

# 与物理揉搓处理结合的99%纯杜仲叶胶的酶生化提取法

张学俊<sup>1,2\*</sup>, 季春<sup>3</sup>, 赵春深<sup>3</sup>, 张萌萌<sup>2</sup>, 薛宇辰<sup>2</sup>

<sup>1</sup>贵州大学, 贵州省发酵工程与生物制药重点实验室, 贵州 贵阳

<sup>2</sup>贵州茂花宏达杜仲生物科技有限公司, 贵州 遵义

<sup>3</sup>贵州大学药学院, 贵州 贵阳

收稿日期: 2025年7月8日; 录用日期: 2025年9月13日; 发布日期: 2025年9月23日

## 摘要

“结合了物理揉搓处理的酶生物化学方法”生产杜仲叶胶的技术弥补了生物法耗时长成本高的缺陷。杜仲树叶是杜仲植株含胶器官中体量最大的每年生的可再生的, 用之不竭的资源。生物酶法提胶技术的生产成本仅为树皮和果壳酶法的五分之一。在杜仲叶中杜仲胶仅分布和贮存于叶脉之中, 叶片的绝大部分组织是提取天然药物成分的不含胶的叶肉。由于叶脉和叶肉组织的物理性质差异显著, 叶脉具有韧性而叶肉组织疏松且易粉碎, 经物理揉搓彼此分离, 粉碎的细粉叶肉过筛后与成丝团叶脉分离两部分。除去了叶肉的含胶丝团叶脉的酶解净化工作量减少至叶片提胶的20%~30%, 胶丝的生产成本和生产周期显著下降。重要的是: 原叶片表面的阻隔生物侵蚀植物组的角质层在揉搓过程中, 被物理磨擦破坏, 并从叶肉和叶脉表面剥离下来。暴露在酶解液中的叶片和叶脉破裂截面和消除了角质层的表面与生物酶的接触, 缔合更易发生降解反应, 提高了生物酶对叶脉和叶肉组织的降解销蚀效率, 游离出的叶脉胶丝更加纯净, 达到≥99%高纯度化。

## 关键词

杜仲鲜叶, 机械揉搓, 全生物酶解, 叶脉胶丝团, 高纯度叶胶

## An Enzyme Biochemical Method for Producing 99% Pure *Eucommia* Leaf Gum by Combining Physical Rubbing Treatment

Xuejun Zhang<sup>1,2\*</sup>, Chun Ji<sup>3</sup>, Chunshen Zhao<sup>3</sup>, Mengmeng Zhang<sup>2</sup>, Yuchen Xue<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Guizhou Province Key Laboratory of Fermentation Engineering & Biological Pharmacy, Guizhou University, Guiyang Guizhou

\*通讯作者。

文章引用: 张学俊, 季春, 赵春深, 张萌萌, 薛宇辰. 与物理揉搓处理结合的99%纯杜仲叶胶的酶生化提取法[J]. 林业世界, 2025, 14(4): 498-506. DOI: 10.12677/wjf.2025.144060

<sup>2</sup>Guizhou Maohua Hongda Eucommia Biotechnology Co., Ltd., Zunyi Guizhou

<sup>3</sup>School of Pharmacy, Guizhou University, Guiyang Guizhou

Received: July 8, 2025; accepted: September 13, 2025; published: September 23, 2025

