

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2024.06.037

张子胥, 胡丁猛, 卢昱存, 等. 抚育间伐条件下凋落物分解对海岸带防护林土壤有机碳稳定性的影响[J]. 水土保持学报, 2024, 38(6): 293-301.

ZHANG Zixu, HU Dingmeng, LU Yucun, et al. The impact of litter decomposition on soil organic carbon stability in coastal shelter forests under thinning[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(6): 293-301.

抚育间伐条件下凋落物分解对海岸带防护林 土壤有机碳稳定性的影响

张子胥^{1,2}, 胡丁猛³, 卢昱存^{1,4}, 吴其聪^{1,2}, 董智^{1,2}, 高鹏^{1,2}

(1. 山东农业大学林学院, 山东 泰安 271018; 2. 山东省高等学校黄河流域水土保持与林草生态保育协同创新中心, 山东 泰安 271018; 3. 山东省林业科学研究院, 山东济南城市生态系统国家定位观测研究站, 济南 250014; 4. 青岛市水利勘测设计研究院有限公司, 济南 250014)

摘要: [目的] 为阐明抚育间伐条件下凋落物分解和土壤有机碳(SOC)组分的变化特征, 揭示抚育间伐条件下凋落物分解对防护林 SOC 稳定性的影响。[方法] 在抚育间伐 3 年后, 以 3 种林分(麻栎林、黑松林和麻栎-黑松林)的海岸带防护林凋落物和表层(0—20 cm)土壤为研究对象, 采用凋落物原位分解、室内化学性质分析和随机森林模型等分析方法, 表征 3 种抚育间伐强度(对照 0, 轻度 15%, 重度 30%)下凋落物分解特征和 SOC 组分, 并分析其关系。[结果] 重度抚育间伐显著增加麻栎和麻栎-黑松凋落物在分解过程中的质量剩余, 较对照分别增加 22.36% 和 4.18%, 代表凋落物分解速率的 K 值变化特征趋势则与之相反; 麻栎林和麻栎-黑松林的 SOC、矿物结合有机碳(MAOC)和 SOC 稳定性均随抚育间伐强度升高显著增加; 在抚育间伐条件下, SOC 及其稳定性与凋落物分解过程中的氮、磷残留率极显著相关, 与凋落物分解速率不相关。[结论] 抚育间伐降低凋落物的分解速率, 但增加凋落物碳、氮和磷的残留率, 尤其在重度间伐条件下。抚育间伐提高 SOC 的稳定性, SOC 及其稳定性的变化主要受凋落物氮和磷的残留率影响, 其中磷残留率的影响最大。

关键词: 间伐; 人工林; 枯落物分解; 颗粒有机碳; 矿物结合有机碳

中图分类号: S714.2 文献标识码: A 文章编号: 1009-2242-(2024)06-0293-09

The Impact of Litter Decomposition on Soil Organic Carbon Stability in Coastal Shelter Forests Under Thinning

ZHANG Zixu^{1,2}, HU Dingmeng³, LU Yucun^{1,4}, WU Qicong^{1,2}, DONG Zhi^{1,2}, GAO Peng^{1,2}

(1. College of Forestry, Shandong Agricultural University, Tai'an, Shandong 271018, China; 2. Co-Innovation Center for Soil-Water and Forest-Grass Ecological Conservation in Yellow River Basin of Shandong Higher Education Institutions, Tai'an, Shandong 271018, China; 3. Shandong Academy of Forestry, Shandong Jinan Urban Ecosystem National Observation and Research Station, Jinan 250014, China; 4. Qingdao Water Resources Survey and Design Institute Co., Ltd., Jinan 250014, China)

Abstract: [Objective] To elucidate the characteristics of litter decomposition and changes in soil organic carbon (SOC) fractions under thinning, and to reveal the impact of litter decomposition on the stability of SOC in coastal shelter forests under thinning. [Methods] After three years of thinning, the litter and surface soil (0—20 cm) of coastal shelter forests (*Quercus acutissima* Carruth. (QAC), *Pinus thunbergii* Parl. (PTP) and mixed *Q. acutissima* Carruth. and *P. thunbergii* Parl. (QP) in Qingdao were studied. In situ decomposition of litter, indoor analyses of chemical properties, and random forest model were used to

收稿日期: 2024-09-29 修回日期: 2024-10-30 录用日期: 2024-10-31 网络首发日期 (www.cnki.net): 2024-12-11

资助项目: 山东省自然资源厅科技创新平台开放课题项目(济南城市森林生态系统固碳增汇功能监测评价研究); 国家自然科学基金项目(42207373); 山东省自然科学基金青年基金项目(ZR2021QD018)

第一作者: 张子胥(1994—), 男, 博士, 副教授, 主要从事生态修复和森林土壤碳循环研究。E-mail: zhangzx@sdau.edu.cn

通信作者: 吴其聪(1988—), 男, 博士, 讲师, 主要从事水土保持与生态修复研究。E-mail: qewu@sdau.edu.cn

<http://stbxb.alljournal.com.cn>

characterize the litter decomposition and SOC fractions under three different thinning intensities (control 0, light 15% and heavy 30%), and analyzed their relationships. [Results] Heavy thinning significantly increased the mass remaining of QAC and QP litter during decomposition, with an increase of 22.36% and 4.18% compared to the control, respectively. The trend of K-value changes representing litter decomposition rate was opposite to mass remaining. The SOC content, mineral associated organic carbon (MAOC) content, and SOC stability of QAC and QP all significantly increased with the increase of thinning intensity. The content and stability of SOC were significantly correlated with nitrogen and phosphorus residual rates during litter decomposition under thinning, but not with litter decomposition rate. [Conclusion] Thinning reduces the decomposition rate of litter, but increases the residual rates of carbon, nitrogen, and phosphorus in litter, especially under heavy thinning. Thinning improves the stability of SOC, and the changes in SOC content and stability are mainly influenced by the residual rates of nitrogen and phosphorus in litter, with phosphorus residual rate having the greatest impact.

