

煤矿复垦区重构土壤溶解性有机碳空间分布特征^①

郑永红¹, 胡友彪¹, 张治国^{1,2}

(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:为探究煤矿复垦区重构土壤中溶解性有机碳(DOC)含量的空间分布特征,以淮南潘一矿区煤矸石山和周边复垦区林地土壤为研究对象,从空间分布和颗粒组成上,分析了煤矸石山顶、山腰和山脚的煤矸石风化物及周边林地土壤中 DOC 的含量。结果表明:自上而下山顶、山腰、山脚的煤矸石风化物中 DOC 含量呈递减趋势,并随采样深度的增加而增大;但林地土壤中 DOC 含量随采样深度的增加而减少。不同粒径颗粒物中 DOC 含量分布不同,煤矸石风化物和林地土壤均以细砂(0.2~0.05 mm)DOC 含量最高,石砾(10~2 mm)DOC 含量最低。在雨水淋溶作用下,煤矸石风化物对周边土壤 DOC 含量贡献较大,距离山脚 1~100 m 范围,随着距离的增加,土壤中 DOC 含量由 325.46 mg/kg 减少至 177.89 mg/kg,煤矸石风化物对周边土壤 DOC 含量的贡献率由 85.78% 降低到 1.54%,在距离山脚 100 m 处土壤中 DOC 含量已接近正常对照土壤含量。

关键词:复垦区;煤矸石风化物;土壤;溶解性有机碳

中图分类号:TD88;X53

文献标识码:A

土壤溶解性有机碳(DOC)是指分子量比较小、结构简单的有机碳化合物,它们能溶解于水中,且能通过 0.45 μm 微孔滤膜,是土壤有机碳中最活跃的部分^[1-5],受植物和微生物影响强烈,在土壤中移动比较快,不稳定,易氧化分解,是对植物与微生物活性比较高的一部分土壤有机碳素^[6]。DOC 虽然只占土壤总有机碳 0.04%~0.22%^[7],但它的变化对土壤碳库及温室效应和全球气候变化有着重要的控制作用^[8-11],同时可直接影响微生物的活性和植物的养分供应^[12-13]。

淮南矿区煤矸石山多以碳质泥岩为主,遇水极易风化。因而在长期露天堆放的情况下,经过不同程度的风化和淋溶作用,煤矸石表层及山脚下的煤矸石风化物颗粒组成已接近土壤^[14],并与周围农田、林地土壤混合。煤矸石中所含的有机碳及钾、钠等盐基物质不断释放,流失,减少^[15],向周围土壤和水体迁移富集,使土壤中有机碳及营养元素含量发生变化。郑永红等^[14]对淮南潘一矿煤矸石山风化物有机碳分布规律进行了初步研究,结果表明煤矸石风化物在淋溶作用下,已经出现有机碳向周边土壤迁移的趋势。但是,仍然缺乏淮南煤矸石山煤矸石风化物-土

壤系统中 DOC 的时空分布、迁移富集规律的研究。因此,本文以淮南潘一矿煤矸石山风化物、复垦区土壤为研究对象,从不同深度和不同粒径对其中 DOC 含量变化及空间分布特征进行研究,为科学地利用煤矸石、提高复垦区土壤质量提供科学决策依据。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

潘一矿煤矸石山位于潘一矿东侧约 1.0 km 处,于 2005 年 12 月正式开工矿山地质环境治理(覆土造地)工程项目,并于 2006 年 12 月结束。其中复垦区是在采煤沉陷区回填煤矸石,上覆黏土工艺所形成。该区域属暖温带半湿润大陆性季风气候,年平均气温 15.3℃,7 月份气温最高,1 月份气温最低;年平均降水量 926 mm,夏季降水量最多,占全年降水量的 55%,春季次之,秋季较少,冬季最少。复垦区土壤类型为砂姜黄壤,成土母质为黄土性古河流沉积物^[16]。

