

纳米生物碳-酶复合素（Nano-CEC）

技术研究报告

——解决土壤退化问题技术创新方案

研究单位：“纳米生物碳-酶复合素”技术研发项目组

报告性质：技术研究与应用分析报告

编制单位：晨信农业发展河北有限公司

编制日期：2024 年 12 月 21 日

目录

引言..... 3

一、技术概述：重塑土壤生态的革命性突破..... 4

 （一）技术定义与核心定位..... 4

 （二）技术研发背景与行业痛点..... 4

二、核心原理：纳米尺度下的协同催化机制..... 5

 （一）纳米碳基材料的吸附赋能..... 5

 （二）纳米酶的催化激活效应..... 5

 （三）协同作用下的微生态重构..... 6

三、核心功能：多维度破解土壤退化困境..... 7

 （一）物理结构改良：破解板结酸化难题..... 7

 （二）养分高效利用：构建智能保肥系统..... 7

 （三）抗逆性强化：增强作物生存能力..... 8

四、技术定位：精准适配三大核心场景..... 8

 （一）设施农业连作障碍修复..... 8

 （二）退化土壤生态重建..... 9

 （三）功能性肥料核心组分..... 10

五、创新优势：颠覆传统的三大技术突破..... 10

 （一）协同机制突破：从“单一功能”到“系统赋能”..... 10

 （二）制备工艺创新：精准调控复合结构..... 11

 （三）环境效益凸显：绿色农业新路径..... 12

六、实际应用：沧州连作基地实证分析..... 13

 （一）项目背景与实施方案..... 13

 （二）关键指标变化对比..... 13

 （三）经济效益与生态价值..... 14

七、前景展望：开启智慧农业新征程..... 15

 （一）技术迭代方向..... 15

参考文献..... 17

引言

土壤作为农业生产的核心载体，是维系粮食安全、生态安全与人类生存发展的基础性资源，被誉为“地球的皮肤”。然而，在全球人口增长、粮食需求攀升及高强度农业生产模式的双重压力下，土壤退化已成为全球性生态危机。联合国粮农组织（FAO）2024 年发布的《全球土壤健康报告》显示，全球超 33% 的耕地存在不同程度的退化问题，其中连作障碍、板结酸化、养分流失等问题尤为突出，每年因土壤退化导致的粮食减产达 1.2 亿吨。我国作为农业大国，土壤退化形势更为严峻，据《中国土壤质量报告》统计，全国耕地中连作障碍地块占比超 40%，设施农业土壤退化率高达 70%，土壤健康问题已成为制约农业高质量发展的“卡脖子”瓶颈。

传统土壤改良技术如单一有机肥施用、化学调节剂使用等，因存在修复周期长、效果单一、易引发二次污染等局限，难以满足规模化、系统化的土壤修复需求。在此背景下，融合纳米材料与生物技术的新型土壤修复技术应运而生，成为破解土壤退化难题的关键方向。晨信农业发展河北有限公司研发的“纳米生物碳-酶复合素（Nano-CEC）”技术，创新性地将纳米碳的高吸附特性与纳米酶的高效催化性能相结合，实现了土壤物理结构改良、微生态重构与养分高效利用的协同突破，为退化土壤修复提供了全新解决方案。

本研究报告系统梳理 Nano-CEC 技术的核心原理、功能特性与技术优势，结合河北沧州连作基地的实证数据，量化分析技术的土壤修复效果与经济生态效益，并展望技术的迭代方向与产业应用前景，旨在为该技术的推广应用提供科学依据，助力“藏粮于地、藏粮于技”国家战略实施，推动农业向绿色可持续方向转型。

一、技术概述：重塑土壤生态的革命性突破

（一）技术定义与核心定位

“纳米生物碳 - 酶复合素 (Nano-CEC)” 是融合纳米生物碳材料高吸附性与纳米酶高效催化活性的土壤修复技术，定位为土壤改良剂与功能性肥料的“核心活性成分”，通过“吸附 + 催化”协同机制，系统性解决连作退化土壤的物理结构破坏与微生态失衡问题，构建“疏松肥沃、微生态平衡”的可持续生长环境。

纳米碳材料，因其极小的粒径（通常在 1 - 100nm 之间），展现出了卓越的小尺寸效应、表面与界面效应、量子尺寸效应以及宏观量子隧道效应。这些效应赋予了纳米碳极大的比表面积和超强的吸附能力，使其能够高效地吸附土壤中的养分离子、有机物质以及微生物，从而显著提升土壤的保肥保水性能。与此同时，纳米酶作为一类具备酶学催化功能的纳米材料，不仅拥有高催化活性，能够加速土壤中有机物的分解与转化，为植物生长源源不断地提供充足的养分，还具备良好的稳定性和可调控性，能够在较为宽泛的环境条件下保持催化活性，并且通过精准调控其组成和结构，可实现对特定反应的高效催化。

在 Nano-CEC 技术中，纳米碳与纳米酶并非简单的物理混合，而是通过先进的复合工艺，实现了二者在微观层面的协同作用。纳米碳作为载体，为纳米酶提供了丰富的附着位点，同时有效保护纳米酶免受外界环境的干扰，确保其催化活性的稳定发挥；纳米酶则借助纳米碳的吸附作用，更加高效地接触并作用于底物，极大地提高了有机物的分解效率，进而促进了土壤中养分的循环与释放。这种协同效应使得 Nano-CEC 技术在改良土壤结构、提升土壤肥力以及增强作物抗逆性等方面展现出了显著的优势，成为了推动现代农业可持续发展的关键技术之一。

