

# 基于文献研究的精益建造与数字技术集成综述

刘刚<sup>1,2</sup>, 马智亮<sup>1</sup>, 李松阳<sup>1</sup>

(1. 清华大学土木水利学院, 北京 100084; 2. 广联达科技股份有限公司, 北京 100193)

**摘要:** 精益建造(LC)与数字技术集成是提高建筑业经济效益和生产效率的关键,也是近年来理论研究和实践创新的热点领域。鉴于目前尚无学者对精益建造与数字技术集成进行系统总结,针对国内外学术刊物发表的精益建造以及应用于建造领域与数字技术相关的研究论文,采用文献计量学和重点文献分析等方法,进行系统分析和归纳。结果表明,数字技术(特别是建筑信息模型(BIM)技术)逐步成为精益建造应用推广的关键支撑,两者深度融合能产生正向协同效应,进一步提高项目管理效率并降低项目管理成本。

**关键词:** 精益建造(LC)与数字技术集成;建筑信息模型(BIM);建造4.0;文献计量学分析

中图分类号: TU18

文献标志码: A

## Survey on Lean Construction and Digital Technology Integration Based on Literature Research

LIU Gang<sup>1,2</sup>, MA Zhiliang<sup>1</sup>, LI Songyang<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Glodon Company Limited, Beijing 100193, China)

**Abstract:** The lean construction (LC) and digital technology integration is the key and path to improve the economic benefit and production efficiency of the construction industry, and it is also a hot field of theoretical research and practical innovation in recent years. However, few scholars have made a systematic summary of the concept so far. Therefore, the relevant research articles in the academic journals published at home and abroad on the lean construction and the digital technology applied in the field of construction are reviewed using the methods of bibliometric analysis and key literature analysis. It is shown that, the digital technology (especially building information modeling (BIM) technology) has gradually become a key support

for the application and promotion of lean construction. The in-depth integration of the two technologies can produce positive synergistic effects, further improving the efficiency and reducing the cost of project management.

**Keywords:** lean construction (LC) and digital technology integration; building information modeling (BIM); Construction 4.0; bibliometric analysis

建筑业的业务特点是围绕工程项目开展生产和经营活动,但建筑工程项目具有建设周期长、资金投入大以及地点分散、多专业、多关系方、流动性强等特点,导致建筑业工业化与数字化水平明显落后于其他产业。据文献分析,在过去的20年里,全球建筑业的年生产增长率仅有1%,全球建筑工程项目平均超进度近20%,超投资80%,平均浪费达44%,工程质量问题及施工安全事故频发<sup>[1-4]</sup>。在数字化变革新时代,应用数字技术促进建筑业转型升级迫在眉睫。

精益建造(LC)是将制造业成功经验之一——丰田生产体系/精益生产的概念和原则改造并应用于建造领域的产物。精益建造可以从管理上助力建筑工程项目持续地减少和消除浪费,最大限度地满足顾客的需求。本质上,精益建造是以客户为中心,以精益求精思想为内核,综合生产管理理论、建筑管理理论以及建筑生产的特殊性,面向建筑产品的全生命周期,运用专业的技术和方法,进行精细化管理,从而实现价值最大化和浪费最小化。根据清华大学的研究<sup>[5]</sup>,超过70%的建筑从业者认为,精益建造可以节约成本,减少浪费。研究表明,不论规模大小,采用精益建造可以节省约20%~30%的时间,并在相同数量级上提高生产效率<sup>[6]</sup>。

传统的精益建造管理,虽然能够增加价值、减少浪费,但是精益建造管理本身的复杂性意味着更高

收稿日期: 2022-04-02

第一作者: 刘刚,高级工程师,博士生,主要研究方向为精益建造、数字建造、数字化转型。

E-mail: liug@glodon.com

通信作者: 马智亮,教授,博士生导师,工学博士,主要研究方向为土木工程信息技术。

E-mail: mazl@tsinghua.edu.cn



论文  
拓展  
介绍

的管理成本<sup>[7]</sup>。在第四次工业革命背景下,各种数字技术正在被建筑业广泛和深度地研究和应用,将数字技术深度集成于精益建造,有望提高精益管理的效率,降低精益管理的成本。对标制造业工业4.0(Industry 4.0)的概念,在欧美发达国家被提出并得到广泛认可的建造4.0(Construction 4.0)<sup>[8]</sup>已经阐述了这样的深度集成。

精益建造已被提出近30年,其理论、方法及工具在实践的基础上不断发展,数字技术在精益建造中的应用也同步发展。在我国致力于尽早实现“双碳”的大背景下,关注并发展精益建造具有重要的理论和实践意义。迄今为止,尚无学者对精益建造及其与数字技术的融合进行系统总结。鉴于此,对在国内外学术

期刊上发表的精益建造及其与数字技术集成有关的研究性论文进行系统分析和归纳,有助于行业和学界的相关人员关注并认识精益建造。

## 1 研究方法与技术路线

为总结精益建造及其与数字技术集成研究所取得的成果,采取文献搜索、文献筛选和文献分析三步骤的研究方法和技术路线。进行数据库选择和主题确定,然后按照标题、所在领域初步选定相关文献;对文献进行快速筛选;对所筛选的文献进行文献计量学分析,讨论当前研究的不足及未来的发展趋势。研究方法和技术路线如图1所示。

