

典型污染场地中滴滴涕浓度空间变异性研究^{*}

刘 敏¹ 马 运²

(1. 重庆市环境科学研究院, 重庆 401147; 2. 中国环境科学研究院, 北京 100012)

摘要 利用经典统计学和地统计学相结合的方法,以某滴滴涕(DDT)粉剂生产企业为例,对污染场地中表层和地下5 m处土样 DDT 浓度的空间变异性进行了研究。结果表明:表层和地下5 m处土样 DDT 浓度经过对数转化后均通过了柯尔莫哥洛夫-斯密诺夫检验(K-S 检验),能够很好地服从正态分布;表层和地下5 m处土样 DDT 浓度的半变异函数拟合符合高斯模型,决定系数分别为0.897 3和0.934 8,由空间自相关引起的空间变异性分别占系统总变异性的99.11%和83.12%;用克里格插值法制出的 DDT 浓度等值线图能直观地反映表层和地下5 m处土样 DDT 浓度的空间分布特征,DDT 浓度呈现以原粉生产车间为中心向四周扩散的趋势,地下5 m处土样 DDT 浓度空间分布与表层基本一致。

关键词 滴滴涕 污染场地 土壤 空间分布 空间变异性 地统计学

Spatial variability of DDT in a typical contaminated site LIU Min¹, MA Yun². (1. Chongqing Academy of Environmental Science, Chongqing 401147; 2. Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012)

Abstract: The surface soil and 5 m depth underground soil were collected from 26 sampling sites of a DDT manufacture enterprise. The spatial variability of DDT in the typical contaminated site was analyzed by using classical statistics and geostatistics method. The results showed that the concentrations of DDT after logarithmic transformation obey the law of normal distribution. The semivariogram of DDT concentration in surface soil and 5 m depth underground soil were well described by Gaussian model, with the fitting coefficient were 0.897 3 and 0.934 8 respectively. Spatial heterogeneity aroused from spatial autocorrelation in the surface and underground soil were 99.11% and 83.12%. The isoline map of DDT concentration in two layers of soil was drew by Kriging interpolation method. The isoline map showed that the concentration of DDT residues diffused from the workshop to around, and the spatial distribution of DDT in underground soil was basically consistent with that in surface soil.

Keywords: DDT; contaminated site; soil; spatial distribution; spatial variability; geostatistics

我国滴滴涕(DDT)生产企业多数在20世纪50~60年代建成^[1]。建厂初期,企业生产工艺落后、厂房简陋、没有污染治理设施,生产过程中任意排放的“三废”对环境进而对人类健康造成巨大的危害,因此污染场地的生态与环境问题越来越受到各国的重视^[2]。1983年后,我国持久性有机污染物(POPs)化学品生产受到禁止,大多数生产企业停产关闭,但污染场地的问题在各大城市搬迁工厂、改造新建过程中仍然普遍存在。土壤是地球上各种人为的和自然的污染物的汇,世界上大部分的污染物最终滞留在土壤中^[3]。因此,研究污染场地土壤中污染物的空间分布及空间变异性是污染场地健康风险评价及风险管理的基础,也是有效控制土壤污染、保障环境安全和农业可持续发展的重要前提。

地统计学是以区域化变量理论为基础,以半变异函数为基本工具的一种方法,广泛应用于空间分

布上既有随机性又有结构性的自然现象的学科^{[4]77-78}。目前,地统计学主要用于研究土壤养分、水分等性质的空间结构特征^[5-7]。也有学者对不同尺度下土壤重金属空间分布加以分析^[8-10],但是上述研究的对象多为污染程度相对较低的区域。典型污染场地的污染状况、污染源分布等条件具有特殊性,在很多方面不同于上述研究对象的特征,可能导致土壤中 POPs 空间变异性特征呈现出不同于上述研究的规律,但是目前研究相对匮乏。当前研究多采用简单随机采样方法,对于土壤污染物含量变化较大的污染区域,样点的代表性不高^[11];采样密度不足,导致样点间的半变异函数值的随机成分增加,小尺度结构特征被掩盖^{[4]43-45}。

