

DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2015.0550

谢云峰, 曹云者, 杜晓明, 等. 2016. 土壤污染调查加密布点优化方法构建及验证 [J]. 环境科学学报, 36(3): 981–989

Xie Y F, Cao Y Z, Du X M, *et al.* 2016. Development and validation of a sampling design optimization procedure for detailed soil pollution investigation [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 36(3): 981–989

## 土壤污染调查加密布点优化方法构建及验证

谢云峰<sup>1</sup>, 曹云者<sup>1</sup>, 杜晓明<sup>1</sup>, 徐竹<sup>1</sup>, 柳晓娟<sup>1</sup>, 陈同斌<sup>2</sup>, 李发生<sup>1</sup>, 杜平<sup>1,\*</sup>

1. 中国环境科学研究院, 环境基准与风险评估国家重点实验室, 北京 100012

2. 中国科学院地理科学与资源研究所环境修复中心, 北京 100101

收稿日期: 2015-05-04 修回日期: 2015-07-03 录用日期: 2015-07-06

**摘要:** 鉴于传统调查布点方法对土壤污染物平均含量的估计精度较高, 但对污染区范围的估计精度不能满足修复治理需求的问题, 同时, 为了准确估计土壤污染区面积及其空间位置, 提出了土壤污染详查样点优化方法. 在初步调查的基础上, 首先利用地统计条件模拟方法预测土壤污染概率, 基于污染概率和土壤污染物含量局部空间变异确定加密布点的优先区域, 并根据污染物含量的空间变化趋势布设样点, 然后根据优化后的土壤污染调查布点方案估计污染区面积和空间位置. 最后, 以某 Cd 污染场地为例, 验证了布点优化方法的效果. 结果表明, 土壤污染调查加密布点方法显著提高了污染区面积及其空间位置的估计精度. 案例场地土壤 Cd 污染区面积的预测误差为 4.10%, 污染区空间位置的精度为 86.10%. 土壤污染调查布点优化方法在保证土壤污染调查精度的同时, 相比于传统调查方法可显著降低土壤污染调查的样本量.

**关键词:** 土壤污染调查; 地统计条件模拟; 污染概率; 局部空间变异; 污染区范围; 布点优化

文章编号: 0253-2468(2016)03-989-09

中图分类号: X144

文献标识码: A

## Development and validation of a sampling design optimization procedure for detailed soil pollution investigation

XIE Yunfeng<sup>1</sup>, CAO Yunzhe<sup>1</sup>, DU Xiaoming<sup>1</sup>, XU Zhu<sup>1</sup>, LIU Xiaojuan<sup>1</sup>, CHEN Tongbin<sup>2</sup>, LI Fasheng<sup>1</sup>, DU Ping<sup>1,\*</sup>

1. State Key Laboratory of Environmental Criteria and Risk Assessment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012

2. Center for Environmental Remediation, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101

Received 4 May 2015;

received in revised form 3 July 2015;

accepted 6 July 2015

**Abstract:** Accurate estimation of soil contaminated area and its spatial distribution is one of the main purposes in soil pollution investigation. Traditional sampling design methods (random sampling, systematic sampling and so on) have good performance in estimating the average concentration of contaminants in soil. However, the accuracy of estimated contaminated area is insufficient for site remediation. In order to improve the estimate accuracy of contaminated area, a sampling design optimization method was proposed. Based on the preliminary soil investigation data, probability of soil contamination was predicted using geostatistical conditional simulation (i.e., sequential gaussian simulation), while local spatial variation of the soil contamination was depicted by the coefficient of variation. Priority areas for detailed soil investigation were delimited according to the contamination probability and local spatial variation of the pollution concentration. Finally, additional samples were placed according to spatial trend of the soil contaminants determined by spatial pattern analysis. The method was then evaluated and verified at a cadmium contaminated field. Results indicated that the proposed sampling optimization method improved the estimation accuracy of polluted area and spatial location significantly. Relative error of the predicted area of the Cd contamination soil was 4.1%. Precision of the spatial location of the contaminated area was 86.10%. Compared to traditional sampling, the optimized method needs 57.1% less of the number of samples.

**Keywords:** soil pollution investigation; geostatistical conditional simulation; probability of contamination; local spatial variability; extent of contaminated soil; sampling design optimization

基金项目: 国家自然科学基金(No.41301229); 国家环境保护公益性行业科研专项(No.201409047)

**Supported by** the National Natural Science Foundation of China (No.41301229) and the Environmental Protection Public Welfare Research Funds (No. 201409047)

作者简介: 谢云峰(1981—), 男, 副研究员(博士), E-mail: xieyf@craes.org.cn; \* 通讯作者(责任作者), E-mail: duping@craes.org.cn

**Biography:** XIE Yunfeng (1981—), male, associate professor(Ph.D.), E-mail: xieyf@craes.org.cn; \* **Corresponding author**, E-mail: duping@craes.org.cn

