

城市污水处理厂污泥资源化利用的技术路径与环境风险评估

唐泽鑫

长缆科技集团股份有限公司望城分公司 湖南长沙 410000

摘要：本文聚焦城市污水处理厂污泥资源化利用，深入探讨其技术路径，并对相关环境风险进行全面评估。首先阐述了城市污水处理厂污泥的特点与现状，强调了污泥资源化利用的重要性和紧迫性。接着详细分析了几种常见的污泥资源化利用技术路径，包括污泥堆肥、污泥焚烧发电、污泥制建筑材料等，剖析了各技术的原理、优势及局限性。然后从土壤环境、大气环境和水环境等方面，对污泥资源化利用过程中可能产生的环境风险进行了系统评估。最后，针对不同技术路径的环境风险提出了相应的防控措施，旨在为城市污水处理厂污泥的科学、合理、安全资源化利用提供理论依据和实践参考，以实现环境效益、经济效益和社会效益的统一。

关键词：城市污水处理厂；污泥资源化利用；技术路径；环境风险评估

引言

随着城市化和污水处理能力提升，城市污水处理厂污泥产量增加。污泥是污水处理副产物，含大量有机物、营养物质及重金属、病原菌等有害物质，若处理不当，会占土地且污染环境。所以，实现污泥有效处理和资源化利用是环保领域热点和难题。污泥资源化利用是将污泥转化为可利用产品或能源，实现减量化、无害化和资源化，能解决处置难题并创造经济效益。但不同技术路径会带来环境风险，如重金属污染、温室气体排放等。因此，深入研究污泥资源化利用技术路径并科学评估其环境风险，对保障可持续性和环境安全至关重要。

一、污泥资源化的主要技术路径

（一）土地利用技术路径

污泥的土地利用技术路径，其核心在于将污泥视为一种富含有机质及植物营养元素的生物质资源，通过科学处理使其能够替代或部分替代传统的土壤改良剂和有机肥料。该路径的技术原理在于，污泥中含有的大量有机质能够有效改善土壤的物理结构，增强其保水保肥能力；同时，其所含的氮、磷、钾及多种中微量元素，可直接为植物生长提供养分，从而实现自然界碳、氮、磷等营养元素的良性循环。该路径的优势在于其能够将污染物转化为有价值的农业资源，实现营养物质的循环利用，符合生态农业的发展方向。然而，该路径的应用也伴随着显著的环境风险。污泥中不可避免地含有一定浓度的重金属、病原体以及持久性有机污染物等有害物质，

这些物质在长期、大规模的土地利用过程中，会在土壤而发生累积，改变土壤的化学性质，并通过作物吸收、淋溶进入地下水等途径，最终可能通过食物链富集和传递，对生态系统和人类健康构成潜在威胁^[1]。

（二）建材利用技术路径

污泥的建材利用技术路径，是将污泥视为一种含有无机成分的工业原料，通过特定的物理化学处理，将其转化为建筑用制品的技术。其技术原理是利用污泥中的大量硅、铝、铁、钙等无机氧化物，作为生产建材的基质成分，在高温烧结或水热固化等工艺条件下，使污泥中的污染物被物理包裹和化学键合，从而稳定固化在致密的建材晶格结构中，实现污染物的无害化处理。该路径的优势在于处理效率高，能够实现污泥的大幅减量化和资源化，尤其适用于处理量巨大的市政污泥。然而，该路径的技术应用也面临着多重挑战。首先，高温烧结过程需要消耗大量能源，其经济性和碳排放问题不容忽视。其次，燃烧过程中可能产生含硫、含氮气体以及挥发性有机物，对大气环境造成二次污染。最后，也是最为关键的一点，是最终建材产品的浸出毒性问题，必须确保固化在其中的污染物在各种环境条件下（如酸雨浸泡）不会重新释放出来，否则将对建筑安全和环境构成长期风险。

（三）能源化利用技术路径

污泥的能源化利用技术路径，旨在通过热化学或生物化学方法，将污泥中蕴含的有机质转化为热能或化学能，实现污泥的减量化、稳定化和能源回收的三重目标。该路径包含了多种不同的工艺技术，其原理各有侧重。

