

黄土高原沟壑区土壤酶活性对植被恢复的响应 *

李林海^{1,2} 邱莉萍^{3*} 梦梦⁴

(¹北京自然博物馆, 北京 100050; ²北京林业大学生物科学与技术学院, 北京 100083; ³西北农林科技大学水土保持研究所, 陕西杨凌 712100; ⁴中国野生动物保护协会, 北京 100714)

摘要 结合野外调查与室内分析, 研究了黄土高原沟壑区小流域自然坡面和不同植被恢复条件下剖面土壤酶活性的分布特征, 以及土壤酶活性对植被恢复的响应。结果表明: 黄土高原沟壑区小流域坡地土壤的脲酶、蔗糖酶和碱性磷酸酶活性为高度变异指标, 过氧化氢酶活性则为弱变异指标。土壤剖面酶活性受植被恢复措施的显著影响, 随土层的加深, 土壤脲酶、蔗糖酶和碱性磷酸酶活性逐渐降低, 过氧化氢酶活性升高。3 种水解酶活性之间呈显著正相关, 并与土壤物理性质显著负相关, 与土壤化学性质显著正相关; 过氧化氢酶活性除与含水量和 pH 正相关外, 与其他理化性质呈负相关。土壤水解酶类可以敏感指示植被恢复的土壤效应, 植被恢复措施可以改善表层和深层土壤的生物学性质。

关键词 植被恢复 土壤酶活性 坡面 土壤剖面 黄土高原沟壑区

文章编号 1001-9332(2012)12-3355-06 **中图分类号** S154.2 **文献标识码** A

Responses of soil enzyme activities to re-vegetation in gully Loess Plateau of Northwest China. LI Lin-hai^{1,2}, QIU Li-ping³, MENG Meng⁴ (¹Beijing Museum of Nature History, Beijing 100050, China; ²College of Biological Science and Technology, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; ³Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A & F University, Yangling 712100, Shaanxi, China; ⁴China Wildlife Conservation Association, Beijing 100714, China). -Chin. J. Appl. Ecol., 2012, 23(12): 3355–3360.

Abstract: In combining field investigation with laboratory analysis, this paper studied the distribution characteristics of soil enzyme activities along the soil profiles and natural slopes with different re-vegetation treatments in gully Loess Plateau, aimed to assess the responses of the soil enzyme activities to re-vegetation. In the study area, the activities of soil urease, invertase and alkaline phosphatase along natural slopes were highly varied, but the activity of soil catalase was in adverse. The profile distribution of the soil enzyme activities varied significantly with vegetation type, and with increasing soil depth, the activities of soil urease, invertase and alkaline phosphatase decreased while the catalase activity increased. There existed significant positive correlation among the three hydrolases activities. The activities of the three hydrolases were all significantly negatively correlated with soil physical properties and positively correlated with soil chemical properties, while the soil catalase activity was positively correlated with soil moisture content and pH and negatively correlated with other soil physiochemical properties. It was suggested that the activities of soil urease, invertase and alkaline phosphatase in gully Loess Plateau could be used as the sensitive indicators for the soil responses to the re-vegetation in the Plateau, and re-vegetation could improve the biological properties in both surface and deeper soil layers.

Key words: re-vegetation; soil enzyme activity; slope; soil profile; gully Loess Plateau.

植被恢复是充分利用土壤-植物复合系统的功

能改善局部环境, 促进生物物种多样性形成的一种手段^[1]。植被恢复的生态效应不但影响退化生态系统本身, 也影响与其相邻的系统, 进而对区域和全球的生态平衡起到调节作用。土壤性质的改善以及土壤质量的改良是植被恢复的一个重要目标^[2]。土壤

* 国家自然科学基金项目(40901145)、北京市科学技术研究院萌芽项目(2011-38)和国家林业局野生动植物保护项目(林规发[2011]95号)资助。

* * 通讯作者. E-mail: qilup79@tom.com
2012-02-11 收稿, 2012-07-13 接受。

酶参与土壤中许多重要生物化学过程和物质循环过程,其活性可以直接或间接地反映植被恢复措施对土壤的改良作用^[3-5].由于土壤酶活性容易测定以及其在土壤-植物相互作用中的重要性,植被恢复下土壤酶活性的研究已经成为生态学、土壤学和微生物学的研究热点^[2,6-8].

