

城市道路绿化带土壤改良技术应用

王莹, 张 锴, 谭 超

(武汉临空经济区建设投资开发有限公司, 湖北 武汉 432200)

摘 要: 在城市道路绿化带的长期使用过程中, 受机动车荷载持续作用以及路基填料混入等因素影响, 导致绿化带土壤普遍面临容重增加、结构紧实板结、水分渗透能力减弱和养分供应不足等问题。通过分析城市主干道绿化带土壤物理性能退化的内在机制, 提出一种将膨润土沸石粉复合改良材料与盲管排水系统相协同的技术方案。依托室内实验研究, 明确了改良材料的最优配比组合, 构建了暗管排水系统的水力计算模型, 并将该技术应用于某城市快速路绿化带建设工程。工程应用结果表明, 该技术可使土壤容重降幅超过 0.25 g/cm^3 , 土壤饱和导水率提升至原有土壤的 3.5 倍, 绿化植物成活率提高至 92% 以上, 为城市道路绿化土壤的修复治理提供了具有实际应用价值的技术路径。

关键词: 道路绿化带; 土壤改良; 膨润土; 盲管排水; 压实板结

中图分类号: TU997

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2026)07-0450-06

Application of Soil Improvement Technology in Urban Road Greenbelts

WANG Ying, ZHANG Kai, TAN Chao

(Wuhan Airport Economic Zone Construction Investment and Development Group Co., Ltd., Wuhan 432200, China)

Abstract: During the long-term use of urban road greenbelts, caused by factors such as continuous action of motor vehicle loads and mixing of subgrade fillers, the soil of the greenbelts generally faces the problems such as increased bulk density, compact and hard structure, weakened water permeability and insufficient nutrient supply. By analyzing the internal mechanism of soil physical property degradation in urban main road greenbelts, an improvement technical scheme that combines bentonite zeolite powder composite improvement material with blind pipe drainage system is proposed. Based on laboratory experiments, the optimal ratio combination of the improvement material is determined, a hydraulic calculation model of the blind pipe drainage system is constructed, and the proposed technology is applied to the greenbelt construction project of an urban expressway. The results of engineering application show that this technology can reduce the soil bulk density by more than 0.25 g/cm^3 , increase the saturated hydraulic conductivity to 3.5 times that of the original soil, and raise the survival rate of green plants to more than 92%, providing a technical path of practical application value for the restoration and management of urban road greenbelt soil.

Keywords: road greenbelt; soil improvement; bentonite; blind pipe drainage; compact and hard

0 引 言

在城市化快速发展进程中, 道路基础设施的建设规模不断扩大。道路绿化带作为城市生态体系的关键部分, 发挥着减轻热岛效应、阻挡道路扬尘以及保护生物多样性等生态作用。实际工程调查的数据显示, 城市主要道路绿化带的土壤普遍受到多种不利因素的影响, 例如重型车辆荷载的反复碾压、路基施工余土的混入以及道路清扫废弃物的覆盖等。这些因素使得土壤的孔隙结构遭到破坏, 容重增加, 通

气性和透水性明显变差。部分路段绿化带土壤的容重超过了 1.65 g/cm^3 , 饱和导水率低于 5 mm/h , 已经不能满足园林植物根系正常生长所需要的最小孔隙度要求。针对这类工程问题, 传统的换填客土方案存在取土不便、成本较高以及会对周边生态环境造成破坏等缺点。而单纯使用化学改良剂或者采取物理疏松措施, 往往难以同时满足土壤结构重建和长期排水的需求。本文从土壤物理性质退化的原理出发, 围绕有机无机复合改良剂的研发和暗管排水系统的布置这两个技术方面, 系统地说明道路绿化带土壤改良的施工方法要点和工程实施参数, 并通过具体的工程案例来验证该技术的可行性和改良效果, 希望能为同类工程提供技术方面的参考。

