

淮南矿区煤矸石风化物特性及有机碳分布特征

郑永红¹, 张治国^{1,2}, 胡友彪¹, 姚多喜¹, 陈孝杨¹

(1. 安徽理工大学 地球与环境学院, 安徽 淮南 232001; 2. 安徽理工大学 安徽省矿山地质灾害防治重点实验室, 安徽 淮南 232001)

摘要:以淮南矿区潘一矿煤矸石山为研究对象,通过对煤矸石风化物的理化特性、电镜扫描(SEM)、能谱(EDS)和总有机碳(TOC)含量分析,初步研究了煤矸石风化物有机碳分布和释放规律,以及煤矸石山堆积淋溶作用对周边土壤溶解性有机碳(DOC)含量的影响。结果表明,从山顶、山腰到山脚煤矸石风化物中的总有机碳(TOC)含量依次减小,随着采样深度的增加总有机碳(TOC)含量逐渐变大。煤矸石风化物中总有机碳含量与煤矸石风化物粒径大小呈正相关,与煤矸石风化物的风化程度成负相关。不同粒径煤矸石风化物淋滤液中溶解性有机碳(DOC)的含量随着淋溶时间增大而减小,在 96 h 淋滤液中溶解性有机碳含量趋于稳定,且值较为接近。距离山脚 2~100 m 内,随着采样距离的增加土壤中溶解性有机碳含量(DOC)呈减少趋势。在距离煤矸石山 80~100 m 处土壤溶解性有机碳含量接近正常农田土壤含量。

关键词:煤矸石风化物; 粒径; 总有机碳; 溶解性有机碳; 淋溶

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2014)05-0018-07

中图分类号: TD88

DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2014.05.011

Properties and Organic Carbon Distribution of Weathered Coal Gangue in Huainan Mining Area

ZHENG Yong-hong¹, ZHANG Zhi-guo^{1,2}, HU You-biao¹, YAO Duo-xi¹, CHEN Xiao-yang¹

(1. School of Earth and Environment, Anhui University of Science and Technology, Huainan, Anhui 232001, China; 2. Key Laboratory of Mine Geological Hazard and Control, Anhui Province, Anhui University of Science and Technology, Huainan, Anhui 232001, China)

Abstract: Taking coal gangue mountain of Panyi coal mine in Huainan mining area as the study object, through the analysis of physicochemical properties, scanning electron microscope(SEM), energy dispersive spectrometry(EDS), total organic carbon(TOC) contents of weathered coal gangue, the authors preliminarily studied the distribution and release of organic carbon from weathered coal gangue, and the content of dissolved organic carbon(DOC) in soil, which was affected by accumulation and eluviation of coal gangue mountain. The results showed that the contents of TOC in weathered coal gangue decreased from the top of mountain to the mountainside, and to the foot, and with the increasing depth of sampling, the contents became higher. The contents of TOC in weathered coal gangue was positively related with the particle size, and negatively related with the weathering degree of weathered coal gangue. With the increase of time of leaching time, the soluble amounts of DOC leached from weathered coal gangue of different particle size reduced. In the 96 hours leachate, the soluble amounts of DOC tended to be stable, and the values were comparatively similar. Within the distance of 2~100 m to the foot of coal gangue mountain, the increasing distance of sampling, the contents of DOC in soil tended to decrease, and within the distance of 80~100 m to coal gangue mountain, the contents of DOC in soil were similar to that in normal farmland.

Keywords: weathered coal gangue; particle size; total organic carbon; dissolved organic carbon; leaching

土壤是陆地生态系统的核心,是联接大气圈、水圈、生物圈以及岩石圈的纽带^[1]。全球绝大多数的碳是以有机质的形态存在于土壤中,土壤碳库是陆地生态系统中最大的碳库。由于土壤有机碳贮量的巨大

库容,其较小幅度的变化就可能影响到碳向大气的排放,以温室效应影响全球气候变化,同时也影响到陆地植被的营养供应,进而对陆地生态系统的分布、组成、结构和功能产生深刻影响^[2]。

收稿日期:2014-06-04

修回日期:2014-07-26

资助项目:国家自然科学基金项目“基于黄铁矿氧化煤矸石填充复垦土壤 CO₂ 运移机理”(51274013);安徽省高校省级优秀人才基金重点项目“粉煤灰制备沸石去除水环境中内分泌干扰物的技术研究”(2013SQRL028ZD)

作者简介:郑永红(1979—),女(汉族),新疆维吾尔自治区乌鲁木齐市人,博士研究生,讲师,研究方向为土壤污染与防治。E-mail:zyhaust@163.com。

