Pre-pub. on line: www.geojournals.cn/georev

基于熵权水质指数方法的岩溶水质量评价及指标优化

——以北京顺平岩溶水系统为例

代垠东[1,2)],郭高轩[,2)],许亮[1,2)],辛宝东[1,2)],戚琦[1,2)]

1）北京市地质环境监测所，北京，100195；2）城市地下水安全防控技术创新基地，北京，100195

内容提要：为优化地下水水质监测方案，确定北京顺平岩溶水系统岩溶水水质的主要控制指标，快速掌握地下水水质变化，基于2022年顺平岩溶水系统49件岩溶水样品，综合运用统计分析、Piper三线图和熵权水质指数（entropy weight water quality index，*EWQI*）分析研究区水化学和水质特征，并耦合逐步多元线性回归分析，探讨能代表研究区岩溶水水质的关键指标。结果显示：（1）顺平岩溶水系统岩溶水具有微碱性、低盐度的特征，水化学类型主要为 HCO_3^-—$Ca^{2+}\cdot Mg^{2+}$ 型（73.47%）。超标指标为 N_{an}（NH_3 或 NH_4^+ 中的N，即氨氮以氮计）、pH值、Fe、Mn和 F^-，超标率分别为10.20%、4.08%、4.08%、4.08%和2.04%。（2）研究区 *EWQI* 平均值为26.33，水质“极好”，其中极好和良好所占比例分别为91.84%和8.16%。（3）基于地下水水质数据构建的 $EWQI_{min}$ 模型筛选的关键指标为 N_{an}、Fe、Mn、N_{ntr}（硝氮以氮计，硝酸盐中N）和 F^-，其决定系数（R^2）和百分比误差（*PE*）分别为0.986和3.88%。表明，$EWQI_{min}$ 模型优选指标可以代表顺平岩溶水系统的水质状况，对优化水质监测网等水资源管理提供了参考价值。

关键词：顺平岩溶水系统；熵权水质指数（*EWQI*）；逐步多元线性回归；关键指标；优化方法

岩溶地下水以其水量大，水质优良成为我国许多地区重要的饮用水供水水源，在国民经济发展中具有举足轻重的地位（梁永平等，2021）。不同于第四系和裂隙水，岩溶水通常具有强烈的非均质性和各向异性，多属于脆弱性系统（Quinn et al.，2005；Kalhor et al.，2019）。岩溶地下水动态监测和质量评价是发挥岩溶水资源功能、生态属性的基础性工作。建立岩溶地下水环境监测网络，是及时掌握地下水系统物理、化学特征变化的主要手段，也是科学管理和决策的主要依据（周磊等，2008）。通常，地下水监测网建设多属于政府公益性投资，具有投入大、维护成本高等特点。而，如何使用最少的资金，布设覆盖全面、科学合理的监测网络，遴选关键特征指标以最大限度的获取地下水系统的各种信息，提高水质评价效率，研究地下水系统循环演化规律，是水文地质学者需要思考的问题。特别是在当前形势下，发挥监测系统预警功能，切实保障水资源和水环境安全就显得更为重要和迫切。对特殊的岩溶水系统而言，评价方法的选择及监测指标数量优化对于准确进行水质评价更为重要（郇环等，2020）。

地下水水质评价方法有模糊数学法、隶属度法、因子分析法、灰色建模法、水质指数法、人工神经网络法、多元统计法、地统计方法、集对分析法和物元可拓法等（Li Peiyue et al.，2010；Kalhor et al.，2019）。其中，基于水化学数据和水质标准评估整体水质和饮用适宜性的水质指数法（water quality index，*WQI*）已在许多国家得到应用（Horton，1965；Dhany et al.，2016；Gitau et al.，2016；Nong Xizhi et al.，2020）。然而，在 *WQI* 的计算过程中，水化学指标权重的分配往往带有一定的主观性，这将掩盖部分重要的水质信息。为了客观反映水质评价中不同水化学指标的权重，Li Peiyue等（2010）引入了熵权法，根据数据源的偏差程度，确定熵指数，从而求出各指标的权重，即熵权水质指数法（entropy weight water quality index，*EWQI*）（Zhang Xiao et al.，2021）。目前 *EWQI* 已被广泛用于饮用水水质评价，特别是在与ArcGIS联合进行时空分析等方面（郇环等，2020；Nguyen et al.，2021；Zhang Yunhui et al.，

注：本文为北京市科学技术委员会项目（编号：Z221100005222014）和北京市百千万人才工程资助项目（编号：2020A55）的成果。

收稿日期：2024-03-25；改回日期：2024-07-10；网络首发：2024-07-20；责任编辑：章雨旭。Doi：10.16509/j.georeview.2024.07.095

作者简介：代垠东，女，1994年生，硕士，环境科学专业；Email：2962375641@qq.com。通讯作者：郭高轩，男，1979年生，博士，教授级高工，主要从事水文、环境地质及城市地质方面的调查和研究；Email：ggx2008@qq.com。

2021)。同时,*EWQI* 在优化关键指标,简化计算步骤,减少冗余信息,降低检测成本方面,也取得了一定的成果。如郑紫吟等(2022)在南昌市对浅层地下水建立了 $EWQI_{min}$ 模型,成功减少常规监测方法中的水质指标。程佳豪等(2023)基于 *EWQI* 利用多元线性回归模型为鲁西北平原浅层地下水优选出 TDS(固体溶解物总量)、Mn^{2+}、I^-、F^- 和 Al^{3+} 等 5 项水质特征指标。

北京顺平岩溶水系统位于北京市东北部,为非封闭式岩溶水系统。区域富水性好,单井涌水量大,是北京市重要的地下水战略储备地。以往研究集中在地下水动态分析(张景华等,2016)、侧向补给(王新娟等,2023)和污染源调查(王永刚等,2006)等方面。本文以顺平岩溶水系统为研究对象,在分析研究区地下水水化学特征的基础上,应用 *EWQI* 方法评价区域地下水质量,同时采用逐步多元线性回归分析,优化、建立最小熵权水质指数 $EWQI_{min}$ 模型,以期为后续地下水环境监测网优化、质量评价和水资源开发与管理等提供借鉴和支撑。

1 研究区概况

本文主要以北京地区的顺平岩溶水系统为研究对象。顺平岩溶水系统位于北京的东北部,横跨平谷、顺义和密云三区,总面积为 1253.40 km^2。西部以顺义断裂和二十里长山断裂为界,北部以巨各庄—方耳峪一带的变质片麻岩为界,东部以北京市界为研究边界(部分为地表分水岭,部分为流入边界),东南部以青龙山—南山地表分水岭为界,西南部以市界为研究边界(王晓红等,2016;刘士成,2017)。岩溶含水岩组在山区裸露,分布面积 368.75 km^2。在平谷盆地、顺义北务一带为第四系覆盖(郭高轩等,2011)。本系统内包含长城系、蓟县系、寒武系和奥陶系 4 个岩溶含水岩组,不同含水岩组间通过断层、地貌、河流及上覆第四系等存在着直接或间接的关系(刘士成,2017)。岩溶水系统补给来源包括大气降水入渗、农业灌溉回渗、第四系越流、山区非可溶岩的间接补给等。北部地区基岩地下水由北向南径流,东北部基岩地下水由东流向西南(王新娟等,2023)。岩溶水向平谷盆地集中径

