◆提质增效产品创制技术◆

褐藻寡糖的制备方法及在肥料增效中的应用研究进展

何浩锋[1]，李绍冲[1]，吕　明[2,3]，苏　航[2,3,4]，李福利[2,3,4]

（1.济南大学，山东 济南　250002；2.中国科学院青岛生物能源与过程研究所，山东省合成生物学重点实验室，青岛新能源山东省实验室，一碳炼制山东省工程研究中心，山东 青岛　266101；3.山东能源研究院，山东 青岛　266101；4.潍坊麦卡阿吉生物科技有限公司，潍坊市海洋功能寡糖绿色生物制造重点实验室，山东 潍坊　261000）

［摘　要］褐藻寡糖是一类从褐藻胶降解获得的寡聚糖，具有促进植物生长、增强逆境耐受性及改善土壤健康等多种功能。概述褐藻寡糖的主要制备方法，包括物理法、化学法、酶解法、发酵法；探讨褐藻寡糖在不同领域的应用，重点分析其作为生物刺激剂在植保领域的应用及作用机制，包括促生根生长，提高抗逆性，提质增产，抗病菌、抗病毒，提高营养成分，抗氧化、耐储存，提高土壤细菌群落多样性等。阐述褐藻寡糖与肥料协同作用的增效机制，强调了其在提高肥料利用率、减少养分流失方面的潜力，为褐藻寡糖在农业可持续发展中的应用提供了科学依据。

［关键词］褐藻寡糖；生物刺激剂；肥料增效；生态农业

［中图分类号］S143　　［文献标志码］A　　［文章编号］2097-4566（2025）02-0054-12

Research progress on preparation methods of alginate oligosaccharides and its application in fertilizer efficiency enhancement

HE Haofeng[1], LI Shaochong[1], LYU Ming[2,3], SU Hang[2,3,4], LI Fuli[2,3,4]

(1. *University of Jinan*, *Jinan* 250002, *China*; 2. *Shandong Provincial Key Laboratory of Synthetic Biology*, *Qingdao Institute of Bioenergy and Bioprocess Technology*, *C1 Refinery Shandong Provincial Engineering Research Center*, *Chinese Academy of Sciences*, *Qingdao* 266101, *China*; 3. *Shandong Energy Institute*, *Qingdao* 266101, *China*; 4. *Weifang Key Laboratory of Marine Functional Oligosaccharides Green Biomanufacturing*, *Weifang Macroalga Biotechnology Co.*, *Ltd.*, *Weifang* 261000, *China*)

Abstract: Alginate oligosaccharides is a type of oligosaccharide derived from the degradation of alginate, with multiple functions such as promoting plant growth, enhancing stress tolerance, and improving soil health. The preparation methods of alginate oligosaccharides are summarized, including physical, chemical and enzymatic processes; The applications of alginate oligosaccharides in various fields are further explored , with a focus on their mechanisms of action as biostimulants, including promoting root growth, enhancing stress resistance, improving quality and yield, resisting bacteria and viruses, improving nutrient content, resisting oxidation and storage, and increasing soil bacterial community diversity, etc. This review centers on the potential applications of alginate oligosaccharides in enhancing fertilizer efficacy, reviewing the synergistic mechanisms between brown alginate oligosaccharides and fertilizers, and highlighting their potential to improve fertilizer utilization and reduce nutrient loss, thereby providing a scientific basis for the application of alginate oligosaccharides in sustainable agricultural development.

Key words: alginate oligosaccharides; biostimulants; fertilizer enhancement; ecological agriculture

0　引言

随着全球人口不断增长和耕地资源日益紧张，提高农作物产量和质量已成为农业领域的重要课题。在此背景下，肥料作为提高农作物生长效率的关键因素，其科学合理的使用显得尤为重要。尽管传统化肥的施用能够在短期内提升农作物产量，但长期过量使用往往会导致土壤退化[1]、环境污染和农作物品质下降[2]等问题。因此，亟须寻求一种既能提高肥料利用率，又能减少对环境负面影响的

［收稿日期］2025-01-01

［作者简介］何浩锋（1999-），男，广东佛山人，在读硕士研究生，研究方向为生物资源转化与利用。

［通信作者］李福利（1975-），男，山东滕州人，研究员，博士生导师，研究方向为一碳生物转化合成生物学；苏　航（1993-），男，陕西汉中人，微生物学博士，研究方向为工业生物技术及合成生物学。

［基金项目］山东省重点研发计划（2022SFGC0101）；山东省自然科学基金面上项目（ZR2021MC125）

新型肥料增效剂。

我国海洋面积辽阔，海洋资源丰富，其中海藻养殖占世界总量的60%以上，2020年，我国沿海地区海藻养殖产量达2 615 100 t[3]。褐藻寡糖（Alginate oligosaccharides，AOS）是一种源自褐藻的天然多糖降解产物，因其独特的生物活性和环境友好性，近年来在肥料增效领域受到了广泛关注。褐藻寡糖不仅能够促进植物生长，增强农作物抗逆性，还能改善土壤结构，提高肥料利用率，从而在农业生产中展现出巨大的应用潜力。

笔者首先介绍褐藻寡糖的化学性质和制备途径，随后总结其在植物生长促进、抗逆性增强以及土壤改良等方面的案例和作用机制，最后综述褐藻寡糖与肥料的相互作用及其作用机制，期望能够为褐藻寡糖在肥料增效领域的应用提供全面的理论支持。

1　褐藻寡糖

褐藻是生活在海洋中的大型藻类，属于褐藻门（*Phaeophyta*），是藻类中比较复杂和高等的一类真核生物，主要包括海带、马尾藻、巨藻等。多数褐藻含有色素墨角藻黄素（fucoxanthin），这使得它们呈现出特有的绿褐色[4]。褐藻细胞壁的主要成分是褐藻胶、岩藻糖胶和纤维素[5]，其中褐藻胶占比约为40%[6]。

褐藻胶中的*α*-*L*-古罗糖醛酸能够与钙离子形成“egg-box”结构，进而固化成纤维[7]，被广泛应用于纺丝行业。褐藻寡糖是通过解聚褐藻胶产生的聚合度为2~25的直链寡糖，通常使用物理化学法、生物合成法、酶解法等方法制备。根据糖醛酸组成的不同，褐藻寡糖分为甘露糖醛酸寡糖（M-AOS）、古罗糖醛酸寡糖（G-AOS）和杂合糖醛酸寡糖（H-AOS）；M-AOS和G-AOS都是由单一糖醛酸组成的寡糖，而H-AOS由于*β*-*D*-甘露糖醛酸与*α*-*L*-古罗糖醛酸比例（M/G）不同而结构有所差异[8]。褐藻寡糖由于分子量小、水溶性好，克服了褐藻胶黏度大、不易被机体吸收的缺点[9]。此外，褐藻寡糖还具有独特的保鲜[10]、抑菌[11]、抗肿瘤[12]、抗氧化[13]、促进植物生长[14]、诱导植物抗性[15]等多种生物活性，因此在食品、保健品、医药和植保等领域的研究和应用得到了极大的发展。

1.1　褐藻寡糖主要制备方法

1.1.1　酶解法

酶解法即利用褐藻胶裂解酶降解褐藻胶，褐藻胶裂解酶可来源于海洋藻类、软体动物、棘皮动物和多种微生物。褐藻胶裂解酶根据其氨基酸序列可分为14个裂解酶家族（PL）[16]：PL5、PL6、PL7、PL8、PL14、PL15、PL17、PL18、PL31、PL32、PL34、PL36、PL39和PL41；根据其对糖苷键的选择特异性，可分为G特异性（EC4.2.2.11）、M特异性（EC4.2.2.3）和双功能（MG）裂解酶（EC4.2.2-）[17]。生物酶解法制备褐藻寡糖具有反应条件温和、催化效率高、底物聚合度可控、无污染等优点，且与其他制备方式相比，生物酶解法制备的褐藻寡糖可以完整地保留生物活性。HU等[18]通过模块重组获得一种名为Aly7C的杂交裂解酶，其在40 ℃、pH 9.0下表现出最大活性，生成的寡糖聚合度为2~5。SONG等[19]从耐盐微生物中筛选出具有耐盐能力的裂解酶，在35~55 ℃下相对活性保持在80%，主要降解产物是聚合度为2的寡糖。然而，大多数裂解酶的最佳反应温度在30~40 ℃，不利于规模化生产。相比之下具有热稳定性的裂解酶在工业应用中有更大的潜力，ZHU等[17]使用嗜热褐藻胶裂解酶AlyRmB在70 ℃下酶解高浓度褐藻胶，10 h后，褐藻寡糖的产率为0.42 g/L，且主要成分的聚合度为2~6，有应用于工业生产的潜力。在规模生产中可尝试使用多种酶组合酶解，显著提升降解效果。由于纤维素也是海藻细胞壁的主要成分，因此纤维素酶有助于降解海藻[20]，SUN等[21]提到使用褐藻胶裂解酶和纤维素酶组合，24 h内海带降解率高达97%；ZHANG等[22]使用褐藻胶裂解酶和纤维素酶组合，褐藻水解速率显著大于商业产品褐藻胶裂解酶。

