

# 浙江省凤阳山不同林分类型土壤酶活性研究

司登宇<sup>1</sup>, 张金池<sup>1</sup>, 陈莉莎<sup>1</sup>, 叶立新<sup>2</sup>, 刘胜龙<sup>2</sup>, 李美芹<sup>2</sup>

(1. 南京林业大学 森林资源与环境学院, 江苏 南京 210037; 2. 浙江凤阳山管理处, 浙江 龙泉 323700)

**摘要:** 在浙江省凤阳山自然保护区选取海拔相近的 6 个典型林分类型(常绿阔叶林、针叶林、针阔混交林、杉木林、毛竹林以及柳杉林), 在其林下采集土壤样品, 分析了脲酶、蔗糖酶、酸性磷酸酶和过氧化氢酶、蛋白酶 5 种主要土壤酶活性的变化。结果表明, 在 6 个林分类型中, 常绿阔叶林土壤脲酶、过氧化氢酶、酸性磷酸酶活性均较高; 柳杉林分土壤蔗糖酶活性较高; 而针叶林则表现出土壤蛋白酶活性最高; 杉木林则表现出土壤脲酶、蔗糖酶活性较低; 土壤酶活性具有明显的垂直分层分布, 土层越深, 土壤酶活性越低; 同时该地区土壤酶活性与土壤理化性质指标相关性较高, 尤其是 pH 值和有机质含量与土壤酶活性关系最为密切。

**关键词:** 凤阳山; 土壤酶活性; 林分类型

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2013)06-0258-06

中图分类号: S718.5

## Soil Enzyme Activity of Different Forest Types in Fengyang Mountain of Zhejiang Province

SI Deng-yu<sup>1</sup>, ZHANG Jin-chi<sup>1</sup>, CHEN Li-sha<sup>1</sup>, YE Li-xin<sup>2</sup>, LIU Sheng-long<sup>2</sup>, LI Mei-qin<sup>2</sup>

(1. College of Forest Resources and Environment, Nanjing Forestry University, Nanjing, Jiangsu 210037, China; 2. The Management office of Fengyang Mountain, Longquan, Zhejiang 323700, China)

**Abstract:** The activity of 5 kinds of soil enzymes(urease, protease, acid phosphatase and catalase, sucrase) were studied in six typical forest types(evergreen broad-leaved forest and coniferous forest, conifer/broad-leaved mixed forests, chinese fir forest, Bamboo forest and *Cryptomeria fortune* forest) at the similar altitude in Fengyang Mountain nature reserve of Zhejiang Province. The results showed that evergreen broad-leaved forest soil urease and catalase, acid phosphatase activities were higher; *Cryptomeria fortune* forest soil invertase activity was higher; And coniferous forest showed the highest soil protease activity. In contrast, the chinese fir forest soil's urease, invertase activity was low; Soil enzyme activity had obvious vertical stratification distribution, the soil was deeper and the enzyme activity was lower; At the same time, correlation analysis showed that the soil enzyme activity and soil physical and chemical properties index correlation was higher, especially the pH value, organic matter content and soil enzyme activity in most close relations.

**Keywords:** Fengyang Mountain; soil enzyme activity; forest type

土壤酶(soil enzyme)是指土壤中的聚积酶, 包括游离酶、胞内酶和胞外酶, 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<sup>[1-2]</sup>, 其活性变化规律及与生态因子的相互作用关系研究引起众多学者的重视, 是评价土壤质量的重要手段之一<sup>[3]</sup>, 同时也是评价土壤自净能力的一个重要指标。作为一类具有专性催化作用的蛋白质, 酶几乎参与了土壤中所有生物化学过程<sup>[4]</sup>。由于土壤酶对环境和管理因素导致的变化具有较强的敏感性, 同

时具有测定方法相对简单、可操作性强的特点, 因此, 一直被看作是比较敏感的反映土壤质量的综合度量指标。为了及时了解森林土壤质量的变化趋势, 土壤酶似乎已成为必不可少的研究内容之一。我国直到 20 世纪 60 年代初才开始有少量关于土壤酶与微生物关系的报告, 80 年代以来, 土壤酶活性的研究得到进一步发展, 研究内容不仅涉及土壤酶与土壤微生物的关系<sup>[5]</sup>, 而且还包括了土壤酶与其它肥力因子的关系<sup>[6]</sup>, 植物多样性对土壤酶活性的影响<sup>[7]</sup>, 森林不同

