

西部地区农业废弃物可利用潜力及环境效益研究

张红丽^{1, 2} 李洁艳¹¹

(1. 石河子大学 经济与管理学院, 新疆 石河子 832000;

2. 石河子大学 农业现代化研究中心, 新疆 石河子 832000)

【摘要】: 西部地区农业废弃物资源丰富, 其资源化利用不仅能解决自身带来的环境污染问题, 而且也发挥着节能减排的重要作用。通过对 2007—2018 年西部地区农业废弃物进行研究, 测算出农作物秸秆和畜禽粪污可利用潜力及资源环境效益。西部地区农业废弃物可利用量资源丰富, 农作物秸秆和畜禽粪污的年平均可利用量分别为 16363.40 万 t、62375.57 万 t; 2007—2018 年西部地区农业废弃物的肥料化潜力在 827.47 万~1201.18 万 t 之间, 可替代化肥施用纯量的比率在 60.00%~72.44% 之间, 其肥料化效益显著; 西部地区农作物秸秆带来的能源化效益远大于畜禽粪污, 2018 年将其农业废弃物能源化利用可减少天然气消耗 842.59 亿 m³, 是该区域能源消耗量的 1.05 倍; 若将 2018 年西部地区焚烧的秸秆和畜禽粪污资源化利用, 分别可最多减少温室气体排放 6224.62 万吨 CO₂、19038.75 万吨 CO₂, 能带来较大的环境减排效益。因此, 推进农业废弃物资源化利用对西部地区缓解资源压力 and 环境污染具有重要意义。

【关键词】: 农业废弃物 可利用潜力 环境效益 西部地区

【中图分类号】: F323; X196; F062.2 **【文献标识码】:** A **【文章编号】:** 1671-4407(2022)10-111-08

资源化利用是落实生态文明建设的重要手段, 提高资源利用效率是缓解环境污染和资源短缺的有效途径^[1]。中国作为世界上产生农业废弃物量最多的国家, 其农作物秸秆和畜禽粪污年产生量已超过 48 亿 t^[2], 而资源化利用率仍处于较低水平^[3]。农业废弃物中蕴含着丰富的可再生资源, 具有较高的肥料化、能源化等潜在价值。然而, 现阶段农作物秸秆就地焚烧及畜禽粪污弃置排放等不合理的处理方式, 不仅造成可利用资源的浪费, 而且增加了温室气体的排放, 也对人体健康和环境污染造成严重的影响。为防治农业废弃物带来的污染等问题, 政府相继颁布《关于加快推进畜禽养殖废弃物资源化利用的意见》《关于创新体制机制推进农业绿色发展的意见》等系列文件, 2021 年中央一号文件中再次提出要推进秸秆综合利用先进理念, 开展农产品加工副产品资源化利用, 大力推进畜禽粪污资源化利用, 基本完成规模养殖场粪污治理设施, 稳定强化美丽乡村建设。若为节省成本, 微观主体未处置农业废弃物, 而任其随意丢弃损害环境, 短期来看因减少成本投入而使经济效益增加, 但长远来看, 却因环境污染限制了经济发展, 进而对农业经济价值产生不利影响。

目前, 国外学者对农业废弃物方面的研究已相当成熟, 主要集中于农业废弃物对土地、能源、经济的影响及提升利用效率等问题^[4,5]。而国内关于农业废弃物的研究处于起步阶段, 学者研究集中在农业废弃物对环境的危害^[6]、治理存在的问题^[7]、利用现状^[8]及资源化利用潜力^[9]等, 部分学者发现废弃物资源利用的过程中存在跨地区现象, 区域协同管理能有效促进农业废弃物区域流动, 提高区域整体的资源化利用率。但现有研究多侧重于国家、省级尺度农业废弃物产生量的估算, 较少涉及区域层面资源替

作者简介: 张红丽, 博士, 教授, 研究方向为农林经济理论与政策、干旱区生态经济。E-mail:zh18291@126.com; 李洁艳, 博士研究生, 研究方向为技术经济及管理。E-mail:1551870190@qq.com

基金项目: 国家自然科学基金项目“新疆农村畜禽粪污资源化利用农户响应行为、激励机制与实现路径研究”(72063028)

代和环境效益等综合性评估。西部地区农业现代化发展相对滞后，机械化和畜牧业规模化程度均偏低，农户绿色生产观念较为落后，导致农业废弃物资源化利用效率低等问题使得农业经济“裹足不前”和“举步维艰”。因此，本文通过对 2007—2018 年西部地区农业废弃物进行分析，测算出农作物秸秆和畜禽粪污可利用潜力及环境效益，从而提出区域农业废弃物资源化策略，以促进农业废弃物高效利用。

1 材料与数据

1.1 研究对象

农业废弃物是人类在农业生产、农副产品加工、畜禽养殖业发展以及农村居民生活等过程中产生的废物，具体包括农作物秸秆；果园中的残株、果壳、枝条；农副产品加工过程中产生的废料和污水；养殖中的畜禽粪污；农村居民排泄粪污和生活垃圾等^[10]。本文主要以农业废弃物中的农作物秸秆和畜禽粪污为研究对象，对 2007—2018 年西部地区农业废弃物可利用潜力及环境效益进行分析，以期缓解区域农业废弃物资源压力及污染减排提供参考。

