

基于 CT 分析露天煤矿复垦年限对土壤有效孔隙数量和孔隙度的影响

王金满^{1,2}, 郭凌俐¹, 白中科^{1,2*}, 秦倩¹, 吕春娟³

(1. 中国地质大学土地科学技术学院, 北京 100083; 2. 国土资源部土地整治重点实验室, 北京 100035;
3. 山西农业大学资源环境学院, 太谷 030801)

摘要: 露天煤矿排土场由于排土过程中大型机械压实等作用会对土壤的孔隙结构产生影响, 重构适合于植被生长的土壤孔隙结构是排土场土地复垦的重要工作。为对排土场重构土壤孔隙结构进行定量分析, 该文采用高精度无损计算机断层扫描技术 (CT) 对山西平朔矿区安太堡露天煤矿排土场平台全黄土母质覆盖的不同复垦年限 (0、20、23 a) 以及原地貌的土壤进行分层扫描成像, 并利用 Photoshop 和 Arcgis 软件对扫描图像进行处理和统计分析, 探讨了排土和复垦对土壤孔隙数量和孔隙度的影响, 分析了排土场重构土壤大、中和小孔隙的变化。结果表明: 原地貌土壤孔隙数量和孔隙度最大, 其次是复垦 23 和 20 a 的土壤, 排土后未复垦土壤孔隙数量和孔隙度最小。采矿和排土等活动由于大型机械压实作用降低了土壤孔隙数量和孔隙度, 尤其是大孔隙数量和大孔隙度; 土地复垦对增加土壤孔隙数量和孔隙度有一定的作用, 但是过程比较缓慢。采矿和排土等活动对表层土壤孔隙数量和孔隙度的影响要高于底层土壤。该研究可为黄土区大型露天煤矿排土场重构土壤结构的优化与土地复垦措施选择提供依据。

关键词: 土地复垦; 土壤; 孔隙度; 露天煤矿; 黄土区; CT 扫描

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2016.12.033

中图分类号: S152.5; TD88

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2016)-12-0229-08

王金满, 郭凌俐, 白中科, 秦倩, 吕春娟. 基于 CT 分析露天煤矿复垦年限对土壤有效孔隙数量和孔隙度的影响[J]. 农业工程学报, 2016, 32(12): 229—236. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2016.12.033 <http://www.tcsae.org>

Wang Jinman, Guo Lingli, Bai Zhongke, Qin Qian, Lü Chunjuan. Effects of land reclamation time on soil pore number and porosity based on computed tomography (CT) images in opencast coal mine dump[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2016, 32(12): 229—236. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2016.12.033 <http://www.tcsae.org>

0 引言

中国已探明煤炭储量中, 适于露天开采的煤炭资源储量为 49 Gt, 预计到 2020 年露天煤矿产量占总产量值将达到 12%~14%。这些露天煤矿主要分布在黄土高原等生态脆弱地区, 该区降水稀少而蒸发强烈, 水土流失严重, 属于强烈侵蚀生态脆弱系统^[1]。中国露天开采每万吨煤损毁土地 0.22 hm², 其中直接挖掘损毁土地 0.12 hm², 外排土场占用土地 0.1 hm²^[2]。因此, 做好强烈侵蚀生态脆弱系统的黄土丘陵区露天煤矿排土场土地的复垦与生态恢复工作, 以有效遏制矿区地表损毁及水土流失, 对保护、恢复和重建矿区生态环境具有重要的意义。

排土场土地复垦包括地貌重塑、土壤重构和植被重建等过程, 其中的关键问题就是土壤基质的重构。因为只有土壤的团粒结构、持水保肥能力等得到相应的修复, 植被才能得到快速的恢复, 生态环境才能得到修复^[3]。土壤结构特征包括 2 个方面: 一是土壤中的固相颗粒或土壤团聚体状况, 二是土壤中的孔隙状况。土壤孔隙性质如数目、大小、形状、方向及空间分布等, 决定着土壤的持水性能、物质运移的形式及速率等, 进而影响植被的生长发育^[4]。露天开采多采用土石混排大型机械压实的排土工艺, 会产生严重的地表压实问题, 彻底改变了土壤孔隙状况^[5]。因此, 分析排土场排土和复垦后土壤孔隙的变化对优化土壤重构措施具有重要作用。然而在已有的土壤重构研究成果中, 多数研究是基于排土场复垦土壤质量与植被恢复效果的评价^[6-8], 较少有关于排土场土壤重构过程中土壤孔隙结构及其演替规律的研究。

土壤孔隙分布获取常采用实测的水分特征曲线、压汞曲线、标记穿透曲线等方法来间接获取^[9]。随着土壤微形态学研究的发展, 土壤切片法成为研究土壤孔隙特征的一种常用方法。但土壤切片法过程比较繁琐, 对试验条件要求比较高, 并且在制备切片的过程中可能会破坏土壤孔隙结构^[10-12]。计算机断层扫描 (computed tomography, CT) 技术是一种无损的三维成像技术, 可

收稿日期: 2015-04-13 修订日期: 2016-03-09

基金项目: 国家自然科学基金 (41271528); 山西省自然科学基金项目 (2014011034-1)。

作者简介: 王金满, 男, 内蒙古赤峰人, 教授, 博士, 博士生导师, 主要从事土地整治与生态恢复研究。北京 北京市海淀区学院路 29 号, 100083。

Email: wangjinman2002@163.com

*通信作者: 白中科, 男, 山西运城人, 教授, 博士, 博士生导师, 主要从事土地整治与生态恢复研究。北京 北京市海淀区学院路 29 号, 100083。

Email: baizk@cugb.edu.cn

中国农业工程学会会员: 王金满 (E040100098M)

中国农业工程学会会员: 白中科 (E041200374S)