笔者以河北省某生产 DDT 的生产企业污染场地为研究对象,对采集的从表层土到深层土壤的样品中 DDT 浓度进行测试分析。应用地统计学和克

第一作者:刘 敏,女,1983年生,本科,工程师,主要从事水污染治理、固体废物污染控制技术方面的研究。

^{*} 国家科技支撑计划项目(No. 2007BAC16B03, No. 2006BAC02A19)。

里格插值分析相结合的方法,做出半变异函数($\gamma(h)$)图对未采样点进行最优估计,把离散的点位信息区域化、连续化、平面化,从而提供污染场地的整体污染状况。

1 材料与方法

1.1 样品采集

样品取自某 DDT 生产企业污染场地,该企业生产 DDT 已有 20 多年且目前仍在生产,主要以生产 DDT 粉剂为主。根据现场情况,综合风向、厂房分布、道路、地下水等因素,采用网格布点法^[12,13]在生产车间周围共布设采样点 26 个,采样点间距为 20 m,厂区平面图及采样点布置如图 1 所示,其中间隔距离单位为 m。

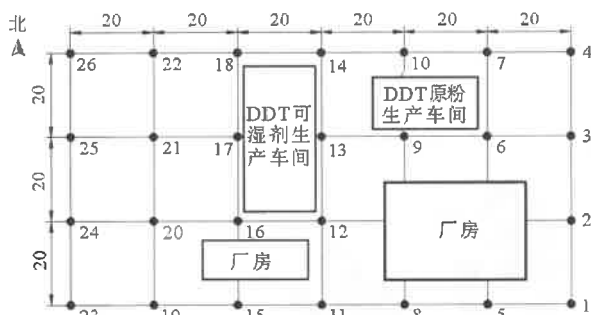


图 1 企业厂区采样点布置图

Fig. 1 Sample distribution in chemical plant

表层土样的采集方法:先挖去表层土的水泥或地砖,除去杂草、石块等,用半圆槽钻套装采样器深度采集土样,采集深度为 0~20 cm 的表层土样,每个采样点的土样由梅花式采样法^[14]采集的 5 点土样混合。

深层土样的采集方法:采用 XY-1 型履带式钻机,回转钻进,每隔 1 m 采集 1 个样品,取样最大深度为 10 m。土样采用敞口式薄壁取土器静压法采取。采出的土样为圆柱状,直径 10 cm,高 10 cm,约 1 kg。每个钻孔在开钻之前清洗钻头、钻杆和工具,以避免不同采样点之间样品的相互污染。土样采取后及时采用铝皮圆筒封装、标识、胶袋密封、装箱保存。将采集的土样风干去掉石块等杂物,研碎过 60 目筛,充分混匀,取 500 g 装入样品瓶,保存以备。

1.2 主要仪器和试剂

HP6890 气相色谱仪(配有 DB-5 毛细管柱); LX3-64-01 高速离心机;ZFQ-85A 真空旋转蒸发器;SA-31 振荡器;275HTAE 超声提取仪。

正己烷、丙酮均为分析纯,且正己烷加入少量 NaOH 重蒸,丙酮加入少量高锰酸钾回流到紫色不

褪后进行重蒸。无水硫酸钠在 300 °C 下烘烤 4 h,放入干燥器中备用。弗罗里硅土,60~100 目,650 °C 灼烧 1~3 h,贮放在干燥器中,使用前在 130 °C 下活化数小时,加入 3% (体积分数) 的蒸馏水脱活,贮于干燥器中,于室温下保存,仅供 2 d 内使用,2 d 后需要重新活化。硅胶,80~120 目,活化温度不超过 150 °C,在 110 °C 活化 4 h。DDT 标准样品由国家标准物质研究中心提供,质量浓度为 0.10 g/L,纯度为 99%。

1.3 分析方法

1.3.1 样品提取

准确称取经风干、研细、过 60 目筛土样 10 g,置于 250 mL 具塞三角瓶中,加入丙酮/正己烷(体积比为 1:1)溶剂 25 mL 在振荡器上振荡 10 min,超声波提取 20 min,将浸泡液转移到离心管中,以每次 5 mL 的正己烷洗涤残渣,洗涤 3 次,将洗涤液合并于离心管中,离心 20 min,然后经过滤,将滤液转入到梨形瓶中,滤渣用 15 mL 正己烷分 3 次洗涤,合并滤液,在 40 °C 水浴中,用旋转蒸发器浓缩至 2 mL 待净化。

