

丛枝菌根真菌共生对鱼菜共生系统的作物生长与水质环境的影响

郑泽惟, 胡文涛*

华南农业大学林学与风景园林学院, 广东 广州

收稿日期: 2026年5月21日; 录用日期: 2026年7月3日; 发布日期: 2026年7月15日

摘要

本研究初步构建了一套丛枝菌根(Arbuscular Mycorrhizal, AM)真菌参与的鱼菜共生复合体系, 通过根系拦截与菌丝介导的营养交换机制, 从而实现花生(*Arachis hypogaea* L.)生长、罗非鱼(*Oreochromis niloticus*)、中华圆田螺(*Cipangopaludina cathayensis*)养殖与水质净化的协同优化。室内外联合试验显示, 相比未接菌异形根孢囊霉(*Rhizophagus irregularis*)、拦截根系的对照组(NM), 接种的AM组(接种 + 拦截根系)花生生长指标、根系侵染率光合作用均处于较高水平; 且AM组的循环水体中总氮(TN)、总磷(TP)和化学需氧量(COD)的回落速率更快。同时, AM组鱼类的生物量优于对照组(NM)。综上, AM真菌可通过强化养分转化与转运、优化水体环境, 协同提升作物生长与水产养殖效果, 为生态循环农业提供技术支撑。

关键词

丛枝菌根真菌, 鱼菜共生, 营养转化

Effects of Arbuscular Mycorrhizal Fungi Symbiosis on Crop Growth and Water Quality in Aquaponic Systems

Zewei Zheng, Wentao Hu*

College of Forestry and Landscape Architecture, South China Agricultural University, Guangzhou Guangdong

Received: May 21, 2026; accepted: July 3, 2026; published: July 15, 2026

*通讯作者。

文章引用: 郑泽惟, 胡文涛. 丛枝菌根真菌共生对鱼菜共生系统的作物生长与水质环境的影响[J]. 林业世界, 2026, 15(3): 580-591. DOI: 10.12677/wjf.2026.153070

Abstract

In this study, a composite aquaponic system involving arbuscular mycorrhizal (AM) fungi was constructed. Through the nutrient exchange mechanism mediated by root interception and hyphae, the synergistic optimization of *Arachis hypogaea* L. growth, *Oreochromis niloticus* and *Cipangopaludina cathayensis* culture, and water purification was achieved. Indoor and outdoor combined experiments showed that compared with the non-inoculated control group (NM, root interception without *Rhizophagus irregularis*), the AM group (inoculation + root interception) exhibited higher values in peanut growth indices, root colonization rate, and photosynthesis. In addition, the concentrations of total nitrogen (TN), total phosphorus (TP), and chemical oxygen demand (COD) in the circulating water of the AM group decreased more rapidly. Meanwhile, the fish biomass in the AM group was superior to that in the control group (NM). In summary, AM fungi can synergistically improve crop growth and aquaculture performance by enhancing nutrient transformation and transport and optimizing the water environment, providing technical support for ecological circular agriculture.

Keywords

Arbuscular Mycorrhizal Fungi, Aquaponics, Nutrient Transformation

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

丛枝菌根(Arbuscular Mycorrhizal, AM)真菌属于球囊霉亚门(Glomeromycotina),是土壤生态系统中最常见的互利共生真菌,能够与72%以上的陆生植物的根系形成共生体[1]。AM真菌在自然界分布广泛,它是迄今发现的与植物关系最密切的微生物之一[2]。AM真菌资源丰富,有很强的生态适应性,存在于各种生态环境,适应力强。AM真菌可以通过改善植物根系的形态,进而促进根系伸长和分支来增加营养吸收面积[3]。在AM真菌与宿主植物的共生互作中,AM真菌能为植物提供其生长所需的矿质营养,尤其促进磷和氮的吸收。AM真菌的菌丝在土壤中可以到达根系接触不到的区域,形成发达的地下网络,构成了植物根系、土壤和AM真菌之间联系的桥梁[4]。土壤中的磷酸盐是有限的,植物吸收土壤中的磷酸盐通常有两种方式:一种是直接的磷吸收途径——高效磷吸收系统,另一种是植物通过与AM真菌建立共生关系产生的磷吸收方式——菌根磷吸收途径,即通过AM真菌根外菌丝吸收并转运土壤中的磷到根内丛枝结构。AM真菌可通过扩大吸收面积、调控相关酶活性,助力宿主高效吸收不同形态氮源。接种AM真菌可显著促进杉木幼苗对氮的吸收,且对铵态氮处理的促进效果更突出;同时,AM真菌可通过调节根际土壤氮转化酶活性,促进有效氮向宿主转移,提升宿主氮利用效率[5]。AM真菌菌丝的表面积约为根系表面积的100倍,其菌丝长度比植物根系的长度大几个数量级。因而,AM真菌的菌丝可以在土壤中探索植物根系达不到的地方,从而协助植物矿质元素和水分的吸收。

在过去几十年中,不合理的传统农业生产方式会加重了土壤负担,降低了耕地质量。推广绿色可持续发展的农业技术,如有机农业、生态农业等,是加快建设现代农业体系,是全面推进乡村振兴的必然之路,有助于从根本上提升农业产业发展水平,实现现代农业的可持续发展[6]。而其中,以现代鱼菜共生复合体系为代表的循环农业是实现农业可持续利用的重要途径之一。其先进的农业技术和管理模式,可以实

现农业废弃物的资源化利用和减少污染排放, 提高耕地质量和生态环境质量[7]。而另一方面, AM 真菌田间应用已逐步向多作物、多逆境场景拓展, 研究日趋成熟, 为绿色农业发展提供实践支撑。在粮食作物领域, Paulo 等[8]研究表明接种 AM 真菌可显著提升免耕玉米的根系活力与籽粒产量, 尤其在水分亏缺条件下增产效果显著; 孙丽等[9]在林木培育中, AM 真菌接种结合园林废弃物处理, 能有效促进刺槐幼苗生长, 改善根际土壤结构。目前, AM 真菌田间应用已覆盖粮食、林木等领域, 但仍受土壤环境、接种方式影响, 其规模化应用技术仍在持续优化。本研究将结合现代农业中 AM 真菌共生协助宿主植物营养交换的特性, 以鱼菜共生复合体系为研究对象展开探讨与实验。

