

空间变异理论在土壤特性分析中的应用研究进展*

姜秋香¹,付 强^{1,2},王子龙¹

(1. 东北农业大学 水利与建筑学院,哈尔滨 150030;
2. 黑龙江农垦总局 北大荒集团公司 博士后科研工作站,哈尔滨 150040)

摘 要:空间变异理论是研究随机变量空间变异性的理论。该理论是建立在地统计学基础之上,其研究的主要对象就是那些在空间上具有一定变异性的随机变量。空间变异理论被广泛应用到土壤学、生态学、地质学、水文学、气象、资源环境及其存在“空间变异性”的领域。对空间变异理论的研究方法进行简要的介绍,并且对空间变异理论在土壤的物理、化学特性及微量元素中的应用研究进行介绍。在对空间变异理论的研究方法和在土壤特性中应用的归纳和分析中,指出空间变异理论在理论和应用中存在的问题并为其提出展望。

关键词:空间变异理论;地统计学;土壤特性

中图分类号:S153 **文献标识码:**A **文章编号:**1005-3409(2008)01-0250-04

Research Progress of the Spatial Variability Theory
in Application to Soil Characteristic Analysis

JIANG Qiu-xiang¹,FU Qiang^{1,2},WANG Zi-long¹

(1. College of Water Conservancy & Architecture, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China;
2. Doctoral Working Station of Beidahuang Company, Heilongjiang Land Reclamation Bureau, Harbin 150040, China)

Abstract: Spatial variability theory is the theory of studying space variability of random variable. The main research objects of this theory that based on the geostatistics are those random variables with certain variability on space. The spatial variability theory is widely applied to agrology, ecology, geology, hydrology, weather, resource environment and other fields with “space variability”. This paper briefly introduces the means of study of the spatial variability theory and the application of this theory in study of physical, chemical characteristics and microelements in soil. By concluding and analyzing the means of study and the application in soil characteristic of this theory, this paper indicates problems existing in theoretics and applications of this theory and gives the expectations.

Key words: spatial variability theory; Geostatistics; soil characteristic

1 引 言

自然界的许多物质由于受到各种因素的影响,决定了其在空间上都具有一定的变异性。如土壤在自然界中的分布极其复杂,同一质地的土壤在同一平面或不同深度上并不完全均质,决定了土壤的各种特性在空间上都具有不同程度的变异性,并且彼此之间还有一定的相关性。人们虽然认识到了空间变异性的存在,但是由于没有系统的理论来定性分析随机变量的变异程度和自相关距离,因此空间变异性的存在一直困扰着学者。随着地统计学的提出和不断完善,这个问题随之得已解决。20 世纪 70 年代国际学术界提出了空间变异理论,即研究随机变量空间变异性的理论,地统计学是其研究的主要方法。国内的学者主要对地统计学进行了研究,对空间变异理论涉及的较少,而实际上空间变异理论早已被广泛地应用到土壤学、生态学、地质学、水文学、气象、资源环境以及其它研究“空间变异性”的领域。

2 空间变异理论的研究方法介绍

2.1 地统计学的基本理论

地统计学(Geostatistics)是空间变异理论的最主要的研究方法。20 世纪 40 年代末和 50 年代初,南非的矿山工程师 D. G. Krige 和 H. S. Sichel 从南非金矿储量计算的具体问题出发,提出了克里格插值。1963 年法国著名的统计学家 G. Matheron 在 D. G. Krige 和 H. S. Sichel 的研究基础上,正式提出地统计学概念和基本理论^[1]。我国于 1977 年开始介绍地统计学,侯景儒等首先将 A. G. Journel 等人的专著译成中文,随后我国的学者对地质统计学进行了深入的研究,并对地统计学的概念进行了归纳和总结。地统计学亦称地质统计学,是以区域化变量、随机函数和平稳性假设等概念为基础,以半方差函数为主要工具,以克里格插值法为手段,研究那些在空间分布上既有随机性又有结构性,或空间相关和依赖性的自然现象的科学。根据其概念可知,凡是对这些数

