

DOI: 10.5846/stxb201711192062

盈斌,王琦,熊康宁,任威,敖文秀.典型喀斯特山区农业生物质能潜力估算——以贵州省为例.生态学报,2018,38(21): - .
Ying B, Wang Q, Xiong K N, Ren W, Ao W X. Quantitative research of agricultural biomass resources for energy utilization in a typical karst mountain area: a case study of Guizhou Province. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(21): - .

典型喀斯特山区农业生物质能潜力估算 ——以贵州省为例

盈斌^{1,2,*}, 王琦¹, 熊康宁^{1,2}, 任威¹, 敖文秀³

1 贵州师范大学喀斯特研究院, 贵阳 550001

2 国家喀斯特石漠化防治工程技术研究中心, 贵阳 550001

3 贵州师范大学地理与环境科学学院, 贵阳 550001

摘要:喀斯特山区生态环境脆弱,能源利用模式低值粗放,开展该区域的农业可利用生物质能潜力研究,对喀斯特山区农村能源建设和生态环境保护具有重要意义。论文以贵州省为例,在考虑土壤生态保留前提下,利用草谷比、土壤生态保留系数、收集系数、折标系数、副产物系数估算农村地区可利用农业生物质能资源总量。结果表明:(1)2009—2015年间,贵州省年均可利用生物质能资源量达 5191.50×10^4 t 标准煤,地均和人均农业生物质能资源量分别达到295 t 标准煤/ km^2 和1.48 t 标准煤/人,其中年均可能源化利用的达到 1974.05×10^4 t 标准煤,占贵州省同期能源消费总量的21.84%。(2)贵州省生物质能储量结构比例分布不均,畜禽粪便资源利用潜力巨大,贡献值高达85%;其中,牛粪资源蕴藏量达年均 3009.78×10^4 t 标准煤,贡献值达到68.39%,是贵州省最重要的农业生物质能资源。(3)从时序变化特征看,2009—2015年间贵州省生物质能资源量呈现U形结构,2011年达到最低值,这与2010年的西南大旱重要事件耦合。最后,针对贵州省农业生物质能现状,论文提出喀斯特山区应该合理布局秸秆电厂和秸秆固化成型燃料生产企业,提高畜禽的规模化养殖水平并加强农业生产防灾减灾工作,农村生活能源推广以沼气、节柴灶与节能秸秆气化炉高效利用相结合的能源利用结构等建议。

关键词:喀斯特山区;生物质能;潜力估算

Quantitative research of agricultural biomass resources for energy utilization in a typical karst mountain area: a case study of Guizhou Province

YING Bin^{1,2,*}, WANG Qi¹, XIONG Kangning^{1,2}, REN Wei¹, AO Wenxiu³

1 School of Karst Science, Guizhou Normal University, Guiyang 550001, China

2 State Key Engineering Technology Research Center for Karst Rocky Desertification Rehabilitation, Guiyang 550001, China

3 School of Geography & Environmental Science, Guizhou Normal University, Guiyang 550001, China

Abstract: The fragile eco-environment, together with low efficiency energy utilization, are typical features of the social-ecological system in Karst mountain areas. It is of great value to determine the potential agricultural biomass resources (ABR) for rural energy construction, and ecological environmental protection of these areas. Based on a case study of Guizhou Province, considering the returning ecological straw biomass for soil and water conservation, this paper estimated the total available ABR in rural areas using the residue to product ratio, ecological returning coefficient, collection coefficient, conversion coefficient to standard energy, and process residue factor. The results showed that: (1) from 2009 to 2015, the ABR of Guizhou Province increased to 5191.50×10^4 tce annually, with a density of 295 tce/ km^2 and 1.48 tce/

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFC0502603);贵州省科技计划项目(黔科合 LH[2017]7365);贵州师范大学博士科研启动基金项目(0514168);贵州师范大学创新创业训练计划项目(201710663082)

收稿日期:2017-11-19; **网络出版日期:**2018-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yingbin@gznu.edu.cn

person, respectively. About 1974.05×10^4 tce of energy-oriented biomass resources are available annually, accounting for 21.85% of the total energy consumption during the same period in Guizhou; (2) the proportion of biomass energy reserves in Guizhou Province is unevenly distributed. The potential utilization of livestock and poultry waste is considerable, with a contribution value up to 85%; the average amount of cattle feces biomass is up to 3009.78×10^4 tce annually, with a 68.39% contribution to the total animal excrement, which is the most important ABR in Guizhou Province; (3) a U-shaped temporal characteristic change in ABR occurred during 2009 to 2015 in Guizhou Province, with the lowest level in 2011, which showed a coupling with an important ecological event of the southwest drought disaster in 2010. Finally, based on the current agricultural biomass resources in Guizhou Province, this paper suggests that the straw power plants and straw curing for fuel factories should be distributed evenly in the karst mountain area, improving the current scale of livestock breeding, strengthening agricultural disaster prevention, and popularizing the comprehensive utilization of biogas, efficient firewood stoves, and energy saving straw gases in karst rocky desertification areas.

Key Words: Karst mountain area; biomass energy; potential appraisal

生物质能被认为是最具潜力的可再生能源^[1-2],到2050年全球可利用生物质能资源潜力为10—262亿t标准煤,平均60—119亿t标准煤,约占生物质年产生量的10%—20%^[3-4],随着因石化能利用带来的全球气候变化和生态环境问题日益加剧,生物质能利用越来越成为全世界关注的焦点。中国是一个传统的农业大国,农村生物质能资源量巨大,根据刘刚^[5],田宜水^[6],Yang^[7]和Yuan^[8]等的研究表明,中国可利用生物质能资源储量介于2.98亿—8.87亿t标准煤,相当于我国已经探获煤炭资源量的1.47—4.93倍^[9],空间分布呈现出生物质能蕴藏潜力与常规一次能源蕴藏潜力互补特征,使得在一次能源蕴藏量较低的地区开发利用生物质能具有巨大潜力^[5];在区域层面上也有大量学者开展了相关研究,重点评估区域尺度内的生物质资源总量和空间分布^[10-14]。已有研究发现,农村地区大量的农业生物质能资源未得到有效利用,尤其秸秆资源就地焚烧、畜禽粪便随意排放造成了极大的环境污染和能源浪费^[15-19]。

