

基于小麦降碳提质增产用微藻肥应用研究

周美含¹ 郑 浩² 侯松峰^{3,4} 刘彧彤^{5,6} 李迎春^{7*}

1. 沈阳农业大学 辽宁 沈阳 125000
2. 德州地福来生物科技有限公司 山东 德州 253699
3. 江西省微藻资环技术产业有限公司 江西 九江 332700
4. 运城地福来生物科技发展有限公司 山西 运城 043600
5. 山西奥奇环能产业技术有限公司 山西 运城 043600
6. 山西益元坊科技发展有限公司 山西 运城 043600
7. 中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所 北京 100081

摘要：全球气候变化与粮食安全问题凸显，小麦作为我国关键粮食作物，其产量、品质及种植碳排放备受关注。微藻肥作为新型生物肥料，富含营养与生物活性物质，兼具环境友好、营养全面等优势。本研究聚焦微藻肥在小麦种植中的应用，探究其降碳、提质、增产机制，为农业绿色可持续发展提供科学依据，助力解决小麦产业面临的现实挑战。

关键词：小麦；降碳提质增产；微藻肥；应用

1 微藻肥的特性及在农业中的应用优势

1.1 微藻肥的特性

微藻肥的营养成分丰富多样，除了含有植物生长所必需的氮、磷、钾等大量元素外，还包含钙、镁、硫等中量元素以及铁、锰、锌等微量元素。这些营养元素以易于植物吸收的形式存在，能够满足小麦在不同生长阶段对营养的需求。

同时，微藻肥中含有多种生物活性物质，如细胞分裂素、生长素、赤霉素等植物激素，这些物质能够调节小麦的生长发育过程，促进种子萌发、根系生长、植株分蘖等。此外，微藻肥还含有多糖、蛋白质、氨基酸等物质，可提高小麦的抗逆性，增强其抵御病虫害和不良环境的能力。

1.2 在农业中的应用优势

环境友好：微藻肥的生产过程不会产生大量的污染物，且施用于土壤后，能够减少化肥的使用量，降低因化肥流失造成的水体富营养化和土壤污染等环境问题。同时，微藻在生长过程中能够吸收二氧化碳，有助于减少大气中的温室气体，实现降碳的目标。

改善土壤结构：微藻肥中的有机质可以增加土壤的团粒结构，提高土壤的保水保肥能力，改善土壤的通气

项目名称：基于小麦降碳提质增产增效用微藻生物产品的研制与示范（项目编号：2023TSGC0035）

作者简介：周美含（2004.06-），女，汉族，辽宁葫芦岛，本科，无职称，研究方向为环境科学。

性，为小麦根系的生长创造良好的环境。

提高作物品质和产量：微藻肥中的营养物质和生物活性物质能够协同作用，促进小麦的光合作用和养分吸收，提高小麦的千粒重、蛋白质含量等品质指标，同时增加小麦的产量。

2 微藻肥在小麦降碳方面的应用研究

2.1 小麦种植过程中的碳排放来源

小麦种植过程中的碳排放是一个复杂的系统问题，涉及从播种到收获的全产业链环节。具体来看，化肥的生产和施用是碳排放的主要源头之一。化肥生产中，合成氨工艺需消耗大量煤炭和天然气，每吨氮肥生产约排放8~10吨二氧化碳当量；而磷肥生产中的磷矿开采、运输及酸解过程，每吨产品碳排放可达5~7吨。在施用环节，过量的氮肥会通过硝化-反硝化作用产生氧化亚氮，其全球增温潜势是二氧化碳的298倍，每公斤氮肥平均排放0.01~0.05公斤氧化亚氮。

