



移动扫码阅读

李文龙, 刘美英, 李 雪, 等. 植被恢复对采煤沉陷区土壤团聚体稳定性的影响 [J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(11): 222-229.

LI Wenlong, LIU Meiyng, LI Xue, et al. Effect of vegetation restoration on stability of soil aggregates in coal mining subsidence area [J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(11): 222-229.

# 植被恢复对采煤沉陷区土壤团聚体稳定性的影响

李文龙<sup>1,2</sup>, 刘美英<sup>1,2</sup>, 李 雪<sup>3</sup>, 李 强<sup>4</sup>, 杨 艳<sup>5</sup>

(1. 内蒙古农业大学 草原与资源环境学院, 内蒙古 呼和浩特 010018; 2. 内蒙古农业大学 内蒙古自治区土壤质量与养分资源重点实验室, 内蒙古 呼和浩特 010018; 3. 黑龙江飞鹤乳业有限公司创新中心, 北京 100015; 4. 国能神东煤炭集团公司, 内蒙古 鄂尔多斯 017209; 5. 鄂尔多斯市水利局, 内蒙古 鄂尔多斯 017209)

**摘要:** 为了明确采煤沉陷区不同植被恢复类型土壤团聚体组成及其稳定性变化, 进而筛选出最佳的复垦林型。针对神府-东胜矿区采煤沉陷地设置长柄扁桃、欧李、文冠果 3 种林型, 同时以周边未复垦地作为对照, 探究深 0~20、20~40 cm 土层土壤机械稳定性和水稳定性团聚体组成及稳定性对长期植被复垦的响应规律。结果表明: 长柄扁桃、欧李和文冠果复垦提升了深 0~20 cm 和 20~40 cm 土层粒级 >2 mm、0.25~2.00 mm 粒级机械稳定性和水稳定性团聚体的含量, 降低了粒级 0.053~0.250 mm 和 <0.053 mm 粒级机械稳定性和水稳定性团聚体的含量; 不同复垦林型各土层 >0.25 mm 机械稳定性团聚体 (DR<sub>>0.25</sub>)、水稳定性团聚体 (WR<sub>>0.25</sub>) 分别较对照增加了 17.86%~33.36% 和 12.94%~21.69%; 平均重量直径 (MWD)、几何平均直径 (GMD) 较对照显著增大、分维形数 (D) 减小; 文冠果土壤团聚体 MWD 和 GMD 最大、D 最小, 稳定性最高; 0.053~0.250 mm 和 <0.053 mm 粒级团聚体与粒级大于 0.25 mm 团聚体含量 R<sub>>0.25</sub>、MWD、GMD 均呈极显著负相关。不同植被恢复林型均能促进粒级较小的团聚体向更大粒级团聚体转变, 尤其是大于 0.25 mm 团聚体含量, 增加土壤团聚体的稳定性; 文冠果林大团聚体含量最高, 稳定性最好, 植被恢复效果更佳。

**关键词:** 神东矿区; 采煤沉陷; 土壤团聚体; 植被恢复; 团聚体稳定性

**中图分类号:** SI52.9      **文献标志码:** A      **文章编号:** 0253-2336(2022)11-0222-08

## Effect of vegetation restoration on stability of soil aggregates in coal mining subsidence area

LI Wenlong<sup>1,2</sup>, LIU Meiyng<sup>1,2</sup>, LI Xue<sup>3</sup>, LI Qiang<sup>4</sup>, YANG Yan<sup>5</sup>

(1. College of Grassland, Resources and Environment, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China; 2. Inner Mongolia Key Laboratory of Soil Quality and Nutrient Resource, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China; 3. Innovation Center of Heilongjiang Feihe Dairy Co., Ltd., Beijing 100015, China; 4. Shendong Coal Company, Erdos 017209, China; 5. Bureau of Water Resources in Erdos, Erdos 017209, China)

**Abstract:** In order to identify the soil aggregate composition and stability changes of soil aggregates in different vegetation restoration types in coal mining subsidence areas, and then screen out the best reclaimed forest types. Aiming at the coal mining subsidence land in Shensheng mining area, three forest types of Amygdalus pedunculata, Cerasus humilis, and Xanthoceras sorbifolia were set up in the coal mining subsidence of this area, and the surrounding unreclaimed land was used as a control to explore the response of soil mechanical stability and water stability aggregate composition and stability in 0~20 cm and 20~40 cm soil layers to long-term vegetation reclamation. The results showed that the reclamation of Amygdalus pedunculata, Cerasus humilis, and Xanthoceras sorbifolia increased the content of mechanical stability and water-stable aggregates of 0~20 cm and 20~40 cm soil layers >2 mm and 0.25~2.00 mm, and decreased the content of mechanical stability and water-stable aggregates of 0.053~0.250 mm and <0.053 mm soil layers; the mechanical stability

收稿日期: 2022-05-01      责任编辑: 朱恩光      DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2021-0447

基金项目: 内蒙古自治区高等学校科学研究资助项目 (NJZZ18043); 国家自然科学基金资助项目 (41301605)

