

高阳县农田土壤速效养分空间变异特征研究

张婵婵^{1,2,3} 张瑞芳^{2,3} 张建恒^{2,3} 张爱军^{2,3} 王 红^{2,3} 周大迈^{2,3*}

(1. 河北农业大学资源与环境科学学院 保定 071000; 2. 河北省山区农业工程技术研究中心 保定 071000;
3. 国家北方山区农业工程技术研究中心 保定 071000)

摘 要 土壤养分空间变异的研究对指导测土配方施肥具有重要意义。为了便于土壤养分的管理,以河北省保定市高阳县为例,应用地统计学和 GIS 相结合的方法,研究了农田土壤速效氮、磷、钾含量的空间变异特征。结果表明:土壤速效氮、磷、钾的含量范围分别为 10.50~210.00 mg·kg⁻¹、1.02~197.75 mg·kg⁻¹ 和 14.51~376.18 mg·kg⁻¹,平均值分别为 76.32 mg·kg⁻¹、22.28 mg·kg⁻¹ 和 128.34 mg·kg⁻¹,变异系数范围为 36.11%~79.71%,属于中等强度变异。速效氮、磷、钾的 $C_0/(C_0+C)$ 值均介于 25%~75%,表现出中等强度的空间自相关,空间变异是结构因素和随机因素共同作用的结果,空间相关距离分别为 43.96 km、1.05 km 和 51.94 km。通过插值误差的比较得出最优拟合模型,速效氮、磷、钾最好的理论模型分别为球状模型、指数模型和球状模型,趋势效应参数宜选取 0 阶。然后用普通克里格方法绘制了土壤速效氮、磷、钾的空间分布图,速效氮含量绝大部分属低等水平,无明显分布特征,速效磷空间分布呈条带状,速效钾空间分布呈条带状和岛状分布相结合的特点。

关键词 ArcGIS 农田 氮、磷、钾 Kriging 插值 空间变异

中图分类号: S158.2 文献标识码: A 文章编号: 1671-3990(2013)06-0758-07

Spatial variability of available nutrients contents in cropland soils in Gaoyang County of Hebei Province, China

ZHANG Chan-Chan^{1,2,3}, ZHANG Rui-Fang^{2,3}, ZHANG Jian-Heng^{2,3}, ZHANG Ai-Jun^{2,3}, WANG Hong^{2,3},
ZHOU Da-Mai^{2,3}

(1. College of Resources and Environmental Sciences, Agricultural University of Hebei, Baoding 071000, China; 2. Mountain District Agricultural Engineering Technology Research Center of Hebei Province, Baoding 071000, China; 3. National Engineering Research Center for Agriculture in Northern Mountain Areas, Baoding 071000, China)

Abstract This study used GIS and geostatistics to analyze the spatial variability and content distribution of available N, P and K as part of a comprehensive management of soil nutrients in Gaoyang County of Hebei Province. Results showed that available N and P distribution was lognormal while that of available K was normal. The averages of soil available N, P and K were respectively 76.32 mg·kg⁻¹, 22.28 mg·kg⁻¹ and 128.34 mg·kg⁻¹. The coefficients of variation ranged from 36.11% to 79.71%, which suggested that the variations were at medium levels. The result showed that $C_0/(C+C_0)$ of available N, P and K were respectively 38.79%, 74.27% and 32.33%, which suggested moderate spatial self-correlations. The spatial variability was caused by structural and random factors. Available K had the longest correlation range (51.94 km), available P the shortest (1.05 km) and that of available N was 43.96 km. Integrated comparisons in interpolation errors were conducted, and the best theoretical model of semivariogram of soil available N, P and K were established, which turned out to be spherical, exponential, spherical models, respectively, with preferable 0-order trend effect. Spatial distribution maps of available N, P and K contents in cropland soils constructed by using universal Kriging interpolation objectively reflected nutrient abundance/deficiency in the study area. The maps suggested that the characteristics of the spatial distribution of available N was insignificant, available P was mainly with a banding distribution and available K was with both banding and island distribution. The content of available N was low, the area of land with 60~90 mg·kg⁻¹ available N accounted for 93.13% of the investigated region. This suggested that there was the need to increase soil nitrogen in the study area. The contents of available P and K were in the medium-to-high range in most of the study area. Also the spatial distribution of available P showed that

* 通讯作者: 周大迈(1957—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事旱作农业和土壤农化方面研究。E-mail: shyhn@hebau.edu.cn
张婵婵(1986—), 女, 硕士研究生, 主要从事植物营养生态研究。E-mail: zhangchanchan08_8@126.com
收稿日期: 2012-09-24 接受日期: 2013-03-04

areas of low, medium, high and very high grades were respectively 0.34%, 31.97%, 46.98% and 20.71% of the study area. Available K map showed that the areas of low, medium, high and very high grades were respectively 0.04%, 40.36%, 54.12% and 5.48% of the study area. The figures of the GIS-based nutrient variability reflected the spatial distribution of soil nutrients and provided the theoretical basis for decision-making and soil nutrient management in the study area.

