

我国南方工程边坡土壤生态修复技术创新的认知与实践^①

朱兆华¹, 赵其国², 赖庆旺¹, 徐国钢¹, 陈晓蓉¹

(1 深圳市万信达生态环境股份有限公司/广东受损边坡生态景观重建工程中心, 深圳 518026;

2 中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008)

摘要:我国高速公路、高速铁路和城镇化建设的快速发展,促进了我国工程边坡生态修复技术的创新。现中国边坡生态修复技术成果,随动车装备和筑路技术,形成了我国高速道路建设举世瞩目的三大技术进步,已成为我国“一带一路”战略重大支撑技术体系。我国“两高”建设是以牺牲土壤生态环境为代价的,产生了大量的创伤裸露边坡,生态修复及安全防护问题非常突出。本文就路域边坡土壤破坏特征、土壤生态修复本质、工程边坡林草种选择、V型槽种植带、喷混基材配置、机械化施工等几个重大技术问题的思考与技术创新途径进行了探讨,并提出了利用路域边坡土地资源发展林草种子产业的引领技术。

关键词:工程边坡;土壤;生态修复;创新研究;生态修复工程学

中图分类号: X171.4 文献标识码: A

工程边坡是国家现代化基础设施建设中,由规模化、机械化开挖而形成的裸露山体坡面,是人类工程活动引起的新的地质环境变异及生态破坏基本单元,主要来源于高速公路、高速铁路等道路工程建设及城镇化建设中的开矿、采石、园区建设等。近年来,中国现代化基础建设取得了巨大的成就,其发展规模、速度及攻坚克难的成效都领先于世界,成为彰显我国实力和产业优势的靓丽名片。国家现代化基础设施建设中的高速公路和高速铁路建设(下文简称“两高”建设)尤其引人注目。中国工程边坡生态修复技术成果,随动车装备和筑路技术,形成了“两高”建设举世瞩目的三大技术进步,已成为“一带一路”国际合作和我国生态文明建设的重大技术支撑体系^[1]。

本文主要对高速公路、高铁和城市边坡土壤生态修复关键技术的创新过程以成果、成效进行总结,并就工程边坡的形成及生态修复的本质、工程边坡土壤生态修复技术体系、利用路域土壤资源发展林草良种产业等重要问题进行创新研究探讨。本文结合工程实践经历,对“两高”道路、土壤生态修复技术创新过程的探索、认知及观点作综合阐述报道,以揭示我国工程边坡土壤生态防护技术的创新进步。

1 工程边坡形成的本质是土壤生态系统的破坏过程

1.1 “两高”建设与路域土壤生态系统的破坏

我国“两高”建设起步晚,但起点高、发展快。自1984年我国建设第一条沈(阳)大(连)高速公路以来,截至2015年底,全国高速公路通车里程达12.35万km,2016年又新增6000多km,总里程突破13万km,连续4年超过美国,稳居世界第一。我国高速铁路始建于1999年秦(皇岛)沈(阳)客运专线,2015年全国运营里程达1.9万km,2016年新增高铁运营干线里程1277km,总里程突破2万km,亦居世界首位^[1-2]。我国“两高”建设已取得了举世瞩目的成就。随着我国“一带一路”战略的稳步推进,作为重要支撑点的“两高”建设将在世界范围内取得更大的成就,造福于世界。

但是,我国“两高”建设是以牺牲土壤生态环境为代价的,产生了大量的创伤裸露边坡。据统计,“两高”建设机械创伤面约70%为裸露边坡,其中挖方边坡约占40%,填方边坡约占30%。截至2014年,仅“两高”建设沿线土地破坏,形成的路域边坡累计面积超过41.46万hm²^[1-2]。

基金项目:国家星火计划重点项目(2010GA781004)、深圳市科技计划项目(GCZX2015051514435234、CXZZ20150527171538718、CXZZ20140422142833835)资助。

作者简介:朱兆华(1973—),男,陕西汉中,人,硕士,高级工和师,主要从事环境保护及生态修复领域的研发与工程实践工作。E-mail:20384211@qq.com

1.2 工程边坡土壤生态破坏特征

1) 地表植被遭彻底铲除。在“两高”建设过程中,线路两侧工程所设置的筑路材料料场、取土场、弃土场、施工营地和便道等临时占地,破坏了原有土壤和植被,使区域内地表裸露增加,对风力、水力作用的敏感性增强,生态环境恶化,稳定性下降。另一方面,各种施工活动包括土石方工程、桥梁工程、道路平整、施工机械活动、材料堆放、临时营地都破坏地表植被。其中,由于土石方的开挖破坏了地表土层,只留下坚硬的岩石,植被难以恢复。其他地表活动造成的植被临时破坏引起的水土流失,也影响到植被的恢复。地表植被的铲除最终导致所在区域生物多样性的丧失及生态景观的破坏。

2) 土壤基础物质转运迁移。高速公路和铁路形成的边坡,主要由沿线地形地貌和道路工程土石方平衡所决定。见山劈山、挖高填低、挖方边坡土石方外运,致使边坡土壤基础物质大规模转运迁移。加之“两高”建设期长,一般3~5年,边坡土层外露,水土流失加剧。据在深圳南坪快速路定点监测结果^[3-4],新开挖60°的道路工程边坡,水土流失量为8500~15000 t/(km²·a),远超过国家标准规定的500 t/(km²·a)公允值。土壤基础物质转运迁移是导致坡面侵蚀加剧的直接原因。

