

# 采伐对天然云冷杉针阔混交林半分解层凋落物 现存量、含水率及林分郁闭度空间异质性的影响

李翔<sup>1</sup>, 王海燕<sup>1\*</sup>, 秦倩倩<sup>1</sup>, 解雅麟<sup>1</sup>, 王福增<sup>2</sup>, 郑永林<sup>1</sup>, 杨丹丹<sup>1</sup>

(1. 北京林业大学林学院, 北京 100083; 2. 吉林省汪清林业局金沟岭林场, 吉林 汪清 133200)

**摘要:** [目的] 以吉林省汪清林业局金沟岭林场4块天然云冷杉针阔混交林为研究对象, 探究不同采伐强度下[重度(采伐强度21.21%), 中度(采伐强度11.22%), 轻度(采伐强度6.29%) 和对照(未采伐)]凋落物半分解层现存量、含水率与林分郁闭度的空间异质性。[方法] 采用地统计学方法, 对各样地凋落物半分解层现存量、含水率与林分郁闭度数据进行普通克里金插值, 得到3个指标的空间分布格局图。[结果] 表明: 在10~100 m的尺度上, 采伐使得凋落物现存量由离散型分布转变为聚集型分布, 而对凋落物含水率的空间格局影响不大; 所有样地的郁闭度均表现为聚集型分布, 采伐一定程度上影响了其中度采伐与重度采伐样地的空间异质性; 凋落物现存量与林分郁闭度之间不存在相关性, 而在对照样地, 凋落物现存量与含水率存在显著的负相关, 但相关程度较弱( $r < 0.3$ )。[结论] 采伐对凋落物半分解层含水率空间异质性影响不大; 中度采伐与重度采伐样地的郁闭度异质性可能是由于采伐不均匀所导致; 采伐使凋落物现存量空间异质性程度降低。

**关键词:** 空间异质性; 采伐; 凋落物; 半分解层

中图分类号: S718.5

文献标识码: A

文章编号: 1001-1498(2018)06-0114-07

## Effect of Cutting on Spatial Heterogeneity of Standing Crop and Water Content in Semi-decomposition Litter Layer and Canopy Density in Natural Spruce-fir Mixed Forest

LI Xiang<sup>1</sup>, WANG Hai-yan<sup>1</sup>, QIN Qian-qian<sup>1</sup>, XIE Ya-lin<sup>1</sup>, WANG Fu-zeng<sup>2</sup>, ZHENG Yong-lin<sup>1</sup>, YANG Dan-dan<sup>1</sup>

(1. College of Forestry, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;

2. Jingouling Forest Farm, Wangqing Forestry Bureau of Jilin Province, Wangqing 133200, Jilin, China)

**Abstract:** [Objective] Four 1-hectare plots of natural mixed spruce-fir coniferous and broadleaf forests located in Jin'gouling Forest Farm of Jilin Province were investigated to explore the spatial heterogeneity of standing crop and water content in semi-decomposition litter layer and forest canopy density under different cutting intensities [21.21% of volume removed (heavy cutting), 11.22% (medium cutting), 6.29% (light cutting) and the control (no thinning)]. [Method] An ordinary Kriging interpolation was performed on the data of the standing crop and water content in semi-decomposition litter layer and forest canopy density, and then their spatial distribution pattern was obtained using geostatistical methods. [Result] At the scale of 10~100 m, cutting resulted in the standing crop of litter from a discrete distribution to aggregated distribution but with little effect on the spatial heterogeneity of water content. The canopy density of all plots showed an aggregated distribution and cutting affected the spatial heterogeneity of medium and heavy cutting plots to some extent. There was no correlation between the standing crop and can-

收稿日期: 2018-04-23 修回日期: 2018-08-09

基金项目: 国家重点研发计划重点专项项目(2017YFC0504002)

作者简介: 李翔(1983—), 男, 硕士研究生, 研究方向: 土壤学、植物营养生态学, E-mail: 917792594@qq.com

\* 通讯作者: 王海燕(1972—), 女, 博士, 副教授, 研究方向: 土壤学、植物营养学, E-mail: haiyanwang72@aliyun.com

opy density. However, there was a significant negative correlation between the standing crop and water content in the control and the moderate cutting stands, but to a lesser degree ( $r < 0.3$ ). [ **Conclusion** ] Cutting has little effect on the spatial heterogeneity of water content in semi-decomposition litter layer. The heterogeneity of forest canopy density in the plots under medium cutting and heavy cutting may result from uneven cutting. Cutting reduces the degree of spatial heterogeneity in the standing crop of the semi-decomposition layer.

