

石灰岩矿山地质及资源问题与恢复治理研究^{*}

袁颖^{1,2}, 曹思源¹, 刘建兵³, 张汐³, 刘波³

(1.河北地质大学 城市地质与工程学院, 河北 石家庄 050031;

2.河北省高校生态环境地质应用技术研发中心, 河北 石家庄 050031;

3.宁夏回族自治区地质资料馆, 宁夏 银川 750021)

摘要:石灰岩矿作为一种不可或缺的矿产资源,被广泛开采并应用在各项工程活动中。随着对矿产资源的开发利用,无序非法的矿山开采会对当地的生态环境造成严重破坏。因此,如何有效进行石灰岩矿山生态修复已成为矿山领域的研究热点。基于国家大力推进矿山遗迹地生态修复的研究背景,通过调查大量矿山以及查阅相关文献,总结了目前石灰岩矿山主要存在的地质及资源问题与恢复治理技术,并对存在的不足和发展趋势提出了几点思考。最终展望性提出了地质灾害隐患消除—生态地质环境评价—立地类型划分—选区试验—土壤重构—植被重建—后期管护的石灰岩矿山生态修复新模式,以为石灰岩矿山治理提供理论参考。

关键词:石灰岩矿山;生态修复;生态地质环境;土壤重构;植被重建

中图分类号:X171.4 **文献标识码:**A

文章编号:1005-2763(2024)11-0184-13

0 引言

石灰岩作为一种被广泛应用的矿产材料,在人类社会活动中扮演着极其重要的角色。石灰岩作为重要的工业原料,在社会生产和发展过程中是不可或缺的^[1-3]。随着社会经济的迅速发展,人们对石灰岩矿产资源的需求和开发力度与日俱增。若矿山选址不当、开采不合理以及选矿产生的废渣处理不当等,将会导致植被破坏、地质灾害隐患、地貌景观破坏、土地资源破坏等地质及资源问题^[4-7],进而影响当地居民的生产生活。这不仅不符合“绿水青山就是金山银山”的发展理念^[8],还严重制约了当地的生态建设和经济发展。

目前,已有不少学者围绕上述问题开展了大量的研究工作,并取得了诸多成果。李胜东^[9]在桂林铁山石灰岩采石场对苔藓类植物进行了筛选试验,明确指出扭口藓为石灰岩质高陡边坡地区的优势先锋植物,可将其利用到石灰岩矿山生态修复工作中。然而,苔藓植物喜湿耐潮,对环境要求高,在干旱恶劣环境下是否仍具有相同的治理效果,还有待商榷。李佳^[10]主要聚焦于河道和湖泊中富营养化底泥的相关研究,并将其成功应用于石灰岩矿山土壤重构工作。经实践证明,该方法在土壤重构上表现出色。但是,石灰岩矿山大多位于偏远山区,交通不便,导致底泥的运输面临着困难,这极大地限制了该方法的推广与应用。目前,该方法仍仅适用于小范围的矿山治理。姜全果^[11]深入论述了蒙阴县汇泉峪石灰岩矿山的环境治理方法与生态修复技术,采取了“乔、灌、藤”相结合的方式重建了矿区植被,并提出了通过浆砌石挡墙和桩板式挡墙来修砌平台绿化坡面的最优工程方案。为同类型矿山生态修复工作提供了借鉴。SANSUPA C等^[12]深入研究了露天石灰岩矿山中的真菌群落,发现存活于石灰岩矿山的活真菌主要由子囊菌门(子囊菌门和子霉菌门)组成,而担子菌门和粘菌门的丰度则大幅下降或缺失。这一发现可为后续石灰岩矿山生物修复技术的应用提供理论支撑。SORIA R等^[13]发现在恶劣的环境和气候条件下,园林废弃物和温室作物残留物制成的有机改良剂对退化的石灰岩采石场土壤重构具有

^{*} 收稿日期:2023-12-25

基金项目:宁夏回族自治区重点研发计划项目(2021BEG02008);河北地质大学科技创新团队项目(KJCXTD-2021-08)。

作者简介:袁颖(1976—),男,江西景德镇人,博士,教授,主要从事环境和灾害地质、工程地质、矿山生态修复方面的研究工作,E-mail:yuanyingson@163.com。

通信作者:曹思源(1996—),男,宁夏固原人,硕士研究生,主要从事环境和灾害地质、矿山生态修复方面的研究工作,E-mail:649813152@qq.com。

显著的修复效果,可视为最佳的修复处理措施。

尽管上述学者在土壤重构和植被重建等方面成果显著,并成功修复了矿山遗迹地,取得了令人满意的治理效果。但是,这些研究大多较为分散,部分成果甚至仅适用于各自领域,尚未形成一套成熟的石灰岩矿山生态修复机制。众所周知,矿山生态修复是一项涉及多学科深度交叉融合的系统性工作,很难依靠某一学科或某一种技术措施和治理模式实现矿山复绿。因此,迫切需要对相关石灰岩矿山生态修复技术措施进行合理的归纳总结,并针对性地提出科学的治理方案和治理模式,以推动矿业工程的绿色发展。鉴于此,文章通过调查大量矿山以及查阅相关文献,对目前石灰岩矿山主要存在的地质及资源问题与恢复治理技术进行了全面总结。同时,

针对存在的不足和发展趋势提出了几点深入思考。最终展望性提出了地质灾害隐患消除—生态地质环境评价—立地类型划分—选区试验—土壤重构—植被重建—后期管护的石灰岩矿山生态修复新模式,以期对石灰岩矿山生态修复提供理论支撑。

1 石灰岩矿山地质及资源问题

石灰岩开采所造成的地质及资源问题一般可分为水土污染问题、地质灾害问题和资源破坏问题^[14-15],如图 1 所示。其中,地质灾害问题和资源破坏问题尤为显著。前者直接威胁当地居民的生命财产安全,后者则会导致治理难度加大。由此可见,上述两个问题对石灰岩矿山生态修复工作而言是亟待解决的^[16]。

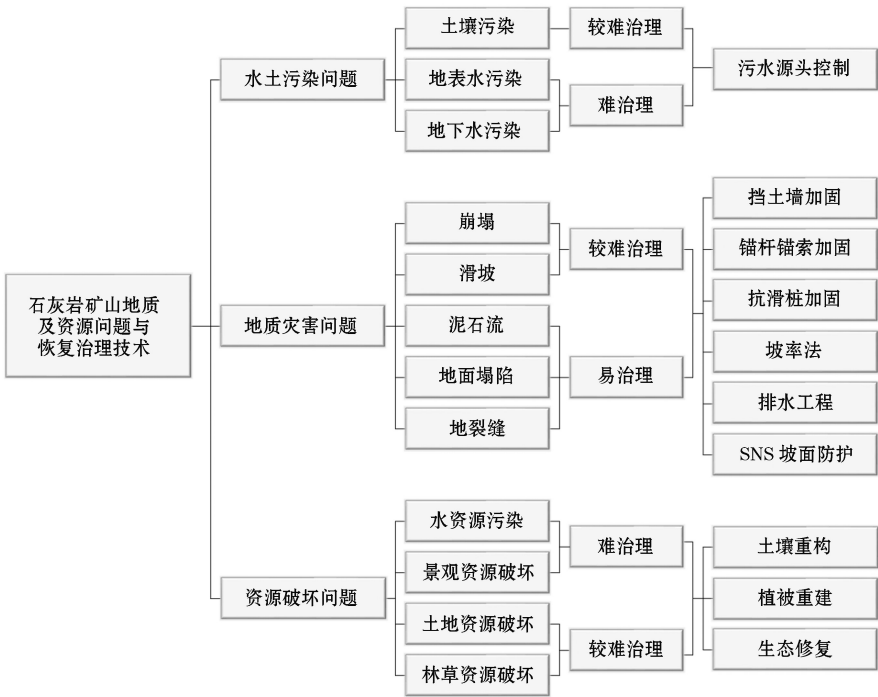


图 1 石灰岩矿山地质及资源问题与恢复治理技术

Fig.1 Geological and resource problems and restoration and management technology of limestone mines

1.1 水土污染问题

石灰岩矿山水土污染问题主要出现在矿区及其周边影响区,污染范围相对较小。采矿过程中,污水排放量有限,仅会在采矿器械和地面冲洗用水过程中产生少量污水,不会对矿区土壤造成大面积污染,也不会长时间渗入地下,污染地下水及地表水环境。虽然采矿污水自身对矿山环境的危害不大,可一旦与矿区粉尘相结合,就会加速粉尘的沉降固结,最终形成矿物质粉粒和废石渣等有害物质,导致土壤板