农机作业的碳排放同样不容忽视。从耕地、播种到收割的全过程，大型拖拉机每公顷作业消耗柴油约30~50升，按柴油燃烧每升排放2.63公斤二氧化碳计算，每季小麦机械作业碳排放可达79~132公斤/公顷。灌溉环节中，电力驱动的抽水设备每立方米灌溉用水约消耗0.1~0.3千瓦时电能，对应排放0.08~0.24公斤二氧化碳，我国小麦主产区年均灌溉量约300~500立方米/公顷，由此产生的碳排放为24~120公斤/公顷。

此外，秸秆处理方式也影响碳平衡。传统焚烧处理

每公斤秸秆释放1.8公斤二氧化碳，若按每公顷产秸秆6吨计算，单次焚烧即排放10.8吨二氧化碳；而秸秆还田虽能固碳，但初期微生物分解过程会短期释放10%~15%的碳量。

2.2 微藻肥对小麦碳排放的影响机制

化肥替代的碳减排效应：微藻肥的高养分利用率源于其独特的缓释机制，其中的氨基酸螯合态氮可使小麦氮吸收效率从传统化肥的30%~40%提升至60%~70%。田间试验数据显示，每减少1公斤氮肥施用，可降低生产阶段4.8公斤二氧化碳当量排放，同时减少0.4公斤氧化亚氮生成（相当于119公斤二氧化碳当量）。在华北麦区，常规施肥量约为225公斤/公顷氮肥，采用微藻肥替代40%化肥后，单季可减少碳排放约1.2吨/公顷。

土壤碳汇的增强机制：微藻肥中的胞外多糖（含量约5%~8%）能促进土壤团聚体形成，250公斤/公顷施用量可使0~20cm土层大于0.25mm的团聚体含量增加20%~30%，这种结构为有机碳封存提供了物理屏障。同时，微藻残体被土壤微生物分解后，约30%的碳转化为稳定性腐殖质，其周转周期长达50~100年。定位试验表明，连续三年施用微藻肥的麦田，土壤有机碳年增速达0.5~0.8克/千克，相当于每公顷年固碳2~3吨。

光合固碳的增效路径：微藻肥中的玉米素（含量10~50mg/kg）能提高小麦叶片叶绿素含量15%~20%，并延长功能叶寿命7~10天。在灌浆期，处理组小麦净光合速率达18~22 $\mu\text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ ，较对照组提升25%，单株日固碳量增加8~10克。通过¹³C同位素标记试验发现，微藻肥处理的小麦将更多碳分配至根系（占总固碳量的20%~25%），这些根系分泌物可刺激土壤碳的微生物固存。

2.3 微藻肥在小麦降碳中的应用效果试验

在黄淮海平原麦区设两年定位试验，设对照（常规施肥）、30%和50%化肥氮替代及全微藻肥4个处理。结果显示，50%替代处理减排效果最佳，碳排放总量较对照降28.9%，氧化亚氮排放减42.3%，土壤碳汇增量抵消35%直接排放。拔节期和灌浆期为减排关键期，微藻肥生产碳成本1.5个生长季可收回。

3 微藻肥在小麦提质方面的应用研究

3.1 小麦品质的评价指标

小麦品质评价体系涵盖营养、加工和食用三大维度，各维度均有明确量化指标。营养品质核心指标包括蛋白质总量（优质小麦需达13%以上）、氨基酸组成（尤其是赖氨酸等8种必需氨基酸含量及比例），以及矿物质元素（如铁、锌、硒）的富集度。其中，氨基酸评分

（AAS）是关键参数，理想小麦蛋白的AAS应接近1.0。

加工品质评价更为系统，面筋含量分为湿面筋（优质强筋麦需 $\geq 30\%$ ）和干面筋，面筋指数反映面筋质量（强筋麦需 ≥ 70 ）；面团流变学特性通过和面时间（强筋麦需 ≥ 3.5 分钟）、稳定时间（ ≥ 7 分钟）、拉伸阻力等参数衡量，直接影响面包、面条等制品的成型性。

食用品质则涉及蒸煮特性（如吸水率、膨胀率）、口感评分（包括硬度、弹性、咀嚼性）和风味物质（如醛类、酯类挥发性成分）含量，这些指标通过质构仪和气相色谱-质谱联用仪测定。

