 41.34%，而 P2 处理下苦荞叶片磷含量最低，比

表 10　磷肥减量配施 gz4-1 生物有机肥对苦荞不同生长时期叶片磷含量的影响

Table 10　Effects of reduced phosphate fertilizer combined with gz4-1 bio-organic fertilizer on leaf phosphorus content of *F. tataricum* at different growth stages　mg/g

处理 Treatment	苗期 Seedling stage	花期 Flowering stage	收获期 Harvest stage
CK	1.79±0.23b	2.64±0.11c	3.43±0.07cd
P0	1.92±0.02b	2.47±0.04d	3.33±0.05d
P1	2.53±0.21a	2.83±0.08b	3.62±0.04ab
P2	1.45±0.04c	2.57±0.03cd	3.50±0.03bc
P3	1.96±0.03b	3.06±0.10a	3.74±0.12a
P4	1.88±0.06b	2.25±0.05e	3.12±0.11e

CK 低 18.99%；花期 P1 和 P3 处理下苦荞叶片磷含量显著高于 CK，分别为 2.83 和 3.06 mg/g，P4 处理最低（2.25 mg/g）；收获期 P1、P2 和 P3 处理下苦荞叶片磷含量高于 CK，其中 P3 处理最高（3.74 mg/g），而 P4 处理最低（3.12 mg/g）。总体来看，P1 和 P3 处理下苦荞各生长周期叶片磷含量均显著高于 CK。

3 讨论

苦荞作为黄土高原地区典型的磷依赖性杂粮作物，其高产栽培常依赖于大量磷肥投入。然而，过量磷肥投入不仅导致资源浪费，还引发土壤退化和水体富营养化等环境问题[33]。土壤微生物作为土壤养分循环的驱动者，其中有机磷降解菌通过分泌有机酸及磷酸酶，可将难溶性磷（如植酸钙和磷酸铁）转化为植物可利用态，同时通过调控根际微环境促进磷素吸收[34]。这一生物学功能为减磷增效提供了理论依据。本研究通过盆栽试验系统解析了磷肥减量配施解磷菌 gz4-1 生物有机肥对苦荞生长发育、生理特性及产量和品质的调控机制。

本研究发现，苦荞不同生育期对磷肥减量配施生物有机肥的响应存在显著差异。苗期磷肥减量 1/2 配施 gz4-1 生物有机肥（P1 处理）的株高、茎粗及根系干重较 CK 处理提升最为显著。这一现象可能归因于菌株 gz4-1 在苗期快速分泌有机酸的能力，通过活化土壤难溶性磷缓解了减磷初期的磷素胁迫[18]。值得注意的是，P1 处理的生长优势在花期逐渐减弱，P3 处理则表现出持续促生效应。这可能归因于生物有机肥中微生物代谢产物与有机质的协同作用可延长磷素释放周期，从而匹配苦荞生殖生长期（花期至收获期）的磷需求高峰。这一动态响应机制与 Ma 等[35]在对玉米的研究中发现减磷配施生物肥效应随作物需磷规律变化的结论高度一致。

生理层面，P3 处理显著提升了苦荞的 SOD（498.91 U/g）和 POD[67.41 U/(g·min)]活性，是解磷菌调控植物抗氧化系统以缓解磷胁迫的重要标志。这表明 gz4-1 生物有机肥可通过增强抗氧化酶活性来缓解减施磷肥引发的活性氧（ROS）积累，进而维持细胞膜稳定性与代谢功能。这一机制与水稻中的研究[36]结果相吻合，即解磷菌通过调控抗氧化途径间接促进磷吸收。同时，P3 处理下苦荞根系活力[0.8288 μg/(g·h)]与叶绿素含量（11.37 mg/g）的提升，揭示了“磷素活化－生理功能强化”的联动机制：解磷菌活化的磷素优先满足根系呼吸与叶片光合作用的需求，形成根系吸收能力增强－光合产物积累增加－磷素吸收进一步促进的良性循环，进一步验证了其通过改善根系生理功能与光合同化能力实现磷素高效利用的作用路径。这与在花椰菜[37]中发现的解磷菌通过改善生理代谢间接提升磷利用效率的机制高度一致。

