
支持向量机在地统计学中的应用研究——以土壤重金属砷的空间分布及其对农产品安全生产的影响为例^{*1}

高铭¹ 王季槐^{2, 3} 卢大远¹ 戴家佳¹ 丰锋³ 汪建文² 王大霞⁴ 杨杰文³

(1 贵州大学数学与统计学院, 贵州贵阳 550025;

2 贵州科学院, 贵州贵阳 550001;

3 广东海洋大学农学院, 广东湛江 524088;

4 贵州省分析测试研究院, 贵州贵阳 550003)

【摘要】:重金属砷广泛存在于地壳中, 它的开采及使用造成了对农田土壤的污染, 进而危害人体健康。Kriging 地统计学方法是解决基于少量样本估计大面积内物质异质性分布的主要手段。但是由于传统的 Kriging 方法对变异函数的拟合的主观性和局限性影响对物质分布的估计。为解决这一问题, 引入了支持向量机(SVM)方法对变异函数进行拟合并将这一方法应用于对农田土壤重金属砷的分布的估计, 即基于在目标地块实地取样获得的少量数据来估计砷在农田内的分布, 结果表明:SVM 回归的拟合优度为 0.944, 高于其他两种传统方法的拟合优度(0.842, 0.744); 基于该拟合函数计算的验证样点估计值与实测值的平均相对误差为 4.75%; 砷在目标地块内呈异质性分布。为了研究土壤砷的分布对农产品安全生产的影响, 根据文献提供的实验数据建立了 9 种蔬菜对重金属砷的富集模型, 据此建立了农产品安全生产的风险评价模型。评价结果表明, 如果在目标地块中种植 9 种蔬菜, 其中 8 种蔬菜是无风险的, 即风险值 $p=0$ 。然而, 尽管整个目标地块土壤砷含量低于《土壤环境质量标准》[14] 的土壤二级标准, 9 种蔬菜中仍有一种蔬菜(青菜)的产品是完全超标的, 即风险值 $p=1$ 。因此, 单纯用土壤重金属含量来评价农田土壤并不能很好地反映农田土壤污染对人类的影响。

【关键词】:支持向量机(SVM), Kriging 方法, 变异函数, 重金属分布, 重金属富集模型, 风险评价

【中图分类号】:029; TP181; X53 **【文献标识码】:**A **【文章编号】:**1003-6563(2017)03-0058-07

¹收稿日期:2016-12-28; 修回日期:2017-01-09

*基金项目:国家自然科学基金项目(30960222); 贵州省科技计划项目(黔科合 NY 字 [2008] 3050 号, 黔科合 NY 字 [2011] 3026 号)。

作者简介:高铭(1991-), 男, 汉族, 硕士研究生, 研究方向:应用统计。

通讯作者:王季槐, 男, 研究员, 研究方向:生物数学。

0 引言

砷元素(As)广泛存在于自然界中,它的化合物也被广泛地应用于工业、农业、医药行业^[1]。砷的开采和使用会污染土壤进而危害人体健康。因此,加强对农田土壤重金属污染的调查和研究对农产品安全生产具有非常重要的意义。土壤本身是一个形态和过程都相当复杂的自然综合体^[2],这就致使土壤性质在空间上具有高度的复杂性和变异性,土壤重金属的分布也自然具有高度的空间异质性,克里格插值方法是分析这种空间异质性和自相关性的主要手段。

克里格插值(Kriginginterpolation)是地统计学研究的主要方法,它以区域化变量理论为基础,以变异函数为工具,现已广泛应用于环境科学、土壤科学、气象、生态、海洋、空间遥感等领域^[3]。在克里格插值中,变异函数的拟合尤为关键^[4]。变异函数能够反映区域化变量的空间变化特征,特别是透过随机性反映区域化变量的结构性,能够有效地联系未知点数据和采样点数据之间的相关关系,因此对正确估计未知点数值起到决定性作用。通常情况下,我们只能通过少量的样本数据计算出有限的实验变异函数值,再通过这些实验变异函数值来拟合变异函数^[5]。而之前人们最常用的的方法就是通过变异函数的理论模型去近似拟合实验变异函数曲线,具有很大的主观性和局限性^[6]。

