

植被自然恢复对煤矸石堆场 Fe/Mn 淋溶迁移的影响及其作用效果

刘方^{1,2}, 陈祖拥¹, 刘元生¹, 朱健^{1,2}, 卜通达¹

(1. 贵州大学 环境与资源研究所, 贵州 贵阳 550025; 2. 贵州喀斯特环境生态系统教育部野外科学观测研究站, 贵州 贵阳 550025)

摘要: [目的] 探讨植被自然恢复下植被类型对煤矸石堆场 Fe, Mn 淋溶迁移的影响及其作用效果, 为煤矿区煤矸石堆场的生态环境治理及生态修复提供科学依据。[方法] 通过对贵州省中部废弃煤矿区不同植被条件下煤矸石堆场地表径流进行采样分析, 同时通过移植煤矸石堆场上生长的马尾松、光皮桦和类芦进行盆栽试验以及采集基质渗透水样品。[结果] 马尾松、光皮桦及类芦生长的煤矸石基质渗透水和煤矸石堆场地表径流水中 Fe, Mn 含量均显著地低于无植物生长的煤矸石, 煤矸石堆场植被自然恢复后地表径流水中 Fe, Mn 含量下降率分别达 45.27%~85.60%, 60.17%~90.13%, 植被作用效果的大小顺序为: 马尾松幼林>阔叶树幼林>类芦草丛。同时, 马尾松幼林、阔叶树幼林、类芦草丛煤矸石堆场地表径流水中泥沙含量分别比无植被裸露的煤矸石堆场平均减少了 40.18%, 30.67%, 27.91%。煤矸石中矿物颗粒态 Fe, Mn 的迁移量也出现明显的降低。[结论] 植被自然恢复能显著地减少煤矸石堆场 Fe, Mn 向水体的迁移及改善废弃煤矿区地表水环境质量。植物生长, 特别是马尾松生长对减少煤矸石中 Fe 向水体迁移产生的环境效应大于 Mn。

关键词: 植被恢复; 煤矸石堆场; 地表径流; Fe/Mn 淋溶迁移

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2020)06-0181-06

中图分类号: S157.1

文献参数: 刘方, 陈祖拥, 刘元生, 等. 植被自然恢复对煤矸石堆场 Fe/Mn 淋溶迁移的影响及其作用效果 [J]. 水土保持通报, 2020, 40(6): 181-186. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2020.06.026; Liu Fang, Chen Zuyong, Liu Yuansheng, et al. Effects of natural vegetation restoration on Fe/Mn leaching and migration in coal gangue yard [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2020, 40(6): 181-186.

Effects of Natural Vegetation Restoration on Fe/Mn Leaching and Migration in Coal Gangue Yard

Liu Fang^{1,2}, Chen Zuyong¹, Liu Yuansheng¹, Zhu Jian^{1,2}, Bu Tongda¹

(1. Environment and Resource Institute of Guizhou University, Guiyang, Guizhou 550025, China;

2. Guizhou Karst Environmental Ecosystem Field Science Observation and Research Station, Guiyang, Guizhou 550025, China)

Abstract: [Objective] The effects of vegetation types on the leaching and migration of Fe/Mn in coal gangue dumps under natural vegetation restoration were discussed in order to provide a scientific basis for the ecological environment management and ecological restoration of coal gangue dumps in coal mining areas. [Methods] The surface runoff of the coal gangue yard under different vegetation conditions in the abandoned coal mine area of central Guizhou Province was sampled and analyzed. At the same time, pot experiment was carried out by transplanting Masson pine, *Betula luminiifera* and reed growing on coal gangue yard, and the samples of matrix permeate water were collected. [Results] The content of Fe or Mn in the infiltrated water of coal gangue substrates, and in the surface runoff water of coal gangue pile site grown with Masson pine, *Betula luminiifera* and reed was significantly lower than that of gangue without plant growth. After natural recovery vegetation at coal gangue pile site, the decrease rates of Fe and Mn contents in surface runoff water were 45.27%~85.60% and 60.17%~90.13% respectively, the order of vegetation effects was *Pinus massoniana*

收稿日期: 2020-05-26

修回日期: 2020-07-20

资助项目: 国家自然科学基金项目“煤矿废弃地煤矸石—水界面锰迁移的生态规律与调控机制”(41661094); 贵州省科技计划项目(黔科合平台人才[2017]5788号)

