

罗心诚,王 麒,张丁月,等. 解磷菌的分离及其在稻虾综合种养中的应用[J]. 江苏农业科学,2022,50(24):205–211.

doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2022.24.031

解磷菌的分离及其在稻虾综合种养中的应用

罗心诚¹, 王 麒¹, 张丁月³, 黄裕鸿¹, 康忠翠¹, 石晓媛¹, 朱建强^{1,2}, 杨亚珍^{1,2}

(1. 长江大学生命科学学院, 湖北荆州 434025; 2. 湿地生态与农业利用教育部工程研究中心, 湖北荆州 434025;

3. 江苏沿海地区农业科学研究所, 江苏盐城 224002)

摘要:为探讨在稻虾综合养的特殊农业生态模式中,施加生物菌剂能否提升水稻的耐淹性和产量,采用解磷性选择培养基,从有机大豆田中筛选出高效解磷性细菌,经 16S rDNA 序列分析,确定出所选解磷细菌 P6 菌株的分类地位,将菌株 P6 和对比菌株制成生物菌剂后,分别追施在盆栽水稻根系周围和稻虾共养田里,观察菌剂对水稻生长、土壤肥力以及克氏原螯虾生长的影响。盆栽试验结果表明,P6 菌株为芽孢杆菌属,该菌可使水稻的净光合速率提高 8.78%;穗、茎、叶的干物质量分别增加 19.05%、21.39%、19.93%;产量提升 21.34%。施用该细菌水稻土中全氮(TN)、全磷(TP)、全钾(TK)以及碱解 N、速效 P、速效 K、有机质的含量均有显著提升,分别增高 15.70%、12.39%、12.23%、12.20%、21.05%、16.84%、5.07%。大田试验结果表明,P6 菌株可提高水稻千粒质量和产量,但 P6 与市售解磷性蜡状芽孢杆菌共同使用增产效果较好,较对照组增产 1.34%。菌 P6 与市售解磷性蜡状芽孢杆菌共同使用可明显促进克氏原螯虾的生长和提高产量,与对照组相比,每尾虾的鲜质量、体长、单位面积产量分别增加 7.61%、8.22%、6.40%。研究表明,施用解磷性生物菌剂能够促进水稻干物质累积,增加籽粒产量,有利于提高水稻的光合速率、改善土壤肥力、增强水稻根部的耐淹能力,为稻虾体系提高水稻产量提供理论依据。

关键词:解磷菌;水稻生长;土壤肥力;稻虾种养

中图分类号:S511.06;S182 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2022)24-0205-07

稻虾综合种养生态农业因其具有“一水两用、一田双收”,既节约空间又能实现粮渔共赢的特点^[1],在我国长江中下游平原区域和沿淮地区发展非常迅速。但稻虾综合种养过程中,农民过度关注克氏原螯虾养殖效益而忽视水稻生产,失去了稻虾共生、稳粮增效的意义^[2]。水稻虽属沼泽作物,有较强的耐涝能力,但稻虾共养过程中水稻长期遭受深水灌、加之晒田不充分,根系长期处于水淹低氧环境中,导致根系活力和生长速率降低,最终影响到水稻的产量和品质^[3],甚至加重水稻稻瘟病以及白叶枯病发生^[4]。蔺万煌等研究表明,淹水使水稻叶片萎缩,下部叶片枯黄,绿叶面积缩减,严重影

响后期物质积累,千粒质量下降^[5]。王振省等研究发现,分蘖期受淹 3~7 d 时,水稻不定根数、根直径和根体积等均会下降^[6]。受淹水稻的无氧呼吸会消耗根系光合作用产物,造成糖类物质减少,而缺少糖类和氧气又会导致根系对矿质养分吸收的减少或使细胞液向外渗透^[7]。

磷肥是水稻的主要肥料投放之一,具有促进水稻分蘖和增产增收的积极作用^[8]。Reddy 等研究显示,施氮^[9]和施磷^[10-11]可以提高水稻植株的初始活力,使其在生长后期具有更好的耐淹性。但在稻虾共养系统下,施入过量的磷肥会对克氏原螯虾的生长造成危害。为了解决磷肥对水稻生长的促进作用与对克氏原螯虾生长的危害作用之间的矛盾,研究者拟筛选既能促进水稻生长又不影响克氏原螯虾生长的解磷型生物菌剂^[12],来代替化学磷肥的使用。

解磷菌是一类能够将土壤中难溶解性磷元素转化为可被植物吸收利用的可溶解性磷盐的微生物。因其具有改善土壤理化性质、提高植物对营养的吸收利用率^[13]、提高土壤肥力和改善作物品质^[14]的特性。人们已经将其制成有活体微生物的菌剂,广泛应用于农业生产中。1935 年蒙基娜分离

