

环保酵素对植物体内ABC蛋白影响的研究进展

林 玉, 刘佩勇*, 张紫晗

东北大学生命科学与健康学院, 辽宁 沈阳

收稿日期: 2022年5月14日; 录用日期: 2022年6月20日; 发布日期: 2022年6月28日

摘 要

环保酵素因其丰富的微生物含量和多种有益酶的活性,使其具有深度研究的意义。环保酵素在污水处理, 医疗运用、土壤治理等方面都有杰出的作用, 但是环保酵素直接作用于植物, 即植物如何从土壤中的环保酵素获得有效成分进入体内, 在植物体内作用于各个器官的研究尚不明确。本文通过国内外相关研究探讨环保酵素的理化性质和微生物菌群, 可能作用与植物体内的分子路线, 如环保酵素提高土壤氮含量, 通过ABC蛋白转运, 进入三羧酸循环, 为植物提供能量; 环保酵素微生物菌群通过与重金属螯合, 抑制ABC蛋白对重金属的吸收。

关键词

环保酵素, ABC蛋白转运, 植物

Research Progress on the Effects of Eco-Enzymes on ABC Proteins in Plants

Yu Lin, Peiyong Liu*, Zihan Zhang

School of Life Sciences and Health, Northeastern University, Shenyang Liaoning

Received: May 14th, 2022; accepted: Jun. 20th, 2022; published: Jun. 28th, 2022

Abstract

Environmental enzymes are of great significance for in-depth research because of their rich microbial content and the activities of a variety of beneficial enzymes. Environmental enzymes have outstanding effects in sewage treatment, medical application, soil management, etc., but environmental enzymes directly act on plants, that is, how plants obtain active ingredients from environmental enzymes in the soil into the body, and act on various organs in plants. Research is unclear. This paper discusses the physicochemical properties and microbial flora of environmental enzymes

*通讯作者。

through relevant research at home and abroad, which may act on the molecular routes in plants. For example, environmental enzymes increase soil nitrogen content, and are transported through ABC protein to enter the tricarboxylic acid cycle to provide energy for plants; eco-enzyme microbial flora inhibits the absorption of heavy metals by ABC proteins by chelating with heavy metals.

Keywords

Environmental Enzymes, ABC Protein Transport, Plants

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

环保酵素(Garbage enzyme)是一种由红糖,水果或者果皮进行不同的比例(红糖:水果:水 = 1:3:10)发酵三个月得到的多用途活性发酵液,呈深褐色,有强烈的甜酸发酵气味。环保酵素中含有丰富的活性物质:① 特定的生物菌功能菌,硝化菌,耐酸菌,纤维素降解酶等。② 具有高活性的酸类物质,酒石酸,乳酸,乙醇酸等。③ 功能丰富的微生物,醋酸菌,乳酸菌,酵母菌等,未检测到有害菌群如金黄色葡萄球菌,沙门氏菌等[1]。因此环保酵素在医学,农业,食品,废水处理以及家庭中都有广泛应用,并且由于环保酵素的简单易制作,成本低廉,无毒无害,在日常生活和医学发展中逐渐占据一席之地[2]。

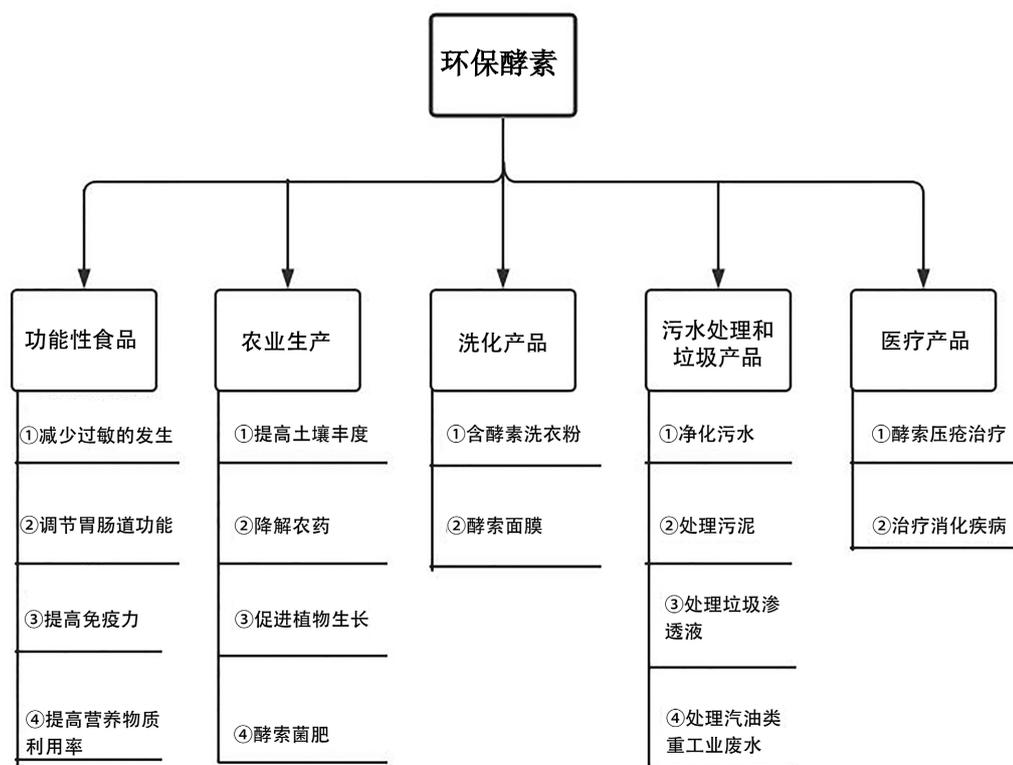


Figure 1. Application of eco-friendly enzymes

图 1. 环保酵素的应用

环保酵素在各个方面具有杰出的作用(见图 1), 在作为化肥进行堆肥, 为植物提供营养物质, 促进植物生长方面尤为突出, 其中包括药用型植物丹参, 铁皮石斛等都进行过生理生化指标的测定[3] [4], 如环保酵素对丹参的有效物质积累方面有显著成效, 使丹参酮的含量增加 40.08%; 并且能够降低有害物质镉的积累, 使丹参体内镉的吸收速率降低 5.84%~37.90%。然而环保酵素对植物生长产生影响的分子生物学机制方面没有过多的被关注。

