

油莎草(*Cyperus esculentus* L.): 从传统作物到多维度高值化利用

许珈源, 张 森, 朱美霖, 陈永杰, 张玉红*

东北林业大学食品与健康学院, 森林植物生态学教育部重点实验室, 黑龙江 哈尔滨

收稿日期: 2026年4月17日; 录用日期: 2026年7月10日; 发布日期: 2026年7月23日

摘 要

油莎草(*Cyperus esculentus* L.), 亦称虎坚果或地栗, 是一种集粮、油、饲、药等多功能于一体的莎草科古老经济作物。在全球气候变化、耕地资源紧张及大健康产业兴起的背景下, 其卓越的抗逆性、高生物量以及全株富含的营养与生物活性物质, 使其重新成为可持续农业和功能食品领域的研究热点。本文综述旨在系统梳理油莎草的研究进展, 围绕其全株(地上茎叶、须根及地下块茎)的化学成分、现代提取技术、药理活性及食品工业创新应用展开深入探讨。研究表明, 油莎草块茎富含高油酸油脂、抗性淀粉与优质植物蛋白, 地上部分则是重要的饲料资源; 以超临界CO₂萃取、酶法辅助等为代表的绿色提取技术, 以及基于“零废弃”理念的副产物综合利用策略, 正推动其高值化发展。大量体内外研究证实, 油莎草提取物具有抗氧化、抗炎、调节血糖血脂、保护心血管及改善肠道健康等多重功效。未来研究需聚焦于分子育种、绿色智能加工、临床营养学验证及全产业链整合, 以充分释放这一“超级作物”在保障粮食安全与促进人类健康方面的巨大潜力。

关键词

油莎草, 虎坚果, 生物活性, 药用价值, 综合利用

Cyperus esculentus L.: From a Traditional Crop to Multidimensional High-Value Utilisation

Jiayuan Xu, Sen Zhang, Meilin Zhu, Yongjie Chen, Yuhong Zhang*

Key Laboratory of Forest Plant Ecology, Ministry of Education, College of Food and Health, Northeast Forestry University, Harbin Heilongjiang

Received: April 17, 2026; accepted: July 10, 2026; published: July 23, 2026

*通讯作者。

文章引用: 许珈源, 张森, 朱美霖, 陈永杰, 张玉红. 油莎草(*Cyperus esculentus* L.): 从传统作物到多维度高值化利用[J]. 植物学研究, 2026, 15(4): 238-249. DOI: 10.12677/br.2026.154028

Abstract

Cyperus esculentus L., commonly known as the tiger nut or earth chestnut, is an ancient crop belonging to the Cyperaceae family. It has many uses, including as a grain for human consumption, an oil source, animal feed, and a medicinal plant. Against the backdrop of global climate change, limited arable land, and the growth of the wellness industry, its exceptional stress tolerance, high biomass, and abundance of nutrients and bioactive compounds throughout the entire plant have made it a focus of research in sustainable agriculture and functional foods once again. This review aims to summarize the latest research on *C. esculentus* systematically, with a particular focus on the chemical composition, modern extraction techniques, pharmacological activities, and innovative applications in the food industry of the entire plant (including the above-ground stems and leaves, fibrous roots, and underground tubers). Research indicates that *C. esculentus* tubers are rich in high-oleic oils, resistant starch, and high-quality plant protein, while the above-ground parts are an important feed resource. Green extraction technologies such as supercritical CO₂ extraction and enzyme-assisted methods, along with comprehensive by-product utilization strategies based on the “zero-waste” concept, are driving its high-value development. Extensive *in vitro* and *in vivo* studies have confirmed that *C. esculentus* extracts have multiple health benefits, including antioxidant and anti-inflammatory properties, and the ability to regulate blood glucose and lipid levels, protect cardiovascular health, and improve gut health. Future research should focus on molecular breeding, green and intelligent processing, clinical nutritional validation, and full industry chain integration to unlock the immense potential of this “super crop” in ensuring food security and promoting human health.

Keywords

Cyperus esculentus L., Tiger Nut, Bioactivity, Medicinal Value, Comprehensive Utilization

Copyright © 2026 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. 油莎草概述

油莎草(*Cyperus esculentus* L.), 又称虎坚果或地栗, 是莎草科(Cyperaceae)多年生草本植物, 因其地下块茎富含油脂与淀粉而闻名。作为一种古老的作物, 其栽培历史可追溯至古埃及时代, 在地中海、西非及亚洲部分地区已有数千年的食用与药用传统[1]。在全球气候变化、耕地资源紧张以及大健康产业兴起的当代背景下, 油莎草因其卓越的环境适应性(耐旱、耐瘠薄)、高生物量以及全株(块茎、茎叶、须根)蕴含的丰富营养与生物活性物质, 正重新成为可持续农业、功能食品及生物经济领域的研究焦点[2]。

从植物学特征来看, 油莎草植株高约 30~90 厘米, 具有三棱形茎秆和线形叶片, 通过地下匍匐茎末端膨大形成卵圆形或球形的块茎进行繁殖[3]。这些块茎直径通常在 0.5~2 厘米之间, 表皮呈黄褐色, 内部肉质呈白色, 是主要的收获器官。油莎草具有较强的生态适应性, 可在沙土、粘土等多种土壤类型中生长, 且在干旱、盐碱等非生物胁迫下表现出较强的耐受性, 这为其在边际土地上的推广种植提供了可能[4]。

油莎草块茎的化学成分复杂且营养均衡。据多项分析表明, 其干物质中油脂含量高达 25%~35%, 蛋白质 8%~15%, 淀粉 20%~30%, 膳食纤维 8%~9%, 并含有丰富的糖类(10%~20%) [2]。其油脂的脂肪酸

组成尤为突出,油酸(C18:1)含量可达 67.7%~76.6%,属于典型的高油酸型植物油,而亚油酸(C18:2)含量约为 8.8%~11.5%,棕榈酸和硬脂酸含量较低,这使得油莎草油在营养品质和氧化稳定性方面均优于许多常见植物油(如大豆油、葵花籽油)[2]。此外,块茎中还检测到多种维生素(如维生素 C、E 及 B 族维生素)、矿物质(钾、磷、镁、钙等)以及生物碱、甾醇、萜类等次生代谢产物[5]。其蛋白质的体外消化率约为 76%,含有 18 种氨基酸,尽管蛋氨酸和半胱氨酸为第一限制性氨基酸,但其整体氨基酸评分和营养指数表明其仍是一种优质植物蛋白来源[6]。

