

西双版纳热带植物园园区土壤理化性质的空间异质性^{*}曹俊琇^{1, 2}, 刘文俊¹, 沙丽清¹

(1 中国科学院 西双版纳热带植物园, 云南 昆明 650223; 2 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

摘要: 利用地理信息系统 ArcGIS 软件的空间分析功能, 通过地统计学的半变异函数定量研究了西双版纳热带植物园园区土壤理化性质的空间异质性特征. 结果表明: 土壤容重、pH 值符合指数模型, 碱解氮符合球状模型. 由随机因素引起的空间变异占空间总变异的比例小, 其值分别为 28.8%, 27.5% 和 30.3%, 反映土壤 3 种性质具有较强的空间自相关格局, 但它们的空间自相关范围具有明显的差异, 土壤 pH 值变程最小, 碱解氮次之, 而土壤容重变程最大, 分别是 3 081, 4 402m 和 5 619 m. 进行土壤理化性质的空间内插, 输出土壤理化性质分布图, 同时输出标准差分布图评价 Kriging 插值精度.

关键词: 西双版纳; 土壤理化性质; 空间异质性; Kriging 插值

中图分类号: S 159 文献标识码: A 文章编号: 0258- 7971(2009) S1- 0325- 06

除光照、温度、水分外, 土壤条件是影响植物生长的又一重要因素. 土壤不仅为植物的生长提供物理支持, 而且还提供养分、水分和空气等^[1]. 不同植物达到最适生长状况其对土壤特性的要求不同, 如土壤酸碱度、有机质^[2]. 同时土壤是一个自然连续体, 空间变异性是土壤的一种自然属性, 对土壤特性变异的充分了解, 是土壤养分管理和合理施肥的基础^[3]. 20 世纪 70 年代地统计学引入到土壤科学中, 推动了土壤研究的发展^[4]. 现今, 地统计学已被证明是分析土壤特性空间分布特征及其变异规律最为有效的方法之一^[5]. 目前利用地统计学和 GIS 对土壤物理特性、养分、水分以及重金属空间变异等各方面进行研究的工作很多^[4, 6-11].

中国科学院西双版纳热带植物园于 1959 年, 在著名植物学家蔡希陶教授领导下创建, 是目前我国最大和保存物种最多的植物园, 集热带科学研究、物种保存、科普教育为一体. 本文将通过对植物园园区土壤理化性状的调查, 利用地统计学的半变异函数定量研究土壤养分的空间变异特征, 确定其空间变异的尺度, 进一步分析引起土壤养分变异的生态过程, 以揭示经典统计方法难以发现的规律,

更深刻、更全面理解土壤养分的空间特征, 同时绘制出土壤容重、pH 值、碱解氮空间分布图, 对现在的土地利用情况提出建议, 同时也为土壤管理和今后植物园规划提供依据.

1 材料和方法

1.1 研究区域概况 中国科学院西双版纳热带植物园位于云南省西双版纳傣族自治州勐腊县勐仑镇的葫芦岛上, 面积 1 125 hm², 其中绿石林占地 225 hm², 该研究区域不包括绿石林. 地理位置 21°52'~ 21°57'N, 101°14'~ 101°18'E, 平均海拔约 600m, 地处热带北缘, 属于西南季风气候区滇南热带季风气候类型. 据中国科学院西双版纳热带生态站气象站 (位于中国科学院西双版纳热带植物园内) 多年资料, 该地区年平均降雨量为 1 557 mm, 全年分为雾凉季 (11~ 翌年 2 月)、干热季 (3~ 4 月)、湿热季 (5~ 10 月). 年平均相对湿度为 86%, 全年平均气温为 21.3℃. 降水分配不均, 具有明显干季 (11~ 翌年 4 月) 和雨季 (5~ 10 月) 的交替, 其中干季降水仅占 20% 左右. 西双版纳热带植物园属丘陵-低中山地貌, 分布有砂岩、石灰岩等

* 收稿日期: 2009- 03- 07

基金项目: 中国科学院“数字植物园建设”项目资助.

作者简介: 曹俊琇 (1984-), 女, 安徽人, 硕士生, 主要从事生态学方面的研究.

通讯作者: 沙丽清, 男, 副研究员, 主要从事土壤生态学方面的研究, shaliqing@xbtg.ac.cn.

成土母岩, 分布的土壤类型主要有砖红壤、赤红壤、石灰岩土及冲积土^[12].

