

引用格式: 陈佳, 姚成硕, 林勇明, 吴承祯, 李键. 武夷山林地土壤酶活性差异及土壤肥力质量评价[J]. 山地学报, 2021, 39(2): 194-206.

CHEN Jia, YAO Chengshuo, LIN Yongming, WU Chengzhen, LI Jian. Soil enzyme activity difference in woodlands, and soil fertility quality evaluation in Mount Wuyi, China [J]. Mountain Research, 2021, 39(2): 194-206.

# 武夷山林地土壤酶活性差异及土壤肥力质量评价

陈佳<sup>1</sup>, 姚成硕<sup>1</sup>, 林勇明<sup>1</sup>, 吴承祯<sup>2</sup>, 李键<sup>1\*</sup>

(1. 福建农林大学 林学院, 福州 350002; 2. 武夷学院 生态与资源工程学院, 福建 南平 354300)

**摘 要:** 关于武夷山土壤理化性质与土壤酶活性的研究主要集中在对不同人工林间的差异及其二者之间相关性的探讨, 而对该地区不同林地类型土壤酶活性差异及与土壤肥力相关性的研究仍是空白。本文从土壤酶与土壤理化性质相关性的角度出发, 采用单因素分析法、Pearson 相关性分析法、主成分分析法等, 对武夷山风景名胜区内 6 种不同的人工林(鹅掌楸、拟赤杨、杉木、枫香、马尾松和南酸枣人工林)以及天然次生阔叶林的森林土壤质量进行评价, 探究在该区域将土壤酶活性作为评价土壤肥力重要指标的可行性。结果表明: 4 种土壤酶活性均受到林地类型的显著影响, 并且随着土层深度的加深而减弱; 4 种土壤酶与 pH 值均呈显著负相关( $P < 0.05$ ), 脲酶与有机质、有效磷呈显著正相关( $P < 0.05$ ), 过氧化氢酶与有机质、全氮、水解氮、有效磷呈显著正相关( $P < 0.05$ ), 蔗糖酶与有机质、全氮、水解氮、有效磷呈极显著正相关( $P < 0.01$ ), 磷酸酶和有机质、全氮、水解氮、全磷、有效磷、全钾、速效钾呈极显著正相关( $P < 0.01$ ), 该区域土壤酶活性与土壤理化性质相关性较高, 可作为肥力评价的重要指标; 土壤肥力质量综合评价分值由大到小依次为: 天然次生阔叶林(0.61)、拟赤杨人工林(0.28)、南酸枣人工林(0.26)、枫香人工林(-0.06)、鹅掌楸人工林(-0.19)、马尾松人工林(-0.42)、杉木人工林(-0.47)。将土壤酶活性作为评价武夷山土壤肥力的重要指标, 对于武夷山风景名胜区内森林资源的可持续开发和利用具有重要的实际意义, 同时也能够为维系周边区域人工林地土壤肥力、改善人工林林地生产力提供科学依据。

**关键词:** 土壤质量评价; 土壤酶活性; 土壤理化性质; 主成分分析; 人工林; 武夷山

**中图分类号:** S158

**文献标志码:** A

武夷山位于福建省与江西省交界处, 保存了同纬度带最完整的中亚热带原生性森林<sup>[1]</sup>。武夷山被评定为具有国际保护意义的 A 级自然保护区以来<sup>[2]</sup>, 中国学者已对武夷山的动植物、微生物、土壤活性、生物多样性等方面开展了较多的研究<sup>[3]</sup>。随着武夷山旅游业和茶产业的发展, 旅游项目的开发和茶园的扩张侵占了武夷山风景名胜区的林地资源<sup>[4-5]</sup>, 森林植被遭到破坏, 整体林分和立地质量下

降, 这对武夷山森林生态系统的功能和结构产生了一定影响, 进而影响了景区森林景观的质量。

土壤酶是森林生态系统中最活跃的生物活性物质, 虽然数量少, 但它在生态系统对土壤与植物生长的作用极大。植物根系的生理活动、微生物的生长繁殖、土壤动物区系(蚯蚓、蚂蚁)的释放和动植物残体的分解是土壤酶的主要来源<sup>[6-8]</sup>。其参与了土壤中各种复杂的生物学和生物化学反应, 在物质

收稿日期(Received date): 2020-08-18; 改回日期(Accepted date): 2021-03-03

基金项目(Foundation item): 福建农林大学林学院林学高峰学科建设项目(71201800705)。[The Forestry Summit Discipline Construction Project of Fujian Agricultural and Forestry University (71201800705)]

作者简介(Biography): 陈佳(1996-), 女, 福建宁德人, 硕士研究生, 主要研究方向: 森林经理学。[CHEN Jia (1996-), female, born in Ningde, Fujian province, M. Sc. candidate, research on forest management] E-mail: 1180430002@fafu.edu.cn

\* 通讯作者(Corresponding author): 李键(1982-), 男, 福建泰宁人, 博士, 副教授, 主要研究方向: 化学生态学和海岸带森林与环境。[LI Jian (1982-), male, born in Taining, Fujian province, Ph. D., associate professor, research on chemical ecology and coastal forest and environment] E-mail: jianli@fafu.edu.cn

循环、能量流动过程起着不可或缺的作用<sup>[9]</sup>。它与微生物通过矿质化作用为土壤提供养分,又通过同化作用改进土壤理化性质,二者共同催化土壤有机质的转化<sup>[10]</sup>。影响土壤肥力的土壤酶类型主要有水解酶类、氧化还原酶类、脱羧酶类等,这些酶活性的变化驱动着土壤的代谢过程,直接影响了土壤肥力的转化及植物对土壤肥力的吸收<sup>[11]</sup>。如,脲酶可以提高土壤氮素供应水平,因为它是催化尿素水解的唯一酶<sup>[12]</sup>;磷酸酶影响有机磷的分解转化,其酶活性可影响磷养分的转化<sup>[13]</sup>;蔗糖酶参与土壤有机碳的循环,存在于所有土壤当中<sup>[14]</sup>;过氧化氢酶属于氧化还原酶,它的活性反映了土壤呼吸作用和微生物生命活动的强弱,可表明土壤的腐殖化程度<sup>[14]</sup>。基于土壤酶上述特性,其活性可反映土壤养分循环能力,估测某一时刻土壤质量的状况,又因为土壤酶活性具有相对的稳定性,故常用于作为评价土壤质量的指标之一<sup>[15]</sup>,但其重要程度还应考量其与土壤理化性质的相关性。

土壤肥力是土壤的本质特征与基本属性<sup>[15]</sup>,而评价土壤肥力的关键是指标的选取。前人对武夷山地区的研究主要聚焦于该地区土壤养分的分析<sup>[16]</sup>、不同海拔梯度土壤理化性质的变化规律<sup>[17]</sup>、模拟不同手段对土壤酶活性及土壤理化性质带来的影响<sup>[18-19]</sup>,且研究区主要为天然林<sup>[16,20]</sup>,对武夷山土壤理化性质与土壤酶活性主要集中在不同人工林间的差异及其二者之间相关性的探讨,而对该地区土壤肥力的关注较少。因此,本研究从土壤酶与土壤理化性质相关性的角度出发,采用单因素分析法、Pearson 相关性分析法、主成分分析法等,对武夷山风景名胜区内 6 种不同的人工林以及天然次生阔叶林的森林土壤质量进行评价,探究在该区域将土壤酶活性作为评价土壤肥力重要指标的可行性,以期该地区土壤肥力评价指标的选取提供参考,对于武夷山风景名胜区内森林资源的可持续开发和利用具有重要的实际意义,同时也能够为维系周边区域人工林地土壤肥力、改善人工林林地生产力提供科学依据。