1.1.2　发酵法

发酵法是利用能自产褐藻胶裂解酶的微生物如弧菌[23]、火色杆菌属[24]、假交替单胞菌属[25]、刺孢小克银汉霉[26]、芽孢杆菌[27]发酵降解褐藻胶。李金梦[28]利用从海带中筛选出的芽孢杆菌Bacillus sp. NCU001发酵褐藻胶，褐藻寡糖产率为34%，并且该菌株生产的褐藻胶裂解酶具有降解甘露糖醛酸片段的偏好性。蒋文俊[29]从深海细菌中筛选出具有降解褐藻胶能力的芽孢杆菌用于发酵马尾藻，经过培养及优化后，马尾藻平板透明圈直径可达2.8 cm，且发酵液对于寄生曲霉NFRI-95孢子拥有较好的抑菌抑毒活性。

1.1.3　物理法

物理法主要分为辐射法、超声法、高温法。辐射法中最有效的是*γ*射线法，随着辐射剂量增加，

褐藻寡糖的分子量会显著降低，但成本较高，通过加入化学引发剂可降低降解所需的剂量，有效控制成本[30]。超声法利用空化现象产生的巨大剪切力破坏单糖单元间的共价键，获得分子量较小的褐藻寡糖，具有方便、快速、低成本、无副反应的优势，然而 Andrea 的研究中超声波降解得到的褐藻寡糖的分子量极限为 100 kg/mol[31]，而使用较高浓度的乙醇作为介质能获得较低黏度和更小分子量的褐藻寡糖，在 96% 乙醇中，能得到分子量为 50 kg/mol 的褐藻寡糖[32]，要获得更小分子量的褐藻寡糖，仍需进一步探索条件。有研究表明，在 140 ℃的高温下对褐藻胶进行解聚，随着反应时间延长，反应产物表现出抗氧化能力越来越强的趋势[13]。

1.1.4 化学法

化学法通常有酸降解法、碱降解法和氧化降解法。目前酸降解法主要使用草酸、盐酸、硫酸或甲酸在沸水浴中进行。快速降解褐藻胶的方法是在 0.1 ~ 1.0 mol/L（pH 2.8 ~ 4.5）的盐酸中水解褐藻胶，但这种方法价格昂贵且对环境不友好。相比于盐酸降解，使用过氧化氢具有更多优势，ANNA 等在研究中发现，使用过氧化氢氧化降解的水解产率远高于盐酸水解，且反应时间更短[33]。亦有其他强氧化剂降解褐藻胶的研究，YUE 等[34]利用臭氧处理褐藻胶，所得褐藻寡糖分子量显著降低，从 972.3 kDa 降低到 76.7 kDa，且不改变其化学结构；AI 等[35]同样利用臭氧降解褐藻胶，并提出了其降解机制，包括氧化和糖苷键的断裂，以及臭氧直接氧化形成 o–二醇和 o–二醛结构。

化学法制备最明显的缺点是反应的随机性、产物聚合度的复杂性以及难以获得具有特定聚合度的产物。尽管化学降解比较高效并且可以处理高浓度的底物，但是化学降解会产生大量副产品造成污染，并不适合褐藻寡糖的大规模生产。

1.2 褐藻寡糖的应用领域

1.2.1 食品工业

褐藻寡糖因其独特的流变性质，可作为食品添加剂中的增稠剂、稳定剂和凝胶剂[36]。值得注意的是褐藻寡糖具有低毒性、非免疫原性和生物降解性，因此可用于食品药物的递送载体，ZHOU 等[37]开发出一种促玉米醇溶蛋白–褐藻寡糖复合材料用于传递营养物质，其分散性、pH 值、离子强度和长期储存稳定性都表现出优异性能。

1.2.2 医疗行业

不同类型的褐藻寡糖具有不同的生物活性，H–AOS 的主要特征与抗氧化、抗凋亡和抗肿瘤作用有关，而 G–AOS 的主要作用是免疫调节和防御病原体。相比之下，M–AOS 及其衍生物主要通过调节肠道菌群和神经炎症发挥抗病毒、抗糖尿病和抗帕金森病药物的重要作用。UM–AOS 和 UG–AOS 的生物活性主要与抗肥胖、抗氧化和脂质调节有关。此外，UM–AOS 可以增强细胞自噬并发挥抗阿尔茨海默病的生物活性[38]。

褐藻寡糖可以用于调节肠道菌群，ZHANG 等[39]的研究表明补充褐藻寡糖可丰富潜在的益生菌并抑制有害细菌（如肠杆菌科、幽门杆菌科和消化链球菌科）的增殖；WANG 等[38]发现褐藻寡糖通过调节肠道菌群，对肥胖、糖尿病、高血压、免疫炎症、动脉粥样硬化和心血管疾病以及癌症等 MetS 相关疾病具有潜在的治疗作用，但其具体机制仍未阐明，需进一步深入研究。

1.2.3 功能性饲料

褐藻寡糖是一类从海洋褐藻胶中提取的低聚糖类益生元[40]，具有调节动物消化道吸收功能、加快机体新陈代谢、促进动物快速生长、提高动物综合体质等作用。邓婉珍[41]在大菱鲆和凡纳滨对虾饲料中添加不同比例的褐藻寡糖，发现添加 0.07% 和 0.60% 的褐藻寡糖显著提高大菱鲆的生长性能、免疫机能、增重率和饲料效率，添加 0.07% 褐藻寡糖能够改善凡纳滨对虾的肠道健康。YANG 等[42]发现褐藻寡糖能增强草鱼肝脏的生长性能，促进脂肪代谢，提高肝脏抗氧化能力。YAN 等[43]研究发现，在饲料中添加 0.2% 褐藻寡糖可明显降低沙门氏菌在肉鸡中的定植，改善鸡的肠道屏障功能和生产性能。

1.2.4 植保领域

褐藻寡糖具有多种生物活性，对植物具有促生根生长、提高抗逆性、提质增产、抗病抗虫等作用，在植保领域中应用相当广泛，将在下文详细叙述。

2 褐藻寡糖作为生物刺激剂在植保领域的应用及作用机制

生物刺激剂是能够通过分子层面的改变以及生理、生化和解剖结构的调节来调节植物生长行为的有机化合物。它们的作用方式多样，可以帮助植物应对各种环境压力，如干旱[44]、盐碱[45]和温度[46]。国内外众多研究证明，褐藻寡糖在植物生长过程中表现出广泛的生物活性。褐藻寡糖作为生物刺激剂的作用见图 1。

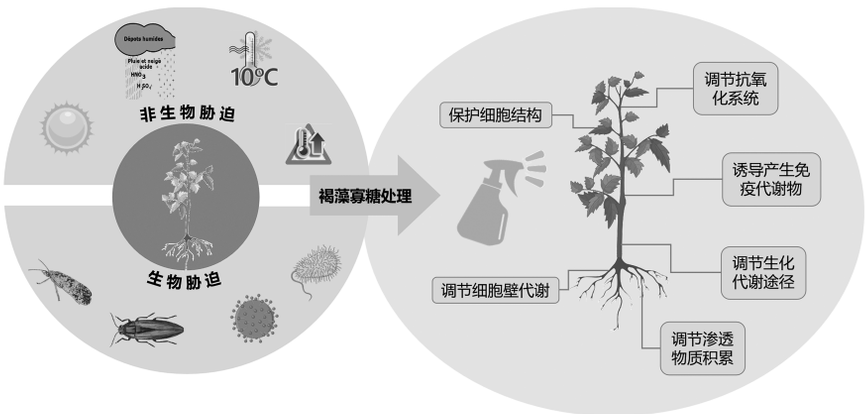

图1　褐藻寡糖作为生物刺激剂的作用

Fig. 1　The role of alginate oligosaccharides as biostimulants

2.1　促生根生长

褐藻寡糖对根系发育具有促进作用。在研究褐藻寡糖对小麦生根影响中发现，褐藻寡糖通过诱导植株上调硝酸还原酶的基因表达和酶活性，诱导小麦根系产生一氧化氮，同时加快了中柱细胞的分裂和生长，导致中柱面积与根横切面积比值增加[47]；另一项对水稻的研究中发现，褐藻寡糖能够诱导生长素相关基因（如OsYUCCA1、OsYUCCA5、OsIAA11和OsPIN1）的表达，加速生长素的生物合成和运输，并降低水稻根中的吲哚乙酸（IAA）氧化酶活性，从而促进根系发育；并且发现钙信号传导可能在褐藻寡糖诱导的根系发育中既作为上游信号分子，也作为下游信号分子，与生长素协同作用[48]。在促进植株生长方面，SANGRAM等[49]研究发现褐藻寡糖处理甜叶菊后，其碳酸酐酶（CA）和硝酸还原酶（NR）活性显著提升。CA是植物中最常见的含锌蛋白之一，存在于所有光合组织中，表明它在光合作用中起着积极的作用；NR是氮素同化的关键酶，也是植物营养状况的指示剂，可促进植株的鲜质量和干质量显著增加。近10年来褐藻寡糖对各种农作物促生根生长的研究见表1。

