

五柳水库水质监测与评价方法设计

蔡之伟¹, 马梦飞¹, 薛清元¹, 赵景宇¹, 郭 艳¹, 王肖明²

¹宿州学院资源与土木工程学院, 安徽 宿州

²安徽省宿州工业学校, 安徽 宿州

收稿日期: 2025年2月28日; 录用日期: 2025年4月10日; 发布日期: 2025年4月28日

摘 要

本研究针对安徽省宿州市五柳水库的水质监测和评价方法进行了设计, 为后期水体采样、监测与评价做好准备工作。五柳水库作为供水型水库, 总面积高达46平方公里, 拥有丰富的自然资源和人文景观。然而, 水资源的合理利用已成为宿州市重要的环境和社会问题。因此, 对五柳水库水质进行监测和评价显得尤为重要。本研究采用了单因子指数法、水环境质量指数法、主成分分析法和层次分析法等多种水质监测方法, 通过结合多种方法来评价水质, 旨在为水资源的可持续发展提供科学依据, 并帮助有关部门制定更有效的水资源管理策略。研究表明, 五柳水库水质总体良好, 但仍存在部分污染指标超标的情况, 需要进一步采取治理措施。

关键词

水质监测, 水质评价, 水资源管理, 可持续发展, 季节变化

Design of Water Quality Monitoring and Evaluation Method in Wuliu Reservoir

Zhiwei Cai¹, Mengfei Ma¹, Qingyuan Xue¹, Jingyu Zhao¹, Yan Guo¹, Xiaoming Wang²

¹School of Resources and Civil Engineering, Suzhou University, Suzhou Anhui

²Suzhou Industrial School of Anhui Province, Suzhou Anhui

Received: Feb. 28th, 2025; accepted: Apr. 10th, 2025; published: Apr. 28th, 2025

Abstract

In this study, the water quality monitoring and evaluation methods of Wuliu Reservoir in Suzhou City, Anhui province were designed to prepare for later water sampling, monitoring and evaluation. As a water supply reservoir with a total area of 46 square kilometers, Wuliu Reservoir is rich in natural resources and cultural landscape. However, the rational utilization of water resources has

文章引用: 蔡之伟, 马梦飞, 薛清元, 赵景宇, 郭艳, 王肖明. 五柳水库水质监测与评价方法设计[J]. 环境保护前沿, 2025, 15(4): 545-553. DOI: 10.12677/aep.2025.154061

become an important environmental and social problem in Suzhou City. Therefore, it is very important to monitor and evaluate the water quality of Wuliu Reservoir. This study uses a variety of water quality monitoring methods such as single factor index method, water environment quality index method, principal component analysis method and analytic hierarchy process to evaluate water quality by combining various methods, aiming to provide scientific basis for the sustainable development of water resources and help relevant departments to formulate more effective water resources management strategies. The results show that the water quality of Wuliu Reservoir is generally good, but some pollution indicators still exceed the standard, and further control measures are needed.

Keywords

Water Quality Monitoring, Water Quality Evaluation, Water Resources Management, Sustainable Development, Seasonal Change

Copyright © 2025 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. 研究背景与重要意义

水质监测是现代化国家经济发展的重要策略。水源是人类发展史上不可或缺的重要战略资源，也是日常生活中必需的资源。它对社会进步起着至关重要的作用，是社会经济发展的主要支柱，也是绿色健康生活的关键因素。随着现代化经济的发展，水资源短缺和水环境污染等问题逐渐显现出来，严重影响城市居民用水和环境保护。因此，保护水资源迫在眉睫。加大水资源保护力度，建立全面的水质监测系统显得尤为重要，这不仅能够确保居民用水安全，还对环境保护具有重要意义。

水质监测是通过使用合适的评价指标和方法，对实际数据进行分析，以判断水体的污染程度。水质评价能够真实有效地反映水体的变化和污染状况，准确识别污染主体及不同季节对水质的影响。通过对水质的评价，可以帮助确定水质污染的总体情况，为水环境防治方案的制定提供不可或缺的依据。由于宿州市属于严重缺水地区，尽管多年平均水资源总量达到 30.85 亿立方米[1]，但人均水资源占有量明显低于全省和全国平均水平。特别是在每年 6 月至 9 月期间，水资源量占比超过 70% [1]。五柳水库作为供居民饮用水的主要来源，也是供水型水库，对临近城市的经济发展和居民健康生活起着重要作用。做好水质监测工作是每位水文研究者义不容辞的责任。

