陈晓东,聂小军,张永慧,等. 中国高陡岩质边坡植被重建技术现状与展望[J]. 环境科学与技术,2024,47(S1):70-78. Chen Xiaodong, Nie Xiaojun, Zhang Yonghui, et al. Study status and prospect of revegetation technology for high and steep rocky slopes in China[J]. Environmental Science & Technology,2024,47(S1):70-78.

中国高陡岩质边坡植被重建技术现状与展望

陈晓东[1,2], 聂小军[1], 张永慧[2], 刘军军[2]
(1.河南理工大学资源环境学院,河南 焦作 454003;
2.焦作市生态环境局,河南 焦作 454000)

摘 要:工程建设和矿山开采等活动形成了大量裸露的岩质边坡,由此可能带来许多地质和生态环境问题。随着边坡治理技术的发展,兼具稳定边坡和绿化环境双重功能的植被重建技术,逐步取代传统的单一工程治理技术,被广泛应用于边坡恢复治理。高陡岩质边坡因坡度陡、高差大,坡面固土保水困难,导致植被生长条件十分恶劣,所以该类岩质边坡的植被重建工作极其困难。为此,文章在分析高陡岩质边坡生态特点的基础上,重点总结了适宜高陡岩质边坡的植被重建技术,并阐述了各类代表性技术的基本概念、适用范围及优缺点。同时,论述了边坡植被重建技术的主要研究热点,指出各类技术中可能存在的理论研究薄弱、基质稳定性差、植被单一、技术选型不合理以及养护费用高等问题,并从特殊生境技术开发、基质研发、植物选配、护坡机理研究、评价机制建立及信息技术应用等方面进行了展望,以期为中国高陡岩质边坡植被重建技术的工程实践和理论研究提供一定的借鉴和参考。

关键词:高陡岩质边坡; 植被重建技术; 研究热点; 研究现状; 展望
中图分类号:X171.4 **文献标志码**:A **doi**:10.19672/j.cnki.1003-6504.1044.23.338 **文章编号**:1003-6504(2024)S1-0070-09

Study Status and Prospect of Revegetation Technology for High and Steep Rocky Slopes in China

CHEN Xiaodong[1,2], NIE Xiaojun[1], ZHANG Yonghui[2], LIU Junjun[2]
(1. School of resources and environment, Henan Ploytechnic University, Jiaozuo 454003, China;
2. Jiaozuo City Ecological Environment Bureau, Jiaozuo 454000, China)

Abstract: Engineering construction and mining activities have formed a large number of exposed rock slopes, which may bring many geological and ecological environmental problems. With the development of slope management technology, the revegetation technology, which has the dual functions of stabilizing slopes and greening the environment, gradually replaces the traditional single engineering management technology, and is widely used in slope restoration and management. High and steep rocky slopes have very poor vegetation growth conditions due to steep slope gradient, large height difference, and difficulties in soil consolidation and water retention on the slope surface, so it is extremely difficult to rebuild the vegetation on such rocky slopes.Therefore, based on the analysis of the ecological characteristics of high steep rocky slopes, this paper focuses on summarizing the vegetation reconstruction techniques suitable for high steep rocky slopes, and describes the basic concepts, scope of application, advantages and disadvantages of various representative techniques. At the same time, the main research hotspots of slope revegetation techniques are discussed, and the problems of weak theoretical research, poor substrate stability, single vegetation, irrational technology selection and high maintenance cost may exist in various techniques are pointed out, and the prospect is given in terms of the development of special habitat technology, substrate research and development, plant selection, research on slope protection mechanism, establishment of evaluation mechanism and application of information technology, etc., so as to provide some reference for the engineering practice and theoretical research of revegetation technology for high steep rocky slopes in China.

Key words: high and steep rocky slopes; revegetation technology; research hotspots; study status; prospect

《环境科学与技术》编辑部:(网址)http://fjks.chinajournal.net.cn(电话)027-87643502(电子信箱)hjkxyjs@vip.126.com
收稿日期:2023-07-29;修回2023-09-20
基金项目:国家自然科学基金(41977284);河南省科技攻关项目(222102320032)
作者简介:陈晓东(1982-),男,工程师,博士在读,研究方向为矿山边坡生态修复技术研究,(电子信箱)xiaodong100179@163.com。

随着我国经济社会的快速发展，道路、水电等基础设施建设及露天矿山开采等资源开发活动形成了大量陡峭无土的岩质边坡，由此可能带来许多地质和生态环境问题。如坡面岩石裸露，在风吹、日晒、雨淋等自然因素作用下，容易诱发崩塌、滑坡和泥石流等地质灾害，严重威胁周边居民的生命财产安全，同时生物多样性减少，地貌景观被破坏，与周围自然景观极不协调，形成视觉上的污染[1]。上述问题严重影响并制约了我国经济社会的可持续发展，因此，做好这些岩质边坡的恢复治理具有十分重要的意义。

20世纪90年代以来，随着我国边坡恢复治理技术的发展，兼具护坡和绿化双重功能的边坡植被重建技术日益受到重视。特别是随着我国高速公路建设的飞速发展，广大科研和工程技术人员在引进和吸收国外先进技术的基础上，开展了大量公路边坡植被重建工程实践和理论研究工作，取得了一系列研究成果，基本上解决了我国公路土质和土石边坡的植被重建问题[2]。相比较而言，岩质边坡的植被重建技术发展相对滞后，特别是高陡岩质边坡因其坡面陡峭，固土保水困难，坡面径流快、冲刷强，昼夜温差大等，导致坡面植物生长条件件极端恶劣，其植被重建工作十分困难。因此，其坡面植被重建技术的选择，显得尤为重要。

目前，国内岩质边坡植被重建技术大多借鉴客土喷播技术、三维植被网喷播技术、厚层基材喷播技术、植生袋法、植被混凝土防护技术、喷混植生技术、飘台法、藤本护坡技术、爆破燕窝、植物纤维毯防护技术等。但因各类技术均有不同的适用条件和技术局限性，导致真正适用高陡岩质边坡的植被重建技术并不多。在实践中，忽视边坡立地条件，盲目、单一地选用植被重建技术，也会导致植被恢复效果不佳。目前，专门针对高陡岩质边坡植被重建技术的综述类文献鲜有发表，针对这一现状，本文在分析高陡岩质边坡生态特点的基础上，重点对适宜高陡岩质边坡的植被重建技术进行了分类总结，并阐述了边坡植被重建技术的主要研究热点，指出了现有边坡植被重建技术中存在的不足，并就下一步的研究方向进行了展望，以期为我国高陡岩质边坡植被重建的工程实践和理论研究提供一定的参考和借鉴。

