

彭州市龙门山不同地震裸地次生 演替初期土壤酶活性研究

秦纪洪¹, 武艳镯², 孙辉², 王琴²

(1. 成都大学 城乡建设学院环境工程系, 成都 610106; 2. 四川大学 环境科学与工程系, 成都 610065)

摘 要:地震形成的次生裸地的生态恢复包括植被和土壤的结构与功能恢复两个方面。选取彭州龙门山地震崩塌地、泥石流冲积扇、滑坡体等震后形成的三个典型次生裸地恢复 3 a 后, 对表土(0—30 cm)有机碳、水溶性氮、有效磷和土壤酶活性等性质进行了研究, 以评价恢复初期不同次生裸地的土壤恢复状况。结果显示, 自然恢复 3 a, 土壤有机碳恢复到原生样地的 27%~42%, 可溶性碳恢复至原生样地的 25%~46%, 可溶性氮恢复至原生样地的 6%~14%, 有效磷恢复至原生样地的 21%~83%。土壤酶中, 过氧化氢酶活性恢复较快, 达到对照样地过氧化氢酶活性的 70% 以上, 而脲酶、蔗糖酶、碱性磷酸酶活性恢复较慢, 分别为对照样地的 5%~19%, 6%~48%, 6%~26%, 因此地震形成的次生裸地上土壤肥力质量与土壤酶活性的恢复是一个长期的过程。

关键词:汶川地震; 次生演替; 生态恢复; 土壤酶活性; 龙门山

中图分类号: S154.2

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2013)03-0055-05

Study on the Soil Enzyme Activity Dynamics under Different Ecological Restoration Models on Earquake-Induced Bareland in Mt. Longmen, Pengzhou

QIN Ji-hong¹, WU Yan-zhuo², SUN Hui², WANG Qin²

(1. Department of Environmental Engineering, College of Urban and Rural Construction, Chengdu University, Chengdu 610106, China; 2. Department of Environmental Science and Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: Ecological restoration on those secondary bareland induced by earthquake generally includes restoration of vegetation and soil structure and function. Topsoils (0—30 cm) were sampled from three typical sites of secondary bareland caused by 5·12 Wenchuan Earthquake, i. e., earthquake collapse, debris flow alluvial fan, and landslide site in Mt. Longmen, soil enzyme activities, soil organic carbon, dissolved N, and available P were examined to determine soil restoration status after 3 years of earthquake. Results showed that after three years of natural restoration of vegetation, soil organic carbon, dissolved organic C, dissolved nitrogen, available phosphorus have been recovered to 27%~42%, 25%~46%, 6%~14%, 21%~83% of those in control plots, respectively. For soil enzymes, catalase activity was restored to more than 70% of that undisturbed plots, while activities of urease, sucrase, and alkaline phosphatase restored slowly, only were restored to 5%~19%, 6%~48%, and 6%~26% of those in undisturbed plots respectively, which indicated that restoration of soil fertility and soil enzyme activity is a long-term process for those secondary bare lands induced by earthquake.

Key words: Wenchuan earthquake; secondary succession; ecological restoration; soil enzyme activities; Mt. Longmen

土壤与植物群落的相互作用是受损生态系统恢复重建的主要驱动力之一, 土壤理化与生物特征对群落演替的影响不容忽视^[1]。群落特定演替阶段的土

壤肥力状况不仅反映了群落与土壤协同作用的结果, 同时也决定着后续演替过程的土壤物质基础和初始状态^[2]。土壤活性有机碳在一定程度上可以表征土

收稿日期: 2012-10-12

修回日期: 2012-11-16

资助项目: 成都市科技局项目(10YTYB130SF-023); 成都大学校基金(2010XJZ13)和中央高校基本科研业务费(2010SCU22007)

作者简介: 秦纪洪(1981—), 女, 四川成都人, 博士, 讲师, 主要从事环境变化背景下高寒生态系统效应方面的研究。E-mail: floodqjh@gmail.com

通信作者: 孙辉(1971—), 男, 四川南充人, 副研究员, 主要从事土壤退化过程及恢复生态方面的研究。E-mail: sunhuifiles@gmail.com