2. 油莎草全株营养成分与活性成分

油莎草原产于非洲,现已广泛分布于全球热带及亚热带地区。其适应性强,耐旱耐瘠薄,具有巨大的农业生产潜力。长期以来,研究多集中于其地下块茎的油脂提取与食品开发,随着农业可持续发展理念的深入,油莎草的全株利用成为研究热点。近年来的文献表明,油莎草不仅是优质的油料作物,其茎叶和须根同样蕴含丰富的营养成分与活性物质,具有抗氧化、抗炎等多种药理活性。

2.1. 地下块茎：高价值的营养与功能宝库

地下块茎是油莎草的主要经济器官,其营养物质储存丰富,成分组成独特。油莎豆块茎以高脂肪、高淀粉含量著称。多项研究对其基础营养成分进行了定量分析。

2.1.1. 油脂与脂肪酸

油莎草块茎的含油率极高,通常在 20%至 35%之间,堪称“地下油库”[7]。其油脂品质优异,脂肪酸组成以单不饱和脂肪酸为主,其中油酸(C18:1)含量尤为突出,可达 67.71%至 76.6%,与橄榄油相似[8]。亚油酸(C18:2)含量约为 8.79%至 12.01%,而饱和脂肪酸(主要为棕榈酸和硬脂酸)的总和相对较低[7]。这种高油酸、高不饱和脂肪酸的组成特征,使其油脂具有优异的氧化稳定性和营养健康价值,有助于降低低密度脂蛋白胆固醇,对心血管健康有益[9]。

2.1.2. 碳水化合物

块茎中碳水化合物含量丰富,形式多样。淀粉是主要成分,含量在 14%至 37%之间,其中包含相当比例的抗性淀粉,后者不易被小肠消化,可作为益生元促进肠道健康[2]。此外,块茎还含有 10%至 20%的可溶性糖,如蔗糖、葡萄糖和果糖,为其带来天然的甜味[10]。高含量的膳食纤维(约 8.9 g/100g)也是其重要特征,有助于改善肠道功能。

2.1.3. 蛋白质

块茎蛋白质含量丰富,不同研究给出的范围在 3.87%至 15%之间[11]。这种差异可能与品种、产地及检测方法有关。蛋白质氨基酸组成较为平衡,具有较高的生物价值[11]。

2.1.4. 膳食纤维

油莎豆块茎含有适量的膳食纤维,含量约为 8%至 9%[2]。膳食纤维有助于改善肠道健康,降低心血管疾病风险。

2.1.5. 维生素、矿物质与植物甾醇

油莎草块茎富含多种维生素,特别是维生素 E(生育酚,含量约 0.05%)和维生素 C(约 0.07%),以及 B 族维生素如 B1、B2、B6 等[5]。矿物质方面,块茎富含多种人体必需的矿物质元素,包括钾、磷、镁、钙、锌、铁等[9]。这些矿物质对于维持机体电解质平衡和生理功能至关重要。此外,块茎中还检测到 β -谷甾醇、 δ^5 -燕麦甾醇等植物甾醇,这些成分具有降低胆固醇、抗炎等生理活性[2]。

2.1.6. 天然活性成分

块茎是多种生物活性物质的富集部位。系统性的植化分析表明,其含有高浓度的黄酮类化合物(约 35.55 g/100g)、酚类物质(约 29.23 g/100g)以及生物碱(约 14.14 g/100g)和苷类(约 14.74 g/100g)[5]。具体而言,已鉴定出的活性成分包括槲皮素、杨梅素、荭草苷等黄酮类化合物,以及咖啡酰奎宁酸等酚酸[12]。同时,块茎中也含有皂苷(约 5.00 ppm)、单宁(约 6.00 ppm)等成分[5]。这些物质共同赋予了油莎草块茎显著的抗氧化、抗菌和抗炎潜力[13]。研究证实,其提取物对多种人体病原菌(如金黄色葡萄球菌、大肠杆菌)具有抑制作用,并且具有抗炎、抗菌、抗糖尿病、抗癌及心血管保护等多种药理活性。这些作用与其丰富的活性成分密切相关[14][15]。

2.2. 地上茎叶: 被低估的饲料与活性物质来源

油莎草的地上部分(茎和叶)生物产量巨大,其干物质主要构成为结构性碳水化合物,但也蕴含独特的活性成分。

2.2.1. 主要营养成分

茎叶的粗蛋白含量因生长阶段而异,一般在 5%~15%之间,可作为优质的青贮饲料或干草。其粗纤维含量高,木质素、纤维素和半纤维素是主要成分,这使其在作为反刍动物饲料的同时,也成为制备生物材料(如纳米纤维素)和生物能源的潜在原料。由于其高纤维含量和适中的蛋白质水平,油莎草地上茎叶被视为畜禽的优质饲草。其良好的适口性和营养价值使其在畜牧业中具有广阔的应用前景[16]。

2.2.2. 天然活性物质

已有研究表明油莎草地上部分含有丰富的次级代谢产物。从叶片中已分离出与块茎类似的活性物质,如豆甾醇、酪胺、N-阿魏酰酪胺、杨梅素、槲皮素、荭草苷以及多种脂肪酸酯。一项针对地上茎叶部分残渣的研究显示,通过微波辅助提取可获得富含对香豆酸、阿魏酸和木犀草素的酚类提取物,表现出显著的抗氧化能力[17],这些化合物赋予了茎叶提取物天然的杀虫驱避活性,研究证实其精油对储藏害虫赤拟谷盗具有显著的驱避作用,这解释了油莎草种植区往往虫害较少的现象[12]。

2.3. 须根: 具有药用潜力

油莎草根部的 70%乙醇提取物被证明能剂量依赖性地显著延迟蓖麻油诱导的大鼠腹泻发作时间,并显著减少腹泻次数和发生腹泻的动物数量[18]。该研究的结果显示,200 mg/kg 和 400 mg/kg 剂量的提取物对蓖麻油诱导的腹泻均表现出显著的抑制作用,且疗效与标准止泻药洛哌丁胺(Loperamide)相当[18]。从化学成分分析来看,油莎草根部分提取物中富含生物碱、单宁、黄酮类和碳水化合物等活性成分。其中,生物碱和单宁具有显著的收敛作用,能够收缩肠道黏膜血管,减少渗出液,从而发挥止泻和黏膜保护作用[19]。

研究发现,油莎草须根提取物具有显著的体外抗氧化活性,研究采用了 DPPH 自由基清除能力、ABTS 阳离子自由基清除能力及总抗氧化能力等体外抗氧化模型进行评价,比较不同溶剂提取部位的抗氧化活性发现,正丁醇部位表现出最强的抗氧化活性。具体而言,正丁醇部位清除 DPPH 自由基的 IC₅₀ 值为 0.268 mg/mL,清除 ABTS 阳离子自由基的 IC₅₀ 值低至 0.011 mg/mL,这些数据表明,须根中富含高效的抗氧化活性物质,其活性可能优于或相当于某些天然抗氧化剂。除了自由基清除能力,须根提取物在总抗氧化能力测定中也表现优异[20],除了抗氧化活性,油莎草须根提取物还表现出一定的抑菌活性[20],提示其在天然防腐剂或植物源农药领域具有潜在应用价值。

