

# 两种采样间距下农田土壤镉含量空间分布特征的研究

陈胤再 夏 枫

宁波市生态环境科学研究院 浙江宁波 315012

**摘要:** 本文研究对象为舟山市定海区某水稻田土壤,采用地统计学方法,仅改变采样间距,全面探讨40m、20m两种采样间距下农田土壤镉(Cd)的空间分布特征。结果表明,两种采样间距下均具有明显的尺度效应,短采样间距(20m)更易于揭示Cd元素的空间分布状况;对于Cd污染农田土壤的安全利用及治理,虽然40m采样间距能减少前期调查成本,但无法准确识别Cd含量较高值所在的具体位置,增加后期安全利用及治理的不确定性,而20m采样间距则能够准确地进行异常值识别,有助于对Cd含量较高值所在位置的土壤采取针对性的污染防控措施以及摸排切断污染源,为Cd污染农田土壤的安全利用及治理提供参考依据。

**关键词:** 地统计学; 采样间距; 镉; 尺度效应

## Cadmium content in agricultural soils under two sampling spacings Spatial Distribution Characteristics of Cadmium in Agricultural Soil at Two Sampling Spacings

Chen Yinzai, Xia Feng

Ningbo Research Institute of Ecological and Environmental Sciences, Ningbo, Zhejiang, 315012

**Abstract:** The research object of this article is a paddy field soil in Dinghai District, Zhoushan City. Geostatistical methods were used to comprehensively explore the spatial distribution characteristics of cadmium (Cd) in farmland soil under two sampling intervals of 40 m and 20 m. The results indicate that both sampling intervals exhibit significant scale effects, and a short sampling interval (20 m) is more likely to reveal the spatial distribution of Cd elements; For the safe utilization and treatment of Cd contaminated farmland soil, although a 40m sampling interval can reduce the initial investigation cost, it is not possible to accurately identify the specific location of high Cd content values, increasing the uncertainty of safe utilization and treatment in the later stage. However, a 20m sampling interval can accurately identify abnormal values, which helps to take targeted pollution prevention and control measures and cut off the source of pollution for the soil where high Cd content values are located, Provide reference basis for the safe utilization and management of Cd contaminated farmland soil.

**Keywords:** geostatistics; Sampling spacing; Cadmium; scale effect

### 引言:

随着工业化的快速发展,过量施肥等因素<sup>[1]</sup>,导致农田土壤Cd污染日益严重。2020年5月7日,生态环境部公布了《2019年全国生态环境质量简况》,根据简况显示,Cd为影响农用地土壤环境质量状况的首要污染物<sup>[2]</sup>。Cd是“五毒”重金属元素之一,其迁移性大,易从土壤环境中迁移转化进入植物体内。人体长期过量摄入含镉作物会严重威胁身体健康,引发癌症,肾脏损伤等一系列疾病。因此,Cd污染农田土壤的治理和安全利用引起

了人们的广泛关注。

土壤并非均质体<sup>[3]</sup>,在其特性变化描述时,常伴随多尺度、多层次变化。目前空间尺度效应对土壤特性的影响已被广泛应用于土壤养分、盐分等研究中,但在土壤重金属方面的研究较少<sup>[4]</sup>。研究发现土壤特性的空间变异是尺度的函数<sup>[5]</sup>,尺度通常包括幅度和粒度<sup>[6]</sup>,两种及以上尺度下,土壤变量间的相关性存在差异,单一尺度下无法深入分析土壤特性的空间变异结构特征,若在两种及以上尺度下能较好地进行深入分析<sup>[7]</sup>。对于不同

采样粒度(间距)的土壤重金属变异规律的研究较少。因此,研究不同采样间距下农田土壤中Cd的含量状况及空间分布特征,从而选择较适宜的采样间距已成为迫切需要解决的问题。本研究选取舟山市定海区某水稻田土壤为对象,以重金属镉(Cd)为例,运用地统计学方法,研究田块尺度不同采样间距下农田土壤Cd的空间分布特征,确定特征采样间距,为Cd污染农田土壤的治理及安全利用提供参考依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于浙江省舟山市定海区某水稻田,总占地面积约为80亩,地处欧亚大陆,属于典型的亚热带海洋性季风气候,气候温和湿润,四季分明,光照充足。

