


潘粲 肖越 杨华荣 ● 著

Utilization of Sludge for Construction Materials:
Key Techniques and Systematic Management

污泥建材化利用

关键技术与系统管理



 江西科学技术出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

污泥建材化利用关键技术与系统管理 / 潘燊, 肖越,
杨华荣著. — 南昌: 江西科学技术出版社, 2021.11
ISBN 978-7-5390-7977-6

I. ①污… II. ①潘… ②肖… ③杨… III. ①污
泥利用—研究 IV. ① X703

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2021) 第 226912 号

选题序号: ZK2021282

图书代码: B21196-101

污泥建材化利用关键技术与系统管理 潘燊 肖越 杨华荣著

出版 江西科学技术出版社有限责任公司
发行 江西科学技术出版社有限责任公司
社址 南昌市蓼洲街 2 号附 1 号
邮编: 330009 电话: (0791) 86623491 86639342 (传真)
印刷 江西骁翰科技有限公司
经销 各地新华书店
开本 889mm × 1194mm 1/32
字数 130 千字
印张 6.25
版次 2021 年 11 月第 1 版
印次 2021 年 11 月第 1 次印刷
书号 ISBN 978-7-5390-7977-6
定价 49.00 元

赣版权登字: -03-2021-433

版权所有, 侵权必究

(赣科版图书凡属印装错误, 可向承印厂调换)

潘燊 污泥处理处置工程师，英国谢菲尔德大学土木工程专业硕士，建造师，拥有多项专利。在环境治理与固废处理方面有多年行业经历，主攻污泥无害化处理与建材化利用，理论基础深厚，实践经验丰富，与行业内多位专家学者合作密切。

肖越 江西财经大学经济学院政治经济学博士，英国帝国理工学院环境工程专业硕士，江西财经大学生态文明研究院助理。师从国际知名固废处理专家 Christopher Cheeseman 教授，在国际知名刊物上发表多篇 SCI、IEEE 论文，主要研究方向为固废处理、污水处理。

杨华荣 本科学历，中共党员，江西浩德实业有限公司(环保)董事长。长期奋斗在环保一线，尤其在生活污水处理、固废处理、土壤修复方面，公司与华中科技大学、江西财经大学、江西省科学院等科研院所保持长期合作关系。

前 言

据相关统计数据，未来五年我国污泥产量将保持 2.3% 的复合增长，到 2025 年达到 1.6 亿 t (包括生活污水和工业污泥)。同时，污泥处理市场将保持 10.8% 的复合增长，预计到 2025 年达到 453 亿元的规模。我国污泥处理起步较晚，过去十年间整体发展缓慢，“重水轻泥”现象普遍存在。随着城镇污泥量的持续增加，污泥的处理处置也面临多方面挑战。

目前，我国通常采用填埋、堆弃、堆肥、焚烧、建材利用等方式处置城镇污泥。由于环境保护的要求越来越高，传统的填埋、堆弃、堆肥、焚烧等处置方式因为存在污染水源、空气、土壤和占用大量田地等弊端，已经难以为继。随着全社会对污泥利用和环境保护问题的日益关注，在系统研究的基础上，研究人员提出了污泥建材资源化的利用方向，即利用污泥生产砖瓦、水泥、陶粒等大宗建筑材料。污泥建材资源化利用不仅可以有效减少污泥对环境的危害，而且污泥利用率高，附加值相对较高，相对于其他处置方式，污泥建材资源化利用更具有可持续性。

污泥的处理、处置应遵循“减量化、稳定化、无害化、资源化”的原则。减量化有利于降低处理成本、提高处置效率，稳定化是污泥处置与利用的前提，无害化是污泥处理处

置的核心目标，资源化则是建立在前三个原则之上的对污泥进行有益的循环利用。根据最新发布的《“十四五”城镇污水处理及资源化利用发展规划》(以下简称《规划》)，破解污泥处置难点、实现污泥无害化、推进污泥资源化利用是我国“十四五”期间污泥处置的关键。《规划》要求，“十四五”期间新增污泥(含水率80%的湿污泥)无害化处置设施规模应大于等于2万t/d，并鼓励污泥能量资源回收利用，土地资源紧缺的大中型城市推广采用“生物质利用+焚烧”“干化+土地利用”等模式，推广将污泥焚烧灰渣建材资源化利用。

污泥处置方式的选择不仅仅是一个技术性问题，更是一个经济问题。本书对污泥的基础特性和处理原则进行了分析，结合污泥建材资源化利用的现状、技术、费效分析，以及地区污泥建材资源化利用案例，对污泥建材资源化利用的技术选择和管理规划进行了较为深入的探讨。污泥建材资源化利用是一个相对前沿的课题，本书在撰写过程中参考了较多的同行研究成果和应用案例。同时，在调研阶段和本书成稿过程中，得到了江西浩德实业有限公司的大力支持，在此一并致谢。

