

DOI: 10.5846/stxb202101130130

曹小玉, 赵文菲, 李际平, 闫文德, 庞一凡, 孙亚萍, 谢政铝. 中亚热带几种典型森林土壤养分含量分析及综合评价. 生态学报, 2022, 42(9): 3525-3535.

Cao X Y, Zhao W F, Li J P, Yan W D, Pang Y F, Sun Y P, Xie Z C. A comprehensive evaluation of soil nutrients in main typical forests in central-subtropical China. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(9): 3525-3535.

中亚热带几种典型森林土壤养分含量分析及综合评价

曹小玉^{1,2,*}, 赵文菲¹, 李际平^{1,2}, 闫文德³, 庞一凡¹, 孙亚萍¹, 谢政铝¹

1 中南林业科技大学林学院, 长沙 410004

2 南方森林资源经营与监测国家林业与草原局重点实验室, 长沙 410004

3 南方林业生态应用技术国家工程实验室, 长沙 410004

摘要:分析及综合评价不同森林植被对土壤养分因子的影响,对揭示森林植被与土壤养分的相互关系,全面衡量森林土壤养分水平具有重要的意义。以中亚热带杉木(*Cunninghamia lanceolata*)纯林、木荷(*Schima superb*)纯林、木荷+楠木(*Phoebe ahenre*)混交林、木荷+杉木混交林、青冈栎(*Cyclobalanopsis glauca*)天然次生林、毛竹(*Phyllostachys edulis*)林 6 种森林类型为研究对象,在分析不同森林类型土壤养分特征状况差异的基础上,采用结构方程模型确定土壤养分因子权重,对其土壤养分水平进行综合评价。结果表明:(1)6 种森林类型 0—60 cm 土壤有机质、全氮、碱解氮和有效磷的含量分别为 8.24—28.17 g/kg、0.67—1.31 g/kg、44.88—89.31 mg/kg 和 1.24—6.50 mg/kg,其含量最高的都是青冈栎天然次生林,土壤有机质和碱解氮含量最低的是毛竹林,土壤全氮和有效磷的含量最低的分别为杉木纯林和木荷纯林,0—60 cm 土壤全磷和速效钾的含量分别为 0.15—0.21 g/kg 和 35.54—54.32 mg/kg,其含量最高的都是木荷+楠木混交林,含量最低的分别为木荷纯林和毛竹林;(2)土壤有机质、全氮、全磷和有效磷的含量在 6 种森林类型中都一致表现出随土层加深而逐渐减小的规律,而碱解氮和速效钾含量在土壤垂直剖面的变化却因森林类型而异,没呈现出具体的变化规律;(3)栎类天然次生林的土壤养分等级综合评分值为 3.47,评价等级属于中上水平,杉木纯林、木荷纯林、木荷+楠木混交林、木荷+杉木混交林的土壤养分等级综合评分值分别为 2.45、2.76、2.83、2.68,评价等级均属于中下水平,而毛竹林的土壤养分等级综合评分值仅为 1.95,评价等级属于土壤养分缺乏。

关键词:中亚热带;土壤养分指标;权重;结构方程模型

A comprehensive evaluation of soil nutrients in main typical forests in central-subtropical China

CAO Xiaoyu^{1,2,*}, ZHAO Wenfei¹, LI Jiping^{1,2}, YAN Wende³, PANG Yifan¹, SUN Yaping¹, XIE Zhengchang¹

1 College of Forestry, Central South University of Forestry & Technology, Changsha 410004, China

2 Key Laboratory of State Forestry & Grassland Administration on Forest Resources Management and Monitoring in Southern Area, Changsha 410004, China

3 National Engineering Laboratory for Applied Technology of Forestry & Ecology in South China, Changsha 410004, China

Abstract: Analysis and assessment of the influence of different forest types on soil nutrients are of great significant to reveal the relationships between forests and soil nutrients, and to comprehensively evaluate soil fertility in forests. In this study, characteristics of soil nutrient states were investigated in six forest types (*Cunninghamia lanceolata* pure forest, *Schima superb* pure forest, *S. superb*+*Phoebe ahenre* mixed forest, *S. superb*+*C. lanceolata* mixed forest, *Cyclobalanopsis glauca* natural secondary forest, and *Phyllostachys edulis* forest) in central subtropical areas of China, by using the structural equation model. The results showed that: (1) the soil organic matter (SOM), total nitrogen (TN), available nitrogen

基金项目:湖南省教育厅重点科学研究项目(19A518);湖南省自然科学基金面上项目(2018JJ2673);中南林业科技大学人才引进项目(2016YJ075)

收稿日期:2021-01-13; 网络出版日期:2022-01-06

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: cxy7723@aliyun.com

(AN) and available phosphorus (AP) in soil (0—60 cm) ranged 8.24—28.17 g/kg, 0.67—1.31 g/kg, 44.88—89.31 mg/kg, and 1.24—6.50 mg/kg, respectively, in the examined forests. The highest values of these nutrients were found in the *C. glauca* natural secondary forests. The lowest contents of SOM and AN occurred in the *P. edulis* forests. The lowest contents of soil TN and AP were found in both *C. lanceolata* pure forests and *S. superba* pure forests. The contents of total phosphorus (TP) and available potassium (AK) in soil (0—60 cm) ranged 0.15—0.21 g/kg and 35.54—54.32 mg/kg, respectively, in the six forest types, with the highest contents in *S. superba*+*P. ahenre* mixed forests, and the lowest contents in *S. superba* pure forests and *P. edulis* forests. (2) The SOM, TN, TP and AP contents gradually decreased with increasing of soil depth in the six forest types, but no vertical changing patterns of AN and AK were found in the examined forests. (3) The comprehensive score of soil nutrients was 3.47 in *C. glauca* natural secondary forests, which belonged to the upper middle level of soil fertility. The comprehensive scores of soil nutrients were 2.45, 2.76, 2.83 and 2.68 in *C. lanceolata* pure forests, *S. superba* pure forests, *S. superba*+*P. ahenre* mixed forests, and *S. superba*+*C. lanceolata* mixed forests, respectively, which all belonged to the lower middle level of soil fertility. The *P. edulis* forests had the lowest score of soil nutrients (1.95), indicating that the forest type was in a soil nutrient deficient status in the study region. The results demonstrated that the natural forests are beneficial to maintain soil nutrients and to reduce soil erosion compared to artificial forest plantations. The structural equation model further indicated that the soil organic matter was the most important factor in affecting soil fertility in the six forest types in the studied area.

