

杉木凋落物对土壤生物群落结构的影响研究进展

曾雅玲^{1, 2}, 黄丽娜^{1, 2}, 王小虎^{1, 2} 马祥庆^{1, 2}

(1.福建农林大学林学院, 2.国家林草局杉木工程技术研究中心, 福建 福州 350002)

摘要: 为解决杉木大量连续栽培导致杉木林土壤质量衰退的问题, 本文从杉木凋落物对其林下的土壤微生物种群的丰度、土壤微生物群落结构、土壤酶特性、土壤动物方面的相互影响进行探讨, 进一步揭示凋落物及其土壤生物对杉木生长的影响作用, 为杉木人工林合理经营提供一定的参考。国内外有不少凋落物对杉木人工林长期生产力保持的相关研究, 但是多局限于凋落物自身的输入对土壤的影响, 杉木凋落物对土壤生物的丰度、群落、活性的影响研究相对还较少, 而且受地理位置的影响。而杉木土地质量的恢复取决于各种因素的相互影响, 对于人为管理杉木人工林而言, 如何避免杉木人工林结构的单一性, 增加生物多样性, 以及凋落物及林下植被对杉木地力的维护作用, 杉木凋落物对杉木林多层群落结构的影响为今后研究的主要方向。

关键字: 杉木; 凋落物; 土壤质量; 土壤酶; 土壤生物

Research progress on the influence of Chinese fir litter on soil biological community structure

Zeng Yaling, Huang Lina, Wang Xiaohu, Ma Xiangqing

(1.College of Forestry, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou, Fujian 350002, China; 2.Chinese fir engineering technology research center of national forestry and grassland bureau, Fuzhou, Fujian 350002, China;)

Abstract : In order to solve the problem of soil quality decline caused by a large number of continuous cultivation of Chinese fir, this paper discusses the interaction of Chinese fir litter on the abundance of soil microbial population, soil microbial community structure, soil enzyme characteristics and soil animals under the forest, and further reveals the influence of litter and soil organisms on the growth of Chinese fir, which provides certain reference for the rational management of Chinese fir plantations. At home and abroad, there are many researches on the long-term productivity maintenance of Chinese fir plantation by litter, but most of them are limited to the impact of litter input on soil. The research on the impact of Chinese fir litter on soil biological abundance, community and activity is relatively few, and it is affected by geographical location. The restoration of Chinese fir land quality depends on the mutual influence of various factors. For artificial management of Chinese fir plantation, how to avoid the singleness of Chinese fir plantation structure, increase biodiversity, and the maintenance of litter and understory vegetation on Chinese fir soil fertility, and the influence of Chinese fir litter on the multi-layer community structure of Chinese fir plantation are the main research directions in the future.

Key words : Chinese fir ; litter soil; enzyme soil; quality soil biology

凋落物一般是指植物地上部分因自身原因枯死而自然脱落或由于外界环境影响而脱离母体, 归还地表面, 作为分解者的物质和能量的主要来源, 是陆地生态系统地上部分和地下部分物质和能量交换的重要环节^[1], 凋落物分解过程中释放的养分占森林植物生长必需元素年总需求量的 68% 至 87%^[2-4]。凋落物可以增加土壤的有机质与涵养水源, 增加土壤酶的种类, 提升土壤酶活性及丰富土壤无脊椎动物的多样性, 还可以降低土壤温度^[5-7]。

杉木(*Cunninghamia lanceolate*)为我国长江以南地区栽培最广、生长快、经济价值高的速生商品材树种, 对土壤要求比一般树种要高, 为浅根系树种。杉木林生产力高, 被大量多代连栽经营导致杉木林土壤质量衰退、下一代杉木成活率降低、早衰^[8,9]。杉木人工林地力衰退已被列为我国的重点研究项目, 杉木林的土

作者简介: 曾雅玲 (1995—), 女, 硕士研究生, 从事森林培育研究, E-mail: 1033041236@qq.com. **通讯作者:** 马祥庆 (1966—), 男, 教授, 博士生导师, 从事森林培育研究, E-mail: kymxq@126.com.

