

王杨扬, 赵中秋, 原野, 等. 黄土区露天煤矿不同复垦模式对土壤水稳性团聚体稳定性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(5):966–973.

WANG Yang-yang, ZHAO Zhong-qiu, YUAN Ye, et al. Effects of different reclamation patterns on the stability of soil water-stable aggregates of an opencast mine in Loess area[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(5):966–973.

黄土区露天煤矿不同复垦模式对土壤水稳性团聚体稳定性的影响

王杨扬¹, 赵中秋^{1,2*}, 原野¹, 陈路明¹, 郭安宁¹

(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: 为了解不同复垦模式对土壤水稳性团聚体稳定性的影响, 选择山西省朔州市安太堡露天矿排土场为研究区, 采取典型小区调查的方法, 分析了复垦 21、22 a 的 4 种混交林复垦模式(刺槐+油松、刺槐+榆树+臭椿、刺槐+柠条+沙棘、沙棘+榆树)、2 种纯林复垦模式(刺槐纯林、沙棘纯林)以及复垦耕地的土壤水稳性大团聚体的含量、土壤团聚体的稳定率(WSAR)、几何平均直径(GMD)、平均重量直径(MWD)、破坏率(PAD), 并通过和原地貌及未复垦地相应指标进行对比, 来研究不同复垦模式对土壤水稳性团聚体稳定性的影响。研究结果表明: 经多年复垦后, 土壤水稳性团聚体的稳定性有了显著提高, 在团聚体 $DR_{0.25}$ (>0.25 mm 团聚体质量)、WSAR、MWD 和 GMD 值上呈现出 4 种混交林复垦模式 $>$ 2 种纯林复垦模式 $>$ 未复垦林地, 以及林地 $>$ 内排耕地的总体趋势; 土壤水稳性团聚体 PAD 值呈现出相反的排序。上述复垦模式中, 刺槐+油松复垦模式下土壤水稳性团聚体的稳定性最好。土壤水稳性团聚体稳定性的评价指标中, $DR_{0.25}$ 、WSAR、MWD 与 GMD 之间相互呈极显著正相关, 且均与 PAD 呈极显著负相关。该研究结果可为黄土区露天煤矿土地复垦及土壤重构提供一定依据。

关键词: 排土场; 复垦模式; 植被恢复; 土壤团聚体; 稳定性指标

中图分类号: S152.9 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2017)05-0966-08 doi:10.11654/jaes.2016-1481

Effects of different reclamation patterns on the stability of soil water-stable aggregates of an opencast mine in Loess area

WANG Yang-yang¹, ZHAO Zhong-qiu^{1,2*}, YUAN Ye¹, CHEN Lu-ming¹, GUO An-ning¹

(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: To understand the effects of different reclamation patterns on the stability of soil water-stable aggregates, reclaimed dumps of the Antaibao opencast mine in Shuozhou, Shanxi Province, which is located in the northwest Loess Plateau of China, were chosen for this case study. Soils were sampled in four mixed forest reclamation patterns (*Robinia pseudoacacia* L. + *Pinus tabulaeformis* C., *Robinia pseudoacacia* L. + *Ulmus pumila* L. + *Ailanthus altissima* M., *Robinia pseudoacacia* L. + *Caragana korshinskii* K. + *Hippophae rhamnoides* L., *Hippophae rhamnoides* L. + *Ulmus pumila* L.); two types of pure forest reclamation patterns (*Robinia pseudoacacia* L. forest and *Robinia pseudoacacia* L. forest); the arable land. The original landform and un-reclaimed land were taken as control. The content of water-stable macro-aggregates, soil water-stable aggregates stability rate (WSAR), geometric mean diameter (GMD), mean weight diameter (MWD), and failure rate (PAD) were analyzed. The results showed that, after years of reclamation, the stability of soil water-stable aggregates has significantly im-

收稿日期: 2016-11-22

作者简介: 王杨扬(1993—), 女, 山西太原人, 硕士研究生, 主要从事土地整治与生态恢复研究。E-mail: yy931007@126.com

* 通信作者: 赵中秋 E-mail: zhongqiu Zhao@163.com

基金项目: 国土资源部公益性行业科研专项——典型露天煤矿复垦生物多样性恢复研究(201411017)

Project supported: Special Fund for Scientific Research on Public Causes of Ministry of Land and Resources of the People's Republic of China (201411017)

proved. The values of $DR_{0.25}$, WSAR, MWD, and GMD of aggregates ranked as: four mixed forest reclamation patterns > two pure forest reclamation patterns > un-reclaimed land, forest land > arable land. The PAD values of soil water stable aggregates showed the opposite order. The stability of soil water-stable aggregates was the best under the *Robinia pseudoacacia* L. + *Pinus tabulaeformis* C. pattern. There was a significant positive correlation among $DR_{0.25}$, WSAR, MWD, and GMD in the evaluation indices of the soil water-stable aggregates, and they all had extremely significant negative correlation with PAD. These results can provide some basis for land reclamation and soil remodeling of opencast mines in Loess areas.