农村能源现代化是我国实施乡村振兴战略的重要基础,农村经济增长将带来乡村能源需求的快速增加,中国农村人均能源消费量由1988年的60kg标准煤,增加到2015年的351kg标准煤,基本接近同期377kg标准煤的城镇人均生活用能消费水平,年增长率达17.96%^[20],随着全面建设小康社会和乡村振兴战略的实施,无论从能源消费总量还是从人均水平看,农村生活能源消费仍具有较大增长空间,这也导致占中国人口近半的广大农村地区将成为中国能源消费和碳排放的主要增长点^[21]。当前,中国能源生态效率整体偏低^[22],在我国广大农村地区的生活能源消费结构中,商品能比重低,柴草占比高达44.2%^[23],薪柴、秸秆等传统生物质能仍然是农村家庭主要生活能源^[24],与此同时,农村地区薪柴的粗放利用对生态环境也造成愈发强烈的胁迫效应。到2020年,中国非化石能源消费比重力争提高到15%以上,煤炭消费比重降低到58%以下,而农村地区以沼气为代表农业生物质能的清洁化利用率仅1.9%^[25],在能源结构调整与乡村振兴战略和生态文明建设背景下,如何统筹广大农村地区能源—环境—经济3E系统效率,成为亟待加强的迫切问题。生物质能源中,薪柴是森林生态系统提供的,秸秆是农业生态系统提供的,粪便是草场及农业生态系统输出量,经过人或牲畜的转化而获得^[26],因此,减少农村能源对薪柴的过度依赖,能加快农村能源对薪柴资源的替代进程,可有效增强森林系统的生态服务功能。开展农业生物质能储藏量的科学评估,提高农业生物质能高效清洁化利用水平,是今后较长时期内解决农村能源消费与生态环境问题的重要途径。

西南喀斯特山区作为全球三大岩喀斯特集中分布地区之一,是我国碳酸盐岩分布最广泛最集中的地区,这一特殊地貌类型上演化发育的喀斯特生态系统,表现出多样性和脆弱性并存的典型特征^[27],喀斯特山区的林、灌、草覆被对于喀斯特地区生态系统保护具有重要意义,但由于不合理的人类活动,叠加原本脆弱的喀斯特环境,导致该区域水土流失加剧,土地呈现石漠化现象,这已成为我国西南喀斯特地区最大的生态环境问题^[28],长期以薪柴为主的能源消费结构加剧了喀斯特生态环境不断退化,是促成我国西南石漠化的主要原

因^[29]。当前,我国农村家庭能源消费结构正处于由传统生物质能源向商品能源和新能源转变的过渡阶段^[30],但在生态脆弱的西南喀斯特山区,薪柴使用依然普遍,替代进程缓慢,家庭耗能总体呈现以薪柴为主导^[31-32],尤其在石漠化地区的低收入家庭,薪柴消费量占人均能耗比例高达 80% 以上,贫困农户对传统生物质能源的依赖性极强^[33]。喀斯特山区广泛利用的传统生物质能主要包括农业和林木生物质资源,对农业生物质能的高效利用,可有效提高对林业生物质能(薪柴)的替代作用,这对维持喀斯特山区森林生态服务功能和石漠化地区生态系统修复有重要作用。因此,减少喀斯特山区农村能源对薪柴的超载利用,增强喀斯特森林系统生态服务功能,利用喀斯特山区大量未加有效利用的农业生物质能资源替代薪柴的农村能源利用策略,可有效降低喀斯特山区农村生活用能对林、草资源的过度依赖,可成为喀斯特山区生态系统修复和石漠化治理的一种有效途径。2008 年以来,我国南方石漠化地区实施大规模的石漠化治理工程,实行了一系列的造林种草、治水保土等措施,但在石漠化防治过程中农业生物质能利用对薪柴的替代作用,以及农业生物质能结构特征与时序变化规律等研究仍显不足,这成为加快喀斯特山区农村薪柴替代、农业生物质能清洁利用政策制定的主要瓶颈。

1 研究区选择与能源供需现状

贵州省地处云贵高原东部,103°36′—109°35′E、24°37′—29°13′N 之间,位于长江和珠江分水岭区域,全省国土总面积 17.62 万 km²,属于亚热带季风气候,雨水充沛,境内喀斯特发育典型,喀斯特面积占国土面积比例高达 61.9% 以上^[34],同时也是我国西南石漠化面积分布最大,最为典型的地区^[35-39]。贵州省也是我国南方煤炭资源最丰富的地区,累计煤炭资源储量 504.3 亿 t^[40],占全国已探获煤炭资源量的 1.9%^[9];2016 年,贵州省一次能源生产总量达 14181 万 t 标准煤,人均占有量为 3988 kg 标准煤,但近 20 年的统计数据表明,电、气等清洁能源占一次能源生产比重不足 13%,在广大农村地区,农村薪柴消费量超过合理森林采伐限额 7.21 个百分点^[41],成为导致贵州省石漠化的重要因素。2008 年以后,国家对贵州支持力度不断加大,贵州经济整体实力和城市化建设得到稳步提升,城乡居民收入快速增长,2008—2016 年间,贵州省 GDP 年均增长率为 12.07%,推动了贵州省生活能源消费的快速增长,生活能源消费量年均增长速度为 6.3%,高于同期全国增长率 2.6 个百分点,年均能源消费弹性系数为 0.5,比同期全国高 0.07(图 1)。根据贵州省十三五规划,到 2020 年,预计贵州省 GDP 总量将达到 2 万亿,按照目前的能源平均增长速度和能源消费弹性系数,2020 年,贵州省能源需求将达到 1.18 万亿 t 标准煤。随着城市化进程的加快,城乡居民人均生活用能源差距逐渐下降,贵州将同时面临经济发展、能源转型与生态文明示范区建设的多重压力,未来农村地区的能源需求将成为贵州省能源供给的最大危机。

