



## 基于主成分分析的多种水质评价方法综合研究 ——以伊通河中游浅层地下水为例

孙艳玲, 高 博, 马 力, 杨洪祥, 王 东

中国地质调查局 牡丹江自然资源综合调查中心, 黑龙江 牡丹江 157021

**摘 要:** 伊通河中游地区浅层地下水水质退化日趋严重, 开展水质现状调查对水资源保护及利用具有重要意义。针对目前多种水质评价方法, 选择适当的水质评价模型是研究地下水质量现状的重中之重。按地貌类型分别采集低山丘陵区、波状台地、阶地及河漫滩区水质样品共计 30 件, 运用舒卡列夫分类法、Piper 三线图等相关统计分析法对地下水水化学特征进行了分析。利用主成分分析法初选评价指标, 降低数据维度, 得出水质评价的主要成分, 随后运用模糊评价法对地下水质量进行评价, 并与单项指标法、内梅罗综合指数法进行对比分析。结果显示, 研究区水质整体较差, 以 V 类水为主, 仅低山丘陵区水质较好; 选取的多种评价方法中, 模糊综合评价考虑了评价因子之间的相互作用, 反映了水质的整体程度, 评价结果相对可靠, 可作为水质评价的首选评价方法。

**关键词:** 水化学类型; 地下水质量评价; 单项指标法; 内梅罗指数法; 模糊评价法; 吉林省

## MULTIPLE WATER QUALITY ASSESSMENT METHODS BASED ON PRINCIPAL COMPONENT ANALYSIS: A Case Study of Shallow Groundwater in the Middle Reaches of Yitong River

SUN Yan-ling, GAO Bo, MA Li, YANG Hong-xiang, WANG Dong

Mudanjiang Natural Resources Comprehensive Survey Center, CGS, Mudanjiang 157021, Heilongjiang Province, China

**Abstract:** As the degradation of shallow groundwater quality in the middle reaches of Yitong River is becoming more and more serious, it is of great significance to investigate the current situation of water quality for protection and utilization of water resources. In view of the various water quality assessment methods at present, selecting an appropriate assessment model is of primary importance to study the status of groundwater quality. A total of 30 water quality samples are collected from low hilly area, undulating platform, terrace and flood plain in terms of geomorphologic types, and the hydrochemical characteristics of groundwater are analyzed by relevant statistical analysis such as Schukalev classification and Piper diagram. Principal component analysis (PCA) is used for the preliminary selection of assessment indexes, reducing the data dimension and getting the main components of water quality assessment. Then fuzzy evaluation method is used to assess groundwater quality, and compared with single index method and Nemerow comprehensive index method. The results show that the water quality in the study area is generally poor, dominated by Class V water quality, with good quality only in the low hilly areas. Among the various selected

收稿日期:2023-10-07; 修回日期:2023-11-08. 编辑:黄欣.

基金项目:中国地质调查局项目“伊通河中游地区自然资源综合调查”(编号 ZD20220122).

作者简介:孙艳玲(1990—), 女, 硕士, 工程师, 主要从事水工环地质调查研究工作, 通信地址 吉林省长春市南湖科技开发区光机路 4855 号, E-mail//1049845147@qq.com

通信作者:高博(1991—), 男, 工程师, 主要从事水文地质、工程地质、环境地质调查工作, 通信地址 吉林省长春市南湖科技开发区光机路 4855 号, E-mail//845916835@qq.com

assessment methods, fuzzy comprehensive evaluation considers the interaction between evaluation factors and reflects the overall water quality, with relatively reliable evaluation results, which can be used as the first choice for water quality assessment.

**Key words:** hydrochemical type; groundwater quality assessment; single index method; Nemerow index method; fuzzy evaluation method; Jilin Province

0 引言

水质评价是保护和合理开发利用水资源的一项基本工作,随着水污染问题逐渐突出,水质评价越来越受到重视.自 20 世纪开始,针对地下水质量评价的研究越来越多<sup>[1]</sup>; Horton 等提出质量指标法,首次引入水质评价指标概念<sup>[2]</sup>; Nemerow 等提出了内梅罗法,利用单项评分法得出内梅罗综合指数<sup>[3]</sup>; Zadeh 等在模糊数学理论的基础上开发了模糊评价法,将模糊数学理论应用于水质评价,利用隶属度确定地下水质量类别,目前已成为评价地下水水质的有效手段之一<sup>[4]</sup>.近年来,各类水质评价方法的应用越来越广泛:李霄等在地下水模糊评价的基础上,利用层次分析法开展了地下水污染防治区划研究<sup>[5]</sup>;孔庆轩等利用模糊综合评价及综合污染指数法开展了地下水质量与污染评价<sup>[6]</sup>;薛伟锋等采用主成分分析和模糊综合评价法相结合方式,评估地下水水质状况<sup>[7]</sup>.研究表明,目前水质评价方法较多且应用广泛,但是多种方法相结合的评价理论尚未成体系.

主成分分析法可以有效降低数据维度,在保留主要原始信息的基础上减少数据量,有效提高水质评价效率<sup>[8-9]</sup>.为了探寻更合理的水质评价模式,同时对比各种评价方法的有效性及其实用性,本研究以伊通河中游地区浅层地下水为例,优先采用主成分分析法筛选评价指标,随后利用多种水质评价方法,得出多种评价方法体系下的地下水质量分类等级,并对评价结果展开对比分析,分析 3 种评价方法的优缺点及差异性,得出相对可靠的评价结果.

