

滇中高原常绿阔叶林土壤生物学特性对土壤理化性质的影响

杨媛媛¹, 黎建强¹, 陈奇伯^{1*}, 赵维娜¹, 刘佩琪¹, 丁延龙²

1. 西南林业大学环境科学与工程学院, 云南 昆明 650224; 2. 内蒙古农业大学生态环境学院, 内蒙古 呼和浩特 010010

摘要: 土壤酶活性和微生物是构成土壤生态系统的重要组成部分,也是决定土壤功能的关键因子,研究土壤生物学特性对理化性质的影响可以阐明影响土壤理化性质的因子,从而为林地土壤质量的恢复与保育提供科学依据。文章通过野外调查与室内实验相结合的方法进行样品采集与处理,结合相关分析与通径分析的数据分析方法对云南省玉溪市磨盘山常绿阔叶林土壤理化因子与土壤酶活性、微生物数量之间的关系进行了研究。结果表明,(1)常绿阔叶林林下土壤含水量、田间持水量、有机质、全氮、碱解氮、全磷、速效钾含量随着土层深度的增加而减少,土壤容重、pH、全钾含量随着土层深度的增加而增加。(2)土壤脲酶、过氧化氢酶、转化酶活性及可培养的细菌、放线菌、真菌数量随着土壤深度的增加而减少。(3)相关分析表明,土壤理化性质与酶活性、微生物数量之间存在显著的相关关系。(4)通径分析表明,过氧化氢酶和脲酶对土壤物理性质影响显著,而脲酶、过氧化氢酶、转化酶和真菌数量对化学性质有显著影响。

关键词: 常绿阔叶林; 土壤养分; 土壤生物学特性; 通径分析

DOI: 10.16258/j.cnki.1674-5906.2016.03.005

中图分类号: S151.9+4; X17

文献标志码: A

文章编号: 1674-5906 (2016) 03-0393-09

引用格式: 杨媛媛, 黎建强, 陈奇伯, 赵维娜, 刘佩琪, 丁延龙. 滇中高原常绿阔叶林土壤生物学特性对土壤理化性质的影响[J]. 生态环境学报, 2016, 25(3): 393-401.

YANG Yuanyuan, LI Jianqiang, CHEN Qibo, ZHAO Weina, LIU Peiqi, DING Yanlong. Effects of Soil Biological Characteristics on Physiochemical Properties in Evergreen Broad-leaved Forest in Middle Yunnan Plateau, China [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2016, 25(3): 393-401.

土壤酶和微生物是土壤生态系统的重要组成部分。土壤酶能够促进土壤中物质转化与能量交换,是植物营养元素的活性库,反映了土壤中进行的各种生物化学过程的强度和方向(Badiane et al., 2001; Kotroczo et al., 2014; 张向前等, 2015; 张学鹏等, 2015)。土壤微生物在土壤物质转化中具有重要作用,与土壤肥力和植物营养有密切关系(Li et al., 2013; Timothy et al., 2014; 丁文娟等, 2014)。因此,土壤酶活性与土壤微生物是决定土壤功能的两个关键性因素(刘曼等, 2013; 张雯雯等, 2014)。国内外学者对于土壤生物学和土壤理化性质关系的研究主要集中在脲酶、过氧化氢酶、蔗糖酶、蛋白酶、磷酸酶、纤维素酶,以及细菌、放线菌、真菌数量与土壤养分的相关性方面(Mina et al., 2012; 付美云等, 2015; 李芳等, 2015)。但是,简单的相关系数并不能完全反映一个变量对另一个变量的直接作用,而通径分析能全面考查变量间的相互关系,消除变量间的混淆,真实地表现出各个自变

量和因变量之间的关系(杨敬天等, 2010)。

常绿阔叶林物种组成丰富,层次结构多,且枯枝落叶多,地表有丰厚的腐殖质层,因此其涵养水源、保持水土的功能要优于其他林种。常绿阔叶林林下土壤有丰富的土壤养分和微生物,病虫害少、经营成本低,提高其实际应用率对人类的环境有重要的意义。本研究以磨盘山天然常绿阔叶林为研究对象,采用相关分析与通径分析相结合的方法对土壤生物学特性和理化性质之间的相关关系进行了分析,以揭示常绿阔叶林森林土壤生物学特性对土壤理化性质的影响机制,为林地土壤质量的恢复与保育提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

磨盘山国家森林公园地处我国云贵高原、横断山地和青藏高原三大自然地理区域的结合部,地处低纬度高原,是云南亚热带北部与亚热带南部的气候过渡地区,地理位置为北纬 23°46'~23°54',东经

基金项目: 国家林业局林业公益性行业科研专项(20120401-10); 云南省高校优势特色重点学科(生态学)建设项目(05000511311); 西南林业大学科技创新基金项目(C15117)

作者简介: 杨媛媛(1992年生),女,硕士研究生,研究方向为森林生态。E-mail: 15247119519@163.com

***通信作者:** 陈奇伯(1965年生),男,教授,研究方向为水土保持/恢复生态学。E-mail: Chenqb05@163.com

收稿日期: 2015-11-16

101°16'06"~101°16'12", 海拔 1 260.0~2 614.4 m。磨盘山海拔高差大, 气候垂直变化明显。年平均气温 15 ℃, 年平均雨量为 1 050 mm。极端最高气温 33.0 ℃, 极端最低气温-2.2 ℃, 全年日照时数 2 380 h。研究样地的基本概况见表 1。

1.2 土样采集

2014 年 11 月对磨盘山国家森林公园进行了全面踏查, 选择现存的 60~70 年的常绿阔叶天然林作为研究对象。在研究区内分别设置 3 个 20 m×20 m 的标准地, 调查林中各种植物的树龄、树高、胸径, 并在标准样地内沿对角线设置 3 个典型采样点, 每个采样点去除表层枯枝落叶, 挖掘土壤剖面, 分别在 0~20、20~40、40~60 cm 的土层采集土壤样品, 用于理化性质和生物学指标的测定, 其中部分鲜土带回实验室后置于 4 ℃保存供土壤酶活性与可培养微生物数量的测定, 其余土样经过阴干研磨, 分别过 1.00、0.25 mm 土壤筛, 装袋待测。

