植物营养与肥料学报 2006,12(3):420－425
Plant Nutrition and Fertilizer Science

奉新毛竹林土壤养分空间变异性研究

郭晓敏[1]，牛德奎[1]，郭 熙[1]，陈 防[2*]，张过师[1]，张 斌[1]，胡冬南[1]
(1 江西农业大学，江西南昌 330045；2 中国科学院武汉植物园 PPI/PPIC 武汉办事处，湖北武汉 430074)

摘要：利用地统计学的半方差函数，定量研究了奉新县平衡施肥毛竹林的土壤养分空间变异特征。结果表明，毛竹林土壤养分存在半方差结构，多数为球状模型。奉新毛竹林土壤的变程为 32 ～398 m，取样距离 15 ～20 m，能满足毛竹林土壤空间变异评价的要求。N、P、K 等养分的空间相关性小，人为经营、施肥等措施对土壤速效 N、P、K 的影响大于 Ca、B、Fe、Mg 等养分。奉新毛竹林土壤养分的分数维值排列顺序为：Cu > Mn > 全 P > Zn > P > N > Fe > K > Mg > S > OM > Ca > B > 全 K > 全 N。施肥时间长对于养分的空间分布均匀性有调和、促进作用。毛竹林土壤养分结构性变异大于随机变异，土壤内在属性(土壤矿物和地形)比人为因素(栽培管理水平和施肥措施)的影响大。

关键词：毛竹；平衡施肥；土壤养分；空间变异性
中图分类号：S795；S158.3　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1008-505X(2006)03-0420-06

Study on spatial variability of soil nutrients for Moso bamboo forest in Fengxin

GUO Xiao-min[1], NIU De-kui[1], GUO Xi[1], CHEN Fang[2], ZHANG Guo-shi[1], ZHANG Bin[1], HU Dong-nan[1]
(*1 Jiangxi Agric. Univ., Nanchang 330045, China; 2 Inst. of plant, ASC, Wuhan 430074, China*)

Abstract: The characteristics of soil nutrition spatial variability have been quantitative studied using semi variogram of geostatistics function in Moso bamboo (*Phyllostachys heterocyla* cv. Pubescens) forest of Fengxin. The results showed that the soil nutrient had semi-variance structure in bamboo forest, and most of them were spherical model. The soil variance distance was ranged between 32 m and 398 m in Fengxin bamboo forest. Sample distance ranged from 15 m to 20 m can satisfy the requirement of the soil spatial variance evaluation of bamboo forest. The spatial correlation of N, P, K was low, and the influences from man-made interference, fertilization and some other measures on soil available N, P and K were larger than soil Ca, B, Fe and Mg. The order of fraction value of Fengxin bamboo forest soil nutrition was: Cu > Mn > total P > Zn > P > N > Fe > Mg > S > OM > Ca > B > total K > total N. Long-term fertilization could increase the homogenization of soil nutrient spatial distribution. The variance of soil nutrient structure was bigger than the random variance, and the influence of the internal nature on soil (soil minerals and topography) was bigger than the anthropic factors (cultivate management level and fertilizer measures).

Key words: moso bamboo; balance fertilization; soil nutrient; spatial variability

林地土壤林况复杂，地形破碎，存在大尺度或小尺度上的土壤空间变异性，林地土壤养分的时空变异则更是土壤空间变异性最具体的体现。随着地理信息系统技术的快速发展和广泛应用，一些现代化先进的统计方法和空间分析方法越来越多地被应用于土壤养分的空间变异研究，地统计学就是一种能够有效地揭示属性变量在空间上的分布、变异和相关特征的优良方法[1-3]。

现代林业的土壤营养管理必须以林地养分的现状和变异为基础，但目前对林地土壤的空间变异性研究不多，特别是针对集约经营林地土壤养分空间变异的研究更有待深入。因此，研究毛竹林土壤养

收稿日期：2004-05-11　　**修改稿收到日期**：2005-05-08
基金项目：江西省科技厅学术带头人项目[(2003)249-2]；加拿大钾磷研究所项目(jiangxi-16)资助。
作者简介：郭晓敏(1956—)，女，江西遂川人，博士，教授，主要从事林木营养和退化生态系统恢复研究。* 通讯作者

