

秦倩,王金满,白中科,等. 基于CT扫描的露天煤矿排土场重构土壤孔隙三维重建及定量表征[J]. 煤炭学报, 2016, 41(S1): 109-117. doi:10.13225/j.cnki.jccs.2015.1120

Qin Qian, Wang Jinman, Bai Zhongke, et al. Three-dimensional reconstruction and quantitative characterization of reconstruction soil pore at opencast coal mine dump based on CT scanning[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(S1): 109-117. doi:10.13225/j.cnki.jccs.2015.1120

## 基于CT扫描的露天煤矿排土场重构土壤孔隙 三维重建及定量表征

秦倩<sup>1</sup>, 王金满<sup>1,2</sup>, 白中科<sup>1,2</sup>, 郭凌俐<sup>1</sup>, 王洪丹<sup>1</sup>

(1. 中国地质大学(北京)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)

**摘要:** 土壤孔隙对水分、养分的运移起着重要作用, 重构土壤孔隙状况反映着复垦土壤质量的高低。通过对安太堡露天煤矿不同复垦年限排土场重构土壤(23, 20, 0 a)以及原地貌土壤进行CT扫描, 获取土壤孔隙信息, 基于Matlab平台进行土壤孔隙分布的三维重建, 并搜索土壤孔隙团的个数及每个孔隙团的体积大小, 计算土壤孔隙度, 实现了重构土壤孔隙状况的定量表征。结果表明: 随着复垦年限的增加, 重构土壤孔隙度、连通性得到显著性提高, 其中复垦23 a土壤孔隙状况最好, 50~75 cm土层孔隙度最大, 为23.92%, 其次为复垦20 a土壤, 25~50 cm土层孔隙度最大, 为14.58%, 未复垦土壤因受大型机械的压实作用, 孔隙连通性最差, 3个土层孔隙分布比较均一, 孔隙度都接近于3%; 孔隙团个数、最大孔隙团体积与孔隙度都符合较好的线性关系, 随着孔隙度的增加, 孔隙团的个数呈减小的趋势, 最大孔隙团体积呈递增趋势; 每个重建区域除最大孔隙团外, 其余团的体积非常小。为了改善未复垦排土场土壤孔隙状况, 应尽快进行植被恢复。

**关键词:** CT扫描; 土地复垦; 重构土壤; 土壤孔隙; 三维重建

中图分类号: TD854.7 文献标志码: A 文章编号: 0253-9993(2016)S1-0109-09

### Three-dimensional reconstruction and quantitative characterization of reconstruction soil pore at opencast coal mine dump based on CT scanning

QIN Qian<sup>1</sup>, WANG Jin-man<sup>1,2</sup>, BAI Zhong-ke<sup>1,2</sup>, GUO Ling-li<sup>1</sup>, WANG Hong-dan<sup>1</sup>

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

**Abstract:** Soil pore plays an important role in migrating water and nutrient, the pore of reconstructed soil reflects the quality of reclaimed soil. In this paper, the reconstruction soil of different reclamation years at Antaibao opencast coal mine including 23 years, 20 years and 0 years old and the soil of original landform were chosen to be scanned to obtain the information of soil pore. Soil pore distribution in three-dimension was reconstructed at matlab platform, then quantitative characterization was realized by searching the number of soil pore groups and the volume of each group. The soil porosity was also calculated. The results indicate that the porosity and connectivity of reconstructed soil had been significantly improved as reclamation years increasing. The condition of reclaimed soil pore of 23 years old is the best, the porosity of 50-75 cm layer is the largest, and its value is 23.93%. The second one is the 20 years old soil, the porosity of 25-50 cm layer is the largest, and its value is 14.58%. The connectivity of unreclaimed soil pore was the worst as compacted by the large mechanism. The porosity of three soil layers are all close to 3%, the distribution of the pore is relatively uniform. The number of pore groups and the volume of the largest pore group all have a good linear relation-

收稿日期: 2015-07-29 修回日期: 2015-12-13 责任编辑: 韩晋平

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

作者简介: 秦倩(1991—), 女, 安徽安庆人, 硕士。E-mail: qinqian2013@163.com。通讯作者: 王金满(1979—), 男, 内蒙古赤峰人, 副教授。E-mail: wangjinman2002@163.com

ship with the porosity. With the increasing porosity, the number of the pore groups is decreasing, the volume of the largest pore group is increasing. The volume of pore groups is very small except the largest one. In order to improve the condition of pore of unreclaimed soil, the vegetation restoration should be carried out as soon as possible.

**Key words:** CT scanning; land reclamation; reconstruction soil; soil pore; three-dimensional reconstruction

露天煤矿开采是一种高速度、大规模改变生态环境的生产活动,严重损坏了地表土壤与植被,且露天矿多分布在黄土高原等生态脆弱区,露天开采使该区的生态环境更加恶劣。因此,在复垦中重构具有良好理化性质与肥力条件的土壤,以促进矿区植被快速恢复至关重要。在排土场排土及复垦时受大型机械的碾压,土壤颗粒重新排列<sup>[1]</sup>,土壤紧实度增大,致使土壤孔隙度减小、充气孔隙的数量减小,从而改变了土壤的三相比,直接影响土壤的理化性质、肥力、通气及水分运移状况等,进而影响到矿区植被恢复及复垦的效果。因此,对矿区排土场土壤孔隙进行研究十分必要。