ABC 蛋白即 ATP 结合盒式蛋白(ATP-binding cassette transporter, ABC)是一种普遍存在与动物, 植物, 微生物体内的转运蛋白, 抑制 ABC 蛋白的表达, 可以引起各种不良反应。在模式生物拟南芥中, ABC 蛋白分为 8 个亚家族: ABCA-ABCH, 分别具有不同的作用[5]。本文将主要就环保酵素作用于植物是否会对 ABC 蛋白产生影响方面开展探索性推测研究。

2. 环保酵素的研究进展

2.1. 环保酵素理化性质研究进展

环保酵素含有丰富的有益微生物, 多种有机养分和天然植物激素以及多种活性物质。这些成分种类丰富, 含量各异, 形成的理化性质研究的并不透彻。

2013 年 Nazim 等[6]检测环保酵素的理化参数, 包括酚类化合物, 氯化物等, 随后 2015 年 Arun 等[7], 2019 年 Aishwarya 等[8]也相继开始检测环保酵素中各项指标, 从而得出环保酵素的微生物活性和其他理化参数(见表 1)。由表 1 可知环保酵素溶解性总固体(TDS)的含量从 2013 年 2210 mg/L, 2015 年的 3910 mg/L 到 2019 年 1021 mg/L, TDS 总体含量呈现降低趋势, TDS 可以反映环保酵素发酵后, 溶液中溶解的有机盐 and 无机盐的浓度, 如果有机盐和无机盐的浓度过高, 会破坏土壤的理化性质平衡; 蒸发总残留物(TS)上升, 生物需氧量(BOD₅)没有发生较大变化, 环保酵素的工艺手段不断提升; 硫酸盐和磷酸盐能够还原细菌, 如脱硫弧菌脱硫剂, 具有将硫酸盐转化为硫酸氢的能力, 然后与镉和锌等重金属反应形成这些金属硫化物的不溶形式, 降低土壤中重金属的含量。

Table 1. Physicochemical properties of environmental enzymes

表 1. 环保酵素理化性质参数

参数	2019	2015	2013
	Aishwarya	Arun	Nazim
pH	3.00	3.60	2.91
电导率($\mu\text{S}/\text{cm}$)	1550.0	-	-
TDS (mg/L)	1021.0	3910.0	2210.0
TS (mg/L)	9812.0	8753.0	-
硫酸盐(mg/L)	0.59	-	-
磷酸盐(mg/L)	3.75	-	-
TKN (mg/L)	241.0	-	-
BOD ₅ (mg/L)	134.0	-	130.0
COD (mg/L)	17320.0	21321.0	48200.0

注: 表格数据来源于 2019 年 Bioresource Technology。

国内自 2017 年才有论文正式研究环保酵素的理化性质, 蔡毅飞等[8]通过研究环保酵素的发酵过程, 检测环保酵素的 pH 和电导率。可知环保酵素 pH 值随着发酵时间不断降低, 最终保持在 3.0~4.0 之间,

与 2013 年 Nazim, 2015 年 Arun 和 2019 年 Aishwarya 检测结果相同; 电导率通常用来表示水的纯净度, 测量环保酵素电导率的变化, 可以监测还原糖含量的变化, 从而控制发酵时间。电导率在发酵过程中一般呈现先下降后上升直至平稳的趋势。

2.2. 环保酵素中金属含量的研究进展

环保酵素中重金属镉(Cd), 锰(Mn), 铅(Zn)的含量较低, 因此植物不会进行体内重金属富集和对植物进行胁迫作用, 重金属会驱逐生物分子中的重要成分, 阻碍分子的功能并改变酶, 蛋白质或膜转运蛋白的结构或功能, 从而对植物产生毒性。

铁(Fe), 镁(Mg)等金属含量高, 能够给微生物提供合适的生活环境。铁是植物新陈代谢所需的必需营养素之一, 根际细菌通过用细菌铁载体溶解弱溶解的营养物质或通过分泌酸性有机化合物降低 pH 值来增强植物生长, 如果它在土壤中缺乏, 铁载体只能由植物产生; 镁参与植物光合反应, 镁过低, 植物营养不良, 严重时会造成植物死亡。因此环保酵素中的铁, 镁等元素有助于微生物和细胞的存活, 促进植物的生长和发育[9]。

2020 年胡月[10]用不同种类的蔬果制作环保酵素, 经过 6 个月的发酵后, 测量镁元素的含量, 其中用菠菜为原料制作的环保酵素镁元素含量最高, 用火龙果为原料制作的环保酵素镁元素含量最低; 经过 12 个月发酵后, 菠菜为原料制作的环保酵素镁元素含量最高, 油菜为原料制作的环保酵素含量最低; 经过 15 个月发酵, 菠菜为原料制作的环保酵素镁元素含量依然最高, 油菜为原料制作的环保酵素含量最低。

2.3. 环保酵素中氮, 磷, 钾元素含量的研究进展

环保酵素制作过程中并未添加大量的氮, 磷, 钾元素, 主要是通过微生物的转化, 提高环保酵素中氮磷钾的含量, 可以安全无毒的为土壤提供氮磷钾元素, 并且不会破坏土壤的元素平衡和造成土壤盐碱化。

植物种植在施加氮肥料的土壤中, 能够提高植物蛋白质等多种营养物质含量。2016 年李方志等[11]用丢弃水果皮制作的环保酵素浇灌浓度为 750 ug/L 时, 土壤中全氮含量最适宜植物生存, 此时植物的叶片比空白组氮磷钾等营养元素含量上升。

早期对植物施加磷肥, 可以促进植物生长, 增加植物产量, 若缺少磷, 即使后期提高磷肥, 也不能增加植物产量。2016 年普燕爽[12]通过对朝天椒浇灌不同梯度的环保酵素, 也可以得知用丢弃水果皮制作的环保酵素浇灌浓度为 750 ug/L 时, 土壤中有效磷和全磷的含量总体大于对照组不施肥区和实验组施肥区, 能够促进植物生长。