作者简介: 李文龙 (1995—), 男, 内蒙古呼和浩特人, 硕士研究生。E-mail: 13154881051@163.com

通讯作者: 刘美英 (1974—), 女, 内蒙古清水河人, 副教授, 博士。E-mail: liumeiyingmau@163.com

aggregates ( $DR_{>0.25}$ ) and water stability aggregates ( $WR_{>0.25}$ ) in different soil layers of different reclaimed forest types increased by 17.86%~33.36% and 12.94%~21.69% respectively compared with the control; the mean weight diameter (MWD) and geometric mean diameter (GMD) increased significantly larger than the control plot, and the number of fractal dimensions ( $D$ ) decreased compared with the control. The MWD and GMD of *Xanthoceras sorbifolia* soil aggregates were the largest, the  $D$  value was the smallest, and the stability was the highest; 0.053~0.250 mm and <0.053 mm aggregates were negatively correlated with  $R_{>0.25}$ , MWD and GMD. The main conclusion is that different types of vegetation restoration can promote the transformation of aggregates of smaller size to larger size aggregates, especially the aggregate content greater than 0.25 mm, which increases the stability of soil aggregates; *Xanthoceras sorbifolia* forest has the highest macroaggregate content, the best stability and better vegetation restoration effect.

**Key words:** Shendong mining area; coal mining subsidence; soil aggregates; vegetation restoration; aggregate stability

## 0 引言

煤炭资源在我国一次能源结构组成中约占76%,凭借资源的可靠性、价格的低廉性以及较强的可获取性等优势,决定了其在今后较长时间内其作为第一能源的地位不会发生根本性变化<sup>[1]</sup>。神东矿区作为我国最大的井工煤矿开采地,其在保证能源供应的同时也造成了大量土地沉陷。然而,土地沉陷加剧了水土流失、土地退化等现象,导致土壤理化性质变差以及土壤养分流失,给当地工农业生产及生态环境等方面带来严重影响。植被恢复被认为是矿区生态恢复最为有效的手段,因为植被恢复可以达到较高的植物生产力,同时能够促进土壤颗粒通过有机质等的胶结作用结合成大团聚体,增加土壤团聚体的稳定性,促进土壤碳氮磷等养分的固持<sup>[2-3]</sup>,进而提升土壤肥力。土壤团聚体是土壤小颗粒和土壤中的有机、无机物质等在干湿冻融的气候条件下,经物理、化学和生物作用形成的团粒结构,其形成与稳定对于复垦土壤的恢复起着至关重要的作用,其组成比例和数量多少也在一定程度上反映了土壤储存养分能力的大小<sup>[4]</sup>。土壤团聚体组成及其稳定性受植被覆盖类型、降水、土壤有机质含量以及人为扰动等多种因素的影响<sup>[5-6]</sup>。朱家琪等<sup>[7]</sup>通过对寒温带森林植被土壤团聚体粒级组成及其稳定性进行研究发现,不同森林植被下各土层土壤大团聚体含量及团聚体稳定性均有不同程度地增加,且不同植被类型间差异显著;韩新生等<sup>[8]</sup>在黄土丘陵区的研究表明土壤团聚体稳定性的顺序为人工林地>人工草地>农田;姜敏等<sup>[9]</sup>研究也发现自然状态下林地的土壤团聚体整体稳定性比耕地和草地要高;刘梦云等<sup>[5]</sup>在黄土台塬的研究得出长期耕作会减少土壤大团聚体含量,降低土壤团聚体稳定性,不利于土壤结构的维持的结论;陈胜要等<sup>[10]</sup>研究黄淮地区不同土地利用方式下土壤团聚体特征的结果表明,不同土地利用方式间团聚体稳定

性具有显著差异,其中林地土壤团聚体稳定性较高,耕地土壤团聚体稳定性表现最差。由此可见,研究不同植被类型下土壤团聚体组成及其稳定性特征对于采煤沉陷区植被复垦工作具有重要意义,而目前对于采煤沉陷地复垦土壤团聚体组成及其稳定性研究甚少,相关工作亟需开展。笔者以神府东胜矿区采煤沉陷地长期复垦试验地为研究平台,通过研究不同复垦林型对土壤团聚体组成及其稳定性变化的响应规律,筛选出最佳的复垦林型,为将来采煤沉陷区植被恢复以及水土保持等提供理论指导依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验区概况

研究区位于神府-东胜矿区优良乡土树种选育试验基地,地处陕西省神木市,北邻内蒙古鄂尔多斯市乌兰木伦镇,其经纬度变化范围为108°36'~110°40' E,37°20'~40°16' N。矿区为典型的干旱半干旱大陆性季风气候,冬季干冷多风,夏季炎热少雨,平均年降水量378 mm,其中降水量最少的年份仅有194.7 mm,降水量最多的年份可达531.6 mm,年蒸发量为2 297.4~2 838.7 mm,是降水量的6~7.5倍,年平均气温7.3 °C,年极端气温在-30.7~38.9 °C,≥10 °C积温约为3 000 °C。研究区土壤的类型是鄂尔多斯高原上典型的粗骨土,土壤养分贫瘠,生产力较低,保水保肥能力差,抗侵蚀能力较弱。矿区地质构造简单,浅埋深、厚松沙、富潜水,容易形成采煤塌陷区。研究区土壤pH为8.09,电导率0.78 mS/cm,容重1.47 g/cm<sup>3</sup>,有机质含量6.09 g/kg,全氮含量0.59 g/kg,全磷含量0.42 g/kg。

### 1.2 试验设计

采煤沉陷导致植被根系受损,土壤结构发生变化,进而出现土壤肥力发生改变,因此沉陷后需要进行植被复垦,试验区自2007年开始进行复垦种植延续至今,总面积约为4×10<sup>4</sup> m<sup>2</sup>。试验采取完全随机设计,共设有4个处理(表1),包括3种不同植被复

