



文章栏目：固体废物处理与资源化

DOI 10.12030/j.cjee.201902105

中图分类号 X705

文献标识码 A

王旭彤, 张蕊, 颜蓓蓓, 等. 西藏自治区污泥特性与资源化利用潜力分析[J]. 环境工程学报, 2019, 13(11): 2753-2769.

WANG Xutong, ZHANG Rui, YAN Beibei, et al. Analysis on characteristics and resource utilization potential of sewage sludge in Tibet, China[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2019, 13(11): 2753-2769.

西藏自治区污泥特性与资源化利用潜力分析

王旭彤¹, 张蕊¹, 颜蓓蓓¹, 陈冠益^{2,*}, 侯立安^{1,3}, 旦增^{1,2}

1. 天津大学环境科学与工程学院, 天津 300072

2. 西藏大学理学院, 拉萨 850012

3. 火箭军后勤科学技术研究所, 北京 100011

第一作者: 王旭彤(1993—), 女, 博士研究生。研究方向: 固体废物资源化利用。E-mail: wangxutong@tju.edu.cn

*通信作者: 陈冠益(1970—), 男, 博士, 教授。研究方向: 生物质、固体废物资源化利用。E-mail: chen@tju.edu.cn

摘要 为解决西藏自治区污泥处置问题, 找到适合西藏地区的污泥资源化利用方法, 通过采样分析, 并与代表性城市对比, 总结了西藏污泥的热化学特性; 通过灰色模型计算, 预测了近 5 年的污泥量; 结合平原地区的经验, 提出了生物处理、热干化处理与生物-热化学耦合处理 3 类资源化利用方案, 分别介绍其技术路线、测算其应用潜力。结果表明: 西藏污泥具有高碳氢、高挥发分、低重金属含量的特性; 预计到 2022 年, 污泥量可达 1.56×10^5 t; 好氧堆肥、厌氧发酵、热解、协同焚烧、制备 RDF 燃料、发酵耦合气化 6 种技术均具有一定的应用潜力。由于清洁度高、成本低、可持续提供清洁燃料, 厌氧发酵与制备 RDF 燃料 2 种技术更具推广潜力。本研究结果可为西藏污泥的资源化利用提供技术与政策参考。

关键词 西藏自治区; 市政污泥; 特性分析; 潜力分析; 资源化

近年来, 随着我国西藏自治区(简称西藏)经济的快速发展与城镇化建设进程的推进, 拉萨市、那曲市、日喀则市的多座污水厂投入运行, 市政污泥产量也随之增加。2017 年, 西藏市政污水处理量达 1.03×10^8 t^[1], 据此推算, 污泥量约 8.23×10^4 t^[2](含水率 80%)。这些污水处理厂由于缺乏后续配套的处理设施, 大量污泥只能堆积在厂房中, 严重影响了设备的正常运行。此外, 对西藏污泥特性的未知, 加深了污泥对环境危害的不确定性。若不能将数量庞大的污泥妥善处理, 会对西藏脆弱的生态环境造成不可逆的影响^[3]。

由于西藏自治区缺乏针对性研究和技术指导, 目前尚未形成成熟的污泥处理方法。考虑到西藏的垃圾填埋场已趋于饱和, 污泥干化后运至填埋场填埋并非长久之计。同时, 污泥中含有大量的有机物和营养物质, 污泥的处理方法可转向有机废物的资源化利用^[4]。在平原地区, 主要的资源化方式包括土地利用^[5]、能源利用^[6]、制备环保材料^[7]等。几种资源化利用技术分别有一定的优势: 好氧堆肥技术操作简单、周期短、效率高, 有机物分解彻底, 产物稳定^[8]; 厌氧发酵技术受污泥含水率的影响较小, 产生的甲烷可用于供电和供热^[9]; 热解技术产生的生物炭可用于吸附重金属或有机污染物^[10]; 污泥与垃圾混合焚烧技术可降低二恶英等污染气体的排放^[11], 将热能转化为电

收稿日期: 2019-02-26; 录用日期: 2019-05-06

基金项目: 天津市自然科学基金资助项目(16JCZDJC39600); 国家自然科学基金资助项目(51676138)

能,可节约化石燃料的费用;污泥衍生燃料具有较高的热值,燃烧效率高^[12];厌氧发酵与气化耦合技术可通过微生物发酵产生沼气,沼渣中未完全降解的有机物通过气化技术转换为生物质燃气^[13],实现全部有机物的资源化利用。

在西藏自治区,须考虑其气压低、氧含量低、昼夜温差大等特殊条件,不能直接照搬平原地区运行良好的资源化利用方法,处理工艺和运行方法都须做出调整。本研究从原料出发,通过取样分析,总结了西藏污泥的特性;根据已有数据,对西藏污泥产量进行了预测;结合西藏污泥的特性与产量,提出了符合西藏特点的处置方案,进而分析每种技术的资源化利用潜力;结合每项技术的经济效益、社会效益及西藏本地的需求,为污泥推荐最优的资源化利用方案。本研究为西藏自治区的污泥处置问题提供新思路,为找到适合西藏地区的污泥资源化利用方法提供了参考,具有理论意义与应用价值。

1 材料与方法

1.1 实验材料与方法

实验用污泥取自西藏自治区拉萨市某污水处理厂,为未经发酵处理的新鲜污泥。污泥取回后含水率为80%~85%,故采用自然晾晒法进行干燥后,再放入烘箱中,在105℃恒温下烘烤24h。取出冷却后,粉碎、研磨并过100目筛,取筛下物备用。

污泥的热化学基础特性包括元素分析、工业分析、重金属含量分析及XRF分析。元素分析与工业分析分别使用《煤的元素分析》(GB/T 31391-2015)^[14]、《固体生物质燃料工业分析方法》(GB/T 28731-2012)^[15]中的方法进行测试。重金属含量测试使用HNO₃-HClO₄法消解,再利用ICP装置进行测试。XRF采用射线荧光光谱仪对污泥中Si、Fe、Al、P、K、Ca、Si、Mg、Ti、Na、Cl、Mn、Sr、Rb、Zr和Co元素的含量进行测试。

1.2 计算方法

1) 污泥量计算模型。通常,污水处理厂处理 1×10^4 t生活污水可产生含水率80%的污泥5~8 t^[2],此处选取8 t计算,由于同一污泥在不同含水率下干物质的质量不变,可计算出不同含水率下的污泥质量(如式(1)所示)。

$$m_1(1-\alpha_1) = m_2(1-\alpha_2) \quad (1)$$

式中: α_1 和 α_2 为污泥含水率; m_1 和 m_2 分别为含水率为 α_1 和 α_2 时的污泥质量。

2) 灰色预测模型。灰色预测模型适用于数据样本点个数少(最少4个)、数据呈现指数或曲线形式及做中短期的预测。由于西藏污泥量数据样本较少且呈现曲线形式,故采用灰色GM(1,1)模型^[16],基于MATLAB软件进行预测。

为了保证建模方法的可行性,须对无规律的西藏污泥量原始数据 $x^{(0)}$ 进行平移变换,使其变为光滑离散函数序列。建立西藏污泥产量的时间序列(如式(2)所示)。

$$x^{(0)} = (x^{(0)}(1), x^{(0)}(2), x^{(0)}(3), x^{(0)}(4)) \quad (2)$$

由于式(2)为西藏污泥量的原始序列,其规律性不强,因此,在预测前,须对 $x^{(0)}$ 进行一次累加,如式(3)所示。

$$x^{(1)} = (x^{(1)}(1), x^{(1)}(2), x^{(1)}(3), x^{(1)}(4)) \quad (3)$$

在数据具有一定规律性后,可建立GM(1,1)的白化微分方程,如式(4)所示。

$$\frac{dx}{dt} + ax^{(1)} = b \quad (4)$$

式中: a 为发展系数; b 为灰作用量。该方程的特解如式(5)所示。

$$\hat{x}^{(0)}(k+1) = \left(x^{(0)} - \frac{b}{a}\right) \left(e^{-ak} - e^{-a(k-1)}\right), k = 2, 3, 4 \quad (5)$$

