

竹林生物质炭 固碳增汇实用技术

Shulin Shengwuzhitan Gutan Zenghui Shiyong Jishu

张 敏 施拥军 单胜道 著



5295
1800

竹林生物质炭固碳 增汇实用技术

张 敏 施拥军 单胜道 著

中国农业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

竹林生物质炭固碳增汇实用技术 / 张敏, 施拥军,
单胜道著. —北京: 中国农业出版社, 2016. 9

ISBN 978-7-109-22372-1

I. ①竹… II. ①张… ②施… ③单… III. ①竹林—
生物质—碳—储量—研究 IV. ①S795

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 275335 号

中国农业出版社出版

(北京市朝阳区麦子店街 18 号楼)

(邮政编码 100125)

责任编辑 王黎黎

中国农业出版社印刷厂印刷 新华书店北京发行所发行

2016 年 9 月第 1 版 2016 年 9 月北京第 1 次印刷

开本: 880mm×1230mm 1/32 印张: 2

字数: 60 千字

定价: 10.00 元

(凡本版图书出现印刷、装订错误, 请向出版社发行部调换)

前 言

竹林因其生长迅速、产量和经济效益高等特点而被誉为“绿色金矿”。据统计,全球竹林面积达2 000万公顷以上,约占总森林面积的1%,是森林碳汇的重要组成部分。中国是世界上最主要的产竹国,在森林面积下降的现状下,竹林面积却以每年3%的速度递增,再加上其较快的生长速度与较高的碳固存量特点,使得其在中国森林碳汇中的地位尤为突出。因此,研究竹林生态系统管理经营模式的固碳增汇能力,并不断提高其应对气候变化的能力,具有重要的现实意义。近年来,竹林经营管理水平虽有较大提高,但仍以高强度的人工经营和采伐为主,整体培育水平低,竹林地的立地生产力与生态系统健康堪忧。土壤管理是影响竹林生态系统碳库平衡的重要环节,也是竹林生长的立地之本。面对竹林地生物多样性下降、土壤退化污染等问题,提倡固碳增汇功能、科学系统的竹林土壤管理模式是目前竹产业可持续发展迫切需要解决的重要问题。

利用废弃生物质制成生物质炭进行农林应用,可以有效解决农林业、能源、环境及气候等多领域的问题,是一举多赢的战略措施,这已成为共识。对于土壤而言,生物质炭用于农林业,一方面可改良和培肥土壤,提高土壤生产力;另一方面,土壤碳汇损失是大气中碳含量不断升高的主要驱动力,生物质炭作为一种具有高度稳定性的富碳物质,可以固定生物质中的碳素于土壤中,起到了增汇减排的积极作用。因此生物质炭施用于竹林,不仅可使农林废弃物得到资源化利用,还可改良林

地土壤、提高竹产品产量与品质，同时也提升了竹林土壤碳库和生态系统健康水平，具有显著的碳汇功能。

本书在介绍应用农林废弃物制备生物质炭进行资源化利用的基础上，以浙江科技学院、浙江农林大学野外竹林长期监测试验基地为平台，系统研究了生物质炭的施用对竹林地地力提升、生态系统健康及竹林地固碳增汇的作用。本书适合从事农村环境保护、农林技术推广的人员，以及从事现代农林建设和社会主义新农村建设的组织管理人员阅读；可作为林业碳汇、土壤改良与培肥、生物炭应用等领域科技工作者的参考资料；也可作为高等院校相关专业师生的参考用书。本书的出版得到了浙江省科技重点创新团队“种养废弃物循环利用与污染防控技术（2013TD12）”和国家科技部国际合作欧盟专项“废弃生物质水热炭化及功能炭材料制备研究（2014DFE90040）”、浙江省重点研发计划“农业固废新型炭化技术及土壤水体修复剂研发（2015C33006）”、浙江省重大科技专项“农业废弃物高效制沼与三沼综合利用技术（2015C02037）”等项目经费的资助，同时得到了浙江科技学院和浙江农林大学相关领导的关心与支持，特别要感谢浙江农林大学周国模教授多年以来的悉心指导。此外，浙江省废弃生物质循环利用与生态处理技术重点实验室和浙江省森林生态系统碳循环与固碳减排重点实验室对本书的出版也给予了大力的支持与帮助。中国农业出版社亦为本书的出版付出来了辛勤的努力，在此一并表示诚挚的谢意。

