

引用格式: 谢娟, 侯婷, 王龙飞, 等. 薄壳山核桃青皮还田分解特征及其对土壤性质的影响[J]. 浙江农林大学学报, 2025, 42(6): 1210–1220. XIE Juan, HOU Ting, WANG Longfei, et al. Decomposition characteristics of *Carya illinoensis* green husk and its effect on soil properties[J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2025, 42(6): 1210–1220.

薄壳山核桃青皮还田分解特征及其对土壤性质的影响

谢娟, 侯婷, 王龙飞, 倪金燕, 王申博, 袁军

(中南林业科技大学林学院 经济林培育与保护教育部重点实验室, 湖南长沙 410004)

摘要: 【目的】探究薄壳山核桃 *Carya illinoensis* 青皮还田的分解过程、养分释放规律及其对土壤代谢物质的影响, 为薄壳山核桃青皮的充分合理利用提供科学参考。【方法】在中南林业科技大学春晖山选取 1 块平整的试验样地, 以薄壳山核桃‘金华’‘Jinhua’青皮为试验材料, 设置对照(青皮不还田)、地表覆盖和埋深(10 cm)3 种处理, 采用尼龙网袋法进行为期 2 a 青皮不同还田深度的分解特征研究, 隔 3 个月对分解袋中剩余青皮的质量和养分质量分数及土壤理化性质和代谢物质进行测定分析。【结果】①在 2 a 分解期内, 埋深处理的青皮分解速率始终快于地表覆盖, 2 种处理下的薄壳山核桃青皮总有机碳和磷表现为富集-淋溶模式, 氮表现为富集模式, 钾表现为净释放模式。②在 2 a 分解期内, 对照处理的土壤全氮质量分数高于地表覆盖和埋深处理, 埋深处理的土壤碱解氮质量分数和速效钾质量分数均高于地表覆盖; 地表覆盖处理的土壤细菌数量大于埋深处理, 地表覆盖处理的真菌和放线菌数量均小于埋深处理。③同一时期地表覆盖和埋深处理之间的土壤代谢物质差异较小, 不同分解时期差异较大。将青皮分解第 12 个月与第 9 个月的土样进行相比, 青皮分解第 18 个月与第 12 个月的土样进行相比, 均筛选出 54 种差异代谢物, 主要富集在嘧啶代谢、泛醌和其他萜类醌生物合成、类固醇激素生物合成、ABC 转运蛋白等 22 条代谢通路中。【结论】薄壳山核桃青皮在分解第 9 个月时养分流失较少, 且土壤微生物数量最多, 产生利于植物生长的土壤代谢物质, 是对土壤肥力产生积极影响的最佳时期。图 8 表 3 参 28

关键词: 薄壳山核桃青皮; 还田; 分解规律; 养分释放; 代谢物

中图分类号: S156.2 文献标志码: A 文章编号: 2095-0756(2025)06-1210-11

Decomposition characteristics of *Carya illinoensis* green husk and its effect on soil properties

XIE Juan, HOU Ting, WANG Longfei, NI Jinyan, WANG Shuaibo, YUAN Jun

(Key Laboratory of Economic Forest Cultivation and Protection of Ministry of Education, College of Forestry, Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, Hunan, China)

Abstract: [Objective] The objective is to study the decomposition, nutrient release of *Carya illinoensis* green husk at different returning depths, and its effects on soil metabolites, so as to provide scientific reference for its full and rational utilization. [Method] A flat test plot was selected in Chunhui Mountain, Central South University of Forestry and Technology. The green husk of *C. illinoensis* ‘Jinhua’ was used as the test material. 3 treatments were set up: control (no return of green husk to the field), ground cover and buried depth (10 cm). The decomposition characteristics of green husk at different returning depths were studied for 2 years by nylon net bag method. The quality and nutrient quality of the remaining green husk in the decomposition bag, as well as physical and chemical properties of soil and metabolites were measured and analyzed every 3 months. [Result] (1) During the 2-year decomposition period, the decomposition rate of green husk from *C. illinoensis*

收稿日期: 2025-01-06; 修回日期: 2025-03-27

基金项目: 湖南省林业科技创新计划(2023NK1020)

作者简介: 谢娟(ORCID: 0009-0002-3591-8463), 从事经济林栽培与利用研究。E-mail: 2459701427@qq.com。通信

作者: 袁军(ORCID: 0000-0003-2925-3661), 教授, 博士, 从事经济林栽培生理与土壤肥料学研究。

E-mail: yuanjun@csuft.edu.cn

under buried depth treatment was faster than that under ground cover. Under both treatments, the total organic carbon and phosphorus exhibited an enrichment and leaching pattern. Nitrogen showed an enrichment mode, while potassium showed a net release mode. (2) During the 2-year decomposition period, soil total nitrogen content under control treatment was higher than that under ground cover and buried depth treatments. The content of alkali-hydrolyzable nitrogen and available potassium in soil under buried depth treatment was higher than that under ground cover. The number of bacteria in soil under ground cover was greater than that under buried depth treatment, while the number of fungi and actinomycetes in soil under ground cover was lower than that under buried depth treatment. (3) The differences in soil metabolites between ground cover and buried depth treatments during the same period were small, while there were significant differences at different decomposition stages. When soil samples from the 12th month of green husk decomposition were compared with those from the 9th month, and soil samples from the 18th month were compared with those from the 12th month, 54 differential metabolites were identified in both comparisons, mainly concentrated in 22 metabolic pathways, including pyrimidine metabolism, ubiquinone and other terpenoid-quinone biosynthesis, steroid hormone biosynthesis, and ABC transporters. [Conclusion] In the 9th month of decomposition, the nutrient loss of *C. illinoensis* green husk is less, the number of soil microorganisms is the highest, and the soil metabolic substances conducive to plant growth are produced. It is the best period to have a positive impact on soil fertility. [Ch, 8 fig. 3 tab. 28 ref.]

Key words: *Carya illinoensis* green husk; returning to farm land; decomposition law; nutrient release; metabolite

农林剩余物是指在农林业生产及其产品的加工及利用过程中产生的废弃物与残留物^[1]。合理有效地开发利用农林剩余物可以实现资源再利用, 缓解日益凸显的能源和环境问题。农林剩余物在缺氧条件下通过高温热解的方式可以制备为生物质炭^[2], 稻秆、畜禽类粪便等农林剩余物可以应用于修复石油污染的土壤^[3], 稻秆地表覆盖和掩埋可以直接影响土壤水分运输, 显著降低表层土壤含盐量, 而稻秆掺入比覆盖或掩埋能更有效地改善沿海盐碱地^[4], 深松稻秆还田有利于改善灰钙土土壤物理性状, 增加土壤肥力, 提高土壤微生物量和酶活性^[5]。橡胶 *Hevea brasiliensis* 树凋落叶埋深处理较地表覆盖加快了物质分解和养分元素释放速率^[6], 可能是由于不同土壤深度土壤微生物活性、水分、径流强度等差异导致的。此外, 代谢组学是对基因组学和蛋白质组学的拓展, 可以直观准确地反映生物体的生理过程和现象。王玲等^[7]利用代谢组学对玉米 *Zea mays* 根际土壤研究表明: 根际土壤的差异代谢物质与微生物群落具有显著的相关性。