支持向量机(SVM)回归是由基于SVM发展出来的回归方法^[7],可以用来完成对实验变异函数曲线的拟合。王赞辉^[4],吴王文^[6]等分别在海洋资料数据和煤层厚度估计上运用SVM作过对变异函数拟合的实例研究,本文将在此基础上,结合R语言中geoR包提供的拟合方法:likfit()和variostat()函数,对比分析支持向量机回归的拟合结果,并估计目标地块土壤重金属砷分布,为SVM在地统计学的应用再增加一实例。基于对目标地块土壤砷含量的估计结果,本文又分析了目标地块内种植不同蔬菜存在的风险,为发展优质农产品提供参考,体现了该研究的实用价值。

1 取样与方法

1.1 样本采集

研究的目标地块区位于贵州省遵义县境内。前期研究的结果表明,农田耕作层的土壤重金属分布在 1m^2 内的变异非常小,在每一平方米内我们采用五点梅花式取样,取样时在每一个点取耕作层(0—200mm)土壤若干混合后取1kg土壤到实验室检测,检测值代表这 1m^2 内的土壤重金属砷的平均含量,而我们将这 1m^2 的中心设为一个样本点,所测砷含量即代表这一样本点的实测数据。

样本点的布置:在目标地块内,采用网格布点的均匀采样方法,将该区域划分成若干均匀网格方格,样点设在方格的中心。在研究区设置了45个样本点,选取其中36个(约80%)作为样本数据进行插值计算,其余9个样点数据作验证使用。而这36个样本数据点呈6行6列矩形分布,列距和行距均为10m(图1)。

1.2 理论方法

1.2.1 普通克里格法

Kriging插值要求满足两个条件:一是无偏性,二是估计方差最小^[3]。

假设区域化变量为 $Z(x)$,待估区域为 V ,其中心点为 x_0 ,采样点为 $x_i(i=1, 2, \dots, n)$,对应观测值为 $Z(x_i)(1, 2, \dots, n)$,则待估区域的估计值为:

$$Z(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i) \quad (1)$$

其中: $\lambda_i (i=1, 2, \dots, n)$ 是待估权重系数。根据无偏性条件和估计方差最小条件可将权重系数 λ_i 的求解问题转换为一个规划问题:

$$\left\{ \begin{array}{l} \min \quad \sigma_E^2 = \bar{C}(V, V) + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \lambda_i \lambda_j C(x_i, x_j) - \\ \quad 2 \sum_{i=1}^n \lambda_i \bar{C}(x_i, V) \\ \text{s. t.} \quad \sum_{i=1}^n \lambda_i = 1 \end{array} \right.$$

建立拉格朗日函数:

$$F = \sigma_E^2 - 2\mu \left(\sum_{i=1}^n \lambda_i - 1 \right) \quad (3)$$

其中, -2μ 是拉格朗日乘子。求出函数 F 对 λ_i 的偏导数, 并令其等于 0, 整理便可得到普通克里格方程组:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{j=1}^n \lambda_j C(x_i, x_j) - \mu = \bar{C}(x_i, V) \\ \sum_{i=1}^n \lambda_i = 1 \end{array} \right. \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (4)$$

从而便可求出所有权重参数 λ_i , 进而得到待估点的估计值。

另外, 普通克里格法要求区域化变量 $Z(x)$ 需满足二阶平稳假设, 其数学期望为 m (未知常数), 协方差函数 $C(h)$ 和变异函数 $\gamma(h)$ 存在且平稳, 且二者有如下关系:

$$\begin{cases} \gamma(\infty) = C(0) \\ C(h) = C(0) - \gamma(h) \end{cases} \quad (5)$$

若将(5)式代入(4)式便可得用变异函数形式来表述的普通克里格方程:

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^n \lambda_j \gamma(x_i, x_j) + \mu = \bar{\gamma}(x_i, V) \\ \sum_{i=1}^n \lambda_i = 1 \end{cases} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (6)$$

其估计方差为:

$$\sigma_{ok}^2 = \sum_{i=1}^n \lambda_i \bar{\gamma}(x_i, V) - \bar{\gamma}(V, V) + \mu \quad (7)$$

而实验变异函数公式通常可如下表示:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \quad (8)$$

其中 $N(h)$ 为两两相距为 h 的样本点对的数量。

在 Kriging 插值理论中给出了实际应用中最常见的几种变异函数的理论模型, 包括: 线性模型, 球状模型, 指数模型和高斯模型等^[2]。变异函数模型中有三个最重要的参数: 一是块金值 (Nugget), 即由于测量误差或空间变异, 两样本点非常接近时, 它们的变异函数值也不为 0; 二是基台值 (Sill), 即变异函数值不再随样本间隔距离增大而改变; 三是变程 (Range), 即当变异函数取值达到基台值时的样本间距。在传统的变异函数拟合方法中, 研究者需根据实验变异函数曲线和自己的经验去选择合适的函数模型, 这有一定的主观性和局限性^[6]。

1.2.2 支持向量机回归

支持向量机 (SVM) 最初是为解决二分类问题提出的, 现广泛用于解决多类非线性分类问题和回归问题^[7-8]。SVM 分类是寻求最优超平面使对所有样本尽可能正确分类的条件下使得两类样本之间间隔最大化。对于支持向量机回归, 就是寻求最优回归超平面, 使得所有样本点距离超平面的总偏差最小^[9]。

解决非线性回归问题, SVM 引入非线性映射 ϕ 的方法, 把样本空间的 X_i 映射到特征空间的 $\phi(X_i)$ 来代替, 在特征空间寻求最优回归超平面, 转化为规划问题如下:

$$\begin{cases} \min & \frac{1}{2} \|W\|^2 + C \sum_{i=1}^l (\xi_i + \xi_i^*) \\ \text{s. t.} & \begin{cases} y_i - (W \cdot \phi(X_i)) - b \leq \varepsilon + \xi_i \\ (W \cdot \phi(X_i)) + b - y_i \leq \varepsilon + \xi_i^* \end{cases} \\ & (\xi_i \geq 0, \xi_i^* \geq 0) \end{cases} \quad (9)$$

引入拉格朗日函数，可将上式转化为：

$$\begin{cases} \max & -\frac{1}{2} \sum_{i=1, j=1}^l (\alpha_i - \alpha_i^*) (\alpha_j - \alpha_j^*) (\phi(X_i) \cdot \phi(X_j)) \\ & -\varepsilon \sum_{i=1}^l (\alpha_i + \alpha_i^*) + \sum_{i=1}^l y_i (\alpha_i - \alpha_i^*) \\ \text{s. t.} & \sum_{i=1}^l (\alpha_i^* - \alpha_i) = 0 \end{cases}$$

其中 $0 \leq \alpha_i, \alpha_i^* \leq C (i = 1, \dots, l)$ 。选择合适的核函数 $K(X, Y) = (\varphi(X) \cdot \varphi(Y))$ 引入上式，便可容易地求出特征空间上的最优线性回归超平面：

$$f(X) = \sum_{\text{支持向量}} (\alpha_i - \alpha_i^*) K(X, X_i) + b \quad (11)$$

而在支持向量机回归中，常用的核函数有：线性核函数，多项式核函数和高斯径向基核函数等。核函数中参数的选取对回归起着至关重要的作用。另外，Vapnik^[9] 定义了 ε -不敏感误差函数：

$$L_\varepsilon(y) = \begin{cases} 0, & \text{当 } |f(x) - y| \leq \varepsilon \\ |f(x) - y| - \varepsilon, & \text{其它} \end{cases} \quad (12)$$

它描述了当回归值与真实值误差小于 ε 时，误差可忽略不计。所以在非线性支持向量机回归中，包含了两个重要的问题：一是核函数的选取以及其参数的选取；二是 ε 的选取。

