

一种新的水质评价模式

陈飞星

(北京师范大学环科所, 北京)

A NEW MODEL OF WATER QUALITY EVALUATION

Chen Feixing

(Institute of Environmental Sciences, Beijing Normal University, Beijing)

Abstract

The present thesis puts forward a new model for evaluating water quality. And its practicability and superiority are proved by comparing with other models and practical application.

国内外现有的各类环境质量评价模式，各有优缺点，无论在科学性、合理性和实际应用价值方面都有待于进一步的研究和提高。在综合比较、批判吸收的基础上，本文提出了一种新的水质评价模式。下面首先阐述新模式的计算评价步骤（以四川省沱江水质评价为例），然后通过对已有的各类评价模式的分析，比较其优缺点。

一、

新模式的计算评价步骤如下：

(一) 计算各污染物指标对不同段别（五级）水质标准的隶属度。

隶属度可用隶属函数表示，根据需要可选择不同的隶属函数。由于各污染指标的污染级别与其标准值之间的关系难于用精确而简单的函数关系来描述，又考虑便于计算且不致引起较大的误差，本文设计的隶属函数如下：

第一级水的隶属函数为：

$$r_{ij} = \begin{cases} 1, & C_i < S_{i1} \\ \frac{C_i - S_{i1}}{S_{i2} - S_{i1}}, & S_{i1} \leq C_i < S_{i2} \\ 0, & C_i \geq S_{i2} \end{cases}$$

第j ($j = 2, 3, 4$) 级水的隶属函数为：

$$r_{ij} = \begin{cases} 0, & C_i \leq S_{ij-1}, C_i \geq S_{ij+1} \\ \frac{C_i - S_{ij-1}}{S_{ij} - S_{ij-1}}, & S_{ij-1} < C_i \leq S_{ij} \\ \frac{C_i - S_{ij+1}}{S_{ij} - S_{ij+1}}, & S_{ij} < C_i \leq S_{ij+1} \end{cases}$$

最后一级水的隶属函数为：

$$r_{i5} = \begin{cases} 0, & C_i \leq S_{i5} \\ \frac{C_i - S_{i5}}{S_{i6} - S_{i5}}, & S_{i5} < C_i \leq S_{i6} \\ \left[\frac{C_i}{S_{i6}} \right], & C_i > S_{i6} \end{cases}$$

以上各式中 C_i 为第 i 种污染物指标实测浓度值， S_{ij} 为第 i 种污染物指标 j 级水质标准值。

注意 $C_i < S_{i1}$ 和 $C_i > S_{i5}$ 条件下隶属度值的记录方法。当 $C_i < S_{i1}$ 时，环境决策者一般无意再细究 $C_i = ?$ 而 $C_i > S_{i5}$ 时，则常引起密切的关注，究竟 C_i 多大，以便确定其削减量。因此，若 $C_i < S_{i1}$ ，取 $r_{i1} = 1$ ，以示与 $r_{ij} = 1.0$ ($C_i = S_{ij}$, $j = 1, 2, \dots, 5$) 有别；当 $C_i > S_{i5}$ 时，若也简单取 $r_{i5} = 1$ 会丢掉某些重要的信息，现取 $r_{i5} = [C_i / S_{i6}]$ (符号 $[]$ 表示与模糊数学中的定义稍有出入)，就使评价结果对水质污染治理有了直接的指导意义。例如从 $r_{i5} = [1.8]$ ，不需去查实测资料，便可知 $C_i = 1.8S_{i6}$ ，而 S_{i6} 是环境决策者非常熟悉的数据。

取 C 为污染物单项指标的集合， S 为水质分级的集合： $C \{1, 2, \dots, n\}$ ， $S \{I, II, \dots, V\}$ 。计算 C 上 n 个污染物指标对 S 上五级水质标准的隶

属度，可得到一个 $5 \times n$ 阶模糊矩阵 R ：

$$\tilde{R} = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2n} \\ \vdots & & & \\ r_{n1} & r_{n2} & \cdots & r_{nn} \end{pmatrix}.$$

(二) 评价结果判别及其表达法

考察模糊矩阵 R ，取第 i 行中隶属度最大者——若出现两个（必相邻，且等于 0.5），为安全起见，取右边一个——所对应的水质级别为第 i 种污染物单项指标的评价结果。