薄壳山核桃 *Carya illinoensis* 又名美国山核桃、碧根果和长寿果等, 属胡桃科 Juglandaceae 山核桃属 *Carya* 落叶高大乔木^[8], 是世界上重要的干果树种之一。随着中国市场需求量不断增加, 产业规模也日益扩大。潘浪波等^[9]利用 MaxEnt 模型预测: 随着未来气温的升高, 薄壳山核桃的潜在高适生区将扩张, 生产中产生的青皮也将不断增加。薄壳山核桃青皮可以制备山核桃壳基活性炭^[10], 应用于农作物病虫害防治^[11], 提取医疗活性成分^[12]。然而, 生产中绝大部分山核桃青皮仍是通过焚烧进行处理, 不仅造成环境的巨大压力, 对人体的健康也产生一定程度的威胁。目前, 针对薄壳山核桃的研究集中在其生长发育规律的初步解析, 对薄壳山核桃青皮分解规律的研究却鲜见报道^[13]。

如何有效地实现薄壳山核桃青皮的资源化利用, 已经成为当前亟待解决的重要现实问题。本研究设置薄壳山核桃青皮不还田、青皮覆盖地表和青皮埋深 3 种处理, 探讨薄壳山核桃青皮分解过程及养分释放规律, 并分析其对土壤肥力及代谢产物的影响, 从而探寻薄壳山核桃青皮还田的最佳方式, 以期为合理再利用薄壳山核桃青皮提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验地与材料

试验样地位于湖南省长沙市天心区中南林业科技大学春晖山 (28°8'N, 112°59'E)。所选区域地势平

缓，平均海拔为110.0 m。光照充足，降雨丰沛，年平均气温为17.2 °C，年平均日照时数为1 726.0 h，年平均降水量为1 422.4 mm，无霜期为279.3 d，属于典型的亚热带湿润季风气候。土壤类型为第四纪酸性红壤，自然植被以亚热带常绿阔叶林为主。

试验材料为薄壳山核桃‘金华’‘Jinhua’青皮。2020年10月下旬于云南省林业科学院漾濞核桃研究院采集果实，采集后对其进行剥壳、晾晒及粉碎处理，然后过20目网筛，每袋称取30.0 g放入11 cm×17 cm，孔径0.178 mm的尼龙网分解袋中。

1.2 试验设计

试验于2020年12月开始。在春晖山选取1块较为平整的试验地，向下挖掘30 cm，将72根内径为20 cm，高度为30 cm的聚氯乙烯管随机放置于试验地，每根聚氯乙烯管之间间隔20 cm，回填原土于管中，将处理过的青皮分装在48个尼龙网袋中。试验设置3个处理。①地表覆盖：将24个网袋置于聚氯乙烯管土柱的上层，用网纱遮盖，橡皮筋固定；②埋深处理：将24个网袋置于聚氯乙烯管中部10 cm；③对照处理：未放置网袋的聚氯乙烯管。

1.3 样品采集与测定

1.3.1 样品采集 2021年3月开始第1次采样，此后隔3个月采集1次，即试验开始后分别于第3、6、9、12、15、18、21、24个月共8次进行取样。取样时将整个分解管完整取出，对照处理和地表覆盖处理取整个聚氯乙烯分解管内的土壤，埋深处理取分解管内尼龙网袋以下的土壤，每次每处理各取3个重复。所有样品均分为2份，一份用于土壤肥力指标等测定，另一份用于土壤代谢组测定，保存于-80 °C超低温冰箱。

1.3.2 青皮干物质残留率测定 将取回的分解网袋用去离子水反复清洗，仔细去除网袋内植物根系与土壤等其他物质，将内部的青皮全部分离下来装于纸质信封袋中置于60 °C烘箱中烘干至恒量，用精度为万分之一的分析天平称量网袋中剩余青皮的质量，计算青皮干物质残留率。

1.3.3 土壤肥力指标、微生物数量测定 采用土壤农化分析方法^[14]测定以下土壤指标：土壤全氮质量分数采用全自动间断分析仪测定；土壤碱解氮质量分数采用碱解扩散法测定；土壤有效磷质量分数采用盐酸-氟化铵浸提-钼锑抗比色法测定；土壤速效钾采用乙酸铵浸提-火焰光度法测定。

根据稀释平板涂布法^[15]，使用营养肉汤培养基、高斯氏合成1号琼脂培养基和孟加拉红培养基分别测定土壤中细菌、放线菌和真菌的数量。

1.3.4 土壤代谢物质测定 准确称取(1 000±5) mg土壤样品于2 mL离心管中，加入1 000 μL的代谢产物提取液(甲醇:水=4:1，体积比)，使用冷冻组织研磨仪研磨6 min(-10 °C, 50 Hz)，低温超声提取30 min(5 °C, 40 kHz)，将样品静置于-20 °C，30 min，离心15 min(13 000 g, 4 °C)，移取上清液至带内插管的进样小瓶中上机分析。每个样本分别移取20 μL上清液进行混合，作为质控样本。2 μL样本经HSS T3色谱柱分离后进入质谱检测。所得到的数据利用代谢组学处理软件Progenesis QI(Waters Corporation, Milford)进行处理，同时将MS、MSMS质谱信息与代谢公共数据库HMDB(<http://www.hmdb.ca/>)和Metlin(<https://metlin.scripps.edu/>)以及美吉自建库进行鉴定，得到代谢物信息。

1.4 数据处理

采用Excel 2016记录数据，采用SPSS 26进行统计分析。采用one-way ANOVA单因素方差分析法分析不同处理下土壤肥力因子是否存在显著差异。采用多元统计分析，使用美吉生物一站式科研服务平台进行主成分分析(PCA)、正交偏最小二乘法-判别分析(OPLS-DA)，根据OPLS-DA模型的变量重要性投影(VIP)和差异倍数值(F_C)以及单变量t检验P值筛选差异代谢物，绘制火山图和代谢通路气泡图，采用Pearson相关性热图分析土壤养分与土壤代谢物相对丰度的相关关系。

2 结果与分析

2.1 薄壳山核桃青皮分解规律

2.1.1 干物质残留率及分解速率 分解期内青皮干物质残留率随分解时间的增加呈现逐渐下降趋势(表1)，且地表覆盖处理的青皮干物质残留率始终大于埋深处理。地表覆盖处理的青皮在第12~15个月时分解速率最快，埋深处理的青皮在第6~9个月时分解速率最快。在分解9和18个月时，2个处理产生显著差

表1 不同土壤深度处理薄壳山核桃青皮干物质残留率变化

Table 1 Changes in dry matter residue rate of *C. illinoensis* green husk under different soil depth treatments

分解时间/月	地表覆盖干物质 残留率/%	埋深处理干物质 残留率/%	显著性	分解时间/月	地表覆盖干物质 残留率/%	埋深处理干物质 残留率/%	显著性
3	98.42±5.14	88.03±4.28		15	69.58±3.57	64.36±3.62	
6	91.64±5.07	82.77±4.31		18	67.36±3.42	55.08±2.95	*
9	88.61±4.53	71.32±3.57	*	21	54.84±2.89	46.21±2.27	
12	87.09±4.22	66.25±2.88	**	24	53.78±2.64	45.37±2.51	