结、硬化,进而大面积污染矿区周边的土壤和植被。其次,采矿污水长时间的浸润也会软化分解粉尘和采矿废渣,增强其溶解性,经降雨入渗也可能侵入土壤,严重破坏土壤的原生结构,制约植被的萌发和生长^[17]。

综上所述,污水排放是石灰岩矿山水土污染问题的关键所在。尽管采矿污水排放量不大,可一旦处理不当,就会污染矿区水土环境。因此,从源头控制采矿污水的排放才是解决石灰岩矿山水土污染问

题最为有效的途径。而对于已经出现的水土污染问题,建议采取相应的恢复治理措施。比如,可以通过修建蓄水池的方式来收集和处理采矿污水,以减少其对环境的污染。此外,扩大绿色植被种植也是一项重要的治理措施,通过增加植被覆盖面积,不仅可以有效改善土壤环境质量,减少水土流失,还能吸收部分有害物质。上述措施的实施将有助于缓解和治理石灰岩矿山存在的水土污染问题,保护生态环境的可持续发展。

1.2 地质灾害问题

石灰岩常受采矿爆破振动的影响,使岩体和内部结构面的完整性遭到破坏,进而改变了边坡原有的应力分布情况,降低了边坡稳定性,存在很大的失稳风险。此外,开采过程中产生的大量陡直立面和陡高边坡,也极易在降雨和地震等外力作用下发生滑坡、崩塌等地质灾害^[18-19],甚至可能导致山体开裂。采矿也会产生大量的堆积物,若这些堆积物堆放位置不合理,例如位于山坡或河道旁等不稳定区域,可能会在强烈地表径流的冲刷下形成泥石流。由此可见,地质灾害问题已然成为了矿山生态修复的首要制约因素。要想有效开展矿山生态修复工作,就必须先消除地质灾害隐患。否则,就会出现前期修复,后期破坏的局面。

因此,在开展矿山生态修复工作前,必须对地质灾害问题的相关防治措施进行系统的总结。这样不仅可以选择合适的治理措施,同时也能对其进行优化组合,最终制定出最佳防治方案,因地制宜地从根本上消除石灰岩矿山存在的地质灾害隐患,确保矿山生态修复工作的顺利进行。

1.3 资源破坏问题

露天采矿会剥离掉地表覆盖层及上覆植被,会对林地、草地、耕地等地形地貌造成不可逆转的破坏。同时,矿山内存在的例如大量裸露岩壁、采石坑以及破碎山体等采矿遗迹,也会严重影响自然景观和地区环境的完整性。此外,尾矿库遗留的废渣和废石等长时间的堆放也会占用大量的土地资源,降低土地质量^[20]。甚至在地下水位较高的矿区,矿山开采还可能会破坏第四系孔隙水含水层,使矿山区域丧失水源涵养功能,进而造成水资源的破坏^[21]。以上破坏性的影响不仅仅局限于矿区周边,还会使整个生态系统严重失衡。因此,针对上述问题,迫切需要对矿山,尤其是石灰岩矿山资源破坏问题相关治理措施的原理、适用条件及优缺点等进行深入梳

理和总结,为石灰岩矿山资源破坏问题的治理提供坚定的理论支撑。

2 地质灾害问题治理措施

制约石灰岩矿山生态修复的地质灾害问题主要是由采矿遗留下的不稳定边坡失稳造成的。大多数不稳定边坡一般都是借助工程措施来提高其稳定性。因此,在选择治理方案以及设计工程措施前应多方面统筹考虑治理方案是否符合安全性、经济性、技术合理性、施工可行性以及环境协调性等原则,以期在达到施工和使用安全的前提下,优选便于施工、尽可能少影响环境、最经济的治理恢复措施。现阶段石灰岩矿山地质灾害防治措施主要有:挡墙加固、锚杆锚索加固、抗滑桩加固、坡率法、排水工程、SNS (Safety Netting System) 柔性防护系统等。

2.1 挡墙加固

抗滑挡墙作为一种被广泛应用于矿山滑坡型地质灾害防治的技术手段,凭借其对山体天然应力平衡破坏小、稳定滑坡体效率高等优点而备受青睐。目前,使用较广泛的挡墙有:桩板式挡墙、扶壁式挡墙、悬臂式挡墙、加筋土挡墙以及重力式挡墙等^[22-24]。

桩板式挡墙具有构造形式丰富、占地面积和土石方开挖量小、抗滑能力强以及施工影响范围小等优点^[25],但成桩过程中石灰岩易与冷却泥浆相遇酸化,腐蚀挡墙,不宜在石灰岩矿区修建。

扶壁式挡墙结构简单、易于建造、质量轻^[26],但其对施工场地的要求较高,在微地貌复杂的石灰岩矿区内修建难度较大。

虽然悬臂式挡墙应用广泛,具有造价经济、施工简便、适用环境广泛等优点^[27],但其在外力荷载作用下容易出现滑动现象,支护效果受环境影响较大,很难适应环境复杂的矿区^[28]。

加筋土挡墙具有结构轻、施工方便、造价低廉和对地形适应性强等优点^[29],但其使用的钢筋一旦与地下水接触,就会发生电化学反应,降低钢筋的结构强度,而石灰岩呈酸性,遇水更会电离出大量的碳酸氢根离子,加快钢筋的腐蚀。因此,加筋土挡墙不适用于石灰岩矿山生态修复工作。

重力式挡墙主要适用于坡高小于 12 m 的岩质边坡加固工程,根据墙背的坡度可将其分为仰斜、俯斜、直立 3 种类型(如图 2 所示)。重力式挡墙可由混凝土一体浇筑而成,也可用水泥砂浆与块石砌筑,

材料的获取相对容易、施工较简单、成本低廉、稳定性良好^[30]。遗留在矿山的采矿废渣和尾矿弃石可直接用于重力式挡墙的修建,不仅能解决废渣弃石的处理问题、节省转运清除的花费,还能因地制宜充分发挥遗留废弃物的力学性能,保护环境。此外,重力式挡墙在墙体中修建的排水管,还能将墙后由降水入渗赋存于石灰岩岩体裂隙中的地下水快速排出,使石灰岩一直处于较干燥的状态,避免了地下水与石灰岩大面积接触酸化,腐蚀挡墙和加快石灰岩风化速度,降低矿山边坡稳定性。综上所述,相较于其他类型的挡墙,重力式挡墙可被视为石灰岩矿山挡墙治理工程的首选措施之一。

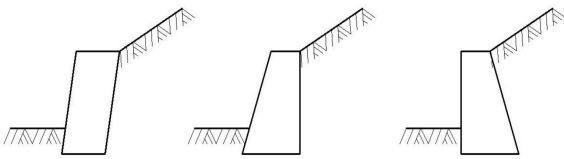


图 2 重力式挡墙^[30]

Fig.2 Gravity retaining wall^[30]

2.2 锚杆锚索加固

锚杆与锚索加固是将不稳定滑坡体固定在稳固基岩层上的技术手段,主要有:现浇式锚杆(索)框架结构、拼装式(装配式)锚杆(索)框架结构、预应力锚杆(索)框架结构以及装配式预应力锚杆(索)框架结构等。

目前,现浇式锚杆(索)框架结构在我国仍然是矿山不稳定边坡治理的主要措施。由于现浇式锚杆(索)框架结构是一体浇筑而成,整体性好,具有不错的抗震性能。但正因为需要一体浇筑,导致其支模、浇注、养护等工序的时间较长^[31]。因此,不建议在场地狭小、工期紧张的治理工程中使用该加固技术。

拼装式(装配式)锚杆(索)框架结构抗力较大,质量轻,不需要现场浇筑,工期短,更加节能环保,可较好地满足矿山地质灾害问题快速治理的需要^[32],但因施工要求较高,导致其经常受限于施工场地、吊装设备和天气的影响,不利于在场地条件差的石灰岩矿山使用。

相较于传统现浇式锚杆(索)框架结构和拼装式(装配式)锚杆(索)框架结构,预应力锚杆(索)框架结构力学性能更好,结构更加牢固。采用预应力锚索、锚杆组成的框架梁防护形式,还可以增强矿山破碎边坡结构的整体稳定性,且该加固技术目前已经相对成熟,可广泛应用于矿山边坡工程的防护治理

中^[33]。但锚杆所施加的预应力释放较缓慢,大大限制了后续工程的开展,且施工机械化程度低^[32],给该方法的推广应用带来了一定的局限性。

装配式预应力锚杆(索)框架结构是将拼装式(装配式)锚杆(索)框架结构和预应力锚杆(索)框架结构相结合的一种矿山边坡灾害防治新技术^[34](见图 3)。具有施工机械化程度高、质量好、外形美观、工期短、耐久性好、施工方便等优点^[34-35]。相较于上述 3 种锚杆(索)框架结构,装配式预应力锚杆(索)框架结构不仅发挥了 3 种结构的优点,还在很大程度上避免了各自的缺点,有较大的推广价值。因此,建议在后续石灰岩矿山地质灾害问题的治理中运用该技术,并结合工程实例,积累相关实践经验,进一步规范该技术的使用,为矿山生态修复提供新的技术支撑。

