

微生物肥料的类型及菌种

益禾箭生物技术公司编译组

生物肥料，也称为微生物接种剂，是含有特定微生物的有机产品，这些微生物来自植物的根和根区。已证明它们能促进植物生长和提高产量 10–40%。这些生物接种剂定植在根际和植物内部，当施用于种子、植物表面或土壤时，促进植物生长。它们不仅通过增加土壤养分来提高土壤肥力和作物生产力，而且还保护植物免于病虫害。它们已经被证明能促进根系的生长，延长其寿命，降解有害物质，提高幼苗存活率，缩短开花时间。另一个有益的方面是，在连续使用生物肥料 3–4 年后，不需要再使用它们，因为亲本接种量足以维持其生长和增殖。

植物的正常生长和发育需要 17 种基本元素，其中氮(N)、磷(P)和钾(K)的需要量都比较大。几种微生物通常用作生物肥料，包括固氮土壤细菌和蓝藻细菌，溶磷细菌，以及它们和霉菌与真菌的组合使用。同样，植物激素产生菌也用于生物肥料配方，它们为植物提供促进生长的物质，如吲哚乙酸(IAA)、氨基酸和维生素，并在保持作物产量的同时提高生产力和土壤肥力。

生物肥料根据其功能和作用方式分为不同的类型。常用的生物肥料有固氮剂(N-fixer)、增钾剂(K- solubilizer)、增磷剂(P- solubilizer)和根际促生细菌(PGPR)。在一克肥沃的土壤中，可存在多达 10^{10} 个细菌，活重达 2000 公斤/公顷。土壤细菌可以是球菌(球形 0.5, μm)、杆菌(杆状, 0.5–0.3 μm)和螺旋形(1–100 μm)。土壤中细菌的存在取决于土壤的物理和化学性质、有机质和磷含量以及栽培活动。然而，细菌的营养固定和促进植物生长是实现未来可持续农业目标的关键组成部分。微生物还促进了生态系统中的各种营养循环。表 1 根据使用的微生物类型和作用方式总结了生物肥料的分类，并附有适当的例子。

1. 固氮微生物肥料

氮是植物生长过程中最具限制性的营养因子。大气中约有 80%的氮以自由态存在，但大多数植物不能利用大气中的氮。需要一组专门的微生物来固定这些氮并使其为植物所用。这些微生物被称为生物固氮剂(BNFs)。它们将惰性 N_2 转化为植物可利用的有机形式。固氮可提供 300–400kg N/ha/年，增产 10–50%。在植物

中，高达 25%的总氮来自于 N 固定。植物的根向土壤中释放物质，这些物质支持植物根际细菌的定殖和固氮。它们可以在不同程度上有效地替代化肥，从而减少环境中的化学负荷。这种替换的粗略近似值见表 2。它们被分组为自由生活的细菌(固氮细菌和固氮螺旋菌)、蓝绿藻及共生体，如根瘤菌、弗兰无氏菌和红萍。与豆科植物相关的固氮细菌包括，根瘤菌、慢生根瘤菌，田菁茎瘤菌，中华根瘤菌，以及那些和非豆科植物相关的，包括无色菌、产碱杆菌属、节杆菌属、醋菌属、氮单胞菌属、拜叶林克氏菌属、肠杆菌属、欧文氏菌、脱磷孤菌属、德克斯氏菌属、棒状杆菌、弯曲杆菌、克雷伯氏菌、分枝杆菌等等。虽然从根际分离出许多属，但主要是固氮菌属和固氮菌属的成员已被广泛测试，以提高豆科和谷类作物在田间条件下的产量。主要的 N₂ 固定细菌如下所述。