收稿日期: 2013-01-31

修回日期: 2013-03-16

资助项目: “十二五”国家科技支撑计划项目“长江中下游典型区域低山防护林体系建设与质量调控技术”(2011BAD38B0405)

作者简介: 司登宇(1987—), 男(汉族), 河南省商丘市人, 硕士研究生, 研究方向为水土保持与林业生态工程。E-mail: si1106gule@163.com。

通信作者: 张金池(1962—), 男(汉族), 山东省潍坊市人, 教授, 博士生导师, 研究方向为水土保持、森林水文学和林业生态工程。E-mail: njfu-jczhang@sina.com。

演替阶段土壤酶活性的变化<sup>[8]</sup>和不同林分密度土壤酶活性的研究<sup>[9]</sup>。凤阳山自然保护区是中国中亚热带森林生态系统保存较好的代表,该区光、热、水差异性明显,植物资源丰富。本研究选择该保护区6个典型林分类型作为对象,测定了5种土壤酶活性,试图了解凤阳山不同林分类型土壤酶活性的差异,进一步加强凤阳山生态系统的研究,同时研究结果对该区域的生物多样性保护和可持续发展起到一定的指导作用,也可为浙江省乃至中国亚热带森林生态系统的研究提供一些参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

凤阳山自然保护区是浙江省凤阳山一百山祖国家级自然保护区的一部分,位于浙江省龙泉市南部,属洞宫山系,由福建省武夷山脉向东伸展而成。保护区现有面积15 171.4 hm<sup>2</sup>,森林覆盖率为90.8%,是以保护典型中亚热带森林生态系统类型为主的保护区。保护区地形复杂多变,气候资源丰富,凤阳山的光、温、水资源存在较大差异,造就了物种类型多样,

主要植被类型以天然分布的针阔混交林、常绿阔叶林、毛竹林为主,生长较好,覆盖度大,并且是《中国生物多样性保护行动计划》实施的重点区域之一。所选研究样地位于凤阳山自然保护区内,地理坐标介于东经119°06′—119°15′、北纬27°49′—27°52′,海拔1 300~1 550 m。凤阳山天然分布的木本植物主要有:木荷(*Schima superba* Gardn. et champ),马尾松(*Pinus massoniana* Lamb.),杉木[*Cunninghamia lanceolata* (Lamb) Hook],柳杉(*Cryptomeria fortunei*),交让木(*Daphniphyllum macropodum* miq.),光皮桦(*Betula luminifera* H. Winkl),黄山松(*Pinus taiwanensis* Hayata),多脉青冈(*Cyclobalanopsis multinervis* W. L. Cheng.),雷公鹅耳枥(*Carpinus viminea* Wall.)等。

### 1.2 样地设置

外业调查在2010年7月中旬进行,在海拔相近,立地条件基本一致的森林地带,选择6个典型林分类型,即常绿阔叶林、针叶林、针阔混交林、杉木林、毛竹林以及柳杉林作为供试样地,在每个供试样地内,设置20 m×20 m的调查样地。样地基本情况详见表1。

表1 试验样地基本特征

植被类型	主要植物种类	平均高/m	平均胸径/cm	坡度/(°)	坡位	坡向	郁闭度	海拔/m
EBF	光皮桦、木荷	11.09	12.79	10~15	中	南	0.73	1 430
CF	黄山松	9.60	13.64	20~34	中	南	0.67	1 350
CBF	黄山松、木荷	10.97	10.92	17~23	上	东	0.81	1 550
FF	杉木	15.11	14.67	3~6	下	北	0.87	1 370
BF	毛竹、连蕊茶幼苗	13.17	9.78	8~14	下	西	0.63	1 330
CFF	柳杉	12.97	23.17	5~20	下	北	0.77	1 490

注:EBF代表常绿阔叶林;CF代表针叶林;CBF代表针阔混交林;FF代表杉木林;BF代表毛竹林;CFF代表柳杉林。下同。

### 1.3 土壤样品采集与测定分析

除去土壤表层的凋落物,同一样地用土壤取样器随机多点(8~10个样点)分别采集0—10 cm,10—20 cm,20—30 cm土层土壤样品,构成相应的混合土壤样品。采样时间为2012年7月(本研究数据均为研究区7月份数据,并不代表全年数据)。样品带回实验室风干后过筛,用于测定土壤酶活性及土壤理化性质。土壤容重采用环刀法测定;土壤的总有机碳和全氮用VARIOEL元素分析仪测定;全磷采用硫酸—高氯酸消煮法;全钾采用火焰光度法;有效磷采用双酸浸提钼锑抗比色法;速效钾采用NH<sub>4</sub>Ac浸提火焰光度法;土壤pH值采用德国(Sartorius)PB-10标准型pH计测定(土:水=1:2.5),有机质质量分数采用重铬酸钾法(国家标准方法GB7857287)<sup>[10]</sup>。土壤脲酶活性用苯酚钠—次氯酸钠显色法测定,酶活性以24 h内1 g风干土中NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N的毫克数表示(NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N

