

竹废弃物的资源化利用研究进展

辜夕容,邓雪梅,刘颖旒,曾清苹,吴雪莲,倪亚兰,刘雪娇,武 涛,
方鹏毅,王 博,吴沁真
(西南大学资源环境学院,重庆 400716)

摘 要:竹是中国重要森林资源,利用过程中约有 60%~70%的废弃物产生,造成资源的极大浪费。竹废弃物中约含 65%的纤维素类物质、23%的木质素以及其他营养成分或功能性成分,可直接利用、传统加工利用和工业化利用,主要产物有材料、生物质燃料、竹炭、竹醋液、药品或保健品、食用菌、肥料、饲料等。今后需加强原料的搜集与预处理、纤维素与木质素等主要成分的充分利用、功能性成分的产品研发、专用设备研发、加工工艺和技术改进、提高产品附加值、精深加工产品研发等方面工作,以利于竹废弃物资源化利用的产业化,真正实现竹资源的“零”剩余,全面提升竹的价值和功能。

关键词:生物质,工程,环境保护;竹;废弃物;资源化利用

doi:10.11975/j.issn.1002-6819.2016.01.033

中图分类号:S789

文献标志码:A

文章编号:1002-6819(2016)-01-0236-07

辜夕容,邓雪梅,刘颖旒,曾清苹,吴雪莲,倪亚兰,刘雪娇,武 涛,方鹏毅,王 博,吴沁真.竹废弃物的资源化利用研究进展[J].农业工程学报,2016,32(01):236-242. doi:10.11975/j.issn.1002-6819.2016.01.033 <http://www.tcsae.org>
Gu Xirong, Deng Xuemei, Liu Yingni, Zeng Qingping, Wu Xuelian, Ni Yalan, Liu Xuejiao, Wu Tao, Fang Pengyi, Wang Bo, Wu Qinzhen. Review on comprehensive utilization of bamboo residues [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2016, 32(01): 236-242. (in Chinese with English abstract) doi:10.11975/j.issn.1002-6819.2016.01.033 <http://www.tcsae.org>

0 引 言

竹是森林资源之一,在中国素有“第二森林”之美称。全世界竹类植物约有 70 多属 1 200 多种,主要分布在热带及亚热带地区,少数竹类分布在温带和寒带。中国竹林面积达到 720 万 hm^2 ,约占世界总量的 30%,种类、面积、蓄积、产量均居世界之首^[1]。目前,中国已构建了从资源培育、加工利用到出口贸易各环节较为完善的竹产业体系,使竹产业成为带动区域经济发展、增加农民收入、促进生态环境保护的新兴产业和生态产业。

竹用途广泛,常是木材的替代和补充材料,用于建筑、造纸、家具和工艺品制造等,有的竹笋还是膳食材料,可鲜食或加工。然而,在这些产业中,利用的多是竹秆或笋肉部分,竹材利用率始终徘徊在 35%~40%左右,就原竹而言,则只利用 12%,在生产过程中产生大量低价值废材^[2];竹笋的利用率也仅在 30%左右。而竹枝、竹叶、笋壳以及加工后的下脚料和碎屑等作为废弃物被随意丢置于路边或沟旁,腐烂霉变,或直接掩埋和焚烧;即使利用,方式也比较初级,技术含量低。这不仅造成环境污染,还是对竹资源的极大浪费。如福建省宁化县治平乡,人口不足 1.5 万,但其

乡镇竹业加工厂每月都会产生竹屑、竹尾等加工剩余物约 100 多 t,不但占据厂区空间,还得雇工人清理焚烧^[3],不只增加处理成本,还浪费竹资源,污染生态环境。在中国森林资源日益减少的情况下,如何充分有效地利用这些废弃物,实现资源“零”剩余,已成为竹资源综合利用的一个紧迫问题。

针对竹资源日益丰富,产量增加,但资源浪费严重的现象,从上世纪 80 年代开始,人们即开展了竹废弃物的资源化利用研究,包括从竹产区将采伐剩余物作生活燃料的原始、初级利用,到大型竹加工厂将加工剩余物通过混炼、裂解、酶解等高新技术制成各种材料、生物油、糖类等产品的工业化利用。目前,竹废弃物的资源化利用取得了一些成效,减轻了竹资源的浪费,但也存在着诸如原料利用不充分、加工工艺和技术有待改进、产品质量和附加值有待提升等问题。为尽可能实现竹资源的“零”剩余,增加竹的利用价值,本文拟在弄清竹废弃物资源组成与组分,并系统总结资源化利用现状的基础上,分析其中存在的问题,探讨竹废弃物资源化利用进一步发展的对策。

1 竹废弃物资源组成与组分

竹在用途上可分为材用竹、笋用竹与笋材两用竹。材用竹中可利用的主要是竹秆,而笋用竹中可利用的主要是笋肉。在各种传统制作和工业加工过程中,会产生大量废弃物,包括材用竹的竹枝、竹叶、竹节、竹青、竹黄,以及切割、造型、打磨过程中产生的大量竹屑、竹粉等废料,这些废弃物约占整竹的 60%以上^[4];在笋用竹的加工过程中,也只取其幼嫩的笋体,老笋头、笋壳等剩余物约占 70%作

收稿日期:2015-07-22 修订日期 2015-11-04

基金项目:重庆市应用开发计划项目(cstc2013yykfA80014);国家自然科学基金(31570599);西南大学资源环境学院本科生科技创新“光炯”培育重大项目(20150103)

