

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2023.04.003.

宋燕平, 喻阳华, 李一彤. 不同林龄顶坛花椒人工林土壤肥力变化规律[J]. 水土保持研究, 2023, 30(4):137-145.

SONG Yanping, YU Yanghua, LI Yitong. Change of Soil Fertility in *Zanthoxylum planispinum* var. *dintanensis* Plantation with Different Ages [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(4):137-145.

## 不同林龄顶坛花椒人工林土壤肥力变化规律

宋燕平, 喻阳华, 李一彤

(贵州师范大学 喀斯特研究院/国家喀斯特石漠化防治工程技术研究中心, 贵阳 550001)

**摘要:** [目的] 探究顶坛花椒 (*Zanthoxylum planispinum* var. *dintanensis*) 人工林土壤肥力随林龄的变化, 为林分培育措施的优化提供理论依据。 [方法] 以 5~7, 10~12, 20~22, 28~32 a 的顶坛花椒人工林为对象, 运用 Pearson 相关性分析与主成分分析, 结合 Norm 值, 建立最小数据集以评价其土壤肥力。 [结果] 不同林龄差异主要表现在土壤有机碳、全磷、全钙、真菌、微生物生物量氮、微生物生物量磷 ( $p < 0.05$ )。 Pearson 相关分析表明, 有效钾与放线菌、微生物生物量磷呈显著正相关, 微生物生物量氮与全磷、有效镁、有效锌呈显著正相关, 表明土壤营养元素的积累可为微生物生长提供物质基础。 不同林龄林分土壤肥力限制因子不同, 5~7 a 和 10~12 a 主要受有效钾、细菌、放线菌、微生物生物量磷支配; 20~22 a 主要受有机碳限制; 28~32 a 则为有效磷、全钙、真菌。 土壤肥力综合指数为 20~22 a ( $1.06$ )  $>$  5~7 a ( $-0.05$ )  $>$  10~12 a ( $-0.42$ )  $>$  28~32 a ( $-0.58$ )。 [结论] 20~22 a 及以后的林分养分吸收能力下降, 应选择该林龄以下的林分作为主要经营目标。

**关键词:** 喀斯特; 林龄; 顶坛花椒; 土壤肥力; 主成分分析

中图分类号: S158

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2023)04-0137-09

### Change of Soil Fertility in *Zanthoxylum planispinum* var. *dintanensis* Plantation with Different Ages

SONG Yanping, YU Yanghua, LI Yitong

(School of Karst Science/State Engineering Technology Institute for Karst Decertification Control, Guizhou Normal University, Guiyang 550001, China)

**Abstract:** [Objective] Exploring the change of soil fertility in *Zanthoxylum planispinum* var. *dintanensis* plantation with forest ages can provide a theoretical basis for the optimization of stand cultivation measures. [Methods] The study took *Zanthoxylum planispinum* var. *dintanensis* plantations with ages of 5~7, 10~12, 20~22, 28~32-year groups as the objects, and the Pearson's correlation and principal component analysis were carried out in combination with norm value. The minimum data set was finally established for comprehensive evaluation of soil fertility. [Results] The differences of soil fertility of different forest ages were mainly manifested in soil organic carbon, total phosphorus, total calcium, fungi, microbial biomass nitrogen, microbial biomass phosphorus. Pearson correlation analysis showed that available potassium was significantly positively correlated with actinomycete and microbial biomass phosphorus; microbial biomass nitrogen was significantly positively correlated with total phosphorus, available magnesium and available zinc, indicated that the accumulation of soil nutrients could provide a material basis for microbial growth. The limiting factors of soil fertility in different ages were different, in which 5~7, 10~12 years groups were mainly dominated by available potassium, bacteria, actinomycete and microbial biomass phosphorus; 20~22 years

收稿日期: 2022-06-22

修回日期: 2022-07-14

资助项目: 贵州省科技支撑计划项目“高麻素与高香型顶坛花椒新品种筛选与高效培育技术研究”(黔科合支撑[2022]一般103)

第一作者: 宋燕平(1995—), 女, 贵州安顺人, 硕士研究生, 研究方向为喀斯特生态建设与区域经济。E-mail: 1756809502@qq.com

通信作者: 喻阳华(1984—), 男, 贵州仁怀人, 博士, 副教授, 主要从事喀斯特环境保护与治理研究。E-mail: yuyanghua2003@163.com

<http://stbcyj.paperonce.org>

group was mainly limited by soil organic carbon; the important restrictive factors in 28~32 years group were available phosphorus, total calcium and fungi. The integrated fertility index decreased in the order: 20~22 years (1.06) > 5~7 years (-0.05) > 10~12 years (-0.42) > 28~32 years (-0.58) group. [Conclusion] The nutrient absorption capacity of the plantation aged 20~22 years and beyond decreased, and the plantation below this forest age should be selected as the main management target.

**Keywords:** karst; forest age; *Zanthoxylum planispinum* var. *dintanensis*; soil fertility; principal component analysis

土壤作为植物的重要养分来源,是其生长发育的物质基础。土壤肥力是土壤物理、化学、生物学性状的综合作用,也是林地生产力的基础<sup>[1]</sup>;其高低显著影响植物生长和分布,反之植物生长及分布亦会改变土壤养分循环过程<sup>[2]</sup>。因此,科学合理评价土壤肥力,可为养分调控、植物优化布局等提供科学依据。

在人工林生态系统中,林龄通过改变光照强度、空气流通等调控林内小生境<sup>[3]</sup>,进而影响土壤肥力。由于不同林分对土壤系统调控作用各异,导致土壤肥力随林分生长发育呈现出一定的差异性。如巨尾桉(*Eucalyptus urophylla* × *E. grandis*)土壤肥力随林龄的增加而降低,全钾(TK)、有机质(SOM)、全磷(TP)、有效氮(AN)、有效硼(AB)是影响土壤肥力的主要因子<sup>[4]</sup>;小黑杨(*Populus* × *xiaohei*)土壤肥力在生长后期明显改善,各肥力参数之间具有较强的相关性<sup>[5]</sup>;随刺槐(*Robinia pseudoacacia*)林龄增大,有机质、全氮(TN)、TP均先增大后减小,而有效磷(AP)逐渐降低<sup>[6]</sup>;茶树(*Camellia sinensis*)种植后土壤有机碳(SOC)、脂肪酸、腐殖质显著提高,均在25 a达到最大值<sup>[7]</sup>;林龄显著影响柑橘(*Citrus sinensis*)园中土壤不同粒径团聚体的比例,其中对大团聚体的影响最为显著<sup>[8]</sup>;pH值, SOC, AN, AP随着柠条(*Caragana korshinskii*)人工林种植年限的增加而增加,而土壤含水量(SWC)、AP逐年下降<sup>[9]</sup>;土壤细菌多样性与丰度随杉木(*Cunninghamia lanceolata*)林龄而逐年上升<sup>[10]</sup>;前人研究表明,人工林土壤肥力变化规律尚无统一定论,这是因为人工林生长发育是土壤养分迁移、富集和再分配的重要驱动力<sup>[11]</sup>,且不同类型生态系统中土壤异质性较强,导致林龄与土壤肥力的关系不具有一致性,因而特定人工林生态系统的土壤肥力动态仍值得研究。

