

生物土壤结皮对矿区土壤重金属修复作用研究

李刚^{1,2,3,4,5}, 卢楠^{1,2,3,4,5}, 王莹^{1,2,3,4,5}

¹陕西地建土地工程技术研究院有限责任公司, 陕西 西安

²陕西地建 - 西安交大土地工程与人居环境技术创新中心, 陕西 西安

³陕西省土地工程建设集团有限责任公司, 陕西 西安

⁴自然资源部退化及未利用土地整治工程重点实验室, 陕西 西安

⁵陕西省土地整治工程技术研究中心, 陕西 西安

收稿日期: 2021年11月13日; 录用日期: 2021年12月15日; 发布日期: 2021年12月22日

摘要

矿山地区生态环境恶劣且脆弱, 气候干燥, 植被生长状况不佳, 部分区域甚至寸草难生, 而生物土壤结皮却可以广泛分布, 尤其是在环境恶劣的区域可以良好的生长。通过筛选符合矿区修复的、具有超富集潜能的结皮类型, 采取积极有效的治理和保护措施, 促进生物土壤结皮修复的工程应用, 对缓解矿区重金属污染引起的生态环境问题具有重要的作用。

关键词

生物土壤结皮, 矿区, 土壤重金属, 修复

Effect of Biological Soil Crusts on the Remediation of Soil Heavy Metals in Mining Area

Gang Li^{1,2,3,4,5}, Nan Lu^{1,2,3,4,5}, Ying Wang^{1,2,3,4,5}

¹Institute of Land Engineering and Technology, Shaanxi Provincial Land Engineering Construction Group Co., Ltd., Xi'an Shaanxi

²Technology Innovation Center for Land Engineering and Human Settlements, Shaanxi Land Engineering Construction Group Co., Ltd. and Xi'an Jiaotong University, Xi'an Shaanxi

³Shaanxi Provincial Land Engineering Construction Group Co., Ltd., Xi'an Shaanxi

⁴Key Laboratory of Degraded and Unused Land Consolidation Engineering, The Ministry of Natural Resources, Xi'an Shaanxi

⁵Shaanxi Provincial Land Consolidation Engineering Technology Research Center, Xi'an Shaanxi

Received: Nov. 13th, 2021; accepted: Dec. 15th, 2021; published: Dec. 22nd, 2021

Abstract

The ecological environment in the mining area is harsh and fragile, the climate is dry, the vegetation growth is not good, and even a single inch of grass is difficult to grow in some areas. However, biological soil crusts can be widely distributed, especially in areas with harsh environments. By screening the types of crusts with super-enrichment potential that are suitable for mining area restoration, active and effective treatment and protection measures are adopted to promote the engineering application of biological soil crust restoration, which plays an important role in alleviating the ecological environmental problems caused by heavy metal pollution in mining areas.

Keywords

Biological Soil Crusts, Mining Areas, Soil Heavy Metals, Remediation

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

人类活动是土壤重金属污染的主要成因[1]。土壤中重金属的主要来源有矿物母质的风化、矿业活动的排放、污水灌溉农田以及农药化肥的使用等[2]。重金属污染不仅能够引起土壤的组成、结构和功能的变化,还能够抑制作物根系生长和光合作用,致使作物减产甚至绝收。更为重要的是,重金属会通过食物链迁移到动物、人体内,严重危害动物、人体健康。土壤中过量的重金属有极大的潜在危害[3]。国土资源部门表示,目前我国耕种土地面积的10%以上受到了不同程度的重金属污染,污染面积约为1.5亿亩,由于污水灌溉而造成污染的耕地达到3250万亩,由于固体废弃物堆积占用和污染的土地达200万亩,土壤重金属的污染主要集中在经济较发达的地区。除此之外,矿山开采等活动也会对矿山及矿区周围地下水、耕地造成严重的重金属污染,对矿区周边人民身体健康和农业可持续发展带来了严重的威胁。为杜绝或减轻重金属对人类健康的危害,除加强管理,坚决杜绝工业“三废”的排放,规划城市垃圾的堆放,严格控制含有重金属的化肥、农药的使用,推行清洁生产工艺,严格控制重金属污染物的排放外,如何高效、生态的修复矿区土壤重金属污染成为人们的主要关注点。

