

东北黑土地区主要土壤肥力质量指标的空间变异性

李双异¹, 刘慧屿¹, 张旭东², 王秋兵¹, 温礼¹, 边振兴¹, 迟凤琴³, 汪景宽^{1*}

(1. 沈阳农业大学, 辽宁 沈阳 110161; 2. 中国科学院 沈阳应用生态研究所, 辽宁 沈阳 110016;
3. 黑龙江农业科学院, 黑龙江 哈尔滨 150086)

摘要:采用地理信息系统(GIS)和地统计学相结合的方法研究了本世纪初东北黑土区土壤表层(0~20cm)pH、有机质、速效磷、速效钾、粘粒这5种土壤肥力指标的空间变异性。结果表明:土壤pH和粘粒的理论模型均为指数模型;有机质、速效磷和速效钾的理论模型均为球状模型。速效磷、速效钾的 $C_0/(C_0+C)$ 较大,为46.63%和49.91%,说明这2种肥力指标具有中等的空间相关性;而pH、有机质、粘粒的 $C_0/(C_0+C)$ 分别为10.80%、16.57%、12.88%,说明这3种肥力指标具有较强的空间相关性。根据每个采样点的指标数据计算出该地区土壤肥力质量综合评价指数,最终得到研究区土壤肥力质量的分布图。

关键词:地统计学;土壤肥力质量;地理信息系统;空间变异

中图分类号:S158 文献标识码:A 文章编号:0564-3945(2006)02-0220-06

土壤是时空连续的变体,具有高度的空间变异性,不论在大尺度上还是在小尺度上,土壤的空间变异性均存在^[1,2]。土壤质量的空间变异性比较复杂,成土母质、地形、人类活动等对土壤质量的空间变异均有较大影响^[3]。对土壤的精确管理和应用环境模型都需要对土壤质量指标的空间变异性进行分析。地统计学方法是研究空间变异性的一种重要方法,其基本原理和运用范例在文献中都有比较详细地描述^[4,5]。该方法是以前区域化变量为核心和理论基础,以空间相关和半方差函数为基本工具的一种数学地质方法。地统计学在矿产地质中的应用目前已经达到了成熟阶段,由于其自身的特点,其应用范围已由当初的地质学领域逐渐推广应用到土壤学和生态学等领域中^[2,6]。近些年来GIS、GPS技术的发展,也为研究相对较大尺度上土壤特性的空间变异性提供了准确、便捷的工具。

我国黑土区面积约为12万 km^2 ,是世界三大黑土带之一。随着时间的推移,由于自然因素和人们不合理的生产经营活动,导致了严重的水土流失,造成生态环境的不断恶化,直接威胁着国家商品粮基地建设和社会经济的发展。本文选取东北典型黑土区的嫩江、五大连池、克山、北安、海伦为研究区域,通过野外调查、采样分析和资料收集,运用地理信息系统(GIS)和地统计分析相结合的方法,研究该地区土壤肥力质量及其各指标的空间变异特征。

1 材料与方法

1.1 自然概况

本研究区位于黑龙江中部地区,东经 $124^{\circ}44'17''$ ~ $127^{\circ}54'54''$,北纬 $46^{\circ}57'37''$ ~ $50^{\circ}59'57''$,总面积为 39140km^2 。本区主要以海拔600m以下低山、丘陵及平原为主。土壤类型主要以黑土为主。这些土壤形成过程的基本特点是具有显著的有机质积累过程(生物富积作用),土壤的腐殖质层厚度一般在20~100cm之间,pH呈中性,主要为黄土状母质。该区域为中温带半湿润大陆季风气候区,种植制度基本上是一年一熟的作物,是我国大豆、玉米、水稻和甜菜的主产区。

1.2 土壤样品的采集与分析

根据上世纪80年代土壤普查和农业肥料定点试验的样点分布状况,于2000年5月在研究区域共采集319个土壤样点,每个采样点向四周辐射,呈梅花状采样,取0~20cm表层土壤的5个点混合样品。每个样点均采用GPS进行野外定位,并详细记载样点周围的环境和利用情况。

