

文章编号: 1001-1498(2006)03-0347-06

长白山阔叶红松林林隙与林下土壤性质对比研究

张春雨, 赵秀海*, 郑景明

(北京林业大学省部共建森林培育与保护教育部重点实验室, 北京 100083)

摘要: 对长白山阔叶红松林林隙与林下物种组成、物种多样性和土壤理化性质进行了对比研究。结果表明: 林隙与林下物种组成及物种多样性不同。林隙中幼苗层树种多样性增大而群落优势度减小, 幼树层树种多样性减小而群落优势度增大。由于资源和空间利用的有效性发生改变, 导致林隙中的土壤和凋落物的理化性质也出现差异。林下地表凋落物厚度、现存量及凋落物含水量均显著高于林隙 ($p < 0.01$), 林隙中凋落物全 N、全 K 含量分别比林下高 10.47% 和 20.73%, 而林下全 P 和有机 C 含量分别比林隙高 15.23% 和 12.66%。林隙中 0~10 cm 和 10~20 cm 土壤含水量分别比林下高 17.65% 和 16.17%。林下 0~10 cm 土壤密度略高于林隙, 而 10~20 cm 土壤密度基本无差异。林隙与林下土壤 pH 值分别为 5.80 和 5.85, 二者差异不大。林隙土壤有机质、全 N、全 K 含量分别比林下高 12.85%、7.67% 和 2.38%, 而林下铵态 N、有效 P、速效 K、全 P 含量分别比林隙高 13.33%、20.04%、16.52% 和 4.30%。

关键词: 阔叶红松林; 林隙; 凋落物; 土壤性质

中图分类号: S718 文献标识码: A

A Study on Soil Properties in Forest Gaps and under Canopy in Broad-leaved *Pinus korienensis* Forest in Changbai Mountain

ZHANG Chunyu ZHAO Xiuhai ZHENG Jingming

(Key Laboratory for Silviculture and Conservation of Forest Ministry of Education Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract The species components, species diversities and soil properties in gap and under canopy in broad-leaved *Pinus korienensis* forests in Changbai Mountains were studied. The results of the study indicated that the species components and species diversities in gap were different from those under canopy. The Shannon-Wiener index, evenness index and abundance index in gap were higher than those under canopy in seedling layer, while the community dominance in seedling layer increased in closed canopy. The physico-chemical properties of soil and litter changed with space and resources usefulness in gaps. The thickness, stock and water holding capacity of litter layer under canopy were significantly ($P < 0.01$) higher than those in gap. The content of total nitrogen and total potassium of litter in gap were 10.47% and 20.73% higher than those under canopy, but the content of total phosphorus and organic carbon under canopy were 15.23% and 12.66% more than those in gap. The water content of 0~10 cm and 10~20 cm of soil layer in gap were 17.65% and 16.17% more than those under canopy, the soil bulk density of 0~10 cm was slightly higher under canopy than that in gap, but there was no apparent difference in the soil bulk density of 10~20 cm. The soil pH were 5.80 and 5.85 in gap and under canopy respectively, and it wasn't significantly different. The content of soil organic matter, total nitrogen and total potassium in gap were 12.85%, 7.67% and 2.38% higher than those under canopy. The content of $\text{NH}_3\text{-N}$, available

收稿日期: 2005-05-10

基金项目: 国家“十五”攻关“长白山次生林区采伐更新技术研究示范”项目(2001BA510B0704)和教育部“高校青年教师奖励计划”(2000103)资助

作者简介: 张春雨(1979—),男,吉林农安人,硕士。主要研究方向:森林生态系统管理。E-mail: zcy_0520@163.com

* 通讯作者: 赵秀海(1961—),男,博士,教授。主要研究方向:森林生态学与森林经营学。E-mail: zhaoxh@bjfu.edu.cn

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

ble phosphorus available potassium and total phosphorus in soil under canopy were 13.33%, 20.04%, 16.52% and 4.30% higher than those in gap.