## 1 引言 (Introduction)

土壤采样调查是获取土壤污染物空间分布信息最重要的手段,采样调查结果的精度直接影响污染风险评价结果的准确性和风险管理决策的合理性.土壤污染调查包括土壤样点布设、样品采集、污染物含量分析等环节.实际工作中,通常认为污染物分析方法的准确性是影响污染调查准确性的最主要因素 (Crumbling *et al.*, 2001),而忽略了土壤采样布点方案的重要性.大量研究表明,污染物在土壤中的空间分布表现出明显的空间变异性,人类活动影响越大的区域,局部变异程度越大 (Thompson, 1996; 丛鑫等, 2009; 杜平等, 2006; 张娟等, 2014; 郑一等, 2003). 针对空间变异性较大的环境要素,样点布设方案是影响调查结果准确性最主要的因素之一. Jenkins 等 (1997) 对土壤中三硝基甲苯污染的调查结果表明,至少 95% 的变异度 (统计方差) 是由采样位置导致,而含量分析 (室内分析和现场分析) 手段对变异度的贡献不超过 5%. 其他类似研究也表明,土壤采样导致的不确定对污染物含量测定不确定性的贡献超过 50% (Argyaki *et al.*, 1997; Theocharopoulos *et al.*, 2001; Jenkins *et al.*, 1999). 因此,科学合理的土壤采样布点方案对保障污染调查结果的精度非常重要.现有的土壤污染调查布点方法主要包括判断性采样和非判断性采样 (姜成晟等, 2009), 其中,判断性采样主要根据已有先验知识设计采样布点方案,并在潜在的高污染风险区域加大采样密度 (UK Environment Agency, 2000); 当缺乏场地污染物分布的背景信息时,就只能采取非判断性采样方法,如随机采样、均匀网格布点采样等 (Thompson *et al.*, 1995; USEPA, 1989). 传统的土壤污染调查布点方法主要用于对污染物总体 (平均含量) 的最佳估计 (Brus *et al.*, 1999), 样本量主要取决于污染物含量的空间变异程度.土壤污染治理过程中,污染调查主要关注目标污染物的超标程度及污染区范围.因此,以总体估计为目标的传统土壤污染调查布点方法对土壤污染范围的估计精度通常不能满足修复决策的需求 (刘庚等, 2013; 谢云峰等, 2010). 近年来,应用地统计学方法来提高土壤污染调查精度已成为研究热点之一 (D'Or, 2005; Demougeot-Renard *et al.*, 2004; Juang *et al.*, 2005; Van Groenigen *et al.*, 1999; Van Tooren *et al.*, 1997),

该方法基于土壤污染物空间分布的自相关性,优化土壤调查布点空间布局,可提高土壤污染调查效率 (Burgess *et al.*, 1981; Demougeot-Renard *et al.*, 2004; Englund *et al.*, 1993; 阎波杰等, 2008; 赵倩倩等, 2012). 虽然基于地统计学和条件模拟方法的样点布设方法效率最高 (Jones *et al.*, 2003),但在土壤污染调查过程中却很少用于土壤污染调查布点优化 (Verstraete *et al.*, 2008).

为了获得准确的土壤中污染物空间分布信息,土壤污染调查通常包括污染初步调查、污染详查等多个阶段.初步调查的主要目的是识别土壤主要污染物及潜在污染区域,通常样本量较少.污染详查是在初步调查基础上,在潜在的污染区域增加样点,确定污染区的范围及其污染程度.土壤污染调查方案的误差主要包括污染区被低估和清洁区被高估 (Marchant *et al.*, 2013; Ramsey *et al.*, 2002), 其中,前者会导致污染区面临的污染风险不能得到有效控制,后者会导致不必要的修复投入.为了获取准确的污染区信息,通常需要增加样本量,但这会导致采样分析成本的增加.高效的采样方案是将采样调查成本与调查不确定性导致的经济损失的总成本降到最低 (Ramsey *et al.*, 2002). 采样方案优化的目的就是要寻求降低污染修复不确定性的最佳样本量 (Demougeot-Renard *et al.*, 2004). 土壤污染物的空间分布受污染来源、环境条件、污染物性质等因素的综合影响,其在空间上表现出不同程度的空间相关性和变异性,对土壤污染物空间变异性的描述准确与否是影响调查结果的关键.本研究结合土壤污染调查的特定需求,提出基于污染概率和污染物局部空间变异特征的土壤污染调查加密布点方法,以提高土壤污染调查方法对污染区范围和污染程度的估计精度,并为土壤污染调查提供方法学支持.

## 2 土壤污染调查加密布点方法 (Sampling design optimization procedure for detailed soil pollution investigation)

土壤污染调查结果的不确定性主要出现在污染物含量过渡区域 (刘庚等, 2013; 谢云峰等, 2010; Xie *et al.*, 2011), 为此,该研究针对污染调查结果的不确定性,提出土壤污染调查加密布点的工作流程和方法 (见图 1). 土壤污染调查加密布点的 2 个核心问题分别为确定需要加密布点区域和样点布设方法.

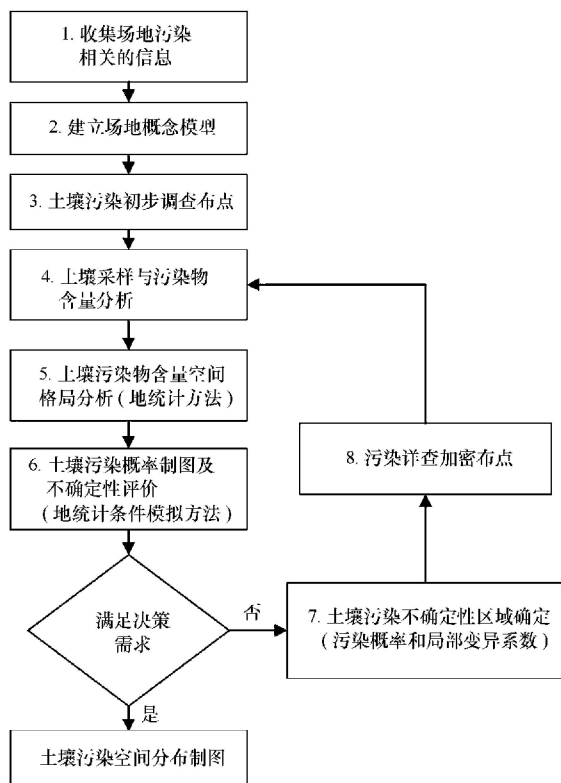


图1 土壤污染调查加密布点方法工作流程  
Fig.1 Flow chart of additional sampling scheme in detailed soil pollution investigation

