科学通报 2023 年 第 68 卷 第 21 期: 2722 ~ 2736
香山科学会议专栏 评 述
第736次学术讨论会·实现建筑碳中和的挑战与应对技术路径

工程渣土资源化基础问题与低碳技术路径

肖建庄[1,2*], 沈剑羽[1], 段珍华[1], 周永祥[3], 任福民[4], 肖绪文[1]

1. 同济大学土木工程学院, 上海 200092;
2. 广西大学土木建筑工程学院, 南宁 530004;
3. 北京工业大学城市建设学部, 北京 100124;
4. 北京交通大学环境学院, 北京 100044
* 联系人, E-mail: jzxiao@gxu.edu.cn, jzx@tongji.edu.cn

2023-03-17 收稿, 2023-04-21 修回, 2023-04-26 接受, 2023-04-27 网络版发表
国家重点研发计划(2022YFC3803400)资助

摘要 本文针对国内工程渣土排放量大但高附加值利用率低、资源化过程碳排放高等难题, 探究了技术层面的基础问题, 并提出了可行的创新技术路径: 阐明了工程渣土的定义、成分与危害, 并将现有资源化处置技术概括分成4类; 梳理了国内近20年工程渣土的4类处置与资源化技术发展脉络与地区差异, 分析了技术的主要研发与应用方向, 明晰并界定了技术术语; 进一步探明了工程渣土的基本性质, 厘清了直接再利用、简单处理与改良、固化以及烧制4类技术的科学原理. 根据国内工程渣土的处置现状, 深入剖析了工程渣土资源化利用率低在技术层面的基础问题, 分析了资源化处置的减排潜力. 结合我国的碳达峰、碳中和战略, 提出了多路径多场景利用、协同处置、数字化技术赋能等创新性解决路径与高附加值策略, 并建议了具有潜力的低碳新技术以及工程渣土综合利用的低碳技术路径.

关键词 工程渣土, 资源化利用, 低碳固化, 减碳烧制, 数字技术, 协同处置

近年来, 我国持续开展的建设工程产生了大量建筑垃圾, 其中工程渣土占比最大, 增速最快, 且目前资源化率较低. 工程渣土来源于地表修整(场地平整、道路建设、河道航道疏浚等)和地下空间开发(地下建筑、隧道交通、地下储能等), 其中后者是主要来源, 因为开发城市地下空间是解决城市发展中所面临的空间资源紧张问题的重要途径. 工程渣土具有增量/存量大、来源广、成分杂、地域差异大的特征, 其中增量/存量大与资源化率低的矛盾显著, 即工程渣土在短时间内大量产生, 但是处置技术单一, 处置能力弱, 无法在短期内规模化消纳. 对此, 提高其资源化利用率并推动规模化、高品质应用迫在眉睫.

一方面, 土是一种广泛存在的天然资源, 在农业、土木工程等领域发挥重要作用. 土的形成需要漫长的时间, 形成2~3 cm土可能需要1000年(数据来源: www.issas.cas.cn), 因此合理利用与积极保护土资源极其重要. 另一方面, 随着全球气候变化, 中国提出了碳达峰、碳中和("双碳")目标, 而建筑业是碳排放的主要来源, 如2019年建筑业全过程碳排放49.97亿吨, 占全国碳排放50.6%(数据来源: www.baogaoting.com/artical/10390). 在新背景下, 建筑业面临绿色转型, 如针对混凝土的低碳结构设计[1]与低碳材料研发[2]发展迅速. 而工程渣土的资源化与再利用是建筑业减碳的一个新抓手, 通过减少渣土运输与填埋, 降低处置过程中的能耗, 制备再生材料替代天然建材资源, 或者提高围护的节能效果, 均有助于减少碳排放. 因此, 在工程渣土数量

引用格式: 肖建庄, 沈剑羽, 段珍华, 等. 工程渣土资源化基础问题与低碳技术路径. 科学通报, 2023, 68: 2722–2736
Xiao J Z, Shen J Y, Duan Z H, et al. Basic problems and low-carbon technical path of construction spoil recycling (in Chinese). Chin Sci Bull, 2023, 68: 2722–2736, doi: 10.1360/TB-2023-0245

© 2023《中国科学》杂志社

庞大、处置需求紧迫的背景下，工程渣土资源化的减排潜力巨大, 是当前研究的重点之一, 尤其是对工程渣土资源化技术的减碳机制、黏土基绿色再生建材以及渣土自身固碳能力的研究较少.

本文旨在通过对工程渣土问题进行系统梳理，了解国内研究与处置的现状，分析工程渣土资源化的基本问题, 并提出针对性建议.

1 工程渣土与资源化技术概述

1.1 工程渣土的定义

工程渣土是在建筑、道路、地铁、水利等土木工程活动中产生、主要成分为土的建筑垃圾. 不同文献对工程渣土的定义存在细微差异，但以下两点是被广泛认可的: (1) 来源为土木工程类的人类活动, 具体涵盖建筑、道路、轨道、隧道、管廊、桥梁、港口、运河等建筑物、构筑物的建设、修缮、拆除活动以及河道、航道的疏浚; (2) 主要成分为土.

根据定义，工程渣土不包括因其他工业、采矿业、冶金业等活动而产生的废弃物，如赤泥、煤矸石、各类尾矿、市政污泥等，也不包括因自然灾害(地震、山体滑坡、泥石流等)而产生的渣土. 据初步推算, 全国建筑垃圾年产生量超过30~35亿吨, 其中工程渣土(含泥浆)约占70%, 且目前主要产生在我国沿海城市[3].

1.2 工程渣土的成分与地域差异性

工程渣土中除土壤外，可能含有砂、石、混凝土、砖瓦陶瓷、木材、塑料、金属等杂质，成分复杂. 杂质的类型及数量与工程类型相关，例如盾构渣土常含膨润土、泡沫剂、高分子聚合物[4]，部分地基开挖的工程渣土则是含废混凝土、废砖、木材、塑料等杂质的杂填土. 此外, 土壤自身的颗粒级配、化学成分以及矿物组成都会随挖掘位置与深度而变化，这与土壤的地质背景和风化程度有关. 其中, 黏土矿物含量与组成的不确定性对工程渣土物理化学性质的波动产生巨大的影响. 黏土矿物是由部分非黏土矿物进一步风化后产生的, 其颗粒粒径极小(≤2 μm), 为片状结构, 一般平面带有负电荷, 而边角处带有正电荷, 可以吸附水分, 其中蒙脱石的湿胀干缩现象最明显. 因此, 工程渣土自身的成分与性质，以及其所含的杂质会随地域空间的不同而发生变化，该性质称为工程渣土的地域差异性. 然而，目前尚无对工程渣土地域差异性开展相关研究的文献.

1.3 工程渣土的危害

工程渣土的危害一般由不合理的堆存或随意倾倒而引发, 主要包括水土流失[5]、土壤污染、水污染、空气污染(扬尘)[6]、淤积河道、填塞航道等，甚至还会造成严重的工程安全事故，如泥石流、边坡失稳、山体滑坡[7].

1.4 工程渣土的处置技术

工程渣土的处置与资源化利用技术主要包括直接处置与再利用、简单处理与改良、固化以及高温烧制4个主要类别. 其中，直接处置与再利用基本不改变土的本质, 最终仍然作为土来使用, 主要包括填埋、填海造陆、填筑路基/地基/堤坝、堆山造景[8,9]、耕植土等. 简单处理与改良则通过物理方式改变渣土的性质，以满足应用需求，主要包括破碎、筛分、研磨、脱水、复配[10]、改良[4,11]等. 固化技术为通过胶凝材料来黏结土颗粒，根据产品形式主要分为固化土[12]、流态固化土[13]、冷黏骨料和免烧砖[14]. 此外，还包括近年来发展较快的水热合成技术[15,16]，主要产品如蒸压硅酸盐骨料、黏土蒸压砖等. 高温烧制技术则通过高温使土发生物理化学变化, 进而使土颗粒自身发生黏结, 根据产品形式分为烧结砖[17]、陶粒[18]、煅烧黏土[19,20]和陶瓷[21]等. 以上技术的国内研究现状将在第2节中讨论, 其技术原理则在第3节中讨论.

2 国内近20年研究现状与问题

2.1 研究现状

为了解目前国内对工程渣土处置技术研究的积累与现状, 我们调查了国内近20年的相关文献, 文献发表时间为2002年1月~2022年12月. 为简化步骤, 审查关键词为“工程渣土”与“工程弃土”, 实际搜索发现, 结果涵盖了“建筑”“盾构”“弃土”“渣土”“泥浆”“淤泥”等相关关键词. 对搜索结果进行精炼, 去除工、矿业产生的废弃物. 文献涵盖研究类与综述类, 并按照文献所涉及的相关工程渣土处置技术进行分类，总计639篇文献. 部分文献运用或推荐了多种处置技术，因此统计处置技术词频时可能会被重复计算. 针对部分渣土收纳场的水土流失、边坡稳定的研究文献，尽管未推荐“渣土收纳”这一处置方式，但侧面证实了该处置方式在国内的

普遍性, 因此也被计算在内.

2.1.1 研究数量与技术词频

图1为国内近20年的工程渣土相关研究文献数量与处置技术词频分析, 可以看到, 文献数量在2009年小幅增加(上海世博会带动固化土技术发展), 并在2015年的深圳渣土收纳场滑坡事故后快速增长. 所有技术中, 直接再利用一直是研究重点, 但近年来, 其他3类技术的研究数量开始快速增加. 此外, 随着时间推移, 处置技术词频数量明显超过了文献数量, 这是因为该时期的部分文献推荐了多种处置技术, 说明当前的研究开始更加注重多种技术的综合使用.

