

植物有机营养的过去、现在和未来（节选）

Chanyarat Paungfoo-Lonhienne

益禾箭生物技术公司编译组

摘要

尽管肥料施用量很高，但作物产量增长的放缓，土壤健康的下降及场外污染都证明，许多作物生产系统需要创新的养分供应策略。一种光明大道是：有机化合物作为作物的营养来源应作出更大贡献。植物吸收和代谢有机分子(有机营养物质)的研究早在最近的兴趣之前就已被发现，其科学根源可追溯到 19 世纪。在 20 世纪的前几十年里，关于有机营养素的研究还在继续，但在两次世界大战之后，由于使用了矿物肥料和合成肥料，产量有所增加，因此人们不希望有机营养素的研究能顺利地继续下去。我们发现，二者在方法和知识的传播方面存在重大的差距。

针对植物营养中“有机主义者”和“矿物主义者”的对立，我们说明了作物营养的焦点是如何从有机营养转移到无机营养的。我们讨论了有机化合物作为营养物质和信号因子作用的原因，并提供了证据。

经过几十年的关注，对无机营养素的研究又有了很大的发展。正如农业历史上以前发生的那样，科学必须经农艺实践验证。我们认为，“将植物视为具有利用有机营养物质的内在能力的**混合营养体**，不管这种利用是通过直接吸收或借助外酶介导的降解的吸收”，这样一种**混合营养体**的认识框架，将转变营养管理和作物培养模式，**将以有机营养物质补充无机和合成肥料**。

简介

我们回顾了植物营养的实践和知识在两个世纪中是如何变化的，从早期农业中有机残留物的应用，到今天在高产作物种植系统中矿质和合成肥料（尿素）占统治地位的应用。近几十年来，有机营养物质被认为是植物在自然生态系统中的营养来源，一个问题就被提了出来：我们知道多少关于如氮素营养以什么形态进入根的？

大量的文献表明，添加矿质营养素成功地促进了作物生长，并对其吸收和同化机制进行了详细描述。**鉴于此，认为有机营养素对作物营养有直接的贡献似乎**

有些异端邪说。最近的文献提出了一个更全面的植物营养的观点，然而，这在很大程度上被忽视。虽然在受控条件下(无菌琼脂培养，水培养)提供无机营养的许多实验表明，植物利用这些无机营养来生长，**但我们应该谨慎地解释这一证据，即只有无机营养才能被土生植物获得。**

将植物营养的高质量研究从严格控制的、以无机营养为重点的实验系统扩展到植物与土壤、微生物和生物区系相互作用的现实世界系统，将促进植物营养向前。将**混合营养**的概念扩展到绿色植物，目前它还被认为是一个异端，但是它为农作物营养提供了创新。长期和近期的植物营养概念值得探索，因为我们正在寻求改善作物的营养供应。

我们不要忘记：一战前对有机营养的研究

在 20 世纪的大部分时间里，植物营养的研究一直集中在无机营养上。19 世纪化学家贾斯特斯·冯·李比希指出，无机营养是植物生长所必需的，并推广了矿物肥料的使用。然而，有机营养物质在农业中的应用历史悠久，我们认为，在现代农业中，知识一直被忽视甚至被怀疑。19 世纪以来，人们研究了有机化合物在植物营养中的作用，包括动物和植物废弃物中的物质(表 2)。当时最有影响力的农学家 Albrecht Thaer 确定了腐殖质作为植物营养的作用。腐殖质理论出现在他的《理性农业原理》一书中，该书为农作物系统确定了可量化的肥力指标。虽然 ingenhousz 在 1779 年就证明了植物可以进行光合作用，但有多少植物的质量来自土壤和空气还不清楚。这个话题引起了 19 世纪研究人员的兴趣，旨在测定植物是否能吸收土壤有机氮(尿素)的试验取得了令人鼓舞的结果。一些研究者遵循这一研究路线，评估天门冬酰胺源(Baessler1884)和特征有机质氮在土壤中的形态。

