

废弃生物质的定义、分类及资源量研究述评

谢光辉^{1,2} 方艳茹^{1,2} 李嵩博^{1,2} 李蒙^{1,2} 杨阳^{1,2} 傅童成^{1,2} 包维卿^{1,2}

(1. 中国农业大学 农学院, 北京 100193;

2. 国家能源非粮生物质原料研发中心, 北京 100193)

摘要 为准确评估中国废弃生物质资源量, 梳理 2008—2018 年已发表文献中的废弃生物质分类、相关术语及其定义、资源量评估方法和结果。将用于生物质原料废弃物的术语统称为“废弃生物质”, 首次确定其定义。根据来源行业不同, 将所有废弃生物质划分为作物秸秆、林业剩余物、食用菌菌渣、畜禽和水产废弃物、工业有机废物及生活垃圾等一级分类, 并分别确定二级和三级分类。结合已有对资源量的评估结果, 总结 2015 年中国废弃生物质资源总量, 其中固体类风干重为 16.91 亿 t, 包括作物秸秆 9.12 亿 t、畜禽粪便 4.17 亿 t、林业剩余物 2.51 亿 t、食用菌菌渣 0.87 亿 t、餐饮垃圾 0.13 亿 t 和污水污泥 0.11 亿 t, 液体废弃生物质即工业有机废水为 199.50 亿 t。

关键词 废弃物; 秸秆; 林业剩余物; 畜禽粪便; 食用菌菌渣; 餐饮垃圾; 污水污泥

中图分类号 X712

文章编号 1007-4333(2019)08-0001-09

文献标志码 A

Review of the definition, classification, and resource assessment of biowaste

XIE Guanghui^{1,2}, FANG Yanru^{1,2}, LI Songbo^{1,2}, LI Meng^{1,2}, YANG yang^{1,2},
FU Tongcheng^{1,2}, BAO Weiqing^{1,2}

(1. College of Agronomy and Biotechnology, China Agricultural University, Beijing 100193, China;

2. National Energy R&D Center for Non-Food Biomass, Beijing 100193, China)

Abstract The rational recycling of biowaste is an effective way to mitigate environmental pollution, reduce carbon emissions and promote energy substitution in China. To assess nationwide biowaste resources, various terms for biowaste were firstly identified and redefined as waste biomass, which could be divided into six categories including crop straw, forestry residue, fungus culture waste, livestock and aquatic waste, industrial organic waste and household garbage. Moreover, two levels of subcategories were further classified for each category according to different sources, respectively. Based on the data from literature summary, the total solid waste biomass in China (1.691×10^9 t in 2015 based on the air-dried weight) was composed of 9.12×10^8 t crop straw, 4.17×10^8 t livestock excrement, 2.51×10^8 t forest residue, 0.87×10^8 t edible fungi residue, 0.13×10^8 t restaurant food waste and 0.11×10^8 t sewage sludge. In addition, the total liquid waste biomass in China was 199.95×10^9 t in 2015 according to the discussed classification system.

Keywords biowaste; crop residue; forest residue; livestock excrement; edible fungi residue; restaurant food waste; sewage sludge

废弃物是当前全球严重环境污染的重要来源之一, 各国对废弃物无害化处理的研究和产业化循环

利用都十分重视。废弃生物质是废弃物种类中资源相对集中, 而且有生物可降解部分。废弃生物质的

收稿日期: 2018-10-28

基金项目: 国家发展与改革委气候司中国清洁发展机制基金赠款项目(2014083)

第一作者: 谢光辉, 教授, 主要从事能源植物和生物质原料研究, E-mail: xiegh@cau.edu.cn

大规模能源化利用不仅可以促进石化能源替代,还能有效降低碳排放,符合循环经济的发展理念^[1-2]。中国正处于经济快速发展阶段,每年废弃生物质产量巨大且为增加趋势,对环境的严重污染已引起广泛关注。但是,迄今为止,对废弃生物质的定义、分类和特征的系统研究未见报道。本研究分析2008—2018年以来废弃生物质相关文献及国家和行业标准,结合中国国情研究确定废弃生物质的概念和分类,并探讨其资源量的现状和进一步研究展望,以期对废弃物循环利用和相关环境治理的研究和产业发展提供理论支撑。

1 废弃生物质的术语和定义

可用于生物质原料的废弃物有各种术语,包括废弃物^[3]、有机废弃物^[4]、生物质废物^[5-7]、生物质固废^[8]、废弃物生物质^[9]、废弃物类生物质^[10]和废弃生物质^[11-12]等,都用于表述各行业生产和生活中可作为生物质原料用于能源和化工生产的废弃或者剩余的动物、植物和微生物产品。但是,这些术语不统一,导致其定义及其内涵不同,定义的边界不清晰、不准确,如“废弃物”内容物范围太广泛,还包括无机类的废弃物等生物质以外的很多内容,“有机废弃物”内容物也比相应的生物质范围宽泛,这2个术语都不能准确的描述作为生物质原料的废弃物资源。相比之下,“生物质废物”、“废弃物生物质”、“废弃物类生物质”和“废弃生物质”4个术语更为准确,英文表达为 biomass waste^[13]和 waste biomass^[14]。其中,“生物质废物”的主词是“废物”,虽然仍然属于生物质的宏观范畴,但是直观字面上这个表述的主词是废弃物,生物质是修饰语,从进一步利用的角度上这个术语也不适宜。这样,“废弃物生物质”、“废弃物类生物质”和“废弃生物质”更为合适,都以生物质为主词,并且能同时满足废弃物属性和生物质属性,但相比之下,“废弃生物质”更简洁。