壤质量变化原因、规律及恢复重建对策已受到各地学者地广泛关注^[10]。

有研究表明,连栽杉木人工林的土壤质量衰退的一个重要原因是其凋落物存量和分解能力^[11-13]。杉木人工林凋落物主要包括针叶、小枝、落果和其他碎屑(包括花、花粉、芽鳞、虫粪、虫瘿及昆虫尸体等)^[14]。它们分解的影响因子主要包括温度、湿度、凋落物本身的质量以及土壤生物^[15]。杉木人工林不同发育阶段其凋落物现存量、持水量、拦蓄能力不同,尤以其成龄林凋落量大,持水能力最强^[16],其凋落量呈大小年与季节性变化,以春夏交替时凋落量最大^[17,18],一般凋落物在林龄5年以后才产生,凋落量随着林龄的增加而增加^[19],而对于连栽杉木人工林凋落量随代数增加而减小,杉木凋落量比阔叶树少33%~52%^[20]。一般认为杉木人工林以凋落物的形式归还养分是在进入中龄林的14-15年后。但是杉木凋落物相较于其他树种的凋落物C/N比较高,多含纤维素、半纤维素、单宁、树脂和木质素分解时酸性较大,具有宿存性导致其分解慢、损失大,且数量少,所以导致其养分归还林地比较少,土壤养分的收入和支出产生不平衡,土壤酸化,自肥能力较差^[21,22]。

目前杉木人工林长期生产力保持机制的研究中,许多学者致力于利用其杉木凋落物或杉阔凋落物混合物来解决杉木人工林地力衰退问题,但是凋落物的添加或减少都会在一定程度上影响土壤生物的群落结构和活性从而影响杉木生长。因此本文将从杉木凋落物对其林下的土壤微生物种群的丰度、土壤微生物群落结构、土壤酶特性、土壤动物方面的相互影响进行探讨,进一步揭示凋落物及其土壤生物对杉木生长的影响作用。

1. 土壤生物学特性与土壤质量关系

土壤质量指的是土壤在一定的生态系统内提供生命必须养分和产生生物物质的能力,容纳、降解、净化污染物质和维护生态平衡的能力,影响和促进植物、动物和人类生命安全和健康的能力值综合量度^[23]。土壤质量可作为衡量土壤为植被生长发育提供良好环境条件能力的指示因子,是土壤理化特性和生物学特性的综合反映^[24]。杉木生长过程被分为幼龄林(4~6年生)、中龄林(10~15年生)、成熟林(25~30年生)一过熟林,幼林郁闭前林地基本无凋落物,杉木凋落物的分解速率大概在25%~45%低于阔叶树种,速生阶段(4~15年生)凋落物分解速率大约为17%,干材阶段(15~20年生)达35%,成熟阶段40%,过熟阶段为59%,土壤在杉木林生长过程属于养分亏缺状态^[25]。不同时期杉木林反应的土壤生物学特性和土壤质量关系不同^[25]。对中龄林及成熟杉木凋落物失重率分析显示凋落物前期分解速度快,后期分解变缓,且分解速率季节变化明显3~5月分解较快,9~11月分解变慢^[26]。

土壤质量指标包括物理指标例如土壤容重、毛管持水量、孔隙度等;化学指标包括pH值、土壤有机质与土壤无机物等;生物学指标包括土壤上生长的植物、土壤动物、土壤微生物^[27]。Jordan^[28]等研究认为土壤质量变化最敏感的指标是土壤微生物包括微生物量、土壤呼吸。土壤动物和土壤微生物,其活动可促进土壤中上下层物质的参合,增大土壤孔隙度,提高通气、透水状况,分解生物残体,影响凋落物的分解,加快矿质化过程,合成腐殖质,提高土壤养分的有效性。土壤酶活性和土壤微生物为反映土壤生物学特性的重要因子。大量研究表明,连栽会使土壤的性质变差,孙启武^[29]等人认为杉木的连栽导致土壤板结导致二代杉木林地力下降,阻碍土壤微生物活动,而连栽的某些耕作制度如炼山或枯落物凋落物的分解能使土壤有机质得以短暂补充且土壤营养元素如N、Ca、Mg主要来自于凋落物的分解。许多学者研究认为凋落物存在可以截留降水、防止土壤溅蚀、延缓地表径流、抑制土壤水分蒸发、增强土壤抗冲性能^[30],从而增加土壤持水量,减少肥力流失。周德明^[31]等人认为随杉木林龄的增长土壤中的细菌、真菌、微生物总量在杉木生长后期呈下降趋势,原因可能是土壤中过多的凋落物分解致使土壤中积累的过多的酸性物质使pH下降从而导致土壤质量变差,不利于微生物的生长繁衍。王丹^[32]等人发现林间郁闭度较低影响杉木林的光照和水热,促进土壤微生物的繁殖和活动,林下草本和灌木生长,导致林下凋落物分解转化强度较大,使土壤有机质含量、全氮量、碱解氮量和速效钾等养分指标出现较高水平。

