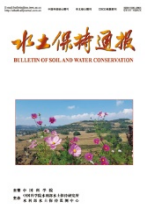


水土保持通报
Bulletin of Soil and Water Conservation
ISSN 1000-288X,CN 61-1094/X

《水土保持通报》网络首发论文

题目：　高原湿地公路工程边坡不同恢复措施下土壤理化性质及酶活性
作者：　马龙，李亚玲，刘诗琪，尹才佳，邹书珍，康迪
DOI：　10.13961/j.cnki.stbctb.20240510.001
收稿日期：　2023-11-01
网络首发日期：　2024-05-17
引用格式：　马龙，李亚玲，刘诗琪，尹才佳，邹书珍，康迪．高原湿地公路工程边坡不同恢复措施下土壤理化性质及酶活性[J/OL]．水土保持通报．https://doi.org/10.13961/j.cnki.stbctb.20240510.001

网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

DOI：10.13961/j.cnki.stbctb.20240510.001　网络首发时间：2024-05-17 19:54:53
网络首发地址：https://link.cnki.net/urlid/61.1094.X.20240517.1028.002

高原湿地公路工程边坡不同恢复措施下土壤理化性质及酶活性

马 龙[1]，李亚玲[1]，刘诗琪[1]，尹才佳[1]，邹书珍[1,2]，康 迪[1,2]
〔1.西华师范大学 生命科学学院，四川 南充 637002；
2.西南野生动植物资源保护教育部重点实验室(西华师范大学)，四川 南充 637002〕

摘　要：[目的] 研究高寒湿地高速公路工程干扰后不同恢复措施下边坡土壤理化性质及酶活性影响，为高寒湿地植被恢复模式的筛选，水土流失治理，改善生态环境提供理论依据。[方法] 以自然演替、喷播植草、草皮回覆 3 种处理边坡模式为研究对象，并以原始未扰动植被作为对照，测定土壤理化指标和土壤酶活性，分析其相互关系及影响因素。[结果] ① 3 种恢复措施与对照相比均导致土壤 pH 值、全钾显著升高($p<0.05$)，土壤有机质、全氮、细根生物量、速效钾显著降低($p<0.05$)在自然演替处理下都最小分别为 15.16(±0.15)，0.75(±0.01)，0.60(±0.27)，65.00(±4.5)；喷播植草、草皮回覆处理下土壤颗粒中黏粉粒比例显著降低($p<0.05$)；喷播植草、自然演替与对照相比丰富度指数显著降低($p<0.05$)在自然演替下最小为 1.29(±0.02)，草皮回覆与喷播植草 2 种恢复措施的土壤 pH 值、有机质、全氮、速效钾、细根生物量及其丰富度指数高于自然演替。②与自然演替相比喷播植草与草皮回覆能更好的恢复蔗糖酶、脲酶、碱性磷酸酶、过氧化氢酶活性，甚至过氧化氢酶活性能恢复至接近对照，在自然演替都最小分别为 12.65(±10.87)，0.24(±0.03)，0.23(±0.05)，1.73(±0.48)。③4 种酶活性与土壤理化性质之间相关性显著，脲酶活性对土壤理化性质最为敏感，能够很好评价高原湿地边坡土壤质量。[结论] 采取喷播植草、草皮回覆相对于自然演替可有效改善土壤理化性质和提高土壤酶活性，土壤酶活性能作为评价高原湿地边坡土壤质量的敏感性指标。

关键词：高原湿地；草皮回覆；土壤酶活性；土壤理化性质
文献标识码：A　　**文章编号：**1000-288X(2024)04-0000-00　　**中图分类号：**S154.1

文献参数：马龙，李亚玲，刘诗琪，等.高原湿地公路工程边坡不同恢复措施下土壤理化性质及酶活性[J]. 水土保持通报，2024，44(4).　Ma Long，Li Yaling，Liu Shiqi，et al. Soil enzyme activity in plateau wetland under different restoration measures after highway engineering disturbance [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation，2024，44(4).

Soil Enzyme Activity in Plateau Wetland Under Different Restoration Measures After Highway Engineering Disturbance

Ma Long[1]，Li Yaling[1]，Liu Shiqi[1]，Yin Caijia[1]，Zou Shuzhen[1,2]，Kang Di[1,2]
〔1.*College of Life Science*，*West China Normal University*，*Nanchong*，*Sichuan* 637002，*China*；2.*Key Laboratory of Southwest Wildlife Resources Conservation*，*Ministry of Education*(*West China Normal University*)，*Nanchong*，*Sichuan* 637002)，*China*〕

Abstract：[Objective] In order to understand the effects of soil physicochemical properties and enzyme activities on slopes under different restoration measures after the disturbance of alpine wetland highway projects，we aim to provide theoretical reference bases for the screening of alpine wetland vegetation restoration modes，soil erosion control，and improvement of ecological environment.[Methods] Taking the three treatment slope patterns of natural succession，spraying grass planting and turf cover as the research

收稿日期：2023-11-01　　**修回日期：**2024-02-27
资助项目：四川省自然科学基金项目“地震退化森林木本植物功能性状与环境的协同变化机制及生态策略”(2023NSFSC0143)；四川省交通运输科技项目“高原高速公路建设湿地保护与修复技术研究”(2019-ZL-19)
第一作者：马龙(1997—)，男(汉族)，四川省南充市人，硕士研究生，研究方向为恢复生态学。Email：1506521334@qq.com。
通信作者：康迪(1986—)，男(汉族)，陕西省武功县人，博士研究生，副教授，主要从事修复生态学与生态系统生态学有关研究。Email：kangyuyao@foxmail.com。

object, and using the Original undisturbed vegetation as the control, the soil physicochemical indexes and soil enzyme activities were measured, and their interrelationships and influencing factors were analyzed. [Result] ① All three restoration measures resulted in a significant increase ($p<0.05$) in soil pH and total potassium compared to the control, and a significant decrease ($p<0.05$) in soil organic matter, total nitrogen, fine root biomass, and quick-acting potassium under natural succession treatments, all with a minimum of 15.16 (±0.15), 0.75 (±0.01), 0.60 (±0.27), and 65.00 (±4.5), respectively; The proportion of clay meal particles in soil particles was significantly lower ($p<0.05$) under spray sodding and turf replanting treatments; the richness indices of spray sodding and natural succession were significantly lower ($p<0.05$) compared to the control, with a minimum of 1.29 (±0.02) under the natural succession, and the soil pH, organic matter, total nitrogen, quick potash, fine root biomass and their richness indices were higher than that of natural succession under the 2 types of restoration measures, namely, turf replanting and spray sodding. The indices were higher than those of natural succession. ② Compared with natural succession, spraying grass and turf replanting could better recover sucrase, urease, alkaline phosphatase and catalase activities, and even catalase activity could be recovered close to that of the control, with the minimum of 12.65 (±10.87), 0.24 (±0.03), 0.23 (±0.05), 1.73 (±0.48), and 1.73 (±0.05), respectively, in the natural succession. 0.48). ③ The correlation between the activities of the four enzymes and the physical and chemical properties of the soil was significant, and the urease activity was the most sensitive to the physical and chemical properties of the soil, which was able to evaluate the soil quality of the slopes of the plateau wetland very well. [Conclusion] Compared with natural succession, spraying of grass and turf can effectively improve the physical and chemical properties of soil and increase the activity of soil enzymes, which can be used as a sensitive indicator for evaluating the soil quality of slopes in plateau wetlands.