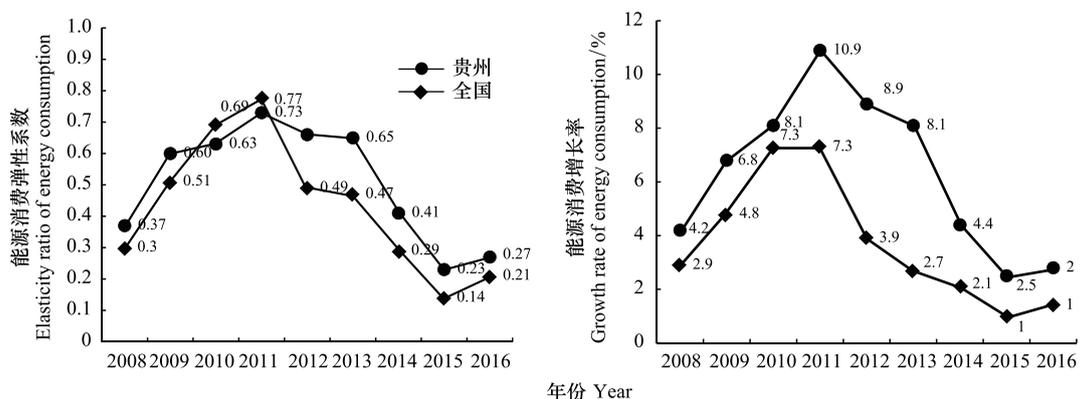


图 1 贵州省 2008—2016 年间能源消费弹性系数与增长率时序特征

Fig.1 Sequential characteristic of elasticity ratio and growth rate of energy consumption of Guizhou Province during 2008—2016

贵州特定复杂的自然地理条件,导致气候和生态条件复杂多样、立体环境特征明显、地域性较强,全省粮

食作物以水稻、玉米、小麦、薯类为主,经济作物以烤烟、油菜籽为主,畜禽养殖主要以猪、牛、羊、鸡为主,丰富的农业生物质资源作为一种绿色无污染的可更新能源必将成为未来贵州省“绿色能源”战略的重要组成部分。但当前对于贵州省农业生物质能资源的研究主要集中在秸秆资源利用现状^[42-43]、生物质树种资源调查^[44]方面,缺乏对贵州整体农业生物质能的潜力估算与利用评估,论文选择以喀斯特石漠化集中分布的贵州省作为研究对象,分析连续时间序列的区域生物质资源总量及其变化和结构特征,旨在以贵州省为例,为喀斯特地区制定农业生物质能开发利用规划,喀斯特森林植被恢复与农村多能互补的能源利用模式提供参考。

2 研究方法和数据来源

按照传统的分类方法,生物质能资源可分为五个大类^[45],农村地区可利用生物质能资源包括农作物秸秆、农副产品加工剩余物、林木生物质能、畜禽粪便等,对农业生物质能资源的合理开发利用,有利于加大林木生物质利用替代,增强森林生态系统服务功能。喀斯特地区由于生态环境脆弱,生态区位敏感,林业生产比重较低,从喀斯特生态系统保护的角度出发,论文未估算林木部分生物质能部分,仅从基于生态保有量的农业可利用生物质能进行分析,估算农作物秸秆、农业加工副产品和畜禽粪便三类农业生物质能储量水平,研究本底数据来源于2010—2016年的《贵州省统计年鉴》。

2.1 生物质资源量估算与参数选取

2.1.1 秸秆资源

秸秆是指农作物籽收获后的植株,是农作物收获后的重要副产品,我国作物秸秆尚处于松散的利用状态,大量过剩秸秆资源被就地焚烧,造成严重的资源浪费和环境污染^[46]。目前全省纳入统计的农作物秸秆资源主要包括粮食作物、油料作物、棉花、麻类和糖料作物等五大类。秸秆资源除可用于还田造肥、造纸等工业原料和畜牧饲料外,剩余部分都可以作为燃料使用。可依据农作物的产量计算得到,计算公式如下:

$$Q_s = \sum_{i=1}^n TS_i \times CS_i \quad (1)$$

式中, Q_s 为秸秆资源总量, TS_i 为第*i*类作物的产量, CS_i 为第*i*类作物的谷草比系数。

秸秆资源量计算关键是确定其谷草比,草谷比取值不当会导致秸秆产量估算结果失实,毕于运选取经过订正的秸秆草谷比,对中国秸秆资源进行了全面系统的估算^[47],蔡亚庆等分析了不同秸秆类型谷草比的变异范围^[48],为了更符合贵州省的实际情况,论文在结合蔡亚庆等人的研究基础上,参考了谭廷甫在毕节地区开展的大田试验中所确定的谷草比系数^[49]。

此外,农作物在收集过程中,需要对秸秆进行流茬,达到农作物秸秆直接还田,这对喀斯特地区维护土壤功能,水土流失防治具有重要意义。根据田野调查,贵州喀斯特地区对于玉米秸秆的流茬高度约在8—10 cm,对于水稻流茬高度约在10—15 cm,论文根据朱开伟^[50]等人提出的土壤生态保留量概念,在综述已有研究基础上,根据不同秸秆作物的播种面积和最低土壤生态保留量,计算了可资源化利用的秸秆资源量,其中烟草秸秆的土壤生态保留系数参考了施河丽等人的研究成果^[51],土壤生态保留量可表示为:

$$\beta_i = \alpha_i \times A_i \quad (2)$$

式中, β_i 为第*i*类秸秆作物的土壤生态保留量, α_i 为第*i*类秸秆的土壤生态保留系数(表1), A_i 为第*i*类秸秆播种面积。

在秸秆收集和运输过程中,还会发生枝叶脱落。因此,除了计算上述的理论收集量外,通过现有收集方式实际可收集到的数量要小于理论可收集量,论文的秸秆资源收集系数引用王亚静等人的研究成果^[52],计算如下:

$$Q_{sa} = \sum_{i=1}^n TS_i \times CS_i \times \beta_i \times r_i \quad (3)$$

式中, Q_{sa} 为秸秆的可收集量, TS_i 为第*i*类作物的产量, CS_i 为第*i*类作物的谷草比系数, β_i 为第*i*类秸秆作物的土壤生态保留量, r_i 为第*i*类秸秆收集系数。

表 1 主要农作物秸秆草谷比、生态保留系数与可收集系数

Table 1 The residue to product ratio, ecological returning coefficient and collection coefficient of different crop straws

系数 Coefficient	水稻 Rice	小麦 Wheat	玉米 Corn	大豆 Soybean	薯类 Tubers	油菜 Rape	甘蔗 Cane	烤烟 Flue-cured tobacco
草谷比 Residue to product ratio	1.23	1.84	1.56	1.54	0.83	3.98	0.23	0.9
生态保留系数 Ecological returning coefficient	1.45	1.31	3.25	1.26	1.70	1.31	1.7	1.5
收集系数 Collection coefficient	0.83	0.83	0.88	0.88	0.8	0.85	0.88	0.9

