

新邱露天煤矿排土场土壤生态化学计量特征

王丹宁, 王东升*, 潘帅, 鹿之慧 (辽宁工程技术大学环境科学与工程学院, 辽宁阜新 123000)

摘要 [目的]以阜新露天矿排土场土壤为研究对象,分析不同植被下不同土层土壤演变规律,为排土场生态修复提供一定的理论指导。[方法]通过对露天煤矿排土场不同植被下土壤有机碳(SOC)、全氮(TN)、全磷(TP)、全钾(TK)含量变化及其生态化学计量特征研究,分析排土场区植被-土壤协同演变过程中土壤养分循环规律及影响机制。[结果]4种植被类型土壤SOC、TN、TP和TK含量分别为22.25~51.31、0.57~1.52、0.35~0.67和23.37~38.94 g/kg,不同植被土壤养分含量均高于裸地对照,表明植被对研究区土壤养分有一定改良作用。土壤养分含量呈表层富集现象,且随着土层深度的增加,不同植被类型下土壤SOC、TN、TP、TK含量均呈现逐渐下降的趋势,与对照的差异逐渐变小。表层SOC、TN、TK含量从大到小依次为榆树>杠柳>狗尾草>猪毛菜>裸地,TP含量从大到小依次为榆树>猪毛菜>狗尾草>杠柳>裸地;4种植被类型土壤C:N、C:P、C:K和N:P平均值分别为39.56、64.35、1.10和1.64,且表层土壤全量比值差异显著。[结论]在排土场土壤演变和形成过程中,不同植被类型影响土壤养分含量,该排土场生态系统中土壤的生态化学计量特征的变化是制约生态恢复的原因之一,并且不同植被对生态环境的恢复具有促进作用。

关键词 露天煤矿;排土场;植被类型;养分含量;化学计量特征

中图分类号 S153 **文献标识码** A

文章编号 0517-6611(2022)21-0061-06

doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2022.21.017



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

Ecological Chemometric Characteristics of Soil at Xinqiu Open Pit Coal Mine Disposal Site

WANG Dan-ning, WANG Dong-sheng, PAN Shuai et al (College of Environmental Science and Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin, Liaoning 123000)

Abstract [Objective] Taking the soil of Fuxin open pit mine drainage site as the research object, the soil evolution pattern of different soil layers under different vegetation were analyzed, which had some theoretical guidance for the ecological restoration of the drainage site. [Method] By studying the changes of soil organic carbon (SOC), total nitrogen (TN), total phosphorus (TP) and total potassium (TK) contents and their ecological chemometric characteristics under different vegetation in the open-pit coal mine drainage site, the soil nutrient cycling patterns and influence mechanisms during the vegetation-soil synergistic evolution in the drainage site area were analyzed. [Result] The contents of SOC, TN, TP and TK in the soil of the four vegetation types were 22.25-51.31, 0.57-1.52, 0.35-0.67 and 23.37-38.94 g/kg, respectively, and the soil nutrient contents of different vegetation were higher than those of the bare ground control, indicating that vegetation had a certain improvement effect on soil nutrients in the study area. Soil nutrient contents showed surface enrichment phenomenon, and with the increase of soil depth, the contents of soil SOC, TN, TP and TK under different vegetation types showed a gradual decrease, and the difference with the control gradually became smaller. The contents of SOC, TN, and TK in the surface layer from large to small were elm>periploca sepium>green bristlegrass>salsola collina>bare land; the order of TP content from large to small was elm>salsola collina>green bristlegrass>periploca sepium>bare land. The mean values of soil C:N, C:P, C:K and N:P of the four vegetation types were 39.56, 64.35, 1.10 and 1.64, respectively, and the differences of surface soil allotropic ratio were significant. [Conclusions] During the evolution and formation of the soil in the drainage site, different vegetation types influence the soil nutrient content, and the variation in the ecological stoichiometric characteristics of the soil in this drainage site ecosystem is one of the constraints to ecological restoration, and the different vegetation contributes to the ecological restoration.

Key words Open-pit coal mine; Disposal site; Vegetation type; Nutrient content; Stoichiometric characteristics

排土场是煤炭在露天开采过程中,剥离的岩土堆积体经过搬运倒堆形成了大面积的松散堆积体,煤矿的开采在产生大量煤炭资源的同时,也在开采过程中对生态系统造成了一些不利影响,如土地被压占无法利用,矿渣中的重金属不仅会污染周围水环境,更加制约了植物根系生长,物料中的细小颗粒造成大气扬尘污染空气,排土场边坡容易产生滑坡崩塌、水土流失等地质灾害问题,其中,土壤和自然植被受破坏的程度尤为明显,土壤养分贫瘠,自然植被演替受到干扰^[1-5]。因此,在恢复和重建排土场生态系统过程中,研究土壤和植被的演变和恢复成为重要课题。

