网络出版时间:2025-10-31 DOI:10.13207/j.jnwafu.2026.04.006

极小种群猪血木分布区土壤养分状况与评价

袁在翔[1],余纽[1],董明亮[1],吴伟煌[1],邱祖械[2],苏宇[3],杨锦昌[1]
(1 中国林业科学研究院 热带林业研究所,广东 广州 510520;2 阳春市林业科学研究所,广东 阳春 529699;
3 广州市生态园林科技协同创新中心,广东 广州 510405)

[摘 要] 【目的】了解不同分布区极小种群猪血木(*Euryodendron excelsum*)生境土壤养分特征,探讨土壤养分状况对猪血木胸径的影响,为猪血木种群的保护与可持续经营提供科学依据。【方法】以天然分布区(广东阳春市八甲镇(BJ)、三甲镇(SJ))与栽培分布区(阳春市林业科学研究所(LKS)、鹅凰嶂省级自然保护区(EHZ))的猪血木种群为研究对象,测定4个分布区0~50 cm土层土壤养分含量,采用主成分分析和相关性分析,筛选出独立性较强的高载荷指标进入土壤养分评价的最小数据集,采用隶属度函数对所有指标进行标准化处理并计算土壤质量指数,同时运用广义线性混合模型(generalized linear mixed model,GLMM)分析土壤质量指数、受干扰程度、坡度、海拔、坡位等因子对不同分布区猪血木胸径的影响。【结果】各分布区猪血木土壤pH值差异较小,但土壤有机质、全氮、全磷、全钾、碱解氮、有效磷、速效钾、有效铁、有效铜、交换性锰含量差异达极显著水平。从13个指标中,筛选出pH、全氮、全钾、碱解氮、有效磷、有效铜、交换性锰7个指标构成土壤养分评价的最小数据集。基于最小数据集得到的猪血木各分布区土壤质量指数均值由大到小的顺序为EHZ(0.37)=LKS(0.37)<BJ(0.39)<SJ(0.41),且各分布区之间均无显著差异($P>0.05$)。评价结果表明,猪血木生境土壤养分状况总体偏差,土壤全磷、有效硼、交换性锰等含量较低,其中栽培分布区土壤有机质、全氮处于中等偏下水平,氮素可利用性较差。相比于受干扰程度、坡度、海拔、坡位等环境因子,土壤质量指数是影响现阶段猪血木胸径分布的最关键因子。【结论】极小种群猪血木的生长与分布存在土壤养分限制。

[关键词] 猪血木;极小种群;土壤养分;速效养分;微量元素;土壤质量指数
[中图分类号] S714.8 [文献标志码] A [文章编号] 1671-9387(2026)04-0043-09

Soil nutrient properties and evaluation in distribution areas of extremely small population plant *Euryodendron excelsum* Hung T. Chang

YUAN Zaixiang[1], YU Niu[1], DONG Mingliang[1], WU Weihuang[1],
QIU Zuxie[2], SU Yu[3], YANG Jinchang[1]
(1 *Research Institute of Tropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Guangzhou, Guangdong* 510520, *China*;
2 *Yangchun Forestry Science Research Institute, Yangchun, Guangdong* 529699, *China*; 3 *Guangzhou Collaborative Innovation Center on Science-Tech of Ecology and Landscape, Guangzhou, Guangdong* 510405, *China*)

Abstract: 【Objective】 The study aimed to investigate the soil nutrient properties in different distribution areas of the extremely small population plant *Euryodendron excelsum* Hung T. Chang and explore the effect of soil nutrient properties on the DBH of *E. excelsum*, to provide scientific basis for its protection and sustainable

[收稿日期] 2025-01-09 [修回日期] 2025-03-06
[基金项目] 广州市科技局社会发展项目(202206010058);广东省林业局猪血木极小种群资源拯救项目(粤林函[2022]250号);广东省林木种质资源调查项目(GDZZDC20228702);中国林科院基本科研业务费专项资金项目(CAFYBB2024QF001)
[作者简介] 袁在翔(1992—),男,湖北黄冈人,助理研究员,博士,主要从事森林生态学研究。E-mail:yzx0090@163.com
[通信作者] 杨锦昌(1976—),男,福建福安人,研究员,博士,主要从事特色、珍稀和濒危植物保育研究。E-mail:fjyjc@126.com

中国知网 https://www.cnki.net

management.【Method】The *E. excelsum* populations from natural distribution area (Bajia town (BJ), Sanjia town (SJ)) and cultivation distribution area (Yangchun Forestry Science Research Institute (LKS), E'huangzhang Provincial Nature Reserve (EHZ)) were taken as the research object. The nutrients content of these soil samples at the depth of 0—50 cm collected from 4 distribution areas were determined. The independent chemical index with higher load value was selected and included in the minimum data set for soil fertility evaluation by principal component analysis and Pearson correlation analysis. All indices were normalized by membership functions and then used to calculate the soil quality indexes (SQI). The effects of SQI, jamming intensity, slope, altitude and slope position on the DBH of *E. excelsum* were evaluated by the generalized linear mixed model (GLMM).【Result】No significant difference was observed in pH among different distribution areas of *E. excelsum*. However, significant difference was observed in organic matter, total nitrogen, total potassium, alkali-hydrolyzed nitrogen, available phosphorus, available potassium, available iron, available copper and exchangeable manganese among different distribution areas of *E. excelsum*. 7 chemical indexes (i. e., pH, total nitrogen, total potassium, alkali-hydrolyzed nitrogen, available phosphorus, available copper and exchangeable manganese) was selected from total data set composed of 13 chemical indexes, to form the minimum data set. The order of SQIs calculated by minimum data set among different distribution areas of *E. excelsum* was as follows: EHZ(0.37)=LKS(0.37)<BJ(0.39)<SJ(0.41), with no significant differences among these SQIs. The soil nutrient status in distribution areas of *E. excelsum* was poor. The contents of total phosphorus, available boron and exchangeable manganese in the soil were low. Moreover, the contents of soil organic matter, total nitrogen and alkali-hydrolyzed nitrogen in cultivation distribution area of *E. excelsum* were relatively low, which were lower than those of natural distribution area. Compared to jamming intensity, slope, altitude and slope position, the SQI based on the minimum data set was the key factors influencing the DBH distribution of *E. excelsum* population at this stage.【Conclusion】The growth and spatial distribution of extremely small population plant *E. excelsum* were limited by soil nutrient status.

