两种边坡生态修复模式土壤肥力与酶活性的变化

薛海龙[1,3]，许文年[2,3]，刘大翔[2,3]

(1. 三峡大学 生物与制药学院，湖北 宜昌 443002；2. 土木与建筑学院，湖北 宜昌 443002；
3. 三峡地区地质灾害与生态环境湖北省协同创新中心，湖北 宜昌 443002)

摘　要：[目的] 研究不同修复技术处理对边坡土壤酶活性的长期影响，以期为土壤地力培育提供理论依据。[方法] 以向家坝水电站工程扰动区代表性的天然次生林以及人工次生林为基础，测定不同坡位以及坡向土壤酶活性，探讨土壤酶活性的变化规律，分析酶活性与其他肥力因子间的相互关系。[结果] 不论阴坡还是阳坡，两种林地坡面地形部位(上坡位、中坡位、下坡位)，除土壤 pH 值降低以外，下坡位肥力因子均显著提高 1.1 倍以上，酶活性水平与肥力因子变化基本一致。除过氧酶活性增长不显著外，磷酸酶活性增长 91.67%～116.67%，脲酶活性增长 5.3%～30.01%，蔗糖酶活性增长 1.38～1.56 倍；阴坡各项指标均高于阳坡，除过氧酶以外，都增长显著。相关性分析表明，两种修复技术下，碱性磷酸酶、脲酶、蔗糖酶两两之间的正相关关系均达到极显著水平，但与过氧化氢酶活性之间相关性均不显著。[结论] 研究区肥力因子总体上呈现空间分布不均匀，沿着坡体从上至下依次增加，北坡高南坡低的趋势，说明坡位坡向影响着土壤内环境的变化进程，因此对于此类边坡坡顶和阳面的二次修复，适当追肥可以更好地进行地力培育和生态修复。

关键词：生态修复；向家坝水电站；酶活性；肥力因子；相关性分析

文献标识码：A　　**文章编号**：1000-288X(2016)04-0182-06　　**中图分类号**：S152，S158

文献参数：薛海龙，许文年，刘大翔. 两种边坡生态修复模式土壤肥力与酶活性的变化[J]. 水土保持通报，2016，36(4)：182-187. DOI：10.13961/j.cnki.stbctb.2016.04.032

Changes of Soil Fertility and Enzyme Activity on Different Standing Conditions Under Two Slope Ecological Restoration Patterns

XUE Hailong[1,2], XU Wennian[2,3], LIU Daxiang[2,3]

(1. *College of Biotechnology and Pharmaceutical, China Three Gorges University, Yichang, Hubei* 443002, *China*; 2. *College of Civil Engineering and Architecture, China Three Gorges University, Yichang, Hubei* 443002, *China*; 3. *Collaborative Innovation Center for Geo-hazards and Eco-environment in Three Gorges Area, Hubei Province, Yichang, Hubei* 443002, *China*)

Abstract: [Objective] The long-term effects of ecological rehabilitation patterns on soil enzyme activity on different standing conditions was studied to provide theory for soil cultivation and remediation. [Methods] A secondary forest and an artificial forest in disturbed area of Xiangjiaba hydropower station were selected as studying sites to measure soil enzyme activities in different slope position and slope exposure and to analyze the relationships between enzymatic activity and other fertility factors. [Results] Except of soil pH value, nutrition level in the lower slope was relatively high in comparison with that at upper and middle slope positions, it was 1.1 times or higher of the levels of the latter two positions. The changes of enzymatic activity was coincided with the indices of soil fertility along different slope positions. Excepting for the slight change of peroxide enzyme activity, other enzymes were all obvious. Among which, phosphatase activity at lower slop position increased 91.67%～116.67% in contrast with the one at upper position urease activity increased

收稿日期：2015-10-26　　**修回日期**：2016-01-28

资助项目：长江科学院开放研究基金资助项目“植被混凝土加筋系统微生物腐蚀行为与机理”(CKWV2015205/KY)；三峡大学博士科研启动基金(KJ2014B038)；国家自然科学基金项目(51278281)；湖北省教育厅优秀中青年科技创新团队计划项目(T201304)

第一作者：薛海龙(1989—)，男(汉族)，新疆自治区阿克苏市人，硕士研究生，研究方向为生态恢复与生态工程。E-mail：15549309903@163.com。

通讯作者：刘大翔(1987—)，男(汉族)，湖北省潜江市人，博士，讲师，主要从事生态修复技术方面的研究。E-mail：liudaxiang004@163.com。

5.3%～5.3%, and invertase activity increased 1.38～1.56 times. In terms of the enzymatic changes of slope exposure, except of peroxide enzyme, other enzymatic activates in shady slope behaved better than the ones in sunny slope. Correlation analysis showed that the correlations between alkaline phosphatase, urease and invertase were significant with each other. The correlations of catalase were not significant with the above three enzymes. [Conclusion] For soil fertility factors, an overall increasing trend from up slope to down slope, and a comparative high in northern slope exposure were both tested. Implying that standing condition can affect the process of soil internal environment. Therefore, for the remediation of upper slope and sunny slope, appropriate fertilization might make the cultivation of soil fertility and the ecological habitation better.

