

物元分析模型在生活垃圾分类收集方案评价中的应用

陈海滨 周靖承 张豪兰 杨 禹

(华中科技大学环境科学与工程学院环境工程系, 武汉 430074)

摘要: 家庭生活垃圾分类收集是实现城市生活垃圾无害化、减量化和资源化的重要方面, 而生活垃圾分类收集方案评价也是实现生活垃圾综合管理的有效方法。以昆明市居民区生活垃圾分类收集为例, 设计 5 种垃圾分类收集方案, 基于问卷调查和层次分析, 并建立物元分析模型, 得出最优分类方案是将生活垃圾分为厨余垃圾与其他垃圾 2 大类。

关键词: 生活垃圾; 分类收集; 物元分析; 方案评价

DOI: 10. 7617/j. issn. 1000 - 8942. 2013. 05. 028

APPLICATION OF MATTER ELEMENT ANALYSIS MODEL TO ASSESSMENT OF DOMESTIC SOLID WASTE SEPARATED COLLECTION

Chen Haibin Zhou Jingcheng Zhang Haolan Yang Yu

(Department of Environmental Engineering, School of Environmental Science & Technology,
Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: Domestic solid waste (DSW) separated collection is an essential part to fulfill the need of harmlessness, reduction and recovery of MSW. Furthermore the evaluation of municipal solid waste separated collection projects is an effective method to realize the integrated waste management. Taking the project of waste separated collection for residential areas in Kunming for example, five alternatives for designing the MSW separated collection were launched. Based on the results of questionnaire surveys and analytic hierarchy process (AHP), the matter element analysis (MEA) model was established as well. Thus, take the realistic status into consideration, the optimal waste separated alternatives is with two categories of kitchen waste and other waste.

Keywords: domestic solid waste; separated collection; matter element analysis; scheme evaluation

0 引言

物元分析是由蔡文教授于 20 世纪 80 年代系统地提出并主要用以解决不相容问题的新兴理论^[1]。物元分析是以可拓学为基础, 提出了“物元”的概念, 并通过物元变换理论与方法, 将具体的现实问题抽象为属性与量值的组合, 将不相容系统转化为相容系统, 将不相容问题转化为相容问题^[2], 体现了思维科学、系统科学和数学的交叉性、实用性和创造性。物元分析理论框架的两大支柱是: 1) 物元变换理论; 2) 物元可拓与关联函数理论^[3-4]。物元分析已经在系统评价^[5]和优化决策^[6-10]等方面得到广泛运用。

环境评价是一个多层次、多目标、多指标的并具有复杂性和综合性分析过程, 物元分析在这方面的运用主要体现在水、大气、土壤的环境质量评价方面^[11-20]。物元分析以其开放的方法体系广泛用

于环境系统评价、方案优化和项目决策, 而在固体废物管理领域和生活垃圾综合处理方向的研究或案例还不多见。本文以昆明市居民区生活垃圾分类收集方案评价为例, 设计 5 类分类方案, 并通过问卷调查和分析, 建立评价体系确定指标, 构建物元分析模型进行方案比选, 得到最优方案和相关结论。以物元分析为重点, 将生活垃圾分类方案、评价指标及指标量值三者联系并构造物元, 然后结合层次分析法确定的指标及其权重作为物元分析的权系数, 进一步构造经典域、节域和关联函数, 建立完整的物元分析模型。

1 物元分析模型的建立

1.1 物元

物元分析模型中的核心概念即为“物元”, 将表征事物 N 及其特征值 C 与量值 x 进行有序组合后所

得到的 (N, C, X) , 称为物元 R 。其中, 事物 N 的特征值 C 用有序数列 $(C_1, C_2, \dots, C_n)$ 表示, 对应的量值用 $(X_1, X_2, \dots, X_n)$ 进行描述, 因此得到 n 维物元 R , 其矩阵形式如下:

$$R = \begin{bmatrix} N & C_1 & X_1 \\ & C_2 & X_2 \\ & \vdots & \vdots \\ & C_n & X_n \end{bmatrix} \quad (1)$$

