

基于水质矩阵与权重分析的污水特性评价研究

赵红梅^{1,2}, 彭党聪¹, 王晓昌¹

(1 西安建筑科技大学 环境与市政工程学院, 陕西 西安 710056 ;

2 长安大学 环境科学与工程学院, 陕西 西安 710054)

[摘 要] 为了明确污水的重点污染物,使污水的特性评价结果更合理、更具实用性,采用水质矩阵与权重分析相结合的评价方法,对西安市城市污水中多种污染物的监测结果进行了分析。结果表明,西安市污水中 SS、COD、BOD₅、TN 和 TP 的权重分别为 0.266 7、0.074 8、0.141 2、0.042 0 和 0.475 3,溶解态与悬浮态污染物的权重分别为 0.637 3 和 0.362 7。说明该污水中的含磷污染物、有机物和悬浮态污染物对环境及水体的危害较大,应作为污水处理的主要去除目标。

[关键词] 水质矩阵;权重分析;污水特性评价;污水处理;水质监测

[中图分类号] X132

[文献标识码] A

[文章编号] 1671-9387(2007)04-0208-05

Evaluation of wastewater characteristic based on water quality matrix and weight analysis

ZHAO Hong-mei^{1,2}, PENG Dang-cong¹, WANG Xiao-chang¹

(1 Department of Environmental and Municipal Engineering Xi'an University Architecture and Technology, Xi'an, Shaanxi 710056, China ; 2 Department of Environmental Science and Engineering, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710054, China)

Abstract: In order to identify the main pollutant in wastewater, and make the evaluation of wastewater characteristic more reasonable and available, methods of water quality matrix and weight analyzing were used to analyze the results of water quality of Xi'an municipal wastewater in this study. The results show that respective weights of SS, COD, BOD₅, TN, TP are 0.266 7, 0.074 8, 0.141 2, 0.042 0, 0.475 3 and respective weights of suspended mater and soluble mater are 0.637 3, 0.362 7. Therefore it can be concluded that contaminations of suspended matter, organic matter and phosphate in Xi'an municipal wastewater are more harmful to environment and natural water and should be firstly removed in wastewater treatment.

Key words: water quality matrix; weight analyzing; evaluation of wastewater characteristic; waste water treatment ; monitoring of water quality

随着水处理技术的日益发展与完善,可供选择的污水处理方法和工艺越来越多,但由于污水中污染物的种类繁多、成分复杂,且不同的处理工艺都具有一定针对性,因此应根据污水特性选择技术可靠、经济合理的污水处理工艺^[1]。所以对污水特性进行评价,明确污水中的主要污染物对处理方法和工艺

的选择显得尤为重要。目前,对水污染评价的研究多是针对河流、湖泊等自然水体展开的,所运用的评价方法也较多^[2],而有关城市污水污染特性评价的研究较少,且主要采用的是单纯的水质指标评价和污染物分布评价等^[3-4]。这两种评价方法尚存在不足,如前者仅反映了污水中不同污染物的多少,并不

[收稿日期] 2006-03-08

[基金项目] 国家自然科学基金重点项目(50138020)

[作者简介] 赵红梅(1978—),女,山西太原人,讲师,在职博士,主要从事水处理研究。

能准确反映重点污染物及其污染水平;而后者则是针对某一种污染物大小或分子质量以及存在状态的分析评价,其综合性较差且无法完全反映污水特性,这给污水处理目标的确定以及污水处理工艺的合理选择带来一定困难。近年来,在对自然水体评价研究的过程中,常利用权重分析法和模糊数学的原理,根据给出的评价标准和实测值对评价对象作出总体评价^[2],这种将定量分析和定性分析相结合的评价方法,提高了评价结果的准确性、综合性。受其启发,本研究以西安市城市污水为研究对象,利用权重分析法与水质矩阵对该污水污染物的分布特性进行了分析,同时还通过污染物的权重分配计算分析,最终明确了该污水中的突出污染物,并对西安市城市污水特性以及不同污染物对环境的危害程度进行了评价,以期为城市污水处理工艺的选择、污水处理目标的确定提供参考。

1 水质矩阵的概念及意义

1.1 水质矩阵的提出

水中污染物的存在状态与可处理性联系起来可以从 3 个方面来表达,即污染物的大小或分子质量分布、化学特性和污染物浓度。从这个角度出发,20 世纪 70 年 Tambo 等^[5]运用矩阵对污水中污染物的可处理性进行了评价,并提出了水质矩阵的概念,其模型如图 1 所示。水质矩阵以范围因子作为横向坐标,其表示对污水中的污染物进行适当的分类。污水中污染物的范围划分可以通过机械、光学或物理化学方法来完成,或是通过用一些合适的水质指标来进行。

