

平陆运河土石方多路径利用的基础问题与解决途径

肖建庄^{1,2,3*}, 沈剑羽², 马少坤¹, 李卓峰¹, 段珍华², 程耀飞⁴, 肖绪文²

(1. 广西大学土木建筑工程学院, 南宁 530004; 2. 同济大学土木工程学院, 上海 200092; 3. 广西大学双碳科学与技术研究院, 南宁 530004; 4. 广西平陆运河建设有限公司, 南宁 530022)

摘要: 平陆运河是西部地区陆海新通道骨干工程, 其建设过程将产生涵盖 23 种岩土类型、成分杂且分布散的土石方约 $3.39 \times 10^8 \text{ m}^3$, 因而土石方资源化利用是建设平陆运河绿色工程的重要组成部分; 正在实施的土石方利用途径以抬填造地为主 (占 50% 以上), 存在高品质的资源化利用率低、产品应用需求研究滞后、创新技术少、数字化程度低、碳排放评价缺失等基础问题, 阻碍了平陆运河土石方的多路径高效利用。本文针对相关基础问题, 着重从资源化、数字化、低碳化的角度出发, 提出了平陆运河土石方利用创新解决途径: 挖掘工程自身及周边地区的潜在应用需求, 根据不同岩土的类型分别形成利用途径, 实现多场景应用和多路径利用; 构建开挖区土石方地质信息模型、土石方信息数据库等, 形成土石方的数字化“挖-运-储-用”技术; 建议针对多利用路径的碳排放进行生命周期评价, 结合土石方数据库开展碳排放的动态评价, 研发模块化移动式处置装备、原位利用技术以支持实现降本减碳。在平陆运河工程的现状基础上, 资源化、数字化、低碳化的有机结合将为平陆运河绿色工程建设提供坚实支撑, 也可为后续其他工程的土石方多路径利用提供技术参照。

关键词: 平陆运河; 土石方; 多路径利用; 地质信息模型; 数据库; 碳排放

中图分类号: R-1 **文献标识码:** A

Multi-path Utilization of Earthwork in Pinglu Canal: Basic Problems and Solutions

Xiao Jianzhuang^{1,2,3*}, Shen Jianyu², Ma Shaokun¹, Li Zhuofeng¹, Duan Zhenhua², Cheng Yaofei⁴, Xiao Xuwen²

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Guangxi University, Nanning 530004, China; 2. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. Institute of Science and Technology for Carbon Peak and Neutrality, Guangxi University, Nanning 530004, China; 4. Guangxi Pinglu Canal Construction Co., Ltd., Nanning 530022, China)

Abstract: Pinglu Canal is the backbone project of the New Western Land-Sea Corridor of China. The canal project generated a total of $3.39 \times 10^8 \text{ m}^3$ of earthwork that covers approximately 23 types of rocks and soil and is characterized by large amount, diverse composition, and scattered distribution. Currently, the earthwork is utilized mainly through landfill and reclamation (over 50%); however, basic problems exist, including a low high-quality utilization rate, lagging research on demand for earthwork-reused products, lack of innovative technologies for earthwork reuse, a low level of digitalization, and lack of carbon emission evaluation. To address these problems, this study proposes innovative solutions from the perspectives of resource utilization, digitization, and carbon reduction. First, it is necessary to explore the potential application demands for the canal project itself and surrounding areas and

收稿日期: 2023-12-11; 修回日期: 2024-01-06

通讯作者: *肖建庄, 广西大学土木建筑工程学院 / 同济大学土木工程学院教授, 研究方向为建筑固废资源化与再生混凝土基础理论; E-mail: jzx@tongji.edu.cn

资助项目: 广西科技重大专项 (AA23062054, AA23023016); 国家重点研发计划项目 (2022YFC3803400)

本刊网址: www.engineering.org.cn/ch/journal/sscae

propose corresponding utilization paths according to different types of rock and soil, thus to achieve multi-scenario, multi-path utilization. Second, geological information models and information databases should be established for earthwork in excavation areas to help develop a digital excavation-transportation-storage-utilization technology for earthwork. Moreover, it is recommended to conduct a lifecycle assessment to clarify the carbon emissions of multi-path utilization technologies, achieve a dynamic evaluation of carbon emissions by combining with the information from the earthwork databases, and develop modular mobile-type disposal equipment and *in-situ* utilization technologies to achieve the reduction of cost and carbon emissions. The organic combination of resource utilization, digitization, and carbon reduction is expected to provide a favorable support for the green construction of the Pinglu Canal Project.

Keywords: Pinglu Canal; earthwork; multi-path utilization; geo-information model; database; carbon emissions

一、前言

平陆运河位于广西壮族自治区，从南宁市横州市西津库区平塘江口出发，经钦州市灵山县陆屋镇沿钦江进入北部湾，是西部地区陆海新通道骨干工程，对全国水网建设、广西壮族自治区乃至西南地区的经济格局调整具有重要影响。平陆运河以满足航运需求为主并结合供水、灌溉、防洪、改善水生态环境等功能，预计2026年12月底主体建成，投资总概算为727.19亿元^[1]；全长为134.2 km，设计单向通过能力为 8.9×10^7 t/a，按内河I级航道标准建设，可通航5000吨级船舶。

平陆运河的建设过程，不可避免地产生大量的土石方，相应的全线开挖总量超过三峡工程，自然方量达 3.39×10^8 m³。运河工程自身无法实现挖填平衡，而全部就近堆填需占用大量土地（如耕地、林地、生产要道），易导致环境污染^[2]、水土流失^[3]甚至工程隐患^[4]。因此，资源化利用土石方中的优质资源更契合平陆运河绿色工程的战略目标。古往今来，大型运河的土石方处置方式多为依靠自身挖填平衡或者沿运河就近堆填处理（见表1），对土石方资源化利用的关注度较低，相应土石方资源化利用路径的历史资料稀缺。

近年来，我国建设工程数量快速增加、更加重视资源和环境保护，因而对工程开挖土石方（即工

程渣土）资源化的关注度显著提升^[5]。当前，工程渣土资源化可分为直接再利用、简单处理与改良后利用、固化后利用、烧制后利用4类共十余种技术路径^[6-9]。已有研究多为针对城市建筑、地铁隧道等工程产生渣土开展的资源化应用^[2,9,10]，而在运河建设大规模产生的工程渣土资源化利用方面经验尚浅。因此，在满足平陆运河工程安全性、经济性、保护生态环境、全过程低碳、保护自然资源等原则的前提下，探讨并实现土石方资源化全利用兼具研究价值和工程意义。

本文系统调研平陆运河土石方工程背景并明确技术特征，立足土石方利用现状凝练出基础问题，综合性提出土石方多路径高效利用的创新解决途径，以为国内外工程渣土资源化实践提供重要增量经验。

二、平陆运河土石方工程背景与技术特征

（一）平陆运河工程背景

平陆运河的航道建设包含河道裁弯取直、山体开凿、土石方挖掘等工程，产生数量众多、类型各异的土石方。不同类型的土石方，其物理、化学、力学性质差异明显，直接影响资源化利用途径，而土石方的岩土类型取决于运河线路上的地质条件。平陆运河整体处于华南板块内，线路上的地质条件

