

DOI: 10.5846/stxb201806131325

秦倩倩, 王海燕, 李翔, 雷相东, 解雅麟, 郑永林, 耿琦. 东北天然针阔混交林凋落物磷素空间异质性及其影响因素. 生态学报, 2019, 39(12): - .
Qin Q Q, Wang H Y, Li X, Lei X D, Xie Y L, Zheng Y L, Geng Q. Spatial heterogeneity and factors affecting phosphorus in the litter of a natural *Picea jezoensis* var. *microsperma* (Lindl.) W.C.Cheng & L.K.Fu and *Abies nephrolepis* (Trautv.) Maxim. mixed forest in northeastern China. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(12): - .

东北天然针阔混交林凋落物磷素空间异质性及其影响因素

秦倩倩¹, 王海燕^{1,*}, 李翔¹, 雷相东², 解雅麟¹, 郑永林¹, 耿琦¹

1 北京林业大学林学院, 北京 100083

2 中国林业科学研究院资源信息研究所, 北京 100091

摘要:以天然云冷杉(*Picea jezoensis* var. *microsperma* (Lindl.) W.C.Cheng & L.K.Fu and *Abies nephrolepis* (Trautv.) Maxim. 针阔混交林为研究对象, 基于 4 块 1 hm² 固定样地林分调查数据和等距离网格布点取样的 400 个半分解层凋落物样品的养分测定数据, 采用地统计学方法, 分析凋落物磷浓度、归还量及利用效率的空间格局特征及其影响因素。结果表明: 4 块样地凋落物磷浓度均值为 1.26 g/kg, 归还量均值为 24.57 kg/hm², 利用效率均值为 841.74, 均表现为中等强度变异, 具有明显的空间异质性, 且同一样地, 变异程度呈现出磷归还量>磷利用效率>磷浓度。凋落物磷浓度、归还量(样地 III 和 IV 结构比大于 75%, 其空间异质性主要由随机效应引起, 不适合进行空间插值)和利用效率主要受结构性因素影响, 具有较高的空间自相关性。同一样地磷利用效率的空间异质性较磷浓度及归还量低, 各样地磷浓度、归还量和利用效率空间自相关范围分别为 9.9—40.5 m、11.9—52.9 m 和 8.1—39.3 m。同一样地磷利用效率的分形维数高于磷浓度, 空间格局较磷浓度复杂, 磷浓度空间依赖性更强, 具有更好的结构性。凋落物磷浓度、归还量(除样地 III 和 IV)和利用效率呈现条带状和斑块状梯度性分布, 且磷浓度和利用效率的空间分布格局相似。凋落物磷浓度、归还量和利用效率受到郁闭度、物种数和植物多样性等多种因子的影响。

关键词:云冷杉针阔混交林; 凋落物; 磷; 空间异质性; 地统计学

Spatial heterogeneity and factors affecting phosphorus in the litter of a natural *Picea jezoensis* var. *microsperma* (Lindl.) W. C. Cheng & L. K. Fu and *Abies nephrolepis* (Trautv.) Maxim. mixed forest in northeastern China

QIN Qianqian¹, WANG Haiyan^{1,*}, LI Xiang¹, LEI Xiangdong², XIE Yalin¹, ZHENG Yonglin¹, GENG Qi¹

1 College of Forestry, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

2 Institute of Forest Resource Information Techniques, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China

Abstract: In order to investigate the spatial heterogeneity of phosphorus (P) in the litter of natural *Picea jezoensis* var. *microsperma* (Lindl.) W.C.Cheng & L.K.Fu and *Abies nephrolepis* (Trautv.) Maxim. mixed forest and associated factors, four 1 hm² permanent plots were established for litter collection and surveyed for stand structure in northeastern China. A total of 400 litter samples from the semi-decomposed layer were collected using an equidistant grid point sampling method. The spatial variation in litter P concentration, return, and use efficiency were analyzed using geostatistics. The results showed that the average litter P concentration was 1.26 g/kg, the average P return was 24.57 kg/hm², and the average use efficiency was 841.74. The variation in P concentration, return, and use efficiency in the four plots was moderate, and the

基金项目: 国家重点研发计划重点专项项目(2017YFC0504002)

收稿日期: 2018-06-13; 网络出版日期: 2018-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: haiyanwang72@aliyun.com

degree of variation showed that P return > P use efficiency > P concentration in an individual plot. Litter P concentration, return (the nugget-to-sill values in plots III and IV were >75%, indicating that their spatial heterogeneity was mainly caused by random effects and they were not suitable for interpolation), and use efficiency showed high spatial autocorrelation, primarily resulting from structural factors. The spatial heterogeneity of P use efficiency was lower than that of P concentration and return, and the spatial autocorrelation ranges of P concentration, return, and use efficiency in the plots were 9.9—40.5 m, 11.9—52.9 m, and 8.1—39.3 m, respectively. Within plots, the fractal dimension of P use efficiency was higher than that of P concentration, with a more complex spatial pattern, while P concentration showed stronger spatial dependence with better spatial structure. Litter P concentration, return (except plots III and IV), and use efficiency in the four plots showed strip and patch gradient distribution, and the spatial variation of P concentration was similar to that of P use efficiency. Litter P concentration, return, and use efficiency were influenced by canopy density, species, plant diversity, and other factors.

Key Words: *Picea jezoensis* var. *microsperma* (Lindl.) W.C.Cheng & L.K.Fu and *Abies nephrolepis* (Trautv.) Maxim. mixed forest; litter; phosphorus; spatial heterogeneity; geostatistics

凋落物养分归还还是森林生态系统最关键的过程之一,是森林植被向土壤输入养分的主要生物学途径^[1]。磷作为植物生长发育不可缺少的营养元素,既是植物体内许多重要有机化合物的组分,又以多种方式参与植物体内各种代谢过程^[2-3]。凋落物中磷的浓度直接影响凋落物养分归还的质量及速率,并间接影响植物根系的吸收^[4]。有研究表明,森林植物吸收的养分中,90%以上的磷来自于凋落物分解归还给土壤的养分^[5-6]。此外,凋落物中磷的利用效率大于其他元素,是植物生长的限制因子,控制着森林生态系统的生态过程^[7-8]。由于凋落物受到地形、气候、取样和测量误差等因素的共同影响^[9-10],凋落物磷浓度、归还量及利用效率存在空间异质性。