1　高陡岩质边坡的生态特点

高陡岩质边坡是一类工程地质体，一般指那些具有特定高度和坡度的天然或工程岩质斜坡。在矿山地质环境治理中，相对高差80 m以上，坡度在65°以上的岩质边坡治理难度较大[3]，这类岩质边坡也称为岩质崖坡或岩质崖壁[4]。其除具备一般岩质边坡的特点外，既高且陡的特性，使其坡面生境条件极端恶劣，植被重建的难度更大。

（1）无土层覆盖，缺乏植物生长的土壤和水分条件。坡面岩石裸露，石质坚硬、透水性强，持水性和保水功能差，干旱是坡面上植物定居的最主要限制因子[5]。另外，岩体含有的活性养分低，植被很难从边坡岩层吸收水分及养分供其生长[6]。因此，植被重建工作首先需要采取某种工程技术手段将土壤基质固定在边坡上，构建植物生长所需的土壤生境，而且土壤层要满足一定的物理、化学和力学性能要求[7]。

（2）坡面高陡，基质附着条件差。坡面既高且陡，坡率大多在65°以上，基质附着条件差，难以在坡面自然留存；常用喷播技术形成的基质层厚度有限，在干旱或暴雨冲刷情况下，基质容易脱落或养分流失严重[5]。

（3）坡面异质性较大，自然生态条件恶劣。岩质边坡不同于土质边坡，坡面异质性较大[8]，即使是同一个边坡其坡向、坡面形态也不尽相同，由于地层结构的复杂性，其生态环境比土质边坡复杂的多。裸露岩石昼夜温差较大，蒸发强烈，易形成极端温度[9]，同时自我供给的水分和养分条件难以持续有效，需要靠外部不断补充[7]。

（4）地质条件复杂，稳定性较差。工程建设形成的高陡岩质挖方边坡在受爆炸或开挖等外力御荷作用影响时，岩体内大多会产生大量御荷节理、裂隙、岩体内原生或构造节理张开。在各种节理裂隙作用下，岩体被切割成大块状，坡面岩体结构较破碎，具有危岩落石发生的可能。因此，植被重建工作应在保证边坡稳定的前提下进行。

2　常用的高陡岩质边坡植被重建技术及其应用

欧美及日本等发达国家边坡植被重建开始于20世纪30~40年代，奥地利、美国等欧美国家主要围绕防止土壤侵蚀和退化方面开展研究；日本因其多山、自然灾害多等原因，更加注重边坡植被重建，其边坡绿化理论和技术，较欧美国家的研究更加系统，处于全球领先地位[10]。我国在边坡植被重建技术方面的研究起步较晚，20世纪90年代以前一般多采用撒草种、穴播或沟播、铺草皮、片石骨架植草等护坡方法[11]。之后在借鉴国外边坡植被重建技术的基础上，经过几十年的快速发展，初步形成了我国边坡植被重建的基础理论和技术体系，能够解决土质边坡及岩土边坡植被重建问题。相对而言，国内对岩石边坡的植被重建研究，还处于初步探索阶段，尤其是对于高陡岩质边坡，

其极端特殊的立地条件决定了常见的液压喷播、植被毯等众多边坡植被重建技术并不能成功应用于高陡岩质边坡。为此，本文在梳理国内岩质边坡植被重建技术的基础上，依据生境营建方式，将适宜高陡岩质边坡植被重建技术分为挂网喷播类、刻槽钻孔类和框格类。重点介绍各类典型技术的基本概念、适用条件、应用实例及优缺点，以期为我国高陡岩质边坡的植被重建提供技术参考。

2.1 挂网喷播类技术

挂网喷播类技术主要采用在坡面挂塑料或金属网，然后喷播含种子的基质。目前该类技术中适用于高陡岩质边坡主要是植被混凝土绿化技术和厚层基材喷播技术。

植被混凝土绿化技术是采用特定的混凝土配方和种子配方，对岩石边坡进行防护和绿化的新技术。具体做法是：先在岩体上铺上铁丝或塑料网，并用锚钉和锚杆固定，将由水泥、种植土、腐殖质、混凝土绿化复合添加剂、混合植绿种子和水组成植被混凝土原料搅拌后，经常规喷锚设备分两层喷射到岩石坡面，形成近10 cm厚的植被混凝土（仅表层含植物种子）；喷射完毕后，覆盖一层无纺布防晒保墒，经过一段时间洒水养护后，形成稳定的植被群落[12]。与其他技术相比，该技术使用水泥为粘结剂，具有较强的抗冲刷能力，适用于坡度1∶0.5以上的高陡岩质边坡。唐欣等[13]将植被混凝土边坡防护绿化技术应用于广州岑村东升采石场岩石边坡的生态治理，完工1年后，植被覆盖率达到100%，可为同类边坡植被混凝土生态防护技术的应用提供参考。

厚层基材喷射护坡技术于1976年首先由日本开发出来，主要用于软弱岩石边坡的生态防护。在借鉴日本成功经验的基础上，科研人员开发了适合我国高陡岩质边坡厚层基材喷射种植基，并形成了一套适宜于机械化施工的施工机械及施工工艺[14]。该技术是运用喷播系统将混有植物种子、防侵蚀材料的基质材料喷附在坡面上，形成一层既适宜植物生长又稳定的基材层，主要由锚杆、网及基材混合物组成。所谓厚层是指喷附在坡面上基质的厚度，相对于客土喷播、液压喷播，厚层喷播而言，厚度为15 cm甚至更厚[15]，该技术可应用于坡比小于1∶0.3的各类岩质边坡的植被防护[16]。张俊云等[14]以内昆线横江车站路堑岩石边坡为试验点，设计了厚层基材喷射种植基各组分配比，采用湿喷法进行厚层基材喷射护坡试验。结果表明采用厚层基材喷射对岩石边坡进行生态防护，厚层基材各项指标均满足植物正常生长所需的条件，防护效果显著。