园区分东、西区, 以电站大桥为界. 西区主要是景区, 分布各种专类园, 用于旅游和科普教育. 东区为试验区, 分布有热带季节雨林、次生林、人工林、橡胶林、柚子园、团花树林等.

1.2 土壤样品的采集和分析方法 根据土地利用现状和园区分布格局采用网格法取样, 采样时参考园区卫星影像图. 其中植物园西区分布的专类园较多, 以 50 m × 50 m 网格作为采样单元, 根据植被情况人为确定采样点, 采样数为 403 个. 植物园东区按 100 m × 100 m 网格为单元进行采样, 由于地势起伏、植被茂密, 利用 GPS 寻找样点, 采样数为 629 个. 整个园区共采集土样 1 032 个 (图 1).

取样方法: 在网格中心取 0~20 cm 的土样, 将土样过 2 mm 筛, 制成风干土然后分析土壤养分含量; **分析方法:** 用环刀法测土壤 0~10 cm 的容重; 碱解氮用碱解扩散法测定; 土壤 pH 值 (H₂O) 用 pH S-3C 精密 pH 计测定.

方差函数计算公式为

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

式中 $R(h)$ —半方差函数; h —样点的空间间隔距离, 称为步长 (lag); $N(h)$ —间隔距离为 h 的样点数; $Z(x_i)$, $Z(x_i + h)$ —区域化变量 $Z(x)$ 在空间位置 i 和 $i + h$ 处的实测值.

克里格法是利用原始数据和半方差函数的结构性, 对未采样点的区域化变量进行无偏估值的一种方法. 与其他方法相比, 具有可以克服内插中误差难以分析的问题, 不会产生回归分析的边界效应, 能估计测定参数的空间变异分布和估算估计参数的方差分布等优点. 想要知道 Kriging 插值结果是否可靠, 可以输出标准差分布图^[18]. 估计标准差是样本数据标准差和大范围取样插值结果内在不确定性的综合反映, 因此, 其值的大小可用于评价 Kriging 插值精度, 值越小, 表明 Kriging 插值结果越可靠.

样本的描述性分析采用 SPSS 13.0 进行, 半方差函数和 kriging 插值是利用 ArcGIS 软件进行.

2 结果与讨论

2.1 土壤理化性质的描述性统计分析 中数和算术平均值是表示样品中心趋向分布的一种测度, 而标准差和变异系数则表示抽样样本的变异程度. 研究区域内, 土壤容重、碱解氮平均值与中数相差不大, 而 pH 值的平均值和中数差别较大 (表 1), 表明土壤 pH 值的中心趋向分布可能被异常值所影响, 导致其非正态分布. 土壤容重的统计变异最小, 为 13.6%, 其次是 pH 值, 变异为 19.83%, 而碱解氮的变异最大, 达到 43.19% (表 1), 其含量的最大值与最小值相差 113 倍.

单样本柯尔莫哥洛夫-斯米诺夫 (One-sample Kolmogorov-Smirnov) 检验表明, 土壤容重、碱解氮符合正态分布, 而 pH 值并不符合正态分布 (表 1). 利用非正态分布的数据将导致变异函数的波动大, 增大估计误差, 所以, 应对这样的数据进行转换, 经对数转换后土壤 pH 值的数据趋于正态分布 (表 1), 计算 pH 值的实验变异函数值用转换后的数据.

2.2 土壤养分的空间变异性特征 要全面了解土壤特性的空间变异结构并进行克里格插值计算, 选用合适的理论模型拟合实验变异函数很重要. 可以

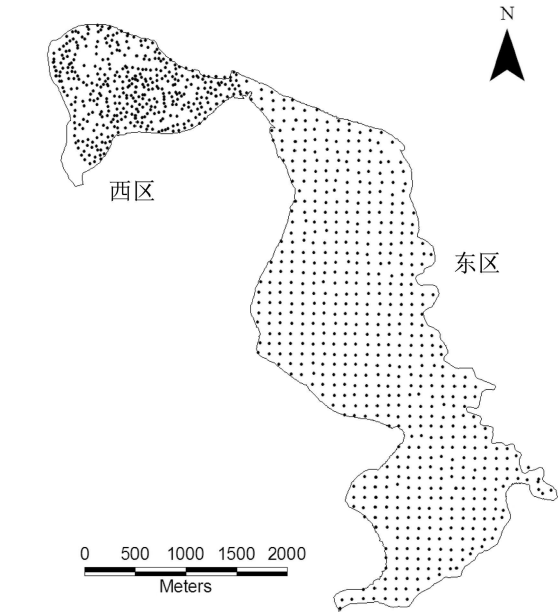


图 1 园区样点分布示意图

Fig 1 Map of study site and sampling points

1.3 研究方法 经典地统计学理论包括半方差函数及其模型和克里格插值方法^[13~15]. 半方差函数 (semivariogram)^[11, 16, 17]是描述土壤特性空间变异结构的一个函数, 反映了不同观测距离之间的变化. 假设区域化变量满足二阶平稳和本征假设, 半