空间异质性是存在于生态学系统中的一个普遍特性,反映了生态系统或其属性在空间上的复杂性和变异性^[11-12]。森林生态系统中有关空间异质性的研究多集中于土壤养分^[13-15],近年来,也有部分研究分析了凋落物性质的空间变异性^[16-19]。Parsons 等^[20]在澳大利亚北皇后岛对凋落物进行了系统的研究,发现凋落物产量、氮和磷的浓度等存在显著的空间变异,但区域尺度(regional scale)和局域尺度(local scale)的变异性不同。温丁等^[21]探讨全国尺度下森林凋落物现存量空间格局时发现,随经度和纬度的增加,凋落物现存量呈增加趋势。Wang 等^[22]在区域尺度上研究了台湾地区亚热带森林凋落物的时空变异,发现凋落物的年产量可能随海拔升高和植被类型的变化而逐渐降低。Fu 等^[23]研究了浙江省森林凋落物碳密度的空间格局,发现由于森林保护政策的实施,浙江省西部和西北部凋落物碳密度较高。但这些研究多集中在全国或区域尺度下森林凋落物的空间格局研究,而目前对小尺度(局域尺度)森林群落凋落物性质特别是磷素空间特征的认识非常有限。

我国东北地区森林类型多样,林分结构复杂,云冷杉(*Picea jezoensis* var. *microsperma* (Lindl.) W.C.Cheng & L.K.Fu and *Abies nephrolepis* (Trautv.) Maxim.) 针阔混交林是该区典型的天然林类型之一。基于该区云冷杉针阔混交林的研究主要集中在林分结构、立地质量和天然更新等方面^[24-26],但有关凋落物的研究鲜有报道。通常来说,云、冷杉凋落量集中在秋季和冬季^[27],云冷杉针阔混交林凋落高峰期为 9—10 月,而此前林地表面新鲜凋落物较少,光照和雨水等生态环境因子对半分解层凋落物影响最大。因此,本文以长白山天然云冷杉针阔混交林为研究对象,选取 4 块立地条件(海拔、坡度、坡向和温湿度等)相似的、面积为 1 hm² 的方形固定样地,收集 8 月末半分解层的凋落物,用于分析森林群落尺度上半分解层凋落物磷浓度、归还量及利用效率的空间变异特征,及其与地上植被、凋落物性质等因子的关系,以期揭示我国东北森林群落尺度上半分解层凋落物磷(P)空间格局特征,为评估森林凋落物的分解归还速率及其对植被和土壤的影响和森林的健康经营与管理提供科学依据。

1 研究区概况

研究地点位于吉林省汪清林业局金沟岭林场(43°17′—43°25′ N, 130°05′—130°20′ E)。该林场属长白山系老爷岭山脉雪岭支脉,为低山丘陵地貌,海拔 550—1100 m,平均坡度 10°—25°。该区属温带大陆性季风气候,全年平均气温 4℃,年降水量 600—700 mm。土壤类型以暗棕壤为主,成土母质主要为花岗岩、片麻岩以及玄武岩的残积物和坡积物,部分地区为洪积物和冲积物,土壤垂直变化明显。地带性植被为针阔混交林,主要乔木树种有臭冷杉(*Abies nephrolepis* (Trautv.) Maxim.)、鱼鳞云杉(*Picea jezoensis* var. *microsperma* (Lindl.) W.C.Cheng & L.K.Fu)、红松(*Pinus koraiensis* Siebold et Zucc.)、红皮云杉(*Picea koraiensis* Nakai)、大青杨(*Populus ussuriensis* Kom.)、紫椴(*Tilia amurensis* Rupr.)、榆树(*Ulmus pumila* L.)、白桦(*Betula platyphylla* Suk.) 和水曲柳(*Fraxinus mandschurica* Rupr.)等。

2 研究方法

2.1 样品采集与测定

2012 年 7 月,在天然云冷杉针阔混交林中设置 12 块面积为 1 hm² 的方形固定样地,各样地立地条件相似(均为中龄林)。2015 年 1 月,各样地按照采伐蓄积量确定择伐强度,共设置 4 种不同处理(含未采伐),每种处理重复 3 次。2017 年 8 月,从各处理中选取具有代表性的 1 块样地,4 块样地的基本概况见表 1。每块样地按网格法设置 100 个 10 m×10 m 的样方,记录样方内胸径>5 cm 的所有乔木植物种类并测量胸径。在样方中心处的 50 cm×50 cm 方形区域内对半分解层凋落物(分层标准为:叶片已经没有完整外观轮廓,大多数凋落物已经成碎末状,颜色为褐色)进行取样,并用 Nikon 的鱼镜头进行拍照获取林分冠层图像。将凋落物样品带回实验室在 60℃ 烘箱中烘至恒重,测定其含水量^[28],并以此估算单位面积上的凋落物现存量。凋落物粉碎过 0.25 mm 筛后分别采用外加热重铬酸钾氧化-容量法、凯氏定氮法和钼锑抗比色法测定全碳(C)、全氮(N)和全磷(P)^[29]。

表 1 样地基本概况

Table 1 Characteristics of experimental plots

样地 Plots	海拔 Altitude/ m	坡度 Slope/ (°)	经度 Longitude/ (°)	纬度 Latitude/ (°)	坡向 Aspect	采伐强度 Thinning intensity/%	蓄积量 Volume/ (m ³ /hm ²)	林分密度 Stand density/ (株/hm ²)	平均树高 Mean height/m	平均胸径 Mean DBH/cm
I	742	3	130.25125	42.38018	东北	21.21	173.89	934	13.9	14.5
II	732	5	130.25000	43.38467	东北	6.29	201.00	1167	11.4	12.3
III	769	5	130.25410	42.38453	东北	11.22	218.10	1301	13.6	13.7
IV	773	3	130.25547	42.38477	东北	0.00	209.10	1437	15.1	14.0

DBH: diameter at breast height

2.2 数据计算与统计分析

凋落物磷归还量用凋落物现存量和凋落物中磷浓度来计算^[30],用凋落物现存量除以凋落物中的磷归还量的值来表示磷的利用效率^[31]。用 Excel 软件计算云冷杉针阔混交林物种丰富度指数、多样性指数、均匀度指数、胸高断面面积和针阔树种比例等林分特征指标^[32],林分郁闭度采用 Photoshop 软件测定^[33]。采用 SPSS 21.0 软件计算凋落物磷浓度、归还量及利用效率的平均值和变异系数(CV)等,根据变异程度分级:CV ≤ 10%,为弱度变异性;10% < CV < 100%,为中等变异性;CV ≥ 100%,为强度变异性^[34];用 Pearson 相关分析计算凋落物磷浓度、归还量及利用效率与郁闭度等因子的相关系数;用 K-S 检验正态分布情况,对于不符合的数据进行 Box-Cox 转换后用于空间异质性分析。

地统计分析和克里格插值图分别在 GS⁺ 7.0 和 ArcGIS 10.2 软件上计算和绘制。用半方差函数分析凋落

物磷素的空间异质性特征^[35],半方差函数计算公式:

$$r(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \quad (1)$$

式中, $r(h)$ 为半方差函数值, $N(h)$ 为间距为 h 的样本对总数; $Z(x_i)$ 和 $Z(x_i+h)$ 指凋落物磷浓度、归还量及利用效率在 x_i 和 x_i+h 位置处的实测值。