因此,本研究认为表述废弃物类的生物质总体的术语应统一为“废弃生物质”,定义为植物、动物和微生物在其生产、加工、贮藏和利用过程中产生的剩余残体、残留成分和排泄等代谢产生的废弃物,但不包括很久前生物残体形成的化石能源相关废弃物。

2 废弃生物质的分类

由于来源的多样性,废弃生物质种类较多。2008年以来对其资源量的研究报道都基于不同种

类进行评估,但所包含种类的术语不统一,其描述内容既不全面,也不一致(表1)。例如,报道的林业废弃物^[3-4]所包括的内容相差较大,作为生物质资源的薪材概念^[4]和现行的行业标准^[15]及相关定义^[16]不一致。又如,对于农产品加工废弃物,有报道^[4]中的定义为农林产品加工生产的废液和废渣,也有报道认为主要包括稻壳、玉米芯和甘蔗渣等^[3]。但是,谢光辉等^[17]将稻壳、玉米芯和甘蔗渣等称作作物加工副产物归为秸秆。

定义和分类不一致必然导致扩大或缩小废弃生物质的范围,高估或低估其资源量。因此,本研究结合2008—2018年已有报道,遵循如下原则确定按来源对废弃生物质分类(图1)和定义(表2)。

第一、内容全面:尽可能包括所有不同产出来源的废弃生物质,按照农、林、牧、工、生活和办公等行业,将废弃生物质分为作物秸秆、林业剩余物、食用菌菌渣、畜禽和水产废弃物、工业有机废物和生活垃圾共6个一级种类,并进一步分为14个二级种类和若干个三级种类。

第二、相互独立:在同一级分类中,不同类型边界是独立的,不和另一类有重叠。

第三、有利于评估资源量及其利用:根据各类废弃生物质的不同产出环节,按有利于利用行业统计数据及现有方法评估资源量的原则,尽可能分类至二级和三级种类。

第四、延续已有研究结果:在分类及其术语选择上,充分应用已有报道的废弃生物质资源所包含的正确种类。

3 废弃生物质资源量研究现状

3.1 评估方法

在已有报道中,对于相应的评估方法,尤其针对产量大的作物秸秆^[17,24-28]、林业剩余物^[18,29-30]和畜禽粪便^[21,31-32]报道了定义、分类和资源评估方法及系数取值(表3)。每年工业有机废水^[33]和污水污泥^[35]的资源量由行业统计公布,按含水量80%折干重。目前,未检索到对废弃动物尸体、屠宰废弃物、工业有机废渣和其他有机废弃物资源量评估方法的报道。餐厨垃圾中,已有餐饮垃圾资源量的研究方法^[34],仍未见厨余垃圾资源量的研究方法。

根据已有研究^[37-38],以行业统计的食用菌产量及生物学效率,通过下述公式求食用菌菌渣产量:

表 1 已报道中国废弃生物质资源所用术语及其包含的种类
Table 1 Waste biomass types in China according to previous studies

所用术语 Terminology used	一级种类 First category	二级种类 Second category	文献 Reference
有机废弃物	农作物秸秆		[4]
	畜禽粪便		
	林业剩余物	采伐剩余物 加工剩余物 薪材	
	工业有机废弃物	农产品加工废弃物	
	城市有机生活垃圾	厨余垃圾 粪便	
	农业废弃物	农作物秸秆 畜禽粪便	
	林业废弃物	采伐剩余物 造林剩余物 木材加工剩余物 废旧木质材料	
废弃物	加工废弃物	农产品加工废弃物 工业加工废弃物	[3]
	生活废弃物	城市生活垃圾	
	作物秸秆	田间秸秆 作物加工副产物	
废弃物 生物质	林业剩余物		[9]
	畜禽粪便		
	城市有机垃圾	生活垃圾 工业有机废弃物	
	有机废水	生活污水 工业有机废水	