以在不破坏原有多孔介质孔隙结构的情况下获得其微观孔隙结构的三维图像, 因此可以对土壤孔隙的三维结构进行研究^[13-14]。目前 CT 扫描技术已在分析土壤大孔隙数目、大小、形状和连通性等方面得到了广泛应用^[13,15-16]。但对排土场压实土壤来说, 除了要分析排土和复垦过程中土壤大孔隙变化外, 还需要研究其微观结构中小孔隙变化, 以更有效地制定复垦中的土壤培肥改良和植被恢复措施。

因此, 本文拟引入高精度无损 CT 扫描技术对山西平朔矿区安太堡露天煤矿排土场平台全黄土母质覆盖的不同复垦年限以及原地貌的土壤进行分层扫描成像分析, 研究排土和复垦对土壤不同大小孔隙数量和孔隙度的影响, 以为该区域土地复垦和生态恢复提供理论依据和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区选择山西省朔州市的平朔露天煤矿区, 地处黄土高原地区晋蒙陕接壤的黑三角地带。矿区地理坐标: 112°10'58"~113°30'E, 39°07'~39°37'N。矿区属典型的温带干旱、半干旱大陆性季风气候区, 年平均降雨量为 428.2 mm 左右, 降水集中分布在 7、8、9 月, 占全年总降水量的 75%, 而年蒸发量却为降水量的 5 倍左右。年

平均气温 6.2 ℃, 无霜期约 115~130 d, 年平均 8 级以上大风日数在 35 d 以上, 最多可达 47 d。矿区地带性土壤为栗褐土与栗钙土的过渡带, 土壤物理风化作用强烈, 土质偏砂, 土体干旱, 土壤肥力低下。

1.2 土壤样品采集

为研究排土和复垦后重构土壤孔隙数量和孔隙度的变化趋势, 根据平朔矿区安太堡露天煤矿排土场复垦年限, 选择复垦年限为 23 a 的南排土场 (Y23), 复垦年限为 20 a 的西排土场 (Y20), 刚排完土未复垦的内排土场 (Y0) 以及原地貌 (OL) 作为对照组开挖土壤剖面采集土壤样品。所选排土场表层均为黄土母质覆盖, 土壤剖面开挖深度为 100 cm, 利用亚克力硬质塑料土柱分层采集 0~25、>25~50 和 >50~75 cm 土层的土壤样品。样品为直径 2 cm、高 10 cm 的未扰动原状土柱。将原状土柱迅速密封, 为防止土壤发霉问题需对土柱进行及时 CT 扫描。同时用环刀分层采集土壤测定干容重, 并采集部分扰动土壤带回实验室测定土壤粒径分布。土壤粒径分布利用激光粒度分析仪 (MasterSizer 2000, 英国马尔文仪器有限公司) 进行分析, 测量范围为 0.02~2 000 μm。土壤质地依据美国三角制标准进行划分。根据测得的土壤容重计算不同土层不同土壤的孔隙度, 计算过程中假设土壤的密度为 2.65 g/cm³。不同土层土壤的主要物理特性见表 1。

表 1 供试土壤主要物理特性
Table 1 Main physical properties of tested soils

复垦年限 Reclamation time/a	供试土壤编号 Number of test soils	土层深度 Soil depth /cm	黏粒质量分数 (2~0.02 mm) Mass fraction of clay content/%	粉粒质量分数 (<0.02~0.002 mm) Mass fraction of silt content/%	砂粒质量分数 (<0.002 mm) Mass fraction of sand content/%	土壤质地 Soil texture	土壤容重 Soil bulk density /(g cm ⁻³)	根据土壤容重计算的 土壤孔隙度 Soil porosity calculated based on soil bulk density/%
23	Y23	0~25	1.38	37.28	61.34	砂质壤土	1.53	42.26
		>25~50	1.42	39.43	59.15	砂质壤土	1.56	41.13
		>50~75	1.28	35.18	63.54	砂质壤土	1.46	44.91
20	Y20	0~25	2.53	48.21	49.26	粉砂质壤土	1.58	40.37
		>25~50	2.47	47.31	50.22	粉砂质壤土	1.54	41.88
		>50~75	2.41	46.84	50.75	粉砂质壤土	1.48	44.15
0	Y0	0~25	2.93	43.16	53.91	粉砂质壤土	1.72	35.09
		>25~50	3.12	44.25	52.63	粉砂质壤土	1.68	36.60
		>50~75	4.08	44.89	51.03	粉砂质壤土	1.67	36.98
原状土	OL	0~25	3.58	42.7	53.72	粉砂质壤土	1.41	46.78
		>25~50	4.02	44.5	51.48	粉砂质壤土	1.43	46.03
		>50~75	4.15	43.6	52.25	粉砂质壤土	1.46	44.91

1.3 土壤样品 CT 扫描

将土壤样品利用 X 射线数字岩心分析设备 Nanotom 进行扫描。Nanotom 是一款高端的纳米焦点 X 射线数字岩心分析设备, 是由通用电气检测科技旗下的德国菲尼克斯 phoenix 研制和生产的计算机层析 CT 三维扫描设备和数字岩心数据处理与分析软件组成, 专业用于油气勘探和地质研究, 可对各种直径尺寸的岩石进行微米/纳米级别的结构和物理特性分析, 具有优越的三维扫描和岩心结构及多种特征参数分析功能, 如孔隙率、最小表征体积、粒度等。利用 X 射线数字岩心扫描分析设备可以通过计算机层析成像 CT 扫描进行原状土壤静态物理参数的完整描述, 并直观地表征不同大小直径的土壤孔隙

特性。

CT 扫描参数为: 最大管电压 180 kV, 平板探测器像素尺寸≤50 μm, 像素数量为 2 200×2 200, 最小体元像素尺寸<0.5 μm, 最大样品直径 120 mm, 最大样品高度 150 mm, 全封闭防护安全屏蔽室泄漏率<1 μSv/h, 供电为单相, 220 V 50 Hz; 压缩空气 600 kPa; 使用环境温度 10~30 ℃; 环境相对湿度最大 90%, 无冷凝。

