

DOI: 10.7672/sgjs2025240116

# 岩石边坡植被混凝土绿化技术机理创新与应用

王兴超

(中建城市建设发展有限公司,北京 100037)

**[摘要]** 针对我国基础设施大规模建设引发的岩石边坡生态退化与稳定性问题,系统研究了植被混凝土绿化技术的核心机理、材料优化及工程应用。通过构建“物理加固-生态基材-生物活性”三位一体技术体系,实现了抗冲刷性能提升60%、植被覆盖率1年内>90%的突破。基于微生物菌剂改良的CBS技术体系在高陡边坡(坡度>60°)修复中取得显著成效,为复杂地质条件下生态修复提供了创新解决方案。研究成果在典型工程中验证了技术可行性,经济效益提升33%,生态效益显著,为“双碳”目标下的国土空间修复提供了技术支撑。

**[关键词]** 植被混凝土;边坡稳定性;生态修复;抗冲刷性能;微生物菌剂;可持续

**[中图分类号]** TV223

**[文献标识码]** A

**[文章编号]** 2097-0897(2025)24-0116-05

## Mechanism Innovation and Application of Vegetation Concrete Greening Technology for Rock Slopes

WANG Xingchao

(CSCEC City Construction Development Co., Ltd., Beijing 100037, China)

**Abstract:** In response to the ecological degradation and stability issues of rock slopes caused by large-scale infrastructure construction in China, this paper systematically investigated the core mechanisms, material optimization, and engineering applications of vegetation concrete greening technology. By establishing a trinity technology system of “physical reinforcement-ecological substrate-biological activity”, breakthroughs were achieved in enhancing anti-scour performance by 60% and achieving a vegetation coverage rate of over 90% within one year. The CBS technology system improved with microbial inoculants achieved remarkable results in the restoration of high and steep slopes (slope is greater than 60°), providing an innovative solution for ecological restoration under complex geological conditions. The research findings verified the technical feasibility in typical projects, with an economic benefit increase of 33% and significant ecological benefits, offering technical support for territorial spatial repair under the “dual carbon” (carbon peaking and carbon neutrality) goal.

**Keywords:** vegetation concrete; slope stability; ecological restoration; anti-scour performance; microbial inoculants; sustainability

### 0 引言

随着我国基础设施建设的快速推进,矿山开采、公路与铁路建设及水利工程等活动导致大量岩石边坡裸露,引发严重的水土流失、生物多样性锐减及地质灾害隐患。传统边坡防护技术虽能在短期内实现基础防护,但普遍存在强度不足、保水性差、生态修复周期长等问题,尤其在高陡边坡(坡度>60°)修复中难以兼顾生态效益与工程稳定性。

此外,我国干旱半干旱地区占比>60%,传统技术因依赖持续人工养护且成本高昂,难以满足生态修复的可持续性需求。在此背景下,植被混凝土技术通过“物理加固-生态基材-生物活性”协同作用机制,为岩石边坡修复提供了新思路。

### 1 研究背景与现状

#### 1.1 国内外研究背景

欧盟《绿色基础设施指令》要求新建工程边坡植被覆盖率≥85%,而我国GB 50330—2013《建筑边坡工程技术规范》尚未明确生态修复量化指标。《2025年全国地质灾害通报》数据显示,2024年全

国因工程建设新增岩质裸露边坡达 12.7 万  $\text{hm}^2$ , 引发地质灾害隐患点同比增加 23%。

随着我国城镇化率突破 65%, 矿山开采、交通基建等工程活动年均新增裸露岩质边坡 >10 万  $\text{hm}^2$ , 导致年土壤侵蚀量达 2.3 亿 t, 生态系统服务价值损失超千亿元。以西南喀斯特地区为例, 因高速公路建设形成的高陡岩质边坡, 因水土流失造成每年的直接经济损失达数十亿元, 引发的滑坡、泥石流等地质灾害威胁周边居民安全。传统刚性支护技术如浆砌石、混凝土格构梁等, 虽能保障边坡稳定, 但存在景观破碎、生态功能缺失等缺陷, 且长期维护成本高昂, 难以满足生态文明建设对“山水林田湖草”系统治理的要求。

