



移动扫码阅读

刘美英,李文龙,赵晶,等.采煤沉陷地复垦土壤团聚体碳氮磷化学计量特征[J].煤炭科学技术,2022,50(12):271-277.  
LIU Meiyong, LI Wenlong, ZHAO Jing, *et al.* Carbon, Nitrogen and Phosphorus nutrients and stoichiometric characteristics of reclaimed soil aggregate in coal mining subsidence land[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(12): 271-277.

## 采煤沉陷地复垦土壤团聚体碳氮磷化学计量特征

刘美英<sup>1,2</sup>,李文龙<sup>1,2</sup>,赵晶<sup>1,2</sup>,许学慧<sup>1,2</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)

**摘要:**为明确不同林型复垦土壤团聚体养分及其化学计量变化,揭示采煤沉陷地土壤养分的固持及限制特征,进而筛选出最佳的复垦林型。本研究在神府-东胜矿区采煤沉陷地上设置长柄扁桃、欧李、文冠果 3 种复垦林型,同时以附近未沉陷且未种植的废弃农田作为对照,基于干筛法探究 0~40 cm 土层土壤机械稳定性团聚体组成、土壤有机碳(SOC)、全氮(TN)、全磷(TP)含量及其化学计量特征对长期植被复垦的响应规律。结果表明:不同复垦林型土壤微团聚体含量下降而大团聚体含量增加,各林型>0.25 mm 大团聚体总量均超过了 70%。不同林型土壤<0.053 mm 矿质颗粒中 SOC、TN、TP 含量最高,大团聚体次之。团聚体对土壤 SOC、TN 以及 TP 的贡献随团聚体粒级的增大而增加,3 种林型>0.25 mm 大团聚体对土壤 SOC、TN 和 TP 的贡献率分别为 72%~83%、66%~74%、65%~82%。不同林型土壤团聚体 C/N、C/P 和 N/P 均低于全国及全球平均水平。土壤 TN 与 SOC、TP 呈显著正相关,与 C/N 呈显著负相关;TP 与 C/P、N/P 呈显著负相关。主要结论为植被复垦增加土壤大团聚体含量,而大团聚体对土壤碳氮磷的贡献率最大,其中文冠果对土壤碳氮磷的贡献率大于其他林型。不同林型土壤团聚体 C/P 的变化范围为 5.44~20.83,低于全国及全球平均水平,表明采煤沉陷区土壤缺乏氮元素,氮元素是主要养分限制因子。

**关键词:**采煤沉陷地;复垦区;植被复垦;土壤团聚体;化学计量比

中图分类号:S152.9

文献标志码:A

文章编号:0253-2336(2022)12-0271-07

### Carbon, Nitrogen and Phosphorus nutrients and stoichiometric characteristics of reclaimed soil aggregate in coal mining subsidence land

LIU Meiyong<sup>1,2</sup>, LI Wenlong<sup>1,2</sup>, ZHAO Jing<sup>1,2</sup>, XU Xuehui<sup>1,2</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)

**Abstract:** In order to clarify the nutrients and stoichiometric changes of soil aggregates in different forest types, reveal the soil nutrient retention and limitation characteristics of coal mining subsidence land, and then screen out the best reclaimed-forest types. In this study, three types of reclaimed forests, namely *Amygdalus sylvestris*, *Prunus sylvestris*, and *Xanthomonas serrata*, were set up on the Shenfu-Dongsheng mining area in the coal mining subsidence area. At the same time, the nearby unsettled and unplanted abandoned farmland was used as a control, based on the dry sieve method to explore the soil mechanical stability aggregate composition, soil SOC (organic carbon), TN (total nitrogen), TP (total phosphorus) content and its stoichiometric characteristics in response to long-term vegetation reclamation in 0-40 cm soil law. The results showed that the content of soil micro-aggregates of different reclaimed-forest types decreased while the content of large aggregates increased, and the total amount of large aggregates >0.25 mm in each forest type exceeded 70%. The content of SOC, TN and TP in soils of different forest types <0.053 mm is the highest, followed by large aggregates. The contribution of aggregates

收稿日期:2021-01-23

责任编辑:黄小雨

DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2021-0080

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:刘美英(1974—),女,内蒙古清水河人,副教授,硕士生导师,博士。E-mail: liumeiyong@imau.edu.cn