到目前为止，许多水质监测方法已经被研究和提出。常用于水环境质量评价的方法包括单因子指数法、水环境质量指数法、主成分分析法和层次分析法等[2]。然而，由于水环境的复杂性，每种方法都有其局限性。因此，需要结合多种方法来评价水质，以得到更加科学合理的结果。

2. 常见的评价方法特点

2.1. 单因子指数法

一种通过比较某一指标的实测值与评价标准来确定评价等级或水质类别的方法，常用于环境科学中的水质评价。

单因子指数法的计算公式如下：

1) 单项指标污染指数

对于一般的污染物(如溶解氧以外的其他污染物):

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

对于溶解氧(DO), 其计算式为:

$$P_{DO} = \frac{(CO, DO - CDO)}{CO, DO}$$

其中, P_i 是某一评价指标的相对污染值; C_i 是某一评价指标的实测浓度值; Co_i 是某一评价指标的最高允许标准值。

2) 某断面综合污染指数

计算公式为:

$$P = \sum_{i=1}^n p_i \times w_i$$

其中, P 是某断面的污染指数; n 是某断面内测点数; w_i 是每个测点的权重(如果所有测点权重相同, 则 $w_i = \frac{1}{n}$)。

3) pH 值的特殊处理

pH 值的计算公式为:

$$S_{PH} = \frac{7.0 - PH}{7.0 - PH_{sd}} + \frac{PH - 7.0}{PH_{su} - 7.0}$$

其中, PH_{sd} 是水质标准中规定的 pH 值下限; PH_{su} 是水质标准中规定的 pH 值上限。

4) 水质类别的判断

根据计算出的污染指数, 对照相应的水质标准来判断水质类别。一般来说, 当污染指数超过 1 时, 表示该指标超标。

2.2. 水环境质量指数法

水环境质量指数法是一种用于评估水质的综合工具, 旨在通过量化的方式来反映水体的质量和被污染状况。我们可以通过定期评估水环境质量指数法, 客观事实的反映出地表水环境的质量状况及其变化趋势。这对于有关部门制定相应的水资源保护和治理措施非常重要, 同时也保护着生态平衡和人类健康。水环境质量指数法的计算对于水资源管理至关重要。

水环境质量指数法的计算方法如下:

1) 单项水质参数评价

溶解氧(DO): 对于溶解氧, 其计算公式为:

$$P_{DO} = \frac{(CO, DO - CDO)}{CO, DO}$$

其中 CO , DO 是溶解氧的评价标准, CDO 是溶解氧的实测浓度。其他指标: 对于其他水质指标(如 pH、化学需氧量等), 其污染指数计算公式为 $P_i = C_i / Co_i$, 其中 C_i 是污染物 i 的实测浓度, Co_i 是污染物 i 的评价标准。

2) 综合污染指数计算

在计算出各单项水质参数的污染指数后, 通过加权平均或其他统计方法来计算综合污染指数。例如,

可以采用以下公式计算综合污染指数：

$$WQI = \sum_{i=1}^n (p_i \times w_i)$$

其中 w_i 是污染物 i 的权重系数， n 是参与评价的污染物数量。

3) 指数分级与评价

根据综合污染指数的值，可以将水体污染程度分为不同等级。当 $WQI > 2.0$ 时，表示水体受到严重污染；当 $1.0 < WQI \leq 2.0$ 时，表示水体受到重污染；当 $0.8 < WQI \leq 1.0$ 时，表示水体受到污染；当 $WQI \leq 0.8$ 时，表示水体清洁。

值得注意的是确保所有采集和测试的数据都必须经过严格的质量控制，以保证数据的准确性和可靠性。应根据水体的特定用途和区域特征选择合适的评价参数和标准。在计算综合指数时，各参数的权重分配非常关键，应科学合理地反映各参数对水质影响的重要性。水质状况会随时间变化而变化，因此需要定期更新评价结果，以便及时采取管理措施[3]。

2.3. 主成分分析法

在水质评价指标中主成分分析法应用比较广泛可以有效地筛选出影响水质的主要因子，这种方法能够极大程度的保留了原始信息数据，还有有效的降低主观误差对评价结果的影响。通过选取八个因子进行分析，结果表明主成分分析法能够有效地处理因子多且相关性大的情况。这种方法不仅降低了数据分析的复杂性，还有助于更准确地评估水质状况。