3) 边坡稳定性差,频发地质灾害事故。“两高”道

路工程建设中,山体切削等挖填方工程的卸荷作用^[5],导致坡体重心位移,坡面变得更高陡,边坡稳定性下降,极易发生滑坡、坍塌、泥石流等地质灾害事故。边坡地质灾害事故一旦发生,通常伴随着巨大的生命财产损失,如2016年9月浙江丽水遂昌山体滑坡、2015年12月深圳光明新区渣土受纳场滑坡等后果极其惨烈,影响巨大。

1.3 工程边坡现场可视坡面特征

“两高”建设产生的路域边坡及土壤具有如下主要特征^[1-4,7]: 土质边坡土壤剖面层次保留完整,主要由A-AB-B-BC土体构型,部分土质边坡也有C层母岩露头; 下边坡是外来土源堆积或填积而成; 路域边坡在主体工程设计上一般控制在45°以下; 土壤质地随母岩而变化,花岗岩、红(紫)砂岩和第四纪红色黏土发育的土壤,都有一定的基础肥力; 路域边坡多分布在高丘和山地,水土流失严重。城市周边采石裸露岩体坡面特征主要有: 岩体高陡,边坡石壁呈半环形,坡度80°~90°,相对高度80~130 m; 采石场宕口多为爆破成型,石坡面凹凸不平,呈断层崖面; 采石场边坡立地条件恶劣,坡面缺少平台或平台窄小,残存土壤极少,原生植被破坏,缺乏植被赖以生存的土壤基本条件; 边坡土壤剖面欠缺完整性,土体构型为BC-C层,几乎A、B层及AB过渡层被推土机械削去(表1)。

表1 工程边坡剖面构型(层)及特征
Table 1 Configuration and characteristics of engineering slope profiles

工程边坡来源	坡面类型	坡体剖面构型(层)
采矿、园区建设、(少部分)道路工程	土质边坡	A-AB
采矿、园区建设、(少部分)道路工程	土夹石边坡	A-AB-B
“两高”建设、园区建设	强风化岩石边坡	A-AB-B-BC
“两高”建设、园区建设	弱风化岩石边坡	B-BC-C
采石、开矿、水电、园区建设等	高陡岩石边坡	BC-C-D

注: A—表土层(腐殖质层); AB—均质层; B—淀积层; BC—网纹层(风化层); C—母质层; D—岩石层(母岩层)。

2 边坡土壤生态修复工程是土壤生态系统演进方向的有效调控

2.1 边坡土壤生态修复是对遭破坏土壤生态系统演进方向的修正

从生态修复的角度看,工程边坡属于一种典型的困难立地。与周边或原有的生态系统相比,边坡立地条件已发生了本质变化,具有明显抑制植物生长的诸多因素^[1-2,7]: 无土或少土; 缺水,变得极易干旱; 无肥或少肥,极度贫瘠; 水热安全性差,变化幅度大,石质坡面最高温度夏天甚至可达50~60℃,远超植物适生范围。在自然条件下,边坡作为典型的

困难立地,无法快速恢复植被。坡面侵蚀越发严重,生态系统亦难以在短期内得到恢复,最终的演进结果就是石漠化。土壤生态系统的结构和功能可通过人为管控措施加以调节和改善。工程边坡土壤生态修复也就是通过人为措施对遭破坏的土壤生态系统不利演进方向的修正,调节、改善其结构和功能,使其尽快恢复,以与周边生态系统同步演进。

2.2 土壤生态修复的原理

土壤是地球陆地表面由矿物质、有机质、水、空气和生物组成的,具有肥力并能生长植物的疏松层;是人类赖以生存和发展的基石,是保障人类食物与生态环境安全的重要物质基础。土壤学是认识自然界和人为活动下土壤

组成、性质、过程、功能及其发生发展规律的独立学科^[8-9]。在现代化“两高”建设工程中,边坡土壤就是边坡土壤生态系统。边坡土壤生态修复就是工程边坡土壤生态系统结构和功能的修复,是现代土壤学的一个重要研究领域。

土壤生态修复就是通过工程技术措施,在受损的陆地表面重构具有土壤肥力的疏松表层及生态系统,恢复其结构与功能,是受损的逆过程。土壤生态修复的工程技术原理如图 1 所示。