对计算的 $r(h)$ 和 h 用球状模型、指数模型、高斯模型和线性模型进行拟合^[36],根据决定系数(R^2)选择适合模型。其理论模型参数中的变程(Range, A)是使半变异函数达到平稳时的空间距离。基台值(C_0+C),是半变异函数在变程处达到的平稳值,它反映数据的空间变异程度。块金值(C_0)是空间尺度上(远小于最小抽样间距)存在的差异或测量误差^[37]。结构比(structural variance ratio, $C_0/(C_0+C)$)可度量空间自相关变异所占的比例,可用于估计随机因素在所研究的空间异质性中的相对重要性。结构比小于25%,表明区域化变量有强烈的空间相关性;在25%—75%之间,有中等的空间相关性;大于75%,则空间相关性微弱^[38]。此外,分形维数(D)可以用于度量变量因子的复杂程度,D值越大,样本之间差异越小,即均一性越好^[39-41]。

克里格插值法,是以空间相关性、变异函数理论和结构分析为基础,在有限区域内对区域化变量进行无偏最优估计,是地统计学中最常用的插值方法之一^[42]。普通克里格的估计公式为:

$$Z(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i) \quad (2)$$

式中, $Z(x_0)$ 为待估点 x_0 处凋落物磷浓度、归还量及利用效率的估测值; $Z(x_i)$ 表示样地 x_i 处凋落物磷浓度、归还量及利用效率的实测值; λ_i 是每个实测值的权重; n 为参与估测 x_0 处实测样点数目。

3 结果与分析

3.1 凋落物磷素的统计特征

凋落物磷浓度、归还量和利用效率的描述性统计特征见表2。样地I-IV凋落物磷浓度平均值分别为1.30、1.49、1.12、1.12 g/kg,变化范围分别在0.67—1.86、0.53—2.41、0.69—1.67、0.57—2.35 g/kg,变异系数分别为16.15%、26.84%、17.86%和19.64%,表明4块样地磷浓度均为中等变异性。4块样地磷归还量均值在19.23—29.32 kg/hm²范围内波动,变异系数在42.38%—58.12%范围内,表现为中等变异性。4块大样地中,样地III的凋落物磷利用效率均值最大,达926.16,样地IV次之,为922.97,样地I和样地II较小,分别为

表2 凋落物磷浓度、归还量和利用效率的描述性统计特征($n=100$)

Table 2 Descriptive statistical characteristics of litter phosphorus concentration, return and use efficiency ($n=100$)

项目 Item	样地 Plot	均值 Mean	最大值 Max.	最小值 Min.	标准差 Standard deviation (SD)	变异系数 Coefficient of variation (CV, %)	偏度 Skewness	峰度 Kurtosis	K-S 检验 K-S test
浓度 Concentration/ (g/kg)	I	1.30	1.86	0.67	0.21	16.15	0.19	0.75	0.84
	II	1.49	2.41	0.53	0.40	26.84	0.31	-0.34	0.82
	III	1.12	1.67	0.69	0.20	17.86	0.10	-0.35	0.58
	IV	1.12	2.35	0.57	0.22	19.64	1.77	8.56	1.32
归还量 Return/ (kg/hm ²)	I	29.32	91.26	9.16	17.04	58.12	1.94	1.40	2.11
	II	27.69	112.60	7.04	15.10	54.53	9.20	2.16	2.16
	III	19.23	53.05	5.99	8.15	42.38	2.46	1.25	2.53
	IV	22.04	90.63	3.95	11.11	50.41	13.46	2.57	2.17
利用效率 Use efficiency	I	793.22	1492.54	537.63	139.00	17.52	1.58	5.63	1.25
	II	724.62	1886.79	414.94	224.85	31.03	1.89	6.96	1.12
	III	926.16	1449.28	598.80	181.47	19.59	0.83	0.48	1.03
	IV	922.97	1754.39	425.53	176.97	19.17	1.13	4.67	1.03

793.22 和 724.62,但磷利用效率最值均出现在样地 II,最大值为 1886.79,最小值为 425.53,变异系数在 17.52%—31.03%,仍属于中等变异。表明云冷杉针阔混交林凋落物磷素的空间离散程度小,但同一样地,变异程度基本呈现出磷归还量>磷利用效率>磷浓度。

3.2 凋落物磷素的空间变异及分布

从表 3 和图 1 可以看出,4 块样地凋落物磷浓度、归还量和利用效率模拟的残差平方和 RSS 值均较低 (1.366×10^{-7} — 2.902×10^{-5})。除样地 II 中凋落物磷浓度的最佳拟合模型为高斯模型外 ($R^2=0.999$),其他 3 块样地均为指数模型 ($R^2=0.222$ — 0.727)。样地 I 中凋落物磷归还量的最佳拟合模型为球状模型 ($R^2=0.349$),样地 II 为指数模型 ($R^2=0.858$),而样地 III 和 IV 均为线性模型 ($R^2=0.001$ — 0.149)。除样地 I 中凋落物磷利用效率的最佳拟合模型为球状模型外 ($R^2=0.513$),其他 3 块样地均为指数模型 ($R^2=0.256$ — 0.883)。表明用半方差函数理论模型能较好地反映云冷杉针阔混交林样地凋落物磷素的空间结构特征。

表 3 凋落物磷浓度、归还量和利用效率空间分析的半方差函数的模型类型及参数 ($n=100$)

Table 3 Semivariogram theoretical models and parameters for litter phosphorus concentration, return and use efficiency ($n=100$)

项目 Item	样地 Plot	模型 Model	块金值 Nugget (C_0)	基台值 Sill (C_0+C)	变程 Range (A, m)	结构比 Structure variance Ratio (C_0/C_0+C , %)	决定系数 Determination coefficients (R^2)	残差平方和 Residual sum of squares (RSS)	分形维数 Fractal dimension (D)
浓度 Concentration/ (g/kg)	I	指数模型	0.0003	0.0119	9.9	2.5	0.276	1.961×10^{-7}	1.988
	II	高斯模型	0.0142	0.0310	40.5	45.8	0.999	1.487×10^{-7}	1.815
	III	指数模型	0.0005	0.0145	17.1	3.4	0.727	7.691×10^{-7}	1.952
	IV	指数模型	0.0000	0.0084	11.1	0.1	0.222	2.626×10^{-7}	1.978
归还量 Return/ (kg/hm ²)	I*	球状模型	0.0001	0.0334	11.9	0.3	0.349	1.966×10^{-5}	1.982
	II*	指数模型	0.0115	0.0252	52.1	44.0	0.858	3.913×10^{-6}	1.884
	III*	线性模型	0.0256	0.0256	52.9	100.0	0.149	3.333×10^{-6}	1.987
	IV*	线性模型	0.0142	0.0142	52.9	100.0	0.001	2.902×10^{-5}	1.974
利用效率 Use efficiency	I	球状模型	0.0000	0.0077	11.9	0.1	0.513	1.366×10^{-7}	1.998
	II	指数模型	0.0013	0.0146	39.3	8.9	0.883	2.031×10^{-6}	1.869
	III	指数模型	0.0008	0.0154	15.3	5.2	0.577	1.031×10^{-6}	1.964
	IV	指数模型	0.0001	0.0105	8.1	1.0	0.256	1.081×10^{-6}	1.995