1.3.2 样品净化

采用以无水硫酸钠、弗罗里硅土、硅胶为填充物的层析柱净化。将净化后收集的洗脱液集中于梨形瓶中,于 40 °C 水浴旋转浓缩,最后以氮吹浓缩并定容至 1 mL 供色谱分析。

1.3.3 色谱条件

无分流进样,进样量 1 μ L,检测器和进样器温度分别为 310、250 °C。程序升温:60 °C 保留 0.5 min,以 25 °C/min 的速率升至 235 °C,保留 2 min,然后以 2 °C/min 的速率升至 250 °C,保留 5 min,然后温度升至 280 °C,运行 5 min。

1.4 质量控制

取 DDT 标准样品,制备一系列浓度的待测液进行测定。分别以标样峰面积对浓度作线性拟合,线性方程的相关系数均高于 0.99。在空白土样中分别添加 DDT 标准样品,测定方法的加标回收率。采用外标法峰面积进行定量,定量方法采用校正曲线法。

DDT 主要同分异构体 p,p'-DDT、o,p'-DDT、p,p'-DDE 和 p,p'-DDD 的检出限和回收率见表 1。

表 1 方法的检出限与回收率
Table 1 Detection limits and recovery ratio of DDT

DDT	方法检出限/(μ g $\cdot$ kg ⁻¹)	回收率/%
p,p'-DDT	0.05	80
o,p'-DDT	0.03	91
p,p'-DDE	0.03	90
p,p'-DDD	0.02	86

1.5 数据分析方法

地统计学分析方法主要由分析空间变异性与结构的半变异函数和空间局部估计的克里格插值法组成。半变异函数是研究区域变量的空间变异性的一种数学方法,是区域化变量空间自相关性的表征,它依赖于分割 2 点的矢量(h_0)。假设区域化变量满足二阶平稳假设和本征假设,其半变异函数可用式(1)表示:

$$r(h) = \left(\frac{1}{2N(h)} \right) \sum_{i=1}^{N(h)} (Z(x_i) - Z(x_i + h))^2 \quad (1)$$

式中: h 为样点的空间间隔距离, m ; $N(h)$ 为间隔距离为 h 的样点数; i 为样点数; $Z(x_i)$ 为处于点 x_i 处变量的实测值; $Z(x_i + h)$ 为与点 x_i 偏离 h 处变量的实测值。

步长的变化,可计算出一系列的半变异函数值。以 h 为横坐标,半变异函数为纵坐标作图,得到半变异函数图。为了尽可能准确地反映变量的空间变化规律,通常还需要用合适的半变异函数模型对变量的半变异函数值与滞后距离之间的关系进行模拟,常用的模型有球状模型、高斯模型、指数模型和线性模型等。

克里格插值法是目前地统计学应用最广泛的最优内插法,它是建立在半变异函数理论及结构分析基础上,根据有限领域(或待估块段)已测点的数据,结合空间变异性分析所提供的空间自相关程度的信息来进行插值,因此可以对未采样点给出最优无偏估计,而且能同时提供估计值的误差和精确度。也就是说它是利用已知点的数据去估计点 X_0 的数值,其实质是一个实行局部估计的加权平均值,具体公式为:

$$Z(X_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(X_i) \quad (2)$$

式中: $Z(X_0)$ 为未经点 X_0 上的内插估计值; n 为样点总数; λ_i 为空间权重,当 $\sum_{i=1}^n \lambda_i = 1$ 时,估计偏差最小, $Z(X_0)$ 的估计应该是无偏的; $Z(X_i)$ 为在点 X_0 附近的若干点上获得的实测值。

正态分布性检验和柯尔莫哥洛夫-斯密诺夫检验(K-S 检验)通过软件 SPSS13.0 完成。实验半变异函数的计算理论模型的拟合通过软件 Variowin 2.21 完成。克里格插值和图形绘制由软件 Surfer 8.0 完成。