## 1 材料和方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于武夷山九曲溪上游保护地(图 1),

地处武夷山市中部,地理坐标为 117°56'07"~117°58'18"E,27°40'04"~27°42'24"N。属亚热带地区,气候季节性变换明显,夏季高温多雨,雨量丰沛,间有台风,冬季温暖湿润,年均气温 17.9℃,年均降水量达 2000 mm 以上,年均相对湿度 78%,有雾日超过 60 d。区内土壤为红壤,呈酸性,黏粒含量较高<sup>[21]</sup>。该地区植被种类丰富,主要分布的天然林树种多以青冈栎(*Cyclobalanopsis glauca*)、甜槠(*Castanopsis eyrei*)等常绿阔叶林为主。除此之外,还有大面积的人工种植林,常见的树种有鹅掌楸(*Liriodendron chinense*)、南酸枣(*Choerospondias axillaris*)、枫香(*Liquidambar formosana*)、拟赤杨(*Alniphyllum fortunei*)、马尾松(*Pinus massoniana*)、杉木(*Cunninghamia lanceolata*)等。

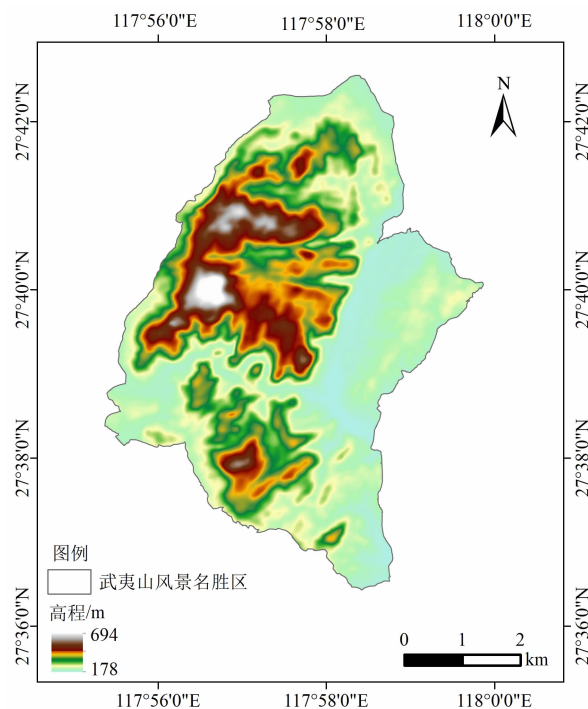


图 1 研究区地理位置

Fig. 1 Location of study area

### 1.2 调查方法

根据前期踏查,于 2018 年 6 月在武夷山九曲溪上游保护地带相同原始土壤发育条件的山地内,选择坡度相近的鹅掌楸、拟赤杨、杉木、枫香、马尾松和南酸枣 6 种不同的人工林以及天然次生阔叶林。在每个林地内利用随机取样法分别选取 3 个大小均为 20 m × 20 m 的重复样方,共 21 个样方,记录样方的坡位、坡度及样方内植被的胸径、树高等数据。并在

每个样方内,用土钻按“S”形,按照 0~10、10~20 和 20~40 cm 的土层取样,每个土样各取混合土约 1 kg。混匀土样后除去其中的植物残体、根系、石块等杂物,低温保存带回实验室,经风干后研磨过筛,用密封袋保存于 4 ℃ 的冰箱,为土壤指标的测定做准备。各林型样地的概况见表 1。

表 1 不同林地类型样地的概况  
Tab.1 Plot survey of different woodlands

林地类型	坡位	坡度/ (°)	平均胸 径/cm	林分密度/ (株·hm <sup>-2</sup> )	郁闭度
鹅掌楸人工林	下部	25	20.44	1020	0.60
南酸枣人工林	中下部	20	19.51	1034	0.70
枫香人工林	下部	25	19.62	1021	0.70
拟赤杨人工林	中部	35	14.09	1710	0.65
马尾松人工林	下部	30	20.48	1500	0.20
杉木人工林	上部	35	21.97	1674	0.25
天然次生阔叶林	中部	30	23.71	1389	0.75

1.3 土壤理化性质与土壤酶活性的测定方法

土壤 pH 值和有机质 (organic matter) 含量测定分别采用电位法和重铬酸钾容量法 - 外加热法<sup>[22]</sup>; 全氮 (Total N) 和水解氮 (Hydrolysis Nitrogen) 含量测定分别采用半微量凯氏法和碱解扩散法<sup>[22]</sup>; 全钾 (Total K) 和速效钾 (Available K) 含量测定分别采用碱熔 - 火焰光度法和 1 mol/L CH<sub>3</sub>COONH<sub>4</sub> 浸提 -

火焰光度法<sup>[22]</sup>; 全磷 (Total P) 和速效磷 (Available P) 含量测定分别采用碱熔 - 钼锑抗比色法和盐酸 - 钼锑抗比色法<sup>[22]</sup>。

对土壤脲酶、磷酸酶、蔗糖酶和过氧化氢酶活性的测定均使用风干土,测酶活性之前进行培养。土壤脲酶活性测定采用靛酚蓝比色法<sup>[23]</sup>; 磷酸酶活性测定采用 C<sub>6</sub>H<sub>5</sub>Na<sub>2</sub>O<sub>4</sub>P 比色法<sup>[23]</sup>; 蔗糖酶活性测定采用 3,5 - C<sub>7</sub>H<sub>4</sub>N<sub>2</sub>O<sub>7</sub> 比色法<sup>[23]</sup>; 过氧化氢酶活性测定采用紫外分光光度法<sup>[23]</sup>。

1.4 数据处理

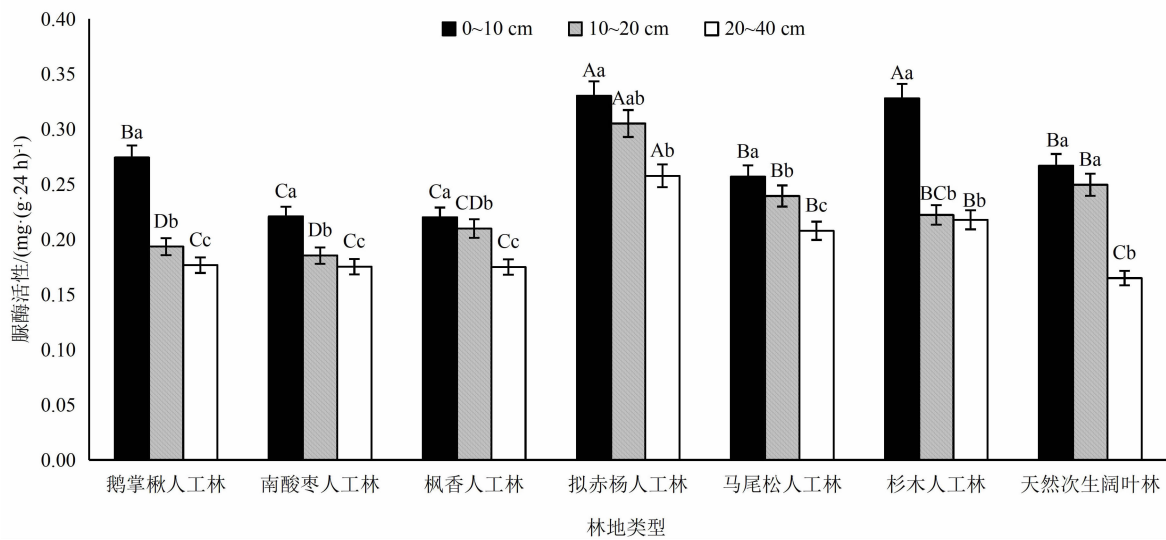
利用 Microsoft Office Excel 2007 软件进行数据记录与图表制作。利用 SPSS 20.0 软件,对不同林型、不同土层下土壤酶活性差异进行单因素方差分析 (One-way ANOVA); 对不同林型、不同土层的交互效应对土壤酶活性的影响进行双因素方差分析 (Two-way ANOVA); 对所有林型的土壤理化性质和酶活性进行 Pearson 相关性分析; 采用主成分分析法对不同林型的土壤肥力质量进行综合评价。

2 结果和分析

2.1 土壤酶活性特征

2.1.1 脲酶

由图 2 可知,不同林地的土壤脲酶活性在各土层的变化范围为 0.16~0.33 mg·(g·24 h)<sup>-1</sup>,且酶活性均随着土层的加深而减小。不同林型平均脲酶活