由于著者水平有限，加上时间仓促，不妥之处，敬请批评指正！

著 者

2016年8月

目 录

前言

第 1 章 竹林生态系统增汇减排技术概述	1
1.1 竹林生态系统的增汇减排功能及意义	1
1.2 竹林生态系统存在的问题	2
1.2.1 毛竹林长期立地生产力衰退	2
1.2.2 雷竹林生态系统健康恶化	3
1.3 竹林生态系统增汇减排工作进展	4
参考文献	5
第 2 章 生物质炭的制备与应用	6
2.1 生物质炭的定义与分类	6
2.2 生物质炭的制备	7
2.3 生物质炭的性质与功能	10
2.3.1 基本性状与影响因素	10
2.3.2 生物质炭的理化性状与功能	13
2.4 生物质炭土壤改良试验研究	15
2.4.1 试验设计	15
2.4.2 结果分析	16
2.5 生物质炭的应用前景	21
2.5.1 提高土壤生产力	21

2.5.2 作为碳贮存库	22
2.5.3 国内外应用动态	25
参考文献	26
第3章 竹林生物质炭施用固碳增汇案例分析	30
3.1 生物质炭施用对竹林植被生长的影响	30
3.1.1 生物质炭施用对雷竹林地肥力的影响研究案例	31
3.1.2 生物质炭施用对毛竹生物碳储量分布格局的影响 研究案例	33
3.2 生物质炭施用对林地土壤养分与生态的影响	34
3.2.1 生物质炭施用对雷竹林土壤性状 的影响研究案例	35
3.2.2 生物质炭施用对毛竹林土壤有机碳的影响 研究案例	36
3.2.3 生物质炭施用对林地生态系统的影响研究案例	36
3.3 生物质炭施用对竹林温室气体排放的影响	37
3.3.1 生物质炭施用对竹林温室气体排放的 影响研究案例	39
3.3.2 生物质炭施用对竹林减排的初步估算研究案例	39
参考文献	40
第4章 竹林生物质炭施用固碳增汇技术方案	42
4.1 竹林地生物质炭覆盖技术	42
4.1.1 施用范围	42
4.1.2 覆盖基质配置与覆盖量	43
4.1.3 覆盖类型	43
4.1.4 覆盖技术	43
4.1.5 配套农艺	44

4.2 竹林生物质炭基肥料应用技术	44
4.3 经济效益分析	45
4.3.1 固碳减排效益分析	45
4.3.2 经济效益分析	46
参考文献	47
第5章 生物质炭生产和竹林施用过程的碳增汇评估	48
5.1 生物质炭生产的全生命周期定量评价	48
5.2 竹林施用生物质炭后的碳增汇评估	50
5.2.1 竹林生态系统碳计量模型应用	50
5.2.2 竹林生物量模型	51
5.2.3 竹林生物质炭施用增汇评估	53
参考文献	54

第 1 章 竹林生态系统增汇 减排技术概述

1.1 竹林生态系统的增汇减排功能及意义

全球变暖对自然生态和人类生存环境产生了显著影响，成为世界共同面临的严峻挑战。直接减排（减少温室气体排放）和间接减排（森林吸收 CO_2 ）是应对全球气候变化两大措施。作为陆地生态系统主体碳库的森林，发挥其生态系统的碳平衡功能是应对全球气候变化最有效、直接的可持续途径。随着全球经济的发展，林地面积大量减少，这非常不利于解决全球环境问题，因此，保护森林、加强可持续经营管理、达到节能减排目标，已成为国际共识。竹子广泛分布于热带、亚热带地区及中国的东南季风区。世界竹种有 1 200 余种，竹林面积达 2 000 万 hm^2 以上，约占世界森林面积的 1%，因此竹林是森林生态系统中的重要组成部分。竹林因其具有生长迅速、产量和经济效益高等特点而被誉为“绿色金矿”。

竹林固碳具有一般森林所没有的优势与特点，对我国而言尤其重要。

①竹林面积广且逐年递增，在全世界森林面积急剧下降的现状下，竹林面积却以每年 3% 的速度递增，这就意味着竹林是不断扩大的碳汇。中国是世界上最主要的产竹国，其竹产业多成为竹产区的支柱性产业。据统计，2011 年全国竹材产量 15.39 亿根，竹业产值超过 1 000 亿元。