该类技术具有机械化程度高、施工效率高、快速复绿等优点，但也存在工程造价和养护费高，喷播基质层厚度有限、易脱落，仅适宜草灌绿化植物根系短类植物生长，植物恢复长期效果差等问题。

2.2 刻槽钻孔类技术

刻槽钻孔类技术是指在边坡上钻生态孔、勾缝、直接构建槽穴或安装穴植装置后，在孔穴和槽内回填土、种植植物的一类技术措施。常用类型包括种植槽法和植生孔法。

种植槽法是指在边坡坡面按设计间距打入锚杆，并在坡面外端预留一定长度，以此预留锚杆为载体，在其上构筑钢筋混凝土种植槽，板槽内填入特殊配置的人工客土基质，然后移栽适宜当地气候环境的灌木和藤本苗袋，并辅以草本种子撒播，采取上爬、下挂、中部遮掩的方式对种植槽上下范围内边坡进行复绿。其结构形式除了可以采取直板式外，还可以采取“V”形、“U”形、“L”形[17]。这种技术主要应用于坡度在80°以上、壁面光滑、缺乏附着存土的石面[18]。管斌等[17]以铜陵市郊区敕山新建白杨涝石料厂矿山地质环境治理工程实践为例，详细介绍了植生槽的结构设计、槽内绿化设计、基质配比、养护系统等，为同类高陡岩质边坡植被重建提供了借鉴。

植生孔法绿化技术是指利用潜孔锤钻机在边坡上打出许多具有一定孔径、深度和方向的种植孔，在孔内种（栽）植耐贫瘠、抗干旱、耐严寒的植物，使坡面迅速恢复植被的一种边坡生态治理技术[19]。该技术适用于坡面坡度>70°甚至垂直的岩石坡面，解决了高陡岩质边坡绿化的问题，为残破山体绿化开辟了新途径、新方法。王忠强[20]将植生孔技术应用于宁波市江北区九龙湖风景区岩质边坡生态修复，选取爬山虎、小叶扶芳藤和常青藤为恢复植物，结果表明爬山虎在岩石坡面有较高的成活率和生长速度，植生孔法可以作为高陡岩面的植被恢复技术之一。

该技术可以适用75°以上甚至垂直边坡，固土牢固，自然降水的利用效率高，可以根据施工设计灵活调整固土量。不足的是一般只适用于结构比较稳定的边坡，恢复早期绿化整体性较差。

2.3 框格类技术

框格法是一种广泛应用于高速公路边坡和路堤中的护坡手段。目前主要是采用浆砌块石或钢筋砼在岩石质边坡上按一定形状砌筑成骨架，即格构梁，并利用锚杆或者锚索加以固定，然后在格构中间填充客土，施肥播种，培育植物。格构梁常见的形状有方形、菱形、人字形和拱形等[21]。白建光等[22]研究了格构护坡复绿技术的特点、施工流程以及在北方干旱-半

干旱地区矿山边坡修复的应用，结合抗逆性强的本土植物及掺有表土的基质材料，大大地提高了植物的成活率。

格构梁的施工方法相对简单，所形成的土壤基层可以有一定的厚度，有利于水分的保持和地表水的涵养，同时也使采用灌木、甚至乔木进行边坡生态护坡成为可能。不足的是这种结构对坡度在60°以上的陡边坡具有施工难度大、格构成型困难的特点。另外一个往往容易被忽视的问题是格构梁与地基的适宜性，当格构梁与边坡的岩性具有较大的刚度差异时，往往会出现格构梁的开裂、破损或架空现象[5]。

针对上述各类技术，在实际应用中，应根据高陡岩质边坡的稳定性、岩石性质、风化程度、坡度等选择适宜的植被重建技术，有时即使是同一边坡，也应根据不同的坡面特征，对坡面划定分区，采取对应的植被恢复技术，从而提高植被重建复绿效果。一般情况下，在困难立地条件下对促进边坡植被的成活和生长起到重要作用、并在停止养护后坡面植被仍能实现可持续发展的边坡绿化关键技术，往往并非单一类别的技术所能做到，而需要若干技术的集成联合。比如在高陡岩质边坡植被重建过程中，将挂网喷混技术与“V”型种植槽技术组合使用，充分发挥“V”型种植槽大量固土和挂网喷混“无死角”绿化的优势，植被恢复效果显著。

3　边坡植被重建技术的主要研究热点

高陡岩质边坡植被重建是边坡植被重建的重要领域之一，总结边坡植被重建技术主要研究热点，可以更全面了解高陡岩质边坡植被技术研究现状，并为下一步推进高陡岩质边坡植被重建技术进步提供研究方向。为此，重点阐述了边坡植被重建技术的2个主要研究热点：固土技术和建植技术。

3.1　固土技术研究

裸露高陡岩质边坡表面无土，没有植物生长的土壤和水分条件，因此首先需要在坡面营造植被生长的土壤条件。常见固土技术分为表面固土、分区固土以及固土构件，针对边坡表层的大范围固土，固土网是应用最广泛、形式最多样的构件。固土网是指以金属、热塑性树脂或植物纤维为原料，经挤出、拉伸、焊接、收缩、编织等工序制成的孔网[23]，根据其所占空间形态的不同，分为平面网和三维网。针对不同的坡质坡度，对网格结构和材料的改良是提高防护稳定性的主要研究方向。分区固土所运用的技术措施以各类格构和格室为主，是工程防护措施基本结构和功能的延伸。目前，应用较广的结构形式有矩形、拱形、十字形、人字形、菱形、蜂窝形等。固土构件包括生态砌块、预制砖和挡土墙等，其砌筑方法及材料的成本控制和环保性能提升是研究热点[24]。总体来看，固土技术研究离不开对固土材料和结构的改良，其演变呈现从传统非环保型到高新环保型的特征，可以预见这也是该类技术研发的未来趋势。

3.2　建植技术研究

依据《裸露坡面植被恢复技术规范》(GB/T 38360−2019)，建植技术包括基质配制和植物选配，因此从基质的配比与特性研究、植被的选择与配置研究2个方面介绍建植技术的研究热点。