Keywords: reclaimed land; different reclamation patterns; vegetation restoration; soil water-stable aggregates; stability index

中国是全世界最大的煤炭生产国和消费国。露天矿开采中土地的挖损、压占和塌陷严重破坏了地表植被生境,造成土壤功能退化,因此选用合理的复垦模式进行排土场生态系统恢复与重建成为近年来关注的焦点,其中复垦土壤的重构是土地复垦中的一个重要研究内容。国外学者对露天煤矿土地复垦中重构土壤进行了深入研究,取得了较多成果,如:Shrestha 等^[1]研究了美国俄亥俄州 8 个县的露天煤矿复垦土壤基本理化性质,认为经过土地复垦,矿区土壤质量明显改善;Frouz 等^[2]研究了捷克 Sokolov 露天煤矿土地复垦 25 a 后土壤质量演替规律,分析发现土壤质量与植被以及土壤动物恢复状况密切相关。国内学者也对黄土丘陵区草原区露天煤矿土地复垦中不同植被恢复模式下重构土壤的基本理化性质^[3]、呼吸作用^[4]、碳库^[5]、水盐运动^[6]及其与植被相互作用规律^[7]等内容进行了系统研究,取得了丰硕成果,为指导我国煤矿区土壤重构积累了丰富的经验。

土壤团聚体是土壤结构的基本单元,是土壤中各种活动过程形成的基本结构单位,其中粒径 $>0.25\text{ mm}$ 的团聚体称为大团聚体^[8]。土壤大团聚体是土壤肥力的中心调节器,具有保证和协调土壤的水肥气热、维持和稳定土壤疏松熟化层等作用,在一定程度上表征土壤通气性与抗蚀性^[9-10]。土壤水稳性大团聚体指抗水力分散的团聚体,是土壤肥沃的标志之一,它在很大程度上影响土壤酶的活性,维持和稳定土壤疏松熟化层^[11]。表层土壤水稳性团聚体稳定性对土壤侵蚀和径流产生重要影响,在促进土壤养分循环、防止土壤侵蚀方面起到重要作用^[12]。因此,土壤水稳性团聚体的稳定性成为近年来的研究热点。

国外对土壤团聚体的研究起步较早,主要研究包括土壤水稳定性团聚体的数量和质量影响土壤抗蚀性^[13-14]以及团聚体大小反映土壤结构的区别^[15]。Letey^[16]认为土壤团聚体的稳定性可通过影响土壤水、通气性、土壤温度等来影响作物生产力。Primoradian 等^[17]和 Zhou 等^[18]通过研究土壤团聚体平均重量直径(MWD)

和几何平均直径(GMD)来分析土壤团聚体特征。水稳性团聚体的研究在国内起步较晚,刘梦云等^[19]研究了土地利用方式对土壤水稳性团聚体稳定性的影响,认为林地与草地的土壤水稳性团聚体较耕地更为稳定。袁俊吉等^[20]研究了不同植被覆盖对养分在土壤水稳性团聚体中分布特征的影响,发现地表植被覆盖的变化对土壤养分在各粒级水稳性团聚体中的含量具有显著影响。祁迎春等^[21]、徐爽等^[22]提出将矩法、结构体破坏率(PAD)作为土壤团聚体特征的评价指标,王晓娟等^[23]分析了土壤有机质含量与土壤团聚体特征的关系,刘美英等^[24]运用土壤团聚体稳定率(WSAR)、PAD 及不稳定团粒指数来评价采煤沉陷复垦区土壤水稳性团聚体的稳定性。总体来说,土壤团聚体研究主要集中在土壤有机碳与团聚体的关系,及土地利用方式对水稳性团聚体稳定性的影响等方面,但矿区土壤重构中水稳性团聚体稳定性的研究鲜见报道。鉴于此,本文以安太堡露天矿排土场复垦地为例,选取复垦年限为 21、22 a 的不同复垦模式,应用 WSAR、GMD、MWD 和 PAD 等参数,分析不同复垦模式对土壤水稳性团聚体稳定性的影响,旨在揭示不同复垦模式对土壤结构的影响,为黄土丘陵区露天矿区排土场土地复垦与生态重建提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

安太堡露天煤矿位于山西省朔州市平鲁区境内(图 1),是我国大型开采的露天煤矿之一,位于 $112^{\circ}11'\sim 113^{\circ}30'E$, $39^{\circ}23'\sim 39^{\circ}37'N$ ^[25],煤炭地质储备量约为 127 亿 t。该矿地处黄土高原的丘陵缓坡地带,森林覆盖率低,地表水蚀风蚀严重,水土流失严重,气候冬春寒冷干旱,夏秋温凉且降水较多,年平均降水量 428.2~449 mm。安太堡露天矿区土壤为普通栗钙土、淡栗褐土与黄绵土,成土母质为黄土性冲积物、洪积物、坡积物以及部分地带性风积物,风害天气致使该区土壤干旱,土质偏砂型,保水能力差。本文选取安太