1.2 研究方法

1.2.1 样品采集 2016 年 7 月,在潘一矿煤矸石山山体北侧未覆土一面,沿雨水径流方向从山顶、山

基金项目:安徽省自然科学基金项目(1508085SMD218)和“土壤卫士”创客实验室项目(2016ckjh071)资助。

作者简介:郑永红(1979—),女,新疆乌鲁木齐人,博士研究生,副教授,研究方向为土壤污染与防治。E-mail: zyhaust@163.com

腰至山脚共设置 3 条采样线,分别采集煤矸石风化物;从煤矸石山脚下延伸至复垦区林地,分别在距离山脚 1、2、5、10、15、20、40、60、80 和 100 m 处设置采样点采集林地土壤,同时以周边闲置农田土壤作为对照。另外,在各采样点,垂直方向以 20 cm 为取样深度单位分 3 个层次(0~20、20~40、40~60 cm)采集垂直剖面上煤矸石风化物样品和土壤样品。

1.2.2 样品处理 对采集的煤矸石风化物、土壤样品,去除植物根系、树叶、石块等杂质后,采用四分法将所采样品进行筛分,用于测定 DOC,如不能及时测定,保存于 4℃ 冰箱中,最好在 24 h 内测定完毕。

1.2.3 测定方法 因 DOC 在土壤中的含量与土壤水分、温度、性质等因素有关,各研究者对土壤 DOC 的测定方法不尽相同,为获得最优 DOC 测定条件,在参考各研究者试验的基础上^[17-21],经过改变水土比(5:1、10:1、20:1、30:1)、浸提剂(超纯水、0.5 mol/L K₂SO₄、1 mol/L KCl、1 mol/L NaCl)、浸提温度(20、30、40、50、60、70)和浸提时间(0.5、1、2、5 h)试验,最终确定最优的煤矸石风化物 and 土壤 DOC 的测定条件见表 1。

表 1 煤矸石风化物 and 土壤 DOC 的测定条件
Table 1 Determination conditions of DOC contents in gangue weathering materials and soils

样品	水土比	浸提剂	浸提时间(h)	浸提温度()
煤矸石风化物	30:1	超纯水	1	30
土壤	20:1	超纯水	1	30

按表 1 中 DOC 的测定条件,振荡(200 r/min)浸提 1 h 后,离心(4 000 r/min)10 min,上清液过 0.45 μm 滤膜后,用 TOC-V_{CPH} 总有机碳分析仪(岛津公司)测定其中 DOC 含量。

1.2.4 数据处理与统计分析 原始数据利用 SPSS17.0 软件进行统计分析,DOC 含量分布图利用 Origin8.0 软件绘制。

2 结果与讨论

2.1 溶解性有机碳含量的空间分布特征

2.1.1 垂直分布特征 潘一矿复垦区煤矸石风化物、林地土壤及对照农田土壤 DOC 含量的垂直分布特征见图 1。从图 1 中可以看出,山顶、山腰、山脚的煤矸石风化物中 DOC 含量呈递减趋势,平均含量分别为 398.80、303.8、254.82 mg/kg,并且随着采样深度(0~20、20~40、40~60 cm)的增加,DOC 含量逐渐变大,与郑永红等^[14]已有研究煤矸石风化物中总有机碳含量随深度增加而变大的趋势相一致;林

地土壤 DOC 含量在 214.38~309.48 mg/kg,平均为 257.09 mg/kg,其含量随深度的增加呈现先减少后增加的趋势。40~60 cm 这一层是复垦区土壤与煤矸石风化物最近的一层,DOC 含量要明显高于上一层土壤,这可能是由于受下部煤矸石的影响。Anne 等^[22]、陈孝杨等^[23]的研究表明,复垦土壤下的煤矸石的理化特性和物质循环过程将影响上层复垦土壤。因此,复垦区土壤在雨水的淋溶过程中,下层煤矸石中的 DOC 溶出并进入土壤,使得 40~60 cm 土壤中 DOC 含量高于上一层土壤(20~40 cm),而郑永红等^[14]研究煤矸石风化物溶出特征,结果显示 DOC 含量随淋滤液的溶出而向周边土壤迁移,正好证明了这一点;对照农田土壤 DOC 含量在 156.66~197.16 mg/kg,平均为 175.91 mg/kg,其含量随土壤深度的增加呈现递减趋势,与孔范龙等^[17]、卫东等^[24]、程静霞等^[25]、郭洋等^[26]的研究结果相一致。

