

亚热带3种森林对土壤碳氮储量及酶活性的影响

高伟^{1,2}, 陈爱平³, 黄雍容², 黄茂根⁴, 吴兴盛⁴, 巫智斌¹, 黄石德²

(1.福建林业职业技术学院 森林生态与碳汇计量研究所, 福建 南平 353011; 2.福建省林业科学研究院, 福建 福州 350012; 3.官庄国有林场, 福建 三明 365504; 4.福建省罗卜岩自然保护区, 福建 三明 365504)

摘要: [目的] 探明森林类型对土壤碳氮含量和酶活性的影响, 为亚热带针叶林改造过程中的树种选择和营林方式选择提供科学依据。[方法] 研究相同海拔高度和相近环境条件下的亚热带常绿阔叶林(米楮林)、常绿—落叶阔叶混交林(闽桦—闽楠林)和针叶林(马尾松林)3种森林类型对土壤碳氮储量和酶活性的影响。[结果] ① 马尾松林的土壤总有机碳含量显著高于其他两种林分类型, 土壤全氮含量与闽桦—闽楠林无显著差异, 但二者均显著高于米楮林, 马尾松林和闽桦—闽楠林的土壤氮储量和碳储量显著高于米楮林; 马尾松林和闽桦—闽楠林的土壤可溶性有机碳含量显著高于米楮林。马尾松林的土壤可溶性有机氮含量显著小于米楮林和闽桦—闽楠林, 米楮林和马尾松林的土壤微生物量碳氮含量均显著高于闽桦—闽楠林, 3种林分的土壤铵态氮含量无显著差异, 而闽桦—闽楠林的土壤硝态氮含量显著高于其他两种林分; ② 米楮林的土壤脲酶活性显著高于闽桦—闽楠林。3种林分的土壤蔗糖酶活性差异显著, 表现为: 马尾松林>米楮林>闽桦—闽楠林, 马尾松林和米楮林的土壤过氧化氢酶活性均显著高于闽桦—闽楠林。3种林分的土壤磷酸酶活性无显著差异, 马尾松林的土壤β-葡糖苷酶活性显著大于米楮林和闽桦—闽楠林; RDA分析表明, 影响3种林分土壤酶活性变化的因子主要为土壤全碳(解释率为59.5%)、全氮(解释率为11.0%)和硝态氮(解释率为14.6%)。[结论] 与米楮林相比, 马尾松林和闽桦—闽楠林具有较高的土壤碳氮储量, 土壤有机质的增加有利于提高土壤酶活性。

关键词: 森林类型; 扰动; 土壤碳氮含量; 可溶性有机质; 酶活性

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2023)01-0314-09

中图分类号: S718.5

文献参数: 高伟, 陈爱平, 黄雍容, 等. 亚热带3种森林对土壤碳氮储量及酶活性的影响[J]. 水土保持通报, 2023, 43(1): 314-322. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.20230220.008; Gao Wei, Chen Aiping, Huang Yongrong, et al. Effects of three forest types on soil carbon and nitrogen storage and enzyme activity in subtropical China [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(1): 314-322.

Effects of Three Forest Types on Soil Carbon and Nitrogen Storage and Enzyme Activity in Subtropical China

Gao Wei^{1,2}, Chen Aiping³, Huang Yongrong², Huang Maogen⁴, Wu Xingsheng⁴, Wu Zhibin¹, Huang Shide²

(1. Institute of Forest Ecology and Carbon Sequestration Measurement,

Fujian Forestry Vocational and Technical Collage, Nanping, Fujian 353011, China;

2. Fujian Academy of Forestry, Fuzhou, Fujian 350012, China; 3. Guanzhuang State Owned Forest Farm,

Sanming, Fujian 365504, China; 4. Luobuyan Nature Reserve of Fujian Province, Sanming, Fujian 365504, China)

Abstract: [Objective] The effects of forest types on soil carbon and nitrogen contents and enzyme activity were analyzed in order to provide a scientific basis for the selection of tree species and forest management methods in the transformation of subtropical coniferous forests. [Methods] The study evaluated data from a subtropical evergreen broad-leaved forest (*Castanopsis carlesii* forest), an evergreen deciduous broad-leaved mixed forest (*Betula fujianensis* and *Phoebe bournei* mixed forest), and a coniferous forest (*Pinus massoniana* forest) at the same altitude and similar environmental conditions. [Results] ① The total soil organic carbon content in the *P. massoniana* forest was significantly greater than in the other two forest types, and the total

收稿日期: 2022-07-11

修回日期: 2022-07-28

资助项目: 福建省科技计划项目“不同林分类型对土壤供氮能力的影响研究”(2019R1009-6); 福建省南平市自然科学资助项目“闽江(延平段)沿岸马尾松低质低效林改造效益研究”(N2021J014); 福建林业职业技术学院博士科研启动基金

第一作者: 高伟(1985—), 男(汉族), 山东省青岛市人, 博士, 高级工程师, 主要从事森林生态系统碳氮循环研究。Email: gao01271@163.com。

通信作者: 黄石德(1982—), 男(汉族), 福建省仙游市人, 博士, 高级工程师, 主要从事森林生态系统碳氮循环研究。Email: hsd9876@126.com。

soil nitrogen content was not significantly different from that in the *B. fujianensis* and *P. bournei* mixed forest. However, both carbon and nitrogen contents were significantly greater than in the *C. carlesii* forest. The soil nitrogen and carbon reserves of the *P. massoniana* forest and the *B. fujianensis* and *P. bournei* mixed forest were significantly greater than the nitrogen and carbon reserves of the *C. carlesii* forest. The soil soluble organic carbon contents in the *P. massoniana* forest and the *B. fujianensis* and *P. bournei* mixed forest were significantly greater than in the *C. carlesii* forest. The soil soluble organic nitrogen content in the *P. massoniana* forest was significantly less than in the *C. carlesii* forest and the *B. fujianensis* and *P. bournei* mixed forest. The soil microbial biomass carbon and nitrogen contents in the *C. carlesii* forest and the *P. massoniana* forest were significantly greater than in the *B. fujianensis* and *P. bournei* mixed forest. There were no significant differences in the soil ammonium nitrogen contents among the three forest stands. However, the soil nitrate nitrogen content in the *B. fujianensis* and *P. bournei* mixed forest was significantly greater than in the other two forest types. ② The soil urease activity in the *C. carlesii* forest was significantly greater than in the *B. fujianensis* and *P. bournei* mixed forest. There were significant differences in soil invertase activities among the three stands, and the differences in activity followed the order of *P. massoniana* forest > *C. carlesii* forest > *B. fujianensis* and *P. bournei* mixed forest. The soil catalase activities in the *P. massoniana* forest and the *C. carlesii* forest were significantly greater than in the *B. fujianensis* and *P. bournei* mixed forest. There was no significant difference in soil phosphatase activity among the three forest stands. Soil β -glucosidase activity in the *P. massoniana* forest was significantly greater than in the *C. carlesii* forest and the *B. fujianensis* and *P. bournei* mixed forest. RDA analysis showed that the main factors affecting the change of soil enzyme activity in the three forests were total soil carbon (explanation rate of 59.5%), total nitrogen (explanation rate of 11.0%), and nitrate nitrogen (explanation rate of 14.6%). [Conclusion] The *P. massoniana* forest and the *B. fujianensis* and *P. bournei* mixed forest had greater soil carbon and nitrogen storage values than observed for the *C. carlesii* forest under the same disturbance background. The increased soil organic matter was conducive to increase soil enzyme activity.