图2分别对4类处置技术的具体内容展开词频分析, 可以看到, 整体上4类技术在国内的研究数量都呈现逐年增长的趋势. 对于直接处置与再利用, 处置整体上仍以堆弃和填埋为主, 再利用以土方填筑为主(路基、地基、堤坝、填海等), 而堆山造景以及种植土这类高值化利用技术的相关文献数量较少. 对于简单处理与改良技术, 主要为地铁盾构施工时在不同地层条件下渣土的改良技术. 而其他的简单处置技术如筛分、脱水开始在近几年受到关注, 特殊的也有将成分合适的工程渣土研磨后, 作为混凝土掺合料的研究. 固化技术主要为工程渣土经稳定/固化后, 作为路基或地基材料以及免烧砖, 而流态固化土、冷黏骨料等技术的研究数量近几年开始增加. 高温处理的烧制技术则主要以烧结砖与烧结陶粒为主, 近年来新增煅烧渣土作为混凝土掺合料的相关研究.

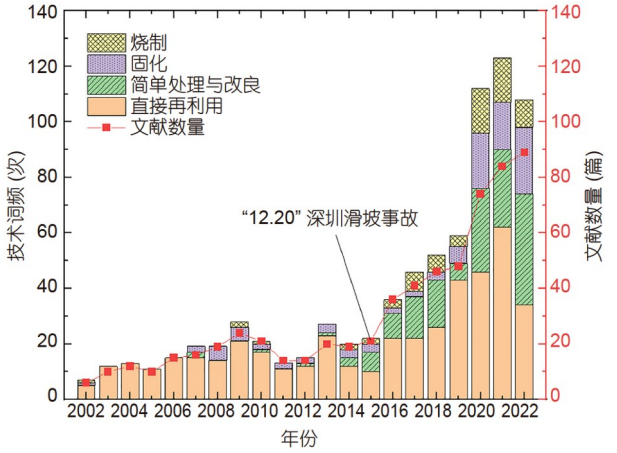


图 1 近20年工程渣土相关文献数量与处置技术词频分析

Figure 1 The number of references related to construction spoil and word frequency analysis of reuse technology in recent 20 years

2.1.2 研究数量地域分布

通过梳理国内工程渣土资源化研究的地域分布特点, 可以侧面反映出国内工程渣土处置的地域现状, 揭

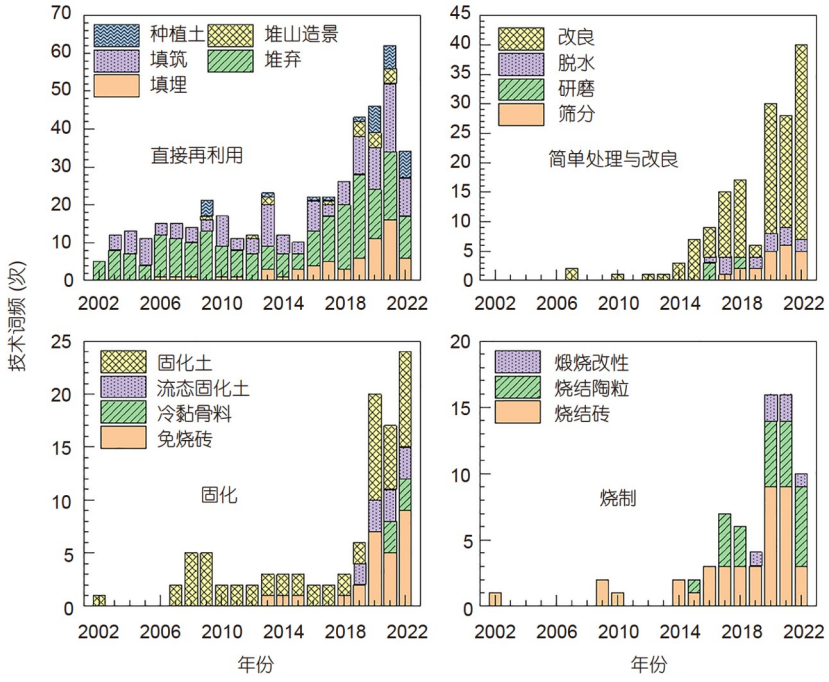


图 2 近20年工程渣土具体处置技术词频分析

Figure 2 Word frequency analysis of reuse technology of construction spoil in recent 20 years

示其地域差异性特征. 地域信息来源为文献正文直接描述的工程渣土处置所在地或者实验室测试工程渣土样品的来源地, 若无相关说明, 则不做记录. 调查发现, 对工程渣土的研究主要集中在沿海地区, 其中广东省的研究数量最多, 超过100篇. 图3为针对研究数量最多的5个省市所采用的处置技术的调查, 可以看到, 各地处置渣土仍以直接处置与再利用为主, 其中上海市的直接利用少, 固化技术多, 且无烧制技术研究. 这是因为上海堆弃渣土场地少, 烧结砖厂清零, 同时上海地质条件差, 因而基本采用固化土技术进行填筑路基. 而河南省的烧制技术研究较多, 这可能与内地对烧结制品的市场需求有关. 从平均每篇文献对应的技术词频数来看, 广东(1.45)、浙江(1.39)和江苏(1.48)的研究对多技术综合利用相对更重视.

2.1.3 应用场景

图4为采用不同工程渣土资源化技术处置后的应用场景, 可以发现, 通过高温烧制后的渣土一般都成为建材或者混凝土掺合料, 均为高附加值的利用场景; 通过固化技术处理工程渣土, 主要用于路基和地基建设、建材以及回填料; 简单处理与改良技术除在盾构渣土改良中应用最广泛外, 主要作为中间产品, 用于进一步的资源化利用, 如高温烧制或者固化; 而直接处置与再利用的应用场景复杂, 除堆弃在渣土场外, 填埋、填海、路基、地基、堤坝、堆山造景和种植土均是直接利用的常见应用场景.

2.2 目前研究存在的不足

2.2.1 技术术语不统一

国内对工程渣土的称呼不统一, 通过文献分析发现, 使用的名称包括工程渣土、工程弃土、废弃泥浆、建筑渣土, 以及深圳市最常用的余泥渣土等. 目前, 国内标准主要使用工程渣土. 工程渣土在国外文献也暂无确定名称, 土可以使用earth、soil、clay、mud、muck、sludge、silt、slurry等, 或采用waste、spoil、slag等表示固废的词, 而工程则可采用construction、building、engineering等, 二者组合就会产生多种变化. 如在英国, 工程渣土被称为ground engineering spoil, 其中spoil指代“earth、soil and other ground materials brought up in excavating、dredging, etc.”[22]. Xiao等人[8]则采用了construction spoil.

为了后续研究的便利, 需要统一和规范用语, 并能准确描述其定义. 第1.1节中的定义强调了工程渣土的

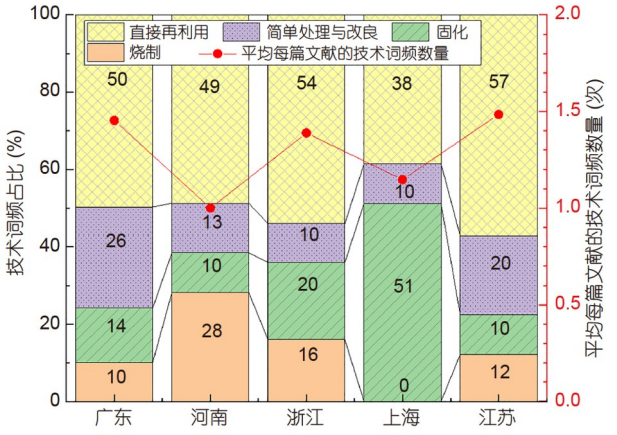


图 3 国内部分地区的工程渣土处置技术词频分布与单位文献技术词频数

Figure 3 Word frequency distribution of construction spoil disposal technology and word frequency of unit literature in some regions of China

来源与主要成分. 首先, “土”的含义更广泛, 如泥浆其实只是含水率更高的土. 其次, 工程渣土来源广泛, 涵盖建筑、地铁、道路等, 因此采用“工程”描述来源更为恰当. 综上, 工程渣土或工程弃土是最恰当的描述, 这是文献调查时仅采用此二者作为关键词的原因. 而二者的区别在于, 对“渣”与“弃”的认识上, 前者强调成分杂, 是客观描述, 而后者强调被丢弃, 是主观描述. 但是弃土排放数量会因为处置者能力的不同而发生变化, 如道路工程产生的工程渣土有部分被直接应用于路基填筑, 而无法被利用的部分才会被丢弃. 若强调“弃”, 则显然遗漏了被现场资源化利用的那部分渣土. 工程渣土与工程弃土的关系如图5所示, 二者的资源化利用率计算方法也存在差异, 如式(1)~(3)所示.

$$E_1 = R_1 + E_2 = R_1 + R_2 + E_3, \tag{1}$$

$$r_1 = \frac{R_1 + R_2}{E_1} = 1 - \frac{E_3}{E_1}, \tag{2}$$

$$r_2 = \frac{R_2}{E_2} = 1 - \frac{E_3}{E_2}, \tag{3}$$

其中, r_1是工程渣土的资源化利用率, r_2是工程弃土的资源化利用率. $r_1 \geq r_2$恒成立, 这主要是由于r_1计算了现场再利用的量R_1.

