

乔木类园林废弃物工业组成与热解特性相关性研究

姚宏鹤¹, 蔡威威¹, 张萍¹, 曹畅², 刘学磊¹, 任学勇^{1,3*}, 祁项超³

(1. 北京林业大学材料科学与技术学院, 木质材料科学与应用教育部重点实验室, 北京 100083; 2. 北京市产品质量监督检验院, 北京 100023; 3. 河北省活性炭产业技术研究院(筹建), 河北省活性炭技术创新中心, 河北承德 067500)

摘要 [目的]探究原料组成对园林废弃物热解特性的影响。[方法]选取北京市乔木类园林树种刺槐、毛白杨、悬铃木、国槐和洋白蜡的树枝和树叶作为试材,分析原料的工业组成、热解特性及动力学参数,研究其相关性关系。[结果]园林废弃物的工业组成与其热解特性参数具有较强的相关性,其中挥发分与灰分影响显著:原料挥发分含量越高,则其热解起始温度越低,最大热失重速率绝对值越大,热解反应速率常数越大,热解反应易发生且较为剧烈;灰分含量越高,则热解残炭率越大且最大热失重速率绝对值减少、热解速率常数越小,热解转化反应越缓慢。[结论]该研究可为分析判断园林废弃物热解转化特性提供科学参考。

关键词 园林废弃物;热解特性;工业组成;挥发分;灰分

中图分类号 X 705 文献标识码 A

文章编号 0517-6611(2022)08-0100-04

doi:10.3969/j.issn.0517-6611.2022.08.027

开放科学(资源服务)标识码(OSID):

**Study on Correlation between Industrial Composition and Pyrolysis Characteristics of Typical Garden Waste**

YAO Hong-he, CAI Wei-wei, ZHANG Ping et al (College of Material Science and Technology, Beijing Forestry University, Key Laboratory of Wood Materials Science and Application, Ministry of Education, Beijing 100083)

Abstract [Objective] In order to explore the influence of feedstock composition on the pyrolysis characteristics of garden waste. [Method] The branches and leaves of some macrophanerophytes in Beijing, such as *Robinia pseudoacacia*, *Populus tomentosa*, *Platanus occidentalis*, *Sophora japonica* and *Fraxinus pennsylvanica* were selected as raw materials. The proximate composition, pyrolysis characteristics and kinetic parameters of the feedstocks were measured and calculated, and their correlation analysis was also studied. [Result] The result showed that there were strong correlations between the proximate composition of garden waste and its pyrolysis characteristic parameters, particularly volatiles and ash content. It was found that a feedstock with higher volatiles content was tend to have lower initial pyrolysis temperature and greater maximum weight-loss rate, which indicated that it was easier to be thermally converted with higher reaction rate. However, a feedstock with higher ash content had lower maximum weight-loss rate but higher residual carbon rate, showing a slower pyrolysis converting process with lower reaction rate. [Conclusion] This study can provide scientific reference for analyzing and judging the thermal energy conversion characteristics of garden waste.

Key words Garden waste; Pyrolysis characteristics; Industrial composition; Volatiles; Ash

园林废弃物,是指在城市绿化养护、植物修剪及加工作业的过程中,所产生的枯枝、落叶、花败等废弃物垃圾。随着国家大力推进生态环境和美丽中国建设,城镇绿化面积逐年增加,随之产生的园林废弃物也大量增多^[1]。园林废弃物具有一定的热值和能量,利用价值较大^[2],但是长久以来其处理方式主要是填埋和焚烧,不仅造成资源浪费,而且由于占用土地空间,存在二次环境污染风险,处理效率低下等问题已经难以满足现阶段城市的发展需求。近年来,有关部门开始采用堆肥^[3-4]、就地粉碎地表覆盖和废弃物再造工艺品等方式来处理利用园林废弃物,但利用方式和处理规模有限,园林废弃物利用仍存在较大的发展空间。