顶坛花椒(*Zanthoxylum planispinum* var. *dintanensis*)是芸香科(Rutaceae)花椒属(*Zanthoxylum*)植物中竹叶椒(*Zanthoxylum planispinum*)的一个变种,为落叶灌木或小乔木;具有喜钙、耐旱、水土保持效果好等特点,是喀斯特高原峡谷地区恢复与重建的优选树种<sup>[12]</sup>。但是,近年来顶坛花椒人工林出

现地力退化现象,系统研究林分土壤肥力随林龄的变化,是维系土壤肥力的关键。在花椒林土壤肥力随林龄变化方面,前人开展了一些研究。何腾兵等<sup>[13]</sup>研究表明花椒生长不良可能是根际土壤的钾(K)亏缺引起的;周玮等<sup>[14]</sup>以土壤酶表征不同林龄花椒林的土壤肥力,发现种植花椒在短时间内不会造成土壤肥力下降,后续研究还发现蔗糖酶、淀粉酶和蛋白酶活性均随着林龄增加而增加,但脲酶和磷酸酶变化规律与之不一致<sup>[15]</sup>。以上研究结果可为花椒人工林的土壤肥力保育提供参考,但最大林龄仅为13 a,增大林龄梯度序列,有利于从更长时间尺度上对顶坛花椒人工林土壤肥力进行诊断,从而采取相应的培肥措施来延缓其生长衰退现象。此外,增大林龄研究也可为花椒适宜栽培林龄的确定提供数据支撑。基于此,该研究以5~7, 10~12, 20~22, 28~32 a的顶坛花椒人工林为研究对象,旨在解决以下3个科学问题:(1)探讨土壤理化生性状对林龄的响应;(2)明晰土壤生物学性状与理化性状的内在关联;(3)阐明不同林龄土壤综合肥力水平和限制因子。以期优化顶坛花椒人工林土壤管理措施提供理论参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于贵州省安顺市关岭县花江镇坝山村(中心坐标:105°40′28.33″E, 25°37′57.41″N, 海拔621 m),属亚热带湿润季风气候,年均降水量1 100 mm,雨量充沛但全年分配不均,冬春季易出现干旱及伏旱现象,年总积温可达6 542.9℃,光热资源丰富;海拔为530~1 473 m,地势起伏大,河谷深切,地下水深埋;石漠化发育,岩石裸露率较高,多呈中度、重度石漠化;区内土层浅薄,土被不连续,主要以石灰岩形成的石灰土为主,土壤富含Ca, Mg等元素, pH值>6.5。因地上、地下二元结构系统发育,导致持水性能低,加之降水时空分布不均,且与植物生长的需水规律不匹配,这种地质性干旱和季节性干旱的叠加,限制了水分和养分的可利用性。

顶坛花椒因在脆弱喀斯特生境中具有较强的

适生性,成为了研究区分布最广的生态产业,该区700 m以上坡度较大,为封山育林区,顶坛花椒主要种植于700 m以下的低洼堆积土区域,其种植历史已有30多年,种植面积超过1 000 hm<sup>2</sup>。采用幼苗移栽方式建植,种苗40~60 cm时移栽,因石漠化发育,采取“见缝插针”的栽培方式。经营管理技术较为完善,期间根据树形和生长阶段采取整形修枝、有机肥+复合肥的施肥等措施,林下植被以苏门白草、细叶旱稗、矛叶苎草、中华小苦荬等为主。花椒林与当地环境构建了良好的互作关系,目前已形成相对稳定的人工林生态系统。

## 1.2 样地设置与样品采集

于2020年7月,通过野外详细调查和查阅当地林业局造林资料,采用时空互代法,在关岭县花江镇坝山村境内选取林龄分别为5~7,10~12,20~22,28~32 a共4个发育阶段的顶坛花椒人工林,林龄通

过询问当地种植农户和林业局获得。不同林龄顶坛花椒人工林的土壤本底值具有一致性,一是土地利用方式转变方式均为次生乔灌林→玉米林→顶坛花椒林;二是坡向、坡位相同,坡度、海拔近似;三是小生境类型均以土面为主,差异较小;四是受劳动力缺乏、耕作成本高的限制,人为干扰强度低,均施用机肥、化肥为主,管理措施一致。林分培育时,因生境脆弱,再加上花椒根系存在化感效应,其存活率为70%,所以会存在补植情形,因而林龄为区间值,而不是具体数值。此外,过熟林出现退化现象,为满足取样时的最小样地需求,因而28~32 a的林龄范围较大,由于该林分在此阶段相对稳定,不会对研究结果带来较大影响。喀斯特地区生境破碎,异质性较高,加之人工林生态系统路网复杂,设置20 m×20 m样地存在困难,因此每个林龄分别设置3个10 m×10 m的样方,共12个样方,相互距离>5 m。样地基本特征见表1。

表1 样地概况

林龄/a	海拔/m	坡位	坡向	坡度/(°)	密度/(株·hm <sup>-2</sup> )	植被覆盖率/%	平均树高/m	平均冠幅/m	平均产量/(kg/株)
5~7	615	中下	阳坡	5	1150	100	2.7	2.5×3	6~7
10~12	621	中下	阳坡	10	1150	100	2.7	2.5×3	7~8
20~22	630	中下	阳坡	5	1000	90	3.5	3.5×3	4~5
28~32	628	中下	阳坡	5	650	75	4	4×5	1~1.5

各样方按照S形布点取样,距离树干基部30~50 cm范围处,避开10~30 cm的施肥区域,采集深度为0~20 cm(不足20 cm的以实际深度为准)的新鲜土壤,将样方内各土壤样品均匀混合,用“四分法”保留鲜重约500 g,共采集样品12份,装入无菌袋密封,立即带回实验室。将所有样品去除根系、石块等杂质,过2 mm筛。土样一部分置于冰箱内4℃冷藏保存,以测定生物学性状;另一部分自然风干、研磨过0.25 mm筛,以测定化学性状。

