

基于多种土壤养分的精准管理分区方法研究*

李 翔^{1,2,3} 潘瑜春¹ 马景宇^{1,2} 赵春江^{1†} 王纪华¹

(1 国家农业信息化工程技术研究中心,北京 100089)

(2 北京师范大学地理学与遥感科学学院遥感与地理信息系统研究中心,北京 100875)

(3 河南省信息产业厅,郑州 450008)

摘 要 根据土壤养分的空间变异性和空间自相关性进行管理分区的划分是精准农业实施变量施肥管理的重要环节。本研究首先分析了 3 种主要土壤养分的空间变异特征和空间自相关性,碱解氮、有效磷、速效钾在空间上均达到了中等强度的变异,但仅有碱解氮和有效磷具有中等强度的空间自相关性,而速效钾在本研究采样尺度下则表现为纯块金效应,不具有空间自相关性;与各向同性相比,碱解氮在各向异性条件下克里金插值精度提高了 42.8%。以空间上既存在变异又具有空间相关性的有效磷、碱解氮两种土壤养分为数据源,利用模糊 k -均值聚类算法将整个地块划分为不同的管理分区,并引入模糊效果指数(PFI)和标准化分类熵(MPE)两个指标确定适宜的分区数为 4 个。最后,为了评价分区结果的合理性,对各管理分区进行了统计,并用 LSD 法进行了各分区间差异显著性检验。结果表明:各管理分区内的碱解氮的变异系数由整个地块的 13.2%减小到 3.0%~5.3%,趋于同质性;有效磷的变异系数由整个地块的 44.3%减小到 10.1%~17.2%,也得到了大幅度的减少;而且不同分区之间各养分均达到了显著差异。

关键词 多变量;精准农业;管理分区;模糊聚类
中图分类号 F159 文献标识码 A

精准农业经过 10 多年的发展,许多技术已趋成熟,然而其在改善环境和提高经济效益上的效果一直未得到充分证实,管理分区技术(Management zone)为研究这一问题提供了经济有效的手段^[1,2]。近年来,基于土壤或作物长势的空间变异性和空间自相关性划分的管理分区进行变量施肥管理是国际上精准农业研究的一个热点。Ostergaard^[3]利用基于土壤类型、产量、地形、航空照片以及生产者的经验等数据划分的管理分区进行变量氮肥管理研究,每 hm^2 可获得 15~35 美元的经济利润。Fleming 等^[4]的研究表明,基于管理分区技术生成精准农业变量施肥处方图是一个经济有效的途径。Koch 等的研究认为,与传统的一致性氮肥管理相比,利用基于可变目标产量的管理分区技术实施精准农业变量氮肥管理可以获得更大的经济利润(18.21~29.57 美元 hm^{-2}),且施氮量减少了 6%~46%,提高了氮肥的利用效率^[2]。Batte、Khosla、Stafford 等的

研究也证实了利用管理分区技术实施精准农业变量管理可以减少氮肥施用量,减少农业带来的环境污染^[5~7]。

目前,国内的精准农业主要以规则网格为作业单元实施变量施肥管理,而田块尺度下精准农业管理分区的划分问题以及基于分区技术的变量施肥研究,尚未见报道。薛绪掌等^[8]基于土壤肥力和目标产量,在北京小汤山国家精准农业示范基地进行了冬小麦变量施氮研究,采用的变量作业单元大小为 18 m × 18 m。张书惠等^[9]采用的变量施肥作业单元大小为 20 m × 40 m。从理论上讲,处方作业单元越小,对大田生产力空间差异的调节就愈精确,然而,在大面积实施精准农业技术时,过小的处方单元会成几何级数地增大数据处理与存储容量,而且田间作业中通过自控频繁地调节作业机械的输出量,也会增加机械磨损和设计难度,降低变量施肥的作业精度。另一方面,这些研究仅考虑了单一土壤养分

* 国家自然科学基金项目(40471093,40571118)资助

† 通讯作者:赵春江(1964~),研究员,博士生导师。E-mail: zhaocj@nercita.org.cn

作者简介:李翔(1975~),男,河南鹿邑人,北京师范大学博士研究生,主要从事 GIS 空间分析与遥感应用研究。E-mail: gmlxiang188@sohu.com;电话:0371-65526508