热解是一种基于热化学反应的高效转化利用技术^[5],在生物质能源转化和固体废物处理领域应用广泛。近年来,园林废弃物热解处理研究较多,主要集中于原料热解行为、热解工艺以及热解炭化制备生物炭等方面^[6-8]。然而,在园林废弃物热解特性方面,有关原料工业组成的影响研究仍不

够充分。因此,笔者从原料工业组成的角度研究了不同园林废弃物的热解特性和动力学参数规律,以期为园林废弃物的热解资源化利用提供基础数据和科学参考。

1 材料与方法

1.1 材料 以北京市典型园林树种为试验原料,在北京林业大学校园收集刺槐(*Robinia pseudoacacia* Linn.)、悬铃木(*Platanus occidentalis* Linn.)、洋白蜡(*Fraxinus pennsylvanica* Marsh.)、国槐(*Sophora japonica* Linn.)和毛白杨(*Populus tomentosa* Carr.) 5个树种的枯枝和落叶作为试验样品。样品收集后先自然干燥,然后在 105 ℃ 的条件下烘至绝干,经粉碎处理后,筛取 40~60 目的样品备用。

1.2 仪器与条件 热重分析仪:耐驰 TGA 5500(氮气气氛,从 20 ℃ 室温条件下以 20 ℃/min 的升温速率均匀升至 790 ℃)。马弗炉: SX2-2.5-10 箱式电阻炉(最高额定温度 1 000 ℃)。

1.3 工业分析与热解动力学计算方法

1.3.1 工业分析研究方法。根据 GB/T 28731—2012 固体生物质燃料工业分析方法^[9],对试验样品进行工业分析,其中灰分含量测定是在(550±10) ℃ 的开放条件下灼烧 2 h,挥发分含量测定是在(900±10) ℃ 下隔绝空气加热 7 min,而固定碳含量则通过全部组分去除水分、灰分和挥发分含量得到。

1.3.2 热解过程的动力学分析。基于阿伦尼乌斯和 Coats-

基金项目 北京林业大学大学生创新创业训练计划项目(X202110022150);绿色发展大数据决策北京市重点实验室开放课题资助项目(DM202101);河北省中央财政林草科技推广示范项目(冀 TG [2022]004)。

作者简介 姚宏鹤(2000—),男,辽宁大连人,从事木材科学与工程研究。*通信作者,副教授,博士,硕士生导师,从事林木生物质能源与材料研究。

收稿日期 2021-12-27

Redfern 积分法来计算热解动力学参数。

$$\frac{d\alpha}{dt} = k(T)f(\alpha)$$

式中, $f(\alpha) = (1-\alpha)^n$, 采用级数模型, n 为反应级数。 $k(T)$ 为阿伦尼乌斯速率常数, $k(T) = A \exp(-\frac{E}{RT})$

将升温速率常数 $\beta = dT/dt$ 代入, 动力学方程:

$$\frac{d\alpha}{dT} = \frac{A}{\beta} \exp(-\frac{E}{RT}) (1-\alpha)^n$$

该试验采用一级反应级数模型, 即 $n = 1$, 上式经积分化简得出:

$$\ln[-\frac{\ln(1-\alpha)}{T^2}] = \ln \frac{AR}{E\beta} - \frac{E}{RT}$$

将 $\ln[-\ln(1-\alpha)/T^2]$ 对 $1/T$ 作图, 回归拟合结果为一条直线, 根据直线斜率 $-\frac{E}{R}$ 和截距 $\ln \frac{AR}{E\beta}$ 求得热解动力学参数活化能 (E) 和指前因子 (A)。

