

DOI:10.3969/j.issn.1000-1298.2010.07.036

滩涂土壤电磁感应仪与方差四叉树法采样布局研究^{*}

姚荣江 杨劲松 赵秀芳 李晓明 刘梅先

(中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008)

【摘要】 将电磁感应仪 EM38 和方差四叉树法 VQT 相结合,以 EM38 测量的土壤表观电导率作为土壤盐分的辅助变量,以表观电导率的空间分布为先验信息,利用 VQT 法对苏北滩涂围垦地土壤盐分的优化采样布局进行了设计、验证与精度评价。结果表明,VQT 法设计的采样方案经 Kriging 插值形成的空间分布图与原始图件极其相似,但两者的样点数目相差近 1/2。相同的样本数目,VQT 法获取的空间分布图与原始图件的相似度高于网格采样法;同样的成图精度,VQT 法需要的样本数量小于网格采样法;在允许最大偏差指数为 10% 的条件下,VQT 法采样效率比网格法提高 17.3%。该方法具有可根据局部位变异大小进行密集或稀疏采样的优势,EM38 和 VQT 法的结合运用为滩涂区降低采样成本、提高采样效率提供了有效手段与理论依据。

关键词: 电磁感应仪 方差四叉树 滩涂 土壤采样 空间变异

中图分类号: S159.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2010)07-0174-07

Application of Electromagnetic Induction (EM38) and Variance Quad-tree (VQT) Method on Spatial Sampling Scheme in Coastal Saline Region

Yao Rongjiang Yang Jingsong Zhao Xiufang Li Xiaoming Liu Meixian

(Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

Abstract

Electromagnetic induction (EM38) and variance quad-tree (VQT) were both applied in the field of the coastal reclamation area in north Jiangsu Province. Apparent soil electrical conductivity (EC_a) measured with EM38 was used as an ancillary variable of soil salinity, and the spatial distribution of EC_a was used as priori information. The optimized sampling pattern of soil salinity was designed and validated by using VQT method, and the precision of the sampling design was evaluated. Results showed that the kriged spatial distribution map of the VQT scheme was highly similar to the kriged map of total sampling sites, while sampling quantity of the former was almost 1/2 of that of the latter. With the same sampling quantity, the kriged map of VQT scheme was more similar to the kriged map of total sites than that of grid sampling scheme. With the same mapping accuracy, the sampling quantity of the VQT scheme was less than that of grid sampling scheme. Under the condition of permitted maximum difference index of 10%, the sampling efficiency of VQT method could be improved by 17.3%. The advantage of the VQT method was that the scheme sampled sparsely or intensively in terms of variability in local parts of the study area. The associated application of EM38 and VQT method provided efficient tools and theoretical basis for saving cost and improving efficiency in coastal saline region.

Key words Electromagnetic induction, Variance quad-tree, Coastal saline region, Soil sampling, Spatial variability

收稿日期: 2009-06-19 修回日期: 2009-11-17

^{*} 国家“863”高技术研究发展计划资助项目(2007AA091702)、公益性行业农业科研专项经费资助项目(200903001)和江苏省自然科学基金资助项目(BK2009337)