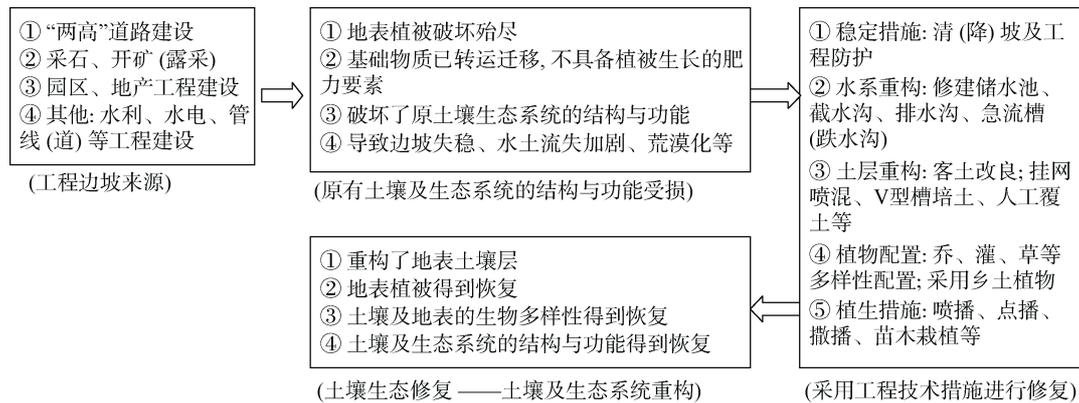


图 1 土壤生态修复原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of soil ecological restoration

2.3 工程边坡土壤生态修复是我国土壤生态环境管理的重要环节

土壤不仅是国家的主要自然资源之一,而且是地球临界带的核心环境要素^[8,10-11]。当前,全球面临资源紧张、能源短缺、环境污染和气候变化等重大挑战,如何协调发挥土壤的生产功能、环境保护功能、生态工程建设支撑功能和全球变化缓解功能,是现代土壤学为人类可持续发展做贡献的重要任务^[12-15]。

工程边坡是我国现代土壤环境破坏的重要部分,其生态修复在我国土壤环境治理中占有重要地位。中国工程边坡生态修复与国民经济和社会发展戚戚相关。一是工程破坏边坡占比大,高速公路约占总工程量的60%以上,南方山地高丘可达70%;高速铁路多以高架桥穿越设,路域边坡也占30%~40%。二是工程边坡是土壤圈物质流、能量流及生物信息流最活跃的区域单元,水土流失模数高达10 000 t/(km²·a),超出国际允许值20倍以上。三是边坡地质灾害发生频率高,在暴雨和地震等外源推力影响下,常形成崩塌、滑坡、泥石流等次生灾害,危害道路安全和社会人居环境。从工程边坡的稳定性和安全性出发,采取工程固坡和生态防护相结合的修复措施势在必行。

3 工程边坡土壤生态修复技术体系的探索与实践

3.1 深圳市万信达生态环境股份有限公司的探索与实践

深圳市万信达生态环境股份有限公司自1997年

以来,通过市场运作,先后承担了深汕、京珠、广惠、成南、昆玉、福宁、元磨、渝黔等高速公路及高速铁路边坡生态治理工程120多个项目,生态治理面积累计3×10⁷ m²,土壤生态修复工程轨迹遍布我国南方各省区,打造了一批边坡土壤生态修复经典工程,完成工程合同金额累计约达8.6亿元。这些工程实践带动了国内工程边坡土壤生态防护技术的进步,为我国土壤修复工程学和边坡生态工程学的研究与发展作出了创新贡献^[1,16]。

依靠科技创新综合实力,深圳市万信达生态环境股份有限公司还先后承担了国家星火计划重点项目《道路边坡及裸露山体植被恢复与生态防护技术》、国家创新基金重点项目《南方工程创伤岩石边坡快速生态修复技术开发》、广东省受损边坡生态景观重建工程中心等13项重点课题,就我国高速公路、高速铁路及城市采石场边坡生态修复的重大关键技术问题,开展了创新性研发,取得突破性成果。《裸露坡面植被恢复综合技术研究》获国家科技进步二等奖^[1,16]。

3.2 我国工程边坡生态修复技术发展阶段

鉴于我国“两高”建设独有的工程边坡国情特点,其生态修复难题的解决并无成熟的模式和技术可借鉴。我国“两高”建设产生的路域边坡生态修复技术经历了由地质工程固坡(抗滑桩、锚索等)→建筑工程护坡(浆砌石、砂浆封盖、钢筋混凝土格构梁、挡土墙等)→草被生态护坡→林草多元植被护坡的技术发展阶段。早期主要采用地质工程及建筑工程固坡,以保持边坡稳定性和安全性为主。如20世纪八九十

年代,国内在铁路和公路工程等施工中,边坡防护主要以打设锚杆(索)、格构梁支护、喷砼、浆砌石挡墙等工程护坡为主。这种边坡防护模式现在仍然可在早期修建的高速公路中见到,主要特点是坡面几乎没有植被,景观效果差。这也体现了当初规划设计时,对边坡安全性和稳定性的忧患意识。直到 20 世纪 90 年代中后期,国内业界同行开始学习国外经验,把草坪草用于边坡生物防护,并陆续开发出垫草皮、三维网植草、空心砖植草等护坡方法,此即草被生态护坡阶段。2000 年国务院 31 号文“关于进一步推进绿色通道建设的通知”明确指出,绿色通道建设要和公路、铁路、水利设施建设统筹规划,要求与工程建设同步设计、同步施工、同步验收。这是第一次将植物护坡强制性纳入高速公路项目建设全过程^[17-19]。至此,植被护坡工艺技术以其防护效果显著、生态景观好、成本低等优点,开始在国内迅速发展,最终演化到稳定的林草多元植被生态护坡模式阶段,并延续至今。草被生态护坡、林草多元植被护坡并不排斥工程防护措施,而是先通过工程防护措施解决了边坡基本的安全与稳定问题,再在此基础上恢复植被,营造生态景观。

