



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 T,YUAN J,ZHOU W J,et al.Decomposition and nutrient releasing pattern in *Carya illinoensis* husks[J].Acta agriculturae universitatis Jiangxiensis,2022,44(5):1188-1196.

薄壳山核桃青皮分解及养分释放规律

侯 婷¹,袁 军¹,周文君¹,李 俊¹,周乃富^{2*}

(1.中南林业科技大学 林学院,湖南 长沙 410004;2.湖南省水资源研究和利用合作中心,湖南 长沙 410031)

摘要:【目的】以薄壳山核桃‘金华’(*Carya illinoensis* ‘Jinhua’)青皮为试验材料,探究还田方式对薄壳山核桃青皮分解的影响,为薄壳山核桃青皮的资源化利用提供参考。【方法】采用尼龙网袋法进行原位分解试验,研究不同还田位置薄壳山核桃青皮在林下的分解过程以及养分释放规律。将取回的分解袋放置于60℃烘箱中烘干至恒重,称量分解袋中剩余青皮的质量,计算青皮干物质残留量;青皮总有机碳含量采用重铬酸钾氧化-分光光度法测定,氮、磷含量采用全自动间断式化学分析仪测定,钾含量采用火焰光度计测定。【结果】(1)覆土处理的青皮分解速率明显高于地表处理的青皮,干物质残留率随分解时间不断下降,地表处理的青皮在分解到第3到第6个月期间分解速率最快,覆土处理的青皮在分解到第6到第9个月期间分解最快,分别为6.49%和12.14%。分解12个月后,地表处理和覆土处理的青皮干物质残留率分别为87.09%和66.25%;薄壳山核桃青皮分解可以很好地拟合为Olson负指数模型,地表处理和覆土处理的青皮半衰期分别为53.05个月和19.74个月,分解95%所需时间分别为228.3个月和85.72个月。(2)经过12个月的分解,两组处理的青皮TOC残留率均呈富集-释放趋势,N残留率地表处理的青皮呈“富集-释放-富集”的趋势,覆土处理的青皮表现为富集趋势,P残留率均呈释放-富集-释放趋势,K残留率均呈释放趋势。两组处理青皮元素含量除氮元素外,无显著差异;地表处理和覆土处理的薄壳山核桃青皮元素残留率无显著差异。【结论】覆土能加快薄壳山核桃青皮的分解和氮的累积,在薄壳山核桃青皮还田时最好采用深施覆土方式。

关键词:薄壳山核桃;青皮;分解;养分释放

中图分类号:S664.1 文献标志码:A 文章编号:1000-2286(2022)05-1188-09

Decomposition and Nutrient Releasing Pattern in *Carya illinoensis* Husks

HOU Ting¹, YUAN Jun¹, ZHOU Wenjun¹, LI Jun¹, ZHOU Naifu^{2*}

(1.College of Forestry, Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, China;
2.Hunan Water Resources Research and Utilization Cooperation Center, Changsha 410031, China)

Abstract: [Objective] Using the *Carya illinoensis* ‘Jinhua’ husks as the test material, this study explores the effect of returning methods on the decomposition of the *Carya illinoensis* husks, thus providing some references for the resource utilization of *Carya illinoensis* husks. [Method] The in-situ decomposition test was implemented by the decomposing mesh bag method to study the process of decomposition and the nutrient release of the *Carya illinoensis* husks at different positions. The retrieved decomposing bag was placed in a 60℃ oven to

收稿日期:2022-03-25 修回日期:2022-05-16

基金项目:湖南省重点研发计划项目(2018WK2041)

Project supported by the Hunan Province’s Key R & D Programme(2018WK2041)

作者简介:侯婷, orcid.org/0000-0002-5312-9735, ht2205588@126.com; *通信作者:周乃富, 助理研究员, 博士, 主要从事经济林生态经营与资源利用, orcid.org/0000-0003-3990-7999, zhounaifu1026@163.com。

dry to constant weight, the mass of the remaining husks in the decomposition bag was weighed, and the dry matter residue of the husks was calculated; the TOC content of the husks was determined by potassium dichromate oxidation-spectrophotometry method. N, P content was determined by automatic intermittent chemical analyzer, K content was determined by flame photometer. **[Result]** (1) The decomposition rate of the husks treated with soil was significantly higher than that of the surface treated husks, and the residual dry matter rate decreased with the decomposition time. The surface treated husks had the fastest decomposition rate from the third to the sixth month. The husks decomposed with the fastest rate from the 6th to the 9th month with the rate of 6.49% and 12.14%, respectively. After being decomposed for 12 months, the dry matter residual rates of the surface treatment and soil-covering treatment were 87.09% and 66.25%, respectively; The half-lives were 53.05 months and 19.74 months, respectively, and the time required for decomposition to 95% was 228.3 months and 85.72 months, respectively. (2) After 12 months of decomposition, the TOC residue rates of the two groups of treatments showed an enrichment-release trend, the N residue rate of the husks treated with the surface showed a trend of enrichment-release-enrichment; the husks treated with soil showed an enrichment trend, and the P residue rates showed a trend of release-enrichment-release, and the K residual rate showed a release trend. Except for N, there was no significant difference in the element content of husks between the two treatments; there was also no significant difference in the residual rate of elements in the husks of *Carya illinoensis* between the surface treatment and the soil-covering treatment. **[Conclusion]** Covering soil can accelerate the decomposition of the husks and the accumulation of N, and it is optimal to apply deep mulching when the husks of the *Carya illinoensis* are returned to the field.