分的空间变异性将有助于了解林地土壤养分地域上的差异，做到有针对性进行集约经营管理和平衡施肥；进而为探讨发展毛竹林的变量精准施肥理论和技术，建立毛竹林土壤养分管理系统提供科学依据和理论基础。本研究选择奉新毛竹林平衡施肥试验林地，利用地统计学的半方差函数，研究一定集约经营条件下的竹林土壤空间变异特征，确定其空间变异尺度，分析竹林土壤养分变异的生态过程、原因和施肥的合理性，意在全面了解林地土壤养分的空间特征，为地统计学方法在林业领域的应用提供有益的参考。

1　材料与方法

奉新县地处赣北山区，属中亚热带湿润季风气候，是江西省木材、竹材的主要产区。试验地设置在奉新县的毛竹中心分布区，海拔高度 300～500 m，土壤为花岗岩母质发育而成的黄红壤，土层厚 40 cm 以上，平均坡度 8～16°，土壤 pH 值在 4.2～5.5 之间，经营目标为笋材两用林[4-8]。1996～2003 年进行毛竹平衡施肥试验并开展土壤养分空间变异性研究。

在平衡施肥 4 年后的 31 个竹林试验地块内沿坡面按等高线，每隔 15～20 m 设一样点，水平距离相隔 20 m。于 2000 年 12 月（大年出笋前），共采集 31 个土样，取土深度为 0—40 cm 的土层，风干后待测。土壤速效养分采用土壤养分状况系统研究法[9]进行分析，土壤全量养分用常规方法分析[10]。

数据统计包括最大值、最小值、平均值、中值、标准差、方差、变异系数等的计算[11]。地统计学中的半方差函数及其模型、分数维计算的软件平台是 $GS^+3.1$。

2　结果与分析

2.1　竹林土壤养分的描述性统计分析

奉新竹林 2000 年采集的 31 个土壤样品的养分丰缺程度结果见表 1。

表 1　奉新竹林土壤养分描述性统计分析及正态分布检验表

Table 1　Criteria and concentration of bamboo soil nutrients in Fengxin

项目 Item	pH	OM (%)	K	NH_4	P	Ca	Mg	B	S	Cu	Fe	Mn	Zn	Tot.N	Tot.P	Tot.K
			(μg/mL)											(%)		
最大值 Max	5.6	1.7	105.6	15.1	25.8	961.9	155.5	0.29	20.9	3.2	376.4	7.8	2.1	0.149	0.102	3.02
最小值 Min	4.2	0.8	11.7	8.4	2.5	320.6	96.0	0	6.6	0.9	33.6	1.6	1.2	0.074	0.033	2.34
平均值 $\bar{X}$	4.7	1.3	43.9	10.9	6.5	545.6	113.9	0.03	11.9	1.5	118.4	4.4	1.6	0.11	0.05	2.68
中值 Mid	4.5	1.3	39.1	10.9	4.8	501.0	110.6	0	10.6	1.3	99.0	4.2	1.7	0.11	0.05	2.69
标准差 *SD*	0.4	0.2	26.3	1.71	5.7	176.7	14.3	0.08	3.9	0.6	65.5	1.5	0.3	0.024	0.013	0.18
CV（%）	8.6	18.9	60.0	15.7	87.6	32.4	12.6	257.0	32.5	40.5	55.4	33.9	16.5	18.2	20.0	6.7
偏斜 Deflexion	3.3	1.4	11.0	0.2	25.8	8.2	2.9	100.0	10.7	15.1	16.4	4.6	-3.7	-2.7	3.9	-0.5

注（Note）：OM—有机质。

为了检验土壤养分分布的不同偏斜程度，直观地表示土壤养分分布的偏斜量。引入偏斜系数 P，即中值偏斜平均百分数[12-13]。

$$P = (V - M) / V \times 100\%$$

式中：V 为平均值，M 为中值。

P 值的 5% 为分界线，大于 5% 为偏斜，小于 5% 为不偏斜。当土壤养分服从正态分布时，中值等于平均值。对奉新竹林施肥试验区土壤不同养分种类的统计量分析结果（表 1）表明，试验地的土壤养分分布有不同程度的偏斜，即可将土壤养分分为两大类，奉新竹林土壤偏斜的养分为：有效 K、P、Ca、B、S、Cu、Fe 等元素，铵态 N、Mn、Zn、pH、有机质、Mg 和全量 N、P、K 均为不偏斜养分。