鱼菜共生(Aquaponics)是一种将水产养殖(Aquaculture)与水培(Hydroponics)结合的现代复合生态农业系统, 它通过微生物循环将鱼类废物转化为植物营养, 实现资源的高效利用和环境的可持续性, 具有良好的发展趋势。鱼菜共生系统能否保持系统高效稳定的运转, 既取决于养殖水体中营养物质的循环以及动态平衡, 也取决于系统中溶氧量等关键水质参数[10]。水体 pH 方面, 养殖鱼类适合在偏碱性 pH 6.5-9.0 的水体环境生长, 但在 pH 5.5~6.5 的偏酸性环境中, 则可以避免养殖水体中磷、钙等元素以不溶性盐的形式沉淀流失, 使植物根系能更高效地吸收这些营养元素[11]。因此, 植物和鱼类的生长发育对水体 pH 的要求不同, 使得两者集成后的鱼菜共生系统实际运行时面临两难选择。体系中的氮素主要来源于饲料中的蛋白质, 经养殖鱼类转化后所产生的代谢物质中含有的大量氨氮($\text{NH}_3\text{-N}$)和矿物质, 当水体中氨氮浓度过高时, 会对鱼产生毒性。氨氮在硝化细菌和异养细菌的分解转化下会转变为植物根部易于吸收的硝酸盐[12]。同时, 当水中缺少氧气时, 反硝化细菌会通过反硝化作用(脱氮), 产生 N_2O , 对环境造成污染。而传统鱼菜共生系统因养殖鱼类、根系微生物及有机污染物分解均需消耗大量氧气, 需持续开启增氧设备, 加之增氧技术溶氧效率低, 进一步增加了打氧负荷[10], 导致氧气缺乏, 氮转化循环效率下降。相比于氮, 代谢物中的无机磷则浓度较低, 有机磷难以被水体中的细菌高效分解, 利用率较低[13]。虽然传统的鱼菜共生系统中已经有微生物膜的应用, 但微生物膜缺乏针对性优化, 对水体中氨氮、亚硝酸盐的转化速率较慢, 且易受水质波动影响, 进一步限制了系统养分循环效率, 增加了水体净化压力[14]。我们所关注的 AM 真菌有利于氮磷资源的利用, AM 真菌根外菌丝可以越出根际区, 将植物吸收养分的范围从根系表面延伸到 12 cm 以外, 其最重要的功能是通过招募特定的菌根际细菌群落来协助植物从土壤中获得生长发育必需的无机磷酸盐, 从而供应给宿主植物来增强宿主植物对氮磷元素的吸收[15]。而且, AM 真菌菌丝体虽然是好氧的, 但相比庞大的植物根系在水体中氧气消耗, AM 真菌菌丝体对水体中氧气的消耗要减少数倍。

基于 AM 真菌协助宿主植物吸收养分的特性, 结合鱼、螺类中养殖中有机氮磷养分过量积累的特性, 本研究开发一种 AM 真菌参与的鱼菜共生复合体系, 以期通过 AM 真菌较强的矿质资源利用潜力, 可持续地控制鱼菜共生复合系统中的营养物质动态平衡, 同时促进矿物质的高效循环利用; 同时, 探究 AM 真菌在整个鱼菜共生复合系统中水体养分利用以及水质改善中的作用, 从而为 AM 真菌共生在现代生态循环农业中高效应用提供参考。

2. 材料与方法

2.1. 试验材料

供试植物: 花生(*Arachis hypogaea* L.)种子。

供试基质: 经 121℃, 103 KPa 灭菌 120 min 的河沙、蛭石均匀混合。

供试菌种: 异形根孢囊霉(*Rhizophagus irregularis*, Ri), 来自华南农业大学林学与风景园林学院菌根课题组实验室, 其孢子来自于玉米(*Zea mays* L.)宿主扩繁的菌剂, 采用蔗糖梯度离心法获得孢子用于接种处理。每盆花生幼苗接种约 200 个孢子, 接种组为 AM 组, 未接种组为 NM 组。

供试鱼类: 罗非鱼(*Oreochromis niloticus*)鱼苗, 5~7 cm, 购买于花鸟鱼虫市场; 中华圆田螺(*Cipangopaludina cathayensis*)活体于网上购买。

供试养殖池: 鱼池 755 mm × 530 mm × 500 mm 的养殖箱, 水深 30 cm; 螺池 395 mm × 270 mm × 250 mm, 水深 20 cm。

2.2. 试验设计

室内试验于 2024 年 8 月~2024 年 9 月于华南农业大学林学与风景园林学院亚热带农业资源保护与利用国家重点实验室内进行。将花生种子均匀播撒于灭菌沙盘中, 加水并保持湿润。置于温室中 1 周后, 从育苗皿中挑选长势一致的发芽幼苗移栽至圆盆(口径 11.5 cm, 底径 7.5 cm, 高度 9.5 cm)中, 每盆 3 株, 继续栽培并接种异形根孢囊霉, 一个月后移栽至野外试验地内。野外试验于 2024 年 9 月~2024 年 11 月于华南农业大学油茶核心种质苗圃内进行。选取适宜花生生长的林下裸露地 10 × 15 m。整地后, 进行分垄和挖沟, 并埋入水循环管道和铺设防水布, 以保证相同的隔离和排水效果。同一垄上的植株彼此间隔 10 cm。AM 真菌参与鱼菜共生复合体系装置实验分为三个处理: 不接种拦截根系组(NM)、接种 AM 真菌拦截根系组(AM-1)和接种 AM 真菌不拦截根系组(AM-2)。每组分别种植花生 25 株、养殖罗非鱼苗 15 尾, 中华圆田螺 8 个。鱼苗和活体螺类经检疫后放入对应养殖池内, 每日喂食一次(植食饲料), 投喂量按鱼苗初始质量的 3%计, 试验期间每日定时使循环装置运作 2 h, 不换水, 只补充蒸发掉的水分。

2.3. 试验装置设计

本研究提供一套 AM 真菌参与鱼菜共生复合体系(图 1), 该装置由种植区域、鱼池、螺池三个区域组成。种植区域下埋设有长 2 m, 宽 10 cm, 高 5 cm 的 PVC 输水管道, 管道中设有挡板, 用于延缓水流的流动, 形成一定的水汽压。植株根系与水体之间由孔径为 45 μm 或 0.5 cm 的尼龙网隔开, 以控制宿主植物的根系是否进入管道。三个区域之间由输水软管连接。