## 1.3 指标测定方法与选取依据

### 1.3.1 理化性状测定

土壤含水量(soil water content, SWC)采用电极法测定,pH值采用电位法测定,有机碳(soil organic carbon, SOC)采用重铬酸钾氧化-外加热法测定,全氮(total nitrogen, TN)和有效氮(available nitrogen, AN)分别采用凯氏定氮法和碱解扩散法测定,全磷(total phosphorus, TP)和有效磷(available phosphorus, AP)均采用酸熔法和盐酸-硫酸浸提法测定,全钾(total potassium, TK)和有效钾(available potassium, AK)均采用酸熔法和中性乙酸铵浸提-火焰光度计法测定,全钙(total calcium, TCa)和全镁(total magnesium, TMg)、有效钙(available calcium, ACa)、有效镁(available

magnesium, AMg)、全铁(total ferrum, TFe)、全锌(total zinc, TZn)均采用分光光度计法测定,有效铁(available ferrum, AFe)和有效锌(available zinc, AZn)采用二乙三胺五乙酸浸提法测定,阳离子交换量(cation exchange capacity, CEC)采用三氯化六氨合钴浸提-分光光度法测定。氧化还原电位(oxidation-reduction potential, ORP)采用电位法测定。因研究区内土壤沙化、土层浅薄且石砾含量高,再加上石缝、石面、石沟等小生境异质性较高的原因,影响容重和团聚体等物理性状的准确性,所以未采用土壤容重、团聚体等物理性状数据。

### 1.3.2 生物学性状测定

土壤细菌(bacteria, BAC)、真菌(fungi, FUN)和放线菌浓度(actinomycete, ACT)分别采用牛肉膏蛋白胨琼脂培养基、马丁-孟加拉红培养基和高氏1号琼脂培养基进行培养;其中BAC于30℃培养24 h后计数,FUN于25℃培养72 h后计数,ACT于28℃培养96 h后计数;BAC,ACT采用平板计数法计数,FUN采用倒皿法计数。

土样先经氯仿熏蒸,土壤微生物生物量碳(microbial biomass carbon, MBC)、微生物生物量氮(microbial biomass nitrogen, MBN)用0.5 mol/L K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>溶液提取,依

次采用重铬酸钾硫酸外加热法、凯氏定氮法测定;微生物生物量磷(microbial biomass phosphorus, MBP)用 0.5 mol/L NaHCO<sub>3</sub> 溶液提取,采用钼蓝比色法测定,计算公式参照文献[16]。

1.3.3 指标选取依据 本研究测定的指标共有 25 个,其中 OPR 能够说明土壤的透气状况;CEC 表示土壤的保肥能力;SOC, TN, AN, TP, AP, TK, AK, TCa, Aca, TMg, AMg, TFe, AFe 反映了大中微量元素水平,均是植物生长必需元素;BAC, FUN, ACT, MBC, MBN, MBP 表示土壤生物性状,是土壤环境变化的敏感指标,主要功能是将矿质元素转化成植物易能吸收利用的养分,pH 值,SWC 影响土壤肥力过程。各个指标共同构成土壤肥力质量评价指标体系,综合表征土壤质量状况。土壤生物学性状中 BAC, FUN, ACT 将喀斯特区岩石风化过程产生的大量次生矿物分解为植物可吸收养分,表征植物营养过程,是土壤肥力的重要组成部分,对林业实践响应迅速。

#### 1.4 土壤肥力综合评价方法

不同林龄顶坛花椒人工林土壤指标首先采用 SPSS 20.0 进行正态检验,然后开展主成分分析,以特征值>1,累计贡献率>85%为原则选取主成分。同一主成分下最高载荷值和最高载荷值 90%以内的指标均入选最小数据集(minimum date set, MDS);再对进入 MDS 的指标进行相关性分析,若指标高度相关( $r>0.5$ ),则保留 Norm 值最高的指标,若不相关,则指标均保留;若某指标同时在两个主成分上属于高载荷,则该指标应归入载荷值较低的主成分组内中,考虑到本研究尺度相对较小,选择  $r>0.80$  为高度相关。Norm 值表示其解释综合信息的能力,计算公式参照文献[17]:

土壤肥力综合指数(integrated fertility index, IFI)是土壤指标的集成,土壤肥力评价采用土壤肥力评价分值来计算,计算公式如下:

$$IFI = \sum_{i=1}^{12} a_i z_i \quad (1)$$

式中:IFI 为土壤肥力综合指数; $a_i$  为各因子的方差贡献率; $z_i$  为因子得分, $z_i = \sum w_{ij} x_{ij}$ ;  $w_{ij}$  为第  $i$  个变量在第  $j$  个因子处的因子得分系数; $x_{ij}$  为第  $i$  个变量在第  $j$  个因子处的标准化值,在本文中, $1 \leq i \leq 12$ 。

#### 1.5 数据处理

采用 Microsoft Excel 2013 初步整理数据,利用 SPSS 20.0 进行统计分析。数据正态分布检验采用 Kolmogorov-Smirnov 法,呈正态分布时,采用单因素方差分析(One-way AVOVE)和最小显著差异法(least significant difference, LSD);不呈正态分布时,采用 Dunnett's T3 法。土壤性状间的相互关系系

用 Pearson 相关分析,指标的筛选采用主成分分析法。利用 Origin 8.6 软件制图。数据表现形式为平均值±标准差。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同林龄顶坛花椒人工林土壤性状

2.1.1 土壤理化性状 由表 2 可知,pH 值为 6.76~7.97,多呈微碱性;SOC 以 5~7 a 的 23.65 g/kg 最高,其余 3 个林龄间差异不显著;TP 在 5~7 a 为 0.43 g/kg,显著低于 20~22 a,与其余 2 个林龄无显著差异;TCa 为 2.50~12.75 g/kg,在 10~12 a,20~22 a 之间差异显著;AMg, AZn 在 20~22 a 分别为 79.40, 10.00 mg/kg,显著高于 10~12 a,28~32 a,与 5~7 a 差异不显著;TFe 在 5~7 a 为 62.25 g/kg,显著高于 20~22 a,与其余 2 个林龄无显著差异;SWC, TN, AN, AP, TK, AK, Aca, TMg, AFe, TZn, CEC, ORP 未随林龄发生显著变化。

