

谷志琪,卞建民,王 宇,等.长白山源头区地下水水质评价及监测指标优化 [J]. 中国环境科学, 2023,43(10):5257-5264.

Gu Z Q, Bian J M, Wang Y, et al. Groundwater quality assessment and index optimization of water quality monitoring in the water source area of Changbai Mountain [J]. China Environmental Science, 2023,43(10):5257-5264.

## 长白山源头区地下水水质评价及监测指标优化

谷志琪<sup>1</sup>,卞建民<sup>1</sup>,王 宇<sup>1\*</sup>,马丽欣<sup>2</sup>,孙晓庆<sup>1</sup>,阮冬梅<sup>1</sup> (1.吉林大学新能源与环境学院,地下水资源与环境教育部重点实验室,吉林 长春 130021; 2.吉林省生态环境监测中心,吉林 长春 130021)

**摘要:**以长白山源头区-安图县作为研究区,分析地下水化学特征及其形成过程,基于组合熵权的云模型评估地下水质量,并利用随机森林联合多元线性回归构建水质指标优化模型,确定地下水水源保障监测的关键指标.结果表明,研究区地下水水化学类型主要为  $\text{HCO}_3\text{-Mg}\cdot\text{Na}\cdot\text{Ca}$  型,主要受岩石风化作用影响;地下水质量评价等级为 I~III 类的样品数达到 74%;最佳指标优化模型的  $R^2$  和 RMSE 值分别为 0.6333 和 0.726,优化指标为  $\text{F}^-$ 、 $\text{Na}^+$ 、TDS、 $\text{Cl}^-$ ,作为该区地下水监测的关键指标,能够有效减少监测费用,并为强化水源地安全保障提供科学依据.

**关键词:** 长白山优质水源; 云模型; 随机森林; 水质评价; 指标优化; 地下水

中图分类号: X824 文献标识码: A 文章编号: 1000-6923(2023)10-5257-08

### Groundwater quality assessment and index optimization of water quality monitoring in the water source area of Changbai Mountain.

GU Zhi-qi<sup>1</sup>, BIAN Jian-min<sup>1</sup>, WANG Yu<sup>1\*</sup>, MA Li-xin<sup>2</sup>, SUN Xiao-qing<sup>1</sup>, RUAN Dong-mei<sup>1</sup> (1.Key Laboratory of Groundwater Resources and Environment, Ministry of Education, College of New Energy and Environment, Jilin University, Changchun 130021, China; 2.Jilin Ecological Environment Monitoring Center, Changchun 130021, China). *China Environmental Science*, 2023,43(10): 5257-5264

**Abstract:** This study chose Antu County, the water source area of Changbai Mountain as the study area. the hydrochemical characteristics and formation mechanism of groundwater in the study area was analyzed. The cloud model based on entropy weight was used to evaluate the groundwater quality. Furthermore, an optimization model of water quality index was constructed by coupling random forest and stepwise multiple linear regression analysis to determine the key indicators of groundwater source security monitoring. The results showed that the primary water chemistry type of groundwater in the study area was  $\text{HCO}_3\text{-Mg}\cdot\text{Na}\cdot\text{Ca}$  type, which was mainly controlled by the rock weathering and dissolution effects. About 74% of groundwater samples were classified as Class I-III. The  $R^2$  and RMSE values of the best index optimization model were 0.6333 and 0.726, respectively.  $\text{F}^-$ ,  $\text{Na}^+$ , TDS and  $\text{Cl}^-$  were identified as the key indicators of groundwater quality monitoring in the study area. This optimized water quality index can effectively reduce monitoring costs and provide scientific basis for guaranteeing the safety of water sources.

**Key words:** high-quality water source in Changbai Mountain; cloud model; random forest; water quality evaluation; index optimization; groundwater

长白山天池水资源丰富,是该地区的重要水源<sup>[1]</sup>,随着经济的发展,人们对优质水源的需求愈加迫切,对水资源的开发利用程度也逐渐增加,而水资源大量开发过程中容易对水源地水质造成影响<sup>[2]</sup>.因此,加强优质水源地保护,探究区域地下水水质现状,构建合理的地下水监测体系等工作亟待开展,对于保障优质水资源的可持续利用,支撑社会经济和生态环境的协调发展具有重要意义.

目前我国针对优质水源地已经开展了水质适宜性分析<sup>[3]</sup>、构建水源评价指标体系<sup>[4]</sup>和决策供水水源模型<sup>[5]</sup>等一系列工作,但是部分水源地水质状况仍不明确,没有建立可靠的监测保障体系.地下水质量评价涉及多个指标的不同决策,大量使用的

Nemerow 指数法<sup>[6]</sup>、模糊综合评价法<sup>[7]</sup>、支持向量机<sup>[8]</sup>、主成分分析<sup>[9]</sup>和投影寻踪法<sup>[10]</sup>等方法由于适用条件及评估标准的不同,当指标监测值在水质分类标准阈值附近时具有一定的模糊性和随机性<sup>[11]</sup>,难以做出准确判断进而导致评价结果的不确定性.针对这种不确定性,基于概率统计和模糊数学的正态云模型在定性概念与定量数值相互转换过程中具有优越性<sup>[12]</sup>,还可以考虑评价标准的非线性和评价参数的多样性,从而确保评价结果更加可靠.