3. 环保酵素作用于植物途径的研究进展

3.1. 环保酵素的理化性质对植物产生影响的研究进展

环保酵素具有分解和催化功能, 已经广泛用于废水处理、重金属积累以及生物堆肥作用。环保酵素因其理化性质, 还对于某些植物体内对于重金属的吸收有抑制作用, 环保酵素中微生物成分对植物的影响作用研究进展, 如丹参(见图 2), 2020 年 Xuemin Wei [4]探讨微生物制剂和环保酵素作用下丹参对于镉的吸收作用, 生物活性化合物的积累和微生物群落组成的影响。研究发现微生物制剂(MI)、环保酵素(GE)和两者混合处理组(MIGE)均与对照组相比, 镉的含量降低, 并且三组根鲜重和干重的生物量未有较大变化; 除此之外, 与对照组相比, 微生物制剂能够最大效果提高总丹参酸的含量, 其次是环保酵素处理组, 混合处理也有小范围的提高; 宏基因组分析表明, 微生物制剂、环保酵素均含有变形杆菌、放线菌、酸杆菌、氯胶菌、拟杆菌、宝石单胞菌、厚壁菌、疣状结肠菌和单胞菌。除此之外, 与重金属生物修复相

关的土壤微生物的丰度也发生了变化，与对照组相比，处理组的短杆菌属、曲霉菌属等都有显著增加。

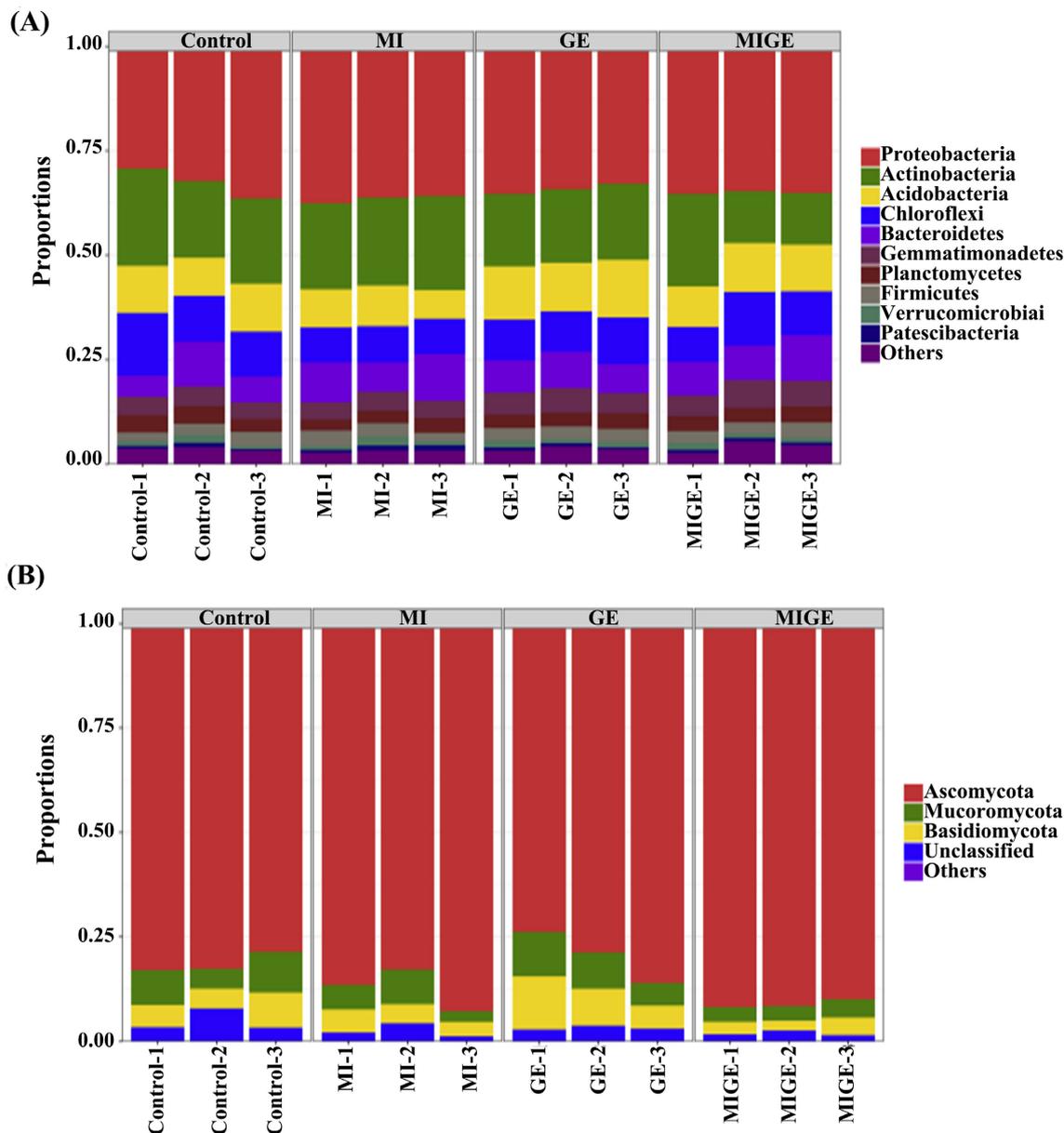


Figure 2. Abundance map of bacteria (A) and fungi (B) in eco-enzymes

图 2. 环保酵素中细菌(A)和真菌(B)的丰度图

2021 年 junfeng W [13]将微生物制剂每周八次接种到玉米根系中,通过植物和微生物的酸溶性和络合效应将镉从不溶性部分转化为生物可利用部分,让作物吸收。与未接种的相比,接种微生物制剂显著提高了玉米的株高和生物量。经研究属于微生物制剂的杆菌,杆菌产生抗菌物质如吡啶乙酸等,抑制有害微生物的生长,并在根际中富集更多的植物生长因子促进根系复合物的形成(见图 3)。除此之外,与对照组相比,接种处理的玉米光合效率也高于未接种处理组。

