

地统计学及 GIS 在黑土区域土壤养分空间 异质性分析中的应用 ——以海伦市为例

赵军¹, 张久明², 孟凯¹, 隋跃宇¹

(1. 中国科学院 东北地理与农业生态研究所 农业技术中心, 黑龙江 哈尔滨 150040;

2. 东北农业大学 资源与环境学院, 黑龙江 哈尔滨 150030)

摘要: 应用地统计学的方法结合 GIS 空间分析技术, 对海伦市黑土农田区域采集的 65 个耕层 (0—20 cm) 土壤样本进行了数据处理, 对其全量养分含量的空间异质性进行了分析和探讨。结果表明, 全碳、全氮和全磷半变量函数曲线的理论模型符合高斯模型, 全钾的理论模型表现为指数模型。全碳、全氮属于中度空间相关, 其空间变异受结构性因子和随机因子的影响各占 1/2。全钾和全磷属于高度空间相关, 其变化主要受结构性因子的影响。土壤全碳与全氮和全磷具有极显著的正相关, 在空间分布上也与全氮和全磷的空间分布吻合度较高。地统计学分析土壤养分空间变异特征和 1978 年海伦县自然资源综合考察对农田土壤肥力调查的结果是吻合的。利用地统计学分析的方法, 对区域农业生产合理布局、综合治理水土流失都具有重要的意义。

关键词: 黑土; 土壤养分; 空间变异; 地统计学; GIS

文献标识码: B

文章编号: 1000—288X(2004)06—0053—05

中图分类号: S153.61; S159

Spatial Heterogeneity of Soil Nutrients in Blacksoil, China —A Case Study at Hailun County

ZHAO Jun¹, ZHANG Jiur-ming², MENG Kai¹, SUI Yue-yu¹

(1. *Northeast Institute of Geography and Agricultural Ecology, Chinese Academy of Sciences,*

Harbin 150040, Heilongjiang Province, China; 2. Academy of Resources and

Environment, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, Heilongjiang Province, China)

Abstract: Geostatistics combined with geographical information system (GIS) techniques were applied to a treatment and analysis of the spatial heterogeneity of soil nutrients in topsoil (0—20cm) at Hailun County of Heilongjiang Province. Sixty-five soil samples were collected from the central farmland of Hailun County. The results indicate that the semivariogram of total C and total P are best described by the Gaussian model; total N and total K are best described by the exponential model. Analysis shows that the spatial correlation of total C and total N at this large scale is moderately dependent, with Nugget/Sill were between 25% ~ 75%; therefore changes in total C and total N are affected by both structural and random factors. The spatial correlation of total K and total P is highly dependent, with Nugget/Sill were less than 25%; therefore, changes in total K and total P are mainly affected by structural factors. There is high spatial correlation between total C and P. Spatial variability results from the geostatistics method were compared to soil fertility survey in 1978 results from Hailun farmland. The analysis is useful to inform strategic planning of farm production, to guide fertilizer application and to control soil erosion and degradation of Blacksoil, in northeastern China.

Keywords: Blacksoil; soil nutrients; spatial heterogeneity; geostatistics; GIS

东北黑土是世界 3 大片黑土之一,也是国家重要商品粮、畜生产基地。其中黑龙江省黑土面积为 4.83 × 10⁶ hm²,约占全省耕地面积的 1/3。黑土土壤肥

沃,作物产量较高。但开垦以后,在人为活动影响下,其有机质的数量和质量明显下降。以海伦市为例,其土地利用不合理,致使水土流失日益严重,耕地支

收稿日期:2004-03-10

资助项目:中国科学院知识创新重大项目(KZCX1-SW-19-3-01);(INF105-SDB-1-28)资助

作者简介:赵军(1958—),女(汉族),哈尔滨市人,创新副研究员,硕士生导师。主要研究方向:黑土肥力信息系统、土壤水肥模拟模型等。

电话(0451)86602023, E-mail: jzhao@mail.hrb.hl.cninfo.net。

离破碎;水土流失面积已经达到 $1.65 \times 10^5 \text{ hm}^2$, 占总面积的 35.3%。严重的水土流失造成土壤肥力锐减,限制了作物产量的增加。土壤养分是土壤生产力的基础也是土壤重要的属性之一,土壤养分的高低直接影响着农业生产和环境安全。各种土壤的养分值亦有着性质上的差异和不同的指标。