Key words ArcGIS; Cropland; Nitrogen, phosphorous and potassium; Kriging interpolation; Spatial variability

(Received Sep. 24, 2012; accepted Mar. 4, 2013)

土壤是人类赖以生存和发展最根本的物质基础^[1-2], 土壤养分是衡量土壤生产力的综合指标, 了解其丰缺状况、变异情况、空间格局分布对提高土壤养分管理和推荐测土配方平衡施肥技术以及实施精准农业具有重要的指导意义^[3]。随着地理信息技术的发展和相关软件的问世, 利用地统计学和 GIS 技术相结合的方法研究土壤性质空间变异已成为目前相关领域的研究热点之一^[4-5]。我国区域土壤养分空间变异特征评价的研究起步较晚, 主要是 20 世纪 90 年代后期以来一些科学工作者沿用欧美等发达国家的评价技术体系从事这方面的研究^[6], 已取得了很好的成果。黄绍文等^[7]研究了县域粮田土壤养分空间变异, 孙永健等^[8]研究了稻麦两熟农田土壤速效钾时空变异, 庞凤等^[9]揭示了双流县土壤速效氮、磷、钾含量空间变异特征及其影响因子, 徐新朋等^[10]对吉林省玉米种植区土壤养分空间变异特征进行了研究等等。以往县域土壤养分特征研究普遍存在取样间距大、采样数量少, 从而导致变量空间相关性减弱, 进而影响到 Kriging 估值的精度^[11]。本文针对上述理论和实际问题, 以河北省高阳县土壤速效氮、磷、钾为例, 减小了取样间距, 加大了采样数量, 研究其空间变异特征, 为实现土壤养分的精确管理提供理论依据。

1 研究区概况

河北省高阳县地处华北平原, 位于北纬 $38^{\circ}30' \sim 38^{\circ}46'$, 东经 $115^{\circ}38' \sim 115^{\circ}59'$, 辖 4 镇 5 乡, 180 个行政村, 总面积 $4.75 \times 10^4 \text{ km}^2$, 其中耕地面积 $3.43 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。全境处于温带大陆性季风气候区, 四季分明, 春季多风少雨, 夏季炎热雨盛, 秋季风清气爽, 冬季寒冷干燥, 年均温 12.0°C , $\geq 10.0^{\circ}\text{C}$ 积温 4325.0°C , 无霜期 186 d, 年平均降水 522.1 mm, 地貌类型冲积平原, 母质类型属河流冲积物。全县土壤有潮土 1 个土类, 2 个亚类, 12 个土种, 其中沙壤质潮土占总面积的 14.71%, 壤质潮土占 64.69%, 盐化潮土占 19.31%, 还有少量沙质潮土和脱沼潮土。全县地势平坦, 土层深厚, 农业生产历史悠久, 以种植业为主, 粮食作物以冬小麦和玉米为主。

2 研究方法

2.1 土壤样品采集及养分化验

根据农业部测土配方施肥的要求, 在高阳县全国第 2 次土壤普查的主剖面点位基础上, 按照“随机”、“等量”和“多点混合”的原则, 2009—2011 年在研究区域选取样点 3 159 个, 平均每 $3.33 \sim 6.67 \text{ km}^2$ 设置 1 个采样点, 每样点设 15 个取土点, 采用 S 形布点采样, 取耕层 0~20 cm 土壤, 采样集中在位于每个采样单元相对中心位置的典型地块, 为确保采样能代表采样单元的土壤特性, 每个样品一律由 15 个土样均匀混合组成, 并采用全球卫星定位系统 (GPS) 准确标定每个中心点的经纬度坐标, 采样点地理位置见图 1。