2.1.2 土壤生物学性状 如图 1 所示,BAC, FUN, ACT 浓度分别为  $3.3 \times 10^5 \sim 7.9 \times 10^5$ ,  $2.10 \times 10^3 \sim 4.15 \times 10^3$ ,  $2.20 \times 10^5 \sim 3.95 \times 10^5$  CFU/g,随林龄变化均呈减少—增加—减少的趋势,总体表现为 BAC>ACT>FUN,其中 FUN 在 20~32 a 与 5~7 a,10~12 a 呈显著差异,与 20~22 a 差异不显著,BAC,ACT 随林龄增加无显著差异;MBC 为 322.50~386.00 mg/kg,在 4 个林龄之间均无显著差异;MBN 以 20~22 a 的 26.15 mg/kg 为最高,与其他 3 个林龄呈显著差异;MBP 在 28~32 a 最低(52.60 mg/kg),显著低于其他 3 个林龄;土壤微生物生物量在数值上随林龄变化先增加后减少,依次为 10~12 a>20~22 a>5~7 a>28~32 a。

### 2.2 土壤理化性状与土壤生物学性状的关系

土壤微生物是土壤生态系统中的重要组成部分,与土壤的生物化学过程密切相关。person 相关性分析见表 3,其中 BAC, MBC 与土壤理化性状无显著相关性;FUN 与 TN, TCa, TMg 呈反向作用效应;ACT, MBP 与 AK 呈显著增强效应;MBN 与 pH 值, TK 呈极显著负相关,与 TP, AMg, AZn 呈显著正相关。结果表明,不同林龄顶坛花椒人工林土壤理化性状与土壤生物学性状之间可能存在一定相关性。

### 2.3 不同林龄顶坛花椒人工林土壤肥力评价指标体系

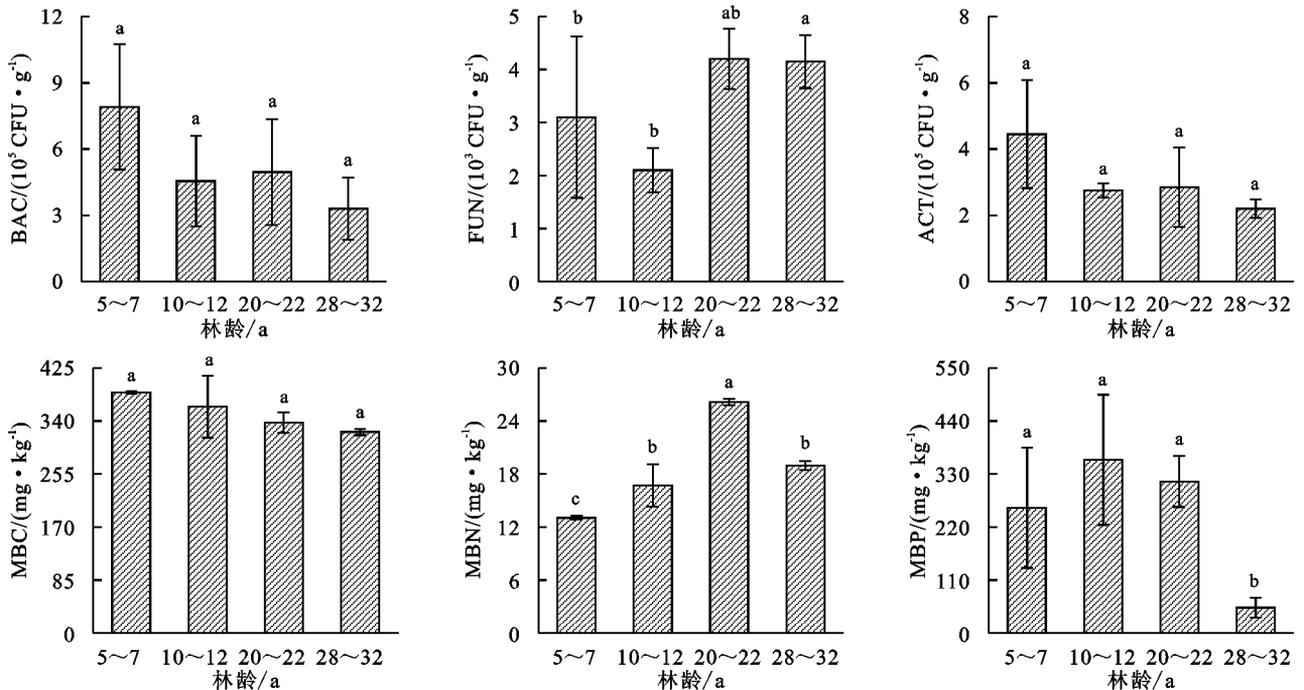
对 25 个指标进行主成分分析,结果见表 4。前 6 个主成分的特征值均>1,累计贡献率达 96.927%,可较好地反映花椒林的土壤肥力状况。PC<sub>1</sub> 的高载荷指标是 AMg, TFe, AFe, 代表中微量元素;PC<sub>2</sub> 主要受 SOC 支配,代表基础肥力;PC<sub>3</sub> 与 AN 关系最密切,表示 N 的有效性;PC<sub>4</sub> 在 TCa, FUN 上的载荷较大,反映了喀斯特区

特征性元素和生物学特性;PC<sub>5</sub>与 AK,BAC,ACT,MBP 中发挥重要作用,代表微生物生物量。每个主成分中密切相关,表征 K 的有效性和生物属性;MBC 在 PC<sub>6</sub> 的高载荷指标入选 MDS。