1.2 数据来源

西部地区 12 个省份的农作物产量和畜禽养殖量来源于《中国统计年鉴》《中国农村统计年鉴》《中国畜牧业年鉴》和中国农林数据库。农作物的草谷比均参考中国能源行业协会所公开的数值；农作物秸秆的可回收系数、养分含量、干物质含量及产气率参考毕于运等^[11]、何可^[12]、张婷婷等^[13]的研究和全国农业技术推广服务中心；西部地区农作物秸秆焚烧率参考石祖梁等^[14]的研究，其中西南地区和西北地区焚烧率分别为 5.1%、20.1%；农作物秸秆焚烧气体排放因子参考杜江等^[15]的研究。由于猪、家禽的饲养周期分别为 199 天、210 天，养殖量用年出栏数来计算，牛、马、驴、骡、羊的饲养周期均超过 1 年，其饲养量按年末存栏数计算；不同畜禽的日排泄系数、干物质含量、养分含量、饲养周期、可回收系数及产气率参考何可^[12]、张田等^[16]的研究和《第一次全国污染源普查畜禽养殖业源产排污系数手册》；畜禽粪污气体排放因子参考冉锦成^[17]和张瑞玲^[18]的研究，将羊的气体排放系数取山羊和绵羊的平均值，具体数值见表 1~表 4。

2 研究方法

2.1 农业废弃物可利用资源量估算模型

2.1.1 农作物秸秆可利用资源量估算

$$M_{GS} = \sum_{i=1}^n W_{Pi} \times S_{Gi} \times GI_i \quad (1)$$

式中： M_{GS} 为农作物秸秆可利用资源量； i 为农作物种类（稻谷、小麦、玉米、大豆、马铃薯、花生、棉花）， $i=1, 2, \dots, n$ ； W_{Pi} 为 i 类农作物产量； S_{Gi} 为 i 类农作物草谷比； GI_i 为 i 类农作物可回收系数。

2.1.2 畜禽粪污可利用资源量估算

$$M_{GS} = \sum_{j=1}^n N_j T_j E_j \times G_{IMj} \quad (2)$$

式中：M_{js}为畜禽粪污可利用资源量；j表示畜禽种类(猪、牛、马、驴、骡、羊、家禽)，j=1, 2, ..., n；N_j表示第j类畜禽饲养量；T_j表示第j类畜禽饲养周期；E_j表示第j类畜禽日排泄系数；G_{msj}为j类畜禽粪污回收系数。

2.2 农业废弃物资源环境效益估算模型

2.2.1 农业废弃物肥料化效益估算模型

(1) 农作物秸秆肥料化效益测算。

$$A=\sum_{i=1}^nM_{GSI}\times Q_i \tag{3}$$

式中：A为农作物秸秆肥料化(N、P、K)效益；i为农作物种类；M_{GSI}为农作物秸秆可利用量；Q_i为i类农作物的单位养分(N、P、K)含量。

(2) 畜禽粪污肥料化效益测算。

$$A=\sum_{j=1}^nM_{Gsj}\times Q_j \tag{4}$$

表 1 2007—2019 年西部地区主要农作物产量 单位：万吨

作物	2007 年	2008 年	2009 年	2010 年	2011 年	2012 年	2013 年	2014 年	2015 年	2016 年	2017 年	2018 年	2019 年
稻谷	4323.5	4482.0	4531.4	4503.8	4371.7	4518.9	4518.1	4550.4	4548.6	4294.3	4262.0	4275.0	4232.4
小麦	1915.4	1963.4	2192.2	2120.3	2157.1	2217.1	2101.9	2179.7	2295.2	2037.7	1956.6	1923.2	1874.4
玉米	4332.0	4749.9	4807.3	5146.9	5361.7	5908.8	6440.7	6507.9	6700.0	7729.1	7574.2	7727.3	7756.8
大豆	277.1	305.6	327.8	339.9	339.3	318.0	306.1	267.2	267.4	377.8	392.2	407.1	461.6
马铃薯	1015.5	1095.6	1129.9	1163.4	1292.7	1344.5	1445.0	1420.6	1410.5	1256.5	1284.9	1322.1	1338.3
花生	106.8	127.3	137.2	142.6	147.4	158.3	164.2	170.8	175.4	174.2	178.3	185.7	192.0
棉花	325.5	327.1	272.5	264.3	306.2	370.7	366.4	380.2	359.8	412.7	461.7	516.2	504.7

表 2 2007—2018 年西部地区畜禽养殖量 单位：万头/万只

畜	2007 年	2008 年	2009 年	2010 年	2011 年	2012 年	2013 年	2014 年	2015 年	2016 年	2017 年	2018 年
---	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------

禽种类												
猪	17362.9	18513.6	19558.9	20262.5	19977.2	20899.8	21537.7	22074.8	21529.8	20837.5	20787.5	21094.7
牛	5451.9	5539.1	5616.3	5589.1	5433.0	5416.1	5459.0	5608.7	5717.0	5706.0	5513.8	5444.8
马	541.7	525.2	1167.8	532.7	534.3	506.7	481.8	493.9	491.5	469.7	308.1	314.0
驴	396.4	390.5	382.6	384.4	386.0	379.0	360.0	355.3	344.8	309.5	168.0	155.8
骡	196.1	194.0	187.2	183.3	180.2	177.6	163.6	166.0	158.4	151.8	62.9	58.8
羊	5063.3	11698.4	17550.9	17468.8	17509.6	17818.5	18260.8	19147.5	19556.3	9818.0	17601.9	19511.8
家禽	173367.6	187857.5	194551.7	204573.5	210359.7	224664.2	226855.9	224673.5	230864.7	237660.7	239018.3	240901.7