得出活化能和指前因子后, 速率常数 k 可通过 Arrhenius

提出的方程式进行求解, 取 500 °C 条件下进行计算。

$$k = A \times e^{-\frac{E}{RT}}$$

2 结果与分析

2.1 园林废弃物原料工业组成 园林废弃物样品的工业组成主要包括挥发分 (70.83% ~ 80.72%)、固定碳 (16.04% ~ 17.95%)、灰分 (2.08% ~ 12.46%) (表 1)。由表 1 可知, 8 个样品的固定碳含量接近, 但枯枝与落叶的挥发分和灰分含量上有明显的区别。挥发分主要是原料中受热易发生分解而析出的有机物质, 分解后形成碳氧化物、碳氢化合物等气相物质和小分子气体, 随着热分解过程的进行从样品中不断释放。枯枝样品的挥发分含量 (79.54% ~ 80.72%) 明显高于落叶样品 (70.83% ~ 77.27%), 树枝的挥发分含量比树叶高 7.13 百分点, 说明树枝中有更多能够发生热降解析出的有机物质。此外, 落叶样品的灰分含量 (7.59% ~ 12.46) 明显高于枯枝样品 (2.08% ~ 3.47%), 这可能是由于树叶中叶绿素等成分的分子结构含有较多的金属元素。

表 1 园林废弃物原料工业分析 (绝干基)

Table 1 Industrial analysis of garden waste raw materials (absolute dry basis)

序号 No.	样品 Sample	挥发分 Volatile matter//%	固定碳 Fixed carbon//%	灰分 Ash content//%	燃料比 Fuel ratio
1	悬铃木枝	80.72	16.35	2.93	0.20
2	国槐枝	80.49	16.04	3.47	0.20
3	洋白蜡枝	79.97	17.95	2.08	0.22
4	毛白杨枝	79.87	16.78	3.35	0.21
5	刺槐枝	79.54	16.99	3.47	0.21
6	洋白蜡叶	77.27	15.14	7.59	0.20
7	悬铃木叶	70.83	16.90	12.27	0.24
8	刺槐叶	70.87	16.66	12.47	0.24

2.2 园林废弃物热解特性

2.2.1 热失重特性。从图 1 可见, 与大多数生物质原料类似, 园林废弃物热解过程主要包含 4 个阶段: 干燥脱水、过渡阶段、快速热解和缓慢热解 (炭化阶段)。干燥脱水阶段对应 DTG 曲线中第 1 个峰, 快速热解阶段对应着第 2 个大峰, 二者之间是过渡阶段, 快速热解之后是缓慢热解炭化阶段。

园林废弃物热解过程中, 首先在 80~110 °C 条件下发生干燥脱水, 原料中的水分达到沸点后以水蒸气形式逸出, 使得样品发生较为明显的失重, 对应 DTG 图线的第一个失重峰。之后是 150~250 °C 的热解过渡阶段, 原料质量虽然没有发生明显降低, 但内部组分发生轻度解聚、重组及玻璃化转变等过程, 为快速热解阶段做准备, 并开始产生小分子气体化合物。快速热解阶段发生在 300~450 °C, 原料内部结构快速热分解, 纤维素、半纤维素和木质素等主要组分发生显著热降解, 释放出大量挥发性物质, 质量大幅降低。快速热解阶段中, 半纤维素 (对应肩状峰) 先于纤维素 (主峰) 发生热解, 同时还伴随着部分木质素的热降解过程。缓慢热解阶段发生在 500~750 °C, 这一阶段主要发生残余木质素的进一步热解, 进一步生成更多的热解炭并进行热解半焦的进一步炭化反应^[9-10]。此时缓慢热解过程只产生极少量挥发性物质, 因此

失重速率较低, 部分原料还出现了小的失重峰, 可能与原料中灰分对半焦热解的催化作用和热解炭的深度裂解有关。

根据图 1 中的 TG 和 DTG 曲线可以计算得到 8 种试验材料的定量热解特性参数, 结果见表 2。由表 2 可知, 8 种样品的热解反应主要发生在 206~576 °C, 热解起始温度在 206~249 °C, 最大失重速率对应的温度在 362~388 °C, 而热解结束温度为 530~576 °C。

