

农业领域的 幕后功臣

在当今快速变化的农业大环境下，高效且可持续的作物生产比以往任何时候都更加重要。肥料通过提供有助于植物生长和增产的营养物质，成为满足这一需求的关键。其中，钼——虽然只需微量——却发挥着至关重要但常被忽视的作用。

植物的健康生长与繁殖依赖多种必需元素。这一认知最早由19世纪化学先驱尤斯图斯·冯·李比希（Justus von Liebig）提出，其研究揭示了植物如何从土壤与空气中吸收养分。需求量大的营养元素称为大量元素，需求量较小的则称为微量元素。氮无疑是作物最重要的大量元素，然而，即使土壤和空气中氮含量丰富，植物若缺乏足够的钼，也无法有效利用氮。

钼对全球主要作物如谷物、豆类和叶菜类蔬菜，发挥着尤为重要的作用，因为这些作物对氮的需求量极高。虽然钼作为微量元素的必要性已得到公认，但最新的研究表明：即使极少量地施用钼酸盐肥料，也能显著改善作物的健康状况并提高产量。

植物如何利用钼

植物依赖钼，因为钼能使它们通过固氮和硝酸盐同化等过程，将氮合成转化为可利用的形式。如果没有足够的钼，这些重要过程就无法发生，进而阻碍植物生长并降低产量。例如，在大豆和鹰嘴豆等豆科植物中，钼是固氮酶的关键组分，固氮酶帮助固氮细菌将空气中的氮转化为氨，这是植物能够利用的一种氮的形式。此类植物在根瘤中与根瘤菌形成共生关系，而钼酸盐是根瘤发挥作用所必需的。这一过程使豆科植物能够利用空气中的氮来生长，部分氮还会留在土壤中，提升土壤肥力并减少对合成肥料的需求，助力可持续农业的发展。

作为硝酸还原酶的组成部分，钼还能帮助将土壤中的硝酸盐转化为亚硝酸盐，植物可进一步将其加工为氨并最终转化为蛋白质的构成单元——氨基酸。依赖土壤中的硝酸盐作为氮来源的作物，如花椰菜和甜瓜，如果缺乏钼，就无法有效地合成蛋白质。充足的钼还能促进蛋白质的合成和叶绿素的生成，它们对于光合作用和植物的健康生长都至关重要。

缺钼与施肥

虽然缺钼并非普遍问题，但在酸性、风化或沙质土壤地区，这是一个严重问题。这类土壤常见于热带、亚热带和干旱地区，包括南美洲、非洲、东南亚和澳大利亚的部分地区。当土壤中钼缺乏时，农作物的产量可能因氮的吸收受到限制而大幅下降。例如澳大利亚农田土壤中钼含量不足，导致谷物产量下降高达30%。而解决缺钼问题能带来显著改善，埃及的一项研究表明，给柑橘树施用钼肥，产量提高了三分之一以上。

植物必需营养元素

大量元素：

氮(N)、磷(P)、钾(K)

中量元素：

钙(Ca)、镁(Mg)、硫(S)

微量元素：

铁(Fe)、硼(B)、氯(Cl)、锰(Mn)、锌(Zn)、铜(Cu)、钼(Mo)、镍(Ni)

在某些情况下，土壤中钼含量虽然充足，但却无法被植物吸收利用。当土壤呈酸性（pH值<5.5）可出现这种情况。多数情况下，施用石灰或白云石可缓慢纠正这个问题，但通常需要几个月，速度不够快而不具备可行性。除非石灰改良剂能带来其它益处，否则施用钼酸盐肥料往往更快捷更经济。

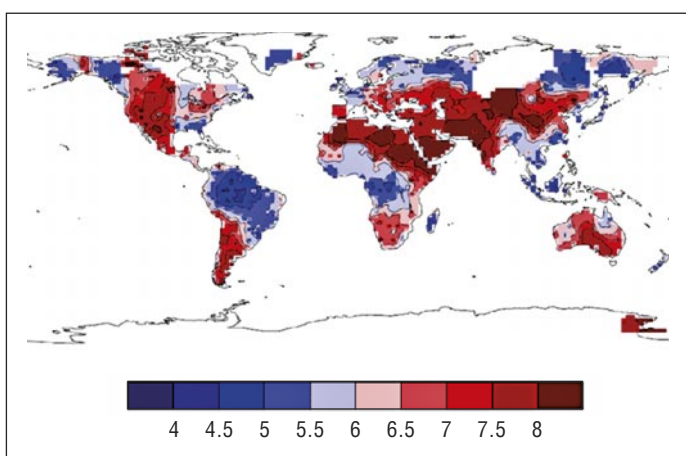
钼缺乏症状包括花期延迟、生长迟缓、叶片发黄和种子产量低



尤斯图斯·冯·李比希：化肥之父

我们如今对钼在农业中重要性的认知，建立在19世纪化学先驱尤斯图斯·冯·李比希的研究基础之上。李比希1803年生于德国，他是最早倡导通过人工补充养分来提升土壤肥力和增加农作物产量的人之一。他挑战了当时的主流理论，证明植物的健康生长需要土壤中的矿物质养分，他确定了氮、磷、钾等必需元素，为现代施肥方法奠定了基础。李比希最具影响力的贡献之一是“最小养分定律”，也称为“李比希定律”，它指出，植物生长受限于最稀缺的营养元素，而非现有资源的总量。