因此，基于支持向量机回归对变异函数进行拟合主要有以下步骤：

1) 通过公式 (8) 计算实验变异函数点，描绘实验变异函数曲线；

2) 采用支持向量机回归对变异函数进行拟合, 得到变异函数曲线和其函数关系式;

3) 对于各待估点, 可根据(11)式得到所有所需的变异函数值或协方差函数值, 再根据(4)或(6)式求出权重系数, 代入(1)式便得到待估点的估计值。

1.2.3 单因子风险评价方法

王季槐等^[10]指出用土壤重金属含量标准去评价某区域内土壤环境质量具有片面性, 因为在该区域上种植不同农作物, 则有些农作物的农产品可能达标, 而另一些可能会超标。因此, 单因子评价主要是以无公害食品标准为评价依据, 根据国家标准(无公害蔬菜卫生指标, NY5003—2001)^[12], 农产品中砷含量要小于标准中规定的砷限值 0.5mg/kg 即为合格产品, 故有单因子评价模型:

$$R_i = f_i(c) - 0.5 \quad (13)$$

其中: i 表示第 i 种农产品, c 表示土壤中重金属砷的含量, $f_i(c)$ 是指农产品中的砷含量, 它是土壤砷含量的函数(富集函数), R_i 为评价指标, 当 $R_i \leq 0$ 时该农产品为合格品。

农作物的风险评价是指在一定区域种植的农作物其产品对人体产生危害的可能性, 可用一个数值 $0 \leq p \leq 1$ 来表征。故有单因子风险评价模型^[10]:

$$P_i \approx \frac{|A_i|}{S} \quad (14)$$

其中: $|A_i|$ 表示种植第 i 种农作物其产品砷含量超标的区域的土地面积, S 表示该种植区域总的土地面积。

2 结果与分析

2.1 变异函数拟合与分析

对于实验变异函数的拟合, 本文将采用三种方法。一是用球状模型去拟合; 二是利用 geoR 包中提供的拟合方法: 函数 `lifkit()` 和函数 `variostat()`; 三是利用支持向量机回归对实验变异函数点进行拟合。拟合结果如图 2 所示, 可以看出支持向量机回归的拟合曲线更能描述变异函数点的趋势。并且计算得到的四条曲线的拟合优度分别为: 函数 `lifkit()` 给出的拟合曲线的拟合优度为 0.583, 函数 `variostat()` 给出的拟合曲线的拟合优度为 0.744, 基于球状模型拟合的拟合优度为 0.842, 而基于支持向量机回归的曲线的拟合优度为 0.944, 故支持向量机回归的曲线拟合优度最高, 故它能更好地解释和呈现重金属砷样本数据所携带的空间结构信息, 即砷分布的空间异质性和相关性。

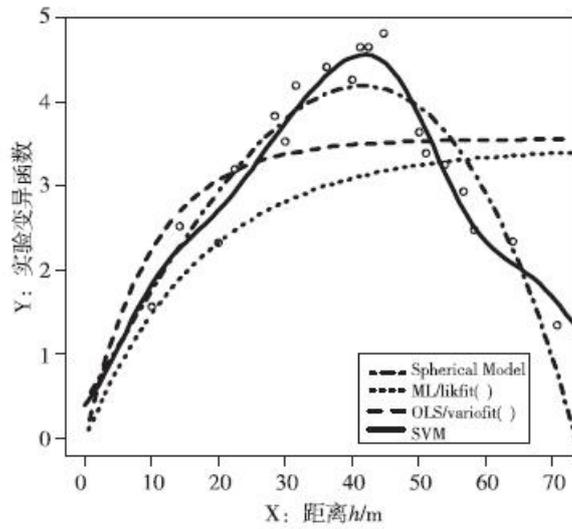


图 2 理论变异函数的拟合图

Fig. 2 The fitting of theory variogram

2.2 估计结果与分析

用基于 SVM 拟合的变异函数的 Kriging 插值算法对整个区域内砷含量进行估计，整个过程用 R 语言进行编程^[11]，运算结果如图 3。从图中可看出，砷在研究区域内的分布具有较强的空间异质性。结果表明，该区域土壤砷含量在 12.9571mg/kg 到 21.2032mg/kg 之间，最大差异为 8.2461mg/kg。