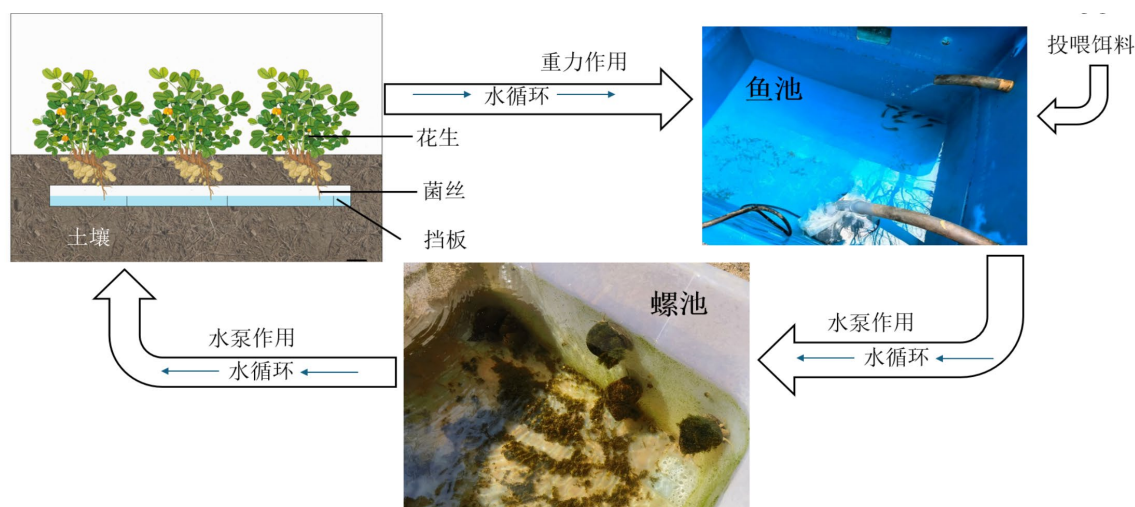


Figure 1. Design diagram and application effect of aquaponic system integrated with AM fungi
图 1. AM 真菌参与鱼菜共生复合体系设计图及应用效果展示图

2.4. 样品采集

2024 年 11 月, 我们采集了不同体系处理下的花生植株。用自来水清洗掉植株根和叶泥土, 将收获样品分装, 置于烘箱中 105℃ 杀青 30 min 后, 70℃~75℃ 烘干 12~24 h 至重量不再变化, 用于后续相关指

标测定。水样采集后置于低温避光条件下运回实验室, 于 24 h 内进行水质相关理化指标测定。

2.5. 植株生长指标、侵染率和光合指标的测定

收获前使用便携式光合仪 Li-6400XT (Li-Cor-6400, Inc., Lincoln, NE, USA) 于阳光明媚的上午 9:00~11:00 测定花生叶片光合参数[16], 每个处理选择 4 株植株, 每株花生选 3 片成熟叶片测定净光合速率(Pn)、胞间 CO₂ 浓度(Ci)、气孔导度(Gs)和蒸腾速率(Tr)等指标。

收获样品时用自来水清洗植株的根和叶, 吸水纸吸干植株表面水分后, 利用电子天平(精确到 0.001 g)分别称取地上部分与地下部分鲜重。采用 Phillips 等[17]改进后的台盼蓝染色法对花生根系进行染色、压片, 计算侵染率。

2.6. 植株理化性质的测定

采用石墨炉消解——凯氏定氮法测定全氮(TN); 经 HClO₄-H₂SO₄ 消煮法消解后, 采用钼蓝比色法测定全磷(TP) [18]。

2.7. 养殖鱼类、螺类生长指标的测定

分别在实验开始和结束期间, 各体系养殖池中随机挑选 5 条罗非鱼鱼苗和 3 个中华圆田螺, 吸水纸吸干鱼苗表面水分后, 利用电子天平(精确到 0.001 g)分别称取初始质量(W₀)和最终质量(W_t)。

2.8. 循环水体理化性质的测定

水体 pH、溶解氧由便携式 pH 计和溶解氧仪测定。采集循环水体水样后, 静置后取上清液待测。参考《水和废水监测分析方法》重铬酸盐法(HJ 828-2017) [19]测定水样化学需氧量(COD), 钼酸铵分光光度法(GB/T 11893-1989) [20]测定水样总磷(TP), 碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法(HJ 636-2012) [21]测定水样总氮(TN)。

2.9. 数据处理与分析

在 Microsoft Excel 2016 中整理数据, 在进行方差分析(ANOVA)之前, 我们进行了 Shapiro-Wilk's 和 Levene's 检验, 以确保所有数据的正态性和方差相等。所有数据均满足正态性和方差齐性假设。采用 Statistical Product and Service Solutions 27.0 (SPSS Inc, Chicago, IL, USA)对数据进行单因素方差分析(One-way ANOVA)不同设置下花生植株的理化性质, 水体水质理化性质差异显著性检验(HSD Test, Turkey Test, $P < 0.05$)。文中所有的统计图均采用 GraphPad Prism 9.0 制图(GraphPad, USA)。