3.3 工程边坡土壤生态修复几个关键技术体系的创新探讨

1) 只有乔灌草立体模式才能重塑稳定持久的边坡生态体系。长期的技术开发和工程实践证明,没有乔灌木参与的人工植被,不是完整的自然生态体系,只有推行乔灌草立体模式,才能建立稳定、持久的边坡生态体系。受欧、美、日、澳等国家和地区种草产业先行发展,以及以草为主的边坡防护技术经验的影响,我国高速公路草被护坡经历了较长时段探索。草被生态护坡工程在技术、生态、经济和美学方面,相比单纯的地质或建筑工程护坡形式具有更高的性价比。但边坡采用单纯的草本类植物进行绿化,植被易严重退化^[19]。早在 2002 年,我们就针对边坡植草单一、易退化、无防灾功能、景观效果差等诸多问题,在《草业科学》发表了“中国西南部道路边坡生态治理的实践”一文,首次指出没有乔灌木的边坡生态系统是不完整的,提出了“乔、灌、草”多元组合的立体生态模式,并在云南元磨、四川成南高速多个中标路段技术交底会上,强调工程边坡植物配置必须以灌木为主,以豆科植物为主,以地方品种为主,多科属、多品种结合,建立乔灌草藤立体生态体系。近十多年来,我们先后在四川成南、京珠高速粤北 D 段、云南元磨、重庆达渝、粤赣高速粤境段等边坡生态修复

工程上,采用乔灌草混播模式,建立以银合欢、金合欢、坡柳、山毛豆、胡枝子、狗牙根为主的乔灌草三元或多元结构的生态体系示范。通过工程实践,认识到没有乔灌木参与的人工草被生态是不完整的边坡生态体系,难以形成稳定的近自然生态系统^[3,20-21]。

2) V 型槽植生带是高陡岩石边坡生态修复主体模式。岩体边坡生态治理技术模式曾百花齐放,但生态效果欠佳。实践证明,“V 型槽+喷混植生”是城市高陡岩体边坡生态修复的主要技术模式。我国南方在早期采石场生态治理中,针对高陡裸岩坡面曾经开发多种工艺技术^[3,5,20-21],如石壁上开凿植生槽法、燕窝巢复绿法、石壁挂笼法、鱼鳞坑法、生态袋法、挂网喷播法等多种工艺措施。在工程实践中,这些工艺措施都出现了种种缺陷。从微地形角度看,采石场平台区种植速生遮挡乔木及喷灌草种等林草恢复模式是比较成功的,原因在于平台区地势平缓,覆土及植物种植作业难度小,水肥管理方便,生态效果尚佳。

城市岩石边坡多为爆炸成型,石壁坡面凹凸不平;高陡险峻,土壤层破坏彻底,缺乏水肥土等植物生存的基本条件,土壤生态修复难度极大^[3,5,22]。生态治理对策在顶层设计上,宜解决三大难题:绿色遮挡:以植物体遮挡覆盖为主,不强调陡坡面播种植物;回填土源:坡面多级断层,每隔 2 m 构建砼槽体,接纳大容量回填土;营造种植带:选择速生植物种类,年生长达 2 m 以上,1 年内即可覆盖裸露岩面,改善视角生态景观。在实践中,我们探索及开发出了“V 型槽+喷混植生”技术模式,很好地解决了上述问题。如在深圳龙岗松子坑、广州南沙、海南三亚等 8 个采石场岩体边坡,采用 V 型槽加挂双层网喷混植生技术,累计完成 50 万 m²的城市裸岩边坡治理工程,取得了很好的生态效果。实践证明,V 型槽不仅能有效接纳回填土和营养土,建立多层次植物生长带,对坡面立体郁闭显著;而且可减少喷混体灾害性卸荷崩塌,将工程措施与生物技术紧密结合,在垂直坡面上创造植物生长的微环境。营造多层次 V 型槽植生带,是城市采石场岩石边坡生态治理的重要技术途径。

3) 喷混基材的选择与配制是解决植被退化问题的关键。在长期的实践应用过程中,出现了植被建植工艺本身难以克服的共性问题^[2,20],集中表现在以下两个方面:一是坡面建植植被易退化,尤其是水热条件特别恶劣的高陡岩石边坡,施工及养护难度大,容易出现“一年青,二年黄,三年枯,四年无”的情况,达不到植被恢复、水土保持、生态防护、景观重建等多重功能目标;该问题在北方及中西部地区,尤其是

干旱半干旱地区较严重。二是植生基材保水、保肥、抗冲刷能力较弱,雨季施工极易出现基材滑落,难以固定附着,植被建植难度大。该问题在我国地处南亚热带,雨量充沛的华南大部分地区较严重。