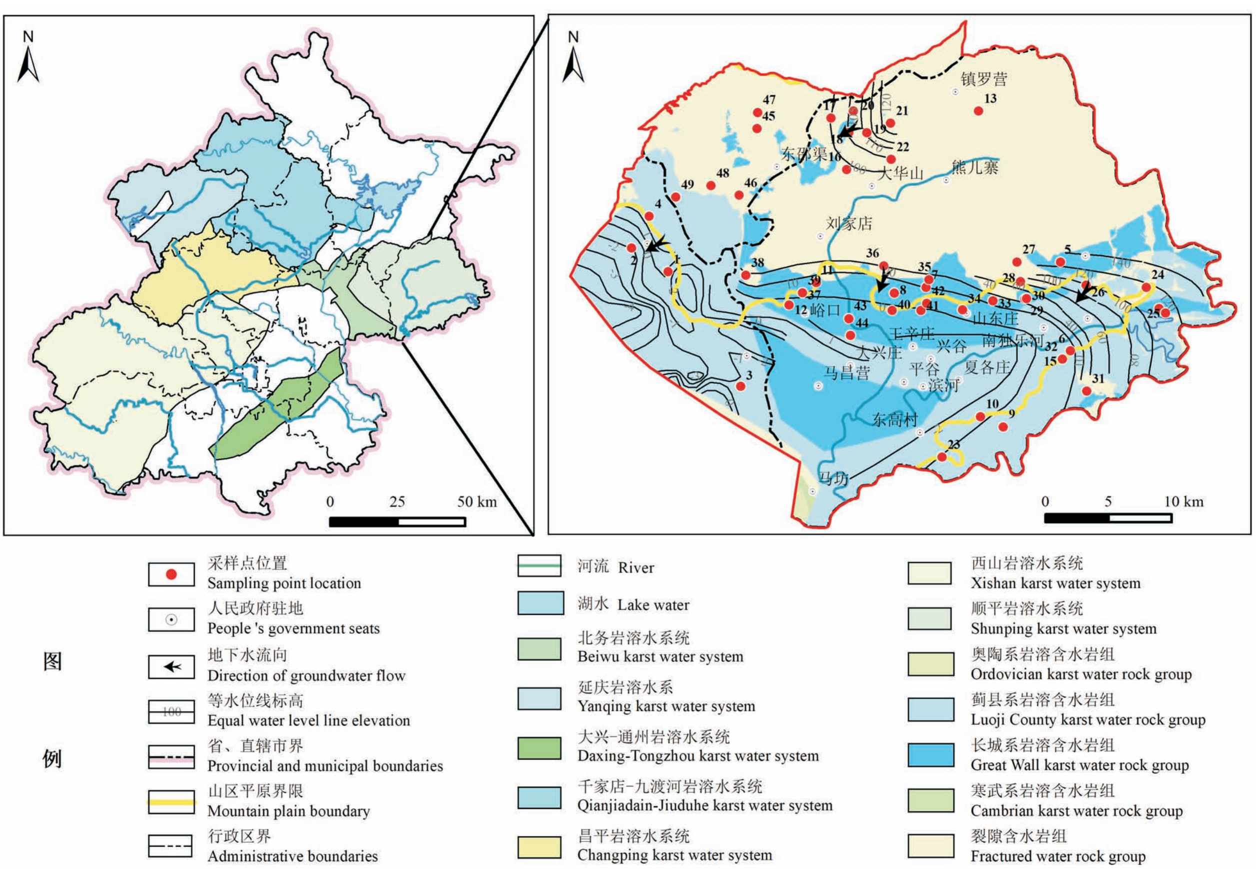

图 1 顺平岩溶水系统水文地质与取样点位置示意图

Fig. 1 Hydrogeology and sampling point location diagram of Shunping Karst Water System

流,排泄包括泉水、顶托补给第四系和人工开采(北京地质环境监测所,2022)。

2　材料与方法

2.1　样品采集

2022 年 5~6 月在研究区内开展了详细的野外调查与样品采集工作,共采集地下水样品 49 件(图 1)。依据《地下水质量标准》(GB/T14848-2017)及往年监测数据,剔除数据缺失、无变异度以及低于检出限的指标,选取 pH 值、总硬度(TH)、溶解性总固体(TDS)、钠(Na^+)、氯化物(Cl^-)、硫酸盐(SO_4^{2-})、NH_3 或 NH_4^+ 中的 N(氨氮以氮计,N_{an})、硝酸盐中 N(N_{ntr})、总铁(Fe)、氟化物(F^-)和锰(Mn)共 11 项,再加上地下水水质分析中常用的钙(Ca^{2+})、镁(Mg^{2+})、钾(K^+)和重碳酸盐(HCO_3^-)等 4 项指标,最终选取 15 项指标。根据以往的研究(秦邦国,2019;顾静等,2020),本次研究所使用的水化学指标完全可以满足顺平岩溶水系统岩溶地下水质量评价及指标优化研究的需要。

取样前,一般先用泵抽取 3 倍井管体积的水量,之后现场采用 DZB-712 便携式多参数水质测定仪测定 pH 和水温(t)等指标。取样时采用 1000 mL 聚乙烯塑料瓶,用水样润洗 3 次,样品尽量装满,密封并避光低温保存,用以检测 HCO_3^-、TH、TDS、Cl^-、SO_4^{2-}、N_{an}、F^-、N_{ntr} 和 pH;采用 50 mL 一次性塑料瓶,用 0.45 μm 滤膜过滤水样加满但不溢出,加入 1∶1 硝酸 1 mL,以检测 K^+、Na^+、Ca^{2+}、Mg^{2+}、Mn;采用 100 mL 聚乙烯塑料瓶,用 0.45 μm 滤膜过滤的水样加满但不溢出,加入 1∶1 硫酸—硫酸铵 1 mL,以检测 Fe,送往北京市地质环境监测所水质分析中心测试。测试指标及方法见表 1。

表 1 指标参数测试方法

Table 1 Index parameter test method

指标	测试方法
pH	玻璃电极法
TDS	称量法
K^+、Na^+、Ca^{2+}、Mg^{2+}、Mn	电感耦合等离子体发射光谱法
Fe(总铁)	硫氰酸铵比色法
TH	EDTA 滴定法
N_{an}	流动注射 — 水杨酸分光光度法
HCO_3^-	酸碱滴定法
Cl^-、SO_4^{2-}、N_{ntr}、F^-	离子色谱法

2.2 *EWQI* 方法

如前所述,*EWQI* 方法是在 *WQI* 方法的基础上改进而来,它克服了指标权重分配较为主观的缺陷。其思路是通过信息熵(e_j)确定水化学指标的权重(w_j),并将大量的水质数据转化为反映水质状况的代表性数值,具体计算步骤如下(Zhang Xiao et al., 2021):