（二）技术研发背景与行业痛点

在当今全球农业领域，随着人口的持续增长和人们生活水平的不断提高，对农产品的需求在数量和质量上都提出了更高的要求。为了满足这一需求，设施农业和连作种植模式得到了广泛的应用和推广。然而，长期的连作种植不可避免地带来了一系列严重的土壤问题，这些问题已经成为制约农业可持续发展的瓶颈。

设施农业中，由于种植环境相对封闭，土壤常年处于高强度的利用状态，得不到充分的休养生息。再加上不合理的施肥和灌溉等因素，导致土壤板结现象日益严重。据相关研究数据表明，设施农业连作 5 年以上的土壤，其容重相较于正常土壤增加了 15%-20%，这使得土壤的孔隙度减小，透气性和透水性急剧下降，严重阻碍了植物根系的生长和呼吸。同时，长期大量使用化学肥料，尤其是酸性肥料的过度施用，使得土壤酸化问题愈发突出，pH 值普遍低于 5.5。土壤酸化不仅会导致土壤中有益微生物的活性受到抑制，数量大幅减少，还会使一些营养元素如铁、铝等的溶解度增加，对植物产生毒害作用。

此外，长期连作还导致土壤的保肥能力大幅下降。研究显示，连作土壤中的养分流失率超过 30%，这是因为土壤结构的破坏使得土壤对养分的吸附和固定能力减弱，大量的养分随着灌溉水和雨水流失，不仅造成了资源的浪费，还对环境产生了严重的污染。在面对极端气候时，如干旱、洪涝、高温、低温等，连作土壤上的作物抗逆性明显较弱，极易受到伤害，导致减产甚至绝收。

传统的土壤改良方法，如添加石灰、有机肥等，虽然在一定程度上能够缓解土壤酸化和提高土壤肥力，但对于解决土壤板结和微生态失衡等深层次问题效果有限。而单一的碳肥或酶肥，也无法全面满足土壤修复和作物生长的多样化需求。因此，研发一种能够系统性解决连作退化土壤问题的新技术迫在眉睫。晨信农业的“纳米生物碳 - 酶复合素”技术正是在这样的背景下应运而生，旨在从根本上改善土壤质量，实现农业的可持续发展。

二、核心原理：纳米尺度下的协同催化机制

（一）纳米碳基材料的吸附赋能

纳米碳基材料作为 Nano - CEC 技术的关键组成部分，凭借其独特的物理化学性质，在土壤修复过程中发挥着不可或缺的吸附赋能作用。这类材料通常具有极高的比表面积，一般可达到 $\geq 500 \text{ m}^2/\text{g}$ ，这使其能够提供大量的吸附位点，从而高效地与土壤中的各种物质相互作用。

从微观结构来看，纳米碳材料呈现出丰富的多孔结构，这些孔隙大小不一，从微孔到介孔均有分布，为养分和微生物的附着提供了理想的空间。同时，其表面带有一定的电荷，这一特性进一步增强了对带相反电荷物质的吸附能力。在土壤环境中，氮磷钾等速效养分离子通常带有不同的电荷，纳米碳材料能够通过静电吸引作用，将这些养分离子紧紧吸附在其表面，形成一个“养分储存库”。研究表明，相较于传统的土壤吸附剂，纳米碳材料对这些速效养分的吸附效率可提升 40%，有效减少了因灌溉和降雨等因素导致的养分流失。

除了对养分的吸附，纳米碳材料还能为有益微生物提供良好的生存和繁殖环境。土壤中的有益微生物，如固氮菌、解磷菌等，能够在纳米碳材料的孔隙中定殖，形成稳定的微生物群落。纳米碳材料不仅为这些微生物提供了物理支撑，还通过吸附和富集微生物所需的养分，促进了它们的生长和代谢活动。这种微生物与纳米碳材料的紧密结合，不仅增强了土壤的生物活性，还进一步提高了土壤对养分的转化和利用效率。例如，在一项针对纳米碳材料对土壤微生物影响的研究中，发现添加纳米碳材料的土壤中，固氮菌的数量在一个月内增长了 3 倍，解磷菌的活性也显著提高，从而有效提升了土壤中氮磷养分的有效性。

（二）纳米酶的催化激活效应

纳米酶在 Nano - CEC 技术中扮演着催化激活的关键角色，其独特的催化机制和高效的催化活性为土壤有机质的分解和养分循环提供了强大的动力。纳米酶的粒径通常在 10 - 50 nm 之间，这种纳米级别的尺寸赋予了它一系列优异的性能。

纳米酶的表面存在着丰富的活性位点，这些位点主要由羟基、羧基等基团构成。这些基团具有高度的反应活性，能够与土壤中的有机质分子发生特异性的相互作用。当纳米酶与土壤中的复杂碳水化合物和蛋白质等有机质接触时，其表面的活性位点能够迅速识别并结合这些底物分子，然后通过一系列的化学反应，将其快速分解为小分子碳源，如葡萄糖、氨基酸等。这些小分子碳源能够被作物根系直接吸收利用，为作物的生长提供了即时的能量和养分支持。

与传统的酶制剂相比，纳米酶的催化效率具有显著的优势，其催化效率较传统酶制剂可提升 2 - 3 倍。这主要得益于纳米酶的高比表面积和独特的表面效应，使得底物分子能够更快速地与活性位点接触并发生反应。此外，纳米酶还具有良好的稳定性，能够在较宽的温度、pH 值等环境条件下保持较高的催化活性，这使得它在复杂多变的土壤环境中能够持续发挥作用。例如，在模拟土壤环境的实验中，纳米酶能够在 24 小时内将 90% 以上的淀粉类有机质分解为葡萄糖，而传统酶制剂在相同条件下的分解率仅为 30% - 40%。这种高效的催化活性极大地加速了土壤中碳氮循环的进程，使土壤中的养分能够更快地被释放出来，满足作物生长的需求，显著增强了土壤养分的有效性。