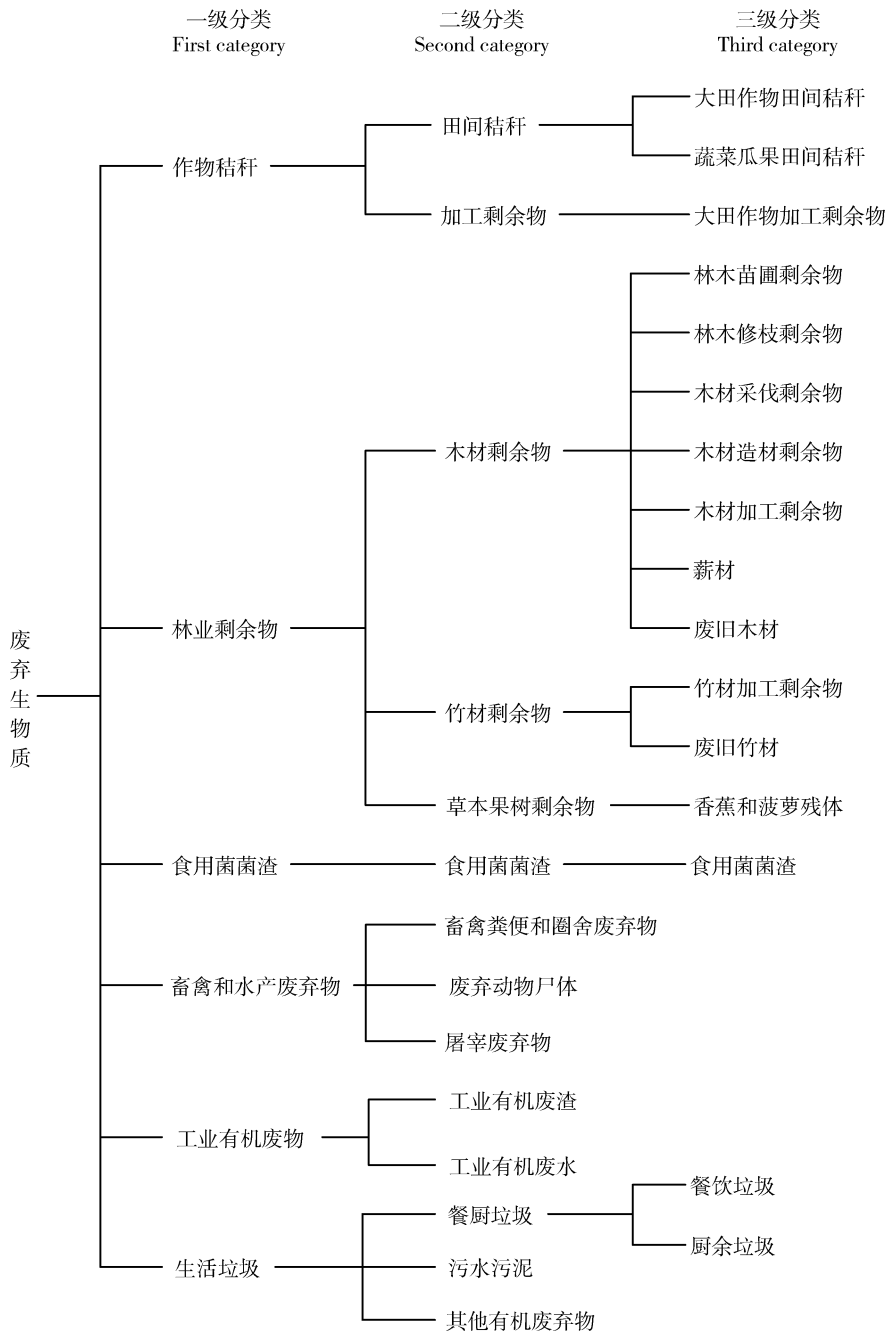


图1 废弃生物质的分类

Fig. 1 Classification of biowaste

食用菌菌渣产量(风干重) =

食用菌产量 ÷ 食用菌生物学效率 × 100%

式中: 食用菌生物学效率取值为 40%^[37-38], 其定义^[41]为单位质量培养料的风干重所培养产生的子实体或菌丝体质量的鲜重。

3.2 资源量研究结果

近十几年来,在废弃生物质资源量研究报道中,尤其对秸秆^[17]和畜禽粪便^[21]资源量评估都有综述。

据不完全统计,2015年中国可计算的固体类废弃生物质产量基于风干重为 16.91 亿 t,液体类废弃生物质仅有工业有机废水的资源量,为 199.50 亿 t (表 3)。固体废弃生物质中,作物秸秆风干重产量最大,达到 9.12 亿 t,占总量干重的 54%。畜禽粪便产量次之,为 4.17 亿 t,占总量干重的 25%。再次为林业剩余物 2.51 亿 t,占总量干重的 15%。产量较小的是食用菌菌渣(0.87 亿 t)、餐饮垃圾