第一作者: 刘方(1964—), 男(侗族), 贵州省天柱县人, 博士, 教授, 主要从事土壤资源利用与改良方面的研究。Email: lfang6435@163.com。

young forest > Broadleaf young forest > reed grass. The sediment content of surface runoff water in the gangue pile sites grown with *Pinus massoniana* young forest, broad-leaved tree young forest, and reed-like grass was reduced by 40.18%, 30.67%, and 27.91%, respectively, compared with that of gangue without plant growth, and the migration of mineral particulate Fe and Mn in coal gangue was also decreased significantly. [Conclusion] Natural vegetation restoration can significantly reduce migration of Fe and Mn from the coal gangue yard to the water and improve the surface water quality in abandoned coal mines. The environmental effect of plant growth on reducing the migration of Fe from coal gangue to water was greater than that of Mn, especially the growth of *Pinus massoniana*.

Keywords: vegetation restoration; coal gangue yard; surface runoff; Fe/Mn leaching and migration

关闭煤矿井周边煤矸石大量露天堆存不仅占用大量土地,而且大量的硫化物及铁、锰等金属离子在降雨条件下随地表径流进入周围土水环境,导致地表水体出现严重污染,以及土壤酸化和重金属污染^[1-3]。由于煤矸石基质酸度大、养分缺乏,植物萌发和生长困难,从而阻碍煤矸石堆场及周边环境的生态恢复^[4-8]。目前对煤矸石堆场的植被恢复技术及植物修复效果、水土流失规律等方面开展了一些研究工作^[9-16],宋楠等对煤矸石山坡面不同覆盖的水土保持效益进行分析,采用煤矸石和黄土混合覆盖的煤矸石山坡面蓄水保土效果显著,植被恢复状况良好^[17]。王丽艳等对煤矸石山 7 种植被恢复模式进行了研究,与裸地相比,不同植被恢复模式均对矸石山坡面土壤侵蚀和养分流失具有明显控制效果^[18]。植被具有大的林冠或茂密的草丛和枯枝落叶层,降低了地表径流流速,提高了煤矸石堆场表面抵抗降雨冲蚀的能力^[19]。近年来贵州多数关闭的小煤窑矿区环境治理取得较明显的效果,煤矸石堆场植被出现一定程度的自然恢复,主要有马尾松、光皮桦、类芦及蕨类植物等植物的生长,这些植物的生长增加了地表覆盖,减少了地表径流的产生及土壤侵蚀作用^[20-21]。但是,对该

区域不同植被恢复类型下煤矸石堆场铁、锰等金属离子淋溶迁移的变化还缺乏深入的研究,故本文选择贵州省中部山区关闭的煤矿区为研究对象,探讨不同植被类型下煤矸石堆场地表径流中 Fe、Mn 的迁移特点以及植被自然恢复对煤矸石中 Fe、Mn 淋溶迁移的作用效果,为煤矿区煤矸石堆场的生态环境治理及生态修复提供科学依据。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

研究区位于贵阳市花溪区麦坪乡及久安乡,属低中山地貌及亚热带季风性湿润气候,年平均气温在 14.0~15.0℃,年降雨量达 1 200~1 300 mm,降雨集中在 5—8 月。植被为常绿阔叶林及混交林,土壤多为黄壤及石灰土。该煤矿区曾经是贵阳市重要产煤区,2000 年底通过煤矿整治后小煤矿井全部关闭,但多年开采废弃的煤矸石仍露天堆放在矿井周边。通过对该区煤矸石堆场自然恢复植被(乔木林、灌木林、草丛)的群落组成和物种多样性进行调查,选择优势植物分别为马尾松、光皮桦、类芦的煤矸石堆场进行样地设置,各种植被类型的物种组成及优势种详见表 1。

表 1 调查区不同植被恢复类型下煤矸石堆场的物种组成

植被类型	植被覆盖率/%	主要树种及物种	优势物种
乔木林	80~90	马尾松 (<i>Pinus massoniana</i>)、油茶 (<i>Camellia oleifera</i>)、火棘 (<i>Pyracantha fortuneana</i>)	马尾松,一般高度为 1.5~2.0 m
灌木林	85~90	光皮桦 (<i>Betula luminifera</i>)、白栗 (<i>Castanopsis delavayi</i>)、青冈 (<i>Cyclobalanopsis argyrotricha</i>)、刺槐 (<i>Robinia pseudoacacia</i>)	光皮桦,一般高度为 1.0~1.5 m
草丛	85~90	类芦 (<i>Neyraudia reynaudiana</i>)、白茅 (<i>Imperata cylindrica</i>)、毛果金星蕨 (<i>Parathelypteris chinensis</i>)、白三叶 (<i>Trifolium repens</i>)、狗牙根 (<i>Cynodon dactylon</i>)、肾蕨 (<i>Nephrolepis auriculata</i>)	类芦,一般高度为 0.5~1.0 m

