

污泥资源化的环境—能源—经济效益评估： 以湖北省襄阳市鱼梁洲污泥甲烷捕获实践为例

ENVIRONMENTAL-ENERGY-ECONOMIC BENEFIT ASSESSMENT FOR SLUDGE-TO-ENERGY:
A CASE STUDY OF CAPTURING METHANE FROM SLUDGE IN XIANGYANG, HUBEI PROVINCE

付晓天 钟丽锦 著

执行摘要

中国污水处理设施数量以及污水处理量的迅速增长带来了污泥产量的激增。预计到 2015 年全国城镇污水处理厂的污泥年产量将超过 3000 万吨（按含水率 80% 计）。污泥二次污染及其存在的显著温室气体效益已经引起广泛关注，成为全球性环境问题。但是污泥也是一种放置错误的资源，通过妥善处置污泥可以有效将污泥从废物转化为资源进行利用。

污泥的有效及可持续处理是众多国家在快速城镇化进程中所面临的共同挑战。经济合作与发展组织国家的许多城市针对污泥能源化和资源化利用已有诸多实践。其中采用厌氧消化技术“捕获”污泥中的可利用物质，避免由此带来的二次污染成为最有效的解决方案之一。中国湖北襄阳市在鱼梁洲项目中通过“高温水解 + 高浓度厌氧消化 + 甲烷 (CH₄) 捕获利用”技术路线对污泥和餐厨垃圾进行协同处理，对上述理念进行了有益尝试。研究表明，当污泥项目能够很好的协调政府—企业—投资者三方关系时，这一模式将给当地带来显著的经济效益。

襄阳的实践证明了一个中等城市如何成功实现“污泥全消纳、能量全平衡、资源全回收、过程全绿色、费用可接受”的多效目标，探索出一条有效的污泥资源化途径。世界资源研究所对该项目进行“环境—能源—经济”效益综合评估，总结其经验，以期为更多城市的建设和环境管理部门提供决策依据，为污泥项目的规划、运营和投资提供可行借鉴，并为其他发展中国家提供经验。

“环境—能源—经济”效益综合评估结果

■ **环境效益：**鱼梁洲项目污泥通过鸟粪石法和厌氧氨氧化法，可有效实现氮 (N)、磷 (P) 营养物质的回收再利用，其中

目录

执行摘要	1
Executive Summary.....	2
前言	4
污泥资源化以及“环境—能源—经济”效益评估框架 ...	4
污泥资源化利用的发展趋势：国际经验	4
环境—能源—经济 (3E) 效益评估框架	6
鱼梁洲项目概况	6
鱼梁洲项目环境效益评价	8
鱼梁洲项目物质流分析	8
鱼梁洲项目的脱氮除磷	8
鱼梁洲项目能源效益与温室气体减排评价	9
鱼梁洲项目与其它处置方式的碳平衡、温室气体减排效益比较	9
鱼梁洲项目的能源管理措施	11
鱼梁洲项目其它资源化效益评价	13
鱼梁洲项目经济效益评价	13
鱼梁洲项目运营模式与融资机制	13
鱼梁洲项目的政府补贴	13
鱼梁洲项目成本分析	15
主要发现	16
注释	17
参考文献	19

免责声明：“工作论文”包括初步的研究、分析、结果和意见。“工作论文”用于促进讨论，征求反馈，对新事物的争论施加影响。多数工作论文最终将以其他形式发表，内容可能会修改。

引用建议：付晓天、钟丽锦. 污泥资源化的环境—能源—经济效益评估：以湖北省襄阳市鱼梁洲污泥甲烷捕获实践为例. 北京：世界资源研究所 2015. <http://www.wri.org.cn>

96% 的氮和 98% 的磷可以通过生物炭土的方式被再利用。

- **能源效益：**鱼梁洲项目预计在 21 年的合同运行期中可处置 22.7 万吨污泥和餐厨垃圾的混合物，共产生 1.3 万吨二氧化碳当量 (CO₂e) 排放。与填埋和焚烧处理技术进行比较，将分别减少 80 万吨和 22 万吨二氧化碳当量排放。
- **污泥处置资源化效益：**鱼梁洲项目日生产生物炭土 (Biochar) 55-60 吨，如果全部用于种植苗木，则 2 年污泥处理生产的生物炭土需要种植 43.2 万株树苗进行消纳，占地 80 万平方米（约 1200 亩）。采用生命周期分析方法对“移动森林”的固碳能力进行动态估算，苗木 2 年后定植开始形成显著固碳效应，则项目 21 年树木固碳能力将达到 75.1 万吨。
- **经济效益：**鱼梁洲项目得到了德国复兴银行 (Bank für Sozialwirtschaft, 简称 KfW) 和中国进出口银行优惠低息贷款，建立了“政府 - 银行 - 企业”三赢的合作模式，保证项目的可持续稳定运营；政府较高水平的补贴支持；同时通过捕获甲烷生产车用压缩天然气 (Compressed Natural Gas, 简称 CNG)，利用生物炭土培植苗木，均为项目提供了良好的收益前景。

主要发现

- **鱼梁洲项目成功实现了污染物的全消纳、资源的全回收以及能源平衡，实现污泥稳定化、无害化、减量化、资源化目标**

通过“高温水解 + 厌氧消化 + 重金属硫化 + 甲烷捕获利用 + 生物炭土”的技术路线，鱼梁洲项目成功实现了碳 (C)、氮、磷等营养物质的充分回收和利用。因为氮、磷等营养物质被充分回收利用，最大程度上避免了水体污染。同时，鱼梁洲项目在 21 年的运营周期中，不仅可以实现 98% 的过程温室气体减排，而且预计将产生约 4500 万立方米车用压缩天然气，可替代近 6 万立方米车用汽油，实现约 14 万吨二氧化碳当量的额外减排。

- **政府与市场的共同支持可以有效解决污泥处置融资困境**

鱼梁洲污泥项目以 BOO (Build-Own-Operate) 合同的方式很好地实现了政府与市场资金的结合，条件优惠的低息长期贷款很好地解决了项目建设初期的投资资金需求，也降低了项目的融资成本。鱼梁洲污泥项目由于需要同时处理襄阳城区每天产生的新鲜污泥以及被长期堆置的 30 万吨陈旧污泥，所以政府提供了相对较高的补贴，但是该模式目前正被安徽、湖南等地方所采用，对于仅考虑新鲜污泥的项目而言，政府需要提供的补贴较低，减轻了政府的支付压力。

- **以市场理念指导污泥处置路线选择，变污泥废物为生产原料，可以有效实现经济效益**

鱼梁洲项目不仅消纳了环境污染物，同时还利用资源物质生产车用压缩天然气、生物炭土、苗木等经济产品，建立了较为完善的产品链。通过鱼梁洲项目的成功实施可以看到，结合市场需求选择产品链的设计以及处置路线是实现项目资金流可持续的重要因素。

EXECUTIVE SUMMARY

Rapid urbanization in China has generated substantial quantities of liquid wastes in municipalities, and along with it massive investments in wastewater conveyance and disposal. This increase in the number of wastewater treatment plants (WWTPs) needed to treat the generated wastewater has led to the emergence of a significant volume of sludge, as the byproduct of the treatment process. It is estimated that China's municipal wastewater treatment plants will have produced over 30 million tons of sludge (80% water content) by 2015, making secondary pollution not just a downstream environmental problem, but also a significant global environmental opportunity to capture significant amounts of greenhouse gas emissions that are also generated through the process.

The problem of effective and sustainable solutions for sludge disposal has been a challenge in all countries witnessing rapid urbanization. Cities in the OECD countries have invested in various technologies aimed at recycling sludge into compost, energy and biochar. Among the various options tried out has been the idea of 'capturing' the various byproducts of the anaerobic digestion process before they end up polluting the land, water and atmosphere. Xiangyang City of Hubei Province is perhaps the first developing country city that tested out such a process by investing in a "high temperature thermal hydrolysis + highly concentrated anaerobic digestion + methane (CH₄) capture and utilization" pathway through which co-digested sludge and kitchen waste have been rendered harmless to the local, regional and global environment. In fact, the research indicates that the economic benefits to the local community are significant, once the project design harmonizes the interests of the city government, the investor and the financier.

The Xiangyang case study documents how a mid-sized city in China has successfully accomplished multidimensional goals of not only complete treatment of sludge, but also achieve renewable energy generation, and resource recovery through a cost effective green treatment process. The World Resources Institute was invited to independently review the energy, environmental and economic benefits of the Xiangyang case, and this paper summarizes Xiangyang's experiences, and provides insights on how other cities in China and in other developing countries facing similar challenges can address their sludge disposal problems in a sustainable manner.

The environmental-energy-economic benefits of Xiangyang project:

- **Environmental benefit:** Using struvite sediments and anaerobic ammonium oxidation (Anammox), Yu Liang Zhou project has the capacity to recover 96% of the nitrogen (N) and 98% of the phosphorous (P) into biochar.
- **Energy benefit:** it is estimated that 227,000 tons of sludge and kitchen waste can be co-digested with 13,000 tons of CO₂e emission during the 21-year contracted period of operation. Compared to landfill and incineration, the project may reduce 800,000 tons and 220,000 tons of CO₂e emissions respectively.
- **Reclamation benefit:** the project has a daily biochar production of 55-60 tons. If the biochar is used for planting trees, 432,000 saplings (one sapling can consume 100 kilograms of biochar soil) and 800,000 m² of land (approximately 1200 mu) will be needed to consume the biochar produced in 2 years. According to the estimation of life cycle analysis, the carbon sink capacity of trees planted will reach 751,000 tons during the 21 years of operation period.
- **Economic benefit:** the project received political support from the municipal government, and low-interest loans from international financial organization and the Export-Import Bank of China. This “government-bank-enterprise” partnership was key in working out long-term contractual agreements that ensured a harmonization of interests between the local government (which wanted to eliminate

pollution from sludge), the financing entity (which offered concessional financing as a means of bridging any financial viability gap), and the enterprise (which was interested in running a sustainable commercial operation through the production of compressed natural gas (CNG) by capturing CH₄ and the sale of biochar for urban forestry programs).

Key findings:

- **Xiangyang project successfully achieve the goals of financial viability of the enterprise, sludge stabilization through pollutant reduction, resource recovery, close to zero net carbon emission from the wastewater system, and renewable energy generation in the city**

Using the technical route as “high temperature hydrolysis + anaerobic digestion + heavy metal vulcanization + methane capture and utilization+ biochar soil”, the project successfully recovered and reutilized the nutrients (C, N, P and etc.) in sludge, avoiding the secondary pollution of water bodies. During the 21 years of operation period, the project can not only reduce 98% of the GHG emissions, but also produce 45 million m³ of CNG to replace 60,000 m³ gasoline, 140,000 tons of CO₂e extra reduction.

