

东灵山油松林和辽东栎林下土壤资源和光资源的空间特征

刘 建^{1, 3}, 何维明^{1*}, 房志玲²

(1. 中国科学院植物研究所植被数量生态学重点实验室, 北京 100093; 2. 北京师范大学自然灾害与环境演变教育部重点实验室, 北京 100875; 3. 山东大学生命科学学院, 济南 250100)

摘要: 油松林和辽东栎林是中国暖温带具有代表性的森林植被林型。为揭示油松林和辽东栎林下土壤资源和光资源的空间特征, 在东灵山相应植被下各设置一条 100 m 样线, 利用 HH2 高精度土壤水分仪 (美国生产) 沿样线每隔 1 m 测定土壤水分含量, 并分析相应点土壤有机质含量; 利用 HemView 林冠分析系统每隔 10 m 测定森林的叶面积指数、林冠覆盖度、林冠均匀性、光资源状况; 采用半方差方法分析土壤水分和有机质的空间异质性。(1) 油松林与辽东栎林的叶面积指数、林冠覆盖度、辐射因子和林下光资源没有显著差异, 但油松林林冠均匀性显著小于辽东栎林。(2) 辽东栎林的间接辐射因子与林下总辐射呈显著正相关 ($R^2 = 0.466$, $p = 0.030$), 而油松林的间接辐射因子与总辐射无显著相关 ($R^2 = 0.203$, $p = 0.191$)。 (3) 光资源的数量及其组成在油松林和辽东栎林下的变化非常相似, 但光资源的组成与林冠特征的关系在两种森林间存在差异。(4) 油松林下土壤水分和土壤有机质含量低于辽东栎林, 但异质性恰好相反; 油松林下这两种因子不具有显著的空间自相关性, 而辽东栎林下具有显著的空间自相关性。(5) 自然条件下, 10 m 尺度的林下辐射强弱与土壤水分之间并不存在显著负相关。

关键词: 林型; 异质性; 光资源; 辐射因子; 土壤有机质; 土壤水分

文章编号: 1000-0933(2005)11-2954-07 **中图分类号:** Q948, S718 **文献标识码:** A

Spatial characteristics of soil moisture and organic matter and light in *Pinus tabulaeformis* forest and *Quercus liaotungensis* forest on Dongling Mountain, Beijing, China

LIU Jian^{1, 3}, HE Weiming^{1*}, FANG Zhiling² (1. Laboratory of Quantitative Vegetation Ecology, Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100093, China; 2. Key Laboratory of Environmental Change and Natural Disasters, the Ministry of Education of China; Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 3. School of Life Sciences, Shandong University, Jinan 250100, China). Acta Ecologica Sinica, 2005, 25(11): 2954~2960

Abstract *Pinus tabulaeformis* forest and *Quercus liaotungensis* forest are among the most important vegetation in warm temperate region in China. In each forest, one transect of 100 m was set up in Dongling Mountain, Beijing, China and soil moisture, soil organic matter and light intensity were measured along the transects. Soil moisture and soil organic matter were measured along the transects at interval of 1 m. The HemView Digital Canopy Analysis System was used to study leaf area index, canopy coverage, canopy uniformity, site light factors and radiation beneath canopy at interval of 10 m along transects. Semivariogram analysis and coefficient of variance (CV) were employed to reveal the spatial heterogeneity pattern of soil moisture and soil organic matter. There were no significant differences between the pine forest and the oak forests in terms of

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 30330130, 30300043)

收稿日期: 2005-02-25; **修订日期:** 2005-09-10

作者简介: 刘建 (1978~), 男, 山东人, 博士, 主要从事植物生态学研究

* 通讯作者 Author for correspondence E-mail: weiminghe@ibcas.ac.cn

Foundation item: the National Natural Science Foundation of China (No. 30330130, 30300043)

致谢: 感谢中国科学院植物研究所董鸣研究员提供 GS+ 软件并对本文写作给予的帮助; 感谢中国科学院北京森林生态系统定位研究站工作人员给予的支持。

Received date: 2005-02-25; **Accepted date:** 2005-09-10

Biography: LIU Jian, Ph.D., mainly engaged in plant ecology.

leaf area index, canopy coverage, and light intensities above and beneath canopy. The canopy uniformity of the pine forest was significantly lower than that of the oak forest. Positive correlations were found between indirect site light factor and total radiation beneath canopy in the pine forest ($R^2 = 0.466$, $p = 0.030$), while the opposite was true in the oak forest ($R^2 = 0.203$, $p = 0.191$). The quality and composition of the pine forest and oak forest were highly similar while the relationship between the composition of light and the canopy characters varied with forest types. Both soil moisture and organic matter in the pine forest were lower compared to oak forests and their heterogeneity in term of coefficient of variance was larger. Soil moisture and organic matter exhibited significant spatial autocorrelation in the oak forest, whereas did not in the pine forest. No significant negative relationship was found between the radiations beneath canopy and water content at the scale of 10m.

