

基于主成分分析和模糊综合评价的地下水水质评价

——以大连市为例

薛伟锋¹, 褚莹倩¹, 吕莹², 侯辰侠², 沈葆真¹, 孙德栋³, 孙鹏³

1. 大连海关技术中心, 辽宁 大连 116600;
2. 中检(大连)测试技术有限公司, 辽宁 大连 116600;
3. 辽宁省大连生态环境监测中心, 辽宁 大连 116023)

摘要: 以大连市8个地下水水质监测断面为研究对象, 采用主成分分析和模糊综合评价法相结合评估了水质优劣, 并分析了影响地下水水质的主要指标。结果表明, 使用主成分分析法, 可将5个水质指标综合为2个主成分进行解释, 解释率为85.8%, 水质综合控制指标为总硬度、溶解性总固体和氨氮。模糊综合评价法预测8个地下水中1个I类水、1个II类水、5个III类水和1个V类水。主成分分析和模糊综合评价法预测地下水水质排名不完全一致, 但总体趋势相同, 说明2种模型都比较适合预测大连地区地下水水质, 而且2种模型结合使用后综合预测结果要比单一预测模型更加可靠。

关键词: 地下水水质; 评价; 主成分分析; 模糊综合评价

中图分类号: X523

文献标志码: A

DOI: 10.16803/j.cnki.issn.1004-6216.2020.05.015

Groundwater Quality Assessment Based on Principal Component Analysis and Fuzzy Comprehensive Evaluation ——Taking Dalian as an Example

XUE Weifeng¹, CHU Yingqian¹, LYU Ying², HOU Chenxia², SHEN Baozhen¹, SUN Dedong³, SUN Peng³

(1. Technical Center of Dalian Customs, Dalian 116600, China; 2. China Inspection (Dalian) Test Technology Co. Ltd., Dalian 116600, China; 3. Dalian Ecological Environmental Monitoring Center, Dalian 116023, China)

Abstract: Eight groundwater quality monitoring sections in Dalian were selected as the research object. The water quality of them was assessed by principal component analysis and fuzzy comprehensive evaluation. And the main indices affecting the groundwater quality were also analyzed in this paper. The results indicated that water quality was explained by two main components instead of five water quality indices according to the principal component analysis, and the interpretation rate was 85.8%. The comprehensive control indices were total hardness, total dissolved solids and ammonia - nitrogen. According to the prediction by the fuzzy comprehensive evaluation, there were one Class I water, one Class II water, five Class III water and one Class V water. There was some difference for the groundwater quality assessment between the principal component analysis and the fuzzy comprehensive evaluation. However, the overall trend of the water quality analyzed by the two models was similarly, thus indicating that the two models were suitable to predict the groundwater quality in Dalian. And the comprehensive prediction by the two models was more reliable than that by one single model.

Keywords: Groundwater Quality; Assessment; Principal Component Analysis; Fuzzy Comprehensive Evaluation

CLC number: X523

地下水是水资源中重要组成部分。近年来, 随着地下水开采量的增加以及恶劣气候变化, 导致地下水环境质量急剧恶化, 随之而来的与地下水有关

的环境问题日益突出, 已引起国内外广泛关注^[1-4]。地下水一旦遭受污染, 由于其自净能力较弱, 会对生态环境造成严重影响, 直接或间接危害人类^[5-7]。

收稿日期: 2019-12-26

基金项目: 辽宁省自然科学基金面上项目(20170540025); 大连市科技创新基金(2019J13SN122)资助

作者简介: 薛伟锋(1983-), 男, 博士、工程师。研究方向: 水环境质量评价。E-mail: xwf526@163.com

引用格式: 薛伟锋, 褚莹倩, 吕莹, 等. 基于主成分分析和模糊综合评价的地下水水质评价——以大连市为例[J]. 环境保护科学, 2020, 46(5): 87-92.