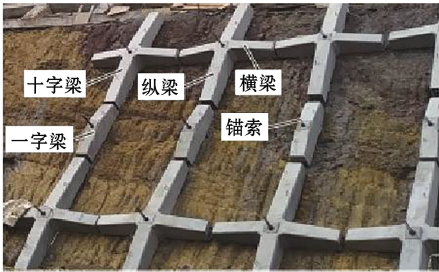


图 3 装配式预应力锚杆(索)框架结构^[34]

Fig.3 Frame structural of prefabricated prestressed anchor rod (cable)^[34]

2.3 抗滑桩加固

抗滑桩,又被称为锚固桩,主要适用于矿山滑坡型地质灾害问题的治理,按其结构可分为单排抗滑桩和多排抗滑桩两种加固形式^[36],具有抗滑能力强、适用性好,不易诱发次生灾害、施工简单等特点^[37]。单排抗滑桩常被用于矿山中小规模滑坡型地质灾害问题的治理,而对于大规模滑坡型地质灾害,往往需要采用多排抗滑桩分解单桩所受到的滑坡推力,增加桩的抵抗力,才能实现较好的治理加固效果^[36]。

但相较于单排桩,多排桩力学行为分析与工程设计较为复杂,且不同桩位的选取,所对应的水平推力和滑体厚度也不同,对于整体抗滑稳定效果也存在差异^[38]。目前,关于多排桩桩位的合理选择仍未有准确的定论,若相邻抗滑桩桩位过近,会引起桩间土的土拱效应,若桩位相隔太远,则无法很好地发挥抗滑桩的力学性能,更无法实现预期的加固效果。

因此,后续需要对上述问题进行针对性技术攻关,提出相应解决方案,以期更加高效地治理石灰岩矿山滑坡型地质灾害。此外,石灰岩性脆、硬度较小、易风化、易遇水酸化,钻进过程中常规的泥浆和液体冷却方式已不再适用。如何在石灰岩上成孔,使成孔符合设计要求,以及如何解决石灰岩遇水酸化、腐蚀抗滑桩等问题,将是未来石灰岩矿山生态修复领域以及钻进成孔工艺改进方面的一大研究热点。

2.4 坡率法

坡率法是一种通过设置合适的边坡坡率来达到边坡自稳状态的方法,无需利用支挡工程进行加固。矿山开挖过程中边坡的变形和破坏通常取决于开挖高度和坡率^[39]。由此可见,坡率对矿山边坡的稳定性是至关重要的。有研究表明,随着坡率的增加,矿山边坡坡体内临界滑动面的位置越靠近坡面,滑出点位置也越靠近坡脚^[40]。因此,在实际工程中,对于坡率较大的边坡,应重点加固坡脚位置。然而,石灰岩矿与其他矿山不同,易受地表水和地下水影响。一般情况下,石灰岩含水量越高,风化越严重。经过水分浸润的石灰岩容易酸化,腐蚀新鲜岩体,加快自然风化的速度。而干燥石灰岩的风化速率则与其他相似质地的岩石相差不大。有时,同一石灰岩岩体的不同部位甚至会出现风化程度各不相同的现象。综上,建议今后在使用坡率法治理石灰岩矿山地质灾害问题时,应充分考虑地表水、地下水与坡面形态的综合影响。

2.5 排水工程

矿山边坡失稳常与地表水和地下水密切相关。几乎所有矿山地质灾害的治理都涉及到排水工程。矿山大量滑坡和泥石流等灾害都是因为坡体内地下水位上升而诱发的。地下水长时间的浸润不仅会增大岩土体自身的重力,使滑体下滑力增大,还会降低土体抗剪强度,不利于矿山边坡的稳定^[41]。由此可见,必须在矿山边坡修建必要的排水工程。但由上文可知,石灰岩易受地表水和地下水影响,遇水会产生一系列反应。因此,在石灰岩矿山,无论是采矿作业,还是后期开展生态修复工作,都应重视矿区排水工程的修建。若排水量太大,则容易使石灰岩上覆浅薄土层内的基质和营养物质流失。而一旦排水量过小,不仅无法解决矿山地质灾害问题,还会导致下层石灰岩遇水大面积酸化,进一步恶化石灰岩矿区的土壤环境。但是,目前有关石灰岩矿山排水量阈值的研究较少,后续还需进一步模拟探究。

2.6 SNS 坡面防护

SNS 是一种以钢丝绳网为主要构成的柔性防护系统。目前已广泛应用于国内诸多防治工程,并对以崩塌为主的边坡表现出良好的防护效果。赵雷等^[42]通过研究发现,在相同冲击条件下,防护系统的边柱位置受冲击的影响最明显,且柱端滑移摩擦系数的增加使得支撑绳内力增长显著,其研究成果规范化了被动柔性防护网的应用。石灰岩遇水风化强烈,易在各种地质应力作用下风化成大小不一的岩块,存在很大的安全隐患。因此,建议今后在以崩塌为主的石灰岩矿山地质灾害问题治理中灵活运用 SNS 防护系统,以降低地质灾害的影响。

2.7 石灰岩矿山地质灾害问题治理技术评述

虽然上述 6 种地质灾害问题防治措施均有着较好的治理效果,但地质灾害的防治是一项复杂工程,有时某一隐患点甚至可能同时存在多种地质灾害,加之岩土体的不确定性,使得地质灾害问题的治理变得异常复杂。在此情况下,单一的治理措施已不再适用。因此,对于具有复杂地质条件的灾害问题,应结合实际情况和地质信息,灵活优化组合,综合应用多种防治措施,以更好地治理石灰岩矿山存在的各种地质灾害问题,为开展后续生态修复工作打下良好的基础。

3 资源破坏问题治理措施

石灰岩矿山资源破坏问题主要涉及土地资源、水资源、景观资源和林草资源 4 个方面。其中,土地资源和水资源是矿山生态修复的载体,而景观资源和林草资源则是修复效果的体现。矿山生态修复就是运用各种技术手段使矿区植被重新繁茂。所以,解决了水土资源破坏问题就能改善景观资源和林草资源状况。但由于几乎所有矿区都缺乏河流和地表水体,传统的直接向水体中添加物理或化学物质的修复方式已不再适用。此外,矿区分布范围广泛,以目前的水资源修复技术水平,仍无法进行大面积的治理。因此,最符合上述现状的水资源修复手段就是利用重建在矿区重构土壤上的耐受植物,借助其生物作用去除污染物,从而恢复地表水和地下水水质,并最终改善矿山景观资源和林草资源等。

3.1 土壤重构

石灰岩矿山土地资源破坏问题主要表现为:表土层被破坏、土壤呈酸性、土层浅薄、土壤原生结构破坏严重、石砾含量高、水分缺乏、持水保肥能力差、

土壤中无机盐及有机物贫乏、土壤立地条件差等^[12]。针对上述问题,国内外众多专家学者提出了一系列土壤重构技术。

3.1.1 表土覆盖重构技术

在众多土壤重构技术中,表土覆盖重构技术应用最早,也最为广泛^[43]。该技术主要通过利用取土、运输和回填的方式,对矿山土壤进行重构^[44]。尽管该技术重构后的土壤在短期内能够展现出良好的修复效果,但在实施过程中仍存在表土的采集、堆放和二次倒土等环节繁琐复杂,施工规模大,资金投入高,管理难度大等诸多问题。同时,该技术重构的土壤无法提供植被长期生长所需的营养物质^[45]。该技术用于石灰岩矿山土壤修复只能治标不治本,无法从根本上解决土壤破坏问题。

3.1.2 物理化学重构技术

除上述直接覆土重构土壤外,最有效的就是物理和化学土壤重构技术。通过挖松、深耕、土壤表面整平、混合改良以及土壤替换等物理措施,可以改变矿区土壤的微观结构,创造出适宜植被生长的土壤条件^[46]。其次,化学作用也能够有效改善原生土壤的基质环境^[47]。将物理和化学重构技术相结合,可从土壤结构和基质两方面对石灰岩矿区内的贫瘠土壤进行重构。研究表明,土壤重构后,植被在种子萌发率、成活率、生长速率以及产量等方面均与翻耕深度和施加化学肥料的浓度呈现出显著正相关性^[48]。然而,石灰岩矿区的土层较浅薄,甚至部分矿区已无土可用。此时,堆放在矿区内的废石渣俨然成为石灰岩矿区唯一可用的土源。尽管上述物理和化学土壤重构技术能够有效重构土壤并改善土壤环境,但都仅适用于有土体覆盖的石灰岩矿区,至于在只有废石渣覆盖的矿区是否仍有相同的重构效果,还需要进一步研究。