产量与品质方面，P3 处理较 CK 在单株粒重和千粒重分别提升 27.50%和 10.54%，与郝亚妮等[38]报道的秸秆配施解磷菌具有增产效应（23.3%）的结论一致。籽粒可溶性蛋白（15.10 mg/g）和黄酮含量（2.19%）的显著提升，表明该施肥模式可同步改善苦荞营养与功能品质。全量生物有机肥处理（P0）产量与品质均低于 CK，这表明单纯依赖生物有机肥难以满足苦荞生殖生长期的高强度磷需求，而 P4 处理的产量低于 P0，这可能归因于过量施肥产生的高磷环境抑制了解磷菌 gz4-1 的活性、产生了磷素拮抗与离子失衡以及引起了根系发育受损等因素，印证了化学磷肥适度减量与生物有机肥增效需协同进行的必要性，为平衡减肥与增效的矛盾提供了理论依据[39-40]。

磷素动态分布研究表明，各处理苦荞不同组织磷含量均随生育期推进而递增，收获期达最大值。P1 处理在苗期表现出显著的磷吸收优势，而 P3 处理在花期和收获期的磷素积累更为突出，印证了生物有机肥在生育后期的持续供磷优势。磷素分配模式呈现叶＞茎＞根的特征，与郝亚妮[17]在低磷胁迫下的研究结果一致，表明苦荞通过优先向光合器官分配磷素以维持代谢活性。本研究为苦荞绿色高效施肥技术体系的构建提供了理论依据。

4 结论

明确了磷肥减量 1/4 配施 gz4-1 生物有机肥是协调苦荞产量、品质与磷素利用效率的最优方案，其内在机制体现为解磷菌 gz4-1 的即时活化效应与生物有机肥的缓释特性协同匹配苦荞不同生育期的磷需求；通过增强抗氧化系统与生理功能，提升磷素吸收与转化效率；优化磷素在各器官的分配模式，提升籽粒产量与品质。

参考文献

[1] Wang C Q，Pollet S，Howell K，et al. Placing cropping systems under suboptimal phosphorus conditions promotes plant nutrient

acquisition and microbial carbon supply without compromising biomass. Soil Biology and Biochemistry，2025，204：109753.

[2] Sofyan T E，Sudirja R，Sara S D，et al. The effect of a combination of N, P, K and biochar-silica fertilizers on CEC, C-organic, N, P, K content of plant and yield of rice on Inceptisols Jatinangor, Indonesia. Asian Journal of Soil Science and Plant Nutrition，2025，11(1)：328-336.

[3] Procopio S L，Escudero A，Hunter C. *Chlamydomonas acidophila* for phosphorus recovery from municipal wastewater treatment plants: effect of light intensity, temperature, different wastewaters and long-term semi-continuous feeding. Algal Research，2025，86：103941.

[4] 谈建鑫. 过量施磷下青稞生长发育和磷素利用的变化. 湖北农业科学，2024，63(4)：6-11.

[5] 郝小雨. 过量施用磷肥对白菜类蔬菜吸收矿质养分的影响研究. 保定：河北农业大学，2009.

[6] 宋毓雪，胡静洁，孔德章，等. 不同氮、磷、钾水平对苦荞产量和品质的影响. 安徽农业大学学报，2014，41(3)：411-415.

[7] Yang G M，Liu C，Gu L D，et al. Studies on the phosphorus-solubilizing ability of *Isaria cateinannulata* and its influence on the growth of *Fagopyrum tataricum* plants. Plants，2024，13(12)：1694.

[8] Chen X L，Li Y，Zhao C X，et al. Compensation mechanisms for early maturity and high yield in tartary buckwheat (*Fagopyrum tataricum*): a study on ‘source-sink’ relationship and phosphorus utilization. Agronomy，2025，15(1)：173.

[9] Ustiatik R，Ariska A P，Hakim Q L，et al. Volcanic deposits thickness and distance from Mt Semeru crater strongly affected phosphate solubilizing bacteria population and soil organic carbon. Journal of Ecological Engineering，2023，24(10)：360-368.

[10] Zeng Q W，Tang L S，Zhang Y，et al. Isolation and characterization of phosphate-solubilizing bacteria from rhizosphere of poplar on road verge and their antagonistic potential against various phytopathogens. BMC Microbiology，2023，23(1)：221.

[11] 刘浩蓝，丁珊珊，包小春，等. 3 株解磷菌的解磷机理及其对杉木幼苗的促生效应. 生态与农村环境学报，2025，41(3)：378-388.

[12] 梁嘉伟，余炜敏，姚钰玲，等. 生物有机肥对土壤质量及蔬菜产量的影响. 生态环境学报，2022，31(3)：497-503.