2.1.2 农业加工副产品

农业加工副产物是指作物粗加工过程中产生的剩余物,如稻壳、玉米芯等,根据《贵州省统计年鉴》发布的大田作物种类,选取稻壳、玉米芯、花生壳、甘蔗渣四类农副加工产品作为估算对象。农业加工副产物量根据其经济产量和加工副产物系数乘积确定,其中,不同作物的加工副产物系数不同,论文引用了郭利磊等人研究成果^[53](表 2)。计算公式如下:

$$Q_p = \sum_{i=1}^n TP_i \times CP_i \quad (4)$$

式中, Q_p 为所有农作物的农副产物量, TP_i 为第 i 类农副产物经济产量, CP_i 为第 i 类农副产物的加工副产物系数。

表 2 主要农业加工副产品系数取值

Table 2 The process residue factor for mainly agriculture products

系数 Coefficient	水稻 Rice	花生 Peanut	玉米 Corn	甘蔗 Cane
加工副产品系数 Process residue factor	0.19	0.27	0.2	0.16

2.1.3 牲畜粪便

牲畜粪便是我国农村地区重要的有机肥资源,但畜禽粪便排放一旦超过耕地氮、磷负荷,将会对土壤和水体造成污染^[18],牲畜粪便的生物质能利用是解决农村环境污染的有效途径。畜禽粪尿产出量是根据不同畜禽的排粪尿量和饲养量进行估算,与动物种类、品种、性别、生长期等因素有关,直接影响估算结果的准确性。畜禽产粪尿总量是根据畜禽存量、日排放系数和饲养周期三者相乘,但该方法得出的是一个饲养周期的粪便量,相比全年的粪便产生量,结果偏小;但若用畜禽存栏和出栏之和作为总量来计算排放量,由于存栏量还未经历完整的饲养周期,又会导致估算的结果偏大,论文在估算饲养量时结合两个方法的优缺点,采用如下的估算方法:

$$Q_i = \sum_{i=1}^n N_i \times T_i \times M_{ij} \quad (5)$$

式中, Q_i 表示畜禽粪便总量, N_i 表示 i 类畜禽年饲养量, T_i 表示第 i 类畜禽的饲养周期, M_{ij} 表示第 i 类畜禽的日排放系数,其中 $j=1,2$ 分别表示 i 类畜禽的尿排放系数和粪便排放系数。

论文中,畜禽饲养量的计算根据畜禽的生长周期确定,生长周期小于 1 年的按当年出栏数作为饲养量;生长周期大于一年的,按年末存栏数作为饲养量。根据《贵州省主要畜禽监测调查数据质量控制办法》,贵州省生猪饲养周期差异较大,散养可到 240—300 d,而规模户最少仅 180 d,综合取平均值 240 d;肉羊饲养周期 210 d;由于鸡的养殖周期差异较大,一般散养土鸡饲养周期可达 120 d,而肉鸡普遍 60 d 左右,按平均数计算畜禽饲养周期为 90 d。畜禽排放系数受众多因素影响,我国目前尚无统一标准,已有学者收集比较了国内 1994—2004 年公开发表的文章中对不同畜禽排泄系数的取值分析,但未能把畜禽的产粪系数和产尿系数分开^[18],为了准确估算畜禽的产尿和产粪量,论文引用了彭里和王定勇^[54]在重庆的研究结果作为参考系数进行估算(表 3)。

表 3 禽粪便日排放量系数

Table 3 Factors of livestock and poultry feces produced per day

排放类型 Excrement types	猪 Pork	牛 Cattle	羊 Sheep	禽 Poultry
粪 Dung	3.5	25	2.6	0.08
尿 Urine	3.5	10	1.5	—

—表示忽略不计

2.2 生物质折标能源量

各类生物质能资源的可收集实物量,乘以相应的折标系数,就可以得到不同种类生物质能折合标准能源量。不同生物质能的折标能源量不同,可利用的秸秆资源折标能源量,就是加总不同类型农作物资源收集量基础上乘以对应的秸秆折标系,计算如下

$$EQ_{sa} = \sum_{i=1}^n Q_{sa} \times \eta_i \quad (6)$$

式中, EQ_{sa} 代表秸秆资源的折标能源量, Q_{sa} 代表可收集秸秆资源量, η_i 表示第*i*类秸秆资源折标系数。

农业加工副产品能源潜力量 EQ_p , 畜禽粪便资源能源潜力量 EQ_i , 计算方法与此相同。区域农业生物质能存量 EQ_t 可以表示为:

$$EQ_t = EQ_{sa} + EQ_p + EQ_i \quad (7)$$

式中,不同生物质能资源 η_i 取值,折标系数根据《中国能源统计年鉴》^[20] 发布数据作为参考(表 4)。

表 4 各类型农业生物质能折标系数

Table 4 Standard conversion coefficient for each types of agricultural residues

类型 Types	稻秆 Rice straw	麦秆 Wheat straw	玉米秆 Maize straw	大豆秆 Soybean straw	薯类秆 Tubers straw	油料秆 Rape straw	甘蔗秆 Cane straw	烤烟秆 Flue-cured tobacco straw
折标系数 Conversion coefficient	0.429	0.500	0.529	0.543	0.486	0.529	0.441	0.471
类型 Types	稻谷壳 Rice hull	花生壳 Peanut shell	玉米芯 Corn cob	甘蔗渣 Bagasse	猪粪 Pig feces	牛粪 Cattle feces	羊粪 Sheep feces	禽粪 Poultry dung
折标系数 Conversion coefficient	0.190	0.270	0.200	0.160	0.429	0.471	0.529	0.643

3 研究结果

3.1 主要农作物秸秆资源量

贵州省主要农作物秸秆资源有稻谷、小麦、玉米、大豆、薯类、油料、甘蔗和烤烟,根据公式(1)—(3),2009年以来,根据农作物可收集量折算各类秸秆资源生物质能如表 5 所示。