由于土壤并非是一个均质体,而是一个时空连续的变异性体,具有高度的空间异质性^[1]。因此,在研究和分析区域土壤肥力特征时,经典统计学在结构和过程分析方面就显得力不从心。地统计学是在传统统计学基础上发展起来的空分分析方法,它不仅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,而且可以将空间格局与生态过程联系起来,有效地解释空间格局对生态过程与功能的影响,目前地统计学的方法结合 GIS 技术在区域土壤养分分析上得到了越来越广泛地应用^[2-11]。

本文将应用地统计学方法结合 GIS 技术分析该区域内土壤养分的空间分异规律和变化特征,并绘制出土壤养分空间分布图,为农业生产合理布局和土壤肥力的培育,以及综合治理水土流失和土地退化等问题提供科学的数据分析方法。

1 材料和方法

1.1 研究区域概况

海伦市位于黑龙江省中部黑土地带,地理位置为北纬 $47^{\circ}26'$,东经 $126^{\circ}38'$ 。海伦市地势东北到西南由低丘陵、高平原、河阶地、河漫滩依次呈阶梯形逐渐降低。海拔高度最高 471 m,最低 147 m,一般为 200 m 左右。境内除少量残丘外,大部分地势为漫川漫岗平原。总面积 $4.55 \times 10^5 \text{ hm}^2$ 。有 4 条主要河流贯穿全境。全县从东北到西南最长,约 150 km;南北较短,约 78 km。海伦气候条件属北温带大陆性季风气候区,冬季寒冷干燥,夏季高温多雨,雨热同季。极端最高气温为 37°C ;极端最低气温为 -39.5°C 。海伦市土壤大部分为黑土,占土地总面积 63.4%。

1.2 采样与化验分析

取样原则沿海伦市境内黑土区域中心地带,林场除外,按土壤亚类划分,根据区域分布面积比例和利用方式不同而取样的密度有所不同。取样方法:耕层取样 0—20 cm。在每种作物的地块 S 型取样,4 分法。共取 65 个样点(见图 1)。将土样自然风干,过 2 mm 筛然后分析土壤养分含量。具体分析方法是:全钾按国标法进行,即氢氧化钠熔融法,用原子吸收分光光度计测定。碳、氮:用意大利产 FlashEA1112 型元素分析仪测定。全磷:酸溶—钼锑抗比色法。

1.3 数据处理方法

(1) 样本的描述性分析采用 SPSS10.0 软件进行,并用 K-S 检验数据是否呈正态分布;(2) 利用 ArcView 软件将数据的经纬度坐标转换为公里网坐标,并以最小经纬度点为基准定出相对应的坐标 0 点;(3) 半方差函数和 kriging 插值应用美国 GAMMADESIGNSOFTWARE 公司的地统计学处理软件 GS+5.3 b 进行计算。计算步骤为:在 GS+ 软件中对数据进行处理,作出频率分布图,判断是否符合正态分布,如果不符还要进行转换;半方差函数的计算、模拟、分析和检验;进行 kriging 插值;生成 2 维或 3 维养分分布图;(4) 利用 SUPERMAP 地理信息系统软件将海伦市区域图、土地利用图等和土壤养分分布图进行配准叠加,生成海伦市农田区域土壤养分分布图。