## Abstract

The technology of producing *Eucommia ulmoides* leaf gum by the enzymatic biochemical methods combined physical rubbing treatment overcomes the shortcomings of the biological method, which is time-consuming and costly, such as long processing time and high cost. The leaves of the *Eucommia* tree are the largest annual, renewable and inexhaustible resource among the gel-containing organs of the *Eucommia* plant. The production cost of the bio-enzymatic extraction technology for extracting gums is only one fifth of that of the bark and shell enzymatic extraction method. In the leaves of *Eucommia ulmoides*, the *Eucommia* gum only distributes and stores within the veins of the leaves. The majority of the leaf tissue consists of non-gum-containing mesophyll that is suitable for extracting natural medicinal components. Due to the significant differences in physical properties between the veins and the parenchyma tissue of the leaves, the veins are tough while the parenchyma tissue is loose and easily crushed. Through physical rubbing, they were separated from each other. The crushed fine powder of the parenchyma tissue was then sieved and separated from the filamentous group of the veins. By removing the mesophyll from the gel-containing silk-like leaf veins, the enzymatic purification workload was reduced to 20% to 30% of that required for extracting the gel from the leaves. The production cost and production cycle of the gel fibers have significantly decreased. The important point is: The protective cuticle on the surface of the original leaf, which acts as a barrier against biological erosion of the plant, was physically worn away during the rubbing process and was detached from the surface of the mesophyll and veins. The rupture surfaces of the leaves and veins exposed to the enzymatic solution and the surfaces without the cuticle came into contact with the biological enzymes, facilitate the occurrence of degradation reactions, thereby enhancing the degradation and erosion efficiency of the biological enzymes on the veins and mesophyll tissues. The isolated leaf vein *Eucommia* gum filaments were even purer, reaching a purity of  $\geq 99\%$ .

## Keywords

Fresh *Eucommia* Leaves, Mechanical Rolling, Complete Biodegradation by Enzymes, Leaf Vein Gel Fiber Clusters, High-Purity Leaf Gum

Copyright © 2025 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

酶生物化学技术属于绿色生物化工，将化工的“先污染后治理”变成“源头根治”，实现可持续发展。酶生化技术最大的缺点是：效率低耗时长，产品难达到高纯度。其缘由是酶对底物生化反应的专一性和接触缔合。所以，对底物的分类降解是提高反应效率的最适途径。为了获得无变性的原生态长丝生物基杜仲胶，保持杜仲胶原有的化学反应性，最佳的天然生物基杜仲胶的提取方法当属绿色无污染的生物化学方法。

杜仲树的杜仲胶仅存在于植株的具生理活性的五大器官中，最主要的是树皮、果实和树叶。含胶量

分别为：干树皮为 11%~18%；含仁干果为 12%；干叶仅为 2%~5%；老细枝干皮含 10% [1]。虽然杜仲叶的含胶率比干树皮和干果实的低很多，但是杜仲树天然生理特点是：结果量少，却枝繁叶茂，树叶的物理量大，基数大则总含胶量也大。

中医药传统都是以树皮入药，但现代科学研究表明，杜仲叶(*Eucommia Folium*)与杜仲皮有相同的有效成分和药理作用[2]，《中华人民共和国药典》2005 年版(一部)开始收载杜仲叶，并于 2023 年 11 月 9 日，杜仲叶被列入“按照传统既是食品又是中药材的物质”(药食同源)。杜仲叶属可再生资源，产量巨大，若对其进行加工利用，既可弥补传统的药源不足，还可以把天然杜仲叶应用到各个领域，尤其是食品加工领域，利用杜仲叶多种生物活性，将其作为保健品原料和添加剂，开发出营养价值较高的功能性产品[3]。但原料成本一直是杜仲产业发展的限制因素[4]。

树叶是由三部分：表面层、叶肉和叶脉组成的复杂组织，生物酶最大的降解植物组织的特点就是它的专一性，只降解特定的底物或这类底物聚合物中特定类型的聚合键[5][6]。所以酶解之前将它们彼此分来进行不同组织的单独生物酶降解是提高酶解效率途径之一。