1.2 煤矸石样品采集及重金属浸出试验

依据煤矸石风化程度及颗粒组成特征,分别对煤矸石堆场中上部坡面风化残积的表层(0—20 cm)煤矸石(残积型煤矸石),以及煤矸石堆场下部经季节性

流水搬运沉积在侵蚀冲沟旁的表层煤矸石(坡积型煤矸石)进行混合样品采集。在麦坪乡采集了 3 个煤矸石堆场的残积型煤矸石样品、3 个煤矸石堆场的坡积型煤矸石样品,在久安乡采集了 3 个煤矸石堆场的残

积型煤矸石样品。煤矸石样品带回实验室后进行自然风干、破碎、并研磨过 60 目筛。然后,参照《固体废物浸出毒性浸出方法—水平振荡法》(HJ/T299-2007),按照 1:10 的固液比,加入去离子水,搅拌混合均匀后静置 48 h,取上清液用 0.45 微米的滤膜过滤,采用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)测定水样中 Fe, Mn, Zn, Cr, Cu, Cd, Pb 的含量(表 2)。

1.3 煤矸石堆场地表径流样品采集

在调查区按马尾松、光皮桦、类芦 3 种植被类型,选择坡度相对一致、植被覆盖率达 80%~90%的地段,对每一种植被设置 3 块样地(20 m²),同时选择周边无植被的煤矸石堆场为对照区。在每个样地内采用无界径流小区法设置径流收集槽^[22],在植物生长旺盛期,于 2019 年 5—7 月在同一大雨条件下(自然降雨)对收集槽的径流水进行样品采集;采样时间分别是 5 月 17 日(平均降雨强度为 36 mm/h),6 月 12 日(平均降雨强度为 40 mm/h)和 7 月 21 日(平均降雨强度为 34 mm/h)。每次采样是降雨时段达到现场,雨后立即采集径流收集槽的水样,装入 2.5 kg 的塑料壶,带回实验室摇匀后量取 250 ml 水样通过 0.45 μm 滤膜过滤,采用原子吸收分光光度计测定水样中 Fe, Mn 含量,同时采用烘干法测定滤膜上的泥沙含量。

1.4 盆栽条件下煤矸石渗透水样品采集

在设置的采样区煤矸石堆场上,选取高度 100 cm 左右、生长良好的马尾松、光皮桦、类芦,在其根部开

挖深约 50 cm 后整株带土移栽到塑料桶中,分别挖取 3 株马尾松、光皮桦、类芦,同时每个采样区挖取无植被的煤矸石为对照。将装桶的马尾松、光皮桦、类芦及对照煤矸石运回盆栽场,移栽存活后在塑料桶底部设置基质渗透水收集装置,根据自然降雨情况,隔两周左右收集一次渗透水样品,在 5 月至 8 月共采集了 7 次渗透水样品。每次量取 150 ml 的渗透水用 0.45 μm 滤膜过滤,采用原子吸收分光光度计测定水样中 Fe, Mn 含量。

2 结果与分析

2.1 废弃煤矿区风化煤矸石中重金属淋溶迁移的特点

从表 2 看出,无论是原地残留的煤矸石,还是经季节性流水搬运堆积的煤矸石,煤矸石水浸液的 pH 值仍达 2.25~2.84 之间,而 7 种重金属元素含量的大小顺序为:Fe>Mn>Zn>Cu>Cr>Pb>Cd,其中 Fe, Mn 含量范围分别达 1.34~5.29 mg/L, 0.42~2.18 mg/L, 均超过了《地表水环境质量标准(GB3838-2002)》中集中式生活饮用水地表水源地补充项目标准限值(Fe 为 0.3 mg/L, Mn 为 0.1 mg/L)。此外,参照《污水综合排放标准(GB3838-2019)》中 Mn≤2.0 mg/L 的限值,其中坡积型煤矸石中 Mn 含量超过此限值。说明废弃煤矿井周边煤矸石堆场对水环境影响的主要因素是 Fe, Mn 的淋溶迁移,且坡积型煤矸石对水环境影响的程度明显大于残积型煤矸石。