数据表明,2009 年以来,贵州省可利用秸秆资源的生物质能储量可观,年均可利用的秸秆资源量折合成标准煤可达 709.04×10^4 t 标准煤。已有研究表明,我国秸秆资源利用的主要方式有肥料还田、畜牧饲料、工业原料以及能源利用^[48],其中,贵州省可作为能源利用的秸秆资源量约为 60%^[50]。由此可以推算,贵州省可能源化利用的秸秆资源储量达到年均 425.42×10^4 t 标准煤。其中,玉米、稻谷和油料作物秸秆是贵州省农作物秸秆资源中占比最大的三种作物,平均可利用生物质能储量分别占全省秸秆总量的 34.02%, 24.49% 和 21.52%(表 6),开展对玉米、稻谷和油料作物秸秆资源的有效收集是贵州省秸秆资源开发利用的重点。

表 5 可收集秸秆资源的生物质能储量/(万 t 标准煤)

Table 5 The biomass reserves of available crop residues

年份 Year	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	均值 Average
稻秆 Rice straw	198.11	194.82	132.76	175.90	157.88	176.25	182.52	174.04
麦秆 Wheat straw	33.85	18.82	38.33	39.86	39.20	46.82	46.96	37.69
玉米秆 Maize straw	293.12	300.51	175.79	247.37	215.26	226.70	234.20	241.85
大豆秆 Soybean straw	11.60	11.69	5.15	5.69	5.84	8.59	9.19	8.25
薯类秆 Tubers straw	66.81	55.60	76.62	75.50	84.37	92.93	97.43	78.47
油料秆 Rape straw	140.50	107.67	140.79	156.05	163.47	175.13	181.01	152.09
甘蔗秆 Cane straw	5.73	4.65	1.06	1.92	2.47	2.47	2.37	2.95
烤烟秆 Flue-cured tobacco straw	13.97	14.01	12.27	14.08	15.78	13.34	12.45	13.70
合计 Total	763.70	707.76	582.79	716.38	684.27	742.24	766.12	709.04

表 6 各类型秸秆生物质量占比/%

Table 6 The biomass ratio of each crop residues

年份 Year	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	均值 Average
稻秆 Rice straw	25.94	27.53	22.78	24.55	23.07	23.75	23.82	24.49
麦秆 Wheat straw	4.43	2.66	6.58	5.56	5.73	6.31	6.13	5.34
玉米秆 Maize straw	38.38	42.46	30.16	34.53	31.46	30.54	30.57	34.02
大豆秆 Soybean straw	1.52	1.65	0.88	0.79	0.85	1.16	1.20	1.15
薯类秆 Tubers straw	8.75	7.86	13.15	10.54	12.33	12.52	12.72	11.12
油料秆 Rape straw	18.40	15.21	24.16	21.78	23.89	23.59	23.63	21.52
甘蔗秆 Cane straw	0.75	0.66	0.18	0.27	0.36	0.33	0.31	0.41
烤烟秆 Flue-cured tobacco straw	1.83	1.98	2.11	1.97	2.31	1.80	1.62	1.94

3.2 农业加工副产品资源量

贵州省农业加工副产品主要有稻壳、花生壳和玉米芯和甘蔗渣,根据公式(4),2009年以来,贵州省农业加工副产品折算生物质能资源量如表7所示。

表 7 各类型农业加工副产品生物质能储量/(万 t 标准煤)

Table 7 The biomass reserves of agricultural byproducts

年份 Year	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	均值 Average
稻谷壳 Rice hull	42.19	41.49	28.3	37.47	33.64	37.54	38.87	37.07
花生壳 Peanut shell	1.16	1.22	0.97	1.25	1.31	1.55	1.67	1.31
玉米芯 Corn cob	48.62	49.85	29.25	41.07	35.76	37.66	38.89	40.16
甘蔗渣 Bagasse	6.17	5.01	1.15	2.08	2.68	2.67	2.57	3.19
合计 Total	98.15	97.58	59.66	81.87	73.4	79.42	82.01	81.73

数据表明,2009—2015年,贵州省农业加工业副产品中年均资源量达到 81.73×10^4 t 标准煤,如果加上药材、蔬菜、瓜果藤蔓以及其他农作物副产品,农业加工副产品的生物质能储量可观。目前贵州省农村地区主要将其用来直接燃烧,因此,农副产品可全部进行能源化利用。各类型副产品中,贡献值最大是玉米芯,其次是稻谷壳,两者的累计年均贡献值达到77.23%,是贵州省主要的农业加工副产品,与表6相比较,说明可利用能源利用的农副产品资源量与种植业结构有着密切联系。

3.3 畜禽粪便资源量

贵州省纳入统计的禽畜类型主要牛、猪、羊、家禽,其中家禽包括鸡鸭鹅,由于在统计上无法将三类活禽分开,故论文统一以鸡为单位计算其粪便产生的生物质能量。由公式(5)和(6),计算得到2009年以来畜禽粪便资源量(表8)。

表 8 各类型畜禽粪便生物质能储量/(万 t 标准煤)

Table 8 The biomass reserves of animal excrement

年份 Year	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	均值 Average
猪粪 Pig feces	1146.47	1217.06	1217.77	1250.28	1320.56	1329.92	1293.88	1253.71
牛粪 Cattle feces	3243.78	3260.02	2810.61	2774.09	2771.56	2983.60	3224.82	3009.78
羊粪 Sheep feces	86.41	90.48	89.87	94.18	93.55	100.38	112.11	95.28
禽 Poultry dung	37.43	38.85	41.10	44.59	44.82	42.42	44.53	41.96
合计 Total	4514.08	4606.41	4159.36	4163.14	4230.49	4456.32	4675.34	4400.73

数据表明,2009—2015年,贵州省年均畜禽粪便生物质能资源量高达 4400.73×10^4 t 标准煤,畜禽粪便除可进行有机肥发酵还田外,有1/3的粪便可进行能源化利用^[8],即贵州省可能源化利用的畜禽粪便达到年均 1466.90×10^4 t 标准煤。大型牲口类型中,猪是养殖量最大的类型,2009—2015年的年均出栏和年末存栏量分别为 1739×10^4 头和 1589×10^4 头,远大于牛的下栏和存栏数量,但从畜禽粪便所产生的生物质能贡献值来说,牛粪的贡献值最大,年均提供生物质能量达到 3009.78×10^4 t 标准煤,年均贡献值高达68.39%,主要原因在于牛的存栏周期长,粪和尿的排放系数均远高于其他畜禽类型,说明牛粪是贵州省最重要的可能源化畜禽粪便资源。目前,贵州省内牛的养殖方式主要是分户散养,粪便资源难以有效收集,若能通过规模化养殖集中收集,开发利用潜力巨大。