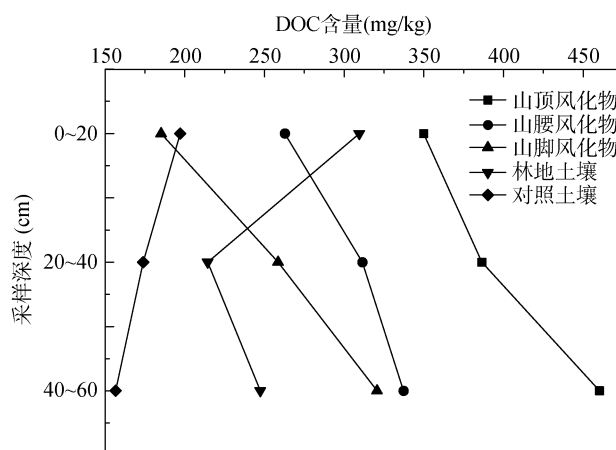


图 1 煤矸石风化物 and 周边土壤中 DOC 含量的垂直分布
Fig.1 Vertical distributions of DOC contents in gangue weathering materials and surrounding soils

2.1.2 水平分布特征 沿雨水径流方向,煤矸石山脚下 1 m 处土壤 DOC 含量最高,为 325.46 mg/kg,随着距离的增加,土壤 DOC 含量逐渐减少,距离山脚下 100 m 处土壤 DOC 含量减少到 177.89 mg/kg,而对照农田土壤 DOC 含量平均为 175.19 mg/kg,表明降雨影响 DOC 在土壤中的横向迁移^[27],周边土壤受到了煤矸石山堆积的影响。

煤矸石山堆积对周边土壤的影响可以用煤矸石风化物对周边土壤 DOC 含量的贡献率来表征^[28-29]。由图 2 可知,与对照土壤 DOC 含量相比,煤矸石风化物对周边土壤 DOC 的贡献率在 85.78%~1.54%,呈明显的下降趋势,离煤矸石山最近的山脚下 1 m 处,贡献率最大,达到 85.78%,随着距离的增加,煤矸石风化物对周边土壤 DOC 的贡献率逐渐降低,

距离煤矸石山脚下 100 m 处的贡献率仅为 1.54%，此处土壤 DOC 含量已经接近正常土壤 DOC 含量。这说明煤矸石风化物中的 DOC 在长期的淋溶作用下，向周边土壤迁移趋势明显，对周边土壤 DOC 含量贡献较大。

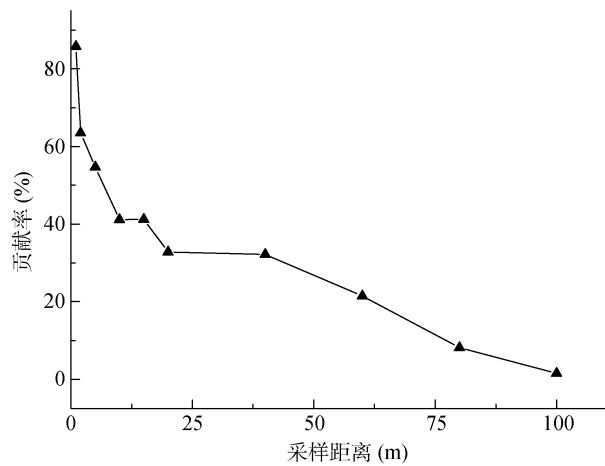


图 2 煤矸石风化物对周边土壤 DOC 含量的贡献率
Fig. 2 Contribution rate of gangue weathering materials to DOC contents in surrounding soils

2.2 粒径对 DOC 含量的影响

煤矸石由于长期暴露在环境中，在风化和雨水的淋溶作用下，会破碎成大小不一的颗粒状态的煤矸石风化物。为了解 DOC 在不同粒径煤矸石风化物 and 土壤中的分布特征，结合我国土壤粒级划分标准、国际制土粒分级标准和美国制土粒分级标准，将煤矸石和土壤样品按粒径筛分为大小不等的颗粒^[30-31]，见表 2。

表 2 煤矸石和土壤样品颗粒分级
Table 2 Size grading of coal gangue and soil samples

颗粒名称	石砾	粗砂	细砂	粉粒及以下
粒径(mm)	10 ~ 2	2 ~ 0.25	0.2 ~ 0.05	<0.05

由表 3 可以看出，潘一矿煤矸石风化物颗粒主要以石砾和粗砂为主，占 92%~95%，细砂以下的细颗粒含量很低，占 5%~8%，但山脚的煤矸石风化物中粗砂比例明显增大，由山顶、山腰的 34%、39% 增大到 48%，说明山脚下的煤矸石风化程度较高，并且颗粒物组成已经近似土壤。林地土壤和对照土壤的机械组成中以砂粒(包括粗砂和细砂)为主，其中细砂占 74%~78%。

