

喻彩丽,李 亮,张 贝,等. 丛枝菌根真菌和解磷菌对青梅根系发育、磷吸收及土壤磷有效性的影响[J]. 江苏农业科学,2023,51(17):240-248.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2023.17.033

丛枝菌根真菌和解磷菌对青梅根系发育、磷吸收及土壤磷有效性的影响

喻彩丽¹, 李 亮¹, 张 贝¹, 郑明治¹, 秦 鹏², 李俊龙¹

(1. 汕尾职业技术学院海洋学院,广东汕尾 516600; 2. 塔里木大学信息工程学院,新疆阿拉尔 843300)

摘要:为探索丛枝菌根(AM)真菌与解磷细菌对果树根系发育、磷吸收及土壤解磷机制的影响,为果树高效复合型菌肥的研制提供理论依据,采用双因素设计,以大核青梅幼苗为试材,AM 真菌选用明根孢囊霉(*Rhizophagus clarus*),解磷细菌选用巨大芽孢杆菌(*Bacillus megatherium* ZS-3),设置 3 个磷(P)水平:0(低,P0)、50(中,P1)、100 mg/kg(高,P2),4 个施菌水平:接种丛枝菌根真菌(AM)、解磷细菌(PB)、结合接种(MX)和未接菌处理对照组(CK)。结果表明,无论 P 条件如何,微生物接种处理均增加了植物 P 浓度、P 总吸收量及生物量,促进了根系体积、表面积及侧根发育,生物 P 贡献表现为 $P2 < P0 < P1$,且 P1 处理下 MX 生物贡献率达 55.75%。此外,微生物处理在一定程度上提高了土壤酶(CAT、INV、ACP、PHY)活性及 Fe-P 含量,降低了土壤分子量有机酸含量及无机磷难溶组分(O-P、 Ca_{10} -P、Al-P)含量,且中低 P 处理下根际土壤磷的有效性显著提高。相关性分析结果表明,AM 处理下,无机磷组分与土壤有效磷(AP)、土壤有机酸关系密切;而 PB 处理下,有机磷含量与 AP 含量、土壤代谢酶活性显著相关。综上,接种 AM 真菌、溶磷细菌均可促进宿主根系发育,提高土壤 P 有效性以改善植物 P 吸收,但二者解磷机制存在差异,AM 真菌主要依赖有机酸活化难溶性无机磷组分从而提高根际磷有效性,解磷细菌则主要提高土壤酶活性以促进有机磷矿化,且中等 P 水平最利于发挥微生物的功能作用,即中等 P 土壤中双接种 AM 真菌和解磷细菌效果最佳。

关键词:丛枝菌根真菌;解磷细菌;根系构型;无机磷组分;低分子量有机酸

中图分类号:S662.406 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2023)17-0240-08

在全球农林业生产中,磷(P)是植物生长所需仅次于氮的第二大必需营养素。在植物体中,P 在碳代谢、光合作用、信号传导及酶活性等生理功能中发挥着重要作用,同时 P 是三磷酸腺苷、核糖体、核苷酸及磷脂的主要组成物质^[1]。在土壤中,P 的质量比不足 0.5%,且仅磷总量的约 0.1% 可供植物吸收,这使得 P 缺乏成为农林业系统中植物生长的重要限制因子^[2]。施用外源磷肥是人类提高土壤 P 有效含量的主要途径,然而土壤 pH 环境深刻影响着 P 的吸收。土壤为碱性时,无机磷酸盐主要沉淀为磷酸钙;而当土壤为酸性时,P 易被铝(Al)、铁(Fe)、锰(Mn)等相关水合氧化物固持^[3],目前全球 50% 以上的农业生态系统仍处于缺磷状态。此外,外源磷肥的施入使得土壤有效态磷急剧升高,当土壤水分较高时易随水份流动而产生流失,在高经济

成本的同时伴随着环境污染^[4],因此如何有效提高土壤内源性磷的有效含量已成为促进农林业可持续发展的重要方向。

在自然生态系统中,植物应对磷限制环境的生理策略包括改变根系构型、促进有机酸分泌、提高相关磷酸酶活性及上调高亲和力磷转运蛋白的表达,且研究表明植物对磷缺乏的响应程度及最终的磷收益受土壤微生物作用影响^[5]。丛枝菌根(AM)真菌和磷酸盐溶解细菌(PSB)是重要的土壤功能微生物,大量研究表明二者在不溶性磷养分的周转和生物利用度中扮演着重要角色^[6]。AM 真菌是隶属于球囊菌亚门(Glomeromycota)的活体专性共生菌根真菌,绝大部分的维管束植物可与其构建共生关系^[7]。在共生体系的构建过程中,宿主为 AM 真菌提供光合碳产物,作为回报,AM 真菌可改变植物根系形态、改善营养状况、降低重金属元素毒害及提高宿主抗非生物胁迫能力等,其中对植物 P 营养状况的改善最为突出^[8]。大量研究表明,接种 AM 真菌可有效通过提高根系表面积及根外菌丝途径改善宿主 P 缺乏,其中宿主 80% 的磷吸收量由 AM 真

收稿日期:2023-03-29

基金项目:国家自然科学基金地区基金(编号:42061046);广东省普通高校重点专项(编号:2021ZDZX4111)。

作者简介:喻彩丽(1989—),女,河南周口人,硕士,讲师,主要从事植物生态研究。E-mail: purejade@163.com。

菌直接或间接提供^[9]。

与 AM 真菌类似,PSB 亦是促进植物吸收土壤 P 的重要微生物,其主要包含假单胞菌属(*Pseudomonas*)、金黄杆菌属(*Chryseobacterium*)、沙雷菌属(*Serratia*)、芽孢杆菌属(*Bacillus*)及木霉菌属(*Trichoderma*)等^[10]。研究表明,PSB 可诱导宿主分泌有机酸和溶解酶类,将有机磷和不溶性磷转化为可供植物吸收利用的有效态磷,从而提高土壤中磷的利用效率以促进植物生长^[11]。巨大芽孢杆菌(*Bacillus megatherium*)是发现最早、解磷效果最稳定、推广面积最大的解磷功能菌株^[12],然而不同的 PSB 菌株对不溶性磷的解磷机制可能存在差异。青梅(*Prunus mume* Sieb. et Zucc.)隶属蔷薇科(Rosaceae)李属(*Prunus* L.)的落叶果树,梅子果含有多多种维生素、有机酸,是酸脆可口、生津止渴的消暑水果,而在医疗上是用途甚广的药品原料。青梅树喜温、好湿,多种植于我国南方酸性土壤地区,青梅的磷肥施入利用率较低^[13]。因此,本研究基于不同土壤 P 水平,探索了 AM 真菌、PSB 对不同 P 水平土壤的溶磷机制。研究结果可为今后微生物技术应用用于果树栽培提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究地点和材料