收稿日期: 2026-04-03

作者简介: 王莹(1981—), 女, 硕士, 高级工程师, 从事建筑业、房地产开发。

1 城市道路绿化带土壤板结退化机理分析

1.1 机动车荷载反复作用导致土壤压实密度增大机理

城市主要交通干道的绿化带若紧邻机动车行驶区域,大型车辆通行时产生的动态负荷会通过路面结构传导至道路两侧的土壤层,导致土壤颗粒排列状态改变及孔隙结构压缩。当车轴重量超过 8 t 的货运车辆行驶时,轮胎与路面的接触压力可达到 0.60 ~ 0.80 MPa,该压力经路基扩散后,仍会在绿化带表层 30 cm 深度范围内形成 0.15 ~ 0.25 MPa 的额外应力^[1]。在此应力程度下,土壤团聚体结构会出现破裂现象,大孔隙被压缩为中、小孔隙,土壤总孔隙度从正常耕作层的 50% ~ 55% 降低至 35% ~ 40% 以下,容重则从 1.20 ~ 1.35 g/cm³ 增加到 1.55 ~ 1.70 g/cm³。土壤压实过程符合土壤力学中的压缩曲线原理,其容重变化与荷载作用次数呈对数关联,即随着车辆通行次数的不断累积,土壤密实程度会持续提升,直至达到极限密实状态。当土壤容重超过 1.50 g/cm³ 时,根系穿透土壤的阻力会明显增大,多数园林植物的根系难以穿透容重高于 1.60 g/cm³ 的土层,进而造成植物根系分布浅层化、吸收面积缩小、抗逆能力降低^[2]。

1.2 路基填料渗入引发土壤质地粗化与营养贫瘠化过程

在道路施工环节,路基填筑过程中较多采用砂砾石或者风化岩碎料这类粗颗粒材料。在施工机械的扰动以及雨水冲刷的影响下,这些填料会逐步向道路两侧的绿化带迁移扩散。当粗颗粒填料与绿化带原本的土壤相互混合之后,会使得土壤质地朝着砂质或者砾质的方向发生改变,土壤中粉粒和黏粒的含量会相应减少。土壤颗粒组成的变化会直接对其保水保肥性能产生影响,砂质土壤的田间持水量一般仅为黏壤土的 40% ~ 50%,阳离子交换量会降低到 10 cmol/kg 以下,氮、磷、钾等养分离离子容易随着水的下渗而流失^[3]。同时,路基填料大多为石灰岩或者花岗岩的风化产物,其 pH 值相对较高,混入绿化带土壤后会使得局部区域土壤的 pH 值上升至 8.0 ~ 8.5,超出了大多数园林植物适宜生长的 pH 范围。另外,粗颗粒填料本身的有机质含量极低,与土壤混合后会进一步降低土壤有机质的浓度,使得土壤有机质含量从正常的 20 ~ 30 g/kg 下降到 10 g/kg 以下,土壤的供肥能力明显减弱,微生物的碳源供应不足,土壤生物活性也会随之降低^[4]。

1.3 地表硬化铺装阻碍土壤气体交换进而诱发微生物活性衰退机制

城市道路绿化带附近一般设置有路缘石、人行道铺设设施以及树池围护等硬化构造,这些构筑物构成了较为封闭的空间,对大气和土壤之间的气体交换形成制约。土壤呼吸所产生的二氧化碳在根系土层积累,氧气的扩散系数降低,使得根系层的氧气浓度低于 10%,而在正常的土壤通气条件下,氧气浓度需要维持在 18% ~ 21%。缺氧的环境会对好氧微生物的代谢活动起到抑制作用,导致土壤酶的活性降低,有机质矿化速度减缓,养分的释放周期变长^[5]。与此同时,压实的土壤中的孔隙数量减少,气体扩散的通道被阻断,这进一步加重了土壤通气不畅。在厌氧的微区域环境里,反硝化作用增强,氮素会以气态形式流失,并且可能生成硫化氢等具有还原性的有毒物质,对植物根系产生生理毒害。土壤氧化还原电位会从正常的 300 ~ 400 mV 下降到 200 mV 以下,根系细胞的呼吸受到抑制,能量代谢出现障碍,最终造成根系坏死。

