

水质评价研究现状及水质评价方法综述

赵卿含, 王顺司, 蒲金洪, 任燕玲*

成都工业学院材料与环境工程学院, 四川 成都

收稿日期: 2023年5月22日; 录用日期: 2023年6月23日; 发布日期: 2023年6月30日

摘要

水质评价对于保护水资源及环境十分重要, 是一项保护水环境的基本工作, 掌握水质评价研究进展及各种方法具有重要意义。介绍了水质评价国内外研究进展, 阐述了不同水质评价方法相关定义及其应用, 最后分析得出, 不同水质评价方法在操作难易程度、适用性和稳定性方面有所不同。

关键词

水环境, 水质评价, 研究进展, 评价方法

Review of Water Quality Evaluation Research and Methods

Qinghan Zhao, Shunsi Wang, Jinhong Pu, Yanling Ren*

School of Materials and Environment Engineering, Chengdu Technological University, Chengdu Sichuan

Received: May 22nd, 2023; accepted: Jun. 23rd, 2023; published: Jun. 30th, 2023

Abstract

Water quality assessment is very important for protecting water resources and environment, and it is a basic work to protect water environment, and it is of great significance to grasp the research progress and various methods of water quality assessment. The research progress of water quality assessment at home and abroad was introduced, the relevant definitions and applications of different water quality assessment methods were expounded, and finally the analysis showed that different water quality assessment methods had different operational difficulties, applicability and stability.

*通讯作者。

Keywords

Water Environment, Water Quality Evaluation, Research Progress, Evaluation Method

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

水资源是可供人类直接利用,能不断更新的天然淡水,主要指陆地上的地表水和地下水,它是保障人类生活和促进社会经济发展不可或缺的自然资源,是地球上一切生物赖以生存的物质基础[1]。然而,随着世界经济的发展和人口的增加,导致世界用水量逐年增加的同时,水环境污染问题也日益恶化。目前,我国正在经历前所未有的水污染转型,水资源、水环境、水生态和水灾害四大问题相互作用,彼此叠加,形成影响未来中国发展和安全的多重水危机,其中水污染的威胁尤为突出,水质评价的引入为解决水体污染提供了一定的依据[2]。水环境综合评价对合理利用水资源、控制水体污染等具有重要意义。

本文首先介绍了水质评价的国内外研究进展,接着系统的阐述了常见的几种水质评价方法,最后分析总结。

2. 国内外研究进展

水质评价是指按照评价目标,选择相应的水质参数、水质标准和评价方法,对水体的质量、利用价值及水的处理要求作出评定。20世纪初,德国柯克维兹(Kirk)和莫松(Moson)提出了有关生物学水质评价的分类方法[3],水质评价这一概念由此出现。步入21世纪以来,水质评价的研究依旧快速发展,各研究者积极探索并运用自己的知识和观点来完善各种水质模型以评估水质,随着水质评价方法研究的不断深入,水质评价工作积极吸收各相关学科领域研究成果,水质评价日益发展和成熟,给水质评价工作产生了积极影响。目前,各国科学家已经提出了几十种水质评价方法,不仅考虑了物理和化学指标,还考虑了生物指标,使现在的水质评价方法更加科学、精确和客观[4]。

2.1. 国外研究现状

美国是开展这项研究最早的国家之一,早在1965年,美国科学家霍顿(Horton)就选择八种水质指标提出了水质指标法,这是首次将水质评价方法运用到水质评价工作中。其后,西德的莱伯曼(Liebman)根据化学和生物学参数提出了一种水质评价指标体系,并编制了白拜恩州的水质图;接着布朗(Brown)提出了水质现状评价的质量指数法;内梅罗(Nemerow)在其《河流污染的科学分析》一文中提出了内梅罗水质指数[5][6];罗斯(Ross)提出了利用生化需氧量(BOD)、氨氮、悬浮物和溶解氧(DO)4项水质指标的水质评价方法。