收稿日期:2022-02-27

基金项目:湖北省生态循环农业创新体系项目(编号:2018skjcx01);
湿地生态与农业利用教育部工程研究中心开发基金(编号:
KFT201904);稻虾共作田微生物水质改良剂的研发(编号:
2018296);稻虾综合种养专用解磷型生物菌肥的研制及其解磷机
制研究(2019278)。

作者简介:罗心诚(1999—),女,广西贵港人,硕士研究生,从事有益
微生物资源的开发与利用研究。E-mail:2447516125@qq.com。

通信作者:杨亚珍,博士,副教授,从事有益微生物资源的开发与利用
研究。E-mail:349158584@qq.com。

出 1 株可分解核酸和卵磷脂的解磷菌,经鉴定其为巨大芽孢杆菌,发现将其施入土壤中可提高土壤中速效磷浓度,于 1947 年得到大量生产应用^[15]。张炳火等研究发现,解磷放线菌能够分泌植物所需的生长调节物质,加入其制作成的菌剂可以促进白菜种子的萌发、株高等生理指标^[16]。朱培森等研究证明,筛选的解磷菌株可促进磷肥的合理施用,使小麦产量提升 12.31%^[17]。李丽等的研究表明,施加微生物菌剂对水稻的增产作用较为明显,可使水稻产量提高 1.84%~14.90%^[18-20]。然而,施加生物菌剂是否可以提高稻虾共养体系中水稻的耐淹性,进而提升水稻产量,目前还没有明确的定论。在此背景下,本试验拟采用具有解磷作用的微生物菌剂来代替外加磷肥的投入,以期明确稻虾共养体系下,生物菌剂对水稻生长、产量提高、土壤肥力改善的积极作用。该研究可为稻虾综合种养科学施肥以及提高水稻产量提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料 and 设计

1.1.1 试验材料 水稻品种选用丰两优香 1 号。解磷细菌 P6 分离自湖北省石首市小河口村有机大豆田,解磷性蜡状芽孢杆菌、解磷性印度梨形孢真菌由长江大学生命科学学院提供,生物菌剂由笔者所在团队研制。

1.1.2 盆栽试验设计 本次水稻盆栽试验于 2020 年 6—9 月在长江大学农学院试验基地内完成。试验用土为当地水稻土,土壤经风干、碾压、过筛后装入盆钵。供试盆钵为红色塑料桶,内径 33 cm,高 35 cm,每盆装风干土 20 kg。水稻移栽前施底肥 600 kg/hm²,底肥为有机无机复混肥(有机质≥20%,N、P₂O₅O、K₂O 含量为 16%、6%、8%),在分蘖期前追施不同的生物菌剂。试验共设 5 个处理(表 1),每盆生物菌剂用量为 20 mL,生物菌剂细菌或真菌孢子的浓度为 1×10⁸ CFU/mL。每处理 5 盆,每盆 4 穴,每穴 1 株水稻。

盆栽试验水分管理模拟稻虾综合种养田水分管理策略,插秧水层深度 0~2 cm,返青至分蘖水深 0~2 cm,分蘖期水层 6~9 cm,晒田期 3~5 d,拔节至孕穗期水层 6~12 cm,抽穗至开花水层 5~10 cm,盛夏高温期水层 15~20 cm,灌浆至乳熟水层 5~10 cm,黄熟期后排水落干后 5 d 收获。

1.1.3 田间试验设计 稻虾共养试验在湖北省荆

表 1 不同处理施肥和添加生物菌剂方式

处理	复混肥 (g/盆)	生物菌剂(分蘖期施用, 用量均为 20 mL/盆)	尿素 (g/盆)
A	10.6	蒸馏水	2.09
B	10.6	解磷性印度梨形孢真菌	2.09
C	10.6	解磷细菌 P6	2.09
D	10.6	解磷细菌 P6 + 市售解磷性蜡状芽孢杆菌	2.09
E	10.6	市售解磷性蜡状芽孢杆菌	2.09

州市长江大学试验基地内进行。水稻在 2020 年 4 月 3 日插秧,虾苗在 2020 年 3 月 15 日投放。本次试验在投苗后 10 d(2020 年 3 月 25 日)开始进行,试验共选取 5 个田块,设 5 个处理。处理 A:向环沟均匀撒播无菌基质(CK);处理 B:撒播解磷性印度梨形孢真菌菌肥;处理 C:撒播解磷性细菌 P6 菌肥;处理 D:撒播解磷性细菌 P6 菌肥 + 市售解磷性蜡状芽孢杆菌菌肥;处理 E:撒播市售解磷性蜡状芽孢杆菌菌肥。每处理田块可用面积为 667 m²,环沟面积占总使用面积的 10%。每处理撒播菌肥 30 kg/hm²,菌肥中菌剂浓度为 1×10⁸ CFU/g。投苗密度为 375 kg/hm²。饲料投放量为克氏原螯虾质量的 3%,投放方式为虾沟定点投放。水肥管理同其他大田正常管理。