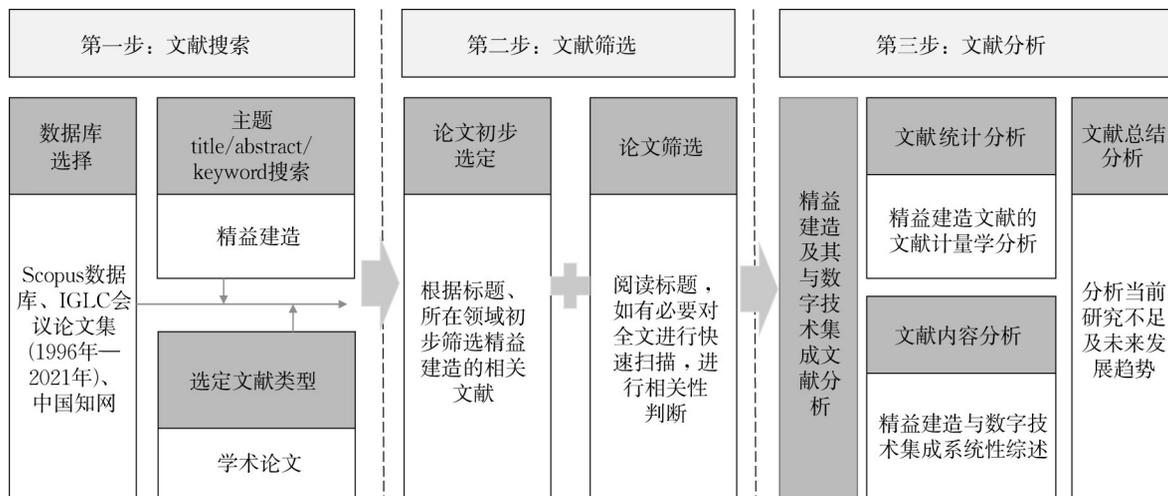


图1 研究方法与技术路线

Fig.1 Research method and technical route

### 1.1 文献搜索

#### 1.1.1 数据库选择

进行了数据库检索和文献分析,所检索的数据库包括 Scopus 数据库(下文简称 Scopus)和 IGLC(International Group for Lean Construction)会议论文集(下文简称 IGLC)。与 Web of Science、PubMed 和 Google Scholar 等其他搜索引擎相比,Scopus 数据库具有更广泛的覆盖范围并更容易建立统一的索引数据<sup>[9]</sup>。IGLC 会议是自 1992 年以来唯一专门针对精益建造领域的会议,引领了精益建造技术在建筑业的应用<sup>[10]</sup>。由于该会议早期的论文并未收录在 Scopus 等主流数据库中,因此将其作为补充数据库。对于中文文献检索,选择中国知网平台下的中国学术期刊网络出版总库作为数据源,该库是目前世界上最大的连续动态更新的中国学术期刊全文数据库<sup>[11]</sup>。

#### 1.1.2 检索式确定

对于英文文献检索,在数据库 Scopus 和 IGLC 中,采用“article title/abstract/keyword=lean construction”的检索式。对于中文文献,采用“主题=精益建造”的检索式。

### 1.2 文献筛选

#### 1.2.1 论文初步选定

对文献进行全面扫描,初步判断论文标题,去掉明显不相关的论文,对剩余论文的摘要,如有必要对全文进行快速阅读,最终筛选出中国学术期刊全文数据库中文文献 482 篇,Scopus 和 IGLC 数据库英文文献 3 139 篇。

#### 1.2.2 基本情况统计分析

从中文论文发表情况来看,2005 年至今,总共有 482 篇相关论文发表,2015 年之前论文数量相对较少,近 5 年论文数量有一定程度的增长,如图 2 所示。

在精益建造领域,国外研究起步较早,因此选取1996年至今发表的英文论文,共3 139篇;2016年前,以IGLC的论文为主,但近年来被Scopus收录的论文数量明显增加,已经超过IGLC。总体来看,2个数据库的英文论文近年来发表数量基本稳定在200篇以上,如图3所示。由统计数据可见,精益建造正在全球范围内受到重视,但是在国内的论文数量仍然与国外存在一定差距。

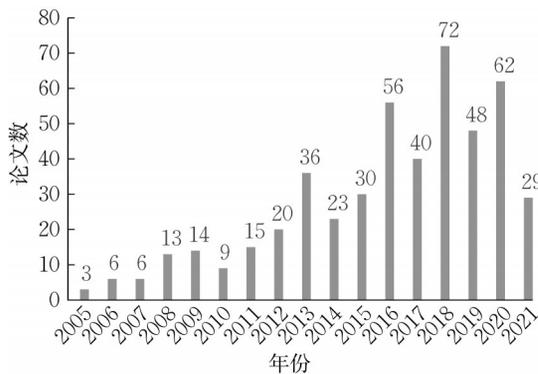


图2 按发表年份的论文数量统计(国内)

Fig.2 Statistics of article number by year (domestic)

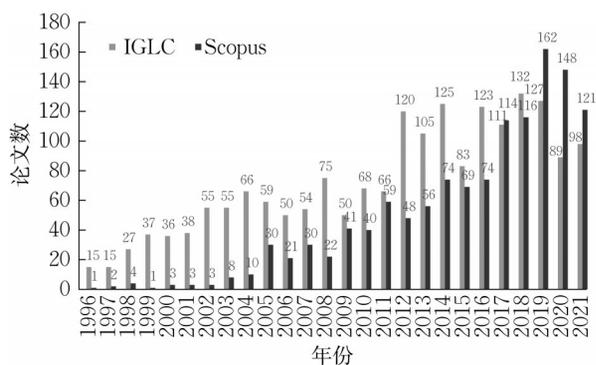


图3 按发表年份的论文数量统计(国外)

Fig.3 Statistics of article number by year (abroad)

### 1.3 文献分析

#### 1.3.1 文献计量学分析

文献计量学分析方法是通过对大规模文献数据的处理,快速识别和建立文献之间的联系,将科学领域的知识结构可视化<sup>[12]</sup>。文献计量学分析方法可以更加客观地评价学科发展现状,更加准确地发现学科发展趋势<sup>[13]</sup>。

#### 1.3.2 文献内容分析

将所选文献按照精益建造与数字技术集成系统性综述对相关领域的研究现状及特点进行解析,并总结当前理论研究的不足,为下一步研究方向的确定奠定基础。

## 2 精益建造及其与数字化应用文献计量学分析

选用VOSviewer作为文献分析工具,该软件具有呈现能力强、分析样本数据容量大、能对知识单元进行聚类、易于操作等特点<sup>[14]</sup>。

### 2.1 中文文献关键词分析

将482篇中文论文的文献著录数据导入VOSviewer中,生成关键词聚类网络图。其中,节点表示论文中包含的主要关键词,节点半径表示关键词出现的相对频度,圆点之间的距离表示关键词之间关联性强弱。关键词的阈值为在论文中至少出现4次,共筛选出43个关键词,如图4所示。图4中,EPC表示工程总承包,5S表示工地现场的5大标准,ANP表示网络层次分析法,SPA表示集对分析法,IPD表示集成项目交付,TFV表示精益建造的生产理论,PPC表示进度计划完成百分比。

由于论文数量较少,关键词呈散点状分布,关联度较低,尚未形成体系。总体来看,建筑信息模型(BIM)技术、成本管控、流程管理、末位计划系统和物联网等关键词涌现,说明精益建造向数字化发展的趋势。

### 2.2 英文文献关键词分析

将3 139篇英文文献著录数据导入VOSviewer中,关键词的阈值为在论文中至少出现23次,共筛选出50个关键词,5个聚类。根据文献计量学理论,按照不同聚类包含的关键词,将每一个聚类代表的研究方向进行归纳,如图5所示。

进一步对不同聚类的研究方向进行分析。可以发现,对于聚类A“精益建造目标/效果”(关键词出现499次,占比21.70%),浪费(Waste)与可持续性(Sustainability)是精益建造关注的重点;对于聚类B“以进度计划为核心的施工过程管控”(关键词出现792次,占比34.43%),末位计划法(LPS)是出现频次最多的关键词,说明进度计划是过程管控的重点;对于聚类C“以增加价值为核心的协同设计”(关键词出现528次,占比22.96%),协同(Collaboration)与设计(Design)是出现次数最多的关键词,表明设计阶段的协同是当前精益建造的关键;对于聚类D“精益建造实施和评估”(关键词出现250次,占比10.87%),标准化(Standardization)是目前的热点之一;对于聚类E“信息化支撑”(关键词出现231次,占