表1　褐藻寡糖对各种农作物促生根生长研究

Table 1　Effects of alginate oligosaccharides on growth promotion in various plants

施用质量浓度/（mg·L^{-1}）	农作物品种	施用方式	施用效果	参考文献
2 000	黄瓜	叶片喷施	株高、茎粗、株幅、鲜质量分别提高19.3%、22.7%、35.4%、74.3%	[50]
100	薄荷	叶片喷施	在120 d时，株高、叶面积、叶片产量较对照组分别提升了66.4%、47.1%、71.6%	[51]
2 000	黄瓜	叶片喷施	单株总产量和平均单果质量分别提高84.43%、10.59%	[52]
40	小麦	加入培养液	显著增加了根鲜质量、最长主根和总根的表面积、根长度、初生根的数量	[47]
5 000	西瓜	根部浇灌	株高、茎粗、叶片数均有明显提高	[53]
400	冰山莴苣	叶片喷施	叶面积、茎长、叶片数较对照组显著提升	[54]
200	薤菜	叶片喷施	株高、净质量分别提升53.19%、147.33%	[55]
500	烟草	叶片喷施	两种不同类型的褐藻寡糖使用后植株高度较对照组分别提升23%和49%	[56]
50	海水小球藻	加入培养基	细胞光密度达到对照组的2.2倍且更快进入对数生长期	[57]
20	水稻	加入培养液	水稻的根尖数、不定根数、根体积和根鲜质量较对照组分别提升4.1%、15.6%、43.8%和30%	[48]
100	生菜	根部浇灌	叶片大小和生根数对比对照组显著提升	[14]
400	卷心莴苣	叶片喷施	叶面积、茎长、穗质量、叶数对比对照组均有显著提升	[54]
200	小麦	根部浇灌	在14 d时，株高、根长分别增加55.81%、63.64%	[58]
100	微藻	加入培养基	微藻的OD_{750}是对照组的3.25倍	[59]

2.2 提高抗逆性

在自然界中，植物无时无刻受到生物和非生物胁迫的挑战，称为逆境，逆境包括干旱胁迫、盐胁迫、高温低温胁迫、病虫害胁迫和氧化胁迫等。褐藻寡糖不仅能促进植物生根生长，在植物抵抗逆境时也表现出巨大的潜力。徐常健[60]研究发现褐藻寡糖与壳寡糖、γ-氨基丁酸为2∶1∶1时能够提高水稻幼苗的抗氧化酶活性，降低丙二醛和过氧化氢含量，增强幼苗的抗寒性。LI等[61]施用褐藻寡糖处理干旱胁迫下的黄瓜，显著提高了干旱胁迫下黄瓜的直径、鲜质量、光合速率、蒸腾速率、气孔导度和叶绿素含量，并阐明了其中机制，即通过刺激脱落酸合成，诱导脱落酸信号通路中涉及的抗氧化酶合成基因的表达，从而提高黄瓜的耐旱性。褐藻寡糖增加植物对盐碱胁迫的抵抗机制尚未明确，DU等[62]通过喷施褐藻寡糖来分析其对水稻幼苗在盐胁迫下的转录组和代谢物谱的影响，试图阐明作用机制，研究发现褐藻寡糖通过激活信号传导、调节光合作用、促进细胞壁形成和多种抗氧化途径来应对盐胁迫，并为褐藻寡糖在水稻中缓解盐胁迫诱导的损伤提供了分子基础。YANG等[63]通过模拟酸雨和高温条件来研究褐藻寡糖对水稻幼苗的影响，褐藻寡糖处理能显著提高在高温和酸雨条件下的生物量，增加抗氧化酶活性，降低水稻叶片中活性氧浓度，并能保护叶绿素含量和叶片组织的完整性。

2.3 提质增产

大量研究证明施用褐藻寡糖能使作物增产。ANISH等[64]研究发现在500 kGy剂量下的γ射线产生的分子量为28.1 kDa的褐藻寡糖，以质量分数0.02%的溶液喷施，可使水稻产量提高13%，并改善种子质量。RAJIB等[65]利用褐藻寡糖处理花椰菜，与对照组相比，褐藻寡糖处理的花椰菜在早期和中期的种子产量分别提高了56.8%和64.5%。LIU等[66]使用不同M/G比例的褐藻寡糖处理白熟期的草莓果实，代谢组分析显示褐藻寡糖主要影响黄酮类化合物，特别是花青素的生物合成，较高的M/G比例有利于褐藻寡糖的着色促进作用。

2.4 抗病菌、抗病毒

褐藻寡糖对各植物病害的抑制情况见表2。许多研究报道指出，褐藻寡糖不仅本身具有抑制病菌的能力，还能诱导提高植物抗病性。HAN等[72]研究褐藻寡糖联合酵母*Meyerozyma guilliermondii*防治梨果青霉病，发现联合处理能显著降低梨果青霉病的发病率和病变直径且能增加梨果中多种酶活性，提高总酚和黄酮类物质含量。同样的方法，LI等[11]采用褐藻寡糖联合酵母*Sporidioboulus pararoseus*控制桃果褐腐病，发现当褐藻寡糖单独使用时即可减少桃果实褐腐病的发病率和病变直径，

表2 褐藻寡糖对各植物病害的抑制情况

Table 2 Effects of alginate oligosaccharides on the inhibition of various plant diseases

施用质量浓度/(mg·L^{-1})	致病菌	植物种类	抗病机制	参考文献
25	*Pseudomonas syringae* pv. tomato (*Pst*)DC3000	拟南芥	褐藻寡糖通过水杨酸(SA)信号途径诱导对*Pst* DC3000产生抗性，同时褐藻寡糖诱导产生的高水平反应性氧自由基(ROS)和一氧化氮(NO)参与免疫应答	[67]
50	*Botrytis cinerea* B05.10	猕猴桃	触发与防御相关的酶活性和病原体抗性来控制猕猴桃中的灰霉病	[68]
	Tobacco mosaic virus (TMV 30B)	烟草		[69]
500	*Monilinia fructicola*	桃	褐藻寡糖联合拟粉红锁掷孢酵母防治，促进酵母在桃果实伤口定殖，并显著提高过氧化氢酶(CAT)、苯丙氨酸解氨酶(PAL)等抗性相关酶的活性和基因表达，促进了总酚的积累，增强桃的抗病性	[11]
50	*Xanthomonas campestris* pv. Campestris	花椰菜	褐藻寡糖诱导提高植物免疫相关代谢物水平，如H_2O_2、类黄酮和抗坏血酸	[65]
1 000	*Magnaporthe grisea*	水稻	褐藻寡糖能诱导感染稻瘟病水稻植株苯丙氨酸解氨酶(PAL)、过氧化物酶(POD)、过氧化氢酶(CAT)的活性，且极大缩短苯丙氨酸解氨酶达到最大活性的时间	[70]
50	*Botrytis cinerea*、*Penicillium expansum*、*Alternaria alternata*	猕猴桃	褐藻寡糖诱导果实产生抗氧化酶(过氧化氢酶、超氧化物歧化酶)和抗氧化物(酚类和黄酮类化合物)	[71]
500	Tobacco mosaic virus	烟草	褐藻寡糖诱导烟草的抗坏血酸过氧化物酶和苯丙氨酸解氨酶活性增加	[56]
5 000	*Penicillium expansum*	梨	褐藻寡糖抑制病原菌丝生长和孢子萌发并能提高果实的抗氧化酶活性和抗氧化物含量	[72-73]
5 000	*Penicillium expansum*	苹果	抑制病原菌丝生长和孢子萌发并能提高果实的抗氧化酶活性，且抗氧化物含量没有受到不利影响	[74]

