

## 天目山常绿阔叶林土壤养分的空间异质性

杜华强<sup>1,2</sup>, 汤孟平<sup>1,2</sup>, 崔瑞蕊<sup>1,2</sup>

(1. 浙江农林大学浙江省森林生态系统碳循环与固碳减排重点实验室, 浙江临安 311300; 2. 浙江农林大学环境与资源学院, 浙江临安 311300)

**摘要:** 采用地统计相关原理分析了天目山国家级自然保护区常绿阔叶林土壤有机质、全氮、碱解氮、有效磷和速效钾的空间异质特征。研究发现: ①土壤有机质具有较强的空间自相关性, 而碱解氮、全氮和有效磷空间自相关为中等程度; 速效钾在不同的步长和间距范围下, 揭示其空间变异特征的模型不同, 其空间变异比较复杂, 在不同尺度下空间格局存在差异; ②决定土壤养分空间格局的尺度以碱解氮最大, 为 4.21~169.50 m, 而有效磷的空间异质性尺度最小, 为 4.21~50.20 m; ③分形维数大小定量反映了不同营养成分空间格局差异及尺度依赖特征, 速效钾分形维数较大, 尺度依赖性强, 空间格局复杂; 有机质分形维数最小, 空间相对简单; 全氮、有效磷、碱解氮分形维数相差不大, 其空间分布格局类似, 但分形维数的细微变化也揭示了空间格局的在局部范围上的差异。图 3 表 3 参 16

**关键词:** 土壤学; 常绿阔叶林; 土壤养分; 空间变异; 分形维数; 自然保护区

中图分类号: S714.8 文献标志码: A 文章编号: 2095-0756(2011)04-0562-07

## Spatial heterogeneity of soil nutrients in an evergreen broadleaved forest of Mount Tianmu, Zhejiang

DU Hua-qiang<sup>1,2</sup>, TANG Meng-ping<sup>1,2</sup>, CUI Rui-rui<sup>1,2</sup>

(1. Zhejiang Provincial Key Laboratory of Carbon Cycling in Forest Ecosystems and Carbon Sequestration, Zhejiang A & F University, Lin'an 311300, Zhejiang, China; 2. School of Environmental Sciences and Resources, Zhejiang A & F University, Lin'an 311300, Zhejiang, China)

**Abstract:** Spatial heterogeneity of soil nutrients is an important factor which affects the spatial distribution of vegetation. In this paper, geostatistical theory was used to analyze the spatial heterogeneity of soil nutrients including soil organic matter (SOM), total nitrogen (TN), available nitrogen (AN, hydrolytic nitrogen), available phosphorus (AP), and available potassium (AK) in an evergreen broadleaf forest of National Nature Reserve of Mount Tianmu, Zhejiang Province, China. Results showed that (1) an exponential model revealed the spatial structures of SOM and AN, whereas spherical models were used for TN and AP. In general, structure was the primary cause of the spatial variability, but SOM had a strong spatial autocorrelation with a spatial proportion of 0.787; TN, AN, and AP had moderate spatial autocorrelation. Due to its differences in active lag distance and its interval with different models explaining its spatial structure, AK had no clear spatial variability. (2) The maximum spatial autocorrelation for AN had a range from 4.21 to 169.50 m, whereas AP had a minimum. (3) Fractal dimensions from log-log semi-variograms quantitatively described spatial pattern differences and scale dependence of the five kinds of soil nutrients. Fractal dimensions were higher for AK, so AK spatial structure had a strong scale dependence with a complex spatial pattern. The fractal dimension of

---

收稿日期: 2010-09-25; 修回日期: 2011-02-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(30871963); 浙江省自然科学基金资助项目(Y3080261); 浙江农林大学研究生科研创新基金资助项目(2112009042)

作者简介: 杜华强, 副教授, 博士, 从事森林碳汇、林业遥感、空间统计在林业中的应用等研究。E-mail: dhqrs@126.com

SOM was minimal, so its spatial pattern was relatively simple. Similar fractal dimensions for TN, AN, and AP explained their similar spatial patterns, but the small distinctions in their fractal dimensions did reveal local spatial structural variability. [Ch, 3 fig. 3 tab. 16 ref.]