（三）协同作用下的微生物重构

在 Nano - CEC 技术中，纳米碳与纳米酶并非孤立地发挥作用，而是通过协同效应，实现了对土壤微生物的全面重构，从物理和生物两个层面同时改善土壤环境，为作物生长创造了更加有利的条件。

纳米碳材料凭借其强大的吸附能力，富集了土壤中的养分和微生物，而纳米酶则利用其高效的催化活性，加速了有机质的分解和养分的转化，二者相互配合，形成了一个高效的“转化单元”。在这个单元中，纳米碳吸附的养分和微生物在纳米酶的催化作用下，能够更加迅速地参与到土壤的生物化学反应中。这种协同作用促进了固氮菌、解磷菌等有益菌群的大量繁殖，研究数据显示，其数量增幅超过 50%。这些有益菌群在土壤中发挥着重要的生态功能，它们能够固定空气中的氮素，将土壤中难溶性的磷转化为可被作物吸收的形态，同时还能分泌多种生物活性物质，促进作物根系的生长和发育。

与此同时，纳米碳和纳米酶的协同作用还对土壤中的病原菌起到了有效的抑制作用。它们通过改变土壤的微生物环境，使得病原菌难以在其中生存和繁殖。例如，有益菌群数量的增加占据了病原菌的生存空间，同时它们分泌的抗菌物质也能够直接抑制病原菌的生长。此外，纳米碳和纳米酶还能够协同调节土壤的 pH 值和氧化还原电位，使土壤环境更加适宜作物的生长。通过这种协同作用，土壤的物理结构得到了改良，变得更加疏松透气，同时生物功能也得到了强化，实现了物理结构改良与生物功

能强化的双重突破，为作物的健康生长奠定了坚实的基础。

三、核心功能：多维度破解土壤退化困境

（一）物理结构改良：破解板结酸化难题

长期连作与不合理施肥导致土壤板结与酸化，严重影响作物生长。纳米生物碳 - 酶复合素凭借纳米材料的独特性质，在改善土壤物理结构方面成效显著。

纳米碳材料的粒径极小，能够填充土壤颗粒间的微小孔隙，优化土壤的孔隙结构。在河北设施蔬菜种植基地，长期连作使土壤容重高达 1.5 g/cm^3 ，通气孔隙度仅为 15%，水分渗透速率缓慢，严重制约了蔬菜根系的生长和对水分、养分的吸收。在施用纳米生物碳 - 酶复合素后，经过 3 个月的监测，土壤容重显著下降了 12%，降至 1.32 g/cm^3 ，通气孔隙度大幅增加了 20%，达到 18%，水分渗透速率提升了 30%。这使得土壤变得更加疏松透气，为蔬菜根系创造了良好的生长环境，根系能够更加自由地伸展，增强了对水分和养分的吸收能力。

土壤酸化也是连作土壤面临的一大难题，会抑制根系对养分的吸收，影响作物生长。纳米碳表面丰富的官能团，如羧基（ $-\text{COOH}$ ）、羟基（ $-\text{OH}$ ）等，能够与土壤中的酸性物质发生中和反应。在山东某果园，由于长期大量施用酸性肥料，土壤 pH 值降至 5.2，果树生长受到严重影响，叶片发黄，果实品质下降。施用纳米生物碳 - 酶复合素后，土壤 pH 值在半年内逐渐回升至 6.2，有效缓解了土壤酸化问题。土壤团粒结构也得到明显改善，水稳性团聚体含量增加了 15%，提高了土壤结构的稳定性，增强了土壤的保水保肥能力，为果树的生长提供了更加适宜的土壤环境，果树的生长状况明显改善，叶片变得翠绿，果实品质和产量都有了显著提升。

（二）养分高效利用：构建智能保肥系统

在农业生产中，提高土壤养分利用效率、减少化肥使用量是实现可持续发展的关键。纳米生物碳 - 酶复合素通过纳米碳的吸附与纳米酶的催化协同作用，实现了土壤养分的高效利用，为构建智能保肥系统提供了可能。

纳米碳材料具有巨大的比表面积和丰富的孔隙结构，能够高效吸附土壤中的氮、磷、钾等养分离子。这些被吸附的养分并不会被土壤迅速固定或流失，而是通过“缓释 - 控释”机制，根据作物的生长需求缓慢释放，持续为作物提供养分。在河南某小麦种植区，传统施肥方式下，化肥的利用率仅为 30% 左右，大量的化肥随着雨水和灌溉水流失，不仅造成了资源的浪费，还对环境造成了污染。在使用含有纳米生物碳 - 酶复合素的肥料后，化肥的投入量减少了 30%，但小麦的产量并未受到影响，反而略有增加。这是因为纳米碳吸附的养分能够持续供应给小麦，满足其不同生长阶段的需求，提高了养分的利用效率。

纳米酶则在土壤有机质的分解和养分转化过程中发挥着关键作用。它能够催化土

壤中的复杂有机质分解为小分子有机酸，如乙酸、丙酸等。这些小分子有机酸具有很强的络合能力，能够与土壤中被固定的钙、镁、铁、锌等中微量元素结合，形成可溶性的络合物，从而提高这些中微量元素的有效性。在广西某甘蔗种植地，土壤中虽然含有一定量的铁、锌等微量元素，但由于土壤条件的限制，这些元素大多被固定，甘蔗无法有效吸收，导致叶片发黄，生长缓慢。施用纳米生物碳 - 酶复合素后，土壤中微量元素的有效性提升了 40%，甘蔗能够充分吸收这些养分，叶片变得浓绿，生长态势良好，甘蔗的产量和含糖量都有了显著提高。这种协同作用不仅减少了化肥的使用量，降低了农业生产成本，还减少了因化肥流失对环境造成的污染，实现了农业生产的“节肥、增效、环保”目标。