Keywords: thinning; artificial forests; litter decomposition; POC; MAOC

Received: 2024-09-29

Revised: 2024-10-30

Accepted: 2024-10-31

Online(www.cnki.net): 2024-12-11

营造防护林是我国生态保护的重要措施之一,其在水土保持、防风固沙、水源涵养、气候调节及污染物减少等方面有十分重要的作用,同时也是我国陆地生态系统碳汇增量的主要来源^[1-2]。随着近 40 年的防护林体系建设,我国成为全球人工林面积增加最快、人工林最多的国家^[2]。然而,以中国人工林面积继续扩展的空间因可利用土地资源的限制逐渐缩小,造林难度不断攀升^[3]。同时,有研究^[4]表明,受密度高、结构单一和老化等原因的影响,现有防护林碳汇能力在 2035 年后将下降。抚育间伐作为一种基于林分密度调控的森林管理措施,被证实能提升防护林生态效益及林木碳汇方面具有良好效果^[5]。然而以往抚育间伐技术规程的制定以及防护林碳汇能力的评估主要聚焦于林木部分,常常忽略抚育间伐后土壤有机碳积累对于防护林生态系统碳汇的贡献^[6]。土壤作为陆地生态系统中最大的有机碳库,其碳储量是大气和陆地植被总和的 3~4 倍,土壤有机碳库的微小改变可能对大气碳库产生极大影响^[7]。因此,对现有低效防护林进行抚育间伐时,充分发掘林下土壤碳库的碳汇潜力,对于我国防护林提质增效和“双碳”战略的实现均具有重要意义。

在森林生态系统中,大部分植物生物量通常以凋落物的形式进入土壤,是土壤有机碳的重要来源,凋落物不仅连接地上和地下的生物地球化学循环系统,同时也是研究土壤碳库的一个重要环节^[8]。研究表明,就大尺度上而言,气候(温度和湿度)主导凋落物的分解,而在区域尺度上,凋落物的分解主要由林下小气候驱动,尤其是在快速分解的阶段^[9-10]。抚育间伐疏开上层林冠,林中空隙增多,更多的阳光可直接照射在地表,能够极大地改变林分和林下小气候^[11]。

抚育间伐对土壤碳库的影响总体分为 2 种观点:一种观点认为,抚育间伐降低物种对有限资源(光照、水分和养分)的竞争,从而通过增加植物的生产力以增加对土壤的碳输入;相反的观点是,抚育间伐改变林下小气候,从而刺激凋落物的分解,以减少对土壤的碳输入^[12]。然而,抚育间伐对凋落物分解变化特征的影响在不同研究中仍存在一定差异,可能是抚育间伐强度、林龄和气候等因素^[13]导致的。总之,由于影响因子的多样性和不确定性及抚育间伐对凋落物分解的复杂作用,抚育间伐对凋落物分解乃至土壤碳库的影响尚不清晰。

土壤有机质被视为土壤中最活跃的碳汇,其主要由复杂多变的有机单体和化合物组成,这些组分通常以非均质混合物的形式存在,而不同组分的降解性和周转率也存在差异,这些特性往往决定土壤有机碳的稳定性和规模^[14]。关于土壤有机碳(SOC)稳定性的研究中,通常将其按照尺寸和密度大小分为颗粒有机碳(POC)和矿物结合有机碳(MAOC)^[15]。MAOC 主要来源于微生物残体及其代谢产物,这部分碳极易与土壤中的小粒径颗粒紧密结合,受土壤黏土矿物的保护难以被分解,此过程被称为有机碳的矿物结合保护机制^[14-15]。相比之下,POC 更容易由植物衍生物生成,由于这部分碳缺乏矿物结合保护机制的保护,其在土壤中的平均停留时间相对较短,通常为几年到几十年不等^[14-15]。抚育间伐可以改变凋落物对土壤的养分输入,然而,它是否影响土壤有机碳组分和稳定性目前尚不清晰。

海岸带地区因其人口密度过高及经济社会活动频繁,成为典型的生态脆弱区^[16]。山东海岸线达 3 290 km,近几十年的脆弱区生态修复中营造大量的

海岸带防护林。目前,该地区防护林主要面临高密度、低质量和稳定性差的问题^[17]。基于此,本研究以 3 种林分(主要是麻栎林、黑松林和麻栎—黑松林)的青岛市海岸带防护林凋落物和表层土壤(0—20 cm)为研究对象,通过开展为期 1 年的凋落物原位分解试验,分析 3 种抚育间伐强度下(对照 CT 0,轻度 LT 15%,重度 HT 30%)凋落物分解及养分残留特征,同时采用基于尺寸的物理分离法测定 POC 和 MAOC 的含量以定量表征 SOC 的稳定性,最终利用相关性分析和利用随机森林模型等手段研究凋落物分解与 SOC 稳定性的关系,揭示抚育间伐条件下凋落物分解对海岸带防护林土壤有机碳稳定性的影响,为我国防护林提质增效和“双碳”战略的实现提供数据支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究地点位于青岛市黄岛区地理位置为 35°46′57.9″—35°48′36.7″N,119°45′35.7″—119°46′51.2″E 的藏马山林场。该区域紧邻黄海岸线,距离约为 13 km,属典型的海岸带地区。研究区气候特征鲜明,为温暖湿润、四季分明的大陆性气候,因距离海洋较近常伴随有来自海洋的湿润气流,从而兼具海洋性气候温和湿润的特点。年平均气温为 12.7 °C,降水量为 662.1 mm。中国土壤分类系统将其划分为酸性岩石形成的棕壤。2000 年前后该地区实施大规模的海岸带防护林营造工程,其主要构成的林分类型包括麻栎纯林、黑松纯林和麻栎-黑松混交林。研究地点内防护林林龄约 20 年,然而由于造林以来该地区严重缺乏抚育与管理措施,导致森林密度过高,麻栎、黑松和麻

栎—黑松混交林的密度分别达到 52.3 万,48.8 万,57.5 万棵/hm²。因此,林分郁闭且光照不良,进而导致生态系统比较脆弱,稳定性比较差,森林质量不高。

