

秸秆“变身”记

陈方方, 邢宇琨, 傅悦, 欧阳湘元*, 谢钢*

西北大学化学与材料科学学院, 化学国家级实验示范中心, 西安 710127

摘要: 秸秆作为一种重要的农业废弃物, 其传统处理方式不仅浪费资源并且存在一定的污染问题。为了促进秸秆资源的可持续利用, 本文从化学的角度, 生动形象地介绍了秸秆的利用现状及存在问题。通过普及秸秆的潜在用途和社会价值, 合理利用秸秆, 提高资源的利用效率, 为促进农业可持续发展, 实现绿色发展、建设生态文明贡献力量。

关键词: 秸秆; 应用; 绿色经济

中图分类号: G64; O6

The Transformation Chronicle of Straw

Fangfang Chen, Yukun Xing, Yue Fu, Xiangyuan Ouyang*, Gang Xie*

National Chemistry Experimental Teaching Demonstration Center, College of Chemistry and Materials Science, Northwest University, Xi'an 710127, China.

Abstract: Straw, as a significant agricultural waste, presents both a resource waste and a pollution challenge when traditionally managed. To promote the sustainable utilization of straw resources, this paper vividly introduces the current utilization status and existing issues of straw from a chemical perspective. By highlighting the potential applications and social value of straw, and advocating for its rational use, this paper aims to enhance resource utilization efficiency and contribute to the sustainable development of agriculture, green growth, and the construction of an ecological civilization.

Key Words: Straw; Applications; Green economy

“亲爱的朋友们, 欢迎收看《秸秆“变身”记》! 在这个节目中, 我们将讲述秸秆如何从一个被遗弃的废弃物, 觉醒并蜕变为人类生活中不可或缺的宝贵资源。接下来, 让我们有请今天的主人公——小秸秆, 闪亮登场!” 主持人小J说道。

“大家好, 我是小秸秆, 曾经的我, 被遗弃在田野上, 无人问津。我静静地躺着, 任由风吹雨打, 腐烂在泥土之中。但有一天, 我觉醒了。我意识到, 我不应该只是这样平庸地度过一生, 我要为人类所用, 成为有价值的存在。” 小秸秆笑着说道。

“好的, 首先, 我们了解一下小秸秆的背景情况, 请看大屏幕。”

(据统计, 2022年粮食产量达到了6.86亿吨, 其中玉米、小麦和稻谷的产量分别占据了2.77亿吨、1.38亿吨和2.08亿吨^[1]。而这些农作物收割后, 残留的秸秆废弃物更是高达7.37亿吨, 比2021年还增加300万吨^[2]。)

“看这些数字, 你们或许只会觉得它们是冰冷的统计。但对我来说, 这代表着巨大的潜力和可能

性。每年，全球都有数亿吨的秸秆被遗弃。如果我们能被合理利用，将成为人类可持续发展的宝贵资源。”小秸秆激动地说道。

“别着急，现在，你需要重新认识一下你自己。只有对你有了充分的了解，我们才能知道如何将你转化为有价值的物质。”主持人小J说道。

“我不太了解自身，我只知道我是秸秆，请问我有什么特别之处吗？”秸秆疑惑地眨了眨眼。

专家顾问耐心地解释：“你的特别之处在于你的组成，你主要是由纤维素、半纤维素、木质素组成(图1)，这些说明你是碳基生命，并且你的体内含有一些微量元素，你的成分将是实现你人生价值的关键”。

专家顾问继续说道：“接下来，我将向你展示如何将你变成各行各业内有价值的东西。”

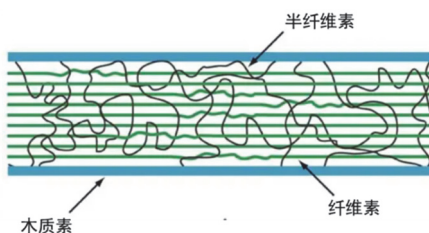


图1 秸秆结构示意图

1 农业领域

1.1 变身肥料

专家顾问：“小秸秆，你知道吗？在农业领域，你有着极其重要的应用价值。接下来，我将向你展示如何通过三个步骤将你转化为肥料，用于土壤的堆肥处理^[3,4]。”

首先，堆肥保持含水量在50%–60%之间，过多的水会阻碍氧气的进入，而过少的水则会影响微生物的活动；其次，进入分解阶段，这个阶段主要通过微生物，如细菌和真菌，将你体内所含的大有机分子分解为小的分子产物；最后，腐熟阶段，在这个阶段有机物质被进一步分解，形成更加稳定的有机质。