利用“交叉证实法”(Cross Validation)^[11 9]选择模型. 模型拟合良好的判别原则为: 标准平均值接近 0 均方根误差最小, 平均标准误差与均方根误差最接近, 以及标准均方根预测误差接近 1. 通过对不同理论模型拟合结果的比较分析表明, 碱解氮选用球状模型, 容重和 pH 值选择指数模型比较合适(表 2).

块金值(C_0)、基台值($C_0 + C$)、变程(a)作为半方差函数的重要参数, 用来表示区域化变量在一定程度上的空间变异和相关程度. 块金常数是由实验误差和小于取样尺度上施肥、作物、管理水平等随机因素共同引起的变异, 基台值表示系统内总的变异, 包括人为因素引起的变异和由土壤母质、地形、气候等非人为的结构性因素引起的变异. 块金值与基台值之比表示空间变异性程度, 该比值高, 说明由随机部分引起的空间变异程度大, 相反则由结构性因素引起的空间变异程度较大. 在研究区域内, 土壤容重的随机变异为 28.8%, 主要体现在 50

m 以下的小尺度, 而在 50~ 5 619 m 的中尺度上, 其结构性变异(由空间自相关引起的)占 71.2%. 2 种空间异质性在碱解氮中分别占 27.5% 和 72.5%, 在 pH 中占 30.3% 和 69.7%, 3 种土壤性质的空间异质性中随机变异均小于结构性变异, 而且其比值较小, 在 27% ~ 30% 之间, 反映土壤养分在此研究尺度上具有较强的空间自相关格局.

变程表明属性因子空间自相关范围的大小, 它与观测尺度以及在取样尺度上影响土壤养分的各种生态过程相互作用有关. 在变程之内, 变量具有空间自相关特性, 反之则不存在. 在研究区域内, 3 种土壤性质的空间自相关范围具有明显的差异, 变程在 3 081~ 5 619 m 范围内变化, 相差近 1 倍, 说明影响这 3 种土壤性质的生态过程在不同的尺度上起作用, 土壤 pH 值变程最小, 碱解氮次之, 而土壤容重变程最大(表 3).

2.3 土壤养分的空间分布格局 从图 2 中可以明显看出, 植物园东、西区土壤性质的差异. 植物园东

表 1 土壤理化性质的描述性统计分析

Tab 1 Descriptive statistics of soil properties and K-S test in the investigated soil

项目	样本数	标准差	最大值	最小值	中位数	平均值	变异系数	K-S 值
容重 /($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	1 032	0.17	1.78	0.73	1.25	1.25	13.6	0.581
pH	1 032	1.17	8.74	3.55	5.74	5.90	19.83	0.013*
碱解氮 /($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	1 032	49.01	318.47	2.82	112.87	113.47	43.19	0.424

* : $\alpha = 0.05$ 水平, 非正态分布; #: 对数转换后的结果

表 2 交叉证实法选择模型的参数

Tab 2 Parameters of Cross-Validation

属性	模型	均方根误差	平均标准误	标准平均值	标准均方根预测误差
容重	指数模型	0.114 4	0.116 7	0.002 9	0.980 3
碱解氮	球状模型	32.72	33.01	0.000 6	0.984 2
pH	指数模型	0.793 5	0.806 3	- 0.012 3	0.985 2

表 3 土壤理化性质变异函数理论模型的相关参数

Tab 3 Characteristic of semivariogram model for soil properties

项目	理论模型	块金值	基台值	变程 /m	块金值: 基台值 /%
容重	指数模型	0.011	0.028	5 619.52	28.8
碱解氮	球状模型	957.17	2 201.7	4 402.3	27.5
pH	指数模型	0.013	0.033	3 081.89	30.3