由式 (2)~式 (5) 得出 2014—2017 年西藏污泥产量的模型预测值后，通过计算预测值与真实值之间的级比偏差、相对误差及平均相对误差的数值，来判断预测结果是否可靠。相对误差算法如式 (6) 所示，级比偏差算法如式 (7) 所示，平均相对误差算法如式 (8) 所示。

$$\delta = \frac{s' - s}{s} \quad (6)$$

式中： δ 为相对误差； s 为真实值； s' 为预测值。

$$\rho = \frac{\lambda(k)' - \lambda(k)}{\lambda(k)}, k = 1, 2, 3, 4 \quad (7)$$

式中： ρ 为级比偏差； $\lambda(k)$ 为真实值的级比； $\lambda(k)'$ 为预测值的级比。

$$\bar{\delta} = \frac{\delta_1 + \delta_2 + \delta_3 + \delta_4}{4} \quad (8)$$

式中： $\bar{\delta}$ 为平均相对误差； $\delta_1 \sim \delta_4$ 分别为 4 个样本的相对误差。

若相对误差小于 α ，且平均相对误差也小于 α ，则说明预测结果可靠，可以用该模型进行预测。此处， α 取 0.5。

3) 产品量计算模型。由污泥产量计算其资源化处理可得的产品量，如式 (9) 或 (10) 所示。

$$P_i = m_{\alpha_x} \cdot \beta \quad (9)$$

$$P_i = m_{\alpha_x} \cdot \gamma \quad (10)$$

式中： P_i 为某产品的产量，t 或 m^3 ； m_{α_x} 为含水率 α_x 时的污泥质量，t； β 为产率系数，表示 1 t 污泥可产生的产品量， $t \cdot t^{-1}$ 或 $m^3 \cdot t^{-1}$ ； γ 为产率，表示污泥中转化为某产品的质量占污泥总质量的百分比。

2 西藏污泥特性及产量

2.1 元素分析对比

元素分析是污泥的基础指标，可为热化学计算提供依据并预测热化学转化率。西藏污泥及代表性城市^[17-21]的元素分析结果见表 1。可以看出，西藏污泥的碳、氢元素含量相对较高，故有机质含量较高。氮元素含量达到 6.46%，而一般煤炭的氮元素含量均在 2% 以下^[22]，这可能使污泥焚烧等利用过程中氮氧化物的排放浓度超标，因此，要注意采取适当的脱硝措施控制氮氧化物排放。相比之下，西藏污泥中硫元素含量较低 (1% 以下)，因此，相较于其他 5 个城市，西藏污泥在焚烧等过程中硫氧化物排放浓度最低，但仍须注意监测是否超标。

表 1 元素分析对比
Table 1 Comparison of ultimate analysis %

自治区与城市	碳含量	氢含量	氧含量 ¹⁾	氮含量	硫含量
西藏自治区	36.50	5.65	50.55	6.46	0.84
天津市 ^[17]	28.47	4.81	60.96	4.84	0.92
深圳市 ^[18]	14.01	3.27	79.58	2.09	1.05
大连市 ^[19]	36.45	5.93	49.82	7.03	0.77
西安市 ^[20]	34.43	4.11	53.50	7.04	0.92
长沙市 ^[21]	36.11	5.25	51.11	6.50	1.03

注：1)使用差减法计算。

2.2 工业分析对比

西藏污泥及代表性城市^[17-21]的工业分析结果见表2。可以看出,西藏污泥中挥发分含量最高,达到60%以上,这说明污泥中含有较多的有机质。其次是灰分,约占28%,由于灰分的存在,热干化利用后也会遗留部分残渣。固定炭和水分含量较低,对于化焚烧、热解等过程影响较小。

与其他5个城市相比,西藏污泥灰分含量最低,挥发分含量最高,同时水分含量也较低,说明西藏污泥有机物质丰富,无机物含量较低。对西藏污泥进行焚烧或热解气化处理时,挥发分是主要的有效成分;且西藏污泥灰分含量最低,产生的灰渣更少,对焚烧炉、热解气化炉等设备运行维护更有利。

表2 工业分析对比
Table 2 Comparison of proximate analysis %

自治区与城市	水分	挥发分	灰分	固定碳 ¹⁾
西藏自治区	3.85	61.04	28.32	6.79
天津市 ^[17]	4.93	53.90	35.22	5.95
深圳市 ^[18]	2.22	28.60	62.64	6.54
大连市 ^[19]	7.50	59.06	24.08	9.36
西安市 ^[20]	4.33	58.21	29.94	7.52
长沙市 ^[21]	5.42	57.22	31.27	6.09

注:1)使用差减法计算。

2.3 重金属含量对比

市政污泥中的重金属主要来自工业废水、生活污水和雨水径流^[17],主要包括As、Cr、Cd、Cu、Hg、Ni、Pb、Zn等^[5]。西藏污泥的重金属含量如表3所示,8种元素含量从高到低依次为Zn>Cu>Cr>As>Pb>Ni>Cd>Hg。其中,Zn元素含量最高,达294.84 mg·kg⁻¹;Cd元素和Hg元素处于较低水平,均低于2.5 mg·kg⁻¹。除As外,西藏污泥中的重金属含量均低于《农用污泥污染物控制标准》(GB 4284-2018)^[23]中的A级与B级极限值。因此,将西藏污泥无害化处理后用于牧草地施肥、土地修复等是符合国家标准的,造成二次污染的危险性较小,这使得西藏污泥资源化处理更具优势。

表3 重金属含量对比
Table 3 Comparison of heavy metal content mg·kg⁻¹

自治区与城市	As	Cr	Cd	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn
西藏自治区	38.09	53.23	<2.5	91.02	<2.5	9.67	26.07	294.84
天津市 ^[17]	38.12	952.54	<2.5	455.57	<2.5	328.53	22.22	909.54
西安市 ^[20]	34.29	154.29	<2.5	240.0	80.48	30.95	113.33	1 005.71
成都市 ^[25]	3.13	275.40	<2.5	178.40	8.09	3.23	56.80	8 330
大连 ^[19]	51.30	935.00	3.00	5 248.20	—	342.50	86.40	2 277.30
深圳 ^[18]	—	126.20	33.4	591.40	—	301.20	291.0	3 884.00
上海 ^[26]	—	226.89	2.93	186.89	—	163.12	—	2 011.52
南昌 ^[27]	—	112.50	11.72	383.47	—	692.94	113.19	609.44
A级国家标准 ¹⁾	30	500	5	500	3	100	300	1 200
B级国家标准 ²⁾	75	1 000	15	1 500	15	200	1 000	3 000

注:1)表示允许使用的农用地类型为耕地、园地、牧草地;2)表示允许使用的农用地类型为园地、牧草地、不种植食用农作物的耕地;—表示文献中缺少该项数据。

已有研究^[24]表明，我国污泥中重金属含量排序为 Zn>Cu>Cr>Pb>Ni>As>Cd>Hg，西藏污泥仅 As 一项含量较低，其余排序和全国规律一致。但由于不同地区、不同来源的污泥中，重金属含量差别较大，故选取 7 个城市^[17-20, 25-27]作为对比，如表 3 所示。在西藏污泥中，除 As 和 Pb 元素外，其余 6 种重金属含量均远低于其他城市，这是由于西藏工业不发达，且终年降雨量少，污泥多来源于生活污水所致。西藏污泥中含量最高的锌元素仅为大连市的 1/10，Cu 元素含量仅为大连市的 1/50，Cr 元素为天津市的 1/17，较为清洁。此外，西藏自治区污水处理厂投产时间较短，运行工艺及设备的质量有所保障，对污泥资源化利用十分有利。

2.4 XRF 分析

西藏污泥的 XRF 分析结果如表 4 所示。所测试的 16 种元素中共有 10 种元素含量大于 1%，其含量从高到低依次为 Si>Fe>Al>P>K>Ca>Si>Mg>Ti>Na。Si 元素含量最高，达到 33.7%，这可能与污泥中砂子、石子含量较高有关。其次是 Fe 元素，达到 18.3%，而 Na 元素含量仅为 1.04%。剩余 6 种元素含量小于 1%，其顺序

表 4 各元素质量分数
Table 4 Mass fraction of each element %

Si	Fe	Al	P	K	Ca	S	Mg
33.7	18.3	12.6	8.15	8	7.46	5.3	2.32
Ti	Na	Cl	Mn	Sr	Rb	Zr	Co
1.39	1.04	0.36	0.20	0.11	0.065	0.057	0.025

为 Cl>Mn>Cr>Sr>Rb>Zr>Co。已有研究^[22]表明，原料中 Mn、Zn 等元素在热解过程中可起到一定的催化作用，有利于孔隙的形成，提高了生物炭的比表面积与孔容。此外，还有研究^[28]表明，产甲烷菌蕴含多种微量元素，浓度为 Fe >> Zn > Ni > Cu ≈ Co ≈ Mo > Mn，这些微量元素作为微生物的生长因子，对厌氧发酵过程起到了重要作用。而西藏污泥与产甲烷菌的元素含量顺序大致相同，由此推测，西藏污泥中的 Fe、Ni、Co、Mo 元素可提高其厌氧发酵的产率。