2019 年韩剑宏等[14]研究环保酵素对碱性土地的改良作用,发现环保酵素的 pH 值通常在 3.0~4.0 之间,将环保酵素作为生物肥料灌溉,能够有效减轻土壤的碱化度。中国大部分土地都有盐碱化的趋势,

主要原因可能是碱性化肥的滥用，即使化肥能够提高植物的营养水平，但是毫无疑问会破坏土地酸碱性平衡。环保酵素作为酸性的无毒无害的生物肥料，能够减缓土地盐碱化的趋势，原理是因为环保酵素中微生物呼吸产生的乙酸，其中的 H^+ 和土壤中过多的 OH^- 结合，从而降低土壤的 pH 值，降低碱性后的土壤能够有效吸附钾离子，镁离子等，促进植物的营养吸收。



Figure 3. The pathway by which eco-enzymes may act on maize roots

图 3. 环保酵素可能作用于玉米根系的途径

3.2. 环保酵素中金属可能对植物产生影响的研究进展

现代农业面临的巨大挑战之一是以可持续的方式增加生物质产量，同时提高植物产品质量，铁和镁在这一过程中起着重要作用。铁稳态是藻类和高等植物光合效率的重要决定因素，光合装置的结构在很大程度上是铁依赖性的，但是通常土壤中的铁不能轻易被植物根部吸收，植物通常只能通过根部菌群改变铁的存在形式。环保酵素因其丰富的微生物活性和酸性环境，能够使铁离子保持二价的形式被植物吸收。吸收的二价铁离子进入根中，被转移到对铁需求量高的地方，通常是叶片，因为叶绿素的生物合成和光合作用更需要铁，并且新生的叶片对铁的需求度更大[15]。

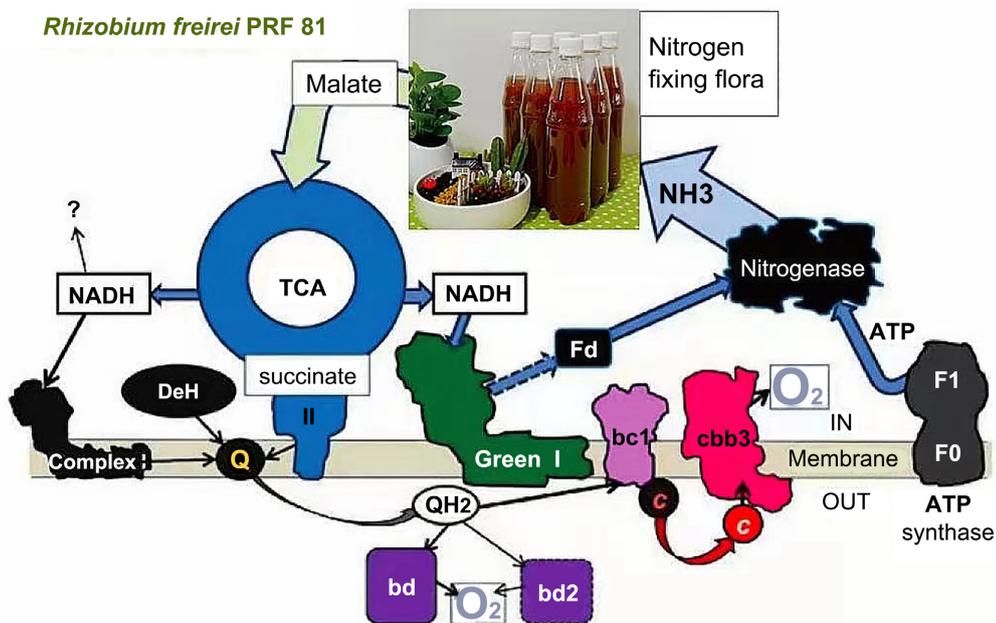
环保酵素中的镁离子同样以二价的形式存在，被植物体根部吸收后进入叶和其他部位，镁离子是各种酶的激活剂，是一个重要的调节信号，即能激活又能介导各种生化反应，促进植物生长发育[16]。

3.3. 环保酵素的氮磷钾对植物产生影响的研究进展

环保酵素主要作为一种无毒有益的生物肥料，提供给植物氮磷钾等营养物质，促进植物生长结果。Jishao J 等[17]将环保酵素(GE)与生物炭(BC)，硅石(PL)进行堆肥处理后，在 0、4、12、24 h 分别进行取样，后两者在土壤堆肥中已被证明具有杰出作用[18] [19]，与它们相比，环保酵素的固氮菌群高于其他两者，在蛋白质细菌的丰度上高于对照组和其他两组。由此可知，环保酵素能够提高氮含量，主要在于能够提高土壤中固氮菌群的丰度。除此之外结果表明，添加 GE、PL 和 BC 后，堆肥 NH_3 排放量分别比对照降低了 40.9%、29.3%和 67.4%， NO_3^-N 含量分别增加了 161.4%、88.2%和 105.8%，从而提高了全氮含量。通过提高土壤中固氮菌群的含量来影响植物，植物通过根吸收土壤中氮元素转化成苹果酸，苹果酸在三羧酸循环(TCA)循环中进一步加工，三羧酸循环(TCA)循环是向固氮酶提供能量和碳的核心(见图 4)。单独使用苹果酸酶或与磷酸烯醇丙酮酸羧化激酶联合使用，丙酮酸激酶将苹果酸转化为丙酮酸，乙酰辅酶 A 与草酰乙酸缩合以继续三羧酸循环(TCA)循环，三羧酸循环(TCA)循环与叶绿体复合物 1 一起作用为植物提供能量[20]。