经过这一系列的转化过程，小秸秆已经不再是原来的自己，它变成了一种宝贵的肥料，为大地提供了滋养。

小秸秆感受着自己的变化，它能感觉到自己成为了大地的滋养者，帮助农作物茁壮成长。这种转变让它感到无比自豪和满足。它知道自己虽然曾经被视为废弃物，但经过科学的处理和利用，也能发挥出巨大的价值。

1.2 变身饲料

“我还能变成其他有价值的东西吗？”秸秆激动地询问。

专家顾问微笑着点头：“当然可以。除了堆肥处理，你还可以通过青储、氨化、碱化、发酵^[5]等步骤，转变为草食牲畜的优质粗饲料。”

秸秆好奇地问：“我变成的饲料有何用处吗？”

专家顾问解释道：“由你转变而成的饲料内含有一定量的纤维素，这对于反刍动物，如牛、羊等来说，是一种非常重要的慢性能量来源。它们可以通过反刍和发酵过程，将这些纤维素转化为能量和营养，满足自身的生长和发育需求。同时，这些纤维还能促进动物的肠胃蠕动，帮助它们更好地消化和吸收其他营养物质。”

小秸秆恍然大悟：“原来是这样啊，怪不得一开始你说我的组成是实现价值的关键呢。看来，我真的很有潜力呢！”

专家顾问鼓励道：“没错，你的潜力远不止于此。随着科技的不断进步和人们环保意识的提高，

你的应用领域还将不断扩大。”

2 能源领域

2.1 变身固体燃料

专家顾问向小秸秆解释：“在能源领域，你同样有着巨大的潜力。你能够转变成生物质颗粒，生物炭的等生物质固体燃料。”

小秸秆：“真的吗？”

专家顾问指了指屏幕：“当然，你看：

将秸秆碎片化，清洗去除其中的杂质，然后通过干燥过程去除多余的水分。接着，这些处理过的秸秆被送入压缩设备，经过高压压缩，秸秆就变成了6–10 mm的小颗粒状，这就是生物质颗粒(如图2)。



图2 秸秆制备生物质颗粒流程

“此外，将秸秆进行粉碎、清洗干燥，调控好设备的温度，在低氧(或无氧)的环境下进行炭化过程(如图3)，最终还可以形成生物炭。”



图3 秸秆制备生物炭流程图

小秸秆询问道：“我变成固体燃料有什么好处呢？现在的我也可以燃烧呢。”

专家顾问耐心解释道：“那可不同，你转变的生物质颗粒和生物炭相比较于原始的你而言，具有热值高、强度好、污染物含量低、性能稳定等特点。可以作为发电、供热或工业生产过程中的燃料，非常实用，其中转变的生物炭具备良好的稳定性、吸附性和丰富的孔隙结构等特点，除了当燃料外，还可以成为环保领域的吸附剂哦。”

小秸秆看着自己被转变成了生物质颗粒，心中充满了自豪和期待。它知道，自己不仅可以在农业领域发挥作用，还可以在能源领域为人类提供清洁、可再生的能源。

2.2 变身液体燃料

小秸秆好奇地询问：“既然我能转变为固体燃料，那也能转变为液体燃料和气体燃料吧。”

专家顾问微笑着点头：“对，接下来我就向你展示如何将你转变为液体燃料。具体地说，是转变为目前最常见的液体燃料——乙醇。”

专家顾问详细解释了三种工艺流程(美国国家可再生能源实验室(NREL)纤维素酶解发酵工艺、伊奥根能源公司(Iogen)纤维素酶解发酵工艺、日本新能源与产业技术综合开发机构(NEDO)纤维素酶解发酵工艺)，并成功地将秸秆转变为了乙醇(如图4)。

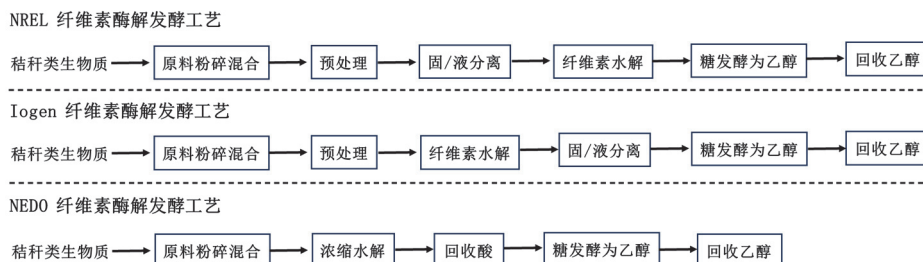
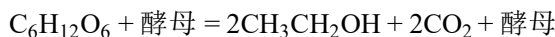
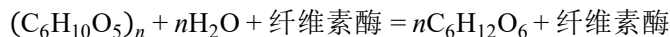