1.3 测定方法

土壤理化性质采用常规方法测定(中国科学院南京土壤研究所, 1978), 土壤容重和田间持水量采用环刀法测定; 土壤有机质采用 K₂Cr₂O₇ 外加热法测定, 土壤碱解氮采用碱解-扩散法测定, 土壤全磷采用钼锑抗比色法测定, 土壤全钾、速效钾采用火焰光度法测定, 土壤 pH 采用电位法测定; 脲酶

活性采用苯酚钠比色法测定, 过氧化氢酶活性采用容量法(高锰酸钾滴定法)测定, 蔗糖酶活性采用 3,5-二硝基水杨酸比色法测定(关松荫, 1986)。土壤微生物数量采用稀释平板分离计数法测定(本研究中测定的微生物均为可培养微生物), 细菌数量采用牛肉膏蛋白胨培养基培养法测定, 放线菌数量采用高氏 1 号培养基培养法测定, 真菌数量采用孟加拉红培养基培养法测定(中国科学院南京土壤研究所微生物室, 1985)。

1.4 数据处理

采用 Excel 与 SPSS 17.0 进行数据处理和分析, 用单因素方差分析(one-way ANOVA)检验 3 种土壤酶活性的显著性, 对所有数据进行正态性与方差齐性检验, 对数据进行相关分析并采用回归模型拟合土壤酶活性与土壤养分的相关关系并进行通径分析。

2 结果与分析

2.1 土壤理化性质

磨盘山国家森林公园天然常绿阔叶林土壤理化性质见表 2。常绿阔叶林林下土壤含水量、田间持水量、有机质、全氮、碱解氮、全磷、速效钾含量随土层深度的加深而减少, 而土壤容重、pH、全钾含量随土层的加深而增加。土壤容重、pH 值和全氮含量在不同土层土壤中存在显著差异

表 1 磨盘山常绿阔叶林群落标准样地基本情况
Table 1 The basic characteristics of evergreen broad-leaved forest in Mopan mountain

群落类型 Forest type	林龄 Stand age/a	平均胸径 Mean diameter at breast height/cm	平均树高 Mean height/m	海拔 Elevation/m	坡位 Slope position	坡向 Slope aspect	坡度 slope gradient	土壤类型 Soil type	郁闭度 Canopy cover/%
天然常绿阔叶林	70	9.81	11.06	2 395	中坡	北偏西 45°	25°	红壤	90

表 2 磨盘山天然常绿阔叶林林地土壤理化性质
Table 2 Soil physicochemical properties in different depth of evergreen broad-leaved forest in Mopan mountain

土壤理化性质指标 Soil physicochemical indices	土层深度 Soil depth		
	0~20 cm	20~40 cm	40~60 cm
土壤容重 Soil bulk density/(g·cm ⁻³)	0.50±0.03c	0.63±0.05b	0.78±0.01a
质量含水量 Volumetric water content/(g·kg ⁻¹)	687.64±55.14a	622.77±54.70a	588.41±53.88a
田间持水量 Field moisture capacity/%	84.01±4.26a	75.71±2.89a	62.85±5.22a
pH 值 soil PH	4.62±0.13c	4.89±0.15b	5.15±0.11a
有机质 Organic matter concentration/(g·kg ⁻¹)	139.79±58.33a	126.01±29.59a	50.87±23.76b
全氮 Total N/(g·kg ⁻¹)	2.51±0.52a	1.86±0.58b	0.99±0.47c
碱解氮 Alkali-hydrolysable N/(mg·kg ⁻¹)	377.72±15.69a	239.26±9.55b	141.73±4.21b
全磷 Total P/(g·kg ⁻¹)	0.25±0.05a	0.19±0.04b	0.16±0.02b
全钾 Total K/(g·kg ⁻¹)	3.71±0.25b	3.4±0.94b	7.29±0.74a
速效钾 Available K/(mg·kg ⁻¹)	314.29±14.53a	167.75±17.85b	113.09±22.86b

表中的数值为平均值±标准误。同一列数值后的不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$)。n=9 (下同)

The date in table are "mean ± standard derivation (SD)", different lowercase letters indicate significant difference within the treatments at 0.05 level by LSD. n=9 (The same below)

($P<0.05$)；有机质及全钾含量在 40~60 cm 土层与 0~40 cm 土层中差异显著；碱解氮、全磷、速效钾含量在表层 (0~20 cm) 土壤中与 20~60 cm 土壤中的差异显著。

2.2 土壤生物学性质

由天然常绿阔叶林不同土层土壤酶活性及微生物数量 (表 3) 可以看出, 土壤脲酶、过氧化氢酶、转化酶活性随着土层加深而逐渐减小, 脲酶、转化酶活性在 0~40 cm 土层与 40~60 cm 土层间有显著差异 ($P<0.05$), 过氧化氢酶活性在不同的土层深度中存在显著差异 ($P<0.05$)。在 0~20、20~40、40~60 cm 土层中 3 种微生物的数量均呈现出相同的规律: 细菌>放线菌>真菌。随着土壤深度的增加, 土壤中细菌、放线菌、真菌数量都是逐渐减少的。土壤中细菌、放线菌与真菌数量在 20~40 与 40~60 cm 土层中无显著差异, 但是放线菌和真菌数量在土壤表层 (0~20 cm) 与 20~60 cm 土层间差

异显著。

2.3 土壤理化性质与土壤生物学特性之间的相互关系

2.3.1 土壤养分与生物学特性之间的相关系数

土壤养分与酶活性、微生物数量的相关系数见表 4。土壤容重与脲酶、转化酶活性呈显著负相关关系 ($P<0.05$), 与过氧化氢酶活性呈极显著负相关关系 ($P<0.01$); 质量含水量与过氧化氢酶活性呈极显著正相关关系 ($P<0.01$); 田间持水量与脲酶活性呈极显著负相关关系 ($P<0.01$); pH 与脲酶、过氧化氢酶、转化酶活性均呈极显著负相关关系 ($P<0.01$), 与真菌数量呈显著负相关关系 ($P<0.05$); 有机质与脲酶、过氧化氢酶活性呈极显著正相关关系 ($P<0.01$), 与转化酶活性呈显著相关关系 ($P<0.05$); 全氮、碱解氮以及全磷均与脲酶、过氧化氢酶、转化酶活性呈极显著正相关关系 ($P<0.01$), 此外全磷与真菌数量呈显著正相关关系 ($P<0.05$); 全钾与脲酶、过氧化氢酶活性呈极显著负相关关系 ($P<0.01$), 与转化酶活性呈显著负相关关系 ($P<0.05$); 速效钾与脲酶、转化酶活性呈极显著正相关关系 ($P<0.01$), 与转化酶活性、真菌数量呈显著正相关关系 ($P<0.01$)。