表 3 表明，不同粒径颗粒物中 DOC 含量分布不同，煤矸石风化物中以细砂 DOC 含量最高，为 355.8~530.10 mg/kg，石砾 DOC 含量最低，为 216.74~235.95 mg/kg，粗砂与粉粒及以下 DOC 含量相差不大，但山脚煤矸石风化物中粉粒及以下颗粒中 DOC 含量最高，这与山脚煤矸石风化程度高，粒径由大变

表 3 煤矸石风化物和周边土壤的颗粒组成及其 DOC 含量

Table 3 Particle compositions and DOC contents of gangue weathering materials and surrounding soils

样品	颗粒组成	颗粒组成比例 (%)	DOC 含量 (mg/kg)
山顶煤矸石风化物	石砾	58	231.53 ± 8.76
	粗砂	34	438.60 ± 23.87
	细砂	4	530.10 ± 26.36
	粉粒及以下	4	433.50 ± 20.67
山腰煤矸石风化物	石砾	56	235.95 ± 10.77
	粗砂	39	288.64 ± 11.43
	细砂	3	379.38 ± 19.97
	粉粒及以下	2	292.13 ± 12.61
山脚煤矸石风化物	石砾	43	216.74 ± 7.84
	粗砂	48	276.34 ± 12.82
	细砂	4	355.8 ± 14.79
	粉粒及以下	5	361.5 ± 20.08
林地土壤	石砾	2	255.17 ± 9.76
	粗砂	19	285.46 ± 12.27
	细砂	78	312.87 ± 13.64
	粉粒及以下	1	298.7 ± 12.94
对照土壤	石砾	2	183.32 ± 6.17
	粗砂	23	215.74 ± 7.79
	细砂	74	233.54 ± 8.68
	粉粒及以下	1	196.93 ± 7.85

注：表中 DOC 含量为平均值±标准差。

小，风化物近似土壤化有关。土壤粒径越小，黏粒含量越高，对 DOC 的吸附能力就越强^[32-34]。林地土壤中以细砂 DOC 含量最高，为 312.87 mg/kg，石砾 DOC 含量最低，为 255.17 mg/kg。对照农田土壤中以细砂 DOC 含量最高，为 233.54 mg/kg，石砾 DOC 含量最低，为 183.32 mg/kg。总体上 DOC 含量分布以砂粒(包括粗砂和细砂)为最多，石砾最少，粉粒及以下颗粒 DOC 含量居中。土壤颗粒越小，表面积越大，对 DOC 的吸附就越强，因此，石砾中 DOC 含量最低，但由于 DOC 本身以溶于水，迁移能力强的特性，粉粒及以下细小颗粒中的 DOC 更易随雨水的淋溶而流失，这就是导致粉粒及以下细小颗粒不及砂粒 DOC 含量高的原因^[14]。

3 结论

- 1) 潘一矿煤矸石山山顶、山腰、山脚的煤矸石风化物中 DOC 含量呈递减趋势，并随深度的增加而增大；周边土壤中 DOC 含量随深度的增加而减少。
- 2) 煤矸石风化物在雨水的淋溶作用下，其中的 DOC 向周边土壤迁移趋势明显，对周边土壤 DOC 含

量有较大的贡献。距离煤矸石山脚 1 m 处, 土壤中 DOC 含量为 325.46 mg/kg, 煤矸石风化物对土壤 DOC 含量贡献率达到 85.78%; 随着距离的增加, 土壤中 DOC 含量逐渐减少, 煤矸石风化物对周边土壤 DOC 的贡献率逐渐降低, 距离煤矸石山脚 100 m 处土壤中 DOC 含量为 177.89 mg/kg, 已接近正常对照土壤(175.19 mg/kg)含量, 煤矸石风化物对土壤 DOC 含量贡献率仅为 1.54%。

3) 煤矸石风化物颗粒组成以石砾和粗砂为主(占 91%~95%), 并且从山顶、山腰到山脚煤矸石风化程度加大, 粗砂比例提高, 山脚下的煤矸石风化物颗粒组成已接近土壤; 土壤颗粒组成以细砂为主(占 74%~78%)。