不同树枝样品与树叶样品的热失重最大速率与残炭率面有明显的差异, 树枝样品的热失重最大速率绝对值高于树叶样品, 可能与树枝样品的高挥发分含量有关。在热解过程中, 随着样品中纤维素和半纤维素等组分发生热解, 所产生小分子气体的析出会改变样品内部的孔隙结构, 同时提高热质传递效率, 加快热解反应的进程, 从而提高样品的热解失重速率。该研究发现, 树叶样品热解残炭率比树枝样品高, 这可能与其较高的灰分含量有关^[11-12]。

2.2.2 热解过程的动力学。对园林废弃物热解过程失重数据进行拟合计算分析, 可以得到原料的热解动力学参数, 主要包括活化能、频率因子和速率常数 (k), 结果见表 3。由表 3 可知, 8 个样品热解动力学参数计算拟合曲线的线性相关系数均大于 0.99, 说明所选择的热解动力学模型较为合适,

计算可信度高。树枝样品的活化能和速率常数均明显高于树叶样品,树枝样品的活化能在 106~127 kJ/mol、速率常数在 16.64~37.72 min⁻¹,而树叶样品的活化能在 60~69 kJ/mol、速率常数在 1.94~3.77 min⁻¹,说明树枝较树叶热解反应程度更为剧烈。

热解活化能和速率常数是表征园林废弃物热解剧烈程度和速度快慢的重要特性参数,对其热解转化利用具有重要的参考价值。样品的活化能越高,表明样品发生热解反应所需的能量越大,热解反应也越剧烈,所对应的最大热失重速率也越大,说明其热解反应活性较大。速率常数是表示样品