国外在水环境水质建模的研究中发展也较快速。国外水资源评价的研究主要集中在水量评价和水质评价方面,水量评价主要采用计算机模型进行预测和评估而且涉及到的方法和技术比国内更加先进。1920年,美国工程师斯特里特(Streeter, H. W.)和菲尔普斯(Phelps, E. B)建立了河流生化需氧量(BOD)和溶解氧(DO)动态建模的一维模型,该模型考虑了河流的长度[7];1944年,Phelps对该模型进行了研究和开发,提出了经典的Streeter-Phelps水质模型(S-P模型)-氧平衡模型-来预测水生环境中的水质变化。在20世

纪 20 年代中期到 60 年代初期, 水质模型的研究主要关注氧平衡, 仅进行了点源污染方面的研究, 因此, 该阶段的模型都较为简单。随着时间的推移, 20 世纪 60 年代, 湖泊水质研究进入一个新的阶段。在此期间, Jacobs 于 1965 年首次提出了水体质量评价的概念和公式, 也即水质指数(Water Quality Index), 这标志着湖泊水质研究迈入了一个新的阶段。随后, 水质评价模型得到了进一步的发展, Horton 提出了采用质量指标的方法来评价水域水质, Bmwn 则在 Jacobs 与 Horton 的基础上建立了水质质量指标指数(WQI)。在 20 世纪 90 年代, 随着地理信息系统(GIS)技术的迅速发展, 国外越来越多的研究人员开始将这一技术应用于水质质量评价。其中, Dangermond [8]首次提出将 GIS 技术用于水质质量评价, 并取得了良好的效果; Cools 与 Sarkar 将 GIS 技术与地下水和地表水水质耦合, 并建立相关模型, 使得水质评价更加准确、客观, 而且不再局限于一维的评价。同时, 增加了地表水与地下水的空间分布特性, 使得评价更加复杂和准确。这一进步极大地拓展了水质评价的研究范围和深度, 为相关领域的研究提供了新的思路和方法。

2.2. 国内研究进展

如前所述, 我国水环境质量综合评价方面起步时间较西方发达国家严脱节, 直至 20 世纪 70 年代, 我国水质评价研究始于第一次对北京西郊环境质量的评价[8], 大体上经历了 4 个阶段: 初步尝试阶段、广泛探索阶段、全面发展阶段和环境影响评价阶段。基于我国严重的总水资源量不足、水资源污染严重和地域分布不均, 因此我国在水资源评价研究方面进展迅速。70 年代关伯仁提出多个指标综合叙述水质环境; 1978 年, 中国科学院地理科学和资源研究所提出了地表水质污染指数, 并将该指数用于我国东部的河流水质污染程度的评价中; 1981 年, 我国将单项评价法、地图重叠法和加权算术平均河长的水质指数法运用在第一次全国水质评估中[9]; 2004 年, 蔡文[10]教授将可拓集合与物元分析相结合, 提出了物元可拓法, 我国水质评价进入了快速发展的时期, 随着先进技术的不断涌现, 我国的水质评价研究也开始与新技术相融合。虽然我国水质评价工作起步较晚, 但是发展迅速。基于传统水质评价方法的改进创新越来越多, 其中, 神经网络法、灰色指数法、模糊综合评价法等新型评价方法被广泛应用于水质评价领域; 我国水质模型的发展逐步精进, 从最初的单因素模型到后来的多因素模型, 以及多种数学方法, 使得地表水质评价更加准确、复杂, 更适应多变的环境, 我国湖泊水质研究主要集中在重点监测的地区, 如滇池、巢湖、太湖等, 这些湖泊污染严重, 监管的同时水质模型的研究也得到了很大的发展。由于我国湖泊水环境污染严重, 水质评价现已成为水环境质量评价中至关重要的内容, 目前, 我国对于水质评价的方法愈来愈多, 发展也日益趋近成熟。