2 结果与讨论

2.1 DDT 的描述性统计分析和正态分布检验

如图 2、图 3 所示,表层、地下 5 m 处土样 DDT

浓度均展示了强的负偏斜效应,进一步来说,这种分布和可能存在的异常值能导致在地统计分析和克里格插值中产生计算结果的偏差。因此,在地统计和插值分析之前必须进行数据的转化。目前,常用的数据处理方法有对数转化、稳健统计、域法处理和 Box-Cox 转化等^[15]。本研究采用对数转化,转化后的直方图如图 4、图 5 所示。

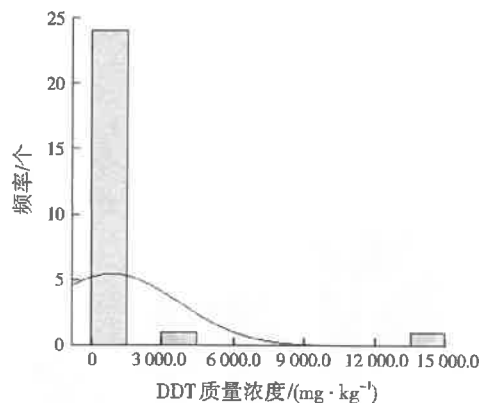


图 2 表层土样 DDT 质量浓度直方图
Fig. 2 Histogram of DDT concentration in topsoil of chemical plant
注:曲线为直方图拟合曲线。图 3 至图 5 同。

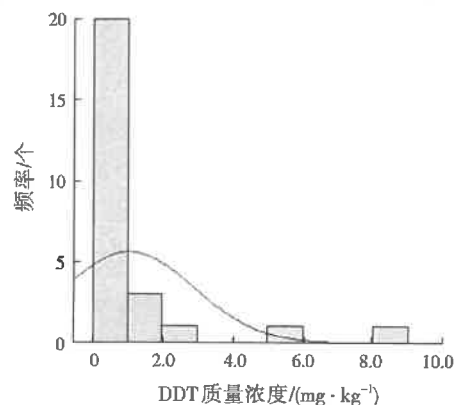


图 3 地下 5 m 处土样 DDT 质量浓度直方图
Fig. 3 Histogram of DDT concentration in 5 m depth underground soil of chemical plant

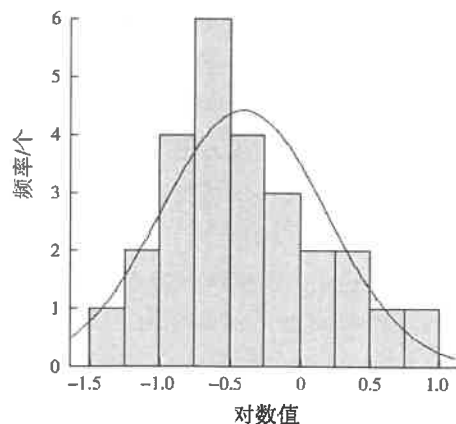


图 4 表层土样 DDT 质量浓度对数转化后直方图
Fig. 4 Histogram of DDT concentration in topsoil of chemical plant after logarithmic transformation

表 2 土样 DDT 质量浓度描述性统计
Table 2 Descriptive statistics of DDT concentration in soil samples

土壤层	数据处理	样本数	标准差	最大值	最小值	偏度	峰度	P
表层	原始数据	26	2 846.56 mg/kg	14 271.90 mg/kg	1.50 mg/kg	4.55	21.62	0
	对数转化	26	0.97	4.15	0.18	0.32	0.39	0.76
地下 5 m 处	原始数据	26	1.85 mg/kg	8.18 mg/kg	0.05 mg/kg	2.97	9.28	0.01
	对数转化	26	0.59	0.91	-1.30	0.60	-0.24	0.90