Keywords: *Carya illinoensis*; husks; decomposition; nutrient releasing

【研究意义】植物残体是植物在生长发育过程中新陈代谢的产物,其分解是生态系统养分循环的重要环节,也是维持土壤肥力的基础。在分解过程中逐渐把养分归还给土壤,对增强土壤结构稳定性,减少水土流失,改善微生物活性等方面发挥重要作用^[1-3]。由于不同植物残体的化学组成不同,影响分解过程的因素又复杂多样,与其本身的理化性质以及外界条件等因素密切相关,因此不同分解物分解过程的研究结果存在差异^[4-7]。【前人研究进展】薄壳山核桃(*Carya illinoensis*)又名长山核桃、美国山核桃、碧根果,原产美国和墨西哥,于1900年左右引入我国,是国内外广泛种植的一种优良的果材兼用树种^[8]。通过上百年的引种栽培及示范推广,目前薄壳山核桃在我国生产发展较为迅速^[9]。近年来,薄壳山核桃种植面积和区域不断增加,据统计,目前薄壳山核桃种植面积约20万hm²,盛产期薄壳山核桃青皮产量将达18万t,同时栽培繁育手段的发展也促进了薄壳山核桃的品质和产量,随之而来的是薄壳山核桃外果皮废弃物的问题。薄壳山核桃外果皮现如今虽利用程度不高,但通过前人的研究表明,它可以被用于多个方面。Novak等^[10]研究了薄壳山核桃的外果皮在700℃下热解,可以形成生物炭,能有效提高土壤中的碳含量,并且对土壤的聚合、渗透和持水能力有一定的改善作用。Vaggett等^[11-12]采用动力学模型研究了薄壳山核桃外壳作为生物吸收剂吸收溶液中Cr³⁺、Fe³⁺、Zn²⁺、Cu²⁺、Mn²⁺、Pb²⁺等的作用,发现其对这些有毒重金属物质均具有较好的吸收作用。梁琼^[13]研究表明,从薄壳山核桃外果皮中提取出的酚类化合物对植物炭疽病菌、腐烂病菌等具有良好的抑制作用。【本研究切入点】薄壳山核桃外果皮又叫做青龙衣、青皮^[14],通常情况下薄壳山核桃废弃青皮通过焚烧或堆弃的方式处理,处理方法极不科学,造成资源浪费。不仅造成环境的巨大压力,对人体的健康问题也产生一定程度的威胁^[15]。目前有大量文献研究山核桃的生长发育规律,而对薄壳山核桃青皮分解的研究却鲜见报道。【拟解决的关键问题】本研究以粉碎后的薄壳山核桃青皮为试验材料,采用尼龙网袋原位分解法研究青皮的干物质分解和养分释放规律,分析不同还田位置对青皮分解的影响。如能充分利用薄壳山核桃青皮分解规律,对薄壳山核桃青皮的再利用不仅能变废为宝,更利于生态环境的保护,以期缓解环境压力和能源危机提供参考资料。

1 材料与方法

1.1 样地概况

试验地点位于中南林业科技大学春晖山(28°8'N, 112°59'E, 海拔110 m)。该地为典型的亚热带湿润季风气候, 年平均气温17.2℃, 冬季平均气温4.6℃, 无霜期年平均279.3 d, 平均总降水量1 422.4 mm, 冬春季节多雨, 夏秋季节高温少雨, 日照年平均1 726 h。土壤类型为第四纪酸性红壤, 原生植被为亚热带常绿阔叶林。

1.2 试验材料

试验材料为薄壳山核桃‘金华’青皮, 于2020年12月采集于云南省林业科学院漾濞核桃研究院。采集后首先将薄壳山核桃进行剥壳处理, 将剥离的青皮放入高速粉碎机进行粉碎, 得到的粉碎物再使用20目筛网进行过筛, 之后放入大小11 cm×17 cm, 孔径0.178 mm大小的尼龙网分解袋中, 每袋准确称取30.0 g。表1为薄壳山核桃青皮初始养分含量。

表1 薄壳山核桃青皮的初始化学组成

Tab.1 Initial chemical composition of *Carya illinoensis* husks

全氮/(g·kg ⁻¹) N	全磷/(g·kg ⁻¹) P	全钾/(g·kg ⁻¹) K	总有机碳/(g·kg ⁻¹) TOC	碳氮比 C/N
10.908	31.072	41.205	146.845	13.462