3.1.3 生物重构技术

生物重构技术是一种被广泛应用于石灰岩矿山土壤重构的技术手段^[49]。与上述化学重构技术相似,其通过改变原有土壤基质环境来改善土壤^[50]。生物重构技术主要依靠自然生物循环过程,与化学重构相比,具有人为干预小、投入少、可自然进行、无化学副作用等优点^[51]。也不会因化学元素的不合理添加而导致土壤二次污染,治理风险较小^[52]。例如,利用蚯蚓重构土壤时,其不仅能很好地改善植物赖以生存的土壤条件,又能增加重建植被的生物量和减少植物物种之间的竞争^[53]。虽然,蚯蚓等生物

具有较好的重构效果,但目前也只是在土壤环境较好的矿山遗迹地土壤重构工作中小范围试验性应用。而对石灰岩矿区,尤其是干旱石灰岩矿区,蚯蚓等生物是否仍具有同样的重构效果,还有待考证。此外,现阶段适用于石灰岩矿区土壤重构的生物和微生物菌群的研究依然不足。各菌群之间的物种竞争关系也不明了。因此,后续应联合地质学、生物学、生态学、化学等多学科来攻关解决上述技术难题,为石灰岩矿山生态修复提供新的技术支撑。

3.1.4 城市固体废弃物重构技术

城市固体废弃物重构技术是近几年提出的新兴土壤重构技术,具有见效快,后期人为干预程度小的特点^[54-55]。该技术利用有机和无机固体废弃物重构新土壤,可以通过调整组成材料和配方满足不同的植被类型和土地条件等需求,具有较大的灵活性。此技术施作的风干污泥中氮、磷、钾等营养元素的平均含量远远高于传统有机肥。此外,活跃在污泥中的生物和微生物菌群可以自然熟化石灰岩矿区土壤,加快土壤重构进度^[56]。但是,城市生活污水的收集、储存、运输等较为困难,这严重制约了该技术的大面积推广和使用。同时,城市生活污水潮湿,生活在污泥内的生物和微生物菌群大多都喜湿耐潮,而石灰岩矿区土壤贫瘠干燥,营养物质匮乏,微生物菌群能否长时间适应还有待考察。其次,关于城市生活污水的土壤重构能力,究竟是来源于其本身高含量的营养物质,还是生物或微生物菌群的生物循环作用,目前仍尚无定论。因此,今后可将上述问题作为城市固体废弃物重构技术的研究方向。

3.2 植被重建

植被重建是指综合考虑气候、海拔、坡度、坡向、地表物质组成和有效土层厚度等条件,选择先锋、适地植物物种,开展植被配置、栽植、扩繁育及管护等工作,重新构建持续稳定的植物群落。是矿山生态修复的重要内容之一,也是实现生态文明建设的重要手段之一。目前,主要有以下4种植被重建技术。

3.2.1 植被地境重塑技术

植被地境重塑(如图4所示)是通过充分利用人工造孔和岩体裂隙为植被营造生存所需的基本地境条件的修复技术,经重塑,岩体裂隙内养分、水分、温度等地境条件均能够满足植被生长发育的需求^[57]。采用该技术开展矿山高陡岩质边坡生态修复时,植被主要依靠根系从添加的客土和岩壁裂隙中吸收养分,但随着植被不断生长,其增长速率逐渐降低^[58],

主要原因是客土和岩壁裂隙中风化沉积的浅薄土壤无法长时间供应植被生长所需的营养物质。其次,裂隙岩壁光秃坚硬,使得植被根系无法继续向裂隙内扎根,汲取养分,对植物生长产生了“胁迫”作用。由此可见,该技术目前还很不成熟,仍需在营养物质的长效供应方面进行深入研究,为后期的推广应用奠定基础。此外,石灰岩本身呈酸性,遇水易酸化,这会对植生孔内以及岩体裂隙内栽植的植被造成腐蚀。因此,在使用该技术时,应栽植适宜石灰岩矿区生长环境的耐酸性先锋植物或本地乡土种。并且在植生孔内添加客土前,还应在孔壁四周构建隔离层,将新添加的客土与石灰岩分隔开,避免石灰岩直接腐蚀客土和植被。但至于何种材料适用于隔离层的构建、如何构建以及最佳隔离层厚度的确定等问题,仍需要进一步研究。

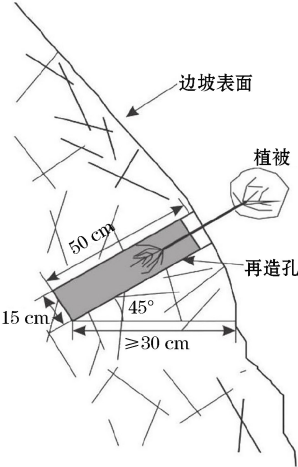


图 4 植被地境重塑技术^[57]
Fig.4 Remodeling technology of vegetation landscape^[57]

3.2.2 喷播重建技术

喷播重建技术是采用喷播设备将植绿物种同其他若干材料的混合物均匀喷射到矿山边坡,实现坡面植被恢复与浅层防护的机械绿化技术^[59],也是目前矿山高陡边坡植被重建中最常用的技术手段之一。现如今已逐步发展为液压喷播重建技术、三维植被网喷播重建技术、厚层基材喷播重建技术和植被混凝土喷播重建技术等分支^[60]。

液压喷播重建技术具有成本低、环境适应性好、施工简单、工期短以及综合成本低等优势,被广泛应用于矿山边坡复绿工程^[61]。但该技术仅适用于坡度较缓的稳定边坡,一旦坡度过大,就会出现喷播层脱落和植被死亡的情况。此缺点严重制约了液压喷

播技术在石灰岩矿山生态修复领域的大面积推广。

三维植被网喷播技术(如图 5 所示)是植被重建和土工网护坡技术的结合,相较于液压喷播技术,其既可以实现矿山边坡的复绿,又可以发挥土工网护坡的优势^[62-63]。然而,该技术仅在施作初期重建效果良好,而在后期,单一的草本植被就会出现不同程度的退化^[64]。因此,利用三维植被网喷播技术重建植被时,应合理地引入多种适应于石灰岩矿山生态环境的植被,增强重建植被群落的多样性,加快植被自然演替速率,最终实现重建植被的自然生长和群落的自我生态循环功能。

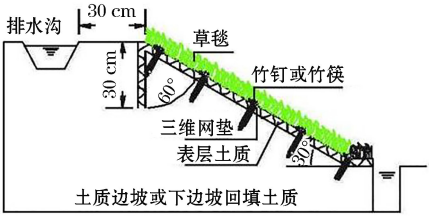


图 5 三维植被网垫铺设^[63]
Fig.5 Laying of three-dimensional vegetation mesh mats^[63]

厚层基材喷播重建技术的核心是在岩质坡面上营造一个适于植被生长的稳定层,具有施工工艺简单、应用广泛、施工成本合理的优点,能够使原裸露岩质坡面植被迅速成坪的植被重建技术^[65-66]。但与三维植被网喷播重建技术一样,重建植被仅在施作初期长势良好,而在后期,一旦厚层基材上的营养物质消耗殆尽,重建植被甚至会出现大面积凋亡的现象,无法从根本上使矿山复绿,存在很大的局限性。

与上述其他重建技术不同,植被混凝土喷播重建技术最大的特点是在植生基材中加入了常规硬性材料水泥,使得喷播基材既有一定强度和抗雨水冲刷能力,又能达到防护作用,可实现传统硬性加固措施与单纯生态修复措施的有机结合,能有效避免生态工程重建现象^[67-69]。但混凝土层质密坚硬,且含有不利于植物生长的化学添加剂,极大制约了重建植被的生长,加之石灰岩矿山土壤环境恶劣,最终导致重建植被复绿效果差于其他矿山。

尽管上述 4 种喷播重建技术在各类矿山植被重建中得到了广泛的应用,并且已经相对成熟。然而,就石灰岩矿山生态修复而言,其仍存在一些不足之处。首先,由于石灰岩矿区土层贫瘠浅薄,且不同区域的土层厚度也不尽相同,这就导致植生层最佳厚