编者

2021年11月

目 录

上编：污泥基础与处理处置原则

第一章 概论	003
第一节 污泥处理处置背景与利用现状	003
第二节 政策法规解读	010
第二章 污泥的来源与特性	021
第一节 污泥的来源与分类	022
第二节 污泥的组成	026
第三节 污泥的性质指标	030
第三章 污泥的处理处置原则	044
第一节 污泥减量化	044
第二节 污泥稳定化	052
第三节 污泥无害化	058
第四节 污泥资源化	063
第四章 污泥处理技术	073
第一节 污泥的浓缩技术	073

第二节	污泥的调理技术	076
第三节	污泥的脱水技术	080
第四节	污泥的热干化技术	087
第五节	污泥的稳定化技术	093

下编：污泥建材化利用与系统管理

第五章	污泥制砖	102
第一节	污泥制砖概述	102
第二节	污泥制砖技术环节	103
第三节	污泥制砖工艺	109
第四节	污泥制砖产品分析	112
第五节	案例分析	115
第六章	污泥制水泥制品	121
第一节	水泥概况	121
第二节	污泥制水泥技术概述	124
第三节	水泥窑协同处置污泥工艺	126
第四节	污泥制水泥产品性能	134
第五节	水泥窑协同处置污泥的发展趋势	134
第七章	污泥制纤维板	137
第一节	纤维板概况	137
第二节	污泥制纤维板的基本原理	139
第三节	制造工艺	142
第四节	生化纤维板的性能	143
第五节	案例分析	144

第八章 污泥制轻质陶粒	146
第一节 轻质陶粒概述	146
第二节 污泥制轻质陶粒的技术方法	151
第三节 污泥制陶粒的工艺方法	154
第四节 轻质陶粒的产品性能	157
第五节 污泥陶粒的应用领域	158
第六节 案例分析	160
第九章 污泥建材化利用的其他技术	162
第一节 污泥制熔融材料	162
第二节 污泥制微晶玻璃	164
第三节 案例分析	169
第十章 全生命周期视角下污泥建材化利用的成本效益分析	170
第一节 污泥建材化利用的环境风险评估	170
第二节 污泥建材化利用的全生命周期分析	174
第三节 成本效益评价	178
参考文献	183

上编：污泥基础与处理处置原则

第一章 概 论

第一节 污泥处理处置背景与利用现状

一、我国污泥处理处置现状

污泥主要伴随着污水处理而产生，可分为城市污泥与工业污泥两大类。其中，城镇污水处理厂是城市污泥的主要来源，属于一般固体废弃物；工业污泥则产生于工业废水处理过程中，对于具备毒性且列入国家危险废物名录的污泥，需要经由危废专业机构进行处理处置。在此，我们仅讨论城市污泥。

早期我国污水处理厂生产污泥量较低且成分简单，污泥的处理处置问题也不迫切，常见的处理处置方式就是把污泥作为农肥使用。随着改革开放的深入和工业的发展，城镇污水处理厂接纳的污水成分越来越复杂，污泥中累积的有害物质和病原菌也越来越多，不再适合简单处理后进行农田利用或随意填埋的处理处置方式。污水处理量和污泥产生量日益增加，污泥处理处置研究也在不断深入。目前，既有污泥卫生填埋、农业利用、干化焚烧等传统处理处置方法，也有建材资源化利用、能源回收、资源回收等新型资源化处置方法。^[1]

目前，国内污泥各种处理处置方式所占的比例如图 1.1 所示。城镇污水处理厂产生的污泥按照从污水中分离出的阶段不同可以分为有栅渣、沉砂池沉渣、剩余活性污泥、腐殖污泥、化学污泥等。体积较大的物质会被格栅（bar screen）拦截，易沉降的大颗粒会在沉砂池沉淀，这些无机固体一般会被运往垃圾填埋场填埋。初沉池和二沉池中的污泥（也称剩余污泥）含有重金属、致病菌和大量的有机物，容易腐烂变质，产生难闻的气味，需要经过稳定化、无害化等程序处理。由于二沉池中一般会使用活性法处理污泥，因此二沉污泥中的微生物较多，污泥成分复杂，其中也含有一些植物营养素，如氮、磷、钾等，所以污泥也具有再利用的潜力。总体而言，如果处置不当，污泥的二次污染风险很高，环境成本大，因此城镇污水处理厂坚持“泥水并重”的原则十分重要，且有必要增加污泥处理配套设施等固定投资，提高就地稳定化、无害化处理处置污泥的能力。