根据东北黑土地区土壤资源的特点,结合其他研究成果和专家意见,选取土壤粘粒、pH值、有机质、速效磷、速效钾5个因素作为该区域土壤肥力质量评价指标。有机质采用干烧法,元素分析仪(Elementar verio III,德国)测定;粘粒采用吸管法测定;pH采用电位法测定;速效磷采用碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法测定;速效钾采用 NH_4Ac 浸提,火焰光度法测定^[7]。

收稿日期:200410-18;修订日期:2004-11-19

基金项目:国家重点基础研究发展规划项目(G1999011810)

作者简介:李双异(1979-),男,丹东东港人,沈阳农业大学土壤学专业硕士,从事土壤肥力和3S应用研究。

* 通讯作者:jkwang@syau.edu.cn

1.3 研究方法

半方差函数是地统计分析的基本工具,假设区域化变量满足二阶平稳和本征假设,用于估计半方差函数 $\gamma(h)$ 的公式为:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2n(h)} \sum_{i=1}^{n(h)} [Z(X_i+h) - Z(X_i)]^2$$

其中 $n(h)$ 为由距离 h 分隔的观测点的对数; h 为滞后距离(Lag); $Z(X_i+h)$ 和 $Z(X_i)$ 分别为区域化变量 $Z(X)$ 在位置 X_i+h 和 X_i 的实测值; 以 h 为横坐标, $\gamma(h)$ 为纵坐标作图, 即为半方差图。

首先利用 GIS 软件, 将研究区土壤采样点进行数字化, 生成用于地统计分析的样点分布图(图 1)。半方差函数的计算一般要求数据符合正态分布, 否则可能存在比例效应, 比例效应的存在, 会抬高块金值和基台值, 降低估计精度, 使某些潜在的特征不明显^[8]; 本文通过 SPSS 软件的 K-S 法对其进行正态分布检验; 半方差函数的计算和理论模型的拟合均采用地统计学软件 GS + 5.3; 克里格插值和插值图的生成是由 ESRI 的 Arc/Info 和 ArcView 完成的。所生成的图形由研究区域边界图形切割, 最后生成研究区域相应的插值结果图。



图 1 土壤样点分布图

Fig. 1 Distribution map of the sampling sites

2 结果与讨论

2.1 土壤肥力指标的描述性统计分析

研究区 5 种肥力指标的描述统计分析(表 1)表明: pH、有机质、速效磷、速效钾、粘粒的含量分别为 $5.98 \pm$

0.49 、 $61.08 \pm 26.81 \text{ g kg}^{-1}$ 、 $21.53 \pm 15.90 \text{ mg kg}^{-1}$ 、 $198.49 \pm 67.51 \text{ mg kg}^{-1}$ 、 $21.59 \pm 4.05\%$ 。5 种肥力指标中, 各样点之间速效磷变异最大, 其变异系数为 73.83%; pH 的变异最小, 其变异系数为 8.20%。变异系数的这种差异反映了黑土区土壤中 pH、有机质、速效磷、速效钾、粘粒含量变化的程度大小, 其大小顺序为: 速效磷 > 有机质 > 速效钾 > 粘粒 > pH。

表 1 土壤肥力指标的描述性统计

Table 1 Descriptive statistics for test soil fertility indices

土壤肥力指标 Soil fertility indices	最大值 Max	最小值 Min	平均数 Mean	标准差 Standard deviation	变异系数 Coefficient of variation (%)
pH	8.34	4.79	5.98	0.49	8.20
有机质 (g kg^{-1})	206.19	6.25	61.08	26.81	43.90
速效磷 (mg kg^{-1})	147.00	1.79	21.53	15.90	73.83
速效钾 (mg kg^{-1})	584.00	74.00	198.49	67.51	34.01
粘粒 (%)	44.90	6.74	21.59	4.05	18.77