1.1. 根瘤菌

根瘤菌属于细菌家族根瘤菌科，是共生固氮的最好例子。它可以在豆科作物和非豆科作物中固定 N₂。在不同的豆科作物中，根瘤菌的固氮量可达 300 公斤/公顷/年。细菌感染豆科植物的根部并形成根瘤，在根瘤内，它们将分子氮还原为氨，而氨被植物用来生产蛋白质、维生素和其他含氮化合物。因此，这些根瘤充当了生产氨的工厂。根瘤菌通过诱导根系形态和生长生理的变化来促进非豆科植物的生长。施用根瘤菌可提高作物株高、种子萌发、叶片叶绿素含量和氮含量，从而促进作物生长。根瘤菌、慢生根瘤菌、中华根瘤菌、田菁茎瘤菌和中根瘤菌统称为根瘤菌。它们可以通过固氮或影响植物激素直接作用，也可以通过抑制病原菌间接作用。根瘤菌通常用于农业实践以确保充足的氮(大约 80%的生物固定氮来自共生)，并有潜力取代化学氮肥。根瘤菌在保持土壤肥力的同时还能提高作物产量。

1.2. 固氮菌

固氮细菌是一种自由生活的固氮细菌，由于具有多种代谢功能，它们在氮循环中起着重要的作用。固氮菌有产生维生素如硫胺素和核黄素的能力。它属于固氮菌科，是所有非豆科植物的生物肥料，特别是水稻、棉花、蔬菜、甘蔗、甘薯和甜高粱。Dutta 和 Singh(2002)报道，接种固氮菌后，油菜和芥菜的种子产量显著增加。它的固氮量约 30 公斤/年。它主要商业化于甘蔗作物，使甘蔗产量增加 25 50 吨/公顷，含糖量增加 10 15%。固氮菌存在于碱性和酸性土壤中。圆褐

微生物肥料的分类、菌种、作用机制

微生物肥料	作用机制	菌种	实例
-------	------	----	----

固氮菌是土壤中最常见的种类，但其他普遍的种类如棕色固氮菌、*A. insignis*、*A. beijerinckii* 和 *A. macrocytogenes* 也被发现。固氮菌还会产生抗真菌化合物和抗生素，抑制几种病原真菌在根区的生长，有助于防止幼苗死亡。固氮菌增殖的主要限制因素是土壤中有机质的减少；因此，根平面缺乏固氮菌细胞。

1.3. 固氮螺菌

这种细菌也是必不可少的，因为它能在土壤中固定相当数量的氮。在非豆科植物如谷类、小米、油籽、棉花和高粱中，它的固氮量可达 20–40 kg N/ha。它主要与植物形成共生关系。一些研究表明了固氮螺菌在作物改良方面的潜力。固氮螺菌接种的小麦幼苗水分状况良好；种子接种的鲜重高于种子未接种的。

Somers 等(2005)的研究表明，巴西固氮螺菌可以合成苯乙酸(PAA)，这是一种具有抗微生物活性的类生长素分子。结果表明产脂螺菌和巨大芽孢杆菌共接种可为植株提供平衡的氮磷营养，产量高于仅接种固氮螺杆菌。

1.4. 项圈藻-红萍共生体

它是一种共生细菌，用于固定大气中的氮，主要存在于水稻中。它总是与一种被称为红萍的自由浮动的蕨类植物联系在一起。红萍叶中氮含量 4–5% (按干重计算) 和 0.2–0.4% (按湿重计算)，能快速分解，为植株提供氮素。红萍-项圈藻系统贡献 1.1 kg N/ha/day。一种红萍在大约 20–25 天内为水稻提供了 20–40 公斤 N/公顷。在许多国家，如越南、中国、泰国和菲律宾，红萍被用作生物肥料。使用这种生物肥料的另一个好处是它的耐金属能力，因此，可以应用于重金属污染区域。

1.5. 蓝细菌（蓝绿藻）

固氮蓝藻是地球上最广泛的固氮剂。蓝绿藻或蓝细菌是原核生物中一种多样化的群体。它们在以氮素营养土壤、提供复合维生素 B 和像生长素、吲哚乙酸、赤霉素等生长促进物质方面都有重要作用。据报道，农业中施用蓝藻可提高植物的氮利用率，特别是在稻田中。蓝藻已被证明能提高小麦和水稻种子的

