



移动扫码阅读

刘音,马吉燕,程兴娜,等. 污泥基充填体浸出水样水质及健康风险评价[J]能源环境保护,2022,36(3):97-102.

LIU Yin, MA Jiyan, CHENG Xingna, et al. Water quality and health risk assessment of leached water samples from sludge-based backfill [J]. Energy Environmental Protection, 2022, 36(3): 97-102.

# 污泥基充填体浸出水样水质及健康风险评价

刘音<sup>1,2</sup>, 马吉燕<sup>1</sup>, 程兴娜<sup>1,\*</sup>, 陈森<sup>1</sup>, 杜玉娇<sup>1</sup>, 王婷婷<sup>1</sup>

(1. 山东科技大学 安全与环境工程学院, 山东 青岛 266590; 2. 山东科技大学 矿业工程国家级  
实验教学示范中心, 山东 青岛 266590)

**摘要:** 为了解污泥基充填体充填至采空区后对地下水环境及周边水质的影响, 进行了有毒有害物质浸出试验, 选取了4个一般化学指标和6个毒性离子指标, 采用和谐度评价法对浸出水样的水质进行评价, 结合健康风险评价模型评估了浸出水样的健康风险。结果表明: 污泥基充填体浸出水样总体符合Ⅲ类水质标准, 部分指标严重超标, 其中pH超出V类水质标准, 浊度略超出Ⅲ类水质标准; 重金属年均致癌风险值为 $4.379 \times 10^{-5} \sim 9.414 \times 10^{-5}$ , 介于USEPA、荷兰建设和环境部规定的最大可接受风险值( $1 \times 10^{-4} \sim 1 \times 10^{-6}$ )之间, 重金属年均非致癌风险值为 $3.916 \times 10^{-9} \sim 8.706 \times 10^{-9}$ , 达到荷兰建设和环境部的可忽略风险水平( $1 \times 10^{-8}$ )。为保证地下水环境的水质安全, 应加强超标项目和健康危害风险较大指标的监测和治理。

**关键词:** 污泥基充填体; 浸出试验; 和谐度评价; 健康风险; 地下水环境

中图分类号: X82

文献标识码: A

文章编号: 1006-8759(2022)03-0097-06

## Water quality and health risk assessment of leached water samples from sludge-based backfill

LIU Yin<sup>1,2</sup>, MA Jiyan<sup>1</sup>, CHENG Xingna<sup>1,\*</sup>, CHEN Sen<sup>1</sup>, DU Yujiao<sup>1</sup>, WANG Tingting<sup>1</sup>

(1. School of Safety and Environmental Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China; 2. National Experimental Teaching Demonstration Center for Mining Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China)

**Abstract:** In order to understand the influence of sludge-based filling body on groundwater environment and the surrounding water after filling into goaf, the poisonous and harmful material leaching test were carried out. Four general chemical indexes and six toxic ion indicators were selected, and the harmonious degree evaluation method was adopted to evaluate the water quality of leaching water samples. Combined with the health risk assessment model, the health risks of leaching water samples were evaluated. The results showed that the leached water samples from sludge-based fillings generally met the class III water quality standard, and some indexes exceeded the standard seriously, such as pH value exceeding the Class V and turbidity slightly exceeding the class III. The annual carcinogenic risk value of heavy metals was between  $4.379 \times 10^{-5} \sim 9.414 \times 10^{-5}$ , which was within the maximum acceptable risk value ( $1 \times 10^{-4} \sim 1 \times 10^{-6}$ ) stipulated by USEPA, the Dutch Construction and Environment Ministry. The annual non-carcinogenic risk value of heavy metals was between  $3.916 \times 10^{-9} \sim 8.706 \times 10^{-9}$ , which reached the negligible risk level stipulated by the Dutch Construction and Environment Ministry ( $1 \times 10^{-8}$ ). In order to ensure the water quality safety of groundwater environment, it was necessary to