度无法准确确定,若植生层太厚,将导致成本过高,而如果太薄,则无法满足重建植被生长所需的物质条件。除植生层厚度外,重建植被营养物质的有效供应也是影响重建植被复绿的主要原因,一旦营养物质供应不及时,就会导致植被长势变缓,甚至出现大面积死亡。综上,植生层最佳厚度的确定以及营养物质的长效释放将是今后喷播重建技术的研究热点。其次,如何有效解决石灰岩对植生层和重建植被根系的腐蚀问题,还需要在工艺和材料等方面进行针对性改进。

3.2.3 藤本植物重建技术

通过种植藤本植物,也能达到矿山快速绿化的效果。该技术具有护坡能力强、适应性好、景观效果好等优点^[70],但其与周围植被还存在着明显的竞争关系。藤本植物的攀爬缠绕不仅会遮挡其他植被吸收阳光,降低植物光合作用,还会对植被产生很强的破坏作用,是重建植被死亡的诱因,不利于植物生长^[71]。然而,目前对于不同群落间藤本植物的合理配置,以及其与其他不同种类植被的生物循环机理的研究仍然不足,这严重限制了该技术在石灰岩矿山生态修复领域的推广应用。

3.2.4 植物纤维毯重建技术

植物纤维毯被定义为“用于土壤、地基、岩石、土地或者任何岩土工程相关的有渗透性的纺织品”^[72],具有蓄水保墒、降低土壤侵蚀程度、减少土壤养分流失、减流减蚀效益等优点,能很好地改善土壤理化性质^[73-74]。综上所述,植物纤维毯主要起到保水固土的作用,而石灰岩矿山覆存的土壤本身就干旱贫瘠,缺乏水分。因此,未来可将此技术大面积推广和应用于石灰岩矿山生态修复工程中,尤其是干旱区石灰岩矿山。

3.3 石灰岩矿山资源破坏问题治理技术评述

虽然上文介绍的各土壤重构和植被重建技术措施均能达到不错的生态修复效果,但其也有较多的局限性,主要表现在各技术措施的选择和使用较为单一,缺乏多技术联合使用、优化组合的研究和应用经验,无法更好地适用于环境复杂多变的废弃矿区。一般情况下,范围小的矿区,其内部环境不会发生较大的变化,单一的技术措施还可以适用,且能达到不错的生态修复效果。而在范围和跨度较大的矿区,其内部不同区域往往会出现各不相同的小环境、小气候等。此时,若继续使用单一技术措施,则根本无法对矿区进行大面积的成片治理,这就导致在原环

境较好的区域植被已经复绿,而环境较差的区域依旧光秃贫瘠,使矿区完整的生态环境被分割成数个大小不一的封闭生态圈。复绿植被在后期,主要还是通过依靠自然生物循环功能进行扩繁,而封闭生态圈内的环境较单一,经长时间自然演替,生态圈内的生物对其独有的生态环境产生了很大的依赖性,不利于生物的自然循环,最终导致复绿矿山返荒。因此,后续应开展多技术联合使用、优化组合的研究,杜绝使用单一技术措施的弊端。

4 结论及展望

(1) 从源头控制采矿污水的排放是解决石灰岩矿山水土污染问题最为有效的途径。针对已经出现的水土污染问题,建议采取相应的恢复治理措施。比如修建蓄水池、扩大绿色植被种植等。通过增加植被覆盖面积,可以改善土壤环境质量,减少水土流失,并吸收部分有害物质。这些措施的实施将有助于缓解和治理石灰岩矿山的水土污染问题,保护生态环境的可持续发展。

(2) 地质灾害隐患是石灰岩矿山生态修复工作的首要制约因素,在开展生态修复工作前,必须先消除地质灾害隐患。对于具有复杂地质条件的石灰岩矿山地质灾害问题,应以石灰岩特性为切入点,深入研究石灰岩矿山地质灾害问题的诱发因素和形成机理等,优选出适用于石灰岩矿山地质灾害治理的技术手段,并结合实际情况和地质信息,灵活优化组合,综合应用多种防治措施,从灾害本身出发,因地制宜解决石灰岩矿山地质灾害问题。与此同时,还应优化传统采矿作业方式,减少地质灾害的发生,从源头上治理,是解决石灰岩矿山地质灾害问题最经济有效的措施。

(3) 土壤重构和植被重建是解决石灰岩矿山水资源、林草资源、土地资源以及景观资源等资源破坏问题的根本所在。而土壤重构又是开展石灰岩矿山生态修复工作的前提和基础,只有解决了石灰岩矿山的土源问题,才能开展后续的植被重建工作进而才能解决石灰岩矿山的资源破坏问题,并最终对石灰岩矿山进行生态修复。然而,石灰岩矿山的土层普遍较浅薄,部分区域甚至缺乏可用土壤。如何将矿区内堆积的废石渣转化为宝贵的土壤资源,利用其重构出适宜植被生长的新土壤,解决石灰岩矿土源紧缺的问题,至今仍存在研究不足的情况。因此,建议今后对上述问题进行深入研究,创新研发出

利用废石渣重构土壤的新技术,从根本上解决石灰岩矿山生态修复的难题,为采矿行业的绿色发展提供新的技术支撑。此外,重构何种结构的土壤、覆盖多厚的土层、如何选择最佳土壤配置比例和粒径组成以及如何有效保水增墒等问题,都是未来石灰岩矿山土壤重构的重要研究方向。

(4) 在进行植被重建工作之前,首先应在矿区有代表性的区域内进行植被的选区试验。筛选出最适合栽植环境的植被种类、配置模式以及扩繁育措施等,以此确保植被重建工作的顺利进行。其次,如何对重建植被进行有效的后期养护也是一个普遍存在的问题。在修复初期,重构土壤的水肥条件较好,植被生长茂盛,绿化程度较高。然而,受重构土壤厚度的限制,其无法长期提供植被生长所需的营养物质。后期水肥能否及时补充对于植被恢复的长期效果而言至关重要。如果后期管护不到位,就会导致矿区内重建植被大规模凋亡的情况发生。因此,对传统养护措施进行针对性的改进已经迫在眉睫,需要进行深入研究。其次,石灰岩具有强透水性,遇水易酸化,腐蚀植被,如何保持坡面植被的水分供应并解决石灰岩的腐蚀问题已经成为石灰岩矿山开展植被重建工作的一大难题。

(5) 生态环境的形成是一个复杂且漫长的自然演化过程,具有显著的区域性特征。矿山类型、所处的地理位置以及人类工程活动等因素的差异都会对生态环境产生不同的影响。每座矿山都具有相对独立的局部生态环境,甚至同一矿区的不同区域之间也可能存在细微的生态环境差异。这种差异会导致在同一矿区内采取同一种治理措施时,出现不同的治理效果。部分区域可能取得良好的治理效果,但另一些区域却表现不佳,很难实现对矿区大面积的成片治理。因此,为确保治理模式和措施的选择更具针对性和指向性,建议今后围绕矿山生态地质环境,深入研究矿山生态环境因子驱动生态地质环境演化的机制,揭示矿山生态地质环境因子之间的相互作用机理和耦合作用。寻找出主导影响因子,建立生态地质环境因子本底数据库。并结合目前最新的机器学习和深度学习等智能算法,构建矿山生态地质环境数字评价技术。明确矿山立地条件,精确划分立地类型。最终构建地质灾害隐患消除—生态地质环境评价—立地类型划分—选区试验—土壤重构—植被重建—后期管护的石灰岩矿山生态修复新模式。为开采立面、废渣场、矿区周边影响区等靶区

的生态环境工程措施选取、土壤基质重构、植物土壤立地条件改善、植物种类筛选、扩繁、栽培和重建等共性技术难题提供数据支撑。确保生态修复方案在不同靶区符合适宜性要求,形成创新性、可复制推广的成套矿山生态修复技术集成,实现矿山治理由传统治理模式向生态化治理的转变。

参考文献(References):

