

浅析水源保护区内公路工程地下水环境评价体系

邵林¹, 陈志敏¹, 袁乾龙²

¹兰州交通大学土木工程学院, 甘肃 兰州

²中国建筑第二工程局有限公司, 北京

收稿日期: 2023年4月25日; 录用日期: 2023年5月15日; 发布日期: 2023年5月30日

摘要

由于施工过程中会对环境造成污染, 针对公路工程施工过程中, 涉及很多水源保护区或自然保护区的问题, 结合国内外研究现状发现: 目前对水源地保护大多是以水库为基础, 对于高环保水保要求的自然保护区少之又少。结合青海加西公路项目, 建立了水源保护区地下水水质评价体系。运用单因子指数法、灰色加权关联度法和熵权-可拓物元法, 对现场地下水水质进行评价, 综合分析了熵权-可拓物元法较单因子指数法和灰色加权关联度法, 突出了其整体性、精度高的优点。

关键词

加西公路, 绿色施工, 水源保护, 熵权法, 可拓物元理论

Analysis on Groundwater Environment Evaluation System of Highway Engineering in Water Source Protection Area

Lin Shao¹, Zhimin Chen¹, Qianlong Yuan²

¹School of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou Gansu

²China Construction Second Engineering Bureau Ltd., Beijing

Received: Apr. 25th, 2023; accepted: May 15th, 2023; published: May 30th, 2023

Abstract

As the construction process will cause pollution to the environment, many water source protec-

tion areas or nature reserves are involved in the construction process of the highway project. Combined with the research status at home and abroad, it is found that most of the protection of water source areas is based on reservoirs, and there are few nature reserves with high environmental protection and water conservation requirements. Based on the Jiayi highway project in Qinghai Province, the groundwater quality evaluation system of water source protection area is established. The single factor index method, grey weighted correlation degree method and entropy weight extension matter element method are used to evaluate the on-site groundwater quality. It is comprehensively analyzed that the entropy weight extension matter element method has the advantages of integrity and high accuracy compared with the single factor index method and grey weighted correlation degree method.

Keywords

Kasai Highway, Green Construction, Water Source Protection, Entropy Weight Method, Extension Matter Element Theory

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

随着我国社会的快速发展，公路工程虽然发展势头良好，但施工过程中对环境造成很多污染。施工过程中，很多废弃材料会渗入地层，污染地下水环境，对水源保护区以及周边生活区的未来长效发展造成了很多隐患。因此，构建地下水环境评价体系，对地下水环境及水质进行实时监测及评价，便于后期监管和治理。

现如今，国内外关于地下水环境影响的研究较少。诸期刊提到了两种地下水生态概念[1] [2]：一种是指地下水体系对植被、湿地等的作用和效应，另一种是地下水在参与自然界水循环时对环境进行物质交换以及对生态环境的修复和改善；王金哲等[3]提出地下水功能是由驱动因子群、状态因子群和响应因子群组成的“驱动-状态-响应”体系，并通过一些表象的影响因素分析要提高西北干旱区地下水的保护能力；张光辉等[4]曾向我国北方地区提出了地下水生态功能评价与区划理论方法，从10项宏观指标，提出了适用于东北华北等大区域地下水功能评价与区划；杨丽芝等[5]研究了干旱半干旱地区由于地下水引起的表生生态效应，以水文地质、气象、地质地貌为要素，构建了相应的评价指标体系。

现阶段，国内外对于地下水环境质量的评价方法，多用层次分析法[6]、单因子判别类评价法[7] [8] [9]、灰色关联度法[10]、自组织映射法[11]、模糊数学评价法[9] [12] [13] [14] [15]、主成分分析法[16] [17]、聚类分析法[18] [19]等。但是，上述方法中所建立的评价体系各不相同，且评价体系中所需监测的影响因素和样本需求量都较多；同时，现阶段国内外的地下水研究均以城区或者平原地区为背景，针对水源保护区特点的评价体系几乎没有。因此，需要针对其污染特征，建立适用于水源保护区的地下水环境评价体系。

本文以青海加西公路为背景。公路范围内有多处国家水源保护区，生态环境较为脆弱，其施工的环保要求和难度较平原地区也更为严苛。且水源保护区一旦因施工导致环境污染和破坏，短期内难以恢复，故需要针对水源保护区及现场施工情况，制定一套行之有效的水源保护区地下水环境评价体系。

