

双龙沟废弃矿区修复年限对土壤物理性质和微生物群落结构的影响

蔡卓良^{1,2}, 张富¹, 王理德^{1,3,4*}, 张裕凯⁵, 赵赫然^{3,4}, 赵学成⁵, 张恒平⁵

(1. 甘肃农业大学林学院, 甘肃 兰州 730070; 2. 兰州市园林科学研究所, 甘肃 兰州 730070; 3. 甘肃省治沙研究所, 甘肃 兰州 730070; 4. 甘肃河西走廊森林生态系统国家定位观测研究站, 甘肃 武威 733000; 5. 甘肃祁连山国家级自然保护区管护中心哈溪自然保护站, 甘肃 天祝 733206)

摘要:【目的】探讨天祝藏族自治县双龙沟矿区废弃矿区不同修复年限土壤物理性质与微生物特性。【方法】采用时空替代法, 选择双龙沟不同修复年限(2 a、5 a、10 a)和未修复(CK)废弃矿区为研究对象, 分析了不同修复年限土壤物理性质(容重、含水量、机械组成)和土壤微生物(微生物量碳、氮、磷及真菌、细菌、放线菌数量)变化特征。【结果】随着修复年限的延长, 表层土壤容重呈减少趋势, 并在修复10 a时达到最小, 为 0.921 g/cm^3 ; 土壤含水率随修复年限的延长呈增加的趋势, 并在修复10 a时为对照样地的2.4倍; 土壤粒径随修复年限的增加整体向细化的方向发展; 3大类微生物数量随修复年限的延长均整体呈增加的趋势, 其中细菌占微生物总数的96.74%, 而放线菌和真菌仅占0.29%和0.003%, 并且放线菌和真菌具有明显的表聚现象; 土壤微生物量碳和土壤微生物量磷呈逐渐增加的趋势, 并分别在修复2 a和5 a时超过对照样地, 最大值分别达到385.562、24.414 mg/kg, 而微生物量氮呈先增加后减少的趋势, 变化范围为14.295~132.388 mg/kg。【结论】在双龙沟矿区废弃地修复使土壤质量有了显著的提升, 加速了矿区生态系统的恢复。

关键词: 双龙沟; 矿区废弃地; 修复年限; 土壤物理性质; 土壤微生物

中图分类号: S153 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-5500(2024)03-0185-10

DOI: 10.13817/j.cnki.cycp.2024.03.022



双龙沟废弃矿区位于甘肃省天祝县哈溪镇西南部水源涵养林区^[1], 这里曾有大面积的森林和草甸草原^[2], 在调节区域大气候、水源涵养、防止水土流失等方面起着非常重要的作用^[3]。但是自1983年出现了一系列粗放的采金活动, 使整个河床上、下游布满了采金后废弃的坑穴、槽井^[4]。采金段和周边地界植被破坏严重, 矿山的过度开采严重影响了生态环境的发展, 使得河床破损, 造成河水断流, 严重损毁了河道及

周边的森林、草原^[5]。大规模采矿不但使土壤污染、水土流失严重^[6], 而且阻碍了植物的生长^[7], 使生态环境的可持续发展受到阻碍。2017年中共中央办公厅、国务院办公厅公布了《甘肃祁连山国家级自然保护区生态环境问题的通报》, 严厉批评祁连山违法违规开矿破坏区域生态环境的行为^[8]。早期粗放的采矿活动随经济的增长产生了严重的环境问题, 如影响矿区周边居民的生产与生活, 破坏生态平衡与社会的可持续发展, 因而对对矿区废弃地进行科学有效的治理已经受到国内外学者的广泛关注, 同时矿区土壤特性的研究也显得越来越重要^[9]。

矿区修复后土壤结构、功能的恢复是控制修复后土壤生态系统状况的关键因素^[10]。其中土壤物理性质反映出土壤的质量状况, 是衡量土壤生态系统的重要特征之一^[11]。赵艳玲等^[12]对露天矿复垦土壤的物

收稿日期: 2022-10-29; **修回日期:** 2023-04-06

基金资助: 国家自然科学基金项目(42167069); 甘肃省青年科技基金项目(20JR10RA468, 21JR7RA734)

作者简介: 蔡卓良(1994-), 男, 甘肃兰州人, 硕士研究生。

E-mail: 1129352873@qq.com

*通信作者。E-mail: wldzy69@163.com

理性质进行研究,结果表明土壤物理性质生了明显变化;王王朝等^[13]研究表明矿区复垦后土壤容重逐渐接近原地土壤容重,土壤含水量也有较大的提升;曹银贵等^[14]认为复垦时间对土地复垦及生态系统恢复十分重要。土壤生物学特性包括土壤微生物生物量和土壤微生物数量等,由于环境的变化可以显著影响土壤微生物特性,因此是反映土壤质量变化的敏感因子^[15],可快速表征微生物的活跃性,在土壤养分循环中发挥着不可或缺的作用^[16]。在矿区不合理的采矿活动改变了土壤中的环境状况,从而影响了土壤微生物的分布和数量,表明了土壤微生物可以准确的指示出土壤质量^[17]。Mummey等^[18]研究表明相较于与之相邻的未受干扰的土壤,复垦土壤在细菌数量、真菌数量以及微生物生物量方面均有显著的提高。李智兰对矿区复垦土壤微生物数量进行了研究,结果表明细菌数量占微生物总数的99.3%以上,占绝对优势^[19]。尚文勤^[20]也对矿区复垦土壤微生物进行了研究,发现土壤中微生物的数量随着生物演替逐渐增加。Helingerova等^[21]研究表明复垦后土壤微生物生物量增长更快。研究表明矿区生态修复效果与环境因子之间存在着密切的相关性,土壤是矿区恢复过程中最基本的因素之一,影响着矿区恢复效果和速度^[22]。

