

# 退化马尾松林下土壤障碍因子分析及酶活性研究\*

赵汝东<sup>1,2</sup> 樊剑波<sup>1</sup> 何园球<sup>1†</sup> 宋春丽<sup>1,2</sup> 屠人凤<sup>1,2</sup> 谭炳昌<sup>1,2</sup>

(1 中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008)

(2 中国科学院研究生院, 北京 100049)

## Research on soil enzyme activities and the obstacle factors for restoration of degraded *Pinus massoniana* plantation

Zhao Rudong<sup>1,2</sup> Fan Jianbo<sup>1</sup> He Yuanqiu<sup>1†</sup> Song Chunli<sup>1,2</sup> Tu Renfeng<sup>1,2</sup> Tan Bingchang<sup>1,2</sup>

(1 Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

(2 Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**关键词** 红砂岩; 马尾松; 退化生态系统; 土壤障碍因子; 土壤酶活性

**中图分类号** S155.4+8 **文献标识码** A

红壤丘陵区因其独特的地形气候条件,是我国水土流失最严重地区之一。自20世纪80年代起,我国南方开展了大规模植树造林活动,水土流失得到明显治理<sup>[1]</sup>。马尾松(*Pinus massoniana*)由于其较强适应能力而作为主要树种进行栽种,但长期种植马尾松造成林下土壤酸化、土壤肥力下降、林下植物多样性降低甚至马尾松枯死等严重问题,导致林地生态功能失调,水土保持功能下降。针对这些问题国内外土壤科技工作者已进行了大量的研究,如柳若安<sup>[2]</sup>与Kong<sup>[3]</sup>等的研究涉及铝毒对马尾松的影响;杨承栋<sup>[4]</sup>与王晓龙<sup>[5]</sup>等研究不同代马尾松人工林土壤理化学性质的变化趋势。土壤酶可在土壤中稳定存在,与微生物共同推动土壤生物化学进程,在土壤养分循环、有机物降解等方面起重要作用,并广泛用于林地生态恢复及土壤质量监测研究<sup>[6-9]</sup>。但这些研究多集中在土壤酸化、林下土壤质量评价、养分循环及生化作用等方面,而对马尾松退化生态系统恢复的土壤障碍因子研究较少。本文以我国红砂岩母质发育红壤下的马尾松退化生态系统为研究对象,目的是寻找马尾松退化生态系统恢复的土壤障碍因子,探讨马尾松退化生态系统下土壤酶活性的响应规律,这对防治马尾松林下土壤退化及林地的可持续经营有重要意义。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于江西省鹰潭市刘家站五分场(28°15'20"N, 116°55'30"E),土壤为红砂岩发育的红壤(铝质湿润淋溶土)。地形以岗地为主,海拔为35~60 m,坡度为5~8°;属中亚热带湿润季风气候区,年均降水量1794 mm,主要集中在4~6月,年均温17.6℃,≥10℃积温为5528℃,无霜期262 d。

### 1.2 样地描述

通过实地调查坡度坡向及林龄相近的马尾松林的长势及林下植被生长情况,选定四种不同退化程度的林型作为研究样地,即退化程度较轻马尾松林(I)、退化程度中等马尾松林(II)、退化程度较重马尾松林(III)和裸地开阔地(BL),见表1。为防止临近效应,各样

\* 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-YW-438-1)资助

† 通讯作者, E-mail: yqhe@issas.ac.cn

作者简介: 赵汝东(1982-),男,博士研究生,研究方向为林地土壤生态学。E-mail: zhrd255@gmail.com

收稿日期: 2010-05-04; 收到修改稿日期: 2010-08-31

地之间距离大于100 m, 样地远离人口聚居区, 林分人为干扰轻微, 抚育措施相同。

### 1.3 研究方法

调查和采样时间为2009年3月上旬。各研究样地内设置3个10 m×10 m的样方, 样方间距大于10 m, 样方内分0~20 cm和20~40 cm两层(裸地无20~40 cm样品)随机采取五点混合样, 分装于保鲜袋保存; 同时采环刀样, 3次重复, 进行土壤容重测定。所采集样品, 一部