**Keywords:** spatial heterogeneity; cutting; litter; semi-decomposition layer

采伐是一种常见的森林经营措施,在以往的研究中,大多关注的是采伐对凋落物产生与分解的影响,如 Ibrahim<sup>[1]</sup>对喀麦隆西南部热带雨林的研究发现,采伐对凋落物的分解与养分动态没有影响;而 Martínez-Falcón<sup>[2]</sup>对墨西哥中部温带松柏林的研究却发现,择伐减慢了凋落物分解的速率,同时 Sabine<sup>[3]</sup>对婆罗洲热带雨林的发现,择伐使得凋落物分解减慢。但有关采伐对凋落物空间异质性影响的报道较少。

本研究选取了4块1 hm<sup>2</sup>不同采伐强度的天然云冷杉针阔混交林样地,8月底进行凋落物样品采集,此时研究区的树木还没有进入落叶季节,地表基本不存在新鲜凋落物,绝大多数以半分解的形态存在。通过研究不同采伐强度下特定时间凋落物半分解层的现存量、含水率和林分郁闭度三者的空间异质性及其相关性,以期了解长白山天然云冷杉针阔混交林凋落物的分布规律以及影响因素,为实施合理有效的森林经营管理措施提供科学依据。

## 1 材料和方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于吉林省汪清林业局金沟岭林场(130°10' E, 43°22' N)。属温带大陆性典型季风气候,

年平均气温3.9℃,年降水量为600~700 mm,降雨主要集中在6—8月。地貌为低山丘陵,海拔在300~1 200 m之间,采样林地的坡度范围为3°~25°,东高西低。土壤类型以暗棕壤为主。森林植被类型为天然云冷杉针阔混交林,针叶树种主要为鱼鳞云杉(*Picea jezoensis* var. *microserma* (Lindl.) Cheng et L. K. F)、红皮云杉(*Picea koraiensis* Nakai)、臭冷杉(*Abies nephrolepis* (Trautv.) Maxim.)、长白落叶松(*Larix olgensis* Henry)和红松(*Pinus koraiensis* Sieb. et Zucc.)等。阔叶树种主要有白桦(*Betula platyphylla* Suk.)、榆树(*Ulmus pumila* L.)、大青杨(*Populus ussuriensis* Kom.)、水曲柳(*Fraxinus mandchurica* Rupr.)和紫椴(*Tilia amurensis* Rupr.)等<sup>[4]</sup>。

### 1.2 研究方法

1.2.1 样地选择及取样 样地设立时间为2012年7月,每块样地面积为1 hm<sup>2</sup>。采伐作业时间为2015年1月,采伐剩余物均移出林地。选择4块固定样地,分别为重度采伐(采伐强度21.21%)、中度采伐(采伐强度11.22%)、轻度采伐(采伐强度6.29%)和对照样地(未采伐)。其中重度采伐样地与其他3块样地距离较远。林地存在一定的坡度,对照样地海拔略高于其他3块样地,各样地基本情况见表1。

表1 各样地基本情况

Table 1 The basic information of the plots

样地 Plot	林分保留密度 Stand density/(stem · hm <sup>-2</sup> )	胸径 DBH/cm	树高 Tree height/m	坡向 Slope aspect	坡度 Slope/°	海拔 Elevation/m
HC	934	14.5 ± 0.32	13.9 ± 0.26	东北 NE	3	732
MC	1 165	12.3 ± 0.26	11.4 ± 0.21	东北 NE	5	769
LC	1 301	13.7 ± 0.24	13.6 ± 0.23	东北 NE	5	742
CK	1 437	14.0 ± 0.19	15.1 ± 0.21	东北 NE	3	773

注:HC: 重度采伐 heavy cutting; MC: 中度采伐 medium cutting; LC: 轻度采伐 light cutting; CK: 未采伐 no thinning。下同 the same below.

2017年8月底采用系统布点法,将1 hm<sup>2</sup>的样地划分为100个10 m × 10 m的样方<sup>[5]</sup>,在每个样方中心选取0.5 m × 0.5 m的小样方进行半分解层凋落物样品采集和称量,用四分法减量后再次称量装袋带回实验室。同时,利用 Nikon, Coolpix995,  $f = 7$

~32 mm 相机与 Nikon, FC - E8,  $f = 8 \sim 24$  m 鱼眼镜头在每个样方中心距离地面1.3 m处垂直向天空拍照,获得晴朗天气下林分郁闭度照片<sup>[6]</sup>。总计得到半分解层样本400个,照片400张。