4) DOC 在煤矸石风化物细颗粒(<2 mm)中的平均含量为 372.89 mg/kg, 粗颗粒(>2 mm)中的平均含量为 228.07 mg/kg; DOC 在周边土壤细颗粒中的平均含量为 257.21 mg/kg, 粗颗粒中的平均含量为 219.25 mg/kg, 因此, 煤矸石风化物对土壤中 DOC 含量在细颗粒中明显高于粗颗粒。

参考文献:

- [1] Kalbitz K, Solinger S, Park J H, et al. Controls on the dynamics of dissolved organic matter in soils[J]. *A review Soil Science*, 2000, 165(4): 277-304
- [2] Liang B C, Mackenzie A F, Schnitzer M, et al. Management induced change in labile soil organic matter under continuous corn in eastern Canadian soils[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 1998, 26(2): 88-94
- [3] 李淑芬, 俞元春, 何晟. 南方森林土壤溶解有机碳与土壤因子的关系[J]. *浙江林学院学报*, 2003, 20(2): 119-123
- [4] Flessa H, Ludwig B, Heil B, et al. The origin of soil organic C, dissolved organic C and respiration in a long-term experiment in Halle, Germany, determined by ^{13}C natural abundance[J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2000, 163(2): 157-164
- [5] 黄倩, 吴靖霆, 陈杰, 等. 土壤吸附可溶性有机碳研究进展[J]. *土壤*, 2015, 47(3): 446-452
- [6] 俞元春, 李淑芬. 江苏下蜀林区土壤溶解有机碳与土壤因子的关系[J]. *土壤学报*, 2003, 35(5): 424-428
- [7] Zsolnay A. Dissolved humus in soil waters[M]//In: Piccolo A, ed. *Humic substances in terrestrial ecosystems*. Amsterdam: Elsevier, 1996, 12: 171-223
- [8] Shimel D S. Terrestrial ecosystem and the carbon cycle[J]. *Global Change Biology*, 2006, 1: 77-91
- [9] Sachse A, Henrion R, Gelbrecht J, et al. Classification of dissolved organic carbon(DOC) in river systems: Influence of catchment characteristics and autochthonous processes[J]. *Organic Geochemistry*, 2005, 36(6): 923-935
- [10] 俞元春, 何晟, Wang G, 等. 杉木林土壤渗滤水溶解有机碳含量与迁移[J]. *林业科学*, 2006, 42(1): 122-125
- [11] 张金波, 宋长春, 杨文燕. 小叶章湿地表土水溶性有机碳季节动态变化及影响因素分析[J]. *环境科学学报*, 2005, 25(10): 1397-1402
- [12] Stutter M I, Lumsdon D G, Thoss V. Physio-chemical and biological controls on dissolved organic matter in peat aggregate columns[J]. *European Journal of Soil Science*, 2007, 58(3): 646-657
- [13] Holl B S, Fiedler S, Jungkunst H F, et al. Characteristics of dissolved organic matter following 20 years of peatland restoration[J]. *Science of the Total Environment*, 2009, 408: 78-83
- [14] 郑永红, 张治国, 胡友彪, 等. 淮南矿区煤矸石风化物特征及有机碳分布特征[J]. *水土保持通报*, 2014, 34(5): 18-24
- [15] 蔡毅, 严家平, 陈孝杨, 等. 表生作用下煤矸石风化特征研究——以淮南矿区为例[J]. *中国矿业大学学报*, 2015, 44(5): 937-943
- [16] 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
- [17] 孔范龙, 郝敏, 吕宪国, 等. 三江平原环型湿地土壤溶解性有机碳的时空变化特征[J]. *土壤学报*, 2013, 50(4): 847-852
- [18] Murphy D V, Macdonald A J, Stockdale E A, et al. Soluble organic nitrogen in agricultural soils[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2000, 30(5/6): 374-387
- [19] Bolan N S, Baskaran S, Thiagarajan S. An evaluation of the methods of measurement of dissolved organic carbon in soils, manures, sludges and stream water[J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 1996, 27(13): 2723-2737
- [20] Matlou M C, Haynes R J. Soluble organic matter and microbial biomass C and N in soils under pasture and arable management and the leaching of organic C, N and nitrate in a lysimeter study[J]. *Applied Soil Ecology*, 2006, 34(2/3): 160-167
- [21] 李忠佩, 焦坤, 吴大付. 不同提取条件下红壤水稻土溶解有机碳的含量变化[J]. *土壤*, 2005, 37(5): 512-516
- [22] Anne M, Heather A, Candace L, et al. Proposed classification for human modified soils in Canada: Anthrosolic order[J]. *Canada Journal of Soil Science*, 2012, 92(1): 7-18
- [23] 陈孝杨, 周育智, 严家平, 等. 覆土厚度对煤矸石充填重构土壤活性有机碳分布的影响[J]. *煤炭学报*, 2016, 41(5): 1236-1243
- [24] 卫东, 戴万宏, 汤佳. 不同利用方式下土壤溶解性有机碳含量研究[J]. *中国农学通报*, 2011, 27(18): 121-124
- [25] 程静霞, 聂小军, 刘昌华. 煤炭开采沉陷区土壤有机碳空间变化[J]. *煤炭学报*, 2014, 39(12): 2495-2500
- [26] 郭洋, 李香兰, 王秀君, 等. 干旱半干旱区农田土壤碳垂直剖面分布特征研究[J]. *土壤学报*, 2016, 53(6): 1433-1443
- [27] 肖胜生, 汤崇军, 王凌云, 等. 自然降雨条件下红壤坡面有机碳的选择性迁移[J]. *土壤学报*, 2017, 54(4): 874-884

