



DOI: 10.5846/stxb201711071992

张绍良, 米家鑫, 侯湖平, 杨永均. 矿山生态恢复研究进展: 基于连续三届的世界生态恢复大会报告. 生态学报, 2018, 38(15): - .
作者. 题目. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(15): - .

矿山生态恢复研究进展: 基于连续三届的世界生态恢复大会报告

张绍良^{1,2}, 米家鑫¹, 侯湖平^{1,*}, 杨永均¹

1 中国矿业大学环境与测绘学院, 江苏徐州, 221116

2 中国矿业大学, 矿山生态修复教育部工程研究中心, 江苏徐州, 221116

摘要:最近连续三届世界生态恢复大会都将矿山生态系统列为大会交流的主题之一。为了解矿山生态恢复的最新进展, 本文采用文献分析方法和统计分析法, 全面对比了这三届大会的论文和报告, 包括参会国家、主要机构、热点矿区、修复要素、矿山类型、修复技术等。在此基础上, 归纳了新开发的生态修复技术, 包括植被恢复、土壤修复和景观恢复等新技术; 总结了当前的研究热点, 主要有复垦的土壤和修复的植物之间相互作用的机理、矿山生态恢复的监测新技术、本土物种保持、污染土壤修复新技术、应对全球气候变化的矿山生态修复新思维和矿山生态系统服务价值等; 介绍了会议提出的新观点, 如自然恢复和人工恢复选择的新标准、矿山生态恢复力新理论、新型矿山生态系统及其设计等。最后对未来研究趋势进行了预测。

关键词:土地复垦; 生态修复; 世界生态恢复大会; 恢复力; 新型生态系统; 矿山

每两年一次的世界生态恢复大会 (World Conference on Ecological Restoration) 是生态恢复领域的盛会, 参会代表多达上千人。第五、六、七届大会分别在美国麦迪逊市 (2013 年)、英国曼切斯特市 (2015 年) 和巴西福斯伊瓜苏市 (2017 年) 举行, 其中 2013 年大会设立了主题为“采矿严重扰动下林地生态系统功能恢复面临的挑战” (Challenges in Restoring Forest Ecosystem Function following Severe Mining Disturbance) 的 2 个口头报告专场和 2 个座谈会专场, 2015 年设立了主题为“采矿” (Mining) 等 3 个口头报告专场, 2017 年则设立了主题为“矿山恢复: 资源开采导致的不同破坏的备选方案和指导方针” (Restoration of mining areas: Alternatives and guidelines to deal with the different cases that occur during the exploitation of mining resources) 的培训课程和“减少采矿影响” (Mitigation: Mining) 等 2 个口头报告专场, 可见, 矿区生态系统是国际生态恢复领域持续关注的对象之一。

相比出版的科技文献, 国际大型学术会议的报告、摘要等在传递最新研究动态方面具有一定优势, 例如, 新观点多、实际恢复案例多、信息量大且集中、面对面讨论容易碰撞出新的思想火花、信息传播快速等, 所以通过国际大型学术会议的总结, 更容易准确把握国际矿山生态恢复的研究动态。

为此, 本文首先统计分析连续三届矿山生态恢复专题报告, 然后归纳总结热点、新观点和新技术, 最后预测未来发展趋势, 以期对我国矿山生态修复有所启示。

1 基本情况统计

2017 年世界生态恢复大会上涉及矿山生态恢复的口头报告 (Oral Presentation) 和专题座谈会 (Symposium)

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51474214)

收稿日期: 2017-11-07; 修订日期: 2018-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: hphou@163.com

Presentation) 共 27 个、张贴论文报告 (Poster Presentation) 22 个, 而 2013 年分别是 34 个、10 个, 2015 年则分别是 31 个、18 个, 可见近三届发表的论文 (报告) 数量变化不大, 这表明矿山生态恢复是一个稳定的研究领域。2013 年, 在会上做口头报告的有美国、法国、捷克、刚果、智利、巴西、南非、中国、加拿大、澳大利亚、菲律宾、阿根廷等 12 个国家, 2015 年有蒙古、南非、捷克、澳大利亚、加拿大、英国、印度、新西兰、法国、美国、德国、芬兰、尼日尔、冰岛、巴西、爱沙尼亚、比利时、秘鲁、中国等 19 个国家, 而 2017 年有巴西、澳大利亚、韩国、美国、波兰、西班牙、秘鲁、西班牙、中国、哥伦比亚、阿根廷、拉脱维亚、南非、厄瓜多尔、冰岛、西班牙、捷克、德国、加拿大、爱沙尼亚等 20 个国家。可见, 澳大利亚、加拿大、美国、中国、南非、捷克、巴西等是持续参加该学术会议并长期关注矿山生态恢复的国家, 因为这些国家是矿产资源开发大国。

参加会议并提交论文的机构主要是高校和科研单位, 而企业和政府部门则相对较少。如图 1 所示, 2013 年参加会议的有高校 30 所、科研单位 5 所、公司 4 家和政府管理部门 2 个; 2015 年有高校 36 所、科研单位 14 所、公司 7 家和政府管理部门 4 个; 2017 年则有高校 43 所、科研单位 30 所、公司 6 家和政府管理部门 5 个。可见, 高等院校是矿区生态恢复的主要研究机构。但值得一提的是, 一些大型矿山企业如澳大利亚美铝有限公司 (Alcoa of Australia Ltd.) 等一直积极参与矿区生态修复的研究工作。