Keywords: forest type; disturbance; soil carbon and nitrogen content; soluble organic matter; enzymatic activity

森林是陆地生态系统中最大的碳库,储存了陆地生态系统 45%左右的碳,在降低大气温室气体浓度、减缓全球气候变暖中,发挥了重要的独特作用^[1-2]。碳氮是构成森林生态系统组分、维持养分循环和影响森林生态功能发挥的两个重要元素,其循环过程及相互作用,对生态系统的生产力、固碳潜力和稳定性等都有关键性的影响^[3-4]。森林土壤碳氮库是土壤养分库的重要部分,其碳储量约占全球土壤碳储量的 39%,而氮储量则占森林生态系统氮储量的 90%以上^[5-6]。因此,森林土壤的碳氮储量与森林土壤肥力和全球碳循环均有着非常密切的关系^[7]。土壤酶对有机质的分解、周转和转化具有高度催化作用,它参与土壤的发生发育及土壤肥力形成和演化的全过程,其活性可指示微生物养分需求与土壤养分供给的关系,也可指示土壤生态系统的健康和可持续性以及森林经营对土壤质量变化的影响等^[8-9]。因此,准确评估森林土壤的碳氮储量和酶活性,对全面认识森林生态系统的碳汇能力和实施森林碳汇的科学管理具有重要意义。

森林更替作为亚热带一种重要的土地利用方式,

被认为是影响生态系统有机质循环的重要原因^[6,8,10]。通常,不同树种有不同的光合速率和养分利用策略,并向土壤输入不同数量和质量的凋落物和根系分泌物,以影响土壤的理化性质和碳氮循环过程^[11]。众多研究认为,阔叶林的土壤碳储量高于针叶林,采用针叶树种更替阔叶树种造林将导致土壤碳氮储量的降低^[12-13]。如有研究表明,将亚热带米楮(*Castanopsis carlesii*)天然林转换为米楮人促更新林和马尾松(*Pinus massoniana*)人工林之后,土壤的可溶性有机质和荧光发射光谱腐殖化指数等均不同程度的降低^[8],将天然阔叶林转换为杉木人工林后,土壤有机碳和全氮含量也显著降低^[6]。但也有研究认为,针叶林下的土壤碳含量会高于阔叶林^[14-16]。刘骏等^[10]研究发现,将天然林转化为闽楠(*Phoebe bournei*)、香樟(*Cinnamomum bodinieri*)和杉木(*Cunninghamia lanceolata*)人工林后,以杉木林的土壤碳氮储量最高。此外还有研究认为,与植被类型相比,经营过程的扰动对土壤碳氮库造成的影响可能更大,因为扰动会引起土壤养分的再分配,从而使土

壤养分和酶活性在不同经营方式下产生差异^[17]。如刘爽等^[9]研究发现,未受扰动的紫花苜蓿(*Medicago sativa*)和免耕地土壤有效氮、有机碳含量和酶活性显著高于翻耕地。由此可见,树种转换对土壤碳氮储量和酶活性的影响尚无定论,采用阔叶树种更新针叶林也未必增加土壤的碳氮含量,且森林更替后土壤理化性质的改变应归因于植被转化还是经营扰动也缺乏统一认识,忽视经营扰动的遗留效应可能导致研究结果的不确定性。

针对亚热带大面积种植针叶树种带来的地力衰退以及马尾松林普遍存在的病虫害问题,中国亚热带地区大力调整造林树种结构,提倡逐步采用阔叶树种替代马尾松林,但替代树种的合理性需要科学评价,森林类型转换对土壤碳氮过程的影响也应准确评估。虽然有研究认为阔叶树种造林能增加土壤的碳氮含量,但相关研究大多忽略了经营扰动的影响,从而在一定程度上限制了对森林转换后碳氮循环规律的理解。鉴于此,本研究选择福建省三明市萝卜岩自然保护区相同海拔高度和相近环境条件下的亚热带常绿阔叶林(米楮林)、常绿—落叶阔叶混交林〔闽桦(*Betula fujianensis*)—闽楠林〕和针叶林(马尾松林)3种森林类型为研究对象,将土壤碳氮储量和酶活性的变化准确归因于森林类型,使所选3种森林类型均为生长环境相似,扰动背景一致的天然林,比较相同扰动背景下3种森林类型的土壤理化性质和碳氮储量,探明林分类型对土壤活性碳氮库和酶活性的影响,以期揭示3种森林类型土壤酶活性与土壤理化性质的关系。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

研究区位于福建省三明市萝卜岩省级自然保护区(117°34′15″—117°36′00″E,26°25′45″—26°27′30″N),研究区具体概况详见文献^[18—20],研究期间的气温和降水量见图1。