### 1.2 样品采集与分析

#### 1.2.1 土壤样点布置与采集

在ArcGIS 10.2软件中布点,20 m采样间距(简称“短采样间距”)共布置130个土壤点(见图1-b),40 m采样间距(简称“长采样间距”)从短采样间距中抽取36个点位(见图1-a)。将布置的土壤点坐标转换为kml格式导入奥维互动地图中进行野外导航采样。选用梅花法采集耕作层(表土层)0~20 cm的土壤,充分混合后按四分法留取1 kg土样,作为该点的代表样点。

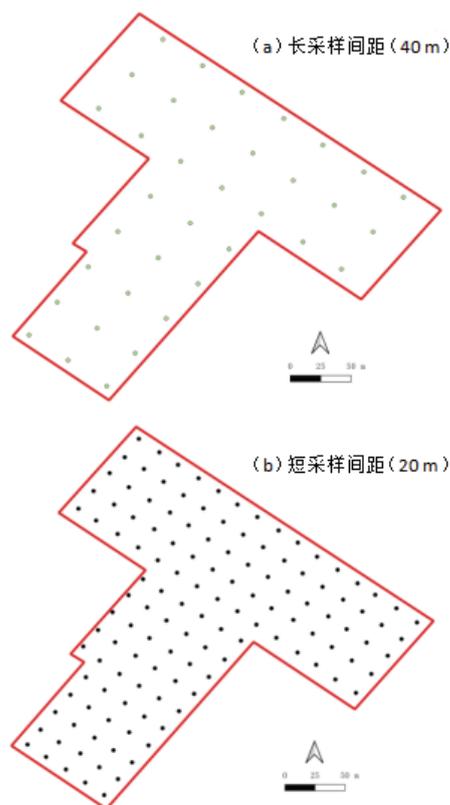


图1 不同采样间距下采样点位图

### 1.2.2 测试分析

将采集的土壤样品经室内自然风干后,剔除土壤样品中碎石、砂砾、植物根系、残渣及可见土壤侵入体,过2 mm筛后研磨,再过0.15 mm筛备用,并装入样品袋。

土壤pH采用pH计(土/水=1:2.5)测量<sup>[8]</sup>;土壤Cd的含量首先采用HCl-HNO<sub>3</sub>-HF-HClO<sub>4</sub>混酸消解法消解样品,再采用石墨炉原子吸收光谱法(GFAAS)测定<sup>[9]</sup>。

### 1.3 地统计学方法

#### 1.3.1 区域化变量理论

区域化变量由地统计学家G. Matheron提出,同时赋予其定义,即以空间点x的3个直角坐标为自变量的随机场, $Z(x_1, x_2, x_3) = Z(x)$ 称为区域化变量。区域化变量通常是某种空间现象特征的呈现。随机性、结构性是区域化变量 $Z(x)$ 的两个最显著与最重要的特征。

#### 1.3.2 半变异函数理论模型

半变异函数是衡量空间异质性与依赖性的综合性指标,又称半方差函数,它有3个重要参数,块金值( $C_0$ , Nugget)、基台值( $C_0+C_s$ , Sill)和变程(Rang)。其中块基比( $C_0/C_0+C_s$ )可用于衡量区域化变量的空间变异性程度。本研究土壤重金属空间变异性程度划分依据使用Cambardella(1994)<sup>[10]</sup>标准,当块基比小于0.25时,表明空间变异以结构变异为主,具有强空间相关性;当块基比大于0.75时,表明空间变异以随机变异为主,具有弱空间相关性;当块基比介于0.25和0.75之间时,表现为中等空间相关性。

本研究应用现发展较为成熟的球状模型、高斯模型和指数模型,以决定系数( $R^2$ )最大、残差平方和(RSS)最小为原则<sup>[11]</sup>,获取最优半方差函数理论模型及参数。

#### 1.3.3 克里格插值法

克里格插值法以结构分析和变异函数理论为基础,在有限区域内,对区域化变量进行最优无偏估计,又称空间局部插值。与一般插值方法相比,其优点在于最大限度地利用了空间取样所提供的各种信息。克里格插值法包括普通克里格法、对数正态克里格、泛克里格法等。普通克里格法在所有克里格插值法中,最基本应用最广泛的插值方法。本研究选取普通克里格法,对研究区Cd含量进行空间分布的插值模拟。