表 2 土壤理化指标

指标	5~7 a	10~12 a	20~22 a	28~32 a
pH 值	7.97±0.25a	7.57±0.25a	6.76±0.33b	7.32±0.25ab
SWC/%	22.47±0.85a	26.23±1.09a	24.97±4.01a	23.23±4.81a
SOC/(g·kg <sup>-1</sup> )	23.65±4.31a	15.30±0.85b	15.05±2.47b	16.50±2.26ab
TN/(g·kg <sup>-1</sup> )	2.62±0.34a	2.50±0.30a	2.00±0.52a	2.12±0.43a
AN/(mg·kg <sup>-1</sup> )	175.00±14.14a	162.00±5.66a	222.50±110.71a	145.00±29.70a
TP/(g·kg <sup>-1</sup> )	0.43±0.11b	0.80±0.20ab	1.11±0.24a	0.77±0.18ab
AP/(mg·kg <sup>-1</sup> )	32.70±5.80a	20.20±5.37a	36.65±9.55a	33.65±7.28a
TK/(g·kg <sup>-1</sup> )	14.65±0.49a	14.35±0.21a	10.55±0.07a	14.80±0.14a
AK/(mg·kg <sup>-1</sup> )	253.00±72.13a	245.00±4.24a	222.00±24.04a	149.50±64.35a
TCa/(g·kg <sup>-1</sup> )	8.30±2.69ab	12.75±6.33a	2.50±1.20b	3.90±1.27ab
ACa/(mg·kg <sup>-1</sup> )	1109.00±185.26a	989.50±156.27a	1018.50±412.24a	1145.00±35.36a
TMg/(mg·kg <sup>-1</sup> )	7.10±2.26a	6.45±1.06a	3.45±0.78a	4.15±1.06a
AMg/(mg·kg <sup>-1</sup> )	31.70±12.59ab	18.45±1.20b	79.40±33.38a	29.45±1.20b
TFe/(g·kg <sup>-1</sup> )	62.25±7.14a	56.25±0.07ab	47.95±4.17b	60.80±1.84a
AFe/(mg·kg <sup>-1</sup> )	5.50±2.12a	7.00±1.41a	41.55±20.01a	5.45±0.50a
TZn/(mg·kg <sup>-1</sup> )	113.50±7.78a	120.00±2.83a	103.50±40.31a	93.00±5.66a
AZn/(mg·kg <sup>-1</sup> )	2.15±0.50ab	1.25±0.35b	10.00±4.00a	1.10±0.28b
CEC/(mmol·kg <sup>-1</sup> )	35.85±3.04a	28.80±1.84a	25.70±7.21a	32.40±0.00a
ORP/mV	361.00±22.63a	340.50±23.33a	329.50±13.44a	336.50±24.75a

注:不同字母表示林龄间差异显著( $p < 0.05$ )。



注:不同字母表示林龄间差异显著( $p < 0.05$ )。

图 1 土壤生物学指标

为避免信息重叠,对入选 MDS 的高载荷指标进行相关性分析(表 5)。PC<sub>2</sub>,PC<sub>3</sub>,PC<sub>6</sub>中均只有一个高载荷指标,保留 SOC,AN,MBC 这 3 个指标;PC<sub>1</sub>中 AM<sub>g</sub>,TFe,AF<sub>e</sub>两两间的相关性上 TFe 与 AF<sub>e</sub> 相关系数的绝对值<0.80,因此保留这 3 个指标;PC<sub>4</sub>中 TCa 与 FUN

相关系数的绝对值<0.80,两者均保留;PC<sub>5</sub>中 AK,BAC,ACT,MBP 两两间的相关性上只有 AK 与 MBP 相关系数>0.80,故全部保留。最终进入 MDS 的指标有 AN,SOC,AK,TCa,AM<sub>g</sub>,TFe,AF<sub>e</sub>,BAC,FUN,ACT,MBP,MBC 这 12 个指标。

表3 土壤理化性状和土壤生物学性状相关性系数

指标	BAC	FUN	ACT	MBC	MBN	MBP
pH 值	0.470	-0.610	0.285	0.422	-0.931**	0.025
SWC	0.117	-0.305	-0.185	-0.200	0.199	0.491
SOC	0.500	-0.364	0.341	0.429	-0.641	-0.150
TN	0.467	-0.712*	0.124	0.251	-0.647	0.246
AN	0.391	-0.109	-0.191	-0.124	0.315	0.306
TP	-0.304	0.225	-0.435	-0.377	0.868**	0.166
AP	0.268	0.545	0.020	-0.145	0.394	-0.197
TK	-0.011	-0.418	-0.021	0.268	-0.861**	-0.400
AK	0.688	-0.231	0.720*	0.510	-0.214	0.808*
TCa	0.268	-0.742*	0.122	0.159	-0.659	0.462
ACa	0.279	-0.179	-0.437	-0.375	-0.198	-0.194
TMg	0.335	-0.821*	0.237	0.463	-0.788*	0.168
AMg	-0.251	0.449	0.085	-0.149	0.748*	0.014
TFe	0.440	0.013	0.228	0.200	-0.773*	-0.195
AFe	-0.318	0.435	0.222	-0.053	0.659	0.132
TZn	0.598	-0.461	0.064	0.257	-0.278	0.545
AZn	0.220	0.293	-0.106	-0.253	0.726*	0.339
CEC	0.464	-0.290	-0.006	0.121	-0.713*	-0.279
ORP	0.531	-0.016	0.419	0.596	-0.474	0.060

注:\*\*表示极显著相关  $p < 0.01$ ; \*表示显著相关  $p < 0.05$ , 下表同。

表4 主成分载荷矩阵及 Norm 值

指标	主成分						Norm 值
	PC <sub>1</sub>	PC <sub>2</sub>	PC <sub>3</sub>	PC <sub>4</sub>	PC <sub>5</sub>	PC <sub>6</sub>	
pH 值	0.507	0.687	-0.147	0.442	0.187	0.106	2.363
SWC	0.023	-0.125	0.709	0.399	0.233	-0.326	1.602
SOC	0.116	<u>0.956</u>	-0.046	0.057	0.104	0.233	2.167
TN	0.281	0.675	0.264	0.573	0.226	-0.055	2.081
AN	-0.039	0.248	<u>0.952</u>	-0.101	0.120	-0.019	1.898
TP	-0.314	-0.540	0.717	-0.155	-0.135	-0.130	2.087
AP	-0.047	0.238	0.483	-0.761	0.015	0.016	1.693
TK	0.711	0.298	-0.459	0.332	-0.229	0.101	2.572
AK	0.021	0.032	0.269	0.217	<u>0.865</u>	0.227	1.336
TCa	0.268	0.227	-0.065	<u>0.849</u>	<u>0.308</u>	-0.190	1.829
ACa	0.342	0.638	0.518	-0.016	-0.238	-0.361	2.086
TMg	0.196	0.653	-0.071	0.694	0.170	0.141	2.000
AMg	<u>-0.916</u>	-0.114	-0.014	-0.373	-0.011	0.004	2.962
TFe	<u>0.892</u>	0.263	-0.277	-0.146	0.130	0.067	2.928
AFe	<u>-0.848</u>	-0.381	-0.252	-0.240	0.113	0.032	2.870
TZn	0.487	0.090	0.660	0.274	0.366	0.215	2.109
AZn	-0.429	-0.053	0.778	-0.38	0.163	-0.047	2.114
CEC	0.593	0.797	0.067	0.004	-0.080	0.007	2.570
ORP	0.619	0.054	-0.039	-0.269	0.266	0.649	2.152
BAC	0.300	0.414	0.182	-0.184	<u>0.802</u>	0.049	1.755
FUN	-0.099	-0.258	-0.162	<u>-0.888</u>	0.094	-0.317	1.735
ACT	-0.086	0.176	-0.349	-0.106	<u>0.832</u>	0.349	1.432
MBC	0.035	0.169	-0.155	0.235	0.294	<u>0.886</u>	1.206
MBN	-0.609	-0.496	0.422	-0.370	-0.218	-0.144	2.453
MBP	-0.110	-0.220	0.284	0.306	<u>0.854</u>	-0.053	1.487
特征值	9.880	4.885	3.563	2.998	1.760	1.146	
方差贡献率/%	20.751	18.834	17.840	17.149	14.557	7.796	
累计贡献率/%	20.751	39.585	57.425	74.574	89.131	96.927	

