



# 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

郝亚妮<sup>1</sup>,裴红宾<sup>1,2</sup>,高振峰<sup>3</sup>,王 莉<sup>1</sup>

(1. 山西师范大学 生命科学学院,山西临汾 041004;2. 山西师范大学 现代文理学院,山西临汾 041004;3. 山西农业大学(山西省农科院)农产品贮藏保鲜研究所,太原 030031)

**摘要** 为明确花域芽孢杆菌 *gz4-1* 与秸秆配施对苦荞幼苗生长发育的影响,于 2019 年以‘迪庆’苦荞为材料,设置秸秆[0 g·kg<sup>-1</sup> 土壤(J0)、4 g·kg<sup>-1</sup> 土壤(J1)]和菌液浓度[0 (P0)、10<sup>4</sup> (P1)、10<sup>6</sup> (P2)、10<sup>8</sup> (P3)、10<sup>10</sup> (P4) cfu·mL<sup>-1</sup>]两因素复合处理,以正常施肥为对照(CK),采用盆栽试验探究花域芽孢杆菌 *gz4-1* 与秸秆配施对苦荞幼苗根系、地上部形态和生理特性的影响。结果表明:(1)花域芽孢杆菌 *gz4-1* 与秸秆配施促进苦荞根系鲜质量、干质量、主根长、根系表面积和根冠比,幼苗主根长在 J0P2 处理下最高,比 CK 显著提高 12.1%,根系表面积和根冠比均在 J1P1 处理下最高,分别比 CK 显著提高 115.6%和 103.3%。(2)花域芽孢杆菌 *gz4-1* 与秸秆配施促进苦荞幼苗茎粗、株高、鲜质量、干质量和节数的生长,幼苗株高和节数在 J1P3 处理下最高,分别比 CK 提高 43.6%和 33.3%。(3)随着菌液浓度的增加,苦荞幼苗根系活力和根系 P 含量均先升后降且在 P2 浓度下最高,在低磷胁迫(J0)条件下,根系酸性磷酸酶活性降低,在施加秸秆(J1)条件下,酸性磷酸酶活性在 P2 浓度时达到峰值。说明花域芽孢杆菌 *gz4-1* 与秸秆配施可通过改变苦荞幼苗形态和根系构型、提高根系活力,改善根系生理机能提高对苦荞幼苗生长发育的影响,且综合因素考虑在 10<sup>6</sup> cfu·mL<sup>-1</sup> (P2)菌液浓度下配施秸秆对苦荞幼苗的促生作用最大,可达最佳促生增产效果。

**关键词** 苦荞;花域芽孢杆菌 *gz4-1*;低磷胁迫;秸秆;磷吸收

**中图分类号** S517;Q945.78

**文献标志码** A

**文章编号** 1004-1389(2021)12-1844-10

磷作为农作物必需的营养元素参与多种生物学过程,而土壤作为植物磷营养的重要来源<sup>[1-2]</sup>,磷在其中的溶解度、流动性和含量高低等因素都对作物生长发育、产量和品质形成具有重要影响<sup>[3]</sup>。然而近年来随着植物养分利用研究的不断深入,越来越多的证据表明土壤中存在很多植物无法有效利用的难溶性磷,且生产中的磷肥投入量和作物利用率(当季利用率仅有 10%~25%<sup>[4]</sup>)之间存在明显不对等关系,不仅浪费大量磷资源,而且还造成一系列环境污染。因此,活化土壤中的难溶性磷和提高作物当季磷利用率对减少磷肥投入、磷资源可持续利用以及环境保护具有重要意义。

解磷细菌作为一类溶磷微生物<sup>[5]</sup>,不仅可通过分泌胞外磷酸酶和有机酸等生物途径将土壤中的难溶性磷转化为可溶性磷,而且部分菌株还兼

有明显的促生作用<sup>[6]</sup>。此外秸秆作为一种农业副产物含有大量有机质、氮、磷、钾和微量元素等养分,其还田后不仅能避免资源浪费造成环境污染,而且还能在土壤中分解,提高土壤有机质含量和肥料利用率<sup>[7]</sup>,且已有研究表明秸秆还田在土壤磷解吸<sup>[8]</sup>、秸秆改性材料亦可活化沙质土壤中的难溶性磷<sup>[9]</sup>、增加土壤有效磷含量<sup>[10-11]</sup>和提高作物对磷的利用率等方面具有明显作用<sup>[12-13]</sup>。因此解磷细菌和秸秆的开发利用对活化土壤难溶性磷、减少磷肥投入和提高作物磷肥利用率具有重要意义。然而目前有关解磷菌的研究仍主要集中在高效解磷菌的筛选、解磷效果影响因素和植物根际定殖规律<sup>[14-16]</sup>等方面;有关秸秆磷的研究主要集中在秸秆增磷特性、材料改性<sup>[7]</sup>和难溶性磷活化<sup>[17]</sup>等方面;而有关解磷菌和秸秆配施后的磷肥替代效果研究方面还较为薄弱,且同作物磷利用率、吸收特性和耐低磷特性等研究的深度和广

收稿日期:2021-01-24 修回日期:2021-03-20

基金项目:山西师范大学现代文理学院基础科研项目(2020JCYJ17)。

第一作者:郝亚妮,女,硕士研究生,研究方向为植物生理生态。E-mail:hyni0120@126.com

通信作者:裴红宾,女,副教授,硕士生导师,研究方向为植物生理生态。E-mail:bbpei65110@163.com

度相比仍存在较大差距,相关研究有待进一步加强和深入。

苦荞(*Fagopyrum tataricum* L.)蓼科荞麦属植物,不仅具有生育期短,耐冷凉瘠薄特点,在高寒和高原地区具有明显的区位优势和生产优势<sup>[18]</sup>,而且具有丰富的营养、医用和经济价值<sup>[19]</sup>,是黄土高原重要的杂粮作物之一。然而因其属喜磷作物,其栽培过程中的磷肥投入量对其产量和品质具有重要影响,且随着国家减肥政策的提出,如何减少苦荞栽培过程中磷肥投入对其产业健康和可持续发展具有重要意义。因此基于上述背景,本试验以苦荞作为研究对象,通过盆栽试验探讨低磷胁迫下以秸秆作为有机肥与实验室前期筛选出的对有机磷具有良好解磷效果的花域芽孢杆菌 gz4-1 配施对苦荞幼苗期生长发育的影响,旨在为苦荞低磷胁迫下高效利用土壤中的磷提供理论依据,并且为该菌株后期田间应用奠定理论基础。