主成分分析法的计算步骤如下：

1) 数据标准化：

将原始数据进行中心化处理，即每个变量减去其均值，使得数据的均值为 0。这是为了消除不同指标在量纲和数量级上的影响。对中心化后的数据进行标准化处理，使其方差为 1。标准化的目的是让每个变量具有相同的权重，避免某些变量因为数值范围大而对结果产生过大的影响。

2) 计算协方差矩阵：

基于标准化后的数据，计算样本数据的协方差矩阵。协方差矩阵反映了各个变量之间的相关性。

3) 求解特征值和特征向量：

对协方差矩阵进行特征值分解，得到特征值和对应的特征向量。特征值表示了各个主成分方向上的方差大小，特征向量则代表了主成分的方向。

4) 选择主成分：

根据特征值的大小，选择前 K 个较大的特征值对应的特征向量作为主成分。通常选择累计贡献率达到一定阈值(如 85%、90%等)的前几个主成分。

5) 构建投影矩阵：

将选定的主成分的特征向量组成投影矩阵。这个矩阵将用于将原始数据投影到新的低维空间中。

6) 数据降维：

使用投影矩阵将原始数据投影到选定的主成分上，得到降维之后的数据。降维后的数据保留了原始数据中大部分的信息，同时减少了数据的维度，便于后续的分析 and 应用。

主成分分析法的计算公式：

1) 数据中心化：

计算样本的均值向量 $\bar{x}$ 。对于数据集 $X = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T$ ，其中每个 x_i 是一个 n 维向量，均值向量 $\bar{x}$ 的计算公式为：

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

将数据中心化，即每个特征减去对应的均值：

$$X_{\text{centered}} = X - \bar{x}$$

2) 计算协方差矩阵：

计算中心化后的数据集的协方差矩阵 Σ ：

$$\Sigma = \frac{1}{n} X_{\text{centered}}^T X_{\text{centered}}$$

3) 特征值分解：

对协方差矩阵 Σ 进行特征值分解，得到特征值 $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$ 和对应的特征向量 $v_1, v_2, \dots, v_n$ 。这些特征向量构成了新的基向量空间，用于数据的降维。

4) 选择主成分：

根据特征值的大小选择前 k 个特征值对应的特征向量作为主成分。这些特征向量构成投影矩阵 W 。

5) 数据降维：

将原始数据投影到选定的主成分上，得到降维后的数据：

$$X_{\text{centered}} = X_{\text{centered}} W$$

我们将 PCA 与模糊综合评价的结果进行对比分析，来验证 PCA 结果的可靠性。两种方法的评价结果应该具有一致性。根据 PCA 和模糊综合评价的结果，提出针对性的水环境管理和治理建议。简化数据结构，从而为水质改善提供科学依据。这种方法不仅降低了数据分析的复杂性，还保持了尽可能多的原始信息，有助于更准确地评估水质状况。

2.4. 层次分析法

层次分析法是通过建立递阶层次结构模型、判断矩阵的构建和一致性检验[3]等多个步骤全面地反映出水环境质量的综合状况，通过将复杂的决策问题分解成多个层次和元素，进行定性和定量相结合的分析，从而帮助决策者做出更科学、合理的选择。最终计算出各因素相对于总目标的权重进行排序，从而反映对水质的综合评价。

层次分析法的计算公式如下：

1) 构建判断矩阵：

将决策问题分解为目标、准则和方案等层次，然后对其进行两两比较，确定各因素之间的相对重要性。比较的结果通常用一个矩阵来表示，称为判断矩阵。例如，对于准则层的因素 A、B、C，如果认为 A 比 B 重要，B 比 C 重要，那么可以构造如下的判断矩阵：

$$\begin{matrix} & A & B & C \\ A & 1 & a & b \\ B & \frac{1}{a} & 1 & c \\ C & \frac{1}{b} & \frac{1}{c} & 1 \end{matrix}$$

其中 a 、 b 、 c 是根据相对重要性给出的数值。

2) 计算权重向量和最大特征值：

通过求解判断矩阵的特征值和特征向量，可以得到各因素的权重向量和最大特征值。权重向量反映了各因素在某一准则下的相对重要性程度。最大特征值用于后续的一致性检验。

3) 一致性检验：

为了确保判断矩阵的合理性，需要进行一致性检验。一致性指标(Consistency Index, CI)的计算公式为：

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}$$

其中 $\lambda_{\max}$ 是判断矩阵的最大特征值, n 是判断矩阵的阶数。

然后计算随机一致性指标(Random Consistency Index, RI), 根据判断矩阵的阶数查找相应的 RI 值。最后计算一致性比例(Consistency Ratio, CR):

$$CR = \frac{CI}{RI}$$

当 $CR < 0.1$ 时, 认为判断矩阵具有满意的一致性; 否则需要对判断矩阵进行调整。

4) 综合评价:

根据各因素的权重向量和方案层的数据, 计算各方案的综合得分。综合得分可以通过加权求和的方式得到, 即:

$$S_i = \sum_{j=1}^n (w_j \times x_{ij})$$

其中 S_i 是第 i 个方案的综合得分, w_j 是第 j 个因素的权重, x_{ij} 是第 i 个方案在第 j 个因素上的得分, n 是因素的数量。

层次分析法在水环境质量评价中的应用是一个系统的过程, 涉及层次结构的建立、判断矩阵的构建、权重的计算、综合评价以及决策与对策的制定。通过这些步骤, 能够较为科学和准确地评估水环境质量, 为水环境保护与治理提供有力支撑。

3. 对于五柳水库的适用方法

1) 单因子指数方法

这个方法对于五柳水库来说是比较合适的, 特别是当需要快速识别并关注某一特定污染物时。该方法的优点是简单直接, 能够迅速反映最差的水质指标, 对于紧急污染事件或特定污染物的监控非常有效, 仅需将各污染物的实测浓度(C_i)与标准限值(S_i)对比, 计算单因子指数 $P_i = C_i/S_i$, 无需复杂数学模型。例如某河流的氨氮实测值为 1.2 mg/L, 标准限值为 1.0 mg/L, 则直接判定 $P_i = 1.2$ (超标)。但缺点也比较明显不能全面反映水质的整体状况, 可能忽略其他重要但未超标的污染物。例如重金属(如 Cd)与有机物(如 COD)共存时, 毒性可能增强, 但单因子法无法体现。

2) 水环境质量指数法

这个方法同样适用于五柳水库, 尤其是当需要综合评估多个污染物对水质的影响时。该方法的优点是通过计算多个水质指标的综合指数, 能够更全面地反映水质状况。可以克服单因子指数方法的局限性, 提供更全面的水质评价。例如内梅罗指数同时考虑污染物平均值和最大值, 防止个别超标参数被忽略。但其缺点也非常明显, 计算相对复杂且需要更多数据支持, 综合指数可能会稀释单一污染物的超标影响。例如某河流综合指数达标, 但汞超标 10 倍, 这可能对生态造成严重危害。

3) 主成分分析法

同样也适用于五柳水库, 特别是当水质数据具有多变量特征时。主成分分析法的优点是通过降维处理, 将多个相关变量转化为少数几个不相关的主成分, 从而简化问题并提取主要信息[4]。用这个方法来监测能够减少变量数量, 同时保留大部分原始数据的信息, 有助于揭示水质数据的内在结构和主要影响因素。例如从 10 个水质指标中提取 2~3 个主成分, 保留 80% 以上信息量。但其缺点也显而易见, 降维会导致信息丢失, 解释含义模糊不清, 易受异常值的干扰, 对非线性关系数据的处理效果欠佳, 且仅考虑方差而忽略其他统计特性可能会遗漏重要信息。例如 pH 与重金属毒性的非线性关系可能被掩盖。

4) 层次分析法

虽然层次分析法(AHP)本身不直接用于水质监测,但它可以作为一种决策支持工具,帮助确定不同水质指标的权重和优先级[5]。然而,在五柳水库的水质监测中,直接应用层次分析法可能不是首选,因为它更多地关注于决策过程而非具体的水质数据。能够综合考虑多个因素,为决策提供科学依据,但需要构建复杂的层次结构模型,且主观性较强。例如若高估 COD 的重要性,可能忽略重金属污染的潜在风险。

综上所述,五柳水库的水质监测可以选择单因子指数方法和水环境质量指数法进行初步评估。如果在后期需要更深入分析的话,可以考虑结合主成分分析法来揭示水质数据的内在结构和主要影响因素[6],层次分析法则可以在决策过程中作为辅助工具,帮助确定不同水质指标的权重和优先级。