从参加会议的高等院校来看, 加拿大的阿尔伯塔大学 (University of Alberta)、澳大利亚的昆士兰大学 (University of Queensland) 和西澳大学 University of Western Australia、捷克的查理斯大学 (Charles University in Prague) 和南波希米亚大学 (University of South Bohemia)、爱沙尼亚的塔林大学 (Tallinn University)、中国的中国矿业大学 (China University of Mining and Technology)、美国的科罗拉多州立大学 (Colorado State University)、密歇根理工大学 (Michigan Technological University)、蒙大拿州立大学 (Montana State University) 以及洛杉矶大学 (Universidad de los Los Andes)、巴西的南大里约热内卢联邦大学 (Universidade Federal do Rio Grande do Sul) 和圣保罗大学 (Universidade de São

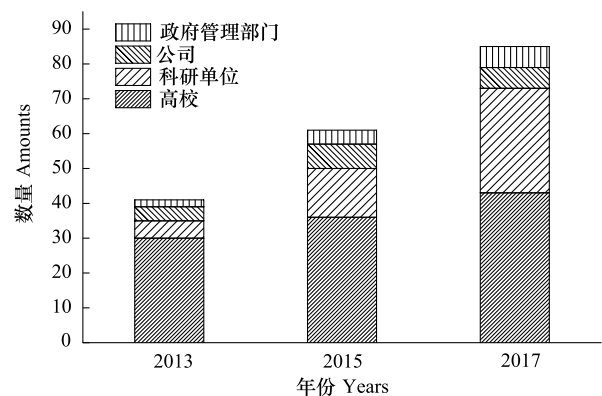


图 1 近三届会议参与机构的组成

Fig.1 Composition of the participating organizations in the last three conferences

Paulo)、波兰的克拉科夫农业大学 (University of Agriculture in Krakow)、西班牙的阿尔卡拉大学 (University of Alcalá-Fundación FIRE)、德国的慕尼黑工业大学 (Technical University Munich) 是最近几年最为活跃的高校。

世界矿山分布极其广阔, 但是研究兴趣区似乎非常集中。主要有加拿大油砂开采矿区、美国阿巴拉契亚矿区、中国西部干旱半干旱矿山、南美热带雨林地区的矿山、澳大利亚热带干旱矿区、非洲金属矿区和欧洲已经修复的矿区等 7 大地区, 表明这些地区资源开采强度大、破坏严重且是生态恢复的重点地区。从地带来看, 对于干旱半干旱矿区生态恢复的关注度最高, 如非洲、南美洲、澳大利亚、印度等季节性干旱的稀树草原 (Savannah) 矿区以及中国西部干旱矿区等; 其次是苔原区 (Tundra) 如北美、北欧和高寒山地的矿区; 再次是南美洲的秘鲁和巴西、非洲的刚果等国家热带雨林著名矿区。

从生态修复的对象来看, 受关注程度最高的一直是植被 (如图 2 所示), 包括林地、苔藓、灌木、草本、豆科植被等。根据植被所在地区不同又可细分为矿区植被、流域植被、泥炭地植被与湿地植被等; 根据所处地可分为干旱带、干湿热带、热带以及寒带植被等。土壤的恢复次之, 包括土壤有机质提高、重金属迁移和土壤结构重构等。除此之外, 修复要素还包生态景观、物种多样性、本土物种结构、土壤微生物、生态系统服务、水资源污染、地下水水位、土壤种子库等的修复。近三届会议关注的生态修复对象间的比例有轻微变化, 但大体上保持一致, 这表明近年来国际矿山复垦和生态修复的关注点较为稳定。

