植物营养与肥料学报 2011,17(6):1342 -1350
Plant Nutrition and Fertilizer Science

吉林省玉米种植区土壤养分空间变异特征研究

徐新朋[1],赵士诚[1],张云贵[1],何 萍[1*],高 强[2]
(1 农业部作物营养与施肥重点开放实验室,中国农业科学院农业资源与农业区划研究所,北京 100081;
2 吉林农业大学资源与环境学院,长春 130118)

摘要:本文以吉林省中部玉米种植区 9 县市为研究区域,采用传统统计学和地统计学相结合的研究方法,探讨研究区域表层土壤(0—20 cm)有机质、全氮、碱解氮、有效磷、速效钾和 pH 值的空间变异特征。结果表明:各养分的变异系数在 10%～100%之间,属中等变异;有机质、碱解氮、有效磷和速效钾的块金值(C_0)与基台值(C_0+C)比值介于 25%～75%之间,表现出中等强度的空间自相关,而全氮和 pH 值表现强烈的空间自相关;根据决定系数(R^2)和残差平方和(RSS)进行模型选择,几种养分均用指数模型拟合的效果较好;依据 GIS 所做的养分空间变异图可以很好地反应该地区的土壤养分空间分布状况,可以为该地区土壤养分的综合评价和施肥管理决策提供依据。

关键词:GIS;空间变异;地统计学;克里格插值
中图分类号:S158.3　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1008 -505X(2011)06 -1342 -09

Spatial variations of soil nutrients in maize production areas of Jilin province

XU Xin-peng[1], ZHAO Shi-cheng[1], ZHANG Yun-gui[1], HE Ping[1*], GAO Qiang[2]
(*1 Ministry of Agriculture Key Laboratory of Crop Nutrition and Fertilization/Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China;*
2 College of Resources and Environmental Sciences, Jilin Agricultural University, Changchun 130118, China)

Abstract: Statistics and geostatistics methods were adopted to study spatial variations of soil nutrients including total nitrogen (N), available N, available phosphorus (P), available potassium (K), organic matter and pH in top soils from nine counties/cities in main production areas of Jilin province. The results show that the variation coefficients of the soil nutrients are from 10% to 100%, which indicate that the variations are at their medium levels. The spatial structures (nugget/sill) of available N, available P available K and organic matter are from 25% and 75%, which indicate moderate spatial self-correlations, while pH and total N are strong spatial self-correlations. According to the decisive coefficients and the least residual sums of squares(RSS) for the model selections, all nutrients are fitted to exponential model well. The GIS-based nutrient spatial variability figures can reflect spatial distributions of the soil nutrients and provide theoretical bases for soil nutrient management and decision-making in the study area.

Key words: GIS; spatial variability; geostatistics analysis; Kriging

土壤养分空间变异即根据观测和取样资料,分析土壤各特征参数的空间变化特征[1]。分析土壤养分空间变异特征可以有效地揭示土壤养分在空间上的分布情况,为土壤养分管理提供科学依据。地统计学是研究土壤养分空间变异的有效方法[2-3],自上世纪 70 年代,国外学者做了许多土壤养分空间变异规律的研究[4-5],如 Lauzon 等[6]采用 30 m×30 m 网格取样的方法研究了加拿大安大略省 23 个农

收稿日期:2011 -01 -28　　**接受日期**:2011 -07 -26
基金项目:国家重点基础研究发展计划课题(2007CB109306);国家自然科学基金项目(30771256);国家科技支撑计划课题(2006BAD02A14);国际植物营养研究所资助。
作者简介:徐新朋(1984—),男,河北承德人,硕士研究生,主要从事植物养分管理方面的研究。E-mail:xinpengxu@163.com
* 通讯作者 E-mail:phe@caas.ac.cn

场的土壤速效磷、速效钾和 pH 值的空间变异，Haefele 和 Wopereis[7] 在西非研究了水稻田的速效氮、磷和钾的分布情况。国内自上世纪 80 年代以来分别在村、县、省等级的土壤养分空间变异方面也做了许多研究[8-9]，如黄绍文等[10] 应用 GIS 技术研究了河北省玉田县土壤养分空间分布特征，Zhu 等[11] 研究了江苏省土壤氮含量和氮肥施用的空间分布特征，这些都为实现土壤养分的精确管理及合理推荐施肥提供了理论依据。我国农业生产主要以一家一户的小农户为经营单元，由于每个农户的施肥习惯千差万别，势必造成土壤养分在空间上的异质性。然而，近年来随着我国经济的快速发展和与之带来的农业从业人口的减少，农业的规模化发展已经成为未来现代化农业的发展趋势。因此，开展区域土壤养分空间分布特征研究对于指导区域土壤养分管理和合理施肥具有重要意义。