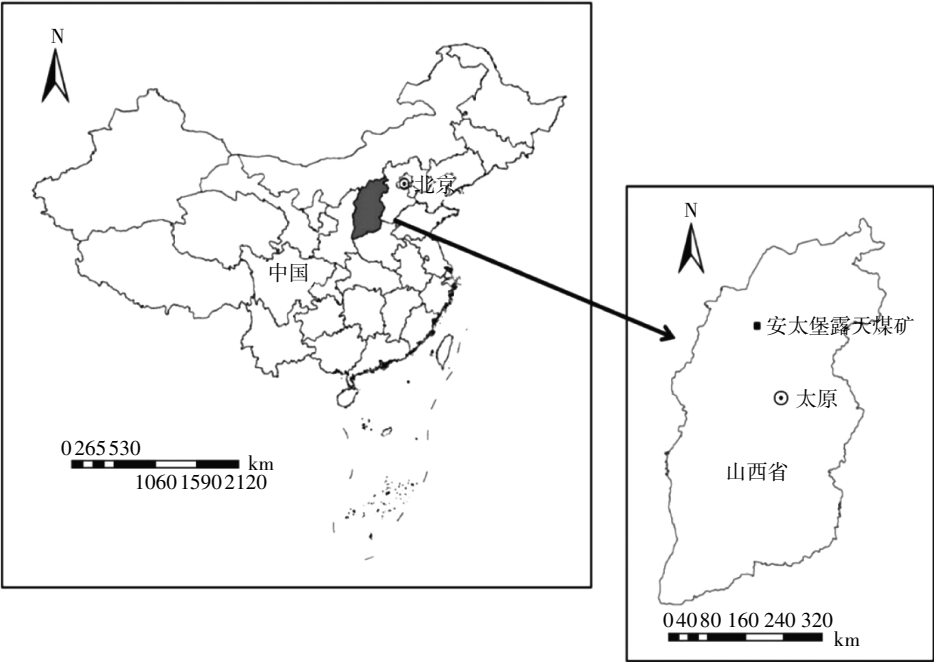


图 1 安太堡露天煤矿地理位置示意图
Figure 1 Location of Antaibao opencast coal mine

堡露天矿南排土场及西排土场作为研究区。两个排土场经过多年复垦,目前已经形成刺槐、榆树、油松、沙棘等为主的林、草、灌多层次、多类型的植被结构,生态恢复取得明显成效。

1.2 样品采集与处理

在安太堡排土场选取复垦年限相近的 6 种复垦林地(复垦 22a 的刺槐纯林、刺槐+油松混交林、刺槐+榆树+臭椿混交林、刺槐+柠条+沙棘混交林及复垦 21a 的沙棘+榆树混交林和沙棘纯林)和复垦耕地,并选原地貌及内排未复垦地作为对照,各样地基本情况见表 1。

土样于 2015 年 8 月采集,根据不同模式选取 9

个样地,每个样地各取 3 个样点作为重复,每个样点按梅花状取 5 个点,去除表层腐殖质后分别用土钻取 0~20 cm 层土壤,将这 5 个点的土样充分混合,用“四分法”弃去多余土壤,共采集 27 份土样。在采集和运输过程中避免震动及翻倒,运回后将直径>2 cm 的土块沿自然结构剥开,然后去除土壤中杂质,将采集的土样放在干燥通风的房间内风干,用于团聚体筛分。

1.3 样品检测方法

土壤团聚体含量测定选用干筛法与湿筛法^[26]。干筛法用于测定土壤机械稳定性团聚体含量,各模式取 150 g 风干土样,先后通过孔径 1、0.5、0.3、0.25 mm 土筛,过筛后收集土样进行分别称重,计算其占总土样

表 1 样地基本情况表
Table 1 Basic information of sample plots

类型	编号	采样地点	复垦模式	复垦起始	经纬度坐标	地形	土壤含水率/%	备注
混交林	SIV	南四样地	刺槐+油松	1993 年	39°27'36"N,112°20'2"E	坡地	5	少量榆树入侵
	SIII	南三样地	刺槐+榆树+臭椿	1993 年	39°27'42"N,112°20'2"E	平台	6	—
	SCM	南四样地对面 1450 平台	刺槐+柠条+沙棘	1993 年	39°27'36"N,112°19'51"E	平台	4	刺槐、沙棘已退化
	WUH	西排	沙棘+榆树	1994 年	39°30'2"N,112°18'28"E	平台	6	—
纯林	SV	南五样地	刺槐纯林	1993 年	39°27'38"N,112°19'39"E	平台	5	—
	WH	西排	沙棘纯林	1994 年	39°30'13"N,112°18'30"E	平台	7	间有小叶杨
未复垦	UR	内排未复垦地	—	—	39°30'13"N,112°20'14"E	平台	7	—
原地貌	OP	原地貌林地	小叶杨	—	39°31'41"N,112°21'8"E	平台	3	—
耕地	IC	内排耕地	荞麦	—	39°30'18"N,112°20'13"E	台阶地	9	—

的百分比,记录机械稳定性团聚体含量。湿筛法用于测定土壤水稳性团聚体含量,在团聚体分析仪上进行。取各模式土样 150 g,依次倒入孔径为 1、0.5、0.3、0.25 mm 的套筛,浸润 10 min,开动仪器,以 20 次·min⁻¹ 的速率定时 5 min;湿筛后,将土筛上各级团聚体分别洗入铝盒,50 ℃烘干称量,计算其在土样中的质量百分含量。土壤含水量的测定采用烘干法。