1.4 城市扬尘覆盖导致土壤表层透气孔隙堵塞效应

城市道路扬尘的主要来源包括车辆轮胎损耗、路面材质脱落以及工程建设产生的颗粒物,其颗粒构成以细砂和粉粒为主体,颗粒直径大多在 0.05 ~ 0.25 mm。扬尘在绿化区域的表层积累,形成厚度为 25 mm 的覆盖层次,该覆盖层次结构紧实,孔隙细微,饱和导水速率低于 1 mm/h。当降水或灌溉的水分到达地面后,会受到紧实覆盖层的阻拦,难以迅速渗透到地下,导致地表径流系数提高,土壤实际得到的水分补充量减少^[6]。同时,扬尘覆盖层堵塞了土壤表层与大气相连通的孔隙,对土壤挥发气体的排放和新鲜空气的进入造成阻碍。扬尘中携带的铅、锌、镉等重金属元素会在表土层聚集,尽管在短期内对土壤化学特性的影响不大,但经过长期积累,可能通过食物链传递带来生态方面的风险。另外,紧实的覆盖层会对新萌发的植物幼苗生长产生阻碍,种子发芽后,根系很难穿透该层次进入下层土壤,进而导致植被更新出现困难,植物群落结构趋向单一化^[7]。

2 有机无机复合改良剂与暗管排水工法设计

2.1 膨润土沸石粉复合改良材料配比优化与改良机理

道路绿化带土壤出现粗化板结,可采用钠基膨润土和沸石粉按质量比 3:2 复合配制的改良材料,

该材料能有效优化土壤物理构造。钠基膨润土具备很强的吸水特性,其吸水膨胀率能达到200%~300%,膨胀后体积会填充土壤中的大孔隙,进而提升土壤保持水分的能力;沸石粉具有多孔晶体结构,比表面积大概在500~700 m²/g,阳离子交换量较高,可达120~150 cmol/kg,能够对养分离子起到吸附固定作用。改良材料的投放量要依据原状土壤的质地来确定,对于砂质土壤,建议投放量为土壤干重的8%~12%,黏质土壤的投放量则控制在5%~8%。改良的原理是基于膨润土吸水膨胀后形成凝胶网络结构,这种结构会把分散的土壤颗粒胶结在一起,形成水稳性团聚体,使团聚体直径增大到25 mm,稳定性指数提升40%以上。沸石粉颗粒填充在团聚体之间的孔隙中,既能够增大土壤比表面积来吸附养分,又能保持适当的通气孔隙。复合改良材料可使土壤毛管孔隙度增加8%~12%,非毛管孔隙度保持在10%以上,从而实现保持水分和透气性能的平衡。

表1 有机无机复合改良剂物理化学性质参数表

指标名称	钠基膨润土	沸石粉	复合改良剂
比重/(g·cm ⁻³)	2.40	2.25	2.35
比表面积/(m ² ·g ⁻¹)	600	550	580
阳离子交换量/(cmol·kg ⁻¹)	85	140	105
吸水膨胀率/%	250	35	165
粒径分布/mm	0.001-0.050	0.05-0.25	0.001-0.250
有机质含量/(g·kg ⁻¹)	5	8	6

表1的相关数据源自实验室的测定情况,呈现复合改良剂的关键物理化学方面的参数信息。膨润土所具备的较强吸水膨胀特性和沸石粉的较高阳离子交换能力之间形成了互补关系,二者复合之后的改良剂同时具备了土壤结构改良以及养分保持这两项功能。