供试青梅品种为大核青梅,是广东地区主栽的青梅品种之一,供试大核青梅为 3 月龄苗,来自广东省普宁市青梅产业示范区。供试磷肥为磷酸钙 $[\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2]$,其 P_2O_5 含量 16.3%,购自默克试剂。供试丛枝菌根真菌为明根孢囊霉(*Rhizophagus clarus*),购自丛枝菌根真菌国际保藏中心(INVAM),接种物为具有孢子、菌丝和侵染宿主根段的砂土基质,孢子密度 50 个/g。供试磷酸盐溶解细菌为巨大芽孢杆菌(*Bacillus megatherium* ZS-3),来自石河子大学,该菌株从苜蓿根际筛选所得,已证实该菌株对苜蓿具有优良的溶磷效果^[11-12,14],所用接种形式为悬浊液,有效活菌总数大于 5.58×10^7 CFU/mL。

供试土壤取自汕尾市吉红农业示范园区,去除砾石、残根后采用苯菌灵熏蒸处理以达到灭菌效果。土壤类型为红壤,pH 值 5.26,0~20 cm 表层土壤有机质含量为 13.03 g/kg,全氮、全磷、全钾含量分别为 0.71、0.39、1.66 g/kg,速效氮、速效磷、速效钾含量分别为 49.56、7.89、94.02 mg/kg。

1.2 试验设计

试验采用完全随机设计,根据《土壤养分等级分级标准》P 水平设置为原土条件下外源施用 0 (P0)、50 (P1)、100 (P2) mg/kg,以模拟低、中、高土壤磷含量水平。上述每个 P 水平下均设置对照(CK)、单接种丛枝菌根真菌(AM)、单接种磷酸盐溶解细菌(PB)以及二者复合接种处理(MX)4 个子处理,试验共 12 个处理组合方式,每个处理 3 次重复,共 36 盆。AM 处理施用量为 40 g/kg,PB 处理施用量为 50 mL/kg,MX 处理则为单接种用量的一半。

采用圆形塑胶盆,每盆装土 8 kg,按磷水平处理施入相应磷肥用量,将磷肥、AM 真菌菌剂与土壤充分混合,PB 处理采用灌根方式施入,将 3 月龄的大核青梅幼苗转移至相应处理的土壤基质中。每周向盆体中加入 50 mL 无磷 Hoagland 营养液,且试验期间不定时适量加入蒸馏水,土壤含水率保持为 70%~80%。试验周期 86 d。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 植株生物量、P 含量及根系形态测定 培养 86 d 后,将青梅植株全部取出,自来水清洗获得完整根系,并使用 WinRHIZO 根系扫描仪(V800PHOTO,Epson,Japan)进行扫描,使用 RHI-ZO PRO Version 2017 分析系统测定根系表面积、根系体积、侧根数和根尖数。将青梅植株地上部、根系分开,70℃烘干至恒质量,记录其生物量,将植株粉碎过筛保存。采用 $\text{H}_2\text{SO}_4-\text{H}_2\text{O}_2$ 消化-钼锑抗比色法测定植株全磷含量。

1.3.2 土壤 P 组分含量及土壤代谢酶活性测定 从根部附近(<0.25 cm)收集根际土壤,根际土壤通过 0.15 mm 网筛。土壤全磷、土壤有效磷分别采用 NaOH 熔融、0.5 mol/L 碳酸氢钠提取,采用钼锑抗比色法进行含量测定。通过 2 mm 网筛进行其他土壤磷组分分析,有效磷(AP)含量采用 0.5 mol/L 碳酸氢钠提取-钼锑抗比色法测定,土壤有机磷含量采用灼烧-钼锑抗比色法测定;无机磷形态(O-P、Fe-P、Al-P、 Ca_{10} -P)含量参照《土壤农业化学分析方法》中酸性土壤无机磷形态的分级测定^[15]。

土壤过氧化氢酶(CAT)、土壤转化酶(INV)、酸性磷酸酶(ACP)、植酸酶(PHY)活性均采用北京索莱宝科技有限公司生产的试剂盒进行测定,其试剂盒号分别为 BC0100、BC3070、BC0140、BC5375。

1.3.3 土壤有机酸含量测定 根际土壤有机酸含量测定参照 Wang 等的方法^[16]略有修改。称取

10.00 g 根际土,采用 50 mL 超纯水在振荡器上振荡 2 h,然后将提取物以 8 000 r/min 离心 15 min,并采用有机膜(0.45 μm)过滤。滤液依次通过阳离子交换树脂柱和阴离子交换树脂柱,随后采用 1 mol/L HCl 洗脱阴离子交换柱内的有机酸组分,然后通过旋转蒸发仪以 90 r/min 蒸发浓缩。浓缩液采用超纯水稀释至 10 mL,然后有机膜过滤(0.45 μm),采用 Agilent1260 型高效液相色谱仪测定根际有机阴离子谱,色谱条件为:色谱柱 Rezex™ ROA(7.8 mm×300 mm,10 μm),进样量 0.1 μL;流动相:2.5 mmol/L H₂SO₄ 溶液,流速为 0.5 mL/min,波长为 210 nm。同时配置草酸、柠檬酸、酒石酸、奎宁酸以及琥珀酸的标准液用于绘制标准曲线。

1.4 数据分析

生物贡献率=(接种植物总吸磷量-未接种植物总吸磷量)/接种植物总吸磷量×100%。

借助 Microsoft Excel 2010 对相关试验数据进行初步整理,SPSS 23.0 软件进行方差分析与显著性检验,Origin 10.1 软件完成图形绘制。

2 结果与分析

2.1 AM 真菌和解磷细菌对青梅生物量、磷吸收及其生物贡献的影响

由表 1 可知,生物量中,地上部生物量大于根系生物量,无论在地上部还是根系,随着 P 水平的提高,其生物量增加。而在根质量比中,随着 P 水平提高,根系质量比降低。其中在 P0 条件下,与 CK 处理相比,微生物接种处理(AM、PB、MX)显著降低 11.11%~20.00%(*P*<0.05)。同样地,在 P1 水平