Key words: heterogeneity; light resource; site light factor; soil organic matter; soil moisture

异质性(Heterogeneity)是自然生态系统的基本特征,随时空尺度发生变化^[1~8]。植物所需资源(如光、土壤水分、土壤养分)的空间异质性表现为斑块性(Patchiness)。在影响植物生长和发育的环境因子中,光资源的时空异质性可能最高^[4]。在森林群落中,群落分层使光资源的空间分配变得更加复杂,是森林更新中极为关键的环境因子^[9]。土壤资源的异质性是决定植物分布的重要因子之一,而植物的反馈也对土壤资源的空间异质性格局具有重要影响^[2, 6, 10]。因此,森林生态系统的光资源和土壤资源都具有很高的空间异质性。

在自然生态系统中,空间自相关(Spatial autocorrelation)是一种普遍存在的现象^[11, 12]。这种现象指示,一种资源的空间自相关可能具有一定尺度或变程(Range),在变程内空间上越靠近的点对之间的差异越小,因此变程对生态学研究中的取样策略具有重要指导意义^[13]。

目前对资源异质性格局及其生态效应的研究较多,不过对光资源异质性的研究主要集中在热带森林生态系统,对土壤异质性的研究大多集中在荒漠和草原生态系统^[2, 3, 14, 15]。不同林型的土壤资源异质性格局可能受不同林型的叶面积指数(Leaf area index)、林冠覆盖度(Canopy coverage)、林冠均匀性(Canopy uniformity)、辐射因子(Site light factor)和林冠下辐射的深刻影响。不同资源之间存在某种相关性,如在光资源丰富的小生境中,水分资源相对缺乏,因为强烈光照可加剧土壤水分蒸发。然而,天然林下辐射强弱与土壤水分之间是否存在显著负相关还需要进一步的野外证据。

油松(*Pinus tabulaeformis* Garr.)是华北地区特有树种,暖温带森林的主要建群种,也是温带地区最具代表性的常绿针叶乔木之一;辽东栎(*Quercus liaotungensis* Koidz.)是中国暖温带地区的阔叶优势树种^[16~18]。在本文中土壤资源包括土壤有机质和土壤水分,因为前者可有效地反映土壤肥力^[19],后者是影响或限制温带植物生长的最重要生态因素之一。本文选取东灵山地区具代表性的两种植被类型(即,油松林和辽东栎林)为研究对象,利用HemView林冠分析系统研究两种林型的叶面积指数、林冠覆盖度、林冠均匀性、辐射因子和林冠下辐射,采用半方差方法分析土壤有机质和土壤水分的空间异质性,旨在揭示暖温带地区不同类型森林的林冠、光资源、土壤水分和土壤有机质特征,探讨两种林型的资源分布格局差异及其可能原因。

1 方法

1.1 研究区概况

东灵山(40°00'~40°02'N, 115°26'~115°30'E)属太行山系,地处小五台向东南延伸的支脉,最高海拔2303m;东灵山地处暖温带落叶阔叶林区,该地区森林是反映当地热量和水分条件的地带性植被^[16]。东灵山地带性土壤为褐土,油松林和辽东栎林则是两种极具代表的常绿针叶林和落叶阔叶林^[16]。

1.2 野外测量

2002年10月,在中国科学院北京森林生态系统定位研究站附近分别选择典型的油松林和辽东栎林为样地,油松林为人工林,辽东栎林为次生天然林,样地海拔1300m。在两种群落中沿同海拔各设置一条100m样线(在南坡)。沿样线每隔1m用HH2高精度土壤水分仪(美国生产)测定土壤水分含量,并在相应点取5~15cm深度土样混合带回实验室用重铬酸钾氧化-外加热法(GB 7857-87)分析土壤有机质^[20],因此共101个样点。每隔10m用HemView林冠分析系统(英国Δ-T公司生产)获得林冠结构、立地和光资源状况等特征的数字化图片。为了保证两种森林的林冠结构、立地和光资源测量结果具有可比性,选择相同时间(08:30~09:30)进行测量。这一点已被仪器测定的实际结果所证实,因为两种林冠上平均总辐射能量均为 $13927 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。测量时林冠分析系统探头离地面1m^[21]。