1.2 经典域与节域

若 N_j 表示事物的第 j 个等级, $j=1, 2, \dots, m$, 也即评价标准的等级, 而用 C_i 表示 N_j 对应的评价指标, 令 $X_{ji} = \langle a_{ji}, b_{ji} \rangle$, $i=1, 2, \dots, n$ 表示评价指标 C_i 对应的取值范围, 那么得到评价标准等级 N_j 关于对应评价指标 C_i 的量值的数据范围, 并将其称为经典域 R_j , 用矩阵形式表示为:

$$R_j = (X_j, C_i, X_j) = \begin{bmatrix} N & C_1 & X_{j1} \\ & C_2 & X_{j2} \\ & \vdots & \vdots \\ & C_n & X_{jn} \end{bmatrix} \quad (2)$$

若用 P 表示评价等级的全体, 那么建立物元 R_p 即构成节域, 用 $X_{p1}, X_{p2}, \dots, X_{pn}$ 分别表示事物 N 关于评价指标 $C_1, C_2, \dots, C_n$ 的取值范围, 且有 $X_{jn} \subset X_{pn}$, 得到节域的矩阵形式为:

$$R_p = (P, C_i, X_{pi}) = \begin{bmatrix} P & C_1 & X_{p1} \\ & C_2 & X_{p2} \\ & \vdots & \vdots \\ & C_n & X_{pn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P & C_1 & \langle a_{p1}, b_{p1} \rangle \\ & C_2 & \langle a_{p2}, b_{p2} \rangle \\ & \vdots & \vdots \\ & C_n & \langle a_{pn}, b_{pn} \rangle \end{bmatrix} \quad (3)$$

1.3 待评物元

若待评事物为 P_0 , 将所有得到的数据 $v_1, v_2, \dots, v_n$ 作为其关于指标 $C_1, C_2, \dots, C_n$ 的量值, 得到对应的待评物元 R_0 :

$$R_0 = (P_0, C_i, v_i) = \begin{bmatrix} P_0 & C_1 & v_1 \\ & C_2 & v_2 \\ & \vdots & \vdots \\ & C_n & v_n \end{bmatrix} \quad (4)$$

1.4 物元关联函数与关联度

$$\rho(x_i, x^{pi}) = \left| x_i - \frac{1}{2}(a_{pi} + b_{pi}) \right| - \frac{1}{2}(b_{pi} - a_{pi}) \quad (5)$$

$$\rho(x_i, x^{pi}) = \left| x_i - \frac{1}{2}(a_{pi} + b_{pi}) \right| - \frac{1}{2}(b_{pi} - a_{pi}) \quad (6)$$

关联函数为

$$K_j(x_i) = \begin{cases} \frac{\rho(x_i, x_{ji})}{\rho(x_i, x_{pi}) - \rho(x_i, x_{ji})}, \\ \rho(x_i, x_{pi}) - \rho(x_i, x_{ji}) \neq 0 \\ -\rho(x_i, x_{ji}) - 1, \\ \rho(x_i, x_{pi}) - \rho(x_i, x_{ji}) = 0 \end{cases} \quad (7)$$

式中: $K_j(x_i)$ 为各评价因子关于各评价等级的关联度(也可以理解为归属程度); $\rho(x_i, x_{pi})$ 为点与区间 X_{pi} 的距, 类似地, $\rho(x_i, x_{ji})$ 表示点与区间 X_{ji} 的距。

1.5 评价等级的确定

利用层次分析法^[21-22]确定评价指标 $C_1, C_2, \dots, C_n$ 的权重系数 $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$, 那么待评事物属于评价等级的程度为

$$K_j(P) = \sum_{i=1}^n \lambda_i K_j(x_i) \quad (8)$$

式中: $K_j(x_i)$ 的数值表示评价单元某标准范围的关联程度; $K_j(P)$ 则表示待评事物 P 关于评价等级 j 的综合关联度。根据最大隶属原则, 使