2.5 污泥产量预测

由于中国住房和城乡建设部仅统计了 2014 年及以后的西藏自治区的污水量，并未记载污泥量。因此，研究对 2014—2017 年污泥产量进行计算，并对 2018—2022 年污泥产量进行预测。参考中国住房和城乡建设部得到的 2014—2017 年的污泥产量(含水率 80%)^[1, 29-31]，根据灰色模型计算得到的预测值及其误差如表 5 所示。由此可知，模型的相对误差、平均相对误差均在 0.5 以内，级比偏差小于 0.22，表明该模型精度较高，可进行后续预测计算。预测得到 2018—2022 年西藏污泥产量的时间序列(见式(11))。

$$x = (110\ 010, 126\ 240, 138\ 710, 148\ 280, 155\ 640) \quad (11)$$

由式(1)和式(11)得到 2014—2022 年不同含水率下的西藏污泥产量，结果如表 6 所示，污泥产量趋势如图 1 所示。由此可见，2014—2022 年西藏污泥量呈 S 型增长趋势，前期增长缓慢，2015—2019 年增长迅速，而 2020 年以后增长速度逐渐放缓。由于灰色预测模型只适合做中短期预测，因此，难以确定西藏污泥含量何时达到饱和。

表 5 2014—2017 年西藏污泥产量预测值及实际值

Table 5 Predictive and actual values of SS yield in Tibet from 2014 to 2017

年份	污泥产量实际值/t	变换后实际值/t	变换后预测值/t	相对误差 δ	级比偏差 ρ
2014	15 437.20 ^[31]	16 456.3	16 456	0	—
2015	20 903.84 ^[30]	15 909.7	15 446	0.029 1	0.217
2016	70 656.00 ^[29]	10 934.4	11 864	0.085 0	-0.116
2017	82 336.00 ^[1]	9 766.4	9 113	0.066 9	0.141

注：污泥含水率 80%。

表6 2014—2022年西藏污泥产量
Table 6 Yield of SS in Tibet from 2014 to 2022

年份	污泥产量(含水率80%)/t	污泥产量(含水率97%)/t	污泥产量(含水率50%)/t	污泥产量(含水率7.5%)/t	干污泥量/t
2014	15 437.20	102 913.33	6 174.8	3 337.73	3 087.40
2015	20 903.84	139 353.33	8 361.2	4 519.57	4 180.60
2016	70 656.00	471 040.00	28 262.4	15 276.97	14 131.20
2017	82 336.00	548 906.66	32 934.4	17 802.38	16 467.20
2018	110 010.00	733 400.00	44 004	23 785.95	22 002.00
2019	126 240.00	841 600.00	50 496	27 295.14	25 248.00
2020	138 710.00	924 733.33	55 484	29 991.35	27 742.00
2021	148 280.00	988 533.33	59 312	32 060.54	29 656.00
2022	155 640.00	1 037 600.00	62 256	33 651.89	31 128.00

3 西藏污泥处理与资源化利用技术

3.1 生物处理技术

1) 污泥好氧堆肥技术。污泥好氧堆肥是利用好氧微生物，在合适的通风、湿度和 pH 等条件下，将污泥中的有机物降解，转化为稳定的腐殖质的过程^[32]。在有氧条件下，好氧微生物经过发热、高温、降温和腐熟 4 个阶段，将污泥中不稳定的有机物分解并稳定化，生成腐殖质、 PO_4^{3-} 、 CO_2 、 H_2O 、 NH_3 、 SO_4^{2-} 等物质。此过程产生的能量及物质一部分用于微生物生长繁殖，维持微生物正常的生理活动，另一部分则释放进入环境，如图 2 所示。堆肥得到的腐殖质产品有效改善了污泥的物理性质，其含水率降低，臭味减轻，体积减小，结构疏松，颗粒分散均匀，化学性质更稳定，更方便运输和贮存，是较为理想的肥料。

污泥好氧堆肥操作简单、容易控制，堆肥周期短、效率高，与厌氧堆肥相比，臭味小，污泥中有机物分解更彻底，产物稳定。堆体温度较高，可以达到 50~60 °C^[6]，因此，在高温灭活作用下，可以杀死多数寄生虫及虫卵、病原菌和野草种子等，避免疾病传播和农田野草蔓延，有效实现污泥的无害化处理。但好氧堆肥具有占地面积大的缺点，由于西藏处于低压缺氧的环境，故堆肥周期可能更长，通氧量、搅拌频率须相应增加。考虑到西藏昼夜温差较大，其保温措施也须增强。此外，堆肥处理可钝化污泥中的重金属，但不能完全去除，所产生的肥料直接施加到土壤中仍具有潜在危害^[33-35]。

2) 污泥厌氧发酵技术。污泥厌氧发酵是利用厌氧微生物群，在无氧或缺氧条件下，将污泥中的有机物进行水解、气化反应，分解为稳定物质(CH_4 ， CO_2 等)的过程^[36]。厌氧发酵是一个涉及电子传递、能量传递和多种中间产物的复杂过程，由多种微生物协同完成。

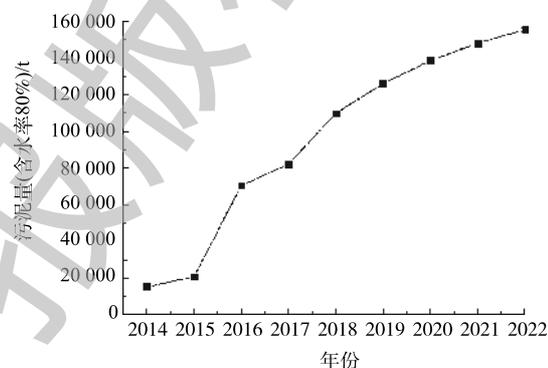


图1 2014—2022年西藏污泥产量(含水率80%)趋势
Fig. 1 Tendency of SS (80% moisture content) yield in Tibet from 2014 to 2022

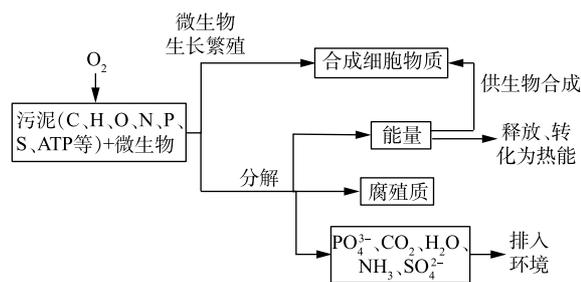


图2 污泥好氧堆肥原理
Fig. 2 Schematic of SS aerobic composting

污泥厌氧发酵原理如图 3 所示，反应包括 3 个阶段。第 1 阶段为水解和发酵阶段，在此阶段中，多糖、蛋白质、脂类等微生物作用下被水解为乙醇、脂肪酸等溶解性小分子有机物，并伴随着 CO_2 、 H_2 、 NH_3 等气体的产生，这个阶段为厌氧发酵的限速阶段。第 2 阶段为产氢、产乙酸阶段，在此阶段中，产氢、产乙酸菌将除甲酸、乙酸、甲胺、甲醇之外的溶解性小分子有机物转化为乙酸、 H_2 和 CO_2 。第 3 阶段为产甲烷阶段，在此阶段中，将上一阶段中 4 类未转化的溶解性小分子有机物及乙酸、 H_2 和 CO_2 转化为甲烷，其中约 70% 的甲烷来自乙酸的分解。

目前，厌氧发酵是一种比较成熟的技术，其受污泥含水率的影响较小，以污泥为原料发酵产生的甲烷可用于供电、供热，可抵消污水和污泥前期处理过程中所需的部分能量^[9]。厌氧消化产物稳定，同时可以杀死致病菌及寄生虫(卵)，是一种可以达到污泥减量化、资源化的有效技术。但厌氧消化反应时间较长，尤其在高原环境下周期更长，有机物去除不彻底，产气效率较低，仍须进一步研究以开发其潜能。

3.2 热干化处理技术

1) 污泥干化热解技术。污泥干化热解是指污泥干燥后，在缺氧或无氧环境，温度为 $350\sim 900\text{ }^\circ\text{C}$ 时，由热量传递驱动的热化学反应过程，同时产生可燃气体、生物油和生物炭^[37]。由于污水处理厂产生的污泥含水率通常在 80% 左右，仍需要对其进行脱水处理以适应热解工艺的要求。污泥热干化技术是一种可行的脱水方法，利用各种热介质(热烟气、水蒸气等)，直接或间接地对污泥进行加热，从而将污泥中的水分部分或全部脱除^[38]。污泥热干化使污泥体积减小约 3/4，而且干化后的污泥颗粒较小，质地均匀。