## 1 材料与方 法

### 1.1 供试材料

供试苦荞品种为‘迪庆’,种子由山西省农业科学院高寒作物研究所提供。供试土壤为石灰性褐土下层,pH 为 7.5,理化性质为有机质 2.35 g·kg<sup>-1</sup>,全磷 0.48 g·kg<sup>-1</sup>,全氮 0.05 g·kg<sup>-1</sup>。供试解磷菌菌株为花域芽孢杆菌 gz4-1,由山西师范大学黄土高原杂粮作物逆境生理生态研究课题组通过室内平板筛选、分离、保存所得。供试秸秆为小麦秸秆,全磷量为 0.70

g·kg<sup>-1</sup>。供试肥料为尿素(含 N 46%)、氯化钾(含 K<sub>2</sub>O 52%)和过磷酸钙(含 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 15%)。

### 1.2 试验设计

试验于 2019 年 4 月—5 月在山西师范大学试验基地的防雨棚中进行。采用二因素完全随机区组设计,设秸秆和菌液 2 个因素,秸秆处理设置 J0(不施秸秆)和 J1(施用秸秆)2 个水平(Jm),菌液因素设置 0(P0)、10<sup>4</sup>(P1)、10<sup>6</sup>(P2)、10<sup>8</sup>(P3)、10<sup>10</sup>(P4) cfu·mL<sup>-1</sup> 5 个水平(Pn),以正常施肥(即正常施用氮、磷、钾肥)为对照(CK),共 11 个处理,每个处理重复 3 次(表 1)。

试验采用盆栽土培法,培养钵规格为 15 cm×13 cm×10 cm(口径×底径×高),每盆装土 2 kg,每盆施尿素 0.44 g、氯化钾 0.46 g。CK 每盆施过磷酸钙 0.4 g,J1 试验组每盆施秸秆粉末 8 g。选取大小均一、颗粒饱满且无病虫害的‘迪庆’苦荞种子,用 75%的乙醇浸泡 30 s 进行表面消毒,再用 1%的次氯酸钠溶液浸泡 10 min,用蒸馏水反复冲洗,室温浸种 24 h。采用穴播法,每盆播种 15 粒(4 月 8 日)。播种后所有盆土正常供应等量水分确保种子顺利出苗(每 2 d 浇水 1 次,浇水量均为 200 mL)。待真叶完全展开后(4 月 25 日)间苗,每盆留苗 5 株。使用花域芽孢杆菌 gz4-1 菌液对 J0、J1 组进行灌根处理(4 月 26 日),按处理每盆灌入 200 mL 相应浓度的菌液,每隔 7 d 灌根 1 次,两次灌根期间浇水 1 次,共进行 3 次(CK 组使用蒸馏水 200 mL 代替菌液灌根),完成第 3 次灌根后(5 月 9 日)继续生长 7 d 对苦荞幼苗各项形态指标与生理指标进行测定。

表 1 花域芽孢杆菌 gz4-1 与秸秆配施不同处理组合

Table 1 Different treatment combinations of *Bacillus Floridans* gz4-1 and straw application

处理 Treatment	基肥/g Base fertilizer			灌根溶液/mL Root irrigation solution						
	N	P	K	秸秆 Straw	H <sub>2</sub> O	P0	P1	P2	P3	P4
CK	0.44	0.4	0.46		200					
J0	0.44		0.46			200	200	200	200	200
J1	0.44		0.46	8		200	200	200	200	200

### 1.3 测定指标与方法

1.3.1 形态指标 每个处理均选取苦荞幼苗 3 株,分为地上部和地下部,用电子天平直接称量鲜物质质量;于 105 °C 杀青 30 min,75 °C 烘干至恒量后称取干物质质量;株高、主根长用直尺测量,茎粗使用游标卡尺测量,根系采用全自动根系扫描仪进行扫描,用 Delta-T SCAN 根系分析系统测定根系表面积。

1.3.2 生理指标 将植株取样后立即放入液氮内冷冻保存,根系活力采用 TTC 还原法<sup>[20]</sup>测定,根系磷含量采用干灰化法<sup>[21]</sup>测定,根系酸性磷酸酶采用对硝基苯磷酸二钠法<sup>[22]</sup>测定。

### 1.4 数据处理

用 SPSS 17.0 软件在 0.05 水平下进行 Duncan's 进行多重比较,使用 SigmaPlot 10.0 作图。

## 2 结果与分析

### 2.1 花域芽孢杆菌 *gz4-1* 与秸秆配施对低磷胁迫下苦荞幼苗形态指标的影响

2.1.1 对苦荞幼苗根系生长的影响 由表 2 可知,对照组(CK)的根系鲜质量与干质量均达到最高,表明正常供应氮、磷、钾肥有利于苦荞根系的生长。在不施秸秆(J0)条件下,苦荞根系鲜质量及干质量均表现出先增加后减小的趋势,且在 J0P2 处理下最高,虽然苦荞幼苗根系长势未达到对照组(CK)处理下苦荞幼苗根系的长势,但相比其余处理组合,J0P2 处理显著提高苦荞根系鲜质量及干质量( $P < 0.05$ ),说明施加花域芽孢杆菌 *gz4-1* 菌液仍有补偿磷肥的作用;施加秸秆(J1)后,J1P2 处理的苦荞根系鲜质量和干质量增加效果显著( $P < 0.05$ ),与对照组(CK)相比差异不显著,说明 P2 菌液浓度配施秸秆处理条件下能有效替代 P 肥作用。由表 2 可以看出,无论是否施加秸秆处理,苦荞幼苗根系的主根长在 P2 菌液

处理下达到最长,分别比对照组(CK)增加 12.1%和 5.6%,且在不施加秸秆的条件下与 CK 相比差异显著,分析说明在 P2 条件下菌液对苦荞根系生长有促进作用,解磷细菌对磷肥的补偿作用在 P2 条件下达到最佳。在 J0 条件下,苦荞根系表面积随着菌液浓度的变化呈先上升后下降的趋势,苦荞根系表面积在 P2 浓度时达到最大,较 CK 显著提高 15.1%( $P < 0.05$ ),在 J1 条件下,菌液浓度在 P1 和 P2 时根系表面积长势均良好,较 CK 分别显著提高 77.4%和 36.5%( $P < 0.05$ ),说明菌液浓度会对苦荞根系生长产生低浓度促进、高浓度抑制作用;苦荞幼苗根系表面积和根冠比在 J1P1 处理下达到峰值,与 CK 相比分别显著提高 115.6%和 103.3%。综上分析可知,低磷胁迫配施秸秆在 P2 浓度花域芽孢杆菌 *gz4-1* 菌液(J1P2)处理下能有效促进苦荞幼苗根系鲜质量、干质量,主根长达到最佳生长条件,说明配施秸秆能够促进苦荞对磷的吸收,适宜的菌液浓度有利于苦荞根系生长。