作者简介: 姚荣江, 助理研究员, 博士, 主要从事水土资源空间变异与溶质运移研究, E-mail: rjyao@issas.ac.cn

通讯作者: 杨劲松, 研究员, 博士生导师, 主要从事土壤和水资源利用与管理研究, E-mail: jsyang@issas.ac.cn

引言

随着国内外精细农业实践的开展,对田间信息空间变异性的研究受到众多学者的关注。合理的土壤取样设计和精确的室内分析是土壤精确管理的前提。土壤采样点是离散和有限的,如果样点密度过大,则室内分析成本过高,如果样点密度过小,则不能客观地描述其分布状况。如何在满足需求精度的前提下,用最少的样点数来设计最佳的布点方案,从而节省野外采样和室内分析成本,是当前土壤取样设计研究的主要目的^[1]。近年来,国内外很多学者采用土壤特性空间变异特性进行这方面的研究^[2-3]。如 Van Groenigen 等^[4]采用模拟退火算法来最小化克立格方差以优化采样布点。McKenzie 等^[5]利用地形、气候和地质信息将研究区域归类,并在各类内随机布点。De Gruijter 等^[6]提出将 K 均值聚类方法用于辅助变量以优化样点布设。Minasny 等^[7]利用方差四叉树法分析了 DEM、NDVI 等影像用于优化土壤采样布局。近年来国内也有对一定条件下土壤合理采样数量的研究,但主要是对采样数据直接进行统计分析以计算采样数^[8-9],忽略了局部变异性的差异,而涉及样点空间布局的研究也以传统的网格采样为主^[10-12]。本研究以国内苏北滩涂围垦区典型地块为研究对象,把电磁感应仪 EM38 和在图像处理方面广泛应用的方差四叉树法 (variance quad-tree, 简称 VQT) 相结合,充分利用 EM38 测量土壤盐分快速、准确、非接触直读式的优点^[13-14],将 EM38 测量的土壤表观电导率作为盐分的辅助变量,以表观电导率的空间分布为先验信息,利用 VQT 法对盐分的优化采样布局进行分析,结合盐分实测数据对该布点方案进行验证,并与传统网格采样法进行比较以评价 VQT 方法的采样效率。

1 试验材料与方法

1.1 研究区概况

研究区域位于江苏省大丰市金海农场,东距黄海约 4 km,西临大丰麋鹿国家级自然保护区,于 1999 年开始围垦。该区地处北亚热带季风气候区,具有明显的过渡性、海洋性和季风性,年均降水量 1 058.4 mm,主要集中在 6~8 月份的雨季。由于当地缺乏蓄水工程,雨季水量丰沛但不能调蓄,非雨季淡水资源紧缺,农田灌溉一般采用当地微咸水(主要是上游东台河来水)。土壤主要发育于海相沉积物,土壤质地以砂壤土为主,盐渍化是制约该地区农业生产发展的主要障碍因子。本研究选择的地块面积为 0.69 hm² (48 m × 144 m),种植制度主要为“棉

花-油菜”的一年两熟制,尽管近年来该地块已被连续垦种,土壤盐分的变异程度仍相当显著,导致局部部位作物生长状况差异较大。

1.2 数据获取与样品采集

在研究地块进行网格布点采样,采样点平均间距约 4 m。首先通过电磁感应仪 EM38 的水平测量模式(图 1),置于地表测定样点的土壤表观电导率(记作 EC_a);待测量完成后,同步对该样点 0~20 cm 表土层进行采样,为保证样品的代表性,各样点均在中心点和相邻的 3 个角采集土样,并混合组成待测样品。本研究共测量了 285 个样点的土壤表观电导率数据,并采集了对应样点的表土层混合土样。

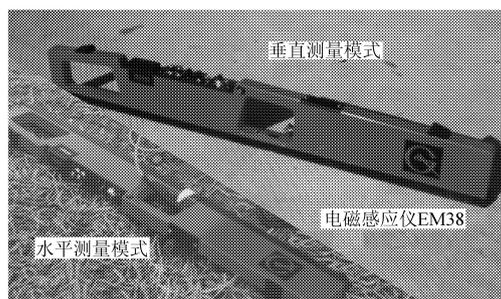


图 1 电磁感应仪 EM38 测量状态示意图

Fig. 1 Sketch map of electromagnetic induction EM38

1.3 样品处理与分析

采集的土样带回实验室内自然风干,磨碎、过 2 mm 筛后备用。所有的土样均制备土水比 1:5 浸提液,并测定其电导率 $EC_{1:5}$ 。具体测定方法参考文献^[15]。本研究采用土壤电导率 $EC_{1:5}$ 来表征土壤盐渍化程度,主要考虑到滨海滩涂区土壤全盐含量和土壤电导率 $EC_{1:5}$ 之间有极显著的相关性,且土壤浸提液电导率较全盐含量更真实地反映了田间土壤盐分实际有效状况^[16]。

1.4 研究方法

本研究采用的方差四叉树算法,是对方差较大区域不断进行四等分,直到方差最大值小于指定的阈值为止。其具体步骤为:① 将感兴趣的研究区域置于矩形内。② 通过连接该矩形水平方向和垂直方向上区域边的中点,将矩形分割为相等的 4 个区层,设 i 为分割次数,则每次分割后可得到 $3i+1$ 个区层,计算出各区层的方差 Q_h 。③ 找出方差 Q_h 最大的区层,若已小于设定的阈值则分割结束。④ 若大于设定的阈值则对方差 Q_h 最大的区层继续四等分,重复分割直到满足条件为止。⑤ 整个研究区域的合理采样布局即在每个区层内布设样点,各样点可位于区层中心,亦可在区层内随机布设,样点的数量则等于区层数 $3i+1$ 。方差四叉树法的具体算法参照文献^[17~18]。