土壤孔隙是指土壤中土粒或团聚体之间以及团聚体内部的孔隙,土壤孔隙结构对水分溶质的运移、渗透,土壤肥力等都有很大的影响<sup>[2-3]</sup>。目前,国内外关于土壤孔隙的研究很多。在土壤孔隙的获取上从一开始的间接法、切片法<sup>[4]</sup>发展到CT扫描<sup>[5-6]</sup>、核磁共振等无损三维成像技术,使土壤孔隙趋于更加直接、精确的研究,在土壤孔隙的研究方法上也引入了分形、多重分形理论<sup>[7-8]</sup>,实现了量化研究。但目前只有少数学者实现了土壤孔隙的三维重建,三维重建可直观显示孔隙的三维分布,为土壤孔隙的研究提供了一种新的手段。刘亚南等<sup>[9]</sup>利用CT扫描图像,通过自行设计的三维重构软件,对土壤孔隙结构进行了三维重建,并根据孔隙形态学参数建立了预测水力性质的网络模型。Ngom等<sup>[10]</sup>用几何模型对传统耕作土地和草地的土壤孔隙进行了三维重建,计算了孔隙半径、曲折率、滞留曲线等土壤几何特征,表明传统耕作土壤相比草地的小孔隙更多。Ojeda-Magaña等<sup>[11]</sup>使用PFCM聚类划分方法来识别土壤孔隙并对土壤孔隙进行了三维重建。此外,其他几位学者<sup>[12-14]</sup>在矿石及煤结构中实现了三维重建,但现有的研究大多只停留在重建的层面上,很少对每个土壤孔隙团的体积进行计算,且涉及重构土壤的很鲜见。

笔者基于Matlab平台,通过获取的CT扫描图片,对不同复垦年限重构土壤孔隙进行三维重建,展示土壤孔隙的三维分布及连通性,并对孔隙团的数量和孔隙团的体积大小进行分析,揭示不同复垦年限土

壤孔隙的分布规律,以为露天矿区的复垦工作与土壤质量的改良提供指导。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

本研究区选取在山西省平朔露天矿区的安太堡煤矿,该矿位于黄土高原东部、山西省北部的朔州市平鲁区境内,地理坐标为 $112.17^{\circ} \sim 113.50^{\circ} \text{E}$ ,  $39.38^{\circ} \sim 39.62^{\circ} \text{N}$ 。该矿区土壤主要为栗钙土,土壤肥力较低,土壤物理风化作用强烈。该区属于典型的温带半干旱大陆性季风气候,春冬季风大,风沙严重,夏季凉爽,平均气温为 $4.8 \sim 7.8^{\circ} \text{C}$ ,年降水量为450 mm左右。本研究主要选择了安太堡矿区的南排土场、西排土场以及内排土场,其中南排土场、西排土场植被复垦生态恢复效果显著,形成了林、草、灌结合的多层次、多结构的生态景观,内排土场还未进行植被恢复措施。矿区植被主要为榆树、刺槐、油松、沙棘等。

### 1.2 土壤样品的采集

本次采样选取的是安太堡矿复垦23 a的南排土场( $Y_{23}$ )、复垦20 a的西排土场( $Y_{20}$ )、刚排完土未复垦的内排土场( $Y_0$ ),另外选取原地貌作为对照组( $Y$ ),分别开挖100 cm的土壤剖面,使用直径为2 cm、高为10 cm的有机玻璃管,分层采集0~25, 25~50, 50~75 cm原状土样,共12个土样,将采集样品密封以供CT扫描。采样点具体情况及供试土壤主要物理特性见表1。

### 1.3 CT扫描

采集的土壤样品在航天特种材料及工艺技术研究所以进行CT扫描,本次扫描所用设备为PHOENIX公司生产的X射线数字岩心分析设备,该仪器主要由焦点X射线管、机械转台、探测器、样品室、计算机断层扫描软件等组成,最大管电压为180 kV,最大管功率为15 W,体元分辨率与样品的直径和密度相关,本次扫描最小体元分辨率为 $9 \mu\text{m}$ ,通过扫描可以在不破坏土壤结构的情况下获取完整的静态物理参数。土壤样品CT扫描的过程为:将样品置于样品室内的机械转台上,在CT检测时,物体在X射线束中旋转,射线在土壤孔隙与土壤基质中有不同的衰减情况,探测器接收到穿过土壤样品的射线信号,通过计算机软

件实现土壤断面图片的重建,CT 扫描图片如图 1 所示。CT 图像是由一定数目由黑到白不同灰度的像素

按矩阵排列所构成,土壤孔隙与土壤基质具有不同的灰度值,因此可以提取土壤孔隙信息。

表 1 取样点具体情况及供试土壤主要物理特性

Table 1 Specific information of sampling point and the main physical properties of tested soils

供试土壤	土层深度/cm	黏粒含量/%	粉粒含量/%	砂粒含量/%	土壤质地	土壤密度/ ( $g \cdot cm^{-3}$ )	根据土壤密度计算的土壤孔隙度/%	表层土壤覆盖类型	主要植被类型
Y <sub>23</sub>	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	黄土覆盖	榆树、油松、刺槐
	50~75	1.28	35.18	63.54	砂质壤土	1.46	44.90		
Y <sub>20</sub>	0~25	2.53	48.21	49.26	粉砂质壤土	1.58	40.38		刺槐
	25~50	2.47	47.31	50.22	粉砂质壤土	1.54	41.89	黄土覆盖	沙棘、榆树、
	50~75	2.41	46.84	50.75	粉砂质壤土	1.48	44.15		
Y <sub>0</sub>	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	黄土覆盖	无
	50~75	4.08	44.89	51.03	粉砂质壤土	1.67	36.98		
Y	0~25	3.58	42.7	53.72	粉砂质壤土	1.41	46.79		
	25~50	4.02	44.5	51.48	粉砂质壤土	1.43	46.04	黄土覆盖	草地
	50~75	4.15	43.6	52.25	粉砂质壤土	1.46	44.91		