1.2 样地设置与样品采集

1.2.1 抚育间伐处理 2019 年 8 月在青岛市藏马山林场选择麻栎纯林、黑松纯林和麻栎—黑松混交林 3 种不同林分类型,每种林分类型并设置 3 个重复样地,共计 27 个样地(3 种林分×3 种强度×3 个重复),每个样地大小为 20 m×20 m。抚育间伐措施在每种林分各设置 3 种抚育间伐强度,分别为对照组(0)、轻度间伐(15%)和重度间伐(30%),间伐强度严格遵循国家标准《森林抚育规程》(GB/T 15781—2015)^[18],为避免边缘效应,在每个样地周围设置 5 m 的缓冲区。为确保初次间伐过程中,林地的郁闭度降低幅度有效控制在不超 0.2 的范围内,间伐强度应根据林分蓄积量的减少设定。对于同一防护林类型下不同抚育间伐强度的样地,应确保它们在地理条件上保持相似性,特别是坡度和坡向 2 个关键因素需保持一致,因此采用随机区组设计。抚育间伐后的样地基本信息见表 1。抚育间伐采用克拉夫特林木分级方法,将林分林木分为 I 级木(优势木)、II 级木(亚优势木)、III 级木(中等木)、IV 级木(被压木)、V 级木(濒死木、枯死木)。按照设定的强度伐除大部分 V 级木(保留黑松枯死木)和大部分 IV 级木,对影响林木生长的干扰树也进行伐除。为保证样地内郁闭度能均匀下降,避免局部出现林下空地,随后进行整体疏枝。全部作业完成之后,进行林下清理,清除树叶、细枝和修剪后留下的有机碎片避免抚育间伐和疏枝等作业产生的残留物对林下土壤和原有凋落物的影响。

表 1 海岸带防护林不同抚育间伐强度下林分结构特征

Table 1 Characteristics of stand structure under different thinning intensities in coastal zone shelter forests

防护林类型	间伐强度	蓄积量/ (m ³ ·hm ⁻²)	平均树高/ m	胸径/ cm	郁闭度/ %	胸高断面面积/ (m ² ·hm ⁻²)	坡度/ (°)	坡向
麻栎	对照	7 325	8.96	9.85	96.23	4129	19.21	东南
	轻度	6 270	9.65	10.18	91.82	3514	20.83	东南
	重度	5 113	9.82	10.13	82.11	2743	19.41	东南
黑松	对照	5 338	4.11	8.47	77.35	3716	17.20	东南
	轻度	4 527	5.01	10.78	76.29	3108	18.15	东南
	重度	3 843	5.33	11.13	71.84	2513	19.68	东南
麻栎-黑松	对照	7 159	6.21	8.27	94.73	4469	21.04	东南
	轻度	6 107	6.57	10.55	92.12	3755	22.39	东南
	重度	4 933	7.15	10.94	79.98	3070	21.21	东南

1.2.2 凋落物网袋布设和样品采集 凋落物的分解过程采用网袋法量化。于 2021 年 8 月在各林分随机布设 3 个 2 m×2 m 的样方。然后用网袋收集每个样方内的表层完整凋落物并标号,27 个样地共收集

网袋 81 个,送回实验室进行烘干处理直至恒重,然后将烘干后的 16 g 凋落物装入孔径为 0.2 mm 的网袋中(按照凋落物叶片的质量比确定混交林的凋落物重量)。完成上述步骤后,取剩余凋落物约 10 g 装入自

封袋,共计 27 份,用于分解前碳、氮和磷含量的测定。其余凋落物在对应样方内均匀铺开,固定网袋模拟自然条件下的分解过程。12 个月以后,将网袋全部带回实验室,烘干后称重,用于测定分解后凋落物有机碳、全氮和全磷含量。

1.2.3 土壤样品采集 土壤样品的采集应与凋落物网袋回收同时进行,土壤取样采用五点取样法挖剖面采集表层土(0—20 cm)样品,将同一样地的 5 个取样点的土壤混合形成 1 份,共计 27 份土壤样品。去除较大颗粒与杂质的土壤样品过 2 mm 筛,随后进行自然风干处理,再将其研磨至过 0.15 mm 筛用于测定土壤有机碳、全氮和全磷。

1.3 指标测定

采集的 27 份凋落物和 27 份土壤样品分别采用重铬酸钾氧化外加加热法、半微量开氏法、钼锑抗比色法测定有机碳、全氮和全磷^[19]。27 份土壤样品的颗粒有机碳(POC)和矿物结合有机碳(MAOC)采用湿筛法^[15]。具体步骤为,称取 10 g 风干并通过 2 mm 筛网筛分的土壤样品将其放置于洗净的离心管中,向离心管中加入 50 mL 浓度为 0.5% 的六偏磷酸钠溶液,进行连续 18 h 的振荡处理。采用孔径 53 μm 的筛子对上述处理过的溶液进行湿筛,留在筛上的为 POC,其粒径在 53~2 000 μm,其余的为粒径 < 53 μm MAOC。对分离后的土壤进行烘干、称重、研磨、过筛(0.15 mm),采用重铬酸钾氧化外加加热法测定两部分的有机碳含量。根据测得的有机碳含量及两部分的质量分数,相乘计算出 POC 和 MAOC 的具体数值。土壤有机碳稳定性采用 MAOC 和 POC 的比值表示^[14]。

1.4 数据分析

质量剩余是指凋落物在单位时间后残留质量占初始质量的百分比,即:

$$M_R = (M_r / M_0) \times 100\% \quad (1)$$

式中: M_R 为质量剩余(%); M_r 为 r 时间后凋落物的残留质量(g); M_0 为放置初期凋落物的质量(g)。

采用 Olson 指数衰减模型计算分解常数(K 值)^[20],公式为:

$$M_r / M_0 = \exp^{-kt} \quad (2)$$

式中: k 为凋落物分解常数 K 值; t 为凋落物分解时间(a)。

养分残留率计算公式为:

$$NMR = (C_t M_r / C_0 M_0) \times 100\% \quad (3)$$

式中:NMR 为凋落物养分残留率(%); C_0 为凋落物分解前的养分质量分数(g/kg); C_t 为凋落物分解后的养分质量分数(g/kg)。

本研究采用单因素方差分析(Tukey-test)以探究不同抚育间伐强度下同一海岸带防护林类型的凋落物碳、氮、磷含量、凋落物分解速率、凋落物养分残留率和土壤有机碳组分之间的显著性差异。林分特征、凋落物分解和养分质量残留率与有机碳稳定性的关系采用皮尔森(Pearson)相关分析确定。随机森林模型(random forest)用于对影响 POC、MAOC 和有机碳稳定性的因素进行重要性排序,依据各参数对均方误差的平均减少值来评估其重要性。数据分析使用 R 4.3.2 软件完成,图形绘制使用 Origin 2018 软件。