$$K_j(P) = \max [K_1(P), K_2(P), \dots, K_n(P)] \quad (9)$$

因此得到待评事物 P 的最终等级。

2 案例分析

2.1 研究思路

设计生活垃圾分类收集方案是构建城市生活垃圾分类收集体系的重要一环, 通过合理设计和优化比选, 才能得出适合城市现实条件和未来发展需要的最优方案。对生活垃圾分类收集方案的研究和设计, 从工程实践的角度上来看主要是解决如何合理有效进行垃圾分类的问题, 其关键就在于垃圾分类类别的确定。目前我国生活垃圾分类主要有2类法、3类法、4类法和多类法, 本文初定的昆明市居民区生活垃圾分类收集方案见表1。

表1 昆明市居民区生活垃圾分类收集方案

Table 1 Separated domestic waste collection alternatives of residential areas in Kunmming

方案	分类法	类别说明
S_1	2类法	厨余垃圾、其他垃圾
S_2	2类法	可回收垃圾、其他垃圾
S_3	3类法	厨余垃圾、可回收垃圾、其他垃圾
S_4	4类法	厨余垃圾、可回收垃圾、有害垃圾、其他垃圾
S_5	多类法	厨余垃圾、纸类、玻璃类、橡塑类、金属类、有害垃圾、其他垃圾

生活垃圾分类工作的推进应在具备垃圾无害化处理条件的基础上,优先解决垃圾减量化问题,其次才是资源化,因此对生活垃圾分类收集方案的研究应遵循三大原则:1) 可识别性原则,即对居民而言,垃圾分类类别和组成应具有明晰的可识别性;2) 可操作性原则,即对城市环境卫生管理部门、生活垃圾处理及收运作业单位而言,垃圾分类工作应便于其落实相关工作;3) 可适应性原则,垃圾分类应与城市所具备的垃圾处理设施类型、处理规模和处理技术相适应,立足现实,兼顾发展,尤其要与垃圾收集和运输系统进行有效衔接。

研究路线主要分为 5 个步骤:1) 分类收集方案设计,确定多个待评方案。2) 问卷调查,包括问卷设

计、组织调查、数据分析和得出结果等内容。3) 评价体系建立,包括筛选评价指标、建立层次分析法模型、得出评价指标权重值等内容。4) 物元分析模型的构建,包括确定待评物元,得出经典域和节域,利用物元关联函数求综合关联度,判别隶属度并确定评价等级等。5) 评价方案方案排序和等级的最终确定。

2.2 评价指标及其权重

评价指标:作业环境与二次污染(B_1)、减量化程度(B_2)、实施操作性(B_3)、社会环境安全(B_4)、投资成本(B_5)、运行成本(B_6)、资源化效果(B_7)、运行管理难度(B_8)、配套设施设备复杂度(B_9)与公众识别难度(B_{10}),共计 10 项指标。评价层次体系如图 1 所示。