1.2.2 半分解层含水率与现存量的测定 将凋落

物样品风干并烘干,称量计算凋落物含水率与现存量。

$$MC = \frac{a-b}{b} \times 100\% \quad (1)$$

$$q = \frac{a-b}{a} \times 100\% \quad (2)$$

$$M = \frac{m(1-q)}{0.25} \times 10^{-2} \quad (3)$$

式中, $MC$ 表示凋落物含水率, $a$ 表示样本湿质量, $b$ 表示样本烘干质量, $q$ 表示水的质量分数, $M$ 表示现存量, $m$ 为样地半分解层称质量,0.25为取样面积。

1.2.3 林分郁闭度的计算 运用 Photoshop 软件对照片进行处理,通过像素来计算林分郁闭度<sup>[7]</sup>。

$$\varepsilon = 1 - \frac{d}{D} \quad (4)$$

式中, $\varepsilon$ 代表林分郁闭度, $d$ 表示选定区域天空部分的像素值, $D$ 选定区域的像素值。

1.2.4 数据分析 经典数据分析(正态分布检验、多重比较、box-cox 数据转换、相关性分析)使用 R3.4.3 与 Excel 软件进行;空间统计分析(莫兰指数、半方差函数(模型))采用 GS + 9.0 以及 ArcGIS10.2 来完成。

空间自相关的莫兰指数表示为:

$$I = \frac{n}{\sum_i \sum_j w_{ij}} \frac{\sum_i \sum_j w_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\sum_i (x_i - \bar{x})^2} \quad (5)$$

式中, $w_{ij}$ 为  $i$  与  $j$  两点的空间权重, $x$  为取样点对应的属性值, $\bar{x}$  为属性平均值, $n$  为样点总数。

## 2 结果与分析

### 2.1 经典数据分析

2.1.1 凋落物现存量 凋落物现存量描述性统计如表 2。轻度采伐(18.45 t·hm<sup>-2</sup>)与中度采伐(17.42 t·hm<sup>-2</sup>)样地凋落物现存量均略低于对照样地(19.65 t·hm<sup>-2</sup>);而重度采伐样地凋落物现存量为 22.42 t·hm<sup>-2</sup>, 比对照样地高;但所有采伐样地与对照样地均无显著差异。随着采伐强度的增加,各样地变异系数也略有变化,轻度采伐样地变异系数(42.03%)略低于对照样地(42.53%),而中度与重度采伐高于对照,但都属于中等强度变异。

2.1.2 凋落物含水率 各样地的凋落物含水率介于 61.55%~68.15%, 样地间差异不显著( $P > 0.05$ )。由于 8 月恰好是汪清的雨季,空气潮湿,且昼夜温差较大,水分很容易在地表聚集,导致各样地

凋落物含水率差异不大。从表 2 可以看出,所有采伐样地凋落物含水率变异系数(CV)均大于对照样地(23.92%),CV 最大值出现在轻度采伐样地,为 44.11%。采伐样地与对照样地相比,水分含量产生了更大的波动:对照处理极差为 65.98%,而轻度、中度和重度采伐处理的凋落物含水率极差分别为 236.9%、123.83% 和 100.31%。

表 2 各样地描述性统计

Table 2 Descriptive statistics of plots

项目 Items	平均值 Mean	最大值 Max	最小值 Min	标准差 SD	变异系数 CV/%	
凋落物现存量 Litter standing crop/ (t·hm <sup>-2</sup> )	HC	22.42b	80.76	6.69	12.20	54.41
	MC	17.42a	71.69	5.77	8.17	46.91
	LC	18.45a	47.31	7.10	7.75	42.03
凋落物含水率 Litter water content/%	CK	19.65ab	54.77	6.83	8.36	42.53
	HC	62.55a	116.84	16.53	21.46	34.31
	MC	61.55a	150.03	26.20	19.28	31.32
林分郁闭度 Canopy density	LC	68.15a	267.05	30.15	30.06	44.11
	CK	64.04a	99.27	33.29	15.32	23.92
	HC	0.743a	0.879	0.497	0.08	11.04
林分郁闭度 Canopy density	MC	0.785b	0.914	0.625	0.06	8.09
	LC	0.755a	0.903	0.512	0.09	11.50
	CK	0.815c	0.938	0.615	0.05	6.43

注:同一指标数值后的不同小写字母表示不同样地差异显著( $P < 0.05$ )。

Data followed by different lowercase letters indicate significant differences between plots at  $P < 0.05$ .