表2 各种类废弃生物质的定义

Table 2 Definition of different biowaste categories

废弃生物质种类 Biowaste category	定义 Definition
作物秸秆 ^[17]	收获作物主产品之后所有大田剩余物及主产品初加工过程产生的剩余物。
田间秸秆	收获作物主产品之后在田间的剩余物,主要包括作物的茎和叶。
大田作物田间秸秆	大田作物收获主产品之后在田间的剩余物,主要包括大田作物的茎和叶。
蔬菜瓜果田间秸秆	园艺作物中的蔬菜和瓜果收获主产品之后的剩余物,主要包括蔬菜和瓜果的茎和叶。
加工剩余物	大田作物和蔬菜粗级加工过程中产生的剩余物,如玉米芯、稻壳、花生壳、棉籽皮、甘蔗渣、甜菜渣和木薯渣等,但不包括麦麸和谷糠等其他精细加工的副产物。
大田作物加工剩余物	大田作物粗级加工过程中产生的剩余物,如玉米芯、稻壳、花生壳、棉籽皮、甘蔗渣、甜菜渣和木薯渣等。
蔬菜瓜果加工剩余物	蔬菜瓜果加工产生的果皮、果渣和废弃的蔬菜瓜果等。
林业剩余物 ^[18]	在林业育苗、管理、采伐、造材以及加工和利用的整个过程中产生的废弃物。
木材剩余物	在木本植物育苗、管理、采伐、造材以及加工和利用的整个过程中产生的废弃物。
林木苗圃剩余物	林木苗圃中死亡的苗木及苗木培育产生的树梢和等截头剩余物。
林木修枝剩余物	用材林、防护林、特殊用途林和经济林在其抚育和管理过程中,人为除去枯枝和部分活枝而产生的枝桠。
木材采伐剩余物	林木在其主伐、抚育间伐和低产(效)林改造采伐和更新采伐等作业过程中产生的剩余物。
木材造材剩余物	原条锯截成一定规格原木的造材过程中产生的剩余物,包括树皮、截头和根部齐头。
木材加工剩余物	木材加工过程中产生的剩余边角料,包括板条、板皮、锯末、碎单板、木芯、刨花和废弃木块。
薪材 ^[16,19]	不符合《次加工原木》标准 ^[15] 要求的圆材,在林业调查中指直立主干长度<2 m或径阶<8 cm的林木。
废旧木材	木质建筑物在建设或改造过程中产生的木质废弃物,以及城市生活、工业生产、办公场所及各种建筑废弃的木质家具。
竹材剩余物	在竹子采伐、造材以及加工和利用的整个过程中产生的废弃物。
竹材加工剩余物 ^[20]	竹子砍伐后产生的竹叶以及加工后产生的竹梢、竹皮和竹屑等。
废旧竹材	竹材的建筑物在建设或改造过程中生产的竹材废弃物以及城乡生活、工业生产、办公场所及各种建筑废弃的竹材家具。
草本果树剩余物	在草本果树主产品收获后产生的废弃物,主要是地上部分剩余的植株残体。
香蕉和菠萝残体	香蕉和菠萝的果实成熟采摘后地上部分剩余的植株残体。
食用菌菌渣	培养菌类产生的废弃培养料(如菌棒)和残余菌体。
畜禽和水产废弃物	畜禽和水产动物养殖及加工过程中产生的各类废弃物。
畜禽粪便和圈舍废弃物 ^[21]	畜禽粪和尿为主,以及混合在其中的圈舍垫料、散落的饲料和羽毛等废弃物。
废弃动物尸体 ^[22]	动物养殖、运输和屠宰场的各类非正常屠宰死亡的废弃动物尸体。
屠宰废弃物 ^[22]	动物在屠宰过程中产生废弃物。
工业有机废物	工业生产过程中的有机废渣、废液和污泥等废弃物。
工业有机废渣 ^[22]	工业生产过程中的排放出的各类有机废渣。
工业有机废水 ^[22]	工业生产过程中的有机废液,如造纸产生的黑液。
生活垃圾	居民生活和各类办公环境产生的餐厨垃圾、市政下水道排污和其他有机废弃物。
餐厨垃圾 ^[23]	餐饮垃圾和厨余垃圾的总称。
餐饮垃圾	对外开放营业的饭店和各单位内部食堂等的饮食剩余物,以及这些单位和用于外买的食品生产单位的后厨果蔬、肉食、油脂和面点等加工、储藏过程产生的有机废弃物。
厨余垃圾	家庭日常生活中丢弃的果蔬及食物下脚料、剩菜剩饭、瓜果皮等易腐有机垃圾。
污水污泥 ^[22]	生活污水和工业有机废水处理过程产生的各类固体沉淀物质。
其他有机废弃物	家庭和办公生产和废纸、废弃纺织物及城乡市场废弃农产品等等。