注:不同大写字母表示同一土层不同林地类型差异显著 ( $P < 0.05$ ); 不同小写字母表示同一林地类型不同土层差异显著 ( $P < 0.05$ )。

图 2 不同林地土壤脲酶活性  
Fig. 2 Urease activity in different woodlands

性,拟赤杨人工林最高  $0.30 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot 24 \text{ h})^{-1}$ ,说明该林地土壤水解氮的转化速度最快,氮素供应状况最好,南酸枣人工林下最低  $0.19 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot 24 \text{ h})^{-1}$ 。其中,鹅掌楸与杉木人工林的脲酶活性在  $10 \sim 20 \text{ cm}$  土层迅速下降,天然次生阔叶林在  $20 \sim 40 \text{ cm}$  土层迅速下降。除了拟赤杨、杉木人工林及天然次生阔叶林外,其他林型的脲酶活性在不同土层均差异显著 ( $P < 0.05$ )。  $0 \sim 10 \text{ cm}$  土层,拟赤杨与杉木人工林的脲酶活性显著高于其他林型,南酸枣、枫香人工林显著低于其他林型;  $10 \sim 40 \text{ cm}$  土层,拟赤杨人工林的脲酶活性显著高于其他林型,枫香、南酸枣与鹅掌楸人工林显著低于其他林型。

### 2.1.2 磷酸酶

由图 3 可知,不同林型的土壤磷酸酶活性在各土层的变化范围为  $1.50 \sim 9.96 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot 24 \text{ h})^{-1}$ 。且随着土层的加深,磷酸酶活性不断降低。不同林型平均磷酸酶活性,天然次生阔叶林最高  $7.78 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot 24 \text{ h})^{-1}$ ,且明显高于其他 6 种人工林,杉木人工林最低  $2.00 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot 24 \text{ h})^{-1}$ ,这说明天然次生阔叶林土壤有效磷的矿化速率最快,磷素供应状况最好。其中,拟赤杨、马尾松人工林与天然次生阔叶林的磷酸酶活性在  $10 \sim 20 \text{ cm}$  土层迅速下降。磷酸酶活性在枫香人工林不同土层均差异显著 ( $P < 0.05$ ),在南酸枣人工林中无显著差异 ( $P > 0.05$ )。  $0 \sim 10 \text{ cm}$  土层,天然次生阔叶林的磷酸酶活性显著高于其他林型;  $10 \sim 20$  和  $20 \sim 40 \text{ cm}$  土

层,次生阔叶林与南酸枣人工林的磷酸酶活性显著高于其他林型,枫香、鹅掌楸、马尾松和杉木人工林显著低于其他林型。

### 2.1.3 蔗糖酶

由图 4 可知,不同林型的蔗糖酶活性在各土层的变化范围为  $119.42 \sim 457.16 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot 24 \text{ h})^{-1}$ ,且土壤的蔗糖酶活性与土层深度呈反比,均随着土层的加深而降低。不同林型平均蔗糖酶活性,天然次生阔叶林最高  $331.26 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot 24 \text{ h})^{-1}$ ,枫香人工林最低  $160.92 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot 24 \text{ h})^{-1}$ ,这说明天然次生阔叶林地提供碳源的能力比较强。所有林型的蔗糖酶活性均在  $10 \sim 20 \text{ cm}$  土层迅速下降。除了鹅掌楸、南酸枣和杉木人工林外,其他林型的蔗糖酶活性在不同土层之间具有显著性差异 ( $P < 0.05$ )。  $10 \sim 40 \text{ cm}$  土层,天然次生阔叶林的蔗糖酶活性显著高于其他林型,鹅掌楸、南酸枣、枫香和马尾松显著低于其他林型。

### 2.1.4 过氧化氢酶

从图 5 可知,不同林型的过氧化氢酶活性在各土层的变化范围为  $0.09 \sim 0.13 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot 20 \text{ min})^{-1}$ ,且酶活性也与土层深度呈反比。不同林型平均过氧化氢活性,杉木人工林最高  $0.12 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot 20 \text{ min})^{-1}$ ,鹅掌楸人工林最低  $0.11 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot 20 \text{ min})^{-1}$ ,但 7 种林地其含量无太大差异。其中,鹅掌楸、南酸枣、枫香和拟赤杨人工林的过氧化氢酶活性在不同土层均具有显著性差异 ( $P < 0.05$ ),马尾松、杉木人工林

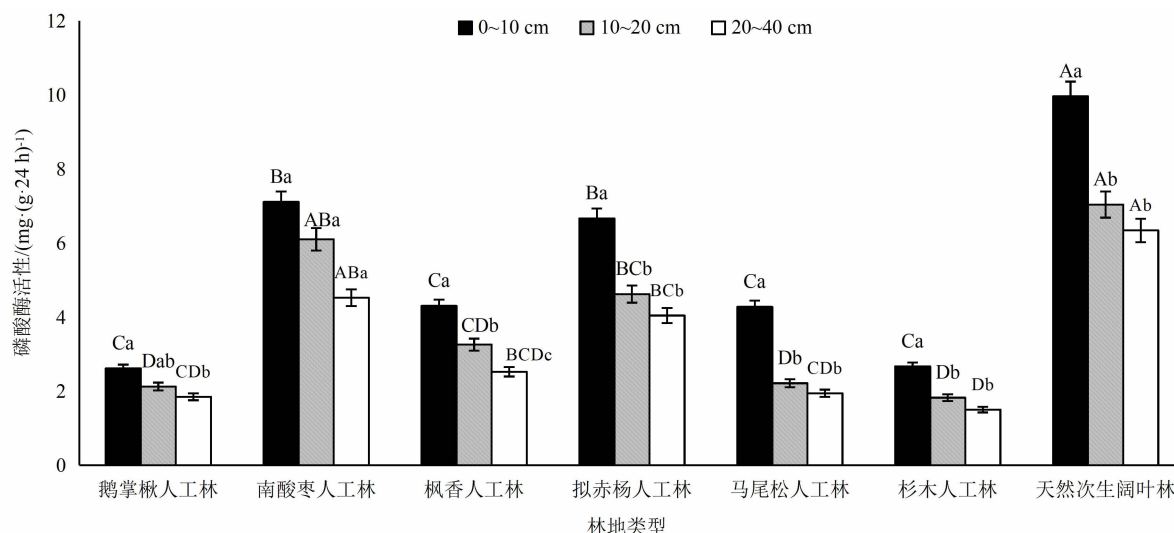


图 3 不同林地土壤磷酸酶活性

Fig. 3 Phosphatase activity in different woodlands





表 2 不同林地类型和土层深度对土壤酶活性的  
双因素方差分析

Tab. 2 Two-way ANOVA of soil enzyme activities in  
different woodlands and soil depths

酶种类	因子	df	F	P
脲酶	林地类型	6	53.01	0.00**
	土层	2	133.06	0.00**
	林地类型×土层	12	6.40	0.00**
磷酸酶	林地类型	6	2124.93	0.00**
	土层	2	1224.72	0.00**
	林地类型×土层	12	57.28	0.00**
蔗糖酶	林地类型	6	413.16	0.00**
	土层	2	2970.31	0.00**
	林地类型×土层	12	50.68	0.00**
过氧化氢酶	林地类型	6	4.37	0.00**
	土层	2	515.88	0.00**
	林地类型×土层	12	1.11	0.38

注: \* 表示  $P < 0.05$ , \*\* 表示  $P < 0.01$ 。

层的加深而增加外,其他土壤理化因子的含量均呈现出随土层的加深而降低的特点。除土壤 pH 值、全磷与速效钾含量,其他土壤理化因子的含量皆在天然次生阔叶林中最高。土壤有机质主要来源于凋落物的分解与淋溶,这 7 种林地土壤有机质的含量差异较大( $7.02 \sim 54.44 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ),但均随土层深度加深而减少,其中阔叶林的有机质含量高于针叶林。马尾松人工林有机质的含量  $0 \sim 10 \text{ cm}$  土层明显高于  $10 \sim 20 \text{ cm}$ ,这可能是因为外界因素的影响。水解氮含量的变化幅度较大( $36.17 \sim 213.50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ),有效磷含量的变化幅度不大( $2.85 \sim 6.66 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ),均低于  $10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,速效钾含量的变化幅度也不大( $3.23 \sim 15.67 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ),均低于  $16 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