1.4 CT 扫描图像处理

得到的土样横断面 CT 扫描 JPG 图像分辨率为 9 μm。将扫描图像输入到计算机, 在 Photoshop 7.0 软件中选择图像-模式-灰度选项, 将 RGB 彩色图像转化为灰度图, 保存为 BMP 格式。将 BMP 图片导入 ArcGIS10 地理信息

系统软件,利用 Spatial Analyst Tools 将灰度图像二值化,在转化的过程中需要注意的是阈值的设定,它关系到计算机将多少灰色区域转化为黑色区域或白色区域,对计算机所得的孔隙面积有一定影响。

本研究阈值通过以下方法确定:将未二值化的图像输入 AutoCAD2010 软件,并圈定 3 个较大的土壤孔隙,利用该软件的面积统计功能测定 3 个较大孔隙的面积。将不同阈值下二值化后的 3 个较大孔隙的面积与用 AutoCAD2010 统计的未二值化的进行比较,如果相差较大,重新设定阈值进行计算,直到所计算出的 3 个较大孔隙面积与未二值化的孔隙面积差值均在 1% 范围内,即可认为二值化的孔隙面积与真实孔隙面积相等。二值化后的图像中黑色区域表示孔隙,白色区域表示土壤基质,整个土柱断面为一近似圆形的封闭曲线,黑色的孔隙域用多边形表示,识别标志为“1”,松散的土壤团粒也用多边形表示,识别标志为“0”。形成的每一个黑色封闭的形体就可以计算为 1 个孔隙。再利用 Conversion Tool 中的 Raster to polygon 将二值化的图像矢量化,在图中的属性表中统计孔隙的面积 A , 周长 P , 最后将表转化为 excel 表格导出。

1.5 土壤孔隙参数计算

根据得到的横断面各孔隙面积 A 、周长 P , 计算各土壤横断面中各土壤孔隙的当量直径 ED (Equivalent Diameter), 其计算公式为^[17]: $ED=2(A/\pi)^{1/2}$ 。

由于本试验样品直径较小,扫描的精度较高,可以将土壤中的部分较小孔隙扫描出来,结合 Warner^[18]、Luxmoore^[19]和周虎^[17]的研究成果,确定本研究利用当量直径划分孔隙大小:大孔隙($ED>100\mu\text{m}$),中孔隙($30\mu\text{m}\leq ED\leq 100\mu\text{m}$),小孔隙($ED<30\mu\text{m}$)。由于图像分辨率的限制,本文中土壤孔隙仅指当量直径 $ED\geq 9\mu\text{m}$ 的孔隙部分。土壤孔隙度为各孔隙平面总面积与图像平面总面积之比。由于受到扫描精度的限制,不能扫描到非活性空隙,这在一定程度会影响土壤的总孔隙度。

2 结果与分析

2.1 土壤孔隙分布的图像特征

CT 扫描图像二值化处理后的 0~25、>25~50 和 >50~75 cm 土层深度的典型土壤孔隙的分布状况见图 1。利用高精度 CT 图像能够比较直观地反映不同复垦年限排土场及原地貌土壤大、中和小孔隙的分布状况。