2 结果与分析

2.1 抚育间伐条件下凋落物分解速率和养分释放变化特征

由表 2 可知,重度抚育间伐后,麻栎凋落物分解后的碳含量分别较轻度抚育间伐和对照提高 21.26% 和 23.10%,具有显著差异($p < 0.05$);氮含量的变化的趋势与碳含量类似,较轻度抚育间伐和对照而言,重度抚育间伐导致氮含量分别显著增加 14.65% 和 23.97%($p < 0.05$);磷含量则未发现随间伐强度不同有较大变化。对黑松来说,重度抚育间伐和轻度抚育间伐均显著增加凋落物分解后的磷含量($p < 0.05$),增幅度分别为 1.83% 和 4.28%。麻栎-黑松林的凋落物分解后养分含量变化较大的是氮,在重度抚育间伐条件下较轻度抚育间伐和对照分别显著减少 27.22% 和 28.72%($p < 0.05$)。受抚育间伐影响凋落物碳、氮和磷均呈不同程度变化,且不同林分变化趋势不同。

由图 1 可知,重度抚育间伐显著增加麻栎和麻栎-黑松凋落物在分解过程中的质量剩余($p < 0.05$),较对照分别增加 22.36% 和 4.18%,然而轻度间伐同对照没有显著差异($p > 0.05$)。 K 值的变化特征与凋落物质量剩余变化特征的趋势相反,即重度抚育间伐显著减少麻栎和麻栎-黑松凋落物在分解过程中的 K 值($p < 0.05$),轻度间伐同对照也同样没有显著差异($p > 0.05$)。受抚育间伐影响凋落物分解变慢,但黑松受到的影响较小。

由图 2 可知,凋落物碳残留率对抚育间伐的响应特征在 3 种防护林类型下存在差异($p < 0.05$),重度抚育间伐显著增加麻栎凋落物分解过程中的碳残留率($p < 0.05$),而黑松林的氮残留率在轻度抚育间伐则显著减少,麻栎黑松林在 3 种抚育间伐强度下没有显著差异($p > 0.05$)。抚育间伐条件下麻栎和黑松凋落物分解过程中的氮残留率变化趋势相似,在重度抚育间伐条件下均出现显著增加($p < 0.05$)。在抚育间伐条件下仅麻栎的磷残留率出现显著变化,重度抚育间伐较对照显著增加 26.07%($p < 0.05$)。总体来看,

抚育间伐增加麻栎凋落物分解过程中的碳、氮和磷的 残留,提高凋落物的养分留存量。

表 2 不同抚育间伐强度下凋落物分解前后碳、氮、磷含量变化特征

Fig.2 Change characteristics of litter carbon, nitrogen and phosphorus before and after decomposition under different thinning intensities

防护林类型	间伐强度	分解前			分解后		
		碳	氮	磷	碳	氮	磷
麻栎	对照	389.15±17.83a	15.91±0.53a	3.67±0.06a	329.01±21.19b	16.73±0.42b	3.58±0.03a
	轻度	392.51±10.95a	16.95±0.45a	3.43±0.06a	334.72±13.49b	18.09±0.59b	3.82±0.14a
	重度	408.51±16.77a	18.41±1.49a	3.76±0.17a	405.79±9.77a	20.74±0.72a	3.91±0.28a
黑松	对照	464.49±7.90a	11.50±0.72a	2.14±0.06a	471.64±7.31a	13.98±0.16a	3.27±0.05b
	轻度	499.59±20.36a	12.73±1.31a	2.23±0.06a	439.98±18.04a	14.78±0.76a	3.41±0.01a
	重度	461.63±13.92a	9.71±0.30a	2.16±0.08a	433.35±6.89a	14.88±1.42a	3.33±0.02ab
麻栎-黑松	对照	461.82±5.04a	14.23±0.26ab	3.73±0.02a	397.51±10.77a	18.11±0.85a	4.57±0.19a
	轻度	440.81±16.37a	15.15±0.73a	3.69±0.21a	354.91±9.30a	18.49±0.99a	4.40±0.05a
	重度	478.27±21.89a	12.31±0.78b	3.77±0.04a	388.24±24.88a	13.18±0.31b	4.17±0.44a

注:表中数据为平均值±标准差;同列不同小写字母表示在相同防护林类型的不同抚育间伐强度下差异显著($p < 0.05$)。下同。

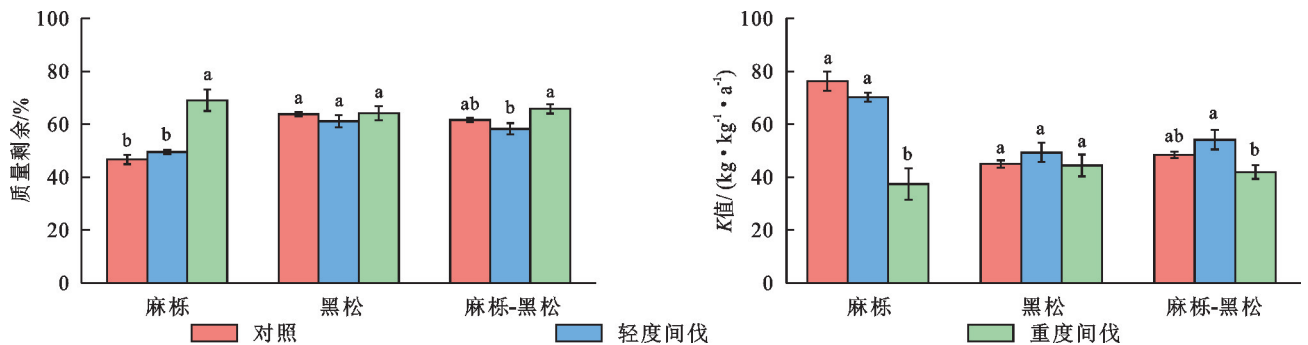


图 1 不同抚育间伐强度下凋落物分解 1 年后的质量残留和分解常数

Fig.1 Mass remaining and K-value of litter after one-year decomposition under different thinning intensities