此外,在辽东栎林中沿同一条样线每隔5m用HemView数字林冠分析系统测定林冠结构、立地和光资源状况,分别以5m和10m尺度进行分析以确定测量结果是否受尺度大小的影响。

1.3 数据分析

利用Nikon View 4将野外获得的数字化图片转入计算机,然后利用HemView 2.1(购买林冠分析系统时由厂商提供)分

析数字化图片从而得到叶面积指数(Leaf area index, LAI)、林冠覆盖度(Canopy coverage)、林冠均匀性(Canopy uniformity)、辐射因子(Site light factor)和林冠下辐射(Radiation below canopy)等指标。这些指标的定义是:直接辐射因子(Direct site light factor),地表某一点的直接太阳辐射/该点的总辐射;间接辐射因子(Indirect site light factor),地表某一点的间接太阳辐射/该点的总辐射;总辐射因子(Global site light factor),林冠下的总辐射/该空间无任何遮挡时的总辐射;林冠均匀性(Canopy uniformity),用图片中叶面积指数变异(LAI deviation)表示;叶面积指数的变异越小,林冠的均匀性越大。

地统计学方法是分析空间相关性的有利工具^[11, 12]。为揭示土壤水分和土壤有机质的空间格局,利用GS+软件(Version 5.1.7, Professional Edition)分析土壤水分和土壤有机质的半方差(Semivariance)、块金值(Nugget)、变程(Range)和基台值(Sill);并给出最优的模拟方程。

半方差是一种自相关统计指标,其定义为:

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

式中, $\gamma(h)$ 为空间相距 h 时点对的半方差, $N(h)$ 为相距 h 的点对数目, $z(x_i)$ 和 $z(x_i + h)$ 分别为点 x_i 和与 x_i 相距 h 时的某性状观测值。 $\gamma(h)$ 是距离 h 的函数, $\gamma(h)$ 随 h 的变化曲线称为半方差图。根据半方差的定义,当 $h = 0$ 时, $\gamma(h) = 0$ 。但在实际样本半方差图计算过程中,其近平滑曲线并不通过原点,而是具有一个正的截距 C_0 ,地统计学上将其定义为块金方差(Nugget variance),它来源于远小于抽样尺度上存在的差异的误差。具有空间相关性分布的变量,其半方差先随 h 增加而增大,当 h 增加到一定程度时,半方差便维持在一定水平,不再有明显的增加,此时的 $\gamma(h)$ 称为阈值,与此阈值相对应的空间距离 h 定义为空间自相关尺度或变程。阈值与块金方差之差定义为结构方差(C)。变程是一个重要的基本参数,它给出了随机变量在空间上自相关性的尺度,相距大于变程的点之间不具备自相关性^[22]。变程对生态学研究的取样策略具有重要指导意义。在半方差的计算中,使用的滞后间隔(Lag interval)是1 m,即采样最小间隔。为保证每个尺度上都有足够多的点对,有效间隔距离(Active lag distance)取60 m。利用SPSS 10.0软件的Independent Sample T-test比较某因子在林型间的差异,通过计算Pearson相关系数以揭示有关参数间的相关性。

2 结果

2.1 林冠和立地

当样点间的距离为10 m时,油松林与辽东栎林的叶面积指数和覆盖度均无显著差异($p > 0.05$) (图1a, b),但两者的叶面积指数与覆盖度之间都存在极其显著的相关性(油松林中 $R^2 = 0.783$, $p < 0.01$; 油松林中 $R^2 = 0.982$, $p < 0.01$)。林冠均匀性用叶面积指数变异表示,辽东栎林林冠的叶面积指数的变异(1.874 ± 0.364)显著小于油松林(2.780 ± 0.26) ($p = 0.048$),这指示辽东栎林林冠均匀性较大。辽东栎林和油松林的直接辐射因子(0.184 ± 0.034 与 0.189 ± 0.029)、间接辐射因子(0.195 ± 0.026 与 0.200 ± 0.015)和总辐射因子(0.186 ± 0.031 与 0.191 ± 0.025)均无显著差异(图2a, b, c)。无论是油松林还是辽东栎林,直接辐射因子和总辐射因子均与林下总辐射呈极其显著相关性($p < 0.001$);辽东栎林的间接辐射因子与林下总辐射呈显著正相关($R^2 = 0.466$, $p = 0.030$),而油松林的间接辐射因子与总辐射无显著性相关($R^2 = 0.203$, $p = 0.191$)。