壤中活性较高的那部分土壤有机碳动态,有研究表明,活性有机碳在次生演替 60 a 以上仍然不能恢复到原来状态^[3],而作为土壤重要生化特征指标之一的土壤酶活性不仅影响到群落的次生演替,同时也受到植物群落组成和多样性影响^[4]。土壤酶活性与土壤类型、植被特征(植物群落生物量、植被盖度、植物多样性等)、土壤微生物量、土壤动物类群和多样性,以及土壤酶类本身的性质有关^[5-7]。根据不同植被恢复模式、不同生态系统中对土壤酶活性的诸多研究以及土壤酶活性与植物物种多样性的研究报道显示:不同植被恢复模式对土壤酶活性的影响不同,人工恢复模式多优于自然恢复模式^[8];土壤酶活性随植被恢复过程逐渐提高,当植被恢复到一定程度后,植被类型的影响不再占主导地位^[9-10];植物群落结果和物种组成与土壤酶活性也存在一定关系^[11]。但是,有关地震迹地上次生演替进程中土壤活性有机碳、氮和磷以及土壤酶活性的特征及恢复状况方面的研究报道较少。

彭州市龙门山区域是汶川地震的重灾区,生态系统在地震中受损面积大,形成的次生裸地种类繁多^[12-13],前期已对龙门山地区一些重要的地震创面(如道路、人口聚居点、重要生态功能区)进行了人工恢复和工程治理,其余的地震破坏创面区域多处于自然生态恢复。对本区域已经开展的一些研究工作多集中在地质灾害、遥感等方面^[12,14-16],有关生态恢复初期土壤生化特征及动态方面的研究报道甚少。鉴于此,本文以四川彭州市龙门山区域震后几个典型的次生裸地及其次生演替群落为研究对象,揭示该地区不同迹地上生态恢复过程中土壤肥力状况与土壤酶的相关关系,及植被动态与土壤之间的相互作用机制,以期为该区生态恢复重建与自然保护提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于四川省彭州市地震破坏最为严重的

龙门山风景区附近(洛河桥、谢家坡、响水洞)。距彭州市约 204 km,属于四川盆地向青藏高原过渡龙门山脉中段,该区域夏无酷暑,7 月平均温度一般不超过 25℃,而 1 月平均温度在 0℃以下。一般 12 月份开始有霜冻,可延续至翌年 3 月初,全年无霜期约 250 d 左右。盛夏多暴雨山洪,且陡涨陡落,具有典型的山溪性河流水文特征。土壤类型属四川盆地山地湿润亚热带山地黄壤和山地黄棕壤,植被为亚热带常绿阔叶林。

该区域具有非常特殊的地质演化历史,是川西著名旅游胜地,又是青藏高原向川西平原过渡的生态交错带和生物多样性分布中心之一,生物多样性程度高。“5·12”特大地震给龙门山境内造成严重的地质灾害和生态灾害,使植被、基础设施、重点工程、珍稀野生动物栖息场所等均遭严重破坏;滑坡、崩塌、泥石流、堰塞湖等次生灾害严重;植被、水体、土壤等自然环境退化;资源环境承载能力下降,人均耕地减少,耕地质量下降。地震对生态系统的破坏严重影响到该区域的生态安全,因此该区域的生态恢复与重建将是今后地震灾区的重点工作之一。

1.2 样地选择与样品采集

采取野外采样和室内试验分析相结合的方法,于 2011 年 11 月 19 日对龙门山风景区附近震后自然恢复的次生裸地进行全面踏查,分别选择洛河桥(地震崩塌地)、谢家坡(大型泥石流冲积扇)、响水洞(大型滑坡体)三类典型灾毁地区为研究对象,对各样地基本情况进行调查(表 1),同时以周围未受地震破坏的原生灌丛植被为对照。每种迹地选择具有代表性的地段设 3 个采样点,在采样点上去除大型石块以及草皮,挖掘土壤剖面,采集约 1 kg 土样于布袋中,带回实验室,一部分鲜土放入 4℃的冰箱内保存,用于分析水溶性有机碳和氮、土壤酶活性,其余部分经风干、研磨,分别过 1.00 mm 和 0.25 mm 筛,装入自封袋内,用于分析土壤理化性质。