1.2 样地选择

选择保护区内3种典型天然林分,分别为季风常

绿阔叶林:建群种为米楮(*Castanopsis carlesii*),林下植被主要为米楮、山血丹(*Ardisia lindleyana*)、多毛茜草树(*Aidia pycnantha*)、鹿角杜鹃(*Rhododendron latoucheae*)、狗脊蕨(*Woodwardia japonica*)、流苏藤(*Thysanopermum diffusum*)等。天然针叶林:优势树种为马尾松(*Pinus massoniana*),林下植被主要为乌饭(*Vaccinium bracteatum*)、青冈栎(*Cyclobalanopsis glauca*)、栲树(*Castanopsis fargesii*)、欐木(*Loropetalum chinense*)、芒萁(*Dicranopteris dichotoma*)、狗脊蕨(*Woodwardia japonica*)等。落叶—常绿阔叶混交林:优势树种为闽桦(*Betula fujianensis*)和闽楠(*Phoebe bournei*),林下植被主要为细枝柃(*Eurya loquaiiana*)、闽粤栲(*Castanopsis fissa*)、草珊瑚(*Sarcandra glabra*)、华南桂(*Cinnamomum austrosinense*)、瘤足蕨(*Plagiogyria adnata*)和菝葜(*Smilax china*)等^[18—20]。将3种林分按优势树种分别命名为米楮林、马尾松林和闽桦—闽楠林。2019年8月,3种天然林内分别设置4个20 m×20 m的固定样地,对样地中胸径>5 cm的乔木树种进行每木调查,记录胸径、树高、冠幅、枝下高等数据,3种林分的基本特征详见表1。

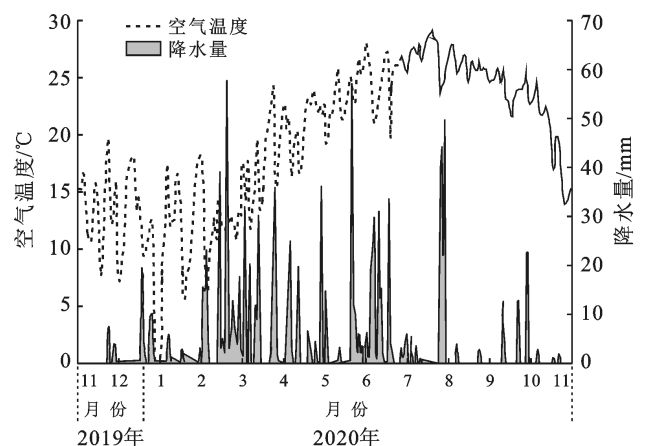


图1 2019年11月至2020年11月福建省三明市萝卜岩省级自然保护区的气温和降水量

Fig.1 Temperature and precipitation from November 2019 to November 2020 in Luoboyan Provincial Nature Reserve, Sanming City, Fujian Province

表1 三明市萝卜岩省级自然保护区3种天然林林分基本特征

Table 1 Basic characteristics of three natural forest types in Luoboyan Provincial Nature Reserve, Sanming City

森林类型	优势树种	林分密度/ (株·hm ⁻²)	林龄/ a	平均 胸径/cm	平均 树高/m	郁闭度	海拔/ m	坡向	坡度/ (°)
米楮林	米楮、鹿角杜鹃	1 700	>100	15.3 ^{ab}	10.3 ^a	0.9	600	S	45
马尾松林	马尾松、欐木	2 100	>100	13.3 ^b	11.6 ^a	0.7	600	S	35
闽桦—闽楠林	闽桦、闽楠	1 100	>100	17.4 ^a	12.5 ^a	0.9	600	NE	35

注:不同小写字母代表不同林分间差异显著($p < 0.05$),下同。

1.3 土壤样品采集和处理

2020 年 10 月,在 3 种天然林的 4 个固定样地中,分别沿对角线按照 10 点采样法分别采集表层土壤(0—10 cm),相同样地的土壤混合为一个样品,同时用环刀法(100 cm³)测定土壤容重。采集后的土壤装入密封袋带回实验室,过 2 mm 筛并去除可见根系后分为 2 份,1 份于 4 °C 冰箱保存,用于测定可溶性有机碳氮、土壤微生物量碳氮和酶活性等指标,另 1 份于通风处自然风干,用来测定土壤全碳、全氮及其他理化性质指标。

1.4 土壤基本理化性质测定

采用碳氮元素分析仪(Vario EL III, Elementar Analysensysteme GmbH, Hanau, Germany)测定土壤碳氮含量,采用如下公式计算土壤碳氮储量:

$$TX = \sum_{i=1}^n (X_i \times L_i \times BD_i \times 0.1) \quad (1)$$

式中:TX 为碳或氮的储量(t/hm²); X_i 为第 i 层土壤有机碳或氮的含量(g/kg); L_i 为第 i 土层厚度(cm); BD_i 为第 i 层土壤容重(g/cm³); 0.1 为单位转换系数。

本研究用烘干法测定含水率;土壤 pH 值以水土比 2.5 : 1 数字式酸度计测定。

1.5 土壤铵态氮和硝态氮浓度测定

土壤样品经氯化钾(KCl)溶液提取后用连续流动分析仪(AA3 Bran+Luebbe, Germany)测定 NO₃⁻, NH₄⁺。

1.6 土壤可溶性有机碳(DOC)、可溶性有机氮(DON)测定

土壤可溶性有机碳氮采用硫酸钾(K₂SO₄, 0.5 mol/L)浸提,浸提液中的可溶性有机碳(DOC)采用 TOC 分析仪(Vario TOC Cube, Elementar, Germany)测定,可溶性有机氮(DON)采用连续流动分析仪分别测定。

1.7 土壤微生物量碳(MBC)、微生物量氮(MBN)测定

土壤微生物量碳(MBC)和土壤微生物量氮(MBN)含量采用氯仿熏蒸—硫酸钾浸提法,浸提液中的有机碳氮浓度用岛津 TOC-LCPH 碳氮分析仪测定。

$$\text{土壤微生物量碳含量(mg/kg)} = E_C \times 2.2 \quad (2)$$

式中: E_C 为熏蒸土样有机碳含量与未熏蒸土样有机碳含量之差(mg/kg), 2.2 为校正系数^[21]。

$$\text{土壤微生物量氮含量(mg/kg)} = E_N \times 1.85 \quad (3)$$

式中: E_N 为熏蒸土样有机氮含量与未熏蒸土样有机氮含量之差(mg/kg), 1.85 为校正系数^[22]。

1.8 酶活性测定

采用苯酚钠—次氯酸钠比色法测定土壤脲酶活

性,其活性以 37 °C 下培养 24 h 后 1 g 土壤中生成 NH₄⁺-N 的毫克数表示;采用磷酸苯二钠比色法测定土壤碱性磷酸酶活性,其活性以 37 °C 下培养 24 h 后 1 g 土壤中生成酚的毫克数表示;采用高锰酸钾滴定法测定土壤过氧化氢酶活性,其活性以 20 min 内每 g 土壤分解的过氧化氢毫克数表示;采用 3, 5-二硝基水杨酸比色法测定土壤蔗糖酶活性,其活性以 37 °C 下培养 24 h 后 1 g 土壤中生成葡萄糖的毫克数表示^[23-24];采用对硝基酚比色法测定土壤 β -葡萄糖苷酶活性,其活性以 37 °C 下培养 1 h 后 5 g 土壤中生成对硝基酚的微克数表示^[25]。