2.3.2 土壤物理性质与生物学特性间关系的途径分析

将土壤物理性质和酶活性、微生物数量进行多元回归分析, 得到标准化多元回归方程:

$$Y_1 = -0.157B_1 - 0.607B_2 - 0.109B_3 + 0.114B_4 - 0.145B_5 - 0.094B_6$$
$$Y_2 = -0.477B_1 + 0.697B_2 + 0.579B_3 - 0.333B_4 + 0.021B_5 - 0.062B_6$$
$$Y_3 = -0.937B_1 - 0.048B_2 + 0.563B_3 - 0.184B_4 - 0.176B_5 - 0.239B_6$$

表 3 磨盘山天然常绿阔叶林不同土层土壤酶活性及微生物数量
Table 3 Soil enzymes activities and microbes in different depth of evergreen broad-leaved forest in Mopan mountain

土壤生物学指标 Soil biological indices	土层深度 Soil depth		
	0~20 cm	20~40 cm	40~60 cm
脲酶活性 Urease activity/(mg·g ⁻¹)	2.60±0.16a	2.58±0.12a	1.35±0.13b
过氧化氢酶活性 Catalase activity/(mL·g ⁻¹)	0.13±0.01a	0.103±0.01b	0.063±0.01c
转化酶活性 Invertase activity/(mg·g ⁻¹)	117.4002±6.45a	93.1429±6.47a	31.8539±3.13b
细菌 Bacterium/(10 ⁵ cfu·g ⁻¹)	10.35±1.42a	2.01±0.10b	1.43±0.24b
放线菌 Actinomycetes/(10 ⁴ cfu·g ⁻¹)	2.94±0.46a	1.00±0.09a	0.76±0.06a
真菌 Fungus/(10 ³ cfu·g ⁻¹)	8.19±0.38a	4.45±0.12b	4.29±0.44b

表 4 磨盘山常绿阔叶林土壤理化性质与酶活性、微生物数量的相关系数

Table 4 The correlation of soil physicochemical properties and both enzymes activities and soil microbes of evergreen broad-leaved forest in Mopan mountain

	土壤容重 Soil bulk density	质量含水量 Volume metric water content	田间持水量 Filed moisture capacity	pH	有机质 Organic matter content	全氮 Total N	碱解氮 Alkali-hydrolysable N	全磷 Total P	全钾 Total K	速效钾 Available K
脲酶活性 Urease activity	-0.471*	0.219	-0.539**	-0.572**	0.493**	0.577**	0.693**	0.531**	-0.646**	0.487**
过氧化氢酶活性 Catalase activity	-0.752**	0.653**	-0.363	-0.704**	0.811**	0.588**	0.498**	0.635**	-0.505**	0.740**
转化酶活性 Invertase activity	-0.410*	0.347	-0.265	-0.521**	0.419*	0.503**	0.672**	0.623**	-0.442*	0.436*
细菌数量 Bacterium	-0.033	-0.286	-0.349	-0.275	-0.175	0.101	0.195	0.09	-0.141	-0.024
放线菌数 Actinomycetes	-0.164	-0.083	-0.293	-0.348	0.016	0.16	0.067	0.213	-0.171	0.042
真菌数量 Fungus	-0.355	0.188	-0.324	-0.382*	0.292	0.376	0.299	0.483*	-0.251	0.415*

*显著相关 ($P<0.05$) ; **极显著相关 ($P<0.01$)

* indicates correlation is significant at $P<0.05$ level; ** indicates correlation is extremely significant at $P<0.01$ level

式中, Y_1 、 Y_2 、 Y_3 分别为土壤容重、土壤质量含水量、田间持水量, B_1 为脲酶活性, B_2 为过氧化氢酶活性, B_3 为转化酶活性, B_4 为细菌数量, B_5 为放线菌数量, B_6 为真菌数量。

土壤生物学特性中, 过氧化氢酶活性对土壤容重有较大的直接负效应, 其次是脲酶活性、放线菌数量、细菌数量、转化酶活性、真菌数量的直接作用。过氧化氢酶对土壤容重的直接作用较大, 并与土壤容重达到了极显著相关水平; 土壤脲酶通过过氧化氢酶产生的间接作用和其自身的直接作用较大, 并与土壤容重达到了显著相关水平; 转化酶主要通过过氧化氢酶、脲酶产生的间接作用及其自身的直接作用影响土壤容重, 并与土壤容重达到了显著相关水平; 微生物 (细菌、放线菌、真菌) 数量对容重的影响较小 (表 5)。

土壤生物学特性中, 对土壤田间持水量的直接作用系数最大的是脲酶, 其作用系数远大于其他因子。土壤酶活性主要通过脲酶、转化酶产生的直接或间接作用影响田间持水量; 土壤细菌、放线菌数量主要通过其自身的直接作用及彼此的交互作用影响田间持水量; 土壤真菌数量主要通过其自身的直接作用以及与脲酶及转化酶产生的间接作用影响土壤田间持水量 (表 5)。

由土壤物理性质与土壤酶活性、微生物数量通径分析的决定系数 (表 6) 可知, 土壤容重主要受

过氧化氢酶的影响, 其决定系数达 0.368, 这说明过氧化氢酶活性是影响土壤容重的关键因子; 对土壤质量含水量影响较大的依次是过氧化氢酶的直接作用、脲酶通过转化酶产生的间接作用、转化酶的直接作用、脲酶通过过氧化氢酶产生的间接作用、过氧化氢酶通过转化酶产生的间接作用、脲酶的直接作用, 说明过氧化氢酶是影响土壤质量含水量的关键因子; 对土壤田间持水量的影响程度较大的依次是脲酶的直接作用和脲酶通过转化酶产生的间接作用, 这说明土壤脲酶是影响田间持水量的关键因子。

