

基于大样地油松种群的地统计学分析

李颖¹, 张婕², 郭东罡^{3*}, 上官铁梁³

(1. 山西大学黄土高原研究所, 山西太原 030006; 2. 山西大学生命科学学院, 山西太原 030006;
3. 山西大学环境与资源学院, 山西太原 030006)

摘要: 在对山西省灵空山国家级自然保护区 4 hm² 样地内油松种群调查的基础上, 采用地统计学的半方差分析法对油松种群的空间分布格局进行了研究, 并用克里金插值法绘制了不同径级油松种群胸径的等值线图。结果表明: 油松种群径级 I、III、IV 的最优半方差拟合模型均为指数模型, 径级 II 的最优拟合模型为球状模型, 说明 4 个径级都为聚集分布且均为中等的空间相关性; 油松种群径级 I、II、III、IV 的空间自相关范围分别为 23.4、15.2、11.1、24.9 m, 分维数大小依次为径级 II (1.999) > 径级 III (1.995) > 径级 IV (1.973) > 径级 I (1.969)。以树高为变量作半方差分析的结果与以胸径作为变量的分析结果基本一致, 且以树高为变量进行的类似分析也进一步证实了该结果的准确性。利用 Surfer 软件绘制的 Kriging 图直观反映了油松种群空间分布的斑块聚集效果, 即油松种群空间格局纹理图。本文利用地统计学的半方差分析法和 Kriging 插值方法相结合弥补了传统格局分析方法的不足, 能精确直观地反映出油松种群个体的空间分布、斑块的聚集效果等, 可为植物空间分布格局的分析提供有效的研究方法。

关键词: 油松; 种群; 半方差; 分布格局; 灵空山

中图分类号: Q948.15

文献标识码: A

文章编号: 2095-0837(2015)02-0158-07

Geostatistical Analysis of *Pinus tabulaeformis* Population Spatial Patterns Based on Large Plots

LI Ying¹, ZHANG Jie², GUO Dong-Gang^{3*}, SHANGGUAN Tie-Liang³

(1. Institute of Loess Plateau of Shanxi University, Taiyuan, Shanxi 030006, China; 2. College of Life Science of Shanxi University, Taiyuan, Shanxi 030006, China; 3. College of Environmental and Resource Sciences of Shanxi University, Taiyuan, Shanxi 030006, China)

Abstract: The distribution patterns of the *Pinus tabulaeformis* population in the National Nature Reserve of Lingkong Mountain in Shanxi Province were studied using geostatistics. According to the data of 4 hm² sample plots, the semivariances of the *P. tabulaeformis* diameter grades were calculated, semivariogram models were simulated, and Kriging interpolation was performed to draw Kriging maps showing different diameter grades. Results showed that the semivariograms of diameter grades I, III and IV well fit the exponential model, while diameter grade II fit the spherical model, suggesting aggregated spatial distribution patterns in all four diameter grades. In addition, all diameter grades exhibited medium spatial correlation with the range of spatial autocorrelation of 23.4 m, 15.2 m, 11.1 m and 24.9 m, respectively, and the fractal dimensions were ranked as: diameter grade II (1.999) > diameter grade III (1.995) > diameter grade IV (1.973) > diameter grade I (1.969). The semivariances of height were basically the same as the semivariances of diameter at breast height (DBH), which further verified the accuracy of our analysis. The Kriging map drawn by the Surfer

收稿日期: 2014-07-29, 退修日期: 2014-09-10。

基金项目: 国家自然科学基金项目(31400358)。

作者简介: 李颖(1988-), 女, 硕士, 研究方向为数量生态学(E-mail: lyzd3680@126.com)。

* 通讯作者(Author for correspondence. E-mail: gdghjlx@126.com)。

software demonstrated the patch aggregation of the *P. tabulaeformis* population. The semivariance analysis and Kriging interpolation methods filled the loopholes of traditional population spatial distribution analyses, and were advantageous in revealing the changes in spatial pattern and aggregate intensity for more precise studies of plant patterns in the landscape.