奉新竹林土壤中全 K 的统计变异最小为 6.7%；其次是 pH 和有效 Mg，变异系数较小；有机质、铵态 N、有效 Zn、全 N、全 P，它们的变异接近，变异系数中等；其余养分变异系数均高达 30% 以上。除掉因测定含量痕量导致有效 B 的无效数据外，有效 P 和有效 K 变异系数最大，分别达到 87.6% 和 60%，其含量的最大值与最小值相差 10 倍。

分析竹林土壤养分的分布不难发现，造成土壤养分分布偏斜的根本原因是土壤性状的变异性。从奉新施肥 4 年后的竹林土壤养分的变异性可以看出，在竹林集约经营管理中通过施肥补充的营养元素一般变异性较大。调查结果表明，在偏斜的养分中，除 B、Cu、Fe、Mn 在该地区施用较少外，其它几种

元素均有施用，其中硫(S)元素则是通过施用过磷酸钙等含硫肥料带入的。通过对营养元素的变异分析还发现，营养元素施用量越大，造成偏斜的程度越严重。所以，在研究区域内，土壤养分变异来源主要是集约经营的施肥措施，由于施肥使得土壤养分变得不均匀。造成竹林土壤营养元素偏斜的另一个主要原因则是林地地形的破碎及坡度。由于南方多雨，集约经营竹林人为干扰大，水土流失严重，上坡养分流失多，下坡养分相对富集，从而造成养分偏斜和变异增大。这些变异一方面会导致在养分含量较低的竹林土壤施肥时毛竹难以达到高产的目的；另一方面，在竹林土壤养分较高的区域，则造成肥料浪费，环境污染，毛竹生产效益下降。因此，对土壤中变异性较大、施肥较多、施肥历史较长的营养元素，在制定平衡施肥配方时，不仅要考虑林地的平均养分含量，还应考虑土壤养分的变异状况，以增加平衡施肥的准确性。

2.2 竹林土壤养分空间变异的半方差分析

2.1.1 竹林土壤养分的空间自相关距 根据半方差公式计算出奉新竹林土壤15种养分的半方差变异函数值。各养分的空间变异特征参数(表2)表明，奉新竹林土壤大多数养分的空间分布存在着半方差结构，经半方差模型的最优拟合，其最佳拟合模型大多数为球状模型，少数为指数模型，理论变异函数除速效Cu、Fe和全P外，其余12种养分与试验变异函数拟合较好。相关系数在0.416～0.871之间，RSS(残差检验)达到显著水平，说明理论模型较好地反映了这几种土壤养分的空间结构特征。

表2 奉新竹林土壤养分半方差特征参数表

Table 2 Semi-variance parameters of soil nutrients in bamboo forest of Fengxin

项目 Item	块金系数 (C_0)	基台值 ($C+C_0$)	结构方差/基台值 $C/C+C_0$	最大相关距离 Range (m)	模型 Model	相关系数 R^2	残差 RSS
OM	0.001	1.038	0.999	50.4	Spherical	0.511	0.459
NH_4	0.117	1.037	0.887	39.2	Spherical	0.718	0.075
P	0.076	1.220	0.938	43.2	Spherical	0.414	0.490
K	0.001	1.082	0.999	36.1	Spherical	0.868	0.041
S	0.025	1.011	0.975	42.5	Spherical	0.533	0.254
Ca	0.502	1.423	0.647	248.4	Exponent	0.848	0.079
Mg	0.327	1.177	0.722	84.9	Exponent	0.871	0.038
Fe	0.257	1.369	0.812	95.5	Spherical	0.224	2.318
Mn	0.148	1.058	0.860	39.7	Spherical	0.496	0.148
Zn	0.022	1.070	0.979	42.2	Spherical	0.533	0.198
Cu	0.001	0.930	0.999	32.1	Spherical	0.126	1.109
B	0.001	1.348	0.999	99.3	Exponent	0.416	1.045
Tot. N	0.016	1.151	0.986	74.4	Spherical	0.456	0.879
Tot. P	0.003	1.178	0.997	50.4	Spherical	0.303	0.848
Tot. K	0.370	2.087	0.823	397.8	Spherical	0.845	0.177

