

亚麻纤维脱胶技术及在复合材料领域的应用与研究进展

张弛^{1,2}, 孙养存^{1,2}, 吕雨泽^{1,2}, 尹紫良^{1,2}, 葛菁萍^{1,2*}

(1. 黑龙江大学农业微生物技术教育部工程研究中心, 黑龙江哈尔滨

150500; 2. 微生物黑龙江省高校重点实验室/黑龙江大学生命科学学院, 黑龙江哈尔滨 150080)

摘要 亚麻(*Linum usitatissimum* L.)是一种古老的作物,在人类历史上扮演着重要的角色。为了研究亚麻纤维作为可再生材料在生产生活中的应用,综述了亚麻纤维的生物学特性、亚麻纤维脱胶方法与表面改良技术的最新研究进展及其在复合材料领域中的应用,探讨了亚麻纤维的应用前景,旨在为亚麻相关的研究提供理论基础。

关键词 亚麻;亚麻纤维;亚麻脱胶;复合材料

中图分类号 TB 332 **文献标识码** A

文章编号 0517-6611(2022)04-0001-04

doi:10.3969/j.issn.0517-6611.2022.04.001



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

Flax Fiber Degumming Technology and Flax Composite Materials: Application and Research Progress

ZHANG Chi^{1,2}, SUN Yang-cun^{1,2}, LÜ Yu-ze^{1,2} et al (1. Agricultural Microorganisms Technology Education Engineering Research Center, Heilongjiang University, Harbin, Heilongjiang 150500; 2. Key Laboratory of Microbiology of Heilongjiang Province, Life Science College, Heilongjiang University, Harbin, Heilongjiang 150080)

Abstract Flax is an ancient crop that has played an important role throughout human history. To study the application of flax fiber as a renewable material in production and life, the biological properties of flax fiber, the latest research progress of flax fiber degumming methods and surface improvement techniques and their applications in the field of composite materials are reviewed, and the application prospect of flax fiber is discussed in order to provide theoretical basis for the related research of flax.

Key words Flax; Flax fiber; Flax degumming; Composite materials

亚麻(*Linum usitatissimum* L.)是一种纤维植物,其茎高达140 cm左右,叶片呈灰绿色,叶长20~40 mm,宽约3 mm^[1]。亚麻纤维作为天然植物纤维之一,由于其具有良好的性能品质,在纺织、材料、食品和医疗领域得到了广泛的应用^[2-3]。自农业开始以来,人们为了获得具有更高特性的植物,根据它们是否符合人们的需求而进行选择^[4];然而,高质量的亚麻纤维因其是纺织加工中重要的纤维作物而备受关注。亚麻植物中含有大量的纤维素、少量的木质素、半纤维素和果胶等物质,它们包埋在细胞内外^[5-7]。

我国是全球第二大亚麻种植生产区。随着人们生活水平的提高与亚麻纤维需求量的日益上升,为了得到高质量的纤维,改进亚麻纤维生产工艺的技术革新迫在眉睫^[8]。目前国内外亚麻纤维的工业化生产中主要通过生物法脱胶、酶法脱胶以及理化法脱胶等技术脱胶,这些方法近年来都是人们研究的热点^[9-11]。现如今,随着环境恶化的不断加剧以及人们的环保意识的提升,亚麻纤维作为增强复合材料已逐渐走进人们的生活,其作为环境友好型材料逐步取代玻璃纤维等材料^[12]。同时,亚麻纤维因其生物降解性良好、热稳定性高和成本低而受到欢迎^[13]。由此可见,亚麻纤维作为新型复合材料前景可观,同时,新技术的不断出现,对高品质亚麻纤维

的开发也是至关重要的。

1 亚麻纤维概述

亚麻纤维是一种纤维素聚合物,主要位于麻茎的韧皮部,与棉花相比,亚麻纤维的结构结晶度更高,因此更坚固、更硬、更易起皱。麻茎从外向内依次由表皮、韧皮部、木质部,以及中间空隙组成,纤维与纤维之间主要由果胶连接在一起^[14-16]。人们想从亚麻中获取大量的高质纤维,必须将纤维束与周围组织之间的胶质连接进行断裂^[17-18]。亚麻纤维作为一种天然纤维,已经被人类广泛应用,并一直持续到今天。在所有天然纤维中,亚麻纤维的比模量仅次于苧麻纤维。因此,亚麻纤维在众多纤维中展现出较高的力学性能和经济性^[19-20]。