吉林省位于东北平原腹地，典型黑土分布区，土壤肥沃，雨热同步，是世界著名的三大“黄金玉米带”之一。得天独厚的地域优势，使吉林省春玉米生产区具有典型的代表性。玉米播种面积在 292.3 万公顷左右、占作物总播种面积的 65%，总产量约 2083 万吨[12]，玉米单产水平、人均占有量、商品率及出口量均居全国首位，在国内占有举足轻重的地位。但随着开垦时间的延长，黑土区也出现了诸如土壤质量恶化、肥力降低、土地生产力下降等一系列威胁我国黑土资源质量安全和粮食安全的问题。国内学者对黑土区的土壤属性空间变异进行了大量的研究。大区域方面，Zhang 等[13] 以 5 km×5 km 网格法取样研究了整个东北黑土区的土壤养分空间变异；王红娟等[14] 用 20 km×20 km 网格法对整个东北平原土壤速效养分状况及分布特征进行了研究；李志斌等[15] 以 30 km×30 km 网格法采样研究了吉林省中部平原区土壤有效态中、微量元素的空间变异特征。小区域方面，张国刚等[16] 应用 GIS 以 100 m×100 m 网格法取样分析了吉林省公主岭市刘房子村 323 hm^2 耕地的土壤养分空间分布规律；张春华等[17] 以每 10 hm^2 取一个土壤样品研究了吉林省伊通县农田耕层土壤养分空间变异特征；同样，李晓燕等[18] 研究了吉林省德惠市土壤速效钾的空间分异特征。然而对吉林省中部玉米种植区土壤养分空间变异的研究还缺少系统报道。因此，本文应用传统统计学和地统计学对吉林省中部玉米种植区九县市的土壤养分空间变异特征开展研究，旨在为吉林省玉米种植区土壤养分精准分区管理和高效施肥提供理论依据和实践指导。

1　材料与方法

1.1　研究区域概况

本研究区域位于吉林省中部地区，东经 123°45′36″～127°5′56″，北纬 42°4′58″～45°31′19″，面积 3.36×10^4 km^2，包括吉林省中部玉米种植区榆树、德惠、公主岭、九台、梨树、农安、扶余、双阳和伊通九县市。土壤以黑土、草甸土、黑钙土等土壤类型为主。该区域属大陆性季风气候，雨热同期；为典型雨养农业，有效积温（≥10℃）2400～3000℃；全年无霜期为 110～160 d，年均日照时数 2400～2900 h，年平均降水量 400～950 mm，65% 降水集中在 7～8 月份。抗灾能力较弱，玉米生产受干旱等自然因素影响较大，总产波动性较大。种植制度为一年一熟，以玉米为主。

1.2　土壤数据来源与分析

于 2005 年玉米收获后采样，同时进行农户调查，包括：耕作管理、施肥水平、产量水平、种植制度等。土壤采样以农户为基本单元，选择吉林省 9 县市 204 个乡镇 3514 户代表性农户。采用“S”法采集 0—20 cm 深度土壤样品 15～20 个，充分混合后，四分法留取 1 kg，以田块中心为 GPS 定位点。经初步处理，去除采样过程中操作失误，经纬度不正确的点后保留 3488 个有效样点。土壤养分样点分布见图 1。土壤类型图由吉林省土肥站提供 1∶50 万纸板图，数字化为数字土壤类型图，国家测绘局 1∶25 万地形图和地区行政图。通过常规方法分析土壤有机质、全氮、碱解氮、有效磷、速效钾、pH 值 6 个指标。

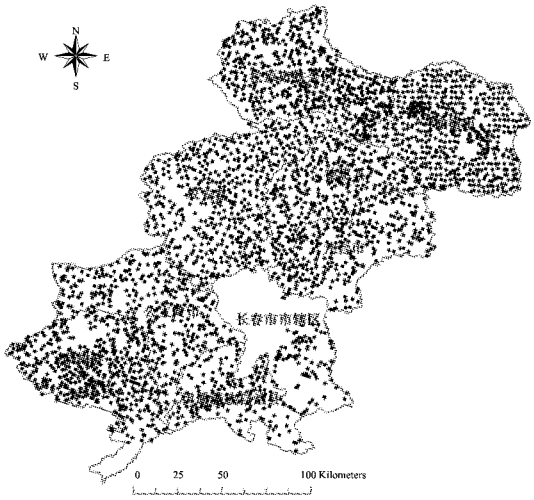

图 1　土壤样点分布图

Fig. 1　Soil sampling sites in the study area

有机质采用重铬酸钾容量法；全氮用半微量开氏法；碱解氮用碱解扩散法；有效磷用 0.5 mol/L $NaHCO_3$ 浸提—钼锑抗显色法；速效钾采用醋酸铵浸提—原子吸收光度法测定；pH 用水土比 2.5∶1，pH 计测定。

1.3 统计分析方法

采用平均值 ±3 倍标准差去除异常值，应用统计分析软件 SAS V8 进行常规统计分析，采用 GS^+ 5.1 软件对土壤养分数据进行半方差分析和空间插值模型的选择，并在 ArcGIS 9.3 中采用 Kriging 法对土壤养分进行空间插值。

2 结果与讨论

2.1 土壤养分含量的统计与分析

对所有采样点进行土壤养分的常规统计分析（表1）。从其变化范围看，有机质的变化范围为 6.42 ～47.42 g/kg，全氮含量的变化范围为 0.33 ～2.86 g/kg，碱解氮、有效磷和速效钾养分含量变化范围分别为：63.76 ～ 257.00、6.52 ～ 120.00 和 14.68 ～ 326.93 mg/kg，pH 值的变化范围为 4.6 ～9.4。从均值来看，有机质均值为 22.94 g/kg，全氮均值为 1.17 g/kg，碱解氮、有效磷和速效钾的均值分别为 128.09、23.80 和 136.66 mg/kg，pH 均值为 6.5。6 个指标的变异系数范围为 15.16% ～ 82.88%，都位于 10% ～ 100% 之间，属于中等变异[1]，且变异系数有效磷 > 全氮 > 速效钾 > 有机质 > 碱解氮 > pH 值，其中全氮、有效磷、速效钾的变异强度比较大，有效磷的变异系数达到了 82.88%，与张兴义等[13]研究的整个东北黑土有效磷的变异系数 80% 是相近的，这与施底肥不均匀和土壤酸碱度有关。有机质、全氮、碱解氮、和 pH 值的中值和平均值之差相对较小，而有效磷和速效钾的中值和平均值之差相对较大。