表 2 废弃煤矿井周边风化煤矸石水浸液中重金属含量的变化

煤矸石 采样区	描述 统计值	pH 值	重金属含量/(mg·L ⁻¹)						
			Fe	Mn	Cr	Cu	Zn	Cd	Pb
麦坪乡残积型 煤矸石区(n=3)	最大值	2.49	1.929	0.700	0.018	0.082	0.102	0.000 7	0.001 6
	最小值	2.38	1.340	0.416	0.013	0.056	0.064	0.000 5	0.001 2
	平均值	2.42	1.640	0.586	0.016	0.070	0.080	0.000 6	0.001 4
久安乡残积型 煤矸石区(n=3)	最大值	2.84	2.838	0.827	0.019	0.091	0.139	0.000 8	0.002 2
	最小值	2.37	2.383	0.826	0.017	0.090	0.106	0.000 7	0.001 3
	平均值	2.55	2.554	0.827	0.018	0.090	0.119	0.000 8	0.001 8
麦坪乡坡积型 煤矸石区(n=3)	最大值	2.27	5.290	2.179	0.028	0.136	0.163	0.001 1	0.001 2
	最小值	2.25	5.019	1.546	0.025	0.128	0.159	0.001 0	0.000 7
	平均值	2.26	5.136	1.861	0.027	0.132	0.160	0.001 1	0.001 0
地表水Ⅲ类水体限值		6~9	≤0.3	≤0.1	≤0.05	≤1.0	≤1.0	≤0.005	≤0.05

2.2 不同类型植物生长对煤矸石中 Fe/Mn 淋溶迁移的影响

通过对盆栽条件下马尾松、光皮桦、类芦及对照(无植物)的煤矸石基质渗透水中 Fe, Mn 含量进行统计分析(每个处理 3 组重复的 7 次采样测定值),马尾

松生长煤矸石基质渗透水中 Fe, Mn 含量范围分别为 0.029~0.678 mg/L(均值 0.198), 0.043~1.175 mg/L(均值 0.345), 光皮桦生长基质渗透水中 Fe, Mn 含量范围分别是 0.044~0.958 mg/L(均值 0.309), 0.015~1.102 mg/L(均值 0.332), 而类芦生

长基质渗透水中 Fe, Mn 含量范围分别为 0.042~0.916 mg/L(均值 0.253), 0.049~0.811 mg/L(均值 0.333)。

从 3 种植物种类煤矸石基质渗透水中 Fe, Mn 平均含量(每次采样 3 个重复的平均值)的变化趋势来看(图 1), 植物生长后煤矸石基质渗透水中 Fe, Mn

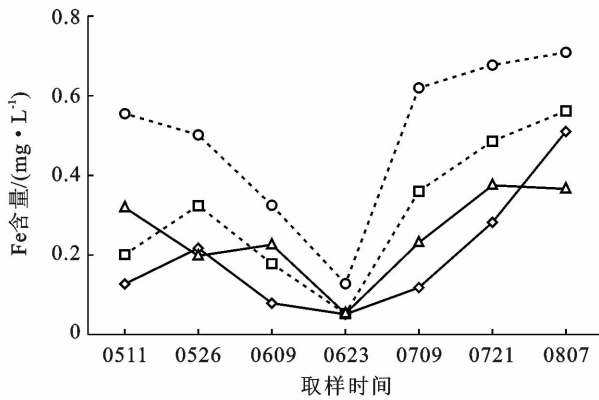
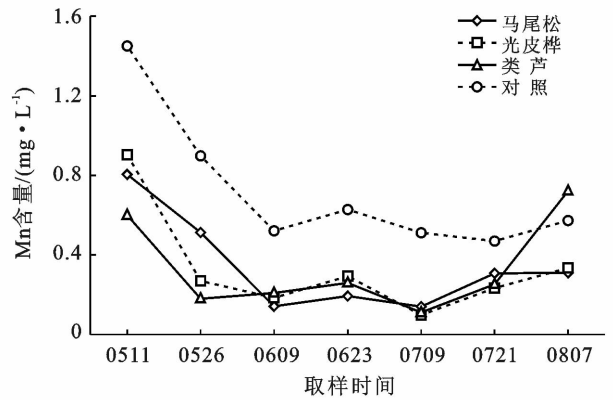