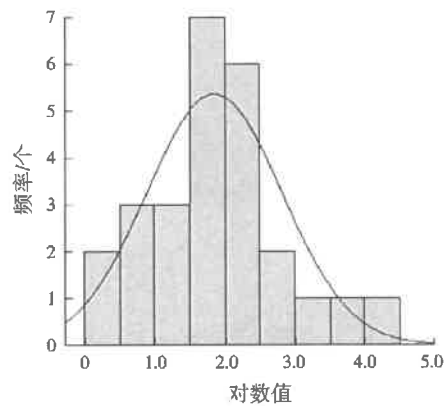


图 5 地下 5 m 处土样 DDT 质量浓度对数转化直方图
Fig. 5 Histogram of DDT concentration in 5 m depth underground soil of chemical plant after logarithmic transformation

采用 K-S 检验对数据是否符合正态分布进行检验,计算了偏度、峰度和显著性水平(P)等参数,检验结果如表 2 所示。K-S 检验结果表明,数据很好地符合正态分布。描述性统计分析只能说明土样 DDT 的浓度特征,但不能完全反映 DDT 在整个研究范围内的空间变异性特征。因此,需要用地统计学的方法对 DDT 浓度在污染场地中的空间变异性进行研究。

2.2 DDT 的空间变异性分析

根据不同空间位置上 DDT 的分析数据,计算实际半变异函数,并绘制半变异函数图,这是地统计学中空间变异性分析的基本步骤,也是进行克里格插值的前提。半变异函数图表示 DDT 浓度的区域化变量在距离与方向上的所有成对点观测值之间的空间相关性。得出的半变异函数图的起伏特征、原点处性状、趋势走向、不同的方向差异性等形状特点提供了丰富的空间结构信息^[16]。

在变异理论中,当变程 α 达到空间相关的最大距离时称为极限距离。在变程内,变量具有明显的空间自相关性,超过该距离之后,不存在空间自相关性,经典统计方法的前提假设可得到满足。因此,DDT 浓度的实际测定值在污染场地中的分布并不是完全随机的,在空间上距离大于变程的 2 点才能

视为相互独立。在 DDT 浓度的测定和统计分析中,极限距离对采样点的布设具有重要的意义和参考价值。变程内重复设置采样点将是无效的。这种重复违反了统计抽样的独立性原则,并导致样本总方差的估计偏低。基台值($C_0 + C$)表示系统属性或区域化变量最大空间变异性程度,是区域化变量空间随机变化(块金值(C_0))与结构变化值(C)的极限值。基台值越大表示系统总变异性程度越大。在本研究中基台值越大,表明 DDT 浓度总的变化幅度越大,其空间分布的空间变异性就越强。块金值表示随机部分引起的空间变异性,随机部分引起的空间变异性占系统总变异性的比值($C_0 / (C_0 + C)$)可表示空间变异性程度,如果该比值较高,说明由随机部分引起的空间变异性程度较大;相反,则说明由空间自相关部分引起的空间变异性程度较大;如果该比值接近 100%,则说明该变量在整个尺度上具有恒定的空间变异性。从结构性因素看, $C_0 / (C_0 + C)$ 可表示系统变量的空间相关性程度,该比值小于 25%,说明变量具有强烈的空间相关性;该比值为 25%~75%,说明变量具有中等的空间相关性;该比值大于 75%,说明变量空间相关性很弱。

如图 6 所示,DDT 浓度在变程 21 m 内具有明显的空间自相关性,说明空间自相关尺度大于采样间隔 20 m。如图 7 所示,自相关的范围为 17 m。这说明,该污染场地采样设计基本恰当,能满足空间差值的要求。

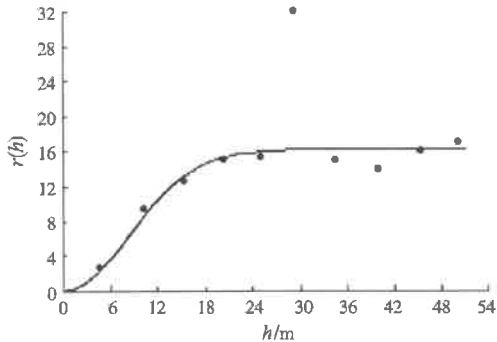


图 6 表层土样 DDT 浓度空间变异性
Fig. 6 Semivariogram of DDT concentration in topsoil of chemical plant