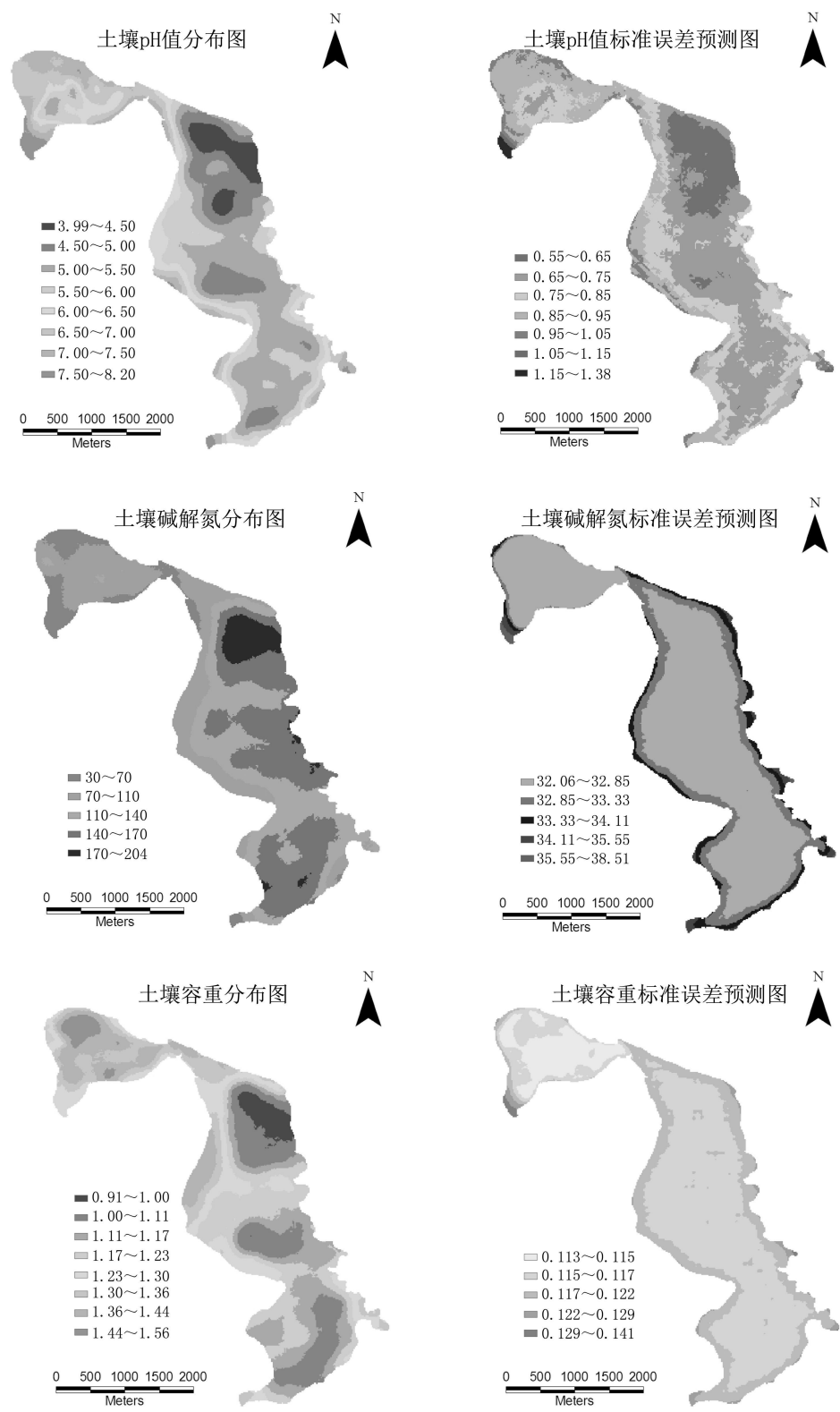


图 2 园区土壤理化性质分布图及标准误差预测图

Fig 2 Spatial distribution and standard error predict maps of soil bulk density, pH value and alkaline nitrogen

区土壤酸度较大, 其中 pH 值小于 6 的区域分别为热带季节雨林、橡胶林、次生林、柚子园、团花树林等人工林。热带季节雨林由于保护较好比较原始, 人为干涉少, 土壤受破坏程度轻, 基本保持了砖红壤的特性。橡胶林土壤 pH 值在 5.0~6 之间。团花树等人工林土壤受到一定程度的破坏, 土壤 pH 值在 5.5~6 之间。西区总体土壤酸度较小, 可能与母质关系很大, 植物园边界大部分在罗梭江边, 部分靠近去勐腊的公路, 江边的土壤基本是冲积土, pH 值一般都大于 6.5。总的来说, 土壤酸度东区大, 西区小, 中间大, 边界小。