[13] Alotaibi M M，Aljuaid A，Alharbi M M，et al. The effects of bio-fertilizer by arbuscular mycorrhizal fungi and phosphate solubilizing bacteria on the growth and productivity of barley under deficit of water irrigation conditions. Agronomy，2024，14(9)：1973.

[14] Celerinos C T M，Manigo I B. Growth and yield of sweet corn (*Zea mays* var. *rugosa*) in response to bio-fertilizer application. Asian Journal of Agricultural and Horticultural Research，2025，12(1)：48-59.

[15] 吴红艳，于淼，冯健，等. 解磷生物肥对温室土壤磷有效性及辣椒产量的影响. 中国农业科技导报，2023，25(10)：189-197.

[16] 石磊，虞文韬，李孝良，等. 解磷生物有机肥对皖北夏玉米产量构成的影响. 安徽科技学院学报，2014，28(3)：25-28.

[17] 郝亚妮. 有机磷高效降解菌的筛选及其对苦荞耐低磷特性的影响. 太原：山西师范大学，2022.

[18] 王莉. 有机磷降解菌 gz4-1 解磷机制及制剂化对苦荞生长的影响. 太原：山西师范大学，2023.

[19] 郝亚妮，裴红宾，高振峰，等. 解磷菌与秸秆配施对低磷胁迫下苦荞幼苗生长发育的影响. 西北农业学报，2021，30(12)：1844-1853.

[20] 董馥慧，裴红宾，张永清，等. 不同生育时期干旱胁迫对‘迪庆苦荞’和‘黑丰一号’苦荞生长及生理特性的影响. 广西植物，2021，41(6)：970-978.

[21] 杨甜，张永清，董馥慧，等. 不同水分条件下不同抗旱性苦荞根系生长规律研究. 作物杂志，2019(6)：76-82.

[22] Bouftira I，Abdelly C，Sfar S. Characterization of cosmetic cream with *Mesembryanthemum crystallinum* plant extract: influence of formulation composition on physical stability and anti-oxidant activity. International Journal of Cosmetic Science，2008，30(6)：443-452.

[23] 王小松. 外源离子钛对苦荞幼苗铅胁迫缓解作用及效果研究. 成都：成都大学，2022.

[24] Zhang Q，Li Y，Sun X，et al. Study on dormancy mechanism and breaking dormancy method of *Viburnum sargentii* seeds. American Journal of Plant Sciences，2019，10(1)：65-78.

[25] Wang N C，Yi X X，Qi H J，et al. Study on destroying enzyme in chestnuts (*Castanea mollissima* Blume) by microwave heating. Advanced Materials Research，2014，852：262-265.

[26] Liu C K，Wang X，Tu B J，et al. Root K affinity drivers and photosynthetic characteristics in response to low potassium stress in K high-efficiency vegetable soybean. Frontiers in Plant Science，2021，12：732164.

[27] Tezcan A，Aslan G E，Kaman H，et al. Assessing different irrigation regimes regarding chlorophyll content of the sweet bell pepper. Journal of Agriculture and Ecology Research International，2018，15(3)：1-7.

[28] Lu H S，Liu Y Q，Liu W J，et al. Isolation, identification of *Chlorella pyrenoides* from aquaculture wastewater and its purification of wastewater. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering，2017，33(4)：273-277.

[29] Thompson D F，Michopoulos F，Smith C J，et al. Phosphorus and sulfur metabonomic profiling of tissue and plasma obtained from tumour-bearing mice using ultra-performance liquid chromatography/inductively coupled plasma mass spectrometry. Rapid Communications in Mass Spectrometry，2013，27(22)：2539-2545.

[30] Singh S，Sharma R. Influence of different hydrogel levels and irrigation scheduling on leaf protein content of chickpea (*Cicer arietinum* L.). Journal of Advances in Biology & Biotechnology，2024，27(9)：883-888.

[31] Wang F H，Wang B B，Gao J，et al. Determination of cyclic adenosine phosphate and protein content in dormant chlamydospore and nondormant chlamydospore of *Arthrobotrys flagrans*. Journal of Basic Microbiology，2024，64(7)：e202400008.

[32] Atif S，Samina A，Imran A. Spectrophotometric quantification of total phenol, flavonoid and alkaloid content and in-vitro investigation of antioxidant and cytotoxic potential of *Hippeastrum equestre* bulbs. Pharmaceutical Chemistry Journal，2022，56(9)：1263-1271.