1.3 试验设计

在春晖山选取一块较为平整的试验地, 向下挖掘30 cm, 将24个内径20 cm, 高30 cm的pvc管随机放入试验地, 确保在试验地中分布均匀, 且与地表平行, 每个管子之间间隔20 cm, 回填原土。将之前粉碎过筛处理的薄壳山核桃青皮分为24个尼龙网袋, 样地划分为2个处理组, 第1个处理组将12个网袋直接放置在pvc管土柱的上层, 即地表处理, 用网纱覆盖, 橡皮筋固定。第2个处理组将另外12个网袋放入pvc管子中部10 cm, 即覆土处理。

2020年12月21日, 将样品置于样地。试验地中尼龙网袋的收集始于2021年3月21日, 为第1次收集, 此后每90 d收集1次。试验开始后分别于第3、6、9、12个月共4次进行对角线收集, 取样时抖落尼龙网袋上附着的土壤和杂物, 每次每处理各取3个重复, 共计6袋, 带回实验室。

1.4 指标测定

将取回的分解网袋装于纸质信封袋中置于60℃烘箱中烘干至恒重, 用精度到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。青皮总有机碳(TOC)含量采用重铬酸钾氧化-分光光度法测定。将青皮用浓硫酸-双氧水消解至澄清后用于其他元素含量的测定, 氮(N)、磷(P)含量采用全自动间断式化学分析仪测定, 钾(K)含量采用火焰光度计测定。

采用Olson负指数衰减模型^[16]对青皮分解过程进行拟合, 公式为:

$$y = ae^{-kt} \quad (1)$$

式(1)中, y 为青皮干物质月残留率(%); k 为分解系数; a 为拟合参数; t 为分解时间(月)。

青皮干物质残留率计算公式^[17]为:

$$Rd = \left(\frac{M_t}{M_0} \right) \times 100\% \quad (2)$$

式(2)中, R_e 为青皮分解干质量残留率(%), M_t 为 t 时刻的青皮剩余干质量(g), M_0 为青皮初始干质量(g)。

青皮元素残留率计算公式^[18]为:

$$R_e = \frac{W_t \times M_t}{W_0 \times M_0} \times 100\% \quad (3)$$

式(3)中, R_e 为元素残留率(%), W_t 为 t 时刻养分元素含量(%), M_t 为 t 时刻的青皮剩余干质量(g); W_0 为初始养分元素含量(%), M_0 为青皮初始干质量(g)。

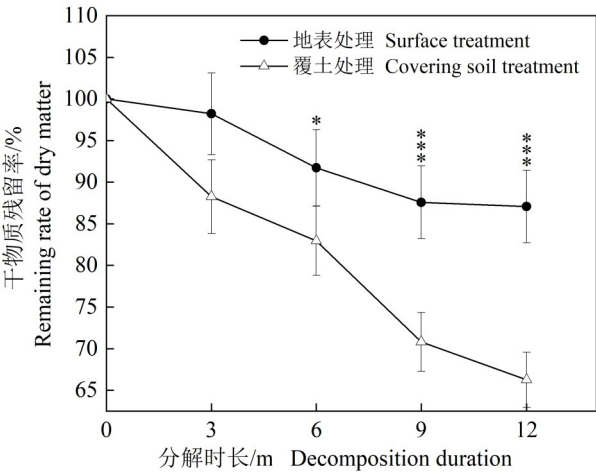
采用SPSS 26.0、MATLAB 2020b和Excel 2016软件进行数据统计分析, 采用Origin 9.8软件绘图。

2 结果与分析

2.1 不同处理中薄壳山核桃青皮干物质残留率的动态变化

2 个处理中薄壳山核桃青皮分解速率不同,地表处理的青皮在分解到第 3 到第 6 个月时分解速率最快,覆土处理的青皮在分解到第 6 到第 9 个月时分解最快,分别为 6.49% 和 12.14%。地表处理的青皮只有在分解第 3 到第 6 个月时分解速率大于覆土处理部分,其他时间覆土处理的分解速率均大于地上部分(图 1)。在分解到第 6 个月后,两者的干物质残留率产生显著差异($P<0.05$),在分解到第 9 个月,两者产生极显著差异($P<0.001$)。分解到第 12 个月时,地表处理和覆土处理的薄壳山核桃青皮干物质残留率分别为 87.09% 和 66.25%。

利用 Olson 负指数衰减模型对青皮干物质残留率进行动态拟合, R^2 表明拟合方程可以较好地表示薄壳山核桃青皮的分解速率(表 2)。覆土处理的青皮 k 值大于地表处理的青皮,分解系数 k 越大,说明分解速率越快,分解 50% 和 95% 所需时间越短。根据方程预测,薄壳山核桃青皮两种处理下分解 50% 分别需要 53.05 个月和 19.74 个月,分解 95% 分别需要 228.3 个月和 85.72 个月。



“*”表示独立样本 T 检验存在显著差异($P<0.05$),“***”表示存在极显著差异($P<0.01$)。

“*” shows a significant difference in independent sample T test ($P<0.05$), “***” shows extremely significant difference.