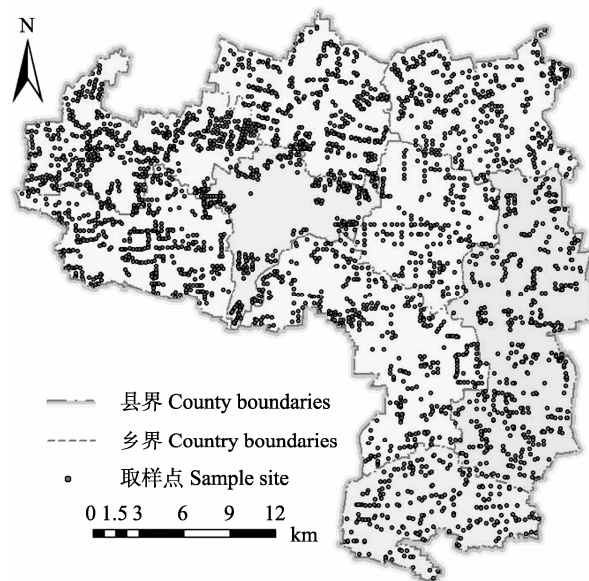


图 1 高阳县土壤采样点分布图

Fig. 1 Diagram of sampling sites in Gaoyang County

把所采集的土壤样品去除杂质, 风干, 过筛, 用于土壤养分的化学分析。速效氮测定采用碱解扩散法, 土壤速效磷测定采用 $0.5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ NaHCO}_3$ 浸提-钼锑抗比色法, 土壤速效钾测定采用 $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ NH}_4\text{OAc}$ 浸提-火焰光度计法^[12]。

2.2 土壤养分图制作步骤

土壤养分图的制作流程包括整理养分数据, 纸

质地图的扫描和栅格图像的配准、矢量化, 采样点分布图的生成, 空间插值、养分分级及成图等步骤。

2.2.1 建立研究区边界

本研究选取 1:50 000 高阳县土地利用现状图作为地理基础底图, 将其扫描为栅格图像。选择 8 个分布比较均匀的经纬线交点、公路网格的交点或者已知坐标典型地物作为控制点, 在 ArcMap 中配准栅格图像, 实现图件坐标向真实坐标的转换。然后通过矢量化建立研究区边界, 设置属性字段, 保存为 shapefile 格式文件。

2.2.2 生成 shapefile 样点文件

将土壤养分数据库的 Excel 电子表格导入 Access, 将数据导出为数据库格式的 dbf 文件, 导入 ArcGIS 的 ArcMap 平台, 添加 XY 数据, 导出为 shapefile 样点文件, 可以在 ArcGIS 的插值处理中直接使用。

2.2.3 土壤养分的克里格插值

地统计学已经被证明是分析土壤特性空间分布特征及其变异规律的最有效方法之一^[13]。地统计学插值常用于将离散点的测量数据转化为连续的数据曲面, 以便与其他空间现象分布模式进行比较。克里格插值(Kriging)又称空间局部插值, 是以变异函数理论和结构分析为基础, 在有限区域内多区域化变量进行无偏最优估计的一种方法^[14]。其适用范围为区域化变量存在空间相关性, 即如果变异函数和结构分析的结果表明区域化变量存在空间相关性, 则可以利用克里格方法进行内插或外推; 否则不适用。因此插值前, 首先要对养分数据进行初步检查, 包括数据的常规统计特征、是否符合正态分布等。

3 结果与分析

3.1 速效氮、磷、钾含量的统计特征与正态分布性检验

通过 Geostatistical Analyst 模块中的 Histogram 直方图分析对土壤样本的养分数据进行分析, 获得土壤养分的描述性统计特征(表 1)。如果变量的偏斜度为 0, 峰度为 3, 那么这个变量呈正态分布, 否则为偏态。从表中可以看出, 农田土壤速效氮和速效

磷含量基本呈对数正态分布, 速效钾呈正态分布。3 种速效养分最大值和最小值之间差异显著, 表明其在研究区内的值域分布广泛, 但峰度检验值较大, 说明土壤速效氮、磷、钾含量集中分布在某一值域范围内。土壤速效氮、磷、钾含量变异系数均处于 10%~100%, 属于中等变异(变异系数 $\leq 10\%$ 时为弱变异性, 10%~100%为中等变异, $\geq 100\%$ 为强变异性^[15-16])。速效磷的变异系数达到 79.71%, 说明人为因素对速效磷空间变异性的影响较速效氮与速效钾强。

