

微生物肥料的功效：离科学和完美还有多远？

益禾箭生物技术公司编译组

1. 简介

利用微生物基肥料可以追溯到古代-已经有希腊和罗马古典著作描述用于提高产量的农业实践；我们今天可以将其与微生物活性联系起来(例如，与豆科植物轮作或使用粪肥)。古玛雅人对墨西哥湿地的水进行管理，以支持藻类、蓝藻菌和其他微生物的复杂混合物，其目的也是增加土壤中的养分含量。然而，有意识地将微生物用于土壤肥料始于 19 世纪晚期，那时开始为施肥目的微生物申请专利并将其销售。从那时起，特别是在过去几十年里，微生物肥料的开发和使用在减少化学肥料过量和/或不当施用所产生的负面环境影响方面发挥了重要作用。然而，尽管有大量有益菌株的研究和发现，微生物肥料在农业实践中的应用仍然受到一些因素的阻碍。主要原因来自：结果的不可预测性，在田间识别和跟踪接种菌株的问题，对微生物和植物之间的相互关系的理解不足，以及生产技术问题。我们打算描述我们认为对微生物肥料的广泛利用影响最大的因素。此外，我们希望促进对该领域感兴趣的不同利益相关者采取行动，以促进这些产品的更广泛实际应用。



2. 作为生物肥料的微生物

不同种类的土壤微生物分属于几个细菌、真菌的分类群，可能还有原生动物界，它们定植于根际或植物组织并促进植物生长 (PGPM)，可用于生产微生物肥料。它们对植物营养的贡献可能仅限于单一的营养元素，如 N 固定菌，或多种元素，如丛枝菌根真菌 (AMF)。然而，通过增加养分吸收能力和所施用化学肥料或有机肥料的利用效率，它们可以对植物的产量和质量产生显著影响。根瘤菌- 最著名的豆科植物 N₂ 固定细菌共生体，通过大气氮固定，能够提供寄主高达 90% 的 N 需求，但他们在非豆科植物，如玉米、小麦、水稻、油菜上，也有像植物根际促生细菌 (PGPR) 一样的行为。非共生的自由生活固氮菌已被证实能促进植物对氮的吸收。蓝藻-自由生活或与红萍（小的自由漂浮在淡水的蕨类植物）共生，被发现固定氮并释放给水稻吸收。丛枝菌根真菌 (AMF) 可以提供超过 50% 的植物所需氮，在干旱和半干旱条件下，这一点尤其重要，因为此时水的有效性限制了植物对无机氮等流动性营养物质的吸收。AM 真菌既可以吸收无机氮 (氨或硝酸盐)，也可以吸收有机氮。

通过增加土壤的开发，无机形态磷的溶解和有机 P 的水解，丛枝菌根真菌形成了促进植物对磷 (P) 吸收的主要微生物类群。几种 PGPR 对不溶性极强的磷酸三钙、羟基磷灰石和岩石磷酸盐中的磷非常有效。

许多细菌属 (如假单胞菌、伯克霍尔德菌、嗜酸硫杆菌、芽孢杆菌和类芽孢杆



菌)能够从云母、伊利石、白云母、黑云母和正长石等矿物质中释放钾,将钾可利用性提高到 15%。

对植物营养显示出有益影响的微生物新菌株的研究,促进了对过去较少考虑的物种的研究。在此基础上,对非菌根真菌在生物肥料中的应用进行了展望。

3. 影响微生物肥料效果的因素

植物生长促进的众多机制可能是寄主植物特异性的,也可能是菌株特异性的。此外,一旦引入土壤,植物生长促进微生物(PGPM)面临的竞争条件,可能会严重降低其有益作用。因此,在不同的农业环境条件下,特定生物肥料的应用所产生的有益效果可能会有很大差异,这导致了对微生物产品的有效性的质疑。然而,为了克服这种认知,并提高农民使用生物肥料的偏好,有必要考虑哪些因素会影响微生物肥料对作物生产力的影响。我们试图符合农民的观点,他们评价生物肥料的应用和其他技术手段一样,基于其有效性。为实用起见,我们将影响生物肥料功效的,与植物、土壤、农民和产品本身相关的主要因素进行了分组。