4. ABC 蛋白的研究进展

ABC 转运蛋白在原核生物到哺乳动物的各种物种中均被报道，陆地植物拥有比其他物种多三到四倍的 ABC 转运体(见图 5)，大米中有 133 个不同的 ABC 转运体，拟南芥中有 130 个不同的 ABC 转运体，而人的体内有 49 个不同的 ABC 转运体，鼠的体内有 53 个不同的 ABC 转运体[21]，这些转运体主要定位在细胞膜上，能够参与细胞的不同生物反应过程。根据不同的反应过程，ABC 转运蛋白被分为 8 个种类(ABCA-ABCH)。在根中，ABC 转运蛋白可保护组织免受金属毒性、生长素转运和底物沉积的影响。同样地，在叶片中，它调节 ABA 的进口，角质层的形成和离子的运输。在芽中，ABC 转运蛋白参与生长素运输、脂肪酰基辅酶 A 向过氧化物酶体的转运、角质层形成和质体脂质形成[22]。



Q: ubiquinone (MQ), QH2: ubiquinol, c: reduced c cytochromes, O₂: low oxygen (microoxia), DeH: other Q-reducing DeHydrogenases, Fd: ferredoxins, Hup: group 1 hydrogenase

Figure 4. Hypothetical diagram of nitrogen fixation in plant roots
图 4. 植物根部固氮作用的假设图

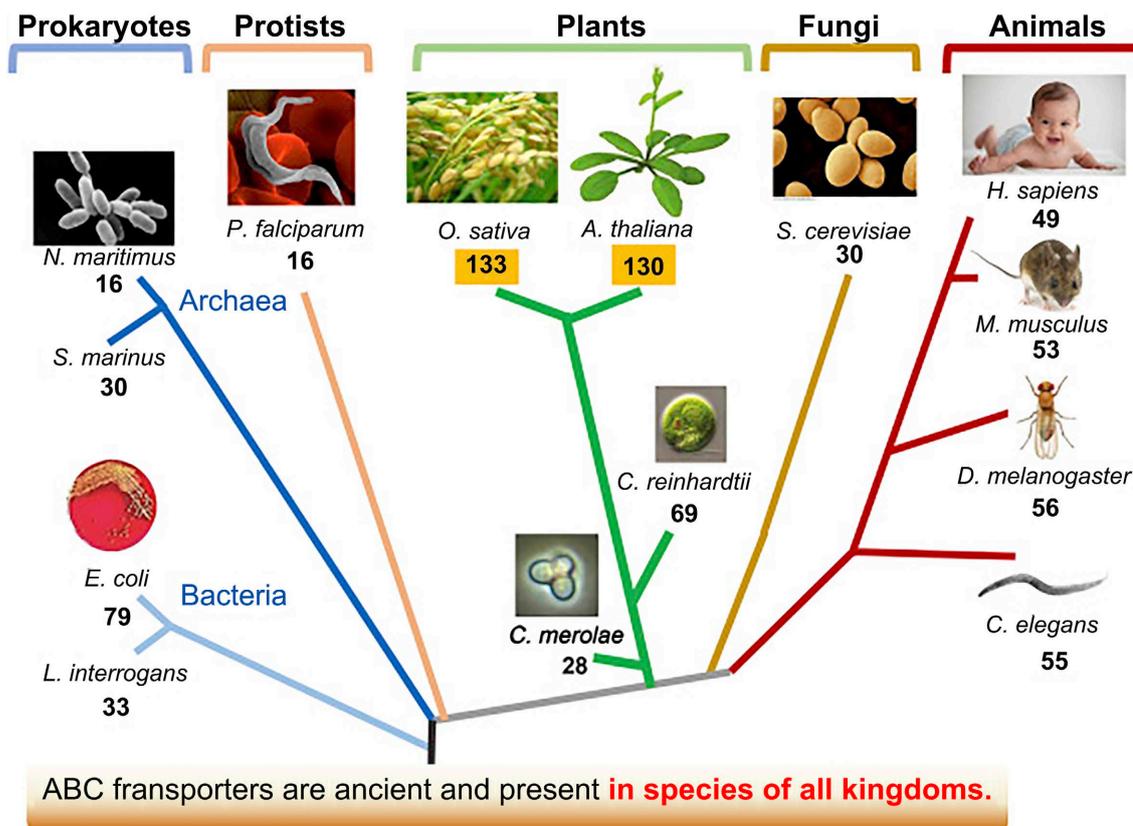


Figure 5. Quantitative map of ABC transporters in organisms
图 5. ABC 转运体在生物体内数量图

同样, ABC 转运蛋白在保护花粉不受不利环境条件影响, 并有助于适当施肥和种子形成方面发挥着重要作用。它们也有助于花粉外壁的形成。ABC 转运体还有助于种子中矿物质、脂类和角质的积累, 调节种子休眠, 帮助保持种子发芽率[23]。

5. 环保酵素对植物中 ABC 蛋白可能产生影响的作用途径

5.1. 环保酵素理化性质对植物中 ABC 蛋白可能产生影响的作用途径

环保酵素的电导率能够有效的反映还原糖的含量变化, 早期种子的大小与己糖含量有关, 环保酵素中含有大量还原性糖, 通过植物自生反应生成己糖, 促进 ABCA 蛋白转运, 加速种子的发育[24]。

环保酵素的酸性 pH 值会缓解土地盐碱化的趋势, 碱性土壤会造成植物缺少铁元素, 而铁元素与植物生长有至关重要的作用, 缺铁时, ABCG 亚家族中的 PDR9 能够促进香豆素的生成, 香豆素还原 Fe^{3+} , 并与 Fe^{2+} 形成络合物, 运输到植物体内。并且仅在酸性环境中, 观察到 Fe^{3+} 被还原[25] (见图 7)。

环保酵素能够抑制微生物菌群产生吲哚乙酸等物质, 保持植物体内生长素含量的平衡, 促进 ABCB 亚家族与植物体内生长素结合, 给予植物良好的生长条件[26]。

ABCD 亚家族与过氧化物酶的形成有关[27]。过氧化物酶是植物的抗逆性指标, 当植物处在逆境中, 过氧化物酶会加速生成, 抵御逆境。只有在环保酵素浇灌浓度不适宜时, ABCD 亚家族生成过氧化物酶使植物处在稳定的环境中, 因此要保证环保酵素适宜的浇灌浓度。