良好的土壤条件是植物正常生长发育的基础,同时,土壤对维持生态系统生产力和碳汇等都起到重要作用。人类不合理的活动对土壤表层造成扰动,使其土壤质量和覆盖的

植被受到破坏,研究土壤养分状况是探究土壤演替和成土作用的重要评价标准之一,对于露天煤矿排土场生态重建与恢复工作有着十分重要的意义^[6]。在国外,对排土场恢复重建的研究起步较早,Levi等^[7]利用有机质等土壤物化属性评价发现恢复区土壤质量高于临近自然区;Bennett等^[8]通过监测氮、磷等土壤养分判定露天矿恢复区已具有土地生产力;Roy等^[9]通过温室和田间试验相结合来探究改善干旱半干旱煤矿退化土壤的生态恢复问题;Ribeiro等^[10]通过研究有机碳、全氮等土壤养分含量,并进行相关分析,得出土壤有机碳、全氮等养分可以改善土壤质量。在国内,包玉英等^[11-12]对排土场理化性质的研究得出一些土壤养分间具有相关关系;珊丹等^[13-14]通过对排土场不同植被类型下的土壤养分的研究,得出相对最优植被模式;李鹏飞等^[15-16]对不同利用方式下不同土层的土壤碳氮磷进行养分测定,得出养分限制对生态恢复有重要作用。同时对于阜新露天排土场前人也有研究,许雨等^[17]对孙家湾矸石山的物种多样性进行研究,得出在不同排矸年限地段,物种组成变化较大,且由一年

基金项目 辽宁省高校“双一流”建设专项经费(552101001009)。

作者简介 王丹宁(1996—),女,河北唐山人,硕士研究生,研究方向:生态修复理论。*通信作者,教授,博士,硕士生导师,从事矿山环境修复研究。

收稿日期 2022-01-07

生草本群落逐渐演变为榆树群落;王凯等^[18]研究得出坡位和坡向是影响排土场边坡生态恢复过程中植物多样性的重要因子;王东丽等^[19]从土壤物理性角度发现可利用土壤分形维数表征土壤特性,进行适宜的利用与改造;吕刚等^[20]对排土场边坡水土流失效应进行模拟降雨研究,结果发现,随着侵蚀沟的增大,土壤侵蚀越严重。恶劣的土壤结构条件和有限的养分有效性是排土场恢复为本地植被的关键制约因素。土壤养分在退化矿区土壤恢复中发挥着重要作用,作为研究土壤质量状况的重要指标,土壤有机碳(SOC)、全氮(TN)、全磷(TP)、全钾(TK)是研究土壤肥力的重要指标,对植物的生长起着关键作用。同时,采用的生态化学计量学的研究手段也可以更好地理解不同植被与自然环境养分循环过程和相互作用关系。该研究通过对排土场植物-土壤发展不同阶段土壤SOC、TN、TP、TK含量及其生态化学计量特征研究,探讨土壤形成及植物发展过程中排土场生态系统养分循环与积累机制,为该地区排土场生态恢复提供理论支持。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况 研究区位于辽宁省阜新市新邱露天煤矿排土场,地处126°46′~126°48′E、42°03′~42°04′N。该区域属温带大陆性季风气候。7—9月为降水集中月份,且雨量分布不均,易出现阶段性干旱。多年平均降水量约519.9 mm,年际间变率大;年平均蒸发量1700 mm,是降水量的3.27倍。年平均气温8.1℃,相对湿度57%,无霜期150 d,全年日照时数为2859.5 h。年平均风速2.4 m/s,6级以上大风日数年均75 d以上^[21]。

1.2 土壤样品的采集及测定 土壤样品于2020年10月采

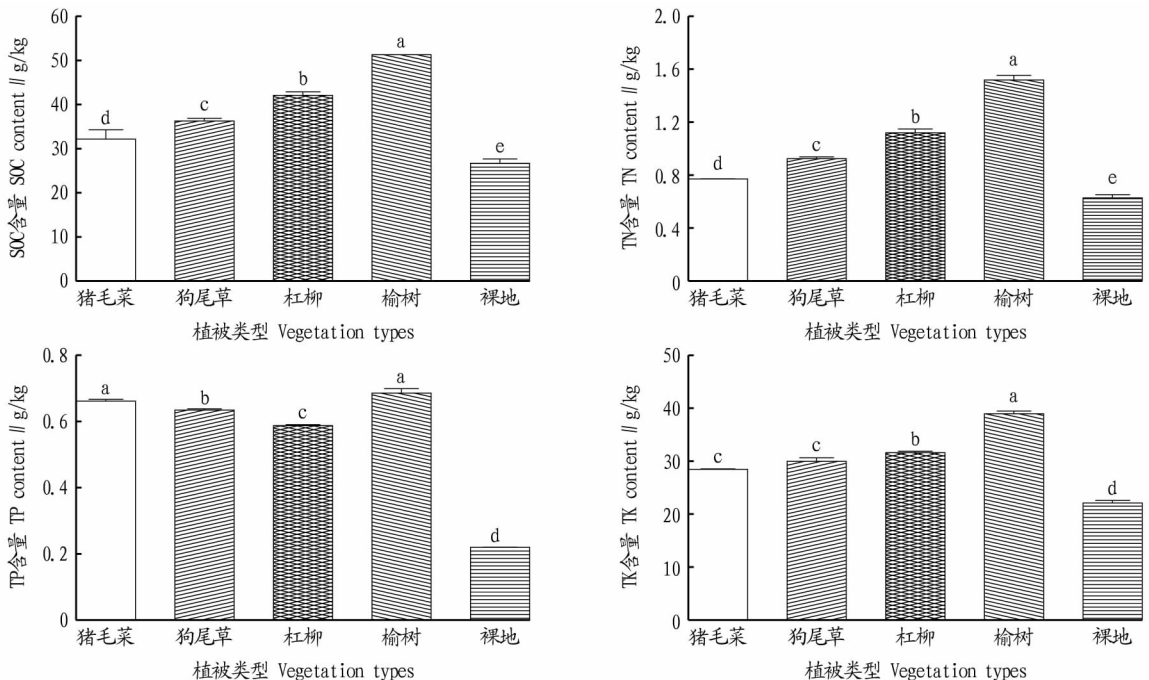
集,在研究区域内选取4种植物群落,即草本植物藜科猪毛菜(*Salsola collina* Pall.)、禾本科狗尾草[*Setaria vividis* (L.) Beauv]、灌木萝藦科杠柳(*Periploca sepium* Bunge)、乔木榆科榆树(*Ulmus pumila* L.),以坡面裸地为对照,采用多点混合采样法,按0~10、10~20和20~30 cm分层取土壤样品,样品在实验室经风干、研磨、过筛后进行指标测定。土壤有机碳(SOC)采用重铬酸钾外加热氧化法测定,全氮(TN)采用半微量凯氏定氮法测定,全磷(TP)采用NaOH熔融-钼锑抗比色法测定,全钾(TK)采用NaOH熔融-火焰光度法^[22]测定。