收稿日期:2005-08-15;收到修改稿日期:2006-03-20

的变量施肥管理,但由于地块内各种土壤养分尤其是氮、磷、钾等大量元素的空间变异不同,使得根据每种养分划分的作业单元也有差别。如果对多种养分同时进行田间变量施肥管理,这种规则网格处方图更难以实施。因此,在大面积实施精准农业技术时,如何划分多种养分变量施肥管理的统一作业单元问题就显得尤为重要。

目前一些 GIS 软件虽然提供了将空间数据划分为潜在的管理分区的方法,如分位数法、等间隔法、自然断点法等,但这些方法只能对单变量空间数据进行分区,却不能用于多变量空间数据管理分区的划分。模糊聚类算法是用来探测分析多源空间数据固有结构模式的一种有效方法,它使研究者能够较好地解释自然界中发生的连续变异现象,使分类结果更趋于合理^[10],在遥感影像分类、景观格局分析中得到了广泛应用。本研究在分析了 3 种主要土壤养分的空间变异特征和空间自相关性的基础上,利用模糊 k -均值聚类算法进行了多变量土壤养分精准管理分区的划分研究,并引入两个指标确定适宜的分区数,对分区结果的合理性进行了分析和评价。

1 数据获取与研究方法

1.1 实验地概况

本研究以国家精准农业示范基地为试验区,该基地位于北京市昌平区小汤山镇东北部,地处 40°10'31"~40°11'18"N,116°26'10"~116°27'05"E。本研究选择一个前茬和当年均种植小麦的地块作为研究对象,面积为 920 m × 420 m,约 38.6 hm²。

1.2 土壤养分数据获取与样品分析

2001 年 8 月对整个实验地的土壤进行栅格采样,地块的北部采样间隔为 30 m,南部为 40 m。采样点的空间分布如图 1 所示。利用差分全球定位系统 DGPS 辅助采样,采样前根据地块已有的地理坐标生成一定间隔的采样点,采样深度为 0~20 cm 与作物生长关系最密切的耕作层。在每个采样点的采样中心及其 10 m 的范围内共计采取 5 个土壤样品,随后将 5 个样品充分混合标号,作为该点的土壤样品。利用采样导航计算机记录样品编号及坐标位置。获取的土壤样品经自然风干、过筛后进行室内养分测定。每个样品测定项目包括碱解氮、有效磷、速效钾,测定方法按《土壤农业化学常规分析方法》^[11]。

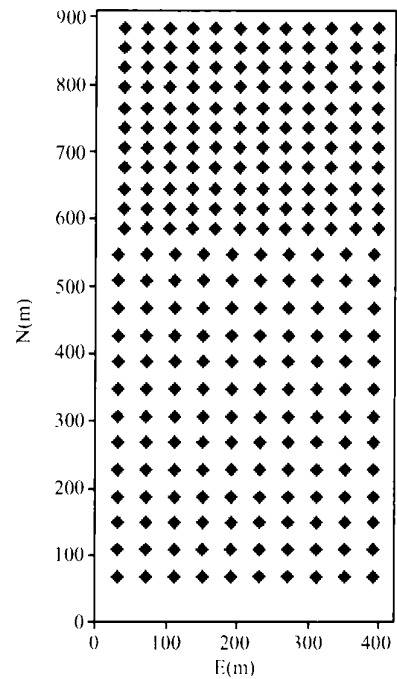


图 1 采样点的空间分布图

Fig. 1 Distribution of sampling points

1.3 数据处理方法

精准农业管理分区的前提,就是土壤养分在空间上必须既存在较大的变异又具有空间相关性。因此,本研究首先分析了 3 种土壤养分的基本统计特征和空间变异结构,前者是通过 SPSS11.0 完成的,而实验半方差函数的计算、理论模型的拟合及 Kriging 插值和图形绘制是由 ARCGIS8.3 完成的。

在各向同性(Isotropy)和各向异性(Anisotropy)两种情况下,对各土壤养分含量使用半方差函数进行拟合,并进行交叉验证(Cross-validation),选择最优模型类型和参数。

为分区的需要,采用普通克里金插值法(Ordinary kriging)将矢量的采样点插为栅格的土壤养分空间分布图。为了得到精确的土壤养分空间分布图,在各向同性和各向异性下分别插值并用公式(1)评价二者的精度。

$$RI(\%) = \frac{RMSE_I - RMSE_A}{RMSE_I} \times 100 \quad (1)$$

其中, RI 为精度相对提高率(Relative Improvement), $RMSE_I$ 为各向同性条件下的均方根误差,而 $RMSE_A$ 为各向异性条件下的均方根误差。