表1 世界大运河及其土石方处置

运河名称	建成时间/年	处所国家	长度/km	土方量/($\times 10^8$ m ³)	处置方式
京杭大运河	1293	中国	1794	—	以就近堆填为主
伊利运河	1825	美国	584	—	堆积在运河河岸下坡地，修运河步道
苏伊士运河	1869	埃及	190	7.2	以就近堆填为主
约塔运河	1832	瑞典	87	0.08	以就近堆填为主
巴拿马运河	1914	巴拿马	81.3	2	以就近堆填为主
平陆运河	2026（拟）	中国	134.2	3.39	多途径利用（拟）

注：表中数据源自网络并经梳理而得。

较为复杂；自北向南穿过三级构造单元，主要有右江褶皱系（ I_2 ）的十万大山断陷（ I_2^1 ），钦州褶皱系的灵山断褶带（ II_{11} ）、六万大山凸起（ II_{12} ）、博白断褶带（ II_{13} ）。平陆运河路线较长，加之航道开挖面涉及的地层较多，导致产生的土石方成分复杂多样；仅从钦江干流中游段的地质条件信息^[11,12]足可窥见全运河岩土类型的复杂程度（见表2）。

（二）平陆运河土石方分类及特征

1. 土石方类型及数量

平陆运河土石方开挖总量为 $3.39 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。压实的土石方在挖掘后产生松动，故松动后的土石方体积约为 $4.05 \times 10^8 \text{ m}^3$ ^[13]。根据前期地质调查，平陆运河土石方种类共有 23 种，主要类型情况见表 3^[13]。

2. 土石方基本性能

本研究通过地质勘察、土工试验、岩体试验等

表 2 平陆运河地质条件（钦江干流中游段）

地质层	岩土类型
第四系	(Q_4^m) 素填土，杂填土（由黏性土、砂砾、圆砾、碎石组成） (Q_4^{al+pl}) 淤泥质黏土、粉质黏土、粉细砂、中粗砂、砂卵砾石砂层 (Q_4^{el+dl}) 碎屑岩残积粉质黏土、黏土、混角砾碎石粉质黏土
第三系	(E_2-Ny) 泥岩、泥质粉砂岩、细中粒砂岩、含油泥岩
白垩系	(K_2b) 质泥质粉砂岩、粉砂质泥岩、夹泥岩、石膏矿、细砂岩 (K_2a) 层状砾岩、砾状砂岩、含砾钙质粉砂岩
泥盆系	(D_2i) 灰岩、泥质灰岩、泥灰岩夹泥岩、白云岩 (D_1s) 灰岩、白云岩、白云质灰岩、泥质灰岩、生物屑灰岩，泥灰岩夹砂岩、泥岩
志留系	(S_1lnb) 细砂岩、细粒岩屑石英砂岩、粉砂岩、粉砂质泥岩

表 3 平陆运河土石方主要类型、数量与占比

土石方类型	数量/ $(\times 10^4 \text{ m}^3)$	占比/%
泥岩	14 007.18	41.26
砂岩	5672.75	16.71
中粗砂	1101.84	3.25
粉细砂（夹层土）	1623.68	4.78
黏性土	6467.57	19.05
其他	5074.81	14.95

注：其他指表层土、淤泥、灰岩、砾砂、卵砾石、砂卵砾石等，相应占比均为 1.05%~7.54%。

手段，系统检测了平陆运河土石方工程中岩土的基本性能。部分岩土的基本性能如表 4 和表 5 所示。

三、平陆运河土石方利用的现状与基础难题

（一）平陆运河土石方利用现状

土石方的资源化利用一般遵循“因土制宜、分类利用”“因地制宜、就近利用”的基本思路。通过调研发现，已规划的平陆运河土石方利用途径有抬填造地、园区回填、绿色建材、矿坑修复、吹填造地、工程利用、土地复垦，具体的土石方计划利用量、当前实际利用量等如表 6 所示。图 1 给出了马道枢纽工程挖掘现场、抬填造地工程中土石方利用状况。

目前规划中，平陆运河土石方利用方式以直接再利用（不含绿色建材的部分）为主，抬填造地的利用量占比达到 54%，用于制备建材的利用量仅占 2.1%，甚至少于中粗砂的占比（3.25%）。严格来说，抬填造地仅是一种无害化的处置方式，不属于土石方的资源化利用。可以判断，平陆运河土石方的高品质资源化率偏低。实际上，平陆运河土石方中含有大量的优质砂石料可供高品质利用，土方也可用于制备黏土基绿色建材，故开展高品质利用的空间较大，多路径利用土石方的需求迫切。

表 4 平陆运河土石方工程中岩体的基本性能

岩体类型	$\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	f_{ak}/kPa	f_{rk}/kPa	E/GPa	E_0/GPa	μ
中风化泥岩	2.1/2.35	400~450	270~300	0.2~0.3	0.1	0.38~0.4
中风化砂岩	2.55/2.65	2000	1000	4.5	3	0.3
砾岩	2.4/2.45	700	320	1.2	0.6	0.35
灰岩	2.58/2.7	2300~2500	1200	12	8	0.26

注： ρ 表示天然/饱和密度； f_{ak} 表示承载力； f_{rk} 表示岩体与锚固体极限粘结强度标准值； E 表示弹性模量； E_0 表示变形模量； μ 表示泊松比。

表5 平陆运河土石方工程中土体的基本性能

土体类型	$\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	C^*/kPa	$\varphi^*/^\circ$	$w_p/\%$	$w_l/\%$	$K/(\times 10^{-5} \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1})$	E_s/MPa
粉质黏土	18.7~19	20~30	10~12	22.9~24.8	35.5~40	0.3~0.5	4.7~6.8
淤泥	16.5	12.8	10	25.5	36.5	5	2.8~3
砂卵砾石	20.5	0	32	—	—	3000	45
中粗砂	20	0	32	—	—	350	30
粉细砂	19.5	0	28	—	—	300	25

注： γ 表示重度； C 表示黏聚力； φ 表示内摩擦角； w_p 表示塑限； w_l 表示液限； K 表示渗透系数； E_s 表示压缩模量；*表示仅展示饱和固结快剪试验得到的黏聚力和内摩擦角。

表6 平陆运河土石方利用途径（已规划）

利用途径	综合利用区/个	计划利用量/ $(\times 10^4 \text{ m}^3)$	占比/%	已利用量/ $(\times 10^4 \text{ m}^3)$	利用进度/%
抬填造地	94	18 268	53.9	7334.4	40.1
园区回填	47	5770	17.0	885.5	15.3
绿色建材	—	726	2.1	24.2	3.3
矿坑修复	1	350	1.0	155.7	44.5
吹填造地	3	1997	5.9	160.2	8.0
工程利用	—	2125	6.3	1523.2	71.7
土地复垦	13	4664	13.8	626.0	13.4
总计	158	33 900	100	10709.2	31.6

