

元谋干热河谷植被恢复对土壤酶活性的影响特征

魏雅丽^{1,2,3}, 郭芬芬^{1,2}, 陈安强^{1,2}, 南岭^{1,2}, 刘刚才^{1*}

(1.中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所, 中国科学院山地灾害与地表过程重点实验室, 成都 610041; 2.中国科学院研究生院, 北京 100049; 3.四川农业大学资源环境学院, 四川 雅安 625014)

摘要:选取5种植被恢复模式,研究了不同模式对土壤酶活性的影响以及土壤肥力与土壤酶活性的关系。结果表明,植被恢复后土壤蔗糖酶、过氧化氢酶和碱性磷酸酶活性相比光板地都有明显提高,顺序依次为酸角>小桐子>印楝;同种植被的土壤酶活性表现出根际大于非根际的特性;不同的植被恢复模式和种植方式对酶活性都有较大的影响,等高垄沟模式具有较好的保土保肥能力,创造了良好的微生物环境,增强了土壤酶活性;植被恢复模式下酶活性与土壤肥力之间的关系密切,特别是有机质、全氮与土壤蔗糖酶、过氧化氢酶和碱性磷酸酶的相关性较好。因此,用土壤酶活性来评价植被恢复的效果是可靠的。

关键词:干热河谷;植被恢复;土壤酶

中图分类号:X171.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2011)01-0100-07

Effects of Vegetation Restoration on Soil Enzyme Activity in Yuanmou Dry-hot Valley, China

WEI Ya-li^{1,2,3}, GUO Fen-fen^{1,2}, CHEN An-qiang^{1,2}, NAN Ling^{1,2}, LIU Gang-cai^{1*}

(1.Key Laboratory of Mountain Hazards and Earth Surface Processes, Chinese Academy of Sciences, Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Chengdu 610041, China; 2.Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3.College of Resources and Environment, Sichuan Agricultural University, Yaan 625014, China)

Abstract: The soil enzyme is a key criterion for evaluating soil efficiency of vegetation restoration, as it is an important indicator of soil quality and function. The objectives of this study are 1) to estimate the effects of vegetation restoration on soil enzyme activity, 2) to determine the correlation between soil fertility and enzyme activity by comparing the five alternatives of vegetation restoration. The results showed that soil enzyme activity of sucrase, catalase and alkaline phosphatase activity had significantly increased after vegetation restoration than that of barren land, and its magnitude followed the order of *Tamarindus* > *Jatropha curcas* L. > *Azadirachta indica*. The soil enzyme activity in the rhizosphere of hedge acacia and *Azadirachta indica* was higher than in non-rhizosphere. Countour planting was found having an important role in preserving soil fertility to create a favorable environment for microorganisms and to enhance soil enzyme activity. These results suggested that different vegetation restoration practices and planting methods had distinct influences on soil enzyme activity. The enzyme activity had closely related with the soil fertility for various vegetation restoration practices, particularly for the relationship between soil organic matter, total nitrogen and soil sucrase, catalase and alkaline phosphatase activity. Thus, we concluded that indicator of soil enzyme activity was reliable for efficiency assessment of vegetation restoration.

Keywords: Dry-hot Valley; vegetation restoration; soil enzyme

干热河谷主要分布于西南地区的金沙江、元江、怒江和澜沧江四大江河的河谷地带,该区域内自然灾害频发,生态系统退化明显,水土流失严重,水热矛盾

突出,是我国典型的脆弱生态系统之一。另一方面,河谷区内人口密度大,人为活动影响明显,加剧了区内生态系统的退化,是植被恢复重中之重的区域。同时,河谷区内光热资源丰富,其自然资源利用开发潜力大、特色资源丰富而经济潜力很大,在国民经济中具有举足轻重的作用。因此,植被恢复及其有关研究一直是该区的一项重要工作。植被恢复通过改变土壤-植物-微生物组成的微生态系统的结构和功能,改善

收稿日期:2010-06-21

基金项目:国家支撑计划课题(2006BAC01A11);国家自然科学基金(40871013)