固氮菌	固定大气中的氮气，使氮素对植物有效化	自由固氮菌	<i>Azotobacter, Anabaena, Clostridium, Aulosira Bejerinkia, Nostoc, Klebsiella, Stigonema, Desulfovibrio, Rhodospirillum, and Rhodopseudomonas</i>
		联合固氮菌	<i>Rhizobium, Frankia, Anabaena azollae, and Trichodesmium</i>
		共生固氮菌	<i>Azospirillum spp., Herbaspirillum spp., Alcaligenes, Enterobacter, Azoarcus spp. Acetobacter diazotrophicus</i>
溶磷	通过分泌有机酸使土壤中不溶性磷转化为可溶性磷，通过降低 pH 溶解绑定的磷	细菌	<i>Bacillus circulans, B subtilis, Pseudomonas striata, Penicillium spp. B. polymyxa Micrococcus Agrobacterium, Aereobacter and Flavobacterium</i>
			$P \bigcirc \emptyset = \square = (L) L - (M)$
			$(S) P (P) . ,$
磷调动	把磷从土壤转移到根皮层。这些是广谱生物肥料。	真菌	$A (S) P \bigcirc \bigcirc / Q = (L) L - (S)$
			$\angle \vee \angle (M) \square \bigcirc = \angle \emptyset \triangle$
			$T \bigcirc = \square \nearrow \square \triangle \bigcirc \bigcirc (M) \angle$
磷调动	把磷从土壤转移到根皮层。这些是广谱生物肥料。	菌根菌	<i>Arbuscular mycorrhiza, Glomus spp., Gigaspora spp., Acaulospora spp., Scutellospora spp., and</i>

			<i>Sclerocystis spp.</i>
			<i>Bacillus. mucilaginosus, B.</i>
			<i>circulanscan, B.</i>
			<i>edaphicus, and [18]</i>
			<i>Arthrobacter spp.</i>
溶钾	通过产生分解硅酸盐的有机酸来溶解钾(硅酸盐)，并帮助脱除金属离子，使其对植物有效。	细菌	
		真菌	<i>AS(P)OQ/L—S</i>
			<i>Q=QOQ.</i>
钾调动	调动土壤中根难以接触到的钾元素。	细菌	<i>Bacillus spp.</i>
		真菌	<i>Aspergillus niger.</i>
	将硫氧化成可供植物使用的硫酸盐。	硫氧化细菌	<i>Thiobacillus spp.</i>
中微量元素	通过质子、螯合配体、酸化和氧化还原系统使锌溶解。	锌溶解菌	<i>Mycorhiza</i>
			<i>Pseudomonas spp.,</i>
			<i>and Bacillus spp.</i>
			<i>Pseudomonas spp.</i>
			<i>Agrobacterium,</i>
促进植物生长	产生促进根系生长的激素，提高养分利用率，提高作物产量	植物根际促生细菌 (PGPR)	<i>Pseudomonas fluorescens,</i>
			<i>Arthrobacter, Erwinia,</i>
			<i>Bacillus, Rhizobium,</i>
			<i>Enterobacter, Streptomyces,</i>

萌发、芽和根的生长和产量。在稻田中，蓝藻可固定 25–30 kg N/ hm² /季。菌株具有释放生物活性物质，能促进植物生长和产量的潜力。在另一项研究中，从稻田中分离的蓝藻菌接种水稻，同时对水稻植株和土壤性质产生了积极的影响。蓝藻作为生物肥料的应用对经济实力弱、不能投资昂贵化肥的农民是有益的。蓝藻生物肥料可用于多种生物群落和环境(陆地、雨水或沙漠)。