- **Joint support from the government and market is efficient in solving the funding challenge of sludge project**

The successful implementation of a BOO (Build-Own-Operate) contracting arrangement validated the importance of cooperation between the local government and the private sector. A key factor in enabling these green investments to take place was the availability of a low-interest with longer tenor because this lowered the financial cost of the project. In addition, as Xiangyang project needs to treat 300,000 tons of old sludge, the organic matter of which is relative low, the local government provided a relatively high level of subsidy. However, in Anhui and Hunan Province, where the projects only treat daily produced sludge by the same treatment technology, the level of subsidies is lower and it will relieve the financial pressure of the local governments.

- **The “market perspective” treatment roadmap**

for sludge ensures the economic benefit of the project

Xiangyang project demonstrated the importance of designing a complete value chain of a sludge project by means of recovering CNG from sludge and using biochar for arboriculture. Taking the market needs as the priority while selecting sludge treatment technology ensured the sustainability of the capital flow of the project. However, the design of concessional financing terms and operating subsidies remain key for project success as this class of projects aimed at mitigating environmental concerns have difficulty passing the market test.

前言

2013 年 7 月，财新网以一篇题为“污水白处理了”的封面报道揭露了中国众多城市将污水处理厂污泥外运偷排，导致二次污染的普遍现象¹，引起社会和公众的极大争议。一直以来，城镇污水处理厂污泥问题在我国长期受到忽视，北京、上海、广州、合肥等大中城市都曾因为污泥随意倾倒而引发环境污染和环境纠纷事件²。

污泥是污水处理厂生化反应的副产物，其有机物含量高、易腐烂，有强烈臭味，且含有寄生虫卵、病原微生物、重金属元素³和盐类等难降解的有毒有害物质，如不加以妥善处理而任意堆弃排放，就会给大气环境、地表水和地下水带来二次污染，直接威胁环境安全和公众健康（明银安等，2007）⁴。

在我国城镇污水处理厂建设发展初期，污水处理量有限，污泥的产生量较小，导致污泥的处置问题被长期忽视。为解决日益严峻的水污染问题，自“十一五”时期开始，我国就加快了污水处理设施的建设速度。截至 2014 年 5 月，全国有超过 3800 座污水处理厂投入运营，总投资达 3.86 万亿元；另有约 1600 座污水处理厂在建设中，计划投资超 1200 亿元⁵。污水处理设施数量以及污水处理量的迅速增长带来了污泥产量的激增。预计 2015 年全国城镇污水处理厂的污泥年产量将超过 3000 万吨（按含水率 80% 计）⁶，较 2013 年将增加 15.4%。

不恰当的污泥处置方式给环境带来严重的二次污染，如：加入大量化学药剂的深度脱水对后续处置和利用的不利影响；70% 左右的污泥填埋处置对土地、水体、空气的污染；开始兴起的污泥焚烧对综合因素缺少充分评价，包括烟气污染、能源消耗和飞灰的处置代价等。

污水处理厂污泥的二次污染已经成为中国快速城镇化发展过程中的重要环境问题之一。与此同时，污泥逸散的沼气主要成分为甲烷（CH₄），其所具有的显著温室气体效应增加了全球气候变化的风险。但值得注意的是，污泥更是放置错误的资源，在污泥厌氧消化过程中产生的甲烷可以作为城市发展的清洁能源，由此可见，对污泥进行妥善处置和资源化利用势在必行。

面临污泥困境，众多城市都在努力探索有效的解决方案。2011 年，湖北襄阳市为了解决污泥造成的恶臭和水污染问题，保障南水北调工程水源安全，选择了“高温水解 + 高浓度厌氧消化 + 甲烷捕获利用”技术路线对污泥和餐厨垃圾进行协同处理，经过两年多的尝试，取得了很好的效果。不仅实现了襄阳市每天新增污泥的全部处置，还逐步消纳了堆置的陈旧污泥，实现了“污泥全消纳、能量全平衡、资源全回收、过程全绿色、费用可接受”的多效目标，探索出了一条有效的污泥资源化途径。

为了帮助更多城市更好地解决城镇污水处理厂的污泥困境，实现城市“资源—废物”闭环管理，世界资源研究所对湖北襄阳市的污泥资源化项目进行了“环境—能源—经济”效益综合评估，总结其经验，以期为更多城市的建设和环境管理部门提供决策依据，并为污泥项目的规划、运营和投资提供可行的借鉴模式。同时，本文的研究结果还可为其他发展中国家的污泥和城镇有机废物处理提供经验。

污泥资源化以及“环境—能源—经济”效益评估框架

污泥资源化利用的发展趋势：国际经验

污水处理厂污泥的主要成分为具有反应活性的有机物，这是污泥可以资源化利用的基本条件。目前常见的污泥资源化利用途径包括农林利用⁷、建材利用⁸和能源回收。而利用污泥的可生化性，通过厌氧菌分解产生沼气（主要成分为甲烷）⁹，对甲烷进行捕获、提纯后制成清洁能源，是国际上目前较为推荐的污泥资源化的重要途径。

欧美国家的污泥处理处置经历了从填埋到土地利用、焚烧、再到“厌氧消化 + 土地利用”的过程。焚烧由于减量化高、处置效果彻底，曾经是欧美国家较为青睐的污泥处置路线，但是，焚烧过程伴有剧毒物质和有害气体产生，需要专门设备对尾气进行处理，且投资及运行维护成本显著高于其他工艺（Cao, 2013）¹⁰。以美国为例，为了进一步降低污泥焚烧的排放，美国国家环境保护局（U.S. Environment Protection Agency，简称 EPA）于

2015 年 4 月提出了一项新的“污泥焚烧排放指南”计划，强制对污泥焚烧设备的烟气排放进行进一步控制，这将带来污泥焚烧成本的上升¹¹。

为了实现更好的污泥处理处置效果同时降低成本，各国不断探索更经济、更具有环境资源效益的处理方式。目前，越来越多的欧美国家选择厌氧消化或好氧发酵技术对污泥进行稳定化和无害化处理，并从政策上予以鼓励和支持。专栏 1 对英国厌氧消化相关政策发展历程进行了介绍。

由于厌氧消化在实现污泥处理的减量化、稳定化、无害化、资源化，以及减少温室气体排放方面具有显著优势，欧美国家采用厌氧消化对污泥进行处理处置的项目越来越多（表 1 列举了近年来欧美国家一些典型厌氧消化装置的建设运行情况），由此带来的能源产量也逐年增长。

欧美国家的污泥厌氧消化处理处置主要有两大趋势。一是将热水解（王治军等，2005）¹⁸ 作为厌氧消化的预处理环节。热水解可以显著改善污泥的脱水和厌氧消化性能，实现高效率厌氧消化，将污泥中的有机物充分转化为沼气，近年来越来越多地被欧美国家采用，并取得了良好效果。例如，波兰 Bydgoszcz 的 Kapusciska 污水处理厂热水解厌氧消化后污泥含固率从 20% 提高到 31%，减少了近一半体积；又如，爱尔兰都柏林的 Ringsend 污水处理厂热水解消化项目中单位池容产气量提高到 3.5 立方米/日，是通常情况的 3.5 倍¹⁹。二是将污水处理厂污泥和餐厨垃圾、农场畜禽粪便等有机废物进行混合消化处理（见图 1）。由于餐厨垃圾和农场畜禽粪便有机质含量较高，与污泥进行混合消化，在实现污泥稳定化、无害化处理的同时，还能够提高产气率和项目的经济效益。

专栏 1 | 英国厌氧消化相关政策发展历程

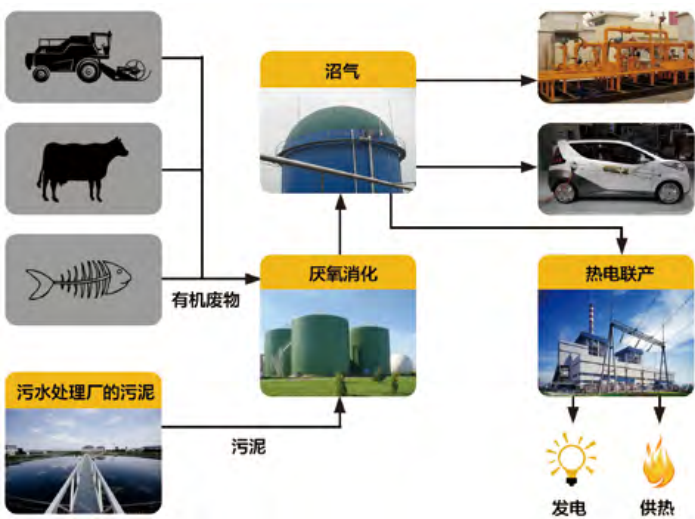
英国政府提出，到 2020 年可再生能源在能源消费结构中所占比例至少达到 15%，而通过厌氧消化从废弃物中回收能源是实现这一目标的主要手段。英国政府提出，在不可避免地产生污泥和餐厨垃圾的情况下，厌氧消化由于具有减少填埋、产生可再生能源、沼渣可作为肥料这三大优点，成为“最佳环境选择”¹²。为了促进这一技术在英国的发展，英国环境、食品和农村事务部 (Department for Environment, Food & Rural Affairs, 简称 DEFRA) 于 2011 年 6 月发布“厌氧消化战略及行动计划”¹³，设立金额为 1000 万英镑的政府贷款支持新建厌氧消化设备。鼓励政策的发布带动了厌氧消化—能源回收在英国的发展，从 2009 年到 2013 年，英国通过厌氧消化处置污泥和畜禽、餐厨废弃物项目的年产能从 5576GWh 提升至 6637GWh，提高了 19%，其中污泥项目的产能规模从 604GWh 扩大到 761GWh，增加了 26%¹⁴。

表 1 | 欧美国家典型污泥厌氧消化装置运行情况

国家	年份	厌氧消化装置		
		进料为污泥 座数	进料为餐厨垃圾 / 农场废物 / 或混合消化 座数	产生能源 吉瓦时 / 年
美国 ^b	2010	NA	162	4530
美国 ^c	2013	NA	239	NA
英国 ^a	2013	146	143	1509
瑞典 ^a	2013	465	147	1118
德国 ^a	2013	1400	8220	27730
韩国 ^a	2013	38	44	2578
巴西 ^a	2013	5	13	7637
法国 ^a	2013	85	251	NA
丹麦 ^a	2013	57	97	912