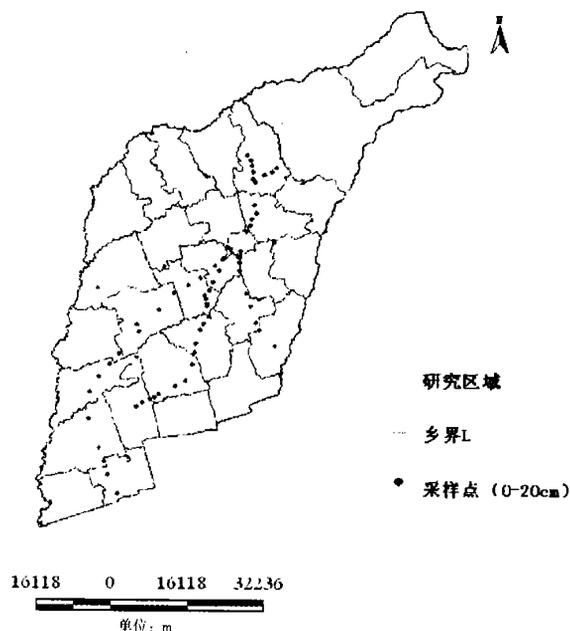


图 1 海伦市农田黑土区域土壤养分调查采样点分布图

1.4 变异函数的计算

变异函数也即半方差函数,是地统计学中研究土壤变异性的关键函数,反映了不同距离观测之间的变化,既 2 点之间插值的 1/2。假设区域化变量满足二阶平稳和本征假设,计算半方差的公式为:

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

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 x_i 和 $x_i + h$ 处的实测值。变异函数的计算是通过 GS+ 软件完成的。

2 结果与讨论

2.1 土壤养分的描述性统计分析

海伦土壤全量养分的描述性统计结果见表1。从表1可见变异系数范围为6.4%~25%。全钾的变异系数<0.1属于弱变异,其它养分属于中等变异水平。就平均值和中值的比较来看差别不大,但有一定的偏移,表明这些养分的中心趋向分布可能被异常值影响而使其呈非标准正态分布,土壤全量养分受外界影响不是很大,但是土壤性状不均一,存在着一定的空间异质性。

表1 土壤全量C,N,P,K的描述性统计 g/kg

项目	全磷	全钾	全氮	全碳
样本数	65.00	65.00	65.00	65.00
标准差	0.08	1.24	0.43	6.00
最大值	0.54	22.07	4.25	52.64
最小值	0.19	16.38	1.44	15.34
中值	0.30	19.31	2.30	25.55
平均值	0.32	19.24	2.34	26.10
变异系数	0.25	0.064	0.18	0.23

2.2 土壤养分之间的相关关系

研究结果表明土壤碳和氮之间有密切的关系^[12-13]。从表2可见,土壤全碳与全氮、全磷均为极显著正相关。全氮和全磷,全磷和全钾之间也显示了极显著的正相关关系。全钾和全碳、全氮为负相关,但不显著。土壤碳的含量对土壤氮和磷影响很大,可作为土壤肥力观测和评价指标。

表2 全量C,N,P,K相关分析

相关性分析 <i>r</i>	全碳	全氮	全磷	全钾
全碳	1.00	—	—	—
全氮	0.96	1.00	—	—
全磷	0.66	0.57	1.00	—
全钾	-0.02	-0.11	0.37	1.00

注:表示 $P < 0.01$ 时极显著相关 ($n = 65, r = 0.325$)。

2.3 土壤养分空间变异特征

在地统计学中,半方差函数的计算要求数据符合正态分布,或近似正态分布,否则可能存在比例效应。本例利用K-S软件对数据的正态分布进行了检验,并在GS+地统计学软件中对正态分布不理想的数据进行对数转换,使其符合正态分布。经过适当的转换,土壤C,N,P和K的性质表现出了在空间等方向性(Isotropic)上的正态分布。其半方差模拟模型及

其拟合参数见表3,地统计学分析的半变异函数及其模型拟合结果见图2。从表3可见:所有变量的基台值均为正值,说明存在着由采样误差、短距离的变异、随机和固有变异引起的各种正基底效应。土壤养分性质的空间相关性可由块金值与基台值比值的大小来划分。比值<25%时空间相关性强,在25%~75%之间时,空间相关性中等;>75%,空间相关性弱^[14]。而土壤性质的空间异质性一般是内在因子和外在因子共同作用的结果^[15-16]。内因是结构性因子,如土壤形成过程中的成土母质、地形、地下水位及形成的土壤类型等。外因是随机的,如农业生产管理过程中施肥、作物布局、耕作措施等。本例中全钾和全磷的块金值和基台值之比<25%,表明其变量具有很强的空间相关性,其相关性受结构性因子影响的比例分别占88.8%和86%。而全碳和全氮的比值在25%~75%之间,表明其变量具有中等空间相关性。除了受结构性因子的影响外,人为的施肥、耕作等农业生产管理措施亦起到了很大的作用。