Key words: *Pinus tabulaeformis*; Population; Semivariance; Spatial pattern; Lingkong Mountain

植物种群空间格局及其变化规律是植物种群生态学研究的核心问题之一, 经典数量生态学方法已广泛用于植物群落的分类和排序、植物种群的空间格局分析, 是研究种群空间格局和变异的有效方法^[1-4]。传统种群格局研究的取样是以随机变量为基础, 强调用种群的概率分布描述种群格局变化, 并将种群的分布格局划分为随机分布、均匀分布和集群分布三个类型。然而, 植物种群的分布格局与空间尺度变化和环境异质性并非随机变量, 而是区域化变量。它是随机变量与空间位置的随机函数, 从这个意义上来说, 传统种群格局的研究对空间尺度、空间异质性与格局过程之间的相互作用没有引起足够的重视。地统计学是法国著名统计学家 G. Matheron 在大量理论研究的基础上提出的一门新的统计学分支^[5], 是空间格局分析的一种新方法。自 20 世纪 80 年代地统计学被引入种群生态学研究以来, 采用地统计学对植物种群格局进行分析的报道不断出现^[6-9]。油松(*Pinus tabulaeformis*)具有耐干旱、耐瘠薄的特点, 是我国暖温带落叶阔叶林区域的代表性树种, 也是暖温性针叶林主要的建群种。灵空山国家级自然保护区是我国油松的集中分布区和优良种源区, 目前对油松种群的研究主要集中在油松林的群落特征^[10-12]、油松种群的空间结构^[13-17]、优势种生态位^[18,19]等方面, 且都是基于经典数量生态学方法。关于应用地统计学对油松种群空间格局和变化规律的研究还未见报道, 为了更好地解释油松种群与环境因子的空间格局和变化关系、揭示油松种群空间分布格局与空间异质性的关系, 我们在对山西省灵空山国家级自然保护区 4 hm² 样地内油松种群进行调查的基础上, 运用地统计学的半方差分析、空间插值和克里金制图相结合的方法, 对油松种群的空间分布格局进行了研究。

1 研究区域概况

山西省灵空山国家级自然保护区(36°33'28"~36°42'52" N, 111°59'27"~112°07'48" E)位于山西省沁源县境内, 属太行山的太岳山支脉。地势北高南低, 海拔 1583~1660 m, 属暖温带大陆性季风气候, 年均温 6.2°C, 无霜期 145 d 左右; 年均降水量 662 mm, 主要集中在 7~9 月, 占全年降水量的 74.8%; ≥10°C 的年积温为 3000°C, 年均日照 2600 h。研究区土壤为石灰岩母岩上发育而成的山地褐土、山地淋溶褐土和山地棕壤。在中国植被区划中^[20], 灵空山属温带落叶阔叶林地带, 主要植物群落有辽东栎(*Quercus wutaishanica*)林、山杨(*Populus davidiana*)林、野核桃(*Juglans cathayensis*)林、油松+辽东栎林、油松林、黄刺玫(*Rosa xanthina*)灌丛和白羊草(*Bothriochloa ischaemum*)草丛等。在研究区域典型的天然林(油松+辽东栎)地段设置调查样地, 其群落中油松密度为 677 株/hm², 平均株高为 5.78 m。

2 研究方法

2.1 野外调查

参照 CTFS (Center for Tropical Forest Science) 样地建设技术规范, 用全站仪将 4 hm² 样地分成 400 个 10 m×10 m 的样方, 并以 4 hm² 样地的西南角为坐标原点, 顺序排列 10 m×10 m 样方的行、列号作为水泥角桩的编号, 采用 GPS (Global Position System) 测量其经纬度和海拔高度, 计算样地内每个基点的相对海拔高度, 绘制等高线地形图(图 1)。

