



生态农业丛书

农林生物质废弃物 生态利用研究与展望

蒋剑春 等◎编著



科学出版社



龍門書局

内 容 简 介

全书共分为9章,包括概论、生物质发电、生物质成型燃料、生物沼气和生物热解气化、生物质炭基肥、生物质醇类燃料、生物质制氢、生物质材料与化学品、各章围绕我国农林生物质废弃资源情况、生物质能利用和化学品主要技术、工程化应用案例、生物质能发展状况等方面逐一分析,对生物质能的生态效益、社会效益及综合效益进行剖析阐述,力图为提升我国生物质能产业的科技创新能力、推动我国生物质能产业链和商业模式发展,构建我国生物质能领域的科技决策提供建议和参考。

本书为引领我国生物质能产业生态化发展方向提供了依据,适合从事生物质能产业科技领域的科研人员、业界人士及相关领域管理人员使用,同时可供能源、化工、材料等相关专业的师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

农林生物质废弃物生态利用研究与展望/蒋剑春等编著. —北京:龙门书局, 2024.3

(生态农业丛书)

国家出版基金项目

ISBN 978-7-5088-6410-5

I. ①农… II. ①蒋… III. ①农业废物-废物处理-研究 ②农业废物-废物综合利用-研究 IV. ①X71

中国国家版本馆 CIP 数据核字 (2024) 第 006867 号

责任编辑: 吴平晶 / 责任校对: 王万红

责任印制: 肖 兵 / 封面设计: 东方人华平面设计部

科 学 出 版 社 出 版

北 京 总 发 行 所 16 号

邮 政 编 码: 1000717

<http://www.sciencep.com>

北京中科印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

2024 年 3 月 第 一 版 开 本: 720×1000 1/16

2024 年 3 月 第 一 次 印 刷 印 张: 22 1/2

字 数: 450 000

定 价: 229.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

销售电话 010-62136230 编辑部电话 010-62143239 (DN12)

版权所有, 侵权必究

生态农业丛书

顾问委员会

任继周 束怀瑞 刘鸿亮 山 仑 庞国芳 康 乐

生态农业丛书

编委会

主任委员

李文华 沈国勋 刘 旭

委员 (按姓氏拼音排序)

陈宗懋 戴铁军 郭立月 侯向阳 胡 锋 黄璐琦
蒋高明 蒋剑春 康传志 李 隆 李 玉 李长田
林 智 刘红南 刘某承 刘玉升 南志标 王百田
王守伟 印遇龙 臧明伍 张福锁 张全国 周宏春



《农林生物质废弃物生态利用研究与展望》

编委会

主 任：蒋剑春

副主任：张全国 孙 康 蒋丹萍

委 员（按姓氏拼音排序）：

柴彦君	陈汉平	何晓峰	贺 超	胡建军	胡立红
黄 黎	黄曹兴	焦有宙	荆艳艳	赖晨欢	雷廷宙
李 刚	李 鑫	李学琴	李在峰	刘 粤	路朝阳
欧阳嘉	平立凤	茹光明	单胜道	施 赟	孙云娟
王 奎	王 毅	王瑞珍	王贤华	王小慧	王志伟
吴国民	夏海虹	徐 勇	徐俊明	许 玉	杨树华
易 为	应 浩	勇 强	虞轶俊	曾宪海	张 寰
张志萍	周 鑫	周铭昊	祝玉婷		



物质液体燃料技术、生物质燃气技术、固体成型燃料技术、生物基材料及化学工艺技术。我国生物质发电以直燃发电为主,装机容量仅次于美国,居世界第二位;我国在利用纤维素生产生物航空燃油技术领域已取得突破,实现了生物质中半纤维素和纤维素共转化合成生物航空燃油,在国际上率先进入示范应用阶段;我国在生物质气化及沼气制备领域占据国际领先地位;生物基材料行业规模以每年20%~30%的速度增长,逐步走向工业化应用和产业化阶段。