表 1 不同退化程度马尾松样地描述

样地	马尾松林分特征						林下植被
	林龄 (a)	林分密度 (tree hm <sup>-2</sup> )	平均胸径 (cm)	冠幅 EW(m)×SN(m)	平均树高 (m)	郁闭度	
I	10~20	1 200	9.9	4.5×4.2	7	0.9	<1.3 m 马尾松(冠径 0.8 m), 马鞭草 ( <i>Verbena officinalis</i> Linn, 盖度 0.8)、蜜甘草( <i>Phyllanthus ussuriensis</i> , 盖度 0.2)、稗草 ( <i>Echinochloa crusgalli</i> , 盖度<0.1)
II	11~20	1 300	3.9	3.1×3.5	4	0.7	<1.3 m 马尾松(冠径 1.2 m), 茅草( <i>Imperata cylindrica</i> , 盖度 0.9)、芒萁( <i>Dicranopteris dichotoma</i> , 盖度<0.1)
III	12~21	900	3.2	3.0×3.0	5	0.6	<1.3 m 马尾松(冠径 1.0 m), 茅草(盖度 0.5)、芒萁(盖度<0.1)
BL							茅草(盖度<0.1), 芒萁(盖度<0.1)

分鲜样放于冰箱中 4 °C 冷藏保存, 用于酶活性的测定; 其他样品自然风干、碾磨, 分过 2 mm、1 mm、0.25 mm 和 0.15 mm 筛, 备用。

土壤有机质测定采用重铬酸钾容量-外加热法, 全氮采用半微量开氏法, 全磷采用碱熔比色法, 全钾采用碱熔火焰光度计法, 速效钾采用乙酸铵火焰光度计法, 碱解氮采用碱解扩散法, 交换性铝采用氯化钾交换法, pH 采用 pH 计法<sup>[10]</sup>。土壤蔗糖酶采用活性 3, 5 二硝基水杨酸比色法, 土壤脲酶采用靛酚蓝比色法, 土壤多酚氧化酶采用邻苯三酚比色法, 土壤过氧化氢酶采用高锰酸钾滴定法<sup>[8, 11]</sup>。

### 1.4 数据处理

分析数据采用 Excel2003 与 SPSS 16.0 进行分析处理。

## 2 结果与讨论

### 2.1 不同退化阶段马尾松林下土壤理化性质

表 2 数据表明, 随马尾松林退化程度加重, 0~20 cm 土层土壤含水量随退化程度加重呈下降趋势, 20~40 cm 土层土壤含水量大于上层, 但无明显变化规律; 土壤容重变化规律不明显, 可排除其为限制性因素; 土层厚度随马尾松退化程度加重而减小。

表 2 不同退化阶段马尾松林土壤物理指标描述

样地	层次(cm)	土壤含水量(%)	土壤容重(g cm <sup>-3</sup> )	土层厚度(cm)
I	0~20	0.20±0.00a	1.49±0.07a	55
	20~40	0.22±0.01a	1.38±0.03ab	
II	0~20	0.19±0.00a	1.58±0.07a	43
	20~40	0.24±0.01a	1.33±0.05b	
III	0~20	0.17±0.02b	1.28±0.04c	41
	20~40	0.22±0.00a	1.43±0.03a	
BL	0~20	0.16±0.00b	1.47±0.05a	23

注: 同列中相同层次不同字母表示  $p<0.05$  水平差异显著

纯林林下凋落物质量差及降解缓慢是导致林下土壤退化的关键因素, 土壤含水量制约作用仅限于 0~20 cm 土层, 也应与马尾松细根系分布特征有关。林下土壤含水量的主要影响因素是植被特征, 随马尾松退化程度加重, 郁闭度减小, 并且林下植被减少, 因此认为土壤含水量的变化是林地退化影响的结果。土层厚度随退化程度加重而减小, 前人亦有类似报道<sup>[4]</sup>, 但本研究限于数据较少, 需进一步调查方能得出正确结论。上述结果说明, 土壤含水量、