当样点间的距离为5 m时,辽东栎林的平均叶面积指数、覆盖度、直接辐射因子、间接辐射因子、总辐射因子和林冠均匀度分别为1.566、0.784、0.192、0.207、0.194、1.763。这些结果与间隔10 m时的测量结果均无显著差异($p > 0.05$)。

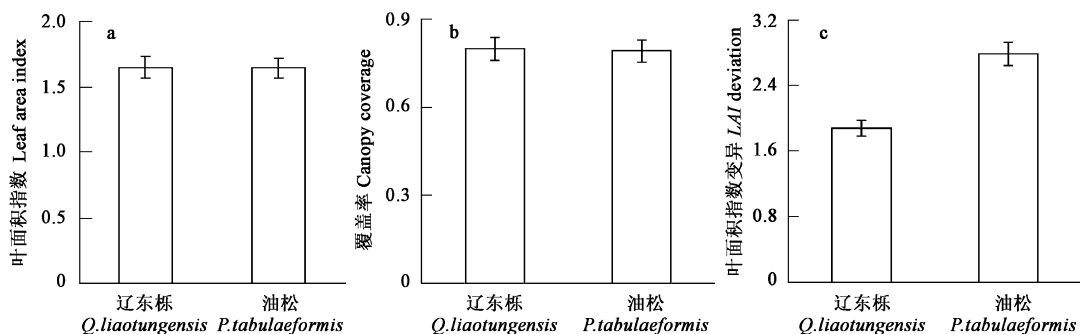


图1 辽东栎林和油松林的叶面积指数和覆盖度($n = 11$)

Fig. 1 Comparison of LAI and canopy coverage between *Q. liaotungensis* forest and *P. tabulaeformis* forest

2.2 光资源

辽东栎林和油松林的林下总辐射(分别为 $2594 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 和 $2656 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)、直接辐射(分别为2145

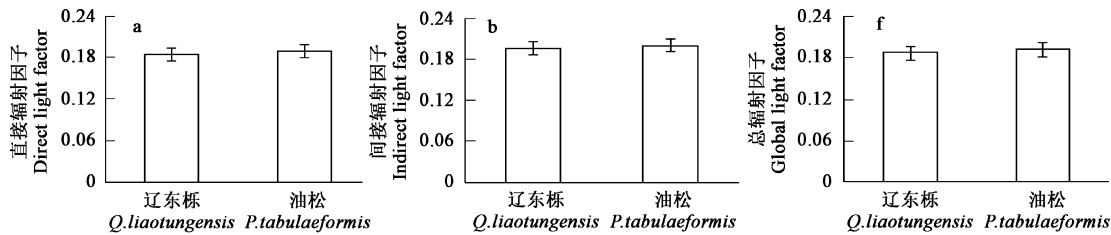


图 2 辽东栎林和油松林的植冠和立地状况($n=11$)

Fig 2 Comparison of canopies and site regimes between *Q. liaotungensis* forest and *P. tabulaeformis* forest

$\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 和 $2196 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$) 和 散射辐射 (分别为 $449 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 和 $461 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$) 均无显著差异 ($p > 0.05$) (图 3)。辽东栎林下直接辐射占总辐射的 81%, 油松林下直接辐射占总辐射的 80%, 这两者间无显著差异 ($p > 0.05$)。在两种林型下, 直接辐射与总辐射均存在极其显著的相关性 ($R^2 = 0.988, p < 0.001$); 油松林下的散射辐射与总辐射无显著相关性 ($R^2 = 0.205, p = 0.189$), 而辽东栎林下的散射辐射与总辐射具有显著性相关 ($R^2 = 0.466, p = 0.030$)。此外, 辽东栎林下的总辐射与叶面积指数和覆盖度具显著性负相关 ($p < 0.05$), 而油松林下的总辐射与叶面积指数和覆盖度均无显著性相关 ($p > 0.05$)。

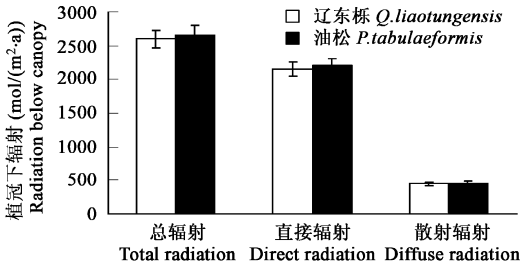


图 3 辽东栎林和油松林林下的辐射状况($n=11$)

Fig 3 Comparison of solar radiation below canopy between *Q. liaotungensis* forest and *P. tabulaeformis* forest