表 2 花域芽孢杆菌 *gz4-1* 与秸秆配施在低磷胁迫下苦荞幼苗根系形态指标的变化

Table 2 Changes of root morphological indexes of tartary buckwheat seedlings with combined application of *Bacillus Floridans gz4-1* and straw under low phosphorus stress

处理 Treatment	根系鲜质量/g Root fresh mass	根系干质量/g Root dry mass	主根长/cm Taproot length	根系表面积/mm <sup>2</sup> Root surface area	根冠比/% Root to shoot ratio	
CK	0.67±0.05 a	0.068±0.001 a	20.67±1.36 ab	1813.93±81.89 d	0.30 b	
J0	P0	0.12±0.05 de	0.025±0.006 c	11.20±1.76 b	684.10±17.83 e	0.37 b
	P1	0.26±0.04 cd	0.028±0.001 c	19.70±4.62 ab	1027.97±30.40 e	0.34 b
	P2	0.42±0.02 b	0.036±0.001 b	23.17±3.60 a	2088.53±56.96 c	0.29 b
	P3	0.08±0.02 e	0.026±0.001 c	17.03±1.05 abc	1075.80±69.23 e	0.21 b
	P4	0.07±0.04 e	0.024±0.001 c	14.70±1.51 bc	624.80±52.78 f	0.23 b
J1	P0	0.12±0.03 de	0.032±0.012 b	16.53±2.31 abc	973.80±39.26 e	0.18 b
	P1	0.37±0.02 bc	0.058±0.014 a	21.43±3.12 ab	3217.73±62.85 a	0.61 a
	P2	0.59±0.08 a	0.064±0.002 a	21.83±0.64 ab	2476.50±55.77 b	0.29 b
	P3	0.14±0.08 de	0.029±0.007 c	18.47±2.04 abc	2016.47±52.18 cd	0.18 b
	P4	0.16±0.05 de	0.033±0.009 b	16.40±2.22 abc	1918.67±40.11 cd	0.20 b

注:CK. 正常施 N、P、K 肥;J0. 不施秸秆处理;J1. 施加秸秆处理。不同浓度菌悬液依次为 P0. 0 cfu · mL<sup>-1</sup>, P1. 10<sup>4</sup> cfu · mL<sup>-1</sup>, P2. 10<sup>6</sup> cfu · mL<sup>-1</sup>, P3. 10<sup>8</sup> cfu · mL<sup>-1</sup>, P4. 10<sup>10</sup> cfu · mL<sup>-1</sup>。表内数据为“平均值±标准误”,图表中的字母为 Duncan's 多重比较结果,同列数据后不同字母表示处理间差异达显著水平( $P < 0.05$ ),下同。

Note:CK. Normal application of N, P, K fertilizer; J0. No straw treatment; J1. Straw treatment. The bacterial suspensions of different concentrations were P0. 0 cfu · mL<sup>-1</sup>, P1. 10<sup>4</sup> cfu · mL<sup>-1</sup>, P2. 10<sup>6</sup> cfu · mL<sup>-1</sup>, P3. 10<sup>8</sup> cfu · mL<sup>-1</sup>, P4. 10<sup>10</sup> cfu · mL<sup>-1</sup>. The data in the table are “mean±standard error”. The letters in the table are Duncan's multiple comparison, different letters after the data within the same columns indicate significant differences between treatments ( $P < 0.05$ ), the same below.

2.1.2 对苦荞幼苗地上部分的影响 由表 3 可知,在 J0 条件下,苦荞幼苗茎粗呈先增后降的趋势,在 P2 浓度达到峰值,其余条件下(P1、P3、P4)

均显著低于对照( $P < 0.05$ ),说明施加解磷菌液对缺磷条件下苦荞幼苗茎粗生长有补偿效应;在 J1 条件下,苦荞幼苗茎粗长势相比 J0 较好,在 P2

浓度下与 CK 相比差异不显著,能有效替代磷肥作用。在 J1P2 条件下,苦荞幼苗茎叶鲜质量和干质量均显著高于其余各处理,与对照相比差异不显著( $P>0.05$ ),其余处理均显著低于 CK,综合茎叶鲜质量、干质量指标下的 J0 和 J1 各处理, J1P2 表现最优。施加秸秆对株高有显著影响( $P<0.05$ ),在 J0 和 J1 条件下,随着菌液浓度的升高,苦荞幼苗株高呈现出先增加后减少的趋势。在 J0 条件下,株高在 P2 达到最高值,相比 CK 差异不显著( $P>0.05$ )。在 J1 条件下,幼苗株高和

节数在 P3 达到峰值,较 CK 分别显著提高 43.6%和 33.3%。与 CK 相比,施加秸秆和菌液对苦荞幼苗茎节数的影响差异不显著,苦荞幼苗茎节数在 J1P3 下达到峰值,说明菌液能对缺磷条件下苦荞茎节生长起到有效补偿作用。综上可知,P2、P3 浓度菌液对低磷胁迫下苦荞幼苗茎叶生长有良好的磷肥补偿效应,J1P2 能显著提高苦荞幼苗茎叶的茎粗、鲜质量和干质量的生长,J1P3 对促进苦荞幼苗株高增长及增加苦荞幼苗茎节数有显著性作用。

表 3 花域芽孢杆菌 gz4-1 与秸秆配施在低磷胁迫下苦荞幼苗地上部分形态指标的变化

Table 3 Changes of morphological indexes of aboveground parts of tartary buckwheat seedlings with combined application of *Bacillus Floridans* gz4-1 and straw under low phosphorus stress