调查并记录 10 m×10 m 样方中油松个体的坐标、胸径(株高小于 1.3 m 的油松测量其基径)、高度及多度等; 调查 4 hm² 样地内油松的群落学特

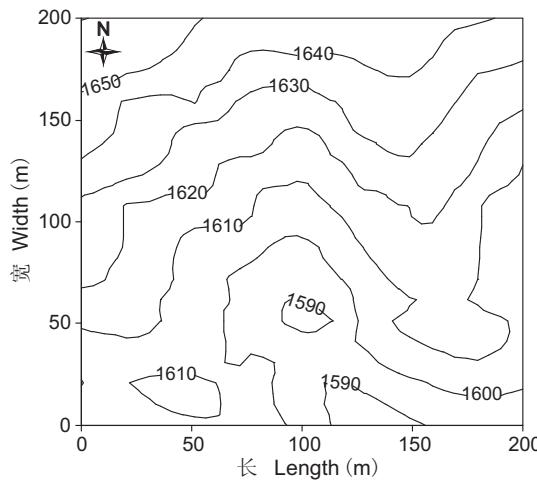


图 1 灵空山样地地形图

Fig. 1 Topography map of the Lingkong Mountain plot

征，如群落类型及主要种类组成、盖度、多度等。

2.2 半方差分析

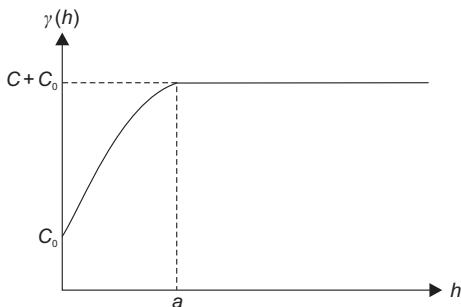
通过计算不同径级油松种群胸径的半方差函数 (semivariogram)^[6-9, 21-25]、拟合半方差函数模型、分析半方差函数结构来描述油松种群的空间分布格局。半方差分析的理论模型如图 2 所示。

用地统计学软件 GS-Plus (Gamma Design Software, Plainwell, M) 进行半方差函数拟合 $\gamma(h)$ 的理论模型并进行参数计算；利用 Surfer 8.0 进行 Kriging 无偏最优内插法插值，绘制油松种群空间分布的等值线图。

3 结果与分析

3.1 油松种群径级结构

根据实测数据并参考以往研究的径级划分方



C_0 : 块金值; $C_0 + C$: 基台值; a : 变程。
 C_0 : Nugget; $C_0 + C$: Sill; a : Range.

图 2 半方差函数理论模型

Fig. 2 Theoretical semivariogram model

法^[26-28]，将研究样地的油松种群划分为 4 个径级：DBH < 5 cm 为径级 I (包括树高小于 1.3 m 的油松和树高大于 1.3 m 且 DBH < 5 cm 的油松)、5 cm ≤ DBH < 10 cm 为径级 II、10 cm ≤ DBH < 30 cm 为径级 III、DBH ≥ 30 cm 为径级 IV。在 4 hm² 样地内共记录油松种群径级 I、II、III、IV 的总个体数为 2707 株(图 3)，其中，径级 I 的油松个体数量较多，共有 1323 株，占油松种群总个体数的 48.88%；径级 II、III 和 IV 的油松个体数量分别为 528 株、621 株和 235 株，占油松种群总个体数的 19.50%、22.94%、8.68%；径级 I、II 的数量共占油松总个体数的 68.38%，表明径级 I 和径级 II 的油松是灵空山国家级自然保护区 4 hm² 样地内油松种群的重要组成部分，属增长型种群。

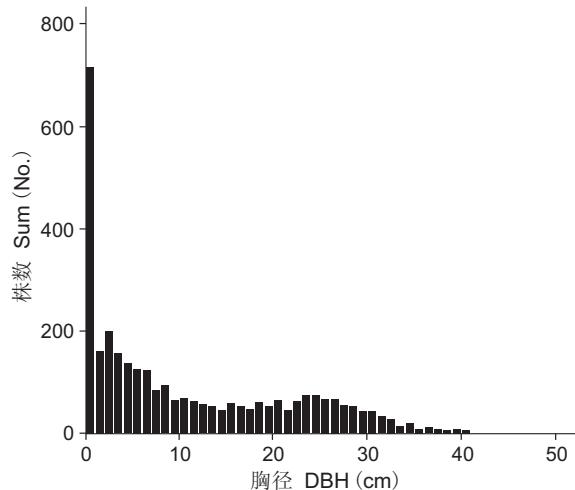


图 3 油松种群的径级结构

Fig. 3 Size-class distribution of *Pinus tabulaeformis* population

3.2 不同径级油松种群的半方差分析

不同径级油松种群的半方差函数模型参数和种群分布型见表 1。由于半方差随间距增大到一定数值时会变得不稳定，通常设定有效距为样地最大间距的一半^[8]，并据此条件绘制不同径级油松种群的半方差函数曲线图(图 4)和 Kriging 图。4 个径级的半方差值均是在小间隔距离范围内有较低的变异函数值，表现出同质性；但随着间隔距离的加大半方差函数值也增大，表现出异质性，并逐渐趋向平稳(图 4)。