植被混凝土技术通过工程力学与生态学的交叉融合, 将水泥基材料的刚性支护与植物根系的柔性锚固相结合, 实现边坡防护与生态修复的双重目标。该技术不仅能有效遏制水土流失, 还能通过植被群落的构建改善微气候, 促进碳汇积累, 契合我国“双碳”目标下的国土空间修复需求。以长江经济带为例, 沿线分布的大量矿山边坡和交通边坡迫切需要高效、可持续的生态修复技术, 植被混凝土技术的研发与应用具有重要的现实意义。

1.2 国内外技术发展现状

欧美国家自 20 世纪 70 年代开展相关研究, 形成了以荷兰 Hydroseeding 技术为代表的成熟体系。该技术通过高压喷播将种子、肥料、纤维等混合液喷射到边坡表面, 适用于缓坡(坡度 <45°)生态修复, 但在高陡边坡中因缺乏有效的力学支撑, 基材流失率 >30%。

我国自 20 世纪 90 年代引进 Hydroseeding 技术后, 通过自主研发形成喷混植生、藤本植物护坡等特色工艺。例如, 喷混植生技术通过在基材中添加水泥、骨料等, 形成具有一定强度的防护层, 适用于坡度 45°~60°的边坡, 但在坡度 >60°的高陡边坡修复中仍面临基材流失率高(传统技术达 35%~42%)、植被存活率不足等技术瓶颈。《中国生态修复产业发展报告(2025)》中数据显示, 我国高陡边坡(>60°)修复企业成本较平缓边坡高出 65%, 且返修率高达 38%。

国内企业通过引入 AB 菌剂改良基材性能, 使植被覆盖率在 1 年内 >90%, 突破传统技术局限<sup>[1]</sup>。然而, 现有研究对微生物菌剂在高陡边坡中的作用机理尚未完全明确, 材料配合比优化仍依赖经验公式, 智能化施工装备和监测体系有待进一步完善。因此, 开展植被混凝土技术的机理创新与应用研究, 对推动我国边坡生态修复技术进步具有重要的

理论和实践意义。

2 技术原理与核心创新

2.1 岩石边坡植被绿化防护技术原理

利用水泥在水化过程中产生水化产物, 与骨料、添加剂等形成具有一定强度的硬化体, 将边坡表面的松散岩石颗粒胶结在一起, 形成一层防护层, 有效防止雨水冲刷、风化侵蚀对边坡的破坏。植物种子在基材中萌发后, 根系深入边坡岩体缝隙中, 与植被混凝土层相互交织, 形成一个复杂的锚固体系<sup>[2]</sup>。以高羊茅为例, 其根系在 3 个月内可深入岩体 5~10cm, 形成直径 0.2~0.5mm 的须根网络; 刺槐等灌木根系在 1 年内可形成主根直径 1~2cm、侧根辐射范围 50~100cm 的根系系统, 如同无数微型锚杆将边坡岩体紧紧锚固, 增强了边坡的整体稳定性, 同时实现边坡的快速绿化和生态恢复。

2.2 植被混凝土植物生长原理

植被混凝土由水泥、骨料、腐殖质、保水剂、肥料、植物种子等多种成分组成, 为植物生长提供了良好的基质条件。腐殖质富含植物生长所需的氮、磷、钾等营养元素, 且具有良好的保水保肥性能, 能持续为植物提供养分。保水剂可吸收和储存大量水分, 在干旱时缓慢释放, 满足植物生长对水分的需求。植物种子在适宜的温度、湿度条件下萌发, 根系在植被混凝土层中生长, 通过光合作用制造有机物质, 促进植物的生长和发育。

2.3 作用机理

植被混凝土通过三重机制实现边坡稳定与生态修复。

1) 力学加固效应。水泥水化产物与骨料形成抗压强度 3~5MPa 的硬化层, 该强度可有效抵抗雨水冲刷和重力作用下的基材流失。锚杆采用直径 16~25mm 的螺纹钢, 间距 1.5~2m, 长度根据边坡岩性和坡度确定(一般为 1~3m), 锚杆抗拔力设计值  $\geq 50\text{kN}$ 。三维钢丝网(网孔尺寸 50mm×50mm)与锚杆通过 U 型卡固定, 形成抗拉强度  $15\text{kN/m}^2$  的柔性骨架。该骨架既能承受边坡表面的拉应力, 又能适应边坡的微小变形, 避免刚性支护因应力集中导致的开裂问题。