1.2 试验方法

1.2.1 细菌菌株的分离筛选及 16S rDNA 序列鉴定

取有机大豆根际土壤,采用稀释涂布法将土壤稀释液涂布于解磷固体培养基上,30℃恒温培养 3~7 d,根据菌落圈径比 H:D(透明圈直径 H,菌体直径 D)大小来筛选高效解磷菌。取最大圈径比的解磷细菌 P6 菌株进行分子鉴定,按照细菌基因组 DNA 提取试剂盒说明方法提取分离菌株的总 DNA,以其为模板进行 PCR 扩增。PCR 反应完成后采用 DNA 纯化回收试剂盒纯化回收 16S rDNA 产物,送至生工生物工程(上海)股份有限公司测序。将所得 16S rDNA 序列在 NCBI 的 GenBank/Blast 中进行同源性比对分析,通过 MEGA 7.0 软件采用邻接法(neighbour-joining method)构建系统发育树。

1.2.2 盆栽试验测定指标及方法 分别在水稻分蘖期、抽穗期和黄熟期取样测定株高;有效分蘖数在水稻分蘖期测定,每处理测量 10 株,取平均值。

相对叶绿素含量(SPAD 值)采用 SPAD-502PLUS 叶绿素仪进行测定,每个处理进行 15 个重复,取平均值。净光合速率(P_n)采用 LI-6400 便携式光合测定仪(美国 LICOR 公司)进行测定。气

孔导度(G_s)、胞间 CO_2 浓度(C_i)、蒸腾速率(T_r)均由仪器自动给出。

产量及产量构成在水稻成熟期测定,单独统计每盆 4 穴水稻有效穗,取平均值作为该盆的有效穗;然后将 4 穴一起收获,采用水漂法测定各盆水稻的结实率;并统计每盆的千粒质量;每盆水稻脱粒后晒干除杂称质量,作为每盆的实际产量;植株干物质质量测定时每处理取 5 株水稻,将其叶、茎和穗部分装于纸袋中,于烘箱中 $105\text{ }^{\circ}\text{C}$ 杀青 0.5 h 后, $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 烘干至恒质量,待冷却至室温后称量并记作干物质质量。

土壤全氮(TN)、全磷(TP)、全钾(TK)、碱解 N、速效 P、速效 K 含量测定;TN 含量采用凯氏半微量蒸馏法测定;TP 含量采用硫酸高氯酸消煮-钼锑抗比色法测定;TK 含量采用硫酸高氯酸消煮-火焰分光光度计测定;土壤碱解 N 采用碱解-扩散法测定;土壤速效 P 含量采用碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法测定;土壤速效 K 采用乙酸铵-火焰光度计分析法^[21]测定。

1.2.3 大田试验测定指标及方法 田间试验分别测定水稻分蘖、干物质质量、千粒质量和产量,测定方法参照盆栽试验。

克氏原螯虾生长指标测定在撒播菌肥后 30 d 进行,每个试验组随机捕捞 40 尾虾,记录每尾虾的鲜质量、体长、单位面积捕捞实际产量。

1.3 数据统计分析

试验数据采用 Microsoft Excel 2010、SPSS 19.0

等软件进行统计、差异显著性分析和 Sigmaplot 作图。

2 结果与分析

2.1 细菌菌株的分离筛选及 16S rDNA 序列鉴定

将土壤悬液接种于解磷培养基上,经分离、纯化,筛选出圈径比较高的解磷菌株 6 株,分离得到的 6 株解磷菌的菌落直径在 $5.3\sim 6.2\text{ mm}$ 之间,形状均为圆形,表面光滑;颜色为蜡白和纯白;边缘整齐,也有呈锯齿状;菌落表面突起和平坦 2 种(表 2),经测量得 P6 菌株圈径比最大,为 2.81。

表 2 解磷菌菌落圈径比

菌株	菌落直径 (mm)	溶磷圈直径 (mm)	圈径比
P1	6.2	11.7	1.89
P2	5.8	16.1	2.78
P3	5.3	13.8	2.60
P4	5.8	11.6	2.00
P5	5.7	11.3	1.98
P6	5.9	16.6	2.81

通过 NCBI 的 GenBank DNA 数据库进行 BLAST 同源性比较,选择与 P6 菌株 16S rDNA 源性较近的比对序列,再通过 MEGA 7.0 软件构建系统发育树(图 1)。P6 菌株(S00965 J1)与 *Bacillus proteolyticus* strain A56 和 *Bacillus cereus* strain WJH 处于同一分支上,表明三者的亲缘关系较近,为芽孢杆菌属。