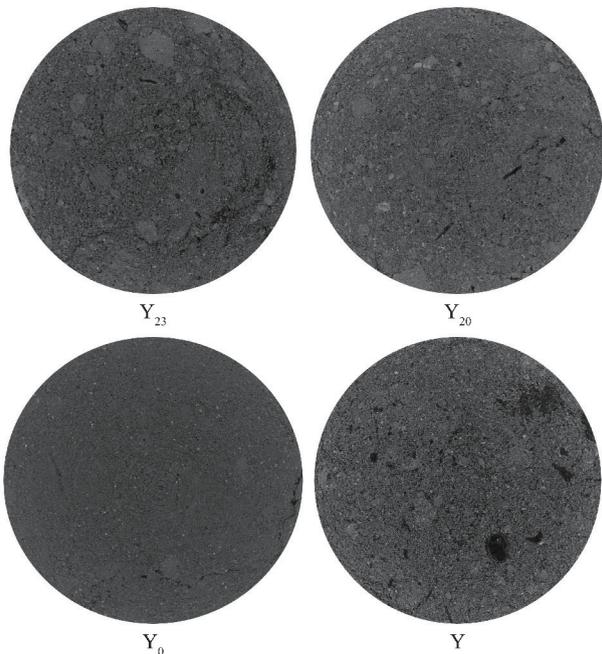


图 1 不同复垦年限土壤 CT 扫描图

Fig. 1 CT scanning images of different reclamation years soil

#### 1.4 土壤孔隙三维重建

基于 Matlab(2009),编写程序实现土壤孔隙的三维重建,主要步骤如下:将 CT 扫描图片导入 Matlab,经过插值处理与三维矩阵的构建得到土壤样品的三维重建图,接着选取合适的阈值进行二值化处理,提取孔隙单元并进行重绘,得到重构土壤孔隙三维分布图,其中黑色代表孔隙,表示为“0”,白色代表土壤基质,表示为“1”。

由于计算机内存有限,本研究每个样点选取了 20 张连续 CT 图片,每张图片选取边长为  $150 \times 150$  个像素点大小的区域进行三维重建,共设置 A,B,C 三个重复,如图 2 所示。

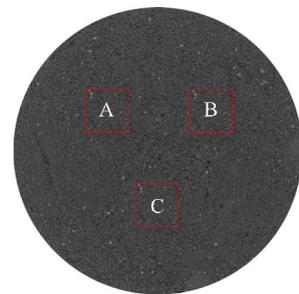


图 2 三维重建位置示意

Fig. 2 Diagram of three-dimensional reconstruction positions

阈值确定的过程如下:每个样点选择一张 CT 图片,选取图片中一个大孔隙进行图像分析计算,得到孔隙面积大小数值,然后随意给定一个阈值,对选出的 CT 图片进行二值化处理,将二值化处理后该孔隙面积与未二值化处理的该孔隙面积大小进行比较,如果相差较大,则重新设定阈值进行试验,当计算出的孔隙面积与未二值化处理的孔隙面积差值非常小时,即可认为二值化处理的孔隙面积与真实的孔隙面积相等,故选用该阈值作为二值化阈值。

#### 1.5 孔隙团搜索

根据土壤孔隙三维分布图,搜索土壤孔隙团的个数及每个孔隙团体积大小,计算土壤孔隙度,土壤孔隙度指的是重建样品中孔隙的体积与整个重建土壤

样品体积的比值。本研究的体积以像素点的个数表示。搜索时,以每个像素点的灰度值来判断该点是否为孔隙,如果灰度值为0,则为孔隙;灰度值为1,则为土壤基质,则孔隙团即为0的连通域。假如搜索的像素点的值是0,就对这个像素点周围的点进行判断,如果周围有0,在其周围是0的像素点继续往下判断,直到附近的像素点没有0值出现,则认为连通域判断完毕,即可计算出这个连通域内有多少个0值像素点;在连通域的判别过程中,对搜索过的点进行排序,以避免在下一轮搜索中重复记录,同时记录每一

个连通域内的像素个数,最后序号的最大值就是连通域所含像素点的个数,每一个孔隙团的体积大小就可以用这个孔隙团所对应的连通域内的像素个数来表征。孔隙团的个数、孔隙度及其他参数取A,B,C三个处理的平均值。