表 1 不同径级油松种群空间分布的半方差函数参数及分布型
Table 1 Distribution type and semivariogram parameters of the *Pinus tabulaeformis* population at different diameter grades

径级 Diameter grade	模型 Modeling	块金值 C_0 Nugget	基台值 $C_0 + C$ Sill	变程 a Range (m)	块金效应 $C_0/(C_0 + C) (%)$ Nugget effect	相关系数 R^2 Correlation coefficient	残差 RSS Residual error	分布型 Distribution type
I 级	指数 Exponential	0.308	0.988	23.4	31.2	0.801	2.613E-03	聚集分布
II 级	球状 Spherical	0.272	0.988	15.2	27.5	0.149	2.993E-03	聚集分布
III 级	指数 Exponential	0.306	0.976	11.1	31.4	0.121	1.232E-03	聚集分布
IV 级	指数 Exponential	0.321	1.081	24.9	29.7	0.429	0.0186	聚集分布

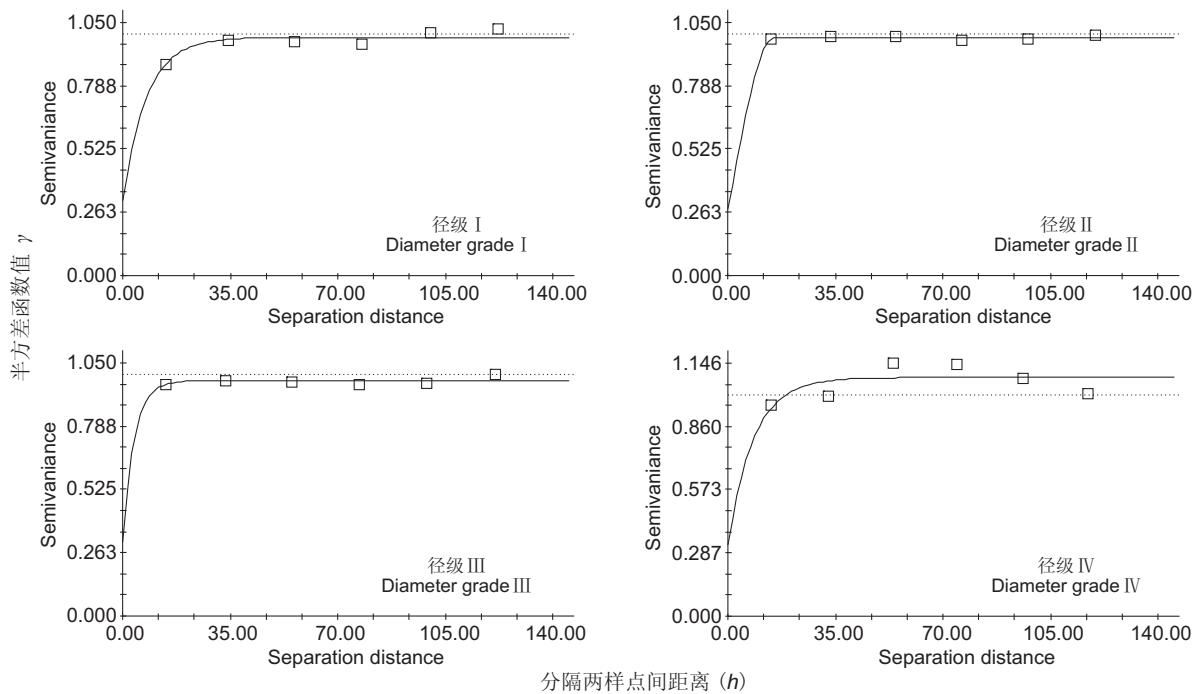


图 4 不同径级油松种群的半方差函数曲线图

Fig. 4 Semivariograms for the *Pinus tabulaeformis* population at different diameter grades

由表 1 可见, 油松种群各径级的块金值 (C_0) 变化较小, 均在 0~1 之间, 径级 I、II、III、IV 的 C_0 分别为 0.308、0.272、0.306、0.321, 说明随机部分对异质性的影响可以不予考虑。径级 I 和 IV 的块金值小于径级 II、III, 表明径级 I 和 IV 的油松个体随机部分的异质性较小。