1 区域概况及样品来源

伊通河中游地区位于吉林省中东部,地处松嫩平原向长白山过渡地带,属北温带大陆性半湿润季风气候区,春季干旱多风,夏季温热而雨量较多,秋季天高气爽,冬季寒冷少雪.全年平均气温 4.8℃,多年平均

降水量 571.1 mm<sup>[10]</sup>.区内地势东高西低、南高北低,主要地貌类型有低山丘陵、波状台地、阶地及河漫滩区<sup>①</sup>.区内主要河流为伊通河及其支流,伊通河发源于大黑山北麓,从南向北穿过长春市东部.地下水作为该区主要饮用水水源,目前水质已受到不同程度污染,严重制约了当地国民经济发展<sup>[11]</sup>.为了查清该区地下水质量现状,本次采集水质样品共计 30 件,其中低山丘陵区 3 件、波状台地区 18 件、阶地及河漫滩区 9 件,样品平均分布全区,采样点分布见图 1.

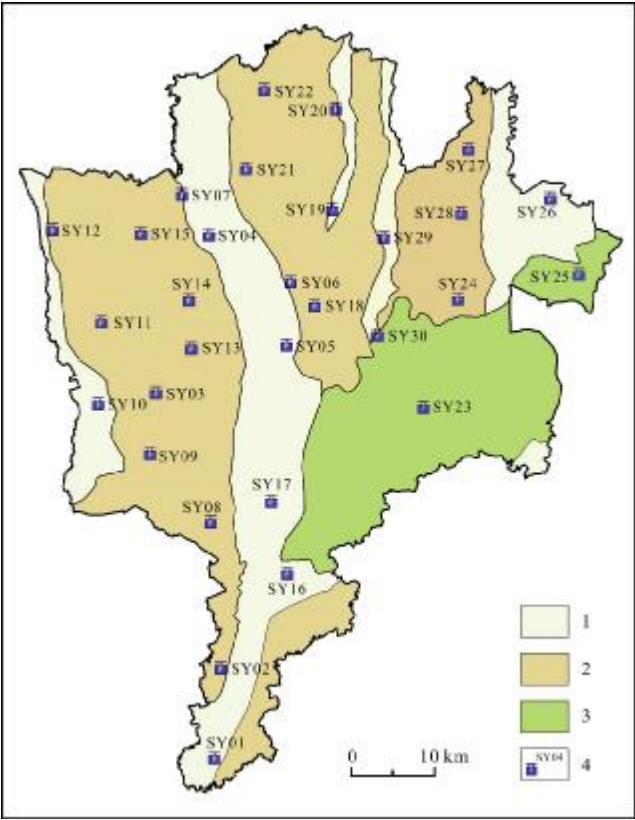


图 1 水质样品采集点分布图

Fig. 1 Distribution map of water quality sampling points  
1—河漫滩及阶地 (flood plain and terrace); 2—波状台地 (undulating platform); 3—低山丘陵 (low hill); 4—采样点及编号 (sampling point and number)

①杜汉学,等. 吉林省长春市伊通河河谷水源区供水水文地质勘探报告. 吉林省地质矿产局第二水文地质工程地质队,1987.

2 地下水化学特征

地下水水化学特征是水文地质中主要的研究内容,其特征受到地形地貌、岩性及人为活动等多因素控制<sup>[12]</sup>。区内地下水整体为淡水, pH 值范围 6.33~8.49, 呈中性偏弱碱型水。根据舒卡列夫分类法, 地下水类型组合以  $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ 、 $\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4\text{-Ca}$ 、 $\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4\cdot\text{Cl-Ca}$  以及  $\text{SO}_4\cdot\text{Cl-Ca}$  型水为主<sup>[13]</sup>。根据 Piper 三线图显示, 阳离子平均浓度  $\text{Ca}^{2+}>\text{Na}^{+}+\text{K}^{+}>\text{Mg}^{2+}$ , 阴离子平均浓度  $\text{HCO}_3^{-}>\text{Cl}^{-}>\text{SO}_4^{2-}$ , 见图 2。

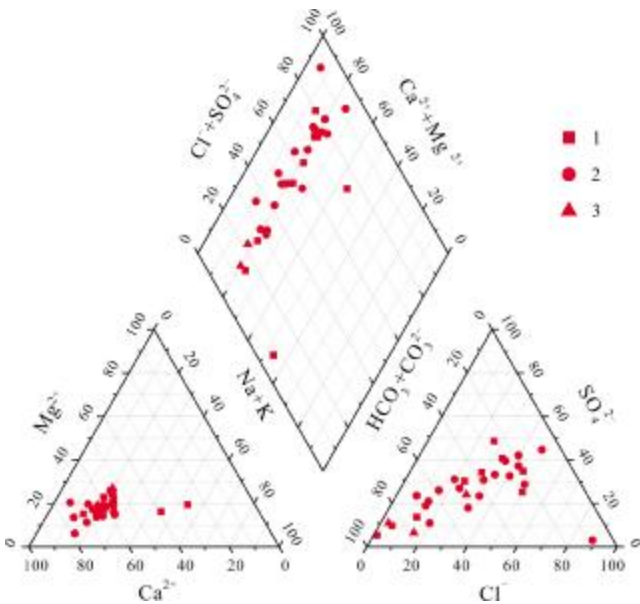


图 2 研究区地下水 Piper 三线图

Fig. 2 Piper diagram of groundwater in the study area  
1—河漫滩及阶地 (flood plain and terrace); 2—波状台地 (undulating platform); 3—低山丘陵 (low hill)

按地貌类型分区,在低山丘陵区,地形坡度较大,地形切割强烈,地下水交替作用积极,水文地球化学作用以淋溶为主,水质中易溶组分及微量组分多被渗入水淋溶带走,元素含量普遍较低,且该区地表植被多为林地,受人为干扰较少。因此该区多形成水质成分较简单的水化学类型,阴离子以重碳酸型水为主,阳离子以钙型水为主,矿化度整体较低,东北低、西南高,均为淡水。

波状台地区,地形坡度稍缓,地下水循环交替较为积极,水文地球化学作用以溶滤为主,阴离子类型较复杂,重碳酸型、氯化物型及硝酸根型水均有分布,阳离子类型主要为钙型水。

河漫滩及阶地区由于地下水水力坡度小,径流缓

慢,水文地球化学作用以富集为主,故水中常量离子含量增多。此外,该区主要污染源附近地下水在天然离子富集的基础上,又叠加了生活、农业及工业污染的离子组分和各种污染物,形成多种而复杂的污染型水化学类型,如重碳酸硫酸型水、硝酸氯化物型水等。