针对双龙沟废弃矿区生态环境状况,当地政府于2005年立项,2006—2009年投入500多万元,实施了“双龙沟采金区地质环境治理”1、2期工程;2009—2014年,通过生态建设项目完成投资254.6万元^[1],一系列措施使得双龙沟内的生态环境得到了初步恢复,然而对修复后的矿区废弃地土壤物理性质和微生物特性的变化报道较少。因此本研究立足当前双龙沟废弃矿区治理现状,以不同修复年限土壤为研究对象,分析了双龙沟废弃矿区土壤物理性质和微生物学特性,探讨两者的相关性,揭示它们的其变化规律,为祁连山矿区修复、土壤质量改善与恢复提供理论科学依据。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

双龙沟(37°22′24.6″N,102°25′24.8″E)位于天祝县哈溪镇,属于祁连山脉东段,处于祁连山国家自

然保护区实验区内,海拔2400~4800 m。区域内有雪山、草原、森林、高寒草甸等,植物资源丰富,乔木以青海云杉(*Picea crassifolia*)为建群种,混交少量祁连圆柏(*Juniperus przewalskii*)、红桦(*Betula albosinensis*)和山杨(*Populus davidiana*)等,灌木以高山柳(*Salix cupularis*)、杜鹃(*Rhododendron simsii*)、锦鸡儿(*Caragana sinica*)为主。曾经受到冰川(融水)及一系列复杂化学反应的影响,在双龙沟流域形成了典型的冰水堆积—阶地型砂金矿床,砂(岩)金、铜、铁、煤炭等矿产资源丰富^[23-24]。双龙沟因受到20世纪80年代掀起的“淘金热”影响,使用大规模人工、机械进行采金活动,让这里的河床伤痕累累,严重破坏了当地地质环境,生态系统呈现不同程度的退化^[25]。

1.2 研究方法

1.2.1 样地选择 试验于2021年9月进行,走访并查阅双龙沟土地使用记录,采用时空替代法,选择试验区修复土壤结构相似且没有受自然因素和因人为因素影响的试验区地段,在保证样地成土母质相同或者相似的情况下,分别选择治理时间为2 a、5 a、10 a的修复地为试验样地,并以没有治理的矿区废弃地为对照样地(CK),共4个样地。

1.2.2 样品采集 在4个样地内分别设置3个2 m×10 m的大样方,在每个样方内对角分别布设两个土样采样点(1 m×1 m),3个样方共6个土壤采样点,由6个样本单位构成一个土壤样本。在剖面分别按0~5、20~25和40~45 cm土层取土样,同一样地、同一土层所采取的6个土样混合均匀后为一个土样,用四分法取两份带回实验室分析,1份实验室用于测定土壤理化性质;另1份用于测定土壤微生物特性。

1.3 土壤物理性质的测定

土壤含水率的测定方法^[26]:以重量百分数表示土壤含水率,用土壤中所含水分重量占烘干土重的百分数来表示,计算公式为:

$$\text{土壤含水率(重量\%)} = (\text{原土重} - \text{烘干土重}) / \text{烘干土重} \times 100\% = \text{水重} / \text{烘干土重} \times 100\%$$

土壤容重的测定采用环刀法^[27]:将环刀托放在容积为100 cm³的环刀上,将环刀刀刃口向下垂直压入土中,直至环刀筒中充满土样为止。

土壤粒径用马尔文激光粒度仪测定(用Malvern Mastersizer 2000激光粒度仪测土壤的机械组成

成分)。

1.4 土壤微生物相关因子的测定

采用平板表面涂抹法^[28]测定土壤3大类微生物,其中细菌选择牛肉膏蛋白胨作为培养基;真菌选择马丁-孟加拉红作为培养基;放线菌选择改良高氏一号作为培养基。

土壤微生物生物量测定:采用氯仿熏蒸培养法^[29],对土壤微生物生物量(土壤微生物生物量碳、土壤微生物生物量氮、土壤微生物生物量磷)进行测定。

1) 测量土壤微生物生物量氮(SMBN)使用凯氏定氮法。计算公式为:

$$\text{SMBN}(\text{mg/kg}) = (E_n - E_{n0})/k_2$$

2) 测量土壤微生物生物量磷(SMBP)使用钼蓝比色法。计算公式为:

$$\text{SMBP}(\text{mg/kg}) = (E_p - E_{p0})/k_3$$

3) 测量土壤微生物生物量碳(SMBC)使用 $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7\text{--H}_2\text{SO}_4$ 外加热法。计算公式为:

$$\text{SMBC}(\text{mg/kg}) = (E_c - E_{c0})/k_1$$

式中: E_{c0} 代表没有经过处理的原始土壤提取液中的有机碳、 E_{n0} 代表没有经过处理的原始土壤提取液中的全氮、 E_{p0} 代表没有经过处理的原始土壤提取液中的磷含量、 E_c 代表经过熏蒸处理后的土壤提取液中的有机碳、 E_n 代表经过熏蒸处理后的土壤提取液中的全氮、 E_p 代表经过熏蒸处理后的土壤提取液中的磷含量; E_c 的校正系数为0.38,用 k_1 来代表, E_n 的校正系数为0.54,用 k_2 来代表, E_p 的校正系数为0.40,用 k_3 来代表。

1.5 数据处理

试验数据采用SPSS26.0软件进行分析处理,用单因素方差分析和相关性分析,在差异显著条件下采用LSD进行多重比较,并使用Excel 2021软件进行制表和作图。

2 结果与分析

2.1 不同修复年限土壤理化性质变化特征

2.2.1 不同修复年限土壤容重的变化 通过对双龙沟废弃矿区不同修复年限土壤容重的测定分析发现(表1),随着修复年限的不断延长,土壤容重均小于对照样地(CK),其中0~5 cm的土层中土壤容重随着修复年限的增加呈减少的趋势,在修复10 a时达到最小,

为0.921 g/cm³,变化范围为0.921~1.202 g/cm³。20~25、40~45 cm土层随修复年限的增加轻微的波动。总体来看,修复2 a的样地上,土壤容重的平均值最大,为1.22 g/cm³,在修复10 a时,土壤容重的平均值最小,为1.12 g/cm³。在修复2 a和5 a的样地中,土壤容重随土层深度的增加,呈现出先增加后减少的趋势,其中20~25 cm的土层中土壤容重最大,分别为1.261、1.296 g/cm³。在修复10 a的样地中,土壤容重随土层深度的增加,呈现出增加的趋势,最大值出现在40~45 cm土层,为1.223 g/cm³。总体来看,修复2、5和10 a土壤容重空间分布均表现为表层低于深层。