从研究的矿区类型看 (如图 3), 露天矿山的生态修复是关注的重点, 井工矿山相对较少。从不同矿山类

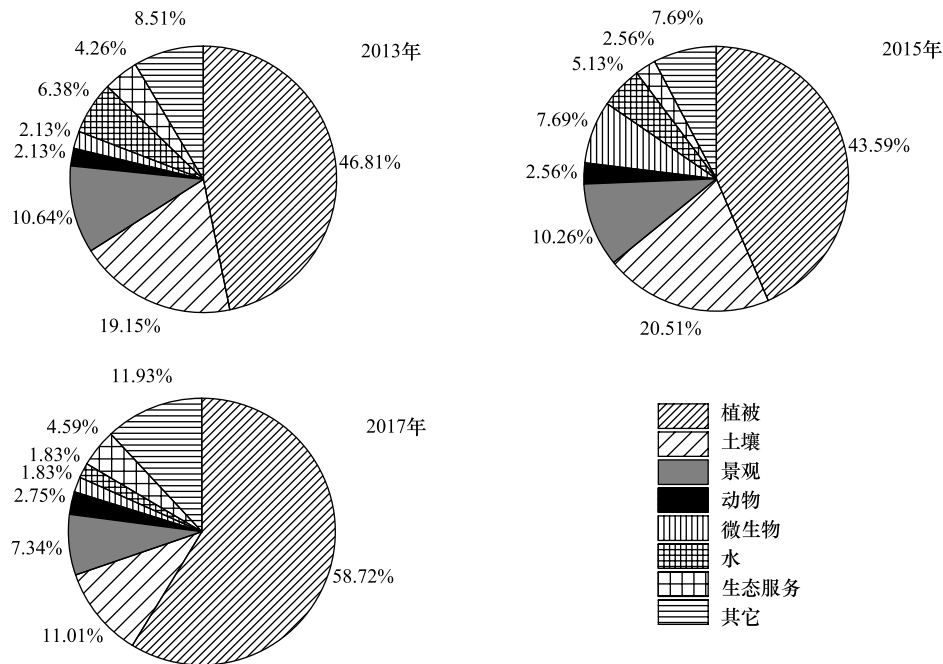


图 2 2013、2015、2017 年主要恢复要素类型

Fig.2 Major Restoration elements in 2013, 2015, 2017

型来看,煤矿是关注的重点,金属矿、砂石矿修复的研究也较多。金属矿山中,以金矿、铜矿、钴矿、铁矿、铝矿、铀矿为主,砂石矿则以干旱地区的采砂场为主。除此之外,油砂矿、草原沙矿、林地砂矿等也受到一定程度的关注。其他矿山,例如粘土矿、页岩矿等的研究也有涉及。值得一提的是,关闭矿山的生态恢复受到较大程度的关注,尤其是关闭时间很长的矿山的复垦场地的生态演替得到了研究人员的重视,例如,研究人员以关闭矿山为研究场地来比较自然修复和人工修复的效果,从而反思现有的修复模式。

从生态修复方法看,人工修复是研究的主体。相比之下,自然恢复的研究较少,但有增长趋势。对这两种修复方法的反思和比较是一个热点。对自然恢复的研究强调恢复效果的监测和评价,而人工修复研究则侧重于开发不同的修复方法,如植被修复、动物修复、微生物修复、表层土壤重构、营养物覆盖方法等。在植被修复方面,研究人员关注固氮植物、吸附重金属植物、保水植物、耐受性植物等的优选方法。

2 新技术进展

大会期间,大部分国家的专家学者介绍了本国土地复垦和生态修复的经验、存在的问题和解决途径等,也有不少专家展示了新的土地复垦和生态修复技术。

2.1 植物修复新技术

植物修复技术的开发一直是矿山生态修复研究的重点。例如,法国新喀里多尼亚镍矿山修复中,在水播法中撒播的是一种丛枝菌根真菌孢子包裹的种子,该种子用 15g/L 的藻酸盐作包衣剂,用微孔膜 (Millipore membranes) 覆盖。该技术的关键是控制水的 pH 值,这是因为水的 pH 值对包衣质量和发芽影响最大^[1]。再例如,美国密歇根湖区铜矿迹地的湿地恢复中,采用土工合成材料 (Geotextile materials)、泥炭 (Peat) 和当地灌草相结合的综合生态修复技术^[2]。来自澳大利亚的研究人员主张建立种子生产基地、专业种子园等来培育种子,因为野生种子数量难以满足需求,他们认为建立专门基地、园地有很多优点,如保持多样性、血统、防止种子污染外物入侵、提高种子质量等,还可以作为气候变化监测场所等^[3]。

然而,近几年很多的案例强调了植被修复的全过程控制技术,而不仅仅依靠单一的生态修复技术。例如,加拿大阿尔伯特油砂矿场植被重建的瓶颈是水,研究人员提出了加强重栽植被的保水管理、重塑地形减少水