植物园东区碱解氮含量明显比西区含量高。东区植被类型较多, 地面凋落物数量也比西区明显的多, 凋落物多有机质含量相对要高, 而碱解氮和有机质含量具有显著的正相关^[20, 21], 因此东区碱解氮含量较高。

土壤容重西区大于东区。这是由于西区大部分是草坪, 割草机定期要去修剪, 游客踩踏, 土壤紧实度增加。其中新建的百花园, 由于建设中大型机器的碾压, 其容重最大。图 2 中土壤容重较小的区域分别是热带季节雨林和橡胶林、次生林、团花树林等人工林。

图 2 中土壤性质标准误差预测图可以看出, 园内部误差较小, 边界误差较大, 进一步证实样点越多, 误差越小。其中土壤容重 Kriging 插值结果最为可靠, 其次是碱解氮, 而 pH 值只是近似正态分布, 标准误差最大, Kriging 插值结果没有前 2 种可靠。

3 结论和讨论

研究区域内, 土壤容重、碱解氮平均值与中数相差不大, 而 pH 值的平均值和中数差别较大, 表明土壤 pH 值的中心趋向分布可能被异常值所影响, 导致其非正态分布。土壤容重的统计变异最小, 为 13.6%, 其次是 pH 值, 变异为 19.83%, 而碱解氮的变异最大, 达到 43.19%, 其含量的最大值与最小值相差 113 倍。

经理论模型的最优拟合, 表明土壤容重、pH 值符合指数模型, 碱解氮符合球状模型。在研究区域内, 3 种土壤性质随机变异变化在 27%~30% 之间, 它们在此研究尺度上均表现出较强的空间自相关格局, 表明土壤内在属性如土壤母质、地形等对这 3 种土壤性质影响较大, 而人为因素如耕作措

施、施肥等对其影响较小。

3 种土壤性质的空间相关范围变化较大 (3 081~5 619 m), 土壤 pH 值变程最小, 碱解氮次之, 而土壤容重变程最大。由于土壤性质的变程是其空间自相关范围的测度, 因此, 变程对土壤取样设计的有效性有一定的指导意义。在西双版纳地区, 如为传统统计分析构建空间独立的数据, 取样网格应大于变程。相反, 取样若为土壤养分的景观制图服务, 取样网格应小于变程。一般来说, 变程以外的取样距离对任何内插和制图均无效。

从总体来看西双版纳热带植物园土壤容重、pH 值和碱解氮的空间分布特征, 土壤 pH 的空间分布呈现西区高, 东区低, 边界高, 中间低的特征, 可能是与土壤母质有关。土壤容重空间分布呈现西区高, 东区低, 边界高, 中间低的特征, 其中东、西区差异主要是由于人为干扰, 内外差异则与土壤类型有关。碱解氮的空间分布西区低, 东区高, 边界低, 中间高的特征, 主要与植被有关。

土壤容重在 $0.9 \sim 1.45 \text{ g/cm}^3$ 的较疏松土壤中, 水、肥、气适宜, 树木容易存活^[22]。而西区专类园部分地区土壤容重超出树木适宜生长范围, 不利于植物扎根生长, 因此在植物移栽时应避开这些地方。另外可以通过耕作、客土和增施有机肥改良土壤容重。同时园区土壤 pH 值跨度很大 (3.55~8.74), 由于不同植物对土壤 pH 值的要求和适应性不同, 引种植物栽培前需要考虑到这个问题。

参考文献:

- [1] 黄昌勇. 土壤学 [M]. 北京: 中国农业科学出版社, 2000.
- [2] 谢国文, 黄娴媛, 余炼文, 等. 国家濒危植物永瓣藤分布的土壤环境特征 [J]. 生态环境, 2007, 16(2): 492-497.
- [3] 刘杏梅, 徐建民, 章明奎, 等. 太湖流域土壤养分空间变异特征分析 [J]. 浙江大学学报, 2003, 29(1): 76-82.
- [4] 李亮亮, 依艳丽, 凌国鑫, 等. 地统计学在土壤空间变异研究中的应用 [J]. 土壤通报, 2005, 36(2): 265-268.
- [5] 李艳, 史舟, 徐建明, 等. 地统计学在土壤科学中的应用及展望 [J]. 水土保持学报, 2003, 17(1): 178-182.
- [6] SHI Jia-chun, WANG Hai-zhen, XU Jian-ming, et al. Spatial distribution of heavy metals in soils: a case study of Changxing, China [J]. Environmental Geology.