术研究和工程实践等领域的应用。为了便于读者对本文综述结果的理解,在文献调研的基础上构建了精益建造体系,如图6所示。英文文献主要有5个聚类结果,其中聚类A主要涉及精益建造思想、精益建造理论和精益建造原则等“上层建筑”,聚类B和聚类C注重精益设计阶段和施工阶段的精益建造方

法、工具等“中层支柱”,聚类D主要注重精益评估等“下层基础”,聚类E体现了精益建造与数字技术的集成,即数字技术为精益建造提供“数字底座”。受篇幅所限,而且精益建造已有很好的研究基础,本节重点分析精益建造与数字技术集成,如图6所示,针对聚类E部分(信息化支撑)按照相关度和代表性选

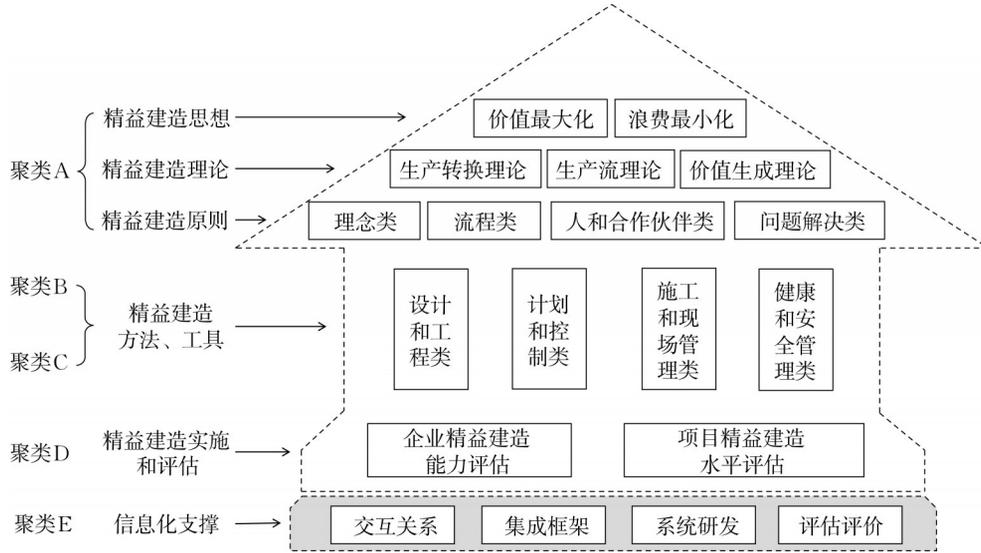


图6 精益建造体系

Fig.6 Lean construction system

取重点文献并进行系统分析。

数字技术与精益建造集成研究可分为交互关系、集成框架、系统研发和评估评价4个环节。将数字技术集成于传统的精益建造中,即利用数字化工具实施精益建造的方法。根据波士顿咨询公司的研究<sup>[15]</sup>,以项目进度计划和控制为例,加入精益建造和数字化工具之后,对项目进度完成能起到20%~22%的提升,效果显著。

作为信息化水平比较低的建筑业,近年来随着建造4.0概念<sup>[16]</sup>的提出,期待通过数字化来加快行业转型。由图7可知,BIM技术和基于云的统一数据环境(云平台)是数字化的核心,也是其他技术集成应用的基础。

### 3.1 BIM技术与精益建造的交互关系及集成框架

通过文献计量学分析和文献阅读可以发现,BIM技术是相关研究中最主要的数字技术,因此将BIM技术单独抽离出来进行详细分析。

#### 3.1.1 BIM技术与精益建造的交互关系

BIM技术与精益建造深度融合,存在错综复杂的交互关系。Sacks等<sup>[17]</sup>最早提出了基于精益建造原则和BIM功能的交互矩阵分析工具,研究了24项精益建造原则+18项BIM功能。通过文献中的研

究内容和工程案例,找到56项交互关系,如表1所示。由表1可知,在精益建造原则中“降低产品不确定性”和“缩短生产周期”所占百分比最大,所以在工程各阶段,特别是施工阶段,要提前筹划,防止由返工造成的工期延迟。此外,工程项目全生命周期管理中BIM技术在项目进度和质量管理可视化、精细化、精准化方面有着广泛交互和深度融合。通过BIM技术与精益建造的深入交互,使得项目方案优化、进度动态调整、费用及时支付、质量缺陷减少、安全事故率降低。由此可见,BIM技术与精益建造的深入交互有助于精益建造原则的实现。

针对BIM技术与精益建造的交互关系,多位研究者从不同维度进行深入研究,取得了相应成果<sup>[18-24]</sup>,如表2所示。由表2可知:BIM技术用于精益建造生产计划和控制的研究是最多的;在研究方向广泛度方面,从建筑全生命周期设计和施工阶段拓展到了用时最长、成本投入最高的运维阶段;虚拟设计与施工(VDC)和精益建造存在正向交互点,说明方案模拟、碰撞检查、精细项目管理等技术在精益建造中逐步发挥积极作用;“BIM技术-精益建造-绿色可持续性”三元交互关系初步形成,说明BIM技术和精益建造是实现建筑业低碳化和可持续发展的有效支撑。