处理 Treatment	茎粗/mm Stem diameter	株高/cm Plant height	每株鲜质量/g Fresh mass	每株干质量/g Dry mass	每株节数 Stem segments	
CK	2.75±0.07 a	14.9±0.6 b	2.022±0.236 a	0.265±0.001 a	6±0.60 a	
J0	P0	1.51±0.06 c	13.5±0.3 b	0.371±0.102 c	0.059±0.015 d	5±0.30 ab
	P1	1.92±0.21 bc	11.8±0.6 b	0.692±0.128 c	0.090±0.001 cd	3±0.30 b
	P2	2.39±0.21 ab	18.0±2.3 ab	1.228±0.525 bc	0.160±0.000 bc	6±0.70 ab
	P3	1.89±0.37 bc	12.6±1.9 b	0.648±0.238 c	0.087±0.021 cd	7±1.20 a
	P4	1.94±0.14 bc	13.0±3.3 b	0.630±0.159 c	0.070±0.022 cd	6±1.20 ab
J1	P0	2.01±0.09 bc	14.0±2.1 b	0.556±0.087 c	0.129±0.037 cd	6±0.70 ab
	P1	2.23±0.27 ab	13.5±1.7 b	0.505±0.180 c	0.119±0.018 cd	5±0.70 ab
	P2	2.72±0.08 a	15.9±1.9 ab	1.835±0.296 ab	0.257±0.072 a	6±0.60 a
	P3	1.89±0.10 bc	21.4±2.1 a	1.011±0.292 c	0.129±0.028 cd	8±0.70 a
	P4	2.24±0.18 ab	17.3±1.1 ab	1.099±0.255 bc	0.134±0.029 cd	7±0.30 a

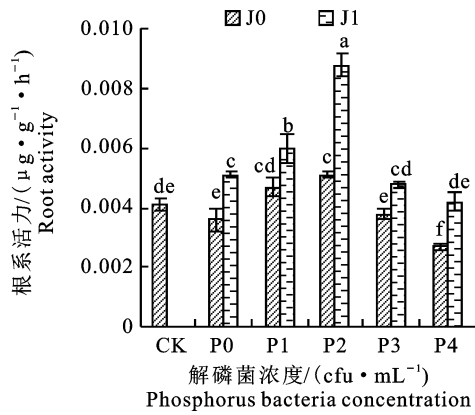
## 2.2 花域芽孢杆菌 gz4-1 与秸秆配施对低磷胁迫下苦荞幼苗根系活力的影响

植物的根和地上部的生长相互依赖,根系负责从土壤中吸收水分、矿物质、有机质以及细胞分裂素等供地上部所用。根系的生长情况与根系活力水平直接影响着植物个体的生长情况、营养状况以及产量水平。由图 1 可知,J0 条件下,随着菌液浓度的升高,苦荞幼苗根系活力呈现先升后降的变化规律,P2 菌液处理的苦荞幼苗根系活力呈现最大值,与 CK 相比差异显著,P0、P3、P4 处理下的根系活力较对照组(CK)分别降低 12.20%、7.32%、34.15%,显著低于 P1、P2 浓度下苦荞幼苗根系活力,且 P1、P2 相比 CK 分别增加了 14.63%、24.39%;J1 条件下苦荞根系活力普遍高于 J0 条件下的,且在 J1P2 达到峰值,比 CK 显著提高 114.60%。随着菌液浓度的增大,苦荞幼苗根系活力降低,说明高浓度的菌液会抑制苦荞幼苗的根系活力,低浓度菌液处理的苦荞

根系活力大幅增加,根系活力的升高促进根系吸收水分和养分的能力,使得秸秆释放出有机磷,供给苦荞植株吸收利用促进生长,表现出低磷胁迫下施加秸秆的补偿效应。

## 2.3 花域芽孢杆菌 gz4-1 与秸秆配施对低磷胁迫下苦荞幼苗根系磷含量的影响

通过对苦荞根系磷含量进行测定,图 2 结果表明,随着菌液浓度的升高,在 J0 和 J1 条件下,苦荞幼苗根系磷含量表现均呈先升高后降低的趋势。在低磷条件下与 CK 相比,J0P2 根系磷含量呈现峰值,较 CK 显著增加 20.53%,苦荞根系磷含量增加从而吸收利用;在 J1 条件下,P2 菌液处理根系磷含量达到最大值,与其余处理组合相比有显著性差异,随着菌液浓度的增大,根系磷含量先增后减,与 CK 相比差异显著,由此可推测,该浓度下的菌液会分解秸秆有机磷,植物吸收后磷含量增加,植株对逆境的抵抗能力有所增强。



图中字母为 Duncan's 多重比较结果, 不同字母表示处理间差异达显著水平 ( $P < 0.05$ ), 下同

The letters in the figure are Duncan's multiple comparison results, different letters indicate significant differences among treatments ( $P < 0.05$ ), the same below

图 1 花域芽孢杆菌 gz4-1 与秸秆配施在低磷胁迫下苦荞幼苗根系活力的变化

Fig. 1 Changes of root activity of tartary buckwheat seedlings with combined application of *Bacillus Floridans* gz4-1 and straw under low phosphorus stress

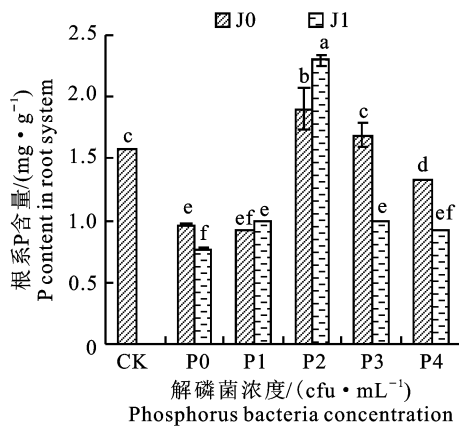


图 2 花域芽孢杆菌 gz4-1 与秸秆配施在低磷胁迫下苦荞幼苗根系磷含量的变化

Fig. 2 Changes of phosphorus content in roots of tartary buckwheat seedlings with combined application of *Bacillus Floridans* gz4-1 and straw under low phosphorus stress

#### 2.4 花域芽孢杆菌 gz4-1 与秸秆配施对低磷胁迫下苦荞幼苗根系酸性磷酸酶活性的影响

酸性磷酸酶是植物和土壤中重要的水解酶, 它也是一种诱导酶, 诱导并分泌酸性磷酸酶是植物应对低磷环境的重要适应性反应之一。植物根系酸性磷酸酶的增加能够水解释放土壤中的有机磷化合物供植物生长。由图 3 可知, 在低磷条件

下, J0P0 根系酸性磷酸酶活性较高, 随着菌液浓度增大, 苦荞幼苗根系酸性磷酸酶活性降低, 且与其余处理组合相比差异显著; 在 J1 条件下, 随着菌液浓度的升高, 酸性磷酸酶活性先升高后降低, 在 P2 浓度下酸性磷酸酶活性达到最大, 说明 P2 浓度的菌悬液对苦荞根系酸性磷酸酶活性有促进作用, 与 CK 相比差异不显著, J0 与 J1 条件相比, J1 的酸性磷酸酶活性水平整体较 J0 高, 说明施用秸秆能显著提高苦荞根系的酸性磷酸酶活性。