2.2.2 对工程渣土基本信息重视不足

对工程渣土的研究应考虑其地域差异性, 当采取相同的资源化处置技术(包括工艺、配方等)时, 使用不同成分与性质的渣土, 会影响最终的处理效果. 研究造成这种差异的机理是有意义的, 但是直接开展系统的

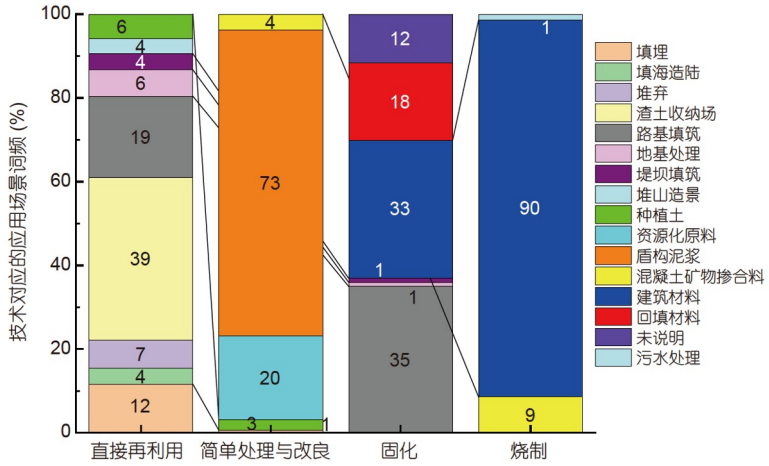


图 4 不同资源化技术处置后的应用场景
Figure 4 Application scenario after disposal of different technologies

试验研究所需工作量较大，而通过对既有文献数据的对比分析是一种简便可行的方法. 但是部分文献对工程渣土的工程来源、产生地区缺少记录，大部分文献缺少工程渣土的颗粒级配、液限、塑限、塑性指数、矿物组成、化学组成等基本信息. 部分信息可以在工程项目的地质勘查报告中找到，充分利用已知信息可以减少资源的浪费. 文献提供充分的信息，可以为后续学者的研究提供巨大的帮助，有利于帮助建立关于工程渣土地域差异性的数据库. 因此，建议在未来的研究中，应加强对工程渣土的来源与基本性能的检测和表征.

2.2.3 缺少对成本与碳排放的描述

当前多数文献缺少对处置技术成本与碳排放的描述，从推进工程渣土资源化与助力“双碳”战略的角度考虑，当推荐某种工程渣土的处置技术时，适当提供其碳排放与经济成本数据，可以使领域内的技术人员或学者更好地横向比较不同方法的优劣，同时可以有效评估技术的可行性.

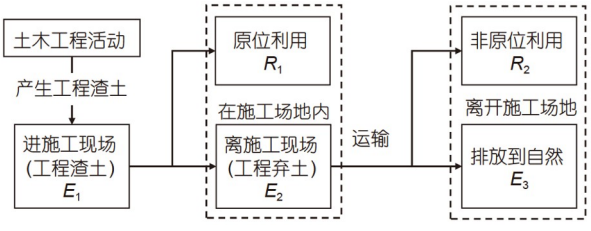


图 5 工程渣土与工程弃土的关系
Figure 5 Relationship between construction spoil and abandoned construction spoil

2.2.4 对资源化技术的科学原理讨论较少

部分文献对工程渣土处置技术背后的物理、化学反应机理的研究与讨论较少，本文对4类处置技术的原理进行阐述，希望能为研究者提供帮助.

3 工程渣土资源化处置技术原理

3.1 土的基本性质

去除杂质与砂石骨料后，工程渣土的成分和性质与土相似，而土的基本性质决定了处置技术的选择和处置后获得的效果. 土中无机固相物质的成分为各类矿物晶体，其中矿物晶体种类与成土母质的类型相关. 黏土矿物最特殊，是岩石风化的最终产物，具有极小的颗粒细度(≤2 μm)与较高的物理化学反应活性. 而非黏土矿物的性质则较稳定，如研究发现，0.15~2.36 mm渣土(黏土含量低)可以替代30%~50%的天然砂制备砂浆[23].

高岭石、蒙脱石、伊利石是工程渣土中常见的黏土矿物. 黏土矿物结晶结构主要由硅氧四面体与氢氧化铝八面体组成. 前者为中间1个硅原子与4个氧原子组成四面体，通过共享氧原子构成联结；后者则由中间1个铝离子和6个氧原子或氢氧根离子等间距排列而成，通过共享边缘形成联结，构成六边形对称的晶格[24,25]. 高岭石的晶体结构稳定，层电荷与碱交换容量最小[26]，层间依靠氢键和范德华力增强联结[27]，因此其膨胀性与压缩性较小. 蒙脱石晶体与伊利石的晶体结构相似，但后者在四面片体之间的六角形网格眼中嵌有一个钾

原子[25]. 蒙脱石的结构单位层间的联结力很弱, 容易被极化水分子楔入而分开, 而八面体的Al^{3+}易被低价阳离子置换, 导致出现多余负电荷, 进一步吸附阳离子(如Na^{+}、Ca^{2+}), 并吸引极化水分子形成水化阳离子进入结构单位层, 使层间距增大, 因此蒙脱石的膨胀性与压缩性极大. 而伊利石由于晶体结构层间存在钾离子, 层间联结较蒙脱石牢固, 但弱于高岭石, 因此膨胀性与压缩性也介于二者之间.

3.2 直接再利用技术

直接再利用技术中, 填筑路基、地基、堤坝以及堆山造景, 其目的均为实现土的稳定堆积, 需要进行压实. 在压实过程中, 通过固结排水减小孔隙水压, 使土颗粒紧密堆积, 一般在最佳含水率时可以达到最大压实度. 实际工程中通常按照土的工程分类判断其可用性, 粗砾石、粗砂、砂性土等无黏性土在密实状态下具有较高的强度, 且结构稳定, 压缩性小, 是作为路基、地基等结构建设的优质材料. 而黏性土由于其可塑性、膨胀性、吸水保水等特性, 是路基、地基等建设的劣质材料. 工程渣土的成分复杂, 其工程性质由其成分决定, 尤其是黏土含量, 因此可以通过黏土占比初步判断土样作为基础材料的可行性[28].

工程渣土除在土木工程领域内应用外, 也可以在农业领域应用, 如耕植土. 作为耕植土时, 要求土体无环境污染、具有保水能力、有机质与营养含量达标、酸碱度适中. 其中保水能力是黏性土的特质, 而其余性质可以是天然具有的(如地表土[29]), 或可以通过改良剂进行改良[30].

3.3 简单处理与改良技术

简单处理与改良技术的原理较简单, 通过破碎、筛分、研磨、脱水、复配、改良等物理方法改变工程渣土的颗粒级配、含水率等, 使其可以被再利用, 或者作为固化或烧结的原材料. 其中脱水、复配和改良技术与黏土对水的吸附作用相关, 因此黏土含量是重要的影响因素. 黏土含量越高, 脱水难度越大, 成本与能耗越高. 复配是将多种不同的工程渣土按一定比例混合而改变其组成与性质的技术, 应用于工程渣土制备烧结砖时, 可调控其可塑性与干燥敏感性等性质[10,31], 这主要是因为改变了黏土与细骨料的含量. 而改良技术主要是通过膨润土、黏土、泡沫剂、水、羧甲基纤维素、砂子以及其他添加剂[4,11]等改良剂改善盾构渣土泥浆的性质. 其中膨润土是高纯度的蒙脱石, 具有良好的水化和分散性能以及较强的泥浆制造能力, 是制备泥浆最常用的材料[4], 主要应用在砂土层、卵石层等缺少黏土的地层中[32,33]. 而富含黏土的地层通常仅采用泡沫剂[34,35], 这是因为渣土自身的黏土矿物足以形成泥浆. 因此, 已经被排出泥浆循环系统的渣土(如含有蒙脱石的泥饼)也可以被用作改良剂[36].

3.4 固化技术

固化技术是使用胶凝材料使土从碎散的颗粒聚合为稳定的整体. 由于黏土自身具有黏聚力, 因此土颗粒的黏结作用由黏土的黏聚力和胶凝材料通过硬化建立的黏结共同组成, 胶凝材料掺量越高, 后者的作用越明显, 固化后的强度和水稳定性越好. 固化可采用的无机胶凝材料包括石灰、水泥[37], 或者冶金渣、粉煤灰[38~40]、脱硫石膏[41]、电石渣与赤泥[42]等工业固废制备的岩土固化剂[13]. 近年来, 采用地聚合物作为胶凝材料[43~46]受到更多关注, 成为新型渣土固化剂的一类. 这主要因为地聚合物的物理力学性能优异, 化学性质稳定, 能够再生利用工业固废, 且具有更低的碳排放[43,46]. 同样, 具有较好环境效益的水热合成技术, 其原理为在180~220°C与0.8~1.6 MPa的环境下, 使渣土中大量存在的SiO_2和Al_2O_3与通过配料加入的CaO发生水热合成反应来固化渣土, 生成托贝莫来石($5CaO·6SiO_2·5H_2O$)为主的物相, 大幅提高强度和水稳定性. 由于减少了熟料的使用, 因此, 水热合成或者采用活性固废通过碱激发固化工程渣土属于低碳固化技术, 是未来的发展趋势.