2 3 土壤水分和土壤有机质

油松林下土壤水分含量($10.55 \pm 0.35\%$) 极显著地小于辽东栎林下土壤水分含量($14.81\% \pm 0.31\%$) ($p < 0.001$); 前者的变异系数(33.27%) 大于后者(20.86%), 这说明油松林下土壤水分的异质性大于辽东栎林下土壤水分的异质性(表 1)。

表 1 油松林和辽东栎林土壤水分和土壤有机质的基本统计分析

Table 1 Characteristics of soil moisture and soil organic matter in <i>P. tabulaeformis</i> forest and <i>Q. liaotungensis</i> forest				
参数 Parameters	林型 Forest types	平均值 Mean	标准误 SE	变异系数 CV (%)
土壤水分 Soil moisture (%)	辽东栎林 <i>Q. liaotungensis</i> forest	14.81	0.31	20.86
	油松林 <i>P. tabulaeformis</i> forest	10.55	0.35	33.27
土壤有机质 Soil organic matter (%)	辽东栎林 <i>Q. liaotungensis</i> forest	11.70	3.61	30.85
	油松林 <i>P. tabulaeformis</i> forest	8.06	2.65	32.88

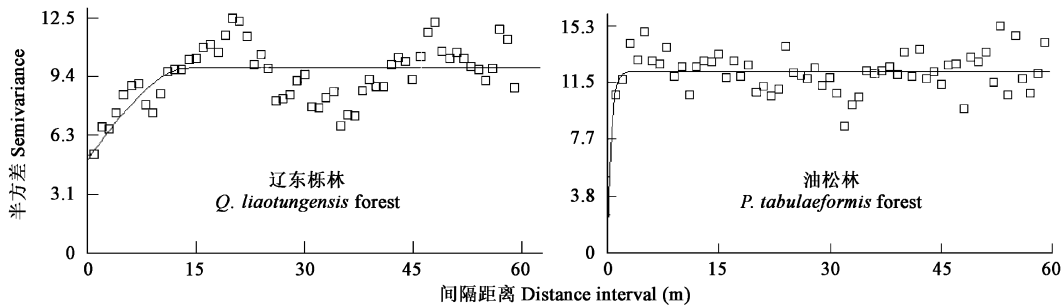


图 4 土壤水分的半方差分析

Fig 4 Semivariance of soil moisture

油松林下土壤有机质($8.06(2.65)$) 极显著地小于辽东栎林下土壤有机质(11.70 ± 3.61) ($p < 0.001$); 前者的变异系数(32.88%) 大于后者(30.85%), 这指示油松林下土壤有机质的异质性大于辽东栎林下土壤水分的异质性(表 1)。

图 4 和图 5 分别是土壤水分和土壤有机质在两种林型下的半方差图。表 2 是各性状拟合模型的参数, 决定系数(R^2) 采用 F

检验^[22]。通过半方差图(图4和图5)和表2可见所研究性状的空间自相关的情况。辽东栎林下土壤水分和土壤有机质的空间变异表现为显著的球形模型,变程分别是14.00 m和14.90 m(表2)。而油松林下两因子都不具有显著的空间自相关(表2)。

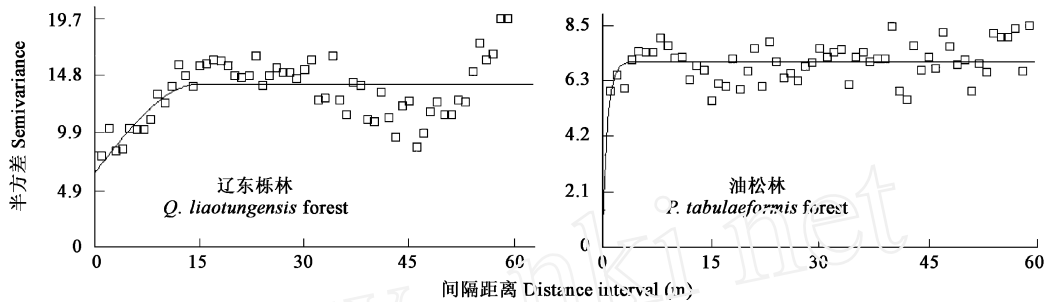


图5 土壤有机质的半方差分析

Fig 5 Semivariance of soil organic matter

表2 油松林和辽东栎林土壤水分和土壤有机质空间变异半方差模型及其参数

Table 2 Summary of semivariance models and their parameters of soil moisture and soil organic matter below *P. tabulaeformis* forest and *Q. liaotungensis* forest