变程(Range)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。所以，变程提供了研究某种属性相似范围的一种测度。在奉新施肥竹林研究区域内，各种养分元素都有较大的空间自相关距，但元素之间存在很大差异。变程从最小的Cu(32 m)到最大的全K(398 m)，在此范围内变化，相差12倍，说明影响这15种土壤养分的生态过程在不同的尺度上起作用，其空间依赖性大小可以排列为：全K > Ca > B > Fe > Mg > 全N > 全P > OM > P > S > Zn > Mn > N > K > Cu。其中，N、K、P、S、Mn、Zn、Cu的空间自相关距离比较接近，都在40 m左右，而全K、Ca、B、Fe、Mg则高于其他元素，具有较大的变程。

这种结果表明，Ca、B、Fe、Mg在奉新竹林试验地内的含量分布趋于大块状变异。速效N、P、K等养分的空间相关性小，空间变异大于Ca、B、Fe、Mg。人为干扰、施肥等措施对土壤速效N、P、K的影响大于Ca、B、Fe、Mg等养分。同时也从土壤养分空间变异的角度再一次证明，通过施肥补充的主要营养元素(N、P、K)变异性较大。另外也说明所采用的取样距

离(20 m)已完全能满足竹林土壤空间变异评价的要求。

分析奉新竹林地土壤养分的空间变异原因，我们认为，一方面，竹林坡度较陡，竹林集约经营人为干扰大，常带来严重的水土流失，导致土壤表层养分流失。因此，引起竹林上下坡位土壤养分空间变异结构大小差异的因素与侵蚀有关；另一方面，有效N、P、K均是毛竹生长需要的重要营养元素，但由于土壤对P、K的吸附固定大，因此，植物对N的吸收利用(需求)明显大于对P、K的吸收。研究区域不同，竹林密度和立竹度的空间分布格局将影响土壤N的分布。此外，N、K在土壤中的易移动特性，使其易流失或淋溶损失。因为研究区域地形破碎，随机性因素如侵蚀的发生及侵蚀强度的空间差异；以及平衡施肥试验导致各试验小区土壤利用方式的镶嵌分布，引起毛竹以及土壤N、K肥使用量的空间差异，均会造成土壤N素和K素的空间自相关减弱，致使土壤有效N和有效K的空间相关尺度减小。

与土壤N、K、P相比，由土壤流失及淋溶损失的土壤有机质较少，有机质表现出中等范围的空间自相关。而全K在土壤中的存在形式相对较稳定，不易流失，更倾向于土壤母质中所含矿物的控制，土壤全K的空间自相关范围大，其变程也大。

2.2.2　竹林土壤养分的块金系数与结构方差　土壤变异的程度取决于土壤形成过程以及它在空间和时间上的平衡。土壤母质、侵蚀、气候及生物活动(包括人类)上的差异往往是使土壤性质产生变异的主要因素。在土壤空间变异的分析中，把空间变异参数中的块金系数和结构方差可以分别理解为土壤养分受人为因素和自然因素即非区域因素和区域因素的影响程度。C_0 为块金值是变异函数在原点处的数值，表示由实验误差和小于最小取样尺度引起的随机变异；$C_0 + C$ 为基台值，通常表示系统内的总变异，包括结构性变异和随机性变异，基台值越高，表示系统总的空间异质性越高；而块金值和基台值之比反映块金方差占空间异质性变异的大小。如土壤肥力性质的空间相关性就可以根据其比值大小进行划分，比值小于0.25时，空间关系强；比值在0.25～0.75之间时，空间相关性中等；比值大于0.75时，空间相关性弱。由表2可知，奉新竹林土壤几种速效养分的 $C/(C_0 + C)$ 呈现 K = OM = Cu = B > 全P > 全N > Zn > S > P > N > Mn > 全K > Fe > Mg > Ca 的趋势。有机质和有效K、Cu、B最大，达到0.999，而Ca、Mg、Fe、全K较小，分别为0.647、0.722、0.812、0.823，这种结果说明土壤中的有机质、有效K、Cu、B、全P、全N、Zn、S、P和N、Mn这些元素的变异除了来自施肥等人为因素外，也来自土壤母质、气候、侵蚀等非人为的区域性因素。