3 主成分分析

主成分分析法是一种多元统计方法,可将多个指标放在同一系统内分析,通过降维简化指标数量,对研究指标较多的数据具有重要意义<sup>[14]</sup>。本次主成分分析计算由 SPSS 27 软件完成,对数据进行预处理<sup>[15]</sup>,得出 pH 值总硬度 (TH)、溶解性总固体 (TDS)、化学需氧量 ( $\text{COD}_{\text{Mn}}$ ) 等各项指标的初始统计表 (表 1)。

表 1 指标初始统计表  
Table 1 Initial statistics of indexes

| 水化学指标                    | 最大值     | 最小值    | 标准差    | 平均值    |
|--------------------------|---------|--------|--------|--------|
| pH                       | 8.49    | 6.33   | 0.48   | 7.60   |
| TH                       | 1222.49 | 95.41  | 246.92 | 392.92 |
| TDS                      | 1722.00 | 163.00 | 353.68 | 629.00 |
| $\text{SO}_4^{2-}$       | 225.00  | 12.10  | 57.70  | 90.42  |
| $\text{Cl}^{-}$          | 360.00  | 3.28   | 71.06  | 79.87  |
| $\text{COD}_{\text{Mn}}$ | 1.92    | 0.12   | 0.38   | 0.67   |
| $\text{Na}^{+}$          | 88.46   | 12.30  | 21.48  | 43.16  |
| $\text{NO}_3^{-}$        | 174.32  | 0.02   | 35.87  | 35.90  |

含量单位:mg/L。

指标中除 pH 值及 COD 外,其余指标标准差均较大,说明不同水质点各指标差距较大。为了消除数据量级及量纲的影响,需要对数据进行标准化处理。

3.1 数据标准化

标准化公式为:

$$x'_{ij}=(x_{ij}-\bar{x}_j)/S_j \tag{1}$$

式中:  $x'_{ij}$  为第  $i$  个样品第  $j$  个指标的标准化数据,  $x_{ij}$  为第  $i$  个样品第  $j$  个指标的原始数据,  $\bar{x}_j$  为所有样品第  $j$  个指标原始数据平均值,  $S_j$  为所有样品第  $j$  个指标原始数据标准差。

3.2 皮尔逊相关性计算

相关性计算主要用于分析各指标相互之间的紧密程度,本次主要采用皮尔逊相关性分析 (表 2)。皮尔逊

表 2 皮尔逊相关关系表

Table 2 Pearson correlation coefficient table

| 相关性                           | PH     | TH     | TDS    | SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> | Cl <sup>-</sup> | COD <sub>Mn</sub> | Na <sup>+</sup> | NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> |
|-------------------------------|--------|--------|--------|-------------------------------|-----------------|-------------------|-----------------|------------------------------|
| pH                            | 1      |        |        |                               |                 |                   |                 |                              |
| TH                            | -0.278 | 1      |        |                               |                 |                   |                 |                              |
| TDS                           | -0.324 | 0.983  | 1      |                               |                 |                   |                 |                              |
| SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> | -0.377 | 0.450  | 0.534  | 1                             |                 |                   |                 |                              |
| Cl <sup>-</sup>               | -0.364 | 0.897  | 0.907  | 0.343                         | 1               |                   |                 |                              |
| COD <sub>Mn</sub>             | -0.195 | -0.016 | -0.044 | 0.028                         | -0.014          | 1                 |                 |                              |
| Na <sup>+</sup>               | -0.292 | 0.511  | 0.612  | 0.790                         | 0.488           | -0.052            | 1               |                              |
| NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>  | -0.251 | 0.858  | 0.865  | 0.137                         | 0.853           | -0.102            | 0.263           | 1                            |

相关系数矩阵计算公式为：

$$r_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^m (x_{ki} - \bar{x}_i)(x_{kj} - \bar{x}_j)}{\sqrt{\sum_{k=1}^m (x_{ki} - \bar{x}_i)^2 \sum_{k=1}^m (x_{kj} - \bar{x}_j)^2}} \quad (2)$$

式中： $x_{ki}$ 、 $x_{kj}$  分别为第  $i$ 、 $j$  个指标的第  $k$  个标准化数据， $m$  为样品数量。

相关性数据显示，TDS、TH、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>及 Cl<sup>-</sup>之间的相关性明显，pH 值与各评价因子相关性较低。

3.3 相关系数矩阵的特征值与特征向量

计算皮尔逊相关系数矩阵的初始特征值  $\lambda$  及特征向量，初始特征值即为主成分的方差(表 3)。选取特征值大于 1 的成分作为主成分。按照各成分的特征值，计算方差贡献率  $a$ ，公式为：

$$a = \frac{\lambda_i}{\sum_{i=1}^n \lambda_i} \quad (3)$$

式中： $\lambda_i$  为第  $i$  个主成分的特征值， $n$  为主成分数量。

提取 3 个主成分，特征值分别为 4.431、1.393 及 1.093，方差贡献率分别为 55.39%、17.42%及 13.67%，主成分累计方差贡献率为 86.48%（大于 85%），可认定其包含大部分原始数据信息。