5.2. 环保酵素中金属对植物中 ABC 蛋白可能产生影响的作用途径

ABCC 亚家族与重金属螯合有关[28]。环保酵素能够促进根系微生物与植物体内 ABCC 出口的重金属螯合, 形成不溶性物质排出植物体外。一些 PDR 转运蛋白有助于抵抗重金属, 例如镉和铅[29] [30]。镉和铅是土壤中常见的污染物, 对植物的生长有害。在植物中, 与野生型植物相比, AtPDR8 过表达植物表现出更强的镉或铅抗性[31] [32]。环保酵素中的微生物能够和其中少量镉发生络合使镉中的不可溶部分形成可溶部分, 被植物体吸收利用, 而进入植物体内的镉都依赖于 ABC 转运体转运和运用, 形成植物体内其他物质。这些基因表达的抑制与根际土壤中生物可利用镉含量的减少呈正相关, PDR8 过表达植物表现出更强的镉或铅抗性, 镉含量的减少, 需要代谢物的分泌减少, 以及需要的抗性弱, 因此 ABC 基因呈现下调趋势(见图 6)。

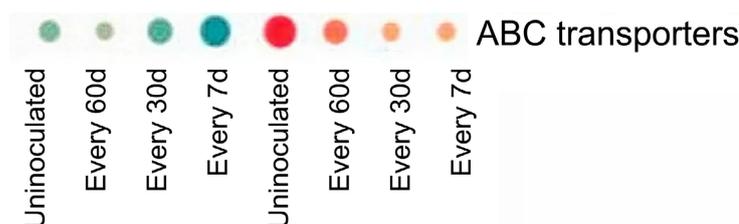


Figure 6. ABC gene expression under cadmium
图 6. 镉胁迫下的 ABC 基因表达

铁对植物的生长和发育至关重要, 环保酵素中含有丰富的铁元素, 但是只有二价铁离子才能被植物吸收, 三价铁离子不能被植物吸收, 因此三价铁离子需要还原成二价铁离子被植物吸收, 通常在酸性土壤中三价铁离子才能被还原。中国大部分土壤呈现碱性, 因此抑制了铁离子的还原, 使植物得不到充足的铁元素。环保酵素因为呈现酸性 pH 能够使三价铁离子被还原成二价, 并且能够长久保存在环保酵素中, 以供后续被植物吸收利用[25]。过程如下: 三价铁离子被细胞中的 ABCG36 蛋白刺激运转的 FRO2

蛋白还原内,同时 IRT2 蛋白运输环保酵素中原本含有的二价铁离子和三价铁离子还原的二价铁离子,进入体内后在将铁离子运送到适宜的区域(见图 7)。

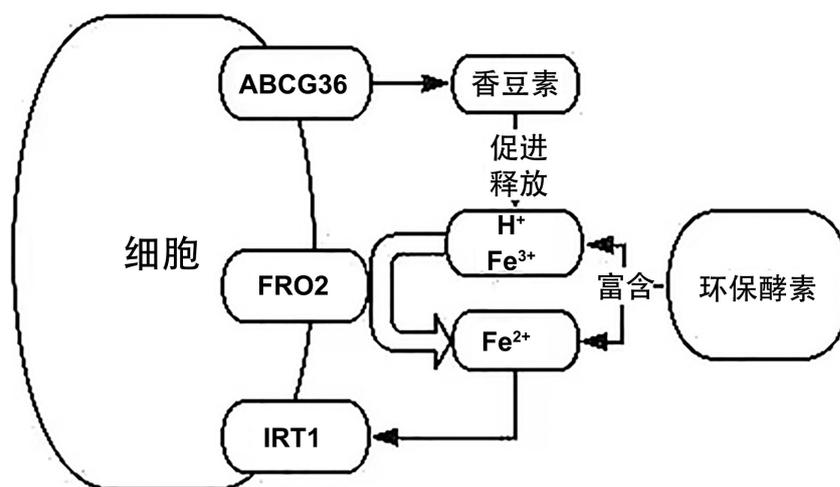


Figure 7. Hypothetical flow chart of iron uptake by plant cells
图 7. 植物细胞吸收铁的假想流程图

5.3. 环保酵素中氮磷钾对植物中 ABC 蛋白可能产生影响的作用途径

如前文探讨,环保酵素中富含氮,能够和土壤中超量的镉等重金属螯合,形成不溶物,不被植物吸收,减少重金属在植物体内积累。

在模式生物拟南芥缺少氮元素时,会造成 ABCA9 转运蛋白的积累促使三酰基甘油代替氮在内质网中活动[33]。环保酵素中充足的氮营养,可能会减少 ABCA9 蛋白的生成,从而会促进 ABC 家族其他蛋白的生成,加快氮的转运。如 ABCG 亚家族全尺寸亚科 PDR 能够释放信号肽,促使豆科根瘤细菌吸收氮元素,从而转运氮进入植物根部,运输到植物其他部位[34]。

ABCG29 能够延长根部结构和毛发生长来增强根鞘的形成,从而增加对磷的吸收,环保酵素中充足磷元素可能会减少 ABCG29 的表达[35]。

ABCC 亚家族还是钾通道的调节器,环保酵素中钾离子能够加速 ABCC 运输钾离子,促进植物的生长发育[36];

6. 结论

1) 环保酵素中糖类物质能够被 ABCA 蛋白转运,从而促进种子的发育;环保酵素的低 pH 能够改善土壤盐碱化,还能够让大多数离子如铁,镁保持在二价的活性状态,减少 PDR9 的表达,促进植物吸收;环保酵素能够抑制微生物菌群产生吲哚乙酸,从而保持植物体内生长素的平衡,降低 ABCG 亚家族转运蛋白的表达,增高 ABCB 亚家族转运蛋白的表达;环保酵素在植物生长过程中会导致细菌趋化性。

2) 环保酵素中少量的重金属如镉铅在植物体内被 ABCC 亚家族蛋白结合运出体外,若环保酵素中无镉铅等重金属可能会导致 ABC 转运蛋白相关的基因的下调;ABCG36 能够释放香豆素促进环保酵素中的二价铁离子被植物吸收。