3.4 可能源化贵州省生物质能存量时序特征

根据公式(6)和(7)可以计算得到贵州省农业生物质能资源总量(表9)。

表 9 各类型农业生物质能储量特征/(万 t 标准煤)

Table 9 The reserves feature of agricultural biomass

年份 Year	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	均值 Average
农作物秸秆 Crop straw	763.70	707.76	582.79	716.38	684.27	742.24	766.12	709.04
农业加工副产品 Process residue	98.15	97.58	59.66	81.87	73.40	79.42	82.01	81.73
畜禽粪便 Livestock excrement	4514.08	4606.41	4159.36	4163.14	4230.49	4456.32	4675.34	4400.73
合计 Total	5375.93	5411.75	4801.80	4961.39	4988.16	5277.98	5523.47	5191.50

数据分析表明,贵州省生物质能储量可观,2009—2015年均生物质资源总量达到 5191.50×10^4 t 标准煤,地均和人均农业生物质能资源量分别达295 t 标准煤/ km^2 和1.48 t 标准煤/人,可能源化利用的农业生物质能达 1974.05×10^4 t 标准煤,贵州省同期能源消耗年均总量为 9038×10^4 t 标准煤,可能源化利用的生物质能占能源消费比例达21.84%,利用潜力大;但各类型农业生物质能储量的内部差异大,比例分布不均,秸秆资源、农副产品资源、畜禽粪便资源三者占总资源量中的比重大约为13:2:85,其中,畜禽粪便平均资源储量高达 4400.73×10^4 t 标准煤,是贵州省所有生物质能中最重要的一种类型。农业生物质资源储量时序变化呈现出一定特征(图2),呈现U形结构,储量水平波动明显,尤其在2011年,无论是生物质能总量还是各类型的储量,均急剧下滑至最低值,农业生物质能总储量从2010年的 5411.75×10^4 t 标准煤急剧下降至2011年的 4801.80×10^4 t 标准煤,下降了11个百分点;2011年以后呈现上升的趋势,但上升趋势缓慢,年均仅3.4个百分点,各类型生物质能资源储量于2014年左右抵达均值线附近,这与当时2010年发生的西南大旱呈现时间耦合。由于喀斯特地区地质环境特点,地表水分储量对降雨变化的响应高度敏感,云南和贵州受灾最为严重,各类型农作物产量减产,其中,牛的存栏量急剧减少了74.69万头,这说明喀斯特地区的农业生物质能源储量水平对自然灾害的响应敏感度极高,增强农业稳产能力是该区域农业生物质能有效利用的重要举措。

4 结论

论文以典型喀斯特石漠化山区省份为例,研究在脆弱生态系统背景下农业剩余物的潜在可利用生物质能

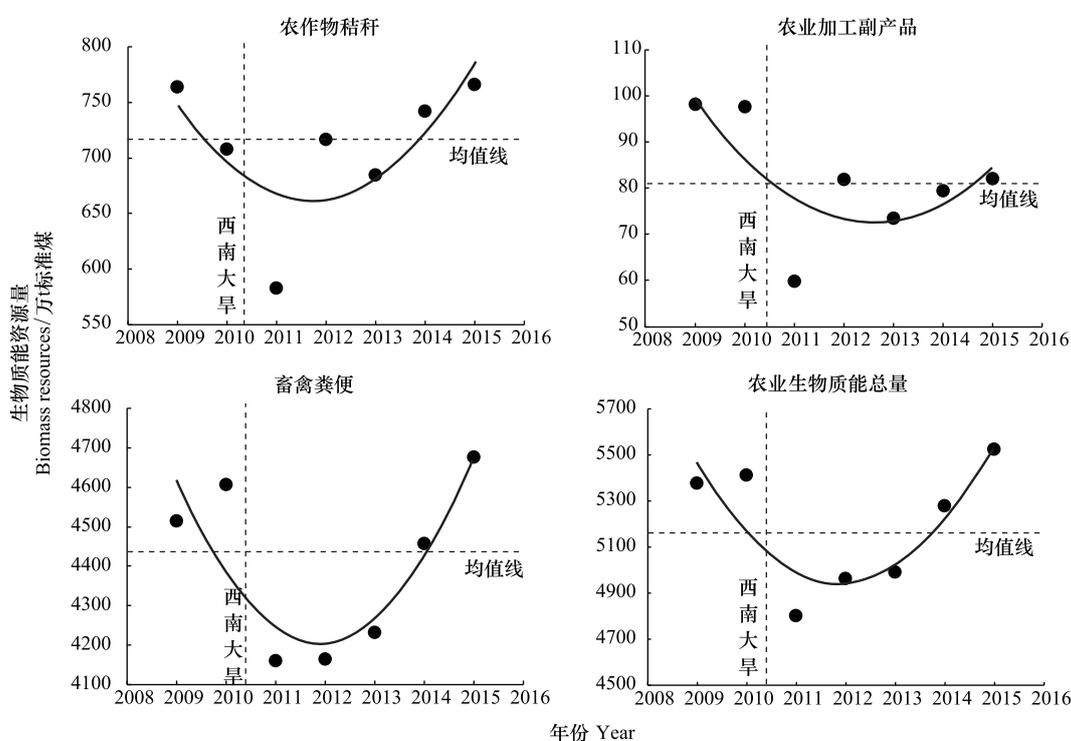


图2 贵州省2009—2015年间各类型农业生物质能储量时序特征

Fig.2 Sequential characteristic of agricultural biomass reserves of Guizhou Province during 2009—2015

总量及其结构特征,从省域层面较为全面地估算了包括秸秆、农业加工副产品、人畜粪便等农业生物质能资源总量,得出以下研究结论:

(1) 贵州省可利用的农业生物质能资源储量可观,开发潜力大,年均可利用资源量达 5191.50×10^4 t 标准煤,其中可能源化利用的达到 1974.05×10^4 t 标准煤,占贵州能源消费的 21.84%。随着农业技术的不断发展,农业生物质能经济和技术可利用系数以及可收集系数逐渐增大,可能源化利用的资源量还有上升空间,这对改善农村能源消费结构,巩固喀斯特山区生态保护成果具有重要意义。