2.3.3 土壤化学性质与生物学特性间关系的通径分析

将土壤化学性质和酶活性、微生物数量进行多元回归分析, 得到标准化多元回归方程:

$$Y_4 = -0.256B_1 - 0.479B_2 - 0.170B_3 - 0.043B_4 - 0.265B_5 - 0.094B_6$$

$$Y_5 = 0.147B_1 + 0.698B_2 + 0.128B_3 - 0.287B_4 + 0.099B_5 + 0.033B_6$$

$$Y_6 = 0.372B_1 + 0.333B_2 + 0.090B_3 - 0.084B_4 + 0.173B_5 + 0.174B_6$$

$$Y_7 = 0.331B_1 + 0.259B_2 + 0.301B_3 + 0.129B_4 - 0.015B_5 + 0.067B_6$$

$$Y_8 = -0.040B_1 + 0.377B_2 + 0.532B_3 - 0.183B_4 + 0.271B_5 + 0.231B_6$$

表 5 磨盘山国家森林公园常绿阔叶林土壤物理性质与土壤酶活性、微生物数量的通径系数

Table 5 Path coefficients between soil physical properties and both enzymes activities and soil microbes of evergreen broad-leaved forest in Mopan mountain

因变量 Dependent variables	自变量 Independent variables	脲酶 Urease $B_1 \rightarrow Y$	过氧化氢酶 Catalase $B_2 \rightarrow Y$	转化酶 Invertase $B_3 \rightarrow Y$	细菌数量 Bacterium $B_4 \rightarrow Y$	放线菌数量 Actinomycetes $B_5 \rightarrow Y$	真菌数量 Fungus $B_6 \rightarrow Y$	总和 Total
土壤容重 Soil bulk density Y_1	脲酶活性 Urease	-0.157	-0.232	-0.088	0.008	0.012	-0.014	-0.471*
	过氧化氢酶活性 Catalase	-0.060	-0.607	-0.031	0.003	-0.024	-0.033	-0.752**
	转化酶活性 Invertase	-0.126	-0.175	-0.109	0.012	0.010	-0.022	-0.410*
	细菌数量 Bacterium	-0.011	-0.018	-0.011	0.114	-0.09	-0.017	-0.033
	放线菌数量 Actinomycetes	0.013	-0.099	0.008	0.071	-0.145	-0.012	-0.164
	真菌数量 Fungus	-0.024	-0.213	-0.025	0.020	-0.019	-0.094	-0.355
质量含水量 Volume metric water content Y_2	脲酶活性 Urease	-0.477	0.267	0.465	-0.024	-0.002	-0.01	0.219
	过氧化氢酶活性 Catalase	-0.183	0.697	0.167	-0.010	0.003	-0.021	0.653**
	转化酶活性 Invertase	-0.383	0.201	0.579	-0.034	-0.002	-0.014	0.347
	细菌数量 Bacterium	-0.035	0.020	0.060	-0.333	0.013	-0.011	-0.286
	放线菌数量 Actinomycetes	0.040	0.114	-0.043	-0.207	0.021	-0.008	-0.083
	真菌数量 Fungus	-0.072	0.245	0.134	-0.059	0.002	-0.062	0.188
田间持水量 Filed moisture capacity Y_3	脲酶活性 Urease	-0.937	-0.019	0.452	-0.014	0.015	-0.036	-0.539**
	过氧化氢酶活性 Catalase	-0.359	-0.048	0.163	-0.006	-0.029	-0.084	-0.363
	转化酶活性 Invertase	-0.752	-0.014	0.563	-0.019	0.013	-0.056	-0.265
	细菌数量 Bacterium	-0.068	-0.002	0.058	-0.184	-0.11	-0.043	-0.349
	放线菌数量 Actinomycetes	0.079	-0.008	-0.042	-0.115	-0.176	-0.031	-0.293
	真菌数量 Fungus	-0.142	-0.017	0.130	-0.033	-0.023	-0.239	-0.324

表 6 磨盘山常绿阔叶林土壤物理性质与土壤酶活性、微生物数量通径分析的决定系数

Table 6 Path analysis determination coefficients of soil physical properties and both enzymes activities and soil microbes of evergreen broad-leaved forest in Mopan mountain

次序 Order	土壤容重 Soil bulk density		质量含水量 Volume metric water content		田间持水量 Filed moisture capacity	
	D _{ij}	决定系数 Determination coefficient	D _{ij}	决定系数 Determination coefficient	D _{ij}	决定系数 Determination coefficient
1	D _y B ₂	0.368	D _y B ₂	0.486	D _y B ₁	0.878
2	D _y B ₂ B ₆	0.04	D _y B ₁ B ₃	-0.443	D _y B ₁ B ₃	-0.847
3	D _y B ₂ B ₃	0.038	D _y B ₃	0.335	D _y B ₃	0.317
4	D _y B ₂ B ₅	0.029	D _y B ₁ B ₂	-0.255	D _y B ₁ B ₆	0.068
5	D _y B ₁ B ₃	0.027	D _y B ₂ B ₃	0.233	D _y B ₃ B ₆	-0.062
6	D _y B ₁	0.025	D _y B ₁	0.227	D _y B ₆	0.057
7	D _y B ₄ B ₅	-0.021	D _y B ₄	0.111	D _y B ₄ B ₅	0.04
8	D _y B ₅	0.021	D _y B ₃ B ₄	-0.04	D _y B ₁ B ₂	0.034
9	D _y B ₄	0.013	D _y B ₂ B ₆	-0.03	D _y B ₄	0.034
10	D _y B ₃	0.012	D _y B ₁ B ₄	0.023	D _y B ₅	0.031

$$Y_9 = -0.744B_1 - 0.223B_2 + 0.224B_3 + 0.030B_4 - 0.187B_5 - 0.093B_6$$

$$Y_{10} = 0.149B_1 + 0.589B_2 + 0.116B_3 - 0.099B_4 + 0.006B_5 + 0.175B_6$$

式中， Y_4 、 Y_5 、 Y_6 、 Y_7 、 Y_8 、 Y_9 、 Y_{10} 分别为土壤 pH、有机质、全氮、碱解氮、全磷、全钾、速效钾， B_1 为脲酶活性， B_2 为过氧化氢酶活性， B_3 为转化酶活性， B_4 为细菌数量， B_5 为放线菌数量， B_6 为真菌数量。

土壤生物学特性中对 pH 的直接作用系数大小顺序为过氧化氢酶、放线菌数量、脲酶、转化酶、真菌数量、细菌数量。过氧化氢酶主要通过自身的直接作用影响土壤 pH，并与 pH 达到了极显著相关水平；放线菌数量主要通过自身的直接作用影响 pH；脲酶、转化酶主要通过自身的直接作用及其他两种酶产生的间接作用影响 pH，并与 pH 达到极显著相关水平；虽然真菌数量对 pH 的直接作用的决定系数只有 -0.094，但其通过与其他微生物及酶的相互作用，使其与 pH 达到显著相关水平（表 7）。

