

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2022.03.011

张梦歌, 尹可敬, 石兆勇, 等. 钼矿开采对球囊霉素相关土壤蛋白和土壤化学计量特性的影响. 土壤, 2022, 54(3): 517–523.

钼矿开采对球囊霉素相关土壤蛋白和土壤化学计量特性的影响^①

张梦歌¹, 尹可敬¹, 石兆勇^{1,2,3*}, 焦 阳¹

(1 河南科技大学农学院, 河南洛阳 471023; 2 洛阳市共生微生物与绿色发展重点实验室, 河南洛阳 471023; 3 河南省乡村人居环境工程中心, 河南洛阳 471023)

摘 要: 以不同开采程度钼矿区根际土壤为研究对象, 探索了钼矿开采对土壤球囊霉素相关土壤蛋白、化学计量特性及其两者之间关系的影响。结果表明, 开采区土壤碳、氮含量分别为 25.30 和 1.00 g/kg, 显著低于恢复区和未开采区土壤的碳、氮含量。开采区土壤的碳氮比达到 29.36, 分别是恢复区和未开采区的 2.02 倍和 1.30 倍。恢复区和未开采区土壤的总提取球囊霉素含量为 2.81 和 3.64 mg/g, 易提取球囊霉素含量为 1.22 和 2.02 mg/g, 分别是开采区土壤总提取和易提取球囊霉素的 2.08 倍、2.70 倍和 1.97 倍、3.26 倍。此外, 土壤碳、氮含量对丛枝菌根真菌分泌球囊霉素相关土壤蛋白有显著的影响。可见, 钼矿开采主要导致了土壤碳、氮的大量流失, 并对丛枝菌根真菌分泌球囊霉素相关土壤蛋白具有明显的抑制作用。

关键词: 钼矿区土壤; 不同开采程度; 土壤化学计量特征; 球囊霉素相关土壤蛋白

中图分类号: S154.36; X144 **文献标志码:** A

Effect of Molybdenum Mining on Glomalin Related Soil Protein and Soil Stoichiometric Characteristics

ZHANG Mengge¹, YIN Kejing¹, SHI Zhaoyong^{1,2,3*}, JIAO Yang¹

(1 College of Agriculture, Henan University of Science and Technology, Luoyang, Henan 471023, China; 2 Luoyang Key Laboratory of Symbiotic Microorganism and Green Development, Luoyang, Henan 471023, China; 3 Henan Rural Human Settlement Environment Engineering Center, Luoyang, Henan 471023, China)

Abstract: The rhizosphere soil in Mo-mining area was taken as the research object, and the influence of Mo-mining on soil glomalin, stoichiometry characteristics and their relationship were explored. The results showed that soil C and N contents in the mining area were 25.30 g/kg and 1.00 g/kg, respectively, which were significantly lower than those in the recovery and virgin areas. Soil C/N reached 29.36 in the mining area, which was 2.02 and 1.30 times of those in the recovery and virgin areas, respectively. Soil total glomalin (TG) contents were 2.81 and 3.64 mg/g in the recovery and virgin areas, respectively, while easily-extracted glomalin (EEG) contents were 1.22 and 2.02 mg/g, respectively, which were 2.08, 2.70 times and 1.97 and 3.26 times of TG and EEG in the mining area, respectively. In addition, the results of regression analysis showed that soil C and N contents had a significant effect on the secretion of glomalin-related soil protein (GRSP) by arbuscular mycorrhizal fungi. It can be seen that Mo-mining mainly has led to a large loss of soil C and N, and has a significant inhibitory effect on the secretion of GRSP by arbuscular mycorrhizal fungi.

Key words: Molybdenum mining soil; Different mining degrees; Soil ecological stoichiometry; Glomalin-related soil protein (GRSP)

钼矿是我国的优势矿种之一, 主要分布于河南、陕西、辽宁等省区^[1], 其中河南省洛阳市栾川县钼储量达 206 万 t, 位居亚洲第一, 日采矿量可达 1.3 万 t^[2]。丰富的矿产资源虽然为当地创造了巨大的经

济效益, 但此前研究也已证明^[3], 矿山采掘、剥离、开采以及尾矿废渣堆积等人为活动不仅会对地表植被造成直接破坏, 还会破坏土壤结构, 造成土壤养分的大量流失, 这也是导致矿区植被短期内难以恢复的

①基金项目: 国家自然科学基金项目(32171620, 31670499)、河南省科技攻关项目(192102110128)和 SRTP 项目(202010464067, 2020337)资助。

* 通讯作者(shizy1116@126.com)

作者简介: 张梦歌(1994—), 女, 河南驻马店人, 博士研究生, 主要研究方向为土壤微生物多样性。E-mail: mgz8928@163.com

一大重要原因,因此对矿区土壤养分特征的研究也就尤为必要。

有研究表明,土壤碳、氮、磷的特性是衡量其有效性的重要指标,对揭示土壤养分含量以及碳、氮、磷元素的循环和平衡机制具有重要的意义。而土壤生态化学计量学结合了化学、生物学与生态学等学科的基本原理,以土壤碳、氮、磷含量变化为主要指标^[4],对研究生态系统养分循环及养分间的限制与平衡具有重要指示意义,并已引起许多学者的广泛关注^[5-7]。学者们对于钼矿区的研究,主要关注重金属的形态及稳定性等方面^[8-9],而关于钼矿开采对土壤生态化学计量特征影响的研究较少。此外,关于钼矿区土壤丛枝菌根真菌(arbuscular mycorrhizal fungi, AMF)分泌物—球囊霉素相关土壤蛋白(glomalin-related soil protein, GRSP)与生态化学计量特性的关系也知之甚微。