表3 中国废弃生物质资源量的评估方法及结果
Table 3 Assessment methods and biowaste quantity in China

废弃生物质种类 Category			已有研究方法 文献 Evaluation methods reference	资源量评估结果/(10 ⁶ t/年) Resource quantity			
一级分类 First category	二级分类 Second category	三级分类 Third category		资源产 出年份 Production year	固体 Solid		液体 Liquid
				鲜重 Fresh mass	风干重 ^a Dry mass		
作物秸秆	田间秸秆	大田作物田间秸秆	[17,24-26]	2015	912.48		
				2015	813.56		
				2014	635.49 ^[27]		
		2015	746.73				
		2014	64.66 ^[27]				
		2015	66.83				
	加工剩余物	大田作物加工剩余物	[17,28]	2014	134.80 ^[27]		
				2015	98.92		
林业剩余物	木材剩余物		[18,29-30]	2013—2015	251.00		
	竹材剩余物		[18,29-30]	2013—2015	225.47		
	草本果树剩余物		[18,29-30]	2013—2015	21.68		
				2013—2015	3.85		
食用菌菌渣	食用菌菌渣			2015	86.90		
畜禽和水产废弃物	畜禽粪便 ^b		[21,31-32]	2015	1 754.97	417.32	
	废弃动物尸体		(未检索到)				
	屠宰废弃物		(未检索到)				
工业有机废物	工业有机废渣		(未检索到)				
	工业有机废水			2015			19 950 ^[33]
生活垃圾				2015	23.52 ^[34-35]		
	餐厨垃圾	餐饮垃圾 ^c		2014—2016	44.06 ^[34]	12.96 ^[34]	
		厨余垃圾		(未检索到)			
	污水污泥			2015	30.16 ^[35]	10.56 ^[35]	
	其他有机废弃物			(未检索到)			
总量				2015	1 691.22 ^d		19 950

注:a,风干重废弃生物质含水量约15%;b,全称畜禽粪便和圈舍废弃物^[21],分别按鲜重和风干重表示;c,分别按鲜重和风干重表示,鲜重含水量按75%;d,固体类废弃生物质总量包括作物秸秆、林业剩余物、畜禽粪便、食用菌菌渣、餐饮垃圾和污水污泥。

Note:a,Moisture of the waste biomass is about 15%;b,Livestock excrement is presented based on fresh and air-dried weighte, respectively;c,It is presented based on fresh and air-dried weighte, respectively,and the fresh resturant food waste contains a moisture of 75%;d,The total quantity of solid waste biomass includes crop residue,forest residue,livestock excrement,edible fungi residue,resturant food waste,and swedg sludge.

(0.13 亿 t) 及污水污泥 (0.11 亿 t), 其总和占总量的 6%。

值得一提的是, 近期何可^[27]对 2014 年作物秸秆从秸秆系数取值到资源量的评估结果进行深入研究, 其作物秸秆资源量比本研究 2015 年秸秆资源量低 8.4%, 其中田间秸秆低 15.9%, 而加工剩余物的估算值高 26.6%。造成这些差异的原因, 除作物产量年际确实存在一定差异外, 主要是秸秆系数和加工剩余物系数取值不同。例如, 本研究中对这两类系数的取值^[24-26], 在甘薯、棉花、向日葵、芝麻和甜菜的秸秆系数上比何可^[27]的取值相差均 >35%, 其中甜菜秸秆系数取值比何可^[27]的高出 4.38 倍。另外, 可能存在计算错误, 例如, 何可^[27]误将玉米收获指数 0.46 作为秸秆系数, 导致我国第一大作物玉米的秸秆量过低。虽然在何可^[27]报道中的大田作物加工剩余物资源量不包括棉籽壳, 但是对加工剩余物系数取值中, 除甜菜渣系数比本研究参考值略小, 稻壳、玉米芯和甘蔗渣系数的取值分别比郭利磊等^[28]研究的取值大 35%~50%。本研究认为, 郭利磊等^[28]的取值可信度较高, 应用何可^[27]的取值会导致加工剩余物资源量评估结果高于实际产量。

4 结论和展望

本研究对各行业生产和生活中废弃或者剩余的动物、植物和微生物产品的术语统一称为“废弃生物质”, 确定其定义为植物、动物和微生物在其生产、加工、贮藏和利用过程中产生的剩余残体、残留成分和排泄等代谢产生的废弃物, 但不包括千百万年以前生物残体形成的化石能源相关废弃物。以有利于评估资源量及其利用的原则, 延续已有的研究结果, 按产出行业对废弃生物质进行分类, 包括作物秸秆、林业剩余物、食用菌菌渣、畜禽和水产废弃物、工业有机废物和生活垃圾共 6 个一级种类, 并进一步分为 14 个二级和若干个三级种类。这一分类体系内容全面, 包括所有不同产出来源的废弃生物质。然后, 总结生物质资源量的评估方法, 目前未检索到对厨余垃圾、废弃动物尸体、屠宰废弃物、工业有机废渣和其他有机废弃物资源量评估方法的报道。最后, 根据不完全统计, 总结分析 2015 年中国可计算的固体类废弃生物质产量共 16.91 亿 t (风干重), 液体类仅有工业有机废水的资源量为 199.50 亿 t。固体废弃生物质中, 基于风干重, 作物秸秆产量达到 9.12 亿 t, 占总量 54%。畜禽粪便和林业剩余物产