2. 水源保护区地下水环境评价体系评价体系

2.1. 水源保护区污染源分析

1) 施工废水

根据区域地下水文地质资料, 4 处水源保护区地下水层为砂卵石地层, 水源取自地下潜水。施工产生的污水及施工含油废水任意排放, 将会在水源保护区内蔓延渗入地下, 对保护区地下水水质将产生一定影响。若在水源保护区内堆放施工区各类建筑材料(如沥青、油料、化学品物质等)在堆放过程中若保管不善, 被雨水冲刷, 产生淋漓水, 下渗可能污染地下水水质。桥梁施工对水源保护区地下水的影响主要来自桥墩钻孔灌注桩基础时用于护壁的泥浆, 泥浆接触地下环境可能渗入深层地下水。预制场、拌合站的施工生产废水主要是施工机械的冲洗废水, 其主要污染物为 SS, 浓度可达到 3000~5000 mg/L。另外, 隧道施工涌水中 SS、石油类浓度较高, 若任意排放, 可能渗入地下, 对地下水水质造成影响。具体指标详见表 1。

Table 1. Main components and concentration of tunnel construction wastewater

表 1. 隧道施工废水主要成分及浓度

主要污染物	pH 值	COD	SS	氨氮	石油类
浓度(mg/L)	9~10	50~60	300~500	2.5~3.5	9~10

2) 生活污水

施工人员平均每人每天生活用水量按 70 L 计, 污水排放系数取 0.9, 则按下述公式计算可得每个施工人员每天产生的生活污水量。

生活污水量:

$$Q_s = (k \cdot q_1) / 1000 \quad (1)$$

式中: Q_s ——每人每天生活污水排放量(t/人·d);

k ——生活污水排放系数(0.6~0.9), 取 0.9;

q_1 ——每人每天生活用水量定额(L/人·d)。

根据上式计算得到施工人员每人每天排放的生活污水量为 0.056 t。据调查, 施工营地生活污水主要是施工人员就餐和洗涤产生的污水及粪便水(旱厕), 主要含动植物油脂、食物残渣、洗涤剂等多种有机物, 其成分及其浓度详见表 2。

Table 2. Composition and concentration of domestic sewage in construction camp

表 2. 施工营地生活污水成分及浓度

主要污染物	SS	BOD ₅	COD	TOC	TN	TP
浓度(mg/L)	55	110	250	80	20	4

2.2. 水源保护区地下水环境评价体系建立

根据《地下水资源质量标准》可知, 有关于地下水环境的影响因素有 20 余项。在地下水环境评价体系的建立过程中, 由于很多影响因素, 如汞、铅、镉等重金属, 其在地下水含量较少, 在规范中的各分级区间极小, 致使该影响因子的最终计算结果对整个评价体系而言没有实质性作用。故应选取在地下水含量相对较多, 且在规范中各分级区间较合理的, 作为地下水环境评价体系的影响因子。从而降低

由于影响因素含量过少或分级区间过小导致评价结果的误差。

结合水源保护区地下水环境的现场勘探资料以及公路施工过程中污染源的分析，对全部影响因素进行综合考虑，并结合水质分析要求，选取 PH 值、总硬度(以 CaCO_3 为主)、氰化物、亚硝酸盐、高锰酸盐指数、氨氮($\text{NH}_3\text{-N}$)、铁、六价铬等 8 个水质评价指标因子，建立起水源保护区地下水环境影响的评价体系，如图 1 所示。

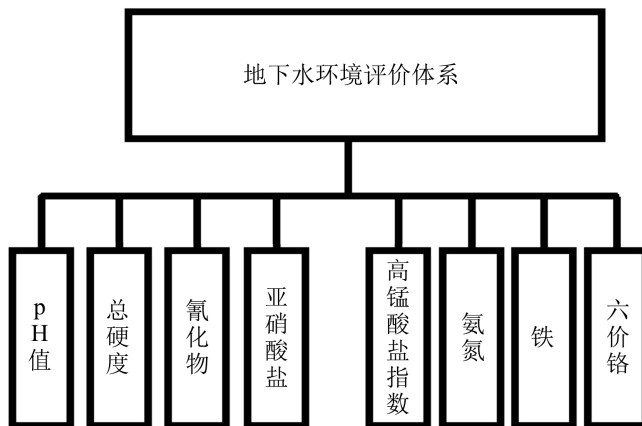


Figure 1. Evaluation system of groundwater environmental impact
图 1. 地下水环境影响的评价体系