作者简介:辜夕容(1973-),女,博士,副教授,主要从事林业资源开发利用、林业微生物研究。重庆 西南大学资源环境学院,400716。

E-mail:gx0956@163.com

为下脚料或“废料”被丢弃^[5]。

竹废弃物主要由纤维素、半纤维素及木质素组成,此外还含蛋白质、氨基酸、脂肪、糖、矿物质(如钾、钠、钙、镁、锌、锰、铁、铜、硒、硅等)等营养成分,它们的含量因竹种、竹龄、竹部位、采伐季节以及生长环境而异。如毛竹竹材废料中纤维素质量分数 47.50%,半纤维素 18.80%,木质素 23.72%,灰分 1.61%,苯乙醇抽提物 9.51%^[6];毛竹竹屑中含纤维素 41.27%,木质素 23.00%,苯醇抽出物 6.05%,灰分 1.04%^[7];毛竹笋的笋壳中含粗纤维 31.14%,粗蛋白 12.17%,粗脂肪 0.71%,可溶性糖 11.05%,灰分 3.54%,而雷竹笋壳中含粗纤维 30.41%,粗蛋白 16.25%,粗脂肪 1.91%,可溶性糖 10.03%,灰分 1.67%^[8];陈瑞等^[9]所测竹屑含纤维素 43.54%,半纤维素 21.51%,木质素 22.54%,可溶性糖 0.85%,淀粉 2.46%,果胶 1.41%。

此外,竹废弃物还含多种次生代谢产物,包括挥发性成分、多糖、酚类及甾醇类。如笋壳中含苜蓿素、紫杉素、黄酮,竹叶中也含黄酮;竹笋中还可分离得到果胶多糖、半纤维多糖、硼多糖复合物等^[5]。

2 竹废弃物的资源化利用

自上世纪 80 年代初,人们就开始探索竹资源的综合利用。进入 21 世纪,竹林面积的迅速扩大加上科技的快速进步,更使竹废弃物的资源化利用蓬勃发展,以竹主要分布区的浙江、福建、江西尤为突出。目前对竹废弃物的资源化利用形式主要有直接利用、传统加工利用和工业化利用 3 种^[10],而主要产物包括材料、生物质燃料、药品或保健品、食用菌、肥料、饲料等方面。

2.1 材料

在一些大型竹材加工厂中,竹加工废料仍作建材使用。所用的竹废料包括蔑黄、竹屑、竹沫、竹枝、竹梢等,历经粉碎、干燥、涂胶、热压等工艺,制成用途颇广的碎料板、蜂窝板、竹编板、竹碎料水泥板、刨花板等新型人造板^[10-12],Luo 等还以汽爆前处理毛竹加工剩余物制取无粘合剂的纤维板^[13]。

除直接利用外,部分加工厂还将竹废弃物与其他材料混合后生产复合材料。竹塑复合材料(bamboo-plastic composites, BPC)即是其中的代表产品。它是以经过预处理改性的竹粉、竹锯末、竹屑或竹渣等原料,利用高分子化学界面融合原理,与熔融热塑性树脂(如聚乙烯(polyethylene, PE)、聚丙烯(polypropylene, PP)、聚氯乙烯(polyvinyl chloride, PVC)等)按一定比例混合,在助剂的作用下,经过高温混炼和成型加工而制得的一种多用途的新型复合材料。如汪义华等^[14]利用竹子备料的废弃竹屑与高密度聚乙烯(high-density polyethylene, HDPE)生产出复合材料,闫微丽^[15]、赵方等^[16]利用竹粉与 HDPE 为主要原料,通过造粒、模压工艺制备出 BPC;林青^[17]以 PP 为基体,用竹纤维作填充、增强材料,通过添加助剂制成可注塑型复合材料。BPC 的拉伸强度、弹性模量和比强度极佳^[16],突破了传统竹材和塑料应用的局限性,实现了竹材优质、多功能和高附加值利用,在生产上得到广泛应用^[18-19]。

竹废弃物液化后可用于胶黏剂、泡沫或模塑材料、生

物燃料油等领域,制成的产物可作相应替代品,且可明显降低成本。不同液化剂、催化剂、液化温度和液化时间下,竹屑的液化产物和液化率明显不同。如李小科^[20]以苯酚作为液化剂,将竹材加工剩余物转化成具有化学反应活性的小分子基团,液化率达到 99.1%,结合酚质量分数 62.5%,产物与甲醛等反应生成的胶黏剂耐水性高,性能稳定,完全可成为酚醛树脂胶黏剂的替代品,且具有价格竞争优势^[19];卢婷婷等对竹材废料进行多羟基液化试验后发现,以硫酸为液化剂(6%)、液固比(液化剂/木材)4.0、150 ℃条件下,60 min 后竹材废料的液化率可达 95%以上^[21];而以聚乙烯乙二醇(PEG 400)和丙三醇为液化剂、浓硫酸作催化剂,150 ℃下反应 1.5 h,液化率可达 97%以上^[22],液化产物由多种带有支链结构的聚醚和聚酯多元醇组成,成分复杂,含有大量的羟基官能团,满足制备中强度硬质聚氨酯泡沫对组分多元醇的要求,可替代工业聚醚多元醇 4110,与 PAPI(多亚甲基多苯基多异氰酸酯)反应制备聚氨酯泡沫塑料^[23]。