2. 杉木凋落物对土壤微生物学形状（土壤微生物量碳，土壤呼吸）

土壤呼吸（Soil Respiration）是指不受人干扰下土壤中产生 CO₂ 的所有代谢作用，包括根际呼吸、异养呼吸以及非生物过程即碳矿物质的化学氧化作用，异养呼吸包括土壤微生物呼吸和土壤动物呼吸。非生物因素如土壤温度、水分、养分和有机质，生物因素如地表植物、土壤微生物、土壤动物的结构、活性和功能都会影响土壤呼吸^[33]。Raich^[34, 35]等人估算全球土壤呼吸释放的 CO₂ 通量为 68 ± 4 PgC yr⁻¹，其中有 50 C. PgC yr⁻¹ CO₂ 来源于凋落物和土壤有机物的分解，可见凋落物分解所产生的 CO₂ 占土壤呼吸的很大一部分，所以凋落物数量的变化会显著影响土壤呼吸，凋落物是影响土壤 CO₂ 通量的重要因子之一。

贺同鑫^[36]等人认为凋落物通过改变土壤养分状况从而改变土壤生物量导致土壤呼吸的量的变化，凋落物的减少会使得有效磷的浓度的降低从而导致土壤微生物量的减少，导致土壤呼吸的下降。有研究表明杉木的凋落物可以增加土壤磷脂脂肪酸（PLFAs）的总量，促进土壤微生物对土壤有机碳的分解与利用，从而增加 CO₂ 累计排放量^[37, 38]。王光军^[39]等人对杉木林研究发现杉木林的土壤呼吸有显著的季节性变化与土壤温度指数呈正相关关系，但受到湿度的影响，凋落物可以阻隔土壤与外界空气的热交换，去除杉木凋落物比添加杉木凋落物对土壤温度和影响更大，而对土壤呼吸速率变化的影响更小，这表示土壤温度的变化在去除和加倍凋落物后土壤呼吸的变化中所起的作用很小。

杉木凋落物各组分在分解过程中释放的碳素量不同，以针叶碳素释放率最高。万菁娟^[40]等人通过实验发现杉木凋落物淋溶的溶解有机物（DOM）可以增加土壤炭累计矿化量，改变土壤微生物和酶的活性从而增加微生物对土壤有机碳的分解。

土壤基础呼吸是土壤排除根呼吸后的微生物呼吸，可表示土壤有机碳的分解速率。土壤呼吸熵（qCO₂）是土壤基础呼吸和土壤微生物碳的比值^[41]，可以反映土壤微生物群落对碳的利用效率。相较于杉木纯林，混合林的土壤呼吸熵值更低，意味着其土壤微生物对土壤养分利用率更高^[42]。王伟东^[43]等人通过杉木根系和凋落物的研究发现土层 0~10cm 处杉木凋落物的存在会显著降低土壤呼吸熵、土壤基础呼吸，略微提高土壤总有机碳量（TOC），对土壤可溶性有机碳量（DOC）微生物量碳（MBC）以及微生物熵的影响不大。在杉阔树种凋落物混合实验中^[44]发现凋落物的覆盖会使土壤 qCO₂ 升高，杉木叶凋落物分解过程中可能释放环二肽等难以分解且对微生物有毒害作用的感化物质，抑制微生物生长。他认为土壤微生物量的季节动态由地下部分的碳输入决定而非地上的新鲜凋落物，但是凋落物与根系在土壤生态系统中有交互作用。

添加和去除凋落物可以改变土壤有机碳的供应量而影响土壤呼吸，土壤有机碳含量增加对土壤微生物量与活性呈正相关。一些研究^[45]表明杉木凋落物添加对土壤有机碳（SOC）分解产生显著的激发效应，促进 SOC 分解，深层 SOC 分解对杉木凋落物添加的响应大于表层土壤，凋落物的添加会使微生物大量繁殖，会产生大量可供 SOC 分解的土壤酶，凋落物的添加会使原土壤中微生物量碳（MBC）增加。