* 样本数 $n=319$

2.2 土壤肥力各指标空间变异特征

半方差函数曲线图可以表示土壤各种指数的区域化变量在距离与方向上不同的所有成对点之间的观测值的空间相关性。通过半方差函数及半方差函数曲线图可以得到 3 个极为重要的参数, 即变程(range)、基台值(sill)、块金值(nugget)。当半方差函数 $\gamma(h)$ 随着间隔距离 h 的增大, 从非零值达到一个相对稳定的常数时, 该常数称为基台值 $C_0 + C$; 当间隔距离 $h=0$ 时, $\gamma(0) = C_0$, 该值称为块金常数或块金方差。基台值是系统或系统属性中最大的变异, 半方差函数 $\gamma(h)$ 达到基台值时的间隔距离 a 称为变程。变程表示在 $h \geq a$ 以后, 区域化变量 $Z(x)$ 空间相关性消失。块金值表示区域化变量在小于抽样尺度时非连续变异, 由区域化变量的属性, 或测量误差决定。另外, 块金方差/基台值 $[C_0/(C_0 + C)]$ 可表示空间变异程度(由随机部分引起的空间变异占系统总变异的比), 如果该比值较高, 说明由随机部分引起的空间变异性程度较大; 相反, 则由空间自相关部分引起的空间变异性程度较大; 如果该比值接近于 1, 则说明该变量在整个尺度上具有恒定的变异。从结构性因素的角度来看, $C_0/(C_0 + C)$ 可表示系统变量的空间相关性程度, 如果比例 > 25%, 说明变量具有强烈的空间相关性; 在 25% ~ 75% 之间, 变量具有中等的空间相关性; > 75% 时, 变量空间相关性很弱^[9]。