煤矸石是煤矿排放量最大的固体废物,也是中国工业固体废物中产生量、累计量、占地面积最大的工业固体废物,约占全国工业固体废物的 20% 以上^[3]。淮南矿区煤矿开采已逾百年,历史上煤矸石最大堆存量近 4.00×10^7 t,截止 2007 年底,矿区现存煤矸石堆场 19 个,矸石存量减少到 2.20×10^7 t,总占地面积 81.67 hm^2 。主要分布在谢桥矿、张集矿、潘一矿。预计 2020 年存量将达到 3.00×10^7 t,占地面积约 186.61 hm^2 。

淮南矿区煤矸石山露天堆放,风化和淋溶作用较为明显,在煤矸石山表层和山脚风化物已出现风化成土现象。目前国内外对煤矸石研究主要集中在重金属污染、微量元素淋溶、煤矸石风化物水分和盐分特征、理化特性等方面^[4-10],而对于煤矸石风化物中有机碳分布、释放和迁移规律研究较少。本研究选择淮南矿区潘一矿煤矸石山为研究对象,实地采样,拟开展煤矸石风化物中有机碳的系统研究,以期对煤矸石充填复垦土地,恢复农业生态环境治理和煤矸石风化物的综合利用奠定基础。

1 研究方法

1.1 研究区域概况

潘一矿煤矸石山位于潘一矿东侧约 1.0 km 处,地处 $116^{\circ}50'E$, $32^{\circ}47'N$,属暖温带半湿润大陆性季风气候区,年平均气温 15.3°C ,年平均降雨量 932 mm,6—9 月降雨量占全年降雨量的 55%。春季次之,秋季较少,冬季最少。周边土壤类型为砂姜黄土,成土母质为黄土性古河流沉积物^[11]。

潘一矿煤矸石山坡度为 $9^{\circ} \sim 52^{\circ}$,平均为 36° ,平均高程为 21.95 m,最高位 70.06 m,煤矸石历年堆存量为 $784\ 173.4 \text{ m}^3$,占地面积 $67\ 607 \text{ m}^2$ 。

潘一矿煤矸石山 2000 年左右停止排矸,露天堆放近 20 a。在煤矸石山进行现场勘查和煤矸石山不同深度温度测试发现,煤矸石山以碳质页岩、泥岩和碳质砂岩为主,内部最高温度小于 70°C 。据文献^[12-17]报道,淮南矿区各煤层全硫含量算数平均值小于 1%,属低硫煤,在淮南矿区也尚未发现有硫铁矿石。查阅矿区资料,也未发现淮南矿区堆存数年的矸石堆有自燃现象。根据煤矸石的自燃机理及实践两方面可以判断,淮南矿区煤矸石山不具备自燃发生的条件,不存在自燃现象。

因此,淮南矿区煤矸石山对周边环境的影响主要以风化(物理、化学和生物作用)和淋溶作用为主。

1.2 样品采集

潘一矿煤矸石山已部分实施生物覆绿工程,仅山

体北侧裸露未覆土。因此,选择潘一矿煤矸石山北侧及附近复垦土地作为研究区域,在北侧坡面顺雨水径流方向设置 3 条采样线,间隔 10 m,分别在每条采样线底部(距地面 1 m 以上)、山腰(35 m)和顶部(70 m)设置采样点,共计 9 个。并且在各采样点分别按照 0—10,10—20,20—30 cm 深度分 3 层采集煤矸石样品,每层深度采集样品 3 个,每个样品不少于 5 kg,装入采样袋中封存。采集煤矸石样品 27 个,带回实验室按四分法缩分,并逐级筛分和颗粒分级。

沿着煤矸石山 3 条采样线延伸至复垦土地,以距离山脚 2,5,10,15,20,50,80 和 100 m 处布设 8 个采样点,采集深度 0—10 cm,每个样点采集 3 个土样,每个样品不少于 1 kg。采集土壤样品 24 个,带回实验室按四分法缩分,过 2 mm 筛,放入冰箱中 4°C 保存,待测。

1.3 分析方法

1.3.1 样品预处理 煤矸石和土壤样品预处理分别按照《工业固体废弃物采样制样技术规范》(HJ/T 20—1998)和《土壤环境监测技术规范》(HJ/T 166—2004)规定操作。

称取新鲜土样 20 g,按水土比 3 : 1 的比例,加入高纯水,常温下振荡 30 min,用高速离心机离心 20 min,取上清液过 $0.45 \mu\text{m}$ 的滤膜过滤,用总有机碳分析仪测定浸提液有机碳浓度,即得到溶解性有机碳含量^[18]。