表达评价结果时，采用补注隶属度的方法区别同级水质中污染程度上的差异。例如， I_{+} ，表明水质为 I 级偏轻， $V_{[1.8]}$ ，表明水质已达到 V 级偏重，若以 BOD_5 为例，还可知 $C_{BOD_5} = 1.8 \times 30 = 54 \text{ mg/l}$ 。

注意，当隶属度值 $r_{ij} = 1.0$ ，即 $C_i = S_{ij}$ ($j = 1, 2, \dots, 5$) 时，可省略补注。如 I (或 II, III, IV, V)，表明水质恰好达到 I (或 II, III, IV, V) 级水标准。

当 $0 < r_{ij} < 1$ 时，必须在隶属度值前加一正号或负号，才能区别同级水质中污染程度上的差异。我们规定，正号（省略）表示水质较该级水偏重，负号表示水质较该级水偏轻。例如，已知 N_1 和 N_2 断面的 BOD_5 对 IV 级水的隶属度均是 0.6，但评价结果分别为 $IV_{+0.6}$ 与 $IV_{-0.6}$ ，表明 N_1 断面的 BOD_5 为 IV 级偏重，即隶属于 IV 级水的程度达 60%，且隶属于 V 级水的程度达 40%；而 N_2 断面的 BOD_5 为 IV 级偏轻，即隶属于 IV 级水的程度也达 60%，但同时隶属于 III 级水的程度达 40%。熟悉环境标准的决策者由此便可推知两断面的 BOD_5 的污染浓度为：

$$C_{N_1} = S_6 + r_4(S_4 - S_6) = 30 - 0.6(30 - 15) = 21 \text{ mg/l},$$

$$C_{N_2} = S_3 + r_4(S_4 - S_3) = 5 + 0.6(15 - 5) = 11 \text{ mg/l}.$$

从这里不难看出，本文采用补注隶属度的方法用于区别同级水质中污染程度上的差异之意义所在了。

综合评价结果采用数字模式表示，其一般形式的写法为：

$$V^{\frac{b}{a}} IV^{\frac{b}{a}} III^{\frac{b}{a}} II^{\frac{b}{a}} I^{\frac{b}{a}}$$

b —— 达到某级水的污染物指标项数（若 $b = 1$ ，可省略） a —— b 项污染物指标中污染程度最严重项的隶属度。

实际工作中，只要写出单项指标评价结果中出现的水质级别，但各级别 b 值之和必须等于参加评价的污染物指标总项数 n 。如表 1 所示，参加评价的污染物指标总项数共有五项，其中有一项为 $V_{[1.8]}$ ，已达到 V 级偏重；有二项分别为 $IV_{+0.6}$ 和 $IV_{-0.6}$ ，该级水的相对最严重项是 $IV_{+0.6}$ ，达到 IV 级偏重；还有二项分别为 I 和 I_{-1} ，该级水的相对严重项是 I，所以，综合评价结果为 $V_{[1.8]} IV^{\frac{2}{3}} I^{\frac{1}{3}}$ 。

模糊矩阵 R 及其评价结果 表 1

$R \backslash S$	I	II	III	IV	V	评价结果	
						单项	综合
D O	1.0	0	0	0	0	I	
BOD ₅	0	0	0	0.6	0.4	IV _{+0.6}	
COD	0	0	0.4	0.6	0	IV _{-0.6}	V _[1.8] IV _{+0.6} I ₋₁
NH ₃ -N	1	0	0	0	0	I ₋₁	
E C	0	0	0	0	[1.8]	V _[1.8]	

注：EC 表示大肠杆菌。

二、

与已有的各类评价模式相比，新模式的特点是：

(一) 继承了已有的模糊数学评价模式中的精华——用隶属度描述水质分级，考虑了水质分级在实际情况下界线的模糊性，克服了用超标倍数划分水质级别的不合理性和人为分级的影响，使比标系数法与分级评分法在某些方面得到了结合。

显然，由于不同污染物同一超标倍数所产生的危害不同，且某一污染物的各级污染浓度与其产生的危害程度并不成简单的倍比关系，因此用超标倍数划分水质级别是不够恰当的。

分级评分法克服了比标系数法的某些不合理之处，但确定评分尺度却有很大的任意性和人为性，而且在划分水级时根据某一分级标准值“一刀切”的做法与比标系数法一样欠合理。如将 BOD_5 值 4.99 毫克/升与 5.10 毫克/升判为截然不同的污染等级，前者为 III 级水，后者为 IV 级水，而实际上两者相差很小；又将 BOD_5 值 5.10 毫克/升与 14.9 毫克/升判为完全相同的污染等级，两者同为 IV 级水，而实际上两者相差很大。