mg/g);蔗糖酶活性用3,5—二硝基水杨酸显色法测定,酶活性以24 h内1 g风干土中葡萄糖的毫克数表示(mg/g,37 °C,24 h);磷酸酶活性用磷酸苯二钠比色法测定,酶活性以2 h后1 g风干土壤中释放的酚的毫克数表示(酚mg/g);蛋白酶采用茚三酮比色法测定;过氧化氢酶活性用KMnO<sub>4</sub>滴定法测定,酶活性以每克土相当于0.1 mol/L KMnO<sub>4</sub>的毫升数表示<sup>[1]</sup>。

数据处理采用Excel及SPSS 16.0软件进行数据分析,对6种林分土壤酶活性进行差异显著性检验(LSD检验, $p < 0.05$ )及相关性分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 凤阳山不同林分类型土壤理化性质特征

不同林分类型土壤理化性质结果详见表2。研究样地内土壤容重变化范围为0.69~1.41 g/cm<sup>3</sup>,不同林分类型土壤容重的大小顺序为:毛竹林(1.38

$\text{g}/\text{cm}^3$ ) > 杉木林 ( $1.27 \text{ g}/\text{cm}^3$ ) > 针阔混交林 ( $1.10 \text{ g}/\text{cm}^3$ ) > 柳杉林 ( $1.04 \text{ g}/\text{cm}^3$ ) > 常绿阔叶林 ( $0.87 \text{ g}/\text{cm}^3$ ) > 针叶林 ( $0.75 \text{ g}/\text{cm}^3$ ), 针阔混交林与柳杉林林分间变幅不大, 造成毛竹林容重最大的原因可能是由于毛竹林土壤根系浓密坚硬, 且存在一定的人为踩踏。土壤 pH 值介于  $4.31 \sim 5.62$  之间, 根据我国土壤的酸碱度分级标准<sup>[11-12]</sup>, 研究区林地土壤呈强酸性到酸性, 各林分间 pH 值变幅不大, 同一林分不同土壤层次间有一定变化。土壤有机质含量变幅为  $6.02 \sim 26.91 \text{ g}/\text{kg}$ , 其中毛竹林 ( $18.09 \text{ g}/\text{kg}$ ) > 常绿阔叶林 ( $16.59 \text{ g}/\text{kg}$ ) > 柳杉林 ( $14.74 \text{ g}/\text{kg}$ ) > 针阔混交林 ( $13.44 \text{ g}/\text{kg}$ ) > 针叶林 ( $12.27 \text{ g}/\text{kg}$ ) > 杉木林 ( $11.63 \text{ g}/\text{kg}$ ), 根据全国第 2 次土壤普查土壤肥力状况分级标准<sup>[13]</sup>, 各林分土壤有机质平均含量为中等水平。土壤全 N 变幅为  $3.04 \sim 6.19 \text{ g}/\text{kg}$ , 其中常绿阔叶林 ( $5.57 \text{ g}/\text{kg}$ ) > 毛竹林 ( $5.44 \text{ g}/\text{kg}$ ) > 柳杉林 ( $5.35 \text{ g}/\text{kg}$ ) > 针叶林 ( $5.05 \text{ g}/\text{kg}$ ) > 针阔混交林 ( $4.67 \text{ g}/\text{kg}$ ) > 杉木林 ( $3.55 \text{ g}/\text{kg}$ ), 全 N 含量均较高。土壤全 P 变幅为  $0.49 \sim 0.91 \text{ g}/\text{kg}$ , 其中常绿阔叶林 ( $0.80$