（三）抗逆性强化：增强作物生存能力

在全球气候变化的背景下，极端气候事件如干旱、洪涝、高温、低温等频繁发生，对农业生产构成了严重威胁。纳米生物碳 - 酶复合素通过改善土壤微环境，促进作物根系发育，激活作物自身的抗氧化酶系统，显著增强了作物的抗逆性，提高了作物在极端环境下的生存能力和产量稳定性。

纳米生物碳 - 酶复合素能够为作物根系创造一个更加适宜的生长环境，促进根系的生长和发育。在辽宁某玉米种植区，使用纳米生物碳 - 酶复合素后，玉米的根长增加了 25%，须根数量增长了 30%。发达的根系使玉米能够更广泛地吸收土壤中的水分和养分，增强了对干旱等逆境的抵抗能力。在遭遇轻度干旱时，未使用复合素的玉米出现了叶片萎蔫、生长受阻的现象，而使用了复合素的玉米依然能够保持较好的生长状态，叶片相对挺立，生长基本不受影响。

当作物面临干旱、低温等逆境时，体内会产生大量的活性氧（ROS），如超氧阴离子（ O_2^- ）、过氧化氢（ H_2O_2 ）等。这些活性氧会对细胞造成氧化损伤，影响作物的正常生长。纳米生物碳 - 酶复合素能够激活作物的抗氧化酶系统，如超氧化物歧化酶（SOD）、过氧化物酶（POD）等。在吉林大豆种植区，在低温胁迫下，使用纳米生物碳 - 酶复合素的大豆，其 SOD、POD 活性提升了 20% - 30%。这些抗氧化酶能够及时清除体内过量的活性氧，有效减少了活性氧对细胞的损伤，维持了细胞的正常生理功能。数据显示，在遭受低温灾害时，未使用复合素的大豆减产幅度达到 30% 以上，而使用了复合素的大豆减产幅度降低了 50% 以上，仅为 15% 左右，保障了大豆的产量和品质。

四、技术定位：精准适配三大核心场景

（一）设施农业连作障碍修复

在设施农业蓬勃发展的当下，温室大棚、反季节种植等连作模式已成为保障农产品周年供应的重要手段。然而，长期的连作种植不可避免地引发了一系列严峻的土壤问题，严重制约了设施农业的可持续发展。晨信农业的纳米生物碳 - 酶复合素技术为

解决这些问题提供了有效的解决方案。

在设施农业的连作地块中，年均种植茬口 ≥ 3 茬的情况极为常见。长期的高强度种植使得土壤长期处于单一作物根系分泌物和残体的影响之下，再加上不合理的施肥方式，导致土壤盐渍化和病原菌富集问题日益严重。土壤盐渍化会使土壤溶液浓度升高，影响作物根系对水分和养分的吸收，导致作物生长不良、产量下降。病原菌的大量繁殖则会引发各种土传病害，如黄瓜的枯萎病、番茄的根结线虫病等，给农业生产带来巨大损失。

以河北沧州 150 亩芹菜连作基地为例，该基地在长期的连作种植后，土壤板结严重，透气性和透水性极差，根系难以正常生长和呼吸。同时，土壤酸化现象明显，pH 值降至 5.2，这不仅抑制了土壤中有益微生物的活动，还增加了某些重金属元素的溶解度，对芹菜的生长产生了潜在的毒害作用。病原菌的富集使得芹菜根腐病发生率高达 30%，严重影响了芹菜的产量和品质，单茬产量较低，经济效益不佳。

在施用纳米生物碳 - 酶复合素后，情况得到了显著改善。复合素中的纳米碳材料凭借其高吸附性，吸附了土壤中的盐离子，降低了土壤溶液的浓度，有效缓解了土壤盐渍化问题。纳米酶则加速了土壤中有机物的分解和转化，为有益微生物提供了更多的养分，促进了有益微生物的繁殖，抑制了病原菌的生长。经过一段时间的使用，土壤 pH 值逐渐回升至 6.5，达到了适宜芹菜生长的范围。土壤容重下降了 12%，变得更加疏松透气，有利于根系的生长和呼吸。芹菜根腐病发生率大幅降至 2%，有效减少了病害对芹菜的危害。单茬产量从原来的 8000 斤提升至 11000 斤，提升了 37.5%，不仅增加了农民的收入，还提高了农产品的市场竞争力。

（二）退化土壤生态重建

在当今全球生态环境面临严峻挑战的背景下，土壤退化已成为威胁农业可持续发展和生态系统平衡的重要问题。重金属污染、荒漠化等因素导致大量土壤失去了原有的生产能力和生态功能，严重影响了土地的合理利用和生态环境的稳定。晨信农业的纳米生物碳 - 酶复合素技术在退化土壤生态重建方面展现出了巨大的潜力。在重金属污染的土壤中，如镉、铅等重金属的超标，会对土壤生态系统造成严重破坏。这些重金属具有毒性，会抑制土壤微生物的活性，影响土壤中养分的循环和转化。同时，它们还会被农作物吸收，通过食物链进入人体，对人体健康造成潜在威胁。荒漠化土壤则由于植被破坏、水土流失等原因，土壤结构遭到严重破坏，保水保肥能力极差，难以维持植物的生长。

纳米生物碳 - 酶复合素技术通过纳米碳和纳米酶的协同作用，为退化土壤的生态重建提供了有效的途径。纳米碳材料具有强大的吸附能力，对重金属离子的吸附率 $\geq 85\%$ 。它能够与重金属离子发生特异性结合，将其固定在土壤中，降低其生物有效性，减少其对土壤微生物和农作物的危害。纳米酶则能够促进植物根系分泌物的分解，这些分泌物中含有一些能够与重金属离子络合的物质，通过纳米酶的催化作用，能够加速络合反应的进行，进一步降低重金属的生物有效性。

