

邓恩桉林地土壤 pH 空间变异分析

谭艳¹, 吴承祯^{1, ①}, 洪伟¹, 陈建忠², 肖应忠², 陈灿¹

(1. 福建省高校森林生态系统过程与经营重点实验室 福建农林大学桉树研究中心, 福建 福州 350002;

2. 福建省建阳市林业局, 福建 建阳 354200)

摘要: 以福建省建阳市 7 年生邓恩桉(*Eucalyptus dunnii* Maiden)林地土壤为研究对象,应用地统计学方法分析了不同土层土壤 pH 的空间变异规律。结果表明:该邓恩桉林地土壤 pH 随土壤深度的增加而增大, 0~20、20~40 和 40~60 cm 土层的土壤 pH 均值分别为 pH 3.57、pH 3.62 和 pH 3.67; 土壤 pH 的变异系数较小, 分别为 3.90%、3.93% 和 4.05%。0~20、20~40 和 40~60 cm 土层土壤 pH 的块金效应值分别为 0.389 6、0.430 3 和 0.604 3, 说明该林地土壤 pH 具有中等空间自相关性;经 K-S 非参数检验,该林地各层土壤 pH 服从正态分布。通过不同趋势效应下不同半方差函数模型预测误差的比较,确定该林地 0~20、20~40 和 40~60 cm 土层土壤 pH 空间变异最优模型分别适用 0 阶高斯模型、1 阶指数模型和 1 阶球状模型。克里格最优插值分析结果表明:该邓恩桉林地各层土壤 pH 整体空间分布趋势均为由西向东递减,最高值出现在西南部;各层土壤 pH 插值标准差较小,且标准差分布均呈现以南部和中部为中心、向东北方向逐渐增大的趋势。根据研究结果推测:该邓恩桉林地土壤酸化程度较严重,其土壤 pH 的空间分布受结构因素和随机因素的共同影响,而土壤 pH 插值标准差的分布特征可能与采样点的数量和设置有关。

关键词: 邓恩桉; 土壤 pH; 空间变异; 半方差分析; 插值标准差; 地统计学

中图分类号: S792.39; S153.4 文献标志码: A 文章编号: 1674-7895(2012)01-0014-06

Analysis on spatial variation of pH in soil of *Eucalyptus dunnii* forest TAN Yan¹, WU Cheng-zhen^{1, ①}, HONG Wei¹, CHEN Jian-zhong², XIAO Ying-zhong², CHEN Can¹ (1. Key Laboratory for Forest Ecosystem Process and Management of Fujian Province, Research Center of Eucalyptus, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China; 2. Forestry Bureau of Jianyang of Fujian Province, Jianyang 354200, China), *J. Plant Resour. & Environ.* 2012, 21(1): 14-19

Abstract: Taking soil of seven-year-old forest of *Eucalyptus dunnii* Maiden in Jianyang City of Fujian Province as the research object, the spatial variation regulation of pH in different soil layers was analyzed by using geostatistics. The results show that the soil pH of *E. dunnii* forest increases with the increasing of soil depth, the average of pH in 0-20, 20-40 and 40-60 cm soil layers is pH 3.57, pH 3.62 and pH 3.67 respectively, with a lower coefficient of variation of 3.90%, 3.93% and 4.05%, respectively. The value of $C_0/(C_0+C)$ of pH in 0-20, 20-40 and 40-60 cm soil layers is 0.389 6, 0.430 3 and 0.604 3, respectively, meaning that the soil pH of the forest has the moderate spatial autocorrelation. By K-S nonparametric test, the pH of different soil layers of the forest assumes the normal distribution. The integrative comparisons of prediction errors of different semivariograms with different trends show that the best model of spatial variation of pH in 0-20, 20-40 and 40-60 cm soil layers is 0-order Gaussian model, 1-order Exponential model and 1-order Spherical model, respectively. The results of Kriging optimal interpolation analysis show that the overall trend of spatial distribution of pH in different soil layers of *E. dunnii* forest is decreasing from the west to the east, and the highest value appears in the southwest. The interpolation standard deviation of pH in different soil layers is small, and all appear the

收稿日期: 2011-08-15

基金项目: 国家教育部博士点学科专项基金资助项目(200803890010); 国家自然科学基金资助项目(30671664); 福建省自然科学基金资助项目(2011J01072)

作者简介: 谭艳(1988—),女,湖南醴陵人,硕士研究生,主要从事植物地理生态学研究。

①通信作者 E-mail: fjwcz@126.com

spatial distribution trends of taking the south and middle as center, and increasing gradually toward the northeast. According to these research results, it is conjectured that the acidification of soil in the *E. dunnii* forest is more serious. And the spatial variation of pH in soil is influenced together by structural and random factors, while the distribution characteristics of interpolation standard deviation of pH in soil of the forest are probably related to quantity and setting of sample plots.