表 3 不同农作物可利用资源的转化系数

转化系数	稻谷	小麦	玉米	大豆	马铃薯	花生	棉花
草谷比	0.623	1.366	2.000	1.500	0.500	2.000	3.000
可回收系数	0.74	0.63	0.87	0.52	0.76	0.82	0.87
N/%	0.910	0.650	0.920	1.810	2.650	1.820	1.240
P/%	0.130	0.080	0.152	0.196	2.720	0.163	0.150
K/%	1.890	1.050	1.180	1.170	3.960	1.090	1.020
干物质含量(TS)	94.0	86.5	85.0	89.7	100.0	100.0	93.2
产气率	0.400	0.450	0.500	0.400	0.400	0.400	0.304
CO ₂ 排放因子	1.11	1.47	1.35	1.58	1.58	1.58	1.35
CH ₄ 排放因子	0.0058	0.0034	0.0044	0.0058	0.0058	0.0058	0.0058
N ₂ O 排放因子	0.00007	0.00007	0.00014	0.00007	0.00007	0.00007	0.00007

表 4 不同畜禽可利用资源的转化系数

畜禽种	粪						尿						饲养周	可回收系数	CH ₄ 排放因子	N ₂ O 排放因子
	排泄	干	氮养	磷养	钾养	能源	排泄	干物	氮养	磷养	钾养	能源				

类	系数 /kg	物 质 含 量 /%	分含 量/%	分含 量/%	分含 量/%	产气 率/%	系数 /kg	质含 量/%	分含 量/%	分含 量/%	分含 量/%	产气 率/%	期/ 天			
猪	2.00	20	0.547	0.245	0.294	0.2	3.30	0.4	0.166	0.022	0.157	0.2	199	0.60	4	0.53
牛	20.00	19	0.383	0.095	0.231	0.3	10.00	0.6	0.501	0.017	0.906	0.2	365	0.50	1	1.39
马	9.00	25	0.437	0.134	0.381	0.3	4.90	0.6	0.689	0.062	0.684	0.1	365	0.55	1.64	1.39
驴	4.80	25	0.491	0.188	0.535	0.3	2.88	0.6	0.71	0.013	0.28	0.1	365	0.55	0.9	1.39
骡	4.80	25	0.312	0.156	0.232	0.3	2.88	0.6	0.06	0.013	0.28	0.1	365	0.55	0.9	1.39
羊	4.80	75	1.014	0.216	0.532	0.3	1.00	0.4	0.592	0.021	0.695	0.1	365	0.60	0.16	0.33
家禽	0.12	80	0.761	0.331	0.594	0.3	—	—	—	—	—	—	210	0.80	0.02	0.02

式中：A 为畜禽粪污肥料化 (N、P、K) 效益；j 为畜禽种类；M_{GSj} 为畜禽粪污可利用量；Q_j 为 j 类畜禽粪污的单位养分 (N、P、K) 含量。

(3) 农业废弃物总养分替代肥料率。

$$P=\frac{A}{F}\times 100 \tag{5}$$

式中：P 为农作物秸秆和畜禽粪污总养分替代率 (%)；A 为农作物秸秆和畜禽粪污养分总量；F 为化肥施用折纯量。

2.2.2 农业废弃物能源化效益估算模型

(1) 农作物秸秆能源化效益测算。

$$H=\sum_{i=1}^nM_{GSi}\times TS_i\times C_i \tag{6}$$

式中：H 表示农作物秸秆能源化效益；i 为农作物种类；M_{GSi} 为农作物秸秆可利用量；TS_i 为 i 类农作物秸秆干物质含量；C_i 为 i 类农作物秸秆单位产沼气量。

(2) 畜禽粪污能源化效益测算。

$$H=\sum_{j=1}^nM_{GSj}\times TS_j\times C_j \tag{7}$$

式中：H 表示畜禽粪污资源化效益；j 为畜禽种类； M_{GSj} 为畜禽粪污可利用量； TS_j 为 j 类畜禽粪污干物质含量； C_j 为 j 类畜禽粪污单位产沼气量。

(3) 农业废弃物燃气替代率。

$$O = \frac{H}{V} \quad (8)$$

式中：O 为农作物秸秆和畜禽粪污燃气替代倍数；H 为农作物秸秆和畜禽粪污转换为沼气总资源量；V 为天然气消耗量。

2.2.3 农业废弃物环境减排效益计算方法

(1) 农作物秸秆焚烧环境减排效益估算。

$$E = \sum_{i=1}^n K_i L_i \quad (9)$$

式中：E 为农作物秸秆焚烧环境减排效益；i 为农作物种类； K_i 为农作物秸秆焚烧量； L_i 为 i 类农作物秸秆焚烧排放温室气体 (CO_2 、 CH_4 、 N_2O) 含量。

(2) 畜禽粪污环境减排效益估算。

$$E = \sum_{j=1}^n M_{GSj} L_j \quad (10)$$

式中：E 为畜禽粪污环境减排效益；j 为畜禽种类； M_{GSj} 为畜禽粪污可利用资源量； L_j 为 j 类畜禽粪污排放的温室气体 (CH_4 、 N_2O) 含量。

3 结果与分析

3.1 西部地区农业废弃物可利用资源量

3.1.1 西部地区农作物秸秆可利用资源量

从图 1 中可以看出，2007—2019 年西部地区农作物秸秆可利用总量从 12806.14 万吨增长至 19561.84 万吨，其呈现出波动上升趋势。2019 年农作物秸秆可利用资源量主要以玉米秸秆、稻谷秸秆、小麦秸秆、棉花秸秆为主，分别为 13496.83 万吨、1951.22 万吨、1613.07 万吨、1317.20 万吨，分别占农作物资源总量的 66.35%、9.59%、7.93%、6.48%；其次为马铃薯秸秆和大豆秸秆，分别占可利用总量的 2.50%、1.77%；花生秸秆最低，仅占可利用总量的 1.55%。对于不同农作物秸秆可利用资源量而言，2007—2019 年棉花、马铃薯、大豆和花生秸秆量大致呈现出波动上升趋势；稻谷、小麦秸秆量基本处于较稳定状态；玉米秸秆量 2007—2016 年呈上升趋势，之后处于稳定趋势。