目前,国内外学者对不同植被恢复措施下土壤酶活性的分布特征进行了研究^[6],但大多体现在植被恢复对表层土壤酶活性的影响方面^[9-10],很少探讨其对深层土壤酶活性的影响^[11],而且对土壤酶活性在坡面中的分布也未见报道.开展这方面的研究可以全面理解植被恢复后土壤性质的改良和土壤酶活性的空间分布特征,从而加深对植物-土壤关系的认识.为此,本研究选择黄土高原沟壑区南小河沟流域恢复后51年的3种水土保持林草地,以荒坡地为对照,分析坡面和剖面土壤酶活性及其对植被恢复的响应特征,探讨土壤酶活性与土壤理化性质之间的关系,以期从土壤酶学角度认识长期植被恢复对土壤环境的影响,为黄土高原沟壑区植被恢复与生态重建提供科学依据.

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

黄土高原沟壑区的南小河沟流域($107^{\circ}30' - 107^{\circ}37' E$, $35^{\circ}41' - 35^{\circ}44' N$, 海拔 $1050 \sim 1423 m$)是泾河支流蒲河左岸的一条支沟.流域长 $13.6 km$, 平均宽度 $2.7 km$, 流域面积 $36.6 km^2$.该区域属半干旱大陆气候,年均气温 $9.3^{\circ}C$, 最高气温 $39.6^{\circ}C$, 最低气温 $-22.6^{\circ}C$, 无霜期 $155 d$, 年均蒸发量 $1503.5 mm$, 年均降水量 $556.5 mm$, 其中 $6\sim9$ 月降雨量占全年降水量的 67.3% .流域土壤主要为黄土母质发育的黑垆土,粘粒含量较少,土质松软^[12].研究区为20世纪50年代在黄土塬区开展水土保持综合治理试验研究时选取的小流域.50多年来,许多研究者在此开展了植被恢复下水土保持作用的研究.

表1 采样点基本概况

Table 1 Basic condition of the sampling sites

采样点 Site	海拔 Altitude (m)	坡向 Slope direction	坡度 Gradient (°)	坡位 Slope position	恢复年限 Re-vegetation time (a)	容重 Bulk density (g·cm ⁻³)
刺槐林 <i>R. pseudoacacia</i> forest	1127	东 East	23.5	坡中 Middle slope	51	1.15
油松林 <i>P. tabulaeformis</i> forest	1139	东 East	24.0	坡中 Middle slope	51	1.10
草地 Grassland	1129	东 East	24.0	坡中 Middle slope	51	1.07
荒坡地 Abandoned slope land (CK)	1198	东 East	22.5	坡中 Middle slope	51	1.17

究^[13-14],而有关不同植被恢复对土壤酶活性的影响研究较少.

1.2 研究方法

2005年5月,在南小河沟流域选取刺槐(*Robinia pseudoacacia*)林、油松(*Pinus tabulaeformis*)林、草地作为研究样地,并以荒坡地为对照.4块采样地相邻近,坡向和海拔高度相近,各样地基本情况见表1.在样地中选取3个剖面采集土壤样品,采样深度为 $105 cm$,除 $0\sim5 cm$ 和 $5\sim15 cm$ 外, $15 cm$ 以下土层每隔 $15 cm$ 取样.在荒坡地(坡长 $260 m$)每隔 $50 m$ 采集表层 $0\sim15 cm$ 土壤混合样品(每个混合样取 $12\sim15$ 个点).所采集的土样中去除植物根系、可见植物残体和石块后,一部分混匀风干研磨过 1 和 $0.25 mm$ 筛以供土壤基本理化性质测定,剩余新鲜样品供土壤酶活性测定.土壤理化性质测定方法参见文献[15].