Key Words: central-subtropical zone; soil nutrient index; weight; structural equation model

森林土壤作为森林生态系统中物理、化学和生物组分生态过程的载体和森林植物生长的基质,在很大程度上影响着森林植被的健康状态^[1-3],直接影响着森林木材和林副产品的产量及生态功能的发挥^[4-5]。分析及综合评价不同森林植被对土壤养分因子的影响,对揭示森林植被与土壤养分的相互关系,全面衡量森林土壤养分水平具有重要的意义,其研究结果可为林地资源的可持续经营方案的制定提供基础数据和参考意见^[6-7]。土壤养分评价涉及众多土壤因子,如何确定指标权重是科学评价森林土壤养分水平的关键,在森林土壤肥力综合评价方法中,土壤养分因子权重的确定方法目前主要有主成分分析法^[8-9]、粗糙集法^[10]、灰色关联度法^[11]等客观权重赋值法和层次分析法^[12]、判断分析法^[13]等主观权重赋值法两种。主观权重赋值法受人的先验知识影响,随意性强,且很少考虑土壤养分因子之间相互影响的依赖关系。而客观权重赋值法的权重原始信息虽来源于客观实际,但却没有考虑各土壤养分因子对评价的重要程度^[14-16]。因此,仍要继续探索全新的土壤养分因子权重确定方法。

结构方程模型是一种模拟社会经济系统复杂关系的方法^[17-18]。土壤养分评价也是一项涉及诸多土壤养分因子的复杂系统工程,且各土壤养分因子之间存在着相互影响相互制约的复杂关系^[19-20],采用结构方程模型生成的路径图不仅可以清晰地揭示各要素之间的复杂关系,还可以利用数据内在逻辑关系计算路径系数从而对指标进行客观赋权^[21]。它的优点是在确定土壤养分指标权重时,不仅全面充分地提取了原始的数据的信息,而且克服了多重共线性的影响,避免了因专家打分误差而造成指标权重的主观误差。因此,采用结构方程模型确定土壤养分指标权重,不失为科学确定土壤养分指标权重的一种方法探索。本文以中亚热带杉木(*C. lanceolata*)纯林、木荷(*S. superba*)纯林、木荷+楠木(*P. ahenre*)混交林、木荷+杉木混交林、青冈栎(*C. glauca*)天然次生林、毛竹(*P. edulis*)林6种典型森林为研究对象,在分析不同森林类型土壤养分特征状况差异的基础上,采用结构方程模型确定土壤养分因子权重,对6种典型森林的土壤养分水平进行了综合评价,以期更为科学地确定土壤养分评价指标权重提供一种新思路,也为林地资源的可持续经营方案的制定提供基础数据和参考意见。

1 研究区概况

本研究的30块调查样地位于湖南省岳阳市平江县福寿林场和芦头林场,平江县(113°10'13"—114°9'6"E,

28°25'33"—29°6'28"N)地处湖南省东北部,汨水和罗水的上游,汨罗江流经全境。属大陆性季风气候、东亚热带向北亚带过渡气候带,年降雨量充足,非常适合森林资源生长。是湖南省著名的林业大县,岳阳市接近60%的森林资源分布在该县,县内森林植被类型多样,森林覆盖率率已达64.2%。研究样地除栎类天然次生林外,其他森林类型均属人工林,且所有森林类型都属于公益林。

2 研究方法

2.1 样地设置和土样采集

2019年7月,在保证研究样地的海拔、坡度等立地条件基本一致的前提下,对能代表研究区主要森林类型的杉木纯林、木荷纯林、木荷+楠木混交林、木荷+杉木混交林、青冈栎天然次生林和毛竹林进行了全面踏查,在每种森林类型分别设置不少于3个的重复样地,每个样地之间的距离不少于30 m,6种森林类型共设置了20块20 m×30 m的样地(表1)。利用内径4.5 cm的土钻,对每个样地采取5点(即先将样地对角线的交点位置作为中心取样点,接着在对角线上设置4个与中心样点距离相等且与样方四个角距离较近的点作为取样点)取样法分0—20、20—40、40—60 cm土层取样。同一土层5个采样点的土壤样品混合成1个土壤混合样品,在清除了植物的根和碎石后,按四分法混合后共采集了60个约为600 g的土壤样品,将其分别装入做有标记的干净自封袋,拿回实验室用于测定土壤有机质等土壤养分指标。

表1 各森林类型基本情况

Table 1 Basic conditions of forest types

森林类型 Forest type	胸径 Mean DBH/cm	树高 Mean tree height/m	平均密度 Mean density/ (株/hm ²)	海拔 Altitude/m	坡度 Slope/(°)	样地数 Amount of plots
PCL	12.8—17.9	13.9—15.8	1656—1823	684—705	16—19	4
PSS	15.2—16.7	14.3—17.2	1486—1527	643—674	18—19	3
SPM	9.8—11.2	12.1—15.9	1507—1732	735—813	19—21	3
SCM	12.3—15.6	12.8—15.3	1815—2107	627—694	18—20	4
NCG	16.3—18.3	12.2—17.9	1283—1456	809—847	19—20	3
PEF	9.8—12.6	12.7—14.3	2896—3156	724—735	19—21	3

PCL:杉木纯林 Pure *C.lanceolata* forest; PSS:木荷纯林 Pure *S.superb* forest; SPM:木荷+楠木混交林 *S.superb*-*P.ahenre* mixed forest; SCM:木荷+杉木混交林 *S. superb*+*C.lanceolata* mixed forest; NCG:青冈栎天然次生林 Natural secondary *C.glauca* forest; PEF:毛竹林 *P.edulis* forest; DBH: 胸径 Diameter at breast height

2.2 土壤样品测定

有机质含量测定采用油浴加热重铬酸钾容量法;全氮含量测定用半微量凯氏法;全磷含量测定用氢氧化钠碱熔-钼锑抗比色法;碱解氮含量测定采用碱解扩散法;有效磷含量测定采用碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法;土壤速效钾含量测定采用乙酸铵浸提-火焰光度法^[22]。

2.3 土壤养分指标权重的计算

本文采用结构方程模型确定土壤养分指标权重,结构方程模型也叫线性结构关系模型。结构方程模型包含测量模型(即外部模型,公式1、2)和结构模型(即内部模型,公式3)两部分^[23—24]:

$$X = \Lambda_x \xi + \delta \quad (1)$$

$$Y = \Lambda_y \eta + \varepsilon \quad (2)$$

$$\eta = B\eta + \Gamma\xi + \zeta \quad (3)$$

测量模型展示了间接通过观测变量(X, Y)得到了潜变量(ξ, η),其中 ξ 为外生潜变量, η 表示内生潜变量。结构模型用于表示潜变量之间的因果关系, B 为内生潜变量之间的关系, Γ 表示外生潜变量对内生潜变量的作用, ζ 是模型中未能解释的部分。采用结构方程模型确定土壤养分指标权重包括概念模型的设定、结构方程模型估计和模型检验两个步骤,结构方程模型的构建及检验均使用 AMOS 24.0 软件完成。

2.3.1 概念模型的设定

基于土壤养分的相关理论可知,常用的养分指标包括土壤有机质、土壤氮磷钾全量及有效量,这些指标不仅能较好地反映土壤养分的丰富程度,也容易测定且含量稳定性较高^[25],基于此,本文将土壤养分作为潜变量,将土壤有机质、全氮、全磷、碱解氮、有效磷和速效钾含量作为可测变量,构建土壤养分综合评价概念模型(图1)。