根据各个样点各项指标的数据, 计算出实际半方差函数的值 $\gamma(h)$, 绘制实际半方差函数曲线, 然后选

择几个(各向同性)模型分别进行拟合,从中选出最优的半方差函数理论模型。图2是土壤肥力各指标的半方差函数图,表2是根据各要素半方差函数模型得出的相应参数。

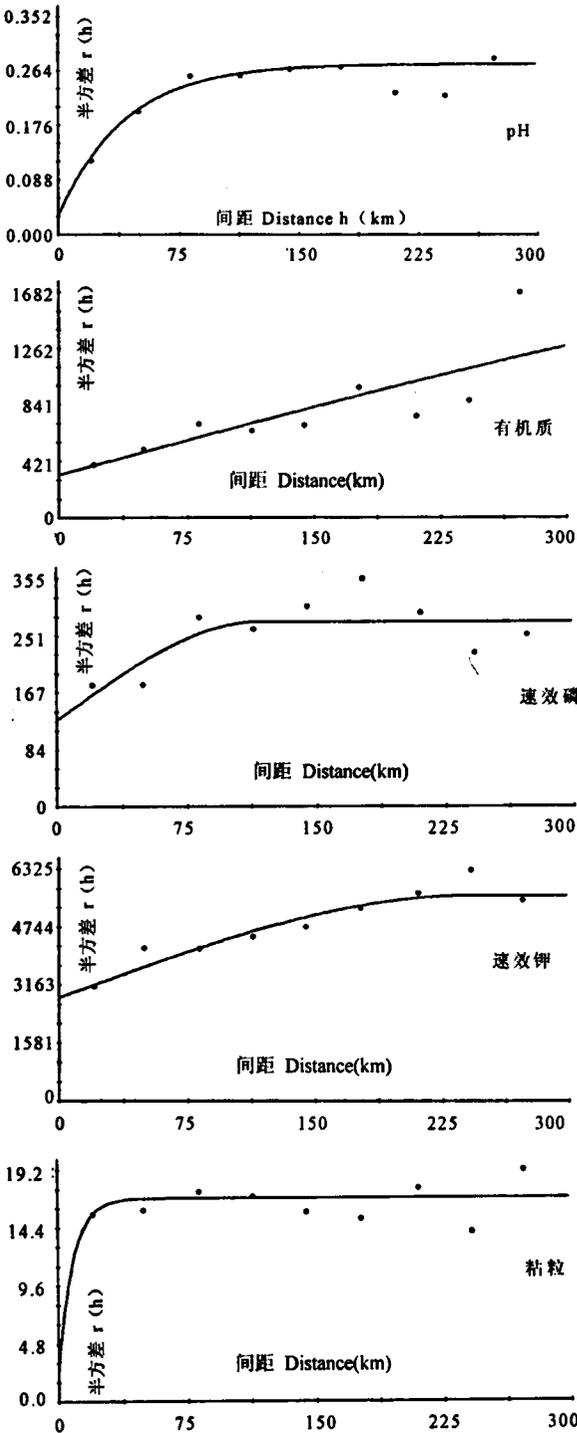


图2 土壤肥力各指标的半方差函数图

Fig.2 The semivariograms of soil fertility indices

经理论模型的最优拟合发现 pH 和粘粒的最佳拟合模型为指数模型,而有机质、速效磷和速效钾的最佳拟合模型均为球状模型,理论半方差函数除粘粒外,其

余四种肥力指标与实验半方差函数拟合较好,决定系数在 0.532 ~ 0.793 之间,说明理论模型较好地反映了这 4 种土壤肥力指标的空间结构特征。

速效磷、速效钾的 $C_0/(C_0 + C)$ 较大,为 46.63% 和 49.91%,说明这 2 种肥力指标体现为中等的空间相关性,这是因为其空间变异是由随机性因素和结构性因素共同作用的结果。pH、有机质、粘粒的 $C_0/(C_0 + C)$ 分别为 10.80%、16.57%、12.88%,说明这 3 种肥力指标体现为强烈的空间相关性,这是由于其空间变异是由结构性因素所致。结构性因素,如气候、母质、地形、土壤类型自然因素等可以导致土壤养分强的空间相关性,而随机性因素如施肥、耕作措施、种植制度等各种人为活动使得土壤养分的空间相关性减弱,朝均一化方向发展^[10,11]。

表2 土壤肥力指标半方差函数理论模型及相关参数

Table 2 Theoretical semivariogram models of soil fertility indices and corresponding parameters

	理论模型 Theory model	块金值 Nugget	基台值 Sill	块金值/基台值 Nugget/Sill (%)	变程 Range (km)	决定 系数 R^2
pH	指数模型	0.0296	0.2742	10.80	123.0	0.673
有机质 ($g\ kg^{-1}$)	球状模型	319	1925	16.57	711.0	0.689
速效磷 ($mg\ kg^{-1}$)	球状模型	126.7	271.7	46.63	117.2	0.532
速效钾 ($mg\ kg^{-1}$)	球状模型	2811	5632	49.91	244.2	0.793
粘粒 (%)	指数模型	2.16	16.77	12.88	24.6	0.056

注:经 K-S 检验,5 项指标均属正态分布

2.3 土壤肥力单项指标空间分布趋势

根据以上半方差函数的拟合数据,进而得出这 5 项指标的克里格插值图(图3)。从这 5 项肥力指标的空间分布来看,pH 的总体空间分布趋势表现为从南向北,从西南向东北逐渐降低;有机质的空间分布趋势则正好相反,即从南向北,从西南向东北逐渐升高,其原因是南部气温较高、黑土开垦时间长、土壤利用强度大、水土流失严重等^[12];速效磷、速效钾和粘粒也同样呈现出南低北高的趋势;但粘粒的分布则有其自身的特点:不同空间位置上差异较大,在图上表现为较多的岛状区域。pH、有机质、速效磷和速效钾的空间变化程度相对比较平缓,局部地区粘粒的变化要比其他 4 项指标大,这同时也说明黑土区土壤的粘粒含量受局部的随机性因素的影响要比其他 4 项指标大,这主要是与土壤开垦、利用历史和水土流失有关^[13]。

2.4 土壤肥力质量的空间分布特征

2.4.1 土壤肥力质量综合指数的计算

(1)土壤肥力质量单因子权重的求取 为避免人为主观因素的干扰,采用因子分析法计算各评价指标的权

重值。因子分析是寻找对观察结果起支配作用的潜在因子(潜变量)的探索性统计分析方法。因子载荷 a_{ij} 表明第 i 个变量在第 j 个主因子上的负荷,或者称为第 i 个变量在第 j 个主因子上的权重,它反映出第 i 个变量在第 j 个主因子上的相对重要性。在本研究中以特