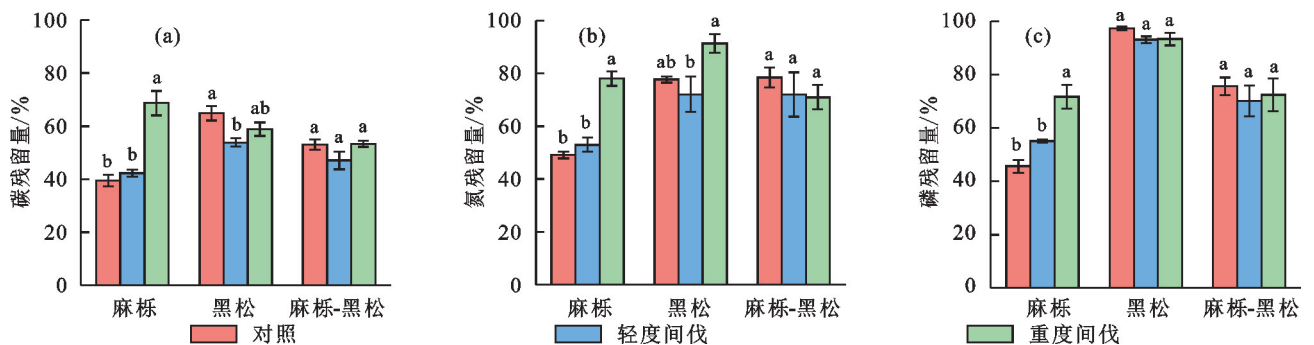


图 2 不同抚育间伐强度下凋落物分解 1 年后的碳、氮、磷残留

Fig.2 Carbon, nitrogen, and phosphorus remaining of litter after one-year decomposition under different thinning intensities

2.2 抚育间伐条件下土壤有机碳及其稳定性的变化特征

由图 3 可知,重度抚育间伐显著增加麻栎和麻栎-黑松的 SOC 含量($p < 0.05$),较对照分别增加 2.09,1.11 g/kg,轻度间伐较对照则没有显著差异($p > 0.05$)。MAOC 的变化趋势与 SOC 相似,麻栎和麻栎-黑松的 MAOC 含量在重度抚育间伐条件下显著增加($p < 0.05$),较对照分别增加 3.40,5.44 g/kg。在抚育间伐条件下 POC 含量仅在麻栎-黑松显著降低,重度抚育间伐较对照降低 4.33 g/kg($p > 0.05$)。重度

抚育间伐增加麻栎和麻栎-黑松的 SOC 稳定性($p < 0.05$),轻度抚育间伐较对照均不存在显著差异($p > 0.05$)。另外,在抚育间伐条件下黑松的 SOC 含量、MAOC 含量、POC 含量和 SOC 稳定性均不存在显著变化($p > 0.05$)。抚育间伐提高土壤有机碳含量,并通过矿物结合保护机制提高土壤有机碳稳定性。

2.3 抚育间伐条件下凋落物分解与土壤有机碳稳定性的关系

由图 4 可知,SOC 含量、MAOC 含量、POC 含量和 SOC 稳定性变化均不同程度与林分特征有关。SOC 含

量与林分蓄积量和郁闭度呈极显著负相关($p < 0.01$),与胸高断面积和树高显著负相关($p < 0.05$)。POC 含量与树高呈显著负相关($p < 0.01$)。MAOC 含量

与树高和胸径显著正相关($p < 0.05$),与胸高断面积极显著负相关($p < 0.01$)。有机碳稳定性则与树高呈极显著正相关($p < 0.01$)。

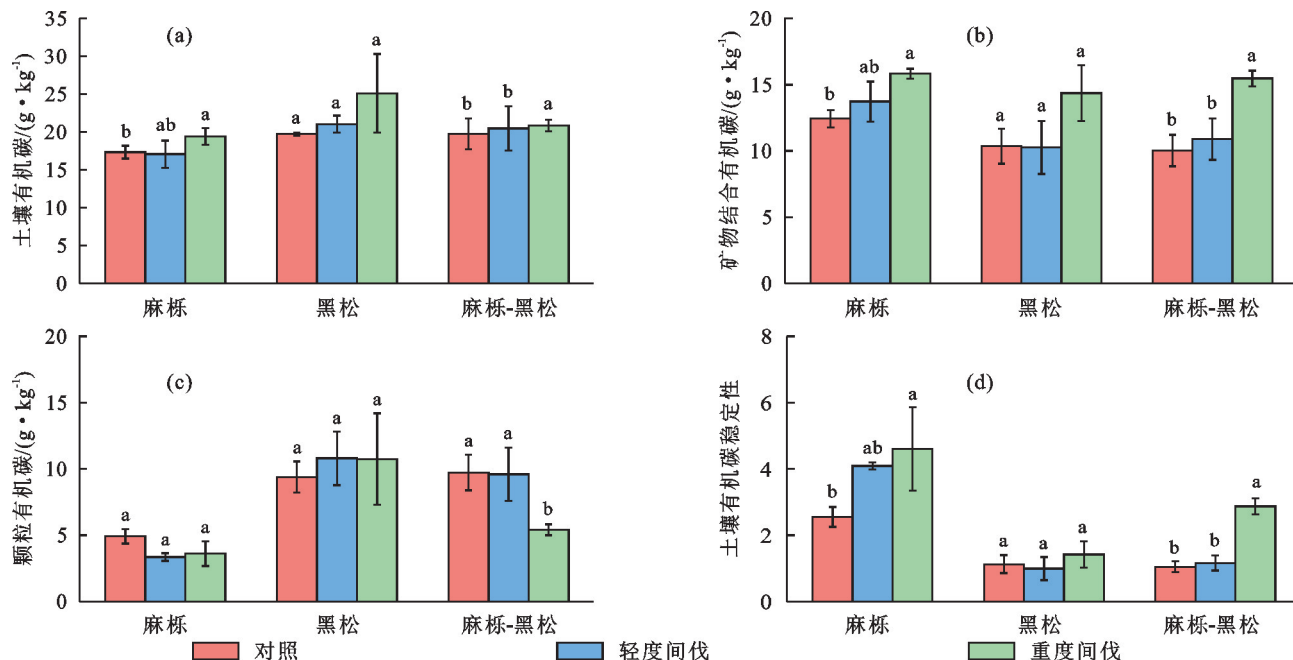


图 3 不同抚育间伐强度下土壤有机碳组分和稳定性变化特征

Fig.3 Change characteristics of SOC fractions and stability under different thinning intensities