垦型(文冠果林、欧李林和长柄扁桃林)和对照(试验区周边未复垦地,立地条件类型与复垦区一致),每个处理设置3次重复,对比复垦后土壤的稳定性和土壤肥力较复垦前的变化情况,以明确复垦成效,同时筛选出复垦效果最佳的植被类型。长柄扁桃和欧李通过植苗种植,行距分别为1.5 m×0.7 m、1.3 m×0.5 m,成行种植,文冠果结合植苗种植和播种种植2种方式(为了提高其成活率),株行距控制在0.4 m×0.3 m。复垦过程中考虑到3种林型种植的密度与规格可能会影响复垦土壤的性质,所以在最初植苗种植时就尽量让行间距小一些,从而使植被覆盖度达到要求,让不同处理间具有可比性,后期随着苗木的生长在复垦管护中要逐步间苗、定苗,以保证植株的正常生长,其中由于文冠果大部分是直接播种,其生长范围会随着复垦年限的增加而逐渐增大,因而需要将部分小苗移栽到试验区周边,这样既保证了文冠果苗之间的合理间距,也扩大了复垦面积,在保证良好复垦效果的同时还节省了大量成本。试验所选用的3种林型是从多种复垦植被当中初步筛选出来的,且都是当地的乡土树种,适宜在当地栽培。

表1 试验区处理基本信息

Table 1 Basic information of treatments in experimental area

处理方式	播种方式	株行距(长×宽)
长柄扁桃林	植苗种植,成行种植	1.5 m×0.7 m
欧李林	植苗种植,成行种植	1.3 m×0.5 m
文冠果林	植苗、播种种植	0.4 m×0.3 m
对照	未种植	—

### 1.3 土壤样品采集

于2018年植被返青前和枯黄后2个时期,分别在不同林型复垦地上的3个小区内用“S”形多点采样法,向下挖深40 cm的土壤剖面,自下而上均匀地取0~20 cm和20~40 cm两个土层的原状土壤,将其装入已编号的密闭硬质塑料盒中带回,去除植物根系及石块等杂物,加盖置于土壤处理室中自然风干后,取适量土壤样品采用干筛法和湿筛法分别进行土壤机械稳定性团聚体和水稳定性团聚体的筛分,并将筛分后得到的不同粒级团聚体进行称重,计算其百分含量。

### 1.4 样品测定方法

干筛法:称取自然风干后的原状土壤500 g,置于孔径自上而下分别为2、0.25、0.053 mm电动振筛机的最上层,筛分5 min后取下,分别得到>2 mm、0.25~2 mm、0.25~0.053 mm和<0.053 mm四个粒级

的土壤团聚体,将各粒级团聚体全部收集称重并计算不同粒级团聚体所占的比例。

湿筛法:称取50 g风干土,用蒸馏水湿润5 min,转移至孔径自上而下分别为2、0.25、0.053 mm套筛的最上层,启动振动筛分仪,以振幅3.8 cm、32 r/min的频率湿筛10 min,将各个筛上的土壤团聚体用蒸馏水冲洗至铝盒中,分离出>2 mm、0.25~2.00 mm、0.053~0.250 mm、<0.053 mm四个粒级的土壤团聚体,在60 ℃下烘干,冷却称量,用于土壤团聚体质量分数、稳定性的计算。

### 1.5 数据分析与统计方法

计算公式<sup>[11]</sup>如下:

$$A_i = \frac{G_i}{M_T} \times 100\% \quad (1)$$

式中: $A_i$ 为第*i*粒级团聚体的质量分数,%; $G_i$ 为第*i*粒级团聚体的风干质量,g。

$$R_{>0.25} = \frac{M_{>0.25}}{M_T} \times 100\% \quad (2)$$

式中: $R_{>0.25}$ 为大于0.25 mm团聚体含量,%; $M_{>0.25}$ 为>0.25 mm团聚体质量,g。

$$MWD = \sum_{i=1}^n \bar{R}_i W_i \quad (3)$$

$$GMD = \exp \left( \sum_{i=1}^n w_i \ln \bar{R}_i \right) \quad (4)$$

式中:MWD为平均质量直径,mm;GMD为几何平均直径,mm;n为团聚体粒级的分组数; $R_i$ 为第*i*粒级团聚体的平均直径,mm; $w_i$ 为第*i*粒级团聚体质量占样品总质量百分比,%。

$$D = 3 - \frac{\lg \left( \frac{M_{r < R_i}}{M_T} \right)}{\lg \left( \frac{\bar{R}_i}{\bar{R}_{\max}} \right)} \quad (5)$$

式中: $D$ 为分形维数; $\bar{R}_i$ 为第*i*粒级团聚体的平均直径; $\bar{R}_{\max}$ 为最大粒级团聚体的平均直径; $M_{r < R_i}$ 为团聚体粒级小于*R<sub>i</sub>*的累积质量,g。

运用SAS 9.4对不同粒级土壤团聚体含量及其稳定性参数进行方差分析(One-way, ANOVA)、趋势检验(The trend analysis method)和相关性分析(Correlation analysis)。