Key words: *Euryodendron excelsum*; extremely small population; soil nutrition; available nutrition; trace element; soil quality index

土壤养分含量是立地质量评价指标的重要组成部分,具有明显的空间异质性,影响着林木的生长、分布与更新[1-2]。例如,关帝山云杉(*Picea asperata*)次生林中优势树种的径向生长与土壤有机质、速效养分、全盐、低pH值呈显著正相关[3],幼苗更新则与土壤pH值、有效氮、有效钾、有效铜、有效铁、有效锰、有效镍、有效锌、有效铝含量等显著相关[4];海南省三亚市极小种群野生植物蕉木(*Oncodostigma hainanense*)的生长及其种群结构特征受土壤养分状况显著影响[5];浙南山区的濒危植物景宁玉兰(*Yulania sinostellata*)分布与生境土壤pH值、有效磷、速效钾关联密切[6]。因此,了解林木生境土壤养分状况,有利于掌握该树种的养分偏好性,进而为该树种的可持续经营与利用提供数据支撑。

猪血木为五列木科(Pentaphylacaceae)猪血木属(*Euryodendron*)常绿高大乔木[7],是我国特有的单种属Ⅰ级濒危植物[8],科研价值高[9],在2012年和2021年先后被列入《全国极小种群野生植物拯救保护工程规划(2011—2015年)》与《国家重点保护野生植物名录》[10-11]。猪血木曾天然分布于广东阳春市和广西平南县、巴马县,但近几次调查发现广西分布的猪血木种群已完全灭绝[12]。当前,猪血木野生植株仅分布于阳春市八甲镇、三甲镇,并且在阳春市林业科学研究所和鹅凰嶂省级自然保护区等地引种栽培较为成功。目前关于极小种群猪血木的研究主要集中在生物学特性[13]、种群动态[14-15]、濒危机制[12]等方面,对其生境土壤养分状况的综合评价少有报道。为此,本研究针对现阶段猪血木的野生与栽培种群,开展生境土壤养分状况调查,采用主成分分析、相关性分析等方法,构建了土壤质量评价最小数据集,分析了猪血木各分布区之间的土壤质量指数差异,同时运用广义线性混合模型量化了土壤质量指数、受干扰程度、坡度、海拔、坡位等环境因子对猪血木胸径分布的影响,以期揭示影响极小种群猪血木分布与生长的关键因子,为其迁地保护与人工栽培提供一定的科学依据。

中国知网 https://www.cnki.net

1　材料与方法

1.1　研究地概况

本研究地点位于广东省阳春市八甲镇（111°26′57.8″ E，21°57′37.5″ N）、三甲镇（111°30′15.4″ E，22°2′2.4″ N）、阳春市林业科学研究所（111°47′49″ E，29°9′11″ N）和鹅凰嶂省级自然保护区（111°21′29″－111°36′03″ E，21°50′36″－21°58′40″ N）。八甲镇、三甲镇、阳春市林业科学研究所为亚热带季风气候，气候温和，年均降水量 2 300 mm，年均气温 22.3 ℃，年均日照 2 012 h，全年无霜期 350 d；鹅凰嶂省级自然保护区总面积为 14 751 hm^2，属于热带北缘季雨林气候，最高海拔为 1 337.6 m，年均降水量 3 428.9 mm，年均气温 22.1 ℃，年均日照 1 743.4 h，全年无霜期 350 d[16]。土壤类型均以黄壤和山地黄壤为主，pH 值偏酸性至微酸性。其中，猪血木的天然分布地（八甲镇、三甲镇）主要植被有阴香（*Cinnamomum burmanni*）、卫矛叶蒲桃（*Syzygium euonymifolium*）、牛矢果（*Osmanthus matsumuranus*）、华润楠（*Machilus chinensis*）、粗叶榕（*Ficus hirta*）、华南青皮木（*Schoepfia chinensis*）、粉箪竹（*Bambusa chungii*）、假蒟（*Piper sarmentosum*）、火炭母（*Persicaria chinensis*）等。

1.2　试验设计与土壤样品采集

于 2023 年 7 月，在阳春市八甲镇（BJ）和三甲镇（SJ）猪血木天然分布区内分别选择 24 个、11 个生境小斑块作为土壤样品采集区；在阳春市林业科学研究所（LKS）、鹅凰嶂省级自然保护区（EHZ）猪血木栽培分布区内各仅有一个斑块且立地条件基本一致，故分别作为一个土壤样品采集区。猪血木各分布区的基本概况见表 1。采集天然分布区的土样时，选择 3～5 株猪血木并在距其树干 50 cm 处，除去地面凋落物和草本植物后，用土钻分别取 0～10，10～30，30～50 cm 土层的土样，并将各取样点对应土层的样品混合后待测；采集栽培分布区的土样时，分别随机设置 3 个 10 m×10 m 标准采样区，按“梅花”型选 5 个点，除去地面凋落物和草本植物后，用土钻分别取 0～10，10～30，30～50 cm 土层的土样，将各取样点对应土层的样品混合后待测。野外采取的土壤样品用冷藏箱带回实验室后，过 10 目（孔径 1.651 mm）筛并混合均匀，以四分法保留部分样品，待自然风干后，用于土壤 pH、有机质、全氮、全磷、全钾、碱解氮、有效磷、速效钾、有效铜、有效锌、有效铁、有效硼、交换性锰含量等指标测定。

表 1　猪血木各分布区的基本概况

Table 1　Basic survey of each distribution area of *Euryodendron excelsum*

分布区 Distribution area	分布区类型 Area type	受干扰强度 Jamming intensity	平均坡度/(°) Average slope	平均海拔/m Average altitude	坡位 Slope position	平均胸径/cm Mean DBH	平均树高/m Mean tree height
八甲镇（BJ） Bajia town	天然分布区 Natural distribution area	重度干扰 Severe interference	7	41.2	下坡 Lower slope	34.5	13.2
三甲镇（SJ） Sanjia town	天然分布区 Natural distribution area	中度干扰 Moderate interference	2	28.8	平地 Flatland	24.2	10.5
阳春市林业科学研究所（LKS） Yangchun Forestry Science Research Institute	栽培分布区 Cultivated area	中度干扰 Mild interference	0	40.0	平地 Flatland	15.5	11.3
鹅凰嶂省级自然保护区 EHZ） E’ huangzhang Provincial Nature Reserve	栽培分布区 Cultivated area	轻度干扰 Mild interference	0	70.7	下坡 Lower slope	9.2	7.9

1.3　试验指标测定

土壤 pH 用电位法测定，有机质含量用重铬酸钾氧化-分光光度法测定，全氮含量用凯氏定氮法测定，全磷含量用 NaOH 碱熔-钼锑抗比色法测定，有效磷含量用浸提法测定，全钾含量用 NaOH 碱熔-火焰光度计法测定，速效钾含量用乙酸铵浸提-火焰光度计法测定，碱解氮含量用碱解扩散法测定，有效硼含量用 $CaCl_2$ 浸提法测定，有效铜、有效锌、有效铁含量用二乙烯三胺五乙酸（DTPA）浸提法-原子吸收分光光度计测定，交换性锰含量用乙酸铵浸提-原子吸收分光光度计测定[17-18]。