**Key words:** soil science; evergreen broadleaf forest; soil nutrients; spatial variability; fractal dimension; nature reserve

空间异质性(spatial heterogeneity)在各种尺度上普遍存在<sup>[1]</sup>, 从不同的尺度和不同层面上研究土壤的空间异质性是一个热点问题, 其研究结果不但对了解土壤的形成过程、结构和功能具有重要的理论意义, 而且对了解植物与土壤的关系, 如更新过程、养分和水分对根系的影响以及植物的空间格局等也具有重要的参考价值<sup>[2]</sup>。研究表明: 森林植被和土壤养分都具有明显的空间变异特征<sup>[2-5]</sup>, 而且土壤营养和水分的异质性是影响植物群落空间格局的重要因素, 特别是在森林更新过程中, 土壤有机质和土壤养分的有效性、土壤 pH 等与根系相互作用, 影响种子的休眠、萌发与更新幼苗的发生格局<sup>[3,6]</sup>。常绿阔叶林是中国亚热带地区最复杂、生产力最高、生物多样性最丰富的地带性植被类型之一, 对保护环境、维持全球性碳循环平衡和人类持续发展都具有极重要的作用<sup>[7-8]</sup>, 其土壤特性一直受到重视。本研究以天目山国家级自然保护区为例, 采用地统计学的相关理论, 研究常绿阔叶林土壤养分空间变异和空间格局, 为常绿阔叶林的经营及自然保护区的管理提供参考。

## 1 研究方法

### 1.1 研究区概况

浙江天目山国家级自然保护区位于浙江省西北部临安市境内的西天目山, 地理坐标为  $30^{\circ}18'30'' \sim 30^{\circ}24'55''N$ ,  $119^{\circ}23'47'' \sim 119^{\circ}28'27''E$ 。西天目山的土壤基本上属于亚热带红黄壤类型, 随着海拔的升高逐渐向湿润的温带型过渡。海拔 850 m 以下为常绿阔叶林<sup>[8]</sup>, 其林下土壤主要为黄壤(分布在海拔 600 ~ 1 200 m), 土壤母质大部分是灰红色流纹状粗面斑岩; 土层一般较薄, 约 30 ~ 70 cm, 湿度大, 腐殖质层厚 15 ~ 30 cm; 质地属轻黏壤土到中黏壤土, 表层带有微团粒状至细粒状结构, 极松脆, 呈酸性反应, 含石砾 5%; 土壤含有机质为  $3.7 \sim 88.0 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 全氮量  $0.2 \sim 4.3 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 有效磷  $0.53 \sim 2.05 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 速效钾  $243.80 \sim 316.60 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

### 1.2 土壤样品采样

选择保存较完好的常绿阔叶林设置样地, 样地大小为  $100 \text{ m} \times 100 \text{ m}$ 。用相邻格子调查方法, 把样地划分为 100 个  $10 \text{ m} \times 10 \text{ m}$  的调查单元。首先, 在样地中心及四边确定 9 个点, 然后在每个调查单元中心再各设置 1 个采样点。鉴于研究区土壤较薄, 在所有 109 个采样点上取 AB 层土壤用于养分测定。样地布设及采样点平面位置如图 1, 其中 1 个采样点数据缺失。土壤养分数据包括有机质( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ), 全氮( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ),