### 1.4 数据综合处理分析

采用数据分析软件(SPSS 22.0)对土壤Cd进行描述性统计分析,采用S-W检验法、K-S检验法分别对长采

样间距和短采样间距的各组数据进行单样本检验，对不符合的数据采用对数转换；采用ArcGIS 10.2中地统计分析扩展模块绘制土壤Cd含量的插值图。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同采样间距下Cd含量描述性统计

研究区不同采样间距下Cd含量描述性统计如表1所示。

根据Nielsen<sup>[12]</sup>划分标准，长采样间距和短采样间距的变异系数分别为74.785%和71.246%，均表现为中等变异性，受结构因素和随机因素共同影响，短采样间距下变异系数较小，随着采样间距缩减，变异系数变小，表明两种采样间距下研究区Cd含量具有明显的尺度效应。

长采样间距下Cd的偏度和峰度分别为1.721和2.491，短采样间距下Cd的偏度和峰度分别为2.031和0.653，表明两种采样间距下研究区Cd含量原始数据均不符合正态分布。空间统计学的前提是原始数据必须符合正态分布，否则将产生比例效应<sup>[13]</sup>。经对数转换后，两种采样间距下Cd含量均符合正态分布，可以进行后续空间自相关分析的研究。

表1 不同采样间距下Cd含量描述性统计 (mg·kg<sup>-1</sup>)

间距	最大值	最小值	平均值	变异系数	偏度	峰度
40 m	0.220	0.020	0.067	74.785%	1.721	2.491
20 m	0.250	0.020	0.063	71.246%	2.031	0.653

### 2.2 不同采样间距下Cd含量半方差函数分析

两种采样间距下Cd元素最优拟合模型均为高斯模型；两种采样间距下决定系数分别为0.734和0.811，均大于0.5，表明模型拟合精度较高，能够较好地反映研究区两种采样间距下Cd元素的空间变异特征，决定系数越高，拟合精度越高，随采样间距缩减，决定系数增大，表明缩减采样间距有利于选取最优拟合模型；两种采样间距下块基比均小于0.25，呈现强空间相关性，以结构变异为主，随采样间距缩减，块基比增大，空间相关性减弱，表明缩减采样间距受结构因素影响程度变小、随机因素影响程度变大，导致Cd元素的相关性呈现诸如此类变化的原因可能与研究区施肥、耕种、灌溉等紧密有关；两种采样间距下变程分别为63.05 m和34.64 m，均小于采样间距，表明两种采样间距下Cd元素在相应变程范围内均存在空间自相关性且均适宜空间变异的分析，变程随采样间距的缩减而明显变小，表明短采样间距下受随机因素影响程度变大使Cd含量发生明显变化，从而使变程明显变小。

表2 不同采样间距下Cd元素半方差模型及参数

元素	理论模型	块金值	基台值	块基比	变程	决定系数	残差
		C <sub>0</sub>	C <sub>0</sub> +C	C <sub>0</sub> /C <sub>0</sub> +C	m	R <sup>2</sup>	RSS
Cd	高斯模型	0.000046	0.002462	0.01868	63.05	0.734	3.606E-8
Cd	高斯模型	0.000174	0.001908	0.09119	34.64	0.811	2.445E-8

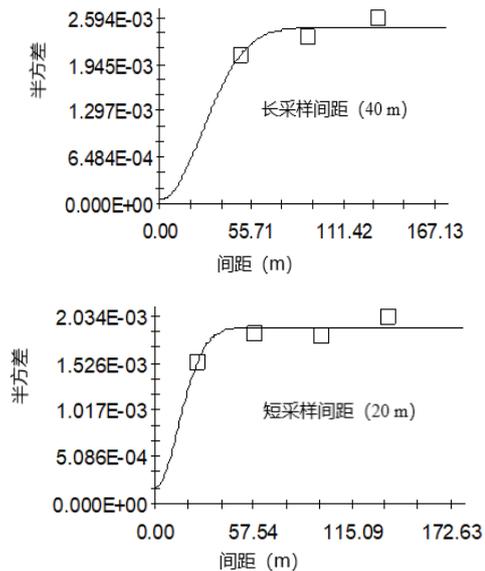
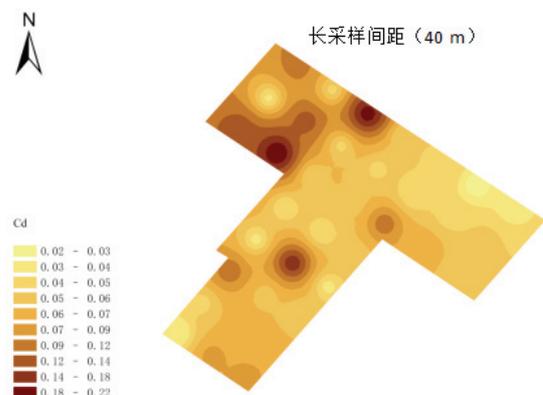