②竹林的生长速度明显超过一般森林，其固碳速率也同样高于一般森林。

③竹林采伐期短、利用率高，一般 4~5 年就可成林，碳元素转

化率和利用率高,有大量的碳元素转化到竹制品中。据推算,中国竹林生态系统的竹林植被、土壤、凋落物碳量分别为 3.19×10^{14} g、 1.66×10^{15} g、 4.5×10^{13} g, 占中国整个森林碳储量的 5.1%。其中,毛竹林年固碳量分别是杉木林和马尾松林的 1.68 倍和 2.33 倍。因此,研究竹林生态系统管理经营模式的减排增汇能力,对不断提高应对气候变化的能力具有重要的现实意义。

1.2 竹林生态系统存在的问题

虽然中国在竹子栽培技术、加工利用水平、研发能力、生产能力及贸易量等方面均居世界领先地位。然而,在当前的竹林经营过程中,人们更多考虑的是经济效益,在很大程度上忽略了竹林的生态效益、社会效益及文化效益等综合效益。不合理的经营造成了对竹林生态环境的巨大破坏,无法充分发挥出竹林的综合效益,对竹产业的健康可持续发展也非常不利。近年来,竹林经营管理水平虽有较大提高,但仍以人工经营和采伐为主,整体培育水平较低,竹林地生态系统的健康堪忧。中国竹林主要分材用林与笋用林两种,其中,毛竹林是面积最大的竹子种类,也是主要的材用林,雷竹林则多为笋用林。下面以这两种典型竹林为例,概述我国竹林立地生产力与生态健康存在的问题。

1.2.1 毛竹林长期立地生产力衰退

我国毛竹林(尤其是笋用竹林)普遍以高强度的人工集约方式经营,多由混交林改为毛竹纯林,林地遭受强度垦复、过度施用化肥等人为干扰,且每年从立地挖春笋、冬笋和伐竹带走了林分内 $1/4$ 的生物量。同时,全竹利用、超短轮伐期方式、强度采伐等人工经营措施对立地有着极大的干扰。当前,在部分较长期经营毛竹纯林中已出现了林分生产力下降和立地退化的现象。由于人工竹林生态系统受到频繁而强度的经营干扰,使其失去了天然林生态系统具有的恢复和平衡功能,造成立地承载能力和恢复能力的明显下

降,其结果可能使竹林生态系统的长期立地生产力比其他树种的人工林生态系统遭受更为严重的影响(李正才等,2010;楼一平等,1999;张奇春等,2010):一是人工集约经营的竹林群落单一,破坏生态多样性,林地病虫害增多、养分不均衡;二是连年采伐减少了人工竹林生态系统的养分总量;三是频繁营林活动(采伐、施肥和垦复等)的过分扰动引起林地土壤表层的生物、理化性状恶化,土壤有机质分解加快;四是传统整株采伐利用作业方式,使竹林系统养分消耗大。

我国经营者和研究者已对这些与竹林长期生产力维护有关的问题给予了关注和初步研究(楼一平等,1999;王宏等,2012),这里涉及的问题包括保持和改善立地的承受力和恢复力、避免引起地力衰退的经营活动、纯林经营和采伐作业,以及竹林环境和竹林生态系统的综合管理等问题。我国毛竹林丰产经营以较高的人力、物力及生态代价来维持林分生产力,这些措施不但不易大面积推广施行,还严重阻碍竹林可持续生产力,迄今仍缺乏合理的长效对策与管理机制。

1.2.2 雷竹林生态系统健康恶化

雷竹是南方著名优良笋用竹,具有成林快、出笋早、笋味鲜、产笋量高等特点。为追求更高的经济效益,农户对雷竹林地采用了林地覆盖、高强度施肥、耕作等集约经营措施,使雷竹林亩产笋量可达几千千克,经济效益明显增加。但是经过3~4年的经营后,雷竹林生态系统退化十分严重,近年来雷竹林地土壤养分状况、土壤酶活性、立竹结构等方面受到了研究者的关注(姜培坤等,2000;刘振勇等,2015;徐祖祥等,2015)。针对实施笋用雷竹林进行一系列研究调查,与天然竹林相比,强度人为干扰使雷竹林生态系统健康全面恶化。

