

丘塘景观土壤养分的空间变异

李明辉^{1,2}, 彭少麟^{2,3*}, 申卫军², 林永标², 刘振乾⁴

(1. 华南师范大学生命科学学院, 广州 510631; 2. 中国科学院华南植物研究所, 广州 510650;
3. 中山大学生命科学学院, 广州 510275; 4. 暨南大学水生态科学研究所, 广州 510632)

摘要:理解土壤养分空间分布的异质性对于评价和管理土地资源具有重要意义。利用地理信息系统和地统计学方法定量研究了丘塘景观土壤养分空间异质性特征。结果表明,土壤全氮的有效变程最大(为165 m),有机碳次之(102m),而全磷的变程最小(90m)。土壤有机碳含量由高到低5个不同级别的土壤面积与丘塘景观整个面积的比值的范围变化较小(10.54%~23.15%),土壤全氮含量比值变化范围较大(5.79%~32.73%),土壤全磷的比值的范围变化最大(1.80%~42.06%)。土壤有机碳和土壤全氮的分布情况较为一致,不同级别斑块分布也很相似,土壤有机碳含量高的地方土壤全氮也高。表层土壤有机碳和全磷的空间异质分布用球状模型拟合最佳,而全氮的空间分布规律更宜用指数模型来拟合。景观尺度的半方差拟合总体上优于斑块尺度。相对有机碳和全氮,全磷的空间异质性更多由随机因素(如人类施肥活动)引起和决定。土壤全氮的取样尺度应大于165m,而有机碳、全磷的取样距离则分别可大于103m和90m。

关键词:丘塘景观;土壤养分;地统计学;空间变异性

Spatial variability of soil nutrients in a hill-pond landscape

LI Ming-Hui^{1,2}, PENG Shao-Lin^{2,3*}, SHEN Wei-Jun², LIN Yong-Biao², LIU Zhen-Qian⁴ (1. College of Life Science, South China Normal University, Guangzhou 510631, China; 2. South China Institute of Botany, Chinese Academy of Science, Guangzhou 510650, China; 3. College of Life Science, Zhongshan University, Guangzhou 510275, China; 4. Institute of Hydrobiology, Ji'nan University, Guangzhou 510632, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(9): 1839~1845.

Abstract: Understanding the spatial variability of soil nutrients and its relationship with ecosystem biogeochemical cycles is important for managing and utilizing land resources. The objective of this study was to characterize the spatial variation of soil nutrients in a hill-pond landscape. This landscape is composed of four patch types: forest in the upper slope, a fish pond at the bottom of the watershed, a fruit garden and grassland in between the forest and fish pond. Soil samples at 0~10 cm and 10~20 cm depths were collected from each of the four patch types. Total carbon content (TC), total nitrogen (TN), and total phosphorus (TP) were analyzed. The spatial variability of the nutrients at the two soil layers was analyzed using geostatistical methods and Geographical Information System (GIS). Semivariance analysis showed that the effective range of TN (164.1 m) was larger than TC (102.4 m) and TP (89.2 m) at 0~10 cm depth. The effective range of TN increased from 164.1 m at 0~10 cm to 1242.7 m at 10~20 cm, whereas those of TC and TP remained almost unchanged. The ratios of nugget to sill for TC, TN, and TP were 5%, 6%, and 49%, respectively. In terms of the ratio of nugget to sill, the distribution pattern of TC was similar to TN. The content of each of the three types of soil nutrients were classified into 5 levels, each of which occupied a certain amount of landscape area. TC showed less variation (10.54%~23.15%) than TN (5.79%~32.73%) and TP (1.80%

基金项目:广东省团队研究资助项目(003031);国家自然科学基金资助项目(30100021);广东省自然科学基金资助项目(010551);中国科学院鹤山生态定位站开放基金资助项目(2001193906)

收稿日期:2004-03-27; **修订日期:**2004-06-08

作者简介:李明辉(1973~),女,博士,主要从事景观生态学研究。E-mail: liminghuilmh@eyou.com

* **通讯作者** Author for correspondence. E-mail: Lsspsl@zsu.edu.cn

致谢:衷心感谢美国亚利桑那州立大学 Darrel Jenerette 博士对英文摘要的修改

Foundation item: Group Project of Guangdong Province (No. 003031); National Natural Science Foundation of China (No. 30100021) and Natuaraal Science Foundation of Guangdong Province (No. 010551); Heshan Open Foundation of CAS (No. 2001193906).

Received date: 2004-03-27; **Accepted date:** 2004-06-08

Biography: 李明辉, Ph.D., mainly engaged in landscape ecology.

