

黄土丘陵区不同植被恢复模式对土壤酶活性的影响

戴全厚^{1,2}, 刘国彬¹, 姜峻¹, 薛蕙^{1,3}, 翟胜⁴

(¹西北农林科技大学 / 中科院水利部水土保持研究所 杨凌 712100; ²贵州大学林学院 贵阳 550025;

³西安理工大学 西安 710048; ⁴聊城大学环境与规划学院 聊城 252059)

摘要: 为了解侵蚀环境下植被恢复对土壤酶活性的影响,以典型侵蚀环境黄土丘陵区纸坊沟流域生态恢复 30a 植被长期定位试验点为研究对象,选取坡耕地为参照,分析了植被恢复过程中土壤脲酶、磷酸酶、蔗糖酶、淀粉酶、纤维素酶、过氧化氢酶、多酚氧化酶及理化性质的演变特征。结果表明,黄土丘陵区的坡耕地由于不合理的人为干扰,土壤理化性质和酶活性较弱,通过植被恢复可以有效的改善土壤肥力,不同恢复模式对土壤酶活性和肥力的改善作用不同,恢复 30a,脲酶活性增加 33%~213%,磷酸酶活性增加 275%~394%,蔗糖酶活性增加 70%~210%,纤维素酶活性增加 24%~48%,过氧化氢酶增加 32%~96%,多酚氧化酶降低 23%~29%,淀粉酶变化规律不同。不同植被恢复模式其生物特性不同,对土壤酶活性影响也不同。相关性分析说明磷酸酶、蔗糖酶、纤维素酶和多酚氧化酶与其它因子相关性相对较强,可以作为评价土壤质量的生物学指标。

关键词: 黄土丘陵区; 植被恢复; 土壤酶活性

中图分类号: S154.36 文献标识码: A

Effect of Soil Enzyme Activities under Different Vegetation Restoration in Eroded Hilly Loess Plateau

Dai Quanhou^{1,2}, Liu Guobin¹, Jiang Jun¹, Xue Sha^{1,3}, Zhai Sheng⁴

(¹Northwest A & F University / Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling 712100; ²College of Forestry, Guizhou University, Guiyang 550025;

³Xi'an University of Technology, Xi'an Shanxi 710048;

⁴College of Environment and Programming, Liaocheng University, Liaocheng 252059)

Abstract: In order to find the effect of soil enzyme activities under different vegetation restoration in Hilly Loess Plateau, seven kinds of soil enzyme activities and physicochemical properties were studied. In this study, six long trial sites located in Zhifanggou Catchment were studied, and a farmland was chosen as the references. The results showed that soil physical and chemical properties were poor in slope farmland, but vegetations recovery can increased them apparently. After 30 years of de-farming and vegetation recovery, soil urease, phosphatases, invertase, cellulose and catalase, respectively, increased by the percentage of 33%~213%, 275%~394%, 70%~210%, 24%~48% and 32%~96% as compared to the farmland, while polyphenol oxidase decreased by the percentage of 23%~29% and amylase had no obvious effect. Different types of vegetation restoration are different in improving soil enzyme activities. The significant relationships were observed between phosphatase, invertase, cellulose, polyphenol oxidase and physical and chemical properties of soil. We think that the four kinds of soil enzyme activities can be used as indicators of soil quality.

Key words: eroded Hilly Loess Plateau, vegetations recovery, soil enzyme activities

基金项目 国家重点基础研究发展计划(2007CB407205)、中科院科学院西部行动计划(KZCX2-XB2-05)和国家自然科学基金重点项目(90502007)资助。

第一作者简介:戴全厚,男,1969年出生,汉族,陕西长武人,副教授(贵州大学特聘教授,吉林省水保院特邀研究员),博士,主要从事水土保持和生态恢复重建研究。通信地址:550025 贵州省贵阳市贵州大学林学院, E-mail: qhdai@foxmail.com fc.qhdai@gzu.edu.cn。

通讯作者:姜峻,男,1968年出生,四川井沿县人,硕士,主要从事牧草引种和草地生态研究。通信地址:712100 陕西省杨凌中国科学院水利部水土保持研究所。Tel: 029-87019090, E-mail: jiangj@cern.ac.cn。