(1) 建立初始水质矩阵

$$\boldsymbol{X}=\begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix} \tag{1}$$

式中,$\boldsymbol{X}$ 为初始数据矩阵,m 为地下水样本数量,n 为水化学检测指标,x_{ij} 为第 i 个水样的第 j 个水化学指标的原始值。

(2) 标准化数据

$$y_{ij}=\frac{x_{ij}-\min(x_j)}{\max(x_j)-\min(x_j)}\in(0,1) \tag{2}$$

式中,$\max(x_j)$ 和 $\min(x_j)$ 分别为初始矩阵中第 j 个水化学指标的最大值和最小值。一般来说,初始水质数据中的水化学指标在量级和维度上差异很大,计算出的权重也有很大差异。因此,有必要对初始水质数据进行标准化。

(3) 确定权重

$$P_{ij}=\frac{1+y_{ij}}{\sum_{i=1}^{m}(1+y_{ij})}\in(0,1) \tag{3}$$

$$e_j=\frac{1}{\ln m}\sum_{i=1}^{m}P_{ij}\ln P_{ij} \tag{4}$$

$$w_j=\frac{1-e_j}{\sum_{j=1}^{n}(1-e_j)}\in(0,1) \tag{5}$$

式中,e_j 为第 j 个水化学指标的信息熵,w_j 为第 j 个水化学指标的熵权。

(4) 确定分级的量化标准

$$q_{ij}=\begin{cases} \dfrac{c_{ij}}{s_j}\times 100 \\ \dfrac{|c_{ipH}-7|}{8.5-7}\times 100 \end{cases} \tag{6}$$

式中,c_{ij} 为第 i 个样本中测量的第 j 个指标,s_j 为《地下水质量标准》(GB/T 14848-2017)中 III 类水标准(中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,2018)的第 j 个指标(pH除外)的标准允许值,

平岩溶水系统的 $EWQI_{min}$ 模型,遴选关键指标。

(2)以 2021 年 6 月各监测点的监测数据(采样井位置同 2022 年)和 *EWQI* 值作为"检验数据",基于决定系数(R^2)和百分比误差(*PE*)判断 $EWQI_{min}$ 模型的预测精度。

表 2 基于 *EWQI* 的水质分类标准

Table 2 Water quality classification standard based on *EWQI*

EWQI 值	水质
<50	极好
50~100	好
100~150	中等
150~200	差
>200	极差

mg/L。pH 的限值为 6.5~8.5,该表达式确保在 pH =7 时 q_{pH} 为 0。

(5)熵加权水质指数计算

$$EWQI=\sum_{j=1}^{n} w_j\, q_{ij} \tag{7}$$

(6)*EWQI* 地下水水质分级标准:基于 *EWQI* 计算值,区域地下水水质分为"极差"到"极好"之间 5 个等级,如表 2 所列。

2.3 逐步线性回归

在建立逐步回归方程时,利用逐步回归方法根据每一个自变量对因变量的贡献大小,由大到小地逐个引入回归方程(赵言等,2012)。一般以方差贡献作为衡量自变量对因变量重要性的指标,从中挑选出对因变量影响最显著的因子(宋润虎,2012)。与此同时,先前被引入方程的自变量在引入新的自变量后可能失去重要性,就需要从方程中剔除。每引入一个自变量或者每剔除一个自变量都称为逐步回归的一步,每一步都要进行 F 检验,以保证在引入新的自变量前方程中只含有对因变量影响显著的自变量,而不显著的自变量已被剔除(王积建,2021)。

2.4 统计分析及模型建立

应用 SPSS 24.0 对所有样本的水化学指标进行统计分析。应用 Origin 2019 绘制 Piper 三线图进行水化学成因分析。应用 Excel 2016 对岩溶地下水进行 *EWQI* 评价,同时利用 ArcGIS 10.8 将 *EWQI* 评价结果与实际水文地质条件结合,以分析水质的区域空间分布特征。本文采用以下步骤建立顺平岩溶水系统的 $EWQI_{min}$ 模型:

(1)以 2022 年各监测点的监测数据和 *EWQI* 值作为"训练数据",利用 SPSS 24.0 进行多元线性逐步回归分析,建立顺平岩溶水系统的 $EWQI_{min}$ 模型,遴选关键指标。

3 结果分析

3.1 水化学统计特征

分析表明(表 3):区域 pH 值平均值为 7.78,呈微碱性,超标率为 4.08%。ρ(TDS)介于 78~435 mg/L,平均值为 246.39 mg/L,均属于淡水[ρ(TDS)<1000 mg/L]。ρ(TH)介于 18~374 mg/L,平均值为 216.73 mg/L,软水[ρ(TH)<150 mg/L]和硬水[150<ρ(TH)<450 mg/L]所占比例分别为 10.20% 和 89.80%。区域内阳离子质量浓度平均值大小为 $\rho(Ca^{2+})>\rho(Mg^{2+})>\rho(Na^+)>\rho(K^+)$,阴离子质量浓度平均值含量为 $\rho(HCO_3^-)>\rho(SO_4^{2-})>\rho(Cl^-)$。

$\rho(N_{an})$ 介于 0.02~2.68 mg/L,中位数为 0.03 mg/L,超标率为 10.20%,超标点主要分布在研究区域的东北部和山区平原分界线附近,表明这些位点的岩溶水已经受到了人类活动影响,可能与区域内农业施肥和生活污水等人为活动有关;$\rho(N_{ntr})$ 介于 0.11~18.1 mg/L,平均值为 5.81 mg/L,肥水

表 3 北京市顺平岩溶水系统地下水理化指标的统计性描述

Table 3 Statistical description of physical and chemical indexes of groundwater in the Beijing Shunping karst water system

指标	最小值	最大值	平均值	中位数	标准偏差	超Ⅲ类水比例(%)	水质Ⅲ标准限值(%)
pH	7.21	10.58	7.78	7.72	0.50	4.08	6.5~8.5
TDS	78	435	246.4	249	69.28	0	1000
TH	18	374	216.7	212	65.95	0	450
K^+	0.31	10.6	1.50	1.23	1.46	/	/
Na^+	1.49	25.7	7.28	6.04	5.07	0	200
Ca^2+	6.69	88.6	46.27	47.7	16.49	/	/
Mg^2+	0.29	37.1	24.57	25.0	7.39	/	/
Cl^-	3.51	37.6	10.52	9.40	5.74	0	250
SO_4^{2-}	2.91	63.1	20.58	15.20	12.46	0.0	250
HCO_3^-	0.0	347.0	215.9	227.0	68.70	/	/
N_{an}	0.02	2.68	0.20	0.03	0.47	10.20	0.5
N_{ntr}	0.11	18.10	5.81	4.69	4.52	0	20
F^-	0.16	2.85	0.38	0.30	0.39	2.04	1
Fe	<0.04	0.50	–	0.09	–	4.08	0.3
Mn	<0.01	0.34	–	<0.01	–	4.08	0.1