2.1.3 林分郁闭度 由表 2 可以看出,采伐样地与对照样地的郁闭度存在显著差异( $P < 0.05$ )。对照样地郁闭度最高,为 0.815;重度采伐样地最低,为 0.743。轻度采伐样地郁闭度为 0.755,低于中度采伐样地(0.785)。在照片处理过程中,作者发现,中度采伐与重度采伐样地的郁闭度值偏高,有 20% 的鱼眼照片呈现出天空被完全遮盖的现象,但是这并非由高大的成年树木所造成,而是高度在 2 m 左右的幼树。拍照高度是 1.3 m,因此,快速生长的幼树的树冠造成了过高的林分郁闭度。很多研究表明,当林分郁闭度在 0.5~0.6 左右时,有利于幼树的生长。采伐减少了树木的密度,且采伐强度越大,林窗越大,充足的阳光使得幼树能更好地生长。伐后 2 年,幼树的快速生长使得林分郁闭度值可以恢复到采伐前的状态。因此,轻度采伐更能体现出采伐对于林分郁闭度的影响,而中度与重度采伐样地,幼树的生长使得林分郁闭度值要高于预期值。

### 2.2 空间统计分析

2.2.1 空间自相关分析 本研究用全局莫兰指数  $I$  来衡量数据的空间自相关性。 $I$  值介于 1 与 -1 之

间,  $I=0$  时为随机分布,  $I>0$  为聚集分布, 而  $I<0$  时为离散分布<sup>[8-9]</sup>。利用 ArcGIS 自带的空间统计分析模块可以对数据进行空间自相关分析, 计算莫兰指数, 结果如表 3。

表 3 各样地莫兰指数  
Table 3 Moran's index of plots

项目 Items	莫兰指数 Moran's I	z 得分 z-score	P 值 P-value
凋落物现存量 Litter standing crop	HC	0.11	2.40
	MC	0.03	0.84
	LC	0.12	1.83
	CK	-0.10	-1.93
凋落物含水率 Litter water content	HC	-0.06	-1.27
	MC	0.03	2.77
	LC	-0.02	-0.60
	CK	-0.03	-1.73
林分郁闭度 Canopy density	HC	0.22	4.62
	MC	0.13	2.73
	LC	0.47	9.74
	CK	0.14	3.07

通常  $P$  值越大, 说明数据更可能是随机分布。结合  $P$  值与  $z$  得分, 中度采伐样地的凋落物现存量, 轻度采伐样地的凋落物含水率较大可能是随机分

布, 不存在显著的自相关性, 因此不适合做空间插值。同时通过莫兰指数可以看出, 对照样地凋落物现存量是离散分布, 而其他样地是聚集分布; 而含水率除了中度采伐样地是聚集分布外, 其他样地均为离散分布; 所有样地的郁闭度均为聚集分布。

2.2.2 半方差函数及模型参数 利用 ArcGIS 软件进行空间插值分析时, 对数据并没有正态分布的要求, 但如果数据不符合正态分布的话, 线性克里格法就不是无偏最优的插值预测法<sup>[10]</sup>。在对不满足正态分布的数据采用 box-cox 变换以后, 再利用 GS + 与 ArcGIS 软件对数据进行半方差函数的模拟<sup>[11-12]</sup>。各样地半方差函数模型参数见表 4。

由于中度采伐样地凋落物现存量与轻度采伐样地凋落物含水率数据不适合做空间插值, 故没有进行拟合。轻度采伐与对照样地凋落物现存量数据、对照样地凋落物含水率数据和中度采伐样地的郁闭度数据均采用了孔洞效应模型, 其余数据则使用了高斯模型。这两种模型曲线与 X 轴交点为块金值, 高斯模型曲线平稳时对应即基台值, 而孔洞效应模型曲线会在基台值附近上下波动。

表 4 各样地半方差模型参数  
Table 4 Parameters for the semi-variogram model of plots

项目 Items	拟合模型 Model	块金值 $C_0$	基台值 $C_0 + C$	结构比 $C_0 / (C_0 + C)$	变程 Range / m	回归拟合决定系数 $R^2$
凋落物现存量 Litter standing crop	HC	G	0.071	1.036	0.068	18.78
	MC	-	-	-	-	-
	LC	H	0.183	0.990	0.184	19.70
	CK	H	0.001	1.057	0.001	19.70
凋落物含水率 Litter water content	HC	G	0.525	1.023	0.513	18.78
	MC	G	0.052	0.943	0.055	19.70
	LC	-	-	-	-	-
	CK	H	0.213	0.982	0.235	18.78
林分郁闭度 Canopy density	HC	G	0.351	1.142	0.307	18.78
	MC	H	0.390	1.029	0.379	21.66
	LC	G	0.001	1.021	0.001	18.78
	CK	G	0.140	1.072	0.130	18.78