- [1] 郭源上,何明珠,刘建兵,等.干旱区石灰岩矿山遗迹地生态修复模式对比研究[J/OL]. 中国沙漠: 1-13[2024-01-26]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/62.1070.P.20231009.0848.002.html>.
GUO Y S, HE M Z, LIU J B, et al. Comparative Study on Ecological Restoration Models of Limestone Mine Relics in Arid Areas[J/OL]. Journal of Desert Research: 1-13[2024-01-26]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/62.1070.P.20231009.0848.002.html>.
- [2] HIBSZER A. Lime Kilns as an Element of the Post-Industrial Cultural Landscape of the Silesian Upland, Poland [J]. Environmental & Socio-economic Studies, 2021, 9(3): 70-77.
- [3] 农仕华,韦佳伟,蒙颖森.石灰岩矿床不同资源储量估算方法对比分析[J].西部探矿工程, 2022, 34(9): 120-122+126.
NONG S H, WEI J W, MENG Y S. Comparative Analysis of Different Resource Reserve Estimation Methods for Limestone Deposits [J]. West-China Exploration Engineering, 2022, 34(9): 120-122+126.
- [4] SU M X, CHENG K, LI H Y, et al. Comprehensive Investigation of Water-Conducting Channels in Near-Sea Limestone Mines Using Microtremor Survey, Electrical Resistivity Tomography, and Tracer Tests: A Case Study in Beihai City, China[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2022, 81(5): 1-14.
- [5] 汪智,杨鹏鹏.甘肃陇南矿山资源环境调查及绿色生态修复[J].有色金属(矿山部分), 2022, 74(6): 116-121.
WANG Z, YANG P P. Investigation of Mineral Resources and Environmental Survey in Longnan, Gansu and Green Ecological Rehabilitation [J]. Nonferrous Metals (Mining Section), 2022, 74(6): 116-121.
- [6] 刘训良,侯秋丽.北京密云某废弃石灰岩矿山生态修复措施[J].城市地质, 2022, 17(3): 331-339.
LIU X L, HOU Q L. Ecological Restoration Measures for an Abandoned Limestone Mine in Miyun, Beijing[J]. Urban Geology, 2022, 17(3): 331-339.
- [7] 付广磊,王耀华.河南太行地区文峰石灰石矿山的绿色生态修复研究[J].中国资源综合利用, 2021, 39(11): 139-141.
FU G L, WANG Y H. Research on Green Ecological Restoration of Wenfeng Limestone Mine in Taihang Region, Henan[J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2021, 39(11): 139-141.

- [8] 杨平.昔日废弃矿山今朝绿水青山:海宁市鼠尾山废弃矿山生态修复治理侧记[J].浙江国土资源,2020(8):32-33.
YANG P. From Abandoned Mines to Green Waters and Mountains: A Side Note on the Ecological Restoration of the Abandoned Shuwei Mountain Mine in Haining City [J]. Zhejiang Land and Resources, 2020(8):32-33.
- [9] 李胜东.苔藓植物在桂北石灰岩矿山边坡生态修复中的应用[D].桂林:桂林理工大学,2023.
LI S D. Application of bryophytes in ecological restoration of limestone mine slopes in northern Guangxi [D]. Guilin: Guilin University of Technology, 2023.
- [10] 李佳.底泥基石灰岩矿山生态修复基料研究[D].绵阳:西南科技大学,2022.
LI J. Study on the Ecological Restoration Base Materials of Limestone Mines Based on Sediment [D]. Mianyang: Southwest University of Science and Technology, 2022.
- [11] 姜全果.蒙阴县汇泉峪石灰岩矿区矿山环境治理方法与生态修复技术[D].济南:山东大学,2013.
JIANG Q G. Methods of Mine Environment Treatment and Ecological Restoration Techniques in Huiquan Yu Limestone Mine Area of Mengyin County [D]. Jinan: Shandong University, 2013.
- [12] SANSUPA C, PURAHONG W, NAWAZ A, et al. Living Fungi in an Opencast Limestone Mine: Who are They and What Can They Do? [J]. Journal of Fungi, 2022, 8(10):987.
- [13] SORIA R, ORTEGA R, BASTIDA F, et al. Role of Organic Amendment Application on Soil Quality, Functionality and Greenhouse Emission in a Limestone Quarry From Semiarid Ecosystems [J]. Applied Soil Ecology, 2021, 164(1): 103925.1-103925.13.
- [14] TAN F, JIAO Y Y, WANG H, et al. Reclamation and Reuse of Abandoned Quarry: A Case Study of Ice World & Water Park in Changsha [J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2019, 85(3):259-267.
- [15] 徐友宁,张江华,何芳,等.西北地区矿山地质环境调查与防治研究[J].西北地质,2022,55(3):129-139.
XU Y N, ZHANG J H, HE F, et al. Investigation and Prevention Research on Geological Environment of Mines in Northwest China [J]. Northwestern Geology, 2022, 55(3): 129-139.
- [16] LIU K M, LI H, PANG S H, et al. Numerical Simulation Analysis of Slope Instability and Failure of Limestone Mine in Weibei [J]. Advances in Civil Engineering, 2021, 2021: 5991348.1-5991348.14.
- [17] 王议,梁宏锟,邵治涛,等.图文解码矿山地质环境问题[J].中国矿业,2020,29(增刊2):98-101.
WANG Y, LIANG H K, SHAO Z T, et al. Decoding the Geological Environmental Problems of Mines through Graphics and Text [J]. China Mining Magazine, 2020, 29(Sup. 2):98-101.
- [18] 罗平,王惠江,王前进,等.新疆石灰岩矿山地质环境现状及防治建议[J].中国非金属矿工业导刊,2022(3):58-61.
LUO P, WANG H J, WANG Q J, et al. Current Situation and Prevention Suggestions of Geological Environment in Limestone Mines in Xinjiang [J]. China Non-metallic Minerals Industry, 2022(3):58-61.
- [19] 寿立永,张亮,王焘,等.陕西省乾县五峰山石灰岩矿高效利用与生态修复研究[J].中国矿业,2020,29(12):89-94.
SHOU L Y, ZHANG L, WANG T, et al. Research on the Efficient Utilization and Ecological Restoration of Wufengshan Limestone Mine in Qian County, Shaanxi Province [J]. China Mining Magazine, 2020, 29(12):89-94.
- [20] 罗明,周妍,鞠正山,等.粤北南岭典型矿山生态修复工程技术模式与效益预评估:基于广东省山水林田湖草生态保护修复试点框架[J].生态学报,2019,39(23):8911-8919.
LUO M, ZHOU Y, JU Z S, et al. Engineering Technical Model and Benefit Pre-assessment of Typical Mine Ecological Restoration in Northern Guangdong Nanling: Based on the Pilot Framework for Ecological Protection and Restoration of Mountains, Rivers, Forests, Fields, Lakes, and Grass in Guangdong Province [J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(23):8911-8919.
- [21] 高明,李向全,王振兴,等.峰峰矿区主要矿山环境地质问题及防治对策[J].中国矿业,2020,29(增刊2):94-97.
GAO M, LI X Q, WANG Z X, et al. Environmental Geological Problems and Prevention Countermeasures of the Main Mines in Fengfeng Mining Area [J]. China Mining Magazine, 2020, 29(Sup. 2):94-97.
- [22] 胡庆.桩板式挡土墙在河道治理工程中的应用[J].建筑结构,2022,52(增刊1):2844-2848.
HU Q. Application of Pile-Board Retaining Wall in River Management Projects [J]. Building Structure, 2022, 52(Sup. 1):2844-2848.
- [23] 李丽华,张怡心,屠嫻哲,等.基于生命周期评价法的挡土墙环境影响分析[J].环境污染与防治,2023,45(5):661-668.
LI L H, ZHANG Y X, TU X Z, et al. Environmental Impact Analysis of Retaining Walls Based on Life Cycle Assessment [J]. Environmental Pollution and Control, 2023, 45(5):661-668.
- [24] 全国国土资源标准化技术委员会.滑坡防治设计规范:GB/T 38509—2020[S].北京:中国标准出版社,2020.
National Technical Committee for Standardization of Land and Resources. Design Code for Landslide Prevention: GB/T 38509—2020 [S]. Beijing: China Standard Press, 2020.
- [25] 豆红强,孙永鑫,王浩,等.桩板式挡土墙桩-板土压力传递特性的试验研究[J].工程科学与技术,2019,51(3):77-84.
DOU H Q, SUN Y X, WANG H, et al. Experimental Study on Soil Pressure Transmission Characteristics of Pile-Plate Retaining Wall [J]. Advanced Engineering Sciences, 2019, 51(3):77-84.
- [26] ZHAO N Y, XU Y, XIANG S, et al. Pressure Distribution Law on Vertical Plate of Cellular-Counterfort Retaining Structure [J]. Alexandria Engineering Journal, 2022, 61(5):3735-3745.