收稿日期: 2022-02-01; 责任编辑: 金丽丽

基金项目: 山东省自然科学基金(ZR2021ME138); 国家创新创业计划项目(202110424163)

第一作者简介: 刘音(1973-), 女, 陕西米脂人, 博士, 副教授, 主要研究方向为矿山环境保护与矿山充填材料技术。E-mail: liuyin-73@163.com

通讯作者简介: 程兴娜(2000-), 女, 山东菏泽人, 本科生, 主要研究方向为矿山环境保护与矿山充填材料技术。E-mail: 2766639381@qq.com

strengthen the monitoring and management of the items exceeding the standard and indexes with high risk of health hazards.

**Key Words:** Sludge - based filling body; Leaching test; Harmony evaluation; Health risks; Groundwater environment

## 0 引言

城市污泥是污水处理厂对污水进行净化后产生的固体或液体物质,由于水、盐、挥发性物质、重金属、致病菌和微量有机物含量高,城市污泥难以被生物降解,对城市环境构成严重威胁<sup>[1-2]</sup>。污泥产量大,生长速度快。据统计,截至2020年6月,我国城市污泥年产生量共计5 000多万t(以含水率80%计,不含工业污泥),预计到2022年将突破8 909万t<sup>[3]</sup>。目前处理城市污泥的主要方法是物理填埋<sup>[4-6]</sup>。然而,这种方法占用土地资源,甚至可能会造成二次污染。

近年来,国内外高度重视对城市污泥的利用和处置,鼓励开展污泥废弃物的研究和污泥安全环保工作<sup>[7-9]</sup>。有专家学者提出将污泥应用于矿山充填领域,为污泥的处置提供了一种新的思路,然而污泥成分比较复杂,有害物质较多,因此有必要对污泥基充填体对地下水的水质影响进行研究。目前,国内外的水质评价方法主要有单因子评价法、综合指数评价法和综合评价法<sup>[10-13]</sup>。单因子评价法以最差指标等级作为水质评价等级,评价结果较为保守。综合指数评价法没有将权重纳入评价,评价结果较为主观。综合评价法综合考虑指标与权重的关系,评价结果较具综合性<sup>[14]</sup>。王晴晴等<sup>[15]</sup>以台州市河网水系为研究对象,利用熵权法与主成分分析法相结合的方法对河流水质进行了系统的评价;夏凡等<sup>[16]</sup>采用主成分分析法对丹江口16条入库河流进行了水质评价,并将评价结果与单因子评价法、综合污染指数法进行了对比分析;杨丽芝<sup>[17]</sup>等采用改进的潜在危害指数法对水源地的地下水样品有机物进行检测和评价;尤龙凤<sup>[18]</sup>对太原市不同类型的饮用水进行研究,引入健康风险评价对其致癌和非致癌风险进行评价。刘久潭<sup>[19]</sup>等运用数理统计、水化学、模糊综合评价以及因子分析等方法对西海岸新区地下水水质进行评价。综上,针对水质状况的研究多采用单一水质评价方法或应用健康风险进行评价,而将两者结合以评价水质的研究却鲜有报道。将水质评价和健康风险评价结合使用有

助于全面掌握水质状况和科学地管理维护水样。

本文对污泥基充填体的环境友好性问题进行了研究,并将和谐度方程引入风险评价,利用和谐度“综合程度评价”法进行水质综合等级评定,并将健康风险评价引入安全评价,为污泥基充填体浸出水样水质状况研究提供了新的思路和方法。