图2 不同采样间距下农田土壤中Cd元素半方差函数图

### 2.3 不同采样间距下Cd含量空间分布特征

由图3对比分析可知，两种采样间距下Cd元素空间分布不均匀且呈现不同的全局空间分布特征，长采样间距下呈多岛状空间分布特征，短采样间距下呈条带状与岛状相结合的空间分布特征，但仍存在一定的相似性，大部分高值点均分布在研究区西北部，Cd含量由高值中心向四周辐射状递减，短采样间距下Cd含量递减程度较为缓慢，短采样间距下采样点Cd含量被掩盖的可能性明显小于长采样间距。



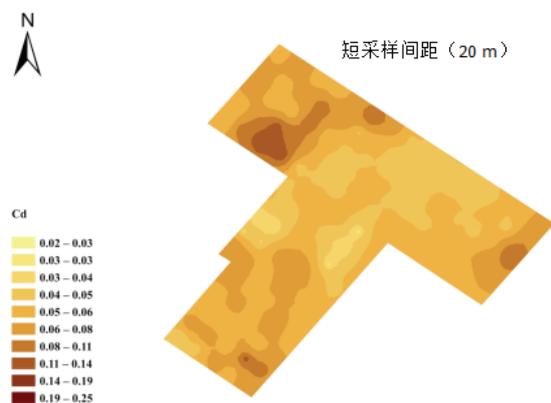


图3 不同采样间距下农田土壤中Cd元素含量插值图

### 3 结果与讨论

土壤重金属是表征土壤质量的重要环境因子, 改变农田土壤重金属空间异质性的影响因子作用于不同的空间范围<sup>[14]</sup>, 表明土壤重金属的空间变异也具有尺度效应。对于尺度效应的研究包括仅改变采样幅度、仅改变采样粒度、同时改变采样幅度和粒度等3种类型, 三者各具特点、揭示的内容有所差异。本研究以舟山市定海区某水稻田土壤为研究对象, 通过改变采样间距, 反映两种采样间距下Cd元素的空间分布特征, 避免单一采样间距下研究结论的不全面性, 为Cd污染农田土壤的治理及安全利用提供参考依据。

描述性统计分析研究表明, 两种采样间距下均为中等变异性, 随采样间距缩减, 变异系数变小, 这与杨奇勇等<sup>[15]</sup>结果类似, 同时二者具有明显的尺度效应, 这与王幼奇等<sup>[16]</sup>发现一致。

半方差函数分析研究表明, 不同采样间距下, 相同变量自相关程度存在较大差异, 随采样间距增大, 半方差函数受随机因素影响逐渐减弱, 较小尺度的空间结构特征将被掩盖<sup>[15]</sup>, 即较大采样尺度下小尺度的空间变异性往往被丢失或减弱, 基于这一发现, 已有大量研究报告, 其中, 张庆利等<sup>[17]</sup>发现采样间距增大, 土壤Cr空间变异性受随机因素影响减小, 而黄绍文等<sup>[18]</sup>发现恰好相反, 这可能与目标重金属因子不同相关。

克里格插值表明, 短采样间距下Cd含量递减程度较为缓慢, 短采样间距下采样点Cd含量被掩盖的可能性明显小于长采样间距, 这与胡孙<sup>[19]</sup>等研究结论类似, 说明短采样间距下更容易揭示研究区农田土壤中Cd的空间分布特征。两种采样间距下均存在高值区域向四周辐射状递减的空间分布特征, 本研究仅初步推测可能与研究区耕种模式或种植模式有关, 无法完全排除Cd污染物由于地表径流、污水灌溉、大气沉降等方式进入研究区农田