通讯作者:许学慧(1982—),男,汉族,内蒙古包头人,讲师,硕士生导师,博士。Email: xhxu@imau.edu.cn

to soil SOC, TN and TP increased with the increase of aggregate fraction. The contribution rates of three forest types >0.25 mm large aggregates to soil SOC, TN and TP were 72%-83%, 66%-74%, 65%-82% respectively. The C/N, C/P and N/P of soil aggregates of different forest types were all lower than the average of national and global. Soil TN was positively correlated with SOC and TP, and negatively correlated with C/N ( $P<0.05$ ); TP was negatively correlated with C/P and N/P significantly ( $P<0.05$ ). In summary, vegetation reclamation increased the content of soil large aggregates, and large aggregates contributed the most to soil Carbon, Nitrogen and Phosphorus. The contribution rate of Chinese canopy to soil Carbon, Nitrogen and Phosphorus was greater than that of other forest types. The variation of C/P of soil aggregates in different forest types ranged from 5.44 to 20.83, which was lower than the levels of national and global average, indicated that the soil in the coal mining subsidence area lacked Nitrogen. So, the soil Nitrogen was the nutrient limiting factor.

**Key words:** coal mining subsidence; reclamation area; vegetation reclamation; soil aggregates; stoichiometric ratio

## 0 引言

煤炭资源在今后很长一段时期内仍是我国的主体能源<sup>[1]</sup>,其在保证能源供应的同时也导致了大量土地沉陷。神东矿区煤炭井工开采造成地表沉陷,其对土壤结构破坏较大,加剧了水土流失和土壤沙化,土地退化更为严重,导致土壤肥力变差,不利于沉陷区土壤可持续发展<sup>[2]</sup>。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,促进土壤碳氮磷等养分的固持,增加碳氮磷养分的含量<sup>[3]</sup>,同时将土壤颗粒通过有机质等的胶结作用结合成为团聚体。植被复垦能够提高土壤大团聚体含量,提高土壤结构稳定性,增加土壤有机碳及固碳能力<sup>[4]</sup>。植被恢复能提高土壤养分含量,但在不同植被覆盖情况下土壤团聚体养分含量有显著区别<sup>[5]</sup>。神东矿区沉陷地栽植文冠果能提高0~20 cm表层土壤各粒级团聚体中有机碳的含量,有利于土壤肥力的提高<sup>[6]</sup>。有研究表明土壤团聚体养分及化学计量特征受植被覆盖情况等影响<sup>[7]</sup>,不同粒径的团聚体物理化学性质不同,土壤微生物活性及养分周转特征存在显著差异,进而导致团聚体C、N、P含量及其化学计量特征存在差异<sup>[8]</sup>。由此可见,采煤沉陷后,特别是干旱半干旱地区,土壤有机碳、微生物量碳、全氮、全磷、碱解氮养分明显损失<sup>[9]</sup>,预想生态恢复应兼顾植被恢复与土壤微生物联合修复,以此促进土壤、植被正向演替。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,运用化学计量学手段分析采煤沉陷地复垦地土壤C、N、P在团聚体中的累积特征及其相互作用关系,并通过土壤团聚体化学计量特征揭示养分的固持特性以及养分限制因子,为将来的植被进一步恢复及合理培肥沉陷区土壤提供理论依据,同时可以筛选出最佳的复垦模式,为干旱半干旱区采煤沉陷地复垦制定合理的复垦管理技术措施。

## 1 采煤沉陷地复垦试验概况与设计

### 1.1 试验区概况

研究区位于神府-东胜矿区采煤沉陷复垦地(108°36'~110°40' E, 37°20'~40°16' N),地处陕西省神木县,土壤养分贫瘠,生产力较低,pH为7.38~8.15,全氮、全磷以及有机质含量分别为0.54~0.63、0.50~0.68和6.62~7.83 g/kg,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。该地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,年平均气温7.3℃,年平均降水量为368 mm,年蒸发量达2 838.7 mm。

### 1.2 试验设计

采煤沉陷复垦试验地已延续10 a。试验共设有3种不同植被复垦类型,即文冠果林、欧李林和长柄扁桃林,同时,以附近未沉陷的废弃农田作为对照(整个复垦区在开采前都是农田,由于沉陷后土壤肥力下降不利于种植农田,因此复垦前期都采用灌木或小乔木林复垦),对比复垦后土壤肥力较沉陷前的恢复效果。长柄扁桃和欧李通过植苗种植,行间距分别为1.5 m×0.7 m、1.3 m×0.5 m,文冠果结合植苗种植和播种种植2种方式,行间距控制在0.4 m×0.3 m内,后期随着生长逐步间苗、定苗,以保证复垦效果。试验共设置3次重复,小区面积3 333.3 m<sup>2</sup>,共计12个小区,试验区总面积约为4×10<sup>4</sup> m<sup>2</sup>。