为了能够及时有效的采取措施,保护和改善地下水水质,需要对地下水环境质量进行评价。

目前,国内外围绕水环境质量评价已开发多种方法,如单因子评价法^[8]、综合指数评价法^[9]、模糊综合评价法^[10]、神经网络法^[11]、灰色评价法^[12]和主成分分析法^[13]等。每种方法都有其侧重点,但每种方法都无法全面地反映复杂的水质状况。因此,在实际研究工作中将多种方法结合使用,能够更加全面、准确了解水质情况。地下水环境是一个复杂系统,存在许多不确定性因素,具有明显的模糊性,从而难以定量。模糊数学法能有效地解决评价边界模糊和监测误差对评价结果的影响。模糊综合评价法以模糊数学理论为基础,通过隶属函数表示模糊状态,利用隶属度对样本进行分类,根据最大隶属度原则,确定水质类别。主成分分析法充分考虑不同指标之间的信息重叠,对多维数据进行标准化,在尽可能地保留原有信息的基础上,对多维数据进行降维处理,更加客观地筛选出独立的综合因子,避免了主观随意性,已被广泛应用于水源水质评价^[14-17]。

大连是一座滨海城市,淡水资源异常匮乏。地下水作为大连淡水资源重要组成部分,其质量优劣直接关系到城市的环境保护、经济建设和居民生活等。因此,有必要对大连市地下水环境质量进行评价。本研究通过 2 种水质评价方法(模糊综合评价法和主成分分析法)结合使用,对 2015 年大连市地下水水质进行评价,并与报道结果^[18]进行比较,分析不同水质评价模型差异原因,为大连市地下水水质保护和改善提供更加全面可靠的科学依据。

1 研究方法

1.1 主成分分析法

采用 SPSS 17.0 软件进行分析,具体步骤如下:

1) 根据文献^[18]报道结果,选取水质评价指标,包括:总硬度、溶解性总固体、氯化物、硝酸盐氮和氨氮。

2) 对相关数据进行标准化,以消除不同指标间的量纲和数量级影响。

3) 采用 Kaiser-Meyer-Olkin (KMO) 检验统计量和 Bartlett 球形度检验判断指标间的相关性,以确定原始变量是否适合进行因子分析。当 KMO 值 >0.5 时,可进行因子分析。Bartlett 球形度检验对应的显著性 <0.05 时,原始变量间存在相关性,可进行主成分分析。

4) 确定主成分个数。一般选取累计方差贡献率 >80%,特征值 >1 的主成分。

5) 根据计算结果,确定主成分 F_i 的表达式。

6) 计算主成分分值,综合得分越高,表明水质污染越严重。

1.2 模糊综合评价法

模糊综合评价法是借助模糊数学的隶属度理论把定性评价转化为定量评价,即对受到多种因素制约的事物或对象作出一个整体的评价,具体如下。

1) 根据文献报道^[18],选取总硬度、溶解性总固体、氯化物、硝酸盐氮和氨氮等 5 项水质因子作为评价指标。

2) 根据《地下水质量标准(GB/T 14848—2017)》^[19]确定水质指标评判标准见表 1。

表 1 地下水水质指标评价标准

mg·L⁻¹

污染物	I类	II类	III类	IV类	V类	I-V类水标准平均值
总硬度	150	300	450	550	650	420
溶解性总固体	300	500	1000	2000	2000	1160
氯化物	50	150	250	350	350	230
硝酸盐氮	2	5	20	30	30	17.400
氨氮	0.02	0.1	0.5	1.5	1.5	0.724

3) 建立隶属度函数及模糊矩阵。当 $j=1$ 时,隶属度见式 (1)(其中, X : 水质因子实际测定值; S : 水质因子标准限定值)。

$$r_{ij} = \begin{cases} 0, & X_i \geq S_{i(j+1)} \\ \frac{S_{i(j+1)} - X_i}{S_{i(j+1)} - S_{ij}}, & S_{ij} < X_i < S_{i(j+1)} \\ 1, & X_i \leq S_{ij} \end{cases} \quad (1)$$

当 $j=2, 3, \dots, n-1$ 时, 隶属度见式 (2)。

$$r_{ij} = \begin{cases} 0, & X_i \leq S_{i(j-1)} \text{ 或 } X_i \geq S_{i(j+1)} \\ \frac{X_i - S_{i(j-1)}}{S_{ij} - S_{i(j-1)}}, & S_{i(j-1)} < X_i < S_{ij} \\ \frac{S_{i(j+1)} - X_i}{S_{i(j+1)} - S_{ij}}, & S_{ij} < X_i < S_{i(j+1)} \end{cases} \quad (2)$$