1.4　土壤质量评价

1.4.1　*最小数据集的构建*　采用主成分分析方法（PCA）构建土壤养分指标的最小数据集，具体方法为：首先，对数据进行 KMO（Kaiser-Meyer-Olkin）与 Bartlett’s（Bartlett test of sphericity）检验，当 KMO 值为 0.63（$P<0.01$）时，表明本研究数据适合进行最小数据集的指标筛选；其次，选择 PCA 中特征

中国知网　https://www.cnki.net

值≥1的主成分,将同一主成分下最高载荷值10%范围内的指标作为高载荷指标;最后,根据各指标间的Pearson相关性分析结果,消除多个高载荷指标之间的冗余,筛选出独立性较强的高载荷指标,将其作为最小数据集的指标[19-20]。

1.4.2 各指标隶属度的计算 为了使各评价指标之间具有可比性,引入"S"型和反"S"型隶属度函数[21]对各指标进行处理,将各指标转换为0~1的标准数值,即隶属度值。其中"S"型隶属度函数针对的是在一定范围内与土壤质量呈正相关的评价指标,且超出此范围后该指标随土壤质量变化比较稳定,如土壤有机质、全氮、全磷、全钾、碱解氮、速效磷、速效钾以及微量元素含量等;反"S"型隶属度函数针对的是当某些评价指标在适宜范围时土壤质量较好,而当超出该范围时则土壤质量下降,适用的指标有pH值等。"S"型和反"S"型隶属度函数的具体计算方法如式(1)和(2)所示:

$$f(x)=\begin{cases}0.1, x\leqslant x_1;\\ 0.9(x-x_1)/(x_2-x_1)+0.1, x_1<x<x_2;\\ 1.0, x\geqslant x_2。\end{cases} \quad (1)$$

$$f(x)=\begin{cases}0.1, x\geqslant x_2;\\ 0.9(x_2-x)/(x_2-x_1)+0.1, x_1<x<x_2;\\ 1.0, x\leqslant x_1。\end{cases} \quad (2)$$

式中:x为各指标的实测值,x_1、x_2分别为各指标实测值的最小值与最大值。

1.4.3 各指标权重的计算 对全体数据集和最小数据集进行PCA分析,获得各指标在不同主成分下的载荷值,然后计算各指标在土壤质量评价中的权重[22],其具体计算公式如下:

$$W_i=C_i/\sum_{i=1}^{n}C_i。 \quad (3)$$

式中:W_i为第i个指标的权重值,C_i为第i个指标的载荷,i为评价指标数量。

1.4.4 土壤质量指数(SQI)的计算 SQI基于多个指标来反映土壤质量的优劣,其数值越高表明土壤质量越好[23]。SQI的计算公式如下:

$$\mathrm{SQI}=\sum_{i=1}^{n}W_i\times S_i。 \quad (4)$$

式中:S_i为第i个指标的隶属度值。

根据SQI的数值范围,可以将土壤质量划分为低(0≤SQI<0.2)、较低(0.2≤SQI<0.4)、中等(0.4≤SQI<0.6)、较高(0.6≤SQI<0.8)、高(0.8≤SQI≤1.0)等5个等级[24]。

1.5 数据分析

使用Excel 2019软件进行数据处理;使用SPSS 20.0软件进行多元统计分析;使用Origin 2022软件进行绘图;使用R 4.3.2软件中的factoextra包、ggcor包、glmm.hp包分别进行主成分分析、Pearson相关性分析与广义线性混合模型拟合。利用LSD法进行差异显著性检验,显著水平定义为$P<0.05$,极显著水平定义为$P<0.01$。