综上所述,油莎草不仅是一种营养密集型作物,更是一种具有多重经济效益和环境效益的生物资源。从产业角度看,油莎草的全株利用模式符合循环农业和“零废弃”理念[21]。块茎用于榨油、制作植物奶、

面粉和零食；榨油后的饼粕可作为高蛋白饲料或提取活性物质；茎叶加工为饲料或生物质材料；须根则可开发为药用原料。这种多层次、高附加值的综合开发策略，能够最大化油莎草的经济与生态效益，使其成为一种极具潜力的战略性新兴作物[16]。

3. 油莎草全株活性物质的提取技术

油莎草作为一种适应性极强的多功能经济作物，其地下块茎、地上茎叶及须根均富含丰富的活性物质。不同提取技术不仅影响目标成分的得率，更决定了提取物的化学轮廓，从而直接影响其最终的生物活性和应用方向。近年来，随着绿色化学理念的普及和对功能性成分需求的增长，研究重点已从传统的溶剂提取转向更为高效、环保且具选择性的现代提取技术。

3.1. 活性物质的提取技术：绿色化与高效化并行

油莎草全株的活性成分主要包括酚类化合物、萜类、甾体、皂苷、氰苷以及生物活性肽等。不同部位的细胞壁结构和极性差异决定了其提取工艺的选择性。过去，传统的有机溶剂提取(如石油醚、正己烷)因其高效性被广泛应用，但其溶剂残留和环境污染问题逐渐受到关注。因此，近年来研究者们积极探索超临界 CO₂ 萃取(Supercritical CO₂ Extraction, SCCO₂)、酶法辅助提取(Enzyme-assisted Extraction, EAE)、微波辅助提取(Microwave-assisted Extraction, MAE)等绿色技术。

3.1.1. 地下块茎的提取技术

地下块茎是油莎草的主要利用部位，其提取技术研究最为深入。传统的机械压榨结合溶剂抽提是工业化生产的主流，但为提升油脂的特定功能性，SCCO₂ 因其无溶剂残留、温度低、选择性强的优势，成为提取高油酸油脂的首选方法[22]。研究表明，通过调节 CO₂ 的压力和温度，SCCO₂ 能够有效富集油酸(C18:1)和亚油酸(C18:2)，显著提升油脂的营养品质[22]。此外，针对块茎中抗性淀粉和多酚的提取，MAE 显示出优越性，通过 Box-Behnken 设计优化提取条件(80℃、18 min、40%乙醇)，MAE 提取物表现出高得率(2.27%)和显著的总酚含量(136 mg GAE/100g)，其中对香豆酸、阿魏酸等酚酸被证实是其主要的抗氧化活性贡献者[23]。值得注意的是，为了降低能耗并提高产率，超声辅助水酶法(Ultrasound-assisted Hydro-enzymatic Extraction, UAHE)结合 Alcalase 酶解的工艺也被验证为一种高效的提油策略，能够在 55℃、pH 9.0 条件下提取效率达 94.78%，且通过酶解破坏细胞壁结构，可显著提升蛋白质的可溶性和提取率[24]。

3.1.2. 地上茎叶的提取技术

油莎草地上茎叶富含纤维素、半纤维素和木质素，且次级代谢产物主要集中在表皮组织。传统的水提或醇提往往难以高效突破细胞壁。因此，EAE 成为主流。研究指出，使用纤维素酶、果胶酶联合的酶解预处理能够显著破坏茎叶的细胞壁结构，释放出内源性酚类化合物[2]。

超声波辅助提取(Ultrasound-assisted Extraction, UAE)是针对油莎草茎叶细胞壁坚硬性的一项突破性技术。该技术利用超声波在液体中产生的空化效应，产生瞬时高压和高温，物理破坏细胞壁，从而显著提高活性成分的释放率。研究表明，利用 UAE 技术提取油莎草地上茎叶中的总黄酮，不仅能在短时间内获得较高的提取率(如 20~25 min 内)，而且不会引起黄酮结构的显著变化，保持了其生物活性[25]。此外，UAE 技术对设备的要求相对较低，且能耗显著低于传统回流提取，已成为工业化提取的首选预处理技术之一。

MAE 利用微波分子在极性介质中的振动引起的内部加热效应，能够在极短时间内(通常不超过 5~10 min)使细胞壁内压升高并发生破裂[26]。在油莎草茎叶提取研究中，MAE 表现出对酚类和黄酮苷类的高选择性。研究通过响应面法(RSM)优化发现，使用 70%乙醇作为溶剂，配合 80 W 功率的微波处理，可最

大限度地提取出高含量的对香豆酸和阿魏酸等酚酸,并显著提高 DPPH 自由基清除率[25]。此外,针对茎叶残渣的开发,微波辅助提取技术不仅可以从残渣中提取多酚,还能将其转化为具有高含量 α -纤维素(47.2%)的生物质原料,进一步用于生产纳米纤维素材料,这为茎叶的“零废弃”利用提供了新的思路[23]。

值得注意的是,针对油莎草茎叶中黄酮苷的提取,研究发现单独使用物理技术(如 UAE 或 MAE)仍难以达到最高提取率。这是因为黄酮苷大多以苷键结合在细胞壁多糖上,物理破壁不足以切断糖苷键。为此,EAE 成为了关键技术。通过使用纤维素酶、果胶酶等植物细胞壁降解酶,能够降解纤维素和果胶,切断糖苷键,使黄酮苷转化为黄酮苷元,大幅提高提取率。最新的研究采用酶法预处理与超声波或微波联用的方式,即“酶-物理复合提取”,通过在最适 pH 和温度条件下(如 pH 5.0, 50℃)酶解 10~30 min 后,再进行超声或微波处理,能够将总黄酮提取率提升至 1.39%以上,且提取物中黄酮的纯度和生物活性均有显著提升[25]。

除了传统的 UAE 和 MAE 技术外,针对油莎草地上茎叶的提取,近年来还探索了更为先进的动态高压微射流辅助提取技术(Dynamic High Pressure Micro Jet Extraction, DPME) [27]。该技术通过高压射流将溶剂高速喷射进入样品基质,利用射流的机械剪切力和瞬时高温高压效应,使得细胞壁在毫秒级时间尺度内被快速破碎。研究表明,DPME 在提取油莎草总黄酮时,能够在不破坏黄酮骨架结构的前提下,提高得率至 1.46%。此技术在提取中不仅保留了活性成分的完整性,还通过改变提取液的剪切速率和湍流状态,提高了分子间的接触效率,从而克服了传统提取中扩散受限的问题。