当 $j=n$ 时, 隶属度见式 (3)。

$$r_{ij} = \begin{cases} 0, & X_i \leq S_{i(j+1)} \\ \frac{X_i - S_{i(j-1)}}{S_j - S_{i(j-1)}}, & S_{i(j-1)} < X_i < S_j \\ 1, & X_i \geq S_{ij} \end{cases} \quad (3)$$

4) 通过超标倍数赋权法实现权重赋值。由于权重的不同定义, 导致最终评价结果有较大差别, 因此应将权重归一化。权重计算方法见式 (4)。

$$a_i = \frac{X_i/S_i}{\sum_{i=1}^n (X_i/S_i)} \Rightarrow (a_1, a_2, \dots, a_n) \quad (4)$$

表 2 标准化后数据

采样点	总硬度	溶解性总固体	氯化物	硝酸盐氮	氨氮
兴民	-0.239 58	-0.154 80	-0.449 65	-0.010 01	-0.490 61
付家	-0.009 16	-0.053 20	-0.530 59	1.065 22	1.427 58
二十里	-0.768 47	-0.946 99	-1.050 73	0.181 15	-1.198 87
黄旗	-1.182 17	-1.120 68	-1.109 11	-1.386 29	-0.579 15
苏家	2.101 19	1.973 20	1.133 33	1.555 04	-0.402 08
尹家	-0.527 59	-0.601 55	-0.113 95	-1.122 26	0.984 92
南鸭路咀	0.132 22	0.172 26	0.496 42	-0.452 04	1.073 45
小黑石	0.493 55	0.731 75	1.624 28	0.169 20	-0.815 23

2.1.2 变量相关系数及相关性检验 采用相关分析法对 5 项水质指标进行分析, 相关系数结果见表 3。2 个指标之间的相关系数绝对值越大, 说明 2 个指标的相关性越强。相关系数为正, 说明 2 个指标之间存在正相关关系, 反之为负相关关系。

表 3 相关系数矩阵

	总硬度	溶解性总固体	氯化物	硝酸盐氮	氨氮
总硬度	1				
溶解性总固体	0.991**	1			
氯化物	0.791*	0.845**	1		
硝酸盐氮	0.768*	0.731*	0.39	1	
氨氮	0.012	-0.002	0.001	-0.035	1

注: *表示 $p < 0.05$, **表示 $p < 0.01$ 。

表 3 可知, 除氨氮外, 其余指标之间相关系数

式 (4) 中: a_i 为污染物 i 的权重值; X_i 为污染物 i 的实测值; S_i 为污染物 i 的评价标准算术平均值。

5) 建立权重矩阵 A 和模糊矩阵 R 之后, 2 个矩阵相乘后可以得到各水质因子的最终矩阵 B , 计算方法见式 (5)。

$$B = A \times B = (b_1, b_2, \dots, b_n) \quad (5)$$

6) 根据评价结果, 获得水质隶属度, 最终确定水质类别。

2 结果与讨论

2.1 主成分分析结果

2.1.1 标准化数据 为消除原始数据不同量纲和数量级的影响, 需要对数据进行标准化处理, 结果见表 2。

均在 0.3 以上, 说明各指标信息存在重叠, 具有一定的相关性, 原始变量适合因子分析。主成分分析以变量相关性检验为前提, 地下水 KMO 和 Bartlett 检验结果见表 4。

表 4 KMO 和 Bartlett 检验结果

KMO 取样足够度量	Bartlett 球形度检验		
	近似卡方值	自由度	显著性
0.647	32.045	10	0.000

表 4 可知, 地下水 KMO 检验度量值 > 0.5 , Bartlett 球形检验显著性 < 0.05 , 表明原始变量之间存在相关性, 适合做主成分分析。

2.1.3 主成分确定 特征值表示成分对指标变量影响力的大小, 若特征值 < 1 , 说明主成分的解释力度不够。主成分的方差及方差贡献见表 5。

表 5 解释的总方差

成分	初始特征值			提取平方和载入		
	合计	方差的%	累积%	合计	方差的%	累积%
1	3.288	65.753	65.753	3.288	65.753	65.753
2	1.002	20.048	85.800	1.002	20.048	85.800
3	0.615	12.290	98.091			
4	0.091	1.822	99.912			
5	0.004	0.088	100.000			

