

规模化猪场废水灌溉农田土壤重金属污染的模糊综合评价

李晓光¹,周其文¹,张 蕾²,张克强¹,雷英春³,黄治平¹,杨 鹏¹

(1.农业部环境保护科研监测所,天津 300191 2.天津水工业工程设备有限公司,天津 300070 3.太原工业学院,山西 太原030008)

摘 要 利用 GPS 定位选取河北省安平县京安猪场废水连续灌溉 8 a 的污灌区的 36 个样点,采用模糊综合评价模型对规模化猪场废水长期灌溉农田土壤重金属(Zn、Cu、Pb、Cr 和 As)污染状况进行了评价。结果表明,研究区 36 个采样点的土壤环境质量级别绝大部分为 I 级(清洁),土壤未受到严重污染,但个别采样点土壤环境质量级别达到 III 级(轻污染),呈现污染趋势,说明长期灌溉猪场废水,存在一定的土壤重金属污染风险。

关键词 猪场废水;土壤;重金属污染;模糊综合评价模型

中图分类号:X825 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2009)03-0502-06

Application of Fuzzy Comprehensive Assessment to Heavy Metals Pollution in Farmland Soils Irrigated with Swine Wastewater

LI Xiao-guang¹, ZHOU Qi-wen¹, ZHANG Lei², ZHANG Ke-qiang¹, LEI Ying-chun³, HUANG Zhi-ping¹, YANG Peng¹

(1.Institute of Agro-environmental Protection, MOA, China, Tianjin 300191, China; 2.Tianjin Water Industry Engineering Equipment Co., Ltd, Tianjin 300070, China; 3.Taiyuan Institute of Technology, Taiyuan 030008, China)

Abstract With the rapid development of scale swine-farms in China, the swine waste which is brought by intensive hoggerly is disposed in farmland soils around swine farm region. Due to plentiful heavy metals in swine wastewater, heavy metals can be accumulated in soils if long-term and large quantity swine wastewater is applied. The assessment of heavy metal pollution is an important issue in the research of heavy metal pollution in soil. According to the graduated feature and fuzzy feature in the degree of soil heavy metals' pollution, the fuzzy comprehensive assessment model was used to assess the heavy metals(Zn, Cu, Pb, Cr, and As) pollution in soils. 36 soil samples in the plough horizon(0~20 cm) of irrigation farmland which had been applied swine wastewater of Jing'an swine-farm 8 years were collected using GPS technology in An'ping County, Hebei Province, and the fuzzy comprehensive assessment model was used to evaluate the heavy metals pollution in soils. The results indicated that most of the samples' soil environmental quality were belonged to cleanliness(grade one), while two soil samples were on the level of slight pollution(grade three)and presented the pollution tendency. After 8 years swine wastewater application, attention should be paid to the pollution risks of heavy metal in the soil.

Keywords swine wastewater; soil; heavy metal pollution; fuzzy comprehensive assessments model

适量的 Zn、Cu 和 As 等重金属元素添加剂有助于畜禽生长,带来良好经济效益。但大部分重金属元素会直接通过动物粪便排出,致使畜禽粪便中重金属元素含量提高。利用猪场废水灌溉农田时,废水中的重金属也会随之进入土壤,当土壤重金属含量超过其

环境容量时,就会对作物起毒害作用,影响作物品质和产量,并通过食物链被植物、动物数十倍的富集,产生不可预见的后果,并最终危害动物和人类的健康和生命^[1-4]。过量的 Zn、Cu、Pb、Cr 和 As 对人体有明确的毒害作用,目前针对土壤重金属污染的研究受到国内外学者的普遍关注^[5-7]。

土壤重金属污染的评价方法有很多,如单因子指数评价法、内梅罗综合污染指数法、地积累指数法^[8]、灰色聚类分析法^[9-10]、层次分析法^[11-12]和模糊数学法等^[13-17]。

模糊综合评价法自 1965 年由美国控制论专家查

收稿日期 2008-05-26

基金项目:“十一五”国家科技支撑课题(2006BAD17B02);中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(2006-aepi-11)