2 亚麻脱胶生产现状

亚麻纤维制备的一个重要程序就是脱胶工艺,脱胶是纤维生产过程中一个关键环节,它直接影响纤维的产量和品质^[21]。换言之,脱胶是连接亚麻种植与纺织加工的桥梁,是亚麻进入大众视野的重要步骤^[22]。过去经常采用传统的温水沤麻和雨露沤麻,因传统技术容易受到气候因素的影响,所以难以有效控制,最终导致脱胶时间长、产量低、质量不稳定和环境污染等问题,严重制约着亚麻产业的发展^[23]。目前生产上普遍采用生物法脱胶、酶法脱胶、物理和化学法脱胶等技术与传统技术相结合的方法,均利用天然微生物、脱胶酶和来自外界的理化作用对亚麻中的果胶、半纤维素和木质素等物质进行降解,从而达到脱胶的目的(图1)。

2.1 生物法脱胶 为了解决在制取亚麻纤维过程中存在的问题,国内外研究者首先从脱胶微生物入手,广泛地开展了“亚麻加菌脱胶方法”的研究。该方法是利用具有能够产生聚合物降解酶的微生物,去除亚麻纤维周围的非纤维素等物

基金项目 国家自然科学基金面上项目“乙酸溢流代谢与群体感应的协同效应对副干酪乳杆菌 HD1.7 种群稳定性影响机制的探究”(32071519);黑龙江省自然科学基金重点项目“乙酸代谢与副干酪乳杆菌群体感应互作探究及对细菌素产生的影响”(ZD2020C008);黑龙江省现代农业产业体系协同创新推广体系麻类(工业)项目;黑龙江大学研究生创新科研项目(YJSCX2020-205HLJU)。

作者简介 张弛(1996—),男,黑龙江鹤岗人,硕士,从事微生物资源挖掘与利用研究。*通信作者,教授,博士,从事微生物资源挖掘与利用研究。

收稿日期 2021-05-20

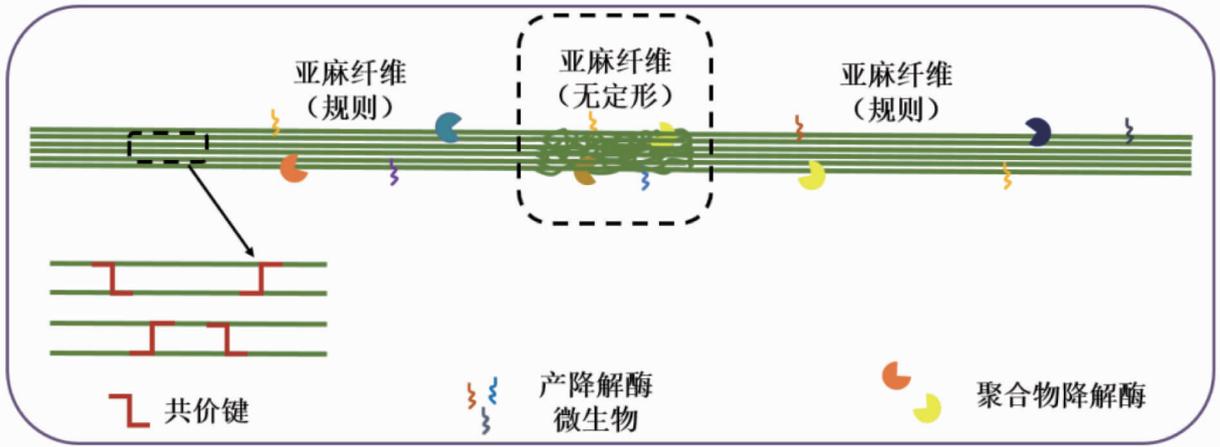


图1 微生物在亚麻原茎中的作用机理

Fig.1 Mechanism of action of microorganism in the original stem of flax

质。早在20世纪初期,为了进一步改善亚麻纤维质量,解决传统脱胶工艺缺陷,人们对亚麻脱胶工艺进行了研究。微生物脱胶的作用过程是微生物生长、微生物代谢和酶降解的循环过程。有趣的是,微生物消耗部分果胶水解物作为代谢活性的碳源,因此防止水解产物(低聚糖或其他低分子糖)对脱胶酶促反应的反馈抑制,并促进果胶的彻底去除,最终提高亚麻纤维生物脱胶的效率^[24-26]。微生物脱胶的一个重要因素是获得具有去除亚麻胶质能力的菌株。包括许多无纤维素分解活性的果胶降解菌株,如枯草芽孢杆菌属、短小芽孢杆菌 DKS1、蜡样芽孢杆菌和放线菌属等^[27-31]。