对土壤有机质产生直接影响较大的生物学特性因子有过氧化氢酶、细菌数量、脲酶、转化酶。过氧化氢酶主要通过自身的直接效应影响有机质，这种作用远大于通过其他因子产生的影响，并与有机质达到极显著相关水平；细菌数量主要通过自身的直接效应作用于有机质；土壤脲酶主要通过过氧化氢酶、转化酶的间接作用及其自身的直接作用影响有机质，并与有机质达到极显著相关水平（表 7）。

在生物学特性因子中，对土壤全氮的直接作用较大的是脲酶活性和过氧化氢酶活性，其他因子的直接作用都比较小。其中，脲酶主要通过其自身的

直接作用及通过过氧化氢酶、转化酶产生的间接作用来影响全氮；过氧化氢酶主要通过自身的直接作用及通过脲酶及真菌数量产生的间接作用来影响全氮，且脲酶、过氧化氢酶均与全氮达到了极显著相关水平；虽然转化酶的直接作用的通径系数只有 0.090，但其通过与其他酶及微生物的交互作用和全氮达到极显著相关水平（表 7）。

对土壤碱解氮有直接作用的生物学特性因子按其直接作用大小排序依次为脲酶>转化酶>过氧化氢酶>细菌数量>真菌数量>放线菌数量，其中酶对碱解氮的直接作用较微生物大。脲酶、过氧化氢酶、转化酶主要是通过自身的直接作用及与其他两种酶产生的间接作用影响碱解氮，且这 3 种酶均与碱解氮达到了极显著相关水平；而微生物对碱解氮的直接和间接作用均比较小（表 7）。

生物学特性因子中对土壤全磷直接作用的系数大小依次为转化酶>过氧化氢酶>放线菌数量>真菌数量>细菌数量>脲酶。其中转化酶对土壤全磷的直接作用远大于其通过其他因子产生的间接作用，且转化酶与全磷达到了极显著相关水平；过氧化氢酶主要通过自身产生的直接作用和通过转化酶产生的间接作用影响全磷，且过氧化氢酶与全磷达到了极显著相关水平；放线菌数量主要通过其自身的直接作用、细菌数量及过氧化氢酶产生的间接作用影响全磷，通过转化酶、真菌数量、脲酶产生的间接作用较小；真菌主要是通过自身的直接作用、通过过氧化氢酶和转化酶的间接作用影响全磷，并与全磷达到显著相关水平；细菌主要通过自身的直接作用、与放线菌的交互作用影响全磷；脲酶的直接作用的通径系数虽然只有 -0.040，但其通过与其他因子的相互作用，最终与全磷达到极显著相关水平（表 7）。

表 7 磨盘山国家森林公园常绿阔叶林土壤化学性质与土壤酶活性、微生物数量的通径系数

Table 7 Path coefficients between soil chemical properties and both enzymes activities and soil microbes of evergreen broad-leaved forest in Mopan mountain

因变量 Dependent variables	自变量 Independent variables	脲酶 Urease $B_1 \rightarrow Y$	过氧化氢酶 Catalase $B_2 \rightarrow Y$	转化酶 Invertase $B_3 \rightarrow Y$	细菌数量 Bacterium $B_4 \rightarrow Y$	放线菌数量 Actinomycetes $B_5 \rightarrow Y$	真菌数量 Fungus $B_6 \rightarrow Y$	总和 Total
pH Y_4	脲酶活性 Urease	-0.256	-0.183	-0.137	-0.004	0.022	-0.014	-0.572
	过氧化氢酶活性 Catalase	-0.098	-0.479	-0.049	-0.002	-0.043	-0.033	-0.704
	转化酶活性 Invertase	-0.206	-0.138	-0.170	-0.005	0.020	-0.022	-0.521
	细菌数量 Bacterium	-0.019	-0.014	-0.017	-0.043	-0.165	-0.017	-0.275
	放线菌数量 Actinomycetes	0.0210	-0.078	0.013	-0.027	-0.265	-0.012	-0.348
	真菌数量 Fungus	-0.039	-0.168	-0.039	-0.008	-0.034	-0.094	-0.382
有机质 Organic matter content Y_5	脲酶活性 Urease	0.147	0.267	0.103	-0.021	-0.008	0.005	0.493**
	过氧化氢酶活性 Catalase	0.056	0.698	0.037	-0.008	0.016	0.012	0.811**
	转化酶活性 Invertase	0.118	0.202	0.128	-0.030	-0.007	0.008	0.419*
	细菌数量 Bacterium	0.011	0.02	0.013	-0.287	0.062	0.006	-0.175
	放线菌数量 Actinomycetes	-0.013	0.114	-0.009	-0.179	0.099	0.004	0.016
	真菌数量 Fungus	0.022	0.245	0.030	-0.051	0.013	0.033	0.292
全氮 Total N Y_6	脲酶活性 Urease	0.372	0.127	0.072	-0.006	-0.014	0.026	0.577**
	过氧化氢酶活性 Catalase	0.142	0.333	0.026	-0.002	0.028	0.061	0.588**
	转化酶活性 Invertase	0.299	0.096	0.090	-0.009	-0.013	0.040	0.503**
	细菌数量 Bacterium	0.027	0.010	0.009	-0.084	0.108	0.031	0.101
	放线菌数量 Actinomycetes	-0.031	0.055	-0.007	-0.052	0.173	0.022	0.160
	真菌数量 Fungus	0.056	0.117	0.021	-0.014	0.022	0.174	0.376
碱解氮 Alkali-hydrolysable N Y_7	脲酶活性 Urease	0.331	0.099	0.242	0.010	0.001	0.010	0.693**
	过氧化氢酶活性 Catalase	0.127	0.259	0.087	0.004	-0.002	0.023	0.498**
	转化酶活性 Invertase	0.266	0.075	0.301	0.013	0.001	0.016	0.672**
	细菌数量 Bacterium	0.024	0.008	0.031	0.129	-0.009	0.012	0.195
	放线菌数量 Actinomycetes	-0.028	0.042	-0.022	0.081	-0.015	0.009	0.067
	真菌数量 Fungus	0.050	0.091	0.070	0.023	-0.002	0.067	0.299
全磷 Total P Y_8	脲酶活性 Urease	-0.040	0.144	0.427	-0.013	-0.022	0.035	0.531**
	过氧化氢酶活性 Catalase	-0.015	0.377	0.153	-0.005	0.044	0.081	0.635**
	转化酶活性 Invertase	-0.032	0.109	0.532	-0.019	-0.020	0.053	0.623**
	细菌数量 Bacterium	-0.003	0.011	0.055	-0.183	0.169	0.041	0.09
	放线菌数量 Actinomycetes	0.003	0.062	-0.039	-0.114	0.271	0.030	0.213
	真菌数量 Fungus	-0.006	0.132	0.123	-0.032	0.035	0.231	0.483*
全钾 Total K Y_9	脲酶活性 Urease	-0.744	-0.086	0.180	0.002	0.016	-0.014	-0.646**
	过氧化氢酶活性 Catalase	-0.285	-0.223	0.065	0.001	-0.03	-0.033	-0.505**
	转化酶活性 Invertase	-0.597	-0.065	0.224	0.003	0.014	-0.021	-0.442*
	细菌数量 Bacterium	-0.054	-0.007	0.023	0.030	-0.116	-0.017	-0.141
	放线菌数量 Actinomycetes	0.062	-0.036	-0.017	0.019	-0.187	-0.012	-0.171
	真菌数量 Fungus	-0.113	-0.078	0.052	0.005	-0.024	-0.093	-0.251
速效钾 Available K Y_{10}	脲酶活性 Urease	0.149	0.226	0.093	-0.007	-0.001	0.027	0.487**
	过氧化氢酶活性 Catalase	0.057	0.589	0.034	-0.003	0.001	0.062	0.740**
	转化酶活性 Invertase	0.120	0.171	0.116	-0.010	-0.001	0.040	0.436*
	细菌数量 Bacterium	0.011	0.017	0.012	-0.099	0.004	0.031	-0.024
	放线菌数量 Actinomycetes	-0.012	0.096	-0.009	-0.062	0.006	0.023	0.042
	真菌数量 Fungus	0.023	0.207	0.027	-0.018	0.001	0.175	0.415*