2 结果与讨论

2.1 土壤 EC_a 空间分布

利用 Kriging 方法对 285 个样点的土壤表观电导率数据 (EC_a) 进行空间内插和制图, 得到其空间分布如图 2a 所示。可以看出, 该地块的表观电导率表现为东南部位高和西北部位低的趋势, 总体上东部高于西部, 南部高于北部, 且其空间变异性极为显著, 局部部位土壤表观电导率差异较大。产生这种现象的主要原因是由于种植模式和管理措施不一, 地块北部前茬种植蔬菜, 而南部种植棉花; 另外主要是受局部微地形的影响, 东南部位地势较高且微地形起伏较大, 土壤盐分表聚性显著, 使得表观电导率增大; 此外, 局部部位土壤质地差异可能也是较为重要的因素。田间调查结果亦显示, 该地块内作物生长状况差异明显, 在表观电导率较低的西部作物长势良好, 而表观电导率很高的东南部基本为裸露的盐斑地, 图 2a 很大程度反映了土壤盐分分布状况。事实上, 相关性分析表明表土层盐分 EC_{1-5} 与表观电导率 EC_a 的相关系数达到 95.4%, 说明采用电磁感应仪 EM38 测量的土壤表观电导率作为含盐量指标具有较高精度, 这也进一步说明利用电磁感应仪 EM38 进行滩涂土壤盐分采样的优化布局具有可行性。鉴于研究地块土壤表观电导率空间分布的变异性较强, 且 VQT 算法要求研究区域为规则正方形, 为此本文将研究地块由北向南划分为 A、B 和 C 三个等面积区域 (均为 $48\text{ m} \times 48\text{ m}$), 如图 2b 所示。可以看出, 区域 C 变异强度最大, 区域 A 变异强度最小, 这也有利于量化比较 VQT 算法对不同空间分布格局计算结果间的差异。

土壤表观电导率 EC_a 的半方差函数及其 Kriging 估值的交叉验证结果如图 3 所示。由图 3b 的交叉验证可知, EC_a 预测值和实测值间平均误差 ME、均方误差 RMSE 仅分别为 -0.00049 、 0.1366 , 且相关系数达 93.55%, 表明本研究中 EC_a 的