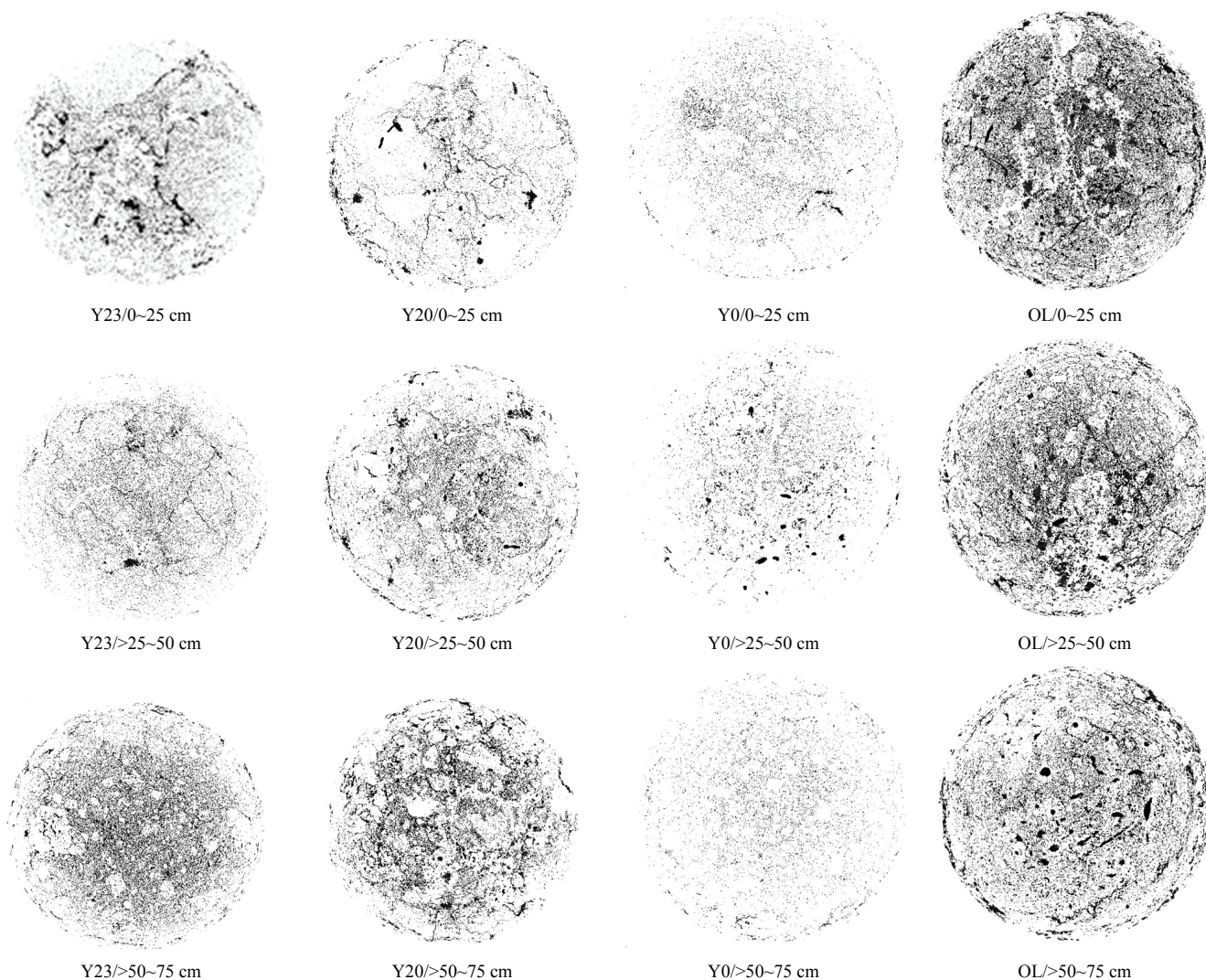


图 1 不同复垦年限不同土层深度土壤孔隙分布图

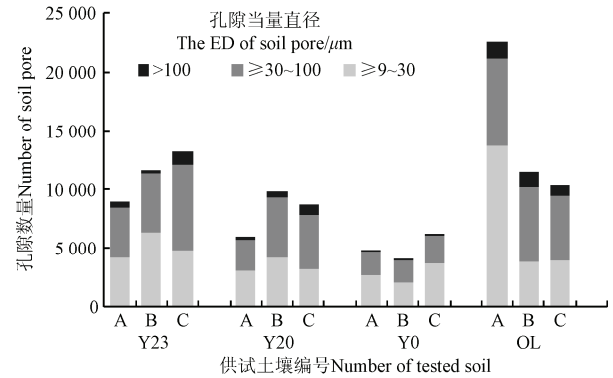
Fig.1 Distribution of soil pores at different soil depths from different reclamation years

未受采矿影响的原地貌各土层土壤孔隙总数量和可见大孔隙数量最多, 且其孔隙直径大小不均匀; 排土后还未进行复垦的内排土场各土层土壤孔隙数量最少, 且其可见的土壤大孔隙数量也最少, 土壤孔隙直径的大小比较均一; 而复垦年限为 20 a 和 23 a 的西排土场和南排土场各土层土壤孔隙数量较多, 可见的大孔隙数量也较多, 但是二者与原地貌大孔隙数量相比还具有一定的差距, 且相比于刚排完土未复垦的内排土场的土壤孔径分布更不均一。说明采矿和排土对土壤孔隙状况产生了影响, 造成了土壤紧实。随着复垦年限的增加, 复垦后排土场的土壤孔隙状况逐渐接近于原地貌, 但还未达到原地貌水平。

2.2 土壤孔隙数量变化

不同复垦年限和原地貌的不同土层深度土壤孔隙数量变化见图 2 和图 3。不同复垦年限和原地貌的不同土层深度土壤孔隙数量均有显著性差异 ($P<0.05$)。从整体上说, 原地貌土壤孔隙数量最多, 尤其是在 0~25 cm 表层土壤表现更为明显; 其次是复垦 23 a 和 20 a 的土壤, 排土后未复垦的土壤孔隙数量最少。说明采矿和排土等活动由于大型机械碾压减少了土壤孔隙数量, 土地复垦对

增加土壤孔隙数量有一定的作用、但是过程比较缓慢。对于原地貌土壤, 表层土壤孔隙数量远远高于底层土壤; 而对于未复垦和已复垦土壤其变化规律恰恰相反, 表层土壤孔隙数量则低于底层土壤。说明采矿和排土对表层土壤孔隙数量的影响要大于底层土壤。



注: A. 0~25 cm; B. >25~50 cm; C. >50~75 cm, 下同。
Note: A. 0~25 cm; B. >25~50 cm; C. >50~75 cm, the same below.

图 2 不同复垦年限不同土层深度土壤孔隙数量分布
Fig.2 Distribution of number of soil pores at different soil depths from different reclamation years

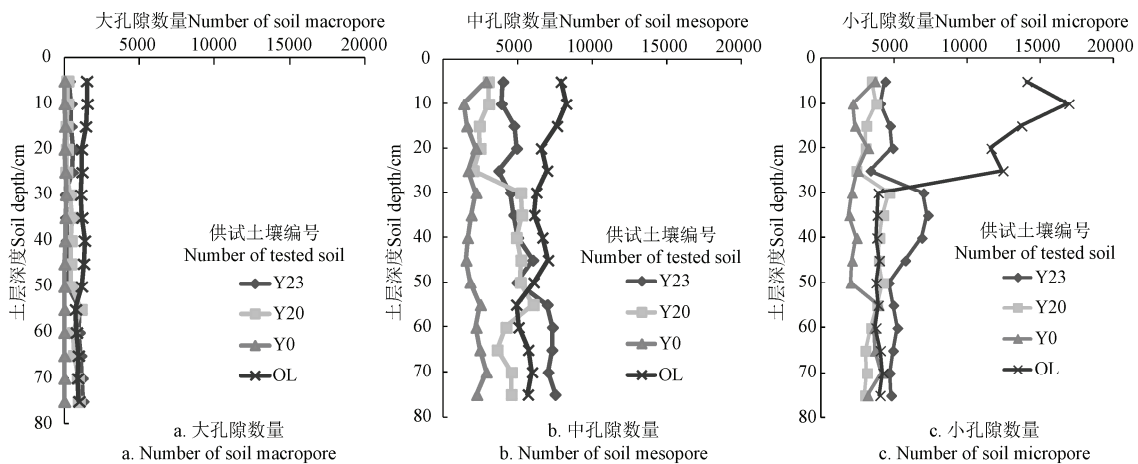


图 3 不同复垦年限不同土层深度土壤孔隙数量变化

Fig.3 Variation on number of soil pores at different soil depths from different reclamation years