4. 与产品相关的因素

4.1. 生产过程

接种物的生产过程是最终高质量产品的关键,因为母培养物的种群密度与最终产品的质量有直接关系。通常地,接种物由一株菌组成。然而,对根际微生物相互作用的复杂关系的认识,促进了对由多种微生物组成的接种剂的研究,其在豆科植物和非豆科植物中都取得了很有前途的结果。在豆科植物中,成功的例子有,根瘤菌与丛枝菌根真菌(AMF)的共接种,根瘤菌和磷酸盐溶解菌的双重接种,由根瘤菌与促生根瘤菌(PGPR)和增磷菌(PSB)共同形成的接种物。据报道,在非豆科植物中,当同时接种 AMF 和自由生活的固氮细菌时,其营养吸收可与化学施肥的植物相媲美,干旱条件下也是这样。AMF 和不同 PGPR 的组合对不同的是一年生和园艺作物是有益的,并导致了化学肥料的应用量减少 50%。如果将 PSB 和 KSB 混合接种,也有较好的营养效果。

当为生物肥料设计一个联合体时,应该考虑的是,某些细菌群似乎更频繁地与 AM 真菌联系在一起,或者被它们的几种机制所抑制,包括真菌释放的刺激性或抑制性化合物,相应地,这可能分别导致较高或受限的根部定植。此外,在选择菌株配制生物肥料时,应考虑菌株的种特异性,即使在 AMF 的情况下,也应考

考虑菌株对环境条件的适应差异。

由于各种微生物存在的不同作用机制，PGPM 联合体可能更高效，有时还要叠加上植物保护机制，它往往既要满足农民-使用“多功能“产品，又要满足生产商-喜欢销售一种实现多种目的的产品。这类产品的一个潜在例子是 Reddy 和 Janarthanam(2014)在美国申请的专利，或者已经在欧洲以 Micosat 品牌销售。然而，事实证明，联盟的效力并不总是一致的，而且他们的生产和商业化带来了一些技术问题。这可以从观察中得出结论，决定微生物与植物关系的一个关键方面，不是它们的分类多样性，而是它们的功能多样性。



接种剂足够长的保质期(至少一个季节)，保持其生物特性在适当水平，是确保生物肥料有效性的关键，尽管对任何一种配方产品来说都是一个很大的挑战。因此，接种剂的配方，即将一种或多种微生物(接种剂)与特定载体混合、加入或不加添加剂(如粘着剂或其他添加剂)的多步骤过程，对保证生物肥料的有效性起着重要作用。它可以在储存和运输过程中保护细胞，可能增强接种剂在土壤中的持久性，从而在接种宿主植物后获得最大的效益。

在配方过程中可以使用不同的载体，每种载体都有各自的优点和缺点，从而影响生物肥料的整体质量和功效。然而，颗粒接种剂在恶劣的土壤条件下表现出更好的效果。液体接种剂虽然易于分发，但保质期较短。尽管理论上允许非常不

同的成分和结构，聚合物的封装在实践中主要局限于以藻酸盐为基础的配方，在工业生产中仍然存在一些局限性。

除了用于提高产品的货架期的各种添加剂外，特定的化合物可以引入配方中，以提高生物肥料的功效。含有结瘤诱导子的豆科生物肥料已经上市，但其他与结瘤过程相关的根瘤菌代谢物(Nod 因子)却成功地提高了固氮菌接种剂在大豆和玉米上的性能。独角金内酯，也以合成类似物的形式，可以用来促进菌根共生的建立。

4.2. 生物肥料的销售和质量标准

一种以微生物为基础的新产品的开发，需要对所使用的术语或名称的定义获得普遍同意。在科学文献中，“生物肥料”一词经常被用来描述一种具有促进植物生长作用的简单微生物。然而，如上所述，要在农艺实践中使用，任何有益微生物(接种物)都需要被培养，以便能够有效地输送到土壤或植物中。随着人们对不同种类有益微生物作用机制的了解不断加深，人们对生物肥料这个术语有了不同的定义，有时会联想到一个令人困惑的术语，没有考虑到其他种类的肥料或修正案的法律定义。最近，为了提出一个对监管也有用的定义，Malusa 和 Vassilev (2014)提议类似于无机肥料定义的生物肥料，“配方产品，含有一种或多种微生物，通过替代土壤养分，和/或通过使养分更容易被植物吸收，和/或通过增加植物对养分的获取，来提高植物的养分状况(生长和产量)”。对这些产品达成一致的、具有法律约束力的定义，以及建立生物肥料注册和销售的最低法律标准，对建立最小的产品质量标准也是重要的，这是影响生物肥料田间效能的另一个因素。事实上，在过去的几十年里，生物肥料的质量似乎并没有改善。

