

# 贵州省煤矸石堆场径流污染特征及其对溪流水质的影响

罗海波, 刘方, 邓为难, 张玲, 李准

(1. 贵州大学 环境与资源研究所, 贵州 贵阳 550025; 2. 贵州大学 资源与环境工程学院, 贵州 贵阳 55003)

**摘要:** 通过对贵州省中部关闭煤矿区煤矸石堆场地表径流及其沉积物进行样品收集与分析, 探讨了降雨—径流下煤矸石中污染物的迁移规律及其对周边地表水体质量的影响。结果表明, 煤矸石堆场地表径流水的 pH 值变化达 2.64~6.38, 污染物以  $\text{SO}_4^{2-}$ , Fe 和 Mn 为主, 其浓度变化受煤矸石类型及降雨强度的影响。径流沉积物在静置或扰动下浸水 3~28 d 后, 上覆水的 pH 达 2.78~3.71;  $\text{SO}_4^{2-}$ , Fe, Mn 的浓度变化分别为 27~160 mg/L, 0.3~3.9 mg/L, 0.6~2.8 mg/L。降雨—径流下关闭煤矿区煤矸石堆场的地表径流对周边水体质量的影响主要表现在水体酸化及 Fe, Mn 污染严重。

**关键词:** 煤矿区; 矸石堆场; 地表径流; 污染特征; 水质

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2010)04-0148-04

中图分类号: S157.1, X52

## Pollution Characteristics of Surface Runoff from Gangue Yards in Guizhou Province and Its Impacts on Water Quality of Rivers

LUO Hai-bo, LIU Fang, DENG Wei-nan, ZHANG Ling, LI Zhun

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

2. College of Resources and Environmental Engineering, Guizhou University, Guiyang, Guizhou 550003, China)

**Abstract:** Water and sediment samples from surface runoff in the coal mine areas of Guizhou Province were collected and analyzed to investigate pollutant migration from gangues and its impacts on water quality of rivers. Results showed that the pH value of runoff was 2.64~6.38 and the main pollutants in runoff were  $\text{SO}_4^{2-}$ , Fe, and Mn. Their concentrations were affected by gangue type and rainfall intensity. After runoff sediment was immersed for 3~28 days, the pH value of upper water reached 2.78~3.71 and the contents of  $\text{SO}_4^{2-}$ , Fe, and Mn reached 27~160, 0.3~3.9, 0.6~2.8 mg/L, respectively. The impacts of surface runoff on water quality of rivers were the acidification of water bodies and serious pollution of Fe and Mn.

**Keywords:** coal mine area; gangue yard; surface runoff; pollution characteristic; water quality

贵州省已查明的煤炭资源保有储量为  $5.04 \times 10^{10}$  t, 居全国第 5 位。该省含煤面积占总面积的 40% 以上, 除东部地区外, 省内各地多有产出, 主要集中于西部的盘县、水城、六枝和织金、纳雍、大方等县, 其次在中部的贵阳—安顺地区。煤是贵州省最重要的能源矿产, 在发展贵州省经济中具有显著的作用<sup>[1]</sup>。但是, 该省大部分煤矿含硫量较高, 含硫多在 1%~4%。煤矿开采过程中产生大量的煤矸石, 由于煤矸石含有  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  以及铁、锰、硫等常量元素, 还有铅、锡、汞、砷、铬等微量重金属元素, 在自然的风化过程中一些有害有毒元素会不断的释放出来, 在大气降水的冲刷和淋溶作用下随地表径流进入水体, 对

周边溪流水质造成严重污染, 并通过食物链等途径直接或间接地危害人类健康<sup>[28]</sup>。该省山区已关闭大量的小煤矿, 但大量矸石堆置地表, 在自然风化和降雨作用下, 矸石中污染元素不断析出, 已对周边的溪流及农田产生明显的污染, 成为当地的主要环境问题<sup>[7]</sup>。研究大气降水—径流过程中煤矸石堆场主要污染元素的迁移特征, 有助于人们了解关闭煤矿区煤矸石堆放过程中污染物释放及迁移对水环境质量产生的影响, 探讨煤矸石堆场污染控制的生态技术。因此, 本研究选择贵州省中部典型的关闭煤矿区, 采用无界径流小区法设置试验区, 研究煤矸石堆场地表径流中主要污染物含量的变化及其对周边地表水质