作者简介:魏雅丽(1980—),女,四川雅安人,在读博士生,讲师,主要从事水土保持与生态恢复研究。E-mail:weiyali@imde.ac.cn

* 通讯作者:刘刚才 E-mail:liugc@imde.ac.cn

土壤的环境条件,促进根际土壤养分和生物化学酶活性组成与转化。土壤酶在土壤物质循环和能量转化过程中起着重要作用,土壤酶活性反映了土壤营养循环过程的速率,可作为土壤生物功能多样性的指标,也是反映土壤生产力和微生物活性潜力的指标,能够较快反映土壤利用和生物变化特征^[1-3]。国外研究中不仅将土壤酶活性作为评价土壤健康和质量的重要指标^[4],酶活性也被认为是植被恢复过程中土壤修复的指示剂^[5]。目前,对于元谋干热河谷的植被恢复研究主要集中在对植被恢复模式的选择和土壤效应的改良方面^[6-8],而植被恢复下土壤酶活性研究相对较少。本文针对5种不同植被恢复模式,主要研究植被恢复后土壤酶的活性特征,以及土壤酶活性与土壤肥力之间的相互关系,为正确评价植被恢复的生态效应提供重要科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于云南省元谋县境内,该县位于云贵高原北缘的金沙江一级支流——龙川江下游的河谷地带(101°35'~102°05'E, 25°25'~26°07'N)。国土面积2 021.46 km²,海拔898~2 835.5 m,高差悬殊,相对高差1 937.9 m,生态环境垂直分异明显。干热河谷区光热资源丰富,年日照时数2 550~2 744 h,日照百分率为60%,年均温21.5℃,年降水量615.1 mm,年蒸量3 569.2 mm,为降水量的5.8倍,是云南省乃至全国宝贵的热区资源之一,是我国著名的冬季蔬菜基地之一。地带性土壤以燥红土分布最为广泛,土层薄,石砾含量较高,保水性差,有效养分缺乏,由砂页岩、砾岩及少量花岗岩、花岗片麻岩和石英岩风化形成。自然植被为南亚热带中山峡谷灌草丛和半湿性常绿阔叶林,乔木树种主要有云南松(*Pinus yunnanensis*)、桉树(*Eucalyptus*)类和栎(*Quercus* spp)类;灌木矮小疏生,代表种有余甘子(*Phyllanthus emblica*)、车桑子(*Dodonaea viscosa* (L.) Jacq);草被代表种有扭黄茅

(*Heteropogon contortus*)、旱茅(*Eremopogon delavayi*)等。元谋干热河谷坝周低山区,气候干燥,水热矛盾突出、植被覆盖率低、水土流失严重、地形破碎、生态环境恶化,人民生活贫困,是我国典型的生态脆弱带之一。

1.2 植被恢复模式

植被恢复模式建立在云南元谋县的元马镇和苴林镇两大试验示范基地内,5种模式的植被情况如表1。

在元马镇有种植银合欢的2种恢复模式:①在坡度较小的地块采取坑隙平板模式,坑隙规格0.3 m×0.3 m;②在坡度>5°的地块,采取等高垄沟模式,沟宽0.4 m,沟深0.3 m,沟间距2 m。银合欢速生性特强,使其他物种在生长竞争中被淘汰或被胁迫,而它本身不断自繁更新,形成了银合欢纯林,主要靠雨养。

在苴林镇设置了3种植被恢复模式:①坑隙种植印楝模式:通过带状水平平整地的积水造林技术,提高林地水分保蓄能力和利用效率,印楝栽植坑规格为0.6 m×0.6 m,栽植密度4 m×4 m,印楝长势较好,主要靠雨养;②坑隙种植酸角模式:酸角种植坑规格同印楝模式,酸角高度1~2 m,草本扭黄茅长势较好,盖度达到98%,主要靠雨养;③等高垄沟小桐子恢复模式:沟宽0.5 m,沟深0.6 m,以小桐子(株距5 m)和扭黄茅为主的恢复模式,小桐子高1~2 m,草本扭黄茅长势较好,盖度达到99%,主要靠雨养。

苴林基地的对照地为光板地,是植被恢复之前的原始状态,光板地上无任何植被。土壤主要是典型的燥红土。

1.3 样品采集与测试方法

2009年7月对上述5种植被恢复模式区及对照区(光板地)的土壤进行野外采样,所选取的样地基本上代表了该区植被恢复中各种立地情况下的土壤和植被状况。在印楝、小桐子和新银合欢种植区中,分坑内和坑外采集土样,在坑内采用抖落法取根际土壤^[9],在坑外沿“S”形布点,采集0~20 cm非根际土壤。每个样地采集3~4个点的土壤,混合后取样,将土壤样品

表1 典型植被恢复模式的植被状况

Table 1 The investigation of vegetation restoration patterns

恢复模式	种植年限/a	高程/m	植被盖度/%	植株高度/m	主要物种
新银合欢等高垄沟模式	15	1 161	68	2~15	新银合欢
新银合欢平板模式	15	1 166	80	2~10	新银合欢
印楝坑隙恢复模式	10	1 115	90	3~7	印楝 & 扭黄茅
酸角坑隙恢复模式	5	1 120	98	1~2	酸角 & 扭黄茅
等高垄沟小桐子恢复模式	5	1 200	99	1~2	小桐子 & 扭黄茅