20 世纪 90 年代对含有根瘤菌的产品进行的调查显示，污染程度很高，在绝大多数产品中，外来细菌的数量超过了根瘤菌的数量。类似的情况也出现在最近的调查中，在 65 个测试的商业化细菌产品(配方中也包括 PSB 和自由生活的 N 固定菌株)中，有 40%的产品不包含声称的菌株，而只包含污染物。这种情况在以 AMF 为基础的生物肥料中似乎并不乐观：对产品的调查显示，活菌数量非常少，且定植潜力降低。这些欺诈行为，加上标签信息不充分，可能是生物肥料田间使用结果不一致的主要原因，从而导致人们对这类产品缺乏信心，这进一步影响了它们的市场潜力。因此，生物肥料的销售应该受到监管，以确保最终产品的最低

质量标准。

配送链还会进一步影响生物肥料的整体质量。的确，几项研究表明，随着时间的推移，特别是在非最佳储存条件下，接种剂中的微生物数量减少，导致接种效率降低。

4.3. 在土壤中的持久性和接种剂的可追踪性:需要一种标准方法

土壤中应用的生物肥料菌株的持久性和可追溯性的评价、调查，是非常困难的，由于（1）错综复杂的微生物网存在于土壤和根际，它可能超过了数亿单位；（2）微生物种群的高度可变性-反映了生态、土壤环境和结构特点；（3）以及各种各样的农业管理系统。因此，由于作为生物肥料销售的生物体的多种类型，没有一种定性和定量的追溯方法可以捕捉生物接种剂在土壤中的持久性。这就提出了一个问题，即哪些方法适合于监测不同接种菌株的持久性。这些信息对评价接种成功与否具有重要意义，有助于调整其应用策略。人们认为需要能够识别和追踪土壤中接种剂的准确和标准的办法。

在过去的 20 年里，以表型和 PCR 为基础的方法已经发展起来，以确定土壤微生物群落的结构、动态和多样性。不同的方法解决不同的问题，因此，所有的方法都适用于监测由于引入生物接种剂对土壤的影响，并提供微生物群落的不同方面的图景。目前有几种分子 DNA 指纹技术可以用于接种菌株的检测，但主要是定性检测，而不是定量检测。在现有的不依赖培养的方法中，常用来调查土壤微生物群落方法包括，传统的分子指纹、测序或不同方法的组合。

当单独使用时，基于通用细菌引物的指纹图谱方法不足以区分本土微生物和非本土微生物。然而，将群落水平指纹识别方法(如 T-RFLP)，与采用依赖培养的方法对菌株进行系统发育鉴定相结合，被证明是一种突出群落结构差异，同时跟踪接种剂的有效方法。为了拓宽接种剂对微生物群落的影响的认识，利用实时荧光定量 PCR 技术可以提供引入菌株在微生物群落中的相对丰度信息，这种方法可用于跟踪施用生物肥料后微生物群落的动态。

分子标记辅助的方法，如 T-RFLP, DGGE, TGGE, 对监测目的也是特别有用的。两种不依赖培养的方法的结合，可以评估引入到土壤中的微生物接种剂的持久性，同时也可以评估本地菌株在物种水平上可能发生的变化。

5. 与植物相关的因素

植物对形成生物肥料的菌株以及它们促生长和产量的功效，都发挥着显著影响，它们与植物的生理状态和生长物候期密切相关。事实上，根据其营养状况，植物可以改变根部化合物的释放，从而导致根沉积物的数量和质量差异，相对于根上的位置，根际沉积在时间、空间和生长阶段的变化，可导致特定根际细菌群落的选择。此外，根分泌物中含有对根际微生物具有刺激和抑制作用的化合物，影响其与植物建立有益关系的能力。在缺磷条件下，植物释放更多的化学信号，刺激 AM 真菌的菌丝分支和定殖。植物还可以影响土壤微生物的功能，如硝化作用。长期单一栽培大豆的根系分泌物对硝化菌群影响不大，但降低了根际硝化作用；与之相反，AMF 的菌丝总长度显著地受到增加释放的大豆异黄酮的刺激，这是一种苯丙化合物，可能参与导致 AMF 根定殖的化学信号传递。酚酸，也由根系分泌，是导致土壤微生物群落变化的原因。