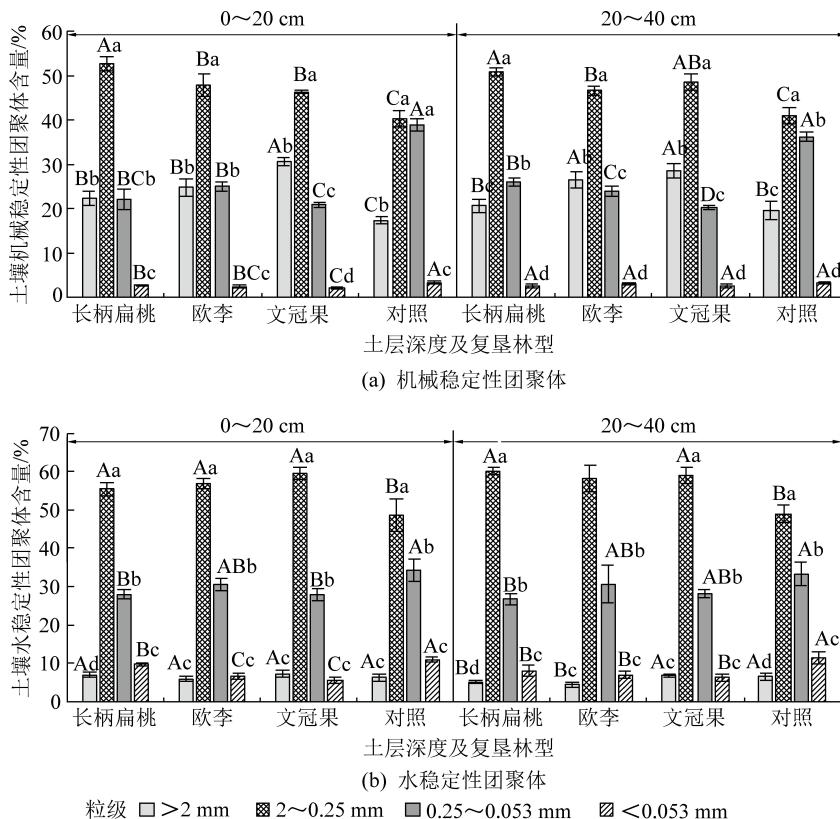
## 2 结果与分析

### 2.1 复垦林型对土壤机械稳定性团聚体组成的影响

图1a中,各林型0~20 cm和20~40 cm土层土

壤机械稳定性团聚体含量均随着粒径的减小呈现先升高后降低的倒“V”形趋势,其中0.25~2.00 mm粒级机械稳定性团聚体含量最高,显著高于其他粒级团聚体(显著性水平 $p<0.05$ ),最高占比达52.66%;整体上,>2 mm粒级机械稳定性团聚体含量高于0.053~0.25 mm粒级团聚体,其中文冠果林>2 mm粒级机械稳定性团聚体的占比达28.54%~30.65%;各林型<0.053 mm粒级机械稳定性团聚体含量显著低于其他粒级团聚体( $p<0.05$ ),仅占3%左右。在0~20 cm土层,长柄扁桃、欧李和文冠果林>2 mm和0.25~2.00 mm粒级机械稳定性团聚体含量较对

照均显著增加,而0.053~0.250 mm和<0.053 mm粒级机械稳定性团聚体含量则显著下降( $p<0.05$ );在20~40 cm土层,除长柄扁桃外,其他林型>2 mm和0.25~2.00 mm粒级机械稳定性团聚体含量较对照均显著增加( $p<0.05$ );各林型0.053~0.250 mm粒级机械稳定性团聚体含量显著小于对照地,但<0.053 mm粒级机械稳定性团聚体无显著差异( $p<0.05$ )。此外,各林型0~20 cm和20~40 cm土层>0.25 mm机械稳定性团聚体( $DR_{>0.25}$ )含量均超过70%,较对照增加17.86%~33.36%。



注:不同大写字母表示相同复垦植被下不同粒级团聚体含量差异显著( $p<0.05$ );不同小写字母表示不同复垦植被下相同粒级团聚体含量差异显著( $p<0.05$ )

图1 不同植被恢复林型土壤团聚体组成

Fig.1 Composition of different vegetation restoration forest-type soil reunites

## 2.2 植被恢复林型对土壤水稳定性团聚体组成的影响

各植被恢复林型0~20 cm和20~40 cm土层水稳定性团聚体含量随粒径的减小同样呈倒“V”形趋势(图1b),其中0.25~2.00 mm粒级水稳定性团聚体含量最高,占总体的48.64%~60.23%,较其他粒级团聚差异显著( $p<0.05$ ),0.250~0.053 mm粒级水稳定性团聚体含量次之,占26.77%~34.24%,而>2 mm和<0.053 mm粒级水稳定性团聚体含量最低,仅有10%左右,且差异显著( $p<0.05$ )。0~20 cm

土层各林型>2 mm粒级水稳定性团聚体含量较对照无显著性差异,而0.25~2.00 mm粒级水稳定性团聚体含量显著增加,0.053~0.250 mm和<0.053 mm粒级水稳定性团聚体含量较对照显著减少( $p<0.05$ );20~40 cm土层,各林型0.25~2.00 mm粒级水稳定性团聚体含量较对照均显著升高,而<0.053 mm粒级水稳定性团聚体含量显著降低( $p<0.05$ ),且其他粒级水稳定性团聚体含量也有不同程度的下降。此外,各林型不同土层>0.25 mm水稳定性团聚体含

