

微地形土壤养分空间变异特征及养分管理研究

王 强¹, 张莉莉², 马友华³, 张承祥^{3*}

(1. 安徽农业大学资源与环境学院, 合肥 230036; 2. 安徽粮食工程职业学院, 合肥 230011;
3. 安徽农业大学新农村发展研究院, 合肥 230036)

摘 要: 选取安徽省郑蒲港新区作为研究区域, 运用地理信息系统与地统计学相结合的方法, 选取土壤有机质、pH、全氮、碱解氮、有效磷、速效钾作为研究对象, 选择不同的插值模型, 并分析了各土壤要素的空间变异特征。结果表明, 受到土地平整和施肥等人为因素影响, 地形因子(高程、坡度)对土壤养分的影响程度较小, 研究区河流隔开采样数据出现空间不连续, 采用区域分块插值的核平滑方法插值模型最为稳定, 更加符合研究区实际情况, 不会出现为满足假设条件而出现系数为负的插值方程。研究区 5 种土壤元素均呈现南北低中间高的趋势, 土壤速效钾和有效磷的变异系数较高, 碱解氮和有机质变异性较弱, pH 变异性最弱。占研究区 90% 以上的土壤 4 种养分元素均土壤有机质含量均处在中上水平以上, 只有占研究区面积的 19.66% 和 72.30% 的碱解氮, 分别处在中上、中下水平, 研究区面积的 61.6% 和 35.67% 的 pH 分别处于酸和弱酸级水平。

关键词: 土壤养分; 克里格插值; 微地形

中图分类号: S158

文献标识码: A

文章编号: 1672-352X (2016)06-0932-07

Spatial variability of soil nutrients and nutrient management in micro-topography

WANG Qiang¹, ZHANG Lili², MA Youhua³, ZHANG Chengxiang³

(1. School of Resources and Environment, Anhui Agricultural University, Hefei 230036;

2. Anhui Vocational College of Grain Engineering, Hefei 230011;

3. New Rural Development Research Institute, Anhui Agricultural University, Hefei 230036)

Abstract: In this research, we chose different interpolation models to analyze the spatial variability of the soil elements in Chengpo port district of Anhui Province by analyzing soil organic matter, pH, total nitrogen, alkali nitrogen, available phosphorus and available potassium using Geostatistics method combined with GIS. The results showed that the topography (altitude and slope) exerted a little effect on soil nutrients due to activities including levelling the land and fertilizing. We observed that the data of river segregation samples remained spatially discontinuous, while the interpolation model by applying of kernel smoothing method in regional segregation interpolation kept the most stable, which corresponded to the realistic situation in the research region, avoiding a minus coefficient interpolation equation just for meeting the assumed conditions. All the five elements in the soil showed a trend of lower in South and North, and higher in the middle. Meanwhile, the variation coefficient of soil available potassium and phosphorus was high, while the variability of alkali-hydrolyzed nitrogen and organic matter was weak and pH was the weakest. The soil nutrients accounted for more than 90% of the study area were all above the middle and upper levels of soil organic matter content. Only 19.66% and 72.30% of alkali nitrogen in the soil of the study area were in the upper and lower levels. At the same time, the soil pH value of 61.6% of the study area was at the acid level, while the soil pH of 35.67% of the study area was at a weak acid level.

Key words: soil nutrients; Kriging interpolation; micro-topography; spatial variability

土壤养分提供了植物生长所需的必需元素, 在土地的可持续利用中发挥着重要作用。土壤养分的

空间异质性^[1], 是影响作物产量和品质空间异质性的主要因素^[2], 这也是农业生产管理和土壤资源管

收稿日期: 2016-08-23

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划“产业聚集区村镇宜居社区建设关键技术研究” (2013BAJ10B12) 资助。