~42.06%)。In general, the semi-variogram for the models three soil nutrients fit better at the landscape than at the patch type scales. TC and TP were better fitted by spherical model, or exponential model was better for TN. The spatially structured variance (the variance due to the location of sampling sites) accounted for a large proportion of the sample variance for OC (95%), TN(94%) and TP(53%)。According the effective range, the efficiency of the sampling can be improved. The scale of the sampling is 165m(TN), 103m(OC) and 90m(TP). To enhance analyzing precision we need increase the sample number, especially for the orchard.

Key words: hill-pond landscape; soil nutrients; geostatistical analyses; spatial variability

文章编号:1000-0933(2004)09-1839-07 中图分类号:F301.24,Q149,S154.1 文献标识码:A

土壤理化属性的空间变异是评价土地管理措施优劣重要指标之一^[1~3]。丘塘景观是一种对我国南方低山丘陵地进行综合开发利用的土地利用模式,具有广泛的应用前景和推广价值,尤其适合于我国南方多水低山丘陵区^[4]。自 20 世纪 80 年代中后期开始,许多学者们对广东省鹤山的丘塘景观进行了较为长期的生态学观测与实验研究,主要集中在生态系统的结构动态、生产力、营养循环、小气候及水文效应等方面^[5~10]。但这些研究主要把组成丘塘的 4 种缀块(人工林、果园、草地和鱼塘)作为独立的生态系统来研究,没有考虑景观整体。例如,对于土壤养分的研究只是通过一些采样点来获得 4 个独立生态系统的土壤养分含量^[11,12],这些数据只代表有限个样点的数据或局部样区,不能反映整个景观土壤养分的空间格局、变异规律和尺度依赖性(scale dependency)。地统计学是量化土壤特性空间变异特征的有效方法之一^[13,14]。地理信息系统(GIS)的应用一方面可以解决土壤性质的空间数据和属性数据关联的问题,另一方面也为分析土壤性质的景观关系提供了方便。

本研究的主要目的是将 GIS 与地统计学结合起来,研究丘塘景观土壤养分的空间分布特征,揭示景观尺度上土壤养分的空间变异规律。由于尺度因素和地统计学分析的条件特征,景观尺度的地统计学分析结果往往更能够揭示土壤养分的空间格局。但多尺度分析可为尺度推绎提供有益的参考。因此,本研究也分析丘塘景观不同组成斑块内的土壤养分的空间异质性。研究结果可用于指导类似景观土壤养分的取样设计及取样密度的确定、进行空间插值和制图;从而增进对土壤养分空间格局在多尺度上如何影响生态学过程的理解,为土壤养分的有效利用与管理提供理论依据。

1 研究区与研究方法

1.1 研究区概况

本研究的对象—丘塘景观是构建于中国科学院鹤山生态定位研究站的几种主要农林复合系统之一。鹤山站是我国热带亚热带退化坡地人工植被恢复的科研和示范基地之一。建站以来,通过植被恢复技术的研究和推广,该区森林覆盖率大大提高,景观结构及其空间格局发生了显著变化,空间异质性明显提高^[5,15]。鹤山站位于广东省中部,约东经 112°53',北纬 22°40',距广州约 80 km。站区主要为低山丘陵,坡面较陡,气候温暖、湿润,年均气温 21.7℃,年均日照时数 1797.8 h,年均降雨量 1801.1 mm,但分布不均,有明显的干、湿季。本区土壤酸性较强。地带性植被为亚热带常绿季风阔叶林,因过度人为干扰,许多地方退化为亚热带草坡。丘塘景观是在原为亚热带退化草坡的一个集水区建立的(总面积 30 000 m²)。1983 年在山顶造林(13 000 m²),种植马占相思(*Acacia mangium*);坡腰种植龙眼(*Dimocarpus longan* Lour.)为主的果树(8 700 m²);谷底筑塘养鱼(2 900 m²),塘基种象草(*Pennisetum purpureum*;3 000 m²)饲鱼(图 1)。

1.2 研究方法

1.2.1 样地布置和采样方法 土壤全磷、全氮和有机质的样地布设见图 1。采样区共分为 10 个斑块,每个斑块又按面积大小分别设定 4~9 个取样点,分布于不同部位。每个样点分 2 层取样,各层深度分别为:0~10cm、10~20cm。环刀采样,塑料袋密封带回实验室,烘干(105℃)、研磨、过 100 目筛后备用。

1.2.2 分析方法 采用重铬酸钾外加热容量法测定土壤有机质含量。全 N 和全 P 采用 HClO₄-H₂SO₄ 法消化,消化后的提取液分别用凯氏定氮仪、分光光度计测定 N、P 含量^[16]。