3. 杉木凋落物对土壤微生物种群丰度的影响

凋落物是土壤有机物的主要来源，也是土壤为微生物食物的来源之一。有研究表明杉木 N 的循环速率仅有 40%~50%，N、P、K、Ca、Mg 养分总体循环速率在 40%左右^[46]。Nadelhoffer^[47]等人认为地上凋落物可为真菌提供主要营养。这说明凋落物的输入量对真菌的数量及活性有一定的影响。因为杉木凋落物的 C/N 比一般阔叶树种高所以较难分解，微生物指数与 C/N 呈显著负相关，高 C/N 比导致土壤 N 素营养缺乏而抑制土壤微生物的活动。微生物在杉木凋落物分解初期是需要消耗大量的土壤中的速效氮，土壤细菌多样性与丰度还与总有机氮、速效氮呈显著正相关（P<0.01），与全氮无明显关系，与 C/N 比呈显著负相关（P<0.05），真菌多样性和丰度与氨态氮呈显著正相关（P<0.01），与碳氮比呈显著负相关（P<0.01），土壤中的氮获取量有硝化细菌、氨化细菌的数量来决定^[48, 49]。焦如珍^[50]对不同龄林的杉木人工林野外研究发现杉木中龄林的微生物总数及细菌数量均明显低于杉木幼龄林和成熟林，他认为是杉木中龄林土壤中微生物的活动减弱导致养分归还减弱，真菌的数量与凋落物的数量呈正相关。田兴军^[51]等人认为凋落物有及养分的无机化过程起决定作用的是真菌。

冯宗炜^[52]等人通过对杉木纯林、火力楠纯林及杉木与火力楠的混林调查发现杉木纯林细菌(芽孢杆菌)和放线菌总量三者最低,而真菌总量最高,而混合林细菌、放线菌、真菌总量适中,且认为混交林细菌数量的增加尤其是具有土壤氨化作用的芽孢杆菌数量增加使得混交林的有效养分释放能力比杉木纯林强。但是有研究认为连栽杉木林地中芽孢杆菌的数量会逐代增加而影响土壤养分释放能力。

微生物的活动对土壤中无机物分解和循环有着很大的影响,对土壤团粒结构的形成与稳定起着决定作用。而不同粒径的土壤团粒结构和组成也会影响土壤生物群落的分布。有研究表明凋落物可使土壤磷脂脂肪酸(PLFA)总量、真菌丰度以及真菌/细菌比值显著增加^[53]。而有研究表明^[54]土壤微生物活性更依赖于根系活性而非凋落物。周德明^[55]等人野外调查发现随杉木林龄的增长,真菌、氨化细菌及微生物的总量呈现出“低-高-低”的趋势,随土层增加细菌、放线菌、真菌及微生物的总量都呈现出“高-低”趋势。由于多酚氧化酶活性可以促使其形成不定根,使得土壤微生物量增加。雷海迪^[56]等人通过 PLFA 实验发现,添加杉木凋落物可以减少革兰氏阳性细菌(GP)、革兰氏阴性细菌(GN)、放线菌(ACT)的丰度,显著增加真菌的丰度。

有研究表明^[57]杉木凋落物分解使土壤 pH 降低,其 pH 最低值与对照值相差 0.58。刘丽^[58]等人实验发现土壤细菌多样性指数变化与土壤 pH 值和总有机碳呈显著正相关($P<0.05$),而土壤真菌多样性指数与土壤 pH 呈显著负相关($P<0.05$)。

4. 杉木凋落物对土壤微生物群落结构的影响

细菌/真菌比值是能够充分反映土壤微生物群落结构变化的重要指标。添加凋落物可以使真菌/细菌比值显著提高,单一针叶凋落物分解时土壤微生物主要通过调节群落真菌含量来促进凋落物的分解,而凋落物分解到后期由于凋落物中养分的降低导致真菌群落生物量降低^[37,59]。土壤 C/N 的变化可以引起土壤微生物群落的变化,土壤真菌群落结构及多样性指数与土壤 C/N 呈显著正相关^[60]。土壤细菌在偏碱性土壤中占据优势地位而土壤真菌则在偏酸性土壤中占优势地位,凋落物通过分解产生酸性物质是改变土壤微生物的群落结构的原因之一^[61]。也有研究认为杉木凋落物中的木质素和多酚类物质可以诱导真菌生长^[62]。

当杉木林内植被变化最小时,土壤的生态系统处于最稳定^[63]。不同配比的凋落物对交互作用效应的相应存在差异,越适合于微生物生长与营养来源时,交互作用越强,从而加快难分解物质的分解速率。杉木人工林内土壤微生物功能多样性的差异变化主要表现在微生物群落个体均匀度上。

不同凋落物配比会影响土壤微生物整体代谢活性以及微生物群落功能多样性^[63]。土壤微生物主要通过调节群落真菌含量、革兰氏阳性细菌(GP)、革兰氏阴性细菌(GN)、丛枝菌根真菌(AMF)、放线菌(ACT)、真菌(Fungi)来促进针叶凋落物的分解。