在 4 个径级中, 径级 IV 的基台值 ($C_0 + C$) 最大, 表明径级 IV 油松种群的空间异质强度高于径级 I、II、III。4 个径级的块金效应值 ($C_0/(C_0 + C)$) 均在 25%~75% 之间, 说明油松种群各径级均为中等空间相关性。径级 II、IV 的块金效应值小于径级 I、III, 表明在小尺度上径级 II、IV 空间变异主要是由空间自相关引起的, 而随机性因素对种群空间变异的影响较小。

由表 1 还可见, 径级 I、III 和 IV 的最优半方差拟合模型均为指数模型, 径级 II 为球状模型; 径级 I 模型拟合的相关系数 R^2 最高 (0.801), 径级 IV 次之 (0.429), 径级 II 和 III 的相关系数则较低, 分别为 0.149 和 0.121。这表明径级 I 和径级 IV 的指数模型拟合效果较好; 而径级 II 和径级 III 的模型拟合效果较差, 其相关系数 R^2 均小于 0.2。

指数模型的自相关范围是模型参数 $3a$, 球状模型的自相关范围是模型参数 a 。从不同径级油松种群的半方差函数曲线图 (图 4) 可以看出, 径级 I、IV 的变程较大, 说明径级 I、IV 的自相关范围大于径级 II、III。因此, 可得出径级 I、II、III、IV 的空间自相关范围即聚集斑块的最大半径分别为 23.4、15.2、11.1、24.9 m, 换算成面积分别为

1719.3、725.5、386.9、1946.8 m²。从整个样地来讲，各个径级在样地内呈聚集状态生长。

3.3 分维数分析

在半方差函数分析的基础上，对径级Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ的分维数进行了计算(表2)。径级Ⅰ和径级Ⅳ具有较好的分形特征，存在尺度上的依赖性。各径级的分维数差异较小，均趋近于2(表2)，其大小依次为径级Ⅱ(1.999)>径级Ⅲ(1.995)>径级Ⅳ(1.973)>径级Ⅰ(1.969)。随着分维数的递减，空间分布格局对尺度的依赖性下降，即径级Ⅱ油松种群的空间分布格局对尺度依赖最大，依赖于尺度的变异最小，空间分布结构最复杂，而径级Ⅰ的空间分布格局最简单。

表2 不同径级油松种群的分维数

Table 2 Fractal dimension of the *Pinus tabulaeformis* population at different diameter grades

径级 Diameter grade	径级Ⅰ Diameter grade I	径级Ⅱ Diameter grade II	径级Ⅲ Diameter grade III	径级Ⅳ Diameter grade IV
分维数值 Fractal dimension	1.969 (0.801)	1.999 (0.149)	1.995 (0.121)	1.973 (0.429)

注：括号中的数据代表相关系数R²。

Note: Data in parentheses represent correlation coefficient of R².

3.4 油松种群格局的 Kriging 分析

参照半方差函数模型参数(表1)，利用Surfer软件的Kriging最优内插法^[29]进行插值，将点状数据转换为面状数据，绘制了4 hm²样地内4个径级油松种群的空间分布等值线图(图5)。