固化土的反应原理与混凝土相比, 一方面, 土的比表面积远大于混凝土骨料, 对胶凝材料的需求量更大; 另一方面, 黏土矿物的强吸附作用会对发生在孔隙水溶液中胶凝材料的水化反应及其水化产物的微结构产生影响. 具体来说, 首先, 黏土矿物(尤其是蒙脱石)会吸附孔隙水溶液中的极化水分子, 被吸附的水无法参与水化反应, 会减小有效水灰比(或液固比), 降低混合物的流动性. 其次, 黏土矿物的阳离子交换作用会吸附孔隙水溶液中的Ca^{2+}离子, 释放Al^{3+}, 影响水化产物的生成. 再次, 黏土颗粒会在高价阳离子的吸附作用下发生絮凝[43], 进一步增大稠度, 降低流动性. 最后, 黏土矿物(尤其是蒙脱石)的静电吸附与化学插层作用会严重降低高效减水剂的分散效果[26]. 因此, 在有大流动性要求的固化土中添加黏土分散剂, 可防止因土颗粒絮凝导

致的稠度与屈服应力增加，避免直接加水改善流动性所造成的强度降低与干缩开裂的风险增加[47]. 常用的黏土分散剂有六偏磷酸钠(HMP)、羧甲基纤维素(CMC)、硅酸钠(Na_2SiO_3)或聚丙烯酸(PAA). 这些添加剂的用量一般很少(约土的0.5%，重量百分比)[47,48]，且对其他土壤成分也有效[48,49]，对强度的影响较小.

成型方式也会影响加水量. 制备固化土、冷黏骨料、免烧砖的加水量较少，一般液固比为10%~15%[41,50~52]，因此强度较高. 而需要高流动性(160~200 mm)流态固化土的加水量较多，根据渣土与胶凝材料的不同，液固比约为25%~50%，且28 d抗压强度一般低于1 MPa[11,53]. 流态固化土具有低强度、自密实的特性，是一种可控低强度材料(controlled low strength material, CLSM).

3.5 烧制技术

烧制技术的原理是工程渣土(主要是黏土矿物)在高温下发生一系列物理化学变化. 低温热处理可以去除黏土矿物夹层中的水分，导致结构水脱水，结构水脱水之后是黏土矿物脱羟基过程，脱羟基导致黏土矿物的层结构塌陷，形成无定形结构. 此时，黏土矿物具有最大的火山灰反应性，这是煅烧黏土增强活性的机理. 继续升高温度，则导致无定形结构的顺序恢复，火山灰反应活性降低，并导致新的不同结晶相或玻璃化形成[54]，即烧结砖与陶粒的强度形成机理，如图6所示. 煅烧改性所需的温度较低，一般为600~800°C[55,56]，此时主要反应为结构水脱水，少量无定形结构生成，可取代20%~30%的水泥，并保持75%~85%的强度比[55,56]. 烧结砖/砌块一般需要800~1100°C[17,57]，烧结陶粒的温度为1100~1300°C，但需要先在500°C下预烧15~20 min[58,59].

未煅烧渣土的主要作用为填充孔隙，但其自身无活性，且黏土矿物会对水化反应产生不利影响，同时降低流动度. 煅烧后的渣土除填充作用外，还生成新的偏高岭土与无定形组分[19]，具有火山灰活性，且煅烧温度越高，对水泥或混凝土强度的不利影响越小[55]，可作为辅助胶凝材料(supplementary cementitious materials, SCMs)[60]或者地聚合物的前体[20]，因此通过煅烧活化渣土并部分取代水泥是一种减碳烧制技术. 继续提高烧结温度时，黏土矿物熔融形成流动的玻璃相并填充骨架孔隙，提高结构密实度，能大幅提高强度，同时可以通过阳离子交换或者物理包裹作用有效固定游离重金属[61~63]. 无玻璃相形成时，主要为土颗粒间的固相反应，存在较多孔隙，颗粒联结不强，因此烧结后的强度也不高. 较高的温度为烧结过程提供了反应条件，但也造成了更高的碳排放. GB/T 51366-2019中烧结砖的碳排放因子为250 kg CO_2e/m^3，而研究显示，碳排放的主要来源为燃料释放[64,65]，然而烧结建材的需求依然较高，因此在未来发展减碳烧制技术尤为重要. 除了采用工程渣土作为烧结原料可以降低碳排放[66]，另外主要通过降低制备过程的能耗与碳排放(包括添加内燃料、助熔剂、余热回用等)，或者采用清洁能源(如电力、生物质燃料)替代化石燃料[8]，以及制备更高强度、更好保温隔热性能的高品质墙体材料来实现节能减排[8].

4 国内处置现状与基础问题剖析

4.1 国内处置现状

第2节表明，国内工程渣土资源化利用技术已较丰富，但实际上国内能够规模化、高品质地处置工程渣土的情况较少. 以广西平陆运河[67]为例，运河开挖总共产生约2.2亿m^3渣土，除砂石骨料(约8.5%)、填海造地(约16.0%)和建造防洪堤(约3.4%)的部分外，剩余约1.6亿m^3渣土(约72.0%)堆弃在渣土场，未能再利用. 更普遍的情况为产生工程渣土的施工现场通常只有直接再利用的能力，其余处置技术受制于场地、设备、成本、环保等因素，综合考虑下可行性不高，有时低于渣土外运，然而渣土收纳场的容量存在客观极限. 另外，工程渣土资源化再生产品自身品质不高，缺乏竞争力导致销售受阻也是阻碍其资源化率提升的重要原因.

因此，国内工程渣土处置现状是渣土持续大量产

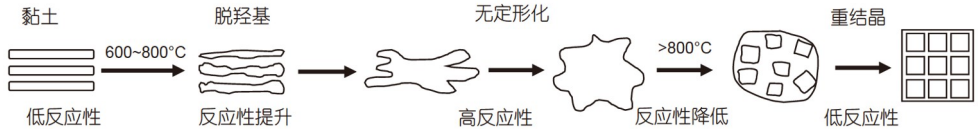


图 6 黏土矿物热处理的不同阶段反应活性示意图[54]
Figure 6 Schematic diagram of reaction activity of clay minerals at different stages of heat treatment[54]

生与现场资源化处理能力不足、集中处置尚未形成体系之间的矛盾. 如图5所示, E_1过大, 而R_1与R_2较少, 导致E_3过大, 对环境压力过大. 对此, 一方面需要提高现场处置能力即R_1, 另一方面则是建设工程渣土资源化厂, 即提升R_2. 解决问题涉及技术、管理、标准、政策等多个方面, 其中技术层面的问题是最基础的.

4.2 基础问题剖析

4.2.1 容纳空间不足

在建筑垃圾中, 空间占用问题是工程渣土特有的, 对应其增/存量大的特征. 我们广泛认可“垃圾是放错位置的资源”, 而空间占用问题的本质在于, 在思考如何将垃圾放在“正确的位置”之前, 首先需要考虑是否有充足的“正确的位置”去容纳它们. 工程渣土主要来源于人类工程建设和对城市地下空间的开发与利用, 这是城市发展的必经之路. 在这个过程中, 人类占据了原本属于土体的地下空间, 那么产生的工程渣土必然会等量地占据人类的地上生存空间. 而且, 考虑到原状土初始处于高度压实状态, 而大多数资源化处置技术都很难达到相同的密实度, 因此渣土将最终占据更多的空间体积. 在过去的研究中, 工程渣土在处置过程中的体积变化很少受到学者的调查, 一方面是关注度不够, 另一方面是体积变化通常不明显. 因此, 如果存在某种技术能够将工程渣土的体积大幅缩小, 那么它将会获得广泛的应用, 然而目前还未发现这样的报道.

4.2.2 需求端分析不足

需求端分析不足是空间占用问题的延伸. 在图5中, E_1过大是客观事实, 减小E_3是最终目的, 空间占用问题表明R_1存在较低的客观上限(不仅是施工场地内空间不足, 有时城市自身的空间也不足), 因此提高资源化率主要通过提高R_2, 即资源化厂的处置能力. 资源化厂需要将垃圾制成再生产品后, 完成销售且实现盈利, 其中后者往往更关键. 而影响销售的关键因素是再生产品的性能与价格, 目前再生产品在这方面的优势并不明显. 但实际上, 低性能的再生产品不一定没有应用场景, 特殊应用场景下的再生产品存在研发空白, 而高性价比的单一产品也存在需求上限. 因此, 比提升性价比更关键的是挖掘再生产品的市场价值, 这需要对需求端开展研究分析. 然而在过去的研究以及实际处置工程中, 对渣土及其再生产品的需求分析往往是不充分的, 由此导致的问题是终端的消费不顺畅, 资源化产业发展受阻, 难以形成完整的资源化产业链.

4.2.3 处置成本较高

成本是技术可行性的关键因素之一, 而成本包括经济、劳动力、时间等关键指标. 以工程渣土资源化再生产品为例, 低成本的技术会使再生产品的品质降低, 进而缺少市场竞争力. 而提升再生产品的性能往往会导致成本的快速增加, 进而降低产品性价比. 如何保持二者之间的平衡, 则需要开展持续深入的研究.

4.2.4 对环境影响考虑不足

环境影响也是技术可行性的关键因素之一, 尤其是工程渣土资源化全过程产生的碳排放, 粗放式的处置方法会造成大量的碳排放, 对环境造成影响. 环境影响可通过生命周期评价(life cycle assessment, LCA)进行全面考察[8]. 除减少碳排放外, 技术的吸碳与固碳能力也是重要的衡量标准, 目前关于该方面的研究不多. 下面以工程渣土运输与处置的减碳、土壤自身的固碳以及再生建材提升围护的节能效果为例, 对工程渣土资源化利用的减碳潜力进行简单评估.