2.2 暗管排水系统布设深度与坡降参数设计方法

针对透水性欠佳的压实土壤,设置盲管排水体系能够加快重力水的排出速度,避免根系区域出现积水情况。排水盲管选用公称直径为100 mm的高密度聚乙烯打孔波纹管,外部包裹200 g/m²的土工布滤层,以此防范泥沙造成堵塞^[8]。盲管的布设深度要根据土壤性质和地下水位状况来确定,一般设置在绿化带地表以下60~80 cm的位置,这一深度在多数园林植物根系分布密集层的下方,既能够避免对根系造成损伤,又可以有效地截流和排出深层重力水。盲管的水平间距需依据土壤渗透系数进行计算确定,可采用通过达西定律推导得出的排水公式开展水力计算。

$$Q = k \cdot i \cdot A \tag{1}$$

式中, Q 为单根盲管承担的排水流量,m³/d; k 为土壤饱和导水率,m/d; i 为水力梯度,无量纲; A 为单根盲管控制的排水面积,m²。

从工程实践情况来看,城市绿化带土壤的饱和导水率可选用0.05~0.10 m/d之间,设计水力梯度在0.01~0.02之间,单根盲管的控制宽度为8~10 m。盲管的纵向坡降需不低于0.3%,以此保证管内水流速度大于0.3 m/s,进而防范泥沙发生沉积现象。盲管出口要接入道路排水边沟或者雨水检查井,且出口标高应比受纳水体的水位高出20 cm以上,从而避免出现倒灌情况^[9]。

2.3 改良剂分层投加工艺与土壤均匀混合技术要点

改良施工采用分层开挖、分层投加、分层拌合的工艺。首先清理绿化带表层10 cm的废弃土壤及杂物,随后对下层土壤按30 cm的厚度进行分层开挖,开挖过程中需留意保护周边植物根系,防止主干根系受到损伤。每层开挖完毕后,将计算所得的改良剂用量均匀地撒布在土层表面,借助旋耕机或园林专用土壤改良机进行现场拌合,拌合深度需抵达该层底部,以确保改良剂与土壤充分混合。拌合次数不低于2遍,拌合后的土壤质地应均匀,不存在明显的改良剂团块。对于距离行道树树干50 cm范围内的土壤,转换为人工翻拌方式,运用铁锹等工具将改良剂与土壤充分混合,避免机械作业对根系造成损伤^[10]。拌合工作完成后进行适度压实,压实度控制在85%~90%,压实度过高会对改良效果产生抵消作用,过低则会对土壤稳定性造成影响。每层处理结束后开展下层开挖,如此循环往复,直至处理深度达到80 cm或遇到稳定层为止。

2.4 改良土壤渗透系数与持水能力平衡调控技术

优化后的土壤需同时满足排水透气和保水供水两方面要求。借助室内土柱试验来明确改良剂的最优添加量,当膨润土沸石粉复合改良剂的添加量达到土壤干重的10%时,土壤饱和导水率能够提高到15~25 mm/h,田间持水量保持在25%~30%。如此,既能够防止出现积水,又可以保障持续的供水能力。改良土壤的渗透系数 k 可运用Kozeny-Carman公式进行估算:

$$k = \frac{\rho_w g}{C \mu S^2} \cdot \frac{e^3}{1 + e} \tag{2}$$

式中, ρ_w 为水的密度,取1 000 kg/m³; g 为重力加速度,取9.81 m/s²; C 为形状系数,取值5~7; μ 为动力

粘滞系数,取 $1.01\times 10^{-3}\text{ Pa}\cdot\text{s}$;S为单位体积土壤颗粒的比表面积,单位为 m^2/m^3 ;e为土壤孔隙比,无量纲^[11]。在土壤改良中,可通过对改良剂中膨润土和沸石粉比例的调整,实现对土壤孔隙比e数值的调控,从而将渗透系数控制在合适范畴。若膨润土占比过大,会使土壤变得过黏过重,导致渗透系数降低;若其占比过小,又会出现改良效果不够。经实验研究得出,当膨润土与沸石粉的质量比例控制在3:2到2:1时,土壤的物理性质能达到较为协调的状态。