收稿日期:2008-06-25, 修回日期:2008-07-21。

恢复植被是黄土高原丘陵区水土保持与生态建设的重要措施,可以通过土壤-植物复合系统的功能改善提高土壤质量。土壤酶是具有蛋白质性质的高分子催化有机物分解的一类生物催化剂,主要来源于土壤微生物的活动、植物根系分泌物和动植物残体腐解过程中释放的酶^[1],参与土壤中各种有机质的分解、合成与转化,以及无机物质的氧化与还原等过程,是土壤生态系统代谢的一类重要动力,在很大程度上反映土壤物质循环与转化的强度,常被用来反应土壤生态系统变化的预警和敏感指标^[2,3]。目前,对侵蚀环境下的黄土丘陵区植被恢复后的土壤质量演变已有个别研究^[4-6]。相对于研究较为集中的土壤理化性质,针对植被恢复对土壤酶活性这种更加灵敏的指标报道相对较少。笔者旨在从土壤酶学角度研究该区域不同植被恢复后土壤生物学分异特征,为揭示生态恢复过程中土壤物质循环、转化、分解及代谢机制,评价生态恢复效果、土壤质量管理提供科学依据。

1 材料与与方法

1.1 研究区概况

中国科学院安塞水土保持试验站纸坊沟流域(E109°13'46"~109°16'03", N36°46'42"~36°46'28")位于陕西省安塞县,该区地形破碎,沟壑纵横,属黄土高原丘陵沟壑地貌,暖温带半干旱季风气候,海拔1010~1400m,年均气温8.8℃,年均降水量505.3mm。土壤类型以黄土母质上发育而成的黄绵土为主,抗冲抗蚀能力差,植被类型处于暖温带落叶阔叶林向干草原过渡的森林草原带。该流域用于生态恢复定位试验

研究,生态系统先后经历严重破坏期(1938—1958年)、继续破坏期(1959—1973年)、不稳定期(1974—1983年)、稳定恢复改善期(1983—1990年)和良性生态初步形成期(1991年至今)。经过30多年的水土保持综合治理,通过林草植被和工程建设等措施,有效遏制了该流域的土壤侵蚀,成功地恢复了退化生态系统,林地面积从1980年的不足5%增加到40%以上,流域生态经济系统进入良性循环阶段^[7]。

研究样地设在该流域的蟠龙山上,1975年在原坡耕地上开始植被恢复长期定位试验,建立了刺槐(*Robinia pseudoacacia* L., RP)、柠条(*Caragana korshinskii* Kom., CA)和油松(*Pinus tabulaeformis* Carr., PT)3种纯林,油松-紫穗槐(*P. tabulaeformis* - *Amorpha fruticosa* Linn., PA)与刺槐-紫穗槐(*R. pseudoacacia* - *A. fruticosa*, RA)2种混交林,同时还设有1个自然恢复的荒草地(Fallow land, FL)。

1.2 样品采集及分析

在试验地各处理小区按S型选取6点,每点采集0~20cm混合土样,重复3次,同时以盘龙山对面相同坡位坡向的坡耕地(Sloping Cropland, CK)为对照,其基本特征如表1。土壤样品带回室内风干、过筛后迅速测定土壤酶活性及理化性质等因子。土壤pH值、全氮、全磷、有机质、碱解氮、速效磷及速效钾含量采用常规方法测定^[8],具体结果见表2。蔗糖酶测定:3,5-二硝基水杨酸比色法,蔗糖酶活性以24h后1g土壤中含有的葡萄糖毫克数表示;淀粉酶测定:3,5-二硝基水杨酸比

表1 样地基本特征

样地	编号	地貌	坡向	坡度/°	海拔/m	土壤类型	林下草本类型
破耕地	CK	梁坡	N	22	1175	黄绵土	谷子
荒草地	FL	梁坡	N	20	1206	黄绵土	铁干蒿
刺槐林	RP	梁坡	NE10°	32	1129	黄绵土	胡枝子-长芒草
柠条林	CA	梁坡	N45° W	24	1029	黄绵土	铁干蒿-长芒草
油松林	PT	梁坡	N	27	1166	黄绵土	铁杆蒿-披针苔草
油松-紫穗槐	PA	梁坡	N	24	1142	黄绵土	铁干蒿-长芒草
刺槐-紫穗槐	RA	梁坡	N56° W	27	1185	黄绵土	铁干蒿