带回实验室后分两份,一份土样风干过筛后,按照常规方法^[10]测定土壤基本理化性质,另一份鲜样测定土壤酶活性,主要参考关松荫等^[11]编制的土壤酶及其研究法。土壤理化性质的测定:pH 采用电位法测定;有机质采用重铬酸钾氧化-外加热法;全氮采用半微量开氏法;全磷采用酸溶-钼锑抗比色法;全钾采用氢氧化钠碱熔-火焰光度法速效氮;速效氮采用氯化钾浸提-蒸馏法,有效磷采用 $0.5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 碳酸氢钠浸提法;速效钾采用 $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 乙酸铵浸提-火焰光度法;阳离子交换量采用醋酸铵交换法。土壤酶活性的测定:蔗糖酶活性采用 3,5-二硝基水杨酸比色法测定,结果以 mg 葡萄糖 $\cdot\text{g}^{-1}$ 土样(37°C , 24 h)表示;脲酶活性采用苯酚-次氯酸钠比色法,结果以 mg 氨氮($\text{NH}_3\text{-N}$) $\cdot\text{g}^{-1}$ 土样(37°C , 24 h)表示;过氧化氢酶活性采用高锰酸钾滴定法,结果以 $0.1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{KMnO}_4 \text{ mL} \cdot 10 \text{ g}^{-1}$ 土样(25°C , 20 min)表示;碱性磷酸酶活性以苯磷酸二钠比色法测定,结果以 $\text{mgP}_2\text{O}_5 \cdot 10 \text{ kg}^{-1}$ 土样(37°C , 2 h)表示。

1.4 数据统计及分析

基本的统计分析用 Excel 处理,数据处理用 SPSS 16.0 软件,差异显著性检验采用 LSD 检验或 t 检验,相关分析采用双变量相关分析法,选择 Pearson 相关系数。

2 结果与分析

2.1 不同恢复模式的土壤酶活性响应特征

2.1.1 苴林基地

苴林基地的不同植被恢复模式下土壤酶活性如图1所示。植被恢复后蔗糖酶和过氧化氢酶活性相比光板地均有显著提高,且变化趋势一致,由高到低依

次表现为:坑隙种植酸角>等高种植小桐子>坑隙种植印楝>对照(光板地)。与光板地相比,酸角恢复模式的蔗糖酶活性提高了 762.32%,且达到显著差异($P=0.012$);小桐子和印楝恢复模式的蔗糖酶活性分别提高了 364.76%、249.00%,但未达到显著差异($P>0.05$)。酸角恢复模式的过氧化氢酶活性较对照提高了 249.51%,达到了显著差异($P=0.028$);小桐子恢复模式提高了 190.01%,达到了显著差异($P=0.026$);印楝恢复模式提高了 90.23%,但未达到显著差异($P=0.238$)。

3 种恢复模式的土壤脲酶活性与光板地相比,均未达到显著差异($P>0.05$),印楝恢复模式的脲酶活性提高 33.34%,小桐子和酸角恢复模式分别下降 50.17%、29.68%。土壤碱性磷酸酶活性较光板地,酸角和小桐子恢复模式的磷酸酶活性分别增加了 93.95%、33.78%,印楝恢复模式下降了 27.59%,均达到显著差异($P<0.05$)。

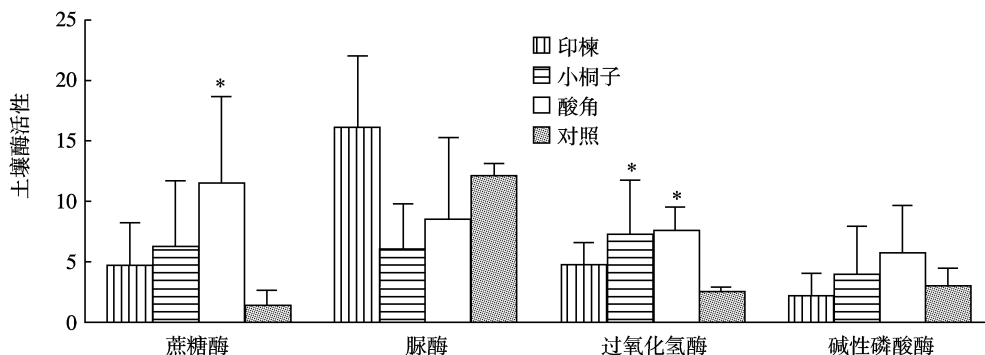
2.1.2 元马基地模式

在元马基地,银合欢的等高垄沟模式和平板模式下(图2)土壤酶活性比较均不具有显著差异性($P>0.05$)。等高垄沟模式下的蔗糖酶活性、过氧化氢酶活性、碱性磷酸酶活性和脲酶活性,较平板种植模式分别提高了 120.00%、93.40%、10.90%和 3.63%。说明等高垄沟种植模式对于酶活性的提高幅度较平板种植模式更明显。

2.2 不同恢复模式根际范围对土壤酶活性的影响特征

2.2.1 苴林基地

将坑隙种植印楝和等高种植小桐子恢复模式的坑内外土壤酶活性进行配对样本 t 检验,发现两种模



注:*表明与对照差异显著 $P<0.05$ 。蔗糖酶单位为 $\text{mg}(\text{葡萄糖}) \cdot \text{g}^{-1}$,脲酶单位为 $\text{mg}(\text{NH}_3\text{-N}) \cdot \text{g}^{-1}$,过氧化氢酶单位为 $0.1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{KMnO}_4 \text{ mL} \cdot 10 \text{ g}^{-1}$,碱性磷酸酶单位为 $\text{mg P}_2\text{O}_5 \cdot 10 \text{ kg}^{-1}$ 。图2~图4同。

Note: *means significant difference at $P<0.05$ level. The unit of sucrase is $\text{mg glucos} \cdot \text{g}^{-1}$. The unit of urease is $\text{mg}(\text{NH}_3\text{-N}) \cdot \text{g}^{-1}$. The unit of catalase is $0.1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{KMnO}_4 \text{ mL} \cdot 10 \text{ g}^{-1}$; The unit of alkaline phosphatase is $\text{P}_2\text{O}_5 \text{ mg} \cdot 10 \text{ kg}^{-1}$. The same as Figure 2~4.