图4 NREL纤维素酶解发酵工艺、Iogen纤维素酶解发酵工艺、NEDO纤维素酶解发酵工艺流程图

小秸秆惊叹道：“请问我为什么能变成乙醇呢？”

专家顾问解释道：“这是因为你体内含有纤维素，在纤维素酶的水解和糖发酵作用下就能转变为乙醇。具体反应方程式如下所示。”



小秸秆：“变身乙醇后的我有何作用呢？”

专家顾问回答：“乙醇的用途非常广泛。首先，它可以与汽油混合形成乙醇汽油，用于汽车等交通工具的燃料。这种乙醇汽油不仅环保，还能减少对化石燃料的依赖。其次，乙醇还可以经过特定的程序制备成生物柴油，为柴油发动机提供动力。此外，乙醇还是许多工业原料的来源，如制造溶剂、涂料、塑料等。因此，转变为乙醇的你，可以为能源提供一定的保障，并在多个领域发挥重要作用。”

小秸秆感激地说：“谢谢，在您的帮助下，我实现了好多的价值。”

专家顾问鼓励道：“别着急谢我，你的价值转变才刚刚开始。接下来，我还会向你展示如何转变为气体燃料。”

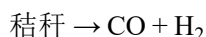
2.3 变身气体燃料

在能源领域的探索中，小秸秆再次展现了其惊人的潜力。这次，它通过微生物厌氧发酵变身为沼气(主要由甲烷和二氧化碳组成)^[6]，并通过生物质气化产生了合成气(主要是一氧化碳和氢气)。

专家顾问向小秸秆解释：“首先，我们利用微生物的厌氧发酵过程，将你转化为沼气。这个过程在密闭的沼气池中进行，通过微生物的作用，你体内的有机物质被分解为甲烷和二氧化碳。沼气是一种清洁、可再生的能源，可以用于烹饪、取暖和发电等。”



“此外，我们还通过生物质气化技术，将你转化为合成气。这个过程在高温条件下进行，通过不完全燃烧，你体内的碳氢化合物被转化为一氧化碳和氢气。合成气是一种重要的化工原料，可以用于制备各种液体燃料和化学品。”



专家顾问进一步解释：“合成气作为原料，可以通过一系列化学反应，如费托(Fischer-Tropsch)合成，制备出多种液体燃料，如柴油、汽油等。这些液体燃料具有与传统化石燃料相似的性能，但更加环保和可持续。”

秸秆好奇地问：“变身沼气和合成气后的我，具体有哪些应用呢？”

专家顾问回答：“变身沼气的你，在农村地区有着广泛的应用。它可以为老百姓提供烹饪和取暖的能源，减少对传统能源的依赖。同时，沼气发电站的建设，还可以为农村地区提供电力供应，改善生活条件。而合成气则可以作为化工原料，用于制备各种化学品和液体燃料，为工业生产和能源领域提供新的选择。”

小秸秆感慨道：“原来我还有这么多可能性啊！真是太神奇了！”

3 建筑领域

秸秆在建筑领域的探索再次展现了它的价值。这一次，它与混凝土和胶粘剂混合，经过高温高压的压制过程，成功变身为板材。

专家顾问向秸秆解释：“变成板材后的你，在建筑领域有着广泛的应用。你可以作为房屋的保温层，利用你优异的保温性能，帮助房屋在冬季保持温暖。你还可以作为建筑的隔断墙板，用于划分室内空间，不仅隔音效果好，还具有环保的特性。此外，你还可以作为家具板材^[7]，用于制作各种家具，如桌椅、衣柜等，为人们提供舒适的生活环境。”

小秸秆兴奋地问道：“为什么我适合作为建筑的板材呢？”

专家顾问回答：“你之所以适合作为建筑的板材，是因为你原本就具有一些独特的优点。你的质

量轻，这使得制成的板材更加轻便，方便搬运和施工。你的导热系数小，这意味着你具有优异的保温性能，能够有效地阻止热量的传递。在冬天，你的保温性能尤为突出，能够为房屋提供额外的保暖效果。”

秸秆感慨道：“真没想到有一天，我这个从农田里出来的秸秆，还能在建筑领域发挥这么大的作用。这真是太神奇了！”

4 文化领域

小秸秆在追求人生价值的道路上并未止步，它来到了文化领域，展现出了新的面貌。

4.1 变身艺术品

专家顾问向小秸秆介绍：“在这里，你可以变身为各种具有艺术气息的工艺品，如麦秆画、首饰、花篮、果盘、收纳箱等^[8]。这些工艺品种类繁多，各具特色，深受文艺青年的喜爱。它们不仅环保，而且充满了自然的气息，让人们在欣赏的同时也能感受到大自然的魅力。”

小秸秆好奇地问：“我可以变成哪些具体的工艺品呢？这些工艺品在市场上受欢迎吗？”