* 收稿日期:2006-10-11
基金项目:国家自然科学基金项目(30400275);中国博士后科学基金项目(2004035167);黑龙江省青年基金项目(QC04C28)
作者简介:姜秋香(1982-),女,黑龙江佳木斯人,硕士,主要从事空间变异理论在水资源应用中的研究。
通信作者:付强(1973-),男,辽宁锦州人,教授,博士生导师,主要从事农业水土资源系统分析、节水灌溉及农业系统工程建模与优化技术研究。

据进行最优无偏内插估计,或要模拟这些数据的离散性、波动性时,均可应用地统计学的理论及相应的方法^[2]。下面对地统计学中的基本内容进行简要的介绍。

2.1.1 半方差函数(semi-variogram)

半方差函数是地统计学中研究空间变异性的工具函数,用来表征随机变量的空间变异结构,或空间连续性。当随机变量的均值不随位置 x 变化,并且其协方差 $Cov[Z(x), Z(y)]$ 只取决于样本点 x 和 y 之间的距离 $|x - y|$ 时,即随机变量满足二阶平稳假设时,半方差函数可以表示为区域化变量 $Z(x)$ 增量的方差的一半,其一般表达式为 $\gamma(h) = \frac{1}{2} var [Z(x) - Z(x + h)]$;计算公式为: $\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2$ 。式中: h ——样本间距; $N(h)$ ——样本距离为的所有测点的对数。

将由半方差函数计算得到的值点绘到表示 h 与 $\gamma(h)$ 之间关系的半方差图上,用于拟合半方差图的曲线方程称为半方差函数的理论模型。常用的半方差函数模型根据其非负定性质可以分为安全型和危险型。安全型模型有线性无基台值模型、球型模型、指数模型;危险性模型有圆形函数模型、线性有基台值模型^[3]。一般常用的为安全性模型,因此,在此只对安全性模型进行介绍。

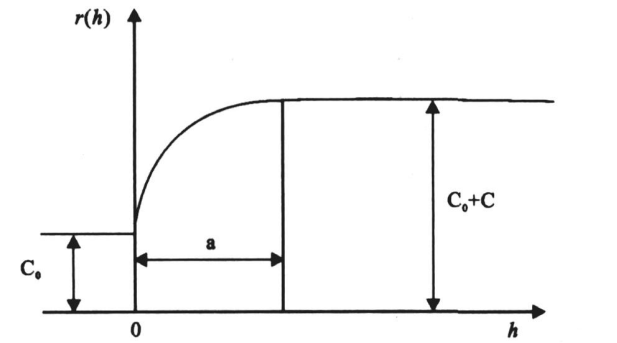


图 1 球型模型的半方差

线性无基台值模型: $\gamma(h) = c_0 + ch/a \quad h \geq 0$

球型模型: $\gamma(h) = \begin{cases} c_0 + c & h > a \\ c_0 + c(\frac{3h}{2a} - \frac{h^3}{2a^3}) & 0 \leq h \leq a \\ 0 & h = 0 \end{cases}$

指数模型: $\gamma(h) = \begin{cases} c_0 + c(1 - e^{-h/a}) & h > 0 \\ 0 & h = 0 \end{cases}$

式中: c_0 ——块金值,是在极短的样本距离 ($h \rightarrow 0$) 之间半方差函数从原点的跳升值(不连续性),是由测定误差或随机变量短距离的变异性引起的。 $c_0 + c$ ——基台值,在一定范围内, $\gamma(h)$ 随 h 的增加而增大,但当测点的间距大于该随机变量的最大相关距离时, $\gamma(h)$ 趋于稳定,此时的半方差值称为半方差函数的基台值,反映随机变量总的变异程度。 a ——变差距离(变程)或相关尺度(指数模型的变差距离为 $3a$),该值为半方差值达到基台值时的测点间的距离。当样本间的距离等于或大于此距离时,样本之间就变得完全独立了。