$\text{g}/\text{kg}$ ) > 毛竹林 ( $0.78 \text{ g}/\text{kg}$ ) > 柳杉林 ( $0.72 \text{ g}/\text{kg}$ ) > 针阔混交林 ( $0.65 \text{ g}/\text{kg}$ ) > 针叶林 ( $0.61 \text{ g}/\text{kg}$ ) > 杉木林 ( $0.52 \text{ g}/\text{kg}$ ), 除针叶林与针阔混交林外其它林分全 N 和全 P 变化情况相同。有效 P 变幅为  $6.81 \sim 9.173 \text{ mg}/\text{kg}$ , 其中常绿阔叶林 ( $8.91 \text{ mg}/\text{kg}$ ) > 毛竹林 ( $8.46 \text{ mg}/\text{kg}$ ) > 柳杉林 ( $8.00 \text{ mg}/\text{kg}$ ) > 针阔混交林 ( $7.71 \text{ mg}/\text{kg}$ ) > 针叶林 ( $7.61 \text{ mg}/\text{kg}$ ) > 杉木林 ( $7.11 \text{ mg}/\text{kg}$ )。土壤全 K 变幅为  $17.81 \sim 21.47 \text{ g}/\text{kg}$ , 其中, 常绿阔叶林 ( $19.55 \text{ g}/\text{kg}$ ) > 毛竹林 ( $19.43 \text{ g}/\text{kg}$ ) > 柳杉林 ( $19.35 \text{ g}/\text{kg}$ ) > 针阔混交林 ( $18.60 \text{ g}/\text{kg}$ ) > 针叶林 ( $18.52 \text{ g}/\text{kg}$ ) > 杉木林 ( $18.40 \text{ g}/\text{kg}$ ) 各林分间全 K 含量变幅不大。土壤速效 K 变幅为  $81 \sim 218 \text{ mg}/\text{kg}$ , 其中毛竹林 ( $199 \text{ mg}/\text{kg}$ ) > 常绿阔叶林 ( $170 \text{ mg}/\text{kg}$ ) > 柳杉林 ( $164 \text{ mg}/\text{kg}$ ) > 针阔混交林 ( $150 \text{ mg}/\text{kg}$ ) > 针叶林 ( $120 \text{ mg}/\text{kg}$ ) > 杉木林 ( $101 \text{ mg}/\text{kg}$ )。综合分析认为, 凤阳山不同植被类型的土壤肥力状况有明显的差异, 各林分土壤呈酸性, 土壤容重跨度较大, 全 N 含量较高, P 和 K 元素含量中等, 有机质含量一般。

表 2 不同林分土壤基本理化性质

林分	统计项目	容重/ ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	pH 值	有机质/ ( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	全 N/ ( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	全 P/ ( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	全 K/ ( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	有效 P/ ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	速效 K/ ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )
EBF	范围	0.82~0.91	4.67~4.99	9.77~25.71	5.17~6.19	0.70~0.91	18.92~20.37	8.62~9.17	151~189
	平均值±标准差	0.87±0.08	4.84±0.17	16.59±1.09	5.57±0.23	0.80±0.01	19.55±3.79	8.91±0.38	170±19.70
CF	范围	0.69~0.81	4.31~4.69	7.13~19.17	4.76~5.41	0.58~0.65	17.81~19.51	7.34~7.92	109~146
	平均值±标准差	0.75±0.04	4.53±0.23	12.27±2.09	5.05±0.46	0.61±0.07	18.52±3.11	7.61±0.18	120±21.70
CBF	范围	1.04~1.17	4.78~4.99	7.18~20.56	4.33~5.17	0.61~0.72	18.07~19.27	7.44~8.16	139~166
	平均值±标准差	1.10±0.08	4.87±0.72	13.44±2.79	4.67±0.19	0.65±0.17	18.60±2.81	7.71±0.38	150±27.70
FF	范围	1.22~1.30	4.77~5.62	6.02~19.71	3.04~4.19	0.49~0.57	17.91~19.08	6.81~7.42	81~119
	平均值±标准差	1.27±0.14	4.96±0.77	11.63±3.72	3.55±0.67	0.52±0.00	18.40±4.11	7.11±0.00	101±10.13
BF	范围	1.34~1.41	4.67~5.06	10.06~26.97	5.09~5.93	0.71~0.89	18.14~21.47	8.29~8.76	193~218
	平均值±标准差	1.38±0.02	4.90±0.21	18.09±1.52	5.44±0.06	0.78±0.02	19.43±3.15	8.46±0.81	199±19.11
CFF	范围	0.99~1.08	4.64~5.37	8.79~23.14	4.99~5.78	0.69~0.75	19.01~19.86	7.70~8.32	152~174
	平均值±标准差	1.04±0.00	5.06±0.08	14.74±2.32	5.35±0.16	0.72±0.00	19.35±5.13	8.01±1.61	164±19.11