### 1.3 土壤样品采集

分别于2017年、2018年植被返青前和枯黄后2个时期,在试验区运用“S”形多点采样法,在各小区内分别向下挖取深40 cm的土壤剖面,自下而上均匀地挖取原状土壤,装入密闭塑料盒中带回实验室后风干,把植物根系及石块等杂物去除后进行土壤机械稳定性团聚体的筛分及理化性质测定。

### 1.4 样品测定方法与数据分析

1)土壤各粒级机械稳定性团聚体测定:运用干筛法将自然风干后的原状土壤置于电动振筛机中进

行筛分,电动振筛机的筛分粒径自上而下分别为 2 mm、0.25 mm 和 0.053 mm,筛分后得到>2 mm、2~0.25 mm、0.25~0.053 mm 和<0.053 mm 四个级别的土壤团聚体,收集称重并计算不同粒径土壤团聚体的占比。

2)土壤有机碳(SOC)、全氮(TN)使用元素分析仪(elementar vario MACRO CUBE)进行测定;土壤全磷(TP)使用 NaOH 熔融-钼锑抗比色法测定。

3)各粒级团聚体含量为各粒级土壤团聚体质量占总机械筛分土壤质量的百分数,某粒级团聚体养分贡献率为某粒级团聚体含量与该粒级团聚体养分含量的乘积除以该土层土壤的总养分含量,土壤 C/N、C/P、N/P 均为质量比。数据的整理及图表制作运用 Microsoft Excel 2016,运用 SAS 9.4 对数据进行方差分析和相关性分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤团聚体变化特征

不同复垦林型下各粒级团聚体含量均随着粒径的减小表现为先增加后降低的趋势(图 1),复垦后各林型>0.25 mm 大团聚体总量均超过了 70%,其中 2~0.25 mm 大团聚体含量最高,均大于 40%,显著高于对照( $p<0.05$ ),且长柄扁桃>欧李>文冠果。文冠果和欧李复垦区>2 mm 大团聚体含量较对照显著增加( $p<0.05$ ),文冠果>2 mm 大团聚体含量最高;不同林型粒径在 0.25~0.053 mm 团聚体以及<0.053 mm 团聚体含量较对照均显著下降( $p<0.05$ ),而<0.053 mm 矿质颗粒仅占 2%左右。由此可见,不同林型复垦均促使土壤微团聚体含量下降但提升了土壤大团聚体含量,图 1 中,不同大写字母表示相同复垦植被下不同粒径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径团聚体含量差异显著( $p<0.05$ ),下同。

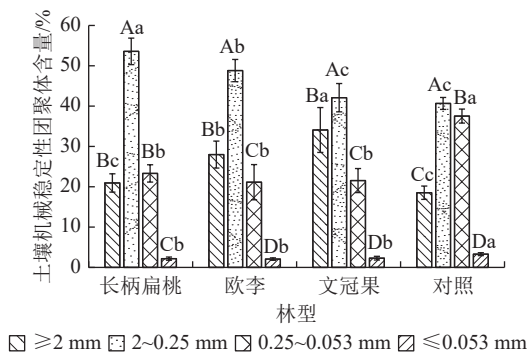
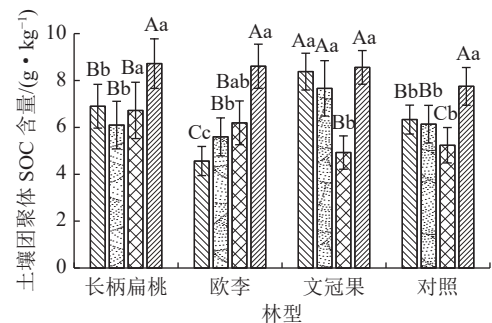


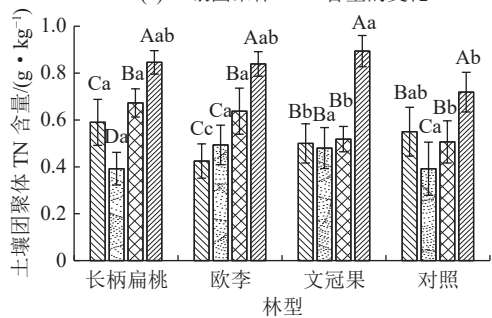
图 1 不同复垦林型土壤机械稳定性团聚体含量  
Fig.1 Content of soil aggregates of different reclamation methods