注: G: 高斯模型 Gaussian model; H: 孔洞效应模型 Hole effect model

对于同一个空间性变量, 基台值越大, 则总的空间异质性程度越大。就现存量而言, 对照样地基台值为 1.057, 其他采伐样地均小于对照样地, 轻度采伐的基台值最小, 为 0.990。对于凋落物含水率, 重度采伐样地的基台值 1.023, 对照样地为 0.982, 中度采伐样地为 0.943。郁闭度的最大基台值出现在重度采伐样地, 为 1.142, 其它依次为对照 1.072, 中度采伐 1.029, 轻度采伐 1.021。同一样地比较时,

重度采伐、轻度采伐与对照样地的郁闭度空间异质性程度最大, 中度采伐样地的凋落物含水率空间异质性最大。

结构比反映的是不同因素所导致的变异所占的比例<sup>[13]</sup>。随机性因素与结构性因素共同产生变异, 两者占比之和为 1。轻度采伐样地现存量结构比最大, 为 18.4%, 对照样地最小, 为 0.1%, 均为强烈的自相关。因此采伐对于现存量空间异质性影响程度

较低。凋落物含水率的结构比大小顺序为重度采伐 > 对照 > 中度采伐。重度采伐样地已超过了 50%，而对照样地为 23.5%，属中度自相关，中度采伐样地仅为 5.5%，表现为强烈的自相关。因此，采伐并不是造成研究地含水率空间异质性的主要原因。此外，林分郁闭度的结构比顺序为重度采伐 > 中度采伐 > 对照 > 轻度采伐，轻度采伐与对照样地属于强烈的自相关，而其他属于中等自相关。

凋落物现存量变程重度采伐为 18.78 m，轻度采伐和对照样地均为 19.70 m。中度采伐样地的凋落物含水率变程最大，为 19.70 m，其余样地均小于中度采伐样地，说明采伐对于半分解层凋落物含水率空间格局贡献不大。而林分郁闭度的变程最大值出现在中度采伐样地，为 21.66 m，其余样地均为 18.78 m。

**2.2.3 空间分布格局** 从凋落物现存量空间格局图(图1)可以看出,3块样地中,采伐样地空间异质性程度低于对照样地。对照、轻度采伐与重度采伐样地均呈现出斑块状分布,说明其空间异质性程度较强;对照样地的斑块小而多,而轻度采伐与重度采伐样地同时呈现出不同程度的带状分布,说明对照样地的空间异质性程度更强。结合莫兰指数可以更直观地看出,对照样地属于离散型的分布,而轻度采伐与重度采伐样地都出现了一定程度的聚集。即采伐使得现存量由离散型分布向聚集型转变。而从整体的趋势来看,重度采伐与轻度采伐样地都有轻微的东高西低的趋势,而对照样地并没有明显的方向趋势。

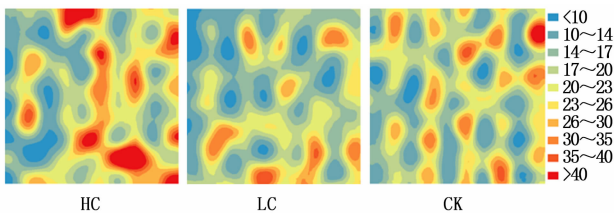


图1 凋落物半分解层现存量空间分布格局( $t \cdot \text{hm}^{-2}$ )  
Fig. 1 Spatial distribution pattern of litter standing crop in semi-decomposition layer ( $t \cdot \text{hm}^{-2}$ )

由凋落物含水率的空间格局分布(图2)可以看出,3块样地均表现为斑块与带状的交替分布,中度采伐样地的聚集现象明显,而重度采伐与对照样地属于离散型分布。在趋势方面,中度采伐样地可以看出明显的东高西低的趋势,而重度采伐与对照样地并没有明显的方向趋势。

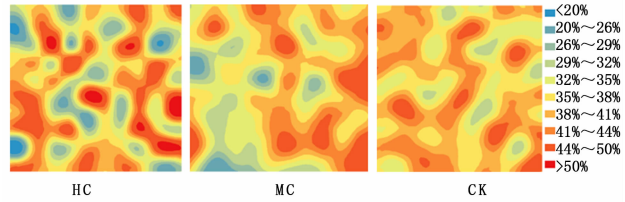


图2 凋落物半分解层含水率空间分布格局  
Fig. 2 Spatial distribution pattern of litter water content in semi-decomposition layer