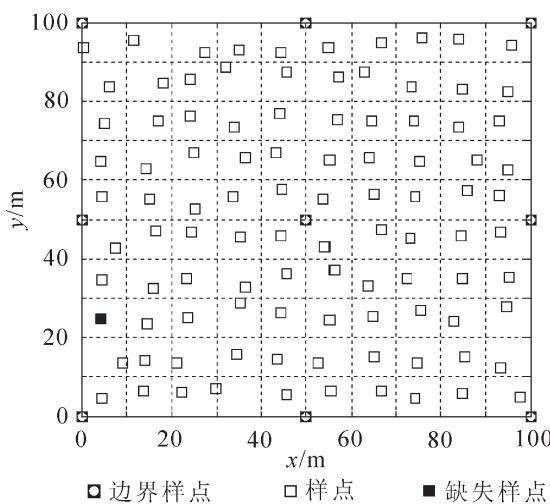


图 1 样地及土壤养分采样点分布图(样点数  $n = 109$ , 其中 1 个样点数据缺失)

Figure 1 Plot and soil sampling locations ( $n = 109$ , one sampling data miss)

碱解氮( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )，有效磷( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )和速效钾( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )。

### 1.3 土壤养分的空间异质性

采用公式(1)所定义的半方差函数及其理论模型参数包括基台、变程和块金常用于分析各土壤养分的空间异质性<sup>[3,9-10]</sup>。

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

式(1)中： $\gamma(\hat{h})$ 为半方差  $\gamma(h)$  的估计值； $h$  为样本间距，又称为滞后距离； $N(h)$  是间距为  $h$  的样本对； $Z(x_i)$  和  $Z(x_i+h)$  是区域化变量  $Z(x)$  在点  $x_i$  和  $x_i + h$  上的值。

### 1.4 土壤养分的分形维数

半方差函数中的  $h$  和  $\gamma(h)$  在双对数坐标的回归曲线可以确定土壤养分空间分维数  $D$ 。它可以提供被研究对象空间格局的尺度及层次性和空间异质性在不同尺度间的相互关系等方面的信息。

$$D = \frac{4-m}{2}。 \quad (2)$$

式(2)中： $m$  为双对数回归曲线的斜率。 $m$  越大，分形维数越小，双对数半方差图的直线越陡，空间格局的空间依赖性就越强，结构性越好，空间格局相对简单，因此，可以统计分形维数分析不同尺度上生态因子场的差异<sup>[5,11-12]</sup>。

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤养分数据的统计分析及正态性检验

从表 1 可知：天目山常绿阔叶林土壤养分数据存在较大的变异，其中有机质变异系数最大，达到 52.75%，其次为有效磷，全氮、水解氮和速效钾相对较低。

区域化变量空间变异地统计分析要求数据满足本征假设<sup>[10]</sup>，实际应用中通常需要数据为正态分布，以避免影响半方差图结构分析和空间估算<sup>[12-13]</sup>。Kolmogorov-Smirnov 正态性检验表明原始数据除速效钾为正态分布外，其他为非正态。采用对数变换对 5 种养分数据进行变换，再次检验表明，变换后数据全部满足正态分布。因此采用对数变换数据进行空间异质性分析。

表 1 数据基本统计量和正态性检验

Table 1 Descriptive statistics and Kolmogorov-Smirnov test for the data

变量	平均	标准差	变异系数/%	最小值	最大值	P 值	对数变化后 P 值
有机质/( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	6.703	3.536	52.75	1.338	23.484	<0.010	0.016
全氮/( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	0.343	0.130	37.93	0.185	0.910	<0.010	0.087
碱解氮/( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	368.600	105.300	28.56	214.100	740.100	<0.010	>0.150
有效磷/( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	2.378	1.093	45.96	0.691	6.576	<0.010	0.123
有效钾/( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	126.930	33.400	26.31	74.380	255.700	0.114	>0.150