这些问题的根源都在于植生基材的选择与配置。科学合理的植生基材配置是防止施工后植被退化的关键,植生基材肥力供应要能够持续、均衡,既不缺素,也不多施;基材质地还要适宜,质地疏松利于植物生长但不易固定附着(尤其是城市高坡岩石边坡),容易滑落,雨季施工时问题尤其突出;但若基材黏性好(如用水泥作为黏结剂且加大用量)就较容易固定,但又出现板结问题,不利于植物生长。这就需要从新材料开发及工艺技术改良来解决。

基材肥力持续、均衡供应问题最终从平衡施肥原理寻找了解决的方法和理论依据^[23-25]。将农业领域广泛应用的平衡施肥技术引入到环境绿化建设领域,并进行了理论和技术创新,提出了纵向平衡与横向平衡相结合的施肥理论,开发出了植生基材养分全面平衡调配技术。横向平衡调配技术主要调配养分的种类,强调养分的全面与均衡,不缺素,不多施;纵向平衡调配技术主要调配养分供应强度,即调配养分的释放速度使其尽量与植物吸收同步,以保证养分供应的持续性、耐久性。同时,我们在生物型人工复合核心基材、新型基材添加剂制备技术方面取得了重要突破,开发出了新型黏结剂、肥料增效剂、保水剂、土壤改良剂等,对在不影响基材肥力的前提下改善基材黏性与质地提供更多的选择,有效地解决了雨季施工基材固附效果差、易滑落的问题。

4) 机械化、规模化施工是我国工程边坡生态快速修复的必然选择,促进了国产机械装备的技术进步。我国“两高”和城镇化基础设施建设规模大,并受很多因素的限制和约束,决定了工程边坡面积大、战线长、集中治理周期短、环境复杂等特点,促使国内在边坡植被防护规模化、机械化施工应用技术的的市场需求,带动了国内边坡绿化机械产品不断向多样化、系列化的方向发展。园林绿化公司多属劳动密集型企业,在工程边坡面前,靠打“人海战术”是行不通的,在规模化创建山体边坡人工植生层,需要有适应的施工装备。国内 20 世纪 90 年代早期对边坡绿化专用机械设备的开发研究方面较为薄弱,尤其是国产施工装备的缺乏,遏制了工程实践的应用。后来,众多科研和工程施工单位陆续开发出了自己的专用施工设备,这些技术已大规模应用于工程实践。

我国在引进、消化进口机械的基础上,反复研究

改进,不断对比完善,吸收了国外喷播机械的一些先进技术,开发出能够兼顾我国南北各地裸露边坡地质条件和不同类型工程施工要求,通过技术集成达到国产化的目的,取得了多项自主知识产权,并形成了自主品牌机型的定型产品。经工程实践,喷播机能适应各种浓度浆液,干湿喷混具有较好的机械性能和结构性能,实现了国产喷播和喷混机械替代进口机械的技术突破。采用科学的施工方法,改进机械施工装备,使用先进的机械设备进行施工,适应了高速公路、高铁和城市工程边坡生态修复规模化施工市场发展的需求。因此,选择先进的喷混喷播机械设备、高空运输机械设备以及养护灌溉机械设施等(表 2),是保证施工工期和养护管理的质量,达到工程边坡生态修复预期效果的重要技术手段。

表 2 道路及城市边坡生态修复施工机械进场清单
Table 2 List of machinery for ecological restoration of road and urban slope

机械名称	数量	主要用途
运输斗车	1 辆	场内运输物料
水车	1 辆	提供施工及养护用水
柴油发电机组	1 套	向现场机械供电
振荡机	1 台	混凝土施工
锚杆电钻	8 套	钻设锚孔
混凝土搅拌机	1 台	砂石水泥混拌
基材搅拌机	1 台	植生基材搅拌混合
空压机	1 台	植生基材管道输送
破碎机	1 台	物料粉碎
液喷喷播机	1 台	喷种(纸浆、胶粉)
高压喷枪	1 台	喷射植生基材
干喷机	1 台	干式喷射植生基材
湿喷机	1 台	湿式喷射植生基材
高空运输机(卷扬机)	10 台	运送种植土或植生基材
>100 m 高程抽水泵	3 台	养护用水
滴灌设备	1 套	滴灌养护
挖掘机	1 台	修坡;在平台挖穴植树

同时,在机械化规模施工中,我们自主研发的喷混植生技术,从质量、速率和效益上,适应了国家重大工程项目的需要,已在全国推广。其主体技术优势:灌草种多品种混合喷播;添加有机基材、营养物质、黏结剂、保水剂,有利于维护种苗安全生长环境;增厚客土层,对缺少表土的风化层或母质层更适用。喷混物料厚度达 10~15 cm,每天喷混 400~500 m²(以 8 h 计)。但也存在工程成本较高、施工速度较慢等问题。我国是应用机械制造大国,如何创造更快、更适用的边坡生态修复的专用或智能作业机械,将是今后

机械装备技术的研发方向。

4 利用路域土壤资源发展林草良种产业链的探索

路域工程边坡是可利用的土地资源，不仅可种植乔灌草藤植物，而且可安排种植开花结实(英)林木，发展林草种业，为我国解决国产优良种源开辟新途径。

我国在相当长的时间内，草坪草种主要依赖进口。20 世纪 80 年代，现代草坪业才进入中国。以 1990 年北京亚运会为契机，国内草坪业开始逐步走向正规化、专业化、市场化^[26]。此后，我国草坪产业进入快速发展阶段，每年草坪建植面积及对草种、草地的需求以 30%~40% 的同比增长率稳步发展。草种进口量增速大。我国 1985 年进口草种不足 10 t，1997 年达到 2 500 t，1998 年突破了 5 000 t，2000 年各类草种进口达到 1.5×10^4 t^[3, 27]。以中粮系、中农系、中贸系为主的进口草种企业迅速发展和扩张起来。