说明: *表示处理间存在显著差异($P<0.05$), **表示处理存在极显著差异($P<0.01$)。异($P<0.05$), 在分解12个月时, 2个处理产生极显著差异($P<0.01$)。利用Olson负指数衰减模型对青皮干物质分解动态进行拟合, 决定系数(R^2)均达显著水平($P<0.05$), 可以较好地表示青皮分解速率。由表2可知: 埋深处理的青皮分解速率显著高于地表覆盖处理, 2个处理到达周转时期所需时间为到达半衰期的4.3倍, 体现了薄壳山核桃青皮分解前期快后期慢的特点。

表2 不同土壤深度处理薄壳山核桃青皮分解特征参数

Table 2 Characteristic parameters of *C. illinoensis* green husk decomposition under different soil depth treatments

处理	回归方程	决定系数(R^2)	分解系数(k)	半分解时间/月	分解95%所需时间/月
地表覆盖	$y=e^{-0.0239x}$	0.88	0.0239	29.00	125.30
埋深处理	$y=e^{-0.0332x}$	0.98	0.0332	20.85	90.12

说明: x 表示分解时间(月), y 表示青皮干物质月残留率(%)。

2.1.2 薄壳山核桃青皮养分质量分数变化特征 由图1可知: 在整个分解期内, 2个处理青皮的有机碳质量分数整体上均表现为富集-淋溶模式, 变化规律较为一致, 且整个分解时期埋深处理的青皮有机碳质量分数明显高于地表覆盖。在分解3、9、18、24个月时青皮有机碳质量分数进行富集, 在分解9个月时地表覆盖和深埋处理的青皮有机碳质量分数均达到最大值, 分别为70.17和76.49 g·kg⁻¹, 在分解

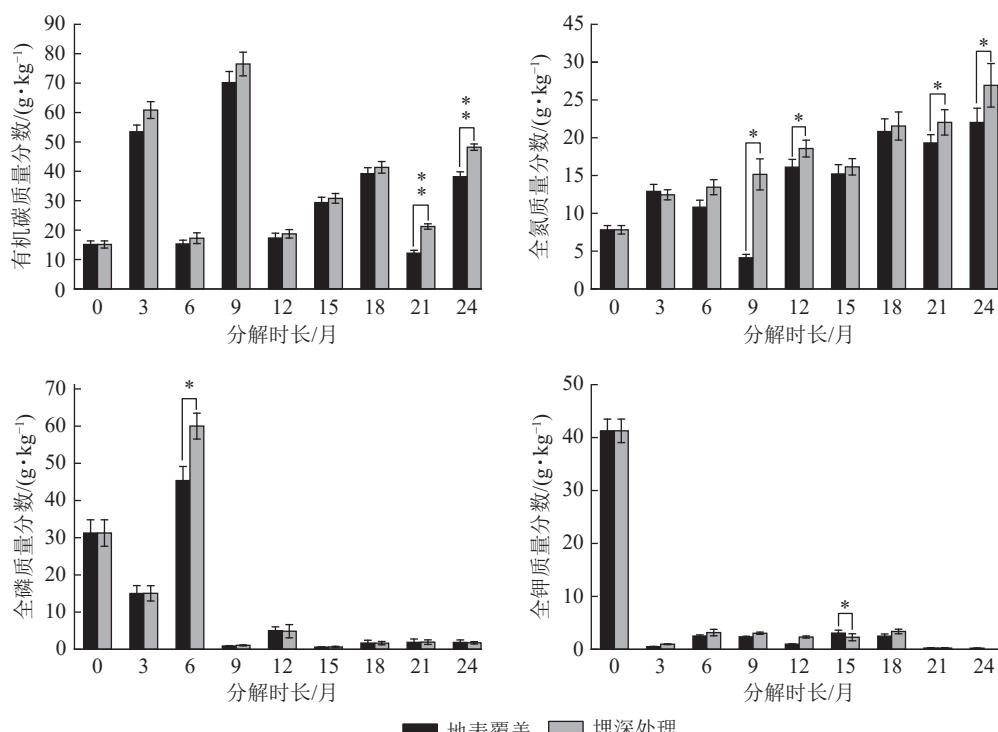
* 表示处理间存在显著差异($P<0.05$), ** 表示处理存在极显著差异($P<0.01$)。

图1 不同土壤深度处理薄壳山核桃青皮分解过程中青皮的养分变化

Figure 1 Changes of husk nutrient contents during decomposition of *C. illinoensis* green husk under different soil depth treatments

21和24个月时2个处理青皮的有机碳质量分数产生极显著差异($P<0.01$)。

青皮的全氮质量分数整体呈上升趋势。2个处理青皮的全氮质量分数在分解9、12、21、24个月时存在显著差异($P<0.05$)。分解前3个月,埋深处理青皮的全氮质量分数低于地表覆盖,其他分解时期均表现为埋深处理高于地表覆盖。在分解9个月时差距最大,相差 $4.16\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。分解24个月时地表覆盖和深埋处理青皮的全氮质量分数均达到最高值,分别为 22.02 和 $26.93\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,分解9个月时达到最低值,地表覆盖的全氮质量分数为 $4.12\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。2个处理青皮的磷质量分数整体变化规律一致,表现为富集-释放模式。在分解6个月时地表覆盖和深埋处理青皮的磷质量分数出现显著差异($P<0.05$),相差 $14.64\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,且均达到最高值,分别为 45.37 和 $60.01\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。2个处理青皮的磷质量分数在3~6个月发生富集,其余时间都表现为释放状态。在整个分解过程中,2个处理青皮的全钾质量分数表现为净释放模式,且明显低于其各自的初始值。2个处理青皮的全钾质量分数变化规律一致且趋于相似水平,在分解前3个月均急剧下降,之后波动幅度较小。在分解15个月时,2个处理青皮的全钾质量分数产生显著差异($P<0.05$),在分解24个月时地表覆盖和深埋处理的全钾质量分数分别为 0.21 和 $0\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

2.2 土壤养分质量分数和微生物数量变化规律

2.2.1 土壤养分质量分数 由图2可知:在分解第1年和第2年,不同处理的土壤全氮质量分数均表现为先上升后下降的趋势。在青皮分解15个月内,土壤全氮质量分数从大到小始终表现为对照、地表覆盖、埋深处理。在分解第18个月时不同处理下的土壤全氮质量分数均达最大值,分解到第21个月时不同处理土壤全氮质量分数差异显著($P<0.05$),分解到第24个月时不同处理土壤全氮质量分数均达分解期最低值。

在分解同一时期内,3个处理的土壤碱解氮不存在显著差异。埋深处理的土壤碱解氮质量分数在分解第12个月时达到最高值,地表覆盖处理的土壤碱解氮质量分数在分解第3个月时达到最高值,在分解第6个月和第15个月时不同处理的土壤碱解氮质量分数明显低于其他分解时期。在分解第15个月时3个处理的土壤碱解氮质量分数均最低。