表2 改良前后土壤物理性质对比数据

指标名称	原状土	改良后土壤	变化率
容重/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	1.62	1.35	-16.7%
总孔隙度/%	38.5	48.2	+25.2%
毛管孔隙度/%	28.3	36.5	+29.0%
非毛管孔隙度/%	10.2	11.7	+14.7%
饱和导水率/($\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$)	4.2	18.5	+340.5%
田间持水量/%	18.5	28.3	+53.0%
pH值/无量纲	8.3	7.6	-8.4%
有机质/($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	9.8	15.2	+55.1%

表2展示了土壤关键物理性质在改良前后的变化。数据显示,经过有机无机复合改良剂进行处理后,土壤容重有明显降低,孔隙度结构得到显著优化。尤其值得注意的是,饱和导水率提高至原状土的4倍以上,田间持水量增长幅度超过50%,这为植物根系的生长营造了适宜的物理条件^[12]。

3 某城市主干道绿化带土壤改良工程应用

某城市快速路K12+500—K14+200路段中间的绿化带宽度是3 m,长度达1 700 m,栽种的香樟和红叶石楠球。该路段在2018年建设完成并通车,经过4年的使用,绿化带的土壤出现了较为严重的板结,植株生长变得衰弱,成活率不到60%。通过现场的勘察,此路段绿化带的土壤是由路基施工留下的风化岩碎屑与原来的粉质黏土混合而成,土壤质地偏向砂质,容重达到了 1.65 g/cm^3 ,饱和导水率只有 3.5 mm/h 。在雨季时地表有严重的积水,旱季时又出现缺水干裂的状况。工程选用了有机无机复合改良剂结合盲管排水的综合整治方案,处理深度为80 cm,目的是让土壤的生态功能得以恢复,同时保证绿化的景观效果。

3.1 原状土壤物理性质检测与改良方案适配性分析

在工程实施之前,按照《绿化种植土壤》(CJ/T 340—2016)以及《园林绿化工程施工及验收规范》

(CJJ 82—2012)所提出的要求,针对K12+500—K14+200此路段,开展一次具有系统性的土壤方面的调查。按照每200 m设置一个断面,并且在每一个断面的左、中、右边这3个点,去采集原状土样26组,让其覆盖整体施工段。

室内检测显示:土壤的容重在 $1.58\sim 1.72\text{ g/cm}^3$ 之间波动,其均值为 1.65 g/cm^3 ,已经超出了CJ/T 340所规定的绿化带种植土壤容重小于或者等于 1.45 g/cm^3 的限制数值;饱和导水率为 $2.8\sim 5.2\text{ mm/h}$,远远低于规范所要求的 10 mm/h 的下限数值;砂粒的含量在55%~70%,黏粒含量不足15%,土壤的类型属于从砂壤土到砂土;pH值在 $8.0\sim 8.5$,有机质的均值仅仅只有 8.5 g/kg ,氮、磷、钾这些养分均处于贫瘠的水平。依据《建筑地基处理技术规范》(JGJ 79—2012)中关于软弱土体改良的技术原则,结合该路段土壤出现粗化板结以及排水不顺畅的特征,确定采用膨润土和沸石粉质量比例为3:2的复合改良剂,其掺加的数量为10%,并且添加5%的腐殖酸来调节酸碱度、补充有机质^[13];同时布设DN100 HDPE盲管排水系统,埋设的深度为70 cm,水平方向的间距为8 m,纵坡为0.5%,以东西向双侧排水的方式接入道路雨水边沟,从而形成土壤结构改良和排水减压的协同治理方案。