竹废弃物还可用于制取其他可再生材料,如杨帼静等^[24]、Sun 等^[25]以竹材加工剩余物为原材料,通过硫酸酸解法成功制备出一种高效增强填料-竹纳米纤维素晶体(竹 CNC);Praneetha 等^[26]用快速微波法从竹废弃物中提取并制得 3 维纳米多孔硅。

2.2 生物质燃料

竹废弃物不仅可直接用作竹产区的农用燃料,还是工业上的优质洁净燃料^[27]。曾宪阳等测定发现,竹的含氮量低于 0.60%,含硫量低于 0.05%,灰分比例低于 1%,低位热值大于 14 MJ/kg,燃烧过程基本不产生 SO₂,灰尘排放也相当低,环保而节能,且价格还不到燃油的 1/5,是一种非常洁净的燃料^[4]。竹废弃物体积大,占地面积多,为便于产品的储存、运输、使用、清洁环保并提高燃烧效率,人们对竹废弃物的裂解、液化、气化和燃烧等转化生产工艺进行了研究^[28],部分已实现产业化和规模化^[29-30]。由竹废弃物制成的生物质燃料主要有 3 种形式:一是固态的生物质固体燃料,二是液态的裂解生物油,三是气态的热解汽化燃气。

将粉碎到一定程度的生物质原料在适当的压强、温度,或不加热不加黏结剂情况下,可压缩成棒状、块状、粒状等有一定密实度的成型生物质固体燃料^[30]。近年来,这种技术在农作物秸秆、木材加工剩余物、有机垃圾及有机废弃物等的资源化上得到广泛应用。刘志佳等^[31]以毛竹为原料,利用木材粉碎机制备竹材颗粒,经常温滚压式生物质颗粒燃料成型机制备出竹材颗粒燃料,其所有性能均能满足美国颗粒燃料协会标准《民用/商用生物质颗粒燃料》的要求,燃烧热值也能满足德国标准《木质颗粒燃料》中规定的关于商业用生物质颗粒燃料的最低要求。

竹剩余物可经热裂解转化为生物油。经过脱水、半纤维素裂解、纤维素和木质素裂解、剩余物裂解 4 步,竹剩余物即可热裂解成生物油、生物炭和不凝气体^[32-33]。热裂解条件不同,热裂解产物及其得率有异。如在裂解功率 800 W、裂解温度 492 ℃、焦炭用量 4.2%、裂解时间 13 min 的条件下,微波裂解竹废料后的生物油得率是 52.80%^[2];而 500 ℃

的实验室慢速热裂解时的生物油得率仅为36.57%^[33]。

有些条件下的竹剩余物液化产物中含有大量生物油。如在120℃、甘油:甲醇:竹屑质量比为8:0:2、300 W下微波7 min的液化产物中主要是甘油及其衍生物,以及糖类降解物^[34-35];而在常压下,以PEG 400和乙烯催化硫酸液化麻竹笋壳,液固比6:1、150℃、催化剂4%时反应80 min的液化产物以多元醇为主^[36];Xie等用微波液化竹剩余物后,也获得大量的多元醇^[23]。

竹材废弃物在气化炉内缺氧条件下进行气化裂解,可获得气化燃气,用于气化炉出口处直接燃烧,是一种较好的竹材废弃物代油燃烧方式^[4]。

2.3 竹炭、竹醋液

竹炭是竹材经高温炭化后得到的固体产物,按原料来源可分为原竹炭和竹屑棒炭。竹醋液是竹材炭化时所得到的价值可观的液体产物,主要用于净化。竹废料热裂解后的产物即有竹炭和竹醋液,其中竹炭的得率基本在20%以上^[2],而竹醋液得率可达到31.3%^[37]。经无机试剂催化后,竹炭表面结构中部分含氧/氮基团增加,吸附活性增强或扩大,对有机物、无机物的吸附选择性改变,可使竹炭产品的吸附指标超过国家一级品的标准。

2.4 药品或保健品

膳食纤维被称为“第七大营养元素”,对人体肠道功能有良好的调节作用,有利于肌体健康。选择膳食纤维原料时,要求来源丰富,消费者可接受,并且须具有平衡的可溶性膳食纤维和不溶性膳食纤维比例,以及是否含相关生理活性物质,如多酚、黄酮、胡萝卜素等。毛竹笋等笋壳中,总膳食纤维比例为58.24%~79.15%,以不溶性膳食纤维为主,显著高于常见膳食纤维原料,持水力、膨胀力、抗氧化能力等都较高^[8],说明竹笋的加工废弃物是一类较好的膳食纤维补充来源。并且福建建瓯也以竹笋加工废弃的笋头、笋壳为原料开发出竹膳食纤维^[38]。

低聚木糖通常是指由2~7个木糖分子通过 β ,1-4糖苷键连接而成的聚木糖,是一种良好的功能性低聚糖,被广泛应用于食品、医疗保健等领域。竹材废弃物的聚戊糖含量相当丰富,过去的竹材工业化对聚戊糖难以利用。而目前工艺则可提取利用竹废弃物中的糖类,如用碱性过氧化氢机械预处理竹屑,用PFI磨浆机5 000 r/min下对物料进行破碎预处理,之后以木聚糖酶10%、料液比1:20 g/mL、水解时间8 h后即可得到12.11%的糖^[39];而26%碱量、24%硫化度、160℃、70 min蒸煮的硫酸法制浆预处理可以除掉约95%的木质素,预处理后的产品可酶解糖化得到79%葡聚糖、77%木聚糖^[40]。