收稿日期: 2023-02-24

基金项目: 吉林省环保厅环境保护科研项目(吉环科字第 2022-10 号); 吉林省科技厅重大科技专项(20230303007SF)

\* 责任作者, 副教授, chair19881224@126.com

基于不同类别的大量地下水监测数据信息基本可以反映出当前环境下的水质状况,但不同的监测指标与水环境之间存在不匹配问题,长期处于符合标准范围内的非重要指标容易减弱重要指标对水环境的影响<sup>[13]</sup>,使水质评价结果出现一定的偏差,难以表征真实的水环境状况,还会造成时间和人力物力上的浪费.目前对水环境监测指标进行优化的研究往往结合水质评价结果进行主观筛选<sup>[14]</sup>,依据不同指标间的相关性<sup>[15]</sup>以及构建水质指数模型<sup>[16]</sup>优化关键指标等.随机森林方法不但数据处理速度快,较其他同类算法准确率也更高,已经在地下水潜力评估<sup>[17]</sup>、地下水水质评价<sup>[18]</sup>、地下水污染预测<sup>[19]</sup>等领域进行了应用<sup>[20]</sup>,而根据随机森林方法定量评价监测指标对于水质类别的重要性,构建指标优化模型的研究鲜见报道.因此,本文选取长白山源头区安图县作为研究对象,进行地下水调查和样品采集测试,分析研究区地下水水化学特征及其形成过程,在此基础上结合熵权理论运用正态云模型评价地下水水质,验证该方法可靠性的同时将其评价结果与随机森林方法联用,构建地下水监测指标的优化模型,筛选影响该地区地下水水质的关键指标,为了解区域地下水水质状况和保护优质水源地提供理论依据.

1 数据与方法

1.1 研究区概况

长白山地处我国东北部(东经 127°~132°,北纬 39°~46°),是中国湿润地区最大的火山台地山脉,面积约 19600km<sup>2</sup>,属于东亚季风气候区,境内多年平均气温 3.54℃,年平均降水量在 700~1400mm 之间<sup>[21]</sup>.区内总体地势东南高西北低,地质构造复杂,以天池为中心形成了众多环状断裂及放射状断裂,各种构造断裂相互穿插、交切,为地下水提供了大量的循环及储存空间<sup>[22]</sup>.松花江、鸭绿江、图们江三大江皆发源于长白山顶端天池,在流经途中分叉形成众多细小分散支流,形成流域面积超过 20km<sup>2</sup>.  
以长白山北侧源头区—安图县(127°48′~129°08′E,北纬 42°01′~43°24′N)作为研究区,该区域总面积约为 7400km<sup>2</sup>,总人口约 22 万,植被覆盖率达 87%以上,总体地势南高北低,东高西低,呈阶梯状台地展布,多年平均气温约为 3.8℃,多年平均降水

量约为 752mm.区内地下水主要为玄武岩孔隙裂隙水,主要赋存于军舰山组玄武岩地层中,其气孔率一般为 20%~30%,该含水层的补给来源包括大气降水和凝结水<sup>[23]</sup>,通过在山前谷地富集,排泄成泉,成为地表径流的补给源.地表径流中二道白河直接发源于长白山天池,与头道白河、三道白河等均属于松花江水系.

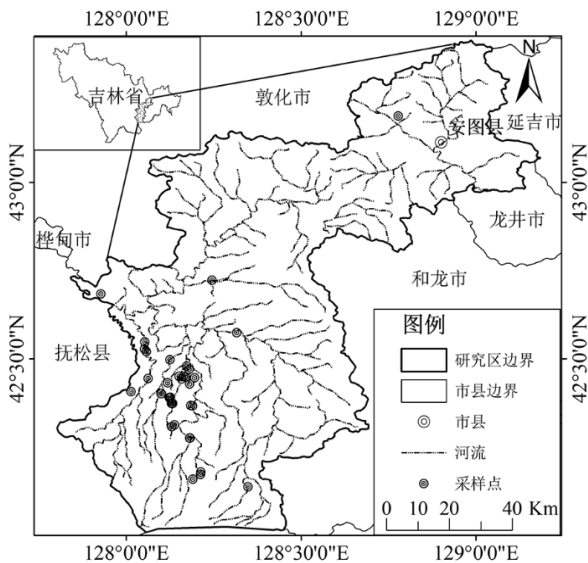


图1 研究区位置及采样点分布示意  
Fig.1 location of the study area and sampling points

1.2 数据来源

利用本课题组在研究区采集的 35 个点位的地下水样品测试数据,采样点的布置结合了研究区地质及水文地质条件,并沿地下水流动路径布置(图 1).样品的采集、运输和储存工作严格遵守《地下水环境监测技术规范》(HJ/T 164-2004),测试工作由吉林大学测试科学实验中心承担,检测指标 14 项,测试方法见表 1.

表 1 地下水水化学组分测定方法  
Table 1 Analytical methods for chemical composition of groundwater

| 测定项目                                                                        | 测定方法                 |
|-----------------------------------------------------------------------------|----------------------|
| K <sup>+</sup> 、Na <sup>+</sup> 、TFe                                        | 火焰原子吸收分光光度法(GFU-202) |
| Ca <sup>2+</sup> 、Mg <sup>2+</sup>                                          | EDTA 二钠盐滴定法          |
| SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> 、F <sup>-</sup> 、NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> | 离子色谱法(HLC-601)       |
| TDS                                                                         | 便携式电导率仪(现场测定)        |
| HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>                                               | 双指示剂滴定               |
| Cl <sup>-</sup>                                                             | 硝酸盐滴定法               |
| pH 值                                                                        | 酸度计法                 |
| H <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>                                             | 硅钼黄分光光度法             |

### 1.3 研究方法

**1.3.1 正态云理论** 正态分布是概率论中最重要的分布之一,根据正态分布曲线延伸出了钟形隶属函数,在其基础上发展了用于处理定性概念与定量描述的不确定转换模型——正态云模型<sup>[24]</sup>,其不确定性使用( $Ex$ 、 $En$ 、 $He$ )等数字特征进行确定,其计算方程如下:

(1) $Ex$ :期望,云滴在论域空间分布的期望,代表云滴的定性概念.

$$Ex = (B_{\min} + B_{\max}) / 2 \quad (1)$$

式中: $B_{\min}$ 、 $B_{\max}$  分别为评价因子隶属于某一水质等级的标准上下限值.