说明：NA 表示数据缺失
来源：（a）IEA Bioenergy-country reports¹⁵；（b）EPA, 2010¹⁶；（c）Biogas Opportunities Roadmap Factsheet¹⁷

图 1 | 污泥和有机废物混合消化甲烷捕获及其应用示意图



来源：威立雅水务

环境—能源—经济（3E）效益评估框架

为了全面了解污泥资源化的环境效益、能源效益和经济效益，本研究以污泥处理处置“四化”（即无害化、稳定化、减量化和资源化）目标作为评价标准，基于物质流分析（Material Flow Analysis，简称 MFA）（黄和平，2007）²⁰ 建立污泥资源化的“环境—能源—经济（Environment-Energy-Economic，简称 3E）”效益评估框架，对污泥处理处置全过程（即污泥产生—运输—污泥处理处置—沼渣 / 沼气 / 沼液处理和利用）的环境效益、能源效益、经济成本效益等三个方面进行系统的量化分析和评估，为决策者在选择污泥处理处置技术路线提供决策依据：

- **环境效益：**通过分析污泥处理处置过程中的物质转换与迁移路径（如碳（C）、氮（N）、磷（P）、重金属），评估环境污染物去除的效果。
- **能源效益：**通过分析污泥处理处置全过程中的能源消耗环节、能耗和能源利用，评估从污泥中恢复能源的潜力及其温室气体减排效果。
- **经济成本效益：**分析污泥处理处置的经济投入、成本和收益，评估项目可持续运营所必需的经济要素（如政府补贴、融资机制等）。

图 2 | 襄阳地理位置示意图



鱼梁洲项目概况

襄阳市位于湖北省西北部，地处长江支流汉江中游；鱼梁洲则位于襄阳市中心地带，处于众多重要水系（汉江、小清河、唐白河）之中（襄阳地理位置见图 2）。截至 2013 年，襄阳市全市常住人口 559.1 万人，城镇化率达到 54.8%²¹，人均地区生产总值为 8117 美元（2013 年当年价），步入中上等收入标准²²，其中，中心城区面积 337.8 平方公里，人口约 79 万人（2013 年）²³。

襄阳市城区生活污水目前主要由鱼梁洲污水处理厂（30 万立方米 / 日）和观音阁污水处理厂（10 万立方米 / 日）进行处理。日产 180 ~ 220 吨污泥（以含水率 80% 计），年污泥产生量为 6.5 ~ 8 万吨。随着东津新区的发展，规划中的东津新区污水处理厂（总规模 30 万立方米 / 日）一期工程（10 万立方米 / 日）预计于 2020 年投运，届时全市污泥日产量预计将达到 270 吨 / 日，年污泥产生量为 10 万吨²⁴。

鱼梁洲污水处理厂曾建设日处理规模为 30 吨的污泥干化设备对污泥进行处理，但由于处理过程中产生大量臭气，遭到市民多次投诉和强烈反对，因此没有通过环保验收，导致产生的污泥全部堆置在鱼梁洲上，造成严重的二次污染。

为了解决污泥难题，2011 年 4 月襄阳市开工建设“襄阳市污水处理厂污泥综合处置示范项目”（以下简称“鱼梁洲项目”），处理襄阳市区及周边污水处理厂产生的污泥和餐厨垃圾。

处理规模

鱼梁洲项目位于鱼梁洲污水处理厂内，占地 45 亩，设计规模 300 吨 / 日（折合年处理污泥约 11 万吨）。其中：

- **处理污泥**（日处理量为 180 ~ 220 吨，启动期内日处理量为 10 吨左右）包括：
 - 鱼梁洲污水处理厂和观音阁污水处理厂的日产新鲜污泥（有机质含量 40% ~ 60%，含水率 80%），其中，鱼梁洲污水处理厂的新鲜污泥产量占总日产量的 80%。
 - 堆置陈旧污泥（有机质含量 35% ~ 42%）：鱼梁洲已经堆置的 15 万吨陈旧污泥。
- **餐厨垃圾**（有机质含量 80% ~ 90%，日处理量为 80 ~ 120 吨），陈旧污泥处置完毕之后，鱼梁洲项目将加大对餐厨垃圾的处理量。

处理技术

鱼梁洲项目对污泥和餐厨垃圾进行集中收运后，采用“高温热水解（170℃）+ 中温厌氧消化（40℃）²⁵”工艺进行处理。

污泥产品

- 鱼梁洲项目的污泥产品包括：
- 车用压缩天然气（Compressed Natural Gas, 简称 CNG）：6000 立方米 / 日；配套建设一座 220 万立方米 / 日的压缩天然气加气站；

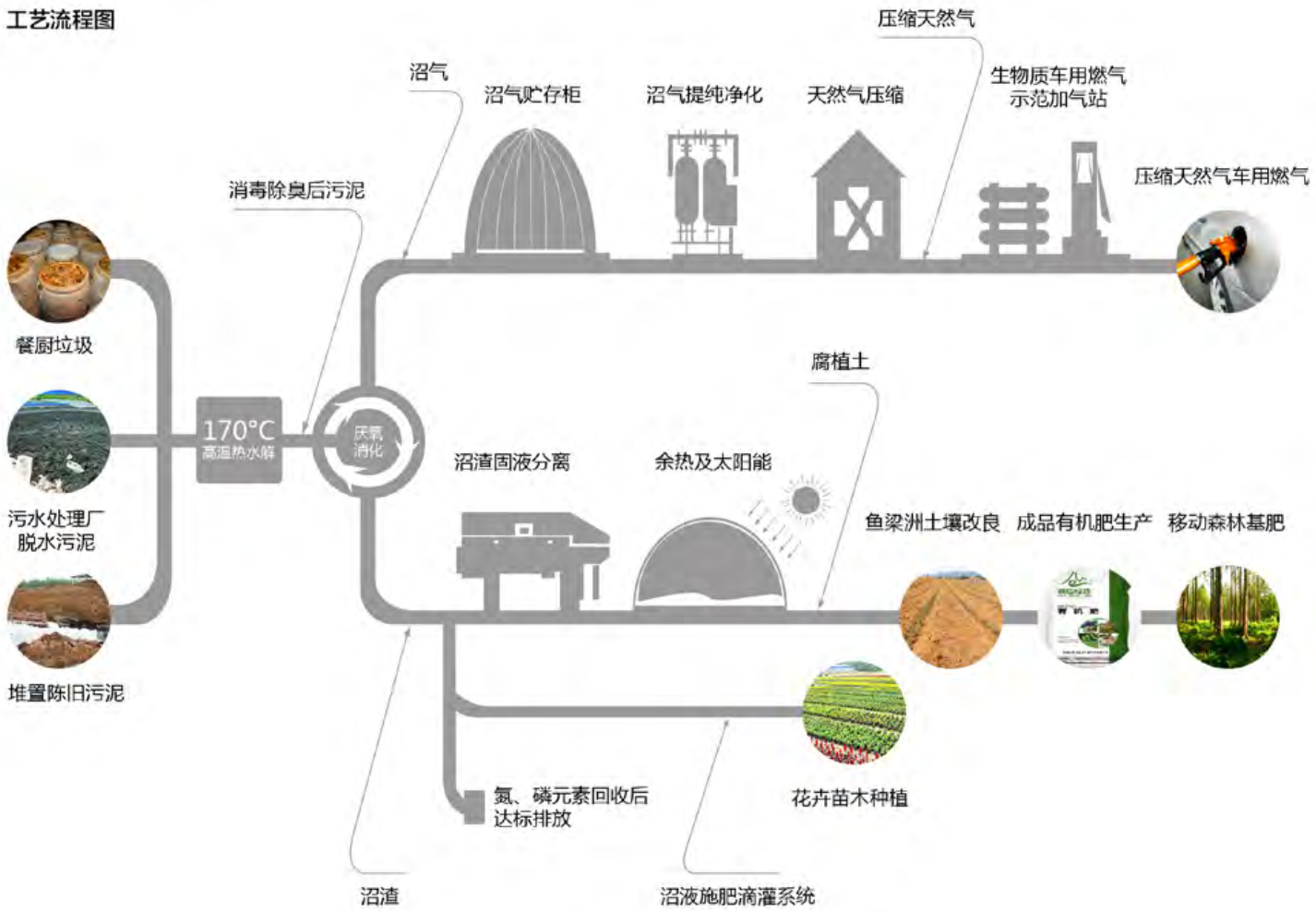
- 生物炭土（Biochar）：55 ~ 60 吨 / 日（含水率 40%）；
- 移动森林：利用生物炭土以容器苗形式种植“移动森林”。

运营模式

鱼梁洲项目由湖北国新天汇能源有限公司以 BOO（Build-Own-Operate）模式负责建设和运营，特许经营期为 23 年（含 2 年建设期），于 2011 年 11 月试运行，2012 年 3 月正式进入商业运行。图 3 所示为鱼梁洲项目流程图。

图 3 | 鱼梁洲项目流程图

工艺流程图



来源：国新天汇

果污泥被随意堆放或倾倒，那么氮和磷会随着污泥重新进入水体造成二次污染，为了去除污水中氮和磷的高额投资将因此而白费。

根据鱼梁洲项目的设计，原污泥中 80% 的氮进入沼渣，随后转化为生物炭土；而进入沼液的氮经过厌氧氨氧化法²⁸和鸟粪石沉淀法²⁹后有 20% 形成氮气排入大气，剩余的氮通过鸟粪石沉淀（磷酸铵镁，分子式 $MgNH_4PO_4 \cdot 6H_2O$ ）也进入生物炭土。与氮的迁移类似，原污泥中 80% 的磷会进入沼渣；而进入沼液的磷经过鸟粪石沉淀法之后有 95% 形成鸟粪石沉淀进入生物炭土中；剩余的磷进入最终的沼液中被用于苗木的滴灌或排入污水处理厂中（氮、磷的迁移见图 5）。

在设计条件下，鱼梁洲项目有望实现对氮、磷等营养物质最大程度的回收再利用，其中 96% 的氮和 98% 的磷以可利用的方式进入了生物炭土。需要指出的是，鸟粪石沉淀法和厌氧氨氧化法在运行过程中面临一定的成本问题，鱼梁洲项目计划下一步对这两个环节进行试运行，以找到效果、成本双赢的运行方式。