注：数据来源于现场调研，截至2023年11月16日；土石方累计开挖 $1.096 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，已利用 $1.071 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，利用率为97.7%；临时堆存土石方为 $2.543 \times 10^6 \text{ m}^3$ 。



(a) 马道枢纽挖掘现场与土石方类型



(b) 马道枢纽抬填造地现场

图1 平陆运河土石方利用现状（部分）

（二）平陆运河土石方利用基础难题分析

调研发现，平陆运河土石方多路径利用的难题主要体现在资源化、数字化、低碳化三方面，其中资源化是基础（见图2）。

1. 资源化

缺少应用市场和资源化创新技术是阻碍土石方资源化利用的根本因素^[9]。提高土石方的高品质资源化率，既需要确保资源化产品有对应的应用场景并能有效应用，也需要可行的土石方资源化技术以生产适合应用的产品。平陆运河工程的空间跨度、施工规模较大，工程开挖岩土的类型较多、空间分布复杂，带来了土石方数量庞大、成分复杂、分布离散的基本特性，加大了开展资源化利用的难度。因此，当前的基础难题是产品应用需求研究滞后，针对性的资源化创新技术缺乏。

2. 数字化

当前，土石方的开挖、运输、储存、利用等技术，多为传统模式，数字化程度不高，影响了土石方利用效率。数字化技术可在降低土石方混杂度、缩短运输距离、优化土石方利用途径等方面发挥作用，进而提高土石方利用效率并降低资源化成本。

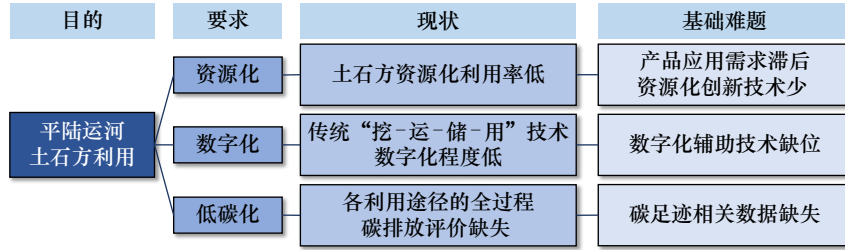


图2 平陆运河土石方利用基本难题

然而，数字化“挖-运-储-用”技术的研发工作尚不充分，不利于支撑土石方利用数字化革新。具体来说，不同类型的岩土在物理、力学、化学特性等方面差异悬殊，无法采用单一利用途径；运河挖掘工程为多点同步进行，每个挖掘点处挖掘深度的增加带来了产生土石方类型的变化，整个运河工程产生的土石方岩土具有类型时空分布不均匀的特征，增大了土石方利用的难度。例如，在运河的某标段工程中，前期需大量浇筑混凝土，而位于较深层的优质砂石料却无法供应工程前期的原位应用。另外，固定式资源化设施的有效服务范围通常不足以覆盖全运河，土石方利用的资源化厂（如骨料破碎厂、洗砂厂、烧砖厂等）远离对应土石方的位置，势必增加运输成本与碳排放量，导致现有资源化路径应用受阻。土石方的岩土类型通常决定可利用途径，产生土石方与附近的资源化设施、可应用场景等的位置关系通常较复杂，通过数字化技术可以进行最优化规划。因此，当前的基础难题是土石方“挖-运-储-用”数字化技术仍属缺位。

3. 低碳化

绿色工程是平陆运河的建设目标之一，降低运河土石方利用过程中伴生的环境影响是关键。在规避土石方挖掘、运输、堆存等过程中产生水土流失、空气污染、水污染、生态破坏等问题之外，还需减少土石方利用的全过程碳排放，这与国家“双碳”战略目标是一致的。然而，在国内土石方资源化利用的研究与应用中，各种土石方利用途径的碳排放分析（如生命周期评价）较为缺乏，难以量化和评价各种利用途径的碳排放量与减碳潜力，不利于土石方利用的低碳化发展，而开展碳排放评价关键在于收集碳足迹相关数据（如碳排放因子）。因此，当前的基础难题是土石方资源化利用工程的碳足迹相关数据缺失。

四、平陆运河土石方利用的创新解决途径

（一）挖掘潜在应用新途径

当前，以抬填造地为主的土石方处置规划未能充分利用优质土石方资源，亟需深挖潜力以构建新的利用途径。应注重需求端的开发，在运河自身建设需求、当前的应用需求外，进一步考虑未来运河通航后因运河沿岸经济发展而产生的新的应用需求。在已经开展的应用之外，有数种土石方利用新途径可供选择（见图3）。

1. 混凝土 / 砂浆骨料

物理、力学性能较好的岩石，如花岗岩、石灰岩、砂岩、砾石、白云岩等，可用作混凝土骨料或道路填料^[14-18]；石灰岩也可用于生产水泥或建筑石材。中粗砂的主要成分是石英，清洗后具有与天然砂相同的质地，可直接用作混凝土细骨料。砂石料用于制备运河工程所需的混凝土，也可用于铺设施工便道、道路水稳层，有助于缓解平陆运河工程建设过程中天然建筑砂石材料紧缺的现状^[19,20]。

2. 低等级石方骨料生态混凝土

平陆运河建设过程中开挖大量的砂岩、砾石、

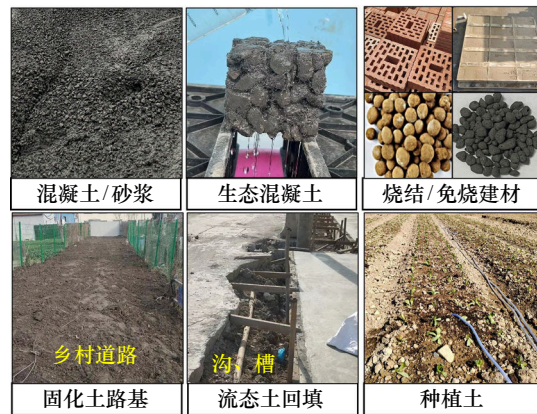


图3 土石方综合利用新途径

泥岩等石方。除了达到混凝土骨料要求的石方，尚有数量众多、不能直接使用的低等级石方。可对低等级石方进行表面处理以增强界面连接性能，进而将低等级石方制作成生态混凝土。生态混凝土是由粗骨料、水泥、其他外加剂组成，具备一定强度并兼顾生态系统功能的多孔混凝土，具有透水、大孔隙的特点；较大的孔隙可为植物根部生长提供空间（内部孔隙的pH需满足植物生长要求）。作为兼顾生物相容性、工程防护性的新型绿色建材，生态混凝土不仅能够有效提高河岸的抗雨水冲刷能力、减少水土流失和滑坡的风险，还可减轻对河岸植物生长的影响、对河岸生态系统的破坏。低等级石方骨料生态混凝土可用于运河两岸的护坡建筑：在边坡浇筑格构梁后，由搅拌机现场搅拌生态混凝土，将生态混凝土铺设在格构之中；待混凝土强度达到要求后，再将营养土灌入生态混凝土的孔隙中并覆盖表土；最后播撒草种或铺设草皮，形成生态护坡结构。