征值 >1 为选取主因子的条件作因子分析,得到各评价因子主成分的特征值和贡献率,并由因子载荷矩阵计算土壤肥力质量指标的公因子方差及权重值。计算出黑土肥力指标的权重值(表 3)。

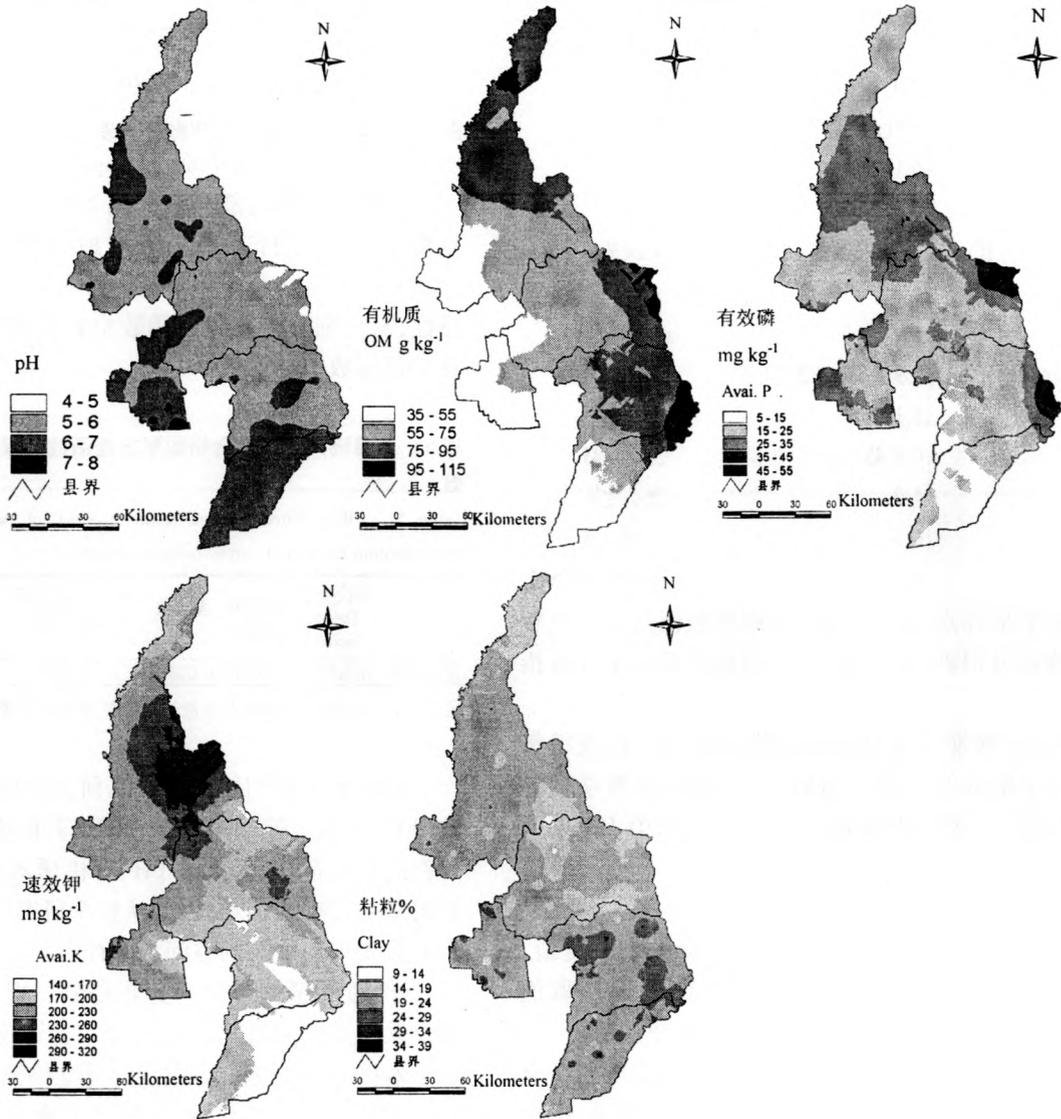


图 3 黑土区 5 项肥力指标的分级图

Fig. 3 The group maps of five fertility indices in black soil region

表 3 黑土地区土壤肥力指标权重值

Table 3 The weight of soil fertility quality indices in black soil region

	因子1 Component 1	因子2 Component 2	因子3 Component 3	公因子方差 Estimated communality	权重值 Weight
pH	0.274	-0.684	0.259	0.610	0.166
有机质	0.116	0.884	0.038	0.796	0.217
速效磷	0.798	-0.044	-0.324	0.744	0.203
速效钾	0.755	-0.039	0.330	0.680	0.185
粘粒	-0.010	-0.116	0.909	0.840	0.229
方差贡献	1.296	1.265	1.109		
累计贡献	0.259	0.512	0.734		

(2) 采样点土壤肥力质量单因子指数的求取 采用隶属函数确定评价因子的单因子评价指数。首先建立各评价指标的隶属函数模型,将肥力指标的隶属度函数分为两种类型即 S 型隶属函数和抛物线型隶属函数,土壤有机质、速效磷、速效钾可采用 S 型隶属函数, pH 值和粘粒可采用抛物线型隶属函数^[14]。根据长期以来生产实践的总结以及专家评定,根据作物效应曲线通过确定各个函数的转折点取值而拟合出每个函数的

确切函数式。从而将每个评价因子值代入相应的函数得到每个评价因子的单因子评价指数。现拟合出的隶属函数曲线分别为：

$$\begin{aligned}
 \text{pH: } f(x) &= \begin{cases} 0.9(8.5-x)/1.5+0.1 & 7.0 < x < 8.5 \\ 1.0 & 6.5 \leq x \leq 7.0 \\ 0.9(x-5.0)/1.5+0.1 & 5.0 < x < 6.5 \\ 0.1 & x \leq 5.0 \text{ 或 } x \geq 8.5 \end{cases} \\