收稿日期: 2009-10-10

修回日期: 2010-01-27

资助项目: 国家自然科学基金(973)计划前期研究专项“喀斯特矿山环境演变与生态安全评价及预警方法的研究”(2008CB417209); 贵州省自然科学基金[黔科合J字(2007)2152]; 贵阳市科技局两湖一库研究专项(2009-3-041); 贵州大学博士启动基金(2006z5102)

作者简介: 罗海波(1973—), 男(苗族), 贵州省思南县人, 博士, 副教授, 主要研究方向为生态修复与污染控制。E-mail: hbluo@126.com。

量的影响,为制订合理的污染治理措施以减少煤矸石中污染物向水体的迁移及改善煤矸石周边水环境质量提供科学依据。

## 1 试验区概况与研究方法

### 1.1 试验区概况

贵州省中部地区属于中亚热带气候类型,年降雨量一般在 1 100~1 200 mm,但多集中 4—8 月份。该区地貌以低山、丘陵为主,土壤多为碳酸盐岩石发育的石灰土以及砂页岩发育的黄壤,林地生长的主要树种有马尾松、油茶以及阔叶树,旱地主要种植作物为玉米、小麦和烤烟等。调查煤矿区所在地为贵阳市花溪区麦坪乡,麦坪乡是贵阳市的重要产煤区,历史上曾拥有大小煤窑 200 余口,到 1996 年该乡通过煤窑整治后还有 62 口。目前,麦坪乡仅存 22 口符合国家要求的煤井,大部分煤窑被关闭。由于煤矿经过多年开采,废弃的煤矸石堆积成山,不仅占用大量的土地,破坏局部地区的生态环境。同时,煤矿区植被覆盖率低,水土流失较严重,煤矸石堆场的排水及地表径流对周边水环境产生严重的污染。

### 1.2 地表径流水样及沉积物的采集

为了使取得的样品具有代表性,在关闭煤矿区内选择煤矸石堆场较多的小流域,从井口附近沿流水方向,按一定的距离设置观察点。在典型的煤矸石堆场上,选择有代表性的地段,采用无界径流小区法设置径流收集槽<sup>[9]</sup>,在同一时间的自然降雨下对不同类型的煤矸石堆场(6个)进行地表径流样品收集,采样时间分别于 2008 年 5 月 15 日(大雨,降雨强度为 40~50 mm/h)和 8 月 10 日(中雨,降雨强度为 20~30 mm/h)。同时,在径流收集槽中收集表层 0—5 cm 干涸的沉积物混合样品。沉积物带回到实验室后,自然风干,然后用研钵碾碎过 2 mm 筛,密封保存待用。

### 1.3 沉积物污染物释放试验

采用的方法是在静置和扰动下沉积物浸水一定时间后,测定沉积物中污染物释放入上层水体的数量。所谓静置释放试验是指在静水条件下进行的释放试验,而扰动释放试验是模拟水体处于一种流动状态下的释放试验,具体操作为每天定时把装有沉积物和水三角瓶放在振荡器上振荡 5 min,振荡强度相同。静置和扰动试验都分别在体积为 250 ml 的三角瓶中进行。

试验所用的水样为蒸馏水。试验前先测定所用沉积物的含水率,试验进行时分别取 20 g 的样品和 200 ml 的蒸馏水,使沉积物与水样按 1:10 的体积进行,试验开始后,第 3, 7, 14, 28 d,分别对沉积物上

层的溶液进行过滤,得到待测水样,对水样的 pH, 电导率,  $\text{SO}_4^{2-}$ , Fe, Mn 等项目进行测定。

### 1.4 污染物浓度的测定方法

量取 200 ml 径流液离心后通过 0.45  $\mu\text{m}$  滤膜,测定过滤后水样污染物浓度。同时,测定沉积物的上层溶液。按国标分析方法(GB3838-2002)对水样进行测定<sup>[10]</sup>,即 pH 采用玻璃电极法测定,电导率采用电导率仪法测定,  $\text{SO}_4^{2-}$  采用络酸钡比色法测定, Fe 采用邻菲罗啉分光光度法测定, Mn 采用高碘酸钾氧化光度法测定。