图1 苴林基地不同植被恢复模式下土壤酶活性比较

Figure 1 The comparison of soil enzyme activity under different patterns of vegetation restoration in Julin base

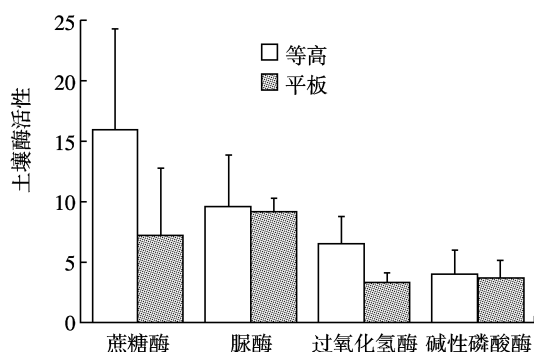


图2 元马基地不同种植模式下土壤酶活性比较

Figure 2 The comparison of soil enzyme activity under different cropping patterns in Yuanma base

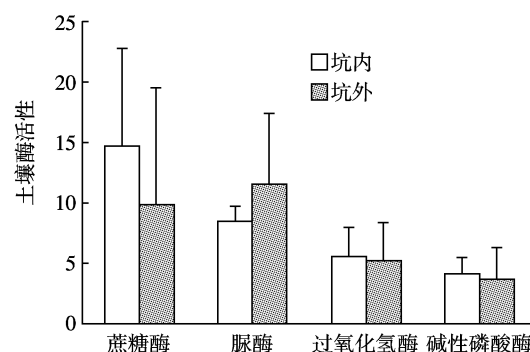


图4 元马基地银合欢坑内坑外的土壤酶活性比较

Figure 4 The comparison of soil enzyme activity of hang inside and outside in Yuanma base

式坑内外土壤酶活性差异性不显著($P>0.05$)。从图3可以看出,坑隙种植印楝恢复模式的土壤酶活性成明显的坑内大于坑外的趋势,坑内根际土的蔗糖活性、碱性磷酸酶活性、过氧化氢酶活性和脲酶活性分别较坑外非根际土提高149.79%、75.81%、39.38%和34.69%。相反,等高垄沟种植小桐子恢复模式的土壤酶活性呈现出坑外大于坑内的规律。坑外非根际土壤的碱性磷酸酶活性、过氧化氢酶活性、蔗糖酶活性和脲酶活性分别较坑内根际土提高143.85%、132.77%、38.59%和15.50%。

2.2.2 元马基地

新银合欢坑内坑外土壤酶活性比较如图4所示。对新银合欢坑内的根际土和坑外的非根际土的酶活性进行配对样本 T 检验,发现不具有显著差异性($P>0.05$)。坑内土壤的蔗糖酶、碱性磷酸酶和过氧化氢酶活性相对于坑外,分别提高了48.79%、12.99%和7.66%。相反,脲酶活性坑内与坑外相比下降了26.49%。

2.3 土壤酶活性与土壤肥力的相关分析

土壤酶活性强弱是表征土壤熟化程度高低和肥力水平的一项重要指标^[12]。将元谋干热河谷的5种恢

复模式的土壤酶活性与土壤理化性质进行Pearson相关分析,得出土壤酶活性与肥力之间相关关系如表2所示。

植被恢复后蔗糖酶活性与有机质、全N和速效N呈极显著的正相关关系($P<0.01$),相关系数依次为有机质($R=0.615$)>全N($R=0.597$)>速效N($R=0.533$);蔗糖酶活性与阳离子交换量呈显著相关关系($P<0.05$),相关系数为0.511;与pH值和其他土壤养分相关性不明显。

脲酶活性与土壤pH值呈显著正相关关系($P=0.027$),相关系数为0.451,表明脲酶的活性在最适的pH值中显示最大;与土壤有机质含量、全N、全P、全K、速效N、速效K、阳离子交换量之间存在显著负相关关系($P<0.05$),与速效P负相关性不明显。

过氧化氢酶与有机质、全N和速效N呈极显著正相关关系($P<0.01$),相关系数依次为全N($R=0.604$)>速效N($R=0.563$)>有机质($R=0.536$);与阳离子交换量显著相关($P<0.05$),相关系数为0.446;与pH和其他养分间相关关系不明显。