注:pH 为无量纲数,其余为质量浓度(ρ),单位为 mg/L。TDS 为固体溶解物总量;TH 为总硬度。"–"表示无相应数据;"/"表示在参照标准《地下水质量标准》(GB/T 14848-2017)中无相应限值要求。

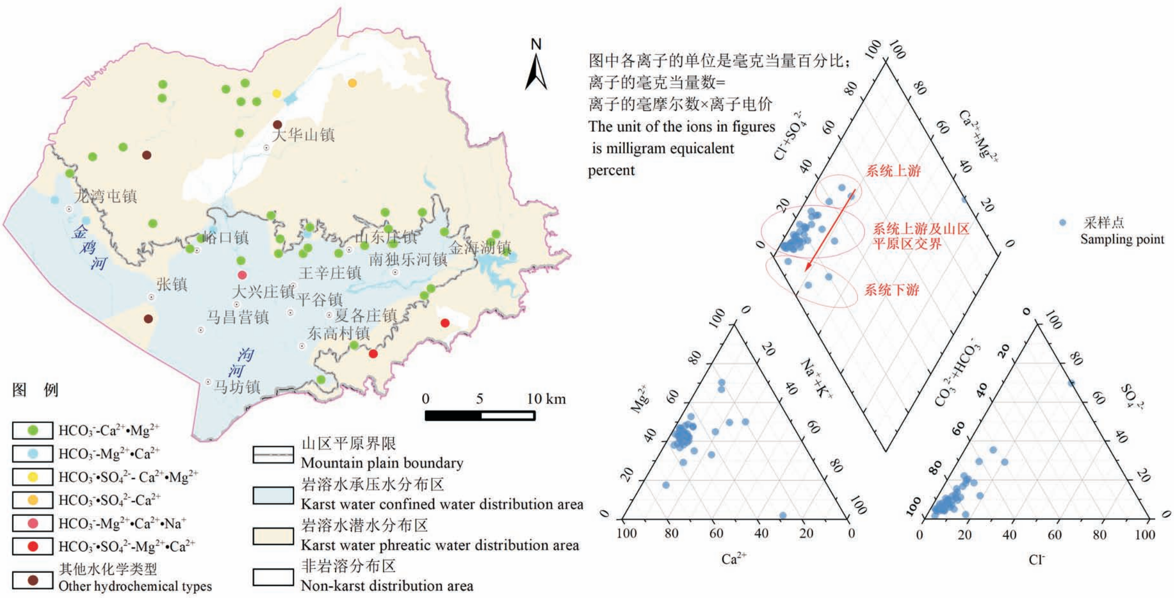

图 2 北京顺平岩溶水系统水化学类型图:(a)水化学类型空间分布图;(b)Piper 三线图

Fig. 2 Hydrochemical type of Shunping karst water system in Beijing : (a) spatial distribution map of hydrochemical types; (b) Piper trilinear diagram

[$\rho(N_{ntr})>10\sim15$ mg/L)]所占比例为 20.41%;ρ(Fe)和ρ(Mn)中位数分别为 0.09 mg/L 和<0.01 mg/L,超标率均为 4.08%;$\rho(F^-)$0.16~2.85 mg/L,平均值为 0.38 mg/L,超标点率为 2.04%。

3.2　水化学类型

按舒卡列夫分类,研究区水化学类型共有 9 种类型(图 2a),以 HCO_3^-—$Ca^{2+}\cdot Mg^{2+}$型(73.47%)为主,其余水化学类型均小于 10.20%。Piper 三线图显示,随着地下水流经路径的延长,溶滤作用进一步增强,伴随人类活动的加剧,地下水中 Mg^{2+}、Na^+含量增加,水化学类型从浅山区的 HCO_3^-—$Ca^{2+}\cdot Mg^{2+}$型变为平原区的顺义区张镇 HCO_3^-—$Mg^{2+}\cdot Na^{2+}$型、平谷区峪口镇 HCO_3^-—$Mg^{2+}\cdot Ca^{2+}\cdot Na^+$型和顺义区龙湾屯镇的 HCO_3^--$Mg^{2+}\cdot Ca^{2+}$型(图 2b)。

3.3　*EWQI* 水质评价

考虑到 K^+、Ca^{2+}、Mg^{2+}和 HCO_3^- 无相应质量标准限值,故选取表 3 中其余 11 个水质指标计算 *EWQI*。计算结果表明岩溶水 *EWQI* 范围在 11.49~77.82,平均值为 26.33,总体水质"极好",其中极好和良好所占比例分别为 91.84%和 8.16%(图 3)。

熵权重(w_j)表示各水化学指标离散程度,水化学指标权重占比大于 0.1 便处于一个较高水平。由表 4 可知,N_{ntr}、Na^+、SO_4^{2-} 和 N_{an} 等 4 个指标权重大于 0.1。*EWQI* 是一个综合指标,受权重与定性标准的共同影响,因此 *EWQI* 中的各指标的权重与各指标的实际浓度对结果影响较大。w_jq_j 表示各指标在权重影响下 *EWQI* 的分项值,统计结果显示 N_{ntr}、Fe、TH 和 pH 等 4 项贡献度最大,共计 60.74%。以百分比堆积条形图表示权重、指标对 *EWQI* 计算结果的贡献度(图 4),发现 1、3、9、11 和 46 等 5 个样点的 N_{an} 和 Mn 贡献度最大,分别为 77.34%、68.98%、77.21%、69.41%和 57.70%。

3.4　区域岩溶水监测指标优化

为确定顺平岩溶水系统水质的主要控制指标,对岩溶水评价模型 *EWQI* 指标进行优化。$EWQI_{min}$ 模型一般选取 3~5 个指标来解释大部分水质变化。

表 4 信息熵和指标的熵权

Table 4 Information entropy and entropy weight of parameters

指标	Na^+	Fe	N_{an}	Cl^-	SO_4^{2-}	F^-	N_{ntr}	Mn	TH	TDS	pH
信息熵(ej)	0.9967	0.9971	0.9971	0.9977	0.9969	0.9981	0.9956	0.9974	0.9981	0.9978	0.9982
熵权(Wj)	0.1124	0.0998	0.1001	0.0774	0.1048	0.0647	0.1504	0.0904	0.0635	0.0762	0.0601