2) 生态锚固效应。先锋草本(高羊茅、黑麦草)在修复初期(1~3 个月)快速覆盖边坡, 减少雨水直接冲刷; 后期灌木(刺槐、紫穗槐、胡枝子)逐渐生长, 形成复合根系网络。研究表明, 草本植物根系主要分布在 0~30cm 的基材层, 灌木根系可深入 50~100cm 的岩体缝隙, 乔木根系甚至 >2m。此种垂直分层的根系结构使边坡抗剪强度提升 40%, 有

效抑制浅层和深层滑坡滑移。通过调控种子配合比(如草本占 60%、灌木占 30%、乔木占 10%),实现草本-灌木-乔木生态演替,最终形成稳定的自然植被群落,降低人工养护成本。

3)微生物强化效应。AB 菌(含  $\alpha$ -中度嗜盐菌、 $\beta$ -耐碱芽孢杆菌)随雨水渗入基材后,在湿度 60%~80%、温度 20~30℃的条件下激活,分解有机质生成腐殖酸、氨基酸等物质。腐殖酸可使土壤团粒结构改良率达 75%,将单粒结构的土壤颗粒胶结成直径 0.25~5mm 的团粒,提高土壤通气性和保水性;同时,微生物代谢产物可促进水泥水化反应,使生态锚固层抗压强度提升 10%~15%(达 3~5MPa)<sup>[3]</sup>。此外,AB 菌具有固氮(每年固氮量 0.5~1.0kg/hm<sup>2</sup>)、解磷(有效磷含量提高 20%~30%)、释钾(速效钾含量增加 15%~20%)功能,为植物生长提供持续养分供应。

2.4 技术体系创新

构建两大核心模块及生物活性技术的三位一体技术体系。

1)三维防护网架结构层模块。采用“锚杆+支撑绳+钢丝网”组合结构,锚杆长度根据边坡岩体风化程度确定,强风化岩体中锚杆长 3m,中等风化岩体中锚杆长 2m,微风化岩体中锚杆长 1.5m。 $\phi$ 12 支撑绳沿边坡走向和倾向铺设,形成间距 1.5m×1.5m 的网格,T4/80 型钢丝网(网孔尺寸 50mm×50mm,镀锌层厚度≥80 $\mu$ m)固定于支撑绳上,抗拉强度达 15kN/m<sup>2</sup><sup>[4]</sup>。该结构可有效分散边坡表面应力,防止局部坍塌,同时为基材喷射提供支撑框架。

2)生态基材层模块。优化配合比为水泥 15%、沙壤土 60%、有机质 15%、保水剂 0.5%,孔隙率控制在 25%~30%<sup>[5-6]</sup>。选用 42.5 级普通硅酸盐水泥,其初凝时间≥45min,终凝时间≤10h,既能保证基材的早期强度,又为种子萌发提供适宜的碱性环境(pH 值为 7.5~8.5)。沙壤土粒径 0.05~2mm,含砂量 50%~60%,黏粒含量 20%~30%,确保基材具有良好的透水性和保水性。有机质采用腐熟的锯末、泥炭土等,含腐殖质≥30%,可提高基材肥力和保水能力。保水剂选用聚丙烯酰胺类高吸水性树脂,吸水倍率≥500 倍,常年干旱地区可调整至 0.35kg/m<sup>3</sup>,使基材含水率保持在 20%~25%。

3)生物活性材料技术应用。通过在基材层中添加 0.5~1.0kg/m<sup>3</sup> 的 AB 菌剂,构建根际微生物群落。研究表明,接种 AB 菌剂的基材中,丛枝菌、根真菌侵染率达 40%~50%<sup>[7]</sup>,促进植物根系对磷元素的吸收效率提升 35%。微生物代谢活动产生的

胞外多糖可增强土壤颗粒间的黏结力,减少雨水冲刷导致的基材流失。通过微生物代谢活动改良基质理化性质,氮、磷、钾利用率提高 30%<sup>[3]</sup>。此外,生物活性层还可调节基材微环境,使夏季基材表面温度降低 3~5℃、冬季提高 2~3℃,改善植物生长的小气候条件。

3 材料配合比设计与优化

3.1 材料配合比设计

植被混凝土所选材料配合比可参照表 1。

表 1 材料配合比  
Table 1 Material mix proportion

组分	配合比/ (kg·m <sup>-3</sup> )	植被混凝土技术
42.5 级水泥	150~300	胶结作用,调节 pH 值
级配骨料	600~800	骨架支撑,控制孔隙率
腐殖质	100~200	提供养分,改善保水性
AB 菌剂	0.5~1.0	促进养分循环,固氮、解磷、释钾
保水剂	0.1~0.3	抗旱保水
肥料	根据种子和环境选择	促生长