Zhao 等^[32]在温水沤麻中添加蜡样芽孢杆菌(*Bacillus cereus*) HDYM-02,利用高通量与 GC-MS 技术相结合,发现细菌菌群丰富度与多样性发生了下降,代谢产物转变明显不同,同时使得优势菌群大量产生脱胶酶等关键酶,使亚麻脱胶时间大大缩短。Di Candilo 等^[33]分别从亚麻及大麻沤麻系统中分离筛选出优势脱胶菌株,分别为厌氧型梭状芽孢杆菌(*Clostridium felsineus*) L1/6 和好氧型芽孢杆菌(*Bacillus* sp.) ROO40B,对亚麻加菌沤麻使得亚麻沤制周期缩短至 3~4 d。Chiliveri 等^[34]研究芽孢杆菌(*Bacillus tequilensis*) SV11 产生一种极耐热碱性的果胶酸裂解酶,试验表明该酶在适宜条件下活力为 1 773 U/mL。葛菁萍等^[35]以 *B. cereus* HDYM-01 和 HDYM-02 2 种菌作为出发菌株进行亚麻脱胶试验发现,加菌脱胶比正常脱胶的麻纤维产量高,还可以使脱胶周期缩短 24 h,纤维强度提高 20~40 N。加菌脱胶后,减少了脱胶周期,提高了纤维质量。因此,加菌脱胶是一种很有前途的技术,可以解决传统脱胶存在的问题,为了降低环境污染、节约成本、提高产量和品质,开发一种加菌脱胶的方法势在必行^[36]。

然而,微生物脱胶也存在一定缺点,如不稳定性 and 不完全去除胶质。脱胶时间也不宜过久,因为在不受控制的微生物脱胶过程中,由于纤维素降解的同时微生物也在不断生长,纤维质量开始恶化。因此,生物法脱胶对时间的把控尤为重要,使得微生物快速生长和繁殖并全面分泌关键脱胶酶。

2.2 酶法脱胶 亚麻脱胶需要一系列多糖水解酶的协同作

用,包括果胶酶和半纤维素降解酶等。果胶酶是酶法脱胶中最重要的酶之一^[37]。在亚麻生物脱胶的早期,果胶酶降解外部果胶物质,松弛细胞结构,促进降解酶与其他聚合物的有效结合,从而提高亚麻纤维的整体脱胶效率^[38-39]。

De Prez 等^[40]利用功能酶组合处理亚麻,对亚麻脱胶和纤维成分的影响,结果发现:经多聚半乳糖醛酸酶和木聚糖酶处理后,纤维素含量提高了(81±1)%,而未添加酶的纤维的含量为(64±2)%;纤维提取率的评价表明,与绿色纤维相比,几种酶组合显著提高。经多聚半乳糖醛酸酶和果胶酶处理后的纤维的提取率为(23±6)%,而未添加酶的纤维的提取率为(11±1)%,经多聚半乳糖醛酸酶和果胶酶处理后的纤维的提取率为(11±1)%,而多聚半乳糖醛酸酶、木聚糖酶和果胶酶 3 种酶的组合会使纤维中的果胶含量降低得更多。Alix 等^[41]研究表明,利用果胶酸裂解酶处理亚麻,不仅能模拟沤麻过程还能提高工艺亚麻的机械属性。Kaur 等^[42]利用果胶酶对亚麻进行脱胶试验,发现最适条件为反应温度为 40 ℃、加酶量为 1:10 时,果胶酶活性较高,沤麻效果好。

与其他的脱胶方法相比,酶法脱胶含有众多优点,如反应条件温和、操作环保、纤维损伤最小、质量易于控制^[43]。然而,酶法脱胶尚未大规模应用于工业生产,主要原因有两个。首先,酶制剂成本昂贵;其次,考虑到亚麻材料的胶质样物质的复杂性,构建一个与衍生的亚麻胶质成分相匹配的脱胶复合酶系统是一项困难的任务。

2.3 物理法脱胶 物理脱胶是利用物理手段(如机械碾压、高温、超声波)破坏纤维素分子间的氢键,从而改变纤维素内部的紧密结构,断开纤维束之间的连接,提高脱胶效率。但由于仅对亚麻进行物理处理不能达到预期的脱胶效果,所以通常将该方法视为纤维预处理,需要与其他方法结合的一种辅助手段。

研究表明,将超声波处理与化学试剂煮沸相结合可用于亚麻脱胶^[44-45]。同样,机械滚压与微生物脱胶相结合的方式在脱胶过程中也被成功应用^[46]。Li 等^[47]提出了一种将微波预处理与超声波脱胶相结合的脱胶新工艺,并与传统的化学脱胶进行了比较,纤维具有更好的断裂强度(7.67 cN/dtex,

传统方法为 6.90 cN/dtex) 和更好的平均长度 (32.5 mm, 传统方法为 23.0 mm), 新方法的加工时间减少了 31.2%, 化学药剂用量减少了 44.8%; 新的脱胶方法可以生产出高质量的纤维。Nair 等^[48] 利用微波辅助处理的方法进行脱胶, 通过对纤维光泽度和强度的测试, 表明该方法对于亚麻质量起到很好的效果。