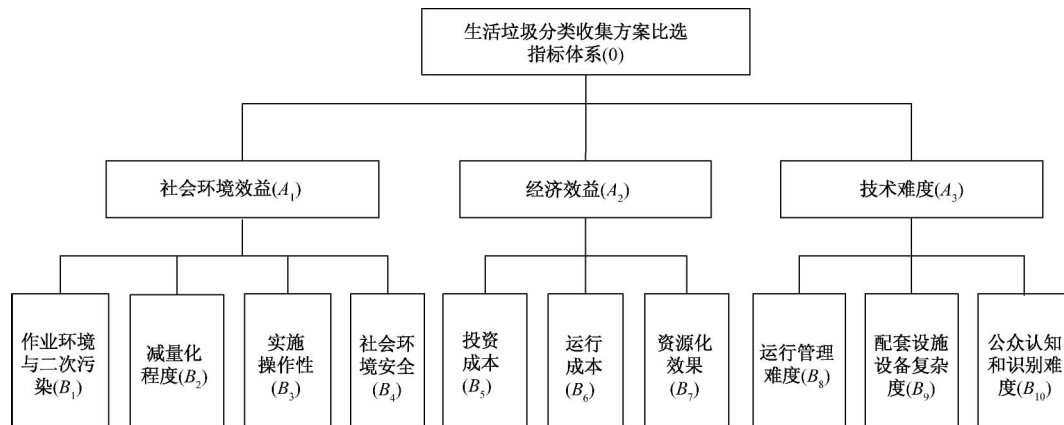


图 1 生活垃圾分类收集方案评价指标体系

Fig. 1 Evaluation index hierarchy of sperated DSW alternatives

依据生活垃圾分类收集评价指标体系,采用问卷调查所得打分结果和层次分析模型,通过一致性检验

后,得出结果并归一化处理,最终得到关于 10 个评价指标的权重值,详表 2。

表 2 生活垃圾分类收集方案评价指标权重

Table 2 Evaluation index weight of separated DSW collection project

评价指标	作业环境 与二次 污染 (B_1)	减量化 程度 (B_2)	实施操 作性 (B_3)	社会环 境安全 (B_4)	投资成本 (B_5)	运行成本 (B_6)	资源化 效果 (B_7)	运行管 理难度 (B_8)	配套设施 设备复 杂度 (B_9)	公众识 别难度 (B_{10})
权重	λ_1	λ_2	λ_3	λ_4	λ_5	λ_6	λ_7	λ_8	λ_9	λ_{10}
归一化权重值	0.117	0.107	0.113	0.124	0.040	0.057	0.115	0.111	0.105	0.111

2.3 生活垃圾分类收集方案评价的物元模型

2.3.1 待评物元、经典域与节域

生活垃圾分类评价指标及标准分级结果见表 3。对于物元分析模型来说,对于待评方案 P_0 ,所得的各方案对应于评价体系所包含指标的得分值,将作为关

于指标 $B_1 \sim B_{10}$ 的量值(表 4)。

表 3 数据所得的各方案在各指标下的取值范围即为经典域($R_1 \sim R_4$);节域 R_p 是根据各评价指标的所有取值范围来确定的,经典域与节域表示形式为:

表 3 生活垃圾分类评价等级划分

Table 3 Evaluation grades for DSW separated collection

评价指标	作业环境 与二次 污染 (B_1)	减量化 程度 (B_2)	实施操 作性 (B_3)	社会环 境安全 (B_4)	投资成本 (B_5)	运行成本 (B_6)	资源化 效果 (B_7)	运行管 理难度 (B_8)	配套设施 设备复 杂度 (B_9)	公众识 别难度 (B_{10})
I 级	20 ~ 24	20 ~ 26	30 ~ 36	25 ~ 30	30 ~ 36.5	35 ~ 43.5	20 ~ 26	29 ~ 36.5	30 ~ 35	29 ~ 36.5
II 级	15 ~ 20	15 ~ 20	20 ~ 30	17 ~ 25	20 ~ 30	22 ~ 35	15 ~ 20	19 ~ 29	20 ~ 30	19 ~ 29
III 级	10 ~ 15	9 ~ 15	10 ~ 20	10 ~ 17	10 ~ 20	10 ~ 22	10 ~ 15	9 ~ 19	10 ~ 20	9 ~ 19
IV 级	4.5 ~ 10	3.5 ~ 9	4 ~ 10	5 ~ 10	4 ~ 10	4 ~ 10	3.5 ~ 10	3.5 ~ 9	3.5 ~ 10	3.5 ~ 9

表 4 分类收集待评方案的指标量值

Table 4 Index values of evaluation on each alternatives of separated DSW collection