材料说明如下。

1)AB 菌菌体经雨水渗入激活,具有代谢活性,提高植被混凝土使用寿命;不仅可固氮、解磷、释钾,还可加速土壤熟化,改善土壤团粒结构,增强保水保肥能力,促进植物根系发育,提高抗逆性。

2)保水剂为一种高吸水性树脂材料,可吸收自重数百倍甚至上千倍水分,常用的保水剂有聚丙烯酰胺类和淀粉接枝丙烯酸盐类。常年干旱地区可调整至 0.35kg/m<sup>3</sup>。

3)不同地区采用多物种混播策略。华南地区选用狗牙根(暖季型,40%)+胡枝子(灌木,30%)+马尾松(乔木,30%)组合,适应高温高湿气候;北方地区可选用黑麦草(冷季型,30%)+狗牙根(冷季型,20%)+刺槐(灌木,30%)+侧柏(乔木,20%)组合,兼顾耐寒性和抗旱性。种子播种量根据物种特性和边坡坡度调整,高陡边坡(>60°)播种量增加 20%~30%,确保初期覆盖率达标。

3.2 优化措施

1)采用响应面分析法优化配合比。以抗压强度、植被覆盖率、基材流失率为响应指标,选取水泥掺量、腐殖质含量、AB 菌剂用量为自变量,设计三因素三水平试验。结果表明,最佳水泥掺量为 200kg/m<sup>3</sup>、腐殖质为 150kg/m<sup>3</sup>、AB 菌剂为 0.8kg/m<sup>3</sup>,此时抗压强度  $Y_1=4.2$ MPa,植被覆盖率  $Y_2=92\%$ ,基材流失率  $Y_3=12\%$ ,模型拟合度良好。

2)引入纳米黏土改性基材。将层状硅酸盐黏土(粒径 20~50nm)以 5%的比例掺入基材,其片层



结构可与水泥水化产物形成氢键,使抗压强度提升20%(达5.0MPa),同时硅酸盐黏土的吸水膨胀特性可调节孔隙率至25%,改善基材的透水性和保水性。

3)开发智能喷播系统。开发基于北斗导航的智能喷播车,配备激光雷达测坡仪和流量控制传感器,可实时获取边坡坡度、曲率等参数,自动调整喷射压力(0.4~0.6MPa)和种子配合比。喷播枪头采用旋转雾化技术,使种子空间分布均匀度>95%,较传统喷播机提高30%。系统还具备数据记录功能,可生成喷播作业轨迹和参数报表,便于质量追溯。

4 施工流程与质量控制

4.1 标准化施工流程

1)坡面预处理。采用液压破碎锤对松块进行清修,填补较大凹陷处,使边坡表面平整、稳定。

2)三维防护网架结构铺设。根据坡高、坡度和岩体性质确定锚杆长度、间距和直径。锚杆长度为1~3m;间距为1~2m;然后铺设铁丝网(钢筋网)与锚杆固定。

3)基材配置。按设计配合比,将原材料及种子搅拌均匀。基材坍落度为8~12cm。控制原材用量,并定期对基材的强度、pH值、保水性等性能进行检测。

4)分层喷射。采用双罐式喷射机(压力0.4~0.6MPa)分层施工<sup>[6]</sup>,喷射顺序自下而上;施工厚度为8~15cm,第2次喷射待初凝后进行。喷射过程中应控制喷射压力和喷射角度(60°~80°),确保植被混凝土与边坡表面紧密结合,无空洞、裂缝等缺陷。

5)养护管理。基材初凝后表面覆盖无纺布或草帘,保持水分的同时防止雨水冲刷。保持基层表面湿润,养护时间2~3个月,至形成稳定的植被群落。

4.2 质量控制要点

1)基材性能检测:7d抗压强度≥3MPa,吸水率≤15%<sup>[6]</sup>。

2)植被覆盖率监测:采用无人机多光谱成像技术,20d覆盖率达70%,60d覆盖率达80%<sup>[8]</sup>。

3)生态效益评估:通过NDVI指数分析,修复区植被指数在3年内从0.15提升至0.68<sup>[3]</sup>。

5 工程应用与效果验证

5.1 案例1:渤船重工厂区高边坡修复(辽宁葫芦岛)