3. 水质评价方法综述

对水环境进行水质评价不仅能准确反映目前水体质量和污染状况, 还可以找出水体质量发展变化的规律, 最后弄清评价区域的主要污染问题。最终为治理水体污染、水环境管理提供重要依据。不同水体所适用的水质评价方法有所不同, 从而影响评价结果的精确度, 所以选择合理的水质评价方法也颇为重要。下面介绍几种常见的水质评价方法。

3.1. 单因子污染指数法

单因子污染指数法[11]是将某单项水质指标实测值与评价标准值进行比较以确定水质类别的方法。表达式(溶解氧和 pH 不适用): $P_i = \frac{C_i}{C_0}$; 式中: P_i 为单因子污染指数; C_i 为第 i 项指标的实际浓度测量值; C_0 为第 i 项指标的评价标准限值。该方法简单明了、计算简便, 也是目前最常用的方法, 但随着水质监

测结果不断变化, 随意性也就越大, 易忽略各环境因子对环境的影响, 所以不具有全面性, 不利于反映水质的整体状况。

3.2. 综合水质标识指数评价法

综合水质标识指数(water quality identification index, WQI)评价法在 2000 年由 Pesce 和 Wunderlin 提出 [12], 是在全面分析各类型水质指标污染状况的基础上, 选取有代表性的重点污染因子, 结合各水体的功能区标准, 通过计算, 用一个综合系数即水质标识指数来反映河流水质状况。水质指数 I_{wq} 计算公式 [13] 为:

$$I_{wq} = \sum_{i=1}^n w_i C_i \quad (2)$$

式中: n 为水质指标个数; W_i 为第 i 个指标的权重, 采用层次分析法 [14] 进行设定; C_i 为第 i 个指标的标准化值, 其标准化值按照国家标准 GB3838-2002 中水质类别标准进行标准化 [15]。是近年来, 出现的一种较新的方法, 该方法能基本反映污染的性质和程度, 多用于河流水质评价中, 但评价过程中选择不同的污染因子会使污染指数值出现波动最后导致夸大污染程度。

3.3. 主成分分析法

主成分分析法(PCA)是一种设法将多个原始指标重新组合成几个互相无关联性的综合指标来替代原来指标的统计方法, 研究如何通过少数几个主成分来揭示多个变量间的内部结构, 又称主分量分析。旨在利用降维思想从诸多相关的变量之间找到几个主要的变量, 来反映原始变量的大部分信息, 并且这些信息互不重复。主成分分析不仅可以在一定程度上减少指标数量, 而且筛选出的水质指标两两之间不相关 [16] 这种方法将多个复杂污染指标转化为几个主要成分, 把复杂问题简单化, 同时又提高了评价的高效性。

主成分分析法可有效的消除评价指标之间的相关影响, 同时减少指标选择的时间和工作量, 在保证主要成分数据完整的前提下, 大大减少了计算工作量。但是主成分分析法容易使函数意义出现不明确的情况, 而且只有大量的统计数据才能支持分析, 不能很好地反映客观发展程度 [17]。

3.4. 灰色评价法

灰色评价法 [18] 是一种用来评估不确定性系统的方法。它是基于灰色系统理论的评估方法, 主要用于评估缺少足够数据和信息的复杂系统, 多层次的灰色评估, 可以满足复杂系统的评价要求。其基本思想是对于多种因素将他们的指标值标准化处理, 然后计算各个因素之间的关联度, 再通过比较各因素之间的关联度来确定他们对环境的影响程度。此方法能够考虑不确定性和多样性, 更具灵活性, 也能够处理缺少数据和信息的情况。可以应用于各种复杂系统的评估, 也可以用来进行综合性评估。但是这种方法可能需要具备专业的知识和技能才能进行评估。评估过程可能存在偏差, 导致结果不准确从而对最终结果质量有影响。

2020 年, 唐贺 [19] 在地表水环境质量评价领域中提出了改进的灰色关联分析法, 克服了传统法的不足, 结合《地表水环境质量标准》(GB3838-2002), 将其作为水质质量标准, 对水环境中水质进行分级, 评价结果较为客观真实, 能够为水环境保护工作提供科学依据和有效途径。