表1 土壤养分含量和 pH 值描述性统计

Table 1 Descriptive statistics of soil nutrients and pH value

变量 Variable	样本数 *n*	最大值 Max.	最小值 Min.	中值 Median	平均值 Mean	标准差 SD	变异系数 *CV*(%)
有机质 OM(g/kg)	3446	47.42	6.42	23.11	22.94	7.28	31.75
全氮 Total. N (g/kg)	3450	2.86	0.33	1.17	1.17	0.5	42.74
碱解氮 Alk. N(mg/kg)	3454	257.00	63.76	126.05	128.09	38.54	30.09
有效磷 Avail. P(mg/kg)	3389	120.00	6.52	17.40	23.80	19.72	82.88
速效钾 Avail. K(mg/kg)	3434	326.93	14.68	128.87	136.66	55.94	40.95
pH 值 pH value	3480	9.4	4.6	6.4	6.5	0.99	15.16

土壤 6 个养分指标的相关分析表明，有机质与其余 5 种指标均呈极显著的正相关（表2），表明较高的有机质含量可能同时具有较高的速效养分含量，因此有高养分高肥力的特征[19]。碱解氮与有效磷没有相关性，与全氮和速效钾呈极显著的正相关。

表2 土壤 6 个养分指标的相关性分析

Table 2 Statistical correlation analysis between six kinds of soil factors

项目 Item	有机质 OM	全氮 Total. N	碱解氮 Alk. N	有效磷 Avail. P	速效钾 Avail. K	pH 值 pH value
有机质 OM	1					
全氮 Total. N	0.50694**	1				
碱解氮 Alk. N	0.24525**	0.1544**	1			
有效磷 Avail. P	0.05967**	0.04141	0.00516	1		
速效钾 Avail. K	0.22446**	0.0474**	0.20063**	0.08276**	1	
pH 值 pH value	0.0924**	−0.04263	0.0811**	−0.24989**	0.36221**	1

注(Note)：**—$P<0.01$.

2.2　土壤养分的半方差分析

半方差分析要求数据符合正态分布或近正态分布，利用 SAS 软件对 6 种土壤养分要素进行正态分布检验，结果显示，除有效磷以外其余 5 种养分要素均符合或接近正态分布，有效磷在经对数转换后符合正态分布，满足半方差分析。利用地统计分析软件 $GS^{+}5.1$ 对数据进行半方差分析和模型拟合，得到半方差图和相应参数。

表 3 为根据变异函数理论模型得出的相应参数。土壤养分的空间变异是由结构性因素和随机性因素共同作用的结果，块金值（C_0）表示随机部分的空间异质性，基台值（C_0+C）表示系统总变异。

表 3　土壤养分和 pH 值空间变异的理论模型和相应参数

Table 3　Theoretic parameters and models for spatial variabilities of soil nutrients and pH

项目 Item	块金值 C_0 Nugget	基台值 C_0+C Sill	变程 Range (km)	块金值/基台值 Proportion (%)	模型 Model	决定系数 R^2	残差平方和 RSS
有机质 OM	32.8	108.65	99.8	30.1	Exponential	0.815	2787.2
全氮 Total. N	0.116	0.62556	61.1	18.5	Exponential	0.751	2.92E+05
碱解氮 Alk. N	842	1718	67.8	49	Exponential	0.971	21130
有效磷 Avail. P	0.083	0.23051	80.0	36	Exponential	0.516	0.0116
速效钾 Avail. K	2007	6853.343	40.9	29.3	Exponential	0.821	6.15E+06
pH 值 pH value	0.342	2.24367	140	15.2	Exponential	0.959	2.14

注（Note）：R^2—决定系数 Decisive coefficients；RSS—残差平方和 Residual sums of squares.

土壤养分的空间自相关程度可以根据块金值（C_0）与基台值（C_0+C）的比值大小进行划分，当 $C_0/(C_0+C)<25\%$ 时，说明变量具有强烈的空间相关性，表明要素的空间变异主要受结构性因素的影响；当 $C_0/(C_0+C)$ 比值位于 25%～75% 之间时，具有中等强度的自相关性，表明除了结构性因素之外随机性因素对要素的空间变异有明显的影响；$C_0/(C_0+C)>75\%$ 说明空间自相关性微弱，变异主要由随机变异组成，不适合采用空间插值的方法进行空间预测[20]。由模拟的土壤养分空间变异相应参数表明，有机质、碱解氮、速效磷、速效钾的 $C_0/(C_0+C)$ 值均介于 25%～75% 之间，表现出中等强度的空间自相关，且碱解氮 > 有效磷 > 有机质 > 速效钾，说明这 4 种养分的空间变异是由如母质、土壤类型、地形等结构性因素和随机性因素如施肥、耕作措施、种植制度等因素共同作用的结果。且碱解氮的 $C_0/(C_0+C)$ 值为 49%，说明各种人为活动等随机性因素使得土壤碱解氮的空间自相关性减弱。全氮和 pH 值的 $C_0/(C_0+C)$ 值分别为 18.5% 和 15.2%，表现出强烈的空间自相关，表明全氮和 pH 值的空间变异主要受结构性因素的影响。