3.1.3. 须根的提取技术

须根通常作为废弃物处理,然而其含有高浓度的次生代谢产物。针对须根精油的提取,溶剂自由微波萃取(Solvent-free Microwave Extraction, SFME)技术展现了显著优势。SFME 技术能够在不使用有机溶剂的情况下,产生高比例的含氧化合物和倍半萜,其中精油中含有的倍半萜含量(约 64.6%)显著高于单萜(约 20.68%),这可能是其显著生物活性的关键[28]。针对非挥发性活性成分的提取,正丁醇分配部位的提取物表现出最强的抗氧化活性(IC₅₀ = 0.268 mg/mL),表明该部位富集了高极性的多酚类物质[23]。

综上所述,油莎草全株的活性物质提取技术正从单一的有机溶剂提取向多模态的绿色工艺转变。超临界 CO₂、微波辅助、酶法辅助等技术不仅提高了提取效率,还保留了活性物质的生物活性。

3.2. 提取技术与目标活性成分及后续应用的关联性

值得注意的是,不同提取技术的选择不仅取决于效率与环保性,更直接决定了所得提取物的成分谱、生物活性强度及其最终应用方向。例如,超临界 CO₂ 萃取能选择性富集高油酸油脂和脂溶性成分(如生育酚、植物甾醇),其产物更适合开发高端营养油脂和化妆品基底油;而微波辅助提取与酶法辅助提取则能更高效地释放并保护热敏性及与细胞壁结合的多酚、黄酮类物质(如对香豆酸、槲皮素),这些富集了特定酚类物质的提取物,其抗氧化和抗炎活性更强,是开发功能性食品配料和天然防腐剂的理想原料。同样,针对须根采用溶剂自由微波萃取获得的富含倍半萜的精油,其独特的化学成分是其表现出显著驱虫和抗菌活性的物质基础。因此,提取工艺的优化应与其目标产物的预期药理活性和终端应用紧密结合,实现从“技术驱动”向“应用导向”的转变。

4. 油莎草的药理学特性与临床应用潜力

近年来,随着对其药用价值的深入挖掘,油莎草全株已被证实具有显著的抗氧化、抗炎、抗菌、抗糖尿病、抗癌及保护生殖系统功能等多种生物活性。这些活性主要归因于其富含的黄酮类、生物碱、皂苷、萜类、酚类化合物及高含量的单不饱和脂肪酸(如油酸)。

4.1. 抗氧化与抗炎活性

油莎草块茎和须根提取物均表现出强大的清除自由基能力。研究通过 DPPH、ABTS 和 FRAP 等体外模型证实,其提取物能够显著清除自由基,抑制脂质过氧化[29][30]。这一活性主要归因于其中的对香豆酸、阿魏酸、木犀草素及槲皮素等酚类化合物[23]。此外,黄酮类化合物(如槲皮素)和萜类化合物的协同作用被认为是其抗炎活性的核心机制。活性物质通过抑制 NF- κ B 通路和下调炎症因子(如 TNF- α 、IL-6)的表达,发挥抗炎作用[2][28]。

4.2. 肝脏保护

油莎草提取物的肝脏保护作用是其药用价值的一个重要方向。研究表明,油莎草块茎中的某些活性物质能够抑制肝脏中乙酰胆碱酯酶的活性[31],从而发挥镇静和抗焦虑作用。更为显著的是,其精油和提取物对药物诱导的肝损伤(如对乙酰氨基酚诱导的肝毒性)具有保护作用[28]。体内实验显示,油莎草精油能够显著降低血清转氨酶水平,减轻肝细胞坏死,这可能与其上调抗氧化酶(如 SOD、CAT)活性和抑制脂质过氧化有关[30]。

4.3. 心血管保护

油莎草对心血管的保护作用是其最受关注的健康功效之一。其核心机制在于其富含的油酸。大量流行病学和临床研究已证实,以油酸为主要脂肪酸的膳食模式有助于降低血清总胆固醇(Total Cholesterol, TC)和低密度脂蛋白胆固醇(Low-Density Lipoprotein Cholesterol, LDL-C)水平,同时维持或升高高密度脂蛋白胆固醇(High-Density Lipoprotein Cholesterol, HDL-C)水平[32][33]。此外,油莎草的抗氧化成分(如黄酮类)能够防止 LDL 胆固醇氧化,保护血管内皮,降低心血管疾病风险[29]。在动物实验中,油莎草提取物显著降低 TC 和三酰甘油(TG)水平,升高 HDL 水平,显示出良好的降脂效果[31]。

4.4. 抗糖尿病与代谢调节

针对代谢综合征的干预是油莎草药用价值的另一重要方向。研究显示,油莎草块茎和根部提取物能够显著抑制肠道内的 α -葡萄糖苷酶活性,从而减缓碳水化合物的分解吸收,降低餐后血糖峰值[9]。在动物实验中,油莎草提取物被证实能够改善高脂饮食诱导的大鼠胰岛素抵抗状态,增强胰岛素敏感性[4]。且油莎草的高膳食纤维含量,特别是抗性淀粉,使其成为一种低升糖指数(GI)的食物。这些纤维能够延缓胃排空,减慢葡萄糖的吸收速度,有助于稳定餐后血糖。此外,抗性淀粉作为益生元,能被肠道有益菌(如双歧杆菌、乳酸杆菌)发酵,产生短链脂肪酸,如丁酸盐[34][35]。短链脂肪酸不仅为结肠细胞提供能量,还能调节肠道 pH 值,抑制有害菌生长,修复肠道屏障,调节免疫功能这种作用机制为其在糖尿病及其并发症的预防和辅助治疗中提供了科学依据。

4.5. 抗菌与抑制有害真菌

除了内服药理作用外,油莎草的活性成分在外用领域同样表现突出。其精油中含有的大量倍半萜(如 α -蒎烯)和酚类化合物显示出对多种细菌(如金黄色葡萄球菌、铜绿假单胞菌)和真菌的抑制作用[2][28]。这为其在天然防腐剂和生物农药开发方面提供了科学依据。

4.6. 抗癌与细胞保护

油莎草的抗癌潜力主要来自于其富含的抗氧化剂和生物碱。体外细胞实验表明,油莎草的提取物能够抑制癌细胞的增殖,并诱导其凋亡[36][37]。其抗癌机制可能与其能够清除自由基、诱导细胞周期停滞以及调节凋亡相关蛋白表达有关。虽然目前多数研究仍停留在体外实验阶段,但油莎草作为一种天然抗