评价指标	作业环境 与二次 污染 (B_1)	减量化 程度 (B_2)	实施操 作性 (B_3)	社会环 境安全 (B_4)	投资成本 (B_5)	运行成本 (B_6)	资源化 效果 (B_7)	运行管 理难度 (B_8)	配套设施 设备复 杂度 (B_9)	公众识 别难度 (B_{10})
S1	23.8	18.5	35	17.6	27.3	24.1	18.5	36	27	36
S2	4.8	3.8	25	6	36.4	43.3	3.8	28	34.6	28
S3	23.8	25.9	20	17.6	18.2	16.3	25.9	20	19.2	20
S4	23.8	25.9	15	29.4	13.6	12.2	25.9	12	15.4	12
S5	23.8	25.9	5	29.4	4.5	4.1	25.9	4	3.8	4

$$R_1 = \begin{bmatrix} \text{I 级 } B_1 <20,24> \\ B_2 <20,26> \\ B_3 <25,36> \\ B_4 <30,30> \\ B_5 <35,36.5> \\ B_6 <20,43.5> \\ B_7 <20,26> \\ B_8 <29,36.5> \\ B_9 <30,35> \\ B_{10} <29,36.5> \end{bmatrix}; R_2 = \begin{bmatrix} \text{II 级 } B_1 <15,20> \\ B_2 <15,20> \\ B_3 <20,30> \\ B_4 <17,25> \\ B_5 <20,30> \\ B_6 <22,35> \\ B_7 <15,20> \\ B_8 <19,29> \\ B_9 <20,30> \\ B_{10} <19,29> \end{bmatrix}; R_3 = \begin{bmatrix} \text{III 级 } B_1 <10,15> \\ B_2 <9,15> \\ B_3 <10,20> \\ B_4 <10,17> \\ B_5 <10,20> \\ B_6 <10,22> \\ B_7 <10,15> \\ B_8 <9,19> \\ B_9 <10,20> \\ B_{10} <9,19> \end{bmatrix}; R_4 = \begin{bmatrix} \text{IV 级 } B_1 <4.5,10> \\ B_2 <3.5,9> \\ B_3 <4,10> \\ B_4 <5,10> \\ B_5 <4,10> \\ B_6 <4,10> \\ B_7 <3.5,10> \\ B_8 <3.5,9> \\ B_9 <3.5,10> \\ B_{10} <3.5,9> \end{bmatrix}; R_p = \begin{bmatrix} P B_1 <4.5,24> \\ B_2 <3.5,26> \\ B_3 <4,36> \\ B_4 <5,30> \\ B_5 <4,36.5> \\ B_6 <4,43.5> \\ B_7 <3.5,26> \\ B_8 <3.5,36.5> \\ B_9 <3.5,35> \\ B_{10} <3.5,36.5> \end{bmatrix}。$$

对于多方案评价,确定各方案的待评物元 $R_{01}—R_{05}$:

$$R_{01} = \begin{bmatrix} P_{01} & c_1 & 23.8 \\ & c_2 & 18.5 \\ & c_3 & 35 \\ & c_4 & 17.6 \\ & c_5 & 27.3 \\ & c_6 & 24.1 \\ & c_7 & 18.5 \\ & c_8 & 36 \\ & c_9 & 27 \\ & c_{10} & 36 \end{bmatrix}; R_{02} = \begin{bmatrix} P_{02} & c_1 & 4.8 \\ & c_2 & 3.8 \\ & c_3 & 25 \\ & c_4 & 6 \\ & c_5 & 36.4 \\ & c_6 & 43.3 \\ & c_7 & 3.8 \\ & c_8 & 28 \\ & c_9 & 34.6 \\ & c_{10} & 28 \end{bmatrix}; R_{03} = \begin{bmatrix} P_{03} & c_1 & 23.8 \\ & c_2 & 25.9 \\ & c_3 & 20 \\ & c_4 & 17.6 \\ & c_5 & 18.2 \\ & c_6 & 16.3 \\ & c_7 & 25.9 \\ & c_8 & 20 \\ & c_9 & 19.2 \\ & c_{10} & 20 \end{bmatrix}; R_{04} = \begin{bmatrix} P_{04} & c_1 & 23.8 \\ & c_2 & 25.9 \\ & c_3 & 15 \\ & c_4 & 29.4 \\ & c_5 & 13.6 \\ & c_6 & 12.2 \\ & c_7 & 25.9 \\ & c_8 & 12 \\ & c_9 & 15.4 \\ & c_{10} & 12 \end{bmatrix}; R_{05} = \begin{bmatrix} P_{05} & c_1 & 23.8 \\ & c_2 & 25.9 \\ & c_3 & 5 \\ & c_4 & 29.4 \\ & c_5 & 4.5 \\ & c_6 & 4.1 \\ & c_7 & 25.9 \\ & c_8 & 4 \\ & c_9 & 3.8 \\ & c_{10} & 4 \end{bmatrix}。$$