土壤脲酶、蔗糖酶、碱性磷酸酶和过氧化氢酶活性测定参照文献[16-17]方法,单位分别为 $\mu g NH_3-N \cdot g^{-1} \cdot h^{-1}$ 、 $\mu g glu \cdot g^{-1} \cdot h^{-1}$ 、 $\mu g ph(OH) \cdot g^{-1} \cdot h^{-1}$ 和 $mL KMnO_4 \cdot g^{-1} \cdot h^{-1}$,分别表示酶催反应下每克土每小时氨的释放量、葡萄糖释放量、酚释放量和高锰酸钾消耗量.测定时均重复3次.

1.3 数据处理

用SAS软件对试验数据进行变异性统计、方差分析、相关分析和主成分分析;采用二因素方差分析(two-way ANOVA)和最小显著差异法(LSD)比较不同数据组间的差异,用Pearson相关系数评价不同因子间的相关关系.用Excel软件作图.

2 结果与分析

2.1 荒坡地土壤酶活性沿坡面的分布特征

荒坡地土壤水解酶(脲酶、碱性磷酸酶及蔗糖酶)的活性整体上表现为坡下部高于坡上部,过氧化氢酶活性沿坡面呈先增加后降低的趋势(图1).荒坡地易遭受水土流失,坡上部土壤细颗粒易随表

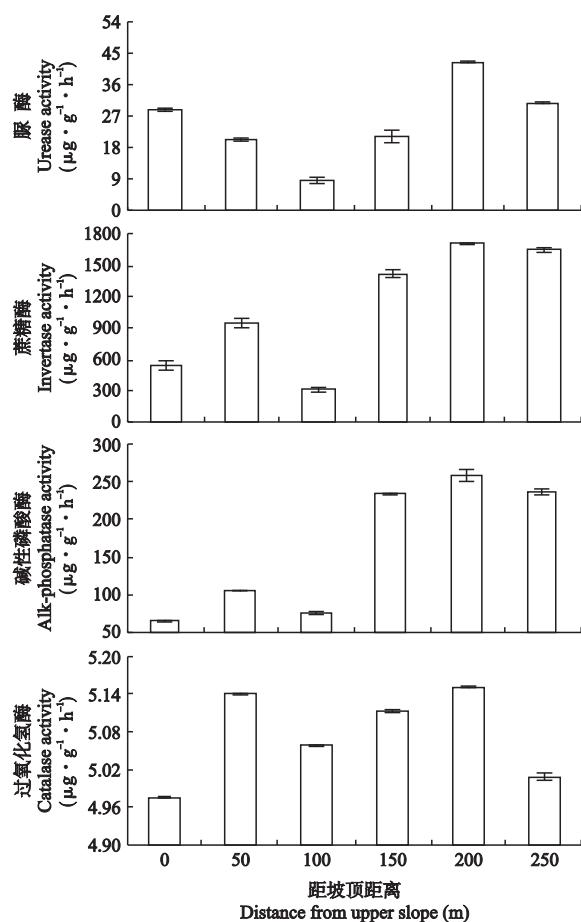


图 1 土壤酶活性沿荒坡地坡面的水平分布

Fig. 1 Distribution of four soil enzyme activities along abandoned slope land.

土径流而流失,土壤养分也随之流失,坡下部则承接了大部分从上部流下的土壤细颗粒。养分环境的优劣决定了土壤环境的优劣,土壤养分含量高,植物生长良好,微生物活动频繁,土壤酶活性就高。荒坡地土壤蔗糖酶和碱性磷酸酶活性均与有机质呈显著正相关(R^2 分别为0.91和0.98),过氧化氢酶活性与有机质相关性最低, R^2 为0.47,这与其属性为氧化还原酶活性有关。高的土壤有机质可以造成还原条件土壤环境,不利于过氧化氢酶活性的提高。坡底部过氧化氢酶活性的高低取决于氧化还原状况和凋落物分解及根系分泌物的消长。