1.9 数据统计分析

采用 PASW Statistics 18.0 软件进行数据处理和统计分析。以样地为统计单位,将所有数据剔除异常值之后进行统计分析,采用单因素方差分析和 Duncan's 法多重比较检验不同林分各个变量之间的差异,显著水平为 $\alpha = 0.05$ 。在 Canoco 5.0 中采用冗余分析(RDA)检验土壤酶活性与土壤理化性质的关系。在 Origin 8.5 中作图,误差线代表标准差。

2 结果与分析

2.1 土壤基本理化性质

由表 2 可知,马尾松林的土壤含水率显著高于米楮林,二者与闽桫—闽楠林均无显著差异。土壤 pH 值在 4.38~4.71 之间,闽桫—闽楠林显著小于其他林分。土壤容重为马尾松林最低,米楮林居中,闽桫—闽楠林最高。马尾松林的土壤总有机碳含量显著高于其他两种林分类型,而土壤全氮含量与闽桫—闽楠林无显著差异,但二者均显著高于米楮林。3 种林分的土壤碳氮比差异显著,表现为:马尾松林 > 米楮林 > 闽桫—闽楠林。

2.2 土壤碳氮储量

由图 2 可知,马尾松林和闽桫—闽楠林的土壤碳储量(图 2a)和氮储量(图 2b)均无显著差异,且均显著高于米楮林($p < 0.05$)。3 种林分中闽桫—闽楠林和马尾松林的土壤碳储量分别是米楮林的 1.29, 1.65 倍,而氮储量分别是米楮林的 1.85, 1.35 倍。

2.3 土壤活性碳氮库

由图 3a 可见,马尾松林和闽桫—闽楠林的土壤可溶性有机碳含量无显著差异,二者均显著高于米楮林,且以马尾松林为最高。马尾松林的土壤可溶性有机氮含量显著小于米楮林和闽桫—闽楠林,而米楮林和闽桫—闽楠林之间土壤可溶性有机氮含量无显著差异(图 3b)。3 种林分的土壤微生物量碳

氮含量均为米楮林最高,其次为马尾松林,闽桦—闽楠林最小,其中米楮林的土壤微生物量碳氮含量与(图 3c,3d)。

表 2 三明市罗卜岩省级自然保护区 3 种林分类型土壤的理化性质和有效养分(0—10 cm)

Table 2 Physical and chemical properties and available nutrients of soil (0—10 cm) of three forest types in Luoboyan Provincial Nature Reserve at Sanming City

林分类型	含水率/%	pH 值	容重	土壤总有机碳/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	土壤全氮/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	土壤碳氮比
马尾松林	19.03 ± 1.35^a	4.62 ± 0.05^a	0.8 ^b	32.4 ± 4.7^a	1.5 ± 0.19^a	21.59 ± 1.57^a
米楮林	15.43 ± 1.7^b	4.71 ± 0.15^a	0.97 ^{ab}	16.2 ± 5.6^b	0.91 ± 0.35^b	18.13 ± 0.91^b
闽桦—闽楠林	17.66 ± 1.6^{ab}	4.38 ± 0.12^b	1.14 ^a	17.8 ± 5.0^b	1.43 ± 0.39^a	12.43 ± 0.44^c

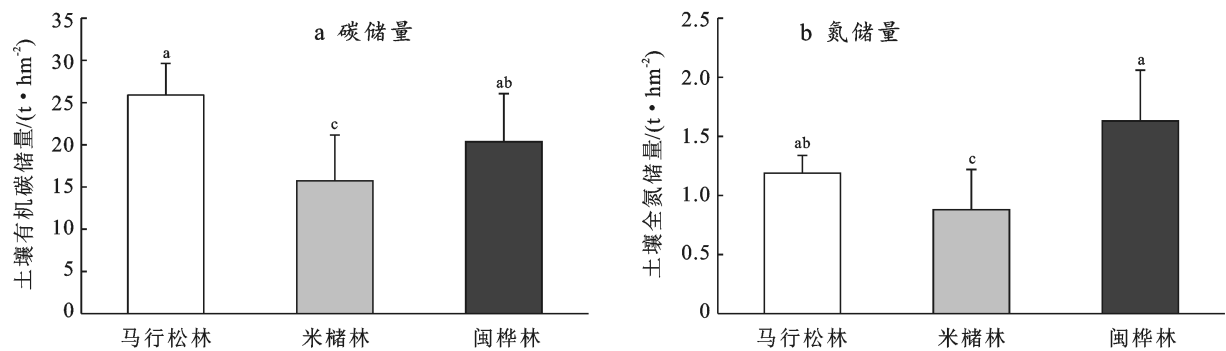


图 2 三明市罗卜岩省级自然保护区 3 种天然林土壤碳氮储量

Fig.2 Soil carbon and nitrogen reserves of three natural forests in Luobuyan Provincial Nature Reserve at Sanming City