癌资源的潜力已引起广泛关注。

4.7. 生殖系统保护

值得注意的是,油莎草根部分提取物(尤其是水提物和乙醇提取物)在保护男性生殖健康方面表现出显著活性。实验研究证实,油莎草根部分提取物能够显著延迟蓖麻油诱导的大鼠腹泻发作时间,减少腹泻次数,其抗腹泻效果与标准药物洛哌丁胺相当[4]。此外,油莎草提取物还被证实能够保护高血糖大鼠的精子形态和睾丸组织结构,改善糖尿病相关的生殖功能障碍[38],其机理可能涉及抗氧化、抗炎以及保护黏膜屏障的多重作用。有研究发现,香烟烟雾可对大鼠睾丸组织结构造成损伤,间接抑制睾丸间质细胞的生长,并削弱其维持抗氧化水平的能力,同时还会破坏血液中生殖激素水平的稳定性,补充高剂量虎坚果油则能够减轻或保护睾丸组织免受此类损伤,有助于维持生殖激素与氧化水平的稳定[39]。

综上所述,油莎草全株(包括地下块茎、地上茎叶及须根)作为一种传统药用植物,蕴含丰富的黄酮类、生物碱、酚类及不饱和脂肪酸等活性成分。其显著的抗氧化、抗炎、抗菌、抗糖尿病、抗癌及生殖系统保护等活性,为其在功能食品、天然药物及健康产品开发中提供了坚实的科学依据。这些药理特性不仅验证了其在民间传统医学中的应用价值,也为现代药理学研究提供了重要的植物资源。

4.8. 提取物活性与提取技术的关联:从化学成分到生物效应的桥梁

油莎草药理活性的强弱和特异性,在很大程度上取决于所采用的提取技术及其获得的化学成分谱。前述章节表明,采用超声-酶法联用技术从茎叶中获得的黄酮苷元提取物,因其更高的生物可利用度,可能在抗氧化和抗炎模型中表现出优于传统水提物的活性。同样,通过超临界 CO₂ 萃取获得的高纯度油莎草油,其心血管保护效应可能不仅源于高油酸,还与其完整保留的天然生育酚和甾醇等协同抗氧化成分有关。这种关联性强调了在报告药理活性时,必须详细说明提取方法和提取物的化学特征,否则不同研究之间的结果难以比较,也阻碍了活性成分的准确定位和作用机制的深入解析。未来研究需有意识地在“特定提取工艺-特征化学成分谱-特定药理活性”三者之间建立明确的构效关系链条。

5. 油莎草的现代多维应用与高值化开发

油莎草,作为一种兼具粮食、油料、饲料及药用价值的多功能植物,在现代生活中的应用已深入渗透到食品工业、饮料研发、医药保健、畜牧饲料及新型生物材料等多个领域。正以其卓越的营养价值、丰富的生物活性成分和广泛的加工适应性,在现代食品、饮料、医药及功能配料等领域展现出巨大的应用潜力。其块茎富含油脂(20%~30%)、优质淀粉(30%~40%)、膳食纤维、蛋白质、矿物质(如钾、镁、磷)及维生素 E 等,构成了其多元化开发的基础[40][41]。

在食品领域,油莎草的创新应用尤为突出。最经典的产品是源自西班牙的植物奶——“欧洽塔”(Horchata de Chufa)。现代食品科学通过优化工艺,如酶解、超高压均质等技术,不仅提升了油莎草乳的稳定性和口感,更强化了其作为无乳糖、无麸质健康饮品的市场定位,契合了全球植物基饮食的浪潮[4]。研究证实,油莎草乳富含益生元(如抗性淀粉和低聚糖),能够促进肠道益生菌增殖,改善肠道健康[42]。

油莎草的含油量高达 20%~30%,其榨取的油脂——油莎草油,因其卓越的脂肪酸组成和高稳定性而备受推崇。油莎草油的油酸(一种单不饱和脂肪酸)含量极高,通常在 65%~75%之间,与高品质的橄榄油相当,而亚油酸(多不饱和脂肪酸)含量适中,饱和脂肪酸含量较低[2][43]。这种“高油酸”特性使其具有优异的抗氧化能力和热稳定性,适合用于烹饪、煎炸和凉拌,不易产生有害物质。多项研究证实,富含单不饱和脂肪酸的膳食有助于降低血液中的“坏胆固醇”(LDL-C)水平,同时维持或提高“好胆固醇”(HDL-C)水平,对预防心血管疾病具有积极作用[43]。现代油脂加工技术,如超临界 CO₂ 萃取和冷榨技术,被广

泛应用于油莎草油的提取,以最大限度地保留其天然的生育酚(维生素 E)、植物甾醇和多酚等生物活性物质[43]。这些伴随物赋予了油莎草油更强的抗氧化性能和额外的健康益处。例如,其中的生育酚含量显著高于许多常见植物油,是天然的抗氧化剂,有助于延缓衰老[43]。因此,油莎草油不仅作为高端烹饪油进入市场,还被用于开发功能性食品、膳食补充剂,甚至作为优质基底油应用于化妆品和护肤品中。

油莎草块茎经干燥、脱脂(或不脱脂)后研磨成的粉末,是无麸质食品市场中极具潜力的新兴原料。随着全球对乳糜泻和麸质不耐受问题的关注度提升,无麸质产品的需求激增。油莎草粉不仅天然无麸质,还富含膳食纤维、抗性淀粉、蛋白质、矿物质(特别是钾、磷、镁)和维生素 E [1]。研究表明,在面包、饼干、蛋糕等产品中以 10%~30%的比例替代小麦粉,能显著提升产品的膳食纤维、矿物质含量,并赋予产品独特的坚果风味和湿润质地,为乳糜泻患者和麸质敏感人群提供了安全且营养丰富的选择[44]。

油莎草块茎中含有约 30%~40%的淀粉,其淀粉颗粒小,糊化温度较高,凝沉性弱,具有独特的理化特性[45]。这些特性使其在食品工业中可作为增稠剂、稳定剂和质构改良剂使用。油莎草淀粉还可以通过改性(如酯化、交联)来优化其性能,应用于生产可降解薄膜、粉丝、粉条等[46]。