表3 土样 DDT 浓度的半变异函数理论模型及相关参数

Table 3 Parameters fitted by semivariogram model for DDT concentration in soil samples

土壤层	模型类型	C_0	$C_0 + C$	$C_0 : (C_0 + C) / \%$	α / m	决定系数(R^2)	残差(RSS)
表层	高斯	0.14	16.10	0.89	20.29	0.897 3	1.401 7
地下 5 m 处	高斯	0.67	3.99	16.88	16.95	0.934 8	0.945 8

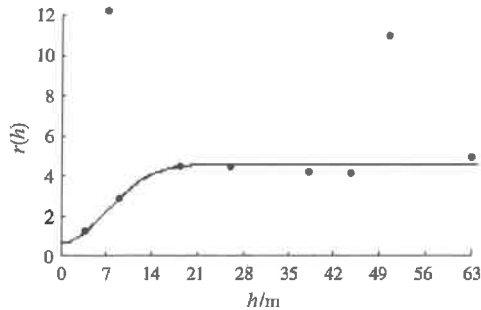


图7 地下5 m处土样 DDT 浓度空间变异性
Fig. 7 Semivariogram of DDT concentration in 5 m depth underground soil of chemical plant

从表3可知,表层和地下5 m处 DDT 半变异函数理论模型的 R^2 分别为 0.897 3 和 0.934 8,说明高斯模型能较好地拟合半变异函数,能很好地体现 DDT 浓度在整个污染场地的空间变异性。从 $C_0 / (C_0 + C)$ 可以看出,表层土样中,影响 DDT 浓度空间分布的总变异性中,由随机部分引起的空间变异性占系统总变异性的 0.89%,则由空间自相关引起的空间变异性占系统总变异性的 99.11%,这表明表层土样 DDT 浓度具有强烈的空间相关性。地下5 m处影响 DDT 空间分布的总变异性中,随机部分引起的空间变异性占系统总变异性的 16.88%,而由空间自相关引起的空间变异性占系统总变异性的 83.12%。与表层土样相比,地下5 m处由空间自相关引起的空间变异性有所下降,但仍占主要地位。

2.3 污染场地中 DDT 浓度的空间分布

在空间变异性分析的基础上,用克里格插值法对未测点的参数进行最优内插估值。图8、图9分别为运用克里格插值法绘制的表层和地下5 m处土样 DDT 质量浓度分布等值线图。等值线间距越小,或等值线越密,则表示 DDT 浓度空间变异性越大;间距越大,则表示 DDT 浓度空间变异性越小。DDT 浓度的空间分布格局进一步表明,土样 DDT 浓度具有高度的空间变异性,并决定了空间格局的存在。从图8、图9可方便地了解到 DDT 浓度由高到低的分布梯度具有明显的规律性。

从图8可知,污染场地表层土样 DDT 污染以原粉生产车间为中心向四周扩散,最大残留质量浓度达 14 271.90 mg/kg,随着扩散距离的增大,DDT 浓度逐渐降低。当地常年风向以西北风和东南风为

主,污染范围跟风向呈现一定相关性。分析原因可能是由于该企业以生产 DDT 粉剂为主,DDT 粉剂随风飘洒所致。葛成军等^[17]研究南京某地土壤中有机污染物的分布也得出了污染扩散与风向的显著相关关系。原粉生产车间较可湿剂生产车间污染严重,这主要是与污染场地的遗洒状况和地面硬化保护措施有关。原粉生产车间建成较早,地面缺乏必要的防护措施,使得遗洒的 DDT 残留在土壤中,造成了土壤的严重污染。可湿剂生产车间投产较晚,地面硬化较好,对土壤起到了一定的保护作用。