叶片杜仲胶集中生长贮存于叶脉中，而叶片的主要组织( $\geq 70\%$ )为不含胶的叶肉，且含有丰富的天然药物成分。本文通过物理揉搓分离叶肉得到高含胶率的叶脉丝团，由于叶肉和叶脉的植物组织不同需分别进行提杜仲胶和提天然药物的生化酶降解，从而显著提升了两种天然产物的生产效率。脉络胶的酶解提取因此减少了 70% 多的除去植物组织的净化工作量，从而降低了杜仲胶的生产成本，并获得专门提取药物成分的叶肉副产品。树皮和果皮的组织结构复杂，胶丝被木栓形成层和栓内层组成的周皮以及里层的韧皮部包裹难以降解除净，并且在这些组织中沉积有难以酶解的木质素，杜仲胶不易纯化[7][8]。一年生的树叶中的杜仲胶含胶细胞只存在于叶脉中。虽然叶脉具有树皮的功能和有韧皮部及木栓形成层，但无木质化。无木质化的叶脉韧皮和木栓层易被高活性的脂肪酶、蛋白酶等生物酶分解于酶解液中。所以仅用四种酶：脂肪酶、果胶酶、蛋白酶和纤维素酶即能完全水解除净叶脉组织，获得 99% 以上纯度的原生态絮状杜仲胶丝，原生态的丝状杜仲胶保持了其原有的化学反应改性活性[9][10]，生产成本仅为树皮和果壳提胶的五分之一，使树叶天然资源得到充分利用。

不使用化学药剂的全生物酶解法提取杜仲植物器官中的天然产物：药物成分和杜仲胶。植物组织被彻底降解消蚀，提取的杜仲天然产物药物成分齐全，种类繁多，药物成分的溶出量高[11][12]。所以，无污染的与环境友好的绿色环保是本方法的另一大特点：在获取天然药物成分的同时净化了与之共存的固态杜仲胶。杜仲胶是我国的基础生物基材料，也是我国重要国防物资。

采用类似茶叶的机械揉搓法除去角质层，经专门制作的揉搓分离机分离叶脉和叶肉[13]，是无污染不改变天然产物物化性质的物理方法。杜仲鲜叶富含水分，对其及时揉搓，揉是使杜仲鲜叶发生深度折叠、卷曲成条相互接触，刚性的表面角质层发生破裂；搓可使叶片细胞破碎，叶肉表面和叶脉表面的角质层被破碎。杜仲叶片经过揉搓使叶面积缩小卷曲，破坏了叶片的组织结构，除去了角质层，断裂截面暴露出可被生物酶接触降解的植物组织。

## 2. 叶胶的特点

1) 叶胶高分子聚合度在所有含胶器官中分子量最低，数均分子量一般为 10 万~30 万。最贴近三叶胶分子量，加工性更好、更容易与三叶胶混合，能明显改善和提高三叶胶性能。

2) 叶胶的提取工艺简单，专用装备“自卸式杜仲胶酶解净化机”(见图 7)中杜仲叶被直接酶解生产高纯精胶，工序步骤少，生产成本低廉，仅为树皮和果壳的五分之一。获得纯度  $\geq 99\%$  的高纯精胶。

3) 杜仲树是落叶乔木，树叶是每年一生的再生资源，必须充分利用。虽然杜仲叶含胶率低(2%~5%)，但杜仲树冠大树叶茂密，物理量大，杜仲胶总量高，且生产无废弃物排放。

4) 叶胶集中生长贮存于叶脉中, 70%~80%的叶片组织是不含胶的叶肉。分离了叶肉获得 15%~20%的附着少量叶肉的富胶叶脉, 减少了 85%~80%的净化工作量。

5) 按国家林业局林业科学院测算, 每亩杜仲林地产杜仲叶 800 kg~900 kg, 是产量高且用之不竭可再生资源, 杜仲林林间管理简单, 生产成本低廉, 结合林下种植和家禽饲养, 是一项经济收入十分稳定的乡村振兴长期项目。

### 3. 生产工艺过程

杜仲叶片有三部分组织组成, 而生物酶的最大特点就是: 使用量少, 降解底物对象专一; 具有反复降解底物的高效性。三部分组织的生理化学和生理物理性质和功能的不同, 组织成分存在明显差异, 酶解的用酶种类顺序不同, 酶的种类也不同, 需要分别进行酶解处理。所以为了省时、省酶、减少污染, 胶的提取采用两步进行的方法: 第一步揉搓叶片分离叶肉和叶脉; 第二步对叶肉和叶脉分别单独降解。