污泥热解原理如图 4 所示。热量从外部传递到污泥颗粒边界层，此时污泥颗粒的温度由外至内逐渐升高，自由水分全部蒸发；不稳定成分裂解为炭和挥发分，挥发分进入气相中，即完成了一次裂解过程，生成炭、一次热解油和不可冷凝气体。随着热解反应的进行，颗粒由内而外逐层升温，未逸出污泥颗粒的挥发分进一步裂解，生成二次热解油和不可冷凝气体；而已经逸出颗粒的挥发分会穿越周围的气相组分进一步裂解。挥发分在污泥颗粒内部和气相中进行的裂解均称为二次裂解，由于二次裂解产生的热效应会改变污泥颗粒的温度，从而影响热解反应的进行。温度越高，气体停留时间越长，二次裂解越严重，对热解反应的影响也更加显著。

在热解过程中，大分子的污泥裂解为小分子产物，反应向产生气体的方向进行，分子数目和体积都大大增加，由质量作用定律可以推断，较低的压力有利于热解反应的进行，而西藏地区平均大气压仅为 60 kPa 左右，因此，在西藏进行热解反应会有 4 个方面的正面影响^[39]。

①热解反应向体积增大的方向进行，低压有利于反应进行，使反应向生成产物的方向移动。

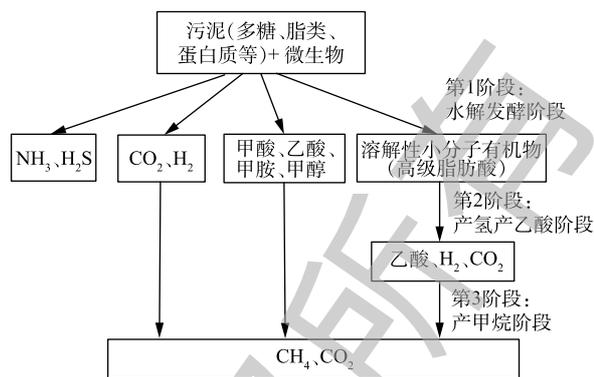


图 3 污泥厌氧发酵原理

Fig. 3 Schematic of SS anaerobic fermentation

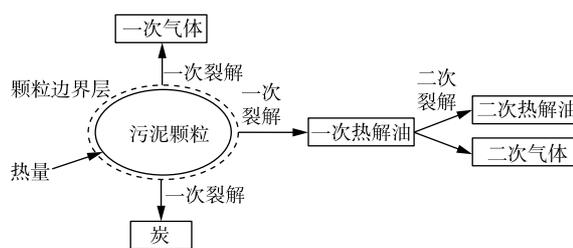


图 4 污泥热解原理

Fig. 4 Schematic of SS pyrolysis

②热解系统内压力较低,使得气相产物快速离开污泥颗粒表面,缩短气相产物的滞留时间,减少二次反应,使热解油产量增加。

③在较低的压力下,热解温度也会降低。研究^[40]表明,在标准大气压下,甘蔗渣中的半纤维素和纤维素分别在 305 ℃ 和 350 ℃ 时达到最大裂解速率;而在真空条件下,两者最大裂解速率对应的温度分别为 200~250 ℃ 和 280~320 ℃。此外,热解反应在低温时,可有效避免污泥中重金属的熔化和蒸发。

④系统压力的降低可相应地降低液体的沸点,从而促进液体产物的蒸发。

另外,热解过程产生大量的生物炭(约为污泥质量的 50%)^[10],可用于吸附重金属或有机污染物。西藏生态环境脆弱,选取本地产生的污泥为原料制备生物炭,可减少外部活性炭的购入,维持西藏自治区原有的生态环境。

2) 污泥干化与垃圾协同焚烧技术。焚烧是固体废物放热氧化并产生一定热量、烟气(CO_2 、 H_2O 、 NO_x 、 SO_2 等)、炉渣和飞灰的过程。通常,污泥焚烧需要在非常高的温度和氧气充足的条件下进行,其中的有机物发生剧烈的氧化反应,被氧化为 NO_2 、 CO_2 、水蒸气等,并产生烟气和残渣。焚烧过程中有机物被完全分解,病原菌、寄生虫等被彻底杀死,焚烧后的污泥体积只有机械脱水污泥体积的 10% 左右^[41]。

由于污泥含水量较高,热值较低,需要吸收大量能源后才能焚烧,因此,单独焚烧的初始投资巨大,运行成本较高。同时,西藏地区污水处理厂分布分散且产量低,将污泥集中焚烧处理会增加运输成本。因此,利用当地的垃圾焚烧厂,将污泥干化后与垃圾协同焚烧,可以节省污泥单独焚烧的成本,实现两者协同资源化利用,具有较大的经济和环境效益^[42]。污泥与垃圾协同焚烧原理如图 5 所示。

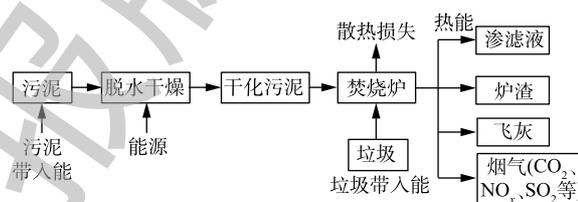


图 5 污泥干化与垃圾协同焚烧原理

Fig. 5 Schematic of SS and municipal solid waste (MSW) co-incineration

陈海军等^[11]发现,尽管污泥中各类污染物含量普遍高于生活垃圾,但当生活垃圾中掺入 15% 以下的污泥时,各种烟气污染物的排放浓度均低于《生活垃圾焚烧污染控制标准》所规定的排放限值,可达标排放。此外,污泥与生活垃圾相比,氯元素的含量较少,两者协同焚烧,可降低二恶英等污染气体的排放。但焚烧不能将污泥完全资源化利用,约 30% 的污泥最终转变为灰分。由于灰分中富集重金属,是潜在的危险废物,因此,灰分的处置须额外关注^[43]。

3) 污泥制备 RDF 燃料技术。由工业分析结果可知,西藏污泥中挥发分约占 60%,说明其中富含大量的有机物,具有作为燃料的潜质,其干化后可作发电厂或水泥厂燃料;而污泥含水率较高,须利用热脱水法去除污泥中的毛细水和吸附水,以达制备燃料的要求。将脱水污泥粉碎,加入药剂混合后,在成型机中不断压缩,使污泥黏结成为整体,风干后即成为成型燃料,其制备原理如图 6 所示。

污泥衍生燃料具有较高的热值,与其他燃料相比,供热费用更加低廉,燃烧效率提高 8%~10%^[12]。水泥厂如选择污泥衍生燃料为主要燃料,燃烧剩余的灰渣还可作为其生产水泥的原料,既减少化石燃料的使用,又节约生产原料。目前,西藏农村多以牛粪作为主要炊事能源,污染物排放较大,如能将清洁的污泥衍生燃料投放至村镇使用,可解决西藏村镇的污

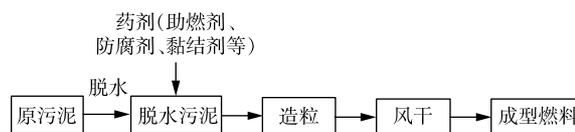


图 6 污泥衍生燃料制备原理

Fig. 6 Schematic of preparing RDF derived by SS

染问题，提高能源利用效率。

3.3 生物-热化学耦合处理技术

通常，厌氧发酵反应仅可使污泥中 40%~60% 的有机物转化为沼气。剩余沼渣中含有大量难以生物降解的有机物，具有较高的能量潜力。因此，污泥厌氧发酵耦合气化技术可将沼渣进一步气化，回收消化污泥的残余能量^[44]，将污泥中的有机物最大化利用。

厌氧发酵耦合气化技术原理如图 7 所示。首先，将污泥进行厌氧发酵反应，再将剩余的沼渣脱水干燥后进行气化，从而回收沼渣中不可生物降解的有机物。厌氧发酵技术原理同前所述，气化是指借助于部分空气、水蒸气下，在一定的热力学条件下，使污泥通过热解、氧化、还原、重整反应，转化为气体燃料的过程^[45]。气化包括干燥、热解、氧化和还原 4 个阶段。在干燥阶段，主要加热析出沼渣表面的水分，该过程的温度约为 100~150 °C，沼渣发生物理变化，化学性能不变。在热解阶段，反应温度上升至 150 °C 以上，沼渣颗粒开始发生热解反应，挥发分逸出。在氧化阶段，热解产物与氧气发生剧烈的氧化反应，该阶段释放大量的热量，是整个气化过程的驱动力。在还原阶段，温度主要为 800 °C 以上，氧化阶段产生的水蒸气、CO₂ 与碳反应生成 H₂ 和 CO，完成沼渣颗粒向气体产物的转变，此阶段为还原反应，吸收大量的热量^[46]。