Keywords: ecological restoration; Xiangjiaba hydropower station; enzyme activity; fertility factor; correlation analysis

大型水利水电工程的兴建必然会对工程区极其脆弱的生态环境产生严重的干扰,威胁社会与经济的可持续发展[1]。解决上述问题通常采用人工方式修复,相关研究也大多集中于先锋物种配置与群落组成[2]、生物多样性、植被演替规律[3-4],修复后水土保持效益和单一生态修复土壤肥力的定性分析[5]等方面,这些研究主要集中在边坡本身,对不同修复土壤在同一地区不同坡位坡向肥力因子后期对比分析的研究相对较少。其中对于在土壤中能够反映各种生物化学过程强度和方向的酶活性的研究虽有所涉及,但大多不很全面。目前,已经有许多的有关于土壤剖面酶活性以及不同坡位对酶活性的影响的研究。前几年,Qin 等[6]在对北盘江喀斯特峡谷区的研究中得出了土壤酶活性会随着植被类型的不同而表现出差异性的规律。周玮、Zhao 等[7-8]则在对云屋山和马尾松林边坡的研究中发现了酶活性呈现出较明显的垂直分布特征。近两年还有些学者进行研究[9-10],得到了酶活性随坡位坡向变化而表现出来的空间分布规律的结论。但此类研究都是针对于一个地区单一坡体进行研究,因此存在一定的局限性,且涉及到同一地区同类坡地不同修复模式边坡坡位和坡向与土壤酶活性变化规律的关系方面的对比研究很少。为此,本研究以西南地区重大水利水电枢纽工程—向家坝水电站工程扰动区天然次生林以及人工次生林边坡土壤为研究对象,分析边坡不同坡位和坡向土壤酶活性的变化规律,为大型水利水电工程扰动区人工植被修复技术的选取和护坡绿化技术的推广应用奠定理论基础,同时为一个集修复技术、基材配制与植被选择三位一体体系的建立提供依据和可靠支撑。

1　研究区概况

金沙江向家坝水电站位于滇东北最北端,地处金沙江与横江(又名关河)交汇的三角地带,该区属南亚热带干热季风气候,是典型的干热河谷地区,干热少雨,年均气温 21～23 ℃,年均降雨量 896.2 mm。其中 6—11 月降雨占全年降雨量的 90%以上,年蒸发量在 2 500～3 000 mm,年均相对湿度 81%左右,年日照时数 2 200 h 左右。植被类型主要以灌木林、草丛为主,覆盖度高的森林植被较少。土壤的垂直地带性分布特点明显,海拔由低至高大致为:红壤—黄壤—黄棕壤—棕壤。库区各类土壤土层普遍较薄,且土壤的质地粗糙,土壤的有机质含量普遍偏低。

2　材料与方法

2.1　采样边坡种类及特征

天然次生林是指最初的天然植被遭到破坏后,再次自然生长繁衍所形成的天然植被群落。本研究对象中的天然次生林选自向家坝坝址退化乔木林边坡,土壤类型为黄棕壤,基本农化性质较好,适宜于植被生长。现覆盖植被以小乔木(山矾、柃木),灌木(红花继木、盐肤木、黄栀子、乌药等),草丛(芒、白茅、苔草等)植被类型为主。人工次生林是指本地的天然植被退化或者被破坏后,通过植被修复技术人为改良土壤性质,促使植被快速恢复而形成的植物群落。本研究对象中的人工次生林也选自向家坝坝址退化乔木林边坡,但退化情况较为严重。土壤质地粗糙,有机质含量偏低,不适宜于植被生长,后期只能通过人工喷施植被混凝土层达到生态恢复的目的。由于植被混凝土中加入了水泥和有机质,既增强了基材强度、提高了抗侵蚀性、加大与坡面的黏结性,又为植被的恢复提供了优良的生长环境。现覆盖植被已恢复到较好水平,以小灌木(红花继木、映山红等),草丛(芒)植被类型为主。

2.2　土壤样品采集

采集两种边坡土壤进行试验研究。取土前,先将边坡表面干土轻轻铲除,表面铲平,尽量不要给下部土壤施加压力,以免被压实。首先,用环刀取土,取边坡上中下坡位以及阴阳坡向土壤,每个层次取 3 个重复样,以备测定土壤容重、含水量、总孔隙度以及 pH