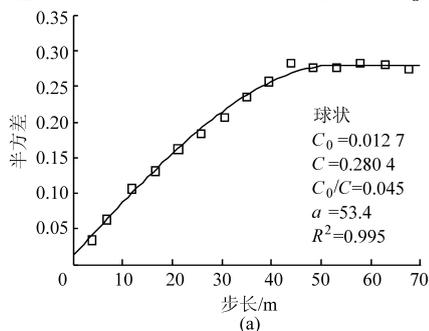


图 3 土壤 EC_a 的半方差函数及其空间预测的交叉验证结果

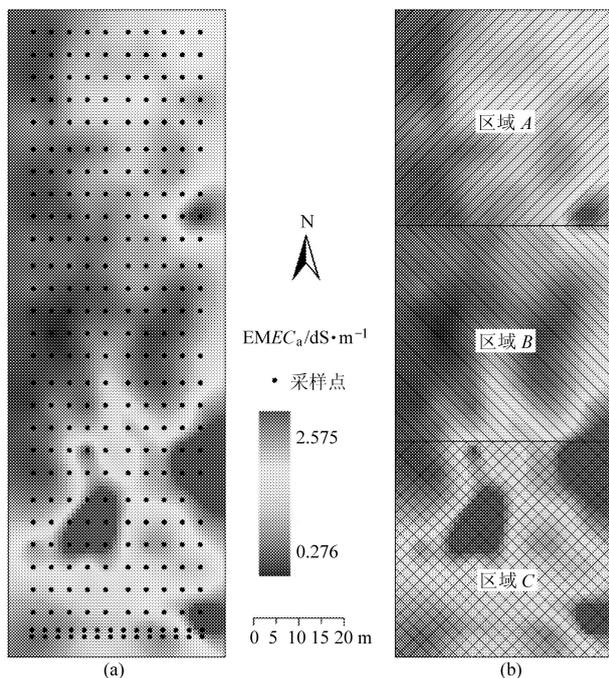


图 2 土壤表观电导率的空间分布及其分区

Fig. 2 Spatial pattern and its zoning of apparent soil electrical conductivity

Kriging 空间估值达到了较高精度, 这说明在图 2 基础上利用 VQT 算法进行合理采样布局分析具有较高的精度和可信度。

2.2 VQT 分析方法与过程

图 4a 显示的是随着 VQT 算法迭代次数的增加, 区域 A、B 和 C 所找出的具有最大预测方差的区域的方差值。可以看出, 各个区域的最大方差均随着分割迭代次数的增加 (即分层数目的增加) 而迅速减少, 随后减少的幅度开始变小, 并最终趋于稳定。区域 A 最大的层内方差在达到 21 次分割后开始趋于稳定, 区域 B 为 16 次, 区域 C 需 19 次。对于同一方差阈值 (以 A 区 5% 最大方差为准), 区域 A 在 21 次分割后开始趋于稳定, 区域 B 需 25 次, 区域 C 则需 45 次。根据图 4a 可以计算出合理分层数目以确保每个层内的最大方差在理想范围内。从图 4b 显示最大方差阈值与分层数目间的关

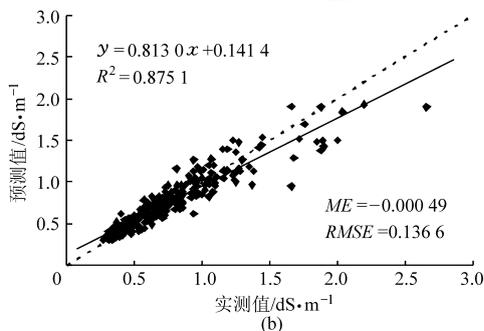
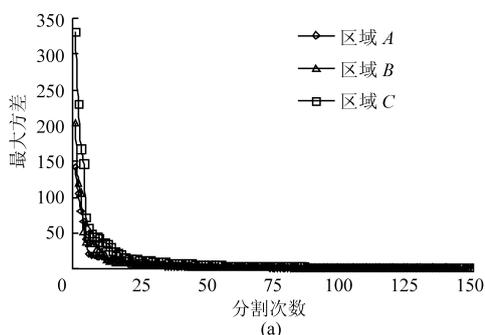


Fig. 3 Semivariogram and spatial prediction cross-validation results of soil EC_a

系来看,对同一方差阈值所需分层数目,区域 $C >$ 区域 $B >$ 区域 A ,即在相同方差阈值标准下,空间分布的变异性越强所需分割迭代次数越多,产生的



分层数目也越多;此外,在同一区域内,方差阈值越小,所需的分割迭代次数和产生的分层数目也越多。

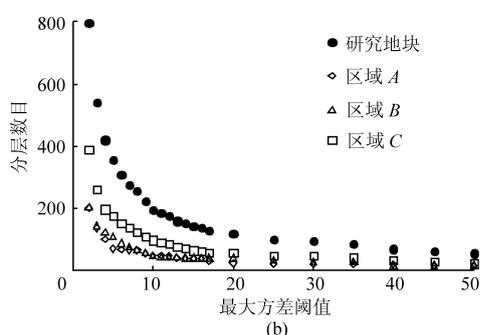


图 4 层内最大方差与分割次数以及最大方差阈值与分层数目之间的关系

Fig. 4 Maximum variance per stratum vs number of iteration and threshold of maximum variance vs number of stratum

图 5 是将整个研究地块分别划分为 420、276 和 195 个层的采样设计图。可以看出,在土壤表观电导率变异性较强的区域分层数密度较高,而在均一性较强的区域分层数较为稀疏,即 VQT 算法可找出那些土壤表观电导率在较小范围上变异最大的区域,这些区域具有较大的局部方差和非连续性,因而可以被视为独立的单元进行特定处理,而网格采样方法这些信息可能会被忽略掉。在田间采样时,可以对这些区域增加采样密度而对那些具有较好连续性的区域稀疏采样,这样不但可以节省采样与分析成本,提高采样效率,而且确保可以采集到具有代表性的样本。