1.3.2 测试方法与仪器 含水量采用烘干法测定;酸碱度采用美国维赛 YSI PH 100 型酸度计;煤矸石总有机碳(TOC)采用岛津 SSM-5000A 有机碳固体分析仪测定;溶解性有机碳分析(DOC)采用岛津 TOC-V CPH 总有机碳分析仪测定;全氮采用 LECO-TCH600 碳氢氮分析仪测定;有效磷用钼锑抗比色法;速效钾用醋酸氨浸提—火焰光度法;电镜扫描(SEM)分析采用日本 HITACHI S-3000N 扫描电子显微镜,能谱分析(EDS)采用日本 HORIBA 7021-HX 射线能谱仪。

1.3.3 淋溶浸泡实验 模拟大气降水对煤矸石山风化物进行淋溶浸泡实验研究,研究不同风化程度下煤矸石风化物浸泡液中总有机碳的含量变化特征。

自制淋滤装置为直径 $D=80 \text{ mm}$, $H=500 \text{ mm}$ 的有机玻璃管,其底端有一直径 5 mm 的排水管收集浸泡液。在距底部 5 cm 镂空支架上铺设不锈钢滤网和一层滤纸,然后均匀装入 20 mm 厚的石英砂样品,将不同粒径煤矸石 1.5 kg 装入自制的淋滤柱内,轻摇使其紧实,再在样品表层铺一张滤纸,固定淋滤装置,关闭淋滤柱下方旋塞,注入高纯水润湿 24 h。

用稀硝酸与高纯水配置淋滤液,酸度模拟淮南地

区大气降水平均酸度值 6.4^[6],每次加浸泡液 700 ml (液层厚度 140 mm),分 7 次加入(年平均降雨量 932 mm可换算为 4 682 ml)。据文献[19—20]报道,淮河流域最大暴雨持续降雨不超过 4 d,因此选择最长浸泡时间为 96 h。用玻璃锥形瓶分时段收集浸泡液,将收集的浸泡液用 0.45 μm 的微孔滤膜抽滤后,上仪器测定浸泡液中总有机碳含量。

1.4 数据处理与统计分析

原始数据利用 SPSS 17.0 软件进行统计分析,用 Origin 8.0 软件制图。

2 结果与分析

2.1 煤矸石风化物特性

2.1.1 矿物成分及理化特性 通过现场观察,煤矸石山顶以块石为主,但用手一捏,块状煤矸石即开裂

成小块。采集潘一矿煤矸石山上不同部位的煤矸石风化样品混匀后,对样品进行 X 衍射矿物成分分析。结果表明,潘一矿煤矸石风化物矿物成分主要以高岭石、石英和伊利石为主,含有少量的方解石、云母、黄铁矿、石膏和石墨等。

选取煤矸石山周边农田土壤和新鲜煤矸石作为对照,分析结果见表 1。与对照农田土壤对比,潘一矿煤矸石山风化物 pH 值偏碱性,均值为 9.75,高于对照农田和新鲜煤矸石的 pH 值。煤矸石风化物含水量小于对照农田,煤矸石风化物中总有机碳、速效钾、有效磷、全氮和水溶性盐含量较高,分别是对照农田的 3.7,1.6,1.6,1.1 和 3.1 倍。与新鲜煤矸石理化指标对比分析,煤矸石风化物中速效钾、全氮和水溶性盐含量略低,含水量、总有机碳和有效磷含量分别是新鲜煤矸石的 2.32,1.33 和 1.22 倍。

表 1 煤矸石风化物的理化指标统计

统计项目	pH 值	含水量/ %	总有机碳/ %	速效钾/ (mg·kg ⁻¹)	有效磷/ (mg·kg ⁻¹)	全氮/ (g·kg ⁻¹)	水溶性盐/ (g·kg ⁻¹)
煤矸石风化物	9.75	4.98	8.74	175.33	6.73	2.62	6.96
新鲜煤矸石 ^[21]	8.83	2.15	6.55	193.46	5.53	4.20	8.45
对照农田	7.99	20.16	2.36	109.14	4.19	2.35	2.24

对照全国第二次土壤普查养分分级标准^[22],煤矸石风化物中有机质含量非常丰富,处于 I 级水平;速效钾均值含量为 175.33 mg/kg,含量很高,处于 II 级水平。有效磷含量均值为 6.73 mg/kg,达到 IV 级水平,仍高于对照土壤;全氮含量均值 2.62 g/kg,含量丰富,处于 I 级水平。参照土壤全盐量分级表^[23],煤矸石风化物全盐量均值为 6.96 g/kg,属于重盐渍化水平。

总体上,煤矸石风化产物偏碱性、营养元素含量较丰富,同时也会对周边土壤有一定的增肥作用。但

是煤矸石风化物水溶性盐处于重盐渍化水平,对周边土壤的盐渍化影响应当引起重视。

2.1.2 电镜扫描(SEM)和能谱分析(EDS) 煤矸石风化物 and 土壤样品研磨过 75 μm 孔径筛网,通过扫描电镜(100 μm)发现二者颗粒物结构明显不同(见图 1—2)。从图 1 可知,煤矸石呈不规则肾状,粒径一般为 0.5~20 μm,最大为 30 μm,以细粒物质(<2 μm)为主^[24]。土壤电镜分析结果显示(图 2),颗粒物形态呈不规则状,粒径大小较均一,粒径一般为 5~50 μm,最大为 60 μm。