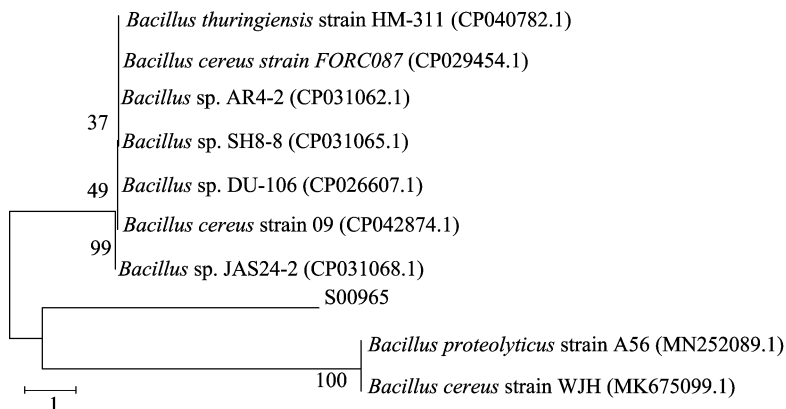


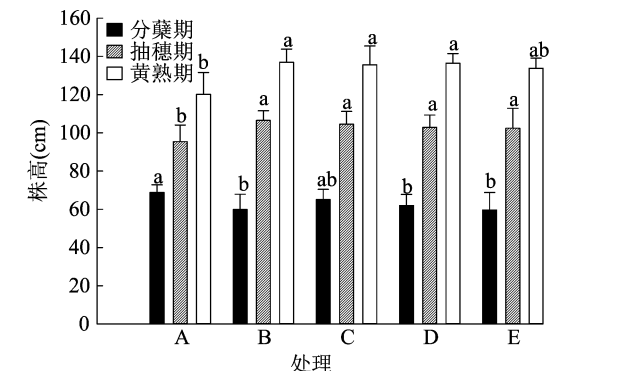
图1 构建解磷细菌 P6(S00965 J1)菌株系统发育树

2.2 不同菌剂处理对盆栽水稻植株生长及产量的影响

2.2.1 不同菌剂处理对水稻株高的影响 株高是反映植物株型的一个指标。由图 2 可知,在水稻分

蘖期前追施生物菌剂,分蘖期株高明显低于 CK,加入印度梨形孢的 B 处理和加入解磷性细菌和市售蜡状芽孢杆菌的 D 处理以及加入市售蜡状芽孢杆菌的 E 处理株高分别降低 12.98%、9.935%、

13.39%。但植株进入抽穗期和黄熟期,加菌剂各组株高显著高于CK。B、C、D、E 处理组与对照组 A 相比,抽穗期株高分别增长 11.66%、9.49%、7.85%、7.38%;黄熟期株高分别升高 12.27%、12.86%、13.54%、11.34%。



柱上不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。图 3、图 4 同图2 不同菌剂处理对水稻不同生育时期株高的影响

2.2.2 不同菌剂处理对水稻有效分蘖数的影响
分蘖是水稻苗是否健壮生长的重要标志,提高水稻有效分蘖数量对提高产量有着重要的意义。由图 3 可知,在分蘖期前施加生物菌剂的各处理组,与对照组 A 相比,水稻的有效分蘖数均有小幅度减少,但与空白对照组间差异不显著。

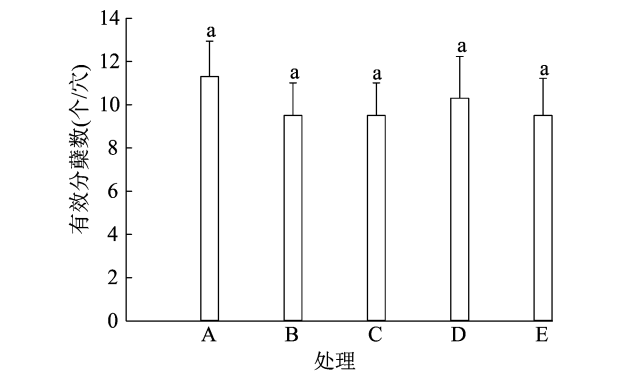


图3 不同菌剂处理对水稻有效分蘖的影响

2.2.3 不同菌剂处理对水稻各部分干物质质量的影响
通过表 3 分析可知,施加生物菌剂均会增加水稻穗、茎、叶的干物质量,与对照组 A 相比差异显著。其中 C 处理与对照组 A 相比较增幅最大,分别达到了 19.05%、21.39%、19.93%。

2.2.4 不同菌剂处理对水稻产量的影响
水稻产量受到水稻结实率、千粒质量、每株有效穗数等的影响。由表 4 可知,在分蘖期前施加生物菌剂处理的水稻穗长均明显大于对照组 A,但不同生物菌剂间差异不显著。分蘖期前施加解磷性细菌的 C 处理能显著增加水稻的有效穗数,与对照组 A 相比较

表 3 不同生物菌剂处理对水稻各部分干物质的量的影响			
处理	干物质量(g/株)		
	穗	茎	叶
A	26.66c	23.14b	8.23b
B	31.28a	27.88a	9.53a
C	31.74a	28.09a	9.87a
D	30.01b	27.81a	9.21b
E	29.82b	26.75a	9.45a