1.2.3 地统计学方法 利用 GIS(ArcGIS),首先将丘塘景观内 51 个样点点位图数字化,生成用于地统计学分析的样点分布图。然后将相应样点的土壤养分数据输入到计算机形成与样点地理坐标匹配的属性数据,然后用 GS+3.0^[17]进行地统计学分析,计算半方差,用变异函数的理论模型进行拟合。

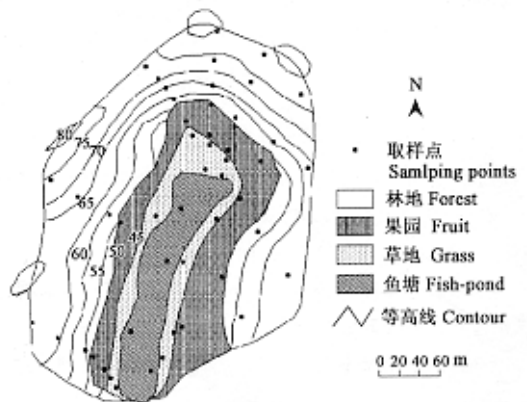


图 1 土壤样品取样图

Fig. 1 Soil sampling locations in the hill-pond landscape

2 结果分析

2.1 土壤养分空间变异的半方差分析

半方差图可用来确定景观中感兴趣变量空间自相关的尺度范围。有效变程则直接反映空间自相关范围的大小。对于指数模型其有效变程为 3a。有效变程之内,变量具有空间自相关特性,反之不存在[18]。图 2 所列不同土层(0~10 cm 和 10~20cm) 3 种营养成分水平空间变异的半方差图。

从图 2 中可看出,最表层(0~10cm)土层土壤全氮变程最大(164.1 m),有机碳次之(102.4m),全磷最小(89.2 m)(见表 1)。全氮的空间变异范围明显大于有机碳和全磷。10~20 cm 土层土壤养分的有效变程呈现出相同的趋势,有效变程为全氮>有机碳>全磷(表 1)。比较不同土层的养分有效变程发现,最表层土壤 3 种养分的有效变程均小于次表层(10~20 cm)的土壤(表 1)。这说明最表层土壤养分空间分布的自相关性程度高于较深层土壤。尤其是全氮,最表层的有效变程(164.1 m)远小于次表层(1232.7 m)。将在讨论部分对造成表层土壤养分自相关性弱的原因作进一步分析。全氮呈现出最大变异性的原因既与模型拟合效果有关,同样与影响土壤全氮含量的因素有关。人类农业生产活动对土壤全氮的影响最为强烈,施肥、根茬残留等都可以改变土壤全氮水平,但这些影响一般只局限在土壤表层,对深层土壤全氮水平的作用不大[8]。

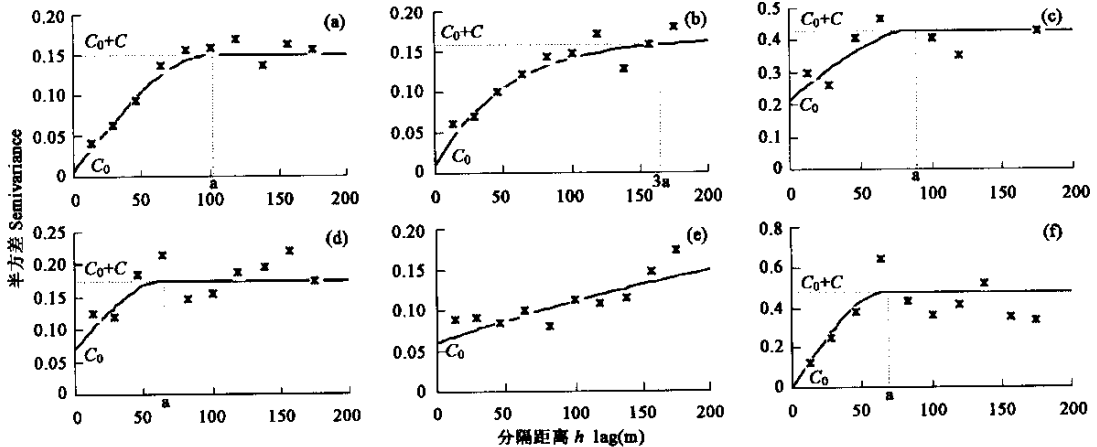


图 2 不同土层 3 种土壤养分半方差图

Fig. 2 Semivariograms of the three soil nutrients at different soil layers

(a)0~10 cm 有机碳 0~10cm soil organic carbon; (b)0~10 cm 全氮 0~10cm total N; (c)0~10 cm 全磷 0~10cm total P; (d)10~20 cm 有机碳 10~20cm soil organic carbon; (e)10~20 cm 全氮 10~20cm total N; (f)10~20 cm 全磷 10~20 cm total P