- [27] 林名棣.钢筋混凝土悬臂式挡土墙优化弯矩幅值的设计方法[J].建筑结构, 2022, 52(增刊1): 2836-2839.
LIN M D. Design Method for Optimizing Moment Amplitude of Reinforced Concrete Cantilever Retaining Wall[J]. Building Structure, 2022, 52(Sup. 1): 2836-2839.
- [28] 宋金华, 代贤映.软土地基桩排悬臂式挡土墙抗滑数值仿真[J].计算机仿真, 2022, 39(12): 347-351.
SONG J H, DAI X Y. Numerical Simulation of Anti-slide Performance of Pile Row Cantilever Retaining Wall on Soft Soil Foundation[J]. Computer Simulation, 2022, 39(12): 347-351.
- [29] 贾亮, 梁荣.基于强度折减法的加筋挡土墙动力稳定性分析[J].兰州理工大学学报, 2021, 47(2): 122-126.
JIA L, LIANG R. Analysis of Dynamic Stability of Reinforced Retaining Wall Based on Strength Reduction Method[J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2021, 47(2): 122-126.
- [30] 廖昕.新增荷载作用下既有重力式挡土墙服役性能研究[D].兰州: 兰州交通大学, 2023.
MIAO X. Research on the Service Performance of Existing Gravity Retaining Walls Under Additional Load [D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2023.
- [31] 郑静, 安孟康, 苏俊霞, 等.拼装式锚杆(索)框架现场试验研究[J].铁道建筑, 2020, 60(7): 93-97.
ZHENG J, AN M K, SU J X, et al. Field Test Research on Assembled Anchor (Cable) Framework [J]. Railway Engineering, 2020, 60(7): 93-97.
- [32] 苏俊霞, 郑静, 安孟康, 等.拼装式锚杆(索)框架结构力学特征数值模拟与试验研究[J].铁道建筑, 2017, 57(10): 101-104.
SU J X, ZHENG J, AN M K, et al. Numerical Simulation and Experimental Research on Mechanical Characteristics of Assembled Bolt (Cable) Frame Structure [J]. Railway Engineering, 2017, 57(10): 101-104.
- [33] 赵常青, 樊占东, 冉黎明, 等.破碎岩土高边坡锚索锚杆框架梁支护施工工艺[J].公路, 2023, 68(5): 50-53.
ZHAO C Q, FAN Z D, RAN L M, et al. Construction Technology of Anchor Cable and Bolt Frame Beam Support for High Slopes with Broken Rock and Soil[J]. Highway, 2023, 68(5): 50-53.
- [34] 魏少伟, 蔡德钧, 姚建平, 等.装配式预应力锚索框架结构设计及施工关键技术[J].铁道建筑, 2022, 62(2): 15-24.
WEI S W, CAI D G, YAO J P, et al. Design and Construction Key Technologies of Prefabricated Prestressed Anchor Cable Frame Structure[J]. Railway Engineering, 2022, 62(2): 15-24.
- [35] 刘少龙, 赵一波, 赵剑峰, 等.等截面装配式框架预应力锚索支护结构承载特性研究及其算法验证[J].建筑结构, 2023, 53(增刊2): 2662-2667.
LIU S L, ZHAO Y B, ZHAO J F, et al. Research on the Load-Bearing Characteristics of Equal Section Prefabricated Frame Prestressed Anchor Cable Support Structure and Its Algorithm Verification [J]. Building Structure, 2023, 53(Sup. 2): 2662-2667.
- [36] 汪源, 谢强, 张建华.双排抗滑桩布设方式对推力分配的影响[J].重庆大学学报, 2023, 46(8): 78-87.
WANG Y, XIE Q, ZHANG J H. The Influence of Double-Row Anti-Sliding Piles Layout on Thrust Distribution[J]. Journal of Chongqing University, 2023, 46(8): 78-87.
- [37] 赵军, 刘静德, 梁志荣.多排抗滑桩在大型滑坡治理中的工程应用研究[J].建筑科学, 2020, 36(增刊1): 156-161.
ZHAO J, LIU J D, LIANG Z R, et al. Research on Engineering Application of Multi-Row Anti-Slide Piles in Large Landslide Control[J]. Building Science, 2020, 36(Sup. 1): 156-161.
- [38] 渠孟飞, 王珏, 朱磊, 等.基于多源数据分析的三峡库区抗滑工程优化与比选[J].科学技术与工程, 2022, 22(29): 12754-12763.
QU M F, WANG J, ZHU L, et al. Optimization and Comparison of Anti-Slide Engineering in the Three Gorges Reservoir Area Based on Multi-Source Data Analysis[J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(29): 12754-12763.
- [39] WU L L, HE K Q, GUO L, et al. Research on the Excavation Stability Evaluation Method of Chaqishan Ancient Landslide in China [J]. Engineering Failure Analysis, 2022, 14: 106664.1-106664.29.
- [40] 韩云山, 杨旺旺, 董彦莉, 等.夯填边坡稳定性研究[J].施工技术, 2013, 42(23): 101-103.
HAN Y S, YANG Y W, DONG Y L, et al. Research on the Stability of Rammed Fill Slope [J]. Construction Technology, 2013, 42(23): 101-103.
- [41] 胡宇轩, 孙红月, 帅飞翔, 等.滑坡负压排水方法的试验研究[J].自然灾害学报, 2020, 29(2): 111-117.
HU Y X, SUN H Y, SHUAI F X, et al. Experimental Research on Negative Pressure Drainage Method for Landslides [J]. Journal of Natural Disasters, 2020, 29(2): 111-117.
- [42] 赵雷, 邹定富, 张丽君, 等.落石被动柔性防护网冲击力学响应的参数化研究[J].振动与冲击, 2023, 42(12): 8-17.
ZHAO L, ZOU D F, ZHANG L J, et al. Parameterized Study on the Impact Mechanics Response of Passive Flexible Protection Nets for Falling Rocks[J]. Journal of Vibration and Shock, 2023, 42(12): 8-17.
- [43] BORUVKA L, KOZÁK J, MÜHLHANSELOVÁ M, et al. Effect of Covering with Natural Topsoil as a Reclamation Measure on Brown-Coal Mining Dumpsites[J]. Journal of Geochemical Exploration, 2012, 113: 118-123.
- [44] RUWANZA S. Topsoil Transfer from Natural Renosterveld to Degraded Old Fields Facilitates Native Vegetation Recovery[J]. Sustainability, 2020, 12(9): 3833.1-3833.13.
- [45] COTTS N R, REDENTE E F, SCHILLER R. Restoration Methods for Abandoned Roads at Lower Elevations in Grand Teton National Park, Wyoming[J]. Arid Soil Research and Rehabilitation, 1991, 5(4): 235-249.
- [46] 曹勇, 毕银丽, 宋子恒, 等.物理改良对采矿伴生黏土水分和养分保持能力的影响[J].矿业研究与开发, 2021, 41(1): 116-121.
CAO Y, BI L Y, SONG Z H, et al. The Effect of Physical Improvement on the Moisture and Nutrient Retention Capacity of Mining-Associated Clay [J]. Mining Research and Development, 2021, 41(1): 116-121.