值等指标。然后再采用分层次多点取样法，每个层次采样量1 kg，采样时将土钻垂直压入土壤中，至钻头深度达到刻线20 cm处时停止，这时土钻中充满20 cm的土壤。将土钻取出，去除上面10 cm土壤，将下面10 cm土壤装入布袋或塑料袋中，贴上标签，做好记录。在实验室内反复按四分法弃取，留取适量土样，进行土壤理化性质和酶活性的测定。

2.3 测定方法

2.3.1 土壤理化性质测定[11] pH值采用电位法，有机质采用重铬酸钾容量法，全氮采用凯氏定氮法，全磷采用氢氧化钠熔融—钼锑抗比色法，全钾采用氢氧化钠熔融—火焰光度法，速效氮采用碱解扩散法，速效磷采用0.5 mol/L碳酸氢钠浸提—比色法。

2.3.2 土壤酶活性测定[12] 过氧化氢酶活性测定用高锰酸钾滴定法，脲酶活性测定用苯酚钠比色法，蔗糖酶活性测定用3,5-二硝基水杨酸比色法，碱性磷酸酶活性测定用磷酸苯二钠比色法。文中所测得的数据采用Excel和SPSS 19.0统计软件进行统计分析。

3 结果与分析

3.1 两种修复模式对土壤肥力的影响

不同修复技术引发土壤在生态系统的结构、养分等的改变，影响很多生态过程。因此检测土壤的肥力因子可以反映边坡防护技术中生态系统的恢复状态，主要包括pH值、有机质、全氮、全磷、全钾、速效氮、速效磷等方面(表1)。

表1 研究区不同坡位和坡向基材肥力因子含量情况

修复边坡类型	坡位	坡向	pH值	有机质/(g·kg^{-1})	全氮/(g·kg^{-1})	全磷/(g·kg^{-1})	全钾/(g·kg^{-1})	速效氮/(mg·kg^{-1})	速效磷/(mg·kg^{-1})
天然次生林	上	阴坡	8.09	6.203	0.322	0.327	1.012	6.445	0.511
		阳坡	7.57	5.959	0.264	0.245	0.708	6.029	0.375
		均值	7.83	6.081	0.293	0.286	0.860	6.237	0.443
	中	阴坡	7.66	6.355	0.500	0.313	1.245	6.651	0.521
		阳坡	6.84	5.825	0.282	0.251	0.699	6.257	0.453
		均值	7.25	6.090	0.391	0.282	0.972	6.454	0.487
	下	阴坡	7.49	6.308	0.565	0.410	1.623	7.003	0.612
		阳坡	6.93	6.030	0.423	0.172	1.233	6.319	0.412
		均值	7.21	6.169	0.494	0.291	1.428	6.661	0.512
人工次生林	上	阴坡	8.67	19.007	0.642	0.936	3.213	8.567	0.955
		阳坡	8.17	17.273	0.402	0.708	2.607	7.355	0.775
		均值	8.42	18.140	0.522	0.822	2.910	7.961	0.865
	中	阴坡	8.76	20.147	0.715	0.923	3.455	8.568	1.277
		阳坡	7.74	18.497	0.627	0.711	2.747	7.85	0.873
		均值	8.25	19.322	0.671	0.817	3.101	8.209	1.075
	下	阴坡	8.33	20.430	0.899	0.907	3.679	8.768	1.343
		阳坡	7.97	19.806	0.597	0.665	3.195	8.096	1.173
		均值	8.15	20.118	0.748	0.786	3.437	8.432	1.258

由表1可以看出，土壤肥力水平整体趋势表现为：人工次生林地＞天然次生林地。除土壤pH值降低以外，无论是天然次生林还是人工次生林的边坡，肥力水平总体上均随着距坡顶距离的增大而提高，阴坡普遍高于阳坡。天然次生林土壤中作为生物源的有机质在下坡位的含量是上坡位的1.41倍，全氮和全钾在下坡位的含量分别高于上坡位68.60%和66.05%，下坡位速效氮以及速效磷含量较上坡位分别提高了1.17和1.25倍。发生这种变化的原因可能是区域的多雨和湿润气候，以及长期的冲刷作用使许多物质和营养元素经水分渗透和地表径流由坡顶向坡脚迁移造成的[13]，即下坡位是其他坡位水土流失的一个汇。全磷在不同坡位和坡向上并未表现出明显的变化规律，受坡位以及坡向的影响也不显著，可能与其受坡面微地形的影响有关。pH值则沿着坡面向下逐渐降低，下坡位平均值低至7.21，受坡位影响显著，原因可能是下坡位植被生长茂盛，表层根系分布较多，根系呼吸产生的二氧化碳、根系分泌的有机酸和氢离子及凋落物分解过程中产生的酸性物质致使土壤pH值降低。人工次生林土壤中有机质在下坡位的含量高于上坡位10.91%，全钾和全氮在下坡位的含量分别是上坡位的1.18和1.43倍，下坡位