3.2.1　基质的配比和特性研究

土壤是植物赖以生存的重要条件之一，土壤生态系统是植被生态系统重建的基础[25]。高陡岩质边坡表面无土，岩石裸露，生态恢复前需通过各种方法和手段将人工土壤基质固定在边坡上，构建稳定的土壤生境条件。因此，人工土壤基质组分和配比是其中最基础、最关键的一环。人工土壤基质的组分和配比是根据不同立地条件以及植物恢复目标而确定的，在极度贫瘠和高陡的裸岩坡面，人工土壤基质既要具备土壤的一般特性，又要含更丰富的营养物质，具有良好的持水性、通气性、坡面依附性和稳定性，使其既能保水、保肥、通气、透水，适于植物生长，又能有效抵抗水蚀和风蚀，抑制水土流失[25]。

(1)适宜特定边坡条件的土壤基质配比试验研究。依据边坡所在区域的气候、植被等条件以及坡度、岩石种类、风化程度等边坡特性，选取不同的基质原料组分，配置出不同种类的土壤基质，进行种植实验，通过对土壤基质理化特性、强度指标及受试植物生理生长指标等进行测定，筛选出适合特定边坡条件的最优土壤基质配比。邵琪[26]、胡双双[27]、牟信刚[28]、刘铁军等[29]利用不同基质组分，筛选出了适合特定边坡条件的土壤基配比，对边坡植被恢复中基质的组分和配比提供了参考。综合有关研究成果，土壤基质主要组分包括种植土、有机质(堆肥、腐殖质、草炭土、秸秆、锯末、糠醛渣、鸡粪等)、水泥、保水剂、生物肥、速效肥、pH缓冲剂、长效缓释肥和复合肥等，需要根据边坡条件进行合理选取。其中，种植土作为土壤基质固相矿物质组成和土壤骨架，是土壤基质的物质基础，是必不可少的组分之一；有机质能有效改善土壤理化性质，是土壤长效养分主要来源之一，使用较多的有泥炭土、堆肥、腐殖质等；保水剂可以有效改善土壤基质的保水性能；团粒剂可以改善土壤基质的团粒结构，形成土壤团聚体，改善土壤结构；水泥、胶黏剂或粗细纤维作为土壤结构稳定剂，可以提升土壤基质

的机械性能，提高抗雨水冲涮的能力；速效肥、缓释复合肥、生物菌肥、pH缓冲剂等基质改良成分，可根据实际情况进行添加。

（2）固体废物综合利用等低成本土壤基质研发。为了减少边坡植被恢复过程中自然土壤以及有机质的使用量，降低植被恢复成本。研究人员从工程弃土、生活垃圾、城市污泥等固体废物综合利用角度进行基质的配置和研发。马朋坤[30]以铁尾矿为主要组分，筛选出适合高羊茅组和紫花苜蓿组的最优配比基质配比；李冰美等[31]以活性污泥、炉渣、粉煤灰物质为基质原料组成部分，以高羊茅为受试植物，筛选出适合焦作北部山区植被恢复的基质配比；蓝群力等[32]充分利用工程废渣为高陡岩质边坡喷射混合物的基础层材料，筛选出满足植物正常生长基质配比；Medl等[33]在研究边坡绿墙植被重建技术时，选取3种矿区开采废弃物和有机肥进行配比，作为植被恢复土壤基质，结果表明其中2种矿区开采废弃物具有较好的植被恢复效果。

（3）土壤基质机械性能研究。在边坡植被恢复过程中，基材除要具备合理的物理结构、化学特性以及水分、养分条件外，还必须满足力学特性和稳定性要求，能有效防止雨水的冲涮。针对土壤基质的机械性能，张俊云[34]、张季如[35]、周中[36]、夏振尧等[37]通过人工降雨模拟试验、直剪试验、收缩性分析试验等，测定抗剪强度、收缩性、抗侵蚀、无侧限抗压强度，来评价不同基质配比种植基材的稳定性、抗冲刷性等稳定特性。梁永哲等[38]研究了基质在冻融条件下的特性变化。

3.2.2 植被的选择与配置研究

不论什么类型的植被重建技术，植物始终扮演着重要角色，不同植物的基因特征不同，对环境条件的适应性也就不同。因此，科学研究及合理论证植物选择和配置模式是成功恢复岩质边坡生态系统，确保植物群落长期有效的关键[39]。近年来，关于边坡植被恢复的选择与配置研究主要体现在以下几点。

（1）注重“乔、灌、草”植被群落构建。随着边坡植物恢复技术的不断发展，科研技术人员对边坡生态恢复植被选择与配置的认识不断深化，逐渐摒弃以往抵抗环境条件变化能力弱、稳定性差的单纯草种或单一草种进行边坡植被恢复方式，越来越重视乔、灌木等植物的应用，主张构建乔、灌、草的相结合的植被群落系统，提高物种多样性和构建稳定且能自维持的植物群落系统。注重选取抗逆性强、根系发达、生长迅速，能在短期内覆盖坡面，越年生或多年生并适应粗放管理的植物种类；以及暖季型和冷季型、深根性和浅根系，固氮植物和非固氮植物等不同植物类型的搭配，注意合理确定各植物种类种子数量配比以及植物之间生态位的关系，尽量减少植物之间的竞争。马建荣等[40]以京承高速为案例，提出了以草本沙打旺、紫花苜蓿，灌木胡枝子、紫穗槐，乔木刺槐、臭椿等植物物种构建的“乔、灌、草”植物配置模式；孔东莲等[41]结合华北地区的区域状况，给出了适合华北区域的主要护坡灌木、藤本和草花植物种类。

（2）注重应用乡土种及野生岩生植物。利用乡土物种完全适应了当地的环境与气候和对外来入侵物种具有化感作用的特点，来加速植被群落的演替过程，提高植被恢复的效果和成功率。宋凤鸣等[42]在华南地区乡土植物种子进行边坡客土喷播绿化试验，表明乡土植物用于边坡绿化的可行性；何蓉蓉等[43]通过对邢汾高速公路沿线植物资源进行调查，利用筛选出的乡土植物进行高速公路边坡生态恢复。结果显示：紫花苜蓿、紫穗槐、刺槐、臭椿发芽率高，在边坡上生长较好，固土护坡效果明显，可有效地促进邢汾高速公路边坡的植被恢复；Hosogi等[44]在恢复边坡的下部分构筑土壤基质层，利用边坡上部或周边植物散落的种子进行边坡植物恢复，可以达到与周边景观一致的生态效果；Nakamura等[45]在研究乡土植物用于边坡植物恢复时，强调应注意恢复边坡生境条件与物种（茎）营养储备的重要性；李西[46]研究表明两种岩生植物金发草、丛毛羊胡子草具有比对照植物狗牙根更强的抗旱、抗寒特性，是理想的植被护坡材料。

