

# 苏州河的多水质评价研究及污染来源浅析

王秋彤

世外中学，上海市，200233；

**摘要：**本课题主要通过运用模糊评价法、综合指数评价法和特征雷达图法对近年来对苏州河水质开展评价研究，结果表明水质持续改善，综合整治有效。

**关键词：**上海市；水质；模糊评价；综合指数评价；特征雷达图

**DOI:** 10. 69979/3060-8767. 25. 11. 032

## 背景

苏州河，黄浦江最大支流，上海段 53.1 公里，自 1980 年代中期起，上海分阶段开展综合治理工程，水质显著改善。

## 1 研究方法

### 1.1 监测点位

上海市境内在苏州河上设置赵屯等 7 个监测断面。

### 1.2 数据来源

数据来源于上海市生态环境局和各区的环境监测局的监测部门的数据，监测方法成熟、数据完整可靠。

## 2 三种评价方法介绍

水质评价的方法主要有单指数法、分级评分法、概率统计法等。本研究主要运用水质数据的综合污染指数评价法和模糊评价法<sup>[1-2]</sup>，并创新性的引入特征雷达图法<sup>[4]</sup>开展评价。

### 2.1 水质综合污染指数

$$P = \sum_{i=1}^n P_i / n$$

除溶解氧外，单项污染指数计算公式：

$$P_i = \frac{C_i}{S_i}$$

式中：P——综合污染指数；

P<sub>i</sub>——单项污染指数；

C<sub>i</sub>——污染物实测浓度；

S<sub>i</sub>——相应水质功能类别的标准值；

n ——参与评价的水质项目。

溶解氧污染指数

$$P_i = \begin{cases} 0 & , C_i \geq C_{\text{饱}(t)} \\ \frac{(C_{\text{饱}(t)} - C_i)}{(C_{\text{饱}(t)} - C_{\text{标}(t)})} & , C_i < C_{\text{饱}(t)} \end{cases}$$

式中：

C<sub>饱</sub>(t) ——t 温度下的饱和溶解氧值；

C<sub>i</sub> ——t 温度下的溶解氧实测值；

C<sub>标</sub>(t) ——t 温度下相应水质类别的溶解氧标准值<sup>[3]</sup>，C<sub>标</sub>(t) = C<sub>饱</sub>(t) × 饱和度标。

1 综合污染指数 P 值分级

综合污染指数 P 值分级<sup>[3]</sup>可以对应水质类别从 I~V 类，以及劣 V 类。

### 2.2 模糊数学综合评价

该法能处理水质评价的模糊性问题，加权评价可全面、准确反映水质状况。

1 评价步骤

I 建立水质评价分级系统。

II 建立每种水质评价因子相应于不同水质级别的隶属函数。

III 将各水质断面的各实际监测值代入相应的隶属函数，计算隶属度得到相应的隶属度矩阵 R。

IV 确定 n 个评价因子的权重值，归一化为作成权重向量 A。以污染物的超标情况决定权重，其计算式为：

$$a_i = c_i / s_i$$

$$s_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^m s_{ij}$$

其中 a<sub>i</sub>、c<sub>i</sub>、s<sub>i</sub> 分别为第 i 种污染物的权重、浓度实测值和多级浓度标准值的平均值，S<sub>ij</sub> 为第 i 种污染物第 j 级的标准值，n 为分级数。为了进行模糊复合运算，各单因子权重必须归一化，即

$$w_i = (c_i / s_i) / (\sum_{i=1}^n c_i / s_i)$$

上述 m 项参数指标，分别计算出权重后，组成一个 1×m 矩阵 A：

$$A = (V_1, V_2, V_3, \dots, V_m)$$

V 模糊矩阵的复合运算

用模糊数学矩阵的乘法求出运算结果  $A \circ R$ 。

$$B = A \circ R = (V_1, V_2, V_3, \dots, V_m) \times \begin{bmatrix} r_{1,1} & r_{1,2} & \dots & r_{1,n} \\ r_{2,1} & r_{2,2} & \dots & r_{2,n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ r_{m,1} & r_{m,2} & \dots & r_{m,n} \end{bmatrix} = (b_1, b_2, b_3, \dots, b_n)$$