* 表示数据因不符合正态分布进行 Box-Cox 转换

从表 3 可以看出,各样地凋落物磷浓度、归还量和利用效率的块金值均接近于 0,表明由试验误差和取样引起的随机变异小。各样地凋落物磷浓度、归还量和利用效率的基台值分别为 0.0084—0.0310、0.0142—0.0334 和 0.0077—0.0154,同一样地磷利用效率的变异程度较磷浓度及归还量低。各样地凋落物磷浓度结构比为 0.1%—45.8%,表明由随机因素引起的空间异质性占其总空间异质性的 0.1%—45.8%,而由结构性因素引起的空间异质性占 54.2%—99.9%,云冷杉针阔混交林样地凋落物磷浓度具有较强的空间自相关性,主要由结构性因素引起。样地 I 中凋落物磷归还量的结构比为 0.3%,表明其具有强烈的空间自相关性,样地 II 中磷归还量的结构比为 44.0%,具有中等强度的空间自相关性,但样地 III 和 IV 结构比大于 75%,其空间相关性微弱,说明空间异质性主要由随机效应引起,不适合进行空间插值^[34]。同样,各样地凋落物磷利用效率的结构比为 0.1%—8.9%,具有强烈的空间自相关性。

从表 3 可以看出,云冷杉针阔混交林各样地凋落物磷浓度变程为 9.9—40.5 m,磷归还量变程为 11.9—52.9 m,磷利用效率变程为 8.1—39.3 m,磷归还量较磷浓度和利用效率有较大的空间自相关性距离和空间连续性,说明其生态过程在较大尺度上起作用。各样地凋落物磷浓度、归还量和利用效率的分形维数分别为 1.815—1.988、1.884—1.987 和 1.869—1.998。样地 I 和 IV 中凋落物磷利用效率的分形维数均高于磷浓度和

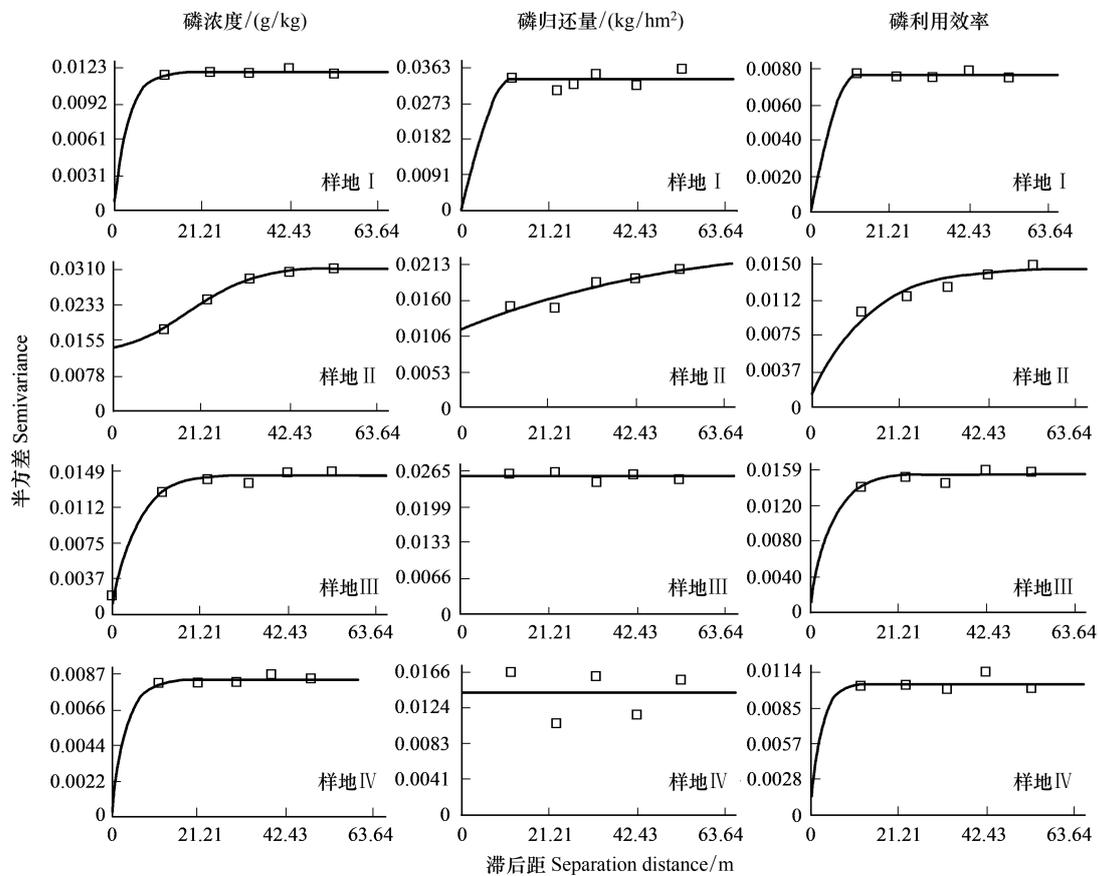


图1 凋落物磷浓度、归还量和利用效率的半方差函数图

Fig.1 Semivariograms of litter phosphorus concentration, return and use efficiency

归还量,表明其磷利用效率的均一性较好,而样地 II 和 III 中凋落物磷浓度的分形维数低于磷归还量和利用效率,表明其磷浓度均一性较差。如图 2 所示,各样地凋落物磷浓度、归还量(除样地 III 和 IV)和利用效率呈明显的条带状和斑块状梯度性分布,且磷浓度和磷利用效率在同一样地内表现为相似的空间分布格局,在磷浓度高值出现的位置磷利用效率则相对较低,而磷归还量变化的规律不如磷浓度和利用效率明显。