速效氮以及速效磷含量较上坡位分别提高了 6.2% 和 45.4%。全磷在不同坡位和坡向上也并未表现出明显的变化规律,受坡位以及坡向的影响仍旧不显著。pH 值则沿着坡面向下逐渐降低,下坡位平均值低至 8.15,但所有坡位 pH 值均超过了 8.0,造成种种现象的原因可以归为:该修复模式下土壤基材中掺入了水泥,使得土壤中在引入绿化添加剂的情况下仍呈弱碱性。

3.2　两种修复模式对土壤酶活性的影响

土壤酶活性反映了土壤中各种生物化学过程的强度和方向,是区域土壤肥力评价的重要指标之一,同时也是土壤自净能力评价的重要指标。测定相应酶的活性,可以间接地了解某种物质在土壤中的转化情况。

3.2.1　*两种修复模式对土壤碱性磷酸酶活性的影响*

如图 1 所示,天然次生林土壤碱性磷酸酶活性高于人工次生林,表现为:下坡>中坡>上坡。人工次生林土壤碱性磷酸酶活性较天然次生林变化极显著,其变化范围为 0.000 6～0.002 3 U/g,阴、阳坡的下坡位土壤酶活性分别高出上坡位 91.67% 和 116.67%。同时,人工次生林的上坡位土壤碱性磷酸酶活性阴阳坡均最低,原因一方面是土壤本身就缺磷,另外水泥的加入也在一定程度上限制了酶的活性,导致碱性磷酸酶活性降低。

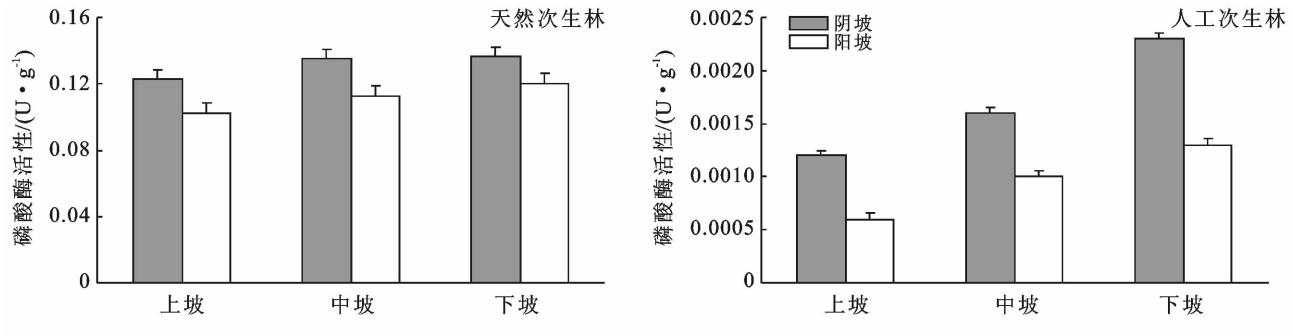


图 1　两种修复模式土壤碱性磷酸酶活性随坡位和坡向的变化

3.2.2　*两种修复模式对土壤脲酶活性的影响*　如图 2 所示,脲酶活性大小均表现为:下坡>中坡>上坡,天然次生林土壤脲酶活性高于人工次生林。无论是阴坡还是阳坡,脲酶活性的变化均不显著,阴坡、阳坡分别只提高了 30.01% 和 24.08% 以及 10.35% 和 5.3%。