根据模型拟合的结果，绘制 6 种土壤养分要素的半方差图，横坐标表示变程，纵坐标表示半方差，图 2 为各土壤要素各向同性半方差图。从图 2 和表 3 看，6 种养分要素在一定范围内均存在着空间相关性，且空间自相关的变化尺度不同，速效钾的变程最小，为 40.9 km，pH 的变程最大，为 140 km，其它 4 种养分的变程大小依次为有机质 > 有效磷 > 碱解氮 > 全氮。

对于区域化变量研究，各向同性只是相对的，而各向异性则是绝对的，土壤养分在空间各个方向上的变异往往是不同的[21]。图 3 是各养分要素在四个主要方向（45°、90°、135° 和 180°）的半方差图，可以看出，碱解氮各方向的块金值和基台值基本保持不变，其余各养分要素在不同方向上虽然块金值几乎相同，但基台值差异较大，且达到基台值时的变程也不同，因此在研究土壤养分空间变异时要考虑方向性，减少随机误差，增强空间自相关性。

因此，除碱解氮半方差变异规律为各向同性外，其余各养分要素半方差变异规律均为各向异性。根据决定系数（R^2）和残差平方和（RSS）进行模型选择，结果表明均用指数模型拟合的效果较好，pH 值和碱解氮的决定系数分别高达 0.959 和 0.971，最低的是有效磷，为 0.516（表 3）。

2.3　土壤养分空间变异特征

采用 ArcGIS 9.3 中的 Geostatistics analysis 模块的 Kriging 方法进行最优内插，得到各养分含量等级的空间变异图（图 4），并根据第二次土壤普查土壤养分分级标准对插值图进行分级，同时对各养分等级面积进行统计计算（表 4），并列出各地区的施肥量调查统计结果（表 5）。