(2) $En$ :熵,反映了代表定性概念云滴的离散程度和在论域空间可被概念接受的云滴的取值范围.

$$En = (B_{\max} - B_{\min}) / 2.355 \quad (2)$$

(3) $He$ :超熵,反映了云的离散程度.

$$He = k \cdot En \quad (3)$$

式中: $k$  为常数,根据系列的分布情况调整<sup>[25]</sup>.耦合熵权法的正态云模型的流程如图 2 所示.

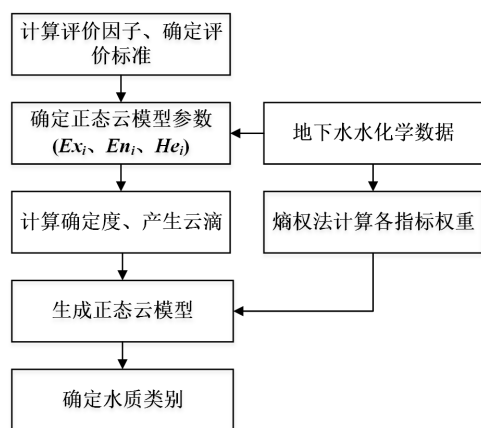


图 2 耦合熵权的正态云模型流程

Fig.2 Flow chart of positive cloud model coupled with entropy weight

**1.3.2 随机森林方法** 随机森林(RF)利用装袋重抽样和特征随机性来构建每棵单独的决策树,生成不相关的森林,其对每个决策结果进行投票表决的最终结果比任何单独的树更准确<sup>[26]</sup>.该方法的一个突出特点是可以通过计算 Mean Decreased Gini Coefficient(平均下降 Gini 指数,MDG)来评价每个因素的相对重要性及其对预测输出的影响<sup>[27]</sup>.MDG 是数据集中随机索引被错误划分的概率,用于指示节

点的纯度,MDG 值越大,该指标的重要性就越大,其计算公式如下:

$$\text{Gini}(i) = 1 - \sum_{j=1}^{|J|} \left( X(i, j) / \sum_{j=1}^n X(i, j) \right)^2, i \in d \quad (4)$$

式中: $X(i, j)$ 表示第  $j$  个变量的第  $i$  个指数; $d$  表示回归树的节点编号.当节点  $d$  分成两个子节点时,两个子节点处的基尼指数将趋于最小化,并将用作节点  $d$  处基尼指数的最终值:

$$|\text{Gini}(d), v| = \min \{ \text{Gini}(i), i \in d \} \quad (5)$$

当节点  $d$  被拆分为两个子节点时,其子节点的基尼指数之和低于其父节点的基尼系数之和,并且减少的绝对值计算如下:

$$\Delta \text{Gini}(d) = \text{Gini}(d) - n_l / n \cdot \text{Gini}(d_l) - n_r / n \cdot \text{Gini}(d_r) \quad (6)$$

式中: $\text{Gini}(d_l)$ 是左侧子节点的 Gini 指数;  $\text{Gini}(d_r)$ 是右侧子节点的基尼指数;  $n_l$  和  $n_r$  分别是左侧和右侧节点的样本大小.

## 2 结果与讨论

### 2.1 地下水化学特征及其形成过程

根据研究区地下水样品指标检出率情况,结合《地下水质量标准》(GB/T14848—2017)<sup>[28]</sup>选取 14 个水质指标进行描述性统计分析,并绘制 Piper 三线图判别水化学类型.结果表明,研究区地下水普遍呈中性,pH 值变化范围为 6.16~8;地下水以淡软水类型为主,TDS 变化范围为 96~2029.68mg/L,TH 变化范围为 24.09~895.41mg/L,分别有约 14.29%和 11.43%的样品超过了地下水Ⅲ类水阈值;其他指标除  $F^-$  和  $TFe$  外,均未超过地下水Ⅲ类水阈值,其中  $F^-$  在所有指标中超标率最高,为 22.86%.经分析,该地区  $F^-$  含量较高的原因是受到地下水深循环影响,火山活动形成的大型断裂中高温热水溶解花岗岩中的氟元素形成高氟水,补给到浅层地下水中使其中  $F^-$  含量相对较高,与前人的研究结论吻合<sup>[29]</sup>. $TFe$  的超标率为 14.28%,主要受到长白山喷发的火成岩铁元素本底值高的影响.pH 值的变异系数非常小,表明区内地下水 pH 值总体上分布均匀,除  $K^+$ 、 $F^-$  和  $H_2SiO_3$  以外其余指标变异系数均大于 1,在研究区范围内空间分布存在一定的差异, $TFe$  的变异系数最大,其形成受火山地质作用影响是其空间差异性的主要原因.

研究区地下水主要阳离子是  $\text{Na}^+$  和  $\text{Ca}^{2+}$ , 主要阴离子是  $\text{HCO}_3^-$ , 地下水水化学类型主要为  $\text{HCO}_3^- \text{Mg} \cdot \text{Na} \cdot \text{Ca}$  型和  $\text{HCO}_3^- \text{Na} \cdot \text{Mg} \cdot \text{Ca}$  型(图 3).