下显著降低 20.93%~23.26%,P2 水平处理下微生物接种处理仍下降 8.33%~11.11%,但处理间均无显著差异。P 浓度中,整体上地上部 P 浓度略微大于根系,随着磷水平提高,其组织 P 浓度增加。任一 P 水平处理下,微生物接种处理均提高了地上部、根系 P 浓度,尤其表现为 P1 处理中。植株 P 总含量由各组织生物量与 P 浓度构成,在 P 总含量中,在任一 P 水平处理下,微生物接种均显著大于 CK 处理,尤其表现在 AM 真菌与解磷菌双接种处理(MX),与 CK 处理相比,P0、P1、P2 水平下 MX 处理分别显著提高 110.27%、126.07%、53.79%。生物贡献率中,任一 P 水平下均以 MX 处理大于 AM、PB 处理,不同 P 水平处理生物贡献率高低顺序表现为 P2<P0<P1,其中在 P1 水平下,MX 处理较 AM、PB 处理分别显著提高 5.13、11.19 百分点。

2.2 AM 真菌和解磷细菌对青梅根系形态发育的影响

由表 2 可知,根系体积、表面积及根尖数中,整体以中高 P 水平处理(P1、P2)大于 P0 处理,其中根系体积和根尖数最大值为 P1 水平下 MX 处理,而根系表面积的最大值出现在 P2 水平下的 MX 处理,三者根系指标的最小值均为 P0 水平下的 CK 处理。就未接种处理(CK)而言,随着 P 水平处理升高,其根系体积、表面积及根尖数参数均增加。同一 P 水平处理下,相关微生物接种处理均大于 CK 处理。一级侧根数中以中高 P 水平处理(P1、P2)大于 P0 处理,但任一 P 水平及微生物接种处理间均无显著差异。二级侧根数中,亦以 P0 水平处理中的 CK 处理最少,侧根数最多的为 P1 水平处理下的 AM 处

表 1 AM 真菌和解磷细菌对青梅生物量、磷吸收及其生物贡献的影响

P 水平	生物处理	生物量(g/株)		根质量比	P 浓度(mg/g)		P 总含量(mg/株)	生物贡献率(%)
		地上部	根系		地上部	根系		
P0	CK	0.88±0.11f	0.72±0.05e	0.45±0.01a	1.17±0.09d	1.14±0.06d	1.85±0.19g	—
	AM	1.75±0.08cd	0.96±0.05d	0.36±0.01c	1.30±0.05c	1.27±0.05c	3.49±0.14e	47.04±1.11c
	PB	1.51±0.17d	1.01±0.04d	0.40±0.03bc	1.31±0.07c	1.26±0.05c	3.25±0.20e	43.08±1.68d
	MX	1.86±0.10c	1.05±0.08cd	0.36±0.02cd	1.35±0.11bc	1.31±0.07bc	3.89±0.16d	52.39±1.22b
P1	CK	1.18±0.15e	0.89±0.10d	0.43±0.01ab	1.25±0.06cd	1.23±0.06c	2.57±0.21f	—
	AM	2.41±0.18ab	1.23±0.08ab	0.34±0.01d	1.45±0.08ab	1.39±0.08ab	5.20±0.32b	50.62±0.93b
	PB	2.25±0.11b	1.15±0.06bc	0.34±0.01d	1.37±0.12bc	1.35±0.07ab	4.64±0.19c	44.56±3.07cd
	MX	2.59±0.16a	1.29±0.04a	0.33±0.01d	1.52±0.11a	1.45±0.06a	5.81±0.23a	55.75±1.96a
P2	CK	1.83±0.15cd	1.02±0.05d	0.36±0.02cd	1.38±0.06b	1.28±0.06b	3.83±0.18d	—
	AM	2.29±0.24ab	1.25±0.04ab	0.33±0.01d	1.53±0.08a	1.43±0.08ab	5.15±0.29b	25.59±1.09f
	PB	2.54±0.12a	1.22±0.07ab	0.32±0.02d	1.51±0.10ab	1.48±0.06a	5.64±0.15ab	32.09±2.01e
	MX	2.61±0.19a	1.28±0.06a	0.32±0.02d	1.52±0.05a	1.50±0.11a	5.89±0.17a	34.93±2.43e

注:同列数据后不同小写字母表示在 0.05 水平上差异显著,表 2、表 3 同。

表 2 AM 真菌和解磷细菌对青梅根系形态的影响

P 水平	生物处理	根系体积 (cm ³)	根系表面积 (cm ²)	一级侧根数 (枝)	二级侧根数 (枝)	根尖数 (枝)
P0	CK	1.81 ± 0.21e	143.36 ± 14.70f	35.84 ± 4.29a	113.99 ± 7.66e	481.24 ± 36.48e
	AM	2.39 ± 0.26cd	225.56 ± 24.74bc	39.75 ± 2.42a	132.35 ± 8.59bcd	705.80 ± 76.85ab
	PB	2.23 ± 0.36de	184.13 ± 23.01de	36.24 ± 4.01a	130.35 ± 4.24bcd	540.04 ± 16.00d
	MX	2.51 ± 0.31cd	222.46 ± 30.73bc	41.86 ± 3.33a	138.24 ± 5.39ab	722.56 ± 65.98ab
P1	CK	2.37 ± 0.46c	161.72 ± 9.65ef	36.34 ± 1.42a	133.51 ± 5.54bcd	522.95 ± 20.47de
	AM	2.78 ± 0.20bc	240.03 ± 14.68b	39.06 ± 1.35a	149.27 ± 11.61a	703.58 ± 52.97ab
	PB	2.84 ± 0.32bc	189.94 ± 9.40ede	37.77 ± 6.38a	134.36 ± 6.96bcd	683.96 ± 33.15b
	MX	3.83 ± 0.29a	267.02 ± 14.75ab	38.85 ± 2.12a	143.35 ± 9.26ab	862.09 ± 80.49a
P2	CK	2.52 ± 0.48bcd	165.51 ± 15.95ef	40.12 ± 5.47a	134.78 ± 7.75abc	577.23 ± 46.65cd
	AM	2.87 ± 0.34bc	181.99 ± 17.81de	41.98 ± 0.82a	133.93 ± 7.74bcd	686.97 ± 55.42b
	PB	2.86 ± 0.25bc	203.45 ± 21.98cd	39.02 ± 0.38a	138.68 ± 4.43ab	643.87 ± 37.26bc
	MX	3.06 ± 0.19b	285.06 ± 13.01a	39.16 ± 2.93a	141.05 ± 10.23ab	834.31 ± 43.07a

理;同一 P 水平处理下,微生物接种处理均大于 CK 处理,尤其表现在 P0 水平中,该 P 水平中,与 CK 处理相比,AM、PB、MX 处理显著提高 16.11%、14.35%、21.27%。