- [47] SINGH A, TIWARI S, PANDEY J, et al. Role of Nanoparticles in Crop Improvement and Abiotic Stress Management[J]. Journal of Biotechnology, 2021, 337(11): 57-70.
- [48] 纪耀坤.化肥与有机肥及土壤改良基质配施对土壤质量和小麦生长发育的影响[J].江苏农业科学, 2022, 50(21): 221-227.
JI Y K. Effects of Chemical Fertilizer, Organic Manure and Soil Amendment Matrix on Soil Quality and Wheat Growth [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2022, 50(21): 221-227.
- [49] LI X H, GAO Y, NING X N. Research Progress and Hotspots on Microbial Remediation of Heavy Metal - Contaminated Soil: A Systematic Review and Future Perspectives [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2023, 30(56): 118192-118212.
- [50] SANSUPA C, PURAHONG W, WUBET T, et al. Soil Bacterial Communities and Their Associated Functions for Forest Restoration on a Limestone Mine in Northern Thailand [J]. Plos One, 2021, 16 (4): e0248806. 1-e0248806.19.
- [51] AO Z Q, BU M H, PENG G Q, et al. Application of Phytostabilization Technology in Remediation of Metal Mine Wasteland[J]. Journal of Landscape Research, 2018, 10(2): 65-68.
- [52] HAN C W, GAO Z W, WU Z H, et al. Restoration of Damaged Ecosystems in Desert Steppe Open - Pit Coal Mines: Effects on Soil Nematode Communities and Functions [J]. Land Degradation Development, 2021, 32 (15): 4402-4416.
- [53] MUDRÁK O, FROUZ J. Earthworms Increase Plant Biomass More in Soil with no Earthworm Legacy than in Earthworm-Mediated Soil, and Favour Late Successional Species in Competition[J]. Functional Ecology, 2018, 32(3): 626-635.
- [54] RODRÍGUEZ-BERBEL N, SORIA R, ORTEGA R, et al. Benefits of Applying Organic Amendments from Recycled Wastes for Fungal Community Growth in Restored Soils of a Limestone Quarry in a Semiarid Environment[J]. Science of The Total Environment, 2022, 806: 151226.1-151226.12.
- [55] CARABASSA V, ORTIZ O, ALCANIZ J M. Sewage Sludge as an Organic Amendment for Quarry Restoration: Effects on Soil and Vegetation [J]. Land Degradation & Development, 2018, 29(8): 2568-2574.
- [56] RODRIGUEZ-BERBEL N, SORIA R, ORTEGA R, et al. Quarry Restoration Treatments from Recycled Waste Modify the Physicochemical soil Properties, Composition and Activity of Bacterial Communities and Priming Effect in Semi-Arid Areas [J]. Science of the Total Environment, 2021, 774: 145693.1-145693.11.
- [57] 苏绘梦,黄景春,王玲,等.高陡岩质边坡植被根系发育地境特征研究[J].中南林业科技大学学报, 2017, 37(11): 56-62.
SU H M, HUANG J C, WANG L, et al. Study on the Characteristics of Vegetation Root System Development in High Steep Rocky Slope Habitats [J]. Journal of Central South University of Forestry and Technology, 2017, 37(11): 56-62.
- [58] 张燕,陈洪年,王小兵,等.华北地区石灰岩质高陡边坡修复先锋植物遴选[J].中国地质灾害与防治学报, 2022, 33(5): 109-118.
ZHANG Y, CHEN H N, WANG X B, et al. Selection of Pioneer Plants for the Restoration of Limestone Steep Slopes in North China [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2022, 33(5): 109-118.
- [59] 申剑,周明涛,田德智,等.我国喷混植生护坡绿化技术浅析[J].人民长江, 2020, 51(3): 61-64+80.
SHEN J, ZHOU M T, TIAN D Z, et al. A Brief Analysis of Spray-Mixed Plant Growth Slope Greening Technology in China [J]. Yangtze River, 2020, 51(3): 61-64+80.
- [60] 阳珍,袁飞云,严贤春,等.适用于岩质边坡植被恢复的植生基材比选研究[J].公路, 2024, 69(1): 351-357.
YANG Z, YUAN F Y, YAN X C, et al. Research on the Selection of Planting Substrates for Vegetation Restoration on Rocky Slopes [J]. Highway, 2024, 69(1): 351-357.
- [61] 杨承祥,李广泽,周生.液压喷播植被绿化在大型露天米拉多铜矿的应用研究与实践[J].矿业研究与开发, 2018, 38(12): 108-111.
YANG C X, LI G Z, ZHOU S. Application Research and Practice of Hydraulic Spray Seeding Vegetation Greening in Large Open-pit Mirado Copper Mine [J]. Mining Research and Development, 2018, 38(12): 108-111.
- [62] 肖阳,袁嘉利.水利工程中河道生态护坡施工技术探究[J].人民黄河, 2020, 42(增刊 2): 176-177.
XIAO Y, YI J L. Exploration of River Ecological Slope Protection Construction Technology in Hydraulic Engineering [J]. Yellow River, 2020, 42(Sup. 2): 176-177.
- [63] 徐一斐,陈盛彬,邓阿琴.三维植被网生态防护施工技术的研究[J].安徽农业科学, 2012, 40(34): 16786-16787+16811.
XU Y F, CHEN S B, DENG A Q. Research on the Construction Technology of Three-Dimensional Vegetation Net Ecological Protection [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2012, 40(34): 16786-16787+16811.
- [64] 张利军,高德彬,赵航,等.黄土地区公路路堑边坡植被防护技术研究[J].人民黄河, 2017, 39(7): 110-113+122.
ZHANG L J, GAO D B, ZHAO H, et al. Research on Vegetation Protection Technology for Highway Cut Slopes in Loess Plateau [J]. Yellow River, 2017, 39(7): 110-113+122.
- [65] 邵蔚,姚庆健,许峰,等.厚层基材喷播技术在江南地区石灰岩矿山高陡岩质边坡生态修复中的应用[J].中国非金属矿工业导刊, 2021(4): 59-62.
SHAO W, YAO Q J, XU F, et al. Application of Thick Layer Substrate Spraying Technology in Ecological Restoration of High Steep Limestone Mine Slopes in Jiangnan Area [J]. China Non-metallic Minerals Industry, 2021(4): 59-62.
- [66] 于辉胜.区域性废弃矿山生态修复实践与思考[J].中国国土资源经济, 2021, 34(6): 84-89.
YU H S. Practice and Reflection on Ecological Restoration of Abandoned Mines in Regions [J]. Natural Resource Economics of China, 2021, 34(6): 84-89.

[67] 刘黎明,宋岩松,钟斌,等.植被混凝土生态修复技术研究进展[J].环境工程技术学报,2022,12(3):916-927.
LIU L M, SONG Y S, ZHONG B, Research Progress on Ecological Restoration Technology of Vegetation Concrete [J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2022,12(3):916-927.

[68] 席文明.植被混凝土生态防护技术在高陡边坡上的应用[J].化工矿产地质,2019,41(1):50-52.
XI W M. Application of Vegetation Concrete Ecological Protection Technology on High Steep Slopes[J]. Geology of Chemical Minerals,2019,41(1):50-52.

[69] 李欣然,张桂荣,林程,等.三峡库区滑坡工程加固和生态保护措施研究进展[J].人民长江,2024,55(1):127-134.
LI X R, ZHANG G R, LIN C, et al. Research Progress on Landslide Engineering Reinforcement and Ecological Slope Protection Measures in the Three Gorges Reservoir Area[J]. Yangtze River, 2024,55(1):127-134.

[70] 高俊美,张吉祥.藤本植物在济南破损山体生态修复中的应用[J].绿色科技,2018(1):113-115.
GAO J M, ZHANG J X. Application of Vines in Ecological Restoration of Damaged Mountains in Jinan[J]. Journal of Green Science and Technology,2018(1):113-115.

[71] 王忠伟,尚晴,刘彦春.鸡公山风景区针阔混交林藤本植物在树干不同方位的依附规律[J].热带亚热带植物学报,2022,30(4):492-499.
WANG Z W, SHANG Q, LIU Y C. Attachment Patterns of Lianas on Different Aspects of Tree Trunks in the Broadleaf-Conifer Mixed Forest of Jigong Mountain Scenic Area[J]. Journal of Tropical and Subtropical Botany,2022,30(4):492-499.

[72] 叶建军,王波,李虎,等.曼大公路 NK-SG4 标段路堤边坡生态防护试验研究[J].公路,2019,64(11):246-251.
YE J J, WANG B, LI H, et al. Experimental Study on Ecological Protection of Road Slope in NK-SG4 Section of Man-Da Highway[J]. Highway,2019,64(11):246-251.

[73] 王鑫,靳正忠,施建飞,等.植物纤维毯覆盖对干旱区尾矿砂水热分布的影响[J].干旱区地理,2023,46(9):1467-1480.
WANG X, JIN Z Z, SHI J F, et al. Effects of Plant Fiber Mat Covering on the Hydrothermal Distribution of Tailing Sands in Arid Areas[J]. Arid Land Geography,2023,46(9):1467-1480.

[74] 刘宏远,刘亮,李秀军,等.植物纤维毯道路边坡防护技术综合效益评价[J].水土保持学报,2019,33(1):345-352.
LIU H Y, LIU L, LI X J, et al. Comprehensive Benefit Evaluation of Plant Fiber Blanket Slope Protection Technology on Roadside [J]. Journal of Soil and Water Conservation,2019,33(1):345-352.

Research on Geology and Resource Problems and Restoration and Treatment of Limestone Mines

YUAN Ying^{1,2}, CAO Siyuan¹, LIU Jianbing³, ZHANG Xi³, LIU Bo³

- (1.School of Urban Geology and Engineering, Hebei GEO University, Shijiazhuang, Hebei 050031, China;
- 2.Hebei Center for Ecological and Environmental Geology Research, Shijiazhuang, Hebei 050031, China;
- 3.Geological Archives of Ningxia Hui Autonomous Region, Yinchuan, Ningxia 750021, China)

Abstract:As an indispensable mineral resource, limestone mine is widely mined and applied in various engineering activities. With the development and utilization of mineral resources, disorderly and illegal mining will cause serious damage to the local ecological environment. Therefore, how to effectively carry out ecological restoration of limestone mines has become a research hotspot in the field of mining. Based on the research background of vigorously promoting the ecological restoration of mine relics, the main geological and resource problems and restoration and treatment technology of limestone mines were summarized by investigating a large number of mines and consulting relevant literature, and some thoughts on its shortcomings and development trend was put forward. Finally, a new model of ecological restoration of limestone mines was proposed, which included the elimination of hidden dangers of geological disasters, the evaluation of ecological geological environment, the division of site types, the test of selected areas, the reconstruction of soil, the reconstruction of vegetation and the later management and protection, in order to provide theoretical reference for the management of limestone mines.

Key words: Limestone mine, Ecological restoration, Eco-geological environment, Reconstruction of soil, Reconstruction of vegetation