式中  $b_n$ —复合运算结果，此结果对应于各级水质的隶属度，水质评价结果一般采取隶属度最大的原则。

## 2 隶属函数的建立

隶属函数一般采用“降半梯形”的函数。公式如下：

$$R_1(X) = \begin{cases} 1 & X \leq U_1 \\ \frac{U_2 - X}{U_2 - U_1} & U_1 < X < U_2 \\ 0 & X \geq U_2 \end{cases}$$

$$R_j(X) = \begin{cases} 0 & X \leq U_{j-1}, X \geq U_{j+1} \\ (X - U_{j-1}) / (U_j - U_{j-1}) & U_{j-1} < X < U_j \\ (U_{j+1} - X) / (U_{j+1} - U_j) & U_j \leq X < U_{j+1} \end{cases} \quad j=2$$

$$R_5(X) = \begin{cases} 0 & X \leq U_4 \\ (X - U_4) / (U_5 - U_4) & U_4 < X < U_5 \\ 1 & X \geq U_5 \end{cases}$$

按照国标<sup>[3]</sup>，制作每个指标的隶属函数。

## 2.3 特征雷达图法

该法对污染物监测数据归一化，用于表征一定时间或区域的污染特征，可直观展示污染物在时空上的变化。该法最初用于大气污染评价<sup>[7]</sup>，本课题将其创新性应用于水质分析，利用单点历史数据开展河道水质评价，并尝试识别多种污染类型。

### 2.3.1 特征雷达图的绘制

(a) 将各污染物进行成分谱的百分比化，即计算特

定时间或站点的归一化成分谱  $Z_{ij}$ ，以削弱污染物浓度波动对整体污染特征判定的影响，计算公式见式(1)，其中  $c_{ij}$  为  $i$  时间/ $i$  断面第  $j$  种污染物原始质量浓度， $\text{mg/L}$ 。

$$Z_{ij} = c_{ij} / \sum_{j=1}^n c_{ij} \quad \text{式 (1)}$$

(b) 将特定时间或断面的归一化成份谱  $Z_{ij}$  同一定时期或区域的平均成份谱  $Z_j$  作商，得到污染物特征值  $CV_{ij}$ ，以扣除由于不同污染物间成份谱差异导致的对整体污染特征判定的影响，如式(2)所示。

$$CV_{ij} = Z_{ij} / \bar{Z}_j \quad \text{式 (2)}$$

(c) 计算一定时期或一定区域污染物标准值及上(下)限值，其中标准值通常取 1，上限为均值加上其标准差与该污染特征成分谱的均值的比值，数值大于 1，其计算公式为(3)。下限为均值减去其标准差与该污染特征成分谱的均值的比值，数值小于 1，其计算公式为(4)

$$\text{Max}_j = \bar{Z}_j + S_j / \bar{Z}_j \quad \text{式 (3)}$$

$$\text{Min}_j = \bar{Z}_j - S_j / \bar{Z}_j \quad \text{式 (4)}$$

式中， $\text{Max}_j$  为第  $j$  种污染物的上限， $\text{Min}_j$  为第  $j$  种污染物的下限， $S_j$  为第  $j$  种污染物的标准偏差。

最后将标准值、特征值和上下限值在 EXCEL 用特征雷达图的绘图工具绘制出一张污染物的特征雷达图。本课题选取了 5 种水质常规污染因子，所以用五边形的特征雷达图。

由于上海的地表水以水质 III 类标准开展评价，本研究尝试将对应水质 III 类标准各个水质污染指标的  $P_i$  值代入特征雷达图的计算，得到对应的各个断面在不同时间的特征雷达图。