3.4 指标选取

计算相关系数矩阵特征向量，得出主成分系数矩阵，选取各主成分中的主要控制因子，可作为水质评价的主要评价因子(表 4)。

表 3 特征值及方差贡献率

Table 3 Eigenvalues and variance contribution rates

| 成分 | 初始特征值 |         |         | 提取特征值 |         |       |
|----|-------|---------|---------|-------|---------|-------|
|    | 总计    | 方差贡献率/% | 累积/%    | 总计    | 方差贡献率/% | 累积/%  |
| 1  | 4.431 | 55.392  | 55.392  | 4.431 | 55.39   | 55.40 |
| 2  | 1.393 | 17.417  | 72.809  | 1.393 | 17.42   | 72.81 |
| 3  | 1.093 | 13.668  | 86.477  | 1.093 | 13.67   | 86.48 |
| 4  | 0.687 | 8.585   | 95.062  |       |         |       |
| 5  | 0.216 | 2.695   | 97.757  |       |         |       |
| 6  | 0.107 | 1.336   | 99.093  |       |         |       |
| 7  | 0.070 | 0.872   | 99.966  |       |         |       |
| 8  | 0.003 | 0.034   | 100.000 |       |         |       |

表 4 主成分荷载值矩阵

Table 4 Principal component load value matrix

| 指标                            | 主成分    |        |        |
|-------------------------------|--------|--------|--------|
|                               | 1      | 2      | 3      |
| pH                            | -0.451 | -0.417 | -0.421 |
| TH                            | 0.946  | -0.211 | 0.040  |
| TDS                           | 0.982  | -0.129 | -0.015 |
| SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> | 0.610  | 0.679  | -0.270 |
| Cl <sup>-</sup>               | 0.918  | -0.238 | 0.116  |
| COD <sub>Mn</sub>             | -0.025 | 0.346  | 0.831  |
| Na <sup>+</sup>               | 0.689  | 0.524  | -0.347 |
| NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>  | 0.823  | -0.497 | 0.129  |

第 1 主成分中 TH、TDS、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>及 Cl<sup>-</sup>为主要控制因子;第 2 主成分中 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、Na<sup>+</sup>为主要控制因子;第 3 主成分中 COD<sub>Mn</sub> 为主要控制因子。

4 地下水质量评价

按照已筛选的主成分,确定主要评价指标为 TH、TDS、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、Cl<sup>-</sup>、COD<sub>Mn</sub>、Na<sup>+</sup>及 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>。针对上述指标,按照《地下水质量标准》(GB/T 14848—2017)<sup>[16]</sup>,分别采用单因子评价法、内梅罗综合指数法及模糊综合评价法进行地下水质量评价,并对评价结果做对比分析。

4.1 单因子评价

单因子评价是指选取指标按照标准中所处的限值范围,确定地下水质量等级的评价方法,并以最差的指标类别确定整体的水质类别<sup>[17]</sup>。

按照单因子评价法,30 个样品的 7 项指标中,COD<sub>Mn</sub>、Na<sup>+</sup>评价类别多为 I 类,表明区内 COD<sub>Mn</sub>、Na<sup>+</sup>含量较低;NO<sub>3</sub><sup>-</sup>评价类别多为 V 类,表明区内 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 含量较高,NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 污染现象明显;TH、TDS 指标评价类别较为分散,指标实测值跨度较大;SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、Cl<sup>-</sup> 两项指标评价类别多数为 I—Ⅲ类水,仅在 SY28 点,Cl<sup>-</sup> 评价类别为 V 类(表 5)。

表 5 地下水质量单因子评价结果  
Table 5 Single factor evaluation results of groundwater quality

| 水化学指标                         | 水质类别 |    |     |    |    |
|-------------------------------|------|----|-----|----|----|
|                               | I    | II | III | IV | V  |
| TH                            | 4    | 9  | 6   | 8  | 3  |
| TDS                           | 6    | 6  | 15  | 3  | 0  |
| SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> | 9    | 17 | 4   | 0  | 0  |
| Cl <sup>-</sup>               | 12   | 16 | 1   | 0  | 1  |
| COD <sub>Mn</sub>             | 26   | 4  | 0   | 0  | 0  |
| Na <sup>+</sup>               | 30   | 0  | 0   | 0  | 0  |
| NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>  | 4    | 3  | 3   | 3  | 17 |

4.2 内梅罗综合指数

在单因子评价法的基础上,按照内梅罗综合指数法计算  $F^{[18]}$ ,公式如下:

$$F=\sqrt{\frac{\bar{F}^2+F_{\max}^2}{2}}$$

(4)

式中: $F$  为综合评价指数, $\bar{F}$  为各指标赋分平均值, $F_{\max}$  为各指标赋分最大值。

内梅罗指数法评价结果相对单因子法评价结果更真实有效,在个别水质点处,水质评价等级相对较好,但整体区内水质多以 V 类水为主。

4.3 模糊评价

模糊评价法主要通过隶属度描述地下水水质指标模糊界限,一般采用降半梯形分布法、抛物线形分布法等建立初始模糊矩阵,按照评价指标等级确定权重矩阵,相结合后得出总体最终质量等级隶属度矩阵,最后按照最大隶属度原则和权重法,对地下水质量进行评级<sup>[19]</sup>。

4.3.1 建立初始隶属度函数

本次采用降半梯形分布法建立模糊评价初始隶属度函数,主要代表水质各项指标在各个评价等级的隶属度,隶属度取值 0~1,评价等级依据现行的地下水评价标准取值。但因标准中 V 类水缺少上限值,为了方便计算,将标准中 I 类水质限值直接作为模糊评价 I 类水分界值,标准中 II—IV 类水质限值的中间值作为模糊评价 II—IV 类水质分界值,标准中 V 类水质最小值作为模糊评价 V 类水质分界值<sup>[20]</sup>,则各隶属函数矩阵计算公式如下。

I 类水质隶属度函数公式:

$$y_{i1}=\begin{cases} 1 & x_i\leq S_{i1} \\ \frac{S_{i2}-x_i}{S_{i2}-S_{i1}} & S_{i1}<x_i\leq S_{i2} \\ 0 & x_i>S_{i2} \end{cases}$$

(5)