参数 Parameters	林型 Forest types	模型类型 Model	块金方差 (C ₀)	基台值 Sill (C ₀ + C)	变程 Range (m)	C/C ₀ + C	R ²
土壤水分 Soil moisture (%)	辽东栎林 <i>Q. liaotungensis</i> forest	Spherical	4.93	9.87	14.00	0.501	0.322 [*]
	油松林 <i>P. tabulaeformis</i> forest	Spherical	0.71	12.23	1.5	0.942	0.026 ^{n.s.}
土壤有机质 Soil organic matter (%)	辽东栎林 <i>Q. liaotungensis</i> forest	Spherical	6.4	14.04	14.90	0.544	0.327 [*]
	油松林 <i>P. tabulaeformis</i> forest	Spherical	0.45	7.07	1.6	0.936	0.042 ^{n.s.}

*: $p < 0.01$; n.s.: 不显著 Not significant

2.4 林下光辐射与土壤水分和有机质的关系

相关分析表明:无论是油松林还是辽东栎林,林下辐射(包括直接辐射、散射辐射和总辐射)与土壤水分含量之间均无显著的相关性($p > 0.05$);油松林的林冠均匀性与土壤水分变异性呈显著的负相关($R^2 = 0.388$, $p = 0.027$),而辽东栎林的林冠均匀性与土壤水分变异性无显著性相关($R^2 = 0.022$, $p = 0.339$)。

3 讨论

辽东栎林和油松林是东灵山地区两种典型的森林群落^[16]。两者的叶面积指数和覆盖度非常相似,但其林冠均匀性(用叶面积指数变异来表示)存在明显差异(图1c)。辐射因子反映了林下光环境的状况。油松和辽东栎林下的辐射因子具有相似的特性,而辐射因子间的关系随森林类型发生明显变化。两种森林间辐射因子的相似可能与其相似的叶面积指数和覆盖度有关,而辐射因子间关系的差异可能与其林冠变异性有关。油松林的叶面积指数的变异显著大于辽东栎林,也就是油松林的林冠均匀性较小,这是本研究两种林型在林冠和立地方面的主要差异。两种林型的林冠均匀性差异很可能是由两种乔木的分枝结构以及针叶林和阔叶林的差异引起的。油松是单轴分枝,油松林是针叶林,林冠均匀性较差;而辽东栎属于迟滞型合轴分枝,树冠顶部呈开张状态,分枝构型具有可塑型能有效扩大光合作用面积^[23],而且辽东栎林是阔叶林,因此林冠均匀性较好。

辽东栎林与油松林下总辐射、直接辐射和散射辐射均无显著差异($p > 0.05$),但光资源的构成与林冠特征的关系随森林类型发生变化。油松林下的散射辐射与总辐射无显著相关性($R^2 = 0.205$, $p = 0.189$),而辽东栎林下的散射辐射与总辐射具有显著性相关($R^2 = 0.466$, $p = 0.030$)。此外,辽东栎林下的总辐射与叶面积指数和覆盖度具显著性负相关($p < 0.05$),而油松林下的总辐射与叶面积指数和覆盖度均无显著性相关($p > 0.05$)。林冠构型(Crown geometry)对林下光资源的空间变异具有重要影响^[24],因此这种差异可能是两种林型的林冠均匀性差异以及针叶林和阔叶林的差异引起的。辽东栎林的林冠均匀性较高,所以能透过林冠穿透到林下的光辐射与叶面积指数和覆盖度具显著性负相关。而油松林林冠均匀性较低,所以总辐射与叶面积指数和覆盖度均无显著性相关。光照往往是林下植物生长的限制因子,因此了解林下光照的时空变异有助于深入探究不同林型下植物多样性差异的机制。

运用地统计学的半方差分析对土壤资源的空间异质性进行小尺度格局研究是当今的研究热点^[2, 3, 25, 26]。油松林土壤水分和土壤有机质均显著小于辽东栎林。但油松林下土壤水分和土壤有机质的异质性高于辽东栎林。半方差分析表明,辽东栎林下的土壤水分和土壤有机质都具有显著的空间自相关,而油松林下取样点之间的土壤水分和土壤有机质均没有发现空间自相