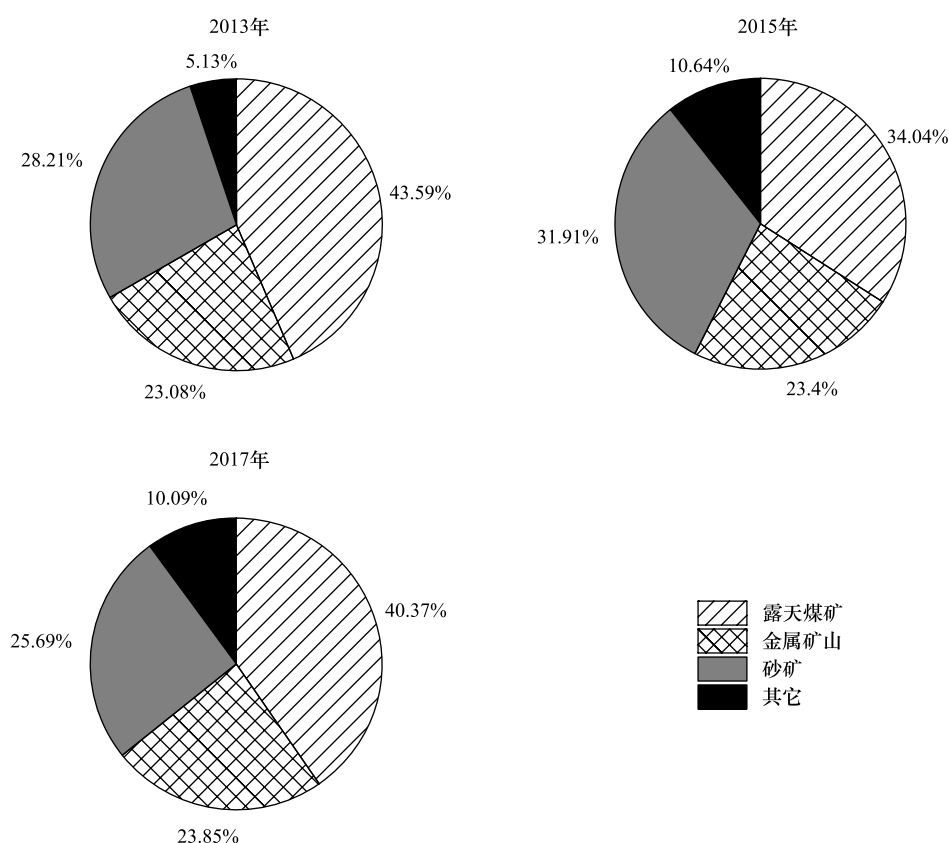


图3 2013、2015、2017 主要矿区类型

Fig.3 Major mine categories in 2013, 2015, 2017

土流失、加大渗透以在地下保水、选择适当的保水植被、关注水的时空配置及其与植被重建相耦合等关键技术^[4]。在澳大利亚露天矿场植被重建中,研究人员考虑到植被生命周期的播种、幼苗和成熟等三个阶段土壤和植被的相互作用,提出了全局植被重建技术,包括植物物种优选、土壤基底重构、表土覆盖、播种和维护管理等环节^[5]。阿根廷的研究人员提出了干旱矿区植被重建关键技术,包括物种选择、胚质生产、幼苗种植、苗木生产、土壤和基底重构、群落构建以及植被维护等^[6]。印度切里亚煤田开采历史 100 多年,是世界著名煤田,在这里进行煤炭开发的巴拉特焦煤公司提出了三步式复垦策略:第一步铲除侵入物种如马缨丹(Lantana),第二步种植灌木和草本植物,第三步种植本土乔木。

2.2 土壤修复新技术

土壤修复往往是针对退化土壤的某种性状缺陷而开展的。例如,在加拿大阔叶林生态修复过程中,研究人员发现人工扰动后土壤酸性太强,因而采用添加石灰来中和土壤酸性。然而石灰的添加会影响到土壤微生物功能,尤其是影响到异养的和无机化能营养的硝化细菌的活性和潜在硝化活动,因此研究人员认为石灰添加量和修复时机十分重要^[7]。再例如,加拿大的矿山生态修复研究人员为了减少锌的污染,提出了专门的土壤修复方法,包括施加鱼粉生物炭、钙基膨润土和覆盖木纤维等^[8]。另外,加拿大研究人员还开发了一种加速泥炭转化为土壤有机质的方法^[9];澳大利亚采矿场地土壤修复中特别强调土壤种子库的保护和建设,研究人员认为土壤种子库是重建生态系统抵抗干旱扰动的关键^[10]。土壤的微生物修复技术也是研究的重点。例如,在英国重金属污染土壤的修复过程中,采用了生物炭和蚯蚓培育技术^[11];在南澳大利亚州干旱砂矿的土壤修复中,提出了构建微生物生态银行技术,这种技术能以最大限度恢复表土质量促进采矿场地重建,通过培育蓝菌(Cyanobacteria)以促进生态结皮生长、表土稳定化^[12]。

2.3 景观恢复新技术

近年来,矿山景观恢复受到越来越多的关注。例如,在加拿大关闭油砂矿的修复过程中,就特别强调景观

恢复,恢复技术包括加强斑块的联通性、地貌重塑、采场排水系统和地面水系的有机联系、加强修复场地和周边湖滨生态系统功能的协调等。澳大利亚露天矿山修复中注重模仿自然地貌来重塑景观,这实质是对自然景观的恢复,其中关键技术是增加地形的异质性^[13]。冰岛严重退化的矿山景观恢复强调非生物因素的改善、利益相关者的参与、生态修复人员的培训和引导等^[14]。

近年来,矿山景观恢复力的评估、矿山生态系统景观服务价值、景观尺度上的生态恢复、生态恢复过程中景观结构和功能的响应和反馈、采后景观的维持和优化、不同物种对景观配置的影响、公共政策和社会过程对矿山景观恢复的作用、景观恢复效果评价这些问题也受到关注^[15-28]。

3 研究热点

在近三届世界生态恢复大会中,矿山生态修复的研究热点变化不大,主要在下五个方面:

3.1 热点一:复垦的土壤和修复的植物之间相互作用的机理

据统计,约 20%的报告和论文都涉及复垦土壤和种植的植被之间的相互影响问题。主要研究工作体现在,一方面,在植被种植不同年份后,调查植被根部土壤理化性质的改善状况,以揭示土壤-植被相互影响的机理和效果。另一方面,针对不同土壤复垦模式如不同覆土厚度、不同土壤基底重构方式等,对植被的恢复效果进行调查和评价。除此之外,还有的论文和报告关注了土壤重金属污染物迁移到植被的界面效应及其影响、在土壤水的约束下植被生长状况和景观变化、金属矿山(金矿、铀矿、铜矿等)开采区域复垦土壤重构及其对植被产生的影响等等。由于不同地区的气候、土壤资源、植物物种都不一样,植被和土壤相互作用机理十分复杂,所以要得到具有普遍意义的规律还需要加大研究力度。