Key words broad-leaved *Pinus koraiensis* forest forest gap litter soil properties

林隙是指森林群落中由于某一上层林冠树木死亡而在林地上形成的不连续的林中空隙地,是森林更新和生长的潜在空间,可分为冠层林隙和扩展林隙^[1]。林隙通过改变土壤微生物区系活性、林隙及周边各种生物学过程,使森林生境更加复杂,显著改变了环境和资源的可利用程度,为生活史周期中具有不同生物生态学特性的树种更新提供了条件^[2]。因此深入探讨林隙小环境特征,对研究森林种群动态及森林更新具有重要意义。

国内外学者从不同角度对林隙小环境进行了大量研究。张一平等^[2-4]对热带季节雨林和次生林林隙小气候特征进行了较为系统的阐述。沙丽清等^[5]对热带季节雨林林隙与林下土壤养分状况进行了对比研究。耿玉清等^[6]对人工针叶林林隙和林下土壤和植被状况进行了报道。Densbaw^[7]对热带森林林隙与林下土壤 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{PO}_4\text{-P}$ 进行了对比。Arumachalam 等^[8]对亚热带湿润阔叶林林隙小气候、土壤微生物及养分状况进行了系统研究。

阔叶红松林是长白山西部地区地带性顶级植物群落类型,该林型的林隙研究主要集中在林隙结构及林隙更新方面,有关土壤性质的对比研究较少^[9]。本文对阔叶红松林林隙与林下物种组成、物种多样性以及土壤理化性质进行了对比研究,并对林隙大小与土壤理化性质之间的关系进行简单分析,旨在为森林物质循环研究提供理论依据。

1 研究地区自然概况与研究方法

1.1 研究地区自然概况

调查地位于长白山自然保护区北坡,属于受季风影响的温带大陆性山地气候,其气候特点是春季干燥多风,夏季温暖多雨,冬季漫长寒冷。年平均气温为 3.3℃,最热月 8 月份平均温度 20.5℃,最冷月 1 月份平均温度 -16.5℃,极端最高温度 32.3℃,极端最低气温 -37.6℃。年降水量在 600~900 mm 之间。土壤为山地暗棕色森林土,土层厚度 20~100 cm,缓坡排水良好。

阔叶红松林在北温带森林生态系统中以建群种独特、物种丰富而著称。乔木层主要有红松 (*Pinus koraiensis* Sieb. et Zucc.), 杉松 (*Abies holophylla* Maxim.),

紫椴 (*Tilia amurensis* Rupr.), 核桃楸 (*Juglans mandshurica* Maxim.), 春榆 (*Ulmus japonica* Hance), 水曲柳 (*Fraxinus mandshurica* Rupr.), 黄菠萝 (*Peltandra amurensis* Rupr.), 蒙古栎 (*Quercus mongolica* Fisch. ex Ledeb.), 千金榆 (*Capinus cordata* Blume), 糠椴 (*Tilia mandshurica* Rupr.) 等,以红松、椴树、色木槭 (*Acer mono* Maxim.) 三者共同占据优势。灌木层主要有东北山梅花 (*Philadelphus schrenkii* Rupr.), 东北溲疏 (*Deutzia amurensis* (Regele) A. N. S. P.), 毛榛 (*Corylus mandshurica* Maxim.), 忍冬 (*Lonicera japonica* Thunb.) 等。草本植物有舞鹤草 (*Maianthemum bifolium* (L.) F. W. Schmidt), 水金凤 (*Impatiens noli-tangere* L.) 等。

1.2 研究方法

于 2004 年 8 月,在中国科学院长白山森林生态系统定位站附近的阔叶红松林内,采用样线调查法,从某一随机点开始,用罗盘仪导航由南向北调查林隙。藏润国等^[9]在以往研究中把 4~1000 m² 作为林隙的大小范围,本文在调查中为操作方便也采用这个标准,共调查了 20 个林隙。记录林隙以及林隙边缘周围 3 m 范围内的全部物种(乔、灌、草),高度在 1.3 m 以上的乔木记录种名、胸径及树高,高度不足 1.3 m 的只记录树高,灌木及草本只记录种类。同时调查林隙长短轴长度和林隙形成木特征(树种、腐烂程度),林隙面积按椭圆形计算。用环刀法测定 0~10 cm 和 10~20 cm 的土壤密度和土壤含水量。采集林隙中心以及林隙内随机 4 点表层(0~10 cm)土壤,混合均匀后带回实验室进行分析,同时采集对应林下部分土壤样品,用于对比研究。在每个林隙内部及其对应林下部分分别随机设置 2 个取样点,用 0.5 m × 0.5 m 的木质采样框固定收集面积,收集采样框内全部地表凋落物并带回实验室,经 105℃ 烘干、称质量、测定含水量,另取部分样品经 60℃ 烘干,磨碎后过 60 目筛,将林隙内凋落物样品混合均匀后四分法取样供室内分析用。