此外,从竹废弃物中还可提取黄酮^[41]、氨基酸、功能多肽、抗真菌蛋白、竹笋甾醇^[37]、可溶性硅^[42]、天然食品防腐剂、天然食用色素、竹花酒^[10]等药品或保健品。

2.5 食用菌

食用菌营养丰富,是倍受人们喜爱的美味佳肴。目前被广泛使用的棉籽壳等原材料价格上涨,造成食用菌栽培成本增加,需因地制宜地选择代料^[43]。竹产区面积大,天然的生态环境可作栽培场地^[10],而且竹林废弃物也是极好的栽培原料,目前已有大量使用竹废弃物作代料栽培食

用菌的成功案例,生产的食用菌有竹荪、香菇、木耳、金针菇、灵芝、平菇等。如浙江安吉以竹屑50%、竹叶15%、木屑35%种植竹荪,每年每公顷毛竹林增收12万元^[44];而福建的傅基丰则用竹子加工后的下脚料竹屑、竹沫等为主要原料种植出平菇、香菇、茶树菇、杏孢菇、木耳等,食用菌的产量、品质等都比以木屑为原料栽培出来的高,出菇提前^[45];刘叶高以毛竹屑41%、棉籽壳35%、麸皮22.5%、轻质碳酸钙1.5%栽培的杏鲍菇营养成分丰富,子实体朵形、菌盖色泽与木屑栽培料的无明显差异,但口感更清脆、带有清淡竹香风味^[46];毛竹屑作原料栽培香菇的投入产出比达到1:4.33^[3];福建省宁化县治平乡菇农利用竹制品加工的下脚料半覆土栽培反季节香菇,出菇散生,菇质致密脆嫩,口感较好,产量与杂木屑栽培相当^[47];王超等以竹粉、杨梅酒渣(质量比1:1)为基质培养出灵芝^[48];吕玉奎等以70%麻竹笋剩余物生产双孢蘑菇,年平均产值17.1万元/hm²;以麻竹叶、竹枝粉碎料、麻竹屑为主料林下种植竹荪,示范区竹荪产量平均达到750 kg/hm²^[49]。虽然他们使用的竹废料种类、原料配比、栽培的菌种以及产品质量等各不相同,但总体而言,都降低了生产成本,提高了产品质量和产量。

2.6 肥料与饲料

竹林废弃物在林下经长期的自然发酵,是一种良好的有机肥。添加纤维分解菌为主的微生物发酵菌剂并堆置发酵后,可开发成笋壳有机肥产品和有机无机复混肥产品,经农户施用,效果显著^[8];而且以竹废弃物为主料栽培食用菌后的菌棒也可作有机肥料,进行循环使用^[45],可提高麻竹林的产笋量30%~50%^[49]。

经过高温蒸煮处理的竹笋加工剩余物易腐败变质,可以青贮的方式保存。在粉碎并适当阴干后,将乳酸菌、木聚糖酶等添加进毛竹笋加工剩余物,厌氧发酵90 d,笋壳的结晶度和热稳定性提高,笋壳呈亮黄色,散发酸香味,质地松软,无粘手现象,保存效果较好^[8]。而吕玉奎等^[49]在麻竹笋加工剩余物中添加5%统糠、3%玉米粉、0.5%甲酸青贮,并在此基础上加0.5%尿素氨化,可使青贮料、氨化料的贮存期达到1周以上,解决了麻竹笋废弃物易腐难存的难题。青贮或氨化后饲料的适口性得以改善,可作为肉牛或奶牛的日粮青粗饲料。

此外,还可在竹材中掺以20%~30%的加工废料如竹屑、竹枝等,通过间隙蒸煮的方式,生产出化学竹浆,竹箨等也可制成箨浆做卷烟纸^[50]。

3 竹废弃物资源化利用存在的问题与建议

目前国内外对竹废弃物的资源化利用研究已取得较大进展,有的技术已逐渐转化到生产中,为竹资源的综合利用提供了技术保障。然而,要将这些技术产业化,实现资源的“零”剩余,全面提升竹的价值和功能,仍有部分问题亟待解决:

1)原料的搜集与预处理。竹的废弃物不仅包括竹秆加工剩余物如竹屑、竹沫、竹节、竹青、竹黄以及竹笋加工剩余物如笋壳、老笋头等,还包括竹梢、竹枝、竹叶、竹箨等采伐剩余物,这部分约占整竹的40%(质量分数)。目前所利用的废弃物绝大多数是加工剩余物如竹屑和笋壳,而

对采伐剩余物则多未利用。竹产区采伐剩余物分散、不易收集,加上体积大、贮存不易、破碎或粉碎困难等,是造成其难以利用的主要原因。因此,在竹废弃物的利用上,还需注意采伐剩余物的破碎技术、破碎机械方面研究,以便原料预处理,减小贮运和加工压力;同时,出台鼓励竹农搜集采伐剩余物的优惠政策,尽量实现资源的“零”剩余;