5. 杉木凋落物对土壤酶学特性的影响

土壤酶主要来源于土壤微生物活动分泌、植物根系分泌和植物残体及土壤动物区系分解,其活性可以反映出土壤微生物活性的高低、土壤碳、氮、磷的动态变化^[64]。杉木林土壤有机物的矿质化主要有磷酸酶、脲酶、转化酶等水解酶类来完成,腐殖化过程有磷酸酶、过氧化物酶、光氧化氢酶来完成。土壤酶活性增强,杉木凋落物中的有机物分解速率就越高。许多研究表明杉木纯林的土壤酶活性显著低于杉阔混交林。在杉木连栽地上,不同发育阶段的 2 代林土壤氢氧化酶、酸性磷酸酶、脲酶活性都低于 1 代林^[29]。杉木中林龄的土壤多酚氧化酶、土壤转化酶活性 2 代林低于 1 代。土壤过氧化物酶活性的下降不利于催化对生物体有毒的过氧化氢的分解,土壤脲酶直接参与土壤中含氮化合物的转化,土壤脲酶活性降低不利于土壤 N 素的营养循环,是导致凋落物的分解速率下降的原因之一。

杉木林土壤中的蛋白酶、脲酶、过氧化氢酶、蔗糖酶的活性从幼龄林到龄林增强后下降的原因可能与土壤中的微生物产生的胞外酶有关,且土层深度的变化导致的土壤空气水分等含量的变化也会影响土壤酶活性^[31]。杉木凋落物相比于檫树、马尾松对增加土壤过氧化氢酶和脲酶的活性的作用较小,但是其纤维

素酶活性高于檫树与马尾松,原因是杉木凋落物的高 C/N 可刺激纤维素的活性,多酚氧化酶活性稍低于其他二种树种^[57]。也有其他研究表明杉木的土壤多酚氧化酶活性较高,导致土壤积累过多有毒物质导致地力衰退。何光训等人认为栽杉木纯林中土壤分类物质的毒性和多酚氧化酶活性随连栽次数增加而增加,而杉木凋落物可以产生化感物质,酚类物质是引起杉木自毒作用的化感物质之一^[21,65]。针阔混交林阔叶树的凋落物可以使水解类酶的活性增强,多酚氧化酶的活性降低,无毒害现象产生。但是也有研究认为土壤中的挥发性酚容易被土壤微生物分解,且含量远低于 $1\sim 3 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 而不能一起毒害作用^[66]。

6. 杉木凋落物对土壤动物的影响

土壤动物类群包括原生动、线虫、跳虫、蚯蚓、螨类、蜘蛛、地表甲虫等。凋落物可以为土壤动物提供生存空间和直接营养来源,或通过为土壤提供养分,改变土壤理化性质,从而为土壤动物提供一定的食物来源,栖息环境,进而影响到土壤动物的数量与种类的变化。林英华对我国多种森林群落调查发现^[67]环境因子对土壤动物影响大小以此为:年均温度>有机质>pH>年均降水量>全年无霜期>凋落物厚度>海拔>盖度>年蒸发量>年均相对湿度,凋落物种类对土壤动物群落有很大影响。杉木林内郁闭、连栽、杉木凋落物分解速率慢,还养少,导致土壤环境退化使环节动物门丰度下降而脊索动物门丰度高于其它物种(84.1%)^[66]。

螨类和跳虫等中型土壤动物可以直接取食凋落物,破碎凋落物或通过取食微生物来影响凋落物的分解^[66]。蚯蚓等大型土壤动物可直接食用凋落物,或碎化凋落物增加凋落物的接触面积加速中小型土壤动物对凋落物的分解。属于捕食者的蜘蛛会对凋落物的分解速率和养分循环产生级联效应,一定程度上是由环境条件所决定。因为杉木凋落物针叶寿命长且随小枝一起脱落,不易直接接触土壤,所以土壤动物对凋落物的破解作用对凋落物的分解有直接影响。袁志忠^[68]等人通过野外控制实验发现跳虫对是否添加凋落物很灵敏,双翅幼虫对凋落物的类型很灵敏,但是对土壤动物群落的影响不明显,他认为纯杉木林凋落物及含林下植被凋落物只是对少数和少量的土壤层中的土壤动物产生影响,土壤动物的多度只决定于凋落物的质量。Zhou^[69]等人通过对红树林凋落物的研究发现在凋落物分解期间土壤动物可以利用细菌来促进自身生长,因此 Zhou 等人认为凋落物可以显著影响线虫群体的密度、多样性和群落结构,但是由于土壤动物种类极多所以认为凋落物的添加仅能增加个别土壤动物的数量而物种数量则会减少。