注: 加下划线的数字表示高载荷值。

表 5 高因子载荷指标相关性

指标	SOC	AN	AK	TCa	AMg	TFe	AFe	FUN	BAC	ACT	MBP
AN	0.188										
AK	0.188	0.318									
TCa	0.281	-0.050	0.362								
AMg	-0.240	0.037	-0.141	-0.578							
TFe	0.393	-0.214	0.084	0.202	-0.801*						
AFe	-0.446	-0.262	-0.051	-0.469	0.915* *	-0.738*					
FUN	-0.364	-0.109	-0.231	-0.742*	0.449	0.013	0.435				
BAC	0.500	0.391	0.688	0.268	-0.251	0.440	-0.318	0.054			
ACT	0.341	-0.191	0.720*	0.122	0.085	0.228	0.222	0.084	0.668		
MBP	-0.150	0.306	0.808*	0.462	0.014	-0.195	0.132	-0.157	0.583	0.510	
MBC	0.429	-0.124	0.510	0.159	-0.149	0.200	-0.053	-0.480	0.265	0.627	0.165

据表 4 和表 6,可筛选出对不同林龄林分具有重要影响的土壤因子。5~7 a,10~12 a 的因子 5 得分均最低,表明其土壤肥力受 AK,BAC,ACT,MBP 支配;20~22 a 的因子 2 得分最低,说明其主要受 SOC 的限制;28~32 a 的因子 4 得分最低,说明其重要影响因子为 AP,TCa,FUN。

表 6 主成分因子得分

林龄/a	因子得分					
	因子 1	因子 2	因子 3	因子 4	因子 5	因子 6
5~7	4.835	1.317	-0.109	-4.876	-12.508	-4.239
10~12	0.058	4.653	3.585	-2.829	-5.526	-4.742
20~22	-3.005	-3.831	-1.993	9.928	17.853	-2.268
28~32	-1.888	-2.138	-1.483	-2.223	0.181	11.249

2.4 不同林龄顶坛花椒人工林土壤肥力评价

本研究对最小数据集进行主成分分析,结合因子得分和方差贡献率,按照公式(2)计算,得到不同林龄顶坛花椒人工林土壤肥力综合指数(图 2),依次为 20~22 a(1.06)>5~7 a(-0.05)>10~12 a(-0.42)>28~32 a(-0.58),土壤肥力随林龄变化先减小后增大再减小的趋势。

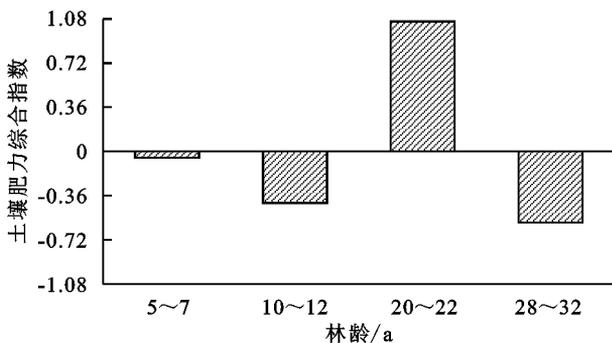


图 2 不同林龄顶坛花椒人工林土壤肥力综合指数

3 讨论

3.1 不同林龄顶坛花椒人工林土壤肥力状况

TCa 在 5~7 a,10~12 a 中含量较为丰富,结合表 1,原因可能是初期植株密度大且植被覆盖率高从

而 Ca 元素不易被淋溶流失,使得土壤中 Ca 富集<sup>[18]</sup>;也有可能是老林龄根系数量少或性能较弱,导致 Ca 富集作用弱于幼龄及成熟林。本研究发现,SOC 以 5~7 a 最高,这是因为花椒种植年限长,再加上配施化肥的原因,SOC 矿化量增加,其稳定性随之降低,导致其余 3 个林龄级的 SOC 较低<sup>[19]</sup>。可能也是因植株自身的营养需求,随林龄增加需从土壤中获取更多 C 源,从而加速有机质分解导致 SOC 的降低<sup>[20]</sup>。TP 在 5~7 a 含量最低,分析原因主要是植株在生长初期为满足所需的蛋白质和核酸导致对 P 的吸收率较高<sup>[21]</sup>,从而土壤中的 P 含量降低。研究显示顶坛花椒人工林大部分土壤理化性状在林龄间无明显差异性,这与林龄通过改变林分结构格局对土壤理化性质产生显著影响的研究不一致<sup>[22]</sup>,究其原因人为调节措施阻止了人工林由简单向复杂演替,导致物种组成较为单一,林下植被多样性未见显著增加,也与长期连栽导致根系分泌有机酸的能力下降有关,导致地上植物对其影响较弱。

研究显示,顶坛花椒人工林土壤三大类微生物浓度表现为 BAC>ACT>FUN,这是因为 BAC,ACT 更适宜中性至微碱性土壤,FUN 则适宜弱酸性土壤,而喀斯特地区土壤多呈中、碱性;同时,植物生长产生的分泌物更适合 BAC 繁衍<sup>[16]</sup>,再加上喀斯特区部分养分随水土流失,导致土壤趋于呈贫瘠,而 BAC 较 ACT,FUN 的营养竞争优势更强<sup>[23]</sup>,导致研究区 BAC 占主导地位。土壤微生物生物量在数值上为 10~12 a>20~22 a>5~7 a>28~32 a,这是因为处于幼龄时期的顶坛花椒人工林,光照、温度、湿度均有利于土壤微生物的新陈代谢,随林龄增加,凋落物数量增加,丰富土壤养分的同时为微生物的代谢和合成提供能量来源,然而林分更进一步成熟时,土壤退化且凋落物减少导致土壤养分减少从而微生物生长较为缓慢<sup>[24]</sup>。