表2 各样地土壤性状属性

样地	有机碳 /(g·kg ⁻¹)	全氮 /(g·kg ⁻¹)	碱解氮 /(mg·kg ⁻¹)	全磷 /(g·kg ⁻¹)	速磷 /(g·kg ⁻¹)	C/N比	速效钾 /(g·kg ⁻¹)	pH (H ₂ O, 1: 2.5)	容重 /(g·cm ⁻³)
CK	2.74	0.365	20.90	0.55	1.64	7.51	105.4	8.73	1.17
FL	6.59	0.769	50.77	0.59	2.44	8.57	162.7	8.70	1.28
RP	5.94	0.731	41.48	0.61	1.97	8.12	174.3	8.74	1.08
CA	5.74	0.710	45.12	0.58	2.32	8.08	192.3	8.70	1.19
PT	6.42	0.663	41.14	0.57	1.77	9.68	122.7	8.74	1.11
PA	6.83	0.806	46.12	0.60	2.40	8.47	168.3	8.73	1.06
RA	9.27	0.880	71.34	0.62	2.79	10.53	203.6	8.62	1.15

色法,淀粉酶活性以 24h 后 1g 土壤中含有的麦芽糖毫克数表示;纤维素酶测定:硝基水杨酸比色法,纤维素酶活性以 72h 后 10g 土壤生成的葡萄糖毫克数表示;脲酶测定:靛酚比色法,脲酶活性以 24h 后 1g 土壤中 NH₃-N 的毫克数表示;磷酸酶测定:磷酸苯二钠比色法,磷酸酶活性 1g 土壤中 24h 后苯酚的毫克数;过氧化氢酶测定:滴定法(0.1N 的标准 KMnO₄ 液滴定)酶的活性以 1g 土壤 20min 后消耗 0.1N KMnO₄ 毫升数表示;多酚氧化酶测定:碘量滴定法,酶活性用滴定相当于 1g 土壤滤液的 0.01N I₂ 的毫升数^[1]。

1.3 数据统计分析

ANOVA、相关分析均采用 SAS 6.12 软件进行分析。

2 结果与分析

2.1 不同植被恢复模式对土壤酶活性的影响

2.1.1 脲酶 土壤脲酶广泛存在于土壤中,由简单蛋白质构成的生物催化剂,一般认为是由土壤中的微生物产生的,存在于土壤中能催化尿素分解、具有氨化作用的高度专一性的一类好气性水解酶。土壤脲酶将土壤中的有机化合物尿素水解为氨态氮,使植物所需的养分转化为有效态,对提高氮素的利用率和促进土壤氮素循环具有重要意义。如表 3 相对于坡耕地,不同植被恢复模式恢复 30a 后对土壤脲酶活性影响不同,其中撂荒后脲酶活性显著降低,刺槐-紫穗槐混交林与坡耕地没有显著差异,其余 5 种恢复模式较坡耕地均有显著升高,增幅达 33%~213%,由高到低依次为柠条林、刺槐林、油松-紫穗槐混交林和油松林。安韶山^[9]等认为植被恢复可以提高土壤脲酶活性,且依赖于有机

质的存在,当有机质含量增加时,酶积极参与其转化分解过程,活性提高。该研究发现,大多数植被恢复模式可以提高脲酶活性,从而促进氮素转化为可供植物利用的有效态养分,提高氮素利用效率和加速土壤氮素循环,土壤质量得到显著改善,不同恢复模式由于物种及管理方式不同,对脲酶改善作用不同。