2.3 AM 真菌和解磷细菌对根际土壤全磷、有机磷及无机磷的影响

由图 1-A 可知,土壤全磷(TP)含量中,随着 P 水平升高,其全磷含量显著提高,但在同一 P 水平处理下各生物处理间均无显著差异。土壤有机磷(OGP)含量中,P0、P1、P2 水平处理间差异较小,而在同一 P 水平处理中,各处理整体呈 MX < PB < AM < CK,其中任一 P 水平下 CK 与 AM 处理间均无显著差异(图 1-B)。土壤有效磷中,随着 P 水平

升高,其有效磷含量显著提高,其中 P0 处理中,与 CK 处理相比,相关微生物接种处理显著提高 46.06% ~ 56.84%,P1 处理显著提高 25.11% ~ 33.99%。同样地,P2 水平下提高 1.65% ~ 2.68%,但处理间均无显著差异(图 1-C)。在无机磷组分中,各处理含量表现为铝磷(Al-P) < 铁磷(Fe-P) < 磷酸十钙(Ca₁₀-P) < 闭蓄态磷(O-P),且随着 P 水平的升高,无机磷组分(Al-P、Fe-P、Ca₁₀-P、O-P)含量均显著增加。其中同一 P 水平下微生物接种处理整体提高了 Al-P、Ca₁₀-P、O-P 含量,而降低了 Fe-P 含量。此外,无机磷组分(Al-P、Fe-P、Ca₁₀-P、O-P)含量中,任一 P 水平处理下,PB 处理与 CK 处理差异整体较小。

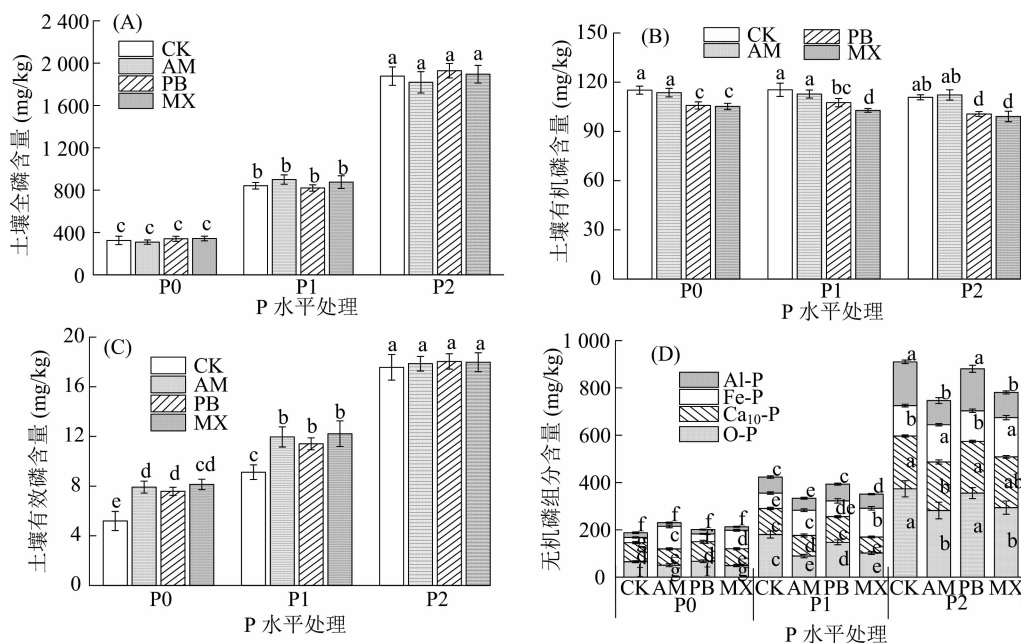


图 1 AM 真菌和解磷细菌对根际土壤全磷、有机磷及无机磷组分含量的影响

2.4 AM 真菌和解磷细菌对根际土壤代谢酶活性的影响

由图 2 - A 可知,土壤过氧化氢酶(CAT)中,随着 P 水平升高,CK 处理显著提高,而微生物接种处理(AM、PB、MX)则呈先升高后降低趋势;在 P₀、P₁ 水平处理中,与 CK 处理相比,微生物接种处理 CAT 活性分别显著提高 209.84% ~ 334.43%、111.65% ~ 366.99%;在 P₂ 水平处理中,微生物接种处理提高 11.54% ~ 33.79%,但两两处理间均无显著差异。由图 2 - B 可知,土壤转化酶(INV)以中高 P 水平(P₁、P₂)大于 P₀ 处理,且在任一 P 水平中,各生物

处理皆呈 CK < AM < PB < MX,与 CK 处理相比,在 P₀、P₁ 中微生物接种处理分别显著提高 634.75% ~ 845.64%、230.59% ~ 412.04%,而在 P₂ 水平下各处理均无显著差异。由图 2 - C 可知,土壤酸性磷酸酶(ACP)中以 P₁、P₂ 大于 P₀ 处理,且在任一 P 水平处理中各生物处理皆呈 CK、AM < PB、MX,CK 与 AM 差距较小,同一 P 水平处理下均无显著差异。且在 P₁ 处理下以 MX 处理大于其他处理,在 P₂ 水平下则以 PB 处理活性最高。各处理土壤植酸酶活性变化趋势与 ACP 规律基本一致(图 2 - D)。