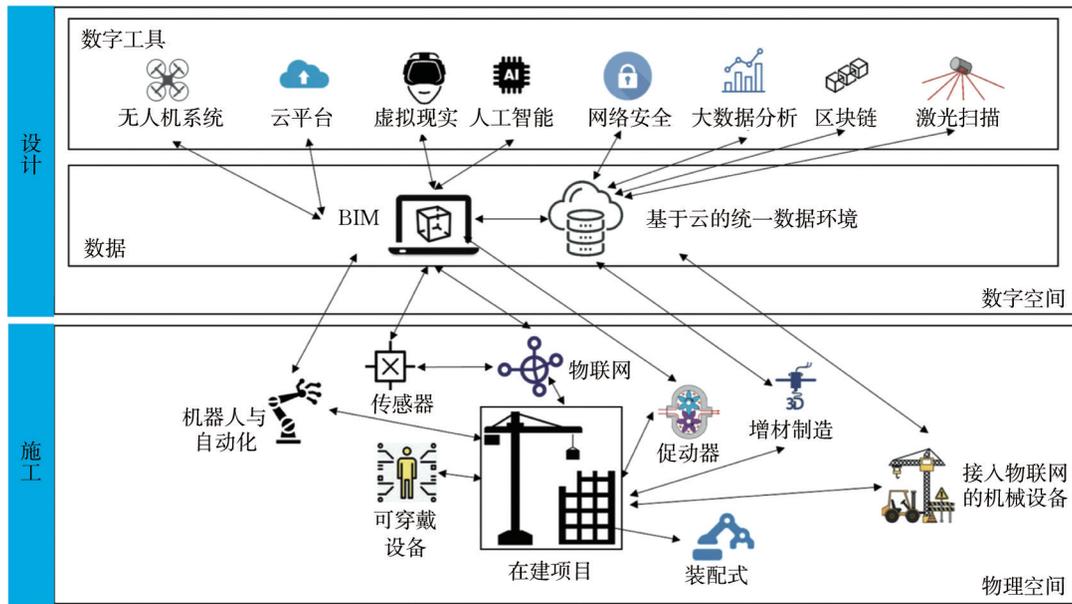


图 7 建造 4.0 体系框架<sup>[16]</sup>

Fig.7 Construction 4.0 architecture framework<sup>[16]</sup>

表 1 精益建造原则和 BIM 功能的交互矩阵<sup>[17]</sup>

Tab.1 Interaction matrix between lean construction principles and BIM functions<sup>[17]</sup>

BIM 功能	序号	精益建造原则																							
		降低产品不确定性	缩短生产周期	降低单批产量	增加灵活性	生产控制方法调适	标准化	持续改善	可视化生产方法	生产系统设计优化	获取完整需求	关注概念抉择	确保需求传递	确认和验证	亲自解决问题	协同决策	拓展合作伙伴								
		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X
可视化方式	1	★													★			★		★	★	★			
快速生成设计替代方案	2	★		★									★	★		★									
用于预测分析的模型	3	★	★	★			★								★			★	★			★			
数据复用	4		★	★														★	★			★			
维护信息和设计模型的完整性	5	★	★	★														★	★	★	★				
图纸和文件自动生成	6	★	★																		★				
设计和施工协同	7	★	★	★																		★			
快速方案比选	8	★		★	☆	★																			
线上/电子方式通信	9	★		★	★	★			★						★							★	★		
	10	★					★											★						★	
	11	★		★			★								☆										
	12		★	★					★						☆				★			★			
	13	★	★	★						★			★	★		★	★					★		★	
	14		★	★	★	★			★				★		☆							★	★		
	15	★		★	★	★			★				★	★		☆						★		★	
	16	★		★			★			★			★	★		☆								★	
	17		★	★					★							☆						☆			
	18		★			★			★						★	☆						★	★		★

注:★表示正向交互关系,☆表示负向交互关系;A表示减少产品可变性,B表示减少生产可变性,C表示缩短生产周期,D表示减少库存,E表示减少批量,F表示减少转换时间,G表示使用多技能团队,H表示采用拉式系统,I表示生产水平,J表示标准化,K表示持续改进,L表示可视化生产方法,M表示可视化生产流程,N表示简化,O表示使用并行处理,P表示仅使用可靠的技术,Q表示确保生产系统的能力,R表示确保全面的需求捕获,S表示注重概念选择,T表示确保需求向下流动,U表示确认和验证,V表示亲自查看,W表示协商一致决定并考虑所有选项,X表示培养扩展的合作伙伴网络。

表 2 BIM 技术与精益建造的交互关系<sup>[18-24]</sup>

Tab.2 Interaction between BIM technology and lean construction<sup>[18-24]</sup>

研究者	研究目标	研究方法	BIM 条目	LC 条目	结果/结论
Sacks 等 <sup>[18]</sup>	建立 BIM 和 LC 交互矩阵	文献调研	提出 18 项 BIM 功能	总结 24 项 LC 原则	56 个 BIM 和 LC 的交互点
Mollasalehi 等 <sup>[19]</sup>	BIM 和 LC 交互对设计阶段信息管理的支持	文献调研	提出 4 项与设计信息管理相关的 BIM 功能	总结 19 项与设计信息管理相关的 LC 原则	BIM 和 LC 交互对设计信息管理具有直接或间接的积极影响
Saieg 等 <sup>[20]</sup>	BIM 和 LC 交互对绿色可持续性的支持	文献调研	提出 18 项 BIM 功能	总结 24 项 LC 原则	21 个 BIM 和 LC 支持绿色可持续性的交互点
Schimanski 等 <sup>[21]</sup>	针对计划和控制,扩展 BIM 和 LC 交互矩阵	文献调研	提出 12 项与计划和控制相关的 BIM 功能	总结 10 项与计划和控制相关的 LC 原则	新增 4 个 BIM 和 LC 支持计划和控制的交互点
Oskouie 等 <sup>[22]</sup>	扩展 BIM 和 LC 交互矩阵	文献调研	新增 12 项 BIM 功能	新增 2 项 LC 原则	新增 17 个 BIM 和 LC 的交互点
Rodriguez 等 <sup>[23]</sup>	建立 VDC 和 LC 的交互矩阵	文献调研	提出 13 项 VDC 功能	总结 15 项 LC 原则	将 BIM 扩展至 VDC 后,会产生更多和 LC 的正向交互点
Evans 等 <sup>[24]</sup>	量化研究 BIM 和 LC 交互对大型项目的支持	文献调研、问卷调查、焦点小组	提出 10 项 BIM 功能	总结 10 项 LC 原则	量化的 BIM 和 LC 交互相关性矩阵用于大型项目指导

3.1.2 BIM 技术与精益建造的集成框架

2020 年, Mellado 等<sup>[25]</sup>提出了 BIM 技术、精益建造和可持续性集成框架,系统分析了 BIM 技术、精益建造、可持续性集成的动因、优势、阻碍和挑战以及三者集成对项目关键绩效指标(KPI)的影响,如图 8 所示。

Sbiti 等<sup>[26]</sup>提出了 BIM 和 LPS 的集成框架,该框架增加的内容主要有:基于 BIM 数据和工作分解结构

(WBS)数据自动生成阶段计划;利用企业资源计划(ERP)、文件管理系统、BIM 交换数据的移动端 APP 辅助前瞻计划编制和周工作计划执行。Chuquín 等<sup>[27]</sup>提出了设计阶段精益和 BIM 集成框架,基于高层住宅案例分析了 BIM 的三维可视化功能、并行设计功能和精益可持续性建筑设计(SBD)、价值流映射(VSM)集成优势和对施工阶段的影响。