3. 烧结或免烧建材

土石方中较难直接再利用的部分有黏土、淤泥、粉细砂、泥岩等，可采取改良、固化或烧制等方式实现资源利用。①黏土通常用作烧结砖、陶粒、免烧砖等建材的制备原料^[5,9]，通过渣土复配技术可将砂土、粉土等纳入制砖原料^[21,22]。②原河道的河床疏浚淤泥，具有较高的有机质和微生物含量，可采用烧结方式制备具有多孔结构的烧结砖、免烧砖、陶粒^[23-27]，还能安全固定淤泥中所含的重金属物质^[28,29]。③粉细砂的工程性质介于砂性土、黏性土之间，可在稳定后用于隧道、路基、地基建设^[30]，也可用作抹灰砂浆^[31]。④泥岩是弱固结的黏土经过中等程度的后生作用形成的强固结、沉积型岩石，层理不明显、质地松软、遇水易发生膨胀^[32]，不利于路基、边坡、地基等工程利用^[33,34]，但可用于制备烧结/免烧建材（如烧结砖^[35,36]、陶粒^[37]、免烧砖^[38,39]）。特殊地，马道枢纽挖掘出的大量碳质泥岩（有机碳含量为6%~40%，明显高于普通泥岩），也可用于制备烧结建材，较高的有机质含量也降低了碳质泥岩制备烧结建材所需的能耗。

4. 种植土

种植土理化性能好，结构疏松、通气，保水、保肥能力强，是适宜园林植物生长的土壤类型。在表土外，土石方中的黏土、粉土、砂土、淤泥以及强/全风化的泥岩等，在去除污染物、调节pH、复

配、增加有机质等改良处理后，也可以制备种植土，用于园林绿化或耕地恢复^[40-42]。低成本的改良技术则是推广应用的难点。

5. 流态土沟槽回填

使用渣土作为主要原料，取代河砂来制备的流态回填材料即流态土，具有高流动性（坍落度>200 mm），强度一般为0.3~2.1 MPa（便于未来的挖掘），可广泛用于管廊、沟槽、深坑回填^[43-46]。相比传统的压实或混凝土回填，流态土沟槽回填可大幅降低回填成本并减少碳排放量^[47]。

6. 乡村道路

平陆运河周边存在较多的乡村泥土道路，对道路改良的需求较大。可利用运河的土石方建设乡村现代道路，其中固化土作为道路基层，砂石料作为道路水稳层材料^[48-51]。

（二）数字化“挖-运-储-用”

1. 开挖区土石方地质信息模型

针对平陆运河土石方成分杂、分布散的特征，采用数字化技术优化“挖-运-储-用”流程是可行的选择^[9]。结合前期运河路段的地质调查数据，构建面向全运河开挖区土石方类型与分布的数字孪生模型，辅助规划土方施工计划，在挖掘过程中即减少土石方的人为混杂程度。在岩土图像识别、数据库辅助分析等技术的支持下，建立快速岩土体识别系统，规划土石方最佳利用途径，在后续运输、储存、利用环节中最优化土石方的调运分配，切实提高土石方资源化利用效率（见图4）。

尽管大部分土石方均可通过针对性的资源化途径得到良好利用^[9]，但工程中不同的岩土通常天然混合存在（以夹层或混杂的形式），加之挖掘、运输、临时存储过程又会加深混合程度，导致开展利用较为困难。此外，分离不同岩土的难度大，也会明显提高资源化成本，不适宜工程实际操作。较为理想的处理方式是事先避免挖掘过程中的人为混合，即根据岩土的开展针对性的挖掘、运输、临时储存，确保挖掘过程中岩土保持较高纯度。为此，需要依据实际地层分布信息来规划开挖过程，具体形式为构建地下空间的地质信息模型（见图5）。