通过工程渣土的现场处置与原位利用可以降低成本与碳排放. 以湖南省长沙市某盾构地铁项目为例, 平均每日产生渣土约300 m^3, 若全部运输至渣土收纳场(距离约50 km, 采用重型卡车, 根据GB/T 51366-2019, 其运输碳排放因子为0.057 kg CO_2e t^{-1} km^{-1}), 运输成本约为5.4万RMB/d, 碳排放量为1710 kg CO_2e/d, 而城市化程度越高的城市将需要更远的运输距离, 并产生更多的碳排放. 图7为工程渣土通过部分资源化途径产生的碳排放减少潜力(数据源于文献[66]). 可以看到, 即使是制备隐含碳排放最高的烧结砖, 采用工程渣土作为原料依然能够减少可观的碳排放. 此外, 工程渣土资源化利用还可以减少填埋造成的空间占用, 以及采用天然黏土原料造成的资源消耗.

土壤自身具有巨大的固碳潜力, 土壤碳汇包含有机碳汇和无机碳汇. 前者主要通过植物光合作用形成有机物质, 被破碎、分解、转化为矿质土中的有机碳, 是土壤碳汇的主要部分. 后者主要通过大气二氧化碳转化形成土壤中的原生矿物或次生矿物(钙或镁的碳酸盐), 多为干旱、半干旱区土壤碳库的主要形式, 其吸碳机制包括大气输送、碳酸盐溶解和包气带土壤水渗滤作用. 工程渣土的填埋或临时堆填通常被认为是初级的处置技术, 但其吸碳固碳的潜力往往被忽视, 通过对堆填场地进行复垦, 可以有效利用土壤固碳的能力, 这已在矿区复垦工作中被证实[68,69]. 土壤固碳能力随复垦时间增加而增强, 土壤有机碳封存可达1.71

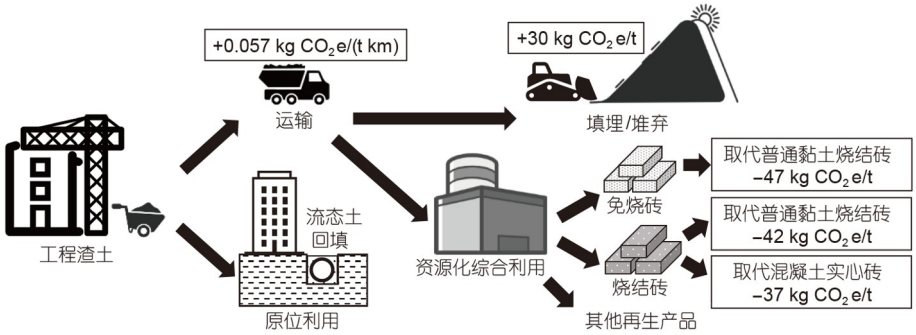


图 7 工程渣土资源化利用的减排潜力示意图
Figure 7 Diagram of the carbon emission reduction potential of the resource utilization of construction spoil

Mg C ha^{-1} a^{-1}, 每公顷土地每年约封存6.27 t二氧化碳, 而总生态系统碳库则每年每公顷可达13.63 t二氧化碳[69], 因此除减少填埋外, 也应对已填埋场地进行充分利用. 更进一步, 堆山造景具有规模化利用、低成本、低碳排放、不改变土壤性质的优势, 同时也建设了一个土壤有机碳库, 其环境效益显著. 另外, 建立人造山体公园, 还可以充当防灾公园与疏散公园.

另外, 由于近一半的建筑碳排放产生在运行阶段, 因此提高建筑围护结构的节能效率也同样重要. 生土建筑的导热系数可低至0.25 W/mK[70], 而且其具有优异的热惯性. 此外, 可以通过原位利用减少运输消耗, 原材料隐含碳排放约22 kg CO_2e/t[71], 远低于传统建材. 高品质的烧结砖, 其导热系数可达0.1 W/mK[8], 也具有良好的保温隔热性能.

5 解决办法与低碳技术路径

5.1 多路径利用与多场景应用

因为单一应用技术的处置能力存在客观限制, 因此针对容纳空间不足与缺少需求端分析的问题, 需要开展多路径利用与多场景应用的研究工作. 可通过开发新需求及其对应的应用空间, 从而提高工程渣土总利用量, 实现资源化率提升. 尤其是针对工程渣土的原位利用, 多路径利用与多场景应用可以有效增加原位利用率, 减少运输渣土产生的额外碳排放与成本. 为便于理解, 以废弃混凝土制备再生混凝土为例, 2021年商品混凝土产量为329330万m^3(数据来源: www.ccpa.com.cn), 约73亿吨, 远远超出废弃混凝土的年产生量, 因此即使将其全部用于生产再生混凝土, 在理论上也是可行的, 且这些需求不包括道路水稳层或者优质填埋料的需求量. 若工程渣土年产生量为30亿吨[3], 全部制成烧结砖, 且制备过程质量损失10%, 空心砖密度为900 kg/m^3, 则每年需新增30亿m^3烧结砖, 约2万亿块标准砖, 远高于全国8100亿块标准砖的年产量[72]. 综上, 可以发现, 单一的需求量可能远小于工程渣土的产生量, 因此只有当多种需求同时存在时, 才有可能规模化消纳工程渣土, 实现资源化率的提升. 多路径利用与多场景应用的应用领域包括建筑、工业(如水泥原料)、农业(种植土)、矿业(如矿坑回填土)和环境工程(如垃圾填埋厂上覆土)等.

5.2 协同处置

利用建筑垃圾之间或者建筑垃圾与其他垃圾之间存在的相似性(如渣土中的砂石料类似再生骨料)或互补性(如工业固废作为胶凝材料(岩土固化剂)固化渣土)开展协同处置, 可以充分发挥垃圾的资源化潜力, 同时降低原料消耗与碳排放, 在综合处置产业园中具有一定的可行性. 协同处置的潜力巨大, 且内容丰富, 可以持续开展深入研究. 如采用渣土与再生混凝土骨料制备混凝土[73]; 采用再生玻璃粉末制备地聚合物固化渣土[74], 而再生砖粉与再生混凝土粉末也具有制备地聚合物的潜力[75], 同样可以用于协同处置工程渣土; 采用煅烧渣土[19,76]取代部分水泥, 可在减少水泥用量的同时, 降低处置成本与碳排放. 另外, 根据初步的研究工作, 采用工、矿业废渣协同工程渣土, 通过水热合成技术制造硅酸盐骨料, 可以发挥级配和粒形优化、内养护等作用, 实现水泥用量的降低和混凝土性能的提升, 进而减少碳排放.

5.3 数字化技术赋能

由于工程渣土具有显著的地域差异性(如1.2节所述), 会对工程渣土的资源化处置造成一定的阻碍, 除了

预先均化外，采用数字技术是一个可行的方法. 首先，在产生渣土的工程开展前，利用地质勘探的资料(尤其是地质调查报告)建立地下土层的数字模型，模型将记录不同深度与位置的土壤信息. 其次，这些信息有利于设计即将产生的工程渣土的资源化路径，若有可能，甚至可以从有利于工程渣土资源化的角度，调整工程的规划与设计，优先挖掘高价值或者有市场需求潜力的土(如稀土、高岭土、卵石、砂砾等). 然后，基于数字模型，可以在有条件的情况下开展有计划的分层挖掘，避免不同层的土相互混杂. 最后，根据已获取工程渣土的成分与性质信息，组建渣土数据库，有利于开展更精细的资源化利用. 总之，数字化技术的支持有利于工程渣土资源化行业往更智能、更高效的方向发展，也有利于降低工程渣土资源化全过程的碳排放.

5.4 开发新应用场景以及新技术

为支撑多路径技术与多场景应用，降低资源化过程的碳排放，开发与绿色建造和智能建造相结合的新技术与新应用场景是必要的，下面介绍两种具有潜力的资源化技术.

(1) 再生生土建筑. 生土作为建材已有数千年历史，至今仍有广泛应用[47]. 生土的环境影响非常低[77,78]，且具有更好的湿热性能[79]，是一种绿色建筑. 生土建筑的强度与耐久性(主要是水稳定性、抗冻融性)[80]是主要局限，但是通过植物纤维、黏合剂(水泥、石膏、石灰等无机黏结剂)，或者生物聚合物(植物提取物、动植物油脂、血液、动物奶、粪便)可以改善这一特性[81]. 另外，生土建筑的形式丰富，包括夯土、土坯、窑洞、cob等[47,82]，可以适应多种应用场景. 利用合适的工程渣土制备再生生土建筑，在城市郊区或者乡镇地区具有应用潜力，且相对钢筋混凝土具有更低的碳排放.

(2) 3D打印土建筑. 3D打印技术与生土建筑的结合很有潜力[83]，尤其是3D打印cob[70,84]. 3D打印可以减少生土建筑的劳动密度，并获得比传统土墙更好的热性能[70]，符合绿色建造与智能建造的理念. 在文献[83,84]中，不同的材料与打印参数均实现了有效打印. 3D打印土的可打印性、可建造性是可调节的，因此在适合的情况下，利用工程渣土开展生土建筑的3D打印具有一定潜力.

5.5 综合利用低碳技术路径

由于原位处置存在空间小、成本高等限制因素，因此工程渣土的多路径综合利用主要依靠综合处置产业园. 图8为工程渣土资源化综合利用的技术路线示意图，包括通用预处理模块和减碳烧制技术模块与低碳固化协同处置模块，基本包含了第2节所提到的所有技术及产品.