## 1 材料与方法

### 1.1 充填体试件及监测水样制备

前期试验证明掺加10%污泥的充填体与未掺加污泥的充填体相比,其28 d强度下降了70.8%,但仍然以达到2 MPa,可以满足目前采空区强度需求。另外污泥的掺加有效地缩短了凝结时间,初凝与终凝时间较未掺加污泥的充填体缩短64.4%和59.5%。按照污泥:水泥:粉煤灰=1:2:3制备试件,生石灰作为激发剂掺量为4%,料浆浓度为70%,试件尺寸为70.7 mm×70.7 mm×70.7 mm。将制备好的污泥基充填体试件养护28 d后浸泡在装有矿井水的水桶中,固液比为1:10,浸泡60 d后,取上清液即为待检水样。本研究选取了10项指标对其进行研究。这些指标大致可分为两类,一类为一般化学指标,包括pH值、总硬度、浊度、溶解性总固体这4项指标,另一类为毒性离子指标,包括Zn、Cr、Cu、Mn、Pb和氟化物(F<sup>-</sup>)这6项指标。分别进行四组试验互为对照补充。评价指标及其等级标准如表1所示。

浸出水样的pH值采用数字式pH计(pHS-3E型)进行测量,使用电导率仪(DDSJ-308F型)进行溶解性总固体测量,使用浊度计(WZS-200型)测定水样的浊度。重金属离子以及氟离子等毒性离子浓度采用电感耦合等离子体质谱仪(型号ICAP6300)进行测定,地下水水质划分标准及水样各指标检测结果如表1和表2所示。

### 1.2 和谐度评价法

左其亭教授最早将研究“和谐”行为的理论和方法体系称为和谐论,并进一步定义“和谐论是研究多方参与者共同实现和谐行为的理论和方法”<sup>[20]</sup>。和谐度方程是和谐论实现量化的基础,和谐度评价法是依据和谐度方程计算单指标和谐

度,进而通过指标权重系数计算多指标综合和谐度,进而判断指标的分类等级。

表 1 评价指标及等级标准

Table 1 Evaluation indicators and grades standard

序号	指标	单位	I 类	II 类	III 类	IV 类	V 类
一般化学指标							
1	pH	无量纲		6.5 ≤ pH ≤ 8.5		5.5 ≤ pH < 6.5 8.5 < pH ≤ 9.0	pH < 5.5 或 pH > 9.0
2	溶解性总固体	mg/L	≤ 300	≤ 500	≤ 1 000	≤ 2 000	> 2 000
3	浊度	NTU	≤ 3	≤ 3	≤ 3	≤ 10	> 10
4	总硬度	mg/L	≤ 150	≤ 300	≤ 450	≤ 650	> 650
毒性离子指标							
5	Cu	mg/L	≤ 0.01	≤ 0.05	≤ 1.00	≤ 1.50	> 1.50
6	Zn	mg/L	≤ 0.05	≤ 0.50	≤ 1.00	≤ 5.00	> 5.00
7	Cr	mg/L	≤ 0.005	≤ 0.01	≤ 0.05	≤ 0.10	> 0.10
8	Mn	mg/L	≤ 0.05	≤ 0.05	≤ 0.10	≤ 1.50	> 1.50
9	Pb	mg/L	≤ 0.005	≤ 0.005	≤ 0.01	≤ 0.10	> 0.10
10	F <sup>-</sup>	mg/L	≤ 1.0	≤ 1.0	≤ 1.0	≤ 2.0	> 2.0

表 2 水样检测结果

Table 2 Water sample test results

指标	单位	水样 1	水样 2	水样 3	水样 4
pH	无量纲	10.3	9.59	9.42	9.52
溶解性总固体	mg/L	647	709	842	723
浊度	NTU	2.1	2.8	2.5	3.3
总硬度	mg/L	332	370	418	470
Cu	mg/L	0.125	0.093	0.081	0.152
Zn	mg/L	0.183	0.142	0.167	0.155
Cr	mg/L	0.021	0.017	0.016	0.025
Mn	mg/L	0.047	0.051	0.075	0.061
P	mg/L	0.006	0.004	0.006	0.005
F <sup>-</sup>	mg/L	0.88	0.89	0.96	1.22