3.3 凋落物磷素空间变异的影响因子

凋落物磷浓度、归还量和利用效率与地上因子的相关系数见表 4。凋落物磷浓度与郁闭度(样地 II)呈极显著正相关($P < 0.01$),与物种数(样地 III)、丰富度指数(样地 III)和多样性指数(样地 III 和 IV)呈显著正相关($P < 0.05$),说明丰富的树种组成有利于凋落物磷浓度的增加;凋落物磷归还量与物种数和丰富度指数(样地 IV)呈极显著正相关,与多样性指数(样地 IV)呈显著正相关,而与其他各指标的相关系数均较小且未达到显著水平;凋落物磷利用效率与郁闭度(样地 II)呈极显著负相关,与物种数、丰富度指数和多样性指数(样地 IV)呈显著负相关,表现出与凋落物磷浓度相反的特征关系。针叶树种比例和针叶株数比例对凋落物磷浓度、归还量和利用效率影响不大但具有相似性。凋落物磷浓度、归还量和利用效率与胸径和胸高断面积相关关系均不显著。

凋落物磷浓度、归还量和利用效率与凋落物因子的相关性(表 5)表明,凋落物磷浓度与全氮(样地 I、III 和 IV)呈显著正相关,与 C/N 比(样地 I)呈显著负相关,与 4 块样地的 C/P 比和 N/P 比均呈极显著负相关;凋落物磷归还量与 4 块样地的凋落物现存量均呈极显著正相关,与 C/P 比(样地 II 和 IV)和 N/P 比(样地 II、III 和 IV)呈极显著负相关;凋落物磷利用效率与全氮(样地 III 和 IV)呈极显著负相关,与 4 块样地的 C/P 比和 N/P 比均呈极显著正相关。凋落物磷浓度、归还量和利用效率与凋落物含水量和全碳浓度无显著相关性。

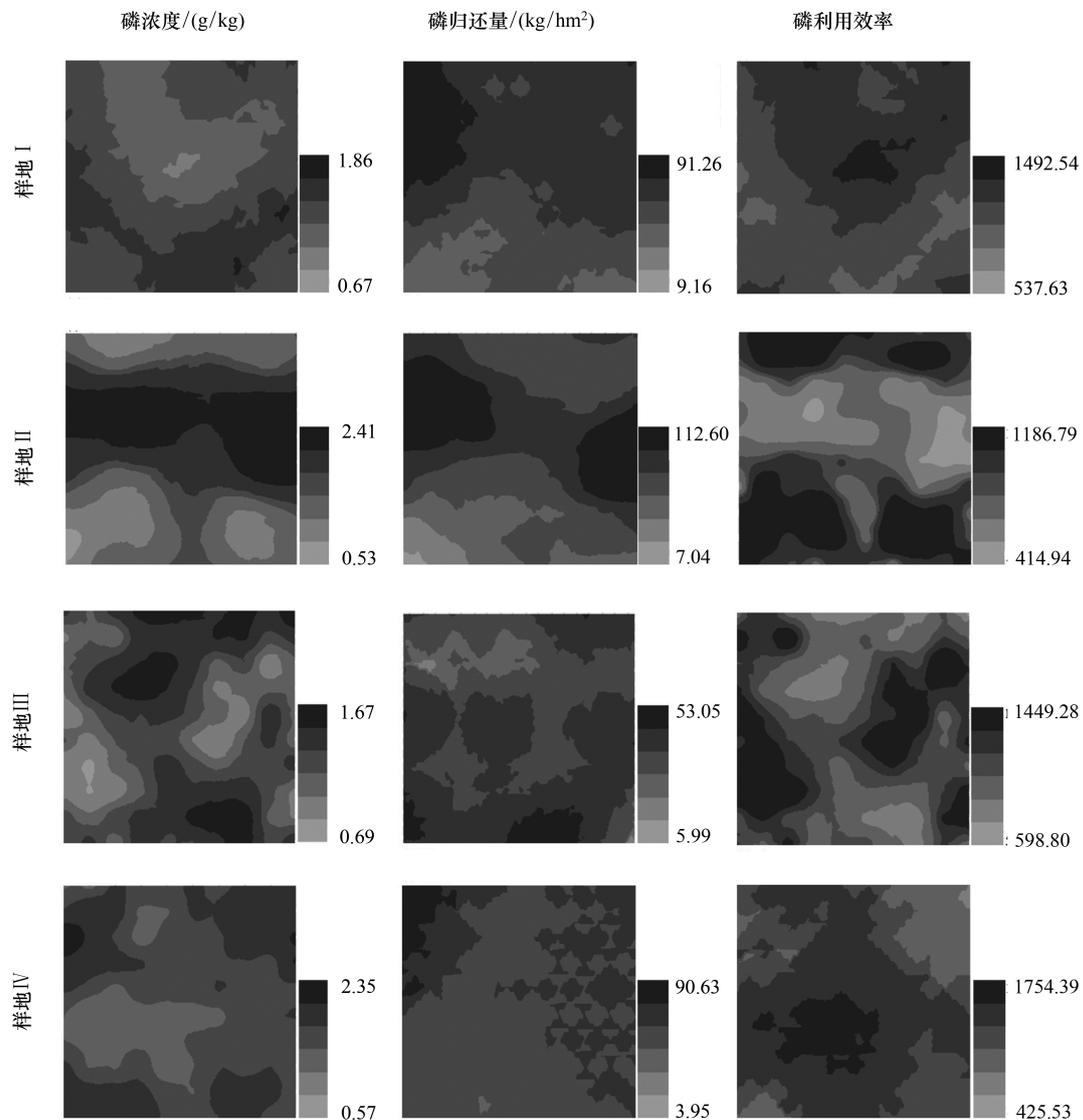


图2 凋落物磷浓度、归还量和利用效率的空间分布格局

Fig.2 Spatial pattern of litter phosphorus concentration, return and use efficiency

4 讨论与结论

4.1 天然针阔混交林凋落物磷素特征

凋落物的养分归还还是土壤肥力的重要来源,而其利用效率可以反映植被的养分状况^[43]。东北天然云冷杉针阔混交林4块大样地凋落物磷浓度平均值为1.26 g/kg,落入全国森林凋落物磷浓度范围内(0.2—1.8 g/kg)^[44],高于青海高寒区华北落叶松天然林凋落物磷浓度(0.77 g/kg)^[45],这可能是由于云冷杉针阔混交林群落优势树种与华北落叶松天然林不同,凋落物初始化学成分存在差异;凋落物的磷归还量均值为24.57 kg/hm²,高于亚热带的格氏栲天然林和巨桉人工林凋落物磷归还量^[46-47],这是由于落叶是云冷杉凋落物的主要归还组分,而云冷杉针叶质地较硬,木质素类等较难分解的物质含量较高,使得分解速率减慢、现存量较多,进而导致归还量较大;凋落物磷利用效率均值为841.74,高于长白山高山冻原生态系统的凋落物磷利用效率^[9],略低于日本中部柳杉天然林凋落物磷利用效率^[7],这可能是由于该区森林土壤磷浓度高于日本中部柳杉天然林,植物吸收和存留在枝叶中的磷浓度较高,导致凋落物磷利用效率较低。无论大尺度还是小尺度,由于森林类型、林龄、林分密度及立地条件和采样时间等存在差异,凋落物性质的空间变异普遍存在。本研究中,各样