3.2 速效氮、磷、钾含量的趋势分析和插值模型选择

由于受自然和人为因素的影响, 区域土壤性质的空间分布常呈明显的趋势特征和异向性分布, 通过 Geostatistical Analyst 模块中的趋势分析对养分数据进行分析, 可获取土壤性质趋势特征参数及异向性分布特征参数。趋势效应一般分为 0 阶(没有趋势效应)、常量(区域化变量沿一定方向呈常量增加或减少)、一阶(区域化变量沿一定方向呈直线变化)、二阶或多阶(区域化变量沿一定方向呈多项式变化)。图 2 是研究区速效氮、磷、钾含量的趋势分析示意图。图中 X 轴表示正东方向, Y 轴表示正北方向, Z 轴表示各样点实测值的大小; 左后投影面上的曲线表示东-西向的全局性趋势效应变化, 右后投影面上的曲线表示的是南-北向全局性的趋势效应变化。图 2 表明, 研究区速效氮含量在两个方向上呈一阶趋势, 且无明显变异; 速效磷在南-北方向上存在倒“U”形的二阶趋势, 速效钾南-北方向上存在“U”形的二阶趋势, 速效磷和速效钾在东-西方向上都呈一阶趋势, 且无明显变异。

考虑各向异性, 对土壤速效氮、磷、钾分别选择 0 阶、一阶和二阶趋势效应参数, 结合普通克里格法的理论模型造成的插值误差进行比较(表 2)。判断半方差函数模型及其参数是否合适, 可按以下标准进行: 平均误差(ME)的绝对值最接近于 0; 标准化平均误差(MSE)最接近于 0; 均方根误差(RMSE)越小越好; 平均标准误差(ASE)与均方根误差(RMSE)最接近, 如果 $ASE > RMSE$ 则高估了预测值, 反之如果 $ASE < RMSE$ 则低估了预测值; 标准化均方根误

表 1 高阳县农田土壤速效氮、磷、钾描述性统计分析

Table 1 Description statistics of available nitrogen, phosphorus and potassium contents of cropland soil in Gaoyang County $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

土壤养分 Soil nutrient	最大值 Max.	最小值 Min.	中值 Median	平均值 Mean	标准差 S.D.	变异系数 CV (%)	偏度 Skewness	峰度 Kurtosis	分布类型 Distribution type
速效氮 Available N	210.00	10.50	72.69	76.32	27.56	36.11	-0.471 6*	4.880 3*	对数正态 Lognormal
速效磷 Available P	197.75	1.02	17.90	22.28	17.76	79.71	-0.299 8*	3.771 5*	对数正态 Lognormal
速效钾 Available K	376.18	14.51	118.41	128.34	52.34	40.78	-0.751 3	5.599 8	正态 Normal

*表示该指标经对数变换后符合正态分布 * means this index accord with normal distribution after logarithmic transformation.

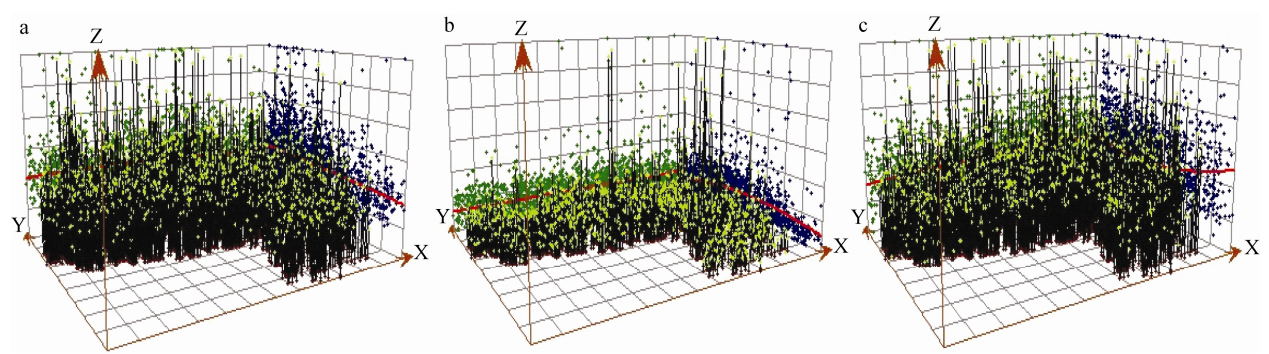


图 2 高阳县农田土壤速效氮(a)、磷(b)、钾(c)含量趋势图

Fig. 2 Surface trend of available nitrogen (a), phosphorus (b) and potassium (c) contents of cropland soil in Gaoyang County