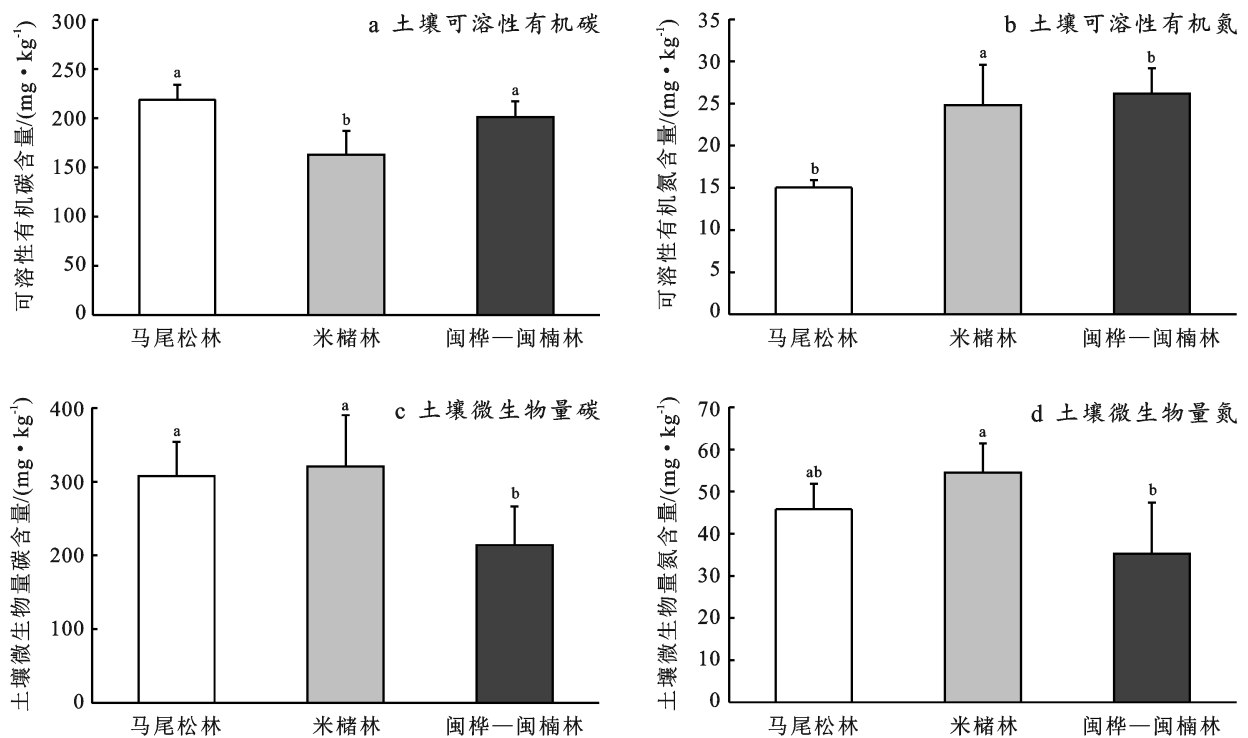


图 3 三明市罗卜岩省级自然保护区 3 种天然林土壤可溶性有机碳氮和微生物量碳氮含量

Fig.3 Content of soil soluble organic carbon and nitrogen and microbial biomass carbon and nitrogen of three natural forests in Luobuyan Provincial Nature Reserve at Sanming City

由图 4a 可见,3 种林分的土壤铵态氮含量无显著差异($p > 0.05$),而闽桦—闽楠林的土壤硝态氮含量显著高于其他两种林分,且分别为马尾松林的 4.2 倍和米楮林的 2.97 倍(图 4b)。

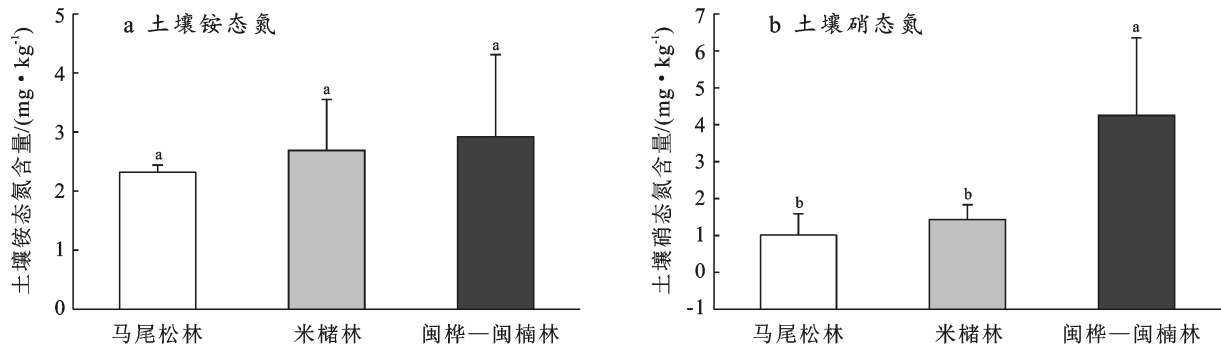


图 4 三明市萝卜岩省级自然保护区 3 种天然林土壤铵态氮和硝态氮含量

Fig.4 Soil ammonium nitrogen and nitrate nitrogen content of three natural forests in Luobuyan Provincial Nature Reserve at Sanming City

2.4 土壤酶活性

由表 3 可知,米楮林的土壤脲酶活性与马尾松林无差异,但显著大于闽栎-闽楠林,而马尾松林与闽栎-闽楠林无差异。

3 种林分的土壤蔗糖酶活性差异显著,具体表现

为:马尾松林>米楮林>闽栎-闽楠林。马尾松林和米楮林的土壤过氧化氢酶活性无显著差异,但均大于闽栎-闽楠林。3 种林分的土壤磷酸酶活性无显著差异。马尾松林的土壤 β-葡糖糖苷酶活性显著大于米楮林和闽栎-闽楠林。

表 3 三明市萝卜岩省级自然保护区 3 种林分类型的土壤酶活性

Table 3 Soil enzyme activities of three forest types in Luobuyan Provincial Nature Reserve at Sanming City

林分类型	脲酶/ (mg · g ⁻¹ · 24 h ⁻¹)	蔗糖酶/ (mg · g ⁻¹ · 24 h ⁻¹)	过氧化氢酶/ (mg · g ⁻¹ · 20 min ⁻¹)	磷酸酶/ (mg · g ⁻¹ · 24 h ⁻¹)	β-葡糖糖苷酶/ (μg · g ⁻¹ · h ⁻¹)
马尾松林	0.99 ± 0.15 ^{ab}	25.27 ± 2.91 ^a	1.61 ± 0.09 ^a	1.39 ± 0.24 ^a	56.81 ± 10.13 ^a
米楮林	1.08 ± 0.24 ^a	15.29 ± 4.11 ^b	1.58 ± 0.12 ^a	1.54 ± 0.20 ^a	23.39 ± 6.74 ^b
闽栎-闽楠林	0.73 ± 0.09 ^b	7.65 ± 2.29 ^c	1.15 ± 0.07 ^b	1.71 ± 0.32 ^a	25.61 ± 6.77 ^b