间采样^[7]。而且,由于确保了采集的每个样品都是具有统一方差区块内的典型代表性样品,因此所收集的信息较仅仅通过网格采样获取的信息更有价值。事实上,VQT 方法要求预先从研究区获取关于研究对象、或者与研究对象密切关联的辅助变量(如本研究中与土壤盐分相关且较易获取的表观电导率 EC_a)空间变异性的一些先验信息,因而要优于一般的几何布样方法(如 K 均值聚类)。根据国外学者研究^[6、19],在有辅助变量先验信息的基础上,尽管 K 均值聚类计算得到的层内方差更小,但其空间离散度远高于 VQT 算法,这也是 VQT 方法较 K 均值聚类的主要优势。

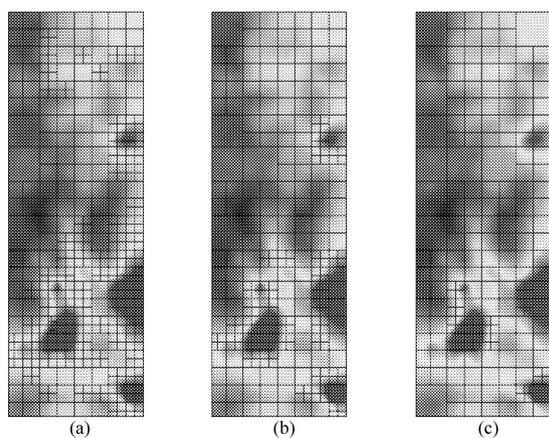


图 5 利用 VQT 算法获得的土壤 EC_a 采样模式

Fig. 5 Sampling schemes of soil EC_a generated with the VQT method

(a) $n = 420$ (b) $n = 276$ (c) $n = 195$

VQT 算法适用于连续变量的采样模式设计。该方法可推广运用于精细农业,如可根据作物产量变异来设计作物产量的采样方案,进而指导那些被认为对作物产量具有较大影响的土壤属性的采样。在遥感分析领域,VQT 方法亦可用于分析数字高程模型 DEM、归一化植被指数 NDVI 等影像并指导田

图 6 显示的是利用 VQT 算法将研究地块分层数目设为 141 层(方差阈值取 10% 最大方差)所得的采样布局模式。可以看出,VQT 算法在研究地块内找出好几个空间分布变化较大的区块,从而保证在这些区块的采样调查在一个较密的尺度上进行。而利用规则的网格采样则不能做到这一点。很明显,利用一个较少的样品数目,VQT 算法就可以提供较为合理的采样模式,该模式不像规则网格采样具有空间上的一致性,而是在土壤特性变异大的区域密集采样而在变异较小区域稀疏采样。图 6a 中,每个样点的位置布设于每层的中心,也可以随机布设,如图 6b 所示。

2.3 方法验证与精度评价

为验证 VQT 算法得到的上述采样布局,对研究地块所有 285 个样点(图 2a)和利用 VQT 算法得到的 141 个样点(图 6a)的土壤盐分实测值分别进行普通 Kriging 插值,得到土壤 $EC_{1.5}$ 的空间分布如图 7 所示。可以看出,图 7a 的土壤盐分与图 2a 的表观电导率空间分布规律高度一致,即表观电导率的空间分布真实地反映了土壤盐分的空间变异状况,证明利用电磁感应仪 EM38 测量的表观电导率进行土

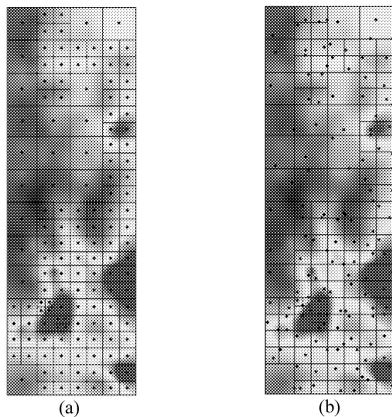


图6 利用VQT算法获得的141个层的 EC_a 采样模式

Fig. 6 Sampling schemes of soil EC_a generated with the VQT method of 141 soil strata
(a) 样点布设于中心 (b) 样点随机布设

壤盐分的采样布局具有较高的精度与可信度。此外,141个样点形成的 $EC_{1.5}$ 空间分布图(图7b)与全部采样点所得到分布图(图7a)亦具有极其相似的空间格局,虽然一部分局部变异的细节被平滑,但图7b仍很好地呈现出地块东部盐分高于西部、南部高于北部的总体趋势,而且变异强度较大的部位在图7b亦得到充分的表现。尽管两者的样点数目相差近1/2,但分析结果显示其空间分布相似度达90%。