对奉新竹林土壤主要养分的分析还发现，速效P的随机变异为6.2%，其结构性变异(由空间自相关引起)占93.8%。两种空间异质性在速效N中占11.3%和88.7%，在速效K中占1%和99.9%；15种土壤养分的空间变异性中结构性变异均大于随机变异，其比值在64.7%～99.9%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和格局。这种空间变异特征应与竹林施肥时间长短有直接关系，与大多数农田土壤的土壤养分空间变异结论相反[12-14]。林地土壤养分的空间异质性中结构性变异均大于随机变异，而且其比值较大，这一方面说明了农田与林地养分变异的影响因子大不相同，林地土壤内在属性如土壤矿物和地形的影响较大，在短时间内甚至超过人为因素如栽培管理水平和施肥措施的影响。另一方面，也表明林地养分变化规律受多因子综合影响，其变化规律比农田更复杂。然而，随着经营水平的提高和施肥措施的采用，其随机变异必将也会相应增大，奉新竹林土壤施肥所添加养分的空间异质性特征就充分证明了这一点。因此，对于高度集约经营竹林的营养管理也应该根据对林地土壤养分的评价，考虑和调整养分的投入，进而发展竹林的变量施肥和精准施肥。

2.3　竹林土壤养分空间变异的分数维分析

与变异系数不同，分数维值是表征养分在空间上分布均一程度的一个指标。分数维方法量化了各种土壤属性在地理空间上的均一程度，是一种定量分析，因而可以把不同区域不同地块乃至不同地区的土壤属性相互比较，使我们对一些自然现象可以有更加充分地了解[15]。概括地说，分形或分数维就是没有特征尺度的自相似结构。分数维值的大小是事物复杂程度的一种量度，由于土壤是一个不均匀的复合体，它与母质、气候、水文、地形和生物等诸多因素相互作用，导致土壤特性参数在空间上表现很不规则，呈随机性，这种情形适用于用分数维布朗运动或函数这类随机分形来度量[16-17]。

分数维D表征样本之间的结构性。D值越小，表示样本之间土壤特性值的差异越大，即均一程度越差；相反，D值越大，表示样本之间土壤特性值的差异越小，即均一程度越好[18]。奉新竹林土壤分数维分析结果列于表3。

表3 奉新竹林土壤养分分数维分析结果

Table3 Fractal analysis of soil nutrients in bamboo forest of Fengxin

项目 Item	分形维数 D	决定系数 R^2	标准差 SD
OM	1.853	0.659	0.504
NH_4	1.898	0.610	0.574
P	1.902	0.293	1.117
K	1.892	0.581	0.607
S	1.862	0.500	0.703
Ca	1.848	0.855	0.288
Mg	1.887	0.786	0.372
Fe	1.898	0.121	1.929
Mn	1.942	0.220	1.382
Zn	1.911	0.364	0.954
Cu	1.957	0.024	4.746
B	1.812	0.491	0.698
Tot. N	1.744	0.636	0.499
Tot. P	1.916	0.145	1.755
Tot. K	1.799	0.720	0.424

决定系数(R^2)表明了对各种理化形状分数维的拟合情况。可以看出,对奉新竹林土壤养分的拟合程度与养分种类有很大关系,R^2 从最小 Cu 的 0.024 到最大 Ca 的 0.855,其中全 K、Mg 和 Ca 的拟合比较好,而 Cu、Fe、P 的拟合程度相对较差。奉新竹林土壤养分的分数维值排列顺序为:Cu > Mn > 全 P > Zn > P > N > Fe > K > Mg > S > OM > Ca > B > 全 K > 全 N。其中,分数维值最高的是 Cu、Mn 和全 P,分别达到 1.957、1.942 和 1.916,也就是说这三种养分与其它养分相比在整个林地上的空间分布更加均匀些;分数维最低的养分元素是 B、全 K、全 N,它们的 D 值分别是 1.812、1.799、1.744,说明这几种元素与其他养分相比在整个林地上的分布较为混乱[19-20]。

