

# 区域土壤电阻率参数的空间分析软件开发与应用

曲良山<sup>1,2</sup> 李晓刚<sup>1</sup> 杜翠薇<sup>1</sup> 李双林<sup>2</sup>

(1. 北京科技大学新材料技术研究院腐蚀与防护中心 教育部腐蚀与防护重点实验室 北京 100083;  
2. 大庆油田建设设计研究院 大庆 163712)

**摘要:** 应用 Kriging 空间分析方法, 对大庆油田某区域现场实测的土壤腐蚀特性参数进行空间分析, 并开发出土壤环境数据的空间分析软件。应用分析软件对试验区取得的 300 组现场测试数据进行分析, 获得基于土壤电阻率评价指标的土壤腐蚀性分级图。介绍土壤腐蚀试验中应用 Kriging 方法的基本程序、软件开发及应用情况。

**关键词:** Kriging 方法 空间分析 土壤电阻率 腐蚀性分级 软件开发

**中图分类号:** TG172.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-4537 (2011) 01-0023-05

## 1 前言

油气田及长输管道沿线的土壤腐蚀性评估和预测是管道和地下结构工程设计前期的重要基础性工作。绘制管道沿线或油田区域土壤腐蚀性分级图的主要方法之一是通过研究土壤腐蚀的主要影响因素及其与碳钢腐蚀速率的相关关系, 进而获得相应的土壤腐蚀性预测模型。国内外应用较多的土壤腐蚀性评价方法是土壤电阻率评价法, 由于其操作简便, 测量相对简单, 许多工业技术标准也沿用了此方法。

本研究利用地质统计学中近年来发展起来的土壤属性空间分析技术, 分析试验区内土壤腐蚀性的主要评价指标 - 土壤电阻率参数的空间分布特征, 结合土壤现场碳钢埋片腐蚀数据, 开发出一套基于 Kriging 插值法的土壤腐蚀性数据空间分析软件。在大庆油田某试验区现场, 采用网格布点法测试土壤电阻率数据, 得到试验区内表征土壤腐蚀性的土壤电阻率值及相关空间数据。应用此分析软件对取得的各试验点电阻率数据的空间变化进行分析, 并利用数字高程模型 (DEM) 完成大庆油田某区域土壤腐蚀性分级图的制作。

## 2 土壤电阻率数据的空间分析模型与算法

地质统计学中的空间分析方法已经成功地应用

于土壤盐分、pH 值等各种土壤属性的空间变异分析中, 土壤电阻率作为评价土壤腐蚀性强弱的主要指标, 与不同尺度测量区域内的其它土壤属性参数变化直接相关, 也与测量尺度大小有关。因此, 研究区域土壤电阻率的空间变异特征, 对评价该区域土壤的腐蚀性等级有较大作用。

考虑到土壤电阻率野外测量的工作量以及实际操作, 测量样本的数量对于大尺度区域来说, 仍然不可能满足较高分辨率的土壤腐蚀性分级图制作需求。因此, 本研究借鉴地质统计学中的空间分析与 Kriging 插值技术较好地解决了此问题。

土壤属性的空间数据预测技术很多, 包括趋势面分析法和距离加权法, 但是在处理与地质因素有关的空间问题时, Kriging 法是空间预测中最常用的方法之一<sup>[1~4]</sup>, 是利用半方差分析图对未采样点的区域化变量进行无偏最优估值的一种方法。该方法的优点是同时能求出估值方差, 从而能了解到估值的可靠性。

Kriging 法采用变差表示空间数据的变化, 通过预测空间分布特征, 使预测数值的误差最小化。Kriging 法采用观测数据的线性加权法预测未知点的数值<sup>[5]</sup>:

$$\hat{v} = \sum_{j=1}^n w_j \cdot v_j \quad \sum_{i=1}^n w_i = 1 \quad (1)$$

$r_i$  作为第  $i$  个估计的误差, 定义为某点估计数值与真值的差:

$$r_i = \hat{v} - v_i \quad (2)$$

第  $k$  个估计的平均误差:

定稿日期: 2010-05-15

基金项目: 国家科技基础条件平台项目 (2005DKA10400) 和国家自然科学基金项目 (50971016) 联合资助

作者简介: 曲良山, 男, 1962 年生, 博士生, 高级工程师, 研究方向为油田腐蚀与防护

通讯作者: 杜翠薇, E-mail: ducuiwei@yahoo.com.cn

$$m_\tau = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k r_i = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \hat{v}_i - v_i \quad (3)$$