## 1.2.1 单因素和谐度方程

$$HD_k = ai - bj \quad (1)$$

式(1)中:  $HD_k$  为和谐度,其取值范围为  $[-1, 1]$ ;  $a$

为统一度,  $b$  为分歧度,  $a, b \in [0, 1]$ ;  $i$  为和谐系数,  $j$  为不和谐系数,  $i, j \in [0, 1]$ 。

和谐度方程各指标含义如表 3 所示。

表 3 和谐度方程各指标介绍

Table 3 Introduction of each index of the harmony degree equation

和谐度指标	含义
a	和谐参与者按照和谐规则具有“相同目标”所占的比重
b	和谐参与者对照和谐规则和目标存在分歧情况所占的比重
i	反映和谐目标的满足程度,可依据和谐目标计算确定
j	反映和谐参与者对存在分歧现象的重视程度,可根据分歧度计算确定

1.2.2 多因素和谐度方程

$$HD = \sum_{k=1}^n \omega_k HD_k \quad (2)$$

式(2)中:HD 为综合和谐度,n 表示因素个数, $\omega_k$  表示各指标权重。

1.2.3 和谐度方程各参数确定方法

(1) 统一度 a 的计算

$$a = \varphi(A_1, A_2) \quad (3)$$

式(3)中: $\varphi(A_1, A_2)$  为和谐行为  $A_1$  与  $A_2$  之间的关联程度隶属度,通常对指标体系建立线性函数进行计算。

(2) 分歧度 b 的计算

分歧度 b 与统一度 a 表达的意思相反,且  $a+b=1$ ,故:

$$b = 1 - \varphi(A_1, A_2) \quad (4)$$

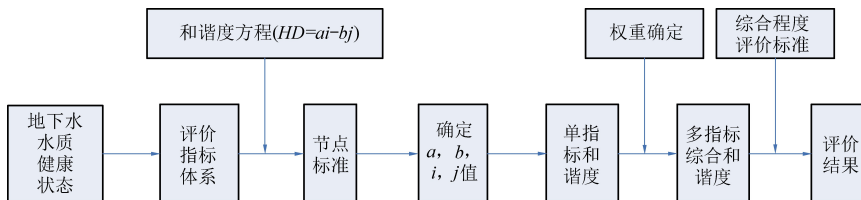


图 1 和谐度方程“综合程度评价”评价流程图

Fig.1 The evaluation flow chart of the “comprehensive degree evaluation” of the harmony degree equation

1.3 健康风险评价

根据重金属进入人体后产生的健康风险,主要划分为化学致癌物质风险评价和化学非致癌物质风险评价两类,计算公式分别为<sup>[21]</sup>:

$$D = V \times C / W \quad (6)$$

$$R_i^c = [1 - \exp(-D_i q_i)] / S \quad (7)$$

$$R_j^n = (D_j \times 10^{-6} / R_{Dj}) / S \quad (8)$$

式(6)(7)(8)中: $R_i^c$  和  $R_j^n$  分别代表化学致癌金属 i 和非致癌金属 j 在食入后产生的平均个人致癌年风险;D 为重金属元素通过食入途径的单位体重日均暴露剂量,mg/(kg·d);V 为成人每日平均饮水量,L/d;C 为饮用水中重金属的实际值,L/d;W 为该地区的平均人体质量,kg; $q_i$  为重金属元素 i 的食入途径致癌强度系数,mg/(kg·d); $R_{Dj}$  为重金属元素 j 通过食入途径参考系数的污染指数,mg/(kg·d);S 为人类平均寿命,a。

