

# 地表水水质评估模型与统计方法研究进展

董崇哲

重庆三峡学院重庆市三峡库区水环境演变与污染防治重点实验室

DOI:10.12238/eep.v7i12.2369

**[摘要]** 随着全球人口增长、工业化和城市化进程的加速,地表水面临着日益严峻的污染挑战,这使得对地表水水质进行准确、有效的评估成为当务之急。为了实现这一目标,众多水质评估模型与统计方法应运而生,它们在揭示地表水水质状况、追踪污染源以及预测水质变化趋势等方面发挥着不可或缺的作用。本文旨在对地表水水质评估中常用的水质量指数(WQI)模型、污染指数(PI)模型以及统计方法进行全面、系统的综述,剖析其原理、应用现状、优势与不足,并展望未来发展方向。

**[关键词]** 地表水水质; 水质指数; 污染指数; 模型评估

中图分类号: X131.2 文献标识码: A

Advancements in modelling and statistical methods for the assessment of surface water quality

Chongzhe Dong

Key Laboratory of Water Environment Evolution and Pollution Prevention in Chongqing Three Gorges Reservoir Area,

Chongqing Three Gorges University

**[Abstract]** With the growth of the global population and the acceleration of industrialization and urbanization, surface water is facing increasingly severe pollution challenges. This makes it urgent to conduct accurate and effective assessments of surface water quality. To achieve this goal, numerous water quality assessment models and statistical methods have emerged. They play an indispensable role in revealing the water quality status of surface water, tracing the sources of pollution, and predicting the trends of water quality changes. This paper aims to provide a comprehensive and systematic review of the commonly used Water Quality Index (WQI) models, Pollution Index (PI) models, and statistical methods in the assessment of surface water quality. It analyzes their principles, application status, advantages, and disadvantages, and looks ahead to future development directions.

**[Key words]** Surface water quality; Water quality index(WQI); Pollution index(PI); Modelling assessment

## 引言

水质分析是一种了解地表水总体状况和生态系统健康状况的有效且经济的方法。分析可以监测地表水质量在空间和时间区域变化。这种质量分析以用水模式、水源、地理位置以及需要测量质量和纯度的程度为基础。因此,在过去的二十年里,人们进行了大量研究来分析水质,以了解生态系统的整体健康状况和地表水的状况<sup>[1]</sup>。研究工作利用不同的水质指数(WQI)模型、污染指数(PI)模型和用于定期评估和时间序列分析的统计方法来评估水质。

## 1 WQI模型

### 1.1 模型概述与发展

WQI模型的核心在于将多个复杂的水质参数进行综合考量,转化为一个直观的单一数值<sup>[2]</sup>,使得人们能够快速、清晰地了解水体的整体质量状况。其应用的历史可以追溯到19世纪中期,真正意义上的WQI模型是在20世纪60年代由Horton提出的<sup>[3]</sup>,该

模型选取了10个水质参数,为后续的研究和应用奠定了基础。目前,全球范围内常用的WQI模型已多达23种,这些模型在不同地区、不同水体类型的水质评估中发挥着重要作用。

### 1.2 模型构建步骤

#### 1.2.1 参数选择

在WQI模型构建过程中,参数选择是至关重要的第一步。如图1所示,参数数量的选择范围较为宽泛,从4个到26个不等,不过多数模型倾向于采用8-11个参数。参数的选取受到多种因素的综合影响,包括地理位置的差异,不同地区的地质、气候条件会导致水体的天然特性不同;水体的物理、化学和生物特性决定了哪些参数能够更准确地反映其质量状况;富营养化情况、健康风险、氧气含量、溶解性成分等因素也在参数选择中起着关键作用;此外,用水目的、环境意义以及数据的可得性也是不可忽视的因素。

#### 1.2.2 子指数计算

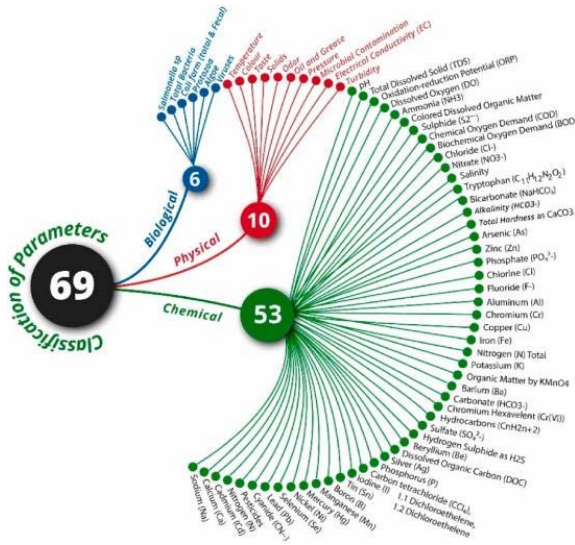


图1 69项水质参数及分类(引自: Surface water quality profiling using the water quality index, pollution index and statistical methods: A critical review)