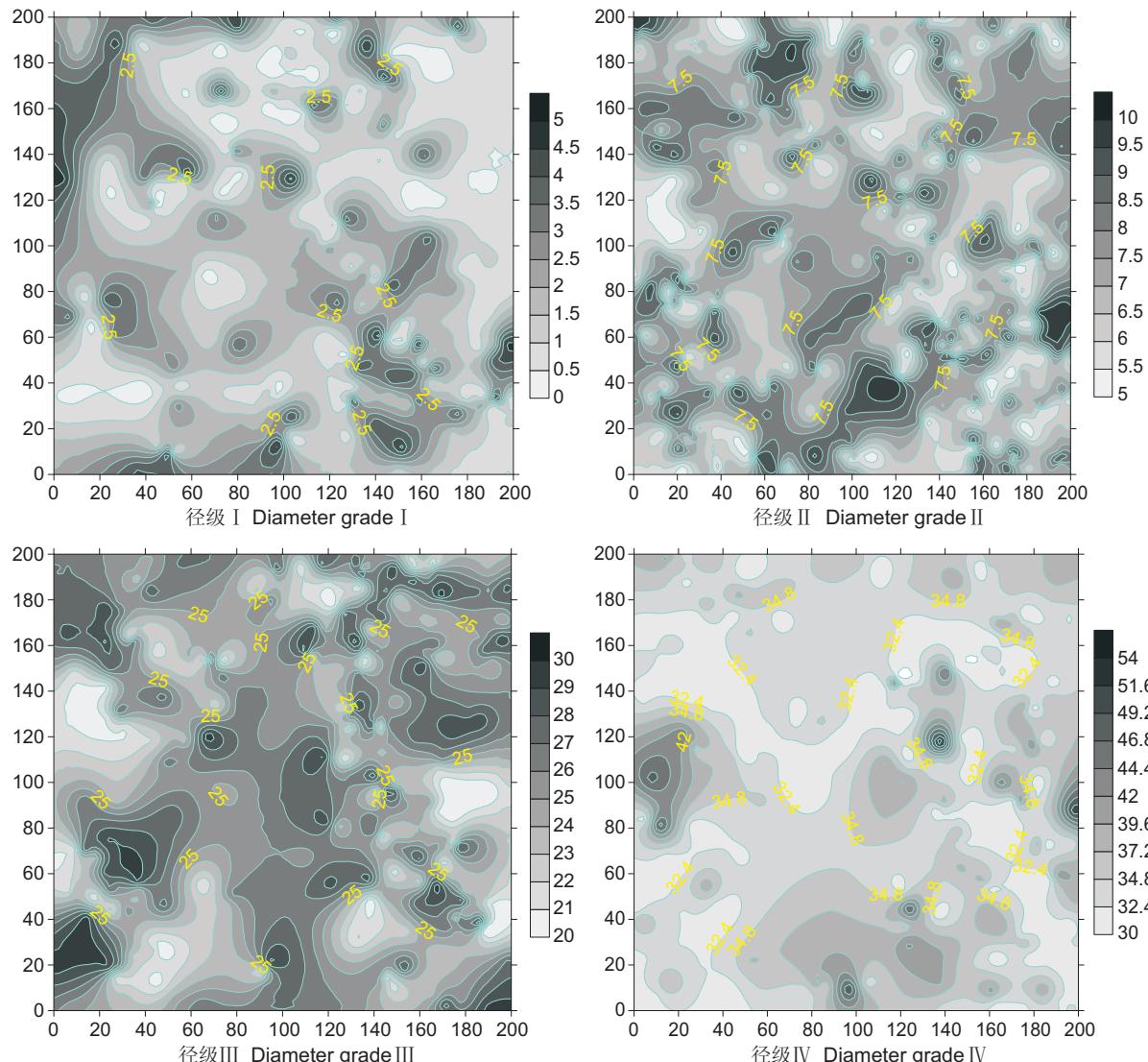


图5 不同径级油松种群的 Kriging 图

Fig. 5 Kriging map of the *Pinus tabulaeformis* population at different diameter grades

等值线图除了能够清晰的反映油松个体的空间分布外,还能更直观地反映空间分布的斑块聚集效果及研究区域油松种群不同径级的空间变化规律。虽然各径级种群的分维数差异不大(表2),但各径级种群个体的空间分布却表现出一定的复杂性(图5),其中尤以径级Ⅱ最为复杂,呈明显的斑块分布特点;Kriging图是围绕多个中心呈聚集型分布且从外部到中心,多数斑块胸径的大小表现为由小到大,显示出层状聚集的板块镶嵌分布格局。

4 讨论

研究区山西省灵空山国家级自然保护区的油松种群属增长型。对各径级油松胸径的半方差分析发现,其块金效应值($C_0/(C_0+C)$)均在25%~75%之间,表明各径级均为中等空间相关性,空间变异主要是由空间自相关引起的,而随机性因素对种群空间变异的影响较小。同时我们以树高作为变量进行半方差分析发现,4个径级均为聚集分布(最优拟合模型分别为指数、球状、球状、球状模型);块金效应分析表明,径级Ⅰ(32.8%)、Ⅲ(28.1%)、Ⅳ(26.4%)为中等的空间相关性,径级Ⅱ(23.1%)表现为强的空间相关性,说明各径级的空间变异主要是由空间自相关引起,这与以胸径作为变量的分析结果基本一致。对样地内油松的树高和胸径进行的相关性分析也表明,两者呈显著正相关($R^2=0.764$, $P<0.01$),即以树高作为变量进行半方差分析也进一步证实了结果的准确性。