作者简介: 王 强, 博士, 讲师。E-mail: allen9084@sohu.com

* 通信作者: 张承祥, 副研究员。E-mail: kjcxcx@ahau.edu.cn

理的重要基础。因此, 分析土壤养分的变异性是实现精准农业中精准养分管理决策、变量肥料投入的核心之一。土壤养分含量空间变化是由自然和人为两大因素所决定, 自然因素如地形、降水等, 导致土壤养分含量存在结构性差异; 人为因素如施肥、耕作等, 农户的施肥量不可能统一, 导致土壤养分含量存在随机性差异。

基于统计学中区域化变量理论的发展为量化土壤养分的空间变异特征提供了先进的理论^[3], 可以依据空间插值对土壤性质空间分布格局的研究^[4], 应用于农田养分管理, 以提高肥料的利用率效率。因此, 土壤养分空间变异与作物养分管理结合是农田养分管理的研究热点之一^[5-13]。地理信息系统 (GIS) 的发展为地统计学方法空间数据内插实现地图可视化提供了简便、可靠的工具, 被广泛应用于土壤性质异质性的研究^[14-20], 为土壤养分空间变异和指导农业生产的养分管理提供了有效的数据支撑。

然而, 大量的研究集中长期稳定的地形条件下对土壤数据的表征分析, 集中分析了土壤形成过程中自然和人为影响的复杂性^[21-22], 但对人为土地平整造成的微地形变化以及水利设施造成土壤养分空间不连续情况下土壤养分空间分布特征研究较少。因此, 本研究运用 GIS 和克里金法相结合的方法, 选择 3 种克里金算法对郑蒲港姥桥镇同创现代产业园区的近 8000 亩耕地的土壤 pH、有机质、全氮、碱解氮、有效磷、速效钾的空间变异及分布特征进行了分析, 选择相关指标 (平均预测误差、均方根误差, 标准化均方根误差和平均标准误差) 交叉验证 3 种土壤数据插值方法的优劣。利用高精度的地形图获取地貌水文特征, 分析土壤养分和微地形的关系, 分析如何结合土地平地、种植类型转变等措施, 进行土壤养分管理, 实现国家耕地质量提升的重要目标。

1 研究区域概况和研究方法

1.1 研究区域概况

研究区位于安徽省郑蒲港新区内, 原属于安徽省和县姥桥镇, 属北亚热带湿润型季风气候区, 具有四季分明、气候温和湿润、雨量适中、光照充足和无霜期长的特点, 气候条件优越, 气候资源丰富, 适宜农作物生长。常年平均降水量为 1067 mm, 年无雨日 250 d 左右, 雨日多集中在 6—7 月, 初夏有梅雨, 7 月和 8 月多暴雨, 夏季降水量占年降水量 44%。降水年内变化大, 容易形成地表径流, 造成

水土流失。

土壤类型主要以水稻土为主, 耕作制度为稻麦轮作, 少数田块种植大豆和玉米, 目前正处于土地置换阶段, 把农户土地置换为高新农业技术产业园, 已经建成的产业园区有 8000 多亩, 以大棚种植水果及果园培育规划为主, 未来拟建万亩国家级高新农业技术产业园。

1.2 数据来源

土壤类型数据来源于中国科学院南京土壤研究所的土壤数据库, 其原始成果源于全国第二次土壤普查。高程数据由测绘公司采用传统方法, 利用水准仪提供的“水平视线”, 测量两点间高差, 从而由已知点高程推算出未知点高程, 卫星影像图从 Google Earth 上获取。

土壤样点采集, 主要根据研究区域的现状, 利用 ARCGIS 网格布点, 共布设样点 200 个, 因为部分样点已经改变为建筑用地和水面无法采集外, 共采集样品 144 个, 如图 1 所示, 采样时间为 2014 年 8-10 月。严格按照国家标准方法采集土壤样品, 一个耕层混合样, 采集 3~4 个混合农化土样, 取样深度 0~20 cm, 每个点的取土深度及重量应均匀一致, 采样使用不锈钢、木、竹或塑料器具。每个混合样品一般取 1 kg 左右, 如果采集样品太多, 用“四分法”弃去多余土壤, 采样点分布如下图 1 所示。