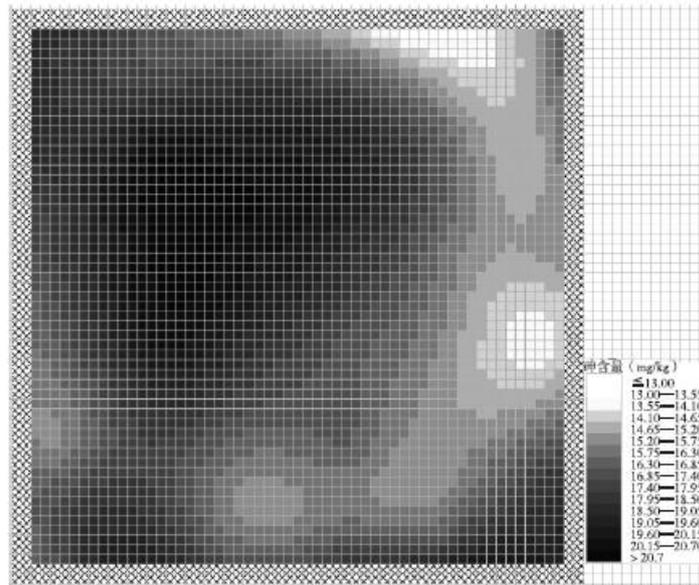


图 3 基于 SVM 和 Kriging 的估计结果

Fig. 3 Estimating results of SVM and Kriging method

表 1 列出了 9 个验证点的实测值和与之对应的基于 SVM 的 Kriging 方法的估计数值。

表 1 估计值与实测值对比(单位:mg/kg)
Tab. 1 Comparison between estimated and measured values (mg/kg)

坐标	(2,7)	(2,27)	(2,47)	(17,52)	(27,52)	(37,52)	(47,52)	(47,32)	(47,12)	平均
实测值	16.8	17.2	17.9	16.7	15.4	15.6	13.4	17.1	16.3	
估计值	17.18	17.41	18.61	17.09	16.62	14.71	14.00	15.32	15.84	
相对误差	2.26%	1.22%	3.97%	2.34%	7.92%	5.71%	4.48%	10.41%	2.82%	4.57%

从表 1 可以看出,除一样点估计值与实测值的相对误差在 10%左右外,其余 8 个点的相对误差均低于 8%,所有点的平均相对误差为 4.57%,说明总的估计效果是好的,估计结果基本能反映重金属砷在目标地块内的空间分布特点(图 3)。

2.3 蔬菜砷富集模型建立及风险评价

为了对目标地块的农作物生产安全性进行评价,需要建立相关农作物对重金属的富集模型。根据徐明飞等^[13]获得的数据对土壤重金属砷与 9 种蔬菜产品中砷含量的关系进行了拟合建立了这些蔬菜的富集模型(表 2)。

表 2 9 种蔬菜对土壤重金属砷的富集模型
Tab. 2 As concentrating models of 9 vegetables

蔬菜种类	土壤重金属砷含量与蔬菜重金属砷含量的关系式
黄瓜	$y = 1.5767 \times 10^{-2} + 6.3752 \times 10^{-4}x$
长瓜	$y = -4.0708 \times 10^{-3} + 2.2115 \times 10^{-3}x$
丝瓜	$y = 3.4622 \times 10^{-3} + 1.0274 \times 10^{-3}x$
辣椒	$y = 1.9154 \times 10^{-2} + 1.1413 \times 10^{-3}x$
番茄	$y = 9.5225 \times 10^{-3} + 1.1552 \times 10^{-3}x$
茄子	$y = 4.0613 \times 10^{-2} + 3.3551 \times 10^{-3}x$
青菜	$y = -3.2935 \times 10^{-1} + 7.1646 \times 10^{-2}x$
萝卜	$y = -1.8144 \times 10^{-2} + 6.064 \times 10^{-3}x$
莴笋	$y = -4.0099 \times 10^{-2} + 7.3616 \times 10^{-3}x$