变异系数(CV)是描述区域化变量空间变异程度的一个重要指标,可根据土壤性质的变异系数对其变异程度进行分类:CV<15%为小变异,CV在16%~35%之间为中等变异,CV>36%为高度变异^[18]。荒坡地坡面过氧化氢酶活性为弱变异性(CV=1.4%),而脲酶(CV=45.8%)、蔗糖酶(CV=53.3%)和碱性磷酸酶(CV=54.5%)活性均为高度变异性,表明水解酶活性能敏感地反映土壤环境的变化。

2.2 不同植被恢复措施对土壤酶活性剖面分布的影响

通过51年的植被恢复,表层土壤和深层土壤的水解酶活性均显著提高,过氧化氢酶活性则有所降低(图2)。在0~105 cm土壤剖面上,脲酶、碱性磷

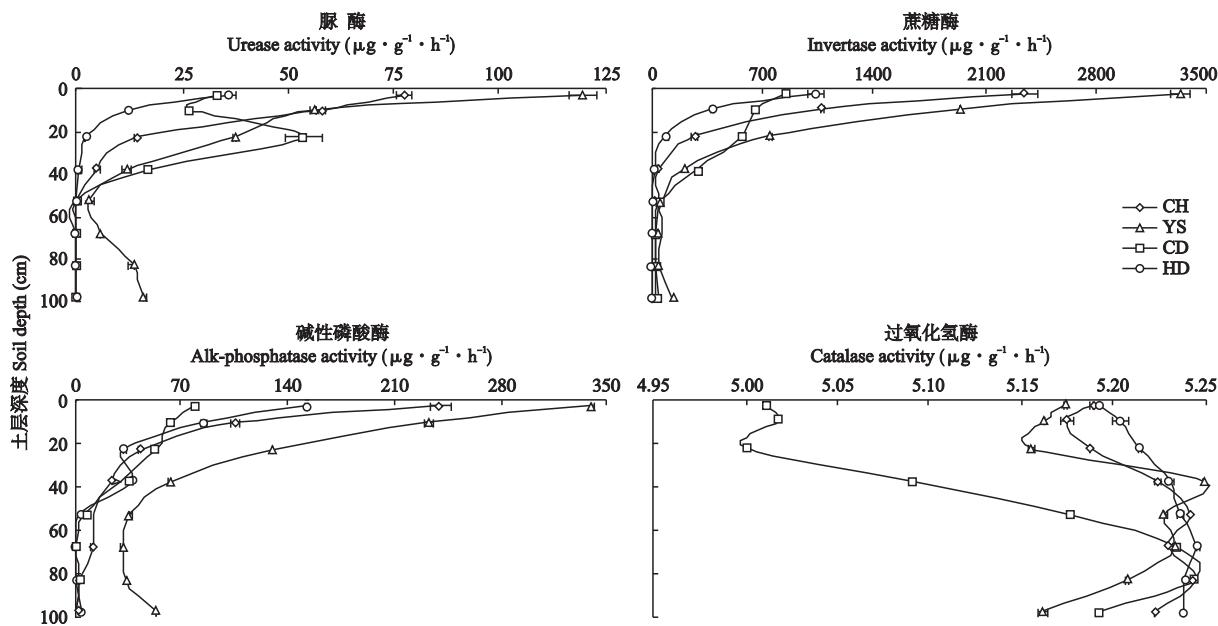


图 2 不同植被恢复剖面土壤酶活性的分布

Fig. 2 Distribution of soil enzyme activities under different re-vegetation.

CH:刺槐林 *R. pseudoacacia* forest; YS:油松林 *P. tabulaeformis* forest; CD:草地 Grassland; HD:荒坡地 Abandoned slope land (CK).