（3）注重根据特定区域气候特征和坡面特征，给出适宜的植物种类和配置。特定边坡植物种类的选取与配置，必须依据边坡所在地的气候条件及边坡坡度、坡向、风化程度等边坡特性进行合理选取。李一为等[47]通过对108国道门头沟段边坡进行调查，筛选出与边坡环境类似条件下生长良好的植物12种，并提出2种植物配置模式，为同类型区边坡绿化的植物选择提供参考；魏冬[48]针对宝鸡市渭河台塬地边坡所处地区的气候、水文、地理等特点，根据边坡坡度和岩石特性不同，给出了3种不同的植物配置模式；刘琦等[49]结合宜昌市峡州大道一期快速道高陡路堑岩质边坡植被防护的实践经验，根据边坡立地条件划分了4种不同类型，针对不同类型给出了具体具体的植物配置模式。

4 存在的问题

近几十年以来，我国边坡植被重建技术在借鉴国外先进技术的基础上，发展十分迅速，并取得了一系列研究成果，初步形成了一套适应我国的边坡植被重

建理论和技术体系。

（1）植被重建技术理论研究薄弱，植被恢复的长期效果差。高陡岩质边坡植被重建工作，对相关工程技术有更高的要求，尽管国内存在的生态修复技术种类繁多，各种新型生态护坡技术也层出不穷，但是真正适用高陡岩质边坡的技术并不多。其中一个主要原因是对现有技术理论研究不够深入，许多技术未形成系统规范的学科体系，与欧美、日本等国家系统规范、体系完善的边坡生态修复技术相比，仍存在较大差距[50]。国内关于生态修复技术的实践水平远远高于理论水平，主要集中在生态恢复前的基质配比、工艺方法等应用技术方面，较少对生态恢复过程中植被、土壤的变化进行长期监测和科学评价。缺乏对水分、养分及坡面热通量等主控生态因子动态变化过程研究，以及在此基础上建立的植物生长过程与生态因子之间的植被建植调控技术体系。同时还缺乏对生态恢复后植被与土壤的演替规律及相互作用关系的认识[51]。由于技术的不成熟，往往植被恢复初期效果好，能实现快速覆绿，但是随着时间的推移，植被退化现象比较严重。“1年绿，2年黄，3年枯，4年死”现象普遍存在。

（2）坡面基质稳定性差，基质易脱落或养分流失，难以形成稳固的土壤生境，而稳定的土壤生境条件，是重建植物群落的前提。高陡岩质边坡坡面高、坡度陡，土壤很难稳定地附着在坡面上。如常用的喷播固土方式，随着时间的推移，在降雨、冻融等因素的影响下，基材中的氮、磷、钾等营养元素流失严重。同时，在雨水的冲刷作用下，基材本身也将受到侵蚀而产生水土流失现象。最后，坡面基质厚度受到限制，太厚容易脱落，太薄不能满足植物生长需要。因此，采用合理的固土措施至关重要。

（3）植被单一，选型不合理。目前岩质坡面植被恢复中多引用国外草坪草或牧草草种，能实现快速复绿，但短根系的草本植物，有抗寒性与抗旱性差、绿期短、需水量大、根系锚固作用差等缺点，退化现象严重。植被的选型比较单一，植被群落结构不稳定。

（4）未选择合理的生态恢复技术，导致生态恢复工作失败。边坡植被恢复技术应根据边坡所在的区域气候特征，边坡坡度、坡高、岩石特性等，合理确定适宜的植被恢复技术。如在高陡岩质边坡和低缓岩质边坡共存的矿区，一味的选择采用挂网喷播绿化技术，工程量巨大，耗费大量人力物力财力。在实际应用中，应根据实际情况选择适宜的植被恢复技术，同时注意多种生态恢复技术的组合使用。

（5）植被恢复成本高、养护难度大。植被恢复成本是一项植被重建技术能否顺利推广应用的一个重要因素。现有技术造价相对较高，极大程度上限制植被重建技术的应用。高陡岩质边坡基质水分、养分不能持续供应，需要靠外界补给。而我国大部分地区降雨量小或极不均匀。后期管理难的问题也已成为岩石边坡植被护坡技术应用的重要限制因素。

5　展望

（1）开发适宜极端立地条件地区高陡岩质边坡的植被重建技术。虽然我国岩质边坡植被护坡技术已取得很多成果，但不同地区的岩石边坡植被护坡工程仍面临着诸多困难和挑战[52]。尤其是针对高寒、干旱及半干旱区等特殊生境的高陡岩质边坡的植被技术仍是生态恢复领域的难题之一。特殊立地条件对基质和植物种类有特殊要求，诸多极端生境条件对植被恢复的协同耦合作用机制是极其复杂的，已成为植被护坡技术急需攻克的技术难题。我国地域辽阔，地形地貌、地质条件和气候条件复杂多变，特殊生境区域工程建设活动形成的众多裸露岩质边坡亟需植被重建。因此，开展适宜极端立地条件的岩质边坡植被重建技术研究有重要的科学意义和工程实践意义[7]。

（2）研发基质新材料和低成本基材。在基质研究方面，应强化对黏合效果更好又不妨碍植物种子发芽和生长的黏合剂、能明显增加保水效果又不板结土壤的保水剂以及能加速岩石表层的风化过程（包括产生细裂缝）又不对植物产生破坏或抑制作用的基质新材料研发[53]，以固体废弃物为基质原料的低成本基质开发和基材肥力及持续供肥能力等关键技术也是基质的研究方向之一。