有机化学的迅速发展促进了植物营养研究，20 世纪早期研究人员测试了在土壤中发现的有机化合物(表 2)。有机 C 被认为对植物生长有贡献。淀粉在含有有机碳化合物的植物中积累，从腐殖质、葡萄糖、糖精钠到甘油，有机碳对植物生长的支持作用在没有光照的植物中得到证实。法国植物生理学家检查了植物生长在无营养条件下有机化合物的存在，得出结论，蔗糖是碳(C)的来源，而天门冬酰胺和尿素是萝卜植物的氮和 C 的来源。他扩大了对土壤中存在的有机 N 物质的研究，证明植物生长以尿酸>天门冬氨酸>天门冬酰胺>糖>甘氨酸>豆科蛋白>

氰化物>苦杏仁蛋白>氢氰酸>亮氨酸顺序支持，而酪氨酸、丙氨酸和丙氨酸则有毒性作用。

美国著名有机化学家 Oswald Schreiner 分析了土壤的有机成分。1912 年在美国科学促进协会的演讲中，schreinerer 描述了肌酐(尿液中含有的一种化合物)和硝酸盐作为小麦的营养来源。根据 chreiner 的研究，在农业土壤中肌酐和硝酸盐的含量是相等的。在水培中，以索兰为供源或添加少量硝酸盐，均比仅添加硝酸盐生长得更好。在华盛顿和纽约的第八届国际应用化学代表大会上 ofApplied 提出了一个观点：“有机土壤成分与土壤肥力的关系：‘含氮肥料，如血粉、肉骨粉、鱼渣等，以及作为主绿肥的豆科作物，是本文所述化合物的良好来源……，这些化合物很难通过排水从土壤中除去，而硝酸盐则很容易就这样流失了，如果植物不能像形成那样尽快地利用掉它们的话。硝酸盐不能随季节变化而保存，但有机化合物可以，而且随时可以被植物吸收和使用。在这种形式下，土壤中的氮得以保存，而过度的硝化作用，甚至氨化作用可能会导致淋溶过程中土壤氮的实际损失。

同样地，土壤肥力研究人员斯金纳将组氨酸和精氨酸作为营养物质，并强调源自于有机质的氮肥，从粪便到绿肥，支持植物生长，并具有不像硝酸盐那样容易从土壤中流失的优势。

令人啼笑皆非的是，一个世纪前就已经有人讨论过作物系统的氮素损失以及解决这一问题的可能办法。

在对土壤有机化合物进行研究的同时，检验生物固氮作用的微生物学研究最终证实了豆科植物的细菌共生体是固氮作用的结论。这一发现解释了吉尔伯特和劳斯更早的研究，他们的土壤消毒实验防止了 N_2 固定。在发现了大豆共生体之后，Winogradsky (1895) 描述了土壤中的非共生体 N_2 固定细菌，之前就发现了负责 N 转化的细菌，并认识到 N 转化细菌对土壤肥力的根本重要性。

很明显，在第一次世界大战之前的几年里，高水平的研究认识到了有机营养物和土壤微生物学在植物营养中的作用。

世界大战期间和前后对有机营养物质的研究

1927 年是认识有机营养物质和微生物学的一个里程碑，土壤微生物学家 Winogradsky 在两次国际化学大会上对氮肥使用量的增加提出质疑。他警告说，

工业化肥正在破坏有效的生物固氮 (BNF) 和相关的土壤肥力培育的微生物过程。维诺格拉斯基认为，农民必须高价购买他们可以用自己的劳动而获得的东西。土壤有机物和土壤微生物学的研究显然已经成熟，给农业带来了巨大的希望，但却被合成氮肥的使用所阻碍。在欧帕 (Germany) 的第一家合成氮工厂，1913 年生产了 800 吨，1928 年扩大到生产 845 000 吨；合成氮最初用于炸药生产，战后被推广为化肥。

政府指导下的农业研究的主要任务是农业的工业化，而有关土壤生物学和有机养分的知识没有转移给新一代的研究人员。在南北战争和二战后，土壤有机物的研究得到了广泛的认可，但后续的研究很少。Schreiner 等人 (1938 年) 在他最后一篇文章中哀叹到：“第一次世界大战对新肥料材料生产的影响非常显著……就炸药而言，所有交战国最关心的是要有充足的氮气供应……当世界大战结束时，那些以战时必需品的生产能力为目标的大型化工厂面临着困难的局面。为了避免破坏，这些工厂转向制造氮和其他化合物用于肥料。”