作为 AMF 的代谢产物,GRSP 广泛分布于陆地生态系统中^[10]。Purin 和 Rillig^[11]根据 GRSP 提取的难易程度将其分为总提取球囊霉素(total extractable glomalin, TG)和易提取球囊霉素(easily extractable glomalin, EEG)。已有研究表明 GRSP 难溶于水,在土壤中的性质极为稳定,是土壤碳库和氮库的重要来源,同时 GRSP 还具有改善土壤结构、增强土壤团聚体的稳定性等作用^[12-13]。不同生态系统中 GRSP 对土壤生态化学计量特征的响应是近年来的研究热点之一。张梦歌等^[14]在热带雨林的研究发现, TG 和 EEG 含量均随着土壤全碳、全氮和碳氮比的增大显著增加,而与土壤全磷含量没有明显的相关关系。马洁怡等^[15]对盐碱地土壤的研究发现, TG 与土壤全磷含量

没有相关关系,而 EEG 则与土壤全磷含量呈显著的负相关关系。张亚娟等^[16]在沙地的研究发现, TG 和 EEG 含量均与土壤全氮、全磷呈显著的正相关关系。而钼矿开采对 AMF 分泌 GRSP 的影响并不清楚,不同开采程度的土壤化学计量特性对 GRSP 的影响也鲜有报道。

因此本研究以不同开采程度钼矿区植物根际土壤为研究对象,测定其碳、氮、磷和 GRSP 含量,分析土壤 GRSP 和生态化学计量特征变化规律及其两者之间的关系,从而为日后钼矿区的生态修复提供更多的理论基础和科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况与样品的采集和处理

本研究选择河南洛阳钼矿区的 3 个典型区域进行研究,分别为开采区、恢复区和未开采区。其中开采区设置在正在开采的中心矿区的边缘,且有较好的植被覆盖,距离矿区中心约 600 m;恢复区为 2012 年停止钼矿开采,正处于自然恢复阶段的区域;未开采区位于已探明钼储量但还未进行钼矿开采的区域。

每个研究区域内设置 5 个采样点,每个采样点内设置 5 个 20 m × 20 m 的样方,对各样方内优势植物的植物种进行记录(表 1);同时采集每个样方内同种优势植物及其根系周围 0 ~ 20 cm 土壤 3 ~ 5 份,并混合成一份土壤样品,即每个样方采集 5 个土壤样品,每个区域采集 25 个土壤样品,共 75 个土壤样品。将采集的土壤样品带回实验室,风干处理,进行相关指标的测定。

表 1 不同开采程度钼矿区的植物种
Table 1 Plant species in Mo-mining areas with different mining levels

研究区	草本	木本
开采区	艾蒿(<i>Artemisia argyi</i>)、白莲蒿(<i>Artemisia sacrorum</i> Ledeb.)、拟高粱(<i>Sorghum bicolor</i>)、狗尾草(<i>Setaria viridis</i>)、黄蒿(<i>Artemisia annua</i> Linn.)、糠稷(<i>Panicum acroanthum</i> Steud.)、芦苇(<i>Phragmites australi</i>)、麦冬(<i>Ophiopogon japonicas</i>)、毛茛菜(<i>Elephantopus mollis</i>)、天门冬(<i>Asparagus cochinchinensis</i>)、茵陈蒿(<i>Artemisia capillaris</i> Thunb.)、早熟禾(<i>Poa annua</i> L.)	臭椿(<i>Ailanthus altissima</i>)、刺槐(<i>Robinia pseudoacacia</i>)、扶芳藤(<i>Euonymus fortune</i>)、胡枝子(<i>Lespedeza bicolor</i>)、黄栌(<i>Cotinus coggygria</i>)、迷迭香(<i>Rosmarinus officinalis</i>)、女贞(<i>Ligustrum lucidum</i>)、卫矛(<i>Euonymus alatus</i>)、线柳(<i>Salix linearifolia</i>)、紫穗槐(<i>Amorpha fruticose</i>)
恢复区	艾蒿(<i>Artemisia argyi</i>)、荻(<i>Triarrhena sacchariflora</i>)、拟高粱(<i>Sorghum propinquum</i>)、狗尾草(<i>Setaria viridis</i>)、鬼针草(<i>Bidens pilosa</i> L.)、黄花蒿(<i>Artemisia annua</i> Linn.)、萎蒿(<i>Artemisia selengensis</i>)、芦苇(<i>Phragmites australi</i>)、野菊花(<i>Chrysanthemum indicum</i>)、茵陈蒿(<i>Artemisia capillaris</i> Thunb.)、早熟禾(<i>Poa annua</i> L.)	臭椿(<i>Ailanthus altissima</i>)、刺槐(<i>Robinia pseudoacacia</i>)、合欢(<i>Albizia julibrissin</i>)、胡桃(<i>Juglans regia</i> L.)、胡枝子(<i>Lespedeza bicolor</i>)、苦树(<i>Picrasma quassioides</i>)、麻栎(<i>Quercus acutissima</i> Carruth.)、马尾松(<i>Pinus massoniana</i> Lamb.)、木蓝(<i>Magnolia liliflora</i>)、漆树(<i>Toxicodendron vernicifluum</i>)、杨树(<i>Populus alba</i>)
未开采区	艾蒿(<i>Artemisia argyi</i>)、荻(<i>Triarrhena sacchariflora</i>)、狗尾草(<i>Setaria viridis</i>)、拐芹(<i>Angelica polymorpha</i>)、鬼针草(<i>Bidens pilosa</i> L.)、藜(<i>Chenopodium album</i>)、牛筋草(<i>Eleusine indica</i>)、千里光(<i>Senecio scandens</i>)、三叶草(<i>Trifolium repens</i>)、天门冬(<i>Asparagus cochinchinensis</i>)、香薷(<i>Elsholtzia ciliata</i>)	臭椿(<i>Ailanthus altissima</i>)、刺槐(<i>Robinia pseudoacacia</i>)、枫香树(<i>Liquidambar formosana</i>)、胡枝子(<i>Lespedeza bicolor</i>)、黄连木(<i>Pistacia chinensis</i>)、连翘(<i>Forsythia suspensa</i>)、麻栎(<i>Quercus acutissima</i>)、山核桃(<i>Carya cathayensis</i>)、绣线菊(<i>Spiraea salicifolia</i>)