量( $WR_{>0.25}$ )均超过60%,较对照增加12.94%~21.69%。

### 2.3 植被恢复林型对土壤团聚体稳定性的影响

除长柄扁桃林0~20 cm土层机械稳定性团聚体MWD值显著大于20~40 cm土层外,其他各林型机械稳定性团聚体MWD、GMD以及D值在不同土层间均无显著差异( $p<0.05$ )。与对照相比,各林型不同土层机械稳定性团聚体MWD、GMD值均显著增大,其中文冠果林机械稳定性团聚体MWD、GMD值最大,且与其他林型有显著性差异( $p<0.05$ );不同林型机械稳定性团聚体D值间无显著差异(表2)。

表2 不同植被恢复林型土壤团聚体稳定性参数(干筛法)

Table 2 Stability parameters of soil aggregates in different vegetation restoration forest types (dry sieve method)

土层 深度/cm	复垦林型	稳定性参数		
		MWD/mm	GMD/mm	D
0~20	长柄扁桃	1.08±0.03Ab	0.84±0.19Ab	2.09±0.05Aa
	欧李	1.07±0.01Ab	0.78±0.05Ab	2.07±0.11Aa
	文冠果	1.17±0.01Aa	1.35±0.08Aa	2.04±0.13Aa
	对照	0.86±0.01Ac	0.31±0.01Ac	2.18±0.11Aa
20~40	长柄扁桃	1.02±0.02Bc	0.57±0.09Ac	2.09±0.07Aa
	欧李	1.09±0.02Ab	0.93±0.11Ab	2.12±0.03Aa
	文冠果	1.15±0.01Aa	1.27±0.08Aa	2.08±0.08Aa
	对照	0.91±0.02Ad	0.39±0.06Ac	2.17±0.06Aa

注:大写字母表示相同复垦林型不同土层差异显著( $p<0.05$ );小写字母表示同一土层不同复垦林型差异显著( $p<0.05$ ),下同。

由表3可知,各林型不同土层间土壤水稳定性团聚体MWD、GMD和D值无显著差异,说明土壤水稳定性团聚体MWD、GMD以及D值受土层因素影响较小。不同林型0~20 cm和20~40 cm土层团聚体MWD均显著大于对照样地( $p<0.05$ ),而文冠果林又显著高于长柄扁桃和欧李林( $p<0.05$ )。3种林型及对照样地在0~20 cm土层上土壤水稳定性团聚体GMD差异较大,其大小依次为长柄扁桃>文冠果>对照>欧李,但在20~40 cm土层上各林型土壤水稳定性团聚体GMD值均未达到显著性差异。不同林型各土层土壤水稳定性团聚体D值与机械稳定性团聚体相一致,同样未达到显著性差异。

### 2.4 团聚体粒级对稳定性参数的相关性分析

图2中,不同林型>2 mm粒级机械稳定性团聚体与 $R_{>0.25}$ 、MWD和GMD值的相关性系数在0.81~

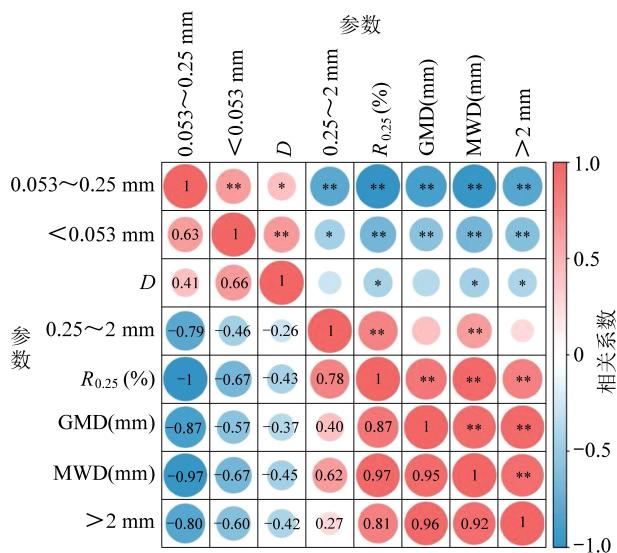
表3 不同植被恢复林型土壤团聚体稳定性参数(湿筛法)

Table 3 Stability parameters of soil aggregates in different vegetation restoration forest types (wet sieve method)

土层 深度/cm	复垦林型	稳定性参数		
		MWD/mm	GMD/mm	D
0~20	长柄扁桃	0.81±0.02Ab	0.25±0.02Aa	2.39±0.10Aa
	欧李	0.81±0.01Ab	0.18±0.02Ac	2.30±0.16Aa
	文冠果	0.86±0.01Aa	0.23±0.02Aab	2.25±0.13Aa
	对照	0.73±0.03Ac	0.19±0.01Abc	2.43±0.24Aa
20~40	长柄扁桃	0.82±0.01Ab	0.23±0.03Aa	2.33±0.16Aa
	欧李	0.79±0.04Ab	0.17±0.06Aa	2.31±0.12Aa
	文冠果	0.84±0.02Aa	0.22±0.01Aa	2.28±0.14Aa
	对照	0.74±0.01Ac	0.20±0.03Aa	2.44±0.05Aa