生物土壤结皮(Biological soil crusts)是干旱半干旱地区生态系统的重要组成部分,主要是由苔藓、地衣、藻类、真菌及细菌等共同形成的复合土壤层,其中苔藓植物、藻类以及地衣是其构成的主要成分,生物土壤结皮的形成是大气降尘和生物综合作用的结果[4] [5] [6]。生物土壤结皮在干旱半干旱地区生态系统中扮演着重要的角色,影响着土壤的结构、稳定性、保水力,也影响生态系统的功能、生态景观的稳定、生产力、碳氮的固定、土壤的肥力、土壤和植物之间的水分平衡及高等植物种子的萌发和幼苗存活等[7] [8]。生物土壤结皮在干旱半干旱地区以及生态环境恶劣的山地、坡地都能广泛的分布,一方面,促进了矿物质的矿化过程,有利于生态系统物质的循环和流动,进而提高土壤养分,促进土壤的形成和发育,加速土壤的演替过程[9]。另一方面,生物土壤结皮对重金属元素具有很强的吸附作用,因此用生物土壤结皮做生态系统污染的生物指示者,尤其是利用生物土壤结皮组分地衣、苔藓及藻类植物来研究重金属富集作用和污染监测,已经成为一种成熟的技术手段[10] [11] [12] [13]。

2. 国内外研究现状

目前,生物土壤结皮对矿区重金属的修复作用研究尚属空白,而相关研究也主要集中于地衣或苔藓的研究上,虽然把地衣和苔藓作为环境污染的指示种,得到了众多专家和学者的肯定,但是这些研究大都集中在湿润的森林区和湿中生的大型苔藓植物[14],而对广泛分布于我国干旱、半干旱地区的生物土壤结皮组成成分的旱生苔藓植物却鲜见报道,而关于生物土壤结皮这一生物土壤复合体的环境污染修复作用还没有研究报道。

在过去 20 多年里,生物土壤结皮一直是国内外荒漠化地区、干旱半干旱地区的研究热点,试验区域主要分布在沙漠、沙地、黄土地区及部分干旱山区。由于生物土壤结皮影响土壤的稳定和侵蚀、大气碳和氮的固定、植物养分的吸收、水分渗透、土壤-植物-水分之间的关系、幼苗萌发和植物生长等生理现象,在自然环境中,尤其是在缺乏氮素的干旱和半干旱生态系统中具有重要的作用,引起了国际生态研究者的广泛关注。

目前国外对生物土壤结皮的研究主要集中在美国、澳大利亚以及以色列等地,研究范围大多集中在生物土壤结皮藻类、土壤水文学、养分循环、生物土壤结皮与种子萌发、生物土壤结皮与土壤物理过程和生态过程中的相互作用、结皮干扰和结皮形成机制等。生物土壤结皮是大气降尘和生物综合作用的结果,生物土壤结皮对防风固沙、防止水土流失及土壤养分积累具有重要作用[15][16]。国外,特别是欧洲用生物土壤结皮及结皮生物组分地衣、苔藓植物来研究重金属富集作用和污染监测,已经取得很多研究成果[17][18]。目前,应用苔藓植物监测和富集重金属研究已经是一种成熟技术,主要应用于各国工业地区,同时通过人工迁移栽培试验观察本地原有种与外来迁移种对重金属的富集和耐受作用,也取得了一定的成果[19]。

