

食品污染综合评价的模糊数学方法*

周泽义^{1,2}, 樊耀波¹, 王敏健¹ (1. 中国科学院生态环境研究中心, 北京 100085, E-mail: m jw ang@m ail. rcees. ac. cn; 2. 国家标准物质研究中心)

摘要: 研究食品污染综合评价的模糊数学方法, 建立食品污染综合评价的模糊数学方法模型, 并应用于北京市主要蔬菜、水果和肉类中重金属、农药、多环芳烃、硝酸盐和亚硝酸盐污染调查结果的综合评价, 取得了较为满意的结果。

关键词: 食品污染, 综合评价, 模糊数学.

中图分类号: X11 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2000)03-0022-05

Fuzzing Mathematics Method in the Comprehensive Assessment of Food Contamination*

Zhou Zeyi^{1,2}, Fan Yaobo¹, Wang Minjian¹ (1. Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China E-mail: m jw ang@m ail. rcees. ac. cn; 2. National Research Center for CRM, Beijing 100013, China)

Abstract: The paper described a method of fuzzing mathematics in the application of food contamination comprehensive assessment. A fuzzing mathematics model of food contamination comprehensive assessment was constructed, which was proved to be useful in the comprehensive assessment of heavy metals, pesticides, polycyclic aromatic hydrocarbons, nitrate and nitrite contamination in the vegetables, fruits and meats in Beijing city.

Keywords: food contamination, comprehensive assessment, fuzzing mathematics.

模糊数学方法已用于水质污染、大气污染和多目标规划等综合评价方面^[1,2]。如何利用大量的食品及污染物的背景信息、监测数据、试验研究成果等来评价食品污染水平, 得到优先监测污染物和优先监测食品品种一直是人们关注的问题。文献报道的食品污染评价方法往往只根据各污染物的限量标准进行逐级评价, 对多污染物的综合评价主要是主观比较判断, 没有量化比较的概念^[3~5]。近年来, 国外一些研究机构^[6,7]在确定优先监测污染物和优先监测食品品种时, 对各评价因素确定评价打分细则, 进行量化比较打分, 最后将各评价因素的打分结果以乘积的形式计算, 根据计算值的大小进行排序, 这种办法虽然很有效, 但理论上无法解释^[6,7]。本文将研究如何利用模糊数学中的评价方法来综合评价食品污染水平, 并将该方法应用于北京市主要蔬菜、水果和肉类中重金属、农药、多环芳烃、硝酸盐和亚硝酸盐污染调查结果的综合评价, 得出了北京市食品污染的主要污染物和主要污染食品。

1 模糊数学的评价方法

模糊数学是描述没有明确界限的模糊事物的数学分析方法。利用模糊数学中的模糊变换可以对各有关

因素进行综合评价。综合评价问题也是多目标决策问题。用模糊数学方法进行综合评价时, 应具备 3 个条件:

- (1) 因素集合 $U = \{u_1, u_2, \dots, u_n\}$, 共有 n 个因素。
- (2) 评价(评语)集 $V = \{v_1, v_2, \dots, v_m\}$, 有 m 个评价。即代表评价等级、分类的集合。
- (3) 评价矩阵 设第 i 个因素的单因素评价为 $i = (r_{i1}, r_{i2}, \dots, r_{im})$, 它可以看作是 V 上的一个模糊子集, 其中 r_{ik} 表示第 i 个因素的评价对于第 k 个等级的隶属度(隶属度: 属于或相关的程度), n 个因素的总的评价矩阵为:

$$\underline{R} = \begin{bmatrix} \underline{R}_1 \\ \underline{R}_2 \\ \vdots \\ \underline{R}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1m} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2m} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ r_{n1} & r_{n2} & \cdots & r_{nm} \end{bmatrix}$$

(1)

在进行综合评价时, 要考虑各个因素对评价等级

* 国家“九五”科技攻关课题: 96-120-80(The National Key Science and Technology Project during the Ninth Five-Year Plan Period, num bered: 96-120-80)
* 通讯联系人
作者简介: 周泽义(1966~), 男, 安徽巢县人, 理学博士, 工程师, 分析化学专业。
收稿日期: 1999-07-24