2.5 土壤酶活性与土壤化学性质的关系

由图 5 可知,3 种林分的土壤酶活性在第一轴上可以明显区分,第一轴可以解释土壤酶活性变异的 70.54%,主要代表了 β-葡糖糖苷酶、蔗糖酶和磷酸酶的变化,影响这 3 种酶的主要因素是土壤全碳和硝态氮含量。第二轴主要代表了脲酶的变化,解释了土壤酶活性总变异的 12.18%。土壤全碳、全氮和硝态氮分别解释了土壤酶活性变化的 59.5% (p = 0.00), 11.0% (p = 0.05) 和 14.6% (p = 0.05)。土壤全碳、全氮与 β-葡糖糖苷酶、蔗糖酶、过氧化氢酶呈正相关,与磷酸酶呈负相关,土壤硝态氮含量与磷酸酶呈正相关;β-葡糖糖苷酶、蔗糖酶、过氧化氢酶和脲酶之间呈正相关,但均与磷酸酶呈负相关。3 种林分根据土壤酶活性可以在排序图中明显区分,其中马尾松林分布在右上角,主要为第一象限,闽栎-闽楠林分布在左上角,主要为第二象限,米楮林则主要分布在下方的第三和第四象限。

系、微生物分解作用以及树种的影响,不同森林类型通过土壤矿化作用影响植物向土壤的养分释放,进而影响土壤碳氮循环,因此,可矿化底物的数量和质量是影响不同林分土壤碳氮储量的重要原因^[26-27]。本研究中,马尾松林的土壤总有机碳含量最高,全氮含量与闽栎-闽楠林无差异,但二者均显著高于米楮林。前期研究发现(尚未发表),3 种林分中马尾松林的年总凋落物量最高[9 815 kg/(hm² · a)],其次为闽栎-闽楠林[9 208 kg/(hm² · a)],米楮林最少[8 083 kg/(hm² · a)],总凋落物碳归还量为马尾松林[(4 970 kg/(hm² · a))] > 闽栎-闽楠林[4 458 kg/(hm² · a)] > 米楮林[3 804 kg/(hm² · a)],总凋落物氮归还量为闽栎-闽楠林[160 kg/(hm² · a)] > 马尾松林[128 kg/(hm² · a)] > 米楮林[113 kg/(hm² · a)]。因此马尾松林的高土壤碳含量可能与其高凋落物量和碳归还量有关,闽栎-闽楠林的高土壤氮储量则与其高凋落物氮归还量有关,而米楮林无论是总凋落物量还是碳氮归还量均最低,可能是导致其土壤碳氮储量低的原因。

3 讨论

3.1 森林类型对土壤碳氮含量的影响

土壤有机碳氮的含量受动植物残体、凋落物、根

长期以来,炼山被作为最经济、方便的营林措施,在中国南方林业生产中曾起到重要作用。但研究表

明,炼山会导致土壤有机质受损,土壤胶体团聚能力减弱,造成采伐迹地大量有机碳和养分移出迹地生态系统,其弊大于利^[28-30]。杨玉盛等^[30]研究发现,炼山时采伐剩余物的氮素损失率最大,福建杉木林、马尾松林和杂木林在炼山时的氮素挥发损失率分别占总量的 94.0%~97.4%,中国南方不同采伐迹地炼山后,表层土壤有机质减少 0.72%~34.52%,炼山初期马尾松采伐迹地表层土壤速效养分迅速增加,但 1 a 后均大幅度下降^[31]。鲍勇等^[8]研究发现将米楮天然林更替为马尾松人工林后,土壤总有机碳和全氮均降低,认为是马尾松凋落物中难分解化合物较多和造林初期炼山使林地有机质流失所致,但具体原因未明

确,且其研究中天然林和马尾松更新林的林龄差异也可能影响研究结果。

本研究中,在林龄和环境条件相近,干扰背景一致的情况下,马尾松林的土壤碳氮储量均高于米楮林,且与物种多样性较高的闽桦—闽楠林无显著差异,除可溶性有机氮外,马尾松林的土壤活性有机碳氮含量在 3 种林分中均处于较高水平。可见,森林更替研究中林地养分降低的原因更可能与更新初期造林扰动导致土壤养分快速流失有关而非树种,在排除扰动的影响后,与分解较快的米楮凋落物相比,分解较慢的马尾松凋落物可能更有利于为林地持续提供养分来源。

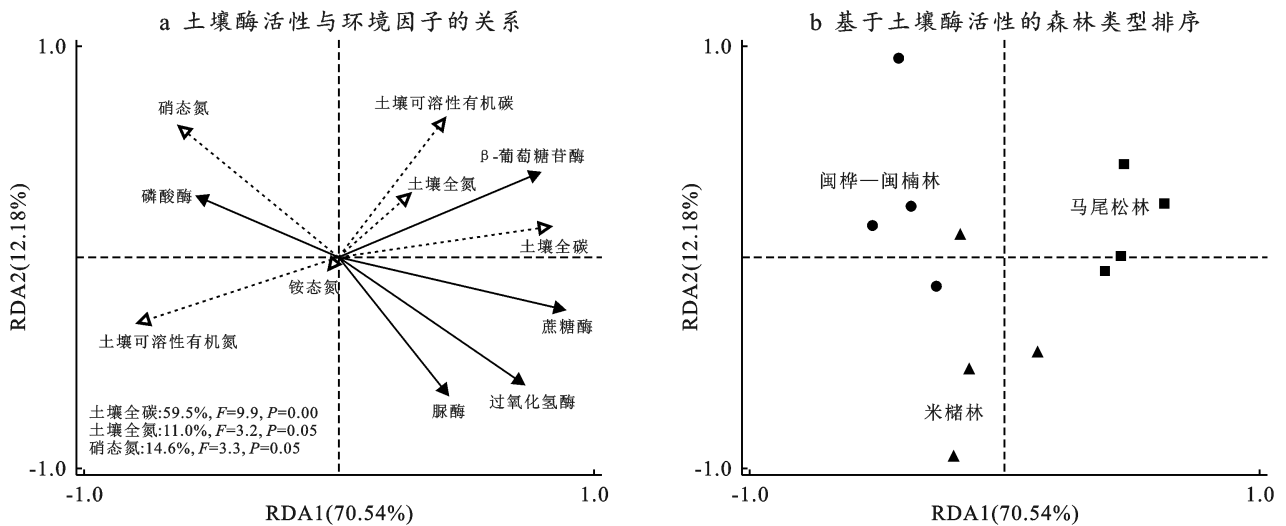


图 5 三明市罗卜岩省级自然保护区 3 种天然林土壤环境因子对土壤酶活性影响的冗余分析 (RDA)