土壤的可能。

在农用地土壤污染状况调查时, 采样密度越小, 越容易揭示调查地块的污染状况, 即采样间距越短, 越容易识别出污染因子的位置。但由于短采样间距通常消耗大量的人力、物力和财力, 故本研究通过两种采样间距下进行对比分析, 研究表明, 短采样间距更易于揭示Cd元素空间分布状况; 对于Cd污染农田土壤的安全利用及治理, 虽然40 m采样间距能减少前期调查成本, 但无法准确识别Cd含量较高值所在的具体位置, 增加后期安全利用及治理的不确定性, 而20 m采样间距则能够准确地进行异常值识别, 有助于对Cd含量较高值所在位置的采取针对性的污染防控措施以及摸排切断污染源头, 为Cd污染农田土壤的安全利用及治理提供参考依据。

#### 参考文献:

- [1]黄卫, 庄荣浩, 刘辉, 王志国, 等. 农田土壤镉污染现状与治理方法研究进展[J]. 湖南师范大学自然科学学报. 2022, 45(1): 49-56.
- [2]生态环境部. 2019年全国生态环境质量简况[J]. 环境保护, 2020, 48(10): 8-10.
- [3]李湘凌, 张颖慧, 杨善谋, 等. 合肥大兴地区土壤重金属含量的空间分布特征[J]. 土壤通报, 2011, 42(1): 179-184.
- [4]RODRIGUEZ J A, Nanos N, Grau J M, et al. Multiscale analysis of heavy metal contents in Spanish agricultural top soils[J]. Chemosphere, 2008, 70(6): 1085-1096.
- [5]王永东, 冯娜娜, 李廷轩, 等. 不同尺度下低山茶园土壤阳离子交换量空间变异性研究[J]. 中国农业科学, 2007, 40(9): 1980-1988.
- [6]段秋亚. 对GIS中尺度和尺度转换的理解与分析[J]. 四川水泥, 2017, (2): 296.
- [7]MALLARINO A P. Spatial variability patterns of phosphorus and potassium in notilled soils for two sampling scales[J]. Soil Science Society of America Journal, 1996, 60(5): 1473-1481.
- [8]WANG R, SHAFI M, MA J, et al. Effect of amendments on contaminated soil of multiple heavy metals and accumulation of heavy metals in plants [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2018, 25(28): 28695-28704.
- [9]王金云, 李晓娜, 吴忠忠. 石墨炉原子吸收光谱法测定土壤中镉[J]. 理化检验(化学分册). 2020, 56(9): 965-969.
- [10]KORRE A. Statistical and spatial assessment of soil

heavy metal contamination in areas of poorly recorded, complex sources of pollution[J]. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 1999, 13(4): 260-287.

[11]王政权, 地统计学及其在生态学中的应用[M]. 北京: 科学出版社, 1999, 35-149.

[12]NIELSEN D R, BOUMA J. Soil spatial variability: Proceedings of a workshop of the ISSS and SSSA, Las Vegas[M]. Wageningen, The Netherlands: Pudoc Scientific Publishers, 1985.

[13]DU P, ZHAO H H, WANG S J, et al. Spatial Distribution and Assessment of Cadmium Pollution in Farmland Soils, Daye City[J]. *Soils*, 2013, 45(6): 1028-1035.

[14]黄银华. 广州市农业表层土壤重金属污染及其与景观格局的多尺度关系[D]. 广州: 广州大学, 2015.

[15]杨奇勇, 杨劲松, 余世鹏, 等. 不同尺度下耕地

土壤Cr含量的空间自相关性分析[J]. *应用与环境生物学报*, 2011.17 (3): 393-397.

[16]王幼奇, 白一茹, 展秀丽. 在不同尺度下宁夏引黄灌区农田土壤养分空间变异分析[J]. *干旱区研究*, 2014, 31 (2): 209-215.

[17]张庆利, 潘贤章, 王洪杰, 等. 中等尺度上土壤肥力质量的空间分布研究及定量评价[J]. *土壤通报*, 2003, (6): 493-497.

[18]黄绍文, 金继运. 土壤特性空间变异研究进展[J]. *土壤肥料*, 2002, (1): 8-14.

[19]HU S, YUAN X Y, CHEN H Y, et al. Multi-scale spatial distribution and source discrimination of heavy metals in suburb soils: A case Study of junctional zone between Nanjing City and Zhenjiang City[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34(12): 2295-2303.