①组织简化,灌木层消失,草本层减少且高度降低,物种以短命种和r-对策种占优势,物种丰富度下降了50%以上,多样性指数下降了30%。

②活力维持力差,虽然丰产栽培措施提高出笋量和产值成倍提

高,但持续时间不长,一般 3~4 年竹林退化严重。

③土壤健康恶化,土壤中 N、P、K 比例失调,多种酶活性下降,P、K 元素超量富积。

④对邻近生态系统破坏可能性加大。

⑤大量化肥农药的投入引起面源污染,对人类健康构成潜在的危害。

⑥水土流失增加,生态系统服务功能弱,对外部输入依赖性强的,管理选择性小。

1.3 竹林生态系统增汇减排工作进展

面对竹林地生物多样性下降、地力退化、土壤污染等问题,竹业界普遍认识到现行竹业经营技术已满足不了现代竹业形势发展的需要,提出了实施竹业可持续经营的发展战略。为解决竹业可持续发展的需要,开展竹林认证被证实是非常有效的解决方式,健康的竹林认证市场逐步成为促进全球可持续发展、应对气候变化和减少区域贫困的重要途径。所以,应对竹林经营管理模式也要提出增汇减排的要求。经营模式包括采伐模式、土壤管理模式、品种选用、林分管理模式等方面,其中土壤管理是影响竹林生态系统碳库平衡的重要环节,也是竹林植被碳库健康的立地之本。提倡减排增汇功能的土壤管理模式是目前竹业可持续发展的重要保障手段。竹林土壤生态管理是以生态安全和可持续经营为标准对一些现行竹林经营技术作了重新认识与修正,开展毛竹丰产林生态培育技术、竹林养分循环利用、提倡自肥能力维护与改善的经营模式优化、竹林专用有机肥应用等一系列促进竹林生态系统生态健康、土壤与植被增汇、土壤生态管理减排的相关研究,提出竹林丰产结构动态管理、竹木混交经营、林地免耕、平衡施肥、竹子专用肥施用等增汇减排措施。如笋用雷竹林生态系统修复和维护可采取以下措施。

①开春出笋后及时清除林地覆盖物,减少除草次数,促进林下植物生长和生物多样性恢复。

②连续覆盖年限不宜过长,最好以覆盖两年后休闲两年。

③控制施肥量,在原有基础上减少40%~60%,减少N、P、K复合肥的用量,改善林地养分比例。

参 考 文 献

- 姜培坤,俞益武,金爱武,等,2000.丰产雷竹林地土壤养分分析[J].竹子研究汇刊,19:50-53.
- 李正才,杨校生,蔡晓郡,等,2010.竹林培育对生态系统碳储量的影响[J].南京林业大学学报(自然科学版),1:24-28.
- 刘振勇,杨晓明,俞群芬,等,2015.德清县雷竹林经营状况调查[J].浙江林业科技,(35):41-46.
- 楼一平,盛炜彤,萧江华,1999.我国毛竹林长期立地生产力研究问题的评述[J].林业科学研究,(12):172-178.
- 王宏,应叶青,王晞月,2012.浙江毛竹林生态经营技术的PRA-DPSIR评价[J],世界竹藤通讯,5:1-6.
- 肖丽霞,萧江华,胡小松等,2005.中国竹产业现状和发展研究[J].世界竹藤通讯,3:29-32.
- 徐祖祥,祝小祥,徐进,等,2015.临安雷竹林施肥现状及问题的分析[J].农学学报,5:53-56.
- 张奇春,王雪芹,楼莉萍,等,2010.毛竹林生态系统地表径流及其氮素流失形态研究[J].水土保持学报,5:23-26.