Keywords: upland wetland; turfgrass mulch; soil enzyme activity; soil physicochemical properties

西南高原湿地具有水源涵养、气候调节、储碳固碳和生物多样性等重要生态功能,但该地区生境脆弱,土壤结构松散,长期受到水力、风力和冻融侵蚀影响[1]。基础建设工程扰动后会造成表土结构破坏,继而加剧侵蚀和养分流失。不同工程创面修复措施对扰动后土壤的恢复和改良作用存在差异,已有较多研究在低海拔区域证实了土壤理化性质、土壤酶与土壤质量和抗蚀性有密切关系,是评价工程创面土壤恢复的重要指标[2-3]。

土壤酶是一类具有生物催化功能的活性蛋白质,参与许多重要的土壤生物化学过程和物质循环、腐殖质的合成与分解以及有机化合物的分解,与土壤理化性质密切相关,其活性是土壤生化过程的表征[4]。土壤酶活性作为评价土壤质量的生物活性指标,能够敏感指示土壤环境变化[5],土壤 SOC,TN 和 SMBC 等关键指标与酶活性密切相关,这表明土壤酶活性能够有效的反映土壤质量变化[6]。研究[3]表明,不同恢复措施对土壤酶活性和土壤理化性质影响差异显著。闫晗等[3]对上述结论的进一步研究表明,在某些情况下,人工修复措施比自然恢复更能改善土壤质量;对不同类型人工恢复边坡的最新研究发现:植被混凝土、厚层基材两种人工恢复手段对工程扰动边坡的土壤养分持续性和土壤酶活性有积极影响,而不同生态修复类型对这些因素的影响存在显著差异。综上,这些研究均强调了修复措施对土壤生化指标恢复的重要性,但不同环境条件下的研究结果是有差异的,故不同生境需要更加针对性的研究来验证。土壤酶活性对温度和水分是高度敏感的,在高原湿地特殊水热条件下,公路工程边坡不同恢复措施下土壤理化性质和土壤酶活性对比研究依然较为缺乏,即扰动后不同修复措施影响土壤养分与酶活性的特征及机理有关科学问题仍不清楚。

青海省久治至四川省马尔康高速公路(久马高速)为《国家高速公路网规划(2013—2030 年)》中穿越西南高原湿地首条开工建设高速公路,其后还有 6 条规划中的高速公路待建,均涉及川西高原湿地生态屏障区,因此其土壤恢复有关研究对于后续公路工程建设乃至高寒湿地其他基础设施建设均有重要的指导意义和参考价值。本研究基于野外调查和室内试验分析,以其最为典型的 3 种边坡恢复类型(自然演替、喷播植草、草皮回覆)和对照样地(原始植被)的土壤理化性质及土壤酶活性进行分析研究。本研究提出以下两点假设:①不同恢复措施下的土壤理化性质和土壤酶活性存在差异,草皮回覆与喷播植草具有

较好的土壤恢复效能；②土壤酶活性与土壤养分是高度协同的，土壤酶活性可以作为评估高原湿地工程边坡土壤质量恢复的敏感指标。研究结论可为我国西南高原生态屏障区生态保护、植被恢复和湿地水土治理提供理依据。

1　材料与方法

1.1　研究区域与样地概况

研究样地位于阿坝县及毗邻的红原县境内（东经101°42′0″—102°23′42″，北纬32°26′49.1″—32°54′46.8″），属大陆性高原寒温带季风气候，该地气候寒冷湿润，年平均温度为1.8 ℃，累积降水量为743.3 mm，5—8月降水量占全年降水量的78%～80%，雨日多达188 d，强度小，蒸发微弱，冻结时间长。地处北东—南西走向山脉，平均海拔3 000 m以上，其东南为深切峡谷，西北为相对较为平坦的松潘高原，地处中国最大的高原泥炭沼泽—若尔盖泥炭积聚区（图1）。

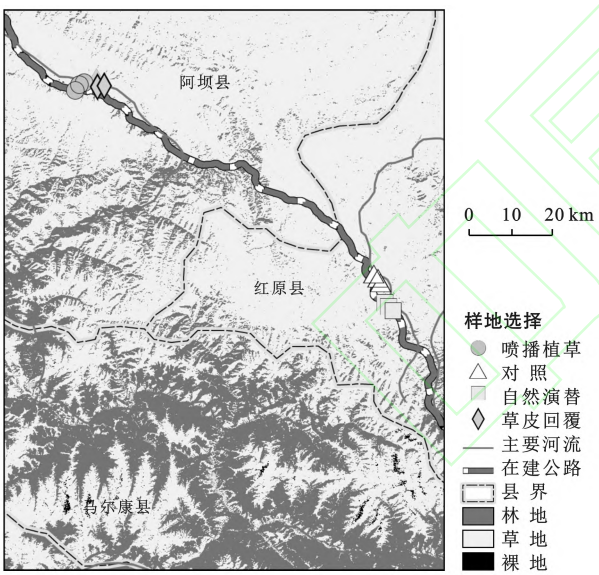


图1　九马高速区位及不同恢复措施样点分布

Fig.1　Location of Jiuma expressway and distribution of sample points for different restoration measures

1.2　研究方法

2021年7月，在阿坝藏族羌族自治州境内久马高速公路沿线以典型边坡的3种不同恢复措施（自然演替、喷播植草、草皮回覆）为研究对象。其中，自然演替为原基面向下开挖形成的原位土壤边坡，边坡形成后覆网封育保护处理，即抑尘网覆盖后近自然恢复，未经施肥等其他处理；喷播处理方式为喷播草籽悬混液后自然恢复；草皮回覆则采用施工前剥离保存的草皮回覆坡面处理；对照为工程迹地附近未扰动的原始植被群落。为达到对不同恢复措施下高原湿地土壤酶活性研究的目的，本研究所选自然演替、喷播植草均为2020年底形成后圈定，在充分防止二次破坏的前提下使其自然演替。草皮回覆边坡2021年3—5月完成回覆试验开始自然生长。每个恢复措施边坡选取3个重复样方为对象，每个样方中随机选取3个点，各样地土壤质地经测定均以粉壤土为主，生境条件相似。土壤理化因子测定采用内径为4.5 cm的土钻采集土样，采样深度为0—10 cm，将每个样点土样混合作为待测土样，土样带回实验室自然风干后进行土壤理化性质及酶活性等各项指标的测定。此外还进行草本层的种类、数量、株高和盖度及物候期等调查，同时记录各样地地理信息，包括海拔高度、经纬度、坡度、坡位、坡向、样地面积及土壤信息和群落信息等。

1.3　数据处理与分析

（1）土壤化学性质的测定。采用电位法测定土壤pH值；容量法测定土壤有机质；凯氏蒸馏法测定土壤全氮；采用浓硫酸—高氯酸消煮—钼锑抗比色法测定土壤全磷；氢氧化钠熔融—火焰光度计法测定土壤全钾；钼锑抗比色法测定土壤有效磷；采用浓度为1.0 mol/L的乙酸铵浸提—火焰光度法测定土壤速效钾[7]。

（2）土壤物理性质的测定。采用密度计法测定土壤机械组成，各物理性质的测定参照张万儒的《森林土壤分析方法》[8]。

（3）群落α多样性指数反映了群落物种的丰富程度和分布的数学期望，是了解群落结构组成的基础。本研究选取了最常用的1种α多样性指数，其计算公式为：

Margalef丰富度指数（M_a）

$$M_a=(S-1)/\ln N \tag{1}$$

式中：N为全部种的个体数总数；S为群落中的物种数[9]。

（4）细根样品的采集及处理。于2021年7月，在各样方随机选择3个样点，用内径为9 cm的根钻采集细根样品。取样深度为0～10 cm，装袋后带回室内用流水在孔径为0.2 mm筛上进行冲洗，洗净后按颜色、弹性等挑拣出≤2 mm的活细根，将挑拣出的细根置于烘箱内于80 ℃温度下烘干至恒重后称质量，根据采样体积和其中细根干重计算细根生物量[10]。