1)工程特征。该边坡为砂岩边坡,坡度55°~80°,坡高80m,分6级边坡。区域年降水量600~800mm,集中在7—8月,边坡因长期风化和雨水冲刷而水土流失严重,局部发生小型滑坡。

2)技术参数。锚杆长度为3m,间距1.5m,铁丝网孔尺寸为50mm×50mm(喷塑);基材厚度10~15cm(平台处15cm,坡面厚10cm)。植物采用狗牙根(40%)、黑麦草(30%)、紫穗槐(30%)混合喷播,播种量30g/m<sup>2</sup>;基层材料内掺加AB菌剂0.8kg/m<sup>3</sup>。

3)实施效果。施工后1个月,草本植物开始萌发,覆盖率达30%;3个月后灌木发芽,覆盖率达70%;1年后植被覆盖率达90%,形成草灌复合群落。侵蚀模数从5000t/(km<sup>2</sup>·年)降至500t/(km<sup>2</sup>·年),减少90%的水土流失。养护成本从传统技术的80元/(m<sup>2</sup>·年)降至20元/(m<sup>2</sup>·年),节省75%的费用。边坡稳定性监测显示,锚杆抗拔力平均55kN,钢丝网无锈蚀和断裂,整体结构安全可靠。

5.2 案例2:广西桂林高陡岩质边坡修复

1)工程特征。灰岩边坡,坡度65°~80°,岩体破碎,pH值为4.2~5.6。

2)技术创新。添加10%火山灰改良酸性基材,采用乡土植物群落配置。

3)实施效果。2年后形成草本-灌木复合群落,地表径流系数由0.75降至0.32,通过碳汇监测,修复区年碳汇量达1.8tC/(hm<sup>2</sup>·年)。

5.3 案例3:京沈高速公路秦皇岛段边坡防护

1)工程特征。土石混合边坡,坡率1:0.75,易风化剥落。

2)实施亮点。集成智能滴灌系统(日供水量5m<sup>3</sup>),建立基材含水率动态监测网络。

3)实施效果。3年后植被覆盖率99%,极端降雨后基材无脱落,行车安全系数提升40%。

6 效益分析与技术创新

6.1 综合效益

依据现场试验数据确定了综合效益,综合效益如表2所示。

表2 综合效益

Table 2 Comprehensive benefits			
指标	传统格构梁	植被混凝土技术	提升幅度/%
单位成本/(元·m <sup>-2</sup> )	520	360	31
养护周期成本/[元·(m <sup>2</sup> ·年) <sup>-1</sup> ]	80	20	75
生态服务价值/(元·年 <sup>-1</sup> )	0	1 200~1 500	新增

6.2 社会效益

修复区域生态系统服务价值提升3.2倍,带动周边乡村旅游收入增长28%。

6.3 关键技术创新

- 1)微生物-植物协同机制:构建根际微生物群落(如丛枝菌、根真菌),促进磷素活化效率提升 35%。
- 2)低碳材料研发:利用粉煤灰替代 20% 的水泥,碳排放强度降低 18%。
- 3)智能监测体系:集成温、湿度传感器与无人机巡检,预警准确率达 90%。

7 结语

植被混凝土技术通过工程固坡与生态修复的有机结合,成功解决了高陡岩质边坡的生态恢复难题。其技术优势体现在抗冲刷性能强(抗剪强度提升 40%)、生态效益显著(3 年形成稳定群落)、经济性突出(综合成本降低 30%)。未来通过智能监测、微生物强化等技术创新,该技术将在“双碳”目标背景下发挥更大作用,为国土空间生态修复提供关键技术支撑。

未来研究方向和技术展望如下。

- 1)菌种功能强化:开发耐极端气候(如高寒、干旱)的复合菌剂,拓展技术适用范围。
- 2)智能监测系统:结合 AI 算法预测植被生长状态,实现养护决策精准化。
- 3)碳汇计量标准化:建立植被混凝土修复项目的碳汇核算体系,推动生态价值市场化。

参考文献:

[ 1 ] 高翔宇. 微生物菌剂在边坡生态修复中的应用进展[J]. 环境科学与技术,2025,48(4):102-108.

GAO X Y. Advances in the application of microbial agents in ecological restoration of slope [J]. Environmental science and technology, 2025,48(4):102-108.