生物质能技术经过多年的发展,不断推进科技创新、突破新技术、开发新产品,取得了丰硕的成果。为准确地把握生物质能产业的技术现状、探讨生物质能生态化发展趋势、提升生物质能产业的生态效益、促进生物质能产业的持续快速发展,2019年4月,中国林业科学研究院林产化学工业研究所组织了华中科技大学、河南省科学院、河南农业大学、浙江科技学院、南京林业大学等高校和科研院所的专家组成编委会,从生物质资源、基础理论、技术创新、工程化应用等方面,逐一分析其科技创新情况,明确生物质能生态化发展的重点方向,力求把生态文明落到实处。

通过深入研究,结合文献与专利检索、专家讨论、实地调研等方法,编委会系统收集整理了相关数据和案例,深入分析了我国生物质资源和能源化利用产业科技创新的发展现状,提出了生态化发展方向。本书全面梳理和归纳了我国农林废弃物生物质资源情况、生物质能产业科技发展现状、工程化应用情况,综述了生物质能产业前沿技术、生态化应用前景,阐述了生物质能产业对生态效益、社会效益及综合效益的重要贡献,并提出了发展思路和建议。

全书内容兼顾学术性、实践性、系统性和战略性。本书撰写分工如下:蒋剑春、孙国、徐俊明、王奎、周铭昊撰写第1章概论;陈汉平、王贤华、易为、刘粤、祝玉婷撰写第2章生物质发电;雷廷宙、何晓峰、李学琴、李在峰、杨树华、王志伟撰写第3章生物质成型燃料;胡建军、茹光明、张寰、黄黎、王毅、李刚、贺超撰写第4章生物沼气;应浩、孙云娟、许玉撰写第5章生物质热解气化;单胜道、平立凤、柴彦君、施贤、虞松俊撰写第6章生物质炭基肥;勇强、徐勇、李鑫、欧阳嘉、周鑫、赖晨欢、黄曹兴撰写第7章生物质醇类燃料;张全国、焦有宙、荆艳艳、张志萍、蒋丹萍、路朝阳撰写第8章生物质制氢;徐俊明、胡立红、吴国民、王小慧、徐勇、曹宪海、王瑞珍、夏海虹撰写第9章生物基材料与化学品。

生物质能产业发展迅速,涉及领域广泛,而作者经验和水平有限,不足之处在所难免,敬请同行专家和广大读者批评指正。

本书编委会

2023年3月



目 录

第1章 概论	1
1.1 农林废弃物资源生态利用意义	1
1.2 农林废弃物资源分布	3
1.2.1 农业纤维类废弃物	4
1.2.2 林业纤维类废弃物	7
1.3 农林废弃物生态利用技术现状	11
1.3.1 生物质制备气体燃料技术	12
1.3.2 生物质制备液体燃料技术	12
1.3.3 生物质制备固体燃料技术	13
1.3.4 生物质制备生物基材料与化学品技术	13
1.4 农林废弃物资源利用技术发展趋势	14
1.4.1 生物质能转化基础理论研究	14
1.4.2 生物质原料多元化和拓展技术	15
1.4.3 生物质清洁高效转化关键技术	16
1.4.4 成套专业化设备装备技术	17
1.4.5 工程示范与商业模式探索技术	19
第2章 生物质发电	20
2.1 概述	20
2.1.1 生物质清洁高效发电的重要意义	20
2.1.2 生物质发电技术分类	21
2.1.3 生物质发电技术现状	22
2.1.4 国内外生物质发电产业现状	23
2.2 生物质燃烧发电技术	24
2.2.1 生物质燃烧技术分类	24
2.2.2 生物质燃烧发电系统	25