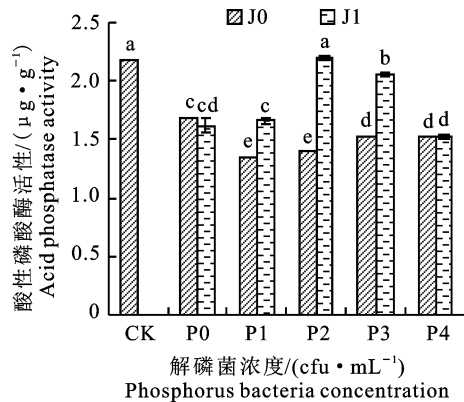


图 3 花域芽孢杆菌 gz4-1 与秸秆配施在低磷胁迫下苦荞幼苗根系酸性磷酸酶活性的变化

Fig. 3 Changes of acid phosphatase activity in roots of tartary buckwheat seedling with combined application of *Bacillus Floridans* gz4-1 and straw under low phosphorus stress

### 3 讨论

在低磷胁迫条件下, 根系最先能感受到胁迫的变化, 是植物生长的重要组成部分<sup>[23]</sup>, 根质量是反映根系生长的重要指标。本研究发现在低磷环境下苦荞苗期根系发育、生理指标以及地上部农艺性状受到明显抑制, 低磷条件下, 苦荞幼苗根系干质量、鲜质量、主根长、表面积比 CK 分别显著降低 63.2%、82.1%、45.8%、62.3%, 地上部农艺性状均下降(茎粗、株高、地上部干质量、鲜质量分别降低 45.1%、9.4%、77.7%、81.7%), 研究结果与杨春婷等<sup>[24]</sup>的研究结果大致一致(低磷胁迫下, 苦荞苗期株高、茎粗、地上部干质量、根系干质量、根系表面积等指标均有所下降), 说明低磷条件抑制苦荞幼苗根系生长以及地上部农艺性状发育, 但低磷环境下苦荞幼苗根系的主根长较正常施磷条件下根长减小, 与杨春婷等<sup>[24]</sup>的结果存在差异(低磷条件下, 苦荞幼苗主根伸长), 造成此差异的原因可能是由于环境等外界因子所致

的试验误差。另外相关结果还与玉米<sup>[23]</sup>和大麦<sup>[25]</sup>中的研究结果存在较大差异(在玉米中,低磷胁迫会显著增加根系长度以应对低磷环境;而在大麦 XZ99 中根系生长和干物质量为了应对低磷胁迫而增加),造成差异的原因可能与试验对象不同有关。对根冠比进行测定后还发现低磷条件下较 CK 有所增大但差异不显著,说明苦荞幼苗通过提高根冠比来实现对低磷胁迫的适应,该结果与沈宏等<sup>[26]</sup>研究结果一致(低磷生境下,作物根冠比增加是作物对逆境的主动适应反应机制),说明低磷条件下根系形态的改变可能是苦荞对低磷逆境的形态适应。杨春婷等<sup>[24]</sup>研究发现苦荞在低磷胁迫下,耐低磷苦荞品种根系活力平均降低 11.77%,不耐低磷苦荞品种根系活力平均下降 21.36%。本研究中低磷胁迫使苦荞幼苗根系活力降低 12.2%,说明根系活力对低磷环境较为敏感,且根系磷含量同 CK 相比降低了 39.0%,由此推测出根系活力的降低导致难溶性磷不能转化为可吸收利用的磷。本研究在低磷条件下植株根系的酸性磷酸酶活性降低,研究结果与杨春婷<sup>[28]</sup>、Gaume 等<sup>[27]</sup>的研究结果不一致(在低磷条件下酸性磷酸酶活性升高是作物应对低磷胁迫的生理反应以适应其生长环境),低磷条件下酸性磷酸酶活性升高从而可以活化出根际中难溶解的磷以增加根际有效磷含量,造成差异的原因可能是由于环境因素而致的试验误差。

在秸秆还田条件下,根系干质量、根系表面积均比低磷环境下长势较好(较低磷环境分别增长了 28.0%、42.3%),但低磷条件下施加秸秆并未达到正常施肥条件下苦荞幼苗根系的生长力(秸秆还田较对照根系干质量、根系表面积分别降低 53.0%、46.3%),该结果与王明达<sup>[29]</sup>在玉米中的研究结果一致(单施秸秆处理较正常施肥的玉米各形态指标均降低)。说明秸秆作为有机肥虽可补偿低磷环境中磷肥的作用,促进苦荞幼苗根系生长,但无法使苦荞根系形态恢复至正常供磷水平。何艳等<sup>[30]</sup>研究结果表明秸秆还田对根系生长的影响表现为前抑后促,抑制分蘖期根系的生长,本研究仅对苗期进行测定相关指标,苗期根系形态指标与 CK 相比,长势较弱可能是由于施加秸秆后苗期抑制了根系生长。在根系活性方面,本研究发现施加秸秆可显著提高根系活力,研究结果与徐国伟等<sup>[31]</sup>在水稻中的研究结果一致,秸秆还田后有利于根系分泌有机酸,根系分泌物中

有机酸总量的增加从而促进根系活力增长。因此本研究推断根系活力的增强可能与苦荞幼苗根系分泌有机酸有关。另外,本研究施加秸秆后根系磷含量与酸性磷酸酶活性显著降低,施加秸秆能提高植株中全磷含量,酸性磷酸酶活性由于磷的增加而降低,分解能力下降,故根系磷含量降低。而战厚强等<sup>[10]</sup>对水稻进行秸秆还田后发现秸秆还田提升了土壤酸性磷酸酶活性和土壤速效磷含量,结果不同的原因可能是因为本试验在低磷环境下进行秸秆还田,试验中条件不一致造成结果不同。