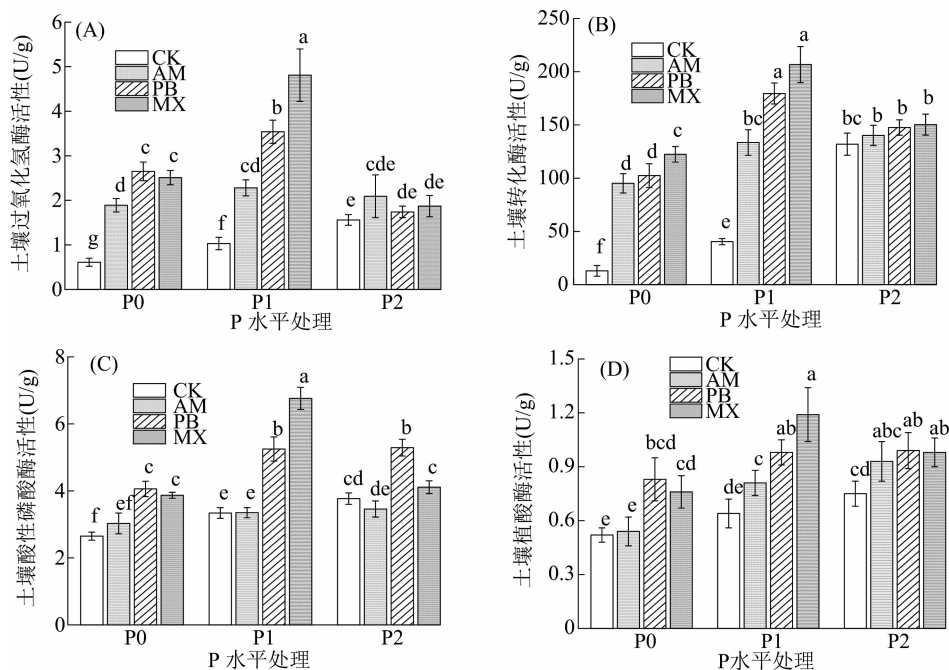


图2 AM 真菌和解磷细菌对根际土壤代谢酶活性的影响

2.5 AM 真菌和解磷细菌对根际土壤有机酸含量的影响

从表 3 可看出,青梅根际有机酸组分含量高低表现为奎宁酸 < 琥珀酸 < 酒石酸 < 柠檬酸 < 草酸,但不同有机酸指标中不同 P 水平处理和生物处理表现存在差异。草酸指标中,随着 P 水平升高,草酸含量提高,同一 P 水平下,微生物接种处理均低于 CK 处理,其中 P₀、P₁、P₂ 水平下微生物接种处理分别降低 30.26% ~ 40.24%、0.93% ~ 44.38%、2.91% ~ 43.42%。柠檬酸指标中,同一 P 水平下,与 CK 处理相比,相关微生物接种均显著降低,其中 P₀ 条件下 AM、PB、MX 分别显著降低 80.01%、66.14%、80.09%,P₁ 和 P₂ 水平下则分别显著降低 81.34%、60.37%、81.19% 和 62.24%、48.67%、58.53%。酒石酸指标中,随着 P 水平升高,CK 处理

酒石酸含量呈降低趋势,AM、MX 处理呈逐渐升高趋势,PB 则呈先升高后降低趋势,且在任一 P 水平下 CK 处理均大于相关微生物接种处理。各处理琥珀酸指标变化趋势与酒石酸规律基本一致。奎宁酸指标中,任一 P 水平下微生物接种处理均整体小于 CK 处理,其中在 P₀、P₁ 处理中,微生物接种处理与 CK 处理均无显著差异,而在 P₂ 水平下 AM、PB、MX 较 CK 处理分别显著降低 24.27%、19.88%、21.05%。

2.6 P 相关指标与土壤有机酸、土壤酶指标间的相关性分析

2.6.1 AM 真菌条件下 P 相关指标与土壤有机酸、土壤酶指标间的相关性分析

由表 4 可知,接种 AM 真菌条件下土壤有效磷(AP)含量与无机磷组分(O - P、Ca₁₀ - P、Fe - P、Al - P)含量、土壤总磷

表 3 AM 真菌和解磷细菌对根际土壤有机酸含量的影响

mg/kg

P 水平	生物处理	草酸含量	柠檬酸含量	酒石酸含量	琥珀酸含量	奎宁酸含量
P0	CK	160.36 ± 8.15b	26.82 ± 2.21a	14.85 ± 0.89a	18.53 ± 0.45a	2.96 ± 0.28ab
	AM	103.29 ± 5.66cd	5.36 ± 1.08d	3.71 ± 0.64h	3.81 ± 0.24e	2.75 ± 0.23b
	PB	111.84 ± 7.33c	9.08 ± 3.27cd	13.92 ± 0.69a	18.09 ± 0.18a	2.96 ± 0.42ab
	MX	95.83 ± 5.13d	5.34 ± 1.02d	6.02 ± 1.36g	3.89 ± 0.46e	2.56 ± 0.17b
P1	CK	196.41 ± 10.94a	27.38 ± 2.99a	13.68 ± 0.75ab	17.57 ± 0.79ab	3.25 ± 0.12a
	AM	194.58 ± 5.71a	5.11 ± 1.68d	3.73 ± 0.63h	3.02 ± 0.63e	2.81 ± 0.35ab
	PB	113.77 ± 9.32c	10.85 ± 0.69bc	10.22 ± 2.01cd	15.59 ± 1.77bc	2.89 ± 0.29ab
	MX	109.25 ± 6.75c	5.15 ± 2.31d	9.22 ± 0.55de	5.76 ± 0.27d	3.06 ± 0.22ab
P2	CK	205.62 ± 7.72a	27.78 ± 2.18a	13.19 ± 1.61abc	15.38 ± 1.02bc	3.42 ± 0.35a
	AM	121.27 ± 13.39c	10.49 ± 3.62bcd	7.03 ± 0.75fg	6.12 ± 0.41d	2.59 ± 0.25b
	PB	199.63 ± 8.96a	14.26 ± 1.45b	11.65 ± 1.27bcd	14.95 ± 0.67c	2.74 ± 0.13b
	MX	116.34 ± 9.52c	11.52 ± 1.92bc	6.57 ± 0.38g	5.87 ± 0.36d	2.70 ± 0.28b

(TP) 含量及植物相关 P 指标(地上 P 浓度、根系 P 浓度、P 总含量)均存在显著($P < 0.05$)或极显著($P < 0.01$)的相关关系,而与酸性磷酸酶(ACP)活性、植酸酶(PHY)活性、柠檬酸含量、琥珀酸含量存在显著或极显著正相关。无机磷组分中,铁磷(Fe-P)与柠檬酸、琥珀酸存在密切关系外,与其他土壤指标均无显著相关关系;而其他无机磷组分(O-P、Al-P、Ca₁₀-P)则整体与土壤转化酶(INV)、草酸、柠檬酸、酒石酸、琥珀酸存在密切相关。植物相关 P 指标(地上 P 浓度、根系 P 浓度、P 总含量)与相关有机酸(草酸、柠檬酸、酒石酸、琥珀酸)含量表现为显著或极显著正相关。

2.6.2 解磷细菌条件下 P 相关指标与土壤有机酸、土壤酶指标间的相关性分析 由表 5 可知,接种解磷细菌条件下土壤,AP 含量与土壤无机磷组分(O-P、Ca₁₀-P、Fe-P、Al-P)含量、TP 含量及植物相关 P 指标(地上 P 浓度、根系 P 浓度、P 总含

量)均存在显著或极显著正相关,而与土壤有机磷(OGP)含量呈显著负相关,与 PHY 活性、草酸含量、柠檬酸含量呈显著正相关。土壤无机磷组分(O-P、Ca₁₀-P、Fe-P、Al-P)、TP 与相关土壤酶和土壤有机酸组分相关性较低,仅闭蓄态磷(O-P)、Al-P 与草酸存在显著、极显著正相关,Fe-P 与柠檬酸存在显著负相关。OGP 含量与 AP 含量、CAT 活性、转化酶(INV)活性、柠檬酸含量显著或极显著负相关,与酸性磷酸酶(ACP)活性、植酸酶(PHY)活性呈显著、极显著正相关。植物相关 P 指标(地上 P 浓度、根系 P 浓度、P 总含量)则整体与 INV 活性、PHY 活性、草酸含量、柠檬酸含量、酒石酸含量、琥珀酸含量存在较强的正相关关系。