### 2.3.2 苏州河水质状况

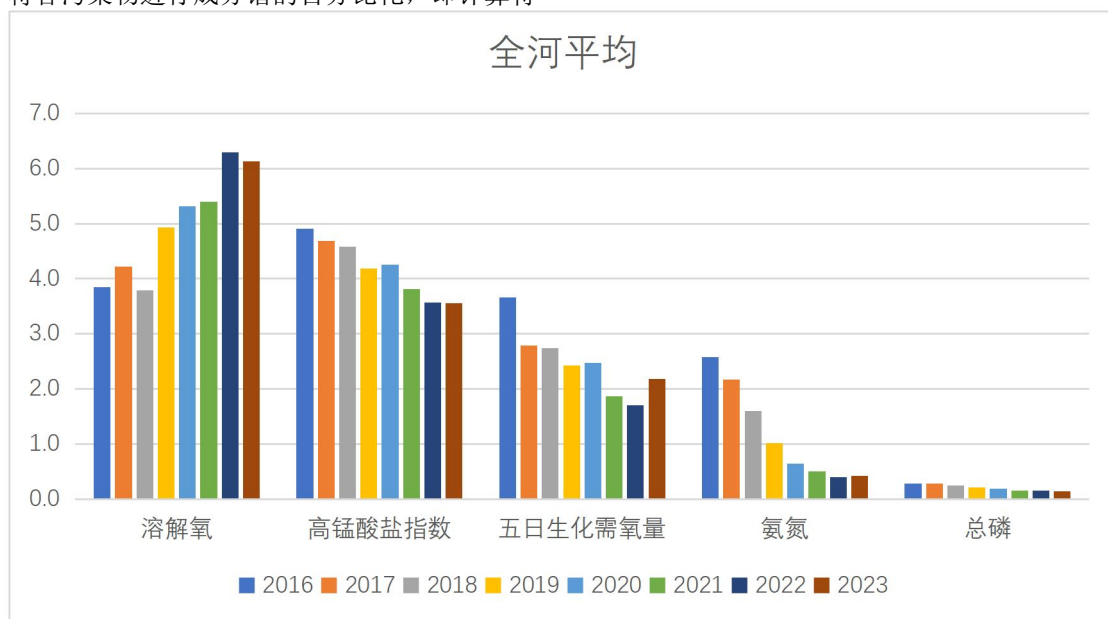


图 1 全河平均历年水质变化图

近年苏州河水质整体改善,D0 上升,高锰酸盐指数、BOD<sub>5</sub>、氨氮和总磷下降,其中氨氮降约 84%、总磷降约 46%,但 2023 年因生产恢复部分指标反弹。

4 苏州河水质的评价

根据国标<sup>[3]</sup>,地表水环境质量按功能高低可依次划

分为五类,定性评价可分为: I 类和 II 类——优、III 类——良好、IV 类——轻度污染、V 类——中度污染、劣 V 类——重度污染。

4.1 苏州河全河平均水质评价

4.1.1 模糊评价法

表 1 历年苏州河全河平均水质模糊评价结果

	I	II	III	IV	V	I~II	III	IV~V
2016	0.000	0.093	0.239	0.281	0.387	0.093	0.239	0.668
2017	0.093	0.072	0.189	0.283	0.364	0.164	0.189	0.646
2018	0.102	0.085	0.254	0.498	0.060	0.187	0.254	0.558
2019	0.117	0.129	0.718	0.036	0.000	0.246	0.718	0.036
2020	0.137	0.394	0.469	0.000	0.000	0.531	0.469	0.000
2021	0.136	0.548	0.316	0.000	0.000	0.684	0.316	0.000
2022	0.260	0.608	0.133	0.000	0.000	0.867	0.133	0.000
2023	0.245	0.639	0.116	0.000	0.000	0.884	0.116	0.000

全河平均水质在不断好转。从 V 类变到 II 类。2019 年好转尤为明显,可能是 2018 年启动了实施苏州河综合整治四期工程。22 年又有明显好转, I~II 类的占比

达到 86.7%。可能是疫情封控期间,人类活动减少排污量减少。

4.1.2 综合指数法

表 2 历年苏州河全河水质综合指数评价结果

	Pi 溶解氧	Pi 高锰酸盐指数	Pi 五日生化需氧量	Pi 氨氮	Pi 总磷	P	首要	P 值分级
2016	1.449	0.818	0.914	2.576	1.403	1.432	氨氮	V
2017	1.346	0.781	0.696	2.169	1.429	1.284	氨氮	V
2018	1.465	0.764	0.686	1.600	1.235	1.150	氨氮	V
2019	1.152	0.698	0.607	1.014	1.040	0.902	总磷	IV
2020	1.046	0.710	0.618	0.649	0.920	0.788	总磷	IV
2021	1.023	0.636	0.468	0.507	0.774	0.682	总磷	III
2022	0.777	0.595	0.425	0.397	0.743	0.587	总磷	III
2023	0.824	0.593	0.546	0.421	0.726	0.622	总磷	III