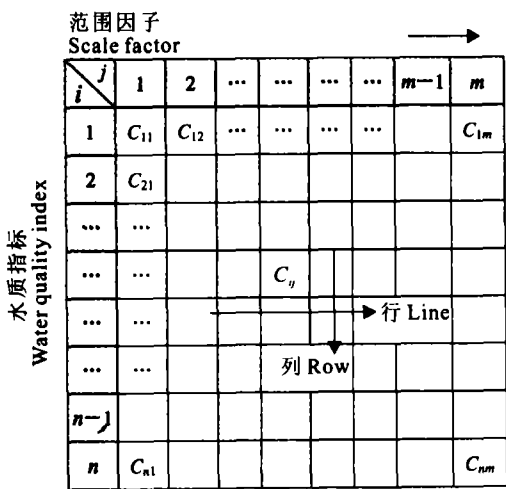


图 1 水质矩阵模型^[3]
Fig. 1 Water quality matrix

水质矩阵的纵向坐标为一些水质指标,通常选择具有代表性、并能显示水中污染物化学特性的一些综合指标,如 COD、TOC、UV 等。

水质矩阵元素 C_{ij} 为第 i 个横向评价因子与第 j 个纵向评价因子所对应的污染物浓度。

在应用过程中,也可以范围因子作为纵坐标,以水质指标作为横坐标,只要 C_{ij} 与其相对应即可。

1.2 水质矩阵的特点及意义

水质矩阵中的横向坐标为范围因子,表示水中污染物的存在状态,纵向坐标为水质评价指标,一般采用综合水质指标。水质矩阵的特征在于其引入了范围因子这一概念,通过对水质评价引入范围概念使得水质控制的信息价值得到很大的扩展。目前,一些学者在相关研究中发现,利用污染物尺寸或分子重分布结合综合性水质指标,可以对污水水质进行评价,利用这种评价方法可为水处理工艺的选择提供更为充分有效的信息^[4,6]。因此,在使用水质矩阵评价污水的污染特性时,只需选择一小部分综合性的水质指标,通过矩阵展开就可以得到更多的有意义的信息。

2 评价方法的建立

2.1 权重因子的添加

由于城市污水中的污染物种类很多且浓度及性质各不相同,它们对环境、水体造成的危害也就有所差别。因此,在污水水质评价时应当考虑在矩阵中添加权重因子,对污水中各水质指标所代表的污染物所占的权重进行分析,突出城市污水中污染物的主要去除目标,使污水处理工艺的选择更具针对性。权重分析是一种定量分析方法,因此在分析过程中,克服了依靠传统经验确定污水处理的主要目标时所具有的不确定性的缺点。

2.2 权重因子的计算

在进行权重分配时,运用模糊数学的层次分析法对权重因子进行求解。权重确定的原理是:调用层次结构模型中任一层次上的各因子进行两两比较,构造比较判断矩阵,然后经过演算最终求得权重^[7-8]。因模糊数学方法有严格的逻辑性,因此在确定权重的过程中必须进行滤波和修复处理,从而尽可能地剔除主观成分,使其求得的权重符合客观事实。以下是推算权重的基本步骤:

2.2.1 构造判断矩阵 用 A 表示目标,以 u_i, u_j 表示评价因素,其中 $u_i \in U (i = 1, 2, 3, \dots, n)$; u_{ij} 为 u_i 对 u_j 的相对重要性数值 ($j = 1, 2, 3, \dots, n$)。根

据上述符号的意义得 A-U 判断矩阵 P :

$$P = \begin{bmatrix} u_1 & u_2 & \cdots & u_n \\ u_{11} & u_{12} & \cdots & u_{1n} \\ u_{21} & u_{22} & \cdots & u_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ u_{n1} & u_{n2} & \cdots & u_{nn} \end{bmatrix} \begin{matrix} u_1 \\ u_2 \\ \vdots \\ u_n \end{matrix}$$

u_{ij} 为标度并且按以下规则取值^[9]:当因素 u_i 与 u_j 相比,具有同等重要性,标度取 1;与因素 u_i 相比, u_j 稍微重要,标度取 3;与因素 u_i 相比, u_j 明显重要,标度取 5;与因素 u_i 相比, u_j 强烈重要,标度取 7;与因素 u_i 相比, u_j 极端重要,标度取 9;标度 2,4,6,8 分别表示相临判断为 1~3,3~5,5~7,7~9 的中值。因素 u_i 与 u_j 相比得到 u_{ij} ,则 u_j 与 u_i 相比得出 $u_{ji} = 1/u_{ij}$ 。