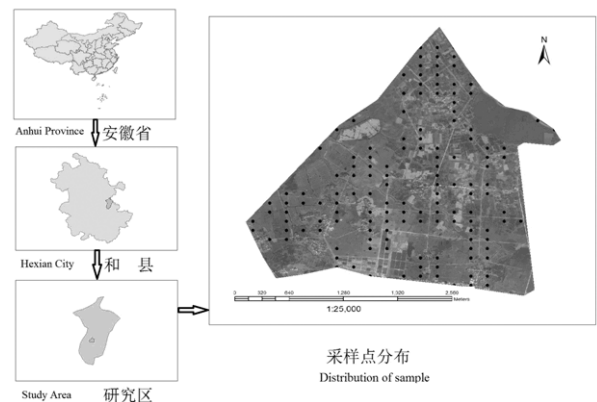


图 1 土壤取样点分布图

Figure 1 Distribution of soil sampling sites

土壤样品分析中, pH 测定玻璃电极和甘汞电极 (或复合电极) 测定, 有机质测定为重铬酸钾氧化-容量法, 碱解氮测定为碱解扩散法, 速效磷测定为碳酸氢钠提取-钼锑抗比色法 (Olsen 法), 速效钾测定为醋酸铵浸提-火焰光度计法。

1.3 研究方法

1.3.1 空间插值 采用 ArcMap10.2 地统计模块中

的协同克利金（简称 CK）、贝叶斯克里金（简称 EBK）和核平滑（简称 KS）方法。ArcGIS Geostatistical Analyst 提供了地统计方法进行表面建模的功能。它提供的工具与 GIS 建模环境完全集成，使用这些工具生成插值模型，并在将这些工具用于深入分析之前对其质量进行评估。

多元空间插值模型现称为协同克利金（Cokriging）结合几个变量的空间数据插值到一个单一的地图之中，适当使用其他的变量可以提高空间预测结果。然而，多元空间插值的预测是需要额外收集其他可能昂贵的数据，如何选择辅助数据作为协调有限数量的数据点插值在许多领域研究的一个重要问题^[23]。经验贝叶斯克里金法（EBK）是一种地统计插值方法，它通过引入一个高斯固定随机函数模型作为趋势函数先验信息，估计基础半变异函数来说明所引入的误差，具有处理模型参数不确定性的能力。其他克里金方法通过已知的数据位置计算半变异函数，并使用此单一半变异函数在未知位置进行预测；此过程隐式假定估计的半变异函数是插值区域的真实半变异函数。由于不考虑半变异函数估计的不确定性，其他克里金方法都低估了预测的标准误差。此方法需要极少的交互式建模，预测标准误差比其他克里金方法更准确，可准确预测一般程度上不稳定的数据，对于小型数据集，具有比其他克里金法更准确的优点。主要缺点是处理时间会随着输入点数、子集大小或重叠系数的增加而快速增加^[24]。核平滑（Kernel smoothing）是局部多项式插值的一个变种，是在局部多项式插值法中使用估计回归系数方法以防止计算不稳定性。当存在景观障碍，如悬崖、河流、矿物、岩石或土地利用