3.5. 模糊综合评价法

模糊综合评价法是一种基于模糊数学理论的综合评价方法。它根据给出的评价标准和实测值, 经过模糊变换对事物作出评价, 能够较好地解决难以量化的非确定性问题 [20], 步骤为: ① 确定评价因子与

评价集；② 建立隶属函数；③ 确定权重；④ 综合评价(隶属度 = 权重集乘以模糊矩阵) [21]。影响水环境质量往往存在多种因素，难以用一个简单的数值去表示，即常常带有模糊性，这时就应该采用模糊评价法。模糊综合评价法的核心在于依据各类评价因素的特征，确定评价价值之间的函数关系(即：隶属度函数)。这种方法可将一些边界不清、不易量化的因素量化且结果清晰，系统性强，适合各种非确定性问题的解决，但可能会出现评价结果趋于均化、模糊失效的现象。

3.6. 人工神经网络法

人工神经网络思想是 McCulloch 和 Pitts 于 1943 年提出的，在水质综合评价中，由 Rumelhart 等学者提出的误差反向传播算法，简称 BP (back propagation) 网络，它在人工神经网络评价法中应用较广泛，也是最具代表性的一种模型[22]。BP 网络采用的误差反向传播算法，是一种 δ 率学习算法[23]，其计算过程由正向计算过程和反向计算过程组成。BP 网络包含 3 层或 3 层以上的神经网络，其中包括输入层、中间层、隐含层和输出层。BP 神经网络各方面较成熟，具有任意复杂的模式分类能力和优良的非线性映射能力，计算简单，受外界影响小，但学习速度慢，容易陷入局部极小值。

3.7. 熵权云模型综合评价法

1995 年李德毅院士提出的云模型是一种表示不确定性的方法，旨在将定性描述转换为定量表示。李德毅院士定义了云的概念，并引入了云的数字特征，包括期望、熵和超熵。他还提出了云发生器的概念，并对云发生器进行了数学分析。他的研究也探讨了模糊性和随机性之间的关联性[24]。

白云模型被提出以来，国内外都对云模型作出了相关研究，但主要集中在国内，云模型逐步得以发展。李德毅、邸凯昌等人拓展了云的概念，并定义了虚云，同时把云理论用在空间数据挖掘中[25] [26]。1999 年，李德毅提出了定性和定量之间转换的云模型的形式化表示方法及不确定性推理机制，成功实现了倒立摆的控制[27]。2005 年，刘常显等人对正态云模型的概率密度函数进行了统计分析[28]，对三个数字特征 E_x (期望)、 E_n (熵)、 E_h (超熵)对云模型的影响作了深入研究，揭示了云模型表示不确定性概念的合理性和深刻性[29]。

目前，云模型主要运用于综合评价、预测、算法改进等领域[3]。在综合评价方面，云模型较普通模糊综合法相比不仅能对评价客体作出有效的评估，还能得出其概率值。在预测方面，基于云模型的预测考虑了模糊性和随机性，使其结果更加合理，所以云模型用于预测越来越普遍。

4. 结论

本文系统的总结了水质评价方法的国内外研究进展，阐述了不同水质评价法，最后通过比较分析得出如下结论：

1) ① 单因子评价法简便易行，可清晰判断出主要污染因子及其主要污染区域，但得到的评价结果过于片面和悲观，不利于反映水体的整体情况，可用于初步筛选出存在的问题，适用于日常监测和短期调查例如饮用水和污染物单一的水体；② 综合水质标识指数评价法能够综合考虑多种水质参数对综合水质的影响，全面且客观反映水质状况易于实际应用中使用，其评价结果具有可比性，不同地区或不同时段同一河段的水质状况容易比较但是只能反映综合水质状况的整体情况，无法确定水质问题的具体来源和治理方案。此方法对于城市排水、工业废水排放等场景中的水质评价具有一定的应用价值；③ 主成分分析法能够避免水质参数之间的共线性和冗余性问题，减少了水质数据的信息重复度，但是主成分的解釋性较差，不能清楚地表述这些主成分所携带的水质参数实际含义，比较适于多指标的数据分析和关联分析例如环境水质评价、生态系统评价；④ 灰色评价法可以处理样本量较少的数据，不需要大量的数据