但也有研究认为，根际微生物群落在与寄主植物共生的过程中，对其他碳库（如微生物菌体）有一定的响应，从而限制了根际沉积物在根际微生物群落形成中的作用。因此，接种生物肥料的菌株也是如此。尽管如此，在极年轻的幼苗和新兴的侧根上，根系分泌物可能对启动根际效应起着非常重要的作用。在这方面，在种子和幼苗上施用生物肥料可以提高处理效果。

6. 与土壤条件相关的因素

6.1. 非生物的相互作用

研究发现，土壤化学（pH 值、养分含量）和物理（质地）特征塑造了细菌和真菌群落。在生态系统水平上，土壤 pH 值是细菌群落结构最重要的预测因子，中性土壤的细菌多样性较高，而酸性土壤的细菌多样性较低，这可能是由于细菌类群相对较窄的 pH 耐受力。在广泛土壤 pH 值范围内，AMF 群落的田间调查表明，PH 也是构建这些群落的主要驱动力，从而影响生物肥料中各种 PGPM 的定殖潜力和有效性。AMF 对土壤温度和养分有效性等非生物因子的适应，会强烈影响共生 AMF 对植物生长的效果。

6.2. 与本土微生物的相互作用

生物肥菌株引入土壤后，面临着来自本土微生物的竞争。然而，目前有关土壤微生物间的生态相互作用，以及生物肥料中微生物对本土微生物种群影响的知识仍然有限，不能有效地预测生物肥料引入的接种剂的效果。然而，采用土壤微生物

生物量、土壤微生物活性、土壤微生物群落结构和多样性等分析方法，在评估这些相互关系及其对生物肥料功效的短期和长期影响方面，人们付出了很大的努力。已有研究表明，接种含有不同 PGPM 的产品(如荧光假单胞菌、共生和自由生活的固氮细菌、AM 真菌等)对本地土壤微生物的不同分类或功能类群有不同的影响。基于固氮细菌的接种剂的应用，要么是增加，要么是强烈减少了当地的细菌群落结构和多样性，采用菌种组合接种也是这样的结果。一种共生固氮菌株被证明特别影响变形菌门的特定组。许多研究证实，与 AMF 相关的细菌种类具有高度的特异性，这反映在接种 AMF 后这些细菌种类的增加。然而，接种 AMF 也显著影响根际细菌和真菌生物量的总体发育。一旦成功建立，引入的 AMF 会降低宿主根中本土 AM 真菌群落的物种丰富度。

表达特种菌株的选择-支持定值过程，为根环境而战-是保证微生物肥料功效的关键。在这方面，群体感应甚至通过“云集”(即在土壤中汇聚移动)给细菌带来了巨大的竞争优势，提高了它们的生存机会(例如通过生物膜形成)和开发更复杂生态位的能力。这些特征与确保 PGPR 促进植物生长的初始接种的最小种群水平的需要密切相关。

生物肥料的功效似乎也受原生动物的调节，特别是受变形虫的影响，这是土壤中最重要细菌的捕食者。施用由 AMF 和 PGPR 组成的生物肥料后，观察到细菌捕食线虫和真菌捕食线虫种群数量的增加。两种假单胞菌和枯草芽孢杆菌的小麦根际定植被三种线虫大幅减少。

然而，必须强调的是，本地微生物和引入微生物之间的关系在很大程度上取决于用于处理土壤微生物群落动态的技术。事实上，尽管微生物类群的数量可以通过宏基因组方法，结合依赖培养的方法明确；但是很难确定，功能归因哪一个特定的微生物或类群，对接种作出反应的土壤微生物群落的代谢潜力是什么，对土壤微生物群落结构的影响与土壤微生物种群功能能力之间的联系是什么。编码重要酶活性基因，或在接种剂与本土微生物种群相互作用的关键基因的研究，可能有助于获得这些知识，这些知识将揭示可能的新功能-为个别土壤或作物特殊设计的微生物肥料功能。