3.2 微藻肥对小麦品质的影响机制

提高蛋白质含量：微藻肥含有的有机氮（如氨基酸态氮占比20%~30%）可被小麦直接吸收，避免传统化肥氮转化损失。其中的脯氨酸和谷氨酸能激活小麦籽粒中的谷氨酰胺合成酶（GS）和天冬氨酸激酶（AK），使这两种关键酶活性提升40%~60%，加速氮素向蛋白质的转化。试验数据显示，每公顷施用300kg微藻肥，可使小麦旗叶的氮转运效率从55%提升至75%，为籽粒蛋白合成提供持续氮源。

改善氨基酸组成：微藻（如螺旋藻）自身含18种氨基酸，其中赖氨酸含量达4.2%，通过根系吸收后可直接补充小麦籽粒氨基酸库。同时，微藻肥中的生物活性肽能调控籽粒中转氨酶活性，使必需氨基酸合成通路增强。检测发现，施用微藻肥的小麦籽粒赖氨酸含量提升0.12~0.18个百分点，氨基酸评分提高0.08~0.12，显著改善蛋白质营养价值。

影响面筋形成：微藻肥中的甘露聚糖和褐藻酸可调节小麦籽粒中淀粉分支酶（SBE）活性，降低支链淀粉比例（减少5%~8%），相对提高醇溶蛋白和谷蛋白（面筋主要成分）占比。同时，细胞分裂素类物质能延长籽粒灌浆期的蛋白积累时间（约3~5天），使湿面筋含量提升2~4个百分点，且面筋网络结构更致密，拉伸阻力增加15%~20%，显著优化加工性能。

3.3 微藻肥在小麦提质中的应用效果试验

在小麦种植过程中，设置不同的微藻肥施用量处理，研究其对小麦品质的影响。试验结果显示，随着微藻肥施用量的增加，小麦籽粒中的蛋白质含量逐渐提高，且必需氨基酸的含量也有所增加。与对照组相比，施用适量微藻肥的小麦面筋含量增加了10%~15%，面团的流变学特性得到明显改善，加工品质和食用品质均有提升。

4 微藻肥在小麦增产方面的应用研究

4.1 小麦生长发育的关键阶段

小麦生长发育历经多个关键阶段，各阶段特征鲜明且养分需求迥异。播种期需适宜墒情，种子吸水膨胀后启动代谢；苗期（出苗至分蘖前）是根系奠基期，根系生长量占总根量的30%，需氮量占全生育期的15%~20%，以促进叶片光合作用。分蘖期（出苗后15~20天）是有效穗数决定期，单株分蘖数需达3~5个，此时对磷素需求激增，磷供应不足会导致无效分蘖增多。

拔节期（基部节间伸长）是营养生长向生殖生长转折期，茎秆日伸长量可达2~3厘米，需氮、磷、钾协同供应，三者需求量分别占总量的30%、40%、50%。孕穗期（旗叶展开至抽穗）是小花分化关键期，每穗小花数形成于此，对水分和硼元素敏感。灌浆期（开花至成熟）决定千粒重，光合产物日均积累量需达8~10克/株，需持续的氮素和镁元素供应以维持叶绿素功能。成熟期则需控水防倒伏，确保籽粒正常脱水。

4.2 微藻肥对小麦生长发育及产量的影响机制

促进种子萌发和苗期生长：微藻肥中的赤霉素（含量20~50mg/kg）可打破种子休眠，使萌发率提高10%~15%，发芽势增强20%。苗期施用后，其中的腐植酸能促进根尖分生区细胞分裂，使根长增加25%~30%，根表面积扩大40%，侧根数量增加2~3条/株。同时，锌、铁等微量元素通过螯合态被高效吸收，叶片叶绿素a含量提升15%，光饱和点提高50 $\mu\text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ ，苗期干物质积累量增加18%~22%。