厌氧消化是在无氧条件下，利用微生物将污泥中的大分子有机物分解为小分子物质，并最终产生以甲烷为主要成分的沼气，沼气可作为清洁能源用于发电或供热；热解是在缺氧或无氧的条件下对污泥进行中低温加热，使其分解为生物油、可燃气和生物炭；而焚烧则是将污泥在富氧条件下完全燃烧，释放的热量可用于发电或供暖，实现能量的高效回收。该路径的优势在于能够同时解决污泥处置和能源短缺两大问题，具有显著的资源回收效益。但该路径的技术应用同样存在复杂的风险点。例如，厌氧消化对污泥的有机物含量和预处理要求较高，且消化效率受温度、pH值等多种因素影响；焚烧处理虽然减容效果最好，但会产生含有高浓度重金属和剧毒物质的飞灰和底灰，属于危险废物，需要后续的专门处置；此外，焚烧过程中若控制不当，极易生成二噁英等剧毒物质，对周边环境和人体健康构成严重威胁，因此对焚烧炉的设计、运行工况控制和尾气净化系统提出了极高的技术要求^[2]。

二、不同技术路径下的环境风险识别

（一）土地利用的环境风险

在土地利用路径下，其核心环境风险并非简单的污染物存在，而是这些污染物在特定环境介质中的迁移、转化及其最终的生态暴露效应。首先，重金属的风险在于其生物有效性，即其在土壤中能够被植物根系吸收利用的形态比例。即使污泥中重金属总量符合标准，但在特定pH值、氧化还原电位等土壤理化条件下，其形态可能转化为高溶解度、高生物活性的形态，从而被农作物大量吸收，并在其可食部位富集，通过食物链进入人体，构成长期的、潜在的健康威胁。其次，病原体和寄生虫卵的风险在于其在土壤环境中的存活能力。在未经充分稳定化处理的污泥施入土壤后，这些微生物仍可在一段时间内保持活性，对土壤中的微生物群落结构造成冲击，并通过接触污染农产品、污染水源等方式，直接或间接地对人类健康构成威胁。此外，新兴污染物如抗生素和微塑料的风险正日益凸显。抗生素可能诱导土壤中耐药菌的产生和传播，形成环境耐药基因库；而微塑料则因其物理和化学稳定性，可在土壤中长期存在，并作为载体吸附其他有毒污染物，其长期生态效应尚不明确，构成了潜在的、不可忽视的长期环境风险。因此，该路径的风险水平并非一成不变，而是与污泥的预处理工艺、目标土壤的类型与理化性质、所种植作物的种类及其可食部位、以及具体的施用方式和频次等因素密切相关，

需要进行精细化的风险评估与管理^[3]。

（二）建材利用的环境风险

建材利用路径下的核心环境风险，主要体现在产品的全生命周期过程中，尤其是在其使用阶段和最终处置阶段可能产生的二次污染。首要风险是浸出风险。将污泥作为原料制得的建材产品，如砖块、陶粒或水泥制品，在长期暴露于自然环境中的情况下，尤其是在酸雨冲刷或长期浸泡的条件下，其内部固化的重金属、盐分等有害物质可能发生浸出，进入周边的土壤和地下水系统，对生态环境造成二次污染。这要求对产品的浸出毒性进行严格且长期的监控。其次，是生产过程中的大气污染风险。在高温煅烧或烧结过程中，污泥中的有机物和含氯物质可能不完全燃烧，生成以二噁英、呋喃为代表的剧毒含氯有机物，以及挥发性有机物等有害气体，直接排放将对大气环境造成严重污染。同时，高温处理过程本身伴随着巨大的能源消耗，产生大量的二氧化碳等温室气体，其高能耗和高碳排放的特性与当前绿色低碳的发展趋势相悖，构成了该路径在宏观层面的环境负担。

（三）能源化利用的环境风险

能源化利用路径，尽管旨在实现污染物的彻底分解或能量回收，但其核心环境风险在于污染物的形态转化与富集，以及过程中可能产生更难处理的二次污染物。在厌氧消化技术中，风险主要存在于污染物的转移。重金属等难以被微生物降解的物质，不会被分解，而是会从液相中转移并富集于消化后的沼渣中。虽然沼渣的总量有所减少，但其有害物质的浓度被浓缩，使得沼渣的后续处置成为一个更为棘手和成本高昂的问题，并未从根本上消除环境风险。在焚烧和热解这类高温处理技术中，风险则更为严峻和复杂。首要风险是剧毒物质的生成，特别是二噁英和呋喃。当污泥中含有氯、碳等元素，并在特定的温度区间（通常为200-450℃）并有催化剂存在时，极易通过“从头合成”或“前体物合成”等途径生成这类强致癌物，对焚烧厂周边环境和人群健康构成严重威胁。其次，是焚烧产生的飞灰风险。飞灰是烟气净化系统收集的细小颗粒物，由于具有巨大的比表面积，极易富集烟气中的重金属和盐分，并被归类为危险废物，其安全填埋或固化处置需要极高的技术和成本投入，构成了该技术应用中一个关键的末端风险环节^[4]。