研究结果证明,坡位以及坡向对土壤脲酶活性的影响不显著。

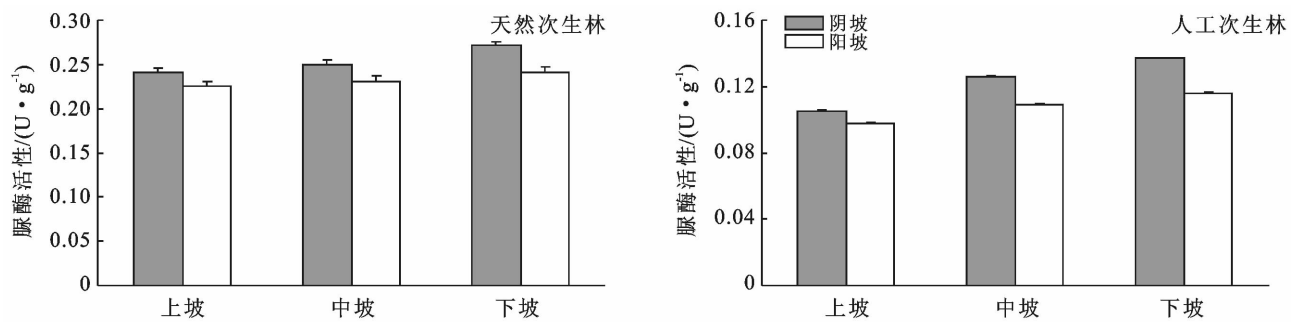


图 2　两种修复模式土壤脲酶活性随坡位和坡向的变化

3.2.3　*两种修复模式对土壤蔗糖酶活性的影响*　由图 3 可以看出,天然次生林土壤蔗糖酶活性高于人工次生林,天然次生林坡位以及坡向对蔗糖酶活性的影响均不显著,人工次生林坡位以及坡向对蔗糖酶活性的影响却极显著。无论是阴坡还是阳坡,蔗糖酶活性大小整体均还表现为:下坡>中坡>上坡,阴坡的下坡位较上坡位提高了 1.56 倍,阳坡的下坡位较上坡位提高了 1.38 倍。说明坡位以及坡向和加入的水泥都会对蔗糖酶活性有极显著的影响。

3.2.4　*两种修复模式对土壤过氧化氢酶活性的影响*

如图 4 所示,两种修复模式处理之间无显著性差异。无论是上坡位还是下坡位,阴坡还是阳坡,过氧化氢酶活性大小均没有发生显著变化,说明土壤过氧化氢酶活性受水泥加入的影响不显著,之前的研究结果也表明,过氧化氢酶活性受酸碱类型物质的影响较小[14]。