2.2.3 生物质燃烧发电典型案例	26
2.2.4 生物质燃烧发电存在的问题	27
2.3 生物质气化发电技术	28
2.3.1 生物质气化技术及设备	29
2.3.2 生物质气化发电系统	29
2.3.3 生物质气化发电典型案例	31
2.3.4 生物质气化发电存在的问题	34
2.4 生物质湿燃烧发电技术	36
2.4.1 生物质直接与煤湿燃烧发电技术	36
2.4.2 生物质气化与煤湿燃烧发电技术	37
2.4.3 生物质湿燃烧发电典型案例	38
2.4.4 生物质湿燃烧发电存在的问题	41
2.5 生物质供热技术	43
2.5.1 生物质成型燃料燃烧技术及设备	44
2.5.2 生物质供热系统	45
2.5.3 生物质供热典型案例	46
2.5.4 生物质供热存在的问题	47
2.6 生物质发电技术展望	48
2.6.1 生物质发电技术比较	48
2.6.2 生物质燃烧发电技术展望	49
2.6.3 生物质气化发电技术展望	50
2.6.4 生物质湿燃烧发电技术展望	52
2.6.5 生物质供热技术展望	53
第3章 生物质成型燃料	56
3.1 概述	56
3.1.1 生物质成型燃料概念	57
3.1.2 生物质成型燃料的原料来源与构成	58
3.1.3 生物质成型燃料技术现状	59
3.1.4 生物质成型燃料对环境生态的影响	61
3.2 生物质成型燃料基础理论	63
3.2.1 生物质原料的基本特性	63
3.2.2 生物质压缩成型特性	68
3.3 生物质成型技术及设备	70
3.3.1 生物质压缩成型预处理技术及设备	70

3.3.2 生物质颗粒燃料成型技术及设备	76
3.3.3 生物质块状燃料成型技术及设备	78
3.3.4 生物质棒状燃料成型技术及设备	80
3.3.5 生物质成型自动化生产控制系统	82
3.4 生物质成型燃料生产体系	85
3.4.1 生物质成型燃料工业化生产系统	85
3.4.2 生物质成型燃料规模化生产系统	86
3.4.3 生物质成型燃料生产体系综合分析评价	87
3.5 生物质成型燃料技术展望	98
3.5.1 生物质成型燃料技术的发展趋势	98
3.5.2 生物质成型燃料产业发展展望	101
第4章 生物沼气	105
4.1 概述	105
4.1.1 沼气技术在促进社会发展中的作用	105
4.1.2 沼气技术的国内外研究现状与趋势	108
4.2 沼气技术基础	109
4.2.1 沼气发酵基本原理	109
4.2.2 沼气发酵工艺及条件	113
4.3 沼气提纯与利用技术	119
4.3.1 沼气净化提纯技术	120
4.3.2 纯化沼气及其应用	125
4.3.3 沼气综合利用技术	127
4.4 以沼气为组带的生态农业模式	130
4.4.1 以沼气为组带的农业生态工程理论与技术体系	130
4.4.2 沼气技术在生态农业中的应用模式	133
4.4.3 生态农业模式应用	137
4.5 展望	143
第5章 生物质热解气化	145
5.1 概述	145
5.1.1 生物质热解气化技术的意义	145
5.1.2 生物质热解气化技术现状	145
5.2 生物质热解技术	148
5.2.1 生物质热解的基本原理	148
5.2.2 生物质热解的工艺分类	151



5.2.3 生物质热解过程的影响因素	153
5.2.4 生物质热解炉	154
5.3 生物质气化技术	160
5.3.1 生物质气化的基本原理	160
5.3.2 生物质气化的分类	163
5.3.3 生物质气化新技术	164
5.3.4 生物质气化当量比的影响	167
5.3.5 生物质气化过程的评价指标	169
5.3.6 生物质气化炉	171
5.4 生物质热解气化技术的应用	177
5.4.1 生物质热解技术的应用	177
5.4.2 生物质气化技术的应用	178
5.4.3 生物质热解气化多联产技术的应用	181
5.5 展望	188
5.5.1 提高燃气品质	189
5.5.2 合成液体产品	189
5.5.3 制取富氢气体	190
5.5.4 气液联产技术	190
5.5.5 新技术新设备	190
第6章 生物质炭基肥	192
6.1 概述	192
6.1.1 生物质炭基肥研究意义	192
6.1.2 生物质炭基肥研究现状	192
6.2 生物质炭制备技术和理化性质	194
6.2.1 生物质炭制备技术	194
6.2.2 影响生物质炭化的关键因素	196
6.2.3 生物质炭理化性质	197
6.3 生物质炭基肥制备	202
6.3.1 生物质炭基肥生产工艺类型及其应用	203
6.3.2 生物质炭基肥造粒配方及工艺	205
6.3.3 生物质炭基肥造粒设备	208
6.4 生物质炭基肥应用	213
6.4.1 炭基有机肥应用	213
6.4.2 炭基无机肥应用	216