在整个分解期内,各处理分解第2年的土壤有效磷质量分数均显著低于第1年。地表覆盖和埋深处

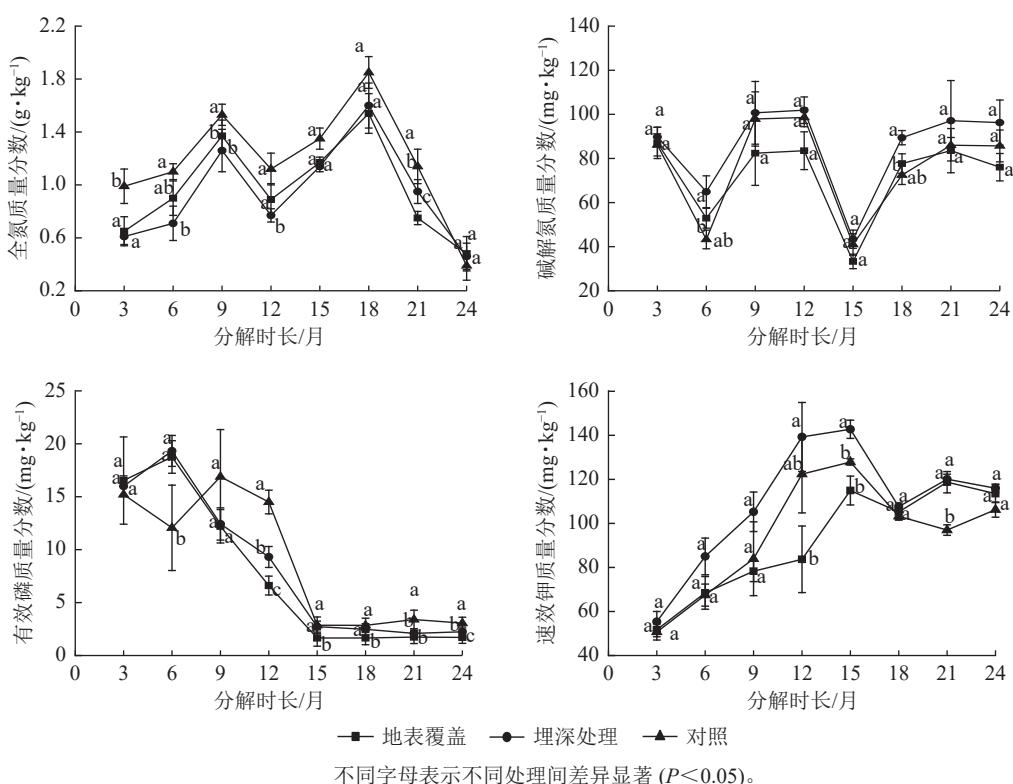


图2 不同土壤深度处理薄壳山核桃青皮分解过程中土壤养分变化

Figure 2 Changes of soil nutrient contents during decomposition of *C. illinoensis* green husk under different soil depth treatments

理的土壤有效磷质量分数均在分解第 6 个月时最高, 分别为 18.76 和 $19.33 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。在分解 9 个月之后, 土壤有效磷质量分数从大到小依次为对照、埋深处理、地表覆盖。在分解 15 个月后各个处理的土壤有效磷质量分数均明显降低, 在分解第 12 个月和第 24 个月时, 各处理间存在显著差异 ($P < 0.05$)。

在整个分解期内, 不同处理土壤速效钾质量分数始终表现为埋深处理最高。在分解第 12 个月和 15 个月时, 速效钾质量分数从大到小依次表现为埋深处理、对照、地表覆盖。分解 12 个月时地表覆盖和埋深处理的土壤速效钾质量分数存在显著差异 ($P < 0.05$)。在分解 15 个月内, 各处理的土壤速效钾随分解时间增加不断增多, 且在分解到第 15 个月时达最大值, 对照、地表覆盖和埋深处理的土壤速效钾质量分数分别为 127.90 、 114.94 和 $142.76 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

2.2.2 土壤微生物数量 由图 3 可知: 在整个分解期内, 地表覆盖的土壤细菌数量始终大于埋深处理, 且埋深处理下的土壤细菌数量的变化幅度较为平稳。分解第 1 年与分解第 2 年不同处理的土壤细菌数均表现为先上升后下降的趋势, 在分解 6、9、12、18 个月时差异极显著 ($P < 0.01$)。地表覆盖土壤细菌数量为 1.10×10^6 ~ $4.50 \times 10^6 \text{ CFU} \cdot \text{g}^{-1}$, 埋深处理土壤细菌数量为 0.25×10^6 ~ $1.30 \times 10^6 \text{ CFU} \cdot \text{g}^{-1}$ 。埋深处理的土壤真菌数量始终大于地表覆盖, 其变化趋势也大致相同, 分解第 1 年表现为先上升后下降的趋势, 分解第 2 年表现为先下降后上升的趋势, 且土壤真菌数量整体小于第 1 年。地表覆盖和深埋处理的土壤真菌数量在分解 3 个月时差异极显著 ($P < 0.01$), 且均在分解第 6 个月达到最高值, 分别为 1.90×10^6 和 $3.20 \times 10^6 \text{ CFU} \cdot \text{g}^{-1}$ 。

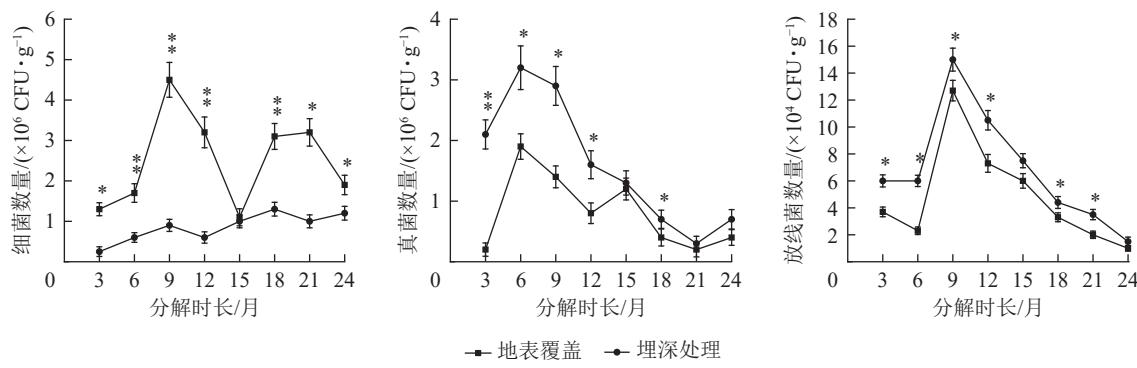


图 3 不同土壤深度处理薄壳山核桃青皮分解过程中土壤微生物的数量变化

Figure 3 Changes in soil microbial during the decomposition of *C. illinoensis* green husk under different soil depth treatments

2 个处理的土壤放线菌数量变化趋势均表现为先上升后逐渐下降, 在分解 3、6、9、12、18、21 个月时, 2 个处理土壤放线菌数量差异显著 ($P < 0.05$), 且埋深处理土壤放线菌数量大于地表覆盖。在分解第 9 个月时, 地表覆盖和深埋处理的土壤放线菌数量最多, 分别为 12.70×10^4 和 $15.00 \times 10^4 \text{ CFU} \cdot \text{g}^{-1}$ 。在分解第 24 个月时, 地表覆盖和深埋处理的土壤放线菌数量均达到最低值, 分别为 1.00×10^4 和 $1.50 \times 10^4 \text{ CFU} \cdot \text{g}^{-1}$ 。

2.3 代谢物鉴定及组学分析

2.3.1 土壤样品主成分分析及正交偏最小二乘判别分析 应用 LC-MS 非靶向代谢组学技术, 根据薄壳山核桃青皮干物质残留率的显著程度确定了 3 个具有代表性的关键分解阶段, 即分解第 9、12 和 18 个月时, 对正离子模式下获得的 3 个时期的土壤样本进行主成分分析。第 1 主成分 (PC1) 的贡献值为 67.50%, 第 2 主成分 (PC2) 的贡献值为 15.70%, 所有样本均置于 95% 的置信区间内 (图 4)。主成分分析结果表明: 薄壳山核桃青皮在不同分解时期的代谢物质差异较大, 同一时期不同处理之间的代谢物质差异较小。