2.2.2 计算重要性排序 根据 A-U 判断矩阵 P,采用方根法求出最大特征方根所对应的特征向量 W。所求特征向量 W 即为各个评价因素的重要性排序,也就是各评价因子的权重分配。方根法计算步骤如下:

- ① 计算判断矩阵每 1 行元素的乘积 $M_i = \prod_{j=1}^n u_{ij} (i, j = 1, 2, 3, \cdots, n)$;
- ② 计算 M_i 的 n 次方根 $\bar{W}_i = \sqrt[n]{M_i}$;
- ③ 对向量 $\bar{W} = [\bar{W}_1, \bar{W}_2, \cdots, \bar{W}_n]^T$ 作归一化或

正规化处理,得 $W_i = \bar{W}_i / (\sum_{j=1}^n \bar{W}_j)$; $W = (W_1, W_2, \cdots, W_n)^T$ 即为所求特征向量,特征向量 W 的表达式中, $W_1, W_2, \cdots, W_n$ 为污染因子 $u_i (i = 1, 2, \cdots, n)$ 所对应的权重,即水质矩阵中污染物所对应的权重因子值。

- ④ 计算判断矩阵的最大特征方根 $\lambda_{max} = \sum_{i=1}^n \frac{(PW)_i}{nW_i} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(PW)_i}{W_i}$,其中 $(PW)_i$ 为向量 PW 的第 i 个元素,其值为:

$$PW = \begin{bmatrix} (PW)_1 \\ (PW)_2 \\ \vdots \\ (PW)_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_{11} & u_{12} & \cdots & u_{1n} \\ u_{21} & u_{22} & \cdots & u_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ u_{n1} & u_{n2} & \cdots & u_{nn} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} W_1 \\ W_2 \\ \vdots \\ W_n \end{bmatrix}$$

2.2.3 检验 以上得到的特征向量即为所求权重,但需要对判断矩阵进行一致性检验,以判断权重分配是否合理。其检验公式为:

$$CR = CI / RI$$

式中: CR 为判断矩阵的随机一致性比率; CI 为判断矩阵的一般一致性指标, $CI = \frac{1}{n-1} (\lambda_{max} - n)$; RI 为判断矩阵的平均随机一致性指标,对于 1~9 阶判断矩阵, RI 的取值如表 1 所示。

表 1 平均随机一致性指标 RI 的取值^[8]
Table 1 Average random consistency value RI

阶数 n Rank n	RI	阶数 n Rank n	RI	阶数 n Rank n	RI
1	0.00	4	0.90	7	1.32
2	0.00	5	1.12	8	1.41
3	0.58	6	1.24	9	1.45

当 $CR < 0.10$ 时,即认为判断矩阵具有满意的一致性,说明权重分配合理;否则就要调整判断矩阵,直到满足一致性要求为止。

3 西安市城市污水污染物分布特性及评价

3.1 水质指标及范围因子的确定

由于水质矩阵的横向坐标一般选用一些综合性水质指标,因此在此次评价中,水质矩阵纵向所选用的水质指标为 SS(悬浮固体)、COD(化学需氧量)、BOD₅(5 日生化需氧量)、TN(总氮)、TP(总磷);矩阵的横向是以 0.45 μm 作为范围因子(通常用 0.45 μm 将污染物分为悬浮物和溶解物 2 类)。经过多日对西安市城市污水水质监测的分析,最终建立的水

质矩阵如表 2 所示。

3.2 城市污水中主要污染物所占权重的计算

在权重计算过程中需要构造判断矩阵,比较污水特性评价中所使用水质指标的相对重要性,本研究主要比较不同水质指标对应的污染物对环境的危害程度。根据国家颁布的《污水综合排放标准》(GB 8978—1996)对污水中各类污染物排放浓度的要求,以及水质监测过程中获取的西安市污水水质特性试验数据,通过计算水质指标对应污染物的超标倍数,比较超标倍数的大小并构造判断矩阵,最终完成对西安市污水中一些主要污染物的权重计算和分配。

在《污水综合排放标准》(GB 8978—1996)中,规定的城市二级污水处理厂 SS(悬浮固体)、COD(化学需氧量)、BOD₅(5 日生化需氧量)、NH₄⁺-N