李比希最具影响力的贡献之一是“最小养分定律”，也称为“李比希定律”，它指出，植物生长受限于最稀缺的营养元素，而非现有资源的总量。



全球土壤酸碱度分布© Meng et. al via ResearchGate

钼酸盐主要以钼酸钠 Na_2MoO_4 和钼酸铵 $((\text{NH}_4)_2\text{MoO}_4)$ 的形式添加到肥料中。这些化合物极易溶于水，易被植物吸收。钼酸盐的施用方法有多种，包括：

- 土壤施用，将钼酸盐混入土壤供植物根系吸收
- 叶面喷施，将钼直接喷洒到植物叶片上，快速缓解钼缺乏。
- 种子处理，即在播种前用钼酸盐进行种子包衣，确保幼苗在发芽和生长过程中能即时获取钼元素。

钼酸钠或钼酸铵通常少量使用就有效果。监测土壤中的钼含量并了解不同作物的具体需求，对于避免过度施肥十分重要。

提高作物产量

近期研究发现，增加钼酸盐肥料的使用能够提升农业产出。例如，中井和丸山-中下报告称，用40ppm（最高测试浓度）钼肥喷洒干豆叶片，可使种子产量提高80%以上。同样，奥斯曼等人发现，鹰嘴豆施用钼酸盐改良剂后产量显著提高。这些研究结果凸显了钼作为微量元素在作物生产中的关键作用。

添加微量钼酸盐即可带来显著经济效益，作物增产和节省肥料所带来的收益远超成本。钼酸盐通过增强固氮作用，还有助于最大程度地减少肥料浪费和养分流失。钼酸盐无论是作为合成肥料、有机改良剂，还是土壤接种剂的组成部分，都在优化养分利用效率与推动可持续农业发展方面发挥了关键作用。

大豆案例研究

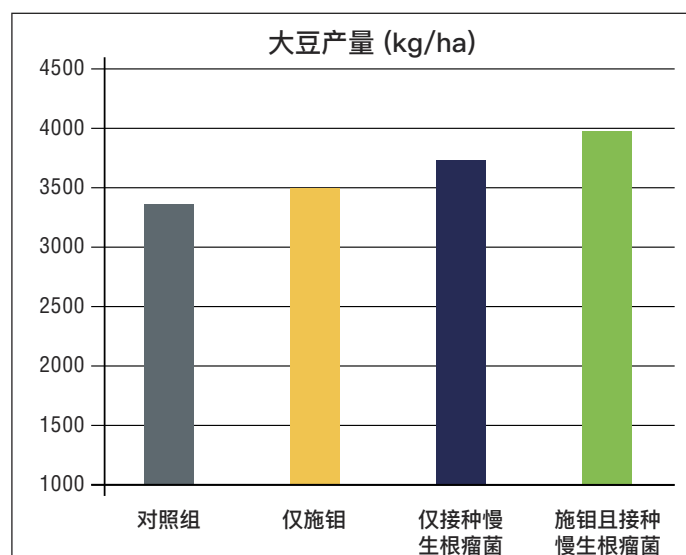
大豆是全球最重要的植物蛋白和植物油来源，其种植面积达1.2–1.3亿公顷，约为英国国土面积的五倍。最大的生产国包括美国、阿根廷、中国和巴西，目前巴西在全球大豆产量和出口量方面居于首位。在2021–2022种植季，巴西的大豆产量高达1.24亿吨。

巴西大豆种植的核心产区是塞拉多草原，属热带稀树草原。该地区土地及开垦成本较低，且容易实现机械化作业，但由于降雨量大，这里的土壤是世界上最古老且淋溶作用最严重的土壤之一。种养分损耗导致它们成为肥力最低的土壤之一，需要大量补充钼等矿物质。持续耕种使这问题进一步恶化，凸显了科学有效施肥的重要性。

鉴于大豆的重要地位，在不扩大耕地面积的前提下提高产量至关重要。近期研究探索了微量元素与有益微生物在提高土壤肥力方面的协同作用。2023年，亚雷茨基研究发现，接种慢生根瘤菌并补充钼的大豆生长状况改善，氮含量和种子产量提高，综合提升了作物的品质表现。给大豆接种慢生根瘤菌可增强生物固氮作用，尤其是在缺乏本地细菌种群的土壤中。钼通过促进结瘤和氮吸收，进一步助力这一过程，最终实现更高产量。

应对不断变化的挑战

随着农业面临愈发复杂的挑战，如气候变化、土壤退化以及资源限制，钼酸盐在肥料创新领域的作用日益凸显。当前的研究致力于揭示钼与植物及土壤微生物群的相互作用机制，优化肥料配方，并开发可持续的实践方法以充分发挥钼酸盐的潜力。这些努力旨在推动全球粮食安全与生态保护的协同发展。（John Tompson）



➤ 一棵健康的大豆植株，不仅对于食品至关重要，而且对化妆品、清洁剂、塑料、油漆甚至蜡笔都很重要



© shutterstock/nnattalli