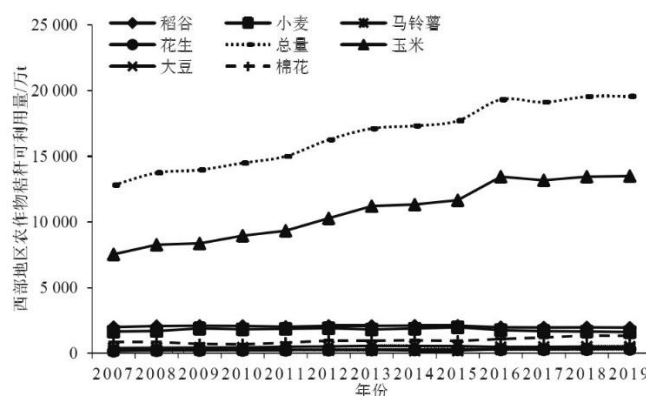


图 1 2007—2019 年西部地区农作物秸秆可利用量

2019 年西部地区各省份主要作物秸秆可利用量分布情况如表 5 所示。从表 5 中可知，内蒙古的农作物秸秆可利用总量最高，达到 5203.23 万吨，占西部地区可利用总量的 26.60%；其次是新疆和四川，秸秆可利用总量分别为 3333.71 万吨、3023.33 万吨；云南、陕西、甘肃、广西、贵州和重庆的农作物秸秆可利用总量在 747.38 万~1015.00 万吨之间，6 个省份农作物秸秆可利用总量占西部地区可利用总量的 37.97%；宁夏、青海和西藏的农作物秸秆可利用总量相对较少，在 21.34 万~471.70 万吨之间。

3.1.2 西部地区畜禽粪污可利用资源量

从图 2 可以看出，2007—2018 年西部地区畜禽粪污可利用资源量在 50748.76 万~64606.16 万吨之间，其年平均可利用资源量为 62375.57 万吨。2018 年西部地区畜禽粪污可利用资源量主要以牛粪尿、羊粪尿和猪粪尿为主，分别为 29810.28 万吨、15383.10 万吨、13349.15 万吨，分别占可利用总量的 461.14%、23.81%、20.66%；其次为家禽粪和马粪尿，分别占可利用总量的 7.52%、1.36%；驴粪尿和骡粪尿最低，分别仅占总量的 0.37%、0.14%。对于不同畜禽粪污可利用资源量而言，2007—2018 年猪粪尿、羊粪尿、家禽粪资源量处于波动上升状态；马粪尿、驴粪尿、骡粪尿资源量呈现出波动下降趋势；牛粪尿资源量基本处于较稳定状态。

2018 年西部地区各省份畜禽粪污可利用量分布情况如表 6 所示。从表 6 中可以看出，四川和内蒙古的畜禽粪污可利用总量最高，分别为 11433.39 万吨、9179.13 万吨，分别占西部地区可利用总量的 17.70%、14.21%；其次是云南、新疆和广西，畜禽粪污可利用总量分别为 8499.66 万吨、6515.20 万吨和 5938.25 万吨；甘肃、贵州、西藏和青海的畜禽粪污可利用总量在 3986.00 万~4518.14 万吨之间，4 个省份的畜禽粪污可利用总量占西部地区总资源量的 26.46%；重庆、陕西和宁夏的畜禽粪污可利用总量相对较少，在 1218.49 万~2370.27 万吨之间。

表 5 2019 年西部地区各省份主要作物秸秆可利用量 单位：万吨

省份	稻谷	小麦	玉米	大豆	马铃薯	花生	棉花	可利用总量	百分比
内蒙古	62.79	157.23	4736.80	176.28	52.36	17.74	0.03	5203.23	26.60%
广西	457.33	0.43	454.49	11.62	4.56	110.22	0.30	1038.95	5.31%
重庆	224.52	5.94	434.13	15.60	44.76	22.43	0.00	747.38	3.82%
四川	677.61	211.87	1848.05	73.87	108.07	112.13	0.73	3032.33	15.50%

贵州	195.38	28.40	404.20	14.43	96.86	19.05	0.11	758.43	3.88%
云南	246.18	61.88	1600.80	35.88	59.17	11.09	0.00	2015.00	10.30%
西藏	0.18	16.52	4.52	0.00	0.08	0.04	0.00	21.34	0.11%
陕西	37.07	328.74	1060.70	18.25	31.50	20.17	1.99	1498.42	7.66%
甘肃	0.97	241.91	1033.73	5.30	78.62	0.35	8.52	1369.41	7.00%
青海	0.00	34.68	24.71	0.00	12.54	0.00	0.00	71.93	0.37%
宁夏	25.40	29.78	401.07	0.47	14.97	0.01	0.00	471.70	2.41%
新疆	23.79	495.69	1493.62	8.35	5.05	1.69	1305.52	3333.71	17.04%
西部地区	1951.22	1613.07	13496.83	360.05	508.55	314.92	1317.20	19561.84	100.00%