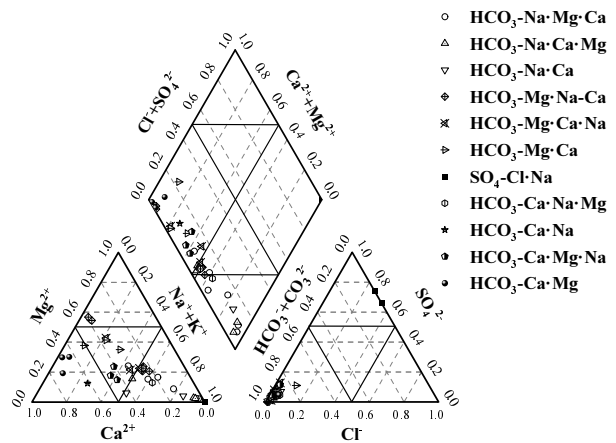


图3 研究区地下水 piper 三线图  
Fig.3 Piper diagram of groundwater samples

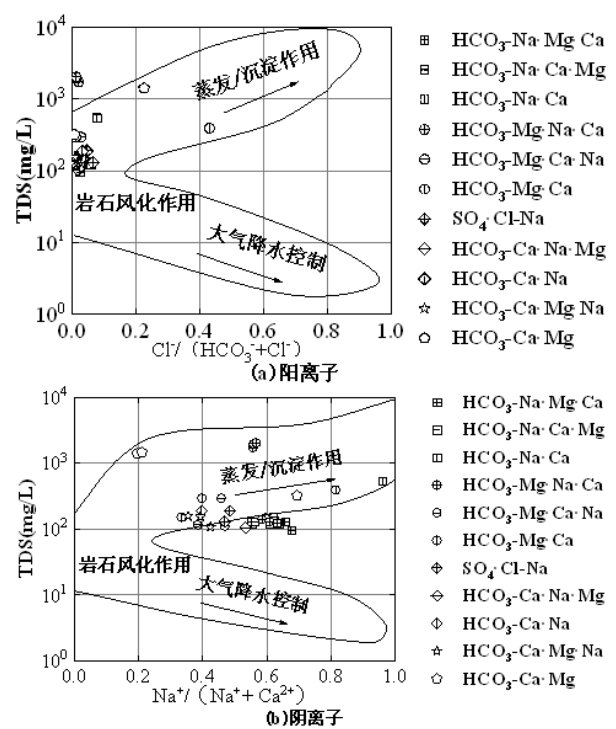


图4 研究区地下水 Gibbs 图  
Fig.4 Gibbs diagram of controlling mechanisms for groundwater in the study area

基于水化学数据绘制 Gibbs 图,根据各点在 Gibbs 图中的位置,分析溶解于水中的化学成分的主要来源,判断地下水的水化学成因.如图 4 所示,大部分水样点均落在 Gibbs 图中间的岩石风化控制区,

少部分水样点分布在蒸发浓缩作用控制区,而在大气降雨作用控制区没有水样点的分布.表明地下水化学成分的形成以岩石风化作用的影响为主,蒸发浓缩作用的影响为次,而大气降雨作用几乎没有影响.个别水样点落在 Gibbs 图外,这表明还可能受到阳离子交换作用的影响.

2.2 地下水水质评价

考虑到地下水质量标准中  $\text{K}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{HCO}_3^-$ 、 $\text{H}_2\text{SiO}_3$  和 pH 值等指标没有具体类别对应的标准阈值,故选择  $\text{Na}^+$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{Cl}^-$ 、TDS、TH、TFe、 $\text{F}^-$ 、和  $\text{NO}_3^-$  这 8 个指标,通过正态云模型理论耦合熵权法评价安图县地下水水质,了解地下水环境质量.

表2 各指标权重计算结果

| Table 2 Calculation results of each index weight |               |               |                    |                 |
|--------------------------------------------------|---------------|---------------|--------------------|-----------------|
| 指标                                               | $\text{Na}^+$ | $\text{Cl}^-$ | $\text{SO}_4^{2-}$ | $\text{NO}_3^-$ |
| Ej                                               | 0.6623        | 0.7505        | 0.8962             | 0.8093          |
| Gj                                               | 0.3377        | 0.2495        | 0.1038             | 0.1907          |
| Wj                                               | 0.1648        | 0.1218        | 0.0506             | 0.0931          |
| 指标                                               | $\text{F}^-$  | TDS           | TH                 | TFe             |
| Ej                                               | 0.9266        | 0.6739        | 0.6686             | 0.5633          |
| Gj                                               | 0.0734        | 0.3261        | 0.3314             | 0.4367          |
| Wj                                               | 0.0358        | 0.1591        | 0.1617             | 0.2131          |

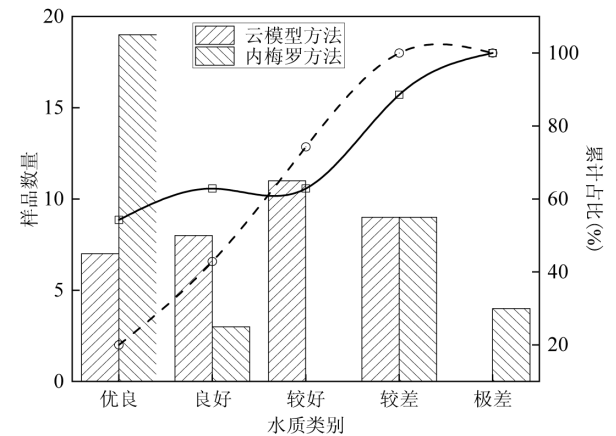


图5 水质评价结果对比图  
Fig.5 Comparison of water quality assessment results

不同指标的熵权计算结果如表 2 所示,在确定各指标权重的基础上,结合云模型参数得出水质综合评价结果,并与内梅罗综合计算结果进行比较(图 5).由图 5 可知:研究区内地下水水质较好,大部分均为 I~III 类,基于组合熵权的正态云模型评

价结果中等于或好于Ⅲ类水的样品有 26 个,内梅罗评价结果中等于或好于Ⅲ类水的样品有 22 个,两种方法对于区域水质的综合评价结果具有较好的一致性.内梅罗综合评价结果中绝大部分样品点属于Ⅰ类或Ⅴ等边缘水质类别,占比超过全部样品的 66%,而基于组合熵权的正态云模型评价结果中各级别样品数量较为平均,不同类别样品占比均小于 35%.