1.4 指标计算

不同粒径水稳性团聚体含量 w_i (质量分数,%) 的计算方法如下:

$$w_i = \frac{W_{w_i}}{150} \times 100\%$$

式中: W_{w_i} 为该范围内水稳性大团聚体的干质量, g。

土壤团聚体稳定率 WSAR 的计算方法^[27]如下:

$$\text{WSAR} = \frac{\text{WR}_{0.25}}{W_T} \times 100\%$$

式中: $\text{WR}_{0.25}$ 为 >0.25 mm 水稳性团聚体质量, g; W_T 为 >0.25 mm 团聚体的质量, g。

土壤水稳性团聚体的平均重量直径 MWD 及几何平均质量 GMD 计算方法^[28]如下:

$$\text{MWD} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i w_i)}{\sum_{i=1}^n w_i}$$

$$\text{GMD} = \exp \left[\frac{\sum_{i=1}^n (w_i \ln x_i)}{\sum_{i=1}^n w_i} \right]$$

式中: x_i 为不同粒径范围内土壤团聚体的平均直径, mm。

土壤水稳性团聚体的破坏率 PAD 计算方法如下:

$$\text{PAD} = \frac{\text{DR}_{0.25} - \text{WR}_{0.25}}{\text{DR}_{0.25}} \times 100\%$$

式中: $\text{DR}_{0.25}$ 为 >0.25 mm 水稳性团聚体质量, g; $\text{WR}_{0.25}$ 为 >0.25 mm 机械性团聚体质量, g。

1.5 数据处理

试验所得数据采用 Excel 2007 处理, 利用 SPSS 22.0 统计分析软件单因素方差分析 (One-Way ANOVA) 方法对样地土壤水稳性团聚体稳定性参数进行差异显著性检验, 并利用新复极差法 (Duncan) 进行多重比较。

2 结果与分析

2.1 不同复垦模式土壤水稳性团聚体的分布

土壤大团聚体相较于其他粒径团聚体, 更能体现土壤团聚体质量的优劣以及稳定性。由表 2 可以看出, 不同复垦模式下排土场土壤水稳性团聚体含量及粒径组成有较明显差异 ($P < 0.05$), 且不同复垦模式土壤水稳性团聚体的含量与粒径大小在总体上呈反比趋势。在所有复垦模式中, SⅢ样地 (40.28%) 土壤水稳性大团聚体含量最高, 其次是 WH 样地 (39.87%) 及 SⅣ样地 (36.97%), 这三种复垦模式差异不显著 ($P < 0.05$), 土壤水稳性大团聚体含量最低的是 UR 样地 (5.37%); 研究区样地中, 粒径 >1 mm 的土壤水稳性团聚体含量均不高, 各复垦模式土壤水稳性团聚体主要分布 0.25~0.5 mm 粒级, 在 0.25~0.3 mm 粒级, SⅤ样

表 2 不同复垦模式下土壤水稳性团聚体含量 (%)

Table 2 The contents of water-stable aggregates in reclaimed soils of different reclamation patterns (%)

样地编号	复垦模式	>1 mm	0.5~1 mm	0.3~0.5 mm	0.25~0.3 mm	>0.25 mm
SⅣ	刺槐×油松	0e	1.58±1.33cd	25.12±4.56a	10.27±1.46ab	36.97±7.69ab
SⅢ	刺槐×臭椿×榆树	0.08±0.22b	2.04±1.45c	27.72±3.53a	10.36±2.54ab	40.28±8.74a
SCM	柠条×刺槐×沙棘	0.01±0.05c	2.42±3.22bc	18.42±1.62b	8.72±1.42b	29.56±5.04b
WUH	沙棘×榆树	15.15±1.32a	2.02±1.58c	6.72±6.33c	5.9±5.86bc	29.79±14.43b
SⅤ	刺槐纯林	0.09±0.13b	2.8±0.12b	12.4±0.23bc	16.65±2.63a	31.94±3.43b
WH	沙棘纯林	0.02±0.04c	3.03±2.67b	25.13±2.54a	11.69±1.21ab	39.87±5.9a
UR	—	0.01±0.31c	0.72±0.42d	2.86±1.67cd	1.78±0.12c	5.37±1.64d
OP	小叶杨	0.01±0.12c	1.82±1.66c	18.36±2.35b	6.9±0.23b	27.09±3.88b
IC	荞麦	0.01±0.03c	9.97±0.46a	0.92±1.68d	7.22±1.53b	18.12±3.47c

注: 同一列不同小写字母代表差异显著 ($P < 0.05$); 表中数据为平均值±标准差。下同。

Note: Different lowercase letters in the same column represent significant differences ($P < 0.05$); The data in the table is the average±standard deviation.

The same below.

地水稳性团聚体含量最高(16.65%),在0.3~0.5 mm 粒级,SⅢ样地水稳性团聚体含量最高(27.72%);从土地利用方式来看,林地的水稳性大团聚体含量显著高于耕地。

2.2 不同复垦模式土壤团聚体的 WSAR

土壤团聚体 WSAR 值是评价土壤团聚体稳定性的重要指标。由图 2 可以看出,经复垦后各样地土壤团聚体 WSAR 均显著高于未复垦地($P<0.05$),4 种混交林土壤团聚体 WSAR 较 2 种纯林更高,林地土壤团聚体 WSAR 较耕地更高。其中:SⅣ样地(87.98%)、SCM 样地(86.11%)和 WUH 样地(81.79%)土壤团聚体 WSAR 无明显差异且显著高于其他复垦模式样地;SV 样地(71.19%)与 WH 样地(69.31%)2 个纯林的团聚体 WSAR 差异不显著($P<0.05$)且低于 4 种混交林复垦模式;各林地土壤团聚体 WSAR 均高于 IC 内排耕地(62.21%)及 UR 未复垦地,UR 未复垦地土壤团聚体 WSAR 最低(40.59%)。