专家顾问回答：“你可以变身为各种精美的工艺品，如用你制成的麦秆画，线条流畅、色彩鲜艳，具有独特的艺术韵味；用你编织的首饰，时尚大方，彰显个性；还有用你制作的花篮、果盘等，既实用又美观。这些工艺品在网上非常受欢迎，销售量持续增长，为人们带来了可观的收益。”

4.2 变身纸张

随后，秸秆又开始了新的探索之旅——变成纸张。它好奇地问：“我听说木材可以制备纸张，我也可以吗？”

专家顾问肯定地回答：“当然可以。你的体内含有大量纤维素，而纤维素正是制备纸张的重要原料。相对于木材而言，你更加物美价廉，并且具有环保优势。”

专家顾问进一步解释：“在制备纸张的过程中，我们采用了热置换立式连续蒸煮加疏解制浆和亚铵法制浆工艺联合的方法(如图5)。首先，通过高温蒸汽对原始的你进行蒸煮，分离出纤维；然后利用热置换技术提高能源利用效率；最后通过亚铵法制浆工艺降低环境污染。这套设备能够高效地将你转化为所需的粗浆^[9]。”

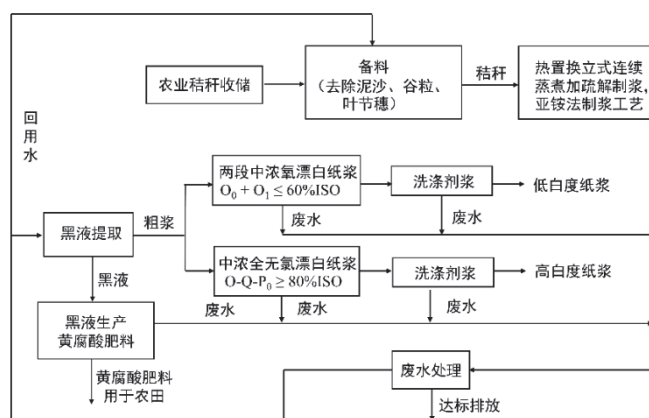


图5 农业秸秆制浆造纸技术体系流程图^[9]

“接下来，根据市场需求，我们利用中浓氧漂白纸浆($O_0 + O_1 \leq 60\%ISO$)或中浓度全无氯漂白纸浆($O-Q-P_0 \geq 80\%ISO$)的工艺来制备不同白度的纸浆。这些纸浆再经过过滤、压榨、干燥等程序，就可以形成我们日常使用的纸张了。”

专家顾问还补充说：“在将你变身为纸张的过程中，我们还注重资源的循环利用。从黑液中提取出的黄腐酸可以作为农业肥料使用，实现了取之于田、反哺于田的良性循环。”

小秸秆感慨道：“真没想到我还有这么多可能性！从工艺品到纸张，再到农业肥料，我的价值真是无穷无尽啊！”

5 环保领域

5.1 变身吸附剂

专家顾问：“除了上述领域，你在环保领域也有其独特的作用，其中一种就是之前转变的生物炭，生物炭含有大量的孔隙结构，这些孔隙就像小小的‘陷阱’，可以吸附各种各样的分子，包括有机物、重金属离子和营养盐等污染物质。此外，还有一种，那就是纤维素凝胶。”

“我们可以通过碱法处理秸秆制得纯纤维素，然后在硫酸作用下水解产生更多氢键，从而形成纤维素凝胶(如图6所示)^[10]。由你制备的凝胶是一种很好的吸附剂，可以有效地去除废水中的金属阳离子和染料。”

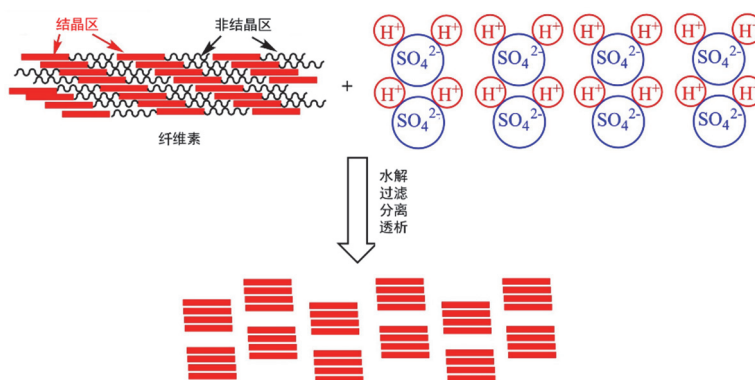


图6 纤维素材料酸解研究过程^[10]

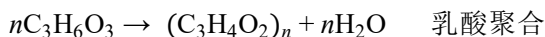
5.2 变身可降解材料

专家顾问笑着说道：“你还可以变成可降解塑料。”