所起作用的大小,这种评价作用就形成了因素集合 U 上的一个模糊子集 $\underline{A}$:

$$\underline{A} = (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n)$$

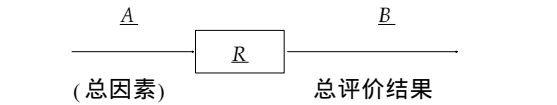
(2)

其中 α_i 为 u_i 对 $\underline{A}$ 的隶属度,它就是单独考虑因素 u_i 对评价等级所起作用大小的度量,代表了根据单因素 u_i 评价等级的能力,其极值根据经验归纳值给出.称 U, V, R 为评价空间.给定 $\underline{A}, R$ 后,即可进行综合评价,这种运算一般写成如下形式:

$$\underline{B} = \underline{A} \times R$$

(3)

用图框可表示为:



根据对 $\underline{A} \times R$ 取不同类型的运算,就构成了不同的评价模型.在食品污染综合评价中笔者将采用下面的评价模型:记作 $M(\bullet, \oplus)$, 其中 $\oplus$ 表示环和,其定义为:

$$\underline{A} \oplus R = \min(100, \underline{A} + R)$$

(4)

由此可以看出环和不超过 100,用 $\sum_{i=1}^n$ 表示对 n 个数在 $\oplus$ 运算下的求和:

$$b_j = \sum_{i=1}^n \alpha_i r_{ij} = \min(100, \sum_{i=1}^n \alpha_i r_{ij})$$

(5)

上述模型有下面 2 个特点:①在决定各因素的评价对等级 v_j 的隶属度 b_j 时,考虑了所有因素 $u_i(i=1, 2, \dots, n)$ 的影响;②由于同时考虑所有因素,所以各 α_i 具有权

系数的含义,因此 α_i 应满足归一化的条件,即 $\sum_{i=1}^n \alpha_i = 1$.可以说这个模型代表“加权平均型”的综合评价,简单的说,该模型的物理意义是加权平均,数学运算变成一般矩阵乘法.

表 2 污染物的毒性量化打分原则^[6]

毒 性 征 状	量化打分(D 值)
对人有显著致癌性或动物有强烈致癌性,对遗传基因有损害或能够进行毒性复制.	10
对动物有显著致癌性,体内试验有致突变性或能够毒性复制或对人的体细胞具有遗传损害性.	9
至少有一项试管致突变性试验呈阳性或体内复制筛余物试验呈阳性或对动物有显著致癌性,而对人的致突变性或毒性复制不明确或不确定.	8
对呼吸道显著敏感或口服致毒量在 90d 研究中小于 5mg/kgbw·d ⁻¹ .	7
对皮肤显著敏感或口服致毒量在 90d 研究中小于 5mg/kgbw·d ⁻¹ .	6
没有数据表明具有致突变性或毒性复制或显著累积效应.	5 ¹⁾
有一项体内致突变试验呈阴性但至少有一项试管试验呈阳性或体内复制筛余物试验呈阴性或无重复毒性剂量数据.	4
致畸变性呈阴性或口服对鼠半致死量 LD ₅₀ ≤25mg/kg.	3
试管基因突变试验呈阴性或仅使染色体异常或仅对生育力有影响,或口服对鼠半致死量 LD ₅₀ ≤2000mg/kg,或对皮肤有腐蚀或对眼睛严重损伤.	2
使眼,呼吸道或皮肤感到不舒服,或口服对鼠半致死量 LD ₅₀ ≤200mg/kg.	1

1)默认值:对无法确定毒性大小的以默认值计.