 \text{有机质(g kg}^{-1}\text{): } f(x) &= \begin{cases} 1.0 & x \geq 80 \\ 0.9(x-10)/70+0.1 & 10 < x < 80 \\ 0.1 & x \leq 10 \end{cases} \\
 \text{速效磷(mg kg}^{-1}\text{): } f(x) &= \begin{cases} 1.0 & x \geq 30 \\ 0.9(x-5)/25+0.1 & 5 < x < 30 \\ 0.1 & x \leq 5 \end{cases} \\
 \text{速效钾(mg kg}^{-1}\text{): } f(x) &= \begin{cases} 1.0 & x \geq 200 \\ 0.9(x-80)/120+0.1 & 80 < x < 200 \\ 0.1 & x \leq 80 \end{cases} \\
 \text{粘粒(\%): } f(x) &= \begin{cases} 0.9(45-x)/15+0.1 & 30 < x < 45 \\ 1.0 & 25 \leq x \leq 30 \\ 0.9(x-10)/15+0.1 & 10 < x < 25 \\ 0.1 & x \leq 10.0 \text{ 或 } x \geq 45 \end{cases}
 \end{aligned}$$

将各个采样点这5个指标的原始数值代入以上相应的函数式可得到每个采样点该指标的单因子评价指数。

(3) 采样点土壤肥力质量综合指数的求取 在获得每个样点各个指标的单因子指数后,根据模糊数学中的加乘法原则,土壤肥力质量综合评价指标值 IFI 采用下列公式来计算:

$$IFI = \sum (q_i \times w_i)$$

其中 q_i 是第 i 项土壤肥力评价指标的隶属度值, w_i 是第 i 项土壤肥力评价指标的权重系数。IFI 取值为 0~1 之间,其值越高,表明土壤肥力质量越好。

(4) 土壤肥力质量的分级 根据土壤的取样点与结合等距划分法,并参考各土种类型土壤的产量水平,提出我国黑土土壤肥力质量分级参考方案(表4)。

表4 黑土地区土壤肥力质量分级标准

Table 4 Criteria for classification of soil fertility quality in black soil region