变化，核插值模型采用两点之间最短的距离，建立一侧不相交的直线连接，减少因空间不连续所造成预测的不确定性，并可以对预测质量进行评估^[25]。

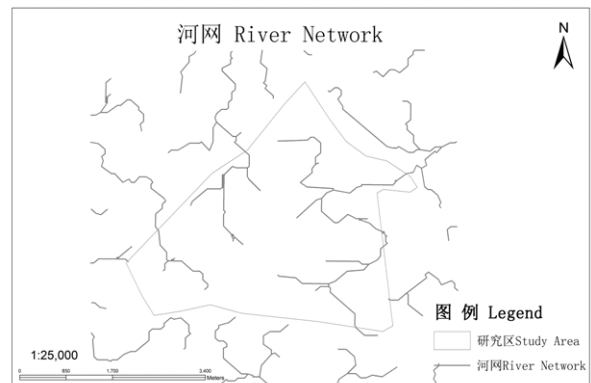


图 2 河网分布

Figure 2 Distribution of river network in the study area

1.3.2 水文分析 采用 ArcMap 10.2 扩展模块工具箱中的基于数字地形提取的水文建模工具，它提供了用于描绘某一表面上各物理组成部分的方法^[26]。利用水文工具识别汇、确定流向、计算流量、描绘分水岭和创建河流网络。本研究用地表采样高程点转化为 DEM 表面，输入 DEM 到水文模型中，确定流向并输出河网分级如图 2 所示。

2 结果与分析

2.1 土壤属性统计特征分析

从数据变异情况看，土壤速效钾和有效磷的变异系数较高，分别达到 77.9% 和 80.56%，碱解氮和有机质变异性较弱，分别是 45.72% 和 32.62%，pH 变异性并不典型，只有 13.07%，如表 1 所示。

表 1 研究区土壤属性特征

Table 1 Characteristics of soil properties in the study area

项目 Item	最小值 Minimum	最大值 Maximum	平均值 Mean	中值 Median	标准差 Standard	变异系数/% Coefficient of variation	偏度 Skewness	峰度 Kurtosis	分布类型 Distribution type
pH	4.73	8.29	6.33	6.15	0.83	13.07	0.50	2.45	正态 Normal
有机质/g·kg ⁻¹ Organic matter	9.13	54.54	29.01	28.05	9.46	32.62	0.25	2.84	正态 Normal
速效钾/mg·kg ⁻¹ Available potassium	42.61	900.54	145.07	119.41	113.06	77.93	3.72	19.87	对数正态 Logarithmic normal
有效磷/mg·kg ⁻¹ Available phosphorus	3.10	82.70	15.53	11.18	12.51	80.56	2.44	10.54	对数正态 Logarithmic normal
碱解氮/mg·kg ⁻¹ Available nitrogen	0.37	271.42	79.22	77.8.8	36.22	45.72	1.10	7.56	正态 Normal

相同的土壤类型中，几种土壤属性变异强度差别很大，说明在较大的尺度下，研究区土壤属性变

异不仅仅受到自然要素影响，同时也受到人为因素影响。通过调查表明农户生产中化肥使用差异很大

(如表 2)。

变异系数能定性反映土壤属性总体水平及其变化趋势,但不能刻画变异的主要影响要素是结构性因素还是随机性因素。为分析微地形变化对土壤属性的影响,对土壤与坡度、高程做相关性检验,

结果如表 3 所示。各土壤属性变量与高程和坡度的线性相关分析结果显示,研究区 5 种土壤属性与高程的相关程度并不高,可能与土地平整后改变土壤结构有关。

表 2 小麦分散种植地养分统计差异

Table 2 Statistical differences of nutrients in dispersed wheat land

养分类型 Nutrient type	最小值 Minimum	最大值 Maximum	平均值 Mean	标准差 Standard deviation
有机质/g·kg ⁻¹ Organic matter	9	55	31	9
速效钾/mg·kg ⁻¹ Available potassium	56	901	142	112
有效磷/mg·kg ⁻¹ Available phosphorus	3	83	15	12
碱解氮/mg·kg ⁻¹ Available nitrogen	15	179	82	31
pH	5	8	6	1