2.2.2 不同修复年限土壤含水量的变化 随着修复年限的不断延长,各层土壤的含水量均呈增加的趋势,并在修复第10年的时候超过CK,是样地含水量的2.4倍。其中0~5 cm土层土壤含水量随修复年限的延长有较大幅度的增加趋势,变化范围为3.24%~27.51%;而20~25 cm和40~45 cm土层土壤含水量增加幅度较小。从垂直方向上来看,在修复2 a的样地中,土层深度的增加对土壤含水率的影响不大;在修复5 a的样地中,土壤含水率随土层深度的增加呈现出增加的趋势,其变化范围5.247%~7.877%;在修复10 a的样地中,土壤含水率变化幅度最大,其随着土层深度的增加呈现出先减少后增加的趋势,变化范围为9.823%~27.510%(表1)。

2.2.3 不同修复年限土壤粒径变化 土壤机械组成按粒径 ≤ 5 、5~10、10~25、25~50、50~80 mm、 ≥ 80 mm分为6个等级(表2)。其中在0~5 cm土层除 ≥ 80 mm的粒径随修复年限的延长呈先增加后减少的趋势外,其他各级粒径均呈减少的趋势,并最终在修复10 a时低于对照样地;20~25 cm土层各级土壤粒径整体呈随修复年限的延长而逐渐减少的趋势,同样在修复10 a时低于对照样地;0~45 cm的土层 ≥ 80 mm的粒径占比最大,分别达到30%和33%(图1),其次是 ≤ 5 mm的粒径,而5~10 mm的粒径含量最少,整体土壤粒径随修复年限的延长呈减少的趋势。垂直方向结果表明,各级土壤粒径随土层深度的增加并没有表现出明显的变化规律。

表1 不同修复年限土壤容重、含水量的变化

Table 1 Changes of soil bulk density and water content in different remediation years

土层/cm	修复年限/a	容重/(g·cm ⁻³)	含水量/%
0~5	CK	1.344 ± 0.098 ^a	6.890 ± 3.267 ^b
	2	1.202 ± 0.091 ^{ab}	3.240 ± 0.901 ^b
	5	1.040 ± 0.138 ^{bc}	5.247 ± 2.807 ^b
	10	0.921 ± 0.122 ^c	27.510 ± 20.465 ^a
20~25	CK	1.379 ± 0.059 ^a	6.037 ± 1.359 ^{ab}
	2	1.261 ± 0.176 ^a	3.247 ± 1.491 ^b
	5	1.296 ± 0.037 ^a	6.367 ± 3.120 ^{ab}
	10	1.219 ± 0.011 ^a	9.823 ± 1.458 ^a
40~45	CK	1.356 ± 0.196 ^a	7.620 ± 1.719 ^{ab}
	2	1.213 ± 0.100 ^a	3.223 ± 2.482 ^b
	5	1.200 ± 0.029 ^a	7.877 ± 5.776 ^{ab}
	10	1.223 ± 0.154 ^a	12.867 ± 3.292 ^a

注:同列不同小写字母表示不同修复年间差异显著($P<0.05$),下同。

2.3 不同修复年限土壤微生物群落结构变化特征

2.3.1 不同修复年限土壤3大类微生物数量的变化

1) 细菌。双龙沟废弃矿区不同修复年限的土壤3大类微生物数量随修复年限的延长均有不同程度的变化,其中细菌有绝对优势,占微生物总数的96.74%,而放线菌和真菌仅占0.290%和0.003%。细菌随着修复年限的延长,整体呈增加的趋势,并现在修复5 a时超过CK,其中表层(0~5 cm)土壤中细菌含量随着修复年限的延长呈先增加后减少的趋势,20~25、40~45 cm土层细菌含量随修复年限的延长呈现逐渐增加的趋势。从空间上看,在修复2 a和5 a的样地上,土壤中的细菌数量随着土层深度的加深而逐

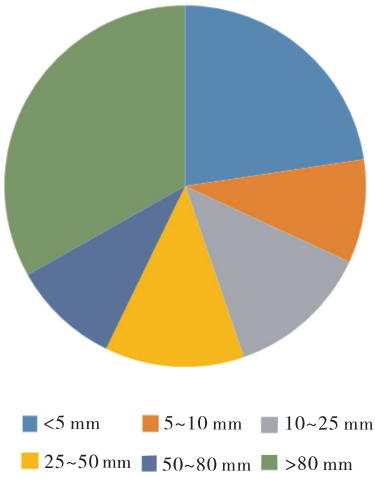


图1 不同大小粒径占比

Fig. 1 Proportions of particle sizes

渐减少;在修复10 a的样地上,随着土层深度的加深,土壤中细菌数量呈现出先增加后减少的趋势,并且40~45 cm土层的细菌含量低于表层(0~5 cm)土壤的含量(表3)。

2) 真菌数量的变化。随着修复年限的增加,表层(0~5 cm)土壤真菌数量呈现出增加的趋势,并且在修复2 a时,表层土壤中的真菌数量超过CK;20~25 cm土层的真菌数量随修复年限的延长呈先增加后降低的趋势,并且在修复5 a时增幅较大;40~45 cm土层真菌数量随修复年限的延长呈逐渐增加的趋势,并且在修复10 a时真菌数量超过CK;总体来看,真菌数量随着修复年限的延长整体呈增加的趋势。从空间上看,不同修复年限样地上的真菌数量均表现为表层(0~5 cm)大于深层(40~45 cm),即随着土层深度的增加,