* 由于土壤全氮拟合模型为指数模型,其有效变程达到 1232.7 m,故未标出其拟合模型的参数值 the effective range of total N is too large to label in this graph;除全氮拟合模型为指数模型外,其余指标均为球状模型;

球状模型拟合公式 Spherical model:
$$r(h) = \begin{cases} C_0 & h = 0 \\ C_0 + C \left(\frac{3h}{2a} - \frac{h^3}{2a^3} \right) & 0 < h \leq a \\ C_0 + C & h > a \end{cases}$$

指数模型拟合公式 Exponential model:
$$r(h) = \begin{cases} C_0 & h = 0 \\ C_0 + C \left(1 - e^{-\frac{h}{a}} \right) & 0 < h \leq a \end{cases}$$

根据半方差图还可以解释变量的空间结构特征。从变量空间分布所符合的模型可以得知空间异质性的变化特征。如果空间异质性的变化不具有空间上的规则性,且陡然变化出现在不同的距离上,则以球状模型拟合最好;如果空间异质性陡然变化出现在所有尺度上,并且这些变化的距离是随机的,则用指数模型拟合最好[19,20]。据对 3 种土壤养分拟合分析,有机碳和全磷的拟合模型均为球状模型,而土壤全氮拟合模型为指数模型。说明它们空间异质性的变化在整个丘塘景观也是不完全相同的,有机碳和全磷在空间上的变化不规则,而全氮的空间变异比较随机。

空间变异参数中的块金值和结构方差可用于描述土壤养分受人为因素和自然因素的影响程度[21]。块金值和基台值的比值 $C_0/(C_0+C)$ 反映随机部分引起的变异所占的比重[22]。土壤母质、灌溉、气候及生物活动(包括人类)上的差异往往是使土壤性质发生变异的主要因素[23]。由表 1 可知,表层土壤全磷的 $C_0/(C_0+C)$ 最大为 49%。这说明全磷相对于有机碳和全氮来说受非自

然因素的影响较大,也就是说施肥习惯、施肥种类及管理水平是造成土壤全磷空间变异的主要因素。相对来说,而结构性变异和基台值的比值就反映了结构性变异占系统变异性的比例,即系统变量的空间相关性的程度。一般而言,结构方差与系统总方差的比例($C/(C_0+C)$)是对变量在空间上的可预测性的重要度量。比值大于 75%,说明系统具有强烈的空间相关性,比值在 25%~75%之间,表明系统具有中等的空间相关性,比值小于 25%,说明系统空间相关性较弱^[24]。表层土壤有机碳、全氮的结构方差与系统总方差的比值分别为 95%和 94%,表明这两种养分具有强烈的空间相关性。全磷的结构方差与系统总方差的比值为 51%,表明全磷含量具有中等的空间相关性,即随机因素和结构性因素共同作用于土壤特性的空间分布。这也说明对于全磷而言,人为干扰活动减弱了空间相关性。

表 1 土壤养分半方差特征参数

Table 1 Characteristic parameters of the semivariograms for the spatial distribution patterns of soil nutrients at different soil layers

土层(cm) Soil depth	土壤养分 Soil nutrients	拟合模型 Theoretical model	块金值 C_0 Nugget	基台值 C_0+C Sill	变程(m) Range	有效变程(m) Effective range	块金值/基台值 $C_0/(C_0+C)$	决定系数 R^2
0~10	有机碳 OC	球状模型 ^①	0.007	0.151	102.4	102.4	0.05	0.96
	全氮 TN	指数模型 ^②	0.011	0.166	54.7	164.1	0.06	0.88
	全磷 TP	球状模型	0.213	0.430	89.2	89.2	0.49	0.53
10~20	有机碳 OC	球状模型	0.070	0.175	65.0	65.0	0.4	0.63
	全氮 TN	指数模型	0.061	0.292	410.9	1232.7	0.21	0.7
	全磷 TP	球状模型	0.001	0.479	68.7	68.7	0	0.65

①Spherical model, ②Exponential model; * 数据均经 log 转换 Data are log-transformed

2.2 GIS 支持下土壤养分的克里格插值分析

地统计学克里格法是根据抽样数据在二维平面上绘出斑块图,也称为克里格图。克里格法在分析景观空间格局,尤其是小尺度的空间格局时非常有用^[26]。克里格插值的精度是受多因素影响的,如变异函数的计算、拟合、采样方式,及样点的分布等。