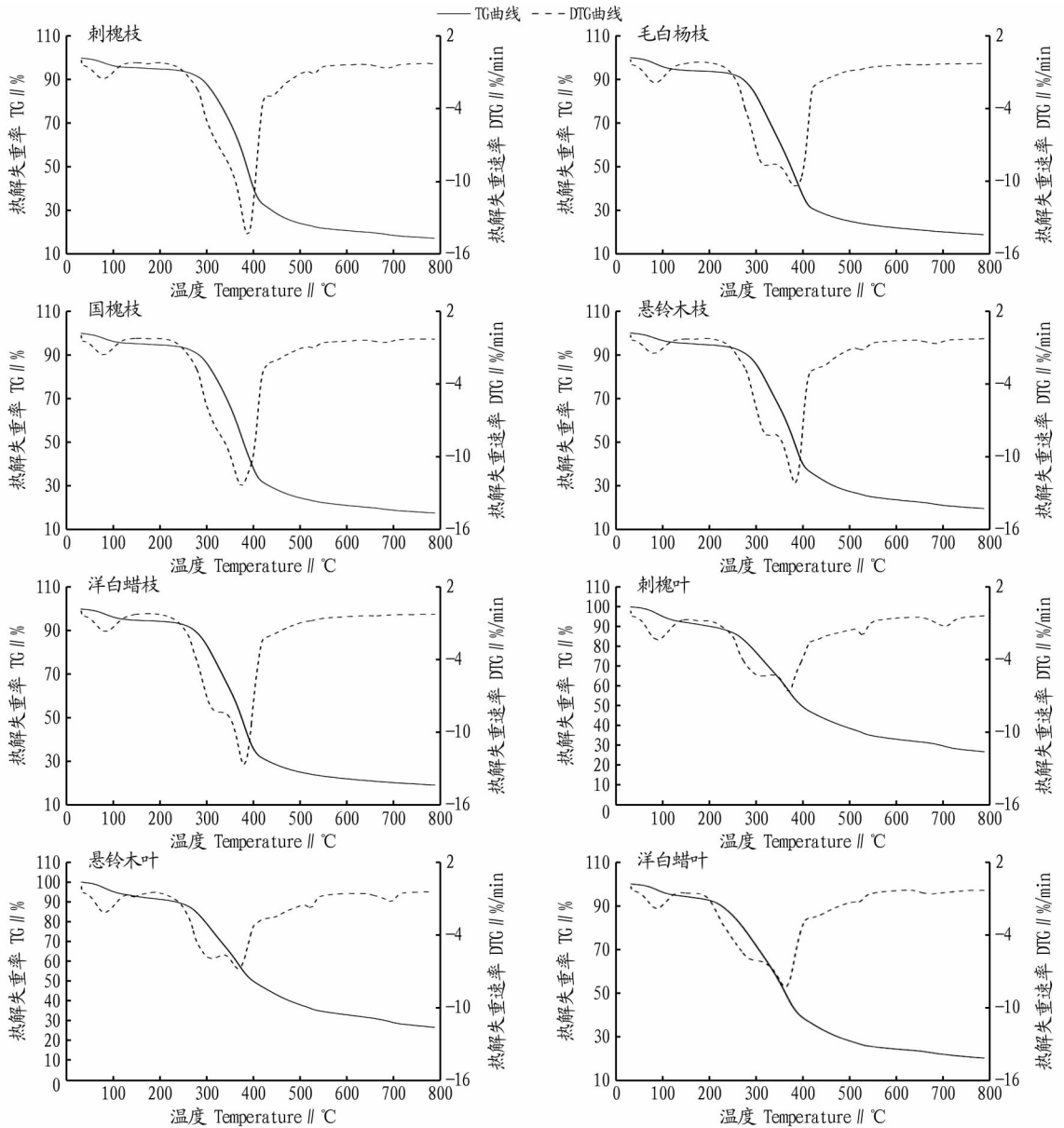


图1 不同园林废弃物热解 TG 和 DTG 曲线

Fig.1 Pyrolysis TG and DTG curves of different garden wastes materials

表2 不同园林废弃物的热解特性参数

Table 2 Pyrolysis characteristic parameters of different garden wastes

序号 No.	样品 Sample	热解起始 温度 T_i / °C	热失重最大 速率绝对值 DTG _{max}	热失重最 大速率对应 温度 T_{max} / °C	热解结束 温度 T_e / °C	残炭率 R / %
1	刺槐枝	221	-14.38	388	550	17.37
2	国槐枝	214	-12.42	374	570	17.42
3	毛白杨枝	213	-10.41	385	566	18.93
4	悬铃木枝	207	-12.15	383	576	19.53
5	洋白蜡枝	208	-12.64	379	567	19.05
6	刺槐叶	249	-6.67	369	536	26.77
7	悬铃木叶	247	-6.79	367	533	26.82
8	洋白蜡叶	206	-8.29	362	530	20.22

表 3 不同园林废弃物热解动力学参数
Table 3 Kinetic parameters of garden waste pyrolysis

序号 No.	样品 Sample	活化能 Activation energy//kJ/mol	频率因子 Frequency factor//min ⁻¹	拟合方程 Fitting equation	相关系数 Correlation coefficient	速率常数 Rate constant min ⁻¹
1	刺槐枝	127	9.4×10 ⁹	y=-15 229 0x+7.648 5	0.997 7	24.69
2	毛白杨枝	114	1.9×10 ⁹	y=-13 713 0x+6.160 0	0.999 8	37.72
3	悬铃木枝	114	9.1×10 ⁸	y=-13 660 0x+5.427 1	0.999 8	18.06
4	国槐枝	110	4.5×10 ⁸	y=-13 172 0x+4.761 4	0.998 1	16.64
5	洋白蜡枝	106	3.1×10 ⁸	y=-12 750 0x+4.414 3	0.998 3	21.36
6	悬铃木叶	69	1.6×10 ⁵	y=-8 341.1x-2.744 7	0.999 5	3.49
7	洋白蜡叶	63	6.8×10 ⁴	y=-7 558.3x-3.489 0	0.997 9	3.77
8	刺槐叶	60	2.2×10 ⁴	y=-7 193.5x-4.543 1	0.999 7	1.94

热分解速率快慢的重要参数,一般而言样品的速率常数越高,其热解反应速度越快。该研究中树枝样品较树叶样品在发生热解时虽然需要更多的能量,但其热解反应也更加剧烈,热解反应速率明显高于树叶样品,综合而言树枝在热解转化过程中表现出更高的热解活性。