2 结果与分析

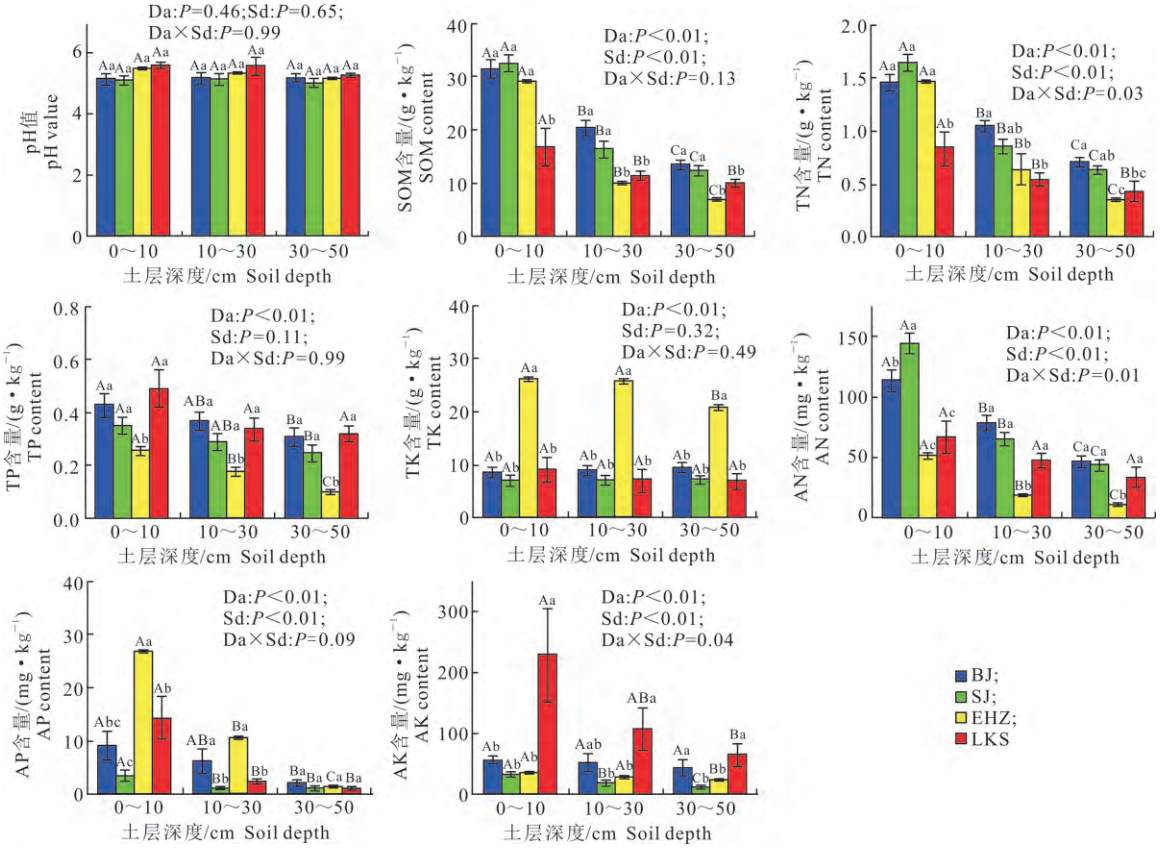
2.1 猪血木不同分布区土壤化学性质的变化

2.1.1 pH及土壤常量养分 由图1可知,猪血木各分布区土壤pH值差异较小,养分含量的差异达极显著水平($P<0.01$),并且土壤全氮、碱解氮、有效磷和速效钾含量还受到土层深度极显著影响($P<0.01$)。在整个土层(0~50 cm)中,pH值、有机质、全氮、全磷、全钾、碱解氮、有效磷、速效钾含量分别为5.09~5.48、12.77~21.84 g/kg、0.61~1.07 g/kg、0.18~0.38 g/kg、7.21~24.36 g/kg、27.02~84.54 mg/kg、1.94~13.00 mg/kg、21.77~134.95 mg/kg。在同一土层中,有机质、全氮和碱解氮含量在BJ、SJ土壤中较高,速效钾含量在LKS土壤中最高,全钾、有效磷含量在EHZ土壤中较高,而全磷含量则在EHZ土壤中最低。此外,有机质、全氮、全磷、碱解氮、有效磷、速效钾含量在各分布区土壤中均表现出较为明显的"表聚效应"。

2.1.2 土壤微量元素 由图2可知,猪血木各分布区之间的土壤有效铁、有效铜、交换性锰含量差异达显著或极显著水平,并且有效铁、有效铜、有效硼、有效锌、交换性锰含量差异还受到土层深度极显著影响。在整个土层(0~50 cm)中,有效铁、有效铜、有效硼、有效锌、交换性锰含量分别为13.67~61.82,1.46~5.61,0.18~0.41,3.42~5.23,1.33~2.90 mg/kg。在同一土层中,有效铁、有效硼等含量在SJ土壤中显著较高,在LKS土壤中显著较低;有效铜、有效锌含量在LKS土壤中较高,在EHZ土

中国知网 https://www.cnki.net

壤中较低；交换性锰含量在LKS土壤中较高，在SJ土壤中较低。此外，各分布区土壤有效铁、有效铜、有效硼、有效锌、交换性锰含量也表现出“表聚效应”。



Da表示分布区类型，Sd表示土层深度。pH表示土壤酸碱度，SOM表示有机质，TN表示全氮，TP表示全磷，TK表示全钾，AN表示碱解氮，AP表示有效磷，AK表示速效钾。大写字母表示同一分布区不同土层之间差异显著（$P<0.05$），小写字母表示相同土层不同分布区之间差异显著（$P<0.05$）。下同。

Da represents distribution areas; Sd represents soil depth; pH represents pH; SOM represents soil organic matter; TN represents total nitrogen; TP represents total phosphorus; TK represents total potassium; AN represents alkali-hydrolyzed nitrogen; AP represents available phosphorus; AK represents available potassium. Different uppercase and lowercase letters indicate significant differences within distribution areas and soil depth, respectively ($P<0.05$). The same below.

图1　猪血木不同分布区土壤的pH值及养分含量

Fig. 1　Soil pH and nutrient content in different distribution areas of *Euryodendron excelsum*

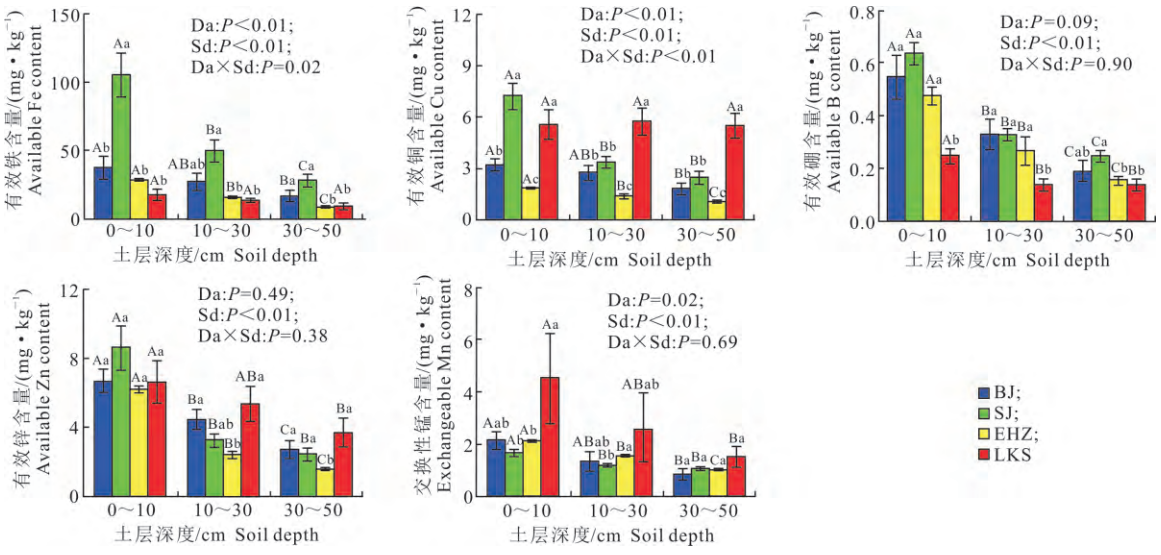


图2　猪血木不同分布区土壤微量元素含量

Fig. 2　Content of each soil trace element in different distribution areas of *Euryodendron excelsum*

中国知网　https://www.cnki.net

2.2 猪血木不同分布区的土壤质量评价

2.2.1 最小数据集指标的确定

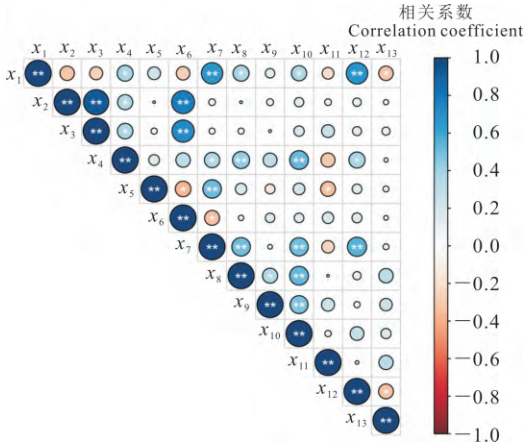
对分布区土壤的13项化学指标进行PCA分析,结果见表2。

表2 猪血木分布区土壤各指标的主成分载荷矩阵、特征值及方差贡献率

Table 2 Principal component loading matrix, eigenvalue and variance contribution for each soil index in distribution areas of *Euryodendron excelsum*