由表 4 可知,土壤 pH 值与土壤酶(脲酶、磷酸酶、蔗糖酶、过氧化氢酶)活性呈显著负相关( $P < 0.05$ )。脲酶活性与土壤 pH 值、有机质和有效磷显著相关( $P < 0.05$ );磷酸酶活性与其他 8 个土壤理

表 3 不同林地土壤理化性质

Tab. 3 Physical and chemical properties of soil in different woodlands

林地类型	土层深度/cm	pH	有机质含量/ ( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	全氮含量/ ( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	水解氮含量/ ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	全磷含量/ ( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	有效磷含量/ ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	全钾含量/ ( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	速效钾含量/ ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )
鹅掌楸人工林	0~10	$4.83 \pm 0.07$	$28.72 \pm 0.11$	$2.13 \pm 0.19$	$121.33 \pm 14.57$	$0.82 \pm 0.03$	$5.27 \pm 0.20$	$3.69 \pm 0.08$	$8.93 \pm 1.05$
	10~20	$5.05 \pm 0.12$	$22.87 \pm 0.13$	$1.85 \pm 0.29$	$98.00 \pm 21.29$	$0.78 \pm 0.01$	$4.32 \pm 0.25$	$3.82 \pm 0.20$	$7.00 \pm 0.45$
	20~40	$5.14 \pm 0.03$	$20.98 \pm 0.22$	$1.74 \pm 0.41$	$77.00 \pm 3.50$	$0.78 \pm 0.04$	$4.29 \pm 0.27$	$3.84 \pm 0.18$	$6.47 \pm 0.50$
南酸枣人工林	0~10	$4.74 \pm 0.23$	$38.79 \pm 0.46$	$2.66 \pm 0.40$	$177.33 \pm 14.18$	$1.06 \pm 0.02$	$4.67 \pm 0.25$	$3.91 \pm 0.37$	$15.67 \pm 1.77$
	10~20	$4.93 \pm 0.21$	$35.23 \pm 0.43$	$2.46 \pm 0.49$	$145.83 \pm 14.05$	$1.01 \pm 0.01$	$3.95 \pm 0.39$	$4.02 \pm 0.36$	$12.93 \pm 1.86$
	20~40	$5.06 \pm 0.15$	$29.57 \pm 0.42$	$2.15 \pm 0.52$	$138.83 \pm 11.68$	$0.95 \pm 0.01$	$3.31 \pm 0.34$	$4.11 \pm 0.34$	$12.70 \pm 1.96$
枫香人工林	0~10	$4.55 \pm 0.19$	$32.04 \pm 0.26$	$2.34 \pm 0.42$	$143.50 \pm 17.86$	$0.92 \pm 0.01$	$4.64 \pm 0.25$	$3.85 \pm 0.38$	$8.60 \pm 0.61$
	10~20	$4.76 \pm 0.16$	$28.01 \pm 0.29$	$2.14 \pm 0.43$	$124.83 \pm 25.38$	$0.77 \pm 0.01$	$4.46 \pm 0.39$	$4.07 \pm 0.32$	$6.57 \pm 1.14$
	20~40	$4.81 \pm 0.23$	$24.35 \pm 0.36$	$1.95 \pm 0.44$	$113.17 \pm 18.39$	$0.75 \pm 0.02$	$3.92 \pm 0.19$	$4.12 \pm 0.03$	$6.03 \pm 0.99$
拟赤杨人工林	0~10	$4.53 \pm 0.18$	$41.71 \pm 0.30$	$2.69 \pm 0.39$	$152.83 \pm 8.81$	$0.97 \pm 0.02$	$3.95 \pm 0.20$	$4.61 \pm 0.37$	$11.97 \pm 1.24$
	10~20	$4.73 \pm 0.17$	$32.19 \pm 0.43$	$2.22 \pm 0.58$	$113.14 \pm 14.57$	$0.96 \pm 0.01$	$3.80 \pm 0.36$	$4.62 \pm 0.44$	$10.17 \pm 0.86$
	20~40	$4.85 \pm 0.23$	$32.00 \pm 0.48$	$2.17 \pm 0.53$	$130.67 \pm 14.57$	$0.90 \pm 0.02$	$3.51 \pm 0.18$	$4.77 \pm 0.39$	$9.40 \pm 0.96$
马尾松人工林	0~10	$4.94 \pm 0.14$	$49.92 \pm 0.36$	$1.23 \pm 0.37$	$121.33 \pm 14.83$	$0.63 \pm 0.02$	$4.58 \pm 0.17$	$3.87 \pm 0.24$	$8.33 \pm 1.75$
	10~20	$5.29 \pm 0.11$	$28.35 \pm 0.31$	$0.96 \pm 0.26$	$58.33 \pm 14.45$	$0.60 \pm 0.02$	$3.89 \pm 0.49$	$3.93 \pm 0.26$	$5.93 \pm 0.12$
	20~40	$5.37 \pm 0.15$	$21.23 \pm 0.26$	$0.83 \pm 0.27$	$36.17 \pm 17.27$	$0.55 \pm 0.02$	$3.74 \pm 0.22$	$4.14 \pm 0.38$	$5.27 \pm 0.38$
杉木人工林	0~10	$4.87 \pm 0.15$	$22.25 \pm 0.29$	$1.57 \pm 0.55$	$96.83 \pm 22.34$	$0.76 \pm 0.03$	$4.06 \pm 0.18$	$3.75 \pm 0.27$	$5.00 \pm 1.39$
	10~20	$5.18 \pm 0.03$	$14.00 \pm 0.24$	$1.14 \pm 0.44$	$61.83 \pm 18.29$	$0.73 \pm 0.01$	$3.80 \pm 0.10$	$3.97 \pm 0.34$	$3.80 \pm 1.10$
	20~40	$5.27 \pm 0.05$	$7.02 \pm 0.19$	$0.80 \pm 0.14$	$36.17 \pm 9.62$	$0.62 \pm 0.03$	$2.85 \pm 0.20$	$4.01 \pm 0.42$	$3.23 \pm 0.31$
天然次生阔叶林	0~10	$4.42 \pm 0.15$	$54.44 \pm 0.34$	$3.54 \pm 0.63$	$213.50 \pm 7.23$	$0.85 \pm 0.04$	$6.66 \pm 0.30$	$5.14 \pm 0.20$	$10.57 \pm 1.82$
	10~20	$4.70 \pm 0.09$	$47.30 \pm 0.27$	$2.76 \pm 0.38$	$151.67 \pm 6.77$	$0.84 \pm 0.01$	$5.30 \pm 0.25$	$5.25 \pm 0.24$	$7.67 \pm 1.55$
	20~40	$4.72 \pm 0.15$	$33.23 \pm 0.46$	$2.08 \pm 0.43$	$140.00 \pm 7.34$	$0.83 \pm 0.02$	$5.30 \pm 0.26$	$5.38 \pm 0.18$	$7.17 \pm 1.12$

化性质均呈极显著相关 ( $P < 0.01$ );蔗糖酶活性与土壤 pH 值、全氮、水解氮、有效磷和有机质呈极显著相关( $P < 0.01$ );过氧化氢酶活性与土壤 pH 值呈极显著相关( $P < 0.01$ ),与全氮、水解氮、有效磷和有机质呈显著相关( $P < 0.05$ )。除上述所描述相关性外,其余土壤酶活性与土壤理化性质皆无显著相关性。

2.3 土壤肥力综合评价

因子分析是一种通过降维技术来达到简化数据的多元统计方法<sup>[24]</sup>。由表 4 可见,在评价土壤肥力的指标间存在显著( $P < 0.05$ )和极显著( $P < 0.01$ )关系,故采用主成分分析方法,对武夷山 6 种人工林与天然次生阔叶林的 12 个指标进行分析(表 5)。各主成分的方差贡献率依次是 34.06%、28.74%、24.78%,累计方差贡献率达 87.58%,基本可以解释变量的大部分信息<sup>[25]</sup>。因此,可以用 3 个公因子表示原来的 12 个因子来评价土壤肥力。