假设饮用水中化学致癌物质与化学非致癌物质对人体健康的危害呈相加关系而非协同或拮抗关系,故饮用水总健康危害风险为:

$$R_{\text{总}} = R_i^c + R_j^n \quad (9)$$

化学致癌物质与化学非致癌物质风险计算模型中参数  $Q_i$  和  $R_{Dj}$  的值见表 4,其余参数值见表 5。

(3) 和谐系数 i 的计算

本文和谐系数计算运用模糊数学思想,对和谐系数进行分级,按照地下水等级标准划分为 1、1~0.67、0.67~0.33、0.33~0、0 五类,数据与划分等级对号入座进行匹配,根据和谐系数两节点公式进行计算,即按公式(4)确定指标和谐系数:

$$i = \frac{i_2 - i_1}{x_2 - x_1}(x - x_1) + i_1 \quad (5)$$

(4) 不和谐系数 j 的计算

不和谐系数 j 反映和谐参与者对存在分歧现象的重视程度,可以根据分歧度计算确定,即  $j=b$ 。

1.2.4 和谐度方程评价流程

基于和谐度分析的地下水水质评价模型利用层次分析法确定指标权重,通过和谐度评价法确定地下水水质等级,其流程见图 1。

表 4 模型参数  $Q_i$  和  $R_{Dj}$  值

Table 4  $Q_i$  and  $R_{Dj}$  values of the model

		mg · kg <sup>-1</sup> · d <sup>-1</sup>	
化学性质	重金属	$Q_i$	$R_{Dj}$
致癌化学物质	Cr	6.100 00	0.003 00
	Cu	/	0.040 00
非致癌化学物质	Zn	/	0.300 00
	Mn	/	1.400 00
	Pb	/	0.001 40

表 5 我国男性、女性的平均体重、寿命及饮水量

Table 5 Average weight, life span and water consumption of Chinese men and women

性别	体重/kg	寿命/a	饮水量/(L · d <sup>-1</sup> )
男	62.7	73	2.464
女	54.4	77	2.170

2 结果与讨论

2.1 和谐度评价

计算出水样各指标和谐度参数值,通过式(1)确定子和谐度,结合权重以及式(2)确定综合和谐

度值,结果见表6。权重的确定采用层次分析法,邀请地下水污染方面专家打分,通过对各因素进行分析、比较和计算,确定 pH 值、溶解性总固体、

浊度、Cu、Zn、Cr、Mn、Pb、氟化物和总硬度 10 项指标的权重值。

表 6 各指标和谐度值

Table 6 Harmony value of each index

指标	单位	$D_1$	$D_2$	$D_3$	$D_4$	
pH	无量纲	-1	-1	-1	-1	
溶解性总固体	mg/L	0.42	0.35	0.20	0.33	
浊度	NTU	1.00	1.00	1.00	0.31	
总硬度	mg/L	0.25	0.09	0.11	0.30	
子和谐度 $HD_k$	Cu	mg/L	0.58	0.61	0.62	0.61
	Zn	mg/L	0.87	0.91	0.89	0.90
	Cr	mg/L	0.45	0.51	0.52	0.38
	Mn	mg/L	1.00	0.66	0.49	0.59
	Pb	mg/L	0.59	1.00	0.59	1.00
	F <sup>-</sup>	mg/L	1.00	1.00	1.00	0.15
	综合和谐度 $HD_i$	/	/	0.50	0.52	0.44

由于四组实验数据具有同等作用,对评价的影响相当,故权重均为 0.25,把四组数据的和谐度再次进行加权平均计算,最终得出浸出液水质和谐度,  $HD=0.45$ 。

通过运用和谐度方程得出污泥煤矸石充填膏体浸出液水质和谐度值,根据表 7 确定水质为Ⅲ类水,可适用于集中式生活饮用水水源及工农业用水。

虽然污泥煤矸石充填膏体浸出液总体符合Ⅲ

类水质标准,但部分指标超过 V 类水质标准,在污泥用作充填材料时,需要特别注意超标项目。pH 超过 V 类水质标准,这是由于污泥在消化过程中本身添加碱性消化材料,而且在后续试验过程中添加了生石灰促进水化反应,在以后的应用过程中可添加弱酸进行地下水的中和。浊度略大于Ⅲ类水质标准,污泥松散易溶于水,粒径小,颜色深,导致浸泡液浊度个别偏大。