由图 4 可知,氮残留率与 POC 含量和 SOC 含量呈极显著正相关($p < 0.01$)。磷残留率与 POC 含量和 SOC 含量呈极显著正相关,与 SOC 稳定性极显著负相关($p < 0.01$)。SOC 含量、MAOC 含量、POC 含量和 SOC 稳定性变化与 K 值和质量剩余均不存在显著关系($p > 0.05$)。SOC 及其稳定性主要与凋落物分解过程中的养分残留率有关,与分解速率关系较小。

排序为 K 值 > 碳残留率 > 磷残留率 > 氮残留率,对 SOC 稳定性影响的重要性排序为磷残留率 > 氮残留率 > K 值 > 碳残留率(图 5)。抚育间伐条件下 SOC 及其稳定性的变化主要受凋落物氮和磷的残留率影响,其中磷残留率的影响最大。

3 讨论

3.1 抚育间伐对凋落物分解及其养分残留的影响

环境和基质是控制凋落物分解的重要因素,而抚育间伐往往能够改变林下小气候,对凋落物的分解和养分的释放有一定的影响^[21-22]。一般认为,抚育间伐有利于凋落物分解主要由于林冠被疏开,从而使到达地表的光线更多^[23]。本研究中,对 3 种类型的防护林进行抚育间伐措施后,凋落物分解的速率在轻度抚育间伐条件下未发生变化,但重度抚育间伐下,麻栎-黑松林以及麻栎林均有所降低(图 1)。是因为光线虽然有利于凋落物分解(即光降解效应),但也带来更高的环境温度和更低的土壤水分,反而是凋落物分解的不利因素,当抚育间伐强度达到重度抚育间伐(30%)时,土壤水分降低所导致的凋落物分解减少量抵消,甚至大于光降解导致的凋落物分解增加量。与本研究相似,BLANCO 等^[24]研究发现,间伐条件下凋落物分解的控制因素是土壤水分而不是光照和温度,因为水分与微生物等分解者数量和活性的关系更加密切。

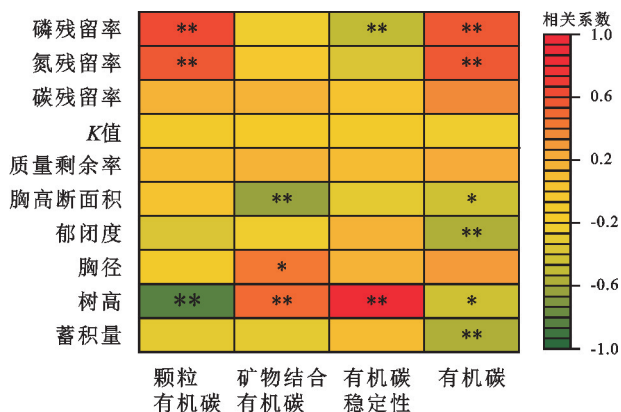


图 4 抚育间伐条件下凋落物分解与土壤有机碳稳定性的相关性

Fig.4 Correlation between litter decomposition and SOC stability under thinning

抚育间伐条件下凋落物分解和养分残留率对 POC 含量影响的重要性排序为磷残留率 > 氮残留率 > 碳残留率 > K 值,对 MAOC 含量影响的重要性

另外,关于光降解加速凋落物分解的报道几乎都位于干旱和半干旱地区的草原生态系统,这些地区的微生物群落对于干旱具有更高的耐受度^[25]。因此,

在本研究所处的海岸带防护林地区轻度抚育间伐对凋落物分解速率的影响较小,重度抚育间伐降低凋落物分解速率。

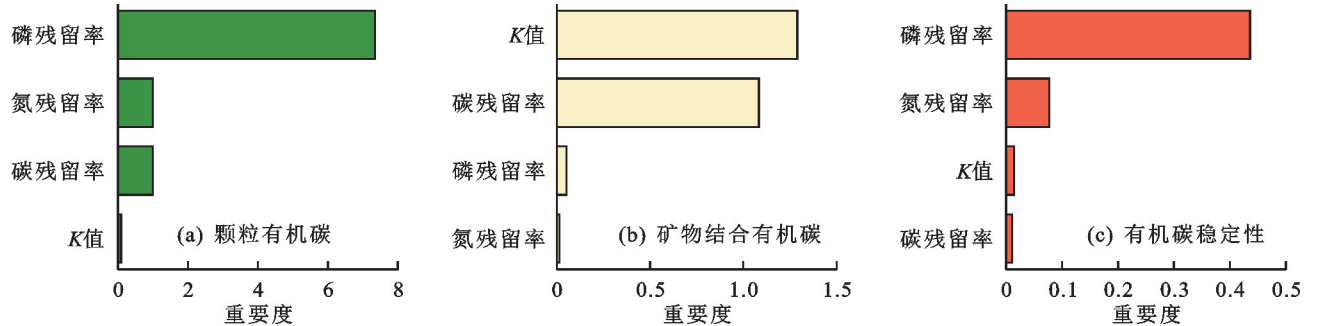


图 5 抚育间伐条件下凋落物分解和养分残留对土壤有机碳稳定性的相对重要性

Fig.5 The relative importance of litter decomposition and nutrient residue on SOC stability under thinning

在凋落物分解过程中,不同凋落物元素的物理和生化过程均存在差异,其释放通常也不同^[21]。在本研究中,凋落物的碳、氮和磷养分残留量均在 1 年内出现不断减少的趋势(表 2),是由于通过微生物分解和物理淋滤的共同作用,各元素逐渐释放^[26]。抚育间伐使碳、氮和磷的养分残留率均得到有效提高,特别是重度抚育间伐下的麻栎林,较对照而言,碳、氮和磷的养分残留率分别增加 29.28%,29.00%,26.07%(图 2)。前人^[27]对杉木人工林的研究发现,间伐导致凋落物氮的净积累,与本研究结果类似。另有研究^[24]在地中海的抚育间伐试验的结果表明,抚育间伐不会增加凋落物碳、氮和磷的养分残留,这或许与其长达 3 年的分解试验时间有关,也可能与本试验的间伐强度设置较小有关。总体来说,抚育间伐能够显著降低凋落物在快速分解阶段(即 1 年内)释放的碳、氮和磷等养分,有利于凋落物在慢速分解期通过物理淋滤向防护林土壤输入养分。