本研究4 hm²样地内油松种群各径级呈聚集分布,4个径级聚集斑块的最大半径分别为23.4、15.2、11.1、24.9 m,与前人有关油松种群空间分布格局为聚集分布的研究结果一致^[10,13~15]。通过Surfer软件绘制的不同径级油松种群胸径的等值线图显示(图5),径级Ⅱ的Kriging图最为复杂。事实上,油松的果实成熟后大部分集中散落于母树周围;此外,动物对种子的影响也不容忽视,如啮齿类动物松鼠对松子的收集掩埋,使得油松种子不易向更大空间扩散,从而导致径级Ⅰ在空间分布上的离散和聚集,使径级Ⅱ聚集分布形成明显的斑块。同时也有研究证实,这是由于更新特性影响种群的分布格局所致^[13,17]。本实验油松种群的4

个径级(图1、图5)均以样地东部的山脊附近分布较多,这与油松喜光、耐旱的特性相适应;而中南部沟谷附近的分布则相对较少,尤其是径级Ⅲ和Ⅳ比较明显,这是由油松自身特性和环境异质性决定的。油松种子成熟后会随着重力、风力的作用到达沟谷,沟谷中丰富的腐殖质、水分等资源为油松种子萌发和生长创造了优越的条件,所以径级Ⅰ和Ⅱ的种群数量在中南部沟谷附近没有明显减少。4个径级的生境如此相似,主要受光照、地形等因素的综合作用,空间分布表现出了相似的特点和特有的规律性。

孙志虎等^[7]研究表明,传统的相邻格子法及数据分析方法仅仅是单一尺度下的格局分析,无论样方大小如何也不能全面反映种群的空间分布格局特点;同样,点格局分析方法虽然能够揭示在连续尺度变化条件下的种群格局强度及其聚集规模,但无法表达种群的空间分布格局纹理。地统计学突破了传统格局分析方法仅能描述空间数量特征的局限性,形成了从空间分析、误差估计到成图的全面分析方法,它与点格局分析方法类似可以得到样地范围内不同径级种群最大聚集斑块的半径^[7],同时还能准确表示出个体在空间上的地理位置、大小和分布特征等。而地统计学与Kriging插值方法的结合,则能得到点格局分析方法、相邻格子法、最近邻体法等格局分析方法所不能得到的空间分布格局的纹理图^[7](图5)。综上,地统计学和Kriging插值方法相结合能够精确而直观地反映出个体的空间分布、斑块的聚集效果和格局分布纹理图等,可为植物空间分布格局的分析提供有效的研究方法。

参考文献:

- [1] 李先琨,苏宗明,向悟生,宁世江,唐润琴,欧祖兰,李瑞棠.濒危植物元宝山冷杉种群结构与分布格局[J].生态学报,2002,22(12):2246~2253.
- [2] 李思文,张连翔,隋国新.油松种群自然更新格局的研究[J].生态学杂志,1991,10(4):14~17.
- [3] 苏志尧,吴大荣,陈北光.粤北天然林优势种群结构与空间格局动态[J].应用生态学报,2000,11(3):337~341.
- [4] 周元满,黄剑坚,韩维栋,杨淑贞.天然红海榄种群分布格局研究[J].广西植物,2013,33(4):496~501.