建立薄壳山核桃青皮分解 9、12 和 18 个月 3 个时期土壤样本分组的 OPLS-DA 模型。由图 5 可知: 青皮分解 12 个月和青皮分解 9 个月、青皮分解 18 个月和青皮分解 12 个月之间差异指数分别为 61.1% 和 75.9%, 且 2 组样本中样本间均没有重叠, 说明该模型有较好的区分效果。由表 3 的模型评价参数可知: 模型对 X 矩阵的累积解释率 [$R^2X(\text{cum})$] 均大于 0.5, 模型对 Y 矩阵的累积解释率 [$R^2Y(\text{cum})$] 和模型的累积预测能力 [$Q^2(\text{cum})$] 均接近 1, 说明建立的模型稳定可靠。

2.3.2 差异代谢物筛选 依据 OPLS-DA 分析后, 以差异倍数值 (F_C) >2 或 $F_C<0.5$, $P<0.05$, 变量重要性投影值 (VIP) >1 相结合, 筛选出差异显著的代谢物, 将数据进行可视化处理绘制火山图 (图 6)。与青皮分解 9 个月相比, 分解 12 个月时土壤中筛选出 54 种差异代谢物, 显著上调的差异代谢物为 33 种, 显著下调的差异代谢物为 21 种。根据京都基因和基因组百科全书 (KEGG), 共鉴定出命名的代谢物 22 种; 与青皮分解 12 个月相比, 分解 18 个月时土壤中筛选出 54 种差异代谢物, 显著上调的差异代谢物为 13 种, 显著下调的差异代谢物为 41 种, 共鉴定出命名的代谢物 20 种。

2.3.3 KEGG 通路富集分析 通过 KEGG 数据库对差异代谢物质进行通路富集分析, 其结果以气泡图的形式展现 (图 7)。由图 7 可知: 这些差异代谢物主要富集在嘧啶代谢、泛醌和其他萜类醌生物合成、类固醇激素生物合成、ABC 转运蛋白等 22 条代谢通路中。青皮分解 12 个月与分解 9 个月土壤中的差异代谢物富集到了 19 条代谢通路中, 其中类固醇激素生物合成和类固醇降解代谢途径较为显著, P 分别为 0.036 1、0.063 7。青皮分解 18 个月与分解 12 个月土壤中的差异代谢物富集到了 14 条代谢通路中, 其中精氨酸和脯氨酸代谢、黄酮和黄酮醇生物合成代谢途径较为显著, P 分别为 0.080 0、0.094 1。有 11 条代谢通路为 2 组共有。随着分解时间的延长, 青皮分解 18 个月富集了角质、木栓碱和蜡质生物

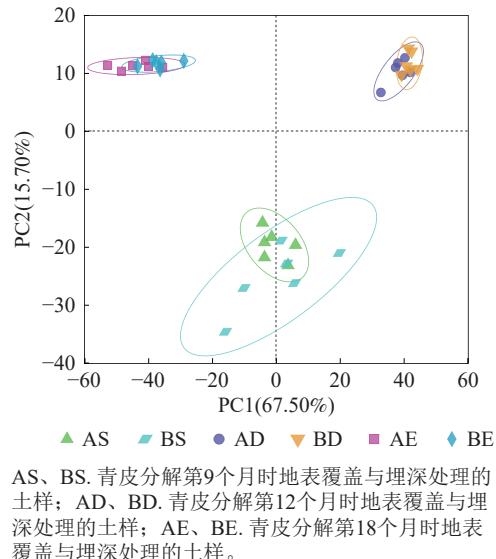
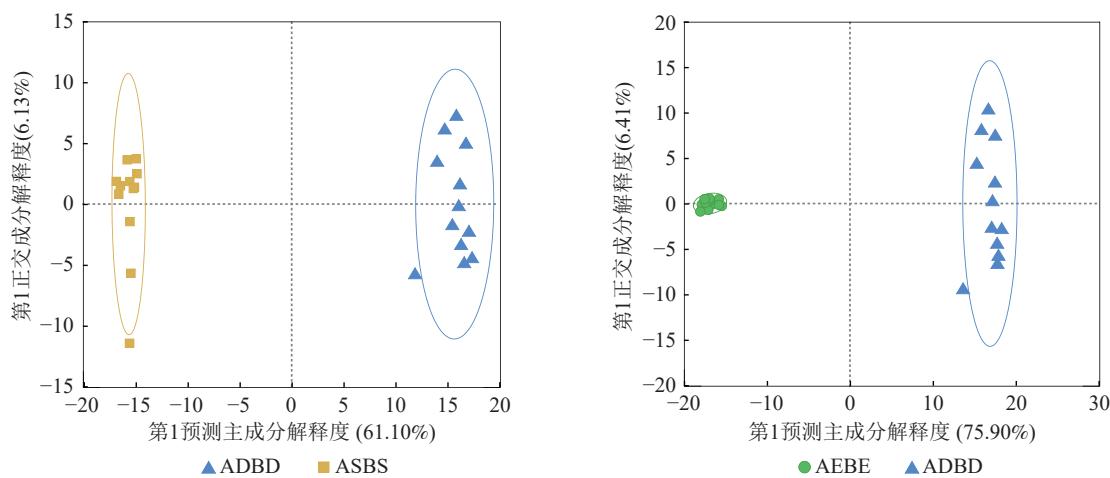


图 4 不同时期土壤主成分分析得分图

Figure 4 Map of PCA scores for different periods of soil



ADBD 和 ASBS 表示将青皮分解 12 个月地表覆盖和埋深处理的土样与分解 9 个月 2 个处理的土样, AEBE 和 ADBD 表示将青皮分解 18 个月地表覆盖和埋深处理的土样与分解 12 个月 2 个处理的土样。

图 5 OPLS-DA 得分图

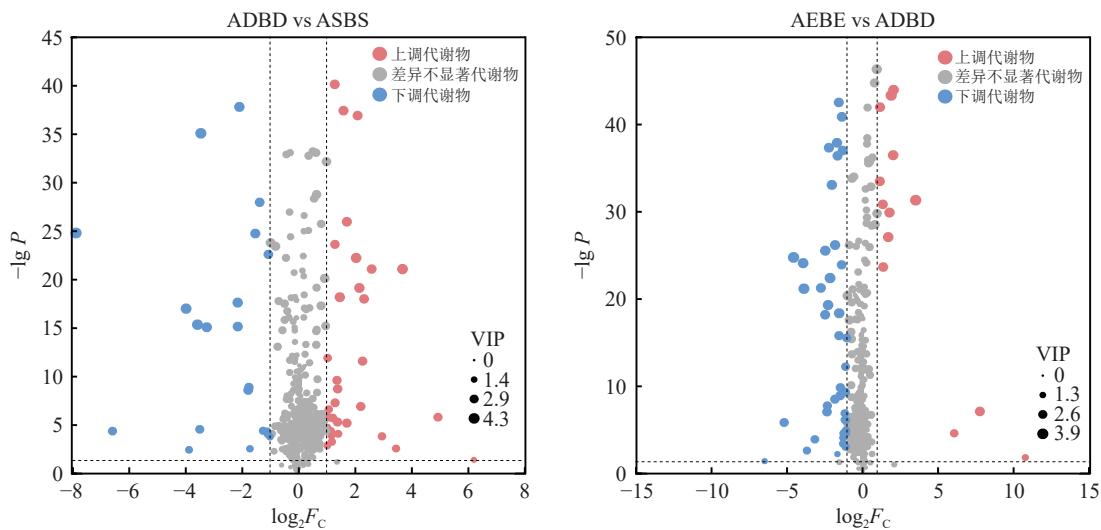
Figure 5 OPLS-DA score plot

表 3 OPLS-DA 模型的评价参数

Table 3 Evaluation parameters of OPLS-DA model

样品分组	主成分数	$R^2X(\text{cum})$	$R^2Y(\text{cum})$	$Q^2(\text{cum})$	R^2	Q^2
ADBD vs ASBS	1+2	0.685	0.995	0.985	0.623	0.973
AEBE vs ADBD	1+2	0.782	0.993	0.986	0.979	0.705