II—IV 类水质隶属度函数公式:

$$y_{ij}=\begin{cases} \frac{x_i-S_{ij-1}}{S_{ij}-S_{ij-1}} & S_{ij-1}<x_i\leq S_{ij} \\ \frac{S_{ij+1}-x_i}{S_{ij+1}-S_{ij}} & S_{ij}<x_i\leq S_{ij+1} \\ 0 & x_i\leq S_{ij-1} \text{ 或 } x_i>S_{ij+1} \end{cases}$$

(6)

V 类水质隶属度函数公式:

$$y_{i5}=\begin{cases} 1 & x_i>S_{i5} \\ \frac{x_i-S_{i4}}{S_{i5}-S_{i4}} & S_{i4}<x_i\leq S_{i5} \\ 0 & x_i\leq S_{i4} \end{cases}$$

(7)

式中: $y_{ij}$  为第  $i$  个指标的  $j$  级水质隶属度, $S_{ij}$  为第  $i$  个指标的  $j$  级水质模糊评价分界值, $x_i$  为  $i$  指标的水质数据。

得出隶属度函数矩阵  $Y$  如下:

$$Y = \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} & y_{13} & y_{14} & y_{15} \\ y_{21} & y_{22} & y_{23} & y_{24} & y_{25} \\ y_{31} & y_{32} & y_{33} & y_{34} & y_{35} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ y_{m1} & y_{m2} & y_{m3} & y_{m4} & y_{m5} \end{bmatrix} \quad (8)$$

4.3.2 建立权重矩阵

利用标准化数据, 计算样品各评价指标的权重矩阵  $B$ .  $B=[b_1 \ b_2 \ b_3 \ \cdots \ b_m]$ , 公式如下:

$$b_i = \frac{x_i'}{\sum_{i=1}^n x_i'} \quad (9)$$

4.3.3 复合运算及数据处理

隶属度矩阵  $Y$  及权重矩阵  $B$  进行复合运算, 即  $B \times Y$ , 得出模糊评价隶属度结果矩阵  $A$ .

$$A = B \times Y$$
$$= [b_1 \ b_2 \ b_3 \ \cdots \ b_m] \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} & y_{13} & y_{14} & y_{15} \\ y_{21} & y_{22} & y_{23} & y_{24} & y_{25} \\ y_{31} & y_{32} & y_{33} & y_{34} & y_{35} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ y_{m1} & y_{m2} & y_{m3} & y_{m4} & y_{m5} \end{bmatrix}$$

$$= [a_1 \ a_2 \ a_3 \ a_4 \ a_5] \quad (10)$$

分别按照最大隶属度原则和加权平均法对地下水水质进行评级. 最大隶属度法即在隶属度结果中选择最大的隶属度, 其对应的等级作为样品的水质等级. 但由于最大隶属度法存在局限性, 即个别情况下可能出现评价结果不合理的现象, 因此采用加权平均原则做对比评价. 加权平均法主要对样品隶属度矩阵赋分, 按照加权平均公式计算得出模糊评价综合指数  $G^{[21]}$ . 公式可表示为:

$$G = \frac{\sum_{j=1}^5 j \times a_j^k}{\sum_{j=1}^5 a_j^k} \quad (11)$$

式中:  $G$  为模糊评价结果,  $a_j$  为  $j$  质量等级的隶属度,  $k$  为待定系数( $k=2$ ). 计算结果见表 6.

5 评价结果及分析

5.1 评价结果

按照上述方法, 得出不同评价方法结果, 见表 7、

表 6 模糊评价综合隶属度  
Table 6 Fuzzy comprehensive evaluation results of membership grade

| 样品编号 | I     | II    | III   | IV    | V     | 样品编号 | I     | II    | III   | IV    | V     |
|------|-------|-------|-------|-------|-------|------|-------|-------|-------|-------|-------|
| SY01 | 0.997 | 0.003 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | SY16 | 0.180 | 0.126 | 0.151 | 0.543 | 0.000 |
| SY02 | 0.129 | 0.145 | 0.000 | 0.000 | 0.725 | SY17 | 0.611 | 0.388 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| SY03 | 0.046 | 0.041 | 0.173 | 0.031 | 0.708 | SY18 | 0.562 | 0.370 | 0.068 | 0.000 | 0.000 |
| SY04 | 0.280 | 0.457 | 0.263 | 0.000 | 0.000 | SY19 | 0.025 | 0.076 | 0.093 | 0.005 | 0.801 |
| SY05 | 0.092 | 0.100 | 0.115 | 0.000 | 0.692 | SY20 | 0.143 | 0.068 | 0.064 | 0.000 | 0.725 |
| SY06 | 0.380 | 0.430 | 0.190 | 0.000 | 0.000 | SY21 | 0.033 | 0.071 | 0.096 | 0.032 | 0.768 |
| SY07 | 0.043 | 0.047 | 0.084 | 0.053 | 0.773 | SY22 | 0.055 | 0.064 | 0.101 | 0.001 | 0.779 |
| SY08 | 0.058 | 0.064 | 0.095 | 0.000 | 0.783 | SY23 | 0.880 | 0.120 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| SY09 | 0.143 | 0.299 | 0.499 | 0.054 | 0.004 | SY24 | 0.083 | 0.116 | 0.025 | 0.000 | 0.776 |
| SY10 | 1.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | SY25 | 0.602 | 0.381 | 0.017 | 0.000 | 0.000 |
| SY11 | 0.067 | 0.116 | 0.094 | 0.000 | 0.723 | SY26 | 0.068 | 0.151 | 0.101 | 0.000 | 0.680 |
| SY12 | 0.058 | 0.029 | 0.147 | 0.116 | 0.649 | SY27 | 0.207 | 0.022 | 0.000 | 0.517 | 0.254 |
| SY13 | 0.091 | 0.068 | 0.506 | 0.334 | 0.000 | SY28 | 0.017 | 0.000 | 0.000 | 0.046 | 0.937 |
| SY14 | 0.033 | 0.087 | 0.122 | 0.006 | 0.753 | SY29 | 0.092 | 0.085 | 0.160 | 0.014 | 0.650 |
| SY15 | 0.110 | 0.062 | 0.101 | 0.002 | 0.726 | SY30 | 0.244 | 0.000 | 0.716 | 0.040 | 0.000 |