通过沿运河航道的连续地质勘查，构建地下空间的地质信息模型；据此开展针对性的挖掘，即按

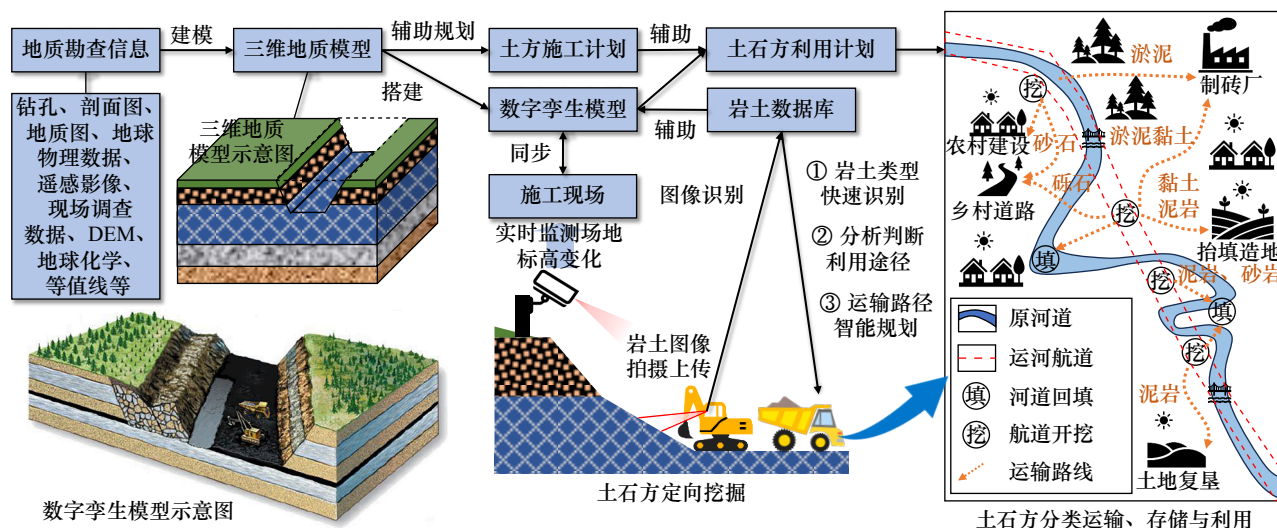


图4 运河岩土数字孪生模型与土石方分类利用示意图
注：DEM表示数字高程模型。

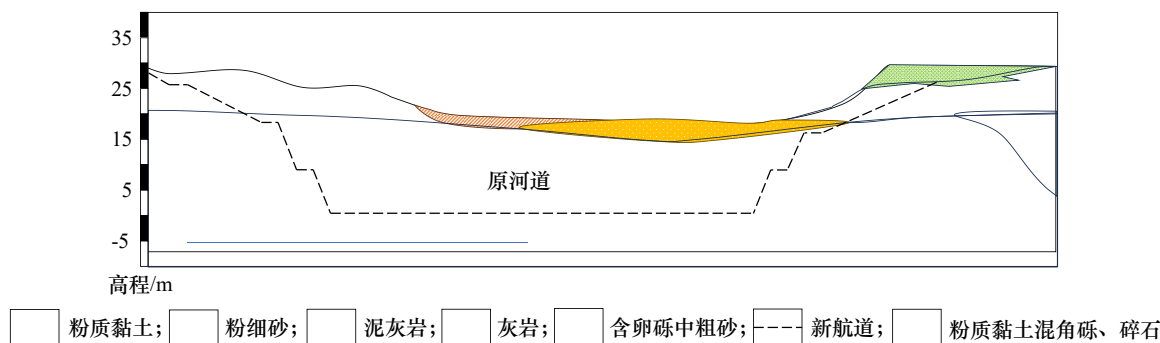


图5 平陆运河航道某标段剖面的岩土地质信息分布示意图

照岩土类型来分期实施挖掘工作，利用地质模型确定每次的挖掘范围和深度，在一定的精度条件下可实现某种岩土的定向挖掘。例如，在图5所示的挖掘工程中，利用三维地质模型信息确定开挖范围和深度，随后依次挖掘粉质黏土（如混角砾、碎石）、含卵砾中粗砂、粉细砂、粉质黏土、灰岩，从而大幅降低开挖土石方的人为混杂度；针对不同土石方的类型，更容易确定利用和处置途径，还可据此开展土方调配工作。

地质信息来源于离散的钻测井，两个钻孔之间的土壤信息实际上是未知的，需要进行插值处理，这可能导致地质信息的失真^[52]。因此，按照地质模型开展挖掘仍有缺陷，采用现场岩土识别可辅助提高岩土分类挖掘、运输、存储的精细度。人工智能、图像识别、卷积神经网络等技术，可支持实现岩土类型的快速识别^[53-57]、岩土较粗颗粒的级配快

速分析^[58,59]，具有显著的应用潜力；与岩土（土石方）数据库结合，能够进一步提高土石方的资源化利用效率。

2. 土石方数据库构建

土石方数据库不仅是岩土信息的记录工具，也可反向为岩土的识别、处置、利用提供参考依据。完整的土石方数据库应包括土石方的来源信息、基本信息、去向信息，尤其注意增加资源化利用效果的信息，以便为后续土石方利用提供有价值的信息。

土石方数据库主要包含来源信息、基本信息、去向信息3个板块（见图6），其中去向信息是土石方数据库体现工程应用价值的重要保障。相关数据信息越具体，则应用参考价值越高。对于每种岩土，来源信息、基本信息、去向信息应有严格的对应关系，可以形成数字映射关系（见图7）。数字映射关系不仅是当前土石方利用的去向信息记录，也

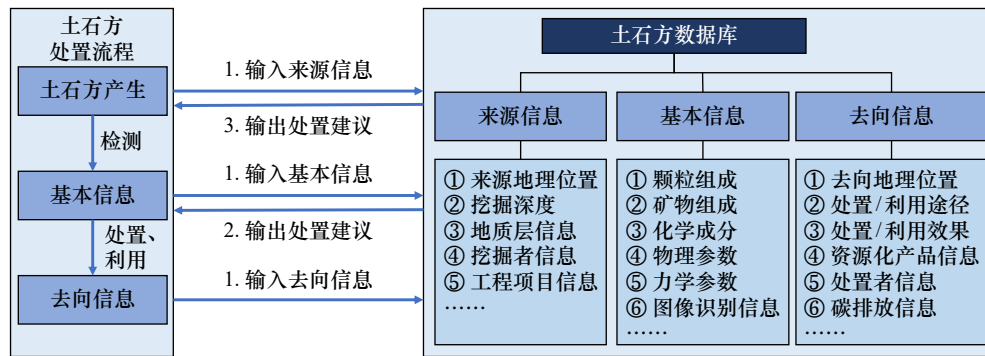


图6 土石方数据库构建与应用分析

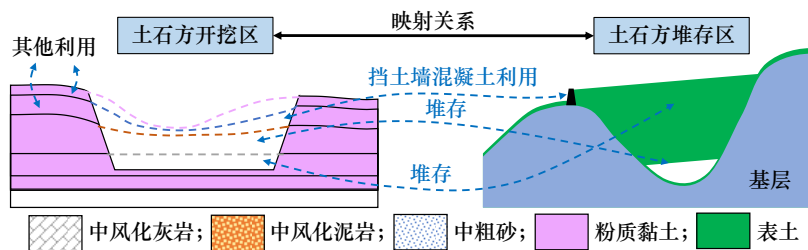


图7 土石方来源与去向的数字映射示意图

可为这些土石方的后续再次利用提供来源信息。例如，临时堆存的土石方、用于抬填造地的土石方，在未来需要再次挖掘并开展资源化利用时，可以通过土石方数据库、已记录的数字映射关系来掌握待挖掘土石方的所有信息，以避免不必要的二次勘查。

土石方数据库完整记录土石方的轨迹，为土石方后续再利用提供基本信息、其他土石方利用提供直接参考，其构建与应用分为3个阶段。① 数据库内容因积累不足而较少，需从实际工程中持续输入信息。② 数据库已有一定的数据存量，考虑到岩土颗粒组成、化学与矿物组成是影响岩土物理、化学、力学性能的重要因素，可依据数据库内的岩土基本信息以及输入的实际土石方基本信息，推断出可行的土石方利用方法并提供利用建议。③ 当数据库的数据存量充足、样本点密集时，基于岩土在地下空间的分布规律即可直接根据来源信息推断出土石方的基本信息，提供合适的利用建议，据此大幅提升土石方资源化利用水平及效率。

(三) 全过程碳排放分析

在土石方利用路径的全过程碳排放研究方面，生命周期评价方法运用较多，细分为过程分析法、投入产出法、混合法等。① 过程分析法对产品各阶

段输入和输出的材料能量进行系统评估，一般采用碳排放系数方法计算利用路径中各环节的电力消耗、燃油消耗、材料消耗（如水、水泥、固化剂等）、其他因素的CO₂产生量。② 投入产出法结合产业各部门的碳排放与经济投入产出表，采用行业投入、碳排放、能源使用等公开数据，量化大型供应链的直接和间接碳排放量。③ 混合法将过程分析法、投入产出法结合使用。以常用的过程分析法为例，分析的关键难点在于收集工艺流程各阶段的材料能量具体值或者对应的碳排放因子，可通过调研、实测等方式进行数据收集。

除了对不同利用途径的全过程碳排放进行计算，还需要厘清各类资源化途径的减碳、吸碳、固碳能力及潜能^[9]，以更准确地评价利用途径的碳排放。假设总共产生的1.4×10⁸ m³泥岩中有50%被用于制备建材，可避免7×10⁷ m³泥岩被填埋。基于文献研究数据^[60]，若将相应数量的泥岩制备成烧结砖并替代普通黏土烧结砖时可减少碳排放约6.17×10⁶ t，若替代混凝土实心砖可减少碳排放约5.44×10⁶ t，若制备泥岩免烧砖替代普通黏土烧结砖可减少碳排放约6.9×10⁶ t。所规划的抬填造地、矿坑回填造地、土地复垦，可新增耕地约2×10⁴亩（1亩≈666.7 m²），每年还可封存约8360 tCO₂（按照相关研究数据^[9]测算）。