我们已估出目标地块内 1m²土壤中的砷含量(图 3),其土壤中最高砷含量为 21.2032mg/kg。基于表 2 给出的模型并利用单因子评价模型(13)和单因子风险评价模型(14)对目标地块种植不同蔬菜时的情况进行了计算和评价,结果表明,各种蔬菜中最高砷含量分别为黄瓜 0.02928mg/kg,长瓜 0.04282mg/kg,丝瓜 0.02525mg/kg,辣椒 0.04335mg/kg,番茄 0.03402mg/kg,茄子 0.11175mg/kg,青菜 1.18977mg/kg,萝卜 0.11043mg/kg,莴笋 0.11599mg/kg。即在该目标地块内种植黄瓜,长瓜,丝瓜,辣椒,番茄,茄子,萝卜,莴笋,其农产品所含的最高砷含量都远远小于 0.5mg/kg,它们的产品都是达标产品,也就是说它们在该区

域内种植都是没有风险的。而青菜的最高砷含量为 1.18977mg/kg, 远远大于 0.5mg/kg, 则种植青菜可能会存在一定的风险, 据单因子风险评价模型(14)式, 可计算出在该区域内种植青菜的具体风险值为:p=1。即在整个研究区域内种植青菜, 其产品的砷含量可能均会超标, 属超标蔬菜, 因此在该区域内完全不宜种植青菜。

3 讨论与结语

Kriging 插值是对具有空间异质性的数据进行最优无偏插值的一种估计方法, 而变异函数则有效地描述了这种空间异质性。本文以农田土壤重金属砷含量估计为实例, 运用支持向量机回归对实例中的变异函数进行拟合估计, 其拟合优度为 0.944, 高于理论模型球状模型的拟合和 geoR 包提供的拟合方法(0.842 与 0.744)。基于 SVM 的 Kriging 方法, 本文完成了对目标地块土壤内砷的空间分布估计, 获得了较好的结果。为进一步提高估计精度, 一种按照样点间相关性对估计区域进行分块处理的方法正在研究中, 希望通过适当的样点划分, 分块计算能够提高全局估计精度。

通常对农田土壤进行评价是以国家标准 GB15618—1995《土壤环境质量标准》^[14]的土壤二级标准作为基础的, 超过二级的土壤被认为是超标的, 是不适合用来种植无公害农作物的。而污染土壤修复又是相当困难之事, 因此被污染土壤的利用就成为亟待解决的事情。已有的研究表明^[13], 不同作物对不同重金属的富集强度是不同的。据此, 我们可以根据重金属的种类, 污染的程度以及空间分布制订合理的种植计划, 使得被重金属污染的土地上生产的农产品对人体健康具有最小的风险。故提高对土壤重金属空间分布的估计精度就变得异常重要, 精确的估计可以提高农产品对人体健康影响的风险预测从而实现精准种植规划。

将本文的主要研究结果总结如下:

1) 在研究农田土壤重金属砷的分布时, 引入了支持向量机(SVM)方法对变异函数进行拟合, SVM 回归的拟合优度达到了 0.944, 高于传统方法的拟合优度, 基于该拟合函数计算的验证样点估计值与实测值的平均相对误差为 4.75%;

2) 对目标地块土壤砷的估计表明, 砷的分布呈较强的空间异质性(图 3), 该区域土壤砷含量最大值与最小值之差为 8.2461mg/kg;

3) 为了研究土壤砷的分布对农产品安全生产的影响, 本文根据文献提供的实验数据建立了 9 种蔬菜对重金属砷的富集模型, 并据此建立了农产品安全生产的风险评价模型。

4) 评价结果表明, 如果在目标地块中种植 9 种蔬菜, 其中 8 种蔬菜是无风险的, 即风险值 p=0。然而, 尽管整个目标地块土壤砷含量低于《土壤环境质量标准》^[14]的土壤二级标准, 9 种蔬菜中仍有一种蔬菜(青菜)的产品是完全超标的, 即风险值 p=1。因此, 单纯用土壤重金属含量来评价农田土壤并不能很好地反映农田土壤污染对人类的影响。

参考文献【REFERENCES】

[1] 赵维梅. 环境中砷的来源及影响 [J]. 科技资讯, 2010(R8) : 146.