指标 Index	PC1	PC2	PC3	PC4	指标 Index	PC1	PC2	PC3	PC4
pH	0.794	−0.316	−0.153	−0.343	AK	0.645	0.103	0.463	0.194
SOM	0.000	0.896	−0.312	0.206	TK	0.465	−0.205	−0.175	0.650
AP	0.845	−0.201	−0.098	0.167	有效Cu Available Cu	0.276	0.214	0.655	−0.363
TN	0.035	0.907	−0.185	0.214	交换性Mn Exchangeable Mn	−0.079	0.142	0.730	0.429
AN	−0.111	0.897	−0.144	−0.203	有效Fe Available Fe	−0.251	0.299	0.481	−0.356
有效Zn Available Zn	0.697	0.279	0.367	−0.018	特征值 Eigenvalues	3.491	3.047	1.896	1.386
TP	0.676	0.426	−0.068	0.034	方差贡献率/% Variance contribuion rate	26.855	23.437	14.586	10.662
有效B Available B	0.642	0.098	−0.365	−0.455	累计方差贡献率/% Cumulative variance contribution rate	26.855	50.292	64.878	75.540

表2表明,前4个主成分的特征值均大于1,累计方差贡献率为75.540%。其中,主成分1(PC1)中,载荷值最大的指标为有效磷,其10%范围内的指标为pH值,故有效磷、pH值均为PC1的高载荷值指标;虽然有效磷与pH之间呈极显著正相关(r=0.669,P<0.01,图3),考虑到pH值是土壤的固有属性,与土壤理化性质密切相关,故未将pH视为冗余指标,因而有效磷、pH均进入最小数据集。在主成分2(PC2)中,载荷值最大的指标为全氮,其10%范围内的指标为有机质、碱解氮,故全氮、碱解氮、有机质均为PC2的高载荷值指标;有机质、碱解氮分别与全氮均呈极显著正相关(r分别为0.926,0.727,P<0.01,图3),并且全氮是有机质的重要组成部分,碱解氮是全氮的重要组成部分,因而有机质、全氮、碱解氮之间存在冗余关系;考虑到碱解氮是土壤速效养分,能够被林木吸收利用,反映了土壤氮素的供应能力,故而碱解氮予以保留在高载荷值指标中;根据载荷值大小,PC2中全氮、碱解氮均选入最小数据集。在主成分3(PC3)中,高载荷值指标为交换性锰、有效铜,且二者无显著相关关系(r=0.228,P>0.05,图3),故均进入最小数据集。在主成分4(PC4)中,仅全钾为高载荷值指标,故直接入选最小数据集。综上所述,选入最小数据集的指标为pH、有效磷、全氮、碱解氮、有效铜、交换性锰、全钾。



x_1表示pH,x_2表示有机质,x_3表示全氮,x_4表示全磷,x_5表示全钾,x_6表示碱解氮,x_7表示有效磷,x_8表示速效钾,x_9表示有效Cu,x_{10}表示有效Zn,x_{11}表示有效Fe,x_{12}表示有效B,x_{13}表示交换性Mn。蓝色表示正相关,红色表示负相关。*、**分别表示在P<0.05和P<0.01水平显著与极显著相关。

x_1 represents pH; x_2 represents soil organic matter; x_3 represents total nitrogen; x_4 represents total phosphorus; x_5 represents total potassium; x_6 represents alkali-hydrolyzed nitrogen; x_7 represents available phosphorus; x_8 represents available potassium; x_9 represents available Cu; x_{10} represents available Zn; x_{11} represents available Fe; x_{12} represents available B; x_{13} represents exchangeable Mn. Blue color indicates positive correlation and red color indicates negative correlation. *,** indicates significant differences at P<0.05 and P<0.01 level, respectively.

图3 猪血木分布区土壤各指标之间的Pearson相关性分析

Fig. 3 Pearson correlation analysis among various soil chemical index in distribution areas of *Euryodendron excelsum*

中国知网 https://www.cnki.net

2.2.2　各指标权重与最小数据集的代表性分析　分别对全体数据集、最小数据集的评价指标进行PCA分析,计算出各评价指标的公因子方差与权重,结果如表3和表4所示。

表3　全体数据集各指标的公因子方差与权重

Table 3　Common factor variance and weight of each index in the sets of total data

指标 Index	公因子方差 Common factor variance	权重 Factor weight
pH	0.872	0.089
SOM	0.942	0.096
AP	0.904	0.092
TN	0.644	0.066
AN	0.712	0.072
有效Zn Available Zn	0.879	0.090
TP	0.792	0.081
有效B Available B	0.678	0.069
AK	0.683	0.070
TK	0.698	0.071
有效Cu Available Cu	0.510	0.052
交换性Mn Exchangeable Mn	0.763	0.078
有效Fe Available Fe	0.744	0.076

表4　最小数据集各指标的公因子方差与权重

Table 4　Common factor variance and weight of each index in the sets of minimum data

指标 Index	公因子方差 Common factor variance	权重 Factor weight
pH	0.880	0.143
AP	0.941	0.153
TN	0.790	0.129
AN	0.922	0.150
有效Cu Available Cu	0.837	0.136
交换性Mn Exchangeable Mn	0.888	0.145
TK	0.877	0.143

表3和表4中,全体数据集与最小数据集的相同评价指标的权重大小顺序基本一致;并且由最小数据集、全体数据集分别计算的土壤质量指数之间呈极显著的线性回归关系(R^2=0.81,P<0.01,图4),表明基于最小数据集的土壤质量评价方法可以充分反映猪血木各分布区的土壤质量变化。

2.2.3　土壤质量指数及其与猪血木生长指标的相关性分析　基于最小数据集得到的猪血木各分布区土壤质量指数均值由大到小的顺序为EHZ(0.37)=LKS(0.37)<BJ(0.39)<SJ(0.41),且各分布区之间均无显著差异(P>0.05)。根据土壤质量分级标准可知,仅SJ分布区的猪血木生境土壤质量处于中等水平,其余均为较低水平。一般来说,林木树高的测量精度远小于胸径,故仅将胸径作为猪血木的生长指标。采用"空间代替时间"方法,运用广义线性混合模型量化土壤质量指数、受干扰程度、坡度、海拔、坡位等因子对猪血木胸径分布的影响,结果发现,以上因子对各分布区猪血木胸径变化的总解释率为23.6%,其中土壤质量指数对猪血木胸径变化的相对解释率显著最高(11.7%,P<0.05)。线性回归分析表明,各分布区猪血木胸径与土壤质量指数之间有显著的正相关关系(P<0.05,图5)。