小秸秆好奇地问：“为何要将我变成可降解塑料啊？”

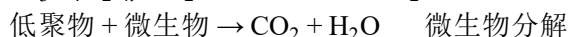
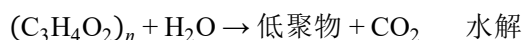
专家顾问回答道：“现在白色污染严重，造成白色污染的原因主要是过度使用聚乙烯或聚氯乙烯等制成的不可降解塑料。它们在大自然中很难分解，对人类的生活环境造成了严重污染。而你含有大量纤维素，这是生产可降解的塑料的好材料来源。

“具体来说，将你体内的纤维素进行水解、发酵、脱水聚合，最终转变成聚乳酸(PLA)，就可以利用聚乳酸生产各种可降解的塑料产品^[11]。”



“由我制备的聚乳酸塑料很容易被降解吗？它的降解过程又是如何呢？”小秸秆询问道。

专家顾问继续答道：“对，很容易降解，由你转变的聚乳酸产品可以被微生物(比如细菌或真菌)吸收和代谢。最终会生成二氧化碳和水，对环境完全没有污染^[12,13]。分解主要分为两个阶段：水解和微生物分解。首先，你转变而成的聚乳酸产品会在水分子的作用下分解成小的低聚物和二氧化碳。然后，这些低聚物会在微生物的作用下彻底分解成二氧化碳和水。



“由于你变身后的聚乳酸具有易降解的特性，它被广泛用于很多领域，比如包装材料、餐饮用具、纤维/无纺布、3D打印材料、生物聚氨酯制备和绿色板材，是一种十分受欢迎的可降解材料，这些都

是由你转变而成的。”

小秸秆惊叹道：“变身聚乳酸之后，可以变成的东西真多啊！”

6 医药领域

“除此之外，你在医学领域也可以发挥自己的作用，变身为抗菌抗氧化剂和抗癌剂。”

“其实你的体内含有酚类化合物，而酚类化合物被认为具有抗氧化和抗菌性能的天然生物活性化合物。目前从你体内发现了酚类化合物，包括邻苯三酚、没食子酸、咖啡酸、羟基肉桂酸、邻苯二甲酸、香草酸、丁香酸、香草素、对香豆酸、阿魏酸、原儿茶酸、咖啡酸等物质^[14-17] (图7)。”

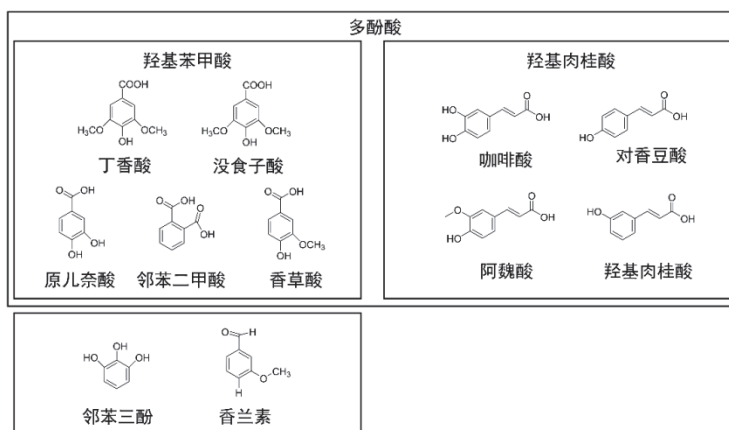


图7 从稻草(RS)中提取的酚酸类化学结构式

专家顾问指了指前面的屏幕：“你看，这是利用你提取酚酸(PAS)，我将其投入到尖孢镰刀菌中，可以看到有明显的抑菌作用^[18]，而在这里面，主要抑菌成分就是对香豆酸，这为你的增值利用提供了一条新的途径。”

专家顾问继续道：“你看你的体内还含有一些抗癌物质呢？我们从亚麻秸秆(也就是你的一种)的提取物中发现了黄酮类C-糖苷，这种物质在体外能够抑制人乳腺癌细胞的生长并诱导细胞凋亡^[19]。此外，由你体内发现的酚酸类物质和黄酮类物质都可以变身成相应的药物，为人类的身体健康做贡献。”

小秸秆：“没想到我的体内还隐藏着如此多的潜力，还能在医药领域发挥自己的作用。”

7 食品领域

专家顾问：“之前提到你体内的酚酸物质除了在医学领域有作用外，在食品领域同样作用巨大，可以变身为食品级抗氧化剂。比如阿魏酸和对香豆酸等抗氧化性物质在食品保鲜方面大有用处，它们可以作为抗氧化剂帮助延缓食品的氧化过程，保持食品的新鲜度和营养价值。”