林分郁闭度空间分布格局(图3)各具特色,但总体上来说都是聚集型。从颜色对比与分布来看,对照样地属于高值聚集且呈现出大面积的块状分布;轻度采伐则呈现出明显的块状分布,高值集中在南部,低值集中在北部,过渡带夹杂少许斑点;中度采伐样地高值多于轻度采伐样地,但并没有对照与轻度采伐样地集中,多以斑块分布,带状分布不明显;重度采伐样地高值集中在中部位置,以带状贯穿南北,低值多集中在西部。

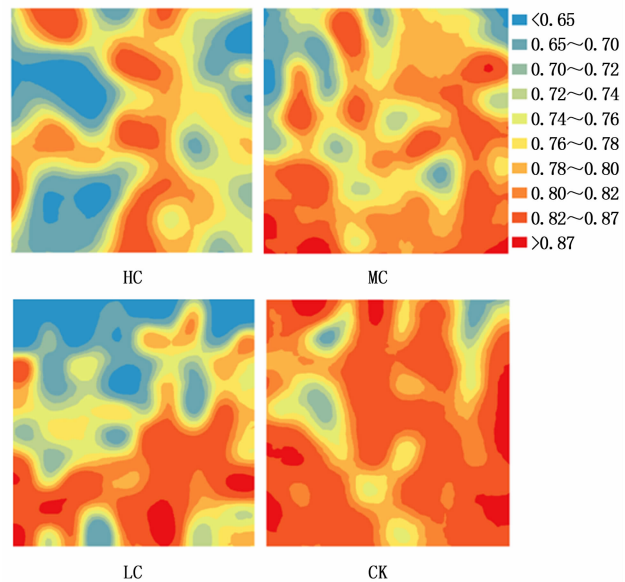


图3 林分郁闭度空间分布格局

Fig. 3 Spatial distribution pattern of canopy density

### 2.3 相关性分析

对半分解层凋落物现存量与凋落物含水率和林分郁闭度进行相关性分析(表5),发现林分郁闭度与凋落物现存量并不存在显著的相关关系,而凋落物含水率与现存量仅在对照样地中存在显著的负相关。即在对照样地中,凋落物含水率越高,现存量越低,但相关系数的绝对值并没有超过 0.3,说明两者之间相关程度较低。

表5 凋落物半分解层现存量与凋落物含水率及林分郁闭度的相关性 ( $n = 100$ )

Table 5 Correlation between litter standing crop with water content in semi-decomposition layer and canopy density ( $n = 100$ )

样地 Plot	相关因素 Factor	相关系数 $r$	$P$ 值 $P$ -value
HC	凋落物含水率 Litter water content	-0.151 2	0.133
	林分郁闭度 Canopy density	0.016 4	0.875
MC	凋落物含水率 Litter water content	-0.132 1	0.572
	林分郁闭度 Canopy density	0.019 4	0.847
LC	凋落物含水率 Litter water content	-0.085 0	0.667
	林分郁闭度 Canopy density	0.151 8	0.132
CK	凋落物含水率 Litter water content	-0.252 0	0.025
	林分郁闭度 Canopy density	0.107 2	0.288

### 3 讨论

#### 3.1 凋落物现存量

温带森林在秋季大范围落叶之前,绝大多数新鲜凋落物转变为半分解状态。刘艳等<sup>[14]</sup>在辽东地区得到不同的森林类型凋落物现存量介于  $8.53 \sim 37.51 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ ;郑金萍等<sup>[15]</sup>对长白山北坡不同林分研究发现其现存量为  $5.50 \sim 6.73 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ ;在本研究中,现存量为  $17.42 \sim 22.42 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。而鉴于现阶段在表征现存量时往往都是直接用某一个时间点的采样值来表示,因此,在特定时间,用凋落物半分解层现存量来表示凋落物整体现存量是可行的。

本研究中半分解层现存量的大小顺序为重度采伐 > 对照 > 轻度采伐 > 中度采伐,与周新年等<sup>[16]</sup>提出的针阔混交林凋落物现存量随着采伐强度的增大呈递减的趋势这一观点相矛盾。这可能是因为周新年对于现存量计算方式是未分解层与半分解层之和,而本研究只用半分解层来表示。郭婧<sup>[17]</sup>对中亚热带4种不同森林类型研究后发现,林分密度与凋落物产量仅在最初几年呈正相关,伐后两年,林分密度降低,导致凋落物产生量减少;同时 Parsons 等<sup>[18]</sup>在研究中发现凋落物现存量与凋落物产生量并没有明显的相关性。凋落物现存量是凋落物产生与分解动态过程的结果,本研究中重度采伐使得凋落物产生量降低的同时,降低了凋落物质量,使得半分解层向完全分解层的转化速度降低,最终使得半分解层现存量反而大于对照样地。其次,地形因素也不可忽视,重度采伐样地相比于其他几块样地,海拔最低,在有风的季节,大风会将枯落物从地势较高的周围林地带到地势较低的重度采伐样地,这也可能导