图 3. 评价结果显示,单因子评价中,Ⅰ类水点 1 个,占比 3.33%;Ⅱ类水点 5 个,占比 16.67%;Ⅲ类水点 3 个,占比 10%;Ⅳ类水点 3 个,占比 10%;Ⅴ类水点 18 个,占比 60%. 综合污染指数法中,Ⅰ类水点 6 个,占比 20%;Ⅱ类水点 3 个,占比 10%;Ⅳ类水点 5 个,占比 16.67%;Ⅴ类水点 16 个,占比 53.33%. 模糊评价法中,Ⅰ类水点 6 个,占比 20%;Ⅱ类水点 2 个,占比 6.67%;Ⅲ类水点 3 个,占比 10%;Ⅳ类水点 2 个,占比 6.67%;Ⅴ类水点 17 个,占比 56.67%.

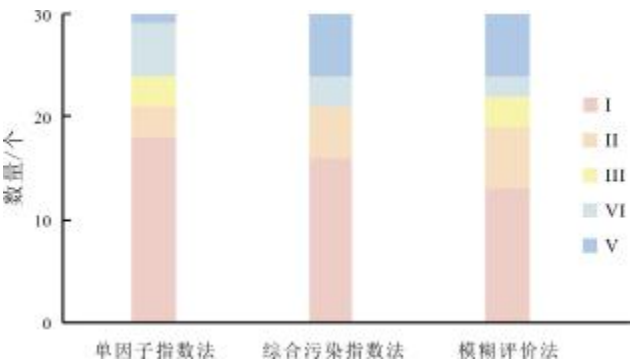


图 3 地下水质量不同方法评价结果

Fig. 3 Assessment results of groundwater quality by different methods  
I—V: 水质等级(classes of water quality)

5.2 三种评价方法对比

将 3 种方法评价等级两两求差,得出等级差对比图(图 4). 由图 4 可见,单因子评价法与内梅罗综合指数评价法对比,所得结果相同的点数为 20 个,占比 66.67%;比之低一个等级的点数为 10 个,占比 33.33%. 单因子评价法与模糊评价法对比,所得结果相同的点数 22 个,占比 73.33%;比之低一个等级的点数为 6 个,占比 30%;比之低两个等级的点数为 2 个,占比 6.67%. 内梅罗综合指数法与模糊评价法对比,所得结果相同的点数 23 个,占比 76.66%;比之高一个等级的点数为 4 个,占比 13.33%;比之低一个等级的点数为 2 个,占比 6.67%;比之低两个等级的点数为 1 个,占比 3.33%.

结果表明,单因子评价结果水质偏差,主要由于评价结果受个别污染物影响大,但优点是可确定主要污染物;内梅罗综合指数法与模糊评价法结果差异较大,其中,综合指数法的缺点是将各个评价因子同等看待,忽略了水质环境的不确定性<sup>[22]</sup>;模糊综合评价法通

表 7 地下水质量评价结果  
Table 7 Assessment results of groundwater quality

| 样品原号 | 类型    | 单因子等级 | 综合指数法 |    | 模糊评价法 |       |         |
|------|-------|-------|-------|----|-------|-------|---------|
|      |       |       | F     | 评级 | 最大法等级 | G     | 加权平均法等级 |
| SY01 | 漫滩及阶地 | II    | 0.713 | I  | I     | 1.000 | I       |
| SY02 | 波状台地  | V     | 7.179 | IV | V     | 4.769 | V       |
| SY03 | 波状台地  | V     | 7.463 | V  | V     | 4.861 | V       |
| SY04 | 漫滩及阶地 | III   | 2.236 | II | II    | 1.974 | II      |
| SY05 | 漫滩及阶地 | V     | 7.248 | V  | V     | 4.823 | V       |
| SY06 | 波状台地  | II    | 0.729 | I  | II    | 1.703 | II      |
| SY07 | 波状台地  | V     | 7.492 | V  | V     | 4.949 | V       |
| SY08 | 波状台地  | V     | 7.248 | V  | V     | 4.930 | V       |
| SY09 | 波状台地  | V     | 7.289 | V  | III   | 2.648 | III     |
| SY10 | 漫滩及阶地 | I     | 0.000 | I  | I     | 1.000 | I       |
| SY11 | 波状台地  | V     | 7.248 | V  | V     | 4.861 | V       |
| SY12 | 波状台地  | V     | 7.616 | V  | V     | 4.841 | V       |
| SY13 | 波状台地  | IV    | 4.472 | IV | III   | 3.236 | III     |
| SY14 | 波状台地  | V     | 7.311 | V  | V     | 4.904 | V       |
| SY15 | 波状台地  | V     | 7.289 | V  | V     | 4.855 | V       |
| SY16 | 漫滩及阶地 | IV    | 4.317 | IV | IV    | 3.584 | IV      |
| SY17 | 漫滩及阶地 | II    | 0.791 | I  | I     | 1.287 | I       |
| SY18 | 波状台地  | III   | 2.167 | II | I     | 1.320 | I       |
| SY19 | 漫滩及阶地 | V     | 7.311 | V  | V     | 4.944 | V       |
| SY20 | 波状台地  | V     | 7.248 | V  | V     | 4.812 | V       |
| SY21 | 波状台地  | V     | 7.408 | V  | V     | 4.936 | V       |
| SY22 | 波状台地  | V     | 7.311 | V  | V     | 4.928 | V       |
| SY23 | 低山丘陵  | II    | 0.755 | I  | I     | 1.018 | I       |
| SY24 | 波状台地  | V     | 7.179 | IV | V     | 4.888 | V       |
| SY25 | 低山丘陵  | II    | 0.713 | I  | I     | 1.287 | I       |
| SY26 | 漫滩及阶地 | V     | 7.382 | V  | V     | 4.785 | V       |
| SY27 | 波状台地  | IV    | 4.301 | IV | IV    | 3.827 | IV      |
| SY28 | 波状台地  | V     | 7.754 | V  | V     | 4.996 | V       |
| SY29 | 漫滩及阶地 | V     | 7.311 | V  | V     | 4.771 | V       |
| SY30 | 低山丘陵  | III   | 2.138 | II | III   | 2.795 | III     |

过建立函数的方法反映水质的整体程度,同时还考虑了不同离子的权重,结果相对可靠,可以较为真实地反映地下水水质.