表3 土壤C,N,P,K半方差模型及其拟合参数

项目	理论模型	块金值	基台值	块金值/基台值	变程	决定系数
全碳	高斯模型	0.171	0.432	39.6	67.7	0.788
全氮	高斯模型	0.007	0.001	49.6	42.0	0.516
全磷	高斯模型	0.027	0.240	11.2	159.7	0.958
全钾	指数模型	0.220	1.564	14.0	13.8	0.479

从空间相关间距来看,全碳、全氮和全钾的相关距离分别为67.7,42和13.8 km。而全磷的相关距离在159 km。说明影响这4种土壤养分的生态过程在不同的尺度上起作用。海伦市黑土开垦时一般多处于高地,热燥,水分适宜通气好。开垦后随着时间的推移,水土流失严重,导致养分的变程变化范围较大,即空间变异较大。全磷在159 km范围内存在着空间相关性,主要受地形因子和土壤母质等因素的影响。从海伦的地形来看,由西南到东北地形逐渐升高,而全磷含量显示了和地形因子极其显著的正相关。全磷和全钾在土壤中存在的形势较稳定,不易流失,土壤母质和地形是主要影响因子之一^[17]。而氮是植物的重要养分来源,作物对氮素的需求大于对磷素的吸收,所以说土壤碱解氮和其它养分因子相比更容易被作物吸收,氮素在土壤中的易移动性更易造成养分的流失和淋溶。因此研究区内水土流失、不合理土地利用方式和农业生产管理制度都会造成土壤氮素的空间自相关相对减弱。