国内市场草种需求主要用于 3 个方面^[28]：以市政园林、地产园林、公共园林、运动场地等为主的景观草坪工程应用，草坪是改善生活环境、游玩休憩、降低城市“热岛效应”的重要措施；以公路、铁路、机场、采石场、矿山、水库、河岸、湖堤等基础设施建设为主的生态治理工程应用，林草种植是生态修复、植被护坡、水土保持的重要措施；

以草地畜牧、养殖生产为主的牧草产业应用，草原、草地是生产优质牧草的重要基地。据中国农科院草原所最新数据显示^[27-28]，我国每年的各种林草

种需求量达 3.0×10^5 t，而目前国内林草种产量尚不足 1.0×10^5 t。就高速公路和高速铁路生态修复每年约需 1.1×10^5 t，市场缺口大。如果利用路域边坡种植道路工程绿化所需的银合欢、金合欢、胡枝子、紫穗槐、山毛豆、坡柳等，若干年内建成 2.0×10^5 hm² 的路域种业基地，3 年进入盛产期，产种量可达 3 000 kg/hm²，则年总产量达 6.0×10^5 t，按 30 元/kg 单价计，总产值可达 180 亿元。

当前，尽管我国草业已有较大发展，但尚未形成完整的一体化产业体系，50% 以上的草种仍依赖进口，草坪草依赖度更高。路域边坡的生态修复工程实践证明，“洋草种”环境适应性脆弱，退化快，极易引发草坪病虫害，草被生态持续性差，而且建植养护成本高^[28]。在路域边坡生态治理上，草种作为先锋植物，仅是生物群落物种配置元素之一，还需要多科属小乔木、灌木和藤本植物参配，这些种子、种苗需量亦相当大。因此，因地制宜、就近解决、发展国产林草种产业是较好的选择。为此，我们积极探索了路域边坡土地资源的利用方向、路域林草种基地选育及扩繁技术，开辟了我国路域林草种产业化发展途径，并提出以下论点：一方水土养一方“林草”，实现价值最大化，真正达到修一路，富一方农民的目的；弥补因工程建设造成的农林用地损失，增加农民收益；部分解决我国当前林草种源供应不足、需消耗外汇进口种子的难题；可形成完整的林草种子产业经济链条(图 2)，为社会提供了大量的就业机会，为农村脱贫致富增加新途径。

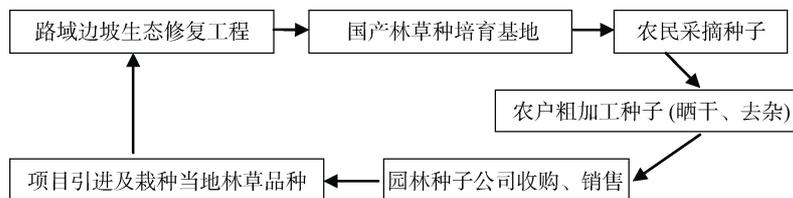


图 2 国产林草种产业经济循环链
Fig. 2 Circular chain of industrial economy of national tree-shrub-grass seeds

我们较早提出在工程边坡生态修复过程中，配置高产种苗木或中药植物，发展国产林草种业。近几年我国植被护坡技术与林草种子产业达到了协调发展。成南、元磨、广惠、粤赣、福宁等高速路已形成银合欢、胡枝子等农民采种基地。植被护坡工程实践证明，通过种源植被护坡技术，形成新的林草种子繁育场所，将废弃的路域边坡转化为可利用的土地资源，通

过农民采收种子，集中收购后，再用于植被护坡工程，形成完整的良种产业链是可行的。

5 我国边坡土壤生态修复工程学的新发展

5.1 “两高”道路快速发展对我国土壤生态修复工程学的创新贡献大

“两高”道路边坡生态修复工程涉及到土壤学、

地质学、植物学、生态学、建筑学等学科领域,在我国大量工程实践中成为一门综合性生态工程新学科,促进边坡生态修复工程学的形成、发展与创新。最近由中国农业科技出版社出版发行的《中国工程边坡生态修复技术与实践》一书,已全面阐述了边坡生态修复工程学独特的理论体系、技术体系、市场体系和工程施工实践,明确了在现代生态学的定位,是一门综合发展的新学科体系^[1,29-30]。

社会经济的快速发展,促进了“两高”道路和城镇化等现代基础工程的大规模建设,形成了大量需要生态治理的工程边坡。经过20多年国家大规模、强制性的生态修复实践,产生了边坡生态修复工程学这门新兴学科。它与国家社会经济发展密切相关,隶属于现代土壤生态学的一门重要分支学科。工程边坡生态修复,也称边坡植被恢复、植被护坡、植物固坡、坡面绿化、坡面生态工程等,是利用植被涵水固土的原理,在稳定岩土边坡的同时,美化路域生态环境的一种新技术,是集多学科于一体的综合技术体系。因此,边坡生态修复工程学的发展与创新,具有独特的理论体系、技术体系、市场体系和工程实践,为“一带一路”战略稳步推进和我国生态文明建设提供了技术支撑体系^[1,28-29]。