解磷菌作为可活化土壤难溶性磷以及减少磷肥用量和提高磷肥利用率具有重要意义的一类有益微生物,近年来被人们广泛关注。本研究对具有解有机磷特性的花域芽孢杆菌 *gz4-1* 在苦荞栽培过程中的减少磷肥用量效果进行测定后发现,一定浓度菌液对苦荞幼苗生长具有明显促进作用,且综合因素考虑 P2 浓度解磷菌液配施秸秆会使苦荞幼苗根系的鲜质量、干质量、主根长以及苦荞幼苗的茎粗、鲜质量、干质量和叶面积达到正常施肥下苦荞的生长能力,说明苦荞可以通过合理施加解磷细菌配施秸秆来增加根系根长和根系表面积、调整苦荞根系构型由此扩大根系吸收营养物质的能力。该试验结果与朱培森等<sup>[32]</sup>在玉米上的研究结果一致(在低磷条件下,单接解磷细菌就可以促进植物的生长,接种解磷细菌后,玉米的茎粗、株高和鲜质量较低磷对照组显著增加),说明添加解磷细菌对苦荞幼苗茎叶生长有补偿作用。整体而言,中等浓度的花域芽孢杆菌 *gz4-1* 的菌液配施秸秆更能增加土壤中有效磷含量,促进植物对磷更好的吸收利用。另外,本研究还发现添加 P2 解磷菌菌液配施秸秆时苦荞幼苗根系活力显著提高,较 CK 显著增加 114.5%,解磷菌菌液的施加增强了根系活力,同时解磷细菌会分解秸秆中有机磷来增加土壤中磷含量,苦荞抵御逆境的能力增加,但低磷量和高磷量也会对根系活力产生抑制作用,这与徐凤花等<sup>[33]</sup>研究结果相似,说明通过作物秸秆还田可为土壤微生物提供大量新鲜的能源物质,激发解磷菌的活性,且 P2 水平下花域芽孢杆菌 *gz4-1* 的解磷能力更有利于苦荞幼苗生长,有效补偿磷肥的对苦荞幼苗生长的作用,根系活力的提高可以为吸收磷素提供能量供应。有相关研究证明了这一结论,王法威<sup>[34]</sup>通过研究表明配施解磷细菌后植物的根系活力随

着磷水平的增加而增加;蒋欣梅等<sup>[35]</sup>施加解磷细菌肥处理可以显著提高茄子的根系活力,其中每 667 m<sup>2</sup> 施加 1 kg 解磷细菌肥时茄子的根系活力的增幅最大为 35.9%。由此说明解磷细菌可以补偿磷肥的缺失作用,增强植株幼苗根系活力,符合植物对逆境反应的典型特征。

## 4 结论

花域芽孢杆菌 gz4-1 与秸秆配施对低磷胁迫下苦荞幼苗生长发育及抗逆性具有重要影响。施加秸秆并用花域芽孢杆菌 gz4-1 菌液灌根在苦荞栽培过程中具有替代磷肥的作用,低磷条件下,添加 P<sub>2</sub> 浓度的花域芽孢杆菌 gz4-1 菌液可以促进苦荞幼苗生长;在施加秸秆后,最佳菌液施用浓度在 10<sup>6</sup> cfu · mL<sup>-1</sup> 对苦荞促生效果最明显。低磷胁迫下,适宜浓度解磷细菌液(P<sub>2</sub>)通过改变根系的构型,增大根系的面积提高吸收磷素的能力,从而改善苦荞幼苗生长状况,促进苦荞根系和地上部生长。采用配施秸秆的方式能够减少磷肥的施用,提高磷素的利用率,本研究中按照每千克土配施 4 g 秸秆并添加 10<sup>6</sup> cfu · mL<sup>-1</sup> 浓度的花域芽孢杆菌 gz4-1 菌液更有利于苦荞的生长,是培肥地力提高产量的有效措施之一。

本研究结果可为苦荞低磷胁迫下提高土壤中磷的利用率提供理论参考,旨在通过开发高效解磷微生物肥料以减少化学肥料的使用来提高土壤中有效磷的含量,使得解磷微生物肥料能在农业生产中推广应用,促进农业的可持续发展,关于秸秆的用量及秸秆还田条件下的该菌株应用效果还需进一步研究。

## 参考文献 Reference:

- [1] WANG Y, ZHAO X, WANG L, *et al.* Phosphorus fertilization to the wheat-growing season only in a rice-wheat rotation in the Taihu Lake region of China[J]. *Field Crops Research*, 2016, 198: 32-39.
- [2] GUAN G, TU S, LI H, *et al.* Phosphorus fertilization modes affect crop yield, nutrient uptake, and soil biological properties in the rice-wheat cropping system[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2013, 77(1): 166-172.
- [3] VESSEY J K. Plant growth promoting rhizobacteria as biofertilizers[J]. *Plant & Soil*, 2003, 255(2): 571-586.
- [4] 寇长林, 王秋杰, 任丽轩, 等. 小麦和花生利用磷形态差异的研究[J]. *土壤通报*, 1999, 30(4): 6-5.  
KOU CH L, WANG Q J, REN L X, *et al.* Study on the difference of phosphorus forms between wheat and peanut [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 1999, 30(4): 6-5.
- [5] 李豆豆, 尚双华, 韩巍, 等. 一株高效解磷真菌新菌株的筛选鉴定及解磷特性[J]. *应用生态学报*, 2019, 30(7): 2384-2392.  
LI D D, SHANG SH H, HAN W, *et al.* Screening, identification, and phosphate solubilizing characteristics of a new efficient phosphate solubilizing fungus[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, 30(7): 2384-2392.
- [6] MAHDI I, FAHSI N, HAFIDI M, *et al.* Plant growth enhancement using rhizospheric halotolerant phosphate solubilizing bacterium bacillus licheniformis QA1 and enterobacter asburiae QF11 isolated from *Chenopodium quinoa* Willd[J]. *Microorganisms*, 2020, 8(6): 948.
- [7] 潘剑玲, 代万安, 尚占环, 等. 秸秆还田对土壤有机质和氮素有效性影响及机制研究进展[J]. *中国生态农业学报*, 2013, 21(5): 526-535.  
PAN J L, DAI W A, SHANG ZH H, *et al.* Review of research progress on the influence and mechanism of field straw residue incorporation on soil organic matter and nitrogen availability[J]. *Chinese Journal of Eco Agriculture*, 2013, 21(5): 526-535.
- [8] 韩晓飞, 谢德体, 高明, 等. 减磷配施有机肥对水旱轮作紫色水稻土磷素淋失的消减效应[J]. *生态学报*, 2017, 37(10): 3525-3532.  
HAN X F, XIE D T, GAO M, *et al.* Effects of reduced-phosphorus fertilizer and combinations of organic fertilizers on phosphorus leaching in purple paddy soil with conventional paddy-upland rotation tillage[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(10): 3525-3532.
- [9] 杨巍. 秸秆改良材料对沙质土壤磷的活化作用及供磷特征的影响[D]. 重庆: 西南大学, 2010.  
YANG W. Effects of straw improved material on activation and supplying character of phosphorus in sandy soil[D]. Chongqing: Southwest University, 2010.
- [10] 战厚强, 颜双双, 王家睿, 等. 水稻秸秆还田对土壤磷酸酶活性及速效磷含量的影响[J]. *作物杂志*, 2015(2): 78-83.  
ZHAN H Q, YAN SH SH, WANG J R, *et al.* Effects of rice straw returning on activities of soil phosphatase and available P values in soil[J]. *Crops*, 2015(2): 78-83.
- [11] 黄少辉, 杨军芳, 刘学彤, 等. 小麦长期秸秆还田对壤质潮土磷素含量及磷盈亏的影响[J/OL]. *作物杂志*: 1-8 [2020-12-04]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1808.S.20201023.1343.004.html>.  
HUANG SH H, YANG J F, LIU X T, *et al.* Effects of wheat long-term straw returning to soil phosphorus content and phosphorus balance in loamy tidal soil[J/OL]. *Crop*, 1-8 [2020-12-04].