### 2.2 土壤养分空间异质性分析

半方差分析要求样本间距  $h$  为最大采样间距的  $1/3$  或  $1/2$  内才具有统计意义，同时步长要求不小于最小采样间距<sup>[12]</sup>。本研究样本间距  $h$  的变化范围取最大间距的一半(即 73.0 m)，而步长取最小间距的 2 倍即 8.4 m。考虑到土壤养分变量单位不同，将半方差进行标准化处理，即半方差与样本方差之比，使得空间异质性具有可比性。图 2 左边为土壤养分数据半方差函数图及理论模型模拟结果，土壤有机质和碱解氮可用指数模型拟合(exponential model)，总氮和有效磷可用球状模型拟合(spherical model)，而速效钾理论半方差函数模型为线性无基台模型。模型决定系数、残差和及模型参数如表 2 所示。

空间异质性由结构方差  $C$  和块金方差  $C_0$  组成。土壤有机质空间结构比  $C/(C_0 + C)$  等于 0.787，大于 75%，表明天目山常绿阔叶林土壤有机质具有较强的空间自相关性；除速效钾外的其他种营养成分空间结构比为 25% ~ 75%，因此，空间自相关为中等程度。

总体上空间结构比的大小顺序为有机质>全氮>有效磷≥碱解氮，与水曲柳 *Fraxinus mandshurica*

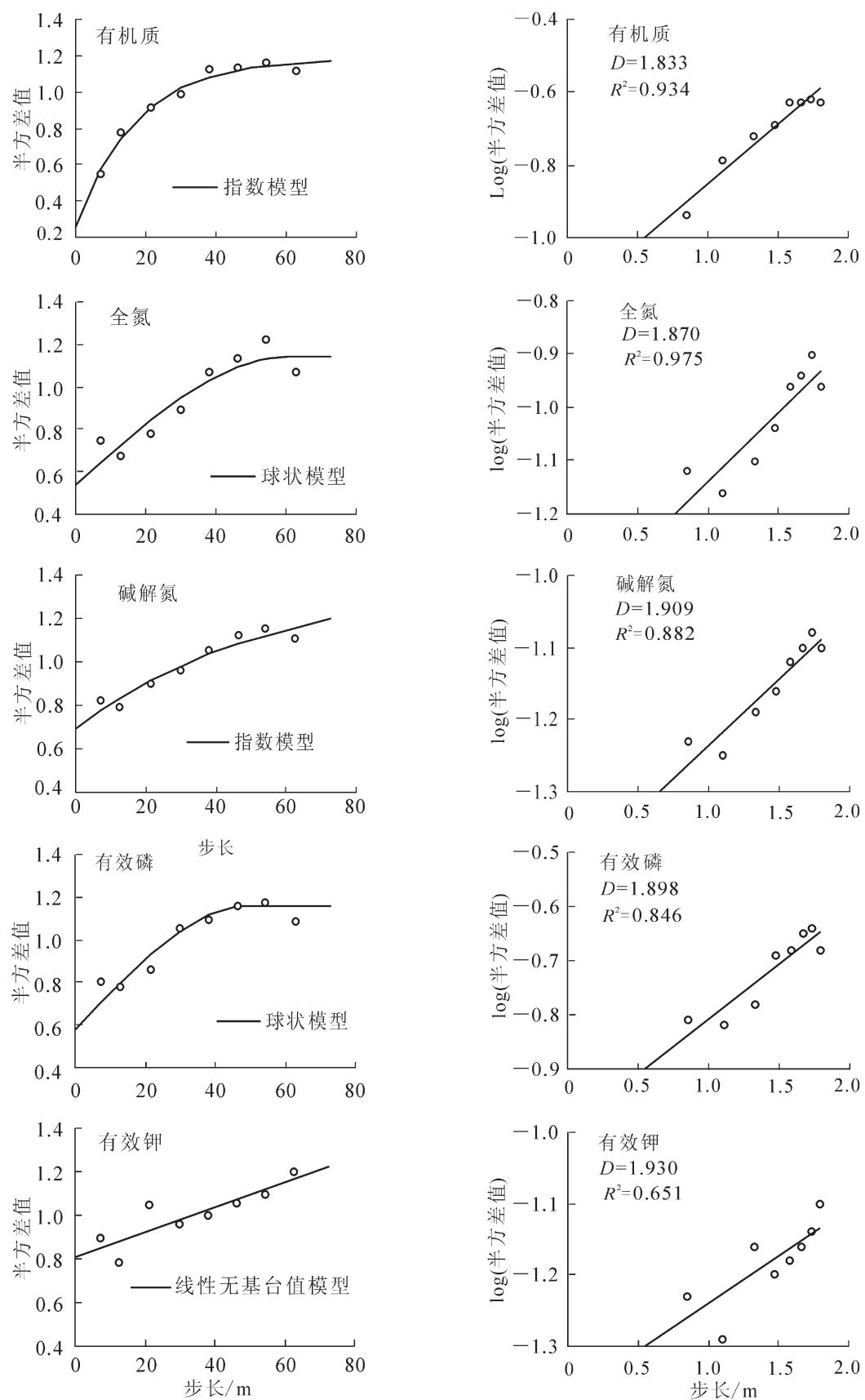


图2 天目山常绿阔叶林土壤养分等方向半方差函数理论模型(左)及空间格局分形维数(右)

Figure 2 Isotropic semivariograms models of soil nutrients in left and its spatial fractal dimensions in right

表2 等方向土壤养分半方差函数理论模型及参数

Table 2 Isotropic semivariogram models and its parameters

变量	模型	块金	基台	变程/m	空间结构比	决定系数	残差
有机质	指数模型	0.251	1.180	50.70	0.787 2	0.980	0.006 8
全氮	球状模型	0.535	1.143	60.70	0.531 9	0.873	0.037 0