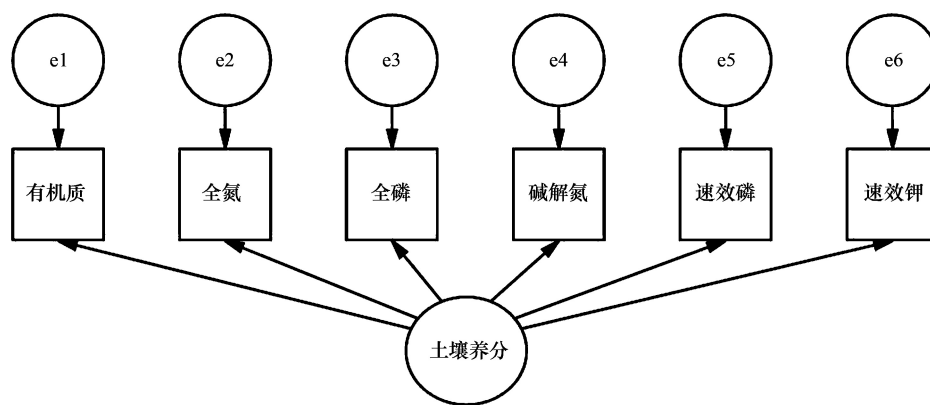


图1 森林土壤养分评价概念模型

Fig.1 The conceptual model of soil nutrients evaluation

2.3.2 结构方程模型估计和模型检验

为了检验模型的适配度,本研究采用绝对适配统计量 χ^2/df (卡方自由度比)、RMSEA(渐进残差均方和平方根)和增值适配度统计量 CFI(比较适配指数)对模型进行适配度检验^[26]。 χ^2/df 介于1—3之间表示模型适配度良好。绝对适配度统计量 RMSEA 值小于0.05,说明模型适配度良好,其值小于0.08,说明模型适配度合理。其计算公式:

$$RMSEA = \sqrt{\frac{F_0}{df}} = \sqrt{\max\left(\frac{F_{ML}}{df} - \frac{1}{N-1}, 0\right)} \quad (4)$$

式中, F_0 是总体差异函数值, df 是模型自由度, F_{ML} 采用极大似然的函数值, N 是样本容量。

增值适配度统计量 CFI, 其值>0.90, 说明模型适配度良好, 计算公式:

$$CFI = \frac{1 - \max(\chi^2_{\text{test}} - df_{\text{test}}, 0)}{\max(\chi^2_{\text{null}} - df_{\text{null}}, 0)} \quad (5)$$

式中, df_{null} 、 df_{test} 分别表示虚无模型与假设模型的自由度, χ^2_{null} 、 χ^2_{test} 分别代表虚无模型与假设模型的卡方值。

模型的适配度检验结果显示 χ^2/df 的值为1.695, RMSEA 为0.041, CFI 为0.953, 说明构建的结构方程模型与数据的适配度较高, 模型拟合基本理想, 可以满足研究的需要。由图2可知, 可测变量有机质、全氮、全磷在土壤养分的载荷分别为0.96、0.80、0.14, 碱解氮、速效磷和速效钾在土壤养分上的载荷分别为0.49、0.21 和0.46。

通过归一化计算相关变量的权重系数, 得出土壤肥力评价各指标的权重结果如表2。

表2 土壤养分指标权重表

Table 2 The table of soil nutrients index weight

指标 Index	有机质 Organic matter	全氮 Total N	全磷 Total P	碱解氮 Available N	速效磷 Available P	速效钾 Available K
指标载荷 Index load	0.96	0.80	0.14	0.49	0.21	0.46
指标权重 Index weight	0.31	0.26	0.05	0.16	0.07	0.15

2.4 土壤养分指标的评分标准

确定土壤肥力评价指标的权重是土壤肥力综合评价的关键, 但要最终确定土壤肥力等级, 还需要给各个

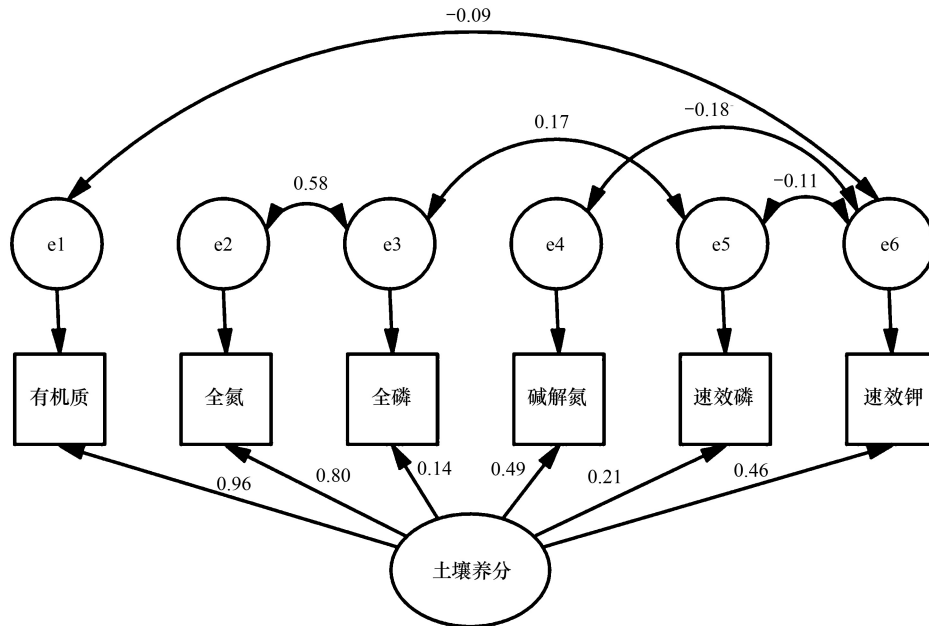


图 2 结构方程模型修正路径图

Fig.2 The correction Structural Equation Model Path Map

土壤养分指标确定评分标准,结合中亚热带森林土壤养分含量特征,借鉴前人已有的研究成果,同时参考我国土壤养分分级标准^[21]。对土壤养分评价指标的观测值进行评分,各指标评分值由高到低为 6—1 分,评分等级见表 3。

表 3 土壤养分评价指标评分等级

Table 3 Grade of soil nutrients evaluation index

土壤养分指标 Soil nutrients index	等级分值 Grade score					
	6	5	4	3	2	1
有机质 Organic matter/(g/kg)	≥40	[30,40)	[20,30)	[10,20)	[6,10)	<6
全氮 Total N/(g/kg)	≥2	[1.5,2)	[1,1.5)	[0.75,1)	[0.5,0.75)	<0.5
全磷 Total P/(g/kg)	≥2	[1.6,2)	[1.2,1.6)	[0.8,1.2)	[0.4,0.8)	<0.4
碱解氮 Available N/(mg/kg)	≥150	[120,150)	[90,120)	[60,90)	[30,60)	<30
速效磷 Available P/(mg/kg)	≥40	[20,40)	[10,20)	[5,10)	[3,5)	<3
速效钾 Available K/(mg/kg)	≥165	[125,165)	[85,125)	[40,85)	[25,40)	<25