等级 Grade	1	2	3	4	5
IFI	≥0.80	0.80~0.70	0.70~0.60	0.60~0.40	<0.40

2.4.2 本世纪初土壤肥力质量的空间分布特征

(1) 各采样点肥力质量的综合评价指数空间变异性 经拟合得到本研究区土壤肥力质量综合指数的半方差函数图(图4)。

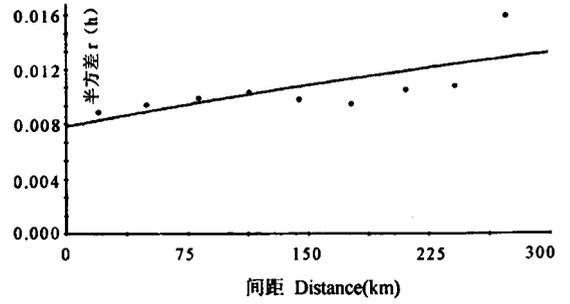


图4 土壤肥力质量综合指数半方差函数图

Fig. 4 The semivariograms of soil fertility quality generalization index

从图4中看出随滞后距离的增加,土壤肥力综合指数表现出特别有规律持续增加趋势,说明它们存在很好的空间结构性。但要进一步具体考察其内部变异特性,需仔细分析其各自函数中相应的参数所表示的意义及参数值。

表5 土壤肥力质量综合指数半方差函数的理论模型及相关参数

Table 5 Best fitted semivariogram models of soil fertility quality generalization index and corresponding parameters

理论模型 Theory model	块金值 Nugget	基台值 Sill	块金值/基台值 Nugget/Sill (%)	变程 Range (km)	决定系数 R ²
综合指数 指数模型	0.00779	0.02368	32.90	2133	0.588

注:经 K-S 检验,土壤肥力质量综合指数的分布类型属正态分布

从表5中我们可以看出本研究区的 $C_0/C_0 + C$ 为 32.90%。由于速效磷和速效钾变异的因素中,随机性因素已明显存在,而影响 pH、有机质和粘粒分布的主要因素是结构性因素,因此从整个研究区域看,土壤肥力通常表现出中等的空间相关性^[9,11]。

(2) 土壤肥力质量的空间分布趋势 根据计算得到的每个采样点的土壤肥力质量的综合评价指数,我们得到了本世纪初土壤肥力质量的克里格插值图(图5)。

从图5中可以看出,研究区土壤几乎被 2、3 级所占据,占整个研究区域面积的 98% 以上,而 1 级和 4 级只有极少数的零星分布,说明虽然个别地区土壤肥力质量较差,但从总体上来说东北黑土区的土壤基本上不会对农业生产造成限制。

3 结论

(1) 东北黑土区土壤中 5 种肥力指标的变异大小顺序为速效磷 > 有机质 > 速效钾 > 粘粒 > pH, 变异系数分别为: 73.83%、43.90%、34.01%、18.77%、8.20%。

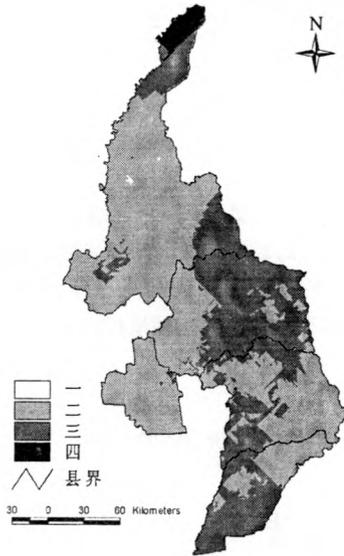


图5 2000年黑土肥力质量分级图

Fig. 5 The group map of black soil fertility quality in 2000

(2) pH、有机质、粘粒的 $C_0/(C_0 + C)$ 分别为 10.80%、16.57%、12.88%，说明这 3 种肥力指标体现为强烈的空间相关性；速效磷、速效钾的 $C_0/(C_0 + C)$ 较大，为 46.63% 和 49.91%，说明这 2 种肥力指标体现为中等的空间相关性。

(3) 从总体趋势来看，除 pH 外，有机质、速效磷、速效钾和粘粒都呈现出南低北高的趋势；从局部的差异来看，粘粒的变化程度要比其他指标大，这也说明粘粒受随机性因素的影响要比其他指标大。