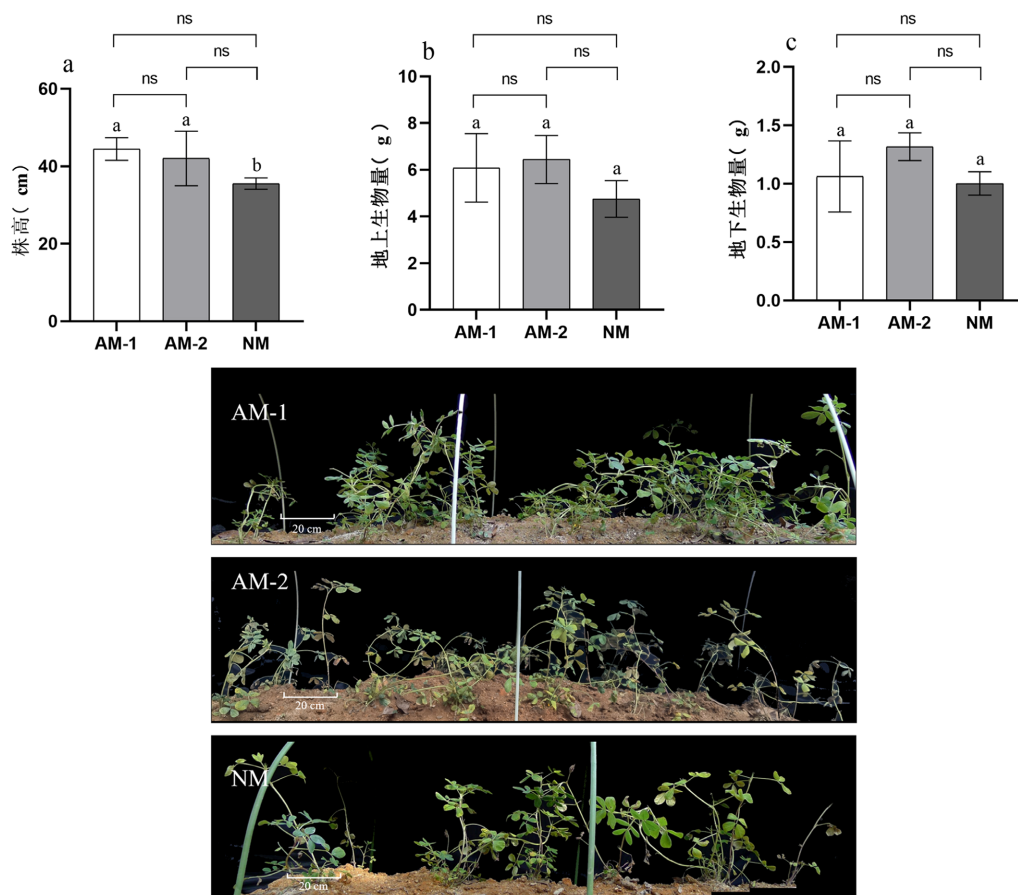
3. 结果与分析

3.1. 不同设置下 AM 真菌参与鱼菜共生复合体系对花生生长的影响

不同设置下 AM 真菌参与鱼菜共生复合体系对花生生长指标的影响如图 2 所示。相比于对照组(NM), 不同设置下 AM 接种组的花生在株高、地上、地下生物量均有所增加。不同设置下 AM 接种组之间的花生在株高、地上、地下生物量与 AM-2 组均无显著差异。

3.2. 不同设置下 AM 真菌参与鱼菜共生复合体系对花生根系侵染率的影响

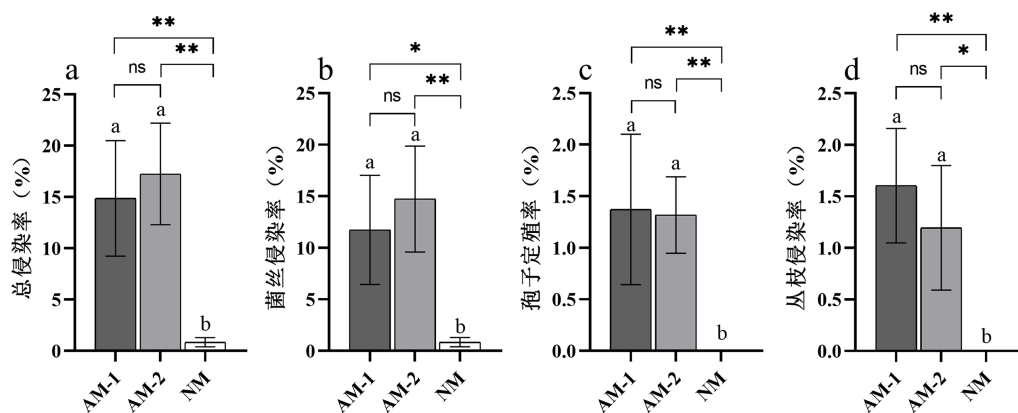
不同设置下 AM 真菌参与鱼菜共生复合体系对花生侵染率的影响如图 3 所示。相比于对照组(NM), 不同设置下 AM 接种组的菌丝总侵染率、菌丝侵染率、丛枝侵染率、孢子定殖率均显著提高($P < 0.05$); 不同设置下 AM 接种组之间总侵染率、菌丝侵染率、丛枝侵染率、孢子定殖率均显著均无显著差异。



注: (a) 不同设置下植株株高; (b) 不同设置下植株地上生物量; (c) 不同设置下植株地下生物量; 柱子表示平均数 $\pm$ 标准误差, 相同字母表示没有显著差异(Tukey 检验 $P < 0.05$, $n = 4$)。*、**、***分别表示 $P < 0.05$ 、 $P < 0.01$ 、 $P < 0.001$, NS 表示无显著差异。AM-1: 接种 AM 真菌拦截根系组; AM-2: 接种 AM 真菌不拦截根系组; NM: 不接种拦截根系组, 下同。

Figure 2. Effects of composite systems under different treatments on peanut growth

图 2. 不同设置下复合体系对花生生长的影响



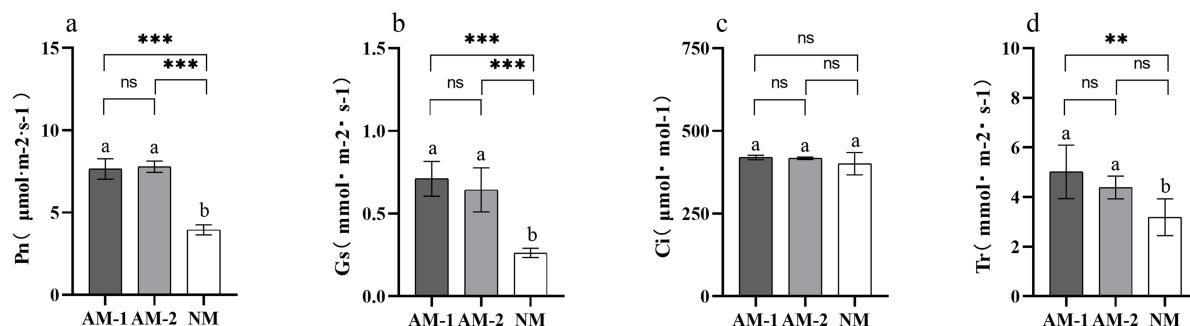
注: (a) 总侵染率; (b) 菌丝侵染率; (c) 孢子定殖率; (d) 丛枝侵染率。柱子表示平均数 $\pm$ 标准误差, 相同字母表示没有显著差异(Tukey 检验 $P < 0.05$, $n = 4$)。*、**、***分别表示 $P < 0.05$ 、 $P < 0.01$ 、 $P < 0.001$, NS 表示无显著差异。

Figure 3. Effects of composite systems under different treatments on AM fungal colonization rate in peanut roots