作者简介:李晓光(1982—),女,山东济南人,硕士研究生,主要从事环境影响评价研究。E-mail: xgli1982@163.com

通讯作者:周其文 E-mail: zhouqiwen@cae.org.cn

德(Zadeh L A)提出以来,得到广泛应用,其评价对象涉及自然科学和社会科学的众多领域。该方法是一种以模糊推理为主的定性与定量相结合、精确与非精确相统一的分析评价方法,通过构造等价模糊子集把反映被评价事物的指标进行定量,然后利用模糊变换原理综合各指标得到综合评价结果。

土壤重金属污染级别是一些模糊的概念,而模糊综合评价法通过隶属度描述土壤重金属污染情况的渐变性和模糊性,能有效解决模糊边界问题,控制评价结果的误差,并且其分辨率明显高于其他评价方法^[17-20]。

模糊综合评价法用于土壤重金属污染评价的文章多见于工业废水灌溉或矿区土壤重金属污染,而关于猪场废水灌溉农田重金属污染模糊综合评价却很少见有报道。

开展规模化猪场废水长期灌溉农田土壤重金属污染综合评价,能客观反映土壤重金属污染状况及存在的环境风险,对污染土壤进行科学管理、修复和治理,防止污染进一步发展和扩大有重要意义。

本文利用 GPS 定位系统,以河北省安平县京安种猪园区周边连续灌溉 8 a 猪场废水的污灌区为研究区,采样点为 36 个,以未灌溉猪场废水和施用化肥的苜蓿地和林地为背景区,背景区采样点为 5 个,采用模糊综合评价法对规模化猪场废水长期灌溉农田土壤重金属 (Zn、Cu、Pb、Cr 和 As) 污染状况进行评价。

1 模糊综合评价模型的建立

模糊综合评价模型主要由 5 个步骤构成,即建立评价因子集、建立评价集、构建隶属度函数、确定权重、模糊综合运算^[21]。

1.1 建立评价因子集

选取评价因子构成评价因子集 $U=\{u_1, u_2, u_3, \dots, u_m\}$, m 代表有 m 个评价指标。

1.2 建立评价集

评价集 $V=\{v_1, v_2, v_3, \dots, v_n\}$, 是评价等级的集合,每一个等级代表一个模糊子集,共有 n 个评价等级。

1.3 确定隶属函数

隶属度用来描述土壤污染状况的模糊界限,并通过隶属函数的计算来确定。隶属函数一般采用降半梯形分布来描述。假设土壤重金属评价的因子 m 个,土壤环境质量标准 n 个级别。隶属度 r_{ij} 按式(1)计算:

$$r_{ij} = \begin{cases} 1 & c_i \leq S_{ij} \\ (S_{ij+1} - c_i) / (S_{ij+1} - S_{ij}) & S_{ij} \leq c_i \leq S_{ij+1} \\ 0 & c_i \geq S_{ij+1} \end{cases} \quad (1)$$

式中 r_{ij} 表示第 i 种污染物的环境质量数值可以被评价为第 j 类环境质量的的可能性(即 i 对 j 的隶属度,它们的关系即为隶属函数);

c_i 为第 i 个污染因子实测浓度;

S_{ij} 为第 i 个污染因子的第 j 级环境质量标准值 ($i=1, 2, 3, \dots, m; j=1, 2, 3, \dots, n$)。

由此可以评价因子即指标 i 对级别 j 的隶属度矩阵:

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{m1} & r_{m2} & \dots & r_{mn} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中 m 表示评价因子数 $i=1, 2, 3, \dots, m$;

n 表示土壤质量级别 $j=1, 2, 3, \dots, n$ 。

1.4 确定各评价因子权重

权重是衡量评价因子集中某一因子对土壤污染程度影响相对大小的量。权重系数越大,说明该因子对土壤的影响越大。一般通过计算超标比来确定各因子权重,即采用反映土壤各种重金属元素相对含量大小的加权法,该方法在一定程度上反映了污染超标轻重对因子权重的影响^[19]。

对于偏小型分布指标第 i 个指标的权重为:

$$I_i = c_i / \bar{S}_i \quad (3)$$

对于偏大型分布指标第 i 个指标的权重为:

$$I_i = \bar{S}_i / c_i \quad (4)$$

式(3)和式(4)中 c_i 为各项指标的实测值;