- [28] 孙汉印, 姬强, 王勇, 等. 不同秸秆还田模式下水稳性团聚体有机碳的分布及其氧化稳定性研究[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(2): 369-376
- [29] 兰木羚, 高明. 不同秸秆翻埋还田对旱地和水田土壤微生物群落结构的影响[J]. 环境科学, 2015, 36(11): 4252-4259
- [30] 戴树桂. 环境化学(第一版)[M]. 北京: 高等教育出版社, 1999: 206-207
- [31] 丁延龙, 高永, 蒙仲举, 等. 希拉穆仁荒漠草原风蚀地表颗粒粒度特征[J]. 土壤, 2016, 48(4): 803-812
- [32] 韩成卫, 李忠佩, 刘丽, 等. 溶解性有机碳在红壤水稻土中的吸附及其影响因素[J]. 生态学报, 2008, 28(1): 445-451
- [33] Arthur M A, Fahey T J. Controls on soil solution chemistry in subalpine forest in north central Colorado[J]. Soil Science Society of America Journal, 1993, 57 (4): 1122-1130
- [34] Wang G M, Zhou L X, Wong J W. Adsorption of dissolved organic matter in soil and dissolved organic matter effect on the copper precipitation in high pH range[J]. Environmental Science, 2006, 27(4) : 754-759

Spatial Distribution Characteristics of Dissolved Organic Carbon in Reconstructed Soil in Coal Mine Reclamation Area

ZHENG Yonghong¹, HU Youbiao¹, ZHANG Zhiguo^{1,2}

(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 of Anhui Province, Anhui University of Science and Technology, Huainan, Anhui 232001, China)

Abstract: In order to analyze the spatial distribution characteristics of dissolved organic carbon(DOC) in reconstructed soil in coal mine reclamation area, this study selected a coal gangue pile and peripheral reclaimed forestry soil in Panyi Coal Mine in Huainan as the study object, the contents of DOC in gangue weathering matters located at the peak, slope and foot of the gangue pile and in reclaimed forestry soil and in their different size particles were measured. The results showed that DOC contents in gangue weathering matters decreased from the peak to foot of gangue pile but increased with the increase of profile depth at the same site, while DOC content in forestry soil reduced with the increase of profile depth. DOC contents were different in different size particles, fine sand part (0.2-0.05 mm) had the highest DOC content while gravel part (10-2 mm) had the smallest DOC content. Under the leaching of rainwater, gangue weathering matter contributed significantly to DOC content in peripheral soil, within the range of 1-100 m, with the increase of the distance from the foot of gangue pile, DOC content in soil decreased from 325.46 mg/kg to 177.89 mg/kg, the contribution rate of gangue weathering matter to soil DOC content decreased from 85.78% to 1.54%, and DOC content in soil at 100 m far was near the normal level of CK soil.

Key words: Coal mine reclaimed area; Gangue weathering matter; Soil; Dissolved organic carbon(DOC)