注：提取方法为主成分分析法。

表 5 可知,特征值>1 的有 2 个成分,累积的方差占比为 85.8%,即可用 2 个主成分替代 5 个水质指标,其包含的信息量可以解释监测指标表征的绝大部分信息,可利用其进行地下水水质的评价研究。

2.1.4 初始因子载荷矩阵 初始因子载荷矩阵系数表征监测水质指标与主成分的相关程度,用于解释各个主成分变量的变异情况。其中,正值表示水质指标与主成分之间呈正相关,负值表示水质指标与主成分之间呈负相关;其绝对值越接近 1,表明相关程度越高,则该指标可以作为评价地下水水质的主要控制指标。地下水主成分初始因子载荷矩阵见表 6。

表 6 主成分初始因子载荷矩阵

指标名称	成分	
	1	2
总硬度	0.986	0.019
溶解性总固体	0.991	0.009
氯化物	0.842	0.033
硝酸盐氮	0.791	-0.062
氨氮	-0.007	0.999

主成分 1 在溶解性总固体和总硬度等 2 个变量上具有高载荷,表明主成分 1 主要反映这 2 个指

标的信息;主成分 2 在氨氮上具有高载荷,表明主成分 2 主要反映氨氮的信息。

2.1.5 主成分表达式建立及水质评价 用主成分初始因子载荷矩阵中数据除以主成分对应特征值平方根,得到主成分相对应的特征向量,即每个指标相应的系数,与标准化的后的数据 ZX_i 相乘,即可得出主成分 F_1 和 F_2 相应的表达式。根据初始特征值方差的百分比 λ_1 和 λ_2 ,进而获得 F 值表达式。 F_1 、 F_2 和 F 相应的表达式见式 (6)~(8)。

$$F_1 = 0.547ZX_{\text{溶解性总固体}} + 0.544ZX_{\text{总硬度}} \quad (6)$$

$$F_2 = 0.998ZX_{\text{氨氮}} \quad (7)$$

$$F = [\lambda_1/(\lambda_1 + \lambda_2)]F_1 + [\lambda_2/(\lambda_1 + \lambda_2)]F_2 \quad (8)$$

公式 (8) 可见,获得地下水水质主成分 F 值,结果见表 7。

表 7 F 值综合得分

采样点	F 值
兴民	-0.28
付家	0.31
二十里	-1.00
黄旗	-1.10
苏家	1.61
尹家	-0.24
南鸭路咀	0.38
小黑石	0.32

根据 F 值越大,水质污染越严重进行不同采样点水质排名,由优至劣依次为黄旗-二十里-兴民-尹家-付家-小黑石-南鸭路咀-苏家。

2.2 模糊综合评价法结果

2.2.1 模糊矩阵结果 根据隶属度公式,计算获得大连市地下水水质模糊矩阵,结果见表 8。

表 8 地下水水质模糊矩阵结果

0.000	0.430	0.570	0.000	0.000	0.000	0.130	0.870	0.000	0.000	0.100	0.900	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.930	0.070	0.000
0.000	0.620	0.380	0.000	0.000	0.000	0.550	0.450	0.000	0.000	0.470	0.530	0.000	0.000	0.000	0.000	0.380	0.620	0.000	0.000
0.570	0.430	0.000	0.000	0.000	0.630	0.370	0.000	0.000	0.000	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.860	0.140	0.000	0.000
0.000	0.060	0.940	0.000	0.000	0.000	0.000	0.190	0.810	0.000	0.000	0.000	0.930	0.070	0.000	0.000	0.310	0.690	0.000	0.000
0.700	0.300	0.000	0.000	0.000	0.000	0.978	0.022	0.000	0.000	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.037	0.963	0.000	0.000	0.000
兴民					付家					二十里					南鸭路咀				
0.000	0.000	0.000	0.000	1.000	0.000	0.790	0.210	0.000	0.000	0.630	0.370	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.240	0.760	0.000
0.000	0.000	0.550	0.450	0.000	0.000	0.940	0.060	0.000	0.000	0.790	0.220	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.992	0.008	0.000
0.000	0.380	0.620	0.000	0.000	0.320	0.680	0.000	0.000	0.000	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.010	0.990	0.000	0.000
0.000	0.000	0.000	0.000	1.000	0.000	0.680	0.320	0.000	0.000	0.000	0.830	0.170	0.000	0.000	0.000	0.000	0.940	0.060	0.000
0.660	0.340	0.000	0.000	0.000	0.075	0.925	0.000	0.000	0.000	0.740	0.260	0.000	0.000	0.000	0.840	0.160	0.000	0.000	0.000
苏家					尹家					黄旗					小黑石				