(上接第 56 页)

LI P. Comparative analysis of Beidou and GPS in bridge deformation monitoring [J]. Beijing surveying and mapping, 2020,34(1):92-95.

[ 5 ] 王晓明,曾旭平,马鑫程,等. GNSS 精密控制网在特大型桥梁施工监测中的应用——以虎门二桥为例[J]. 全球定位系统, 2019,44(5):106-110.

WANG X M, ZENG X P, MA X C, et al. Application of GNSS precision control network in super large bridge construction monitoring;a case of the Second Humen Bridge[J]. GNSS world of China,2019,44(5):106-110.

[ 6 ] 梅秀道,钟继卫,史晶. GNSS-RTK 在大跨斜拉桥施工期位移监测中的应用[J]. 桥梁建设,2020,50(4):36-41.

MEI X D, ZHONG J W, SHI J. Application of GNSS-RTK to displacement monitoring in construction period of long-span cable-stayed bridge[J]. Bridge construction,2020,50(4):36-41.

[ 7 ] 王华平,林忠和,马俊. 基于 GNSS-RTK 技术的超高层结构施工期水平变形实测[J]. 施工技术(中英文),2022,51(8):41-44.

[ 2 ] 樊剑峰. 植被混凝土护坡技术在高陡岩石边坡生态防护中的应用[J]. 工程技术研究,2024,9(6):85-87.

FAN J F. Application of vegetation concrete slope protection technology in ecological protection of high and steep rock slope [J]. Engineering and technological research,2024,9(6):85-87.

[ 3 ] 湖北金源绿通公司. CBS 植被混凝土 AB 菌技术白皮书 [Z]. 2025.

Hubei Jinyuan Lütong Company. CBS vegetation concrete AB bacteria technology white paper [Z]. 2025.

[ 4 ] 朱骏灵,王晓华,梁楠,等. 广西桂林高陡岩质边坡生态修复技术研究及应用[J]. 勘察科学技术,2025(1):56-61.

ZHU J L, WANG X H, LIANG N, et al. Research and application of ecological restoration technology for high-steep rock slopes in Guilin, Guangxi Zhuang Autonomous Region [J]. Site investigation science and technology,2025(1):56-61.

[ 5 ] 高翔宇. 挖方岩石边坡绿化技术研究[J]. 亚热带水土保持, 2025,37(2):12-17.

GAO X Y. Research on greening techniques for excavated rock slopes [J]. Subtropical soil and water conservation, 2025, 37(2):12-17.

[ 6 ] 三峡大学. 植被混凝土护坡绿化技术专利文件[Z]. 2024.

China Three Gorges University. Patent document for vegetation concrete slope protection and greening technology [Z]. 2024.

[ 7 ] 王来,杜昱樊,陈奎娟. 不同水环境梯度下水生植物细根丛枝菌根真菌感染特征研究[J]. 生物化工,2025,11(2):184-186,190.

WANG L, DU Y F, CHEN K J. Study on the characteristics of arbuscular mycorrhizal fungi infection of fine roots of aquatic plants in different water environmental gradients [J]. Biological chemical engineering,2025,11(2):184-186,190.

[ 8 ] 深圳新闻网. 植被混凝土技术破解边坡绿化难题[N]. 2021-05-10(A03).

Shenzhen News Network. Vegetation concrete technology solves the problem of slope greening [N]. 2021-05-10(A03).

WANG H P, LIN Z H, MA J. Horizontal deformation measuring of a super high-rise building during the construction stage based on GNSS-RTK technology [J]. Construction technology, 2022, 51(8):41-44.

[ 8 ] 赵帅,王胜,杨淑娟,等. 基于 GNSS 技术的结构位移监测应用研究进展[J]. 施工技术(中英文),2022,51(21):6-10,16.

ZHAO S, WANG S, YANG S J, et al. Research progress of structural displacement monitoring based on GNSS technology [J]. Construction technology,2022,51(21):6-10,16.

[ 9 ] 范晓曼. 整体 GNSS RTK 模型及方法研究[D]. 武汉:武汉大学,2021.

FAN X M. Research on integration GNSS RTK model and method [D]. Wuhan:Wuhan University,2021.

[10] 魏子卿. 2000 中国大地坐标系及其与 WGS84 的比较[J]. 大地测量与地球动力学,2008,28(5):1-5.

WEI Z Q. China geodetic coordinate system 2000 and its comparison with WGS84 [J]. Journal of geodesy and geodynamics,2008,28(5):1-5.