2.4 化学法脱胶 亚麻原料中的物质在碱、无机酸或氧化剂环境中发生不同程度的分解。化学脱胶的机理是在给定的化学环境下, 纤维素与杂质之间的水解或氧化, 以同步或分步去除胶质物质。在化学脱胶方法中, 利用化学试剂螯合剂 (如 EDTA) 是目前的研究重点, 在碱性条件下, EDTA 都具有很强的钙离子螯合作用, 破坏果胶与其他物质的链接。亚麻原茎经过汽蒸处理之后, 加入 EDTA 和草酸盐, 反应一段时间后就能够获得亚麻纤维。Akin 等^[49] 发现加入 EDTA 能够有效地与果胶质等聚合物相结合, 破坏亚麻原茎内部结构, 对亚麻脱胶具有明显的促进作用。虽然化学脱胶法缩短了脱胶周期, 减少了杂质, 提高了脱胶效率, 但仍需要大量的其他化学试剂来完成, 容易导致能源浪费和环境污染。

3 亚麻纤维增强复合材料

3.1 亚麻纤维增强复合材料概述 将两种或两种以上具有不同特性的材料适当增强, 制成一种新材料的组合称为复合材料^[50]。这些材料之所以被引入, 是因为它们可被操纵成具有传统材料无法获得的性能组合。复合材料加工用常规纤维的增强造成了许多关于生物降解、能源消耗及其对环境的影响的问题。关于可持续发展与环保理念的提出导致了可再生资源等原材料得到大量开发与使用。天然纤维增强复合材料是由天然植物纤维作为增强体而合成的复合材料, 通常由麻纤维、竹纤维等植物纤维作为增强体, 而水泥、树脂等其他材料被用作复合材料的基体。Fiore 等^[9] 研究玄武岩纤维外层对亚麻增强复合材料耐久性的影响, 发现玄武岩与纤维的混杂可提高复合材料耐久性。由于天然植物纤维复合材料具有更高的性价比, 在复合材料领域占有一席之地, 具有更好的发展潜力^[51]。

3.2 亚麻纤维表面改良技术 由于材料的强度取决于纤维和基体之间的界面结合程度, 所以纤维表面改良技术显得尤为重要。纤维表面改性具有防止吸湿、清洁纤维表面和提高表面光滑度等优点, 从而提高纤维和基体之间的界面附着力, 显著改善性能。表面改性还改善了纤维分离和一些不良影响, 如机械强度降低、膨胀引起的结构变化、纤维表面可能发生降解。因此, 当纤维用于工业用途时, 表面改性非常重要^[52]。为了最大限度地发挥亚麻纤维及其复合材料的性能, 许多学者对不同的纤维表面处理进行了研究。为了改善亚麻纤维质量, 经常进行物理和化学表面改性^[53]。物理改良技术包括: 等离子体处理、热处理、电子束照射以及高压灭菌处理等以增加纤维和树脂之间的相容性。化学改良技术包括: 硅烷、乙酰化、氰乙基化、硬脂酸、马来酸酐聚丙烯 (MAPP) 以及乙酸等化学处理法以改善性能。

3.3 亚麻纤维增强复合材料的应用 近年来, 亚麻纤维复合

材料因其具有良好的特性, 而越来越被人们所青睐, 使得玻璃等复合材料逐渐被取代。同时在建筑业和轻量化工业等领域, 纤维复合材料也展现了巨大的市场应用潜力。

3.3.1 建筑行业。 在日常生活中, 建筑行业领域增强复合材料的应用最为广泛。相比于人工合成的复合材料, 亚麻纤维增强复合材料具有密度小, 成本低等优点。亚麻纤维作为可再生资源, 可减少建筑垃圾。将亚麻纤维增强复合材料应用到实际生活中, 可以减轻环境负担, 促进我国的生态建设, 这也体现了绿色环保的理念。徐蕾^[54] 对亚麻纤维对混凝土收缩开裂的影响进行研究, 将麻纤维混入砂浆中, 进行收缩性能试验发现, 当麻纤维的添加量为 0.3% 时, 与不添加样品对比, 裂缝的总面积降低了 99.5%。目前在铁路和道桥等领域, 亚麻纤维复合材料也逐渐成为代替木材的新型建材。

3.3.2 轻量化工业。 亚麻纤维复合材料的价格低、性能高, 被广泛应用于汽车等轻量化工业领域。伴随着轻便、安全与舒适成为汽车行业的主要发展趋势, 所以亚麻纤维复合材料在汽车行业占据了主导地位。法国一家汽车生产商, 通过利用亚麻纤维复合材料成功研制出一种新型汽车车门内饰板, 该材料能够将汽车的总重量减轻 20%^[55]。近年来, 亚麻纤维由于具有吸湿散热、清凉透气、防尘抑菌等显著优点, 被广泛应用于服装行业。因此, 高质量的亚麻纤维通常还会被用来制造衣物和床上用品。