2.3.2 物元关联度的计算

根据表 2 数据及关联函数式(9),计算权系数和关联度,结果见表 5。

2.3.3 评价等级的最终确定

关联度 $K_i(x)$ 的值表示被评价方案隶属于设定等级的程度。在物元模型中,关联函数值可以取负

数。应用在方案评价时综合关联度应该是大于零且越接近于零,表示隶属程度越高,即属于该评价等级,但是在决策过程中,则是数值越大方案越佳。根据表 5 以及式(10)可以计算出物元 $R_{01}—R_{05}$ 关于各等级的综合关联度,由此得出居民区五个备选方案对评价等级的综合评价结果(见表 6)。

表 5 各方案的不同等级对应各指标的关联函数值

Table 5 The correlated function values of indexes corresponding to different grades of the alternatives

方案	对应等级	关联函数值									
		B_1	B_2	B_3	B_4	B_5	B_6	B_7	B_8	B_9	B_{10}
S_1	I	0.050	-0.167	0.167	-0.374	-0.227	-0.360	-0.167	0.067	-0.273	0.067
	II	-0.950	0.300	-0.833	0.075	0.270	0.161	0.300	-0.933	0.300	-0.933
	III	-0.978	-0.318	-0.937	-0.046	-0.442	-0.098	-0.318	-0.971	-0.467	-0.971
	IV	-0.986	-0.559	-0.961	-0.380	-0.653	-0.421	-0.559	-0.981	-0.680	-0.981
S_2	I	-0.981	-0.981	-0.312	-0.950	0.015	0.012	-0.981	-0.105	0.080	-0.105
	II	-0.971	-0.974	0.500	-0.917	-0.985	-0.976	-0.974	0.100	-0.920	0.100
	III	-0.945	-0.945	-0.312	-0.800	-0.994	-0.991	-0.945	-0.514	-0.973	-0.514
	IV	0.055	0.055	-0.577	0.200	-0.996	-0.994	0.055	-0.691	-0.984	-0.691
S_3	I	0.050	0.017	-0.385	-0.374	-0.454	-0.603	0.017	-0.353	-0.408	-0.353
	II	-0.950	-0.983	-0.006	0.075	-0.112	-0.317	-0.983	0.100	-0.484	0.100
	III	-0.978	-0.991	0.010	-0.046	0.100	0.475	-0.991	-0.057	0.080	-0.057
	IV	-0.986	-0.994	-0.385	-0.380	-0.366	-0.339	-0.994	-0.400	-0.369	-0.400
S_4	I	0.050	0.017	-0.577	0.120	-0.631	-0.735	0.017	-0.667	-0.533	-0.667
	II	-0.950	-0.983	-0.312	-0.880	-0.400	-0.544	-0.983	-0.307	-0.279	-0.307
	III	-0.978	-0.991	0.500	-0.954	0.360	0.183	-0.991	0.300	0.460	0.300
	IV	-0.986	-0.994	-0.312	-0.970	-0.273	-0.212	-0.994	-0.261	-0.312	-0.261
S_5	I	0.050	0.017	-0.961	0.120	-0.981	-0.997	0.017	-0.980	-0.988	-0.980
	II	-0.950	-0.983	-0.938	-0.880	-0.968	-0.994	-0.983	-0.968	-0.982	-0.968
	III	-0.978	-0.991	-0.833	-0.954	-0.917	-0.983	-0.991	-0.909	-0.954	-0.909
	IV	-0.986	-0.994	0.167	-0.970	0.083	0.017	-0.994	0.091	0.046	0.091

表 6 各备选方案的综合关联度及最终评价等级

Table 6 The overall correlation and the final evaluation grades for selected alternatives