3.2 热点二:矿山生态修复的监测技术

矿山土地复垦与生态修复工程浩大,而工程结束恰恰是植被生长、土壤质量提高、系统演替和稳定的开始,这就意味着矿山土地复垦与生态修复必须进行长期监测。只有通过长期监测,才能判断生态修复工程的成功性。然而,很多国家学者都指出本国修复工程缺乏有效监管和长期监测。中国的矿山土地复垦与生态修复也存在类似的问题。

在过去三届大会上,关于生态恢复监测技术方面的研究较多,主要涵盖了社会监督、国际协议,还包括信息网络、物联网、大数据、移动客户端(APP)等监测技术的联合使用,还包括从结构和功能的监测到过程和性能的监测的重心转变、建立国际生态恢复监测统一标准和程序等等。生态恢复监测的指标、植被等特定要素的监测、生态恢复的驱动力监测等是探讨的重点。3S 技术(GIS、GPS 和 RS)、物联网技术、无人机技术、大数据技术以及社交网络媒体技术是研究的热点。

3.3 热点三:本土物种保持与特定污染的土壤修复技术

在矿山植被恢复中,普遍主张栽植本土物种,从而防止外来物种的侵入。然而,近年来由于气候变化,有一种观点认为引入非本土植被更能适应气候变化。澳大利亚学者通过试验表明,本土植物的适应性更强,外来物种对气候变化响应并没有优势,这印证了“local is best”的观点^[29]。除此之外,还有不少国家的研究人员探索了应当如何有效修复本土植物。例如,智利巴塔哥尼亚地区露天煤矿探索种植本土假山毛榉的可能性^[30];美国阿巴拉契亚山区露天煤矿修复时种植大量草和豆科植物以防止侵蚀和保证场地稳定,然而动物啃食等扰动导致本土双子叶树侵入,这不利于水土保持,研究发现增加土壤密实度可减少灌木和乔木的侵入^[31];印度切利亚煤田研究种植本土树木等。也有一些国家学者介绍本国矿山生态修复在控制外来物种侵入失败的案例,建议要加强对生态恢复的监测^[32-34]。

金属矿山修复中重金属污染的控制和修复一直是学者关注的重点。研究案例的场地有美国遗弃的铀矿场、南非金山金矿尾矿场、刚果加丹加省铜钴采矿采场、秘鲁亚马孙东南铝矿场、澳大利亚铁矿场等。修复的方法包括隔离、覆土、地貌重塑、本土植被吸附等。有学者提出应当建立生物可利用砷的主导度量方法、选择抗砷金属强的植被、监测土壤砷迁移的技术体系。还有学者认为,用无人机定期监测场地重金属污染物迁移

是一个好的污染控制办法。澳大利亚的研究人员认为铁矿场地的修复必须引入生态生理学 (Eco-physiological) 和生态水文学方法 (Eco-hydrology)^[35], 美国的研究人员认为污染土地的修复中, 恢复生态学和环境毒理学 (Environmental toxicology) 起到了关键作用^[36]。

3.4 热点四: 应对全球气候变化的矿山生态修复新思维

全球气候变化对所有尺度的生态系统及其要素都可能产生影响。矿山土地复垦与生态修复规划、设计、实施以及管理中如何考虑影响这种影响, 受到各国学者的热议。议题之一是全球气候变化产生的极端气候如洪灾、旱灾等自然灾害对已修复生态系统的冲击效应以及如何提高该生态系统应对这些变化的恢复力。议题之二是温度异常升高或降低对植被生长的影响, 以及物种筛选和种源策略。例如, 澳大利亚干旱矿区植被恢复的主要挑战是气候多变、关键物种生长缓慢, 木本植物却很难再生。研究发现种子发芽的阈值与降雨、温度有关, 土壤含水量的时空变化可能制约了植物修复的效果^[37]。议题之三是通过长期监测数据来证明现有修复工程是否具备恢复力^[38]。例如, 澳大利亚西南正经历着显著的气候变化, 1975—2004 年降雨量相比 1900—1974 年减少了 14%, 而矾土矿区红柳桉林地恢复的长期记录为检验气候影响提供了很好的信息。研究表明, 气候变化对恢复有负面作用, 但是影响规模并不是很大, 受影响的场地占恢复场地的比例小于二分之一, 因此, 矿山修复对气候变化具有抵抗力^[39]。