表2 不同修复年限土壤粒径的变化

Table 2 Change of soil particle size in different remediation years

土层/ cm	修复年 限/a	粒径/mm					
		≤5	5~10	10~25	25~50	50~80	≥80
0~5	CK	2.435 ± 0.830 ^b	1.960 ± 1.077 ^a	2.188 ± 0.570 ^b	2.223 ± 0.615 ^{ab}	2.193 ± 0.464 ^a	3.483 ± 0.432 ^b
	2	7.739 ± 1.970 ^a	2.726 ± 1.358 ^a	3.353 ± 1.206 ^a	3.509 ± 1.746 ^a	2.364 ± 0.508 ^a	4.195 ± 2.193 ^{ab}
	5	4.179 ± 0.569 ^b	1.458 ± 0.888 ^{ab}	2.022 ± 1.175 ^b	1.487 ± 0.936 ^{bc}	1.038 ± 0.947 ^b	6.952 ± 2.225 ^a
	10	3.079 ± 1.124 ^b	0.469 ± 0.562 ^b	0.666 ± 0.753 ^c	0.633 ± 0.695 ^c	0.802 ± 0.762 ^b	4.197 ± 1.253 ^{ab}
20~25	CK	3.202 ± 0.643 ^{ab}	2.002 ± 0.562 ^a	2.753 ± 0.775 ^a	2.333 ± 0.802 ^{ab}	2.070 ± 1.209 ^a	10.773 ± 6.006 ^a
	2	4.714 ± 2.447 ^a	2.194 ± 1.802 ^a	2.398 ± 0.357 ^a	3.005 ± 1.806 ^a	1.580 ± 0.868 ^{ab}	9.642 ± 2.040 ^a
	5	3.928 ± 1.186 ^{ab}	1.900 ± 0.543 ^a	2.558 ± 0.612 ^a	2.478 ± 0.753 ^a	2.087 ± 1.091 ^a	1.775 ± 1.176 ^b
	10	2.242 ± 0.448 ^b	0.468 ± 0.091 ^b	0.794 ± 0.174 ^b	1.073 ± 0.469 ^b	0.753 ± 0.540 ^b	5.317 ± 0.634 ^{ab}
40~45	CK	3.036 ± 0.888 ^b	1.963 ± 0.755 ^a	2.962 ± 0.677 ^b	3.184 ± 1.291 ^a	2.445 ± 2.024 ^a	4.187 ± 0.397 ^b
	2	7.897 ± 3.492 ^a	2.174 ± 0.573 ^a	4.094 ± 0.967 ^a	3.376 ± 1.391 ^a	3.103 ± 2.603 ^a	10.028 ± 3.756 ^a
	5	3.566 ± 1.202 ^b	1.923 ± 0.689 ^a	2.649 ± 0.520 ^b	2.501 ± 0.382 ^a	1.396 ± 1.173 ^a	3.683 ± 2.061 ^b
	10	2.604 ± 0.220 ^b	0.589 ± 0.272 ^b	1.216 ± 0.852 ^c	1.017 ± 0.390 ^b	0.817 ± 0.777 ^a	7.002 ± 2.112 ^{ab}

真菌数量呈现出明显的减少趋势,表现出明显的表聚现象(表3)。

3) 放线菌数量的变化。随着修复年限的增加,表层(0~5 cm)土壤放线菌的数量呈先增加后减少的趋势,并在修复 5 a 时远远大于 CK,是对照样地表层放线菌数量的 3 倍。20~25、40~45 cm 土层放线菌数量随修复年限的延长变化幅度不大。从垂直方向上看,不同修复年限矿区废弃地土壤中的放线菌数量均表现为随着土层深度的增加,呈逐渐减少的趋势,并且表层(0~5 cm)土层中的放线菌数显著多于 20~45 cm 土层,有明显的表聚性(表3)。

2.3.2 不同修复年限土壤微生物生物量的变化 1) 土壤微生物生物量碳的变化。随着修复年限的延长,表层(0~5 cm)土壤的微生物量碳呈现逐渐增加的趋势,变化范围为 100.599~385.562 mg/kg;20~25 cm 土层中的含量随修复年限的延长呈先下降后上升的趋势;40~45 cm 土层,随修复年限的延长呈上升趋势,变化范围为 126.146~264.561 mg/kg。总体来看,随着修复时间的延长,土壤微生物量碳呈上升趋势,并在修复 2 a 时超过 CK。从垂直方向上看,修复 5 a 以后表层土壤中微生物量碳含量均高于深层(40~45 cm),表现出一定的表聚现象(表4)。

2) 土壤微生物生物量氮的变化。随着修复年限

的延长,表层(0~5 cm)土壤的微生物量氮呈现出先增加后减少的趋势,变化范围为 14.295~132.388 mg/kg;20~25 cm 土层中的微生物量氮的变化趋势与表层的类似,但变化幅度较小;40~45 cm 土层中的微生物量氮随修复年限的延长呈先减少后增加的趋势,变化范围为 74.161~112.941 mg/kg。总体来看,试验区土壤中的微生物量氮在修复 5 a 时含量最大,总体呈现先增加后减少的趋势。从垂直方向上看,在修复 2 a 和 10 a 的样地上,土壤中的微生物量氮随土层深度的增加呈现出增加的趋势,并且随着修复年限延长,增加幅度减小。在修复 5 a 的杨地上,微生物量氮随土层深度的增加呈现逐渐减少的趋势(表4)。

3) 土壤微生物生物量磷变化。随着修复年限的不断延长,微生物量磷整体呈现出增加的趋势,并在修复 5 a 时超过 CK,是对照样地含量的 1.8 倍。其中表层(0~5 cm)土壤的微生物量磷随修复年限的延长增幅较大,变化范围是 8.495~24.414 mg/kg。40~45 cm 土层的微生物量磷随修复年限的延长增幅较小,其变化范围是 5.511~14.860 mg/kg。从垂直方向上看,相同修复年限的微生物量磷随土层的加深而呈现逐渐减少的趋势,表层(0~5 cm)土壤微生物生物量磷显著高于 20~25、40~45 cm 土层的,可见,土壤微生物生物量磷随着土层深度增加逐渐减小,表现出明显的表聚现象(表4)。