2.5 土壤养分含量综合评分值的计算

根据上述计算的土壤养分权重和确定的土壤养分指标评分标准,可以根据公式(6)可以计算出土壤养分含量综合评分值。

$$A = 0.31B_1 + 0.26B_2 + 0.05B_3 + 0.16B_4 + 0.17B_5 + 0.15B_6 \quad (6)$$

式中, A 为土壤养分含量综合评分值; B_1 、 B_2 、 B_3 、 B_4 、 B_5 、 B_6 分别为有机质、全氮、全磷、碱解氮、速效磷和速效钾养分含量得分值。采用等距划分法对各林分样地土壤养分含量等级划分,分为 6 个等级,分别为:极丰、丰富、中上、中下、缺乏和极缺^[27],划分结果见表 4。

2.6 土壤养分指标数据处理

用 Excel 2007 图表处理软件和 SPSS 24.0 统计分析软件进行土壤养分指标数据处理分析。

表 4 土壤养分等级划分标准

Table 4 Grading criterion of forest health evaluation

土壤营养含量分级 Soil nutrient content classification	极丰富 Extremely rich	丰富 Rich	中上 upper-middle	中下 Lower-middle	缺乏 Insufficiency	极缺 Very scarce
分值 Score	[5,6)	[4,5)	[3,4)	[2,3)	[1,2)	[0,1)

3 结果与分析

3.1 土壤养分含量分析

3.1.1 不同森林类型土壤养分含量

从表 5 可以看出,研究区 6 种森林类型 0—60 cm 土壤有机质的含量为 8.24—28.17 g/kg,排序为 NCG>SPM>SCM>PSS>PCL>PEF, PSS 与 SCM 的土壤有机质含量无显著差异 ($P>0.05$),其余森林类型的有机质含量两两之间均达到了显著差异 ($P<0.05$)。土壤全氮的含量为 0.67—1.31 g/kg,排序为 NCG>SPM>SCM>PSS>PEF>PCL,其中 PCL 与 PEF, PSS 与 PEF, PSS 与 SPM, PSS 与 SCM 的土壤全氮含量无显著差异 ($P>0.05$),而其它森林类型的土壤全氮含量两两之间均达到了显著差异 ($P<0.05$)。土壤全磷含量为 0.15—0.21 g/kg,排序为 SPM>SCM>NCG>PEF>PCL>PSS,但 6 种森林类型的土壤全磷含量两两之间都无显著差异 ($P>0.05$)。土壤碱解氮的含量为 44.88—89.31 mg/kg,排序为 NCG>SCM>PSS>SPM>PCL>PEF。其中 NCG 与 PCL、SPM、SCM 及 PCL 与 PSS、SCM 的土壤碱解氮的含量均存在显著差异 ($P<0.05$),其余森林类型两两之间均未达到显著差异 ($P>0.05$)。土壤有效磷的含量为 1.24—6.50 mg/kg,排序为 NCG>SCM>SPM>PEF>PCL>PSS。其中 NCG 与其他 5 种森林类型的土壤有效磷含量均存在显著差异 ($P<0.05$),PCL 与 SCM, PSS 与 SCM 的土壤有效磷含量也存在显著差异 ($P<0.05$),其余森林类型两两之间均未达到显著差异 ($P>0.05$)。土壤速效钾的含量为 35.54—54.32 mg/kg,排序为 SPM>NCG>PSS>SCM>PCL>PSS。除了 PCL 与 PSS, NCG 与 SCM, SPM 与 SCM 之间达到显著差异 ($P<0.05$),其余森林类型两两之间均未达到显著差异 ($P>0.05$)。

表 5 0—60 cm 土壤养分含量

Table 5 Contents of soil nutrients in soil within 0—60 cm

森林类型 Stand types	有机质 Organic matter/ (g/kg)	全氮 Total N/ (g/kg)	全磷 Total P/ (g/kg)	碱解氮 Available N/ (mg/kg)	有效磷 Available P/ (mg/kg)	速效钾 Available K/ (mg/kg)
PCL	11.65±1.49d	0.67±0.13d	0.16±0.06a	46.34±17.91c	2.24±1.05c	37.22±11.39b
PSS	15.33±1.91c	0.82±0.13bc	0.15±0.04a	66.61±15.60ab	1.24±0.98c	42.23±24.32ab
SPM	19.74±2.18b	0.95±0.12b	0.21±0.14a	61.01±14.87bc	3.34±1.09bc	54.32±12.22a
SCM	17.71±3.01c	0.94±0.21b	0.20±0.09a	76.19±13.55ab	4.43±1.04b	39.94±10.20b
NCG	28.17±2.54a	1.31±0.19a	0.19±0.05a	89.31±21.39a	6.50±2.08a	46.98±12.06a
PEF	8.24±2.21e	0.71±0.18cd	0.18±0.08a	44.88±14.18c	2.58±0.95bc	35.54±21.39b

同列不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$)

3.1.2 不同森林类型 0—60 cm 土壤养分含量剖面分布

从图 3 可以看出,研究区 6 种森林类型的土壤有机质、全氮、全磷和有效磷的含量在 0—60 cm 土层范围内都一致表现出随土层加深而逐渐减小的规律。土壤有机质含量的下降幅度 PEF>PCL>PSS>SCM>SPM>NCG,其中 PCL、SCM、NCG 和 PEF 的土壤有机质含量表现为(0—20 cm)土层均显著高于(20—40、40—60 cm)土层 ($P<0.05$),而 PSS 和 SPM 的土壤有机质含量表现为(0—20 cm)土层只显著高于(40—60 cm)土层 ($P<0.05$)。土壤全氮含量的下降幅度 PEF>SCM>PCL>NCG>SPM>PSS,其中 PCL、SCM 和 PEF 的全氮含量表现为(0—20 cm)土层均显著高于(20—40、40—60 cm) ($P<0.05$),而 PSS、SPM 和 NCG 的土壤全氮含量则表现为(0—20 cm)土层只显著大于(40—60 cm)土层 ($P<0.05$)。土壤全磷含量下降幅度 SPM>SCM>PCL>PEF