方案	$K_1(x)$	$K_2(x)$	$K_3(x)$	$K_4(x)$	评价结果
S_1	-0.102	-0.285	-0.584	-0.734	I 级
S_2	-0.499	-0.556	-0.767	-0.375	IV 级
S_3	-0.254	-0.372	-0.312	-0.588	I 级
S_4	-0.312	-0.618	-0.256	-0.605	III 级
S_5	-0.501	-0.958	-0.942	-0.408	IV 级

评价结果表明: 方案 $S_1—S_5$ 的优先排序为 $S_1 > S_3 > S_4 > S_2 > S_5$ 。根据综合方案设计和问卷调查结果来分析,方案 S_1 主要将垃圾分为 2 类(厨余垃圾和其他垃圾),方案 S_3 (厨余垃圾、可回收垃圾和其他垃圾)则在 S_1 的基础上增加了可回收垃圾,细化分类一方面可增加垃圾分类作业的作业负荷,但另一方面又可提高了垃圾资源化效益,但从目前来看方案 S_1 分类类别少,便于居民区源头实行垃圾粗分类。方案 S_2 将垃圾分为可回收垃圾和其他垃圾,尽管分类类

别少,便于垃圾回收,重视垃圾分类的资源化效果,但分类综合效益较低,其他垃圾包含种类过多,且由于我国许多城市居民区的厨余垃圾部分占垃圾组分比例最高,含水率大,因此这种分类方式并不利于提升垃圾减量化和无害化处理水平。方案 S_2 介于 S_4 和 S_5 之间。方案 S_5 划分的垃圾类别最多,虽然完全实施后理论上能取得最大的无害化、减量化、资源化效益,但是管理难度和运行成本相较其他方案也最高,就目前来看,在垃圾分类的辨识度和可操作性上不尽理想。综上所述,昆明市居民区生活垃圾分类收集方案采取方案 S_1 较为可行。

3 结论

1) 物元是物元分析模型的基本概念,引进物元更便于描述事物和分析其变换过程,而且将事物的属性和量值辩证统一起来。正是基于物元的可拓性,采用物元变换的方法来描述现实世界中的相容和不相容问题,从而提供更加全面丰富的信息,有利于进行

方案评价和比选。

2) 利用物元分析模型对生活垃圾分类收集方案进行评价是有效的,结果表明,现阶段垃圾分类收集方案不宜采用多类法,而从辨识度、可操作性和经济性上考量,采用 2 类法、3 类法更加符合城市居民区源头分类的实际情况。进一步地,垃圾分类首先分离出厨余垃圾,对厨余垃圾进行生化处理以及对后续垃圾进一步实施细分类,提供了较大的便利性和灵活性,从而能保证生活垃圾分类工作的有效推进,而且本文采用物元分析模型用于方案的评价是有有效的。

参考文献

- [1] 蔡文. 物元分析 [M]. 广州: 广东高等教育出版社, 1987.
- [2] 蔡文. 物元模型及其应用 [M]. 北京: 科学技术文献出版社, 1994.
- [3] 张勇, 黎雪梅. 物元分析在环境质量评价及优化布点的应用 [J]. 环境科学与技术, 2005, 28(9): 114-115.
- [4] 韩传峰, 刘亮, 王忠礼. 基于物元分析法基础设施系统可持续性评价 [J]. 中国人口. 资源与环境, 2009, 19(2): 116-121.
- [5] 罗文斌, 吴次芳, 吴一洲. 基于物元模型的土地整理项目绩效评价方法与案例研究 [J]. 长江流域资源与环境, 2011, 20(11): 1321-1326.
- [6] 安玉伟. 大规模定制产品平台更新熵权——模糊物元决策 [J]. 计算机工程与应用, 2009, 45(10): 16-19.
- [7] 付彦景, 王杰. 多工程项目物元模型的决策方法研究 [J]. 制造业自动化, 2010, 33(12): 77-79.
- [8] 罗君君, 郑俊杰, 孙玲. 公路软基处理方案优选的熵权模糊物元决策法 [J]. 铁道科学与工程学报, 2008, 5(4): 20-24.
- [9] 王德荣, 王智源, 李必鑫. 基于模糊物元分析的城市加油站选址决策方法研究 [J]. 重庆科技学院学报. 自然科学版, 2008, 10(3): 121-124.