土壤容重非目标因素，而土层厚度对退化马尾松生态恢复的制约亦需进一步研究。

表 3 数据显示，土壤 pH、有机质、全氮、全磷、碱解氮在 0~20 cm 和 20~40 cm 土层均随退化程度加重呈减小趋势；交换性铝、全钾和速效钾随退化程度加重而增大；速效磷未能检出。土壤酸化是森林土壤的一个普遍现象，土壤酸化引起森林土壤 pH 降低、盐基离子流失、铝活化等，林地土壤酸化的原因很多，主要与酸沉降、林地类型母质等因素有关<sup>[12]</sup>。本研究中，随退化程度加重，pH 降低、交换性铝活性升高，表现出酸化加重。该区域是受酸雨影响较为严重地区<sup>[13]</sup>；母质富铝且土壤对酸化缓冲较弱；土壤酸化会引起一些养分元素有效性降低<sup>[12, 14]</sup>。因此，可认为研究区域土壤酸化是酸沉降、母质等综合作用的结果，土壤酸化是限制退化马尾松林恢复的限制性因素，特别是酸化引起的铝活化对马尾松有毒害<sup>[14-15]</sup>。此外，有机质矿化出的质子是土壤酸化来源之一<sup>[16]</sup>，有机质的络合作用可使交换性铝活性降低。马尾松退化梯度中，有机质含量与活性铝含量和 pH 间的相关性分别达显著 ( $r=-0.735$ ,  $p<0.05$ ) 和极显著水平 ( $r=0.878$ ,  $p<0.05$ ) 也表明有机质与土壤酸化间存在联系。至于 pH 下层值大于上层值，应归因于马尾松凋落物腐化分解产生的有机酸等致酸物质的影响，以及马尾松细根集中于 0~20 cm，根系分泌致酸物质有关；20~40 cm 土层交换性铝大于 0~20 cm 土层，应归因于淋溶及 20~40 cm 土层有机质含量较小<sup>[14, 17]</sup>。有机质含量主要受气候和凋落物质和量的影响，湿热气候条件下，有机质矿化严重，若有机物输入较少，较易缺乏。林下土壤无剧烈干扰情况下，种植年限相近的马尾松退化梯度与有机质含量降低趋势一致，林下植被种类和相应盖度也降低，马尾松凋落物较少，且易随风吹散，开阔裸地甚至基本无有机物料输入，造成裸地有机质一直处于矿化状态，因此研究样地中有机质的不同表现是马尾松退化的结果而非原因。森林土壤中氮主要受氮沉降和矿化制约，虽然有报道认为氮对林分生长的限制不再是个普遍问题，因为空气污染加重而使空气中的氮沉降可以满足植被对氮的需求，但氮素的研究仍是植被恢复的研究重点<sup>[18]</sup>。全氮和碱解氮随退化程度加重而减小，裸地开阔地的含量最低但与退化程度严重的马尾松林的值相比差异不显著，应与有机质含量较低有关。因此，土壤氮及其有效性是退化马尾松恢复的障碍因素。全钾和速效钾随退化程度加重而增大，且 0~20 cm 土层全钾含量在裸地达最大值，这与张劲峰等<sup>[19]</sup>的研究结论不同，全钾主要来自母质矿化，速效钾来源于凋落物，马尾松林下凋落物较少，对钾的吸收量大于归还量少，马尾松长势越好，钾亏损越大，20~40 cm 土层全钾含量大于 0~20 cm 土层值，原因在于马尾松吸收较强的细根系集中于 0~20 cm 土层。

表 3 不同退化阶段马尾松林土壤化学性质描述

样地	层次 (cm)	交换性铝 ( $\text{cmol kg}^{-1}$ )	pH	有机质 ( $\text{g kg}^{-1}$ )	全氮 ( $\text{g kg}^{-1}$ )	全磷 ( $\text{g kg}^{-1}$ )	全钾 ( $\text{g kg}^{-1}$ )	碱解氮 ( $\text{mg kg}^{-1}$ )	速效钾 ( $\text{mg kg}^{-1}$ )
I	0~20	3.83±0.38b	4.52±0.01a	6.13±0.69a	0.247±0.041a	0.103±0.016a	3.00±0.41a	32.0±8.9a	19.5±6.0a
	20~40	4.51±0.53b	4.64±0.01a	4.07±0.43a	0.205±0.021a	0.113±0.015a	3.81±0.06a	16.1±3.6a	13.7±3.0a
II	0~20	3.53±0.76b	4.50±0.02a	4.80±0.40b	0.225±0.002a	0.088±0.012a	3.14±0.68a	29.1±6.7a	20.5±6.7a
	20~40	5.36±0.95b	4.56±0.02b	3.64±0.14a	0.146±0.015b	0.074±0.013a	3.80±0.82a	20.4±7.1a	19.7±7.8a
III	0~20	9.15±0.32a	4.41±0.02b	3.70±0.94b	0.107±0.008b	0.065±0.005b	7.58±1.03b	31.9±2.4ab	48.2±6.8b
	20~40	8.91±0.16a	4.48±0.01c	2.51±0.42b	0.099±0.008c	0.062±0.003b	8.54±0.98b	14.1±2.9a	53.0±7.8b
BL	0~20	9.62±0.24a	4.38±0.01c	2.21±0.58c	0.078±0.027b	0.111±0.002a	9.09±0.13c	13.2±1.7b	38.7±4.4b