在重金属污染的农田中，土壤中镉含量严重超标，导致农作物生长受阻，产量极低。在施用纳米生物碳 - 酶复合素后，经过一段时间的修复，土壤中镉的生物有效性显著降低，农作物对镉的吸收量减少了 50% 以上。同时，纳米酶促进了土壤中有机的分解和转化，增加了土壤中养分的含量，改善了土壤的肥力状况。在荒漠化地区的试验中，纳米生物碳 - 酶复合素能够增加土壤的团聚性，提高土壤的保水保肥能力，为植被的生长提供了有利条件。经过修复，植被覆盖率逐渐提高，生态环境得到了明显改善，为生态脆弱区的农业可持续发展提供了有力支撑。

（三）功能性肥料核心组分

在农业现代化进程中，肥料的高效利用和多功能化发展已成为实现农业可持续发展的关键因素。传统肥料在满足作物养分需求方面发挥了重要作用，但随着农业生产对环境友好和资源高效利用的要求日益提高，其局限性也逐渐凸显。晨信农业的纳米生物碳 - 酶复合素作为新型肥料增效剂，为功能性肥料的研发和应用带来了新的突破。作为新型肥料增效剂，纳米生物碳 - 酶复合素具有独特的优势。它可以与有机肥、水溶肥等多种肥料进行复配，赋予肥料“保肥、促生、抗逆”多重功能。与传统肥料相比，含纳米生物碳 - 酶复合素的复合肥料在养分利用率方面表现出色，可使养分利用率提升 25%。这是因为纳米碳材料能够吸附肥料中的养分离子，减少养分的流失和固定，使其能够更持久地为作物提供养分。纳米酶则能够加速土壤中有机的分解和转化，释放出更多的养分，提高土壤养分的有效性。

在施肥周期方面，含纳米生物碳 - 酶复合素的复合肥料也具有明显优势，施肥周期可延长 10 - 15 天。这意味着农民可以减少施肥次数，降低施肥管理成本，同时也减少了因频繁施肥对土壤和环境造成的负面影响。在某果园中，使用含纳米生物碳 - 酶复合素的水溶肥后，果树对氮、磷、钾等养分的吸收效率明显提高，叶片更加翠绿，果实品质和产量都有了显著提升。与使用传统水溶肥相比，施肥次数减少了 2 - 3 次，不仅节省了人力和物力成本，还提高了肥料的利用效率，实现了农业生产的节本增效。

五、创新优势：颠覆传统的三大技术突破

（一）协同机制突破：从“单一功能”到“系统赋能”

传统的土壤改良产品往往功能单一，碳肥主要侧重于改良土壤的物理结构，通过增加土壤孔隙度，改善土壤的通气性和保水性，使土壤变得更加疏松，有利于作物根系的生长和伸展。然而，碳肥对土壤中生化反应的调节作用相对较弱，无法有效促进土壤中有机的分解和养分的转化。酶肥则主要聚焦于调节土壤的生化反应，通过加速土壤中有机的分解，释放出更多的养分，提高土壤养分的有效性。但酶肥在改善土壤物理结构方面的效果并不明显，难以解决土壤板结等问题。

晨信农业的纳米生物碳 - 酶复合素（Nano - CEC）技术打破了这种局限，实现了从“单一功能”到“系统赋能”的跨越。在吸附储存方面，纳米碳材料凭借其极大的比表

面积和丰富的孔隙结构，对土壤中的氮、磷、钾等养分离子以及有机质具有超强的吸附能力，能够将这些养分牢牢储存起来，减少养分的流失。研究数据表明，纳米碳材料对氮素的吸附量可比普通土壤吸附剂提高 50%，对磷素的吸附量提高 40%，有效提高了土壤的保肥能力。

在催化转化方面，纳米酶具有高效的催化活性，能够加速土壤中有机物的分解和转化。纳米酶可以在短时间内将复杂的碳水化合物和蛋白质等有机物分解为小分子碳源，如葡萄糖、氨基酸等，这些小分子碳源能够被作物根系迅速吸收利用，为作物的生长提供充足的能量和养分。实验显示，纳米酶对淀粉类有机物的分解效率比传统酶制剂提高了 2 - 3 倍，大大加速了土壤中碳氮循环的进程。

在微生态调控方面，纳米碳和纳米酶的协同作用促进了土壤中有益微生物的繁殖和生长。纳米碳为有益微生物提供了良好的栖息场所和丰富的养分来源，而纳米酶则通过催化反应，为有益微生物的代谢活动提供了更多的能量。这使得土壤中有益菌的数量大幅增加，如固氮菌、解磷菌等，它们能够固定空气中的氮素，将土壤中难溶性的磷转化为可被作物吸收的形态，从而增强了土壤的生物活性和肥力。研究发现，添加纳米生物碳 - 酶复合素的土壤中，有益菌的数量比对照土壤增加了 50% 以上，土壤微生物群落结构更加稳定和丰富。

与单一碳基或酶基产品相比，Nano - CEC 对土壤有机质含量的提升效率快 3 倍。在连续种植 3 年的番茄大棚中，使用单一碳肥的土壤有机质含量每年仅增加 0.5%，使用单一酶肥的土壤有机质含量每年增加 1%，而使用 Nano - CEC 的土壤有机质含量每年增加 3%。Nano - CEC 对有益菌的富集速度也提升了 50%，在相同的时间内，Nano - CEC 处理的土壤中有益菌的数量明显多于单一碳肥或酶肥处理的土壤。这种全方位、立体化的修复体系，使得土壤的物理、化学和生物性质得到全面改善，为作物生长提供了更加优质的土壤环境。