（5）土壤脲酶活性采用苯酚—次氯酸钠比色，土壤蔗糖酶活性采用3,5-二硝基水杨酸比色法，过氧化氢酶使用钼酸铵比色法，碱性中性磷酸酶活性采用磷酸苯二钠比色法[11]。

采用 Office Excel 2010 软件对原始数据进行预处理以及丰富度指数计算；使用 IBM SPSS 21 软件对数据进行统计与分析，采用单因素方差检验分析各结果在不同样本间的差异性；将 4 种土壤酶活性看成一个酶系统，使用 R 4.2.3 进行 mantel test 分析酶系统与土壤理化性质之间关系；使用 RDA 分析不同土壤酶活性与土壤理化性质间相关性；采用 ArcGIS 10.2 进行研究区概况图绘制；采用软件 Origin 9.2 绘制不同恢复措施下边坡土壤酶活性特征柱状图，以及土壤酶活性与土壤理化特征的 RDA 分析图。

2 结果分析

2.1 不同恢复措施下边坡土壤理化性质特征

研究不同恢复措施（自然演替、喷播植草、草皮回覆）下边坡土壤理化性质，结果表明，不同恢复措施下土壤理化性质存在显著性差异。①土壤 pH 值变化特征如表 1 所示，表现为：喷播植草＞草皮回覆＞自然演替＞对照，在喷播植草处理下最大为 8.05，与对照相比增加 2.57 达到中等碱性。②土壤有机质、全氮与对照相比显著降低，均表现为：对照＞草皮回覆＞喷播植草＞自然演替，在自然演替处理下的最小值分别为 15.16，0.75，与对照相比分别降低了 478.41 和 16.21，3 种恢复措施与对照均存在显著差异（$p<0.05$）。全磷与对照相比显著降低，表现为：对照＞喷播植草＞自然演替＞草皮回覆，在草皮回覆处理下最小为 0.72 与对照相比降低 0.88，3 种恢复措施与对照均存在显著差异（$p<0.05$）。全钾与对照相比显著增加，表现为：自然演替＞喷播植草＞草皮回覆＞对照，在自然演替处理下最大为 20.79，与对照相比增加 13.02。除全钾外，人工恢复类样地土壤全量养分均低于原始对照样地。③土壤速效养分变化特征如表 1 所示，有效磷与对照相比显著增加，表现为：自然演替＞草皮回覆＞喷播植草＞对照，在自然演替处理下最大，与对照相比增加了 8.38。速效钾与对照相比显著降低，表现为对照＞草皮回覆＞喷播植草＞自然演替，在自然演替处理下最小为 65.00 与对照相比降低 127.00。土壤速效养分含量的变化范围表现出不同恢复措施边坡在养分积累与分解上的较大差异。④黏粒变化特征如表 1 所示，表现为：自然演替＞对照＞草皮回覆＞喷播植草，在自然演替处理下最大。粉粒变化特征，表现为：对照＞自然演替＞草皮回覆＞喷播植草，粉粒在对照最大。砂粒变化特征，表现为：喷播植草＞草皮回覆＞自然演替＞对照，在喷播植草处理下最大。总体上看，黏粒与粉粒变化趋势相同，与砂粒趋势相反。⑤细根生物量与对照相比显著降低，表现为：对照＞草皮回覆＞喷播植草＞自然演替，在自然演替处理下最小为 0.60，与对照相比细根生物量降低了 97.33，3 种恢复措施与对照均存在显著差异（$p<0.05$）。丰富度指数变化特征，表现为：对照＞草皮回覆＞喷播植草＞自然演替。

表 1 不同恢复措施下边坡土壤理化性质及植被相关

Table 1 Soil physical and chemical properties under different restoration measures

因子类别	土壤化学性质						
处 理	pH 值	土壤有机质/（g·kg^{-1}）	全氮/（g·kg^{-1}）	全磷/（g·kg^{-1}）	全钾/（g·kg^{-1}）	有效磷/（mg·kg^{-1}）	速效钾/（mg·kg^{-1}）
对 照	5.48±0.03^{c}	493.57±108.51^{a}	17.01±3.80^{a}	1.60±0.37^{a}	7.77±1.64^{c}	1.60±0.60^{b}	192±28.55^{a}
自然演替	6.58±0.47^{bc}	15.16±0.15^{b}	0.75±0.01^{b}	0.77±0.08^{b}	20.79±0.43^{a}	9.98±1.42^{a}	65±4.50^{c}
喷播植草	8.05±0.03^{a}	25.56±3.19^{b}	1.16±0.05^{b}	0.80±0.08^{b}	18.79±0.70^{a}	5.43±1.23^{b}	86.5±14.00^{bc}
草皮回覆	6.95±0.87^{ab}	48.21±3.10^{b}	2.38±0.18^{b}	0.72±0.01^{b}	16.21±0.27^{b}	5.77±2.70^{ab}	135±30.50^{ab}
因子类别	土壤物理机械结构			植被相关			
处 理	黏粒/%	粉粒/%	砂粒/%	细根生物量/（kg·m^{-3}）	Margalef 丰富度指数		
对 照	14.61±0.70^{a}	26.20±0.29^{a}	59.19±0.99^{b}	97.93±13.10^{a}	1.74±0.01^{a}		
自然演替	15.29±0.25^{a}	24.75±4.08^{a}	59.96±4.33^{b}	0.60±0.27^{b}	1.29±0.02^{b}		
喷播植草	5.12±1.00^{b}	10.30±1.13^{b}	84.58±2.13^{a}	5.01±1.22^{b}	1.43±0.01^{b}		
草皮回覆	5.78±2.98^{b}	11.10±6.55^{b}	83.12±9.54^{a}	11.53±0.57^{b}	1.70±0.18^{a}		

注：表中数据为平均值±标准误；每列数字后的字母表示处理间差异显著性（$p<0.05$）。

2.2 不同恢复措施下土壤酶活性特征

研究不同恢复措施下边坡土壤酶活性特征（图 2），结果表明，不同恢复措施下土壤酶活性存在一定的差异。不同恢复措施下蔗糖酶、脲酶、碱性磷酸酶活性与对照相比显著降低，均表现为：对照＞草皮回覆＞喷播植草＞自然演替，其活性在自然演替处理下

都最小分别为 12.65，0.24，0.23，与对照相比分别降低 173.22，3.15 和 7.06，3 种恢复措施与对照存在显著差异（$p<0.05$）。从图 2 可以看出，不同恢复措施下过氧化氢酶活性，表现为：对照＞草皮回覆＞喷播植草＞自然演替，过氧化氢酶活性在自然演替处理下最小为 1.73，与对照相比降低 3.12。草皮回覆、喷播植草 2 种恢复措施下 4 种土壤酶活性都高于自然演替，其过氧化氢酶活性甚至可以恢复到对照水平，且草皮回覆、喷播植草之间没有显著差异。