1.4 管理分区方法

本研究模糊 k -均值分区算法及确定适宜分区数的两个指标的计算都是通过 MATLAB6.5 语言编

程实现的。

1.4.1 模糊 K 均值分区算法 $\{x_i, i = 1, 2, \dots, n\}$ 是 n 个样本组成的样本集合, 这里表示空间数据插值后栅格图像的像元属性值的集合, K 为分区数, $m_j (j = 1, 2, \dots, n)$ 为每个聚类的中心, μ_{ij} 为第 i 个像元对第 j 个管理分区的隶属度。

$$J_f = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^K \mu_{ij}^b d_{ij}^2 \quad (2)$$

$$\sum_{j=1}^K \mu_{ij} = 1, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

其中, $b > 1$, 是一个可以控制聚类结果模糊程度的常数, 当对土壤数据进行分类时, 取值介于 1.2 ~ 1.5 之间使分类结果更合理^[12]; d_{ij}^2 为第 i 个像元到第 j 个聚类中心的距离, 可以表示为 $d_{ij}^2 = (x_i - m_j)^2$ 。

在满足条件 (3) 的情况下, 求式 (2) 的极小值, 令 J_f 对 m_j 和 μ_{ij} 的偏导数为 0, 可得必要条件:

$$m_j = \frac{\sum_{i=1}^n \mu_{ij}^b x_i}{\sum_{i=1}^n \mu_{ij}^b}, \quad j = 1, 2, \dots, K \quad (4)$$

$$\mu_{ij} = \frac{(1/\sum_{j=1}^K (x_i - m_j)^2)^{1/(b-1)}}{(1/\sum_{j=1}^K (x_i - m_j)^2)^{1/(b-1)}}, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (5)$$

用迭代方法求解式 (4) 和式 (5), 就是模糊 K 均值算法。具体算法归纳如下: (1) 设定聚类数目即分区数 K 和模糊程度参数 b ; (2) 初始化各个聚类中心; (3) 用当前的聚类中心根据式 (4) 计算隶属度函数, 用当前的隶属度函数根据式 (5) 更新计算各聚类中心; (4) 重复步骤 (3) 的运算, 直至各个样本 (像元) 的隶属度值稳定为止。

1.4.2 适宜分区数的确定 一个地块究竟划分几个管理分区合适, 主要是由地块自身的空间变异

和分布特征决定的。为了确定适宜的分区数, 引入了两个评价指标。

模糊效果指数 (Fuzziness Performance Index, FPI) 是表示不同类别间共享的成员量的一个指数, 用来度量 K 个类别之间的分离程度^[12,13]。FPI 值的范围介于 0 ~ 1 之间, 值接近于 0 表示不同分区间共享的成员越少, 也即不同管理分区间差异越大; 当接近于 1 表示分区间共享的成员越多, 管理分区间的差异越小。

$$FPI = 1 - \frac{K}{K-1} \left[1 - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^K \mu_{ij}^2 \right] \quad (6)$$

标准化分类熵 (Modified Partition Entropy, MPE) 是表示由于一个数据集被分成不同类别而引起的数据组织 (或相似性) 的破坏程度^[14]。MPE 值介于 0 ~ 1 之间。显然当 MPE 越小, 表明整个地块被分区后, 各管理分区内的像元属性值之间相似程度越高, 也即区内方差越小。

$$MPE = - \frac{1}{n - K} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^K \mu_{ij} \log(\mu_{ij}) \quad (7)$$

2 结果与分析

2.1 基本统计特征分析

如表 1 所示, 从均值来看, 按照沈汉提供的北京土壤养分分级标准^[15], 有效磷为较低水平 (10 ~ 20 mg kg⁻¹), 碱解氮为高水平 (80 ~ 110 mg kg⁻¹), 速效钾为较高水平 (100 ~ 125 mg kg⁻¹), 因此, 在本试验地最缺乏的是磷素。对变异系数来说, 所有的土壤养分均属于中等强度的变异, 其中碱解氮的变异系数最低 (为 13.2%), 有效磷的变异系数最高 (达 44.3%), 这说明试验地的各土壤养分在空间上存在较大的变异, 满足精准农业管理分区划分和实施变量施肥管理的前提条件。