注：同列中相同层次不同字母表示  $p<0.05$  水平差异显著

所以分析认为，全钾和速效钾受马尾松退化程度影响，也即全钾和速效钾并非退化马尾松恢复的土壤障碍性因素。土壤中磷主要来源母岩矿化，全磷含量随马尾松退化程度加重而减小，无树裸地样地的全磷值为最大，说明马尾松林地磷出于亏损状态，马尾松退化程度受土壤全磷限制，全磷是影响马尾松退化的土壤因素之一，这也符合多数研究所持的热带亚热带林地缺磷的观点<sup>[20]</sup>。因此，土壤氮及其有效性、土壤酸化和土壤全磷应是退化马尾松林地恢复的土壤障碍因素。

表 4 土壤理化性质与酶活性间相关系数 (0~20 cm)

	URE	CAT	PPO	OM	TN	TP	TK	AN	AK	EX	pH	WC	BD
INV	0.776**	0.092	0.455	0.863**	0.887**	-0.420	-0.907**	0.634*	-0.171	-0.824**	0.890**	0.897*	0.306
URE		0.207	0.703*	0.673*	0.638*	-0.381	-0.768**	0.660*	-0.428	-0.667*	0.723**	0.639*	0.114
CAT			0.391	0.092	0.272	-0.435	-0.460	0.350	-0.434	-0.368	0.184	0.103	0.189
PPO				0.509	0.633*	-0.304	-0.577	0.692*	0.692*	-0.678*	0.594	0.396	0.387
OM					0.907**	0.210	-0.761*	0.766**	-0.611*	-0.735*	0.878**	0.718*	0.347
TN						0.026	-0.929**	0.745**	-0.792**	-0.927**	0.932**	0.844*	0.511
TP							0.052	-0.364	-0.405	-0.147	-0.174	0.066	0.691
TK								-0.772*	0.787*	0.974*	-0.945**	-0.851**	-0.515
AN									-0.611*	-0.606	0.721*	0.608*	0.033
AK										0.856**	-0.787**	-0.701*	-0.694*
EX											-0.961**	-0.849**	-0.742**
pH												0.908*	0.575
WC													0.509

注: INV 转化酶; URE 脲酶; CAT 过氧化氢酶; PPO 多酚氧化酶; EX 交换性铝; WC 含水量; BD 土壤容重。下同。\* $p < 0.05$ , \*\* $p < 0.01$

## 2.2 不同退化阶段马尾松林下土壤酶活性

不同退化阶段马尾松土壤酶活性见图 1。从图 1 可以看出, 0~20 cm 土层酶活性大于 20~40 cm 土层。0~20 cm 土层转化酶活性随马尾松退化程度加重呈减小趋势, 脲酶活性总体表现出减小趋势, 虽然各退化程度间差异不显著, 但各阶段与裸地差异性显著 ( $p < 0.05$ ); 过氧化氢酶和多酚氧化酶活性规律性不明显, 与各理化性质间亦未表现出明显相关性。20~40 cm 土层四种酶活性规律性均不明显, 可能的原因是土壤层次越深土壤酶活性受植被影响越小<sup>[21-22]</sup>, 也因此不容易表现出规律性。