#### 3.1. 杜仲叶片的揉和搓

杜仲叶胶都集中在树叶的脉络韧皮组织中。提取过程中, 除了生物酶水解释蚀包裹叶胶的叶脉组织外, 大部分酶解工作都在销蚀树叶高占比的叶肉, 叶肉组织占到了叶片近 85% (W/W)的量, 是杜仲叶胶净化的最大酶解负担。

就叶脉和叶肉的物理性质而言。叶肉组织的结构疏松、强度低、韧性差、易断裂、易破碎。但叶肉碎片碎末中含有大量绿原酸、桃叶珊瑚苷、京尼平苷和京尼平苷酸, 以及最突出的黄酮类化学成分, 特别是其中具高抗氧化性的槲皮素, 其抗氧化能力是维生素 E 的 50 倍, 维生素 C 的 20 倍。这些化学成分是可替代抗生素的天然药物。相对于三叶胶杜仲胶是硬性天然橡胶, 具有高聚合度、耐磨、抗冲击、抗撕裂、高韧性的天性聚合物, 可弯曲、折叠、耐机械揉搓。所以机械揉搓方法正是利用了叶肉和叶脉胶丝两者物理性质的显著差异, 赋予这两种物质不同的揉搓效果: 叶肉被粉碎成粉、杜仲胶丝则纠结成团, 从而达到彼此分离的目的。

揉和搓的作用: 机器揉搓杜仲叶片获得占叶片总量 70%~80%的叶肉碎片碎末, 是提取药物成分的原料, 除去不含胶叶片组织剩下仅占叶片总重的 20%~15%的杜仲叶脉粗胶丝团, 含胶率由原来的 2%~5%提高到 8%~15%, 与树皮 8%~12%的含胶率相当, 酶解净化叶片非含胶植物组织提胶的工作量大为下降, 显著提高了杜仲胶的单位时间产量。

杜仲叶片的揉和搓的机械作用, 最主要的是叶片间的磨擦破坏粉碎叶肉和叶脉表面的角质层。

粉碎叶肉: 破裂粉碎的叶肉与高韧性叶脉丝分离, 裸露出网状叶脉组织, 后续的揉搓力施加在叶脉组织上, 剥落了叶脉表层的角质层(见图 1 和图 2), 叶脉组织的酶解效率急剧增高, 加速叶脉中高纯度杜仲胶的净化提取。



Figure 1. Fragmented and crushed fragments of *Eucommia* leaves  
图 1. 揉搓的杜仲叶肉碎片碎末



**Figure 2.** The rolled-up Gun Filament of *Eucommia* leaves veins  
**图 2.** 揉搓的杜仲叶脉胶丝团

剥离表面角质层：揉搓方法无法除尽非胶组织，为获得 99 以上高纯杜仲胶，须对揉搓粗胶胶丝进行深度酶解，销蚀除尽所有非胶植物组织，叶片组织表面的防外来微生物侵害和控制叶面水分蒸腾的角质层是植物地上器官(如茎、叶等)表面的一层脂肪性物质保护层，由角质或与蜡质混合组成，阻碍了微生物及生物酶对底物接触降解。不破坏表面角质层，生物酶就无法降解和销蚀残余的非胶组织。

揉搓过程：鲜青叶揉搓后颜色为深褐色，而陈干叶则仍保持绿色。这就说明鲜青叶的角质层容易被揉搓破坏，绿色的叶肉暴露在空气中发生了氧化，桃叶珊瑚苷等药物成分被氧化成了深褐色。而陈干叶表层的角质层韧性结实抗压，无法揉搓破坏，仍具有光泽且完好地保护了叶肉免受外界的氧化。同样，揉搓的鲜叶叶脉丝团也发生了颜色的改变(见图 1 和图 2)。