表 3 不同修复年限土壤 3 大类微生物数量的变化

Table 3 Changes in the number of three major types of soil microorganisms in different remediation years

土层/cm	修复年限/a	细菌/(10^6 cfu·g $^{-1}$)	真菌/(10^4 cfu·g $^{-1}$)	放线菌/(10^4 cfu·g $^{-1}$)
0~5	CK	1.75±0.12 ^c	0.70±0.12 ^b	12.63±8.42 ^b
	2	1.25±0.91 ^c	1.74±0.83 ^b	11.15±7.34 ^b
	5	4.65±0.99 ^a	1.73±0.22 ^b	36.756±11.44 ^a
	10	5.39±2.05 ^b	3.80±0.63 ^a	28.51±10.36 ^{ab}
20~25	CK	3.12±2.14 ^b	0.54±0.12 ^{bc}	4.07±3.52 ^a
	2	0.47±0.31 ^b	0.20±0.00 ^c	5.40±4.21 ^a
	5	2.26±0.44 ^b	1.62±0.32 ^a	4.23±0.00 ^a
	10	4.91±4.14 ^a	0.86±0.21 ^b	5.71±4.45 ^a
40~45	CK	1.48±0.21 ^{ab}	0.64±0.37 ^b	2.12±0.00 ^a
	2	0.42±3.64 ^b	0.28±0.12 ^b	4.90±3.21 ^a
	5	1.08±0.94 ^b	0.29±0.12 ^b	3.60±1.24 ^a
	10	5.35±4.01 ^a	1.28±0.21 ^a	4.99±3.267 ^a

2.4 土壤物理性质与微生物的关系分析

双龙沟矿区废弃地土壤物理性质与微生物之间表现出不同程度的相关性,土壤容重与微生物生物

量和 3 大类微生物数量均呈负相关关系,其中与微生物量磷、真菌、细菌呈显著负相关关系($P<0.05$),与放线菌呈极显著负相关关系($P<0.01$);

表 4 不同修复年限土壤微生物生物量的变化
Table 4 Changes of soil microbial biomass in different remediation years

土层/cm	修复年限/a	微生物量碳/(mg·kg ⁻¹)	微生物量氮/(mg·kg ⁻¹)	微生物量磷/(mg·kg ⁻¹)
0~5	CK	83.994±32.774 ^b	72.832±16.560 ^{ab}	5.555±1.488 ^b
	2	30.937±79.937 ^b	14.295±3.233 ^b	8.495±4.180 ^{ab}
	5	20.445±89.445 ^a	132.388±18.124 ^a	19.625±3.031 ^{ab}
	10	385.562±64.619 ^a	69.745±3.436 ^{ab}	24.414±5.667 ^a
20~25	CK	35.078±95.078 ^b	100.609±25.581 ^a	10.760±2.957 ^{ab}
	2	50.784±122.784 ^{ab}	81.280±16.577 ^a	7.206±1.810 ^b
	5	138.063±78.503 ^b	127.520±20.563 ^a	15.251±4.900 ^{ab}
	10	350.393±55.549 ^a	101.897±22.153 ^a	19.014±3.227 ^a
40~45	CK	31.871±151.871 ^a	126.981±62.036 ^a	9.054±3.398 ^a
	2	48.273±128.273 ^a	112.941±59.493 ^a	5.511±2.036 ^a
	5	212.112±39.536 ^a	74.161±13.258 ^a	10.294±2.396 ^a
	10	264.561±60.175 ^a	104.526±18.206 ^a	14.860±8.668 ^a

含水量除了与微生物量氮呈负相关关系外,与微生物量碳、磷和 3 大类微生物数量均呈正相关关系,其中与放线菌呈显著正相关关系($P<0.05$);土壤的机械组成与微生物特性总体呈负相关关系,其中 <5 、 $5\sim10$ 和 $10\sim25$ mm 的粒径与微生物量碳呈极显著负相关关系($P<0.01$); $5\sim10$ 、 $10\sim25$ 和 $25\sim50$ mm 的粒径与细菌呈极显著负相关关系($P<0.01$)(表 5—6)。

表 5 不同修复年限土壤物理性质与微生物变化的相关性
Table 5 Correlation between soil physical properties and microbial changes in different remediation years

土壤物理性质	微生物量碳	微生物量氮	微生物量磷	真菌	细菌	放线菌
容重	-0.31	-0.12	-0.40 [*]	-0.37 [*]	-0.34 [*]	-0.58 ^{**}
含水量	0.16	-0.07	0.18	0.24	0.24	0.36 [*]

注:* 在 0.05 水平上显著相关。** 在 0.01 水平上极显著相关。

表 6 不同修复年限土壤机械组成与微生物变化的相关性
Table 6 Correlation between soil mechanical composition and microbial changes in different remediation years

土壤微生物	粒径/mm					
	<5	5~10	10~25	25~50	50~80	>80
微生物量碳	-0.49 ^{**}	-0.57 ^{**}	-0.63 ^{**}	-0.38 [*]	-0.39 [*]	0.10
微生物量氮	-0.24	-0.14	-0.17	-0.08	-0.15	0.18
微生物量磷	-0.20	-0.32	-0.52 ^{**}	-0.44 ^{**}	-0.06	-0.25
细菌	-0.37 [*]	-0.55 ^{**}	-0.55 ^{**}	-0.58 ^{**}	-0.30	0.03
真菌	-0.24	-0.39 [*]	-0.35 [*]	-0.54 ^{**}	-0.06	-0.24
放线菌	0.03	-0.17	-0.18	-0.29	-0.01	-0.13

注:* 在 0.05 水平上显著相关,** 在 0.01 水平上极显著相关。

3 讨论

3.1 不同修复年限土壤物理性质变化特征

土壤物理性质是反映矿区土地生态功能恢复的重要指标之一^[30],而矿区修复后的土壤的物理性质往往较差^[31]。本研究发现研究区 CK 的土壤容重达到 1.379 g/cm³,说明土壤结构过于紧实,而修复后土壤容重均小于对照样地,该结果与谭学进^[32]等的研究结