室内土壤样品分析方法依据《土壤农业化学分析方法》^[10]的操作步骤进行:用开氏消煮法测定土壤中全 N 含量,碳酸钠熔融法测定土壤中全 P 含量,氢氧化钠熔融法测定土壤中全 K 含量,高温外热重

铬酸钾氧化-密度法测定土壤有机质含量, 靛酚兰比色法测定土壤中铵态 N 含量, 盐酸-氟化铵法测定土壤中有效 P 含量, 乙酸铵提取法测定土壤中速效 K 含量, $H_2SO_4-H_2O_2$ 蒸馏法测定凋落物中全 N 含量, 钒钼黄比色法测定凋落物中全 P 含量, $H_2SO_4-H_2O_2$ 消煮法测定凋落物中全 K 含量。

将高度 < 1.5 m 的乔木划为幼苗, 高度 > 1.5 m、胸径 < 4 cm 的乔木划为幼树, 分层(幼苗层、幼树层)计算乔木树种多样性指数。物种多样性指数采用下列计算公式: Margalef 丰富度指数 $RI = (S - 1) / \log_2 N$; Shannon-Wiener 多样性指数 $H' = -\sum P_i \log_2 P_i$; 均匀度指数 $E = H' / \log_2 S$; 生态优势度指数 $\lambda = \sum [n_i(n_i - 1)] / [N(N - 1)]$ 。其中 S 为物种数, n_i 为第 i 个物种的多度, N 为所有物种的多度之和, $P_i = n_i / N$ 。

2 结果与分析

2.1 物种组成及物种多样性

林隙形成以后, 其中的物理环境和生物环境都发生了一系列变化, 由于不同物种对林隙环境的占据和利用特性不同^[6,9,11], 林隙与林下的物种组成和物种丰富度也表现出一定的差异。林隙中乔木物种丰富度略高于林下, 林下和林隙乔木物种分别为 27 种和 29 种。此外树种组成上也存在差异, 例如稠李 (*Prunus padus* L.)、山荆子 (*Malus baccata* (L.) Borkh.)、怀槐 (*Maackia amurensis* Rupr. et Maxim.) 等主要出现在林冠下, 而白桦 (*Betula platyphylla* Suk.)、赛黑桦 (*Betula schmidtii* Regel.)、鼠李 (*Rhamnus davurica* Pall.)、暴马丁香 (*Syringa reticulata* (Blume) Hara var. *mandshurica* (Maxim.) Hara) 等主要出现在林隙中。林隙不仅影响森林乔木树种的种类及丰富度, 而且对灌木和草本植物的物种组成及丰富度也具有重要影响。林隙中灌木物种丰富度大于林下, 林下灌木为 18 种, 而林隙中为 23 种。并且林隙中灌木盖度明显大于林下, 其中土庄绣线菊 (*Spiraea pubescens* Turcz.)、硬木条荚蒾 (*Viburnum burejaeticum* Regel et Herder) 等主要出现在林冠下, 而刺玫蔷薇 (*Rosa davurica* Pall.)、朝鲜接骨木 (*Sambucus coreana* (Nakai) Kom. et Aliss.)、葎叶蛇葡萄 (*Ampelopsis humulifolia* Bunge.)、山楂叶悬钩子 (*Rubus crataegifolius* Bge.) 等主要出现在林隙中; 林隙中草本植物物种丰富度大于林下, 林冠下有草本植物 52 种, 而林隙中为 60 种, 其中草乌 (*Aconitum*