2.1.2 磷酸酶 磷酸酶能够催化磷酸单酯的水解及无机磷酸释放,是生物磷代谢的重要酶类。土壤磷酸酶在土壤磷素循环中起重要作用,可以加速有机磷的脱磷速度。在 pH4~9 的土壤中均存在着磷酸酶,它的积累对土壤磷素的有效性有重要作用,其活性可以被用来评价土壤磷素生物转化方向与强度指标和作为生态系统对外界环境因素响应的指示物^[10,11]。不同植被恢复对土壤磷酸酶活性影响显著,恢复 30 年后相对于坡耕地显著增加,增幅达 275%~394%(表 3),由高到低依次为刺槐-紫穗槐混交林 > 油松-紫穗槐混交林 > 柠条林 > 荒草地 > 油松林 > 刺槐林,可见混交林对增加磷酸酶活性最高。磷是植物生长的主要营养元素之一,土壤中 95% 的磷是以迟效性状态存在,而且不同磷形态其有效性不同。全磷含量高时并不意味着磷素供应充足,而全磷含量低于 0.8~1.0g/kg 时,土壤常出现磷供应不足。土壤有机磷占土壤全磷的 10%~25%,其中只有少部分是有效的,绝大部分有机磷必须在土壤微生物和磷酸酶作用下,将磷酸肌醇、磷脂等含磷有机化合物转化为植物可利用的无机磷酸盐^[12] 释放出生物有效磷。黄土丘陵区土壤磷素贫瘠,随着生态恢复,使磷酸酶活性明显增强,从而促进有机磷向无机磷转化,为植物生长提供了更好的立地条件,土壤质量得到恢复。

表 3 不同植被模式土壤酶活性分异特征

样地	脲酶	淀粉酶	磷酸酶	蔗糖酶	纤维素酶	多酚氧化酶	过氧化氢酶
CK	0.566d	1.227ab	0.315e	1.052e	1.436c	2.810a	0.488d
FL	0.397e	1.008bc	1.294bc	2.488bc	2.131a	2.157b	0.643c
RP	1.272b	0.852c	1.184c	3.271a	1.967ab	2.122b	0.956a
CA	1.770a	0.893c	1.321bc	2.169cd	1.953ab	2.107b	0.691c
PT	0.751c	1.398a	1.242c	1.788d	1.782b	2.072b	0.667c
PA	0.888b	1.056bc	1.425ab	2.797ab	2.120a	2.007b	0.785b
RA	0.602d	1.045bc	1.556a	2.535bc	1.946ab	1.987b	0.799b

注:同一列中所带字母不相同,表明样地之间达到 1% 的显著差异。

2.1.3 蔗糖酶 蔗糖酶广泛存在于各种土壤中,能断裂蔗糖分子中果糖基的 - 葡糖苷键,使蔗糖水解成葡萄糖和果糖,直接参与土壤有机质的代谢过程,对增加土壤中易溶性营养物质起着重要作用,通常土壤肥力越高,蔗糖酶活性越强。蔗糖酶活性不仅是表征土壤生物学活性的一个重要的酶,而且其强弱可作为土壤健康质

量、营养供应能力、熟化程度和肥力水平的评价指标^[1,13]。研究发现不同的植被恢复模式可以显著增加土壤蔗糖酶活性(表 3),6 种恢复模式增幅分别达 70%~210%,由高到低依次为刺槐林 > 油松-紫穗槐混交林 > 刺槐-紫穗槐混交林 > 荒草地 > 柠条林 > 油松林。土壤蔗糖酶对碳素转化起到了重要的作用,植物根圈大量

活性碳组分将直接作为微生物的碳源和能源物质,可以引起根圈微生物种群、土壤呼吸速率等生物或生物化学活性的变化^[14-16],另一方面凋落物中的 C/N 增加可能会影响异养型微生物的组成和活性^[2],进一步导致对土壤蔗糖酶活性的影响,这主要是由于土壤蔗糖酶的主要来源之一为土壤微生物的增殖及其死亡残体的胞溶物质。由此推测随着生态恢复,植被物种增加,为土壤中微生物提供的营养物质增多,微生物代谢增强,蔗糖酶活性明显提高,土壤肥力得到改善,而不同恢复模式由于物种的差异导致凋落物组分和微生物群落的异质性,进一步造成对土壤蔗糖酶活性的影响差异。