2. 磷溶解和调动微生物肥料

植物含磷量约为干重的 0.2%，磷是植物生长发育所必需的养分。与其他养分相比，磷是目前大多数土壤条件下植物可获得的流动性最低的养分。需要微生物将不溶性磷酸盐转化为可溶形态。一些细菌和真菌种类参与磷酸盐的溶解过程。磷酸盐溶解细菌 (PSB) 通过不同的机制将不溶性磷酸盐 (如 HPO_4 和 H_2PO_4) 转化为可溶的形式，包括产生有机酸、螯合作用和离子交换反应。在微生物种群中，溶磷细菌占 1–50%，而真菌仅占溶磷活性的 0.1–0.5%。PSB 可以释放代谢产物，如有机酸，具有羟基和羧基，螯合结合在磷酸盐上的阳离子并将磷转化为可溶形式，供植物利用。分泌的酸也会降低土壤的 pH 值，并溶解结合的磷酸盐，使其对植物是有效的。除有机方法外，微生物还利用质子挤出机制（氢离子替换绑定在磷酸上的阳离子）对磷酸盐进行增溶。PSB 提供磷酸盐以及其他微量元素，如铁和锌，最终促进植物生长。它们还能合成杀死病原体的酶，从而保护植物免受疾病的侵袭。来自假单胞菌属、芽孢杆菌属、根瘤菌属、肠杆菌属以及青霉菌属的真菌菌株是众所周知的磷酸盐增溶剂。在最近的一项研究中，对增磷剂黑曲霉作为生物肥料的效率进行了评价，与未处理植株相比，其株高、果实大小、叶片长/宽和单株果实数均显著增加。但同时接种增磷菌和固氮菌的效果优于单独接种两种生物肥料的效果。

磷调动微生物可以调动磷的固定形式。它们把不溶性磷酸盐从土壤层转移和调动到根皮层。丛枝菌根是一个磷调动真菌的例子，真菌穿透根系，增加根系表面积，刺激代谢过程，并将营养物质吸收到根系中。据报道，溶磷细菌 (PSB) 有时充当磷的调动剂。在最佳条件下，它们有可能增溶/调动约 30–50 kg P_2O_5 / hm²，从而使作物增产 10–20%。

2.1. 菌根

菌根是寄主植物与某一类真菌之间的一种共生关系。它可以说是地球上最重要的共生关系。这种结合为植物提供必需的营养物质，主要是磷和促进植物生长的生长激素。它们还能增加根系的表面积，增加对土壤养分的吸收，提供植物对植物病原体的抵抗力[。真菌的菌丝吸收不溶性磷并将其转化为可溶解的形式，被植物吸收，作为回报，植物为真菌提供庇护和其他营养物质。这些真菌在地理分布上是普遍存在的，并与所有作物有关，除了 *Brassicaceae*。

2.2. 内生菌根或 VAM 真菌

泡囊丛枝菌根 (Vesicular arbuscular mycorrhiza, VAM) 是某些藻菌与被子植物根之间的共生关系。这些共生的土壤真菌在大约 80% 的植物的根部定植。它们通过被称为囊泡和丛枝的特殊结构，加强土壤营养物质向根系的转移。这种联系给植物带来许多好处。真菌菌丝增强磷和其他营养物质的吸收，并增加根和茎的长度。它们还能帮助植物从根部吸收大量的水分。VAM 可以潜在地提高植物对各种生物和非生物胁迫的耐受性，并可以替代树木对肥料的需求，降低目前对化肥的需求水平。VAM 真菌可使根际磷、硫、钙、镁、锌、铜等流动性较弱的营养物质的吸收量增加一倍以上。六种真菌被证明可以形成菌根组合。VAM 真菌、球囊霉与慢生根瘤菌+假单胞菌 (*Pseudomonas striata*) 或青霉菌共接种处理，显著提高了养分吸收和植物产量。此外，VAM 真菌通过分泌酶和有机酸来增强对营养物质的吸收。与非菌根植物相比，菌根植物的钾浓度有所增加。

3. 钾溶解和调动微生物肥料

钾是继氮和磷之后第二最丰富和重要的植物营养物质。虽然钾在土壤中是一种丰富的元素，但只有 1-2% 的对植物是有效的，而其余的钾以矿物质钾的形式存在，不能被植物吸收。因此，需要对土壤溶液不断补充 K。它在植物的生长发育中起着至关重要的作用。如果供给量不足，植株生长缓慢，根系发育不良，种子小，产量低。据报道，许多细菌和真菌菌株利用各种机制，包括酸的产生、螯合、酸解、络合解和交换反应，将不溶性 K 溶解为可溶性形式。溶钾生物肥料的例子包括芽孢杆菌和黑曲霉。土壤芽孢杆菌和胶质芽孢杆菌是众所周知的提高溶解和