3.2 土壤理化性状对生物学性状的影响

本文中,研究 TN 对 FUN 呈反向作用效应,这与

Yang 等<sup>[25]</sup>的研究结果一致,表明较高的土壤 N 会降低 FUN 的浓度。分析原因为,土壤 N 的增加在一定范围内可以缓解 FUN 对 N 的限制作用,但当 N 过量时 FUN 对其获取成本较高,再加上 FUN 对高 N 环境的耐受性较差,导致 FUN 随着 TN 的增加而下降<sup>[26]</sup>。MBC, MBN 通常与 SOC, TN 呈显著相关关系<sup>[27]</sup>,与该研究中 MBC, MBN 与 SOC, TN 无显著相关性的结果不一致,究其原因,是由于采取有机肥与化肥配施的方案,外源有机质能够为微生物生长与代谢提供充足的营养盐<sup>[28]</sup>,因而 C, N 元素不是土壤 MBC, MBN 的限制因素。土壤微生物活性会受到 pH 值的调控,本文研究发现 MBN 与 pH 值呈显著负相关,暗示弱酸性环境可能利于微生物繁殖,推断其原因,可能是因为弱酸环境提高了土壤养分的可利用性,增加了 MBN<sup>[29]</sup>。土壤养分可为微生物繁殖提供充足的营养源,研究显示,AK 与 ACT, MBP 呈显著增强效应,MBN 与 TP, AMg, AZn 呈正相关,反映了土壤矿质元素的积累可为微生物生长与代谢提供能量来源,反过来微生物生长又促进了矿质元素的积累和循环,但对其影响机理尚不明晰,有待进一步考究。

### 3.3 不同林龄顶坛花椒人工林土壤肥力综合评价

该文构建的 MDS 涵盖了土壤大中微量元素以及生物学性状,其中 SOC, AN, AK 反映了土壤大量元素水平与有效性, TCa, AMg 表征土壤中量元素水平,同时也是喀斯特地区特征性元素; TFe, AFe 表示微量元素水平, Fe 在植物体内许多重要的代谢反应中发挥关键作用。FUN, BAC, ACT, MBC, MBP 代表生物指标,其推动着土壤养分循环和转化。构建的 MDS 能较全面地反映顶坛花椒人工林土壤肥力状况。土壤肥力综合指数依次为  $20\sim 22\text{ a} > 5\sim 7\text{ a} > 10\sim 12\text{ a} > 28\sim 32\text{ a}$ 。由表 1 可知,  $20\sim 22\text{ a}$  的顶坛花椒人工林产量开始下降,原因主要是该林龄出现衰退趋势,生长速率变缓导致林分对养分需求量降低,从而对土壤养分的吸收与利用开始减弱,土壤养分得以积累<sup>[30]</sup>。  $5\sim 7\text{ a}$ ,  $10\sim 12\text{ a}$  的顶坛花椒人工林土壤肥力较低,究其原因,因其种植密度大、产量高,且处于生长旺盛期,再加上花椒连枝采摘时带走大量养分,对各养分的需求量增加而引起土壤养分出现盈亏,导致养分生长消耗高于补给,因此土壤肥力较低;  $28\sim 32\text{ a}$  的顶坛花椒人工林土壤肥力最低,究其原因是该林分属于衰老死亡期,密度大幅下降,林内环境改变导致地上凋落物分解较慢,且地表径流增加,土壤养分流失加快<sup>[31]</sup>。也可能是因为其生长缓慢,挂果量大幅降低,管理较为粗放,再加上养分循环周期长、归还速率慢,更多消耗林地养分来维持自身的生长。

### 3.4 对顶坛花椒人工林培育的启示

在顶坛花椒人工林不同生长发育阶段,其肥力限制因子不同,应采取相应的培肥措施以实现养分的全面性和均衡性。  $5\sim 7\text{ a}$ ,  $10\sim 12\text{ a}$  的顶坛花椒人工林土壤肥力受 AK, BAC, ACT, MBP 的支配,应注重 K 肥和菌肥的施用,同时提高 MBP 的活性;  $20\sim 22\text{ a}$  林分主要受 SOC 的限制,应增施有机肥,注重土壤团粒结构;  $28\sim 32\text{ a}$  的重要影响因子为 AP, TCa, FUN, 栽培过程中应补充 P 肥、Ca 肥,同时配施菌肥;此外,还应的林龄进行调控,以保证土壤肥力得到充分利用,维持林地生产力,因为在研究中花椒在林龄为  $20\sim 22\text{ a}$  及以后吸收养分的能力变弱,产量也有所下降。顶坛花椒人工林培育应选择林龄在  $20\sim 22\text{ a}$  以下的林分作为主要经营目标。

## 4 结论

(1) SOC 以  $5\sim 7\text{ a}$  的  $23.65\text{ g/kg}$  最高, TP 在  $20\sim 22\text{ a}$  为  $0.43\text{ g/kg}$ , 显著低于  $20\sim 22\text{ a}$ , TCa 为  $2.50\sim 12.75\text{ g/kg}$ , 在生长初期含量较为丰富; FUN 为  $2.10\times 10^3\sim 4.15\times 10^3\text{ CFU/g}$ , 随林龄变化先减少后增大再减小, MBN 以  $20\sim 22\text{ a}$  的  $26.15\text{ mg/kg}$  为最高,与其他 3 个林龄呈显著差异; MBP 在  $28\sim 32\text{ a}$  显著低于其他 3 个林龄。多数土壤理化性状未随林龄发生显著变化。

(2) Pearson 相关分析表明, SOC, TN 不是顶坛花椒人工林土壤 MBC, MBN 的显著影响因子, AK 与 ACT, MBP 呈显著正相关, MBN 与 TP, AMg, AZn 呈极显著增强效应,表明土壤矿质元素的积累可为微生物生长提供物质基础。

(3) 不同林龄林分土壤肥力限制因子有所不同,其中  $5\sim 7\text{ a}$ ,  $10\sim 12\text{ a}$  土壤肥力受 AK, BAC, ACT, MBP 的支配;  $20\sim 22\text{ a}$  主要受 SOC 的限制;  $28\sim 32\text{ a}$  重要影响因子为 AP, TCa, FUN。