>PSS>NCG,其中 PCL、SCM、NCG 和 PEF 的土壤全磷含量表现为(0—20 cm)土层均显著高于(20—40、40—60 cm)土层($P<0.05$),而 PSS 和 NCG 的土壤全磷含量则表现为(0—20 cm)土层均显著大于(40—60 cm)土层($P<0.05$),只有 SPM(0—20 cm)土层的土壤全磷含量均未显著高于(20—40、40—60 cm)土层($P>0.05$)。土壤有效磷含量下降幅度 $PEF>PCL>SPM>SCM>PSS>NCG$,其中 PCL、PSS、SCM 和 NCG 的土壤有效磷含量表现为(0—20 cm)土层均显著高于(20—40、40—60 cm)土层($P<0.05$),而 PEF 和 SPM 的土壤有效磷含量表现为(0—20 cm)土层只显著大于(40—60 cm)土层($P<0.05$)。研究区 6 种森林类型中 PCL、SPM 和 PEF 的碱解氮含量随土层加深,下降幅度 $PCL>PEF>SPM$,其中 PCL(0—20 cm)土层的碱解氮含量显著大于(40—60 cm)土层($P<0.05$),而 SPM 和 PEF(0—20 cm)土层土壤的碱解氮含量均未显著高于(20—40、40—60 cm)土层($P>0.05$)。PSS、SCM 和 NCG 的碱解氮含量随土层加深都没表现出明显的规律。研究区 6 种森林类型中 PSS 的土壤速效钾含量随土层变深逐渐降低,其中 PSS(0—20 cm)土层土壤的速效钾含量显著大于(40—60 cm)土层($P<0.05$),PEF 和 SCM 的土壤速效钾含量随着土层变深逐渐增加,其中 SCM 和 PEF(0—20 cm)土层土壤的速效钾含量均显著低于(40—60 cm)土层($P<0.05$),而 PCL、PSS 和 NCG 林的土壤速效钾含量随土层加深无明显规律。

3.2 土壤养分综合评价结果

从表 6 可以看出,研究区 NCG 的土壤养分等级综合评分值为 3.47,评价等级属于中上水平,PCL、PSS、SPM、SCM 的土壤养分等级综合评分值分别为 2.45、2.76、2.83、2.68,评价等级均属于中下水平,而 PEF 的土壤养分等级综合评分值仅为 1.95,评价等级属于土壤养分缺乏。从土壤养分单项指标看,研究区 6 种典型森林类型的土壤全磷指标的得分值都为 1,均属于缺乏水平,土壤有机质和全氮指标中,得分值最高的都是 NCG,得分值为 4,为丰富水平,而 PEF 的得分值最低,得分值为 2,为中下水平,PCL、PSS、SPM 和 SCM 的得分值均为 3,为中上水平。土壤碱解氮指标中,PCL 和 PEF 的得分值均为 2,为中下水平,而 PSS、SPM、SCM 和 NCG 的得分值均为 3,为中上水平。土壤有效磷指标中,PCL 和 PSS 的得分值均为 1,为缺乏水平,NCG 的得分值为 3,为中上水平,而 SPM、SCM 和 PEF 的得分值均为 2,为中下水平。土壤速效钾指标中,PCL、SCM 和 PEF 的得分值为 2,为中下水平,而 PSS、SPM 和 NCG 的得分值为 3,为中上水平。

表 6 土壤养分含量综合得分值及评价等级

Table 6 Comprehensive score and evaluation grade of soil nutrient contents

森林类型 Forest types	有机质 Organic matter/ (g/kg)	全氮 Total N/ (g/kg)	全磷 Total P/ (g/kg)	碱解氮 Available N/ (mg/kg)	有效磷 Available P/ (mg/kg)	速效钾 Available K/ (mg/kg)	综合得分值 Comprehensive score	评价等级 Evaluation level
PCL	3	3	1	2	1	2	2.45	中下
PSS	3	3	1	3	1	3	2.76	中下
SPM	3	3	1	3	2	3	2.83	中下
SCM	3	3	1	3	2	2	2.68	中下
NCG	4	4	1	3	3	3	3.47	中上
PEF	2	2	1	2	2	2	1.95	缺乏

4 讨论

不同类型的森林具有不同的树种结构、冠层结构、年龄结构、群落组成和林下光环境^[28—29]。这些显著的差异形成了不同的凋落物性质、土壤质地和养分条件,从而使其土壤养分的含量也存在明显差异^[30]。本研究结果显示:研究区 NCG 土壤有机质、全氮、碱解氮和有效磷含量最高,SPM 土壤全磷和速效钾含量最高,PEF 土壤有机质、碱解氮和速效钾含量最低,PCL 土壤全氮含量最低,PSS 土壤全磷和有效磷含量最低。NCG 土壤养分含量较高主要是因为天然次生林在长期演替进化过程中形成了比较理想的森林结构和林下光环境^[31]。多树种混交使林地土壤表面形成了较多的凋落物,分解后的凋落物为表层土壤累积了大量有机质,而