表 2 高阳县农田土壤速效氮、磷、钾含量不同趋势插值模型误差的比较

Table 2 Comparisons of interpolating error with different trends and models of available nitrogen, phosphorus and potassium contents of cropland soil in Gaoyang County

养分 Nutrient	趋势效应 Trend effect	模型 Model	预测误差 Prediction error				
			平均误差 Mean error (ME)	均方根误差 Root mean square error (RMSE)	平均标准误差 Standard error of mean (ASE)	标准化平均误差 Mean square error (MSE)	标准化均方根误差 Normalized root mean square error (RMSSE)
速效氮 Available N	0 阶 0-order	球形 Spherical	-0.206	27.965	28.118	-0.007	0.994
		指数 Exponential	-0.208	27.965	28.780	-0.007	0.971
		高斯 Gaussian	-0.208	27.968	28.383	-0.007	0.985
	一阶 1-order	球形 Spherical	-0.201	27.964	28.118	-0.007	0.994
		指数 Exponential	-0.203	27.964	28.800	-0.007	0.971
		高斯 Gaussian	-0.203	27.967	28.383	-0.007	0.985
	二阶 2-order	球形 Spherical	-0.204	27.966	28.118	-0.007	0.994
		指数 Exponential	-0.206	27.965	28.800	-0.007	0.971
		高斯 Gaussian	-0.206	27.969	38.383	-0.007	0.985
速效磷 Available P	0 阶 0-order	球形 Spherical	0.132	16.765	17.561	-0.012	0.985
		指数 Exponential	0.047	16.743	17.120	-0.018	1.011
		高斯 Gaussian	0.182	16.797	17.862	-0.008	0.970
	一阶 1-order	球形 Spherical	0.338	16.811	18.465	-0.002	0.943
		指数 Exponential	0.132	16.767	17.584	-0.012	0.986
		高斯 Gaussian	0.248	16.809	18.159	-0.005	0.956
	二阶 2-order	球形 Spherical	0.113	16.768	17.545	-0.013	0.988
		指数 Exponential	0.069	16.743	17.257	-0.017	1.004
		高斯 Gaussian	0.134	16.796	17.710	-0.012	0.980
速效钾 Available K	0 阶 0-order	球形 Spherical	-0.111	53.981	69.369	-0.001	0.777
		指数 Exponential	-0.110	54.005	72.956	-0.001	0.739
		高斯 Gaussian	-0.109	53.995	71.498	-0.001	0.754
	一阶 1-order	球形 Spherical	-0.113	53.985	69.369	-0.001	0.777
		指数 Exponential	-0.113	54.009	72.956	-0.001	0.740
		高斯 Gaussian	-0.112	53.999	71.499	-0.001	0.754
	二阶 2-order	球形 Spherical	-0.122	53.994	69.381	-0.002	0.777
		指数 Exponential	-0.122	54.016	72.868	-0.002	0.741
		高斯 Gaussian	-0.121	54.007	71.512	-0.002	0.754

差(RMSSE)最接近于 1, 如果 $RMSSE<1$, 则高估了预测值, 反之如果 $RMSSE>1$, 则低估了预测值^[17]。由表 2 可知, 趋势效应对插值误差的影响并不显著, 不同插值模型对插值误差的影响较大。综合考虑, 在进行普通克里格插值的时候土壤速效氮、磷、钾分别选择 Spherical、Exponential 和 Spherical 模型,

趋势效应均选择 0 阶。

3.3 速效氮、磷、钾含量的变异函数分析

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。块金值和基台值之比可以揭示变量的空间相关程度,若比值 $<25\%$,表明变量具有强烈的空间相关性,且空间变异主要受结构性因子影响;若比值 $>75\%$,则说明变量的空间相关性很弱,且空间变异主要受随机性因子影响^[18-19]。由表 2 可知,速效氮、磷、钾的 $C_0/(C_0+C)$ 值均介于 $25\%\sim75\%$,表现出中等强度的空间自相关,且速效磷 $>$ 速效氮 $>$ 速效钾,说明这 3 种养分的空间变异是由母质、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。速效磷