图 1 薄壳山核桃青皮干物质残留率变化

Fig.1 Changes of remaining rates of dry matter in *Carya illinoensis* husks

表 2 薄壳山核桃青皮的 Olson 分解模型

Tab.2 Olson decomposition models of *Carya illinoensis* husks

处理 Treatment	回归方程 Regression equation	决定系数 R^2 Coefficient of determination	分解系数 k Decomposition rate	半分解时间/m Decomposition time	分解 95% 所需时间/m Time required to break down 95%
地表处理 On the ground	$y=1.004e^{-0.013\ 14x}$	0.939 6	0.013 14	53.05	228.30
覆土处理 Under the ground	$y=0.995\ 8e^{-0.034\ 9x}$	0.984 8	0.034 90	19.74	85.72

2.2 不同处理中薄壳山核桃青皮各元素含量及残留率的动态变化

2.2.1 TOC 含量及其残留率的动态变化 青皮 TOC 含量随着分解时间的增加呈先上升后下降趋势(图 2)。在分解的前 3 个月,TOC 含量迅速上升,分解到第 3~6 个月期间迅速下降,6 个月后含量逐渐降低,两组处理的青皮 TOC 含量在整个分解期无显著差异。青皮 TOC 残留率在分解的 12 个月期间先增加后减少(图 3)。其中,分解到第 3 到第 6 个月降低幅度最大。两组处理的青皮 TOC 残留率在整个分解期无显著差异。

2.2.2 N 含量及其残留率的动态变化 随着分解时间的增加,地表处理的青皮 N 含量呈“上升-下降-上升”的趋势,覆土处理的青皮 N 含量呈逐渐上升的趋势(图 4)。地表处理的青皮在分解到第 3 个月时 N 含量高于覆土处理部分,其余时间覆土处理的青皮 N 含量均高于地表处理。当分解到第 9 个月时,两组处理 N 含量存在显著差异($P<0.05$)。地表处理的青皮 N 残留率呈“富集-释放-富集”的趋势,覆土处理的青皮 N 残留率表现为富集(图 5)。地表处理的青皮 N 残留率波动幅度高于覆土处理。研究结果表明埋深明显加快了 N 元素的积累。

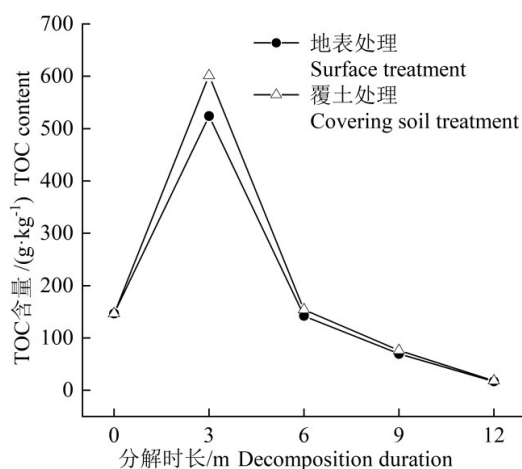


图2 青皮TOC含量的动态变化
Fig.2 Dynamic changes of TOC content in *Carya illinoensis* husks

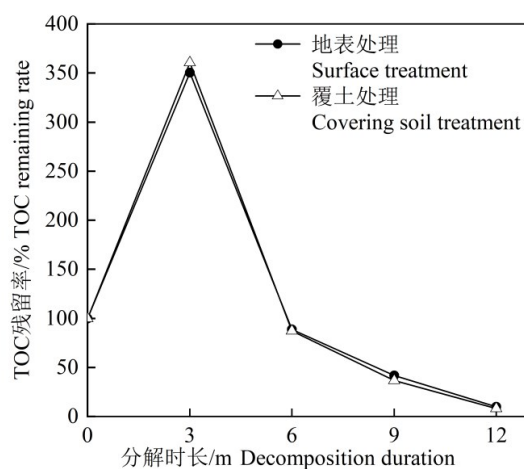


图3 青皮TOC残留率的动态变化
Fig.3 Dynamic changes of TOC remaining rate in *Carya illinoensis* husks