## 2.2 凤阳山不同林分类型土壤酶活性分析

土壤酶是土壤生物化学反应的催化剂, 其参与土壤中物质的转化过程与循环, 反映土壤生物活性的大小, 可以作为土壤肥力的标志之一<sup>[14]</sup>。凤阳山不同林分类型土壤酶活性的研究结果可以得出(图 1—5), 不同林分类型下土壤酶活性大小有一定差异, 其中常绿阔叶林土壤脲酶、过氧化氢酶、酸性磷酸酶均较高, 由于土壤脲酶对促进土壤氮素循环和提高土壤氮素的利用率有重要意义<sup>[15]</sup>, 说明该地区常绿阔叶林对当地土壤氮素的利用率可能较高, 在与其它林分类型作比较的结果中与白翠霞<sup>[16]</sup>等研究的阔叶林林分土壤脲

酶活性大于针叶林活性结果类似。而对于过氧化氢酶活性的研究与陈彩虹<sup>[14]</sup>研究中杉木林过氧化氢酶活性明显大于枫香这一阔叶树种土壤酶活性的研究结果存在一定差异; 柳杉林分土壤蔗糖酶活性较高; 而针叶林则表现出土壤蛋白酶活性较高; 相比之下杉木林则表现出土壤脲酶、蔗糖酶活性较低, 与田月亮<sup>[17]</sup>的研究结果相同; 柳杉林土壤酶活性表现为过氧化氢酶、酸性磷酸酶以及蛋白酶活性均较低, 这可能是由于柳杉林及杉木林相对于其它几种林分来说林分郁闭度过大, 植被多样性差, 枯枝落叶虽较厚且分解率极低, 加之处于阴面温度相对较低, 最终造成以

上几种酶活性较低。

由图 1—5 可知,研究区内所测土壤酶活性均随土层深度的增加而呈现减弱趋势,且剖面上部酶活性的递减率高于下部,这与以往大多数研究结果相同<sup>[18]</sup>,而过氧化氢酶活性并无以上特点,呈无规律变化特征,耿玉清等<sup>[19]</sup>的研究也显示出类似结果。其中不同林分森林上层土壤(0—10 cm)脲酶活性是下层(20—30 cm)的 1.50~2.36 倍,柳杉林、针叶林、针阔混交林均大于两倍,常绿阔叶林较小为 1.5 倍,由此可知有针叶树种的林分,上下层土壤间脲酶活性的差异会更大;在过氧化氢酶、蔗糖酶上也可得到相同结果。过氧化氢酶活性上层是下层的 1.37~4.68 倍;蔗糖酶活性上层是下层的 1.8~5.19 倍;酸性磷酸酶活性上层是下层的 1.13~3.02 倍;蛋白酶活性上层是下层的 1.31~1.79 倍,变化幅度较小,针阔混交林(1.79 倍)最大,柳杉林(1.31 倍)最小。本研究认为造成这种土壤酶活性上层高于下层的原因主要有两方面,一方面是由于上层枯落物量高造成上层有机质含量明显高于下层,而土壤酶主要以化学的或物理的形式与腐殖质络合或吸附在土壤有机和无机颗粒上;另一方面,随着土层深度的增加,土壤中水、气、热状况越来越差,微生物种类及数量也会减少,可能导致土壤酶活性减弱。同时,说明了土壤酶活性与有机质含量及微生物状况关系密切。