(氨氮)、磷酸盐的排放标准见表 3。

表 2 西安市污水水质评价的水质矩阵
Table 2 Water quality matrix of Xi'an wastewater quality evaluation

评价指标 Evaluation index	平均含量/(mg·L ⁻¹) Mean value		
	悬浮物 Suspended matter	溶解物 Soluble matter	总计 Total
SS	162.3	0	162.3
COD	181.8	93.7	275.5
BOD ₅	84.8	51.6	136.4
TN	11.1	39.1	50.2
TP	4.10	4.06	8.16

表 3 城市二级污水处理厂主要污染物排放标准
Table 3 Integrated wastewater discharge standard of secondary WWTP

水质指标 Water quality index	排放标准/(mg·L ⁻¹) Discharge standard	水质指标 Water quality index	排放标准/(mg·L ⁻¹) Discharge standard
SS	≤20	NH ₃ ⁺ -N	≤15
COD	≤60	磷酸盐 Phosphate	≤0.5
BOD ₅	≤20		

由于城市污水中的含氮、含磷污染物种类较多，因此在计算超标倍数时用总氮代替氨氮指标，用总磷代替磷酸盐指标。根据排放要求，即根据表 2 和表 3 所提供数据对西安市城市污水中污染物含量高

出排放标准的倍数，即超标倍数进行了计算，其结果见表 4。

表 4 西安市城市污水污染超标倍数
Table 4 Excess multiples of Xian municipal wastewater

评价指标 Evaluation index	总含量超标倍数 Total Excess multiples	悬浮物含量超标倍数 Suspended matter excess multiples	溶解物含量超标倍数 Soluble matter excess multiples
SS	7.12	7.12	-1.00
COD	3.59	2.03	0.56
BOD ₅	5.82	3.24	1.58
TN	2.35	-0.26	1.61
TP	15.32	7.20	7.12

比较表 4 所示各类污染物超出排放标准的倍数，根据倍数的大小确定其中任意两指标的相对重要性(即对环境水体的危害度)，构造判断矩阵，并结合标度赋值规则给判断矩阵赋值，可得：

SS XOD BOD₅ TN TP

$$P = \begin{bmatrix} 1 & 3 & 2 & 5 & 1/3 \\ 1/3 & 1 & 1/2 & 2 & 1/7 \\ 1/2 & 2 & 1 & 4 & 1/4 \\ 1/5 & 1/2 & 1/4 & 1 & 1/8 \\ 3 & 7 & 4 & 8 & 1 \end{bmatrix} \begin{matrix} \text{SS} \\ \text{COD} \\ \text{BOD}_5 \\ \text{TN} \\ \text{TP} \end{matrix}$$

由上式可求得： $\overline{W}_1=1.888\ 2$ ， $\overline{W}_2=0.529\ 6$ ， $\overline{W}_3=1.000$ ， $\overline{W}_4=0.297\ 1$ ， $\overline{W}_5=3.365\ 9$ ；判断矩阵的特征向量为： $W=(0.266\ 7,0.074\ 8,0.141\ 2,0.042\ 0,0.475\ 3)$ ；矩阵的最大特征方根 $\lambda_{max}=5.033\ 2$ 。

由于 $CI=(\lambda_{max}-5)/(5-1)=0.008\ 3$ ，查表 1 可知 $n=5$ 时， $RI=1.12$ ，所以 $CR=CI/RI=$

$0.015\ 9<0.1$ ，表明判断矩阵具有满意的一致性，即说明权重分配合理，特征向量 $W=(0.266\ 7,0.074\ 8,0.141\ 2,0.042\ 0,0.475\ 3)$ 可以作为权重向量。

以各类污染物的悬浮态与溶解态为权重分配对象，利用同样方法构造出 1 个 9 阶 $A-U$ 判断矩阵 P 并进行赋值，根据矩阵 P 进行权重分配，可分别计算出各类悬浮态、溶解态污染物所占权重。将两次权重计算结果与水质矩阵相结合，其评价结果见表 5。从表 5 可以看出，SS(悬浮固体)、COD(化学需氧量)、BOD₅(5 日生化需氧量)、TN(总氮)、TP(总磷)所对应的权重分别为 0.266 7、0.074 8、0.141 2、0.042 0、0.475 3，其中 TP、SS、BOD₅ 所占权重较大，这表明从污染物总量控制的角度出发，所评价的西安市城市污水中含磷污染物、悬浮物和有机物对环境及水体污染的危害较大。另外，由于所评价城市污水中悬浮态污染权重之和为 0.637 3，与溶解态污染物的权重之和 0.362 7 相比，显示出所评价