图 3. 不同设置下复合体系对花生根系 AM 真菌侵染率的影响

3.3. 不同设置下 AM 真菌参与鱼菜共生复合体系对花生光合作用的影响

不同设置下 AM 真菌参与鱼菜共生复合体系对花生光合指标的影响如图 4 所示。相比于对照组(NM), 不同设置下 AM 接种组花生的净光合速率(Pn)、气孔导度(Gs)显著增加($P < 0.001$), 而 AM-1 组的蒸腾速率(Tr)显著增加($P < 0.01$), 其他光合指标之间均与对照组(NM)无显著差异。不同设置下 AM 接种组间的光合指标均无显著差异。



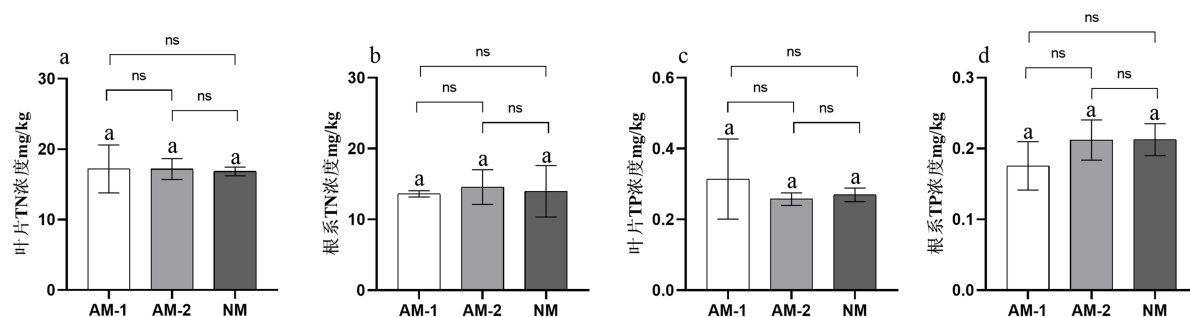
注: (a) 净光合速率(Pn); (b) 气孔导度(Gs); (c) 胞间 CO_2 浓度(Ci); (d) 蒸腾速率(Tr)。柱子表示平均数 $\pm$ 标准误差, 相同字母表示没有显著差异(Tukey 检验 $P < 0.05$, $n = 4$)。*、**、***分别表示 $P < 0.05$ 、 $P < 0.01$ 、 $P < 0.001$, NS 表示无显著差异。

Figure 4. Effects of composite systems under different treatments on photosynthesis of peanut

图 4. 不同设置下复合体系对花生的光合作用的影响

3.4. 不同设置下 AM 真菌参与鱼菜共生复合体系对花生氮、磷浓度的影响

不同设置下 AM 真菌参与鱼菜共生复合体系对花生植株氮、磷浓度如图 5 所示。相比于对照组(NM), 不同设置下 AM 接种组各养分浓度均无显著差异。不同设置下 AM 接种组间, 各养分浓度均无显著差异。



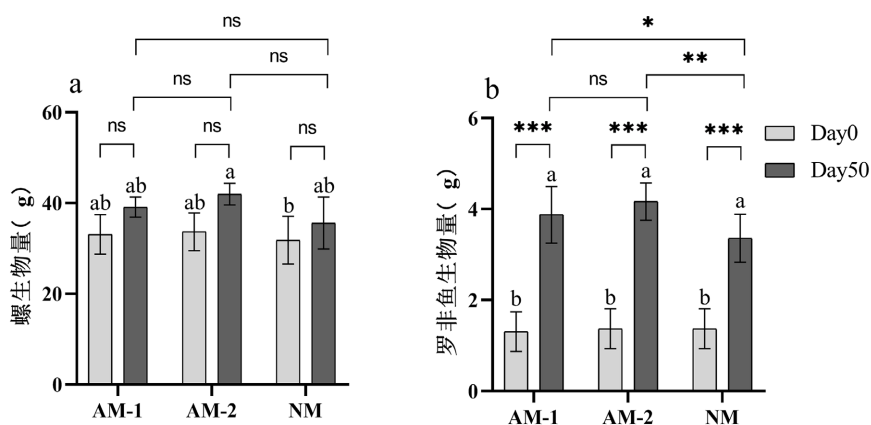
注: (a) 叶片全氮浓度(TN); (b) 根系全氮浓度(TN); (c) 叶片全磷浓度(TP); (d) 根系全磷浓度(TP)。

Figure 5. Effects of composite systems under different treatments on nitrogen and phosphorus concentrations in peanut plants

图 5. 不同设置下复合体系对花生植株氮磷浓度的影响

3.5. 不同设置下 AM 真菌参与鱼菜共生复合体系对鱼类、螺类生物量的影响

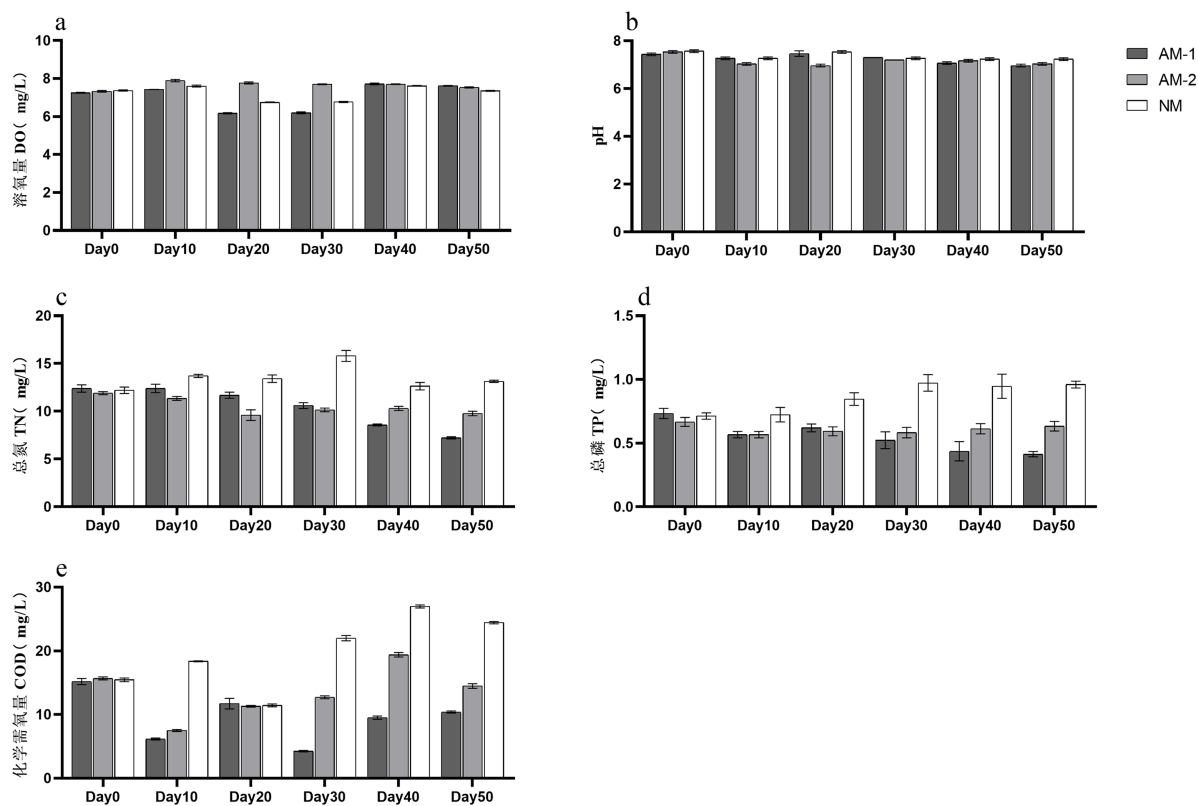
不同设置下鱼、螺类生物量如图 6 所示。不同设置下鱼类的生物量均呈现显著增长($P < 0.001$), 而螺类生物量则有所增长。不同设置下各组的螺类最终生物量之间均无显著差异。相比于对照组(NM), 不同设置下 AM 接种组的鱼类最终生物量显著增加($P < 0.05$)。不同设置下 AM 接种组间鱼类最终生物量则无显著差异。