## 2.1 加密布点区域的确定方法

由于土壤污染治理仅关注污染物含量超过相关环境标准或修复目标值的区域,因此,提高污染区范围的估计精度就显得尤为重要,加密布点法正是基于这一需求而提出.由于初步调查阶段已经获得了一定的污染物分布信息,所以在加密详查阶段只需要针对污染分布信息不确定性较大的区域进行补充调查即可,其中,不确定性区域是指污染物空间分布精度低于修复决策需求精度的区域.

为了定量评估土壤污染调查的不确定性,该研究引入土壤污染概率方法.基于初步调查数据,利用概率制图方法预测土壤污染物超过环境标准或修复目标值的概率,常用的概率制图方法有地统计条件模拟方法、指示克里格方法等.其中,地统计条件模拟方法包括多种模拟算法,如序贯高斯模拟、序贯指示模拟等.污染概率的取值范围为 $0\sim 1$ ,概率值越高,可优先判定为污染土壤;相反,污染概率值越低,可优先判定为清洁土壤.概率制图结果中,概率值介于高值和低值之间者即为不确定性区域,需要进一步补充调查确认.假定某污染土地统计条件模拟的污染概率阈值范围为 $0.1\sim 0.8$ ,设定污染

概率阈值和清洁概率阈值分别为 $0.5$ 和 $0.3$ ,则污染概率为 $0.5\sim 0.8$ 者为污染区域, $0.1\sim 0.3$ 者为清洁区域, $0.3\sim 0.5$ 者即是需要加密调查的区域.

不确定性区域污染概率值较低的可能原因:  
①区域内污染物含量较低;②区域属污染区域,并且样本量较少.为了进一步探究其具体原因,该研究引入局部变异特征方法.基于初步调查数据,分析土壤污染物含量的局部变异特征(包括变异系数、方差、自相关性等),如果局部变异性较大,表明土壤中污染物含量空间分布差异较大;反之,则表明污染物含量空间分布差异较小.对于局部变异性较大者,通常是污染物含量高值区向低值区的过渡区域,也是调查结果不确定性较大的区域;对于变异性较小者,通常是高值集中或低值集中的区域,调查结果的可靠性较高.因此,根据土壤污染物的局部变异系数,将土壤污染调查结果划分为不确定性区域和确定性区域.假定某污染土壤局部变异系数为 $20\%\sim 200\%$ ,设定变异系数阈值为 $100\%$ ,则变异系数为 $100\%\sim 200\%$ 者为不确定性区域;低于 $100\%$ 者为确定性区域.

综合污染概率和局部空间变异系数确定的污染调查不确定性区域,即为污染调查加密布点的目标区域.

## 2.2 不确定性区域样点布设方法

不确定性区域样点布设包括加密样点的数量和样点的空间位置.其中,加密样点数量主要与不确定性程度相关,不确定性较大的区域,加密布设的样本量也较大;样点的空间位置主要与污染物含量空间变化趋势相关,主要利用趋势分析方法分析土壤污染物空间变化规律,沿着土壤污染物含量变化的方向布设加密样点.

本研究提出的污染调查加密布点方法的主要目的是为提高污染区范围的估计精度.在初步调查结果的基础上,结合污染概率和局部变异系数方法确定加密布点的目标区域,再根据土壤污染物含量分布的空间变异性及其变化趋势,确定加密样点的布设方案.该方法可优化加密布点的位置,降低加密布点的数量,提高加密布点的效果,从而在保证调查精度的前提下,降低调查成本.

## 3 加密布点方法案例验证 (Validation of the sampling design optimization procedure for detailed soil pollution investigation)

### 3.1 案例区概况

案例数据来源于某重金属污染场地,场地面积

约 14.50 km<sup>2</sup>.按照 200 m 间隔进行均匀采样,在部分高污染区域适当增加样本量,共采集 359 个土壤样品. 土壤污染调查结果表明,土壤重金属 Cu、Pb、As、Cd 等污染物都存在不同程度的污染.以该场地土壤 Cd 污染为例,开展土壤污染调查详查加密布点优化方法研究.

3.2 样点加密布点方案

案例验证研究过程中并不实际开展土壤污染初步调查布点取样,以及初步调查结果分析和详查加密布点工作. 而是利用案例场地已有的 359 个调查数据,采用空间抽样的思路,模拟开展土壤污染初步调查和加密详查布点过程.具体操作步骤为:首先基于案例数据的 359 个样点数据,进行模拟的土壤污染初步调查.根据图 1 的工作流程可知,土壤污

染物空间变异特征研究和土壤污染不确定性区域确定是土壤详查加密布点的 2 个最重要的环节.地统计学的半方差分析方法是常用的空间变异特征研究手段之一,为了获取比较准确的土壤污染物的空间分布规律,需要有足够的样本量.因此,在初步调查阶段,将研究区域划分为 10×10 的网格,落在网格内的土壤样点作为初步调查样点,当网格内有多个土壤样点时,随机选取其中一个,由此共获得土壤初步调查样点 97 个,样点间平均距离约为 386 m.在初步调查的 97 个样点数据的基础上,利用本研究提出的加密布点方法进行加密布点.具体步骤为:基于初步调查数据,利用地统计学方法分析场地土壤 Cd 含量( $w(\text{Cd})$ )的空间分布规律.利用条件模拟方法预测该场地土壤 Cd 污染概率(图 2a).