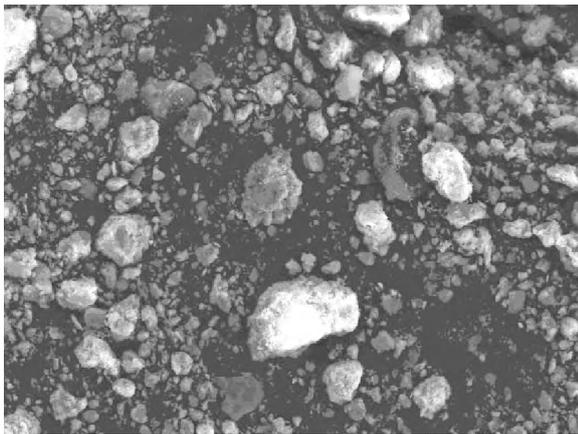


图 1 潘一矿煤矸石电镜分析

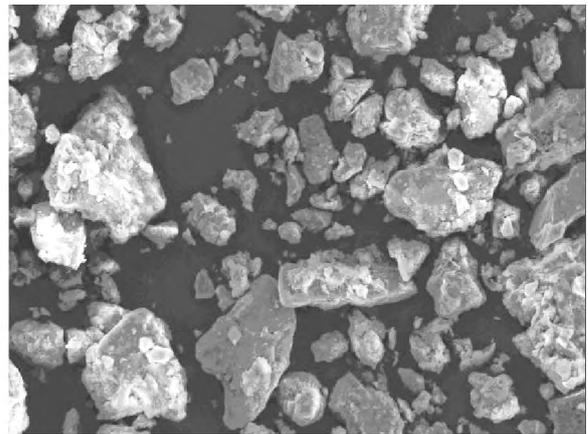


图 2 对照农田土壤电镜分析

对煤矸石风化物 and 土壤颗粒物进行能谱分析(表 2)可知,煤矸石风化物颗粒中主要含有 C, O, Al 和 Si, 以及少量的 Mg, K, Fe 等元素。对照农田土壤颗粒物中主要含有 C, O, Al 和 Si, 以及少量的 Mg, K,

Fe, Ca 和 Ti 等元素。

煤矸石风化物颗粒与土壤颗粒物中元素组成较为一致, 并且煤矸石风化物颗粒物中 C 元素的质量分数是对照土壤的 3.3 倍。

表 2 潘一矿煤矸石和土壤颗粒物中各元素含量能谱分析

样品	C	O	Mg	Al	Si	K	Fe	Ca	Ti
煤矸石	10.83	56.71	0.43	11.73	18.47	1.13	0.7	—	—
对照土壤	3.31	55.34	0.89	5.64	27.94	1.19	2.7	0.39	0.6

2.1.3 煤矸石风化物的机械组成 潘一矿煤矸石山的岩性组成主要是页岩、泥岩等软质岩石和砂岩等硬质岩石, 其中页岩、泥岩等软质岩石极易风化。煤矸石的风化按作用因素与性质的不同, 分为物理风化(机械破碎)、化学风化(降水淋溶)和生物风化(生物活动)3 大类, 三者常同时进行, 互相影响, 互相促进。煤矸石堆放 0.5~1 a 后会产生风化层, 风化层厚度在 10 cm 左右, 能保持十几年。由于风化层的存在, 煤矸石山内部的煤矸石和外界空气隔绝, 很难再进一步风化^[25-26]。

潘一矿煤矸石山西侧已被覆土绿化, 选择北侧按照雨水径流方向, 设置 3 条采样线, 间隔 10 m。从潘一矿煤矸石山山顶、山腰和山脚不同位置, 分别采集 0—10, 10—20 和 20—30 cm 深度煤矸石样品, 待样品风干后, 逐级筛分(表 3)。

表 3 潘一矿煤矸石山风化物颗粒组成

采样地点	剖面深度/cm	块石 (>10 mm)	砾石 (1~10 mm)	砂粒 (1~0.5 mm)	砂粒以下 (<0.5 mm)
山顶	0—10	51	38	5	6
	10—20	73	23	2	2
	20—30	50	40	5	5
山腰	0—10	34	42	12	12
	10—20	41	46	7	6
	20—30	51	41	5	3
山脚	0—10	58	6	22	14
	10—20	42	45	6	7
	20—30	48	42	5	5