## 2 结果与分析

### 2.1 煤矸石堆场地表径流中溶解态污染物浓度变化

在天然降雨量较大的条件下,煤矸石堆场地表径流水中主要污染物的浓度出现明显的差异。煤矸石堆场地表径流水的 pH 值变化范围达 2.64~6.38,  $\text{SO}_4^{2-}$  浓度变化范围达 25~690 mg/L, Fe 和 Mn 浓度的变化范围分别为 0.10~74.5 mg/L, 0.97~38.8 mg/L(表 1)。说明关闭煤矿区煤矸石堆场地表径流水具有低 pH 值和高  $\text{SO}_4^{2-}$ , Fe, Mn 含量的特点。

表 1 不同类型煤矸石堆场地表径流中溶解态污染物浓度变化

时间	类型	地形	pH 值	污染物浓度/( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )		
				$\text{SO}_4^{2-}$	Fe	Mn
5 月 大雨	泥质煤矸石	洼地	2.92	330	27.90	38.8
	泥质煤矸石	沟谷	3.50	270	1.00	6.6
	砂质煤矸石	沟谷	5.80	144	2.10	1.1
	砂质煤矸石	坡地	4.14	90	0.40	3.6
	煤矸石夹土	坡地	6.38	65	0.25	3.0
	煤矸石夹土	坡地	6.78	12	0.03	2.0
8 月 中雨	泥质煤矸石	洼地	2.64	690	74.50	13.0
	泥质煤矸石	沟谷	3.70	580	3.10	6.6
	砂质煤矸石	沟谷	6.04	381	2.30	1.9
	砂质煤矸石	坡地	4.40	376	2.20	4.6
	煤矸石夹土	坡地	4.86	25	0.10	4.0
	煤矸石夹土	坡地	5.09	20	0.04	1.6

从表 1 看出,煤矸石堆场地表径流中  $\text{SO}_4^{2-}$ , Fe 和 Mn 含量变化主要受煤矸石的类型及降雨强度的影响,地表径流水中  $\text{SO}_4^{2-}$ , Fe 和 Mn 含量的大小顺序为:泥质型煤矸石>砂质型煤矸石>煤矸石夹土。泥质型煤矸石以泥岩、炭质泥岩为主体,煤矸石组成物质主要为高岭石、伊利石、煤粒、黄铁矿等,在自然条件下容易风化,可以释放出更多的具有化学活性的有害元素,在降雨—径流下使煤矸石中大量的  $\text{SO}_4^{2-}$ , Fe 和 Mn 迁移进入水体。砂质型煤矸石以粉砂岩、碳质页岩主体,煤矸石组成物质主要为石英、高岭石、

长石、细煤块、黄铁矿等,风化过程相对缓慢,因而煤矸石中  $\text{SO}_4^{2-}$ , Fe 和 Mn 的释放量相对较少。可见,煤矸石类型是直接地表径流中溶解态  $\text{SO}_4^{2-}$ , Fe 和 Mn 含量的重要因素,煤矸石中矿物的氧化作用及雨水的淋溶作用是煤矸石污染物释放与迁移的重要过程。此外,降雨强度也明显影响煤矸石污染物的释放与迁移,低强度降雨增加了水—矸石的接触时间,有利于淋溶过程的发生,从而促进煤矸石中水溶态污染物向水体的迁移,增加了地表径流中水溶态污染物的含量。

由此可见,减少煤矸石堆场地表径流中  $\text{SO}_4^{2-}$ , Fe 和 Mn 向水体的迁移,是控制煤矸石污染的重要途径。近期研究表明<sup>[11-12]</sup>,在煤矸石山人工构建以植物为主的生态系统,利用植物改良和保持煤矸石及其

风化物,达到吸附有害物质,减少地表侵蚀与冲刷,改善煤矸石山的生态环境及周边水环境的质量,从而减少煤矸石污染物迁移的生态风险。但是,由于不同地区采用的植物品种及种植方式不同,其作用大小可能存在明显差异,还需要进行深入的研究。

## 2.2 降雨—径流下煤矸石污染物迁移对周边水体质量的影响

关闭煤矿周围的溪流来水主要是地表径流,其水质与径流水质量密切相关。由表 2 可见,关闭煤矿周围的溪流水体中污染物浓度与离煤矿井口距离有关。在煤矿区小流域内,离井口距离近,水体的 pH 值低; $\text{SO}_4^{2-}$ , Fe, Mn 的浓度高。随着距离的增加,水体的 pH 值逐渐增加,电导率及  $\text{SO}_4^{2-}$ , Fe, Mn 浓度也不断下降。