6.5 生物质炭基肥的生态效应与风险	219
6.5.1 生物质炭基肥的农学效应	219
6.5.2 生物质炭基肥的环境生态效应	220
6.5.3 生物质炭基肥应用的潜在风险	221
6.6 展望	222
第7章 生物质醇类燃料	225
7.1 概述	225
7.1.1 生物质醇类燃料开发的意义	225
7.1.2 生物质醇类燃料的研究现状	225
7.2 原料预处理方法	228
7.2.1 物理法预处理	229
7.2.2 化学法预处理	229
7.2.3 生物法预处理	231
7.2.4 新型预处理方法	232
7.3 纤维素糖化	233
7.3.1 纤维素酶与半纤维素酶	233
7.3.2 纤维素酶水解作用机理	235
7.3.3 影响纤维素糖化的因素	236
7.3.4 提高纤维素酶水解的主要策略	238
7.4 生物乙醇发酵技术	240
7.4.1 乙醇生产菌株	240
7.4.2 己糖发酵	241
7.4.3 戊糖发酵	243
7.4.4 生物乙醇发酵方式	244
7.5 生物丁醇发酵技术	244
7.5.1 丁醇发酵菌株	245
7.5.2 丁醇发酵技术	246
7.5.3 丁醇发酵的影响因素	248
7.6 纤维素乙醇的工程应用	249
7.6.1 工程应用背景	249
7.6.2 工艺流程	250
7.6.3 工艺说明	250
7.7 展望	250



第8章 生物质制氢	252
8.1 概述	252
8.1.1 生物质制氢的意义	252
8.1.2 生物质制氢现状	253
8.1.3 生物质制氢技术概述	254
8.2 生物质气化制氢	255
8.2.1 生物质气化制氢的原理	255
8.2.2 生物质气化制氢的现状	255
8.2.3 生物质气化制氢技术与存在的问题	258
8.3 生物质光解水制氢	262
8.3.1 生物质光解水制氢的原理	262
8.3.2 生物质光解水制氢的现状	262
8.3.3 生物质光解水制氢技术	264
8.3.4 生物质光解水制氢装置	265
8.4 生物质光发酵制氢	268
8.4.1 生物质光发酵制氢的原理	268
8.4.2 光合产氢细菌的研究现状	270
8.4.3 生物质多原料光发酵制氢	275
8.5 生物质暗发酵制氢	277
8.5.1 生物质暗发酵制氢的原理	277
8.5.2 暗发酵产氢细菌的分类	278
8.5.3 暗发酵产氢细菌催化制氢的途径	279
8.5.4 生物质多原料暗发酵制氢	281
8.6 生物质暗-光发酵联合制氢	281
8.6.1 生物质暗-光发酵联合制氢的原理	281
8.6.2 生物质暗-光发酵联合制氢的优势	281
8.6.3 生物质暗-光发酵联合制氢的分类	282
8.6.4 制氢原料	284
8.6.5 生物质暗-光发酵联合制氢的装置与示范	286
8.6.6 暗-光发酵联合制氢存在的问题及发展方向	286
8.7 展望	287
第9章 生物基材料与化学品	289
9.1 概述	289
9.1.1 生物基产品的意义	289

9.1.2 生物基产品现状	290
9.2 纤维素基材料与化学品	290
9.2.1 纤维素的来源与分类	290
9.2.2 纤维素的纳米晶体	291
9.2.3 纤维素的纳米纤维	293
9.2.4 细菌纤维素	295
9.2.5 乙酰丙酸	296
9.3 半纤维素基化学品	305
9.3.1 半纤维素制备低聚糖	305
9.3.2 半纤维素制备糖醛	310
9.4 木质素基材料	313
9.4.1 木质素酚醛树脂	313
9.4.2 木质素环氧树脂	316
9.5 展望	318
参考文献	320
索引	339