5.2 对我国工程边坡土壤生态修复技术研发方向及任务的建议

2016—2020年,我国将再建高速铁路 3×10^4 km,高速公路 4.6×10^4 km。按常规统计率估算,“十三五”期间,“两高”建设约总占用土地面积 1.37×10^6 hm²,其中高速铁路占地 4.5×10^5 hm²,高速公路占地 9.2×10^5 hm²。除去车道或轨道建设占地外,约余留边坡总面积 1.824×10^5 hm²,其中高速铁路边坡 7.2×10^4 hm²,高速公路边坡 1.104×10^5 hm²^[1,16]。同时,在此期间,我国城镇化建设将加快,交通建设破坏沿线环境和城市采石场废弃边坡不断叠增,裸露边坡将威胁道路行车与人居安全,其生态修复难度甚大。由此可见,“十三五”期间,土壤生态修复工程市场广阔,但生态修复任务仍然艰巨。

随着我国“一带一路”战略稳步推进,我国高铁及动车技术作为主打国家品牌,已走向世界,掀起了“中国高铁热”。中国工程边坡生态修复技术成果应用亦面临着前所未有的机遇,在国内外有着巨大市场需求及产业拉动,对工程边坡生态修复科技创新亦提出了更高的要求。今后,中国工程边坡生态修复学界、业界还需要针对以下几个方面做更深入的工作:

1) 应将国家提出的“创新,协调,绿色,开发,

共享”五大发展理念及“四个全面”战略布局,作为深化“两高”路域边坡土壤生态修复研究的指导思想与出发点。

2) 今后应着重加强对工程边坡水土流失模数及物质迁移的定位监测^[6,31],工程边坡次生地质灾害的预警预测研究^[32-35];边坡植被水分、养分循环系统的平衡与维护研究^[1,2-3,36];工程边坡不同生物气候带植物群落生物物质积累最大化的综合技术研究,工程边坡植物演替规律及持久性后效监测研究^[1,19,29];城市采石场边坡公益利用途径及渣土受纳场避灾处理研究^[30,32-33]。

3) 进一步加强企业与国家科研院所专题攻关合作研究,以促进高科技与高效益成果产出,为我国高速公路、高速铁路和城市生态文明建设,发展我国现代土壤科学作出创新贡献。

4) 我国高速公路和高铁建设起步晚、起点高、发展快、技术成熟,是我国对外经济与技术合作靓丽名片。中国工程边坡生态修复技术成果,随同动车装备和筑路技术形成了举世瞩目的三大技术进步,是国家“一带一路”战略布局的重大技术支撑体系。希望我国相关企业跨国门,与国内著名交通建筑企业携手,参与国际基础工程生态建设大项目市场竞争,使该项成果更好转化生产力,推创新型经济跨越式发展。

参考文献:

- [1] 徐国钢, 赖庆旺. 中国工程边坡生态修复技术与实践[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2016: 1-403
- [2] 朱兆华, 陈晓蓉, 徐国钢, 等. 受损边坡生态修复与景观重建技术探索与实践[J]. 江西农业学报, 2016, 28(10): 75-81
- [3] 徐国钢, 朱兆华, 赖庆旺, 等. 我国工程边坡生态修复几个重大技术问题的认知与实践[J]. 江西农业学报, 2016, 28(5): 88-94
- [4] 程睿, 赖庆旺, 徐国钢, 等. 我国基础建设中土壤生态破坏与修复问题探讨[J]. 江西农业学报, 2015, 27(7): 65-68
- [5] 葛修润, 蒋宇, 卢允德, 等. 周期荷载作用下岩石疲劳变形特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(10): 1581-1585
- [6] 曹华英, 朱兆华, 徐国钢, 等. 城市高陡岩石边坡V型槽生态修复的施工技术探索[J]. 江西农业学报, 2013, 25(6): 129-131
- [7] 周德培, 张俊云. 植被护坡工程技术[M]. 北京: 人民交通出版社, 2003: 1-322
- [8] 赵其国. 发展与创新现代土壤科学[J]. 土壤学报, 2003, 40(3): 321-327
- [9] 赵其国, 滕应. 国际土壤科学研究的新进展[J]. 土壤, 2013, 45(1): 1-7