Key words: *Eucalyptus dunnii* Maiden; pH in soil; spatial variation; semivariance analysis; interpolation standard deviation; geostatistics

近年来,作为重要的速生丰产林树种之一,桉树(*Eucalyptus* spp.)的生产和种植越来越受到各级政府和学者的重视。邓恩桉(*Eucalyptus dunnii* Maiden)是一种抗寒、速生性桉树种类,其主要用途是作为纸浆原料^[1],目前已成为中国南方地区工业原料林基地的主要造林树种。邓恩桉为外来引种树种,耐寒性强,目前对该种的引种繁育、栽培技术及耐寒能力等方面已有大量的研究报道^[1-6],且有学者探讨了其林地土壤养分与土壤酶活性之间的关系^[7]。邓恩桉要求在土层深厚、水肥条件较好的立地条件下种植,否则生长速率会受到一定影响,因而,土壤条件决定了邓恩桉的生长质量,土壤养分状况也成为邓恩桉种植和培养过程中营养调控的重要依据。土壤pH能影响土壤养分有效性的发挥,是土壤的重要属性之一。因此,研究邓恩桉林地土壤pH的空间分布特征,对于邓恩桉的栽培管理及其种植地土壤生产力的提高具有重要意义。

目前,地统计学方法已被证明是研究土壤养分和其他属性空间变异规律的最佳方法之一^[8]。该方法可同时考虑到样本值的大小和样本的空间位置及样本的间距,弥补了经典统计学方法忽略空间方位的欠缺。近年来,地统计学方法的应用领域不断拓宽,从土壤到地质、矿业,从景观生态格局到生态学,从地下水水文过程到水资源等^[9],但应用地统计学方法研究林地土壤养分与土壤pH的相关报道较少,而关于邓恩桉林地土壤pH的空间变异分析研究尚未见报道。

作者以福建省建阳市7年生邓恩桉林地作为研究对象,测定了林地不同土层(0~20、20~40和40~60 cm)土壤的pH,运用ArcGIS 9.2软件的Geostatistic Analyst模块对土壤pH的空间变异特征及其分布格局进行了分析,以期掌握邓恩桉林地土壤pH的空间变异规律,为邓恩桉种植管理及林地长期生产力的维护奠定研究基础。

1 研究区概况和研究方法

1.1 研究区概况

建阳市地处福建省北部、武夷山南麓,地理坐标为东经117°31'~118°38'、北纬27°06'~27°43',总面积3 378.2 km²,丘陵山地面积占总面积的90.4%;土壤类型为红壤和黄壤,土层深厚肥沃。该地区属中亚热带季风性气候,光热资源丰富;冬短夏长、气候宜人,静风多、温差大,雨季集中;年平均气温18℃,年平均无霜期282 d,年平均降雨量1 700~2 400 mm,年均日照时数1 802 h,适宜动植物生长繁衍。

建阳市2004年开始先后引种邓恩桉3 000 hm²。本研究对象为建阳市潭城街道城关村7年生邓恩桉林地,林地土壤为红壤,造林面积6.6 hm²,种植密度为1 665株·hm⁻²,株距和行距分别为2和3 m;邓恩桉的平均胸径11.9 cm、平均树高13.1 m。林地前茬为马尾松毛虫(*Dendrolimus punctatus* Walker)重度危害树木枯死1 a后进行采伐的采伐迹地,属阳坡地、坡向为全坡,但立地质量较差,土层较厚,坡度在25°以下。