2 北京市食品污染调查的综合评价

2.1 评价因素

北京市食品污染调查中,共调查了土豆,大葱,大白菜,黄瓜,洋白菜,番茄,茄子,冬瓜,葱头,芹菜,西瓜,柑橘,苹果,香蕉,梨和猪肉 16 种食品;每种食品均测定了 DDT,666,敌敌畏,敌百虫,乐果,氧化乐果,甲拌磷,对硫磷,甲基对硫磷,辛硫磷,马拉硫磷,铜,镉,汞,铅,铬,锰,镍,砷,蒽,苯并[a]蒽,萤蒽,苯并[a]芘,硝酸盐和亚硝酸盐 25 种污染物.要从这 16 种食品和 25 种污染物中评价筛选出主要污染食品和主要污染物,就必须综合考虑下面这些因素:如品种的多样性、污染物的多样性、各种污染物的毒性差异、各种污染物在环境中的富集差异以及各食品品种消费量的不同等,并对这些因素进行综合评价.评价因素的量化比较打分将按照表 1 进行.

表 1 评价因素量化比较^[6,7]

评 价 因 素	影响因子大小打分
污染指数(I)	I=1~10
超标率(C)	C=1~10
污染物的毒性(D)	D=1~10
污染物在环境中的富集(E): 污染物 的暴露时间和富集行为	E=1~5
食品的消费量(V)	V=1~6

各污染物的毒性(D)量化打分原则和打分结果见表 2~3;各污染物在环境中的富集(E)打分原则和打分结果见表 4~5.

各类食品的消费量(V)量化打分原则为:销售量小于 5 万 t 为 1;5~8 万 t 为 2;8~11 万 t 为 3;11~14 万 t 为 4;14~17 万 t 为 5;大于 17 万 t 为 6. 表 6 为所要研究的 16 种食品量化打分结果.

表 3 污染物的毒性量化打分结果^[8,9]

污染物	D 值	污染物	D 值	污染物	D 值
敌敌畏	8	硝酸盐	7	铜	7
敌百虫	8	亚硝酸盐	9	锌	2
乐果	8	蒽	8	镉	8
氧化乐果	8	苯并[a]蒽	8	汞	7
甲拌磷	7	萤蒽	8	铅	8
对硫磷	9	苯并[a]芘	8	铬	7
甲基对硫磷	9	666	10	锰	8
辛硫磷	7	DDT	9	砷	8
马拉硫磷	9			镍	8

表 4 污染物在环境中的富集量化打分原则^[6,7]

生物富集因子(BCF)	logK _{ow} ¹⁾	量化打分(E 值)
小于 10	小于 2	1
10~ 100	2~ 3	2
100~ 1, 000	3~ 4	3
1, 000~ 10, 000	4~ 5	4
大于 10, 000	大于 5	5

¹⁾ logK_{ow}: 正辛醇-水分配系数.

表 5 污染物在环境中的富集量化打分结果^[10~ 16]

污染物	E 值	logK _{ow}	BCF 值 ¹⁾	重金属	E 值	logK _{ow}	BCF 值 ¹⁾
666	5	5.15		对硫磷	3	3.76	
DDT	5	5.7		甲基对硫磷	2	2.94	
蒽	4	4.54		辛硫磷	4	4.39	
苯并[a]蒽	5	5.91		马拉硫磷	2	2.84	
萤蒽	5	5.33		铜	1		< 1
苯并[a]芘	5	6.04		锌	1		< 1
硝酸盐	1		< 10	镉	1		< 1
亚硝酸盐	1		< 10	汞	1		< 1
敌敌畏	1	1.47		铅	1		< 1
敌百虫	1	0.43		铬	1		< 1
乐果	1	0.77		锰	1		< 1
氧化乐果	1	0.80		砷	1		< 1
甲拌磷	3	3.83		镍	1		< 1

¹⁾ 生物富集因子.

表 6 食品的消费量化打分结果/万 t

品种	土豆	大葱	白菜	黄瓜	洋白菜	蕃茄	冬瓜	茄子	葱头	芹菜	西瓜	柑橘	苹果	香蕉	梨	瘦肉
消费量	20.6	12.3	16.9	12.8	11.3	10.6	11.7	7.85	8.16	8.44	48.0	14.1	12.9	7.44	4.50	15
量化(V 值)	6	4	5	4	4	3	4	2	3	3	6	5	4	2	1	5

各污染物的污染指数(I)和超标率(C)打分原则见表 7.