3.2 暗管排水沟槽开挖与改良剂机械拌合施工工法

盲管施工在土壤改良剂工作之前进行,目的是保证深层排水的通道畅通。对于沟槽,是采用小型的挖掘机来进行分段开挖,每段的长度要控制在20 m以内,呈现梯形的断面,底部的宽度是30 cm,深度是80 cm,边坡比例是1.0:0.5。在沟底要铺设厚度为10 cm、粒径在 $10\sim 20\text{ mm}$ 的碎石垫层,并且要平整。按照《室外排水设计规范》(GB 50014—2021)里面关于渗透管渠设计的相关技术要求,安装DN100 HDPE打孔波纹管,外面包裹 200 g/m^2 的短纤针刺无纺土工布,管周回填20 cm厚的碎石形成反滤层,以防止泥沙把管道堵塞。在盲管安装完成之后,用原土进行分层式的回填并夯实,直到距离地表30 cm的位置,压实度要控制在85%,要避免过度压实影响透水性。开展土壤改良工作是采用履带式改良机沿着绿化带的纵向方向来推进的,作业的宽度是2.5 m,深度是每层30 cm。改良剂是通过车载定量撒布机来均匀地进行投加的,按照每立方米150 kg的标准控制用量,改良机刀齿的转速是 350 r/min ,行进速度是 1.5 km/h ,拌和的次数不少于2遍,要确保混合的

均匀程度达到90%以上。在距离行道树树干50 cm范围以内,要改用人工的方式来进行翻拌,使用铁锹等工具把改良剂和土壤充分地混合在一起,避免机械作业对主干根系造成损伤^[14]。

3.3 分层回填与压实度控制的关键技术参数实施

在进行拌合之后,使用一台重量为1.5 t的小型振动压路机,开展静压操作,静压的次数为2遍,接着进行振压操作,振压的次数为1遍,以此来对其进行适度的压实。静压的情况下,行进速度在1.0~1.5 km/h。振压频率是30 Hz。按照《建筑地基处理技术规范》(JGJ 79—2012)里面对于填土地基压实度的控制方面的要求,在现场采用环刀法来进行分层检测土壤容重的工作,要把土壤容重严格地控制在1.30~1.40 g/cm³范围,对应的孔隙度是45%~50%。此指标既能够满足CJ/T 340对于绿化种植土壤物理性状的要求,又可以保证土体的结构保持稳定。若是在检测的情况下发现压实度不够,则补充进行1遍静压操作;若是压实度过高,则先使用旋耕机进行疏松操作,然后再适当地进行复压操作。下层在30~60 cm范围按照相同的工艺来进行处理;60~80 cm这层因为临近盲管碎石层,所以改由人工和小型挖掘机相互配合,小心地开展作业,改良剂的掺加数量降低到5%,主要是为了改善深层的结构,避免过量投加改良剂而导致透水性下降。3层处理完成后,在表层覆盖厚度为10 cm的营养土,营养土的配比是腐叶土70%、河沙20%、有机肥10%,为植被的恢复提供优良的基质环境。整体施工应该避开雨季,把土壤的含水率控制在15%~20%,防止因为土壤过湿而导致压实困难,或者因为土壤过干而造成拌合不均匀,确保改良层的结构均匀且稳定。

3.4 改良后土壤渗透性与植被成活率跟踪监测结果

在项目竣工之后,会建立为期12个月的跟踪监测机制,分别在第1、3、6、12个月,按照《绿化种植土壤》(CJ/T 340—2016)所规定的方法,去采集原状的土样,采用环刀方法来测定土壤的容重,采用变水头方法来测定土壤的饱和导水率,同时开展植被恢复状况的调查。把监测所得到的结果进行汇总,汇总内容如表3所示。

从表3可知,在经过改良之后1个月后,土壤的容重从1.65 g/cm³降低到了1.38 g/cm³,满足CJ/T 340所规定的对于一般绿化种植土壤容重不大于1.45 g/cm³的限值要求的;饱和导水率从3.5 mm/h提升到了16.2 mm/h,远远超过规范所规定的10 mm/h的下限。