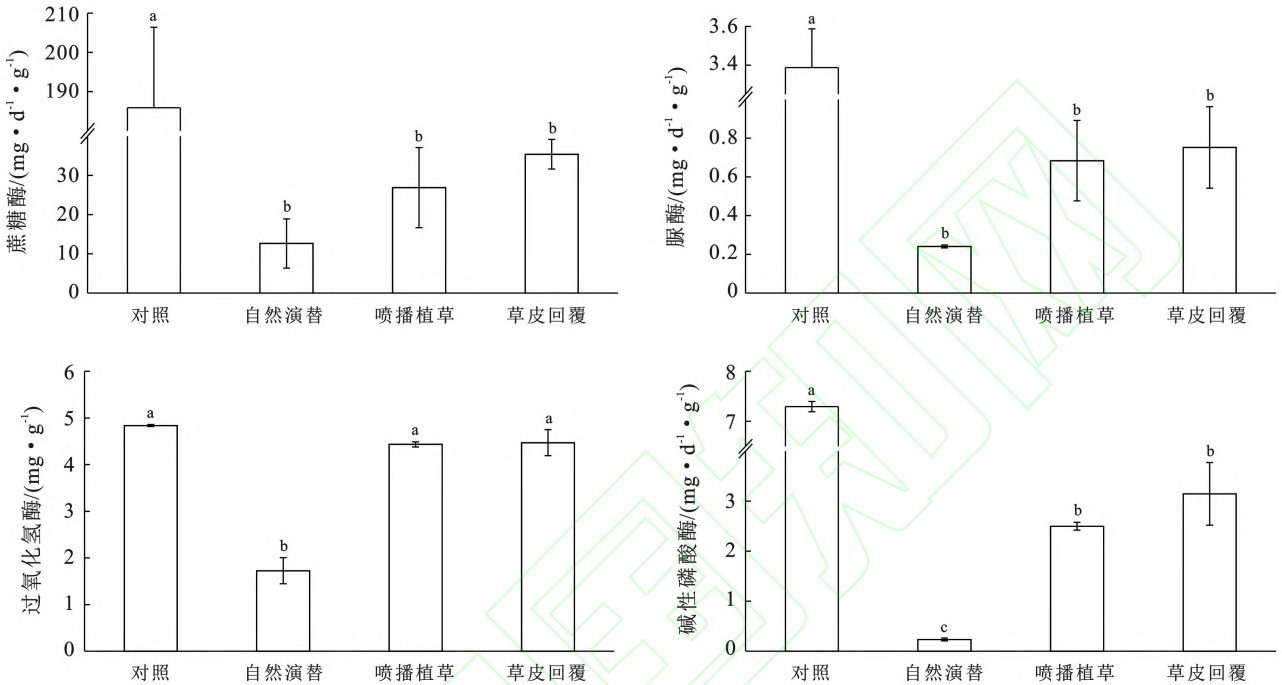


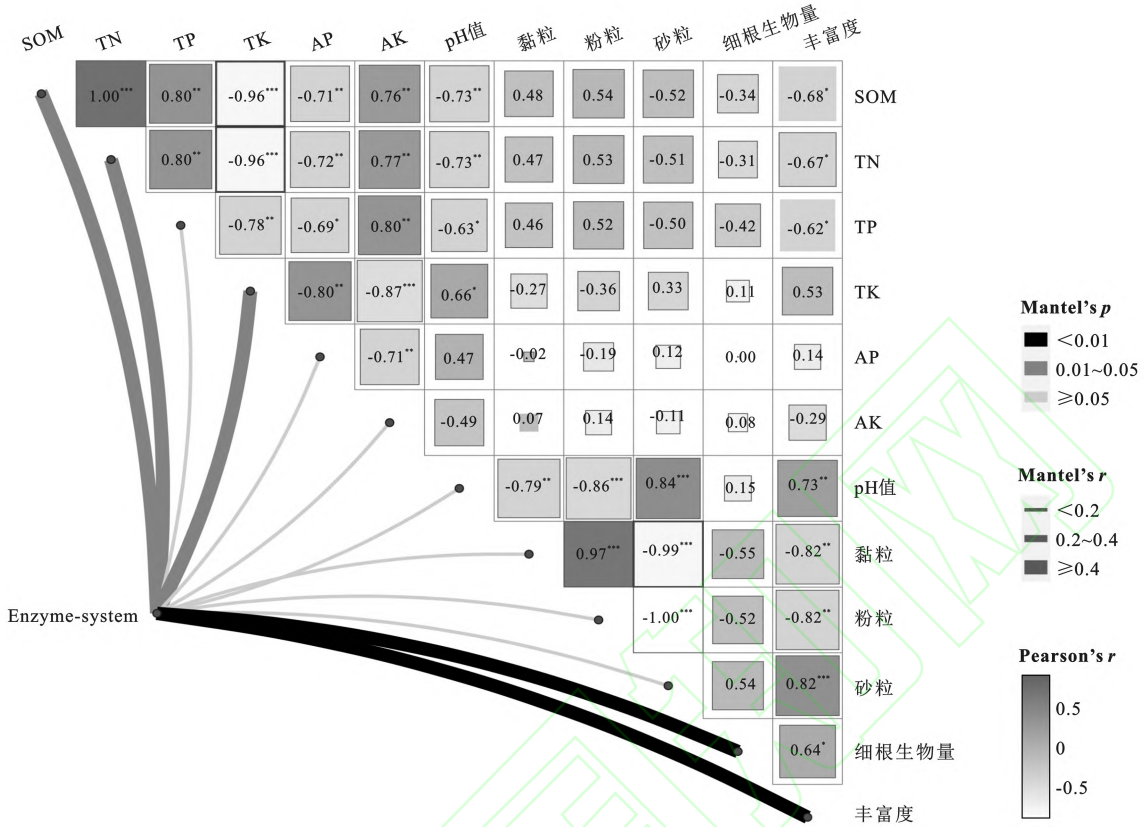
图 2　不同恢复措施下边坡土壤酶活性特征

Fig.2　Characteristics of soil enzyme activity in slope under different restoration measures

2.3　土壤酶活性与土壤理化性质的关系

不同恢复措施下边坡土壤酶活性与土壤理化性质的相关性如（图 3）所示，结果表明，土壤酶系统活性与丰富度指数、细根生物量（$p<0.01$），TK，TN，SOM（$0.01<p<0.05$）相关性显著。丰富度指数与细根生物量（0.64*）、土壤砂粒（0.82***）、pH（0.73**）相关性强，丰富度指数与土壤粉粒（−0.82***）、土壤黏粒（−0.82***）、TP（−0.62*）、TN（−0.67*）、SOM（−0.68*）负相关性强；细根生物量与丰富度指数（0.64*）相关性强。TK 与 AP（0.80**）、pH（0.66*）相关性强，TK 与 SOM（−0.96***）、TN（−0.96***）、AK（−0.87***）、TP（−0.78***）负相关性强；TN 与 SOM（1.00***）、TP（0.80**）、AK（0.77**）相关性强，TN 与 TK（−0.96***）、AP（−0.72**）、pH（−0.73**）、丰富度（−0.67*）负相关性强；SOM 与 TN（1.00***）、TP（0.80**）、AK（0.76**）相关性强，SOM 与 TK（−0.96***）、AP（−0.71**）、pH（−0.73**）、丰富度（−0.68*）负相关性强。