预处理模块通过合并不同处置技术中共有的步骤，如检测识别、筛分、脱水、破碎等，通过对工程渣土的识别分类实现针对性利用. 其中通过检测与识别分类利用渣土，因为富含黏土的渣土适宜制备烧结材料[72]，而低黏土含量渣土的固化效果更好. 最终产物包括种植土与工程用土，以及用于固化与烧制的原料土. 工程用土是指用于路基、地基、堤坝、填埋、填海等直接再利用技术的原料土，而种植土则可以充分发挥土壤的固碳潜力，可用作填埋场地的表层土并开展复垦，特别建议可应用于堆山造景.

减碳烧制模块除了推荐使用清洁能源外，还可利用通过回收烧结技术所产生的低品位热能进行土坯干燥[85]、渣土脱水或者试件养护.

低碳固化模块主要为结合其他活性固废的协同处置开展工程渣土的低碳固化，以及使用回收烧制模块产生的CO_2进行碳化养护，通过碳化提升性能并实现固碳. 另外，将固化土与流态固化土改为预拌固化土与预拌流态固化土，二者类似预拌混凝土，通过预制保证产品稳定性，再运输到施工现场进行利用，与现场直接制备相比，具有质量可控、均质稳定的特点[13].

6 结论与展望

本文针对工程渣土资源化利用的现状展开了深入讨论，分析了工程渣土资源化的基础问题，并提出了高附加值与低碳化的资源化低碳技术路径；系统分析了国内近20年关于工程渣土资源化处置研究的文献，剖析了目前研究存在的不足，厘清了不同的处置技术原理，揭示了资源化率难以提升的本质问题，并从科学技术层面提出了建议，具体如下.

(1) 国内近20年对工程渣土资源化技术的研究逐年增长，近年来相关研究数量快速增加，技术类型更加丰富，对多技术综合利用的重视程度提高. 相关研究大多集中在我国沿海地区，且具有地域特色. 直接再利用技术的应用场景丰富，而其余处置技术的应用场景类型亟待继续开发. 但存在工程渣土的术语不统一，且对工程渣土基本信息的检测以及对技术成本与碳排放的研究不足等问题，对此提出了相应的倡议.

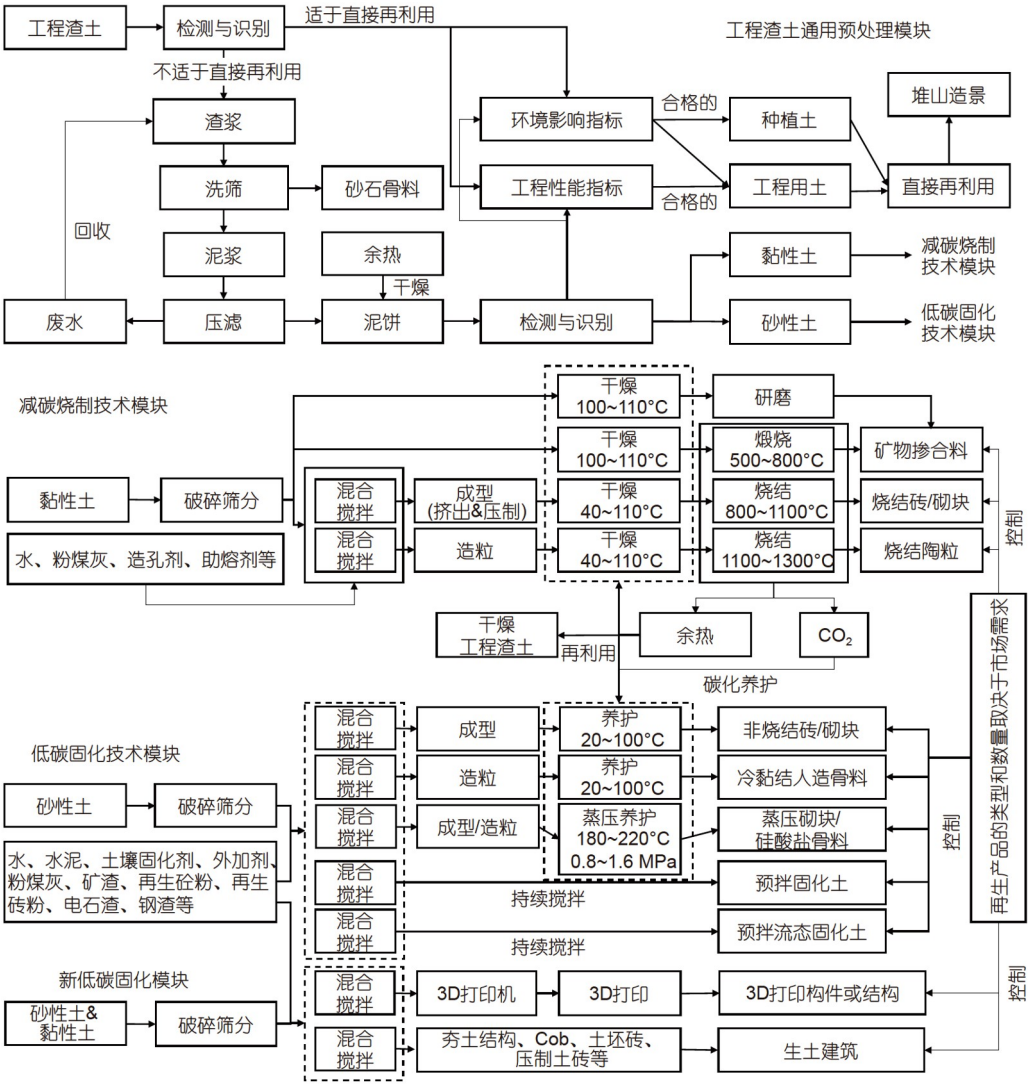


图 8 工程渣土的通用预处理模块与减碳烧制和低碳固化协同处置模块

Figure 8 General pretreatment module and cooperative carbon-reduction sintering and low-carbon solidification collaboration module of construction spoil

(2) 目前, 国内处置工程渣土实际采用的技术仍处于初级阶段, 在技术、标准、政策等方面未形成体系. 深入分析发现, 容纳空间不足、需求端分析不足、成本高、对环境影响的重视不足是工程渣土资源化的基础问题, 工程渣土资源化利用的减排潜力巨大. 针对基础问题提出了多路径技术与多场景利用、协同处置等解决方案, 提出了两种具有潜力的工程渣土资源化低碳新技术——再生生土建筑与3D打印土建筑.

(3) 针对工程渣土原位利用与综合处置产业园, 实现工程渣土多路径利用、多场景应用, 结合未来的发展趋势提出了综合利用低碳技术路径, 包括通用预处理模块、减碳烧制与低碳固化协同处置模块, 全面降低工程渣土资源化处置过程的碳排放, 并提出了数字化技术对工程渣土资源化利用赋能可能的新方向.

参考文献

1 Xiao J Z, Xia B, Xiao X W, et al. Prospects for low-carbon design theory of concrete structures (in Chinese). Chin Sci Bull, 2022, 67: 3425–3438 [肖建庄, 夏冰, 肖绪文, 等. 混凝土结构低碳设计理论前瞻. 科学通报, 2022, 67: 3425–3438]