3 讨论与结论

土壤磷限制深刻影响着植物生产力,植物可通过调节自身生理代谢及根际趋化策略以改善土壤

表 4 AM 真菌条件下 P 相关指标与土壤有机酸、土壤酶指标间的相关性分析

指标	相关系数									
	AP 含量	CAT 活性	INV 活性	ACP 活性	PHY 活性	草酸含量	柠檬酸含量	酒石酸含量	琥珀酸含量	奎宁酸含量
AP 含量	1.00	0.62	0.63	0.76 *	0.78 *	0.69	0.89 **	0.55	0.75 *	-0.49
O-P 含量	-0.97 **	-0.42	-0.82 *	-0.61	-0.50	0.81 *	0.97 **	0.76 *	0.78 *	-0.70
Ca ₁₀ -P 含量	-0.92 **	-0.29	-0.78 *	-0.48	-0.35	0.79 *	0.99 **	0.80 *	0.68	-0.22
Fe-P 含量	0.76 *	0.58	0.65	0.71	0.64	-0.67	-0.90 **	-0.64	-0.82 *	-0.63
Al-P 含量	-0.93 **	-0.65	-0.78 *	-0.71	-0.70	0.78 *	0.88 **	0.82 *	0.78 *	-0.66
TP 含量	0.99 **	0.58	0.6	0.69	0.62	0.68	0.92 **	0.58	0.74	-0.10
OGP 含量	-0.30	-0.10	-0.63	-0.66	-0.56	0.20	-0.32	-0.77 *	-0.59	0.23
地上 P 浓度	0.88 **	0.55	0.60	0.67	0.74	0.86 *	0.83 *	0.85 *	0.92 **	-0.06
根系 P 浓度	0.87 *	0.37	0.65	0.79 *	0.76 *	0.77 *	0.91 **	0.94 **	0.92 **	0.03
P 总含量	0.79 *	0.25	0.50	0.74	0.65	0.85 *	0.92 **	0.95 **	0.97 **	0.17

注: *、** 分别表示指标间在 0.05、0.01 水平上显著、极显著相关。表 5 同。

表 5 解磷细菌条件下 P 相关指标与土壤有机酸、土壤酶指标间的相关性分析

指标	相关系数									
	AP 含量	CAT 活性	INV 活性	ACP 活性	PHY 活性	草酸含量	柠檬酸含量	酒石酸含量	琥珀酸含量	奎宁酸含量
AP 含量	1.00	0.35	0.60	0.45	0.80 *	0.77 *	0.81 *	0.31	0.63	-0.18
O - P 含量	0.96 **	0.04	0.35	0.19	0.42	0.79 *	0.61	0.16	0.53	-0.05
Ca ₁₀ - P 含量	0.92 **	0.01	0.27	0.18	0.32	0.70	0.72	0.17	0.44	-0.06
Fe - P 含量	0.88 **	0.67	-0.62	-0.65	-0.66	-0.51	-0.77 *	-0.21	-0.48	0.53
Al - P 含量	0.92 **	0.04	0.34	0.11	0.45	0.88 **	0.40	0.06	0.53	-0.03
TP 含量	0.99 **	0.26	0.53	0.40	0.58	0.70	0.70	0.29	0.65	-0.15
OGP 含量	-0.85 *	-0.78 *	-0.95 **	0.76 *	0.88 **	-0.51	-0.77 *	-0.21	-0.48	-0.74
地上 P 浓度	0.86 *	0.71	0.85 *	0.73	0.90 **	0.80 *	0.74	0.71	0.78 *	-0.42
根系 P 浓度	0.94 **	0.61	0.82 *	0.67	0.87 *	0.79 *	0.83 *	0.76	0.82 *	-0.36
P 总含量	0.88 **	0.67	0.89 **	0.72	0.92 **	0.72	0.79 *	0.80 *	0.90 **	-0.32

磷胁迫^[17]。丛枝菌根(AM)真菌和磷酸盐溶解细菌是重要的土壤功能微生物,在土壤 P 代谢、周转及循环中扮演着重要角色^[10,18]。本研究中,在不同 P 水平处理下,与未接种处理(CK)相比,AM 真菌、解磷细菌单接种(AM、PB)或双接种处理(MX)均提高了青梅根系、地上生物量及 P 浓度,且在 P 总含量中,P0、P1 水平下各处理均表现为 CK < PB < AM < MX。前人研究表明,AM 真菌外生菌丝可通过形成致密的菌丝网络,增加根系与土壤的接触面积,从而有效促进土壤养分吸收^[19],这可能是 AM 处理表现较优的缘故。本研究中,较高 P 水平(P2)中 PB 处理的磷吸收量高于 AM 处理,这可能由于较高 P 水平下,植物通过根系直接吸收的 P 数量即可满足自身需求,AM 菌根的依赖性降低^[7,16],因此 AM 真菌的生物贡献率降低。此外,本研究进一步表明,生物贡献率中,以 P1 水平的生物贡献率最高,尤其表现在 MX 处理(55.75%),这表明中等 P 水平下接种 AM 真菌和解磷细菌对宿主磷营养的促进作用最为显著。

根系是植物获取土壤养分资源的主要器官,更粗且更致密的根系构型往往拥有着更大的表面积,可通过增加与土壤的接触以更好地吸收土壤养分^[20]。本研究结果表明,在根系质量比中,P 水平处理表现为 P2 < P1 < P0,且任一 P 水平下,与 CK 处理相比,相关微生物处理(AM、PB、MX)根系质量比均降低。前人研究指出,为适应低 P 环境,植物倾向于把较多的养分分配于根部,以保证根系的发育,为获取养分提供可能^[17,21];充足的磷供应条件下则可将更多的养分分配于地上部,以保证空间伸

展从而同化更多的光合产物^[22]。相关微生物处理下根系质量比降低则意味着宿主的生长发育得到了改善。本研究中,任一 P 水平下微生物接种处理均有效促进根系体积、根系表面积、根尖数、一级侧根及二级侧根的发育,尤其表现在 P1 条件,这与相关的研究结论趋于一致:较低的土壤 P 环境中,植物可供于根际的碳衍生物有限,不利于根际功能菌的繁殖;较高 P 含量时,根际微生物的作用削弱;中等 P 水平最有利于发挥微生物的功能作用^[12]。