“此外你体内含有的纤维素和黄酮类物质都可以用于生产功能性的食品^[20]。其中，纤维，特别是不可溶性纤维，对促进肠道健康、降低血糖和胆固醇有益。而黄酮类化合物、多酚等，这些成分具有抗氧化、抗炎和抗癌等生物活性。这些都是生产功能性食品的材料。”

8 纳米材料领域

小秸秆走到一块屏幕前：“纳米材料，是指至少有一个维度在纳米尺度(1-100 nm)范围内的材料。在这个尺度上，材料的物理、化学或生物学特性会与其宏观形态有显著不同，表现出独特的量子效应、表面效应和尺寸效应。这些特性使得纳米材料在许多领域具有广泛的应用潜力，包括电子学、医学、能源、环境保护和材料科学等。专家顾问，我还能变身成纳米材料？”

8.1 变身纳米纤维

“当然了，你看，利用对甲苯磺酸水解-温和圆盘研磨的方法对秸秆(麦草)等进行处理就可以制备木质纤维纳米纤维(L-CNF) [21]。”

“首先，将麦草秸秆手动加入酸性溶液(对甲苯磺酸)中，连续搅拌，制得悬浮液(L-CNF)，如图8所示。然后通过碱和过氧化氢混合处理，就可以得到含量较低、直径较小的木质纤维纳米纤维(P-LCNF)：将制得的L-CNF悬浮液加入到2%的H₂O₂溶液中，机械搅拌后，用氢氧化钠调节悬浮液的pH至碱性，在60 °C下进行漂白。即可得到精制的L-CNF(P-LCNF) (图8)。”专家顾问补充道。

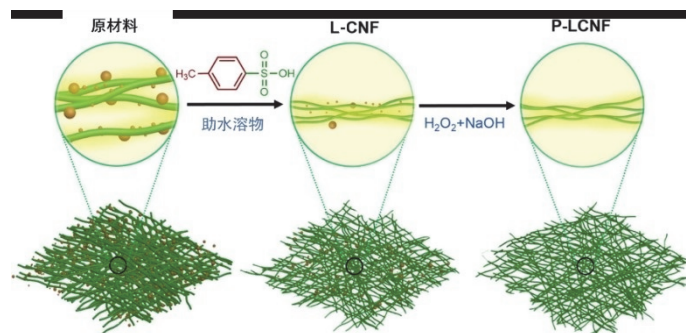


图8 制备木质纤维纳米纤维的实验过程^[21]

“以你制备的纤维素纳米材料还有很多，如半纤维素活性纳米碳(ANC)、木质素纳米球(LNS)、纤维素纳米纤维(CF)等，这些纳米材料都具有潜在的应用前景。

“比如以你为原料制备的木质素纤维素纳米纤维(LCNF)，经过简单的阳离子修饰后，可以有效应用于农业领域，作为农药载体，从而提高农药的利用效率^[22]。”

“此外，利用碱法从秸秆体内可以提取出纤维素纳米纤维CF(C₆H₁₀O₅)^[23]。纤维素纳米纤维具备非常优秀的生物相容性。具体步骤(如图9)：将你的粉末与氯化钠溶液混合，在适当温度下加入醋酸，搅拌，然后对多余的液体进行洗涤和倾倒，得到浅黄色固体样品。接着在室温下用KOH浸取样品，然后向溶液中倒入冰块。将水样离心，通过冷冻干燥，可得到白色浆状纤维素纳米纤维(CF)。”