\bar{S}_i 为第 i 项指标的标准限值的平均值。

当每个评价指标的超标比按公式(3)、(4)计算完后,所得权重可能大于 1,因而需要使用下式对各项权重进行归一化处理:

$$W_i = I_i / \sum_{i=1}^m I_i \quad (5)$$

由此得到了权重集:

$$W = \{W_1, W_2, W_3, \dots, W_m\} \quad (6)$$

式(5)和式(6)中 W_i 为各项监测指标进行归一化后的权重值;

m 为评价指标数。

1.5 模糊综合评价

确定了模糊评价矩阵 R 和权重集 W 后,得到以下模糊综合评价模型 B

$$B=W \circ R=(w_1, w_2, \dots, w_m) \circ \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{m1} & r_{m2} & \dots & r_{mn} \end{pmatrix} =$$

$$(b_1, b_2, \dots, b_n) \quad (7)$$

○为模糊算子,有4种模糊算子可以计算 b_j ,即 $M_1(\wedge, \vee)$, $M_2(\cdot, \oplus)$, $M_3(\cdot, \vee)$, $M_4(\wedge, \oplus)$ 。本文采用加权平均模型即 $M_2(\cdot, \oplus)$ 来计算,这是因为这种模型能对所有因素依权重大小均衡兼顾,可以避免丢失过多的信息,突出考虑诸污染因子的综合作用。而其他模型,无论是按小中取大 $M_1(\wedge, \vee)$,还是突出主导因子都会抹去其他因子的影响,不能真正反映客观实际^[22]。

$$\text{从而得到 } b_j = \sum_{i=1}^m w_i \cdot r_{ij} = \min\{1, \sum_{i=1}^m w_i \cdot r_{ij}\} \quad (8)$$

若 $b_j = \max(b_1, b_2, \dots, b_n)$,根据最大隶属度原则,则待评价对象的土壤环境质量等级为第 j 类。

2 模型应用

2.1 评价区域概况

京安猪场建于1998年,位于河北省安平县城东5 km处的京安种猪园区,年产瘦肉型商品猪10万头,种猪3万头,占地面积约4 hm²,排放粪污量约2 000 m³·d⁻¹。京安猪场清粪方式为水冲粪,粪污直接冲至污水沟,湿粪从污水沟清出送入肥料加工厂,剩余污水排入污水塘,浇灌周边约100 hm²农田土壤。周边农田连续灌溉了8 a,猪场废水,废水施用量为2 400~3 600 m³·hm⁻²·a⁻¹,灌溉方式为漫灌。猪场废水重金属含量见表1。

表1 猪场废水重金属含量(mg·kg⁻¹)

重金属	Zn	Cu	Pb	Cr	As
含量	2.13±0.32	1.24±0.15	0.00±0.00	0.17±0.02	0.31±0.12

2.2 样品采集与分析

2006年6月,在研究区利用GPS定位选取41个样点(东经115°32'46"~115°35'02",北纬38°13'22"~38°13'42")其中污灌区36个样点,背景区5个样点,采样点均远离公路300 m,每一采样点均取1 m²内3个点的土壤混匀,四分法采集约1.0 kg土壤样品,采样深度均为20 cm。

Zn、Cu、Pb、Cr和As全量测定为称取过100目烘干土壤2.000 0 g,经过盐酸-硝酸-高氯酸消解,消解

液过滤后应用原子吸收分光光度计(PE5000)测定,其中As全量应用原子荧光光谱仪测定。

背景区为首蓿地和林地,未灌溉猪场废水,地势比较平坦,土壤质地比较均一,土壤中重金属含量的变异系数小于0.5,基本能反映未灌溉猪场废水和使用化肥的土壤重金属背景特征。因此,使用首蓿地和林地的土壤重金属含量值作为未灌溉猪场废水的土壤背景值。背景区重金属含量见表2。

表2 土壤重金属含量背景值(mg·kg⁻¹)

重金属	Zn	Cu	Pb	Cr	As
含量	84.18±29.06	23.50±7.40	5.36±3.61	30.12±14.11	9.62±2.19

2.3 建立评价因子集

本文选取土壤重金属Zn、Cu、Pb、Cr、As作为评价因子,评价因子集为 $U=\{Zn, Cu, Pb, Cr, As\}$,评价区土壤重金属含量实测数据见表3。

2.4 建立评价集

研究表明,不加考虑的选用国家《土壤环境质量标准》(GB15618—1995)进行土壤环境评价往往会出现偏差^[23]。鉴于此,笔者参考有关文献^[17,21],采用土壤重金属元素背景值和临界含量确定的评价标准(表3)。根据上述标准,将土壤质量分为5个级别,即清洁()、尚清洁()、轻度污染()、中度污染()、重度污染(),则评价集为 $V=\{ , , , , \}$ 。