误差的方差:

$$\delta_R^2 = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k (r_i - m_R)^2 = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \left[ \hat{v}_i - v_i - \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k (\hat{v}_i - v_i) \right]^2 \quad (4)$$

由于无法知道  $v_1, \dots, v_k$  的真值, 实际上上述方程无法使用, 为此引进由若干随机变量构成的固定的随机函数  $V(x_i)$ ,  $x_i$  为观察点的位置, 对未知点  $x_0$  的估计值  $V(x_0)$  由下列随机函数表示

$$\begin{aligned} \tilde{V}(x_0) &= \sum_{i=1}^n w_i \cdot V(x_i) \\ R(x_0) &= \tilde{V}(x_0) - V(x_0) \end{aligned} \quad (5)$$

误差的方差为

$$\delta_R^2 = \tilde{\delta}^2 + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_i w_j \tilde{C}_{ij} - 2 \sum_{i=1}^n w_i \tilde{C}_{i0} + 2\mu \left( \sum_{i=1}^n w_i - 1 \right) \quad (6)$$

$\tilde{\delta}^2$  是随机变量  $V(x_0)$  与其自身的协方差, 假设所有的随机变量具有相同的方差。  $\mu$  是拉格朗日参数。为了使误差的方差最小化, 从方程 (6) 中对每一个权系数  $w$  计算偏微分, 并设其等于 0。对应  $w_1$  的偏微分方程如下:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\tilde{\delta}_R^2)}{\partial w_1} &= 2 \sum_{j=1}^n w_j \tilde{C}_{1j} - 2\tilde{C}_{10} + 2\mu = 0 \\ \sum_{j=1}^n w_j \tilde{C}_{1j} + \mu &= \tilde{C}_{10} \end{aligned} \quad (7)$$

所有权系数  $w_i$  可以表示为

$$\sum_{j=1}^n w_j \tilde{C}_{ij} + \mu = \tilde{C}_{i0} \quad (8)$$

可以从方程 (8) 中得到权系数  $w_i$ , 然后估计  $x_0$  值。这里采用变差代替协方差, 计算方程 (8) 中每一个权重系数, 变差定义如下:

$$\gamma_{ij} = \tilde{\delta}^2 - \tilde{C}_{ij} \quad (9)$$

最小误差的方差估计为:

$$\tilde{\delta}_R^2 = \sum_{i=1}^n w_i \gamma_{i0} + \mu \quad (10)$$

Kriging 方法包含两个变差模型:

(1) 球形模型

$$\tilde{\gamma}(h) = \begin{cases} C_0 + C_1 \left( 1.5 \frac{h}{a} - 0.5 \left( \frac{h}{a} \right)^3 \right) & |h| \leq a \\ C_0 + C_1 & |h| > 0 \end{cases}$$

(2) 指数模型

$$\tilde{\gamma}(h) = \begin{cases} 0 & |h| = 0 \\ C_0 + C_1 \left[ 1 - \exp\left(-\frac{3|h|}{a}\right) \right] & |h| > 0 \end{cases}$$

在土壤属性的空间变异分析中, 空间变异参数中的块金系数和结构方差可以分别理解为土壤成分或其它腐蚀性参数受人为因素和自然因素即非区域因素和区域因素的影响程度。上述两个模型描述了变差  $\tilde{\gamma}$  与空间距离  $h$  之间的关系, 其中, 参数  $a$  为作用范围, 在该范围内的样本具有空间上的相关性, 超出该范围后样本之间不具有空间相关性;  $C_0$  为块金值, 是变异函数在原点处的数值, 表示由实验误差和小于最小取样尺度引起的随机变异;  $C_0 + C_1$  为基台值, 通常表示研究系统内的总变异, 包括结构性变异和随机性变异, 基台值越高, 表示系统总的空间异质性越高; 而块金值和基台值之比反映块金方差占空间异质性变异的大小。

### 3 主要功能模块设计思路或流程

本软件对土壤腐蚀试验取得具有空间坐标的试验数据, 利用 Kriging 方法进行空间分析, 通过建立空间高程模型进行空间预测, 在此基础上给出空间数据分布 (3D 或等值图)。数据流程图如图 1 所示。