用隶属度描述水质分级，则可确切地划出

BOD_5 值为4.99毫克/升时水质级别为Ⅲ_{-0.99}，即隶属于Ⅲ级水的程度达99%，且隶属于Ⅱ级水的程度达1%；而5.10毫克/升及14.9毫克/升时其水质分别为Ⅲ_{0.99}及Ⅳ_{-0.99}，其含义可按前述方法类推（参见图1）。

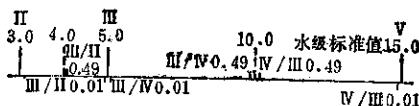


图1 根据污染物(BOD_5)浓度划分水级示意图

(二)设计了一种新颖的单项指标评价结果表达式，不仅定量精确，并且能真正体现出运用模糊数学手段评价水质污染的合理性和先进性。

以往评价工作中的指导思想常常局限于判定水质是否达到某级标准，且多数划分水级的方法不当，所以评价结果仅仅限于粗略的水质级别概念，或者由所谓的“精确”计算转而给出“重污染”、“污染”、或“轻污染”等模糊的评价结果。这样的评价结果与水质治理和规划管理没有内在的定量联系，从而导致评价工作与环境治理和规划管理工作脱节，难于收到良好的环境效益和经济效益。

仍以 BOD_5 为例，现设某一河段的实际情况为5.10毫克/升，而另一河段的实际情况为14.9毫克/升，按照以往的评价模式得到的评价结果将是：两河段的水质级别都为Ⅳ级水（参见图1）。如果水质规划目标要求水质达到三级以上的清洁水，那么环境决策者根据评价结果对两个河段势必采取同样的治理措施。很显然，第一河段 BOD_5 虽然超过了三级水标准，但要达到环境目标其削减量仅为0.1毫克/升，所以采取与第二河段(BOD_5 削减量为9.9毫克/升)同样的治理措施势必造成不必要的环境投资。

即便在已有的模糊数学评价模式中，也由于评价结果表达式未能突破旧框，过于简单粗糙，从而丧失了模式本身的合理性和先进性。按文献[2]、[3]中的隶属度计算方法和水级判别原则，将 BOD_5 值4.02毫克/升与9.99毫克/升判为完全相同的污染等级，两者同为Ⅲ级水，而实际上两者相差很大；又将 BOD_5 值9.99毫克/升与10.1毫克/升判为截然不同的污染等级，前者为Ⅲ级水，后者为Ⅳ级水，而实际上两者相差很小。由此可见，该模式

水级划分本质上仍旧是“一刀切”，与其他各类评价模式相比，只不过是将原来的截分界限 S_{ij} 改成了 $\frac{1}{2}(S_{ij} + S_{ij+1})$ 而已。

若采用新模式，则 BOD_5 值为4.02、5.10、9.99、10.1和14.9毫克/升时其水质级别分别为Ⅲ_{-0.51}、Ⅲ_{0.99}、Ⅲ_{0.51}、Ⅳ_{-0.51}和Ⅳ_{-0.99}（参见图1）。评价结果差异昭然，环境决策者便可“对症下药”，分别对不同污染水平的河段采取不同的治理措施，以最小的经济投资获得最好的环境效益。这就是新模式具有的更深一层的意义和价值。

(三)扬弃了已有的各类评价模式中方法不当且意义不大的权重计算和综合评价运算步骤，采用数字模式直接如实地反映水质污染全貌。

(1)在以往的多数评价模式中权重 w_i 都以主观或经验决定，缺乏理论依据。在已有的模糊数学评价模式中用下式计算权重值：

$$w_i = \frac{C_i / \bar{S}_i}{\sum_i C_i / \bar{S}_i}, \text{ 其中 } \bar{S}_i = \sum_j S_{ij}$$

该模式的本意是，在各污染物指标标准值的大小不同中体现它们不同的重要性，并根据它们的超标情况进行加权，超标越多，加权越大。以原则上讲，这种主张变权的思想基础是无可非议的。但计算模式中存在的实际问题是：

a、如表2所示，不同水质级别之间各级标准值的变化幅度是不同的，而且不同污染物在相同水质级别之间标准值的变化幅度又是不同的。如 \bar{S}_{DO} 介于 S_{DO1} 与 S_{DO3} 之间，而 \bar{S}_{EC} 介于 S_{EC4} 与 S_{EC5} 之间。显然，当 $C_i = \bar{S}_i$ 时，两种污染物造成的污染程度是不同的，按说应该给予不同的权重。可是，按上述公式计算得到的权重值却是相同的。由此可见，用 \bar{S}_i 作权重分配基准是不恰当的。

b、即使 \bar{S}_i 不存在上述a的问题，简单地用 C_i / \bar{S}_i 计算权重值也是不恰当的。因为不同污染物同一超标倍数（尤其当 $C_i / \bar{S}_i > 1$ 时）所产生的危害程度并不相同。