表 7 水质和谐度划分标准

Table 7 Classification criteria for water quality harmony

水质	I 类	II 类	III 类	IV 类	V 类
和谐度范围	0.8~1	0.6~0.8	0.4~0.6	0.2~0.4	0~0.2

## 2.2 健康风险评价

经和谐度评价结果表明污泥基充填体浸出水样适用于用作集中饮用水水源或工农业用水,故对其进行和谐度评价以外再进行水环境健康风险评估也是十分必要的。

从表 8 可知,本试验选取指标中的致癌金属铬在食入途径下的个人平均致癌年风险值在

$0.438 \times 10^{-5} \sim 1.237 \times 10^{-5}$  之间波动,此数值低于 USEPA 规定的最大风险值  $1 \times 10^{-4}$ ,但是高于荷兰建设和环境部所能接受的最大风险水平  $1 \times 10^{-6}$ ,总体属于中等风险等级。表明污泥基充填体浸出水样在食入途径下给人体带来的潜在危害不容忽视,在食入前需对水样进行预处理。污泥基充填体浸出水样中的非致癌金属铜、锌、锰、铅在食入

表 8 致癌物质和非致癌物质通过饮水途径的致癌健康风险值

Table 8 Carcinogenic health risk values of carcinogens and non-carcinogens through the drinking water route

	致癌物		非致癌物				$R_{\text{总}}/10^{-5}$	
	Cr/ $10^{-5}$	$R^c/10^{-5}$	Cu/ $10^{-9}$	Zn/ $10^{-9}$	Mn/ $10^{-11}$	Pb/ $10^{-9}$		$R^n/10^{-9}$
最小值	4.379	4.379	0.910	0.213	1.509	1.284	3.916	4.379
最大值	9.414	9.414	2.354	0.378	3.319	2.655	8.706	9.414

途径下的总平均致癌风险值位于  $3.916 \times 10^{-9} \sim 8.706 \times 10^{-9}$  之间,且风险值以锰最大,铅、铜次之,锌最小,总体属于低风险等级。四种非致癌金属风险值达到荷兰建设和环境部的可忽略风险水平  $1 \times 10^{-8}$ ,即化学致癌物质对人体健康危害的个人年风险是非致癌物质的  $10^5$  倍左右,即污泥基充填体浸出水样的总体个人健康危害年均值以致癌物质铬健康危害风险为主,故应加强对充填采空区水环境中重金属铬的监测。

### 3 结 论

利用和谐度评价和健康风险评价相结合的方法对污泥基充填体浸出水样的水质进行分析评价,得出以下结论:

(1) 和谐度评价结果表明污泥基充填体浸出液和谐度值为 0.45,总体符合Ⅲ类水质标准,水质状况良好。但部分指标超过Ⅴ类水质标准,需要特别注意超标项目,尤其是浸出液 pH,可减少碱性试剂用量或者对地下水进行中和反应后再利用。

(2) 污泥基充填体浸出水样的重金属年均致癌风险值位于  $4.379 \times 10^{-5} \sim 9.414 \times 10^{-5}$  之间,此数值介于 USEPA ( $1 \times 10^{-4}$ ) 和荷兰建设和环境部 ( $1 \times 10^{-6}$ ) 规定的最大可接受风险值之间。重金属年均非致癌风险值位于  $3.916 \times 10^{-9} \sim 8.706 \times 10^{-9}$  之间,达到荷兰建设和环境部的可忽略风险水平 ( $1 \times 10^{-8}$ ),故健康危害主要取决于致癌重金属铬。

(3) 除了对污泥基充填体浸出液进行常规的地下水水质评价(和谐度评价),同时对其进行水环境健康风险评价也具有重要意义,将两者结合使用可以更加全面科学地评估水质风险,从而加强对充填采空区及周边水质的管理监测及治理保护。