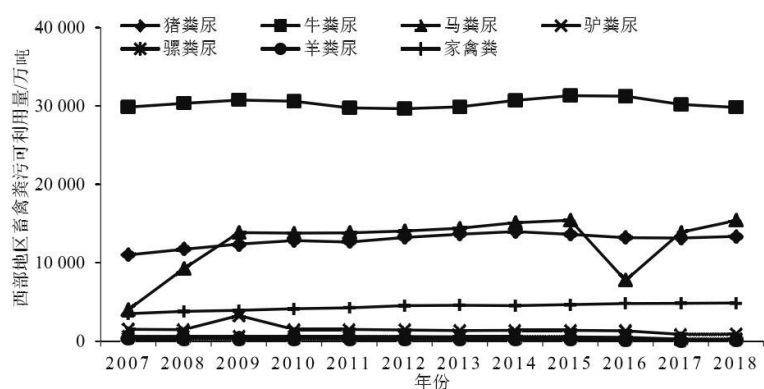


图2 2007—2018年西部地区畜禽粪污可利用量

表6 2018年西部地区各省份畜禽粪污可利用量 单位: 万吨

省份	猪	牛	羊	马	驴	骡	家禽	可利用总量	百分比
内蒙古	5.67	33.74	47.32	1.78	1.12	0.13	2.03	9179.13	14.21%
广西	21.93	17.99	1.76	0.52	0.00	0.05	17.12	5938.25	9.19%
重庆	11.13	5.68	2.55	0.04	0.00	0.01	4.30	2370.27	3.67%
四川	42.01	45.13	11.53	2.07	0.13	0.14	13.32	11433.39	17.70%
贵州	11.83	25.48	3.17	0.48	0.00	0.01	2.37	4333.09	6.71%
云南	24.37	44.45	10.00	0.40	0.20	0.31	5.26	8499.66	13.16%
西藏	0.11	33.31	8.26	0.77	0.07	0.02	0.06	4260.13	6.59%

陕西	7.28	8.21	6.83	0.01	0.04	0.01	1.17	2354.43	3.64%
甘肃	4.38	24.11	14.87	0.33	0.53	0.23	0.73	4518.14	6.99%
青海	0.74	28.16	10.53	0.32	0.01	0.00	0.10	3986.00	6.17%
宁夏	0.71	6.82	4.21	0.00	0.06	0.00	0.37	1218.49	1.89%
新疆	3.33	25.03	32.80	2.04	0.23	0.00	1.73	6515.20	10.08%
西部地区	133.49	298.10	153.83	8.76	2.40	0.91	48.57	64606.16	100.00%

3.2 农业废弃物资源环境效益

3.2.1 农业废弃物肥料化效益

根据表 7 可知, 2007—2019 年西部地区农作物秸秆资源化利用带来的肥料化效益从 326.22 万吨增长至 490.14 万吨, 基本呈现上升趋势; 2007—2018 年西部地区畜禽粪污产生的年平均肥料化效益为 670.57 万吨; 西部地区农作物秸秆资源化利用带来的肥料化效益远小于畜禽粪污; 2007—2018 年西部地区农业废弃物的肥料化潜力呈波动上升趋势, 带来的肥料化效益在 827.47 万~1201.18 万吨之间, 其可替代化肥施用纯量的比率在 60.00%~72.44%之间。若将农业废弃物进行资源化利用, 可有效减少区域内肥料消耗等问题。

由图 3 可知, 内蒙古的农作物秸秆和畜禽粪污带来的肥料化效益均最大, 分别为 120.68 万吨、119.74 万吨; 其次是四川和新疆, 农作物秸秆和畜禽粪污产生的肥料化效益分别为 81.21 万吨、116.11 万吨和 75.01 万吨、84.91 万吨; 青海、西藏、重庆和宁夏的农业废弃物的肥料化潜力相对较小, 其资源化效益处于 26.55 万~47.30 万吨之间。总体来看, 若西部地区各省份对农业废弃物进行资源化处理, 作为有机肥料投入农田中, 不仅节约肥料等投入资源, 而且具有改良土壤、提高农作物产量等效果, 也在缓解农业资源环境压力等方面有重要作用, 进而为区域带来较大的肥料化效益。

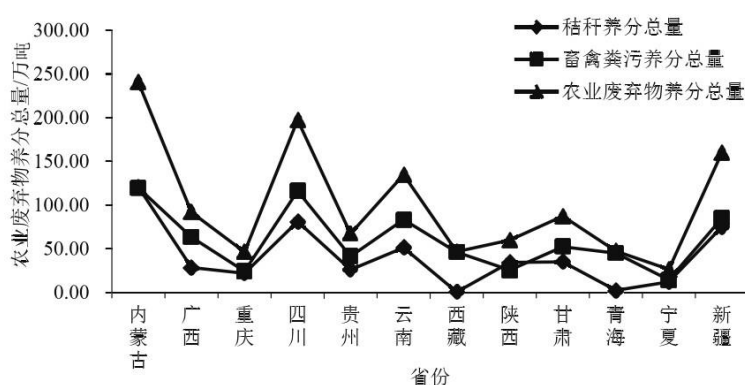


图 3 2018 年西部地区各省份农业废弃物养分总量

3.2.2 农业废弃物资源化效益

西部地区农业废弃物资源量丰富, 具有较大的资源化潜力。通过对西部地区农业废弃物的资源化潜力进行估算, 其带来的能

源化效益和能源替代率如表 8 所示。2007—2019 年西部地区农作物秸秆进行资源化利用带来的能源化效益在 513.75 亿~792.97 亿立方米之间；2007—2018 年西部地区畜禽粪污产生的年平均能源化效益为 45.61 亿立方米；西部地区农作物秸秆带来的能源化效益要远大于畜禽粪污；2007—2018 年西部地区农业废弃物沼气潜力基本呈上升趋势，带来的能源化效益在 542.97 亿~842.59 亿立方米之间，是该区域天然气能源消费量的 1.05~1.61 倍。若将农业废弃物进行能源化利用，可有效解决区域内能源需求等问题。