污水中悬浮态污染物是必须首先去除的。

表 5 西安市城市污水特性评价结果

Table 5 Evaluation result of Xi'an municipal wastewater characteristic

评价指标 Evaluation index	权重 Weight	悬浮物/(mg·L ⁻¹) Soluble matter	权重 Weight	溶解物/(mg·L ⁻¹) Suspended matter	权重 Weight
SS	0.266 7	162.3	0.224 0	0	0
COD	0.074 8	181.8	0.058 9	93.7	0.025 9
BOD ₅	0.141 2	84.8	0.104 3	51.6	0.054 6
TN	0.042 0	11.1	0.022 2	39.1	0.054 6
TP	0.475 3	4.10	0.227 8	4.06	0.224 0
权重合计 Total weight	1	—	0.637 3	—	0.362 7

目前,我国城市污水处理多采用二级处理工艺,但是用于环境治理的投资并不充裕,尤其是经济欠发达且干旱缺水的西部地区,用于污水处理的费用更是紧缺。因此在污水处理方法的选择上也可有相应的侧重点,如可利用一些经济、简单的污水处理方法首先去除污水中对环境危害较大的污染物。以西安市城市污水评价结果为例,在投资有限的情况下,应首先考虑选择以处理悬浮物为主,且紧凑、高效、节能、经济的污水处理工艺,这为经济发展程度较低、资金短缺地区污水处理方法的选择,提供了一个有益的参考。

4 结 论

通过水质矩阵与权重分析相结合,不但给出了所评价城市污水的污染物浓度以及分布特性,同时判断出对环境危害较大且需要首要去除的污染物。如果仅依据污染物的浓度、含量百分比等较模糊的信息,则不易确定合理的处理工艺,因此这种评价方法具有重要的实际意义。

近年来,城市污水的强化一级处理成为研究的热点,并有专家提出了城市污水强化一级处理的重要性^[10]。通过对污水特性的评价结果,可以判断出所评价污水强化一级处理时应去除的污染物目标,若污水中悬浮态污染物为突出污染因素,那么将其作为强化一级处理的目标,并以此选择合理的处理工艺就较为合理。因此,在对污水处理工艺进行选择论证时,通过评价可以得到更丰富的原始设计信息,使一些模糊的判断定量化,避免主观判断的不确定性,从而为污水处理工艺的正确选择提供理论依据。

当然,要得到合理的评价结果,首先必须以可靠的试验数据为依据。另外权重分析中,对判断矩阵的合理赋值是一个关键,根据不同的依据进行赋值,权重分配得到的结果有可能不同。因此,还需要对判断矩阵的构造和合理赋值进行进一步深入的研究。

[参考文献]

[1] Odegaard H. The influence of wastewater characteristic on choice of wastewater treatment method [C]//Proc Nordic Conf. Nitrogen removal and biological phosphate removal. Oslo, Norway: Norwegian University Press, 1999,135-147.

[2] 郭劲松,王 红,龙腾锐. 水资源水质评价方法分析与进展[J]. 重庆环境科学,1999,21(6):1-9.

[3] 于文柱,刘哲人,单丽莎,等. 齐齐哈尔市混合污水的特征[J]. 黑龙江环境通报,2005,29(4):53-54.

[4] 乐林生,鲍士荣,康兰英,等. 黄浦江上游原水水质特征与处理对策[J]. 给水排水,2005,31(7):26-31.

[5] Tambo N, Tasuku K. Treatability evaluation of general organic matter. Matrix conception and its application for a regional water and waste water system[J]. Water Research, 1978, 12, 931-950.

[6] Odegaard H. Norwegian experience with chemical treatment of raw wastewater [J]. Water Science & Technology, 1992, 25 (12):255-263.

[7] 扈 垚. 实用模糊数学[M]. 北京:科学技术文献出版社, 1989:191-206.

[8] 张龙江. 评价水质评价的模糊综合评判——加权平均复合模型应用[J]. 环境工程,2001,19(6):53-55.

[9] 张美华,陈 宏. 几种模糊聚类法在环境质量综合评价中的应用[J]. 重庆环境科学,1999,21(3):13-16.

[10] 潘碌亭,肖 锦,赵建夫,等. 中国城市污水强化一级处理研究现状与进展[J]. 环境污染与防治,2003,25(1):29-32.