lusnezoffii Reichenb.)、紫斑风铃草 (*Campanula punctata* Lam.)、玉竹 (*Polygonatum humile* Fisch. ex Maxim.)、淫羊藿 (*Epimedium brevicornum* Maxim.)、轮叶沙参 (*Adenophora divaricata* Franch. et Savat.)、铃兰 (*Convallaria majalis* L.)、京黄芩 (*Scutellaria pekinensis* Maxim.)、鸡腿堇菜 (*Viola acuminata* Ledeb.)、落新妇 (*Astilbe chinensis* (Maxim.) Franch. et Sav.) 等主要出现在林冠下, 而半夏 (*Pinnellia ternate* (Thunb.) Breit.)、东北牛防风 (*Heracleum moellendorffii* Hance.)、黑白蚊子草 (*Filipendula palmata* (Pall.) Maxim.)、类叶牡丹 (*Caulophyllum robustum* Maxim.)、藜芦 (*Veratrum nigrum* L.)、毛茛 (*Ranunculus japonicus* Thunb.)、星叶蟹甲草 (*Cacalia kamaroviana*) 等主要见于林隙中。

林隙与林下乔木物种多样性见表 1。由表 1 可知林下幼树层 Shannon-Wiener 多样性指数、Margalef 丰富度指数和 Pielou 均匀度指数均大于林隙, 而 Simpson 生态优势度变化规律正好相反, 为林隙大于林下。幼苗层 Shannon-Wiener 多样性指数、Margalef 丰富度指数、Pielou 均匀度指数均为林隙大于林下, Simpson 生态优势度变化规律相反, 为林下大于林隙。因此林隙对不同层次树种多样性的作用不同, 有增大幼苗层树种多样性, 而降低幼树层树种多样性的趋势。林隙中幼苗层树种优势度与林下差异不大, 而林隙中幼树层树种的优势性程度较林下要高。说明一部分树种从幼苗层进入到幼树层的过程中由于竞争作用而大量死亡, 而且与林下相比林隙内死亡的树种要更多, 从而使植物个体数量在种内分布更加集中。

表 1 林隙与林下物种多样性对比

层次		H'	RI	E	λ
幼树层	林隙	1.227 3	1.236 1	0.733 3	0.365 2
	林下	1.591 1	1.905 8	0.873 4	0.291 8
幼苗层	林隙	1.230 1	1.314 4	0.764 7	0.346 9
	林下	0.926 8	1.204 0	0.731 4	0.355 6

2.2 地表凋落物性质对比

枯枝落叶层是森林土壤的特有层次, 土壤有机质的主要来源。由于林隙上层林冠疏开, 凋落物输入量减少, 导致林隙内凋落物现存量下降; 地表凋落物越厚, 现存量越高, 其截持水分能力越强, 凋落物持水量也越高。林隙与林下物种组成和结构上的差异^[11-14], 导致凋落物组成不同, 从而使凋落物养分含量也出现差异。研究结果表明, 林下地表凋落物

厚度、现存量及凋落物含水量均显著高于林隙 ($p < 0.01$), 并且凋落物现存量与凋落物自然含水量之间呈显著正相关 $r = 0.728 (p < 0.01)$ 。林隙凋落物全

N、全 K 含量分别比林下高 10.47% 和 20.73%, 而林下的凋落物全 P 和有机 C 含量分别比林隙高 15.23% 和 12.66% (表 2)。

表 2 林隙与林下凋落物性质

位置	厚度 / cm	现存量 / ($t \cdot hm^{-2}$)	含水量 / ($t \cdot hm^{-2}$)	全 N / ($g \cdot kg^{-1}$)	全 P / ($g \cdot kg^{-1}$)	全 K / ($g \cdot kg^{-1}$)	pH 值	有机 C / ($g \cdot kg^{-1}$)
林隙	3.168	5.429	9.038	8.21	3.70	2.23	6.336	254.21
	(0.228)	(0.475)	(1.152)	(0.07)	(0.64)	(0.15)	(0.079)	(16.10)
林下	4.579	7.487	13.240	7.44	4.26	1.87	6.405	286.41
	(0.2622)	(0.424)	(1.358)	(0.42)	(0.67)	(0.15)	(0.062)	(19.26)

注: 表中数值为均值, 括号内数据为标准误。

2.3 土壤性质对比研究

林隙形成以后, 林隙内的树木根系均相应死亡, 同周围的林下相比, 林隙中活根极少^[7, 15], 从而降低了因植物根系吸收而带来的土壤水分损失。而且林隙中灌木杂草丛生, 根系盘结可有效降低表层土壤水分蒸发。此外调查期间正值东北林区雨季, 林隙上方没有林冠遮蔽, 雨水可直接降落到地面, 而林内由于林冠的截留作用, 只有一小部分雨水能降落到地面。以上都可能导致林隙中土壤水分含量增大, 研究表明 0~10 cm 和 10~20 cm 土壤含水量林隙分别比林下高 17.65% 和 16.17% (图 1)。