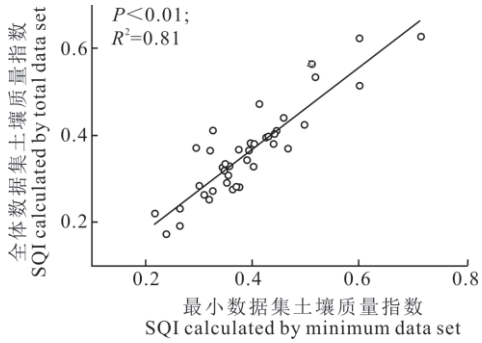


图4　不同数据集土壤质量指数之间的线性回归关系

Fig. 4　Linear regression relation between SQIs calculated using the minimum data set and total data set in distribution areas of *Euryodendron excelsum*

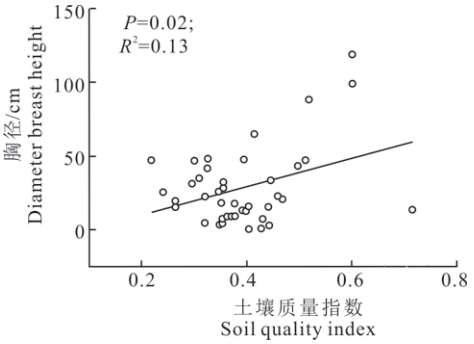


图5　基于最小数据集土壤质量指数与各分布区猪血木胸径之间的关系

Fig. 5　Relationship between SQI calculated by minimum data set and DBH of *Euryodendron excelsum* in each distribution area

3　讨　论

3.1　猪血木各分布区的土壤养分状况

本研究参照全国第二次土壤普查养分分级标准[25],可知猪血木各分布区土壤为酸性至微酸性,有效铜、有效锌、有效铁含量较高,全磷、有效硼、交换性锰含量较低,这表明猪血木偏好酸性且有效铜、有效锌、有效铁含量高的土壤。土壤有机质、全氮含量在猪血木天然分布区(BJ、SJ)土壤中较高,

中国知网　https://www.cnki.net

在栽培分布区(EHZ、LKS)土壤中处于中等或较低水平,这可能与森林类型有关[26]。一般来说,天然林土壤有机质、全氮含量均高于人工林[27]。在天然分布区(BJ、SJ),猪血木林分结构复杂,地上生物量与地表凋落物均较多,有利于土壤有机质与全氮的累积;而在栽培分布区(EHZ、LKS),猪血木纯林均为乔-草复层结构,层次结构简单,且林龄较短,林分养分归还能力较弱,不利于土壤有机质与全氮的累积。碱解氮含量在天然分布区土壤中处于适中水平,在栽培分布区土壤中较低,表明猪血木天然分布区土壤氮的可利用性更高。全钾含量仅在EHZ土壤中较高,在其余分布区土壤中较低,这是因为全钾主要来源于成土母质风化过程[28],而EHZ属于热带北缘季雨林气候,海拔较高,高温多湿,成土母质风化强烈,可能导致土壤全钾含量相对较高[29]。此外,有效磷、速效钾等含量均在SJ土壤中较低,表明SJ分布区土壤中磷、钾的可利用性较差。

3.2 各分布区土壤质量指数及对猪血木生长的影响

基于最小数据集的土壤质量指数能以最少的信息损失客观地反映土壤养分状况[30]。本研究中,最小数据集包括土壤pH、有效磷、全氮、碱解氮、有效铜、交换性锰、全钾等7个指标,由此计算的土壤质量指数在0.37~0.41,可以解释猪血木各分布区土壤养分状况的81%变异,具有较好的代表性。各分布区猪血木土壤质量指数处于中等偏下水平,且在不同分布区之间差异不显著,表明现阶段猪血木生境土壤养分状况总体较差。其中,猪血木天然分布区的土壤养分状况总体好于栽培分布区,这与李榕涛等[31]的研究结果基本相似。此外,土壤质量指数、受干扰程度、坡度、海拔、坡位对各分布区猪血木胸径变化的总解释率为23.6%,其中仅土壤质量指数的解释率最为显著,且与猪血木的胸径分布呈显著的正相关关系,表明现阶段猪血木的生长与分布可能主要受土壤养分状况限制。这是因为栽培分布区的猪血木均处于幼龄林阶段,对土壤养分的需求较大,并且 栽培分布区的土壤氮素含量及可利用性均较低,因而可能影响了猪血木的生长。

4 结 论

猪血木生境土壤酸性至微酸性,养分状况总体偏差,土壤全磷、有效硼、交换性锰含量较低;栽培分布区土壤有机质、全氮含量处于中等偏下水平,氮素可利用性较差。通过主成分分析和相关性分析,从反映猪血木生境土壤养分状况的13个指标中筛选出pH、全氮、全钾、碱解氮、有效磷、有效铜、交换性锰作为评价土壤质量的最小数据集。广义线性混合模型和线性回归分析表明,基于最小数据集的土壤质量指数是影响现阶段猪血木胸径的最关键因子。因此,猪血木生长与分布存在土壤养分限制。

[参考文献]

[1] 刘俊成,朱光玉,吕勇. 基于立地、土壤养分及其交互作用的湖南杉木人工林立地指数模型[J]. 生态学报,2025,45(3):1339-1350.
LIU J C,ZHU G Y,LÜ Y. Site index model of Chinese fir plantation in Hunan province based on site,soil nutrients and their interactions[J]. Acta Ecologica Sinica,2025,45(3):1339-1350.

[2] 袁在翔,关庆伟,李俊杰,等. 不同植被恢复模式对紫金山森林土壤理化性质的影响[J]. 东北林业大学学报,2022,50(1):52-57.
YUAN Z X,GUAN Q W,LI J J,et al. Effect of various vegetation restoration types on soil physio-chemical properties[J]. Journal of Northeast Forestry University,2022,50(1):52-57.

[3] 陈颂,王晨林,任宇辰,等. 关帝山云杉次生林树木径向生长的空间关联及其影响因子[J]. 生态学报,2023,43(4):1572-1583.
CHEN S,WANG C L,REN Y C,et al. Spatial autocorrelation patterns and influencing factors of tree radial growth in the secondary *Picea* forest in Guandi Mountains,northern China[J]. Acta Ecologica Sinica,2023,43(4):1572-1583.