3. 基于熵权 - 可拓物元理论的地下水环境评价模型的建立

熵是热力学之中的基本概念，最先由 Shannon 引入到信息论中，用来对系统的无序性进行度量[20]。系统整体的无序性与信息量成负相关，从而可以用熵来对其整体情况进行度量[21]。对于某一评价指标，其熵越小，则表明系统越有序，该指标在系统评价过程中的作用也越大，权重也越大[22]。因此可利用熵，减小主观认识对权重大小的影响，计算出各指标的权重，为多指标系统的综合评价提供依据。

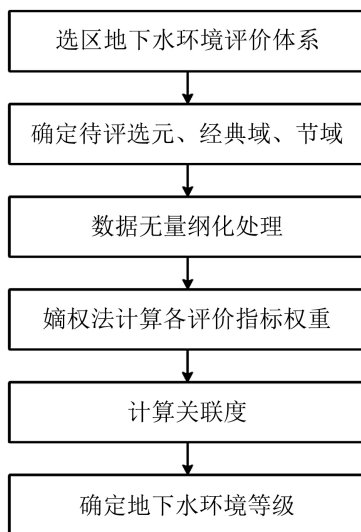


Figure 2. Flow chart of groundwater environmental assessment
图 2. 地下水环境评价流程图

可拓物元理论[23]是由我国著名学者蔡文提出的,是一种基于可拓数学和物元理论的数学分类方法。该方法目前广泛应用于高速公路交通评价、工程项目评价、施工质量评价等领域。

基于熵权-可拓物元理论地下水环境评价的具体流程如图2所示。

通过确定经典域、确定节域、列出待评物元、确定关联系数和综合关联度和评价等级确定等步骤进行熵权-可拓物元理论的计算[24],本文关于其计算原理,不做过多赘述。

4. 基于熵权-可拓物元理论的地下水环境评价模型的应用

4.1. 获取现场地下水样本

选取的10个典型断面获得的10组监测样本来源于《青海省加定(青甘界)至海晏(西海)公路环境影响报告书》(JGH(2016)-752),如表3所示。地下水环境评价标准按《地下水环境质量标准》(GB3838-2002)执行,如表4所示。

Table 3. Field groundwater sample data

表 3. 现场地下水样本数据

中心桩号	PH 值	总硬度	氰化物	亚硝酸盐	高锰酸盐指数	氨氮	铁	六价铬
K46 + 500	6.7	189	0.002	0.0028	0.54	0.03	0.02	0.0039
K47 + 640	7.0	192	0.0018	0.0026	0.52	0.03	0.018	0.0039
K60 + 350	7.82	212	0.0029	0.003	0.57	0.025	0.025	0.0040
K98 + 425	7.1	203	0.0026	0.003	0.55	0.027	0.017	0.0045
K98 + 725	7.90	207	0.0024	0.0028	0.56	0.026	0.02	0.0041
K99 + 430	7.6	210	0.0025	0.0026	0.56	0.025	0.018	0.0043
K100 + 550	7.7	217	0.0025	0.0027	0.54	0.023	0.022	0.0044
K101 + 070	7.9	205	0.0024	0.003	0.50	0.022	0.024	0.0040
K102 + 280	7.4	208	0.0021	0.0027	0.56	0.022	0.02	0.0041
K116 + 550	6.9	211	0.0029	0.003	0.57	0.02	0.011	0.0055

Table 4. Criteria for groundwater environmental assessment. Unit: (mg/L)

表 4. 地下水环境评价标准。单位: (mg/L)

项目	pH	总硬度 (以 CaCO ₃ 计)	挥发酚	硫酸盐	氯化物	氟化物	硝酸盐
III 类	6.5~8.5	≤450	≤0.002	≤250	≤250	≤1.0	≤20
项目	溶解性总固体	氰化物	亚硝酸盐	高锰酸盐指数	总大肠菌群	六价铬	铁
III 类	≤1000	≤0.05	≤0.02	≤3.0	≤3.0	≤0.05	≤0.3
项目	铅	镉	砷	汞	氨氮	锰	-
III 类	≤0.05	≤0.01	≤0.05	≤0.001	≤0.2	≤0.1	-