结果表明, 潘一矿煤矸石风化物质地较差, 主要以块石和砾石为主(占 64%~96%)。砂粒以下(<0.5 mm)细粒含量很少(占 2%~14%), 且颗粒粗细差异极大。风化表层以下砾石、块石更多, 细粒风化物更少。对比土壤的机械组成, 煤矸石风化物颗粒组成与土壤完全不同, 砂粒以下(<0.5 mm)颗粒含量仅占到 2%~14%, 而土壤机械组成中粉粒占到 70% 左右。这与段永红等^[5]、胡振琪^[27]等研究结论一致。

另外, 从表 3 可知, 煤矸石山风化物 0—10 cm 层砂粒及以下粒径含量明显高于 10—20 和 20—30 cm 这两层, 说明煤矸石的风化主要发生在 0—10 cm 层, 即风化表层^[5]。潘一矿煤矸石山脚风化表层颗粒物组成中砂粒及砂粒以下成分占到 36%, 说明山脚煤矸石风化物颗粒物组成已接近土壤。

2.2 煤矸石山风化物中总有机碳分布特征

2.2.1 不同高度深度煤矸石风化物中总有机碳含量

考虑煤矸石山的堆积形状、径流方向、风化程度等因素的影响, 分析煤矸石山不同高度(山顶、山腰和山脚)煤矸石中总有机碳的分布规律。

由表 4 可知, 山顶、山腰、山脚煤矸石的总有机碳含量呈递减趋势, 山顶煤矸石风化物中总有机碳含量均值最大为 9.06%, 山腰和山脚总有机碳含量均值差别不大。另外, 山脚煤矸石风化物中砂粒及以下粒径占到 36%, 明显高于山顶和山腰, 说明山脚煤矸石风化程度较高^[8]。

表 4 潘一矿煤矸石风化物中总有机碳含量

采样深度/cm	山顶		山腰		山脚	
	均值	标准偏差	均值	标准偏差	均值	标准偏差
0—10	8.01	0.095	6.67	0.092	5.87	0.106
10—20	9.20	0.044	8.25	0.075	8.14	0.051
20—30	9.98	0.059	8.52	0.085	8.24	0.045
平均值	9.06	0.980	7.81	1.000	7.42	1.340

由表 3 可知, 随着深度(0—10, 10—20 和 20—30 cm)的加深, 煤矸石的风化物中块石和砾石的含量增大, 表明煤矸石的风化程度逐渐减弱。结合表 4 可知, 山顶煤矸石风化物总有机碳含量在 8.01%~9.98%, 山腰总有机碳含量在 6.67%~8.52%, 山脚总有机碳含量在 5.87%~7.75%, 煤矸石风化物中总有机碳含量随着深度的增加而变大。另外, 煤矸石山 3 个采样点不同深度风化物总有机碳均值标准偏差值较大, 说明不同深度煤矸石的风化程度差异较

大。结果表明,煤矸石风化物的风化程度与其总有机碳含量成负相关。

2.2.2 不同粒径煤矸石风化物中总有机碳含量 分析不同粒径中煤矸石总有机碳含量特征,有助于了解有机碳在不同粒径中的迁移分布规律以及温度、时间等外部因素对总有机碳分布的影响(表 5)。

表 5 潘一矿不同粒径煤矸石风化物中总有机碳含量

粒径/mm	总有机碳/%	平均值/%	粒径/mm	总有机碳/%	平均值/%
>10 (块石)	10.55	8.99	1.0~0.5 (砂粒)	4.47	4.43
	8.82			4.42	
	9.34			4.39	
10~1.0 (砾石)	7.23	7.69	<0.5	3.66	3.63
	7.71			3.94	
	8.14			3.28	

分析表 5 数据可知,煤矸石风化物粒径从大于 10 mm 到小于 0.5 mm,其总有机碳含量均值从 8.99% 降低到 3.63%,变化非常明显。在 4 种不同的粒径中,砂粒及更小颗粒中总有机碳含量最小。这与李阳兵、贾晓红等^[28-30]研究结论一致。他们认为与砂粒结合的有机碳被称为颗粒有机碳(POC),被认为是有机碳中的非保护性部分,最易流失的有机碳。因此,煤矸石风化物中总有机碳含量与煤矸石风化物粒径大小呈正相关。

2.2.3 煤矸石风化物有机碳溶出特征 溶解性有机碳(DOC)是能够被微生物利用作为能源和碳源的有机质^[28]。它在陆地生态系统碳循环中起着重要作用,它的浓度和通量是土壤环境变化的敏感指标,可以用来反映环境条件的变化^[31-33]。