1.2 土壤理化性质的测定

土壤全碳、全氮含量用元素分析仪测定^[17], 土壤全磷含量采用高氯酸-浓硫酸消煮-钼锑抗比色法测定^[18]。

1.3 球囊霉素相关土壤蛋白的测定

TG 和 EEG 的含量根据 Wright 等^[10]和 David 等^[19]的方法测定。EEG 的主要提取步骤: 取 1 g 风干土于试管中, 加入 8 ml 柠檬酸钠浸提剂(20 mmol/L pH 7.0), 在 103 kPa、121 °C 条件下提取 90 min 后, 在 6 000 r/min 下离心 15 min, 收集上清液。TG 提取方法: 在装入 1 g 风干土的试管中, 加入 8 ml 柠檬酸钠浸提剂(50 mmol/L, pH 8.0), 于 103 kPa、121 °C 条件下连续提取 60 min, 并重复提取 2 次; 6 000 r/min 下离心 15 min, 收集上清液。分别吸取上清液 0.5 ml 加入 5 ml 考马斯亮蓝 G-250 染色剂, 在 595 nm 波长下比色; 用牛血清蛋白作为标准液, 考马斯亮蓝法显色, 绘制标准曲线, 计算出球囊霉素相关土壤蛋白的含量。

1.4 数据处理

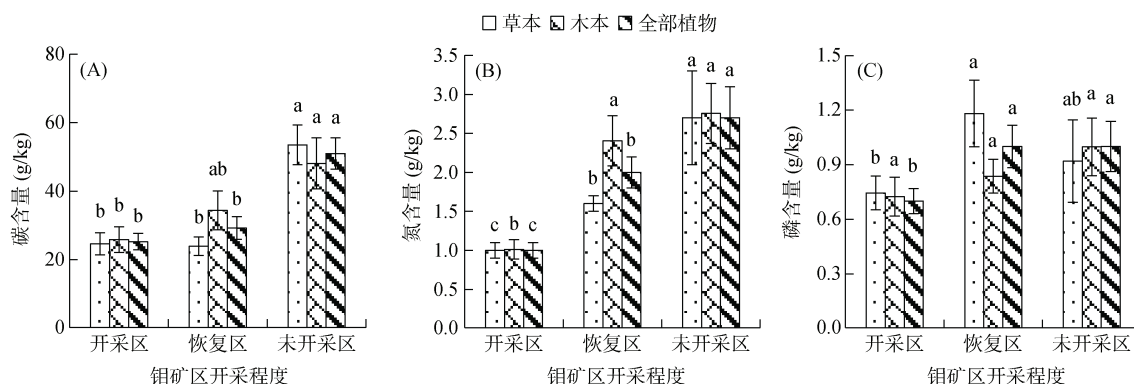
使用 SPSS 21.0 对不同开采程度钼矿区全部植物

根际土壤及不同开采程度钼矿区草本和木本植物根际土壤的碳、氮、磷和 GRSP 含量分别进行单因素方差分析, 对钼矿区植物根际土壤的碳、氮、磷间的关系进行 Pearson 相关分析。土壤碳、氮、磷对 GRSP 含量的影响, 则采用线性回归的方法进行分析。