除了原地貌土壤的 0~25 cm 土层, 各土壤的不同土层中的中孔隙数量最多, 其次是小孔隙, 土壤的大孔隙数量最少。对于不同土层的大、中、小孔隙数量, 也是原地貌土壤的最多, 其次是复垦 23 a 和复垦 20 a 的土壤, 刚排完土未复垦的土壤数量最少。

2.3 土壤孔隙度变化

由图 4 和图 5 可知, 土壤孔隙度变化和土壤孔隙数量变化具有类似的规律。不同复垦年限和原地貌的不同土层深度土壤孔隙度也存在显著性差异 ($P<0.05$)。从整体上说, 原地貌土壤度孔隙度最大, 尤其是在 0~25 cm 表层土壤; 其次是复垦 23 a 和 20 a 的土壤, 排土后未复垦土壤的孔隙度最小。说明采矿和排土等活动由于大型机械碾压在减少土壤孔隙数量的同时也降低了土壤孔隙

度, 土地复垦对增加土壤孔隙度有较好的作用, 且复垦土壤底层孔隙度增加比表层土壤明显。

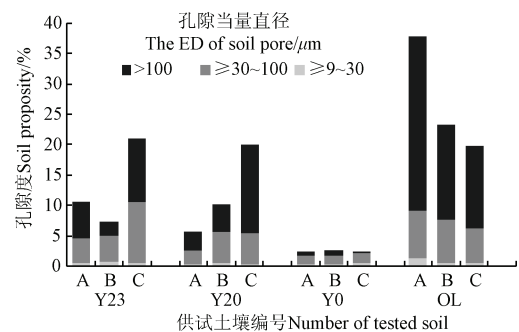


图 4 不同复垦年限不同土层深度土壤孔隙度分布
Fig.4 Distribution of soil porosity at different soil depths from different reclamation years

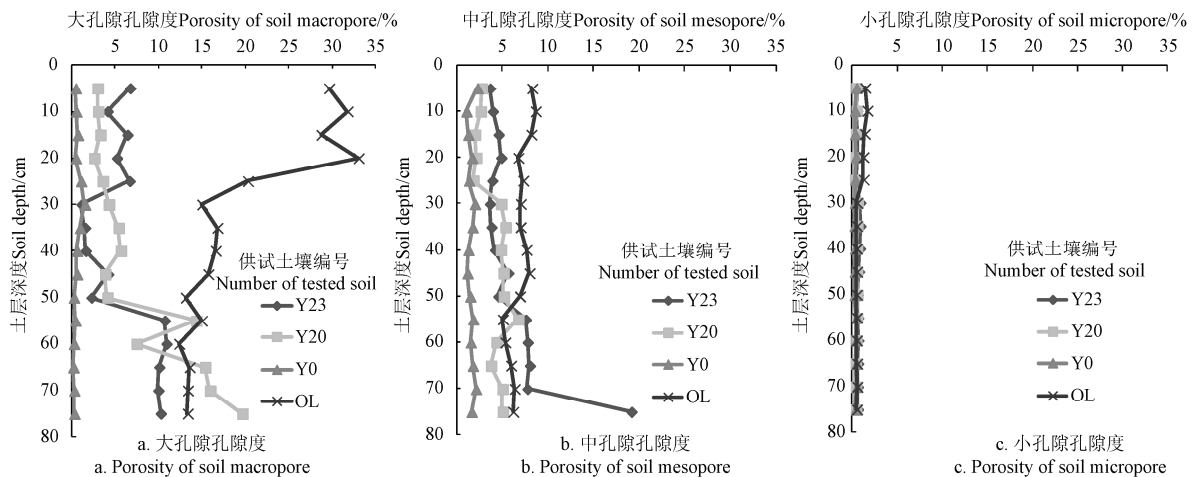


图 5 不同复垦年限不同土层深度土壤孔隙度变化

Fig.5 Variation on soil porosity at different soil depths from different reclamation years

排土场排土多采用扇形向外扩散排土工艺，排土高度多为一个台阶高度，台阶高度 10 m 左右，因此排土过程中表层土壤压实程度要高于底层土壤，这可能是造成复垦后的土壤表层的孔隙度比表层高的原因。对于原地貌土壤，表层土壤孔隙度远远高于底层土壤并随土层深度增加呈递减趋势；而对于已复垦土壤表层土壤孔隙度数则低于底层土壤，排土后未复垦土壤各层土壤孔隙度基本一致。也同样说明采矿和排土对表层土壤孔隙的影响要大于底层土壤。

对于原地貌和已复垦土壤，除了复垦 23 a 的 25~50 cm 土层外其余都是土壤的大孔隙度最大，其次是中孔隙度，小孔隙度最小。对于排土后未复垦的土壤，则是中孔隙度最大，其次是大孔隙度，小孔隙度也是最小。同样也说明，采矿和排土过程中由于大型机械碾压等作用降低了土壤孔隙度，尤其是大孔隙度。土地复垦能促进大孔隙的形成，从而增加大孔隙度。

3 讨论

3.1 采矿与排土对土壤孔隙数量和孔隙度的影响

露天开采将覆盖在矿床上的表土和岩石全部剥离，使原有的土壤孔隙状况遭到完全破坏；同时在排土过程中多采用土石混排大型机械压实的工艺，出现了非均匀沉降和地表严重压实问题，彻底改变了原地貌土壤孔隙结构^[20-22]。本研究中，排土后未复垦土壤的孔隙度远远低于原地貌土壤，以表层 0~25 cm 土壤为例，压实后未复垦土壤的孔隙度不到 5%，而未受扰动的原地貌土壤却达到了 37%。说明采矿和排土对土壤孔隙的影响非常大。土壤孔隙，尤其是大孔隙的一些性质（如数目、大小、形状、方向及空间分布等）决定着土壤中水分的流量、流速及持水性能等，影响着植被的生长^[22]。本研究中，排土后未复垦土壤大孔隙数量和大孔隙度分别只达到了原地貌土壤的 5.24% 和 3.02%，这必然会对土壤水分的入渗和地表径流产生影响，进而会加剧排土场的岩土侵蚀和边坡的稳定性^[23]。同时，与根据土壤容重换算得到土壤孔隙度比（表 1），根据图 2 可以推测出 CT 扫描无法