[4] 李璟,周朵朵,陈颂,等. 关帝山云杉次生林树木更新与土壤养分的空间关联性[J]. 应用生态学报,2021,32(7):2363-2370.
LI J,ZHOU D D,CHEN S,et al. Spatial associations between tree regeneration and soil nutrient in secondary *Picea* forest in Guandi Mountains,Shanxi,China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2021,32(7):2363-2370.

[5] 洪文君,王炳宇,曾德华,等. 极小种群野生植物蕉木分布区土壤养分特征[J]. 生态学杂志,2024,43(12):3580-3586.
HONG W J,WANG B Y,ZENG D H,et al. Soil nutrient properties in the distribution area of the extremely small population of *Oncodostigma hainanense*[J]. Chinese Journal of Ecology,2024,43(12):3580-3586.

[6] 邬宇峰,徐建恩,申亚梅,等. 濒危植物景宁木兰分布特征及其与生境土壤性质的关联分析[J]. 林业资源管理,2023(1):62-70.
WU Y F,XU J E,SHEN Y M,et al. Distribution characteristics of the endangered plant *Magnolia sinostellata* and its correlation analysis with habitat soil properties[J]. Forest Resources Management,2023(1):62-70.

[7] REN H,YI H L,ZHANG Q M,et al. Morphological,anatomical and physiological traits of *Euryodendron excelsum* as af-

中国知网 https://www.cnki.net

fected by conservation translocation (augmentation vs. conservation introduction) in South China[J]. Photosynthetica, 2019, 57(1): 217-225.

[8] 傅立国. 中国植物红皮书：第一册. 稀有濒危植物[M]. 北京：科学出版社，1991：1-736.
FU L G. China plant red book: volume Ⅰ. rare and endangered plants[M]. Beijing: Science Press, 1991: 1-736.

[9] 刘心怡，曾晶珏，吴坤林，等. 基质和植物生长调节剂对猪血木组培苗、实生苗插穗生根的效应[J]. 热带亚热带植物学报，2025，33(4)：390-398.
LIU X Y, ZENG J J, WU K L, et al. Effects of matrix and plant growth regulators on cutting rooting from tissue culture seedlings and seedlings of *Euryodendron excelsum*[J]. Journal of Tropical and Subtropical Botany, 2025, 33(4): 390-398.

[10] 国家林业局，国家发展改革委. 全国极小种群野生植物拯救保护工程规划(2011－2015年)[EB/OL]. (2012-04-18). http://www.forestry.gov.cn/.
State Forestry Administration of China, National Development and Reform Commission. Comprehensive plan of rescuing and Conserving China's PSESP (2011－2015)[EB/OL]. (2012-04-18). http://www.forestry.gov.cn/.

[11] 国家林业和草原局. 国家重点保护野生植物名录[EB/OL]. (2021-09-08). http://www.forestry.gov.cn/c/www/gkml/11057.jhtml.
National Forestry and Grassland Administration. List of key protected wild plants in China[EB/OL]. (2021-09-08). http://www.forestry.gov.cn/c/www/gkml/11057.jhtml.

[12] 申仕康，马海英，刘湘永，等. 中国特有植物猪血木的濒危原因及保护对策[J]. 生态环境，2007，16(6)：1819-1823.
SHEN S K, MA H Y, LIU X Y, et al. The endangered causes and preserving strategies for *Euryodendron excelsum*, a plant endemic to China[J]. Ecology and Environment, 2007, 16(6): 1819-1823.

[13] 王跃华，申仕康，申国柱，等. 濒危植物猪血木的传粉生物学特性研究[J]. 西部林业科学，2007，36(4)：11-15.
WANG Y H, SHEN S K, SHEN G Z, et al. Pollination biology of endangered *Euryodendron excelsum*[J]. Journal of West China Forestry Science, 2007, 36(4): 11-15.

[14] 魏雪莹，叶育石，林喜珀，等. 极小种群植物猪血木的种群现状及保护对策[J]. 植物生态学报，2020，44(12)：1236-1246.
WEI X Y, YE Y S, LIN X P, et al. Population status and conservation of an extremely small population species *Euryodendron excelsum*[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2020, 44(12): 1236-1246.

[15] 申仕康，马海英，王跃华，等. 濒危植物猪血木(*Euryodendron excelsum* H. T. Chang)自然种群结构及动态[J]. 生态学报，2008，28(5)：2404-2412.
SHEN S K, MA H Y, WANG Y H, et al. The structure and dynamics of natural population of the endangered plant *Euryodendron excelsum* H. T. Chang[J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(5): 2404-2412.

[16] 于耀泓，刘悦，王艺颖，等. 鹅凰嶂季雨林土壤有机碳特征及空间分布规律[J]. 中国土壤与肥料，2022(9)：139-147.
YU Y H, LIU Y, WANG Y Y, et al. Spatial distribution of soil organic in E'huangzhang monsoon forest[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2022(9): 139-147.

[17] 袁在翔，关庆伟，邹朋峻，等. 农田转化林地土壤可溶性氮的初期变化[J]. 东北林业大学学报，2022，50(3)：87-92.
YUAN Z X, GUAN Q W, ZOU P J, et al. Short-term effect of converting cropland to plantation on soil soluble nitrogen[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2022, 50(3): 87-92.

[18] 崔罗肖，刘娅，赵兰凤，等. 韶关市典型香芋产区土壤养分状况及肥力评价[J]. 华南农业大学学报，2024，45(3)：344-353.
CUI L X, LIU Y, ZHAO L F, et al. Soil nutrient status and fertility evaluation of typical taro producing areas in Shaoguan City[J]. Journal of South China Agricultural University, 2024, 45(3): 344-353.

[19] 李鹏，齐实，张林，等. 北京山区不同植被恢复类型土壤质量综合评价[J]. 水土保持学报，2024，38(1)：337-346，356.
LI P, QI S, ZHANG L, et al. Comprehensive evaluation of soil quality of different vegetation restoration types in mountainous areas of Beijing[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(1): 337-346, 356.

[20] 畅翔，脱云飞，王澍，等. 旱地水稻产量和土壤质量对水肥耦合的响应研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版)，2025，53(8)：23-36.
CHANG X, TUO Y F, WANG S, et al. Response of dryland rice yield and soil quality to water-fertilizer coupling[J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2025, 53(8): 23-36.

[21] 梅楠，谷岩，李德忠，等. 基于最小数据集的吉林省黑土耕层土壤质量评价[J]. 农业工程学报，2021，37(12)：91-98.
MEI N, GU Y, LI D Z, et al. Soil quality evaluation in topsoil layer of black soil in Jilin Province based on minimum data set[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(12): 91-98.