碱解氮	指数模型	0.694	1.389	169.50	0.500 3	0.928	0.009 0
有效磷	球状模型	0.580	1.161	50.20	0.500 4	0.916	0.020 4
有效钾	线性无基台值模型	0.809				0.751	0.028 5

人工林土壤养分空间结构比顺序大致相同,但水曲柳人工林全氮、碱解氮、有效磷均表现很强的空间相关性<sup>[5]</sup>。说明不同森林类型土壤养分空间异质性有相似之处,但其组成存在较大的差异,因此,针对不同森林类型制定相应的管理措施是很有必要。

空间异质性尺度方面,有机质、全氮、碱解氮、有效磷的空间自相关范围分别为50.7, 60.7, 169.5和50.2 m。可以看出,碱解氮的空间异质性尺度最大,而有效磷的空间异质性尺度最小,这与磷不易移动的特性有关<sup>[5]</sup>。就氮而言,碱解氮的空间异质性尺度是全氮的3倍左右,而其空间结构比相当,因此在天目山常绿阔叶林内不同氮素的消耗过程不同,有效氮对生态格局和过程作用的尺度大于全氮。

除土壤有机质具有较小的块金外,全氮、碱解氮、有效磷均具有较大的块金效应,占总方差的50%左右,说明较小尺度上的某种过程不容忽视。

速效钾最优模型为线性无基台模型,基台不存在,故空间结构比也不明确,其 $C_0$ 值在5种养分中最大,为0.809,是否说明其空间异质性主要来自小尺度上的块金效应,将进一步分析。在此,保持 $h$ 范围不变,分别以1倍最小采样间距、3倍最小采样间距、4倍最小采样间距和5倍最小采样间距作为步长,对速效钾进行半方差分析,如表3。可以看出,1倍采样间距依然为线性无基台模型;而3倍、4倍、5倍最小采样间距均表现为指数模型,且具有中等空间自相性,但空间异质性尺度存在较大差异。因此,天目山常绿阔叶林土壤速效钾在不同步长范围具有不同的空间变异特征,其空间变异较为复杂,随机效应不容忽视。

表3 不同步长下速效钾等方向土壤养分半方差函数理论模型及参数

Table 3 Isotropic semivariogram models and its parameters for available K in different steps