表 7 污染指数和超标率打分原则

污染指数	量化打分 (I 值)	超标率	量化打分(C 值)
小于 0.1	1	小于 0.1	1
0.1~ 0.2	2	0.1~ 0.2	2
0.2~ 0.3	3	0.2~ 0.3	3
0.3~ 0.4	4	0.3~ 0.4	4
0.4~ 0.5	5	0.4~ 0.5	5
0.5~ 0.6	6	0.5~ 0.6	6
0.7~ 0.8	7	0.7~ 0.8	7
0.8~ 0.9	8	0.8~ 0.9	8
0.9~ 1.0	9	0.9~ 1.0	9
1.0~ 2.0	11	9.0~ 10.0	11
2.0~ 4.0	12	10.0~ 12.0	12
4.0~ 6.0	13	12.0~ 14.0	13
6.0~ 8.0	14	14.0~ 16.0	14
8.0~ 10.0	15	16.0~ 18.0	15
10.0~ 12.00	16	18.0~ 20.0	16
12.0~ 14.0	17	20.0~ 22.0	17
> 14.0	18	> 22.0	18

2.2 评价方法 1

2.2.1 主要污染物的评价筛选

采用模糊数学中的模糊变换对 25 种污染物进行综合评价.

(1) 评价因素集合 $U = \{ \text{某类污染物加权污染指数} (I_i); \text{某类污染物加权超标率} (C_i); \text{污染物毒性} (D); \text{污染物在环境中的富集} (E) \}$, 共有 4 个因素.

(2) 评价集 $V = \{ \text{DDT, 666, 敌敌畏, 敌百早, 乐果, 氧化乐果, 甲拌磷, 对硫磷, 甲基对硫磷, 辛硫磷, 马拉硫磷, 铜, 隔, 汞, 铅, 铬, 锰, 镍, 砷, 蒽, 苯并[a]蒽, 萤蒽, 苯并[a]芘, 硝酸盐, 亚硝酸盐} \}$, 25 个污染物的评价.

(3) 评价矩阵, 4 个评价因素的总的评价矩阵为:

$$\underline{R} = \begin{bmatrix} \underline{R}_1 \\ \underline{R}_2 \\ \underline{R}_3 \\ \underline{R}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{125} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{225} \\ r_{31} & r_{32} & \cdots & r_{325} \\ r_{41} & r_{42} & \cdots & r_{425} \end{bmatrix} \quad (6)$$

上述矩阵 r_{ij} 表示各评价因素量化打分值, 其中 $i =$

1~4 表示评价因素,依次为:污染指数(I),超标率(C),污染物的毒性(D),污染物在环境中的富集(E); $j=1\sim25$ 表示污染物的种类,依次为:DDT,666,敌敌畏,敌百虫,乐果,氧化乐果,甲拌磷,对硫磷,甲基对硫磷,辛硫磷,马拉硫磷,铜,隔,汞,铅,铬,锰,镍,砷,蒽,苯并[a]蒽,萤蒽,苯并[a]芘,硝酸盐,亚硝酸盐.

(4) 确定各因素对评定结果所起作用大小的模糊子集 $\underline{A}$:

$$\underline{A} = (\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4) \tag{7}$$

其中 α_i 为单独考虑因素 u_i 对评价等级所起作用大小的度量,代表了单因素 u_i 评价等级的能力,在满足 α_i 归一化的条件前提下,并考虑到各因素对评价等级所起作用大小相等,则: $\underline{A} = (\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4) = (0.25, 0.25, 0.25, 0.25)$.

(5) 按照 $\underline{B} = \underline{A} \times \underline{R}$ 计算矩阵的直积,得出评价结果:

$$\begin{aligned} \underline{B} &= \underline{A} \times \underline{R} = [\alpha_1 \quad \alpha_2 \quad \alpha_3 \quad \alpha_4] \\ &\times \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{125} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{225} \\ r_{31} & r_{32} & \cdots & r_{325} \\ r_{41} & r_{42} & \cdots & r_{425} \end{bmatrix} \\ &= [\alpha_1 r_{11} + \cdots + \alpha_4 r_{41}) \cdots (\alpha_1 r_{125} + \cdots + \alpha_4 r_{425})] \end{aligned} \tag{8}$$

对上式计算得到的 $\underline{B}$ 矩阵中元素的大小进行排序就可以得到 25 种被调查污染物的污染程度排序结果.