(四) 有机结合资源化、数字化、低碳化

1. 降本减碳技术研发

平陆运河土石方开挖总量巨大,相应的多路径资源化利用需要资源化、数字化、低碳化的有机结合。数字化技术可支持土石方资源化途径降低成本并提高效率。低碳化与资源化的有机结合,重点在于研发降本减碳技术,如土石方中的优质砂石料用于浇筑混凝土并原位利用,黏土原位制砖并用于工程项目设施等。一般来说,能够减少成本的技术路径通常也能减少碳排放,土石方原位利用是最为直接有效的降本减碳技术,主要通过减少运输路程的方式降低碳排放及成本。对于原位利用缺少应用场景的问题,需要挖掘附近的潜在应用场景;对于原位利用缺少生产设备的问题,可基于模块化的移动式设备建设土石方资源化的临时处置枢纽,弥补固定式资源化处理厂服务范围受限的不足。此外,优化资源化技术的工艺路径,增设循环利用系统(如中水循环、废水净化回用、余热回用等),可进一步降本减碳。

2. 碳排放数据入库

在建立土石方数据库、开展土石方利用全过程碳排放分析的基础上,为了更好地发挥土石方数据库的评估和指导作用,需要将相关碳排放数据加入土石方数据库,在来源信息和去向信息中加入“挖-运-储-用”各环节的燃油、电力、材料等消耗以及碳排放量数据,共同构成动态碳排放评价体系。例如,对于任意一种土石方的利用途径,都可以根据相应土石方的挖掘地点、存储地点、资源化处理地点、应用地点的地理位置以及拟采用的资源化技术,直接计算可能产生的碳排放量,与成本数据一起提供给工程管理决策,也可自动选择最优化路径。有机结合数字化技术与低碳化技术,将支持提高土石方资源化利用决策的科学性。

五、结语

平陆运河意义重大、影响深远,是一项世纪工程,建设绿色工程是诸多高要求之一,又以土石方资源化利用为关键。本文系统讨论了平陆运河土石方的多路径资源化利用课题,以为工程高质量建设直接提供理论与技术支撑。

(1) 平陆运河施工过程产生的土石方总量约为

$3.39 \times 10^8 \text{ m}^3$,包含岩土种类23种并以泥岩、黏土、砂岩等为主要类型,整体上具有数量大、成分杂、分布散的特征。目前土石方利用途径以抬填造地为主(占50%以上),而高品质的资源化利用率偏低。平陆运河土石方多路径利用的基础问题在于应用需求研究滞后、资源化创新技术少、数字化程度低、对各种利用途径的全过程碳排放评价缺失。

(2) 针对平陆运河土石方资源化利用率低的难题,应挖掘运河工程自身及周边地区在当前及未来的潜在应用需求,同步研发新的资源化技术。基于“因土制宜、分类利用”“因地制宜、就近利用”的思路,在已规划的利用途径外,提出了包括利用优质砂石料制备混凝土、低等级石方制备生态混凝土、烧结/免烧建材、流态土回填料、固化土乡村道路、种植土等在内的综合利用新途径,以为高质量开展土石方资源化利用提供充分的方案选择。

(3) 基于平陆运河土石方成分杂、来源广的特征和当前土石方“挖-运-储-用”技术数字化程度低的现状,针对数字化辅助技术缺位的难题,建议开发数字化的“挖-运-储-用”技术,包括构建地质信息模型、人工智能辅助岩土快速识别、建立土石方信息数据库等,降低在土石方挖掘、运输、存储等过程中造成的人为混杂程度,提高土石方资源化利用和二次开发利用的效率。

(4) 针对平陆运河土石方各种利用途径的全过程碳排放评价缺失现状、碳足迹数据缺失难题,建议对各利用路径的碳排放进行生命周期评价,通过调研和实测来收集缺失的碳足迹数据,全面评估各利用途径的减碳潜力,如利用50%的泥岩制备建材可实现碳减排 $5.44 \times 10^6 \sim 6.9 \times 10^6 \text{ t}$ 。重点研发降本减碳技术、原位利用技术、移动式模块化设备。将碳排放数据与土石方数据库结合,实现土石方利用路径碳排放的动态评价,以土石方多路径利用的资源化、数字化、低碳化支持土石方资源化利用的科学决策。

截至2023年11月16日,平陆运河工程土石方利用的进度约为31.6%,表明后续高品质资源化利用的空间仍较大;工程实施过程中也初步建立了数字化平台,用于土石方调配的运输路径优化与碳核算。本文提出的相应解决途径,是在平陆运河土石方利用工程现状基础上的进一步深化,兼具研究新意与工程可行性。需要指出的是,实际工程中为了

开展新途径的实施和推广,一方面需要继续在技术理论、工艺优化、成本控制等方面进行深入研究,促进涉及多学科的交叉融合以及关联多部门的协调合作;另一方面需要在标准编制、政策制定等方面提供关键基础保障,切实提升土石方资源化利用的规模和水平。此外,平陆运河土石方利用的资源化、数字化、低碳化技术可以形成完整体系,为后续其他运河建设、城镇各类重大建设工程的土石方(工程渣土)资源化利用提供技术参照。

利益冲突声明

本文作者在此声明彼此之间不存在任何利益冲突或财务冲突。

Received date: December 11, 2023; **Revised date:** January 6, 2024

Corresponding author: Xiao Jianzhuang is a professor from the College of Civil Engineering and Architecture Engineering of Guangxi University and College of Civil Engineering of Tongji University. His major research fields include recycling of construction waste and the basic theory of recycled concrete. E-mail: jzx@tongji.edu.cn

Funding project: Guangxi Science and Technology Major Program (AA23062054, AA23023016); National Key R&D Program of China (2022YFC3803400)