### 2.2 土壤团聚体碳氮磷含量变化

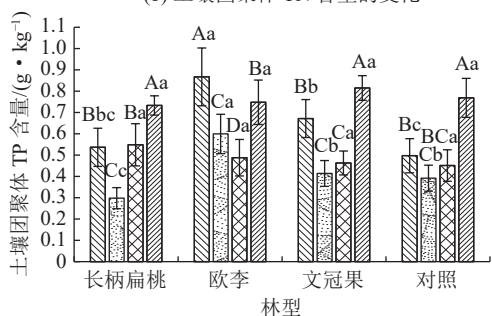
随着团聚体粒径的减小,各复垦林型总体上表现为先降低后升高的“V”形趋势(图 2)。除文冠果样地>2 mm、2~0.25 mm 大团聚体与<0.053 mm 矿质颗粒 SOC 含量无显著性差异外,其他复垦林型<0.053 mm 矿质颗粒 SOC 含量均显著高于其他粒级团聚体( $p<0.05$ ),SOC 含量均超过 8.56 g/kg;文冠果>2 mm、2~0.25 mm 大团聚体 SOC 含量显著高于对照及其他复垦林型( $p<0.05$ ),分别为 8.38 g/kg 和 7.66g/kg,其次是长柄扁桃,欧李含量最低(图 2a)。



(a) 土壤团聚体 SOC 含量的变化



(b) 土壤团聚体 TN 含量的变化



(c) 土壤团聚体 TP 含量的变化

□ ≥2 mm ▨ 2~0.25 mm ▤ 0.25~0.053 mm ▩ ≤0.053 mm

图 2 不同复垦林型各粒级土壤团聚体养分含量  
Fig.2 Content of soil aggregates nutrient of different sizes in different reclaimed forest types

不同粒级团聚体养分贡献率更能说明各粒级养分含量的变化特征,长柄扁桃、欧李和文冠果复垦区>0.25 mm 大团聚体对土壤 SOC 的总贡献率均超过 70%,其中文冠果高达 83%,0.25~0.053 mm 微团聚体的贡献率为 14%~24%,而<0.053 mm 矿质颗粒的



贡献率仅占3%左右,表明土壤SOC的积累与大团聚体的形成有一定联系,且文冠果复垦效果较好。

各复垦林型土壤团聚体TN含量的变化特征与SOC基本一致(图2b), <0.053 mm 矿质颗粒中TN含量最高,为0.84~0.89 g/kg,且较其他粒级团聚体有显著性差异( $p<0.05$ );长柄扁桃和文冠果>2 mm 大团聚体TN含量较对照无显著差异,而欧李则显著下降约24%( $p<0.05$ );长柄扁桃和欧李0.25~0.053 mm 微团聚体中TN含量显著高于对照( $p<0.05$ ),分别为0.67和0.64 g/kg;文冠果<0.053 mm 矿质颗粒TN含量显著高于对照。通过分析不同林型团聚体对土壤TN的贡献率可知,3种林型>0.25 mm 大团聚体的贡献率在66%~74%,文冠果贡献最大,其中2~0.25 mm 大团聚体的贡献高于>2 mm 的大团聚体,0.25~0.053 mm 微团聚体的贡献率为22%~31%,大小依次为长柄扁桃、欧李、文冠果,而<0.053 mm 矿质颗粒的贡献率均低于4%。

不同林型复垦后土壤团聚体TP含量变化有较大差异(图2c)。欧李复垦区>2 mm 大团聚体TP含量为0.87 g/kg,显著高于其他粒级团聚体( $p<0.05$ ),其次是<0.053 mm 矿质颗粒,而长柄扁桃和文冠果<0.053 mm 矿质颗粒中TP含量显著最高( $p<0.05$ ),分别是0.73和0.81 g/kg;欧李和文冠果>2 mm 大团聚体TP含量显著高于对照;不同林型2~0.25 mm 大团聚体TP含量,大小依次为欧李>文冠果>对照>长柄扁桃,差异性显著( $p<0.05$ );长柄扁桃、欧李和文冠果复垦区>0.25 mm 大团聚体对土壤TP的总贡献率分别为65%、82%和77%,较对照高17%~46%,0.25~0.053 mm 微团聚体以及粒径<0.053 mm 矿质颗粒贡献率均低于对照,分别处于16%~31%和2%~4%。

### 2.3 土壤团聚体碳氮磷化学计量特征

不同复垦林型土壤团聚体碳氮磷化学计量比总体上随着粒级的减小表现为先增加后降低的趋势(图3),且相互之间存在显著差异( $p<0.05$ )。

不同林型2~0.25 mm 大团聚体C/N整体较高,变化范围为11.4~16.16(图3a),在长柄扁桃、文冠果及对照样地上有显著性差异( $p<0.05$ ),>2 mm 大团聚体次之,0.25~0.053 mm 微团聚体和<0.053 mm 矿质颗粒最小,且二者差异不显著;文冠果>2 mm、2~0.25 mm 大团聚体C/N均高于16,其中>2 mm 大团聚体显著高于对照及其他林型( $p<0.05$ );欧李2~0.25 mm 大团聚体C/N显著低于对照( $p<0.05$ )。