（二）制备工艺创新：精准调控复合结构

在纳米生物碳 - 酶复合素（Nano - CEC）技术的研发过程中，制备工艺的创新是实现其优异性能的关键环节。传统的纳米材料复合方法往往存在复合效率低、材料分散不均匀以及界面协同性差等问题，这些问题严重影响了产品在土壤复杂环境中的稳定性和有效性。

晨信农业研发团队通过深入研究和不断探索，成功开发出了一种独特的“纳米碳表面功能化修饰 - 纳米酶定向负载 - 分子间作用力调控”三步法制备工艺。在纳米碳表面功能化修饰阶段，采用技术手段，在纳米碳材料的表面引入特定的官能团，如羧基（-COOH）、氨基（-NH₂）等。这些官能团的引入不仅增加了纳米碳表面的活性位点，还改变了其表面电荷性质，使其更易于与纳米酶发生相互作用。通过优化修饰条件，如反应温度、时间和试剂浓度等，确保了官能团在纳米碳表面的均匀分布，为后续的纳米酶定向负载奠定了良好的基础。

在纳米酶定向负载阶段，利用纳米碳表面修饰后的活性位点，通过共价键合或静电吸附等方式，将纳米酶精准地负载到纳米碳材料的表面。通过控制负载条件，如纳米酶的浓度、负载时间和溶液 pH 值等，实现了纳米酶在纳米碳表面的均匀分散，避免了纳米酶的团聚现象，提高了复合效率。实验结果表明，采用该方法制备的纳米生物碳 - 酶复合素，复合效率 $\geq 95\%$ ，显著高于传统复合方法的复合效率（通常在 70% - 80% 之间）。

在分子间作用力调控阶段，通过调节纳米碳与纳米酶之间的分子间作用力，如氢键、范德华力等，实现了两种纳米材料在微观层面的紧密结合和协同作用。通过添加特定的调控剂，如表面活性剂、聚合物等，优化了纳米碳与纳米酶之间的界面结构，增强了它们之间的相互作用，确保了在土壤复杂环境中能够稳定发挥作用。

这种独特的制备工艺使产品的储存稳定性得到了显著提升，提升至 24 个月。传统的纳米材料复合产品在储存过程中，由于纳米材料的团聚和活性降低等问题，其有效期往往较短，一般在 12 个月左右。而采用晨信农业制备工艺的 Nano - CEC，在储存 24 个月后，其性能依然保持稳定，纳米碳和纳米酶的活性损失均小于 5%。该工艺还拓宽了产品的适用温度范围，至 $-10^{\circ}\text{C}\sim 40^{\circ}\text{C}$ 。在低温环境下，传统产品的活性会受到明显抑制，而 Nano - CEC 在 -10°C 的低温条件下，仍能保持 70% 以上的活性，在高温 40°C 条件下，活性保持在 85% 以上，能够适应不同地区和季节的土壤环境，为其广泛应用提供了有力保障。

（三）环境效益凸显：绿色农业新路径

在全球大力倡导绿色农业和可持续发展的背景下，晨信农业的纳米生物碳 - 酶复合素（Nano - CEC）技术以其显著的环境效益，为绿色农业的发展开辟了一条新的路径。

通过减少化肥农药使用，Nano - CEC 技术对降低农业面源污染起到了关键作用。传统农业生产中，大量使用化肥和农药虽然在一定程度上提高了农作物的产量，但也带来了严重的环境污染问题。化肥的过量使用导致土壤中养分失衡，氮、磷等养分大量流失，进入水体后引发水体富营养化，造成藻类大量繁殖，水质恶化，影响水生生物的生存。农药的残留则会对土壤、水体和空气造成污染，危害生态环境和人类健康。Nano - CEC 技术的应用有效缓解了这些问题。在化肥使用方面，由于纳米碳材料能够吸附和储存养分，纳米酶能够促进土壤中养分的释放和转化，使得土壤的保肥能力和养分利用效率大幅提高，从而可以减少化肥的用量。实际应用数据表明，使用 Nano - CEC 后，化肥用量可降低 30%。在某水稻种植区，传统施肥方式下每亩需要施用化肥 50 公斤，使用 Nano - CEC 后，每亩化肥施用量减少到 35 公斤，不仅降低了生产成本，还减少了化肥流失对环境的污染。

在农药使用方面，Nano - CEC 技术通过改善土壤微生态环境，增强了作物的抗逆性，使作物对病虫害的抵抗力提高，从而减少了农药的使用量。实验结果显示，使用 Nano - CEC 的农田，农药用量减少了 20%。在某蔬菜种植基地，使用 Nano - CEC

后，番茄的病虫害发生率明显降低，农药使用次数从原来的每月 4 次减少到每月 3 次，有效减少了农药残留对环境和农产品的影响。

改良后的土壤还能延长作物生长期 7 - 10 天，这主要是因为 Nano - CEC 改善了土壤的物理和化学性质，为作物生长提供了更稳定和适宜的环境。土壤结构的改善使得根系能够更好地吸收水分和养分，微生物群落的优化促进了土壤中养分的循环和释放，从而使作物能够在更长的时间内保持良好的生长状态。作物生长期的延长有助于提高农产品的品质和产量，提升农产品耐储存性。以芹菜为例，使用 Nano - CEC 后，芹菜的粗纤维含量下降了 15%，口感更加鲜嫩，货架期延长了 3 天，减少了农产品在储存和运输过程中的损耗，提高了农产品的市场竞争力。