表 1 样地概况

地点		纬度	经度	高程/ m	年降水 量/mm	年均 温/℃	样地基本 特征
洛河桥	样地 I	31°26′14″	103°54′03″	1495	1660	7.4	地震崩塌裸地,坡积土壤只剩母质层,砾石含量高
	对照 I	31°26′14″	103°54′03″	1495	1660	7.4	亚热带常绿阔叶林
谢家坡	样地 II	31°17′36″	103°50′53″	1218	1390	11.5	地震诱发的大型泥石流冲积扇
	对照 II	31°17′36″	103°50′53″	1218	1390	11.5	亚热带人工林
响水洞	样地 III	31°17′12″	103°49′51″	1241	1314	12.5	大型滑坡体
	对照 III	31°17′12″	103°49′51″	1241	1314	12.5	亚热带常绿阔叶林

1.3 实验方法

1.3.1 土壤基本理化性质的测定 土壤有机碳采用 K₂Cr₂O₇ 外加热法^[17]测定,可溶性有机碳和可溶性

有机氮采用去离子水提取(水与土质量比为 5 : 1)后,用 0.45 μm 滤膜抽滤,滤液采用 K₂Cr₂O₇ 外加热法测定^[17],土壤有效磷采用碳酸氢钠浸提—钼锑抗

分光光度法测定^[18]。

1.3.2 土壤酶活性的测定 土壤理化性质分析采用常规法测定^[19-21],测定土样为风干土。过氧化氢酶采用 KMnO₄ 滴定法测定,以 20 min 后滴定 1 g 土壤所消耗的 0.002 mol/L 的 KMnO₄ 毫升数表示。脲酶采用苯酚钠比色法测定,酶活性以 1 g 土在 37℃ 下培养 24 h 分解尿素产生的 NH₄⁺-N 的毫克数表示。蔗糖酶采用 3,5—二硝基水杨酸比色法测定,酶活性以 1 g 土在 37℃ 下培养 24 h 分解蔗糖产生葡萄糖的毫克数表示。碱性磷酸酶采用 2,6—双溴苯酚氯酰亚胺比色法测定,酶活性以 1 g 土在 37℃ 下培养 24 h 分解磷酸苯二钠释放酚的毫克数表示。对于水解酶同时进行无机质对照和无土对照试验。数据采用 Excel 2003 处理,SPSS 17.0 进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 土壤碳、氮、磷状况

三类地震成因裸地恢复 3 a 后及其相应的对照原生样地的土壤全碳、可溶性碳、可溶性氮和有效磷含量见表 2。从表 2 可以看出,这三类裸地恢复 3 a 后,土壤 C,N,P 含量仍然远远低于相应的对照样地,

这表明地震成因的裸地中土壤全碳、可溶性碳、可溶性氮和有效磷的恢复速度很慢。其中,土壤全碳恢复到原生样地的 27%~42%,可溶性碳恢复至原生样地的 25%~46%,可溶性氮恢复至原生样地的 6%~14%,有效磷恢复至原生样地的 21%~83%。这些指标中,有机碳、可溶性碳和有效磷的恢复速度相对较快,可溶性氮恢复较慢。

不同地震成因裸地之间土壤有机碳和可溶性碳含量表现为地震崩塌地>泥石流冲积扇>大型滑坡体,各类样地之间差异较显著,且与其各自的对照样地之间差异也很显著($p<0.05$);可溶性氮含量实验区与原生样地均为地震崩塌地>滑坡体>泥石流冲积扇,试验区各样地间的差异不显著,但与原生地之间差异显著($p<0.05$);有效磷含量泥石流冲积扇和地震崩塌地显著高于滑坡体($p<0.05$),而原生样地为地震崩塌地>滑坡体>泥石流冲积扇,且泥石流冲积扇试验区与原生地差异不显著,其余两个样地与其原生地差异显著。表明洛河桥地震引起的崩塌迹地上土壤碳、氮、磷含量恢复速率较快,恢复年限较短,而地震形成的冲积扇和滑坡体样地上土壤碳、氮、磷含量恢复的较慢,自然恢复到对照样地水平所需时间较长。