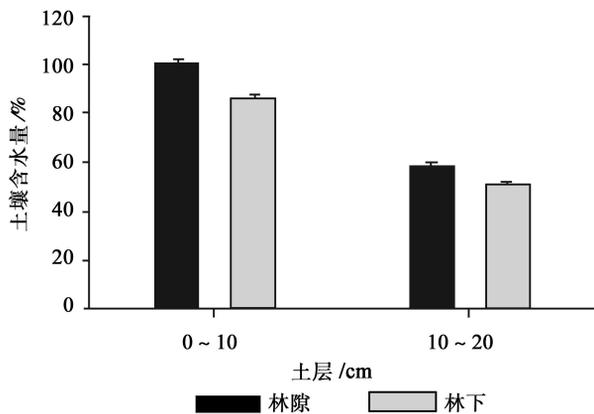


图 1 林隙与林下土壤含水量对比

光照条件的改变导致林隙中植物种类及数量也发生相应变化, 林隙中的植被主要由喜光的阔叶树种组成^[16]。林内上层林冠郁闭, 光照条件较差, 下木与草本发育不良, 种类也较少; 而林隙中光照充足, 灌木与杂草生长旺盛^[17]。所以林隙中的凋落物主要由易分解的阔叶和草本组成。土壤有机质是林分中凋落物经土壤动物和微生物逐渐分解的产物。凋落物的分解速率随温度升高而升高, 并且与湿度呈正相关^[18]。林隙中光照增强, 温度升高, 土壤湿

度增大, 导致地表凋落物分解速率增大^[19], 凋落物分解后向土壤中输送的有机质数量也增多。以上原因将导致林隙中土壤有机质含量增大。研究表明, 林隙土壤有机质含量较林下高 12.85% (表 3)。

土壤有机质对土壤结构的形成、土壤物理性状的改善有决定性作用, 林隙中较高的土壤有机质含量有利于土壤腐殖质和团粒结构的形成, 可能导致林隙中土壤密度相对较小。研究表明: 林下 0~10 cm 土壤密度略高于林隙 (7.92%), 而 10~20 cm 土壤密度差异不大 (图 2)。

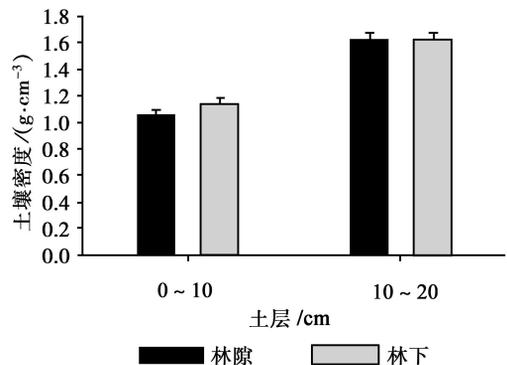


图 2 林隙与林下土壤密度对比

土壤酸碱度对土壤养分存在的形态和有效性、土壤理化性质、微生物活动以及植物生长发育有很大的影响。大多数植物所需的营养元素与土壤的 pH 值有关。阔叶树的叶片中含较多的灰分, 归还土壤后使土壤保持微酸性至中性反应。而多数针叶树的叶片浸出液呈酸性, 归还土壤后使土壤呈酸性反应^[6]。研究表明: 林隙与林下土壤均呈酸性, 林隙土壤 pH 值为 5.80, 林下土壤 pH 值为 5.85, 二者基本无差异。

土壤有机质是土壤养分的主要来源, 土壤中的 N 素绝大部分以有机态存在, 其数量和分布与土壤有机质密切相关。林隙土壤中较高的有机质含量可

有效提高 N 素数量; 落叶和死根分解后产生有机 C, 林隙内较高的有机 C 含量可有效地增加土壤全量元素。研究表明, 林隙中土壤全 N、全 K 含量分别比林下高 7.67% 和 2.38%, 与土壤有机 C 变化规律一致 (表 3)。