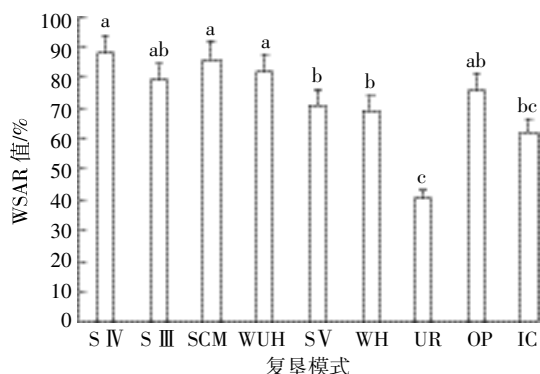


图 2 不同复垦模式土壤团聚体稳定率(WSAR)

Figure 2 WSAR of soil aggregates under different reclamation patterns

2.3 不同复垦模式土壤水稳性团聚体的 MWD 和 GMD

土壤团聚体 MWD 和 GMD 值均是评价土壤团聚体稳定性的重要指标,能够反映土壤团聚体大小分布状态,其增加值反映土壤中大团聚体含量的增加,MWD 和 GMD 值越大表示团聚体团聚度越高、稳定性越好^[27,29]。图 3 表明,研究区不同复垦模式下土壤团聚体的 MWD 和 GMD 具有相似的变化规律,且各复垦模式与原地貌林地 MWD 和 GMD 值相差不大,MWD 变化范围在 0.568 5~0.600 2 mm 之间,GMD 变化范围在 0.348 9~0.390 3 mm 之间。各复垦模式样地中,MWD 和 GMD 值以 SⅣ样地(0.600 2、0.390 3 mm)和 SCM 样地(0.592 2、0.387 2 mm)为最高,而 SV 和 WH 两个纯林样地的 MWD 和 GMD 值略低于 4 种混交

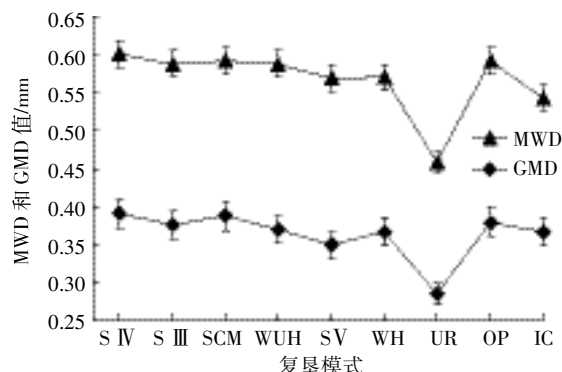


图 3 不同复垦模式土壤水稳性团聚体的平均重量直径(MWD)和几何平均直径(GMD)

Figure 3 MWD and GMD of soil water-stable aggregates under different reclamation patterns

林。总体来看,UR 未复垦地的 MWD 与 GMD 值最低,其次是 IC 内排耕地;林地的 MWD 和 GMD 值高于耕地。

2.4 不同复垦模式土壤水稳性团聚体的 PAD

土壤水稳性团聚体的 PAD 表示土壤水稳性团聚体在水蚀作用下的分散程度,PAD 值越小,表示土壤水稳性团聚体的稳定性越高^[19]。如图 4 所示,经复垦后各样地土壤水稳性团聚体 PAD 值显著低于 UR 未复垦地及 IC 内排耕地($P<0.05$)。其中,UR 未复垦地(59.41%)的 PAD 值最大,SⅣ样地(12.01%)的 PAD 值最小;4 种混交林复垦样地(SⅢ样地、SⅣ样地、SCM 样地、WUH 样地)PAD 值差异不显著且低于 2 种纯林样地(SV 样地、WH 样地);各复垦模式样地及 OP 原地貌林地 PAD 值均低于 IC 内排耕地。

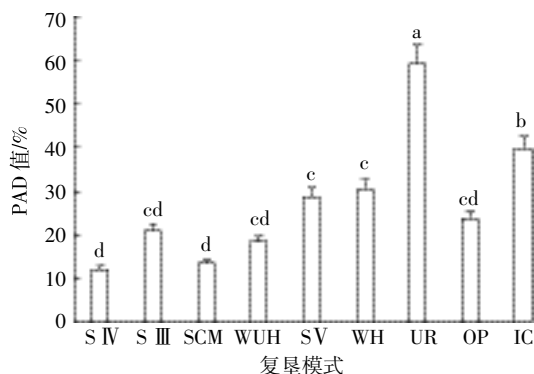


图 4 不同复垦模式土壤水稳性团聚体的破坏率(PAD)

Figure 4 PAD of soil water-stable aggregates under different reclamation patterns

2.5 不同复垦模式土壤水稳性团聚体稳定性指标相关性分析

DR_{0.25}、WSAR、MWD、GMD 和 PAD 均可以表示土壤水稳性团聚体的稳定性。利用相关性分析法,分析

了各指标之间的相关性,结果如表 3 所示。各稳定性指标之间相关性极显著,其中 $DR_{0.25}$ 、WSAR、MWD 及 GMD 相互之间呈极显著正相关,且均与 PAD 呈极显著负相关。排土场复垦地土壤中水稳性大团聚体含量越多,WSAR、MWD 和 GMD 值越大,PAD 值越小,说明水稳性团聚体越稳定,土壤质量越好,即复垦模式效果越好;反之,则土壤水稳性团聚体越不稳定,土壤结构越不稳定,复垦模式效果也略差。