1953 年，诺贝尔奖获得者维尔塔宁强调，农业集约化的途径不是通过增加化肥的使用，而是通过增加 BNF（生物固氮）。他指出，与豆科植物共生的非豆科植物获得了豆科植物释放的氨基酸。这项研究很受欢迎，《自然》杂志的编辑对维尔塔宁的系列讲座进行了总结：“因此可以得出结论，高等植物可以直接吸收和利用土壤中的有机化合物，在其中的氮被细菌或其他微生物矿化之前”

至少有两种人造氮肥的替代品被认为可以促进作物生产：(一) 在农业生产中更大规模地引入生物固氮，(ii) “有机”方法的进一步发展，限制矿物和合成肥料的添加。这两种选择都是可行的，包括轮作固氮作物和施用粪肥。

到 1952 年，美国农业部农业研究中心下属的研究所已经停止了对有机植物营养的研究。国家土壤和肥料研究委员会成立于 1947 年，1951 年成立国家肥料工作组，并于 1954 年发表了联合研究成果“美国肥料和作物产量”。对合成尿素和无机肥料的关注表明，有机化合物以及绿肥、粪肥和堆肥已经从视野中消失。这种新愿景被宣示的一个例子是，植物、土壤和农业工程出版局局长罗伯特·索尔特 (Robert Salter) 的《世界土壤肥料资源与粮食作物的关系》，文章没有提到土壤局的科学家们先前关于有机营养和生物固氮的研究：“由于氮肥可以通过从大气中固定氮来生产，因此世界供应量仅受工厂生产能力的限制。由于硝酸盐是

战争的必需品，这个工厂的生产能力在过去十年里大大扩大了”

到 20 世纪中期，植物营养主要集中在矿物质和合成肥料上，但对有机分子吸收的研究确立了植物功能的基本知识。自 20 世纪 50 年代以来，同位素标记技术可以追踪植物中的有机化合物及其转化产物(表 3)。通过观察发现，腐烂秸秆的水提取物增加了用沙土种植的黑麦幼苗的干重，研究了植物和腐殖质化合物之间的关系。芥菜根和茎提取物中的色氨酸是吡啶代谢的中间体，为植物吸收和代谢有机化合物提供了证据， ^{14}C 标记的甘氨酸和 β -丙氨酸被豆类植物吸收。据报道，在大麦根中添加 ^3H -DNA 后，核苷酸和 DNA 会进入植物根部。根的放射自显影显示，细胞核心很快被 ^3H 标记，放射性主要集中在根的伸长区-代表了大麦 DNA 的 0.5%。进一步的实验得出了这样的结论：获得了外部供应的 DNA 或核苷酸，并将核苷酸整合到植物 DNA 中。Gahan 等人(1974)的研究表明，用鲑鱼精子或小麦胚芽 DNA 进行通气水培养的蚕豆植株，随着培育时间的延长，DNA 酶活性增加了 7 倍。同时检测到含有酸性脱氧核糖核酸酶活性的胞浆囊泡数目增加。Gahan 等人(1974)解释了这些发现，类似于动物细胞中的溶酶体消化，DNA 通过内吞作用进入根。对含 N 化合物扩展到荧光蛋白的研究，表明溶菌酶可进入根皮层细胞，而更大的铁蛋白(450 kDa)则不能穿透细胞，仅在根细胞壁的表皮中观察到。然这些实验没有确定完整的大分子或碎片是否进入根细胞，但它们提供了植物获得和代谢有机化合物的证据，并与当代研究有关。

当代关于有机氮和磷的研究

Aerts 和 Chapin(2000)宣告了在植物氮(N)营养上的范式转变，指出了矿化只是从土壤有机质转化植物可利用有机化合物的漫长轨迹的终点：由于氮通常是从不溶性有机氮转化为可溶性有机氮，转化为铵态氮，再转化为硝态氮，随着植物和/或微生物在每一步的吸收，任何土壤中氮的吸收速率必须是这样的：可溶有机氮大于铵态氮，大于硝态氮。因此，植物吸收可溶性有机氮的潜力可能比以前预期的要重要得多。从那时起，从生态学到分子生物学的大量出版物证明了这种新模式的丰硕成果。值得注意的是，有机营养物可作为必要的营养物质输入源的重新发现，并非来自源农学，而是来自生态学。