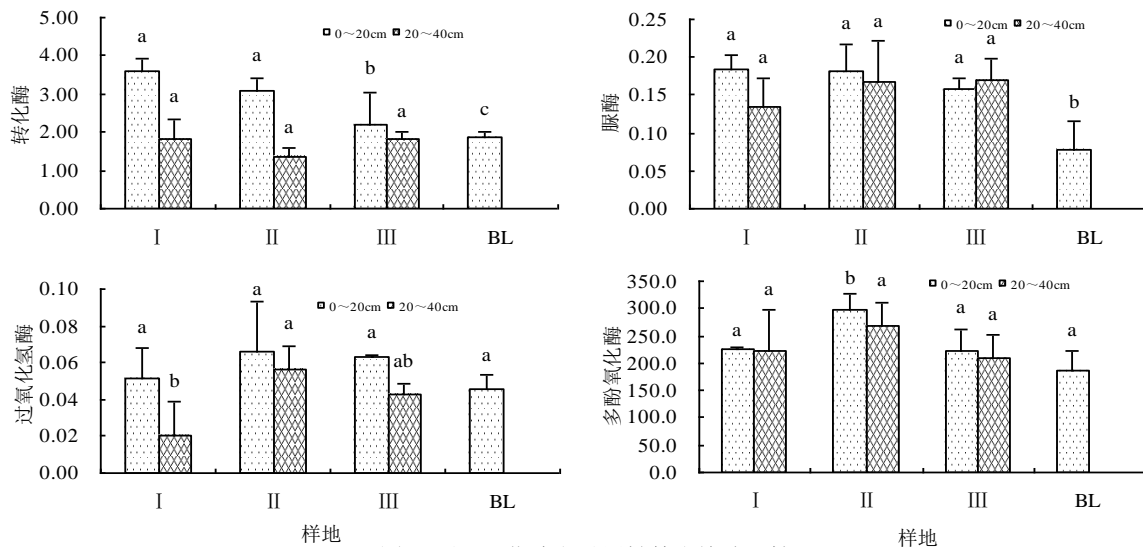


图 1 不同退化阶段马尾松林土壤酶活性

注: 转化酶活性单位: Glucose  $\text{mg g}^{-1}$  soil, 37 °C, 24h; 脲酶活性单位:  $\text{NH}_3\text{-N mg g}^{-1}$  soil, 37 °C, 24h; 过氧化氢酶活性单位:  $0.1 \text{ mol L}^{-1} \text{ KMnO}_4 \text{ ml g}^{-1}$  soil, 20min; 多酚氧化酶活性单位: gallnut  $\text{mg g}^{-1}$  soil, 30 °C, 3h

### 2.2.1 土壤转化酶与脲酶活性 土壤转化酶在小分子糖分解中起关键作用, 其受土壤有机质

含量及类型影响较大<sup>[7, 11]</sup>。随退化程度加重林下有机物积累降低, 0~20 cm 土层土壤转化酶活性随之减弱, 并与有机质、全氮、全钾、碱解氮之间相关关系达极显著或显著水平, 说明 0~20 cm 土层转化酶活性与马尾松退化生态系统有明显响应关系, 与林下土壤有机质及养分含量等因素关系密切。土壤脲酶可促使土壤有机氮向挥发态或植物可利用态转化, 其活性受土壤有机质含量、速效氮及环境(如酸度, 水分)等因素影响<sup>[4, 6]</sup>, 表 4 数据显示, 0~20 cm 土层脲酶活性与有机质、全氮、碱解氮、交换性铝、pH 和含水量间存在显著或极显著相关性, 这与前人结论基本一致<sup>[23-24]</sup>。0~20 cm 土层转化酶和脲酶活性与大部分理化性质间相关性显著, 说明脲酶和转化酶可作为研究区域马尾松人工林退化的监测指标, 特别是两种酶与交换性铝、pH 和含水量关系的研究对马尾松土壤酸化研究有重要意义<sup>[3, 17]</sup>。0~20 cm 土层转化酶和脲酶活性均与 pH 间存在极显著性正相关关系, 前人研究的结论不一致应与研究区域母质和植被不同有关<sup>[23-25]</sup>。因此, 红砂岩母质发育的红壤 0~20 cm 土层转化酶和脲酶活性对马尾松生态系统退化, 尤其是林下土壤酸化有较敏感的响应关系。