但联合使用的效果更为显著。研究表明，褐藻寡糖和*S. pararoseus*联合应用是控制桃果实褐腐病的有效方法，可以提高果实的抗病性和保持果实品质。ZHUO等[68]施用不同浓度的褐藻寡糖处理猕猴桃，探究褐藻寡糖对猕猴桃采后品质和病害的影响，研究表明处理后的猕猴桃储存期间灰霉病发病率和病斑直径均降低，同时提高了猕猴桃的硬度，降低了可溶性固形物含量，从而延长采后储存时间。ZHANG等[70]研究褐藻寡糖对水稻稻瘟病的作用，发现褐藻寡糖能够诱导水稻发芽种子中多种植物防御素的积累，激活水稻的防御反应，显著降低由稻瘟病菌引起的病害指数（从17.74%降低到10.81%），保护效果达到39.06%。

2.5　提高营养成分

各研究中不同植物施用褐藻寡糖后的效果见表3。营养成分的提高是多方面因素作用的结果，首先褐藻寡糖能够增强植物的光合作用，提高叶绿素合成速率及稳定性[80]，促进生长；其次是褐藻寡糖能够诱导相关产物合成基因的表达，增加了产物的积累量[81-82]；最后，褐藻寡糖处理能增加植物的相对水含量，提高气孔导度，从而保证叶片对CO_2的充分吸收[64]。

表3　褐藻寡糖对各植物的营养成分增加效果

Table 3　Effects of alginate oligosaccharides on the enhancement of nutritional components in various plants

施用质量浓度/(mg·L^{-1})	施用方式	植物类型	施用效果	参考文献
5 000	叶片喷施	黄瓜	黄瓜有机酸、维生素C、可溶性糖、蛋白质、可溶性固形物较对照组分别增加5%、33.77%、39.48%、56.21%、15.17%	[52]
5 000	根部浇灌	西瓜	可溶性糖、可溶性蛋白、维生素C、可溶性固形物较对照组均有显著提高	[53]
100①	根部浇灌	樱桃番茄	可溶性蛋白和抗坏血酸较对照组分别增加65.7%和39.67%	[75]
0.01	浸种处理	绿豆	可溶性蛋白和维生素C较对照组分别增加19.95%和137.61%	[76]
200	涂布于培养基表面	花椰菜蘑菇	两种褐藻寡糖的处理均增加蘑菇菌柄中的β-葡聚糖，较对照组分别增加了56.01%和59.74%	[77]
20 000	添加至培养基	大豆愈伤组织	大豆抗毒素含量比未处理对照组提高85.3倍	[78]
50	叶片喷施	甜叶菊	甜叶菊植株叶片的甜菊糖苷质量分数达到103.90 mg/g，较对照组提升30%	[79]
80	叶片喷施	甜叶菊	甜叶菊植株叶片的甜菊糖苷质量分数较对照组提升57.14%	[49]
100	叶片喷施	薄荷	在120 d时，薄荷醇、l-薄荷酮、异薄荷酮和乙酸薄荷酯较对照组分别增加了6.2%、32.1%、21.7%、37.2%	[51]

注：①海藻发酵液稀释100倍。

2.6　抗氧化、耐储存

褐藻寡糖具有抗氧化、保鲜、抗腐的作用，可延长采后果实的储存时间，降低运输、储存成本。ZHUO等[68]使用质量浓度50～500 mg/L的褐藻寡糖处理采后猕猴桃，研究发现褐藻寡糖能够提高猕猴桃的果实硬度，降低灰霉病发生率及发病后的病灶直径，提高总抗氧化能力，提升果实品质；XIONG等[83]同样使用褐藻寡糖处理采后猕猴桃，得出相似的结论，但所用褐藻寡糖的质量浓度是80 mg/L。BOSE等[84]使用褐藻寡糖处理草莓果实，阐明了延长储存时间的机制，褐藻寡糖能够减少脱落酸和脱落酸偶联物的积累并抑制脱落酸信号基因表达，从而保持果实品质延长储存时间。

褐藻寡糖的使用方式不局限于直接喷洒，还可与含苯丙素物质的银杏叶提取物复合，制成绿色防腐剂用于桃的保鲜[85]，具有降低果实呼吸频率，抑制腐败，减少对黑腹果蝇吸引力的作用。

2.7　提高土壤细菌群落多样性

土壤微生物在植物生长、发育、抗逆性、抗病性等方面起着关键作用[86-87]，而施用褐藻寡糖有利于提升土壤细菌群落的多样性。胡静等[58]对小麦根部浇灌褐藻寡糖，研究褐藻寡糖对根际微生物群落的影响，结果表明与对照组相比，处理组中的嗜酸菌属、*Simplicispira*、固氮螺菌属（*Azospira*）相对丰度有所增加，固氮螺菌属中包含了多个参与氮素固定、代谢的菌种[88]，提高土壤养分的转化。WANG等[89]通过对土壤施用不同浓度的褐藻寡糖，对0 d和60 d的结果进行细菌16s rRNA基因扩增深度测序，处理60 d后的样本chao1指数和shannon指数与处理0 d相比差异显著，增加了细菌多样性和丰度，且可激活土壤酶活性和微生物活性，从而促进土壤质量改善。

3　褐藻寡糖在肥料增效中的应用及作用机制

3.1　肥料利用现状

自2006年以来，我国一直是世界上最大的化肥生产国和消费国，化肥产量占世界的四分之一以上，每年消费量占比超过30%[90]。

化肥类型主要有氮肥、磷肥、钾肥和复合肥。

氮、磷、钾是植物生长过程中最重要的元素。氮缺乏会导致植物光合效率降低[91-92]，减少氨基酸和蛋白质的生物合成[93]，进而降低植物生长和产量。由于土壤中速效磷的浓度低且流动性差[94]，磷成为植物生长的主要限制因素，磷是核酸、磷脂、三磷酸腺苷（ATP）的组成成分，磷缺乏会导致植物水分利用效率降低，降低耐旱能力，根系生长发育受阻[95]，且根际抗病能力降低[96]。钾在提高农作物产量和质量中起着至关重要的作用[97]，钾充足能促进蛋白质合成[98]、提高氨基酸及其他营养物质含量[99]。施用化肥是目前提高土壤中氮、磷、钾元素的主要方法，但植物对于氮元素的利用率只占施用的30%～40%[100]，磷利用率更是仅有10%～20%[101]，过度施用化肥导致土壤酸化[102]、土壤传播病害加剧[1]、土壤微生物多样性下降[103]、地下水污染，甚至危害人体健康[104]。提高肥料利用率减少施肥量能从根本解决过度使用化肥引发的一系列问题[105]。

3.2 褐藻寡糖在肥料增效中的应用

褐藻寡糖分子结构中的羧基含有负电荷，结合氮肥中的氨和铵态氮，在特定条件下形成络合物，缓慢释放氮养分，抑制其向硝态氮及亚硝态氮的转化，减少氮素损失，提高氮肥的利用率[106]。多个报道指出添加褐藻寡糖能增加化肥的利用率[107-116]（见表4）。此外，褐藻寡糖能与各种生物质共混开发出缓释化肥的涂层材料，延长养分释放的时间，极大增加肥料利用率的同时增强土壤保水能力，FIRMANDA等[117]利用油棕空果串与褐藻寡糖开发缓释材料；MENG等[118]使用硫和褐藻寡糖双层包衣制备大颗粒缓控释肥，氮利用率提高22.9%；BOUCHTAOUI等[119]利用木质素和褐藻寡糖开发新型涂层材料用于控释氮磷肥，当木质素与褐藻寡糖的比例为75:25时，在第16天释放的氮磷肥占总量的80%，与不添加涂层的4 d相比极大延长了释放时间，且能抑制土壤微生物对肥料的水解和硝化作用，减少肥料损失；TEIXEIRA等[120]利用马黛茶粉与褐藻寡糖结合开发用于尿素肥缓释的可降解封装材料，尿素基肥料养分释放量在第5天达到总量的80%；SATHISARAN等[121]利用明胶与褐藻寡糖制成复合微珠用于实现尿素基肥料缓释，其控释遵循fickian扩散动力学。相比于相同成分肥料，缓释肥料更有利于提高农作物产量并增加土壤微生物多样性[122]。

表4 褐藻寡糖增加化肥利用率

Table 4 Algal oligosaccharides increase the utilization rate of chemical fertilizers

施用质量浓度/（mg·L^{-1}）	使用方式	农作物	增效效果	参考文献
4 000	溶液混匀	玉米	氮肥利用率、磷肥利用率、钾肥利用率分别提高了16.57%、25.05%、12.06%	[107]
	复混基施	大豆	氮素利用效率提升12.6%	[108]
500	复混基施	冬小麦	氮肥利用率、磷肥利用率、钾肥利用率分别提高了14.85%、9.54%和13.50%	[109]
3 000	复混基施	水稻		[110]
30 000	添加至熔融尿素冷却制粉		减缓尿素的水解，降低氨挥发速率和损失量，抑制培养前期铵态氮向硝态氮的转化，从而提高氮肥的实际利用率	[111]
50 000	添加至熔融尿素冷却制粒	玉米	累计氨挥发量降低41.77%，提高氮肥实际利用率	[112]
5 000	复混基施	小麦、玉米	小麦氮肥利用率提升10.84%，玉米氮肥利用率提升9.95%	[113]
25 000	添加至熔融尿素冷却制粒	玉米	氮肥利用率提高5%～10%，氮肥损失率降低6.16%	[114]