从土壤表层克里格插值(图 3)可看出,依坡位从上至下,林地有机碳含量较高而鱼塘的最低,果园和草地的居中;依坡向而言,西坡和南坡土壤有机碳的含量较高,其分布有 3 个层次。而东坡的有机碳的含量相对于西、南坡要少。土壤全氮与有机碳的分布情况较为一致,不同级别斑块分布也很相似,土壤有机碳含量高的地方土壤全氮也高。通过克里格插值图可以计算出不同级别土壤养分含量所占的面积。土壤有机碳含量由高到低 5 个不同级别的土壤面积占丘塘景观整个面积的比例见图 4。可以看出,土壤有机碳的含量分布是比较均匀的,各个级别的分布变异不大(10.54%~23.15%)。而土壤全氮的变异相对要大于有机碳(5.79%~32.73%)。变异最大的是土壤全磷(1.80%~42.06%)(图 4)。

土壤有机碳、全磷和全氮具有明显的各向异性结构。从不同土壤养分的空间分布格局来看,土壤养分含量分布具有高度的空间异质性,决定了空间格局的存在。养分含量斑块的大小、形状及空间分布具有显著的差异,但不论在什么方向上,养分含量由低到高的分布梯度规律总是存在的。丘塘景观植被格局的分布是林地、果园、草地和鱼塘的带状镶嵌分布,而相应的土壤养分也呈现出斑块状分布的。这种养分空间分布的特征与植被-土壤在不同空间位置上的各种物理的、化学的和生物学因素与过程的长期相互作用有关,如生态系统的元素生物地球化学循环。有机碳和全氮的分布是呈现梯度变化的,尤其是林地的分布从上坡到下坡呈由大到小的趋势变化。土壤有机碳和全氮的分布表现为高含量的斑块之间的梯度分布和低含量斑块的镶嵌分布。说明虽然土壤的性状存在空间异质性,但这种异质性是相互关联、有一定规律性的。土壤全磷的分布变异比较大,不同级别养分斑块呈现镶嵌式分布。从插值图可以看出,土壤有机碳含量与全氮量的空间变化趋势极为相似,低值区和高值区互相吻合,变化的趋势也相同。

2.3 丘塘景观不同斑块养分变异的半方差分析

丘塘景观是由 4 个不同斑块组成的,分别是马占相思林、果园、象草地和鱼塘。鱼塘由于面积最小,只有 4 个取样点,不适宜单独进行地统计学分析,因此仅对林地、果园和草地进行半方差分析。

由表 2 可见 3 个不同斑块的半方差拟合效果并不是很好,决定系数都很小,尤其是全磷,有机碳和全氮的拟合虽然优于全磷,但效果都比基于整个景观尺度的拟合差。这在一定程度上反映了生态学的空间格局随着取样尺度不同而异。对于有机碳和全氮,3 个不同斑块的空间自相关距均为林地<草地<果园;全磷空间自相关距也呈现林地<果园<草地。

不同斑块表层土壤养分的块金值和基台值都比较小(表 2)。对不同斑块不同土壤养分的块金值进行比较,发现无论是有机碳、全磷还是全氮都是果园的块金值最大,分别达到 0.0243,0.2692 和 0.2692,土壤全磷由随机因素引起空间异质性最大(39.4%),说明果园受人为因素影响最大,而这与丘塘景观中只有果园是加入了人为干扰-施肥活动有关。

3 讨论与结论

丘塘景观的土壤养分存在着明显的空间变异规律。表层土壤有机碳和全氮的拟合模型均为球状模型,其决定系数都在 0.8 以上,全磷的拟合模型为指数模型,但其决定系数较小。总体来说,景观尺度的半方差拟合优于斑块尺度半方差拟合的效果,对于全磷的拟合要比有机碳和全氮的拟合差。这在一定程度上反映了生态学变量的空间格局随着取样尺度的不同而异。由不同斑块之间的空间自相关距离和拟合效果看,如果要进一步提高拟合精度,重要的是增加果园的取样点。

不同元素在丘塘景观内的空间变异程度也是不同的。土壤有机碳和土壤全氮的分布情况较为一致,不同级别斑块分布位置也很相似,土壤有机碳含量高的地方土壤全氮也高。土壤有机碳含量的变化范围较小,土壤全氮的变异相对要大于有机碳,变异最大的是土壤全磷。