2.3 原料工业组成与热解特性相关性

2.3.1 相关性分析。为探究园林废弃物原料工业组成与其热解特性数据之间的相关性关系,该研究将各样品的工业分析数据与热解特性数据分别进行拟合,各拟合曲线的皮尔逊

相关系数与判定系数见表 4,其中判定系数 R^2 为皮尔逊相关系数的平方,用于判定 2 组数据是否有相关性关系。经过拟合分析发现,原料挥发分和灰分含量与园林废弃物热解特性和动力学数据具有相对较强的相关性,挥发分含量与热解起始温度、灰分含量与最大热失重速率绝对值、灰分含量与活化能、灰分含量与速率常数为负相关;挥发分含量与最大热失重速率绝对值、挥发分含量与速率常数、灰分含量与残炭率为正相关。

表 4 园林废弃物工业分析数据与热解特性及动力学数据的相关性

Table 4 Correlation analysis between industrial analysis data of garden waste and pyrolysis characteristics and kinetic data

序号 No.	拟合关系项 Fitting relation term	相关性 Relevance	皮尔逊相关系数 Pearson correlation coefficient	R^2
1	挥发分含量与热解起始温度	负相关	-0.915	0.84
2	挥发分含量与最大热失重速率绝对值	正相关	0.872	0.76
3	挥发分含量与速率常数	正相关	0.742	0.55
4	灰分含量与残炭率	正相关	0.940	0.88
5	灰分含量与最大热失重速率绝对值	负相关	-0.911	0.83
6	灰分含量与活化能	负相关	-0.886	0.79
7	灰分含量与速率常数	负相关	-0.800	0.64

2.3.2 原料挥发分含量对热解特性的影响。原料挥发分含量对样品热解特性的影响主要体现在起始温度、最大热失重速率和速率常数 3 个方面。一般而言,高挥发分含量的原料热解起始温度较低,但热解最大失重速率较高,说明挥发分含量高的园林废弃物更易发生热解并且反应程度更剧烈。在热解初期阶段,园林废弃物中的半纤维素和纤维素等组分先发生热解,产生小分子气体,如 CO、CO₂ 和 H₂ 等从样品内挥发,然后木质素再开始发生高温热解炭化^[13]。原料挥发分含量越高,则其在热解过程中产生的小分子气体越多,在热解转化时的反应速率常数越大,这在该研究中得到验证。在同样温度条件下,挥发分含量高的样品能够比挥发分含量低的样品更早地发生热解反应,并且其快速挥发析出会改变原料内部的孔隙结构,从而促进热分解反应更加剧烈地发生,具有更高的热解反应速率。

2.3.3 原料灰分含量对热解特性的影响。原料灰分含量对园林废弃物的影响主要体现在热解反应活化能、最大热失重速率、反应速率和残炭率等方面。该研究中,随着灰分含量的增大,样品的热解最大失重速率绝对值、活化能、速率常数下降。灰分主要由钠、钾、钙、磷、铁和硅等金属和无机元素组成。这些灰分元素可能会对各样品的热解起到催化

作用,降低了热解反应所需要的能量,但如果灰分过多,在热解的过程中会堵塞原料内部孔隙通道,影响小分子气体挥发析出、削弱热质传递效果,抑制样品热解反应的剧烈程度,降低热解转化反应速率。另外,随着灰分含量的增大,样品的残炭率也逐渐升高,说明灰分也是热解焦炭的重要来源。

3 结论

通过对 8 种乔木类园林绿化废弃物的工业组成和热解特性进行相关性研究,发现原料挥发分与灰分含量对园林废弃物热解特性和动力学参数具有显著影响。原料挥发分含量越高,园林废弃物热解起始温度越低,最大热失重速率绝对值和速率常数越大,越容易被热解转化;随着原料灰分含量的提高,园林废弃物热解后的残炭率提高、热解活化能与最大热失重速率绝对值显著降低,越不容易被热解转化。该研究为基于原料工业组成基础数据分析及判断园林废弃物热解转化特性提供了科学参考。

参考文献

- [1] 孙健,罗文邃,汪洋.园林植物废弃物资源化利用现状与展望[C]//2013 中国环境科学学术年会论文集.北京:中国环境科学学会,2013:2122-2127.