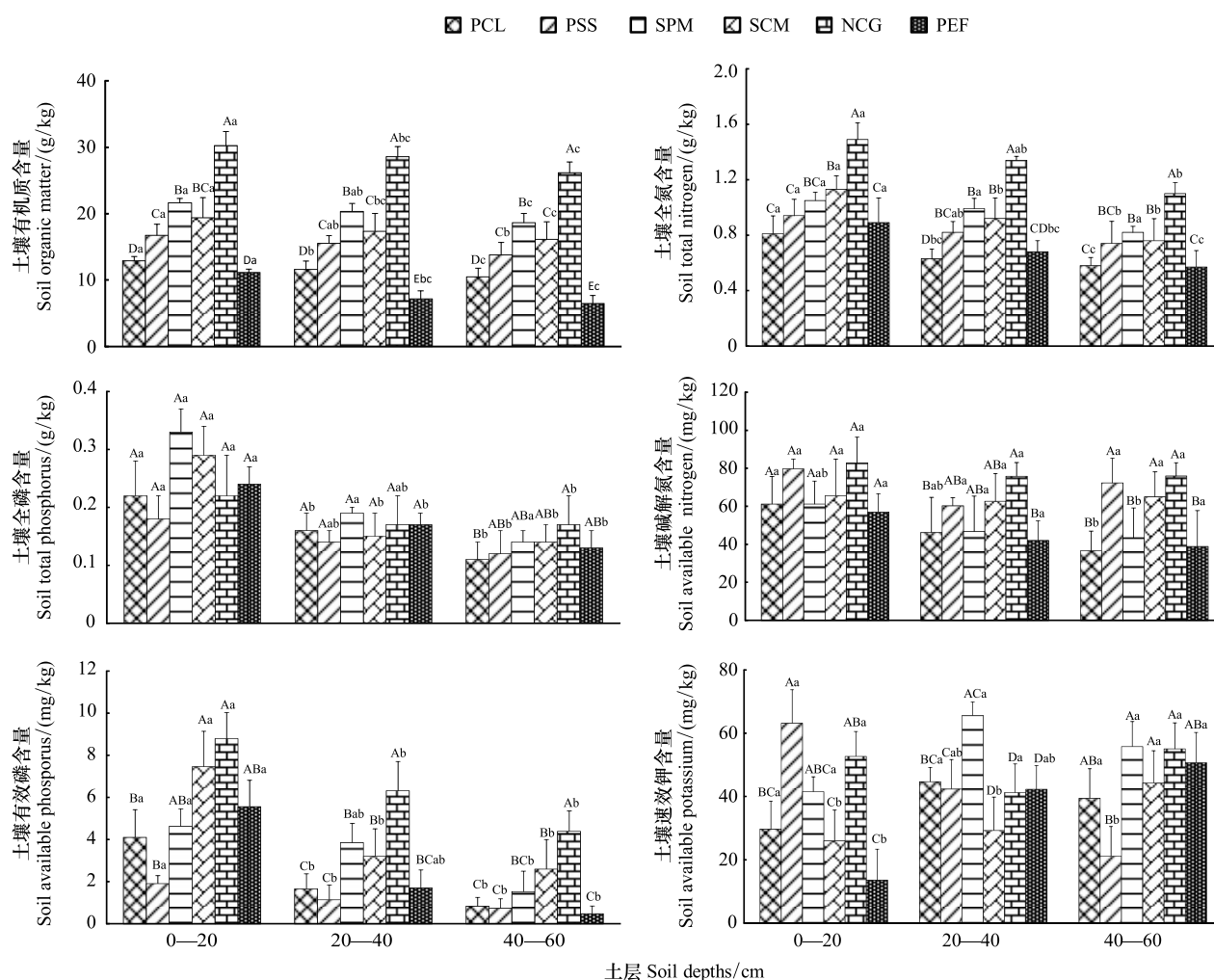


图3 不同深度土壤养分的含量

Fig.3 Content of of soil nturient in soil with different depth

不同大写字母表示不同林分在相同深度土壤间的差异显著 ($P < 0.05$), 不同小写字母表示不同土层在相同林分间的差异显著 ($P < 0.05$); PCL: 杉木纯林 Pure *C.lanceolata* forest; PSS: 木荷纯林 Pure *S.superb* forest; SPM: 木荷+楠木混交林 *S.superb-P.ahenre* mixed forest; SCM: 木荷+杉木混交林 *S. superb+C.lanceolata* mixed forest; NCG: 青冈栎天然次生林 Natural secondary *C.glauca* forest; PEF: 毛竹林 *P.edulis* forest

深浅不一、相互穿插的根系使土壤的通透性极大地改善, 土壤微生物的活动速度和土壤养分循环速度加快^[32-33]。重叠交错的冠层结构形成了差异明显的林内小气候, 为林下耐阴物种和喜光物种都能存活提供了适宜的光环境、空气温度, 显著地增加了林下植被的物种多样性, 为土壤有机质和养分的积累提供了丰富的物质来源。SPM 土壤全磷含量高是因为阔叶混交林林下累积了大量容易分解的凋落物, 很容易使土壤磷素得到补充^[34-36]。而 PEF 土壤养分含量相对较低, 主要是因为竹林的每年砍伐和更新, 砍伐导致凋落物累积量少, 更新幼竹的生长又需要土壤中不少养分^[37-38]。PCL 土壤养分含量低是因为针叶林林下凋落物组成单一, 且分解速度慢, 土壤有机质和养分得不到及时补充。路翔等研究发现, 针叶林地上枯落物和地下细根的 C/N 显著高于阔叶林与针阔混交林, 从而使其枯落物和树种根系难以分解, 导致土壤养分含量相对较低^[39]。

研究同时发现在 0—60 cm 土层范围内, 研究区土壤有机质、全氮、全磷和有效磷的含量在 6 种森林类型中都一致表现出随土层加深而逐渐减小的规律, 而土壤碱解氮和速效钾含量随土层变深发生变化的趋势因森林类型不同而不同, 并没呈现出具体的变化规律。这是因为土壤有机质、全氮和全磷含量随土层加深变化的规律是由其来源影响的, 累积于土壤表层的微生物、动物残体及死的凋落物和根系分解后为土壤表层提供了

大量的有机质来源,也使土壤表层磷素得到及时补充。而随着土层的加深,土壤微生物及动物生存的机会因为土壤环境变差而下降,导致林木根系生长发育受阻,土壤有机质、磷素含量和固氮水平下降^[40-41]。而土壤碱解氮和速效钾的含量易受到土壤含水量、气候、植被和腐殖质厚度等环境因素的影响,因此其含量随土壤加深变化的规律并不明显^[42]。

研究进一步表明研究区 NCG 的土壤养分等级综合评分值为 3.47,评价等级属于中上水平,PCL、PSS、SPM、SCM 的土壤养分等级综合评分值分别为 2.45、2.76、2.83、2.68,评价等级均属于中下水平,而 PEF 的土壤养分等级综合评分值仅为 1.95,评价等级属于土壤养分缺乏。这与前人的研究结果基本一致,吕瑞恒等研究发现蒙古栎天然次生林土壤肥力优于蒙古栎混交林、油松和落叶松人工林^[43]。李静鹏等研究也发现常绿天然次生林肥力综合评分值大于针阔混交林,针阔混交林大于纯林^[44]。李萍等对亚热带典型林分土壤肥力进行评价研究,也发现天然次生林的肥力水平最高^[8]。郑华等研究认为天然次生林在长期生长进化过程中,几乎没有受到人为干扰,林下灌草丰富、水土保持效果明显,土壤养分保育效果好,再加上天然次生林在凋落物数量、质量方面和土壤微生物活性、酶活性方面也优于人工林,这是导致天然林养分含量水平整体较高的主要因素^[30]。而竹林养分含量低的主要原因在竹林的经营周期短,导致土壤养分的输出量大于输入量,致使林地土壤养分含量逐渐下降。Shanmughavel 等研究发现竹林的养分周转速度慢也是导致竹林林地肥力下降的重要原因^[45],李正才等研究发现竹阔混交林的土壤养分含量明显高于毛竹纯林^[46],因此为提高竹林土壤养分含量,可以适当补植些阔叶树种。

在对土壤养分进行综合评价中,土壤养分指标权重的确定是关键,本研究采用结构方程模型确定土壤养分指标权重。模型的适配度检验结果显示 χ^2/df 的值为 1.695, RMSEA 为 0.041, CFI 为 0.953,说明构建的结构方程模型与数据的适配度较高,模型拟合基本理想,可以满足研究的需要。根据土壤养分权重研究结果可知土壤有机质是影响研究区 6 种森林土壤养分最主要的因子,这与前人的研究结果一致,土壤有机质不仅是土壤氮磷钾含量的重要来源,而且对改善土壤结构和物理性质、促进土壤微生物和土壤动物活动、活化土壤磷元素有着非常重要的作用^[47]。