7. 与农民管理相关的因素

7.1. 施肥

施肥无疑是对生物肥料效果影响最大的农艺措施。大量施用矿质肥料对土壤微生物有深远的影响，因此预计也将强烈影响接过种的土壤。长期施用矿质氮已被证明会降低土壤微生物活性，对土壤细菌和 AMF 群落产生定量和定性的影响，从而对天然菌根根部的定植产生负面影响。10 年、90 年施磷肥，或污水灌溉导致土壤中磷的积累，降低了 AM 真菌的孢子密度、定殖和群落。然而，尽管 70 年来土壤施肥制度不同，孢子形成的 AMF 多样性差异较低。在施肥的土壤上生长的玉米、大豆和小麦，AMF 的定殖水平较低。使用氮肥的种类也会影响 AMF 群落：嗜硝基类群摩西球囊霉（可耕地土壤中最常见的类群）的出现被硝酸铵极大降低，而它更喜欢硝酸钙。然而，就 AMF 而言，在某些条件下施肥量可能比肥料性质（矿物的或有机的）影响更大。

然而，就 AMF 生物肥料的预期效果而言，重要的是要考虑土壤的整体肥力来调节 AMF 与植物之间的关系。根据交易平衡模型，在 AMF 共生关系中，寄生的、共利的或互惠的结果，可能取决于氮、磷的相对丰度和有效性，以及它们与碳供需的相互作用-对植物与微生物而言。当 N 和 P 数量足够多时，AM 真菌更有可能导致生长抑制；另一方面，在氮可用性充足而磷不充足的条件下，植物从互惠共生中获益。

有机肥料一般对根际微生物有积极的影响，虽然对生物肥料引入的接种物，这并不必然地是一个有利的条件。AMF 的根定殖和 AM 真菌菌丝体在土壤中的发育可被不同的有机基质所激发。施用肥料可以诱导细菌和 AMF 丰富度的普遍增加，但会对根际微生物的特定种群产生不同的影响，如反硝化、好氧固氮或硫酸盐还原菌。堆肥处理增加了革兰氏阳性菌的频率，使其占总分离菌的 80% 以上，并使根际细菌种群表现出 PGPR 特征的频率增加。与普通的矿质肥料相比，即使是在植物生长很短的一段时间之后，两个液体有机肥料（来源于有机质替代资源，一个是釜溜物，一个是蚯蚓粪，二者在特性和组成上有明显不同）也差异地影响根际古细菌和真细菌种群的大小和多样性。然而，并不是所有的有机肥料都能对 AMF 生物接种剂产生积极的影响，例如，污水污泥的应用被证明降低了 AMF 的丰富度，并强烈地改变了当地的细菌群落。

考虑到 PGPM 在低营养条件下表现出较高的定植效果和活性，建议减少而不是消除化肥的用量，以有利于接种菌株的建立。对几种作物而言，减少 20% 至 50%

的化肥已被证明是可行的。相对于高或低施氮量，中等施氮量会导致菌根植物对氮的吸收更高。对于 PGPR 而言，在小麦上结合不同的 NPK 水平下，当两株荧光假单胞菌被进行测试时，随着土壤中氮磷钾添加量的增加，其有效性降低，当氮肥用量达到推荐量的 25% 时，可获得最大的养分利用率。

生物肥料的使用将导致允许养分利用率较低的各种无机肥料的同时使用，因此对农民来说生物肥料比合成肥料更便宜。例如，在缺磷、缺钾的土壤上，不同植物共接种 PSB 和 KSB，同时直接施磷钾岩，具有溶解度低、产量高和氮、磷、钾吸收率高的特点。

7.2. 其它土壤管理措施

土壤微生物组的结构通常受到农业管理措施的影响。集约型和环保型管理模式的对比如表明：管理强度(如高无机肥、不轮作、深耕)越高，微生物多样性越低。与连续的常规管理相比，20 年的有机管理改变了土壤细菌和真菌的群落结构，细菌的差异主要是由于多样性的大量增加造成的。耕作、虫害管理、无机肥料和有机肥料的联合施用以及水分管理等措施，可以改善接种 AMF 的效果。通过在耕作土壤上翻耕而规律性的干扰，极大地降低了 AMF 的存活。此外，一些 AMF 类群如 *Acaulospora*、*Gigaspora*、*Paraglomus* 和 *Scutellospora* 似乎对一些土壤管理措施(如耕作)更敏感。这一特点可能导致使用不同种类的生物肥料来适应特定的作物。对传统和低投入农田中 AMF 群落多样性的几项调查得出结论，在均匀化真菌多样性方面，养分状况和土壤扰动比耕作制度发挥更有影响力的作用。