注: “*”为参照《地下水资源质量标准》(SL63-94)执行标准。

4.2. 熵权、关联度的计算

根据熵权 - 可拓物元理论的基本计算原理, 分别计算出各评价指标因子权重值(表 5), 以及各评价指标因子关于各地下水环境级别的关联度, 由于本文选取的样板断面较多, 故选取 K60 + 350 段和 K98 + 725 段作为示例, 具体数据如表 6、表 7 所示。

Table 5. Each evaluation index factor weight value
表 5. 各评价指标因子权重值

指标	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆	C ₇	C ₈
权重	0.127	0.134	0.113	0.113	0.134	0.112	0.133	0.134

Table 6. The correlation degree of each evaluation index factor in K60 + 350 section with respect to each evaluation level
表 6. K60 + 350 段各评价指标因子关于各评价等级的关联度

	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆	C ₇	C ₈
K _{II}	0.043	-0.031	-0.045	-0.045	0.034	0.048	-0.022	0.027
K _{III}	0.043	0.055	0.024	0.025	-0.100	-0.048	-0.022	-0.027
K _{III}	0.043	-0.040	-0.080	-0.079	-0.117	-0.081	0.004	-0.080
K _{IV}	-0.046	-0.071	-0.106	-0.106	-0.123	-0.091	-0.116	-0.123

Table 7. Correlation degree of each evaluation index factor in K98 + 725 on each evaluation level
表 7. K98 + 725 段各评价指标因子关于各评价等级的关联度

	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆	C ₇	C ₈
K _{II}	0.038	-0.029	-0.043	-0.044	0.026	0.050	-0.025	0.024
K _{III}	0.038	0.048	0.020	0.023	-0.108	-0.050	-0.025	-0.024
K _{III}	0.038	-0.044	-0.083	-0.081	-0.121	-0.081	0.004	-0.079
K _{IV}	-0.045	-0.074	-0.107	-0.106	-0.125	-0.092	-0.025	-0.123

4.3. 地下水环境级别确定

根据表 6, 表 7 得到的各评价指标因子关于各评价等级的关联度结果, 计算得到各段地下水环境关于各地下水环境等级的综合关联度, 如表 8 所示。

Table 8. The comprehensive correlation degree of groundwater environment of each section with respect to the level of local groundwater environment
表 8. 各段地下水环境关于各地下水环境等级的综合关联度

中心桩号	K _I	K _{II}	K _{III}	K _{IV}	MAX
K60 + 350	0.009726394	-0.050433678	-0.429678095	-0.783079345	0.009726394
K98 + 725	-0.002713047	-0.078182047	-0.446657287	-0.69638679	-0.002713047

根据上表数据, 结合最大关联度理论中, 可以确定: K60 + 350 段地下水环境为 I 级, K98 + 725 段地下水环境为 I 级。

用本文建立的基于熵权 - 可拓物元理论的地下水环境评价模型, 对表 3 中所有样本进行分级评价, 结果如表 9 所示。

Table 9. Results of grading evaluation of groundwater environment in each section

表 9. 各段地下水环境分级评价结果

中心桩号	K_I	K_{II}	K_{III}	K_{IV}	级别
K46 + 500	-0.02986365	-0.387261234	-0.202128635	-0.804063312	I
K47 + 640	-0.008817415	-0.347077681	-0.208568915	-0.71060625	I
K60 + 350	0.009726394	-0.050433678	-0.429678095	-0.783079345	I
K98 + 425	-0.136951116	-0.131847156	-0.797658808	-0.68500438	II
K98 + 725	-0.002713047	-0.078182047	-0.446657287	-0.69638679	I
K99 + 430	-0.163629635	-0.230573849	-0.848305964	-0.666038761	II
K100 + 550	0.015318043	-0.036641503	-0.427386412	-0.790114301	I
K101 + 070	-0.125208963	0.29586644	-0.786289548	-0.806811087	II
K102 + 280	-0.079465616	0.043671651	-1.190310842	-0.960127926	II
K116 + 550	-0.046337868	-0.024929837	-0.440889897	-0.724171003	II

4.4. 对比分析

为更准确验证基于熵权 - 可拓物元理论的地下水环境评价模型的适用性及准确性, 本文将基于熵权 - 可拓物元理论的地下水环境评价模型获得的地下水环境分级结果与平原地区常用的单因子指数法及灰色加权关联度法(具体步骤不做赘述)获得的地下水环境分级结果进行对比, 结果见表 10。