2.1.4 纤维素酶 土壤中含有大量的来自于植物残体和有机肥料的纤维素,约占两者干重的 35%~60%。这些纤维素在纤维素酶的作用下,形成腐殖质和释放碳素养分,并在营养元素的循环过程中起到重要作用。如表 3 所示,相对于坡耕地,不同植被恢复模式可以显著增强土壤纤维素酶活性,但影响大小不一,增幅分别达 24%~48%,由高到低依次为荒草地、油松-紫穗槐混交林 > 刺槐林、刺槐-紫穗槐混交林、柠条林 > 油松林。杨海君等^[17]研究认为放牧可以导致张家界索溪峪景区土壤纤维素酶活性降低,谈嫣蓉等^[18]认为轻度退化草地的纤维素酶和过氧化物酶活性 > 重度退化 > 过度退化,由此可见生态退化可以导致土壤纤维素酶降低。该研究认为,随着生态恢复,归还到土壤中的物质增多,纤维素酶活性明显增强,从而促进纤维素分解,形成葡萄糖,为植物生长提供了更好的可利用物质,土壤质量得到恢复。

2.1.5 淀粉酶 淀粉是土壤中有机残体的组成成分,淀粉酶能使淀粉水解生成糊精和麦芽糖,它是参与自然界碳素循环的一种重要的酶。土壤淀粉酶广泛存在于土壤中,主要来源于植物根系分泌物、植物残体及微生物分泌,参与土壤有机碳的代谢,其活性大小表征着有机碳代谢的快慢^[13,19]。不同植被恢复模式对土壤淀粉酶活性影响不同(表 3),相对于坡耕地,除油松显著增加外,其余模式显著降低,荒草地、油松-紫穗槐混交林和刺槐-紫穗槐混交林之间没有显著差异,降幅最大的是刺槐林和柠条林。

2.1.6 过氧化氢酶 过氧化氢酶广泛存在于土壤中和生物体内,由于过氧化氢酶的存在促进了过氧化氢的分解,有利的防止它对生物体的毒害作用^[1]。生物呼吸过程和有机物各种生物化学氧化反应形成的过氧化氢酶,它的作用在于破坏对生物体(包括土壤)内有氧的过氧化氢,可以被用作表示土壤氧化过程的强度,而土壤氧化过程的强度又形成了土壤有机质合成及其有

效性有关的土壤动力学现象,无论在哪一种土壤中,其活性都能表示出土壤氧化还原能力的特点,所以过氧化氢酶活性与土壤有机质转化速度密切相关,深入地研究其活性具有重要意义^[20-23]。研究发现植被恢复对土壤过氧化氢酶活性改善作用明显,不同模式作用不同(表 3),相对于坡耕地,恢复 30 年后增幅达 32%~96%,其中以刺槐林增幅最高,其次为刺槐-紫穗槐混交林和油松-紫穗槐混交林,最后是荒草地、柠条林和油松林。由此可以推断生态恢复可以有效地缓解生物氧化作用对土壤和生物体的破坏能力,促进有机质的物质转化。

2.1.7 多酚氧化酶 土壤多酚氧化酶主要来源于土壤微生物、植物根系分泌物及动植物残体分解释放的酶,它是一种复合性酶^[24-27],主要参与腐殖质组分芳香族有机化合物的转化,能把该类化合物氧化成醌,醌在适宜条件下,醌与土壤中蛋白质、氨基酸、糖类、矿物等物质反应生成大小分子量不等的有机质和色素,其中有一类就是最初的胡敏酸分子,完成土壤芳香族化合物循环^[28]。植物中木质素经过微生物分解产生酚类物质^[29],如果酚类物质得不到转化,将对土壤和水体造成污染,因此研究土壤中多酚氧化酶有非常重要的意义。研究发现,相对于坡耕地,不同植被恢复模式恢复 30a 可以显著降低土壤多酚氧化酶活性,但不同恢复模式差异不明显(表 3)。目前对生态恢复后土壤多酚氧化酶变化说法不一,郑华^[30]等认为随着生态恢复多酚氧化酶活性呈降低趋势,而李传荣^[31]和张咏梅^[32]等则得出相反的结论。该研究也认为生态恢复可以降低土壤多酚氧化酶活性,可以推测在黄土丘陵区植被的凋落物经过一系列转化最终形成腐殖质的过程,很可能不是通过酚类转化进一步缩合形成腐殖质,而是通过它以外的途径,比如有机体直接降解再缩合形成腐殖质等途径,间接证明了生态恢复后物质转化的途径逐步多样化。