检测到的土壤非活性孔隙对于排土未复垦的土壤来说所占比例较大。这也说明，采矿和排土增加了土壤无效孔隙的数量。因此，在土地复垦过程中应通过深松、种植绿肥和施加有机肥等措施，增加复垦土壤表层大孔隙数量和大孔隙度，以改良表层土壤的持水性和通气性，进而促进复垦植被的生长，从而改善深层次土壤孔隙状况。

3.2 土地复垦对土壤孔隙数量和孔隙度的影响

有机质是土壤团聚体形成的最重要胶结物质，通过有机质中不同组分的作用，土壤中的颗粒或团聚体进行胶结，改变土壤的固体形态，从而也就改变了土壤孔隙的状况^[24]。土壤孔隙度随着碳含量的增加而增大^[25]，随着复垦时间的延长，越来越多的植物凋落物腐烂、分解并转化为有机质积累于土壤剖面中，致使有机质含量增加，而有机质含量的增加又使土壤孔隙特征发生变化。由此可见，复垦植被过程增加了土壤有机质的积累，从而驱动了土壤大孔隙特征的优化。根据表 1 和图 2 推测，复垦土壤与未复垦的土壤相比其无效孔隙所占总孔隙的比例也有所降低。土壤的孔隙状况除了受有机质累积的影响外，可能与植物根系的活动及土壤动物等因素有关。本研究中，复垦 23 a 和 20 a 土壤中大孔隙度随深度增加呈现先减小后增加的趋势，而原地貌土壤大孔隙度随深度增加有明显减少的趋势，这也与 Asare 等^[26]应用 CT 技术研究的大孔隙的变化趋势相同，其认为大孔隙的形成机理与地上残留物、植物根系类型及土壤动物等因素有关。

植被的类型及土地利用类型也会影响土壤大孔隙的分布^[27-28]，复垦 23 a 和 20 a 的排土场种植植物为抗旱乔、灌木林类型，其植被的根系较深，因此在土壤深度为 50~75 cm 处的大孔隙数量较多。复垦 23 a 的土壤由于人工种植植被的年限较长，随着植被群落的演替，群落结构及种类组成趋于复杂和稳定^[29]，表层植被的枯枝落叶比复垦 20 a 和未复垦的土壤表层多，相应的导致表层土壤中孔隙较多^[30]，而有机质等土壤养分方面的差异又导致植被的土壤根系对土壤的疏松程度不同，因此在 50~75 cm 处复垦 23 a 土壤比复垦 20 a 和未复垦土壤的孔隙多。而

原地貌植被以草地为主, 植被的根系较浅, 土壤微生物及植被的腐蚀物质集中于表层, 导致其在表层的孔隙数最多, 而在 50~75 cm 处孔隙数不及复垦 23 a 土壤多。

4 结 论

本文通过先进的无损 CT 扫描技术对山西平朔矿区安太堡露天煤矿排土场平台全黄土母质覆盖的不同复垦年限以及原地貌的土壤进行分层扫描成像分析, 研究了排土和复垦对土壤孔隙数量和孔隙度的影响, 通过研究得出结论如下:

1) 高精度 CT 扫描图片直观地反映了排土场重构土壤内孔隙的大小、数目和分布状况, CT 扫描技术方便了复垦土壤孔隙变化研究。

2) 原地貌土壤孔隙数量和孔隙度最大, 其次是复垦土壤, 排土后未复垦土壤孔隙数量和孔隙度最小。采矿和排土等活动由于大型机械压实作用降低了土壤孔隙数量和孔隙度, 尤其是大孔隙数量和大孔隙度; 土地复垦对增加土壤孔隙数量和孔隙度有一定的作用。

3) 采矿和排土等活动对表层土壤孔隙数量和孔隙度的影响要高于底层土壤。在土地复垦过程中应通过深松、种植绿肥和施加有机肥等措施, 增加复垦土壤表层大孔隙数量和大孔隙度。

[参 考 文 献]