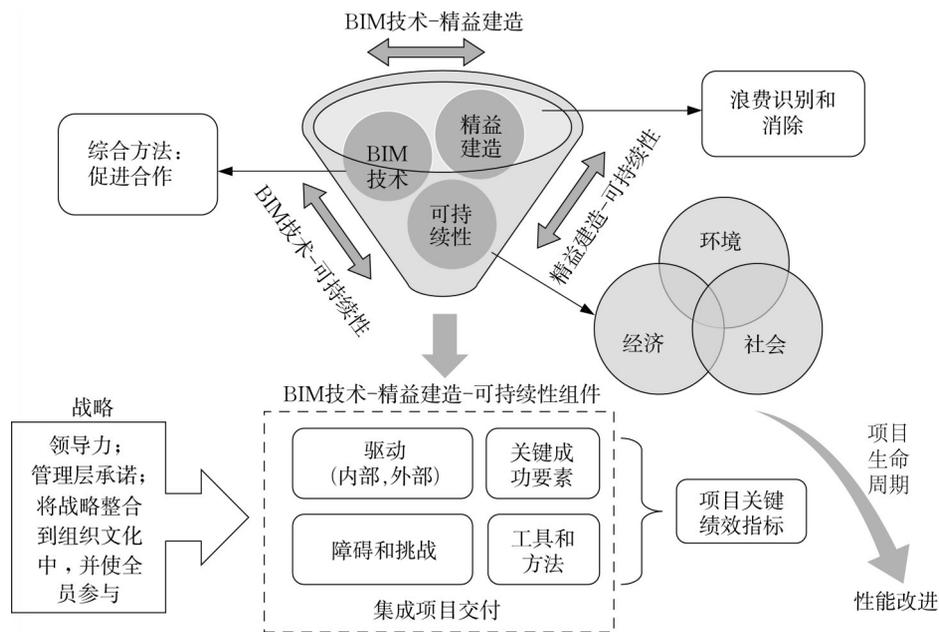


图 8 BIM、精益建造和可持续性原则的集成理论框架及组成<sup>[25]</sup>

Fig.8 Integrated theoretical framework and composition of BIM technology, lean construction and sustainability principles<sup>[25]</sup>

其他学者<sup>[28-30]</sup>也提出了相应的 BIM 技术与精益建造的集成框架。研究表明, BIM 技术和精益建造集成框架正在构建,如在末位计划系统流程中融合 BIM 技术以及三维可视化、四维仿真、碰撞检查等功能,有助于提升项目计划按时完成率。

3.2 其他数字技术与精益建造的交互关系及集成框架

3.2.1 其他数字技术与精益建造的交互关系

Brissi 等<sup>[31]</sup>系统地梳理了 35 篇装配式建造中数字技术和精益建造交互的文献,以及 9 篇机器人系

统和精益建造的交互矩阵。研究表明,精益建造与新一代设备和技术的融合,将更有助于装配式建造项目精益效能的发挥。装配式建造中数字技术和精益建造的交互研究如表3所示。

表3 装配式建造中数字技术和精益建造交互研究<sup>[31]</sup>

Tab.3 Research on the interaction between digital technology and lean construction in assembly construction<sup>[31]</sup>

建造自动化技术分类	建造自动化技术	各精益建造原则文献数															
		降低产品不确定性	缩短生产周期	降低单批产量	增加灵活性	生产控制方法调适	标准化	持续改善	可视化管理	生产系统设计优化	获取完整需求	关注概念抉择	确保需求传递	验证和确认	亲自解决问题	协同决策	拓展合作伙伴
机器人系统	机器人	3	3		2	1	1		3								
	可穿戴设备																
	自动导引车	1	1														
	自动化设备	3	3		2	2	1		2								
建模和仿真	DF/CNC/CAM						1		2								
	BIM/BIM4D/BIM5D	9	7		5	6	3	3	9	7	6	2	5	1	2	5	1
	VR/AR/MR		1						1	2				2	1		
	游戏引擎	1				1	1		1							1	
数字化和可视化	计算机仿真	6	7		5	5			1	7			3				
	环境信息系统(EIS)		2			3										4	
	云计算	1	1			2			2	3	2	1	2	1		3	1
	IoT/IoS	2	3			4			2	3						3	
感知	大数据	1	1			1				1							
	实时定位系统(RTLS)	4	7		1	10	1	1	3	8	1		1	3	1	5	
	激光扫描/点云/图像感知		1			1		1									
	算法	7	5	3	5	3	1			8	3	2				1	
AI和机器学习	ANN/SVM/RBF																
	数据分析	2	1		1	1			2	1						1	
	知识工程系统(KBS)	1	1			1								1			
	自然语言处理(NLP)																

注:DF/CNC/CAM表示数字工厂/计算机数控/计算机辅助制造;VR/AR/MR表示虚拟现实/增强现实/混合现实;IoT/IoS表示物联网/服务互联网;ANN/SVM/RBF表示人工神经网络/支持向量机/径向基函数。

### 3.2.2 其他数字技术与精益建造的集成框架

数字技术的迅速发展对精益建造产生着深刻影响。文献调研表明,近年来在数字技术与精益建造的集成研究方面文献数量有所增加,主要分为3个研究方向:①精益建造施工,基于超宽带(UWB)和机器视觉实时定位施工现场人、机、材<sup>[32]</sup>,数字看板系统用于土方施工的资源调度<sup>[33]</sup>,基于物联网的精益建造管理<sup>[34]</sup>,基于价值流映射的3D打印精益建造分析<sup>[35]</sup>;②精益建造教育培训,如射频识别(RFID)技术<sup>[36]</sup>、仿真游戏技术、VR<sup>[37]</sup>等方式;③精益建造管理。通用数据环境(CDE)支持数字化精益建造管理<sup>[38]</sup>。

Dave等<sup>[39]</sup>提出了建筑全生命周期的物联网典型框架,该框架基于物联网开放式消息接口标准,采用VisiLean精益施工管理软件,涵盖建筑设计、生产、建造、使用、运维及拆除各阶段,对建筑全生命周期进行精益化管理。

### 3.3 精益建造软件研发

在建设全过程各阶段构建相应的精益建造软件和管理平台系统,对精益建造项目的推进至关重要。

根据项目集成应用开发了不同的软件,如表4所示。由表4可知,精益建造软件的应用主要集中在设计阶段,施工阶段较少。在设计阶段,利用BIM技术可视化的优势,在三维空间维度进行多个设计方案比选,加入时间维度后,能够进行过去、现在和未来工作任务状态的可视化展示与模拟推演;通过基于BIM工作流的信息系统支持,可以制定精益建造计划进度排程。在施工阶段,基于BIM自动化算量、四维进度模拟以及计划执行结果的分析,能有效实现项目精细化管理。

### 3.4 数字技术和精益建造集成评估

数字技术和精益建造集成研究中起到反馈闭环作用的评估是提高精益建造效果的重要环节。由表5可知,数字技术和精益建造的集成是必要的。然而,在集成运用过程中,对应用水平和成熟度的定性分析较多,而对集成数字技术后的应用水平在企业级和项目级的定量评估手段较少,因此建立数字技术与精益建造集成评估体系非常必要。数字技术与精益建造集成评估主要分为两大类,即基于工程项目数据评估和基于专家经验(问卷)评估。前者主要