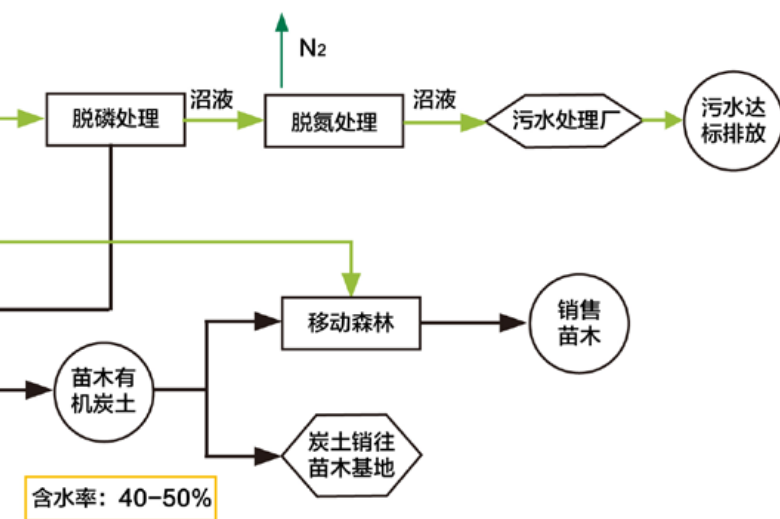
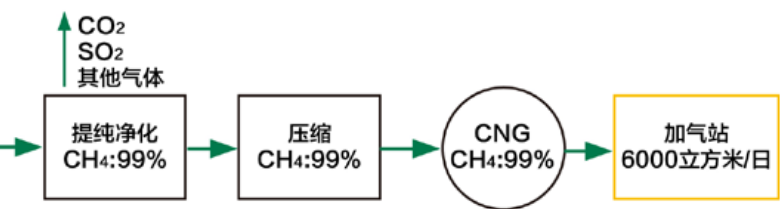
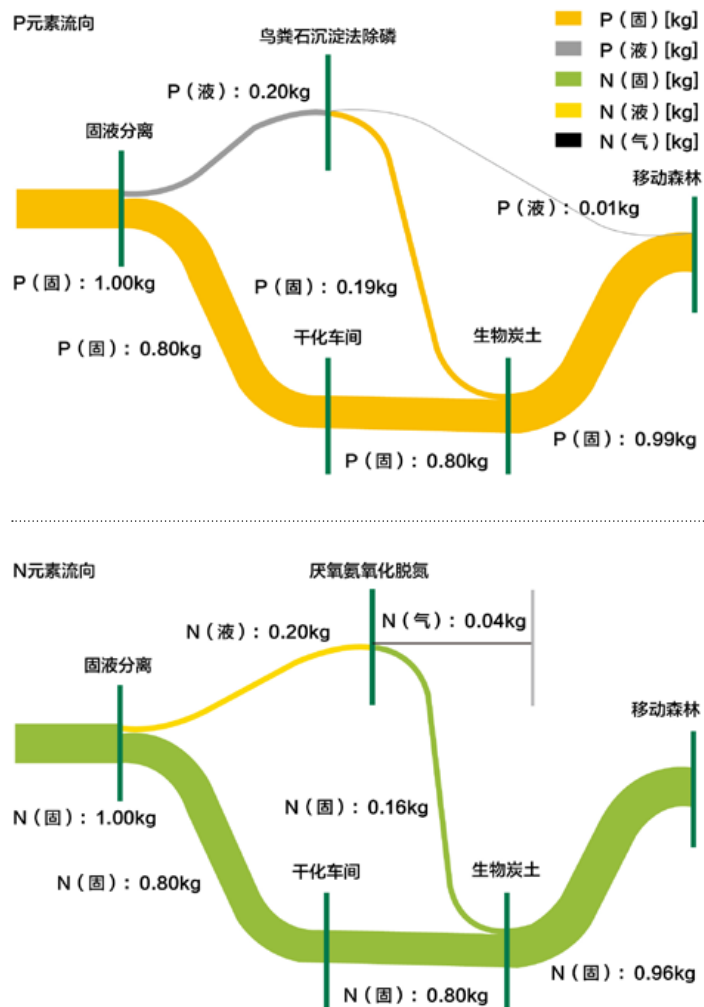


图 5 | 鱼梁洲项目氮、磷平衡示意图



说明：依据项目设计条件和参数进行测算。

鱼梁洲项目能源效益与温室气体减排评价

污泥生化反应过程中会产生甲烷、二氧化碳等温室气体，污泥干化过程中也会消耗大量的能源（热量）。本章将对鱼梁洲项目的技术路线，以及其它处置方式的碳平衡和碳排放进行比较分析。

鱼梁洲项目与其它处置方式的碳平衡、温室气体减排效益比较

为了比较不同污泥处置方式的温室气体排放，本研究首先根

据“环境管理——生命周期评价与框架（ISO14040）”确定温室气体排放核算边界（见图6）。由于污泥处置过程中有副产品产生（如沼气），因此需采用系统扩展（system expansion）方法³⁰，以污泥处置最终产品的利用为边界，核算边界内燃料燃烧排放、过程排放³¹、以及污泥处置最终产品所替代的能源或资源的排放。

■ 鱼梁洲项目的温室气体核算边界

由于鱼梁洲项目中污泥反应过程所产生的沼气（或压缩天然气）、沼渣和移动森林最终成为产品被利用，因此鱼梁洲项目需要同时考虑过程排放和最终产品的替代排放，温室气体核算边界包括：

- 污泥处理过程中（污泥热水解和厌氧消化）的燃料排放。

- 最终产品所替代的能源或资源的排放，包括沼气替代化石能源（反应过程的燃料）、压缩天然气替代车用汽油、生物炭土替代化肥（氧化亚氮（N₂O））、移动森林的碳汇等。

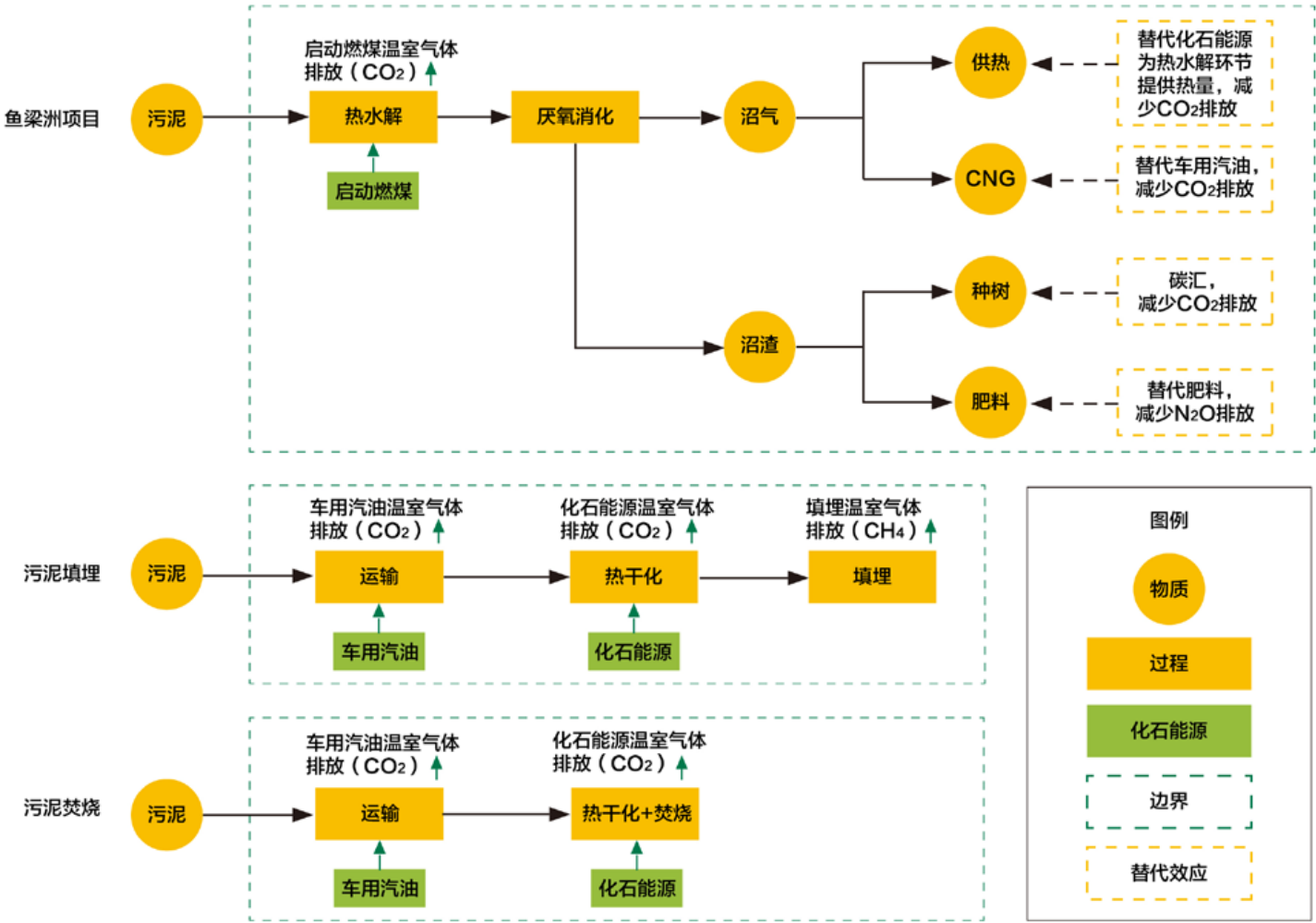
由于鱼梁洲项目大部分进料来自于鱼梁洲污水处理厂，二者位置相邻，由此本研究认为污泥的运输排放可以忽略不计，为了具有可比性，对于焚烧和填埋也不考虑运输排放。

■ 污泥填埋的温室气体核算边界

- 污泥热干化过程的外加热源排放。
- 污泥填埋过程中产生的甲烷排放。

■ 污泥焚烧的温室气体核算边界³²

图6 | 不同污泥处理处置方式分析的系统边界划分



- 污泥热干化过程的外加热源的排放。

- 污泥焚烧过程中所需燃料的排放。

污泥是一种生物质能，当对其进行能源利用时所产生的二氧化碳一般不计入项目总排放中。例如，欧盟可再生能源指令 (Directive 2009/28/EC) 规定沼气用作车用燃料时，其排放记为 0；美国环境保护署 (U.S. Environmental Protection Agency, 简称 EPA) 的 eGRID 数据库 (The Emissions & Generation Resource Integrated Database) 和英国环境、食品和农村事务部对生物质燃烧发电时的二氧化碳排放也记为 0。国家发改委发布的《省级温室气体清单编制指南》(简称《清单》) 中规定，生物质燃料燃烧主要核算甲烷的排放，而对生物质转化的二氧化碳排放则不纳入项目排放总量中。因此，本文在对污泥不同处置方式的温室气体核算分析中，对于生物质能的二氧化碳排放仅做备案记录，不计入项目排放。