长柄扁桃、文冠果复垦地和对照样地2~0.25 mm

大团聚体的C/P最大,分别为20.83、18.98和15.78,显著高于其他粒级团聚体( $p<0.05$ ),其次是>2 mm 大团聚体,0.25~0.053 mm 微团聚体和<0.053 mm 矿质颗粒C/P最低,而欧李复垦地>2 mm、2~0.25 mm 大团聚体C/P显著低于0.25~0.053 mm、<0.053 mm 团聚体( $p<0.05$ )。长柄扁桃复垦地>2 mm、<0.053 mm 粒级团聚体C/P显著大于对照;欧李复垦地>2 mm 和2~0.25 mm 大团聚体C/P较对照显著降低,而<0.053 mm 矿质颗粒显著升高( $p<0.05$ )(图3b)。

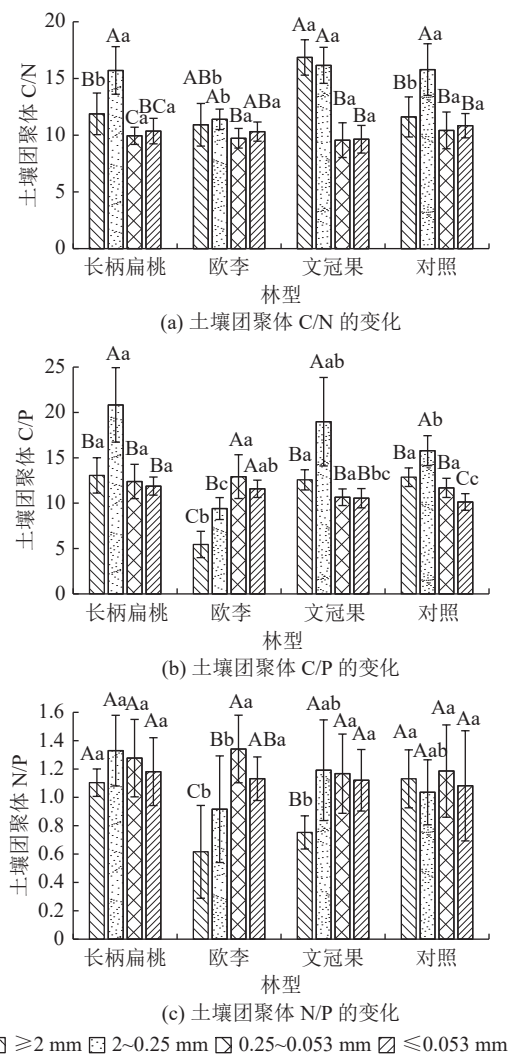


图3 不同复垦林型各粒级土壤团聚体化学计量比特征

Fig.3 Characteristics of stoichiometric ratio of soil aggregates of different sizes in different reclaimed forest types

不同林型团聚体N/P变化特征表明欧李复垦地各粒级团聚体间N/P差异显著( $p<0.05$ );文冠果复垦地>2 mm 大团聚体N/P显著低于其他粒级团聚体( $p<0.05$ );与对照相比,欧李和文冠果复垦地>2 mm 大团聚体N/P显著降低,分别下降46%和33%,而其他粒级团聚体与对照差异不显著(图3c)。

## 2.4 碳氮磷养分和化学计量间的关系

为了进一步明确在采煤沉陷地进行植被恢复的效果,对不同复垦林型土壤机械稳定性团聚体碳氮磷含量和化学计量特征进行 Pearson 相关性分析表明(表 1),土壤 SOC 与 TN、C/N 与 C/P 呈极显著正相关;TN 与 TP、C/P 与 N/P 呈显著正相关,TN 与 C/N、TP 与 N/P 呈显著负相关;TP 与 C/P 呈极显著负相关。

表 1 土壤养分含量与化学计量比之间的相关系数

Table 1 Correlation coefficient between soil nutrient content and stoichiometric ratio

指标	SOC	TN	TP	C/N	C/P
TN	0.711 **				
TP	0.389	0.593 *			
C/N	0.123	-0.603 *	-0.44		
C/P	0.176	-0.3	-0.773 **	0.674 **	
N/P	0.119	0.279	-0.561 *	-0.2	0.575 *