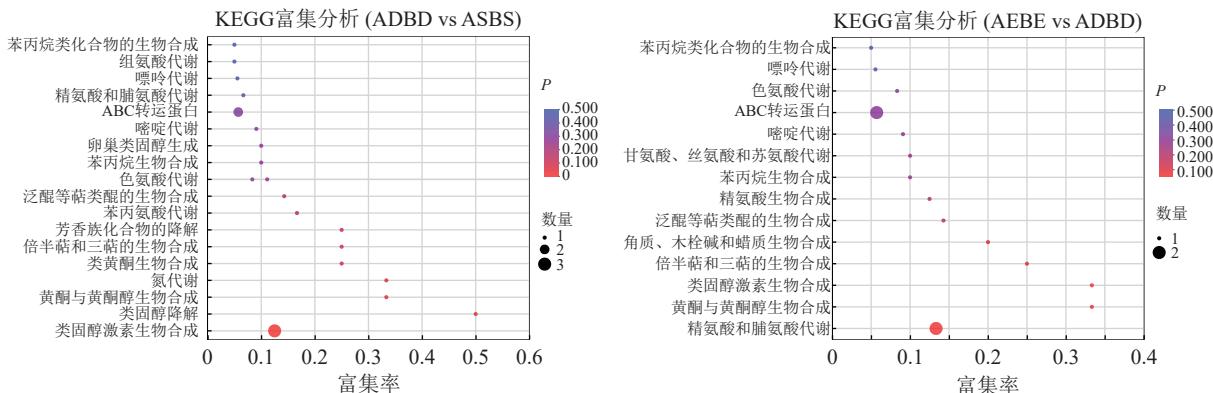
说明: ADBD vs ASBS 表示将青皮分解 12 个月地表覆盖和埋深处理的土样与分解 9 个月 2 个处理的土样进行对比, AEBE vs ADBD 表示将青皮分解 18 个月地表覆盖和埋深处理的土样与分解 12 个月 2 个处理的土样进行对比。 $R^2X(\text{cum})$ 和 $R^2Y(\text{cum})$ 分别表示所建模型对 X 和 Y 矩阵的累积解释率, R^2 表示模型对数据变异性解释能力, Q^2 表示模型的预测能力, $Q^2(\text{cum})$ 表示模型的累积预测能力。



横坐标 $\log_2 F_c$ 为代谢物在两组间表达差异的倍数变化值(F_c)，纵坐标 $-\lg P$ 为代谢物表达量变化差异的统计学检验值，点的大小表示变量重要性投影(VIP)。ADBD vs ASBS表示将青皮分解12个月地表覆盖和埋深处理的土样与分解9个月2个处理的土样进行对比，AEBE vs ADBD表示将青皮分解18个月地表覆盖和埋深处理的土样与分解12个月2个处理的土样进行对比。

图6 差异代谢物火山图

Figure 6 Volcano map of differential metabolites



ADBD vs ASBS表示将青皮分解12个月地表覆盖和埋深处理的土样与分解9个月2个处理的土样进行对比，AEBE vs ADBD表示将青皮分解18个月地表覆盖和埋深处理的土样与分解12个月2个处理的土样进行对比。

图7 不同时期差异代谢通路气泡图

Figure 7 Bubble diagram of differential metabolic pathways at different times

合成的代谢通路，参与植物抗逆、抵御病虫害等抗逆性生理过程。

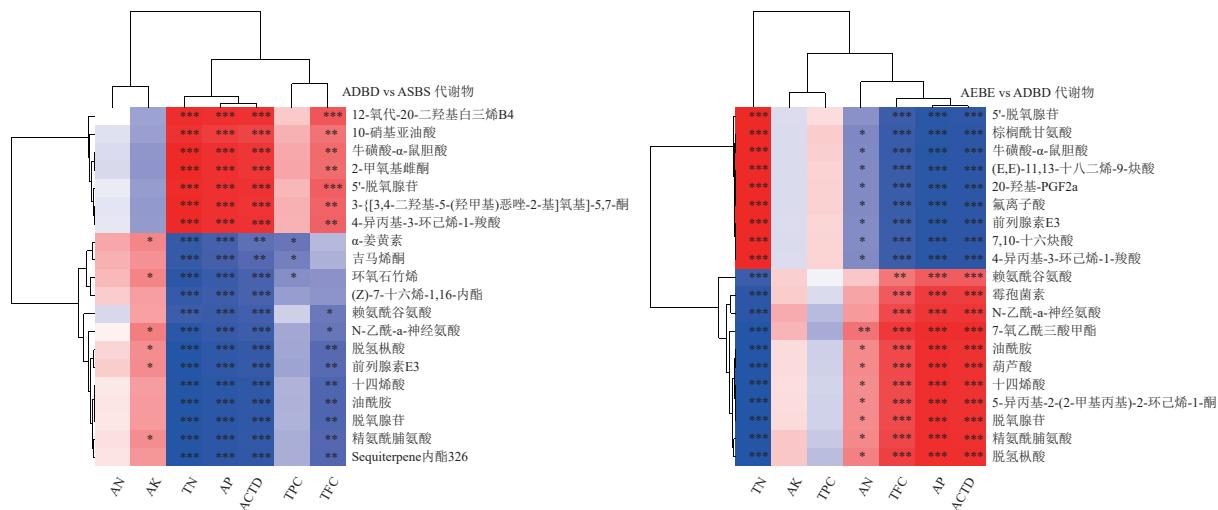
2.4 土壤理化指标与代谢物的相关性分析

通过对土壤理化指标和不同时期土壤丰度前20位的代谢物进行关联分析，其结果以热图(图8)的形式展现。将青皮分解12个月与分解9个月土壤中的代谢物进行对比，碱解氮与丰度前20位的代谢物没有显著的相关性，速效钾与其中6种代谢物呈显著正相关($P<0.05$)，细菌总数与其中3种代谢物呈显著负相关($P<0.05$)。将青皮分解18个月与分解12个月土壤中的代谢物进行对比，速效钾和细菌总数与代谢物没有显著的相关性。碱解氮与1种代谢物呈极显著正相关($P<0.01$)，与7种代谢物呈显著正相关($P<0.05$)，与8种代谢物呈显著负相关($P<0.05$)。此外，2个时期的全氮、有效磷和放线菌总数与代谢物的相关性均较为一致，均呈非常显著的正相关或负相关($P<0.001$)。