表 6 为土壤肥力 12 个指标的主成分载荷矩阵,该矩阵反映了指标对主成分的影响程度<sup>[25]</sup>。把每个主成分中因子载荷  $\geq 0.5$  的指标筛选出来,第一主成分中载荷较高的指标:磷酸酶、全氮、水解氮、速效钾和全磷;第二主成分:脲酶、过氧化氢酶、蔗糖酶和有效磷;第三主成分:水解氮、全氮、有机质、有效磷、磷酸酶和全钾。

在主成分分析的基础上,根据综合得分模式计算不同林型土壤肥力的综合得分(表 7)。综合得分为正,说明该林型的土壤肥力在平均水平之上,得分越高,则土壤肥力质量越高。研究区土壤肥力质量评价分值由小到大依次为:杉木人工林、马尾松人工林、鹅掌楸人工林、枫香人工林、南酸枣人工林、拟赤杨人工林、天然次生阔叶林。其中,天然次生阔叶林的土壤肥力明显高于其他 6 种人工林,阔叶人工林的土壤肥力也高于针叶人工林。

3 讨论

3.1 土壤酶活性及其与土壤理化性质之间的关系

本研究中,不同林地类型的土壤酶活性均随土层深度的加深而减弱。磷酸酶与蔗糖酶活性在天然次生阔叶林中最高,脲酶活性在拟赤杨人工林中最高,过氧化氢酶在天然次生阔叶林中最低,这与前人<sup>[26-27]</sup>得出土壤脲酶、磷酸酶、蔗糖酶、过氧化氢酶在常绿阔叶林活性最高的研究结果不相符。脲酶活性在拟赤杨人工林而非天然次生阔叶林中最高,这可能是因为脲酶的最适 pH 约为 7,但研究区的土壤 pH 值均低于 5.4,抑制了酶的活性,且天然次生阔叶林的 pH 值在 7 种林型中最小;结合林地水解氮与速效钾的含量来看,该人工林脲酶活性最高也可

表 4 土壤酶活性与土壤理化性质的相关系数  
Tab.4 Correlation coefficient between soil enzyme activity and  
soil physical and chemical properties

酶种类	pH	有机质	全氮	水解氮	全磷	有效磷	全钾	速效钾
脲酶	-0.47 *	0.45 *	0.26	0.31	0.04	0.44 *	0.20	0.09
磷酸酶	-0.76 **	0.85 **	0.85 **	0.89 **	0.62 **	0.63 **	0.67 *	0.70 **
蔗糖酶	-0.66 **	0.61 **	0.58 **	0.61 **	0.33	0.66 **	0.29	0.35
过氧化氢酶	-0.63 **	0.55 *	0.46 *	0.54 *	0.34	0.51 *	-0.06	0.42

表 5 土壤主成分分析  
Tab.5 Principal component analysis of soil

主成分	提取因子载荷的平方和			旋转后提取因子载荷的平方和		
	特征值 $\lambda$	方差贡献率/%	累计方差贡献率/%	特征值 $\lambda$	方差贡献率/%	累计方差贡献率/%
$F_1$	7.30	60.84	60.85	4.09	34.06	34.06
$F_2$	1.94	16.18	77.03	3.45	28.74	62.80
$F_3$	1.27	10.55	87.58	2.97	24.78	87.58

注: $F_1$ 、 $F_2$ 、 $F_3$  分别表示第一、二、三主成分。

表 6 旋转后主成分因子载荷与得分  
Tab. 6 Principal component factor loads and scores after rotation

指标	各主成分因子的载荷			各主成分因子的得分		
	$F_1$	$F_2$	$F_3$	$F_1$	$F_2$	$F_3$
pH	-0.58	-0.46	-0.51	-0.07	-0.05	-0.09
有机质	0.48	0.43	0.59	0.01	0.04	0.17
全氮	0.76	0.25	0.52	0.16	-0.06	0.09
水解氮	0.77	0.33	0.51	0.16	-0.02	0.07
全磷	0.95	0.03	0.08	0.37	-0.10	-0.19
有效磷	0.14	0.53	0.65	-0.15	0.10	0.27
全钾	0.09	-0.05	0.92	-0.18	-0.18	0.54
速效钾	0.93	0.11	0.06	0.36	-0.06	-0.21
脲酶	-0.05	0.93	0.16	-0.15	0.37	-0.04
磷酸酶	0.61	0.32	0.66	0.06	-0.04	0.12
蔗糖酶	0.25	0.88	0.23	-0.06	0.30	-0.03
过氧化氢酶	0.34	0.92	-0.04	0.06	0.36	-0.26

表 7 不同林地土壤肥力预测评价结果

Tab. 7 Prediction and evaluation results of soil fertility in different woodlands

林地类型	$F_1$	$F_2$	$F_3$	综合得分	排名
鹅掌楸人工林	-0.19	0.06	-0.58	-0.19	5
南酸枣人工林	1.70	-0.61	-0.59	0.26	3
枫香人工林	0.19	-0.37	-0.07	-0.06	4
拟赤杨人工林	0.68	0.05	0.15	0.28	2
马尾松人工林	-1.16	0.14	-0.26	-0.42	6
杉木人工林	-1.12	0.41	-0.85	-0.47	7
天然次生阔叶林	-0.10	0.32	2.21	0.61	1

能是因为受到人为活动的影响。过氧化氢酶活性在天然次生阔叶林中最低,这可能是因为相较人工林,天然林树种更丰富,不仅凋落物的分解速度更快,而且植物根系的次生分泌物也更多,这都增强了土壤的抗氧化性,从而影响土壤微生物的活性,进而抑制了土壤过氧化氢酶的活性<sup>[28]</sup>。磷酸酶活性在南酸枣人工林中无显著差异,这与前人<sup>[27]</sup>的研究结果也不符,结合林地全磷与速效钾的含量来看,该林型也可能受到了人为活动的影响。不同林地类型与土壤深度都对这 4 种土壤酶活性影响显著( $P < 0.05$ ),林型与土壤深度的交互作用对土壤中脲酶、酸性磷酸酶和蔗糖酶的活性影响极显著( $P < 0.01$ ),对过氧

化氢酶无显著影响,这与王海英等<sup>[29]</sup>对嘉陵江上游不同植被恢复模式土壤酶活性差异研究中的结果基本一致。这表明在水平与垂直方向上,土壤酶活性存在空间异质性。

通过简单相关分析发现,这 4 种土壤酶活性与 8 个土壤理化性质指标之间存在显著的相关性,其相关系数的大小反映不同酶的专性作用或共性作用的大小。不同林型对土壤酶活性与土壤理化性质均有显著( $P < 0.05$ )影响,其中水解氮含量的变化幅度较大,这主要是因为不同林型凋落物不同,分解速率也不同,阔叶林的凋落物含量明显高于针叶林,天然林凋落物含量高于人工林,加上马尾松与杉木人工林的郁闭度也都较低所导致的;有效磷含量的变化幅度不大,主要是因为研究区土壤呈酸性至强酸性,土壤中游离态的磷易与游离态的  $\text{Fe}^{3+}$ 、 $\text{Al}^{3+}$  形成磷酸铁、磷酸铝沉淀,甚至会进一步形成闭蓄态的磷<sup>[30]</sup>所造成的;速效钾的含量变化幅度也不大,这可能是因为除了杉木人工林,其他林地所处的坡位均位于中下部,而武夷山雨水充沛,土壤通透性较好,土壤中的钾易受到雨水淋洗而流失<sup>[17]</sup>所导致的。这 4 种土壤酶活性与 pH 值之间均呈显著负相关( $P < 0.05$ ),这表明 pH 值偏酸的土壤会抑制土壤酶的活性,且相关系数的绝对值越大,pH 值对该酶活性的影响也就越大。土壤酶活性与土壤钾、磷、氮、有机质等的相关系数较高,且分别呈现显著或极显著相关,这说明土壤酶活性与土壤有机质两者之间的关系密不可分,并积极参与有机质转化分解的过程<sup>[11]</sup>,也证明了本研究选取的这 4 种土壤酶的活性可以作为表征该地区土壤肥力水平的一种手段。