的 $C_0/(C_0+C)$ 值为 74.27% ,说明各种人为活动等随机性因素使得土壤速效磷的空间自相关性大幅减弱(表 3)。

3.4 速效氮、磷、钾含量的空间变异特征

采用 ArcGIS 10.0 中 Geostatistics analysis 模块的普通克里格方法进行最优内插,得到了高阳县土壤速效氮、磷、钾含量的空间分布图(图 3)。根据全国第 2 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)。由图 3 可知,高阳县速效氮含量绝大部分都在 $60\sim90\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,属于低等水平;速效磷空间分布呈条带状,西部和东部含量高,中部含量低;速效钾空间分布呈条带状和岛状分布相结合的特点,大部分处于中等或高等水平。由表 4 可知,高阳县速效氮含量低,速效磷和速效钾含量丰富。

表 3 高阳县农田土壤速效氮、磷、钾含量变异函数理论模型及相关参数

Table 3 Best-fitted semivariogram models and corresponding parameters of available nitrogen, phosphorus and potassium contents of cropland soil in Gaoyang County

养分 Nutrient	理论模型 Model	块金值 C_0 Nugget	基台值 C_0+C Sill	变程 Range (km)	块金值/基台 $C_0/(C_0+C)$ Nugget/sill (%)
速效氮 Available N	球形 Spherical	0.055 7	0.140	43.96	38.79
速效磷 Available P	指数 Exponential	0.384	0.517	1.05	74.27
速效钾 Available K	球形 Spherical	1 419.28	4 390.38	51.94	32.33

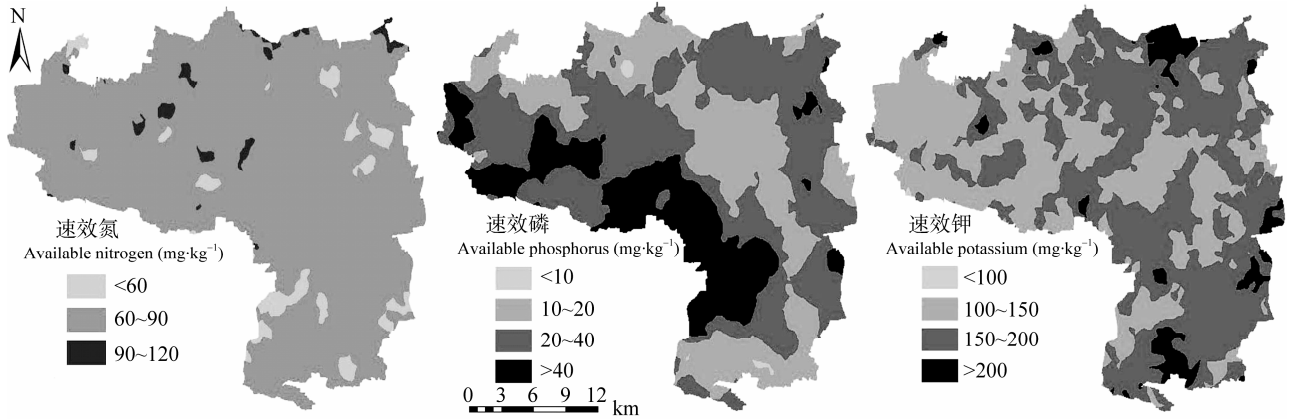


图 3 高阳县农田土壤速效氮、磷、钾分布图

Fig. 3 Spatial distributions of available nitrogen, phosphorus and potassium of cropland soil in Gaoyang County

表 4 第 2 次土壤普查分级标准及插值后的高阳县土壤养分分级面积比例

Table 4 National grade standards of the second soil census and area ratios of different grades of soil nutrients of cropland soil in Gaoyang County

土壤养分 Soil nutrient		养分分级 Nutrient classification				
		极低 Very low	低 Low	中 Middle	高 High	极高 Very high
速效氮	分级标准 Grade standard ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	<60	$60\sim90$	$90\sim120$	$120\sim150$	>150
Available N	分级面积比 Area ratio (%)	4.96	93.13	1.91	—	—
速效磷	分级标准 Grade standard ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	<5	$5\sim10$	$10\sim20$	$20\sim40$	>40
Available P	分级面积比 Area ratio (%)	—	0.34	31.97	46.98	20.71
速效钾	分级标准 Grade standard ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	<50	$50\sim100$	$100\sim150$	$150\sim200$	>200
Available K	分级面积比 Area ratio (%)	—	0.04	40.36	54.12	5.48