2 结果与分析

2.1 不同开采程度钼矿区土壤碳、氮、磷的分布特征

通过对 3 个区域根际土壤碳、氮、磷含量的测定发现(图 1), 未开采区土壤的全氮、全碳含量均显著高于开采区域($P<0.05$), 未开采区土壤的全氮含量分别为开采区和恢复区全氮含量的 2.70 倍和 1.35 倍, 全碳含量则分别为开采区和恢复区的 2.01 倍和 1.74 倍。木本植物根际土壤的全磷含量在 3 个区域间均没有显著差异。未开采区木本植物的全氮、全碳含量分别为 2.76 g/kg 和 48.13 g/kg, 而未开采区草本植物根际土壤的全氮、全碳含量则分别 2.70 g/kg 和 53.50 g/kg。



(图柱上方不同小写字母表示钼矿区不同开采程度下同种植物类型根际差异达 $P<0.05$ 显著水平, 下同)

图 1 不同开采程度钼矿区植物根际土壤的碳、氮、磷含量

Fig. 1 The content of C, N and P in the rhizosphere soil of plants in Mo-mining areas with different mining levels

此外, 3 个区域植物根际土壤的碳氮比范围为 13.53 ~ 29.74(图 2), 恢复区根际土壤的 C/N 显著低于其他两个区域。通过对不同生活型植物根际土壤的碳氮比调查也得到相似的结果, 其中恢复区木本植物根际土壤的碳氮比为 13.53, 草本植物根际土壤的碳氮比为 15.66。

2.2 不同开采程度钼矿区土壤碳、氮、磷间的关系

总体来看, 钼矿区土壤碳含量与氮含量间存在极显著的正相关关系($r=0.707$, $P<0.01$), 与之相似, 氮磷间也存在极显著的正相关关系($r=0.374$, $P<0.01$), 而碳含量与磷含量没有明显的相关关系($r=0.057$, $P>0.05$)。进一步分析不同开采程度钼矿区土壤碳、

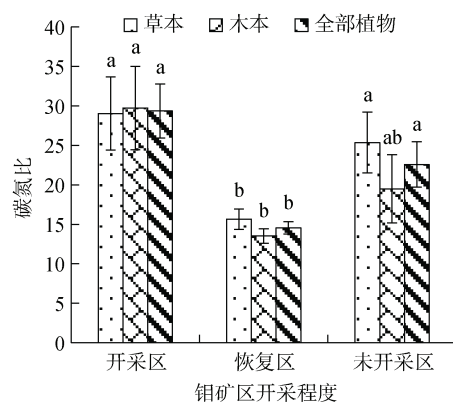


图 2 不同开采程度钼矿区植物根际土壤的碳氮比

Fig. 2 The C/N in the rhizosphere soil of plants in Mo-mining areas with different mining levels

氮、磷间的相关关系发现,恢复区和未开采区土壤碳氮间均存在极显著的正相关关系($r=0.905$, $P<0.01$; $r=0.614$, $P<0.01$),而开采区土壤碳、氮、磷间均不存在显著相关关系(表 2)。

2.3 不同开采程度钼矿区土壤球囊霉素相关土壤蛋白的分布特征

总体来看,洛阳钼矿区土壤 TG 的含量变化范围为 1.35 ~ 4.06 mg/g, EEG 含量的变化范围为 0.57 ~ 2.22 mg/g,其中未开采区植物根际土壤 TG 和 EEG 含量都显著高于开采区和恢复区土壤的 TG 和 EEG 含量($P<0.05$)(图 3A)。进一步比较不同开采程度钼矿区草本或木本植物根际土壤的 TG 和 EEG 含量发现,

表 2 不同开采程度钼矿区土壤碳、氮、磷的相关性
Table 2 Correlation of soil C, N and P in Mo-mining areas with different mining levels

	C	N	P
C	1	0.905** 0.614**	0.091 -0.075
N	0.707** 0.102	1	0.049 0.383
P	0.057 -0.187	0.374** 0.311	1

注:左下一对指标的两个数字分别代表 3 个区域总的相关系数和开采区的相关系数;右上同一对指标的两个数字分别代表恢复区和未开采区的相关系数。*、** 分别表示相关性达 $P<0.05$ 和 $P<0.01$ 显著水平。

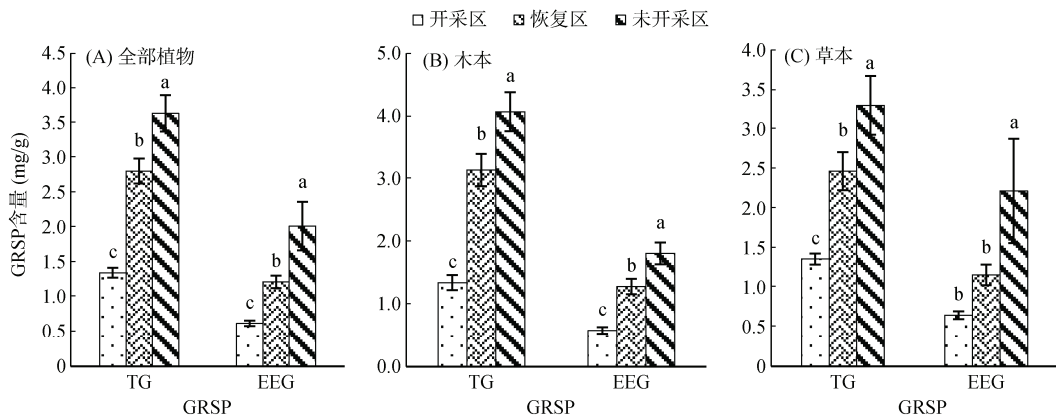


图 3 不同开采程度钼矿区植物根际土壤球囊霉素相关土壤蛋白的含量
Fig. 3 The content of GRSP in plant rhizosphere soils in Mo-mining areas with different mining levels