作者认为，以单个环境要素的评价而言，权重的问题并不如在区域环境质量综合评价中那么突出，而且可以认为各污染物的危害性已反映在变化幅度大小不同的分级标准值之中。因此，在隶属度计算过程中，上述加权的基本思想 $[w_i = f(C_i, S_{ij})]$ 已经得到了充分体现，并且避免了以往某些模式用一个固定的基准（如 \bar{S}_i 或 S_i 地面水最高允许浓度）

不同污染物水质级别标准的变化幅度

表 2

	S_{t_1}	S_{t_2}	S_{t_3}	S_{t_4}	S_{t_5}	\bar{S}_i	d_1	d_2	d_3	d_4
DO	8	6	4	3	1	4.4	2	2	1	2
BOD ₅	1	3	5	15	30	10.8	2	2	10	15
DOD _{cr}	6	12	18	60	150	49.2	6	6	42	90
NH ₃ -N	0.04	0.24	0.67	2.5	6.7	2.03	0.20	0.43	1.83	4.2
EC	500	10000	50000	100000	500000	132100	9500	40000	50000	400000

注：标准值的单位除EC为个/升以外，其余均为毫克/升。

标准选用城建部地水面水环境质量三级标准(HB3838-83)和82年拟定的污染状况下水质的三级标准(缺项参考地水面最高允许标准和国外部分标准)。

$$d_j = |S_{tj+1} - S_{tj}|, \quad j = 1, 2, 3, 4.$$

划分水级的不合理之处。上述的权重计算不仅重犯了以往的错误，而且就其用意而言亦属重复。

(2) 关于综合评价问题，以往多数采用迭加平均的办法。但其评价结果有时不能代表水质污染的实际情况，引起错觉。如某种污染物浓度很高，远超过标准，但其他污染物的浓度很低，算出的综合指数不高，所有污染因子浓度均较高，但未超过允许浓度，而算出的符合指数值反较高。这个问题在国外也引起重视，但未提出良好的解决办法，而只是在原来的基础上作一些修改。例如，Nemerow采用：

$$PI_j = \sqrt{\frac{(C_i/S_i)^2_{\text{最大}} + (C_i/S_i)^2_{\text{平均}}}{2}}$$

试图解决突出影响的问题。但遗憾的是，他过分强调了最大超标项的作用，而且反过来从 PI_j 中却又很难找出 $(\frac{C_i}{S_i})_{\text{最大}}$ 值所代表的污染物的真实污染程度，从物理意义上也难于作出合理的解释。北大关伯仁先生曾对此有专门的评述，这里就不再赘笔。近年来，又有人提出几何均数模式、向量模式、统计模式等，然而无论从数学模式还是从物理意义上讲，都未能突破原有的框架。

作者认为，目前的综合模式存在着两个弊端：
a、由于各污染物之间的协同，消长作用尚未研讨清楚，因此单纯依靠相加、相乘或开方等数学运算手段来实现综合是困难的。事实上，迄今为止的所谓综合，无一不是不考虑污染物相互作用情况的数学运算而已。

b、过分将“综合”的概念抽象化，导致计算方法复杂，综合指数值不易理解和掌握。若再由所谓的“精确计算值”转化成“重污染”、“污染”或“轻污染”等模糊的水质等级，且不说其转化标准尚存在问题，就是提高了些微的“分辨率”也被淹

没其中了。此外，由于过分强调综合，有些尽管在数学概念上合理的综合评价结果，在水质污染治理和规划管理中却不能发挥作用。限于目前的研究和管理水平，实际工作中环境决策者真正想知道的并非是那种高度抽象化的综合结果。因为一般认为污染程度重的项目不能被污染程度轻的所缓解，所以无论在用水或水质污染防治上，都希望了解比较具体的水质污染状况。如最坏及次坏等等的水质项目有几项，污染程度如何，以便制订相应的对策。但是，在这方面以往多数的评价模式却令人失望。