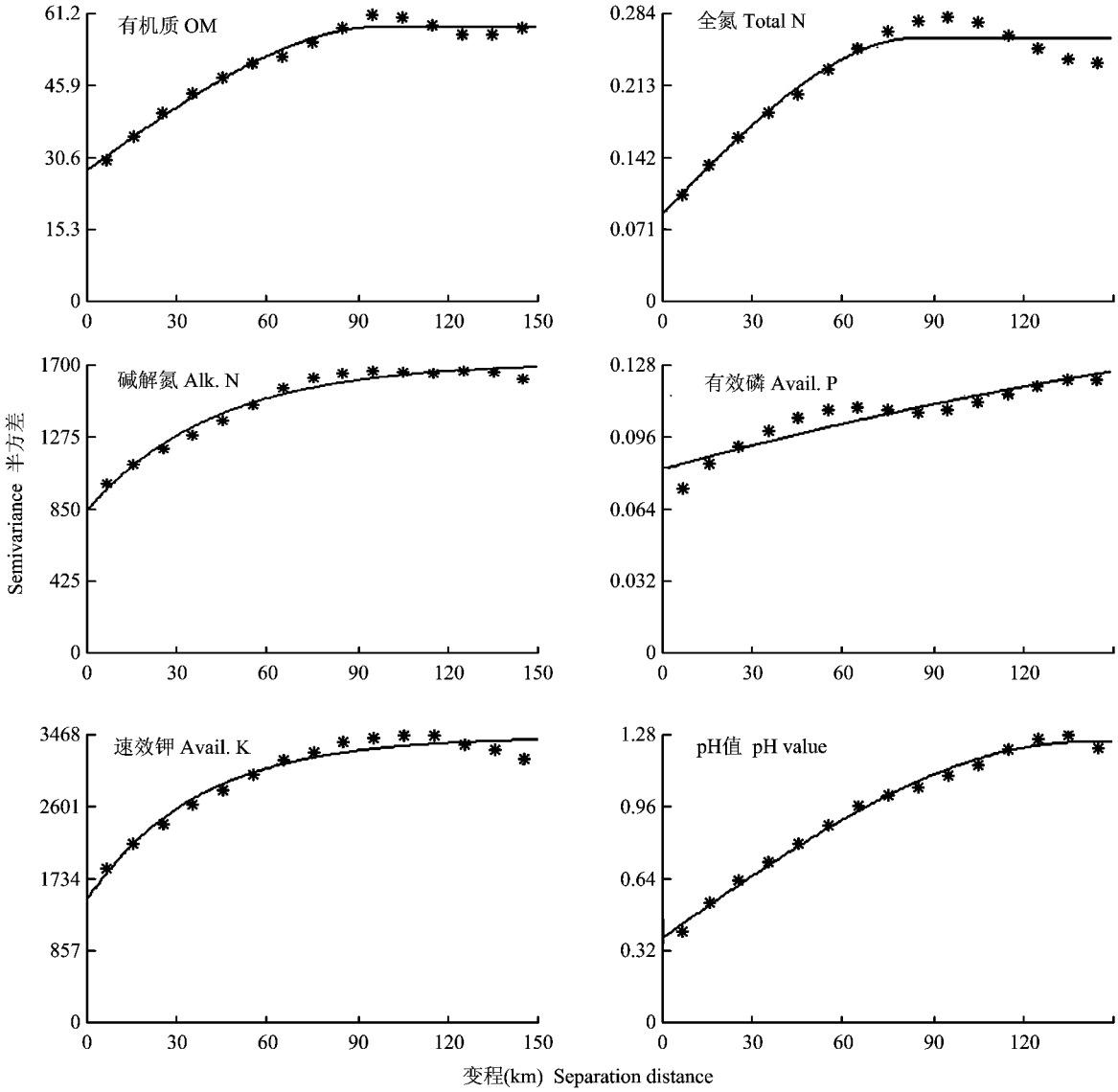

图2 土壤有机质、全氮、碱解氮、有效磷、速效钾和pH值各向同性半方差图

Fig. 2 Isotropic semivariograms of soil organic matter, total nitrogen, available nitrogen, available phosphorus, available potassium and pH

从图4可知,除了公主岭西部和梨树县西北部的碱解氮含量在60～90 mg/kg之间外,其余各县点的碱解氮含量都大于90 mg/kg,属于中等和中等以上水平,且高水平以上碱解氮含量所占面积比例高达65.17%(表4),碱解氮含量最高的区域大于150 mg/kg,出现在农安县大部分区域以及双阳县中部和南部。从施肥情况的调查来看,农安县的平均氮肥施用量很高(表5),使此地区的碱解氮含量处于较高水平。

有效磷仅农安县中部小块区域和公主岭西北部小地区处于较低水平,所占面积比例仅为3.19%(表4),其余各点都处于中上水平,其中梨树和伊通大部分区域速效磷大于40 mg/kg,处于较高水平(图4)。虽然农安县的平均施磷肥量也较高,但由于本地区的土壤pH较高(图4),属碱性土壤,不利于磷的活化,磷容易以磷酸钙盐等形式固定,有效磷含量较低。伊通和梨树地区的有效磷含量较高,与这两地区的磷肥用量较高和适宜的土壤pH值有关。

伊通大部,梨树西部小块,公主岭西部小块,九台东南部,榆树东部速效钾含量小于100 mg/kg处于低水平(图4),其所占面积比例为19.11%(表4),这与本区域农民重氮、磷肥轻钾肥的施肥习惯有关,使土壤钾含量逐年降低,而其余各区域处于中等或中等以上水平,其中农安中部地区速效钾含量大于200 mg/kg,属于高水平,与本地区高的施钾肥量有关(表5)。