0.96,均为极显著正相关( $p<0.01$ ),与D值呈显著负相关( $p<0.05$ ),相关系数为-0.42;0.25~2.00 mm粒级土壤机械稳定性团聚体与 $R_{>0.25}$ 和MWD呈极显著正相关( $p<0.01$ ),相关系数分别为0.78和0.62,与GMD呈正相关、与D值呈负相关但相关性不显著;0.053~0.250 mm和<0.053 mm粒级土壤机械稳定性团聚体与 $R_{>0.25}$ 、MWD和GMD均为极显著负相关( $p<0.01$ ),与此同时,前者与D值呈显著正相关( $p<0.05$ ),而后者为极显著正相关( $p<0.01$ ),相关系数分别为0.41和0.66。上述结果说明不同粒级机械稳定性团聚体和稳定性参数之间联系密切,且正负相关以0.25 mm粒级为界。此外, $R_{>0.25}$ 与MWD和GMD、MWD与GMD之间也存在极显著正相关关系( $p<0.01$ ),D值与 $R_{>0.25}$ 、MWD之间呈显著负相关( $p<0.05$ )。

如图3所示,>2 mm粒级水稳定性团聚体与GMD值呈显著正相关( $p<0.05$ ),相关系数为0.41,与 $R_{>0.25}$ 、MWD和D值相关但不显著;0.25~2 mm粒级土壤水稳定性团聚体与 $R_{>0.25}$ 和MWD值呈极显著正相关( $p<0.01$ ),相关系数分别为0.97和0.91;不同植被恢复林型土壤0.25~0.053 mm粒级水稳定性团聚体与 $R_{>0.25}$ 、MWD以及GMD值均呈极显著负相关( $p<0.01$ ),相关系数在-0.76~-0.89;<0.053 mm水稳定性团聚体与 $R_{>0.25}$ 、MWD之间为极显著负相关( $p<0.01$ ),相关系数均为-0.74。整体来看,水稳定性团聚体与稳定性参数的正负相关性仍以0.25 mm团聚体粒级为界限。此外,不同林型土壤水稳定性团聚体GMD与 $R_{>0.25}$ 和MWD值之间呈显著正相关( $p<0.05$ ),其相关系数分别是0.46和0.51,团聚体 $R_{>0.25}$ 与MWD值呈极显著正相关( $p<0.01$ ),相关系数为0.98。



注: \* — 在 0.01 级别(双尾)相关性显著;

\* — 在 0.05 级别(双尾)相关性显著,下同。

图 2 各粒级机械稳定性团聚体与稳定性参数的相关性

Fig.2 Correlation between different granular mechanical stability reunions and stability parameters

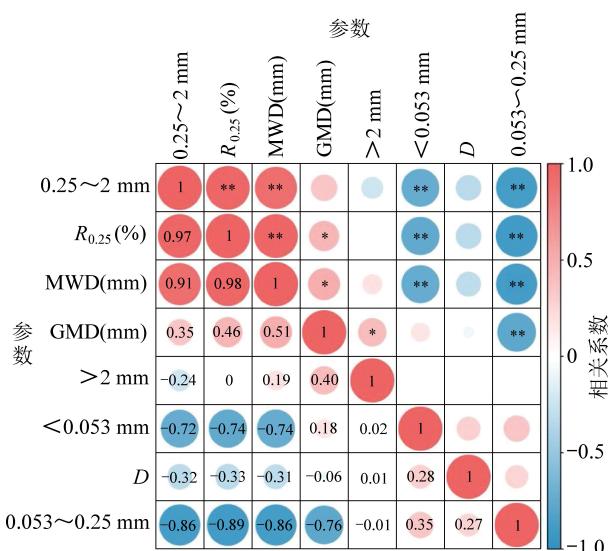


图 3 各粒级水稳定性团聚体与稳定性参数的相关性

Fig.3 Correlation between different granular water stability reunites and stability parameters

### 3 讨 论

土壤团聚体是土壤结构组成的基本单位,也是评价土壤肥力状况的重要指标。通常认为 $>0.25\text{ mm}$ 的团聚体为大团聚体,而 $<0.25\text{ mm}$ 粒级团聚体称为微团聚体,宋莉群等<sup>[12]</sup>按照团聚体粒级的大小又把 $<0.053\text{ mm}$ 粒级团聚体进一步划分为矿质颗粒,其中大团聚体结构性好,抗蚀能力强,有利于增加土壤的稳定性,便于土壤肥力的提升。研究

表明,矿质土壤主要由粒径在 $0.1\sim1\,000\text{ }\mu\text{m}$ 的固体颗粒构成,而研究区由于塌陷使地表植被破坏,土壤侵蚀加重,团聚体结构被破坏,所以在复垦初期,土壤团聚成分较少,多以粒级较小的土壤颗粒为主,而植被恢复能够加速这些土壤颗粒的胶结,促进土壤大团聚体的形成,使大团聚体所占比例升高<sup>[4,13]</sup>,微团聚体含量则相应下降,因此本研究区各林型不同土层土壤机械稳定性团聚体和水稳定性团聚体百分含量均表现为中间高两边低的倒“V”形趋势,其中 $0.25\sim2.00\text{ mm}$ 粒级土壤团聚体百分含量最高,说明采煤沉陷区植被复垦主要通过提升 $0.25\sim2.00\text{ mm}$ 粒级大团聚体含量来提高土壤团聚体的稳定性。