2.2.2 权重矩阵结果 根据权重计算公式, 获得大连市地下水水质权重矩阵, 结果见表9。

表9 权重矩阵结果

采样点	矩阵
兴民	(0.299 0.193 0.131 0.357 0.020)
付家	(0.270 0.165 0.099 0.426 0.040)
二十里	(0.277 0.143 0.084 0.485 0.011)
黄旗	(0.335 0.202 0.128 0.297 0.039)
苏家	(0.327 0.206 0.152 0.305 0.011)
尹家	(0.322 0.186 0.209 0.230 0.053)
南鸭路咀	(0.309 0.198 0.203 0.252 0.038)
小黑石	(0.282 0.196 0.244 0.267 0.010)

2.2.3 综合评价结果及水质类别 将上述计算获得的权重矩阵和模糊矩阵相乘后得到最终矩阵, 进而获得综合评价结果, 根据最大隶属度原则, 确定水质所属类别, 见表10。

表10 地下水水质模糊综合评价结果

采样点	水质分类					最大值	隶属类别
	I类	II类	III类	IV类	V类		
兴民	0.089	0.331	0.580	0.000	0.000	0.580	III类
付家	0.063	0.202	0.391	0.345	0.000	0.391	III类
二十里	0.190	0.325	0.451	0.034	0.000	0.451	III类
黄旗	0.525	0.425	0.051	0.000	0.000	0.525	I类
苏家	0.007	0.061	0.207	0.094	0.632	0.632	V类
尹家	0.071	0.778	0.151	0.000	0.000	0.778	II类
南鸭路咀	0.001	0.365	0.612	0.022	0.000	0.612	III类
小黑石	0.008	0.004	0.755	0.232	0.000	0.755	III类

表10可知, 模糊综合评价法获得大连市地下水水质由优至劣顺序为黄旗-尹家-小黑石-南鸭路咀-兴民-二十里-付家-苏家。

2.3 主成分分析与模糊综合评价法预测结果比较

主成分分析法获得大连市地下水水质由优至劣依次为黄旗-二十里-兴民-尹家-付家-小黑石-南鸭路咀-苏家; 模糊综合评价法预测地下水水质由优至劣依次为黄旗-尹家-小黑石-南鸭路咀-兴民-二十里-付家-苏家。根据模糊综合评价法结果, 黄旗水质最好(I类水), 苏家水质最差(V类水), 尹家为

II类水, 其余5个采样点均为III类水。其中, 模糊综合评价法给出的黄旗和苏家水质排名与其在主成分分析中排名一致。尹家水质在模糊综合评价法和主成分分析中均具有较高排名, 分别为第2位和第4位。尽管兴民、付家、二十里、南鸭路咀和小黑石在两个预测模型中排名顺序不很一致, 可能原因是这5个采样点水质均为III类水, 本身污染程度差别不明显, 还有2种模型算法也不完全相同, 导致2种预测模型在预测同一类水水质排名时出现较大差异。

由水质结果比较可知, 采用主成分分析和模糊综合评价法所得结果基本一致。尽管模糊综合评价法在水质指标选取方面主观性较强, 而且对同一级水质不能更好的区分优劣, 但采用主成分分析法却有效地解决了这一问题。主成分分析法能有效降低数据维度, 筛选出主要污染因子, 最大限度地降低了评价因子选取主观性对评价结果的不利影响, 而且能对同一级水质结果按照水质污染程度进行排序, 更好地对水质优劣进行区分, 使评价结果更加客观合理。尽管主成分分析法无法直接获得水质类别, 但结合模糊综合评价法后, 不仅可以获得水质类别, 还能针对同一级水质进行水质排名, 使结果更加详实。以上分析说明, 主成分分析和模糊综合评价法2种模型结合使用后预测结果要比单一预测模型更加全面可靠。通过与文献^[18]报道的内梅罗指数法水质预测结果比较, 发现本研究使用的模糊综合评价法预测的水质类别要比内梅罗指数法预测的水质类别更好, 可能原因是2种预测模型基于的计算方法不同造成的, 但2种预测模型预测水质排名总体趋势基本一致。