2)原料主要成分的充分利用和功能性成分的产品研发。竹废弃物的主要成分是纤维素、半纤维素和木质素,它们占全竹的质量分数共90%左右,此外还包含蛋白质、脂肪、氨基酸、糖、矿物质以及醇、酯、酮等功能性成分。目前除人造板等材料以及生物质燃料的固体燃料方面对原料各成分利用较充分外,其他途径仍会产生大量剩余物。如在开发生物质燃油上,通过裂解获得的生物油高时为52.8%^[2],仅利用了纤维素类物质的50%~80%;对约占23%的木质素的利用则更少,多数以去除木质素为主;笋壳废弃物中粗蛋白质量分数为12%~16%,目前多见于饲料、肥料等粗加工利用,精深加工或高档产品极少见;在矿物质、氨基酸及其他功能性成分的利用上,虽有少部分产品出现,但基本上还未被消费者接受,更难以形成产业化。对此,还需加强原材料主要成分的利用技术研究和功能性成分的产品研发,尽量达到物尽其用、产品适销的目的。

3)研发专用设备,改进工艺和技术。竹废弃物形状各异,如采伐剩余物分散且体积较大,而加工剩余物多片状、块状或屑状,它们质地坚实、纤维粗硬,现有的切片机、破碎机等机械难以适当处理;竹料与其他材料高温混炼、成型加工,生物质固体燃料的挤压成型,以及液化、裂解、发酵等所用的机械能耗高、主要部件寿命短、机械故障率高,且所使用的设备多为进口,自主研发的较少。因此,需加强专用设备的自主研发,解决关键部件磨损过快问题,增加机械的使用寿命,降低能耗和成本。

竹废弃物的主要成分是纤维素、半纤维素和木质素,这些成分决定了其具有不同于塑料或木料的加工特性。如生产竹塑复合材料(bamboo-plastic composites)BPC时,存在纤维素易热降解、纤维与热塑性塑料的界面相容性差、纤维在基体树脂中的不易分散性、流动性能差等问题,影响到BPC的拉伸性能、流变性能和力学性能;胶黏剂生产、人造板制造等需添加甲醛,涉及到甲醛释放量超标、危害人类健康等问题;开发生物油时所使用的仪器设备、裂解方法、生产方法等都会影响到生物油的得率,目前生物油得率高时是52.8%,仅利用了纤维素类物质的50%~80%,而且所得生物油存在酸度高、腐蚀性强、稳定性差等缺点。因此,在利用竹废弃物时,还需依据原料的自身特点,改进工艺和技术,以降低能耗和生产成本,提高产品得率和品质。

4)提高产品附加值,研发精深产品。虽然近几年开发的新产品较多,但大部分加工企业仍然以生产低附加值或低技术含量的传统产品或半成品为主,而且有些产品尚处于实验室阶段,还未投入生产,导致竹废弃物的精深加工产品种类、数量都较少,产品附加值不高。如竹废弃物液化后有醇、醚、甘油、糖等产物,虽可用于燃料、胶黏

剂、泡沫或模塑材料等,但目前多只是将其液化,少见进一步的精深加工产品;生物油中含有的酸、醛、酮、酚等化合物会影响其品质,使其不能成为高品质燃油,可研究生物油的改性工艺并提取回收这些化合物,开发出高档生物燃油和高价值的化学副产品。

4 结 论

竹是我国的重要森林资源,种类、面积、蓄积量、产量均居世界之首。利用竹的过程中会产生60%~70%的废弃物,造成竹资源的极大浪费。竹废弃物的主要成分是65%左右的纤维素类物质、23%左右的木质素以及其他营养成分或功能性成分,可直接利用、传统加工利用和工业化利用,产物主要有:1)新型人造板、竹塑复合材料、胶粘剂、泡沫、模塑材料、竹纳米纤维素晶体、3维纳米多孔硅等材料类;2)竹材颗粒燃料、生物油、气化燃气等生物质燃料类;3)竹炭、竹醋液;4)膳食纤维、低聚木糖、黄酮、氨基酸、功能多肽、抗真菌蛋白、竹笋甾醇、可溶性硅、天然食品防腐剂、天然食用色素、竹花酒等药品或保健品类;5)作代料栽培竹荪、香菇、木耳、金针菇、灵芝、平菇等食用菌类;6)肥料与饲料。

今后需加强原料的搜集与预处理,纤维素、木质素等主要成分的充分利用,功能性成分的产品研发,专用设备研发、加工工艺和技术改进,产品附加值提高,精深加工产品研发等方面工作,以利于竹废弃物资源化利用的产业化,真正实现竹资源的“零”剩余,全面提升竹的价值和功能。

[参 考 文 献]

- [1] 吴协保,吴健,但新球,等. 竹类资源在我国石漠化防治中的应用研究[J]. 世界林业研究, 2015-03-05.
Wu Xiebao, Wu Jian, Dan Xinqiu, et al. Application research of bamboo resources on rocky desertification control in China[J]. World Forestry Research, 2015-03-05. (in Chinese with English abstract)
- [2] 罗爱香. 竹废料微波裂解及其产物性质的研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2007.
Luo Aixiang. Study on Microwave Pyrolysis of Bamboo Residues and Properties of its Products[D]. Nanchang: Nanchang University, 2007. (in Chinese with English abstract)
- [3] 刘艳,罗森发,张国柱,等. 宁化县治平乡生态农业—竹屑香菇产业发展的SWOT分析[J]. 经济研究导刊, 2010, (36): 39-40.
- [4] 曾宪阳,孙公钢,凌忠钱,等. 竹材废弃物作为工业锅炉燃料的研究[J]. 中国计量学院学报, 2009, 20(2): 144-148.
Zeng Xianyang, Sun Gonggang, Lin Zhongqian, et al. Research on the bamboo waste as an industrial boiler fuel[J]. Journal of China University of Metrology, 2009, 20(2): 144-148. (in Chinese with English abstract)
- [5] 黄伟素, 陆柏益. 竹笋深加工利用技术现状及发展趋势[J]. 林业科学, 2008, 44(8): 118-123.
Huang Weisu, Lu Baiyi. Advances in deep-processing technology of bamboo shoots[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2008, 44(8): 118-