致了重度采伐样地的凋落物量大于其他样地。

#### 3.2 空间异质性

现阶段缺乏对于空间异质性的量化手段,只能通过模型模拟得到空间格局图,才能直观地表现空间变量的自相关性与空间异质性。因此,模型选择至关重要,作者最终选择了高斯模型与孔洞效应模型。Zhou<sup>[19]</sup>认为在由植被与土壤特性所引起的空间异质性研究中,取样也应该具有特异性,即对于不同的空间变量应该有不同的最小取样距离。而本研究3个指标的最小取样距离均为  $10 \text{ m}$ ;同时由于选择的是  $100 \text{ m} \times 100 \text{ m}$  的大样地,导致最后对模型拟合的检验中(表4),回归函数的决定系数值均偏低。因此,有可能3个指标的变程小于  $10 \text{ m}$ ,但在模型中无法体现,如果缩小取样距离,比如  $5 \text{ m}$  甚至更小,则有利于函数模型的选择,提高其拟合度,可以更好地探索本研究中的3个指标的空间异质性特征。

结构比可以反映出引起空间异质性的原因。本研究中除了郁闭度,其他两个指标的结构比均较小,因此,可以认为采伐对其空间异质性的影响较小。但对对照样地凋落物含水率与郁闭度的结构比均不是最小的。由于对照样地没有采伐行为说明有其他非结构的因素造成了空间异质性。作者假设对照样地没有人为干扰,而事实上除采伐外的其它人为干扰仍然存在,比如松子采集、牧牛等,这些因素可能导致了对照样地的空间异质性。

天然林在未受到干扰的情况下,会有更高的空间异质性,因此格局图多呈现为斑块状。邵方丽等<sup>[20]</sup>在对河北天然杨桦次生林凋落物空间异质性的研究中发现,半分解层有明显的斑块状分布。本研究的结果与此一致。而采伐后现存量的斑块状减弱,说明采伐使得现存量空间异质性减弱。通过对比空间分布格局图,作者也发现了地形因素的一些巧合。4块样地坡向均为东北向,而半分解层现存量的空间格局存在一定的方向趋势,重度采伐与轻度采伐样地都沿着东北方向大致划分高低值区域。东北坡向恰好是接受光热条件最差的坡向之一,越靠近南向光热条件越好,树木的生长状态也更好,因此产生更多的凋落物,这也一定程度上解释了半分解层空间分布格局。对于其它地形因素,魏强等<sup>[21]</sup>认为,半分解层现存量受海拔显著影响,而与坡度并没有显著相关关系。本研究中坡度与海拔差异不大,是否会影响现存量的空间异质性还需要进一步的研究。



本研究各样地凋落物含水率差异不显著,空间分布格局差异也不大。这主要是由于采样前的天气状况与空气湿度相对稳定,与张恒等<sup>[22]</sup>观点一致。不同的是,对照样地海拔高,而其他几块样地相对地势较低,且有一定的坡度,水分总存在向低地势集中的趋势,因此,地势可能是造成各样地含水率空间异质性的原因之一。当然对照与重度采伐样地凋落物含水率的空间异质性并没有明显的方向趋势,也可能与林分本身的性质有关,因为所选择的样地为云冷杉天然林,样地之间存在一定的差异。

林分郁闭度的空间格局各异,轻度采伐样地有明显的东北到西南的高低值界限,但结构比非常小。解伏菊等<sup>[23]</sup>在火烧后林地郁闭度恢复的研究中认为,坡度、坡向和坡位均会影响到森林郁闭度的恢复。因为其空间异质性与采伐无关,可以推测其仍然与坡向为东北有关,南向的光照更加充足,使得林木的生长更加茂盛。而重度采伐与中度采伐样地郁闭度的空间异质性更多是由非结构因素造成,可能是由于采伐不均造成了林分郁闭度的差异。

## 4 结论

采伐使得天然云冷杉针阔混交林的凋落物含水率与林分郁闭度的变异系数增大;凋落物半分解层现存量与林分郁闭度之间相关性不显著,而在对照样地与中度采伐样地,其与凋落物含水率之间存在显著的负相关关系,但相关程度不高。

在 10 ~ 100 m 的尺度上,采伐使得凋落物现存量空间异质性程度降低,且由离散型分布转变为聚集型分布;中度采伐样地凋落物含水率的空间格局为聚集分布,而重度采伐与对照样地均为离散型分布,但采伐并不是造成凋落物含水率空间异质性的主要原因;采伐对林分郁闭度空间异质性有一定的影响,中度采伐与重度采伐样地的异质性可能是由于采伐的不均匀所导致。

## 参考文献:

[1] Ibrahim A, Ntonga J, Antoine Z E. Litter decomposition and nutrient dynamics in tropical rainforests of Ebom, southwestern Cameroon: effects of logging-disturbed[J]. *Global Journal of Botanical Science*, 2016, 4(1):24-36.