表 3 地形因素与土壤养分相关性

Table 3 The correlation between topographic factors and soil nutrients

地形因素 Topographic factors		有机质 Organic matter	有效磷 Available phosphorus	速效钾 Available potassium	碱解氮 Available nitrogen	pH	坡度 Slope	高程 Elevation
坡度 Slope	Pearson correlation	-0.184*	0.123	0.044	-0.294**	0.276**	1	0.413**
	Sig. (2-tailed)	0.027	0.142	0.601	0	0.001		0
	N	144	144	144	144	144	144	144
高程 Elevation	Pearson correlation	-0.035	0.078	0.023	-0.118	0.076	0.413**	1
	Sig. (2-tailed)	0.674	0.355	0.786	0.16	0.365	0	
	N	144	144	144	144	144	144	144

“**”表示通过 0.01 水平上显著性检验(双尾),“*”表示通过 0.05 水平上显著性检验(双尾)。

“***” Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed), “**” Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed).

表 4 预测误差

Table 4 Prediction error

项目 Item	有机质 Organic matter			碱解氮 Available nitrogen		
	EBK	KS	CK	EBK	KS	CK
采样点数 Number of sampling sites	144	144	144	144	144	144
平均值 Mean	0.063	0.339	0.117	0.163	0.634	0.242
均方根预测误差 Root-mean-square	9.129	9.134	8.908	36.392	37.705	37.194
标准平均值 Mean standardized	0.006	0.041	0.013	0.009	0.016	0.005
标准均方根预测误差 Root-mean-squares standardized	1.000	1.007	0.994	1.059	1.012	1.024
平均标准误差 Average standard error	9.076	8.994	8.950	33.515	37.324	35.997

有效磷 Available phosphorus			速效钾 Available potassium			pH		
EBK	KS	CK	EBK	KS	CK	EBK	KS	CK
144	144	144	144	144	144	144	144	144
1.249	0.940	-5.203	0.423	0.131	-0.547	-0.014	0.008	0.005
114.384	118.244	113.523	12.029	12.834	11.960	0.813	0.814	0.790
-0.018	0.010	0.072	0.040	0.009	0.044	0.017	0.013	0.008
1.200	1.000	1.534	1.179	1.007	1.112	1.009	1.003	1.010
112.253	119.270	74.740	10.588	12.799	10.553	0.804	0.807	0.782

生成土壤属性分布图之前,要先确定最合适的插值方法,同时采用协同克利金(CK)、贝叶斯经

验克里金(EBK)和核平滑有障碍插值(KS)3种方法对验证点的每种土壤变量进行预测。其中协同克利

金考虑高程数据, 贝叶斯经验克里金法只用训练点的数据和所拟合的模型进行预测, 核平滑有障碍插值方法用上述训练点的数据, 并以研究区的河流及水塘障碍因素, 作为辅助障碍变量进行预测。插值模型选择标准, 主要参考 Cross validation 中的 Prediction error 中的若干指标。符合以下标准的模

型是最优的: 标准平均值 (Mean standardized) 最接近于 0, 均方根预测误差 (Root-mean-square) 最小, 平均标准误差 (Average mean error) 最接近于均方根预测误差 (Root-mean-square), 标准均方根预测误差 (Root-mean-square standardized) 最接近于 1。