**2.2.2 土壤过氧化氢酶与多酚氧化酶活性** 土壤过氧化氢酶活性反映土壤氧化还原能力, 可加速土壤中有毒物质的分解<sup>[4, 11]</sup>。研究显示有关林地土壤过氧化氢酶活性的研究结论尚不一致, 如杨小青等<sup>[26]</sup>对卡斯特石漠化生态系统研究发现随植被恢复过氧化氢酶活性呈增大趋势; 而同样母质下周玮等<sup>[27]</sup>则指出 0~20 cm 土层过氧化氢酶活性随顶坛花椒林龄增加变化不明显。因此, 不同恢复模式下过氧化氢的变化应与恢复植被不同有关。本研究土壤过氧化氢酶活性随退化程度加重变化不明显, 应与马尾松林地本身的生境有关, 说明在研究区域, 过氧化氢酶活性对马尾松生态系统退化不敏感。多酚氧化酶对多酚类物质起分解作用, 可降低其对土壤的毒害, 0~20 cm 土层多酚氧化酶活性变化随马尾松退化程度加重无明显规律, 但多数学者<sup>[21, 27-28]</sup>认为土壤多酚氧化酶活性随植被恢复而减小, 因此, 植被类型及母质对多酚氧化酶活性影响较大。本研究结果说明马尾松人工林退化过程中不会产生刺激多酚氧化酶的芳香类化合物, 林下植被对林下土壤养分循环与地力保持方面有重要作用<sup>[29]</sup>。表 4 表明过氧化氢酶与多酚氧化酶活性与大部分养分指标相关性不显著, 说明林下植被对过氧化氢酶和多酚氧化酶活性影响也不明显, 可能与林下植被较少有关。

### 3 结论

对红砂岩母质发育红壤而言, 在样地自然、林龄等条件相近情况下, 全氮含量及氮有效性偏低、土壤全磷的缺乏及土壤酸化是马尾松退化生态系统恢复的主要土壤障碍因子; 土壤含水量、土壤容重非土壤障碍因子。所研究的 4 种酶活性在 20~40 cm 土层中均未表现出明显规律性, 0~20 cm 土层酶活性均大于 20~40 cm 土层值。0~20 cm 土层中, 转化酶和脲酶活性随马尾松退化程度加重而减小, 与大部分理化指标存在相关关系, 可作为马尾松林地退化的监测指标; 过氧化氢酶和多酚氧化酶活性对马尾松退化生态系统响应不明显, 表明马尾松退化生态系统不会产生催生两种酶活性的有毒物质。

氮和磷是对森林的限制性元素, 较多研究指出温带地区森林易缺氮而热带地区森林区富氮而缺磷, 但这并不具有规律性, 除了与气候有关外, 还与母质、地形、林分等因素有关, 所以应根据具体情况研究, 尤其是对于亚热带地区这样过渡地带。退化林地退化生态恢复土壤障碍因素研究一般有两种方法, 即野外调查和元素控制实验, 较为理想的方法是控制某些元素并结合地上部观测的方法, 但应对林地的衰退过程进行观测, 这需要较长的时间和较大的工作量。土壤酶活性受地上植被影响较大, 不同的林分类型酶活性会有迥异的结论, 酶活性变异较大, 因此酶活性研究应根据不同的林分类型, 并结合其他指标研究, 单个酶的研究意义不大。