Table 10. Comparison table of results of different groundwater environmental assessment methods

表 10. 不同地下水环境评价方法结果对比表

中心桩号	单因子指数法	灰色加权关联度法	熵权 - 可拓物元法
K46 + 500	I	I	I
K47 + 640	I	I	I
K60 + 350	I	II	I
K98 + 425	II	II	II
K98 + 725	I	I	I
K99 + 430	II	II	II
K100 + 550	II	I	I
K101 + 070	II	II	II
K102 + 280	II	II	II
K116 + 550	I	I	II

由表 10 知, 使用单因子指数法计算得出该地区 50% 的采样点水质达到 I 级, 50% 的水质达到 II 级; 使用灰色加权关联度法计算得出该地区 50% 的采样点水质达到 I 级, 50% 的水质达到 II 级; 使用熵权 - 可拓物元法计算得出该地区 50% 的采样点水质达到 I 级, 50% 的水质达到 II 级。

由表 10 知, 采用熵权 - 可拓物元法所得结果, 有 8 处与单因子指数法结果相同, 吻合程度为 80%; 有 8 处与灰色加权关联度法结果相同, 吻合程度为 80%。通过宏观的指标吻合程度来看, 熵权 - 可拓物元法与现场所使用的单因子指数法以及用作对比的灰色加权关联度法十分吻合。从微观角度考虑, 针对每个断面, 不同种方法会有不同的结果表现, 其原因是: 由于单因子指数法是针对单因素为主考虑的方法, 其对于评价因子相比熵权 - 可拓物元法, 主观性更强, 在各个因素相互作用的整体性分析上不及灰色加权关联度法和熵权 - 可拓物元法; 在同样考虑各评价因子相互作用的灰色加权关联度法和熵权 - 可拓物元法中, 由于灰色加权关联度法其所需计算量小, 其结果可能偏差不大, 但较熵权 - 可拓物元法而言, 其计算精度比之不足。所以熵权 - 可拓物元法较其他两种方法, 不仅能综合考虑各评价因子之间相互作用, 其计算精度也相对更高。

5. 结论

本文针对水源保护区内地下水环境影响的综合评价问题进行研究, 得出以下结论:

1) 通过使用单因子指数法、灰色加权关联度法和熵权 - 可拓物元法, 对现场地下水环境进行评价。由结论可知, 熵权 - 可拓物元法计算的分级结果与其他两种常用方法的吻合程度均达到 80%, 吻合程度较高。

2) 通过与单因子指数法对比分析得到: 熵权 - 可拓物元法可以对整个系统内各评价因子之间的作用进行综合分析和评价, 避免了单因子指数法对于单一评价因子的主观性。通过与灰色加权关联度法分析得到: 熵权 - 可拓物元法通过对样本的大量计算, 相对于灰色加权关联度法, 不仅提高了精度, 而且可以计算出当前地下水环境级别与其他级别间的差距。

3) 引入熵权和可拓物元理论, 降低了对系统评价指标因子赋权的主观性, 解决了系统内各评价指标因子间相互影响的问题。同时, 综合关联度不仅反映出当前系统地下水环境属于何种级别, 还可以计算出当前地下水环境级别与其他级别间的差距, 便于现场施工单位掌握水质的实时变化, 根据现场水质对施工措施及时进行调整, 以达到保护水质的要求。因此, 基于熵权 - 可拓物元理论的地下水环境评价模型适用于水源保护区地下水环境影响的综合评价。

基金项目

中国建筑第二工程局有限公司科技资助计划(2020ZX150002)。

参考文献

- [1] 张光辉, 申建梅, 聂振龙, 王金哲, 严明疆, 郝明亮, 杨丽芝, 刘中培, 连英立, 张行南. 区域地下水功能及可持续利用性评价理论与方法研究[M]. 北京: 地质出版社, 2009.
- [2] 王文科, 宫程程, 张在勇, 陈立. 旱区地下水文与生态效应研究现状与展望[J]. 地球科学进展, 2018, 33(7): 702-718.
- [3] 王金哲, 张光辉, 申建梅, 聂振龙, 严明疆. 地下水功能评价指标选取依据与原则的讨论[J]. 水文地质工程地质, 2008, 35(2): 76-81.
- [4] 张光辉, 申建梅, 聂振龙, 王金哲, 严明疆, 郝明亮. 区域地下水功能及可持续利用性评价理论与方法[J]. 水文地质工程地质, 2006, 33(4): 62-66+71.
- [5] 张发旺, 陈立, 余秋生, 薛忠歧. 宁夏南部地区水质形成机制研究[J]. 地质论评, 2006, 52(6): 810-814.
- [6] 杨志辉, 陈铁牛, 刘龙章. 基于改进层次分析法的模糊优选模型[J]. 数学的实践与认识, 2010, 40(10): 25-31.