1.2 土壤样品采集与处理及pH测定方法

于2011年4月中旬在研究区内划出南北向长660 m、东西向长90 m的采样区,按照30 m等距划分网格,在网格的4个顶点各采集1个土样,理论上应有采样点92个,但是受地形和邓恩桉分布状况的影响,共设采样点65个(详见图1),基本涵盖了7年生邓恩桉的主要栽植区域。65个采样点的土壤均按0~20、20~40和40~60 cm分3层采集,共采集土壤样品195个,自然风干。

参照文献^[10]采用电位法测定土壤pH,测定时土和水的质量比为1:2.5,每个土样重复测定3次,结果取平均值。

1.3 数据分析与处理

分别对邓恩桉林地各层土壤的pH数据进行描

述性统计分析,统计特征值包括平均值、中位值、标准差、变异系数、偏度、峰度等。通过 ArcGIS 9.2 软件的地统计分析模块 Geostatistic Analyst 对邓恩桉林地各层土壤 pH 进行半方差函数理论模型相关参数和误差的检验分析,从而选出最优半方差函数理论模

型。在此基础上,通过 ArcGIS 9.2 地统计软件的普通克里格(Kriging)法对邓恩桉林地各层土壤 pH 进行空间局部插值分析和插值标准差分析,并以插值标准差分析评价空间插值效果。

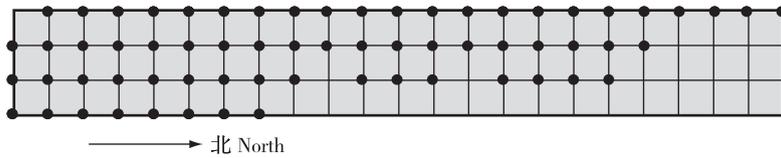


图 1 邓恩桉林地土样采样点分布图

Fig. 1 Distribution diagram of soil sample plots in *Eucalyptus dunnii* Maiden forest

2 结果和分析

2.1 邓恩桉林地土壤 pH 的描述性统计分析

对 7 年生邓恩桉林地各层土壤 pH 的描述性统计分析结果见表 1。由表 1 可见:0~20 cm 土层 pH 最小值为 pH 3.31,最大值为 pH 3.93;20~40 cm 土层 pH 最小值为 pH 3.30,最大值为 pH 3.86;40~60 cm

土层 pH 最小值为 pH 3.33,最大值为 pH 3.90。邓恩桉林地 3 层土壤 pH 的变幅较小,均小于 0.62,其平均值自上而下逐渐增大。分别对 0~20 和 20~40 cm 土层的 pH 以及 20~40 和 40~60 cm 土层的 pH 进行配对样本 *t* 检验,检验结果表明:双尾显著性水平均为 0.000,表明该邓恩桉林地 0~20 与 20~40 cm 土层的 pH 以及 20~40 和 40~60 cm 土层的 pH 均存在显著性差异。

表 1 7 年生邓恩桉林地不同土层土壤 pH 描述性统计分析结果

Table 1 Analysis results of descriptive statistics of pH in different soil layers of seven-year-old forest of *Eucalyptus dunnii* Maiden

土层/cm Soil layer	最大值 Maximum	最小值 Minimum	平均值 Mean	中位值 Median	标准差 Standard deviation	变异系数/% Coefficient of variation	偏度系数 Skewness coefficient	峰度系数 Kurtosis coefficient
0-20	pH 3.93	pH 3.31	pH 3.57	pH 3.58	0.14	3.90	0.11	-0.36
20-40	pH 3.86	pH 3.30	pH 3.62	pH 3.65	0.14	3.93	-0.41	-0.84
40-60	pH 3.90	pH 3.33	pH 3.67	pH 3.68	0.15	4.05	-0.34	-0.80

邓恩桉林地 0~20、20~40 和 40~60 cm 土层的土壤 pH 变异系数分别为 3.90%、3.93% 和 4.05%,变异幅度很小,说明该林地 3 层土壤的 pH 均属于弱变异^[11],并呈现随土层加深自上而下逐渐增大的趋势。对该邓恩桉林地 3 层土壤的 pH 分别进行非参数单样本 K-S 检验,结果表明:0~20、20~40 和 40~60 cm 土层土壤 pH 的 *P* 值分别为 0.909、0.523 和 0.710,各土层土壤 pH 均服从正态分布,满足地统计学分析要求。

2.2 邓恩桉林地土壤 pH 的半方差分析

利用 ArcGIS 9.2 软件的 Geostatistic Analyst 模块获得 7 年生邓恩桉林地各层土壤 pH 的空间变异半方差函数理论模型的相关参数和误差检验值(表 2),并