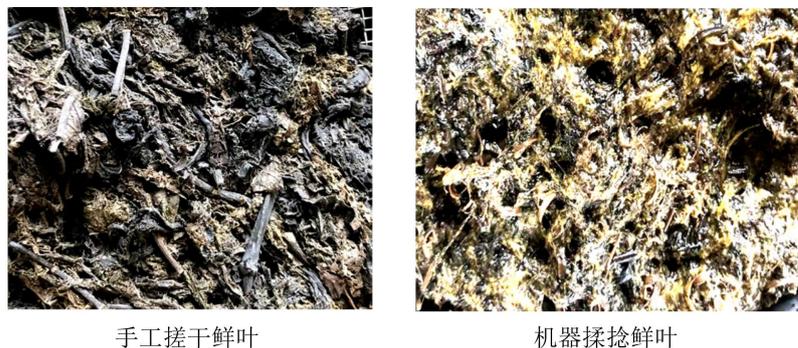
同样因为角质层的原因，鲜青叶叶脉粗胶的酶解除渣净化率比陈干叶叶脉粗胶高且快、容易。即使经水泡陈干叶揉搓杜仲粗胶很难酶解除尽植物组织渣滓。不能生产出纯度达 99% 的杜仲精胶。

### 3.2. 叶脉胶丝团的单独酶解

生物材料的提取采用生物化学方法，提取的生物材料才能确保其生物基的本质稳定不变。酶是一种绿色、高效、低耗能的无毒、无害的催化剂，用于植物天然产物提取已有 80 多年历史，1971 年第一届国际酶工程会议上将酶生化技术命名为“酶工程(Enzyme engineering)”。酶工程提取天然产物特点是：植物组织被酶降解释放出天然产物的高效无污染的过程。与无法控制的生物发酵技术(日本大阪大学采用白腐霉发酵技术提取杜仲胶)相比，酶工程可进行机械工业化大规模生产，机械强力辅助提高效率，缩短生产周期。

实验证实：以杜仲鲜叶(春、夏、秋季鲜叶经过揉捻机揉捻)和杜仲干叶(9 月份陈干老叶(未经揉捻))为对照，比较生物酶的降解效果。

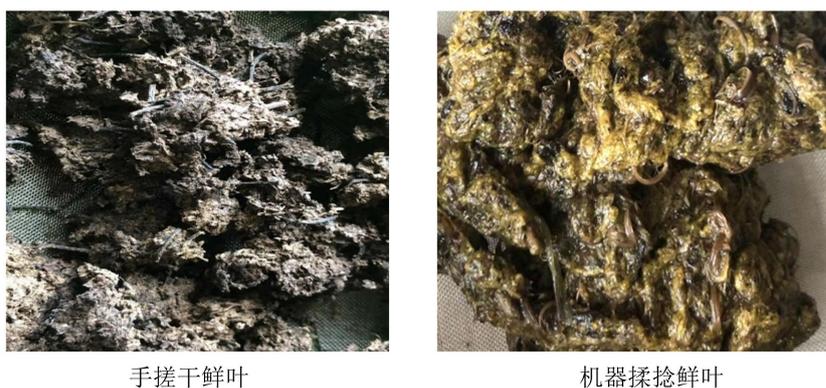
图 3 显示，仅经脂肪酶、果胶酶两种生物酶降解后，干鲜叶和机器揉搓鲜叶的降解效果存在明显的差距。原因就是：无论季节采摘的都是鲜叶，经过揉茶机揉捻挤压、磨擦后，鲜叶表层的角质层遭到了严重的破坏，叶肉失去了角质层的保护变成了深褐色，且叶肉组织可与生物酶接触发生生物化学的降解，销蚀在酶解液中。其中包括叶柄和叶脉组织表层角质结构破裂脱落、植物细胞破损，内部组织外露，遭遇生物酶接触、降解，叶脉中的黄色杜仲胶被游离出来。而手工揉搓干鲜叶由于完好的角质层的保护和阻隔，生物酶无法渗入到叶片内部，叶肉组织和叶脉组织没有明显的降解销蚀。含胶量高的叶柄组织完好地存在，杜仲胶丝仍被这些组织包裹无法游离出来，图中的手搓干鲜叶照片中观察不到杜仲胶的存在。