为了将不同量纲、不同变化范围的水质参数转化为具有可比性的无量纲数值,需要进行子指数计算。常用的计算方法有多种,参数浓度法直接利用参数的浓度值进行计算,操作相对简单,但可能无法充分考虑参数的变化范围对水质的影响;线性插值函数法通过在给定的标准值区间内进行线性插值,能够更灵活地反映参数的变化对水质的影响;评级曲线函数法则根据预先设定的评级曲线,将参数测量值映射为相应的子指数。

1.2.3 权重分配

权重分配的目的是为了体现不同参数在反映水质状况中的相对重要性。在众多WQI模型中,多数采用不等权重法,即根据参数的重要程度赋予不同的权重。例如,对于饮用水源评估,与人体健康密切相关的参数可能会被赋予较高的权重。确定权重的方法主要有层次分析法(AHP)和House指数法。AHP通过构建层次结构模型,对不同参数的相对重要性进行两两比较,从而确定权重;House指数法则根据专家意见和经验来分配权重。合理的权重分配对于减少模型的不确定性、提高评估结果的准确性至关重要。

1.2.4 综合计算

运用聚合函数对加权后的子指数进行综合计算,以得到最终的WQI值。常见的聚合函数包括加法函数、乘法函数、组合聚合函数、调和平均平方根函数、最小算子函数以及线性/非线性聚合函数等。每个WQI模型都有其特定的评级标准,根据计算得到的WQI值与评级标准进行对比,即可对水质进行分类,如将水质分为优秀、良好、中等、较差等不同等级,为水质管理和决策提供直观的依据。

1.3 模型不确定性处理

由于WQI模型是基于数学聚合函数构建的,其在应用过程中不可避免地存在不确定性,这种不确定性主要来源于模型构建的各个环节。为了降低这种不确定性,首先需要合理确定参数数

量,确保所选参数能够全面、准确地反映水质状况。其次,采用可靠的监测方法和数据处理技术。足够的数量级和代表性能够提高模型的稳定性。在子指数规则和权重因子的选择上,需要充分考虑参数的实际意义和相互关系,避免因不合理的选择不掩盖参数的重要性<sup>[4]</sup>。此外,优先采用最小算子聚合函数,因为该函数能够在一定程度上减少极端值对结果的影响,提高模型的稳健性。

2 PI模型

2.1 模型概述与分类

PI模型从污染程度的角度出发,对地表水水质进行量化评估。其评估的核心依据是水体或沉积物中重金属的浓度<sup>[5]</sup>。PI模型可以分为重金属污染指数模型和沉积物污染指数模型,常见重金属元素及其分类见表1。在重金属污染指数模型中,常用的有重金属污染指数(HPI)、重金属评价指数(HEI)、污染程度指数(Cd)等;沉积物污染指数模型则包括富集因子(EF)、地累积指数(Igeo)等。这些模型通过对重金属浓度的分析,能够直观地反映水体的污染程度。

表1 常见重金属元素及其分类

分类依据	类别	常见重金属	特性及说明
对生物毒性	一般重金属	锌(Zn)、锰(Mn)、铜(Cu)、镍(Ni)等	在低浓度时可能是生物生长发育所必需的微量元素,但高浓度时会对生物产生毒害作用。
	有毒重金属	铅(Pb)、镉(Cd)、汞(Hg)、铊(Tl)等	对生物体具有显著毒性,即使在极低浓度下也可能对生物的生理功能、神经系统、免疫系统造成严重损害,且通常不是生物生长所必需的元素。
元素性质及相关性	黑色重金属	铁(Fe)、锰(Mn)、铬(Cr)等	表面常呈现黑色或灰黑色氧化膜,在工业生产中具有重要地位,如钢铁生产中,铁是主要成分,锰和铬用于改善钢的性能。
	有色重金属	铜(Cu)、铅(Pb)、锌(Zn)、镍(Ni)、锡(Sn)等	通常具有各种鲜艳颜色;在电气、电子、建筑、机械制造等众多领域广泛应用,如铜良好的导电性使其大量用于电线电缆制造。