7. 结语

目前,国内外有不少凋落物对杉木人工林长期生产力保持的相关研究,但是多局限于凋落物自身的输入对土壤的影响,杉木凋落物对土壤生物的丰度、群落、活性的影响研究相对还较少,而且受地理位置的影响。而杉木土地质量的恢复取决于各种因素的相互影响,对于人为管理杉木人工林而言,如何避免杉木人工林结构的单一性,增加生物多样性,以及凋落物及林下植被对杉木地力的维护作用,杉木凋落物对杉木林多层群落结构的影响为今后研究的主要方向。

参考文献

- [1] Sun T, Hobbie S E, Berg B, et al. Contrasting dynamics and trait controls in first-order root compared with leaf litter decomposition.[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America. 2018, 115(41).
- [2] Jiung-Hao L, Hsiang-Hua W, Chen-Chi T, et al. Litter production, decomposition and nutrient return of uplifted coral reef tropical forest[J]. Forest Ecology and Management. 2006, 235(1).
- [3] Roger R. Review:Forest Ecosystems, Concepts, and Management[J]. Journal of Range Management. 1986, 39(5).
- [4] Berg, B. Decomposition patterns for foliar litter - A theory for influencing factors[J]. -. 2014.
- [5] 高志红张万里张庆费. 森林凋落物生态功能研究概况及展望[J]. 东北林业大学学报. 2004(06): 79-80.
- [6] Adejoke O A, Ugonma D. Leaf litter decomposition and nutrient release of three selected agroforestry tree species[J]. Agroforestry Systems. 2021(prepublish).
- [7] 王淳, 董雪婷, 杜瑞鹏, 等. 华北落叶松与阔叶树种混合凋落叶分解过程中养分释放和酶活性变化[J]. 应用生态学报. 2021: 1-10.

- [8] 周玉泉, 康文星, 陈日升, 等. 不同栽植代数杉木林养分吸收、积累和利用效率的比较[J]. 生态学报. 2018, 38(11): 3868-3878.
- [9] 马祥庆, 范少辉, 刘爱琴, 陈绍桂, 林上杰. 不同栽植代数杉木人工林土壤肥力的比较研究[J]. 林业科学研究. 2000(06): 577-582.
- [10] 任丽红, 索沛衡, 唐楚珺, 等. 不同连栽代数杉木人工林土壤氮素季节变化特征[J]. 水土保持研究. 2021: 1-8.
- [11] 徐昇. 不同杉木林经营模式的凋落物特征及其生态功能[D]. 福建农林大学, 2012.
- [12] Li R, Guan X, Han J, et al. Litter decomposition was retarded by understory removal but was unaffected by thinning in a Chinese fir [*Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook] plantation[J]. *Applied Soil Ecology*. 2021(prepublish).
- [13] 洪小敏, 魏强, 李梦娇, 等. 亚热带典型森林地上和地下凋落物输入对土壤新老有机碳动态平衡的影响[J]. 应用生态学报. 2021, 32(03): 825-835.
- [14] 方晰, 田大伦, 项文化, 等. 杉木人工林凋落物量及其分解过程中碳的释放率[J]. 中南林学院学报. 2005(06): 12-16.
- [15] 高嘉, 卫芯宇, 谌亚, 等. 模拟冻融环境下亚高山森林凋落物分解速率及有机碳动态[J]. 生态学报. 2021(09): 1-10.
- [16] 周丽丽, 吴鹏飞, 马祥庆, 等. 不同发育阶段杉木人工林凋落物及不同组分持水特性的比较[J]. 武夷科学. 2012, 28(00): 158-165.
- [17] 宁晓波, 项文化, 王光军, 等. 湖南会同连作杉木林凋落物量20年动态特征[J]. 生态学报. 2009, 29(09): 5122-5129.
- [18] 魏玉洁, 赵亮. 缙云山常绿阔叶林6个树种凋落叶量及其C、N、P化学计量学季节动态研究[J]. 林业科学研究. 2020, 33(06): 73-80.
- [19] 黄承才, 张骏, 江波, 等. 浙江省杉木生态公益林凋落物及其与植物多样性的关系[J]. 林业科学. 2006(06): 7-12.
- [20] 赖增茂. 杉木人工林栽培的试验研究[J]. 科学时代. 2013, 000(015): 1-3.
- [21] 何光训. 杉木连栽林地土壤酚类物质降解受阻的内外因[J]. 浙江林学院学报. 1995(04): 434-439.
- [22] 黄凯璇, 汤新艺, 秦欢, 等. 近自然经营对杉木人工林地地被物和土壤碳氮积累的影响[J]. 生态环境学报. 2020, 29(08): 1556-1565.
- [23] 王晓维, 徐健程, 孙丹平, 等. 生物炭对铜胁迫下红壤地油菜苗期叶绿素和保护性酶活性的影响[J]. 农业环境科学学报. 2016, 35(04): 640-646.
- [24] 郭永红, 张义华, 张宏霞, 等. 天水市退耕还林(草)不同造林模式对土壤养分的影响[J]. 安徽农业科学. 2010, 38(30): 16980-16983.
- [25] 俞新妥. 杉木栽培学[M]. 杉木栽培学, 1997.
- [26] 鄧士垒, 何宗明, 黄志群, 等. 不同年龄序列杉木人工林凋落物数量、组成及动态变化[J]. 江西农业大学学报. 2015, 37(04): 638-644.
- [27] 郑昭佩, 刘作新. 土壤质量及其评价[J]. 应用生态学报. 2003(01): 131-134.
- [28] D. J, R. J K, W. A B, et al. Evaluation of microbial methods as potential indicators of soil quality in historical agricultural fields[J]. *Biology and Fertility of Soils*. 1995, 19(4).
- [29] 孙启武, 杨承栋, 焦如珍. 江西大岗山连栽杉木人工林土壤性质的变化[J]. 林业科学. 2003(03): 1-5.
- [30] Zongming H, Shaohui F, Jingming L, et al. Effects of site management treatments on growth of six-year-old, second-rotation Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata*) plantations[J]. *Frontiers of Forestry in China*. 2007, 2(4).
- [31] 周德明, 马玉莹, 梅杰. 不同林龄杉木林地土壤特性分析[J]. 土壤通报. 2012, 43(02): 353-356.
- [32] 王丹, 戴伟, 王兵, 等. 杉木人工林不同发育阶段土壤性质变化的研究[J]. 北京林业大学学报. 2010, 32(03): 59-63.
- [33] Kretschmar A, Ladd J N. Decomposition of ¹⁴C-labelled plant material in soil: The influence of substrate location, soil compaction and earthworm numbers[J]. *Pergamon*. 1993, 25(6).
- [34] James W R, Christopher S P, Dwipen B. Interannual variability in global soil respiration, 1980 - 94[J]. *Global Change Biology*. 2002, 8(8).
- [35] Raich J W, Schlesinger W H. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate[J]. *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*.
- [36] 贺同鑫, 李艳鹏, 张方月, 等. 林下植被剔除对杉木林土壤呼吸和微生物群落结构的影响[J]. 植物生态学报. 2015, 39(08): 797-806.