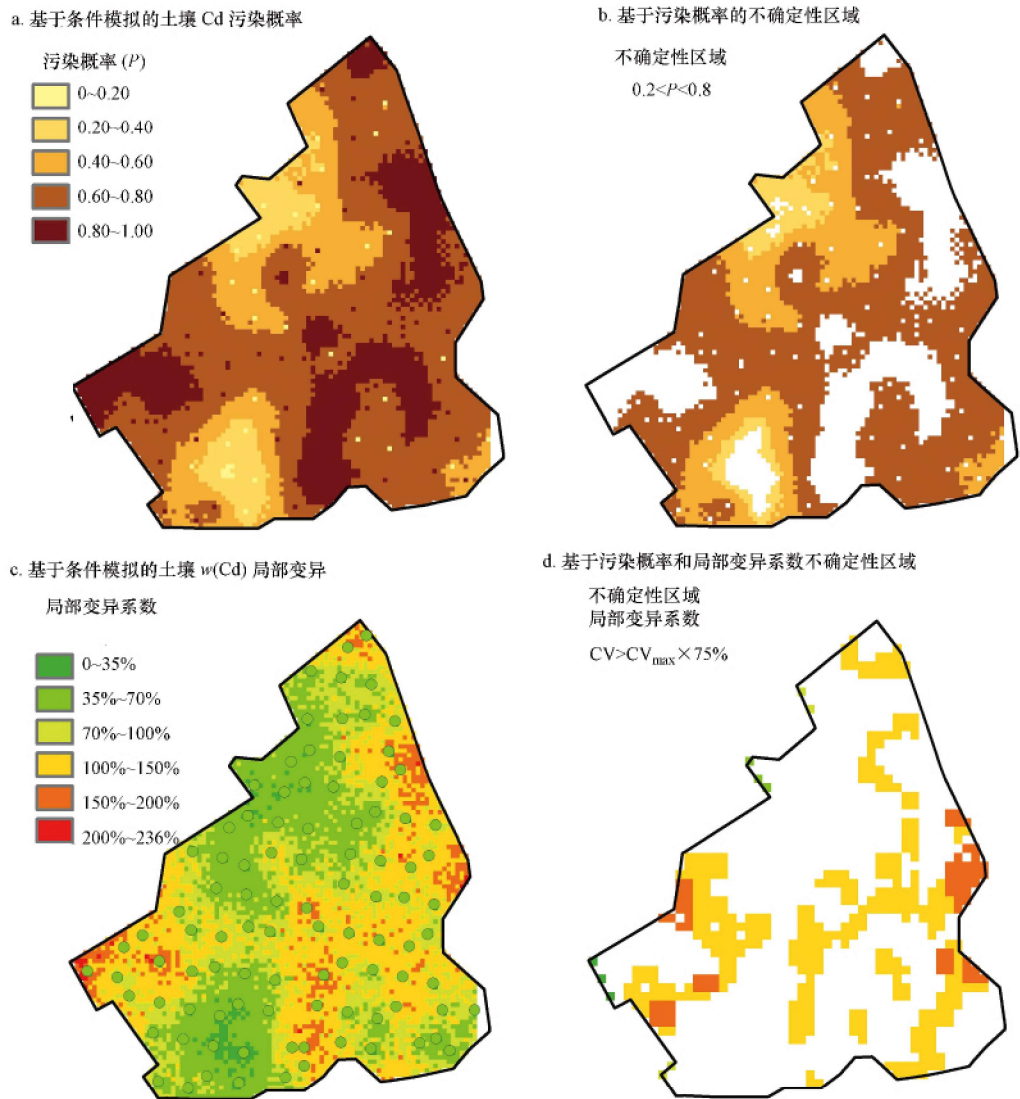


图 2 基于污染概率和局部变异系数确定土壤污染调查的不确定性区域

Fig.2 Uncertainty area of contaminated soil estimated using probability of contamination and local spatial variability

基于污染概率预测结果,设定污染概率阈值( $P_l$ )和清洁概率阈值( $C_l$ ),污染区域确定方法如式(1)所示.土壤 Cd 污染概率阈值和清洁概率阈值分别设定为 0.8 和 0.2,基于污染概率划定的不确定性区域见图 2b;在此基础上,结合土壤污染局部变异特征(图 2c),将局部变异性大于变异系数阈值( $CV_l$ )的区域划定为不确定性区域(图 2d),变异系数阈值设定为局部变异系数最大值的 75%(式(2)).综合污染概率和局部变异系数的结果,即为土壤污染详查布点的优先区域,根据土壤污染物空间结构分析结果,沿着污染物含量变化的方向确定加密样点的位置(图 3a).由于该研究是模拟研究,如果在最佳的采样位置没有样点数据,就选择邻近样点作补充,土

壤详查加密样点为 57 个,布点方案见图 3b.将加密布点后的污染调查结果与案例场地 359 个数据获得的结果进行对比,评价加密布点的效果.

$$R_p = \begin{cases} P(Z(x) > Z_c) > P_l & \text{污染区域} \\ P(Z(x) > Z_c) < C_l & \text{未污染区域} \\ \text{其它} & \text{不确定性区域} \end{cases} \quad (1)$$

$$R_{cv} = \begin{cases} CV_x > CV_l & \text{不确定性区域} \\ \text{其它} & \end{cases} \quad (2)$$

式中, $R_p$ 为污染概率分区, $Z(x)$ 为条件模拟预测的土壤污染物含量, $Z_c$ 为土壤污染评价标准, $P_l$ 为污染概率阈值, $C_l$ 为清洁概率阈值, $R_{cv}$ 为污染变异系数分区, $CV_x$ 为局部变异系数, $CV_l$ 为变异系数阈值.