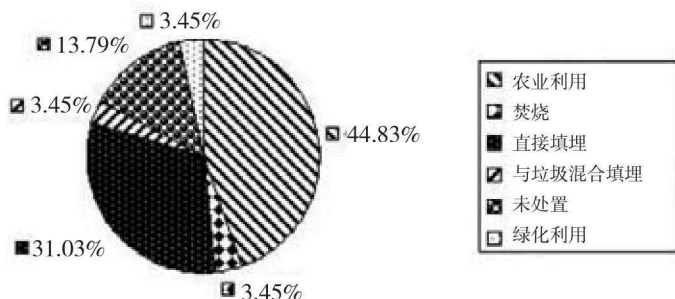


图 1.1 我国污泥处理处置情况

污泥处理处置是水污染控制和水环境保护的重要组成部分。如果处理处置不当,不仅会对生态环境造成负面影响,也会危害人们的身体健康,对国家经济发展的长期影响也不容小觑。我国早期存在“重水轻泥”现象,较晚才认识到污泥处理处置的重要性。因此,在这方面的观念意识、技术和管理上都和发达国家存在着一定的差距。污泥处理处置的首要原则是稳定化、减量化和无害化,并在条件允许的情况下再实现资源化。通过污泥脱水和干化等污泥减量方法,我国基本实现了污泥减容,但由于污泥的处理处置技术路线还不明确、资金与盈利模式还不清楚、法律法规还不完善、监督检查还不到位等多方面原因,使得污泥处理处置离实现稳定化、无害化和资源化的目标还甚远。据统计,2010年我国仅有3%不到的污水处理厂配套了污泥厌氧消化系统,其中正常运行的更是少数。我国市政污泥农业利用比例最高,占污泥总量的44.83%;第二是卫生填埋,占34.48%;污泥干化焚烧占6.90%;而有13.79%的污泥没有经过任何处理处置,存在二次污染风险和资源浪费问题。^[2]

从治理过程看,污水处理是污泥处理处置的先决条件,且水污染具有流动性,污水处理的优先度自然高于污泥处理;从资金投入看,若增加污泥处理处置环节,污水处理项目的总投资需增加30%左右,考虑到污水处理问题仍需大量资金投入,且此前的污泥处理设施运行并不好,如果强制增加污泥处理处置环节,有可能不仅达不到投资效果,还会分散污水处理的精力。在此背景下,各级政府最终选择先将污泥处理处置搁置一旁,将有限资金优先用于污水处理设施和管网

建设，这导致国内“重水轻泥”现象明显。

我国早期政策对污泥处理处置的支持力度不足，污泥处理处置优先度低且财政资金有限，普遍存在“重水轻泥”的现象。国家在“十二五”期间开始重视污泥的处理处置问题，鼓励大力开发污泥的综合利用，并对污泥的处理处置问题提供了资金支持。在国家政策导向下污泥市场得以发展，成为继污水处理之后的又一个投资热点。^[3]“十三五”期间，我国城市污水处理率超过 95%，污水处理提标改造进程快速推进，污泥处理处置行业的发展环境也逐步得到改善。

经历了多年的探索和积累，在污泥无害化、资源化利用方面，当前国内已经形成了四条主流的污泥处理技术路线：污泥深度脱水—卫生填埋（“深填”路线）、好氧发酵—土地利用（“好土”路线）、厌氧消化—土地利用（“灰土”路线）、污泥干化—焚烧—灰渣填埋或建材利用（“干焚”路线）。^[4]图 1.2 是我国 2016—2019 年污泥处理处置技术方式占比情况。