Fig.5 Redundancy analysis (RDA) on the influence of soil environmental factors of three natural forests on soil enzyme activities in Luoboyan Provincial Nature Reserve at Sanming City

3.2 森林类型对土壤酶活性的影响及驱动因子

土壤酶作为森林土壤生态系统的组成部分,其活性高低很大程度上反映了物质循环的快慢,并一定程度上反映了森林土壤状况,包括有机质的分解能力和简单物质的再合成能力^[32]。影响土壤酶活性的因素主要为土壤中有有机质的输入量和土壤微生物的活性与数量^[33]。研究表明,土壤养分含量和酶活性多呈负相关,随着土壤养分含量的增加,微生物获取养分的难度降低,因此相关催化酶的活性也相应降低^[8]。已有研究认为,土壤脲酶活性与土壤氮素相关,其可将土壤中的有机化合物尿素分解转化为植物能利用的有效氮^[9]。本研究中,米楮林的土壤脲酶活性最高,而闽桦—闽楠林的最低,这是因为米楮林凋落物氮归还量和土壤氮储量较低,微生物需要分泌更多脲酶来获取氮素,而闽桦—闽楠林的凋落物氮归还量和土壤氮储量较高,微生物获取氮素的难度相对较低,

因此其脲酶活性也降低。

土壤蔗糖酶与土壤有机质代谢和土壤肥力有密切关系,研究认为,土壤蔗糖酶含量的提升,有利于土壤肥力的提高与平衡^[34-36]。谢洪宝等^[37]研究发现,土壤蔗糖酶活性可以表征土壤有机质含量,土壤有机质含量越高则蔗糖酶活性越高。郑兴蕊等^[32]研究认为,土壤较高的氮浓度可能会抑制植物根系活性,使土壤 pH 值降低,土壤硝化作用增强,土壤有效碳降低,从而抑制土壤蔗糖酶活性。本研究中,土壤蔗糖酶活性与土壤全碳正相关性最高,而与土壤硝态氮含量负相关性最高,3 种林分的土壤蔗糖酶活性差异显著,表现为马尾松林最高,其次为米楮林,闽桦—闽楠林最低,这可能与马尾松林的年凋落物量和碳归还量以及凋落物现存量均较高,可向土壤提供更多的碳有关,而闽桦—闽楠林的土壤 pH 值、微生物量碳氮均最低,而土壤硝态氮含量最高,说明其土壤较高的硝

化作用导致土壤微生物数量减少,降低了土壤蔗糖酶的活性。

土壤过氧化氢酶的作用是催化过氧化氢分解,减缓其对生物体的毒害作用。李冰等^[38]研究发现,土壤过氧化氢酶活性与土壤 pH 值呈极显著正相关,且与土壤中细菌多样性关系密切,细菌多样性越高,丰度越大,则土壤过氧化氢酶活性越高。本研究中,闽桦—闽楠林的土壤 pH 值和土壤微生物生物量均较低,其土壤过氧化氢酶活性也较低,而马尾松林和米楮林土壤 pH 值和土壤微生物生物量均较高,其土壤过氧化氢酶活性也较高,与已有研究一致。土壤 β -葡萄糖苷酶是微生物将纤维素分解为葡萄糖的限制酶,其活性与有机质含量呈显著正相关^[8]。本研究中,马尾松林土壤有机质含量最高,而米楮林和闽桦—闽楠林土壤有机质含量无显著差异,这可能是导致马尾松林土壤 β -葡萄糖苷酶显著高于米楮林和闽桦—闽楠林的主要原因。RDA 分析表明,土壤 β -葡萄糖苷酶与土壤全碳紧密正相关,与已有研究一致。

4 结论

选择福建省三明罗卜岩自然保护区相同海拔高度和相近环境条件下的亚热带常绿阔叶林(米楮林)、常绿—落叶阔叶混交林(闽桦—闽楠林)和针叶林(马尾松林)3 种森林类型为研究对象,研究了在生长环境相似,扰动背景一致的情况下,森林类型对土壤碳氮储量和酶活性的影响。

(1) 马尾松林的土壤总有机碳含量显著高于其他两种林分类型,土壤全氮含量与闽桦—闽楠林无显著差异,但二者均显著高于米楮林。马尾松林和闽桦—闽楠林的土壤氮储量和碳储量显著高于米楮林。

(2) 马尾松林和闽桦—闽楠林的土壤可溶性有机碳含量显著高于米楮林,且以马尾松林为最高。马尾松林的土壤可溶性有机氮含量显著小于米楮林和闽桦—闽楠林。米楮林和马尾松林的土壤微生物量碳氮含量均显著高于闽桦—闽楠林。3 种林分的土壤铵态氮含量无差异,而闽桦—闽楠林的土壤硝态氮含量显著高于其他两种林分。

(3) 米楮林的土壤脲酶活性显著高于闽桦—闽楠林。3 种林分的土壤蔗糖酶活性差异显著,表现为:马尾松林>米楮林>闽桦—闽楠林。马尾松林和米楮林的土壤过氧化氢酶活性均显著高于闽桦—闽楠林。3 种林分的土壤磷酸酶活性无显著差异。马尾松林的土壤 β -葡萄糖苷酶活性显著大于米楮林和闽桦—闽楠林。RDA 分析表明,影响 3 种林分土壤酶活性变化的因子主要为土壤全碳、全氮和硝态氮。

[参 考 文 献]