- [1] 白中科, 李晋川, 王文英, 等. 中国山西平朔安太堡露天煤矿退化土地生态重建研究[J]. 中国土地科学, 2000, 14(4): 1—4.
- [2] 陕永杰, 郝 蓉, 白中科, 等. 矿区复合生态系统中土壤演替和植被演替的互相影响[J]. 煤矿环境保护, 2001, 15(5): 28—30.
Shan Yongjie, Hao Rong, Bai Zhongke, et al. Interactions of soil successions and vegetation successions in complex ecosystem of mine area[J]. Coal Mine Environmental Protection, 2001, 15(5): 28—30. (in Chinese with English abstract)
- [3] 胡振琪. 煤矿山复垦土壤剖面重构的基本原理和方法[J]. 煤炭学报, 1997, 22(6): 617—622.
Hu Zhenqi. Principle and method of soil profile reconstruction for coal mine land reclamation[J]. Journal of China Coal Society, 1997, 22(6): 617—622. (in Chinese with English abstract)
- [4] Vogel H J, Roth K. Quantitative morphology and network representation of soil pore structure [J]. Advances in Water, 2001, 24(3/4): 233—242.
- [5] 韩武波, 马 锐, 白中科, 等. 黄土区大型露天煤矿排土场水土流失评价[J]. 煤炭学报, 2004, 29(4): 400—404.
Han Wubo, Ma Rui, Bai Zhongke, et al. Water and soil loss assessment of the dump in the large opencast mine in loess area[J]. Journal of China Coal Society, 2004, 29(4): 400—404. (in Chinese with English abstract)
- [6] 王金满, 杨睿璇, 白中科. 草原区露天煤矿排土场复垦土壤质量演替规律与模型[J]. 农业工程学报, 2012, 28(14): 229—235.
Wang Jinman, Yang Ruixuan, Bai Zhongke. Succession law and model of reclaimed soil quality of opencast coal mine dump in grassland[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(14): 229—235. (in Chinese with English abstract)
- [7] 李新举, 胡振琪, 李晶, 等. 采煤塌陷地复垦土壤质量研究进展[J]. 农业工程学报, 2007, 23(6): 276—280.
Li Xinju, Hu Zhenqi, Li Jing, et al. Research progress of reclaimed soil quality in mining subsidence area[J]. Transactions of the Chinese Society Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2007, 23(6): 276—280. (in Chinese with English abstract)
- [8] 孙海运, 李新举, 胡振琪, 等. 马家塔露天矿区复垦土壤质量变化[J]. 农业工程学报, 2008, 24(12): 205—209.
Sun Haiyun, Li Xinju, Hu Zhenqi, et al. Variance of reclamation soil quality in Majiata opencast mine region [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2008, 24(12): 205—209. (in Chinese with English abstract)
- [9] 程亚南, 刘建立, 张佳宝. 土壤孔隙结构定量化研究进展[J]. 土壤通报, 2012, 43(4): 988—994.
Chen Yanan, Liu Jianli, Zhang Jiabao. Advance in the study on quantification of soil pore structure[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2012, 43(4): 988—994. (in Chinese with English abstract)
- [10] 郭飞, 徐绍辉, 刘建立. 土壤样本分形几何特征的图像分析方法[J]. 土壤学报, 2005, 42(1): 24—29.
Guo Fei, Xu Shaohui, Liu Jianli. On fractal Geometry characteristics of soil sample images[J]. Acta Pedologica Sinica, 2005, 42(1): 24—29. (in Chinese with English abstract)
- [11] 张季如, 黄丽, 祝杰, 等. 微观尺度上土壤孔隙及其分维数的 SEM 分析[J]. 土壤学报, 2008, 45(2): 207—215.
Zhang Jiru, Huang Li, Zhu Jie, et al. SEM analysis of soil pore and its fractal dimension on micro scale[J]. Acta Pedologica Sinica, 2008, 45(2): 207—215. (in Chinese with English abstract)
- [12] 周云艳, 徐 琨, 陈建平, 等. 基于 CT 扫描与细观力学的植物侧根固土机理分析[J]. 农业工程学报, 2014, 30(1): 1—9.
Zhou Yunyan, Xu Kun, Chen Jianping, et al. Mechanism of plant lateral root reinforcing soil based on CT scan and mesomechanics analysis[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2014, 30(1): 1—9. (in Chinese with English abstract)
- [13] 冯杰, 郝振纯. CT 扫描确定土壤大孔隙分布[J]. 水科学进展, 2002, 13(5): 611—617.
Feng Jie, Hao Zhenchun. Distribution of soil macropores characterized by CT[J]. Advances in Water Sciences, 2002, 13(5): 611—617. (in Chinese with English abstract)
- [14] 程亚南, 刘建立, 吕菲, 等. 基于 CT 图像的土壤孔隙结构三维重建及水力学性质预测[J]. 农业工程学报, 2012, 28(22): 115—122.