步长/m	模型	块金	基台	变程/m	空间结构比	决定系数	残差	分维
4.21	线性无基台值模型	0.818				0.526	0.124 0	1.927
12.63	指数模型	0.316	1.066	29.4	0.704	0.872	0.007 0	1.915
16.84	指数模型	0.540	1.158	63.9	0.534	0.950	0.003 0	1.897
21.05	指数模型	0.346	1.102	41.7	0.686	0.983	0.000 6	1.898

### 2.3 土壤养分空间分布格局分形分析

由图2可知:天目山土壤养分具有分形特征,分形维数大小依次为土壤速效钾、碱解氮和有效磷、全氮、有机质。土壤有效钾分形维数最大,为1.930,明显将其与其他4种营养成分区分开。表3也表明,尽管合适的步长范围内有效钾具有中等空间相关,但其分形维数总体还是偏高。因此,说明有效钾的空间格局比较复杂,对尺度的依赖性比较大,在不同尺度下具有不同的格局。

土壤有机质分形维数最小,为1.833,说明有机质空间格局的空间依赖性强,具有良好的结构性,这与有机质空间结构比最大,强空间自相关是一致的。有效磷和碱解氮的空间分形维数相当,其空间结构比也均为0.5;全氮的分形维数低于有效磷和碱解氮,其空间结构比却比它们高,说明全氮的空间格局可能略好于有效磷和碱解氮。

图3为5种养分空间分布格局图,更加直观的揭示了它们空间格局的差异。虽然碱解氮和有效磷空间结构比相等,但分形维数之间的细微差异(相差0.011)却揭示了两者空间格局的局部变异,这正是分形从局部出发揭示研究对象精细结构的优点。Lee等<sup>[14]</sup>指出在研究自然界结构或系统的空间格局时,解释