P 值从 1.432 下降到 0.622,氨氮下降最快,2022 年为 2016 年的 15%。首要污染物从氨氮在 2019 年转为

总磷。P 值分级从 V 类变到 III 类。

4.1.3 特征雷达图

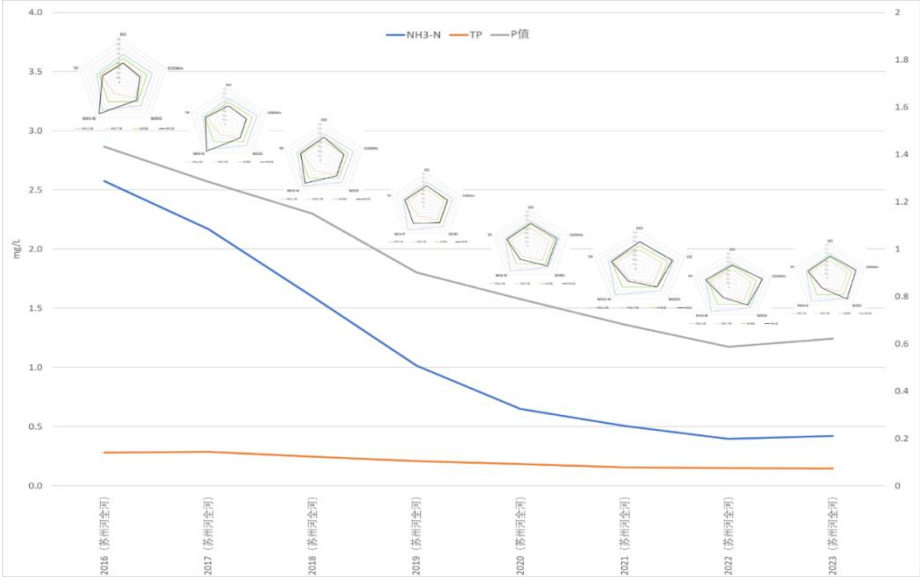


图 2 苏州河全河各年份特征雷达图

氨氮特征值由 16、17 年的高水平降至 2023 年低于下限，DO 改善，治理成效显著。TP 虽有所下降却更为突出，高锰酸盐指数和 BOD<sub>5</sub> 的特征值突出，反映有机污染治理仍是水质改善的难点。

### 4.3 评价结果比较

#### 4.3.1 水质类别评价比较

三种方法都可以准确评价各个断面的水质状况。在 16、17 年，苏州河各断面的水质均是 V 类，模糊评价法和综合指数法评价一致，而特征雷达图法不能直接说明水质的类别。但其它几年，模糊评价法的评价结果会比综合指数法的评价结果好一些，可能是模糊评价考虑了各个污染指标的权重，而综合指数法的各个污染指标的权重是平均的。在污染物浓度水平较低或当水质出现变化时，模糊评价法和综合指数法这两种方法可能会出现不同的评价结果，这可能与计算方法有关。

#### 4.3.2 定量评价比较

模糊评价法可以查看各类水质的隶属度，而综合指数法通过 P 值的大小可以直观的查看整体水质的变化情况。一个信息量大，一个简单直观，各有优缺点。而特征雷达图法基于各个污染物的 P 值，画出的图能直观看出某个时期主要的污染物质，并从时间序列上查看各个污染物的变化情况，信息量大。

#### 4.3.3 主要污染指标比较

模糊评价法通过权重值确定主要污染物，综合指数法通过  $P_i$  值的大小确定主要污染物，特征雷达图通过图型的变化来确定主要污染物，直观性较好，其结果较一致。

#### 4.3.5 污染源浅析

苏州河水质主要受工业、农业和生活污染源影响，氨氮与总磷为主要污染物。随着综合整治推进，废水排放减少、处理能力增强，首要污染物由氨氮转为总磷，其主要来源为含磷生活污水和农业活动（如牲畜粪便、作物残留及化肥使用）。因此控制总磷排放是下一步治理关键。同时，市区断面氨氮污染仍较突出，或与人口密集区生活污水偷排漏排有关。

### 5 结论

（1）近 8 年苏州河 7 个断面水质持续改善，氨氮下降约 80%、总磷下降约 50%，但 2023 年出现反弹，主要得益于综合整治。

（2）三种评价方法各有优势：综合指数法突出首要污染物，利于溯源；模糊评价直观反映总体水质，但难指向污染物控制；雷达图不能直接判级，但能直观展现主要污染物及其时序变化，信息量大。

（3）总体水质良好，首要污染物为总磷。

### 参考文献

- [1] 田野，李畅游，赵胜男，等. 基于模糊数学的黄河内蒙古段水环境质量评价[J]. 水土保持通报，2016, 36（5）：162-166.
- [2] 李梅，王妲，熊丽黎. 模糊数学方法在鄱阳湖水质评价中的应用[J]. 江西水利科技，2015, 41（3）：160-164.
- [3] GB3838-2002，地表水环境质量标准.
- [4] 段菁春，胡京南，谭吉华，等. 特征雷达图的设计及其在大气污染成因分析中的应用[J]. 环境科学研究，2018, 31（8）：1329-1336.