污泥中可生物降解的有机物在微生物厌氧发酵的作用下产生沼气，沼渣中未完全降解的有机物通过气化技术转换为生物质燃气，实现了污泥的高效资源化、减量化利用。产生的气体燃料具有易管道输送、燃烧效率高、燃烧器具简单、低颗粒物排放的优势，是一种品质较高的燃料。但污泥在气化过程会产生焦油，易堵塞管道并污染后续设备，因此，气化过程中要采取适当的脱焦油方式，降低产气中的焦油含量。同时，由于污泥厌氧发酵后，含水率升高，需要将沼渣干燥后再进行热解气化，这一过程也会增加能量的消耗^[47]。

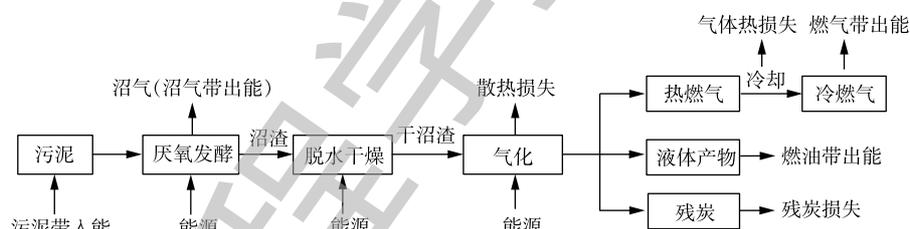


图 7 污泥厌氧发酵耦合气化原理

Fig. 7 Schematic of SS anaerobic digestion coupling gasification

4 西藏污泥资源化利用潜力

4.1 生物处理潜力

1) 污泥好氧堆肥。将含水率为 80% 的污泥进行好氧堆肥，1 t 污泥可产生 0.21 t 肥料^[45]，因此，产率系数 $\beta=0.21 \text{ t}\cdot\text{t}^{-1}$ 。当污泥进行农田利用时，其产生的资源化效益可通过节省的肥料费用来计算。市面上农用化肥的价格为 1 700 元 $\cdot\text{t}^{-1}$ ，每年农田施用化肥量为 750 kg $\cdot\text{hm}^{-2}$ ，因此，农田每年施用化肥花费 1 275 元 $\cdot\text{hm}^{-2}$ 。如果施用污泥有机肥，按照安全用量计算，农田每年需要施用 7.5 t $\cdot\text{hm}^{-2}$ 污泥有机肥^[48]，从而计算节省总资金，结果如表 7 所示。由此可知，预计 2022 年污泥堆肥肥料年产量将从 2014 年的 3 241 t 增加到 3.2 $\times 10^4$ t，将增长 10 倍，年总节省资金也从 5.51 $\times 10^5$ 元上升到 5.55 $\times 10^6$ 元，这可在节省农民大量开支的同时实现对污泥的资源化利用，减少环境污染，效益非常可观。

2) 污泥厌氧发酵。将含水率为 80% 的污泥进行厌氧发酵，1 t 污泥约可产生 20 m³ 沼气，产率系数为 $\beta=20 \text{ m}^3\cdot\text{t}^{-1}$ 。在农村，一个四口之家每天煮饭、照明共需沼气约 1.5 m³，沼气价格约为 1.5 元 $\cdot(\text{m}^3\cdot\text{t})^{-1}$ ，假设至 2022 年价格不变^[46]。根据以上参数，计算 2014—2022 年西藏污泥厌氧发酵

表7 2014—2022年西藏污泥好氧堆肥肥料产量计算

Table 7 Fertilizer yield calculation of SS aerobic composting in Tibet from 2014 to 2022

年份	污泥量(含水率80%)/t	产率系数 β /(t·t ⁻¹)	肥料产量/t	可施用的农田面积/hm ²	节省总资金/元
2014	15 437	0.21	3 241.77	432.45	551 100
2015	20 904	0.21	4 389.64	585.58	746 237
2016	70 656	0.21	14 837.76	1 979.36	2 522 419
2017	82 336	0.21	17 290.56	2 306.56	2 939 395
2018	110 010	0.21	23 102.10	3 081.82	3 927 357
2019	126 240	0.21	26 510.40	3 536.49	4 506 768
2020	138 710	0.21	29 129.10	3 885.82	4 951 947
2021	148 280	0.21	31 138.80	4 153.92	5 293 596
2022	155 640	0.21	32 684.40	4 360.10	5 556 348

可产生的沼气量、可供应的农户数及节省总资金,结果如表8所示。由此可知,2016年以后,随着污泥产量的剧增,厌氧发酵产生的沼气量也快速增加,2016年沼气产量突破 $1 \times 10^5 \text{ m}^3$,可供2 581户农民使用,节省资金约 2.12×10^6 元。预计至2022年,沼气产量可突破 $3 \times 10^6 \text{ m}^3$,可供5 600余户农民日常生活使用,可以满足阿里地区狮泉河镇(总人口为 2×10^4 人)的沼气供应,节省资金约 4.67×10^6 元,与2016年相比翻一番。DEUBLEIN等^[49]指出,污泥厌氧消化产生的沼气可以用于发电、产热等,提供的能源约占污水处理厂能源消耗的50%。RAHEEM等^[10]报道,在运用厌氧发酵的奥地利某污水处理厂中,在污水处理和热电联产的最佳条件下运行,该厂可以实现电力独立。由此可见,污泥厌氧发酵产沼气前景乐观,在创造经济效益的同时可以实现污泥的资源化、减量化,减少对化石燃料的依赖,并减少温室气体排放。

表8 2014—2022年西藏污泥厌氧发酵沼气产量计算

Table 8 Biogas production by SS anaerobic fermentation in Tibet from 2014 to 2022

年份	污泥量(含水率80%)/t	产率系数/(m ³ ·t ⁻¹)	沼气产量/m ³	年沼气用量/(m ³ ·户 ⁻¹)	可供应农户数	节省资金/元
2014	15 437	20	308 740	547.5	563	463 110
2015	20 904	20	418 080	547.5	763	627 090
2016	70 656	20	1 413 120	547.5	2 581	2 119 680
2017	82 336	20	1 646 720	547.5	3 007	2 470 080
2018	110 010	20	2 200 200	547.5	4 018	3 300 300
2019	126 240	20	2 524 800	547.5	4 611	3 787 200
2020	138 710	20	2 774 200	547.5	5 067	4 161 300
2021	148 280	20	2 965 600	547.5	5 416	4 448 400
2022	155 640	20	3 128 800	547.5	5 685	4 669 200

4.2 热干化处理潜力

1) 污泥干化热解技术。根据GAO等^[19]的研究,当污泥含水率为7.5%,在450℃下进行慢速热解时,产炭率为54%,由此可计算热解产炭量。白旭佳^[50]研究发现,当土壤中生物炭施用量为5%时,对黑麦草种子发芽的促进作用最为明显,故取施加量为5%。按土壤耕作层深度为20 cm、土壤密度为 $1.3 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ ^[51]进行计算,则土地需施加的生物炭量为 $13 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$,由此可计算出西藏污泥热解产炭可改良的土壤面积。若从平原地区购买生物炭,生物炭报价为 $4 000 \text{ 元} \cdot \text{t}^{-1}$,由此可得出节省

生物炭资金。桑光明^[52]指出，污泥热干化成本约为 256~537 元·t⁻¹，取 256 元·t⁻¹ 进行计算，可得出污泥干化所需成本。土地每年改良费用约为 3 300 元·hm⁻²^[26]，由此得出扣除干化成本后的总节省资金。产炭量、节省生物炭资金、改良土地面积及节省资金量，结果如表 9 所示。由此可知，2014 年西藏污泥热解产炭可改良土地 13.87 hm²，至 2017 年，可改良土地面积超过 70 hm²，预计至 2022 年，改良土地面积将达到约 140 hm²，与 2014 年相比翻了十番，而土地每年改良费用约为 3 300 元·hm⁻²，用污泥基生物炭进行改良，可节省资金 3 300 元·hm⁻²，由此估算，若 2019—2022 年采用污泥基生物炭进行土壤修复，共可节约资金约 1.69×10⁶ 元。因此，污泥热解制备生物炭用于土壤改良可创造可观的经济效益，并可降低污泥对环境及人类的危害，是一种资源化利用的有效途径。