3.2 抚育间伐通过凋落物分解对土壤有机碳组分和稳定性的影响

在土壤碳库中,POC 是易于分解的组分,主要由植物衍生物组成,而 MAOC 一直被认为较为稳定的组分,在土壤中受矿物结合保护较难被分解^[15]。本研究结果显示,抚育间伐提高麻栎和麻栎-黑松林土壤的 SOC、MAOC 含量和 SOC 稳定性(图 3),说明抚育间伐有利于 SOC 的矿物保护机制的形成,更高的 SOC 稳定性进而促进 SOC 的积累。对于黑松林来说,抚育间伐强度并未对 SOC 各组分及其稳定性产生影响(图 3),表明抚育间伐对黑松林(针叶林)土壤碳库的影响相较于麻栎林(阔叶林)和麻栎-黑松林(混交林)来说并不灵敏。可能与黑松林地表覆盖的凋落物层难分解性有关,减少外界环境对土壤碳库的影响^[28]。

本研究的结果表明,抚育间伐条件下土壤碳组分

和稳定性主要受凋落物氮和磷的残留率的影响(图 4)。这是因为凋落物是表层土壤养分的主要来源,凋落物在分解过程中的养分残留量极大地影响其对土壤的养分输入量和效率^[29]。同时,已有研究^[30-31]表明,外源养分输入的变化能够改变微生物群落结构和活性,进而改变微生物碳利用效率,微生物及其衍生物被认为是 MAOC 的主要成分,可能是抚育间伐条件下凋落物氮和磷的残留率的影响 SOC 稳定性的主要原因。随机森林模型结果显示,凋落物在分解过程中的磷残留率对土壤有机碳稳定性的影响最大(图 5),表明抚育间伐条件下凋落物磷残留率的提高可能缓解防护林土壤微生物的磷限制。但是,上述观点还需要测定微生物胞外酶等指标进一步验证。

4 结论

在中国北方海岸带防护林地区,抚育间伐降低凋落物的分解速率,但增加凋落物碳、氮和磷的残留率,尤其在重度间伐(30%)条件下。防护林土壤有机碳含量和矿物结合有机碳含量随抚育间伐强度升高逐渐增加,抚育间伐提高土壤有机碳的稳定性。抚育间伐条件下土壤有机碳组分和稳定性的变化主要受凋落物氮和磷的残留率的影响,其中磷残留率的影响最大。但是,抚育间伐条件下凋落物磷残留率的提高是否通过缓解防护林土壤微生物的磷限制,从而提高土壤有机碳稳定性,仍需测定微生物胞外酶等指标进一步验证。

参考文献:

[1] 徐丽,于贵瑞,何念鹏.1980s—2010s 中国陆地生态系统土壤碳储量的变化[J].地理学报,2018,73(11):2150-2167.

XU L, YU G R, HE N P. Changes of soil organic carbon storage in Chinese terrestrial ecosystems from the 1980s to the 2010s[J].Acta Geographica Sinica,2018,73(11):2150-2167.

- [2] 朱教君. 防护林学研究现状与展望[J]. 植物生态学报, 2013, 37(9): 872-888.
ZHU J J. A review of the present situation and future prospect of science of protective forest[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2013, 37(9): 872-888.
- [3] 刘世荣, 杨予静, 王晖. 中国人工林经营发展战略与对策: 从追求木材产量的单一目标经营转向提升生态系统服务质量和效益的多目标经营[J]. 生态学报, 2018, 38(1): 1-10.
LIU S R, YANG Y J, WANG H. Development strategy and management countermeasures of planted forests in China: Transforming from timber-centered single objective management towards multi-purpose management for enhancing quality and benefits of ecosystem services [J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(1): 1-10.
- [4] CAI W X, HE N P, LI M X, et al. Carbon sequestration of Chinese forests from 2010 to 2060: Spatiotemporal dynamics and its regulatory strategies [J]. Science Bulletin, 2022, 67(8): 836-843.
- [5] 刘晓曼, 王超, 高吉喜, 等. 服务双碳目标的中国人工林生态系统碳增汇途径[J]. 生态学报, 2023, 43(14): 5662-5673.
LIU X M, WANG C, GAO J X, et al. Approaches to carbon sequestration enhancement in China's plantation ecosystem for carbon peaking and carbon neutrality goals [J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(14): 5662-5673.
- [6] MILLS M B, MALHI Y, EWERS R M, et al. Tropical forests post-logging are a persistent net carbon source to the atmosphere[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2023, 120(3): e2214462120.
- [7] LAL R. Soil carbon sequestration to mitigate climate change[J]. Geoderma, 2004, 123(1/2): 1-22.
- [8] WIEDER W R, BOEHNERT J, BONAN G B. Evaluating soil biogeochemistry parameterizations in Earth system models with observations [J]. Global Biogeochemical Cycles, 2014, 28(3): 211-222.
- [9] ZHANG X Y, WANG W. Control of climate and litter quality on leaf litter decomposition in different climatic zones[J]. Journal of Plant Research, 2015, 128(5): 791-802.
- [10] WANG W B, CHEN D S, ZHANG Q, et al. Effects of mixed coniferous and broad-leaved litter on bacterial and fungal nitrogen metabolism pathway during litter decomposition[J]. Plant and Soil, 2020, 451(1): 307-323.
- [11] 王成, 庞学勇, 包维楷. 低强度林窗式疏伐对云杉人工纯林地表微气候和土壤养分的短期影响[J]. 应用生态学报, 2010, 21(3): 541-548.
WANG C, PANG X Y, BAO W K. Short term effects of low intensity thinning simulated by gap on ground microclimate and soil nutrients of pure spruce plantation [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2010, 21(3): 541-548.
- [12] JANDL R, LINDNER M, VESTERDAL L, et al. How strongly can forest management influence soil carbon sequestration? [J]. Geoderma, 2007, 137(3/4): 253-268.
- [13] ZHANG X Z, GUAN D X, LI W B, et al. The effects of forest thinning on soil carbon stocks and dynamics: A meta-analysis [J]. Forest Ecology and Management, 2018, 429: 36-43.
- [14] COTRUFO M F, RANALLI M G, HADDIX M L, et al. Soil carbon storage informed by particulate and mineral-associated organic matter [J]. Nature Geoscience, 2019, 12: 989-994.
- [15] LAVALLEE J M, SOONG J L, COTRUFO M F. Conceptualizing soil organic matter into particulate and mineral-associated forms to address global change in the 21st century [J]. Global Change Biology, 2020, 26(1): 261-273.
- [16] CAI F, CAO C, QI H S, et al. Rapid migration of mainland China's coastal erosion vulnerability due to anthropogenic changes [J]. Journal of Environmental Management, 2022, 319: e115632.
- [17] 王月海, 韩友吉, 夏江宝, 等. 黄河三角洲盐碱地低效防护林现状分析与类型划分[J]. 水土保持通报, 2018, 38(2): 303-306.
WANG Y H, HAN Y J, XIA J B, et al. Present situation analysis and type division of low-benefit protection forest in saline alkali soil of Yellow River Delta [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2018, 38(2): 303-306.
- [18] 国家林业局. GB/T 15781—2015 森林抚育规程[S]. 中华人民共和国: 中国国家标准化管理委员会, 2015.
National Forestry Administration. GB/T 15781—2015 Regulations for forest tending [S]. People's Republic of China: China National Standardization Administration, 2015.
- [19] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
BAO S D. Soil and agricultural chemistry analysis [M]. 3rd Edition. Beijing: China Agriculture Press, 2000.
- [20] OLSON J S. Energy storage and the balance of producers and decomposers in ecological systems [J]. Ecology, 1963, 44(2): 322-331.
- [21] YANG K, ZHU J J, ZHANG W W, et al. Litter decomposition and nutrient release from monospecific and mixed litters: Comparisons of litter quality, fauna and decomposition site effects [J]. Journal of Ecology, 2022, 110(7): 1673-1686.
- [22] BRAVO-OVIEDO A, RUIZ-PEINADO R, ONRUBIA