本文的数字模式，就是基于上述的考虑而提出的。笔者认为，新模式既简单又实用，既能反映水质污染的全貌，又能对污染程度进一步加以比较。在单项指标评价的基础上，并没做更多的数学运算，仅仅多了相似于“合并同类项”一个步骤，但评价结果却回答了我们最关心的问题。例如，IV_{0.7}⁺ II_{0.4}⁺，表示参加评价的指标共有 4 + 1 = 5 项，其中达到IV级水的污染指标有 4 项（占总项数的 80%），且最严重的污染程度已达IV级偏重(IV_{0.7}⁺)，而另一项指标则低于III级水质标准(II_{0.4}⁺)。此外，再看IV_{0.8}⁺ III_{0.9}⁺ II²，虽然最高水级也为IV级，但与上例比较而言，污染程度就要轻一些，达到IV级水的污染指标只占总项数的 40%，且最严重的污染程度仅为IV级偏轻(IV_{0.8}⁺)，还有一项指标则稍高于III级水标准(III_{0.9}⁺)，还有两项指标则低于或等于II级水标准(II²)。如是，表达式虽稍复杂些，但信息量之大，实为利多弊少。

除了上述种种利弊分析之外，根据作者的实践，还发现采用新模式与已有的各类评价模式对同一实例进行计算评价，当各单项指标污染级别大体相当时，综合评价结果基本一致；但当各单项指标

不同模式评价结果比较

表 3

断面号	27	30	34	38
内梅罗模式	IV	III	III	III
分级评分模式	IV	III	III	III
聚类分析模式	III	III	III	II
已有的模糊数学模式	IV	III	IV	II
新 模 式	IV _{0.67} III _{0.57}	III _{0.42} II _{-0.87}	IV _{2.0.93} III _{0.98} II _{0.59}	IV _{-0.61} III _{0.61} II _{0.67}
单项指标 评价结果	DO	III _{-0.63}	III _{-0.79}	II _{0.59}
	BOD ₅	III _{0.57}	III _{0.98}	III _{0.91}
	COD	III _{-0.62}	III _{-0.88}	II _{0.67}
	NH ₃ -N	IV _{0.87}	III _{0.58}	III _{0.61}
	EC	IV _{0.85}	II _{-0.87}	IV _{-0.61}
说 明	各单项指标污染级别大体相当			各单项指标污染级别相差悬殊

注：此表是根据84年3月沱江若干断面五个参数的实测资料用上述五种评价模式得到的结果。

污染级别悬殊时，只有新模式能如实地反映水质污染的真实情况，其他模式则常常掩盖或夸大了水质污染的严重性。如表3所示，其结果证明，新模式的可行性和优越性是经得起实践检验的。

参 考 文 献

- [1] 汪培庄，模糊集合论及其应用，上海科学出版社，上海，1983。
- [2] 容跃等，环境科学，3(2)，69~72(1982)。
- [3] 李祚泳等，环境科学学报，4(3)，204~212(1984)。
- [4] 黄元钩，上海环境科学，2(1)，41~43(1983)。

- [5] Ross, S.L., Water Pollution Control, 76(1), 113(1977).
- [6] Brown, R.M. et al., Water and Sewage Works, 117(10), 339~343(1970).
- [7] 唐永奎，环境科学，(2)，71~74(1979)。
- [8] 申葆诚等，环境科学，2(4)，57~60(1981)。
- [9] Nemerow, N.L., Scientific Stream Pollution Analysis, McGraw-Hill, New York, 1974.
- [10] 关伯仁，环境科学，(4)，67~71(1979)。
- [11] 白希孟等，中国环境科学，5(6)，38~42(1985)。
- [12] 林宗振，环境科学，6(2)，67~69(1985)。



中国环境土壤与土壤生态学术委员会

在重庆成立

中国环境土壤与土壤生态学术委员会于8月19日至23日在西南农业大学举行了成立大会暨学术讨论会。参加会议的有来自全国十省市十七个科研单位和高等院校的教授、专家和科技工作者24名。

大会由中国农学会土壤肥料研究会副秘书长刘怀旭同志主持，一些知名的老科学家发来了贺信。

北京农业大学白瑛副教授作了学术报告，到会代表对学术委员会成立的意义、环境土壤学的概念、任务和研究的主要内容等方面进行了热烈的讨论。代表们经过充分酝酿，推选白瑛同志为主任委员、程桂荪等三同志为副主任委员。

(黄润华供稿)