目前用于评价土壤团聚体稳定性的指标主要有土壤大团聚体含量( $R_{>0.25}$ )、土壤平均质量直径(MWD)、几何平均直径(GMD)和分形维数( $D$ )等。通常认为土壤大团聚体含量、土壤平均质量直径和几何平均直径越大、分形维数越小,土壤结构的稳定性越好,土壤抗蚀能力越强<sup>[14-15]</sup>。WANG 等<sup>[16]</sup>曾在实行退耕还林之后的黄土高原进行采样和测定,结果表明植被恢复使大团聚体数量、平均质量直径和几何平均直径均有不同程度的增加,而本研究中各复垦林型不同土层土壤 $>0.25\text{ mm}$ 团聚体( $R_{>0.25}$ )含量显著增加,土壤团聚体稳定性参数 MWD 值和 GMD 显著增大、 $D$  值减小,二者结果一致,说明植被复垦能够提高采煤沉陷区土壤团聚体的稳定性,从而使土壤中的养分更好地保持下来。

通过对各复垦林型不同土层上土壤团聚体粒级和稳定性参数进行相关性分析表明,  $0.053\sim0.25\text{ mm}$  和  $<0.053\text{ mm}$  团聚体与  $R_{>0.25}$ 、MWD、GMD 均呈极显著负相关,说明粒级小的团聚体不利于土壤团聚体稳定性的提升,其可作为土壤团聚体稳定性评价的直观表征参数,而大团聚体与稳定性参数呈显著或极显著正相关,反映出不同植被类型土壤大团聚体百分含量越高,土壤团聚体稳定性越好<sup>[17]</sup>。本研究中,3 种林型复垦后  $0\sim20\text{ cm}$  和  $20\sim40\text{ cm}$  土层土壤 $>2\text{ mm}$  和  $0.25\sim2.00\text{ mm}$  粒级机械稳定性和水稳定性大团聚体含量增加而  $0.053\sim0.250\text{ mm}$  微团聚体和  $<0.053\text{ mm}$  矿质颗粒含量降低,与宋莉群等<sup>[12]</sup>研究结果基本一致,这是因为土壤团聚体的形成与有机碳关系密切,而采煤沉陷地由于多年复垦,且长柄扁桃、欧李和文冠果都属于当地树种,抗旱性强,长势较好,地上及地下生物量大,地表枯枝落叶以及地下腐烂根系增加,正是由于植被枯枝落叶等凋落物和腐烂根系的归还作用,土壤中积累了大量的有机质,土壤胶结作用增强,促使微

团聚体黏结形成大团聚体<sup>[18]</sup>;与此同时,土壤中积累的有机质能够为微生物提供碳源,土壤微生物数量增加,其分泌物随之增多,这促进了土壤团聚体黏合剂的形成,大团聚体含量也因此增加<sup>[19]</sup>。此外,根系分泌物及根系的挤压作用也可能是促进土壤小颗粒聚合形成大团聚体的重要因素<sup>[20]</sup>。由此可见,长期植被复垦能够改变土壤结构组成,提升土壤中大团聚体的含量,进而增加土壤团聚体的稳定性。

## 4 结 论

1)不同林型复垦均提升了粒级 $>2\text{ mm}$ 和 $0.25\sim2.00\text{ mm}$ 机械稳定性和水稳定性团聚体含量,降低粒级 $0.053\sim0.250\text{ mm}$ 和 $<0.053\text{ mm}$ 机械稳定性和水稳定性团聚体含量,促进粒级较小的团聚体向更大粒级团聚体转变,文冠果林效果最好。

2)植被恢复通过增加土壤大团聚体含量而提升其稳定性,具体表现为粒级 $>0.25\text{ mm}$ 团聚体( $R_{>0.25}$ )含量显著增加,土壤团聚体稳定性参数MWD和GMD显著增大、 $D$ 值减小。