碱性磷酸酶活性与阳离子交换量呈极显著相关

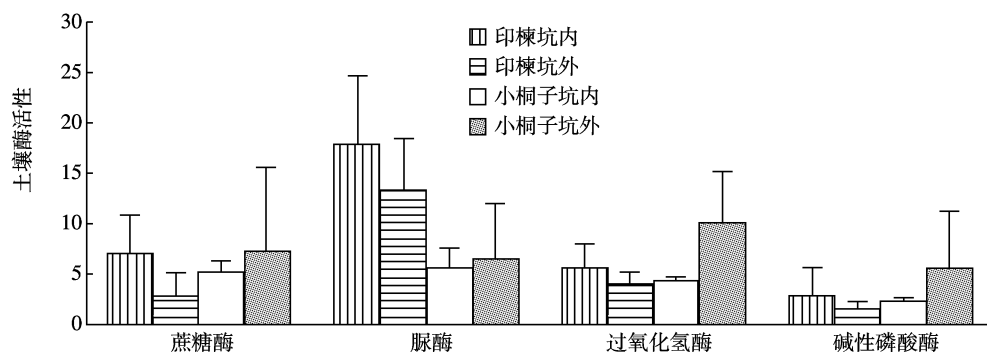


图3 苴林基地不同植被恢复模式坑内坑外的土壤酶活性比较

Figure 3 The comparison of soil enzyme activity of hang inside and outside under different patterns of vegetation restoration in Julin base

表 2 酶活性与肥力之间相关性

Table 2 Correlation analysis between enzyme activity and soil fertility

项目		pH	有机质	全 N	全 P	全 K	速效 N	速效 P	速效 K	阳离子交换量
蔗糖酶活性	相关系数	0.363	0.615**	0.597**	-0.064	0.272	0.533**	-0.173	-0.316	0.511*
	显著水平	0.081	0.001	0.002	0.765	0.198	0.007	0.418	0.133	0.011
脲酶活性	相关系数	0.451*	-0.472*	-0.442*	-0.444*	-0.488*	-0.497*	-0.125	-0.426*	-0.455*
	显著水平	0.027	0.020	0.030	0.030	0.016	0.013	0.561	0.038	0.025
过氧化氢酶活性	相关系数	0.330	0.536**	0.604**	-0.071	0.022	0.563**	-0.133	0.107	0.446*
	显著水平	0.116	0.007	0.002	0.743	0.919	0.004	0.536	0.619	0.029
碱性磷酸酶活性	相关系数	0.444*	0.475*	0.482*	0.000	0.228	0.377	-0.139	-0.149	0.529**
	显著水平	0.030	0.019	0.017	1.000	0.284	0.069	0.516	0.488	0.008

注:** 表示显著水平为 0.01;* 表示显著水平为 0.05。

关系($P<0.01$),相关系数为 0.529;与 pH、有机质和全 N 显著相关 ($P<0.05$), 相关系数依次为全 N ($R=0.482$)>有机质($R=0.475$)>pH($R=0.444$)。

3 讨论

3.1 不同植被恢复模式对酶活性的影响差异

本研究表明,元谋干热河谷植被恢复的 5 种模式,能不同程度地增加土壤酶活性。由于苴林基地和元马基地土壤的本底情况和种植方式有差异,分别对其植被恢复模式进行讨论。

元谋苴林基地 3 种植被恢复模式都能不同程度地增加土壤酶活性。由于恢复模式的恢复年限和生境不同,土壤酶活性的变化也有显著的不同,土壤酶活性常作为衡量植被恢复后土壤的敏感性指标^[13]。酸角坑隙种植模式、小桐子等高垄沟模式植被恢复后土壤蔗糖酶、过氧化氢酶、碱性磷酸酶活性的变化规律基本一致,均明显高于光板地。已有研究表明,土壤蔗糖酶活性对于植被恢复有较快的响应能力^[14-15],各植被恢复措施对土壤过氧化氢酶活性都有所提高^[16],碱性磷酸酶活性对植被恢复有一定的响应^[17]。究其原因,酸角和小桐子种植年限较短,虽然植株高度较短,但是草被扭黄茅覆盖率高达 98%,土壤细根分布较多,植物残体、微生物和养分密集,土壤酶的作用底物多,微生物活性增强,所以蔗糖酶、过氧化氢酶、碱性磷酸酶活性较光板地有明显提高。印楝种植年限较长,植株长势较高,对土壤酶活性有较大影响。除了碱性磷酸酶外,脲酶、蔗糖酶、过氧化氢酶活性均高于光板地。植被恢复后,土壤脲酶活性仅印楝较光板地有所提高,其他恢复模式均降低。有研究表明,脲酶活性与土壤营养物质成正相关关系^[18],由于恢复年限的增加,印楝土壤氮素和碳素营养循环强度得到较大提

高,说明脲酶活性对于植被恢复年限有一定的响应,同其他研究一致^[17,19]。

元马基地的新银合欢恢复模式的土壤酶活性变化趋势,从图 2 可以看出等高模式较平板模式的土壤酶活性更高,表明种植模式对土壤酶活性有不同程度的影响。相关研究也表明,在干热河谷区坡地改造为等高垄沟模式,促进了恢复区的生态系统循环,起到很好的保土保水功能,垄沟内根际养分的有效性增强,微生物改善营养状况,促进有机碳循环,对酶活性提高具有很大的作用^[20-21]。