关。土壤某一性状的空间自相关格局是由性状自身特性和当地土壤特点共同决定的^[6], 本研究发现的两种林型下土壤水分和土壤有机质空间异质性格局的差异。这种不同的空间异质性格局对两种林型下生态学取样具有指导意义。辽东栎林下土壤水分和土壤有机质的变程分别是 14.00 m 和 14.90 m, 在进行辽东栎林下土壤水分和土壤有机质调查时候应该选择大于这个尺度的取样材料来避免取样点之间的空间自相关性。而油松林下则不存在这种空间自相关, 油松林下土壤水分和土壤有机质的变异主要来自远小于 1 m 尺度下的变异和随机变异(图 4 和图 5)。两种林型下辐射因子、叶面积指数和覆盖度非常相似, 但它们的林冠均匀性存在明显差异, 这暗示着林冠均匀性对土壤有机质和土壤水分的空间格局具有影响。

对半干旱区的林地研究显示, 土壤水分是由光辐射和根系吸收作用共同决定的^[27]。然而, 温带山地林地的土壤水分分布格局与半干旱区林地可能不同。本研究显示, 自然条件下在 10 m 尺度林下辐射强弱与土壤水分之间并不存在负相关。这表明, 在此尺度下林下辐射不是决定东灵山土壤水分状况的关键因子, 微地形和地表覆盖物可能对土壤水分状况具有决定性作用^[19]。

在东灵山, 辽东栎林的物种多样远高于油松林^[28], 群落物种多样性与土壤有机质密切相关^[19]。与辽东栎林相比, 油松林下林冠均匀性较小, 土壤水分和土壤有机质都较低, 异质性很高但不具有显著的空间自相关性。这些特点可能是油松林物种多样性比较低的原因。土壤、植被和地形因子三者相互作用, 土壤因子对物种多样性产生影响, 反过来植被也影响着土壤因子^[6, 19]。深入探讨两种林型下这种差异产生的机制将能加深对两种林型生态系统功能的认识。

References

- [1] Sveson B M and Callaghan T V. Small-scale vegetation pattern related to the growth of *Lycopodium annotinum* and variations in its micro-environment *Vegetatio*, 1988, **76**: 167~ 177.
- [2] Jackson R B and Caldwell M M. The scale of nutrient heterogeneity around individual plants and its quantification with geostatistics *Ecology*, 1993, **74**: 612~ 614
- [3] Schlesinger W H, Raikes J A, Hartley A E. On the spatial pattern of soil nutrients in desert ecosystem s *Ecology*, 1996, **77**: 364~ 374
- [4] Pearcy R W and Yang W. A three-dimensional crown architecture model for assessment of light capture and carbon gain by understory plants *Oecologia*, 1996, **108**: 1~ 12
- [5] Chen Y F and Dong M. Spatial heterogeneity in ecological system s *Acta Ecologica Sinica*, **23**(2): 346~ 352
- [6] Liu J, Zhu X W, Yu F H, et al. Spatial Heterogeneity of *Ulmus pumila* Open Forest Ecosystem in Ordos Sandy Land *Chinese Journal of Environmental Science*, **23**(4): 29~ 34
- [7] Liu F H, Liu J, Dong M. Spatial pattern of sandy vegetation and two dominant clonal semi-shrubs in the Ordos Plateau *Acta Ecologica Sinica* **24**(11): 2374~ 2381.
- [8] Rajaniemi T K and Reynolds H L. Root foraging for patchy resources in eight herbaceous plant species *Oecologia*, 2004, **141**(3): 519~ 525
- [9] Han Y Z, Wang Z Q, Gu J C. The effects of spatial heterogeneity of understory light availability on regeneration of Manchurian ash *Acta Phytocologica Sinica*, 2004, **28**(4): 468~ 475
- [10] McLaren J R, Wilson S D, Peltzer D A. Plant feedbacks increase the temporal heterogeneity of soil moisture *Oikos*, 2004, **107**(1): 199 ~ 205
- [11] Koenig W D. Spatial autocorrelation of ecological phenomena *Trends in Ecology and Evolution*, 1999, **14**: 22~ 26
- [12] Bebb D. Spatial autocorrelations *Trends in Ecology and Evolution*, 1999, **14**: 196
- [13] Tobin P C. Estimation of the spatial autocorrelation function: consequences of sampling dynamic populations in space and time *Ecography*, 2004, **27**: 767~ 775
- [14] Hoorens B, de Goede R G M, Gleichman M. Small-scale shifting mosaics of two dominant grassland species: the possible role of soil-borne pathogens *Oecologia*, 2000, **125**: 45~ 54
- [15] Anderson M T, McNaughton S J and Ritchie M E. Scale-dependent relationships between the spatial distribution of a limiting resource and plant species diversity in an African grassland ecosystem. *Oecologia*, 2004, **139**: 277~ 287.
- [16] Chen L Z, ed. *Study on forest ecosystem structure and function in warm temperate region*. Beijing: Science Press, 1997.
- [17] Wu G and Feng Z W. Study on the social characteristics and biomass of the *Pinus tabulaeformis* forest system s in China. *Acta Ecologica Sinica*, 1994 **14**(4): 415~ 422
- [18] Hou J H, Mi X C, Liu C R, et al. Spatial patterns and associations in a *Quercus-Betula* forest in northern China *Journal of Vegetation Science*, 2004, **15**: 407~ 414
- [19] Liu S L, Ma K M, Fu B J, et al. The relationship between landform, soil characteristics and plant community structure in the Donglingshan Mountain region, Beijing *Acta Phytocologica Sinica*, 2003, **27**(4): 496~ 502