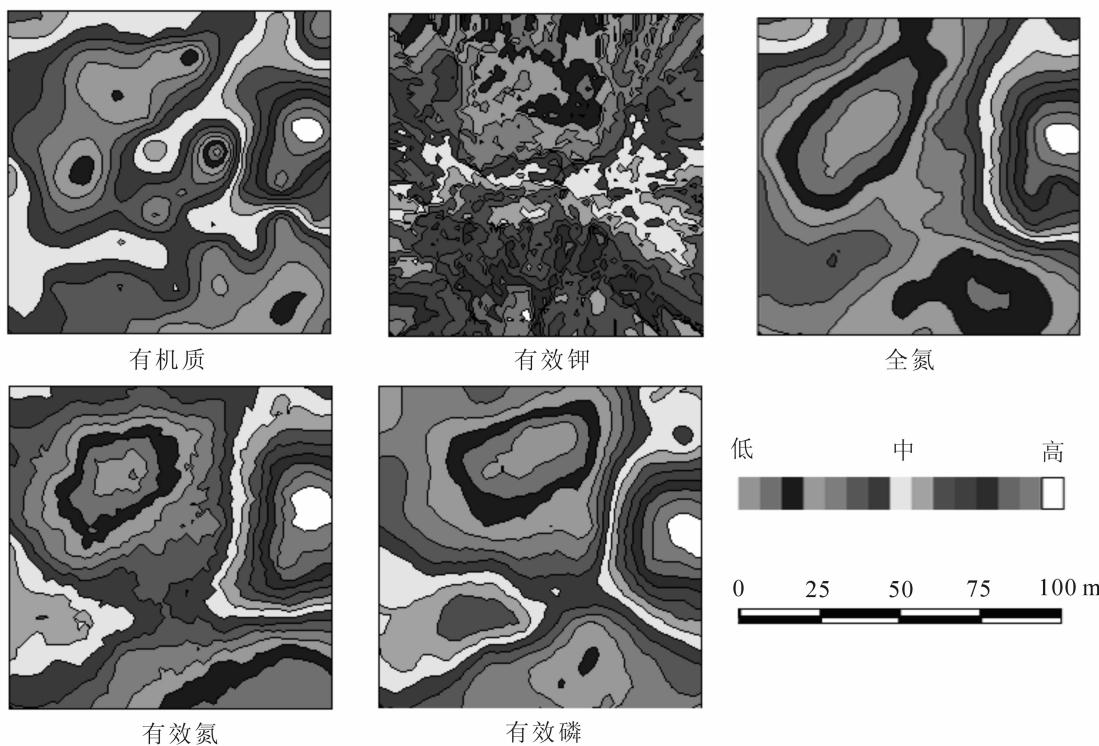


图 3 天目山常绿阔叶林土壤养分空间格局

Figure 3 Spatial patterns of the five kinds of soil nutrients in Mount Tianmu

产生该格局的基本过程是不可避免的，未知的细节可能对原因因子的理解很重要。

除速效钾外，其余几种养分的空间分布在东西、南北方向具有类似的特征，说明这些养分受地形影响较小。相关研究表明，速效钾没有明确的变异规律<sup>[15]</sup>，且在不同尺度上表现出不同的空间自相关格局<sup>[5,16]</sup>。本研究也表明，在不同的尺度上，天目山常绿阔叶林土壤速效钾具有不同的空间变异特征，因此，其不同尺度上变异特征的差异决定了其空间格局的复杂性。

### 3 结论

本研究半方差理论分析天目山国家自然保护区常绿阔叶林土壤 5 种营养成分的空间异质性特征，主要得到以下几方面的结论：

土壤有机质和碱解氮的空间变异可由指数半方差模型揭示，总氮和有效磷可用球状半方差模型揭示。其中土壤有机质空间结构比  $C/(C_0 + C)$  为 0.787，具有较强的空间自相关性；碱解氮、全氮和有效磷空间自相关为中等程度。因此，其空间异质性主要由结构因素构成，对于自然保护区，人为干扰因素比较小，该区亚热带海洋暖湿气候条件、土壤母质、地形等结构因素可能会进一步增强养分的空间相关性。当然，块金占一定比例，特别是有效磷、全氮达到 50%，说明在该自然保护区小尺度上的某种生态过程也不能忽视。

决定土壤养分空间格局的尺度以碱解氮最大，为 4.21 ~ 169.50 m，而有效磷的空间异质性尺度最小。这与磷不易移动的特性有关。

速效钾空间变异比较复杂，在不同步长范围内，揭示其空间异质性的参数不同，随机效应及小尺度上的生态过程应该引起重视。

5 种养分空间格局不同，其中有效钾的空间格局最复杂；全氮、有效磷、碱解氮次之；而有机质分形维数最小，空间格局的空间依赖性强。

森林土壤的物理性质、养分、森林更新乃至整个森林生态系统都具有空间异质性特征<sup>[2-6]</sup>。天目山是重要的国家级自然保护区，研究结果将为摸清保护区常绿阔叶林下土壤养分循环提供参考，同时也为常绿阔叶的施肥、培育等经营措施提供理论依据。