1.3 数据处理 所有数据采用Excel 2016整理,应用SPSS 26.0软件进行统计分析,采用单因素方差分析(One-way ANOVA)检验不同植被下土壤中SOC、TN、TP、TK含量和C:N、C:P、C:K、N:P(全量比值)之间差异,采用最小显著差异法(LSD)进行多重比较,对土壤养分含量及化学计量特征进行Pearson相关分析,应用SigmaPlot 14.0软件进行绘图。

2 结果与分析

2.1 不同植被类型下土壤养分含量

2.1.1 表层土壤养分含量。从图1可以看出,土壤SOC、TN、TP和TK含量在4种典型植被间存在差异,4种植被下表层土壤(0~10 cm)SOC、TN、TP和TK含量平均值分别为32.17、0.77、0.66和31.48 g/kg。不同植被条件下,0~10 cm土壤SOC、TN、TK含量从大到小依次为榆树>杠柳>狗尾草>猪毛菜>裸地,TP含量从大到小依次为榆树>猪毛菜>狗尾草>杠柳>裸地。可见,榆树和杠柳植物群落下的土壤SOC、TN、TK在土壤表层的养分积累效果较佳,达到了差异显著水平($P<0.05$),土壤TP含量在榆树和猪毛菜不同植被类型下



注:不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)

Note: Different lowercase letters indicate significant difference ($P<0.05$)

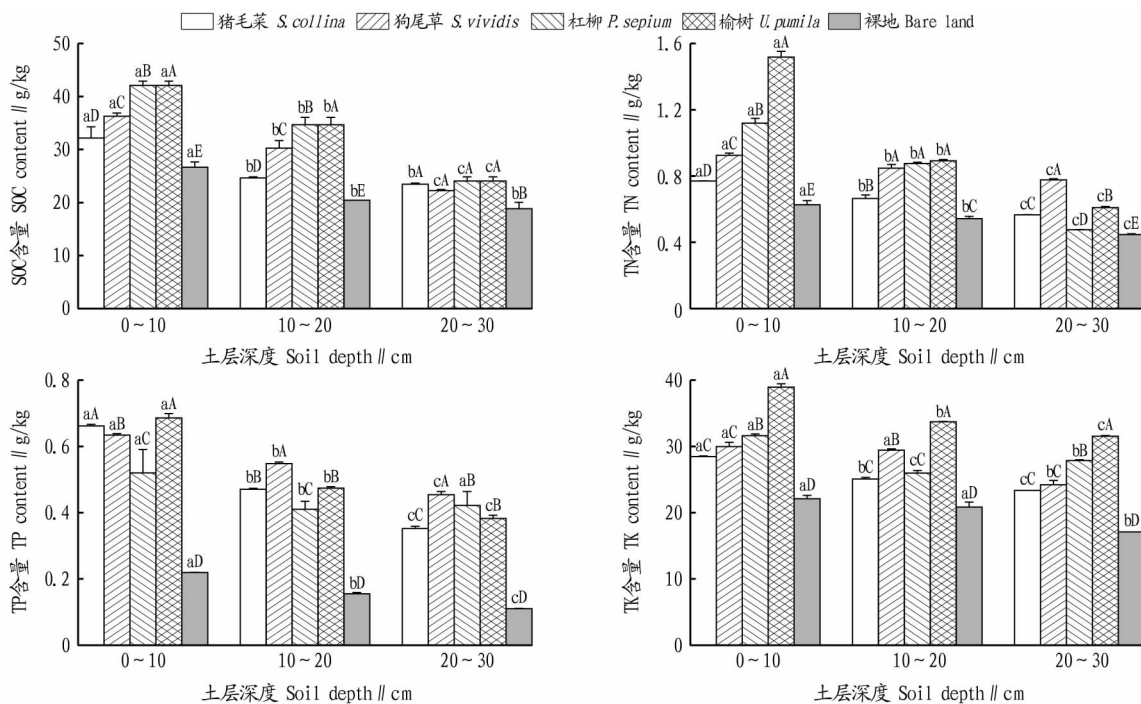
图1 4种植被表层土壤养分含量

Fig. 1 The nutrient content of the surface soil of four types of vegetation

土壤间差异不显著,但土壤 SOC、TN、TP、TK 含量均显著高于裸地坡面。排土场土壤演替过程中,土壤肥力的变化在最初级的恢复阶段,猪毛菜作为先锋物种最先侵入,虽覆盖率较低,但由于其耐旱耐瘠薄的植物特性得以生存,随着土壤环境的改善,各元素指标也有所改善,狗尾草逐渐替代猪毛菜成为优势物种,此时仍属于植被演替的早期阶段,狗尾草和猪毛菜的共同作用下土壤条件不断得到优化,灌木杠柳和小型乔木榆树的出现和生长逐渐代替草本植物(猪毛菜、狗尾草)成为优势物种,在一定程度上对土壤肥力产生更加积极的影响。