（3）植物选育与配置优化研究。乡土植物完全适应了当地的环境与气候，可以缩短植被群落演替进程。因此，应加强不同生态区划植被种类的现状调查，开展乡土植物的驯化及商品化育种工作，加大乡土物种在植被恢复的应用。摒弃传统依靠单一或单纯草种的植被恢复模式，构建灌、草、藤等的植被恢复系统，提高植物群落的稳定性。加强具有耐贫瘠、耐高温、抗干旱且具有特殊生长机制的攀援类植物在高陡岩质边坡垂直绿化中的应用研究。

（4）岩面-基质-植物的相互作用机理及整体力学稳定性研究。在深入研究根系护坡的正效应时，关注植被根系对基材稳定性的不利影响研究，与植被根系有关的大孔隙结构研究，以及岩体（面）特性对基材-根系复合体稳定性的影响，还可以对坡面-基材-根系的整体力学稳定性进行精细数值模拟研究[7]。

（5）开展全过程研究，建立各种恢复技术的规范

和评价体系。加强生态恢复过程中水分、养分的循环机制研究，强化恢复过程中植被与基质的动态监测，建立生态因子与植物生长的调控技术体系，强化植被恢复后植物演替规律及植物与土壤相互作用关系研究[51]。建立科学的评价机制体制，以及建立每种技术的施工工艺、养护措施、验收标准和恢复效果评价机制。

（6）强化现代信息技术的应用。克服传统小尺度和未连续、未实时监测的缺点，将GIS、RS及物联网等现代信息技术有效结合，对边坡立地条件、土壤墒情及植物生长情况进行实时动态监测。对于缺水的干旱半干旱地区，根据智能实时监测获取边坡不同区域植生基材、土壤水分含量、空气湿度及其动态变化规律，结合区域天气变化，将5G技术与矿区节水适时灌溉养护技术相融合，可有效提升边坡生态修复工程质量，降低成本，这也是未来发展的方向之一[54]。

[参考文献]

[1] 李予红,赵金召,张万河,等. 露天矿山高陡岩质边坡生态修复技术研究现状与发展趋势[J]. 河北地质大学学报, 2021, 44(3):82−86.
Li Yuhong, Zhao Jinzhao, Zhang Wanhe, et al. Research status and development trend of ecological restoration technology for high and steep rock slope in open−pit mine[J]. Journal of Hebei GEO University, 2021,44(3):82−86.

[2] 顾卫,邵琪,戴泉玉,等. 基于坡面植被恢复的岩质边坡分类及生境再造技术研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2012, 20(5):745−758.
Gu Wei, Shao Qi, Dai Quanyu, et al. Rock slope classification based on vegetation restoration and habitat reconstruction technology of slope surface[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2012,20(5):745−758.

[3] 杜占吉,李帅. 徐州市废弃采石场高陡岩质边坡生态修复研究[J]. 地下水, 2020,42(6):220−222.
Du Zhanji, Li Shuai. Study on ecological restoration of high and steep rock slope in Xuzhou abandoned quarry[J]. Ground Water, 2020,42(6):220−222.

[4] LY/T 2771−2016, 北方地区裸露边坡植被恢复技术规范[S].
LY/T 2771−2016, Technical Regulation on Slope Revegetation in the North of China[S].

[5] 赵华,黄润秋. 岩石边坡生态护坡特点及其关键技术问题探讨[J]. 水文地质工程地质, 2004,31(1):87−90.
Zhao Hua, Huang Runqiu. Characters of biological protection of rock slopes and analysis of its key problems[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2004,31(1):87−90.

[6] 许文年,夏振尧,戴方喜,等. 恢复生态学理论在岩质边坡绿化工程中的应用[J]. 中国水土保持, 2005(4):31−33.
Xu Wennian, Xia Zhenyao, Dai Fangxi, et al. Application of restoration ecology theory in rock slope greening project[J]. Soil and Water Conservation in China, 2005(4):31−33.

[7] 张家明,陈积普,杨继清,等. 中国岩质边坡植被护坡技术研究进展[J]. 水土保持学报, 2019,33(5):1−7.
Zhang Jiaming, Chen Jipu, Yang Jiqing, et al. Research progress on vegetation slope protection technology of rock slope in China[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2019,33(5):1−7.

[8] 张俊云,周德培,李绍才. 岩石边坡生态护坡研究简介[J]. 水土保持通报, 2000,20(4):36−38.
Zhang Junyun, Zhou Depei, Li Shaocai. Brief introduction of research on ecological slope protection of rock slope[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2000,20(4):36−38.

[9] 杨振意,薛立,许建新. 采石场废弃地的生态重建研究进展[J]. 生态学报, 2012,32(16):5264−5274.
Yang Zhenyi, Xue Li, Xu Jianxin. Advances in ecology restoration of abandoned Quarries[J]. Acta Ecologica Sinica, 2012,32(16):5264−5274.

[10] 郭小平,朱金兆,周心澄,等. 植被护坡技术及其应用[J]. 中国水土保持科学, 2004,2(4):112−116.
Guo Xiaoping, Zhu Jinzhao, Zhou Xincheng, et al. Technology and application of slope bio−technique[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2004,2(4):112−116.

[11] 江锋,张俊云. 浅析植被护坡技术在我国的应用[C]//中国交通土建工程学术论文集(2006), 2006:925−928.

[12] 许文年,王铁桥,叶建军. 岩石边坡护坡绿化技术应用研究[J]. 水利水电技术, 2002,33(7):35−36.
Xu Wennian, Wang Tieqiao, Ye Jianjun. Study on application of slope protection and greening technology of rock slope[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2002,33(7):35−36.

[13] 唐欣,向佐湘,倪海满. 植被混凝土在采石场生态恢复中的应用[J]. 草业科学, 2011,28(1):74−76.
Tang Xin, Xiang Zuoxiang, Ni Haiman. Application of vegetation concrete in ecological restoration of quarry[J]. Pratacultural Science, 2011,28(1):74−76.

[14] 张俊云,周德培,李绍才. 厚层基材喷射护坡试验研究[J]. 水土保持通报, 2001,21(4):44−46.
Zhang Junyun, Zhou Depei, Li Shaocai. Test on Slope Eco engineering by Spraying a Thick Layer Material[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2001,21(4):44−46.

[15] 李义强,王英宇,宋桂龙,等. 厚层基材喷播技术在北方半干旱区岩石边坡植被恢复中的应用：以京承高速公路(三期)植被恢复工程为例[J]. 草原与草坪, 2012,32(3):58−64.