2 Xiao J Z, Zhang H H, Tang Y X, et al. Principles for waste concrete recycling and basic problems of recycled concrete (in Chinese). Chin Sci Bull, 2023, 68: 510–523 [肖建庄, 张航华, 唐宇翔, 等. 废弃混凝土再生原理与再生混凝土基本问题. 科学通报, 2023, 68: 510–523]
3 Xiao J Z, Shen J Y, Gao Q, et al. Current situation and innovative technology for recycling of engineering waste soil (in Chinese). J Archit Civil Eng, 2020, 37: 1–13 [肖建庄, 沈剑羽, 高琦, 等. 工程弃土现状与资源化创新技术. 建筑科学与工程学报, 2020, 37: 1–13]
4 Wang S, Fu J, Zhang C, et al. Shield Tunnel Engineering. Amsterdam: Elsevier, 2021. 491–521
5 Tanner S, Katra I, Argaman E, et al. Erodibility of waste (Loess) soils from construction sites under water and wind erosional forces. Sci Total Environ, 2018, 616-617: 1524–1532
6 Zhang N, Duan H, Sun P, et al. Characterizing the generation and environmental impacts of subway-related excavated soil and rock in China. J Clean Prod, 2020, 248: 119242
7 Yin Y, Li B, Wang W, et al. Mechanism of the December 2015 catastrophic landslide at the Shenzhen landfill and controlling geotechnical risks of urbanization. Engineering, 2016, 2: 230–249
8 Xiao J, Shen J, Bai M, et al. Reuse of construction spoil in China: Current status and future opportunities. J Clean Prod, 2021, 290: 125742
9 Lei H, Lu H, Bai J. Design and construction of a piled mountain with engineered municipal construction waste over soft clay. Geotech Geol Eng, 2017, 35: 1341–1356
10 Hou Y Q, Xiao J Z, Gao Q, et al. Study on vacuum extrusion molding and drying characteristics of construction spoil: A case study on Xuchang City (in Chinese). Environ Sanit Eng, 2021, 29: 71–81 [侯逸青, 肖建庄, 高琦, 等. 工程弃土真空挤出成型及干燥特性研究——以许昌市为例. 环境卫生工程, 2021, 29: 71–81]
11 Zhu Y X, Bian Y, Min F L, et al. Improvement of metro shield muck to controlled low-strength material (in Chinese). China Civil Eng J, 2020, 53 (S1): 245–251 [朱瑜星, 卞怡, 闵凡路, 等. 地铁盾构渣土改良为流动化土进行应用试验研究. 土木工程学报, 2020, 53(S1): 245–251]
12 Oggeri C, Fenoglio T M, Vinai R. Tunnel spoil classification and applicability of lime addition in weak formations for muck reuse. Tunn Undergr Space Technol, 2014, 44: 97–107
13 Zhou Y X, Wang J Z. Principle of ready-mixed solidified soil and its prospects for engineering application (in Chinese). New Build Mater, 2019, 46: 117–120 [周永祥, 王继忠. 预拌固化土的原理及工程应用前景. 新型建筑材料, 2019, 46: 117–120]
14 Al-Fakih A, Mohammed B S, Liew M S, et al. Incorporation of waste materials in the manufacture of masonry bricks: An update review. J Build Eng, 2019, 21: 37–54
15 Lin M, Chen G, Chen Y, et al. Hydrothermal solidification of alkali-activated clay-slaked lime mixtures. Constr Build Mater, 2022, 325: 126660
16 Chen G, Lin M, Chen Y, et al. Alkali-reinforced hydrothermal solidification of waste soil. Mater Chem Phys, 2022, 289: 126505
17 Gao Q, Xiao J Z, Shen J Y. Effects of garden waste on the properties of sintered bricks prepared with construction spoil (in Chinese). J Build Mater, 2022, 25: 1195–1202 [高琦, 肖建庄, 沈剑羽. 园林垃圾对工程弃土烧结砖性能的影响. 建筑材料学报, 2022, 25: 1195–1202]
18 Collins R J. Dredged silt as a raw material for the construction industry. Resour Recovery Conserv, 1980, 4: 337–362
19 Wu H, Yao P, Yang D, et al. Upcycling of construction spoil powder as partial cement replacement for sustainable cement-based materials: Properties and modification. J Clean Prod, 2022, 369: 133361
20 Khalifa A Z, Cizer Ö, Pontikes Y, et al. Advances in alkali-activation of clay minerals. Cem Concr Res, 2020, 132: 106050
21 Hua K, Xi X, Xu L, et al. Effects of AlF_3 and MoO_3 on properties of Mullite whisker reinforced porous ceramics fabricated from construction waste. Ceram Int, 2016, 42: 17179–17184
22 Kwan J C T, Jardine F M. Ground engineering spoil: Practices of disposal and reuse. Eng Geol, 1999, 53: 161–166
23 Wu B, Cao H X, Lin L, et al. Experimental study on mechanical behaviors of cement mortar containing excavated soil (in Chinese). J South China Univ Technol (Nat Sci), 2020, 48: 1–8 [吴波, 曹慧璇, 林朗, 等. 水泥砂土浆的力学性能试验研究. 华南理工大学学报(自然科学版), 2020, 48: 1–8]
24 Brigatti M F, Galan E, Theng B K G. Developments in Clay Science. Amsterdam: Elsevier, 2006. 19–86
25 Qian J G, Yuan J Y, Zhao C F. Soil Properties and Soil Mechanics (in Chinese). Beijing: China Communication Press, 2015 [钱建固, 袁聚云, 赵春风. 土质学与土力学. 北京: 人民交通出版社, 2015]
26 Lei L, Palacios M, Plank J, et al. Interaction between polycarboxylate superplasticizers and non-calcined clays and calcined clays: A review. Cem Concr Res, 2022, 154: 106717
27 Tunega D, Zaoui A. Mechanical and bonding behaviors behind the bending mechanism of kaolinite clay layers. J Phys Chem C, 2020, 124: 7432–7440
28 Penka J B, Nana U J M P, Manjia M B, et al. Hydrological, mineralogical and geotechnical characterisation of soils from Douala (coastal, cameroon): Potential used in road construction. Heliyon, 2022, 8: e11287
29 Deng C J, Xu X, Huang B D, et al. Preliminary study on the way to build high-standard farmland by comprehensive utilization of urban engineering residues: A case study of Yunnan (in Chinese). Technol Innov Appl, 2022, 12: 51–53 [邓昌军, 许歆, 黄丙东, 等. 综合利用城市工程渣土建设高标准农田途径初探——以云南省为例. 科技创新与应用, 2022, 12: 51–53]

30 Yin Z F, Yu X X, Liang K, et al. Modification of construction waste tails into planting soil (in Chinese). Build Energy Effic, 2022, 50: 139–144 [尹曾甫, 迂晓轩, 梁琨, 等. 建筑垃圾尾料改良制园林绿化土. 建筑节能, 2022, 50: 139–144]

31 Hou Y, Xiao J, Shen J, et al. Effects of distiller's grains and seawater on properties of sintered brick made from construction spoil. J Build Eng, 2022, 62: 105391

32 Guo C X, Kong H, Wang M S. Study on muck improvement of EPB shield tunneling in waterless sandy cobble-boulder stratum (in Chinese). China Civil Eng J, 2015, 48(S1): 201–205 [郭彩霞, 孔恒, 王梦恕. 无水大粒径漂卵砾石地层土压平衡盾构施工渣土改良分析. 土木工程学报, 2015, 48(S1): 201–205]

33 Qiu Y, Yang X A, Tang Z H, et al. Soil improvement for earth pressure balance shields construction in watered sandy stratum (in Chinese). J Tongji Univ (Nat Sci), 2015, 43: 1703–1708 [邱龑, 杨新安, 唐卓华, 等. 富水砂层土压平衡盾构施工渣土改良试验. 同济大学学报(自然科学版), 2015, 43: 1703–1708]

34 Xiao C, Tan L X, Xia Y F, et al. Excavation parameters characteristics of earth pressure balanced shield based on soil modification (in Chinese). J Railw Sci Eng, 2017, 14: 2418–2426 [肖超, 谭立新, 夏一夫, 等. 基于渣土改良的土压平衡盾构掘进参数特征研究. 铁道科学与工程学报, 2017, 14: 2418–2426]

35 Wang M S, Lu J F, Luo A L. Experiment on soil improver for shield tunnel construction in silty clay stratum (in Chinese). J Railw Eng Soc, 2020, 37: 74–79 [王明胜, 路军富, 罗奥雷. 粉质黏土地层隧道盾构施工渣土改良剂试验. 铁道工程学报, 2020, 37: 74–79]

36 You Z, Zhong X C, Zhang Y, et al. Study on the modulated mud of filter press mud cake and its application in soil conditioning (in Chinese). J Hebei Univ Eng (Nat Sci), 2020, 37: 40–46 [游智, 钟小春, 张洋, 等. 压滤泥饼调制泥浆及其在砂层渣土改良中的应用研究. 河北工程大学学报(自然科学版), 2020, 37: 40–46]

37 Murmu A L, Patel A. Towards sustainable bricks production: An overview. Constr Build Mater, 2018, 165: 112–125

38 Silvani C, Braun E, Masuero G B, et al. Behavior of soil-fly ash-lime blends under different curing temperatures. Procedia Eng, 2016, 143: 220–228

39 Indiramma P, Sudharani C, Needhidasan S. Utilization of fly ash and lime to stabilize the expansive soil and to sustain pollution free environment—An experimental study. Mater Today-Proc, 2020, 22: 694–700

40 Yang D, Xi Z, Chen Q, et al. Mechanical properties of tunnel muck with fly-ash geopolymer. Adv Civ Eng, 2020, 2020: 7247134

41 Kong X, Zhang Z, Liang Y, et al. Experimental study on solidified dredged sediment with MgO and industrial waste residue. Constr Build Mater, 2023, 366: 130105

42 Suo C, Fang P, Cao H, et al. Influence and microscopic mechanism of the solid waste-mixture on solidification of Cu^{2+}-contaminated soil. Constr Build Mater, 2021, 305: 124651

43 Maheepala M M A L N, Nasvi M C M, Robert D J, et al. A comprehensive review on geotechnical properties of alkali activated binder treated expansive soil. J Clean Prod, 2022, 363: 132488

44 Wattez T, Patapy C, Frouin L, et al. Interactions between alkali-activated ground granulated blastfurnace slag and organic matter in soil stabilization/solidification. Transp Geotech, 2021, 26: 100412

45 Syed M, GuhaRay A, Kar A. Stabilization of expansive clayey soil with alkali activated binders. Geotech Geol Eng, 2020, 38: 6657–6677

46 Zhang L. Production of bricks from waste materials—A review. Constr Build Mater, 2013, 47: 643–655

47 Van Damme H, Houben H. Earth concrete. Stabilization revisited. Cem Concr Res, 2018, 114: 90–102

48 Moevus M, Jorand Y, Olagnon C, et al. Earthen construction: An increase of the mechanical strength by optimizing the dispersion of the binder phase. Mater Struct, 2016, 49: 1555–1568

49 Landrou G, Brumaud C, Winnefeld F, et al. Lime as an anti-plasticizer for self-compacting clay concrete. Materials, 2016, 9: 330

50 Dong B, Liu J, Hong S, et al. Core-shell structured ceramsite made by excavated soil and expanded perlite through cold-bonded technology. Constr Build Mater, 2021, 306: 124941

51 Gao W, Zhang H, Ren Q, et al. A low-carbon approach to recycling engineering muck to produce non-sintering lightweight aggregates: Physical properties, microstructure, reaction mechanism, and life cycle assessment. J Clean Prod, 2023, 385: 135650

52 Hu Y, Yang D, Li S, et al. Preliminary study on preparation of unfired bricks using filter cake from tunnel muck. J Build Eng, 2022, 60: 105175

53 Zhu Y, Liu D, Fang G, et al. Utilization of excavated loess and gravel soil in controlled low strength material: Laboratory and field tests. Constr Build Mater, 2022, 360: 129604