表 7 2007—2019 年西部地区农业废弃物肥料化效益及肥料替代率 单位：万吨

项目	2007 年	2008 年	2009 年	2010 年	2011 年	2012 年	2013 年	2014 年	2015 年	2016 年	2017 年	2018 年	2019 年
农作物秸秆养分总量	326.22	350.15	355.40	368.47	383.12	413.38	435.75	439.37	447.24	480.73	477.63	488.79	490.14
畜禽粪污养分总量	501.25	600.19	706.01	689.83	683.15	693.76	703.72	724.62	735.13	607.18	689.55	712.39	—
农业废弃物养分总量	827.47	950.34	1061.41	1058.30	1066.27	1107.14	1139.47	1163.99	1182.37	1087.91	1167.18	1201.18	—
化肥施用折	1341.20	1402.10	1465.20	1526.40	1590.50	1673.70	1717.70	1777.10	1806.50	1813.30	1786.20	1732.70	1662.10

纯量													
肥料替代率 / %	61.70	67.78	72.44	69.33	67.04	66.15	66.34	65.50	65.45	60.00	65.34	69.32	—

虽然西部地区农业废弃物能源化利用潜力较大，但由于种养殖业发展水平和地理位置等差异，导致 12 个省份农作物秸秆和畜禽粪污带来的能源化效益存在不同。由图 4 可知，内蒙古的农作物秸秆和畜禽粪污产生的能源化效益最大，分别为 216.36 亿立方米、9.71 亿立方米；其次是新疆和四川，农作物秸秆和畜禽粪污带来的能源化效益分别为 131.15 亿立方米、6.87 亿立方米和 124.02 亿立方米、7.57 亿立方米；宁夏、青海和西藏农业废弃物转化为沼气的潜力最小，产生的能源化效益分别为 21.71 亿立方米、5.70 亿立方米和 3.60 亿立方米。总体来看，若 2018 年西部地区对农业废弃物进行能源化利用，则能够减少消耗天然气 842.59 亿立方米，是该区域能源消耗量的 1.05 倍，其在解决自身带来的环境问题的同时，也能节约能源消耗，从而为该区域带来较大的能源化效益。

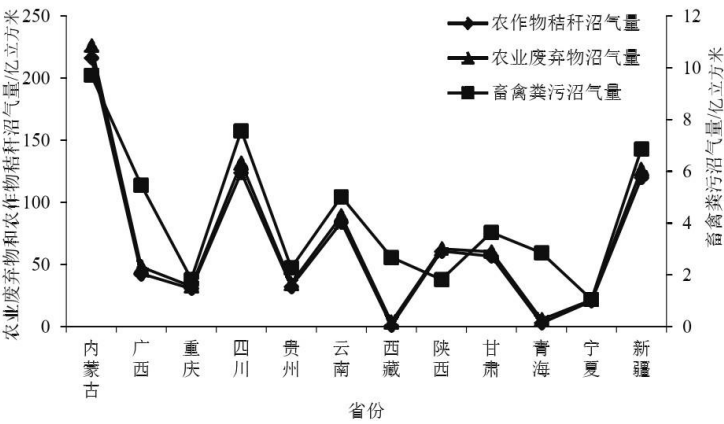


图 4 2018 年西部地区各省份农业废弃物沼气量

3.2.3 农业废弃物环境减排效益

表 8 2007—2018 年西部地区农业废弃物能源化效益及能源替代倍数 单位：亿立方米

项目	2007 年	2008 年	2009 年	2010 年	2011 年	2012 年	2013 年	2014 年	2015 年	2016 年	2017 年	2018 年	2019 年
农作物秸秆沼	513.75	552.47	562.98	585.8	606.01	656.71	693.42	701.55	718.23	785.89	775.88	791.8	792.97

气量													
畜禽粪污沼气量	29.22	38.70	47.66	47.18	47.16	48.26	49.04	50.44	51.42	39.12	48.36	50.79	—
农业废弃物沼气量	542.97	591.17	610.64	632.98	653.17	704.97	742.46	751.99	769.65	825.01	824.24	842.59	—
天然气消耗量	341.57	366.61	397.56	479.91	494.19	523.36	563.31	643.15	672.11	701.17	731.83	804.72	—
能源替代倍数	1.59	1.61	1.54	1.32	1.32	1.35	1.32	1.17	1.15	1.18	1.13	1.05	—

《中华人民共和国大气污染防治法》《畜禽规模养殖污染防治条例》中规定要禁止秸秆焚烧和畜禽粪污随意排放，推进农业废弃物资源化利用，以减少温室气体排放，保护生态环境安全，促进农业可持续发展。若将秸秆就地焚烧或畜禽粪污随意丢弃排放，不仅会使农业废弃物作为肥料或能源等资源造成浪费，而且也会排放出大量温室气体造成环境污染日益严重。通过将农作物焚烧的秸秆和畜禽粪污进行资源化利用，一方面可以利用农业废弃物的潜在价值，另一方面可以减少温室气体排放，进而带来较大的环境效益。本文中秸秆焚烧和畜禽粪污主要排放的是 CO_2 、 CH_4 、 N_2O 和 CH_4 、 N_2O 等温室气体，借鉴《京都议定书》中规定的 1 吨 CH_4 相当于排放 21 吨 CO_2 ，1 吨 N_2O 相当于排放 310 吨 CO_2 ，温室气体的排放量用 CO_2 量来衡量。从表 9 中可看出，2007—2019 年西部地区将农作物秸秆焚烧进行资源化利用，带来的环境减排效益从 5080.32 万吨 CO_2 增长至 6432.13 万吨 CO_2 ，呈现出波动上升趋势；2007—2018 年西部地区畜禽粪污产生的环境减排效益年平均量为 19407.94 万吨 CO_2 ；西部地区的畜禽粪污带来的环境减排效益大于农作物秸秆焚烧的环境减排效益。若将 2018 年西部地区农业废弃物用来制作肥料或沼气等资源均能减少温室气体的排放，且最多可带来 25263.37 万吨 CO_2 的环境减排效益。