图 7 对鱼梁洲项目和其它不同处理方式 (填埋、焚烧) 的碳平衡、碳迁移进行了比较分析。

- 在鱼梁洲项目中，污泥 (含餐厨垃圾) 中的固态碳经过热水解和厌氧消化后，约有 50% 的碳转化为气态，即沼气 (其中甲烷占沼气成分的 60% ~ 70%，二氧化碳占 30% ~ 40%)，剩余 50% 的碳则仍以固态形式存在于沼渣中，最终制成生物炭土。

- 假设同样成分的污泥进料采取填埋方式，则 20% 的碳会转化成气态的沼气 (含甲烷和二氧化碳) 逸散到大气中，80% 的碳会以固态形式存在于填埋场中。如果采取焚烧方式 (假设焚烧完全)，那么所有的碳最终会转化成气态的二氧化碳排入大气 (根据《清单》，该部分二氧化碳排放不计)。

因此，不同污泥处置方式的温室气体排放主要包括：

- 鱼梁洲项目的反应过程中燃烧所用的沼气为污泥自身生化反应生成，不计入排放；项目建设地点在污水处理厂旁边，无运输环节，运输排放为 0；所以温室气体排放仅来自于项目启动燃煤的微量排放。此外，该项目中所提供的车用压缩天然气可以替代车用汽油，实现等效化石燃料的减排。
- 填埋过程中的温室气体排放包括 2 个环节：污泥干化至含水率 60% 时所用外加能源 (约 10500 立方米蒸汽 / 日)³³ 对应的排放当量；污泥填埋过程中厌氧反应逸散的甲烷 (温室效应为二氧化碳的 25 倍) 所造成的排放当量；由于以逸散方式进入大气的甲烷难以收集并利用，所以会形成一定量的碳排放。

- 焚烧过程中的温室气体排放包括 2 个环节：污泥干化至含水率 30% 时所用外加能源 (约 14980 立方米蒸汽 / 日) 对应的排放当量³⁴；污泥焚烧时所加燃料对应的排放当量。

- 虽然本核算将运输环节排放划于核算边界之外，但是假设污水处理厂距离污泥处理处置场所距离为 50 公里³⁵，则粗略计算往返一次运输污泥排放为 0.10 吨二氧化碳当量，而 1 年运输排放为 1080 吨二氧化碳当量³⁶。

根据项目运行数据测算，鱼梁洲项目在 21 年的运行期中可处置 22.7 万吨污泥，共产生 1.3 万吨二氧化碳当量排放 (相当于年均产生 606 吨二氧化碳当量排放)。根据图 8，如果对相同规模的污泥和餐厨垃圾混合物按照相同运行周期 (21 年) 采用填埋或焚烧进行处置，则将分别产生 81.3 万吨二氧化碳当量或 23.7 万吨二氧化碳当量的排放，是鱼梁洲项目温室气体排放的 62.5 倍或 18.2 倍。

同时，鱼梁洲项目在 21 年的运行期中可产生约 4500 万立方米车用压缩天然气，可替代近 6 万立方米车用汽油，实现约 14 万吨二氧化碳当量的额外减排。而且，与汽油比，采用天然气的汽车颗粒物排放几乎为零，氮氧化物 (NO_x)、一氧化碳 (CO) 和碳氢化合物 (HC)³⁷ 的排放也显著降低，在改善空气质量方面有着重要意义³⁸。

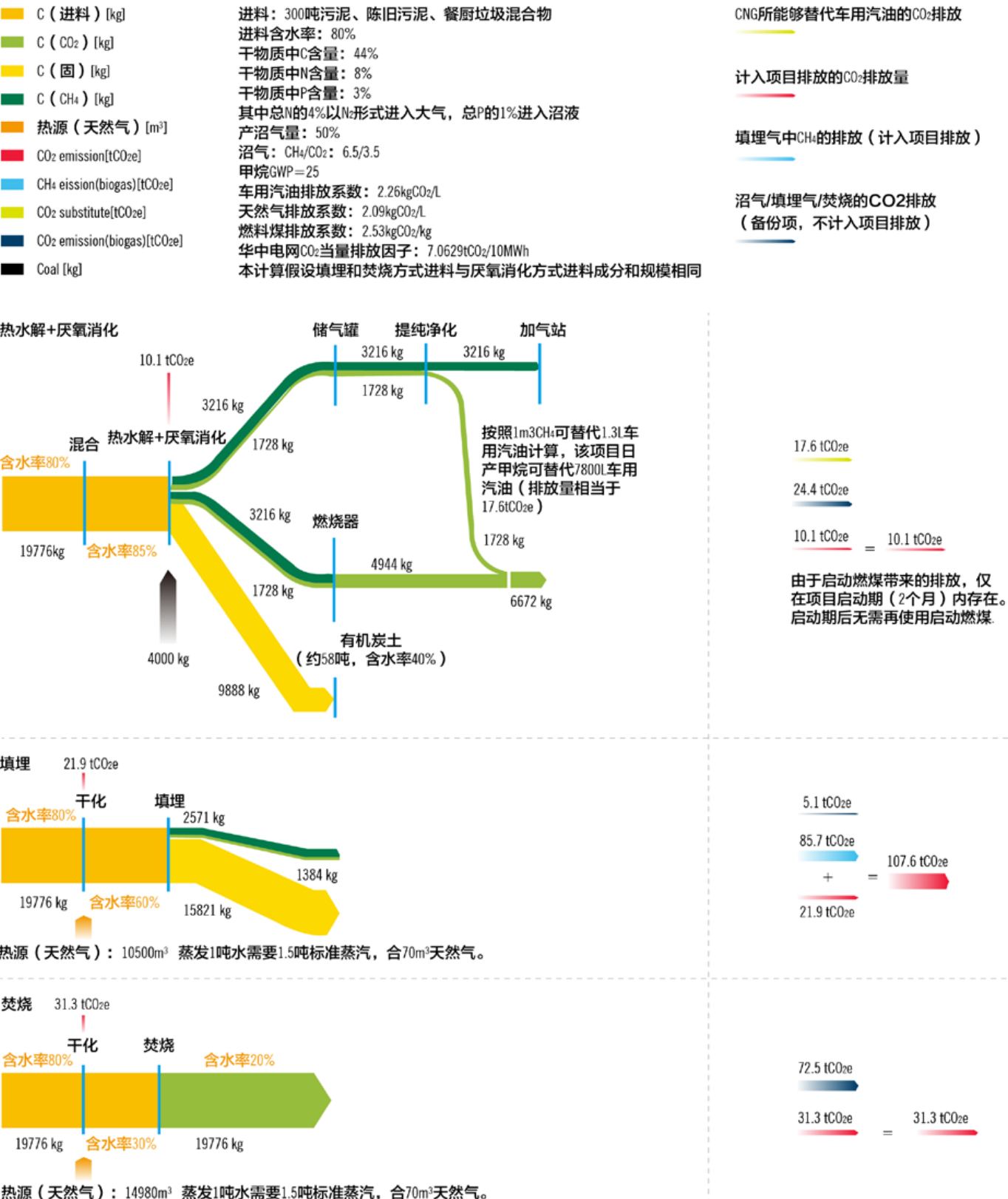
鱼梁洲项目的能源管理措施

污泥处置过程中的外用能源是其处理过程中温室气体排放的主要来源之一。

厌氧消化工艺的能耗主要用于维持厌氧反应温度，以及维持污泥泵、搅拌设备和沼气压缩机等设备运转。鱼梁洲项目中，污泥和餐厨垃圾的混合进料在热水解环节需加热至 170℃，而在进入厌氧消化环节前需要通过冷却器将改性污泥降温至 40℃。目前，鱼梁洲项目电耗约为 6000 千瓦时 / 日 (折算成单位电耗为 20 ~ 22 千瓦时 / 吨污泥，按含水率 80% 计)。

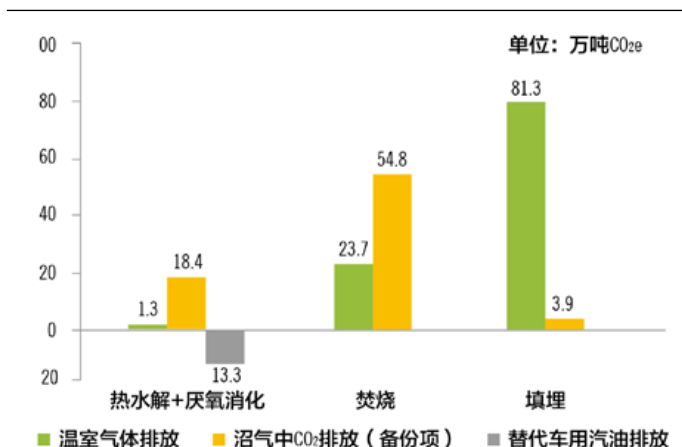
为了提高污泥处置的能效，鱼梁洲项目采取了一系列能源管理措施，包括：利用厌氧消化产生的沼气提供热能，维持热水解和厌氧消化过程所需温度，除了系统启动以外，系统在运行过程中的热能完全靠污泥自身反应产生的沼气提供，不需外加能源；热水解后的污泥需要从 170℃ 冷却至 40℃ 之后再进入厌氧消化过程，利用冷却过程释放的多余能量进行沼渣干化，解决了沼渣干化过程所需的 70% ~ 80% 热能 (沼渣化所需的其余热能利用太阳能提供)，进一步实现了热能的再利用。

图 7 | 污泥不同处置方式的碳平衡和碳排放比较



说明：本研究中对鱼梁洲项目的分析基于项目方提供的运行实测数据，由于项目运行初期餐厨垃圾仅占进料的3%，因此，计算中其影响忽略不计。

图 8 | 鱼梁洲项目与其它处置方式的碳排放比较
(21 年运营周期)