将煤矸石风化物按照不同粒径(>10,10~1.0,1.0~0.5 和 <0.5 mm)分别装入自制淋滤柱中,模拟静态雨水淋溶作用,间隔不同时间段收集淋滤液。淋滤液中 pH 值和溶解性有机碳检测结果如图 3—4 所示。

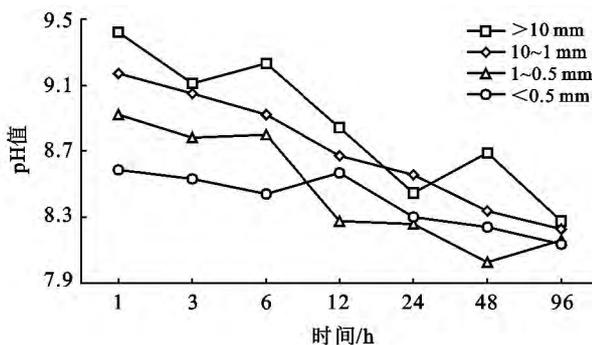


图 3 煤矸石风化物淋滤液 pH 值—时间淋溶浸泡曲线

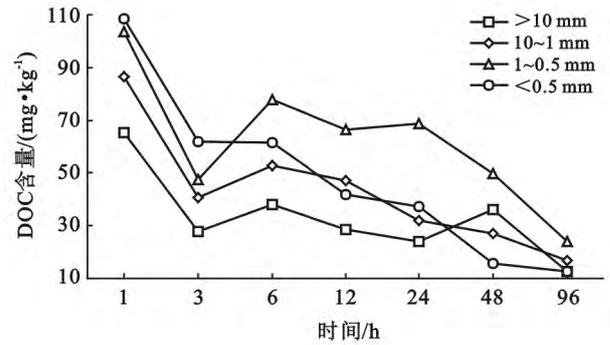


图 4 煤矸石风化物淋滤液溶解性有机碳(DOC)—时间淋溶浸泡曲线

由图 3 可知,煤矸石风化物淋滤液 pH 值变化在 8.03~9.42,属弱碱性。同一时间不同粒径风化物随着粒径的减小都出现 pH 值下降的现象。同时,同一粒径的风化物随淋溶时间的增长 pH 值有降低的趋势。在总的变化趋势上,4 种不同粒径煤矸石风化物淋滤液 pH 值呈缓慢下降趋势,并 96 h 左右趋于平稳,最终为 8.14~8.24,主要围绕 8.20 上下波动。可以看出,煤矸石粒径大小对淋溶液 pH 值影响差别不大。

从图 4 中可以看出,整体上 4 种不同粒径煤矸石风化物淋滤液中溶解性有机碳的含量随着淋溶时间增大而减小,溶解性有机碳的含量范围在 12.69~108.37 mg/kg。在淋溶 1 h,淋滤液中溶解性有机碳含量达到最大,溶出量变化最明显的粒径在 0.5~1 mm。这可能是由于颗粒越小,比表面积越大,溶出的溶解性有机碳的量就愈大。在淋溶 96 h 后,不同粒径煤矸石风化物淋滤液 pH 值和溶解性有机碳含量趋于稳定,且值较为接近,在 12~24 mg/kg 范围内波动。

2.3 煤矸石山对周边土壤有机碳含量的贡献

在潘一矿煤矸石山东北侧,顺着雨水径流方向,距离煤矸石山脚间距为 2,5,10,15,20,50,80 和 100 m 处布设 8 个采样点,采集 0—10 cm 深度表层土壤,测定采样点土壤溶解性有机碳的含量,分析煤矸石山堆积淋溶过程对周边土壤溶解性有机碳的贡献程度。

从图 5 可知,潘一矿煤矸石山周边土壤中的溶解性有机碳含量在 0.36~1.99 g/kg,总体上呈下降趋势,且下降幅度较大。在距离山脚 2 m 处,土壤溶解性有机碳含量最大,达到 1.99 g/kg,是对照农田 0.35 g/kg 的 5.7 倍。距离山脚 2~100 m,随着距离的增加,土壤溶解性有机碳含量呈减少趋势。在距离煤矸石山 80~100 m 处,土壤溶解性有机碳含量趋于稳定,接近正常农田土壤含量。结果表明在煤矸石山长期淋溶作用下,有机碳对周边土壤有迁移趋势,对土壤溶解性有机碳含量贡献较大。