**参考文献:**

- [1] WU Jianguo, DENNIS E, JELINSKI M L, et al. Multi-scale analysis of landscape heterogeneity: scale variance and pattern metrics [J]. *Geogr Inform Sci*, 2000, **6** (1): 6 – 19.
- [2] 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.  
WANG Zhengquan, WANG Qingcheng. The spatial heterogeneity of soil physical properties in forests [J]. *Acta Ecol Sin*, 2000, **20** (6): 945 – 950
- [3] 王政权. 地统计学及其在生态学中的应用[M]. 北京: 科学出版社, 1999.
- [4] CHEN Yufu, YU Feihai, DONG Ming. Scale-dependent spatial heterogeneity of vegetation in Mu Us Sandy Land, a semi-arid area of China [J]. *Plant Ecol*, 2002, **162**: 135 – 142.
- [5] 孙志虎, 王庆成. 水曲柳人工林土壤养分的空间异质性研究[J]. 水土保持学报, 2007, **21** (2): 81 – 84.  
SUN Zhihu, WANG Qingcheng. Study on spatial heterogeneity of topsoil nutrient in *Fraxinus mandshurica* plantation [J]. *J Soil Water Conserv*, 2007, **21** (2): 81 – 84
- [6] 韩有志, 王政权. 森林更新与空间异质性[J]. 应用生态学报, 2002, **15** (5): 615 – 619.  
HAN Youzhi, WANG Zhengquan. Spatial heterogeneity and forest regeneration [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2002, **15** (5): 615 – 619.
- [7] 包维楷, 刘照光, 刘朝禄, 等. 中亚热带湿性常绿阔叶次生林自然恢复 15 年来群落乔木层的动态变化[J]. 植物生态学报, 2000, **24** (6): 702 – 709.  
BAO Weikai, LIU Zhaoguang, LIU Chaolu, et al. Fifteen-year changes of tree layer in secondary *Castanopsis-Schima* humid evergreen broad-leaved forest in central subtropics of western China [J]. *Acta Phytoecol Sin*, 2000, **24** (6): 702 – 709
- [8] 汤孟平, 周国模, 施拥军, 等. 天目山常绿阔叶林优势种群及其空间分布格局[J]. 植物生态学报, 2006, **30** (5): 743 – 752.  
TANG Mengping, ZHOU Guomo, SHI Yongjun, et al. Study of dominant plant populations and their spatial patterns in evergreen broadleaved forest in Tianmu Mountain, China [J]. *J Plant Ecol*, 2006, **30** (5): 743 – 752.
- [9] VILLARD M A, MAURER B A. Geostatistics as a tool for examining hypothesized declines in migratory songbirds [J]. *Ecology*, 1996, **77**(1): 59 – 68.
- [10] ZAWADZKI J, CIESZEWSKI C J, ZASADA M, et al. Applying geostatistics for investigations of forest ecosystems using remote sensing imagery [J]. *Silv Fenn*, 2005, **39** (4): 599 – 617.
- [11] 邬建国. 景观生态学: 格局、过程、尺度与等级[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.
- [12] 赵斌, 蔡庆华. 地统计学分析方法在水生态系统研究中的应用[J]. 水生生物学报, 2000, **24** (5): 514 – 520.  
ZHAO Bin, CAI Qinghua. An application of geostatistical analysis in freshwater ecosystem [J]. *Acta Hydrobiol Sin*, 2000, **24** (5): 514 – 520.
- [13] McGRATH D, ZHANG Chaosheng, CARTON O T. Geostatistical analyses and hazard assessment on soil lead in silvermes area, Ireland [J]. *Environ Poll*, 2004, **127**: 239 – 248.
- [14] KIRKPATRICK L A, WEISHAMPEL J F. Quantifying spatial structure of volumetric neutral models [J]. *Ecol Model*, 2005, **186** (3): 312 – 325.
- [15] 张宏伟, 魏忠义, 王秋兵. 沈阳城市土壤全钾和碱解氮的空间变异性[J]. 应用生态学报, 2008, **19** (7): 1517 – 1521.  
ZHANG Hongwei, WEI Zhongyi, WANG Qiubing. Spatial variability of soil total K and available N in Shenyang urban area [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2008, **19** (7): 1517 – 1521.
- [16] 郭旭东, 傅伯杰, 马克明, 等. 基于 GIS 和地统计学的土壤养分空间变异特征研究: 以河北省遵化市为例[J]. 应用生态学报, 2000, **11** (4): 557 – 563.  
GUO Xudong, FU Bojie, MA Keming, et al. Spatial variability of soil nutrients based on geostatistics combined with GIS: a case study in Zunhua City of Hebei Province [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2000, **11** (4): 557 – 563.