123. (in Chinese with English abstract)
- [6] 罗爱香,刘玉环,万益琴,等.竹废料微波裂解的实验研究[C].第二届中国资源生物技术与糖工程学术研讨会论文集,中国威海,2007,07:15-18.
- Luo Aixiang, Liu Yuhuan, Wan Yiqin, et al. Experimental study on the microwave pyrolysis of bamboo residues[C]. Weihai: The 2nd National Symposium on Resources and Biotechnology and Sugar Engineering, 2007, 07:15-18. (in Chinese with English abstract)
- [7] 周建钟,徐光辉.竹屑成分测定及其精度分析[J].实验室研究与探索,2004,23(1):25-27.
- Zhou Jianzhong, Xu Guanghui. Measurement of the constituent of bamboo powder and its precision analysis[J]. Research and Exploration in Laboratory, 2004, 23(1): 25-27. (in Chinese with English abstract)
- [8] 贾燕芳.竹笋加工废弃物中纤维再生利用研究及产业链设计[D].杭州:浙江大学,2011.
- Jia Yanfang. Research on the Utilization of Fibers from Bamboo Shoots Processing and Recycling Industry Chain Design[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2011. (in Chinese with English abstract)
- [9] 陈瑞,朱圣东,杨武,等.竹子化学成分的测定[J].武汉工程大学学报,2013,35(2):57-59.
- Chen Rui, Zhu Shengdong, Yang Wu, et al. Analysis of chemical components of bamboo [J]. J. Wuhan Inst Tech, 2013, 35(2): 57-59. (in Chinese with English abstract)
- [10] 王晓明,王建和.我国竹资源综合利用的现状分析[J].浙江林学院学报,1993,10(1):86-92.
- Wang Xiaoming, Wang Jianhe. Status analysis of comprehensive developing and utilization of bamboo resources in recent years in China[J]. Journal of Zhejiang Forestry College, 1993, 10(1): 86-92. (in Chinese with English abstract)
- [11] 周文华,薛孔宽.浅析竹材及竹建筑[C].第二届生态环境建材与绿色建筑选材论坛,北京:2007年5月10日:48-51.
- [12] Valarelli I D, Battistelle R A G, Bueno M A P, et al. Physical and mechanical properties of particleboard bamboo waste bonded with urea formaldehyde and castor oil based adhesive [J]. Materia-rio de Janeiro, 2014, 19: 1-6.
- [13] Luo H, Yue L, Wang N W, et al. Manufacture of binderless fiberboard made from bamboo processing residues by steam explosion pretreatment[J]. Wood Research, 2014, 59: 861-869.
- [14] 汪义华,杨军.用竹子制浆备料废弃物生产竹塑复合材料[J].中国造纸,2013,32(9):67-70.
- Wang Yihua, Yang Jun. Production of bamboo-plastic products from bamboo residues[J]. China Pulp & Paper, 2013, 32(9): 67-70. (in Chinese with English abstract)
- [15] 闫微丽.竹塑复合材料制备及其性能研究[D].南京:南京林业大学,2008.
- Yan Weili. The Study on the Preparation Technology and Capability of Bamboo-plastic Composites [D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2008. (in Chinese with English abstract)
- [16] 赵方,程海涛,张双保.竹塑复合材料的制备工艺及其性能研究[J].林产工业,2013,(5):21-25.
- Zhao Fang, Cheng Haitao, Zhang Shuangbao. Study on the preparation technology and properties of bamboo plastic composites[J]. China Forest Products Industry, 2013, (5):21-25. (in Chinese with English abstract)
- [17] 林青.竹塑复合材料的制备与性能研究[D].南京:南京理工大学,2013.
- Lin Qing. The Study on the Preparation Technology and Capability of Bamboo-plastic Composites[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2013. (in Chinese with English abstract)
- [18] 王玉琴.唐道远:把竹屑变成金矿[J].绿色视野,2012,(06):31-34.
- Wang Yuqin. Master Tang Daoyuan: Turn the bamboo shavings into gold mine[J]. Green vision, 2012, (06): 31-34. (in Chinese with English abstract)
- [19] 贺磊,王玉,王小东,等.竹材加工企业废弃物综合治理技术研究初探[J].江西林业科技,2014,42(3):56-58.
- He Lei, Wang Yu, Wang Xiaodong, et al. Study on comprehensive governmance technologies of bamboo processing enterprise's waste [J]. Jiangxi Forestry Science and Technology, 2014, 42(3): 56-58. (in Chinese with English abstract)
- [20] 李小科.竹材加工剩余物酚化及其胶粘剂制造技术[D].南京:南京林业大学,2006.
- Li Xiaoke. Bamboo Residue Liquefied and a Manufacturing Technique of Glue[D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2006. (in Chinese with English abstract)
- [21] 卢婷婷,房桂干,卓治非.酸催化竹材废料多羟基醇液化特性研究[J].化工中间体,2013,(6):32-37.
- Lu Tingting, Fang Guigan, Zhuo Zhifei. Study on properties of acid catalyzed polyhydric alcohol liquefaction of bamboo wastes [J]. Chemical Intermediate, 2013, (6): 32-37. (in Chinese with English abstract)
- [22] 卢婷婷.竹材制浆备料废弃物液化及产物制备聚氨酯阻燃保温材料研究[J].生物质化学工程,2015,49(1):60-61.
- Lu Tingting. Liquefaction of bamboo processing residues and preparation of flame-retardant and heat-insulation polyurethane foam[J]. Biomass Chemical Engineering, 2015, 49(1): 60-61. (in Chinese with English abstract)
- [23] Xie J L, Qi J Q, Hse C Y, et al. Effect of lignin derivatives in the bio-polyols from microwave liquefied bamboo on the properties of polyurethane foams[J]. Bioresources, 2014, 9: 578-588.
- [24] 杨畅静,陈宇飞,吴强,等.竹材剩余物纳米纤维素晶体的制备及性能表征[J].纤维素科学与技术,2013,21(4):63-68.
- Yang Guojing, Chen Yufei, Wu Qiang, et al. Preparation and characterization of cellulose nano-crystals extracted from bamboo residual[J]. Journal of Cellulose Science and Technology, 2013, 21(4): 63-68. (in Chinese with English abstract)