表 4 精益建造软件系统研发情况<sup>[40-48]</sup>

Tab.4 Research and development of lean construction software system<sup>[40-48]</sup>

研究者	系统名称	应用阶段	BIM集成	主要功能
Kagioglou等 <sup>[40]</sup>	Process Protocol Map Creation	设计阶段	无	支持基于Process Protocol框架的设计流程
Choo等 <sup>[41]</sup>	DePlan	设计阶段	无	支持基于LPS和DSM的集成化设计管理
Wong等 <sup>[42]</sup>	SetPlan	设计阶段	从BIM中提取多方案比选所需要的信息	利用BIM支持设计过程中的SBD
Sacks等 <sup>[43]</sup>	KanBIM	设计阶段	BIM可视化展示过去、现在和未来的工作任务	基于BIM的设计工作流信息系统,支持LPS短期计划的制定和监控,支持工作任务状态的可视化展示
Dave <sup>[44]</sup>	VisiLean	设计阶段	BIM可视化展示工作进度	支持LPS各层级进度计划编排,移动端APP支持工作任务推送和进度反馈
Ma等 <sup>[45]</sup>	BIM-based Collaboration Platform for IPD	设计阶段	基于BIM和关联数据进行查询和推理	利用BIM和关联数据支持IPD模式下多参与方基于LPS、SBD的协同设计
Heigermoser等 <sup>[46]</sup>	BIM-based LPS Tool	施工阶段	基于BIM的自动化算量提取,四维模拟和进度可视化	支持施工流水段划分,支持自动算量提取,支持短期计划四维模拟,支持计划执行结果的系统性分析
Schimanski等 <sup>[47-48]</sup>	BeaM!	施工阶段	基于BIM算量提取进行排程、进度可视化	完全支持施工LPS,支持BIM算量提取和可视化展示,支持数字化看板管理

注:DSM表示设计结构矩阵;SBD表示可持续性建筑设计。

基于项目数据的理论分析和变量分析,对项目进度和成本影响进行评估;后者主要通过问卷或专家经验,找出项目浪费来源,分析显著程度和关联路径,从而找到消除浪费的途径。

表 5 精益建造与数字技术集成评估研究情况<sup>[49-54]</sup>

Tab.5 Research on evaluation of lean construction and digital technology integration<sup>[49-54]</sup>

类别	研究者	研究目标	研究方法	结果/结论
基于工程项目数据评估	Gurevich等 <sup>[49]</sup>	KanBIM对工作流和效率的影响	使用仿真方法实施2个虚拟工程案例,对比仿真结果;问卷和访谈调研参与者感受,并进行显著性分析	KanBIM能帮助参与者了解进度,降低管理复杂度,减少返工和时间浪费
	Lagos等 <sup>[50]</sup>	IT对LPS实施的影响	对比18个工程案例的16个LPS实施点以及PPC;使用相关性分析确定IT通过哪些LPS实施点对PPC产生影响	10个使用IT的项目在6个LPS实施点上有显著改善,7个LPS实施点以及PPC具有正相关关系;2个LPS实施点(计划和控制过程标准化,对于约束的系统性分析和消除)与IT应用及PPC改善都相关
	Nguyen等 <sup>[51]</sup>	IPD、LC、BIM三者集成对项目进度和成本的影响	72个工程项目的数据分析,基于理论的定性分析和单变量或多变量的方差分析	定性分析了三者有效集成的6个关键点;定量分析表明,三者集成对进度有较大提升,对成本提升不明显
基于专家经验(问卷)评估	Maraqqa等 <sup>[52]</sup>	BIM和LC对工作流CFI的影响	18个高层住宅项目的7个不同LC/BIM实施水平的项目对比分析	应用BIM和LPS能显著改善CFI,集成应用比单独应用效果更好
	Singh等 <sup>[53]</sup>	IT对浪费来源的影响	问卷调研找出主要浪费来源,文献调研找出可被IT解决的浪费来源	根据问卷的打分确定3类40种浪费的来源;文献调研13类IT技术;定性分析每类IT可解决的问题,确定23种浪费来源可被IT消除
	Varela等 <sup>[54]</sup>	精益制造和工业4.0对经济、社会、环境可持续性的影响	问卷调研,结构方程模型	精益制造对可持续性的影响不显著,工业4.0对可持续性的影响非常显著

注:IT表示信息技术;CFI表示建造工作流指数。

## 4 结语

数字技术与精益建造的深入交互有助于精益建造原则的实现。现有研究大多涉及BIM技术和LPS的集成,以及对BIM技术对精益建造的影响评估。通过文献调研,从发展趋势来看,数字技术正成为推

动建筑业转型的核心驱动力。然而,已有研究成果和工程实践缺乏精益建造与数字技术集成的系统性研究,未来还可从以下三方面进一步加强:基于数字化的精益建造及其管理模型、基于数字化的精益建造管理平台、基于数字化的精益建造成熟度评估模型和方法。