与现有的指标权重确定方法相比,结构方程模型是一种全新的方法,它是通过模拟影响森林土壤养分的各要素内逻辑关系生成路径模型,反映影响土壤养分(不可测变量)与土壤养分的指标(可测变量)关系来对指标赋权,然后加权汇总进行评价^[48]。它的优点是在确定土壤养分指标权重时,不仅全面充分地提取了原始的数据的信息,而且克服了多重共线性的影响,从而使土壤养分指标的权重确定更加科学合理^[49]。但结构方程模型需要大量的数据,Bentler 等建议结构方程模型的样本容量应该为指标数目的 10 倍以上^[50]。Boomsma 建议样本容量 N 最少在 100 以上^[51]。Alexandra 在 CQ(创意智商)预测研究中研究样本为 122^[52]。任峰等用 112 个研究样本研究了网络对企业传统营销方式的影响^[53]。舒树森等用 100 个样地数据分析了云南松次生林林木多样性的影响因子^[54]。吴仁吉等基于 69 个野外样地调查数据分析了锡林河流域草原植被的分异驱动力^[55]。本文采用 60 个土壤样本构建模型,样本容量达到了指标数目的 10 倍,从统计学的角度,完全能够满足建模的需要。Muthén 指出确定结构方程模型样本容量非常复杂,并没有公认的经验法则,样本容量的大小除了考虑自由参数和指标的数目外,还受到数据观察指标、研究设计、数据多变量正态性、处理数据缺失、模型复杂性等因素的影响^[56]。一些学者提出通过统计检验力分析来解决具体研究的样本容量问题,如蒙特卡罗模拟^[57-58]。

5 结论

不同森林类型对土壤养分有显著的影响,研究表明青冈栎类天然次生林的土壤养分显著高于杉木纯林、木荷纯林、木荷+楠木混交林、木荷+杉木混交林和毛竹林,因此,与人工造林相比,天然植被更有利于土壤养分的维持。结构方程模型进一步表明土壤有机质是影响研究区 6 种森林土壤养分最主要的因子,这与前人的研究结果一致。说明采用结构方程模型确定土壤养分因子权重是一种科学的方法,可为综合评价土壤养分提

供一种新思路。

参考文献(References):

- [1] Schoenholtz S H, Van Miegroet H, Burger J A. A review of chemical and physical properties as indicators of forest soil quality: challenges and opportunities. *Forest Ecology and Management*, 2000, 138(1/3): 335-356.
- [2] Zhang Y H, Xu X L, Li Z W, Liu M X, Xu C H, Zhang R F, Luo W. Effects of vegetation restoration on soil quality in degraded karst landscapes of southwest China. *Science of the Total Environment*, 2019, 650: 2657-2665.
- [3] Doran J W, Zeiss M R. Soil health and sustainability: managing the biotic component of soil quality. *Applied Soil Ecology*, 2000, 15(1): 3-11.
- [4] Pang D B, Cao J H, Dan X Q, Guan Y H, Peng X W, Cui M, Wu X Q, Zhou J X. Recovery approach affects soil quality in fragile karst ecosystems of southwest China: implications for vegetation restoration. *Ecological Engineering*, 2018, 123: 151-160.
- [5] Doran J W. Soil health and global sustainability: translating science into practice. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2002, 88(2): 119-127.
- [6] Shao G D, Ai J J, Sun Q W, Hou L Y, Dong Y F. Soil quality assessment under different forest types in the Mount Tai, central Eastern China. *Ecological Indicators*, 2020, 115: 106439.
- [7] 杨晓娟, 王海燕, 任丽娜, 于洋, 刘玲. 我国森林土壤健康评价研究进展. *土壤通报*, 2012, 43(4): 972-978.
- [8] 李萍, 王兵, 戴伟, 王丹, 邓宗付, 赵超. 亚热带几种林分类型的土壤肥力评价研究. *北京林业大学学报*, 2010, 32(3): 52-58.
- [9] Fathizad H, Ardakani M A H, Heung B, Sodaiezhadeh H, Rahmani A, Fathabadi A, Scholten T, Taghizadeh-Mehrjardi R. Spatio-temporal dynamic of soil quality in the central Iranian desert modeled with machine learning and digital soil assessment techniques. *Ecological Indicators*, 2020, 118: 106736.
- [10] 叶回春, 张世文, 黄元仿, 周志明, 沈重阳. 粗糙集理论在土壤肥力评价指标权重确定中的应用. *中国农业科学*, 2014, 47(4): 710-717.
- [11] 王振南, 张清平, 陆姣云, 杨梅, 杨惠敏. 基于灰色关联度法的不同年龄紫花苜蓿草地土壤肥力评价. *草业科学*, 2015, 32(8): 1230-1236.
- [12] 周王子, 董斌, 刘俊杰, 李强. 基于权重分析的土壤综合肥力评价方法. *灌溉排水学报*, 2016, 35(6): 81-86.
- [13] 严昶升. 土壤肥力研究方法. 北京: 农业出版社, 1988.
- [14] Budak M, Gunal H, İsmail C, Yildiz H, Acir N, Acar M. Soil quality assesment of upper Tigris basin. *Carpathian Journal of Earth and Environmental Sciences*, 2018, 13(1): 301-316.
- [15] 骆东奇, 白洁, 谢德体. 论土壤肥力评价指标和方法. *土壤与环境*, 2002, 11(2): 202-205.
- [16] Mukhopadhyay S, Masto R E, Yadav A, George J, Ram L C, Shukla S P. Soil quality index for evaluation of reclaimed coal mine spoil. *Science of the Total Environment*, 2016, 542: 540-550.
- [17] Anderson J C, Gerbing D W. Structural equation modeling in practice: a review and recommended two-step approach. *Psychological Bulletin*, 1988, 103(3): 411-423.
- [18] Laughlin D C, Abella S R, Covington W W, Grace J B. Species richness and soil properties in *Pinus ponderosa* forests: a structural equation modeling analysis. *Journal of Vegetation Science*, 2007, 18(2): 231-242.
- [19] Yang J, Yang W H, Wang F, Zhang L M, Zhou B Q, Sarfraz R, Xing S H. Driving factors of soluble organic nitrogen dynamics in paddy soils: structure equation modeling analysis. *Pedosphere*, 2020, 30(6): 801-809.
- [20] 曹小玉, 李际平, 闫文德. 不同龄组杉木林土壤有机碳与氮磷钾分布特征及耦合关系. *土壤通报*, 2014, 45(5): 1137-1143.
- [21] 俞立平, 潘云涛, 武夷山. 基于结构方程的学术期刊评价研究. *情报学报*, 2010, 29(1): 136-141.
- [22] 查同刚. 土壤理化分析. 北京: 中国林业出版社, 2017.
- [23] Carpenter P J, Scanlan T K, Simons J P, Lobel M. A test of the sport commitment model using structural equation modeling. *Journal of Sport and Exercise Psychology*, 1993, 15(2): 119-133.
- [24] Feist G J, Barron F X. Predicting creativity from early to late adulthood: intellect, potential, and personality. *Journal of Research in Personality*, 2003, 37(2): 62-88.
- [25] 郑姗姗, 吴鹏飞, 马祥庆. 森林土壤养分空间异质性研究进展. *世界林业研究*, 2014, 27(4): 13-17.
- [26] Tucker L R, Lewis C. A reliability coefficient for maximum likelihood factor analysis. *Psychometrika*, 1973, 38(1): 1-10.
- [27] 武淑霞, 张维理, 徐爱国, 张认连, 雷秋良. 不同分级标准下土壤养分图的整合模型构建. *中国农业信息*, 2019, 31(5): 110-120.
- [28] 姜红梅, 李明治, 王亲, 刘星星. 祁连山东段不同植被下土壤养分状况研究. *水土保持研究*, 2011, 18(5): 166-170.
- [29] Illeris L, Jonasson S. Soil and plant CO₂ emission in response to variations in soil moisture and temperature and to amendment with nitrogen, phosphorus, and carbon in northern Scandinavia. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 1999, 31(3): 264-271.