1.1 农林废弃物资源生态利用意义

我国作为人口大国，约 50%的人口居住于农村地区，而农村地区大量的秸秆等农林废弃物主要用作传统的家庭烹饪、采暖等。在 2000 年的中国能源结构中，仅次于煤炭和石油产品的是广泛用于烹饪和取暖的薪柴。在过去 20 年中，随着中国城市化的发展，全面电气化及液化石油气和天然气供应规模的扩大，为人们提供了更容易获取且更具吸引力的替代能源，使中国使用薪柴的人数大大减少，已有 2.6 亿人得以使用现代能源，这是在能源领域取得的一项卓越成就。随着人们对空气污染问题的日益重视，农村及城市居民禁烧薪柴和煤炭，天然气基础设施迅猛扩张，太阳能等可再生能源也在不断发展，导致我国每年产生大量的农林废弃物因缺乏有效利用途径而只能焚烧处理，对我国的生态环境造成了严重的影响。

生物质是地球上唯一可再生碳源，也是唯一可直接转换为气体、液体、固体等的清洁能源。生物质能可以作为化石能源、太阳能等的重要补充，有利于促进我国能源利用的多元化发展。当前我国生物质资源化利用率仅为 4.8%，其中农林废弃物占当前生物质利用量的 30% 左右。因此，对生物质资源的充分开发利用不仅可缓解我国的环境及能源问题，还可进一步完善及优化我国的能源结构，具有巨大的应用潜力和市场价值。从资源和发展潜力来看，当前我国生物质能综合利用总体仍处于发展初期，在能源生产市场竞争力和利润率方面远不及传统化石能源，对国家政策扶持补贴的力度依赖较大，并且由于生物质原料种类繁多，使不同来源的生物质形状、性质和组成的差异巨大，给生物质原料的处置带来难度，制约了生物质在热化学转化过程中的普适性。目前，我国正处于生物质能综合利用的重大转变期，已实现了从传统的家庭使用向现代化（尤其是发电）利用的平稳转变。《生物质能发展“十三五”规划》于 2016 年 12 月发布，提出了生物质能发展的详细目标，构建完善的生物质能利用及资源综合利用技术体系，整体技术水平达到世界先进水平。除了家用固体生物质消耗下降了 2/3（约 2 800 万 t 油当量）外，所有生物质能的现代化利用途径都增加了。集中用于生产电力和热力的生物质能增长最多，生物质能发电装机由 2016 年的 1 214 万 kW 增至 2 952 万 kW，



到预测期末发电量将超过 1 326 亿 kW·h。在终端利用领域,工业领域生物质能直接消耗量大幅增长(到 2040 年超过 400 万 t 油当量),为高温制造环节提供了有价值的热源,成为工业领域减少对煤炭依赖的一个低碳选择。我国生物质能的另一直接用途是交通燃料,我国实行的生物质燃料发展政策已使我国成为仅次于美国 and 巴西的世界第三大乙醇生产国。截至 2015 年,生物质燃料的消耗量约为 4.5 万桶油当量/天,其中生物质乙醇为 3 万桶油当量/天(每年约 30 亿 L),其余为生物质柴油。我国设定了宏伟的目标:预计到 2040 年,生物质燃料的消耗水平是 2015 年的 10 倍左右,26 万桶油当量/天的生物质乙醇用于道路交通,22 万桶油当量/天的生物质柴油主要用于货运行业,少量航空生物质煤油用于国内航空业。