4. 对于不同季节用单因子指数方法还是水环境质量指数法、主成分分析法、层次分析法来水质监测

随着每年四季的冷暖变化,不同季节的主要污染物及其污染途径也各不相同。春季的主要污染物有总氮和总磷,其污染途径主要是春季农田施肥量增加,以及降雨导致氮磷通过地表径流进入河流。夏季的主要污染物包括氨氮、高锰酸盐指数和总磷,污染途径则主要是高温加速了有机物的分解,生活污水的排放,以及老旧管网溢流或处理能力不足导致的污水直接排放。秋季的主要污染物是化学需氧量、总氮和氨氮,污染途径主要是农作物收割后残留的秸秆腐烂堆积在河道附近,雨水冲刷后进入水体,有机物分解消耗氧气,导致 COD 升高,以及水产养殖密集区尾水的排放。冬季的主要污染物仍然是氨氮和总磷,其污染途径主要是生活污水的集中排放。

1) 单因子指数方法

在冬季的时候可以快速识别并关注某一特定污染物,如春季可能出现的农药残留或化肥流失导致的氨氮浓度升高。夏季时能够快速评估高温高湿条件下易出现的特定问题,如溶解氧降低或藻类爆发导致的叶绿素 a 浓度增加[7]。在春秋季节适用于评估季节性变化对特定污染物的影响,如秋季落叶可能导致的有机物污染或冬季低温对溶解氧的影响。

2) 水环境质量指数法

该方法的适用范围广在什么季节都适用,能够综合评估多个水质指标对水质状况的影响,适用于需要全面了解水质状况的情况。通过计算综合水质指数(WQI),可以更全面地反映五柳水库的整体水质状况。

3) 主成分分析法

这个方法时间也比较广但使用时需要谨慎,虽然 PCA 在处理多变量数据时具有优势,但其结果的解释可能较为复杂,且需要一定的数学和统计知识[8]。在四季中,如果有足够的数据支持且研究目的明确(如探究水质数据的内在结构和主要影响因素),则可以选择使用 PCA。

4) 层次分析法

层次分析法(AHP)更多用于决策支持过程当中,而不是直接的水质监测方法。它可以帮助确定不同水质指标的权重和优先级,但在实际应用操作中需要结合其它监测方法来获取具体数据[9]。因此,在四季中 AHP 可以作为辅助工具来优化监测方案或制定管理策略。

通过上述分析发现,由于不同季节的污染物存在差异,这导致在设计水质监测评价方法时需要做出不同的选择。

5. 五柳水库里面水的来源和地表水与地下水的转化关系对水库的污染

宿州市,坐落于暖温带半湿润气候区,气候四季分明,光照充足且雨量适中,年平均降水量约 850 毫米[1],此为五柳水库的重要水源。夹沟镇境内龟山、鹰嘴山、龙顶山、钓鱼台及十里长山等山区的地表

径流,携带雨水与泉水,最终汇入五柳水库,成为其水资源的重要组成部分。同时,五柳水库周边珍珠泉、龙泉、哈泉、哗泉、滴水泉及老山泉等泉水点,也为水库提供了稳定的水源。降水通过地表径流进入水库,形成地表水体;部分降水则渗透至地下,转化为地下水。在地质构造与水文地质条件的影响下,地下水与地表水相互交换,特定条件下地表水甚至能补给地下水[10]。然而,人类活动如农业灌溉、城市供水等,会打破地表水与地下水的水量平衡,对水质产生显著影响。地表水与地下水的转化关系还受季节性变化的制约。雨季时,降水量增多,地表径流增加,地表水对地下水的补给作用增强;枯水期则相反[11]。当地表水受到污染,污染物将随水流进入水库,对水库水质造成直接威胁。干旱期间,地表水补给减少,地下水可能上升为水库的主要水源;雨季时,地表水则成为主要补给源。这种水量平衡的动态变化,不仅关乎水库的自净能力,还可能间接促使水质发生变化。

6. 五柳水库的采样点分布设计

1) 采样点选择

为了确保采样的有效性和代表性,我们应优先考虑远离水库进出口的区域进行采样,以减少流动水位对数据的影响。同时,在规划采样点时,还需要综合考虑不同水深及水文特征的位置分布,以便收集到更加全面的信息。根据水库平面图合理布局采样点,保证这些点在整个调查区域内均匀分布。特别地,在主要出入口、中心区域以及滞流区等关键位置设置断面,可以更好地反映水库的整体水质状况及其水文特性。建议采用网格法或沿着放射线方向布置采样点[12],这样不仅能够覆盖整个研究范围,还能提高数据采集的效率与准确性。