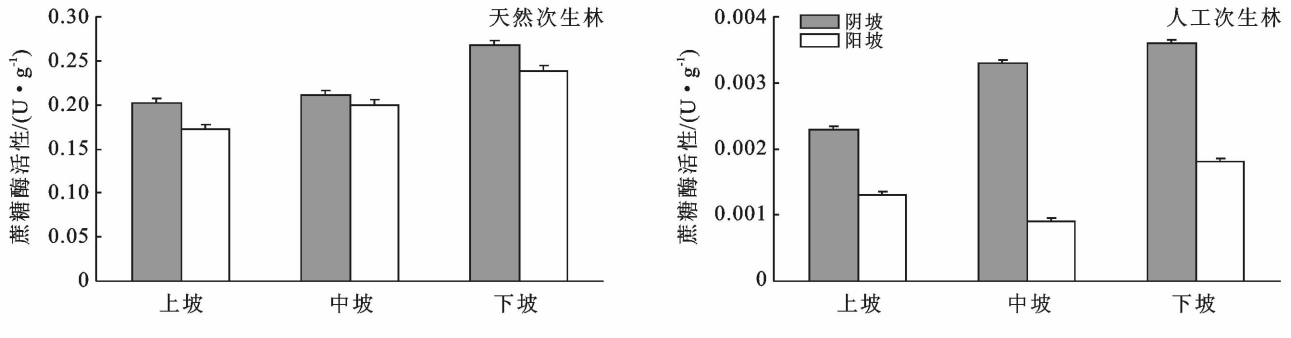


图3 两种修复模式土壤蔗糖酶活性随坡位和坡向的变化

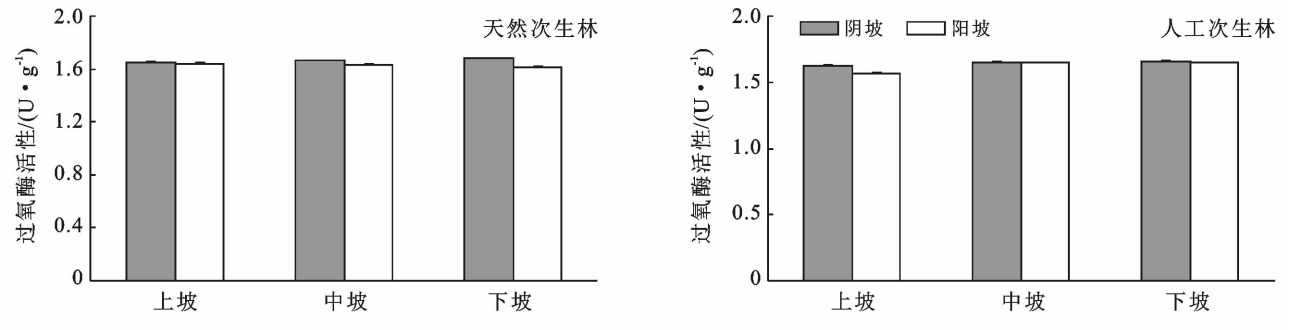


图4 两种修复模式土壤过氧化氢酶活性随坡位和坡向的变化

综上所述,两种修复模式中土壤酶活性整体表现的为:天然次生林>人工次生林,其原因主要是人工次生林土壤基材中加入了水泥,水泥在遇水后产生了氢氧化钙,使土壤pH值大为提高,在这种高pH值水平下,脲酶、碱性磷酸酶和蔗糖酶的活性受到抑制,这可能是因为酶蛋白活性中心的质子移变基团的离子化作用或脱离子化作用的可逆反应,或是酶在强碱性环境下发生不可逆失活的缘故[15],表现为:下坡位>上坡位,原因与土壤化学性质变化的原因基本一致,而且土壤酶活性受到土壤生物生存环境的影响也较为明显,含水率影响着植物蒸腾、地表蒸发、地表径流和土壤水分交换,是生命活动的基本条件。含水量不同对土壤中空气含量产生较大影响,而土壤水、空气是土壤生物生存的重要环境条件,通过影响土壤生物进一步对土壤酶活产生影响[16]。而下坡位土壤含水量高于上坡位,在一定程度上可以反映出下坡位土壤水肥条件优于上坡位[17],水肥条件良好促使土壤微生物活动增强,对土壤物质的分解速率加快,酶活性增强,表现为:阴坡>阳坡,这与日照对水分蒸发的影响有关,而且阴坡的植物根系较阳坡扎得更深,更有利于涵养水分,水分影响土壤生物生存环境进而影响土壤酶活性。

3.3 土壤肥力指标相关性分析

土壤酶之间相关性分析的结果表明(表2),土壤酶活性之间存在明显的相关关系。碱性磷酸酶与脲酶、碱性磷酸酶与蔗糖酶、脲酶与蔗糖酶之间的正相关关系均达到极显著水平($p<0.01$),这与前人研究结果一致[18]。土壤脲酶、碱性磷酸酶、蔗糖酶活性与过氧化氢酶活性之间也存在正相关关系,但不显著($p>0.05$)。由此可见,催化养分循环的几大酶系之间是相互紧密联系的,共同调控土壤的物质循环和生态循环平衡[19]。

土壤酶与土壤基本性质相关性分析表明(表2),土壤碱性磷酸酶活性分别与土壤全钾和速效磷含量正相关,相关性在两种修复模式下均达到显著或极显著水平;与土壤有机质、全氮、全磷、速效氮含量负相关,相关性在两种修复模式下也均达到显著或极显著水平。土壤脲酶活性与pH值、全钾、速效磷之间存在显著或极显著正相关;与全磷和速效氮显著或极显著负相关。土壤蔗糖酶活性与全氮、全磷正相关,与全氮相关性显著与全磷相关性不显著;与pH值、速效磷之间负相关,在人工次生林中相关性极显著,在天然次生林中仅与速效磷相关性极显著。

土壤过氧化氢酶与pH、全钾、速效磷之间存在正相关关系,天然次生林中与pH、全钾相关性极显著,人工次生林中不显著;与速效磷相关性均不显著,与有机质、全氮、全磷、速效氮之间存在负相关关系,在天然次生林中,与全氮、全磷、速效氮相关性显著,与有机质相关性不显著;在人工次生林中,与有机质、全氮相关性显著;与全磷、速效氮相关性不显著。

表 2　土壤肥力指标之间相关性分析

修复边坡	相关系数	磷酸酶活	脲酶活	蔗糖酶活	过氧酶活	pH 值	有机质	全氮	全磷	全钾	速效氮	速效磷
天然次生林	磷酸酶活	1				−0.708*	−0.932**	−0.971**	−0.767*	0.577*	−0.888**	0.996**
	脲酶活	0.804**	1			0.989**	−0.533*	−0.923**	−0.998**	0.949**	−0.801**	0.853**
	蔗糖酶活	0.849**	0.872**	1		−0.228	0.983**	0.697*	0.312	−0.058	−0.262	−0.800**
	过氧酶活	0.409	0.369	0.134	1	0.934**	−0.05	−0.616*	−0.899**	0.981**	−0.992**	0.488
人工次生林	磷酸酶活	1				0.672*	−0.840**	−0.993**	−0.583*	0.678*	−0.702*	0.521*
	脲酶活	0.856**	1			0.548*	0.996**	0.137	−0.639*	0.540*	−0.511*	0.694*
	蔗糖酶活	0.896**	0.717*	1		−0.931**	−0.112	0.942**	0.883**	−0.934**	0.945**	−0.846**
	过氧酶活	0.252	0.203	0.437	1	0.191	−0.778*	−0.789*	−0.078	0.2	−0.233	0.004