三、环境风险评估与管控方法

（一）环境风险评估框架

针对污泥资源化利用项目的环境风险评估，必须构

建立一个系统化、结构化的评估框架。该框架的核心是贯穿项目全生命周期的“源头识别-过程分析-后果评估-综合评判”逻辑链条。在源头识别阶段，需明确不同技术路径下污泥中各类污染物的种类、形态及初始含量。过程分析阶段则应深入剖析污染物在预处理、转化、利用及最终处置等各个环节中的释放特性、迁移转化规律及其关键影响因素。后果评估阶段，需结合不同资源化方式下的受体暴露情景，如土壤-植物系统、地下水环境或大气环境，预测和量化污染物可能产生的生态与健康效应。最终，通过综合评判，将各环节的风险数据进行整合，形成对项目整体环境风险的系统表征，为后续的管控决策提供科学、全面的数据支持。

（二）关键评估要素与指标

环境风险评估的科学性与准确性，高度依赖于所选取的关键评估要素与指标。这些指标应构成一个多维度、多层次的体系。首先是污染物指标，不仅包括重金属的总量，更需关注其在特定环境条件下的有效态或可交换态含量，同时涵盖持久性有机污染物、抗生素及病原体等新兴污染物的检测。其次是环境过程指标，用以量化污染物在环境介质中的动态行为，如通过标准浸出毒性试验评估其潜在淋溶风险，通过迁移模型计算其在土壤或地下水中的迁移速率，通过降解半衰期评估其环境持久性。第三是生态毒理指标，直接反映污染物对生物体的危害程度，包括急性毒性和慢性毒性数据，以及生物富集因子等用于评估食物链放大风险的指标。最后是管理控制指标，将国家或地方的排放标准、产品质量标准、土地利用限值等法规要求纳入评估体系。该框架的价值在于强调必须根据不同的资源化路径，科学地选择和构建差异化的评估指标组合，以确保评估结果的真实性和针对性。

（三）风险管控策略

基于风险评估的结果，必须制定并实施一套行之有效的风险管控策略，该策略应遵循“预防为主、全程控制”的基本原则。源头管控是风险的第一道防线，其核心在于通过优化污泥的预处理工艺，如稳定化、减量化技术，从源头上降低污染物的含量和活性，为后续的资源化利用创造有利条件。过程管控是风险控制的核心环节，要求在生产运行过程中强化管理，确保各项处理设施稳定、高效运行，对工艺参数进行实时监控，确保污

染物得到有效固定或达标处理，防止在利用过程中发生意外释放。末端管控则是风险控制的最后一道保障，强调对资源化产品（如农用污泥、建材等）在使用后的环境行为进行长期监测与跟踪，建立产品使用档案，及时发现并处理可能出现的风险累积效应。该策略的最终价值在于提出必须建立从污泥产生、运输、处理到最终资源化产品利用的全过程环境风险监管体系，通过制度化手段确保各环节风险可控，从而为污泥资源化利用的可持续性提供根本性的保障^[5]。

结语

污泥资源化利用对解决污泥处置问题意义重大，其主要技术路径包括土地利用、建材利用和能源化利用，各有技术原理、优势和环境风险。土地利用能循环利用营养物质，但有有害物质威胁；建材利用可实现减量化和资源化，但存在能源消耗等问题；能源化利用能回收能源，但工艺有污染物转移等风险。识别不同技术路径的环境风险很重要，可了解污染物迁移等效应。构建评估框架、选取关键要素与指标，能准确评估项目整体环境风险。基于评估结果制定“预防为主、全程控制”策略，从源头、过程和末端降低环境风险。未来，要推动可持续发展，需加强技术研发、优化路径、降低风险，强化评估与管控体系建设，提高监管科学性和有效性，加强公众教育，形成全社会参与监督氛围，实现污泥无害化处理和资源化利用，为环保和资源可持续利用作贡献。

参考文献

- [1] 许洲. 超大城市大型污水处理厂碳中和路径探讨[J]. 给水排水, 2022, 48(7): 7.
- [2] 徐玉璐, 乔子茹, 储思琴, 等. 污泥资源化过程中新兴污染物的赋存与控制研究进展[J]. 环境工程, 2021, 039(009): 146-153.
- [3] 周维奇, 方宁, 郭亚丽, 等. 基于多源污泥泥质特性的处理技术路径探析[J]. 中国给水排水, 2022.
- [4] 黄文成, 李想, 程贝贝, 等. 碳中和背景下长江大保护发展路径探索: 污泥处理处置[J]. 2021.
- [5] 曾谦, 倪哲, 陈君, 等. 有机固废沼渣特性及其资源化探究[J]. 环境工程, 2022.