- [7] 赵璐, 金红, 薛莲. 基于单因子评价法和城市水质指数法的青岛市主要地表水水质评价与排名[J]. 中国资源综合利用, 2022, 40(2): 68-70.
- [8] Singh, S., Ghosh, N.C., Krishan, G., *et al.* (2019) Development of Indices for Surface and Ground Water Quality Assessment and Characterization for Indian Conditions. *Environmental Monitoring and Assessment*, **191**, Article No. 182. <https://doi.org/10.1007/s10661-019-7276-8>
- [9] Melese, D.A. (2021) Evaluation of Ground Water Quality with Water Quality Index (WQI) in Woreillu Town, Ethiopia. *Journal of Environment and Earth Science*, **11**, 8-16.
- [10] Ip, W.C., Hu, B.Q., Wong, H. and Xia, J. (2009) Applications of Grey Relational Method to River Environment Quality Evaluation in China. *Journal of Hydrology*, **379**, 284-290. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.10.013>
- [11] Tsakovski, S., Astel, A. and Simeonov, V. (2010) Assessment of the Water Quality of a River Catchment by Chemometric Expertise. *Journal of Chemometrics*, **24**, 694-702. <https://doi.org/10.1002/cem.1333>
- [12] 窦小涵, 潘叶, 王腊春, 等. 基于模糊综合优化模型的水质评价与重金属污染健康风险分析——以贵州省铜仁市碧江区饮用水源地为例[J]. 水土保持通报, 2022, 42(1): 173-183+190.
- [13] Icaga, Y. (2007) Fuzzy Evaluation of Water Quality Classification. *Ecological Indicators*, **7**, 710-718. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2006.08.002>
- [14] 方运海, 郑西来, 彭辉, 等. 基于模糊综合优化模型的地下水质量评价[J]. 地学前缘, 2019, 26(4): 301-306.
- [15] Chanapathi, T. and Thatikonda, S. (2019) Fuzzy-Based Regional Water Quality Index for Surface Water Quality Assessment. *Journal of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste*, **23**, Article No. 04019010. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HZ.2153-5515.0000443](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HZ.2153-5515.0000443)
- [16] Mustapha, A. and Abdu, A. (2012) Application of Principal Component Analysis & Multiple Regression Models in Surface Water Quality Assessment. *Journal of Environment and Earth Science*, **2**, 16-23.
- [17] Dai, B.L., He, Y.L., Li, Y.Z., *et al.* (2014) Surface Water Quality Assessment by Use of a Combination of Projection Pursuit and Principal Component Analysis. *Fresenius Environmental Bulletin*, **23**, 1490-1496.
- [18] Dabgerwal, D.K. and Tripathi, S.K. (2016) Assessment of Surface Water Quality Using Hierarchical Cluster Analysis. *International Journal of Environment*, **5**, 32-44. <https://doi.org/10.3126/ije.v5i1.14563>
- [19] 冯思静, 姜滢, 宋康, 刘朝. 基于模糊聚类分析的矿业城市地表水环境质量评价[J]. 地球与环境, 2013, 41(2): 180-184.
- [20] 倪九派, 李萍, 魏朝富, 谢德体. 基于 AHP 和熵权法赋权的区域土地开发整理潜力评价[J]. 农业工程学报, 2009, 25(5): 202-209.
- [21] 侯恩科, 纪卓辰, 车晓阳, 等. 基于改进 AHP 和熵权法耦合的风化基岩富水性预测方法[J]. 煤炭学报, 2019, 44(10): 3164-3173.
- [22] 邓红雷, 戴栋, 李述文. 基于层次分析-熵权组合法的架空输电线路综合运行风险评估[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(1): 28-34.
- [23] 蔡文. 物元分析[M]. 广州: 广东高等教育出版社, 1987.
- [24] 田芬芳, 王雪蓉, 黄耀兴. 基于多因素可拓物元法的围岩稳定性评价[J]. 人民长江, 2021, 51(S1): 277-280..