2.5 确定隶属度函数

根据表3、表4的数据,利用公式(1)计算各重金属元素对应于各土壤重金属环境质量等级的隶属函数,得到模糊关系矩阵。以第1个采样点为例,经计算得模糊关系矩阵为:

$$R_1 = \begin{pmatrix} 0.727 & 0.273 & 0 & 0 & 0 \\ 0.768 & 0.232 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.587 & 0.413 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (9)$$

限于篇幅,其他35个采样点的隶属矩阵不一列出。

2.6 确定各评价因子权重

重金属各项指标都是偏小型分布指标,按公式(3)将表3和表4数据代入计算,得到各个采样点各重金属评价指标的权重值(表5)。

2.7 模糊综合评价

将各采样点模糊关系矩阵及对应的权重系数代入式(7)确定的映射关系,得到各采样点对评价等级的

表 3 评价区土壤重金属含量实测值($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)Table 3 Heavy metal contents in soil($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

采样点	Zn	Cu	Pb	Cr	As
1	92.71	31.21	5.21	21.02	12.89
2	82.04	22.61	6.33	19.4	10.86
3	120.72	31.38	5.32	24.76	9.77
4	97.61	26.56	5.24	24.57	10.44
5	78.24	24.76	3.88	23.49	9.77
6	93.5	22.75	5.3	21.59	9.43
7	77.91	19.41	0	19.14	8.43
8	72.87	21.88	9.8	20.73	9.03
9	117	23.23	3.5	30.17	9.22
10	90.79	22.94	4.55	19.99	9.28
11	77.3	21.64	1.1	22.33	10.13
12	132.31	23.07	7	26.57	10.21
13	135.69	25.91	0	21.58	10.07
14	97.97	27.4	0	28.18	10.85
15	98.59	27.85	3.95	22.57	10.5
16	215.64	53.33	0.7	28.3	11.6
17	168.97	38.05	33.35	24.79	10.91
18	129.76	23.84	11.5	24.48	8.99
19	101.94	38.05	0	30.13	8.22
20	243.45	56.07	14.98	36.98	10.33
21	154.76	34.57	0	23.04	8.64
22	111.84	30.7	2.93	30.48	10.62
23	90.38	34.51	7.4	29.98	11.97
24	81.41	23.33	6.28	22.02	10.34
25	81.41	29.68	7.15	36.39	11.03
26	91.85	22.6	6.38	23.18	9.85
27	77.37	49.04	7	36.95	11.58
28	138.83	41.76	8.03	42.39	13.43
29	112.04	31.95	8.13	44.61	12.78
30	104.87	30.73	7.05	47.5	10.28
31	116.52	35.34	8	36.92	11.24
32	88.37	33.99	7.75	45.85	11.71
33	93.88	23.69	7.03	29.58	10.34
34	76.62	66.9	8.48	45.52	11.5
35	148.96	44.27	7.95	37.1	12.05
36	112.17	76.68	9.38	46.03	13.45

表 4 土壤环境质量分级标准($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)Table 4 Classification standards of soil environmental quality($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

元素	清洁	尚清洁	轻污染	中污染	重污染
Zn	83.68	116.75	240	560	800
Cu	28.37	40.63	120	280	400
Pd	23.35	36.09	150	350	500
Cr	74.88	99.54	150	350	500
As	10	17	30	50	70