- [25] Sun S L, Wen J L, Ma M G, et al. Enhanced enzymatic digestibility of bamboo by a combined system of multiple steam explosion and alkaline treatments[J]. *Applied Energy*, 2014, 12: 519–526.
- [26] Praneetha S, Murugan A V. Development of sustainable rapid microwave assisted process for extracting nanoporous Si from earth abundant agricultural residues and their carbon-based nanohybrids for lithium energy storage[J]. *Acs Sustainable Chemistry & Engineering*, 2015, 3(2): 224–236.
- [27] Scurlock J M O, Dayton D C, Hames B. Bamboo: an overlooked biomass resource[J]. *Biomass and Bioenergy*, 2000, 19(4): 229–244.
- [28] 杨敏, 宋晓锐, 邓鹏飞, 等. 生物质的裂解及液化[J]. *林产化学与工业*, 2000, 20 (4): 77–82.
- Yang Min, Song Xiaorui, Deng Pengfei, et al. Pyrolysis and liquefaction of biomass[J]. *Chemical and Industry of Forest Products*, 2000, 20(4): 77–82. (in Chinese with English abstract)
- [29] 简相坤, 刘石彩. 生物质固体成型燃料研究现状及发展前景[J]. *生物质化学工程*, 2013, 47(2): 54–58.
- Jian Xiangkun, Liu Shicai. Research status and development prospect of densified biofuel [J]. *Biomass Chemical Engineering*, 2013, 47(2): 54–58. (in Chinese with English abstract)
- [30] 杨晓梦, 刘志佳, 费本华, 等. 竹材颗粒燃料的经济效益分析[J]. *可再生能源*, 2013, 31(11): 121–125.
- Yang Xiaomeng, Liu Zhijia, Fei Benhua, et al. Economic benefit analysis of bamboo pellet fuel[J]. *Renewable Energy Resources*, 2013, 31(11): 121–125. (in Chinese with English abstract)
- [31] 刘志佳, 江泽慧, 费本华, 等. 竹材颗粒燃料—中国具有商业开发潜力的生物质固体燃料[J]. *林业科学*, 2012(10): 140–144.
- Liu Zhijia, Jiang Zehui, Fei Benhua, et al. Bamboo pellets: a potential and commercial pellets in china[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2012 (10): 140–144. (in Chinese with English abstract)
- [32] Zhang Z F, Huang K, Ye Y J, et al. Pyrolysis characteristics and kinetics analysis of moso bamboo[J]. *Materiale Plasticae*, 2015, 52(1): 122–124.
- [33] Chen D Y, Liu D, Zhang H R, et al. Bamboo pyrolysis using TG-FTIR and a lab-scale reactor: Analysis of pyrolysis behavior, product properties, and carbon and energy yields[J]. *Fuel*, 2015, 148: 79–86.
- [34] Xie J L, Qi J Q, Hse C Y, et al. Optimization for microwave-assisted direct liquefaction of bamboo residue in glycerol/methanol mixtures[J]. *Journal of Forestry Research*, 2015, 26(1): 261–265.
- [35] Xie J L, Hse C Y, Shupe T F. et al. Liquefaction behaviors of bamboo residues in a glycerol-based solvent using microwave energy [J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2014, 131(9).
- [36] Ye L Y, Zhang J M, Zhao J, et al. Liquefaction of bamboo shoot shell for the production of polyols[J]. *Bioresource Technology*, 2014, 153: 147–153.
- [37] 刘志坤. 竹材加工剩余物综合利用研究(一) [J]. *竹子研究汇刊*, 2003, 22(1): 56–59.
- Liu Zhikun. Study on the comprehensive utilization of the left-over of bamboo timber processing(I)[J]. *Journal of Bamboo Research*, 2003, 22(1): 56–59. (in Chinese with English abstract)
- [38] 王越, 胡玓. 中国竹子之乡发展特色[J]. *园林*, 2011, (1): 34–37.
- [39] 叶利培, 房桂干, 沈葵忠, 等. 木聚糖酶水解竹材废弃物抽取低聚木糖工艺条件的优化[J]. *食品工业科技*, 2013, 22(34): 141–144, 148.
- Ye Lipai, Fang Guigan, Shen Kuizhong, et al. Optimization of xylo-oligosaccharides production by xylanase hydrolysis with bamboo wastes in processing[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2013, 22(34): 141–144, 148. (in Chinese with English abstract)
- [40] Huang C X, Chu Q L, Xie Y H, et al. Effect of kraft pulping pretreatment on the chemical composition, enzymatic digestibility, and sugar release of moso bamboo residues[J]. *Bioresources*, 2015, 10(1): 240–245.
- [41] 杜玉梅, 陶文亮, 胡勇. 竹屑黄酮的工艺初探[J]. *贵州化工*, 2011, 36(6): 4–6.
- Du Yumei, Tao Wenliang, Hu Yong. Study on extraction process of flavonoids from bamboo sawdust[J]. *Guizhou Chemical Industry*, 2011, 36(6): 4–6. (in Chinese with English abstract)
- [42] 杜孟浩, 王敬文, 张金萍, 等. 竹可溶性硅抽取和生物利用的研究[C]. 成都: 第九届中国林业青年学术年会论文摘要集(第5分会场), 2010–07–31, 207.
- [43] 钟以举, 卢成英. 武陵山区代料栽培食用菌的优势与建议[J]. *中国林副特产*, 2002, (1): 27–29.
- [44] 安吉农民竹屑种竹荪[N/OL]. *农家报*, 2013–05–03. http://qzrb.qz828.com/njb/html/2013-05/03/content_57594.htm.
- [45] 傅基丰: 竹屑种菇亦香甜[N/OL]. *闽西日报*, 2011–04–15. http://www.mxrb.cn/szb/html/2011-04-15/content_12847.htm.
- [46] 刘叶高. 毛竹屑栽培杏鲍菇试验[J]. *食用菌*, 2008, (3): 35–36.
- [47] 吴中声. 竹屑半覆土栽培香菇技术[J]. *中国食用菌*, 2000, 19 (2): 26–27.
- [48] 王超, 许文静, 余学军, 等. 灵芝发酵竹粉基质产菌质多糖的条件优化[J]. *中国食品学报*, 2014, 14(3): 94–99.
- Wang Chao, Xu Wenjing, Yu Xuejun, et al. The optimization condition of fungal substance polysaccharides in the medium of bamboo powder fermented with *Ganoderma Lucidum*[J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2014, 14 (3): 94–99. (in Chinese with English abstract)
- [49] 吕玉奎, 王玲, 吕玉素, 等. 麻竹废弃物循环利用关键技术研究[J]. *世界竹藤通讯*, 2015, 13(1): 1–5.
- Lv Yukui, Wang Ling, Lv Yusu, et al. Key technologies for residues recycling of *Dendrocalamus latiflorus munro*[J]. *World Bamboo and Rattan*, 2015, 13(1): 1–5. (in Chinese with English abstract)
- [50] 周晓川. 木屑、竹屑及竹枝的综合利用[J]. *纸和造纸*, 2012, 31 (3): 6–7.