(4) 通过 MDS 构建的评价指标体系可基本反映研究区土壤肥力水平,评价结果依次为  $20\sim 22\text{ a}(1.06) > 5\sim 7\text{ a}(-0.05) > 10\sim 12\text{ a}(-0.42) > 28\sim 32\text{ a}(-0.58)$ 。  $20\sim 22\text{ a}$  及以后的林分养分吸收能力下降,应选择林龄在  $20\sim 22\text{ a}$  以下的林分作为主要经营目标。

### 参考文献:

- [1] Samaei F, Emami H, Lakzian A. Assessing soil quality of pasture and agriculture land uses in Shandiz County, north-western Iran[J]. Ecological Indicators, 2022, 139:108974.
- [2] Roe N A, Ducey M J, Lee T D, et al. Soil chemical variables improve models of understory plant species distributions[J]. Journal of Biogeography, 2022, 49(4):

- 753-766.
- [3] Zhong Z K, Zhang X Y, Wang X, et al. Soil bacteria and fungi respond differently to plant diversity and plant family composition during the secondary succession of abandoned farmland on the Loess Plateau, China[J]. *Plant and Soil*, 2020, 448:183-200.
- [4] 王纪杰,王炳南,李宝福,等.不同林龄巨尾桉人工林土壤养分变化[J].*森林与环境学报*,2016,36(1):8-14.
- [5] Zhang J, Zhao Y, Xin Y. Changes in and evaluation of surface soil quality in *Populus* × *xiaohei* shelterbelts in midwestern Heilongjiang Province, China[J]. *Journal of Forestry Research*, 2021, 32:1221-1233.
- [6] 赵丹阳,毕华兴,侯贵荣,等.不同林龄刺槐林植被与土壤养分变化特征[J].*中国水土保持科学*,2021,19(3):56-63.
- [7] He S Q, Zheng Z C, Zhu R H. Long-term tea plantation effects on composition and stabilization of soil organic matter in Southwest China[J]. *Catena*, 2021, 199:105132.
- [8] Cao S, Zhou Y Z, Zhou Y Y, et al. Soil organic carbon and soil aggregate stability associated with aggregate fractions in a chronosequence of citrus orchards plantations[J]. *Journal of Environmental Management*, 2021, 293:112847.
- [9] 刘婧,缙倩倩,王国华,等.晋西北丘陵风沙区50年林龄人工柠条林植被群落及其土壤特性变化[J].*水土保持学报*,2022,36(1):219-230.
- [10] 曹升,潘菲,林根根,等.不同林龄杉木林土壤细菌群落结构与土壤酶活性变化研究[J].*生态学报*,2021,41(5):1846-1856.
- [11] Li Y, Han C, Sun S, et al. Effects of tree species and soil enzyme activities on soil nutrients in dryland plantations[J]. *Forests*, 2021, 12(9):1153.
- [12] 瞿爽,杨瑞,王勇,等.喀斯特高原顶坛花椒生长过程中土壤养分变化特征[J].*经济林研究*,2020,38(2):183-191.
- [13] 何腾兵,刘元生,李天智,等.贵州喀斯特峡谷水保经济林植物花椒土壤特性研究[J].*水土保持学报*,2000,14(2):55-59.
- [14] 周玮,周运超,田春.花江喀斯特地区花椒人工林的土壤酶演变[J].*中国岩溶*,2008,27(3):240-245.
- [15] 周玮,周运超.北盘江喀斯特峡谷区不同植被类型的土壤酶活性[J].*林业科学*,2010,46(1):136-141.
- [16] 王理德,姚拓,王方琳,等.石羊河下游退耕地土壤微生物变化及土壤酶活性[J].*生态学报*,2016,36(15):4769-4779.
- [17] 廖程,王伟伟,唐亮,等.基于最小数据集的成都平原某区土壤养分综合评价体系的构建[J].*地球与环境*,2021,49(2):189-197.
- [18] 倪大伟,王妍,刘云根,等.典型岩溶小流域不同土地利用类型土壤钙分布及形态特征[J].*西南林业大学学报:自然科学版*,2018,38(2):83-88.
- [19] 张文娟,廖洪凯,龙健.种植花椒对喀斯特石漠化地区土壤有机碳矿化及活性有机碳的影响[J].*环境科学*,2015,36(3):1053-1059.
- [20] He J, Dai Q, Xu F, et al. Variability in carbon stocks across a chronosequence of masson pine plantations and the trade-off between plant and soil systems[J]. *Forests*, 2021, 12. DOI: org/10.3390/f12101342.
- [21] 李红,喻阳华,龙健,等.顶坛花椒叶片功能性状对早衰的响应[J].*生态学杂志*,2021,40(6):1695-1704.
- [22] 邱新彩,彭道黎,李伟丽,等.北京延庆区不同林龄油松人工林土壤理化性质[J].*应用与环境生物学报*,2018,24(2):221-229.
- [23] Ma X L, Liu J, Chen X F, et al. Bacterial diversity and community composition changes in paddy soils that have different parent materials and fertility levels[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2021, 20(10):2797-2806.
- [24] Song P, Ren H, Jia Q, et al. Effects of historical logging on soil microbial communities in a subtropical forest in southern China[J]. *Plant and Soil*, 2015, 397(2):115-126.
- [25] Yang X D, Ma L F, Ji L F, et al. Long-term nitrogen fertilization indirectly affects soil fungi community structure by changing soil and pruned litter in a subtropical tea (*Camellia sinensis* L.) plantation in China[J]. *Plant and Soil*, 2019, 444: 409-426.
- [26] Wang C, Liu D, Bai E. Decreasing soil microbial diversity is associated with decreasing microbial biomass under nitrogen addition[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2018, 120:126-133.
- [27] 李艳琼,黄玉清,徐广平,等.桂林会仙喀斯特湿地芦苇群落土壤养分及微生物活性[J].*生态学杂志*,2018,37(1):64-74.
- [28] 徐华勤,肖润林,邹冬生,等.长期施肥对茶园土壤微生物群落功能多样性的影响[J].*生态学报*,2007,27(8):3355-3361.
- [29] 肖焯,黄志刚,肖茵曦,等.不同水位时期东洞庭湖湿地土壤微生物生物量碳氮和酶活性变化[J].*应用生态学报*,2021,32(8):2958-2966.
- [30] 黄章翰,李维扬,纪小芳,等.不同林龄杉木人工林根际效应及养分特征[J].*东北林业大学学报*,2021,49(11):61-67,75.
- [31] 刘慧敏,韩海荣,程小琴,等.不同密度调控强度对华北落叶松人工林土壤质量的影响[J].*北京林业大学学报*,2021,43(6):50-59.