生物学特性因子对土壤全钾直接作用系数较大的有脲酶、转化酶、过氧化氢酶、放线菌数量。其中脲酶主要通过其自身的直接作用及通过转化酶、过氧化氢酶产生的间接作用影响全钾，且脲酶与全钾达到了极显著相关水平；转化酶主要通过脲酶、过氧化氢酶产生的间接作用及通过自身产生的

直接作用影响全钾，并与全钾达到显著相关水平；过氧化氢酶主要通过脲酶、转化酶产生的间接作用及其自身的直接作用影响全钾，并与全钾达到极显著相关水平；放线菌主要通过自身的直接作用影响全钾；真菌主要通过转化酶的间接作用、自身的直接作用影响全钾，并与全钾达到显著相关水平；放

线菌主要通过过氧化氢酶及细菌的相互作用影响全钾（表 7）。

对土壤速效钾产生直接作用的生物学特性因子直接作用系数的大小顺序依次为过氧化氢酶>真菌数量>脲酶>转化酶>细菌数量>放线菌数量。其中过氧化氢酶主要通过自身的直接作用影响速效钾，且过氧化氢酶与速效钾达到了极显著相关水平；真菌数量主要通过过氧化氢酶产生的间接作用及自身的直接作用影响速效钾，并与速效钾达到了显著相关水平；脲酶主要通过过氧化氢酶、转化酶产生的间接作用、通过自身的直接作用影响速效钾，并与速效钾达到极显著相关水平；转化酶主要通过自身的直接作用及与其他两种酶的交互作用影响速效钾，且与速效钾达到显著相关水平（表 7）。

由通径分析的决定系数（表 8）可知，过氧化氢酶的直接作用对土壤 pH 影响最大（0.229），其次是脲酶与过氧化氢酶的交互作用、真菌数量的直接作用、脲酶与转化酶的交互作用、脲酶的直接作用，因此，脲酶、过氧化氢酶与转化酶活性及真菌数量是影响 pH 的重要因子；过氧化氢酶的直接作用对有机质的影响最大（0.487），其次是脲酶和过氧化氢酶的交互作用、过氧化氢酶和转化酶的交互作用，因此，脲酶、过氧化氢酶与转化酶活性是影响土壤有机质的重要因子；对全氮影响较大的是脲酶与过氧化氢酶的直接作用和交互作用、脲酶和转化酶的交互作用，因此，脲酶、过氧化氢酶、转化酶活性是决定土壤全氮的关键因子；由表 7 也可以清楚看出，脲酶、过氧化氢酶、转化酶还是决定土壤碱解氮和全磷的重要因子；对土壤全磷影响较大

的依次是转化酶的直接作用、过氧化氢酶的直接作用、转化酶与过氧化氢酶的交互作用，因此，过氧化氢酶、转化酶活性是决定土壤全钾的关键因子；对速效钾影响较大的主要有过氧化氢酶的直接作用、过氧化氢酶与真菌的交互作用、脲酶与过氧化氢酶的交互作用、过氧化氢酶与转化酶的交互作用、真菌的直接作用，所以，脲酶、过氧化氢酶、转化酶活性和真菌数量是影响速效钾的重要因子。

3 讨论与结论

3.1 讨论

常绿阔叶林林下土壤含水量、田间持水量、有机质、全氮、碱解氮、全磷、速效钾含量随着土层加深而减少，土壤容重、pH、全钾含量随着土层加深而增加。这与樊后保等（2012）对杉木人工林土壤酶活性对氮沉降的响应研究的结果一致。这是因为森林群落中枯落物是有机质和土壤养分元素的重要来源，枯落物矿化释放的土壤养分主要集中在表层，因此土壤全氮、碱解氮、全磷、速效钾与有机质的含量都表现出在表层较高的趋势。土壤表层的植物根孔较多，表层的土壤呼吸和生物及微生物活动较下层频繁，所以疏松多孔的结构增加了土壤含水量与田间持水量而降低了土壤容重。

土壤脲酶、过氧化氢酶、转化酶活性随着土层深度的加深而逐渐减小，随着土壤深度的增加，土壤中细菌、放线菌、真菌数量都是逐渐减少的，这和刘飞渡等（2015）的研究结果相似。这是因为土壤微生物直接参与土壤有机质的分解，因此微生物数量与有机质含量在土层中呈现相同的变化趋势。