表 1 总结了最近对有机营养素的研究，表明有机分子已经确定了作为植物必需元素来源和信号因子的功能。以氨基酸形式存在的有机单体是被研究得最好的

例子，包括单子叶莎草、草和谷物作物，以及双子叶草本植物、灌木和树木在内的各种生命形式都可以获得。最初仅被认为是根分泌物的成分，氨基酸摄取分子机制已在拟南芥中得到阐明。

对氨基酸的关注和后续研究表明，非菌根北极莎草在氨基酸条件下比在硝酸盐条件下生长得更好，在氨基酸和氨条件下也能达到相似的生长效果，而大麦 (*Hordeum vulgare*) 在无机氮条件下生长得更好。然而，氨基酸作为植物氮源的相关性一直受到质疑，原因包括：

- (i) 微生物比植物是更好的氨基酸竞争者，
- (ii) 氨基酸是土壤 N 池中的少量组分，实验系统使用了不实际的高浓度氨基酸，
- (iii) 某些氨基酸抑制根生长。

但这些问题已经在研究中得到解决：以土壤中相同的浓度提供氨基酸的混合物或氨基酸+无机 N，而不是单一氨基酸。大麦、小麦和拟南芥在土壤相关浓度为 2-50 μM 时，对氨基酸的吸收动力学与土壤微生物相似，氨基酸作为 N 源，比无机 N 导致相似或更大的生物量。尽管还没有弄清楚在作物的氮预算中氨基酸贡献多大，但迄今为止所有研究的植物都有获取和代谢氨基酸的能力，而且在这方面研究的所有土壤都含有氨基酸。

在这里，我们需要指出，主导有机营养和无机营养争论的主要方面。虽然生态学家倾向于承认，氨基酸是具有低矿化率特征的生态系统中的氮素来源，但作物生理学家和农学家通常将硝酸盐和氨视为作物的主要氮素来源，因为它们普遍存在于施氮肥土壤中。另一种观点认为，氨和硝酸盐是氮解聚的最终产物，有机前体化合物也可用于植物。何种形式的氮进入植物体内仍然是一个有争议的问题，因为在土壤-微生物-植物连续体中测定通量、同时吸收、释放、固定和转化氮，存在固有的困难。从植物获得和代谢无机氮的能力去推断，硝酸盐和氨是唯一的氮来源是错误的，因为同样的观点也适用于氨基酸。类似地，认为土壤中硝酸盐和铵的高浓度证明它们是唯一氮源的论点，引发了另一种相反的论点，即无机氮的普遍存在表明了作物对“剩余”池氮的歧视。

每公顷土壤中根系可触及的深度存在着大约 1-10 吨的以蛋白质形态为主的氮，这增加了识别氮以何种形式进入根系的困难。Jamtgard 等人 (2010) 认为，

为了进一步了解氨基酸和其他形式的有机氮对作物的氮收支的贡献，应该在氮质量不同而不是数量不同的土壤中比较植物的生长。对土壤和微生物过程的了解必须与对植物的分子和生理过程的了解相结合，但就我们所知，还没有一项研究利用了这一整套工具。

我们检测了植物是否利用微生物作为营养来源，发现非共生和非致病性微生物进入根细胞并被消化。由于植物生长促进菌 (PGPB) 作为生物肥料的应用越来越广泛，可以想象，PGPB 的益处包括作为植物直接营养来源的功能。总之，这些例子表明，关于植物养分来源的知识正在扩大，并对植物完全依赖土壤生物群来解聚和最小化有机质的观念提出了质疑。

有机氮的研究主要集中在氨基酸上，但包括二肽、三肽和四肽在内的低聚体也有可能成为作物的 N 来源。肽寡聚体通过专门的转运蛋白进入根细胞，当作为唯一的氮源供应时，能够使植物生长 (表 1)。多肽寡聚物在不同程度上促进拟南芥和天然丛枝菌根半边莲 (无真菌共生) 的生长，说明不同物种对单肽的响应和使用能力不同。在土壤相关浓度 ($10\ \mu\text{M}$ 及以上) 下，小麦获得多肽的速率与氨基酸和无机氮相当。因此，有必要将小肽添加到作物氮源的目录中。

有机聚合物是有机 N 研究的最终前沿。由于菌根共生菌的蛋白水解活性，外生或类杜鹃花菌根物种能获取蛋白质作为 N 来源。AM 真菌从有机质中获取氮，因此可以想象，农作物通过 AM 共生体直接获取蛋白质氮。