这是因为内梅罗综合评价根据计算  $F$  值进行分类,评价结果易受极大值影响,忽略水质较为适中的类别,而在大量云滴基础上建立的正态云模型减少了极大值对评价结果的影响程度,同时与熵权法耦合,降低了评价过程中的模糊性,使得评价结果更能反映出地下水环境的真实情况.云模型结合不同权重方法应用于评价某地区的地下水水质的相关研究均得出了相似结论<sup>[30-31]</sup>,也证明了本文结论的可靠性.

### 2.3 地下水监测指标优化

基于组合熵权的正态云模型的地下水质量评价结果,通过随机森林定量评价水质指标对水质类别的特征重要性,结果表明, $F^-$  是对研究区地下水水质影响最大的指标,MDG 值为 3.08,  $Na^+$ 、TH、TDS、 $Cl^-$  与  $SO_4^{2-}$  的重要性差别较小,均在 2.05~2.3 范围内,TFE 和  $NO_3^-$  的重要性相对较低(图 6(a)),因此,可选择  $F^-$ 、 $Na^+$ 、TH、TDS、 $Cl^-$  与  $SO_4^{2-}$  等指标构建

优化指标模型.

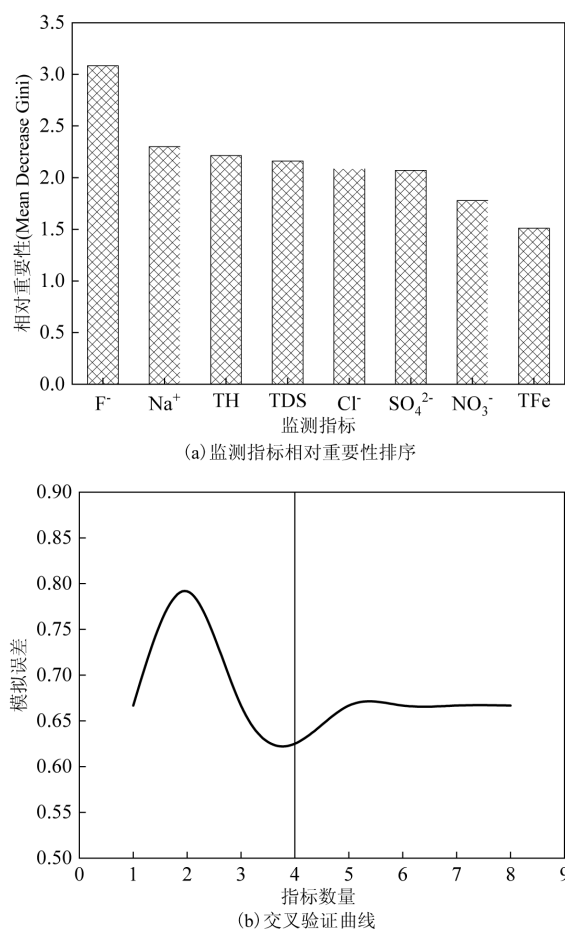
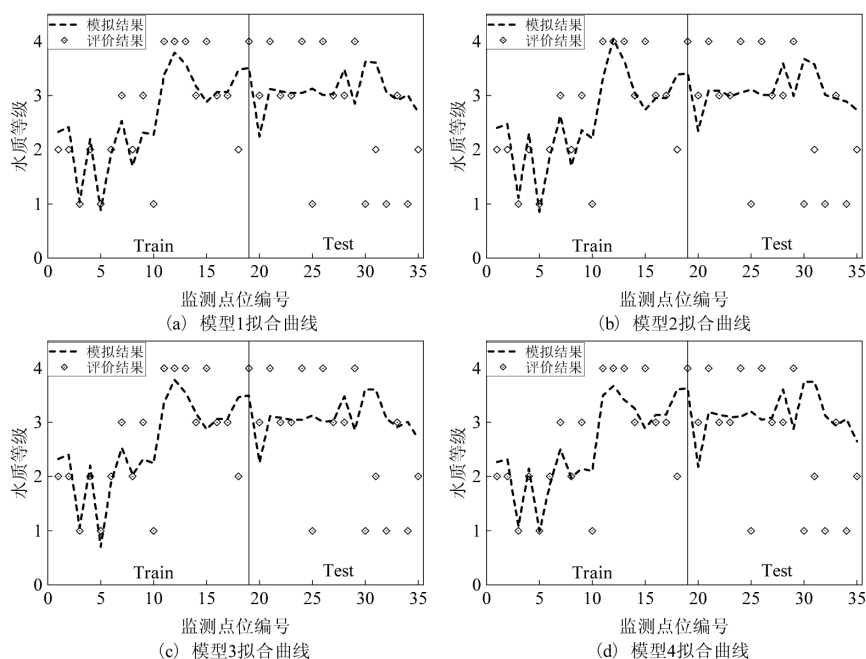