尽管生物土壤结皮在荒漠生态系统中发挥着重要作用,但长期以来它却很少被作为主要的生物因素受到关注和进行研究,直到 20 世纪 80 年代后期,伴随着荒漠化威胁的日益加重,生物土壤结皮在荒漠中的重要作用才被越来越多的科学家及科研机构重视起来。与物理结皮相比较,生物土壤结皮具有低容重、低密度、高孔隙度和高持水性等特征,在荒漠生态系统中发挥积极的作用,被称为荒漠生态系统的工程师。更因为其结构成分复杂,在荒漠及矿区等条件恶劣地区的生态系统中相对稳定,具备进行土壤重金属修复的有利条件。

在国内,对生物土壤结皮的研究始于 20 世纪 80 年代中后期,主要研究区域集中于沙坡头、科尔沁、鄂尔多斯以及陕北水蚀风蚀地区 and 新疆古尔班通古特沙漠等干旱半干旱地区。中国科学院寒旱所、中国农业科学院草原所、北京微生物研究所、武汉水生生物研究所、新疆生态与地理研究所、中科院水保所、内蒙古大学等单位众多科研人员开展了一系列土壤生物结皮研究工作,取得了一定的成果,人们对生物土壤结皮的发育过程、生态功能等方面的认识有了明显的提高。近年来,我国利用湿中生型大型苔藓植物作为监测治理手段,对大气环境中的重金属污染已经有一些进展,但是针对于干旱半干旱地区的生物土壤结皮这一生物土壤复合体对土壤及矿区重金属污染的研究还尚属空白。

3. 生物土壤结皮对土壤重金属的修复机理探索

生物土壤结皮中微生物富集重金属的机制:重金属对微生物具有毒害作用,且微生物不能降解重金属,但是微生物可以修复和转化重金属,对重金属又具有一定的抗性和解毒作用。

3.1. 生物土壤结皮中藻类植物富集重金属的机制

藻类植物由于个体小、生长速度快、代谢迅速、吸附作用快、净化效率高等特点,对重金属修复和吸附具有较好的应用前景。藻类细胞分内外层,外层是由纤维素、果胶质、藻酸铵和聚半乳糖硫酸酯等

多层微纤丝组成的多孔结构，内层主要成分是纤维素细胞外壁富含藻类细胞释放的以多肽、多糖为主的胞外产物。这些多聚复合体，给藻类提供了大量可以与金属离子结合的羟基、氨基、醛基等官能团，在藻类对重金属离子的吸收中扮演了重要的角色。此外，藻类细胞壁表面多褶皱，表面积较大，这些官能团能合理排列在具有较大表面积的藻类细胞壁上，与金属离子充分接触。在吸附过程中，其中有些可以失去质子而带负电荷，靠静电吸附金属离子；有的带孤对电子，可以与金属离子形成配位键而络合吸附金属离子。

3.2. 生物土壤结皮中苔藓植物富集重金属的机制

苔藓植物是一种结构简单、体型小、多细胞的原始高等植物。由于苔藓植物广泛的分布于世界各地，是一种适应性很强的植物，不仅分布在热带、温带等地区，也在高山丘陵、荒漠以及冻原地区广泛分布，加之苔藓植物结构简单，生命力极强，在高山丘陵、荒漠和冻原地区能够起到重要的拓荒作用；苔藓植物没有角质层和表皮层，这就使得它们的叶片可以高度地渗透微量元素离子。重金属物质可以通过背腹两面进入叶细胞内，所以苔藓植物具有很强的吸附保留重金属元素的能力；苔藓植物还具有很强的阳离子交换能力[20]，苔藓植物对离子的吸收机制主要有：离子交换和微粒捕获。Richardson [21]等的研究表明，在苔藓植物细胞壁上存在一些带负电荷的离子交换位点，具有类似离子交换树脂的作用，可以吸附金属离子并释放氢离子和其他一些与该交换位点结合能力弱的金属离子。Clough [22]在一系列风洞试验中则确定苔藓植物对微量元素的吸附和持留作用非常显著，并且这种强吸附和持留作用在死亡的苔藓中也存在，主要原因在于苔藓的多毛分支结构[23]。所以苔藓植物通过简单的离子交换过程，能有效的吸收周围环境中的金属离子。