对 4 种半方差函数的理论模型(圆状模型 Circular model、球状模型 Spherical model、指数模型 Exponential model 和高斯模型 Gaussian model)在 0 阶、1 阶、2 阶、3 阶趋势效应下预测误差的各指标进行比较,筛选出最优半方差函数模型,最终分析确定该邓恩桉林地 0~20、20~40 和 40~60 cm 土层土壤 pH 空间变异的最优模型分别为 0 阶高斯模型、1 阶指数模型和 1 阶球状模型(表 2)。

半方差函数模型具有 4 个重要的参数,即块金值(C_0)、变程、基台值(C_0+C)和偏基台值。其中,块金值与基台值的比值称为块金效应,用以表明土壤属性的空间变异特征;根据该比值大小可将相关土壤属性划分为强空间相关、中等空间相关和弱空间相关 3 个

等级^[12]。供试的7年生邓恩桉林地0~20、20~40和40~60 cm 土层土壤 pH 的块金效应分别为0.389 6、0.430 3、0.604 3(表3),均位于0.25~0.75之间,说明该7年生邓恩桉林地土壤 pH 的空间相关性中等。

表2 7年生邓恩桉林地不同土层土壤 pH 的最优半方差模型预测误差

土层/cm Soil layer	趋势效应 Trend effect	理论模型 Theoretical model	预测误差 Prediction error				
			平均误差 ME	均方根误差 RMS	平均标准误差 ASE	标准平均误差 MSE	标准均方根误差 RMSE
0~20	0阶 0-order	高斯模型 Gaussian model	0.001 8	0.110 6	0.110 6	0.012 6	0.998
20~40	1阶 1-order	指数模型 Exponential model	-0.000 3	0.105 5	0.105 3	-0.000 8	1.005
40~60	1阶 1-order	球状模型 Spherical model	-0.000 2	0.115 2	0.112 1	-0.000 5	1.029

表3 7年生邓恩桉林地不同土层土壤 pH 最优半方差模型参数

Table 3 Parameters of the best semivariogram model of pH in different soil layers of seven-year-old forest of *Eucalyptus dunnii* Maiden

土层/cm Soil layer	趋势效应 Trend effect	理论模型 Theoretical model	块金值 C_0	基台值 C_0+C	块金效应 $C_0/(C_0+C)$	长轴变程/m Major range	短轴变程/m Minor range	各向异性比 Anisotropic ratio
0~20	0阶 0-order	高斯模型 Gaussian model	0.010 4	0.026 6	0.389 6	167.809	55.783 5	3.008 2
20~40	1阶 1-order	指数模型 Exponential model	0.006 7	0.015 6	0.430 3	151.968	75.539 4	2.011 8
40~60	1阶 1-order	球状模型 Spherical model	0.009 9	0.016 4	0.604 3	145.684	85.155 3	1.710 8

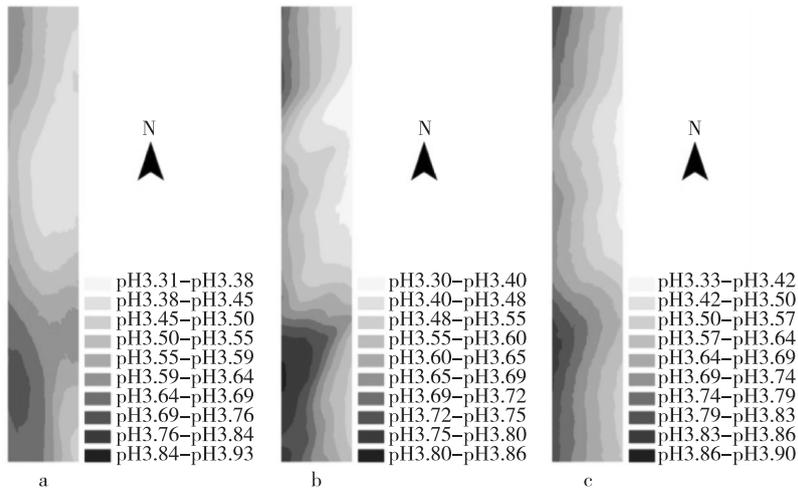
长轴变程和短轴变程分别是相关性消失最慢和最快方向的变程,经计算,该7年生邓恩桉林地不同土层土壤 pH 的长轴变程为145.684~167.809 m,短轴变程为55.783 5~85.155 3 m,也即不同土层土壤 pH 空间相关性消失的范围在55~168 m,而本研究的采样距离为30 m,因此,该采样尺度在变程以内,符合采样距离要求。长轴变程与短轴变程的比值称为各向异性比(Anisotropic ratio),其值接近或等于1时,空间异质性为各向同性,反之为各向异性。由表3可见:该7年生邓恩桉林地不同土层土壤 pH 的各向异性比均大于1,所以呈现明显的各向异性,符合空间插值的要求。