- [37] 雷海迪, 尹云锋, 刘岩, 等. 杉木凋落物及其生物炭对土壤微生物群落结构的影响[J]. 土壤学报. 2016, 53(03): 790-799.
- [38] 陈法霖, 郑华, 欧阳志云, 等. 土壤微生物群落结构对凋落物组成变化的响应[J]. 土壤学报. 2011, 48(03): 603-611.
- [39] 王光军, 田大伦, 闫文德, 等. 改变凋落物输入对杉木人工林土壤呼吸的短期影响[J]. 植物生态学报. 2009, 33(04): 739-747.
- [40] 万菁娟, 郭剑芬, 刘小飞, 等. 杉木和米楮凋落叶DOM对土壤碳矿化的影响[J]. 生态学报. 2015, 35(24): 8148-8154.
- [41] Oliver D, Jean-Charles M. Microbial biomass content, basal respiration and enzyme activities during the course of decomposition of leaf litter in a black alder (*Alnus glutinosa* (L.) Gaertn.) forest[J]. *Soil Biology and Biochemistry*. 1996, 28(8).
- [42] 胡亚林汪思龙黄宇于小军. 凋落物化学组成对土壤微生物学性状及土壤酶活性的影响[J]. 生态学报. 2005(10): 2662-2668.
- [43] 张伟东, 汪思龙, 颜绍馥, 等. 杉木根系和凋落物对土壤微生物学性质的影响[J]. 应用生态学报. 2009, 20(10): 2345-2350.
- [44] 张伟东, 汪思龙, 杨会侠, 等. 树种和凋落物对杉木林土壤微生物性质的影响[J]. 应用与环境生物学报. 2010, 16(02): 168-172.
- [45] 王晓峰, 汪思龙, 张伟东. 杉木凋落物对土壤有机碳分解及微生物生物量碳的影响[J]. 应用生态学报. 2013, 24(09): 2393-2398.
- [46] 盛炜彤范少辉. 人工林长期生产力保持机制研究的背景、现状和趋势[J]. 林业科学研究. 2004(01): 106-115.
- [47] Nadelhoffer K J, Boone R D, Bowden R D, et al. The DIRT Experiment: litter and root influences on forest soil organic matter stocks and function[M]. *Forest Landscape Dynamics in New England: Ecosystem Structure and Function as a consequence of 5000 years of Change*, 2004.
- [48] 刘丽, 段争虎, 汪思龙, 等. 不同发育阶段杉木人工林对土壤微生物群落结构的影响[J]. 生态学杂志. 2009(12): 2417-2423.
- [49] 向仕敏, 陆梅, 徐柳斌, 等. 5种林分类型林地土壤氮含量与其土壤微生物学性质的研究[J]. 西部林业科学. 2008(01): 41-45.
- [50] Jiao R Z, Yang C D, Sun Q W. Changes in Soil Microbial Amount and Biomass During the Development of Chinese Fir Plantation[J]. *Scientia Silvae Sinicae*. 2005.
- [51] 田兴军, 立石贵浩. 亚高山针叶林土壤动物和土壤微生物对针叶分解的作用[J]. 植物生态学报. 2002, 26(003): 257-263.
- [52] 一种高生产力和生态协调的亚热带针阔混交林——杉木火力楠混交林的研究[J]. 植物生态学报. 1988(03): 165-180.
- [53] 雷海迪, 尹云锋, 刘岩, 等. 杉木凋落物及其生物炭对土壤微生物群落结构的影响[J]. 土壤学报. 2016, 53(003): 790-799.
- [54] 杨洋, 王继富, 张心昱, 等. 凋落物和林下植被对杉木林土壤碳氮水解酶活性的影响机制[J]. 生态学报. 2016, 36(024): 8102-8110.
- [55] 周德明, 马玉莹, 梅杰. 不同林龄杉木林地土壤特性分析[J]. 土壤通报. 2012(02): 353-356.
- [56] 雷海迪, 尹云锋, 刘岩, 等. 杉木凋落物及其生物炭对土壤微生物群落结构的影响[J]. 土壤学报. 2016, 53(003): 790-799.
- [57] 徐秋芳钱新标桂祖云. 不同林木凋落物分解对土壤性质的影响[J]. 浙江林学院学报. 1998(01): 29-33.
- [58] 徐秋芳钱新标桂祖云. 不同林木凋落物分解对土壤性质的影响[J]. 浙江林学院学报. 1998(01): 29-33.
- [59] 戚德才. 凋落物分解过程中土壤微生物群落的变化[J]. 河南农业. 2016(11): 147.
- [60] Niaz M, Zhongmin D, Kongcao X, et al. Changes in microbial community structure due to biochars generated from different feedstocks and their relationships with soil chemical properties[J]. *Geoderma*. 2014, 226-227.
- [61] 刘丽, 徐明恺, 汪思龙, 等. 杉木人工林土壤质量演变过程中土壤微生物群落结构变化[J]. 生态学报. 2013, 33(15): 4692-4706.
- [62] Shengrui Y, Ian A M, George W B, et al. Orchard floor management practices that maintain vegetative or biomass groundcover stimulate soil microbial activity and alter soil microbial community composition[J]. *Plant and Soil*. 2005, 271(1-2).