表 5 各采样点各重金属评价因子权重

Table 5 Weighing of every assessment factor in each sampling position

采样点	Zn	Cu	Pb	Cr	As
1	0.281	0.196	0.027	0.098	0.398
2	0.293	0.167	0.038	0.106	0.395
3	0.364	0.196	0.027	0.114	0.299
4	0.32	0.18	0.029	0.123	0.348
5	0.288	0.189	0.024	0.133	0.366
6	0.335	0.169	0.032	0.119	0.344
7	0.334	0.172	0	0.126	0.367
8	0.282	0.175	0.064	0.123	0.355
9	0.376	0.155	0.019	0.149	0.301
10	0.335	0.175	0.029	0.113	0.348
11	0.296	0.172	0.007	0.131	0.394
12	0.393	0.142	0.035	0.121	0.308
13	0.418	0.165	0	0.102	0.315
14	0.318	0.184	0	0.14	0.358
15	0.324	0.19	0.022	0.114	0.351
16	0.441	0.226	0.002	0.089	0.241
17	0.373	0.174	0.125	0.084	0.245
18	0.396	0.151	0.06	0.115	0.279
19	0.328	0.254	0	0.149	0.269
20	0.445	0.212	0.047	0.104	0.192
21	0.443	0.205	0	0.101	0.251
22	0.334	0.19	0.015	0.139	0.322
23	0.264	0.209	0.037	0.134	0.356
24	0.291	0.173	0.038	0.121	0.376
25	0.252	0.19	0.038	0.173	0.347
26	0.322	0.164	0.038	0.125	0.351
27	0.212	0.278	0.033	0.155	0.323
28	0.315	0.196	0.031	0.147	0.31
29	0.287	0.17	0.035	0.175	0.333
30	0.293	0.178	0.033	0.203	0.292
31	0.311	0.196	0.036	0.151	0.306
32	0.244	0.195	0.036	0.194	0.329
33	0.307	0.161	0.039	0.149	0.344
34	0.184	0.333	0.035	0.168	0.281
35	0.344	0.212	0.031	0.131	0.283
36	0.227	0.321	0.032	0.143	0.277

隶属度 根据最大隶属度原则 确定各采样点的污染程度 从而得到各采样点的土壤环境质量等级(表 6)。

按照最大隶属度原则,可以看出 36 个采样点中的有 30 个采样点的土壤重金属环境级别是(清洁), 采样点 17、28、35 和 36 土壤环境级别为 级(尚清洁) 采样点 16 和 20 土壤环境级别达到了 级(轻污染),说明研究区连续灌溉 8 a 猪场废水后,土壤环境

表6 模糊综合评价结果
Table 6 Results of fuzzy comprehensive evaluation

采样点						评价等级
1	0.713	0.287	0	0	0	(清洁)
2	0.95	0.049	0	0	0	(清洁)
3	0.588	0.401	0.012	0	0	(清洁)
4	0.843	0.157	0	0	0	(清洁)
5	1	0	0	0	0	(清洁)
6	0.9	0.1	0	0	0	(清洁)
7	0.999	0	0	0	0	(清洁)
8	0.999	0	0	0	0	(清洁)
9	0.376	0.155	0.019	0.149	0.301	(清洁)
10	0.928	0.072	0	0	0	(清洁)
11	0.993	0.007	0	0	0	(清洁)
12	0.597	0.353	0.05	0	0	(清洁)
13	0.579	0.357	0.064	0	0	(清洁)
14	0.819	0.181	0	0	0	(清洁)
15	0.83	0.171	0	0	0	(清洁)
16	0.277	0.332	0.39	0	0	(轻污染)
17	0.361	0.482	0.158	0	0	(尚清洁)
18	0.605	0.354	0.042	0	0	(清洁)
19	0.618	0.382	0	0	0	(清洁)
20	0.334	0.18	0.481	0.005	0	(轻污染)
21	0.453	0.41	0.136	0	0	(清洁)
22	0.651	0.349	0	0	0	(清洁)
23	0.742	0.258	0	0	0	(清洁)
24	0.981	0.018	0	0	0	(清洁)
25	0.929	0.071	0	0	0	(清洁)
26	0.92	0.08	0	0	0	(清洁)
27	0.65	0.322	0.029	0	0	(清洁)
28	0.336	0.604	0.059	0	0	(尚清洁)
29	0.572	0.428	0	0	0	(清洁)
30	0.765	0.234	0	0	0	(清洁)
31	0.525	0.475	0	0	0	(清洁)
32	0.794	0.204	0	0	0	(清洁)
33	0.889	0.111	0	0	0	(清洁)
34	0.608	0.283	0.11	0	0	(清洁)
35	0.362	0.539	0.1	0	0	(尚清洁)
36	0.347	0.508	0.146	0	0	(尚清洁)