最后，当考虑盆栽作物的基质准备时(例如在苗圃)，发现所使用的泥炭的特性会不同地影响 AMF 的根定植。

7.3. 使用方法

农民需要更好地了解微生物是如何在土壤中起作用的，以便学习成功接种作物的适当方法。施用的方法确实会影响生物肥料的性能。然而，在评估和优化生物肥料的应用方面所做的工作很少：(1) 满足农民使用农场现有技术的要求，或 (2) 验证所使用的施用方法对接种剂的生活力有多大影响。在这方面为数不多的努力中，可以提到应用生物肥料的机器的发展，生物肥料具有不同的物理形态。

现有的机器不能用于散布生物肥料，特别是颗粒肥料。然而，通过对现有机器的小规模改造，一些机器已经被开发出来用于园艺作物或为特定目的例如注入

含有 AMF 的浆液以接种大树，已经显示，这些机器支持了生物肥料更好的发挥作用。

通过种子处理或通过将接种剂与土壤或堆肥混合后应用接种剂，在籽粒和秸秆产量方面提供了相当的功效。假如是真菌，含水量和剂量对孢子递送量和孢子递送效果也有影响。也可以考虑在叶面施用 PGPM，特别是对植物内生菌株。利用这种应用方法促进生长和产量的例子已在几种水果品种上得到证明。

由于对于 PGPR 而言，接种的菌株在土壤或根际的复活被限制在接种后 30–40 天，所以在生长季节，以 3–4 周为间隔，重复施用 (2–4 次) 会更有效。与无机肥料相比，这并不被认为是生物肥料的另一个缺点，因为通常，即使是谷类作物也要进行至少两次施肥处理，以满足法律要求或质量标准。

8. 结论

据估计，2017 年全球生物肥料市场价值约为 100 亿美元，活跃在拉丁美洲、印度和中国。生产质量标准的改善和和一个明确的同时保护制造商和农民的法律框架，是维持这种潜在的经济发展的必须。

考虑到，一般来说，所施用全部肥料的 60–90% 会流失掉，只有 30–50% 的 N 肥和 10–45% 的 P 肥被作物吸收，生物肥料的应用对于建立一个完整的养分管理系统、维持农业生产能力和降低对环境的影响方面都具有重要作用。

微生物肥料的一个有效目标将是：达到同样的作物生产力，但要显著减少无机肥料的使用。在综合养分管理系统的框架下使用生物肥料，有可能帮助减少农田养分的积累、淋溶或流失，参与养分循环并有利于作物生产力。

更广泛有效地使用生物肥料的动力来自于最近的微生物知识和技术发展。利用与本地微生物(如内生细菌)合作的菌株，或者利用微生物群落的协同作用，以及在生物肥料配方中包含原生动物，也可能是开发新型生物肥料的关键。

豆科植物释放一种挥发性有机化合物，以吸引将根瘤菌输送到根部的线虫，这一发现也支持了更广泛地使用不同的微生物来形成土壤生物网。新种类的生物肥料可以从酵母接种物的内含物中获益，因为从该属中分离出来的如酿酒酵母、假丝酵母、毕赤酵母等，已被证明能促进不同作物的生长。

使用非专性内共生菌根真菌，可以简化这种生物肥料的生产过程，这也显示出有益的影响，无论与 PGPR，或与非菌根物种联合。

新型添加剂可从参与根的菌落化的生物物质中提取，如 AMF 植物共生的独脚金内酯合成类似物，或者通过接种的微生物，如维生素，来支持根的定植。

生物肥料也可用于体外培养的植物材料，促进幼苗生长，对生物和非生物胁迫有更强的抵抗力，定量和/或定性地提高药用植物中次生代谢产物的含量。

几种生物、非生物和人为因素对商业生物肥料的成功应用构成了挑战，并对生物肥料作为一种田间实践的有效性负有责任。数学模拟结果表明，影响 PGPR 生存的最重要因素是与本地细菌的竞争、与宿主分泌的化合物的相容性(根际沉积)和利用它们的能力。另一方面，已经有一些工具和措施可以用来提高生物肥料的田间功效。因此，确保生物肥料在特定土壤和特定作物品种中的有效性是一项复杂的任务，研究人员、制造商、农业顾问和农民在设计 and 应用一种特定的生物肥料时都应考虑到这一点。