地凋落物磷浓度、归还量和利用效率均为中等强度变异,且同一样地,变异程度基本呈现出磷归还量>磷利用效率>磷浓度,可能与凋落物中磷素迁移特征和地上植被分布及其选择性吸收利用等有关。

表4 凋落物磷浓度、归还量和利用效率与地上因子的相关系数($n=100$)

Table 4 Correlation coefficients of litter phosphorus concentration, return and use efficiency with aboveground factors ($n=100$)

项目 Item	样地 Plot	郁闭度 Canopy density	物种数 Species number	株数 Stem number	生物多样性指数 Biodiversity index			针叶树 种比例 Tree species proportion	针叶株 数比例 Stem number ratio	胸径 DBH	胸高断面面积 Basal area
					丰富度 Simpson index (D)	多样性 Gleason Wiener index (H')	均匀度 Pielous index (J)				
浓度 Concentration	I	-0.106	-0.038	-0.077	-0.038	-0.066	-0.105	0.010	0.007	-0.097	-0.111
	II	0.262 **	0.013	-0.109	0.013	0.043	0.058	-0.038	-0.021	0.038	0.042
	III	0.147	0.206 *	0.148	0.206 *	0.222 *	0.123	0.023	-0.097	0.093	-0.087
	IV	0.037	0.195	-0.030	0.195	0.212 *	0.126	-0.035	-0.133	-0.057	-0.058
归还量 Return	I	-0.029	-0.094	-0.085	-0.094	-0.113	-0.106	-0.001	-0.117	-0.087	-0.078
	II	0.137	0.025	0.033	0.025	0.022	0.017	-0.011	-0.086	-0.111	-0.091
	III	0.079	0.128	0.067	0.128	0.158	0.147	0.076	-0.031	0.059	-0.030
	IV	0.040	0.258 **	0.149	0.258 **	0.230 *	0.061	-0.072	-0.001	-0.113	-0.107
利用效率 Use efficiency	I	0.096	0.035	0.059	0.035	0.064	0.080	-0.028	-0.039	0.085	0.095
	II	-0.269 **	-0.043	0.052	-0.043	-0.054	0.006	0.019	-0.007	-0.002	-0.012
	III	-0.121	-0.150	-0.112	-0.150	-0.165	-0.098	-0.028	0.089	0.056	0.053
	IV	-0.102	-0.209 *	0.014	-0.209 *	-0.233 *	-0.121	0.060	0.169	0.035	0.034

**表示影响极显著($P<0.01$), *表示影响显著($P<0.05$)

表5 凋落物磷浓度、归还量和利用效率与凋落物因子的相关系数($n=100$)

Table 5 Correlation coefficients of litter phosphorus concentration, returned mass and use efficiency with litter factors ($n=100$)

项目 Item	样地 Plot	凋落物 现存量 Litterfall	凋落物 含水量 Moisture content	全碳 Total C	全氮 Total N	碳氮比 C/N	碳磷比 C/P	氮磷比 N/P
浓度 Concentration	I	0.090	-0.133	0.023	0.236 *	-0.243 *	-0.725 **	-0.342 **
	II	0.060	0.061	0.084	0.091	-0.007	-0.758 **	-0.771 **
	III	-0.151	0.060	0.011	0.230 *	-0.131	-0.689 **	-0.835 **
	IV	-0.013	-0.078	0.046	0.271 **	-0.101	-0.609 **	-0.690 **
归还量 Return	I	0.949 **	-0.075	0.174	0.055	0.065	-0.130	-0.137
	II	0.831 **	-0.009	-0.041	-0.052	0.003	-0.409 **	-0.414 **
	III	0.818 **	0.097	0.115	-0.068	0.183	-0.062	-0.294 **
	IV	0.798 **	0.121	-0.067	0.010	-0.055	-0.280 **	-0.371 **
利用效率 Use efficiency	I	-0.110	0.158	-0.049	-0.175	0.183	0.738 **	0.434 **
	II	-0.032	-0.017	-0.127	-0.034	-0.077	0.822 **	0.890 **
	III	0.186	0.044	-0.003	-0.252 **	0.159	0.712 **	0.834 **
	IV	0.060	0.025	-0.077	-0.281 **	0.080	0.620 **	0.745 **

4.2 天然针阔混交林凋落物磷素空间异质性

空间异质性是结构性因素和随机性因素共同作用的结果^[11]。通常,结构性因素能促使空间相关性增强,而随机性因素会减弱空间相关性^[48]。本研究中,各样地凋落物磷浓度、归还量及利用效率空间格局存在差异,同一样地磷利用效率的变异程度较磷浓度及归还量低。凋落物磷浓度、利用效率由结构性因素引起的空间异质性分别占系统总变异的54.2%—99.9%和91.9%—99.9%,说明其异质性在研究尺度上主要受结构性因素影响,即当成土母质和气候等条件基本一致时,地形、林分结构和土壤是凋落物磷素空间异质性产生的重要

原因;而样地 III 和 IV 的凋落物磷归还量结构比大于 75%,其空间相关性微弱,说明空间异质性主要由随机性因素(如采样和测定等随机误差)引起。变程指示空间相关范围大小,变量只有在变程内才具有空间自相关性^[11]。云冷杉针阔混交林各样地凋落物磷浓度、归还量及利用效率变程分别为 9.9—40.5 m、11.9—52.9 m 和 8.1—39.3 m,表明磷素具有较小的空间异质性尺度,因此,本研究采用 10 m×10 m 样方收集凋落物样品,足以反映凋落物磷浓度、归还量及利用效率的总体变化情况。分形维数指随机因素引起的异质性占系统变异的比值大小,可反映磷素空间格局的复杂程度^[11, 48]。本研究各样地凋落物磷浓度、归还量和利用效率的分形维数分别为 1.815—1.988、1.884—1.987 和 1.869—1.998,尽管分维数差异不大,但磷利用效率的分形维数整体比磷浓度高 0.010—0.054,表明磷浓度的空间依赖性更强,具有更好的结构性,空间分布简单。克里格插值图可直观地反映各样地凋落物的空间分布特征,各样地凋落物磷浓度、归还量(除样地 III 和 IV)和利用效率呈明显的条带状和斑块状梯度性分布,且同一样地磷浓度和利用效率具有相似的空间分布格局,但变化趋势相反,而磷归还量变化的规律不如磷浓度和利用效率明显。本研究所选 4 块样地海拔差异不大,坡向均为东北坡向,坡度仅为 3°—5°,而各样地凋落物磷浓度、归还量和利用效率高值区域各不相同则很可能是受天然林郁闭度和树种组成等地上因子和凋落物现存量 and 含水率等凋落物因子而非地形和气候等立地条件的影响。