表 1 土壤养分基本特征统计分析结果

Table 1 Statistical analysis of soil properties

土壤养分 Soil nutrient	均值 Mean (mg kg ⁻¹)	中值 Median (mg kg ⁻¹)	标准差 Standard deviation (mg kg ⁻¹)	最小值 Minimum (mg kg ⁻¹)	最大值 Maxmum (mg kg ⁻¹)	变异系数 Coefficient variation (%)
有效磷 Available P	14.2	12.8	6.3	4.5	41.1	44.3
碱解氮 Alkalytic N	99.8	99.4	13.2	50.7	133.2	13.2
速效钾 Available K	114.6	109.5	39.3	38.1	249.5	34.3

2.2 空间变异结构分析

2.2.1 各向同性分析 区域化变量如果在各个方向上的变异相同, 则称为各向同性; 如果在各个方向上的变

异不同, 则称为各向异性。为了大致了解各土壤养分的空间变异结构, 在忽略变异的方向性即各向同性的条件下拟合了半方差模型并进行了交叉验证, 如表 2 所示。

表 2 土壤属性的半方差模型参数
Table 2 Semivariogram parameters of soil properties

土壤养分 Soil nutrient	模型 Model	各向同性 Isotropy					各向异性 Anisotropy				
		C_0	C_1	$C_1 / (C_0 + C_1)$	$a_{max}(m)$	$RMS E_I$	C_0	C_1	$a_{min}(m)$	$a_{max}(m)$	$RMS E_A$
有效磷 Available P	指数 Exponential model	0.06	0.10	0.63	418.4	4.50	0.06	0.10	308.5	418.4	4.40
碱解氮 Alkalytic N	指数 Exponential model	86.04	96.45	0.52	291.5	10.74	0.00	175.9	68.28	418.4	6.14
速效钾 Available K	纯块金 Pure-nugget model	1 585									

结果表明,有效磷的块金效应(C_0)较小而碱解氮的较大,这说明前者由随机原因造成的误差较小,而后者的随机误差较大。有效磷最大空间相关尺度即变程($a_{max} = 418.4 m$)大于碱解氮的相关尺度($a_{max} = 291.5 m$),而且有效磷的 $C_1 / (C_0 + C_1)$ 值大于碱解氮,这说明前者的空间自相关程度比后者要好。两者的 $C_1 / (C_0 + C_1)$ 值均介于0.25~0.75之间,均表现出中等强度的空间自相关^[16]。速效钾表现为纯块金效应,说明速效钾在所布设的采样尺度下是完全独立的,不具有空间自相关,因此,为了使速效钾参与管理分区的划分,必须加大其采样密度,

进一步探测其空间变异结构。有效磷和碱解氮在空间上既存在变异又具有空间自相关性,符合精准农业管理分区的前提条件,因此,本研究只能以这两种土壤养分为例进行管理分区的划分研究。

2.2.2 各向异性分析 Rossi 等认为,对区域化变量来说,各向同性是相对的,而各向异性是绝对的^[17]。由于土壤理化过程、生物过程在不同方向上的差异性以及人为施肥失衡等原因,土壤养分在空间各个方向上的变异往往是不同的^[18]。如表 2、图 2 所示,与各向同性相比,各向异性条件下有效磷的块金值和基台值保持不变,而碱解氮的块金值由原