[2] 杨炜林, 祖艳群, 李元. 土壤重金属化学形态的空间异质性及其影响因素为研究 [J]. 云南农业大学学报, 2007, 22(6) : 912-916.

YANG W L, ZU Y Q, LI Y. Spatial variability of sequential extraction parts of heavy metals and its affecting factors in soil [J]. Journal of Yunnan Agricultural University, 2007, 22 (6) : 912-916.

-
- [3] 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.
- WANG Z Q. Geostatistics and its application in ecology [M]. Beijing: Science press, 1999.
- [4] 王辉赞, 张韧, 刘巍, 等. 支持向量机优化的克里金插值算法及其海洋资料对比试验 [J]. 大气科学学报, 2011, 34(5) : 567-573.
- WANG H Z, ZHANG R, LIU W, et al. Kriging interpolation method optimized by Support Vector Machine and its application in oceanic data [J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 2011, 34(5) : 567-573.
- [5] OLIVER M A, WEBSTER R. Kriging: A method of interpolation for geographical information system [J]. International Journal of Geographical Information Systems, 1990, 4(3) : 313-332.
- [6] 吴王文, 杨永国, 陈优阔. 基于LSSVM优化的Kriging方法预测煤厚变化研究 [J]. 煤炭技术, 2015, 34(5) : 89-91.
- WU W W, YANG Y G, CHEN Y K. Kriging interpolation method optimized by LSSVM and its application in predicting coal thickness [J]. Coal Technology, 2015, 34(5) : 89-91.
- [7] GUNN S R. Support vector machines for classification and regression [J]. ISIS Technical Report, 1998, 14: 85-86.
- [8] SMOLA A J, SCHLÖPKF B. A tutorial on support vector regression [J]. Statistics and Computing, 2004, 14 (3) : 199-222.
- [9] Vapnik. 统计学习理论的本质 [M]. 张学工, 译. 北京:清华大学出版社, 2000.
- VAPNIK V N. The essence of statistical learning theory [M].
- ZHANG X G, trans. Beijing: Tsinghua University Press, 2000.
- [10] 王季槐, 王大霞, 汪建文, 等. 农田环境空间异质性及农作物生产安全风险评价方法研究——以蔬菜生产为例 [J]. 生物数学学报, 2014, 29(1) : 69-76.
- WANG J H, WANG D X, WANG J W, et al. The Studies on spatial heterogeneity of heavy metals in arable environment and risk evaluation methods of crop safe production on the arable-vegetable production as an example [J]. Journal of Biomathematics, 2014, 29(1) : 69-76.
- [11] KARATZOGLU A, MEYER D, HORNIK K. Support vector machines in R [J]. Journal of Statistical Software, 2006, 15(9) : 1-28.
- [12] 中华人民共和国农业部. 无公害食品白菜类蔬菜:NY 5003-2001 [S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2001.

[13] 徐明飞, 郑纪慈, 阮美颖, 等. 不同类型蔬菜重金属 Pb, As, Cd, Hg 积累量的比较 [J]. 浙江农业学报, 2008, 20(1) : 29-34.

XU M F, ZHENG J C, RUAN M Y, et al. Comparison of the amounts of heavy metals accumulated by different groups of vegetables [J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2008, 20 (1) : 29-34.

[14] 国家环境保护局. 土壤环境质量标准: GB15618-1995 [S]. 北京: 中国环境科学出版社, 1995.

The State Environmental Protection Agency. Environmental quality standard for soils: GB15618-1995[S]. Beijing: China Environmental Science Press, 1995.