4 结论及展望

系统地探讨褐藻寡糖的生产方式、各领域功能、作为生物刺激剂的应用及其作用机制，并分析了褐藻寡糖在肥料增效中的应用及其作用机制。褐藻寡糖作为一种新型生物活性物质，其独特的结构和功能使其在农业领域展现出巨大的潜力和价值。

尽管褐藻寡糖在农业领域中展现出积极的效果，但仍存在一些问题和挑战需要进一步研究和解决，一方面是生产工艺，以目前可查阅的资料来看，能做到工业化生产且具有优异生物活性的最佳方法是酶解法，但现有的酶大多为中低温酶，热稳定性差，无法规模化生产，需要继续探索挖掘出热稳定性强且高效的褐藻胶裂解酶，提高生产效率；另一方面需要进一步探究褐藻寡糖与植物互作的分子机制，以及其在不同作物和环境条件下的作用差异。

总的来说，褐藻寡糖作为一种多功能的生物刺激剂，在肥料增效领域具有广阔的应用前景。未来的研究应聚焦于其作用机制的深入解析、生产工艺

的优化、以期实现褐藻寡糖在农业可持续发展中的更大贡献。

[参考文献]

[1] ZHANG Y J, YE C, SU Y W, et al. Soil acidification caused by excessive application of nitrogen fertilizer aggravates soil-borne diseases: Evidence from literature review and field trials [J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2022, 340: 108176.

[2] YIN R X, LI L L, LI X, et al. Positive effects of nitrogen fertilization on the flavor ingredients of tea (Wuniuzao), soil physicochemical properties, and microbial communities [J]. Environmental Technology & Innovation, 2025, 37: 103911.

[3] LE J H, WEI Y. Green Efficiency Measurement of Seaweed Culture in China under the Double Carbon Target [J]. Sustainability, 2023, 15(9): 7683.

[4] SONG M, PHAM H D, SEON J, et al. Marine brown algae: A conundrum answer for sustainable biofuels production [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015, 50: 782-792.

[5] MICHEL G, TONON T, SCORNET D, et al. The cell wall polysaccharide metabolism of the brown alga Ectocarpus siliculosus. Insights into the evolution of extracellular matrix polysaccharides in Eukaryotes [J]. New Phytologist, 2010, 188(1): 82-97.

[6] KIM H S, LEE C G, LEE E Y. Alginate lyase: Structure, property, and application [J]. Biotechnology and Bioprocess Engineering, 2011, 16(5): 843-851.

[7] 纪潇波,孙理想,张利雄.具有纺锤状节点的海藻酸钙纤维的改性及其润湿性能[J].南京工业大学学报(自然科学版),2015,37(3):31-35.
JI X B, SUN L X, ZHANG L X. Modification and wetting ability of alginate calcium fiber with spindle-knots [J]. Journal of Nanjing Tech University (Natural Science Edition), 2015, 37(3): 31-35.

[8] LI L, JIANG J J, YAO Z, et al. Recent advances in the production, properties and applications of alginate oligosaccharides- a mini review [J]. World Journal of Microbiology and Biotechnology, 2023, 39(8): 207.

[9] LIU J, YANG S Q, LI X T, et al. Alginate Oligosaccharides: Production, Biological Activities, and Potential Applications [J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2019, 18(6): 1859-1881.

[10] LIU M, ZHANG F, LIU B J, et al. Mechanisms and technology of marine oligosaccharides to control postharvest disease of fruits [J]. Food Chemistry, 2023, 404: 134664.

[11] LI J M, WEI Y Y, CHEN Y, et al. Combined application of alginate oligosaccharide and marine yeast Sporidiobolus pararoseus to control brown rot of peach fruit [J]. Postharvest Biology and Technology, 2024, 208: 112677.

[12] CHEN J Y, HU Y, ZHANG L R, et al. Alginate Oligosaccharide DP5 Exhibits Antitumor Effects in Osteosarcoma Patients following Surgery [J]. Frontiers in Pharmacology, 2017, 8: 623.

[13] KELISHOMI Z H, GOLIAEI B, MAHDAVI H, et al. Antioxidant activity of low molecular weight alginate produced by thermal treatment [J]. Food Chemistry, 2016, 196: 897-902.

[14] MUBARAKALI D, LEE M, MANZOOR M A, et al. Production of Oligoalginate via Solution Plasma Process and Its Capability of Biological Growth Enhancement [J]. Applied Biochemistry and Biotechnology, 2021, 193(12): 4097-4112.

[15] TANG J C, ZHOU Q X, CHU H R, et al. Characterization of Alginase and Elicitor-Active Oligosaccharides from Gracilibacillus A7 in Alleviating Salt Stress for Brassica campestris L. [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2011, 59(14): 7896-7901.

[16] DRULA E, GARRON M L, DOGAN S, et al. The carbonhydrate-active enzyme datebase: functions and literature [J]. Nucleic Acids Research, 2022, 50(D1): D571-D577.

[17] ZHU B W, LI L, YUAN X Y. Efficient preparation of alginate oligosaccharides by using alginate lyases and evaluation of the development promoting effects on Brassica napus L. in saline-alkali environment [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 270: 131917.

[18] HU F, CAO S S, LI Q, et al. Construction and biochemical characterization of a novel hybrid alginate lyase with high activity by module recombination to prepare alginate oligosaccharides [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2021, 166: 1272-1279.

[19] SONG L, GUO Y F, WANG Y L, et al. Preparation of Alginate Oligosaccharides from Laminaria japonica Biomass by a Novel Biofunctional Alginate Lyase with pH and Salt Tolerance [J]. Processes, 2023, 11(5): 1495.

[20] INOUE A, MASHINO C, KODAMA T, et al. Protoplast Preparation from Laminaria japonica with Recombinant Alginate Lyase and Cellulase [J]. Marine Biotechnology, 2011, 13(2): 256-263.

[21] SUN C X, ZHOU J L, DUAN G L, et al. Hydrolyzing Laminaria japonica with a combination of microbial alginate lyase and cellulase [J]. Bioresource Technology, 2020, 311: 123548.

[22] ZHANG X X, TANG Y Q, GAO F, et al. Low-cost and efficient strategy for brown algal hydrolysis: Combination of alginate lyase and cellulase [J]. Bioresource Technology, 2024, 397: 130481.

[23] XU C, XIONG Y R, WANG Q Z, et al. Isolation of salt-tolerant Vibrio alginolyticus X511 for efficient co-production of 2, 3-butanediol and alginate lyase from Laminaria japonica [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 288: 138765.

[24] ZHU B W, NI F, SUN Y, et al. Elucidation of degrading pattern and substrate recognition of a novel bifunctional alginate lyase from Flammeovirga sp. NJ-04 and its use for preparation alginate oligosaccharides [J]. Biotechnology for Biofuels, 2019, 12(1): 13.

[25] SUN X H, CHEN X L, WANG X F, et al. Cost-effective production of alginate oligosaccharides from Laminaria japonica roots by Pseudoalteromonas agarivorans A3 [J]. Microbial Cell Factories, 2023, 22(1): 179.

[26] DOS SANTOS SILVA M C, DE FARIAS SILVA C E, DOS SANTOS L M, et al. Alginate Lyase Produced by Filamentous Fungus Through Solid State Fermentation Using Sargassum from the Brazilian Coast [J]. Waste and Biomass Valorization, 2022, 13(6): 2947-2962.

[27] 高荣.褐藻胶裂解酶Alg2668在枯草芽孢杆菌中的表达[D].保定:河北农业大学,2023.
GAO R. Recombinant Expression of Alginate LyaseAlg2668 in Bacillus subtilis[D]. Baoding: Hebei Agricultural University, 2023.

[28] 李金梦.芽孢杆菌发酵褐藻胶制备褐藻寡糖的研究[D].南昌:南昌大学,2024.
LI J M. Study on the preparation of brown algaloligosaccharides by fermentation of brown algal gum with Bacillus sp. NCU001[D]. Nanchang: Nanchang University, 2024.

[29] 蒋文俊.产褐藻胶裂解酶深海细菌的筛选与马尾藻发酵研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2023.
JIANG W J. Screening of deep-sea bacteria producing alginate lyase and study on fermentation of sargassum[D]. Haerbin: Harbin Institute of Technology, 2023.

[30] EL-MOHDY L A H. Radiation-induced degradation of sodium alginate and its plant growth promotion effect[J]. Arabian Journal of Chemistry, 2017, 10(S1): S431-S438.