4 展望

综上所述, 笔者研究了不同的脱胶方式对亚麻纤维脱胶影响, 以及近年来国内外在亚麻领域的相关研究进展, 强调了亚麻纤维作为天然植物纤维增强复合材料的发展使用和表面改良技术的各种要点。该研究主要关注涉及复合材料、建筑工程以及轻量化工业等领域的工艺应用。我国是亚麻生产和产品出口大国, 且亚麻种植地域较为广泛。但是在亚麻加工上仍有不足之处: 一是亚麻出麻率较低, 难以生产高质量纤维; 二是脱胶方法没有得到广泛的推广, 还局限于传统脱胶方法中。由此可见, 加快亚麻脱胶, 提高纤维品质, 是振兴亚麻业的重要举措^[56]。

亚麻纤维是可再生的高环保的天然植物纤维, 因此要充分利用我国亚麻纤维资源丰富的特点, 对生产工艺进行改进, 使亚麻纤维质量和产量得以提高, 推广应用到各个领域。然而亚麻纤维也存在一些有待研究的缺陷, 例如, 亚麻纤维的强度大、韧性足, 但其弹性较差; 同时亚麻纤维中还含有大量的果胶等杂质, 导致上染率不高、质地不均匀; 亚麻纤维的表面粗糙, 影响舒适程度; 并且亚麻纤维属于纤维素类, 极易燃烧, 应提高其阻燃性。随着人们生活水平和安全意识的不断提高, 亚麻纤维的不足之处将会成为日后研究的热点与难点。

亚麻未来的发展前景是不可忽视的, 随着对亚麻纤维研究的不断深入, 其在多个领域会产生巨大的影响。它不仅可以代替化学纤维以缓解石油枯竭等问题, 而且在衣着、食品、交通及医药等方面都有重要的经济价值。所以要根据亚麻生产过程中存在的问题, 寻找相应的解决办法, 不断地推动