3 结论

本研究以大连市地下水为研究对象, 运用主成分分析和模糊综合评价法对水质主要影响指标进行分析, 并对综合水质进行了评价。

1) 针对大连市8个地下水监测断面水质进行评价, 采用主成分分析法可将5个水质指标综合为2个主成分进行解释, 解释率为85.8%。其中, 第1主成分贡献率为65.753%, 第2主成分贡献率为20.048%, 第1主成分控制指标为溶解性总固体和

总硬度,第 2 主成分控制指标为氨氮。模糊综合评价法预测 8 个地下水中 1 个 I 类水、1 个 II 类水、5 个 III 类水和 1 个 V 类水。

2) 主成分分析和模糊综合评价法对 8 个不同区域的地下水水质排名预测存在差异,但总体趋势基本一致,说明两种模型结合使用后预测结果要比单一预测模型更加全面可靠。

参考文献

- [1] KAZAKIS N, MATTAS C, PAVLOU A, et al. Multivariate statistical analysis for the assessment of groundwater quality under different hydrogeological regimes[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2017, 76(9): 1-13.
- [2] TAHROUDI M N, SIUKI A K, RAMEZANI Y. Redesigning and monitoring groundwater quality and quantity networks by using the entropy theory[J]. *Environmental Monitoring Assessment*, 2019, 191(4): 250-266.
- [3] 任晓霞, 张鸣之, 韩明伟, 等. 咸阳市地下水饮用水源地的水环境评价[J]. *环境工程*, 2019, 37(4): 17-21.
- [4] 杜军凯, 傅尧, 李晓星. 模糊-主成分分析综合评价法在地下水水质评价中的应用[J]. *中国环境监测*, 2015, 31(4): 75-81.
- [5] 张士超, 姚宏, 向鑫鑫, 等. 沈抚新城地下水中 PAHs 的污染特征及健康风险评价[J]. *环境科学*, 2019, 40(1): 248-254.
- [6] 苗迎, 孔祥胜, 李成展. 重工业城市岩溶地下水中多环芳烃污染特征及来源[J]. *环境科学*, 2019, 40(1): 239-247.
- [7] 周巧丽, 宋玉梅, 周漪波, 等. 广州市某生活垃圾填埋场空气及地下水污染状况分析[J]. *环境化学*, 2019, 38(4): 760-769.
- [8] 国家环境保护总局, 国家质量监督检验检疫总局. 地表水环境质量标准: GB 3838-2002[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [9] 徐祖信. 我国河流综合水质标识指数评价方法研究[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2005, 33(4): 482-488.
- [10] 潘俊, 高维春, 臧海洋. 基于模糊综合评价法在溪泉湖地表水中的水质评价[J]. *环境科学与技术*, 2010, 33(12F): 551-553.
- [11] 王梦. 水环境质量评价中几种方法的比较[J]. *渤海大学学报(自然科学版)*, 2008, 29(1): 34-37.
- [12] 罗庆成, 徐国新. 灰色关联分析与应用[M]. 南京: 江苏科学技术出版社, 1989.
- [13] 蔡广强, 张金松, 刘彤宙, 等. 基于主成分分析的中国南方某市水库水质评价[J]. *环境科学与技术*, 2018, 41(S2): 88-94.
- [14] 曾庆飞, 谷孝鸿, 周露洪, 等. 东太湖水水质污染特征研究[J]. *中国环境科学*, 2011, 31(8): 1355-1360.
- [15] 刘潇, 薛莹, 纪毓鹏, 等. 基于主成分分析法的黄河口及其邻近水域水质评价[J]. *中国环境科学*, 2015, 35(10): 3187-3192.
- [16] 赵明伟, 王琦, 陈秋颖, 等. 主成分分析法在黑鱼水库水质评价中的应用[J]. *沈阳师范大学学报(自然科学版)*, 2016, 34(2): 188-192.
- [17] 马诗茜, 陈卓君. 基于主成分分析法的某水库型水源地水质评价[J]. *净水技术*, 2017, 36(S1): 36-44.
- [18] 孙大明. 基于层次分析法的大连市地下水环境质量评价[J]. *水资源开发与管理*, 2017(2): 75-78.
- [19] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 地下水质量标准: GB/T 14848-2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.