2.2 模型构建步骤

PI模型的构建步骤与WQI模型有一定的相似性。首先,需要根据所要测量的污染类型,确定参与评估的参数。接着计算子指数和权重。最后,通过聚合函数对指数和权重进行计算,得出污染指数。根据预先设定的标准,将污染指数与相应的阈值进行比较,从而判断水体的污染程度,如将污染程度分为无污染、轻度污染、中度污染和重度污染等不同等级。例如,HPI模型会计算每个污染参数的子指数,并根据其相对重要性赋予权重,最后通过特定的聚合函数计算HPI值;而HEI模型则直接使用参数值在聚合函数中进行计算,省略了子指数和权重计算的步骤。

2.3 模型不确定性处理

PI模型在应用过程中,其结果可能会受到多种因素的影响。一方面,在计算污染指数时,若使用重金属的绝对浓度,而不考虑其生物毒性差异,可能会导致对污染程度的误判。另一方面,不同的PI模型采用不同的聚合函数和评估标准。在应用PI模型时,需要充分考虑重金属的预期毒性,通过合理的子指数计算来反映其差异;同时,要考虑区域的整体污染负荷,通过权重分配

来体现不同地区的污染特点。在选择PI模型时,需要深入了解其聚合函数和评估标准的特点,谨慎选择适合特定研究目的和区域的模型。

### 3 统计方法

#### 3.1 方法概述与应用

统计方法在地表水水质数据分析中扮演着至关重要的角色,能够帮助研究者从大量复杂的数据中提取有价值的信息,揭示水质的时空变化规律,为水资源管理和决策提供科学依据。常见的统计方法包括聚类分析(CA)、主成分分析(PCA)、多元统计分析、熵权法、皮尔逊和斯皮尔曼相关系数、广义最小二乘法、线性混合和广义线性混合效应模型以及贝叶斯技术等。

#### 3.2 方法选择与验证

在实际应用中,选择合适的统计方法至关重要。不同的统计方法适用于不同的分析目的和数据特点<sup>[6]</sup>。例如,聚类分析适用于对大量水体样本进行分类,以识别具有相似水质特征的群组;主成分分析则更适用于减少数据维度,提取关键信息。在选择统计方法时,需要综合考虑环境数据的不确定性、不一致性、时空依赖性等特性。此外,统计模型建立后,需要进行验证以确保其准确性和可靠性。常用的验证方法包括RMSE、R<sup>2</sup>、MAE、最大绝对误差、平均绝对百分比误差、最大绝对百分比误差、归一化贝叶斯信息准则、预测值和置信区间等。通过这些验证方法,可以对不同统计方法的性能进行评估和比较,选择最适合的方法用于地表水水质分析。

### 4 结束语

WQI模型能够直观地反映水质的综合状况,为水资源管理者和公众提供了一个易于理解的水质评价指标。该模型在参数选择的标准化、对有毒成分的考虑以及模型不确定性的处理等方面仍有待改进。PI模型专注于衡量水体的污染程度,特别是对重

金属污染的评估具有重要意义,但不同模型之间的差异给结果的比较和应用带来了困难。未来的研究应致力于优化WQI和PI模型的参数选择和构建过程,引入更科学、客观的方法,提高模型的准确性和通用性。同时,加强统计方法与水质评估模型的结合。

### [参考文献]

[1] Drasovean, R., Murariu, G., Water Quality Parameters and Monitoring Soft Surface Water Quality Using Statistical Approaches. Promising Techniques for Wastewater Treatment and Water Quality Assessment, London, IntechOpen, 2021.

[2] 刘薇,康可佳,刘侨博.针对高溶解氧、高锰酸盐指数的地表水水质评估方法研究[J].环境科学与管理,2014,39(8):178-182.

[3] Uddin, M.G., Nash, S., Olbert, A.I., A review of water quality index models and their use for assessing surface water quality. ECOLOGICAL INDICATORS. 2021, 122: 107218.

[4] 黄雯.基于熵权优化综合污染评价法的水环境特征研究[J].人民珠江,2024,45(7):101-110.

[5] Banu, Z., Chowdhury, M.S.A., Hossain, M.D., Nakagami, K., Contamination and Ecological Risk Assessment of Heavy Metal in the Sediment of Turag River, Bangladesh: An Index Analysis Approach. Journal of Water Resource and Protection. 2013, 5(2): 239-248.

[6] Iticescu, C., Georgescu, L.P., Murariu, G., Topa, C., Timofti, M., Pintilie, V., Arseni, M., Lower Danube Water Quality Quantified through WQI and Multivariate Analysis. Water. 2019, 11(6): 1305.

### 作者简介:

董崇哲(1997--),男,汉族,山东济宁人,硕士,研究方向:水污染防治。