3 讨论

3.1 薄壳山核桃青皮分解及影响因子

植物残体分解是一个复杂的过程，主要包括粉碎、淋溶和分解代谢3个部分，受到各种因素的影响，如气候条件、分解物类型和土壤微生物等^[16]。大量研究表明：植物残体质量损失快慢表现出明显的



TN. 全氮; AN. 碱解氮; AK. 速效钾; AP. 有效磷; TPC. 细菌总数; TFC. 真菌总数; ACD. 放线菌总数。*表示处理间存在显著差异 ($P < 0.05$)，**表示处理存在极显著差异 ($P < 0.01$)，***表示处理存在非常显著差异 ($P < 0.001$)。ADBD vs ASBS表示将青皮分解12个月地表覆盖和埋深处理的土样与分解9个月2个处理的土样进行对比，AEBE vs ADBD表示将青皮分解18个月地表覆盖和埋深处理的土样与分解12个月2个处理的土样进行对比。

图8 土壤理化指标与代谢物的关联分析

Figure 8 Correlation analysis of soil physical and chemical indexes and metabolites

阶段性，总体上呈先快后慢的趋势。GARCIA-PAUSAS等^[17]研究发现：陆生森林凋落物第1年干物质损失率为30%~70%，之后4~5 a损失率为20%~30%。在本研究中，薄壳山核桃青皮分解速率同样表现为前期分解迅速，后期较缓慢，随分解时间的延长干物质残留率逐渐降低。这可能与不同分解时期青皮中的分解物质有关。分解前期青皮中易分解物质较多，青皮分解迅速。随着分解时间的延长，木质素、纤维素等难分解物质的比例增多，青皮的进一步分解受到抑制，因此分解速率降低。本研究发现：不同处理薄壳山核桃青皮的有机碳、全氮、全磷和全钾表现出相似的变化特征，但埋深处理青皮的营养元素质量分数显著高于地表覆盖 ($P < 0.05$)，而残留率差异不显著。这与渠心静等^[18]对油茶 *Camellia oleifera* 茶枯分解的研究结果一致。土壤中的养分由于淋溶作用向地下淋失，埋深青皮在分解过程中可能会吸附上层土壤淋溶的养分，导致埋深处理青皮的营养元素质量分数高于地表覆盖。

3.2 薄壳山核桃青皮分解对土壤性质的影响

在整个分解过程中，薄壳山核桃青皮的干物质残留率和养分元素等处于动态变化中。薄壳山核桃青皮分解是青皮养分与土壤养分互相调节的过程，青皮养分及分解速率的变化会影响土壤养分^[19]，从而导致土壤理化性质和生物学特性等也随之发生变化^[20]。由此说明，薄壳山核桃青皮的分解对土壤肥力及化学性质的影响是持续存在的。青皮分解可以为土壤提供养分，但与此同时，在其分解的过程中微生物活动又会与植物竞争营养物质，从而导致土壤养分的差异^[21]。薄壳山核桃青皮的分解改变了土壤肥力状况，土壤肥力状况的变化会对土壤微生物的数量和种群组成产生影响，土壤微生物的活性同样也会影响土壤养分的转化^[22]。本研究结果显示：土壤微生物数量与土壤肥力之间存在显著正相关，土壤肥力较好的分解阶段土壤中微生物数量较高；地表覆盖细菌数量高于埋深处理，真菌和放线菌数量均低于埋深处理。这与谭杰辉等^[23]的研究结论一致。

3.3 薄壳山核桃青皮分解对土壤代谢物质的影响

土壤代谢物主要来自植物根系分泌物、微生物代谢物以及植物、微生物和土壤有机质的分解^[24-25]。本研究发现：地表覆盖和埋深处理均可以显著影响土壤代谢产物。在分解的3个关键时期，显著上调的差异代谢物为γ-生育三烯酚。γ-生育三烯酚参与泛醌和其他萜类醌的生物合成。泛醌和其他萜类醌是重要的抗氧化剂，参与植物对逆境的反应，影响土壤中的生物合成与代谢^[26]。土壤微生物种类和丰度的变化决定了土壤代谢产物种类和丰度的变化^[27]。本研究发现：在青皮分解第9、12个月时微生物数量达到顶峰。对青皮分解不同时期土壤代谢物进行两两对比，通过代谢通路富集分析发现：与遗传物质传递有关的嘧啶代谢、嘌呤代谢广泛存在于土壤代谢通路中，且脱氢腺苷、胞苷和胸腺嘧啶核苷等与遗传有关的差异代谢物的质量分数最高，证明薄壳山核桃青皮分解会通过影响微生物的繁殖与代谢，从而诱导土

壤代谢物质的变化,增加土壤代谢产物的种类和丰富度。随着薄壳山核桃青皮分解时间的延长,逐渐出现了可以参与土壤碳代谢、氮代谢的代谢通路,精氨酸和脯氨酸代谢通路中的精氨酸、脯氨酸同时参与土壤中的矿物质吸收^[28]。

4 结论

埋深处理的青皮分解速率快于地表覆盖处理,2个处理在分解12个月时差异极显著,埋深处理的薄壳山核桃青皮总有机碳、氮、磷、钾质量分数整体显著高于地表覆盖,埋深处理土壤碱解氮和速效钾质量分数较高,地表覆盖土壤中细菌数量大于埋深处理,埋深处理土壤真菌和放线菌数量大于地表覆盖。青皮分解后期出现与碳代谢、氮代谢、蛋白质合成代谢等有关的代谢通路,诱导土壤代谢物质变化,为土壤微生物提供营养物质,土壤的代谢丰度逐渐增强。薄壳山核桃青皮不同还田方式均有利于提高土壤肥力,改善资源浪费的现状,但还需进一步研究效果更好的青皮还田处理方式。