图 1 煤矸石基质渗透水中 Fe, Mn 含量的变化

的含量均出现明显的降低, 马尾松、光皮桦及类芦生长的煤矸石基质渗透水中 Fe 的平均含量分别比对照降低 60.56%, 38.44%, 49.60%, 而 Mn 的平均含量分别比对照减少 52.22%, 54.02%, 53.88%; 其中, 马尾松生长的基质渗透水中 Fe 的平均含量分别比光皮桦及类芦低 56.06%, 27.87%。



2.3 不同植被类型对煤矸石堆场地表径流中 Fe/Mn 含量的影响及其作用效果

通过对 3 次自然降雨(大雨)条件下马尾松幼林、阔叶树幼林、类芦草丛(3 个重复样地)煤矸石堆场的地表径流样品测定值进行统计分析(表 3), 马尾松幼林、阔叶树幼林、类芦草丛煤矸石堆场径流水中 Fe 的平均含量分别比裸露煤矸石堆场低 85.60%, 72.57%, 45.27%, 而 Mn 的平均含量则分别比裸露煤矸石堆场低 90.13%, 81.11%, 60.17%。从采集的全部径流样品测定值来看, 裸露煤矸石堆场地表径流中 Fe, Mn 浓度范围分别达 0.419~1.552 mg/L, 0.713~1.813 mg/L, 均超过《地表水环境质量标准(GB 3 838-2002)》中集中式生活饮用水地表水源地补充项目的标准限值(Fe 为 0.3 mg/L, Mn 为 0.1 mg/L)。但是, 马尾松幼林煤矸石堆场地表径流中 Fe, Mn 浓度范围分别在 0.034~0.162 mg/L, 0.043~0.173 mg/L, Fe 含量均未出现超标, 而 Mn 未超标率为 55.6%; 阔叶树幼林煤矸石堆场径流水中 Fe, Mn 浓度范围分别为 0.105~0.641 mg/L, 0.074~0.695 mg/L, Fe, Mn 未超标率分别为 88.9%, 33.3%; 类芦草丛煤矸石堆场径流水中 Fe, Mn 浓度范围分别为 0.131~0.714 mg/L, 0.117~0.681 mg/L, Fe, Mn 未超标率分别是 44.4%, 11.1%。可见, 煤矸石堆场恢复植物后能明显减少降雨过程中 Fe, Mn 的迁移量, 植被作用效果的大小顺序为: 马尾松幼林>阔叶树幼林>类芦草丛, 植物生长对减少煤矸石中 Fe 向水体迁移产生的环境效应大于 Mn。另一方面, 马尾

松幼林、阔叶树幼林、类芦草丛煤矸石堆场地表径流的 pH 值比裸露煤矸石堆场均出现明显的增加, 其平均提高幅度分别达 32.15%, 25.47%, 12.32%(表 3)。同时, 煤矸石堆场植被恢复后地表径流中泥沙含量出现明显的减少, 马尾松幼林、阔叶树幼林、类芦草丛煤矸石堆场径流中泥沙平均含量分别比裸露煤矸石堆场降低了 40.18%, 30.67%, 27.91%。对表 3 中全部地表径流样品进行相关分析, 煤矸石堆场地表径流中 Fe, Mn 含量与 pH 值之间存在显著的负相关(相关系数分别为 -0.789, -0.828, $p < 0.01$), 而地表径流中 Fe, Mn 含量与泥沙含量之间存在显著的正相关(相关系数分别为 0.754, 0.766, $p < 0.01$)。因而, 煤矸石堆场植被自然恢复后, 不仅通过降低径流水的酸度而减少煤矸石中矿物态 Fe, Mn 的溶解度, 同时也减少了地表径流作用下矿物颗粒态 Fe, Mn 的迁移, 对废弃煤矿区水环境质量的改善有明显的促进作用, 特别是马尾松生长。

3 讨论

3.1 不同类型植被恢复对煤矸石堆场 Fe/Mn 的淋溶迁移影响存在明显的差异性

植被自然恢复能明显的减少降雨过程中煤矸石堆场 Fe, Mn 的淋溶迁移, 其作用效果的顺序为: 马尾松幼林>阔叶树幼林>类芦草丛, 多重比较结果表明: 马尾松、光皮桦及类芦生长的煤矸石基质渗透水、煤矸石堆场地表径流水中 Fe, Mn 的含量均显著地高于无植被的对照, 3 种植物种类之间煤矸石基质渗透