表3 改良后土壤物理性质与植被恢复指标监测结果

监测时间	土壤容重/ (g·cm ⁻³)	饱和导水率/ (mm·h ⁻¹)	植物成 活率/%	新梢年生 长量/cm	叶片 SPAD值
改良前	1.65	3.5	58	8	28
竣工后 1个月	1.38	16.2	—	—	—
竣工后 3个月	—	—	93	—	—
竣工后 6个月	1.32	18~20	—	25	38
CJ/T 340 限值	≤1.45	≥10	—	—	—

随着植物根系进行穿插以及微生物活动得到增强,6个月之后容重进一步降低到了1.32 g/cm³,导水率稳定在18~20 mm/h之间,这表明改良的效果是具有持续性以及稳定性的。在植被恢复方面,补植的苗木3个月的成活率达到了93%,原有植株新梢的年生长量从8 cm增加到了25 cm,香樟叶片SPAD值从28上升到了38,光合能力明显增强。2023年夏季,遭遇了连续20 d日降雨量超过30 mm的暴雨天气,改良的路段没有出现积水现象,地表径流系数和改良之前相比下降了40%,盲管排水系统运行良好。经济分析显示,单位面积的改良成本是180元/m²,和客土换填相比降低了35%,并且减少了废弃土的外运,综合效益十分显著。

4 结 语

城市道路的绿化带土壤出现板结退化,是交通基础设施在运营期间常常会出现的病害,它会直接对绿化景观的品质以及生态服务的功能产生影响。本文针对因为机动车荷载压实、路基填料粗化以及地表硬化封闭而导致的土壤物理性状出现劣化的问题,系统地对膨润土-沸石粉复合改良剂和盲管排水协同修复的作用机理以及关键的技术参数进行了分析。

研究表明,通过对改良剂的配比以及掺量进行优化,能够有效地对土壤团粒结构进行重建,从而实现保水性和透气性的协调提升;通过对盲管的埋深、间距以及坡降进行合理设计,并且严格地对回填压实度进行控制,能够解决压实土壤的排水透气方面的难题。工程应用证明,这项技术能够让土壤容重降低0.25 g/cm³以上,把饱和导水率提升到原状土的3.5倍,使植物成活率提高到92%以上,且单位成本和传统换填方案相比降低35%,既具备技术可行性,又具备经济合理性。

建议后续的研究进一步开发针对不同土壤类型的专用改良剂,完善盲管排水系统的长效维护技术,并且建立涵盖土壤物理、化学、生物指标的综合评价体系^[15],以此推动这项技术在城市道路绿化修复工程当中的标准化应用,为提升城市绿化建设的质量以及延长绿化设施的使用寿命提供技术支撑。

参考文献:

[1] 胡红宇,王振波,李彬彬,等.德州市市区绿化带土壤养分实测数据集研发[J].全球变化数据学报(中英文),2025,9(2):229-238;356-365.
[2] 李广涛,姚兵,吴世红,等.公路绿化带土壤CH₄吸收通量特征及其环境因素关联性研究[J].交通节能与环保,2025,21(2):106-110.
[3] 张野.胺类抗氧化剂道路累积特征及对长春花生理代谢的影响[D].哈尔滨:东北林业大学,2025.
[4] 朱建刚,郭佳,李子敬,等.撒施氯盐型融雪剂对道路绿化带植物和土壤污染情况调查与分析[J].树木医学,2025,2(1):80-86.
[5] 谢昕云,华兴达,姚晓洁.合肥金寨路高架桥下绿化带土壤优化措施研究[J].池州学院学报,2024,38(6):55-59.