表 8 磨盘山常绿阔叶林土壤化学性质与土壤酶活性、微生物数量通径分析的决定系数

Table 8 Path analysis determination coefficients of chemical properties and both enzymes activities and soil microbes of evergreen broad-leaved forest in Mopan mountain

次序 Order	pH		有机质 Organic matter content		全氮 Total N		碱解氮 Alkali-hydrolysable N		全磷 Total P		全钾 Total K		速效钾 Available K	
	决定系数		决定系数		决定系数		决定系数		决定系数		决定系数		决定系数	
	D _{ij}		D _{ij}		D _{ij}		D _{ij}		D _{ij}		D _{ij}		D _{ij}	
	Determination coefficient		Determination coefficient		Determination coefficient		Determination coefficient		Determination coefficient		Determination coefficient		Determination coefficient	
1	D ₃ B ₂	0.229	D ₃ B ₂	0.487	D ₃ B ₁	0.138	D ₃ B ₁ B ₃	0.160	D ₃ B ₃	0.283	D ₃ B ₁	0.553	D ₃ B ₂	0.347
2	D ₃ B ₁ B ₂	0.094	D ₃ B ₁ B ₂	0.082	D ₃ B ₂	0.111	D ₃ B ₁	0.110	D ₃ B ₂	0.142	D ₃ B ₁ B ₃	-0.268	D ₃ B ₂ B ₆	0.072
3	D ₃ B ₆	0.070	D ₃ B ₂ B ₃	0.079	D ₃ B ₁ B ₂	0.095	D ₃ B ₃	0.091	D ₃ B ₂ B ₃	0.116	D ₃ B ₁ B ₂	0.127	D ₃ B ₁ B ₂	0.067
4	D ₃ B ₁ B ₃	0.070	D ₃ B ₄	0.052	D ₃ B ₁ B ₃	0.054	D ₃ B ₂	0.067	D ₃ B ₁	0.073	D ₃ B ₃	0.050	D ₃ B ₂ B ₃	0.039
5	D ₃ B ₁	0.065	D ₃ B ₄ B ₅	-0.035	D ₃ B ₂ B ₆	0.041	D ₃ B ₁ B ₂	0.066	D ₃ B ₄ B ₅	-0.062	D ₃ B ₂	0.050	D ₃ B ₆	0.031
6	D ₃ B ₂ B ₃	0.047	D ₃ B ₁ B ₃	0.030	D ₃ B ₆	0.030	D ₃ B ₂ B ₃	0.045	D ₃ B ₂ B ₆	0.061	D ₃ B ₃	0.035	D ₃ B ₁ B ₃	0.028
7	D ₃ B ₂ B ₅	0.042	D ₃ B ₂ B ₅	0.023	D ₃ B ₅	0.030	D ₃ B ₄	0.017	D ₃ B ₃ B ₆	0.057	D ₃ B ₂ B ₃	-0.029	D ₃ B ₁	0.022
8	D ₃ B ₂ B ₆	0.032	D ₃ B ₁	0.022	D ₃ B ₁ B ₆	0.020	D ₃ B ₂ B ₆	0.012	D ₃ B ₆	0.053	D ₃ B ₁ B ₅	-0.023	D ₃ B ₃	0.013
9	D ₃ B ₃	0.029	D ₃ B ₃	0.016	D ₃ B ₂ B ₅	0.019	D ₃ B ₃ B ₆	0.009	D ₃ B ₁ B ₃	-0.034	D ₃ B ₁ B ₆	0.021	D ₃ B ₄	0.010
10	D ₃ B ₄ B ₅	0.014	D ₃ B ₂ B ₅	0.016	D ₃ B ₄ B ₅	-0.018	D ₃ B ₃ B ₄	0.008	D ₃ B ₂ B ₅	0.033	D ₃ B ₂ B ₆	0.015	D ₃ B ₃ B ₆	0.009

土壤酶积极参与土壤的生化反应,因此土壤酶活性在生化反应剧烈的土层中含量较高,即表层的酶活性大于下层。

土壤理化性质与酶活性、微生物数量之间存在着密切的相关关系。这与葛晓改等(2012)、邓丹丹等(2015)、刘作云等(2015)的研究结果一致。过氧化氢酶活性是影响土壤容重和质量含水量的关键因子,这可能是因为过氧化氢酶在参与酶促反应时影响枯枝落叶分解有机质,从而通过改变土壤的通气透水性来影响土壤容重和质量含水量。脲酶活性作为影响田间持水量的关键因子,可能是因为脲酶在参与土壤生化反应时通过改变酶促反应的土壤环境来影响田间持水量。脲酶、过氧化氢酶、转化酶活性及真菌数量是影响 pH 和速效钾的重要因子,这可能是因为速效钾参与了酶促反应以及真菌的活动;而酶促反应与真菌的活动对 pH 值的影响主要是通过改变酶促反应的环境来体现的。脲酶、过氧化氢酶与转化酶活性是影响土壤有机质的重要因子,同时也是影响全氮、碱解氮及全磷的关键因子,这是因为酶促反应的底物和来源(动植物及微生物分泌)都是来自土壤中的营养物质,因此在酶促反应进行时,会对参与反应的营养元素产生较大的影响。脲酶、过氧化氢酶活性是影响全钾的关键因子,这可能是因为脲酶与过氧化氢酶在进行酶促反应时通过消耗以植物的根系分泌物为主的催化剂,进而影响促进植物生长的全钾含量。以上这些结果都反应出土壤脲酶、过氧化氢酶和转化酶是参与土壤生化反应和物质循环的重要因子,而土壤微生物则可能根据类群不同对理化因子产生影响,至于具体如何通过微生物类群产生影响,还有待进一步的研究。

3.2 结论

(1)常绿阔叶林林下土壤含水量、田间持水量、有机质、全氮、碱解氮、全磷、速效钾含量随着土层深度的增加呈递减趋势,土壤容重、pH、全钾含量随着土层深度的增加呈递增趋势。