水中 Fe, Mn 含量未出现显著性的差异, 但马尾松幼林煤矸石堆场地表径流水中 Fe, Mn 的含量均显著地低于类芦草丛煤矸石堆场; 这种差异主要与不同类型植被的生物量有明显的关联性; 调查区样地煤矸石堆场自然植被覆盖度均达 80%~90%, 但马尾松幼林的生物量明显大于光皮桦为主的阔叶树幼林以及类芦为主的草丛; 由于 Fe, Mn 是植物生长的必需元素, 植物生长过程中植株吸收的大量 Fe, Mn 被固定在植株体内^[23-25]。田大伦等对广西中部丘陵区的 4 个不同年龄阶段马尾松人工林内 Fe, Cu, Zn, Mn, Pb, Ni,

Cd 等 7 种微量元素的含量、积累、空间分配进行了研究, 林木各器官微量元素含量大小排序为: 根>叶>枝>皮>干, 微量元素在各器官含量大小顺序均为: Fe>Mn>Zn>Cu>Pb>Ni>Cd; 随着林龄的增加, 微量元素含量存在明显差异, 尤其以 Fe 突出; 树皮和树干的贮存量最高, 占总贮存量的 40%~46%^[23]。从本研究结果也看出(图 1), 在植物生长茂盛的 6—7 月, 马尾松、光皮桦及类芦生长的煤矸石基质渗透水中 Fe, Mn 的含量出现最低值; 说明植被恢复过程中植物吸收固定是减少煤矸石中 Fe, Mn 向水体迁移的主要原因。

表 3 不同植被类型下煤矸石堆场地表径流中泥沙含量、pH 及 Fe, Mn 含量的变化

采样时间	平均雨强/ (mm·h ⁻¹)	植被类型	泥沙含量/ (g·L ⁻¹)	pH 值	Fe 含量/ (mg·L ⁻¹)	Mn 含量/ (mg·L ⁻¹)
0517	36	马尾松幼林	1.89±0.21	6.49±0.40	0.113±0.029	0.159±0.022
		阔叶树幼林	2.06±0.19	5.91±0.80	0.124±0.017	0.354±0.298
		类芦草丛	1.92±0.22	4.42±0.44	0.639±0.125	0.579±0.091
		裸露地	2.99±0.22	4.50±0.41	0.631±0.113	1.574±0.231
0612	40	马尾松幼林	2.00±0.17	6.15±0.61	0.109±0.067	0.095±0.059
		阔叶树幼林	2.38±0.28	6.15±0.77	0.150±0.029	0.142±0.041
		类芦草丛	2.33±0.22	6.14±1.06	0.183±0.064	0.250±0.202
		裸露地	3.32±0.51	4.59±0.48	0.568±0.130	0.917±0.176
0721	34	马尾松幼林	1.96±0.10	6.34±0.35	0.093±0.018	0.095±0.059
		阔叶树幼林	2.33±0.38	5.97±0.37	0.326±0.275	0.170±0.092
		类芦草丛	2.82±0.19	5.57±0.42	0.376±0.196	0.575±0.098
		裸露地	3.47±0.58	5.30±0.42	0.989±0.489	1.036±0.210

3.2 植被自然恢复改变了煤矸石堆场表生环境, 对煤矸石中 Fe/Mn 的淋溶迁移也产生影响

植被恢复过程中树冠及枯落物的覆盖、植物根系对煤矸石中 Fe, Mn 迁移具有拦截、过滤作用, 植物生长后煤矸石堆场表面抗冲和抗蚀能力增强, 降雨引起的侵蚀作用减弱, 本研究表明, 马尾松幼林、阔叶树幼林、类芦草丛煤矸石堆场地表径流水中泥沙含量比裸露煤矸石堆场出现显著性的降低, 植被覆盖对煤矸石中矿物颗粒态 Fe, Mn 的迁移具有较大的调控作用。于桂芬等^[19]采用径流小区观测法研究了风化煤矸石山水土流失变化特征及植被恢复的关系, 结果表明, 裸露和植被稀少的矸石山边坡径流量与 30 min 雨强相关性最大, 刺槐人工林边坡径流量与 45 min 雨强相关性最大, 产沙量与径流量紧密相关; 植物根系对矸石山坡面的保护作用显著, 在相同径流冲刷强度与相同冲刷时间条件下, 植物根系丰富坡面比裸露坡面土壤抗冲性明显增强。此外, 植物根系及覆盖作用增加了煤矸石堆场表面基质的含水量以及降低了表面基质的氧化还原电位, 从而减少煤矸石中矿物颗粒态