3) 环保酵素中充足的氮元素,可能会减少 ABCA9 蛋白的表达,但是会促使 PDR 释放信号肽,加速转运过程;环保酵素中充足的磷元素,可能会降低 ABCG29 的表达;环保酵素中充足的钾元素可能会加速 ABCC 亚家族运送蛋白的过程。

7. 展望

环保酵素制作简单, 方便易得, 常见的环保酵素通过蔬果果皮制作, 据研究可以得知环保酵素对于植物的成长发育有一定的促进作用, 但是不同种类的环保酵素对植物吸收是否有不同的作用。

ABC 蛋白在植物体内的作用巨大, 数量众多, 但是每种蛋白的作用并没有完全解释清楚。环保酵素作用于一些 ABC 亚家族蛋白呈现下调趋势, 另一些则呈现上调趋势, 这些 ABC 蛋白之间是否会相互影响。

环保酵素中营养元素被植物吸收后, 大多数由 ABC 蛋白进行转运到特定部位, 后续的 ABC 蛋白是否会被物质的浓度影响转运的过程与速度。除此之外, 环保酵素中大部分物质被 ABC 蛋白运送进入根后, 又是通过什么方式什么蛋白转运到叶片, 芽等位置, 在叶片和芽中又起到什么作用, 这些仍然值得我们去探究。

参考文献

- [1] 饶毅萍, 魏建华, 陈冬娥, 张彩云, 张淑怡. 环保酵素的微生物检测和生化成分分析[J]. 农业与技术, 2021, 41(1): 30-32.
- [2] 高玉秋, 刘佩勇. 环保酵素在土壤改良及农业生产和环境治理方面的应用的研究进展[J]. 环境保护前沿, 2020, 10(4): 541-548. <https://doi.org/10.12677/AEP.2020.104066>
- [3] Wei, X., Cao, P., Wang, G. and Han, J. (2020) Microbial Inoculant and Garbage Enzyme Reduced Cadmium (Cd) Uptake in *Salvia miltiorrhiza* (Bge.) under Cd Stress. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, **192**, Article ID: 110311. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.110311>
- [4] Dahuja, A., Kumar, R.R., Sakhare, A., Watts, A., Singh, B., Goswami, S., et al. (2020) Role of ABC Transporters in Maintaining Plant Homeostasis under Abiotic and Biotic Stresses. *Physiologia Plantarum*, **171**, 785-801. <https://doi.org/10.1111/ppl.13302>
- [5] Aishwarya, R., Negi, S., Hussain, A. and Kumar, S. (2020) Treatment of Urban Municipal Landfill Leachate Utilizing Garbage enzyme. *Bioresource Technology*, **297**, Article ID: 122437. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122437>
- [6] Arun, C. and Sivashanmugam, P. (2015) Identification and Optimization of Parameters for the Semi-Continuous Production of Garbage Enzyme from Pre-Consumer Organic Waste by Green RP-HPLC Method. *Waste Management*, **44**, 28-33. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.07.010>
- [7] Nazim, T. and Meera, V. (2013) Treatment of Synthetic Greywater Using 5% and 10% Garbage Enzyme Solution. *Bonfring International Journal of Industrial Engineering and Management Science*, **3**, 111-117. <https://doi.org/10.9756/BIJEMS.4733>
- [8] 蔡毅飞, 唐敏. 环保酵素的发酵过程研究[J]. 科技资讯, 2017, 15(14): 230+232. <https://doi.org/10.16661/j.cnki.1672-3791.2017.14.230>
- [9] 陈良碧, 蔡丹, 张林安, 宋绍文, 罗璇, 陈依君, 等. 植物镁离子转运及镁胁迫响应机制研究进展[J]. 生命科学, 2021, 25(5): 442-447.
- [10] 胡月. 不同植物环保酵素主要活性成分分析[D]: [硕士学位论文]. 沈阳: 东北大学, 2020.
- [11] 李方志, 杨琴, 杨汝兰, 杜北, 王殷, 李丝丝, 等. 环保酵素对土壤中有效氮、全氮及有机质改良效果的研究[J]. 玉溪师范学院学报, 2016, 32(4): 42-47.
- [12] 普燕爽, 陶津, 林森, 赵敏慧. 环保酵素对朝天椒生长势及土壤有效磷、水解氮的影响研究[J]. 环境科学导刊, 2019, 38(3): 5-11.
- [13] Wang, J.F., Li, W.L., Ahmad, I., He, B.Y., Wang, L.L., He, T., et al. (2021) Biomineralization of Cd²⁺ and Inhibition on Rhizobacterial Cd Mobilization Function by *Bacillus Cereus* to Improve Safety of Maize Grains. *Chemosphere*, **283**, Article ID: 131095. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131095>
- [14] 韩剑宏, 刘泽霞, 张连科, 李玉梅, 姜庆宏, 王维大. 环保酵素对盐碱土关键化学性质的影响[J]. 水土保持通报, 2019, 39(3): 126-131.
- [15] Kobayashi, T., Nozoye, T. and Nishizawa, N.K. (2019) Iron Transport and Its Regulation in Plants. *Free Radical Biology & Medicine*, **133**, 11-20. <https://doi.org/10.1016/j.freeradbiomed.2018.10.439>
- [16] Kleczkowski, L.A. and Iqamberdiev, A.U. (2021) Magnesium Signaling in Plants I. *International Journal of Molecular Sciences*, **22**, Article No. 1159. <https://doi.org/10.3390/ijms22031159>