在工业与可持续发展领域,油莎草的生物质全利用也展现出巨大的潜力,符合循环经济和可持续发展的理念。油莎草油的理化性质使其成为制备生物柴油的优质原料。其高产油率、非粮属性(可在边际土地种植,不与主粮争地)使其在生物能源领域具有战略优势。研究表明,通过酯交换反应,油莎草油可以高效地转化为符合国际标准的生物柴油,其十六烷值高,冷滤点低,燃烧性能良好[47]。榨油后的油粕仍富含蛋白质和淀粉,可进一步加工为高蛋白动物饲料或用于发酵生产生物乙醇,实现了资源的最大化利用[40]。油莎草植株本身具有良好的抗旱、耐贫瘠特性,可用于边际土地的生态修复与固沙,在中国乌兰布和沙漠等地的种植实践已证实其在防治风蚀方面的生态效益[48]。油莎草的淀粉和纤维素还可作为原料,用于生产生物可降解塑料、环保包装材料以及化妆品中的磨砂颗粒等[1]。

6. 当前研究的局限性与未来产业化挑战

尽管油莎草展现出巨大潜力,但其研究和产业化进程仍面临一系列挑战,正视这些问题是推动其可持续发展的前提。

基础研究与转化应用的脱节:目前多数药理活性研究停留在体外或动物模型阶段,缺乏严格设计的随机对照人体临床试验来验证其健康功效(如降血脂、调节血糖的具体效应量及长期安全性)。活性成分的构效关系、在人体内的代谢途径及作用靶点尚不清晰。

原料生产的标准化与规模化瓶颈:油莎草块茎大小、成分含量受品种、产地和气候影响显著,导致原料品质不均一,给标准化加工带来困难。尽管其耐逆性强,但在边际土地上的高产稳产栽培技术、专用收获机械(如有效分离块茎与泥沙、减少损伤)仍不完善,限制了规模化原料供应[49]。作为外来物种,其在某些地区的生态入侵风险也需要谨慎评估和管理。

加工技术的经济性与产品竞争力:许多先进的绿色提取技术(如超临界 CO₂、动态高压微射流)虽然能提高产品品质,但设备投资和运行成本高昂,可能影响终端产品的价格竞争力。如何平衡工艺的先进性、经济性与规模化生产的可行性,是技术转化面临的核心问题。

市场认知与产业链整合不足:油莎草及其产品对大多数消费者而言仍属小众,市场教育和品牌建设需要大量投入。从种植、采收、加工到销售的全产业链尚未形成高效协同,存在信息不对称和利益分配不均的风险,影响了产业整体效益和抗风险能力[50]。

政策与标准缺失:目前针对油莎草作为新食品原料、药用原料或饲料添加剂的相关法规、质量标准和认证体系尚不健全,这增加了企业进入市场的合规成本和不确定性。

基于现有进展与面临的挑战,未来研究应聚焦于以下更具针对性的方向:

精准育种与栽培管理：利用分子标记辅助选择或基因编辑技术，定向培育高油酸、高活性成分、块茎大小均匀且适宜机械化收获的专用品种。同时，研发适配边际土地的节水节肥栽培模式及土壤微生物调控技术，以稳定并提升原料品质与产量[51]。

活性成分的深度解析与标准化：系统阐明关键活性物质(如特定黄酮苷元、酚酸)的构效关系、体内代谢途径及多靶点作用机制。在此基础上，建立基于特征标志物的原料和提取物质量标准，为产品功效声称提供科学依据。

面向应用的绿色智能加工技术：开发成本效益更高、易于放大的集成化提取与改性技术。例如，将不同提取技术(如酶法预处理耦合膜分离)进行智能组合，实现目标成分的高效、高选择性分离与富集，并探索副产物(如饼粕、茎叶纤维)在生物材料、能源等领域的定向转化技术。

临床营养学验证与产品开发：针对其最具潜力的健康功效(如心血管代谢健康、肠道调节)，开展设计严谨的人体干预研究，获取确切的临床证据。以此驱动开发具有明确功能定位和剂量的标准化终端产品，如特定配方的特膳食品、膳食补充剂或天然药物先导化合物。

全产业链整合与政策支持：推动建立“产学研用”协同创新平台，整合从种植到消费的各环节。呼吁相关部门加快制定油莎草相关产品的法规标准，并将其纳入特色农产品或战略性新兴产业扶持范围，通过政策引导和市场机制，克服产业化初期瓶颈。

综上所述，推动油莎草这一“被低估的超级作物”的产业化发展，是一项需要农学、食品科学、生物技术、工程学及临床医学等多学科协同攻关的系统工程。通过解决上述关键科学问题和技术瓶颈，油莎草有望在保障全球营养安全、促进人类健康及应对环境挑战中发挥更为关键的作用。

7. 结论

油莎草作为兼具悠久历史与新兴价值的作物，具有从传统食材向多学科交叉应用转型的巨大潜力。本文全面阐释了油莎草在营养学、食品科学、医药保健及绿色工业领域的多维价值。核心结论如下：首先，油莎草块茎独特的营养组分(高油酸油脂、抗性淀粉、膳食纤维及生物活性物质)是其高值化利用的基石，使其在植物基乳品、无麸质烘焙、功能油脂及益生元配料等现代食品体系中占据重要地位。其次，其提取物在调节血脂、抗氧化、改善肠道微生态及辅助血糖管理等方面展现出明确的生物活性，为开发功能性食品和植物基保健品提供了坚实的科学依据。再者，油莎草的非粮属性与全株利用潜力——从生物柴油原料、高蛋白饲料到生态修复材料——完美契合了循环经济与可持续发展理念。

参考文献

- [1] Yu, Y., Lu, X., Zhang, T., Zhao, C., Guan, S., Pu, Y., *et al.* (2022) Tiger Nut (*Cyperus esculentus* L.): Nutrition, Processing, Function and Applications. *Foods*, **11**, Article 601. <https://doi.org/10.3390/foods11040601>
- [2] Zhang, S., Li, P., Wei, Z., Cheng, Y., Liu, J., Yang, Y., *et al.* (2022) Cyperus (*Cyperus esculentus* L.): A Review of Its Compositions, Medical Efficacy, Antibacterial Activity and Allelopathic Potentials. *Plants*, **11**, Article 1127. <https://doi.org/10.3390/plants11091127>
- [3] Edo, G.I., Samuel, P.O., Nwachukwu, S.C., Ikpekor, V.O., Promise, O., Oghenigwe, O., *et al.* (2024) A Review on the Biological and Bioactive Components of *Cyperus esculentus* L.: Insight on Food, Health and Nutrition. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, **104**, 8414-8429. <https://doi.org/10.1002/jsfa.13570>
- [4] Novor, S. and Donkor, E.F. (2024) Harnessing the Potential of Tiger Nut (*Cyperus esculentus* L.) for Food and Nutritional Security, Good Health, and Economic Development of Ghana or Africa. A Review. *Australian Journal of Crop Science*, **18**, 416-424. <https://doi.org/10.21475/ajcs.24.18.07.p4074>
- [5] Gi, U., Ekeke, C. and Chibeoso, H.O. (2022) Comparative Phytochemical and Nutritional Analysis *Cyperus esculentus* L. and *Cyperus rotundus* L. (Cyperaceae). *Innovare Journal of Agricultural Sciences*, **10**, 15-19. <https://doi.org/10.22159/ijags.2022.v10i6.46589>
- [6] 房芳, 敬思群, 马泽鑫, 等. 油莎豆蛋白营养评价[J]. 食品科技, 2013, 38(10): 69-73.