[31] DODERO A, VICINI S, CASTELLANO M. Depolymerization of sodium alginate in saline solutions via ultrasonic treatments: A rheological characterization[J]. Food Hydrocolloids, 2020, 109: 106128.

[32] WARDHANI D H, ARYANTI N, AZIZ A, et al. Ultrasonic degradation of alginate: A matrix for iron encapsulation using gelation[J]. Food Bioscience, 2021, 41: 100803.

[33] ZIMOCH-KORZYCKA A, KULIG D, KRÓL-KILIŃSKA Ż, et al. Biophysico-Chemical Properties of Alginate Oligomers Obtained by Acid and Oxidation Depolymerization[J]. Polymers, 2021, 13(14): 2258.

[34] YUE W, ZHANG H H, YANG Z N, et al. Preparation of low-molecular-weight sodium alginate by ozonation [J]. Carbohydrate Polymers, 2021, 251: 117104.

[35] AI X, NIU Q F, LI S J, et al. Eco-friendly ozonation of alginate: Physicochemical characterization and degradation mechanism exploration through mass spectrometry[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 279: 135306.

[36] 姚骏,张弘,郭森,等.海带营养调味料的研究进展[J].食品研究与开发,2018,39(4):213-217.
YAO J, ZHANG H, GUO S, et al. The Research Progress of Kelp Nutrition Seasoning[J]. Food Research and Development, 2018, 39(4): 213-217.

[37] ZHOU J J, YANG T L, CHEN Z Y, et al. A non-thermal modification method to promote the interaction of zein-alginate oligosaccharides composites for better encapsulation and stability—Cold plasma[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 253: 126496.

[38] WANG J Y, ZHANG Z X, DAI T, et al. The therapeutic effect and possible mechanisms of alginate oligosaccharide on metabolic syndrome by regulating gut microbiota[J]. Food & Function, 2024, 15(19): 9632-9661.

[39] ZHANG Y, GUO C C, LI Y R, et al. Alginate Oligosaccharides Ameliorate DSS-Induced Colitis through Modulation of AMPK/NF-κB Pathway and Intestinal Microbiota[J]. Nutrients, 2022, 14(14): 2864.

[40] 马斌,苏航,徐永江,等.褐藻寡糖对花鲈幼鱼生长和生理指标及肠道组织形态的影响[J].南方水产科学,2024,20(3):76-84.
MA B, SU H, XU Y J, et al. Effects of alginate oligosaccharide on growth performance, physiological indicators and intestinal morphology of Lateolabrax maculatus juvenile[J]. South China Fisheries Science, 2024, 20(3): 76-84.

[41] 邓婉珍.褐藻寡糖对大菱鲆和凡纳滨对虾生长、肠道健康、免疫和抗病力的影响[D].济南:山东大学,2024.
DENG W Z. Effects of Alginate oligosaccharide on growth, intestinal health, immunity and disease resistance of Scophthalmus maximus and Litopenaeus vannamei[D]. Jinan: Shandong University, 2024.

[42] YANG M X, LU Z J, LI F L, et al. Alginate oligosaccharide improves fat metabolism and antioxidant capacity in the liver of grass carp (Ctenopharyngodon idellus)[J]. Aquaculture, 2021, 540: 736664.

[43] YAN G L, GUO Y M, YUAN J M, et al. Sodium alginate oligosaccharides from brown algae inhibit Salmonella Enteritidis colonization in broiler chickens[J]. Poultry Science, 2011, 90(7): 1441-1448.

[44] 王恒,曹佳茵,侯剑,等.喷施褐藻寡糖对茶树抗旱性的影响[J].山东农业科学,2023,55(12):63-70.
WANG H, CAO J Y, HOU J, et al. Effect of Spraying Algal Oligosaccharide on Drought Resistance of Tea Plant [J]. Shandong Agricultural Sciences, 2023, 55(12): 63-70.

[45] 孙林,陈春琳,钟志海,等.褐藻寡糖对翅碱蓬种子萌发及抗盐胁迫能力的影响[J].分子植物育种,2023,21(8):2746-2753.
SUN L, CHEN C L, ZHONG Z H, et al. Effects of Brown Algae Oligosaccharides on Seed Germination and Salt-resistance of Suaeda heteroptera[J]. Molecular Plant Breeding, 2023, 21(8): 2746-2753.

[46] BHUPENCHANDRA I, CHONGTHAM S K, DEUI E L, et al. Role of biostimulants in mitigating the effects of climate change on crop performance[J]. Frontiers in Plant Science, 2022, 13: 967665.

[47] ZHANG Y H, LIU H, YIN H, et al. Nitric oxide mediates alginate oligosaccharides-induced root development in wheat (Triticum aestivum L.)[J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2013, 71: 49-56.

[48] ZHANG Y H, YIN H, ZHAO X M, et al. The promoting effects of alginate oligosaccharides on root development in Oryza sativa L. mediated by auxin signaling[J]. Carbohydrate Polymers, 2014, 113: 446-454.

[49] SINGH S, UDDIN M, SINGH S, et al. Radiolytically Depolymerized Low Molecular-Weight Chitosan (ICH) and Sodium Alginate (ISA) Improve Growth Attributes, Physiological Performance and the Production of Steviol Glycosides (SGs) of S. rebaudiana (Bertoni)[J]. Journal of Polymers and the Environment, 2024, 32(7): 3258-3284.

[50] 李佳琪,汤洁,李明月,等.不同分子量的褐藻寡糖对黄瓜幼苗光合作用及生长的影响[J].中国农业大学学报,2018,23(9):53-59.
LI J Q, TANG J, LI M Y, et al. Effects of different molecular weight alginate-derived oligosaccharide on photosynthetic characters and the growth of cucumber seedlings[J]. Journal of

China Agricultural University,2018,23(9):53-59.

[51] NAEEM M,IDREES M,AFTAB T,et al. Employing depolymerised sodium alginate, triacontanol and 28-homobrassinolide in enhancing physiological activities, production of essential oil and active components in Mentha arvensis L[J]. Industrial Crops & Products,2014,55:272-279.

[52] 孙冰,张金梅,刘朋宇,等.不同浓度褐藻寡糖对黄瓜生长、产量、品质与抗氧化酶及其基因表达的影响[J].江苏农业科学,2023,51(13):175-181.
SUN B,ZHANG J M,LIU P Y,et al. Effects of Different Concentrations of Brown Seaweed Oligosaccharides on Cucumber Growth, Yield, Quality, Antioxidant Enzymes, and Their Gene Expression[J]. Jiangsu Agricultural Sciences,2023,51(13):175-181.

[53] 武芳,路兆军,孙瑶,等.不同质量浓度褐藻寡糖对西瓜生长、产量和品质的影响[J].种业导刊,2024(5):25-28.
WU F,LU Z J,SUN Y,et al. Effects of different concentrations of brown algae oligosaccharides on the growth, yield, and quality of watermelon. [J]. Journal of Seed Industry Guide,2024(5):25-28.

[54] ALY A A,ELIWA N E,SAFWAT G. Role of gamma-irradiated sodium alginate on growth,physiological and active components of iceberg lettuce (Lactuca Sativa) plant [J]. BMC Plant Biology,2024,24(1):185.

[55] 王学江,李峰,迟艳,等.褐藻寡糖对蕹菜生长量及生长速率的影响[J].分子植物育种,2022,20(14):4851-4857.
WANG X J,LI F,CHI Y,et al. The Effect of Brown Algae Oligosaccharides on the Growth and Growth Rate of Water Spinach [J]. Molecular Plant Breeding, 2022, 20 (14): 4851-4857.

[56] LAPORTE D, VERA J, CHANDÍA N P, et al. Structurally unrelated algal oligosaccharides differentially stimulate growth and defense against tobacco mosaic virus in tobacco plants[J]. Journal of Applied Phycology,2007,19(1):79-88.

[57] 马冬冬,李永富.褐藻寡糖用于海水小球藻和盐生杜氏藻异养培养及其促生长作用机制[J].中国海洋大学学报(自然科学版),2020,50(5):40-45.
MA D D,LI Y F. Heterotrophic culture of Chlorella sp. and Dunaliella salina using alginate oligosaccharide and its growth promoting mechanism [J]. Periodical of Ocean University of China,2020,50(5):40-45.

[58] 胡静,彭守华,张玉琴,等.褐藻寡糖对土壤养分、小麦生长以及根际微生物多样性的影响[J/OL].分子植物育种. https://link.cnki.net/urlid/46.1068.s.20240220.1347.009.
HU J, PENG S H, ZHANG Y Q, et al. Effects of Algal Oligosaccharides on Soil-Nutrients, Wheat-Growth and Rhizosphere Microbial Diversity[J/OL]. Molecular Plant Breeding. https://link.cnki.net/urlid/46.1068.s.20240220.1347.009.