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤孔隙三维分布

不同复垦年限重构土壤三维重建及孔隙三维分布如图3,4所示。

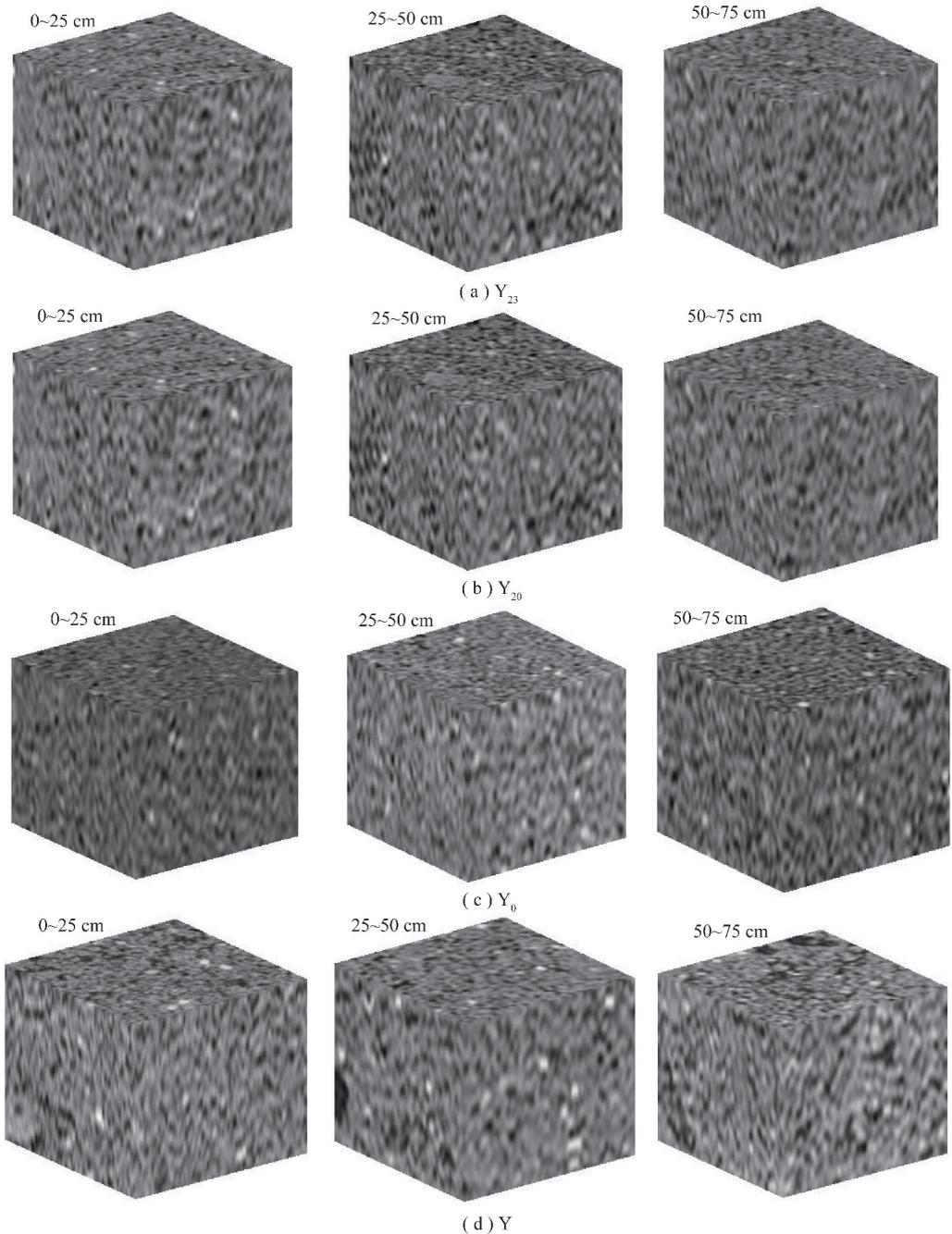


图3 不同复垦年限重构土壤三维重建

Fig. 3 Three-dimensional of reconstruction soil under different reclamation years

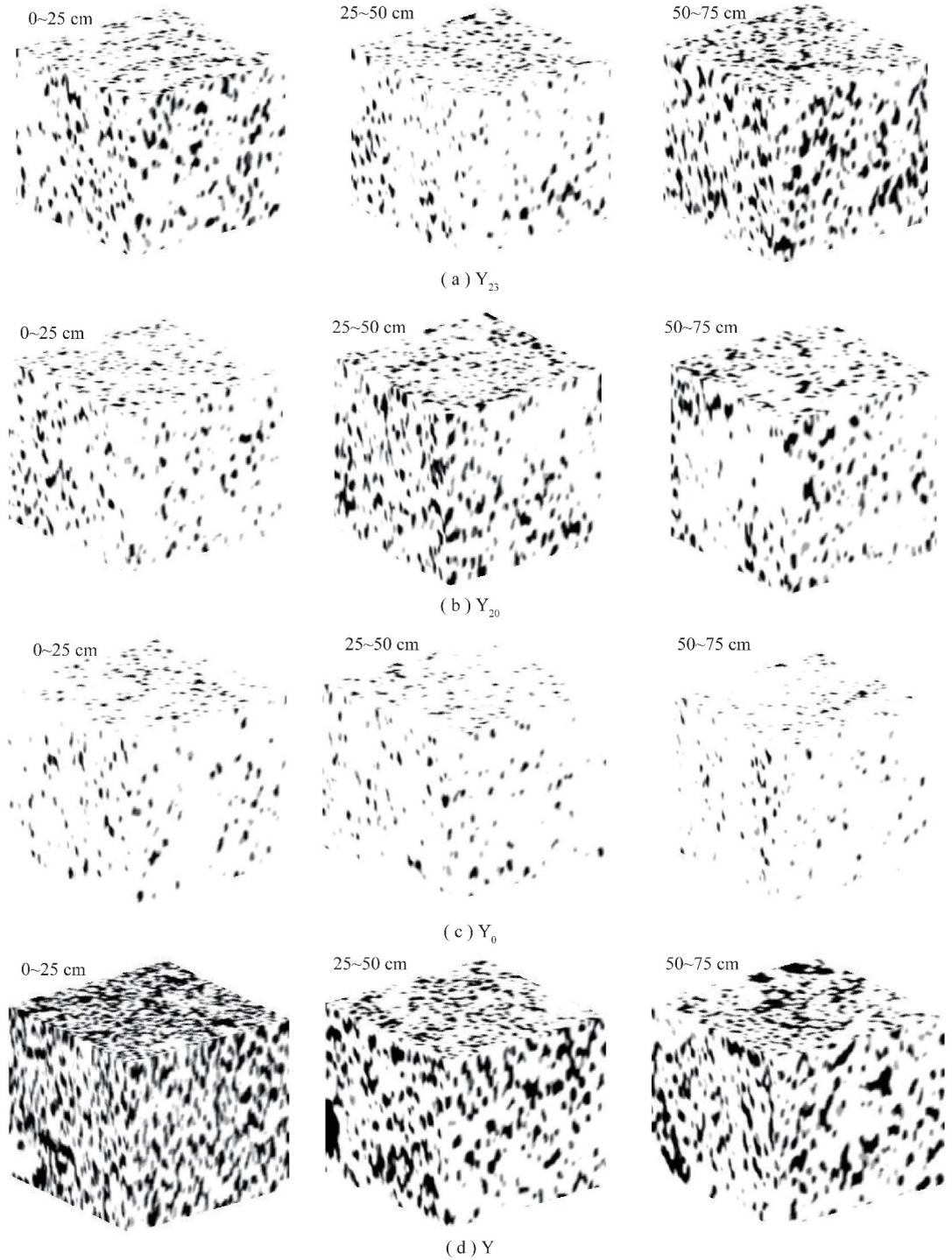


图 4 不同复垦年限重构土壤孔隙三维分布

Fig. 4 Three-dimensional distribution of reconstruction soil pore under different reclamation years