量分别为 4.17 和 2.51 亿 t, 分别占总量的 25% 和 15%, 食用菌菌渣 (0.87 亿 t)、餐饮垃圾 (0.13 亿 t) 及污水污泥 (0.11 亿 t) 总和占总量的 6%。

近年来废弃生物质资源^[34]、污染^[40-41]、利用及其对碳减排影响^[42-43]的研究受到了国内外广泛重视, 但是, 作物秸秆^[24-28]、林业剩余物^[29-30]和畜禽粪便^[31-32]的研究最多, 污水污泥和餐饮垃圾^[34, 42]研究较少。但是, 其他废弃生物质资源量的系统研究仍未见报道, 建议今后重视厨余垃圾、废弃动物尸体、屠宰废弃物、工业有机废渣和其他有机废弃物资源量的研究。对于产量大的种类, 建议重点研究基于县级区域或更小范围的资源量, 已有报道我国在部分地区县级水平的秸秆产量^[44-45]。另外, 以产业原料角度综合研究废弃生物质, 需要进一步完善其术语定义和分类, 从而建立相关行业标准。在此基础上, 建立可用于能源的各类废弃生物质资源量及其时空分布的实时数据库也应是今后研究重点内容, 有利于减少资源化利用的盲目性, 促进制定更切实可行的管理政策。

参考文献 References

- [1] 石元春. 发展生物质产业[J]. 中国农业科技导报, 2006, 8(1): 1-5
Shi Y C. Developing the biomass industrials[J]. *Review of China Agricultural Science And Technology*, 2006, 8(1): 1-5 (in Chinese)
- [2] 罗钰翔. 中国主要生物质废物环境影响与污染治理策略研究[D]. 北京: 清华大学出版社, 2010
Luo Y X. Environmental impact and pollution control strategies of typical biomass waste in China [D]. Beijing: Tsinghua University, 2010 (in Chinese)
- [3] 崔宗均. 生物质能源与废弃物资源利用[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2011
Cui Z J. *Utilization of Biomass Energy and Waste Resource* [M]. Beijing: China Agricultural University Press, 2011 (in Chinese)
- [4] 石元春. 中国可再生能源发展战略研究丛书(生物质能卷)[M]. 北京: 中国电力出版社, 2008
Shi Y C. *Strategy Research Series of Renewable Energy Development in China (Biomass Energy Volume)* [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2011 (in Chinese)
- [5] 徐衣显, 刘晓, 王伟. 我国生物质废物污染现状与资源化发展趋势[J]. 再生资源与循环经济, 2008, 1(5): 31-34
Xu Y X, Liu X, Wang W. Pollution status and utilization of biomass waste in China[J]. *Renewable Resources And Recycling Economy*, 2008, 1(5): 31-34 (in Chinese)