亚麻产业化发展,为我国的经济建设做出贡献。

参考文献

- [1] KULMA A,ZUK M,LONG S H,et al.Biotechnology of fibrous flax in Europe and China[J].Industrial crops & products,2015,68:50-59.
- [2] ZHAO D,JI H R,DU R P,et al.Optimization of process conditions for microwave-assisted flax water retting by response surface methodology and evaluation of its fiber properties[J].BioResources,2020,15(3):5859-5870.
- [3] 邓乾春,马方勋,魏晓珊,等.亚麻籽加工品质特性研究进展[J].中国油料作物学报,2016,38(1):126-134.
- [4] RIBEIRO A,POCHART P,DAY A,et al.Microbial diversity observed during hemp retting[J].Applied microbiology & biotechnology,2015,99(10):4471-4484.
- [5] TAHIR P M,AHMED A B,SAIFULAZRY S,et al.Retting process of some bast plant fibres and its effect on fibre quality:A review[J].BioResources,2011,6(4):5260-5281.
- [6] 王玉富,邱财生,龙松华,等.中国纤维亚麻生产现状与研究进展及建议[J].中国麻业科学,2013,35(4):214-218.
- [7] ASSAEDI H,SHAIKH F U A,LOW I M.Characterizations of flax fabric reinforced nanoclay-geopolymer composites[J].Composites part B:Engineering,2016,95(10):412-422.
- [8] BATISTA R,DE JESUS SILVA J ÚNIOR A,DE OLIVEIRA A B.Plant-derived antimalarial agents:New leads and efficient phytomedicines.Part II. Non-alkaloidal natural products[J].Molecules,2009,14(8):3037-3072.
- [9] FIORE V,SCALICI T,CALABRESE L,et al.Effect of external basalt layers on durability behaviour of flax reinforced composites[J].Composites part B:Engineering,2016,84(3769):258-265.
- [10] LI Y,XUE B.Hydrothermal ageing mechanisms of unidirectional flax fabric reinforced epoxy composites[J].Polymer degradation and stability,2016,126:144-158.
- [11] MONTI A,EL MAHI A,JENDLI Z,et al.Mechanical behaviour and damage mechanisms analysis of a flax-fibre reinforced composite by acoustic emission[J].Composites:Part A,2016,90:100-110.
- [12] 姜弼天,王琪,张炎,等.亚麻纤维在增强复合材料中的应用与研究进展[J].中国农学通报,2019,35(23):35-39.
- [13] KECK S,FULLAND M.Effect of fibre volume fraction and fibre direction on crack paths in flax fibre-reinforced composites[J].Engineering fracture mechanics,2016,167:201-209.
- [14] 关凤芝.亚麻产业发展存在的技术问题与建议[J].中国麻业科学,2007,29(S2):396-398.
- [15] 吴昌斌,孙洪涛,范志辉,等.亚麻韧皮部的化学组成及果胶的结构[J].中国麻作,1997,19(3):38-40,45.
- [16] 肖丽,王贵学,陈国娟.苧麻酶法脱胶的研究进展[J].微生物学通报,2004,31(5):101-105.
- [17] JOSHI S V,DRZAL L T,MOHANTY A K,et al.Are natural fiber composites environmentally superior to glass fiber reinforced composites? [J]. Composites part A:Applied science and manufacturing,2004,35(3):371-376.
- [18] NETRAVALI A N,CHABBA S.Composites get greener[J].Mater today,2003,6(4):22-29.
- [19] LI Y,WANG D,MA H.Improving interlaminar fracture toughness of flax fiber/epoxy composites with chopped flax yarn interleaving[J].Science China technological sciences,2015,58(10):1745-1752.
- [20] SCHULZE G,陈廷(译).加工亚麻纤维的实践[J].国际纺织导报,1998(3):14-16.
- [21] CHAUDHARY V,BAJPAI P K,MAHESHWARI S.An investigation on wear and dynamic mechanical behavior of jute/hemp/flax reinforced composites and its hybrids for tribological applications[J].Fibers & polymers,2018,19(2):403-415.
- [22] 何伟坚,吴霁弟.亚麻纤维的特性及其应用[J].化纤与纺织技术,2019,48(4):36-38.
- [23] 汪润波,赵才.亚麻弹力纱生产理论及工艺研究[J].黑龙江纺织,2012(3):6-7,10.
- [24] 汪陆洋.服装材料的发展演变之天然纤维[J].新材料产业,2018(9):71-77.
- [25] 柳汉梅.解读麻纤维服装[J].中国纤检,2014(S1):92-93.
- [26] 刘健,陈洪章,李佐虎.大麻纤维脱胶研究综述[J].中国麻业,2002,24(4):39-42,25.
- [27] MOAWAD H,ABD EL-RAHIM W M,HASHEM M M,et al.Retting and degumming of flax using biotechnology eco-friendly approach[J].Egyptian journal of chemistry,2019,62(11):2033-2045.
- [28] CHABBERT B,PADOVANI J,DJEMIEL C,et al.Multimodal assessment of flax dew retting and its functional impact on fibers and natural fiber composites[J/OL].Industrial crops and products,2020,148[2021-01-25].https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.112255.
- [29] 石杰,吴昌斌,姬妍茹,等.亚麻脱胶微生物的筛选及应用研究[J].中国麻业科学,2013,35(1):22-27.