由图 4 可看出原地貌孔隙数量最多,孔隙形态最为复杂、不规则,在重构土壤中,复垦 23 a 和复垦 20 a 的土壤孔隙较多,未复垦的土壤孔隙很少,且孔隙形态比较单一。每个复垦年限不同土层土壤孔隙分布情况也有所不同,在复垦 23 a 的土壤孔隙分布图中可以看出,50 ~ 75 cm 土层土壤孔隙最多,0 ~ 25 cm 土层次之,25 ~ 50 cm 土层孔隙最少;在复垦 20 a 的土壤孔隙分布图中可知,25 ~ 50 cm 与 50 ~

75 cm 土层孔隙较多,两土层孔隙量相差不大,0 ~ 25 cm 土层孔隙相对较少;未复垦土壤 3 个土层孔隙量都很少,3 个土层相差不大,孔隙分布比较均一;原地貌土壤中,0 ~ 25 cm 土层孔隙最多,形态最为复杂,25 ~ 50 cm 与 50 ~ 75 cm 土层孔隙比较接近。

### 2.2 孔隙团搜索结果

根据重建的土壤孔隙三维立体图,搜索出土壤孔隙团的个数及体积大小,统计出最大孔隙团像素个数

及总孔隙团像素个数,并计算出土壤孔隙度,结果见表2。由表2中总孔隙团像素个数及孔隙度可知,搜索结果与图4直观观察结果一致,原地貌的土壤孔隙度最大,复垦23 a与复垦20 a的土壤孔隙度次之,刚排土未复垦的土壤孔隙度最小。

采用SPSS 20.0对不同复垦年限及原地貌土壤

孔隙团个数、最大孔隙团像素个数、总孔隙团像素个数及孔隙度间进行单因素方差分析及显著性检验,结果见表3。由表3可以看出,各因素中 $P < 0.05$ ,  $F > F_{crit}$ ,说明不同复垦年限及原地貌各因素间差异显著,具有统计学意义。

复垦23 a土壤中,50~75 cm土壤孔隙度最大,

表2 不同复垦年限重构土壤孔隙团搜索结果

Table 2 Searching results of reconstruction soil pore groups under different reclamation years

复垦年限	土层/cm	孔隙团个数	最大孔隙团像素个数	最小孔隙团像素个数	总孔隙团像素个数	孔隙度/%
Y23	0~25	1 383	260 002	1	573 212	12.55
	25~50	1 888	44 570	1	374 690	8.12
	50~75	644	1 032 677	1	1 090 864	23.92
Y20	0~25	1 639	90 884	1	412 613	9.02
	25~50	1 255	380 247	1	670 539	14.58
	50~75	1 523	169 514	1	499 799	10.96
Y0	0~25	2 012	3 340	1	157 081	3.41
	25~50	1 781	25 697	1	171 806	3.76
	50~75	2 031	3 659	1	112 698	2.44
Y	0~25	837	1 561 530	1	1 576 014	34.56
	25~50	843	863 192	1	979 358	21.47
	50~75	1 001	591 009	1	812 484	17.82

表3 单因素方差分析与显著性检验

Table 3 One-way ANOVA and significance test

组间差异因素	方差 SS	自由度 df	均方差 MS	F	P-value	Fcrit
孔隙团个数	1 690 902.920	3	563 634.310	4.920	0.032	4.066
最大孔隙团像素个数	$1.659 \times 10^{12}$	3	$5.532 \times 10^{11}$	4.074	0.050	4.066
总孔隙团像素个数	$1.465 \times 10^{12}$	3	$4.882 \times 10^{11}$	6.180	0.018	4.066
孔隙度	706.111	3	235.370	6.180	0.018	4.066

为23.92%,这应该与复垦种植的抗旱乔灌木有关,树木根系扎根较深,故在50~75 cm土层孔隙较多,其中最大孔隙团像素点个数为100多万个,占了总孔隙体积的95%,表明内部孔隙连通性较好,除了最大团外,其他孔隙团体积都比较小;0~25 cm孔隙度大于25~50 cm孔隙度,可能由于植被的枯枝落叶在表层转化为有机物质,使草本植被生长较好,草本根系疏松了表层土壤;与孔隙度相反,孔隙团的个数从大到小依次为25~50 cm,0~25 cm,50~75 cm土层,最大有1 888个孔隙团,最小的只有644个孔隙团。复垦20 a土壤孔隙度在10%左右,从大到小依次为25~50 cm,50~75 cm,0~25 cm土层,这是因为在25~50 cm与50~75 cm土层的植被根系分布较多,3个土层最大孔隙团的大小顺序与孔隙度大小一致;孔隙团个数由表层到底层依次为1 639,1 255,1 523个,同样与孔隙度成反比关系。复垦为0 a的土壤