3.2 土壤肥力

由于土壤酶的敏感性,其已成为了解土壤状况的指示性指标与评价土壤肥力的重要评价指标之一<sup>[15]</sup>。土壤酶活性与土壤理化性质之间的相关性反映了土壤养分循环过程,强调了土壤酶在土壤有机质分解转化过程中的作用<sup>[31-35]</sup>。本研究中,7 种林地类型的初始土壤条件相同、演替时间相近。利用主成分分析对这 7 种林型的土壤肥力质量进行量化评价,结果由小到大依次为:杉木人工林、马尾松人工林、鹅掌楸人工林、枫香人工林、南酸枣人工林、拟赤杨人工林、天然次生阔叶林。天然林土壤肥力质量优于人工林,且阔叶林优于针叶林,这与张俊



华<sup>[36]</sup>等对黄土丘陵不同植被的研究结果类似。天然次生阔叶林土壤质量优于人工林,这主要是因为天然林结构比人工林更复杂,土壤表层凋落物较多,有机质含量高于人工林。阔叶人工林土壤质量优于针叶人工林,主要是因为针叶人工林林分结构单一,凋落物较少,且针叶林的凋落物中含有较多单宁、蜡质、树脂等难分解的有机质,导致土壤养分归还的速率变慢。

同时,通过主成分分析发现,第一主成分的累积方差贡献率最大,故全氮、水解氮、全磷、速效钾和磷酸酶可作为表征该地区土壤肥力的较优指标,近似的反映土壤的综合肥力水平。而第二、三主成分中载荷较高的一些指标(脲酶、蔗糖酶、过氧化氢酶等),虽不能直接反映该地区土壤的综合肥力水平,但其可以反映土壤氮、碳等在循环转化过程中的变化,以及土壤微生物活动的强弱<sup>[15]</sup>。因此,在武夷山人工林建设过程中,可通过人工手段来增加土壤中的磷酸酶含量,以提高土壤肥力,并根据不同人工林土壤肥力现状,因地制宜,适当增施有机肥、绿肥等肥料来补充土壤氮、磷、钾等微量元素,以改善土壤理化性质。而在土壤贫瘠的地区,选择种植拟赤杨和南酸枣人工林,或者种植混交林,可促进土壤肥力的恢复。

本实验是对亚热带森林土壤肥力评价指标的选取与土壤质量评价的一次尝试,还有很多没有兼顾到的因素,如土壤微量元素、土壤微生物等,在后续研究中将进一步完善。同时,在评价土壤肥力的过程中,还应该要考虑到我国土壤地带类型的丰富性与土壤利用的差异性,针对不同地区不同土壤类型,对所选取的指标进行调整,构建科学合理的土壤肥力评价指标体系,使其更具普适性。今后,拟在以下三个方面开展进一步研究:第一,研究不同地区不同土壤类型的土壤酶种类差异,与不同种类土壤酶活性大小和土壤团粒结构的相关性,以及其对土壤理化性质和土壤肥力的影响;第二,深入研究土壤酶活性季节的动态变化与酶的动力学特征,为该区域森林土壤的良性发展提供理论支持;第三,将土壤微生物、植物根系分泌物与土壤酶活性的研究相联系,通过微生物手段来改良土壤问题,对土壤进行修复,从而进一步改善土壤质量,提高土壤肥力。

## 4 结论

(1)本研究分析了武夷山不同林型、不同土层条件下土壤酶活性的差异,发现研究区不同林地间的土壤酶(脲酶、磷酸酶、蔗糖酶、过氧化氢酶)活性存在显著性差异,且土壤酶活性均随着土层深度的加深而减弱。不同林型与不同土壤深度均对这4种土壤酶活性影响显著( $P < 0.05$ ),它们的交互作用对土壤中脲酶、磷酸酶和蔗糖酶的活性影响均极显著( $P < 0.01$ ),但是对过氧化氢酶无显著影响。

(2)通过 Pearson 相关性分析法,可以发现该地区的4种土壤酶活性与8个土壤理化性质指标之间关系密切。其中,脲酶的活性与土壤 pH 值、有机质和有效磷显著相关( $P < 0.05$ );磷酸酶的活性与其他8个土壤理化性质均呈极显著相关( $P < 0.01$ );蔗糖酶的活性与土壤有效磷、有机质、全氮、pH 值和水解氮呈极显著相关( $P < 0.01$ );过氧化氢酶的活性与土壤 pH 值呈极显著相关( $P < 0.01$ ),与有机质、全氮、水解氮和有效磷呈显著相关( $P < 0.05$ )。

(3)本文应用主成分分析法,对8个土壤理化性质指标与4种土壤酶活性共12个指标进行降维分析,证明了这12个指标可作为评价该研究区土壤肥力的指标。磷酸酶、全氮、水解氮、速效钾和全磷是表征土壤肥力的较优指标,可在一定范围区域内表征土壤肥力水平,故可以根据实际情况通过针对性的增施肥料等手段来提高土壤肥力。对武夷山7种林型的土壤肥力质量进行排序,由高到低依次为:天然次生阔叶林、拟赤杨人工林、南酸枣人工林、枫香人工林、鹅掌楸人工林、马尾松人工林、杉木人工林。

## 参考文献 (References)

- [1] 何容,汪家社,施政,等. 武夷山植被带土壤微生物量沿海拔梯度的变化[J]. 生态学报,2009,29(9):5138-5144. [HE Rong, WANG Jiashe, SHI Zheng, et al. Variations of soil microbial biomass across four different plant communities along an elevation gradient in Wuyi Mountains, China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(9): 5138-5144]
- [2] 陈安泽. 论旅游地学与地质公园的创立及发展,兼论中国地质遗迹资源——为庆祝中国地质科学院建院60周年而作[J]. 地球学报,2016,37(5):535-561. [CHEN Anze. The establishment and development of tourism earth-science and geopark, and geoheritage resources in China: Celebrating the 60<sup>th</sup> anniversary of