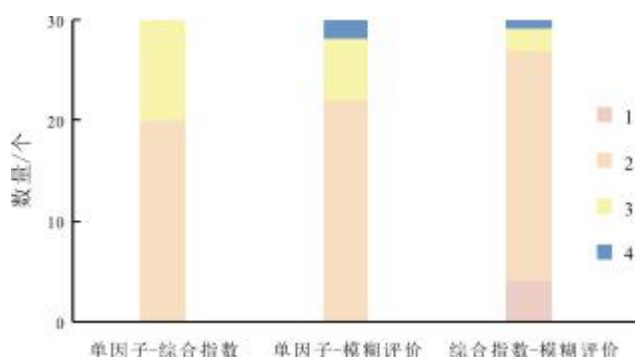


图4 地下水质量不同评价结果等级差

Fig. 4 Class differences between assessment results of groundwater quality

1—低一个等级(one class lower); 2—等级相同(same class); 3—高一个等级(one class higher); 4—高两个等级(two classes higher)

### 5.3 评价结果分析

研究区地下水水质整体较差,按照地貌类型,区内仅低山丘陵区水质相对较好,水样点均符合Ⅲ类水标准。而河漫滩及阶地区、波状台地区Ⅴ类水均占比50%以上。推测造成浅层地下水污染的原因主要为人类活动及含水层自身特征两个方面。

1)含水层特征:由于潜水埋藏较浅,直接接受大气降水入渗补给,在此过程中,大气降水会携带土壤中污染物直接进入潜水层,造成水质不同程度的污染。此外,在河流湖泊等水系周边,由于潜水与地表水存在水力联系,且交换作用明显,在降水相对较强时,受到污染的地表水也会补给地下水,从而造成地下水污染。

2)人为活动:人为活动是造成地下水污染的主要因素。研究区种植了大量农田,农业污染源在污染表层土壤的同时,会间接造成地下水的面源污染,而此次的水样点中,污染物主要为 $\text{NO}_3^-$ ,推测其与过度施用农药化肥等农业活动相关。此外,不合理的开采活动导致地下水天然循环方式受到影响,改变了原有的氧化还原电位,也是造成地下水水质变差的因素之一。

## 6 结论

本文主要针对伊通河中游地区的30个水质样品点,分析其水化学特征,并在主成分分析的基础上,利用单因子评价、内梅罗指数法及模糊评价法对地下水质量等级进行评价,主要得出以下结论:

1)根据舒卡列夫分类,伊通河中游地区地下水化

学组合以 $\text{HCO}_3-\text{Ca}$ 、 $\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4-\text{Ca}$ 、 $\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4 \cdot \text{Cl}-\text{Ca}$ 以及 $\text{SO}_4 \cdot \text{Cl}-\text{Ca}$ 型水为主。

2)根据主成分分析法筛选 $\text{TH}$ 、 $\text{TDS}$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 、 $\text{Na}^+$ 及 $\text{NO}_3^-$ 等7个评价指标,有效降低数据处理量。对比单因子评价法、内梅罗指数法及模糊评价法,单因子评价法得出水质评价结果偏差,内梅罗指数法受评分限制,得出的结果有一定局限性,模糊评价法综合考虑了各项因素,得出评价结果更为可靠,可作为优选评价方法。

3)区内整体水质较差,多数以Ⅴ类水为主,占比约56.67%。仅在低山丘陵区水质较好,符合Ⅲ类水标准。波状台地、河漫滩及阶地区水质均较差,表明该区浅层地下水已受到不同程度污染。单因子质量评价结果显示,硝酸盐超标严重,多为人为污染。

### 参考文献(References):

- [1]王维,纪枚,苏亚楠.水质评价研究进展及水质评价方法综述[J].科技情报开发与经济,2012,22(13):129-131.  
Wang W, Ji M, Su Y N. Reviews of the progress in the research of water quality evaluation and the methods for water quality evaluation [J]. Sci-Tech Information Development & Economy, 2012, 22(13): 129-131.
- [2]郭彤,张永祥,贾瑞涛.多重水质评价方法在地下水水质评价中的对比研究——以北京市朝阳区为例[J].环境工程技术学报,2022,12(6):2020-2026.  
Guo T, Zhang Y X, Jia R T. Comparative study of multiple water quality assessment methods in groundwater quality assessment: Taking Chaoyang District of Beijing as an example[J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2022, 12(6): 2020-2026.
- [3]Nemerow N L. Scientific stream pollution analysis[M]. New York: McGraw Hill, 1974.
- [4]郑志国,张秀敏,岳超,等.模糊数学法在水质评价中的应用[J].治淮,2016(1):88-89.  
Zheng Z G, Zhang X M, Yue C, et al. Application of fuzzy mathematics in water quality evaluation [J]. Harnessing the Huaihe River, 2016 (1): 88-89. (in Chinese)
- [5]李霄,柴璐,王晓光,等.基于层次分析法的丹东地区地下水污染防治区划[J].地质与资源,2018,27(4):396-405.  
Li X, Chai L, Wang X G, et al. Regionalization of groundwater pollution prevention in Dandong area based on analytic hierarchy process [J]. Geology and Resources, 2018, 27(4): 396-405.
- [6]孔庆轩,董宏志,王燕,等.哈尔滨地区浅层地下水质量与污染评价[J].地质与资源,2015,24(1):70-74.  
Kong Q X, Dong H Z, Wang Y, et al. Assessment for the quality and pollution of shallow groundwater in Harbin, Heilongjiang province [J].