### 参考文献

- [1] Dedi Li, Jianzhong Liu, Shuangni Wang, et al. Study on coal water slurries prepared from coal chemical wastewater and their industrial application [J]. Applied Energy, 2020, 268: 114976.
- [2] A S Makarov, S D Boruk, A I Egunov, et al. Utilization of industrial wastewater in production of coal-water fuel [J]. Journal of Water Chemistry and Technology, 2014, 36 (4): 333-340.
- [3] 王艳语, 苗俊艳, 侯翠红, 等. 城市污泥热解及其固体残渣资源化利用 [J]. 化工矿物与加工, 2020, 49 (12): 41-45.
- [4] Wzorek M. Characterisation of the properties of alternative fuels containing sewage sludge [J]. Fuel Processing Technology, 2012, 104: 80-89.
- [5] Li J, Wang S, Li Y, et al. Experimental research and commercial plant development for harmless disposal and energy utilization of petrochemical sludge by supercritical water oxidation [J]. Chemical Engineering Research and Design, 2020, 162: 258-272.
- [6] Eom H, Jang Y H, Lee D, et al. Optimization of a hybrid sludge drying system with flush drying and microwave drying technology [J]. Chemical Engineering Research and Design, 2019, 148: 68-74.
- [7] Nowak Benedikt, Aschenbrenner Philipp, Winter Franz. Heavy metal removal from sewage sludge ash and municipal solid waste fly ash-A comparison [J]. Fuel Processing Technology, 2013 (105): 195-201.
- [8] Sadique Monower, Al-Nageim Hassan, Atherton William, et al. Analytical investigation of hydration mechanism of a non-Portland binder with waste paper sludge ash [J]. Construction & Building Materials, 2019: 80-87.
- [9] Saffarzadeh A, Shimaoka T, Wei Y, et al. Impacts of natural weathering on the transformation/neof ormation processes in landfilled MSWI bottom ash: A geoenvironmental perspective [J]. Waste Management, 2011, 31 (12): 2440-2454.
- [10] 高宗军, 孙金凤, 鲁统民, 等. 淄博市大武水源地地下水有机污染物种类与分析评价 [J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2019, 38 (4): 1-9.
- [11] 左其亭, 韩春辉, 马军霞, 等. 和谐度方程(HDE)评价方法及应用 [J]. 系统工程理论与实践, 2017, 37 (12): 3281-3288.
- [12] 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.
- [13] 李海华, 邢静, 李喜柱, 等. 基于BP神经网络的黄河小浪底济源断面水质评价模型研究 [J]. 节水灌溉, 2014 (6): 57-59.
- [14] 余勋, 梁婕, 曾光明, 等. 基于三角模糊数的贝叶斯水质评价模型 [J]. 环境科学学报, 2013, 33 (3): 904-909.
- [15] 王晴晴, 陈星, 常进. 主成分分析法与熵值法结合在水质评价中的应用 [J]. 人民长江, 2015, 46 (8): 10-13+18.
- [16] 夏凡, 胡圣, 龚洽娟, 等. 不同水质评价方法的应用比较研究——以丹江口水库入库河流为例 [J]. 人民长江, 2017, 48 (17): 11-15+24.
- [17] 杨丽芝, 朱恒华, 刘治政, 等. 淄博大武水源地地下水健康风险评价 [J]. 干旱区资源与环境, 2021, 35 (12): 106-113.
- [18] 尤龙凤, 丁志强. 太原市饮用水重金属健康风险评价 [J]. 山西水利科技, 2021 (3): 45-47+50.
- [19] 刘久潭, 周丹, 高宗军, 等. 青岛西海岸新区地下水水化学特征及水质评价 [J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2019, 38 (2): 14-24+43.
- [20] 左其亭. 和谐论的数学描述方法及应用 [J]. 南水北调与水利科技, 2009, 7 (4): 129-133.
- [21] 潘妮, 梁川. 基于熵权的灰色关联模型在流域水质综合评价中的应用 [J]. 中国农村水利水电, 2008 (4): 1-3+7.