- [1] Houghton R A. Balancing the global carbon budget [J]. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 2007, 35:313-347.
- [2] 阮超越,刘小飞,吕茂奎,等.杉木人工林凋落物添加与去除对土壤碳氮及酶活性的影响[J].土壤学报,2020,57(4):954-962.
- [3] Gao Wei, Huang Shide, Huang Yongrong, et al. Effects of tree species on soil carbon and nitrogen stocks in a coastal sand dune of southern subtropical China [J]. International Journal of Plant Research, 2019, 32(2): 142-150.
- [4] Gao Wei, Huang Zhiqun, Ye Gongfu, et al. Effects of forest cover types and environmental factors on soil respiration dynamics in a coastal sand dune of subtropical China [J]. Journal of Forestry Research, 2018, 29(6): 1645-1655.
- [5] 王敬,李贤伟,荣丽,等.森林土壤氮贮量及氮素输入过程研究进展[J].世界林业研究,2008,21(1):14-19.
- [6] 李若南,楚海燕,李一清,等.森林转换对不同土层土壤碳氮含量及储量的影响[J].亚热带资源与环境学报,2019, 14(1):23-29.
- [7] 杨萌,李永夫,李永春,等.集约经营对毛竹林土壤碳氮库及酶活性的影响[J].应用生态学报,2016,27(11):3455-3462.
- [8] 鲍勇,高颖,曾晓敏,等.中亚热带 3 种典型森林土壤碳氮含量和酶活性的关系[J].植物生态学报,2018,42(4): 508-516.
- [9] 刘爽,王雅,刘兵兵,等.晋西北不同土地管理方式对土壤碳氮、酶活性及微生物的影响[J].生态学报,2019,39(12):4376-4389.
- [10] 刘骏,薛莉,田地,等.森林转化对乔木地上部分与土壤的碳氮储量及分配格局的影响[J].生态学杂志,2018, 37(10):3047-3052.
- [11] 高伟,林捷,黄石德,等.南亚热带海岸沙地不同树种叶片化学计量学季节动态研究[J].热带作物学报,2018, 39(11):2304-2312.
- [12] Wang Q K, Wang S L. Soil organic matter under different forest types in Southern China [J]. Geoderma, 2007,142(3/4):349-356.
- [13] Wang Hui, Liu Shirong, Mo Jiangming, et al. Soil organic carbon stock and chemical composition in four plantations of indigenous tree species in subtropical China [J]. Ecological Research, 2010, 25(6): 1071-1079.
- [14] Augusto L, Ranger J, Binkley D, et al. Impact of several common tree species of European temperate forests on soil fertility [J]. Annals of Forest Science, 2002,59(3):233-253.

- [15] Kasel S, Bennett L T. Land-use history, forest conversion, and soil organic carbon in pine plantations and native forests of south eastern Australia [J]. *Geoderma*, 2007,137(3/4):401-413.
- [16] Schulp C J E, Nabuurs G J, Verburg P H, et al. Effect of tree species on carbon stocks in forest floor and mineral soil and implications for soil carbon inventories [J]. *Forest Ecology and Management*, 2008,256(3):482-490.
- [17] Sever H, Makineci E. Soil organic carbon and nitrogen accumulation on coal mine spoils reclaimed with maritime pine (*Pinus pinaster* Aiton) in Agacli-Istanbul [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2009,155(1):273-280.
- [18] 黄茂根. 中亚热带三种森林类型凋落物现存量及碳氮储量[J]. *福建林业*, 2018(5):37-40.
- [19] 高伟, 黄石德, 林建丽, 等. 亚热带 3 种森林类型的群落特征与物种多样性的耦合关系[J]. *热带作物学报*, 2021,42(6):1756-1763.
- [20] 高伟, 黄雍容, 林建丽, 等. 濒危树种闽桦天然林优势种群种间相关性[J]. *林业科学*, 2021,57(10):1-14.
- [21] Joergensen R G. The fumigation-extraction method to estimate soil microbial biomass: Calibration of the k_{EC} value [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1996,28(1):25-31.
- [22] Joergensen R G, Mueller T. The fumigation-extraction method to estimate soil microbial biomass: Calibration of the k_{EN} value [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1996,28(1):33-37.
- [23] 李振高, 骆永明, 滕应. 土壤与环境微生物研究法[M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- [24] 林先贵. 土壤微生物研究原理与方法[M]. 北京: 高等教育出版社, 2010.
- [25] Eivazi F, Tabatabai M A. Glucosidases and galactosidases in soils [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1988,20(5):601-606.
- [26] Mueller K E, Eissenstat D M, Hobbie S E, et al. Tree species effects on coupled cycles of carbon, nitrogen, and acidity in mineral soils at a common garden experiment [J]. *Biogeochemistry*, 2012,111(1):601-614.
- [27] Sariyildiz T, Savaci G, Kravkaz I S. Effects of tree species, stand age and land-use change on soil carbon and nitrogen stock rates in northwestern Turkey [J]. *iForest-Biogeosciences and Forestry*, 2016,9(1):165-170.
- [28] 林思祖, 林开敏, 吴擢溪. 炼山对杉木人工幼林养分流失影响的定量研究[J]. *自然资源学报*, 1997,12(3):243-249.
- [29] 马祥庆, 何智英, 俞新妥. 不同林地清理方式对杉木人工林地力的影响[J]. *林业科学*, 1995,31(6):485-490.
- [30] 杨玉盛, 何宗明, 马祥庆, 等. 论炼山对杉木人工林生态系统影响的利弊及对策[J]. *自然资源学报*, 1997,12(2):153-159.
- [31] 杨玉盛, 俞新妥, 何智英, 等. II 炼山初期土壤肥力变化初步研究[J]. *福建林学院学报*, 1989,9(3):248-255.
- [32] 郑兴蕊, 王克勤, 宋娅丽, 等. 滇中亚高山不同森林土壤酶活性对模拟 N 沉降的响应[J]. *林业科学研究*, 2021,34(2):50-62.
- [33] 王兵, 刘国彬, 薛蕊. 退耕地养分和微生物量对土壤酶活性的影响[J]. *中国环境科学*, 2010,30(10):1375-1382.
- [34] 于镇华, 李彦生, 金剑, 等. 不同施肥措施对农田黑土剖面土壤酶活性特征的影响[J]. *土壤与作物*, 2018,7(3):276-283.
- [35] 孙文颖, 马维伟, 李广, 等. 尕斯库勒湖湿地植被退化过程中土壤蔗糖酶和淀粉酶活性的动态特征[J]. *草地学报*, 2019,27(1):88-96.
- [36] 邓欧平, 李翰, 熊雷, 等. 秸秆、猪粪混施对麦田根际土壤过氧化氢酶与蔗糖酶活性的影响[J]. *土壤*, 2018,50(1):86-92.
- [37] 谢洪宝, 于贺, 陈一民, 等. 秸秆深埋对不同氮肥水平土壤蔗糖酶活性的影响[J]. *中国农学通报*, 2021,37(24):79-83.
- [38] 李冰, 李玉双, 陈琳, 等. 沈北新区不同土地利用类型土壤过氧化氢酶活性特征及其影响因素分析[J]. *沈阳大学学报(自然科学版)*, 2019,31(6):465-473.