2.3 邓恩桉林地土壤 pH 的普通克里格插值及其标准差分析

由于该邓恩桉林地各层土壤 pH 数据经验证均符合正态分布,因此采用普通克里格法对7年生邓恩桉林地不同土层土壤 pH 进行了最优插值分析,并绘制不同土层土壤 pH 的空间分布图,结果见图2。由图2可见:该邓恩桉林地不同土层土壤 pH 等值线整体上既体现相似性,又体现出一定的差异性。不同土层土壤 pH 分布均呈现出带状分布,且带状分布的显著度随土壤深度的增加而增强。不同土层土壤 pH 的空间变异格局均呈现由西向东递减的趋势;0~20、20~40和40~60 cm 土层土壤 pH 分布格局相似,说明各层土壤 pH 之间的空间相关性极强。0~20 cm 土层土

壤 pH 最高值集中在西南方向的斑块区域,并向东北方向和东面逐渐减小,最小值出现在东北方向(图2-a);20~40和40~60 cm 土层土壤 pH 最高值均出现在西南侧和西北侧,并向东面呈波浪带状递减,且变化比较均匀,最低值均出现在东北方向(图2-b,c)。该林地20~40与40~60 cm 土层间土壤 pH 的分布格局相似度高于0~20与20~40 cm 土层之间的相似度。

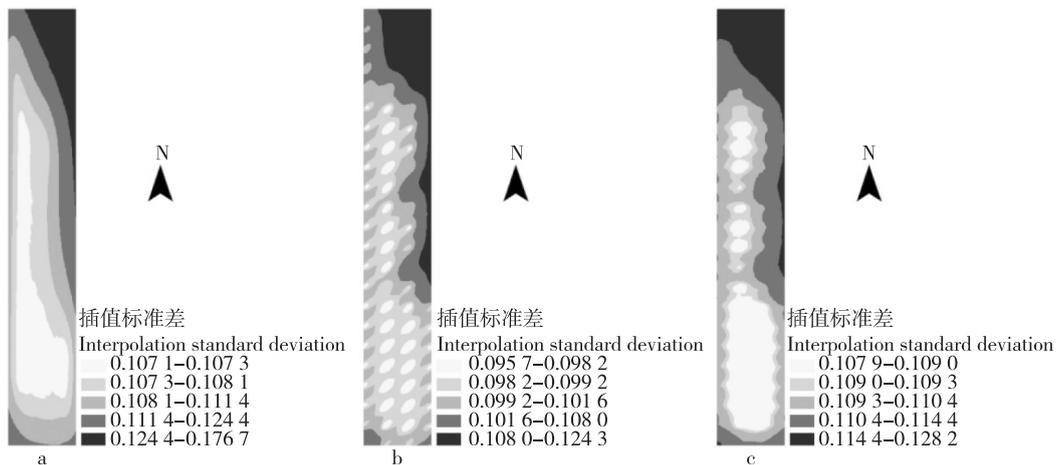
进一步分析该邓恩桉林地不同土层土壤 pH 经普通克里格插值分析之后产生的插值标准差的空间分布,结果见图3。由图3可见:该林地0~20、20~40和40~60 cm 土层土壤 pH 插值标准差的变化范围分别为0.107 1~0.176 7、0.095 7~0.124 3、0.107 9~0.128 2,pH 插值标准差较小,表明各土层土壤 pH 插值结果较好。由图3还可见:该邓恩桉林地不同土层土壤 pH 的插值标准差均呈现出一定的规律性,大体上以南部和中部为中心,向东北方向逐渐扩散增大,在东北部达到最大值。0~20 cm 土层土壤 pH 插值标准差的空间分布以低值带为中心向四周增大(图3-a);20~40 cm 土层土壤 pH 插值标准差的空间分布出现许多低值小斑块,插值标准差围绕低值小斑块向四周增大,并将小斑块连在一起,形成1个与采样点布局相似的网格(图3-b)。该林地20~40与40~60 cm 土层间土壤 pH 插值标准差分布图相似度较高(图3-b,c)。