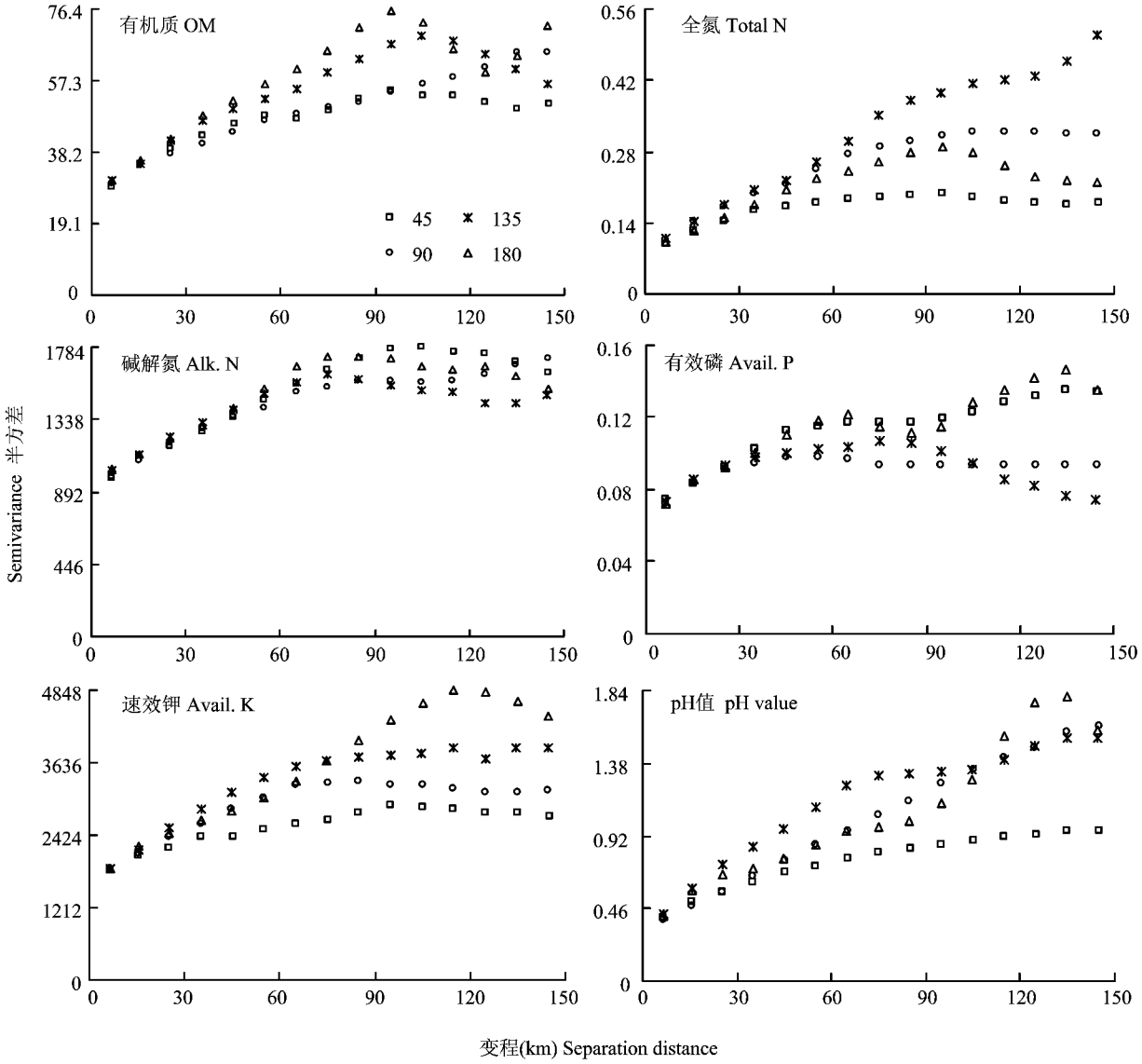

图 3　土壤有机质、全氮、碱解氮、有效磷、速效钾和 pH 值的各向异性半方差图

Fig. 3　Anisotropic semivariograms of soil organic matter, total nitrogen, available nitrogen, available phosphorus, available potassium and pH

九县市土壤有机质含量大多处于 20 ～ 30 g/kg 之间,属于中等水平,其所占面积比例为 72.88%(表 4)。松原市几乎全市、梨树和公主岭西北部的有机质含量处于较低水平(图 4),其所占面积比例为 23.36%,重化肥轻有机肥的施肥习惯使黑土有机质含量下降,这与周永娟等[22]的研究结果也是相同的。松原全市、公主岭和梨树西北部、伊通中东部的全氮含量处于较低水平,所占面积比例为 29.35%(表 4),其余区域多具有中等或较高的全氮含量。pH 值沿着 135 度角从西北方向向东南方向依次降低。

了解土壤养分的分布状况,有利于指导吉林省中部玉米种植区的合理施肥。几种土壤养分要素的空间变异图能够清楚地表明土壤养分的空间分布情况。农民的施肥历史对土壤养分空间分布的影响较大。因此,在本地区进行施肥指导时除了考虑结构性因素之外,应着重考虑施肥、耕作措施等随机性因素。

3　结论

对吉林省中部玉米种植区农田土壤养分空间变异的研究表明: 6 种土壤养分要素在一定范围内均存在空间自相关性,均达到了中等和较强的空间自相关。土壤养分之间存在着一定的相关性,有机质与其余 5 种养分要素含量均呈极显著的正相关,碱解氮与有效磷没有相关性,与全氮和速效钾呈极显