2.1.2 克里格插值(Kriging)

由于实验条件和时间的有限,在分析随机变量空间变异的时候,不能对所研究区域上的所有点都进行取样,只有通过已知的测点对未知的区域进行估计,以此来得出该随机变

量在空间的分布图。克里格插值法是利用原始数据和半方差函数的结构性,对未来采样点的区域化变量进行无偏估计的一种方法^[4]。该方法是一种最好的线性无偏估计方法,即 BLUS(Best Linear Unbiased Estimator)方法^[5]。针对各种不同的目的和不同的条件,可以采用不同的克里格法。其方法主要有普通克里格法(OK)、泛克里格法、协同克里格法、析取克里格法^[6]。在这里简要介绍一下最常用的普通克里格法。

普通克里格法的估计公式为

$$\hat{Z}^*(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i)$$

各区域化变量的权重,应满足 $\sum_{i=1}^n \lambda_i = 1$ 。

方差的估计公式为

$$S = 2 \sum_{i=1}^n \lambda_i (x_i - x_0) - \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^n \lambda_i \lambda_j (x_i - x_j) - 2\mu(\sum_{i=1}^n \lambda_i - 1)$$

式中: μ ——拉格朗日乘数。

当使方差的估计为最小时,可以推导出计算权重的克里格线性方程组,该线性方程组的解即为权重 λ_i , L , n 和拉格朗日乘数 μ 。由此可以得出估计值 \hat{Z}^* 。通过对未知点随机变量的估计可以做出克里格插值图,通过插值图可以更直观描述随机变量在空间上的分布。

2.2 人工神经网络(ANN)在空间变异理论中应用

在地统计学中,应用克里格插值必需同时满足 3 个前提条件:(1)区域变量可表达为与均值有关的结构成分、与空间有关的随机成分和随机噪声三部分之和;(2)所研究区域是均质的;(3)对研究区域的不同部分使用不同的半方差图。由于在一些情况下无法满足上述条件而无法使用地统计学来研究空间变异问题^[7]。近年来,在人工神经网络不断完善的前提下,一些学者尝试着将人工神经网络应用到土壤空间变异性的插值问题上。

José A. C. Ulson 等用带一个隐层的多层感知器研究了土壤肥力的空间分布,与克里格插值结果相比,达到相近甚至更好的预测精度^[8]。但是这种方法必须要求使用者有一定的经验,才能确定合适的神经网络模型、算法及参数设置,以此来达到预期的效果。

随着神经网络集成方法的提出和在各个领域的应用,证明了神经网络集成可以提高神经网络的泛化能力。沈掌泉等应用集成 BP 神经网络对田间土壤空间变异性 and 插值精度进行了研究,并与地统计学方法的克里格插值法进行了比较。研究结果表明,当训练样本数较大时,集成 BP 网络的预测精度与克里格法比较接近;而随着样点数的减少,集成 BP 网络的插值精度超过了克里格法的插值精度,表现出了一定的优势;在样本点少的布局中,克里格法无法拟合出半方差曲线方程而无法得到插值结果,但集成 BP 网络得到的插值精度仍然较好^[9]。

高瑞忠、朝伦巴根等利用学习速率和动量因子自适应的 BP 神经网络模型,以影响土壤水力特征参数的因子集(土壤物化特征参数)与体现土壤水力特征参数分布的空间坐标作为输入层节点来进行土壤水力特征参数的区域估值,并研究空间变异性是可行的,通过实测值计算取得了较好的效果^[10]。

2.3 分形在空间变异理论中的应用

所谓分形是指在形态或结构上存在着相似性的几何对象,研究这种分形的科学称为分形几何学。可用分形维数(分维)来描述分形特征^[11]。分形维数的大小是指事物复杂程度的一种量度^[12]。通过土壤特性的分形维数可以更好地分析具有空间变异性的随机变量的变异程度,并可以将其变异程度用分形维数进行量化。