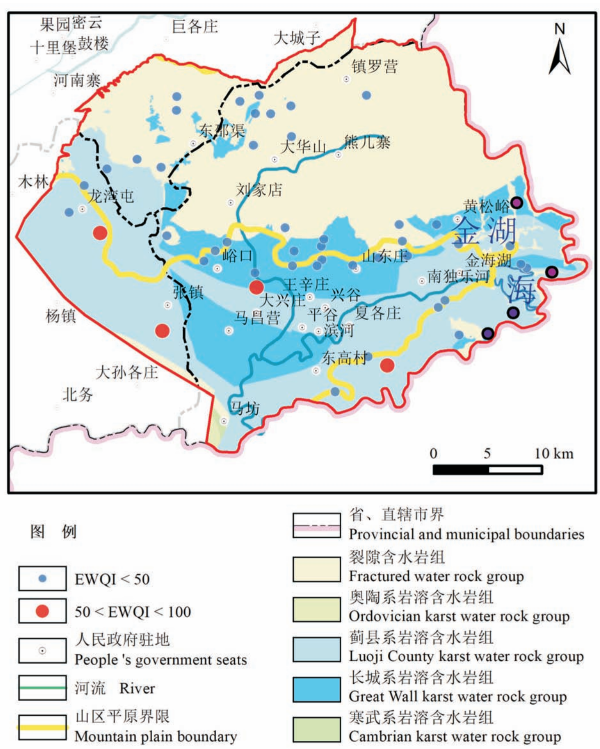

图 3 北京顺平岩溶水系统 *EWQI* 空间分布特征图

Fig. 3 Spatial distribution characteristics of *EWQI* in Beijing Shunping karst water system

通过逐步线性回归法,依据对 *EWQI* 值影响的显著程度,逐步引入 N_{an}、Fe、Mn、N_{ntr} 和 F^- 等 5 个指标,分别建立 $EWQI_{min\text{-}1}$、$EWQI_{min\text{-}2}$、$EWQI_{min\text{-}3}$、$EWQI_{min\text{-}4}$ 和 $EWQI_{min\text{-}5}$ 等 5 个优化模型(见表 5)。一般通过 R^2 和 *PE* 来比较模型的拟合优度和预测能力,从而判断模型的可行性。由表 5 可知,随着水质指标的逐步引入,R^2 回归显著提高,且 *PE* 逐步下降,$EWQI_{min\text{-}5}$ 模拟精度最高($PE=3.88\%$),预测性能最优($R^2=0.986$),最适合代表研究区地下水的 *EWQI* 值。因此,选择 N_{an}、Fe、Mn、N_{ntr} 和 F^- 等 5 个指标作为评估该研究区地下水水质的基本指标建立优化模型 $EWQI_{min}$。

为了更好地验证模型的准确性,以 2021 年枯水期数据作为验证数据集进行验证。图 5 所示,验证集 $EWQI_{min}$ 预测值与 2021 年 *EWQI* 具有显著且密切的相关性,其中 R^2 和 *PE* 值分别为 0.964 和 7.06%,表明前者能较好地反应 2021 年真实的 *EWQI*。因此,包含 N_{an}、Fe、Mn、N_{ntr} 和 F^- 这 5 个关键水质指标的 $EWQI_{min}$ 模型为研究区最佳的 $EWQI_{min}$ 模型,其表现出较好的水质评价性能,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。

4 讨论

根据逐步多元线性回归分析结果,本研究中提出的顺平岩溶水系统 $EWQI_{min}$ 模型由 5 个关键水质指标组成,即 N_{an}、Fe、Mn、N_{ntr} 和 F^-,在水质评估中表现出非常好的性能,能够最大限度地表征该系统水质的总体特征和变化,降低检测成本,提高水质评价效率。作为回归模型选择的第一个指标,N_{an} 对 *EWQI* 变化的解释贡献最大($R^2=0.657$, $P<0.001$),N_{ntr} 与 N_{an} 显著负相关($p<0.05$, $r=-0.33$),为 *EWQI* 变化表现的第 4 个解释值。农业是顺平岩溶水系统主要生产产业之一,系统内畜禽养殖业、种植业占较大比重,其中平谷区是中国著名的大桃之乡,现有大桃面积 1.29 万 hm^2(王涓禹等,2021),主要

表 5 逐步多元线性回归结果

Table 5 Steowise multiple linear regression results

模型	线性模型	R^2	*P*	*PE*(%)
1	$EWQI_{min-1}=21.968+22.293\frac{\rho(N_{an})}{mg/L}$	0.657	<0.001	23.06
2	$EWQI_{min-2}=15.148+24.954\frac{\rho(N_{an})}{mg/L}+54.888\frac{\rho(Fe)}{mg/L}$	0.804	<0.001	15.61
3	$EWQI_{min-3}=14.129+20.774\frac{\rho(N_{an})}{mg/L}+55.634\frac{\rho(Fe)}{mg/L}+76.046\frac{\rho(Mn)}{mg/L}$	0.892	<0.001	13.42
4	$EWQI_{min-4}=9.599+22.605\frac{\rho(N_{an})}{mg/L}+50.820\frac{\rho(Fe)}{mg/L}+88.811\frac{\rho(Mn)}{mg/L}+0.762\frac{\rho(N_{ntr})}{mg/L}$	0.953	<0.001	5.96
5	$EWQI_{min-5}=7.755+22.225\frac{\rho(N_{an})}{mg/L}+32.082\frac{\rho(Fe)}{mg/L}+87.073\frac{\rho(Mn)}{mg/L}+0.979\frac{\rho(N_{ntr})}{mg/L}+7.412\frac{\rho(F^-)}{mg/L}$	0.986	<0.001	3.88

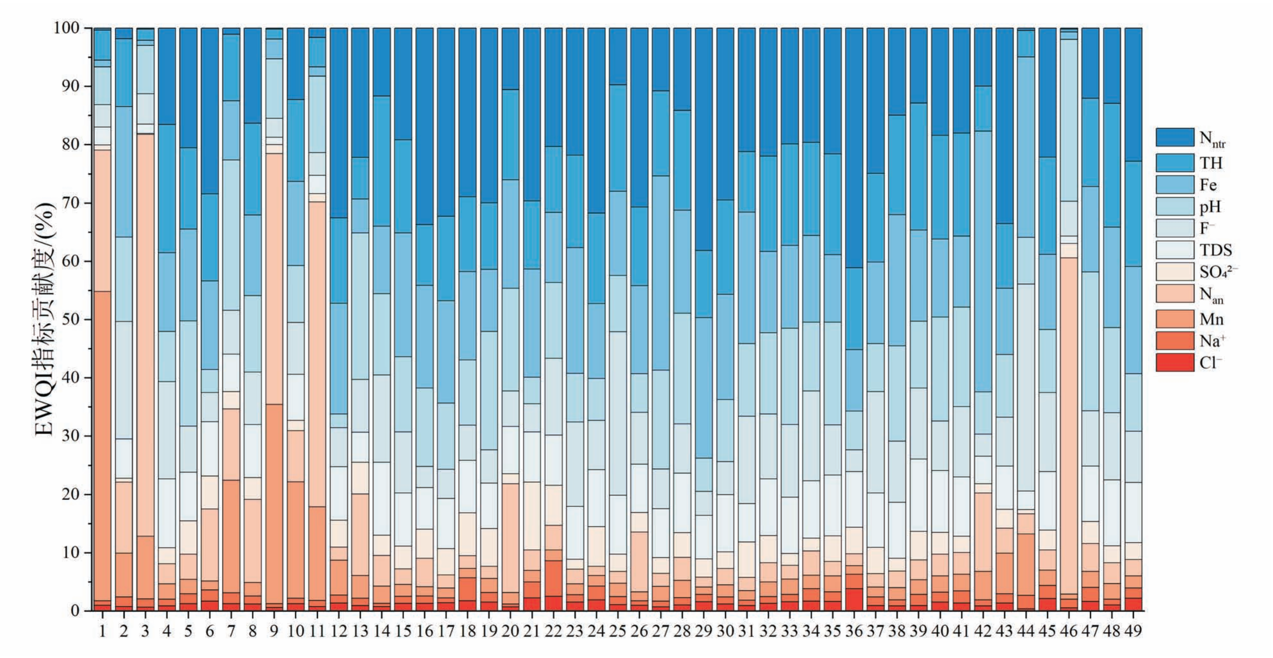

图 4 顺平岩溶水系统 *EWQI* 指标权重贡献度

Fig. 4 Contribution degree of *EWQI* index weight in Shunping Karst water system

分布在山区,农业使用的氮肥量较大(史怀苹,2022)。农业污水、生活污水通过降雨等作用渗入地下含水层污染地下水,导致地下水中 N_{an} 超标和ρ(N_{ntr})高(秦邦国,2019;顾静等,2020)。