3.5 热点五: 矿山生态系统服务价值

2005 年, 千年生态系统评估项目报告发表后, 生态系统服务价值的研究不断升温, 近年来这个热点也传导到矿山生态系统修复中。例如, 美国学者认为, 矿山生态恢复是可持续采矿和复垦的结合, 要体现经济可行、生态温和与社会期待, 综合的恢复方法包括景观地形设计、河流重建、土壤重构、原始动植物通过替换种子库, 创建微观和宏观生境, 以及本土物种的种植和播种等措施来恢复^[40]。生态恢复的效益很多, 包括被提高的土地价值、碳信用潜力、促进矿山资源开采利益相关方的合作、更好的水域保护和水质量, 以及更好的生态系统服务等。来自中国的学者评估了关闭矿山社会生态系统恢复力及服务价值。蒙古草原深沙矿生态群落的恢复效果评价中采用了服务价值指标。德国矿山生态景观自然恢复可行性评价中也考虑了生态系统服务如侵蚀控制或饲料生产等指标^[41]。美国学者提出文化服务价值的恢复应该受到矿山生态修复的重视, 应将本土文化和现代文化有机结合, 保护本土文化有特殊意义, 所以生态恢复中要关注“本土现代性” (Indigenous modernity)。可见, 矿山生态系统修复的服务价值开始逐渐受到重视。

4 新观点

4.1 自然恢复和人工恢复的选择标准需要探索

自然修复 (Spontaneous restoration) 或被动恢复 (Passive restoration) 是指不依靠人工干预或者最小化的人工干预达到生态恢复的目标, 但是这种恢复方式一直受到质疑。相比之下, 人工修复 (Artificial restoration) 或者主动修复 (Active restoration) 的原理和技术是研究的重点, 也被认为是矿区生态修复的最基本方法。然而, 最近三届世界生态恢复大会上, 自然修复和人工修复的选择成为争论的焦点。

捷克、澳大利亚、加拿大、德国、秘鲁、阿根廷、菲律宾等国的矿山生态恢复学者调研了本国早期和近期修复的矿山生态系统, 并与没有受到采矿扰动的系统进行比较, 发现近期人工修复系统的生物量比自然恢复系统恢复的快, 而且土壤质量恢复的好, 碳储量也大, 但是随着时间的推移, 自然恢复区生物多样性更好, 自然演替的效果也强于人工恢复区。捷克、德国学者认为, 在中欧地区的破坏严重的矿区, 采用主动修复是必要的, 其他条件下, 应依赖近自然恢复, 因为近自然恢复场地生物多样性更高, 自我维持能力更强。德国学者研究认为, 是否采取自然恢复手段取决于周边景观状况、历史、地区物种池中本土物种或者外来物种的共享、损失生境的快速补偿的必要性、以及有关的生态系统服务如侵蚀控制或饲料生产。但是, 阿根廷、南非、秘鲁等国家学者却得到不同的结论, 例如南非金山金矿场尾矿库种植的植被难以长期稳定, 必须人工定期干预才能维持稳定性。对秘鲁金矿山废弃自然恢复场地植被结构的调查发现, 不同恢复年限下, 植被结构差异很大, 且植被

恢复较慢,需要主动恢复。由此可见,矿山生态修复中,自然恢复和人工修复两种策略的优劣还需要继续探索。

4.2 矿山生态恢复需要引入恢复力理论

矿山土地复垦和生态修复的核心不仅是治理破坏的植被或者退化的土壤,而且还应该建设生态系统恢复力,这一观点得到越来越广泛的认可。但是,矿山生态系统恢复力针对的扰动类型却存在不同观点。很多学者认为,矿山土地复垦和生态修复针对的就是采矿扰动,如沉陷、裂缝、滑坡、地下水破坏以及污染等。然而,有的学者认为这种看法必须改变。例如,加拿大油砂矿区的阔叶林生态系统的结构和功能十分复杂,且受到地形、土壤、植被和外在扰动等多种因素的影响,这个阔叶林生态系统是一个自适应系统。重建有恢复力的系统需要了解这个系统的自然演替、相互作用以及动态性。因此恢复力应包含两种能力,一是从采矿扰动的恢复能力,二是从未来扰动中恢复的能力。据此,来自加拿大的研究人员提出恢复力建设的途径,包括:1)重新建立与地形、土壤相匹配的树种多样性;2)使用定植苗技术来提高抗压能力;3)利用表土和林地表层物质来促进多样的、自然的林下植物群落的演替;4)利用粗木制材料来迅速启动关键生态过程。另外,有学者认为目前提高土壤恢复力、植被群落恢复力、景观恢复力等的路径仍不清楚,澳大利亚学者还呼吁应重新定义 Revegetation、Rehabilitation 和 Restoration,以利于明确恢复力建设的目标。

4.3 矿山生态修复需要重视新型矿山生态系统的设计及研究

随着生活水平的提高,人们对精神文化、环境质量的要求也逐渐提高。早期矿山土地复垦与生态修复强调耕地复垦和高经济效益,近来逐渐增加了对风景和休闲娱乐等生态服务价值的重视。新的恢复目标和方式完全改变了原有系统的结构和功能,被修复后的系统往往成为新型矿山生态系统。如何规划、设计新型生态系统并保证它的恢复力,是参会代表讨论的重点之一。例如,有的学者认为,新的生态系统,无论是偶然的还是特意设计的,都是由人类衍生出来的景观和文化。在那些高度改变的景观中,规划和设计可以提升文化和美学品质,同时也增加生物与自然的相关性。也有相似的观点认为,仅仅保证生态和景观系统的持续性还不够,应在寻求增加生态效用的足迹时,将之建设称为生态功能再生的场所。