54 Skibsted J, Snellings R. Reactivity of supplementary cementitious materials (SCMs) in cement blends. Cem Concr Res, 2019, 124: 105799

55 Hao T, Wang S, Li X X, et al. Feasibility study on preparation of cement mixture by shield muck (in Chinese). Bull Chin Ceram Soc, 2019, 38: 1018–1023 [郝彤, 王帅, 李鑫箫, 等. 利用盾构渣土制备水泥混合材的可行性研究. 硅酸盐通报, 2019, 38: 1018–1023]

56 Zhou D, Wang R, Tyrer M, et al. Sustainable infrastructure development through use of calcined excavated waste clay as a supplementary cementitious material. J Clean Prod, 2017, 168: 1180–1192

57 Singh A, Chandel M K. Valorization of fine fraction from legacy waste as fired bricks: A step towards circular economy. J Clean Prod, 2022, 331:

129918
58 Zhang L, Zhang H F, Rong H, et al. Fabrication and performance of 700–900 density grade muck ceramsite (in Chinese). J Build Mater, 2018, 21: 803−810 [张磊, 张鸿飞, 荣辉, 等. 700~900密度等级渣土陶粒的研制及其性能. 建筑材料学报, 2018, 21: 803−810]
59 Wang S, Yang L, Ma X, et al. The formation of porous light ceramsite using Yellow River sediment and its application in concrete masonry production. Case Stud Constr Mater, 2022, 17: e01340
60 Ayati B, Newport D, Wong H, et al. Low-carbon cements: Potential for low-grade calcined clays to form supplementary cementitious materials. Clean Mater, 2022, 5: 100099
61 Zhang M, Chen C, Mao L, et al. Use of electroplating sludge in production of fired clay bricks: Characterization and environmental risk evaluation. Constr Build Mater, 2018, 159: 27–36
62 Ukwatta A, Mohajerani A. Leachate analysis of green and fired-clay bricks incorporated with biosolids. Waste Manage, 2017, 66: 134–144
63 Kadir A A, Hassan M I H, Salim N S A, et al. Stabilization of heavy metals in fired clay brick incorporated with wastewater treatment plant sludge: Leaching analysis. J Phys-Conf Ser, 2018, 995: 012071
64 Muñoz I, Cifrian E, Andrés A, et al. Analysis of environmental benefits associated with the incorporation of Waelz slag into fired bricks using LCA. Constr Build Mater, 2018, 168: 178–186
65 Koroneos C, Dompros A. Environmental assessment of brick production in Greece. Build Environ, 2007, 42: 2114–2123
66 Zhang N, Zhang H, Schiller G, et al. Unraveling the global warming mitigation potential from recycling subway-related excavated soil and rock in China via life cycle assessment. Integr Environ Assess Manag, 2021, 17: 639–650
67 Tang Y L. Analysis on utilization and treatment of excavation waste slag of Pinglu Canal Project (in Chinese). West China Commun Sci Technol, 2021, 10: 190−194 [唐羽玲. 平陆运河工程开挖弃渣利用及处理方案分析. 西部交通科技, 2021, 10: 190−194]
68 Li J, Li H, Zhang Q, et al. Effects of fertilization and straw return methods on the soil carbon pool and CO_2 emission in a reclaimed mine spoil in Shanxi Province, China. Soil Tillage Res, 2019, 195: 104361
69 Ahirwal J, Maiti S K, Singh A K. Changes in ecosystem carbon pool and soil CO_2 flux following post-mine reclamation in dry tropical environment, India. Sci Total Environ, 2017, 583: 153–162
70 Gomaa M, Carfrae J, Goodhew S, et al. Thermal performance exploration of 3D printed cob. Archit Sci Rev, 2019, 62: 230–237
71 Pacheco-Torgal F, Jalali S. Earth construction: Lessons from the past for future eco-efficient construction. Constr Build Mater, 2012, 29: 512–519
72 Bai J, Kang P, Zhang W, et al. Feasibility study on using excavated soil and rock to sintering utilization. Circ Econ, 2022, 1: 100007
73 Luo W, Liu S, Hu Y, et al. Sustainable reuse of excavated soil and recycled concrete aggregate in manufacturing concrete blocks. Constr Build Mater, 2022, 342: 127917
74 Pourabbas Bilondi M, Toufigh M M, Toufigh V. Experimental investigation of using a recycled glass powder-based geopolymer to improve the mechanical behavior of clay soils. Constr Build Mater, 2018, 170: 302–313
75 Ye T, Xiao J, Duan Z, et al. Geopolymers made of recycled brick and concrete powder—A critical review. Constr Build Mater, 2022, 330: 127232
76 Chen W, Dang J, Du H. Using low-grade calcined clay to develop low-carbon and lightweight strain-hardening cement composites. J Build Eng, 2022, 58: 105023
77 Melià P, Ruggieri G, Sabbadini S, et al. Environmental impacts of natural and conventional building materials: A case study on earth plasters. J Clean Prod, 2014, 80: 179–186
78 Ben-Alon L, Loftness V, Harries K A, et al. Integrating earthen building materials and methods into mainstream construction using environmental performance assessment and building policy. IOP Conf Ser-Earth Environ Sci, 2019, 323: 012139
79 Hall M, Allinson D. Analysis of the hygrothermal functional properties of stabilised rammed earth materials. Build Environ, 2009, 44: 1935–1942
80 Carreira I, Cardoso I P, Faria P. Earth mortars stabilization: A review. Conserv Patrim, 2021, 37: 35−43
81 Losini A E, Grillet A C, Bellotto M, et al. Natural additives and biopolymers for raw earth construction stabilization—A review. Constr Build Mater, 2021, 304: 124507
82 Hamard E, Cazacliu B, Razakamanantsoa A, et al. Cob, a vernacular earth construction process in the context of modern sustainable building. Build Environ, 2016, 106: 103–119
83 Fratello V S, Rael R. Innovating materials for large scale additive manufacturing: Salt, soil, cement and chardonnay. Cem Concr Res, 2020, 134: 106097
84 Gomaa M, Vaculik J, Soebarto V, et al. Feasibility of 3DP cob walls under compression loads in low-rise construction. Constr Build Mater, 2021, 301: 124079
85 Ye Q G. Characteristics and application of pressure distribution and change in drying and firing integrated tunnel kiln (in Chinese). Brick Tile, 2020, (7): 31−33, 41 [叶琦贵. 干燥焙烧一体式隧道窑窑内压力分布和变化特点及其应用探讨. 砖瓦, 2020, (7): 31−33, 41]

Summary for “工程渣土资源化基础问题与低碳技术路径”

Basic problems and low-carbon technical path of construction spoil recycling

Jianzhuang Xiao[1,2*], Jianyu Shen[1], Zhenhua Duan[1], Yongxiang Zhou[3], Fumin Ren[4] & Xuwen Xiao[1]

[1] *College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;*
[2] *College of Civil Engineering and Architecture, Guangxi University, Nanning 530004, China;*
[3] *Faculty of Architecture, Civil and Transportation Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;*
[4] *School of Environment, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China*
* Corresponding author, E-mail: jzxiao@gxu.edu.cn, jzx@tongji.edu.cn

In the past 20 years, China has made tremendous progress in urbanization and infrastructure construction, but it has also generated a large amount of construction spoil that is difficult to handle. The annual emission of construction spoil in China is huge, but its high value-added resource utilization rate is very low. Currently, it is still mainly landfilling and stacking to construction spoil storage sites, and the current disposal process generates a large amount of carbon emissions. In view of the national strategy of carbon peak and carbon neutral, as well as the current situation of low resource utilization rate of construction spoil, the basic problems at the technical level are explored and the feasible and innovative technical path was put forward.

Firstly, the definition, composition and harmfulness of construction spoil are expounded. The existing disposal and recycling technologies of construction spoil are divided into four types, including direct reuse, simple treatment and conditioning, solidification and sintering. The development context and regional differences of four types of disposal and recycling technologies of construction spoil in China in the past 20 years are combed, the main research and application directions of those technologies are analyzed, and the technical terms are clarified and defined, and the shortcomings of previous relevant research are pointed out.

The basic properties of construction spoil are intensively introduced and the scientific principles of four types of disposal and recycling technologies including direct reuse, simple treatment and conditioning, solidification, and sintering, are further revealed. And we suggested that low-carbon solidification technology and carbon-reduction sintering technology are the future development trends.

Based on the case study of the Pinglu Canal, it is found that the current situation of disposal of construction spoil in China is still relatively preliminary. According to the current situation, the basic problems of low utilization rate of construction spoil at the technical level are analyzed, mainly including insufficient space, insufficient analysis of demand, high disposal costs, and insufficient attention to environmental impacts of the disposal of construction spoil. Then the potential of carbon absorption and sequestration of construction spoil itself and the possibility of reducing carbon emissions in the process of resource utilization and disposal of construction spoil is analyzed.

Finally, to address these basic problems and in combination with China’s dual-carbon strategy, innovative solutions and high-value-added strategies such as recycling at multi-scenario through multi-path, co-processing, and digital technology empowerment are proposed, new potential technologies with low-carbon and carbon sequestration such as raw earth construction and 3D printed soil are suggested, and new technology paths for comprehensive utilization of construction spoil including low-carbon solidification, carbon reduction sintering, and other technologies are put forward.

With the continuous development of the domestic construction industry, the recycling of construction spoil will provide a new direction for saving natural resources, alleviating urban environmental pressure, and achieving green construction.

construction spoil, resource utilization, low-carbon solidification, carbon-reduction sintering, digital technology, co-processing

doi: 10.1360/TB-2023-0245