中,3个土层孔隙度大小很接近,都在3%左右,最大孔隙团的体积也较小,这是由于在排土过程中受大型机械的碾压,土壤颗粒重新排列,使得土壤结构板结<sup>[15]</sup>,从上到下土壤孔隙比较均一,小孔隙居多;未复垦土壤孔隙团个数最多,3个土层比较接近。原地貌土壤孔隙团个数较小,表层土壤孔隙度最大,为34.56%,最大孔隙团像素点个数达到150多万,占了总孔隙团体积的99%,说明孔隙团内部连通性非常好,大孔隙较多,这应该与原地貌草本植物生长茂盛有关,草本植被根系主要在表层,表层土壤最为疏松。

表2根据三维重建算出的孔隙度与表1中根据土壤容重计算的土壤孔隙度存在一定差异,主要原因是由于受分辨率的限制本研究土壤孔隙仅为当量直径大于9  $\mu\text{m}$ 的孔隙部分,重构土壤中一些小的无效孔隙扫描不到。表1,2中未复垦土壤孔隙度数据相差最大,说明未复垦土壤中当量直径小于9  $\mu\text{m}$ 小孔

隙居多。土壤中小孔隙居多,说明未复垦土壤压实严重,土壤大中孔隙减少,小孔隙增多。随着复垦年限的增加,CT 扫描得出的孔隙度与根据容重计算出的孔隙逐渐接近,说明随着复垦年限的增加,土壤中有效的大孔隙逐渐增多,小孔隙数量减少,土壤质量逐步得到改善。虽然 2 者孔隙度数据存在一定差异,但 CT 扫描计算出的孔隙度可以从孔隙大小分布状况方面反映土壤质量的演替规律。

**2.3 孔隙团个数、最大孔隙团体积与孔隙度之间的关系**

由图 5 可以看出,孔隙团个数、最大孔隙团像素个数与孔隙度都符合较好的线性关系,拟合优度  $R^2$  分别为 0.835 0,0.961 6。随着孔隙度的增加,孔隙团的个数呈减小的趋势,最大孔隙团像素点个数呈递

增趋势,这是由于孔隙度越大,孔隙连通性越好,越多的孔隙团合并成更大的团,孔隙团的个数减小,最大孔隙团的体积变大,相反,如果孔隙连通性越差,其内部孔隙分布越细碎,独立分布的孔隙团个数越多,最大孔隙团的体积越小。

**2.4 孔隙团体积分布**

表 4 为不同复垦年限土壤孔隙团体积大小分布情况,可以看出,每个土层中除了几个较大团外,绝大部分孔隙团的体积都小于 10 000 个像素点,且 96% 以上都处于 1 000 个像素点以下,说明除最大孔隙团外,其余团的体积非常小,这种情况在原地貌 0 ~ 25 cm 土层表现的最为明显,最大孔隙团像素点个数达到 100 多万,而其他所有团的像素点都  $\leq 1 000$ ,孔隙团的大小分布是非常不均匀的。

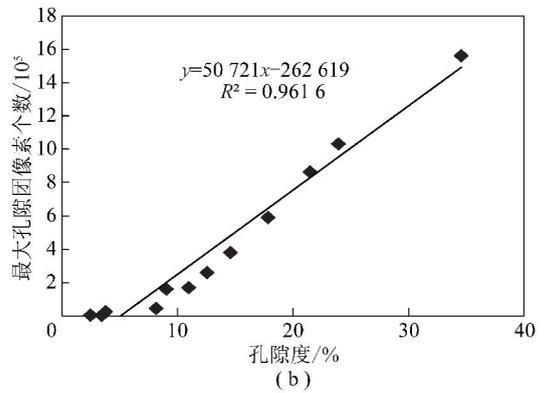
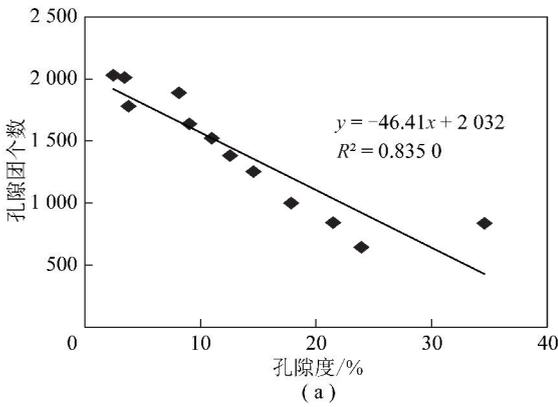


图 5 孔隙团个数和最大孔隙团像素点个数与孔隙度的关系

Fig. 5 Relationship between the number of soil pore and pixels of the largest soil pore group groups and the porosity

表 4 不同复垦年限土壤孔隙团体积分布情况

Table 4 Volume distribution of soil pore groups of different reclamation years

复垦年限	土层/cm	孔隙团体积分布/个(像素点个数)					合计个数
		>1 000 000	100 000 ~ 1 000 000	10 000 ~ 100 000	1 000 ~ 10 000	$\leq 1 000$	
Y23	0 ~ 25	0	1	3	50	1 330	1 383
	25 ~ 50	0	0	3	45	1 840	1 888
	50 ~ 70	1	0	0	7	636	644
Y20	0 ~ 25	0	0	2	39	1 597	1 639
	25 ~ 50	0	1	3	33	1 218	1 255
	50 ~ 70	0	1	3	51	1 468	1 523
Y0	0 ~ 25	0	0	0	8	2 004	2 012
	25 ~ 50	0	0	1	11	1 769	1 781
	50 ~ 70	0	0	0	6	2 025	2 031
Y	0 ~ 25	1	0	0	0	836	837
	25 ~ 50	0	1	0	16	825	843
	50 ~ 70	0	1	1	21	978	1 001