表 3 土壤水稳性团聚体稳定性指标的相关性

Table 3 Correlation between stability indexes of soil water-stable aggregates under different reclamation patterns

指标	$DR_{0.25}$	WSAR	MWD	GMD	PAD
$DR_{0.25}$	1				
WSAR	0.793 1**	1			
MWD	0.160 9	0.615 1**	1		
GMD	0.751 9**	0.915 8**	0.503 3*	1	
PAD	-0.797 1**	-0.990 1**	-0.607 5**	-0.901 6**	1

注:* 和 ** 分别表示在 0.05 和 0.01 水平上显著相关。

Note:* and ** indicate significant correlation at 0.05 and 0.01 level, respectively.

3 讨论

不同复垦模式对土壤水稳性团聚体的粒径分布有较为明显的影响,复垦地土壤水稳性大团聚体含量显著高于未复垦地,与刘梦云等^[19]、刘美英^[24]等研究结果一致。本研究所选安太堡露天矿地处黄土高原区,以干草原植被为主,土壤贫瘠,加上常年的煤矿开采及环境污染,矿区土壤养分整体水平较低,经过地貌重塑、土壤重构和植被重建后,刺槐、油松等先锋物种在排土场迅速拓殖,刺槐、油松等产生的凋落物和根系腐解物在土壤中不断积累和矿化,将有机物和无机营养元素释放于土壤,改善土壤的理化性质和生物学性状^[30],从而优化了土壤的结构,致使土壤大团聚体含量增多,土壤结构更加稳定。

经过多年复垦,研究区排土场复垦样地土壤水稳性团聚体 WSAR、MWD、GMD 值,均呈现出 4 种混交林复垦模式>2 种纯林复垦模式>未复垦林地,林地>内排耕地的总体趋势;土壤水稳性团聚体 PAD 值呈现出 4 种混交林复垦模式<2 种纯林复垦模式<未复垦林地,林地<内排耕地的总体趋势。各复垦模式中,刺槐+油松复垦模式下土壤水稳性团聚体更稳定。林地生物结构较优,有大量回归土壤的有机质,因此其表层土壤的 PAD 值较低,WSAR 值较高。有关不同植

被覆盖模式土壤水稳性团聚体的分布和稳定性已有较多报道, Gaillard 等^[31]研究表明植被覆盖模式不同,其产生的植物残渣便不同,残渣进入土体在微生物作用下与土壤矿物结合的能力也不同,进而影响土壤团聚过程及团聚体的稳定性。王晓峰等^[32]研究表明,混交林可以发挥种间互补作用,合理占据生存空间,充分利用温度、光照、水分、土壤中的养分等生态因子,生长量上有显著的提高,其枯枝落叶的土壤培肥作用要优于纯林,因此土壤结构更加合理,土壤水稳性团聚体更稳定。乔木林中,种植针阔混交林可以更好的改良土壤结构,针叶树的凋落物中含有大量单宁、树脂和木质素等,这些物质分解后产生酸性物质,使得土壤 pH 值下降、质地疏松、结构改善、持水量和孔隙度提高,从而提高土壤水稳性团聚体的稳定性。毛艳玲等^[33]研究表明,当林地开垦为农田后,>2 mm 团聚体含量明显下降,团聚体稳定性也下降。耕地与林地相比,地表掉落物明显减少,土壤中的天然有机质也随之减少,而且耕作会破坏表层土壤,破坏大粒径团聚体,使有机质胶体氧化分解,导致土壤团聚体易破裂分散,降低其 MWD、GMD 及 WSAR 值,因此耕地土壤水稳性团聚体稳定性较林地差。这与本研究结果相一致。

研究区 $DR_{0.25}$ 、WSAR、MWD、GMD 和 PAD 值的相关分析表明,排土场复垦样地 $DR_{0.25}$ 、WSAR、MWD 和 GMD 值呈显著正相关,且与 PAD 值呈显著负相关,与刘艳等^[34]研究结果相吻合。已有研究表明土壤中大粒径的团聚体越多,团聚体分布越集中,团聚体越不容易遭到破坏,土壤结构越稳定^[19,22],则该模式复垦效果越好;反之,团聚体中小颗粒越多,土壤团聚体稳定性越差,越容易遭到破坏^[24]。

4 结论

(1)经多年复垦后,土壤水稳性团聚体趋于稳定状态,随之土壤结构也越来越稳定,土壤质量得到有效改良。

(2)在 4 种混交林复垦模式及 2 种纯林复垦模式中,混交林复垦模式对土壤水稳性团聚体的改良作用优于纯林,其中,刺槐+油松复垦模式的改良效果最佳。

(3)对于不同的土地利用方式,林地的土壤有机质更为丰富且团聚体粒径较大,结构较为均一,其土壤水稳性团聚体稳定性优于耕地。耕地由于频繁的人为扰动造成团聚体粒径相对较小,较易被破坏,稳定

性较差。

(4)评价土壤水稳性团聚体稳定性的指标 $DR_{0.25}$ 、WSAR、MWD与GMD相互之间呈极显著正相关,且均与PAD呈极显著负相关。

参考文献:

- [1] Shrestha R K, Lal R. Changes in physical and chemical properties of soil after surface mining and reclamation[J]. *Geoderma*, 2011, 161(3/4): 168-176.
- [2] Frouz J, Prach K, Pižl V, et al. Interactions between soil development, vegetation and soil fauna during spontaneous succession in post mining sites[J]. *European Journal of Soil Biology*, 2008, 44(1): 109-121.
- [3] 张耿杰. 矿区复垦土地质量监测与评价研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2013.
ZHANG Geng-jie. Study on monitoring and evaluation of the quality of reclaimed land in mining area[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2013.
- [4] 郭春燕, 李晋川, 岳建英, 等. 安太堡露天煤矿复垦区不同人工林土壤呼吸特征[J]. 水土保持通报, 2015, 35(3): 55-61.
GUO Chun-yan, LI Jin-chuan, YUE Jian-ying, et al. Soil respiration characteristics of different artificial forests in reclaimed region of An-taibao opencast coal mine[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2015, 35(3): 55-61.
- [5] 李俊超, 党廷辉, 薛江, 等. 植被重建下露天煤矿排土场边坡土壤碳储量变化[J]. 土壤学报, 2015, 52(2): 453-460.
LI Jun-chao, DANG Ting-hui, XUE Jiang, et al. Variability of soil organic carbon storage in dump slope of opencast coal mine under revegetation[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2015, 52(2): 453-460.
- [6] 陈孝杨. 粉煤灰充填重构土壤水盐变化特征与作物响应研究[D]. 合肥: 安徽理工大学, 2013.
CHEN Xiao-yang. Water-salt variational properties and crop response of reconstruction soil filled with fly ash[D]. Hefei: Anhui University of Science and Technology, 2013.
- [7] 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 Jin-man, GUO Ling-li, BAI Zhong-ke, 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(21): 223-232.
- [8] 刘恩科, 赵秉强, 梅旭荣, 等. 不同施肥处理对土壤水稳性团聚体及有机碳分布的影响[J]. 生态学报, 2010, 30(4): 1035-1041.
LIU En-ke, ZHAO Bing-qiang, MEI Xu-rong, et al. Distribution of water-stable aggregates and organic carbon of arable soils affected by different fertilizer application[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(4): 1035-1041.
- [9] 史奕, 陈欣. 土壤团聚体的稳定机制及人类活动的影响[J]. 应用生态学报, 2002, 13(11): 1491-1494.
SHI Yi, CHEN Xin. Stable mechanisms of soil aggregate and effects of human activities[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, 13(11): 1491-1494.
- [10] 李阳兵, 魏朝富, 谢德体, 等. 岩溶山区植被破坏前后土壤团聚体稳定性研究[J]. 中国农学通报, 2005, 21(10): 232-234.
LI Yang-bing, WEI Chao-fu, XIE De-ti, et al. The features of soil water-stable aggregate before and after vegetation destruction in Karst mountains[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2005, 21(10): 232-234.
- [11] 王国梁, 周生路, 赵其国. 土壤颗粒的体积分形维数及其在土地利用中的应用[J]. 土壤学报, 2005, 42(4): 545-550.
WANG Guo-liang, ZHOU Sheng-lu, ZHAO Qi-guo. Volume fractal dimension of soil particles and its applications to land use[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2005, 42(4): 545-550.
- [12] Li Z X, Cai C F, Shi Z H, et al. Aggregate stability and its relationship with some chemical properties of red soils in subtropical China[J]. *Pe-dosphere*, 2005, 15(1): 129-136.
- [13] Chatterjee R K, Jain J K. Studies on aggregate formation with reference to cementing substances[J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 1970, 16(6): 231-233.
- [14] Aspiras R B, Allen O N, Harris R F, et al. The role of microorganisms in the stabilization of soil aggregates[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 1971, 3(4): 347-353.
- [15] Donald R G, Kay B D, Miller M H. The effect of soil aggregate size on early shoot and root growth of maize (*Zea mays* L.)[J]. *Plant and Soil*, 1987, 103(2): 251-259.
- [16] Letey J. Relationship between soil physical properties and crop production[M]//Stewart B A. Advances in soil science. New York: Springer, 1985: 277-294.
- [17] Pirmoradian N, Sepaskhah A R, Hajabbasi M A. Application of fractal theory to quantify soil aggregate stability as influenced by tillage treatments[J]. *Biosystems Engineering*, 2005, 90(2): 227-234.
- [18] Zhou H, Lü Y, Yang Z, et al. Influence of conservation tillage on soil aggregates features in North China Plain[J]. *Agricultural Sciences in China*, 2007, 6(9): 1099-1106.
- [19] 刘梦云, 吴健利, 刘丽雯, 等. 黄土台塬土地利用方式对土壤水稳性团聚体稳定性影响[J]. 自然资源学报, 2016, 31(9): 1564-1576.
LIU Meng-yun, WU Jian-li, LIU Li-wen, et al. Stability characteristics of soil water-stable aggregates under different land-use patterns on the loess plateau[J]. *Journal of Natural Resources*, 2016, 31(9): 1564-1576.
- [20] 袁俊吉, 蒋先军, 胡宇, 等. 不同植被覆盖对养分在土壤水稳性团聚体中分布特征的影响[J]. 水土保持学报, 2009, 23(6): 112-117.
YUAN Jun-ji, JIANG Xian-jun, HU Yu, et al. Distribution of nutrient elements within water-stable aggregates under different vegetation[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2009, 23(6): 112-117.
- [21] 祁迎春, 王益权, 刘军, 等. 不同土地利用方式土壤团聚体组成及几种团聚体稳定性指标的比较[J]. 农业工程学报, 2011, 27(1): 340-347.
QI Ying-chun, WANG Yi-quan, LIU Jun, et al. Comparative study on composition of soil aggregates with different land use patterns and several kinds of soil aggregate stability index[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2011, 27(1): 340-347.
- [22] 徐爽, 王益权, 王浩, 等. 不同肥力水平土壤团聚体的稳定性及对氮肥盐溶液的响应[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(5): 1135-