- [63] 王珍, 曹光球, 张月全, 等. 凋落物配比对杉木土壤微生物碳代谢多样性的影响[J]. 森林与环境学报. 2017, 37(02): 148-154.
- [64] 刘善江, 夏雪, 陈桂梅, 等. 土壤酶的研究进展[J]. 中国农学通报. 2011, 27(21): 1-7.
- [65] 陈龙池廖利平汪思龙黄志群肖复明. 香草醛和对羟基苯甲酸对杉木幼苗生理特性的影响[J]. 应用生态学报. 2002(10): 1291-1294.
- [66] 李传涵李明鹤何绍江陈秀华. 杉木林和阔叶林土壤酚含量及其变化的研究[J]. 林业科学. 2002(02): 9-14.
- [67] 林英华, 孙家宝, 张夫道. 我国重要森林群落凋落物层土壤动物群落生态特征[J]. 生态学报. 2009, 29(06): 2938-2944.
- [68] 袁志忠, 崔洋, 颜绍馥. 叶凋落物数量和类型对森林土壤动物及其生物学质量的影响[J]. 生物多样性. 2013, 21(02): 206-213.
- [69] Hong Z. Effects of leaf litter addition on meiofaunal colonization of azoic sediments in a subtropical mangrove in Hong Kong[J]. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology. 2001, 256(1).