- 2007, 52: 1-10
- [7] ZHANG X ing-yi, SUI Y ue-yu, ZHANG Xu-dong et al. Spatial variability of nutrient properties in black soil of northeast China[J]. *Pedosphere*, 2007, 17(1): 19-29
- [8] BROCCA L, MORBIDELLI R, MELONE F et al. Soil moisture spatial variability in experimental areas of central Italy[J]. *Journal of Hydrology*, 2007, 333: 356-373
- [9] DUFFERA M, WHITE J G, WEISZ R. Spatial variability of Southeastern U S Coastal Plain soil physical properties: Implications for site-specific management[J]. *Geoderma*, 2007, 137: 327-339.
- [10] 秦鱼生, 涂仕华, 冯文强, 等. 基于地统计学和 GIS 的土壤速效养分空间变异研究[J]. *山地学报*, 2006, 24(增刊): 153-160
- [11] 陈彦, 吕新. 基于 GIS 和地统计学的土壤养分空间变异特征研究[J]. *中国农学通报*, 2005, 21(7): 389-394, 405.
- [12] 沙丽清, 孟盈, 冯志立, 等. 西双版纳不同热带森林土壤氮矿化和硝化作用研究[J]. *植物生态学报*, 2000, 24(2): 152-156
- [13] 谭万能, 李志安, 邹碧, 等. 地统计学方法在土壤学中的应用[J]. *热带地理*, 2005, 25(4): 307-311.
- [14] 杨玉玲, 文启凯, 田长彦, 等. 土壤空间变异研究现状及展望[J]. *干旱区研究*, 2001, 18(2): 50-55.
- [15] MATHERON G. Principles of geostatistics[J]. *Economic Geology*, 1963, 58: 1246-1266
- [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[J]. *应用生态学报*, 2000, 11(4): 557-563
- [17] OLIVER M A. Geostatistics and its application to soil science[J]. *Soil Use and Management*, 1987, 3(1): 8-19
- [18] 刘付程, 史学正, 于东升, 等. 基于地统计学和 GIS 的太湖典型地区土壤属性制图研究[J]. *土壤学报*, 2004, 41(1): 20-27
- [19] 阮本清, 许凤冉, 蒋任飞. 基于球状模型参数的地下水水位空间变异特性及其演化规律分析[J]. *水利学报*, 2008, 39(5): 573-579.
- [20] 朱立博, 郑勇, 曾昭海, 等. 呼伦贝尔典型草原不同植被类型植被与土壤特征研究[J]. *中国草地学报*, 2008, 30(3): 32-36
- [21] 李惠卓, 张彦广, 吴杨哲, 等. 保定市植物园土壤特性研究[J]. *河北农业大学学报*, 2004, 27(4): 59-62
- [22] 李玉和. 城市土壤密度对园林植物生长的影响及利用措施[J]. *中国园林*, 1995, 11 (3): 41-43

Spatial heterogeneity of soil physical and chemical properties in Xishuangbanna tropical botanical garden

CAO Jun-xia^{1, 2}, LIU Wen-jun¹, SHA Li-qing¹

(1 Xishuangbanna Tropical Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Kunming 650223, China

2 Graduate School, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract Geostatistics combined with spatial analysis of geographical information system (GIS) techniques were applied to a treatment and analysis of the spatial heterogeneity of soil physical and chemical properties in Xishuangbanna Tropical Botanical Garden. The results indicate that the semivariogram of soil bulk density and pH value are best described by the exponential model; alkaline nitrogen is best described by the spherical model. With Nugget/Sill were 28. 8%, 27. 5% and 30. 3%, therefore changes in soil bulk density, pH value and alkaline nitrogen are mainly affected by structural factors. But the ranges of spatial autocorrelation are very different. pH value < alkaline nitrogen < soil bulk density, the ranges were 3 081, 4402 m and 5 619 m. Use Kriging interpolation generated predict maps of soil physical and chemical properties respectively export maps of standard error which can evaluation the precision of Kriging interpolation.

Key words Xishuangbanna soil physical and chemical properties spatial heterogeneity, Kriging interpolation