酸酶及蔗糖酶的平均活性在刺槐林地分别比荒坡地高197%、156%和39%，在油松林地比荒坡地高405%、333%和193%，在草地比荒坡地高151%、66%和25%。与此相反，刺槐林地、油松林地和草地土壤的过氧化氢酶平均活性比荒坡地低1%、1%和2%。上层土壤植被恢复对土壤酶活性改变的幅度大于深层土壤，如林地0~5 cm层土壤脲酶、碱性磷酸酶及蔗糖酶的平均活性比荒坡地分别高41~83、1324~2340和88~189 $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ ，在5~15 cm土层土壤分别比荒坡地高44~46、692~1564和21~148 $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ ，而在深层(45~105 cm)土壤比荒坡地高3~14、59~197和2~45 $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ 。此外，随土层厚度加深，脲酶、碱性磷酸酶和蔗糖酶活性均降低，过氧化氢酶活性增加。这表明植被恢复对土壤酶活性的影响与植被恢复种类、土壤类型和土壤酶类型有关。

2.3 土壤酶活性与土壤理化性质的相关性

不同植被恢复措施下，土壤脲酶、蔗糖酶和碱性磷酸酶之间极显著正相关(表2)，这与它们同属水解酶类有关，同时也表明3种酶在进行酶促反应时，既有自身的专一特性，又存在着共性，其总体活性在某种程度上反映着土壤肥力水平的高低。因此，可用脲酶、蔗糖酶和碱性磷酸酶的总体活性来衡量植被恢复的土壤效应。脲酶与过氧化氢酶呈极显著负相关，而蔗糖酶和碱性磷酸酶与过氧化氢酶无显著关系，这可能与过氧化氢酶的属性不同有关。

相关分析表明，除土壤比表面积和速效磷外，水解酶活性与土壤CEC、有机质、活性有机质、全氮、全磷、硝态氮、铵态氮及速效钾显著正相关，而与土壤含水量、物理性粘粒和pH显著负相关。过氧化氢酶与pH显著正相关，而与CEC、有机质、活性有机质、全氮、硝态氮、铵态氮和速效钾均显著负相关(表2)。这表明水解酶活性可以反映不同植被恢复措施的土壤效应，而且它们对土壤质量的表征具有较高的一致性。

将土壤酶与土壤主要理化因子进行主成分分析(表3)，结果表明，第1主成分的方差贡献率最大，为55.9%，第2主成分方差贡献率为35.9%，二者的累积方差贡献率为91.8%(>85%)，因此前2个主成分能基本反映土壤质量的变异信息。通过计算主成分各因子的载荷发现，第1主成分主要综合了

表2 土壤酶活性与土壤理化性质的相关系数

Table 2 Correlation coefficients between soil enzyme activities and physico-chemical properties ($n=32$)

项目 Item	脲酶 Urease	蔗糖酶 Invertase	碱性磷酸酶 Alk-phosphatase	过氧化氢酶 Catalase
含水量 Water content	-0.595 **	-0.607 **	-0.706 **	0.325
比表面积 Specific surface area	-0.295	-0.333	-0.406 *	-0.225
物理性粘粒 Clay	-0.395 *	-0.461 **	-0.519 **	-0.104
pH	-0.815 **	-0.843 **	-0.875 **	0.407 *
阳离子交换率 CEC	0.795 **	0.777 **	0.706 **	-0.357 *
有机质 Organic matter	0.934 **	0.920 **	0.895 **	-0.568 **
活性有机质 Labile organic matter	0.933 **	0.964 **	0.926 **	-0.417 *
全氮 Total nitrogen	0.943 **	0.934 **	0.922 **	-0.535 **
全磷 Total phosphorous	0.478 **	0.476 **	0.540 **	-0.173
硝态氮 Nitrate nitrogen	0.616 **	0.505 **	0.402 *	-0.715 **
铵态氮 Ammonium nitrogen	0.743 **	0.767 **	0.746 **	-0.468 **
速效磷 Available phosphorous	0.235	0.318	0.171	-0.243
速效钾 Available potassium	0.706 **	0.786 **	0.688 **	-0.542 **
脲酶 Urease	1	0.930 **	0.895 **	-0.474 **
蔗糖酶 Invertase		1	0.973 **	-0.312
碱性磷酸酶 Alk-phosphatase			1	-0.255