2.2.2 主要污染食品的评价筛选

采用模糊数学中的模糊变换对 16 种被调查的食品污染程度进行综合评价.

(1) 评价因素集合 $U = \{\text{某类食品某类污染物平均污染指数}(\overline{I}_i, \text{共 25 种污染物的污染指数}); \text{某类食品某类污染物超标率}(C_i, \text{共 25 种污染物的超标率}); \text{食品的消费量}(V)\}$, 共有 51 个因素;

(2) 评价集 $V = \{\text{土豆, 大葱, 大白菜, 黄瓜, 洋白菜, 番茄, 茄子, 冬瓜, 葱头, 芹菜, 西瓜, 柑橘, 苹果, 香蕉, 梨, 猪肉}\}$, 16 种食品的评价.

(3) 评价矩阵, 51 个评价因素的总的评价矩阵为:

$$\underline{R} = \begin{bmatrix} \underline{R}_1 \\ \underline{R}_2 \\ \vdots \\ \underline{R}_{51} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{116} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{216} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ r_{511} & r_{512} & \cdots & r_{5116} \end{bmatrix} \tag{9}$$

上述矩阵 r_{ij} 表示各评价因素量化打分值, 其中 $i=1\sim51$ 表示评价因素, 依次为: 某类食品某类污染物平均污染指数($\overline{I}_i$), 共 25 种污染物的污染指数; 某类食品

某类污染物超标率(C_i), 共 25 种污染物的超标率; 食品的消费量(V); $j=1\sim16$ 表示 16 种食品, 依次为: 土豆、大葱、大白菜、黄瓜、洋白菜、番茄、茄子、冬瓜、葱头、芹菜、西瓜、柑橘、苹果、香蕉、梨、猪肉.

(4) 确定各因素对评定结果所起作用大小的模糊子集 $\underline{A}$:

$$\underline{A} = (\alpha_1, \alpha_2, \cdots, \alpha_{51}) \tag{10}$$

其中 α_i 为单独考虑因素 u_i 对评价等级所起作用大小的度量,代表了单因素 u_i 评价等级的能力,在满足 α_i 归一化的条件前提下,并考虑到各因素对评价等级所起作用大小相等,则: $\underline{A} = (\alpha_1, \alpha_2, \cdots, \alpha_{51}) = (0.0196, 0.0196, \cdots, 0.0196)$.

(5) 按照 $\underline{B} = \underline{A} \times \underline{R}$ 计算矩阵的直积,得出评价结果:

$$\begin{aligned} \underline{B} &= \underline{A} \times \underline{R} = [\alpha_1 \quad \alpha_2 \quad \cdots \quad \alpha_{51}] \\ &\times \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{116} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ r_{511} & r_{512} & \cdots & r_{5116} \end{bmatrix} \\ &= [\alpha_1 r_{11} + \cdots + \alpha_{51} r_{511}) \cdots (\alpha_1 r_{116} + \cdots + \alpha_{51} r_{516})] \end{aligned} \tag{11}$$

对上式计算得到的 $\underline{B}$ 矩阵中元素的大小进行排序就可以得到 16 种被调查食品的污染程度排序结果.

2.3 评价方法 2

为进行比较,按照文献[6,7]提供的评价方法,即用乘积的方法模型将各评价因素打分结果进行相乘计算,根据计算的结果大小进行排序.

(1) 主要污染物的评价筛选 北京市食品污染调查主要污染物可通过计算下式进行排序:

$$R_i = \overline{I}_i \times C'_i \times E_i \times D_i \tag{12}$$

式中, $\overline{I}_i$ 为加权污染指数量化打分值; C'_i 为加权超标率量化打分值; D_i 为某类污染物的毒性量化打分值; E_i 为污染物在环境中的富集量化打分值.

根据 R_i 值的大小对污染物进行排序以确定污染较重的污染物. 筛选结果与 2.2 评价方法 1 的主要污染物的筛选结果基本一致.