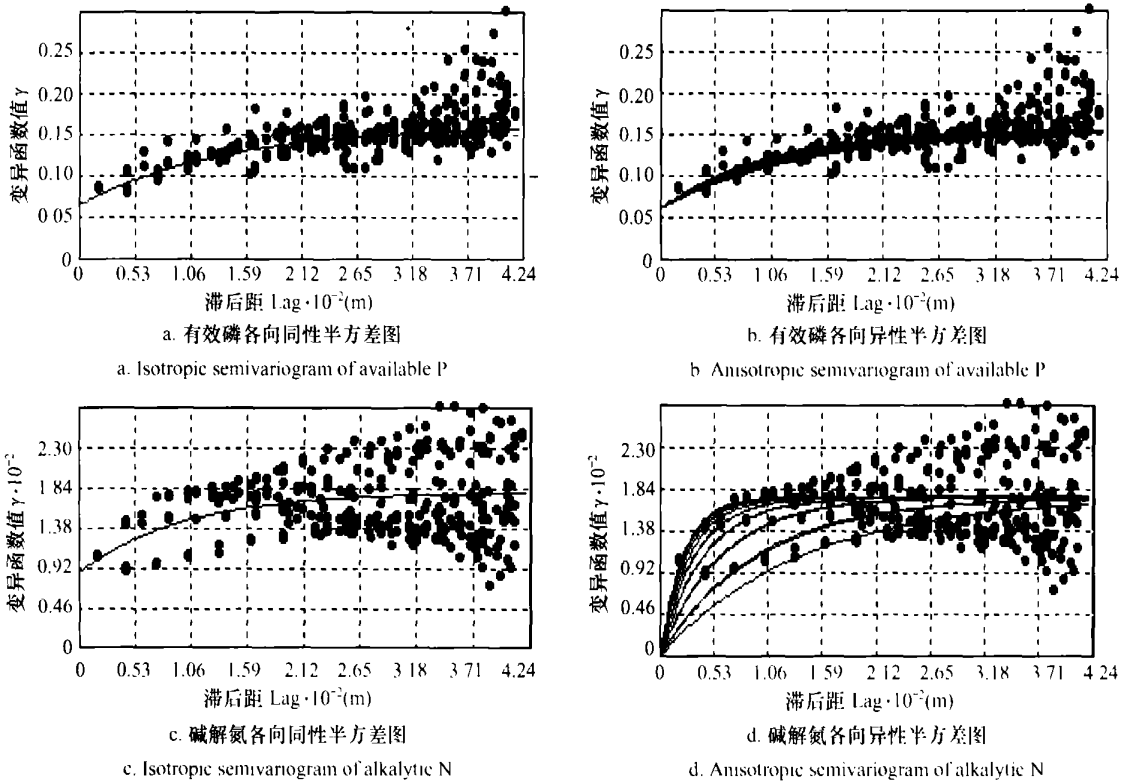


图 2 土壤属性数据在各向同性与各向异性条件下半方差图

Fig. 2 Semivariogram of soil properties

来的 86.04 减少到零;有效磷的各向异性比 (a_{\max}/a_{\min}) 为 1.35,而碱解氮的各向异性比为 6.12。这说明各向异性条件下有效磷变异的方向性不强,考虑方向性对半方差模型的拟合影响不大;而碱解氮变异的方向性较强,考虑方向性会使碱解氮的随机误差减小,空间自相关性得到显著增强。

2.2.3 精度比较 在建立了各向同性和各向异性半方差模型的基础上,利用普通克里金插值法对

土壤有效磷和碱解氮的未测数据点进行插值并绘图,获得了各养分含量在田间的空间分布图,如图 3a、图 3b 所示。从插值精度来看,与各向同性相比,在各向异性条件下,由式(1)计算的有效磷插值精度相对提高率为 2.2%,而碱解氮的相对提高率为 42.8%。因此,为了得到精确的空间分布图用于管理分区的划分,在插值时必须考虑碱解氮变异的方向性。

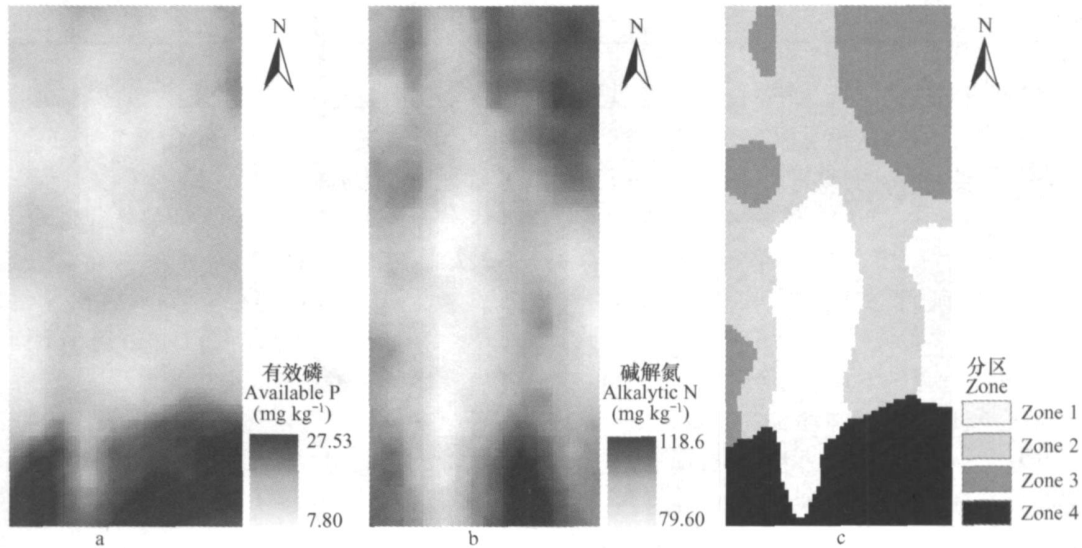


图 3 土壤养分插值分布图和管理分区图

Fig. 3 Interpolated distribution map of soil properties and zoning map

2.3 分区结果评价

以有效磷、碱解氮两种土壤养分数据源,利用模糊聚类法进行了管理分区的划分,分区结果如图 3c 所示。从图 4 可以看出,随分区数的增加,FPI 和 MPE 均不是单调增加或减小,但二者具有相同的变化趋势,而且在分区数为 4 时,两个指标同时达到最小,这说明此时的区内方差最小,而区间方差最大。