表 2 雨季煤矸石堆场周边地表水体水化学指标值变化

地点	pH 值	电导率/( $\mu\text{s} \cdot \text{cm}^{-1}$ )	$\text{SO}_4^{2-}$ /( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	Fe/( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	Mn/( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )
离井口 30 m 处溪沟	2.46	2 830	950	61.90	27.4
离井口 50 m 处溪沟	2.70	2 432	780	86.40	12.8
离井口 80 m 处溪沟	2.58	1 999	580	54.80	14.5
离井口 90 m 处拦截坝	2.82	1 775	387	36.20	11.6
离井口 100 m 稻田	3.73	497	47	0.25	11.0
离井口 350 m 溪沟	6.21	82	15	0.02	1.2
离井口 300 m 稻田	5.91	103	18	0.04	1.4
离井口 400 m 未受污染溪沟	6.88	82	12	0.01	0.2

以《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( $\text{SO}_4^{2-}$  为 250 mg/L, Fe 为 0.3 mg/L, Mn 为 0.1 mg/L)来进行评价。在关闭煤矿井口周围 100 m 范围内,溪流水体的 pH 值达 2.46~2.82,  $\text{SO}_4^{2-}$  的浓度达 387~950 mg/L, 超过了标准限值的 0.5~2.8 倍; Fe 和 Mn 的浓度分别为 32.6~86.4 mg/L, 11.6~27.4 mg/L, 均超过标准限值的 108~270 倍。受污染流水的影响,稻田水质也受到一定程度的污染,水体的 pH 值达 3.73, Mn 的浓度达 11.0 mg/L, 超过了标准限值的 110 倍。在距井口 300 m 外, Mn 的浓度仍超过标准限值的 10 倍。说明关闭煤矿区煤矸石堆场地表径流污染物迁移对附近水体会产生明显的污染。

## 2.3 煤矸石堆场径流沉积物中污染物释放对水质的影响

由表 3 可以看出,径流沉积物浸水 3~28 d(静置或扰动)后,其上覆水的污染物浓度也发生明显变化。在浸水一周前, pH 值达 2.88~3.47,  $\text{SO}_4^{2-}$  的浓度变化达 20~130 mg/L; Fe 和 Mn 浓度变化分别达 0.15~2.4 mg/L, 0.4~1.5 mg/L。浸水两周后沉积物上覆水的 pH 值达 2.78~3.71,  $\text{SO}_4^{2-}$  的浓度变化达 45

~167 mg/L; Fe 和 Mn 的浓度变化分别达 0.8~3.9 mg/L, 1.8~2.8 mg/L。可见,随着时间的延长,沉积物中  $\text{SO}_4^{2-}$ , Fe, Mn 不断被释放,特别是 Fe 和 Mn。因此,沉积物上覆水酸性增强,污染强度增加。

以《地表水环境质量标准(GB3838-2002)》为评价标准,静置和扰动条件下沉积物上覆水的 pH 值范围远超出地表水环境质量标准,沉积物上覆水中  $\text{SO}_4^{2-}$  的浓度范围低于标准值;但 Fe 和 Mn 浓度远超过标准值;浸水一周前, Fe 的浓度超过标准值 2~8 倍, Mn 的浓度超过标准值 4~15 倍;浸水两周后 Fe 的浓度超过标准值 3~10 倍, Mn 的浓度超过标准值 18~28 倍。因此,径流沉积物在下次降雨或积水的条件下,其 Fe 和 Mn 的释放对上覆水质也产生明显的影响。

## 3 结论

(1) 关闭煤矿区煤矸石堆场地表径流的 pH 值变化范围达 2.64~6.38, 主要污染物以  $\text{SO}_4^{2-}$ , Fe, Mn 为主;其中  $\text{SO}_4^{2-}$  含量变化范围达 25~690 mg/L, 水溶态 Fe 和 Mn 含量的变化范围分别为 0.10~74.5 mg/L, 0.97~38.8 mg/L; 这种变化主要是由于煤矸石类型及降雨强度的影响。