苴林基地不同植被恢复模式下坑内根际土和坑外非根际土的土壤酶活性变化不一致,主要与植被恢复的生境有重要关系。国外有研究表明,根际土的脲酶和磷酸酶等酶活性显著高于光板地^[22-23]。从图 3 可以看出,印楝恢复模式下,4 种酶活性均表现出坑内根际土壤酶活性较坑外非根际土壤酶活性明显增加。原因是印楝恢复年限的增加,印楝根系大量的脱落物和分泌物进入坑内根际土,有效地归还了印楝生长所必需的养分,促进了根际土壤中营养物质的循环、代谢和提高速效养分^[24]。已有研究表明,蔗糖酶、淀粉酶、过氧化氢酶、脲酶活性在相同植被类型中均表现为根际大于非根际^[25]。但是小桐子恢复模式的土壤酶活性表现在坑外的非根际土高于坑内根际土,其原因是与小桐子的生境有很大关系。由于种植年限较短,坑内根际土壤根系分泌物有限,而坑外的扭黄茅等草本覆盖率高达 95%以上,坑外的非根际土壤具有较好的生物活性。

新银合欢坑内的根际土壤和坑外的非根际土壤酶活性变化趋势不一致(图 4),蔗糖酶、过氧化氢酶和碱性磷酸酶活性是根际土高于非根际土,但是脲酶刚好相反,表现在非根际土大于根际土。原因可能与

新银合欢的生境条件有关,它具有速生、早实、结量大和自然脱落种子易发芽等特点,故林下自然更新良好,生长繁茂,在坑外能快速形成密集的异龄复层林^[26];坑内主要是以枯落物为主,包括新银合欢的叶和果实。新银合欢树种具有根瘤菌固氮能力,而脲酶与土壤供氮能力有密切的关系^[27]。因此,银合欢坑外的复层林改善了微生物环境,土壤中的氮素利用率增高,使得坑外非根际土壤脲酶活性较坑内根际土明显增强。

3.2 土壤养分与酶活性相关分析

通过土壤酶活性和肥力之间的相关关系分析(表2),得出蔗糖酶、过氧化氢酶、碱性磷酸酶活性与有机质、全氮和阳离子交换量呈显著的正相关关系。已有研究表明,土壤酶活性的增强与有机质提高和土壤环境改善密切相关^[28];蔗糖酶、过氧化氢酶和磷酸酶活性均与土壤有机质含量呈明显正相关^[29-30]。有机质高的土壤,蔗糖酶、过氧化氢酶、碱性磷酸酶的活性较强,它们可以表征植被恢复后土壤总的生物学活性和肥力状况。

通过相关分析还得到脲酶与pH正相关,与其测定指标呈负相关,这与前人的研究结果不一致。部分研究认为土壤脲酶活性与土壤有机物质含量、全氮和速效磷含量呈正相关^[31-32]。脲酶的主要来源是微生物细胞的增加和裂解以及植物根系本身向土壤提供的酶,干热河谷区土壤脲酶活性变化规律有待于进一步探索。

4 结论

宜林基地不同恢复模式下,土壤蔗糖酶、过氧化氢酶和碱性磷酸酶活性比光板地都有明显提高,顺序依次为酸角、小桐子、印楝;脲酶的活性顺序依次为印楝、酸角、小桐子,仅印楝脲酶活性较光板地有所提高。不同植被坑内外的酶活性根际效应的变化不一致,印楝土壤酶活性表现在坑内根际土壤大于坑外非根际土壤,小桐子的坑内根际土壤酶活性小于坑外非根际土壤酶活性,充分说明了不同的植被类型和植被的生境对根际酶活性的影响显著不同。

元马基地新银合欢恢复模式下,坑内的土壤蔗糖酶、过氧化氢酶和碱性磷酸酶活性大于坑外。研究表明,同种植被的土壤酶活性表现出根际大于非根际的特性;对于不同种植模式的比较,等高种植新银合欢的酶活性明显大于平板种植的酶活性。说明不同的植被恢复模式和种植方式对酶活性都有较大的影响,等

高垄沟模式具有较好的保土保肥能力,创造了良好的微生物环境,增强了土壤酶活性。

植被恢复模式下土壤酶活性与土壤理化性质之间有密切关系,特别是有机质、全氮与土壤蔗糖酶、过氧化氢酶和碱性磷酸酶的相关性较好。因此,用土壤酶活性来评价植被恢复的效果是可靠的。

参考文献:

- [1] Bending G D, Turner M K, Jones J E. Interactions between crop residue and soil organic matter quality and the functional diversity of soil microbial communities[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2002, 34(8):1073-1082.
- [2] Sicardi M, García-Préchac F, Frioni L. Soil microbial indicators sensitive to land use conversion from pastures to commercial *Eucalyptus grandis* (Hill ex Maiden) plantations in Uruguay[J]. *Applied Soil Ecology*, 2004, 27(2):125-133.
- [3] Bending G D, Turner M K, Wood M, et al. Microbial and biochemical soil quality indicators and their potential for differentiating areas under contrasting agricultural management regimes[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2004, 36(11):1785-1792.
- [4] Bossio D A, Fleck J A, Scow K M, et al. Alteration of soil microbial communities and water quality in restored wetlands[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2006, 38(6):1223-1233.
- [5] Garcia C, Hernandez T, Roldan A, et al. Organic amendment and mycorrhizal inoculation as a predict in afforestation of soils with *Pinus halepensis* Miller: Effect on their microbial activity[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2000, 32(8):1173-1181.
- [6] 熊东红, 周红艺, 杨 忠, 等. 金沙江干热河谷植被恢复研究[J]. 西南农业学报, 2005, 18(3):337-342.
XIONG Dong-hong, ZHOU Hong-yi, YANG Zhong, et al. Studies on revegetation in the dry-hot valley of Jinsha river[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2005, 18(3):337-342.
- [7] 杨振寅, 苏建荣, 罗 栋, 等. 干热河谷植被恢复研究进展与展望[J]. 林业科学研究, 2007, 20(4):563-568.
YANG Zhen-yin, SU Jian-rong, LUO Dong, et al. Progress and perspectives on vegetation restoration in the Dry-hot Valley[J]. *Forest Research*, 2007, 20(4):563-568.
- [8] 杨 忠, 张信宝, 王道杰, 等. 金沙江干热河谷植被恢复技术[J]. 山地学报, 1999, 17(2):57-61.
YANG Zhong, ZHANG Xin-bao, WANG Dao-jie, et al. Vegetation rehabilitation in the arid hot valleys of Jinshajiang river[J]. *Journal of Mountain Research*, 1999, 17(2):57-61.
- [9] 杨玉盛, 何宗明, 邹双全, 等. 格氏栲天然林与人工林根际土壤微生物及其生化特性的研究[J]. 生态学报, 1998, 18(2):198-202.
YANG Yu-sheng, HE Zong-ming, ZOU Shuang-quan, et al. A study on the soil microbes and biochemistry of rhizospheric and total soil in natural forest and plantation of *castanopsis kauakamii*[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 1998, 18(2):198-202.
- [10] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1978:62-176.
Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences. Soil physical and chemical analysis[M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1978:62-176.