支持即可进行评价也不需要准确的数学模型,但是评价过程中需要确定比较准确的灰色关联系数,对于关联系数的确定会影响评价结果的准确性。此方法适于样本量较少、数据不完备或不确定、模型难以建立的情况,此外灰色评价法可以与其他水质评价方法相结合使用;⑤ 模糊综合评价法在水质综合评价中得到广泛的应用,但是有明显的可操作性差计算复杂的特点,较适于环境水质、地下水资源、城市水资源和水环境等方面的评价和决策;⑥ 人工神经网络法可以处理大量非线性、非参数化和高维度的数据,具有自学习和自适应的特性,但基于不透明的复杂模型,无法解释模型的输出结果,此方法益于水质类别判别、水质污染源定位、水质污染预测和评价;⑦ 熵权云模型综合评价法在进行水质综合评价的实际运用中,不仅其操作性强,精确度高,还能够有效提高评估的准确性并减少人为主观因素带来的误差。基于这些结果,本研究可为今后研究者在进行类似的研究提供了参考,也为改善目前水环境质量评估方法提供了新的思路和方法。

2) 根据水质评价的目标水体可以结合多种水质评价方法进行评价以减小单一评价方法的局限性,再依照水质评价的结果,可以对某水环境质量进行评价。具体来说,可以将评价结果分为不同等级,如优、良、轻度污染、中度污染、重度污染等级,从而得出某地表水的整体水质状况。同时,也可以分别分析各个监测点的水质状况,以更全面地了解水质状况分布情况,同时,还可以对不同季节、不同流域、不同污染源等进行分析,以进一步了解水质变化趋势及其影响因素。最后,针对某地表水环境质量现状评价与变化趋势分析,可以制定相应的保护与治理措施。比如,在发现水质存在较严重的污染问题时,要采取措施减少污染物排放,加强治理和管理。此外,还可以加强环境监测力度,及时掌握水质变化情况,有针对性地制定措施,提高水环境的质量和可持续发展水平。

参考文献

- [1] 杨永宇. 黑河流域水环境因子分析及水环境质量综合评价[D]: [硕士学位论文]. 银川: 宁夏大学, 2017.
- [2] 王兆波. 长春市典型水库水质综合评价及预测研究[D]: [硕士学位论文]. 长春: 长春工程学院, 2018.
- [3] 杨文. 基于云模型的宁海县地表水环境质量评价[D]: [硕士学位论文]. 金华: 浙江师范大学, 2013.
- [4] Tao, Y., Shen, S.L. and Zhou, A. (1987) Indices and Models of Surface Water Quality Assessment: Review and Perspectives. *Environmental Pollution*, **308**, Article ID: 119611. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.119611>
- [5] 薛巧英. 水环境质量评价方法的比较分析[J]. 环境保护科学, 2004, 30(4): 64-67.
- [6] 周扬. 双溪水库水环境质量评价研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西南交通大学, 2008.
- [7] Streeter, H.W. and Phelps, E.B. (1925) A Study of the Pollution and Natural Purification of the Ohio River. *Public Health Bullertin*, Wsahington, D.C.
- [8] 杜兰. 地表水水质监测现状分析与对策[J]. 资源节约与环保, 2018(7): 34.
- [9] 丁桑岚. 环境评价概论[M]. 北京: 化学工业出版社, 2001.
- [10] 蔡文, 杨春燕, 王光华. 一门新的交叉学科——可拓学[J]. 中国科学基金, 2004, 18(5): 268-272.
- [11] 李慧明, 等. 不同水质指数法在峡江水库水质评价中的应用[J]. 人民长江, 2020, 51(S02): 32-36, 87.
- [12] Pesce, S.F. and Wunde, D.A. (2000) Use of Water Quality Indices to Verify the Impact of Córdoba City (Argentina) on Suquia River. *Water Research*, **34**, 2915-2926. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(00\)00036-1](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(00)00036-1)
- [13] Han, Q., Tong, R.Z., Sun, W.C., et al. (2020) Anthropogenic Influences on the Water Quality of the Baiyangdian Lake in North China over the Last Decade. *Science of the Total Environment*, **701**, Article ID: 134929. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134929>
- [14] 范语馨, 史志华. 基于模糊层次分析法的生态环境脆弱性评价: 以三峡水库生态屏障区湖北段为例[J]. 水土保持学报, 2018, 32(1): 91-96.
- [15] 王正冉, 王笑峰, 张明胜, 等. 基于多元统计分析的聊城市河流水质评价[J]. 济南大学学报(自然科学版), 2023(1): 1-8.
- [16] Singh, K.P., Malik, A. and Sinha, S. (2005) Water Quality Assessment and Apportionment of Pollution Sources of Gomti