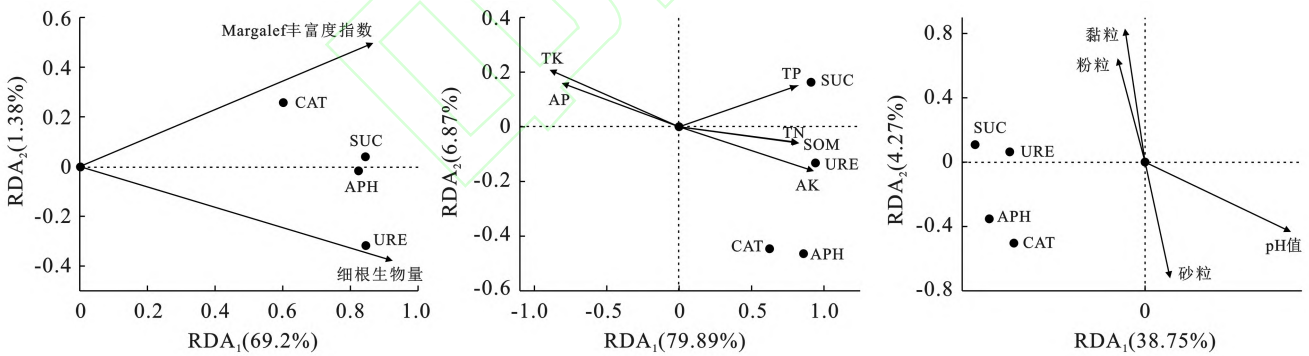
研究不同恢复措施下边坡 4 种土壤酶活性分别与土壤理化性质之间关系，由图 4 可以看出，4 种酶活性与丰富度呈正相关，表现为过氧化氢酶相关性最强，脲酶相关性最弱；与细根生物量呈正相关，表现为脲酶相关性最强，过氧化氢酶相关性最弱。黏粒和粉粒与蔗糖酶、脲酶呈正相关，表现蔗糖酶＞脲酶，与过氧化氢酶、碱性磷酸酶呈负相关，表现为：过氧化氢酶＞碱性磷酸酶；砂粒与过氧化氢酶、碱性磷酸酶呈正相关，表现为：过氧化氢酶＞碱性磷酸酶，与蔗糖酶、脲酶呈负相关，表现为蔗糖酶＞脲酶；4 种酶活性与 pH 值呈负相关，表现为与蔗糖酶和脲酶相关性强于碱性磷酸酶和过氧化氢酶。4 种酶活性与 TP，TN，SOM，AK 呈正相关，TP 表现为蔗糖酶最强；TN 和 SOM 箭头几乎重合到一起，是因为本研究全氮和有机质相关性（1.00***）极强，表现为与脲酶相关性最强；AK 表现为，与脲酶相关性最强，与其余 3 种酶相关性都较弱。4 种酶活性与 TK，AP 呈负相关，均表现为脲酶相关性最强，与剩下 3 种酶相关性都较弱。



注:右上角为环境因素指标的两两相关性热图,用颜色梯度表示 Pearson 的相关系数。通过偏地理距离校正试验,将蔗糖酶、土壤脲酶、过氧化氢酶和碱性磷酸酶看成一个酶系统与每个环境因子相关。线宽对应距离相关性的 Mantel's r 统计量,线颜色表示基于 999 次统计的显著性。

图 3 基于土壤酶活性与土壤理化特征的 partial Mantel test 分析

Fig.3 Partial Mantel test analysis based on soil enzyme activity and soil physicochemical characteristics



注:SUC:蔗糖酶 URE:脲酶 CAT:过氧化氢酶 APH:碱性磷酸酶

图 4 基于土壤酶活性与土壤理化特征的 RDA 分析

Fig.4 RDA analysis based on soil enzyme activity and soil physicochemical characteristics

3 讨论

3.1 不同恢复措施对土壤理化性质的影响

与未经扰动的原始边坡相比,不同边坡修复技术对土壤养分、质地、植被相关带来的影响不尽相同。本研究中,3 种不同恢复措施均导致土壤 pH 值上升,喷播植草与对照相比显著增加($p<0.05$)达到中等碱性,自然演替、草皮回覆则增加至中性,其原因是在进行喷播植草时需要添加保水剂、pH 缓冲剂(石灰)等[12],该研究地工程边坡对原生土壤进行了扰动,可能混入了部分建筑渣体,其内含物硅酸盐水泥等为碱性物质,可能导致 pH 值上升。杨鑫光等[13]人发现,土壤 pH 值随着植被恢复年限的增加而增加,土壤由酸性逐步向中性过渡,以更好适应植被恢复生长。

不同恢复措施下有机质、全氮、全磷与对照相比显著降低($p<0.05$),参照全国第二次土壤普查养分

分级标准[14],草皮回覆有机质、全氮均处于极高(1级)水平,自然演替、喷播植草有机质分别处于中(4级)和中上(3级)水平以及全氮都处于中上(3级)水平,3种恢复措施全磷均处于中(4级)水平。全钾与对照相比显著增加($p<0.05$),3种恢复措施全钾处于中上(3级)水平。

土壤速效养分虽然含量较低,但能有效表征养分的可利用性[15],不同恢复措施下有效磷与对照相比有所增加,自然演替处理与对照相比显著增加($p<0.05$),参照全国第二次土壤普查养分分级标准[14],3种恢复措施有效磷均处于中(4级)水平,表明不同恢复措施对土壤中磷的可利用性较强。速效钾与对照相比有所降低,喷播植草、自然演替与对照相比显著降低($p<0.05$),参照全国第二次土壤普查养分分级标准[14],喷播植草、自然演替速效钾质量分数处于中(4级)和草皮回覆处于中上(3级)水平,表明不同恢复措施对土壤中钾的可利用性较强。本研究发现在工程边坡修复后土壤中速效钾和全钾表现规律不一致。具体而言,当速效钾和全钾表现规律一致,例如何群等[16]在人工植被恢复时发现全钾、速效钾含量变化一致,崔高仰等[17]在石漠化治理过程发现土壤速效K随时间增加的变化趋势与全K类似;而当速效钾和全钾表现规律不一致,例如严雨洁等[2]在研究不同修复类型边坡土壤养分及土壤酶活性特征,发现单以土壤钾营养而言,样地之间差异显著,且速效钾含量差异大,天然林土壤全钾含量显著低于人工恢复样地,而速效钾含量仅低于植被混凝土边坡,该结果和本研究中不同恢复措施与对照在土壤钾元素上的变化相似,且速效钾含量主要与植物吸收和土壤矿化作用相关,可见3种恢复措施下钾素含量较高,其植物对钾素吸收能力较强。关于土壤中速效钾和全钾表现规律是复杂的,有待在今后进一步研究中证实。

自然演替处理下土壤颗粒中黏粉粒比例与对照相比差异不显著;喷播植草、草皮回覆处理下土壤颗粒中黏粉粒比例与对照相比显著降低($p<0.05$)。研究表明,土壤颗粒中黏粉粒比例越高,越易与有机质形成矿质复合体,进而有利于土壤中碳、氮、磷素的固定与保存[18]。罗亚勇等[19]发现随着高寒草甸的退化,砂粒含量呈增加趋势,黏粉粒呈降低趋势,土壤pH值逐步增加,土壤有机质、全N和全P含量呈降低趋势,全K含量逐渐增加,该结果与本研究中不同恢复措施下部分土壤理化性质的变化相一致。

不同恢复措施下细根生物量与对照相比显著降低($p<0.05$),其原因是限制草本细根生物量积累的因素有土壤TP含量、土壤C∶N,N∶P[20],而本研究3种恢复措施下土壤有机质、全氮、全磷与对照相比显著降低,限制草本细根生物量积累。喷播植草与草皮回覆2种恢复措施的细根生物量及其丰富度指数高于自然演替,其原因是喷播植草技术中有复合肥掺入[12],更有利于早期优势物种入驻,使边坡植被快速重建。此外草皮回覆处理下丰富度指数与对照(原始植被)相比差异不显著,是因为草皮回覆采用施工前剥离保存的草皮回覆坡面处理有利于保持地上植物多样性。

3.2　不同恢复措施对土壤酶活性的影响

本研究发现土壤酶活性具有一致的变化规律,与对照相比,3种恢复措施下土壤蔗糖酶、脲酶、碱性磷酸酶活性显著降低($p<0.05$),均表现为对照>草皮回覆>喷播植草>自然演替。本研究中草皮回覆土壤酶活性与对照相比显著,其原因是虽然草皮回覆采用施工前剥离保存的草皮进行回覆坡面处理,但陈蓓等[21]研究发现移栽草皮群落与原生群落物种特征值有差异,人为干扰的草皮植物群落在结构与功能方面发生了退化,这也是在丰富度没有显著差异下其酶活性显著降低相吻合。