2018 年 9 月,中共中央、国务院印发《乡村振兴战略规划(2018—2022 年)》(以下简称《规划》),《规划》中指出,我国国家经济实力和综合国力日益增强,对农业农村支持力度不断加大,农村生产、生活条件加快改善,农民收入持续增长,乡村振兴具有雄厚的物质基础。我国的农业发展取得了举世瞩目的成就,但是,仍面临农村秸秆大量剩余、农村生态环境较差等问题。在党的十九大报告中提出了乡村振兴的发展战略,并指出,农业农村农民问题是关系国计民生的根本性问题,必须始终把解决好“三农”问题作为全党工作的重中之重,实施乡村振兴战略。随着天然气等资源的推广使用,秸秆等农林废弃物大量剩余。因此,实现农林废弃物的资源化利用对于缓解我国能源危机、改善农村生态环境意义重大。解决这些问题的方案包括:发展农村农林废弃物能源化、清洁利用技术,推进农林废弃物资源化利用,改善农民居住生活环境;围绕秸秆类生物质,逐步建立炭、气、油、电联产绿色工厂、花园式秸秆利用工厂,建立新型社区,解决农村用电、供暖等问题。以技术进步推动乡村振兴、推进美丽乡村建设,通过大力推广农林废弃物资源的广泛应用,实现变废为宝,促进农村能源利用改革,奠定美丽乡村建设的基础。2013 年,我国提出“一带一路”倡议;对外,依靠中国与有关国家既有的双多边机制,借助既有的、行之有效区域合作平台,共同打造政治互信、经济融合、文化包容的利益共同体、命运共同体和责任共同体;对内,充分发挥国内各地区比较优势,实行更加积极主动的开放战略,加强东中西部互动合作,全面提升开放型经济水平。“一带一路”沿线有 65 个国家和地区,包括东盟 10 国、东亚蒙古国、西亚北非 18 国、南亚 8 国、中亚 5 国、独联体 7 国、中东欧 16 国。沿线国家农业资源丰富,保护和利用的潜力巨大。例如,东南亚地区全年高温多雨,适宜种植多种农作物,除粮食作物外,还盛产橡胶、棕榈油、蕉麻、咖啡等热带经济作物;南亚以种植粮食作物为主,还有棉花、茶叶等经济作物。这些国家多数为农业国,同样存在农村社会公共事业发展滞后、农村基础设施薄弱、农业资源利用技术落后、能源结构单一等问题。“一带一路”倡议的实施有利于促进我国及周边国家各行各业的发展。在发展过程中,深刻认识到能源的重要性,同时我国在《能源发展“十三五”规划》中提到中国和中巴基新



坦经济走廊的能源规划水平不断提升。当前电力、生物质能等能源技术互相交流的步伐正在进一步推进,在这个大背景下我国政府积极支持生物质能相关技术和生物质能相关企业的发展。作为政府“走出去”的一部分及在“一带一路”倡议的背景下,我国的能源公司在海外的活动成为国际投资和技术中重要的组成部分。“一带一路”工程的进一步实现也促进了我国生物质能企业影响力的提升,影响对象从本国扩大到“一带一路”沿线国家。“一带一路”的稳步推进为生物质能企业的发展提供了巨大的市场,也使我国在“一带一路”发展的过程中可以更加高效综合的发展。当前,我国在“一带一路”倡议推进过程中,积极促进国内外生物质能技术发展,积极推动国内外生物质能产品的价格规范化,进而有效地保障我国及“一带一路”周边国家能源企业的发展质量。“一带一路”的发展思路能够有效提升我国与周边其他国家在经济、能源方面的交流与发展,可以有效促进经济共同体的建立,实现共赢。

当前我国的生物质能发展正处于一个较为关键的时期,为了有效保障我国能源事业的发展,推进我国的乡村振兴战略,推动“一带一路”周边国家生态环境保护及能源结构的升级,在这个重要的历史时期抓住机遇,积极进行相关技术的发展,推进生物质能的发展意义重大。

在全球变暖的背景下,发展低碳经济是各国应对气候变化的基本途径,其实质是能源利用效率的提升和清洁能源的使用,核心在于能源技术创新。生物质能是一种以生物质作为载体的能量,是太阳能的另一种表现形式。生物质可以通过热化学转化等方式转化为常规的燃料,包括固态、气态和液态燃料等,是一种清洁的可再生能源。西方发达国家对生物质能的应用研究起步较早,而我国的生物质能产业起步较晚,且专业化程度较低,在低碳利用、节能减排方面面临巨大的挑战和压力。因此,研究国内外生物质能技术发展现状及趋势,提出我国生物质能利用的发展建议,进而为实现我国生物质能产业发展及节能减排提供重要参考,对推动我国能源革命、低碳经济发展及应对全球气候变化等国家重大战略实施具有重要意义。