(2)土壤脲酶、过氧化氢酶、转化酶活性及可培养细菌、放线菌、真菌数量随着土壤深度的增加而逐渐减少。

(3)土壤理化性质与酶活性、微生物数量之间存在着密切的相关关系。

(4)过氧化氢酶活性是影响土壤容重和质量含水量的关键因子;脲酶活性是影响田间持水量的关键因子;脲酶、过氧化氢酶、转化酶活性及可培养的真菌数量是影响 pH 和速效钾的重要因子;脲酶、过氧化氢酶与转化酶活性是影响土壤有机质的重要因子,同时也是影响全氮、碱解氮及全磷的关键

因子;脲酶、过氧化氢酶活性是影响全钾的关键因子;常绿阔叶林土壤理化性质受土壤酶活性影响较大,受微生物数量的影响相对较小。

参考文献:

- BADIANE N N Y, CHOTTE J L, PATE E, et al. 2001. Use of soil enzyme activities to monitor soil quality in natural and improved fallows in semi-arid tropical regions [J]. *Applied soil ecology*, 18(3): 229-238.
- KOTROCZÓ Z, VERES Z, FEKETE I, et al. 2014. Soil enzyme activity in response to long-term organic matter manipulation [J]. *Soil Biology and Biochemistry*: 70: 237-243.
- LI F, LIU M, LI Z, et al. 2013. Changes in soil microbial biomass and functional diversity with a nitrogen gradient in soil columns [J]. *Applied soil ecology*, 64: 1-6.
- MINA U, CHAUDHARY A. 2012. Impact of transgenic cotton varieties on activity of enzymes in their rhizosphere [J]. *Indian Journal Biochemistry & Biophysics*, 49(3): 195-201.
- TIMOTHY M, VERONICA A M, FRANCISCO C, et al. 2014. Soil enzyme activities, microbial communities, and carbon and nitrogen availability in organic agroecosystems across an intensively-managed agricultural landscape [J]. *Elsevier*, 68: 252-262.
- 邓丹丹, 刘棋, 蒋智林, 等. 2015. 紫茎泽兰与不同植物群落土壤养分及酶活性差异[J]. *生态环境学报*, 24(9): 1466-1471.
- 丁文娟, 曹群, 赵兰凤, 等. 2014. 生物有机肥施用期对香蕉枯萎病及土壤微生物的影响[J]. *农业环境科学学报*, 33(8): 1575-1582.
- 樊后保, 刘文飞, 徐雷, 等. 2012. 杉木人工林土壤酶活性对氮沉降的响应[J]. *林业科学*, 48(7): 8-13.
- 付美云, 杨宁, 杨满元, 等. 2015. 衡阳紫色土丘陵坡地不同恢复阶段土壤微生物与养分的耦合关系[J]. *生态环境学报*, 24(1): 41-48.
- 葛晓改, 肖文发, 曾立雄, 等. 2012. 三峡库区不同林龄马尾松土壤养分与酶活性的关系[J]. *应用生态学报*, 23(2): 445-451.
- 关松荫. 1986. 土壤酶及其研究方法[M]. 北京: 农业出版社: 4-6.
- 李芳, 信秀丽, 张丛志, 等. 2015. 长期不同施肥处理对华北潮土酶活性的影响[J]. *生态环境学报*, 24(6): 984-991.
- 刘飞渡, 韩蕾. 2015. 亚热带红壤丘陵区不同人工林型对土壤理化性质、微生物类群和酶活性的影响[J]. *生态环境学报*, 24(9): 1441-1446.
- 刘曼, 辛颖, 赵雨森. 2013. 氯氟菊酯对水源涵养林土壤微生物及酶活性的影响[J]. *东北林业大学学报*, 41(6): 80-83.
- 刘作云, 杨宁. 2015. 衡阳紫色土丘陵坡地不同植被恢复阶段土壤化学与微生物性质[J]. *生态环境学报*, 24(4): 595-601.
- 杨敬天, 苏智先, 胡进耀, 等. 2010. 珙桐林土壤有机质与酶活性的途径分析[J]. *应用与环境生物学报*, 16(2): 164-167.
- 张雯雯, 徐军, 董丰收, 等. 2014. 苣荬菜对水稻田土壤微生物群落功能多样性的影响[J]. *农业环境科学学报*, (9): 1749-1754.
- 张向前, 陈欢, 赵竹, 等. 2015. 不同秸秆覆盖水平对砂姜黑土生物学性状的影响[J]. *生态环境学报*, 24(4): 610-616.
- 张学鹏, 宁堂原, 杨燕, 等. 2015. 不同浓度石灰氮对黄瓜连作土壤微生物量及酶活性的影响[J]. *应用生态学报*, 26(10): 1-11.
- 中国科学院南京土壤研究所. 1978. 土壤理化分析[M]. 上海: 上海科学技术出版社: 36-42.
- 中国科学院南京土壤研究所微生物室. 1985. 土壤微生物研究法[M]. 北京: 科学出版社: 40-59, 263-269.

Effects of Soil Biological Characteristics on Physiochemical Properties in Evergreen Broad-leaved Forest in Middle Yunnan Plateau, China

YANG Yuanyuan, LI Jianqiang, CHEN Qibo, ZHAO Weina, LIU Peiqi, DING Yanlong

1. School of Environmental Science and Engineering, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China;

2. School of ecological environment, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010010, China

Abstract: Soil enzymes activities and soil microbes are the important components of soil ecosystem, particular for forest soil, and also the key factor to determine the soil function. Predicting impacts of soil biological characteristics on physiochemical properties requires a clear understanding of relationship between physicochemical properties and both enzymes activities and soil microbes. In this study, the indices of physicochemical properties, enzymes activities and soil microbes were measured in evergreen broad-leaved forest located in Middle Yunnan Plateau, and the relationship between physicochemical properties and both enzymes activities and soil microbes were analyzed using path analysis. The results showed that: (1) The soil moisture content, field capacity, organic matter, total nitrogen, alkali-hydro nitrogen, total phosphorus, available potassium content were decreased with the increasing of soil depth, and the soil bulk density, pH, total potassium content were increases with increasing of soil depth; (2) Soil urease, catalase, invertase activity and bacteria, actinomyces, fungi is gradually reduce with the increasing of soil depth; (3) Correlation analysis indicated that the physiochemical properties was significantly correlated with both enzymes activities and soil microbes; And (4) the path analyses suggested that soil urease and catalase are the main contributing factors to soil physical properties, and the urease, catalase, invertase and bacteria fungus had significant effects on chemical properties.

Key words: evergreen broad-leaved forest; soil nutrients; soil biological characteristics; path analysis