[22] 刘淼，蔡春菊，范少辉，等. 不同恢复年限对川南丘陵区竹林地土壤质量的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版)，2022，50(1)：63-71.
LIU M, CAI C J, FAN S H, et al. Effects of different restoration years on soil quality of *Bambusa rigida* plantations in southern Sichuan[J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2022, 50(1): 63-71.

[23] 朱鸣鸣，徐镀涵，陈光燕，等. 基于最小数据集的喀斯特不同利用方式下土壤质量评价[J]. 草地学报，2021，29(10)：2323-2331.
ZHU M M, XU D H, CHEN G Y, et al. Assessment on soil quality under different land use patterns in karst area based on minimum data set[J]. Acta Agrestia Sinica, 2021, 29(10): 2323-2331.

(下转第 62 页)

中国知网　https://www.cnki.net

2010:37-40.
LI G F. Changes of cell ultrastructure and oxidative enzymes activities during browning of apple flesh[C]//2010 First International Conference on Cellular, Molecular Biology, Biophysics and Bioengineering, Qiqihar, Heilongjiang. 2010:37-40.

[33] 刘聪,邓宇宏,刘选明,等. 过氧化氢酶在植物生长发育和胁迫响应中的功能研究进展[J]. 生命科学研究,2023,27(2):128-138.
LIU C, DENG Y H, LIU X M, et al. Research advances in the function of catalase in plant growth, development and stress response[J]. Life Science Research, 2023, 27(2):128-138.

[34] 曹雪莲,陈影,王迪,等. 中国皱木耳类群种质资源鉴定和表型性状分析[J]. 菌物学报,2024,43(12):20-33.
CAO X L, CHEN Y, WANG D, et al. Identification of germplasm resources and analysis of phenotypic traits of the *Auricularia delicata* complex in China[J]. Mycosystema, 2024, 43(12):20-33.

[35] 余帅,冯光燕,苏晓丽,等. 17份多花黑麦草品种(系)农艺性状与产量形成关系的多重分析[J]. 草地学报,2024,32(9):2862-2874.
YU S, FENG G Y, SU X L, et al. Multiple analyses of the relationship between agronomic traits and yield formation in 17 varieties/lines of *Lolium multiflorum*[J]. Acta Agrestia Sinica, 2024, 32(9):2862-2874.

[36] 樊晓芸,郭素娟,李艳华,等. 板栗果实褐变度与总酚和总黄酮的相关性研究[J]. 南京林业大学学报(自然科学版),2023,47(6):159-166.
FAN X Y, GUO S J, LI Y H, et al. Study on correlation between browning degree of chestnut fruit and total phenols and flavonoids[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2023, 47(6):159-166.

[37] 陈明俊,罗小波,曹贞菊,等. 基于主成分分析和隶属函数法对不同马铃薯酶促褐变评价[J]. 中国蔬菜,2024(4):85-92.
CHEN M J, LUO X B, CAO Z J, et al. Comprehensive evaluation of enzymatic browning of different potatoes based on principal component analysis and membership function method[J]. China Vegetables, 2024(4):85-92.

[38] 李泰,孙君茂,黄家章,等. 不同产地'富士'苹果果实品质分析及评价[J]. 中国农业大学学报,2024,29(11):23-29.
LI T, SUN J M, HUANG J Z, et al. Fruit quality analysis and evaluation of 'Fuji' apples from different producing areas[J]. Journal of China Agricultural University, 2024, 29(11):23-29.

[39] 何超,李萌,李婷婷,等. 多目标综合评价中四种确定权重方法的比较与分析[J]. 湖北大学学报(自然科学版),2016,38(2):172-178.
HE C, LI M, LI T T, et al. Comparison and analysis of the four methods of determining weights in multi-objective comprehensive evaluation[J]. Journal of Hubei University (Natural Science), 2016, 38(2):172-178.

(责任编辑:屈李纯)

(上接第51页)

[24] 张俊华,黄华雨,丁启东,等. 河套平原盐碱化耕地土壤质量评价与障碍因素诊断[J]. 环境科学,2025,46(4):2320-2336.
ZHANG J H, HUANG H Y, DING Q D, et al. Soil quality evaluation and obstacle diagnosis of saline-alkali cultivated land in Hetao plain[J]. Environmental Science, 2025, 46(4):2320-2336.

[25] 全国土壤普查办公室. 中国土壤普查技术[M]. 北京:农业出版社,1992.
National Soil Survey Office. Soil survey technology in China[M]. Beijing: Agriculture Press, 1992.

[26] 陆其伟,脱云飞,冯永钰,等. 栗子坪自然保护区林分类型对土壤化学计量特征、微生物及其季节动态响应[J]. 水土保持学报,2024,38(5):285-295.
LU Q W, TUO Y F, FENG Y Y, et al. Response of forest stand types to soil stoichiometric characteristics, microorganisms and their seasonal dynamics in Liziping Nature Reserve[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(5):285-295.

[27] 张向宁,王海燕,崔雪,等. 土壤pH与养分的空间异质性及土壤肥力分析:以内蒙古旺业甸林场为例[J]. 干旱区资源与环境,2023,37(7):127-136.
ZHANG X N, WANG H Y, CUI X, et al. Spatial heterogeneity of soil pH and nutrients and soil fertility analysis: a case study of Wangyedian forest farm in Inner Mongolia[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2023, 37(7):127-136.

[28] 梁士楚,苑晓霞,卢晓明,等. 漓江水陆交错带土壤理化性质及其分布特征[J]. 生态学报,2019,39(8):2752-2761.
LIANG S C, YUAN X X, LU X M, et al. Soil physico-chemical properties and distribution characteristics in an aquatic-terrestrial ecotone of the Lijiang River, southwest China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(8):2752-2761.

[29] 于耀泓,刘悦,王艺颖,等. 鹅凰嶂山地雨林土壤阳离子交换量和交换性盐基离子分布特征[J]. 土壤通报,2022,53(6):1341-1349.
YU Y H, LIU Y, WANG Y Y, et al. Distribution of soil cation exchange capacity and exchangeable based cations in the E'huangzhang montane rain forest[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2022, 53(6):1341-1349.

[30] NEGIS H, ŞEKER C, GÜMÜS İ, et al. Establishment of a minimum dataset and soil quality assessment for multiple reclaimed areas on a wind-eroded region[J]. Catena, 2023, 229:107208.

[31] 李榕涛,卢丽兰,甘炳春,等. 海南主要益智生长区土壤养分调查与分析[J]. 中国农学通报,2011,27(13):130-134.
LI R T, LU L L, GAN B C, et al. Investigation and analysis of soil nutrients in the main growing area of *Alpinia oxyphylla* in Hainan[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2011, 27(13):130-134.

(责任编辑:李小平)

中国知网 https://www.cnki.net