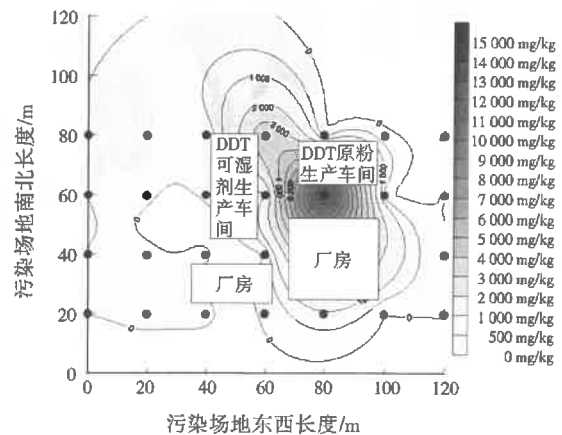


图8 表层土样 DDT 质量浓度分布等值线图
Fig. 8 Spatial distribution of DDT concentration in topsoil of chemical plant

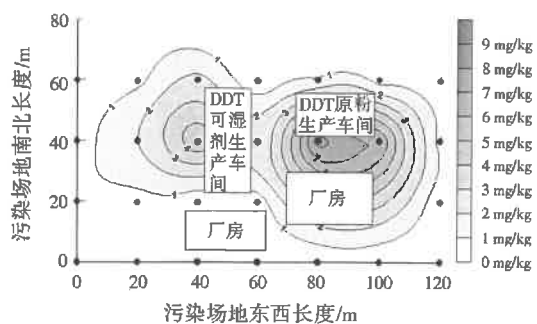


图9 地下5 m处土样 DDT 质量浓度分布等值线图
Fig. 9 Spatial distribution of DDT concentration in 5 m depth underground soil of chemical plant

从图9可知,虽然 DDT 污染主要集中在表层,地下5 m处土样 DDT 浓度迅速降低,但仍有一定的检出,最大检出值为 8.18 mg/kg,高浓度处与表层高浓度处相对应。有研究表明,农药更深层的迁移主要是通过水分的淋溶。CATER^[18]和 VOERMAN^[19]曾证明,大多数有机氯杀虫剂难以向下淋

溶, ODUM 等^[20]也曾讨论过这一问题。目前, 国内外学者对于 POPs 在土壤剖面的污染状况的研究最大采样深度为 3 m, 而本研究中地下 5 m 处绝大多数土样中 DDT 浓度均高于《土壤环境质量标准》(GB 15618—1995)三级指标(1 mg/kg), 可见 DDT 虽然难溶于水, 但是在污染场地即使深层土壤, DDT 浓度也没有降到安全水平。

3 结 论

(1) 以生产 DDT 粉剂为主的企业的污染场地中, DDT 污染严重, 最大残留质量浓度达 14 271.90 mg/kg, DDT 污染主要集中在表层。

(2) 半变异函数分析表明, 污染场地内 DDT 空间分布表现出较大的空间变异性较强的空间自相关性, $C_0/(C_0+C) < 25\%$, 表层土样半变异函数变程为 21 m, 大于采样间距(20 m), 说明污染场地采样点布设基本满足空间插值分析的需要。

(3) 用克里格插值法制出的等值线图直观地反映了表层和地下 5 m 处土壤 DDT 浓度空间分布特征, 污染场地中 DDT 污染以原粉生产车间为中心向四周扩散, 地下 5 m 处土样 DDT 浓度分布污染中心位置与表层基本一致。

参考文献:

- [1] 华小梅, 单正军. 我国农药的生产、使用状况及其污染环境因子分析[J]. 环境科学进展, 1996, 4(2): 33-34.
- [2] SUTER G W, EFROYMONSON R A, SAMPLE B E, et al. Ecological risk assessment for contaminated sites[M]. Washington, D. C.: Lewis Publishers, 2000.
- [3] 骆永明, 滕应, 过园. 土壤修复——新兴的土壤科学分支学科[J]. 土壤, 2005, 37(3): 230-235.
- [4] 王政权. 地统计学及在生态学中的应用[M]. 北京: 科学出版社, 1999.
- [5] 郭旭东, 傅伯杰, 陈利顶, 等. 河北省遵化平原土壤养分的时空变异特征: 变异函数与 Kriging 插值分析[J]. 地理学报, 2000, 55(5): 555-566.
- [6] 姜勇, 张玉革, 梁文举, 等. 沈阳市苏家屯区耕层土壤养分空间变异性研究[J]. 应用生态学报, 2003, 14(10): 1673-1676.
- [7] 李海滨, 林忠辉, 刘苏峡. Kriging 方法在区域土壤水分估值中的应用[J]. 地理研究, 2001, 20(4): 446-452.
- [8] 郑袁明, 陈煌, 陈同斌, 等. 北京市土壤中 Cr、Ni 含量的空间结构与分布特征[J]. 第四纪研究, 2003, 23(4): 436-445.
- [9] 徐尚平, 陶澍, 徐福留, 等. 内蒙土壤微量元素含量的空间结构特征[J]. 地理学报, 2000, 55(3): 337-345.
- [10] 张乃明, 李保国, 胡克林. 太原污灌区土壤重金属和盐分含量的空间变异特征[J]. 环境科学学报, 2001, 21(3): 349-353.
- [11] 国家环境保护总局. 土壤环境检测技术规范[M]. 北京: 科学出版社, 2004.