图 6 影响地下水水质的关键指标

Fig.6 Key indicators affecting groundwater quality



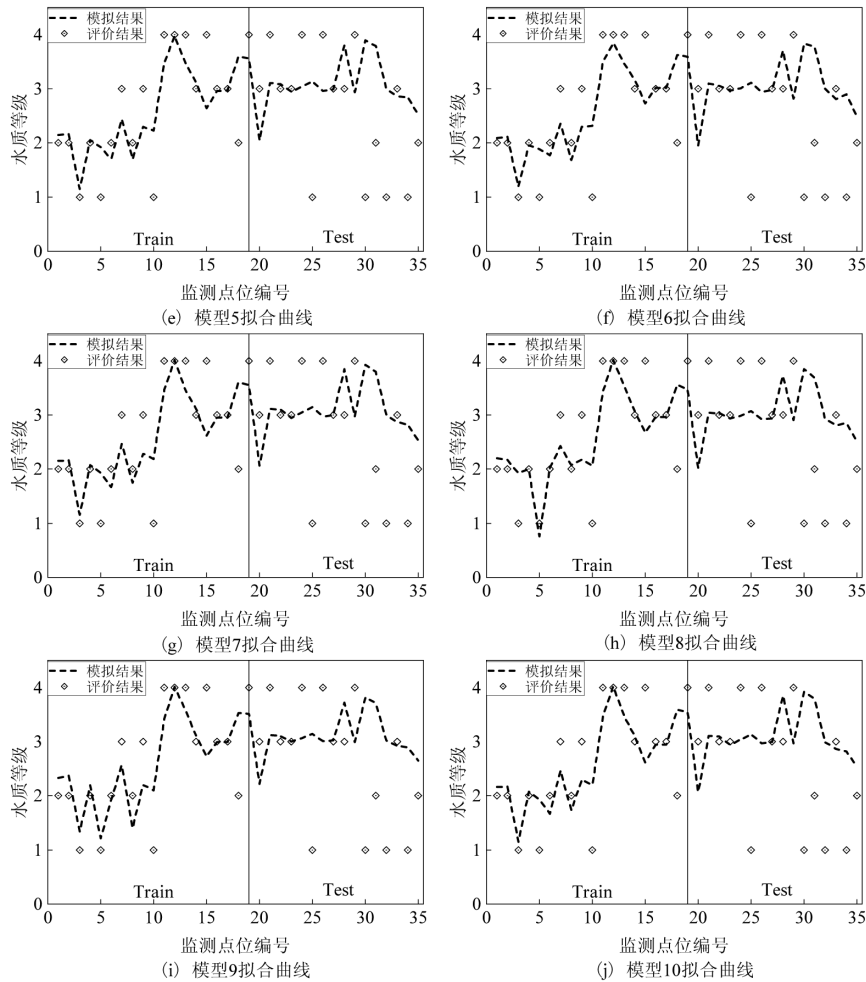


图 7 优化模型训练、检验样本的模拟与实测拟合曲线

Fig.7 Optimize model training, test sample simulation and actual measurement fitting curve

表 3 优化模型指标选择及分析结果  
Table 3 Optimization model index selection and analysis results

| 模型 | 指标                                    | $R^2$  | RMSE   | $P$   |
|----|---------------------------------------|--------|--------|-------|
| 1  | $F^-$ 、 $Na^+$ 、TH、TDS                | 0.5735 | 0.7541 | <0.05 |
| 2  | $F^-$ 、 $Na^+$ 、TH、 $Cl^-$            | 0.6030 | 0.7425 | <0.05 |
| 3  | $F^-$ 、 $Na^+$ 、TH、 $SO_4^{2-}$       | 0.6312 | 0.7393 | <0.05 |
| 4  | $F^-$ 、 $Na^+$ 、TDS、 $Cl^-$           | 0.6333 | 0.7260 | <0.05 |
| 5  | $F^-$ 、 $Na^+$ 、TDS、 $SO_4^{2-}$      | 0.6344 | 0.7371 | <0.05 |
| 6  | $F^-$ 、 $Na^+$ 、 $Cl^-$ 、 $SO_4^{2-}$ | 0.6178 | 0.7473 | <0.05 |
| 7  | $F^-$ 、TH、TDS、 $Cl^-$                 | 0.5448 | 0.7782 | <0.05 |
| 8  | $F^-$ 、TH、TDS、 $SO_4^{2-}$            | 0.5404 | 0.7815 | <0.05 |
| 9  | $F^-$ 、TH、 $Cl^-$ 、 $SO_4^{2-}$       | 0.5445 | 0.7771 | <0.05 |
| 10 | $F^-$ 、TDS、 $Cl^-$ 、 $SO_4^{2-}$      | 0.5450 | 0.7778 | <0.05 |

同时,为确定构建优化模型的最佳指标数量,本文采取十折交叉验证法,计算不同指标数量下水质类别的拟合误差(图 6(b)).结果表明,水质拟合误差随着选取指标数量的增加先增加,后减小,当选择 4

个指标时,水质拟合的误差最小,之后在选取指标数量增加的情况下,拟合误差也趋于稳定,因此,选择 4 个指标构建优化指标模型.此外,由于  $F^-$  的相对重要性排序显著高于其他指标(图 6(a)),因此,以  $F^-$  作为优化模型的基础指标,分别加入  $Na^+$ 、TH、TDS、 $Cl^-$  与  $SO_4^{2-}$  构建 10 个优化指标模型,通过多元线性回归分析对地下水质量进行拟合,比较模拟结果与组合熵权的云模型评价结果间的拟合优度( $R^2$  和 RMSE 值),判断优化模型的可行性.