鱼梁洲项目其它资源化效益评价

鱼梁洲项目将厌氧消化后的污泥制成生物炭土，用于培植观赏性或市政绿化树种，为污泥的最终无害化、稳定化处理开辟了新思路。

■ 采用生物炭土种植苗木，实现污泥的最终稳定化和资源化

目前，鱼梁洲项目采用容器苗模式在厂区种植了 1500 株香樟、紫薇、樱花、桂花等苗木。项目每天产生生物炭土 55 ~ 60 吨，则每年可以产生生物炭土 21600 吨（按每天 60 吨生物炭土，每年 360 天计），需要种植 21.6 万株树苗进行消纳（按照每株苗木消纳 100 公斤生物炭土计算）³⁹。

值得注意的是，目前国家禁止将污泥直接用于耕地，且缺乏污泥产品土地利用的强制性标准，鱼梁洲项目采用生物炭土及容器苗模式种植，实现了对污泥的消纳，一定程度上避免了污泥直接还田，是中国特殊背景下的一个创新举措⁴⁰。

■ 利用贫瘠土地建设树苗基地，减少良田占用

利用生物炭土以容器苗方式种植苗木，苗木种植所需要的土壤即为容器中的生物炭土和土壤掺混土（每株苗木的种植需要：100 公斤生物炭土 + 100 公斤土壤），因而可以在贫瘠的环境下种植，而不需要占用良田，这样既可以保护耕地，同时也可以起到土壤改良的作用。鱼梁洲项目目前主要种植香樟、紫薇等经济价值较高的树种，2 年出苗，则 2 年污泥处理所生产的生物炭土（约 4.32 万吨）需要种植 43.2 万株树苗进行消纳，占地 80 万平方米（约 1200 亩）⁴¹。

■ 苗木种植在增加城市森林碳汇的同时，创造经济价值

采用生命周期分析方法可以对“移动森林”的固碳能力进行动态估算。假设鱼梁洲项目种植苗木 2 年后定植开始形成显著固碳效应，一棵树平均每年吸收 18.3 公斤二氧化碳计算⁴²，则在该项目 21 年的运行周期中所配置的树木固碳能力可以达到 75 万吨。

同时，目前我国建成区的绿地率为 39.22%（2011 年）（中华人民共和国住房和城乡建设部，2012）⁴³，随着城镇化进程的加快，城市建成区面积以及绿地面积的增加，各城市对于绿化用树种的需求也将增大。《国家新型城镇化规划》中提出到 2020 年全国城镇化率将达到 60%⁴⁴。假设 2020 年城市建成区面积较 2011 年增加 5%，绿地率增加到 45%，则绿地面积需要增加 3500 平方公里，需要增加 10 亿株苗木。由此可见，未来我国城市绿化的树种具有很大的市场潜力，而鱼梁洲项目的苗木种植模式借此机遇可以创造较好的经济价值。

鱼梁洲项目经济效益评价

鱼梁洲项目运营模式与融资机制

鱼梁洲项目总投资 1.34 亿元，其中 8930 万元用于污泥处理设施投资（其中 1400 万元用于收购原有污泥干化系统），4470 万元用于建设处理餐厨垃圾的前端设备（如分拣、制浆、干燥设备等）、建设加气站和购买餐厨垃圾。

在鱼梁洲项目中，湖北国新天汇能源有限公司分别与襄阳市城市建设委员会和襄阳市城市管理执法局就污泥处置和餐厨垃圾处置签订 BOO 合同进行建设运营，特许经营期为 23 年（含 2 年建设期）。项目的融资资金包括：

- 企业资金（4000 万元）占总投资的 30%。
- 银行贷款（8000 万元）为中国进出口银行转贷的德国复兴银行（Bank aus Verantwortung，简称 KFW）低息贷款，包括 750 万元德国贷款和 7250 万元的配套贷款，贷款期限为 12 年，利率在央行基准贷款利率基础上下浮 5%，占总投资的 60%。
- 政府污泥投资补贴（1400 万元）占总投资的 10%。

鱼梁洲项目的政府补贴

襄阳市政府对于污泥和餐厨垃圾处理均提供相应补贴，具体的补贴标准根据项目运营成本和收益核算确定。对于鱼梁洲项目，

污泥处理补贴为 254 元 / 吨⁴⁵，餐厨垃圾处理补贴为 72 元 / 吨。补贴标准根据居民消费价格指数（CPI）变化每两年调整一次，调整幅度约为 3 ~ 5 元 / 吨。

根据项目实际运行情况发现：

- 餐厨垃圾补贴低于处理成本，但是由于餐厨垃圾有机质含量较高，与污泥混合后提升了产气率和产气量，车用压缩天然气收益的增加弥补了损失。
- 由于污泥和餐厨垃圾的处理成本和收益基本持平，因此企业对于处理污泥和餐厨垃圾的意愿不存在显著差异。

目前，襄阳市政府为污泥处置提供的补贴仍然是项目运行的重要资金保障。表 2 介绍了目前我国主要污泥处置项目的政府补贴情况，通过比较可见，鱼梁洲项目的补贴水平较高，为项目的顺利、平稳运行提供了有力的资金支持。

表 2 | 不同地区污泥处置项目补贴情况

序号	地点	项目名称	污泥处理处置方式	污泥处理补贴（元 / 吨）
1	襄阳	鱼梁洲污泥资源化项目 ^a	厌氧消化	254
2	大连	大连东泰夏家河污泥处理厂 ^b	厌氧消化	135
3	宁海	城北污泥处理厂污泥处理项目 ^c	厌氧消化	200
4	包头	城市生物质垃圾联合厌氧发酵项目 ^d	厌氧发酵	90
5	北京	北京水泥厂有限责任公司处置污水厂污泥工程 ^b	污泥干化（与水泥厂进料共同处理）	315
6	厦门	厦门城市污泥深度脱水处理和资源化处置利用工程 ^b	产品可填埋、制砖、绿化	130
7	广州	广州津生污泥处理厂 ^c	干化制砖	195
8	秦皇岛	河北省秦皇岛城市污泥处置工程 ^b	堆肥	130
9	山东	威海城市污水处理厂污泥无害化处置及资源化利用 ^b	堆肥	180
10	江苏	昆山污泥深度脱水及全量焚烧项目 ^b	焚烧	258
11	江苏	吴江平望垃圾焚烧发电厂 ^f	焚烧	95
12	香港	香港市政污泥干化焚烧项目 ^c	焚烧	HKD 1000
13	苏州	苏州垃圾焚烧发电厂 ^g	焚烧	180–200
14	南京	南京协鑫生活污水泥发电厂 ^b	焚烧	86
15	上海	上海石洞口污泥干化焚烧项目 ^b	焚烧	280
16	浙江	萧山污泥干化焚烧工程 ^b	焚烧	100

说明：a. 国新天汇；b. 中国水网；c. 中持环保；d. 包头人民政府专家顾问组，2010⁴⁶；e. 杨伟利，2007⁴⁷；f. 人民网；g. 中国新能源发电网

鱼梁洲项目成本分析

污泥主要处置方式的成本结构

根据《城镇污水处理厂污泥处理处置技术指南（试行）》，污泥的四种主流处理方式（厌氧消化、干化焚烧、堆肥、填埋）中，传统厌氧消化的投资与直接运行成本仅比填埋高，均低于堆肥和干化焚烧方式（见表 3）。

表 3 | 不同污泥处置方式的成本比较

处置方式	工程投资（万元）	直接运行成本（元 / 吨）
厌氧消化	20 ~ 40	60 ~ 120
干化焚烧	30 ~ 70	120 ~ 250
堆肥	25 ~ 45	120 ~ 160
填埋	18	70 ~ 80（如考虑运输成本，按运输距离在 50 千米内核算，则为 100 ~ 125）

说明：a. 污泥按含水率 80% 计算；b. 厌氧消化指简单厌氧消化，成本计算不含浓缩、脱水和热水解环节；c. 填埋方式投资成本按填埋气 20 年计算；d. 直接运行成本不含折旧；e. 实际运行中干化焚烧的成本高于 400 元 / 吨。
来源：《城镇污水处理厂污泥处理处置技术指南（试行）》。

项目成本

鱼梁洲项目于 2011 年开始投入建设，2012 年底投入运行。根据项目的实际投资以及现有的运行情况，主要成本包括：

- 污泥处理的单位全口径成本⁴⁸：254 元 / 吨污泥（按含水率 80% 计），其中单位固定成本（不含财务费用、折旧）为 110 元 / 吨污泥（按含水率 80% 计），单位运营成本为 110 元 / 吨污泥（按含水率 80% 计），其他为财务费用等；项目成本结构中人工、电力、药剂和设备更新占到项目运营成本的 81.8%（见图 9）。
- 餐厨垃圾处理的单位运营成本为 75 元 / 吨（污泥和餐厨垃圾成本分开核算）。
- 贷款本息约 1100 万元 / 年。
- 税款约 90 万元 / 年。
- 清洁能源调节基金：1 元 / 立方米车用压缩天然气。

从项目运行环节来看，如果考虑到鱼梁洲项目热水解环节所需蒸汽全部由项目自产甲烷提供，则脱水、热水解、消化三个环

节成本分别占到项目运营成本的 30% ~ 35%、15% ~ 20% 和 5%；而如果热水解环节所需蒸汽全部来自外加热源，则该环节成本占比将显著上升至总成本的 30% ~ 40%。

项目产品收入

目前，鱼梁洲项目的销售收入主要源于车用压缩天然气的销售收入；从长期来看，鱼梁洲项目的收入在未来还将扩展到生物炭土和移动森林的销售。

- 湖北省现行车用压缩天然气价格为 4.5 元 / 立方米，目前项目日产气 6000 立方米，可以满足 300 台次车辆加气需求，年销售收入约 972 万元；
- 生物炭土目前尚未出售，但是根据市场上同类产品的售价（80 ~ 100 元 / 吨），按照日产 60 吨计算，生物炭土年销售收入预计为 173 ~ 216 万元⁴⁹。
- 鱼梁洲项目运行时间较短，尚未进行苗木销售，然而未来苗木销售将成为鱼梁洲项目的主要收入之一。按照日产 60 吨碳土、树木 2 年生长期计算，需要荒地 1200 亩来消纳所有的碳土⁵⁰。假设每棵树净收益 200 元⁵¹，则 2 年生长期之后每天可收益 12 万元，每年收益约 4320 万元，相当于每吨湿污泥收益 400 元。

项目收益

如前所述，由于鱼梁洲项目目前并未对苗木和生物炭土进行销售，因此根据现有的数据，项目无论是处理污泥还是处理餐厨垃圾，都处于运营成本和补贴 / 收益水平持平状态。表 4 分析了鱼梁洲项目的成本收益情况。