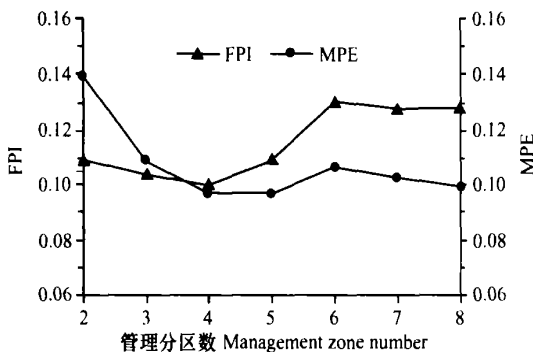


图 4 评价指标随管理分区数增加的变化趋势

Fig. 4 Changes in evaluation indices with increasing number of management zones

因此,确定 4 为适宜的分区数。

为了评价分区效果,对各管理分区的土壤养分进行了统计并用最小显著差数法(LSD)进行了各分区间差异显著性检验,如表 3 所示。

与整个地块相比,各管理分区的有效磷和碱解氮的变异系数都有不同程度的减小,其中碱解氮的变异系数由整个地块的 13.2% 减小到 3.0% ~ 5.3% 之间,各分区内的养分含量分布趋于同质性;有效磷的变异系数由整个地块的 44.3% 减小到 10.1% ~ 17.2% 之间,也得到了大幅度的减小。

分区间差异显著性检验表明,不同分区之间碱解氮和有效磷的均值均达到了显著差异。其中,对碱解氮来说,除分区 3 与分区 4 之间未达到极显著,其他分区间均达到极显著差异;对有效磷来说,分区 1、2、3 之间均未达到极显著,但它们与分区 4 之间均达到了极显著差异。总之,整个地块被分区后,各管理分区内养分含量空间分布差异较小,而管理分区间差异显著,适宜在同一管理分区内采用相同的施肥量而在不同分区间实施变量施肥管理。

表 3 土壤养分分区统计和 LSD 检验结果¹⁾

Table 3 Zoning statistics for soil properties and LSD test

土壤养分 Soil nutrient	分区 1 Zone 1		分区 2 Zone 2		分区 3 Zone 3		分区 4 Zone 4	
	均值 Mean	变异系数 Coefficient variation (%)	均值 Mean	变异系数 Coefficient variation (%)	均值 Mean	变异系数 Coefficient variation (%)	均值 Mean	变异系数 Coefficient variation (%)
碱解氮 Alkalytic N	88.73aA	3.89	97.20bB	3.01	101.8cC	3.47	105.9dC	5.27
有效磷 Available P	13.23aA	17.23	11.92bA	15.60	12.75cA	17.96	22.97dB	10.10

1) 均值后的小写字母和大写字母分别表示 5%、1% 显著水平 Letters after the means indicate significant difference at 5%, and 1% level, respectively

3 结 论

本研究首先分析了 3 种主要土壤养分的空间变异特征和空间自相关性,碱解氮、有效磷、速效钾在空间上均达到了中等强度的变异,但仅有碱解氮和有效磷具有中等强度的空间自相关性,而速效钾在本研究采样尺度下则表现为纯块金效应,不具有空间自相关性;与各向同性相比,碱解氮在各向异性条件下克里金插值精度提高了 42.8%。以空间上既存在变异又具有空间相关性的有效磷、碱解氮两种土壤养分作为数据源,利用模糊 k -均值分区算法将整个地块划分为不同的管理分区,并引入 PFI 和 MPE 两个指标确定适宜的分区数为 4 个。为了评价分区结果的合理性,对各管理分区的土壤养分进行了统计,并用 LSD 法进行了各分区间差异显著性检验,结果表明:各管理分区内的碱解氮的变异系数由整个地块的 13.2% 减小到 3.0% ~ 5.3%,趋于同质性;有效磷的变异系数由整个地块的 44.3% 减小到 10.1% ~ 17.2%,也得到了大幅度的减少;而且不同分区之间各养分均达到了显著差异。所以各养分均可以统一的管理分区作为变量施肥管理的作业单元。与基于单一养分划分的管理分区和传统的规则网格相比,以这种统一的管理分区作为作业单元进行多元养分变量施肥管理可以大大减少施肥机的数据计算量与存储容量,减少机械磨损和自控系统设计难度,降低变量管理作业成本。因此,基于多种土壤养分的精准管理分区研究具有重要的理论意义和实用价值,同时也是解决精准农业经济效益问题的一个有效途径和突破口。