- tail/11.1808.S.20201023.1343.004.html.
- [12] FINK J R, INDA A V, BAYER C, *et al.* Mineralogy and phosphorus adsorption in soils of south and central-west Brazil under conventional and no-tillage systems[J]. *Acta Scientiarum Agronomy*, 2014, 36(3): 379-387.
- [13] REDDY D D, KUSHWAHA S, SRIVASTAVA S, *et al.* Long-term wheat residue management and supplementary nutrient input effects on phosphorus fractions and adsorption behavior in a vertisol[J]. *Communications in Soil Science & Plant Analysis*, 2014, 45(4): 541-554.
- [14] GANDHI A, MURALIDHARAN G, SUDHAKAR E. Isolation and identification of elite phosphate solubilizing bacteria from soil under paddy cultivation[J]. *International Letters of Natural Sciences*, 2013, 11(1): 62-68.
- [15] HAN Y, WANG C, LI X, *et al.* Isolation and identification of saline tolerance phosphate-solubilizing bacteria derived from salt-affected soils and their mechanisms of p-solubilizing[J]. *Lecture Notes in Electrical Engineering*, 2014, 250: 1259-1266.
- [16] SUDEWI S, ALA A, PATANDJENGI B, *et al.* Isolation of phosphate solubilizing bacteria from the rhizosphere of local aromatic rice in bada valley central sulawesi, indonesia[J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2020, 575(1): 012017.
- [17] 刘明, 张爱君, 陈晓光, 等. 秸秆还田配施化肥对土壤肥力及鲜食甘薯产量和品质的影响[J]. *应用生态学报*, 2020, 31(10): 3445-3452.
- LIU M, ZHANG A J, CHEN X G, *et al.* Effects of straw returning combined with chemical fertilizer on soil fertility and yield and quality of fresh sweet potato[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, 31(10): 3445-3452.
- [18] 张雄, 王立祥, 柴岩, 等. 小杂粮生产可持续发展探讨[J]. *中国农业科学*, 2003, 36(12): 1595-1598.
- ZHANG X, WANG L X, CHAI Y, *et al.* Sustainable development of minor food crops in China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2003, 36(12): 1595-1598.
- [19] 张余, 黄小燕, 刘昌敏, 等. 苦荞营养保健成分及其食品开发研究进展与展望[J]. *粮食与油脂*, 2019, 32(8): 12-14.
- ZHANG Y, HUANG X Y, LIU CH M, *et al.* Research progress and prospect on nutritional and healthful components of tartary buckwheat and its food development[J]. *Cereals & Oils*, 2019, 32(8): 12-14.
- [20] 张志良, 瞿伟菁, 李小方. 植物生理学实验指导[M]. 第4版. 北京: 高等教育出版社, 2009: 30.
- ZHANG ZH L, QU W J, LI X F. Experimental Guidance for Plant Physiology[M]. 4th ed. Beijing: Higher Education Press, 2009: 30.
- [21] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 第3版. 北京: 中国农业出版社, 2000: 284.
- BAO SH D. Soil Agrochemical Analysis[M]. 3ed ed. Beijing: China Agriculture Press, 2000: 284.
- [22] 李莹飞, 耿玉清, 周红娟, 等. 基于不同方法测定土壤酸性磷酸酶活性的比较[J]. *中国生态农业学报*, 2016, 24(1): 98-104.
- LI Y F, GENG Y Q, ZHOU H J, *et al.* Comparison of soil acid phosphatase activity determined by different methods[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2016, 24(1): 98-104.
- [23] ZHU J, ZHANG C, LYNCH J P. The utility of phenotypic plasticity of root hair length for phosphorus acquisition[J]. *Functional Plant Biology*, 2010, 37(4): 313-322.
- [24] 杨春婷, 张永清, 董璐, 等. 不同基因型苦荞幼苗对低磷胁迫的响应[J]. *植物科学学报*, 2018, 36(6): 859-867.
- YANG CH T, ZHANG Y Q, DONG L, *et al.* Responses of different genotype *Fagopyrum tataricum* seedlings to low phosphorus stress[J]. *Plant Science Journal*, 2018, 36(6): 859-867.
- [25] NADIRA U A, AHMED I M, ZENG J, *et al.* The changes in physiological and biochemical traits of Tibetan wild and cultivated barley in response to low phosphorus stress[J]. *Soil Science & Plant Nutrition*, 2014, 60(6): 832-842.
- [26] 沈宏, 施卫明, 王校常, 等. 不同作物对低磷胁迫的适应机理研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2001, 7(2): 172-177, 210.
- SHEN H, SHI W M, WANG X CH, *et al.* Study on adaptation mechanism of different crops to low phosphorus stress[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2001, 7(2): 172-177, 210.
- [27] GAUME A, MCHLER F, CARLOS DE LEN, *et al.* Low-P tolerance by maize (*Zea mays* L.) genotypes: Significance of root growth, and organic acids and acid phosphatase root exudation[J]. *Plant & Soil* 2001, 228: 253-264.
- [28] 杨春婷. 苦荞耐低磷基因型筛选及其适应机制的研究[D]. 山西临汾: 山西师范大学, 2019.
- YANG CH T. Screening and identifying of tolerance genotype *Fagopyrum tataricum* and the mechanism of adapting to low phosphorus stress environment[D]. Linfen Shanxi: Shanxi Normal University, 2019.
- [29] 王明达. 秸秆还田方式与化肥配施对玉米生长及土壤养分的影响[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2017.
- WANG M D. Effects of straw returning and fertilizer application on maize growth and brown soil nutrients[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2017.
- [30] 何艳, 严田蓉, 郭长春, 等. 秸秆还田与栽插方式对水稻根系生长及产量的影响[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(7):