Fe、Mn 对代表水质理化指标的 *EWQI* 变化表现出第 2 和 3 高的解释值。含水层介质及其上覆土层中的含铁锰矿物是地下水中铁锰的主要物质来源。

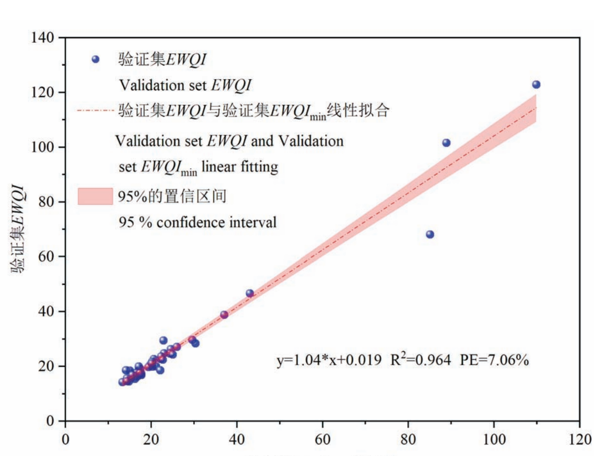

图 5 顺平岩溶水系统 2021 年 *EWQI* 和 $EWQI_{min}$ 线性拟合

Fig. 5 Linear fitting of *EWQI* and $EWQI_{min}$ in Shunping Karst water system in 2021

在还原条件下,从含水层和土壤释放到地下水中的有机物先后发生反硝化、Mn^{4+} 还原、Fe^{3+} 还原、硫酸盐还原反应并产生甲烷。随着停留时间的持续,地下水中铁锰的浓度逐渐升高(吕晓立等,2020)。一般 N_{ntr} 与 Mn 呈负相关关系,只有在 N_{ntr} 浓度较低的情况下,Mn 含量才呈明显上升趋势,与本文的结果相同(图 6)(王金金,2021)。F^-是地层中矿物溶解的代表,受控于水文地质条件(韩久虎,2021),作为 $EWQI_{min}$ 模型的第 5 个指标被引入,提高了 R^2 值,降低了 *PE* 值。

5　结论

本文以北京顺平岩溶水系统为例,在水化学特征综合分析的基础上,采用 *EWQI* 方法对水质进行综合评价,并耦合逐步多元线性回归,提取关键水质指标进行了对比研究,以期为地下水环境监测网络优化和相关管理工作提供支撑,得到如下结论:

(1)顺平岩溶水系统岩溶水普遍呈微碱性,以硬淡水类型为主,水化学类型以 HCO_3^-—$Ca^{2+}\cdot Mg^{2+}$ 型(73.47%)为主,由山区至平原,岩溶地下水中 Mg^{2+}、Na^+含量增加,水化学类型趋于复杂。该系统中地下水中超标指标分别为 N_{an}(NH_3 或 NH_4^+ 中的 N,即氨氮以氮计)、pH 值、Fe、Mn 和 F^-,超标率分别为 10.20%、4.08%、4.08%、4.08%和 2.04%,超

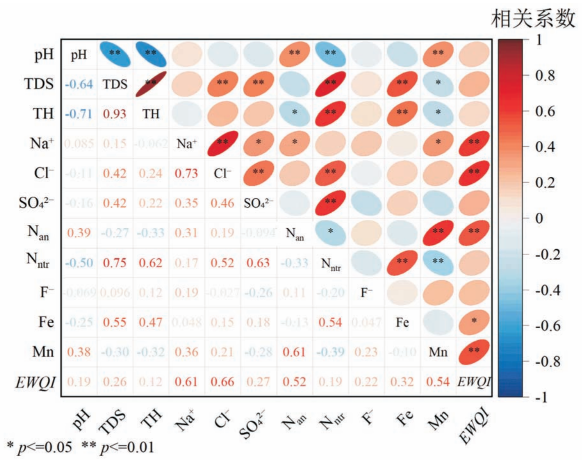

图 6 顺平岩溶水系统地下水不同水质指标 *EWQI* 相关性分析

Fig. 6 Correlations between different groundwater quality indicators and the *EWQI* in the Shunping karst water system

标点主要分布在山区与平原交界地带。

(2)计算和评价结果表明,顺平岩溶水 *EWQI* 值范围在 11.49～77.82,平均值为 26.33,总体水质“极好”,其中极好和良好所占比例分别为 91.84% 和 8.16%。

(3)经过验证和对比,基于区域采样数据构建的顺平岩溶水系统 $EWQI_{min}$ 模型,是可行有效的。该模型包括 N_{an}、Fe、Mn、N_{ntr}(硝氮以氮计,硝酸盐中 N)和 F^- 等 5 个特征指标,能够表征该系统的总体特征和变化,最大程度的还原指标参数所带来的水质信息。$EWQI_{min}$ 模型的建立对水质评估、水质控制和水质监测网优化在内的地下水水资源和水环境管理提供了参考价值,同时对节约检测成本、提高评价效率具有重要借鉴和指导意义。

致谢:审稿专家和章雨旭研究员提出了宝贵的修改建议,特致感谢。

参 考 文 献 / References

(The literature whose publishing year followed by a “&” is in Chinese with English abstract; The literature whose publishing year followed by a “#” is in Chinese without English abstract)

北京地质环境监测所. 2022. 北京岩溶水. 北京: 地质出版社: 1～273.

程佳豪, 姚天, 胡晓农, 支传顺, 董玉龙, 吴光伟, 赵瑾. 2024. 鲁西北平原区浅层地下水质量评价及指标优化[OL]. 水利水电技术(中英文), 55(4): 137～150.

顾静, 和利钊, 张海欧, 郑子健, 杨国航, 牛婧, 李琼. 2020. 畜禽养殖污染对土壤和地下水的影响——以北京市顺义区龙湾屯镇为例. 安徽农业科学, 48(7): 89～94+99.

郭高轩, 刘文臣, 辛宝东, 李宇, 沈媛媛. 2011. 北京岩溶水勘查开发的现状与思考. 南水北调与水利科技, 9(2): 33～36+45.