- Geology and Resources, 2015, 24(1): 70–74.
- [7]薛伟锋, 褚莹倩, 刘强, 等. 主成分分析和模糊综合评价法在大连市地下水水质评价中的应用研究[J]. 辽宁大学学报(自然科学版), 2020, 47(3): 218–226.
- Xue W F, Chu Y Q, Liu Q, et al. Groundwater quality assessment in Dalian based on principal component analysis and fuzzy comprehensive evaluation[J]. Journal of Liaoning University (Natural Science Edition), 2020, 47(3): 218–226.
- [8]郭新强. 基于主成分分析法的福建某滨海场地地下水水质评价[J]. 地下水, 2022, 44(6): 17–19.
- Guo X Q. Evaluation on groundwater quality of a seashore field in Fujian Province based on principal component analysis [J]. Ground Water, 2022, 44(6): 17–19.
- [9]田福金, 马青山, 张明, 等. 基于主成分分析和熵权法的新安江流域水质评价[J]. 中国地质, 2023, 50(2): 495–505.
- Tian F J, Ma Q S, Zhang M, et al. Evaluation of water quality in Xin'anjiang River Basin based on principal component analysis and entropy weight method[J]. Geology in China, 2023, 50(2): 495–505.
- [10]张梅桂, 黄永明, 蔡贺. 松嫩平原地下水位动态影响因素分析[J]. 地质与资源, 2016, 25(6): 558–562.
- Zhang M G, Huang Y M, Cai H. Analysis on the dynamic impacting factors for the groundwater table of Songnen Plain[J]. Geology and Resources, 2016, 25(6): 558–562.
- [11]杨威, 卢文喜, 卞玉梅, 等. 吉林西部地下水水质评价与分析[J]. 节水灌溉, 2008(2): 42–45.
- Yang W, Lu W X, Bian Y M, et al. Groundwater quality evaluation and analyses in west Jilin Province[J]. Water Saving Irrigation, 2008 (2): 42–45.
- [12]王建伟, 高博, 佟智强, 等. 牡丹江市主城区第四系地下水主要离子特征与成因分析[J]. 矿产与地质, 2023, 37(2): 399–405.
- Wang J W, Gao B, Tong Z Q, et al. Characteristics and origin analysis of major ions in Quaternary groundwater at Mudanjiang City [J]. Mineral Resources and Geology, 2023, 37(2): 399–405.
- [13]寇文杰. 基于 EXCEL 的地下水化学舒卡列夫分类方法[J]. 工程勘察, 2013, 41(5): 48–50, 96.
- Kou W J. Groundwater chemical Shoka Lev classification method based on EXCEL[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2013, 41(5): 48–50, 96.
- [14]林卉, 李楠, 黄伯当, 等. 基于主成分分析的南流江水质评价[J]. 广东化工, 2020, 47(4): 144–146, 148.
- Lin H, Li N, Huang B D, et al. Water quality evaluation of Nanliu River based on principal component analysis[J]. Guangdong Chemical Industry, 2020, 47(4): 144–146, 148.
- [15]张亚娟, 牛姗姗, 孙亚乔, 等. SPSS 软件在渭河流域(陕西段)水质主成分分析评价中的运用[J]. 安徽农业科学, 2012, 40(29): 14414–14416.
- Zhang Y J, Niu S S, Sun Y Q, et al. Application of SPSS in the principal component analysis of water quality in Weihe River [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2012, 40(29): 14414–14416.
- [16]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.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, China National Standardization Administration. Standard for groundwater quality: GB/T 14848—2017[S]. Beijing: China Standard Press, 2017.
- [17]江峰, 刘汉武, 吉勤克补子, 等. 单因子水质标识指数法在贵州省洋水河流域地下水水质评价中的应用[J]. 四川地质学报, 2021, 41(1): 151–153, 176.
- Jiang F, Liu H W, Ji Q, et al. The application of single factor water quality identification index method to the evaluation of groundwater quality in the Yangshuihe River basin [J]. Acta Geologica Sichuan, 2021, 41(1): 151–153, 176.
- [18]冯林娜. 基于内梅罗污染综合指数方法的克兰河水质评价研究[J]. 地下水, 2022, 44(1): 116–118.
- Feng L N. Research on water quality evaluation of the Kelan River based on the Nemero pollution comprehensive index method [J]. Ground Water, 2022, 44(1): 116–118.
- [19]潘峰, 付强, 梁川. 模糊综合评价在水环境质量综合评价中的应用研究[J]. 环境工程, 2002, 20(2): 58–61.
- Pan F, Fu Q, Liang C. Applying fuzzy synthesize judgement in the study of water environment quality evaluation [J]. Environmental Engineering, 2002, 20(2): 58–61.
- [20]杨志峰, 张玉先. 水源水质模糊评价中的综合赋权和折减系数赋权[J]. 给水排水, 2004, 30(4): 37–40.
- Yang Z F, Zhang Y X. Indices combination and coefficient reduction in fuzzy assessment of raw water quality [J]. Water & Wastewater Engineering, 2004, 30(4): 37–40.
- [21]张进. 基于模糊综合指数法对丹江上游水质评价[J]. 陕西水利, 2022(7): 98–100, 106.
- Zhang J. Evaluation of water quality in the upper reaches of Danjiang River based on fuzzy comprehensive index method[J]. Shaanxi Water Resources, 2022(7): 98–100, 106.
- [22]潘萃, 黄晓荣, 魏晓玥, 等. 三种常用水质评价方法的对比分析研究[J]. 中国农村水利水电, 2019(6): 51–55.
- Pan L, Huang X R, Wei X Y, et al. A comparative analysis of three common water quality evaluation methods[J]. China Rural Water and Hydropower, 2019(6): 51–55.