表 2 三类地震迹地土壤 C,N,P 含量

样地编号	有机碳/(g·kg ⁻¹)	可溶性碳/(mg·g ⁻¹)	可溶性氮/(mg·g ⁻¹)	有效磷/(mg·kg ⁻¹)
对照 I	50.36±0.04d	1.86±0.02d	0.1200±0.0300b	21.27±0.13c
样地 I	21.06±2.83a	0.85±0.08a	0.0170±0.0104a	7.18±0.08a
对照 II	34.92±0.34e	1.83±0.65d	0.0420±0.0030c	11.77±0.02a
样地 II	13.22±1.90b	0.72±0.06b	0.0027±0.0023a	9.68±4.76a
对照 III	34.66±0.37e	1.92±0.23d	0.0780±0.0100d	15.94±0.35d
样地 III	9.67±1.25c	0.47±0.13c	0.0060±0.0030a	3.43±0.55b

注:表中值为平均值±标准差;右上角字母为 Duncan 法进行多重比较的结果,小写字母不同者表示同一列的数值间差异达到显著性水平($P<0.05$);样地 I 为洛河桥地震崩塌迹地,样地 II 为谢家坡泥石流冲积扇,样地 III 为响水洞滑坡体;下同。

2.2 土壤酶活性

土壤酶参与土壤物质转化与循环的整个生物地化过程。过氧化氢酶活性在一定程度上反映了土壤微生物学过程的强度,土壤脲酶是决定土壤中 N 转化的关键,土壤蔗糖酶在土壤碳循环中起着重要的作用,土壤磷酸酶活性高低直接影响着土壤中有机磷的分解转化及其生物有效性。各类样地及其对照的相

应几种土壤酶活性见表 3。从表 3 可以看出,与相应对照样地相比,各类地震次生裸地的过氧化氢酶、脲酶、蔗糖酶和碱性磷酸酶活性均显著较低,这表明地震成因裸地的土壤酶活性显著受到地震的破坏,在地震 3 a 后仍然未能恢复到对照水平,这也证明了土壤酶活性可作为土壤生态系统健康与活性强度的评价指标。

表 3 三类迹地土壤酶活性

样地类型	过氧化氢酶	脲酶	蔗糖酶	碱性磷酸酶
对照 I	9.47±0.12a	0.2300±0.0100b	30.99±0.03d	0.82±0.41c
样地 I	8.77±0.77a	0.0430±0.0280a	8.06±5.88a	0.18±0.04a
对照 II	9.24±0.02a	0.1500±0.0200c	27.08±0.78e	0.46±0.06d
样地 II	8.91±0.96a	0.0068±0.0054a	12.87±2.33b	0.12±0.05a
对照 III	9.40±0.05a	0.2000±0.0400b	25.57±0.19e	0.63±0.01e
样地 III	6.58±0.33b	0.0300±0.0080a	1.53±0.48c	0.04±0.01b

注:过氧化氢酶单位为[ml 0.002 mol/L KMnO₄/(g±20 min)];脲酶单位为[mg NH₄⁺-N/(g±d)];蔗糖酶单位为[mg 葡萄糖/(g±d)];碱性磷酸酶单位为[mg 酚(kg±d)]。

恢复 3 a 后地震崩塌地和泥石流迹地上过氧化氢酶活性分别恢复到原生样地的 87% 和 96%，比较接近原生样地，表明这两类样地的过氧化氢酶活性恢复较为迅速。响水洞滑坡体迹地上过氧化氢酶活性显著低于原生样地(70%)，表明滑坡形成的次生裸地过氧化氢酶活性恢复低于其他两类迹地。

泥石流迹地、地震崩塌地、滑坡体三类样地的土壤脲酶活性均极显著低于原生样地(恢复 3 a 后分别为原样地的 19%，5%，15%)，这表明地震成因的样地中土壤脲酶活性退化严重，恢复也极为困难，恢复时间较长。这从另外一个侧面反映出地震成因的这三类裸地的土壤氮过程微弱，很可能是植被恢复的制约因素，影响到群落的次生演替，在恢复过程中应该解决土壤氮的问题。三类样地的蔗糖酶活性也是极显著低于相应的对照样地，但恢复较快。不同样地的恢复速度存在差异，泥石流样地恢复最快(48%)，地震崩塌地次之(26%)，滑坡体恢复最慢(6%)。滑坡形成的裸地蔗糖酶活性恢复速率极其缓慢，也说明此类裸地在土壤碳过程的恢复方面也存在瓶颈。这与土壤有机碳和可溶性碳含量的规律相似，区别仅在于地震滑坡体迹地中土壤有机碳和可溶性碳含量高于泥石流迹地。这可能是与其土壤质地及含沙量有关。