(4) 东北黑土区土壤大部分属于 2 级和 3 级，说明研究区土壤基本不会阻碍农业生产。

Spatial Variability of Soil Fertility Quality Indices in Northeast China

LI Shuang - yi¹, LIU Hui - yu¹, ZHANG Xu - dong², WANG Qiu - bing¹,
WEN Li¹, BIAN Zhen - xing¹, CHI Feng - qin³, WANG Jing - kuan^{1*}

(1. Shenyang Agricultural University, Shenyang 110161;

2. Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016;

3. Heilongjiang Agriculture Academy of Sciences, Haerbin 150086)

Abstract: Geographical information system (GIS) combined with Geostatistics was applied to reveal the spatial variability of soil fertility quality indices i. e., soil pH, organic matter, available P, available K and clay in the topsoil (0 ~ 20cm) in the northeastern area of China. The results showed that theoretical semivariogram models of soil pH and clay were best described with an exponential model, whereas the organic matter, available P and available K were best fitted with a spherical model. The ratios of nugget to sill of available P and available K were 46.63%, 49.91%, respectively, indicating that the spatial correlation of the two fertility indices was moderately dependent. The ratios of nugget to sill of pH, organic matter and clay were 10.80%, 16.57% and 12.88%, respectively, indicating that the spatial correlation of the three fertility indices was strongly dependent. The integrated index of soil fertility quality was calculated based on each sample index, then from the spatial distributed map of soil fertility quality we could get the integrated index in the region.

Key words: Geostatistics; Soil fertility quality; Geographical information system; Spatial variability

参考文献:

- [1] Huggett R J. Soil chronosequences, soil development, and soil evolution: a critical review[J]. *Catena*, 1998, 32: 155 - 172.
- [2] Trangmar B B, Yost R S, Uehara G. Application of geostatistics to spatial studies of soil properties[J]. *Advances in Agronomy*, 1985, 38: 45 - 94.
- [3] Berndtsson R, Bahri A and Jinno K. Spatial dependence of geochemical elements in a semiarid agricultural field: II. Geostatistical properties[J]. *SSSAJ*, 1993, 57: 1323 - 1359.
- [4] 郭旭东, 傅伯杰, 等. 基于 GIS 和地统计分析的土壤养分空间变异特征研究[J]. *应用生态学报*, 2000, 11(4): 557 - 563.
- [5] 李艳, 史舟, 等. 地统计学在土壤科学中的应用及展望[J]. *水土保持学报*, 2003, 17(1): 178 - 182.
- [6] Wang J, Fu B J, Qiu Y, et al. Geostatistical analysis of soil moisture variability on Da Nangou catchment of loess plateau, China[J]. *Environmental Geology*, 2001, 41: 113 - 120.
- [7] 鲁如坤主编. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1999.
- [8] 郭旭东, 傅伯杰. 河北省遵化平原土壤养分的时空变异特征 - 变异函数与 Kriging 插值分析[J]. *地理学报*, 2000, 55(5): 555 - 566.
- [9] Cambardella C A, et al. Field scale variability of soil properties in central Iowa soils[J]. *SSSAJ*, 1994, 58: 1501 - 1511.
- [10] 姜勇, 张玉革, 等. 沈阳市苏家屯区耕层土壤养分空间变异性研究[J]. *应用生态学报*, 2003, 14(10): 1673 - 1676.
- [11] Chien Y J, Lee D Y, Guo H Y, et al. Geostatistical analysis of soil properties of mid - west Taiwan soils[J]. *Soil Science*, 1997, 62: 291 - 298.
- [12] 孟凯, 王德录, 等. 黑土有机质分解、积累及其变化规律[J]. *土壤与环境*, 2002, 11(1): 42 - 46.
- [13] 徐尚平, 陶澍, 曹军. 内蒙古土壤 pH、粘粒和有机质含量的空间结果特征[J]. *土壤通报*, 2001, 32(4): 145 - 148.
- [14] 王建国, 杨林章, 单艳红. 模糊数学在土壤质量评价中的应用研究[J]. *土壤学报*, 2001, 38(2): 176 - 183.