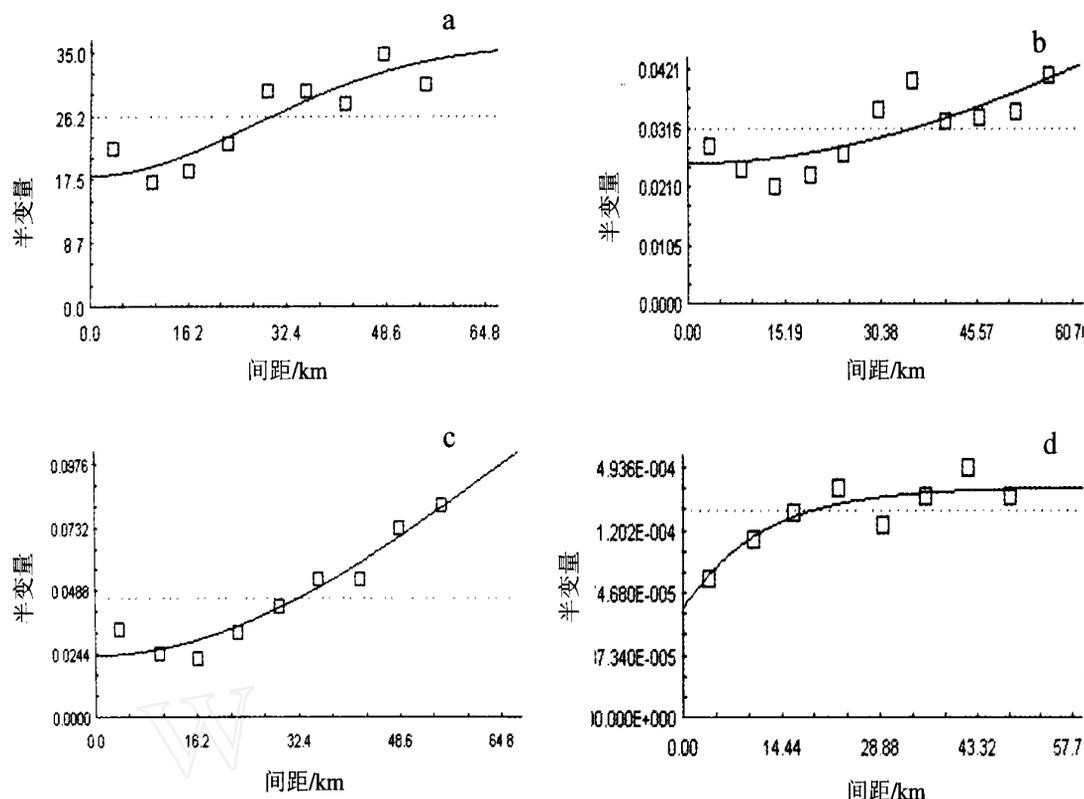


图 2 半变异函数图及其模型拟合结果 (a. 全碳, b. 全氮, c. 全磷, d. 全钾)

2.4 土壤养分的空间布局

根据所得到的半方差函数模型,应用普通克里格法(Ordinary Kriging)进行最优内插。Kriging 插值法是利用区域化变量的原始数据和变异函数的结构特点,对未采样点的区域化变量的取值进行线性无偏最优估计的一种方法。Kriging 插值图是此法在空间布局估计中的重要应用^[1,18]。插值后绘制土壤养分等值线图,并在 SUPERMAP 的 GIS 平台上与土地利用图、地形图等进行叠加。以此对区域土壤 C 和 N, P, K 的空间布局进行分析。

土壤全碳含量基本走向是从西南到东北逐渐升高,西南角最低,其值 $< 19.5 \text{ g/kg}$,东北角最高,其值 $> 30.5 \text{ g/kg}$ 。但在共和乡附近(北部)全碳含量在 50 g/kg 左右。分析可见:根据海伦市地形来看该区域属岗阜状高原,海拔约 240 m 。土壤类型为深厚黑土、中厚黑土和草甸黑土。有几条来自通肯河的支流经过,多种植大豆等作物。西南角全碳含量低是由于该类区域属于微倾斜高原,海拔约 190 m ,大部分土壤为碳酸盐草甸土,有部分中厚黑土,多种植玉米。海伦市地形从通肯河到扎音河的海拔高度变化约为 $150 \sim 300 \text{ m}$ 。因此这样的内因和外因对土壤碳的含量会造成一定的影响。全氮的空间分布同全碳分布基本吻合,区域最低值 $< 1.7 \text{ g/kg}$,最高值 $> 2.7 \text{ g/kg}$ 。这从表 2 的分析中也可以看出,全碳和全氮有极其显著的正相关关系。同全碳一样高值区域也出现

在北部(共和乡附近)为 4 g/kg 左右。差异可能与施肥等管理措施的随机因素有关。

全磷含量的空间异质性最明显,其值在西北角低, $< 0.257 \text{ g/kg}$,东北角高, $> 0.4 \text{ g/kg}$,与土壤全碳的空间分布吻合度较高。全钾的空间异质性较差,整体变化范围为 $16.4 \sim 22 \text{ g/kg}$ 。主要由于土壤钾相对稳定,在土壤全剖面中含量较高,受结构性因子影响较大所致。地统计学分析的结果与 1978 年海伦县自然资源综合考察对土壤肥力的调查、分析和评价的结果是吻合的。

3 结论

海伦市黑土土壤中全碳、全氮、全磷和全钾 4 种养分性质中,全磷的空间变异系数最大,全钾最小。4 种养分均具有较大的空间异质性。块金值/基台值的大小表明土壤全钾和全磷空间相关性强,其空间变化主要受内在结构性因子控制。全碳和全氮属中等空间相关性,受内因和外因共同作用决定。土壤全钾空间异质性最差,但变化不大。土壤全碳与全氮、全磷均为显著正相关。全氮和全磷,全磷和全钾之间也显示了正相关的关系。Kriging 插值的结果揭示了土壤养分性质在一定程度上表现出的空间相似性和异质性。总之,海伦市不同地区的黑土农田,其耕层全碳、全氮和全磷呈现明显的区域规律性。按其含量水平,由西南部 $<$ 中部 $<$ 东北部而逐渐增加。

至于同一地区,也会因为作物的种群结构、农艺措施、工艺和管理水平影响作物生长和微生物活动诸因素,特别是水热条件和开垦利用时间的长短及归还补给量的高低等不同,从而均会对土壤养分含量有显著的影响。