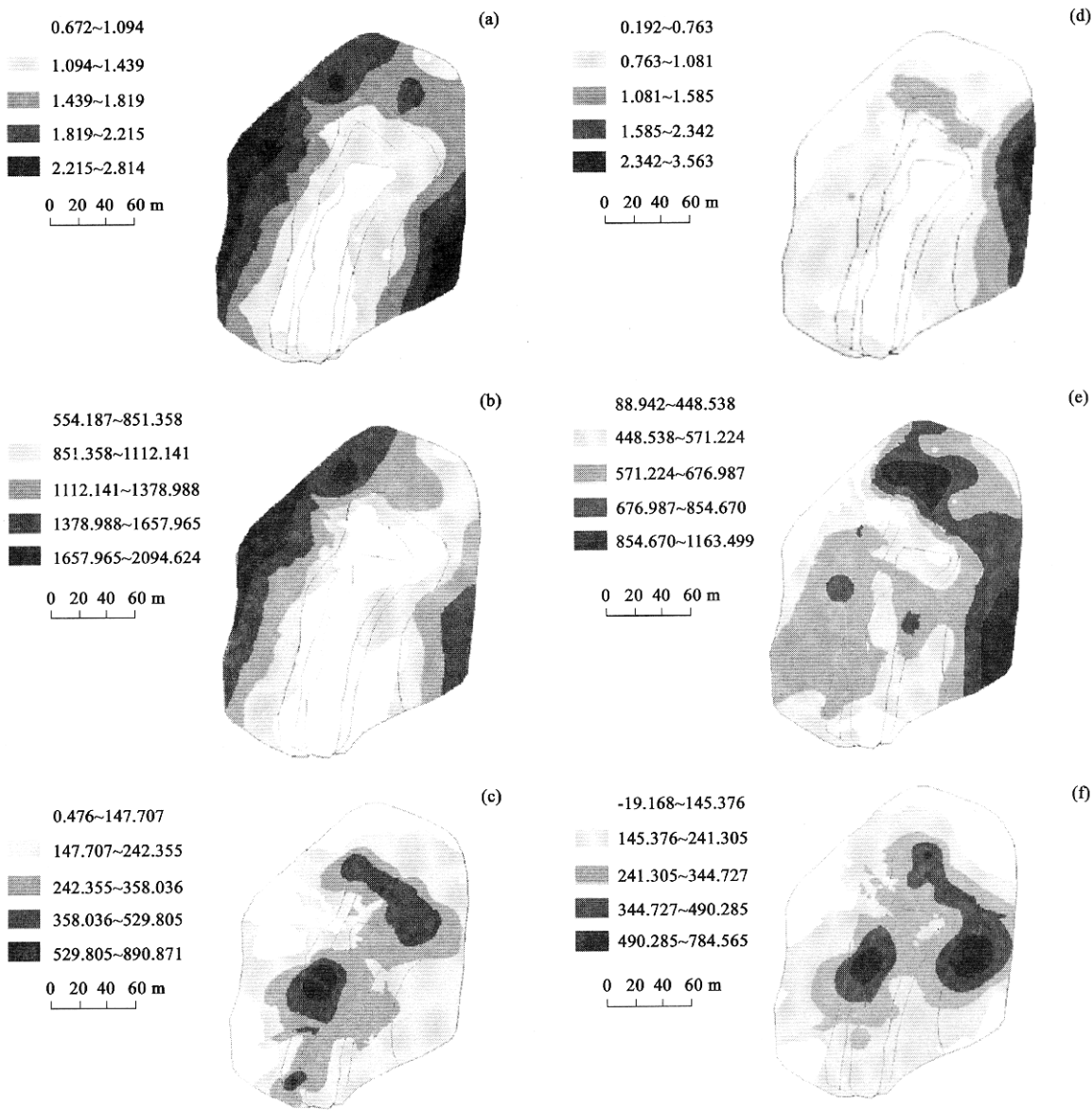


图 3 土壤养分克里格插值图

Fig. 3 Two dimensional soil nutrients at two depths:kridging

(a)0~10 cm 有机碳 0~10cm soil organic carbon(%);(b)0~10cm 全氮 0~10cm total N ($\mu\text{g/g}$);(c)0~10cm 全磷 0~10cm total P($\mu\text{g/g}$);(d)10~20cm 有机碳 10~20cm soil organic carbon(%);(e)10~20cm 全氮 10~20cm total N($\mu\text{g/g}$);(f)10~20cm 全磷 10~20cm total P($\mu\text{g/g}$)

从景观尺度来说,土壤有机碳、全氮和全磷具有较大的变程,说明表层土壤的养分在丘塘景观内含量分布趋于大块状变异。变程对土壤养分取样设计的有效性有一定的指导意义。故在类似景观内,如果为传统统计分析构建空间独立的数据,土壤全氮的取样尺度应大于 165m,而有机碳、全磷的取样距离则分别可大于 103m 和 90m。从斑块尺度来说,土壤有机碳和全氮空间分布的有效变程呈现林地<草地<果园,果园的空间变异范围明显大于林地和草地,说明人类活动(如施肥)作为随机因素影响到果园土壤养分空间变异。