4. 讨论

矿山地区生态环境恶劣且脆弱，气候干燥，植被生长状况不佳，部分区域甚至寸草难生，而生物土壤结皮却可以广泛分布，尤其是在环境恶劣的区域可以良好的生长。但是在应用过程中需要注意，一方面，矿山地区重金属污染方式及来源的确定，由于矿山地区重金属污染情况复杂，部分重金属随降雨和径流扩散，进而污染周边地区土壤和河流；部分重金属则是以矿渣的形式存在，在一定的气象条件下，则会随风扩散，由于大气沉降等作用，导致土壤表层污染。另外一方面，藻类生物土壤结皮中重金属的测定。由于藻类结皮的特殊结构，导致藻类结皮难以从下层土壤中彻底剥离，为了精确测定藻类结皮对土壤重金属的修复作用，在测定过程中需要彻底将藻类结皮从土壤剥离。

5. 结论

通过筛选符合矿区修复的、具有超富集潜能的结皮类型，采取积极有效的治理和保护措施，促进生物土壤结皮修复的工程应用，对缓解矿区重金属污染引起的生态环境问题具有重要的作用。

基金项目

陕西地建 - 西安交大土地工程与人居环境技术创新中心开放基金资助项(2021WHZ0094)；陕西省土地工程建设集团内部科研项目(DJNY2020-21)。

参考文献

- [1] 黄益宗, 郝晓伟, 雷鸣. 等. 重金属污染土壤修复技术及其修复实践[J]. 农业环境科学学报, 201, 32(3): 409-417.
- [2] Wei, B.G. and Yang, L.I. (2010). A Review of Heavy Metal Contaminations in Urban Soils, Urban Road Dusts and Agricultural Soils from China. *Microchemical Journal*, **94**, 99-107. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2009.09.014>