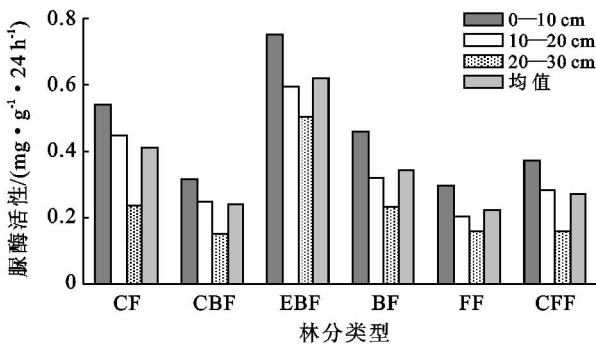


图 1 不同林分下土壤脲酶活性

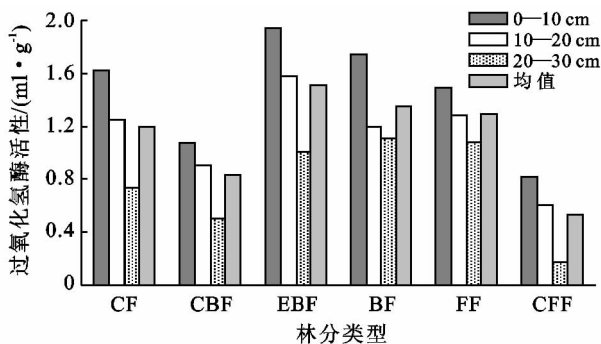


图 2 不同林分下土壤过氧化氢酶活性

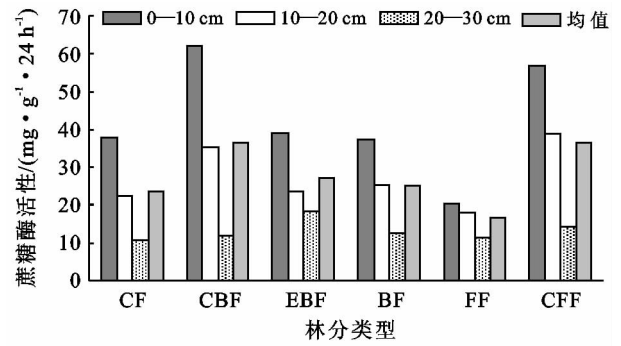


图 3 不同林分下土壤蔗糖酶活性

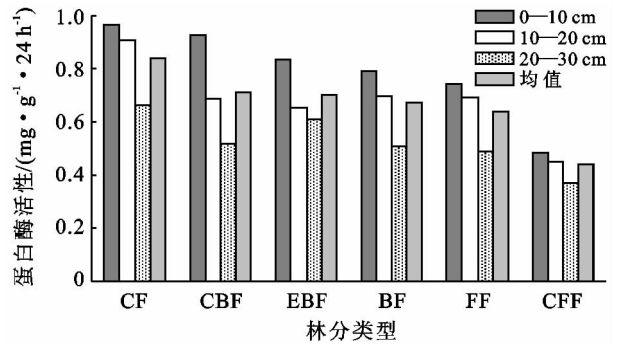


图 4 不同林分下土壤蛋白酶活性

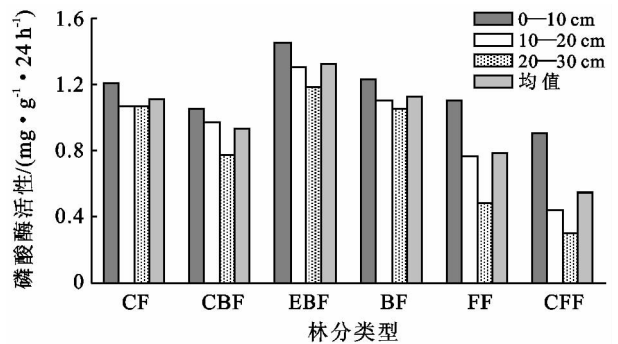


图 5 不同林分下土壤酸性磷酸酶活性

### 2.3 土壤酶活性与土壤理化性质相关关系

土壤酶活性与土壤理化性质指标的相关分析详见表 3。

由表 3 可以看出,土壤脲酶与过氧化氢酶、酸性磷酸酶、pH 值、有机质、全 N、全 K 在  $\alpha=0.01$  水平下呈显著相关关系,与蛋白酶、容重、全 P、有效 P 在  $\alpha=0.05$  水平下呈显著相关关系;土壤过氧化氢酶与酸性磷酸酶、蛋白酶、有机质在  $\alpha=0.01$  水平下呈显著相关关系,与 pH 值、全 K 呈显著相关( $\alpha=0.05$ );土壤酸性磷酸酶与 pH 值、有效 P 在呈显著相关关系( $\alpha=0.05$ ),与蔗糖酶、蛋白酶、有机质、全 N、全 P 呈显著相关( $\alpha=0.05$ );土壤蔗糖酶与有机质、全 K 呈显著相关关系( $\alpha=0.05$ ),与 pH 值、全 N、全 P 呈显著相关( $\alpha=0.05$ );土壤蛋白酶与 pH 呈显著相关关系( $\alpha=$

0.05),与容重、有机质呈显著相关关系( $\alpha=0.05$ )。结果表明,在凤阳山自然森林土壤中 5 种土壤酶活性自身之间相互影响,且与土壤理化性质呈一定相关关