- Cheng Ya'nan, Liu Jianli, Lü Fei, et al. Three-dimensional reconstruction of soil pore structure and prediction of soil hydraulic properties based on CT images[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(22): 115—122. (in Chinese with English abstract)
- [15] 吕菲, 刘建立, 何娟. 利用 CT 数字图像和网络模型预测近饱和土壤水力学性质[J]. 农业工程学报, 2008, 24(5): 10—14.
- Lü Fei, Liu Jianli, He Juan. Prediction of near saturated soil hydraulic properties by using CT images and network model[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2008, 24(5): 10—14. (in Chinese with English abstract)
- [16] 冯杰, 郝振纯. 分形理论在描述土壤大孔隙结构中的应用研究[J]. 地球科学进展, 2004, 19(增刊): 270—274.
- Feng Jie, Hao Zhenchun. Study on application of fractal theory to describe soil macropore structure [J]. Advance in Earth Sciences, 2004, 19(Supp.): 270—274. (in Chinese with English abstract)
- [17] 周虎, 李保国, 吕贻忠, 等. 不同耕作措施下土壤孔隙的多重分形特征[J]. 土壤学报, 2010, 47(6): 1094—1100.
- Zhou Hu, Li Baoguo, Lü Yizhong, et al. Multifractal characteristics of soil pore structure under different tillage systems[J]. Acta Pedologica Sinica, 2010, 47(6): 1094—1100. (in Chinese with English abstract)
- [18] Warner G S, Nieber J L, Moore I D, et al. Characterizing macro-pores in soil by computed tomography[J]. Soil Science Society of America Journal, 1989, 53: 653—660.
- [19] Luxmoore R J, Jarding P M, Wilson G V, et al. Physical and chemical controls of preferred path flow through a forested hill slope[J]. Geoderma. 1990, 46(1/3): 139—154.
- [20] 毕如田, 白中科, 叶宝莹, 等. 安太堡露天煤矿排土场景观结构及其分形研究[J]. 中国农学通报, 2007, 23(4): 339—344.
- Bi Rutian, Bai Zhongke, Ye baoying, et al. Study on landscape structure and fractal of the dumping place in Antaibao opencast coal mine[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2007, 23(4): 339—344. (in Chinese with English abstract)
- [21] 王金满, 张 萌, 白中科, 等. 黄土区露天煤矿排土场重构土壤颗粒组成的多重分形特征[J]. 农业工程学报, 2014, 30(4): 230—238.
- Wang Jinman, Zhang Meng, Bai Zhongke, et al. Multi-fractal characteristics of reconstructed soil particle in opencast coal mine dump in loess area[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2014, 30(4): 230—238. (in Chinese with English abstract)
- [22] 刘宁, 李新举, 郭斌, 等. 机械压实过程中复垦土壤紧实度影响因素的模拟分析[J]. 农业工程学报, 2014, 30(1): 183—190.
- Liu Ning, Li Xinju, Guo Bin, et al. Simulation analysis on influencing factors of reclamation soil compaction in mechanical compaction process[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2014, 30(1): 183—190. (in Chinese with English abstract)
- [23] 华珊, 陈研, 梁露焘, 等. 利用基于偏微分方程的图像滤波技术研究土壤孔隙结构[J]. 农业工程学报, 2014, 30(3): 78—85.
- Hua Shan, Chen Yan, Liang Lutao, et al. Studying soil pore structure by using image filtering technology based on partial differential equation model[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2014, 30(3): 78—85. (in Chinese with English abstract)
- [24] 魏忠义, 胡振琪, 白中科. 露天煤矿排土场平台“堆状地面”土壤重构方法[J]. 煤炭学报, 2001, 26(1): 19—22.
- Wei Zhongyi, Hu Zhenqi, Bai Zhongke. The loose-heaped-ground method of soil reconstruction on the stackpiles of open-pit coal mine[J]. Journal of China Coal Society, 2001, 26(1): 19—22. (in Chinese with English abstract)
- [25] 彭新华, 张斌, 赵其国. 土壤有机碳库与土壤结构稳定性关系的研究进展[J]. 土壤学报, 2004, 41(4): 618—623.
- Peng Xinhua, Zhang Bin, Zhao Qiguo, et al. A review on relationship between soil organic carbon pools and soil structure stability[J]. Acta Pedologica Sinica, 2004, 41(4): 618—623. (in Chinese with English abstract)
- [26] Emerson W W, McGarry D. Organic carbon and soil porosity[J]. Australian Journal of Soil Research, 2003, 41(1): 107—118.
- [27] Asare S N, Rudra R P, Dickinson W T, et al. Soil macroporosity distribution and trends in a no-till plot using a volume computer tomography scanner[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 2001, 78(4): 437—447.
- [28] 郑子成, 李廷轩, 张锡洲, 等. 不同土地利用方式下土壤团聚体的组成及稳定性研究[J]. 水土保持学报, 2009, 23(5): 228—231.
- Zheng Zicheng, Li Tingxuan, Zhang Xizhou, et al. Study on the composition and stability of soil aggregates under different land use[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2009, 23(5): 228—231. (in Chinese with English abstract)
- [29] 赵辉, 陈国玉, 解明曙, 等. 湖南武水流域不同土地利用类型土壤结构分形特征研究[J]. 土壤通报, 2009, 40(5): 993—997.
- Zhao Hui, Chen Guoyu, Xie Mingshu, et al. Study on fractal property of red soil structure derived from granite under different land-use types in Hunan[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2009, 40(5): 993—997. (in Chinese with English abstract)
- [30] 王金满, 郭凌俐, 白中科, 等. 黄土区露天煤矿排土场复垦后土壤与植被的演变规律[J]. 农业工程学报, 2013, 29(21): 223—232.
- Wang Jinman, Guo Lingli, Bai Zhongke, et al. Succession law of reclaimed soil and vegetation on opencast coal mine dump of loess area[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(21): 223—232. (in Chinese with English abstract)

Effects of land reclamation time on soil pore number and porosity based on computed tomography (CT) images in opencast coal mine dump

Wang Jinman^{1,2}, Guo Lingli¹, Bai Zhongke^{1,2*}, Qin Qian¹, Lü Chunjuan³

(1.College of Land Science and Technology, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2.Key Laboratory of Land Consolidation and Rehabilitation, Ministry of Land and Resources, Beijing 100035, China; 3.College of Resources and Environmental Science, Shanxi Agriculture University, Taigu 030801, China)

Abstract: Opencast coal mining is an anthropogenic activity that changes the antecedent soil profile, and the physical, chemical and biological properties. The compaction activities of large machinery play a great effect on reconstructed soil pore structure in opencast coal-mine dump, so it is an important work to reconstruct a suitable soil pore structure for vegetation growth during the land reclamation for dump. In order to make a quantitative analysis on the pore number and porosity of reconstructed soils in dump, high precision and lossless computed tomography (CT) was used to study the effect of opencast coal-mining, land reclamation and dumping on soil pore number and porosity by scanning the soils in Antaibao opencast coal mine in Pingshuo mining area, Shanxi Province, China. The soils were taken from the dump platform covered by loess parent material, which were the ones with different reclamation time (0, 20 and 23 a) and the one of original landform. The softwares, including Photoshop 7.0, ArcGIS 10 and AutoCAD 2010, were used to process the scanned image and carry out statistical analysis for soil pore properties, and the image characteristics of soil pores and the changes in the number of soil pores and the porosity were analyzed. The changes in macropores, mesopores and micropores of reconstructed soils were also studied in this paper. The results indicated that: 1) Applying the combination method of high precision CT scan imaging technology and computer graphics software could accurately analyze the size, number and distribution of reconstructed soil in opencast coal-mine dump; 2) The number of soil pores and the porosity in original landform were the largest, followed by the soils reclaimed for 23 and 20 years, and the soils after dumping before reclamation were the lowest; 3) Opencast coal-mining and dumping activities reduced the number of soil pores and the porosity because of the effects of large mechanical compaction, especially for macropores, and land reclamation had a certain function of increasing soil pore size and improving soil porosity; 4) The effect of mining, dumping and other activities on the number of soil pores and the soil porosity for surface soils was higher than that for the bottom soils. During the land reclamation process, subsoiling, planting green manure, applying organic fertilizer and other land reclamation measures should be used to increase the number of reclaimed soil pores and the porosity of macropore on surface soils. This research can provide theoretical reference for the quantitative expression of reconstructed soil pores' distribution, the selection of land reclamation measures, and the optimization of reconstructed soil structure in opencast coal-mine dumps in loess areas.

Keywords: land reclamation; soils; porosity; opencast coal mine; loess area; CT scan