- [17] Jiang, J., Wang, Y., Yu, D., Zhu, G., Cao, Z., Yan, G., *et al.* (2021) Comparative Evaluation of Biochar Pelolith and Garbage Enzyme on Nitrogenase and Nitrogen-Fixing Bacteria during the Composting of Sewage Sludge. *Bioresource Technology*, **333**, Article ID: 125165. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125165>
- [18] Awasthi, M., Duan, Y., Awasthi, S., Liu, T. and Zhang, Z. (2020) Influence of Bamboo Biochar on Mitigating Greenhouse Gas Emissions and Nitrogen Loss during Poultry Manure Composting. *Bioresource Technology*, **303**, Article ID: 122952. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.122952>
- [19] Jiang, J., Pan, Y., Yang, X., Liu, J., Miao, H., Ren, Y., *et al.* (2019) Beneficial Influences of Pelolith and Dicyandiamide on Gaseous Emissions and the Fungal Community during Sewage Sludge Composting. *Environmental Science and Pollution Research International*, **26**, 8928-8938. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-04404-x>
- [20] Kristina, L. and Abdollah, M. (2020) Effectiveness of Nitrogen Fixation in Rhizobia. *Microbial Biotechnology*, **13**, 1314-1335. <https://doi.org/10.1111/1751-7915.13517>
- [21] Hwang, J., Yong, W., Hong, D., Ko, D., Yamaoka, Y., Jang, S., *et al.* (2016) Plant ABC Transporters Enable Many Unique Aspects of a Terrestrial Plant's Lifestyle. *Molecular Plant*, **9**, 338-355. <https://doi.org/10.1016/j.molp.2016.02.003>
- [22] Kang, J., Yim, S., Choi, H., Kim, A., Lee, K.P., Lopez-Molina, L., *et al.* (2015) Abscisic Acid Transporters Cooperate to Control Seed Germination. *Nature Communications*, **6**, Article No. 8113. <https://doi.org/10.1038/ncomms9113>
- [23] Thanh, H., Martinoia, E. and Youngsook, L. (2018) Functions of ABC Transporters in Plant Growth and Development. *Current Opinion in Plant Biology*, **41**, 32-38. <https://doi.org/10.1016/j.pbi.2017.08.003>
- [24] Shin, S., Chairattanawat, C., Yamaoka, Y., Yang, Q., Lee, Y. and Hwang, J.U. (2022) Early Seed Development Requires the A-type ATP-Binding Cassette Protein ABCA10. *Plant Physiology*, **189**, 360-374. <https://doi.org/10.1093/plphys/kiac062>
- [25] Clemens, S. and Weber, M. (2016) The Essential Role of Coumarin Secretion for Fe Acquisition from Alkaline Soil. *Plant Signal Behavior*, **11**, Article ID: e1114197. <https://doi.org/10.1080/15592324.2015.1114197>
- [26] Yang, C., Wang, D., Zhang, C., Ye, M., Kong, N., Ma, H., *et al.* (2021) Comprehensive Analysis and Expression Profiling of PIN, AUX/LAX, and ABCB Auxin Transporter Gene Families in *Solanum tuberosum* under Phytohormone Stimuli and Abiotic Stresses. *Biology*, **10**, Article No. 127. <https://doi.org/10.3390/biology10020127>
- [27] Baker, A., Carrier, D.J., Schaedler, T., Waterham, H.R., van Roermund, C.W. and Theodoulou, F.L. (2015) Peroxisomal ABC Transporters: Functions and Mechanism. *Biochemical Society Transactions*, **43**, 959-965. <https://doi.org/10.1042/BST20150127>
- [28] Wanke, D. and Kolukisaoglu, H.U. (2010) An Update on the ABCC Transporter Family in Plants: Many Genes, Many Proteins, but How Many Functions. *Plant Biology*, **12**, 15-25. <https://doi.org/10.1111/j.1438-8677.2010.00380.x>
- [29] Stukkens, Y., Bultreys, A., Grec, S., Trombik, T., Vanham, D. and Boutry, M. (2015) NpPDR1, a Pleiotropic Drug Resistance-Type ATP-Binding Cassette Transporter from *Nicotiana plumbaginifolia*, Plays a Major Role in plant Pathogen Defense. *Plant Physiology*, **139**, 341-352. <https://doi.org/10.1104/pp.105.062372>
- [30] Lee, M., Lee, K., Lee, J., Noh, E.W. and Lee, Y. (2005) AtPDR12 Contributes to Lead Resistance in Arabidopsis. *Plant Physiology*, **138**, 827-836. <https://doi.org/10.1104/pp.104.058107>
- [31] Kim, D.Y., Bovet, L., Maeshima, M., Martinoia, E. and Lee, Y. (2007) The ABC Transporter AtPDR8 Is a Cadmium Extrusion Pump Conferring Heavy Metal Resistance. *Plant Journal*, **50**, 207-218. <https://doi.org/10.1111/j.1365-313x.2007.03044.x>
- [32] Kang, J., Hwang, J.U., Lee, M., *et al.* (2010) PDR-Type ABC Transporter Mediates Cellular Uptake of the Phytohormone Abscisic Acid. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **107**, 2355-2360. <https://doi.org/10.1073/pnas.0909222107>
- [33] Jang, S., Kong, F., Lee, J., Choi, B.Y., Wang, P., Gao, P., *et al.* (2020) CrABCA2 Facilitates Triacylglycerol Accumulation in *Chlamydomonas Reinhardtii* under Nitrogen Starvation. *Molecules and Cells*, **43**, 48-57. <https://doi.org/10.14348/molcells.2019.0262>
- [34] Jasinski, M., Banasiak, J., Radom, M., Kalitkiewicz, A. and Figlerowicz, M. (2009) Full-Size ABC Transporters from the ABCG Subfamily in *Medicago truncatula*. *Molecular Plant-Microbe Interactions*, **22**, 921-931. <https://doi.org/10.1094/MPMI-22-8-0921>
- [35] Aslam, M.M., Waseem, M., Zhang, Q., Ke, W., Zhang, J. and Xu, W. (2021) Identification of ABC Transporter G Subfamily in White Lupin and Functional Characterization of L.albABGC29 in Phosphorus Use. *BMC Genomics*, **22**, Article No. 723. <https://doi.org/10.1186/s12864-021-08015-0>
- [36] Wanke, D. and Kolukisaoglu, H.U. (2010) An Update on the ABCC Transporter Family in Plants: Many Genes, Many Proteins, but How Many Functions. *Plant Biology*, **12**, 15-25. <https://doi.org/10.1111/j.1438-8677.2010.00380.x>