* $P<0.05$ ；** $P<0.01$ 。

表3 供试土壤主成分特征根

Table 3 Principal component eigenvalues of the soils tested

项目 Item	第1主成分 PC1	第2主成分 PC2	第3主成分 PC3
特征根 Eigenvalue	9.502	6.097	1.400
方差贡献率 (%) Variance contribution rate	55.9	35.9	8.2
累积方差贡献率 (%) Cumulative variance contribution rate	55.9	91.8	100.0

活性有机质、蔗糖酶、pH、全氮、全磷、有机质和碱性磷酸酶的变异信息，第2主成分综合了过氧化氢酶、CEC、含水量、硝态氮、脲酶、速效钾和铵态氮的变异信息(表4)。第1主成分的累积方差贡献率最大，对土壤质量起着主要作用。从分权系数来看，蔗糖酶和碱性磷酸酶都在第1主成分内，因此，蔗糖酶和碱性磷酸酶较脲酶能更敏感地反映植被恢复的土壤效应。

表4 供试土壤主成分的特征向量

Table 4 Principal component eigenvectors of the soils tested

项目 Item	第1主成分 PC1	载荷-1 LC-1(%)	第2主成分 PC2	载荷-2 LC-2(%)	第3主成分 PC3	载荷-3 LC-3(%)
含水量 Water content	0.134	17.1	0.332	67.1	0.336	15.8
比表面积 Specific surface area	-0.124	14.6	-0.289	50.9	0.496	34.5
物理性粘粒 Clay	-0.280	74.3	0.187	21.3	-0.178	4.4
pH	-0.319	96.9	0.067	2.7	-0.052	0.4
阳离子交换量 CEC	-0.180	30.9	0.336	69.0	-0.016	0
有机质 Organic matter	0.309	90.6	0.023	0.3	0.254	9.1
活性有机质 Labile organic matter	0.323	99.1	-0.038	0.9	-0.003	0
全氮 Total nitrogen	0.313	93.1	-0.106	6.9	-0.011	0
全磷 Total phosphorous	0.312	92.8	-0.098	5.8	-0.100	1.4
硝态氮 Nitrate nitrogen	0.184	32.0	0.332	67.2	-0.077	0.8
铵态氮 Ammonium nitrogen	0.213	43.1	0.302	55.8	-0.090	1.1
速效磷 Available phosphorous	0.181	31.3	-0.224	30.7	-0.521	38.0
速效钾 Available potassium	0.136	17.7	0.318	61.8	0.383	20.5
脲酶 Urease	0.184	32.1	0.331	66.9	-0.087	1.1
蔗糖酶 Invertase	0.322	98.8	-0.040	1.0	0.041	0.2
碱性磷酸酶 Alk-phosphatase	0.300	85.5	-0.150	13.7	-0.079	0.9
过氧化氢酶 Catalase	0.022	0.4	-0.379	87.8	0.290	11.8

载荷-1, 2, 3 分别指各主成分上承载的各因子的方差百分率 Loading capacity-1, 2, 3 were the percent of variance in principal component of different factors respectively. PC: Principal component; LC: Loading capacity.