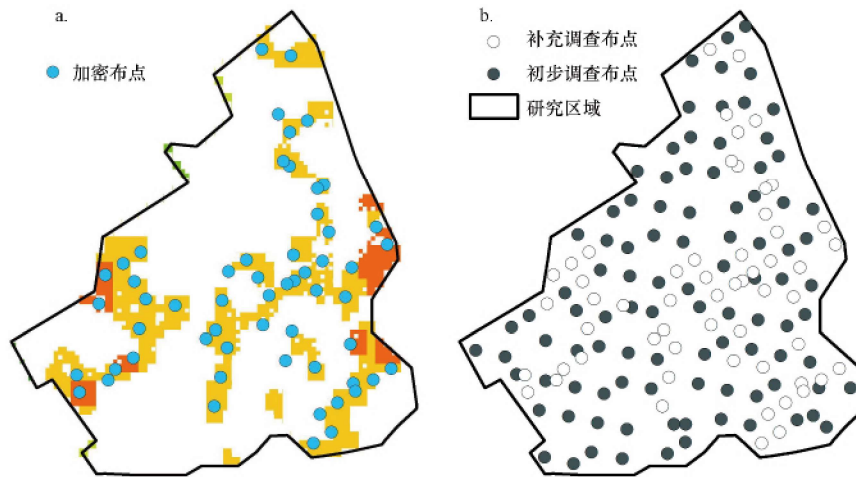


图3 土壤 Cd 污染调查样点分布(a.加密样点分布,b.初步调查和加密样点分布)

Fig.3 Sampling scheme of soil Cd concentration investigation

### 3.3 数据处理方法

利用 GS+7.0 软件进行土壤污染物含量的空间结构特征分析.样点污染物含量局部变异特征是在样点 VORONOI 图的基础上,借助 ArcGIS 10.1 的 Geostatistical Analyst 工具,计算每个样点及其邻近样点的变异系数.采样网格、初步调查样点设计及所有空间制图均在 ArcGIS 10.1 软件中实现.土壤污染物含量条件模拟及污染概率计算在 GSLIB (Geostatistical Software Library) 中实现 (Journel *et al.*, 1998).地统计学条件模拟方法较多,该研究采用最常用的算法之一序贯高斯模拟方法 (Sequential Gaussian Simulation, SGS) (谢云峰等, 2015),该方法算法简单、灵活、计算方便,其基本思路为:根据现有样点数据计算待模拟点污染物浓度的条件概率分布,从该分布中随机取值作为模拟实

现;将得到的每一个模拟值,连原始样点数据一起作为条件数据,进入下一个点的模拟.

### 3.4 结果与讨论

3.4.1 土壤 Cd 统计特征的估计精度 由表 1 可见,土壤 Cd 污染初步调查样点(97 个)与污染详查样点加密后(154 个)的统计特征很相似,平均值差异仅为  $0.01 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ .加密详查后样本的变异系数降低.与总体样本相比,初步调查和加密详查这 2 个阶段采样的 Cd 平均值都偏高,误差为 5.40%.变异系数较总体分别降低 2.79%和 6.71%.初步调查平均值的估计精度较高,而加密详查并没有进一步提高平均值的估计精度.在污染详查阶段,由于在土壤污染空间变异较大的区域增加了样点,因此,其变异系数降低.

表 1 土壤初步调查和加密详查后  $w(\text{Cd})$  的统计特征

Table 1 Descriptive statistics of the soil Cd concentration at different stages of investigation

| 调查阶段 | 样点数 | $w(\text{Cd}) / (\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1})$ |      |         |      |         |      | 变异系数 (CV) |
|------|-----|---------------------------------------------------|------|---------|------|---------|------|-----------|
|      |     | 平均值                                               | 最小值  | 1/4 分位值 | 中值   | 3/4 分位值 | 最大值  |           |
| 初步调查 | 97  | 1.36                                              | 0.14 | 0.71    | 1.22 | 1.79    | 4.18 | 63.86%    |
| 污染详查 | 154 | 1.35                                              | 0.14 | 0.75    | 1.23 | 1.78    | 4.18 | 59.94%    |
| 所有样点 | 359 | 1.29                                              | 0.14 | 0.65    | 1.10 | 1.69    | 5.13 | 66.65%    |

注:污染详查样点包括初步调查的 97 个样点和污染详查加密布设的 57 个样点.

3.4.2 土壤污染区面积的估计精度 土壤污染调查重点关注的是污染信息的识别精度. 初步调查和加密详查阶段, 根据样点  $w(\text{Cd})$  超标率 (表 2) 估算的污染区面积所占比例分别为 68.04% 和 70.13%, 比所有样本的估算结果分别高 3.14% 和 5.23%. 污染概率预测结果表明, 当污染概率阈值为 0.8 时, 污染概率预测的污染区面积所占比例在 53.58% ~ 57.84% 之间, 比样点超标率估计结果低 7.06% ~ 16.39%. 基于超标率估算污染区面积, 意味着当某个采样网格内的土壤样点污染物含量超标时, 则判定该网格超标. 样点加密详查后, 增加的样点都位于污染概率较高的区域, 因此, 总体样点中污染区域样点的比例增加, 导致污染面积估计结果增大.