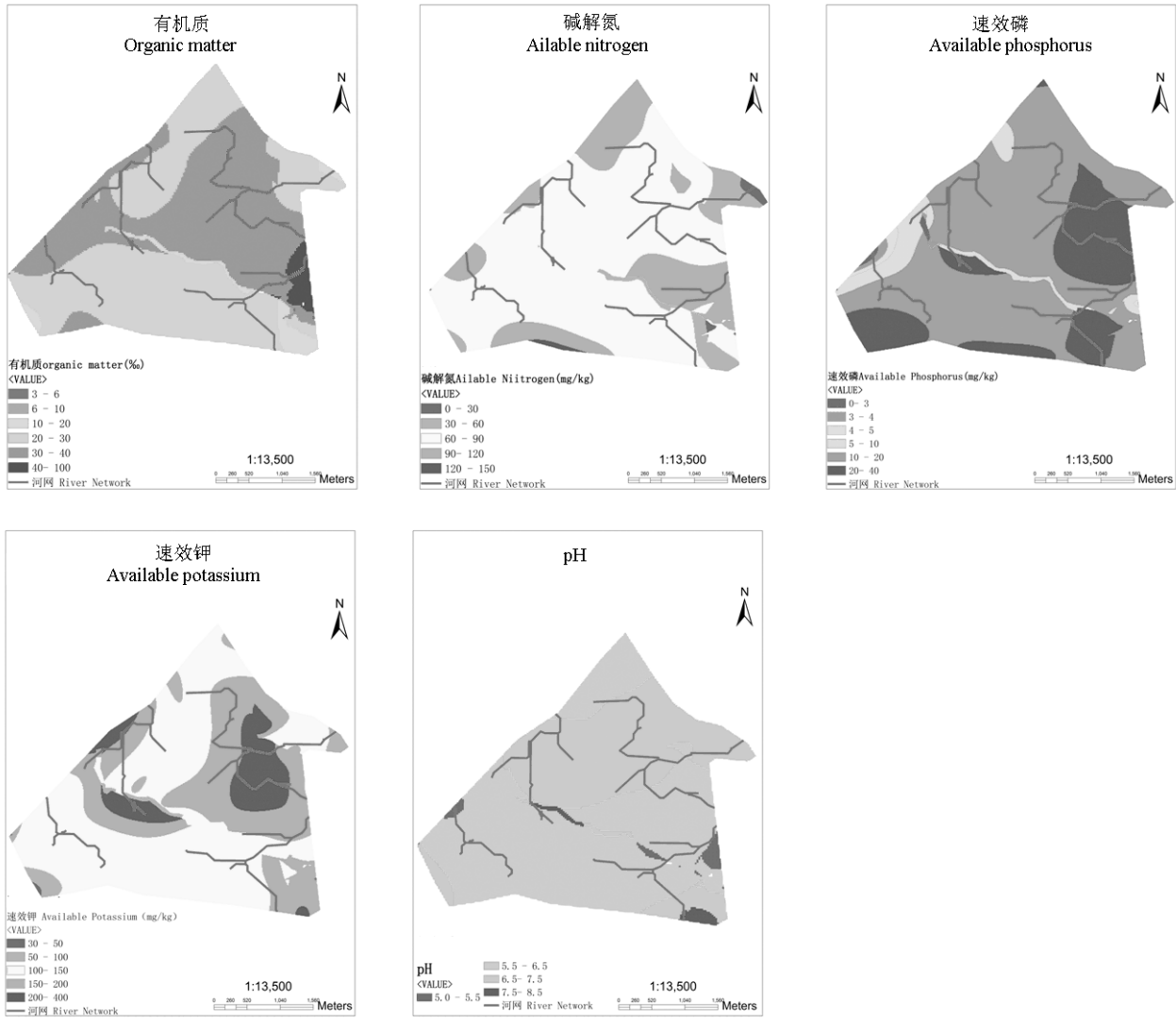


图 3 土壤元素空间分布图
Figure 3 Spatial distribution maps of soil elements

如表 4 所示, 贝叶斯经验克利金和协同克利金模型较为敏感, 均出现了部分土壤养分元素平均值为负值的现象, 显然不符合研究区实际情况; 核平滑有障碍插值方法满足项最多, 同时核平滑方法插值最为稳定, 没有出现满足插值假设条件平均值为负的现象, 原因是通过障碍层的条件限制, 把地理上的没有相关性的研究区域分块插值, 不会为满足假设条件而出现系数为负的插值方程。因此, 本文选择核平滑有障碍插值方法作为数据最优的克里格

插值方法。

2.2 土壤养分空间格局分析

按照全国第 2 次土壤普查推荐的土壤肥力分级指标, 对插值后的养分栅格结果分别重新分类土壤养分空间分布。图 3 集中展示了利用原始数据插值生成的土壤属性分布图, 结合全国第 2 次土壤普查制定的肥力标准进行划分, 可以得出, 研究区 43.22% 和 50.48% 土壤有机质含量范围在 3.7%~48% 之间, 主要处在丰富、中上两个级别, 空间分