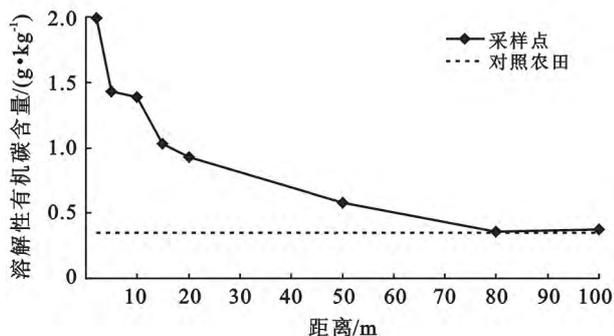


图5 煤矸石山周边对照农田土壤溶解性有机碳含量

3 结论

(1) 电镜扫描表明煤矸石风化物颗粒($<75 \mu\text{m}$)显微镜下呈不规则肾状,粒径一般为 $0.5\sim 20 \mu\text{m}$,最大为 $30 \mu\text{m}$,以细颗粒物($<2 \mu\text{m}$)为主。能谱分析表明煤矸石风化物颗粒物中主要含有 C, O, Al 和 Si, 以及少量的 Mg, K, Fe 等元素,与土壤颗粒物中元素组成较为一致,并且煤矸石颗粒物中 C 元素的质量分数是对照土壤的 3.3 倍。煤矸石风化物质地较差,颗粒物组成主要以块石和砾石为主(占 $64\%\sim 96\%$),砂粒以下($<0.5 \text{ mm}$)细粒含量很少(占 $2\%\sim 14\%$),且颗粒粗细差异极大。煤矸石的风化主要发生在 $0\sim 10 \text{ cm}$ 层。

(2) 从山顶、山腰到山脚煤矸石风化物中的总有机碳依次减小,随着采样深度的增加总有机碳含量变大。煤矸石风化物中总有机碳含量与煤矸石风化物粒径大小呈正相关,与煤矸石风化物的风化程度成负相关。

(3) 不同粒径煤矸石风化物淋滤液的 pH 值和溶解性有机碳的含量总体上随着淋溶时间增大而减小,在淋溶浸泡 96 h 后, pH 值和溶解性有机碳的含量趋于稳定,且值较为接近。煤矸石粒径大小对淋溶液 pH 值影响不大,但对溶解性有机碳的含量影响较大。距离山脚 $2\sim 100 \text{ m}$ 内,随着采样距离的增加,土壤中溶解性有机碳含量呈减少趋势,在距离煤矸石山 $80\sim 100 \text{ m}$ 处,土壤溶解性有机碳含量接近正常农田土壤含量 350.30 mg/kg 。

(4) 煤矸石风化物在淋溶作用下已出现有机碳向周边土壤迁移趋势,并且煤矸石风化物营养元素含量较丰富,对周边土壤有一定的增肥作用。因此,可以探索尝试利用煤矸石风化物对土壤进行改良。

[参 考 文 献]

[1] 陈庆强,沈承德,易惟熙. 土壤碳循环研究进展[J]. 地球科学进展,1998,13(6):555-563.

[2] 王义祥,翁伯琦,黄毅斌. 土地利用和覆被变化对土壤碳库和碳循环的影响[J]. 亚热带农业研究,2005,1(3):44-51.

[3] 蔡峰,刘泽功,林柏泉,等. 淮南矿区煤矸石中微量元素的研究[J]. 煤炭学报,2008,33(8):892-897.

[4] 党志, Fowler M, Watts S, 等. 煤矸石自然风化过程中微量重金属元素的地球化学行为[J]. 自然科学进展,1998,8(3):314-318.

[5] 段永红,白中科,赵景逵. 阳泉煤矸石山浅层矸石风化物水分特性初探[J]. 煤炭学报,1999,24(5):533-537.

[6] 吴代赦,郑宝山,康往东,等. 煤矸石的淋溶行为与环境影响的研究:以淮南潘谢矿区为例[J]. 地球与环境,2004,32(1):55-59.

[7] 秦俊梅,白中科,马祥爱,等. 煤矸石自然风化及人工模拟风化过程中盐分及 pH 值的动态变化:以朔州露天矿区为例[J]. 土壤通报,2007,38(4):649-652.

[8] 于淼,魏忠义,王秋兵,等. 不同粒级煤矸石风化物矿质元素的含量变化及风化程度分析[J]. 山西农业科学,2008,36(5):66-69.

[9] 张锐,张成梁,李美生,等. 煤矸石山风化堆积物水分动态研究[J]. 水土保持通报,2008,28(1):124-129.

[10] 魏忠义,韩周,王秋兵. 煤矸石风化物不同粒级中重金属镉含量及其形态变化[J]. 生态环境学报,2009,18(5):1761-1763.

[11] 郑永红,张治国,姚多喜,等. 煤矿复垦区土壤重金属含量时空分布及富集特征研究[J]. 煤炭学报,2013,38(8):1476-1483.

[12] 崔龙鹏,白建峰,黄文辉,等. 淮南煤田煤矸石中环境意义微量元素的丰度[J]. 地球化学,2004,33(5):535-540.