- [12] 李国刚, 李红莉. 持久性有机污染物在中国的环境监测现状[J]. 中国环境监测, 2004, 20(4): 53-60.
- [13] GRINGARTEN E, DEUTSCH C V. Teacher's aide: variogram interpretation and modeling[J]. Mathematical Geology, 2001, 33(4): 507-534.
- [14] 张成才, 秦昆, 卢艳, 等. GIS 空间分析理论与方法[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2004.
- [15] McGRATH D, ZHANG C S, CARTON O T. Geostatistical analyses and hazard assessment on soil lead in Silvermines area, Ireland[J]. Environmental Pollution, 2004, 127(5): 239-248.
- [16] 路鹏, 彭佩钦, 宋变兰, 等. 洞庭湖平原区土壤全磷含量地统计学和 GIS 分析[J]. 中国农业科学, 2005, 38(6): 1204-1212.
- [17] 葛成军, 安琼, 董元华, 等. 南京某地农业土壤中有有机污染分布状况研究[J]. 长江流域资源与环境, 2006, 15(3): 361-365.
- [18] CATER F L. Residues and degradation products of technical heptachlor in various soil types[J]. Bull. Environ. Contam. Toxicol., 1970, 5(4): 422-423.
- [19] VOERMAN S. Residue of dieldrin, lindane, DDT, and parathion in a light sandy soil after repeated application throughout a period of 15 years[J]. Agr. Food Chem., 1970, 18(1): 717-719.
- [20] ODUM W E, WOODWELL G M, WURSTER C F. DDT residues absorbed from organic detritus by fiddler crabs[J]. Science, 1969, 164(3879): 576-577.

编辑: 黄 苇 (修改稿收到日期: 2010-08-17)

(上接第 11 页)

菌的富集, 聚磷菌的总量较少, 但系统中存在一定比例(81.1%)的反硝化聚磷菌。

(3) 系统的释磷量受到硝态氮浓度的抑制, 进而影响了整个系统的除磷能力, 说明要提高系统的除磷能力应设法降低回流液中的硝态氮浓度。

参考文献:

- [1] GORONSZY M C, 朱明权, MUTSCHKE K. 循环式活性污泥法(CAST)的应用及发展[J]. 中国给水排水, 1992, 12(6): 4-9.
- [2] 熊红权, 李文彬. CASS 工艺在国内的应用现状[J]. 中国给水排水, 2003, 19(2): 34-35.
- [3] KUBA T, VAN LOOSDRECHT M C M. Phosphorus removal from wastewater by anaerobic-anoxic sequencing batch reactor[J]. Wat. Sci. Tech., 1993, 27(5/6): 241-252.
- [4] 国家环境保护总局《水和废水监测分析方法》编委会. 水和废水监测分析方法[M]. 4 版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [5] 任明华, 高乃云. CAST 工艺的性能和优化运行研究[D]. 上海: 同济大学, 2007.
- [6] 李亚新. 活性污泥法理论与技术[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007.
- [7] 王亚宜, 彭永臻, 王淑莹. 反硝化除磷理论、工艺及影响因素[J]. 中国给水排水, 2003, 19(1): 33-36.

编辑: 贺锋萍 (修改稿收到日期: 2010-04-20)