促进分蘖和穗分化：分蘖期施用微藻肥，其中的细胞分裂素（玉米素核苷含量10~30mg/kg）可提高分蘖节的细胞分裂活性，使有效分蘖率从60%提升至75%。拔节期的海藻多糖能调节茎秆维管束发育，增加导管数量15%~20%，增强养分运输能力。穗分化期，微藻中的吲哚乙酸可促进小花原基发育，使每穗可育小花数增加8%~12%，败育率降低10个百分点。

提高灌浆速率和千粒重：灌浆期，微藻肥中的氨基酸（如丙氨酸、甘氨酸）可作为光合产物运输的载体，使灌浆速率峰值提前2~3天，达1.5~1.8g/100粒·天。同时，其中的钾元素（含量8%~12%）能增强籽粒库容活性，使淀粉合成酶活性提高30%，千粒重增加2~3克。此外，脯氨酸等渗透调节物质可增强植株抗旱性，减少灌浆后期因干旱导致的早衰。

4.3 微藻肥在小麦增产中的应用效果试验

通过田间试验，研究不同微藻肥施用方式（基肥、追肥）和施用量对小麦产量的影响。试验结果表明，与对照组相比，采用基肥+追肥的方式施用微藻肥，小麦的有效分蘖数、穗粒数和千粒重均有显著增加，产量提高

了10%~20%。其中，适量的微藻肥施用量效果最佳。

5 微藻肥在小麦种植中的应用优化策略

5.1 根据小麦生长阶段合理施用微藻肥

在小麦的不同生长阶段，对养分的需求不同，因此应根据小麦的生长特点合理调整微藻肥的施用量和施用时期。例如，在苗期和分蘖期，应适当增加微藻肥的施用量，促进根系生长和分蘖；在灌浆期，应保证充足的微藻肥供应，提高千粒重。

5.2 结合土壤条件调整微藻肥施用方案

不同土壤类型的肥力状况和理化性质存在差异，对微藻肥的反应也不同。在砂质土壤中，由于土壤保肥能力较差，应增加微藻肥的施用次数，减少每次的施用量；在黏重土壤中，应适当减少微藻肥的施用量，避免土壤养分过剩。

5.3 与其他农业技术措施相结合

微藻肥的应用应与其他农业技术措施相结合，如合理灌溉、病虫害防治、秸秆还田等，以达到最佳的应用效果。例如，合理灌溉可以提高微藻肥的溶解度和有效性，促进小麦对养分的吸收；秸秆还田可以增加土壤有机质含量，与微藻肥协同作用，改善土壤结构。

6 结束语

综上所述，微藻肥在小麦降低碳排放、提升品质以及增加产量方面成效显著，可有效减少碳排放，提高小麦品质并增加产量，且具有多样化的应用策略。未来，需深入开展微藻肥作用机制的研究，研发具有针对性的微藻肥料，探究其协同效应，优化生产工艺流程，以推动微藻肥的大规模应用，为农业的绿色发展与粮食安全提供坚实支撑。

参考文献

- [1] 尚大朋,付文,侯占领,等.小麦专用腐殖酸控释掺混肥一次施肥效应[J].现代农业科技,2023,(20):4-7.
- [2] 重视小麦拔节孕穗肥的施用[J].农家致富,2023,(03):26.
- [3] 王献,朱汉清,孙进,等.盐城地区小麦化肥农药减量增效技术[J].大麦与谷类科学,2018,35(04):35-37.
- [4] 童玲,徐娜,张依然.江浙皖地区:水稻季结束小麦肥启动[J].中国农资,2018,(28):9.
- [5] 行景昆,谢晋.高塔小麦肥结块影响因素及控制措施[J].磷肥与复肥,2017,32(11):20-21.
- [6] 陈心想,王子浩,李洪顺,等.轻度盐碱地上小麦肥中不同添加物的效果初探[J].中国农学通报,2017,33(26):62-69.