Nano - CEC 技术实现了“提质、增效、减污”的多重目标，契合了全球绿色农业发展的趋势，为农业的可持续发展提供了有力的技术支持。它不仅有助于保护生态环境，减少农业对环境的负面影响，还能提高农业生产经济效益和社会效益，是一种具有广阔应用前景的绿色农业技术。

六、实际应用：沧州连作基地实证分析

（一）项目背景与实施方案

河北沧州 150 亩芹菜连作试验基地，凭借其得天独厚的地理位置和气候条件，是当地重要的蔬菜种植点。然而，长期的连作种植模式却给这片土地带来了沉重的负担。连续 10 年以上的芹菜种植，使得土壤问题日益严峻。土壤 pH 值降至 5.2，呈现出强酸性状态，这严重影响了土壤中微生物的活性和养分的有效性，许多有益微生物难以生存，土壤中的一些营养元素也变得难以被芹菜根系吸收。土壤容重高达 1.45 g/cm³，表明土壤已经严重板结，通气性和透水性极差，根系在这样的土壤中难以伸展和呼吸，无法充分吸收水分和养分。根腐病发生率更是高达 30%，大量的芹菜植株受到病害侵袭，导致减产严重，亩产仅 8000 斤，菜农们的经济效益受到了极大的影响。

为了改善这种状况，2024 年春季，该基地开始引入晨信农业的纳米生物碳 - 酶复合素（Nano - CEC）技术，施用含 Nano - CEC 的土壤改良剂。在施用过程中，采用了基施与滴灌结合的方式，以确保改良剂能够均匀地分布在土壤中，充分发挥其作用。基施时，按照 200 kg / 亩的用量将改良剂均匀地撒施在土壤表面，然后通过深耕将其翻入土壤中，使改良剂与土壤充分混合。滴灌则是在芹菜生长的关键时期，将改良剂溶解在水中，通过滴灌系统缓慢地输送到芹菜根系周围，实现精准施肥。在整个过程中，对土壤的各项指标以及芹菜的生长状况进行了持续 3 个月的严密监测，包括土壤的 pH 值、容重、有益菌数量等物理化学指标，以及芹菜的发病率、产量、品质等生长指标，为后续的效果评估提供了详实的数据支持。

（二）关键指标变化对比

指标	施用前	施用后	变化率
土壤 pH 值	5.2	6.5	+25%
土壤容重	1.45	1.28	-12%
有益菌数量	1.2×10 ⁸	1.8×10 ⁸	+50%
根腐病发生率	30%	2%	-93%
亩产	8000 斤	11000 斤	+37.5%
芹菜粗纤维含量	1.8%	1.5%	-17%

从表中数据可以清晰地看出，施用含 Nano - CEC 的土壤改良剂后，各项指标均发生了显著变化。土壤 pH 值从 5.2 提升至 6.5，增长了 25%，这使得土壤的酸碱度更加适宜芹菜的生长，为土壤中微生物的活动和养分的转化提供了良好的环境。土壤容重从 1.45 g/cm³ 下降到 1.28 g/cm³，降低了 12%，表明土壤的板结状况得到了明显改善，变得更加疏松透气，有利于芹菜根系的生长和呼吸，根系能够更好地吸收水分和养分。

有益菌数量从 1.2×10⁸ 增长到 1.8×10⁸，增加了 50%，这得益于 Nano - CEC 技术对土壤生态环境的改善。纳米碳和纳米酶的协同作用为有益菌提供了丰富的养分和适宜的生存环境，促进了有益菌的繁殖和生长。有益菌的增加不仅增强了土壤的生物活性，还能够抑制病原菌的生长，减少病害的发生。

根腐病发生率从 30% 大幅降至 2%，降低了 93%，这是土壤微生态环境改善和芹菜抗逆性增强的直接体现。健康的土壤环境和强大的植株抗逆能力有效地抵御了根腐病的侵袭，保障了芹菜的健康生长。

亩产从 8000 斤提升至 11000 斤，增长了 37.5%，这是土壤改良和病害减少共同作用的结果。良好的土壤条件和健康的植株使得芹菜能够充分吸收养分，生长更加旺盛，从而实现了产量的大幅提升。

芹菜粗纤维含量从 1.8% 下降到 1.5%，降低了 17%，这表明芹菜的品质得到了显著提升。粗纤维含量的降低使得芹菜的口感更加鲜嫩，更受消费者的喜爱，提高了芹菜的市场竞争力。

（三）经济效益与生态价值

在项目实施期间，纳米生物碳 - 酶复合素技术展现出了显著的经济效益和生态价值。在经济效益方面，化肥投入减少 35%，这主要是因为 Nano - CEC 技术提高了土

壤的保肥能力和养分利用效率。纳米碳材料能够吸附和储存养分，纳米酶能够促进土壤中养分的释放和转化，使得土壤中的养分能够更有效地被芹菜吸收利用，从而减少了化肥的使用量。据测算，每亩地节约成本 120 元，这为菜农们减轻了经济负担。农药投入减少 25%，这是由于 Nano - CEC 技术增强了芹菜的抗逆性，使芹菜对病虫害的抵抗力提高。改良后的土壤微生态环境有利于有益微生物的生长繁殖，这些有益微生物能够抑制病原菌的生长，减少病虫害的发生，从而降低了农药的使用量。每亩地节约成本 80 元，同时也减少了农药残留对环境 and 农产品的影响。

亩产增加 3000 斤，按照市场价格计算，新增产值 3600 元 / 亩。这不仅增加了菜农的收入，还提高了土地的利用效率。综合来看，使用纳米生物碳 - 酶复合素技术后，每亩地的综合收益提升 4000 元以上，为农业生产带来了显著的经济效益。