- River (India) Using Multivariate Statistical Techniques: A Case Study. *Analytica Chimica Acta*, **53**, 355-374. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2005.02.006>
- [17] 骆阳, 汪刚, 杨莉. 基于主成分分析法与熵值法结合模型的财务综合评价[J]. 财会通讯, 2012(8): 112-114. <https://doi.org/10.16144/j.cnki.issn1002-8072.2012.08.027>
- [18] 慕金波, 侯克复. 灰色聚类法在水环境质量评价中的应用[J]. 环境科学, 1991, 12(2): 86-89.
- [19] 唐贺. 基于改进的灰色关联分析法在地表水环境评价中的应用[J]. 海河水利, 2020(4): 36-39.
- [20] 郭华. 不同水质评价法在清河水质评价中的应用[J]. 人民长江, 2012, 43(S1): 132-134.
- [21] 侯玉婷, 周忠发, 王历, 等. 基于改进模糊综合评价法的喀斯特山区水质评价研究[J]. 水利水电技术, 2018, 49(7): 129-135.
- [22] 郭小青, 项新建. 基于神经网络模型的水质监测与评价系统[J]. 重庆环境科学, 2003, 25(5): 8-10.
- [23] 王凤艳, 汤玉福. 人工神经网络法在大清河水质评价中的应用[J]. 东北水利水电, 2019, 37(6): 25-26, 35.
- [24] 李德毅, 史雪梅, 孟海军. 隶属云和隶属云发生器[J]. 计算机研究与发展, 1995, 32(6): 15-20.
- [25] Li, D.Y., Han, J., Chan, E., *et al.* (1997) Knowledge Representation and Discovery Based on Linguistic Atoms. Proc the 1st Pacific & Asia Conf KDD&DM, Singapore, February 1997.
- [26] Li, D.Y., Di, K.C., Li, D. and Shi, X.M. (1998) Mining Association Rules with Linguistic Cloud Models. In: Wu, X., Kotagiri, R. and Korb, K.B., Eds., *Research and Development in Knowledge Discovery and Data Mining*, Springer, Berlin, 392-393. https://doi.org/10.1007/3-540-64383-4_39
- [27] 李德毅. 三级倒立摆的云控制方法及动平衡模式[J]. 中国工程科学, 1999(2): 41-46.
- [28] 刘常昱, 李德毅, 杜鹤, 等. 正态云模型的统计分析[J]. 信息与控制, 2005, 34(2): 236-239, 248.
- [29] 罗赞骞, 夏靖波, 陈天平. 基于云模型和嫡权的网络性能综合评估模型[J]. 重庆邮电大学学报(自然科学版), 2009, 21(6): 771-775.