第2章 生物质炭的制备与应用

2.1 生物质炭的定义与分类

生物质炭 (biochar) 是生物质在缺氧或低氧环境下, 经热裂解 (通常 $< 700^{\circ}\text{C}$) 产生的相对稳定、芳香化、富含碳素的固态产物 (Antal and Gronli, 2003; 何绪生等, 2011)。根据生物质材料的来源, 生物质炭可以分为木炭、竹炭、秸秆炭、稻壳炭、动物粪便炭等; 根据热裂解工艺, 可分为热裂解炭与水热炭。为便于更好地阐述生物质炭及其相关概念, 表 2-1 比较了生物质炭与若干炭质材料的概念内涵 (Lehmann, 2007; Lehmann et al., 2011; 李力等, 2011)。

表 2-1 常见炭质材料概念分类

(李力等, 2011)

概念	内 涵
生物质炭 (Biochar)	强调生物质原料来源和农业科学、环境科学中的应用, 主要用于土壤肥力改良、大气碳库增汇减排以及受污染环境修复
炭 (Char)	泛指炭材料, 尤其强调用天然火在自然状态下烧制形成
木炭/炭黑 (Charcoal)	制作过程和性质特点与生物质炭相似, 多使用木头、煤炭作为原料, 强调应用于燃料、工业热炼、除臭脱色的生物质热解残渣, 具有高热值和高内表面积
农业炭 (Agrichar)	强调用于农业土壤改良、作物增产的炭质材料, 可认为是生物质炭在农业科学的特定称谓
活性炭 (Activated carbon)	强调制作过程中为增强表面特性的应用而人为采用极高温 (通常 $> 700^{\circ}\text{C}$)、物理化学手段 (如高温气体或化学药剂) 活化的、高比表面积、高吸附特性的疏松多孔性物质, 常用于受污染环境的修复、环境工程处理等方面
黑炭 (Black char)	泛指各类有机质不完全碳化生成的残渣, 包括炭黑、生物质炭、活性炭、焦炭等各种炭质材料

将废弃生物质中 40% (质量分数) 的碳元素通过炭化的方式转变成相对难降解的炭化物, 被认为是一种有效固定 CO_2 和废弃生物质资源化的方法。生物质炭具有促进植物生长、分解慢、降低重金属和有机污染物生物有效性等作用, 既可作为高品质能源、土壤改良剂, 也可作为污染修复剂、肥料缓释载体及 CO_2 封存剂等, 广泛应用于固碳减排、水源净化、重金属吸附和土壤改良等, 为气候变化、环境污染和土壤功能退化等热点问题提供了可能的解决方案 (Dominic et al., 2010; Kleiner, 2009; Lehmann, 2007)。在气候变化、环境污染、能源短缺、粮食危机和发展农业可持续等宏观背景下, 生物质炭的潜在应用价值和空间被不断拓展, 理论研究与技术开发发展迅速。

2.2 生物质炭的制备

高温裂解与低温裂解 (水热技术) 是生物质转化生物质炭的两种主要热化学方法, 两者均能将生物质转化成富含碳元素的炭化物, 产物可分别为热解炭 (图 2-1) 和水热炭 (图 2-2)。热裂解炭化是指在惰性气氛下将生物质慢速加热到 $350\sim 700^\circ\text{C}$ 达几小时至几天的一种典型炭化方法。水热炭化是将生物质在密闭的水溶液中 ($180\sim 250^\circ\text{C}$ 、 $2\sim 10\text{ MPa}$) 停留 1h 以上, 是一种脱水脱羧的加速煤化过程 (Funke and Ziegler, 2010)。