蔗糖酶和脲酶活性与对照相比显著降低($p<0.05$),在自然演替最低,而草皮回覆、喷播植草之间没有显著性差异,是因为蔗糖酶、脲酶都属于水解酶类,可将复杂大分子转化为植物易吸收的小分子物质,与土壤碳氮循环密切相关[4],且本研究中不同恢复措施下土壤有机质、全氮、细根生物量与对照相比显著降低,草皮回覆、喷播植草之间差异不显著,而自然演替最低,植被覆盖度小,枯落物量少,酶促底物不充分导致2种酶活性降低。在红树林潮滩各红树群落土壤中的蔗糖酶活性均大于蛋白酶、脲酶和酸性磷酸酶,说明蔗糖酶是最活跃的水解酶,能很好的反映土壤的生物学活性强度和土壤熟化程度[22]。本研究中土壤中的蔗糖酶活性均大于其余酶活性,在高原泥炭湿地也支持其蔗糖酶是最活跃的水解酶的论点。

草皮回覆、喷播植草的过氧化氢酶活性与对照相比没有显著性差异且数值相差不大,甚至其活性能恢复到接近对照水平,而自然演替与对照及另外2种恢复措施相比显著降低($p<0.05$),原因是过氧化氢酶属于氧化还原酶类,与能量的获得与释放有关,其活性受植物根系垂直分布直接影响,根系越密集,过氧化氢酶活性越高[23],草皮回覆与喷播植草之间差异不显著,而自然演替的细根生物量最低,植物根系代谢加快,也有助于土壤酶活性增高[24]。过氧化氢酶与蔗糖酶活性之间呈极显著正相关关系[25],该结果与本研究中不同恢复措施下2种酶活性的变化相一

致。崔羽等[26]发现汶川地震受损区受损治理区过氧化氢酶活性与未受损区均无显著差异相似，闫晗等[3]发现工程复垦能够显著提高过氧化氢酶活性，严雨洁等[2]也发现人工恢复类样地过氧化氢酶活性均显著高于天然林，与本研究人工恢复措施下过氧化氢酶恢复至对照水平的结果相印证，其原因可能是由于工程干扰后土壤破碎化与土壤重分布使过氧化氢酶活性呈随机分布趋势。现阶段关于土壤过氧化氢酶的研究尚存在争议，我们仅仅是基于对高原泥炭湿地过氧化氢酶活性进行研究讨论，具体原因还有待于我们以后的研究。

碱性磷酸酶活性与对照相比显著降低($p<0.05$)，在自然演替最低，而草皮回覆、喷播植草之间没有显著性差异，其原因是碱性磷酸酶能促进有机磷化合物的分解，其活性还能表征土壤中磷素供应状况，与土壤肥力有关[27]，且其活性与土壤有机质之间也存在极显著的正相关[22]。刘存歧等[22]在崇明东滩湿地的研究表明，碱性磷酸酶活性与土壤TP呈显著的正相关，高的有机质含量能够吸附大量的有机磷，诱导碱性磷酸酶活性的产生，同时有机质也能够为微生物提供电子受体，因此高的有机质导致高的酶活性[28]。本研究中土壤有机质、全氮、全磷与对照相比显著降低，导致其活性与对照相比显著降低，且由于自然演替措施下土壤有机质、全氮最低，所以其活性显著低于人工恢复类样地。

综合不同恢复措施下样地土壤酶活性分析结果，人工恢复类样地酶活性之间差异不显著且整体高于自然演替，其活性也能反映出恢复区域土壤质量在不同程度上有所提高。草皮回覆与喷播植草2种恢复措施的土壤pH值、有机质、全氮、速效钾、细根生物量及其丰富度指数高于自然演替，其原因可能是由于人工治理能够迅速提高地表植被种类和数量，减少降水对土壤冲刷，促进生态系统的生物化学循环过程，有利于加快生态恢复的演替过程[26]。草皮回覆与喷播植草2种人工恢复措施相较于人工参与较少的自然演替恢复措施能更好的恢复土壤中4种酶活性。

3.3 土壤酶与土壤理化性质的关系

土壤酶系统与丰富度指数、细根生物量($p<0.01$)相关性极其显著，TK，TN，SOM($0.01<p<0.05$)相关性显著。本研究中土壤有机质与全氮、全磷、速效钾间均呈极显著正相关($p<0.01$)以及全氮与全磷间呈极显著正相关($p<0.01$)这与陈模芳等[29]研究发现土壤有机质与全氮、碱解氮、全磷间均呈极显著正相关($p<0.01$)，全氮与碱解氮、全磷间呈极显著正相关($p<0.01$)结果相似，表明随着有机质的积累有助于改善土壤结构，也说明土壤各养分间的累积与消耗有着互相协同促进的关系，这充分证明了土壤全氮来源于有机质。

RDA分析结果表明，土壤理化性质和酶活性之间相关性显著。蔗糖酶、脲酶与丰富度指数、细根生物量、黏粒粉粒、TP，TN，SOM，AK显著正相关，与pH、砂粒、TK，AP负相关。蔗糖酶、脲酶都属于水解酶类，能水解多糖、蛋白质等大分子物质，从而形成简单的、易被植物吸收的小分子物质，对于土壤生态系统中的碳、氮循环具有重要作用[4]，张丽娜等[30]发现影响蔗糖酶活性的主要养分因子是全N、速效K和全K，与本研究中土壤酶活性和土壤养分关系的结果一致，有机质必须经过微生物分解、转化才能释放出可供植物根系直接吸收的氮、磷元素[31]。脲酶对土壤中氮素转化和分解受的影响较大，是因为脲酶将土壤中的尿素水解释放出$N-NH4^{+}$，能酶促有机质分子中肽键的水解[4]，所以与土壤中的SOM和TN呈现正相关，而有机质主要是通过间接影响土壤生物和植物的生命活动来影响蔗糖酶活性[31]。韩福贵等[32]研究发现脲酶与全氮呈极显著正相关，与速效磷及速效钾呈极显著负相关，与全磷呈显著相关，可用脲酶活性表征土壤的氮素状况，与本研究土酶活性和土壤养分关系的结果一致。王友保等[33]研究发现蔗糖酶活性与植被状况相关性最强，脲酶活性与植被状况有显著相关性，这与本研究蔗糖酶、脲酶与丰富度指数、细根生物量呈显著正相关的结果相一致，且脲酶活性与细根生物量相关性极强，其原因可能是川西高原土壤层薄其下为砾石，细根集中于表层土壤利于降低根系生长成本其分泌物与细胞的脱落促使酶进入土壤，也提高了表层土壤酶活性[34]。

过氧化氢酶和碱性磷酸酶与丰富度指数、细根生物量、砂粒、TP，TN，SOM，AK正相关，与黏粒粉粒、pH，TK，AP负相关。王天琦等[35]研究发现过氧化氢酶受有机质和氮素含量的影响最为显著，过氧化氢酶能够破坏土壤中对生物体有毒害作用的过氧化氢，从而保护生物体提高生物活性[4]，过氧化氢酶与丰富度指数相关性最大，其原因是不同植被类型及生物量会影响土壤呼吸强度，进而影响过氧化氢酶的活性[36]，过氧化氢酶活性与土壤肥力呈正比，因此提高有机质含量可有效防止土壤中有害物质的积累，维持草地生产力。碱性磷酸酶可催化含磷化合物在土壤中的转化[4]，刘存歧等[22]研究发现碱性磷酸酶活性与全磷呈极显著的正相关而与溶解无机磷含量呈极显著的负相关，与本研究结果一致，同时溶解无机磷是碱性磷酸酶的反应产物，高含量时降低酶活性，而