a: 0~20 cm 土层 0-20 cm soil layer; b: 20~40 cm 土层 20-40 cm soil layer; c: 40~60 cm 土层 40-60 cm soil layer.

图 2 7 年生邓恩桉林地不同土层土壤 pH 空间分布图

Fig. 2 Spatial distribution maps of pH in different soil layers of seven-year-old forest of *Eucalyptus dunnii* Maiden



a: 0~20 cm 土层 0-20 cm soil layer; b: 20~40 cm 土层 20-40 cm soil layer; c: 40~60 cm 土层 40-60 cm soil layer.

图 3 7 年生邓恩桉林地不同土层土壤 pH 插值标准差空间分布图

Fig. 3 Spatial distribution maps of interpolation standard deviation of pH in different soil layers of seven-year-old forest of *Eucalyptus dunnii* Maiden

3 结论和讨论

经统计分析,供试 7 年生邓恩桉林地 0~20、20~40 和 40~60 cm 土层土壤 pH 均值分别为 pH 3.57、pH 3.62 和 pH 3.67,变化幅度分别为 pH 3.31~pH 3.93、pH 3.30~pH 3.86 和 pH 3.33~pH 3.90,变异系数分别为 3.90%、3.93% 和 4.05%,说明随土层深度的增加土壤的酸性减弱,pH 的空间变异增强。经 K-S 检验,研究区域内的土壤 pH 服从正态分布。

陈朝阳^[12]的研究结果显示:建阳市植烟区土壤 pH 的变幅为 pH 3.96~pH 7.0,且土壤有酸化的趋势;而邓恩桉林地的土壤 pH 小于植烟区的土壤 pH,说明邓恩桉林区土壤酸化程度比植烟区更严重。导致邓恩桉林地土壤酸化严重的因素可能有 4 个:一为酸雨的影响,建阳市为福建省内受酸雨影响最为严重的城市之一,酸雨的酸度小于 pH 4.5^[13];二为人工施肥的影响,研究区土壤在造林前与造林过程中经过多次施肥;三为种植邓恩桉的影响,有研究表明桉树的种植会使土壤 pH 降低^[14];四为造林地前茬的影响,该邓

恩桉林地造林前茬为马尾松 (*Pinus massoniana* Lamb.) 林,马尾松生长过程中从土壤中吸收大量营养物质,导致土壤酸化,若马尾松死后枝体归还土壤,将使土壤酸化状况得到一定的缓解,但若将马尾松从林地中大量移走,相当于将土壤中的盐基离子移走,马尾松被移走的越多,土壤酸化效应越明显^[15]。供试的邓恩桉林地为马尾松受虫害后 1 a 被人工采伐的林地,因马尾松被采伐使大量盐基离子无法归还土壤,因此无法使土壤酸化状况得到缓解。由于邓恩桉林地的土壤 pH 较低,因此在轮作种植抗酸性弱或对土壤碱性要求较高的植物时,应注意对林地土壤 pH 的改良。

地统计学分析结果表明:邓恩桉林地 0~20、20~40 和 40~60 cm 土层的土壤 pH 块金效应值分别为 0.389 6、0.430 3 和 0.604 3,均具有中等的空间相关性,这可能与林地土壤类型和经营措施等因素有关。通常空间相关性越大,表明土壤属性主要由结构因素决定,如成土母质、地形、土壤类型等;反之则表明土壤属性主要由随机因素决定,如施肥等人为干扰活动。邓恩桉林地土壤 pH 的空间相关性处于中等水平,说明该林地的土壤属性是由结构因素和随机因素共同决定的。邓恩桉林地土壤块金效应值自上而下逐渐变大,土壤 pH 的空间相关性越来越强,说明随土层深度的增加,土壤 pH 受随机因素的影响不断减小,而受结构因素的影响不断增大。具体而言,在该邓恩桉林地范围内,结构因素主要是地形等,随机因素主要是施肥管理,即邓恩桉林地各层土壤 pH 受土壤类型、成土母质、地形和人工施肥等因素的综合影响,且自上而下受人为干扰的影响越来越小。