系,综合运用 5 种酶能更好地代表该地区土壤肥力状况以及土壤生态系统的稳定性,是较为理想的土壤质量指标。

表 3 土壤酶活性与土壤理化性质间的相关关系

指标	脲酶	过氧化氢酶	酸性磷酸酶	蔗糖酶	蛋白酶	容重	PH	有机质	全 N	全 P	有效 P	全 K	速效 K
脲酶	1.00	0.74**	0.67**	0.38	0.57*	-0.57*	-0.58*	0.62**	0.89**	0.57*	0.78**	0.64**	0.43
过氧化氢酶		1.00	0.77**	0.22	0.81**	-0.09	-0.62**	0.61**	0.27	0.37	0.45	0.49*	0.24
酸性磷酸酶			1.00	0.25	0.71**	-0.31	-0.73**	0.57*	0.53*	0.49*	0.62**	0.40	0.42
蔗糖酶				1.00	0.39	-0.23	-0.44*	0.75**	0.56*	0.50*	0.42	0.61**	0.45
蛋白酶					1.00	-0.39*	-0.81**	0.51*	0.26	0.16	0.19	0.29	0.41

注: \* 在  $\alpha=0.05$  水平下显著相关, \*\* 在  $\alpha=0.01$  水平下显著相关。

#### 2.4 土壤酶活性与土壤理化性质回归分析

通过上述分析发现,凤阳山土壤酶活性与土壤理化性质尤其是化学性质有较高的相关性,用回归方程完全有可能表示它们之间的关系,最终可以用易测土

壤性质指标对各种土壤酶活性进行预测分析。采用逐步回归法(若  $p \leq 0.05$  则引入,  $p > 0.1$  则剔除),对其进行逐步回归分析,凤阳山亚热带森林土壤酶活性与化学性质的回归方程详见表 4。

表 4 土壤酶活性与化学性质逐步回归方程分析结果

土壤酶指标	回归方程	$R^2$	F	P
土壤脲酶	$Y_1 = 0.323X_6 - 0.249X_2 - 2.977X_8 - 0.560$	0.899	51.399	0.000
过氧化氢酶	$Y_2 = 0.043X_3 + 0.502$	0.348	10.059	0.006
酸性磷酸酶	$Y_3 = 0.507X_6 - 0.938X_2 - 0.273X_4 + 2.845$	0.832	29.112	0.000
蔗糖酶	$Y_4 = 1.736X_3 + 2.484$	0.54	20.922	0.000
蛋白酶	$Y_5 = 3.325 - 0.547X_2$	0.628	29.655	0.000

注:  $X_1$  为土壤容重;  $X_2$  为 pH 值;  $X_3$  为有机质;  $X_4$  为全 N;  $X_5$  为全 P;  $X_6$  为有效 P;  $X_7$  为全 K;  $X_8$  为速效 K。

表 4 中对土壤脲酶和酸性磷酸酶拟合的  $R^2$  系数较之其它 3 种酶的拟合方程比较高,拟合效果较好,可以作为该地区这两种土壤酶活性预测分析的通用方程。然而,森林土壤作为复杂的生态系统,其生物特性可能受到水分、温度、生物活动、病虫害及各种养分含量等因素的影响,时空变异性比较大,在实践中仍要综合考虑以上各因子可能的影响。

### 3 结论

(1) 凤阳山地区常绿阔叶林土壤脲酶、过氧化氢酶、酸性磷酸酶活性较之其它林分最高;柳杉林土壤蔗糖酶活性最高;针叶林土壤蛋白酶活性最高;杉木林脲酶和蔗糖酶含量均最低;柳杉林过氧化氢酶、酸性磷酸酶、蛋白酶含量最低。6 种林分类型下土壤酶活性在土壤剖面上均表现出自上而下逐渐减小的趋势,但是变化趋势在不同林分间有一定的差异。

(2) 相关分析结果表明,凤阳山不同林分类型土壤酶活性与各土壤理化性质指标间存在较高的相关性,通过回归方程甚至可以得出该地区土壤脲酶、酸性磷酸酶可以用少数化学指标进行预测。

(3) 本研究首次系统地测定了凤阳山保护区内主要林分类型下的土壤酶活性,并做了较为详实的分析,但由于酶活性受多种因素的制约,该地区土壤酶活性是否与林木根系分布,枯落物性质,微生物类群、数量等有关,仍需进一步研究。另外,研究区内酶活性与多个土壤理化性质指标有着相关关系,因此,在一定程度上土壤酶活性可以反映该地区土壤生态特性状况,可为该地区林地管理提供可靠的科学依据。同时,凤阳山自然保护区由于其地理环境的独特性,本研究对该地区不同林分类型土壤酶活性的研究,能否直接套用到其它地区相似林分类型土壤酶活性的研究中,仍需进一步验证。