(2) 主要污染食品的评价筛选 北京市食品污染调查主要污染食品可通过计算下式进行排序:

$$F_j = V_j \times \sum_{i=1}^N (\overline{I}_i \times C_i \times D_i \times E_i) \tag{13}$$

式中, $\overline{I}_i$ 为某类食品某类污染物平均污染指数的量化打分值; C_i 为某类食品某类污染物超标率量化打分值; D_i 为某类污染物毒性量化打分值; E_i 为某类污染物在环境中的富集量化打分值; $N=25$; V_j 为某类食品消费

量打分值。

根据 F_j 值的大小对主要污染食品进行排序以确定污染较重的食品。筛选结果与 2.2 评价方法 1 的主要污染食品的筛选结果基本一致。

食品环境污染的综合评价一直是食品污染研究领域亟待解决的论题, 本文从模糊数学的研究方法入手, 从理论上找到了一些依据, 尝试了模糊数学方法在食品环境污染综合评价中的应用。

参考文献

- 1 水本雅晴(日), 刘凤璞, 王铭文, 解恩泽编译. 模糊数学及其应用. 北京: 科学出版社, 1986. 1~ 36.
- 2 钱仲范, 刁颖敏. 环境数学. 北京: 中国环境科学出版社, 1995. 308~ 357.
- 3 许宇飞. 沈阳市主要农产品污染调查及防治途径研究. 农业环境保护, 1996, **15**(1): 32~ 35.
- 4 潘洁, 陆文龙. 天津市郊蔬菜污染状况及对策. 农业环境与发展, 1997, **14**(4): 21~ 22.
- 5 赵玲, 董爱萍. 宁波市蔬菜污染状况及防治对策. 上海环境科学, 1996, **15**(1): 42~ 44.
- 6 Steven J Wearne, Martin G de M Gem et al. Prioritisation Scheme to Identify Manufactured Organic Chemicals as Potential Contaminants of Food. *ESPR-Environ. Sci & Pollut. Res.*, 1996, **3**(2): 83~ 88.
- 7 Donald V Reed. The FDA Surveillance Index for Pesticides: Establishing Food Monitoring Priorities Based on Potential Health Risk. *J. ASSOC. OF. ANAL. CHEM.*, 1985, **68**(1): 1634~ 1649.
- 8 国家环境保护局有毒化学品管理办公室、化工部化学化工研究院环境保护研究所编. 化学品毒性法规环境数据手册. 北京: 中国环境科学出版社, 1992. 15~ 288.
- 9 农业部农药鉴定所主编. 新编农药手册. 北京: 农业出版社, 1989. 52~ 362.
- 10 沈明珠, 翟宝杰等. 蔬菜硝酸盐累积研究. 园艺学报, 1982, **9**(4): 41~ 47.
- 11 Rene P T Janssen, Leo Posthum a et al. Equilibrium partition of heavy metals in Dutch field soils. II. Prediction of metal accumulation in earthworms. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 1997, **16**(12): 2479~ 2488.
- 12 Temara, Warnau M, Jangoux M, Dubois P. Factors influencing the concentrations of heavy metals in the asteroid *Asterias rubens* L. (*Echinodermata*). *The Science of the Total Environment*, 1997, **203**: 51~ 63.
- 13 Patil G S. Prediction of aqueous solubility and octanol-water partition coefficient for pesticides based on their molecular structure. *Journal of Hazardous Materials*, 1994, **36**: 35~ 43.
- 14 Wild S R and Jones K C. Organic chemicals entering agricultural soils in sewage sludges: screening for their potential to transfer to crop plants and livestock. *The Science of the Total Environment*, 1992, **119**: 85~ 119.
- 15 Sim on R Wild, Angus J Beck and Kevin C Jones. Prediction the fates of non-ionic organic chemicals entering agricultural soils following. *Land Contamination and Reclamation*, 1995, **3**(3): 578~ 592.
- 16 Keith Chamberlain, Avis A et al. 1-Octanol/Water Partition Coefficient (K_{ow}) and pK_a for Ionisable Pesticides Measured by a pH Metric Method. *Pesti Sci.*, 1996, **47**: 265~ 271.