注: (a) 螺类生物量; (b) 鱼类生物量。

Figure 6. Effects of composite systems under different treatments on the biomass of cultured fish and snails

图 6. 不同设置下复合体系对鱼、螺类养殖生物量的影响



注: (a) 循环水体溶氧量(DO); (b) 循环水体 pH 值; (c) 循环水体总氮浓度(TN); (d) 循环水体总磷浓度(TP); (e) 循环水体化学需氧量(COD)。

Figure 7. Effects of composite systems under different treatments on physicochemical properties of recirculating water

图 7. 不同设置下复合体系对循环水体理化性质的影响

3.6. 不同设置下 AM 真菌参与鱼菜共生复合体系对循环水体理化性质的影响

不同设置下 AM 真菌参与鱼菜共生复合体系下对水质指标如图 7 所示。观测周期的 50 天内(Day

0~Day 50), 三组水质指标呈现显著组间差异。(1) 各组溶解氧(DO)浓度维持在 6~8 mg/L 的相对稳定区间。其中, AM-1 组在实验中期(Day 20~Day 30)溶氧量(DO)下降;(2) 各组 pH 值都呈现下降趋势, AM 接种组在实验后期(Day 50)维持在 7.0 左右, 而对照组(NM)则维持在较高的 7.2 左右;(3) 相比于对照组(NM), AM 接种组的总氮(TN)浓度显著下降, 而对照组(NM)的总氮(TN)浓度显著高于 AM 接种组并在 Day 30 达到峰值;(4) 相比于对照组(NM), AM 接种组的总磷(TP)浓度显著下降, 而对照组(NM)的总磷(TP)浓度显著增加并在 Day 50 达到峰值;(5) 相比于对照组(NM), AM 接种组中的 AM-1 组维持在较低的水平, 在 Day 30 达到最低值;而对照组(NM)的 COD 显著增加并在 Day 40 达到峰值。

4. 结论

本研究初步构建的 AM 真菌参与鱼菜共生复合体系, 通过根系拦截与菌丝介导的营养交换机制, 实现了作物生长、鱼螺类养殖与水质净化的协同优化。异形根孢囊霉接种的 AM 组花生株高、地上/地下生物量均有提高, 且对光合作用有较好的促进作用; AM 组循环水体中总氮(TN)、总磷(TP)和化学需氧量(COD)的回落速率更快, 水质稳定性显著增强。

5. 讨论与展望

鱼菜共生的核心价值在于实现氮磷等营养元素的高效循环与动态平衡, 本研究的设计隔离了土壤与循环水体, 保障了鱼类生长所需的水体环境稳定性, 又通过 AM 真菌的菌丝网络将土壤和水体中难以被植物直接吸收的有机氮、无机磷转化为易于被植物根系同化的硝酸盐(NO_3^-)、铵(NH_4^+)和可溶性无机磷酸盐(H_2PO_4^- 、 HPO_4^{2-} 、 PO_4^{3-})等形态, 高效转运至花生根系[22]。

AM 真菌的接种显著改善了花生的生长与光合特性, AM 真菌与花生的共生关系强化了花生根系的养分吸收能力。结果显示, AM 接种组花生株高、地上及地下生物量均高于对照组(NM)。AM 真菌菌丝可突破根系吸收范围, 将养分摄取区域从根际延伸至循环水体, 为花生提供更充足的氮磷供给。光合指标测定结果表明, AM 接种组净光合速率(Pn)、气孔导度(Gs)显著提升, AM-1 组蒸腾速率(Tr)也显著增加, 说明 AM 真菌通过优化作物对磷素的吸收利用, 间接促进光合色素合成和光合相关酶活性, 减少非气孔因素对光合作用的限制[23]。侵染率检测结果显示, AM 接种组的侵染率显著高于 NM 组, 证实接种 AM 真菌可成功与花生建立共生, 而根系拦截处理未抑制真菌侵染, 反而因花生根系无法直接吸收水体养分, 进一步加强了与 AM 真菌的共生关联[24]。一方面, 这可能是因为花生根系在直接接触水体的条件下, 将吸收的养分分配至地下生物量积累, 但是根系过量的水分条件不利于养分向上传输, 从而限制了 AM-2 组植株的生长, 另一方面, AM-1 组的处理设置则更适配陆生花生的生长特性, 既避免了根系长期接触水分可能导致的缺氧、养分失衡以及高水分条件不利用养分向上传输的问题[25], 又充分发挥了 AM 真菌耐受潮湿环境并高效转运养分的优势, 实现花生地上/地下生物量的均衡增长, 最终呈现出两组 AM 接种组花生植株的生长均无显著差异。值得注意的是, 各组花生植株氮、磷浓度无显著差异, 推测是试验体系内养分供给充足, 植物与菌根的吸收潜力已接近饱和, 浓度提升空间被压缩[26]。在充足养分的条件下, 而植株优先将养分用于生物量构建而非提高体内浓度, 与 AM 真菌一同促进了植株的生物量积累, 使吸收的氮、磷被大量新增生物量所稀释, 最终表现为养分浓度无显著差异[27]。同时, AM 真菌菌丝可临时储存大量磷素, 减少向宿主植物地上部的转运, 进一步降低植株养分浓度的提升幅度[28]。