**3 讨 论**

土壤孔隙一方面对水分、养分及气体的运移起重

要作用,孔隙的大小、形状、连通性都会影响运移的速度与效率,另一方面土壤孔隙可以贮藏水分,提高水分的入渗速率,减少地表的水土流失,具有涵养水源

的功能<sup>[16]</sup>。土壤孔隙状态能够反映复垦土壤质量的好坏,影响植被的生长。排土和复垦对土壤孔隙状况都有很大的影响。

### 3.1 排土对土壤孔隙状况的影响

随着机械化水平的提高,露天煤矿在排土时受大型机械的碾压,土壤颗粒重新排列组合,大孔隙数量减少<sup>[17]</sup>,使土壤紧实度增大,导致土壤板结,如果在土壤水分较大时作业,更容易导致土壤下沉、孔隙度下降<sup>[18]</sup>。此外,排土机械越重,轮胎与地面接触面积越小,土壤压实就越严重,孔隙度越小。当土壤孔隙度小于10%时,土壤大孔隙急剧减少,而小孔隙会呈现封闭的状态,不利于空气的交换,土壤趋于厌氧环境会导致土壤微生物活性降低、数量减少<sup>[19]</sup>,同时对土壤动物也有影响<sup>[20]</sup>。较大的土壤紧实度还会影响土壤中水分、养分的有效性,抑制植物根系的伸长,根系的生长需要消耗更多的营养物质<sup>[21]</sup>。

本研究中刚排土未复垦土壤孔隙度只有3%左右,属于严重压实,不利于植被的恢复,应进行深耕等措施对土壤结构进行改良。有研究表明履带型机械对土壤的压实度相对较小<sup>[22]</sup>,未来在露天煤矿排土时应选择合适的机械,改进工艺,减轻排土场土壤的压实度。

### 3.2 复垦对土壤孔隙状况的影响

随着排土场的复垦,土壤质量会不断提高<sup>[23]</sup>,植被生物量也不断丰富<sup>[24]</sup>,使土壤孔隙得到极大的改善。首先,植被根系可改良土壤孔隙状况<sup>[25]</sup>,根据对复垦23 a、复垦20 a、未复垦土壤及原地貌土壤孔隙的分析发现,随着复垦年限的增长,土壤孔隙度增大,但在不同的植被恢复措施下,孔隙结构在垂直方向上的发展不尽相同,复垦23 a的土壤底层孔隙较多,而原地貌土壤表层孔隙较多,存在明显的差异,这是因为土地的利用类型不同,种植的植被根系分布深度不同。因此,在复垦中选择合适的植被配置模式对土壤孔隙的改良具有重要影响。其次,土壤有机质对土壤孔隙有改善作用,有机质中成分能够与土壤颗粒或团聚体产生胶结作用,土壤有机质含量较高,土壤团聚体就较发育<sup>[26]</sup>,研究表明土壤团聚体与土壤孔隙度间有着深刻的联系<sup>[27]</sup>,Chen等研究也发现较高的有机碳含量会导致较大的土壤孔隙度<sup>[28]</sup>。随着复垦时间的增长,土壤中微生物的数量、种类不断丰富<sup>[29-30]</sup>,越来越多的植被凋落物在微生物的分解下转化为有机质存储在土壤中,从而优化了土壤孔隙结构。此外,随着土壤条件的改善,土壤动物的数量、种类也不断增加,像蚯蚓等动物对土壤有着很好的疏松作用,从而增加了土壤孔隙度。为了改善未复垦排土

场土壤压实状况,应选择合适的植被进行复垦,使土壤质量不断提高,改善土壤孔隙条件。

## 4 结 论

(1) CT扫描技术能够无损获取土壤孔隙信息,通过三维重建可以得到土壤孔隙三维分布,随着复垦年限的增加,土壤孔隙度、连通性得到显著性提高,不同复垦年限土壤孔隙分布在垂直方向上有很大差异。

(2) 孔隙团个数、最大孔隙团像素个数与孔隙度都符合较好的线性关系,随着孔隙度的增加,孔隙团个数呈减小的趋势,最大孔隙团像素点个数呈递增趋势,除最大孔隙团外,其余孔隙团的体积非常小。

(3) 根据CT扫描计算出的孔隙度显示未复垦排土场土壤压实严重,应合理安排复垦。由于CT设备分辨率的限制,微小孔隙不能识别出,存在一定的局限性,在以后应在扫描设备和孔隙识别等方面加强研究。

### 参考文献:

- [1] 陈星彤,胡振琪,张学礼. 开采沉陷区不同复垦技术下复垦土壤压实的空间变化[J]. 灌溉排水学报,2005,24(6):74-77.  
Chen Xingtong, Hu Zhenqi, Zhang Xueli. Reclamation soil compaction spatial variation law about different reclamation technologies in subsidence area[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2005, 24(6): 74-77.
- [2] Poesen J, Ingelmosanchez F. Runoff and sediment yield from topsoils with different porosity as affected by rock fragment cover and position[J]. Catena, 1992(19):451-474.
- [3] Edwards W M, Norton L D, Redmond C E. Characterizing macropores that affect infiltration into nontilled soil[J]. Soil Science Society of America Journal, 1988, 52(2):483-487.
- [4] 李德成, Velde B, 张桃林. 利用土壤切片的数字图像定量评价土壤孔隙变异度和复杂度[J]. 土壤学报, 2003, 40(5):678-682.  
Li Decheng, Velde B, Zhang Yaolin. Quantitative estimation of pore variability and complexity in soils by digital image method[J]. Acta Pedologica Sinica, 2003, 40(5):678-682.
- [5] 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 Science, 2002, 13(5):611-617.
- [6] Zeng Y, Gantzer C J, Peyton R L. Fractal dimension and lacunarity determined with X-ray computed tomography[J]. Soil Science Society of America Journal, 1996(60):1718-1724.
- [7] 周虎, 李保国, 吕贲忠, 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 under different Tillage systems[J]. Acta Pedologica Sinica, 2010, 47(6):1094-1100.
- [8] Martinez F S, Martin M A, Caniego F J, et al. Multifractal analysis of discretized X-ray CT images for the characterization of soil macropore