#### 3.1 主要功能模块简介

主要功能模块包括数据输入模块、数据显示模块、数据处理模块、数据输出模块。

(1) 数据输入模块

将试验取得的具有二维空间坐标的土壤腐蚀调查数据读入内存, 待进一步处理。输入数据为 XLS 电子表数据。试验数据为土壤腐蚀性参数或土壤腐蚀性等级。

支持矢量图 (包括 DXF 数据、ACCESS 数据) 及影像图输入。

(2) 数据显示模块

显示原始测试数据、分析处理所取得的数值高程模型 (3D)、等值线。

(3) 数据预处理模块

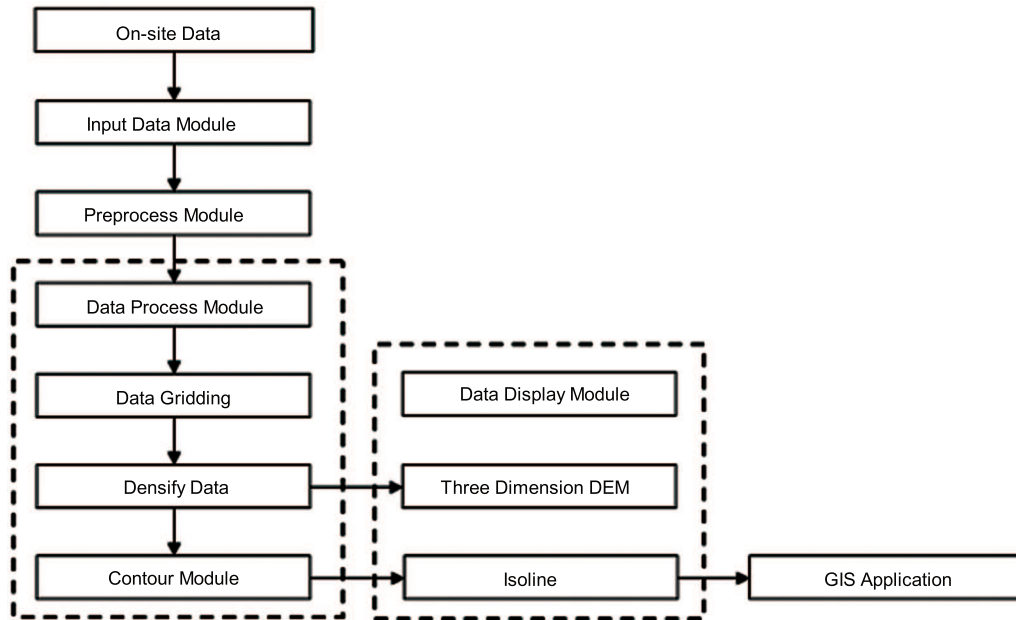


Fig.1 Diagram of data flow

提供将土壤腐蚀参数转换为土壤腐蚀性等级或其它相关数据处理功能。

#### (4) 数据处理模块

包括主处理模块,由网格化、网格加密和等值线生成三项功能。

#### (5) 数据输出模块

保存试验数据、保存网格化数据、网格加密数据、等值线数据等。

### 3.2 测试点网格化与网格加密

利用 Kriging 法对每一个测试点的值构建预测模型,即数值高程模型 (DEM)。利用 DEM 模型进行预测,完成测试点的网格化。另外,为了提高 DEM 数字高程模型的精度,实际操作中需要对网格数据进行二次加密处理。在二次加密中,采用与网格化相同的预测技术,对各加密点的空间数值进行测试。

## 4 空间数据分析软件开发与应用

### 4.1 现场测试与土壤电阻率数据样本的统计性描述

土壤自然环境的腐蚀性试验评价方法,除了直接采用野外埋设试片测量腐蚀速率之外,国内外应用较多的是土壤电阻率评价法。土壤电阻率是土壤中各种因素的综合特性表征,现场实测数据通常与土壤类型、质地和结构、含水量、地温、含盐量等密切相关,数据离散性较大,为了判断在不同空间尺度上测量的土壤电阻率是否具有较好的代表意义,应对其予以分析。

本研究在大庆油田某试验区,采用网格法布点测试,网格间距 1000 m,用四电极法现场测试浅层

土壤的电阻率值(测试土层深度 1.0 m),同时,利用 GPS 定位测试点的空间  $X$ 、 $Y$  坐标参数(单位 m),共取得实测数据 300 组(表 1 为部分数据)。

不同的统计方法对土壤性质样本数据分布规律有一定的适应性。若样本数据满足正态分布和平稳性两个条件,就可用最简单的点克立格法或块段克立格法进行估值。当区域变量为非平稳变量时,必须用其他克立格法,如泛克立格法、普通克立格法等。

因此,首先对土壤电阻率数据进行统计分布分析,表 2 是采用 SPSS (Statistical Product and Service Solutions) 软件中的 K-S 非参数检验后的结果。结果表明,样本区域的土壤电阻率分布为正态分布,因此,可以采用点克里格法进行变差分析以及空间插值计算。