[59] LI Y F,ZHANG L T,WANG L,et al. Growth-promoting effects of alginate-derived oligosaccharides on marine microalgae [J/OL]. Journal of Applied Phycology,2022,34(6):2847-2856.

[60] 徐常健.低温胁迫下三种诱导剂对水稻幼苗抗寒的研究[D].黑龙江:黑龙江八一农垦大学,2023.
XU C J. Study On Cold Resistance of Rice Seedlings By Three Inducers Under Low Temperature Stress [D]. Heilongjiang: Heilongjiang Bayi Agricultural University,2023.

[61] LI J Q, WANG X Y, LIN X P, et al. Alginate-derived oligosaccharides promote water stress tolerance in cucumber (Cucumis sativus L.)[J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2018,130:80-88.

[62] DU Y W,LIU L,FENG N J,et al. Combined transcriptomic and metabolomic analysis of alginate oligosaccharides alleviating salt stress in rice seedlings[J]. BMC Plant Biology, 2023, 23(1):455.

[63] YANG X J, CHEN Y, HU Z, et al. Alginate Oligosaccharides Alleviate the Damage of Rice Leaves Caused by Acid Rain and High Temperature[J]. Agronomy,2021,11(3):500.

[64] SAMDURKAR A N,CHOUDHARY A D,VARSHNEY L,et al. Application of 28.1 kDa Alginate Oligosaccharide Improves the Yield and Quality of Grain in Rice[J]. ChemistrySelect,2024,9(38):202400742.

[65] RAJIB MD M R,SULTANA H,GAO J,et al. Curd,seed yield and disease resistance of cauliflower are enhanced by oligosaccharides[J]. PeerJ,2024,12:17150.

[66] LIU M,ZHANG F,XIAO J B,et al. The M/G ratio of alginate oligosaccharides: The key to enhance the coloration of strawberries[J]. Carbohydrate Polymers,2024,323:121422.

[67] ZHANG C G, HOWLADER P, LIU T M, et al. Alginate Oligosaccharide (AOS) induced resistance to Pst DC3000 via salicylic acid-mediated signaling pathway in Arabidopsis thaliana[J]. Carbohydrate Polymers,2019,225:115221.

[68] ZHUO R L,LI B Q,TIAN S P. Alginate oligosaccharide improves resistance to postharvest decay and quality in kiwifruit (Actinidia deliciosa cv. Bruno)[J]. Plant Journal,2022,8(1):44-52.

[69] LIU S S,SU C Y,GUO J,et al. Anti-Tobacco Mosaic Virus Effects of Silver Nanoparticles Coated with Alginate Oligosaccharides Prepared through Enzymatic Degradation[J]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2022, 10 (36): 11726-11738.

[70] ZHANG S,TANG W Z,JIANG L L,et al. Elicitor activity of algino-oligosaccharide and its potential application in protection of rice plant (*Oryza saliva* L.) against *Magnaporthe grisea*[J]. Biotechnology & Biotechnological Equipment, 2015, 29 (4): 646-652.

[71] LIU J,KENNEDY J F,ZHANG X F,et al. Preparation of alginate oligosaccharide and its effects on decay control and quality maintenance of harvested kiwifruit [J]. Carbohydrate Polymers,2020,242:116462.

[72] HAN J J,ZHAO L N,ZHU H M,et al. Study on the effect of alginate oligosaccharide combined with Meyerozyma guilliermondii against Penicillium expansum in pears and the possible mechanisms involved[J]. Physiological and Molecular Plant Pathology,2021,115:101654.

[73] ZHAO L N,HAN J J,LI B,et al. Transcriptome analysis of the disease resistance in postharvest pears induced by Meyerozyma guilliermondii combined with alginate oligosaccharide [J]. Biological Control,2022,170:104931.

[74] XI Y N,YANG Q Y,GODANA E A,et al. Study on the effect of Debaryomyces hansenii enhanced by alginate oligosaccharide against postharvest blue mold decay of apples and the

physiological mechanisms involved[J]. Biological Control,2022,176:105081.

[75] 崔维香,林梅,秦松,等.海藻发酵液在樱桃番茄上的施用效果及分析[J].分子植物育种,2018,16(13):4387-4394.
CUI W X, LIN M, QIN S, et al. The Applied Effect and Analysis of Seaweed Fermentation Liquid on Cherry Tomato (Lycopersicon esculentum Mill. var. cerasiforme Alef) [J]. Molecular Plant Breeding,2018,16(13):4387-4394.

[76] 何雅清,唐文竹,李宪臻.褐藻胶寡糖对绿豆芽品质的影响[J].中国食品添加剂,2024,35(2):119-127.
HE Y Q,TANG W Z,LI X Z. Effect of alginate oligosaccharide on the quality of mung bean sprouts[J]. China Food Additives,2024,35(2):119-127.

[77] KIM Y W, WU Y Z, CHOI M H, et al. Alginate-Derived Elicitors Enhance β-Glucan Content and Antioxidant Activities in Culinary and Medicinal Mushroom, Sparassis latifolia [J]. Journal of Fungi,2020,6(2):92.

[78] WANG K Q, PENG Q, QIAO Y, et al. Different glyceollin synthesis-related metabolic content and gene expressions in soybean callus suspension cultures and cotyledon tissues induced by alginate oligosaccharides[J]. Process Biochemistry,2018,73:188-196.

[79] WANG Y, XU P Y, WANG W X, et al. Oligosaccharides increased both leaf biomass and steviol glycosides content of Stevia rebaudiana[J]. Plant Physiology and Biochemistry,2023,202:107937.

[80] 严国富,杜朋潮,李方敏,等.褐藻酸寡糖对草莓光合特性及植株形态的影响[J].现代农业科技,2023(15):60-62,69.
YAN G F, DU P C, LI F M, et al. Effects of Alginate Oligosaccharides on Photosynthetic Characteristics and Plant Morphology of Strawberry[J]. Modern Agricultural Science and Technology,2023(15):60-62,69.

[81] WANG Y, XU P Y, WANG W X, et al. Oligosaccharides increased both leaf biomass and steviol glycosides content of Stevia rebaudiana[J]. Plant Physiology and Biochemistry,2023,202:107937.

[82] PENG Q, ZHANG M M, GAO L, et al. Effects of alginate oligosaccharides with different molecular weights and guluronic to mannuronic acid ratios on glyceollin induction and accumulation in soybeans [J]. Journal of Food Science and Technology,2018,55(5):1850-1858.

[83] XIONG S G,MA Z H,XIONG H,et al. Preserving refrigeration and shelf life quality of hardy kiwifruit (*Actinidia arguta*) with alginate oligosaccharides preharvest application[J]. Journal of Food Science,2024,89(11):7422-7436.

[84] BOSE S K, HOWLADER P, JIA X C, et al. Alginate oligosaccharide postharvest treatment preserve fruit quality and increase storage life via Abscisic acid signaling in strawberry [J]. Food Chemistry,2019,283:665-674.

[85] MOU L Y, LU Y, ZHANG J, et al. Sodium alginate coating of *Ginkgo biloba* leaves extract containing phenylpropanoids as an ecofriendly preserving agent to maintain the quality of peach fruit[J]. Journal of Food Science,2023,88(9):3649-3665.

[86] RAAIJMAKERS J M,MAZZOLA M. Soil immune responses[J]. Science,2016,352(6292):1392-1393.

[87] CASTRILLO G,TEIXEIRA P J P L,PAREDES S H,et al. Root microbiota drive direct integration of phosphate stress and immunity[J]. Nature,2017,543(7646):513-518.

[88] DIAS T, AZMALIYEV K, MELO J, et al. The diazotrophic bacteria Azospirillum baldaniorum and A. brasilense improve wheat seedlings' nitrogen budget through ammonia scavenging [J]. Applied Soil Ecology,2024,204:105737.

[89] WANG M P,CHEN L,LI Y T,et al. Responses of soil microbial communities to a short-term application of seaweed fertilizer revealed by deep amplicon sequencing [J]. Applied Soil Ecology,2018,125:288-296.

[90] GUO Y Z, WANG J Y. Spatiotemporal Changes of Chemical Fertilizer Application and Its Environmental Risks in China from 2000 to 2019[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health,2021,18(22):11911.

[91] TANTRAY A Y,BASHIR S S,AHMAD A. Low nitrogen stress regulates chlorophyll fluorescence in coordination with photosynthesis and Rubisco efficiency of rice[J]. Physiology and Molecular Biology of Plants,2020,26(1):83-94.

[92] MU X H,CHEN Q W,CHEN F J,et al. Within-Leaf Nitrogen Allocation in Adaptation to Low Nitrogen Supply in Maize during Grain-Filling Stage[J]. Frontiers in Plant Science,2016,7:699.