4.3 天然针阔混交林凋落物磷素空间异质性的影响因素

采伐是森林经营的主要措施,直接或间接地影响了森林生态系统植物多样性和郁闭度等林分特征^[49-50],决定了太阳辐射和降水的空间分配。本研究中,4 块样地的地形及土壤性质相似,但不同的采伐强度使局部生境的小气候条件产生一定的差异,进而影响了凋落物磷素的空间变异。研究得出,4 块样地半分解层凋落物磷浓度、归还量和利用效率与地上植被和凋落物因子的相关关系存在差异,但总的来说,凋落物磷浓度、归还量和利用效率与郁闭度、物种数和生物多样性等指标呈现一定的相关性,而与胸径和胸高断面积相关性不大。齐泽民等^[51]研究认为缺苞箭竹凋落物磷利用效率随密度增大而增高,而本研究中凋落物磷利用效率却与郁闭度呈负相关。郁闭度是反映林分密度的指标,郁闭度大,光照和降水对凋落物影响较小,凋落物分解减慢,覆盖在土壤表面,加上东北林区在采样时间节点,水热条件适宜,土壤蒸发相对减弱,影响了土壤通气性和土壤微生物的繁殖,加强了腐殖质的积累过程,因此土壤磷浓度增大,而相对的凋落物磷利用效率降低^[52-53]。凋落物磷归还量与凋落物现存量呈显著正相关,表明凋落物现存量增高,有利于磷归还土壤,这与薛达等^[7]观点一致。凋落物磷浓度和利用效率与凋落物全氮、C/N 比等呈显著相关,表明凋落物磷与碳、氮三者之间有着密切的耦合关系。肖银龙等^[54]曾模拟氮沉降对华西苦竹林凋落物养分输入量的早期影响,发现氮能加速凋落物中养分的释放和循环,间接增加了生态系统地下部分对地上部分营养元素的供应量,从而有利于凋落物中磷浓度的增加,本研究得出凋落物磷浓度与全氮呈正相关的结果与此相吻合。

凋落物磷浓度、归还量和利用效率影响着陆地生态系统物质循环和能量转换,在维持土壤肥力、提高土壤质量等方面也发挥着重要的作用。东北天然云冷杉针阔混交林半分解层凋落物磷素的空间分布规律较复杂,与地上植被和凋落物等因子呈显著相关性但相关程度并不高。由于现阶段缺乏对于空间异质性的量化方法,只能通过模型拟合得到空间分布图,通过参数说明空间变量的自相关性与空间异质性。而本研究中个别指标模型拟合的决定系数较低,因此,为提高函数模型的拟合度,建议对于 1 hm²大样地缩小取样距离至 5 m 及以下。此外,本文主要探究特定采样时间(凋落高峰期前)凋落物养分的空间格局及各生态因子对其作用,而各因素间协同作用、时空尺度、全球气候变化及长期定位监测下的凋落物养分变化规律等问题仍存在很大的不确定性,亟待进一步的研究。

参考文献(References):

- [1] Vitousek P M, Howarth R W. Nitrogen limitation on land and in the sea: how can it occur? *Biogeochemistry*, 1991, 13(2): 87-115.
- [2] Arthur M A, Fahey T J. Biomass and nutrients in an Engelmann spruce-subalpine fir forest in north central Colorado: pools, annual production, and internal cycling. *Canadian Journal of Forest Research*, 1992, 22(3): 315-325.
- [3] Aerts R, Chapin III F S. The mineral nutrition of wild plants revisited: a re-evaluation of processes and patterns. *Advances in Ecological Research*,