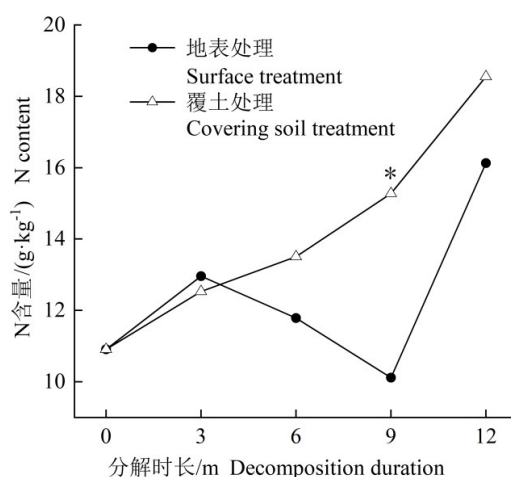


图4 青皮N含量的动态变化
Fig.4 Dynamic changes of N content in *Carya illinoensis* husks

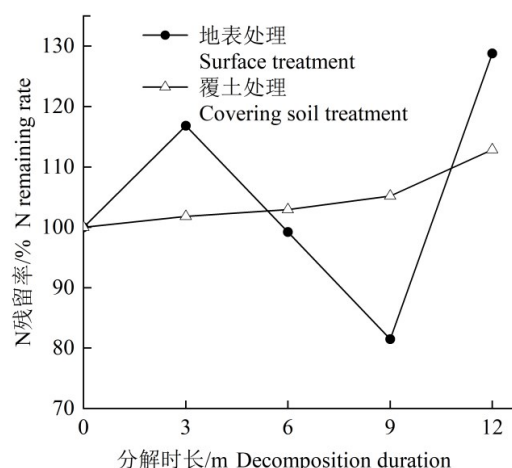


图5 青皮N残留率的动态变化
Fig.5 Dynamic changes of N remaining rate in *Carya illinoensis* husks

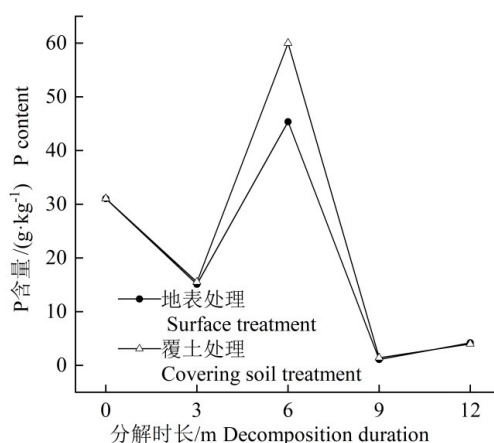


图6 青皮P含量的动态变化
Fig.6 Dynamic changes of P content in *Carya illinoensis* husks

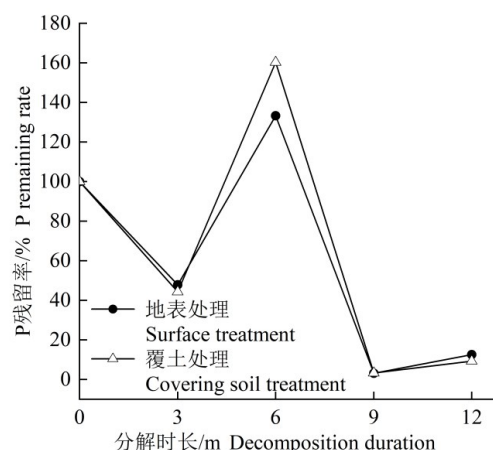


图7 青皮P残留率的动态变化
Fig.7 Dynamic changes of P remaining rate in *Carya illinoensis* husks

2.2.3 P 含量及其残留率的动态变化 随着分解时间的增加,青皮 P 含量呈“降低-增加-降低-增加”的波动趋势(图 6)。在分解到第 3 个月时,两组处理青皮 P 含量无显著差异,第 6 到第 9 个月覆土处理的青皮含量高于地表处理,分解到第 9~12 个月时两者无显著差异。在分解到第 3 个月和第 12 个月时,地表处理青皮 P 残留率略高于覆土处理(图 7),其余时间覆土处理的青皮 P 残留率均高于地表处理,2 个处理青皮 P 残留率无显著差异($P<0.05$)

2.2.4 K 含量及其残留率的动态变化 在分解的前 3 个月,2 个处理中青皮 K 含量急剧下降,分解到第 3~6 个月期间后 K 含量缓慢增加,分解到第 6~12 个月 K 含量缓慢降低(图 8),地表处理和覆土处理两者无显著差异。青皮 K 残留率的变化趋势和 K 含量相似(图 9),在分解的前 3 个月急剧下降,地表处理和覆土处理分别释放了总量的 98.8% 和 97.91%,随后缓慢增加后又缓慢降低,2 个处理中青皮 K 残留率无显著差异,这与国内外研究中关于枯落物中 K 元素动态的研究结果一致。