从泥石流迹地、地震崩塌地、滑坡体三类样地的碱性磷酸酶活性，分别只有相应对照样地碱性磷酸酶活性的 22%，26%，6%，以泥石流迹地为最大，震崩塌地次之，滑坡体最小(表 3)。地震崩塌地和泥石流迹地之间碱性磷酸酶活性无显著性差异，但滑坡体碱性磷酸酶活性显著低于其他两类样地($p<0.05$)。这与土壤有效磷含量的规律相似。

2.3 相关性分析

2.3.1 酶与土壤肥力的相关性 分析 0—30 cm 剖面土壤酶活性和土壤碳、氮磷之间的关系(表 4)得出，氧化氢酶与土壤有机碳、可溶性碳、可溶性氮、有效磷之间的相关性不明显，均未达到显著水平，这可能是由于地震引起的不同裸地类型中土壤微生物类群有很大差异，从而改变了土壤过氧化氢酶活性。脲酶、蔗糖酶、碱性磷酸酶与土壤有机碳、可溶性碳、可溶性氮、有效磷之间呈极显著或显著相关关系。由此可见脲酶、蔗糖酶和碱性磷酸酶与土壤养分的多种指标相关性较强，可以作为评价土壤质量的生物学指标。

许多研究表明，土壤酶活性与土壤肥力间有一定的相关性，土壤酶活性总体可以作为评价土壤肥力的指标，本研究也得出类似的结论。所以，测定与土壤肥力因素有关的分布最广泛的土壤酶活性，可以间接地了解或预测某些营养物质的转化情况以及土壤肥

力的一般状况。

表 4 土壤酶与土壤 C、N、P 的相关关系

	过氧化氢酶	脲酶	蔗糖酶	碱性磷酸酶
土壤有机碳	0.727	0.951**	0.927**	0.977**
可溶性碳	0.765	0.948**	0.961**	0.934**
可溶性氮	0.598	0.955**	0.845*	0.978**
有效磷	0.786	0.890*	0.923**	0.960**
过氧化氢酶		0.616	0.828*	0.714
脲酶			0.902*	0.980**
蔗糖酶				0.933**

注：* 表示显著相关($p<0.05$)，** 表示极显著相关($p<0.01$)。

2.3.2 几种酶之间的相关性 表 4 表明，过氧化氢酶与蔗糖酶之间呈显著正相关，与脲酶和碱性磷酸酶之间相关性不明显，表明土壤中过氧化氢的水解产物可能与多糖的转化、氮的转化及有机磷之间无关；脲酶与蔗糖酶呈显著相关关系，而碱性磷酸酶与脲酶、蔗糖酶之间呈极显著相关，表明土壤中氮素转化与多糖的转化、有机磷的转化之间关系密切并相互影响。

3 结论

(1) 汶川地震的三类次生裸地恢复 3 a 后，土壤有机碳、可溶性碳、可溶性氮及有效磷含量仍远低于相应的对照样地，这表明地震成因的裸地中土壤全碳、可溶性碳、可溶性氮和有效磷的恢复速度很慢。土壤有机碳恢复到原生样地的 27%~42%，可溶性碳恢复至原生样地的 25%~46%，可溶性氮恢复至原生样地的 6%~14%，有效磷恢复至原生样地的 21%~83%。这些指标中，有机碳、可溶性碳和有效磷恢复速度的相对快些，可溶性氮恢复需要更长的时间。

(2) 土壤酶活性与相应对照样地相比，地震次生裸地的过氧化氢酶、脲酶、蔗糖酶和碱性磷酸酶活性均显著降低，这表明地震成因裸地的土壤酶活性显著受到地震的破坏，在地震 3 a 后仍未能恢复到对照水平；各类次生裸地的演替中，过氧化氢酶活性恢复较快，脲酶、蔗糖酶和碱性磷酸酶活性恢复缓慢。

(3) 相关性分析表明，氧化氢酶与土壤有机碳、可溶性碳、可溶性氮、有效磷之间的相关性不明显，脲酶、蔗糖酶、碱性磷酸酶与土壤有机碳、可溶性碳、可溶性氮、有效磷之间呈极显著或显著相关关系。说明脲酶、蔗糖酶和碱性磷酸酶与土壤肥力指标相关性相对较强，可以作为评价土壤质量的生物学指标。

参考文献：

[1] 张庆费,宋永昌,由文辉.浙江天童植物群落次生演替与土壤肥力的关系[J].生态学报,1999,19(2):174-178.

