浙 江 农 林 大 学 学 报，2011，**28**(5)：828 – 832
Journal of Zhejiang A & F University

集约经营毛竹林土壤养分空间变异特征初探

柳丽娜，金爱武

（浙江农林大学 亚热带森林培育国家重点实验室培育基地，浙江 临安 311300）

摘要：利用地统计学方法初步分析了浙江省安吉县河干村经过 20 a 集约经营的毛竹 *Phyllostachys pubescens* 林土壤养分变异情况。结果表明：①安吉县河干村毛竹林土壤中 pH 值、全氮、碱解氮、有效磷、速效钾、有机质属于中等变异。②在本研究采样尺度下，土壤中碱解氮和速效钾的变异主要受自然因素的影响，但全氮和有机质的变异受到随机性因素和结构性因素共同影响。③土壤养分的分数维值(D)大小排列顺序为碱解氮(D=1.969)＞速效钾(D=1.958)＞有机质(D=1.798)＞全氮(D=1.787)。表 3 参 11

关键词：土壤学；毛竹；集约经营；地统计学；土壤养分；空间变异

中图分类号：S714.8　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：2095-0756(2011)05-0828-05

Spatial variability of soil nutrients for an intensively managed *Phyllostachys pubescens* forest

LIU Li-na，JIN Ai-wu

(The Nurturing Station for the State Key Laboratory of Subtropical Silviculture，Zhejiang A & F University，Lin'an 311300，Zhejiang，China)

Abstract：This research used geostatistics method to analyze the spatial characteristics of a 20-year, intensively managed, moso bamboo (*Phyllostachys pubescens*) forest in Hegan of Anji County. Results showed that 1) organic matter，pH，total nitrogen(TN)，rapidly available nitrogen(N)，available phosphorus(P) and rapidly available potassium (K) of the bamboo forest soil were moderately variant；2) natural factors mainly caused spatial variability in N and K, but random and natural factors together caused spatial variability of TN and organic matter；3) the order of fractal values for the moso bamboo forest was P ＞ N ＞ K ＞ organic matter ＞ TN. [Ch，3 tab. 11 ref.]

Key words：soil science；moso bamboo (*Phyllostachys pubescens*)；intensive management；geostatistics； soil nutrient；spatial variability

土壤是一个时空连续的变异体，无论在大尺度上还是小尺度上都具有高度的空间异质性。了解土壤空间变异可以更全面地了解土壤营养情况，进行合理的施肥。自 20 世纪 60 年代，学者们开始把地统计学应用于土壤性质的空间变异研究，使得地统计学在研究土壤养分空间变异性方面有了长足的发展，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[1-5]。由于林地土壤林况复杂，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[6]。毛竹 *Phyllostachys pubescens* 是中国栽培面积最大的经济竹种，施肥是毛竹林地养分补充与调节的重要手段，通过增加土壤缺乏的营养元素，改变土壤原来的养分比例，使土壤养分建立新的平衡，更有利于毛竹生长[7]。因此，研究毛竹林土壤养分的空间变异特性有助于了解土壤养分地域上的差异，做到针对性进行集约经营管理和平衡施肥，为建立毛竹林土壤养分管理提供科学依据和理论基础。本研究选择位

收稿日期：2010-11-10；修回日期：2011-02-28

基金项目：中央财政林业科技推广示范资金项目(2009TS001)

作者简介：柳丽娜，硕士，从事竹林培育与利用研究。E-mail：liulina-hui@163.com。通信作者：金爱武，研究员，博士，从事竹林培育与利用等研究。E-mail：kinaw@zafu.edu.cn

于安浙江省安吉县河干村，自 20 世纪 80 年代初就开始集约经营的毛竹林为研究对象，利用地统计学方法，研究经过长期集约经营的毛竹林土壤养分的空间变异特征，分析毛竹林土壤养分变异的原因，旨在全面了解林地土壤养分的空间特征，为推荐施肥提供有益的参考。

1　材料与方法

1.1　研究区基本情况

安吉县章村镇河干村（30°27′N，119°24′E)位于天目山北麓，处于中亚热带北缘，气候湿润，雨水充沛，光照充足，四季分明。年平均气温为 15.6 ℃，极端低温 –17.4 ℃，平均年无霜期 226 d，年降水量为 1 100~1 900 mm。河干村是章村镇毛竹现代科技园区的核心区，海拔为 300 ~ 400 m，土壤类型为黄红壤，土层厚度在 30 cm 以上，平均坡度为 20 °，经营类型以材用林为主。平均立竹量为 3 000 株·hm^{-2}，年龄结构(Ⅰ:Ⅱ)组成是 1∶1。自 20 世纪 80 年代初分山到户，该村就开始对所属毛竹林进行集约经营，并形成了较为统一的施肥经营管理模式，小年进行毛竹林施肥，施肥量为 750 ~ 1 125 kg·hm^{-2}，施肥种类以氮、磷、钾有效养分≥45%的复合肥为主，少数农户施用尿素，施肥方法以蔸施为主。