4 结论

研究区土壤速效氮、磷、钾属于中等强度变异,表现出中等强度的空间自相关,空间变异是结构因素和随机因素共同作用的结果,与杨玉玲等^[20]、秦占飞等^[21]的研究结果相同,但与大部分的研究结果不同^[22-25]。说明对于不同的研究区域、区域尺度,速效氮、磷、钾的空间变异是不同的。

趋势分析表明,土壤速效氮呈变异不明显的一阶趋势效应,速效磷在南-北方向上存在倒“U”形的二阶趋势,速效钾南-北方向上存在“U”形的二阶趋势。对土壤速效氮、磷、钾克里格插值误差的综合比较表明,速效氮和速效钾选择球状模型,速效磷选择指数模型,三者均为无趋势效应拟合效果较好。

采用普通克里格最优内插法得到了高阳县土壤速效氮、磷、钾含量空间分布图。速效氮含量绝大部分属低等水平,无明显分布特征,速效磷空间分布呈条带状,速效钾空间分布呈条带状和岛状分布相结合的特点。

参考文献

- [1] Goovaerts P. Geostatistics in soil science: State-of-the-art and perspectives[J]. *Geoderma*, 1999, 89(1/2): 1-45
- [2] 唐群锋, 杨安福, 王汀忠, 等. 定安县耕地土壤主要养分的空间变异[J]. *热带作物学报*, 2007, 28(1): 44-50
Tang Q F, Yang A F, Wang T Z, et al. Spatial variation of soil main nutrients on arable land in Ding'an County[J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2007, 28(1): 44-50
- [3] 方睿红, 常庆瑞. 关中平原台塬区土壤养分空间格局研究——以西安市长安区为例[J]. *水土保持研究*, 2011, 18(6): 141-145
Fang R H, Chang Q R. Study on spatial distribution pattern of soil nutrients in Guanzhong Plain—A case study in Chang'an District of Xi'an City[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2011, 18(6): 141-145
- [4] 王良杰, 赵玉国, 郭敏, 等. 基于GIS与模糊数学的县级耕地地力质量评价研究[J]. *土壤*, 2010, 42(1): 131-135
Wang L J, Zhao Y G, Guo M, et al. Evaluation of farmland productivity based on GIS and fuzzy mathematics theory at county level[J]. *Soils*, 2010, 42(1): 131-135
- [5] 李强, 周冀衡, 杨荣生, 等. 马龙县植烟土壤养分空间变异特征及适宜性评价[J]. *土壤*, 2011, 43(6): 897-902
Li Q, Zhou J H, Yang R S, et al. Assessment of feasibility and spatial variability of nutrient contents of tobacco soils in Malong County[J]. *Soils*, 2011, 43(6): 897-902
- [6] 孙义祥, 吴传洲, 朱克保, 等. 插值方法与样点数对县域土壤有效磷空间变异特征评价的影响[J]. *应用生态学报*, 2009, 20(3): 673-678
Sun Y X, Wu C Z, Zhu K B, et al. Influence of interpolation method and sampling number on spatial prediction accuracy of soil Olsen-P[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, 20(3): 673-678
- [7] 黄绍文, 金继运, 杨俐苹, 等. 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, et al. Spatial variability and regionalized management of soil nutrients in the grain crop region in Yutian County[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2003, 40(1): 79-88
- [8] 孙永健, 周蓉蓉, 王长松, 等. 稻麦两熟农田土壤速效钾时空变异及原因分析——以江苏省仪征市为例[J]. *中国生态农业学报*, 2008, 16(3): 543-549
Sun Y J, Zhou R R, Wang C S, et al. Spatio-temporal variation of soil available potassium under wheat-rice double cropping system—A case study in Yizheng City, Jiangsu Province[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2008, 16(3): 543-549
- [9] 庞凤, 李廷轩, 王永东, 等. 土壤速效氮、磷、钾含量空间变异特征及其影响因子[J]. *植物营养与肥料学报*, 2009, 15(1): 114-120
Pang S, Li T X, Wang Y D, et al. Spatial variability of soil available N, P and K and influencing factors[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2009, 15(1): 114-120
- [10] 徐新朋, 赵士诚, 张云贵, 等. 吉林省玉米种植区土壤养分空间变异特征研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2011, 17(6): 1342-1350
Xu X P, Zhao S C, Zhang Y G, et al. Spatial variations of soil nutrients in maize production areas of Jilin Province[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2011, 17(6): 1342-1350
- [11] Andronikov S V, Davadson D A, Spiers R B. Variability in contamination by heavy metals: Sampling implications[J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 2000, 120(1/2): 29-45
- [12] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 第三版. 北京: 中国农业出版社, 2000: 30-33, 56-57, 81-83
Bao S D. Soil and agricultural chemistry analysis[M]. 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2000: 30-33, 56-57, 81-83
- [13] 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——以河北省遵化市为例[J]. *应用生态学报*, 2000, 11(4): 557-563
Guo X D, Fu B J, Ma K M, et al. Spatial variability of soil nutrients based on geostatistics combined with GIS—A case study in Zunhua City of Hebei Province[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2000, 11(4): 557-563
- [14] 汤国安, 杨昕. ArcGIS地理信息系统空间分析实验教程[M]. 北京: 科学出版社, 2006: 368
Tang G A, Yang X. Space analysis experimental course of ArcGIS[M]. Beijing: Science Press, 2006: 368
- [15] 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
Hu K L, Li B G, Lin Q M, et al. Spatial variability of soil nutrient in wheat field[J]. *Transactions of the CSAE*, 1999, 15(3): 33-38
- [16] Wang Y Q, Zhang X C, Zhang J L, et al. Spatial variability of