**Figure 3.** Comparison of the fresh leaves after hand-drying and machine-rolling, after being subjected to enzymatic degradation by lipase and pectinase

**图 3.** 手搓干鲜叶和机器揉捻茶叶经脂肪酶、果胶酶生物酶降解后的对照

这一现象经过酸性蛋白酶和纤维素酶的深度降解，表现得更为明显(见下面图 4)。



**Figure 4.** *Eucommia* gum after degradation by acid protease, cellulase, and pectinase following lipase and cellulase

**图 4.** 继脂肪酶果胶酶后酸性蛋白酶和纤维素酶降解后的杜仲胶

经过脂肪酶、果胶酶、酸性蛋白酶，和纤维素酶降解，仅仅三天的依次降解就可以得到如图 5 所示的杜仲叶纯胶，当使用我们设计并制作的高效的专用自卸式杜仲胶酶解纯化机专用装备(见图 7)，这不仅效率提高、产量提高、净化纯度进一步提升。



**Figure 5.** The surface-active agent from natural soap powder cleanses and separates the yellow *Eucommia* leaves residue after the separation process

**图 5.** 天然皂粉表面活性剂清洗分离除渣后的黄色杜仲叶胶

四种特定生物酶的降解，机器揉搓叶中的杜仲胶完全被游离出来。而人工揉搓干鲜叶仍保留着角质层在叶片表面，角质层的阻隔作用保护了叶片免受生物酶的外界侵蚀，阻挡了叶片组织的降解和销蚀，所以在图 4 中观察不到杜仲胶丝。这一结果确证了揉搓破坏叶片表面角质层的关键性和重要性，以及必要性。

生物酶的降解使叶片非胶植物组织不再依附在杜仲胶上，但是长丝杜仲胶在酶解液中与降解渣滓纠缠，裹挟植物渣滓在纠结的胶丝团中。只有在表面活性剂的帮助下疏水的杜仲胶束才能舒展散开，解除对植物渣滓的束缚。

天然皂粉是由植物油脂——脂肪酸  $C_{17}H_{35}COOCH_2$  经皂化生成皂粉表面活性剂[14]。植物油脂脂肪酸具有长链的不饱和烷烃链，碳链中含有碳碳双键，与杜仲胶聚异戊二烯聚合物具有高度的相似性，相似相容的物理化学经典原则指明：异戊二烯杜仲胶与脂肪酸具有相似的结构，彼此间的高度亲密结合性，杜仲胶得以在水溶液中自由舒展和分散。裹挟在其中植物渣滓不再受长丝胶团的束缚而分散沉降在清洗液底部，分散舒展的杜仲胶得以净化(见图 5 机器揉搓叶)。

皂粉活性剂分离植物渣滓是有条件的。那就是被分离的植物渣滓必须被生物酶降解剥离，脱离与杜仲胶组织附着，是游离的渣滓。图 5 中机器揉搓鲜叶的酶解销蚀渣滓满足这一条件而被表面活性剂淘洗净化，而手搓干鲜叶由于角质层的阻碍不能被生物酶降解剥离，仍旧依附在杜仲胶上，故表面活性剂清洗过的杜仲胶中如图 5 和图 6 手搓干鲜叶照片所示，仍包裹有大量的深褐色的不能分离的杜仲叶碎片细末。

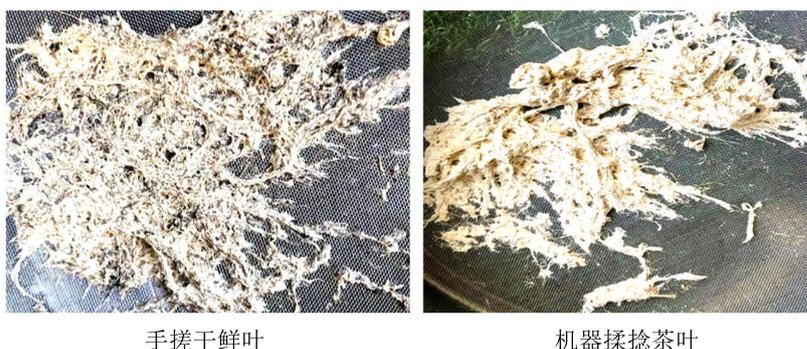


Figure 6. Dried extracts of *Eucommia* leaves after being washed in water  
图 6. 天漂洗后晾干杜仲叶胶