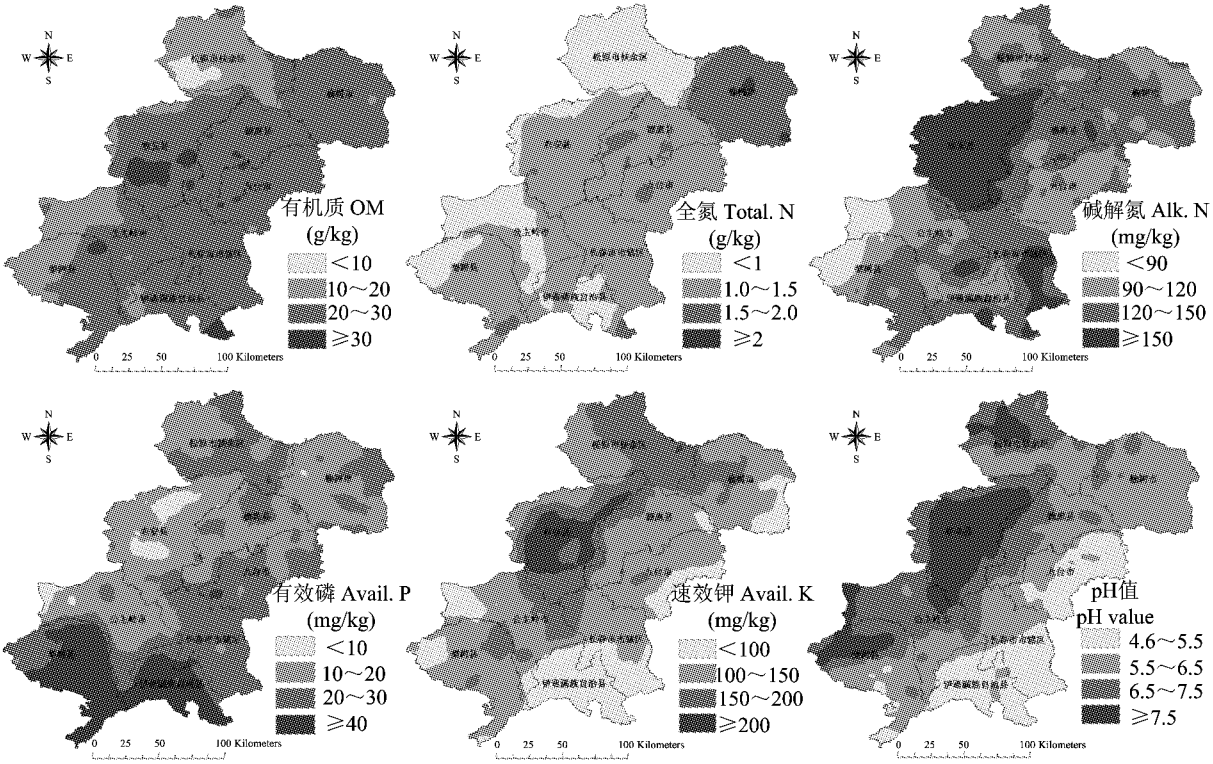

图4 土壤有机质、全氮、碱解氮、有效磷、速效钾和pH值的空间变异图

Fig. 4 Spatial heterogeneities of soil organic matter, total nitrogen, available nitrogen, available phosphorus, available potassium and pH

表4 第二次土壤普查分级标准及土壤养分插值后的分级面积比例统计

Table 4 The national grade standards of the second soil census and statistical ratios of areas by classifying the soil nutrients after Kriging

土壤养分 Soil nutrients		养分分级 Nutrient classification			
		低 Low	中 Middle	高 High	很高 Very high
有机质 OM	含量 Content(g/kg)	< 20	20～30	≥30	
	分级面积比 Ratios of areas (%)	23.36	72.88	3.76	
全氮 Total. N	含量 Content(g/kg)	< 1.0	1.0～1.5	1.5～2.0	≥2.0
	分级面积比 Ratios of areas (%)	29.35	54.84	15.33	0.48
碱解氮 Alk. N	含量 Content(mg/kg)	< 90	90～120	120～150	≥ 150
	分级面积比 Ratios of areas (%)	5.33	29.5	44.68	20.49
有效磷 Avail. P	含量 Content(mg/kg)	< 10	10～20	20～40	≥ 40
	分级面积比 Ratios of areas (%)	3.19	45.43	36.07	15.31
速效钾 Avail. K	含量 Content(mg/kg)	< 100	100～150	150～200	≥200
	分级面积比 Ratios of areas (%)	19.11	48.76	26.25	5.88

著正相关。利用Kriging插值方法对各要素进行最优内插,同时结合当地施肥历史分析土壤养分的丰缺情况,结果显示土壤养分的空间变异图能够很好地反应土壤养分的空间分布,有机质、碱解氮和有效磷总体丰富,多数处于中等或中等以上水平,而速效钾和全氮低水平含量的面积所占比例较高,分别达到了19.11%和29.35%,这与研究区域农户重化肥轻有机肥,重氮、磷肥轻钾肥的施肥方式有密切关系,这种施肥方式下使土壤的有机质和速效钾含量呈下降趋势。

表 5　施肥量调查统计表

Table 5　Fertilizer surveys and statistics

县市 County	调查农户数(n) Survey number	平均施肥量 Average amount of fertilizer applied(kg/hm^2)		
		N	P_2O_5	K_2O
农安 Nong'an	297	358.5	157.5	144.0
德惠 Dehui	299	190.5	61.5	58.5
扶余 Fuyu	520	178.5	72.0	82.5
公主岭 Gongzhuling	1806	204.0	84.0	73.5
九台 Jiutai	2703	211.5	76.5	75.0
梨树 Lishu	2803	235.5	94.5	76.5
双阳 Shuangyang	396	195.0	75.0	69.0
伊通 Yitong	3423	181.5	82.5	69.0
榆树 Yushu	1822	189.0	63.0	55.5

农户的施肥历史对土壤养分的空间分布的影响较大。因此,在施肥指导时应该多考虑施肥等人为因素。

制定符合黑土区的养分分级标准对黑土土壤养分的管理很重要。根据相对产量与土壤速效养分的关系能够真实地反应土壤肥沃程度和养分丰缺状况,并可以进行土壤养分分级,因为产量的变异与土壤养分的变异是相关的[23],但此方面的研究还需要继续加强。在今后的工作中还需要加强土壤养分的空间变异性与养分吸收的空间变异性之间的关系方面的研究,使养分供应与吸收在时空上达到同步,进一步深入讨论影响养分空间变异性和作物养分吸收的内在机理,为养分管理和科学施肥提供理论依据和实践指导。

参 考 文 献:

[1] 雷志栋, 杨诗秀, 许志荣, G. 瓦肖尔. 土壤特性空间变异性初步研究[J]. 水利学报, 1985, 9(9): 10-21.
Lei Z D, Yang S X, Xu Z R, G. Vachaud. Preliminary investigation of the spatial variability of soil properties[J]. J. Hydraul. Eng., 1985, 9(9): 10-21.

[2] Matheron G. Principles of geostatistics[J]. Econ. Geol., 1963, 58: 1246-1266.

[3] 孙洪泉. 地质统计学及其应用[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1990.
Sun H Q. Geostatistics and its application [M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 1990.

[4] Burgess T M, Webster R. Optimal interpolation and isarithmic mapping of soil properties Ⅰ. The semi-variogram and punctual kriging[J]. J. Soil Sci., 1980, 31: 315-331.

[5] Burgess T M, Webster R. Optimal interpolation and isarithmic mapping of soil properties Ⅱ. Block kriging[J]. J. Soil Sci., 1980, 31: 333-341.