注: \*为相关性显著( $p < 0.05$ ); \*\*为相关性极显著( $p < 0.01$ )。

## 3 讨论

### 3.1 复垦林型对土壤团聚体组成的影响

土壤团聚体是土壤小颗粒和土壤中有有机、无机物质等胶结而成的团粒结构<sup>[10]</sup>,其形成过程十分复杂,不仅受到土壤自身物质组成的影响,也受植被复垦等人为活动等因素的影响。矿区复垦初期,土壤基质差,生产力较低,且基质团聚成分少,需经过长时间复垦熟化,逐渐提高团聚体含量,改善土壤肥力水平。有研究表明,矿质土壤主要由粒径范围在 0.1~1 000  $\mu\text{m}$  的固体颗粒构成,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>[11-12]</sup>。采煤沉陷地经过 10 a 复垦,3 种林型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;同时,积累的有机质能够为微生物提供碳源,微生物数量随之增加,进而促进了土壤团聚体黏合剂的形成,大团聚体含量因此增加<sup>[13]</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>[14]</sup>。上述结果说明,长期植被复垦可促使土壤大团聚体的比例不断增加。

### 3.2 复垦林型对土壤团聚体碳氮磷含量的影响

随着团聚体粒级的递减,不同复垦林型土壤碳氮磷含量呈“V”形分布,其中<0.053 mm 矿质颗粒

中 SOC、TN、TP 含量显著高于其他粒级团聚体<sup>[12,15]</sup>,这说明团聚体对养分具有不同程度的固持能力,团聚体粒径越小,其比表面积越大,能够吸附的养分颗粒越多,故养分含量高于其他粒级团聚体。但是,由于植被复垦后土壤大团聚体含量大幅提升,且大团聚体可以固持养分,所以团聚体对土壤 SOC、TN 以及 TP 的贡献率随着粒级的增大而增加,大团聚体的贡献率最大<sup>[10,16]</sup>,由此可见,随着时间的推移,土壤养分储量的增加更多地取决于大团聚体而非微团聚体。3 种林型复垦不同程度地提升了土壤大团聚体 SOC 和 TP 含量,但对<0.25 mm 土壤团聚体几乎没有作用,土壤 TN 与之相反,大团聚体 TN 的提升并不明显,而<0.25 mm 粒级团聚体的 TN 含量显著增加,这是因为粒级小的团聚体吸附能力强,能够吸附更多的有机质而使有机氮得以积累,并且土壤颗粒表面的负电荷会使较小粒级的团聚体更易吸附  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ ;同时,微团聚体的稳定性较强且周转较慢,与之结合的有机质成分也更稳定,不易被矿化分解,因而有较强的吸附和保存氮元素的能力。文冠果选育时尽可能采用当地或附近相同气候带的优势物种,更加适合在干旱地区生长,且其根冠比较高,地上地下生物量大,枯枝落叶多,土壤有机质得到显著提升,有利于土壤水分的保持,而良好的水热条件可以增加土壤动物、微生物和酶的数量及活性,促进分解作用,进而使土壤养分得到提升<sup>[10,17]</sup>,故其对土壤大团聚体 SOC、TN 和 TP 的贡献最大,综合复垦效果更好。

### 3.3 复垦林型对土壤团聚体碳氮磷化学计量特征的影响

土壤 C/N/P 是土壤碳氮磷矿化和固持作用的重要指标之一,能够反映土壤养分的限制情况以及土壤内部碳氮磷循环特征。粒径显著影响各林型 C、N 含量进而导致 C/N 产生较大差异<sup>[15]</sup>,说明不同粒级团聚体 C/N 的差异可能与不同粒级团聚体保持养分的能力有关,也可能是不同林型复垦对土壤养分输入程度不同导致的。土壤 C/N 作为影响土壤碳氮循环的重要因素,经常被用来衡量有机质的分解速率以及土壤氮元素的矿化能力<sup>[18]</sup>。本研究中,长柄扁桃、文冠果复垦地土壤大团聚体 C/N 显著高于微团聚体及矿质颗粒,表明植被复垦加剧了大团聚体与微团聚体之间的 C/N 差异,其中微团聚体的 C/N 更低,这是由于氮元素的矿化过程在土壤中并不是均匀进行,微团聚体内的氮元素矿化速率明显低于大团聚体,加上复垦地土壤大团聚体中较高的有机碳含量削弱了氮元素含量对 C/N 的限制作用,导致