2.1.2 土壤养分含量垂直变化。从图 2 可以看出,土壤 SOC、TN、TP 和 TK 含量分别为 22.25~51.31、0.57~1.52、

0.35~0.67 和 23.37~38.94 g/kg。不同植物在不同土层养分含量存在差异性,在 0~10、10~20 cm 土层土壤 SOC、TN 含量从大到小依次为榆树>杠柳>狗尾草>猪毛菜,土壤 TK 在 0~10、10~20 cm 土层表现为榆树植物群落下土壤含量最高。土壤碳、氮、磷元素在 0~20 cm 土层间受植物群落种类不同的影响显著,土壤钾元素对土层深度影响更大,表现为灌木乔木植物群落>草本植物群落。榆树、杠柳、狗尾草、猪毛菜养分含量在各土层均高于裸地。SOC、TN、TP、TK 含量均表现为 0~10 cm>10~20 cm>20~30 cm,土壤养分含量受垂直深度的影响,各元素含量在不同植被类型间存在一定差异,随着土层加深,与裸地的差异逐渐变小,且随着土层深度的增加,各土壤养分元素含量与裸地之间的差异逐渐减小。



注:不同小写字母表示同一植被不同土层之间差异显著($P<0.05$),不同大写字母表示同一土层不同植被之间差异显著($P<0.05$)

Note: Different lowercase letters indicate significant differences between different soil layers of the same vegetation ($P<0.05$), and different capital letters indicate significant differences between different vegetations in the same soil layer ($P<0.05$)

图 2 4种植被不同土层 SOC、TN、TP 和 TK 含量

Fig. 2 Contents of SOC, TN, TP and TK in different soil layers of four types of vegetation

2.1.3 表层土壤 SOC、TN、TP、TK 的相关关系。为探究该研究区表层土壤(0~10 cm)不同植被下土壤生态化学计量特征的相关关系,对不同植被下土壤 SOC、TN、TP、TK 含量进行 Pearson 相关分析,结果发现(表 1),不同植被类型间的相关关系存在明显差异。猪毛菜植被下土壤中各养分相关关系不显著;狗尾草植被下土壤中 SOC 与 TN 呈显著正相关;在杠柳植被下土壤中 SOC 与 TN 呈极显著正相关, SOC 和 TN 与 TK 均呈极显著负相关;在榆树植被下土壤中 TN 与 TP、TK 分别呈显著、极显著负相关, TK 与 TP 呈显著正相关;在裸地土壤中 SOC 与 TN、TK 均呈极显著正相关, TN 与 TK 呈显著正相关。

2.2 不同植被类型下土壤 C、N、P、K 化学计量特征 从图 3 可以看出,4种植被类型下不同土层土壤的 C:N、C:P、C:

K、N:P(全量比值)与裸地坡面变化具有一定差异。猪毛菜、狗尾草、杠柳和榆树下的土壤的 C:P、N:P 在 0~30 cm 下明显低于裸地坡面($P<0.05$)。0~10 cm 土层, C:N 从大到小依次为猪毛菜>狗尾草>杠柳>榆树, C:P、N:P 从大到小依次为榆树>杠柳>狗尾草>猪毛菜, C:K 从大到小依次为杠柳>榆树>狗尾草>猪毛菜。10~20 cm 土层, C:N 从大到小依次为榆树>杠柳>猪毛菜>狗尾草, C:P 从大到小依次为榆树>杠柳>狗尾草>猪毛菜, C:K、N:P 从大到小依次为杠柳>榆树>狗尾草>猪毛菜。20~30 cm 土层, C:N 从大到小依次为杠柳>榆树>猪毛菜>狗尾草, C:P 从大到小依次为榆树>猪毛菜>杠柳>狗尾草, C:K 从大到小依次为猪毛菜>狗尾草>榆树>杠柳, N:P 从大到小依次为狗尾草>猪毛菜>榆树>杠柳。

表1 不同植被下表层土壤SOC、TN、TP、TK含量之间的相关性

Table 1 The correlation between the content of SOC, TN, TP, TK in the subsurface soils of different vegetations

植被类型 Vegetation type	养分指标 Nutrient indicators	SOC	TN	TP	TK
猪毛菜 <i>S. collina</i>	SOC	1.000			
	TN	-0.152	1.000		
	TP	0.869	0.356	1.000	
	TK	0.933	0.214	0.989	1.000
狗尾草 <i>S. vividis</i>	SOC	1.000			
	TN	0.998*	1.000		
	TP	0.948	0.968	1.000	
杠柳 <i>P. sepium</i>	SOC	1.000			
	TN	1.000**	1.000		
	TP	-0.975	-0.976	1.000	
榆树 <i>U. pumila</i>	SOC	1.000			
	TN	-0.010	1.000		
	TP	0.078	-0.998*	1.000	
	TK	0.022	-1.000**	0.998*	1.000
裸地 Bare land	SOC	1.000			
	TN	1.000**	1.000		
	TP	0.990	0.992	1.000	
	TK	1.000**	0.999*	0.986	1.000