- [7] 刘玉兰, 王小宁, 舒垚, 等. 不同产地油莎豆性状及组成分析研究[J]. 中国油脂, 2020, 45(8): 125-129.
- [8] 陈燕云, 平华, 高媛, 等. 黍稷麸皮多糖分离纯化、结构表征及抑菌活性分析[J]. 食品工业科技, 2024, 45(10): 1-7.
- [9] Bamishaiye, E. and Bamishaiye, O. (2011) Tiger Nut: As a Plant, Its Derivatives and Benefits. *African Journal of Food, Agriculture, Nutrition and Development*, **11**, 5157-5170. <https://doi.org/10.4314/ajfand.v11i5.70443>
- [10] Sánchez-Zapata, E., Fernández-López, J. and Angel Pérez-Alvarez, J. (2012) Tiger Nut (*Cyperus esculentus*) Commercialization: Health Aspects, Composition, Properties, and Food Applications. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, **11**, 366-377. <https://doi.org/10.1111/j.1541-4337.2012.00190.x>
- [11] 武逸凡. 油莎豆油提取工艺及不饱和脂肪酸富集分离研究[D]: [硕士学位论文]. 阿拉尔: 塔里木大学, 2023.
- [12] Feng, X., Shan, C., Ma, J., Ma, Y., Li, N., Zhang, D., *et al.* (2025) Main Chemical Components, Activity and Mechanism of Repellence of *Cyperus esculentus* Essential Oil against *Tribolium confusum*. *Molecules*, **30**, Article 631. <https://doi.org/10.3390/molecules30030631>
- [13] Adelakun, S.A., Ojewale, A.O., Jeje, S.O. and Adedotun, O.A. (2022) Histomorphometric and Biochemical Activities of Bioactive Component of *Cyperus esculentus* Tubers Extract on Letrozole-Induced Polycystic Ovarian Syndrome and Cholesterol Homeostasis in Female Sprague-Dawley Rats. *Toxicology Research and Application*, **6**, 1-18. <https://doi.org/10.1177/23978473221109475>
- [14] Prakash, N. and Ragavan, B. (2009) Phytochemical Observation and Antibacterial Activity of *Cyperus esculentus* L. *Ancient Science of Life*, **28**, 16-20.
- [15] Chukwuma, E.R., Obioma, N. and Christopher, O.I. (2010) The Phytochemical Composition and Some Biochemical Effects of Nigerian Tigernut (*Cyperus esculentus* L.) Tuber. *Pakistan Journal of Nutrition*, **9**, 709-715. <https://doi.org/10.3923/pjn.2010.709.715>
- [16] 杨向东, 李子勇. 我国油莎豆产业发展现状、潜力及对策[J]. 中国油料作物学报, 2022, 44(4): 712-717.
- [17] Sabiu, S., Ajani, E.O. and O'Neill, F.H. (2018) Membrane Stabilization and Andro-Spermatogenic Potential of Standardized Fraction of *Cyperus esculentus* L. *Indian Journal of Traditional Knowledge*, **17**, 78-84.
- [18] Majumder, P. (2014) Investigation of Phytochemicals and Anti-Diarrhoeal Potential of an Ignored Grass-*Cyperus esculentus* L. Root. *Indian Journal of Research in Pharmacy and Biotechnology*, **2**, Article 1158.
- [19] Shorinwa, O.A. and Dambani, D.T. (2020) Antidiarrheal Activity of Aqueous Ethanol Extract of *Cyperus esculentus* Tuber in Albino Rats. *Journal of Applied Biology & Biotechnology*, **8**, 47-50.
- [20] 陈菲, 敬思群, 刘根梅, 等. 油莎草须根提取物体外抗氧化活性及抑菌性研究[J]. 韶关学院学报, 2023, 44(3): 7-12.
- [21] 马紫薇, 牛陆, 杨向东, 等. 油莎豆种质资源表型性状遗传多样性分析及综合评价[J]. 草地学报, 2022, 30(8): 2135-2143.
- [22] Zhang, Y. and Sun, S. (2023) Tiger Nut (*Cyperus esculentus* L.) Oil: A Review of Bioactive Compounds, Extraction Technologies, Potential Hazards and Applications. *Food Chemistry: X*, **19**, Article ID: 100868. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2023.100868>
- [23] Pelegrín, C.J., Ramos, M., Jiménez, A. and Garrigós, M.C. (2022) Chemical Composition and Bioactive Antioxidants Obtained by Microwave-Assisted Extraction of *Cyperus esculentus* L. By-Products: A Valorization Approach. *Frontiers in Nutrition*, **9**, Article 944830. <https://doi.org/10.3389/fnut.2022.944830>
- [24] 高芳芳, 田丽萍, 薛琳. 超声波辅助水酶法提取油莎豆油[J]. 农垦医学, 2013, 35(6): 493-497.
- [25] 王赛赛, 杨飞飞, 聂正兴, 等. 超声波双辅助法提取油莎草总黄酮工艺优化[J]. 食品工业, 2014, 35(11): 189-193.
- [26] Hartini Tara, M.R., Harismah, K. and Fuadi, A.M. (2021) Optimization of Batch Extraction of Functional Ingredients from Stevia Leaves with Response Surface Methodology. *Journal of Physics: Conference Series*, **1858**, Article ID: 012092. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1858/1/012092>
- [27] 郭改, 菅田田, 齐蕊, 等. 油莎草总黄酮的动态高压微射流辅助提取及其在曲奇饼干中的应用[J]. 现代食品科技, 2017, 33(3): 184-190, 115.
- [28] Hassanein, H.M., Nazif, N.M., Aboutabl, E.A. and Hammouda, F.M. (2011) Solvent-Free Microwave Extraction and Hepatoprotective Activity of *Cyperus esculentus* L and *Cyperus articulatus* Essential Oils. *Journal of Applied Sciences Research*, **7**, 2455-2461.
- [29] 李超颖, 敬思群. 油莎豆油不同提取方法的比较[J]. 中国酿造, 2014, 33(4): 61-64.
- [30] Eskander, D., Nassar, M., Mohamed, R. and Farrag, A. (2020) Isolation, Characterization of Phytochemical Compounds and Hepatoprotective Activity Evaluation in Rats of Various Extracts from *Cyperus esculentus* L. Tubers. *Egyptian Journal of Chemistry*, **63**, 4867-4873. <https://doi.org/10.21608/ejchem.2020.28752.2627>