注:同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。表 4 至表 7 同。

提升了 13.93%。加入生物菌剂不能提高水稻的结实率。在分蘖期前施加生物菌剂均能显著提高水稻的千粒质量,尤其是 C 处理组对水稻的千粒质量提升作用最大,与空白对照组 A 相比千粒质量提高 4.2%。分蘖期前施加生物菌剂的处理 C、B、E 与对照组 A 相比较能显著提高水稻的每株实际产量和总产量。其中分蘖期前施加解磷性细菌的 C 处理对水稻增产作用最为明显,与对照组 A 相比总产量提高了 20.50%,分蘖期施加印度梨形孢的 B 处理增产效应次之,与对照组 A 相比总产量提高了 12.20%。

表 4 不同菌剂处理对水稻产量的影响					
处理	穗长(cm)	每株有效穗数(穗/株)	结实率(%)	千粒质量(g)	每株实际产量(g)
A	25.84b	8.8b	81.41a	25.00b	29.66b
B	27.74a	5.6c	75.36b	25.73a	33.28a
C	29.44a	9.8a	78.10a	26.05a	35.74a
D	27.74a	8.4b	79.57a	25.66a	32.01a
E	26.58a	6.0c	82.34a	25.62a	31.82b

2.3 不同菌剂处理对盆栽水稻植株叶片光合作用和叶绿素含量的影响

2.3.1 不同菌剂处理对叶片光合作用的影响
光合作用是水稻转化光能和自身各物质积累最主要的生理活动。从表 5 可以看出,分蘖期前施加解磷性细菌的 C 处理相比对照组 A 显著提升了净光合速率、气孔导度和蒸腾速率,3 项指标的分别增加 8.78%、19.05%、17.70%。其他施加生物菌剂的处理与对照组相比较对水稻的净光合速率、气孔导度、蒸腾速率影响差异并不明显。

2.3.2 不同处理对水稻不同时期叶绿素含量的影响
叶绿素是高等植物进行光合作用的主要色素,在光反应中起着吸收、传递和转换光能的作用。叶绿素仪测定的 SPAD 值反映植物叶绿素相对含量,

表 5 不同菌剂处理对叶片净光合速率的影响

处理	净光合速率 [$\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]	气孔导度 [$\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]	胞间 CO_2 浓度 ($\mu\text{mol}/\text{mol}$)	蒸腾速率 [$\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]
A	$19.81 \pm 1.34\text{b}$	$0.42 \pm 0.07\text{b}$	$239.93 \pm 10.09\text{a}$	$7.12 \pm 0.70\text{b}$
B	$19.94 \pm 1.73\text{b}$	$0.42 \pm 0.07\text{b}$	$237.39 \pm 11.79\text{a}$	$7.36 \pm 0.58\text{b}$
C	$21.55 \pm 2.20\text{a}$	$0.50 \pm 0.07\text{a}$	$243.57 \pm 5.90\text{a}$	$8.38 \pm 0.66\text{a}$
D	$20.00 \pm 1.40\text{b}$	$0.43 \pm 0.01\text{b}$	$235.72 \pm 12.83\text{a}$	$7.37 \pm 0.38\text{b}$
E	$19.56 \pm 1.39\text{b}$	$0.42 \pm 0.06\text{b}$	$240.68 \pm 10.39\text{a}$	$7.24 \pm 0.50\text{b}$

而 SPAD 值与含氮量有一定比例关系,SPAD 值偏高,说明植物氮含量偏高,则不需要施氮肥;SPAD 值偏低,说明氮含量偏低,应适当增施氮肥。由图 4 可知,分蘖期前施加生物菌剂对水稻分蘖期和抽穗期的叶绿素含量(SPAD 值)无显著影响,但能显著增加黄熟期的叶绿素含量,其中施加印度梨形孢的 B 处理黄熟期叶绿素含量增幅最大,为 32.91%。

2.4 不同菌剂处理对盆栽土壤养分含量的影响

由表 6 可知,施加生物菌剂可明显提高土壤 TN、TP、TK 以及碱解 N、速效 P、速效 K、有机质的含量。其中 C 处理对土壤 TN、TP、TK 以及碱解 N、速效 P、速效 K、有机质的含量增幅最大,增幅分别为