- [30] 郑华, 欧阳志云, 王效科, 苗鸿, 赵同谦, 彭廷柏. 不同森林恢复类型对南方红壤侵蚀区土壤质量的影响. 生态学报, 2004, 24(9): 1994-2002.
- [31] 张海鑫, 曾全超, 安韶山, 王宝荣, 白雪娟. 子午岭典型植被凋落叶-土壤养分与酶活性特征. 生态学报, 2018, 38(7): 2262-2270.
- [32] 黄勇来. 枫香与不同树种混交林的培肥土壤功能. 浙江林学院学报, 2006, 23(5): 497-500.
- [33] Chen C, Fang X, Xiang W H, Lei P F, Ouyang S, Kuzyakov Y. Soil-plant co-stimulation during forest vegetation restoration in a subtropical area of southern China. Forest Ecosystems, 2020, 7(1): 32.
- [34] 康磊. 基于冠层结构之森林土壤蒸发数学模型的研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2009.
- [35] 樊纲惟, 项文化, 雷丕峰, 邹丽梅. 亚热带常绿阔叶林土壤磷素空间分布特征及其影响因素. 农业现代化研究, 2014, 35(3): 367-370.
- [36] Sun Y T, Luo C L, Jiang L F, Song M K, Zhang D Y, Li J, Li Y T, Ostlee N J, Zhang G. Land-use changes alter soil bacterial composition and diversity in tropical forest soil in China. Science of the Total Environment, 2020, 712(1): 136526.
- [37] 赵超. 不同海拔毛竹林土壤特征及肥力评价的研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2011.
- [38] Wang H, Liu S R, Song Z C, Yang Y J, Wang J X, You Y M, Zhang X, Shi Z M, Nong Y, Ming A G, Lu L H, Cai D X. Introducing nitrogen-fixing tree species and mixing with *Pinus massoniana* alters and evenly distributes various chemical compositions of soil organic carbon in a planted forest in southern China. Forest Ecology and Management, 2019, 449: 117477.
- [39] Wan X H, Huang Z Q, He Z M, Yu Z P, Wang M H, Davis M R, Yang Y S. Soil C:N ratio is the major determinant of soil microbial community structure in subtropical coniferous and broadleaf forest plantations. Plant and Soil, 2015, 387(1/2): 103-116.
- [40] 路翔, 项文化, 刘聪. 中亚热带 4 种森林类型土壤有机碳氮贮量及分布特征. 水土保持学报, 2012, 26(3): 169-173.
- [41] 曾晓敏, 高金涛, 范跃新, 袁萍, 鲍勇, 高颖, 赵盼盼, 司友涛, 陈岳民, 杨玉盛. 中亚热带森林转换对土壤磷积累的影响. 生态学报, 2018, 38(13): 4879-4887.
- [42] 周建勤, 贾宏涛. 围栏封育对亚高山草原土壤碱解氮、速效钾空间异质性的影响. 西南农业学报, 2016, 29(7): 1729-1734.
- [43] 吕瑞恒, 刘勇, 李国雷, 于海群, 杨占军, 李秀玲. 北京延庆飞播林区不同植被类型土壤肥力的差异. 东北林业大学学报, 2009, 37(5): 39-42.
- [44] 李静鹏, 徐明锋, 苏志尧, 孙余丹, 胡硯秋. 不同植被恢复类型的土壤肥力质量评价. 生态学报, 2014, 34(9): 2297-2307.
- [45] Shanmughavel P, Francis K. Balance and turnover of nutrients in a bamboo plantation (*Bambusa bambos*) of different ages. Biology and Fertility of Soils, 1997, 25(1): 69-74.
- [46] 李正才, 傅懋毅, 谢锦忠, 历日光, 肖基泮. 毛竹竹阔混交林群落地力保持研究. 竹子研究汇刊, 2003, 22(1): 32-37.
- [47] 张政, 蔡小真, 唐偲頔, 郭剑芬. 可溶性有机质输入对杉木人工林表层土壤有机碳矿化的激发效应. 生态学报, 2017, 37(22): 7660-7667.
- [48] Torrance E P. Healing qualities of creative behavior. Creative Child and Adult Quarterly, 1978, 3(3): 146-158.
- [49] Jonsson M, Wardle D A. Structural equation modelling reveals plant-community drivers of carbon storage in boreal forest ecosystems. Biology Letters, 2010, 6(1): 116-119.
- [50] Bentler P M, Chou C P. Practical issues in structural modeling. Sociological Methods & Research, 1987, 16(1): 78-117.
- [51] Boomsma A. On the Robustness of LISREL (Maximum Likelihood Estimation) Against Small Sample Size and Non-Normality[D]. Groningen: University of Groningen, 1983.
- [52] Alexandra V. Predicting CQ development in the context of experiential cross-cultural training: the role of social dominance orientation and the propensity to change stereotypes. Academy of Management Learning & Education, 2018, 17(1): 62-78.
- [53] 任峰, 李垣, 孙爱英. 基于网络的企业营销活动实证分析. 南开管理评论, 2003, 6(4): 37-41.
- [54] 舒树森, 赵洋毅, 段旭, 胡慧蓉, 熊好琴. 基于结构方程模型的云南松次生林林木多样性影响因子. 东北林业大学学报, 2015, 43(10): 63-67.
- [55] 吴仁吉, 康萨如拉, 张庆, 任海娟, 任婧, 周俊梅, 王珍, 李丹, 牛建明. 锡林河流域羊草草原植被分异的驱动力. 草业学报, 2017, 26(4): 15-23.
- [56] Muthén B O. Beyond SEM: general latent variable modeling. Behaviormetrika, 2002, 29(1): 81-117.
- [57] Wolf E J, Harrington K M, Clark S L, Miller M W. Sample size requirements for structural equation models: an evaluation of power, bias, and solution propriety. Educational and Psychological Measurement, 2013, 73(6): 913-934.
- [58] Goodboy A K, Bolkan S, Brisini K, Solomon D H. Relational uncertainty within relational turbulence theory: the bifactor exploratory structural equation model. Journal of Communication, 2021, 71(3): 403-430.