2.2 土壤酶活性与养分的相互耦合关系

对土壤酶活性与主要肥力因子进行相关性分析,结果表明(表 4),土壤脲酶活性和淀粉酶活性和其它类酶活性及主要土壤肥力因子相关性较弱,并未达到显著水平,磷酸酶活性与纤维素酶活性、多酚氧化酶活性和主要肥力因子相关性密切,达到显著或极显著水平;蔗糖酶除与纤维素酶和过氧化氢酶活性显著或极显著相关外,还与全氮、全磷显著极显著相关;纤维素酶活性与磷酸酶、蔗糖酶、多酚氧化酶活性和全氮显著或极显著相关;多酚氧化酶活性除与磷酸酶、纤维素酶活性相关性显著外,还与有机碳、全氮、碱解氮和全磷

表 4 土壤酶活性与养分因子相关性分析

R	脲酶	淀粉酶	磷酸酶	蔗糖酶	纤维素酶	多酚氧化酶	过氧化氢酶	有机碳	全氮	碱解氮	全磷	速效磷	速效钾
脲酶	1.000	-0.547	0.200	0.276	0.163	-0.255	0.385	-0.089	0.102	-0.078	0.086	-0.025	0.420
淀粉酶		1.000	-0.349	-0.703	-0.569	0.302	-0.588	-0.202	-0.445	-0.314	-0.596	-0.498	-0.766
磷酸酶			1.000	0.722	0.862*	-0.983**	0.647	0.916**	0.974**	0.866*	0.783*	0.774*	0.788*
蔗糖酶				1.000	0.836*	-0.743	0.922**	0.615	0.805*	0.565	0.891**	0.543	0.727
纤维素酶					1.000	-0.836*	0.612	0.693	0.891**	0.666	0.736	0.731	0.725
多酚氧化酶						1.000	-0.705	-0.872*	-0.940**	-0.785*	-0.754*	-0.651	-0.717
过氧化氢酶							1.000	0.587	0.706	0.507	0.864*	0.376	0.666

注: * 表示差异达显著水平($P < 0.05$), ** 表示差异达极显著水平($P < 0.01$)。

显著相关;过氧化氢酶和其它酶类及主要肥力因子关系较弱,仅与蔗糖酶和全磷显著相关。以上结果说明土壤酶活性种类不同,所催化的生化反应功能差异较大,从而形成与不同的肥力因子的相关性差异较大,总体来说,磷酸酶、蔗糖酶、纤维素酶和多酚氧化酶与其它因子相关性相对较强,可以作为评价土壤质量的生物学指标。

3 结论

黄土丘陵区的坡耕地由于不合理的人为干扰,水土流失严重,土壤理化性质和酶活性较弱,通过植被恢复可以有效的改善土壤肥力,不同恢复模式对土壤酶活性和肥力的改善作用不同,恢复 30 年,脲酶活性增加 33%~213%,磷酸酶活性增加 275%~394%,蔗糖酶活性增加 70%~210%,纤维素酶活性增加 24%~48%,过氧化氢酶增加 32%~96%,多酚氧化酶降低 23%~29%,淀粉酶变化规律不明显。不同植被恢复模式其生物特性不同,对土壤酶活性影响也不同。相关性分析说明磷酸酶、蔗糖酶、纤维素酶和多酚氧化酶与其它因子相关性相对较强,可以作为评价土壤质量的生物学指标。

参考文献

[1] 关松荫.土壤酶及其研究法[M].北京:农业出版社,1986.
 [2] 周礼恺.土壤酶学[M].北京:科学出版社,1987:118-159.
 [3] 南京土壤所.土壤微生物研究法[M].北京:科学出版社,1985.
 [4] 巩杰,陈利顶.黄土丘陵区小流域植被恢复的土壤养分效应研究[J].水土保持学报,2005,19(1):93-96.
 [5] 焦峰,温仲明.黄土丘陵区退耕土壤养分变异特征[J].植物营养与肥料学报,2005,11(6):724-730.
 [6] 王国梁,刘国彬.黄土丘陵区小流域植被建设的土壤水文效应[J].自然资源学报,2002,17(3):339-344.
 [7] Guobin Liu. Soil conservation and sustainable agriculture on Loess Plateau: challenge and prospective[J]. AMBIO, 1999, 28(8):663-668.