未受到严重污染,但呈现出污染趋势,存在一定的环境风险,应予以重视。

3 结论

(1)利用模糊综合评价法评价土壤重金属污染状况,可以有效地解决评价标准边界模糊和监测误差对评价结果的影响,更加客观地评价重金属污染状况。

(2)研究区连续灌溉8a猪场废水后,36个采样点中有30个采样点土壤环境质量级别为Ⅰ级(清洁),土壤未受到严重污染,但4个采样点土壤环境质量级别达到Ⅱ级,2个采样点土壤环境质量级别达到Ⅲ级(轻污染),呈现污染趋势,说明长期灌溉猪场废水,存在一定的土壤重金属污染风险,应予以重视。

参考文献:

- [1] Mireles A, Sols C, Andrade E, et al. Heavy metal accumulation in plants and soil irrigated with wastewater from Mexico city[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, 2004, 219-220(6):187-190.
- [2] 黄顺生, 廖启林, 吴新民, 等. 扬州地区农田土壤重金属污染调查与评价[J]. *土壤*, 2006, 38(4):483-488.
HUANG Shun-sheng, LIAO Qi-lin, WU Xin-min, et al. Survey and assessment of heavy metal pollution of cropland soil in Yangzhou Area Jiangsu Province[J]. *Soil*, 2006, 38(4):483-488.
- [3] Turkdogan M K, Kilicel Karak K, Tuncer I, et al. Heavy metals in soil, vegetables and fruits in the endemic upper gastrointestinal cancer region of Turkey[J]. *Environmental Toxicology and Pharmacology*, 2002(13):175-179.
- [4] Alam M G M, Snow E T, Tanaka A. Arsenic and heavy metal contamination of vegetables grown in Samta village, Bangladesh[J]. *The Science of the Total Environment*, 2003, 308:83-96.
- [5] 钟晓兰, 周生路, 赵其国. 长江三角洲地区土壤重金属污染特征及潜在生态风险评价——以江苏太仓市为例[J]. *地理科学*, 2007, 27(3):395-400.
ZHONG Xiao-lan, ZHOU Sheng-lu, ZHAO Qi-guo. Spatial characteristics and potential ecological risk of soil heavy metals contamination in the Yangtze River Delta—a case study of Taicang City[J]. *Jiangsu Province, Scientia Geographica Sinica*, 2007, 27(3):395-400.
- [6] 郭平, 谢忠雷, 李军, 等. 长春市土壤重金属污染特征及其潜在生态风险评价[J]. *地理科学*, 2005, 25(1):108-112.
GUO Ping, XIE Zhong-lei, LI Jun, et al. Specificity of heavy metal pollution and the ecological hazard in urban soils of Changchun City[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2005, 25(1):108-112.
- [7] Loska K, Wiechula D, Korus I. Metal contamination of farming soils affected by industry[J]. *Environment International*, 2004, 30:159-165.
- [8] 彭景, 李泽琴, 侯家渝. 地积累指数法及生态危害指数评价法在土壤重金属污染中的应用及探讨[J]. *广东微量元素科学*, 2007, 14(8):13-17.
PENG Jing, LI Ze-qin, HOU Jia-yu. Application of the index of geo-accumulation index and ecological risk index to assess heavy metal pollution in soils[J]. *Guangdong Trace Elements Science*, 2007, 14(8):13-17.
- [9] 李慧伶, 王修贵, 崔远来, 等. 灌区运行状况综合评价的方法研究[J]. *水科学进展*, 2006, 17(4):543-548.
LI Hui-ling, WANG Xiu-gui, CUI Yuan-lai, et al. Comprehensive evaluation methods for irrigation district[J]. *Advances Water Science*, 2006, 17(4):543-548.
- [10] 徐卫国, 周琦, 田伟利, 等. 灰色关联分析模型权重的修正及在环境空气质量评价中的应用[J]. *环境污染与防治*, 2005, 27(4):308-