参考文献

- [1] 平陆运河初步设计获批 [J]. 珠江水运, 2023 (3): 17. Preliminary design of Pinglu Canal approved [J]. Pearl River Water Transport, 2023 (3): 17.
- [2] Zhang N, Duan H B, Sun P W, et al. Characterizing the generation and environmental impacts of subway-related excavated soil and rock in China [J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 248: 119242.
- [3] Tanner S, Katra I, Argaman E, et al. Erodibility of waste (loess) soils from construction sites under water and wind erosional forces [J]. Science of the Total Environment, 2018, 616/617: 1524–1532.
- [4] Yin Y P, Li B, Wang W P, et al. Mechanism of the December 2015 catastrophic landslide at the Shenzhen landfill and controlling geotechnical risks of urbanization [J]. Engineering, 2016, 2(2): 230–249.
- [5] Xiao J Z, Shen J Y, Bai M Y, et al. Reuse of construction spoil in China: Current status and future opportunities [J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 290: 125742.
- [6] Zhang Z P, Wong Y C, Arulrajah A, et al. A review of studies on bricks using alternative materials and approaches [J]. Construction and Building Materials, 2018, 188: 1101–1118.
- [7] Zhang L Y. Production of bricks from waste materials—A review [J]. Construction and Building Materials, 2013, 47: 643–655.
- [8] Muñoz V P, Morales O M P, Mendivil G M A, et al. Fired clay bricks manufactured by adding wastes as sustainable construction material—A review [J]. Construction and Building Materials, 2014, 63: 97–107.
- [9] 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 [J]. 科学通报, 2023, 68(21): 2722–2736. Xiao J Z, Shen J Y, Duan Z H, et al. Basic problems and low-carbon technical path of construction spoil recycling [J]. Chinese Science Bulletin, 2023, 68(21): 2722–2736.
- [10] Bai J, Kang P, Zhang W B, et al. Feasibility study on using excavated soil and rock to sintering utilization [J]. Circular Economy, 2022, 1(1): 100007.
- [11] 中交水运规划设计院有限公司. 西部陆海新通道(平陆)运河马道枢纽及上游航道工程施工图(K13+223~K30+561) [R]. 北京: 中交水运规划设计院有限公司, 2023. China Communication Planning and Design Institute for Water Transportation Co., Ltd. Construction drawings for the new land-sea channel of Western China (Pinglu Canal): Madao Hub and upstream waterway project (K13+223~K30+561) [R]. Beijing: China Communication Planning and Design Institute for Water Transportation Co., Ltd., 2023.
- [12] 中水珠江规划勘测设计有限公司. 西部陆海新通道(平陆)运河钦江干流中游段航道工程(初步设计阶段)岩土工程勘察报告 [R]. 广州: 中水珠江规划勘测设计有限公司, 2022. China Water Resources Pearl River Planning Surveying & Designing Co., Ltd. Geotechnical investigation report on the waterway engineering of the middle reaches of the Qinjiang River for the new land-sea channel of Western China (Pinglu Canal) (Preliminary design stage) [R]. Guangzhou: China Water Resources Pearl River Planning Surveying & Designing Co., Ltd., 2022.
- [13] 黄宗清, 时成相, 何振洲. 平陆运河沿线土石方综合利用研究 [J]. 珠江水运, 2023 (11): 24–26. Huang Z Q, Shi C X, He Z Z. Study on comprehensive utilization of earthwork along Pinglu canal [J]. Pearl River Water Transport, 2023 (11): 24–26.
- [14] 王晓波, 亢泽千, 孔亚宁, 等. 母岩类型和岩性对混凝土骨料性能的影响 [J]. 混凝土, 2023 (3): 77–80, 85. Wang X B, Kang Z Q, Kong Y N, et al. Concrete aggregate performance affected by the type and lithology of parent rock [J]. Concrete, 2023 (3): 77–80, 85.
- [15] 温郁斌, 张静晓, 孙艳鹏. 基于粉碎性黄土环境的弃渣砂岩在混凝土中的应用性能研究 [J]. 施工技术(中英文), 2022, 51(19): 116–121. Wen Y B, Zhang J X, Sun Y P. Study on performance of sandstone in concrete applications based on pulverized loess environment [J]. Construction Technology, 2022, 51(19): 116–121.
- [16] Osouli A, Chaulagai R, Tutumluer E, et al. Strength characteristics of crushed gravel and limestone aggregates with up to 12% plastic fines evaluated for pavement base/subbase applications [J]. Transportation Geotechnics, 2019, 18: 25–38.
- [17] Tang Y X, Xiao J Z, Liu Q, et al. Natural gravel-recycled aggregate concrete applied in rural highway pavement: Material properties and life cycle assessment [J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 334: 130219.
- [18] Mohammed M, Geremew A, Mohammed M, et al. A study on the applicability of scoria gravel an alternative base course material through blending with marble waste aggregate [J]. Heliyon, 2022, 8(11): e11742.
- [19] Bendixen M, Best J, Hackney C, et al. Time is running out for sand [J]. Nature, 2019, 571: 29–31.
- [20] Alhumayani H, Gomaa M, Soebarto V, et al. Environmental assess-