3)文冠果林土壤团聚体MWD值和GMD值最大、 $D$ 值最小,土壤团聚体稳定性最高,效果最好,适宜在该地区采煤沉陷地复垦工作中推广。

## 参考文献(References):

- [1] 陈仲常,谢小丽.中国GDP能源消耗强度变动趋势及影响因素解析[J].经济学家,2011(6):56-62.  
CHEN Zhongchang, XIE Xiaoli. Analysis on the trends and influencing factors of energy consumption intensity of China's GDP [J]. Economist, 2011(6):56-62.
- [2] YANG Yongjun, ERSKINE Peter D, LECHNER Alex M, et al. Detecting the dynamics of vegetation disturbance and recovery in surface mining area via Landsat imagery and LandTrendr algorithm [J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 178:353-362.
- [3] ZHAO Chunlei, JIA Xiaoxu, ZHU Yuanjun, et al. Long-term temporal variations of soil water content under different vegetation types in the Loess Plateau, China [J]. Catena, 2017, 158: 55-62.
- [4] 李文龙,刘美英,张有新,等.采煤沉陷区不同复垦林型土壤团聚体碳氮磷化学计量特征[J].干旱区资源与环境,2020, 34(8):188-193.  
LI Wenlong, LIU Meiyng, ZHANG Youxin, et al. Stoichiometric characteristics of carbon nitrogen and phosphorus in soil aggregates of different planted forests in coal-mining subsidence area [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2020, 34(8): 188-193.
- [5] 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定性团聚体稳定性影响[J].自然资源学报,2016,31(9): 1564-1576.  
LIU Mengyun, WU Jianli, LIU Liwen, et al. Stability characteristics of soil water-stable aggregates under different land-use [J]. Journal of Natural Resources, 2016, 31(9):1564-1576.
- [6] 赵友朋,孟苗婧,张金池,等.凤阳山主要林分类型土壤团聚体及其稳定性研究[J].南京林业大学学报(自然科学版),2018, 42(5):84-90.  
ZHAO Youpeng, MENG Miaojing, ZHANG Jinchi, et al. Study on the composition and stability of soil aggregates of the main forest stands in Fengyang Mountain, Zhejiang Province [J]. Journal of Nanjing Forestry University ( Natural Sciences Edition ), 2018, 42(5):84-90.
- [7] 朱家琪,满秀玲,王飞.我国寒温带四种森林植被类型下土壤团聚体粒级组成及其稳定性比较研究[J].土壤通报,2020, 51(3):606-613.  
ZHU Jiaqi, MAN Xiuling, WANG Fei. Composition and stability of soil aggregates in four forest vegetation types in cold [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2020, 51(3):606-613.
- [8] 韩新生,马璠,郭永忠,等.土地利用方式对表层土壤水稳定性团聚体的影响[J].干旱区资源与环境,2018,32(2):114-120.  
HAN Xinsheng, MA Fan, GUO Yongzhong, et al. Effects of surface-layer soil water-stable aggregates under land use patterns [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2018, 32(2):114-120.
- [9] 姜敏,刘毅,刘闯,等.丹江口库区不同土地利用方式土壤团聚体稳定性及分形特征[J].水土保持学报,2016,30(6): 265-270.  
JIANG Min, LIU Yi, LIU Chuang, et al. Study on the stability and fractal characteristics of soil aggregates under different land use patterns in the Danjiangkou Reservoir [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2016, 30(6):265-270.
- [10] 陈胜要,陈居田,朱利霞.黄淮地区不同土地利用方式下土壤团聚体特征[J].云南师范大学学报(自然科学版),2019, 39(5):73-78.  
CHEN Shengyao, CHEN Jutian, ZHU Lixia. Characteristics of soil aggregate stability under different land use types in Huanghuai Area [J]. Journal of Yunnan Normal University ( Natural Sciences Edition ), 2019, 39(5):73-78.
- [11] 刘鸿涛,郑纪勇,李高亮,等.晋陕蒙露天煤矿排土场土壤团聚体的变化特征[J].农业环境科学学报,2021, 40(1): 137-143.  
LIU Hongtao, ZHENG Jiyong, LI Gaoliang, et al. Characteristics of soil aggregates in the Shanxi-Shaanxi-Inner Mongolia opencast coal dump, China [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2021, 40(1):137-143.
- [12] 宋莉群,王义东,李冬初,等.长期退耕对红壤团聚体碳氮磷生态化学计量特征的影响[J].生态学杂志,2019, 38(6): 1707-1715.  
SONG Liqun, WANG Yidong, LI Dongchu, et al. Long-term effects of natural restoration on C:N:P ecological stoichiometry in aggregates of red soil [J]. Chinese Journal of Ecology, 2019, 38(6):1707-1715.
- [13] GELAW Aweke M, SINGH B R, LAL R. Organic carbon and nitrogen associated with soil aggregates and particle sizes under different land uses in Tigray, Northern Ethiopia[J]. Land Degradation

- tion and Development, 2015, 26(7):690-700.
- [14] 李鉴霖,江长胜,郝庆菊.土地利用方式对缙云山土壤团聚体稳定性及其有机碳的影响[J].环境科学,2014,35(12):4695-4704.
- LI Jianlin, JIANG Changsheng, HAO Qingju. Impact of land use type on stability and organic carbon of soil aggregates in Jinyun Mountain [J]. Environmental Science, 2014, 35 (12): 4695-4704.
- [15] 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 Yingchun, WANG Yiqian, 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.
- [16] WANG Yixia, RAN Lishan, FANG Nufang, et al. Aggregate stability and associated organic carbon and nitrogen as affected by soil erosion and vegetation rehabilitation on the Loess Plateau[J]. Catena, 2018, 167:257-265.
- [17] 白秀梅,韩有志,郭汉清.庞泉沟自然保护区典型森林土壤大团聚体特征[J].生态学报,2014,34(7):1654-1662.
- BAI Xiumei, HAN Youzhi, GUO Hanqing. Characteristics of soil macroaggregates under typical forests in Pangquangou Nature Reserve[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(7):1654-1662.
- [18] ZHANG Mingkui, HE Zhenli, CHEN Guochao, et al. Formation and water stability of aggregates in red soils as affected by organic matter[J]. Pedosphere, 1996(1):39-45.
- [19] 蒋腊梅,白桂芬,吕光辉,等.不同管理模式对干旱区草原土壤团聚体稳定性及其理化性质的影响[J].干旱地区农业研究,2018,36(4):15-21,39.
- JIANG Lamei, BAI Guifen, LYU Guanghui, et al. Effects of different management modes on soil aggregate stability and physico-chemical properties of grassland in arid area[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2018, 36(4):15-21,39.
- [20] 苑亚茹,韩晓增,李禄军,等.低分子量根系分泌物对土壤微生物活性及团聚体稳定性的影响[J].水土保持学报,2011,25(6):96-99.
- YUAN Yaru, HAN Xiaozeng, LI Lujun, et al. Effects of soluble root exudates on microbial activity and aggregate stability of black soils[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2011, 25(6): 96-99.