根毛中外部供给的绿色荧光蛋白 (25kDa GFP) 的存在，表明完整的蛋白质可以被整合到细胞中。目前缺乏对根直接获取 N 聚合物的机理和生态学意义的认识，但是可以把摄取蛋白质和降解产物作为几种氮获取策略之一。

近年来，有机氮的研究进展迅速，而有机磷的研究却因常规土壤测试方法而受阻，常规方法错过了植物的有效土壤有机质池。尽管土壤中可溶性磷以有机形式存在，但有机磷比有机氮受到的关注较少。有机磷，包括植酸酯、磷脂、磷蛋白、磷酸酯、糖磷酸盐和其他，通常被认为不能被根系直接吸收，需要微生物转化为无机磷酸盐 (Pi) 或由根衍生的磷酸酶解聚有机磷酸酯。无菌拟南芥细胞外磷酸酶活性升高，能改善以植酸为磷源的磷营养。根分泌核裂解酶，核酸分解为 Pi ，这被认为是拟南芥以核酸为唯一的磷源生长的原因。然而，由 25 个核苷酸 (16.5

kDa)组成的 DNA 完整地进入了拟南芥的根,这就提出了一个问题,即是否其他形式的有机磷也进入了根中,如果得到证实,有多少有机磷参与了植物的磷营养。

这些研究表明,植物,包括非菌根物种,可以获得和吸收有机营养。除了有营养作用外,有机化合物对根系形态形成的影响已在无机氮中得到证实。拟南芥生长在丰富的 Pi、同时补充 DNA 条件下,其根分枝、根和根毛长度增加,这与有机化合物促进有机质丰富地点的根系增殖的概念是一致的。

有机营养物质在现代作物生产中的作用

除了所讨论的有机营养物质在提供必需营养物质方面的作用外,在农业中使用有机营养物质也有很好的理由。合成肥料和无机肥料来自于有限的自然资源,如化石燃料、磷矿、钾盐等,而有机废物则是各种工业的副产品。仅在美国,每年就产生约 10 亿吨的农业可回收物(Edwards 和 Someshwar 2000),有机养分对土壤、植物和微生物的影响有助于改善土壤功能和植物健康,从而使可持续的高产作物系统受益。

秸秆等有机废物含有大量的纤维素和半纤维素,它们可以作为纤维素分解微生物的基质,随后也可以作为其他微生物(包括固氮细菌)的基质。无机肥料可以通过抑制菌根和 N₂ 固定共生体,来影响植物和土壤健康,土壤中添加无机肥料比有机营养物质 AM 真菌要少。有机营养物的存在可减少土壤土壤病害,长期使用无机肥料会促进植物病害的发生。解释包括:有机改良剂具有生物或化学特性,可直接或通过刺激竞争微生物和/或诱导植物抗性来影响病害。然而,有机修正剂的抑病效果往往是不一致的,而且伴随着有机修正剂的应用,疾病发生率和严重程度会巧合地增加,这就需要更好地了解土壤生物学。

无机或合成营养物质在现代农业中使用的原因包括:易于使用和专业农业企业中缺乏有机材料。从全球来看,作物生产系统的养分利用率较低,作物的吸收量分别占氮肥和磷肥施用量的 30%-50%和 45%。虽然一些营养物质仍然存在于土壤中,但其他的营养物质会造成污染,包括活性 P 和 N 的不断增加,这是一个紧迫的问题,原因包括生物区系、生态系统的完整性和全球生物地球化学循环的丧失。有机养分,例如来自畜禽粪肥,也可能导致土壤中的氮流失。但在接受有机营养的系统中,这些损失可能比无机营养素低。吸收有机养分的系统单位面积上硝态氮淋失量低于常规系统,尽管只有经过几个季节的有机改良后,减少浸出才