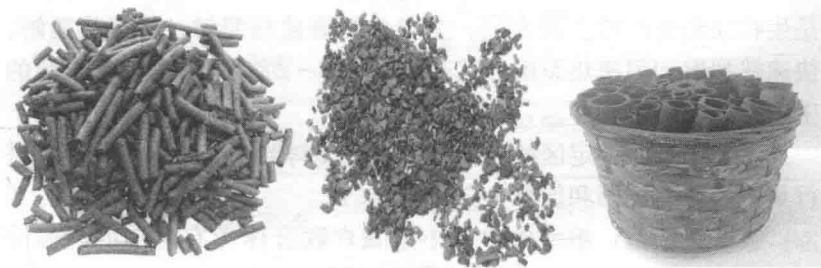


图 2-1 生物质炭——热解炭

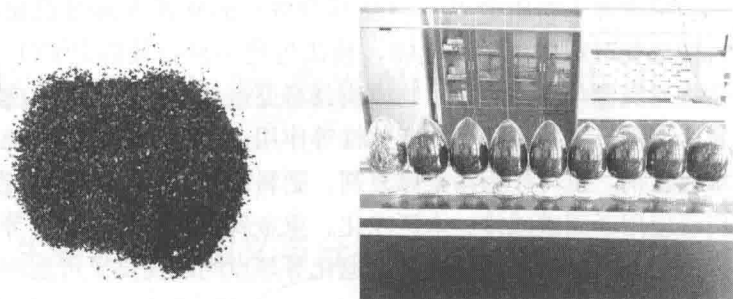


图 2-2 生物质炭——水热炭

水热炭化也称为湿法，是一种使生物质性能显著增强的预处理工艺（Acharjee et al. , 2011; Kobayashi et al. , 2008; Libra et al. , 2011; Yan et al. , 2009）。与热解生物质炭相比，水热生物质炭得炭率较高，进而产生较高的总能量，但碳化率较低，芳香结构较少且生物稳定性差。通过水热炭化技术利用农林废弃物生产生物质炭，对于缓解资源浪费和解决环境污染等问题有着巨大潜力。水热炭化是可以将生物质转化成多种多样生物产品的技术（吴倩芳和张付申，2012），应用十分广泛（表 2-1），如煤替代品的固体燃料、液体燃料或生物油；土壤调理剂提高土壤肥力和作物产量；铀、铜以及镉污染水体的廉价吸附剂；纳米结构炭材料或增加燃料利用率的炭材料。热解生物质炭制备传统采用土窑掩埋法，现代多采用锅炉炭化、程序高温炭化法，在高温缺氧条件下有机物质发生热解，形成了表面具有疏松多孔炭结构的物质。目前，工业热裂解是生物质炭生产的主流方向，主要包括慢速热裂解、中速热裂解、快速热裂解和闪速热裂解（其产物见表 2-2）。国际上生物质炭的生产方式有以下几种。

①集中型，一定区域的所有生物质废料都被送到中央处理厂进行集中处理，美国和加拿大应用较多。

②非集中型，单个农户或小型农户联合体拥有自制的高温分解炉。

③流通型，装有高温分解设备的合成气动力车，走乡串户为农户

提供生物质炭烧制服务,将制好的炭给农户使用,收集生物油到精炼厂制成可供车辆使用的液态生物燃料,这种方法可能更为可行。

影响生物质炭制备的主要因素之一是温度。温度不仅影响生物质炭的产率,同时影响生物质炭的理化性质(Lehmann, 2007; 毕于运等, 2009)。生物质炭化后的产物主要是生物油、挥发性气体和生物质炭。炭化温度越高,生物质炭产率越低,含碳质量越高,对不同性质的生物质原料需要筛选最适合的炭化温度,求得炭化质量和产量的黄金比例。生物质炭与自然和人为活动中生产的炭屑、活性炭和炭黑不同,尽管这些也是生物质热处理下的炭产物,但它们的耗能和 CO_2 释放量高。当然,高温热裂解也释放 CO_2 ,在秸秆炭制备装置中,生产过程一般只消耗其中 10% 的能量。在消耗生物质较多的合成气生产过程中,其生物质炭副产物中仍有超过 60% 的碳保留。当然,单宁和木质素含量高而灰分和氮含量低的有机废弃物最适合中温(约 500°C)条件下生物质炭的加工。生物质炭制备流程工艺与设备见表 2-2 和表 2-3,图 2-3 和图 2-4。

表 2-2 水热炭化废弃生物质的种类、用途及制备条件

(吴倩芳和张付申, 2012)

种类	组成	用途	制备条件
生活垃圾	纸类、塑料、餐厨、无机物、木料	固体燃料	$220\sim 250^\circ\text{C}$, 0.5~20h
林业废弃物	柳枝稷、松木屑、杉树	地下水处理屏障、吸附材料(六价钼)、 Cu^{2+}	300°C , 20~30min
牲畜粪便	家禽粪便、猪粪	有机物吸附剂(双酚 A、菲、乙烯雌二醇)	250°C , 20h
种植废弃物	小麦秸秆、果壳	有机物吸附剂(双酚 A、菲、乙烯雌二醇、燃料)	$250\sim 300^\circ\text{C}$, 20h
食品废弃物	餐厨垃圾、虾壳、甜菜根	土壤改良剂、电池和超级电容器材料的前驱体、用于 CO_2 赋存和生物检测	$180\sim 200^\circ\text{C}$, 18~24h
泥炭	热带泥炭	脱水、提升热值	$250\sim 380^\circ\text{C}$, 30min