表 9 2014—2022 年西藏污泥干化热解产炭量计算
Table 9 Biochar production by SS pyrolysis in Tibet from 2014 to 2022

年份	污泥量 (含水率7.5%)/t	产炭率/%	产炭量/t	可改良土地 面积/hm ²	污泥干化 成本/元	可替代生物炭 资金/元	节省土地改良 资金/元
2014	3 337.73	54	1 802.37	13.87	790 384.64	7 209 496.22	45 752.34
2015	4 519.57	54	2 440.57	18.78	1 070 276.61	9 762 265.95	61 952.53
2016	15 276.97	54	8 249.57	63.49	3 617 587.20	32 998 261.62	209 411.00
2017	17 802.38	54	9 613.28	73.99	4 215 603.20	38 453 137.30	244 028.31
2018	23 785.95	54	12 844.41	98.85	5 632 512.00	51 377 643.24	326 048.80
2019	27 295.14	54	14 739.37	113.44	6 463 488.00	58 957 491.89	374 151.44
2020	29 991.35	54	16 195.33	124.64	7 101 952.00	64 781 318.92	411 110.16
2021	32 060.54	54	17 312.69	133.24	7 591 936.00	69 250 767.57	439 473.83
2022	33 651.89	54	18 172.02	139.85	7 968 768.00	72 688 086.49	461 287.47

2) 污泥干化与垃圾焚烧协同处理。炉排炉焚烧厂垃圾净发电量 225~379 kWh·t⁻¹^[53](取 350 kWh·t⁻¹)；污泥发电量约为 50 kWh·t⁻¹^[54]。实验证明，当污泥以 20% 的质量比例添加至垃圾中时，两者具有最佳的协同效果^[55]。因此，掺混后混合物发电量为 290 kWh·t⁻¹。发电标准煤耗一般在 312~365 g·kWh⁻¹，并且随着技术的发展，煤耗量逐渐下降^[56]，按照 320 g·kWh⁻¹ 进行计算，得出标煤发电量为 3 125 kWh·t⁻¹，由此可计算年节省煤量，结果见表 10。由此可知，污泥发电量较低 (50 kWh·t⁻¹)，但与垃圾混合焚烧发电时，混合物发电量可以达到 290 kWh·t⁻¹。国家规定垃圾焚烧发电厂垃圾发电量须高于 280 kWh·t⁻¹^[57]，故垃圾焚烧厂掺混污泥后发电量仍然符合国家标准。2014 年，将西藏所有的污泥与垃圾混合后进行焚烧发电，可发电约 9×10⁶ kWh，节省标煤 2 865 t。而 2018 年发电量可达 6.3×10⁷ kWh 以上，节省标煤约 2×10⁴ t。预计到 2022 年，发电量将达到 9×10⁷ kWh 以上，节省标煤约 3×10⁴ t。这将在很大程度上减少化石燃料的使用，为西藏提供了新的发电途径，环境效益、经济效益显著，也符合国家相关政策和技术规范，可以实施产业化生产及工程应用^[58]。

3) 污泥制备 RDF 燃料。根据尹龙晓^[59]的研究，在污泥中掺入稻草粉，可改善 RDF 的成型效果并提高 RDF 燃料热值。当稻草粉的添加比例为 20%(基于干物质)，RDF 燃料最终含水率为 9% 时，样品的综合成型情况最好，RDF 燃料热值可达 13.91 MJ·kg⁻¹。据此计算西藏污泥可生产的 RDF 燃料量及节约的标煤量，结果见表 11。由此可知，2014 年西藏污泥可制成约 4 000 t RDF 燃料，产生总热值约 6×10⁷ MJ，相当于标煤约 2 000 t，2016 年，RDF 燃料产量可剧增至 2×10⁴ t，产生热值约 2×10⁹ MJ，可节约标煤 9 000 t 左右。预计至 2022 年，西藏污泥可产生约 4.3×10³ t RDF 燃

表10 2014—2022年西藏污泥干化与垃圾协同焚烧发电量

Table 10 Power generation from co-incineration of SS and MSW in Tibet from 2014 to 2022

年份	污泥产量 (含水率50%)/t	垃圾发电量/ (kWh·t ⁻¹)	污泥发电量/ (kWh·t ⁻¹)	掺混/ (kWh·t ⁻¹)	标煤发电量/ (kWh·t ⁻¹)	污泥与垃圾混合 发电量(kWh)	节约标煤量/t
2014	6 174.8	350	50	290	3 125	8 953 460	2 865.11
2015	8 361.2	350	50	290	3 125	12 123 740	3 879.60
2016	28 262.4	350	50	290	3 125	40 980 480	13 113.75
2017	32 934.4	350	50	290	3 125	47 754 880	15 281.56
2018	44 004	350	50	290	3 125	63 805 800	20 417.86
2019	50 496	350	50	290	3 125	73 219 200	23 430.14
2020	55 484	350	50	290	3 125	80 451 800	25 744.58
2021	59 312	350	50	290	3 125	86 002 400	27 520.77
2022	62 256	350	50	290	3 125	90 271 200	28 886.78

表11 2014—2022年西藏污泥制备RDF燃料产量

Table 11 Yield of RDF derived by SS in Tibet from 2014 to 2022

年份	干污泥量/t	掺入稻粉后质量 (基于干物质)/t	RDF产量 (含水率9%)/t	RDF热值/ (MJ·kg ⁻¹)	标准煤热值/ (MJ·kg ⁻¹)	总热值/MJ	节约标煤量/t
2014	3 087.40	3 859.25	4 240.93	13.91	29.31	58 991 392.86	2 012.88
2015	4 180.60	5 225.75	5 742.58	13.91	29.31	79 879 321.43	2 725.61
2016	14 131.20	17 664.00	19 410.99	13.91	29.31	270 006 857.14	9 213.05
2017	16 467.20	20 584.00	22 619.78	13.91	29.31	314 641 142.86	10 736.04
2018	22 002.00	27 502.50	30 222.53	13.91	29.31	420 395 357.14	14 344.54
2019	25 248.00	31 560.00	34 681.32	13.91	29.31	482 417 142.86	16 460.82
2020	27 742.00	34 677.50	38 107.14	13.91	29.31	530 070 357.14	18 086.82
2021	29 656.00	37 070.00	40 736.26	13.91	29.31	566 641 428.57	19 334.68
2022	31 128.00	38 910.00	42 758.24	13.91	29.31	594 767 142.86	20 294.37

料,产生热值高达 6×10^9 MJ,可节约标煤量达到 2×10^4 t以上。由此可见,RDF燃料热值是标煤的47%左右,相当于一种劣质燃料,有较高的热能利用价值,符合当前污泥处置的发展趋势。

4.3 生物-热化学耦合处理潜力

由计算可知,西藏污泥厌氧发酵产生的沼气量,沼气热值为 $15.9 \sim 27.8$ MJ·m⁻³(取 25.8 MJ·m⁻³),而发酵后的污泥中含有的大量不可生物降解的有机物,仍然蕴含着大量能量。通常,在挥发性固体中,污泥中约40%~60%的有机物可在厌氧消化过程中转化为沼气,典型值为45%^[60]。而在850℃,以水蒸气和空气为气化剂的流化床气化工工艺中,可以产生约 1.47 m³·kg⁻¹燃气,产物气的LHV为 $4.12 \sim 6.20$ MJ·m⁻³,属于低热值气体^[61],按照 5 MJ·m⁻³进行计算,结果如表12所示。由此可知,2014—2018年,产气总热值从 3×10^7 MJ增加到 2.1×10^9 MJ,节约标煤量从1 000 t增加到7 500 t,增长了7.5倍。预计到2022年,产气总热值将达到 3×10^9 MJ,可节约标煤 1×10^4 t以上。这将在一定程度上减轻西藏对于化石燃料的依赖程度,减轻煤燃烧带来的环境污染,并使污泥中有机质的利用更加充分,实现污泥的减量化处理及资源化利用。

表 12 2014—2022 年西藏污泥厌氧发酵耦合气化产气量

Table 12 Gas production by SS anaerobic fermentation coupling gasification in Tibet from 2014 to 2022

年份	污泥量(含水率80%)/t	VS总量/t	厌氧发酵产沼气量/m ³	剩余VS量/t	气化产气量/(10 ⁶ m ³)	产气总热值/(10 ⁶ MJ)	节约标煤量/t
2014	15 437	1 960.01	308 740	1 078.01	1.58	3.07	1 046.82
2015	20 904	2 654.02	418 060	1 459.71	2.15	4.15	1 417.48
2016	70 656	8 971.07	1 413 120	4 934.09	7.25	14.04	4 791.34
2017	82 336	10 454.06	1 646 720	5 749.73	8.45	16.36	5 583.38
2018	110 010	13 967.78	2 200 200	7 682.28	11.30	21.86	7 460.02
2019	126 240	16 028.48	2 524 800	8 815.66	12.96	25.09	8 560.61
2020	138 710	17 611.77	2 774 200	9 686.47	14.24	27.57	9 406.22
2021	148 280	18 826.86	2 965 600	10 354.77	15.22	29.47	10 055.19
2022	155 640	19 761.34	3 112 800	10 868.74	15.98	30.93	10 554.28