会发生效果。对无机和有机养分及其组合应用进行评价，将为提高农业养分利用效率提供必要的知识。

正如 Schreiner(1913)所指出的，土壤生物区系受到肥料盐的影响，改变了土壤的物理、化学和生化特性。报道的与无机氮肥有关的土壤退化，包括土壤有机质(SOM)的损失，土壤 pH 值下降和作物产量下降。土壤有机质的损失影响土壤的通气、结构、养分有效性和微生物生态。自定居农业开始以来，防止 SOM 下降一直是一个挑战，而将有机残留物返回土壤有助于 SOM 的补充。合成肥料和无机肥料的不良影响对它们的继续使用提出了质疑，荷兰谚语说得很好，“化肥使父亲富，儿子穷”。SOM 在土壤结构、生物过程和养分循环中发挥重要作用，为土壤生物和植物提供养分和能量的汇和源，是土壤肥力的关键因子。长期试验表明，在 SOM 较高的土壤中，产量往往更高。主要提供有机材料和豆类作物作为营养来源的有机种植体系与传统种植体系进行了比较，表明有机系统的平均产量比传统系统低 5 - 34%。与传统农业相比，有机系统更有可能受到氮的限制，这可能会减少场外氮的流失。

将高投入/高产出的作物系统转变为有效利用资源的系统是必要的，矿物学家和有机主义者的意识形态正在架起桥梁-如果不是在概念上，而是通过在农业中增加有机肥料的使用。尽管施用了大量化肥，但产量仍然停滞或下降，‘绿藤地毯式覆盖’的采用-收获后仍保留植物在地面上，可贡献 60 公斤 N/公顷，也导致了作为土壤修复剂和营养源的工厂废料、堆肥等有机物质使用的增加。

面对现实

从 20 世纪中期开始，土壤营养化学计量和最大产量的最佳供应是植物营养研究的主要驱动力。之所以几乎只关注无机营养，原因是建议用相对简单的化学分析方法精确、简便地应用和定量养分的有效性。由于化肥的迅速溶解，农作物土壤中无机营养物质的浓度往往比自然生态系统中的含量高出几个数量级。¹⁵N 标记方法(MacVicar 1957)表明，在一些被研究的系统中，植物从土壤有机质中获得的 N 比从添加的肥料中获得的 N 的比例要大，虽然还不知道这种氮是有机的，还是无机的。

但要在未来 40 年里增加农业生产来满足预计将达到 90 亿左右的人口增长将是困难的。为了满足农业生产的预期需求，对土地、水和能源资源的竞争将被放

大。从 1960 年到 1995 年，全球氮肥和磷肥的使用量增加了 7 到 3.5 倍，我们正经历着这种增加所带来的严重的生态问题。很明显，我们不能仅仅预测到 2050 年氮肥和磷肥的需求量将增加两倍，我们还必须考虑所有可以利用的方法来加强农业生产，并选择适应土壤和生态的肥料。

认识到健康土壤的重要性，现在是时候利用各种营养来源来防止污染和自然资源的枯竭(FAO2011)。以粮食安全为主要目标，Haber-Bosch(技术促进反应性 N 的合成)和绿色革命(促进研究、发展和技术转让，从而在 20 世纪 40-70 年代提高作物产量的倡议)使我们免于饥荒；现在，环境可持续性农作物生产创新的核心。下一代作物系统将越来越多依赖于补充或取代合成肥料和自然资源的营养物质。营养高效的作物系统必须将微生物共生体、适当的土壤生物群和不同的营养来源结合起来。我们对有机养分对作物营养预算贡献的定量信息有限，但受控实验的结果令人鼓舞，无性系拟南芥在添加亚标准无机氮和蛋白质后，与不限制无机氮供应的植物产生的生物量相同。

有机+无机复合养分提高产量的例子包括撒哈拉以南非洲的玉米种植，在水稻集约化系统中使用有机+无机肥料，管理植物、土壤、水和养分，降低生产成本，提高作物产量。施用农家肥和无机肥，保持了 SOM 和长期生产力，增加了微生物生物量。

未来的研究将确定如何最大限度地利用有机营养物质与增加的生物固氮和 AM 真菌相结合。AM 真菌能促进有机物的分解，为植物回收有机质和磷。可以利用植物固氮来提高土壤中磷的有效性。根分泌物的质子、有机酸和细胞外酶值得考虑，以改善利用有机营养物质。在农业实践、植物选择、根际工程和生物技术的推动下，有机养分的利用将得到进一步发展。

结论

尽管有机化合物被认为是植物的营养来源和生长促进剂已有一个多世纪，但植物营养的重点仍主要是无机营养物质。由于需要提高作物生产的养分效率以及农业和其他工业废物中所含养分的循环利用，有机养分有希望在现代作物系统中使用，并需要新的植物营养方法。