果一致,说明随着修复年限的增加,双龙沟矿区废弃地土壤物理结构逐渐得到了改善,其改良的结果随着年限的延长而逐渐增强。从垂直方向上来看,同一年限不同土层深度的土壤容重无明显的变化规律。这一结果与李玉婷^[33]等的研究结果不一致,其原因可能是本研究区位于祁连山高海拔地区,在生态修复过程中不便使用大型机械,因此研究区土壤未受到大型机

械碾压,因此表层土壤容重和深层土壤容重没有明显的变化。本研究结果表明含水量随修复年限延长呈增加的趋势,进一步说明随着矿区废弃地修复的进行,土壤容重变小,土壤的结构性得到优化,入渗能力增强,因此土壤中的水分也得到相应的改善,这与土壤的物理性质的变化是相对应的。这一结果与CAO等^[34]和PAN等^[35]对重构土壤物理性质的研究结果相一致。在垂直方向上含水量则在修复5 a时,表现出随土层深度的加深含水量增加的趋势,而在修复2 a的样地上没有明显的变化规律,说明矿区废弃在进行修复后土壤质量的恢复存在一定的滞后性^[36]。土壤粒径特征不仅反映了土壤结构和生产力情况,还决定了矿区修复后土壤的结构与质地^[37]。研究数据可以看出双龙沟废弃矿区进行多年的综合修复后,土壤的粒径发生了较大的变化,结果显示除 ≥ 80 mm粒径无明显变化规律外,其他各粒径随着修复年限的增加总体表现出减少的趋势,并且5~10、10~25、25~50、50~80 mm的粒径,在修复10 a时均少于对照样地中的含量。这一结果表明,土壤粒径逐渐向细化的趋势变化,土壤的物理结构得到逐步改善,致使大颗粒在逐渐减少^[38],这有利于土壤中养分固持能力的增强。总体上看,双龙沟废弃矿区修复后土壤物理性质有明显改善。研究证明,通过合理的人工修复,可以使废弃矿区土壤生产力得到显著的改善^[25]。

3.2 不同修复年限土壤微生物的变化特征

3大类土壤微生物数量可以影响其生态功能,土壤质量的改善情况与其数量的增加密不可分^[39]。矿区生态修复增加了根系的分泌物、根际沉积物以及凋落物,因此创造了一个更适宜微生物生长发育的空间,使微生物能够有效的恢复^[40]。本研究中,细菌占微生物总数的96.74%,具有绝对优势,其次是放线菌,而真菌数量最少,这可能是由于双龙沟废弃矿区中土壤呈中性偏碱性,对细菌生长发育更加有利,使得细菌成为了优势菌,而土壤呈中性偏碱性抑制了真菌的生存。因此细菌数量的占比远远大于其他两类,另外总体来看土壤3大类微生物数量均呈现出随土层深度的加深而减少的趋势,这可能受到土壤中有机质的含量的影响,有机质对细菌和真菌非常有益,可以为微生物的生长发育提供充足的碳源、氮源和能量^[41]。并且在修复10年的样地中,细菌和真菌的数量

均超过了未进行修复的对照样地。

土壤微生物量的大小和活性取决于人为因素和植被类型等多种因素^[42]。土壤微生物生物量为土壤养分提供了能量,是土壤中最活跃的因子,因此土壤微生物生物量成为当前国内外热点研究之一^[43]。本研究中土壤微生物量碳和微生物量磷随着修复年限的延长,整体呈增加的趋势,这主要是由于修复年限的增加,植物不断生长发育,根系会逐渐增多,使土壤养分不断积累。随着修复年限的增加,土壤微生物量碳和微生物量磷随土层的加深而降低,这是因为在表层土聚集了大量凋落物,增加了土壤养分,适宜微生物活动,并且表层土通气状况和水热条件较好,使微生物的生长更加旺盛,对土壤中多种养分的有效性产生积极影响,因此表现出明显的表聚性。

3.3 土壤物理性质与微生物的相关分析

双龙沟矿区废弃地修复后土壤物理性质和微生物之间具有较强的相关性。土壤的物理特性是土壤生态系统健康与否的重要指标之一,决定了土壤的紧实度,进而影响土壤透水性、通气性等^[44],在土壤微生物活动、养分的转化中起着十分重要的作用^[13]。因此,土壤物理性质与微生物的生长发育密切相关^[11]。土壤物理性质为土壤微生物提供适宜的生境,并且主要通过控制水分含量、温度变化等条件间接影响微生物群落组成、养分循环和代谢活性^[45],而土壤微生物学特征对土壤的质量影响很大,土壤微生物生物量的多少,能够用来表征微生物新陈代谢功能的程度,土壤微生物繁殖、发育以及死亡的过程就是养分在土壤中释放与固定循环的过程^[46]。本研究中不同修复年限下,土壤容重与微生物生物量和三大类微生物数量均呈负相关关系,含水量总体和微生物学特性呈正相关关系,而容重和含水量则呈极显著负相关关系。这一结果李世清^[47]、王党朝^[13]等的研究结果一致,表明土壤含水量、土壤容重是影响微生物特性变化的重要因子。本研究表明土壤的机械组成与微生物特性总体呈负相关关系,这一结果与Seaton F M等^[48]的研究一致,即研究区土壤粒径随着修复年限的延长逐渐向细化的方向发展,而质地越细的土壤中微生物多样性和微生物量就越高,因为土壤小粒径中有更好的养分含量和适宜的微环境,可以为微生物提供一定的保护和滋养。

4 结论

双龙沟矿区废弃地随着修复年限的增加,土壤结构得到较大的改善,其中土壤容重呈减少的趋势,并低于对照样地;含水量也随修复年限延长呈增加的趋势;土壤粒径随修复年限的延长逐渐向细化的方向发展;土壤微生物量碳和磷总体上呈增加的趋势,而微生物量氮则呈先上升后下降的趋势。细菌数量在3类微生物中占有绝对优势,总体上看,3大类微生物表现出一定的表聚性。