未开采区木本植物根际土壤 TG 和 EEG 含量分别为 4.07 和 1.81 mg/g,均显著高于恢复区和开采区 TG 和 EEG 含量;无论是 TG 还是 EEG 含量,都是在开采区其含量最低,分别为 1.34 和 0.57 mg/g(图 3B)。与木本植物相似,草本植物根际土壤的 TG 和 EEG 含量也是在未开采区达到最大,分别为 3.30 和 2.22 mg/g,且显著高于恢复区和开采区(图 3C)。

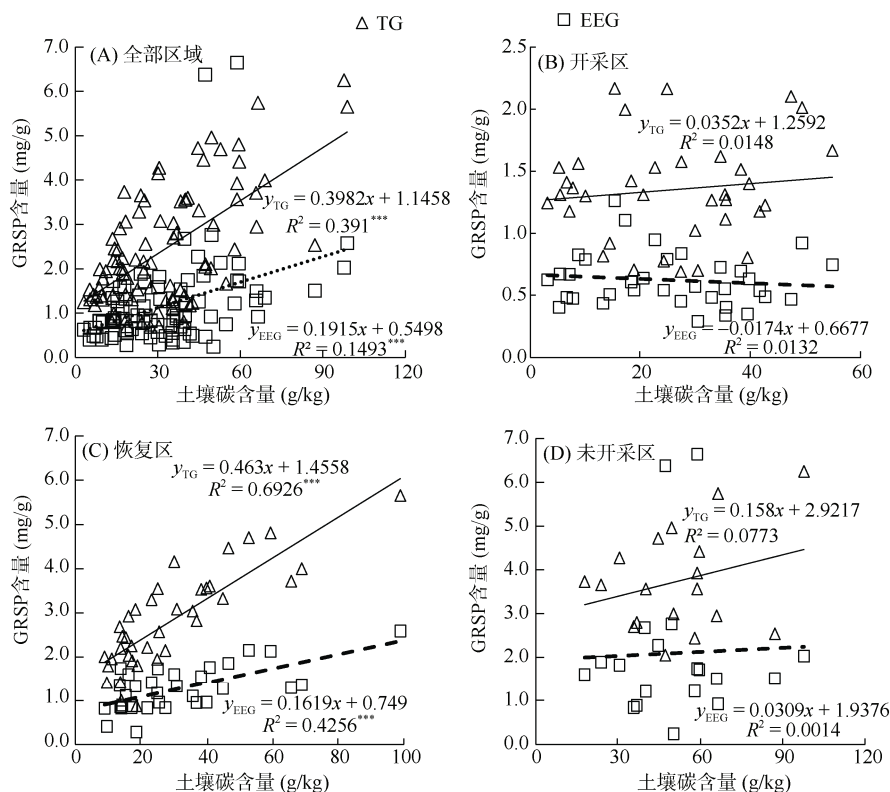
2.4 不同开采程度钼矿区土壤碳、氮、磷含量对球囊霉素相关土壤蛋白的影响

通过对不同开采程度钼矿区植物根际土壤碳、氮、磷含量对 GRSP 影响的分析可知,土壤碳、氮、磷含量对 TG 和 EEG 均有显著的影响(图 4A、5A 和 6A)。进一步分析不同开采程度土壤碳、氮、磷含量对 GRSP 的影响发现,开采区土壤的碳、磷含量对 TG 和 EEG 均没有显著的影响(图 4B 和图 6B),而氮含量对 TG 和 EEG 有极显著的影响(图 5B)。恢复区土壤的碳、氮含量对 TG 和 EEG 有极显著的影响(图 4C 和图 5C),而恢复区土壤磷含量对 TG 和 EEG 没有影响(图 6C)。未开采区土壤 TG 仅受氮的显著影响,

不受碳、磷含量的影响;EEG 则与碳、氮、磷均没有显著的关系(图 4D、5D 和 6D)。

3 讨论

已有研究表明土壤碳、氮、磷是许多生态系统生产力和物质循环的主要限制因素^[4-5],其可以直接反映土壤肥力的基本状况。在本研究中,未开采区土壤碳的平均含量为 51 g/kg。未开采区土壤氮、磷的平均含量为 3 g/kg 和 1 g/kg,与全国第二次土壤普查养分分级标准相比^[20],分别高于一级和二级标准,处于丰富和较丰富水平,但其低于陕西煤矿区土壤氮、磷含量^[21],可能是由于钼矿露天开采移走大量的表层土壤,而本研究中开采区采集的根际土壤样品是在受到钼矿开采干扰后所留下的根际土壤,难以避免是深层次土壤受钼矿开采而翻堆至表层的土壤,从而导致其碳、氮含量显著低。本研究发现开采区土壤碳、氮含量均显著低于未开采区土壤的碳、氮含量,而土壤磷含量在两个区域间没有显著差异,说明钼矿开采主要造成了开采区土壤碳、氮这两种养分的大量流