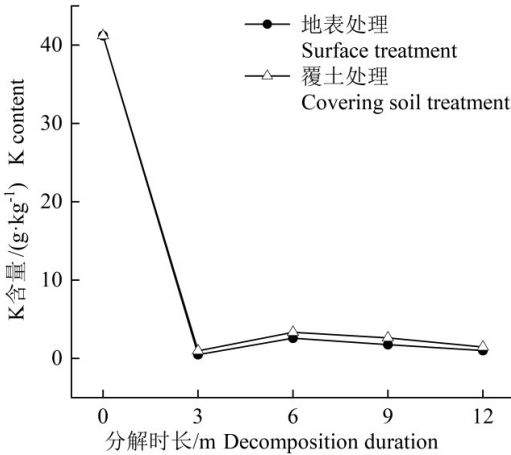


图 8 青皮 K 含量的动态变化

Fig.8 Dynamic changes of K content in *Carya illinoensis* husks

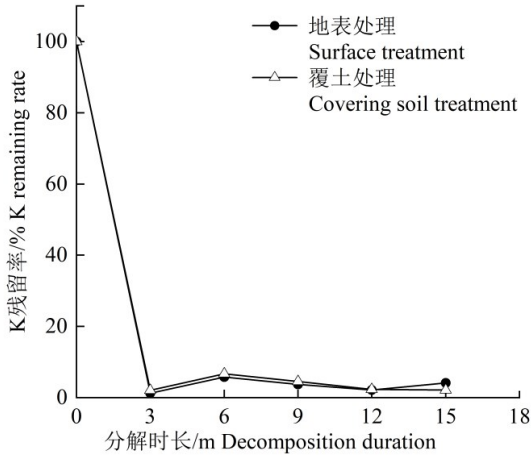


图 9 青皮 K 残留率的动态变化

Fig.9 Dynamic changes of K remaining rate in *Carya illinoensis* husks

3 结论与讨论

3.1 讨论

植物残体分解包括粉碎、淋溶和分解代谢,是一个复杂的物理、化学和生物学过程,受气候条件、分解物类型、土壤微生物和动物等因素的影响^[19]。薄壳山核桃青皮分解先慢后快,是外界环境条件和青皮成分变化共同作用的结果。分解前期青皮的质量损失主要是通过非结构性化合物的淋溶作用实现,试验开始时(12月),薄壳山核桃青皮中易分解物质的含量高,但由于此时气温低,降水少,淋溶作用弱,微生物活性降低,不利于青皮分解,因此分解速度缓慢;从3月开始,气温回升,降水量增加,雨热同期,良好的水热条件使微生物繁殖迅速,青皮分解速率明显增加。本研究表明,在薄壳山核桃青皮的分解过程中,覆土处理的青皮在整个分解期分解速率比地表处理的青皮快,主要是因为覆土处理的青皮 N 含量高于放于地表处理, N 含量越高,微生物可以利用的氮源就越高,且地下水热条件好,更有利于增加微生物的生物量及活性^[20],且覆土处理青皮与土壤的接触面积大,因此有利于微生物参与分解,分解迅速。还有研究表明^[21],在 5~10 cm 深度的土壤脲酶、多酚氧化酶和过氧化氢酶含量较高,有利于植物残体分解。

薄壳山核桃青皮分解伴随着养分元素的变化,这些元素的释放或富集在循环过程中起着重要作用。本研究表明,青皮分解过程中的 TOC、N、P、K 变化特征不同,这是由于青皮分解及元素自身特性所决定的。薄壳山核桃青皮 TOC 的主要成分是木质素和纤维素, TOC 含量随着分解时间的增加逐渐降低。在分解前期, TOC 的损失量小于干物质损失量,所以 TOC 浓度表现为上升。分解到第 3 个月时,随着木质

素和纤维素等有机物的大量分解,TOC浓度开始下降^[22]。由于薄壳山核桃青皮在分解过程中主要以C为主导的物质循环模式,易分解碳水化合物的分解以及可溶性物质的淋失都会引起青皮TOC的释放。青皮在分解中N的释放与富集主要取决于分解初期N含量能否维持微生物活动的需要^[23]。覆土处理的青皮在分解期间N含量一直处于增加状态,地表处理的青皮N含量先增加后降低再增加,这可能是由于土壤的淋溶作用导致有效态的养分向下淋失,有机质在分解过程中带有负电荷,可以吸附阳离子,覆土处理的青皮作为有机质在分解过程中可能吸附了上层土壤淋溶下的养分,2个处理的N含量在分解第9个月时存在显著差异。覆土处理青皮N含量显著高于地表处理,这是由于地下部分的水热条件好,微生物大量繁殖,青皮N含量不能满足分解的需要,微生物得不到充足的养分来维持自身生长,因此分解者会在周围环境中固持N^[24],即青皮N含量增加以促进分解。P元素属于易淋溶元素,主要以硫酸根或化合物的形态存在^[25],在青皮分解初期,温度较低,微生物量少,P可以供微生物的营养需要,所以P会表现为释放。到分解第3个月到第8个月,温度上升,降雨增多,湿度较大,微生物活性增大,微生物对P的需求不足时,会出现累积^[26]。分解到第9~12个月,温度逐渐下降,微生物数量减少,青皮腐解P元素释放较快。温度是P元素的主要限制因子。K元素在植物体内主要以离子状态存在,在分解过程中流动性很强,其浓度在分解开始时便急剧下降,后趋于平缓^[27-28]。国内外研究中关于枯落物中K元素动态的研究结果基本为直接释放^[29],与本研究结果一致。综上所述,覆土加快了薄壳山核桃青皮的分解和N的累积,建议在薄壳山核桃青皮还田时采用深施覆土方式。

分解是一个漫长的过程,本研究中仅探究了薄壳山核桃青皮的分解规律及埋深对青皮分解的影响,而青皮分解过程对土壤微生物、养分的影响,氮沉降、磷沉降和酸沉降对青皮分解的影响以及薄壳山核桃青皮还田对大田作物的影响等尚需进一步研究。