5 参考文献

- [1] 黄丹青.薄壳山核桃果皮废弃物对铀的吸附性能研究[D].合肥:安徽农业大学,2020.
HUANG Danqing. *Study on Adsorption Performance of Pecan Fruit Peel Waste to Simulated Uranium*[D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2020.
- [2] 张小凯,何丽芝,陆扣萍,等.生物质炭修复重金属及有机物污染土壤的研究进展[J].土壤,2013,45(6): 970-977.
ZHANG Xiaokai, HE Lizhi, LU Kouping, et al. Use of biochar for remediation of soils contaminated with heavy metals and organic pollutants: a review [J]. *Soils*, 2013, 45(6): 970-977.
- [3] SHCHEMELININA T N, ANCHUGOVA E M. The integrated biotechnology for oil-polluted soil cleanup [J]. *Biology Bulletin*, 2023, 50(10): 2791-2796.
- [4] LI Jingsong, LI Jing, FENG Xiaohui, et al. Straw incorporation: a more effective coastal saline land reclamation approach to boost sunflower yield than straw mulching or burial[J/OL]. *Agricultural Water Management*, 2024, 305: 109140[2024-12-06]. DOI: 10.1016/j.agwat.2024.109140.
- [5] 温美娟,杨思存,王成宝,等.不同耕作和秸秆还田方式对灰钙土土壤理化性状、酶活性及玉米产量的影响[J].生态学杂志,2025,44(3): 903-911.
WEN Meijuan, YANG Sicun, WANG Chengbao, et al. Effects of different tillage and straw returning on soil physicochemical properties, enzyme activities in sierozem, and maize yield [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2025, 44(3): 903-911.
- [6] 薛欣欣,吴小平,王文斌,等.坡度和埋深对橡胶林凋落叶分解及红外光谱特征的影响[J].生态学报,2019,39(3): 874-883.
XUE Xinxin, WU Xiaoping, WANG Wenbin, et al. Effects of varying slopes and depths on decomposition and infrared spectrum characteristics of leaf litter in a rubber forest [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(3): 874-883.
- [7] 王玲,龙飞宇,刘佳斌,等.有机种植对玉米根际土壤代谢物的影响[J].东北农业大学学报,2022,53(3): 30-41.
WANG Ling, LONG Feiyu, LIU Jiabin, et al. Effects of organic planting on metabolites in maize rhizosphere soil [J]. *Journal of Northeast Agricultural University*, 2022, 53(3): 30-41.
- [8] 吴国良,张凌云,潘秋红,等.美国山核桃及其品种性状研究进展[J].果树学报,2003,20(5): 404-409.
WU Guoliang, ZHANG Linyun, PAN Qiuhong, et al. Advances in study of pecan and its cultivars' characteristics [J]. *Journal of Fruit Science*, 2003, 20(5): 404-409.
- [9] 潘浪波,段伟,黄有军.基于MaxEnt模型预测薄壳山核桃在中国的种植区[J].浙江农林大学学报,2022,39(1): 76-83.
PAN Langbo, DUAN Wei, HUANG Youjun. Prediction on the potential planting area of *Carya illinoiensis* in China based on MaxEnt model [J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2022, 39(1): 76-83.
- [10] 梁琼.山核桃外果皮活性炭的制备及其吸附性能的研究[D].杭州:浙江农林大学,2015.
LIANG Qiong. *Study on Preparation of Walnuts Shell Activated Carbon and its Properties*[D]. Hangzhou: Zhejiang A&F University, 2015.
- [11] HU Wenyi, DU Wenxian, BAI Shumin, et al. Phenoloxidase, an effective bioactivity target for botanical insecticide screening from green walnut husks [J]. *Natural Product Research*, 2018, 32(23): 2848-2851.
- [12] FENG Simin, WANG Lei, BELWAL T, et al. Phytosterols extraction from hickory (*Carya cathayensis* Sarg.) husk with a green direct citric acid hydrolysis extraction method[J/OL]. *Food Chemistry*, 2020, 315: 126217[2024-12-06]. DOI:

- 10.1016/j.foodchem.2020.126217.
- [13] 周文君. 湖南省4个薄壳山核桃品种果实生长发育规律及综合评价[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2022.
ZHOU Wenjun. *Fruit Growth and Development Regularity and Comprehensive Evaluation of Four *Carya illinoensis* Varieties in Hunan Province*[D]. Changsha: Central South University of Forestry and Technology, 2022.
- [14] 鲍示旦. 土壤农化分析[M]. 第3版. 北京: 中国农业出版社, 2000: 25–114.
BAO Shidan. *Soil Agrochemical Analysis*[M]. 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2000: 25–114.
- [15] 郑洪元, 许兴辉. 土壤微生物分析方法手册[M]. 北京: 农业出版社, 1986: 55–93.
ZHENG Hongyuan, XU Xinghui. *Handbook of Soil Microbial Analysis Methods*[M]. Beijing: Agricultural Publishing House, 1986: 55–93.
- [16] 侯婷, 袁军, 周文君, 等. 薄壳山核桃青皮分解及养分释放规律[J]. 江西农业大学学报, 2022, 44(5): 1188–1196.
HOU Ting, YUAN Jun, ZHOU Wenjun, et al. Decomposition and nutrient releasing pattern in *Carya illinoensis* husks [J]. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*, 2022, 44(5): 1188–1196.
- [17] GARCIA-PAUSAS J, CASALS P, ROMANYA J. Litter decomposition and faunal activity in Mediterranean forest soils: effects of N content and the moss layer [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2004, 36(6): 989–997.
- [18] 渠心静, 赵冠宇, 耿蕊, 等. 油茶茶枯分解及养分释放规律[J]. 经济林研究, 2019, 37(4): 104–111.
QU Xinjing, ZHAO Guanyu, GENG Rui, et al. Decomposition and nutrient releasing pattern in *Camellia oleifera* seed meal [J]. *Non-wood Forest Research*, 2019, 37(4): 104–111.
- [19] 刘玉林. 子午岭植被恢复中凋落物分解对土壤有机碳的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2020.
LIU Yulin. *Effects of Litter Decomposition on Soil Organic Carbon in Vegetation Restoration of Ziwuling*[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2020.
- [20] JIANG Xiaojin, LIU Wenjie, WU Jinen, et al. Land degradation controlled and mitigated by rubber based agroforestry systems through optimizing soil physical conditions and water supply mechanisms: a case study in Xishuangbanna, China [J]. *Land Degradation & Development*, 2017, 28(7): 2277–2289.
- [21] 罗佳. 枫香人工林凋落物分解速率及其对土壤养分的影响[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2009.
LUO Jia. *Decomposition Rate of the Litter of Artificial Forest of Liquidambar Formosana and Its Effects of Soil Nutrient*[D]. Changsha: Central South University of Forestry and Technology, 2009.
- [22] 王秋雅. 不同复垦模式对土壤肥力及微生物群落结构的影响[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2022.
WANG Qiuya. *Effects of Different Reclamation Patterns on Soil Fertility and Microbial Community Structure*[D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2022.
- [23] 谭杰辉, 付双军, 南丽丽, 等. 轮作绿肥对黄土高原半干旱区土壤微生物数量及酶活性的影响[J]. 草原与草坪, 2020, 40(5): 116–123.
TAN Jiehui, FU Shuangjun, NAN Lili, et al. Effects of green manure crop rotation on soil microbial quantity and enzyme activity in semi-arid region of the Loess Plateau [J]. *Grassland and Turf*, 2020, 40(5): 116–123.
- [24] LI Yingzhe, XU Lining, LETUMA P, et al. Metabolite profiling of rhizosphere soil of different allelopathic potential rice accessions[J/OL]. *BMC Plant Biology*, 2020, 20(1): 265[2024-12-06]. DOI: 10.1186/s12870-020-02465-6.
- [25] PATCHETT A, NEWMAN J A. Comparison of plant metabolites in root exudates of *Lolium perenne* infected with different strains of the fungal endophyte *Epichloë festucae* var. *loli* [J]. *Journal of Fungi*, 2021, 7(2): 148–148.
- [26] LIU Miaomiao, LU Shanya. Plastoquinone and ubiquinone in plants: biosynthesis, physiological function and metabolic engineering[J/OL]. *Frontiers in Plant Science*, 2016, 7: 1898[2024-12-06]. DOI: 10.3389/fpls.2016.01898.
- [27] 程红岩. 旱作农田土壤微生物群落及代谢产物对磷肥管理的响应[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2022.
CHENG Hongyan. *Response of Soil Microbial Communities and Metabolites to Phosphorus Fertilizer Management in Dryland Farmland*[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2022.
- [28] ZHU Lingyue, WANG Jiachen, WENG Yilin, et al. Soil characteristics of *Eucalyptus urophylla*×*Eucalyptus grandis* plantations under different management measures for harvest residues with soil depth gradient across time[J/OL]. *Ecological Indicators*, 2020, 117(5): 106530[2024-12-06]. DOI: 10.1016/j.ecolind.2020.106530.