## 作者贡献声明:

刘刚:研究方法与技术路线制定,精益建造与数字技术集成重点文献分析,论文撰写。

马智亮:研究方法与技术路线指导,论文审核。

李松阳:参考文献收集,文献计量学分析。

## 参考文献:

- [1] McKinsey Global Institute. Imagining construction's digital future [EB/OL]. [2016-06-24]. <https://www.mckinsey.com/capabilities/operations/our-insights/imagining-constructions-digital-future>.
- [2] KOSKELA L. Application of the new production philosophy to construction [R]. Stanford: The Stanford Center for Integrated Facility Engineering (CIFE), 1992.
- [3] 袁正刚. 建筑企业的数字化转型之路[J]. 施工企业管理, 2019(2):38.  
YUAN Zhenggang. Digital transformation of construction enterprises [J]. Construction Enterprise Management, 2019(2):38.
- [4] 刘刚. 智慧工地的“前世今生”[J]. 施工企业管理, 2017(4):16.  
LIU Gang. “Past life and present life” of smart construction site [J]. Construction Enterprise Management, 2017(4):16.
- [5] 沈楷程. 装配式建造过程返工风险研究[D]. 北京:清华大学, 2021.  
SHEN Kaicheng. Research on rework risk of prefabricated construction process [D]. Beijing: Tsinghua University, 2021.
- [6] GIORGIO L, MAURO M, GIULIA G, *et al.* Improving projects performance with lean construction: state of the art, applicability and impacts [J]. Organization, Technology & Management in Construction: An International Journal, 2013, 5:775.
- [7] 林肯·H·福布斯, 赛义德·M·艾哈迈德, 何清华, 等. 现代工程建设精益项目交付与集成实践[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 2015.  
LINCOLN H F, SYED M A, HE Qinghua, *et al.* Modern construction lean project delivery and integrated practices [M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2015.
- [8] NATHALIE P, ARISTIDE B, MARIO B, *et al.* Construction 4.0: a survey of research trends [J]. Journal of Information Technology in Construction, 2020, 25: 416.
- [9] MEHO L.I, ROGERS Y. Citation counting, citation ranking, and *h*-index of human computer interaction researchers: a comparison of Scopus and Web of Science [J]. The Journal of the Association for Information Science and Technology, 2008, 59(11):1711.
- [10] SALEM O, SOLOMON J, GENAIDY A, *et al.* Lean construction: from theory to implementation [J]. Journal of Management in Engineering, 2006, 22(4): 168.
- [11] 涂佳琪, 杨新涯, 王彦力. 中国知网CNKI历史与发展研究[J]. 图书馆论坛, 2019, 39(9):1.  
TU Jiaqi, YANG Xinya, WANG Yanli. Research on the history and development of CNKI [J]. Library Forum, 2019, 39(9): 1.
- [12] 马智亮, 蔡诗瑶. 高层建筑自动化和机器人研究开发40年及今后优先发展方向[J]. 施工技术, 2021, 50(13):34.  
MA Zhiliang, CAI Shiyao. Construction automation and robotics for high-rise buildings: research and development in past 40 years and its tendency [J]. Construction Technology, 2021, 50(13):34.
- [13] 娄丽娜. 文献计量学在科研机构竞争力评价中的应用研究[J]. 图书情报工作, 2014, 58(S2):209.  
LOU Lina. Application of bibliometric in competitiveness evaluation of scientific research institutions [J]. Library and Information Service, 2014, 58(S2):209.
- [14] 王海焦, 黄锐娜, 王小俊, 等. 基于VOSviewer的富血小板血浆研究热点主题分析[J]. 中国组织工程研究, 2019, 23(18): 2947.  
WANG Haijiao, HUANG Ruina, WANG Xiaojun, *et al.* Analysis of hot topics in platelet rich plasma research based on VOSviewer [J]. Journal of Clinical Rehabilitative Tissue Engineering Research, 2019, 23(18):2947.
- [15] BCG. Boosting productivity in construction with digital and lean [R]. Boston: Boston Consulting Group, 2018.
- [16] SAWHNEY A, RILEY M, IRIZARRY J. Construction 4.0: an innovation platform for the built environment [M]. New York: Routledge, 2020.
- [17] SACKS R, DAVE B, KOSKELA L, *et al.* Analysis framework for the interaction between lean construction and building information modelling [C]//17th Annual Conference of the International Group for Lean Construction. Taipei: [s. n.], 2009:221-234.
- [18] SACKS R, KOSKELA L, DAVE B, *et al.* Interaction of lean and building information modeling in construction [J]. Journal of Construction Engineering and Management, 2010, 136(9): 968.
- [19] MOLLASALEHI S, RATHNAYAKE A, ABOUMOEMEN A, *et al.* How BIM-lean integration enhances the information management process in the construction design [C]// 25th Annual Conference of the International Group for Lean Construction. Heraklion: [s. n.], 2017:531-538.
- [20] SAIEG P, SOTELINO E, NASCIMENTO D, *et al.* Interactions of building information modeling, lean and sustainability on the architectural, engineering and construction industry: a systematic review [J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 174: 788.
- [21] SCHIMANSKI C, MARCHER C, MONIZZA G, *et al.* The last planner system to building information modeling in construction execution: from an integrative review to a conceptual model for integration [J]. Applied Science, 2020, 10: 821.
- [22] OSKOUIE P, GERBER D J, ALVES T, *et al.* Extending the

- interaction of building information modeling and lean construction [C]//Proceedings for the 20th Annual Conference of the International Group for Lean Construction. San Diego: [s. n.], 2021: 1-10.
- [23] RODRIGUEZ M, CARDENAS L, DAVE B, *et al.* Understanding the interaction between virtual design, construction and lean construction [C]// 29th Annual Conference of the International Group for Lean Construction. Lima: [s. n.], 2021: 107-115.
- [24] EVANS M, FARRELL P, ZEWEIN W, *et al.* Analysis framework for the interactions between building information modelling (BIM) and lean construction on construction mega-projects [J]. *Journal of Engineering, Design and Technology*, 2021, 19(6): 1451.
- [25] MELLADO F, LOU E. Building information modelling, lean and sustainability: an integration framework to promote performance improvements in the construction industry [J]. *Sustainable Cities and Society*, 2020, 61: 102355.
- [26] SBITI M, BEDDIAR K, BELADJINE D, *et al.* Toward BIM and LPS data integration for lean site project management: a state-of-the-art review and recommendations [J]. *Buildings*, 2021, 11: 196.
- [27] CHUQUÍN F, CHUQUÍN C, SAIRE R. Lean and BIM interaction in a high-rise building [C]//29th Annual Conference of the International Group for Lean Construction, Lima: [s. n.], 2021:136-144.
- [28] HEYL J, DEMIR S. Digitizing lean construction with building information modeling [C]//27th Annual Conference of the International Group for Lean Construction. Dublin: [s. n.], 2019: 843-852.
- [29] WICKRAMASEKARA A, GONZALEZ V, O'SULLIVAN M, *et al.* Exploring the integration of last planner system, BIM and construction simulation [C]// 28th Annual Conference of the International Group for Lean Construction. Berkeley: [s. n.], 2020:1057-1068.
- [30] ASLAM M, GAO Z, SMITH G. Integrated implementation of virtual design and construction (VDC) and lean project delivery system (LPDS)[J]. *Journal of Building Engineering*, 2021, 39: 102252.
- [31] BRISSI S, CHONG O, DEBS L, *et al.* A review on the interactions of robotic systems and lean principles in offsite construction [J]. *Engineering, Construction and Architectural Management*, 2021, 29(1): 233791078.
- [32] CHENG T, YANG J, TEIZER J, *et al.* Automated construction resource location tracking to support the analysis of lean principles [C]// 18th Annual Conference of the International Group for Lean Construction. Haifa: [s. n.], 2010:643-653.
- [33] KIRCHBACH K, KOSKELA L, GEHBAUER F. Digital Kanban for earthwork site management [C]// 22th Annual Conference of the International Group for Lean Construction. Oslo: [s. n.], 2014:663-676.
- [34] XU G, LI M, CHEN C, *et al.* Cloud asset-enabled integrated IoT platform for lean prefabricated construction [J]. *Automation in Construction*, 2018, 93: 123.
- [35] SAKKA F, HAMZEH F. 3D concrete printing in the service of lean construction [C]// 25th Annual Conference of the International Group for Lean Construction. Heraklion: [s. n.], 2017:781-788.
- [36] LI X, SHEN G, WU P, *et al.* RBL-PHP: simulation of lean construction and information technologies for prefabrication housing production [J]. *Journal of Management in Engineering*, 2018, 34(2): 04017053.
- [37] LIU C, GONZALEZ V, LIU J, *et al.* Accelerating the last planner system (LPS) uptake using virtual reality and serious games: a sociotechnical conceptual framework [C]// 28th Annual Conference of the International Group for Lean Construction. Berkeley: [s. n.], 2020:481-492.
- [38] SCHIMANSKI C, MONIZZA G, MATT D. The role of common data environments as enabler for reliable digital lean construction management [C]// 29th Annual Conference of the International Group for Lean Construction. Lima: [s. n.], 2021:97-106.
- [39] DAVE B, KUBLER S, FRÄMLING K, *et al.* Opportunities for enhanced lean construction management using Internet of Things standards [J]. *Automation in Construction*, 2016, 61: 86.
- [40] KAGIOGLOU M, WU S, AOUAD G, *et al.* An IT tool for managing the product development process [C]// 11th Annual Conference of the International Group for Lean Construction. Blacksburg: [s. n.], 2003:120-132.
- [41] CHOO H, HAMMOND J, TOMMELEIN I, *et al.* DePlan: a tool for integrated design management [J]. *Automation in Construction*, 2004, 13: 313.
- [42] WONG J, PARRISH K, TOMMELEIN I, *et al.* SetPlan: a computer tool to aid in set-based design [C]//17th Annual Conference of the International Group for Lean Construction. Taipei: [s. n.], 2009:235-244.
- [43] SACKS R, RADOSVLJEVIC M, BARAK R. Requirements for building information modeling based lean production management systems for construction [J]. *Automation in Construction*, 2010, 19: 641.
- [44] DAVE B. Developing a construction management system based on lean construction and building information modeling [D]. Haifa: Technion University, 2013.
- [45] MA Z, ZHANG D, LI J. A dedicated collaboration platform for integrated project delivery [J]. *Automation in Construction*, 2018, 86: 199.
- [46] HEIGERMOSER D, SOTO B, ABBOTT E, *et al.* BIM-based Last Planner System tool for improving construction project management [J]. *Automation in Construction*, 2019, 104: 246.
- [47] SCHIMANSKI C, MONIZZA G, MARCHER C, *et al.* Development of a BIM-based production planning and control