3.2 结论

薄壳山核桃市场前景广阔,综合效益高,是国内外广泛种植的一种优良的果材兼用树种。为给薄壳山核桃青皮的资源化利用提供参考,本研究采用分解网袋法进行原位分解试验,分析不同还田位置处理下薄壳山核桃青皮的分解及养分释放规律,主要结论如下:

(1)不同还田位置处理下的薄壳山核桃青皮分解速率不同。覆土处理的青皮分解速率显著快于地表处理,分解速率随分解时间的增加呈增大趋势,分解时间越久,两组处理的分解速率差异就越显著。

(2)薄壳山核桃青皮的干物质残留率符合Olson负指数衰减模型,前期缓慢,后期分解加快,地表处理和覆土处理的青皮半衰期分别为53.05个月和19.74个月,分解95%所需时间分别为228.3个月和85.72个月。

(3)两组处理的青皮TOC残留率均呈富集-释放趋势,N残留率地表处理的青皮呈“富集-释放-富集”的趋势,覆土处理的青皮表现为富集趋势,P残留率均呈释放-富集-释放趋势,K残留率均呈释放趋势,薄壳山核桃青皮养分元素残留率与环境条件和微生物活性密切相关。

参考文献 References:

- [1] 郭剑芬,杨玉盛,陈光水,等.森林凋落物分解研究进展[J].林业科学,2006,42(4):93-100.
GUO J F, YANG Y S, CHEN G S, et al. A review on litter decomposition in forest ecosystem [J]. Scientia silvae sinicae, 2006, 42(4): 93-100.
- [2] BRAY S R, KITAJIMA K, MACK M C. Temporal dynamics of microbial communities on decomposing leaf litter of 10 plant species in relation to decomposition rate [J]. Soil biology & biochemistry, 2012, 49: 30-37.
- [3] 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 X J, ZHAO G Y, GENG R, et al. Decomposition and nutrient releasing pattern in *Camellia oleifera* seed meal [J]. Non-wood forest research, 2019, 37(4): 104-111.
- [4] 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 X X, WU X P, WANG W B, 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.
- [5] 渠心静, 李建安, 夏宇飞, 等. 油茶落叶分解对土壤养分及药用菊花生长的影响[J]. *安徽农业大学学报*, 2018, 45(5): 861-866.
- QU X J, LI J A, XIA Y F, et al. Effects of decomposition of senesced oil-tea leaves on soil nutrient content and growth of intercropping *Chrysanthemum morifolium* [J]. *Journal of Anhui agricultural university*, 2018, 45(5): 861-866.
- [6] 王瑾, 黄建辉. 暖温带地区主要树种叶片凋落物分解过程中主要元素释放的比较[J]. *植物生态学报*, 2001(3): 375-380.
- WANG J, HUANG J H. Comparison of major nutrient release patterns in leaf litter decomposition in warm temperate zone of China [J]. *Chinese journal of plant ecology*, 2001(3): 375-380.
- [7] 潘蓉. 茶叶中残留农药的降解[J]. *湖南农业*, 2019, 502(10): 38-39.
- PAN R. Degradation of pesticide residues in tea[J]. *Hunan agriculture*, 2019, 502(10): 38-39.
- [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): 404-9.
- WU G L, ZHANG L Y, PAN Q H, et al. Advances in study of pecan and its cultivars' characteristics[J]. *Journal of fruit science*, 2003, 20(5): 404-9.
- [9] 李健. 薄壳山核桃种质资源生物学特性研究及遗传多样性分析[D]. 杭州: 浙江农林大学, 2018.
- LI J. Research about biological characteristics and genetic diversity of germplasm resources of *Carya illinoensis* [D]. Hangzhou: Zhejiang Agriculture & Forestry University, 2018.
- [10] NOVAK J M, BUSSCHER W J, LAIRD D L, et al. Impact of biochar amendment on fertility of a southeastern coastal plain soil[J]. *Soil science*, 2009, 174(2): 105-112.
- [11] VAGHETTI J C, LIMA E C, ROYER B, et al. Pecan nutshell as biosorbent to remove toxic metals from aqueous solution[J]. *Separation science and technology*, 2009, 44(3): 615-644.
- [12] VAGHETTI J C, LIMA E C, ROYER B, et al. Pecan nutshell as biosorbent to remove Cu(II), Mn(II) and Pb(II) from aqueous solutions[J]. *Journal of hazardous materials*, 2009, 162(1): 270-280.
- [13] 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 Q. Study on preparation of walnuts shell activated carbon and its properties [D]. Hangzhou: Zhejiang Agriculture & Forestry University, 2015.
- [14] 陈乐乐, 李珩玉, 周祥禄, 等. 青龙衣化学成分和药理作用研究进展及质量标志物的预测分析[J]. *中草药*, 2021, 52(9): 2785-2800.
- CHEN L L, LI H Y, ZHOU X L, et al. Research progress on chemical composition and pharmacological effects and predictive analysis on quality markers of Qinglongyi[J]. *Chinese traditional and herbal drugs*, 2021, 52(9): 2785-2800.
- [15] 李勇, 刘娟, 李庆. 废弃干果壳粉吸附亚甲基蓝模拟印染废水试验研究[J]. *印染助剂*, 2014, 31(6): 5-7.
- LI Y, LIU X, LI Q. Study on the adsorption of waste nut shell powder for simulated methylene blue dyeing wastewater[J]. *Textile auxiliaries*, 2014, 31(6): 5-7.
- [16] OLSON J S. Energy storage and the balance of producers and decomposition in ecological systems[J]. *Ecology*, 1963, 44: 332-341.
- [17] 文海燕, 傅华, 郭丁. 黄土高原典型草原优势植物凋落物分解及养分释放对氮添加的响应[J]. *生态学报*, 2017, 37(6): 2014-2022.
- WEN H Y, FU H, GUO D. Influence of nitrogen addition on *Stipa bungeana* and *Heteropappus altaicus* litter decomposition and nutrient release in a steppe located on the Loess Plateau[J]. *Acta ecologica Sinica*, 2017, 37(6): 2014-2022.
- [18] 陈小燕, 吕家珑, 张红, 等. 不同植被覆盖下植物残体分解特性[J]. *干旱地区农业研究*, 2008, 26(4): 83-87.
- CHEN X Y, LYU J L, ZHANG H, et al. Residue decomposition in soils under different vegetation types[J]. *Agricultural research in the arid areas*, 2008, 26(4): 83-87.
- [19] KONSTANTIN S. Dynamics of alpine plant litter decomposition in a changing climate[J]. *Plant & Soil*, 2010, 337(1/2): 19-32.