图 9 | 鱼梁洲项目污泥处理运营成本构成

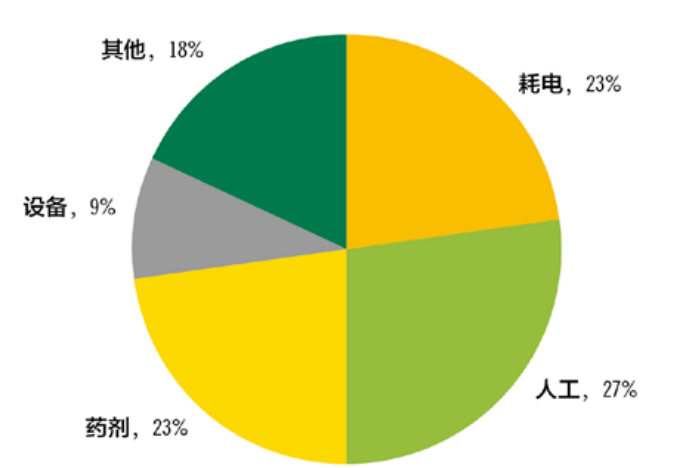


表 4 | 鱼梁洲项目成本收益分析

单位：万元

收入 (+)		成本 (-)	
污泥处理补贴	1828.8	污泥处理成本	1584
餐厨垃圾处理补贴	259.2	餐厨垃圾处理成本	270
车用压缩销售收入	972	清洁能源调节基金	21.6
		税金	90
		财务费用	244.8
		间接费用	849.6
合计	3060	合计	3060

说明：a. 按照一年运行 360 天计算；b. 进料按照日处理污泥 200 吨、餐厨垃圾 100 吨计算；c. 污泥和餐厨垃圾处理成本包括固定成本和运营成本；d. 财务费用包含该项目所需支付的 1100 万人民币每年的贷款利息。

主要发现

污泥问题在中国的城镇化进程中长期受到忽视。随着污水处理设施和污水处理量的激增，以及处理厂进水成分的复杂化，城镇污水处理厂污泥已经由“量变”而引起“质变”，成为严峻的环境污染问题。截至 2015 年，预计全国将产生超过 3000 万吨污泥（含水率 80%），如果不妥当处置，污泥堆弃过程中可能出现的甲烷逸散（以填埋过程的甲烷产量计算），将可能导致 220 万吨 CO₂e 的温室气体排放；还将导致严重的氮、磷和重金属二次污染，造成污水处理投资的巨大浪费。

目前我国的污泥大多被简单堆弃或偷排，已经引发了严重的环境二次污染；而已经处理的部分污泥主要是通过填埋、堆肥、简单厌氧消化、焚烧等方式，仍然面临成本高、处理不完全等问题。鱼梁洲项目在技术选择策略、项目融资机制、运营模式等方面，均为决策者制定可持续污泥管理策略提供了可借鉴、可复制的经验。目前在我国合肥、长沙、大连、宁海等地已经建成或者正在筹备建设同类项目。

通过对鱼梁洲污泥项目的环境效益、能源效益、经济效益进行全面综合评估，可以有以下发现：

■ 鱼梁洲项目通过污染物的全消纳、资源的全回收和能源平衡，成功实现了污泥稳定化、无害化、减量化、资源化目标

根据环境效益评估与能源效益评估可以看到，通过“高温水解 + 厌氧消化 + 重金属硫化 + 甲烷捕获利用 + 生物炭土”的技术

路线，鱼梁洲项目成功实现了碳、氮、磷等营养物质的充分回收和利用，污泥中 96% 的氮、99% 的磷、以及 50% 的碳成为生物炭土制品被用于苗木种植；余下 50% 的碳被充分甲烷化，不仅为系统运行提供了足够的能源，还可以为其它用户（如出租车）提供天然气（6000 立方米 / 日，相当于 7800 升车用汽油）。

在鱼梁洲项目中，氮、磷等营养物质被充分回收利用，最大程度上避免了水体污染；最终的固态产物作为生物炭土用于苗木种植和土壤修复，避免了固体废弃物的产生。

此外，鱼梁洲项目还实现了良好的能源回收和温室气体减排。以填埋工艺作为基准，鱼梁洲项目在 21 年的运营周期中，不仅可以实现 98% 的过程温室气体减排（减少 80 万吨二氧化碳当量的排放），而且预计将产生约 4500 万立方米的压缩天然气，可替代近 6 万立方米车用汽油，实现约 14 万吨二氧化碳当量的额外减排。假设采用鱼梁洲项目的处理路线对全国 2015 年产生的 3000 万吨污泥（含水率 80%）进行处理估算，则减排潜力可达 1000 万吨二氧化碳当量（含处理过程的直接减排和污泥生物质能利用后实现的减排量）。

因此，该项目成功实现了污染物全消纳、资源全回收和能源平衡。

■ 政府与市场的共同支持可以有效解决污泥处置融资困境

污水处理费低、资金短缺是限制我国污泥处置发展的一个重要原因。襄阳鱼梁洲污泥项目以 BOO 合同的方式很好地实现了政府与市场资源的结合，条件优惠的低息长期贷款（市场资源）不仅很好地满足了项目建设初期的投资需求，同时也降低了项目的金融成本；同时，政府对该项目的大力支持，尤其是较高的补贴标准确保了项目的运营资金。根据鱼梁洲项目与其他污泥项目的政府补贴情况进行对比，目前襄阳政府给予的补贴标准处于较高水平。

鱼梁洲项目不仅消纳了环境污染物，而且还利用资源物质生产车用压缩天然气、生物炭土、苗木等经济产品，建立了较为完善的产品链。通过鱼梁洲项目的成功实施可以看到，结合市场需求选择产品链的设计以及处置路线是实现项目资金流可持续的重要因素。

例如，为了解决堆肥肥效不高、没有市场的问题，鱼梁洲项目先通过市场调查，根据自身特点，因地制宜，发现了城市绿化苗木的市场需求，而后再针对苗木培植的需求设计了生物炭土、移动式苗木种植容器、曝气滴灌系统等一系列产品，形成较为完善的产品链，并实现了经济成本的可承受。通过经济效益分析可以发现，鱼梁洲项目解决了污泥干化焚烧高成本的问题，也避免了堆肥产品无市场导致投资无收益的问题。

注释

¹ 参考：<http://topics.caixin.com/dirt/>。

² 近年来国内媒体屡有由于污泥随意倾倒或偷排引发的环境问题的报道，例如：合肥（新浪网，2005 年）、北京（新华网，2010 年；财新网，2013 年）、上海（人民网，2012 年）、广州（南方日报，2011 年）和南京（人民网，2013 年）。

³ 污泥中的重金属浓度与分布受污水处理厂进水水源、工业废水比例和污水处理工艺等因素有关。

⁴ 明银安、陶涛等. 厦门市城市污水处理厂污泥资源化评价. 全国污水处理节能减排新技术、新工艺、新设施高级研讨会论文集, 2008.

⁵ 住建部，全国城镇污水处理管理信息系统。

⁶ 根据《“十二五”全国城镇污水处理及再生利用设施建设规划》，2015 年，我国污水处理能力将达到 1.7 亿 m³/d，污水处理率达到 85%，投运三年以上污水处理厂负荷率不低于 75%。

⁷ 污泥中含有丰富的营养物质，每吨干污泥养分含量相当于 100kg 硫酸氨、100kg 过磷酸钙和 16kg 硫酸钾。经无害化和稳定化处理后的污泥及污泥产品，可以以有机肥、基质、腐殖土、营养土等形式用于农业、林业、园林绿化和土壤改良等方面。

⁸ 污泥中除了有机物外，往往还含有 20% ~ 30% 的无机物，主要是硅（Si）、铝（Al）、铁（Fe）、钙（Ca）等，与许多建筑材料常用的原料成分相近，可以分别利用污泥中的无机成分和有机成分做为制砖或者水泥的基础成分之一。

⁹ 污泥厌氧消化产生沼气的反应方程式为：

$$C_2H_5O_2Na + H_2O \rightarrow NaHCO_3 + CH_4 + 29.3 \text{ kJ/mol}$$

¹⁰ Cao & Pawlowski. "Life cycle assessment of two emerging sewage sludge-to-energy systems: Evaluating energy and greenhouse gas emissions implications". Bioresource Technology. 127 (2013) 81–91

¹¹ <http://www.epa.gov/airtoxics/129/ssi/ssipg.html>

¹² <https://www.gov.uk/government/policies/reducing-and-managing-waste/supporting-pages/anaerobic-digestion-and-energy-recovery-from-waste>

¹³ <https://www.gov.uk/government/publications/anaerobic-digestion-strategy-and-action-plan>

¹⁴ IEA Bioenergy-country reports

¹⁵ <http://www.iea-biogas.net/country-reports.html>

¹⁶ EPA.U.S. Farm Anaerobic Digestion Systems: A 2010 Snapshot [EB/OL]: http://www.epa.gov/agstar/documents/2010_digester_update.pdf, 2010.

¹⁷ <http://www.epa.gov/climatechange/Downloads/Biogas-Roadmap-Factsheet.pdf>

¹⁸ 热水解的原理是使污泥中的胞外聚合物和大分子有机物发生水解，并破解污泥中微生物的细胞壁，强化物料的可生化性能，改善物料的流动性，提高污泥厌氧消化池的容积利用率、厌氧消化的有机物降解率和产气量，同时通过高温预处理，还可以改善污泥的卫生性能及沼渣的脱水性能，进一步降低沼渣的含水率，有利于厌氧消化后沼渣的资源化利用。一般来说，热水解的温度范围为 60 ~ 270℃，根据反应温度可以分为高温热水解（高于 130℃）和低温热水解（低于 130℃）。有研究表明，最适合发生热水解的温度条件为 170℃，此时，污泥总化学需氧量（TCOD）去除率从热水解前的 38.1% 提高到 56.8%，污泥单位 TCOD 沼气产率从热水解前的 160mL 提高到 250mL。

¹⁹ 参考：<http://www.cambi.no/photoalbum/view2/P3NpemU9b3JnJmIkPTM2NTY0MSZ0eXBIPTE>

²⁰ 物质流分析（Material Flow Analysis, 简称 MFA）是指在一定时空范围内关于特定系统的物质流动和贮存的系统性分析。MFA 的最主要特征之一在于通过研究对象所有的输入、贮存及输出过程达到最终的物质平衡。由于为资源、废弃物和环境的管理提供了方法学上的决策支持工具，近年来 MFA 广泛应用于循环经济和可持续发展研究领域。

²¹ 数据来源为《2012 年襄阳市国民经济和社会发展统计公报》。

²² 根据世界银行贫富划分标准。同期巴西和印度的人均 GDP 分别为 12576 美元和 1234 美元。

²³ 数据来源为《中国城市建设统计年鉴（2013）》，中国统计出版社。

²⁴ <http://ctdsb.cnhubei.com/html/ctdsb/20110316/ctdsb1327263.html>

²⁵ 厌氧消化是利用兼性菌和厌氧菌进行厌氧生化反应，分解污泥中有机物质，实现污泥稳定化。根据反应温度不同，厌氧消化可以分为高温厌氧消化（55±2℃，停留时间 10 ~ 15 天）和中温厌氧消化（35±2℃，停留时间 20 天以上）。

²⁶ 数据来源为《城镇污水处理厂污泥处理处置技术指南（试行）》。

²⁷ 耿维等. 中国区域畜禽粪便能源潜力及总量控制研究. 农业工程学报. 2013.29（1）:171~180.