- system for lean construction through advancement and integration of existing management techniques [J]. *Frontiers of Engineering Management*, 2021, 8(3): 429.
- [48] SCHIMANSKI C, PRADHAN N, CHALTSEV D, *et al.* Integrating BIM with lean construction approach: functional requirements and production management software [J]. *Automation in Construction*, 2021, 132: 103969.
- [49] GUREVICH U, SACKS R. Examination of the effects of a KanBIM production control system on subcontractors' task selections in interior works [J]. *Automation in Construction*, 2014, 37: 81.
- [50] LAGOS C, HERRERA R, ALARCÓN L. Contributions of information technologies to last planner system implantation [C]// 25th Annual Conference of the International Group for Lean Construction. Heraklion: [s. n.], 2017:87-94.
- [51] NGUYEN P, AKHAVIAN R. Synergistic effect of integrated project delivery, lean construction, and building information modeling on project performance measures: a quantitative and qualitative analysis [J]. *Advances in Civil Engineering*, 2019, 2019: 1267048.
- [52] MARAQA M, SACKS R, SPATARI S. Quantitative assessment of the impacts of BIM and lean on process and operations flow in construction projects [J]. *Engineering, Construction and Architecture Management*, 2021, 28(8): 2176.
- [53] SINGH J, MANGAL M, CHENG J. IT for lean construction: a survey in India [C]// 25th Annual Conference of the International Group for Lean Construction. Heraklion: [s. n.], 2017:119-126.
- [54] VARELA L, ARAÚJO A, ÁVILA P, *et al.* Evaluation of the relation between lean manufacturing, Industry 4.0, and sustainability [J]. *Sustainability*, 2019, 11(5): 1439.

### (上接第94页)

- LI Shucai, LIU Bin, SUN Huaifeng, *et al.* State of art and trends of advanced geological prediction in tunnel construction [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2014, 33(6):1090.
- [10] QI Taiyue, LEI Bo, WANG Rui, *et al.* Solid-fluid-gas coupling prediction of harmful gas eruption in shield tunneling [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2018, 71:126.
- [11] KANG X, XU M, LUO S, *et al.* Study on formation mechanism of gas tunnel in non-coal strata [J]. *Natural Hazards*, 2013, 66(2):291.
- [12] COPUR H, CINAR M, OKTEN G, *et al.* A case study on the methane explosion in the excavation chamber of an EPB-TBM and lessons learnt including some recent accidents [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2012, 27(1):159.
- [13] RAHIMI S, ATAEE-POUR M, MADANI H, *et al.* Investigating the impact of gas emission uncertainty on airflow distribution in an auxiliary ventilation system using CFD and Monte-Carlo simulation [J]. *Building and Environment*, 2021, 204:108165.
- [14] LI H, WANG W, LIU Y, *et al.* An integrated drilling, protection and sealing technology for improving the gas drainage effect in soft coal seams [J]. *Energy Reports*, 2020, 6: 2030.
- [15] FAN J, LIU P, LI J, *et al.* A coupled methane/air flow model for coal gas drainage: model development and finite-difference solution [J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2020, 141:288.
- [16] GUO H, WANG K, WU Y, *et al.* Evaluation of the weakening behavior of gas on the coal strength and its quantitative influence on the coal deformation [J]. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2021, 31(3):451.
- [17] KOVALCHUK N, HADJISTASSOU C. Adsorption and storage characteristics of natural gas in low-permeability porous materials [J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2021, 95:104217.
- [18] LIU S, YANG Y, DENG B, *et al.* Tectonic evolution of the Sichuan Basin, Southwest China [J]. *Earth-Science Reviews*, 2021, 213:103470.
- [19] XING X, QI S, ZHANG J, *et al.* Spatial distribution and source diagnosis of polycyclic aromatic hydrocarbons in soils from Chengdu Economic Region, Sichuan Province, western China [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2011, 110(2):146.
- [20] JIANG D, WANG M, SONG G, *et al.* Transition from fault-propagation folds to fault-bend folds determined by along-strike variations of structural styles and fault displacement-distance relationships: the Sumatou anticline, Sichuan Basin, China [J]. *Journal of Structural Geology*, 2020, 131: 103951.
- [21] EL-AMIN M F. Derivation of fractional-derivative models of multiphase fluid flows in porous media [J]. *Journal of King Saud University: Science*, 2021, 33(2):101346.
- [22] ZHANG Rong, CHENG Yuanping, YUAN Liang, *et al.* Enhancement of gas drainage efficiency in a special thick coal seam through hydraulic flushing [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2019, 124:104085.