1.2　土样采集与分析

2009 年 12 月，采集土壤样品，方法是按照样地坡面等高线，借助全球定位系统(GPS)，根据样地实际情况，隔 20 ~ 25 m 设 1 个样点。因样地地形的原因部分地方不易取点，则样点间距放宽至 50 m，但尽量使样点较均匀地分布于林地坡面。每个采样点采取 S 形确定 5 个采样点，采集 0 ~ 30 cm 的土样，混合均匀，取混合样。共采集 43 个混合样，带回实验室风干，并对样品的 pH 值、全氮、碱解氮、有效磷、速效钾和有机质等进行测定。

依据中华人民共和国林业行业标准 LY/T 1210~1279–1999《森林土壤分析方法》：①土壤 pH 值。水土比 5∶1 浸提，酸度计法。②土壤全氮。硒粉-硫酸铜-硫酸钾消化，半微量凯氏定氮法；全自动(FOSS)凯氏定氮仪。③土壤碱解氮。碱解-扩散吸收法。④土壤有效磷。0.03 mol·L^{-1} 氟化铵+0.025 mol·L^{-1} 盐酸浸提，钼锑抗比色法。⑤土壤速效钾。1 mol·L^{-1} 乙酸铵浸提，火焰光度计法。⑥土壤有机质。重铬酸钾氧化-外加热法。

1.3　数据处理分析

1.3.1　*描述性统计分析*　用 SPSS 16.0 统计分析软件对所测的 43 个土壤样品养分进行数理统计，计算其平均值、标准差、最大值、最小值、变异系数、偏度和峰度。

1.3.2　*数据转换*　因地统计学半变异函数必须建立在本征假设或二级平稳假设基础上，要求各土样指标值必须符合正态分布或近正态分布，否则会导致比例效应，使基台值和块金值增大，降低估计精度，导致某些结构特征不明显，因此，对不符合正态分布的数据进行对数正态转换，以消除比例效应。

1.3.3　*地统计分析*　用 GS+软件对所测土壤养分各指标进行半变异方差分析，并通过半方差模型拟合图综合考虑决定系数、残差选出最优半方差函数模型，分析土壤变异特征。

2　结果与分析

2.1　毛竹林土壤养分的描述性统计分析

毛竹林土壤样品的养分统计结果见表 1。

从表 1 看出：全氮、碱解氮、有效磷、速效钾、有机质质量分数的变异系数(coefficient of variance)都较大，除 pH 值、全氮外，其余的变异系数都高达 30%以上。变异系数的大小能够反映土壤特性空间变异性大小，通常认为变异系数≤10%时为弱变异性，10%＜变异系数≤100%时为中等变异性，变异系数≥100%时为强变异性[8]。施肥是造成土壤养分变异的主要原因之一。另外，由于样地较大的坡度(10° ~ 25°)和频繁的人为经营活动，易引起林地养分随水土流失，导致林地上下坡位土壤养分含量差异。但从本样地各养分含量变异程度看出，长期较为统一的施肥经营管理模式使得竹林地各养分变异程度趋于较为一致，除 pH 值外，其他各养分变异系数基本都在 30%左右。

2.2　竹林土壤养分空间变异的半方差函数分析

从表 2 中看出：全氮和有机质都可用球状模型拟合，且拟合程度较好，决定系数分别为 0.90 和

表 1 河干村土壤养分描述性统计分析

Table 1 Descriptive statistical analysis of bamboo soil nutrients in Hegan village

参数	pH 值	全氮/(g·kg⁻¹)	碱解氮/(mg·kg⁻¹)	有效磷/(mg·kg⁻¹)	速效钾/(mg·kg⁻¹)	有机质/(g·kg⁻¹)
平均值	4.66	2.41	161.59	9.94	81.74	42.74
标准差	0.19	0.65	55.06	3.97	24.71	13.99
最小值	4.26	1.42	66.30	4.16	49.17	19.60
最大值	5.31	3.90	380.49	19.22	187.94	82.11
变异系数/%	4.08	26.97	34.07	39.94	30.23	32.73
偏度	0.99	0.64	1.47	0.49	2.00	0.71
峰度	2.97	－0.14	5.23	－0.62	7.05	0.50