初步调查和加密详查这 2 个阶段估计的污染区面积非常接近, 样点加密后污染概率预测的污染区

面积仅增加 0.16%, 初步调查与加密详查估算的面积均小于总体样本的估计结果, 污染面积低估 4.10%. 为了评价污染区范围空间位置的预测精度, 将不同采样阶段预测的污染区范围与总体样本预测的结果进行空间差值运算, 并根据差值结果将污染区空间位置预测精度分为相同、低估和高估 3 种情况. 相同表示污染程度预测结果一致, 低估表示污染区被预测为清洁区, 高估表示清洁区被预测为污染区 (图 4). 从污染区的空间位置精度来看, 初步调查污染区面积预测的准确度为 79.35%, 分别有 12.45% 的区域污染程度被低估, 8.20% 的区域污染程度被高估. 加密详查后, 污染区面积预测的准确度提高到 86.10%, 污染程度被低估和被高估的面积分别降至 9.00% 和 4.90%.

表 2 不同调查阶段土壤 Cd 污染区面积估计结果

Table 2 Soil Cd contaminated area estimated at different stages of investigation

| 调查阶段 | 样点数 | 污染面积所占比例 |          | 空间位置精度 |        |       |
|------|-----|----------|----------|--------|--------|-------|
|      |     | 基于超标率估算  | 基于污染概率估算 | 低估     | 相同     | 高估    |
| 初步调查 | 97  | 68.04%   | 53.58%   | 12.45% | 79.35% | 8.20% |
| 污染详查 | 154 | 70.13%   | 53.74%   | 9.00%  | 86.10% | 4.90% |
| 所有样点 | 359 | 64.90%   | 57.84%   | —      | —      | —     |

注:空间位置精度是与 359 个样本的预测结果相比较.

土壤 Cd 平均值估计结果表明, 在初步调查阶段, 其估计精度就已达到 94.00% 以上, 而污染区的估计精度仅为 79.35%. 表明在土壤污染调查过程中, 平均值或土壤污染统计特征的估计精度, 并不能反映污染区范围的估计精度. 土壤污染治理过程中, 污染区空间分布信息比平均值更重要, 直接影响到修复成本的估计. 本研究提出的土壤污染详查加密布点方法, 在保证土壤污染总体平均含量估计精度的前提下, 显著提高了污染区面积的估计精度; 加密详查后, 污染区面积的估计误差为 4.10%, 空间位置精度为 86.10%, 比初步调查精度提高了 6.75%; 土壤污染调查的样本量显著降低, 初步调查和加密详查的样本量仅为总体的 42.90%.

本研究的样点优化思路是在不确定性较大的区域内增加样点, 不确定性区域的界定标准为条件模拟的污染概率和局部变异系数. 从图 2 可知, 不确定性区域主要分布在污染区边缘, 在这些区域增加样点密度, 能显著提高污染区空间位置精度. 初步调查过程中, 污染程度被低估时, 污染区域被误判为清洁区域 (见图 4 左下角和左上角的绿色区域); 样点优化过程中, 清洁区域不会补充调查样点, 因此, 优化后的结果仍然是被低估. 污染程度被低估与初步调查布点、污染概率阈值选择有关. 由于没有污染物分布相关的背景信息, 网格随机采样布点法对总体平均含量和变异程度的预测精度较高, 对局部污染信息的预测精度较低. 在初步调查前, 收集场地污

污染源排放、土地利用方式、土壤理化性质、水文地质条件等影响污染物空间分布的相关信息,辅助调查样点设计,可以提高对污染区识别的精度(Falk *et al.*, 2011). 污染概率阈值选择对加密点的空间分布有较大影响,如果选择的污染概率阈值过低,就会导致被高估的区域不能被识别;概率阈值过高,则会导致不确定性区域增大,需加密的样本过多,从而降低加密效率.本研究为了获取较大的不确定性区域,选择了较高的污染概率阈值和较低的清洁概率阈值,用于检验样点优化方案的效率.在具体

应用中,应结合研究区的特点和调查目标,选择适宜的污染概率阈值,进一步提高样点优化方案的效率.加密详查样点优化过程中,基于污染概率和局部变异系数筛选出不确定性较大的区域,该研究并没有在这些区域增加样点,而是根据已有的样点数据,基于距离邻近原则,用邻近样点替代最佳位置的样点.增加的样点在空间位置上并不是最优化的,这可能会降低样点优化的效率.实际应用中在最佳的空间位置补充样点,应该会取得更好的调查效果.

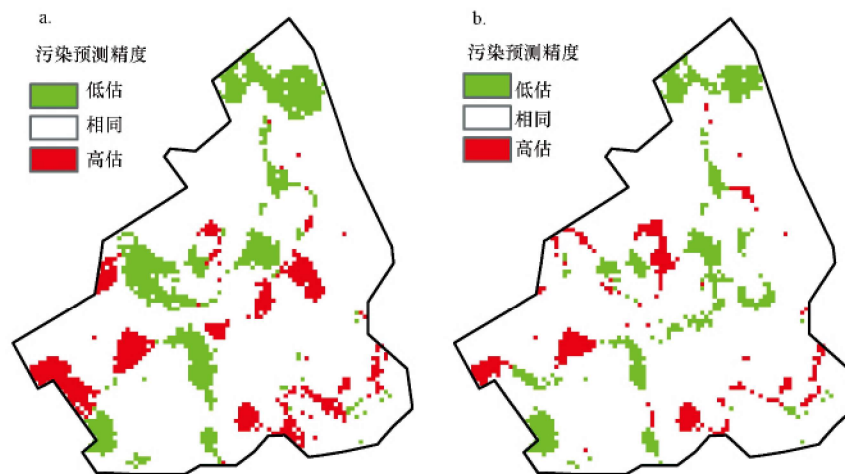


图4 土壤Cd污染范围预测结果的空间误差(a.初步调查阶段,b.详细调查阶段)