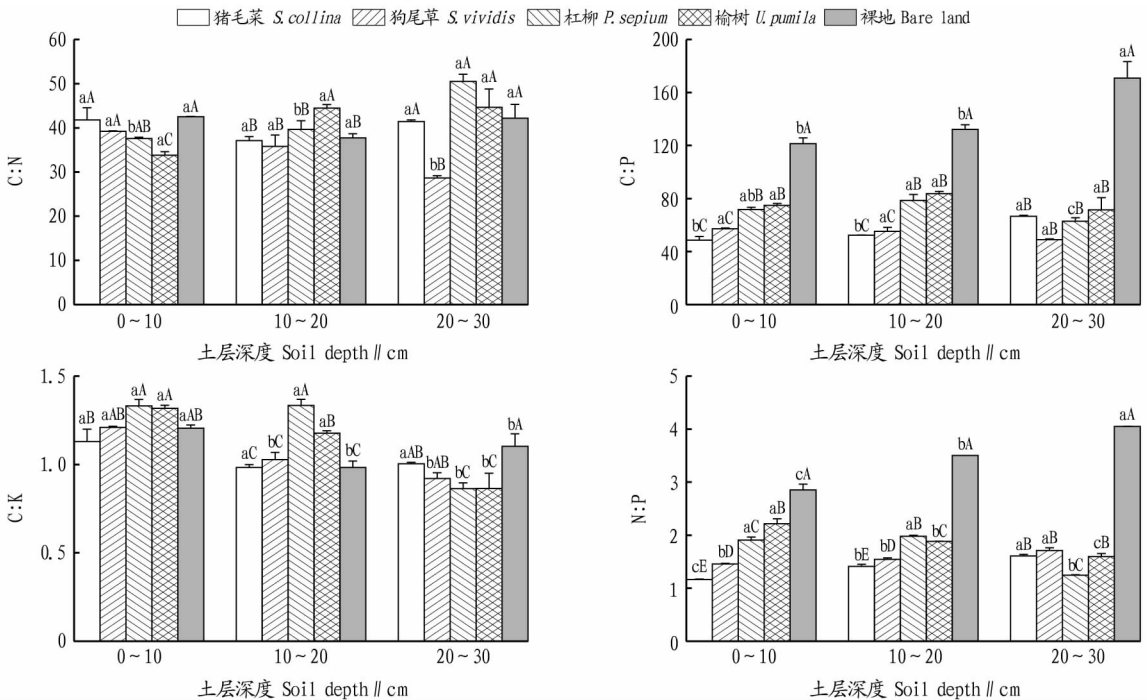
注: **表示在0.01水平上 Pearson 双侧检验极显著相关; *表示在0.05水平上 Pearson 双侧检验显著相关

Note: ** means extremely significant correlation at 0.01 level by Pearson two-sided test; * means significant correlation at 0.05 level by Pearson two-sided test

3 讨论

3.1 表层土壤养分含量分析 该研究中,4种植被下表层土壤(0~10 cm)SOC、TN、TP含量平均值分别为32.17、0.77、0.66 g/kg,与全国表层土壤C含量(10.32 g/kg)、N含量(1.86 g/kg)和P含量(0.78 g/kg)相比,SOC含量显著高于全国均值,TN和TP低于全国均值^[23]。SOC、TN、TK含量从大到小依次为乔木植被(榆树)>灌木植被(杠柳)>草本植被(狗尾草>猪毛菜),TP含量从大到小依次为灌木植被(杠柳)>草本植被(狗尾草>猪毛菜)>乔木植被(榆树),所以土壤肥力水平在不同植被间表现为乔木树种SOC、TN、TK含量高、草本植被含量低的特点,这一研究结果与王琛^[24]对于土壤演替规律的研究结果一致。同时,4种植被下的土壤SOC、TN、TP、TK含量均高于裸地坡面,也在一定程度上说明自然植被可以改善土壤质量,这与王晓琳等^[25-26]对于排土场研究适生植物对土壤形成和演变有积极作用,使得土壤养分条件得到改善,从而促进植被重建的研究结果一致。

3.2 不同土层土壤养分变化分析 该研究对4种典型植被SOC、TN、TP、TK含量进行比较,发现各元素含量在不同植被类型间存在一定差异,且随着土层加深,与裸地对照的差异逐渐变小,说明植被对土壤表层养分含量的影响较大,垂直分布存在表层聚集现象。同时,土壤SOC、TN含量在3层土壤间表现为显著的趋同现象,越向下养分含量越接近裸地土壤养分含量,TP、TK含量则表现不显著,分析其原因在于随着土层的加深,成土作用越来越弱,养分含量就越接近裸地。



注:不同小写字母表示同一植被不同土层之间差异显著($P < 0.05$),不同大写字母表示同一土层不同植被之间差异显著($P < 0.05$)

Note: Different lowercase letters indicate significant differences between different soil layers of the same vegetation ($P < 0.05$), and different capital letters indicate significant differences between different vegetations in the same soil layer ($P < 0.05$)

图3 4种植被不同土层C、N、P、K化学计量比

Fig. 3 The stoichiometric ratios of C, N, P, K in different soil layers of four types of vegetation