中国种都建设。成立“武汉·中国种都”暨武汉国家现代农业产业科创中心建设市级领导小组和工作专班,统筹研究落实重大决策、重大项目、重要计划,建立联席会议制度,整合政府、科技、金融、教育、企业等多方力量,用好技术、资金、人才等要素资源,建立健全体制机制。

4.2 提升种业育种装备水平和创新能力 依托“武汉·中国种都”及武汉国家现代农业科技产业创新中心建设,聚焦分子育种研究和应用,建设公共组培中心、分子育种中心、基因库和智能化设施温室,集成优良基因发掘、分子辅助育种等核心技术,强化育种基础研究。目前武汉市已有两个实验室纳入国家“十四五”重点支持国家科创中心重点实验室建设的第一批支持计划,一个是湖北省农业科学院的生物育种实验室,一个是湖北省农业科学院生物农药中试与产业化重点实验室。下一步武汉将加大对国家重点实验室、研究中心、洪山实验室的投入,政府、高校、科研院所、企业共建共享,支撑种业高质量发展。

强化种业原始科技创新,支持武汉本地原创的油菜、红莲系水稻、多倍体水稻、水生菜、种猪、淡水鱼育种创新,建立产学研深度融合的联合攻关团队,突破“卡脖子”技术,加快建立以“育繁推一体化”种业企业为主体的商业化育种体系,发展壮大优势种业。

4.3 创新种业科技成果转化机制 建立纵向贯通、横向多元“政产学研”协同创新体系,构建以知识产权为纽带的“产学研用”合作机制与利益共享机制,加强成果转化平台的引进与建设,促进技术集成、资源集约、企业集中、产业集聚。健全完善“创新研发团队+核心试验示范基地+种业龙头企业”的成果研究、熟化和转化推广模式,打造种业科技“苗圃—孵化—加速—产业化—示范”的全产业服务链,建立种业研发与产业有机融合、专家团队与种业企业紧密对接、成果转化与生产效益直接挂钩的种业科技成果快速转化机制。

4.4 培育壮大种业龙头企业 以建设国家现代农业科技产业创新中心为契机,支持优势骨干企业开展兼并重组,培育在全国有影响的大型种业集团,支持种子企业上市,打造种业航母和旗舰企业,支持油菜、水稻、种猪、淡水鱼等优势种业做大做强。发挥龙头企业在种业产业链建设中的延链、强链和补链作用,与上下游市场主体形成种业产业联盟,

推进种养殖、科工贸、农文旅一体化产业发展,实现一二三产业有机衔接和融合发展。

4.5 完善种业知识产权保护体系 加大对原始创新品种保护力度,适时加入《国际植物新品种保护公约》1991年文本,完善新品种权保护范围,强化对原始创新品种权利人利益的保护。在资源保护利用过程中尊重农民的权益,尽快将农民对当地传统原始品种的所有权纳入现行知识产权保护体系,充分探讨在实践中如何界定该权力的拥有主体,建立农民收益分享机制。加强法律宣传,提升种企管理人员的知识产权保护意识。加大种业监管力度,政府、企业和农户等多方进行合作,适量增加种子鉴定检测机构,调动企业的维权积极性,减少维权难度。

4.6 推进种业展会融合 武汉种子交易会、武汉种业博览会都是武汉农业的重要品牌和武汉的城市名片,二会在政府的支持下逐步发展壮大,具有较强的互补性,可将二会深度融合成一个会议,做强武汉种业名片,将交易与展示结合,引进互联网、大数据等现代信息技术,构建线上、线下相结合的种子交易展示平台,促进产销衔接和种业育繁推一体化发展,打造涵盖种子现货、期货和科技成果(植物新品种、技术、商标等)等在内在的大型开放种子交易展示平台,擦亮武汉种业名片。