Fig.4 Spatial difference of the estimated soil Cd contaminated area

本研究提出的加密布点方法的核心是在污染预测结果不确定性的区域,根据污染物空间分布规律补充调查样点.如图1所示,在污染物空间分布、污染概率预测、预测结果不确定性评价等阶段都应用了地统计学方法.根据地统计学方法的基本假设,应用该方法时要求污染物空间分布具有显著的空间自相关性.大量的研究表明,重金属、多环芳烃等污染物在土壤中的空间分布都表现出明显的空间相关性(胡克林,2004;郑一等,2003).因此,地统计学方法是适用的.对某些污染物,如化工场地的氯代烃污染等,这类污染物主要是通过泄漏释放到土壤中,然后通过土壤孔隙进一步向下迁移.在水平空间上,存在泄漏的区域就会检出污染物,没有泄漏的区域就不存在污染(韩春梅等,2009),因此,这类污染物在空间上自相关性较差,本研究提出的加密布点方法就不适用.土壤中污染物空间分布受污染源分布及释放特征、区域环境条件、污染物性质及环境行为特点等多种因素的综合影响,在不同尺度上会表现出不同的空间分布规律.针对具体区域

开展污染调查时,需综合考虑污染物空间分布的影响因素,同时可借鉴前期研究和其它类似研究的成果,初步分析土壤中污染物的空间分布特征,在此基础上,进行初步调查布点.基于初步调查结果,应用地统计学方法研究污染物空间分布规律,如果污染物具有较好的空间自相关性,就可以采用本研究的方法进行加密布点优化,否则,本研究的方法就不适用.加密布点是在初步调查结果的基础上,通过辨识污染物的空间分布规律,结合污染调查的要求,开展详查布点优化.因此,初步调查的可靠性会直接影响加密布点的效果.地统计学应用半方差分析研究污染物的空间自相关性.相关研究表明,样点数量和空间分布会直接影响半方差分析结果的准确性(Goovaerts, 1999).从样点数量来看,由于污染物类型、研究区域条件的差异,不同研究的结论不太一致,通常认为样点数小于60时,难以获得较准确的半方差(秦耀东,1998).在具体应用时,可根据半方差函数的拟合效果,评估样点数是否足够.从样点空间分布来看,为评估污染物在不同距离和不同

方向上的空间分异规律,初步调查样点应尽可能在研究区域内均匀分布,在不同距离和方向上都有足够的样点数用于分析污染物的空间分布规律,可帮助提高加密布点优化的效率。

#### 4 结论(Conclusions)

1) 土壤污染调查布点方法对土壤污染物含量的估计精度较高,案例场地土壤中 Cd 平均值的预测误差为 5.40%,变异系数的预测误差为 6.71%。

2) 土壤污染调查布点方法显著提高了污染区面积和污染区空间位置的估计精度,案例场地土壤 Cd 污染区面积的预测误差为 4.10%,污染区空间位置的精度为 86.10%。

3) 在初步调查的基础上,基于污染概率和局部变异系数优化土壤污染调查布点,在保证土壤污染调查精度的同时可显著降低土壤污染调查的样本量。

责任作者简介:杜平(1982—),女,博士,中国环境科学研究院高级工程师,主要从事土壤污染风险评估与修复研究。E-mail: duping@craes.org.cn.