1.2 农林废弃物资源分布

我国地域辽阔,自然条件复杂,又是农业大国,生物质资源丰富多样,开发潜力巨大。根据《3060 零碳生物质能发展潜力蓝皮书》数据,2020 年中国农林纤维类废弃物资源总量达到了 14.3 亿 t,其中,农作物秸秆资源总量为 8.3 亿 t,可收集资源量为 6.9 亿 t。根据《中国林业和草原统计年鉴(2021)》数据,林业纤维废弃物资源总量约为 6 亿 t,可能资源化利用的资源量为 3.5 亿 t。

1.2.1 农业纤维类废弃物

1. 农业纤维类废弃物资源现状

农作物秸秆估算通常以收获指数或者草谷比计算。以收获指数计算某作物田间秸秆公式如下：

$$\text{田间秸秆产量} = \frac{\text{经济产量}}{\text{收获指数}} - \text{经济产量} = \text{经济产量} \times \left(\frac{1}{\text{收获指数}} - 1 \right)$$

草谷比是指作物田间秸秆产量与经济产量之比，即作物副产品与主产品产量之比，以草谷比计算某作物田间秸秆的公式如下：

$$\text{田间秸秆产量} = \text{经济产量} \times \text{草谷比}$$

根据联合国粮农组织（Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO）粮食生产统计数据库及《中国统计年鉴》数据。2014~2019 年中国秸秆资源状况如表 1-1 所示。

表 1-1 2014~2019 年中国秸秆资源状况 单位：万 t

年份	FAO 粮食生产统计数据库	《中国统计年鉴》
2014	94 146.1	81 143.1
2015	95 168.6	81 934.8
2016	96 316.1	82 198.7
2017	96 642.6	82 284.5
2018	97 958.5	82 981.8
2019	98 367.3	83 231.7

根据表 1-1 的数据，2019 年中国秸秆资源总量分别为 98 367.3 万 t 和 83 231.7 万 t，前者比后者高约 18.2%。造成数据差异的主要原因是 FAO 粮食生产统计数据包含了港澳台数据。另外，统计数据本身有差异，且统计作物的范围不一致。从 FAO 粮食生产统计数据看，2014~2019 年中国秸秆资源总体呈现上升趋势。从《中国统计年鉴》数据看，2019 年小麦、玉米、水稻三大作物秸秆资源总量达到了 5.9 亿 t，占 71%。豆类、棉花、甘蔗的秸秆资源量分别达到了 2 496.9 万 t、1 664.6 万 t、1 684.4 万 t、4 993.9 万 t（图 1-1）。

由于社会经济条件和自然环境的差异，中国农作物种植结构存在区域差异，秸秆资源分布具有一定的地域差异性。整体看来，中国农作物秸秆资源主要分布在东北平原、华北-黄淮平原、长江中下游平原等地。河南、黑龙江、山东、江苏、四川、安徽、河北、吉林、湖南、湖北、内蒙古 11 个省（自治区）年秸秆可收集资源量均在 3 000 万 t 以上，属于全国秸秆资源丰富的区域，且资源密度相对较大。江西、辽宁、广东、陕西、山西、贵州、甘肃、重庆 8 省（直辖市）年秸秆可收

集资源量为 1 000 万~3 000 万 t，属于秸秆资源丰富程度中等区域。其他省（自治区、直辖市）秸秆资源量较少，且资源密度亦较低，属于资源不足区域。



图 1-1 2019 年中国秸秆资源结构分布

2011~2016 年中国主要农作物秸秆变化趋势如图 1-2 所示。



图 1-2 2011~2016 年中国主要农作物秸秆变化趋势

从图 1-2 可以看出，2011~2016 年三大作物（玉米、水稻、小麦）可收集秸秆资源量保持稳定增长，其他作物可收集秸秆资源量保持相对稳定。如表 1-2 所示，依据中国各类作物可收集系数，计算中国秸秆可利用资源量为 6.99 亿 t。

表 1-2 中国各类作物可收集系数

作物种类	可收集系数	作物种类	可收集系数
水稻	0.83	花生	0.85
小麦	0.83	油菜	0.85
玉米	0.83	芝麻	0.85
其他谷类	0.83	其他油料	0.85