3 讨论

目前,国内外学者在植被恢复和土壤酶活性关系方面的研究主要集中在表层土壤^[10-12],对深层土壤的关注较少。本研究表明,土壤水解酶类(脲酶、蔗糖酶和磷酸酶)与土壤物理性质呈显著负相关,与土壤化学性质呈显著正相关,可以敏感指示植被恢复的土壤效应;不同植被恢复措施提高了表层土壤水解酶的活性,对深层土壤转化酶活性的改善也有一定的作用。说明在黄土高原沟壑区,林草植被恢复可以显著改善表层和深层土壤生物学性质,而且对生物学性质的影响深度与植被措施类型有关。植被恢复措施对深层土壤酶活性的改善作用可能以下几个方面因素有关:1)表层土壤酶活性和理化性质的改善:植被恢复后,有机物质在表层土壤积累,显著改善了表层土壤的生物学和理化性质,使得酶类物质在表层土壤富集^[1-3],为酶类自身以及随土壤颗粒向深层土壤的迁移提供了重要来源;2)深层土壤理化性质的改善:植被恢复后,深层土壤的理化性质和微生物学性质得到改善^[6,8],促进了土壤酶活性的提高;3)植物根系向深层土壤的穿插:林草植被恢复后形成大量植物根系,并向深层土壤穿插,经过长期的恢复,深层土壤可积累大量的植物根系^[19-20],根系代谢作用释放出大量的酶类,提高深层土壤酶活性,此外,深层土壤根系周转也刺激了土

壤酶活性的提高;4)土壤水力学性质的改善以及较高的降水量:植被恢复后,土壤容重有所减小,土壤入渗性能和透水性增强^[8,15],有利于土壤物质随水分运动的迁移,促进了酶类物质向深层土壤的迁移,研究区较高的降水量也加强了酶类物质从表层向深层土壤的迁移以及在深层土壤的积累。

本研究中,过氧化氢酶呈现出与其他酶类不同的响应特征。这是因为过氧化氢酶属氧化还原酶类,其活性大小除与凋落物组成及根系分泌物有关外,土壤环境是影响其分布的重要因素。过氧化氢酶活性在整个剖面上均以草地土壤最低。草地植物为1年生草本植物,其凋落物层较厚,覆盖在土壤表层,大大增加了土壤有机质的含量,并促进了对降雨的截流。草地土壤含水量(13.27%)和有机质含量(9.57 g·kg⁻¹)基本高于其他林分(10.81%~13.01%和5.85~11.53 g·kg⁻¹),而这两者的含量越高,土壤环境越易处于还原状态,从而抑制土壤过氧化氢酶活性。荒坡地由于表层无太多的覆被物,土壤通气性好,大大促进了微生物的繁殖,提高了过氧化氢酶的活性。

本研究表明,在黄土高原降雨量相对较多的区域,长期的林-草植被恢复可以促进深层土壤生物学性质的改善。因此,在植被恢复后土壤生物学性质变化预测和生态环境脆弱地区植被恢复的土壤质量评价方面,应该考虑深层土壤生物学性质的变化,以得

到比较全面深入的预测和评价结果。另一方面,从土壤生物学性质改善的角度,黄土高原地区植被建设中应该选择根系生物量大、根系分布深、耗水量低的物种,以达到防止水土流失、改善土壤质量的生态效果。