表 2 毛竹林土壤半方差函数特征参数

Table 2 Semi-variance parameters of bamboo soil nutrients

项目	全氮	碱解氮	有效磷	速效钾	有机质
转换方式		对数		对数	
块金值 C_0	0.14	0.10	2.98	0.06	0.04
基台值 C_0+C	0.56	0.13	16.05	0.08	0.14
结构方差/基台值 $C/(C_0+C)$	0.75	0.27	0.81	0.27	0.69
变程/m	284.80		28.40		258.50
相关系数	0.90	0.03	0.23	0.12	0.91
残差	0.02	0.01	29.80	0.00	0.00
模型	球状	线性	线性	线性	球状

0.91；有效磷符合线性有基台值模型，但拟合程度较差，决定系数为 0.23；速效氮和速效钾用无基台值线性模型拟合，拟合程度都较低，决定系数分别只有 0.03 和 0.12。

土壤异质性是结构因素和随机性因素共同作用的结果[9]。在半方差函数模型中，C 表示结构方差，C_0 表示块金值。C_0 是由于实验误差和随机因素共同引起的变异，较大的块金值表示小尺度上的某种过程不容忽视[5]。从表 2 中看出：全氮(C_0 = 1.43)，碱解氮(C_0 = 0.10)，速效钾(C_0 = 0.06)和有机质(C_0 = 0.04)的块金值较小，有效磷(C_0 = 2.98)的块金值较大，说明有效磷在小于采样尺度的范围内存在的变异不容忽视。C 是由土壤母质、地形、气候等非人为结构因素引起的变异；($C_0 + C$)为基台值，是半方差函数随间距递增到一定程度后出现的平稳值，表示系统内总的变异；$C/(C_0 + C)$ 表示空间变异程度，表示由随机性因素引起的空间变异性占系统总变异的比例，比值大，说明由随机部分引起的空间变异性程度较大，相反由结构性因素引起的空间变异程度较大[10]。按照区域化变量空间相关性程度的分级标准，当 $C/(C_0 + C)<25\%$，变量具有强烈的空间相关性；当 25% ~ 75%时，变量具有中等的空间相关性；而 $C/(C_0 + C)>75\%$时，变量空间相关性很弱。由各养分元素的块基比 $C/(C_0 + C)$的大小看出，全氮和有机质的块基比分别为 0.75 和 0.69，属于中等相关性，说明全氮和有机质的变异是结构性因素和随机性因素(长期的施肥、垦复等人为经营措施)共同影响的结果，且它们的变程相似，都趋于大块状分布；碱解氮和速效钾的块基比都为 0.27，因模型拟合较差，不能准确地反映情况，但有一定的参考意义，说明引起碱解氮和速效钾变异的主要原因是土壤母质和地形等结构性因素；有效磷的块基比为 0.81，但由于小尺度范围的变异不容忽视，因此最小采样尺度不能正确地反映有效磷的变异情况，这里不再对其作进一步分析。

综上所述：在样地范围内，经过长期的集约经营，河干村毛竹林土壤中碱解氮和速效钾的变异主要受土壤母质和地形等结构性因素的影响；土壤中全氮和有机质的变异受到经营措施等随机性因素和土壤母质、地形等结构性因素共同的影响，且趋于大块状分布。因本次研究的采样尺度不能准确地反映毛竹

林土壤养分变异情况，因此，要进一步研究集约经营毛竹林土壤养分变异情况，要减小采样最小尺度，扩大采样范围。

2.3　毛竹林土壤养分空间变异的分数维分析

分数维值(D)是表征养分在空间分布均一程度的一个指标。分数维值的大小是事务复杂程度的一种量化，由于土壤是一个不均匀的复合体，它与土壤母质、气候、水文、地形和生物诸多因素相互作用，导致土壤特性参数在空间上的表现很不规则，呈随机性[11]。分数维表征样本之间的结构性，D 值越小，表示样本之间的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差异越小，即均一程度越好[6]。决定系数 R^2 表示模型的有效性。从表 3 看出：全氮和有机质的决定系数较高，分别为 0.88 和 0.89，碱解氮和速效钾决定系数较低，因此，只能参考性地得出河干村毛竹林土壤养分的分数维值大小排列顺序为：碱解氮(D=1.97)＞速效钾(D=1.96)＞有机质(D=1.80)＞全氮(D=1.79)。在研究范围内，碱解氮和速效钾分布较有机质和全氮分布均匀。