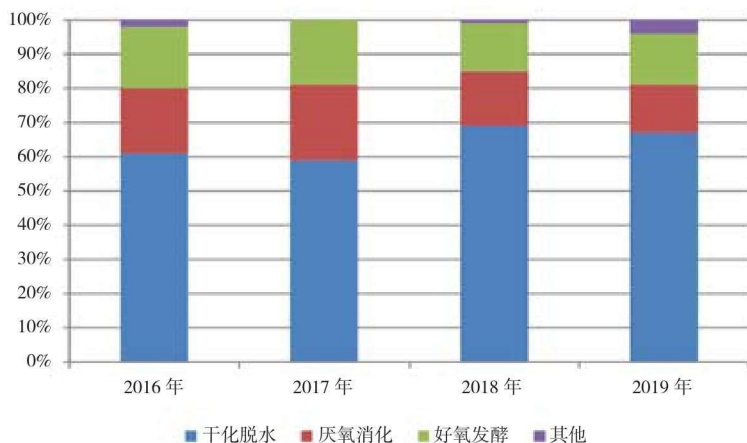


图 1.2 我国 2016—2019 年污泥处理处置技术方式占比

二、国外污泥处理处置现状

(一) 美国

美国每年产生的干污泥总量约 700 万 t，其中 15%~22% 进入同步焚烧系统进行无害化处理。值得一提的是，美国几乎所有的污泥焚烧系统都建在污水处理厂内，污泥无须转运。美国国家环境保护局于 1993 年制定了现行的污泥利用相关条例，Part503 规定了污水、污泥的最终处理处置标准，其中包括一般要求、污染物限值、管理方法和操作标准，规定了土地利用、地表处置或用于焚烧的标准。在不利天气或农田条件不允许污泥土地利用时，每个项目都预备了污泥储存或其他处置的备选方案。因此，污泥土地利用成为一个相对可靠的污泥管理方式。

为了确保污泥土地利用按规定进行，真正发挥有益作用，避免不当利用对水体、土壤和空气等产生的负面影响，美国农业部、食品药品监督管理局和国家环境保护局联合制定了一个政策，要求“利用高质量的污泥（经稳定化、卫生化处理的污泥）必须遵循正确的管理流程，确保消费者避免食用受污染的作物和最小化任何潜在的环境影响”。

(二) 日本

目前，焚烧、熔融、炭化是日本污泥处理处置的主流技术路线，其中干化焚烧占比最高，炭化比例也逐年上升。日本在技术和管理上不断创新，对污泥进行减量化、无害化和稳定化处理，包括能源回收利用（发酵产生沼气、固体燃料等）、建材化利用（制作微晶玻璃、轻质陶粒等）和土地利用

(制作肥料)等资源化利用,对于可持续发展和节能减碳有着重要意义。

污泥处理处置的一个关键问题是处理成本的增加。处于沿海地区的静冈县积极推动废物回收工作,将污泥与其他生物质垃圾综合发酵以获得甲烷,将产生的沼气作为能源对污泥进行干化处理并投入肥料生产。静冈县通过这个项目在污泥处理和其他生物质处理上节约了成本,提高了污泥及垃圾综合处置的经济效率。自投入运行以来,该设施的运行成效较好,也在一定范围得到了推广。

(三) 欧洲

据估计,欧洲每年共产生 1000 万 t 左右的干污泥。其中,欧盟老成员国(15 国)产生 870 万 t 左右的干污泥,欧盟新成员国(12 国)产生 130 万 t 左右的干污泥。从新、老成员国之间存在的人均污泥产量差异可以看出,《城市废水处理指令》在各国之间的实施水平不同。污泥处置路线设计应与《欧盟废物指令》中规定的废物等级制度一致。该制度指出了减少和管理废物的行动优先顺序,即预防、最小化、再利用、回收、能源回收,以及填埋。在欧洲最受欢迎的污泥处理处置方式是污泥的土地利用,这是由《污水污泥指令》规定的。《污水污泥指令》的制定具有双重目的,即保障人类和环境免受污水、污泥在农田中无节制地传播的影响,并促进污水、污泥在土地上的可持续利用。

污泥的能源回收、焚烧和共燃是欧盟老成员国最常见的处理处置途径之一,但其高投资成本会增加市民的负担。近几年,发明了有利于污泥热处理的创新系统,这是通过热解

或气化等途径对污泥进行更有效的能源价值化的前提条件。同时，通过厌氧消化和与其他有机废物共同消化的生物处理方式也得到了应用，特别是在北欧应用最为普遍。《污水污泥指令》为不同国家处理处置污泥提供了很大的灵活性。因此，欧盟每个成员国选择的方法和限制值都有很大的差异。例如，对于污泥中的重金属及其最大年负荷，一些国家设定了指令中的最低限值，而一些国家对某些金属（如汞、铅和铬）的限值甚至比《污水污泥指令》规定的还要低一些数量级。

各国污泥处理处置方法及比例见表 1.1。

各国污泥处理处置方法及比例见表 1.1

方法	美国	日本	德国	法国	西班牙
土地利用 /%	60	9	25	65	52
焚烧 /%	20	65	12	24	7
卫生填埋 /%	12	25	63	11	34
其他 /%	3	1	0	0	7

第二节 政策法规解读

纵观我国政府部门发布的污泥处理处置的相关政策，可以发现 2012 年是一道分水岭。在 2012 年以前，我国政府部门在污泥处理处置工作方面并未有明确和清晰的规划；直到 2012 年，国务院出台了《“十二五”全国城镇污水处理及再生利用设施建设规划》，才首次对污泥处理处置提出明确指标。^[5]