地统计学分析土壤养分的结果和1978年海伦县自然资源综合考察对黑土农田土壤肥力的调查结果是完全吻合的。利用地统计学的方法对区域肥力进行评价和分析,结合定点的试验研究,对合理的土地利用、水土流失的综合治理和土壤肥力培育指标体系的制定都有重要的应用价值。

[参 考 文 献]

- [1] 王政权. 地统计学及在生态学中的应用[M]. 北京:科学出版社,1999.
- [2] 朱益玲,刘洪斌,谢德体,等. 江津紫色土壤养分空间变异性研究——地统计学方法[J]. 西南农业大学学报,2002,24(3):207—210.
- [3] 程先富,史学正,于东升,等. 丘陵山区林地土壤养分状况研究——以江西省兴国县为例[J]. 水土保持学报,2003,17(2):28—30.
- [4] 孙波,赵其国,闫国年. 红壤肥力的时空变异[J]. 土壤学报,2002,39(2):190—197.
- [5] 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,1998,35(1):10—15.
- [6] 许咏梅,冯耀祖,张小玲. 土壤速效养分空间变异研究[J]. 新疆农业科学,2003,40(2):103—105.
- [7] 王军,傅伯杰,邱杨,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—1177.
- [8] 许尚平,陶澎,徐福留,等. 内蒙土壤微量元素含量的空间结构特征[J]. 地理学报,2000,55(3):337—345.
- [9] 高祥照,胡克林,郭焱,等. 土壤养分与作物产量的空间变异特征与精确施肥[J]. 中国农业科学,2002,35(6):660—666.
- [10] 张有山,林启美,秦耀东,等. 大比例尺区域土壤养分空间变异定量分析[J]. 华北农学报,1998,13(1):122—128.
- [11] 胡克林,李保国,林启美,等. 农田土壤养分的空间变异性特征[J]. 农业工程学报,1999,15(3):33—38.
- [12] 马育华. 试验统计[M]. 北京:农业出版社,1982.
- [13] 王建国,王守宇,乔云发,等. 黑土农田养分平衡与养分消长规律[J]. 土壤学报,2003,40(2):246—251.
- [14] Cambardella C A, Moorman T B, Novak J M, et al. Field-scale heterogeneity of soil properties in central low a soils [J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 1994, 58:1501—1511.
- [15] Chien Y J, et al. Geostatistics analysis of soil properties of mid-west Taiwan soils [J]. Soil Sci., 1997, 162:291—298.
- [16] Matheron G. Principles of geostatistics [J]. Economic Geology, 1963, 58:1246—1266.
- [17] Miller M P, Singer P M J, Nielsen D R. Spatial variability of wheat yield and soil properties on complex hills [J]. Soil Sci. Am. J., 1988, 52:668—674.
- [18] Webster R. Quantitative spatial analysis of soil in the field [J]. Advance in Soil Sciences, 1985, 3:1—70.

《水土保持通报》第四届编委会成员名单

编委会主任

李 锐 中国科学院水利部水土保持研究所 所长 研究员

编委会副主任

刘 震 水利部水土保持司

郭索彦 水利部水土保持监测中心

刘国彬 中国科学院水利部水土保持研究所

王 修 中国科学院水利部水土保持研究所《水土保持通报》编辑部

编委成员(按姓氏笔划排序)

卜崇德	山 仑	于振江	马为民	马志尊	王 鑫	王彦成	王海宁	王建林
王 修	王丽槐	田均良	史学正	朱显谟	冯明汉	安芷生	刘昌明	刘宝元
刘国彬	刘 震	李 锐	李占斌	李相玺	李 靖	李日生	李定强	李胜利
李智广	邵明安	吴发启	吴普特	张效武	张信宝	张建华	张殿发	陈循谦
赵其国	赵光耀	周伏建	周万龙	郭索彦	范允安	唐克丽	景 可	章明奎
程国栋	崔中兴	蔡建勤	Chi-hua Huang(美国)	D. E. Walling(英国)	D. A. Lobb(加拿大)			
Robert Horton(美国)			T. A. Quine(英国)					