- [6] 侯华华,王伟,胡颂,徐衣显.城市生物质废物热水解-ASBR厌氧消化研究[J].环境科学,2010,31(2):526-533
Hou H H, Wang W, Hu S, Xu Y X. Municipal biowaste thermal-hydrolysis and ASBR anaerobic digestion[J]. *Environmental science*, 2010, 31(2): 526-533 (in Chinese)
- [7] 陈冠益.生物质废物资源综合利用技术[M].北京:化学工业出版社,2015
Chen G Y. *Comprehensive Utilization Technology of Biomass Waste Resources* [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2015 (in Chinese)
- [8] 鞠美庭.生物质固废资源化技术手册[M].天津:天津大学出版社,2014
Ju M T. *The Technical Manual of Biomass Solid Waste Recycling* [M]. Tianjin: Tianjin University Press, 2014 (in Chinese)
- [9] 谢光辉.非粮生物质原料体系研发进展及方向[J].中国农业大学学报,2012,17(6):1-19
Xie G H. Progress and direction of non-food biomass feedstock supply research and development in China [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2012, 17(6): 1-19 (in Chinese)
- [10] 日本能源学会.生物质和生物能源手册[M].北京:化学工业出版社,2012:7
Japan Energy Institute. *Biomass And Bioenergy Handbook* [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2012 (in Chinese)
- [11] 刘汉桥,蔡九菊,包向军,王博.废弃生物质热解的两种反应模型对比研究[J].材料与冶金学报,2003,2(2):153-156
Liu H Q, Cai J J, Bao X J, Wang B. Comparison of two mechanism models for pyrolysis of waste biomass [J]. *Journal of Materials and Metallurgy*, 2003, 2(2): 153-156 (in Chinese)
- [12] 吴倩芳,张付申.水热炭化废弃生物质的研究进展[J].环境污染与防治,2012,34(7):70-75
Wu Q F, Zhang F S. Progress on hydrothermal carbonization of waste biomass [J]. *Environmental Pollution and Prevention*, 2012, 34(7): 70-75 (in Chinese)
- [13] Corma A, de la Torre O, Renz M, Vollandier N. Production of high-quality diesel from biomass waste products [J]. *Angewandte Chemie*, 2011, 123(10): 2423-2426
- [14] Mattuschka B, Straube G. Biosorption of metals by a waste biomass [J]. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 1993, 58(1): 57-63
- [15] LY/T1369-2011.次加工原木[S].北京:中国标准出版社,2011
LY/T1369-011. Secondary Processing Logs [S]. Beijing: China Standard Press, 2011 (in Chinese)
- [16] 于露.中国农村薪材消耗研究综述[J].经济研究导刊,2012,8(6):40-41
Yu L. A review of the research on the consumption of rural firewood in China [J]. *Economic Research Guide*, 2012, 8(6): 40-41 (in Chinese)
- [17] 谢光辉,王晓玉,任兰天.中国作物秸秆资源评估研究现状[J].生物工程学报,2010,26(7):855-863
Xie G H, Wang X Y, Ren L T. China's crop residues resources evaluation [J]. *Chinese Journal of Biotechnology*, 2010, 26(7): 855-863 (in Chinese with English abstract)
- [18] 谢光辉,傅童成,马履一,李辉,包维卿,李莎.林业剩余物的定义和分类述评[J].中国农业大学学报,2018,23(7):141-149
Xie G H, Fu T C, Ma L Y, Li H, Bao W Q, Li S. An overview of definition and classification of forestry residue [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2018, 23(7): 141-149 (in Chinese)
- [19] 王恺.中国农业百科全书森林工业卷[M].北京:农业出版社,1993:56-60
Wang K. *Encyclopedia of Chinese Agriculture* [M]. Beijing: China Agriculture Press, 1993: 56-60 (in Chinese)
- [20] 万晓清,蒋新元.竹加工剩余物的综合利用[J].企业技术开发,2006,25(7):71-73
Wan X Q, Jiang X Y. Comprehensive utilization of bamboo processing residues [J]. *Technological Development of Enterprise*, 2006, 25(7): 71-73 (in Chinese)
- [21] 谢光辉,包维卿,刘继军,安捷.中国畜禽粪便资源研究现状述评[J].中国农业大学学报,2018,23(4):75-87
Xie G H, Bao W Q, Liu J J, An J. An overview of researches on livestock and poultry excreta resource in China [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2018, 23(4): 75-87 (in Chinese)
- [22] NB/T 34029-2015.非粮生物质原料名词术语[S].北京:中国农业出版社,2016
NB/T 34029-2015. Terminology of non-food biomass feedstock [S]. Beijing: China Agriculture Press, 2016 (in Chinese)
- [23] CJJ 184-2012.餐厨垃圾处理技术规范[S].北京:中国建筑工业出版社,2013
CJJ 184-2012. Technical Code For Food Waste Treatment [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2013 (in Chinese)
- [24] 谢光辉,韩东倩,王晓玉,吕润海.中国禾谷类大田作物收获指数和秸秆系数[J].中国农业大学学报,2011,16(1):1-8
Xie G H, Han D Q, Wang X Y, Lv R H. Harvest index and residue factor of cereal crops in China [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2011, 16(1): 1-8 (in Chinese)
- [25] 谢光辉,王晓玉,韩东倩,薛帅.中国非禾谷类大田作物收获指数和秸秆系数[J].中国农业大学学报,2011,16(1):9-17
Xie G H, Wang X Y, Han D Q, Xue S. Harvest index and residue factor of non-cereal crops in China [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2011, 16(1): 9-17 (in Chinese)
- [26] 王晓玉,薛帅,谢光辉.大田作物秸秆量评估中秸秆系数取值研究[J].中国农业大学学报,2012,17(1):1-8
Wang X Y, Xue S, Xie G H. Value-taking for residue factor as a parameter to assess the field residue of field crops [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2012, 17(1): 1-8 (in Chinese)
- [27] 何可.农业废弃物资源化的价值评估及其生态补偿机制研究[D].武汉:华中农业大学,2016,85-111.