分形在解决空间变异问题时需要和地统计学相结合。将由地统计学计算得出的半方差函数和样本间距画在双对数纸上,对于分形曲线,lg (h) 与 lgh 存在着线性关系,用最小二乘法进行线性回归,得到回归直线的斜率 m。分形维数 D 可以用下式进行估算: $D = \frac{1}{2} (4 - m)$ 。分形维数 D 表示样本之间的结构性。D 值越小,表示样本之间的差异越大,即均一程度越差;相反,D 值越大,表示样本之间的差异越小,即均一程度越好。

我国许多学者将分形维数应用到土壤特性的空间变异分析上。李小昱、雷廷武等用分维和地统计学相结合,对土壤含水量和土壤坚实度的空间变异进行分析,得出含水量和坚实度的分维数和自相关距离。通过对数据的分析,土壤含水量的采样距离大于坚实度的采样间距^[13]。

许多学者在分析土壤特性空间变异特性时,都将分形维数作为一项指标与 $c_0/(c_0 + c)$ (块金值与基台值的比值)、 C_v (变异系数) 共同分析土壤特性空间变异程度并对变异性进行了分类(表 1)。

表 1 不同衡量指标对变异程度的划分

衡量指标	空间相关性强	空间相关性中等	空间相关性弱
	变异性弱	变异性中等	变异性强
$c_0/(c_0 + c)$	25 %	25 % ~ 75 %	75 %
C_v	0.1	0.1 ~ 1	1
D	D 值越小变异性越强,空间相关性越弱		

由此可以得出,分维、 $c_0/(c_0 + c)$ 和变异系数均能在一定程度上反映土壤特性的空间变异程度,并且它们之间具有一定的相关性: $c_0/(c_0 + c)$ 与 C_v 呈正相关, C_v 与 D 呈反相关,并且相关系数均很高^[13-15]。

3 空间变异理论在土壤特性分析中的应用研究

土壤在成土的过程中由于受到气候、生物、母质、地形等因素的影响及耕作方式的不同,使其在空间上表现出严重的变异性,这种变异性对土壤取样间距的影响尤为重要,取样间距过大,代表性不强;间距过小,既增加了取样的数量又会使变量之间的相关性增强。在实际中往往依靠经验来确定取样的合理间距,以此来消除变异性的影响。为了定性分析土壤特性的变异程度,国内外许多学者将空间变异理论应用到土壤特性分析中。通过近 40 a 的研究,空间变异理论在土壤的物理特性、化学特性及微量元素的空间变异性上的应用都取得了相当大的成就,不仅为生产实践提供了指导作用,而且为精确农业的开展提供了理论依据。

3.1 在土壤物理特性中的应用

土壤物理特性空间变异的研究大多是针对土壤的容重、颗粒组成、各种含水量、导水率、扩散率、渗透系数等的研究,确定其相关距离、合理的取样数及克里格插值图,以此为生

产实践提供指导意义。

1985 年雷志栋等应用地统计学对土壤的颗粒组成、干容重、土壤水吸力、含水量和饱和导水率的空间变异性进行了分析,得出变量的合理取样数;用克里格插值法进行了土壤黏粒含量的插值,并与一般线性内插进行比较,得出克里格插值法精度较高,并且可以得出估值的方差^[14]。李子忠、龚元石用传统统计学和地统计学进行比较,对农田土壤含水量和电导率的采样数进行分析,得出用地统计学确定的合理采样数比传统统计学高出 6 ~ 8 倍,大大提高了采样效率^[16]。熊亚兰考虑了坡度对土壤的空间变异的影响,对坡地土壤水分特性的空间变异进行研究,得出各水分特性在坡面各层的变异情况,并绘出各水分特性的克里格插值图,即空间分布图^[17]。由于在农田灌溉管理决策中,利用中子仪监测土壤水分时,中子仪观测管的个数、间距及具体的位置对于灌溉决策的精度有重要的影响。李毅等根据有代表意义的田间持水量值进行空间变异分析,确定了合理地埋设观测管的数量和间距,这对于农田节水过程中动态监测土壤水分状况是十分必要和可行的^[18]。