(2) 贵州省农业生物质能储量构成比例分布不均,秸秆资源、农副产品资源、禽畜粪便资源三者在总资源量中的比重大约为 13 : 2 : 85,禽畜粪便资源蕴藏量贡献最大,平均资源储量高达 4400.73×10^4 t 标准煤;其中,牛粪产生的生物质达到 3009.78×10^4 t 标准煤,年均贡献值达 68.39%,是贵州省最重要的禽畜粪便资源,若能通过规模化养殖集中收集,对贵州省生态建设和农村能源利用具有重要意义。

(3) 贵州省 2009—2015 年间可利用农业生物质能储量水平的时序变化呈现 U 形结构特征,农业生物质资源储量波动明显,2011 年各类型生物质能储量均下滑至最低值,这与 2010 年发生的西南大旱事件耦合,由于大旱影响,贵州省生物质能储量一年内的下滑幅度高达 11 个百分点,2011 年以后呈现缓慢上升趋势,到 2014 年才恢复至均值线附近,说明喀斯特地区的农业生物质能源储量水平对自然灾害的响应敏感度极高,农业稳产对生物质能有效利用意义重大。

5 建议

喀斯特石漠化山区环境脆弱、经济贫困、生活能源短缺,薪材过量消耗成为水土流失和土地石漠化的重要驱动因素,利用农业生物质能替代薪材消费,对于促进喀斯特森林植被恢复具有重要的现实意义。论文在优先考虑土壤生态保留的前提下,估算了贵州省农业生物质能储量,研究数据表明,贵州省可利用的生物质能储量可观,利用潜力大,如何提高存量资源的有效利用水平是当务之急,对此,论文提出三个方面的建议。

(1) 农业生物质能利用要实事求是,应根据现有的类型结构差异有的放矢,当前畜禽粪便的生物质能资

源量巨大,对畜禽粪便的开发利用应作为贵州省生物质能产业开发的重点,政府需加大资金投入和政策扶持,推广应用现有较为成熟技术体系,提高畜禽的规模化养殖水平,加强养殖场畜禽粪便的沼气化建设。针对秸秆和农业副产品资源,应积极探索生物质固体成型燃料技术,合理布局秸秆电厂、秸秆固化等能源企业,并做好秸秆资源的收集、转运与储存工作,防止因收集工作不及时导致秸秆丢弃和焚烧。

(2)喀斯特山区的地质环境特点决定了地表水分储量对降雨变化高度敏感,该类型区的农业生产对自然灾害的响应度高,这同时表现在种植和养殖的结构和产出方面,政府在提高生物质能开发利用水平的同时,更应加强农业生产的防灾减灾工作,这是保证生物质能资源稳定供给与有效利用的重要举措。

(3)针对喀斯特石漠化山区能源结构单一、薪材砍伐严重的能源利用现状,推广以石山沼气池建设与沼渣沼液综合利用、节柴灶与节能秸秆气化炉高效利用相结合的能源利用结构,结合当地石漠化程度、地形特征、能源资源开发利用潜力、社会经济基础、群众意愿等特征,开展社区种养与再生能源清洁循环利用,因地制宜推广以沼气利用为重点的薪材替代模式。

参考文献 (References):

- [1] Yamamoto H, Fujino J, Yamaji K. Evaluation of bioenergy potential with a multi-regional global-land-use-and-energy model. *Biomass and Bioenergy*, 2001, 21(3): 185-203.
- [2] Boyle G. *Renewable energy: power for a sustainable future*. Oxford: Oxford University Press, 2012; 1-3.
- [3] Hamelinck C, Faaij A P C. Outlook for advanced biofuels. *Energy Policy*, 2006, 34(17): 3268-3283.
- [4] Smeets E M W, Faaij A P C, Lewandowski I M, Turkenburg W C. A bottom-up assessment and review of global bio-energy potentials to 2050. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2007, 33(1): 56-106.
- [5] 刘刚, 沈镭. 中国生物质能源的定量评价及其地理分布. *自然资源学报*, 2007, 22(1): 9-19.
- [6] 田宜水, 赵立欣, 孙丽英, 孟海波. 农业生物质能源资源分析与评价. *中国工程科学*, 2011, 13(2): 24-28.
- [7] Yang Y L, Zhang P D, Zhang W L, Tian Y S, Zheng Y H, Wang L S. Quantitative appraisal and potential analysis for primary biomass resources for energy utilization in China. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2010, 14(9): 3050-3058.
- [8] Yuan Z, Wu C Z, Huang H, Lin G F. Research and development on biomass energy in China. *International Journal of Energy Technology and Policy*, 2002, 1(1/2): 108-144.
- [9] 孙杰, 陈美英, 唐朝苗, 郑翠. 我国煤炭资源勘查现状跟踪研究. *中国煤炭地质*, 2017, 29(11): 1-8.
- [10] 米锋, 潘文婧, 陈凯, 多琳娜. 内蒙古通辽地区农业生物质资源开发利用及其经济效益分析. *干旱区资源与环境*, 2013, 27(9): 44-49.
- [11] 郑雄, 何俊贺, 洗萍, 刘亚青, 李小平, 徐英博, 唐铭. 南宁市农业生物质资源存量估算与评价. *南方农业学报*, 2013, 44(4): 697-700.
- [12] 邢红, 赵媛, 王宜强. 江苏省南通市农村生物质能源资源潜力估算及地区分布. *生态学报*, 2015, 35(10): 3480-3489.
- [13] 朱丽君, 王光宇, 张耀兰. 长三角地区农作物秸秆资源量的时空分布特点. *贵州农业科学*, 2017, 45(4): 138-142.
- [14] 张亚平, 左玉辉, 柏益尧. 江苏省能源农业发展的资源现状与发展潜力. *生态学报*, 2008, 28(8): 3948-3957.
- [15] 康晓慧, 江平. 调整农村能源结构是改善西部农业生态环境的核心问题之一. *重庆环境科学*, 2003, 25(7): 32-34.
- [16] 李书先. 关于开展农村能源生态经济研究的探索. *农业环境和发展*, 1995, 12(3): 36-38.
- [17] 乐小芳. 我国农村生活方式对农村环境的影响分析. *农业环境与发展*, 2004, (4): 42-45.
- [18] 王方浩, 马文奇, 窦争霞, 马林, 刘小利, 许俊香, 张福锁. 中国畜禽粪便产生量估算及环境效应. *中国环境科学*, 2006, 26(5): 614-617.
- [19] 侯彩霞, 赵雪雁, 文岩, 张亮, 张方圆. 农户生活消费对环境影响的空间差异及其原因——基于张掖市 2010 年调查数据. *生态学报*, 2015, 35(6): 2013-2019.
- [20] 国家统计局能源统计司. *中国能源统计年鉴-2016*. 北京: 中国统计出版社, 2016; 9-9.
- [21] 万文玉, 赵雪雁, 王伟军, 薛冰. 我国农村居民生活能源碳排放的时空特征分析. *生态学报*, 2017, 37(19): 6390-6401.
- [22] Guan W, Xu S T. Study of spatial patterns and spatial effects of energy eco-efficiency in China. *Journal of Geographical Sciences*, 2016, 26(9): 1362-1376.
- [23] 国务院第三次全国农业普查领导小组办公室, 中华人民共和国国家统计局. 第三次全国农业普查主要数据公报(第四号). (2017-12-16) [2018-12-28]. http://www.stats.gov.cn/tjsj/tjgb/nypcgb/qgnypcgb/201712/t20171215_1563634.html.
- [24] 王效华, 郝先荣, 金玲. 基于典型县入户调查的中国农村家庭能源消费研究. *农业工程学报*, 2014, 30(14): 206-212.
- [25] 王飞, 蔡亚庆, 仇焕广. 中国沼气发展的现状、驱动及制约因素分析. *农业工程学报*, 2012, 28(1): 184-189.