经过对 7 年生邓恩桉林地 3 层土壤 pH 的 0、1、2、3 阶的 4 个半方差函数模型的预测误差进行比较,获得的不同层次最优半方差函数模型分别为:0~20 cm 土层土壤 pH 适用 0 阶高斯模型;20~40 cm 土层土壤 pH 适用 1 阶指数模型;40~60 cm 土层土壤 pH 适用 1 阶球状模型。对 7 年生邓恩桉林地土壤 pH 进行普通克里格插值分析并绘制空间分布图,结果表明:0~20、20~40 和 40~60 cm 土层的土壤 pH 均由西向东递减,最高值出现在西南部;而林地土壤 pH 的插值标准差呈现由南部和中部向周围及东北部逐渐增大的分布规律。赵汝东等^[16]认为:离采样点越近,插值标准差越小,反之则插值标准差越大越不可信。因

此,在采样点周围的插值标准差较小,离采样点较远的位置插值标准差较大。本研究中,邓恩桉林地各层土壤 pH 插值标准差的空间分布图的表征规律与赵汝东等^[16]的研究结果相一致。另外,插值标准差大小还与采样点的数量及采样点的设置有关,受地形影响在北部设置的采样点较少,越往南部采样点越多,因此中南部位置的插值标准差较小,精度较高。有关采样点数量与采样点设置对邓恩桉林地土壤 pH 插值的影响及其机制还有待于进一步研究。

参考文献:

- [1] 燕丽萍,夏 阳,毛秀红,等. 邓恩桉的组织培养[J]. 林业科学, 2011, 47(5): 157-161.
- [2] 宗亦臣,郑勇奇,常金财. 邓恩桉国内引种和繁育技术研究进展[J]. 中国农学通报, 2010, 26(5): 82-86.
- [3] 范海兰,洪 伟,陈建忠,等. 邓恩桉引种区极端气温的起伏型时间序列分析[J]. 河南农业大学学报, 2008, 42(4): 391-393.
- [4] 宋建英. 邓恩桉的组织培养和植株再生[J]. 林业科学, 2010, 46(6): 138-145.
- [5] 郭祥泉,洪 伟,吴承祯,等. “t”检验法则在闽北抗寒速生邓恩桉优株筛选的应用[J]. 应用与环境生物学报, 2009, 15(3): 385-389.
- [6] 张宁南,吴 炜,徐大平,等. P 肥对邓恩桉生长与叶片养分状况的影响[J]. 中南林业科技大学学报, 2010, 30(6): 32-37.
- [7] 陈少杰. 邓恩桉林地土壤酶活性与土壤养分关系研究[J]. 安徽农学通报, 2009, 15(15): 171-183.
- [8] GOOVAERTS P. Geostatistics in soil science: state-of-the-art and perspectives[J]. Geoderma, 1999, 89(1/2): 1-45.
- [9] 郭怀成,周 丰,刀 谔. 地统计方法学研究进展[J]. 地理研究, 2008, 27(5): 1191-1202.
- [10] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [11] 王绍强,朱松丽,周成虎. 中国土壤土层厚度的空间变异性特征[J]. 地理研究, 2001, 20(2): 161-169.
- [12] 陈朝阳. 南平市植烟土壤 pH 状况及其与土壤有效养分的关系[J]. 中国农学通报, 2011, 27(5): 149-153.
- [13] 赵卫红. 福建省城市酸性降水特征及变化趋势[J]. 环境科学与技术, 2006(9): 41-43.
- [14] 理永霞,罗 微,茶正早,等. 桉树幼苗对土壤养分及 pH 的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2008(4): 77-78.
- [15] 许中坚,刘广深,刘维屏. 人为因素诱导下的红壤酸化机制及其防治[J]. 农业环境保护, 2002, 21(2): 175-178.
- [16] 赵汝东,孙焱鑫,王殿武,等. 北京地区耕地土壤有机质空间变异分析[J]. 土壤通报, 2010, 41(3): 552-557.

(责任编辑: 佟金凤)