### 4.2 软件开发过程

利用 DELPHI 开发环境开发了空间数据分析软件(图 2),该软件具有试验数据的管理、显示、空间分析和分级图制作等功能。基于 Kriging 空间分析方法,软件实现了现场试验离散点数据的网格化处理、网格加密和等值线生成等空间数据处理功能。

(1) 对上述试验数据进行数据处理,利用 Kriging 法对每一个测试点的值构建数字高程预测模型(即 DEM),利用 DEM 模型进行插值预测,完成测试点的网格化,得到区域或管道沿线的土壤腐蚀性空间预测模型(图 3)。分析过程中 Kriging 模型选用球型模型拟合,其相关参数:块金效应  $C_0$  为 0,作用范围  $a$  为 1819 m,基台  $C_0+C_1$  为 2235。

(2) 利用 Kriging 法对每一个测试点的值构建预测模型,即数值高程模型 (DEM)。为了提高 DEM

Table 1 Part of on-site data of soil resistivity

X /m	Y /m	soil resistivity /Ω·cm	X /m	Y /m	soil resistivity /Ω·cm	X /m	Y /m	soil resistivity /Ω·cm
21610405	5150199	218.7	21617405	5132199	44.5	21613405	5144199	13.6
21611405	5150199	74.6	21618405	5132199	9.8	21614405	5144199	28.5
21612405	5150199	73.1	21618405	5131199	101.8	21614405	5143199	113.1
21612405	5151199	60.3	21618405	5130599	33.2	21615405	5144199	45.4
21611405	5151199	218.7	21617405	5133199	26.4	21615405	5143199	101.8
21610405	5152199	98.0	21618405	5133199	29.6	21613405	5137199	2.8
21611405	5152199	169.6	21617405	5136199	73.9	21611405	5137199	86.7
21610405	5153199	0.8	21618405	5142199	89.0	21611405	5138199	7.6
21611405	5153199	0.9	21618405	5143199	32.0	21612405	5138199	75.4
21613405	5151199	67.1	21617405	5142199	161.4	21612405	5139199	64.1
21614405	5151199	61.8	21617405	5143199	150.8	21613405	5139199	22.6
21612405	5152199	24.9	21617405	5144199	98.0	21614405	5139199	90.5
21613405	5152199	45.2	21618405	5145199	89.0	21613405	5140199	158.3
21614405	5152199	101.8	21617405	5145199	113.1	21612405	5140199	82.9
21612405	5153199	12.8	21616405	5146199	86.0	21611405	5139199	151.6

Table 2 Non-parametric test (K-S test) results

	parameters	soil resistivity
samples	<i>N</i>	300
normal	means	58.358
parameter	std.	47.6492
	abs.	0.114
extreme value	positive	0.098
	negative	-0.114
Kolmogorov-	<i>Z</i>	1.966
Smirnov	level of significance	0.001

(double side)

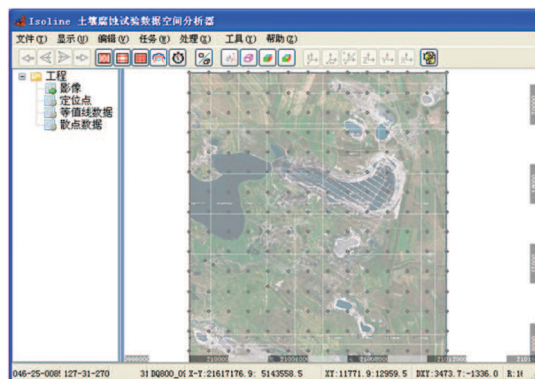


Fig.2 Appearance of spatial data analysis software

数字高程模型的精度，利用空间预测模型对离散的试验点进行网格化处理和二次加密，二次加密网格距离 100 m，在二次加密中，采用与网格化相同的预测技术，对各加密点的空间数值进行测试。使用软件等值线生成功能，在二次加密数据的基础上绘制等值线图，此等值线图反映了不同区域土壤腐蚀性的强弱分布，与其它应用系统集成，可以指导油田防腐设计或长输管道运行管理。图 4 是集集成到大庆油田防腐保温数据分析系统中的等值线图。

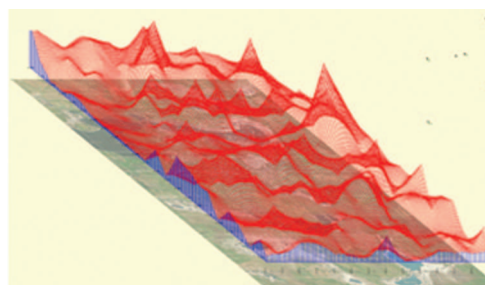


Fig.3 Digital elevation model(DEM)