参考文献

- [1] Hu B (胡斌), Duan C-Q (段昌群), Wang Z-H (王震洪), et al. Effect of vegetation rehabilitation measures on soil fertility and soil enzymatic activity in degraded ecosystem. *Acta Pedologica Sinica* (土壤学报), 2002, **39**(4): 604–609 (in Chinese)
- [2] Wei XR, Shao MA, Zhang XC, et al. Landform affects on profile distribution of soil properties in black locust (*Robinia pseudoacacia*) land in loessial gully region of the Chinese Loess Plateau and its implications for vegetation restoration. *African Journal of Biotechnology*, 2009, **8**: 2984–2992
- [3] Ndour NYB, Chotte JL, Pate E, et al. Use of soil enzyme activities to monitor soil quality in natural and improved fallows in semi-arid tropical regions. *Applied Soil Ecology*, 2001, **18**: 229–238
- [4] Senwo ZN, Tabatabai MA. Aspartase activity of soils. *Soil Science Society of America Journal*, 1996, **60**: 1416–1422
- [5] Cao H (曹慧), Sun H (孙辉), Yang H (杨浩), et al. A review on soil enzyme activity and its indication for soil quality. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology* (应用与环境生物学报), 2003, **9**(1): 105–109 (in Chinese)
- [6] Wei XR, Shao MA, Shao HB, et al. Fractions and bioavailability of soil inorganic phosphorus in the Loess Plateau of China under different vegetations. *Acta Geologica Sinica*, 2011, **85**: 263–270
- [7] Wei X-R (魏孝荣), Shao M-A (邵明安). Distribution of soil properties as affected by landforms in small watershed of loessial gully region. *Journal of Natural Resources* (自然资源学报), 2007, **22**(6): 946–954 (in Chinese)
- [8] Qiu LP, Zhang XC, Cheng JM. Effects of black locust (*Robinia pseudoacacia*) on soil properties in the loessial gully region of the Loess Plateau, China. *Plant and Soil*, 2010, **332**: 207–217
- [9] Wang H-Y (王海英), Gong Y-B (宫渊波), Chen L-W (陈林武). Comparison of soil microorganism and enzyme activity in different patterns of vegetation rehabilitation: An example from upper reaches of Jialingjiang River. *Resources and Environment in the Yangtze Basin* (长江流域资源与环境), 2006, **15**(2): 201–206 (in Chinese)
- [10] He B (何斌), Wen Y-G (温远光), Yuan X (袁霞), et al. Studies on soil physical and chemical prop-
- erties and enzyme activities of different mangrove communities in Yingluo Bay of Guangxi. *Scientia Silvae Sinicae* (林业科学), 2002, **38**(2): 21–26 (in Chinese)
- [11] Zhang C-S (张昌顺), Fan S-H (范少辉), Xie G-D (谢高地). Research on soil enzyme activities and its relations with soil fertility under typical bamboo (*Phyllostachys edulis*) plantations in northern Fujian Province. *Journal of Natural Resources* (自然资源学报), 2010, **25**(2): 236–248 (in Chinese)
- [12] Huang M-B (黄明斌), Kang S-Z (康绍忠), Li Y-S (李玉山). Evolution of moisture environment of small watershed in gully region of Loess Plateau. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 1999, **10**(4): 411–414 (in Chinese)
- [13] Li Y-J (李亚娟), Song X-Y (宋孝玉), Li H-Y (李怀有), et al. Research on soil infiltration of Nanxiaohegou basin in Gansu Xifeng. *Journal of Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry* (Natural Science) (西北农林科技大学学报·自然科学版), 2006, **34**(12): 147–152 (in Chinese)
- [14] Chen H (陈浩), Wang K-Z (王开章). A study on the slope-gully erosion relationship on small basins in the loess areas at the middle reaches of the Yellow River. *Geographical Research* (地理研究), 1999, **18**(4): 363–372 (in Chinese)
- [15] Qiu L-P (邱莉萍), Zhang X-C (张兴昌). Vegetation types effects on soil properties in small watershed of the Loess Plateau. *Research of Soil and Water Conservation* (水土保持研究), 2010, **17**(3): 64–68 (in Chinese)
- [16] Guan S-Y (关松荫). *Soil Enzyme and Its Research Methods*. Beijing: China Agriculture Press, 1986 (in Chinese)
- [17] Хазиев ФХ. Trans. Zheng H-Y (郑洪元). *Soil Enzyme*. Beijing: China Agriculture Press, 1976 (in Chinese)
- [18] Wilding LP. Spatial variability: Its documentation, accommodation and implication to soil surveys// Nielson DR, Bouma J, eds. *Soil Spatial Variability*. Wageningen: Purdoc, 1984: 166–193
- [19] Wei XR, Shao MA, Fu XL, et al. Changes in soil organic carbon and total nitrogen after 28 years grassland afforestation: Effects of tree species, slope position, and soil order. *Plant and Soil*, 2010, **331**: 165–179
- [20] Wei XR, Shao MA, Fu XL, et al. Distribution of soil organic C, N and P in three adjacent land use patterns in the northern Loess Plateau, China. *Biogeochemistry*, 2009, **96**: 149–162

作者简介 李林海,男,1977年生,博士,助理研究员。主要从事生物资源保护与管理研究。E-mail: lilinhai1977@sina.com

责任编辑 李凤琴