- [5] Perry JN, Liebhold AM, Rosenberg MS, Dungan J, Miriti M, Jakomulska A, Citron-Pousty S. Illustrations and guidelines for selecting statistical methods for quantifying spatial pattern in ecological data [J]. *Ecography*, 2002, 25(5): 578–600.
- [6] 王晓春, 韩士杰, 邹春静, 周晓峰. 长白山岳桦种群格局的地统计学分析 [J]. 应用生态学报, 2002, 13(7): 781–784.
- [7] 孙志虎, 张彦东. 长白落叶松人工林天然更新幼苗分布格局及其研究方法的比较 [J]. 生物数学学报, 2009, 24(3): 556–566.
- [8] 张刚华, 聂洁珠, 萧江华. 毛竹种群空间格局的地统计学分析 [J]. 中国农学通报, 2007, 23(12): 136–141.
- [9] 李哈滨, 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.
- [10] 崔长美, 王孝安, 郭华, 李伟. 子午岭林区天然油松林的种群结构与动态 [J]. 干旱区研究, 2011, 28(1): 111–117.
- [11] 赵琦, 韩海荣, 康峰峰. 山西太岳山油松人工林群落结构研究 [J]. 四川林业科技, 2012, 33(3): 37–40.
- [12] 郭微, 上官铁梁, 王志明, 李润强. 灵空山油松种群年龄结构与动态分析 [J]. 植物科学学报, 2013, 31(2): 130–135.
- [13] 张笑菁, 赵秀海, 康峰峰, 王娟, 贺自书, 马钦彦, 卢文敏, 药占文. 太岳山油松天然林林木的空间格局 [J]. 生态学报, 2010, 30(18): 4821–4827.
- [14] 苏薇, 岳永杰, 余新晓. 北京山区油松天然林的空间结构分析 [J]. 灌溉排水学报, 2009, 28(1): 113–116.
- [15] 张赟, 张春雨, 赵秀海. 内蒙古黑里河天然油松林主要树种的空间分布格局 [J]. 西北植物学报, 2009, 29(1): 167–173.
- [16] 牛丽丽, 余新晓, 岳永杰. 北京松山自然保护区天然油松林不同龄级立木的空间点格局 [J]. 应用生态学报, 2008, 19(7): 1414–1418.
- [17] 张赟, 赵秀海, 张春雨. 华北油松林油松种群的空间分布格局 [J]. 东北林业大学学报, 2009, 37(11): 43–51.
- [18] 柴宗政, 王得祥, 张丽楠, 张洋, 黄青平, 吴昊. 秦岭山地天然油松群落主要植物种群生态位特征 [J]. 生态学杂志, 2012, 31(8): 1917–1923.
- [19] 巨天珍, 张彦文, 葛建团, 张宋智, 宋晓伟, 师贺雄, 米彩艳. 小陇山国家级自然保护区油松群落生态位研究 [J]. 干旱区资源与环境, 2013, 27(4): 171–175.
- [20] 中国科学院植物研究所. 中国植被区划 [M]. 北京: 科学出版社, 1960.
- [21] Lamsal S, Rizzo DM, Meentemeyer RK. Spatial variation and prediction of forest biomass in a heterogeneous landscape [J]. *Forest Res*, 2012, 23(1): 13–22.
- [22] 蔡博峰, 于嵘. 景观生态学中的尺度分析方法 [J]. 生态学报, 2008, 28(5): 2279–2287.
- [23] 吕一河, 傅伯杰. 生态学中的尺度及尺度转换方法 [J]. 生态学报, 2001, 21(12): 2096–2105.
- [24] 王政权. 地统计学及在生态学中的应用 [M]. 北京: 科学出版社, 1999: 65–193.
- [25] Akhavan R, Sagheb-Talebi KH, Zenner EK, Safavimanesh F. Spatial patterns in different forest development stages of an intact old-growth Oriental beech forest in the Caspian region of Iran [J]. *Eur J Forest Res*, 2012, 131(5): 1355–1366.
- [26] 郝占庆, 李步杭, 张健, 王绪高, 叶吉, 姚晓琳. 长白山阔叶红松林样地(CBS): 群落组成与结构 [J]. 植物生态学报, 2008, 32(2): 238–250.
- [27] 叶万辉, 曹洪麟, 黄忠良, 练瑞愉, 王志高, 李林, 魏识广, 王章明. 鼎湖山南亚热带常绿阔叶林 20 公顷样地群落特征研究 [J]. 植物生态学报, 2008, 32(2): 274–286.
- [28] 祝燕, 赵谷风, 张俪文, 沈国春, 米湘成, 任海保, 于明坚, 陈建华, 陈声文, 方腾, 马克平. 古田山中亚热带常绿阔叶林动态监测样地—群落组成与结构 [J]. 植物生态学报, 2008, 32(2): 262–273.
- [29] 张义辉. 亚高山草甸土壤呼吸的时空变异特征研究 [D]. 太原: 山西大学, 2010: 27–41.