- [26] 孙九林. 农村能源与生态环境. 生态学杂志, 1985, (4): 46-48.
- [27] 王荣, 蔡运龙. 西南喀斯特地区退化生态系统整治模式. 应用生态学报, 2010, 21(4): 1070-1080.
- [28] Yuan D X. Rock desertification in the subtropical karst of south China. Zeitschrift für Geomorphologie N. F., 1997, 108: 81-90.
- [29] 国家林业局. 岩溶地区石漠化状况公报. 中国绿色时报, (2006-06-23) [2017-11-17]. <http://www.china.com.cn/chinese/huanjing/1252781.htm>.
- [30] Wang X H, Feng Z M. Rural household energy consumption with the economic development in China; Stages and characteristic indices. Energy Policy, 2001, 29(15): 1391-1397.
- [31] Li Z M, Tang R S, Xia C F, Luo H L, Zhong H. Towards green rural energy in Yunnan, China. Renewable Energy, 2005, 30(2): 99-108.
- [32] 何威风, 阎建忠, 周洪, 李秀彬. 农户薪柴消费的理论模型及实证研究. 生态学报, 2016, 36(5): 1369-1379.
- [33] 唐亮, 刘肇军, 熊康宁, 肖华. 喀斯特地区农村家庭能源消费结构及效应分析——以贵州毕节撒拉溪示范区为例. 贵州师范大学学报: 自然科学版, 2013, 31(2): 96-102.
- [34] 贵州师范大学地理研究所, 贵州省农业资源区划办公室. 贵州省地表自然形态信息数据量测研究. 贵阳: 贵州科技出版社, 2000: 205-205.
- [35] 王世杰, 李阳兵, 李瑞玲. 喀斯特石漠化的形成背景、演化与治理. 第四纪研究, 2003, 23(6): 657-666.
- [36] 熊康宁, 黎平, 周忠发, 安裕伦, 吕涛, 蓝安军. 喀斯特石漠化的遥感—GIS 典型研究——以贵州省为例. 北京: 地质出版社, 2002: 26-28.
- [37] 韦茂繁. 广西石漠化及其对策. 广西大学学报: 哲学社会科学版, 2002, 24(2): 42-47.
- [38] 赖兴会. 云南的石漠化土地及其治理策略. 林业调查规划, 2002, 27(4): 49-51, 55-55.
- [39] 苏维词. 中国西南岩溶山区石漠化的现状成因及治理的优化模式. 水土保持学报, 2002, 16(2): 29-32, 79-79.
- [40] 易同生. 贵州省煤炭资源勘查与开发的现状、问题与对策. 中国煤炭, 2010, 36(6): 32-36, 48-48.
- [41] 齐新民, 谢双喜, 喻理飞, 徐来富, 刘浪, 黄永昌. 贵州生态可持续发展与农村能源合理利用研究. 贵州林业科技, 2001, 29(3): 51-55.
- [42] 杨柳, 范成五, 秦松. 贵州秸秆资源综合利用现状与对策. 贵州农业科学, 2012, 40(5): 109-112.
- [43] 张雅蓉, 李渝, 蒋天明, 张文安. 贵州主要农作物秸秆资源分布及综合利用现状. 贵州农业科学, 2015, 43(8): 262-267.
- [44] 邓伯龙, 石扬文, 陈波涛. 贵州生物质能源树种资源的开发利用. 资源开发与市场, 2006, 22(3): 265-266.
- [45] 闫强, 王安建, 王高尚, 于汶加. 全球生物质能资源评价. 中国农学通报, 2009, 25(18): 466-470.
- [46] 钟华平, 岳燕珍, 樊江文. 中国作物秸秆资源及其利用. 资源科学, 2003, 25(4): 62-67.
- [47] 毕于运, 高春雨, 王亚静, 李宝玉. 中国秸秆资源数量估算. 农业工程学报, 2009, 25(12): 211-217.
- [48] 蔡亚庆, 仇焕广, 徐志刚. 中国各区域秸秆资源可能源化利用的潜力分析. 自然资源学报, 2011, 26(10): 1637-1646.
- [49] 谭廷甫. 毕节地区秸秆资源综合利用探讨. 贵州农业科学, 2002, 30(4): 60-62.
- [50] 朱开伟, 刘贞, 欧训民, 贺良萍, 林金钗. 基于土壤功能的我国主要农作物可能源化秸秆生态潜力分析. 中国生态农业学报, 2017, 25(2): 276-286.
- [51] 施河丽, 谭军, 王兴斌, 彭五星, 尹忠春, 秦兴成. 烟草秸秆生物有机肥对植烟土壤交换性盐基的影响. 中国烟草科学, 2015, 36(4): 80-84.
- [52] 王亚静, 毕于运, 高春雨. 中国秸秆资源可收集利用量及其适宜性评价. 中国农业科学, 2010, 43(9): 1852-1859.
- [53] 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. 中国农业大学学报, 2012, 17(6): 45-55.
- [54] 彭里, 王定勇. 重庆市畜禽粪便年排放量的估算研究. 农业工程学报, 2004, 20(1): 288-292.