考虑是以下 3 方面原因:一是地表植被产生的凋落物的归还,比如植物通过光合作用固定 C,产生有机物,将其转移或以凋落物形式补给到土壤中,而表层土壤的通气状况较好,根区土壤与凋落物中 N、P 具有较好的相关性,有利于微生物将凋落物分解后的一部分 N、P 返还土壤,致使土壤养分在凋落物和腐殖质的积累在不同土层中呈现逐渐降低的趋势。二是降雨量不足导致成土作用的影响深度有限。该研究区域地处干旱半干旱地区,年降雨量 500 mm 左右,在排土场风化过程中,沉积岩通过降雨作用下的岩石风化进程缓慢,对土壤深度的影响有限,降雨对于成土作用的影响也就越来越微弱,岩石风化速度限制,因此土壤肥力状况也受到土层深度受到限制。三是不同植被类型对土壤肥力的影响不同。杠柳和榆树这类灌木、小型乔木一般生长高度可达 1 m 以上,深层次的植被相对比猪毛菜和狗尾草这类高度一般在 10~50 cm 的草本植物,在对土壤中营养物质、养分吸收和能量转化过程,起到了更加积极的作用,表现出灌木、小型乔木高于裸地坡面的养分含量,且草本植物随土壤深度加深,养分含量与裸地差异越来越小。不同土壤深度土壤 SOC、TN、TP、TK 含量存在差异,但土壤养分随土壤深度的增加存在逐渐减小的趋势,这一现象与前人^[27-28]的研究规律一致。

3.3 表层土壤 SOC、TN、TP、TK 的相关关系分析 通过相关关系分析可以发现,不同植被类型间的相关关系存在明显差异,其中狗尾草和杠柳植被下土壤的 SOC 与 TN 存在显著正相关,这与刘卫华等^[29-30]的研究结论一致。说明土壤生态化学计量特征间相互制约,反映在排土场的生态系统中,不同植被下的土壤养分因子的变化是紧密相关相互影响的。在植被发展与土壤演替的过程中,不同植被类型所需要的土壤养分存在差异,由于不同植被所需要的养分条件不同,表现出相关性差异大,这与李向磊等^[31]研究得出植被群落对土壤养分的需求不同而在群落植被中表现不同的结论一致。随着土壤演替的不断进行,各植被类型在土壤养分间均存在一定相关关系,说明植被发展与土壤演替间存在相互作用、共同促进的积极影响,这与毕银丽等^[1]研究得出土壤 SOC、TN、TP、TK 等营养元素含量的丰缺影响植被的生长,同时植被恢复有利于土壤肥力水平的提高的结论一致。

3.4 土壤 SOC、TN、TP、TK 化学计量特征分析 该研究中,4 种植被下表层土壤(0~10 cm)C:N、C:P、N:P 平均值分别为 41.78、48.61、1.16,表层土壤全量比值与国内富含 SOC 的土壤中生物与环境间 0~10 cm 土层相对应的 C:N(14.4)、C:P(136)和 N:P(9.3)比值相较^[32],C:N 显著高于全国均值,C:P、N:P 低于全国均值。C:N 较高(>25)表明有机质的积累速度快于分解速度,可能原因是该研究区域露天煤矿排土场在排放过程中含有大量煤矸石,由于测定方法限制,导致测定的有机碳中有相当一部分是混杂到排土场当中的煤矸石中的碳,所以测定的有机质含量偏高,导致 SOC 含量高,所以 C:N 全量比值高于全国水平。土壤 N:P 在植物生长时受限制的临界值是 14 和 16,N:P ≤ 14 时,植物生长受 N 限

制,在 14 < N:P < 16 时,植物生长受 N 和 P 同时限制,N:P ≥ 16 植物生长受 P 限制^[33],由此可知本区域植物生长主要受 N 限制。

不同植被类型下土壤间化学计量特征存在差异,土壤 C:P、N:P 在不同植被类型间表现为裸地坡面>灌木乔木>草本植物;土壤 C:N、C:K 不同植被类型间差异不明显。猪毛菜、狗尾草作为先锋植物,C:N、C:K 与裸地差异小,说明其表层土壤更加接近排土场未恢复的原土,土壤氮、钾元素尚未得到明显改善。4 种植被 C:P、N:P 均与裸地差异大,且乔木(榆树)和灌木(杠柳)比值高于草本植物(猪毛菜和狗尾草),说明土壤情况得到进一步改善。

在垂直方向(0~30 cm),4 种植被类型 C:N、C:P、C:K 和 N:P 与裸地坡面均存在差异。C:P 和 N:P 3 层土壤全量比值与裸地差异随土层加深而增大,原因在于不同植被在 0~30 cm 全磷含量显著高于裸地,甚至 3 倍以上,且变化差异显著高于裸地,所以比值差异低于裸地比值。SOC 和 TK 含量在 0~30 cm 土层也显著高于裸地,但程度没有 TP 高,因此 C:N 和 C:K 在 3 个土层与裸地相比的差异显著性低于 C:P 和 N:P 的显著程度。

4 结论

该研究探究了新邱露天煤矿排土场 4 种典型植被类型(猪毛菜、狗尾草、榆树、杠柳)土壤的生态化学计量特征,结果表明:

(1) 4 种植被类型下的土壤 SOC、TN、TP、TK 含量呈现表层富集,不同植被间的土壤元素含量存在一定差异,含量均高于裸地,说明植被对成土作用和土壤演替有积极作用,且榆树植被对土壤 SOC、TN、TP、TK 元素的积累效果更好,更有利于土壤条件恢复。

(2) 不同类型植被影响土壤养分循环,但影响深度有限,在土层垂直方向,4 种典型植被土壤养分含量均存在随土层加深而减小的趋势,且差异逐渐减小,越向下层养分含量越接近裸地。