4.4 分析与讨论

预计到 2022 年，通过好氧堆肥技术处理污泥可产肥料 3.27×10^4 t，节省肥料投资约 5.56×10^6 元；通过厌氧发酵技术可产沼气 3.11×10^6 m³，节省资金约 4.67×10^6 元；通过干化热解产炭技术可产炭 1.81×10^4 t，节省炭肥投资约 4.61×10^5 元；通过污泥干化与垃圾焚烧协同处理可发电 9×10^7 kWh，节省标准煤约 2.89×10^4 t；通过制备 RDF 燃料技术可制得 RDF 燃料 4.28×10^4 t，约节省标准煤 2.03×10^4 t；通过厌氧发酵耦合气化技术可产沼气 3.11×10^6 t，可节省标准煤 1.06×10^4 t。

从热值、肥力、吸附潜力方向判断，污泥厌氧发酵、好氧堆肥、干化热解技术都具有一定的潜力。污泥好氧堆肥操作简单、设备简单、投资少、可节省资金最多。虽然西藏污泥目前能满足污泥农用的国家标准，但是由于堆肥中钝化重金属的存在，好氧堆肥对西藏脆弱的生态系统仍有潜在风险，且随着环境标准的日益严格，堆肥产品可能不再适合农用。相比之下，厌氧发酵技术可节省资金虽略少于好氧堆肥，却为干化热解技术的 10 倍。污泥发酵产生的沼气较为清洁，可用于供电和供热，改善藏民生活质量，同时比干化热解节省更多资金，初投资少，剩余消化污泥也仍然具有高能量潜力，可以后续利用。因此，污泥厌氧发酵技术在西藏更具有推广潜力。

从能源化方向分析，污泥干化与垃圾协同焚烧处理技术、制备 RDF 燃料、厌氧发酵耦合热解气化技术也具有较大潜力。虽然协同焚烧可以依托已有垃圾焚烧厂进行处理，但是焚烧烟气含有多种污染物，飞灰也属于危险废物，对西藏环境的风险更大，并且西藏地区太阳能丰富，可以采用光伏发电来代替环境污染较大的焚烧发电。由于掺入了大量的垃圾，协同焚烧处理技术节省标准煤量最多。但制备 RDF 燃料能源潜力与协同焚烧相差较小，约为厌氧发酵耦合气化技术的 2 倍。由于目前西藏农村多以牦牛粪作为主要炊事能源，污染严重，能源品质低劣，村镇农民对清洁燃料需求迫切。制备 RDF 燃料技术投资运行费用低，投放在西藏农村代替牦牛粪可满足当地需求，更具优势。厌氧发酵耦合热解气化技术虽然也十分清洁，可完全利用污泥中的有机物，但目前该项技术仍在实验阶段，短时期难以实现工业化。综上，厌氧发酵与制备 RDF 燃料技术在西藏地区更具有推广潜力。

5 结论

1) 西藏污泥与平原代表性城市的污泥相比，具有高碳氢、高挥发分、低重金属含量等适合资源化利用的特性。

2) 灰色预测模型测算显示，2014—2022 年西藏污泥产量呈 S 型增长趋势，2022 年污泥量可达 1.56×10^5 t。

3) 结合平原地区的经验, 提出生物处理、热干化处理与生物-热化学耦合处理3种处理方案, 分别包括好氧堆肥、厌氧发酵; 热解、协同焚烧、制备 RDF 燃料; 厌氧发酵耦合气化技术。潜力分析表明, 预计至2022年, 污泥好氧堆肥产生的肥料可施用于4 360.10 hm²土地; 污泥厌氧发酵产生的沼气可供约5 700户农民使用; 污泥干化热解产炭可改良140 hm²土地; 协同焚烧技术可节约标准煤2.89×10⁴ t; 制备污泥 RDF 燃料可节约标准煤2.03×10⁴ t; 发酵耦合气化技术可节约标准煤1.06×10⁴ t。

4) 综合考虑西藏的环境特点与需求性, 污泥厌氧发酵与制备 RDF 燃料2项技术在西藏地区更具潜力。这一结论可为西藏自治区的污泥处置问题提供新思路, 亦可对西藏污泥的利用提供重要参考。

参 考 文 献

- [1] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 2017年城乡建设统计年鉴[EB/OL]. [2019-02-20]. <http://www.mohurd.gov.cn/xytj/tjzljxsxytjgb/jstjnj/w02019012421874448602635000.zip>, 2019.
- [2] 李平, 邵敏, 刘玉坤, 等. 有机固体废弃物资源化利用市场潜力研究[J]. *资源节约与环保*, 2018(10): 103-107.
- [3] 伍远辉, 潘仕江, 巫受群, 等. 城市污水处理厂污泥无害化处理研究[J]. *广州化工*, 2015(11): 13-15.
- [4] 崔荣煜, 周天水, 王东田, 等. 国内污泥成分特性的研究进展[J]. *环境科学与技术*, 2016, 39(S2): 256-261.
- [5] 朱玉珍, 潘悝. 我国城市污泥处理现状及资源化简述[J]. *山东工业技术*, 2018(9): 245.
- [6] 陈冠益, 马文超, 颜蓓蓓. 生物质废物资源综合利用技术[J]. 北京: 化学工业出版社, 2015.
- [7] 张权, 张有为, 蒲港, 等. 污泥处理现状及资源化利用研究综述[J]. *山西建筑*, 2018(6): 192-194.
- [8] 魏先勋, 翟云波, 曾光明, 等. 城市污水处理厂污泥资源化利用技术进展[J]. *环境污染治理技术与设备*, 2003, 4(10): 10-13.
- [9] BEEGLE J R, BOROLE A P. Energy production from waste: Evaluation of anaerobic digestion and bioelectrochemical systems based on energy efficiency and economic factors[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, 96: 343-351.
- [10] RAHEEM A, SIKARWAR V S, HE J, et al. Opportunities and challenges in sustainable treatment and resource reuse of sewage sludge: A review[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2018, 337: 616-641.
- [11] 陈海军, 严骁, 许榕发, 等. 市政污泥掺烧对生活垃圾焚烧设施烟气中污染物排放的影响[J]. *安全与环境学报*, 2018, 18(2): 766-772.
- [12] 熊筱, 蹇含. 垃圾衍生燃料(RDF)“干化”技术初步探索: 以遵义市生活垃圾“干化”试验为例[J]. *环保科技*, 2017, 23(5): 28-31.
- [13] CHEN G, GUO X, CHENG Z, et al. Air gasification of biogas-derived digestate in a downdraft fixed bed gasifier[J]. *Waste Management*, 2017, 69: 162-169.
- [14] 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. 煤的元素分析: GB/T 31391-2015[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.
- [15] 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.
- [16] 赵学敏. 基于灰色GM(1, 1)预测模型的北京市大气污染物浓度预测[J]. *北方工业大学学报*, 2018, 30(5): 47-51.
- [17] CHEN G Y, YANG R L, CHENG Z J, et al. Nitric oxide formation during corn straw/sewage sludge co-pyrolysis/gasification[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 197: 97-105.
- [18] CHEN J J, SUN Y Q, SHAO N N, et al. Environmental mitigation of sludge combustion via two opposite modifying strategies: Kinetics and stabilization effect[J]. *Fuel*, 2018, 227: 346-354.
- [19] GAO N, LI J J, QI B Y, et al. Thermal analysis and products distribution of dried sewage sludge pyrolysis[J]. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2014, 105: 43-48.
- [20] 张喻, 樊英杰, 杨鹏程, 等. 西安地区市政污泥泥质分析及其处置方式探讨[J]. *城市道桥与防洪*, 2018(9): 221-225.
- [21] JIANG L B, LIANG J, YUAN X Z, et al. Co-pelletization of sewage sludge and biomass: The density and hardness of pellet[J]. *Bioresource Technology*, 2014, 166: 435-443.
- [22] 姚毅, 李博, 王飞, 等. 深圳市污水处理厂污泥焚烧处理可行性研究[J]. *环境卫生工程*, 2011, 19(5): 31-34.
- [23] 国家市场监督管理总局, 中国国家标准化管理委员会. 农用污泥污染物控制标准: GB/T 4284-2018[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.
- [24] 马学文, 翁焕新, 章金骏. 中国城市污泥重金属和养分的区域特性及变化[J]. *中国环境科学*, 2011, 31(8): 1306-1313.
- [25] EMAD K, JENKINS G A, ADAME M, et al. Carbon sequestration potential for mitigating the carbon footprint of green stormwater infrastructure[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, 94: 1179-1191.
- [26] LI J H, ZHANG M, YE Z Y, et al. Effect of Manganese oxide-modified biochar addition on methane production and heavy metal speciation during the anaerobic digestion of sewage sludge[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2019, 76: 267-277.
- [27] YANG T, HUANG H J, LAI F Y. Pollution hazards of heavy metals in sewage sludge from four wastewater treatment plants in Nanchang, China[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2017, 27(10): 2225-2249.
- [28] CHONG Y Y, NORLI I, ABDULLAH A Z, et al. Impacts of trace element supplementation on the performance of anaerobic digestion process: A critical review[J]. *Bioresource Technology*, 2016, 209: 369-379.
- [29] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 2014年城乡建设统计年鉴[EB/OL]. [2019-02-20]. <http://www.mohurd.gov.cn/xytj/tjzj/sxytjgb/jstjnj/w02016122321215889918808807.rar>, 2016.
- [30] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 2015年城乡建设统计年鉴[EB/OL]. [2019-02-20]. <http://www.mohurd.gov.cn/xytj/tjzj/sxytjgb/jstjnj/w02016122321215892839597737.rar>, 2017.
- [31] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 2016年城乡建设统计年鉴[EB/OL]. [2019-02-20]. <http://www.mohurd.gov.cn/xytj/tjzj/sxytjgb/jstjnj/w02018010521542516111326280.zip>, 2018.
- [32] 盛金良, 朱强, 杨志强, 等. 污泥好氧堆肥预处理混合破碎机实验研究[J]. *环境工程学报*, 2010, 4(2): 445-448.