韩久虎. 2021. 淮北市地下水中铁、锰、氟原生环境下超标问题. 安徽地质, 31(3): 276～279+285.

郇环, 廉新颖, 杨昱, 贾永锋, 姜永海. 2020. 基于级别差法的地下水水质评价方法筛选技术研究. 环境科学研究, 33(2): 402～410.

梁永平, 申豪勇, 赵春红, 王志恒, 唐春雷, 赵一, 谢浩, 石维芝. 2021. 对中国北方岩溶水研究方向的思考与实践. 中国岩溶, 40(3): 363～380.

刘士成. 2017. 北京顺平岩溶水系统富水性分析. 城市地质, 12(4): 67～71.

吕晓立, 刘景涛, 周冰, 朱亮. 2020. 新疆塔城盆地地下水中铁锰分布特征及人类活动的影响. 中国地质, 47(6):1765～1775.

秦邦国. 2019. 北京市顺义区地下水潜在污染风险源风险性评价. 导师: 袁颖, 李翔. 石家庄: 河北地质大学硕士论文: 1～75.

史怀苹. 2022. 北京市平谷区地下水水质状况及污染防治措施. 水土保持应用技术, (3): 35～37.

宋润虎. 2012. 多元线性回归与逐步回归在洪水预报中的应用——以南汀河中长期洪水预报为例. 人民长江, 43(S1): 122～125.

王积建. 2021. 基于偏最小二乘回归模型的空气质量监测数据校准模型. 科技通报, 37(10):31～37.

王金金. 2020. 北京平谷平原区浅层地下水化学特征演化研究. 导师: 李晓. 成都: 成都理工大学硕士学位论文: 1～70.

王涓禹, 王健, 蔡廷瑶. 2021. 北京市平谷区大桃产业发展现状及对策. 现代农业科技, (6): 90～92.

王晓红, 刘久荣, 辛宝东, 叶超, 沈媛媛. 北京岩溶水系统划分及特征分析. 城市地质, 2016, 11(3): 8～15.

王新娟, 韩旭, 许苗娟, 孙颖, 刘久荣. 2023. 环境同位素在北京平谷盆地山前侧向补给研究中的应用. 地质论评, 69(1): 266～274.

王永刚, 武江津, 孙长虹, 安同艳, 刘桂中. 2006. 平谷应急水源地防护区污染源调查及污染防治对策. 地下水, 28(6): 94～96+111.

张景华, 陈晓梅, 李世君, 李阳. 2016. 应急水源地开采以来平谷平原区地下水动态分析. 北京水务, (6): 5～8+13.

赵言, 花向红, 李萌. 2012. 逐步回归模型在地表沉降监测中的应用研究. 测绘信息与工程, 37(1): 6～8+35.

郑紫吟, 储小东, 徐金英, 马志飞. 2023. 南昌市浅层地下水水质评价及监测指标优化. 环境科学, 44(7): 3846～3854.

中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 地下水质量标准:GB/T 14848-2017 [S]. 北京:中国标准出版社: 2018.

周磊, 王翊虹, 林健, 叶超, 董殿伟, 郑跃军, 万利勤, 李文鹏, 周仰效. 2008. 北京平原区地下水水质监测网优化设计. 水文地质工程地质, (2):1～9.

Beijing Institute of Geo-Environment Monitoring. 2022#. Beijing karst water. Beijing: Geological Publishing House: 1～273.

Cheng Jiahao, Yao Tian, Hu Xiaonong, Zhi Chuanshun, Dong Yulong, Wu Guangwei, Zhao Jin. 2024&. Quality evaluation and index optimization of shallow groundwater in the Northwest Plain of Shandong Province. Water Resources and Hydropower Engineering, 55(4): 137～150.

General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People ´ s Republic of China. 2018&. Standard for groundwater quality: GB/T 14848-2017 [S]. Beijing: Standards Press of China.

Gu Jing, He lizhao, Zhang haiou, Zheng Zijian, Yang Guohang, Niu Jing, Li Qiong. 2020&. Effect of livestock and poultry pollution on soil and groundwater——A case study of Longwantun Town, Shunyi District, Beijing. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 48(7): 89~94+99.

Guo Gaoxuan, Liu Wenchen, Xin Baodong, Li Yu, Shen Yuanyuan. 2011&. Current situations and discussions on karst groundwater resources exploration in Beijing. South-to-North Water Diversion and Water Science & Technology, 9(2): 33~36+45.

Horton RK. An index number system for rating water quality. 1965. Water Pollut Control Fed, 37(3): 300~306.

Han Jiuhu. 2021&. On the excessive levels of iron, manganese and fluorine in groundwater of the primary environment in Huaibei city. Geology of Anhui, 31 (3): 276~279+285.

Huan Huan, Lian Xinying, Yang Yu, Jia Yongfeng, Jiang Yonghai. 2020&. Screening method for groundwater quality assessment based on level difference method. Research of Environmental Sciences, 33 (2): 402~410.

Quinn J J, Tomasko D, Kuiper J A. 2005. Modeling complex flow in a karst aquifer. Sedimentary Geology, 184(3): 343~351.

Kalhor K, Ghasemizadeh R, Rajic L, Alshawabken A. 2019. Assessment of groundwater quality and remediation in karst aquifers: a review. Groundwater for Sustainable Development, 8(1): 104~121.

Li Peiyue, Wu Jianhua, Qian Hui. 2010. Groundwater quality assessment based on entropy weighted osculating value method. International Journal of Environmental Sciences, 1(4): 621~630.

Li Peiyue, Qian Hui, Wu Jianhua. 2010. Groundwater quality assessment based on improved water quality index in Pengyang County, Ningxia, Northwest China. E-Journal of Chemistry, 7 (S1): S209~S216.

Liang Yongping, Shen Haoyong, Zhao Chunhong, Wang Zhiheng, Tang Chunlei, Zhao Yi, Xie Hao, Shi Weizhi. 2021&. Thinking and practice on the research direction of karst water in northern China. Carsologica Sinica, 40(3): 363~380.

Liu Shicheng. 2017&. Discussion on water abundance of karst water system in Shunping Area, Beijing. Urban Geology, 12(4): 67~71.

Lv Xiaoli, Liu Jingtao, Zhou Bing, Zhu Liang. 2020&. Fe and Mn distribution of groundwater in the Tacheng Basin, Xinjiang and its impact of human activities. Geology in China, 47(6): 1765~1775.

Gitau M W, Chen Jingqiu, Ma Zhao. 2016. Water Quality Indices as Tools for Decision Making and Management. Water Resources Management, 30(8): 2591~2610.

Nong Xizhi, Shao Dongguo, Zhong Hua, Liang Jiankui. 2020. Evaluation of water quality in the South-to-North Water Diversion Project of China using the water quality index (WQI) method. Water Research, 178, 115781.

Nguyen A H, Pham N TT, Tat V M H, Truong H T, Vo P L. 2021. Application of Entropy weight in groundwater quality index (EWQI) and GIS for groundwater quality zoning in the Southeastern Coastal region, Vietnam. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 652(1): 012005 (14pp).