低含量时诱导碱性磷酸酶的产生,碱性磷酸酶活性与总磷和溶解无机磷的存在着紧密的相互关系。张孝存等[34]研究发现黑土区坡耕地碱性磷酸酶活性与土壤有机质、全氮、碱解氮之间呈极显著正相关,本研究土酶活性和养分关系的结果一致。

综合不同恢复措施样地土壤酶活性分析结果,还发现 pH 值与土壤酶活性呈负相关,说明 pH 值也是限制该地区土壤酶活性的一个重要因素。本研究中 4 种酶活性与土壤理化性质相关性显著,说明土壤酶活性可以用来表征部分土壤肥力状况,用土壤酶活性来评价土壤肥力指标是可行的。然而,本研究涉及指标并不全面,未来还需要进行更加深入的研究。

4　结 论

川西高原湿地公路边坡不同恢复措施下,土壤理化性质和酶活性及其植被相关均存在一定差异。与自然演替相比,草皮回覆与喷播植草恢复措施能提高部分土壤养分,更好地恢复植被状况和 4 种酶活性,过氧化氢酶活性甚至能恢复到对照水平。说明合理运用人工修复手段有利于提高和维持工程扰动边坡土壤养分的持续稳定。

不同恢复措施下土壤 4 种酶活性与土壤理化性质及植被相关均达到显著相关,用土壤酶活性作为评价高原湿地边坡土壤肥力的敏感性指标是重要且有效的,其中脲酶活性对土壤理化性质最为敏感,能够更好的用来评价高原湿地边坡土壤恢复状况。

[参 考 文 献]

[1] 崔豪,蔡道明,黄金权,等.久马高速公路建设工程水土流失防治难点与对策[J].绿色科技,2022,24(24):81-86.
Cui Hao, Cai Daoming, Huang Jinquan, et al. Difficulties and Countermeasures of Water and Soil Loss Prevention in Jiuma Expressway Construction Project. [J] Journal of Green Science and Technology, 2022,24(24):81-86.

[2] 严雨洁,夏露,赵冰琴,等.向家坝工程扰动区不同修复类型边坡土壤养分及土壤酶活性特征[J].长江流域资源与环境,2020,29(9):2005-2015.
Yan Yujie, Xia Lu, Zhao Bingqin, et al. Characteristics of Soil Nutrients and Soil Enzyme Activities in Different Restoration Models of Xiangjiaba Project [J] Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2020,29(9):2005-2015.

[3] 闫晗,葛蕊,潘胜凯,等.恢复措施对排土场土壤酶活性和微生物量的影响[J].环境化学,2014,33(2):327-333.
Yan Han, Ge Rui, Pan Shengkai, et al. Effects of restoration measures on soil enzyme activities and micobial biomass in the coalmine dump [J] Environmental Chemistry, 2014,33(2):327-333.

[4] 王理德,王方琳,郭春秀,等.土壤酶学研究进展[J].土壤,2016,48(1):12-21.
Wang Lide, Wang Fanglin, Guo Chunxiu, et al. Review: Progress of Soil Enzymology [J] Soils, 2016,48(1):12-21.

[5] Sinsabaugh R L, Hill B H, Follstad Shah J J. Ecoenzymatic stoichiometry of microbial organic nutrient acquisition in soil and sediment [J]. Nature, 2009, 462(7274):795-798.

[6] 王振芬.三江平原湿地不同土地利用方式对土壤养分及酶活性的影响[J].水土保持研究,2019,26(2):43-48.
Wang Zhen fen.Characteristics of Soil Nutrients and Enzyme Activity Under Different Types of Land Use in Wetland of Sanj iang Plain [J] Research of Soil and Water Conservation, 2019,26(2):43-48.

[7] 鲍士旦.土壤农化分析[M].3 版.北京:中国农业出版社,2000.
Bao Shidan. Soil agrochemical analysis [M]. 3 ed. Beijing: China Agricultural Press, 2000.

[8] 张万儒.森林土壤分析方法[M].北京:中国标准出版社,1999.
Zhang Wanru. Methods of forest soil analysis [M]. Beijing: China Standard Press, 1999.

[9] Kang Di, Yin Caijia, Zhu Dahai, et al. Altitude and landslide scale regulated the assembly of grassland communities on landslides during the recovery process after the magnitude 8.0 Wenchuan earthquake, China [J]. Ecological Engineering, 2021,172(2):106413.

[10] 孙平生,任成杰,邓健,等.黄土丘陵区退耕植被细根生物量及其碳氮磷库动态变化[J].草地学报,2016,24(6):1203-1210.
Sun Ping shen, Ren Chengjie, Deng Jian. et al. Dynamics of Biomass and C, N, P Storages of Fine Root under Typical Revegetation Lands in Hilly Loess Region [J]. Acta Agrestia Sinica, 2016,24(6):1203-1210.

[11] 李振高.土壤与环境微生物研究法[M].北京:科学出版社,2008.
Li Zhengao. Soil and environmental microbiology [M]. Beijing: Science Press, 2008.

[12] 杨飞.道路边坡喷播植草防护技术研究[J].公路交通科技(应用技术版),2011,7(11):42-45.
Yang Fei. Research on road slope spraying grass protection technology [J]. Highway and Transportation Science and Technology (Applied Technology Edition), 2011,7(11):42-45.

[13] 杨鑫光,李希来,金立群,等.短期恢复下高寒矿区煤矸石山土壤变化特征研究[J].草业学报,2018,27(8):30-38.

Yang Xinguang, Li Xilai, Jin Liquan, et al. Changes in soil properties of coal mine spoils in an alpine coal mining area after short-term restoration[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2018,27(8):30-38.

[14] 全国土壤普查办公室编.中国土壤普查技术[M].北京:农业出版社,1992.
National Soil Census Office, ed. Techniques of soil census in China [M]. Beijing: Agricultural Press, 1992.

[15] 袁在翔,关庆伟,李俊杰,等.不同植被恢复模式对紫金山森林土壤理化性质的影响[J].东北林业大学学报,2022,50(1):52-57.
Yuan Zai xiang, Guan Qing wei, Li Jun jie, et al. Effect of Various Vegetation Restoration Types on Soil Physio-chemical Properties [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2022,50(1):52-57.

[16] 何群,席欢,万婷.不同植被恢复模式对红原沙化草地土壤理化性质的影响[J].四川环境,2017,36(1):35-40.
He Qun, Xi Huan, Wan Ting. Impact of Different Artificial Vegetation Restoration Pattern on the Physical and Chemical Properties of Desertification Grassland in Hongyuan County [J]. Sichuan Environment, 2017,36(1):35-40.

[17] 崔高仰,容丽,李晓东,等.喀斯特高原峡谷石漠化治理过程中土壤理化性质的变化[J].生态学杂志,2017,36(5):1188-1197.
Cui Gaoyang, Rong Li, Li Xiaodong, et al. Changes of soil physicochemical properties during rocky desertification control in karst mountain-canyon region [J]. Chinese Journal of Ecology, 2017,36(5):1188-1197.

[18] Reed, S C, Townsend A R, Taylor PG, et al. Phosphorus Cycling in Tropical Forests Growing on Highly Weathered Soils [C]. Springer Part of the Soil Biology book series; Springer: New York, NY, USA, 2011, 26:339-369.