(*、**、***分别表示相关性达 $P < 0.05$ 、 $P < 0.01$ 和 $P < 0.001$ 显著水平, 下同)

图4 不同开采程度钼矿区土壤碳含量对球囊霉素相关土壤蛋白的影响

Fig. 4 The effect of soil carbon content on GRSP in Mo-mining areas with different mining levels

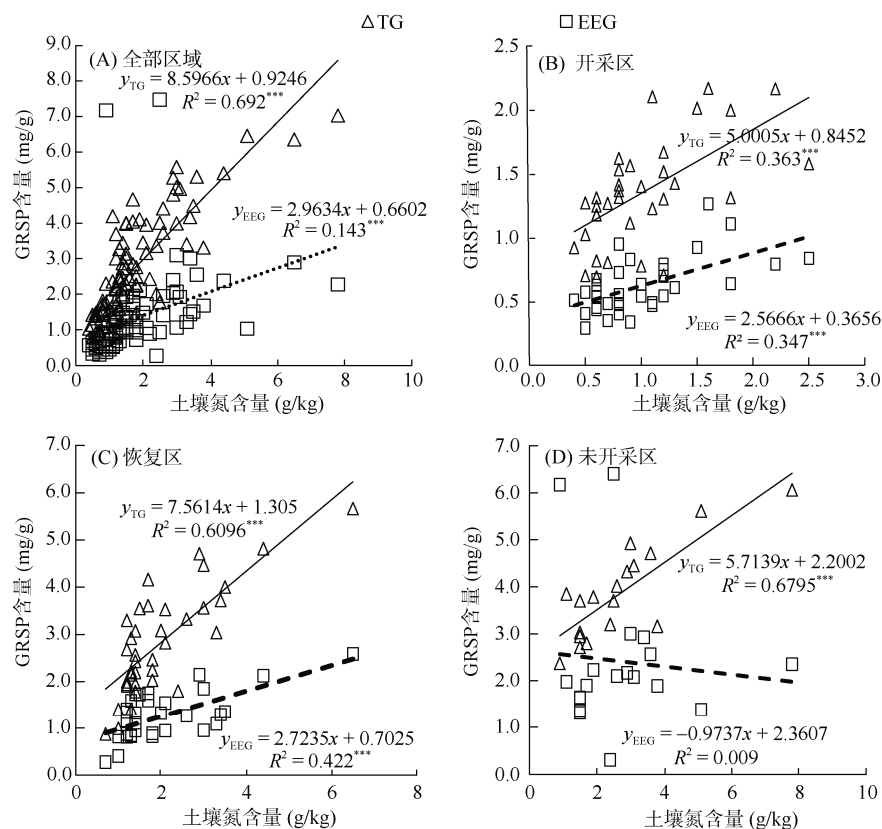


图5 不同开采程度钼矿区土壤氮含量对球囊霉素相关土壤蛋白的影响

Fig. 5 The effect of soil nitrogen content on GRSP in Mo-mining areas with different mining levels

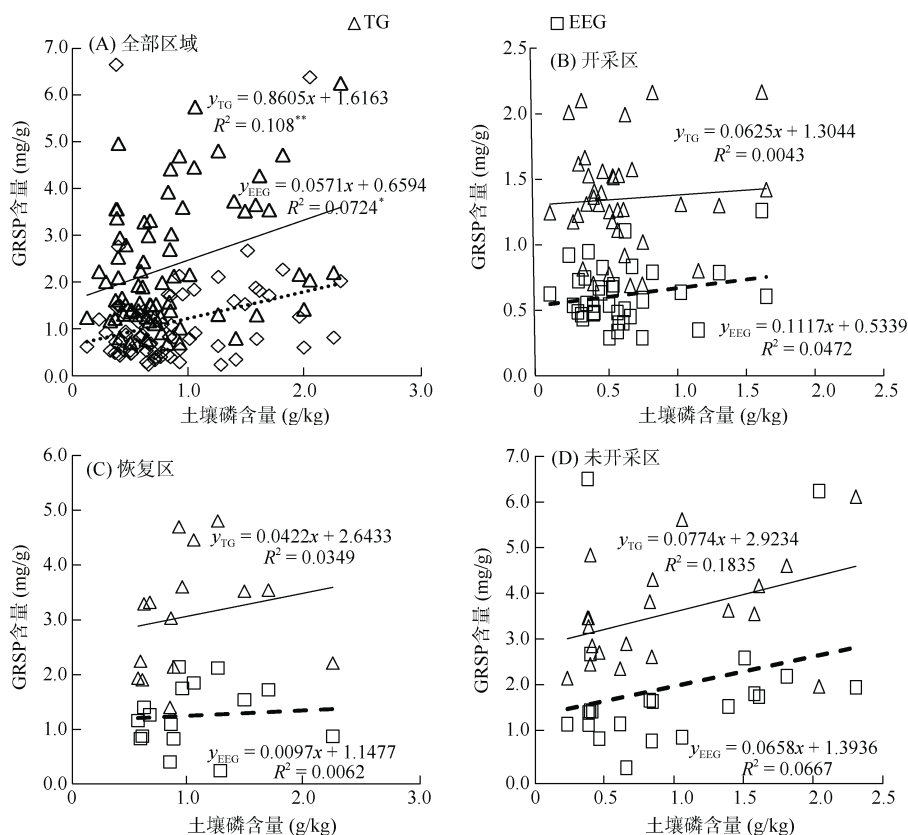


图 6 不同开采程度钼矿区土壤磷含量对球囊霉素相关土壤蛋白的影响

Fig. 6 The effect of soil phosphorus content on GRSP in Mo-mining areas with different mining levels