- 105-114.
- HE Y, YAN T R, GUO CH CH, *et al*, Effect of methods of straw returning and planting on root growth and rice yield[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019, 35(7): 105-114.
- [31] 徐国伟, 李 帅, 赵永芳, 等. 秸秆还田与施氮对水稻根系分泌物及氮素利用的影响研究[J]. *草业学报*, 2014, 23(2): 140-146.
- XU G W, LI SH, ZHAO Y F, *et al*, Effects of straw returning and nitrogen fertilizer application on root secretion and nitrogen utilization of rice[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2014, 23(2): 140-146.
- [32] 朱培森, 杨兴明, 徐阳春, 等. 高效解磷细菌的筛选及其对玉米苗期生长的促进作用[J]. *应用生态学报*, 2007, 18(1): 107-112.
- ZHU P M, YANG X M, XU Y CH, *et al*, High effective phosphorus-solubilizing bacteria; their isolation and promoting effect on corn seedling growth[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18(1): 107-112.
- [33] 徐凤花, 刘永春. 秸秆还田的增磷作用及对植株全磷含量干物质积累的影响[J]. *黑龙江八一农垦大学学报*, 1997, 9(3): 1-5.
- XU F H, LIU Y CH. The function of improving phosphate level and the effect of increasing phosphate level or adding dry materials of plant by returning straw to soil directly [J]. *Journal of Heilongjiang August First Land Reclamation University*, 1997, 9(3): 1-5.
- [34] 王法威. A9 解磷细菌解磷机制及其对潜在缺磷石灰性土壤上大豆生长的影响研究[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2013.
- WANG F W. A9 Phosphate-solubilizing bacteria dissolving mechanism and its impact on soybean growth on potential phosphorus deficiency on calcareous soil [D]. Yangling Shaanxi: Northwest A&F University, 2013.
- [35] 蒋欣梅, 夏秀华, 于锡宏, 等. 微生物解磷菌肥对大棚茄子生长及土壤有效磷利用的影响[J]. *浙江大学学报(理学版)*, 2012, 39(6): 685-688.
- JIANG X M, XIA X H, YU X H, *et al*. Effect of phosphorus-dissolving microbes fertilizer on growth of eggplant and utilization of available phosphorus in soil in the vinyl tunnel[J]. *Journal of Zhejiang University (Science Edition)*, 2012, 39(6): 685-688.

## Effects of Combined Application of Phosphate-Solubilizing Bacteria with Straw Application on Growth and Development of Tartary Buckwheat Seedlings under Low Phosphorus Stress

HAO Yani<sup>1</sup>, PEI Hongbin<sup>1,2</sup>, GAO Zhenfeng<sup>3</sup> and WANG Li<sup>1</sup>

(1. College of Life Sciences, Shanxi Normal University, Linfen Shanxi 041004, China; 2. College of Modern Arts and Sciences, Shanxi Normal University, Linfen Shanxi 041004, China; 3. Research Institute of Agricultural Products Storage and Preservation, Shanxi Agricultural University (Shanxi Academy of Agricultural Sciences), Taiyuan 030031, China)

**Abstract** In order to understand the effect of combined application of *Bacillus Floridans* gz4-1 and straw on the growth and development of tartary buckwheat seedlings, taking ‘Diqing’ tartary buckwheat as material in 2019, using normal fertilization as control (CK), two factors combined treatment of straw [0 g · kg<sup>-1</sup> soil (J0), 4 g · kg<sup>-1</sup> soil (J1)] and bacterial liquid concentration [0 (P0), 10<sup>4</sup> (P1), 10<sup>6</sup> (P2), 10<sup>8</sup> (P3), 10<sup>10</sup> (P4) cfu · mL<sup>-1</sup>] were set in this paper. A pot experiment was conducted to investigate the effects of combined application of *Bacillus Floridans* gz4-1 and straw on root and shoot morphology and physiological characteristics of tartary buckwheat seedlings. The results showed that: (1) The combined application of *Bacillus Floridans* gz4-1 and straw promoted the root surface area and root shoot ratio of tartary buckwheat root fresh mass, dry mass, taproot length and root shoot ratio. The taproot length of seedlings was the highest under J0P2 treatment, which significantly increased by 12.1% compared with CK. The root surface area and root shoot ratio were both the highest under J1P1 treatment, which significantly increased by 115.6% and 103.3% compared with CK. (2) The combined application of *Bacillus Floridans* gz4-1 and straw promoted the stem diameter, plant height, fresh mass, dry mass and node number of tartary buckwheat seedlings, the plant height and node number were the highest under the treatment of J1P3, which were 43.6% and 33.3% higher than CK. (3) With the increase of bacterial solution concentration, root activity and root P content of tartary buckwheat seedlings increased firstly and then decreased, and reached the highest value under P2 concentration. Under low phosphorus cultivation (J0) condition, root acid phosphatase activity decreased, and under condition of straw returning to field (J1), root acid phosphatase activity reached the peak value under P2 concentration. That *Bacillus Floridans* gz4-1 and straw could improve root activity, root physiological function by changing the buckwheat seedling morphology and root architecture, finally, its effect on the buckwheat seedling growth was improved. Comprehensively, under treatment of 10<sup>6</sup> cfu · mL<sup>-1</sup> (P2) bacteria liquid concentrations, combined application of straw had the greatest growth-promoting effect on tartary buckwheat seedlings.

**Key words** Tartary buckwheat; *Bacillus Floridans* gz4-1; Low phosphorus stress; Straw; Phosphorus absorption

**Received** 2021-01-24

**Returned** 2021-03-20

**Foundation item** Basic Research Project of College of Modern College of Arts and Science of Shanxi Normal University(No. 2020JCYJ17).

**First author** HAO Yani, female, master student. Research area: plant physiological ecology. E-mail: hyni0120@126.com

**Corresponding author** PEI Hongbin, female, associate professor, master supervisor. Research area: plant physiological ecology. E-mail: bbpei65110@163.com

(责任编辑:潘学燕 **Responsible editor: PAN Xueyan**)