由图 5 可知，2018 年西部地区各省份中农作物秸秆焚烧和畜禽粪污碳减排潜力最高的省份分别是内蒙古和四川，带来最多的环境减排效益分别为 3479.49 万吨 CO_2 、27761.14 万吨 CO_2 ；而青海、西藏和重庆、宁夏分别是农作物秸秆焚烧和畜禽粪污碳减排潜力相对较低的省份，分别带来的环境减排效益在 1.83 万~22.26 万吨 CO_2 之间和 2912.09 万~4961.3 万吨 CO_2 之间。若将西部地区各省份的农业废弃物资源化利用，四川、内蒙古和云南带来的环境减排效益最高；其次是新疆、西藏和广西，带来的环境减排效益分别为 14638.71 万吨 CO_2 、12329.46 万吨 CO_2 和 12290.28 万吨 CO_2 ；陕西、重庆和宁夏环境减排效益相对较低，均在 41.24 万~52.24 万吨 CO_2 之间。总体而言，若西部地区各省份对农业废弃物进行资源化利用，即能作为肥料或能源等资源，不仅可以节约资源消耗，而且也能缓解温室气体的排放带来的环境污染等问题，进而为区域带来较大的环境减排效益。

表 9 2007—2019 年西部地区农业废弃物环境减排效益 单位：万吨 CO_2

环境减排效益	2007 年	2008 年	2009 年	2010 年	2011 年	2012 年	2013 年	2014 年	2015 年	2016 年	2017 年	2018 年	2019 年

秸秆焚烧减排总量	5080.3 2	3751.0 3	3972.7 7	4069.3 7	4358.0 4	4769.7 4	5098.5 3	5348.3 6	5493.6 7	5870.1 0	6053.5 2	6224.6 2	6432. 13
畜禽粪污减排总量	17919. 05	18840. 16	20503. 71	19713. 99	19287. 47	19372. 16	19551. 64	20093. 66	20289. 99	19274. 83	19009. 90	19038. 75	—
环境减排效益总量	22999. 37	22591. 19	24476. 48	23783. 36	23645. 51	24141. 90	24650. 17	25442. 02	25783. 66	25144. 93	25063. 42	25263. 37	—

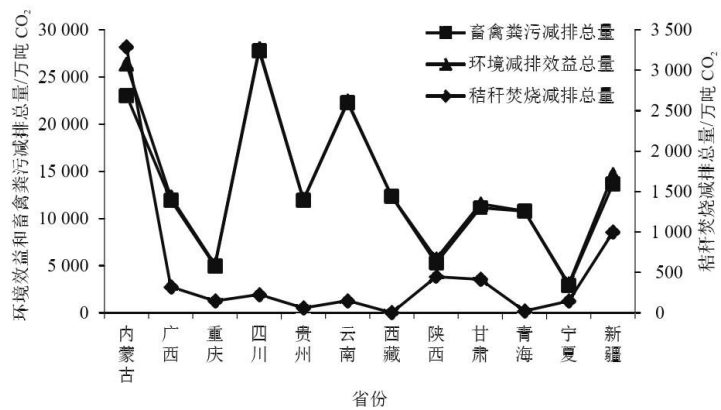


图 5 2018 年西部地区各省份农业废弃物环境减排效益

4 结论与讨论

4.1 结论

2007—2018 年西部地区农业废弃物的可利用量资源丰富，农作物秸秆和畜禽粪污的年平均可利用量分别为 16363.40 万吨、62375.57 万吨。

(2)通过对西部地区农业废弃物进行肥料化利用，研究发现农作物秸秆带来的肥料化效益远小于畜禽粪污；2007—2018 年其农业废弃物肥料化潜力呈波动上升趋势，产生的肥料化效益在 827.47 万~1201.18 万吨之间，可替代化肥施用纯量的比率在 60.00%~72.44%之间，则表明农业废弃物的肥料化效益显著。

(3)西部地区农业废弃物资源量丰富，具有较大的能源化效益。农作物秸秆带来的能源化效益要远大于畜禽粪污；2007—2018 年西部地区农业废弃物沼气潜力呈上升趋势，其带来的能源化效益在 542.97 亿~842.59 亿立方米之间，是该区域天然气能源消费量的 1.05~1.61 倍。

(4)农业废弃物资源化利用可以减少秸秆焚烧和畜禽粪污产生温室气体的排放，其环境减排效益显著。西部地区畜禽粪污带来的环境减排效益大于农作物秸秆；若将 2018 年西部地区农业废弃物用来制作肥料或沼气等资源均能减少温室气体的排放，且最多可带来 25263.37 万吨 CO₂ 的环境减排效益。

西部地区农业废弃物可利用量丰富，通过资源化利用可显著降低资源消耗和温室气体排放，促使该区域资源能持续循环利用及缓解面源污染，以带来较大的环境效益。为此得出政策启示如下：(1)相关部门应通过广播、电视及抖音短视频等媒介对农业废弃物处理进行普及推广，以增强农户生态保护意识，进而提高农业废弃物利用率。(2)政府要制定生态补偿政策来鼓励农业废弃物资源化利用，在引导农户、企业对农业废弃物处理的同时给予技术指导和扶持。(3)各省份应结合当地实际情况，因地制宜地去选择适合的农业废弃物治理模式。