从整体上看,奉新竹林土壤养分的半方差与间距双对数的拟合程度较好,且竹林土壤各类养分的空间分布均匀性有趋好倾向,表明连续施肥对于养分的空间分布均匀性有调和、促进作用。

3 结论

1)奉新竹林土壤养分分布有不同程度的偏斜。土壤偏斜的养分为:有效 K、P、Ca、B、S、Cu、Fe 等元素。

2)奉新竹林土壤有效 P 和有效 K 变异系数达到 87.6% 和 60%,pH 和全 K 的变异系数最小,造成土壤养分分布偏斜的根本原因是土壤性状的空间变异性。竹林集约经营管理中通过施肥补充的营养元素变异性较大。营养元素施用量越大,造成偏斜的程度越严重,故施肥是造成土壤养分变异的主要原因。在制定平衡施肥配方时,应进行适当的调整,不仅要考虑林地的平均养分含量,还应考虑土壤养分的空间变异状况,以增加平衡施肥的准确性。

3)施肥竹林土壤养分存在着半方差结构,它们的最佳拟合模型大多数为球状模型。其中速效 N、P、K 等养分的空间相关性小,人为干扰、施肥等措施对土壤速效 N、P、K 的影响大于其它养分。取样距离(20 m)已完全能满足竹林土壤空间变异评价的要求。

4)奉新竹林土壤养分的空间变异性中结构性变异均大于随机变异,说明土壤区域因素如土壤矿物和地形对土壤养分变异的影响较大,但随着经营水平的提高和施肥措施的采用,非区域因素带来的随机变异也会相应增大。因此,对于集约经营竹林的营养管理应该根据林地土壤养分变异的状况,考虑和调整养分的投入,进而发展竹林的变量施肥和精准施肥。

5)奉新竹林土壤养分的分数维值排列顺序为:Cu > Mn > 全 P > Zn > P > N > Fe > K > Mg > S > OM > Ca > B > 全 K > 全 N。施肥时间长对于养分的空间分布均匀性有调和、促进作用。

参考文献:

[1] 王军,傅伯杰,邱扬,等.黄土高原小流域土壤养分的空间异质性[J].生态学报,2002,22(8):1173-1178.
Wang J, Fu B J, Qiu Y *et al*. Spatial heterogeneity of soil nutrients in a small catchment of the Loess Plateau [J]. Acta Ecologica Sinica, 2002, 22(8): 1173-1178.

[2] 周慧珍,龚子同.土壤空间变异性研究[J].土壤学报,1996,33(3):232-241.
Zhou H Z, Gong Z T. Study on soil spatial variability [J]. Acta Pedologica Sinica, 1996, 33(3): 232-241.

[3] 许明祥,刘国彬.黄土丘陵区刺槐人工林土壤养分特征及演变[J].植物营养与肥料学报,2004,10(1):040-046.
Xu M X, Liu G B. The characteristics and evolution of soil nutrient in artificial black locust (Robinia pseudoacacia) forest land in the hilly Loess Plateau [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2004, 10(1): 040-046.

[4] 郭晓敏,牛德奎,杜天真,等.毛竹林平衡施肥技术及效应研究初报[J].经济林研究,1999,17(3):34-36.
Guo X M, Niu D K, Du T Z *et al*. Preliminary studies on the effectiveness and technologies of the balanced fertilization in moso bamboo forest [J]. Economic Forest Researches, 1999, 17(3): 34-36.

[5] 胡冬南，郭晓敏，刘细燕，等．笋用林土壤养分限制因子的研究[J]．江西农业大学学报，2001，23(1)：105-108.
Hu D N, Guo X M, Liu X Y *et al*. A study on the limiting nutrient factors in shoot-utilizing bamboo soil[J]. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis, 2001, 23(1): 105-108.