#### 参考文献(References):

- Argyaki A, Ramsey M H, Potts P J. 1997. Evaluation of portable X-ray fluorescence instrumentation for in situ measurements of lead on contaminated land [J]. *The Analyst*, 122 (8): 743-749
- Brus D, Spatjens L, De Gruijter J. 1999. A sampling scheme for estimating the mean extractable phosphorus concentration of fields for environmental regulation [J]. *Geoderma*, 89 (1/2): 129-148
- Burgess T, Webster R, Mcbratney A. 1981. Optimal interpolation and isarithmic mapping of soil properties [J]. *European Journal of Soil Science*, 31 (2): 315-331
- 丛鑫, 朱书全, 薛南冬, 等. 2009. 有机氯农药企业搬迁遗留场地土壤中污染物的垂向分布特征 [J]. *环境科学研究*, 22 (3): 351-355
- Crumbling D M, Lynch K, Howe R, *et al.* 2001. Peer reviewed: managing uncertainty in environmental decisions [J]. *Environmental Science and Technology*, 35 (19): 404-409
- D'Or D. 2005. Towards a real-time multi-phase sampling strategy optimization [A] // Renard P, Demougeot-Renard H, Froidevaux R. *Geostatistics for Environmental Applications* [C]. Berlin: Springer. 355-366
- Demougeot-renard H, De Fouquet C, Renard P. 2004. Forecasting the number of soil samples required to reduce remediation cost uncertainty [J]. *Journal of Environmental Quality*, 33 (5): 1694-1702
- 杜平, 张跃进, 杜晓明, 等. 2006. 某锌厂周围表层土壤及典型剖面镉污染特征 [J]. *环境科学研究*, 19 (5): 113-117
- Englund E, Heravi N. 1993. Conditional simulation: practical application for sampling design optimization [A] // Soares A. *Geostatistics Troia* 92 [C]. Netherlands: Springer. 613-624
- Falk M, Denham R, Mengersen K. 2011. Spatially stratified sampling using auxiliary information for geostatistical mapping [J]. *Environmental and Ecological Statistics*, 18 (1): 93-108
- Goovaerts P. 1999. Geostatistics in soil science: state-of-the-art and perspectives [J]. *Geoderma*, 89 (1/2): 1-45
- 韩春媚, 李慧颖, 杜晓明, 等. 2009. 化工污染场地土壤不饱和区和典型氯代烃化合物的垂向分布特征 [J]. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 45 (5/6): 636-641
- 胡克林, 张凤荣, 吕貽忠, 等. 2004. 北京市大兴区土壤重金属含量的空间分布特征 [J]. *环境科学学报*, 24 (3): 463-468
- Jenkins T F, Grant C L, Brar G S, *et al.* 1997. Sampling error associated with collection and analysis of soil samples at TNT-contaminated sites [J]. *Field Analytical Chemistry and Technology*, 1 (3): 151-163
- Jenkins T F, Grant C L, Walsh M E, *et al.* 1999. Coping with spatial heterogeneity effects on sampling and analysis at an HMX-contaminated antitank firing range [J]. *Field Analytical Chemistry and Technology*, 3 (1): 19-28
- 姜成晟, 王劲峰, 曹志冬. 2009. 地理空间抽样理论研究综述 [J]. *地理学报*, 64 (3): 368-380
- Jones N L, Davis R J, Sabbah W. 2003. A Comparison of three-dimensional interpolation techniques for plume characterization [J]. *Ground Water*, 41 (4): 411-419
- Journel A, Deutsch C. 1998. *GSLib Geostatistical Software Library and Users Guide* (2nd Edition) [M]. New York: Oxford University Press
- Juang K W, Lee D Y, Teng Y L. 2005. Adaptive sampling based on the cumulative distribution function of order statistics to delineate heavy metal contaminated soils using Kriging [J]. *Environmental Pollution*, 138 (2): 268-277
- 刘庚, 毕如田, 张朝, 等. 2013. 某焦化场地苯并(a)芘污染空间分布范围预测的不确定性分析 [J]. *环境科学学报*, 33 (2): 587-593
- Marchant B P, Mcbratney A B, Lark R M, *et al.* 2013. Optimized multi-phase sampling for soil remediation surveys [J]. *Spatial Statistics*, 4: 1-13
- 秦耀东. 1998. 土壤空间变异研究中的半方差问题 [J]. *农业工程学报*, 12 (4): 42-47
- Ramsey M, Taylor P, Lee J. 2002. Optimized contaminated land investigation at minimum overall cost to achieve fitness-for-purpose [J]. *Journal of Environmental Monitoring*, 4 (5): 809-814
- Theocharopoulos S P, Wagner G, Sprengart J, *et al.* 2001. European soil sampling guidelines for soil pollution studies [J]. *Science of The Total Environment*, 264 (1/2): 51-62
- Thompson M, Ramsey M H. 1995. Quality concepts and practices applied to sampling—an exploratory study [J]. *The Analyst*, 120 (2): 261-270
- Thompson M. 1996. Sense and traceability [J]. *Analyst*, 121 (3): 285-288
- UK Environment Agency. 2000. Secondary model procedure for the development of appropriate soil sampling strategies for land contamination [R]. Birmingham: Monitor Environmental Consultants Ltd. 11-25
- U.S. Environmental Protection Agency (USEPA). 1989. Soil sampling quality assurance users guide [R]. Las Vegas NV. Environmental Monitoring Systems Laboratory. 85-109

- Van Groenigen J W, Siderius W, Stein A. 1999. Constrained optimisation of soil sampling for minimisation of the Kriging variance [J]. *Geoderma*, 87 (3/4) :239-259
- Van Tooren C F, Mosselman M. 1997. A Framework for optimization of soil sampling strategy and soil remediation scenario decisions using moving window Kriging [A] // Soares A, Gomez-Hernandez J, Froidevaux R. *GeoENVI-geostatistics for environmental applications* [C]. Netherlands: Springer. 259-270
- Verstraete S, Van Meirvenne M. 2008. A Multi-stage sampling strategy for the delineation of soil pollution in a contaminated brownfield [J]. *Environmental Pollution*, 154 (2) :184-191
- 谢云峰, 陈同斌, 雷梅, 等. 2010. 空间插值模型对土壤 Cd 污染评价结果的影响 [J]. *环境科学学报*, 30 (4) :847-854
- Xie Y F, Chen T B, Lei M, *et al.* 2011. Spatial distribution of soil heavy metal pollution estimated by different interpolation methods: accuracy and uncertainty analysis [J]. *Chemosphere*, 82 (3) :468-476
- 谢云峰, 杜平, 曹云者, 等. 2015. 基于地统计条件模拟的土壤重金属污染范围预测方法研究 [J]. *环境污染与防治*, 37 (1) :1-6
- 阎波杰, 潘瑜春, 赵春江. 2008. 区域土壤重金属空间变异及合理采样数确定 [J]. *农业工程学报*, 24 (S2) :260-264
- 张娟, 范书凯, 杜晓明, 等. 2014. 浑蒲灌区土壤中多环芳烃的分布及生态响应 [J]. *环境科学研究*, 27 (5) :505-512
- 赵倩倩, 赵庚星, 姜怀龙, 等. 2012. 县域土壤养分空间变异特征及合理采样数研究 [J]. *自然资源学报*, 27 (8) :1382-1391
- 郑一, 王学军, 李本纲, 等. 2003. 天津地区表层土壤多环芳烃含量的中尺度空间结构特征 [J]. *环境科学学报*, 23 (3) :311-316