Fe, Mn 的氧化过程。付天岭等研究不同氧化还原环境对煤矸石污染物释放的影响, 两种氧化环境下煤矸石浸出液 pH 值明显降低, 浸出液中 Fe, Mn, Cu, Zn 和 SO₄²⁻, F⁻ 多种污染物溶出数量明显增加并呈现典型的持续氧化产酸过程; 而还原环境下煤矸石浸出液的 pH 值随时间延长降低不明显, Fe, Mn, Zn 等污染物溶出数量显著低于两种氧化环境下, Fe, Mn, Cu 和 SO₄²⁻ 的释放也受到明显抑制。还原环境能有效抑制煤矸石氧化产酸及多种污染物的溶出, 且显著低于氧化环境^[26]。因此, 植物不仅通过吸收固定作用, 而且可以通过改变煤矸石堆场表面微环境, 从而减少煤矸石中 Fe, Mn 向水体的迁移。然而, 煤矸石中重金属元素的迁移与降雨量及基质含水率变化有密切的关联性^[15-17], 降雨强度的变化能改变径流水与煤矸石表层矿物颗粒的作用时间, 从而影响煤矸石中 Fe, Mn 的溶出量及迁移量, 在不同降雨条件下植被对煤矸石中 Fe, Mn 淋溶迁移的影响因素是多方面的, 植被恢复对煤矸石中 Fe, Mn 迁移规律的影响及其生态效应还需做进一步的研究。

4 结论

植被自然恢复能明显地减少煤矸石堆场 Fe, Mn 的淋溶迁移, 马尾松、光皮桦、类芦生长下煤矸石基质渗透水和煤矸石堆场地表径流水中 Fe, Mn 含量均显著地低于无植物生长的裸露煤矸石, 马尾松幼林、阔叶树幼林、类芦草丛煤矸石堆场地表径流水中 Fe 的平均含量分别比裸露煤矸石堆场降低 85.60%, 72.57% 和 45.27%, 而 Mn 的平均含量则分别比裸露煤矸石堆场减少 90.13%, 81.11%, 60.17%。此外, 植被自然恢复提高了地表覆盖度, 煤矸石堆场地表径流水的 pH 值出现明显的增加, 而地表径流中泥沙含量出现显著的降低; 与裸露煤矸石堆场相比, 马尾松幼林、阔叶树幼林、类芦草丛煤矸石堆场地表径流水的 pH 值分别平均提高了 32.15%, 25.47% 和 12.32%, 煤矸石堆场地表径流中泥沙含量则分别平均降低了 40.18%, 30.67%, 27.91%。植被自然恢复后不仅能明显地降低煤矸石中溶解态 Fe, Mn 的淋溶迁移, 同时也显著地减少了煤矸石中矿物颗粒态 Fe, Mn 向水体的迁移, 这种植被作用效果顺序为: 马尾松幼林 > 阔叶树幼林 > 类芦草丛, 而且植物生长对减少煤矸石中 Fe 向水体迁移产生的环境效应大于 Mn。植被自然恢复有助于减少煤矸石堆场 Fe, Mn 的迁移量及其对周边水环境质量的影响, 特别是马尾松生长。

[参 考 文 献]