参考文献

- [1] 汪彤.湖北全力赴打好种业“翻身仗”[N].湖北日报,2021-01-07(003).
- [2] 陈俊红,陈玛琳,安然.新形势下北京市种业发展的思考[J].湖北农业科学,2016,55(21):5677-5681,5685.
- [3] 朱启臻.打好种业翻身仗 确保农业安全[J].乡村振兴,2021(3):36-38.
- [4] 张克华,鲁宏杰.为“中国粮”装上更多“北大荒芯”:北大荒集团强势发力为国家“解决好种子问题”纪实[J].中国农垦,2021(3):9-11.
- [5] 中共中央,国务院.关于全面推进乡村振兴加快农业农村现代化的意见[R].2021.
- [6] 武汉市统计局,国家统计局武汉调查队.武汉统计年鉴-2020[M].北京:中国统计出版社,2020.
- [7] 桑瑜.发展木本油料产业,保障我国粮油供给安全[J].农经,2021(3):70-75.
- [8] 李佳,刘峥,郭会兵,等.武汉研发全球首根试管藕亮相[N].长江日报,2020-12-17.
- [9] 李友强.推进甘肃现代种业发展的思路与措施[J].中国种业,2021(1):1-4.
- [10] 张学武.实施种业攻坚工程 破解农业芯片卡脖子难题[J].中国食品工业,2021(5):32-34.
- [11] 李慧.未来5年,我国种业如何发展[N].光明日报,2020-12-18(10).
- [12] 朱俊峰,马鹏飞.我国种业知识产权保护研究综述[J].种子,2019,38(8):145-149.

(上接第103页)

- [2] SHI Y, GE Y, CHANG J, et al. Garden waste biomass for renewable and sustainable energy production in China: Potential, challenges and development[J]. Renewable and sustainable energy reviews, 2013, 22: 432-437.
- [3] 刘瑜, 戚智勇, 赵佳颖, 等. 我国城市园林废弃物及其资源化利用现状[J]. 再生资源与循环经济, 2020, 13(8): 38-44.
- [4] 鄢海印, 唐志远, 吕浩荣, 等. 园林废弃物堆肥配制基质的防病解磷效果研究[J]. 安徽农业科学, 2018, 46(22): 122-124.
- [5] 任学勇, 王鹏起, 常建民, 等. 林木剩余物快速热裂解液化技术探析及展望[J]. 林业机械与木工设备, 2008, 36(9): 13-16.
- [6] 阎杰, 赵洪宇, 仁善普, 等. 城市生活垃圾与园林废弃物的共热解特性[J]. 环境工程学报, 2017, 11(9): 5220-5226.
- [7] 金森, 杨艳波. 基于热重的南方7种典型乔木叶片热解特性和燃烧性分析[J]. 中南林业科技大学学报, 2015, 35(12): 58-63.

- [8] 鞠艳艳, 丁元君, 邵前前, 等. 城市园林废弃物生物质炭性质及其应用潜力[J]. 林业科学, 2020, 56(8): 107-120.
- [9] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 固体生物质燃料工业分析方法: GB/T 28731—2012[S]. 北京: 中国标准出版社, 2013.
- [10] 王雷, 徐家琛, 甄雅星, 等. 基于热重分析的呼和浩特主要园林树种热解动力学研究[J]. 北京林业大学学报, 2020, 42(2): 87-95.
- [11] 杜海清, 王晶, 白雪峰. 木质类生物质热解过程的热重分析研究[J]. 黑龙江大学自然科学学报, 2008, 25(1): 85-89, 94.
- [12] HE M, MOURANT D, GUNAWAN R, et al. Yield and properties of bio-oil from the pyrolysis of mallee leaves in a fluidised-bed reactor[J]. Fuel, 2012, 102: 506-513.
- [13] 童晨轩, 刘以凡, 吕源财, 等. 不同生物质热解特性及气体产物释放规律研究[J]. 广州化学, 2020, 45(3): 1-7, 28.