- ment of large-scale 3D printing in construction: A comparative study between cob and concrete [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 270: 122463.
- [21] 沈剑羽, 肖建庄, 高琦, 等. 工程弃土复配及再生砖性能试验 [J]. *应用基础与工程科学学报*, 2023, 31(4): 990–1005.
Shen J Y, Xiao J Z, Gao Q, et al. Compound mixing and properties of recycled brick with construction spoil [J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2023, 31(4): 990–1005.
- [22] 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 [J]. *环境卫生工程*, 2021, 29(6): 71–81.
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 [J]. *Environmental Sanitation Engineering*, 2021, 29(6): 71–81.
- [23] Collins R J. Dredged silt as a raw material for the construction industry [J]. *Resource Recovery and Conservation*, 1980, 4(4): 337–362.
- [24] Wang H Y, Tsai K C. Engineering properties of lightweight aggregate concrete made from dredged silt [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2006, 28(5): 481–485.
- [25] Bhairappanavar S, Liu R, Shakoor A. Eco-friendly dredged material-cement bricks [J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 271: 121524.
- [26] Mezencevova A, Yeboah N N, Burns S E, et al. Utilization of Savannah Harbor River sediment as the primary raw material in production of fired brick [J]. *Journal of Environmental Management*, 2012, 113: 128–136.
- [27] Slimanou H, Eliche-Quesada D, Kherbache S, et al. Harbor dredged sediment as raw material in fired clay brick production: Characterization and properties [J]. *Journal of Building Engineering*, 2020, 28: 101085.
- [28] Arsenovic M, Radojevic Z, Stankovic S. Removal of toxic metals from industrial sludge by fixing in brick structure [J]. *Construction and Building Materials*, 2012, 37: 7–14.
- [29] Weng C H, Lin D F, Chiang P C. Utilization of sludge as brick materials [J]. *Advances in Environmental Research*, 2003, 7(3): 679–685.
- [30] Zhang J, Lu S D, Feng T G, et al. Research on reuse of silty fine sand in backfill grouting material and optimization of backfill grouting material proportions [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2022, 130: 104751.
- [31] 吴筱文, 乌呢日, 王小燕, 等. 巴基斯坦粉细砂在抗裂抹灰砂浆中的应用研究 [J]. *新型建筑材料*, 2023, 50(9): 68–70.
Wu X W, Wu N R, Wang X Y, et al. Research on application of Pakistan fine sand in anti-cracking plastering mortar [J]. *New Building Materials*, 2023, 50(9): 68–70.
- [32] 朱江. 岩石与地貌 [M]. 重庆: 重庆大学出版社, 2014.
Zhu J. *A field guide to rocks & landforms* [M]. Chongqing: Chongqing University Press, 2014.
- [33] Liu C D, Cheng Y, Jiao Y Y, et al. Experimental study on the effect of water on mechanical properties of swelling mudstone [J]. *Engineering Geology*, 2021, 295: 106448.
- [34] Huang K, Dai Z J, Yan C Z, et al. Swelling behaviors of heterogeneous red-bed mudstone subjected to different vertical stresses [J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, [2023-09-27]. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2023.08.004>.
- [35] 颜锦生. 南宁含砂泥岩资源开发利用的调查报告 [J]. *南方国土资源*, 2012 (3): 38–39.
Yan J S. Investigation report on development and utilization of sandy mudstone resources in Nanning [J]. *NanFang GuoTu ZiYuan*, 2012 (3): 38–39.
- [36] 颜锦生. 南宁含砂泥岩烧结多孔高抗压环保砖的发展前景 [J]. *地质论评*, 2010, 56(3): 441.
Yan J S. Development prospect of porous and high compressive environmental protection brick sintered from sandy mudstone in Nanning [J]. *Geological Review*, 2010, 56(3): 441.
- [37] 黄少文, 郭灿贤, 徐玉华. 利用红泥岩制备轻质高强球形陶粒试验研究 [J]. *非金属矿*, 2004, 27(6): 11–13.
Huang SW, Guo C X, Xu Y H, et al. Experimental research on preparation of lightweight and high strength ceramisite from red mudstone [J]. *Non-metallic Mines*, 2004, 27(6): 11–13.
- [38] 许宁, 陈铭, 蔺威威, 等. 泥岩地层盾构渣土免烧砖制备技术研究 [J]. *新型建筑材料*, 2023, 50(6): 80–82, 94.
Xu N, Chen M, Lin W W, et al. Study on preparation technology of unburned brick for shield tunneling in mudstone formation [J]. *New Building Materials*, 2023, 50(6): 80–82, 94.
- [39] Oti J E, Kinuthia J M, Robinson R B. The development of unfired clay building material using brick dust waste and mercia mudstone clay [J]. *Applied Clay Science*, 2014, 102: 148–154.
- [40] Wu S L, Peng X, Sun X H, et al. One-step processing of waste dredged slurry into planting soil by targeted pretreatment and vacuum filtration [J]. *Journal of Environmental Management*, 2024, 349: 119334.
- [41] 李世汭, 徐扬帆, 夏新星, 等. 调理方式对淤泥绿化种植土细菌多样性的影响 [J]. *北方园艺*, 2023 (15): 73–80.
Li S G, Xu Y F, Xia X X, et al. Effects of regulation methods on bacterial diversity in silt greening [J]. *Northern Horticulture*, 2023 (15): 73–80.
- [42] Zhang J, Amonette J E, Flury M. Effect of biochar and biochar particle size on plant-available water of sand, silt loam, and clay soil [J]. *Soil and Tillage Research*, 2021, 212: 104992.
- [43] Qian J S, Hu Y Y, Zhang J K, et al. Evaluation the performance of controlled low strength material made of excess excavated soil [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 214: 79–88.
- [44] Zhu Y P, Liu D R, Fang G W, et al. Utilization of excavated loess and gravel soil in controlled low strength material: Laboratory and field tests [J]. *Construction and Building Materials*, 2022, 360: 129604.
- [45] Kim Y S, Do T M, Kim H K, et al. Utilization of excavated soil in coal ash-based controlled low strength material (CLSM) [J]. *Construction and Building Materials*, 2016, 124: 598–605.
- [46] Jian S W, Cheng C, Wang J, et al. Effect of sulfonated acetone formaldehyde on the properties of high-fluid backfill materials [J]. *Construction and Building Materials*, 2022, 327: 126795.
- [47] Jian S W, Cheng C, Lv Y, et al. Preparation and evaluation of high-fluid backfill materials from construction spoil [J]. *Construction and Building Materials*, 2022, 345: 128370.
- [48] Al-Subari B L, Hilal A, Ekinci A. Life cycle assessment of soil

- stabilization using cement and waste additives [J]. *Construction and Building Materials*, 2023, 403: 133045.
- [49] Liu J, Wang B, Hu C T, et al. Multiscale study of the road performance of cement and fly ash stabilized aeolian sand gravel base [J]. *Construction and Building Materials*, 2023, 397: 131842.
- [50] Yang S Q, Yang Z Y, Chen K K, et al. Using case study on the performance of rural cement stabilizing construction waste recycling road base [J]. *Construction and Building Materials*, 2023, 405: 133351.
- [51] Zhao Y, Li Y, Wang C L, et al. Road performance of ordinary Portland cement improvement of strongly weathered phyllite filler [J]. *Construction and Building Materials*, 2022, 350: 128801.
- [52] Zhao C Y, Mahmoudi E, Luo M M, et al. Unfavorable geology recognition in front of shallow tunnel face using machine learning [J]. *Computers and Geotechnics*, 2023, 157: 105313.
- [53] 许振浩, 马文, 李术才, 等. 岩性识别: 方法、现状及智能化发展趋势 [J]. *地质论评*, 2022, 68(6): 2290–2304.
Xu Z H, Ma W, Li S C, et al. Lithology identification: Method, research status and intelligent development trend [J]. *Geological Review*, 2022, 68(6): 2290–2304.
- [54] 王名越, 狄永军, 张春禹. 花岗岩矿物正交偏光镜下图像人工智能识别研究 [J/OL]. *矿物学报*, [2023-09-11]. <https://doi.org/10.16461/j.cnki.1000-4734.2023.43.063>.
Wang M Y, Di Y J, Zhang C Y. Artificial intelligence in recognition study of the minerals in granite images under crossed polarizer [J/OL]. *Acta Mineralogica Sinica*, [2023-09-11]. <https://doi.org/10.16461/j.cnki.1000-4734.2023.43.063>.
- [55] Kiran P D N, Murugan R, Goel T. Smart soil image classification system using lightweight convolutional neural network [J]. *Expert Systems with Applications*, 2024, 238: 122185.
- [56] Lou W, Zhang D X, Bayless R C. Review of mineral recognition and its future [J]. *Applied Geochemistry*, 2020, 122: 104727.
- [57] 熊峰, 廖一凡, 曹伟腾, 等. 基于卷积神经网络-深度迁移学习的岩性自动识别研究 [J]. *安全与环境工程*, 2023, 30(4): 26–34.
Xiong F, Liao Y F, Cao W T, et al. Study on automatic recognition of rock lithology based on convolutional neural network and deep transfer learning [J]. *Safety and Environmental Engineering*, 2023, 30(4): 26–34.
- [58] 于沫, 温彦锋, 王玉杰, 等. 基于图像识别技术的土石料级配检测系统 [J]. *中国水利水电科学研究院学报*, 2019, 17(6): 439–445.
Yu S, Wen Y F, Wang Y J, et al. Gradation testing system of rock-fill material based on image recognition technology [J]. *Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research*, 2019, 17(6): 439–445.
- [59] 雷雨萌, 陈祖煜, 于沫, 等. 基于深度阈值卷积模型的土石料级配智能检测方法研究 [J]. *水利学报*, 2021, 52(3): 369–380.
Lei Y M, Chen Z Y, Yu S, et al. Intelligent detection of gradation for earth-rockfill materials base on deep otsu convolutional neural network [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2021, 52(3): 369–380.
- [60] 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 [J]. *Integrated Environmental Assessment and Management*, 2021, 17(3): 639–650.