在生态价值方面，土壤保水能力增强，这是因为纳米生物碳 - 酶复合素改善了土壤的结构，增加了土壤的孔隙度，使得土壤能够更好地储存水分。灌溉用水减少 20%，这对于水资源的节约和合理利用具有重要意义，特别是在水资源短缺的地区，能够有效地缓解水资源压力。面源污染风险显著降低，减少了化肥和农药的使用量，降低了氮、磷等养分和农药残留对水体和土壤的污染，保护了生态环境，实现了经济与生态效益的双赢。

七、前景展望：开启智慧农业新征程

（一）技术迭代方向

1. **精准靶向修复**：开发针对不同土壤类型（如红壤、黑土、盐碱土）的专用型 Nano - CEC 配方，提升修复特异性。红壤酸性强、铁铝含量高，在研发针对红壤的 Nano - CEC 配方时，可增加纳米碳材料表面碱性官能团的修饰，以中和土壤酸性；同时，通过调控纳米酶的活性位点，使其能够更有效地促进红壤中磷素的活化，提高磷的利用率。对于黑土，其有机质含量丰富但存在结构性退化问题，可强化纳米碳对土壤团聚体的稳定作用，配合纳米酶促进有机质的适度分解，维持土壤肥力平衡。针对盐碱土，优化纳米碳的吸附性能，使其能够优先吸附土壤中的盐分离子，降低土壤盐浓度，纳米酶则着重激活土壤中耐盐碱微生物的活性，增强土壤的抗盐碱能力。

2. **智能化应用**：结合土壤墒情传感器与无人机喷施技术，实现“精准诊断 - 精准施药”的智能农业场景。土壤墒情传感器可实时监测土壤的水分、温度、养分等参数，通过物联网将数据传输至云端平台。无人机搭载多光谱相机，在飞行过程中获取作物的生长信息，如叶面积指数、叶绿素含量等。云端平台利用大数据分析和人工智能算法，对传感器和无人机采集的数据进行整合分析，精准判断土壤的健康状况和作物的生长需求。根据分析结果，自动生成无人机的喷施方案，实现 Nano - CEC 的精准施用，提高资源利用效率，减少浪费和环境污染。

3. **全产业链延伸**：探索 Nano - CEC 在有机肥腐熟、秸秆还田增效等环节的应

用，构建土壤 - 作物 - 环境协同的大循环体系。在有机肥腐熟过程中，添加 Nano - CEC 可加速有机物的分解和转化，缩短腐熟周期，提高有机肥的品质。纳米酶能够快速将复杂的有机物分解为小分子物质，纳米碳则吸附这些小分子，促进微生物的生长和繁殖，从而加速腐熟进程。在秸秆还田时，Nano - CEC 可增强秸秆的降解速度，促进秸秆中的养分释放，同时改善土壤微生物群落结构，增强土壤对秸秆养分的利用效率，减少秸秆还田对土壤和环境的负面影响，实现农业废弃物的资源化利用和农业生态系统的良性循环。

（二）产业影响与社会价值

作为“藏粮于地”国家战略的关键技术支撑，Nano-CEC 技术可有效盘活全国超 5 亿亩连作障碍耕地与退化土壤，提升粮食产能与品质，助力“双碳”目标实现（土壤固碳能力提升 20%）。随着全球农业向可持续转型，该技术有望成为国际土壤修复领域的“中国方案”，引领智慧农业新变革。

Nano-CEC 技术在提升粮食产能方面具有巨大潜力。通过改善土壤结构和肥力，为作物生长提供良好的环境，促进作物根系的发育和养分吸收，从而提高粮食产量。在品质方面，优化后的土壤环境使作物能够均衡吸收养分，减少化肥和农药的使用，降低农产品中的有害物质残留，提升农产品的品质 and 安全性，满足消费者对高品质农产品的需求。

在“双碳”目标背景下，Nano-CEC 技术通过增强土壤固碳能力，为应对气候变化做出贡献。纳米碳材料的稳定存在和对土壤有机质的保护作用，以及纳米酶促进的微生物活动，共同作用使土壤能够固定更多的碳，减少二氧化碳等温室气体的排放。在国际上，该技术也具有广阔的应用前景，为其他国家解决土壤退化问题提供了参考和借鉴，有助于提升我国在全球农业领域的影响力和话语权，推动全球智慧农业的发展和进步。

参考文献

- [1] 张福锁, 崔振岭, 王激清, 等. 中国主要粮食作物肥料利用率现状与提高途径[J]. 土壤学报, 2008, 45(5):915-924.
- [2] 赵其国, 黄标, 鲍士旦. 土壤质量与持续环境: I.土壤质量的定义及评价方法[J]. 土壤, 1997(3):113-120.
- [3] 阎秀兰, 李花粉, 张福锁. 纳米材料在农业中的应用研究进展[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(增刊):826-830.
- [4] 陈立松, 林文雄. 植物逆境生理与分子生物学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2005:128-135.
- [5] 王光华, 金剑, 徐美娜, 等. 连作障碍下土壤微生物区系变化及生物修复研究进展[J]. 应用生态学报, 2009, 20(1):245-252.
- [6] Gao L, Zhuang J, Nie L, et al. Nanozymes: classification, catalytic mechanisms, activity regulation, and applications[J]. Chemical Reviews, 2020, 120(10):4741-4819.
- [7] 李娟, 张宇, 王效华. 农业面源污染防治技术研究进展[J]. 生态环境学报, 2010, 19(6):1459-1464.
- [8] 国家统计局农村社会经济调查司. 中国农村统计年鉴 2024[M]. 北京: 中国统计出版社, 2024.
- [9] Liu J, Li Y, Zhang X, et al. Carbon-based nanomaterials for soil remediation: A review[J]. Journal of Hazardous Materials, 2021, 403:123958.