[6] Lauzon J D, O'Halloran I P, Fallow D J *et al*. Spatial variability of soil test phosphorus, potassium, and pH of Ontario soils[J]. Agron. J., 2005, 97: 524-532.

[7] Haefele S M, Wopereis M C S. Spatial variability of indigenous supplies for N, P and K and its impact on fertilizer strategies for irrigated rice in West Africa[J]. Plant Soil, 2005, 270: 57-72.

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

[9] 杨俐苹, 姜城, 金继运, 张峰民. 棉田土壤养分精准管理初探[J]. 中国农业科学, 2000, 33(6): 67-72.
Yang L P, Jiang C, Jin J Y, Zhang F M. Study on site-specific nutrient management in cotton field[J]. Sci. Agric. Sin., 2000, 33(6): 67-72.

[10] 黄绍文, 金继运, 杨俐苹, 程明芳. 县级区域粮田土壤养分空间变异与分区管理技术研究[J]. 土壤学报, 2003, 40(1): 79-88.
Huang S W, Jin J Y, Yang L P, Cheng M F. Spatial variability and regionalized management of soil nutrients in the grain crop region in Yutian county[J]. Acta Pedol. Sin., 2003, 40(1): 79-88.

[11] Zhu D W, Huang Y, Jin Z Q *et al*. Nitrogen management evaluated by models combined with gis-a case study of jiangsu croplands, China, in 2000[J]. Sci. Agric. Sin., 2008, 7(8): 999-1009.

[12] 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2009.
China statistical yearbook [M]. Beijing: China Statistics Press, 2009.

[13] Zhang X Y, Sui Y Y, Zhang X D *et al*. Spatial variability of nutrient properties in black soil of northeast China[J]. Pedosphere,

2007, 17(1): 19-29.

[14] 王红娟, 白由路, 魏义长. 东北平原土壤速效养分状况与分布研究[J]. 中国土壤与肥料, 2008, (2): 19-23, 39.
Wang H J, Bai Y L, Wei Y C. Status and distribution of soil nutrients in Northeast plain[J]. China Soils Fert., 2008, (2): 19-23, 39.

[15] 李志斌, 陈佑启, 姚艳敏, 石淑芹. 吉林省中部平原区土壤有效态中微量元素的空间变异特征[J]. 中国生态农业学报, 2007, 15(4): 30-35.
Li Z B, Chen Y Q, Yao Y M, Shi S Q. Spatial variation of available soil medium-and micro-element in Jilin middle plain[J]. Chin. J. Eco-Agric., 2007, 15(4): 30-35.

[16] 张国刚, 王秀芳, 王立春, 等. 应用GIS分析限制玉米高产的土壤养分因子的序位演变[J]. 吉林农业科学, 2004, 29(1): 35-37.
Zhang G G, Wang X F, Wang L C *et al*. Analysis of changes in sequence of limiting factors of soil nutrient in maize production using GIS technology[J]. J. Jilin Agric. Sci., 2004, 29(1): 35-37.

[17] 张春华, 王宗明, 宋开山, 等. 吉林省伊通县农田土壤养分空间变异特征[J]. 农业系统科学与综合研究, 2010, 26(2): 203-208.
Zhang C H, Wang Z M, Song K S *et al*. Spatial variability of soil nutrients in farmland of yitong county, jilin province[J]. Syst. Sci. Compr. Stud. Agric., 2010, 26(2): 203-208.

[18] 李晓燕, 张树文. 吉林省德惠市土壤速效钾的空间分异及不同插值方法的比较[J]. 水土保持学报, 2004, 18(4): 97-100.
Li X Y, Zhang S W. Spatial heterogeneity and comparison of different methods of interpolation of soil available k in Dehui city, Jilin province[J]. J. Soil Water Conserv., 2004, 18(4): 97-100.

[19] 汪景宽, 王铁宇, 张旭东, 等. 黑土土壤质量演变初探Ⅰ—不同开垦年限黑土主要质量指标演变规律[J]. 沈阳农业大学学报, 2002, 33(1): 43-47.
Wang J K, Wang T N, Zhang X D *et al*. An approach to the changes of black soil quality Ⅰ — Changes of the indices of black soil with the year(s) of reclamation[J]. J. Shenyang Agric. Univ., 2002, 33(1): 43-47.

[20] Cambardella C A, Moorman T B, Novak J M *et al*. Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils[J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 1994, 58: 1501-1511.

[21] Rossi R E, Mulla D J, Journel A G, Franz E H. Geostatistical tools for modeling and interpreting ecological spatial dependence[J]. Ecol. Monogr., 1992, 62(2): 277-314.

[22] 周永娟, 侯彦林, 李红英, 王剑峰. 吉林省玉米主产区土壤有机质和速效养分分布特征[J]. 土壤通报, 2008, 39(5): 1038-1041.
Zhou Y J, Hou Y L, Li H Y, Wang J F. Distribution of soil organic matter and available nutrient in maize zone of Jilin province[J]. Chin. J. Soil Sci., 2008, 39(5): 1038-1041.

[23] Jin J Y, Jiang C. Spatial variability of soil nutrients and site-specific nutrient management in the P. R. China[J]. Comput. Electron. Agric., 2002, (36): 165-172.