注:* 表示相关性显著,* * 表示相关性极显著。

4　结 论

(1) 除土壤 pH 值沿着坡面向下逐渐降低以外,两种修复模式边坡肥力因子总体上均随着距坡顶距离的增大而提高,阴坡普遍高于阳坡。有机质、全钾和全氮在下坡位的含量均高于上坡位,下坡位速效氮以及速效磷含量较上坡位有显著提高,全磷在不同坡位和坡向上并未表现出明显的变化规律,受坡位以及坡向的影响不显著。综上所述,土壤肥力因子受边坡坡位以及坡向的影响较大,因此建议在后期修复工程中基材的配制与植被的配置必须考虑的更加系统,由点及面,力求做到因地制宜,使修复效果最大化。

(2) 两种修复模式下土壤酶活性,除过氧化氢酶活性无明显差异以外,土壤碱性磷酸酶、脲酶、蔗糖酶活性随着坡位与坡向的不同均表现出显著的差异性,表现为:下坡位>上坡位,阴坡>阳坡,其次碱性磷酸酶、脲酶和蔗糖酶的活性均表现为:天然次生林>人工次生林,而过氧化氢酶活性变化不大。上述结论说明人工次生林土壤微生物水平偏低,建议有必要向基材土壤中添加有益微生物菌剂以提高基材微生物量来提升土壤酶活性,或者通过植物的选择搭配来改良土壤内部结构与环境,为微生物量及酶活性的提高提供适宜条件。

(3) 相关性分析表明,两种修复模式下,碱性磷酸酶与脲酶、碱性磷酸酶与蔗糖酶、脲酶与蔗糖酶之间的正相关关系均达到极显著水平,土壤脲酶、碱性磷酸酶、蔗糖酶活性与过氧化氢酶活性之间也存在正相关关系,但不显著。上述分析说明了土壤酶之间是通过相互影响,相互协作共同发挥作用的,缺一不可,因此在边坡修复工程的后期对基材土壤中酶的跟踪研究与及时补充是非常必要和重要的。

(4) 边坡修复方式多种多样,修复技术也越来越成熟。为了保证生态修复效果最大化,边坡修复工程中基材配方的优化和植被的选择就成为重点考虑的问题。如何在降低工程成本的基础上,保证土壤与植物生态环境恢复的持续性与稳定性则尤为重要。本文对已修复边坡土壤生理生化以及生物指标进行测定,研究了各指标的变化规律和相关性,指出了边坡修复过程中的不足,为二次修复工作中更有针对性的改良和优化提供依据。本研究还存在诸多像边坡样本的筛选,土样的采集等方面的问题,如何建立更加有效的边坡修复模式仍旧是今后研究的重点。

[参 考 文 献]

[1] 周明涛,许文年,夏栋. 向家坝水电站工程扰动区不同类型边坡土壤酸碱度与肥力分析[J]. 应用生态学报,2010,21(4):1031-1037.

[2] 李少丽,许文年,丰瞻,等. 边坡生态修复中植物群落类型设计方法研究[J]. 中国水土保持,2007(12):53-55.

[3] 许小娟,朱凯华,尹金珠,等. 海岛矿山生态修复边坡植物多样性分析[J]. 北方园艺,2011(7):106-109.

[4] 杨晓军. 采石场岩质边坡植被生态恢复效果的调查评价[D]. 江苏 南京:南京农业大学,2012.

[5] 付靖,张晓龙,祝小科. 贵州公路陡峭岩石边坡生态修复技术效果分析[J]. 西部交通科技,2013(1):69-74.

[6] Qiu Liping, ZHANG Xingchang, Cheng Jiming. Influence of slope direction, position and fallow measurement of soil enzymatic activities in grassland at Yunwu Mountain[J]. Acta Prateculturae Sinica, 2007,16(1):87-93.

[7] 周玮,周运超. 北盘江喀斯特峡谷区不同植被类型的土壤酶活性[J]. 林业科学,2010,46(1):136-141.

[8] Zhao Rudong, Fan Jianbo, He Yuanqiu, et al. Effect of slope position on soil physicochemical in *Pinus massoniana* plantation[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2010,19(12):2857-2862.

[9] 成毅,安韶山,马云飞. 宁南山区不同坡位土壤微生物生物量和酶活性的分布特征[J]. 水土保持研究,2010,17(5):148-153.

[10] 秦华军,何丙辉,赵璇池,等. 西南喀斯特山区寿竹林地土壤微生物量与酶活性在不同坡位和剖面层次的分布特征[J]. 环境科学,2014,35(9):3580-3586.

(下转第 192 页)

率之间的相关关系，并不能建立可有效预测饱和导水率的关系式。在下一步研究中，将依托限制变量法，对土壤结构指标与土壤饱和导水率的关系进行模拟。

[参 考 文 献]

[1] 樊军，邵明安，王全九. 田间测定土壤导水率的方法研究进展[J]. 中国水土保持科学，2006，4(2)：114-119.