- [20] Liu G S, ed *Soil Physical and chemical analysis & description of soil profiles* Beijing: Standards Press of China, 1996 166~ 167.
- [21] Bellingham P J, Tanner E V J, Rich P M, *et al* Changes in light below the canopy of a *Jamaican montane* rainforest after a hurricane *Journal of Tropical Ecology*, 1996, **12**: 699~ 722
- [22] Wang Z Q, ed *Geostatistics and application in ecology*. Beijing: Science Press, 1999.
- [23] Sun S C and Chen L Z The architecture variation of *Quercus liaotungensis* in different habitats *Acta Ecologica Sinica*, 1999, **19**(3): 358 ~ 364
- [24] Canham C D, Finzi A C, Pacala S W, *et al* Causes and consequences of resource heterogeneity in forests: interspecific variation in light transmission by canopy trees *Canadian Journal of Forest Research*, 1994, **24**: 337~ 349
- [25] Aubry P and Debouzie D. Geostatistical estimation variance for the spatial mean in two-dimensional systematic sampling *Ecology*, 2000, **81**: 543~ 553
- [26] Zhu X W, Liu H D, Liang S C, *et al* Heterogeneities of *Leymus secalinus* ramet population and its soil resources in the Otindag Sandland *Acta Ecologica Sinica*, 2004, **24**(7): 156~ 162
- [27] Breshears D D, Rich P M, Barnes F J, *et al* Overstory-imposed heterogeneity in solar radiation and soil moisture in a semiarid woodland *Ecological Applications*, 1997, **7**: 1201~ 1215
- [28] Ma K P, Huang J H, Yu S L, *et al* Plant community diversity in Dongling Mountain, Beijing, China II. Species richness, evenness and species diversities *Acta Ecologica Sinica*, 1995, **15**(3): 268~ 277.

参考文献:

- [5] 陈玉福, 董鸣 生态学系统的空间异质性 生态学报, 2003, **23**(2): 346~ 352
- [6] 刘建, 朱选伟, 于飞海, 等 浑善达克沙地榆树疏林生态系统的空间异质性 环境科学, 2003, **23**(4): 29~ 34
- [7] 刘凤红, 刘建, 董鸣 鄂尔多斯高原沙地植被两种优势克隆半灌木的空间格局 生态学报, 2004, **24**(11): 2374~ 2381
- [9] 韩有志, 王政权, 谷加存 林分光照空间异质性对水曲柳更新的影响 植物生态学报, 2004, **28**(4): 468~ 475
- [16] 陈灵芝主编 暖温带森林生态系统结构与功能的研究 北京: 科学出版社, 1997.
- [17] 吴刚, 冯宗炜 中国油松林群落特征及生物量的研究 生态学报, 1994, **14**(4): 415~ 422
- [19] 刘世梁, 马克明, 傅伯杰, 等 北京东灵山地区地形土壤因子与植物群落关系研究 植物生态学报, 2003, **27**(4): 496~ 502
- [20] 刘光崧主编 土壤理化分析与剖面描述 北京: 中国标准出版社, 1996 166~ 167.
- [22] 王政权 地统计学及其在生态中的应用 北京: 科学出版社, 1999
- [23] 孙书存, 陈灵芝 不同生境中辽东栎的构型差异 生态学报, 1999, **19**(3): 358~ 364
- [26] 朱选伟, 刘海东, 梁士楚, 等 浑善达克沙地赖草分株种群与土壤资源异质性分析 生态学报, 2004, **24**(7): 156~ 162
- [28] 马克平, 黄建辉, 于顺利, 等 北京东灵山地区植物群落多样性的研究 II. 丰富度, 均匀度和物种多样性指数 生态学报, 1995, **15**(3): 268~ 277.