[33] Zhang W L，Yang Q H，Xia M J，et al. Effects of phosphate fertiliser on the physicochemical properties of tartary buckwheat (*Fagopyrum tataricum* (L.) Gaertn.) starch. Food Chemistry，2020，307：125543.

[34] Fonseca M，Pedrinho A，Merloti L F，et al. Differential stimulation of phosphorus-mobilizing bacteria by common bean genotypes in Amazonian dark earth and agricultural soils with

varying fertility levels. Rhizosphere，2025，33：101026.
[35] Ma X Z，Zhao Y，Zheng Y，et al. Effect of different fertilization on soil fertility, biological activity, and maize yield in the albic soil area of China. Plants，2025，14(5)：810.
[36] He J F，Zeng G Y，Liu Z H，et al. Replacing traditional nursery soil with spent mushroom substrate improves rice seedling quality and soil substrate properties. Environmental Science and Pollution Research International，2024，31(27)：39625-39636.
[37] Shalaby O A. Using *Bacillus megaterium* as a bio-fertilizer alleviates salt stress, improves phosphorus nutrition, and increases cauliflower yield. Journal of Plant Nutrition，2024，47(6)：926-939.
[38] 郝亚妮，裴红宾，高振峰，等. 解磷菌协同秸秆替代磷肥对苦荞生长及产量和品质的影响. 作物杂志，2024(1)：204-213.
[39] 张轶珺. 解磷菌 gz4-1 生物肥的制备及其在苦荞栽培过程中的减磷效果. 太原：山西师范大学，2024.
[40] 赵买琼. 高效解磷菌株的筛选及其复合微生物肥料的研制与肥效研究. 南京：南京农业大学，2015.

Effects of Phosphorus Fertilizer Combined with Phosphate-Solubilizing Bacterial Bio-Organic Fertilizer on Growth and Phosphorus Utilization in *Fagopyrum tataricum*

Zhao Jia[1], Wang Xiaoyong[1], Zhang Yijun[2], Pei Hongbin[2], Gao Zhenfeng[3]

([1]Department of Biological Science and Technology, Jinzhong University, Jinzhong 030619, Shanxi, China;
[2]College of Life Sciences, Shanxi Normal University, Taiyuan 030031, Shanxi, China;
[3]College of Food Science, Shanxi Agricultural University, Taiyuan 030031, Shanxi, China)

Abstract To investigate the potential of phosphate-solubilizing *Bacillus vallismortis* gz4-1 bio-organic fertilizer in reducing phosphorus (P) input and enhancing its efficiency in Tartary buckwheat (*Fagopyrum tataricum*) cultivation, a pot experiment was conducted using Jinqiao No. 6 as the test material. Six treatments were established: conventional fertilization (CK), full-rate bio-organic fertilizer (P0), and gradient P reduction by 1/2 (P1), 1/3 (P2), 1/4 (P3), and 1/5 (P4) combined with bio-organic fertilizer. The effects on Tartary buckwheat growth, physiological characteristics, yield, and P uptake were systematically analyzed. The results showed that the P3 treatment significantly promoted growth at the flowering stage, with plant height (60.08 cm), stem diameter (5.01 mm), stem-leaf dry weight (4.25 g), main root length (21.66 cm), root surface area (0.785 m^2), root volume (6.97 cm^3), and root dry weight (0.77 g) all reaching the highest values among treatments. Under the P3 treatment, superoxide dismutase activity (498.91 U/g) and peroxidase activity [67.41 U/(g·min)] increased by 26.67% and 27.04%, respectively, compared with CK, while root vigor [0.8288 μg/(g·h)] and chlorophyll content (11.37 mg/g) increased by 46.27% and 10.49%, respectively. In terms of yield, the P3 treatment significantly increased grain weight per plant (3.06 g) and 1000-grain weight (15.83 g) by 27.50% and 10.54%, respectively, compared with CK. Grain soluble protein content (15.10 mg/g) and flavonoid content (2.19%) were also significantly enhanced by 24.17% and 60.76%, respectively, compared with CK. Phosphorus dynamics analysis revealed that at harvest, the P3 treatment increased P content in roots, stems, and leaves by 23.68%, 14.16%, and 9.03%, respectively, compared with CK. In summary, a 1/4 reduction in P fertilizer combined with gz4-1 bio-organic fertilizer is the appropriate application rate for high-yield and high-quality Tartary buckwheat cultivation.

Key words *Fagopyrum tataricum*; Phosphate-solubilizing bacteria; Reduced phosphorus application; Bio-organic fertilizer; Phosphorus utilization