- [30] LIU Q,STUART T,HUGHES M,et al.Structural biocomposites from flax-Part II:The use of PEG and PVA as interfacial compatibilising agents[J].Composites part A,2007,38(5):1403-1413.
- [31] KU H,WANG H,PATTARACHAIYAKOOP N,et al.A review on the tensile properties of natural fiber reinforced polymer composites[J].Composites part B:Engineering,2011,42(4):856-873.
- [32] ZHAO D,LIU P F,PAN C,et al.Bacterial succession and metabolite changes during flax (*Linum usitatissimum* L.) retting with *Bacillus cereus* HDYM-02[J].Scientific reports,2016,6:1-9.
- [33] DI CANDILO M,BONATTI P M,GUIDETTI C,et al.Effects of selected pectinolytic bacterial strains on water retting of hemp and fibre properties[J].Journal of applied microbiology,2010,108(1):194-203.
- [34] CHILIVERI S R,LINGA V R A novel thermostable, alkaline pectate lyase from *Bacillus tequilensis* SV11 with potential in textile industry[J].Carbohydrate polymers,2014,111:264-272.
- [35] 葛菁萍,凌宏志,宋刚,等.微生物快速脱胶法在温水沤麻中的应用研究[J].黑龙江大学自然科学学报,2006,23(3):307-310.
- [36] COBB J N,DECLERCK G,GREENBERG A,et al.Next-generation phenotyping: Requirements and strategies for enhancing our understanding of genotype-phenotype relationships and its relevance to crop improvement[J].Theoretical & applied genetics,2013,126(4):867-887.
- [37] WANG Q,CHEN H G,FANG G,et al.Isolation of *Bacillus cereus* P05 and *Pseudomonas* sp.X12 and their application in the ramie retting[J].Industrial crops & products,2017,97:518-524.
- [38] KESSLER R W,BECKER U,KOHLER R,et al.Steam explosion of flax-a superior technique for upgrading fibre value[J].Biomass and bioenergy,1998,14(3):237-249.
- [39] LI X,PANIGRAHI S,TABIL L G.A study on flax fiber-reinforced polyethylene biocomposites[J].Applied engineering in agriculture,2009,25(4):525-531.
- [40] DE PREZ J,VAN VUURE A W,IVENS J,et al.Flax treatment with strategic enzyme combinations:Effect on chemical fiber composition and ease of fiber extraction[J].Biotechnology reports,2019,23:350-358.
- [41] ALIX S,LEBRUN L,MARAIS S,et al.Pectinase treatments on technical fibres of flax:Effects on water sorption and mechanical properties[J].Carbohydrate polymers,2012,87(1):177-185.
- [42] KAUR G,KUMAR S,SATYANARAYANA T.Production, characterization and application of a thermostable polygalacturonase of a thermophilic mould *Sporotrichum thermophile* Apinis[J].Bioresource technology,2004,94(3):239-243.
- [43] JOHN M E,KELLER G.Metabolic pathway engineering in cotton: Biosynthesis of polyhydroxybutyrate in fiber cells[J].Proceedings of the national academy of sciences,1996,93(23):12768-12773.
- [44] GORSKOVA T,BRUTCH N,CHABBERT B,et al.Plant fiber formation: State of the art, recent and expected progress, and open questions[J].Critical reviews in plant sciences,2012,31(3):201-228.
- [45] MOOSE S P,MUMM R H.Molecular plant breeding as the foundation for 21st century crop improvement[J].Plant physiology,2008,147(3):969-977.
- [46] CODISPOTI R,OLIVEIRA D V,OLIVITO R S,et al.Mechanical performance of natural fiber-reinforced composites for the strengthening of masonry[J].Composites part B,2015,77:74-83.
- [47] LI C H,LIU S Y,SONG Y,et al.A facile and eco-friendly method to extract apocynum venetum fibers using microwave assisted ultrasonic degumming[J/OL].Industrial crops & products,2020,151[2021-01-25].https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.112443.
- [48] NAIR G R,KURIAN J,YAYLAYAN V,et al.Microwave-assisted retting and optimization of the process through chemical composition analysis of the matrix[J].Industrial crops and products,2014,52:85-94.
- [49] AKIN D E,CONDON B,SOHN M,et al.Optimization for enzyme-retting of flax with pectate lyase[J].Industrial crops and products,2007,25(2):136-146.