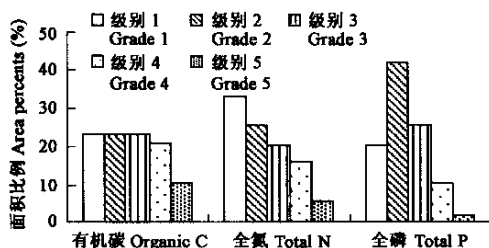


图 4 5 个不同级别的土壤面积占丘塘景观整个面积的比例图

Fig. 4 Five percents of the area of the five grades

表 2 不同斑块表层土壤养分半方差参数*

Table 2 Geostatistical model parameters describing the spatial distribution characteristics of soil nutrients in different patches

土壤养分 Soil nutrients	斑块类型 patch type	拟合模型 Theoretical model	块金值 C_0 Nugget	基台值 C_0+C Sill	变程 Range	有效变程 Effective range	块金值/基台值 $C_0/(C_0+C)$	决定系数 R^2
有机碳 OC	林地 ^①	球状模型 ^④	0.0001	0.0567	32.7	32.7	0.002	0.397
	果园 ^②	指数模型 ^⑤	0.0243	0.0616	107.3	321.9	0.394	0.231
	草地 ^③	球状模型	0.0013	0.0445	47.2	47.2	0.029	0.334
全磷 TP	林地	球状模型	0.0040	0.3370	22.8	22.8	0.012	0.091
	果园	线性模型	0.2692	0.2692	118.7	118.7	1	0.138
	草地	指数模型	0.0310	0.4470	256.2	768.6	0.069	0.269
全氮 TN	林地	球状模型	0.0007	0.0665	65.1	65.1	0.011	0.571
	果园	线性模型	0.2692	0.2692	118.7	118.7	1	0.138
	草地	球状模型	0.0001	0.0692	74.8	74.8	0.001	0.403

① Forest, ② Orchard, ③ Meadow; ④ Spherical model; ⑤ Exponential model; * 数据均经 log 转换 Data are log-transformed

References:

[1] Buchter B, Aina P O, Azari A S, et al. Soil spatial variability along transects. *Soil Technol.*, 1991, **4**: 297~314.

[2] Diiwu J Y, Ridry R P, Dickenson P, et al. Effect of tillage on the spatial variability of soil water properties. *Can. Agr. Eng.*, 1998, **40**: 1~8.

[3] Silver W L, Scatena F N, Ohnson A H. Nutrient availability in a Montana wet tropical forest: spatial patterns and methodological considerations. *Plant Soil*, 1994, **164**: 129~145.

[4] Zhong G F. The knowledge of the dike-pond systems. *Tropical Geography*, 1984, **4**(3): 129~135.

[5] Yu Z Y, Peng S L. *Ecological studies on vegetation rehabilitation of tropical and subtropical degraded ecosystems*. Science and Technology Press of Guangdong, 1996. 1~15.

[6] Ren H, Peng S L, Xiang Y C. Biomass and net primary productivity in an Acacia Mangium Plantation in Heshan, Guangdong, China. *Acta Phytocologica Sinica*, 2000, **24**(1): 18~21.

[7] Ding M M, Yi W M, Liao Y L. Effect of ecological factors on nodulation and N-fixation in Acacia Mangium. *Journal of Tropical and Subtropical Botany*, 1994, **2**(2): 15~21.

[8] Shen W J, Zhou G Y, Peng S L. Surface runoff in five Ecosystems of Heshan subtropical hilly land. *Journal of Tropical and Subtropical Botany*, 1999, **7**(4): 273~281.

[9] Ren H, Peng S L, Yu Z Y. Biological and ecological characteristics of *Acacia Mangium*. *Chinese Journal of Ecology*, 1996, **15**(4): 1~5.

[10] Zhao P, Zeng X P, Yu Z Y. The annual photosynthetic trend of trees on downland in Heshan, Guangdong. *Acta Ecologica Sinica*, 1995, **15**(Supp. A): 64~67.

[11] Li Z A, Fang W, Weng H. The relationship between the soil fertility and artificial vegetation recovery in tropics and subtropics. In: Yu Z Y, Peng S L, eds. *Ecological Studies on Vegetation Rehabilitation of Tropical and Subtropical Degraded Ecosystems*. Guangzhou: Science and Technology Press of Guangdong, 1996. 155~171.

[12] Li Z A, Ding M M, Fang W. The nutrient storage and distribution in artificial *Acacia mangium* forest. *Acta Ecologica Sinica*, 1995, **15** (Supp. A): 14.