- structures[J]. *Geoderma*,2010,156(1-2):32-42.
- [9] 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 Yanan, 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*,2012,28(22):115-122.
- [10] Ngom N F, Garnier P, Monga O, et al. Extraction of three-dimensional soil pore space from microtomography images using a geometrical approach[J]. *Geoderma*,2011,163(1-2):127-134.
- [11] Ojeda-Magana B, Quintanilla-Dominguez J, Ruelas R, et al. Identification of pore spaces in 3D CT soil images using PFCM partitional clustering[J]. *Geoderma*,2014,217:90-101.
- [12] 孙华飞,鞠杨,行明旭,等.基于 CT 图像的土石混合体破裂-损伤的三维识别与分析[J]. *煤炭学报*,2014,39(3):452-459.  
Sun Huafei, Ju Yang, Xing Mingxu, et al. 3 D identification and analysis of fracture and damage in soil-rock mixtures based on CT image processing[J]. *Journal of China Coal Society*,2014,39(3):452-459.
- [13] 李伟,要惠芳,刘鸿福,等.基于显微 CT 的不同煤体结构煤三维孔隙精细表征[J]. *煤炭学报*,2014,39(6):1127-1132.  
Li Wei, Yao Huifang, Liu Hongfu, et al. Advanced characterization of three-dimensional pores in coals with different coal-body structure by micro-CT[J]. *Journal of China Coal Society*,2014,39(6):1127-1132.
- [14] Yang B H, Wu A X, Miao X X, et al. 3D characterization and analysis of pore structure of packed ore particle beds based on computed tomography images[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*,2014,24(3):833-838.
- [15] 杨晓娟,李春俭.机械压实对土壤质量、作物生长、土壤生物及环境的影响[J]. *中国农业科学*,2008,41(7):2008-2015.  
Yang Xiaojuan, Li Chunjian. Impacts of mechanical compaction on soil properties, growth of crops, soil-borne organisms and environment[J]. *Scientia Agricultura Sinica*,2008,41(7):2008-2015.
- [16] 李红,范素芳,张光灿,等.黄土丘陵区退耕还林后不同林地土壤孔隙与贮水特性[J]. *水土保持通报*,2010,30(1):27-30.  
Li Hong, Fan Sufang, Zhang Guangcan, et al. Characteristics of soil water-holding and soil porosity of different tree species after conversion of cropland to forest in loss hilly region [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*,2010,30(1):27-30.
- [17] Lipiec J, Hajnos M, Swieboda R. Estimating effects of compaction on pore size distribution of soil aggregates by mercury porosimeter [J]. *Geoderma*,2012,179:20-27.
- [18] 张兴义,隋跃宇.农田土壤机械压实研究进展[J]. *农业机械学报*,2005,36(6):122-125.  
Zhang Xingyi, Sui Yueyu. International research trends of soil compaction induced by moving machine fiend operations [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2005, 36(6):122-125.
- [19] Jordan D, Ponder F, Hubbard V C. Effects of soil compaction, forest leaf litter and nitrogen fertilizer on two oak species and microbial activity[J]. *Applied Soil Ecology*,2003,23:33-41.
- [20] Bouwman L A, Arts W B M. Effects of soil compaction on the relationships between nematodes, grass production and soil physical properties[J]. *Applied Soil Ecology*,2000,14:213-222.
- [21] Groleau-Renaud V, Plantureux S, Guckert A. Influence of plant morphology on root exudation of maize subjected to mechanical impedance in hydroponics conditions [J]. *Plant and Soil*,1998,201:231-239.
- [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*,2014,30(1):183-190.
- [23] 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 reclamation soil quality on grassland opencast coal mine dump [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*,2012,28(14):229-235.
- [24] 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(20):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*,2013,29(20):223-232.
- [25] 李宗超,胡霞.小叶锦鸡儿灌丛化对退化沙质草地土壤孔隙特征的影响[J]. *土壤学报*,2015,52(1):225-231.  
Li Zongchao, Hu Xia. Effects of shrub (*Caraganamicrophylla* Lam) encroachment on soil porosity of degraded sandy grassland [J]. *Acta Pedologica Sinica*,2015,2(1):225-231.
- [26] 钟继红,唐淑英,谭军.广东红壤类土壤结构特征及其影响因素[J]. *土壤与环境*,2002,11(1):61-65.  
Zhong Jihong, Tang Shuying, Tan Jun. Structure characteristics of red soils and their effective factors [J]. *Soil and Environmental Sciences*,2002,11(1):61-65.
- [27] Regelink I C, Stoof C R, Rousseeu S, et al. Linkages between aggregate formation, porosity and soil chemical properties [J]. *Geoderma*,2015,247:24-37.
- [28] Chen Y Y, Yang K, Tang W J, et al. Parameterizing soil organic carbon's impacts on soil porosity and thermal parameters for Eastern Tibet grasslands [J]. *Science China-Earth Sciences*,2012,55(6):1001-1011.
- [29] 樊文华,白中科,李慧峰,等.不同复垦模式及复垦年限对土壤微生物的影响[J]. *农业工程学报*,2011,27(2):330-336.  
Fan Wenhua, Bai Zhongke, Li Huifeng, et al. Effects of different vegetation restoration patterns and reclamation years on microbes in reclaimed soil [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*,2011,27(2):330-336.
- [30] Li J J, Zheng Y M, Yan J X, et al. Effects of different regeneration scenarios and fertilizer treatments on soil microbial ecology in reclaimed opencast mining areas on the Loess Plateau China [J]. *PLoS One*,2013,8(5):1-11.