(3) 在不同植被类型间,土壤养分含量存在一定的相关关系,化学计量特征存在一定差异,土壤养分富集影响不同植被间化学计量特征,不同植被类型与土壤演替相互作用,土壤养分主要受土壤氮素控制。

参考文献

- [1] 毕银丽,彭苏萍,杜善周.西部干旱半干旱露天煤矿生态重构技术难点及发展方向[J].煤炭学报,2021,46(5):1355-1364.
- [2] 李夕兵,曹芝维,周健,等.硬岩矿山开采方式变革与智能化绿色矿山构建:以开阳磷矿为例[J].中国有色金属学报,2019,29(10):2364-2380.
- [3] 吉莉,董紫红,房阿曼,等.宝日希勒大型露天矿敏感区划定及重金属累积效应[J].生态学杂志,2021,40(10):3325-3338.
- [4] 邓雅元,赵廷宁,张艳,等.基于 SEM-EDS 的大气降尘特征及来源解析:以荒漠草原区井工开采煤炭基地为例[J].中国环境科学,2021,41(12):5512-5521.
- [5] 薛东明,郭小平,张晓霞.干旱矿区排土场不同边坡生态修复模式下减流减沙效益[J].水土保持学报,2021,35(6):15-21,30.
- [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.
- [7] LEVI N, HILLEL N, ZAADY E, et al. Soil quality index for assessing phosphate mining restoration in a hyper-arid environment [J/OL]. Ecological

- indicators, 2021, 125 [2021-09-21]. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.107571>.
- [8] BENNETT J L, MELLAND A R, EBERHARD J, et al. Rehabilitating open-cut coal mine spoil for a pasture system in south east Queensland, Australia: Abiotic soil properties compared with unmined land through time [J/OL]. *Geoderma regional*, 2021, 25 [2021-09-21]. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2021.e00364>.
- [9] ROY R, SULTANA S, WANG J X, et al. Revegetation of coal mine degraded arid areas: The role of a native woody species under optimum water and nutrient resources [J/OL]. *Environmental research*, 2022, 204 [2021-09-22]. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.11921>.
- [10] RIBEIRO S S, SCHWARTZ G, SILVA A R, et al. Soil properties under different supplementary organic fertilizers in a restoration site after kaolin mining in the Eastern Amazon [J/OL]. *Ecological engineering*, 2021, 170 [2021-09-22]. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2021.106352>.
- [11] 包玉英, 莫莉, 陈金, 等. 北电胜利煤矿排土场土壤 AM 真菌与土壤理化性状相关性研究 [J]. *煤炭学报*, 2019, 44 (12): 3670-3675.
- [12] 毛旭芮, 王明力, 杨建军, 等. 采煤对露天煤矿土壤理化性质及可蚀性影响 [J]. *西南农业学报*, 2020, 33 (11): 2537-2544.
- [13] 珊丹, 邢恩德, 荣浩, 等. 草原矿区排土场不同植被配置类型生态恢复 [J]. *生态学杂志*, 2019, 38 (2): 336-342.
- [14] 金立群, 李希来, 孙华方, 等. 高寒矿区排土场不同坡向植被和土壤特征研究 [J]. *土壤*, 2020, 52 (4): 831-839.
- [15] 李鹏飞, 张兴昌, 朱首军, 等. 植被恢复对黑岱沟矿区排土场土壤性质的影响 [J]. *水土保持通报*, 2015, 35 (5): 64-70.
- [16] 夏光辉, 郭青霞, 卢庆民, 等. 黄土丘陵区不同土地利用方式下土壤养分及生态化学计量特征 [J]. *水土保持通报*, 2020, 40 (2): 140-147, 153.
- [17] 许丽, 张彩霞, 汪季, 等. 阜南矿区孙家湾矸石山阴坡物种多样性研究 [J]. *干旱区资源与环境*, 2006, 20 (6): 178-182.
- [18] 王凯, 刘锋, 祝畅, 等. 阜南露天矿排土场边坡植物多样性与生产力特征 [J]. *水土保持通报*, 2015, 35 (1): 338-343.
- [19] 王东丽, 刘阳, 郭莹莹, 等. 半干旱矿区排土场苜蓿恢复过程中土壤颗粒分形的演变特征 [J]. *生态学报*, 2020, 40 (13): 4585-4593.
- [20] 吕刚, 李叶鑫, 宁宝宽, 等. 暴雨作用下排土场平台-边坡系统土壤侵蚀过程模拟研究 [J]. *煤炭学报*, 2021, 46 (5): 1463-1476.
- [21] 王东升. 新邱露天矿排土场岩石风化及风化物物理性质研究 [C]//中国煤炭学会环境保护专业委员会, 中国煤炭工业技术委员会矿区环境保护专家委员会. 全国矿区环境综合治理与灾害防治技术研讨会论文集. 北京: 中国煤炭学会, 2011: 117-122.
- [22] 鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2005.
- [23] 黄智军, 刘青青, 颜耀, 等. 不同郁闭度马尾松林土壤元素生态化学计量特征 [J]. *森林与环境学报*, 2021, 41 (5): 456-463.
- [24] 王琛. 干旱半干旱区露天矿排土场土壤恢复力评价研究 [D]. 徐州: 中国矿业大学, 2020.
- [25] 王晓琳, 王丽梅, 张晓媛, 等. 不同植被对晋陕蒙矿区排土场土壤养分 16a 恢复程度的影响 [J]. *农业工程学报*, 2016, 32 (9): 198-203.
- [26] 高雅, 陆兆华, 魏振宽, 等. 露天煤矿区生态风险受体分析: 以内蒙古平庄西露天煤矿为例 [J]. *生态学报*, 2014, 34 (11): 2844-2854.
- [27] 孙梦媛, 刘景辉, 米俊珍, 等. 植被复垦对露天煤矿排土场土壤化学及生物学特性的影响 [J]. *水土保持学报*, 2019, 33 (4): 206-212.
- [28] 黄磊, 张永娥, 邵芳丽, 等. 冀北山地天然次生林土壤生态化学计量特征及影响因素 [J]. *生态学报*, 2021, 41 (15): 6267-6279.
- [29] 刘卫华, 赵冰清, 白中科, 等. 半干旱区露天矿生态复垦土壤养分与植物群落相关分析 [J]. *生态学杂志*, 2014, 33 (9): 2369-2375.
- [30] 王改玲, 王小利, 李东方, 等. 安太堡露天煤矿复垦地土壤养分相关研究 [J]. *煤矿环境保护*, 2001, 15 (5): 25-27.
- [31] 李向磊, 毕银丽, 彭苏萍, 等. 西部露天矿区周边植物多样性与土壤养分空间变异性特征 [J/OL]. *煤炭科学技术*, 2020-05-19 [2021-09-21]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2402.TD.20200519.1624.002.html>.
- [32] TIAN H Q, CHEN G S, ZHANG C, et al. Pattern and variation of C:N:P ratios in China's soils: A synthesis of observational data [J]. *Biogeochemistry*, 2010, 98: 139-151.
- [33] 王璐, 喻阳华, 邢容容, 等. 喀斯特高寒干旱区不同经济树种的碳氮磷钾生态化学计量特征 [J]. *生态学报*, 2018, 38 (15): 5393-5403.