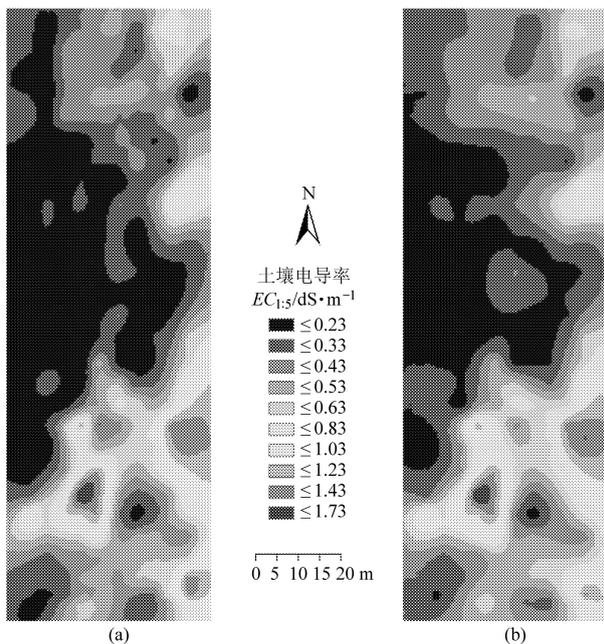


图7 所有采样点与VQT采样模式下土壤电导率 $EC_{1.5}$ 的空间分布

Fig. 7 Spatial distribution of soil $EC_{1.5}$ kriged with total sampling sites and VQT method
(a) $n=285$ (b) $n=141$

利用传统的网格法和VQT算法分别对研究地块土壤盐分进行采样设计,并对两种采样设计所得

到的不同的样点数目,分别进行Kriging插值并绘图。以图7a所有样点插值形成的土壤盐分空间分布作为参照图层,采用Costantini提出的偏差指数法对各采样模式下土壤盐分分布图的相似程度进行量化^[19],并将不同取样数目和偏差指数关系绘制成图(图8)。可以看出,利用VQT算法得到的采样模式比利用传统的网格采样具有明显优势,对于相同的样本数目,根据VQT方法获取的空间分布图的偏差指数明显小于网格采样法,即其与参照图层的相似度更高。也就是说,要达到同样的精度,VQT法需要的样本数量小于网格采样法。假设图8中的虚线是土壤盐分空间分布图所能允许的最大偏差指数10%(即平均相对误差),VQT法达到该精度需要约148个样点,而网格法则需要179个样点,即VQT法采样效率比网格法提高17.3%。综上所述,本研究建立的土壤盐分采样布局,不仅节省了采样与分析成本,其采样效率和Kriging估值精度亦要优于网格采样。

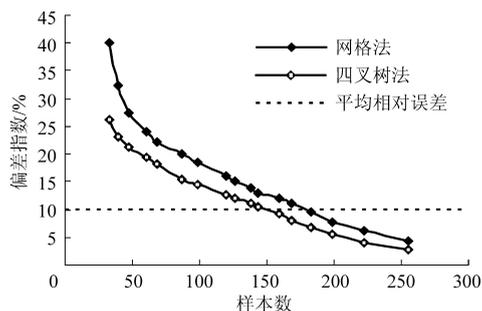


图8 VQT和网格采样获得的土壤 $EC_{1.5}$ 分布图的偏差指数与样本数的关系

Fig. 8 Difference index vs sampling number of soil $EC_{1.5}$ distribution maps of VQT and grid sampling methods

3 结束语

方差四叉树算法(VQT)可将连续的变量按方差分割从而获得具有等方差(等变异性)区层,它通过对变异较大的区域增加采样密度、对变异较小的连续区域降低采样密度来提供比传统规则网格采样法更为高效的采样布点方案。该方法适用于诸如实施精确农业的地块、长期监测的农田区等需要周期性采样的区域,这样随着田间土壤空间分布特性信息的不断累积,采样效率会越来越高。该方法的局限性在于它必须要有研究区土壤特性的先验空间变异性信息,对空间分布特征未知的田块的首次采样设计其适用性较差。电磁感应仪EM38能在地表快速、准确测量滩涂土壤盐分,且为非接触直读式。为此,本文将EM38与VQT方法相结合,将EM38测量