5 未来趋势

从连续三次世界生态恢复大会关于矿山生态系统恢复的论文与报告来看,矿山生态系统是世界生态恢复研究的主要对象之一。植被、土壤和水的修复是矿山生态修复的核心主题,系统性、大尺度的生态恢复将是研究的重要方向。自然恢复的方法和技术将成为研究热点,矿区社会生态恢复力建设将逐步受到重视,确保矿区生态系统的可持续性是一些研究的共同目标。

参考文献 (References):

- [1] Lagrange A, L'Huillier L, Amir H. Mycorrhizal status of Cyperaceae from New Caledonian ultramafic soils: effects of phosphorus availability on arbuscular mycorrhizal colonization of *Costularia comosa* under field conditions. *Mycorrhiza*, 2013, 23(8):655-661.
- [2] Bess J A. Restoration of headwater and coastal fens in the lake superior of upper Michigan [D]. Houghton: Michigan Technological University, 2015.
- [3] Broadhurst L M, Jones T A, Smith F S, North T, Guja L. Maximizing seed resources for restoration in an uncertain future. *Bioscience*, 2016, 66(1):v155.
- [4] Thompson C, Mendoza C A, Devito K J. Potential influence of climate change on ecosystems within the boreal plains of alberta. *Groundwater in Cold Environments Current Understanding & Challenges*, 2017, 31: 2110-2124.
- [5] Merino-Martín L, Commander L, Mao Z, Stevens J C, Miller B P, Golos P J, Mayence C E, Dixon K. Overcoming topsoil deficits in restoration of semiarid lands: Designing hydrologically favourable soil covers for seedling emergence. 2017, 105: 102-117.
- [6] Fernández M E, Passera C B, Cony M A. Sapling growth, water status and survival of two natives hrbus from the Monte Desert, Mendoza, Argentina, under different preconditioning treatments. *Revista De La Facultad De Ciencias Agrarias*, 2015, 48(1): 33-47.
- [7] Siciliano S D, Palmer A S, Winsley T, Lamb E, Bissett A, Brown M V, Dorst J V, Ji M, Ferrari B C, Grogan P. Soil fertility is associated with

- fungal and bacterial richness, whereas pH is associated with community composition in polar soil microbial communities. *Soil Biology & Biochemistry*, 2014, 78(6): 10-20.
- [8] Stewart K M E, Penlidis A. Designing polymeric sensing materials for analyte detection and related mechanisms. *Macromolecular Symposia*, 2016, 360(1): 123-132.
- [9] Borkenhagen A K. Recreating peatland initiation conditions: Methods for reclaiming peatlands in Alberta's oil sands region [D]. Fort Collins: Colorado State University, 2014.
- [10] Nussbaumer Y, Cole M A, Offler C E, Patrick J W. Identifying and ameliorating nutrient limitations to reconstructing a forest ecosystem on mined land. *Restoration Ecology*, 2016, 24(2): 202-211.
- [11] Sizmur T, Martin E, Wagner K, Parmentier E, Watts C, Whitmore A P. Milled cereal straw accelerates earthworm (*Lumbricus terrestris*) growth more than selected organic amendments. *Applied Soil Ecology*, 2017, 113: 166.
- [12] Williams W. Cyanobacteria in the Australian mulga lands: diversity, function and ecological role in high stress environments [D]. Brisbane: The University of Queensland, 2010.
- [13] Datar A S. Quantification of landform heterogeneity and its relationship with ecological patterns in broad-scale post-mine rehabilitation [D]. Brisbane: The University of Queensland, 2015.
- [14] Hagen D, Svavarsdottir K, Nilsson C, Tolvanen A K, Raulund-Rasmussen K, Aradóttir Á L, Fosaa A M, Halldorsson G. Ecological and social dimensions of ecosystem restoration in the nordic countries. *Ecology & Society*, 2013, 18(4): 1373-1392.
- [15] Angelo C D, Paviolo A, Wiegand T, Kanagaraj R, Bitetti M S D. Understanding species persistence for defining conservation actions: A management landscape for jaguars in the Atlantic Forest. *Biological Conservation*, 2013, 159(1): 422-433.
- [16] Becker D A, Wood P B, Strager M P, Mazzarella C. Impacts of mountaintop mining on terrestrial ecosystem integrity: identifying landscape thresholds for avian species in the central Appalachians, United States. *Landscape Ecology*, 2015, 30(2): 339-356.
- [17] Chazdon R L, Uriarte M. Natural regeneration in the context of large-scale forest and landscape restoration in the tropics. *Biotropica*, 2016, 48(6): 709-715.
- [18] Frank S, Fürst C, Koschke L, Makeschin F. A contribution towards a transfer of the ecosystem service concept to landscape planning using landscape metrics. *Ecological Indicators*, 2012, 21(21): 30-38.
- [19] Křováková K, Semerádová S, Mudrochová M, Skaloš J. Landscape functions and their change - a review on methodological approaches. *Ecological Engineering*, 2015, 75: 378-383.
- [20] Mansourian S, Stanturf J A, Derkyi M A A, Engel V L. Forest landscape restoration: increasing the positive impacts of forest restoration or simply the area under tree cover? *Restoration Ecology*, 2017, 25(2): 1-6.
- [21] Mayer A L, Buma B, Davis A, Gagné S A, Loudermilk E L, Scheller R M, Schmiegelow F K A, Wiersma Y F, Franklin J. How landscape ecology informs global land-change science and policy. *Bioscience*, 2016, 66(6): 458-469.
- [22] Ontiveros D, Márquez-Ferrando R, Fernández-Cardenete J R, Santos X, Caro J, Pleguezuelos J M. Recovery of the bird community after a mine spill and landscape restoration of a mediterranean river. *Restoration Ecology*, 2013, 21(2): 193-199.
- [23] Pezzulo G, Cisek P. Navigating the affordance landscape: feedback control as a process model of behavior and cognition. *Trends in Cognitive Sciences*, 2016, 20(6): 414-424.
- [24] Redondo-Vega J M, Alonso-Herrero E, Santos-González J, Gonzalez-Gutierrez R B, Gómez-Villar A. La Balouta exhumed karst: a Roman gold-mine-derived landscape within the Las Médulas UNESCO World Heritage Site (Spain). *International Journal of Speleology*, 2015, 44(3): 267-276.
- [25] Sinha N, Deb D, Pathak K. Development of a mining landscape and assessment of its soil erosion potential using GIS. *Engineering Geology*, 2016: 1-12.
- [26] Stafford W, Blignaut J. Reducing landscape restoration costs: Feasibility of generating electricity from invasive alien plant biomass on the Agulhas Plain, South Africa. *Ecosystem Services*, 2017, 27(Part B): 224-231.
- [27] Su S, Xiao R, Jiang Z, Zhang Y. Characterizing landscape pattern and ecosystem service value changes for urbanization impacts at an eco-regional scale. *Applied Geography*, 2012, 34(1): 295-305.
- [28] Willemen L, Veldkamp A, Verburg P H, Hein L, Leemans R. A multi-scale modelling approach for analysing landscape service dynamics. *Journal of Environmental Management*, 2012, 100(10): 86-95.
- [29] Krauss S L, Sinclair E A, Bussell J D, Hobbs R J. An ecological genetic delineation of local seed-source provenance for ecological restoration. *Ecology & Evolution*, 2013, 3(7): 2138-2149.
- [30] Valenzuela P, Arellano E, Burger J, Zegers G, Fernández I. Bases para el desarrollo de un modelo de rehabilitación forestal en minería utilizando *Nothofagus pumilio* [Poepf. et Endl.] Krasser. *Anales Del Instituto De La Patagonia*, 2015, 43(1): 97-107.