(上接第 58 页)

3 结论

羊肚菌室外栽培受到环境中病菌的污染, 是羊肚菌减产的重要原因之一^[12], 目前关于羊肚菌栽培过程中, 真菌性病原菌报道较多, 如 He 等^[13]筛选羊肚菌白霉病的病原菌株长毛拟青霉 (*Paecilomyces penicillatus*), He 等^[14]筛选出羊肚菌盖腐病的病原菌 *Diplöospora longispora*, 常见的羊肚菌重要病原菌还有镰刀菌属^[15-16], 余苗等^[10]报道了由曲霉属真菌引起的羊肚菌白腐病, 该研究通过对患病羊肚菌子实体的分离, 筛选到 3 株细菌, 通过培养时间及侵染方式, 最终确定菌株 YDJ-1 (*Pseudomonas*) 为羊肚菌的病原菌。

参考文献

- [1] 吴兴亮, 卯晓岚, 图力古尔. 中国药用真菌 [M]. 北京: 科学出版社, 2013.
- [2] 任伯莲, 冯锐, 朱金霞, 等. 羊肚菌国内外研究现状及产业发展建议 [J]. *宁夏农林科技*, 2020, 61 (8): 50-53.
- [3] 敬华英. 羊肚菌种属鉴定及活性成分保健功效研究进展 [J]. *安徽农业科学*, 2018, 46 (14): 34-36, 140.
- [4] 赵晨. 羊肚菌营养成分测定及营养价值评价 [J]. *福建轻纺*, 2020 (3): 37-40.
- [5] 吴映明. 羊肚菌对小鼠胃排空的影响 [J]. *辽宁中医药大学学报*, 2007, 9 (4): 170-171.
- [6] 吴映明, 陈奋, 林建新, 等. 羊肚菌对小鼠小肠推进功能的研究 [J]. *广东教育学院学报*, 2005, 25 (3): 80-82.
- [7] OWER R. Notes on the development of the morelascocarp: *Morchella esculenta* [J]. *Mycologia*, 1982, 74 (1): 142-144.
- [8] 宋金梯, 曲绍轩, 马林. 食用菌病虫害识别与防治原色图谱 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2013.
- [9] 陶天申, 杨瑞馥, 东秀珠. 原核生物系统学 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2007: 1-367.
- [10] 余苗, 尹琪, 何培新. 羊肚菌白腐病病原菌的分离与鉴定 [J]. *北方园艺*, 2020 (7): 142-145.
- [11] YOUNG J M. Drippy gill: A bacterial disease of cultivated mushrooms caused by *Pseudomonas agarici* n. sp. [J]. *New Zealand journal of agricultural research*, 1970, 13 (4): 977-990.
- [12] 唐杰, 王勇, 许瀛引, 等. 羊肚菌产业发展关键问题研究进展 [J]. *菌物研究*, 2021, 19 (4): 217-231.
- [13] HE X L, PENG W H, MIAO R Y, et al. White mold on cultivated morels caused by *Paecilomyces penicillatus* [J]. *FEMS microbiology letters*, 2017, 364 (5): 1-5.
- [14] HE P X, LI C C, CAI Y L, et al. First report of pileus rot disease on cultivated *Morchella importuna* caused by *Diplöospora longispora* in China [J]. *Journal of general plant pathology*, 2018, 84 (1): 65-69.
- [15] GUO M P, CHEN K, WANG G Z, et al. First report of stipe rot disease on *Morchella importuna* caused by *Fusarium incarnatum-F. equiseti* species complex in China [J]. *Plant disease*, 2016, 100 (12): 2530.
- [16] 刘伟, 蔡英丽, 何培新, 等. 羊肚菌栽培的病虫害发生规律及防控措施 [J]. *食用菌学报*, 2019, 26 (2): 128-134.