#### [参 考 文 献]

- [1] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京: 农业出版社, 1996.
- [2] 杨万勤, 王开运. 森林土壤酶的研究进展[J]. 林业科学, 2004, 40(2): 152-159.
- [3] 周礼恺, 张志明, 陈恩凤. 黑土的酶活性[J]. 土壤学报, 1981, 18(2): 158-165.
- [4] Dick R P. Soil Enzyme Activities as Indicators of Soil

- quality[M]//Doran J W, Coleman D C, Bedzicekd F, et al. Defining Soil Quality for a Sustainable Environment. Madison: SoilSociety ofAmerica Inc, 1994: 107-124.
- [5] 张猛,张健.林地土壤微生物、酶活性研究进展[J].四川农业大学学报,2003,21(4):347-351.
- [6] 和文祥,来航线,武永军,等.培肥对土壤酶活性影响[J].浙江大学学报,2001,27(3):265-268.
- [7] 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[J].林业科学,2000,37(4):124-128.
- [8] 李国雷,刘勇,甘敬,等.飞播油松林地土壤酶活性对间伐强度的季节响应[J].北京林业大学学报,2008,30(2):82-88.
- [9] 郭蓓,刘勇,李国雷,等.飞播油松林地土壤酶活性对间伐强度的响应[J].林业科学,2007,43(7):128-133.
- [10] 刘光菘.土壤理化分析与剖面描述[M].北京:中国标准出版社,1996.
- [11] 卢瑛,冯宏,甘海华.广州城市公园绿地土壤肥力及酶活性特征[J].水土保持学报,2007,21(1):160-163.
- [12] 陶宝先,张金池,崔志华,等.苏南丘陵区林地土壤酶活性及其与土壤理化性质的相关性[J].生态与农村环境学报,2009,25(2):44-48.
- [13] 全国土壤普查办公室.中国土壤[M].北京:中国农业出版社,1998:877-935.
- [14] 陈彩虹,叶道碧.4种人工林土壤酶活性与养分的相关性研究[J].中南林业科技大学学报,2010,30(6):64-68.
- [15] Baligar V C, Wright R J, Smedley M D. Enzyme activities in hill land soils of the Appalachian region[J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 1988,22(9):367-384.
- [16] 白翠霞,耿玉清,梁伟.八达岭地区主要森林类型土壤脲酶活性研究[J].四川农业大学学报,2005,23(4):424-781.
- [17] 田月亮.凤阳山主要林分类型结构特征及其改土效应[D].江苏南京:南京林业大学,2012.
- [18] 郑诗樟,肖青亮,吴蔚东,等.丘陵红壤不同人工林型土壤生物类群、酶活性与土壤理化性状关系的研究[J].中国生态农业学报,2008,16(1):57-61.
- [19] 耿玉清,白翠霞,赵铁蕊,等.北京八达岭地区土壤酶活性及其与土壤肥力的关系[J].北京林业大学学报,2006,28(5):7-11.

(上接第257页)

- [8] 许旭,李晓兵,符娜,等.生态系统服务价值核算在土地利用规划战略环境评价上的应用:以北京市为例[J].资源科学,2008,30(9):1382-1388.
- [9] 李艳超,朱胜标,曹秋平,等.基于生态系统服务功能价值理论的土地利用总体规划环境影响评价探讨:以湘乡市为例[J].国土资源情报,2011(12):56-61.
- [10] 闵捷,高魏,李晓云,等.武汉市土地利用与生态系统服务价值的时空变化分析[J].水土保持学报,2006,20(4):170-174.
- [11] 王娟,崔保山,卢远.基于生态系统服务价值核算的土地利用规划战略环境评价[J].地理科学,2007,27(4):549-554.
- [12] Costanza R, d'Arge R, Groot R, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital[J]. Nature, 1997,387(6630):253-260.
- [13] 谢高地,鲁春霞,冷允法,等.青藏高原生态资产的价值评估[J].自然资源学报,2003,18(2):189-196.
- [14] 谢高地,甄霖,鲁春霞,等.一个基于专家知识的生态系统服务价值化方法[J].自然资源学报,2008,23(5):911-919.
- [15] 苏飞,张平宇.基于生态系统服务价值变化的环境与经济协调发展评价:以大庆市为例[J].地理科学进展,2009,28(3):1471-1477.
- [16] 国家发展和改革委员会价格司.中国农产品成本收益资料汇编(2008年)[M].北京:中国统计出版社,2008.
- [17] 陈风波,丁士军.水稻投入产出与稻农技术需求:对江苏和湖北的调查[J].农业技术经济,2007(6):44-50.
- [18] 王超.土地利用总体规划环境影响评价研究:以将乐县为例[D].北京:北京师范大学,2010.