- Chinese Academy of Geological Sciences [J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2016, **37**(5): 535 – 561]
- [3] 杨青, 刘敏榕, 陈慧琪, 等. 基于 CiteSpace 的武夷山生物研究文献计量分析[J]. *福建林业科技*, 2020, **47**(3): 110 – 119. [YANG Qing, LIU Minrong, CHEN Huiqi, et al. Bibliometric analysis of biological research in Wuyi Mountain based on CiteSpace [J]. *Journal of Fujian Forestry Science and Technology*, 2020, **47**(3): 110 – 119] DOI: 10.13428/j.cnki.fjlk.2020.03.021
- [4] 林雪儿, 尤丽萍, 胡静, 等. 武夷山风景名胜区理学文化景观时空分布特征[J]. *海南师范大学学报(自然科学版)*, 2019, **32**(2): 199 – 207. [LIN Xue'er, YOU Liping, HU Jing, et al. Temporal and spatial distribution of the neo-confucianism cultural landscape in the Wuyishan Scenery District [J]. *Journal of Hainan Normal University (Natural Science)*, 2019, **32**(2): 199 – 207] DOI: 10.12051/j.issn.1674 – 4942.2019.02.015
- [5] 游巍斌, 何东进, 洪伟, 等. 基于景观安全格局的武夷山风景名胜区旅游干扰敏感区判别与保护[J]. *山地学报*, 2014, **32**(2): 195 – 204. [YOU Weibin, HE Dongjin, HONG Wei, et al. Identification for tourism disturbance sensitive areas and their protection based on landscape security pattern in world mixed heritage site Wuyishan Scenery District [J]. *Mountain Research*, 2014, **32**(2): 195 – 204] DOI: 10.16089/j.cnki.1008 – 2786.2014.02.002
- [6] 王升忠, 王树生, 魏民. 泥炭沼泽微地貌特征及其形成的水动力机制[J]. *东北师大学报(自然科学版)*, 1997(2): 83 – 89. [WANG Shengzhong, WANG Shusheng, WEI Min. On features and hydrodynamic mechanism of forming of microlandform on peatmires [J]. *Journal of Northeast Normal University (Natural Science Edition)*, 1997(2): 83 – 89] DOI: 10.16163/j.cnki.22 – 1123/n.1997.02.019
- [7] 高扬, 汪亚峰, 何念鹏, 等. 不同土地利用方式下崇明岛土壤酶与有机质空间分布特征[J]. *农业环境科学学报*, 2013, **32**(1): 21 – 28. [GAO Yang, WANG Yafeng, HE Nianpeng, et al. Spatial distribution characteristic of soil enzymes activity and organic matter under different land use management Chongming Island [J]. *Journal of Agro – Environment Science*, 2013, **32**(1): 21 – 28]
- [8] SINSABAUGH R L, LAUBER C L, WEINTRAUB M N, et al. Stoichiometry of soil enzyme activity at global scale [J]. *Ecology Letters*, 2008, **11**(11): 1252 – 1264. DOI: 10.1111/j.1461 – 0248.2008.01245.x
- [9] 王涵, 王果, 黄颖颖, 等. pH 变化对酸性土壤酶活性的影响[J]. *生态环境*, 2008, **17**(6): 2401 – 2406. [WANG Han, WANG Guo, HUANG Yingying, et al. The effects of pH change on the activities of enzymes in an acid soil [J]. *Ecology and Environmental*, 2008, **17**(6): 2401 – 2406] DOI: 10.16258/j.cnki.1674 – 5906.2008.06.056
- [10] 胡霞, 蔡霜, 廖金花, 等. 峨眉山不同海拔森林土壤微生物和酶活性特征[J]. *重庆师范大学学报(自然科学版)*, 2016, **33**(1): 109 – 114. [HU Xia, CAI Shuang, LIAO Jinhua, et al. Responses of soil microbial and enzyme activity features of different altitudes of Mt. Emei [J]. *Journal of Chongqing Normal University (Natural Science)*, 2016, **33**(1): 109 – 114] DOI: 10.11721/cqnj20160109
- [11] 杨皓, 范明毅, 李婕玲, 等. 喀斯特山区无籽刺梨种植基地土壤酶活性与肥力因子的关系[J]. *山地学报*, 2016, **34**(1): 28 – 37. [YANG Hao, FAN Mingyi, LI Jieling, et al. Relationship between soil enzyme activities and fertility factors from *Rosa sterilis* S. D. Shi planting bases located in karst mountain region [J]. *Mountain Research*, 2016, **34**(1): 28 – 37] DOI: 10.16089/j.cnki.1008 – 2786.000097
- [12] 王玉功, 刘婧晶, 刘貽熙, 等. 苯酚 – 次氯酸钠比色法测定土壤脲酶活性影响因素的研究[J]. *土壤通报*, 2019, **50**(5): 1166 – 1170. [WANG Yugong, LIU Jingjing, LIU Yixi, et al. Effective factors of urease activities in soil by using the phenol-sodium hypochlorite colorimetric method [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2019, **50**(5): 1166 – 1170] DOI: 10.19336/j.cnki.trtb.2019.05.22
- [13] 朱芸芸, 李敏, 曲博, 等. 湿地植物根际土壤磷酸酶活性变化规律研究[J]. *环境科学与技术*, 2016, **39**(10): 106 – 112. [ZHU Yunyun, LI Min, QU Bo, et al. Research on the variations of phosphatase activity in rhizosphere soil of wetland plants [J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, **39**(10): 106 – 112] DOI: 10.3969/j.issn.1003 – 6504.2016.10.020
- [14] 邓欧平, 李翰, 熊雷, 等. 秸秆、猪粪混施对麦田根际土壤过氧化氢酶与蔗糖酶活性的影响[J]. *土壤*, 2018, **50**(1): 86 – 92. [DENG Ouping, LI Han, XIONG Lei, et al. Effect of mixed application of rice-wheat straws and pig manure on soil enzyme activities in wheat-growth field [J]. *Soils*, 2018, **50**(1): 86 – 92] DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2018.01.012
- [15] 叶协锋, 杨超, 李正, 等. 绿肥对植烟土壤酶活性及土壤肥力的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2013, **19**(2): 445 – 454. [YE Xiefeng, YANG Chao, LI Zheng, et al. Effects of green manure in corporation on soil enzyme activities and fertility in tobacco-planting soils [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2013, **19**(2): 445 – 454] DOI: 10.11674/zwjy.2013.0223
- [16] 赵家豪, 袁景西, 袁在翔, 等. 武夷山南方铁杉针阔混交林不同地形土壤营养元素分析[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2020, **44**(4): 176 – 182. [ZHAO Jiahao, YUAN Jingxi, YUAN Zaixiang, et al. An analysis of soil nutrient elements in different terrains of coniferous (*Tsuga chinensis* var. *tchekiangensis*) and broadleaf mixed forest in Jiangxi Wuyishan [J]. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition)*, 2020, **44**(4): 176 – 182] DOI: 10.3969/j.issn.1000 – 2006.201902009
- [17] 张厚喜, 林丛, 程浩, 等. 武夷山不同海拔梯度毛竹林土壤有机碳特征及影响因素[J]. *土壤*, 2019, **51**(4): 821 – 828. [ZHANG Houxi, LIN Cong, CHENG Hao, et al. Variation of soil