- He K. Reserach on the ecological compensation mechanism and the value assessment of agricultural wastes recycling [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2016, 85-111 (in Chinese)
- [28] 郭利磊, 王晓玉, 陶光灿, 谢光辉. 中国各省大田作物加工副产物资源量评估[J]. 中国农业大学学报, 2012, 17(16): 45-55
Guo L L, Wang X Y, Tao G C, Xie G H. Assessment of field crop process residues production among different provinces in China[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2012, 17(16): 45-55 (in Chinese)
- [29] 傅童成, 包维卿, 谢光辉. 林业剩余物资源量评估方法[J]. 生物工程学报, 2018, 34(9): 1500-1599
Fu T C, Bao W Q, Xie G H. Method of forestry residue resource assessment[J]. *Chinese Journal of Biotechnology*, 2018, 34(9): 1500-1509 (in Chinese)
- [30] 傅童成, 王红彦, 谢光辉. 林业剩余物资源量评估所用系数的定义和取值[J]. 生物工程学报, 2018, 34(10): 1693-1705
Fu T C, Wang H Y, Xie G H. Definition and assessment of coefficients for the calculation of forestry residues[J]. *Chinese Journal of Biotechnology*, 2018, 34(10): 1693-1705 (in Chinese)
- [31] 包维卿, 刘继军, 安捷, 谢光辉. 中国畜禽粪便资源量评估的排泄系数取值[J]. 中国农业大学学报, 2018, 23(5): 1-14
Bao W Q, Liu J J, An J, Xie G H. Value-taking of livestock and poultry excreta factor in China [J]. *Journal of China agricultural university*, 2018, 23(5): 1-14 (in Chinese)
- [32] 包维卿, 刘继军, 安捷, 谢光辉. 中国畜禽粪便资源量评估参数取值商榷[J]. 农业工程学报, 2018, 34(24): 314-322
Bao W Q, Liu J J, An J, Xie G H. Discussion on value-taking of parameters for assessment of livestock and poultry excrement resource in China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2018, 34(24): 314-322 (in Chinese)
- [33] 中华人民共和国环境保护部. 2015年全国环境统计公报[DB/OL]. (2017-02-23) http://www.mee.gov.cn/gzfw_13107/hjtj/qghjtjgb/201702/t20170223_397419.shtml
Ministry of Environmental Protection of The People's Republic of China. National Environmental Statistics Bulletin in 2015 [DB/OL]. (2017-02-23) http://www.mee.gov.cn/gzfw_13107/hjtj/qghjtjgb/201702/t20170223_397419.shtml (in Chinese)
- [34] Yang Y, Bao W, Xie G H. Estimate of restaurant food waste and its biogas production potential in China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 211: 309-320
- [35] 国家统计局环境保护部. 中国环境统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2016, 109-110
Ministry of Environmental Protection of the National Bureau of Statistics. *China Environmental Statistics Yearbook* [M]. China Statistics Press, 2016, 109-110 (in Chinese)
- [36] 中国食用菌协会. 关于印发全国食用菌 2015 年产量、产值和出口统计调查结果的分析[DB/OL]. (2016-10-28) <http://www.cefa.org.cn/2016/10/28/9924.html>
China edible fungus association. Analysis on the the yield, production value and export statistics survey of national edible fungi in 2015[DB/OL]. (2016-10-28) <http://www.cefa.org.cn/2016/10/28/9924.html> (in Chinese)
- [37] 卫智涛, 周国英, 胡清秀. 食用菌菌渣利用研究现状[J]. 中国食用菌, 2010, 29(5): 3-6, 11
Wei Z T, Zhou G Y, Hu Q X. Research and utilization of edible fungi residue[J]. *Edible Fungi of China*, 2010, 29(5): 3-6, 11 (in Chinese)
- [38] 李昕竺, 曾先富, 熊维全, 潘绍坤. 四川省食用菌菌渣资源化利用研究现状[J]. 四川农业科技, 2015, 45(5): 59-61
Li X Z, Zeng X F, Xiong W Q, Pan S K. Study on the resource utilization of edible fungus residue in Sichuan province[J]. *Sichuan Agricultural Technology*, 2015(5): 59-61 (in Chinese)
- [39] GB/T 12728—2006. 食用菌术语[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006
GB/T 12728—2006. Terms of edible mushroom [S]. Beijing: China Standard Press, 2006 (in Chinese)
- [40] Le C, Zha Y, Li Y, Sun D, Lu H, Yin B. Eutrophication of lake waters in China: Cost, causes, and control[J]. *Environmental Management*, 2010, 45(4): 662-668
- [41] Herrero M, Havlik P, Valin H, Notenbaer A, Rufino M C, Thornton P K, Blümmel M, Weiss F, Grace D, Obersteiner M. Biomass use, production, feed efficiencies, and greenhouse gas emissions from global livestock systems[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2013, 110(52): 20888-20893
- [42] Yang Y, Fu T, Bao W, Xie G H. Life-cycle analysis of greenhouse gas and PM 2.5 emissions from restaurant waste oil used for biodiesel production in China [J]. *BioEnergy Research*, 2017, 10(1): 199-207
- [43] Yang Y, Ni J Q, Zhu W, Xie G H. Life Cycle assessment of large-scale compressed bio-natural gas production in China: A case study on manure co-digestion with corn stover [J]. *Energies*, 2019, 12(3): 429, DOI: 10.3390/en12030429
- [44] Han L P, Wang X Y, Spiertz J H J, Yang L, Zhou Y, Liu J T, Xie G H. Spatio-temporal availability of field crop residues for biofuel production in northwest and southwest China [J]. *BioEnergy Research*, 2015, 8(1): 402-414
- [45] Yang L, Wang X Y, Han L P, Spiertz J H J, Liao S H, Wei M G and Xie G H. A quantitative assessment of crop residue feedstocks for biofuel in North and Northeast China[J]. *Global Change Biology Bioenergy*, 2015, 7(1): 100-111