修复后土壤物理性质和微生物之间具有较强的相关性,其中土壤容重与微生物生物量和3大类微生物数量均呈负相关关系;含水量除了与微生物量氮呈负相关关系外,与微生物量碳、微生物量磷和3大类微生物数量均呈正相关关系;土壤的粒径大小与微生物特性总体呈负相关关系,表明矿区废弃地经过修复,显著改善了土壤结构。

参考文献:

- [1] 周怀清. 武威地区彻底整治双龙沟采金区[J]. 中国水土保持, 1999(4): 33—34.
- [2] 常丽, 吴春荣, 何芳兰, 等. 双龙沟废弃采金区人工栽植沙棘后植物群落组成和土壤性质的变化研究[J]. 中国农学通报, 2019, 35(19): 83—90.
- [3] 杨晓玫, 姚拓, 王理德, 等. 天祝不同退化程度草地植物群落结构与物种多样性研究[J]. 草地学报, 2018, 26(6): 1290—1297.
- [4] 李耀林. 天祝县双龙沟采金区河道整治思路[J]. 甘肃水利水电技术, 2001, 37(4): 290—291.
- [5] 马金宝, 罗永寿, 王英成, 等. 石羊河流域上游水源涵养型流域植被恢复重建试验示范[J]. 林业科技, 2009, 34(5): 21—24.
- [6] 于亚军, 庞碧琳. 不同复垦模式煤矸山土壤微生物、酶活性及其影响因素[J]. 干旱区资源与环境, 2018, 32(6): 160—164.
- [7] 米美霞, 邵明安, 武小刚, 等. 煤矸石和钙结石对植物生长和土壤含水量的影响[J]. 土壤学报, 2021, 58(6): 1460—1471.
- [8] 李新, 勾晓华, 王宁练, 等. 祁连山绿色发展: 从生态治理到生态恢复[J]. 科学报, 2019, 64(27): 2928—2937.
- [9] 李许娜. 矿区废弃地的土壤特征与植被恢复研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2019.
- [10] Jenny H. The Soil Resource: Origin and Behavior[M]. New York: Springer—Verlag, 1980: 23—26.
- [11] 王理德. 民勤退耕区次生草地植被及土壤系统演变研究[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2016.
- [12] 赵艳玲, 刘慧芳, 王鑫, 等. 基于无人机影像的复垦排土场地形因子与土壤物理性质的关系研究[J]. 中国煤炭, 2018, 44(9): 117—122.
- [13] 王党朝, 尚志, 余长超. 草原露天矿区重构土壤典型物理性质与生物量的关系[J]. 中国农学通报, 2020, 36(23): 60—65.
- [14] 曹银贵, 白中科, 张耿杰, 等. 山西平朔露天矿区复垦农用地表层土壤质量差异对比[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(12): 2422—2428.
- [15] 王英成, 马金宝. 哈溪双龙沟流域生态系统退化成因及恢复对策[J]. 中国林业, 2009(19): 61.
- [16] 卢研, 张倩, 张彩军. 生物土壤结皮对东祁连山高寒草甸土壤特性的影响[J]. 草原与草坪, 2022, 42(1): 13—20.
- [17] 付勇, 庄丽, 王仲科, 等. 新疆野生多伞阿魏生境土壤理化性质和土壤微生物[J]. 生态学报, 2012, 32(10): 3279—3287.
- [18] Mummey D L, Stahl P D, Buyer J S. Soil microbiological properties 20 years after surface mine reclamation: spatial analysis of reclaimed and undisturbed sites[J]. Soil Biol Biochem, 2002, 34(11): 1717—1725.
- [19] 李智兰. 矿区复垦对土壤养分和酶活性以及微生物数量的影响[J]. 水土保持通报, 2015, 35(2): 6—13.
- [20] 尚文勤, 朱利平, 孙庆业, 等. 自然生态恢复过程中尾矿废弃地土壤微生物变化[J]. 生态环境, 2008, 17(2): 713—717.
- [21] Helingerova M, Frouz J, Santruckova H. Microbial activity in reclaimed and unreclaimed post—mining sites near Sokolov (Czech Republic) [J]. Ecol Eng, 2010, 36(6): 768—776.
- [22] 王君芳. 内蒙古草原区典型露天矿生态修复植被和土壤特征研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2020.
- [23] 李汉业, 张峰. 甘肃省双龙砂金矿床成因的研究[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 1994, 30(4): 122—126.
- [24] 吕海元. 双龙沟废弃矿区植被恢复干扰因素调查分析[J]. 农业与技术, 2015, 35(6): 7.
- [25] 李永强, 赵萌莉, 韩国栋, 等. 不同年限草原撂荒地土壤理化特性研究[J]. 中国草地学报, 2012, 34(3): 61—64.
- [26] 屠丹, 毛天旭. 添加生物炭对喀斯特地区黄壤饱和导水率的影响[J]. 水土保持研究, 2021, 28(5): 108—113.