Qin Bangguo. 2019&. Risk assement of groundwater potential pollution risk sources in Shunyi District, Beijing. Supervisor: Yuan Ying. Thesis of Master degree. Shijiazhuang: Hebei GEO University: 1~75.

Shi Huaiping. 2022#. Groundwater quality status and pollution control measures in Pinggu District of Beijing City. Technology of Soil and Water Conservation, (3): 35~37.

Song Ruihu. 2012 #. Application of multiple linear regression and stepwise regression in flood forecasting —— A case study of medium and long-term flood forecasting in Nanting River. Yangtze River, 43 (S1): 122~125.

Dhany S A, Nitin M, Gokhan Y A, Perera B J C. 2016. Development of river water quality indices——A review. Environmental Monitoring and Assessment, 188(1): 58.1~58.29.

Wang Jijiang. 2021&. Model for air-quality data calibration based on partial least square regression. Bulletin of Science and Technology, 37(10):31~37.

Wang Jinjin. 2020&. Study on Evolution of Chemical Characteristics of Shallow Groundwater in Pinggu Plain of Beijing. Supervisor: Li Xiao. Thesis of Master degree. Chengdu: Chengdu University of Technology: 1~70.

Wang Juanyu, Wang Jian, Cai Tingyao. 2021#. Development status and countermeasures of peach industry in Pinggu District of Beijing. Modern Agricultural Science and Technology, (6): 90~92.

Wang Xiaohong, Liu Jiurong, Xin Baodong, Ye Chao, Shen Yuanyuan. 2016&. Division and characterization analysis of karst groundwater system in Beijing. Urban Geology, 11(3): 8~15.

Wang Xinjuan, Han Xu, Xu Miaojuan, Sun Ying, Liu Jiurong. 2023&. Application of environmental isotopes in the study of lateral recharge in front of Pinggu Basin Beijing. Geological Review, 69(1): 266~274.

Wang Yonggang, Wu Jiangjin, Sun Changhong, An Tongyan, Liu Guizhong. 2006 #. Pollution Source investigation and pollution prevention countermeasures in pinggu emergency water source protection area. Ground Water, 28(6): 94~96+111.

Zhang Jinghua, Chen Xiaomei, Li Shijun, Li Yang. 2016&. Analysis of groundwater dynamic in plain area of Pinggu since the emergency water source exploitation. Beijing Water, (6): 5~8+13.

Zhang Xiao, Zhao Rong, Wu Xiong, Mu Wenping. 2021. Hydrogeochemistry, identification of hydrogeochemical evolution mechanisms, and assessment of groundwater quality in the southwestern Ordos Basin, China. Environmental science and pollution research international, 29(1): 901~921.

Zhang Yunhui, He Zhihao, Tian Haohao, Huang Xun, Zhang Zhixiong, Liu Yang, Xiao Yong, Li Rui. 2021. Hydrochemistry appraisal, quality assessment and health risk evaluation of shallow groundwater in the Mianyang area of Sichuan Basin, southwestern China. Environmental Earth Sciences, 80(17): 576~592.

Zhao Yan, Hua Xianghong, Li Meng. 2012&. Application of stepwise regression model to dam radial displacement monitoring[J]. Journal of Geomatics, 37(1): 6~8+35.

Zheng Ziyin, Chu Xiaodong, Xu Jinying, Ma Zhifei. 2023&. Evaluation of shallow groundwater quality and optimization of monitoring indicators in Nanchang. Environmental Science, 44(7): 3846~3854.

Zhou Lei, WangYihong, Lin Jian, Ye Chao, Dong Dianwei, Zheng Yuejun, Wan Liqin, Li Wenpeng, Zhou Yangxiao. 2008&. Optical design of monitoring network of groundwater quality in the Beijing Plain. Hydrogeology & Engineering Geolog, (2): 1~9.

Quality evaluation and index optimization of karst water based on *EWQI* Method

——A case study of Shunping Karst Water System in Beijing

DAI Yindong[1,2], GUO Gaoxuan[1,2], XU Liang[1,2], XIN Baodong[1,2], QI Qi[1,2]

1) Beijing Institute of Geo-Environment Monitoring, Beijing, 100195;

2) Urban Groundwater Safety Prevention and Control Technology Innovation Base, Beijing, 100195

Objectives: The construction of groundwater monitoring network often has the problems of large investment and high maintenance cost. How to use limited funds to set up a comprehensive, scientific and reasonable monitoring network, select key characteristic indicators to maximize the information of groundwater environment and improve the efficiency of water quality evaluation has become a hot topic in this field. In this paper, Shunping karst groundwater system is taken as the study area. Through the selection of evaluation methods and the optimization of the number of monitoring indicators, the main control factors of water quality in the study area are identified, and the groundwater-monitoring network is optimized.

Methods: Based on 49 karst groundwater samples in Shunping karst water system in 2022, the water chemistry and water quality characteristics of the study area were analyzed by statistical analysis, Piper diagram and entropy weight water quality index (*EWQI*), and the key indicators that can represent the karst groundwater quality in the study area were discussed by coupling stepwise multiple linear regression analysis.

Results: (1) The karst groundwater of Shunping karst water system has the characteristics of slightly alkaline and low salinity. The hydrochemical type is mainly HCO_3^-—Ca^{2+} · Mg^{2+} type (73.47%). The over-standard indicators were N_{an} (Nitrogen in NH_3 or NH_4^+), pH, Fe, Mn and F^-, and the over-standard rates were 10.20%, 4.08%, 4.08%, 4.08% and 2.04%, respectively. (2) The average *EWQI* in the study area was 26.33, and the water quality was "excellent", of which the proportions of excellent and good were 91.84% and 8.16%, respectively. (3) The $EWQI_{min}$ model constructed based on groundwater quality data can well represent the actual *EWQI*, and the key indicators include N_{an}, Fe, Mn, N_{ntr} (Nitrogen in NO_3^-) and F^-, and the determination coefficient (R^2) and percentage error (*PE*) values are 0.986 and 3.88%, respectively.

Conclusions: The optimization method of groundwater monitoring index based on *EWQI* and stepwise multiple linear regression can be used as an important reference for optimization index and provide technical methods for regional groundwater environment management.

Keywords: Shunping Karst Water System; Entropy Weight Water Quality Index (*EWQI*); Stepwise Multiple Linear Regression; Key Indicators; Optimization Method

Acknowledgements: This study was supported by the project funded by Beijing Science and Technology Commission (No. Z221100005222014) and the project funded by Beijing Million Talents Project (No. 2020A55)

First author: Dai Yindong, female, Master; Email: 2962375641@qq.com

Corresponding author: Guo Gaoxuan, male, professor-level senior engineer, mainly working on the investigation and research of hydrology, environmental geology and urban geology; Email: ggx2008@qq.com

Manuscript received on: 2024-03-25; Accepted on: 2024-70-10; Published online on: 2024-07-20

Doi: 10.16509/j.georeview.2024.07.095 **Edited by**: ZHANG Yuxu