[13] 文辉,杨起,彭苏萍,等. 淮南二叠纪煤及其燃烧产物地球化学特征[J]. 地球科学:中国地质大学学报,2001,26(5):501-507.

[14] 黄文辉,杨起,汤达祯,等. 潘集煤矿二叠纪主采煤层中微量元素亲和性研究[J]. 地学前缘,2000,7(S):263-270.

[15] 胡军,郑宝山,王明仕. 中国煤中硫的分布特征及成因[J]. 煤炭转化,2005,28(4):1-6.

[16] 任德贻. 煤的微量元素地球化学[M]. 北京:科学出版社,2006:61-64.

[17] 葛涛. 淮南煤田煤中全硫含量特征分析[J]. 煤炭科学技术,2010,38(7):126-128.

[18] 张金波,宋长春,杨文燕. 土地利用方式对土壤水溶性有机碳的影响[J]. 中国环境科学,2005,25(3):343-347.

[19] 马晓群,陈晓艺,姚筠. 安徽淮河流域各级降水时空变化及其对农业的影响[J]. 中国农业气象,2009,30(1):25-30.

- [20] 李燕,夏广义. 淮河流域易涝洼地涝灾特性及成因研究[J]. 水利水电技术, 2012, 43(6): 93-96.
- [21] 郑永红,张治国,姚多喜,等. 煤矸石充填复垦对土壤特性影响研究[J]. 安徽理工大学学报:自然科学版, 2013, 33(4): 7-11.
- [22] 全国土壤普查办公室. 中国土壤普查技术[M]. 北京: 农业出版社, 1992.
- [23] 姜凌,李佩成,胡安焱,等. 干旱区绿洲土壤盐渍化分析评价[J]. 干旱区地理, 2009, 32(2): 234-239.
- [24] 何毓蓉,徐祥明,刘黎. 西南地区水耕人为土诊断层土壤特性及 SEM 特征[J]. 山地学报, 2009, 27(6): 727-734.
- [25] 王志亚,林大仪,赵景逵,等. 煤矸石复垦工程中绿肥牧草对矸石风化层生态环境影响[J]. 土壤学报, 1996, 33(3): 317-321.
- [26] 许丽,周心澄,王冬梅. 煤矸石废弃地复垦研究进展[J]. 中国水土保持科学, 2005, 3(3): 117-122.
- [27] 胡振琪. 半干旱地区煤矸石山绿化技术研究[J]. 煤炭学报, 1995, 20(3): 322-327.
- [28] 李阳兵,杨霞,宋晓利,等. 岩溶生态系统土壤非保护性有机碳含量研究[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(2): 402-406.
- [29] 贾晓红,李新荣,陈应武,等. 植被恢复对旱区表土颗粒中有机碳和氮分布的影响[J]. 中国环境科学, 2006, 26(5): 560-564.
- [30] 刘涛泽,刘丛强,张伟. 植被恢复中坡地土壤颗粒有机碳分布特征和 $\delta^{13}\text{C}$ 值组成[J]. 生态环境, 2008, 17(5): 2031-2036.
- [31] 王晶,解宏图,朱平,等. 土壤活性有机质(碳)的内涵和现代分析方法概述[J]. 生态学杂志, 2003, 22(6): 109-112.
- [32] Ghani A, Dexter M, Perrott K W. Hot-water extractable carbon in soils: A sensitive measurement for determining impacts of fertilization, grazing and cultivation [J]. Soil Biology & Biochemistry, 2003, 35(9): 1231-1243.
- [33] Smith C K, Munson A D, Coyea M R, et al. Nitrogen and phosphorous release from humus and mineral soil under black spruce forests in Central Quebec [J]. Soil Biology & Biochemistry, 1998, 30(12): 1491-1500.

(上接第 17 页)

[参 考 文 献]

- [1] 张风宝,杨明义. 基于 ^7Be 示踪和细沟沟网分形维数研究坡面土壤侵蚀[J]. 核农学报, 2010, 24(5): 1032-1037.
- [2] 严冬春,王一峰,文安邦,等. 紫色土坡耕地细沟发育的形态演变[J]. 山地学报, 2001, 29(4): 469-473.
- [3] 王贵平,白迎平,贾志军,等. 细沟发育及侵蚀特征初步研究[J]. 中国水土保持, 1988(5): 13-16.
- [4] 吴普特,周佩华,武春龙,等. 坡面细沟侵蚀垂直分布特征研究[J]. 水土保持研究, 1997, 4(2): 47-56.
- [5] 李水根. 分形[M]. 北京: 高等教育出版社, 2004.
- [6] 姚文艺,李占斌,康玲玲. 黄土高原土壤侵蚀治理的生态环境效应[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [7] 崔灵周,朱永清,李占斌. 基于分形理论和 GIS 的黄土高原流域地貌形态量化及应用研究[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2006.