- [27] Alvarez E, Torrado V M, Marcos M, *et al.* Microbial biomass and activity in a forest soil under different tree species[J]. *Electronic Journal of Environmental Agricultural & Food Chemistry*, 2009, 8(9): 878—887.
- [28] 何振立. 土坡微生物量的测定方法: 现状和展望[J]. *土壤学进展*, 1994, 22(4): 36—44.
- [29] 付玲, 王彩云, 尹少华. 蘑菇渣基质生产狗牙根无土草皮配方施肥优化研究[J]. *草业学报*, 2013, 22(3): 241—249.
- [30] 张振佳, 曹银贵, 王舒菲, 等. 平朔黄土露天矿区复垦地表层土壤微生物与酶活性分析[J]. *生态学报*, 2021, 41(1): 110—123.
- [31] 黄雨晗, 况欣宇, 曹银贵, 等. 草原露天矿区复垦地与未损毁地土壤物理性质对比[J]. *生态与农村环境学报*, 2019, 35(7): 940—946.
- [32] 谭学进, 穆兴民, 高鹏, 等. 黄土区植被恢复对土壤物理性质的影响[J]. *中国环境科学*, 2019, 39(2): 713—722.
- [33] 李玉婷, 曹银贵, 王舒菲, 等. 黄土露天矿区排土场重构土壤典型物理性质空间差异分析[J]. *生态环境学报*, 2020, 29(3): 615—623.
- [34] Cao Y G, Wang J M, Bai Z K, *et al.* Differentiation and Mechanisms on Physical Properties of Reconstructed Soils on Open-Cast Mine Dump of Loess Area[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2015, 74(8): 6367—6380.
- [35] Pan J, Bai Z K, Cao Y G, *et al.* Influence of Soil Physical Properties and Vegetation Coverage at Different Slope Aspects in a Reclaimed Dump[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2017, 24(30): 23953—23965.
- [36] 程林森, 雷少刚, 卞正富. 半干旱区煤炭开采对土壤含水量的影响[J]. *生态与农村环境学报*, 2016, 32(2): 219—223.
- [37] 杜雅仙, 樊瑾, 李诗瑶, 等. 荒漠草原不同植被微斑块土壤粒径分布分形特征与养分的关系[J]. *应用生态学报*, 2019, 30(11): 3716—3724.
- [38] 和丽萍, 方向京, 李贵祥, 等. 昆阳磷矿植被修复土壤理化与生物学性状的典型相关分析[J]. *水土保持研究*, 2015, 22(2): 58—68.
- [39] Nishida T, Katayama N, Izumi N, *et al.* Arbuscular mycorrhizal fungi species—specifically affect induced plant responses to a spider mite[J]. *Population Ecology*, 2010, 52(4): 507—515.
- [40] 钱奎梅, 王丽萍, 李江. 矿区复垦土壤的微生物活性变化[J]. *生态与农村环境学报*, 2011, 27(6): 59—63.
- [41] 柴晓虹, 王理德, 姚拓, 等. 石羊河中下游不同退耕年限次生草地土壤理化及生物学特性研究[J]. *草业学报*, 2015, 24(8): 24—34.
- [42] 王理德. 石羊河下游绿洲边缘次生草地自然恢复过程及微生物特性的研究[J]. *草原与草坪*, 2015, 35(6): 14—20.
- [43] Garnier P, Néel C, Aita C, *et al.* Modelling carbon and nitrogen dynamics in a bare soil with and without straw incorporation[J]. *European Journal of Soil Science*, 2010, 54(3): 555—568.
- [44] 李艺锋. 植被修复对废弃矿山土壤理化性质的影响[J]. *防护林科技*, 2019, 185(2): 44—45.
- [45] 黄龙, 包维楷, 李芳兰, 等. 土壤结构和植被对土壤微生物群落的影响[J]. *应用与环境生物学报*, 2021, 27(6): 1725—1731.
- [46] 赵晓丽, 张增祥, 周全斌, 等. 中国土壤侵蚀现状及综合防治对策研究[J]. *水土保持学报*, 2002, 16(1): 40—43.
- [47] 李世清, 任书杰, 李生秀. 土壤微生物体氮的季节性变化及其与土壤水分和温度的关系[J]. *植物营养与肥料学报*, 2004, 10(1): 18—23.
- [48] Seaton F M, George P B L, Lebron I, *et al.* Soil textural heterogeneity impacts bacterial but not fungal diversity[J]. *Soil Biol Biochem*, 2020, 144: 1—10.

Soil physical properties and microbial characteristics in Shuanglonggou abandoned mining area in different restoration years

CAI Zhuo-liang^{1,2}, ZHANG Fu¹, WANG Li-de^{1,3,4*}, ZHANG Yu-kai⁵,
ZHAO He-ran^{3,4}, ZHAO Xue-cheng⁵, ZHANG Heng-ping⁵

(1. College of Forestry, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China; 2. Lanzhou Institute of landscape science, Lanzhou 730070, China; 3. Gansu Desert Control Research Institute, Lanzhou 730070, China; 4. Gansu Hexi Corridor Forest Ecosystem National Research Station, Wuwei 733000, China; 5. Haxi Station of Gansu Qilian Mountain National Nature Conservation Area Management and Protection Center, Tianzhu 733206, China)

Abstract: 【Objective】 In order to explore the soil physical properties and microbial characteristics in the abandoned land in Shuanglonggou mining area of Tianzhu Tibetan Autonomous County over different restoration years, the abandoned mining area with different restoration years (2 a, 5 a, 10 a, and ck) in Shuanglonggou was selected as the research objects. 【Method】 The temporal and spatial substitution method was used to analyze the characteristics of soil physical properties, including (unit weight, water content and mechanical composition), and soil microbial biomass (microbial biomass carbon, nitrogen, phosphorus, and the number of fungi, bacteria, and actinomycetes) in different remediation years. 【Result】 The results indicated that the bulk density of topsoil decreased with the extension of remediation years, reaching the minimum (0.921 g/cm^3) after 10 years of remediation. Soil moisture content increased with the extension of the remediation period, reaching 2.4 times that of the original land after 10 years of remediation. Soil particle size developed towards refinement with the increase in restoration years. The numbers of three types of microorganisms increased with the extension of the restoration period, with bacteria accounting for 96.74% of the total number of microorganisms, while actinomycetes and fungi only accounted for 0.29% and 0.003%, respectively, showing obvious surface aggregation. Soil microbial biomass carbon and phosphorus exhibited a trend of gradual increase, exceeding the control sample plots, with the maximum values of 385.562 mg/kg and 24.414 mg/kg, respectively, after remediation for 2 and 5 years. Microbial biomass nitrogen showed a trend of first increase and then decrease, with a range of 14.295~132.388 mg/kg. 【Conclusion】 Through the remediation of abandoned land in Shuanglonggou mining area has significantly improved the soil quality and accelerated the restoration of the mining area ecosystem to a certain extent. This research provides theoretical and scientific bases for ecological restoration and improvement of soil quality in the mining area.

Key words: shuanglonggou; abandoned mining area; repair period; soil physical properties; soil microorganism

(责任编辑 靳奇峰)