15.70%、12.39%、12.23%、12.20%、21.05%、16.84%、5.07%。

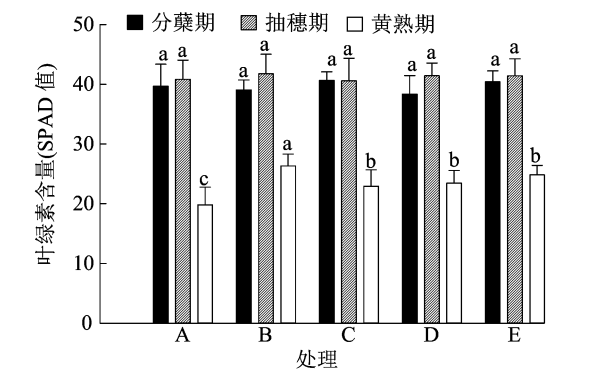


图4 不同菌剂处理对水稻不同生育时期叶绿素含量的影响

表 6 不同菌剂处理对土壤全量养分以及速效养分和有机质含量的影响

处理	TN 含量 (g/kg)	TP 含量 (g/kg)	TK 含量 (g/kg)	碱解 N 含量 (mg/kg)	速效 P 含量 (mg/kg)	速效 K 含量 (mg/kg)	有机质含量 (g/kg)
初始土	1.61d	2.04c	13.18c	89.35c	9.92c	96.42d	17.06c
A	1.72c	2.18b	14.23b	98.26b	10.45c	102.77c	17.34b
B	1.90b	2.36a	14.76b	108.24a	11.72b	113.06b	17.98a
C	1.99a	2.45a	15.97a	110.25a	12.65a	120.08a	18.22a
D	1.85b	2.39a	14.82b	106.01a	12.28a	108.42b	18.12a
E	1.83b	2.40a	15.21a	104.72a	11.93b	123.63a	18.16a

2.5 田间试验结果

2.5.1 不同菌剂处理对田间水稻生长的影响 由表 7 可知,在稻虾共作系统中,施用 4 种生物菌剂处理的水稻干物质质量略高于对照组,其中施加市售解磷性蜡状芽孢杆菌的 E 处理组,干物质质量提高最大,较对照组增加了 6.34%;施用 4 种生物菌剂能明显高于水稻的千粒质量,尤其是解磷细菌 P6 与市售解磷性蜡状芽孢杆菌共同使用的 D 处理组,其千粒质量增加最为明显,较对照组显著提高 10.34%;施用 4 种生物菌剂能在一定程度上提高水稻产量,其中解磷细菌 P6 与市售解磷性蜡状芽孢杆菌共同使用(D 处理组)增产效果最好,较对照组

增产 1.34%,解磷细菌 P6 组较对照组增产 0.65%。但各处理间有效分蘖数差异不显著。

2.5.2 不同菌剂处理对克氏原螯虾生长的影响 由表 8 可见,在稻虾共作系统下,施加 4 种生物菌剂对克氏原螯虾生长和产量会起到提升作用,尤其是解磷细菌 P6 与市售解磷性蜡状芽孢杆菌共同使用的 D 处理组,虾的鲜质量、体长、单位面积产量增加最为明显,较对照组分别提高 7.61%、8.22%、6.40%。

3 讨论与结论

刘一江等研究发现,施用生物菌剂增加了水稻根际土壤微生物数量,改善了土壤微生态环境,有

表 7 不同菌剂处理对稻虾共作体系中水稻生长性状的影响

处理	干物质质量 (g/穴)	有效分蘖 (个/穴)	千粒质量 (g)	总产量 (g/m ²)
A	176.98 ± 17.59ab	18.67 ± 0.58a	27.17 ± 0.92c	816.94 ± 9.07a
B	181.42 ± 23.62ab	18.67 ± 2.31a	29.30 ± 0.69ab	819.00 ± 44.36a
C	187.14 ± 22.25b	19.00 ± 1.73a	29.27 ± 0.57ab	822.23 ± 85.31a
D	186.48 ± 4.87b	18.67 ± 2.31a	29.98 ± 0.83a	827.91 ± 62.44a
E	188.20 ± 32.95a	18.67 ± 4.05a	29.40 ± 0.72b	817.35 ± 54.05a

表 8 不同菌剂处理对稻虾共作体系中克氏原螯虾的影响

处理	鲜质量 (g/尾)	体长 (cm/尾)	产量 (kg/hm ²)
A	20.24 ± 1.52d	9.61 ± 0.48b	741.30d
B	21.19 ± 0.32b	9.60 ± 0.40b	732.90b
C	21.59 ± 4.10a	9.82 ± 0.61b	735.60b
D	21.78 ± 5.26a	10.40 ± 0.49a	760.05a
E	20.71 ± 1.37c	9.76 ± 0.39b	721.65c

利于土壤养分的转化,从而促进水稻生长,提高水稻产量^[18]。王翰霖等研究发现,添加生物菌剂可促进水稻生长,提高结实率,增加有效分蘖数和水稻各部分干物质质量^[22]。本试验研究发现,施加生物菌剂后,分蘖期水稻株高均低于对照组,但在抽穗期和黄熟期显著增高;与对照组 A 相比,水稻的有效分蘖数均有小幅度减少,但与空白对照组间差异不显著。分析认为,生物菌剂在分蘖期前加入水稻根系周围,由于菌体的定殖以及菌体的大量繁殖,菌体会从根系周围吸收养分,导致根系的分蘖会在短期内受到一定的影响。试验结果还表明,施加生物菌剂均能显著增加水稻的穗、茎、叶干物质质量,其中 C 处理与对照组 A 相比较增幅最大,分别达到 19.05%、21.39%、19.93%。李海云等认为,生物菌剂本身作为一种具有高活力、高效力的特定生物制剂,可促进植物养分吸收,刺激作物生长^[23-25],提高作物品质^[26]。