[16] 李绍才,孙海龙. 中国岩石边坡植被护坡技术现状及发展趋势[J]. 资源科学, 2004,26(S1):61−66.
Li Shaocai, Sun Hailong. Present situation and development trend of vegetation slope protection technology for rock slopes in China[J]. Resources Science, 2004,26(S1):61−66.

[17] 管斌,朱成林. 种植槽技术在铜陵市岩质高陡边坡生态修

复中的应用[J]. 现代矿业, 2020,36(2):209-211.
Guan Bin, Zhu Chenglin. Application of planting trough technology in ecological restoration of high and steep rock slope in Tongling City[J]. Modern Mining, 2020,36(2):209-211.

[18] 高丽霞,孔旭晖,曹震. 广东采石场植被生态恢复技术及存在的问题[J]. 仲恺农业技术学院学报, 2005,18(3):51-53.
Gao Lixia, Kong Xuhui, Cao Zhen. Technology of vegetation ecology rehabilitation on quarry in Gangdong[J]. Journal of Zhongkai Agrotechnical College, 2005,18(3):51-53.

[19] 袁芳,殷焘,原华山,等. 种植孔绿化在福山区下官矿区生态修复中的应用[J]. 山东国土资源, 2013,29(9):78-80.
Yuan Fang, Yin Tao, Yuan Huashan, et al. Application of planting holes greening in ecological restoration in Xiaguan mining area in Fushan District[J]. Shandong Land and Resources, 2013,29(9):78-80.

[20] 王忠强. 攀援植物爬山虎生长特性及其在高陡岩面植被恢复中的应用[D]. 杭州:浙江大学, 2008.
Wang Zhongqiang. Growth Characteristics of Climbing Plant Parthenocissus Tricuspidata and Its Application in Vegetation Restoration on High and Steep Rock Surface[D]. Hangzhou:Zhejiang University, 2008.

[21] 许英姿,朱劲松. 公路边坡防护中常见格构锚固结构分析[J]. 桂林工学院学报, 2003,23(1):106-110.
Xu Yingzi, Zhu Jinsong. Analysis of common lattice anchorage structure in highway slope protection[J]. Journal of Guilin University of Technology, 2003,23(1):106-110.

[22] 白建光,王建军,温楠,等. 现浇网格矿山边坡生态修复技术研究[J]. 内蒙古农业大学学报:自然科学版, 2014,35(1):99-102.

[23] 罗阳明,雷承弟,周德培,等. SNS主动防护条件下边坡绿化及稳定性探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2006,25(2):235-240.
Luo Yangming, Lei Chengdi, Zhou Depei, et al. Discussion on slope greening and stability under SNS active protection condition[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006,25(2):235-240.

[24] 杨雨荷,廖克武,麻坚,等. 中国30年边坡绿化技术专利发展[J]. 生态学杂志, 2023,42(8):1993-2002.
Yang Yuhe, Liao Kewu, Ma Jian, et al. Patent development of slope greening technology in China in the past 30 years [J]. Chinese Journal of Ecology, 2023,42(8):1993-2002.

[25] 钱华,柏明娥,刘本同,等. 岩质边坡绿化过程中人工土壤的重建[J]. 中国水土保持科学, 2006,4(S1):83-86.

[26] 邵琪,顾卫,齐藤诚,等. 边坡生态恢复中生长基质的成分配比实验研究[C]//全国公路生态绿化理论与技术研讨会论文集, 北京, 2009:298-305.

[27] 胡双双. 岩质边坡生态护坡基材研究[D]. 武汉:武汉理工大学, 2006.
Hu Shuangshuang. Study on Base Material of Ecological Slope Protection of Rock Slope[D]. Wuhan:Wuhan University of Technology, 2006.

[28] 牟信刚. 护坡绿化基质筛选及其理化性质研究[D]. 泰安:山东农业大学, 2008.
Mou Xingang. Research on Selection of Substrates for Slope Protection and Revegetation and Its Physiochemical Properties[D]. Tai'an:Shandong Agricultural University, 2008.

[29] 刘铁军,卢建男,张哲乾,等. 干旱半干旱区裸露边坡适宜喷播的绿化基质筛选[J]. 草业科学, 2016,33(7):1291-1296.
Liu Tiejun, Lu Jiannan, Zhang Zheqian, et al. Screening of green substrate suitable for spraying and sowing in uncovering slope of arid and semi-arid zone[J]. Pratacultural Science, 2016,33(7):1291-1296.

[30] 马朋坤. 岩质边坡生态重建人工土壤基质构建研究[D]. 唐山:河北联合大学, 2015.
Ma Pengkun. Study on Construction of Artificial Soil Matrix for Ecological Reconstruction of Rock Slope[D]. Tangshan:Hebei United University, 2015.

[31] 李冰美,郭晓明,赵同谦,等. 矿山边坡绿化基质的优化配比[J]. 环境工程学报, 2017,11(2):1233-1241.
Li Bingmei, Guo Xiaoming, Zhao Tongqian, et al. Optimal proportion of greening substrate for mine slope[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2017, 11(2): 1233-1241.

[32] 蓝群力,张新天,卞立波,等. 高陡岩石边坡植被恢复组合结构与材料性能研究[J]. 材料导报, 2019,33(S2):143-146.
Lan Qunli, Zhang Xintian, Bian Libo, et al. Study on combined structure and material properties of vegetation restoration on high and steep rock slopes[J]. Materials Reports, 2019,33(S2):143-146.

[33] Medl A, Stangl R, Kikuta S B, et al. Vegetation establishment on 'Green Walls': integrating shotcrete walls from road construction into the landscape[J]. Urban Forestry & Urban Greening, 2017,25:26-35.

[34] 张俊云,周德培. 厚层基材喷射植被护坡基材混合物的收缩恢复性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004,23(7):1203-1208.
Zhang Junyun, Zhou Depei. Study on shrinkage recovery of thick substrate sprayed with vegetation for slope protection [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004,23(7):1203-1208.

[35] 张季如,朱瑞赓,夏银飞,等. ZZLS绿色生态护坡材料的强度试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003,22(9):1533-1537.
Zhang Jiru, Zhu Ruigeng, Xia Yinfei, et al. Experimental study on strength of ZZLS green ecological slope protection material[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003,22(9):1533-1537.