- 1143.
- XU Shuang, WANG Yi-quan, WANG Hao, et al. Effects of nitrogen fertilizer solution on stability of soil aggregates under different fertility levels[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2012, 18(5):1135-1143.
- [23] 王晓娟, 贾志宽, 梁连友, 等. 旱地施有机肥对土壤有机质和水稳性团聚体的影响[J]. 应用生态学报, 2012, 23(1):159-165.
- WANG Xiao-juan, JIA Zhi-kuan, LIANG Lian-you, et al. Effects of organic manure application on dry land soil organic matter and water stable aggregates[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2012, 23(1):159-165.
- [24] 刘美英, 金永昌, 刘金善, 等. 复垦模式对采煤沉陷复垦区土壤团聚体组成及稳定性的影响[J]. 干旱区资源与环境, 2016, 30(12):170-174.
- LIU Mei-ying, JIN Yong-chang, LIU Jin-shan, et al. Effect of reclamation method on composition and stability of soil aggregates among reclaimed soil of coal-mining subsidence[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2016, 30(12):170-174.
- [25] 白中科, 赵景逵. 山西煤矿区土地复垦研究[J]. 能源环境保护, 1997, 11(2):29-32.
- BAI Zhong-ke, ZHAO Jing-kui. Study on land reclamation in Shanxi coal mining area[J]. *Energy and Environmental Protection*, 1997, 11(2):29-32.
- [26] 田慎重, 王 瑜, 李 娜, 等. 耕作方式和秸秆还田对华北地区农田土壤水稳性团聚体分布及稳定性的影响[J]. 生态学报, 2013, 33(22):7116-7124.
- TIAN Shen-zhong, WANG Yu, LI Na, et al. Effects of different tillage and straw systems on soil water-stable aggregate distribution and stability in the North China Plain[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(22):7116-7124.
- [27] 周 虎, 吕贻忠, 杨志臣, 等. 保护性耕作对华北平原土壤团聚体特征的影响[J]. 中国农业科学, 2007, 40(9):1973-1979.
- ZHOU Hu, LÜ Yi-zhong, YANG Zhi-chen, et al. Effects of conservation tillage on soil aggregates in Huabei Plain, China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2007, 40(9):1973-1979.
- [28] 杨长明, 欧阳竹. 华北平原农业土地利用方式对土壤水稳性团聚体分布特征及其有机碳含量的影响[J]. 土壤, 2008, 40(1):100-105.
- YANG Chang-ming, OUYANG Zhu. Effects of agricultural land uses on water-stable aggregate distribution and organic carbon in farmland soil in the Northern China Plain[J]. *Soils*, 2008, 40(1):100-105.
- [29] Kemper W D, Rosenau R C, Klute A. Aggregate stability and size distribution[M]//Klute A. Methods of soil analysis. Part 1. Physical & mineralogical methods. Madison: American Society of Agronomy, 1986: 425-442.
- [30] Rutigliano F A, D'Ascoli R, Virzo D S A. Soil microbial metabolism and nutrient status in a Mediterranean area as affected by plant cover [J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2004, 36(11):1719-1729.
- [31] Gaillard V, Chenu C, Recous S. Carbon mineralisation in soil adjacent to plant residues of contrasting biochemical quality[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2003, 35(1):93-99.
- [32] 王晓峰, 唐彦民, 鲁少军. 关于混交林与纯林的比较优势分析[J]. 防护林科技, 2006(5):63-64.
- WANG Xiao-feng, TANG Yan-min, LU Shao-jun. Analysis on comparative superiority of mixed forest and pure[J]. *Protection Forest Science and Technology*, 2006(5):63-64.
- [33] 毛艳玲, 杨玉盛, 邢世和, 等. 土地利用方式对土壤水稳性团聚体有机碳的影响[J]. 水土保持学报, 2008, 22(4):132-137.
- MAO Yan-ling, YANG Yu-sheng, XING Shi-he, et al. Effects of land use on soil organic carbon in water-stable aggregates[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2008, 22(4):132-137.
- [34] 刘 艳, 查同刚, 王伊琨, 等. 北京地区栓皮栎和油松人工林土壤团聚体稳定性及有机碳特征[J]. 应用生态学报, 2013, 24(3):607-613.
- LIU Yan, ZHA Tong-gang, WANG Yi-kun, et al. Soil aggregate stability and soil organic carbon characteristics in *Quercus variabilis* and *Pinus tabulaeformis* plantations in Beijing area[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2013, 24(3):607-613.