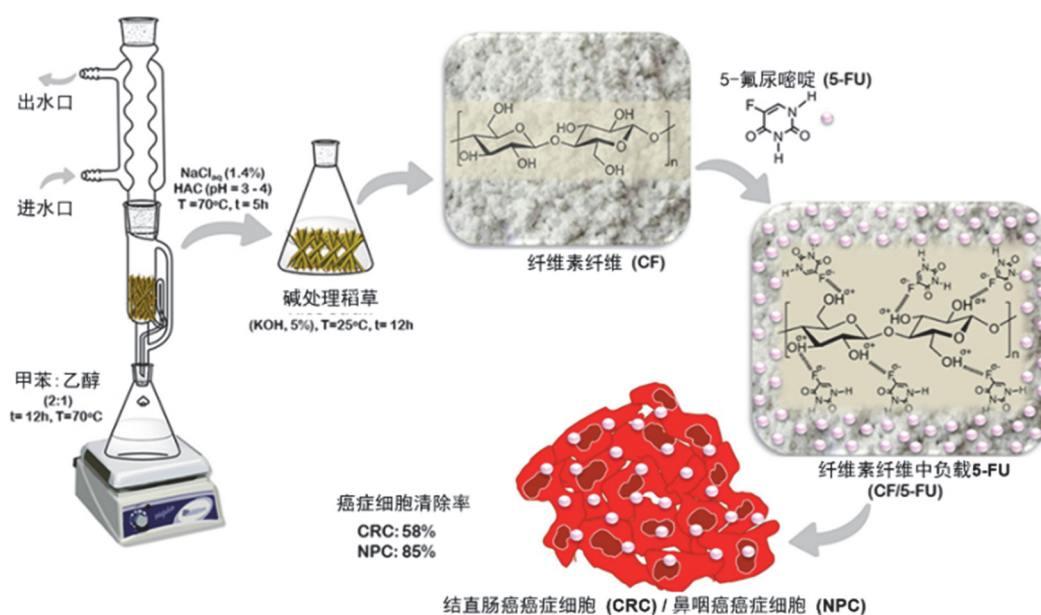


图9 从稻草(RS)中分离纤维素纤维(CF)的过程，并结合5-FU对癌细胞进行毒性测试^[23]

专家顾问继续说：“由于你转变成的纤维素纳米纤维具备非常好的生物相容性，还可以负载抗癌药物5-氟尿嘧啶(5-FU)对人结直肠癌(HCT116)和人鼻咽癌(HONE-1)进行抗癌测定呢。”

小秸秆：“太好了，没想到变身一系列的纳米纤维后可以产生这么大的作用。”

8.2 变身碳纳米材料

专家顾问点点头：“由于你的本质是碳源物质，因此你还可以制备碳纳米材料呢，就比如高荧光的纳米碳点(CDs) [24]。”

“首先，将你用去离子水洗涤并在阳光下晒干，然后切成小块。将粉碎好的小块在300 °C的氮气气氛下、在马弗炉中焙烧得到黑褐色粉末，自然冷却到室温。再用电粉砂浆进一步粉碎生成的粉末，形成细小的颗粒，并进行筛分消除大颗粒。然后，将获得的细小颗粒溶解在去离子水中，将分散液搅拌形成碳化溶液。最后，将得到的碳化溶液分散离心，进一步去除较大的颗粒，随后，将获得的上清液在115 °C下进一步加热60 min，制得粉状CDs。”

小秸秆：“纳米碳点(CDs)有什么用呢？”

“以你制备的CDs可以实现对鞣花酸(EA)分子的荧光传感(如图10)，因为鞣花酸(EA)作为CDs导带中的有效电子受体，阻止了CDs中电子空穴的复合现象，进而导致CDs的荧光猝灭，这种荧光猝灭和EA的含量有关，所以能通过荧光的猝灭进而实现对鞣花酸的检测。”

小秸秆：“没想到自己还能变成荧光体，还能对其他物质进行检测。”

专家顾问笑着说：“随着科学的进步，未来还能将你变成更多有用的东西呢。”

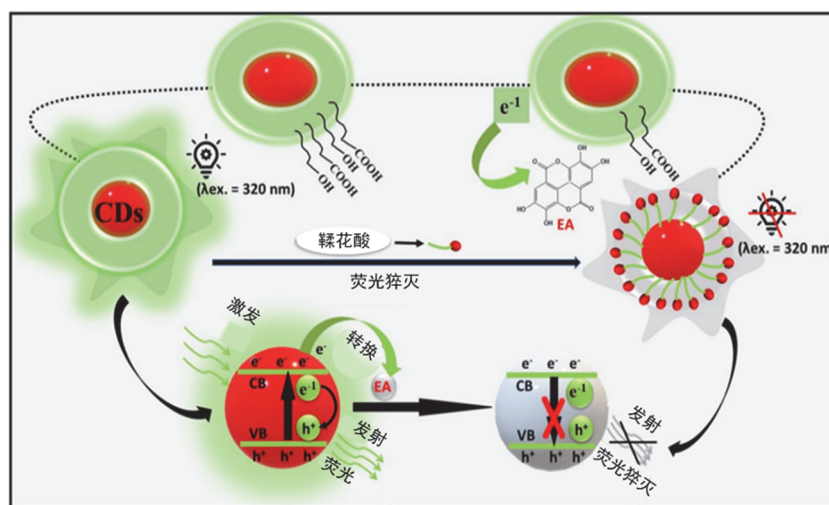


图10 EA存在下荧光CDS猝灭机理图 [24]

9 结语

专家顾问总结道：“看，小秸秆，你并不平凡。你的价值远超你的想象。只要我们科学合理地利用你的特性，你就能在各行各业中发光发热，实现你的人生价值。”