[36] 周中,巢万里,刘宝琛,等. 岩石边坡生态种植基强度的正交试验[J]. 中南大学学报:自然科学版, 2005,36(6):1112-1116.

Zhou Zhong, Chao Wanli, Liu Baochen, et al. Orthogonal test on strength of ecological planting base of rock slope[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2005,36(6):1112-1116.

[37] 夏振尧,许文年,王乐华. 植被混凝土生态护坡基材初期强度特性研究[J]. 岩土力学, 2011,32(6):1719-1724.
Xia Zhenyao, Xu Wennian, Wang Lehua. Study on initial strength characteristics of vegetation concrete ecological slope protection substrate[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011,32(6):1719-1724.

[38] 梁永哲,陈毅,刘大翔,等. 外掺植物纤维对冻融作用下植被混凝土抗剪强度的影响[J]. 水土保持通报, 2016,36(2):136-139.
Liang Yongzhe, Chen Yi, Liu Daxiang, et al. Effect of adding plant fiber on shear strength of vegetation concrete under freeze-thaw action[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2016,36(2):136-139.

[39] 兰虎林,尹金珠,彭国涛,等. 岩质边坡植被恢复研究[J]. 四川大学学报:自然科学版, 2011,48(3):713-719.
Lan Hulin, Yin Jinzhu, Peng Guotao, et al. Study on vegetation restoration of rock slope[J]. Journal of Sichuan University: Natural Science Edition, 2011,48(3):713-719.

[40] 马建荣,汪伟刚. 乔灌草结合在边坡景观形成中的应用及相关设计方法研究[J]. 交通建设与管理, 2009(9):168-170.
Ma Jianrong, Wang Weigang. Study on the application of the combination of arbor, shrub and grass in the formation of slope landscape and related design methods[J]. Transport Construction & Management, 2009(9):168-170.

[41] 孔东莲,郭小平,赵廷宁. 华北地区边坡生态防护植物选择[J]. 林业调查规划, 2006,31(4):31-34.
Kong Donglian, Guo Xiaoping, Zhao Tingning. Selection of ecological protection plants for slope in North China[J]. Forest Inventory and Planning, 2006,31(4):31-34.

[42] 宋凤鸣,刘建华,钱瑭璜,等. 8种乡土植物在边坡植被恢复工程中的应用[J]. 中国水土保持科学, 2016,14(4):134-141.
Song Fengming, Liu Jianhua, Qian Tanghuang, et al. Application of eight native plants in slope vegetation restoration project[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2016,14(4):134-141.

[43] 何蓉蓉,刘东明,王丙兴,等. 乡土植物资源在邢汾高速公路边坡生态恢复中的选择与应用[J]. 河北林业科技, 2015(2):54-60.

[44] Hosogi D, Yoshinaga C, Nakamura K, et al. Revegetation of an artificial cut-slope by seeds dispersed from the surrounding vegetation[J]. Landscape and Ecological Engineering, 2006,2(1):53-63.

[45] Nakamura T, Hirano H, Jin H, et al. Transplantation of native species to existing vegetated slopes: importance of optimal habitat and initial nutrient reserves[J]. Ecological Engineering, 2020,144:105708.

[46] 李西. 应用于植被护坡两种岩生植物土壤植被系统(SVS)研究[D]. 雅安:四川农业大学, 2004.
Li Xi. The Research of Soil-vegetation System (SVS) on Two Petrophile Plants Applied on Slope Eco-engineering [D]. Ya'an: Sichuan Agricultural University, 2004.

[47] 李一为,田佳,赵方莹,等. 108国道门头沟段微立地植物分布特征及边坡绿化植物的选择与配置[J]. 中国水土保持科学, 2006,4(S1):19-21.
Li Yiwei, Tian Jia, Zhao Fangying, et al. Distribution characteristics of micro-site plants in Mentougou section of National Highway 108 and selection and configuration of slope greening plants[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2006,4(S1):19-21.

[48] 魏冬. 渭河台塬城镇(郊)护坡植物选择及其配置模式研究[D]. 咸阳:西北农林科技大学, 2016.
Wei Dong. Research on Species Selection and Allocation of Slope-Protecting Plants in the Towns of Tableland Slopes Along Weihe River[D]. Xianyang: Northwest A&F University,2016.

[49] 刘琦,夏振尧,饶云康,等. 亚热带区域高陡路堑岩质边坡绿化植物的选择和配置:以宜昌市峡州大道一期快速道为例[J]. 公路交通科技, 2018,35(9):137-145.
Liu Qi, Xia Zhenyao, Rao Yunkang, et al. Selection and configuration of greening plants on rock slope of high and steep cutting in subtropical region: a case study of Xiazhou avenue phase Ⅰ expressway in Yichang City[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2018,35(9):137-145.

[50] 赵冰琴,夏振尧,许文年,等. 工程扰动区边坡生态修复技术研究综述[J]. 水利水电技术, 2017,48(2):130-137.
Zhao Bingqin, Xia Zhenyao, Xu Wennian, et al. Review on ecological restoration technology of slope in engineering disturbance area[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2017,48(2):130-137.

[51] 邹蜜,李妍均,辜彬. 岩石边坡生态恢复研究综述[J]. 中国水土保持, 2016(12):58-61.
Zou Mi, Li Yanjun, Gu Bin. Review on ecological restoration of rock slope[J]. Soil and Water Conservation in China, 2016(12):58-61.

[52] 张霄,张红玉,陆兆华,等. 高寒地区路堑边坡植被恢复效果[J]. 生态学报, 2017,37(5):1450-1457.
Zhang Xiao, Zhang Hongyu, Lu Zhaohua, et al. Vegetation restoration effect of cutting slope in alpine region[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017,37(5):1450-1457.

[53] 汤惠君,胡振琪. 试论采石场的生态恢复[J]. 中国矿业, 2004,13(7):38-42.
Tang Huijun, Hu Zhenqi. On the ecological restoration of quarry[J]. China Mining Magazine, 2004,13(7):38-42.

[54] 李富平,贾淯斐,夏冬,等. 石矿迹地生态修复技术研究现状与发展趋势[J]. 金属矿山, 2021(1):168-184.