AM 真菌的参与对鱼菜共生体系中的水产养殖与循环水体净化具有显著促进作用。结果显示, AM 真菌参与鱼菜共生复合体系对鱼类的促进作用更显著, 而螺类生长受体系影响较小。AM 真菌优化了水体理化环境, 减少了氨氮、亚硝酸盐等有害物质的累积, 降低了鱼类的环境应激, 同时提升了水体养分的循环效率, 间接增加了鱼类的饵料利用效率。

本研究中最显著的结果体现在水体理化性质的调控上, AM 真菌的参与较显著地优化了循环水体的养分状况与水质指标, 且接种组与对照组(NM)呈现显著组间差异, 这是 AM 真菌与水体微生物协同互动、促进植物养分吸收的综合结果。在溶解氧(DO)方面, 各组均维持在适宜范围, 整体体系溶氧稳定性良好, 充足的溶氧为硝化细菌活动与鱼类生长提供了保障, 也弱化了反硝化作用, 避免了 N_2O 污染与硝酸盐流失[22]。pH 值方面, 所有处理均呈下降趋势, 且 AM 接种组后期降幅大于对照组(NM), 维持在 7.0 左右, 这一 pH 范围既兼顾了鱼类生长的偏碱性需求, 又减少了养分的沉淀流失, 利于植物与 AM 真菌对矿质养分的吸收[11], 同时 AM 真菌通过调节盐基离子与有机质积累, 将 pH 稳定在硝化酶活性的适宜区间, 进一步促进了氮素转化[29]。

总氮(TN)、总磷(TP)的变化趋势充分体现了 AM 真菌参与下促进了养分的活化与转运, 结果显示 AM 接种组总氮(TN)、总磷(TP)浓度均显著低于对照组(NM), 后期均处于较低水平。水体中氮磷主要来源于鱼类代谢与残饵分解, 初期以氨氮、有机磷等难利用形态为主, 对照组(NM)因缺乏 AM 真菌的介导, 硝化细菌富集缓慢、磷活化能力不足, 导致氮磷持续累积; 而 AM 接种组中, 真菌一方面与硝化细菌协同作用, 将氨氮逐步转化为植物可吸收的硝酸盐, 完成有毒氮素的无害化转化, 另一方面通过分泌酸性磷酸酶、有机酸及招募解磷细菌[30], 将难溶性磷矿化为有效磷, 再通过发达的菌丝网络将氮磷转运至花生根系, 实现了养分的有效循环, 既降低了水体氮磷负荷, 又为花生生长提供了养分, 避免了水体富营养化。

化学需氧量(COD)的变化反映了水体有机污染物的降解效率[31], 结果显示 AM-1 组 COD 维持在较低水平, 对照组(NM)的 COD 显著升高并在后期达到峰值, 后期 AM 接种组的 COD 显著低于对照组(NM)。试验初期, 残饵、鱼类排泄物等有机物质大量输入, 水体微生物群落尚未完善, 导致 COD 阶段性升高; 而 AM 真菌与水体细菌形成协同作用, 将大分子有机物分解为葡萄糖、氨基酸等小分子物质, 供花生与自身吸收利用, 加速了有机污染物的降解, 降低了 COD 浓度[32], 其中 AM-1 组因根系拦截减少了根系对水体氧气的消耗, 提升了微生物的分解效率, COD 的控制效果更优。同时, AM 真菌菌丝体的耗氧量远低于植物根系, 减少了水体的氧负荷, 为好氧微生物的活动提供了更有利的条件, 这也是接种组水质指标更优的重要原因[33]。

AM 接种组(AM-1 与 AM-2)未造成试验结果的显著差异, 说明两种接种模式均能较好地发挥 AM 真菌的作用, 而 AM-1 组在部分指标(如 COD)上表现更优, 更适合鱼菜共生体系的实际应用。AM-1 组通过尼龙网隔离花生根系与水体, 避免了根系长期接触水分导致的缺氧、养分失衡问题, 同时为 AM 真菌菌丝开辟了专属养分吸收通道, 既保障了水体环境的稳定性, 又能充分发挥 AM 真菌耐受潮湿环境、高效转运养分的优势; 而 AM-2 组中花生根系直接接触水体, 虽能直接吸收部分养分, 但根系的氧气消耗增加了水体溶氧负荷, 且水分过多可能影响养分向地上部分传输, 因此未表现出更优的效果。这一结果为 AM 真菌在鱼菜共生体系中的应用提供了实践参考, 即采用根系拦截的接种模式, 可实现植物生长、水产养殖与水质调控的协同优化。

致 谢

感谢国家自然科学基金面上项目(3257141073)的资助。

参考文献

- [1] Brundrett, M.C. and Tedersoo, L. (2018) Evolutionary History of Mycorrhizal Symbioses and Global Host Plant Diversity. *The New Phytologist*, **220**, 1108-1115. <https://doi.org/10.1111/nph.14976>
- [2] Smith, S.E. and Read, R. (2010) *Mycorrhizal Symbiosis*. Elsevier Science.
- [3] 刘润进, 陈应龙. 菌根学[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [4] Peng, S., Guo, T. and Liu, G. (2013) The Effects of Arbuscular Mycorrhizal Hyphal Networks on Soil Aggregations of