- [3] Wang, H. and Sun, X.Y. (2003). Studies on Heavy Metal Pollution in Soil-Plant System: A Review. *Forestry Studies in China*, **5**, 55-62
- [4] Belnap, J., Williams, J. and Kaltenecker, J. (1998) Structure and Function of Biological Soil Crusts. In: Meurisse, R.T., Ypsilantis, W.G. and Seybold, C., Eds., *Pacific Northwest Forest and Rangeland Soil Organism Symposium*. USDA Forest Service, Pacific Northwest Research Station, Portland; Oregon State University, Corvallis, 161-178.
- [5] Li, X.R., Xiao, H.L., Zhang, J.G. and Wang, X.P. (2004). Long-Term Ecosystem Effects of Sand-Binding Vegetation in the Tengger Desert, Northern China. *Restoration Ecology*, **12**, 376-390.
<https://doi.org/10.1111/j.1061-2971.2004.00313.x>
- [6] Li, X.R., Zhang, P., Su, Y.G. and Jia, R.L. (2012) Carbon Fixation by Biological Soil Crusts Following Revegetation of Sand Dunes in Arid Desert Regions of China: A Four-Year Field Study. *CATENA*, **97**, 119-126.
<https://doi.org/10.1016/j.catena.2012.05.009>
- [7] 徐杰, 白学良, 杨持, 等. 固定沙丘生物结皮层藓类植物多样性及固沙作用研究[J]. 植物生态学报. 2003, 27(4): 545-551.
- [8] 徐杰, 白学良, 田桂泉, 等. 腾格里沙漠固定沙丘藓类植物结皮层藓类植物的生态功能及与土壤环境因子的关系[J]. 中国沙漠, 2005, 25(2): 234-242.
- [9] Onianwa, P.C. (2001) Monitoring Atmospheric Metal Pollution: A Review of the Use of Mosses as Indicators. *Environmental Monitoring and Assessment*, **71**, 13-50. <https://doi.org/10.1023/A:1011660727479>
- [10] Fernández, J.A. and Carballeira, A. (2001). A Comparison of Indigenous Mosses and Topsoils for Use in Monitoring Atmospheric Heavy Metal Deposition in Galicia (Northwest Spain). *Environmental Pollution*, **114**, 431-441.
[https://doi.org/10.1016/S0269-7491\(00\)00229-3](https://doi.org/10.1016/S0269-7491(00)00229-3)
- [11] Ermakova, E.V., Frontasyeva, M.V. and Steinnes, E. (2004) Air Pollution Studies in Central Russia (Tula Region) Using the Moss Biomonitoring Technique, INAA and AAS. *Journal Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, **259**, 51-58.
<https://doi.org/10.1023/B:JRNC.0000015805.22707.a1>
- [12] Lucaciui, A., Culicov, O., Timofte, L., et al. (2004) Atmospheric Deposition of Trace Elements in Romania Studied by the Moss Biomonitoring Technique. *Journal Atmospheric Chemistry*, **49**, 533-548.
<https://doi.org/10.1007/s10874-004-1264-1>
- [13] Eldridge, D.J. and Koen, T.B. (1998) Cover and Floristics of Microphytic Soil Crusts in Relation to Indices of Landscape Health. *Plant Ecology*, **137**, 101-114. <https://doi.org/10.1023/A:1008036214140>
- [14] 徐杰, 白学良, 田桂泉, 等. 干旱半干旱地区生物结皮层藓类植物氨基酸和营养物质组成特征及适应性分析[J]. 生态学报, 2005, 25(6): 1247-1255.
- [15] Li, X.R., Wang, X.P. and Li, T. (2002) Microbiotic Soil Crust and Its Effect on Vegetation and Habitat on Artificially Stabilized Desert Dunes in Tengger Desert, North China. *Biology and Fertility of Soils*, **35**, 147-154.
<https://doi.org/10.1007/s00374-002-0453-9>
- [16] Egilli, E., Topcuoglu, S., Knt, D., Kirbaşoğlu, Ç. and Esen, N. (2003) Heavy Metals and Radionuclides in Lichens and Mosses in Trace, Turkey. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, **70**, 502-508.
<https://doi.org/10.1007/s00128-003-0014-4>
- [17] Ugur, A., Ozden, B., Sac, M.M., Yener, G., Altinbaş, Ü., Kurucu, Y., et al. (2004). Lichens and Mosses for Correlation between Trace ^{210}Po in the Areas Near Coal-Fired Power Plant at Yatagan, Turkey. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, **259**, 87-92. <https://doi.org/10.1023/B:JRNC.0000015811.68036.69>
- [18] Fernandez, J.A. and Carballeira, A. (2000) Differences in the Responses of Native and Transplanted Mosses to Atmospheric Pollution: A Possible Role of Selenium. *Environment Pollution*, **110**, 73-78.
- [19] 方精云, 王襄平. 植物群落清查的主要内容、方法和技术规范[J]. 生物多样性, 2009, 17(6): 533-548.
- [20] Buescher, P. and Koedam, N. (1990) Cation-Exchange Properties and Adaptation to Soil Acidity in Bryophytes. *New Phytologist*, **115**, 177-186. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.1990.tb00936.x>
- [21] Richardson, D.H.S. (1992) Pollution Monitoring with Lichens. Richmond slough, U.K.
- [22] Clough, W.S. (1975) The Deposition of Particles on Moss and grass Surface. *Atmospheric Environment*, **9**, 1113-1119.
[https://doi.org/10.1016/0004-6981\(75\)90187-0](https://doi.org/10.1016/0004-6981(75)90187-0)
- [23] 籍霞. 几种藓类植物对重金属胁迫的响应研究[D]: [硕士学位论文]. 曲阜: 曲阜师范大学, 2010.