- 1999, 30: 1-67.
- [4] 潘复静, 张伟, 王克林, 何寻阳, 梁士楚, 韦国富. 典型喀斯特峰丛洼地植被群落凋落物 C:N:P 生态化学计量特征. 生态学报, 2011, 31(2): 335-343.
- [5] 曾昭霞, 刘孝利, 王克林, 曾馥平, 宋同清, 宋希娟. 桂西北喀斯特区原生林与次生林凋落物及养分归还特征比较. 生态环境学报, 2010, 19(1): 146-151.
- [6] Chapin III F S, Matson P A, Vitousek P M. Principles of Terrestrial Ecosystem Ecology. New York: Springer, 2011.
- [7] 薛达, 薛立, 罗山. 日本中部风景林凋落物量、养分归还量和养分利用效率的研究. 华南农业大学学报, 2001, 22(1): 23-26.
- [8] Wang Y P, Law R M, Pak B. A global model of carbon, nitrogen and phosphorus cycles for the terrestrial biosphere. Biogeosciences, 2010, 7(7): 2261-2282.
- [9] 魏晶, 邓红兵, 吴刚, 郝莹婕, 尚文艳. 长白山高山冻原生态系统三种养分含量的空间分布. 生态学报, 2004, 24(11): 2360-2366.
- [10] 杨阳, 王根绪, 冉飞, 常瑞英. 西藏高原主要森林类型凋落物碳储量及空间分布格局. 生态学杂志, 2016, 35(3): 559-566.
- [11] 李哈尔滨, 王政权. 空间异质性定量研究理论与方法. 应用生态学报, 1998, 9(6): 651-657.
- [12] Li H, Reynolds J F. On definition and quantification of heterogeneity. Oikos, 1995, 73(2): 280-284.
- [13] 张忠华, 胡刚, 祝介东, 倪健. 喀斯特森林土壤养分的空间异质性及其对树种分布的影响. 植物生态学报, 2011, 35(10): 1038-1049.
- [14] 杨一, 王懿祥, 白尚斌, 刘蕾蕾, 朱婷婷, 朱旭丹, 尤誉杰. 临安次生灌丛植物多样性对林火烈度空间异质性的响应. 生态学报, 2016, 36(14): 4438-4446.
- [15] 刘玲, 王海燕, 戴伟, 杨晓娟, 李旭. 长白山低山区森林土壤有机碳及养分空间异质性. 应用生态学报, 2014, 25(9): 2460-2468.
- [16] Obrist D, Johnson D W, Lindberg S E, Luo Y, Hararuk O, Bracho R, Battles J J, Dail D B, Edmonds R L, Monson R K, Ollinger S V, Pallardy S G, Pregitzer K S, Todd D E. Mercury distribution across 14 U.S. forests. Part I: spatial patterns of concentrations in biomass, litter, and soils. Environmental Science & Technology, 2011, 45(9): 3974-3981.
- [17] Wang X, Bao Z D, Lin C J, Yuan W, Feng X B. Assessment of global mercury deposition through litterfall. Environmental Science & Technology, 2016, 50(16): 8548-8557.
- [18] 贾丙瑞, 周广胜, 刘永志, 蒋延玲. 中国天然林凋落物量的空间分布及其影响因子分析. 中国科学: 生命科学, 2016, 46(11): 1304-1311.
- [19] 郭屹立, 李冬兴, 王斌, 何运林, 向悟生, 蒋裕良, 李先琨. 北热带喀斯特季节性雨林凋落物组分构成及时空动态. 生物多样性, 2017, 25(3): 265-274.
- [20] Parsons S A, Congdon R A, Shoo L P, Valdez-Ramirez V, Williams S E. Spatial variability in litterfall, litter standing crop and litter quality in a tropical rain forest region. Biotropica, 2014, 46(4): 378-386.
- [21] 温丁, 何念鹏. 中国森林和草地凋落物现存量的空间分布格局及其控制因素. 生态学报, 2016, 36(10): 2876-2884.
- [22] Wang H C, Lin K C, Huang C Y. Remote sensing of temporal and spatial variations of litterfall in a subtropical forest//Proceedings of the EGU General Assembly 2014. Vienna, Austria: EGU, 2014.
- [23] Fu W J, Jiang P K, Zhou G M, Zhao K L. Using Moran's I and GIS to study the spatial pattern of forest litter carbon density in a subtropical region of southeastern China. Biogeosciences, 2014, 11(8): 2401-2409.
- [24] 蒋桂娟, 郑小贤. 吉林省汪清林业局云冷杉天然林结构特征研究. 北京林业大学学报, 2012, 34(4): 35-41.
- [25] 徐罗, 亢新刚, 郭韦韦, 张嘉伟, 陈日东, 廖庆文, 孔雷. 天然云冷杉针阔混交林立地质量评价. 北京林业大学学报, 2016, 38(5): 11-22.
- [26] 杨华, 李艳丽, 沈林, 亢新刚, 岳刚, 王妍. 长白山云冷杉林幼苗幼树空间分布格局及其更新特征. 生态学报, 2014, 34(24): 7311-7319.
- [27] 刘颖, 韩士杰, 林鹿. 长白山四种森林类型凋落物动态特征. 生态学杂志, 2009, 28(1): 7-11.
- [28] 崔建国, 谭娟. 辽西油松蒙古栎林下凋落物现存量及持水能力的研究. 水土保持研究, 2008, 15(2): 154-155, 158.
- [29] 鲍士旦. 土壤农化分析(第三版). 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [30] 葛晓改, 周本智, 肖文发. 马尾松人工林凋落物产量、养分含量及养分归还量特性. 长江流域资源与环境, 2014, 23(7): 954-961.
- [31] Birk E M, Vitousek P M. Nitrogen availability and nitrogen use efficiency in Loblolly Pine stands. Ecology, 1986, 67(1): 69-79.
- [32] 孟宪宇. 测树学(第三版). 北京: 中国林业出版社, 2006.
- [33] 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. 北京林业大学学报, 2009, 31(6): 60-66.
- [34] Goovaerts P. Geostatistics for Natural Resources Evaluation. New York: Oxford University Press, 1997.
- [35] Cressie N A C. Statistics for Spatial Data, Revised Edition. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1993.
- [36] Burgos P A, Madejón E, Pérez-de-Mora A, Cabrera F. Spatial variability of the chemical characteristics of a trace-element-contaminated soil before and after remediation. Geoderma, 2006, 130(1/2): 157-175.
- [37] Liu L, Wang H Y, Dai W, Lei X D, Yang X J, Li X. Spatial variability of soil organic carbon in the forestlands of northeast China. Journal of

- Forestry Research, 2014, 25(4): 867-876.
- [38] 曾春阳, 唐代生, 唐嘉谔. 森林立地指数的地统计学空间分析. 生态学报, 2010, 30(13): 3465-3471.
- [39] Burrough P A. Fractal dimensions of landscapes and other environmental data. Nature, 1981, 294(5838): 240-242.
- [40] Burrough P A. Multiscale sources of spatial variation in soil. I. The application of fractal concepts to nested levels of soil variation. Journal of Soil Science, 1983, 34(3): 577-597.
- [41] Wang Y Q, Shao M A. Spatial variability of soil physical properties in a region of the Loess Plateau of PR China subject to wind and water erosion. Land Degradation & Development, 2013, 24(3): 296-304.
- [42] Bivand R S, Pebesma E J, Gómez-Rubio V. Applied Spatial Data Analysis with R. New York: Springer, 2008.
- [43] Bridgham S D, Pastor J, McLaugherty C A, Richardson C J. Nutrient-use efficiency: a litterfall index, a model, and a test along a nutrient-availability gradient in North Carolina peatlands. The American Naturalist, 1995, 145(1): 1-21.
- [44] 郑路, 卢立华. 我国森林地表凋落物现存量及养分特征. 西北林学院学报, 2012, 27(1): 63-69.
- [45] 左巍, 贺康宁, 田赟, 王玮璐. 青海高寒区不同林分类型凋落物养分状况及化学计量特征. 生态学杂志, 2016, 35(9): 2271-2278.
- [46] Guo J F, Xie J S, Lu H L, Liu D X, Yang Y S, Chen G S. Carbon return and dynamics of litterfall in natural forest and monoculture plantation of *Castanopsis kawakamii* in subtropical China. Forestry Studies in China, 2004, 6(1): 33-36.
- [47] 刘洋, 张健, 冯茂松. 巨桉人工林凋落物数量、养分归还量及分解动态. 林业科学, 2006, 42(7): 1-10.
- [48] 郭旭东, 傅伯杰, 陈利顶, 马克明, 李俊然. 河北省遵化平原土壤养分的时空变异特征——变异函数与 Kriging 插值分析. 地理学报, 2000, 55(5): 555-566.
- [49] 宋启亮, 董希斌. 采伐强度对小兴安岭低质林生物多样性的影响. 东北林业大学学报, 2014, 42(10): 1-6.
- [50] 李建, 彭鹏, 何怀江, 谭凌照, 张新娜, 吴相菊, 刘兆刚. 采伐对吉林蛟河针阔混交林空间结构的影响. 北京林业大学学报, 2017, 39(9): 48-57.
- [51] 齐泽民, 王开运. 密度对缺苞箭竹凋落物养分归还及养分利用效率的影响. 应用生态学报, 2007, 18(9): 2025-2029.
- [52] Vitousek P. Nutrient cycling and nutrient use efficiency. The American Naturalist, 1982, 119(4): 553-572.
- [53] 张洪亮, 朱建雯, 张新平, 张毓涛, 郝帅. 天山中部不同郁闭度天然云杉林立地土壤养分的比较研究. 新疆农业大学学报, 2010, 33(1): 15-18.
- [54] 肖银龙, 涂利华, 胡庭兴, 张健, 李贤伟, 胡红玲. 模拟氮沉降对华西雨屏区苦竹林凋落物养分输入量的早期影响. 生态学报, 2013, 33(23): 7355-7363.