- [20] 马志良,高顺,杨万勤,等.亚热带常绿阔叶林6个常见树种凋落叶在不同降雨期的分解特征[J].生态学报,2015,35(22):7553-7561.
- MA Z L,GAO S,YANG W Q,et al.Litter decomposition of six common tree species at different rainy periods in the subtropical region[J].Acta ecologica Sinica,2015,35(22):7553-7561.
- [21] 陈晓丽,王根绪,杨燕,等.山地森林表层土壤酶活性对短期增温及凋落物分解的响应[J].生态学报,2015,35(21):7071-7079.
- CHEN X L,WANG G X,YANG Y,et al.Response of soil surface enzyme activities to short-term warming and litter decomposition in a mountain forest[J].Acta ecologica Sinica,2015,35(21):7071-7079.
- [22] 刘晶,谢婉余,张巧明,等.黄土丘陵区不同植物凋落叶片的分解及养分释放特性[J].草业学报,2018,27(9):25-33.
- LIU J,XIE W Y,ZHANG Q M,et al.Leaf decomposition and nutrient release characteristics of different plant species in the Loess Hilly region[J].Acta praeaculturae Sinica,2018,27(9):25-33.
- [23] PARTON W,SILVER W L.Global-scale similarities in nitrogen release patterns during long-term decomposition[J].Science,2007,315(26):361-364.
- [24] 安然,龚吉蕊,尤鑫,等.不同龄级速生杨人工林土壤微生物数量与养分动态变化[J].植物生态学报,2011,35(4):389-401.
- AN R,GONG J R,YOU X,et al.Seasonal dynamics of soil microorganisms and soil nutrients in fast-growing *Populus* plantation forests of different ages in Yili,Xinjiang,China[J].Chinese journal of plant ecology,2011,35(4):389-401.
- [25] 温达志,魏平,张佑昌,等.鼎湖山亚热带森林细根分解干物质损失和元素动态[J].生态学杂志,1998(2):1-6.
- WEN D Z,WEI P,ZHANG Y C,et al.Dry mass loss and chemical changes of the decomposed fine roots in three China south subtropical forests at dinghushan[J].Chinese journal of ecology,1998(2):1-6.
- [26] 李娜,赵传燕,郝虎,等.海拔和郁闭度对祁连山青海云杉林叶凋落物分解的影响[J].生态学报,2021,41(11):4493-4502.
- LI N,ZHAO C Y,HAO H,et al.Decomposition and its nutrients dynamic of Qinghai spruce leaf litter with elevation gradient in Qilian Mountains[J].Acta ecologica Sinica,2021,41(11):4493-4502.
- [27] BALASUBRAMANIAN D,ARUNACHALAM K,DAS A K,et al.Decomposition and nutrient release of *Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms.under different trophic conditions in wetlands of eastern Himalayan foothills [J].Ecological engineering,2012,44:111-122.
- [28] EDMONDS,R L,TUTTLE,et al.Red alder leaf decomposition and nutrient release in alder and conifer riparian patches in western Washington,USA[J].Forest ecology and management,2010,259(12):2375-2381.
- [29] TAGLIAVINI M,TONON G,SCANDELLARI F,et al.Nutrient recycling during the decomposition of apple leaves (*Malus domestica*) and mowed grasses in an orchard[J].Agriculture ecosystems & environment,2006,118(1):191-200.