[93] HAO Q N,SHANG W J,ZHANG C J,et al. Identification and Comparative Analysis of CBS Domain-Containing Proteins in Soybean (Glycine max) and the Primary Function of GmCBS21 in Enhanced Tolerance to Low Nitrogen Stress[J]. International Journal of Molecular Sciences,2016,17(5):620.

[94] SHEN J B,YUAN L X,ZHANG J L,et al. Phosphorus Dynamics: From Soil to Plant1 [J]. Plant Physiology, 2011, 156 (3): 997-1005.

[95] KATAL K,ALIPOUR A,ZAHEDI H,et al. Effects of Different Irrigation Levels and Phosphate Fertilizer Doses with or without Nano Iron Application on Sugar Beet Growth and Physiology [J]. Russian Journal of Plant Physiology,2024,71(6):190.

[96] CAO Y F,SHEN Z Z,ZHANG N,et al. Phosphorus availability influences disease-suppressive soil microbiome through plant-microbe interactions[J]. Microbiome,2024,12(1):185.

[97] SHAO J J,LIU A Z,DONG H L,et al. Impact of active root zone soil potassium levels on cotton yield and fiber quality under no tillage [J]. Frontiers in Plant Science, 2024, 15: 1458367.

[98] ZANG F J,ZHANG M,ZHOU Q,et al. Effect of sulfur and potassium foliar applications on wheat grain protein quality[J]. Field Crops Research,2024,319:109639.

[99] WAN R,SHI Z G,LI Y K,et al. Effect of potassium on the agronomic traits and fruit quality of Goji (Lycium barbarum L.)[J]. Scientific Reports,2024,14(1):21477.

[100] BASHIR S S,SIDDIQI T O,KUMAR D,et al. Physio-biochemical, agronomical, and gene expression analysis reveals different responsive approach to low nitrogen in contrasting rice cultivars for nitrogen use efficiency[J]. Molecular Biology Reports,2023,50(2):1575-1593.

[101] 冯固.提高我国土壤-作物体系磷肥高效利用的途径[J].磷肥与复肥,2021,36(2):刊首页.

FENG G. Ways to Improve the Efficient Utilization of Phosphorus Fertilizers in the Soil-Crop System in Our Country [J]. Phosphate & Compound Fertilizer, 2021, 36(2): Issue of home page.

[102] WANG X B, WANG X L, SHENG H J, et al. Excessive Nitrogen Fertilizer Application Causes Rapid Degradation of Greenhouse Soil in China[J]. Polish Journal of Environmental Studies, 2022, 31(2): 1527-1534.

[103] YANG X D, MA L F, JI L F, et al. Long-term nitrogen fertilization indirectly affects soil fungi community structure by changing soil and pruned litter in a subtropical tea (Camellia sinensis L.) plantation in China[J]. Plant and Soil, 2019, 444(1-2): 409-426.

[104] AHMED M, RAUF M, MUKHTAR Z, et al. Excessive use of nitrogenous fertilizers: an unawareness causing serious threats to environment and human health[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2017, 24(35): 26983-26987.

[105] DIMKPA C O, FUGICE J, SINGH U, et al. Development of fertilizers for enhanced nitrogen use efficiency - Trends and perspectives[J]. Science of the Total Environment, 2020, 731: 139113.

[106] AFTAB T, NAEEM M, IDREES M, et al. Simultaneous use of irradiated sodium alginate and nitrogen and phosphorus fertilizers enhance growth, biomass and artemisinin biosynthesis in Artemisia annua L.[J]. Journal of Applied Research on Medicinal and Aromatic Plants, 2016, 3(4): 186-194.

[107] 张朝霞,许加超,盛泰,等.海藻寡糖增效肥料(NPK)对玉米生长的影响[J].农产品加工(学刊),2013(21):63-66.
ZHANG C X, XU J C, SHENG T, et al. Effect of Alginate-derived Oligosaccharide Synergistic Fertilizer (NPK) on The Growth of Corn [J]. Academic Periodical of Farm Products Processing, 2013(21): 63-66.

[108] 张运红,和爱玲,姚健,等.海藻寡糖增效尿素与有机肥在大豆上的配合施用效果研究[J].大豆科学,2018,37(4):570-577.
ZHANG Y H, HE A L, YAO J, et al. Studies on the Effects of Combined Application of Alginate-derived Oligosaccharides Synergistic Urea and Organic Manures in Soybean [J]. Soybean Science, 2018, 37(4): 570-577.

[109] 李金鑫,李絮花,刘敏,等.海藻酸增效复混肥料在冬小麦上的施用效果[J].中国土壤与肥料,2020(1):153-159.
LI J X, LI X H, LIU M, et al. Effect of alginate compound fertilizer on growth and yield of winter wheat [J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2020(1): 153-159.

[110] 张运红,孙克刚,杜君,等.海藻寡糖增效尿素对水稻产量和品质的影响[J].河南农业科学,2016,45(1):53-56.
ZHANG Y H, SUN K G, DU J, et al. Effects of Alginate-derived Oligosaccharides Synergistic Urea on Yield and Quality of Rice [J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2016, 45(1): 53-56.

[111] 张静,冀建华,李絮花,等.海藻酸增效剂对尿素在土壤中转化及损失的调控[J].中国土壤与肥料,2020(6):228-233.
ZHANG J, JI J H, LI X H, et al. Regulation of Alginate Enhancers on the Transformation and Loss of Urea in Soil[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2020(6): 228-233.

[112] 陈振伟.海藻酸增效剂及含海藻酸增效尿素的制备和应用[J].肥料与健康,2022,49(4):18-21,35.
CHEN Z W. Preparation and Application of Alginate Synergist and Synergistic Urea Containing Alginate [J]. Fertilizer & Health, 2022, 49(4): 18-21, 35.

[113] 李兵.海藻复合肥减施对小麦玉米生长及其氮素吸收利用的影响[D].泰安:山东农业大学,2022.
LI B. Effects of Reducing Seaweed Composite Fertilizer Application on Wheat Corn Growth and Nitrogen Utilization [D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2022.

[114] 孟凡龙,李絮花,王韬虎,等.海藻酸增效尿素对夏玉米氮素吸收利用及氮肥损失的影响[J].农业资源与环境学报,2024,41(3):549-557.
MENG F L, LI X H, WANG T H, et al. Effects of alginic acid-enhanced urea on nitrogen absorption, utilization, and loss of summer maize [J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2024, 41(3): 549-557.

[115] 张琳,韩西红,王海朋,等.海藻酸及海藻寡糖在肥料增效助剂领域的应用[J].种子科技,2018,36(10):34-35,40.
ZHANG L, HAN X H, WANG H P, et al. The Application of Alginate and Alginate Oligosaccharides in the Field of Fertilizer Efficiency Enhancers [J]. Seed Science & Technology, 2018, 36(10): 34-35, 40.

[116] 张朝霞,许加超,盛泰,等.海藻寡糖(ADO)对不同形态氮素的影响[J].农产品加工(学刊),2014(20):1-4,8.
ZHANG C X, XU J C, SHENG T, et al. Effects of Alginate-derived Oligosaccharides (ADO) on the Different Nitrogen Forms [J]. Academic Periodical of Farm Products Processing, 2014(20): 1-4, 8.

[117] FIRMANDA A, FAHMA F, SYAMSU K, et al. Immobilization of urea on beads based on OPEFB cellulose-alginate via blending to fabricate sustained release fertilizer [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 282: 137467.

[118] MENG C P, WU M, WANG X Z, et al. Slow-release fertilisers increased microflora and nitrogen use efficiency and thus promoted peanut growth and yield [J]. Plant, Soil and Environment, 2024, 70(2): 61-71.

[119] EL BOUCHTAOUI F Z, ABLOUH E H, KASSEM I, et al. Slow-release fertilizers based on lignin-sodium alginate biopolymeric blend for sustained N-P nutrients release [J]. Journal of Coatings Technology and Research, 2022, 19(5): 1551-1565.

[120] SCHNEIDER T A, DELADINO L, ZARITZKY N. Yerba Mate (Ilex paraguariensis) Waste and Alginate as a Matrix for the Encapsulation of N Fertilizer[J]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2016, 4(4): 2449-2458.

[121] SATHISARAN I, BALASUBRAMANIAN M. Physical characterization of chitosan/gelatin-alginate composite beads for controlled release of urea[J]. Heliyon, 2020, 6(11): 05495.

[122] MENG T T, SHI J J, ZHANG X Q, et al. Slow-Release Nitrogen Fertilizer Promotes the Bacterial Diversity to Drive Soil Multifunctionality[J]. Agronomy, 2024, 14(11): 2712.