4.2 讨论

目前在环境保护“地板”和资源能量“天花板”等约束下，农业废弃物资源化利用是缓解环境压力 and 资源短缺的重要手段^[19]。农业废弃物“用则利，弃则害”，根据上文可知西部地区农业废弃物可利用量丰富，具有巨大的资源化潜力，若将农业废弃物资源化利用或无害化处理，不仅能获得农业废弃物中秸秆、畜禽粪污的肥料或能源等潜在价值，而且也可减少秸秆焚烧、畜禽粪污造成的温室气体(CO₂、CH₄、N₂O)排放，从而带来较大的环境效益。

西部地区是农业发展区域，也是生态环境脆弱区域。该区域农业现代化发展相对滞后，机械化和畜牧业规模化水平偏低，农户绿色生产观念较为落后，进而造成农业废弃物随意丢弃、资源化利用率低下等问题，导致环境污染日益严重。为防治农业废弃物污染，推进农业废弃物资源化利用，促进农业可持续发展，政府相继颁布《畜禽规模养殖污染防治条例》《关于创新体制机制推进农业绿色发展的意见》和 2021 年中央一号等文件。但现阶段农户生态意识较差，且实施的强制性和激励性等环境政策尚未发挥作用，使得处理农业废弃物问题迫在眉睫。在生态环境的有限承载力下，农户为实现成本最小化与收益最大化，会争先地去排放农业废弃物，以获得较多环境容污量来换取经济利润；农户参与农业废弃物资源化需投入物力、人力及财力，而采取资源化手段带来的社会价值与生态价值，不仅被自身享有，且社会中的全体居民均可无偿享有。即在没有约束或激励政策下，农业废弃物污染的负外部性和其资源化的正外部性促使市场处于“失灵”状态，导致农业废弃物资源化的经济价值、社会价值和生态价值难以靠市场机制来实现。倘若以政府干预的方式来改变市场行为(如生态补偿政策)，将是实现农业废弃物资源化市场有效配置的手段。现阶段由于农业发展水平和地域等差异，导致西部地区 12 个省份的农业废弃物可利用量及环境效益分布不一致，具有较显著的地域空间差距。因此，在制定农业废弃物资源化利用的相关政策时，要注意顶层设计，充分考虑各省份的农业发展水平，因地制宜地选择适合的农业废弃物高效治理的发展方式^[20]。对于以农业为主的欠发达省份，应选择以农业废弃物肥料化利用为主、种养结合的农业生产模式；而对于经济较为发达的省份，应采取能源化利用为主的模式，以强化能源化高效利用技术研发

与推广。

参考文献:

- [1] Yao H L, Zhang C H. A bibliometric study of China's resource recycling industry policies: 1978–2016[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2018, 134: 80–90.
- [2] 陈天宇, 曹俊, 金保昇. 农业有机废弃物能源化利用现状及新技术展望[J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2019(3): 295–300.
- [3] 李丹阳, 靳红梅, 吴华山. 畜禽养殖废弃物养分管理决策支持系统研究及应用[J]. 中国农业资源与区划, 2019(5): 21–30.
- [4] Manzone M, Calvo A. Energy and CO₂ analysis of poplar and maize crops for biomass production in north Italy[J]. Renewable Energy, 2016, 86: 675–681.
- [5] Yay A S E. Application of life cycle assessment (LCA) for municipal solid waste management: A case study of Sakarya[J]. Journal of Cleaner Production, 2015, 94: 284–293.
- [6] 仇焕广, 廖绍攀, 井月, 等. 我国畜禽粪便污染的区域差异与发展趋势分析[J]. 环境科学, 2013(7): 2766–2774.
- [7] 秦仕华, 张崇玉, 白家云. 贵州畜禽养殖业现状及其污染防治对策[J]. 贵州农业科学, 2014(4): 157–161.
- [8] 吴昌华, 陈柳萌, 戴星照. 江西省农业废弃物资源化利用调查研究[J]. 农学学报, 2020(3): 26–30.
- [9] 杜艳玲, 周怀平, 程曼, 等. 山西省种养废弃物构成及资源化利用潜力研究[J]. 农业资源与环境学报, 2019(3): 329–336.
- [10] 农业大词典编辑委员会. 农业大词典[M]. 北京: 中国农业出版社, 1998.
- [11] 毕于运, 王亚静, 高春雨, 等. 中国主要秸秆资源数量及其区域分布[J]. 农机化研究, 2010(3): 1–7.
- [12] 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.
- [13] 张婷婷, 冯永忠, 李昌珍, 等. 2011 年我国秸秆沼气化的碳足迹分析[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2014(3): 124–130.
- [14] 石祖梁, 贾涛, 王亚静, 等. 我国农作物秸秆综合利用现状及焚烧碳排放估算[J]. 中国农业资源与区划, 2017(9): 32–37.
- [15] 杜江, 罗珺, 王锐, 等. 粮食主产区种植业碳功能测算与时空变化规律研究[J]. 生态与农村环境学报, 2019(10): 1242–1251.
- [16] 张田, 卜美东, 耿维. 中国畜禽粪便污染现状及产沼气潜力[J]. 生态学杂志, 2012(5): 1241–1249.

-
- [17]冉锦成. 西北五省农业碳排放及影响因素研究[D]. 新疆: 新疆农业大学, 2017.
- [18]张瑞玲. 山西省农业碳排放的测度及影响因素研究[D]. 太原: 山西财经大学, 2019.
- [19]田慎重, 郭洪海, 姚利, 等. 中国种养业废弃物肥料化利用发展分析[J]. 农业工程学报, 2018(S1): 123-131.
- [20]陈芬, 余高, 张红丽, 等. 贵州省畜禽粪污构成及资源化利用潜力研究[J]. 干旱区资源与环境, 2020(12): 78-85.