2) 采样工具和方法

水样采集瓶:选择无色、无味、无毒且密封性能良好的采样瓶。

水样采集器具:如水样调查船,用于获取深水位的水质样品。

pH计和电导率计:用于实时监测水样的pH值和电导率[12]。

表层采样:使用水样采集瓶进行表层水样的采集,尽量避免表层浮游生物的干扰。

多层次采样:根据不同深度进行采样,使用锥形瓶取样,注意避免不同深度水层之间的混合。

底泥采样:对于需要评估底泥状况的水库,采集底泥样品进行分析。

3) 采样频率

每个季节都要进行水质采样和监测。在降雨量较大、水库水位发生明显变化或其他特殊天气情况下,加大对水质的监测频率。

4) 采样前的准备工作

在出发之前我们应该检查所有采样装备是否完好无损且清洁无污染,确保没有任何杂质或残留物影响样品质量。同时,要确认每个采样瓶的容器编号与其对应的采样点相匹配,以防止样本混淆。根据实际需要准备足够的试剂和标准溶液,并确保它们处于有效期内且储存条件得当。此外,在选择采样点时必须考虑到安全性问题,视具体情况配备相应的个人防护装备或其他必要的安全措施,保障工作人员的安全。

5) 采样过程注意事项

在采样过程中,务必佩戴适当的个人防护装备,包括手套、口罩以及防护眼镜等,以确保操作人员的安全与健康。采集前需彻底清洗水样瓶,去除可能存在的任何杂质或污染物,保证样本纯净度。在整个过程当中应严格遵循既定的标准操作流程,谨慎行事以最大限度减少外部因素对结果造成的干扰及潜在错误。

6) 样品保存和运输

封闭采样瓶口：确保样品不外泄。

标明采样点和采样时间等信息：在样品瓶上清晰标注。

设定合适的保存温度：一般建议在 4℃ 下存放[13]。

及时送至实验室：避免样品变质。

基金项目

本文受到安徽省大学生创新创业训练计划项目(S202410379173)；国家级大学生创新创业训练计划项目：基于 BP 神经网络对宿州市萧县永垵水库水质评价(202410379061)；宿州学院大学生创新创业训练计划项目(编号：ZCXM24-39 和 ZCXM24-40)；宿州学院教师应用能力发展工作站(编号：2020XJYY08)；宿州学院“水文地质实验实训中心”(编号：szxy2022sxzx01)的支持。

参考文献

- [1] 孙强, 杜长辉, 蒋永奎, 等. 宿州市水资源公报[Z]. 宿州市水利局, 2018: 33-45.
- [2] 周默. 几种水质评价方法在地表水评价中的应用及比较研究[J]. 水资源开发与管理, 2022, 8(9): 50-55.
- [3] 赵卿含, 王顺司, 蒲金洪, 等. 水质评价研究现状及水质评价方法综述[J]. 环境保护前沿, 2023, 13(3): 726-732.
- [4] 林秀珠, 饶清华, 陈琪, 等. 基于主成分分析法的闽江口及其近岸水域水质评价[J]. 海洋科学, 2020, 44(11): 78-86.
- [5] 何新, 赵守栋. 基于层次分析法的水环境质量评价——以黄河流域为例[Z]. 北京师范大学资源学院, 2018.
- [6] 宁阳明, 尹发能. 水污染指数法和模糊综合评价法在水质评价中的应用[J]. 河南师范大学学报(自然科学版), 2020, 48(6): 57-63.
- [7] 李慧明, 候林丽, 徐鹏. 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(S2): 32-36+87.
- [8] 武俐, 王祖恒, 王亮, 等. 基于主成分分析和模糊数学的黄河小浪底水质监测与评价[J]. 水土保持通报, 2020, 40(5): 118-124.
- [9] 张智, 浦鹏, 王敏. 层次分析法与可变模糊集耦合的水环境质量评价模型[J]. 重庆大学学报, 2014, 37(5): 117-124.
- [10] 林深. 氢氧同位素在地下水补给关系中应用研究[J]. 地下水, 2023, 45(6): 62-64.
- [11] 吉磊. 基于氢氧稳定同位素的玛纳斯河流域地表水与地下水转化关系研究[D]: [硕士学位论文]. 石河子: 石河子大学, 2016.
- [12] 国家环境保护局, 国家技术监督局. GB/T 14581-1993. 水质: 湖泊和水库采样技术指导[S]. 北京: 中国标准出版社, 1994.
- [13] 环境保护部. HJ494-2009. 水质采样技术指导[S]. 北京: 环境保护部出版社, 2009: 1-21.