- [33] ZHENG G D, GAO D, CHEN T B, et al. Stabilization of nickel and chromium in sewage sludge during aerobic composting[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2007, 142(1): 216-221.
- [34] 马殿旗, 姜楠, 王涛, 等. 污泥好氧堆肥工艺技术经济分析[J]. *建设科技*, 2010(23): 55-57.
- [35] 何李健, 尹军, 王争. 污泥好氧堆肥处理技术探讨[J]. *中国资源综合利用*, 2014, 32(3): 30-33.
- [36] 黄潇, 董文艺, 赵福祥, 等. 发酵周期对初沉污泥厌氧发酵产酸影响及微生物机制研究[J]. *环境科技*, 2019, 32(2): 1-11.
- [37] BARRY D, BARBIERO C, BRIENS C, et al. Pyrolysis as an economical and ecological treatment option for municipal sewage sludge[J]. *Biomass and Bioenergy*, 2019, 122: 472-480.
- [38] 许志欣, 蓝梅, 孙文叶. 污泥热干化技术浅析[J]. *市政技术*, 2016, 34(1): 117-120.
- [39] WALL T F, LIU G S, WU H W, et al. The effects of pressure on coal reactions during pulverised coal combustion and gasification[J]. *Progress in Energy & Combustion Science*, 2002, 28(5): 405-433.
- [40] BRIDGWATER A V, PEACOCKE G C. Fast pyrolysis processes for biomass[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2000, 4(1): 1-73.
- [41] 纪伟勇, 姬志国, 陈思明. 市政污泥干化焚烧技术及运用[J]. *绿色环保建材*, 2018(1): 152.
- [42] 何萍, 张京京, 费志嘉, 等. 我国污泥合成燃料技术研究进展[J]. *化工时刊*, 2018(1): 49-51.
- [43] SAMOLADA M C, ZABANIOTOU A A. Comparative assessment of municipal sewage sludge incineration, gasification and pyrolysis for a sustainable sludge-to-energy management in Greece[J]. *Waste Management*, 2014, 34(2): 411-420.
- [44] FABBRI D, TORRI C. Linking pyrolysis and anaerobic digestion (Py-AD) for the conversion of lignocellulosic biomass[J]. *Current Opinion in Biotechnology*, 2016, 38: 167-173.
- [45] 陈平. 生物质流化床气化机理与工业应用研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2006.
- [46] 蒋剑春. 生物质热化学转化行为特性和工程化研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2003.
- [47] LI H, FENG K. Life cycle assessment of the environmental impacts and energy efficiency of an integration of sludge anaerobic digestion and pyrolysis[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 195: 476-485.
- [48] 孟锦. 城镇污泥处理处置方案综合评价研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2015.
- [49] DEUBLEIN D, STEINHAUSER A. *Biogas from Waste and Renewable Resources: An Introduction*[M]. 2nd ed. Germany: WILEY-VCH, 2010.
- [50] 白旭佳. 污泥基生物炭制备及其保肥效能的应用研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2012.
- [51] 郭月婷. 中国耕作层土壤剥离利用研究进展[J]. *中国水土保持科学*, 2017, 15(1): 148-156.
- [52] 桑光明. 城市污水污泥处理处置综合比较分析[D]. 深圳: 深圳大学, 2015.
- [53] 吴剑, 蹇瑞欢, 刘涛. 我国生活垃圾焚烧发电厂的能效水平研究[J]. *环境卫生工程*, 2018, 26(3): 39-42.
- [54] 陈兆林, 温俊明, 刘朝阳, 等. 市政污泥与生活垃圾混烧技术验证[J]. *环境工程学报*, 2014, 8(1): 324-328.

- [55] CHEN G Y, WANG X T, LI J, et al. Environmental, energy, and economic analysis of integrated treatment of municipal solid waste and sewage sludge: A case study in China[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 647: 1144-1433.
- [56] 吴力波, 孙可芻, 时志雄. 环境规制下中国煤炭发电企业成本技术效率研究[J]. *中国人口·资源与环境*, 2018, 28(8): 31-38.
- [57] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 国家发展改革委关于完善垃圾焚烧发电价格政策的通知[EB/OL]. [2019-02-20]. http://www.ndrc.gov.cn/zcfb/zcfbtz/201204/t20120410_472395.html, 2012.
- [58] 刘志永, 郑泽华. 生活垃圾焚烧发电协同处置市政污泥技术研究: 以衡阳市为例[J]. *环境卫生工程*, 2018, 26(3): 14-17.
- [59] 尹龙晓. 城市污泥燃料化利用实验研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2013.
- [60] CAO Y C, PAWLOWSKI A. Sewage sludge-to-energy approaches based on anaerobic digestion and pyrolysis: Brief overview and energy efficiency assessment[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2012, 16(3): 1657-1665.
- [61] GIL-LALAGUNA N, SANCHEZ J L, MURILLO M B, et al. Air-steam gasification of sewage sludge in a fluidized bed: Influence of some operating conditions[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2014, 248: 373-382.

(本文编辑: 郑晓梅, 张利田)

Analysis on characteristics and resource utilization potential of sewage sludge in Tibet, China

WANG Xutong¹, ZHANG Rui¹, YAN Beibei¹, CHEN Guanyi^{2,*}, HOU Li'an^{1,3}, DAN Zeng^{1,2}

1. School of Environmental Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China

2. School of Science, Tibet University, Lhasa 850012, China

3. Logistics Science and Technology Research Institute of Rocket Army, Beijing 100011, China

*Corresponding author, E-mail: chen@tju.edu.cn

Abstract In order to solve the problem of sludge disposal in Tibet Autonomous Region and find a suitable method of sludge resource utilization in Tibet, China. The thermochemical characteristics of Tibetan SS were summarized through sample analysis and comparison with the representative cities. The SS amount in recent 5 years was predicted by the grey model calculation. Combined with the experience of the plain area, three resource utilization plans of biological treatment methods, thermal utilization methods and biological coupling thermal utilization method were proposed, and their technical routes and application potential analysis were addressed, respectively. The results showed that SS in Tibet Autonomous Region had high carbon-hydrogen and volatile content, low heavy metal content. The SS yield was predicted to reach 1.56×10^5 t in 2022. Six utilization methods of aerobic composting, anaerobic digestion, pyrolysis, co-incineration, RDF fuel preparation and anaerobic digestion coupled gasification present certain application potential. Of which anaerobic digestion and RDF fuel preparation are worth promoting because of low pollution, low cost and the ability to provide clean fuels. This study provides technical and political guidance for SS utilization in Tibet Autonomous Region.

Keywords Tibet Autonomous Region; sewage sludge; characteristic analysis; potential analysis; utilization