²⁸ 厌氧氨氧化工艺是指是在缺氧条件下，以浮霉目细菌为代表的微生物直接以 NO₂-N 为电子受体，将 NH₄⁺-N 氧化成氮气的生物脱氮工艺。

²⁹ 鸟粪石沉淀法是指向含氮、磷的废水中投加铵盐或者磷酸盐和镁盐，使之与废水中的磷酸盐或者铵离子（ NH_4^+ ）发生反应生成难溶复盐鸟粪石（ $\text{MgNH}_4\text{PO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ）沉淀，通过固液分离达到从废水中脱氮除磷的目的。

³⁰ Luo, L., Van der Voet, E., Huppes, G., de Haes, H.A.U. Allocation Issues in LCA Methodology: A Case Study of Corn Stover-Based Fuel Ethanol. The International Journal of Life Cycle Assessment. 2009. 14(6), 529-539.

³¹ 根据《中国电网企业温室气体排放核算方法与报告指南》，燃料燃烧排放指化石燃料在各种类型的固定或移动燃烧设备中与氧气充分燃烧生成的二氧化碳排放；工业生产过程排放指化石燃料和其它碳氢化合物用作原材料产生的二氧化碳排放。

³² 污泥制水泥是污泥焚烧后再利用的一种产品，其排放被认为包含在污泥焚烧中，不单独列出进行比较。

³³ 根据蒸发 1m^3 水，需要 1.5t 标准蒸汽测算。

³⁴ 根据蒸发 1m^3 水，需要 1.5t 标准蒸汽测算。

³⁵ 根据对青岛市排水管理处的访谈，在城镇化程度较高的城市，一般污泥处理厂距离污水处理厂距离较远，而以青岛为例，一般在 70km 左右。

³⁶ 根据 IPCC 2006 中，卡车排放因子为 $1.011\text{kgCO}_2/\text{km}$ 计算。

³⁷ HC 泛指汽车排放里的碳氢化合物，确切的说是燃料没有完全燃烧或者干脆没有经过燃烧就排放的污染物。

³⁸ 车用压缩天然气产生量按照鱼梁洲项目日产压缩天然气 6000m^3 ，运营 21 年（每年按 360 天）计算；压缩天然气对车用汽油的替代量，根据 1m^3 压缩天然气替代 1.3 L 车用汽油计算；车用汽油的温室气体排放根据 IPCC2006 年碳排放系数中规定，1L 车用汽油排放系数为 2.26kgCO_2 当量。

³⁹ 通过访谈林学专家获得。

⁴⁰ 目前出台的污泥利用相关标准包括：《城镇污水处理厂污泥处置园林绿化用泥质》（GB/T23486—2009）、《城镇污水处理厂污泥处置土地改良用泥质》（GB/T24600—2009）、《农用污泥中污染物控制标准》（GB 4284—1984）、《城镇污水处理厂污泥处置混合填埋用泥质》（GB/T23485—2009）。而农业部《农业部关于加快推进农业清洁生产的意见》（农科教发[2011]11 号）禁止污泥直接用作肥料。

⁴¹ 香樟、紫薇等树木种植 2 年地径可达 $2 \sim 4\text{cm}$ ，高 $1.5 \sim 2\text{m}$ ，每棵占地约 2m^2 。

⁴² 北京节能环保中心：<http://www.beec.gov.cn/kpzs/408.jhtml>

⁴³ 数据来源为《中国城市建设统计年鉴（2011 年）》。

⁴⁴ 参考 http://www.jjckb.cn/2013-12/05/content_480393.htm

⁴⁵ 该补贴由三部分组成：污泥处理补贴 219 元 / t，企业收购原有资产（投资 1400 万元）折合每吨污泥固定及财务成本约为 15 元 / 吨，堆置污泥取泥费 20 元 / t（主要补贴堆置污泥的挖取、预处理环节）。

⁴⁶ 包头市人民政府专家顾问组，2010，对包头市城市垃圾处置的建议，http://zfwz.baotou.gov.cn/zfsw/zjgwz/zjyy/zjyy_201005.htm

⁴⁷ 杨伟利 . 市政污泥：环境效益下的隐性资源，http://www.epi88.com/master/News_View.asp?NewsID=1617

⁴⁸ 全口径成本 = 固定成本 + 运营成本 + 财务费用

⁴⁹ 生物炭土价格由项目方提供，而根据对有关专家的访谈，市场同类产品价格可至 250 元 / t，则项目年销售收入可达 495 万元，远远高于目前的估算。

⁵⁰ 鱼梁洲项目目前主要种植香樟、紫薇等经济价值较高的树种，2 年生长期则地径可达 $2 \sim 4\text{cm}$ ，高 $1.5 \sim 2\text{m}$ ，每棵占地约 2m^2 。

⁵¹ 树木的具体收益与树种有很大关系，每棵树的成本约 100 元，包括种植盆（30 元）、树苗（30 元，以香樟或者紫薇为例，地径达到 2-3cm 时市场售价即可达到 30 元）、喷灌系统（10 元）、人工费（5 元），以及销售成本（约 25 元）和其它成本 10 元，由于该项目主要利用荒地或垃圾填埋场种植，土地租金忽略不计；假设树木的销售价格可达 300 元，则每棵树的净收益可以达到 200 元。如果占用农田，需要在成本中考虑土地租金，约每亩 1000 元 / 年。

参考文献

1. Cao & Pawlowski. "Life cycle assessment of two emerging sewage sludge-to-energy systems: Evaluating energy and greenhouse gas emissions implications". Bioresource Technology. 127 (2013) 81–91
2. 耿维等. 中国区域畜禽粪便能源潜力及总量控制研究. 农业工程学报. 2013.29 (1) :171~180.
3. EPA.U.S. Farm Anaerobic Digestion Systems: A 2010 Snapshot [EB/OL]: http://www.epa.gov/agstar/documents/2010_digester_update.pdf, 2010.
4. 黄和平等. 物质流分析研究述评 [J]. 生态学报, 2007,27 (1) :368-379.
5. IEA. IEA Bioenergy - Task 37 Country Report [DB/OL]: <http://www.iea-biogas.net/country-reports.html>, 2014.
6. Luo, L., Van der Voet, E., Huppes, G., de Haes, H.A.U. Allocation Issues in LCA Methodology: A Case Study of Corn Stover-Based Fuel Ethanol. The International Journal of Life Cycle Assessment. 2009. 14(6), 529-539.
7. 明银安、陶涛等. 厦门市城市污水处理厂污泥资源化评价. 全国污水处理节能减排新技术、新工艺、新设施高级研讨会论文集, 2008.
8. 王治军、王伟. 热水解预处理改善污泥的厌氧消化性能. 环境科学, 2005,26(1):68.
9. 徐小力. 城市污泥焚烧需解决三大世界难题 [EB/OL]: www.xmepi.org/upload/20080803195855.DOC
10. 杨伟利. 市政污泥：环境效益下的隐性资源 [J]. 环境, 2007,3:49-52.
11. 赵鸣、吴广芬、李刚. 污泥资源化利用的途径与分析 [J]. 再生资源研究, 2004,5:38-31.
12. 中华人民共和国住房和城乡建设部. 中国城市建设统计年鉴 (2011 年) [M]. 北京：中国计划出版社, 2012.
13. 中华人民共和国住房和城乡建设部. 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 城镇污水处理厂污泥处理处置技术指南 (试行) [M]. 北京：中国建筑工业出版社, 2012.

关于作者

付晓天 世界资源研究所中国水项目研究员，电子邮件：
Xiaotian.fu@wri.org，电话：+86 10 6416 5697 分机 59

钟丽锦 博士 高级研究员，世界资源研究所中国水项目主任，
电子邮件：Lijin.zhong@wri.org，电话：+86 10 6416 5697 分机 55

致谢

在此向为本工作论文的撰写提供了宝贵、专业建议和意见的专家们表示诚挚的感谢（排名不分先后）：

张悦 中华人民共和国住房和城乡建设部
窦文龙 国新天汇（集团）公司
程卫华 国新天汇（集团）公司
金宜英 清华大学
董欣 清华大学
许国栋 中持（北京）环保发展有限公司
方婉丽 世界银行
Vijay Jagannathan 世界资源研究所
Cy Jones 世界资源研究所
温华 世界资源研究所
袁敏 世界资源研究所

我们同时感谢中国社会科学院庄贵阳博士、世界资源研究所科学与研究副主席 Janet Ranganathan、李来来博士对本论文提供的中肯意见和指导。感谢 Ella Smith、丛逸、王源、吴志轩和谢亮对论文的编辑和出版做出的努力。

关于世界资源研究所

WRI 关注环境与社会经济发展的相互关系。我们不只是研究，而且把想法转化为行动，与全世界的政府、企业和民间组织合作，制定改革性的解决方案，保护地球，改善人民生活。

对于紧急的可持续性挑战的解决方案

WRI 采用改革性的思路，保护地球，促进发展，推进社会平等，因为只有实现可持续性，才能满足人类当今的需要，达成人类未来的理想。

实用的变革战略

WRI 采用实用的变革战略和有效的变革工具，促进变革进程。我们衡量成功与否的方式是，是否制定了新政策，采用了新产品，采取了新措施，改变了政府的工作方式、企业的运营方式和人们的行为方式。

全球行动

我们的活动遍及全球，因为当今的问题没有边界。我们渴望交流，因为世界各地的人们均需要思想的激发，知识的启迪，通过相互了解，积极做出改变。我们通过准确的、公平的、独立的工作，为地球可持续发展提供了创新性的路径。

WITH SUPPORT FROM:



Copyright 2015 World Resources Institute. This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. To view a copy of the license, visit <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>