- [31] Tamés, R.S., Gesto, M.D.V. and Vieitez, E. (1973) Growth Substances Isolated from Tubers of *Cyperus esculentus* var. *aureus*. *Physiologia Plantarum*, **28**, 195-200. <https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.1973.tb01175.x>
- [32] 耿梦楠. 水酶法提取油莎豆油的研究[J]. 煤炭与化工, 2015, 38(9): 53-55.
- [33] 郭婷婷, 万楚筠, 黄凤洪, 等. 油莎豆主要营养成分及生理功能研究进展[J]. 中国油料作物学报, 2021, 43(6): 1174-1180.
- [34] Wei, Y., Zhang, X., Meng, Y., Wang, Q., Xu, H. and Chen, L. (2022) The Effects of Resistant Starch on Biomarkers of Inflammation and Oxidative Stress: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Nutrition and Cancer*, **74**, 2337-2350. <https://doi.org/10.1080/01635581.2021.2019284>
- [35] Giuberti, G., Gallo, A., Moschini, M. and Masoero, F. (2013) *In Vitro* Production of Short-Chain Fatty Acids from Resistant Starch by Pig Faecal inoculum. *Animal*, **7**, 1446-1453. <https://doi.org/10.1017/s1751731113001092>
- [36] Achoribo, E.S. and Ong, M.T. (2017) Tiger Nut (*Cyperus esculentus*): Source of Natural Anticancer Drug? Brief Review of Existing Literature. *EuroMediterranean Biomedical Journal*, **12**, 91-94. <https://doi.org/10.3269/1970-5492.2017.12.19>
- [37] Abu, L.M. (2024) Tiger Nut (*Cyperus esculentus*) Tuber: A Sustainable Resource for Industrial Starch: A Review. *Communication in Physical Sciences*, **11**, Article ID:180.
- [38] Nwakanma, A.A., Ekong, M., Ngwuben, I.C., Idaguko, C.A. and Elemuo, C.O. (2022) *Cyperus esculentus* L. Protects testis and Sperm Morphology of Hyperglycaemic Rats. *International Journal of Medical and Surgical Sciences*, **9**, 1-16.
- [39] Wang, H., Ye, Y., Xu, J., Xu, X., Zhang, P., Suo, Y., et al. (2025) The Protective Effect of Tiger Nut (*Cyperus esculentus* L.) Oil on a Male Rat Model of Reproductive Disorders Induced by Cigarette Smoke. *Food and Chemical Toxicology*, **197**, Article ID: 115289. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2025.115289>
- [40] He, L., Tan, W., Wei, C., Dai, F. and Tian, J. (2025) Tiger Nut (*Cyperus esculentus* L.): A Systematic Review of Metabolic Regulation, Functional Bioactivities, and Sustainable Food Applications. *Journal of Food Science*, **90**, e70705. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.70705>
- [41] Edo, G.I., Ugbune, U., Ezekiel, G.O., Onoharigho, F.O. and Agbo, J.J. (2023) *Cyperus esculentus* (Tiger Nut): Its Application in Agriculture, Food, Health and Nutrition. A Review. *Vegetos*, **37**, 757-766. <https://doi.org/10.1007/s42535-023-00672-8>
- [42] Abdulrasheed, H.H., Hussaini, S.J., Suleiman, Z.I., Suleiman, S.H., Shehu, F.M. and Olayemi, J.O. (2023) The Nutritional and Health Benefits of Tigernuts (*Cyperus esculentus* L.): A Potential Astronaut Food. *Frontiers*, **3**, 1-5.
- [43] Ezech, O., Gordon, M.H. and Niranjan, K. (2014) Tiger Nut Oil (*Cyperus esculentus* L.): A Review of Its Composition and Physico-Chemical Properties. *European Journal of Lipid Science and Technology*, **116**, 783-794. <https://doi.org/10.1002/ejlt.201300446>
- [44] Oladele, A.K. and Aina, J.O. (2007) Chemical Composition and Functional Properties of Flour Produced from Two Varieties of Tigernut (*Cyperus esculentus*). *African Journal of Biotechnology*, **6**, 2473-2476. <https://doi.org/10.5897/ajb2007.000-2391>
- [45] Akonor, P.T., Tortoe, C., Oduro-Yeboah, C., Saka, E.A. and Ewool, J. (2019) Physicochemical, Microstructural, and Rheological Characterization of Tigernut (*Cyperus esculentus*) Starch. *International Journal of Food Science*, **2019**, Article ID: 3830651. <https://doi.org/10.1155/2019/3830651>
- [46] Liu, Z., Tian, S., Lv, C. and Chen, Z. (2023) Preparation and Physicochemical Properties of *Cyperus esculentus* Starch from Its Tubers Using Ultrasound-Assisted Alkali Method. *BioResources*, **18**, 60-72. <https://doi.org/10.15376/biores.18.1.60-72>
- [47] Ozioma Juliana, A. and Ishmael Egbulefu, A.V. (2015) Comparative Analysis of the Fuel Properties of Ethylester Biodiesels from *Cyperus esculentus*, Sesamum Indicum and Colocynthus Vulgaris Seed Oils. *Journal of Energy and Natural Resources*, **4**, 40-44. <https://doi.org/10.11648/j.jenr.20150403.11>
- [48] 廖贵云, 吴秀芹, 谭锦, 等. WEPS模型在乌兰布和沙漠油莎豆(*Cyperus esculentus*)种植区的应用[J]. 干旱区研究, 2022, 39(5): 1504-1513.
- [49] He, X., Ma, S., Liu, Z., Shang, S. and Wang, D. (2025) Study on Digging Form of Mechanized Harvesting of *Cyperus esculentus* and Optimization Test of Device Parameters. *Scientific Reports*, **15**, Article No. 16583. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-81581-x>
- [50] Palanga, K.K., Bawa, A., Lare, Y.G., Dicko, A., Ayena, J.I.K., Adjacou, D.M., et al. (2025) Ethno-Ecological Knowledge of Tiger Nut (*Cyperus esculentus* L.) across Contrasted Climate Zones: Uses, Diversity, Production System, and Perception of Climate Change in Togo (West Africa). *Journal of Ethnobiology and Ethnomedicine*, **21**, Article No. 87. <https://doi.org/10.1186/s13002-025-00834-9>
- [51] 叶松林, 舒泉, 李思悦, 等. 芽孢杆菌对油莎豆生长及根际土壤理化性质的影响[J]. 地质通报, 2025, 44(10): 1-19.