3.2 在土壤化学特性中的应用

化学元素从对作物营养的关系上分为大量元素(N,P,K)、中量元素(Ca,Mg,S)和微量元素(Mn,B,Cu,Zn,Fe,Mo等)^[19]。因此,在分析土壤化学特性的同时分析土壤的养分和肥力,进而为确定农田肥料投入和精确施肥奠定基础。

王珂、John S. Bailey 等通过研究得出:研究地区的土壤有效钾、有效磷的变异系数明显比土壤镁、硫和有机质高;在允许误差的情况下,虽然精确描述土壤有效钾空间变异性所需的采样比原始采样数减少了一半,但是在精度上仍能满足要求^[20]。郭跃冬等将 GIS 与地统计学相结合,对扎龙湿地水体的 N,P 营养物质的空间变异性进行研究,得出 N,P 都具有一定的变异特征。通过对水位的空间变化分析,推测出水位就是控制 N,P 营养物质空间分异特征的结构因素,从侧面证明了水位变化对湿地生态过程包括生物地球化学循环的控制作用^[21]。许红卫等针对稻田的化学性质的空间变异来分析土壤养分的空间变异,得出各化学元素的合理采样数和在实验区的管理模式。通过分析得出农户不同的经营方式与施肥习惯等人为因素对水稻田田间土壤养分的变异起主导作用^[22]。

3.3 在土壤微量元素中的应用

微量元素在保证植物正常生长发育方面与大量营养元素所起的作用是同等重要的。当作物缺乏某种微量元素时,作物的生长发育会受到明显的影响^[23]。因此,对土壤微量元素空间变异的研究对作物的生长和微量元素的施用有很重要的作用,对了解土壤微量元素和合理利用开发土地资源也同样具有重要的意义。

王学军、李本纲等分别对深圳市、北京东郊污灌区及内蒙古的土壤微量金属含量的空间分异特性进行了分析,得出了不同层面上的各微量元素的克里格插值图。在研究过程中提出了利用高程数据的衍生数据集作为基础数据,并探讨了其在土壤微量金属空间分析研究中的应用^[6]。虽然只是理论研究,但是为研究数据的获得提供了一种新的方法。赵良菊等对甘肃省武威地区灌漠土微量元素的空间变异性的

研究得出变异系数、 $c_0/(c_0+c)$ 及分形维数三者之间的关系,并总结出三者的不同之处是变异系数与均值有关,只有在一定程度上反映总体,而 $c_0/(c_0+c)$ 及分形维数则能定量描述土壤微量元素空间含量分布的不规则性和相关性^[15]。

4 存在的问题及研究展望

自空间变异理论提出的 30 多年里,国内外学者为空间变异理论的发展和完善进行了大量的研究。但是空间变异理论仍存在着一些需要继续研究的问题:

(1)在理论方面,空间变异理论的研究方法比较单一,主要是以地统计学为主要研究方法,即使是有其他的方法也是单纯与地统计学相结合,来解决插值的问题,而且在新的方法使用上还需要更多的实践来检验其模型的可靠性;地统计学本身也存在着一些需要解决的问题。如半方差函数及模型的选择都带有一定的个人因素在内。

(2)在应用方面,虽然空间变异理论应用在许多领域,但是能够真正把空间变异理论研究的成果应用到实践中却不是很多。如土壤特性空间变异中的研究,大多是单纯对物理化学性质变异性的简单分析,没有真正的与节水灌溉、土壤肥力分析等相结合。

随着精准农业的提出,空间变异理论在农业中将会起到不可替代的作用。通过对农田土壤类型、土壤质地、土壤养分和水分等的空间分布进行定量的分析,可以达到精细的测土施肥技术,提高产量,减少成本的目的,为土壤资源和水资源的更合理利用提供指导意义。因此,空间变异理论在农业中的应用前景将会更加美好。

参考文献:

[1] 王政权.地统计学及其在生态学中的应用[M].北京:科学出版社,1999:1-2.
[2] 侯景儒,郭光裕.矿床统计预测及地质统计学的理论与应用[M].北京:冶金工业出版社,1993.
[3] 李亮亮,依艳丽.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):265-266.
[4] 杨玉玲,文启凯.土壤空间变异研究现状及展望[J].干旱区研究,2001,18(2):52.
[5] 张仁铎.空间变异理论及应用[M].北京:科学出版社,2005.
[6] 王学军,李本纲.土壤微量元素含量的空间分析[M].北京:科学出版社,2005:121-159.
[7] 岳天祥,刘纪远.多源信息融合数据模型[J].世界科技

研究与发展,2001,23(5):1-4.

[8] Jos A Ulson, Ivan N Silva, Sérgio H Benez, et al. Modeling and identification of fertility maps using artificial neural networks[J]. IEEE, 2000:2673-2678.
[9] 沈掌泉,施洁斌, John S. Bailey, 等.应用集成 BP 神经网络进行田间土壤空间变异研究[J].农业工程学报,2004,20(3):35-38.
[10] 高瑞忠,朝伦巴根.神经网络模型在根系带土壤水力特征参数空间变异性研究中的应用[J].水资源与水利工程学,2004,15(4):13-16.
[11] 李毅,刘建军.土壤空间变异性研究方法[J].石河子大学学报:自然科学版,2000,4(4):331-333.
[12] 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[J].土壤学报,1998,3(1):10-15.
[13] 李小昱,雷廷武.农田土壤特性的空间变异性及分形特征[J].干旱地区农业研究,2000,18(4):61-64.
[14] 雷志栋,杨诗秀,许志荣.土壤特性变异性初步研究[J].水利学报,1985(9):10-20.
[15] 赵良菊,肖洪浪.甘肃省武威地区灌漠土微量元素的空间变异特征[J].土壤通报,2005,36(4):536-540.
[16] 李子忠,龚元石.农田土壤水和电导率空间变异性及确定其采样数的方法[J].中国农业大学学报,2000,5(5):59-66.
[17] 熊亚兰.丘陵区土壤水分特性的空间变异及其水库贮量[D].重庆:西南农业大学,2004.
[18] 李毅,门旗.土壤水分空间变异对灌溉决策的影响研究[J].干旱地区农业研究,2000,18(2):80-85.
[19] 孙波,赵其国.红壤退化中的土壤质量评价指标及评价方法[J].地理科学进展,1999,18(2):119-120.
[20] 王珂,沈掌泉.精确农业田间土壤空间变异与采样方式研究[J].农业工程学报,2001,17(2):33-35.
[21] 郭跃冬,何岩.扎龙湿地水体 N、P 营养物质空间异质性研究[J].环境科学研究,2005,18(2):51-56.
[22] 许红卫,高克异,王珂.稻田土壤养分空间变异与合理取样数研究[J].植物营养与肥料学报,2006,12(1):37-43
[23] 北京农业大学.农业化学[M].北京:农业出版社,1994.

(上接第 249 页)

参考文献:

[1] 陈国阶,徐琪,杜榕桓.三峡工程对生态与环境的影响及对策研究[M].北京:科学出版社,1995:246-272.
[2] 杜佐华,严安国.三峡库区水土保持与生态环境改善[J].长江流域资源与环境,1999,8(3):299-304.
[3] 熊平生,谢世友,莫心祥.长江三峡库区水土流失及其生态

治理措施[J].水土保持研究,2006,13(2):272-273.

[4] 沈怡,刘秀华.自然灾害对重庆土地资源可持续利用的影响及对策[J].地域研究与开发,2004,23(2):84-87.
[5] 涂建军,陈治谏,陈国阶,等.三峡库区消落带土地整理利用:以重庆开县为例[J].山地学报,2002,20(6):712-717.
[6] 龙良碧,秦志英.三峡库区消落带土地开发利用探讨[J].重庆教育学院学报,2005,18(6):42-45.