稻虾共养模式中水稻根系长期淹水,呼吸受阻,水稻茎、叶片、穗等发育受阻导致其增收产量受到影响。本试验结果表明,分蘖期前施加生物菌剂的处理 C、处理 B 与对照组 A 相比较也能显著提高水稻的每株实际产量和总产量,其中施加解磷性细菌的 C 处理提高了 20.50%,施加印度梨形孢的 B 处理提高了 12.20%。分析原因认为,施加生物菌剂后,水稻气孔导度提高,会增加氧的扩散速率,进而改善根系周围的通气状态,保持根系活力,极大

改善了水稻低氧量下的低光合作用和低产量输出的状况,提高水稻的产量。

叶绿素含量可侧面反映植物的生长发育情况,从本试验结果可以看出,分蘖期前施加解磷性细菌相比对照组气孔导度增加 19.05%;分蘖期前施加解磷性细菌相比对照组净光合速率和蒸腾速率,增幅分别为 8.78%、17.70%,本结果与郭夏宇等得出的生物菌剂可以提升水稻光合作用的研究结果^[27]一致。刘玉兰等认为,叶片叶绿素含量较高,可以减缓植株后期的衰老,有利于光合物质的积累^[28]。吴周周等研究发现,在施用 3 种生物菌剂后,水稻在齐穗期以及齐穗后 10~20 d,剑叶叶绿素含量有所增加,能够促进光合营养物质向植株各个部位转运,提高水稻产量^[29]。

侶国涵等研究认为,稻虾综合种养模式可以改善土壤结构,增加土壤养分,提高水稻产量。根区淹水不仅直接影响作物根系的生长和活动,还影响到土壤的理化性质。Meyer 等认为,根区淹水,土壤氮的损失是导致其后植物氮素减少的原因^[30]。本试验结果显示,施加生物菌剂会显著增加土壤 TN、TP、TK 以及碱解 N、速效 P、速效 K、有机质的含量。这可能是因为生物菌剂能改善水稻根际微生物菌群结构,活化土壤养分^[31],促使土壤中氮磷钾和有机质含量提高,增强土壤肥力^[32]。

在稻虾共作系统中,施加生物菌剂在一定程度上可以促进水稻的生长,但效果不如盆栽试验明显,其原因可能为大田试验受气候影响较大,与水稻种植期间光照、温度、降水量等具有较大关联^[33]。在本试验中,施加生物菌剂后对克氏原螯虾的鲜质量、体长和单位面积产量均有所提升,但生物菌剂、水稻生长和克氏原螯虾生长三者之间的相互关系以及互作机制有待进一步研究。

总之,在稻虾种养模式下,田间长期深水淹,作物冠层光强较低,水中溶解氧浓度降低,一定程度

上使水稻的光合作用受到阻碍。本试验结果表明,施用功能性生物菌剂有利于提高水稻的光合速率和气孔导度,改善土壤肥力,促进水稻干物质累积,增加籽粒产量,增强水稻根部的耐淹能力。研究结果可为稻虾综合种养科学施肥提供理论指导,为水稻的高产栽培提供理论依据。

参考文献:

- [1] Chien Y H, Avault J W Jr. Production of crayfish in rice fields[J]. The Progressive Fish - Culturist, 1980, 42(2): 67 - 71.
- [2] 曹凑贵, 江 洋, 汪金平, 等. 稻虾共作模式的“双刃性”及可持续发展策略[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(9): 1245 - 1253.
- [3] 武孟祥. 渍涝胁迫对水稻生长发育及产量结构的影响[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2015: 12 - 14.
- [4] 高德友, 赵新华, 段祥茂, 等. 抽穗期洪涝对水稻产量及其构成因素的影响[J]. 耕作与栽培, 2001(5): 31 - 47.
- [5] 蔺万煌, 孙福增, 彭克勤, 等. 洪涝胁迫对水稻磷及钾营养的影响[J]. 湖南农业大学学报, 1999, 25(4): 271 - 274.
- [6] 王振省, 李 磊, 李婷婷, 等. 水稻分蘖期淹水对根系生长和产量的影响研究[J]. 灌溉排水学报, 2014, 33(6): 54 - 57.
- [7] 夏石头, 彭克勤, 曾 可. 水稻涝害生理及其与水稻生产的关系[J]. 植物生理学通讯, 2000, 36(6): 581 - 588.
- [8] Qiao J F, Liu Z H, Deng S Y, et al. Occurrence of perfect and imperfect grains of six japonica rice cultivars as affected by nitrogen fertilization[J]. Plant and Soil, 2011, 349(1): 191 - 202.
- [9] Reddy B B, Ghosh B C, Panda M M. Flood to lerance of rice at different crop growth stages as affected by fertilizer application[J]. Plant and Soil, 1985, 83(2): 255 - 263.
- [10] Gautam P, Nayak A K, Lal B, et al. Submergence tolerance in relation to application time of nitrogen and phosphorus in rice (*Oryza sativa* L.) [J]. Environmental and Experimental Botany, 2014, 99: 159 - 166.
- [11] Lal B, Gautam P, Rath L, et al. Effect of nutrient application on growth, metabolic and enzymatic activities of rice seedlings during flooding stress and subsequent re - aeration [J]. Journal of Agronomy and Crop Science, 2015, 201(2): 138 - 151.
- [12] 宋维民, 王丽艳, 郭永霞, 等. 秸秆还田条件下固氮蓝藻复合菌剂与促生细菌 SM13 对水稻产量及稻米品质的影响[J]. 南方农业学报, 2021, 52(3): 762 - 768.
- [13] 陈家杰. 长期施磷对新疆农田磷素肥力演变、土壤磷的转化及磷肥肥效的影响[D]. 石河子: 石河子大学, 2016: 14 - 19.
- [14] 杨鹤同, 徐 超, 赵桂华, 等. 微生物肥料在农林业上的应用[J]. 安徽农业科学, 2014, 42(29): 10078 - 10080, 10082.
- [15] Rao W, Sinha M. Phosphate dissolving microorganisms in the soil and rhizosphere[J]. Indian Journal of Agricultural Sciences, 1963, 33: 272 - 278.
- [16] 张炳火, 李汉全, 罗娟艳, 等. 放线菌 JXJ - 0136 对白菜和豇豆生长的影响及其解磷作用[J]. 中国农业科学, 2016, 49(16): 3152 - 3161.
- [17] 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.
- [18] 刘一江, 都林娜, 康华靖. 微生物菌剂对水稻植株性状、产量及土壤理化性质的影响[J]. 中国稻米, 2019, 25(6): 39 - 42.
- [19] 李 丽, 韩 周, 张 昀, 等. 减氮配施菌剂对水稻土酶活性及水稻根系生长的影响[J]. 辽宁农业科学, 2019(2): 1 - 7.
- [20] 王杰鹏, 王德琦, 姚 利, 等. 农用微生物菌剂对水稻产量的影响[J]. 天津农林科技, 2019(1): 16 - 18.
- [21] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000: 22 - 36.
- [22] 王翰霖, 刘晓彤, 侯小宁, 等. 微生物碱抗菌剂对水稻产量的影响[J]. 宁夏农林科技, 2020, 61(10): 18 - 20.
- [23] 李海云, 王 静, 吕福堂, 等. 生物菌肥发展现状与展望[J]. 中国农村小康科技, 2008(10): 53 - 54.
- [24] 徐志峰, 王旭辉, 丁亚欣, 等. 生物菌肥在农业生产中的应用[J]. 现代农业科技, 2010(5): 269 - 270.
- [25] 王 佳, 马 玥. 微生物肥料的应用是增加农作物产量的有效途径[J]. 发展, 2011(10): 68 - 71.
- [26] 李 明. 微生物肥料研究[J]. 生物学通报, 2001, 36(7): 5 - 7.
- [27] 郭夏宇, 艾治勇. 微生物菌剂肥对超级杂交水稻生长和产量的影响[J]. 湖南农业科学, 2015(4): 17 - 19.
- [28] 刘玉兰, 陈殿元, 元明浩, 等. 盐胁迫对小粒大豆幼苗生长发育及光合特性的影响[J]. 大豆科学, 2017, 36(6): 913 - 920.
- [29] 吴周周, 唐 雪, 赵红艳, 等. 不同生物菌剂对水稻产量及生理特性的影响[J]. 沈阳农业大学学报, 2021, 52(1): 79 - 84.
- [30] Meyer W S, Barrs H D, Mosier A R, et al. Response of maize to three short - term periods of waterlogging at high and low nitrogen levels on undisturbed and repacked soil[J]. Irrigation Science, 1987, 8(4): 257 - 272.
- [31] 段雪娇. 微生物菌剂对水稻土壤微生物数量及酶活性的影响[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2015: 22 - 27.
- [32] 张雅楠, 张 昀, 燕香梅, 等. 氮肥减施配施菌剂对水稻生长及土壤有效养分的影响[J]. 土壤通报, 2019, 50(3): 655 - 661.
- [33] 骆 鹏, 吴 晗, 刘凯健, 等. 分析气候因素对水稻生育及产量的影响[J]. 种子科技, 2017, 35(4): 110 - 111.