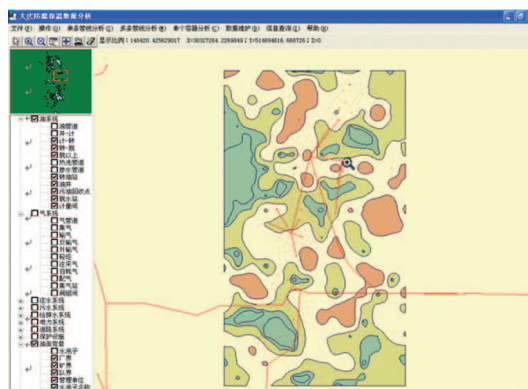


Fig.4 Application of soil corrosivity classification in Daqing

### 5 结论

(1) 在材料土壤腐蚀性试验与腐蚀性评价中，针对常规数理统计难以处理的较大尺度范围内土壤属性参数的空间变异性问题，运用地质统计学中的空间数据变异性分析和预测方法，可以较好地进行区域土壤腐蚀性评价和预测。

(2) 所开发的土壤腐蚀性数据空间分析软件将土壤腐蚀性参数空间分析方法和地理信息技术结合起来，形成了一套具有较强操作性的区域土壤腐蚀

性分级方法, 对管道沿线和油气田土壤腐蚀性分析具有一定的实际意义。

## 参考文献

- [1] Guo L Q, Liu S D. Realization of Kriging algorithm and applied analysis to spatial interpolation of geophysics data [J]. Coal Technol., 2008, 27(5): 9-11  
(郭立全, 刘盛东. Kriging 算法的实现及其在矿井物探数据处理中的应用 [J]. 煤炭技术, 2008, 27(5): 9-11)
- [2] Li H B, Lin Z H, Liu S X. Application of Kriging methods in estimating content of regional soil water [J]. Geographical Res., 2001, 20(4): 446-451  
(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): 446-451)
- [3] She Y X. Estimate of soil properties in decision system of geotechnique [J]. Build. Sci., 2003, 19(2): 42-45  
(余跃心. 基于 Kriging 法的土性参数估计 [J]. 建筑科学, 2003, 19(2): 42-45)
- [4] Li X Y, Lei T W, Wang W. Spatial variation of soil properties and Kriging methods [J]. Acta Univ. Agric., 2000, 12(6): 30-34.  
(李小昱, 雷廷武, 王为. 农田土壤特性的空间变异性及 Kriging 估值法 [J]. 西北农业大学学报, 2000, 12(6): 30-34)
- [5] Bao S T, Liao Y X, Hu Y M, et al. Terrain interpolation based on Kriging method [J]. Geogr. Geo-Inf. Sci., 2007, 23(3): 32-36  
(包世泰, 廖衍旋, 胡月明等. 基于 Kriging 的地形高程插值 [J]. 地理与地理信息科学, 2007, 23(3): 32-36)

# DEVELOPMENT AND APPLICATION OF SPATIAL ANALYSIS SOFTWARE FOR REGIONAL SOIL RESISTIVITY PARAMETERS

QU Liangshan<sup>1,2</sup>, LI Xiaogang<sup>1</sup>, DU Cuiwei<sup>1</sup>, LI Shuanglin<sup>2</sup>

1. Corrosion and Protection Center, University of Science and Technology Beijing, Ministry of Education Key Laboratory for Corrosion and Protection, Beijing 100083;
2. Daqing Oilfield Construction Design and Research Institute, Daqing 163712

**Abstract:** Relativity analysis of regional soil property is useful for the soil corrosion estimation on the basis of certain appropriate indicators. This is significantly important for the corrosion control of oil & gas pipeline engineering. However, as we all know, soil properties is extremely complicated in natural environment. Large data dispersion error of the *in-situ* soil property measurement has been found out. Obviously, routine data statistical methods can not be used in such situation. The Kriging method of spatial data analysis has been applied on the project of typical soil property data according to the field measurement.

At the same time, the data analysis software has been developed to deal with the soil characters specified. 300 on-site data have been processed, and the corrosion classification map has been founded based on the evaluation indicators of soil resistivity.

This paper described the principle and basic procedures of Kriging method used in soil corrosion assessment, as well as relevant software development and its application.

**Key words:** Kriging method, spatial analysis, soil resistivity, corrosion classification, software development