本研究的模糊 k -均值分区算法不受输入变量数的限制,对多个变量的精准农业管理分区的划分也是适用的,但由于受所选数据源的限制,该实验仅用两种土壤养分进行了精准农业管理分区的划分研究。本研究利用地面采样获取的速效养分作为数据源

进行了管理分区研究,但每年都要获取高密度的田间采样数据,的确需要投入大量的人力和时间。土壤电导率与对作物生长发育起重要作用的土壤属性(如土壤硬度、黏土深度、土壤含水量、阳离子交换量、土壤全碳、氮、磷、pH 值等)具有较好的相关性,是反映地块内土壤养分空间变异的重要指示因子^[19~21]。带有 GPS 系统的牵引式的电导率测试仪可以快速、精确且以较低廉的代价获取土壤电导率^[22]。因此,可以利用土壤电导率作为数据源进行精准农业管理分区的划分研究。另外,随着遥感技术的发展,高空间、高光谱分辨率的遥感影像可以用于监测田块尺度下裸露土壤养分状况和作物长势变异^[23,24],为精准农业管理分区研究提供了更为有效的数据源。

参 考 文 献

- [1] Stafford J V. Implementing precision agriculture in the 21st century. *Journal of Agriculture Engineering Research*, 2000, 76:267 ~ 275
- [2] Koch B, Khosla R, Frasier W M, et al. Economic feasibility of variable-rate nitrogen application utilizing site-specific management zones. *Agronomy Journal*, 2004, 96:1 572 ~ 1 580
- [3] Ostergaard H G S. Agronomic consequences of variable N fertilization. In: Stafford J V. ed. *Precision Agriculture '97*. Oxford, UK, 1999. 145 ~ 153
- [4] Fleming KL, Westfall D G, Wiens D W, et al. Evaluating farmer developed management zone maps for variable rate fertilizer application. *Precision Agriculture*, 2001, 2:201 ~ 215
- [5] Batte M T. Factors influencing the profitability of precision farming systems. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2000, 55:12 ~ 18
- [6] Khosla R, Fleming K, Delgado J A, et al. Use of site-specific management zones to improve nitrogen management for precision agriculture. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2002, 57(6): 513 ~ 518
- [7] Stafford J, Werner A. eds. *Evaluation of Site-specific Management Zones: Grain Yield and Nitrogen Use Efficiency*. Precision Agriculture. Wageningen, the Netherlands: Wageningen Academic Publish, 2003. 297 ~ 302
- [8] 薛绪掌,陈立平,孙治贵,等. 基于土壤肥力与目标产量的冬