[13] Bourgault G, Journel A G, Rhoaders L D, et al. Geostatistical analysis of a salinity data set. *Advances in Agronomy*, 1997, **58**: 254~

291.

- [14] Warrick A W, Myers D E, Nielsen D E. Geostatistical methods applied to soil science. In: A. Klute ed. *Methods of soil analyses part 1: Physical and mineralogical methods*. ASA and SSSA, Madison, WI, 1986. 53~73.
- [15] Peng S L. *Dynamics of forest communities in the south subtropical region*. Beijing: Science Press, 1996. 198~222.
- [16] Lu R K. *Analytical methods of soil agrochemistry*. Beijing: Chinese Agriculture Science and Technology Press, 1999.
- [17] Gamma Design 1998. *GS+ GeoStatistics for the environmental sciences, version 3. 1a*. Gamma Design, Plainwell, Michigan, USA, 1998.
- [18] Bian L, Walsh S J. Scale dependencies of vegetation and topography in a mountainous environment of Montana. *Professional Geographer*, 1993, **45**: 1~11.
- [19] Burrough P A. Spatial aspects of ecological data. In: Jongman R. H. G., Ter Braak C. J. F., Van Tongeren O. F. R., eds. *Data Analysis in Community and Landscape Ecology*. Cambridge, Cambridge University Press, 1995. 213~265.
- [20] Wu J G. *Landscape ecology: pattern, process, scale and hierarchy*. Beijing: Higher Education Press, 2000. 119~131.
- [21] Robertson G P, Gross K L. Assessing the heterogeneity of belowground resources: Quantifying pattern and scale. In: Caldwell M M, Pearcy R W, eds. *Exploitation of environmental heterogeneity by plants: ecophysiological processes above-and-belowground*. San Diego: Academic Press, 1994. 237~253.
- [22] Gong Y S, Liao C Z, Li B G. Spatial variability and fractal dimension for soil water content and buck density. *Acta Pedologica Sinica*, 1998, **35**(1): 10~15.
- [23] Beckett P H T, Webster R. Soil variability: a review. *Soil and Fertilizers*, 1971, **34**(1): 1~5.
- [24] Burgess T M, Webster R. Optimal interpolation and isarithmic mapping of soil properties I. The semi-variogram and punctual kriging. *J. Soil Science*, 1980, **31**: 315~331.

参考文献:

- [4] 钟功甫. 对珠江三角洲桑基鱼塘系统的再认识. *热带地理*, 1984, **4**(3): 129~135.
- [5] 余作岳, 彭少麟. 热带亚热带退化生态系统植被恢复生态学研究. 广州: 广东科技出版社, 1996. 1~15.
- [6] 任海, 彭少麟, 向言词. 鹤山马占相思林的生物量和净初级生产力. *植物生态学报*, 2000, **24**(1): 18~21.
- [7] 丁明懋, 蚁伟民, 廖玉兰. 生态条件对马占相思结瘤固氮的影响. *热带亚热带植物学报*, 1994, **2**(2): 15~21.
- [8] 申卫军, 周国逸, 彭少麟, 等. 南亚热带鹤山 5 种生态系统的地表径流. *热带亚热带植物学报*, 1999, **7**(4): 273~281.
- [9] 任海, 彭少麟, 余作岳. 马占相思的生物生态学特性. *生态学杂志*, 1996, **15**(4): 1~5.
- [10] 赵平, 曾小平, 余作岳. 广东鹤山丘陵人工林几种乔木的光合作用年变化. *生态学报*, 1995, **15**(Supp.): 64~67.
- [11] 李志安, 余作岳, 翁轰, 等. 热带亚热带人工植被恢复与土壤肥力发育之关系. 见: 余作岳, 彭少麟主编. *热带亚热带退化生态系统恢复的研究*. 广州: 广东科技出版社, 1996. 155~171.
- [12] 李志安, 丁明懋, 方炜, 等. 马占相思人工林生态系统养分物质的储存与分布. *生态学报*, 1995, **15**(Supp.): 103~114.
- [15] 彭少麟. 南亚热带森林群落动态学. 北京: 科学出版社, 1996. 198~222.
- [16] 鲁如坤. *土壤农业化学分析*. 北京: 中国农业科技出版社, 1999.
- [20] 邬建国. *景观生态学——格局、过程、尺度与等级*. 北京: 高等教育出版社, 2000. 119~131.
- [22] 龚元石, 廖超子, 李保国. 土壤含水量和容重的空间变异及其分形特征. *土壤学报*, 1998, **35**(1): 10~15.