经多次清水振荡淘洗，于通风处晾干得到图 6 中无水杜仲胶。从照片中不难发现，手搓干鲜叶的酶降解销蚀叶肉和叶脉组织杂质的效果远不及机器揉捻鲜叶的酶降解销蚀除叶肉和叶脉植物组织杂质的效果。再次证明了机器揉搓叶片对提取高纯杜仲胶的意义是重要的，不可缺少的。

### 3.3. 揉搓鲜叶的工业化生产

根据叶片表面角质层的生化、生理性质得知，在水分含量高的嫩叶表面的角质层有两个特点：1) 薄，2) 易破裂。这也正是机器揉捻杜仲鲜叶的特点，所以用揉搓鲜叶为酶解原料能快速、高效、高纯度地分离其中的杜仲胶。

采摘的高含水杜仲鲜叶应该及时进行机器揉搓。生产实践的经验证实，未经晾干的杜仲叶在机器揉搓过程中，由于叶肉组织质坚易碎，在高压的揉搓条件下发生明显揉搓成碎片碎末与叶脉分离。生产实践说明，叶肉的碎片碎末化过程无需烘干叶片，即使是刚采下的鲜叶同样可以经过揉搓生产碎片碎末粉，并且揉搓粉碎叶肉提高了叶脉胶丝团的胶含量。

然而，杜仲叶采摘的基本上都是老叶，且采摘集中，大量的老鲜叶不可能全部在短时间内揉搓完。风干老叶表面的特点是：角质层坚韧，抗折跌，不易被揉搓破坏。所以在揉搓干叶之前必须用清水长时间浸没杜仲叶，使之浸水泡发，水分大量渗入叶片中，角质层与叶肉之间出现不同程度的胀软，且饱含水分在机器挤压揉搓时易发生脱落和破裂。

揉搓机：在机器揉搓破碎叶肉，破坏叶脉组织时。若没有专用的杜仲叶揉搓机，可以采用 75 型茶叶揉捻机替代，85 型茶叶揉捻机处理量大，不同是，揉搓叶片时要随时压紧揉搓料仓桶盖，使杜仲叶紧贴着揉搓底盘，增大杜仲叶在地盘上摩擦力，增强叶肉的破碎作用。

酶解纯化机：这是没有替代机器的专用杜仲植物组织酶解纯化机，下图 7 为自卸式杜仲酶解净化机及酶解杜仲叶叶胶。这种专用的杜仲胶净化机具有高效的生物酶降解销蚀杜仲胶丝团中残余的叶肉和叶脉组织的功能，且处理量大，胶丝团在锥形的酶解罐中随着降解的不断深入，胶丝就会越来越集中，相互间在酶解过程的彼此搓动会加快酶解效果的进程，促进酶解效率的提高。因其具有洗衣机的揉搓洗涤和漂洗功能，在天然皂粉表面活性剂的辅助作用下，可获得比实验室漂洗效果更佳的高纯度杜仲精胶(见图 7 的右边照片)。



Figure 7. Self-discharging *Eucommia* enzyme hydrolysis purification machine and the extracted leaf gum  
图 7. 自卸式杜仲酶解净化机及提取的叶胶

#### 4. 结论

树皮和果壳的酶降解植物组织提取杜仲胶需经六种生物酶降解植物组织，而树叶仅仅需四种酶就可获得 99%以上的高纯杜仲叶精胶，见下图检测证书。树皮和果壳的组织复杂、酶降解组织难度大，消耗酶类的品种多，消耗需求量大成本高，纯度难提高；而树叶含胶脉络的新生组织种类少、量少，组成简单，易于酶降解销蚀，易纯化除尽组织残渣获得超过 99%的叶精胶，生产成本低廉。