土壤磷形态及其含量是决定 P 有效性的重要因素,酸性土壤无机磷可分成铝磷(Al - P)、铁磷(Fe - P)、钙磷(Ca - P)和闭蓄态磷(O - P),其中钙磷中的 Ca₁₀ - P 是难溶性磷,Al - P、Fe - P 是植物的第二有效磷源,而 O - P 是被土壤胶体固持的潜在磷源^[23]。侯殿明的研究表明,盆施 40g/kg AM 真菌菌剂可将不溶和难溶性磷(O - P、Ca₁₀ - P)活化为可用性磷(A - P、Ca₂ - P、Ca₈ - P、Fe - P),从而促进辣椒对磷的吸收^[24]。刘俊英等的研究表明,施磷水平、AM 真菌与芽孢属解磷细菌互作可有效提高土壤全磷和有效磷含量,从有效提高苜蓿种植的磷肥偏生产力及磷肥农学效率^[25]。本研究结果表明,施磷水平下,接种 AM 真菌与解磷细菌均在一定程度上降低了土壤有机磷(OGP)、Ca₁₀ - P、Al - P 和 O - P 含量,提高了 AP 和 Fe - P 含量,这与 Wahid 等的研究结论^[26]一致。然而,试验数据来看,AM 真菌与解磷细菌对 OGP、无机磷组分(Al - P、Fe - P、Ca₁₀ - P、O - P)影响效果存在偏向差异,即 AM 真菌处理对无机磷组分的影响较为深刻,对 OGP 影响较小,而解磷细菌处理则反之。

土壤酶在土壤肥力和土壤健康中发挥着重要作用,其活性可反映土壤微生物功能活性,有助于调节土壤质量及土壤生态^[20,27]。低分子量有机酸参与土壤多种代谢过程,可提高养分可用性和维持内部电荷平衡,在养分有限的环境中植物可分泌更多的有机酸至根际以活化和吸收难溶性养分^[28]。本研究结果表明,土壤过氧化氢酶(CAT)、转化酶(INV)、酸性磷酸酶(ACP)、植酸酶(PHY)中PB处理酶活性整体高于AM处理,这表明接种解磷细菌可以增加土壤微生物活性。而在相关有机酸组分(草酸、柠檬酸、酒石酸、琥珀酸、奎宁酸)中,任一P水平下,PB与CK处理差距均较小,而AM处理有机酸含量明显下降。有机酸可与磷酸盐竞争固定位点,甚至置换被吸附在土壤黏土表面的磷酸盐,且可与 Al^{3+} 、 Ca^{2+} 和 Fe^{3+} 等金属离子形成可溶性络合物,从而提高土壤P的有效性^[29]。相关性分析结果表明,接种AM真菌条件下,无机磷组分整体与AP、土壤有机酸存在密切关系,而接种解磷细菌条件下,有机磷含量整体与AP、土壤代谢酶活性显著相关。

综上,本研究结果表明,土壤P0(低)、50(中)、100(高)mg/kg水平下,接种AM真菌、解磷细菌均可有效促进青梅根系发育、生物量累积,活化根际磷有效性以提高磷吸收量,尤其表现在中等P水平下。但AM真菌、解磷细菌二者的解磷机制不同,AM真菌主要依赖根际有机酸活化难溶性无机磷组分从而提高根际磷有效性,解磷细菌则主要诱导土壤代谢酶活性从而促进有机磷矿化,二者组合接种时效果最佳。

参考文献:

- [1] de Bang T C, Husted S, Laursen K H, et al. The molecular – physiological functions of mineral macronutrients and their consequences for deficiency symptoms in plants [J]. The New Phytologist, 2021, 229(5): 2446 – 2469.
- [2] Cho H, Bouain N, Zheng L Q, et al. Plant resilience to phosphate limitation: current knowledge and future challenges [J]. Critical Reviews in Biotechnology, 2021, 41(1): 63 – 71.
- [3] 刘 瑾, 杨建军. 近三十年农田土壤磷分子形态的研究进展 [J]. 土壤学报, 2021, 58(3): 558 – 567.
- [4] 杨林章, 冯彦房, 施卫明, 等. 我国农业面源污染治理技术研究进展 [J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(1): 96 – 101.
- [5] Wang R Z, Lu J Y, Jiang Y, et al. Carbon efficiency for nutrient acquisition (CENA) by plants: role of nutrient availability and microbial symbionts [J]. Plant and Soil, 2022, 476(1): 289 – 300.
- [6] Wahid F, Sharif M, Fahad S, et al. Mycorrhiza and phosphate solubilizing bacteria: potential bioagents for sustainable phosphorus

- management in agriculture [J]. Phytom, 2022, 91(2): 257 – 278.
- [7] 曹本福, 姜海霞, 陆引罡, 等. 烟草与丛枝菌根真菌的共生效应研究进展 [J]. 中国土壤与肥料, 2021(1): 327 – 338.
- [8] 王亚妮, 申晓晨. 丛枝菌根真菌与赤霉素对盐胁迫下番茄生长及生理化的影响 [J]. 江苏农业科学, 2022, 50(20): 174 – 182.
- [9] 薛英龙, 李春越, 王荻蓉, 等. 丛枝菌根真菌促进植物摄取土壤磷的作用机制 [J]. 水土保持学报, 2019, 33(6): 10 – 20.
- [10] 付小猛, 毛加梅, 杨虹霞, 等. 果树根际微生物研究综述 [J]. 中国果树, 2021(11): 5 – 9.
- [11] Liu J Y, Liu X S, Zhang Q B, et al. Response of alfalfa growth to arbuscular mycorrhizal fungi and phosphate – solubilizing bacteria under different phosphorus application levels [J]. AMB Express, 2020, 10(1): 1 – 13.
- [12] 孙艳梅, 张前兵, 苗晓茸, 等. 解磷细菌和丛枝菌根真菌对紫花苜蓿生产性能及地下生物量的影响 [J]. 中国农业科学, 2019, 52(13): 2230 – 2242.
- [13] 黄世宇. 不同有机肥处理对青梅产量、优果率与经济效益的影响 [J]. 东南园艺, 2020, 8(4): 41 – 44.
- [14] An X X, Liu J Y, Liu X S, et al. Optimizing phosphorus application rate and the mixed inoculation of arbuscular mycorrhizal fungi and phosphate – solubilizing bacteria can improve the phosphatase activity and organic acid content in alfalfa soil [J]. Sustainability, 2022, 14(18): 11342.
- [15] 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.
- [16] Wang P, Wang T Y, Wu S H, et al. Effect of arbuscular mycorrhizal fungi on rhizosphere organic acid content and microbial activity of trifoliate orange under different low P conditions [J]. Archives of Agronomy and Soil Science, 2019, 65(14): 2029 – 2042.
- [17] 许仙菊, 张永春. 植物耐低磷胁迫的根系适应性机制研究进展 [J]. 江苏农业学报, 2018, 34(6): 1425 – 1429.
- [18] Sagar A, Rathore P, Ramteke P W, et al. Plant growth promoting rhizobacteria, arbuscular mycorrhizal fungi and their synergistic interactions to counteract the negative effects of saline soil on agriculture: key macromolecules and mechanisms [J]. Microorganisms, 2021, 9(7): 1491.
- [19] 曹本福, 姜海霞, 刘 丽, 等. 丛枝菌根菌丝网络在植物互作中的作用机制研究进展 [J]. 应用生态学报, 2021, 32(9): 3385 – 3396.
- [20] Liu D. Root developmental responses to phosphorus nutrition [J]. Journal of Integrative Plant Biology, 2021, 63(6): 1065 – 1090.
- [21] 黄小辉, 夏 鹰, 冯大兰, 等. 缺磷胁迫对核桃幼苗生长及生理特征的影响 [J]. 土壤通报, 2022, 53(3): 613 – 622.
- [22] 曹翠玲, 毛圆辉, 曹朋涛, 等. 低磷胁迫对豇豆幼苗叶片光合特性及根系生理特性的影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(6): 1373 – 1378.
- [23] 黄雨轩, 林宇岚, 张林平, 等. AM真菌和无机磷对油茶苗磷吸收和培养土壤磷组分的影响 [J]. 林业科学研究, 2022, 35(5): 33 – 41.
- [24] 侯殿明. 丛枝菌根真菌对盐渍土辣椒生长、生理代谢及土壤无机磷组分的影响 [J]. 江苏农业科学, 2022, 50(15): 101 – 107.