- organic carbon content of moso bamboo forest along altitudinal gradient in Wuyi Mountain in China [J]. *Soils*, 2019, **51**(4): 821–828 DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2019.04.025
- [18] 曹聪,阮超越,任寅榜,等. 模拟增温对武夷山不同海拔森林表层土壤碳氮及酶活性的影响[J]. *生态学报*, 2020, **40**(15): 5347–5356. [CAO Cong, RUAN Chaoyue, REN Yinbang, et al. Effects of stimulating warming on surface soil carbon, nitrogen and its enzyme activities across a subtropical elevation gradient in Wuyi Mountain, China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, **40**(15): 5347–5356] DOI: 10.5846/stxb201908041644
- [19] 孙海燕,赵俊平,肖艳玲,等. 模拟氮沉降对武夷山亚热带常绿阔叶林土壤呼吸的影响[J]. *生态环境学报*, 2018, **27**(9): 1632–1638. [SUN Haiyan, ZHAO Junping, XIAO Yanling, et al. Soil respiration and its response to simulated nitrogen deposition in a subtropical evergreen broad-leaved forest in Mount Wuyi [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2018, **27**(9): 1632–1638] DOI: 10.16258/j.cnki.1674–5906.2018.09.007
- [20] 丘清燕,杨钰,王浩,等. 易分解有机碳输入量对武夷山常绿阔叶林不同土层深度土壤激发效应的影响[J]. *生态学杂志*, 2020, **39**(4): 1153–1163. [QIU Qingyan, YANG Yu, WANG Hao, et al. Effects of labile organic carbon application rates on the priming effect at different soil depths in an evergreen broadleaved forest of Wuyi Mountain [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2020, **39**(4): 1153–1163] DOI: 10.13292/j.1000–4890.202004.020
- [21] 李巍,刘洋,罗钦,等. 武夷山常绿阔叶林土壤微生物多样性的季节动态[J]. *热带亚热带植物学报*, 2017, **25**(2): 115–126. [LI Wei, LIU Yang, LUO Qing, et al. Seasonal dynamics in soil microorganisms diversity of evergreen broadleaved forest in Wuyi Mountains, southeastern China [J]. *Journal of Tropical and Subtropical Botany*, 2017, **25**(2): 115–126] DOI: 10.11926/jtsb.3656
- [22] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000: 25–109. [BAO Shidan. *Soil agrochemical analysis* [M]. Beijing: China Agricultural Press, 2000: 25–109]
- [23] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京: 中国农业出版社, 1986: 260–339. [GUAN Songyin. *Soil enzymes and their research methods* [M]. Beijing: China Agricultural Press, 1986: 260–339]
- [24] 杨钦,胡鹏,王建华,等. 1980–2018 年扎龙湿地及乌裕尔河流域景观格局演变及其响应[J]. *水生态学杂志*, 2020, **41**(5): 77–88. [YANG Qin, HU Peng, WANG Jianhua, et al. Landscape pattern change and response analysis in Zhalong Wetland and the Wuyuer River Basin, 1980–2018 [J]. *Journal of Hydroecology*, 2020, **41**(5): 77–88] DOI: 10.15928/j.1674–3075.2020.05.010
- [25] 刘照德,詹秋泉,田国梁. 因子分析综合评价研究综述[J]. *统计与决策*, 2019, **35**(19): 68–73. [LIU Zhaode, ZHAN Qiuquan, TIAN Guoliang. Research review on comprehensive evaluation of factor analysis [J]. *Statistics & Decision*, 2019, **35**(19): 68–73] DOI: 10.13546/j.cnki.tjyjc.2019.19.015
- [26] 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): 424–427 + 481. [BAI Cuixia, GENG Yuqing, LIANG Wei. Studies on soil urease activity of major forest types in Badaling of Beijing [J]. *Journal of Sichuan Agricultural University*, 2005, **23**(4): 424–427 + 481] DOI: 10.16036/j.issn.1000–2650.2005.04.011
- [27] 司登宇,张金池,陈莉莎,等. 浙江省凤阳山不同林分类型土壤酶活性研究[J]. *水土保持通报*, 2013, **33**(6): 258–263. [SI Dengyu, ZHANG Jinchi, CHEN Lisha, et al. Soil enzyme activity of different forest types in Fengyang Mountain of Zhejiang province [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2013, **33**(6): 258–263] DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2013.06.047
- [28] LEMENIH M, OLSSON M, KARLTUN E. Comparison of soil attributes under *Cupressus lusitanica* and *Eucalyptus saligna* established on abandoned farmlands with continuously cropped farmlands and natural forest in Ethiopia [J]. *Forest Ecology and Management*, 2004, **195**(1/2): 57–67. DOI: 10.1016/j.foreco.2004.02.055
- [29] 王海英,宫渊波,陈林武. 嘉陵江上游不同植被恢复模式土壤微生物及土壤酶活性的研究[J]. *水土保持学报*, 2008, **22**(3): 172–177. [WANG Haiying, GONG Yuanbo, CHEN Linwu. Study on soil microorganism and soil enzyme activity of different vegetation restoration in the upper reaches of Jialing River [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2008, **22**(3): 172–177] DOI: 10.13870/j.cnki.stbxb.2008.03.025
- [30] 吕倩,尹海锋,何朋俊,等. 马尾松人工林目标树经营初期对土壤理化性质与植物多样性的影响[J]. *应用与环境生物学报*, 2018, **24**(3): 500–507. [LV Qian, YIN Haifeng, HE Pengjun, et al. Effects of early management of *Pinus masoniana* plantation target trees on soil physicochemical properties and plant diversity [J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2018, **24**(3): 500–507] DOI: 10.19675/j.cnki.1006–687x.2017.12003
- [31] 金裕华,汪家社,李黎光,等. 武夷山不同海拔典型植被带土壤酶活性特征[J]. *生态学杂志*, 2011, **30**(9): 1955–1961. [JIN Yuhua, WANG Jiashe, LI Liguang, et al. Soil enzyme activities in typical vegetation zones along an altitude gradient in Wuyi Mountains [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2011, **30**(9): 1955–1961] DOI: 10.13292/j.1000–4890.2011.0327
- [32] 徐雪蕾,孙玉军,周华,等. 间伐强度对杉木人工林下植被和土壤性质的影响[J]. *林业科学*, 2019, **55**(3): 1–12. [XU Xuelei, SUN Yujun, ZHOU Hua, et al. Effects of thinning intensity on understory growth and soil properties in Chinese fir plantation [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2019, **55**(3): 1–12] DOI: 10.11707/j.1001–7488.20190301

- [33] 王理德, 王方琳, 郭春秀, 等. 土壤酶学研究进展[J]. 土壤, 2016, **48**(1): 12 – 21. [WANG Lide, WANG Fanglin, GUO Chunxiu, et al. Review: Progress of soil enzymology [J]. Soils, 2016, **48**(1): 12 – 21] DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2016.01.002
- [34] 王玉琴, 尹亚丽, 李世雄. 不同退化程度高寒草甸土壤理化性质及酶活性分析[J]. 生态环境学报, 2019, **28**(6): 1108 – 1116. [WANG Yuqin, YIN Yali, LI Shixiong. Physicochemical properties and enzymatic activities of alpine meadow at different degradation degrees [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2019, **28**(6): 1108 – 1116] DOI: 10.16258/j.cnki.1674 – 5906.2019.06.005
- [35] PAZ-FERREIRO J, FU S, MENDEZ A, et al. Interactive effects of biochar and the earthworm *Pontoscolex corethrurus* on plant productivity and soil enzyme activities [J]. Journal of Soils and Sediments, 2014, **14**(3): 483 – 494. DOI: 10.1007/s11368 – 013 – 0806 – z
- [36] 张俊华, 常庆瑞, 贾科利, 等. 黄土高原植被恢复对土壤肥力质量的影响研究[J]. 水土保持学报, 2003, **17**(4): 38 – 41. [ZHANG Junhua, CHANG Qingrui, JIA Keli, et al. Effect of plant restoration to soil fertility quality on Loess Plateau [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2003, **17**(4): 38 – 41] DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2003.04.010

## Soil Enzyme Activity Difference in Woodlands, and Soil Fertility Quality Evaluation in Mount Wuyi, China

CHEN Jia<sup>1</sup>, YAO Chengshuo<sup>1</sup>, LIN Yongming<sup>1</sup>, WU Chengzhen<sup>2</sup>, LI Jian<sup>1\*</sup>

(1. College of Forestry, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China;

2. College of Ecology and Resource Engineering, Wuyi University, Nanping 354300, Fujian, China)

**Abstract:** Soil enzymes are key factors in the construction and succession of forest communities. The research on soil physical and chemical properties and soil enzyme activities in Mount Wuyi mainly focuses on the differences and correlations between different plantations. However, the differences of soil enzyme activities and their relationship with soil fertility in different woodlands in this area are still blank. In order to compare the difference of soil enzyme activity in different woodlands and examine its correlation with soil fertility in Mount Wuyi, soils were sampled from 7 different stands including 6 plantations of *Choerospondias axillaris*, *Liquidambar formosana*, *Pinus massoniana*, *Alniphyllum fortunei*, *Liriodendron chinense* and *Cunninghamia lanceolata* as well as a spontaneously developed secondary broad-leaved forest. A total of 12 forest soil physical and chemical indexes were investigated by One-Way ANOVA, Two-Way ANOVA, Pearson Correlation Analysis and Principal Component Analysis (PCA), and the comprehensive quality of forest soil was evaluated. The results showed that soil enzyme activity was significantly affected by stand type and decreased with soil depth. And urease activity was highest in the *Alniphyllum fortunei* plantation, phosphatase and sucrase activities were highest in natural secondary broad-leaved forest, catalase activity was highest in *Cunninghamia lanceolata* plantation. The correlation varied between soil physical and chemical properties and soil enzymes in different stands. Among them, there was a significant negative correlation between pH and the four soil enzymes ( $P < 0.05$ ). Urease was significantly positively correlated with organic matter (OM) and available phosphorus (AP) ( $P < 0.05$ ). Catalase was significantly positively correlated with OM, total nitrogen (TN), hydrolysable nitrogen (HN) and AP ( $P < 0.05$ ). Sucrase was significantly positively correlated with OM, TN, HN and AP ( $P < 0.05$ ). Phosphatase was positively correlated with OM, TN, HN, total phosphorus (TP), AP, total potassium (TK) and available potassium (AK) ( $P < 0.01$ ). Soil enzyme activity in this region has a high correlation with soil physical and chemical properties and could be used as an

important index for fertility evaluation. TN, HN, TP, AP and phosphatase could be better indexes to characterize soil fertility in this region. On the whole, the comprehensive evaluation scores of soil fertility quality of different stands in Mount Wuyi were as follows: natural secondary broad-leaved forest (0.61), *Alniphyllum fortunei* plantation (0.28), *Choerospondias axillaris* plantation (0.26), *Liquidambar formosana* plantation (−0.06), *Liriodendron chinense* plantation (−0.19), *Pinus massoniana* plantation (−0.42), *Cunninghamia lanceolata* plantation (−0.47). The research results can provide reference for the strategy formulation of sustainable development and utilization of forest resources in Mount Wuyi.

**Key words:** soil quality evaluation; soil enzyme activity; physical and chemical properties of soil; principal component analysis (PCA); plantation; Mount Wuyi