此外，生物酶解植物组织的作用，是将各种聚合物组织单体之间的化合键断开，降解为聚合物的单体分子于酶解液中，这个过程只是解除了单体糖残基之间的聚合键，却并没有损害和降解的单糖分子，只是还原成了聚合前的各种游离单糖分子。在植物中最多的组织是纤维素，是植物细胞壁的主要成分。纤维素是自然界中分布最广、含量最多的一种多糖，占植物界碳含量的 50%以上。一般木材中，纤维素占 40%~50%，还有 10%~30%的半纤维素。植物中由单糖经聚合酶聚合成各种大分子物质还有：淀粉、果胶和多糖。所以，生物酶降解植物组织提取杜仲天然产物最大副产品就是溶解于水中的葡萄糖和各种单糖。天然葡萄糖等单糖是一种应用广泛的回收的生物能源材料。

## 基金项目

十三五国家重点研发计划:橡胶用和药用杜仲定向培育与高效利用关键技术研究(2017YFD0600702);  
贵阳市科技计划项目[2011102]1-09号;黔科合SY字[2009]3096号。

## 参考文献

- [1] Du, H.Y., Du, L.Y., Fu, J.M., *et al.* (2006) Analysis of the Differences in Gel Content in Different Organs of *Eucommia ulmoides* and Their Correlations. *Journal of Central South Forestry University*, **26**, 1-4.
- [2] Hirata, T., Kobayashi, T., Wada, A., *et al.* (2011) Anti-Obesity Compounds in Green Leaves of *Eucommia ulmoides*. *Bioorganic & Medicinal Chemistry Letters*, **21**, 1786-1791. <https://doi.org/10.1016/j.bmcl.2011.01.060>
- [3] 吴红艳, 彭呈军, 邓后勤. 杜仲叶化学成分研究进展[J]. 食品工业科技, 2019, 40(17): 360-364.
- [4] 康向阳. 杜仲产业化进程中的瓶颈问题及其解决对策[J]. 北京林业大学学报, 2025, 47(3): 1-6.
- [5] 张学俊, 张萌萌, 苏晓兰. 原生态杜仲胶的生物提取意义[J]. 中国橡胶, 2015, 31(5): 41-46.
- [6] 刘重阳, 赵德刚. 酶解法提取杜仲胶工艺的优化[J]. 经济林研究, 2023, 41(4): 263-272.
- [7] 任顺强, 王司晨, 侯世航, 等. 杜仲胶高效提取过程动力学和热力学研究[J/OL]. 林产化学与工业: 1-5. <https://doi.org/10.20195/j.issn.0253-2417.2024178>, 2025-06-18.
- [8] 全熙宇. 杜仲叶和杜仲皮三种成分的提取分离研究[D]: [硕士学位论文]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2020.
- [9] 韩志英. 杜仲胶的提取、改性及功能性研究[D]: [博士学位论文]. 上海: 华东师范大学, 2024.
- [10] 王东慧. 杜仲胶的提取、老化动力学及防腐应用研究[D]: [硕士学位论文]. 吉首: 吉首大学, 2023.
- [11] 谢宇峰. 利用工程酿酒酵母发酵杜仲叶制胶工艺的研究[D]: [硕士学位论文]. 贵阳: 贵州大学, 2022.
- [12] 郑瑞杰. 微生物发酵在杜仲叶胶提取中作用的研究[D]: [硕士学位论文]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2006.
- [13] 张学俊. 一种杜仲叶片揉搓分离机[P]. 中国, ZL202223032617.0. 2023-01-18.
- [14] 贺扬洁. 酶解超声-表面活性剂水分分散法制备原生态杜仲精胶[D]: [硕士学位论文]. 贵阳: 贵州大学, 2020.