- [1] 罗海波, 刘方, 邓为难, 等. 贵州省煤矸石堆场径流污染特征及其对溪流水质的影响[J]. 水土保持通报, 2010, 30(4): 148-151.
- [2] 彭立, 杜勇立, 黄满红, 等. 煤矸石堆场对周围水环境中的污染分析研究[J]. 环境科学与管理, 2014, 39(10): 34-37.
- [3] 王萍, 刘静, 朱健, 等. 贵州省煤矿区污染农田重金属累积与迁移对生态环境的影响[J]. 湖北农业科学, 2019, 58(21): 68-72.
- [4] 许丽, 丰菲, 刘莹, 等. 煤矸石山植物物种多样性与土壤化学因子的关系: 以灵武矿区生态修复初期为例[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(4): 97-104.
- [5] 王锐, 李希来, 马钰, 等. 青海圣雄煤矿煤矸石堆积对周边高寒湿地植被和土壤的影响[J]. 土壤, 2020, 52(2): 386-393.
- [6] 张津裕, 蔡俊林, 李成文, 等. 核桃岩沟南区煤矸石堆场生态修复实践[J]. 能源与环保, 2020, 42(6): 25-29.
- [7] 金立群, 李希来, 孙华方, 等. 不同恢复年限对高寒露天煤矿区渣山植被和土壤特性的影响[J]. 生态学杂志, 2019, 38(1): 121-128.
- [8] 魏怀建, 李玉成, 王宁, 等. 不同植被恢复模式下煤矸石充填复垦土壤物理性质与有机无机复合体的关系[J]. 水土保持通报, 2015, 35(6): 207-212.
- [9] 郑永红, 张治国, 胡友彪, 等. 淮南矿区煤矸石风化物特性及有机碳分布特征[J]. 水土保持通报, 2014, 34(5): 18-24.
- [10] 罗有发, 吴永贵, 付天岭, 等. 类芦植被对煤矸石堆场特征金属的富集特征及生物有效性的影响[J]. 地球与环境, 2016, 44(3): 329-335.
- [11] 李文, 任晓旭, 蔡体久. 不同排矸年限煤矸石废弃地养分含量及重金属污染评价[J]. 林业科学, 2011, 47(6): 162-166.
- [12] 闫宝环, 李凯荣, 时亚坤. 铜川市三里洞煤矸石堆积地风化土壤重金属污染及植物富集特征[J]. 水土保持通报, 2012, 32(3): 47-51.
- [13] 王虎, 吴永贵, 付天岭, 等. 不同类型天然碳酸盐矿物对风化煤矸石污染物释放的影响[J]. 环境污染与防治, 2015, 37(4): 35-41.
- [14] 陆海波, 刘方, 朱健, 等. 煤矸石堆场自然植被优势植物根际微域有效态重金属含量[J]. 生态学杂志, 2012, 31(12): 3207-3212.
- [15] 冯晶晶, 张成梁, 刘治辛, 等. 自然降水条件下煤矸石坡土壤含水量及径流变化[J]. 中国水土保持科学, 2016, 14(4): 60-67.
- [16] 冯慧敏, 王电龙, 胡振华. 风化煤矸石坡面水土流失规律模拟[J]. 中国水土保持科学, 2013, 11(2): 39-44.
- [17] 宋楠, 张成梁, 张洪江, 等. 煤矸石山坡面不同覆盖的水土保持效益分析[J]. 水土保持通报, 2013, 33(1): 73-77.
- [18] 王丽艳, 张成梁, 韩有志, 等. 煤矸石山不同植被恢复模式对土壤侵蚀和养分流失的影响[J]. 中国水土保持科学, 2011, 9(2): 93-99.
- [19] 于桂芬, 吴祥云, 杨亚平, 等. 潞安矿区煤矸石山水土流失特征及植被恢复关键技术[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2011, 30(2): 244-246.
- [20] 赵晓燕, 刘方. 贵州中部煤矸石堆场废弃地自然植被的群落组成及物种多样性[J]. 环境科学导刊, 2012, 31(4): 5-9.
- [21] 付天岭. 植被参与对煤矸石表生地球化学过程的影响[D]. 贵州 贵阳: 贵州大学, 2015.
- [22] Robert J L. Measurement methods for soil erosion [J]. Progress in Physical Geography, 1989, 20(2): 5-9.
- [23] 田大伦, 项文化, 康文星. 马尾松人工林微量元素生物循环的研究[J]. 林业科学, 2003, 39(4): 1-8.
- [24] 方晰, 田大伦, 项文化, 等. 广西马尾松人工林对重金属元素的吸收、累积及动态[J]. 广西植物, 2004, 24(5): 437-442.
- [25] 符娟林, 张履勤, 章明奎. 种植马尾松对污染土壤重金属移动性的影响[J]. 浙江林业科技, 2005, 25(6): 6-10.
- [26] 付天岭, 吴永贵, 欧莉莎, 等. 不同氧化还原环境对煤矸石污染物质释放的影响[J]. 环境科学学报, 2012, 32(10): 2476-2482.