- [31] Wilson-Kokes L, Skousen J. Tree growth on ripped, compacted, and slightly compacted gray sandstone topsoil substitute on a surface coal mine in West Virginia. *Journal American Society of Mining and Reclamation*, 2014, 1(3): 117-136.
- [32] Josa R, Jorba M, Vallejo V R. Opencast mine restoration in a Mediterranean semi-arid environment: Failure of some common practices. *Ecological Engineering*, 2012, 42(9): 183-191.
- [33] Silveira F A O, Negreiros D, Barbosa N P U, Buisson E, Carmo F F, Carstensen D W, Conceição A A, Cornelissen T G, Echternacht L, Fernandes G W. Ecology and evolution of plant diversity in the endangered campo rupestre: a neglected conservation priority. *Plant & Soil*, 2016, 403(1/2): 129-152.
- [34] Stradic S L, Buisson E, Negreiros D, Campagne P, Fernandes G W. The role of native woody species in the restoration of Campos Rupestres in quarries. *Applied Vegetation Science*, 2014, 17(1): 109-120.
- [35] Benigno S M, Dixon K W, Stevens J C. Increasing soil water retention with native-sourced mulch improves seedling establishment in postmine mediterranean sandy soils. *Restoration Ecology*, 2013, 21(5): 617-626.
- [36] Nimick D A, Harper D D, Farag A M, Cleasby T E, Macconnell E, Skaar D. Influence of in-stream diel concentration cycles of dissolved trace metals on acute toxicity to one-year-old cutthroat trout (*Oncorhynchus clarki lewisi*). *Environmental Toxicology & Chemistry*, 2007, 26(12): 2667-2678.
- [37] Sluiter I R K, Sluiter K R. On the ecology, distribution and conservation status of *Vittadinia blackii* (Asteraceae) in Australia. *Cunninghamia A Journal of Plant Ecology for Eastern Australia*, 2011, 12(1): 1-5.
- [38] Daws M I, Koch J M. Long-term restoration success of re-sprouter understorey species is facilitated by protection from herbivory and a reduction in competition. *Plant Ecology*, 2015, 216(4): 1-12.
- [39] Orozco-Aceves M, Standish R J, Tibbett M. Soil conditioning and plant-soil feedbacks in a modified forest ecosystem are soil-context dependent. *Plant & Soil*, 2015, 390(1/2): 183-194.
- [40] Burger J, Gochfeld M, Powers C W, Niles L, Zappalorti R, Feinberg J, Clarke J. Habitat protection for sensitive species: Balancing species requirements and human constraints using bioindicators as examples. *Natural Science*, 2013, 05(5): 50-62.
- [41] Baasch A, Tischew S, Bruehlheide H. Twelve years of succession on sandy substrates in a post-mining landscape: a Markov chain analysis. *Ecological Applications*, 2010, 20(4): 1136-1147.