[19] 罗亚勇,孟庆涛,张静辉,等.青藏高原东缘高寒草甸退化过程中植物群落物种多样性、生产力与土壤特性的关系[J].冰川冻土,2014,36(5):1298-1305.
Luo Yayong, Meng Qingtao, Zhang Jinghui, et al. Species diversity and biomass in relation to soil properties of alpine meadows in the eastern Tibetan Plateau in different degradation stages [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2014,36(5):1298-1305.

[20] 拓行行,李玉华,李美慧,等.六盘山 4 种典型林分林下草本细根生物量与土壤特性的关系[J].西北林学院学报,2023,38(2):53-60.
Tuo Hanghang, Li Yuhua, Li Meihui, et al. Relationship Between Fine Root Biomass of Understory H erb Layer and Soil Characteristics of Four Kinds of Stands in the Liupan Mountain [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2023,38(2):53-60.

[21] 陈蓓,孙辉,秦纪洪,等.朗川公路若尔盖湿地段人工移栽草皮的群落生态学研究[J].水土保持研究,2007,14(2):68-71.
Chen Bei, Sun Hui, Qin Jihong, et al. Community Biodiversity of Swarding Restoration Meadow for Highway Construction in the Zoige Wetland, N W Sichuan [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2007,14(2):68-71.

[22] 刘存歧,陆健健,李贺鹏.长江口潮滩湿地土壤酶活性的陆向变化以及与环境因子的相关性[J].生态学报,2007,27(9):3663-3669.
Liu Cunqi, Lu Jianjian, LI Hepeng. The landward changes of soil enzyme activities in a tidal flat wetland of the Yangtze River estuary and correlations with physico-chemical factors [J]. Acta Ecologica Sinica, 2007,27(9):3663-3669.

[23] 李志建,倪恒,周爱国.额济纳旗盆地土壤过氧化氢酶活性的垂向变化研究[J].干旱区资源与环境,2004,18(1):86-89.
LI zhiJian, Ni Heng, Zhou Aiguo. Study on Catalase Activity of Soil in Ejina Basin [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2004,18(1):86-89.

[24] 赵满兴,余光美,白二磊,等.陕北黄土高原植被恢复区土壤酶活性研究[J].土壤通报,2020,51(1):105-114.
Zhao Manxing, Yu Guangmei, BAI Erlei, et al. Seasonal Dynamics of Soil Enzyme Activity in Vegetation Restoration Area of Loess Plateau in Northern Shaanxi [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2020, 51(1): 105-114.

[25] 罗英,孙辉,唐学芳,等.珠穆朗玛峰北坡土壤过氧化氢酶与蔗糖酶活性研究[J].土壤学报,2007,44(6):1144-1147.
Luo Ying, Sun Hui, Tang Xuefang, et al.Variations of Soil Catalase and Invertase in Activity With Altitude along The North Slope of MT Everest [J]. Acta Pedologica Sinica, 2007,44(6):1144-1147.

[26] 崔羽,严思维,吴建召,等.汶川地震受损区恢复初期植物与微生物生物量、土壤酶活性对土壤呼吸的影响[J].应用与环境生物学报,2019,25(2):215-224.
Cui Yu, Yan Siwei, Wu Jianzhao, et al.Effects of plant and microbial biomass and enzyme activities on soil respiration in the preliminary stage after the Wenchuan earthquake [J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2019,25(2):215-224.

[27] 蒲琴,胡玉福,何剑锋,等.植被恢复模式对川西北沙化草地土壤微生物量及酶活性研究[J].水土保持学报,2016,30(4):323-328.
Pu Qin, Hu Yufu, He Jianfeng, et al. Effect of Vegetation Restoration Pattern on the Soil Microbial Bio-

mass and Enzyme Activity in Desertification Grassland of Northwest Sichuan [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2016,30(4):323-328.

[28] 邢培茹,郑粉莉,王彬.典型黑土区坡耕地土壤碱性磷酸酶和有机质空间分布研究[J].水土保持研究,2014,21(1):39-42.

Xing Peiru, Zheng Fenli, Wang Bin. Spatial Distribution of Soil Alkaline Phosphatase Activity and Soil Organic Matter on Sloping Farmlands in Typical Black Soil Region [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2014,21(1):39-42.

[29] 陈模芳,赵熙洲,孔维勋,等.不同土地利用方式下土壤理化性质及酶活性的特征[J].北方园艺,2023(7):87-94.

Chen Mofang,Zhao Xizhou,Kong Weixun, et al. Characteristics of Different Land Use Types on Soil Physiochemical Properties and Soil Enzymes Activity [J]. Northern Horticulture, 2023(7):87-94.

[30] 张丽娜,许丽,杨宇平,等.乌海矿区排矸场土壤酶活性及其与土壤养分的关系研究[J].内蒙古农业大学学报(自然科学版),2020,41(6):46-51.

Zhang Lina, Xu Li, Yang Yuping, et al. Study on The Soil Enzyme Activity and its Relationship with Soil Nutrients in Gangue Field in Wuhai Mining Area [J].Journal of Inner Mongolia Agricultural University (Natural Science Edition), 2020,41(6):46-51.

[31] 杨晓娟,廖超英,李晓明,等.榆林沙区樟子松林土壤酶活性与土壤化学性质的通径分析[J].干旱区资源与环境,2013,27(9):109-112.

Yang Xiaojuan, Liao Chaoyin, Li Xiaoming, et al. Path analysis of soil enzyme activities and soil chemical properties of Pinus sytvestris var.mongolicain sandy area of Yulin [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2013,27(9):109-112.

[32] 韩福贵,王理德,王芳琳,等.石羊河流域下游退耕地土壤酶活性及土壤肥力因子的相关性[J].土壤通报,2014,45(6):1396-1401.

Han Fu-gui, Wang Lide;Wang, Fanglin et al. Analysis of Relationship between Soil Enzymes Activities and Fertilities in the Field of Grain for Green in Downstream of the Shiyang RiverChinese [J]. Journal of Soil Science, 2014,45(6):1396-1401.

[33] 王友保,张莉,刘登义.灰渣场土壤酶活性与植被和土壤化学性质的关系[J].应用生态学报,2003,14(1):110-112.

Wang Youbao, Zhang Li, Liu Dengyi. Relationship among soil enzyme activities, vegetation state,and soil chemical properties of coal cinder yard [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2003,14(1):110-112.

[34] 张孝存,郑粉莉,安娟,等.黑土区坡耕地土壤酶活性与土壤养分关系研究[J].干旱区资源与环境,2013,27(11):106-110.

Zhang Xiaocun, Zheng Fenli, An Juan, et al. Relationship between soil enzyme activities and soil nutrient of a sloping farmland in the black soil region [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2013,27(11):106-110.

[35] 王天琦,李昊伦,赵占军,等.老爷岭林区退耕还林地土壤理化性质及酶活性变化规律研究[J/OL].吉林农业大学学报,1-9[2024-04-26].https://doi.org/10.13327/j.jjlau.2021.1461.

Wang Tianqi, Li Haolun, Zhao Zhanjun, et al. Study on soil properties and enzyme activity of returned farmland to forest in Laoyeling forest area [J]. Journal of Jilin Agricultural University:1-9[2024-04-26].https://doi.org/10.13327/j.jjlau.2021.1461.

[36] 莫雪,陈斐杰,游冲,等.黄河三角洲不同植物群落土壤酶活性特征及影响因子分析[J].环境科学,2020,41(2):895-904.

Mo Xue, Chen Feijie;You Chong, et al. Characteristics and Factors of Soil Enzyme Activity for Different Plant Communities in Yellow River Delta [J]. Environmental Science, 2020,41(2):895-904.