土壤微生物和土壤酶是土壤的重要组成部分, 直接参与了土壤有机质分解、腐殖质形成、土壤养分转化和循环等过程^[20]。土壤中微生物数量及土壤酶的活性对土壤营养元素的有效化过程有重要影响^[21-22], 土壤酶的活性与土壤碱解 N、有效 P 和速效 K 含量均呈显著正相关^[23-26]。土壤微生物的数量与树种、林木根际的距离等因子密切相关, 植被的存在有利于增加土壤微生物数量^[27]。由于林木根际附近土壤疏松、通气性好, 根系分泌物数量及种类较多, 土壤中的微生物数量明显高于非根际区^[28-30]。土壤酶的活性也表现出一定的水平分布规律, 其活

性为根际大于非根际区域^[31-34]。由于林隙形成后树木根系大量死亡^[7,15], 导致林隙中土壤微生物数量及土壤酶的活性大幅度下降^[8], 土壤中有效态营养元素也随之大幅减少。此外由于林隙上层树冠疏开, 降落到林隙内雨量较大, 地表径流的冲刷以及土壤的淋溶作用, 也会导致林隙土壤中有效态营养元素下降。研究表明, 林下土壤铵态 N、有效 P、速效 K 含量分别较林隙高 13.33%、20.04% 和 16.52%, 与土壤 C/N 的变化规律一致 (表 3)。

林隙形成以后土壤理化性质、物质的分解与矿化、土壤动物与微生物的种类与数量以及土壤酶的活性都发生改变, 使得土壤养分变化规律十分复杂。林下土壤全 P 含量较林隙稍高 (4.30%), 可能与林下土壤粘粒含量高^[35], 而粘粒结构对 P 元素具有很强的固定作用有关^[5,36] (表 3)。林下土壤 C/N 较林隙高 10.06%。

表 3 林隙和林下土壤养分对比

位置	全 N / (g·kg ⁻¹)	全 P / (g·kg ⁻¹)	全 K / (g·kg ⁻¹)	铵态 N / (mg·kg ⁻¹)	有效 P / (mg·kg ⁻¹)	速效 K / (mg·kg ⁻¹)	有机 C / (g·kg ⁻¹)	有机质 / (g·kg ⁻¹)
林隙	7.72 (0.60)	0.93 (0.086)	12.49 (0.33)	90.19 (8.86)	10.08 (1.22)	151.32 (15.34)	176.8 (6.7)	304.7 (11.6)
林下	7.17 (0.65)	0.97 (0.077)	12.20 (0.38)	102.21 (10.08)	12.10 (1.37)	176.32 (18.29)	156.6 (9.9)	270.0 (17.1)

注: 表中数值为均值, 括号内数据为标准误。

2.4 林隙大小与土壤性质间相关分析

林隙面积大小作为林隙的重要结构特征, 在很大程度上反映了林隙内微环境条件变化, 对其中的温度、水分和养分等生态因子的有效性具有重要影响^[36]。由表 4 可知, 林隙大小与土壤及凋

落物理化性质间表现出一定的相关性。土壤含水量、土壤铵态 N 及凋落物有机 C 含量与林隙大小呈显著负相关 ($p < 0.05$), 土壤密度及凋落物全 N 含量与林隙大小呈显著正相关 ($p < 0.05$), 土壤 pH 值与林隙大小呈显著正相关 ($p < 0.01$)。

表 4 林隙大小与土壤理化性质相关系数

土壤 pH 值	土壤铵态 N	土壤含水量		土壤密度		凋落物有机 C	凋落物全 N
		0~10 cm	10~20 cm	0~10 cm	10~20 cm		
0.842 ^{**}	-0.478 [*]	-0.689 [*]	-0.670 [*]	0.649 [*]	0.460 [*]	-0.652 [*]	0.524 [*]

注: ** 表示在 $p < 0.01$ 水平上显著相关; * 表示在 $p < 0.05$ 水平上显著相关。

3 结论与讨论

(1) 林隙与林下在物种组成及物种多样性上都存在差异。与林下相比, 林隙中幼苗层树种多样性增大而群落优势度减小, 幼树层树种多样性减小而群落优势度增大。这与以往林隙增加物种多样性, 降低群落优势度的研究结论略有不同^[37,38]。