Review on comprehensive utilization of bamboo residues

Gu Xirong, Deng Xuemei, Liu Yingni, Zeng Qingping, Wu Xuelian, Ni Yalan, Liu Xuejiao, Wu Tao,
Fang Pengyi, Wang Bo, Wu Qinzen

(College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400716, China)

Abstract: Bamboo, which is called “the second forest”, is one kind of the major forest resources. China ranks first in terms of bamboo species, planting areas, growing forest stock, and bamboo harvests in the world. During the process of bamboo utilization, 60%~70% of bamboo harvests were removed as residues which included bamboo branches, leaves, shoot apex, joint, skin, tabaxir, sawdust and shoot shell. In order to make full use of bamboo resources and explore new products, many studies on comprehensive utilization of bamboo residues were carried out since 1980. In order to utilize bamboo residues more efficiently, further studies on new technologies of processing bamboo residues are needed and summarized as follows: 1) Gathering and rough handling on raw materials. For example, preferential policies, crushing technologies and crushing machinery on bamboo raw materials are needed to encourage farmers to gather harvested or processed bamboo residues. 2) Making full use of the major ingredients of bamboo and developing new products on functional components. We should exploit more products from cellulose, hemicelluloses, and lignin to evaluate the utilization level, and extract lignin from processed bamboo remains to get corresponding lignin products. Besides, many components such as proteins, amino acids, saccharides, alcohols, esters, ketenes and mineral elements could be extracted and then made into favorite products. 3) Exploiting new and special machinery for crushing, compressing, moulding, pyrolysing, liquefying, and fermenting to solve the problems from current equipments. These problems are high energy-consuming, heavy wearing, short service life, frequent breakdown and high cost. Utilization and processing technology should be improved also for efficient ways to solve the problems such as thermal degradation of cellulose, poor interface compatibility between cellulose and thermoplastic, cellulose dispersing and flowing difficulty in matrix resins (frequently happened in bamboo-plastic composites processing), excess emission of formaldehyde from wood-based panels and resin adhesive, low bio-oil yield from pyrolysing or liquefying, high acidity, strong corrosion and lack of stability of bio-oil made from bamboo residues. 4) Promoting added value of bamboo products and exploiting refined processing products of bamboo residues. Bamboo residues could be used to extract many substances such as alcohol, ether, glycerol, saccharides in liquefied bamboo products, and acid, aldehyde, ketone, phenol in bio-oil. Refined liquefying products and high-quality bio-oil could be obtained as well. Finally, these substances could be made into high added value products. In conclusion, full use of bamboo residues is promising, but further study and new technology is urgently needed.

Keywords: biomass; engineering; environmental protection; bamboo; residues; comprehensive utilization