[6] 黄耀芯.园林绿化中的土壤改良技术应用[C]//中国智慧工程研究会.2024智慧施工与规划设计学术交流会议论文集,2024:1032-1034.
[7] 张样.土壤改良剂联合草本植物修复道路绿化土壤环境的技术研究[D].上海:上海应用技术大学,2024.
[8] 孟莹,纪丹丹,刘妍君,等.武汉中心城区道路绿化带土壤调查分析与改良对策[J].湖北林业科技,2021,50(4):38-42.
[9] 王雪,郭松,于蓉,等.不同土壤改良剂对西瓜产量及土壤理化性状的影响[J].农业研究与应用,2026,39(2):250-260.
[10] 李芯宇,郝晓晖,王茂,等.黄河淤泥无害化处理及其在盐碱土改良中的资源化利用研究[J].湖南师范大学自然科学学报,2026(2):110-119.
[11] 蔡尽忠,张绿萍.堆肥在农业土壤改良中的应用研究进展[J].安徽农学通报,2026,32(6):65-68.
[12] 耿怀婷,付堯,周玉,等.烤烟连作影响及其改良措施[J].安徽农学通报,2026,32(6):76-79.
[13] 万佳璐,王玲玉,钱晓晴,等.不同肥料对比对大棚青菜品质和土壤肥力的影响[J].中国果菜,2026,46(3):52-56.
[14] 丁克歧.生态修复技术融入水土保持与园林设计的实践探索与效应分析[J].现代园艺,2026,49(9):110-112.
[15] 崔丹.城市园林绿地中的土壤改良与养护技术[J].世界热带农业信息,2026(3):133-135.

(上接第 439 页)

外也在科技板块额外赋值,提升企业影响力。

(3)智慧化系统在污水处理厂的建造及运维中应用,能够提高建设管理效率、减少运维投入,并提高污水处理效率,强化项目实施成效。

(4)项目管理期间构建绿色产业链,能够提高项目绿色建造实施水平,减少项目施工、采购及运维的碳排放,践行了绿色低碳的环保理念。

将绿色建造管理在工业污水处理项目全生命周期内打通,并在管理模式、组织机构上进行创新,引入科研团队提供技术支持,并通过智慧化管理及精细化绿色供应链的构建,提高了项目管理效果,建设出绿色环境友好型工业污水处理厂,类似项目可以予以借鉴。

参考文献:

[1] 卢昱杰,王娜,朱彤,等.“双碳”背景下我国绿色建造技术发展战略研究[J].施工技术,2024,53(17):77-84;106.
[2] 王飞,宋亚峰.原状地基及大面积换填地基在污水处理厂中的应用[J].安徽建筑,2025,32(5):130-132;184.
[3] 梁贤贤.EPC总承包模式下工程项目管理的实践研究[J].价值工程,2024,43(17):29-32.

[4] 彭鹏.新常态下市政基础设施施工工程总承包(EPC)经营与管理[M].北京:中国建筑工业出版社,2021.
[5] 黄威.市政工程施工技术管理中精细化管理的应用分析[J].工程建设与设计,2024(4):235-237.
[6] 刘妍妍,武艳丽.“双碳”战略下建筑行业产业链协同实施绿色建造的关键路径研究[J].建设科技,2022(16):26-28;31.
[7] 叶浩文.双碳目标下EPC工程总承包发展研究[J].施工企业管理,2024(12):84-87.
[8] 钱七虎.关于绿色发展与智能建造的若干思考[J].建筑技术,2022,53(7):951-952.
[9] 肖绪文.以绿色建造引领和推动建筑业高质量发展[J].建筑,2021(4):22-23.
[10] 陈珂,丁烈云.我国智能建造关键领域技术发展的战略思考[J].中国工程科学,2021,23(4):64-70.
[11] GB/T 50640—2023 建筑与市政工程绿色施工评价标准[S].
[12] 吴海滨,洪一兵,李钰,等.园区废水处理碳排放分析及低碳路径探索[J].给水排水,2025,61(4):71-76;83.
[13] 吴泽洲,黄浩全,陈湘生,等.“双碳”目标下建筑业低碳转型对策研究[J].中国工程科学,2023,25(5):202-209.
[14] DBJ 13-197—2017 福建省绿色建筑评价标准[S].
[15] 住房和城乡建设部办公厅.绿色建造技术导则(试行)[R/OL].(2021-03-16)[2026-01-23].<https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202104/15/5599673/files/f0f9281359224c29ad9367e2ed23650d.pdf>.