[6] 郭晓敏，牛德奎，杜天真，等．毛竹林平衡施肥持续效应研究初报[J]．江西农业大学学报，2002，24(6)：786-790.
Guo X M, Niu D K, Du T Z *et al*. Preliminary studies on the sustained effectiveness of the balanced fertilization in moso bamboo forest [J]. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis, 2002, 24(6): 786-790.

[7] 郭晓敏，牛德奎，杜天真，等．平衡施肥对毛竹笋产量的影响效应研究[J]．江西农业大学学报，2003，25(1)：48-53.
Guo X M, Niu D K, Du T Z *et al*. A study on the effects of balance fertilization on bamboo shoot yield [J]. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis, 2003, 25(1): 48-53.

[8] 胡冬南，陈立新，李发凯，等．配方施肥对毛竹笋竹的影响[J]．江西农业大学学报，2004，26(2)：196-199.
Hu D N, Chen L X, Li F K *et al*. Effect of optimun amount and proportion of fertilizer on bamboo shoots and timbers [J]. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis, 2004, 26(2): 196-199.

[9] 金继运．土壤养分状况系统研究法及其在我国的初步应用[M]．北京：中国农业科技出版社，1992. 1-14.
Jin J Y. A systematic approach for soil nutrient status study and its application in China [J]. Beijing: China Agricultural Scientech Press, 1992. 1-14.

[10] 张万儒．森林土壤分析方法(GB 7830 —7892-87) [M]．北京：中国林业出版社，1987.
Zhang W R. Analysis of forestry soil(GB 7830 —7892-87) [M]. Beijing: China Forestry Press, 1987.

[11] 贾乃光．数理统计[M]．北京：中国林业出版社，1980.
Jia N G. Mathematic statistic[M]. Beijing: China Forestry Press, 1980.

[12] 白由路，金继运，杨俐苹，何萍．农田土壤养分变异和施肥推荐[J]．植物营养与肥料学报，2001，7(3)：130-133.
Bai Y L, Jin J Y, Yang L P, He P. Variability of soil nutrients in field and fertilizer recommendation[J]. Plant Nurition and Fertilizer Science, 2001, 7(2): 129-133.

[13] 金继运，白由路．精准农业与土壤养分管理[M]．北京：中国大地出版社，2001.
Jin J Y, Bai Y L. Precision agriculture and soil nutrient management [M]. Beijing: Earth Publishing House of China, 2001.

[14] 杨俐苹，金继运．平原地区农田土壤养分变异与合理取样研究[J]．土壤肥料，2001(2)：8-13.
Yang L P, Jin J Y. Study on soil fertility variability and evaluation using sampling techniques in field of the plain areas [J]. Soils and Fertilizers, 2001(2): 8-13.

[15] 李保国．分形理论在土壤科学中的应用及其展望[J]．土壤学进展，1994，22(1)：1-10.
Li B G. The application and future of fractal theory in soil science [J]. Progress in Soil Science, 1994, 22(1): 1-10.

[16] 黄绍文，金继运．农田土壤养分平衡状况及其评价的试点研究[J]．土壤肥料，2000(6)：14-19.
Huang S W, Jin J Y. Nutrient balance of agricultural soils and their evaluation [J]. Soils and Fertilizers, 2000(6): 14-19.

[17] Wollenhaupt N C. Mapping soil test phosphorous and potassium for variable-rtate fertilizer application [J]. J. Prod. Agric., 1994, 7: 441-448.

[18] Gotway C A. Comparison of krigng and inverse-distance methods for mapping soil parameters [J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 1996, 60: 1237-1247.

[19] 郭熙，郭晓敏，谭雪明，等．农田钾素空间变异插值模型研究[J]．江西农业大学学报，2003，25(4)：528-531.
Guo X, Guo X M, Tan X M *et al*. A study on spatial variability interpolation model of K nutrient in field soil [J]. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis, 2003, 25(4): 528-831.

[20] 郭熙，郭晓敏，谭雪明，等．农田养分空间变异研究[J]．江西农业大学学报，2004，26(1)：73-77.
Guo X, Guo X M, Tan X M *et al*. A study on spatial variability of red soil nutrient status in hill field [J]. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis, 2004, 26(1): 73-77.