- R, et al. Thinning alters the early-decomposition rate and nutrient immobilization-release pattern of foliar litter in Mediterranean oak-pine mixed stands[J]. *Forest Ecology and Management*, 2017, 391: 309-320.
- [23] MAO B, ZHAO L, ZHAO Q, et al. Effects of ultraviolet (UV) radiation and litter layer thickness on litter decomposition of two tree species in a semi-arid site of Northeast China[J]. *Journal of Arid Land*, 2018, 10(3): 416-428.
- [24] BLANCO J A, IMBERT J B, CASTILLO F J. Thinning affects *Pinus sylvestris* needle decomposition rates and chemistry differently depending on site conditions[J]. *Biogeochemistry*, 2011, 106(3): 397-414.
- [25] HUANG G, LI Y. Photodegradation effects are related to precipitation amount, precipitation frequency and litter traits in a desert ecosystem[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2017, 115: 383-392.
- [26] WANG L F, CHEN Y M, ZHOU Y, et al. Environmental conditions and litter nutrients are key determinants of soluble C, N, and P release during litter mixture decomposition[J]. *Soil and Tillage Research*, 2021, 209: e104928.
- [27] 肖文娅,刁娇娇,费菲,等.不同强度间伐对杉木人工林凋落物分解速率的影响[J].*生态环境学报*, 2016, 25(8): 1291-1299.
- XIAO W Y, DIAO J J, FEI F, et al. Effects of different intensity thinning on litter decomposition in Chinese fir plantations[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2016, 25(8): 1291-1299.
- [28] WANG C Y, LÜ Y N, WANG L, et al. Insights into seasonal variation of litter decomposition and related soil degradative enzyme activities in subtropical forest in China[J]. *Journal of Forestry Research*, 2013, 24(4): 683-689.
- [29] QIN Q Q, WANG H Y, LI X, et al. Spatial heterogeneity and affecting factors of litter organic carbon and total nitrogen over natural spruce-fir mixed forests in northeastern China[J]. *CATENA*, 2019, 174: 293-300.
- [30] 冯晓娟,戴国华,刘婷,等.从生物地球化学视角理解土壤碳封存的机制和潜在途径[J].*中国科学:地球科学*, 2024, 54(11): 3421-3432.
- FENG X J, DAI G H, LIU T, et al. 2024. Understanding the mechanisms and potential pathways of soil carbon sequestration from the biogeochemistry perspective[J]. *Science China Earth Sciences*, 2024, 54(11): 3421-3432.
- [31] KUZUYAKOV Y. Priming effects: Interactions between living and dead organic matter[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2010, 42(9): 1363-1371.
- components in litter of several native trees at different phenological stages in the Rainy Area of West China[J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2019, 25(1): 9-15.
- [26] ZHANG Y, LI P F, LIU X J, et al. Changes in soil aggregate fractions, stability, and associated organic carbon and nitrogen in different land use types in the Loess Plateau, China[J]. *Sustainability*, 2022, 14(7): e3963.
- [27] LIU M, HAN G L, ZHANG Q. Effects of soil aggregate stability on soil organic carbon and nitrogen under land use change in an erodible region in Southwest China[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2019, 16(20): e3809.
- [28] WU Y, WANG Q, WANG H M, et al. Effects of poplar shelterbelt plantations on soil aggregate distribution and organic carbon in Northeastern China[J]. *Forests*, 2022, 13(10): e1546.

(上接第 292 页)

- [23] 程欢,宫渊波,付雨欣,等.四川盆地西南缘不同林分类型土壤团聚体稳定性及有机碳组分特征[J].*水土保持学报*, 2018, 32(5): 109-115.
- CHENG H, GONG Y B, FU Y X, et al. Soil aggregate stability and characteristics of organic carbon components in three forests of the southwest edge of Sichuan Basin[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2018, 32(5): 109-115.
- [24] 陈玉真,王峰,尤志明,等.不同植茶年限茶园土壤的物理性状及渗透性能[J].*山地学报*, 2016, 34(1): 38-45.
- CHEN Y Z, WANG F, YOU Z M, et al. Soil physical properties and infiltration capability with different tea plantation ages[J]. *Mountain Research*, 2016, 34(1): 38-45.
- [25] 何聪,任颖,麦淑媛,等.华西雨屏区几种乡土树种不同物候关键时期凋落物的有机组分特征[J].*应用与环境生物学报*, 2019, 25(1): 9-15.
- HE C, REN Y, MAI S Y, et al. Characteristics of organic