动员的微生物。另一株蜡样芽孢杆菌(*Bacillus cereus*)与对照相比显著提高了的株高、地上部干重和分枝数。一些真菌,如曲霉和青霉也有从有机和无机资源溶解和调动K的潜力。因此,增钾剂的作用对于保证作物定期供应钾具有重要意义。这些也会对土壤其他必需养分的有效性产生积极影响,从而在保持土壤的可持续性方面发挥重要作用。

4. 硫氧化微生物肥料

硫作为一种微量营养素也是植物所需要的。据报道,硫在改善土壤的某些生物和物理特性方面起着关键作用。硫以缓冲高pH值的土壤而闻名。已有研究表明,硫还能促进氮、磷肥料的效率,提高作物对微量营养物质的吸收效率。硫氧化微生物的一个例子是硫杆菌。含硫硫杆菌可以将硫氧化成有助于植物营养的可用硫酸盐。最近的一项研究表明,硫杆菌与单质硫一起接种会增加单质硫的氧化,从而增加土壤中的养分有效性,促进植物生长。硫化物,特别是还原形式的硫化物,严重污染环境。硫氧化菌通过生物消除硫污染,在环境保护方面也发挥着重要作用。

5. 锌溶解微生物肥料

锌是植物生长和繁殖所必需的微量元素之一,组织中浓度相对较低(5-100 mg/kg)。锌缺乏症在土壤中非常普遍,这是由于不平衡地增加肥料的施用量、集约化农业和土壤健康状况差造成的。据估计,到2025年,如果忽视锌缺乏症的原因,缺锌率可能会从42%上升到63%。锌参与生长激素的合成。植物缺乏锌会导致枝条生长受阻、膜完整性降低、叶片尺寸缩小、黄化,对光、热和真菌感染的敏感性增加,并影响籽粒产量、根发育、花粉形成和水分吸收和运输。缺锌会导致小麦叶片变黄和生长发育不良。因此,在其他微量营养素中,解决农业中的锌缺乏症是重中之重。微生物接种剂已被确定可使土壤中复杂形式的锌增溶。据报道,菌根、酵母菌和一些根际细菌属,如假单胞菌属和芽孢杆菌属可以提高土壤中锌的有效性。这些微生物通过螯合配体和氧化还原系统来溶解锌。这些细菌还产生光敏色素、抗生素、维生素和抗真菌物质,并在许多方面帮助植物。在一项研究中,水稻植株接种了合适的溶锌菌株组合(伯克霍氏菌和不动杆菌),提高了生长属性和水稻产量,并发现与未接种的植株相比,水稻从土壤中获取锌的效率更高。有报道称,含有溶锌细菌的生物肥料可以提高玉米产量。

6. 植物根际促生细菌 (PGPR)

一组自由生活的根际细菌定植在植物根部，并对植物生长发挥有益作用，称为 PGPR。它们作为生物肥料，促进植物的生长和发育，促进对生物和非生物胁迫的抗性，并通过分解有机质帮助土壤矿化。PGPR 的接种对植物有多种有益作用。它们增加了植物对于干旱、盐度和生物胁迫的耐受性。它们能增强种子萌发和土壤肥力，并通过产生生长素、IAA、乙烯、赤霉素等植物激素来促进生长。它们可以调节植物次生代谢产物以及重金属和污染物的生物修复。PGPR 包括农杆菌属、节杆菌属、产碱菌属、固氮菌属、不动杆菌属、放线菌、芽孢杆菌、假单胞菌、根瘤菌、黄单胞菌、肠杆菌、纤维素单胞菌、沙雷菌、黄杆菌、硫杆菌等。

PGPR 对植物生长促进的详细贡献及其作用模式已经在一些综述中包括。PGPR 被认为是最有发展前途的微生物肥料。