310.
XU Wei-guo, ZHOU Qi, TIAN Wei-li, et al. Study on modification and application of grey relation analysis model in evaluation of atmospheric environmental quality[J]. *Environment Pollution & Control*, 2005, 27(4) : 308-310.
- [11] 孟宪林, 郭威. 改进层次分析法在土壤重金属污染评价中的应用[J]. *环境保护科学*, 2001, 27(1) : 34-36.
MENG Xian-lin, GUO Wei. The application of reformed AHP in the assessment of heavy metal pollution[J]. *Environmental Protection Science*, 2001, 27(1) : 34-36.
- [12] 黄菊文, 李光明, 王华, 等. 层次分析法评价固体废弃物的资源化利用[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2007, 37(8) : 1090-1094.
HUANG Ju-wen, LI Guang-ming, WANG Hua, et al. Analytic hierarchy process-based evaluation of recycling solid waste in Shanghai[J]. *Journal of Tongji University(Natural Science)*, 2007, 37(8) : 1090-1094.
- [13] 王建国, 杨林章, 单艳红, 等. 模糊数学在土壤质量评价中的应用[J]. *土壤学报*, 2001, 38(2) : 176-183.
WANG Jian-guo, YANG Lin-zhang, SHAN Yan-hong, et al. Application of fuzzy mathematics to soil quality evaluation[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2001, 38(2) : 176-183.
- [14] 朱青, 周生路, 孙兆金, 等. 两种模糊数学模型在土壤重金属综合污染评价中的应用与比较[J]. *环境保护科学*, 2004, 30(3) : 53-57.
ZHU Qing, ZHOU Sheng-lu, SUN Zhao-jin, et al. Application and comparison of two fuzzy mathematical models used in the evaluation of soil heavy metals' comprehensive pollution[J]. *Environmental Protection Science*, 2004, 30(3) : 53-57.
- [15] 邹志红, 孙靖南, 任广平. 模糊评价因子的熵权法赋权及其在水质评价中的应用[J]. *环境科学学报*, 2005, 25(4) : 552-556.
ZOU Zhi-hong, SUN Jing-nan, REN Guang-ping. Study and application on the entropy method for determination of weight of evaluating indicators in fuzzy synthetic evaluation for water quality assessment[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2005, 25(4) : 552-556.
- [16] 石晓翠, 钱翌, 熊建新, 等. 模糊数学模型在土壤重金属污染评价中的应用[J]. *土壤通报*, 2006, 37(2) : 334-336.
SHI Xiao-cui, QIAN Yi, XIONG Jian-xin, et al. Application of fuzzy mathematics models in the evaluation of soil heavy metal pollution[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2006, 37(2) : 334-336.
- [17] 龚磊, 周永章, 王旭日, 等. 针对土壤重金属污染评价的模糊数学模型的改进及应用[J]. *土壤通报*, 2007, 38(1) : 101-105.
DOU Lei, ZHOU Yong-zhang, WANG Xu-ri, et al. Improvement and application of a fuzzy mathematical model for assessment of heavy metal pollution in soil[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2007, 38(1) : 101-105.
- [18] Wang H Y. Assessment and prediction of overall environmental quality of Zhuzhou City, Hunan Province, China[J]. *Journal of Environmental Management*, 2002, 66 : 329-340.
- [19] Sheng Q, LU Y T, Wang M N, et al. Status and fuzzy comprehensive assessment of combined heavy metal and organochlorine pesticide pollution in the Taihu Lake region of China[J]. *Journal of Environment Management*, 2005, 76 : 355-362.
- [20] Onkal-engin G, Demir I, Hiz H. Assessment of urban air quality using fuzzy synthetic evaluation[J]. *Atmospheric Environment*, 2004, 38 : 3809-3815.
- [21] 岳子明, 李晓秀, 高晓晶. 北京通州区土壤环境质量模糊综合评价[J]. *农业环境科学学报*, 2007, 26(4) : 1402-1405.
YUE Zi-ming, LI Xiao-xiu, GAO Xiao-jing. Fuzzy comprehensive assessment on soil environment of Tongzhou in Beijing[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(4) : 1402-1405.
- [22] 杨西飞, 周涛发, 张鑫, 等. 基于 Matlab-FIS 的土壤中重金属污染模糊综合评价[J]. *合肥工业大学学报(自然科学版)*, 2007, 30(10) : 1245-1249.
YANG Xi-fei, ZHOU Tao-fa, ZHANG Xin, et al. Fuzzy comprehensive assessment of heavy metals in soil based on MATLAB-FIS[J]. *Journal of Hefei University of Technology(Natural Science)*, 2007, 30(10) : 1245-1249.
- [23] 高怀友, 刘凤枝, 赵玉杰. 我国农产品产地环境标准中存在的问题与对策研究[J]. *生态环境*, 2004, 13(4) : 691-693.
GAO Huai-you, LIU Feng-zhi, ZHAO Yu-jie. The status and related countermeasures research of the environmental standards for the agricultural producing areas in China[J]. *Ecology and Environment*, 2004, 13(4) : 691-693.