- [10] 赵其国, 骆永明, 滕应. 中国土壤保护宏观战略思考[J]. 土壤学报, 2009, 46(6): 1140-1145
- [11] 赵其国. 土壤科学发展的战略思考[J]. 土壤, 2009, 41(5): 681-688
- [12] 赵其国, 骆永明, 滕应, 等. 当前国内外环境保护形势及其研究进展[J]. 土壤学报, 2009, 46(6): 1146-1154
- [13] 赵其国, 史学正. 土壤资源概论[M]. 北京: 科学出版社, 2007: 1-515
- [14] 赵其国, 黄国勤, 马艳芹. 中国生态环境状况与生态文明建设[J]. 生态学报, 2016, 36(19): 6328-6335
- [15] 赵其国, 黄国勤, 马艳芹. 中国南方红壤生态系统面临的问题及对策[J]. 生态学报, 2013, 33(24): 7615-7622
- [16] 徐国钢, 程睿, 赖庆旺, 等. 中国南方基础建设中土壤生态修复技术体系与实践[J]. 土壤学报, 2015, 52(2): 133-141
- [17] 徐国钢, 赖庆旺. 中国西南部道路边坡生态治理实践[J]. 草业科学, 2002, 19(1): 66-69
- [18] 赖庆旺, 陈德华, 徐国钢, 等. 京珠高速公路粤境北段边坡生态防护技术[J]. 草业科学, 2003, 20(9): 71-73
- [19] 陈晓蓉, 徐国钢, 朱兆华, 等. 深圳地区道路边坡植物配置及群落建植技术[J]. 草业科学, 2013, 30(9): 1359-1364
- [20] 蒋鹏飞, 李志勇, 舒安平, 等. 公路边坡防护技术[M]. 北京: 人民交通出版社, 2011: 1-248
- [21] Lee I W Y. A review of vegetative slope stabilization[J]. Hong Kong Inst Eng., 1985, 13(7): 9-12
- [22] Yin K, Yue Z Q, Lee C F. Slope vegetation and its application in Hong Kong[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics & Engineering, 2004, 23(16): 2804-2810
- [23] 廖宗文, 刘可星, 王德汉, 等. 发展有中国特色的控释肥[J]. 中国农业科技导报, 2001, 3(4): 71-75
- [24] 刘可星, 廖宗文. 平衡施肥概念的发展及其技术开发[J]. 磷肥与复肥, 1997(6): 64-65
- [25] 李方敏, 廖宗文, 艾天成. 平衡施肥理论与肥料高效利用[J]. 磷肥与复肥, 2004, 19(5): 66-67
- [26] 吴朝锋, 马雪梅. 21 世纪中国草坪业的现状与发展[J]. 天津农业科学, 2009, 15(3): 74-77
- [27] 彭燕, 张新全, 周寿荣. 我国主要草坪草种质资源研究进展[J]. 园艺学报, 2005, 32(1): 359-364
- [28] 单华佳, 李梦璐, 孙彦. 近十年来中国草坪业发展现状[J]. 草地学报, 2013, 21(2): 222-229
- [29] 张永兴. 边坡工程学[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008: 1-392
- [30] 陈祖煜, 程耿东, 杨春和. 关于我国重大基础设施工程安全相关科研工作的思考[J]. 土木工程学报, 49(3): 1-5
- [31] 张俊云. 岩石边坡植被护坡系统的水分平衡及控制[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(9): 1729-1735
- [32] 陈祖煜, 章吟秋, 宗露丹, 等. 加筋土边坡稳定分析安全判据和标准研究[J]. 中国公路学报, 2016, 29(9): 1-12
- [33] 吴振君, 葛修润, 王水林. 考虑地质成因的土坡可靠度分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(9): 1901-1911
- [34] 黄润秋. 中国西南岩石高边坡的主要特征及其演化[J]. 地球科学进展, 2005, 20(3): 292-297
- [35] 黄润秋, 张倬元, 王士天. 高边坡稳定性的系统工程地质研究[M]. 成都: 成都科技大学出版社, 1991: 1-200
- [36] 江锋, 张俊云. 植物根系与边坡土体间的力学特性研究[J]. 地质灾害与环境保护, 2008, 19(3): 57-61

Cognition and Practice on Technological Innovation of Ecological Restoration of Engineering Slope Soil in South China

ZHU Zhaohua¹, ZHAO Qiguo², LAI Qingwang¹, XU Guogang¹, CHEN Xiaorong¹

(1 Shenzhen Master Ecology & Environment Co., Ltd./Damaged Slope Eco-reconstruction Technology Center of Guangdong Province, Shenzhen, Guangdong 518026, China; 2 Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

Abstract: With the rapid development of expressway, high-speed railway and urbanization in China, the innovation research of ecological restoration technology of engineering slope in our country has been promoted. Now, the ecological restoration technology of engineering slope soil, along with the vehicle equipment and road construction technology, has formed three major technical progresses of highway construction in China and attracted worldwide attention, which has become a support system to the “One Belt, One Road” strategy of major science and technology. The “two high” road construction in our country is at the expense of soil ecological environment destruction and results in a number of damaged bare slopes. Therefore, the ecological restoration and safety protection are very prominent. This paper discussed the following major issues: 1)The essence of soil ecological restoration; 2)Characteristics of soil ecological destruction in road slope; 3)How to select trees, shrubs and grass seeds and create the biodiversity of the plant community for the engineering slope; 4)V groove planting technique for high steep rock slope; 5)Substrate configuration technology for spray mixing planting; 6)Mechanized construction technology for slope vegetation construction, etc. The concept to develop the industry of trees, shrubs and grass seeds and its key technology were also put forward.

Key words: Engineering slope; Soil; Ecological restoration; Innovation research; Ecological restoration engineering science