[8] 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.
 [9] 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.
 [10] 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.
 [11] 沈菊培,陈振华,陈利军,等.草甸棕壤水稻田磷酸酶活性及对施肥措施的响应[J].应用生态学报,2005,16(3):583-585.
 [12] Molla M A Z, Chowdhury A A. Microbial mineralization of organic phosphate in soil. Plant and Soil, 1984, 78:393-399.
 [13] 严昶升.土壤肥力研究方法[M].北京:农业出版社,1988:263-269.
 [14] Korner C, AITIOne JA. 1992. Responses to elevated carbon dioxide in artificial tropical ecosystems. Science, 257:1672-1675.
 [15] Rogers GS, Milham PJ, Thibaud MC.1996 Interactions between rising CO2 concentration and nitrogen supply in cotton growth and leaf nitrogen concentration. Austr J Plant Physiol, 23:119-125.
 [16] Zak DR, Pregitzer KS, Curtis PS. 1993. Elevated atmospheric CO2 and feedback between carbon and nitrogen cycles, Plant Soil, 151: 105-117.
 [17] 杨海君,肖启明,谭周进,等.放牧对张家界索溪峪景区土壤酶活性及微生物作用强度的影响 [J]. 农业环境科学学报 2006,25(4): 913-91.
 [18] 谈嫣蓉,蒲小鹏,张德罡,等.不同退化程度高寒草地土壤酶活性的研究[J].草原与草坪,2006,3:20-22.
 [19] 韩永伟,韩建国,张蕴薇,等.农牧交错带退耕还草对土壤淀粉酶和脲酶活性的影响[J].草地学报,2005,13(1):59-63.
 [20] 孙炳寅,朱长生.互花米草(Spartina alterniflora)草场土壤微生物生态分布及某些酶活性的研究[J].生态学报,1989,9(3):240-244.
 [21] 鲁萍,郭继勋,朱丽,等.东北羊草草原主要植物群落土壤过氧化氢酶活性的研究[J].应用生态学报 2002,13(6):675-679.
 [22] 杨万勤,王开运.土壤酶研究动态与展望[J].应用与环境生物学报,2002,8(5):564-570.
 [23] 张咏梅,周国逸,吴宁.土壤酶学的研究进展[J].热带亚热带植物学报,2004,12(1):83-90.
 [24] Nelson Durin, Elisa Esposito. Potential applications of oxidative enzymes and phenoloxidase-like compounds in wastewater and soil

- treatment:a review[J]. Applied Catalysis B: Environmental, 2000, 28: 83-99.
- [25] Heribert Insam. Developments in soil microbiology since the mid 1960s[J]. Geoderma, 2001, 100:389-402.
- [26] Grigofios Diamantidis, Aline Eosse, Patrick Potier, et al. Purification and characterization of the first bacteria1laecase in the rhizospheric bacterium Azospirillum lipoferum [J]. Soil Biology & Biochemistry, 2000, 32:919-927.
- [27] Giuseppe Toseano, Maria Letizia Colarieti, Guido Greco. Oxidative polymerisation of phenols by a phenol oxidase from green olives[J]. Enzyme and Microbial Technology, 2003, 33:47-54.
- [28] C Trasar-Cepeda, M C Leiro s, S Seoane, et al. Limitations of soil enzymes as indicators of soil pollution[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2000, 32:1867-1875.
- [29] Y Ma J Y Zhang, M H Wong. Microbial activity during composting of anthracene-contaminated soil [J]. Chemosphere, 2003, 52: 1505-1513.
- [30] 郑华,欧阳志云,易自力.红壤侵蚀区恢复森林群落物种多样性对土壤生物学特性的影响[J].水土保持学报,2004,18(4):137-141.
- [31] 李传荣,许景伟,宋海燕,等.黄河三角洲滩地不同造林模式的土壤酶活性[J].植物生态学报,2006,30(5):802-80.
- [32] ZHANG Yong-Mei, ZHOU Guo-Yi, WU Ning, et al. Soil Enzyme Activity Changes in Diferent-Aged Spruce Forests of the Eastern Qinghai-Tibetan Plateau.Pedosphere, 2004, 14(3):305-312.