表 3　毛竹林土壤养分分数维

Table 3　Fractal analysis of bamboo soil nutrients

项目	全氮	碱解氮	速效钾	有机质
分数维值	1.79	1.97	1.96	1.80
决定系数	0.88	0.08	0.14	0.89
标准差	0.25	2.50	1.82	0.93

3　结论

经过 20 a 的集约经营，安吉县河干村的毛竹林土壤养分中，全氮、碱解氮、有效磷、速效钾和有机质质量分数的变异系数都较大，除全氮外，其余的变异系数都高达 30%以上，土壤中各养分属于中等变异。长期的施肥经营等人为活动使土壤养分元素变异程度趋于较为一致。

经过长期的集约经营施肥，在研究范围内，河干村毛竹林土壤中碱解氮和速效钾的变异主要受自然因素的影响；土壤中全氮和有机质的变异受到随机性因素和结构性因素共同的影响。长期的施肥经营等人为活动和地形等自然因素都是造成土壤养分变异的部分原因。

通过分析各土壤养分的分数维值，得出分数维值 D 大小排列顺序为碱解氮＞速效钾＞有机质＞全氮。说明碱解氮和速效钾分布较有机质和全氮分布均匀。

虽本研究采样尺度的原因，不能准确反应毛竹林土壤养分变异情况，但通过本研究为进一步研究集约经营毛竹林土壤养分空间变异提供了参考，也为毛竹林测土施肥提供了一定的理论基础。同时，本研究也反映了另一个不容忽视的问题，集约经营毛竹林技术提高了竹林产量，增加了竹农收入，但大量的肥料施入，并不能完全被竹林吸收，大量未被吸收的肥料随着水土而流失，不但造成肥料的浪费，还会引起环境污染。因此，毛竹林测土施肥技术成为解决这些问题的一项有效技术措施。

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 Jun, FU Bojie, QIU Yang, *et al*. Spatial heterogeneity of soil nutrients in a small catchment of the Loess Plateau [J]. *Acta Ecol Sin*, 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 Huizhen, GONG Zitong. Study on soil spatial variability [J]. *Acta Pedolog Sin*, 1996, **33**(3): 232－241.

[3] 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.
YANG Yuling, WEN Qikai, TIAN Changyan. The status quo and prospect of spatial variabitity of soil [J]. *Arid Zone Res*, 2001, **18**(2): 50－55.

[4] 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，**24**(4)：307－311.
TAN Wanneng, LI Zhian, ZHOU Bi, *et al*. The application of geostatistics to soil science [J]. *Trop Geogr*, 2005, **24**

(4)：307 – 311.

[5] 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 variabiity 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.

[6] 郭晓敏，牛德奎，郭熙，等. 奉新毛竹林土壤养分空间变异性研究[J]. 植物营养与肥料学报，2006，**12** (3)：420 – 425.

GUO Xiaomin，NIU Dekui，GUO Xi，*et al*. Study on variability of nutrients for moso bamboo forest in Fengxin [J]. *Plant Nutr Fert Sci*，2006，**12** (3)：420 – 425.

[7] 陈建华，何正安，李定盈. 毛竹施肥效果研究[J]. 竹子研究汇刊，2000，**19** (2)：30 – 35.

CHEN Jianhua，HE Zheng'an，LI Dingying. The fertilizing effects on bamboo [J]. *J Bamboo Res*，2000，**19** (2)：30 – 35.

[8] 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.

WANG Shaoqiang，ZHU Songli，ZHOU Chenghu. Characteristics of spatial variability of soil thickness in China [J]. *Georgr Res*，2001，**20** (2)：161 – 169.

[9] 贾树海，张琦，孟维君，等. 基于 GIS 余地统计学土壤养分空间变异特征研究：以辽宁省凌源市 6 乡镇为例[J]. 水土保持通报，2009，**29** (3)：197 – 201.

JIA Shuhai，ZHANG Qi，MENG Weijun，*et al*. Spatial varibility of soil nutrients based on GIS and geostatistics：a case study of 6 townships in Lingyuan City，Liaoning Province [J]. *Bull Soil Water Conserv*，2009，**29** (3)：197 – 201.

[10] 阳正熙，吴堑虹，彭直兴，等. 地学数据分析教程[M]. 北京：科学出版社，2008.

[11] 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 Shaowen, JIN Jiyun. Nutrient balance of agricultural soils and their evaluation [J]. *Soil Fert*，2000 (6)：14 – 19.