(2) 林下地表凋落物厚度、现存量及凋落物自然含水量均显著高于林隙 ($p < 0.01$); 林隙凋落物全

N、全 K 含量分别比林下高 10.47% 和 20.73%, 而林隙土壤 pH 值略低于林下, 凋落物全 P 和有机 C 含量分别比林隙高 15.23% 和 12.66%; 林隙中土壤含水量高于林下, 0~10 cm 和 10~20 cm 土壤含水量分别比林下高 17.63% 和 16.17%; 林下 0~10 cm 土壤密度略高于林隙 (7.92%), 而 10~20 cm 土壤密度基本无差异; 林隙土壤有机质含量较林下高 12.85%; 林隙与林下土壤均呈酸性, pH 值分别为 5.80 和 5.85 二者差异不大; 林隙中土壤全 N、全 K 含

量分别比林下高 7.67% 和 2.38%, 与土壤有机质变化规律一致; 林下土壤铵态 N、有效 P、速效 K、全 P 含量分别比林隙高 13.33%、20.04%、16.52% 和 4.30%。

(3) 土壤含水量、土壤铵态 N 及凋落物有机 C 含量与林隙大小呈显著负相关 ($p < 0.05$), 土壤密度及凋落物全 N 含量与林隙大小呈显著正相关 ($p < 0.05$), 土壤 pH 值与林隙大小呈显著正相关 ($p < 0.01$)。

参考文献:

- [1] Watt A S. Pattern and process in the plant communities [J]. Ecology, 1947, 35: 1~22
- [2] 张一平, 刘玉洪, 马友鑫, 等. 西双版纳干季晴天次生林林窗气温时空分布特征 [J]. 生态学报, 2001, 21(2): 211~215
- [3] 张一平, 王进欣, 刘玉洪, 等. 热带次生林林窗平均气温空间分布特征的初步分析 [J]. 生态学杂志, 2001, 20(2): 1~4
- [4] 张一平, 龚军霞, 刘玉洪, 等. 热带季节雨林林窗小气候要素时空分布特征 [J]. 福建林学院学报, 2002, 22(1): 1~3
- [5] 沙丽清, 曹敏. 西双版纳热带季节雨林林冠下及林窗中土壤养分对比研究 [J]. 东北林业大学学报, 1999, 27(6): 78~80
- [6] 耿玉清, 单宏臣, 谭笑, 等. 人工针叶林冠空隙土壤的研究 [J]. 北京林业大学学报, 2002, 24(4): 16~19
- [7] Denslow J S, Ellison A M, Salafnd R R. Treefall gap size effects in above and below-ground processes in a tropical wet forest [J]. Journal of Ecology, 1998, 86: 597~609
- [8] Annachalm A, Annachalm K. Influence of gap size and soil properties on microbial biomass in a subtropical humid forest of north east India [J]. Plant and Soil, 2000, 223: 185~193
- [9] 藏润国, 刘静芳, 董大方. 林隙动态与森林多样性 [M]. 北京: 中国林业出版社, 1999
- [10] 中国土壤学会. 土壤农业化学分析方法 [M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1999
- [11] 藏润国, 徐化成, 高文韬. 红松阔叶林主要树种对林隙大小及其发育阶段更新反应规律的研究 [J]. 林业科学, 1999, 35(3): 2~9
- [12] 藏润国, 蒋有绪, 余世孝. 海南霸王岭热带山地雨林森林循环与树种多样性动态 [J]. 生态学报, 2002, 22(1): 24~32
- [13] 朱小龙, 李振基. 南靖和溪南亚热带雨林林隙内树种更新初步研究 [J]. 厦门大学学报 (自然科学版), 2002, 41(5): 589~595
- [14] 边巴多吉, 郭泉水, 次柏, 等. 西藏冷杉原始林林隙对草本植物和灌木树种多样性的影响 [J]. 应用生态学报, 2004, 15(2): 191~194
- [15] Ostentag R. Below-ground effects of canopy gaps in a tropical wet forest [J]. Ecology, 1998, 79: 1294~1304
- [16] Canham C D. Different responses to gaps among shade tolerant tree species [J]. Ecology, 1989, 70: 548~550
- [17] 王战, 徐振邦, 李昕. 长白山北坡主要林型和群落结构特征 [J]. 森林生态系统研究, 1980(1): 25~42
- [18] Swift M J, Heal OW, Anderson JM. Decomposition in Terrestrial Ecosystems [M]. Blackwell, Oxford, 1978
- [19] Annachalan A, Maihani K, Pandey H N, et al. The impact of disturbance on detrital dynamics and soil microbial biomass of a *Pinus kesiya* forest in north east India [J]. For Ecology Management, 1996, 88: 273~282
- [20] Zelles L. Fatty acid patterns of phospholipids and lipopolysaccharides in the characterisation of microbial communities in soil: a review [J]. Biology and Fertility Soils, 1999, 29: 111~129
- [21] 薛立, 陈红跃, 毕鸿雁. 马占相思纯林及柚木纯林土壤养分、微生物和酶活性的研究 [J]. 华南农业大学学报 (自然科学版), 2002, 23(2): 12
- [22] 闫德仁, 刘永军. 落叶松人工林土壤微生物的变化 [J]. 林业月报, 1995(7): 13
- [23] Cang D H, Yang Y S, Zou S Q. A study on the microflora and biochemical properties of soil microorganisms and the soil fertility of underplanted forest of *Cunninghamia lanceolata* and *Amomum villorsum* [J]. Scientia silvae Sinicae, 1988, 4(4): 458~465
- [24] 赵林森, 王九龄. 杨槐混交林生长及土壤酶与肥力的相互关系 [J]. 北京林业大学学报, 1995, 17(4): 1~7
- [25] 孙翠玲, 郭玉文, 佟超然, 等. 杨树混交林地土壤微生物与酶活性的变异研究 [J]. 林业科学, 1997, 33(6): 488~496
- [26] 许景伟, 王卫东, 李成. 不同类型黑松混交林土壤微生物、酶及其与土壤养分关系的研究 [J]. 北京林业大学学报, 2000, 22(1): 51~55
- [27] 潘维旺, 李景英, 周启水, 等. 土壤微生物与森林环境因子关系初探 [J]. 南昌水专学报, 1998, 17(4): 38~41
- [28] Campbell R, Greaves M P. Anatomy and community structure of the rhizosphere [A]. In Lynch JM. The rhizosphere [M]. Chichester Wiley Press, 1990, 11~34
- [29] Eiland F, Gahonia T S B. Biologically associated C and N in relation to number of bacteria and ATP content in the rhizosphere [M]. 15th World Congr Soil Sci, 1994, 4: 50~51
- [30] 何振立. 土壤微生物量及其在养分循环和环境评价中的意义 [J]. 土壤, 1997, 2: 61~69
- [31] 田呈明, 刘建军, 梁英梅, 等. 秦岭火地塘林区森林根际微生物及其土壤生化特性研究 [J]. 水土保持通报, 1999, 19(2): 19~22
- [32] 周国英, 陈小艳, 李倩茹, 等. 油茶林土壤微生物生态分布及土壤酶活性的研究 [J]. 经济林研究, 2001, 19(1): 9~12
- [33] 仲庆林, 韩素梅. 油松沙棘混交林土壤酶活性状况的研究 [J]. 辽宁林业科技, 2001(2): 18~19
- [34] 姚胜蕊, 束怀瑞. 有机物料对苹果根际营养元素动态及土壤酶活性的影响 [J]. 土壤学报, 1999, 36(3): 428~432
- [35] Pandey C B, Singh A K, Shama D K. Soil properties under *Acacia nilotica* trees in a traditional agroforestry system in central India [J]. Agroforestry Systems, 2000, 49: 53~61
- [36] Lee D, Han X G, Jordan C F. Soil phosphorus fractions, aluminum, and water retention as affected by microbial activity in an ultisol [J]. Plant and Soil, 1990, 121: 125~136
- [37] 刘庆, 吴彦. 滇西北亚高山针叶林林窗大小与更新的初步分析 [J]. 应用与环境生物学报, 2002, 8(5): 453~459
- [38] 罗大庆, 郭泉水, 薛会英. 西藏色季拉山冷杉原始林林隙更新研究 [J]. 林业科学研究, 2002, 15(5): 564~569