小秸秆听后，眼中闪烁着期待的光芒，仿佛已经看到了自己未来在各个领域中绽放光彩的场景。

主持人小J总结道：“在专家顾问的帮助下，小秸秆终于实现了自己的梦想，它不再是平凡的存在，而是变成了各种各样的有价值的东西，如农业肥料、能源物质、艺术品、纸张、环保领域的污染物吸附剂、可降解塑料，医药和食品领域以及目前正在研究的纳米材料。它们为人类带来了自己的价值，成为了人们生活中不可或缺的一部分，实现了自己的资源化利用。感谢大家收看《秸秆‘变身’记》！我们下期见。”

参 考 文 献

- [1] 国家统计局关于2022年粮食产量数据的公告. [2024-10-31]. https://www.stats.gov.cn/xxgk/sjfb/zxfb2020/202212/t20221212_1890928.html
- [2] 2023年中国秸秆综合利用现状分析,“农用为主、五化并举”的格局已基本形成. [2024-10-31]. <https://www.huaon.com/channel/trend/892260.html>
- [3] 聂晓璐, 于春静, 卢倩, 崔继哲. 中国农学通报, **2022**, *38* (26), 76.
- [4] Yusefi, M.; Shamel, K.; Jahangirian, H.; Teow, S. Y.; Umakoshi, H.; Saleh, B.; Rafiee-moghaddam, R.; Webster, T. J. *Int. J. Nanomed.* **2020**, *15*, 5417.
- [5] 赵楚琦, 王喜成, 姜涛, 安冬, 王欣宇, 邵洪泽. 吉林畜牧兽医, **2022**, *43* (11), 109.
- [6] 李娜. 电化学法和化学法预处理对稻草厌氧发酵产沼气性能研究[硕士学位论文]. 北京: 北京化工大学, 2017.
- [7] 肖力光, 丁艳波. 应用化工, **2021**, *50* (4), 1142.
- [8] 吴宇枫, 熊倩, 宋玉娜, 冯香玲. 商场现代化, **2023**, No. 3, 32.
- [9] 王克复, 田晓俊, 王斌, 李军. 华南理工大学学报(自然科学版), **2015**, *43* (10), 122.
- [10] El-Zawahry, M. M.; Hassabo, A. G.; Mohamed, A. L. *Int. J. Biol. Macromol.* **2023**, 248.
- [11] Wang, Y.; Jiang, F. *BioResources* **2013**, *8* (4), 5371.
- [12] 张艳, 解清园. 安徽水利水电职业技术学院学报, **2023**, *23* (3), 33.
- [13] 卢嘉敏. 包装工程, **2023**, *44* (S2), 77.
- [14] Karimi, E.; Mehrabanjoubani, P.; Keshavarzian, M.; Oskoucian, E.; Jaafar, H.; Abdolzadeh, A. *J. Sci. Food Agric.* **2014**, *94* (11), 2324.
- [15] Li, Y.; Qi, B.; Luo, J.; Khan, R.; Wan, Y. *Sep. Purif. Technol.* **2015**, *149*, 315.
- [16] Zheng, W.; Zheng, Q.; Xue, Y.; Hu, J.; Gao, M. T. *J. Biosci. Bioeng.* **2017**, *123* (6), 731.
- [17] Menzel, C.; Gonzalez-Martínez, C.; Vilaplana, F.; Direccion, G.; Chiralt, A. *Int. J. Biol. Macromol.* **2020**, *146*, 976.
- [18] Wei, H.; Wang, Y.; Jin, Z.; Yang, F.; Hu, J.; Gao M.-T. *J. Biosci. Bioeng.* **2021**, *131*, 53.
- [19] Czemplik, M.; Mierziak, J.; Szopa, J.; Kulma, A. *Front. Pharmacol.* **2016**, 7.
- [20] Xue, Y.; Wang, X.; Chen, X.; Hu, J.; Gao, M. T.; Li, J. *Bioresour. Technol.* **2017**, *234*, 208.
- [21] Bian, H.; Gao, Y.; Luo, J.; Jiao, L.; Wu, W.; Fang, G.; Dai, H. *Waste Manage.* **2019**, *91*, 1.
- [22] Shen, F.; He, C.; Wang, Y.; Hu, J.; Huang, M.; Zhao, L.; Zhang, S.; Tian, D.; Shen, F. *Chem. Eng. J.* **2023**, *467*, 143376.
- [23] Yusefi, M.; Shamel, K.; Jahangirian, H.; Teow, S. Y.; Umakoshi, H.; Saleh, B.; Rafiee-moghaddam, R.; Webster, T. J. *Int. J. Nanomed.* **2020**, *15*, 5417.
- [24] Kumari, M.; Chaudhary, G. R.; Chaudhary, S.; Huang, M.; Guo, Z. *Biomass Convers. Biorefinery* **2024**, *14* (16), 7507.