各模型选择的指标及模型的  $R^2$ 、RMSE 值如表 3 所示.结果表明,优化模型 3、4 和 5 的  $R^2$  值显著高于其他模型,分别为 0.6312、0.6333、0.6344,且 RMSE 值也低于其他模型,分别为 0.7393、0.7260、0.7371,其中,模型 4 的模拟误差较模型 5 少 1.53%,且拟合度较模型 5 仅低 0.17%.另外,从图 7 中可以看出,优化模型 4、5 对 II、III 类水拟合效果均十分准确,而模

型 4 对 I、IV 类水的模拟效果较模型 5 更好,且由相似的模型 7、8 也可证明,选择  $\text{Cl}^-$  的模型较选择  $\text{SO}_4^{2-}$  的模型对 I、IV 类水的模拟效果更准确。

由 2.1 节可知,  $\text{F}^-$ 、TDS 是研究区内地下水超标率最高的两个指标,可代表研究区内水质较差区域的主要监测指标。 $\text{Na}^+$  是地下水中阳离子的最主要的成分,与  $\text{Cl}^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$  共同作为研究区内未超标组分,可以表征高质量的地下水,通过前文分析可知,选择  $\text{Cl}^-$  的模型较选择  $\text{SO}_4^{2-}$  的模型拟合效果更好。因此,包含  $\text{F}^-$ 、 $\text{Na}^+$ 、TDS、 $\text{Cl}^-$  这 4 个关键水质指标的优化模型 4 可作为研究区监测指标的最佳优化模型,以上优化指标可作为研究区地下水水质监测及评价主要参考指标。

### 3 结论

3.1 研究区地下水普遍呈中性,以软淡水类型为主,水化学类型主要为  $\text{HCO}_3^-$ - $\text{Mg} \cdot \text{Na} \cdot \text{Ca}$  型,超标组分主要包括  $\text{F}^-$ 、TFe、TDS 和 TH,地下水中主要离子来源于含盐矿物的溶解,水化学特征主要受岩石风化作用控制。

3.2 区内约 43% 的地下水采样点水质为 I、II 类水,基于组合熵权的正态云模型评价结果与内梅罗综合评价法对区域水质的整体判断具有较好的一致性,而组合熵权的云模型对水质类别的划分更为细致。

3.3 基于随机森林计算的相对重要性排序为  $\text{F}^-$ 、 $\text{Na}^+$ 、TH、TDS、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、TFe、 $\text{NO}_3^-$ ,构建优化模型的最佳指标数量为 4 个,优化的关键指标为  $\text{F}^-$ 、 $\text{Na}^+$ 、TDS、 $\text{Cl}^-$ ,可作为研究区地下水水质监测及评价主要参考指标,使得减少监测费用的同时能够有效保障优质水源地安全。

### 参考文献:

- [1] 吕琳. 吉林省矿泉水区域与非矿泉水区域环境中矿物质元素含量分析 [D]. 长春: 吉林大学, 2015.  
Lu L. Research on the environmental mineral elements contents of the mineral water area and the non-mineral water area in Jilin Province [D]. Changchun: Jilin University, 2015.
- [2] 汪明武, 周天龙, 叶晖, 等. 基于联系云的地下水水质可拓评价模型 [J]. 中国环境科学, 2018, 38(8): 3035-3041.  
Wang M W, Zhou T L, Ye H, et al. A novel extension evaluation model of groundwater quality based on connection cloud model [J]. China Environmental Science, 2018, 38(8): 3035-3041.
- [3] 朱琴, 左丽明, 彭锦添, 等. 河北省近岸海域海水淡化取水水质适宜性分析 [J]. 海洋开发与管理, 2017, 34(7): 60-66.  
Zhu Q, Zuo L M, Peng J T, et al. Analysis on optimal water quality sources for seawater desalination in Hebei Coastal Waters [J]. Ocean Development and Management, 2017, 34(7): 60-66.
- [4] 沈强, 胡俊, 胡菊香. 浙江省绿色水源地评价体系建设研究 [J]. 环境工程, 2014, 32(1): 847-851, 859.  
Shen Q, Hu J, Hu J X. Study on assessment system for green water-source in Zhejiang province [J]. Environmental Engineering, 2014, 32(1): 847-851, 859.
- [5] 于冰, 梁国华, 何斌, 等. 城市供水系统多水源联合调度模型及应用 [J]. 水科学进展, 2015, 26(6): 874-884.  
Yu B, Liang G H, He B, et al. Modeling of joint operation for urban water-supply system with multi-water sources and its application [J]. Advances in Water Science, 2015, 26(6): 874-884.
- [6] Yang Q, Zhang J, Hou Z, et al. Shallow groundwater quality assessment: Use of the improved Nemerow pollution index, wavelet transform and neural networks [J]. Journal of Hydroinformatics, 2017, 19(5): 784-794.
- [7] Wang A F, Yang X T, Gu X B. The risk assessment of rockburst intensity in the highway tunnel based on the variable fuzzy sets theory [J]. Scientific reports, 2023, 13(1): 4755.
- [8] Gu Z Q, Bian J M, Wu J J, et al. Effects of anthropogenic activities on hydrochemical characteristics of ground water of Da'an irrigation area in Western of Jilin Province [J]. Environ Sci Pollut Res Int, 2021, 29(14): 20479-20495.
- [9] 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.  
Liu X, Xue Y, Ji Y P, et al. An assessment of water quality in the Yellow River estuary and its adjacent waters based on principal component analysis [J]. China Environmental Science, 2015, 35(10): 3187-3192.
- [10] Jia Z, Bian J M, Wang Y, et al. Assessment and validation of groundwater vulnerability to nitrate in porous aquifers based on a DRASTIC method modified by projection pursuit dynamic clustering model [J]. Journal of Contaminant Hydrology, 2019, 226: 103522.
- [11] 高玉琴, 赖丽娟, 姚敏, 等. 基于正态云-模糊可变耦合模型的水环境质量评价 [J]. 水资源与水工程学报, 2018, 29(5): 1-7.  
Gao Y Q, Lai L J, Yao M, et al. Water environment quality assessment based on normal cloud-fuzzy variable coupling model [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2018, 29(5): 1-7.
- [12] 李德毅, 孟海军, 史雪梅. 隶属云和隶属云发生器 [J]. 计算机研究与发展, 1995: 15-20.  
Li D Y, Meng H J, Shi X M. Membership clouds and membership cloud generators [J]. Journal of Computer Research and Development, 1995: 15-20.
- [13] 姜厚竹. 松花江流域省界缓冲区水质监测指标与断面优化 [D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2017.  
Jiang H Z. Water quality monitoring index and section optimization of provincial buffer zone in Songhua River basin [D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2017.
- [14] 曲茉莉. 黑龙江水系干流监测水质指标与断面优化研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.