的土壤表观电导率作为盐分的辅助变量,以表观电导率的空间分布作为先验信息,利用VQT算法对其进行盐分采样布点设计,并用盐分实测数据对该布局方案进行了验证与评价。研究结果表明应用VQT算法设计的盐分采样方案进行Kriging估算时,其空间分布图与原始图件具有极其相似的空间规律,且变异性较大的部位均得到充分的表现,但两者的样点数目相差近1/2。精度评价结果显示对于相同的样本数,VQT法获取的空间分布图与原始图件的相似度高于网格采样法;即在同样的成图精度要

求下,VQT法需要的样本数量小于网格采样法;如假设允许最大偏差指数为10%,VQT法采样效率比网格法提高17.3%。本研究对象为小范围的田块尺度,如果应用于较大尺度的采样布局设计,是否会受到其他要素如地形、水系、土地利用等的影响;此外,本研究利用EM38测量的表观电导率作为盐分辅助变量,而表观电导率对盐分的响应还易受土壤质地、含水率、地下水性质等因素的影响,该方法在不同地域、不同时段使用是否会导致较大偏差,都有待进一步研究。

参 考 文 献

- McBratney A B, Mendonça-Santos M L, Minasny B. On digital soil mapping[J]. *Geoderma*, 2003, 117(1~2): 3~52.
- 张淑娟, 方慧, 何勇. 精细农业田间信息采样策略[J]. *农业机械学报*, 2004, 35(4): 88~92.
Zhang Shujuan, Fang Hui, He Yong. Sampling strategies of field information on precision agriculture[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2004, 35(4): 88~92. (in Chinese)
- 杨诗秀, 雷志栋. 田间土壤含水率的空间结构及取样数目确定[J]. *地理学报*, 1993, 48(5): 447~456.
Yang Shixiu, Lei Zhidong. Spatial structure of soil water content and sampling number determination in the field[J]. *Acta Geographica Sinica*, 1993, 48(5): 447~456. (in Chinese)
- Van Groenigen J W, Siderius W, Stein A. Constrained optimisation of soil sampling for minimisation of the Kriging variance [J]. *Geoderma*, 1999, 87(3~4): 239~259.
- McKenzie N J, Ryan P J. Spatial prediction of soil properties using environmental correlation[J]. *Geoderma*, 1999, 89(1~2): 67~94.
- De Grijter J, Brus D, Bierkens M F P, et al. Sampling for natural resource monitoring[M]. Berlin:Springer,2006:332.
- Minasny B, McBratney A B, Walvoort D J J. The variance quadtree algorithm: use for spatial sampling design [J]. *Computers and Geosciences*, 2007, 33(3): 383~392.
- 李子忠, 龚元石. 农田土壤水分和电导率空间变异性及确定其采样数的方法[J]. *中国农业大学学报*, 2000, 5(5): 59~66.
Li Zizhong, Gong Yuanshi. Spatial variability of soil water content and bulk soil electrical conductivity and determination of sampling number in field[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2000, 5(5): 59~66. (in Chinese)
- 姚荣江, 杨劲松, 姜龙. 黄河三角洲土壤盐分空间变异性与合理采样数研究[J]. *水土保持学报*, 2006, 20(6): 89~94.
Yao Rongjiang, Yang Jingsong, Jiang Long. Study on spatial variability and appropriate sampling quantity of soil salinity in Yellow River Delta[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2006, 20(6): 89~94. (in Chinese)
- 王珂, 沈掌泉, Bailey J S, 等. 精确农业田间土壤空间变异与采样方式研究[J]. *农业工程学报*, 2001, 17(2): 33~36.
Wang Ke, Shen Zhangquan, Bailey J S, et al. Spatial variants and sampling strategies of soil properties for precision agriculture[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2001, 17(2): 33~36. (in Chinese)
- 齐文虎, 谢高地, 丁贤忠. 精准农业土壤采样密度研究——以上海精准农业试验示范基地为例[J]. *中国生态农业学报*, 2003, 11(1): 48~52.
Qi Wenhui, Xie Gaodi, Ding Xianzhong. Study on soil sampling for precision agriculture—a case study from Shanghai Experimental Demonstration Base[J]. *Chinese Journal of Eco-agriculture*, 2003, 11(1): 48~52. (in Chinese)
- 吴才聪, 马成林, 张书慧, 等. 基于GIS的精确农业合理采样与施肥间距研究[J]. *农业机械学报*, 2004, 35(2): 80~83.
Wu Caicong, Ma Chenglin, Zhang Shuhui, et al. Research on reasonable distances of soil sampling and fertilizing based on GIS in precision agriculture[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2004, 35(2): 80~83. (in Chinese)
- 姚荣江, 杨劲松, 邹平, 等. 基于电磁感应仪的田间土壤盐渍度及其空间分布定量评估[J]. *中国农业科学*, 2008, 41(2): 460~469.
Yao Rongjiang, Yang Jingsong, Zou Ping, et al. Quantitative evaluation of the field soil salinity and its spatial distribution based on electromagnetic induction instruments[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2008, 41(2): 460~469. (in Chinese)