表3 静置和扰动条件下沉积物上覆水中水化学指标值的变化

类型	天数/d	pH 值		电导率/( $\mu\text{s} \cdot \text{cm}^{-1}$ )		$\text{SO}_4^{2-}$ / ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )		$\text{Fe}$ / ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )		$\text{Mn}$ / ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	
		扰动	静置	扰动	静置	扰动	静置	扰动	静置	扰动	静置
泥质沉积物	3	2.94	2.95	804	693	120	92	1.4	1.6	1.0	0.4
	7	2.97	2.88	852	856	130	120	2.5	1.7	1.5	1.4
	14	2.86	2.90	943	882	145	152	2.0	2.5	2.0	2.2
	28	2.84	2.78	1 054	1 100	160	167	3.9	3.6	1.8	2.2
	平均值	2.90	2.88	913	883	139	133	2.4	2.3	1.6	1.5
砂质沉积物	3	3.38	3.47	239	206	27	20	0.3	0.2	0.6	1.2
	7	3.32	3.42	284	262	35	30	0.8	0.6	1.2	0.6
	14	3.24	3.28	358	347	47	45	1.2	0.8	2.8	2.6
	28	3.26	3.71	412	435	55	57	1.3	1.4	2.2	2.6
	平均值	3.30	3.47	323	312	41	38	0.9	0.7	1.7	1.7

(2) 受煤矸石堆场地表径流的影响, 废弃煤矿井周围 100 m 范围内, 溪流水体的 pH 值达 2.46~2.82,  $\text{SO}_4^{2-}$  的浓度超过了集中式生活饮用水地表水源地补充项目标准限值的 0.5~2.8 倍; Fe 和 Mn 浓度超过了标准限值的 108~270 倍。随着离井口距离的增加, 污染物的浓度逐渐下降。

(3) 径流沉积物淹水 3~28 d 后, 上覆水体的 pH 值达 2.78~3.71,  $\text{SO}_4^{2-}$  的浓度变化范围达 27~160 mg/L; Fe 和 Mn 的浓度变化范围分别达 0.3~3.9 mg/L, 0.6~2.8 mg/L; Fe 浓度超过标准限值的 2~10 倍, Mn 浓度超过标准限值的 4~28 倍。径流沉积物 Fe 和 Mn 的释放对上覆水质也产生明显的影响。

#### [ 参 考 文 献 ]

- [1] 韦天娇. 论贵州煤矿的资源优势及开发战略[J]. 贵州地质, 1996, 13(1): 93-97.
- [2] 岳梅, 赵峰华, 任德胎. 煤矿酸性水水化学特征及其环境地球化学信息研究[J]. 煤田地质与勘探, 2004, 32(3): 46-49.
- [3] 王辉, 郝启勇, 尹儿琴, 等. 煤矸石的淋溶、浸泡对水环境的污染研究[J]. 中国煤炭地质, 2006, 18(2): 43-45.
- [4] 郝启勇, 尹儿琴, 刘波, 等. 不同类型煤矸石中微量元素含量的探讨[J]. 中国煤炭地质, 2008, 20(8): 23-25.
- [5] 武强, 董东林. 煤矿开采诱发的水环境问题研究[J]. 中国矿业大学学报, 2002, 31(1): 19-21.
- [6] 杨伟华, 沈士德. 酸性矿井水对地下水和地表水的影响[J]. 煤矿环境保护, 1999, 13(3): 15-16.
- [7] Dang Zhi, Liu Congqiang, Haigh M J. Mobility of heavy metals associated with the natural weathering of coal mine spoils [J]. Environmental Pollution, 2002, 18(3): 419-426.
- [8] Carlson C L, Carlson C A. Impacts of coal pile leachate on a forested wetland in South Carolina [J]. Water, Air & Soil Pollution, 1994, 72(14): 89-109.
- [9] Robert J L. Measurement methods for soil erosion [J]. Frog. Phys. Gmg., 1989, 20(2): 5-9.
- [10] 国家环保局. 水和废水监测分析方法 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [11] 胡振琪, 魏忠义, 秦萍. 矿山复垦土壤重构的概念与方法 [J]. 土壤, 2005, 37(1): 8-12.
- [12] 王伟, 张洪江, 张成梁, 等. 煤矸石山植被恢复影响因子初探 [J]. 水土保持通报, 2008, 28(2): 147-152.