- Qu M L. Study on monitoring indexes and monitoring sections optimization of the main stream of Heilongjiang River [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012.
- [15] 侯佳均.北京市平谷区地下水污染监控指标优化研究 [D]. 成都:成都理工大学, 2020.
- Hou J J. Study on optimization of groundwater pollution monitoring index in Pinggu District of Beijing [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2020.
- [16] Naghibi Seyed A K, Daneshi Alireza. Application of support vector machine, random forest, and genetic algorithm optimized random forest models in groundwater potential mapping [J]. *Water Resources Management*, 2017,31(9):2761–2775.
- [17] Naghibi Seyed A K, Daneshi Alireza. Application of support vector machine, random forest, and genetic algorithm optimized random forest models in groundwater potential mapping [J]. *Water Resources Management*, 2017,31(9):2761–2775.
- [18] 许力文,卞建民,孙晓庆,等.灌区退水对区域地下水水质影响与健康风险评估 [J/OL]. *中国环境科学*:1–10[2023–02–22].DOI:10.19674/j.cnki.issn1000–6923.20221117.017.
- Xu L W, Bian J M, Sun X Q, et al. The influence and health risk assessment of groundwater quality in irrigated area [J/OL]. *China Environmental Science*: 1–10[2023–02–22].DOI:10.19674/j.cnki.issn1000–6923.20221117.017.
- [19] He S, W J H, Wang D, et al. Predictive modeling of groundwater nitrate pollution and evaluating its main impact factors using random forest [J]. *Chemosphere*, 2022,290.
- [20] 杜尚海,古成科,张文静.随机森林理论及其在水文地质领域的研究进展 [J]. *中国环境科学*, 2022,42(9):4285–4295.
- Du S H, Gu C K, Zhang W J. A review on the progresses in random forests theory and its applications in hydrogeology [J]. *China Environmental Science*, 2022,42(9):4285–4295.
- [21] Xu T T, Zheng J Q, Han S J, et al. Responses of soil nitrogen transformation to long-term nitrogen fertilization and precipitation changes in a broad-leaved Korean pine forest in Changbai Mountains, China [J]. *The journal of applied ecology*, 2018,29(9):2797–2807.
- [22] 张文卿,王文凤,刘淑芹,等.长白山矿泉水补给径流与排泄关系 [J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2019,47(2):108–113.
- Zhang W Q, Wang W F, Liu S Q, et al. Relationship of recharge runoff and drainage for the mineral water in the Changbai Mountain [J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2019,47(2):108–113.
- [23] 马于曦.安图县矿泉水水源涵养能力评估与生态红线划定 [D]. 长春:吉林大学, 2021.
- Ma Y X. Assessment of water conservation capacity and delineation of ecological red line of mineral water in Antu County [D]. Changchun: Jilin University, 2021.
- [24] Liu, Q Y, Wang M W, Zhou T L, et al. A connection cloud model coupled with extenics for water eutrophication evaluation [J]. *Earth Science Informatics*, 2019,12(4):659–669.
- [25] 雷丽萍.基于云模型的水质评价方法优化研究 [D]. 成都:南交通大学, 2019.
- Lei L P. Research on optimization of water quality assessment method based on cloud model [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2019.
- [26] 杨明悦,毛献忠.基于变量重要性评分-随机森林的溶解氧预测模型——以深圳湾为例 [J]. *中国环境科学*, 2022,42(8):3876–3881.
- Yang M Y, Mao X Z. Dissolved oxygen prediction model based on variable importance measures and random forest: A case study of Shenzhen Bay [J]. *China Environmental Science*, 2022,42(8):3876–3881.
- [27] Cutler D R, Edwards Jr T C, Beard K H, et al. Random forests for classification in ecology [J]. *Ecology*, 2007,88(11):2783–2792.
- [28] GB/T 14848–2017 地下水质量标准 [S].
- GB/T 14848–2017 Groundwater quality standard [S].
- [29] 曹玉和,齐佳伟,熊绍礼.吉林省氟中毒病区水文地质特征及防氟改水对策 [J]. *中国地质*, 2010:690–695.
- Cao Y H, Qi J W, Xiong S L. Hydrogeological characteristics of endemic fluorine disease areas of Jilin Province and water source project countermeasures for fluorine prevention [J]. *Geology in China*, 2010:690–695.
- [30] 侯炳江.基于组合赋权的水质综合评价云模型及其应用 [J]. *水电能源科学*, 2016,34(8):24–27.
- Hou B J. Water quality evaluation based on combination weight-normal cloud model and its application [J]. *Water Resources and Power*, 2016,34(8):24–27.
- [31] 赵梦婷,黄显峰,金国裕,等.基于改进云模型的区域水质评价研究 [J]. *安徽农业大学学报*, 2020,47(5):778–783.
- Zhao M T, Huang X F, Jin G Y, et al. Study on regional water quality evaluation based on improved cloud model [J]. *Journal of Anhui Agricultural University*, 2020,47(5):778–783.

**作者简介:** 谷志琪(1997–),男,吉林长春人,吉林大学博士研究生,主要从事地下水资源评价与承载力研究.发表论文 2 篇.lh2568@163.com.