- [11] 关松荫, 张德生, 张志明. 土壤酶及其研究法 [M]. 北京: 农业出版社, 1986: 274-276.
GUAN Song-yin, ZHANG De-sheng, ZHANG Zhi-ming. Soil enzyme and its research methods [M]. Beijing: Agriculture Press, 1986: 274-276.
- [12] 关松荫. 土壤酶与土壤肥力[J]. 土壤通报, 1980, 11(6): 41-44.
GUAN Song-yin. Soil enzyme and soil fertility [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 1980, 11(6): 41-44.
- [13] Carreira J A, Vinegla B, Garcca-Ruiz R, et al. Recovery of biochemical functionality in polluted flood-plain soils: The role of microhabitat differentiation through revegetation and rehabilitation of the river dynamics [J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2008, 40(9): 2088-2097.
- [14] 戴全厚, 刘国彬, 姜 峻, 等. 黄土丘陵区不同植被恢复模式对土壤酶活性的影响[J]. 中国农学通报, 2008, 24(9): 429-434.
DAI Quan-hou, LIU Guo-bin, JIANG Jun, et al. Effect of soil enzyme activities under different vegetation restoration in eroded hilly Loess Plateau [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2008, 24(9): 429-434.
- [15] 宋娟丽, 吴发启, 姚 军, 等. 弃耕地植被恢复过程中土壤酶活性与理化特性演变趋势研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2009, 37(4): 103-107.
SONG Juan-li, WU Fa-qi, YAO Jun, et al. Evolution of soil enzyme activities and physical & chemical characteristics during vegetation restoration on abandoned cropland [J]. *Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition)*, 2009, 37(4): 103-107.
- [16] 姜 华, 毕玉芬, 朱栋斌, 等. 恢复措施对云南退化山地草甸土壤微生物和酶活性的影响[J]. 草地学报, 2008, 16(3): 256-261.
JIANG Hua, BI Yu-fen, ZHU Dong-bin, et al. Studies on soil microbial populations and enzyme activities of degraded hilly meadow under different vegetative restoration measures in Yunnan Province [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2008, 16(3): 256-261.
- [17] 黄懿梅, 安韶山, 曲 东, 等. 黄土丘陵区植被恢复过程中土壤酶活性的响应与演变[J]. 水土保持学报, 2007, 21(1): 152-155.
HUANG Yi-mei, AN Shao-shan, QU Dong, et al. Responses and evolution of soil enzymatic activities during process of vegetation recovering [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2007, 21(1): 152-155.
- [18] LI Juan, ZHAO Bing-qiang, LI Xiu-ying, et al. Effects of long-term combined application of organic and mineral fertilizers on microbial biomass, soil enzyme activities and soil fertility [J]. *Agricultural Sciences in China*, 2008, 7(3): 336-343.
- [19] 安韶山, 黄懿梅, 郑粉莉. 黄土丘陵区草地土壤脲酶活性特征及其与土壤性质的关系[J]. 草地学报, 2005, 13(3): 233-237.
AN Shao-shan, HUANG Yi-mei, ZHENG Fen-li. Urease activity in the loess hilly grassland soil and its relationship to soil property [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2005, 13(3): 233-237.
- [20] 刘刚才, 高美荣, 朱 波, 等. 等高垄作垄沟的水土流失特点研究[J]. 水土保持通报, 1999, 19(3): 33-35.
LIU Gang-cai, GAO Mei-rong, ZHU Bo, et al. Erosion characters of ridge and ditch under contour tillage [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 1999, 19(3): 33-35.
- [21] 纪中华, 潘志贤, 沙毓沧, 等. 金沙江干热河谷生态恢复的典型模式[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(Suppl): 716-720.
JI Zhong-hua, PAN Zhi-xian, SHA Yu-cang, et al. Model construction of ecological restoration in arid hot valley of Jinsha River [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2006, 25(Suppl): 716-720.
- [22] Caravaca F, Alguacil M M, Figueroa D, et al. Re-establishment of *Re-tama sphaerocarpa* as a target species for reclamation of soil physical and biological properties in a semi-arid Mediterranean area [J]. *Forest Ecology and Management*, 2003(1), 182: 49-58.
- [23] Naseby D C, Lynch J M. Rhizosphere soil enzymes as indicators of perturbation caused by a genetically modified strain of *Pseudomonas fluorescens* on wheat seed [J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 1997, 29(9): 1353-1362.
- [24] 张 亮. 百合不同生育期根际土壤微生物和酶活性的变化[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2008: 3.
ZHANG Liang. Variation of microbial biomass and enzyme activities in the rhizosphere soil of lily at different developmental periods [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2008: 3.
- [25] 李媛媛, 周运超, 邹 军, 等. 黔中石灰岩地区不同植被类型根际土壤酶研究[J]. 安徽农业科学, 2007, 35(30): 9607-9609.
LI Yuan-yuan, ZHOU Yun-chao, ZHOU Ju, et al. Study on rhizosphere soil enzyme activities of different vegetation types in the Limestone Area of Guizhou Province [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2007, 35(30): 9607-9609.
- [26] 胡琼梅. 元江县新银合欢引种的适应性调查 [J]. 云南林业科技, 2002, 100(3): 61-65.
HU Qiong-mei. Adaptability of *Leucaena leucocephala* cv. salvador in Yuanjiang County of Yunnan Province [J]. *Yunnan Forestry Science and Technology*, 2002, 100(3): 61-65.
- [27] 陈 明. 新疆典型荒漠植被立地土壤酶活性及微生物数量研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2008: 34.
CHEN Ming. Study on soil enzyme activities and microorganisms population at site ground of desert typical vegetation in Xinjiang [D]. Wulumuqi: Xinjiang Agriculture University, 2008: 34.
- [28] Su Yong-Zhong, Li Yu-Lin, Cui Jian-Yuan, et al. Influences of continuous grazing and livestock exclusion on soil properties in a degraded sandy grassland, Inner Mongolia, Northern China [J]. *Catena*, 2005, 59(3): 267-278.
- [29] 于群英. 土壤磷酸酶活性及其影响因素研究[J]. 安徽技术师范学院学报, 2001, 15(4): 5-8.
YU Qun-ying. Study on soil phosphatase activity and their influenced factors [J]. *Journal of Anhui Agrotechnical*, 2001, 15(4): 5-8.
- [30] 陆 梅, 田 昆, 陈玉惠, 等. 高原湿地纳帕海退化土壤养分与酶活性研究[J]. 西南林学院学报, 2004, 24(1): 35-37.
LU Mei, TIAN Kun, CHENG Yu-hui, et al. Studies on soil nutrients and enzyme activities of degraded wetland in Napahai [J]. *Journal of Southwest Forestry College*, 2004, 24(1): 35-37.
- [31] 杨 刚, 谢永宏, 陈心胜, 等. 洞庭湖区退田还湖后不同恢复模式下土壤酶活性的变化[J]. 应用生态学报, 2009, 20(9): 2187-2192.
YANG Gang, XIE Yong-hong, CHEN Xin-sheng, et al. Soil enzyme activities under different restoration modes after returning farmland to lake in Dongting Lake area [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, 20(9): 2187-2192.
- [32] 王海英, 官渊波, 陈林武. 不同植被恢复模式下土壤微生物及酶活性的比较: 以嘉陵江上游地区为例[J]. 长江流域资源与环境, 2006, 15(2): 201-206.
WANG Hai-ying, GONG Yuan-bo, CHEN Lin-wu. Comparison of soil microorganism and enzyme activity in different patterns of vegetation rehabilitation: An example from upper reaches of Jialingjiang river [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2006, 15(2): 201-206.