- 小麦变量施氮及其效果. 农业工程学报, 2004, 20(3):59~62. Xue X Z, Chen L P, Sun Z G, *et al.* Results of variable-rate nitrogen fertilization of winter wheat based on soil fertility and yield map (In Chinese). Transactions of the CSAE, 2004, 20(3):59~62
- [9] 张书惠, 马成林, 吴才聪, 等. 地理信息系统在精确农业变量施肥中的应用. 农业工程学报, 2003, 34(3):92~95. Zhang S H, Ma C L, Wu C C, *et al.* Application of GIS to variable rate fertilization in precision agriculture (In Chinese). Transactions of the CSAE, 2003, 34(3):92~95
- [10] Bezdek J C. Pattern Recognition with Fuzzy Objective Function Algorithms. New York: Plenum Press, 1981
- [11] 中国土壤学会农业化学专业委员会编. 土壤农业化学常规分析方法. 北京: 科学出版社, 1983. Committee of Agricultural Chemistry, Soil Science Society of China. ed. Analysis Method of Soil and Agricultural Chemistry (In Chinese). Beijing: Science Press, 1983
- [12] Odeh I O A, McBratney A B, Chittleborough D J. Soil pattern recognition with fuzzy-c-means: Application to classification and soil landform interrelationships. Soil Sci. Soc. of Am. J., 1992, 56:505~516
- [13] Boydell B, McBratney A B. Identifying potential within-field management zones from cotton yield estimates. In: Stafford J V. ed. Precision Agriculture '99. Proceeding European Conference on Precision Agriculture. 1999. 331~341
- [14] Lark R M, Stafford J V. Classification as a first step in the interpretation of temporal and spatial variation of crop yield. Annals Applied Biology, 1997, 130:111~121
- [15] 宋秉彝. 现代化吨粮技术与实践. 北京: 中国农业科技出版社, 1995. Song B Y. ed. Modern High-yield Technology and Practice (In Chinese). Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 1995
- [16] 刘付程, 史学正, 于东升, 等. 基于地统计学和 GIS 的太湖典型地区的土壤属性制图研究——以土壤全氮制图为例. 土壤学报, 2004, 41(1):20~27. Liu F C, Shi X Z, Yu D S, *et al.* Mapping soil properties of the typical area of Taihu Lake watershed by geostatistics and geographic information system—A case study of total nitrogen in top soil (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2004, 41(1):20~27
- [17] Rossi R E, Mulla D J, Journel A G, *et al.* Geostatistics tools for modeling and interpreting ecological spatial dependence. Ecol. Monogr., 1992, 62(2):277~314
- [18] Schlesinger W H, Raikes J A, Hartley A E, *et al.* On the spatial pattern of soil nutrients in desert ecosystems. Ecology, 77:364~374
- [19] Johnson C K, Doran J W, Duke H R, *et al.* Field-scale electrical conductivity mapping for delineating soil condition. Soil Sci. Soc. of Am. J., 2001, 65:1829~1837
- [20] Kravchenko A N, Omernode R. Quantitative mapping of soil drainage classes using topographical data and soil electrical conductivity. Soil Sci. Soc. of Am. J., 2002, 66:235~243
- [21] Johnson C K, Mortensen D A, Wienhold B J, *et al.* Site-specific management zones based on soil electrical conductivity in a semiarid cropping system. Agronomy Journal, 2003, 95:303~315
- [22] Corwin D L, Lesch S M. Application of soil electrical conductivity to precision agriculture: Theory, principles, and guidelines. Agronomy Journal, 2003, 95:455~471
- [23] Yang C, Bradford J M, Wiegand C L. Airborne multi-spectral imagery for mapping variable growing conditions and yields of cotton, grain sorghum, and corns. Transactions of the ASAE, 2001, 44(6):1983~1994
- [24] Fleming K L, Heermann D F, Westfall D G. Evaluating soil color with farmer input and apparent soil electrical conductivity for management zone delineation. Agronomy Journal, 2004, 96:1581~1587

SOIL NUTRIENTS-BASED ZONING FOR MANAGEMENT OF PRECISION AGRICULTURE

Li Xiang^{1,2,3} Pan Yuchun¹ Ma Jingyu^{1,2} Zhao Chunjiang^{1†} Wang Jihua¹

(1 National Engineering Research Center for Information Technology in Agriculture, Beijing 100089, China)

(2 Research Center for Remote Sensing and GIS, College of Geography and Remote Sensing, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

(3 Henan Information Industry Department, Zhengzhou 450008, China)

Abstract Zoning based on spatial variability and spatial autocorrelation of soil nutrients on a field scale, is a key to variable-rate fertilization in precision agriculture. First of all, spatial variability and spatial autocorrelation of three main soil nutrients were analyzed. The variation coefficient of available P, alkalytic N and available K was 44.3%, 13.2% and 34.3%, respectively. Available P and alkalytic N demonstrate medium spatial autocorrelation, but available K did not show any on the sampling scale. Precision of the Kriging interpolation of alkalytic N was improved by 42.8% considering anisotropy of spatial variability. Secondly, fuzzy-K-means cluster analysis of interpolated soil distribution maps was conducted to delineate management zones based on available P and alkalytic N. Fuzziness Performance Index (FPI) and Modified Partition Entropy (MPE) were employed to determine optimal zone number. The whole field was divided into four management zones. Finally, the zoning statistics showed that variation coefficient of alkalytic N and available P within a zone decreased from 13.2% on the field scale to 3.0%~5.3%, from 44.3% to 10.1%~17.3%, respectively, while the means of the soil nutrients differed sharply between management zones.

Key words Multi-variable; Precision agriculture; Management zoning; Fuzzy K-means cluster analysis