丁宝根,王怡婷. 基于熵权 TOPSIS 模型的我国农业绿色发展水平评价及影响因素分析[J]. 江苏农业科学,2023,51(17):248-256.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2023.17.034

基于熵权 TOPSIS 模型的我国农业绿色发展水平评价及影响因素分析

丁宝根,王怡婷

(东华理工大学,江西南昌 330013)

摘要:为构建农业绿色发展水平评价指标体系,对 2011—2020 年我国农业绿色发展水平进行测度[因香港特别行政区、澳门特别行政区、台湾地区(简称港澳台地区)数据缺失,故选择全国及 31 个省(市、区)作为研究对象],探究其时空演变特征,并以相对贴进度和阻碍度作为研判标准,分析影响农业绿色发展水平相关因素,以期为推动我国农业绿色发展提供参考。采用熵权 TOPSIS 模型、阻碍度模型进行分析。结果表明,2011—2020 年全国农业绿色发展水平在时序上持续改善,水平综合评分涨幅较大,相比 2011 年,2020 年水平综合评分涨幅达 679.35%;一级指标综合评分波动幅度存在差异性,其中质量高效评分涨幅最大;2011—2020 年全国农业绿色发展水平在空间上呈现较大的省际差异性,31 个省(市、区)农业绿色发展水平及水平改善程度存在较大差距,北京、上海等地水平较高,河南、贵州等地水平较低;农业绿色发展一级指标相对贴进度整体提高,生态保育对农业绿色发展水平优化程度最大;一级指标阻碍度均有所下降,资源节约是阻碍农业绿色发展水平改善的主要因素。2011—2020 年全国及 31 个省(市、区)农业绿色发展水平整体处于增长阶段,但农业绿色发展水平及其改善程度存在省际差异性,应引导各主体协同推进农业绿色发展,并通过完善农业绿色发展支撑体系、实施差异化农业绿色发展策略等措施推动不同地区齐头并进,进而提高农业绿色发展整体水平。

关键词:熵权 TOPSIS;农业绿色发展水平;影响因素;阻碍度

中图分类号:S181;F323 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2023)17-0248-09

绿色是农业的底色,“推进农业绿色发展,营造良好生态环境”既是贯彻落实生态文明建设的具体要求,也是全面推进乡村振兴的主要内容,更是满足人们对美好生活追求的重要举措。长期以来,“高耗能、高污染、高排放”的传统农业生产方式导致生态环境破坏、农业面源污染加剧、耕地地力下降、农业绿色产出效益低下等,农业发展与生态环境保护之间的矛盾仍较突出,亟须推动农业向绿色

化转型升级。党的十八大以来,我国高度关注生态文明建设,特别是党的十八届五中全会提出五大发展理念后,“绿色发展理念”逐渐成为全党全社会的共识,为农业绿色发展奠定了良好基础。2021 年农业农村部等多部门联合发布《“十四五”全国农业绿色发展规划》,列出农业绿色发展重点任务清单,要求目标同向、资源同聚、力量同汇,共同推进农业绿色发展。2022 年中央一号文件明确提出要推进农业农村绿色发展,从加强农业面源污染综合治理、建设国家农业绿色发展先行区等方面入手。在此背景下,农业绿色发展相关研究引起了学术界的广泛关注。农业绿色发展是以经济效益、环境效益、社会效益的协调发展为目标,采用先进的农业设施、技术和理念,提高资源合理化利用水平,实现农

收稿日期:2022-09-29

基金项目:国家社会科学基金(编号:19CJY040);江西省高校人文社会科学项目(编号:JJ20208);江西省抚州市社会科学规划项目(编号:21SK06)。

作者简介:丁宝根(1985—),男,江西南昌人,博士,副教授,从事资源与产业绿色低碳高质量发展研究。E-mail:592852935@qq.com。

[25]刘俊英,回金峰,孙梦瑶,等. 施磷水平和接种 AMF 与解磷细菌对苜蓿产量及磷素利用效率的影响[J]. 农业工程学报,2020,36(19):142-149.

[26]Wahid F,Fahad S,Danish S,et al. Sustainable management with mycorrhizae and phosphate solubilizing bacteria for enhanced phosphorus uptake in calcareous soils[J]. Agriculture, 2020, 10(8):334.

[27]梁文举,董元华,李英滨,等. 土壤健康的生物学表征与调控[J]. 应用生态学报,2021,32(2):719-728.

[28]王永壮,陈欣,史奕,等. 低分子量有机酸对土壤磷活化及其机制研究进展[J]. 生态学杂志,2018,37(7):2189-2198.

[29]Etesami H, Jeong B R, Glick B R. Contribution of arbuscular mycorrhizal fungi, phosphate-solubilizing bacteria, and silicon to P uptake by plant[J]. Frontiers in Plant Science, 2021, 12:699618.