C/N在不同粒级团聚体间的差异变大<sup>[19]</sup>。土壤C/N反映了C和N之间的平衡关系,其与土壤有机质的分解速率呈反比,土壤C/N值越小,说明其矿化作用越快,不利于有机质的积累<sup>[20]</sup>。研究结果显示,长柄扁桃、欧李复垦地土壤团聚体C/N均未达到对照农田的水平,而文冠果复垦地土壤较对照农田及其他林型有明显提升,其中大团聚体C/N大于16,高于全国平均水平(10~12)和全球平均水平(14.3)<sup>[21]</sup>,说明文冠果复垦地有机质矿化速率相对更加缓慢,这为有机质的累积创造了良好的条件,也反映出其具有良好的复垦效果。

土壤C/P是衡量微生物矿化土壤有机物质释放磷或从环境中吸收固持磷潜力的一种指标,是土壤中磷矿化潜力的重要标志。较低的土壤C/P有利于微生物对有机质的分解释放,提升土壤中磷的有效性;反之,较高的C/P则会增加土壤微生物的固磷潜力,导致微生物同植物争夺土壤中的无机磷<sup>[22]</sup>,不利于植被生长。研究区不同林型土壤团聚体C/P的变化范围为5.44~20.83,但均远低于我国平均水平(136)和全球平均水平(186)<sup>[23]</sup>,一方面说明该研究区土壤微生物的固磷潜力较弱,另一方面表明本区域内土壤磷为净矿化,其有效性较高。各林型土壤C/P随着团聚体粒级的减小总体上呈倒“V”形趋势,2~0.25 mm大团聚体C/P较高而微团聚体和矿质颗粒较低,这与C元素在不同粒级团聚体间的累积和分布有直接关系<sup>[15]</sup>。此外,团聚体P和C/P呈极显著负相关关系,而较小粒级团聚体中磷的含量高于大团聚体,所以C/P较大团聚体更低。

土壤N/P可表示土壤养分的相对平衡程度,常被用于预测土壤养分限制类型。土壤N/P低,说明氮元素对植被生长有限制作用,反之则说明磷元素为植被生长的限制性因素。经过长期复垦,不同林型土壤N/P已经接近甚至达到复垦前的水平,但整体来看,各林型土壤团聚体N/P在0.62~1.34之间,低于我国(3.9)及全球(5.9)平均水平<sup>[24]</sup>,说明研究区植被受到土壤氮元素的限制。

## 4 结 论

1)植被复垦可以促进土壤微团聚体向大团聚体转变,使各林型土壤机械稳定性团聚体以大团聚体为主。不同复垦林型土壤<0.053 mm矿质颗粒中SOC、TN、TP含量最高,大团聚体次之。

2)团聚体对土壤SOC、TN及TP的贡献随粒级的增大而增加,其中文冠果对土壤大团聚体SOC、

TN和TP的贡献最大,培肥效果最好。

3)碳氮磷化学计量变化主要体现在大团聚体上,且植被复垦加剧了大团聚体与微团聚体之间的差异。从化学计量学角度分析,氮元素为本研究区最主要的养分限制因子。

## 参考文献(References):

- [1] 王国法,任世华,庞义辉,等.煤炭工业“十三五”发展成效与“双碳”目标实施路径[J].煤炭科学技术,2021,49(9):1-8.  
WANG Guofa, REN Shihua, PANG Yihui, et al. Development achievements of China's coal industry during 13 th Five-Year Plan period and future prospects[J]. *Coal Science and Technology*, 2021, 49(9): 1-8.
- [2] 毕银丽,李向磊,彭苏萍,等.露天矿区植物多样性与土壤养分空间变异性特征[J].煤炭科学技术,2020,48(12):205-213.  
BI Yinli, LI Xianglei, PENG Suping, et al. Characteristics of spatial variability of plant diversity and soil nutrients in open-pit mining area[J]. *Coal Science and Technology*, 2020, 48(12): 205-213.
- [3] 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.
- [4] 赵世伟.黄土高原子午岭植被恢复下土壤有机碳—结构—水分环境演变特征[D].咸阳:西北农林科技大学,2012.  
ZHAO Shiwei. Evolution characteristics of soil organic carbon-structure-water environment under vegetation restoration on the ziwuling mountain loess plateau[D]. Xi'an: Northwest A&F University, 2012.
- [5] BI Yinli, WANG Kun, WANG Jin. Effect of different inoculation treatments on AM fungal communities and the sustainability of soil remediation in Daliuta coal mining subsidence area in northwest China[J]. *Applied Soil Ecology*, 2018, 132: 107-113.
- [6] 金永昌,刘美英,刘金善,等.复垦模式对采煤沉陷区土壤团聚体有机碳分布特征的影响[J].干旱区资源与环境,2017,31(11):105-109.  
JIN Yongchang, LIU Meiyang, LIU Jinshan, et al. Effect of reclamation method on organic carbon distribution of soil aggregates among reclaimed soil of coal-mining subsidence[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2017, 31(11): 105-109.
- [7] XU Xia, LI Dejun, CHENG Xiaoli, et al. Carbon: nitrogen stoichiometry following afforestation: a global synthesis[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 19117.
- [8] XIAO Shuangshuang, ZHANG Wei, YE Yingying, et al. Soil aggregate mediates the impacts of land uses on organic carbon, total nitrogen, and microbial activity in a Karst ecosystem[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 1866-1869.
- [9] 聂小军,高爽,陈永亮,等.西北风积沙区采煤扰动下土壤侵蚀与养分演变特征[J].农业工程学报,2018,34(2):127-134.  
NIE Xiaojun, GAO Shuang, CHEN Yongliang. Characteristics of soil erosion and nutrients evolution under coal mining disturbance