妆品工程高新技术及其手段广泛应用于火棘产品的开发,使火棘的营养、药用、保健、美容价值得到充分利用,带动山区农户参与种植,形成产业,振兴乡村经济、保住脱贫成果,产生更大的经济效益和社会效益、生态效益。

参考文献

- [1] 滕井通,程玉环,薛建平,等.火棘功效成分及资源开发研究进展[J].淮北师范大学学报(自然科学版),2017,38(3):43-48.
- [2] 蒋利华,熊远福,李霞,等.野生火棘果有效成分研究进展[J].中国野生植物资源,2007(2):8-10.
- [3] 贵州省中药研究所.贵州中药资源[M].北京:中国医药科技出版社,1992.
- [4] 彭莉,张红,李聪,等.云南火棘果营养成分及其综合开发利用初探[J].云南大学学报(自然科学版),1993(S2):93-95.
- [5] 郭亚力,李聪.云南两种火棘中几种成份的测定[J].蒙自师范高等专科学校学报,1994(2):29-31.
- [6] 苏科巧.云南三种特色野果资源的研究现状及开发前景[J].农产品加工,2019(4):90-92,95.
- [7] 唐宇,刘建林.凉山州火棘资源的开发利用与可持续发展[J].四川农业科技,2002(9):6.
- [8] 曾佳,杨蓉,李跃军,等.火棘的化学成分与药理作用研究进展[J].湖南中医杂志,2016,32(10):226-228.
- [9] 邓如福,王三根,李关荣.野生植物——火棘果营养成分[J].营养学报,1990,12(1):79-84.
- [10] 王敬勉,廖德胜,栗巧功,等.火棘果营养成分及果胶的研究[J].食品科学,1992,13(4):40-42.
- [11] 黄祖良,韦国锋,何有成,等.桂西火棘果实特性和营养成分的研究[J].食品研究与开发,2004(2):75-76.
- [12] 蔡金腾,朱庆刚.火棘果实和刺梨果实的特性及营养成分的研究[J].食品工业科技,1996(4):19-23.
- [13] 侯建军,覃红斌,魏文科.不同产地火棘果实营养成分分析及评价[J].湖北农业科学,2003(2):83-85.
- [14] 葛丽娜,韩雪,任珂珂,等.火棘花挥发油化学成分的 GC-MS 分析及抗氧化活性研究[J].植物研究,2014,34(2):276-281.
- [15] 甘秀海,赵杨,周欣,等.火棘不同药用部位中槲皮素含量的比较[J].中国实验方剂学杂志,2012,18(11):100-102.
- [16] 甘秀海,陈华国,周欣,等.火棘果中总黄酮的含量测定[J].光谱实验室,2012,29(2):1223-1226.
- [17] 戴毅.火棘果实中酪氨酸酶抑制活性成分研究[D].沈阳:沈阳药科大学,2006.
- [18] 王军宪,牛娟芳,尤晓娟.火棘果化学成分研究[J].西北药学杂志,1994(6):253-255.
- [19] 朱艳华,石玉坤,付起超,等.火棘叶挥发油化学成分的 GC-MS 分析[J].化学研究与应用,2013,25(9):1279-1282.
- [20] 周铭东,李聪,杨明攀,等.火棘中挥发性化学成分的研究[J].云南大学学报(自然科学版),1996,18(3):305-306.
- [21] 罗宝芳,王金妮,黄银妹,等.野生火棘研究进展[J].中国酿造,2014,33(2):1-4.
- [22] 黄荣,傅小红.火棘植物功能性成分研究进展[J].中国野生植物资源,2014,33(5):37-41.
- [23] 胡丽娟,张党省.汉中地区野生植物火棘的开发利用[J].今日科苑,2006(10):66.
- [24] 江峰.浅谈在园林绿化中应用的几种绿篱植物[J].科技信息(学术研究),2007(4):236.
- [25] 曾明颖.火棘的园林应用简述[J].南方农业(园林花卉版),2008,2(1):49.
- [26] 张春怀.火棘在园林绿化中的运用[J].现代园艺,2015(16):111.
- [27] 毛丽.观果植物在园林绿化中的应用[J].现代园艺,2010(6):59-60.
- [28] 唐桂梅.蔷薇科树种在城市园林绿化中的应用:以南京市为例[D].南京:南京农业大学,2007.
- [29] 李家金.浅析火棘的价值[J].云南农业,2005(12):10.
- [30] 程后秀.火棘栽培及其在园林配景中的应用[J].现代农业科技,2010(16):202-203.
- [31] 胡一民,王义群.火棘盆景的制作[J].中国花卉盆景,1994(1):28.
- [32] 赵安治.安康市野生火棘资源现状与利用[J].现代农业科技,2018(19):206,210.
- [33] 海红.盆景四派[J].山西老年,2014(3):44.
- [34] 许万明.发掘云南盆景资源 体现云南盆景特色[J].花木盆景(盆景赏石),2014(1):25-27.
- [35] 李溯,单蓓,杨平,等.昆明地区乡土观赏灌木选择与推广应用[C]//中国植物学会植物园分会编辑委员会.中国植物园:第十三期.北京:中国林业出版社,2010.
- [36] 谢恭莉.云南易门县园林树种规划研究[D].昆明:西南林业大学,2013.
- [37] 邓瑜圆.昆明翠峰公园植物景观营造浅析[J].云南林业,2015,36(5):67-68.
- [38] 土小宁,梁月,杨松.云南省高效水土保持植物开发与利用[J].水资源开发与管理,2015,13(4):54-57.
- [39] 赵敏慧,陆艳,王婷,等.云南省砚山县石漠化区域植被修复的物种配置研究[J].水土保持通报,2015,35(2):319-325,331.
- [40] 邓利杰.贵州石漠化地区野生火棘种群空间异质性分析[J].科技经济导刊,2016(10):111-112.
- [41] 沐建华.文山州石漠化地区常见木本先锋植物资源[J].中国野生植物资源,2016,35(5):67-69,77.
- [42] 谭兴元.废弃矿山的生态复绿技术的应用研究[J].世界有色金属,2019(10):224,226.
- [43] 毕波,李贵祥,邵金平,等.昆阳磷矿废弃地 16 个主要树(草)种对重金属的富集特征[J].西部林业科学,2015,44(4):105-109,115.

(上接第4页)

- [50] 王丽英,姜丽芳.绿色植物——亚麻的开发利用[J].黑龙江纺织,2017(2):1-3.
- [51] 张雪,徐立群,王庆峰,等.不同用途亚麻的研究进展[J].东北农业科学,2018,43(5):16-20.
- [52] BOURMAUD A, SHAH D U, BEAUGRAND J, et al. Property changes in plant fibres during the processing of bio-based composites[J]. Industrial crops and products, 2020, 154: 1127-1134.
- [53] DAS B, CHAKRABARTI K, GHOSH S, et al. Effect of efficient pectinolytic bacterial isolates on retting and fibre quality of jute[J]. Industrial crops and products, 2012, 36(1):415-419.
- [54] 徐蕾.应用亚麻纤维减少混凝土塑性收缩开裂的研究[J].混凝土,2013(10):91-94.
- [55] YAN L B, CHOUW N. Behavior and analytical modeling of natural flax fibre-reinforced polymer tube confined plain concrete and coir fibre-reinforced concrete[J]. Journal of composite materials, 2013, 47(17):2133-2148.
- [56] WANG W T, LOWE A, DAVEY S, et al. Establishing a new Forming Limit Curve for a flax fibre reinforced polypropylene composite through stretch forming experiments[J]. Composites part A: Applied science and manufacturing, 2015, 77:114-123.