布整体平缓, 呈现南北低中间高的趋势, 大于 40% 的高值区主要在东南部, 中下级别面积较少, 空间分布较离散; 碱解氮空间变化平缓, 含量范围在 $3.7\sim 134.8\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间, 主要处在中上、中下两个级别, 分别占研究区面积的 19.66% 和 72.30%, 中下级别所占面积最大超过总面积的 2/3, 7.00% 地区缺乏氮元素需要根据作物类型补氮; 速效磷空间变化较大, 含量范围在 $3.7\sim 134.8\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间, 主要存在于丰富和中上级别, 分别占研究区面积的 24.44% 和 67.23%; 速效钾空间变化较大, 含量范围在 $39.1\sim 384\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间, 主要分布在极丰、丰富和中上级别, 分别占研究区面积的 24.44%、67.23% 和 6.23%; pH 空间变化平缓, 含量范围在 5.2~8.28 之间, 主要分布在酸和弱酸级别, 分别占研究区面积的 61.6% 和 35.67%。

从有机质空间分布图可以得出, 东南部大于 40% 的高值区可能受到地表径流的影响很大, 随河网流向土壤有机质含量增加, pH 图也佐证随河网流向土壤 pH 降低, 可能存在土壤养分随地表径流流失的问题, 需要调整种植结构, 建立生态拦截沟, 减少养分流失。

3 讨论

理论上微小地形的变化也会影响土壤地表养分变化。从有机质、pH 空间分布图可以推断研究区东南部能受到地表径流的影响较大, 随河网流向土壤有机质含量增加, 同时土壤 pH 降低, 可能存在土壤养分随地表径流流失的问题, 需要调整种植结构, 建立生态拦截沟, 减少养分流失。受到土地平整和施肥等人为因素影响, 相关分析中地形因子(高程、坡度)对土壤养分的影响程度较小, 还要通过研究土壤元素作为土壤溶质随土壤水分迁移过程, 才能得到真正实现土壤养分空间变异的机理, 从而找到土壤养分管理的有效途径。

4 结论

本研究为获取研究区的土壤养分具体情况及酸碱性质, 通过地统计学和 GIS 结合的方法生产土壤养分空间分布状况, 得出结论如下:

当研究区出现河流隔开采样数据时采用核平滑方法插值模型最为稳定, 而贝叶斯经验克利金和协同克利金模型相对敏感, 核平滑模型把空间存在障碍的研究区域分块插值更加符合研究区实际情况, 不会出现为满足假设条件而出现系数为负的插值方程。

研究区 5 种土壤元素均呈现南北低中间高的趋势, 土壤速效钾和有效磷的变异系数较高, 分别达到 77.9% 和 80.56%, 碱解氮和有机质变异性较弱, 分别是 45.72% 和 32.62%, pH 变异性只有 13.07%。研究区 43.22% 和 50.48% 的土壤有机质含量分别处在丰富、中上水平, 研究区面积的 19.66% 和 72.30% 碱解氮分别处在中上、中下水平, 速效磷空间变化平缓, 主要存在于丰富和中上级别, 分别占研究区面积的 24.44% 和 67.23%; 研究区面积的 24.44%、67.23% 的速效钾分别处在极丰和丰富水平, 研究区面积的 61.6% 和 35.67% pH 分别处于酸和弱酸级水平。

参考文献:

- [1] EZUI K S, FRANKE A C, MANDO A, et al. Fertiliser requirements for balanced nutrition of cassava across eight locations in West Africa[J]. *Field Crop Res*, 2016, 185: 69-78.
- [2] EGHBALL B, Schepers J S, Negahban M, et al. Spatial and temporal variability of soil nitrate and corn yield[J]. *Agron J*, 2003, 95(2): 339-346.
- [3] MATHERON G. Principles of geostatistics[J]. *Econ Geol*, 1963, 58(8): 1246-1266.
- [4] 赵方华, 姜波. 加工番茄精准施肥决策支持系统的研究[J]. *农机化研究*, 2016(4): 11-16.
- [5] 王雪梅, 柴仲平, 武红旗. 典型干旱荒漠绿洲区耕层土壤养分空间变异[J]. *水土保持通报*, 2016, 36(1): 51-56.
- [6] 杨美玲, 王雪梅, 罗梦媛. 基于 GIS 的库车县耕层土壤养分空间变异研究[J]. *水土保持研究*, 2015, 22(1): 61-65.
- [7] 武德传, 罗红香, 宋泽民, 等. 黔南山地植烟土壤主要养分空间变异和管理分区[J]. *应用生态学报*, 2014, 25(6): 1701-1707.
- [8] 徐丽华. 土壤养分预测方法的比较研究—以三峡库区王家沟小流域为例[D]. 重庆:西南大学, 2012.
- [9] 吴晓磊, 王大庆, 徐博, 等. 漫岗丘陵区黑土村级农田土壤养分空间变异研究[J]. *土壤通报*, 2010, 41(4): 825-829.
- [10] 盛建东, 肖华, 武红旗, 等. 不同取样间距农田土壤全量养分空间变异特征研究[J]. *土壤通报*, 2006, 37(6): 1062-1065.
- [11] 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.
- [12] 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): 123-129.
- [13] SALDAÑA A, STEIN A, ZINCK J A. Spatial variability of soil properties at different scales within three terraces of the Henares River (Spain)[J]. *Catena*, 1998, 33(3): 139-153.
- [14] 朱菊兰, 刘淼, 张阳, 等. 浑河太子河流域地形和土地

- 利用对表层土壤养分空间变异的影响[J]. 生态学杂志, 2016, 35(3): 621-629.
- [15] 周星, 彭毅, 吴绍军, 等. 剑阁县植烟土壤养分的空间变异研究[J]. 水土保持研究, 2015, 22(1): 85-89.
- [16] 赵业婷. 基于 GIS 的陕西省关中地区耕地土壤养分空间特征及其变化研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2015.
- [17] 张惠. 典型绿茶茶园土壤养分和重金属的空间变异特性分析及肥力质量评价[D]. 北京: 中国农业科学院, 2015.
- [18] 宋根鑫. 县域农田养分动态监测的方法优化和应用研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2014.
- [19] 雷宝佳. 农耕区土壤养分空间变异及其影响因素分析[D]. 西安: 西北大学, 2014.
- [20] 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.
- [21] 赵文旻. 精准变量施肥技术研究现状及发展趋势[J]. 科技与创新, 2016(16): 32-33.
- [22] LIN Q H, LI H, LI B G, et al. Assessment of spatial uncertainty for delineating optimal soil sampling sites in rubber tree management using sequential indicator simulation[J]. Ind Crop Prod, 2016, 91: 231-237.
- [23] ELSAYED K. Optimization of the cyclone separator geometry for minimum pressure drop using Co-Kriging[J]. Powder Technol, 2015, 269: 409-424.
- [24] AELION C M, DAVIS H T, LIU Y, et al. Validation of Bayesian kriging of arsenic, chromium, lead, and mercury surface soil concentrations based on internode sampling[J]. Environ Sci Technol, 2009, 43(12): 4432-4438.
- [25] WU C O, CHIANG C T. Kernel smoothing on varying coefficient models with longitudinal dependent variable[J]. Stat Sin, 2000(2): 433-456.
- [26] JENSON K, DOMINGUE O. Extracting topographic structure from digital elevation data for geographic system analysis[J]. Photogramm Eng Remote Sensing, 1988, 54(11): 1593-1600.