- [2] 蒋金平. 黄土高原半干旱丘陵区生态恢复中植被与土壤质量演变关系[D]. 兰州:兰州大学,2007.
- [3] 姜发艳,孙辉,林波,等. 川西亚高山云杉人工林恢复过程中表层土壤碳动态变化[J]. 应用生态学报,2009,20(11):2581-2587.
- [4] 杨万勤,钟章成,韩玉萍. 缙云山森林土壤酶活性的分布特征,季节动态及其与四川大头茶的关系研究[J]. 西南师范大学学报:自然科学版,1999,24(3):318-324.
- [5] Bandick A K, Dick R P. Field management effects on soil enzyme activities[J]. Soil Biololgy & Biochemistry, 1999,31(11):1471-1479.
- [6] Groffman P M, Mc Dowellb W H, Myersc J C, et al. Soil microbial biomass and activity in tropical riparian forests[J]. Soil Biololgy & Biochemistry,2001,33(10):1339-1348.
- [7] Yang W Q, Zhong Z C, Tao J P. Study on relationship between soil enzymic activities and plant species diversity in forest ecosystem of mountain Jinyun[J]. Sci Silvae Sin. (林业科学),2001,37(4):124-128.
- [8] 张刘东,李传荣,孙明高,等. 沿海破坏山体周边不同植被恢复模式的土壤酶活性[J]. 水土保持学报,2011,25(5):112-116.
- [9] 安韶山,黄懿梅,刘梦云,等. 宁南宽谷丘陵区植被恢复中土壤酶活性的响应及其评价[J]. 水土保持研究,2005,12(3):31-34.
- [10] 崔晓晓,王纪杰,罗惠宁,等. 喀斯特峡谷区植被恢复过程中土壤酶活性的变化[J]. 南京林业大学学报,2011,35(2):103-107.
- [11] 李媛媛,周运超,邹军,等. 黔中石灰岩地区典型灌木林土壤酶活性与植物物种多样性研究[J]. 水土保持研究,2010,17(3):245-249.
- [12] 武艳镯,秦纪洪,孙辉,等. 彭州市龙门山震后迹地植物群落生态恢复初探[J]. 水土保持研究,2012,19(3):140-146.
- [13] 杨红露,刘冬梅,孙辉. 地震的生态破坏及其恢复重建研究进展[J]. 四川环境,2009,28(4):97-101.
- [14] 陈学华,周建中. 基于 GIS 和 RS 的四川省彭州市土壤侵蚀敏感性评价[J]. 山地学报,2011,29(6):707-712.
- [15] 司渤海,第宝锋,张斌,等. 基于 GIS 的汶川地震灾区小流域土壤侵蚀评价:以彭州龙门山区为例[J]. 山地学报,2011,29(4):433-441.
- [16] 蔡柯柯,何政伟,倪忠云,等. 基于 RS 和 GIS 的彭州市震毁土地信息提取及分析[J]. 水土保持研究,2010,17(4):43-45.
- [17] Jones D L, Willett V B. Experimental evaluation of methods to quantify dissolved organic nitrogen (DON) and dissolved organic carbon (DOC) in soil[J]. Soil Biology and Biochemistry,2006,38(5):991-999.
- [18] Cambardella C A, Elliott E T. Particulate soil organic-matter changes across a grassland cultivation sequence [J]. Soil Science Society of America Journal,1992,56(3):777-783.
- [19] 中国土壤学会农业化学专业委员会. 土壤农化常规分析方法[M]. 北京:科学出版社,1984.
- [20] 周礼恺. 土壤酶学[M]. 北京:科学出版社,1987.
- [21] 和文祥,朱铭莪. 陕西土壤脲酶与土壤肥力关系研究[J]. 土壤学报,1997,34(1):42-52.