- soil organic carbon in a watershed on the Loess Plateau[J]. *Pedosphere*, 2009, 19(4): 486–495
- [17] 路鹏, 彭佩钦, 宋变兰, 等. 洞庭湖平原区土壤全磷含量地统计学和 GIS 分析[J]. *中国农业科学*, 2005, 38(6): 1204–1212
- Lu P, Peng P Q, Song B L, et al. Geostatistical and GIS analyses on soil total P in the typical area of Dongting Lake Plain[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2005, 38(6): 1204–1212
- [18] Cambardella C A, Moorman T B, Parkin T B, et al. Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils[J]. *Soil Sci Soc Am J*, 1994, 58(5): 1501–1511
- [19] Weindorf D C, Zhu Y. Spatial variability of soil properties at Capulin Volcano, New Mexico, USA: Implications for sampling strategy[J]. *Pedosphere*, 2010, 20(2): 185–197
- [20] 杨玉玲, 盛建东, 田长彦, 等. 盐化灌淤土壤速效氮、磷、钾空间变异性与棉花生长关系初步研究[J]. *中国农业科学*, 2003, 36(5): 542–547
- Yang Y L, Sheng J D, Tian C Y, et al. A study on relationship between the spatial variability of saline anthropogenic alluvial soil available nitrogen, phosphorous, potassium and cotton growth[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2003, 36(5): 542–547
- [21] 秦占飞, 常庆瑞. 县域土壤养分空间变异分析——以蒲城县为例[J]. *干旱地区农业研究*, 2012, 30(1): 30–35
- Qin Z F, Chang Q R. Analysis on spatial variability of soil nutrients at county level—A case study in Pucheng County[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2012, 30(1): 31–35
- [22] 盛建东, 肖华, 武红旗, 等. 不同取样尺度农田土壤速效养分空间变异特征初步研究[J]. *干旱地区农业研究*, 2005, 23(2): 63–67
- Sheng J D, Xiao H, Wu H Q, et al. Primary study of spatial variability of available soil nutrients in farmland with different sampling intervals[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2005, 23(2): 63–67
- [23] 赵军, 孟凯, 隋跃宇, 等. 海伦黑土有机碳和速效养分空间异质性分析[J]. *土壤通报*, 2005, 36(4): 487–492
- Zhao J, Meng K, Sui Y Y, et al. Analysis for spatial heterogeneity of organic carbon and available nutrients in black soil region of Hailun County[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2005, 36(4): 487–492
- [24] 张少良, 张兴义, 于同艳, 等. 哈尔滨市辖区黑土速效养分空间异质性分析[J]. *土壤通报*, 2008, 39(6): 1277–1283
- Zhang S L, Zhang X Y, Yu T Y, et al. Cokriging application in the spatial variability analysis of available nutrients in the black soil region of Harbin[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2008, 39(6): 1277–1283
- [25] 刘杨, 孙志梅, 杨军, 等. 京东板栗主产区土壤氮磷钾的空间变异[J]. *应用生态学报*, 2010, 21(4): 901–907
- Liu Y, Sun Z M, Yang J, et al. Spatial variability of soil N, P and K in main production area of *castanea mollissima*[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(4): 901–907