- in Aeolian sand area of Northwest China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(2): 127-134.
- [ 10 ] BAI Yongxin, ZHOU Yunchao, HE Hongzao. Effects of rehabilitation through afforestation on soil aggregate stability and aggregate-associated carbon after forest fires in subtropical China[J]. Geoderma, 2020: 114548.
- [ 11 ] GELAW A 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 & Development, 2015, 26: 690-700.
- [ 12 ] 李文龙, 刘美英, 张有新, 等. 采煤沉陷地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 Meiyong, 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.
- [ 13 ] 蒋腊梅, 白桂芬, 吕光辉, 等. 不同管理模式对于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.
- [ 14 ] 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.
- [ 15 ] 潘俊, 刘苑秋, 刘晓君, 等. 退化红壤植被恢复团聚体及化学计量特征[J]. 水土保持学报, 2019, 33(4): 187-195,320.  
PAN Jun, LIU Yuanqiu, LIU Xiaojun, *et al.* Distribution and stoichiometry of water-stable aggregates of different vegetation restoration patterns in degraded red soil regions[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2019, 33(4): 187-195,320.
- [ 16 ] ZHANG Xianfeng, XIN Xiuli, ZHU Anning, *et al.* Effects of tillage and residue managements on organic C accumulation and soil aggregation in a sandy loam soil of the North China Plain[J]. CATENA, 2017, 156: 176-183.
- [ 17 ] 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 Meiyong, JIN Yongchang, LIU Jinshan, *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.
- [ 18 ] 李占斌, 周波, 马田田, 等. 黄土丘陵区生态治理对土壤碳氮磷及其化学计量特征的影响[J]. 水土保持学报, 2017, 31(6): 312-318.  
LI Zhanbin, ZHOU Bo, MA Tiantian, *et al.* Effects of ecological management on characteristics of soil carbon, nitrogen, phosphorus and their stoichiometry in loess hilly region, China[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2017, 31(6): 312-318.
- [ 19 ] 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.
- [ 20 ] BATJES N H. Total carbon and nitrogen in the soils of the world[J]. European Journal of Soil Science, 2014, 65(1): 10-21.
- [ 21 ] 陶冶, 张元明, 周晓兵. 伊犁野果林浅层土壤养分生态化学计量特征及其影响因素[J]. 应用生态学报, 2016, 27(7): 2239-2248.  
TAO Ye, ZHANG Yuanming, ZHOU Xiaobing. Ecological stoichiometry of surface soil nutrient and its influencing factors in the wild fruit forest in Yili region, Xinjiang, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, 27(7): 2239-2248.
- [ 22 ] 曾全超, 李鑫, 董扬红, 等. 陕北黄土高原土壤性质及其生态化学计量的纬度变化特征[J]. 自然资源学报, 2015, 30(5): 870-879.  
ZENG Quanchao, LI Xin, DONG Yanghong, *et al.* Ecological stoichiometry characteristics and physical-chemical properties of soils at different latitudes on the loess plateau[J]. Journal of Natural Resources, 2015, 30(5): 870-879.
- [ 23 ] ZHAO Fazhu, SUN Jiao, REN Chengjie, *et al.* Land use change influences soil C, N, and P stoichiometry under 'Grain-to-Green Program' in China[J]. Scientific Reports, 2015, 5: 10195.
- [ 24 ] CLEVELAND C C, LIPTZIN, D. C: N: P stoichiometry in soil: is there a "Redfield ratio" for the microbial biomass[J]. Biogeochemistry, 2007, 85(3): 235-252.