[2] 张川，陈洪松，张伟，等. 喀斯特坡面表层土壤含水量、容重和饱和导水率的空间变异特征[J]. 应用生态学报，2014，25(6)：1585-1591.

[3] 彭舜磊，由文辉，沈会涛. 植被群落演替对土壤饱和导水率的影响[J]. 农业工程学报，2010，26(11)：78-84.

[4] 郑纪勇，邵明安，张兴昌. 黄土区坡面表层土壤容重和饱和导水率空间变异特征[J]. 水土保持学报，2004，18(3)：53-56.

[5] 王力，邵明安，王全九. 林地土壤水分运动研究述评[J]. 林业科学，2005，41(2)：147-153.

[6] 席彩云，余新晓，徐娟，等. 北京密云山区典型林地土壤入渗特性[J]. 北京林业大学学报，2009，31(5)：42-47.

[7] 陈风琴，石辉. 缙云山常绿阔叶林土壤大孔隙与入渗性能关系初探[J]. 西南师范大学学报：自然科学版，2005，30(2)：350-353.

[8] Helalia A M. The relation between soil infiltration and effective porosity in different soils [J]. Agricultural Water Management, 1993, 24(1): 39-47.

[9] Bodman G B, Colman E A. Moisture and energy conditions during downward entry of water into soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 1944, 8(8): 116-122.

[10] 马晓刚. 缙云山不同植物群落类型土壤入渗性能研究[D]. 重庆：西南大学，2008.

[11] 邹焱，陈洪松，苏以荣，等. 红壤积水入渗及土壤水分再分布规律室内模拟试验研究[J]. 水土保持学报，2005，19(3)：174-177.

[12] 王瑗玲，赵庚星，王庆芳，等. 丘陵区土地整理对土壤理化性状的影响[J]. 农业工程学报，2011，27(9)：311-315.

[13] Shi Zhongjie, Xu Lihong, Wang Yanhui, et al. Effect of rock fragments on macropores and water effluent in a forest soil in the stony mountains of the Loess Plateau, China[J]. African Journal of Biotechnology, 2012, 11(39): 9350-9361.

[14] 张鹏，贾志宽，王维，等. 秸秆还田对宁南半干旱地区土壤团聚体特征的影响[J]. 中国农业科学，2012，45(8)：1513-1520.

[15] 陈世超，林剑辉，孙宇瑞，等. 基于土壤表面粗糙度预测降雨影响下的表层土壤孔隙度[J]. 北京林业大学学报，2013，35(2)：69-74.

[16] 张摇川. 喀斯特坡面表层土壤含水量，容重和饱和导水率的空间变异特征[J]. 应用生态学报，2014，25(6)：1585-1591.

[17] Luo Lifang, Lin Henry, Halleck Phil. Quantifying soil structure and preferential flow in intactsoil using x-ray computed tomography [J]. Soil Science Society of America Journal, 2008, 72(4): 1058-1069.

[18] 赵春雷，邵明安，贾小旭. 黄土高原北部坡面尺度土壤饱和导水率分布与模拟[J]. 水科学进展，2014，25(6)：806-815.

[19] Hu Wei, Shao Mingan, Si Bingcheng. Seasonal changes in surface bulk density and saturated hydraulic conductivity of natural landscapes[J]. European Journal of Soil Science, 2012, 63(6): 820-830.

(上接第187页)

[11] 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，1999.

[12] Tabatabai M, Bremner J. Use of p-nitrophenyl phosphate for assay of soil phosphatase activity [J]. Soil Biology and Biochemistry, 1969, 1(4): 301-307.

[13] 刘大翔，许文年，周明涛，等. 坡位坡向及年限对黄龙滩电站生态护坡肥力的影响[J]. 水土保持研究，2010，17(1)：178-182.

[14] 邱现奎，董元杰，万勇善，等. 不同施肥处理对土壤养分含量及土壤酶活性的影响[J]. 土壤，2010，42(2)：249-255.

[15] 万超，徐福利，邹诚，等. 黄土丘陵沟壑区不同土地利用模式对土壤酶活性和土壤微生物影响研究[J]. 西北农业学报，2009，18(2)：158-162.

[16] 曹志平. 土壤生态学[M]. 北京：化学工业出版社，2007.

[17] 明安刚，陶怡，吴光枝，等. 不同坡位米老排人工林生长量与生物量的研究[J]. 中国农学通报，2011，27(28)：90-93.

[18] 路怡青，朱安宁，张佳宝，等. 免耕和秸秆还田对小麦生长期内土壤酶活性的影响[J]. 生态与农村环境学报，2013，29(3)：329-334.

[19] 丁永全. 坡向和坡位对大兴安岭干旱阳坡蒙古栎林温湿度的影响[J]. 东北林业大学学报，2015，43(4)：46-51.