- 14 姚荣江, 杨劲松, 刘广明, 等. 电磁感应仪 EM38 用于土壤盐渍剖面分类与评价研究[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2007, 18(4): 54 ~ 59.
Yao Rongjiang, Yang Jingsong, Liu Guangming, et al. Study on classification and evaluation of soil salinity profiles using with electromagnetic induction EM38[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2007, 18(4): 54 ~ 59. (in Chinese)
- 15 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1999: 90 ~ 99.
- 16 Rhoades J D, Shouse P J, Alves N A, et al. Determining soil salinity from soil electrical conductivity using different models and estimates[J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 1990, 54(1): 46 ~ 54.
- 17 史舟, 李艳, 金辉明. 基于方差四叉树法的滨海盐土电导率采样布局研究[J]. 土壤学报, 2007, 44(2): 294 ~ 299.
Shi Zhou, Li Yan, Jin Huiming. Spatial sampling scheme for coastal saline soil based on the variance quad-tree (VQT) method[J]. Acta Pedologica Sinica, 2007, 44(2): 294 ~ 299. (in Chinese)
- 18 吴盼密, 龙鹏飞. 基于四叉树和进化算法的分形图像压缩[J]. 微计算机应用, 2005, 26(2): 198 ~ 200.
Wu Panmi, Long Pengfei. A fractal image compression algorithm based on quadtrees and evolution algorithm [J]. Microcomputer Applications, 2005, 26(2): 198 ~ 200. (in Chinese)
- 19 Brus D J, De Grujter J J, Van Groenigen J W. Designing spatial coverage samples using the *k*-means clustering algorithm [M]//Lagacherie P, McBratney A B, Voltz M. Digital soil mapping: an introductory perspective. Amsterdam: Elsevier, 2006.

~~~~~

(上接第 173 页)

- 11 Wang N, Zhang N, Dowell F E, et al. Determining virtuousness of durum wheat using transmitted and reflected images[J]. Transactions of the ASAE, 2005, 48(1): 219 ~ 222.
- 12 刘兆艳. 基于机器视觉的稻种品种识别研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2006.  
Liu Zhaoyan. Research on variety identification of rice seed using computer vision[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2006. (in Chinese)
- 13 成芳, 应义斌. 基于 Matlab 平台的稻种图像分析系统[J]. 浙江大学学报: 农业与生命科学版, 2004, 30(5): 572 ~ 576.  
Cheng Fang, Ying Yibin. Image analysis system of rice seed based on Matlab platform[J]. Journal of Zhejiang University: Agriculture & Life Sciences, 2004, 30(5): 572 ~ 576. (in Chinese)
- 14 成芳, 应义斌. 机器视觉技术在农作物种子质量检验中的应用研究进展[J]. 农业工程学报, 2001, 17(6): 175 ~ 179.  
Cheng Fang, Ying Yibin. Application of machine vision to quality evaluation of agricultural seed resources[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2001, 17(6): 175 ~ 179. (in Chinese)
- 15 成芳. 稻种质量的机器视觉无损检测研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2004.  
Cheng Fang. Nondestructive quality inspection of rice seeds with machine vision [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2004. (in Chinese)
- 16 王瑶. 种子分类与检验的图像分割与识别[D]. 长春: 吉林大学, 2007.  
Wang Yao. Image segmentation and recognition in seed classification and inspection [D]. Changchun: Jilin University, 2007. (in Chinese)
- 17 马长青. 基于机器视觉的种子质量检测新型算法[J]. 农机化研究, 2008, 30(12): 166 ~ 168, 172.  
Ma Changqing. A new arithmetic of seed quality checking based on machinery vision [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2008, 30(12): 166 ~ 168, 172. (in Chinese)
- 18 高木干雄, 下田阳久. 图像处理技术手册[M]. 孙卫东, 等, 译. 北京: 科学出版社, 2007: 1 228.