失。恢复区木本植物根际土壤的碳含量为 34.39 g/kg, 显著高于开采区木本植物根际土壤的碳含量, 说明恢复区随着自然植被的恢复, 有效减少了养分大量流失, 土壤碳含量逐步提高, 这一结果与之前研究结果相一致^[22]。同时还发现恢复区草本植物根际土壤的碳、氮含量均显著低于未开采区草本植物, 说明土壤养分恢复是一个缓慢的过程。

土壤碳氮比和有机质的分解与积累密切相关, 是反映土壤养分循环的重要指标, 通过对矿区土壤碳氮比的研究, 有助于明确矿区土壤养分和能量循环对环境变化的响应。本研究发现, 开采区土壤碳氮比约为恢复区土壤碳氮比的 2.02 倍, 表明钼矿开采显著提高了土壤的碳氮比。通常情况下, 碳氮比高表明有机质具有较慢的矿化作用, 而植物、土壤微生物主要是以无机氮素为营养的, 所以土壤有效氮可能成为限制开采区植物正常生长发育的限制因素。可见在开采区植被恢复的治理初期要加大无机氮的投入, 从而创造更有利植物生长的环境条件, 使土壤碳氮比能处于较平衡的状态。同时还发现, 恢复区土壤碳氮比为 14.56, 与全球、中国土壤碳氮比均值(分别为 14.3 和 14.4)均十分接近^[23], 说明恢复区经过长期的自然恢复, 土壤碳氮比逐渐趋向平衡的状态。研究业已表明,

因为土壤氮素大多是以有机态的形式存在于土壤有机碳中, 而土壤有机碳又是土壤全碳的一部分, 所以土壤碳氮间存在着一定的耦合关系^[23]。

此前研究发现^[24-25]耕作施肥、石油开采、重金属胁迫等因素对土壤 GRSP 含量有显著影响。在本研究中发现, 钼矿开采显著降低了土壤 GRSP 的含量, 恢复区和未开采区 TG 含量分别是开采区的 2.28 倍和 2.70 倍, EEG 则分别是开采区的 1.97 倍和 3.26 倍。而钼矿开采导致土壤 GRSP 含量显著降低主要是因为 AMF 是以碳素为能源、氮素为营养的^[16]。钼矿开采造成土壤养分大量流失, 同时开采区土壤的高碳氮比表明氮的矿化速率较低。这两个因素造成 AMF 无法获取足够其维持正常生理活动的营养物质, 并最终导致其分泌 GRSP 含量的显著减少。

业已证明, GRSP 与土壤碳、氮存在一定的相关性^[12-15, 26]。本研究通过对 GRSP 和土壤碳、氮的关系调查发现, GRSP 与土壤碳、氮呈极显著正相关关系, 进一步证实了 GRSP 是土壤碳库和氮库的重要来源。恢复区土壤碳、氮含量对 TG 和 EEG 均存有显著的影响, 而未开采区土壤只有氮含量对 TG 有极显著的影响, 由于植物种类是导致 GRSP 含量变化的一个关键因素, 因此出现这一结果的原因可能与植物种类有

关。马洁怡等^[15]也研究发现同一区域不同树种根际土壤 GRSP 含量存在显著差异。胡家欣等^[27]则发现不同树龄的同一树种根际土壤的 GRSP 含量也可能存在显著差异。而未开采区草本植物和木本植物的种类不一, 所以土壤碳对 GRSP 是否有显著的影响有待进一步研究。GRSP 含量这一结果在本研究中也得到证实, 虽然总体上土壤磷含量对 GRSP 有显著的影响, 但不同开采程度钼矿区土壤磷含量对 GRSP 没有显著的影响, 原因可能是土壤中的磷主要来源于岩石的风化, 在土壤中的含量相对稳定^[28], 而 GRSP 易受植被类型、土壤碳氮含量等因素影响^[29], 导致同一开采程度区域内 GRSP 含量变化较大, 所以二者在不同开采程度钼矿区的关系均较弱。

4 结论

钼矿开采主要导致了土壤碳、氮的大量流失, 并显著提高了土壤的碳氮比。此外, 钼矿开采显著降低了土壤的 TG 和 EEG 含量, 对丛枝菌根真菌分泌 GRSP 具有明显的抑制作用。

参考文献:

- [1] 张照志, 王贤伟, 张剑锋, 等. 中国钼矿资源供需预测[J]. 地球学报, 2017, 38(1): 69–76.
- [2] Zeng Q D, Liu J M, Qin K Z, et al. Types, characteristics, and time-space distribution of molybdenum deposits in China[J]. International Geology Review, 2013, 55: 1311–1358.
- [3] 黄仲德. 矿山开采对生态环境的影响及矿区生态修复分析[J]. 中国资源综合利用, 2020, 38(10): 134–136.
- [4] 贺金生, 韩兴国. 生态化学计量学: 探索从个体到生态系统的统一化理论[J]. 植物生态学报, 2010, 34(1): 2–6.
- [5] 区晓琳, 陈志彪, 陈志强, 等. 亚热带侵蚀红壤区植被恢复过程中土壤团聚体化学计量特征[J]. 土壤学报, 2018, 55(5): 1156–1167.
- [6] 宁志英, 李玉霖, 杨红玲, 等. 沙化草地土壤碳氮磷化学计量特征及其对植被生产力和多样性的影响[J]. 生态学报, 2019, 39(10): 3537–3546.
- [7] 赵洛琪, 付登高, 吴晓妮, 等. 滇中不同植物群落土壤养分及其计量比的变化特征[J]. 土壤, 2020, 52(6): 1248–1255.
- [8] 程俊伟, 蔡深文, 黄明琴. 贵州毛石钼矿区土壤及表层沉积物中重金属形态分析及生态风险评价[J]. 水土保持研究, 2021, 28(1): 353–359.
- [9] 韩张雄. 钼矿区污染特征及伴生 Pb、Cd 的稳定化研究[D]. 杨陵: 西北农林科技大学, 2020.
- [10] Wright S F, Frankesnyder M, Morton J B, et al. Time-course study and partial characterization of a protein on hyphae of arbuscular mycorrhizal fungi during active colonization of roots[J]. Plant and Soil, 1996, 181(2): 193–203.
- [11] Purin S, Rillig M C. The arbuscular mycorrhizal fungal protein glomalin: Limitations, progress, and a new hypothesis for its function[J]. Pedobiologia, 2008, 51(2): 123–130.
- [12] 曹梦, 唐中华, 赵龙, 等. 苏打盐碱化土壤 pH 与团聚体中球囊霉素相关土壤蛋白含量的关系[J]. 土壤, 2018, 50(2): 319–325.
- [13] 肖玖军, 邢丹, 毛明明, 等. AM 真菌对桑树根围土壤团聚体的影响机制[J]. 土壤学报, 2020, 57(3): 773–782.
- [14] 张梦歌, 石兆勇, 杨梅, 等. 热带山地雨林土壤球囊霉素的分布特征[J]. 生态环境学报, 2020, 29(3): 457–463.
- [15] 马洁怡, 王金平, 张金池, 等. 沿海造林树种根际丛枝菌根真菌与土壤因子的通径分析[J]. 南京林业大学学报, 2019, 43(4): 139–147.
- [16] 张亚娟, 贺学礼, 赵丽莉, 等. 塞北荒漠植物根围球囊霉素和生态化学计量特征的空间分布[J]. 环境科学研究, 2017, 30(11): 1723–1731.
- [17] 张威, 刘宁, 吕慧捷, 等. TruSpec CN 元素分析仪测定土壤中碳氮方法研究[J]. 分析仪器, 2009(3): 46–49.
- [18] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [19] David P, Janos A, Sara G. Glomalin extraction and measurement[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2008, 40(3): 728–739.
- [20] 杨皓, 胡继伟, 黄先飞, 等. 喀斯特地区金刺梨种植基地土壤肥力研究[J]. 水土保持研究, 2015, 22(3): 50–55.
- [21] 毕银丽, 江彬, 秦芳玲, 等. 干旱半干旱煤矿区联合接菌对土壤改良动态生态效应[J]. 农业工程学报, 2021, 37(7): 85–93.
- [22] 陈海滨, 陈志彪, 陈志强, 等. 不同治理年限的离子型稀土矿区土壤生态化学计量特征[J]. 生态学报, 2017, 37(1): 258–266.
- [23] 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(1/2/3): 139–151.
- [24] 山宝琴, 李茜, 杨燕. 陕北石油污染对土壤球囊霉素含量的影响[J]. 环境工程学报, 2017, 11(11): 6155–6162.
- [25] Cornejo P, Meier S, Borie G, et al. Glomalin-related soil protein in a Mediterranean ecosystem affected by a copper smelter and its contribution to Cu and Zn sequestration[J]. The Science of the Total Environment, 2008, 406(1/2): 154–160.
- [26] 谢靖, 唐明. 黄土高原紫穗槐丛枝菌根真菌与土壤因子和球囊霉素空间分布的关系[J]. 西北植物学报, 2012, 32(7): 1440–1447.
- [27] 胡家欣, 彭思利, 张栋, 等. 氮添加对不同林龄杨树人工林丛枝菌根真菌群落的影响[J]. 生态环境学报, 2020, 29(9): 1768–1775.
- [28] Hou E Q, Chen C R, Wen D Z, et al. Phosphatase activity in relation to key litter and soil properties in mature subtropical forests in China[J]. The Science of the Total Environment, 2015, 515/516: 83–91.
- [29] 权常欣, 马玲玲, 林钊凯, 等. 广东省森林球囊霉素相关土壤蛋白含量及影响因素[J]. 生态环境学报, 2020, 29(2): 240–249.