- [10] 胡绍华, 梅全亭, 包文, 等. 基于模糊物元分析的战时野营保障方案优选决策方法 [J]. 物流技术, 2010, 19(6): 146-148.
- [11] 张鸿飞, 刘志斌, 董欣. 大气环境质量物元可拓评价分析和实例验证 [J]. 能源与环境, 2008, 2(6): 63-64.
- [12] 张军, 夏训峰, 席北斗, 等. 基于模糊物元分析模型的湖泊富营养化评价 [J]. 环境工程, 2010, 28(2): 106-108.
- [13] 温欣欣, 郑育毅, 张江山. 基于熵权物元可拓模型的福州市环境综合质量评价 [J]. 安全与环境工程, 2011, 18(1): 29-32.
- [14] 宁立波, 刘新宇, 全晓霞. 基于物元分析的武汉市水资源承载力分析 [J]. 安全与环境学报, 2008, 8(4): 76-80.
- [15] 韩智霞, 张江山, 许丽忠. 模糊物元法综合评价福州市大气环境质量 [J]. 环境科学与管理, 2010, 35(4): 166-170.
- [16] 陈林, 许其功, 李铁松, 等. 模糊物元识别模型在巢湖水体富营养化评价中的应用研究 [J]. 环境工程学报, 2010, 4(4): 729-736.
- [17] 饶清华, 张江山. 熵权物元分析模型在湖泊富营养化评价中的应用 [J]. 环境工程, 2006, 24(6): 80-82.
- [18] 余立斌, 张江山, 王菲凤. 熵权物元分析模型在土壤环境质量评价中的应用 [J]. 黑龙江环境通报, 2008, 32(1): 70-73.
- [19] 曹毅. 物元分析法在水质监测优化布点中的应用 [J]. 环境监控与预警, 2012, 4(1): 43-45.
- [20] 于鲁冀, 何青, 赵晴. 物元可拓法的改进及在城市环境可持续发展综合评价中的应用 [J]. 四川环境, 2010, 29(5): 40-45.
- [21] 王金保, 侯得印, 吴琴芬. 层次分析法在环境工程方案优选中的应用 [J]. 上海环境科学, 2005, 24(5): 209-213.
- [22] 任沁清, 李平. 基于模糊层次关联分析法的逆向物流选址方法 [J]. 上海环境科学, 2009, 28(5): 222-226.

作者通信处 周靖承 430074 湖北省武汉市洪山区珞喻路 1037 号
华中科技大学东校区东十三楼南 301 室
E-mail jingchengzjc@gmail.com

2012-09-23 收稿

(上接第 77 页)

法兰或经车床加工的较厚钢板的自制法兰, 阀杆与壳体增设简易密封设施等等。

参考文献

- [1] GB 5468—91 锅炉烟尘测试方法 [S].
- [2] GB 10180—88 工业锅炉热工测试规范 [S].
- [3] GB 13271—2001 锅炉大气污染物排放标准 [S].
- [4] DB 44/765—2010 锅炉大气污染物排放标准 [S].
- [5] 郝吉明, 马广大. 大气污染控制工程 [M]. 2 版. 北京: 高等教育出版社, 2005: 45-48.
- [6] 蒋文举. 大气污染控制工程 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2006: 25-29.
- [7] 童志权. 大气污染控制工程 [M]. 北京: 机械工业出版社,

2006: 47-50.

- [8] 周邦彦. 热电工程与环保 [M]. 北京: 中国电力工业出版社, 2009: 39-50, 358-405.
- [9] 李广超. 大气污染控制技术 [M]. 2 版. 北京: 化学工业出版社, 2008: 14-18.

作者通信处 张立奎 518055 深圳市南山区龙珠大道梅州宾馆
11F-1101
E-mail zhanglk08@gmail.com

2012-11-28 收稿