[2] Martínez-Falcón A P, Moreno C E, Pavón N P. Litter fauna communities and litter decomposition in a selectively logged and an unmanaged pine-oak forest in Mexico[J]. *Bosque*, 2015, 36(1):81-93.

[3] Sabine B, Dafydd M O, Uilly H, *et al.* Land use not litter quality is a stronger driver of decomposition in hyperdiverse tropical forest[J].

*Ecology & Evolution*, 2017, 7(22):9307-9318.

[4] 秦倩倩,王海燕,李翔,等.长白山云冷杉针阔混交林半分解层凋落物生态功能[J]. *林业科学研究*,待发表.

[5] 姚丹丹,雷相东,余黎,等.云冷杉针阔混交林叶面积指数的空间异质性[J]. *生态学报*,2015,35(1):71-79.

[6] 朱教君,康宏樟,胡理乐.应用全天空照片估计林分透光孔隙度(郁闭度)[J]. *生态学杂志*,2005,24(10):1234-1240.

[7] 祁有祥,骆汉,赵廷宁.基于鱼眼镜头的林冠郁闭度简易测量方法[J]. *北京林业大学学报*,2009,31(6):60-66.

[8] 黄中秋,傅伟军,周国模,等.浙江省森林土壤有机碳密度空间变异特征及其影响因素[J]. *土壤学报*, 2014,51(4):906-913.

[9] Li W R, Xu B B, Song Q J, *et al.* The identification of 'hotspots' of heavy metal pollution in soil-rice systems at a regional scale in eastern China[J]. *Science of the Total Environment*, 2013, 472:407-420.

[10] 刘爱利,王培法,丁园圆.地统计学概论[M].北京:科学出版社,2012.

[11] 吴学文,晏路明.普通Kriging法的参数设置及变异函数模型选择方法——以福建省一月均温空间内插为例[J]. *地球信息科学*,2007,9(3):104-108.

[12] 李海滨,王政权,王庆成.空间异质性定量研究理论与方法[J]. *应用生态学报*,1998,9(6):651-657.

[13] 王政权,王庆成.森林土壤物理性质的空间异质性研究[J]. *生态学报*,2000,20(6):945-950.

[14] 刘艳,孙向阳,范俊岗,等.辽宁省森林枯落物现存量及其持水性能[J]. *应用基础与工程科学学报*,2017,25(4):689-797.

[15] 郑金萍,郭忠玲,徐程扬,等.长白山北坡主要森林群落凋落物现存量月动态[J]. *生态学报*,2011,31(15):4299-4307.

[16] 周新年,巫志龙,郑丽凤,等.天然林择伐10年后凋落物现存量及其养分含量[J]. *林业科学*,2008,44(10):25-28.

[17] 郭婧.中亚热带4种森林类型凋落物量及周转[D].长沙:中南林业科技大学,2015.

[18] Parsons S A, Congdon R A, Shoo L P, *et al.* Spatial variability in litterfall, litter standing crop and litter quality in a tropical rain forest region[J]. *Biotropica*, 2014, 46(4):378-386.

[19] Zhou Y, Boutton T W, Wu X B. Soil carbon response to woody plant encroachment: importance of spatial heterogeneity and deep soil storage[J]. *Journal of Ecology*, 2017,105,1738-1749.

[20] 邵方丽,余新晓,杨志坚,等.天然杨桦次生林表层土壤水分与枯落物的空间异质性[J]. *水土保持学报*,2012,26(3):199-204.

[21] 魏强,凌雷,王多锋,等.甘肃兴隆山主要森林类型凋落物累积量及其影响因子[J]. *林业科学研究*,2015,28(6):818-825.

[22] 张恒,金森,邸雪颖.大兴安岭森林凋落物含水率的季节动态与预测[J]. *林业科学研究*,2014,27(5):683-688.

[23] 解伏菊,肖笃宁,李秀珍,等.大兴安岭北坡火烧迹地森林景观恢复及其影响因子——以郁闭度指标为例[J]. *应用生态学报*, 2005,16(9):1711-1718.

(责任编辑:彭南轩)