### 参考文献

- 
- [1] 梁音, 张斌, 潘贤章, 等. 南方红壤丘陵区水土流失现状与综合治理对策. 中国水土保持科学, 2008, 6(1):22-27
- [2] 柳若安, 刘厚田. 酸度和铝对马尾松生长的影响. 植物学报, 1995, 37(2):154-158
- [3] Kong F X, Liu Y, Hu W, et al. Biochemical responses of the mycorrhizae in *Pinus massoniana* to combined effects of Al, Ca and low pH. Chemosphere, 2000, 40(3):311-318
- [4] 杨承栋, 孙启武, 焦如珍. 大青山一二代马尾松土壤性质变化与地力衰退关系的研究. 土壤学报, 2003, 40(2):267-273
- [5] 王晓龙, 胡锋, 李辉信, 等. 侵蚀退化红壤自然恢复下土壤生物学质量演变特征. 生态学报, 2007, 27(4):1 404-1 411
- [6] Makoi J H J R, Ndakidemi P A. Selected soil enzymes: Examples of their potential roles in the ecosystem Afr J Biotechnol, 2008, 7(3):181-191
- [7] Zhang Y, Wu N, Zhou G, et al. Changes in enzyme activities of spruce (*Picea balfouriana*) forest soil as related to burning in the eastern Qinghai-Tibetan Plateau. Applied Soil Ecology, 2005, 30(3):215-225
- [8] 关荫松. 土壤酶及其研究方法.北京: 农业出版社, 1986
- [9] Kandeler E, Tschirko D, Spiegel H. Long-term monitoring of microbial biomass, N mineralisation and enzyme activities of a chernozem under different tillage management. Biology and Fertility of Soils, 1999, 28(4):343-351
- [10] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法.北京: 中国农业科技出版社, 2000
- [11] 周礼恺. 土壤酶学. 北京: 科学出版社, 1987
- [12] Boruvka L, Mladkova L, Drabek O. Factors controlling spatial distribution of soil acidification and Al forms in forest soils. Journal of Inorganic Biochemistry, 2005, 99(9):1 796-1 806
- [13] 何纪力, 陈宏文, 胡小华, 等. 江西省严重酸雨地带形成的影响因素. 中国环境科学, 2000, 20(5):477-480
- [14] 侯爱敏, 彭少麟, 周国逸. 鼎湖山地区马尾松年轮元素含量与酸雨的关系. 生态学报, 2002, 22(9):1552-1559
- [15] 刘厚田, 田仁生. 重庆南山马尾松衰亡与土壤铝活化的关系. 环境科学学报, 1992, 12(3):297-304
- [16] Augusto L, Ranger J, Binkley D, et al. Impact of several common tree species of European temperate forests on soil fertility. Ann For Sci, 2002, 59(3):233-253
- [17] 吕焕哲, 王凯荣, 谢小立. 土地利用方式与坡位土壤活性铝形态特征分析. 水土保持学报, 2007, 21(1):172-175
- [18] Yanai R D, Blum J D, Hamburg S P, et al. New insights into calcium depletion in northeastern forests. Journal of Forestry, 2005, 103(1):14-20
- [19] 张劲峰, 宋洪涛, 耿云芬, 等. 滇西北亚高山不同退化林地植被与土壤养分特征. 生态学杂志, 2008, 27(7):1 064-1 070
- [20] von Oheimb G, Power S, Falk K, et al. N:P ratio and the nature of nutrient limitation in calluna-dominated heathlands. Ecosystems, 2010, 13(2):317-327
- [21] Zhang Y M, Bao W K, Pang X Y, et al. Changes of soil enzyme activities in different restoration ages of spruce forests on the eastern Qinghai-Tibet Plateau. Wuhan University Journal of Natural Sciences, 2005, 10(4):701-706
- [22] 杨万勤, 钟章成, 陶建平, 等. 缙云山森林土壤酶活性与植物多样性的关系. 林业科学, 2001, 37(4):124-128
- [23] 和文祥, 朱铭莪. 陕西土壤脲酶活性与土壤肥力关系分析. 土壤学报, 1997, 34(4):392-398
- [24] Acosta-Martínez V, Tabatabai M A. Enzyme activities in a limed agricultural soil. Biology and Fertility of Soils, 2000, 31(1):85-91
- [25] 何跃军, 钟章成, 刘济明, 等. 石灰岩退化生态系统不同恢复阶段土壤酶活性研究. 应用生态学报, 2005, 16(6):1 077-1 081
- [26] 杨小青, 胡宝清. 喀斯特石漠化生态系统恢复演替过程中土壤质量特性研究——以广西都安县澄江小流域为例. 生态与农村环境学报, 2009, 25(3):1-5
- [27] 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. 林业科学, 2010, 46(1):136-141
- [28] 刘福德, 孔令刚, 安树青, 等. 连作杨树人工林不同生长阶段林地内土壤微生态环境特征. 水土保持学报, 2008, 22(2):121-125
- [29] Liu S, Li X, Niu L. The degradation of soil fertility in pure larch plantations in the northeastern part of China. Ecological Engineering, 1998, 10(1):75-86