- Purple Soil in Southwest China. *Soil Biology and Biochemistry*, **57**, 411-417.
<https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2012.10.026>
- [5] 雷梅, 甘子莹, 谭世广, 等. 丛枝菌根真菌和不同形态氮对杉木幼苗根际土壤氮磷养分含量及其相关酶化学计量比的影响[J]. 林业科学研究, 2023, 36(1): 59-67.
- [6] 袁辰辉, 崔敏敏, 罗章松. 现代农业体系的发展困囿与纾解策略——以河南省安阳市 N 县为例[J]. 现代农机, 2024(4): 13-16.
- [7] 徐宇翔. 建设现代农业体系下的耕地质量保护与可持续利用探讨[J]. 河北农机, 2024(18): 142-144.
- [8] Ferreira, P.A.A., Marchezan, C., Scopel, G., *et al.* (2024) Field Application of Mycorrhizal Inoculant Influences Growth, Nutrition, and Physiological Parameters of Corn Plants and Affects Soil Microbiological Attributes. *Agronomy*, **14**, Article 3006. <https://doi.org/10.3390/agronomy14123006>
- [9] 孙丽, 李文彬, 张颖, 等. 不同园林废弃物处理方式下接种丛枝菌根真菌对刺槐幼苗生长及土壤结构特性的影响[J]. 生态与农村环境学报, 2025, 41(10): 1329-1338.
- [10] 饶伟, 杨卫中, 位耀光, 等. 鱼菜共生水体溶解氧时空变化规律及其影响因素研究[J]. 农业机械学报, 2017, 48(S1): 374-380.
- [11] 刘爽, 安诗琦, 严子微, 等. 现代鱼菜共生技术研究进展与展望[J]. 中国农业科技导报, 2020, 22(3): 160-166.
- [12] van Rijn, J. (2013) Waste Treatment in Recirculating Aquaculture Systems. *Aquacultural Engineering*, **53**, 49-56.
<https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2012.11.010>
- [13] Schneider, O., Sereti, V., Eding, E.H., *et al.* (2005) Analysis of Nutrient Flows in Integrated Intensive Aquaculture Systems. *Aquacultural Engineering*, **32**, 379-401.
- [14] 唐广静, 吴正理, 孙瑜, 等. 鱼菜共生复合种养技术发展现状及未来趋势[J]. 大连海洋大学学报, 2025, 40(3): 529-540.
- [15] Akiyama, K., Matsuzaki, K. and Hayashi, H. (2005) Plant Sesquiterpenes Induce Hyphal Branching in Arbuscular Mycorrhizal Fungi. *Nature*, **435**, 824-827. <https://doi.org/10.1038/nature03608>
- [16] Lichtenthaler, H.K. (1987) Chlorophylls and Carotenoids: Pigments of Photosynthetic Biomembranes. *Methods in Enzymology*, **148**, 350-382. [https://doi.org/10.1016/0076-6879\(87\)48036-1](https://doi.org/10.1016/0076-6879(87)48036-1)
- [17] Phillips, J.M. and Hayman, D.S. (1970) Improved Procedures for Clearing Roots and Staining Parasitic and Vesicular-Arbuscular Mycorrhizal Fungi for Rapid Assessment of Infection. *Transactions of the British Mycological Society*, **55**, 158-161, IN16-IN18. [https://doi.org/10.1016/S0007-1536\(70\)80110-3](https://doi.org/10.1016/S0007-1536(70)80110-3)
- [18] 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.
- [19] 中国环境监测总站. 水质 化学需氧量的测定 重铬酸盐法: HJ 828-2017 [S]. 北京: 中国环境出版社, 2017.
- [20] 北京环保监测中心, 上海市环境监测中心. 水质 总磷的测定 钼酸铵分光光度法: GB/T 11893-1989 [S]. 北京: 国家技术监督局, 1989.
- [21] 大连市环境监测中心. 水质 总氮的测定 碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法: HJ 636-2012 [S]. 北京: 中华人民共和国环境保护部, 2012.
- [22] 蒋金辰, 高霞婷, 徐琰斐, 等. 鱼菜共生系统氮、磷利用效率研究现状和展望[J]. 农业工程学报, 2022, 38(S1): 292-300.
- [23] Xia, D., An, X., Ignacio, López, F., *et al.* (2023) Enhancing Alfalfa Photosynthetic Performance through Arbuscular Mycorrhizal Fungi Inoculation across Varied Phosphorus Application Levels. *Frontiers in Plant Science*, **14**, Article ID: 1256084. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1256084>
- [24] Johnson, N.C., Graham, J.H. and Smith, F.A. (1997) Functioning of Mycorrhizal Associations along the Mutualism-Parasitism Continuum. *The New Phytologist*, **135**, 575-586. <https://doi.org/10.1046/j.1469-8137.1997.00729.x>
- [25] Zhang, Y., Chen, X., Geng, S., *et al.* (2025) A Review of Soil Waterlogging Impacts, Mechanisms, and Adaptive Strategies. *Frontiers in Plant Science*, **16**, Article ID: 1545912. <https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1545912>
- [26] 刘进法, 夏仁学, 王明元, 等. 丛枝菌根促进植物根系吸收难溶态磷的研究进展(综述) [J]. 亚热带植物科学, 2007, 36(4): 62-66.
- [27] Wu, Y., Chen, C. and Wang, G. (2024) Inoculation with Arbuscular Mycorrhizal Fungi Improves Plant Biomass and Nitrogen and Phosphorus Nutrients: A Meta-Analysis. *BMC Plant Biology*, **24**, Article No. 960.
<https://doi.org/10.1186/s12870-024-05638-9>
- [28] 王凤玲, 张锐, 陈秀华. 转 Bt 基因棉叶片腐熟物抑制 AM 真菌定殖及菌根对磷的吸收[J]. 菌物学报, 2017, 36(7): 963-971.

-
- [29] Liu, J., Fu, X., Yuan, R., *et al.* (2022) Carbon Sources Derived from Corncobs Enhanced Nitrogen Removal in SBBR Treating Low C/N Domestic Sewage. *Process Safety and Environmental Protection*, **166**, 628-637. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2022.08.063>
- [30] 孙宁康, 江飞焰, 张林, 等. 丛枝菌根真菌 *Rhizophagus irregularis* 菌丝分泌物可诱导解磷细菌 *Rahnella aquatilis* 向菌丝移动[J]. 科学通报, 2021, 66(32): 4157-4168.
- [31] Li, J., Luo, G., He, L., *et al.* (2018) Analytical Approaches for Determining Chemical Oxygen Demand in Water Bodies: A Review. *Critical Reviews in Analytical Chemistry*, **48**, 47-65. <https://doi.org/10.1080/10408347.2017.1370670>
- [32] 蔡徐依, 田亚雄, 陈潘毅, 等. 固定化菌剂原位净化养殖水体效果及对微生物群落结构的影响[J]. 农业环境科学学报, 2023, 42(7): 1606-1615.
- [33] Bosma, R.H., Verdegem, M.C.J. (2011) Sustainable Aquaculture in Ponds: Principles, Practices and Limits. *Livestock Science*, **139**, 58-68. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2011.03.017>