



地下水质量影响因素识别与定量评价

——以广西桂林会仙湿地为例

梁建宏, 彭聪, 潘晓东, 焦友军, 曾洁, 任坤

中国地质科学院岩溶地质研究所, 自然资源部广西岩溶动力学重点实验室,

联合国教科文组织国际岩溶研究中心/岩溶动力系统与全球变化国际联合研究中心, 广西桂林, 541004

内容提要:近年来,在人类活动强烈的干扰下,湿地地下水环境日益恶化。传统的地下水质量评价方法因未区分天然高背景和人为污染的影响,评价结果不能全面、真实、可靠地表示出水质的实际状态。笔者等选取地下水主要超标指标进行因子分析,并根据各因子的得分和方差贡献率计算各采样点得分,并最终计算因子影响下的综合得分。综合评价结果表明,研究区地下水主要有3个影响因子,因子1主要为天然高背景引起的高铁(TFe)、锰(Mn)和铝(Al),因子2为农业及生活污水影响导致的 NH_4^+ 、高锰酸钾指数(COD_{Mn})和 NO_2^- 超标,因子3为天然与人为复合影响导致的I污染。计算得出的综合影响程度与传统的水质评价结果吻合,综合影响程度得分图不仅可以得出地下水水质信息,还可根据确定的因子得出天然与人为对地下水水质的影响。

关键词:因子分析;地下水水质;会仙湿地;影响程度得分图;水质影响因素;识别方法

地下水是重要的自然资源,能够满足人类各种用水需求、支持区域经济社会发展和维持生态系统功能与服务的多样性(Ouedraogo et al., 2016)。然而,随着人类活动的日益加剧,地下水水质的持续恶化引起了社会的广泛关注(滕彦国等, 2014; Kazakis and Voudouris, 2015; 张兰真等, 2018; Yan Jiaheng et al., 2022)。地下水作为环境的重要组成部分,地下水环境质量评价是地下水污染防控和治理的重要依据。因此,科学准确评价区域地下水水质是获取地下水水质信息的重中之重。

目前国内外关于地下水质量综合评价的方法较多,最常见的有综合指数法(李亚松等, 2011; 王慧玮等, 2021)、模糊综合评价法(邱林等, 2015)、灰色系统法(李亚松等, 2012; 向用彬等, 2014)、人工神经网络法(潘俊等, 2015; 陈绮等, 2016)等。这些方法基本未将人为污染和天然高背景区分考虑,使得评价结果隐藏了部分水质信息,从而导致水质结果不能有效地指导居民饮水安全,也不能有效地为生态环境的修复与治理提供参考。

地下水水质影响因素的识别主要是通过水化学特征指标对各类影响因素进行划分,主要包括人为因素和天然因素(Guo Huaming et al., 2016; Peng Cong et al., 2017)。目前,关于识别影响地下水水质因素的研究较为丰富,主要方法有层次分析法、聚类分析法、因子分析法(Xiang Juan et al., 2020)和离子比例系数(袁利等, 2022)等。层次分析法主要是收集可能影响地下水水质的因素,如人口密度、农业生产、工业生产、地质因素等,通过对各样品点的影响因素进行评分,以此来确定各因素的影响情况(高春雨等, 2010)。这种方法存在一定的主观性,且评选因素也可能根据不同地区的特点或有增减。聚类分析和因子分析则主要是通过对水化学信息的整理获取,其中聚类分析是通过样品指标测试数据,利用统计分析方法将具有相似指标性质的样品归为一类,通过指标性质并结合人类活动类型确定影响因素(Huang Guanxing et al., 2013)。因子分析是通过地下水化学数据的分类、降维处理,提取主要的影响因子,并根据各因子中指标的特征来

注:本文为广西重点研发计划项目“会仙湿地石漠化水土流失破坏含水层调蓄功能的地质记录与修复示范”(编号:桂科 AB21196026);广西自然科学基金面上项目“岩溶关键带土壤胶体促进下优先流中镉污染物迁移研究”(编号:2020GXNSFAA238034);中国地质科学院岩溶地质研究所基本科研业务项目“广西会仙湿地典型抗生素动态变化规律研究”(编号:No. 202017)的成果。

收稿日期:2022-03-27;改回日期:2022-08-28;网络首发:2022-09-20;责任编辑:刘志强。Doi: 10.16509/j.georeview.2022.09.091

作者简介:梁建宏,男,1982年生,博士,硕士生导师,主要从事岩溶环境学研究;Email: jhliang@karst.ac.cn。通讯作者:彭聪,男,1991年生,助理研究员,主要从事岩溶环境学和水文地质学研究;Email: pengcong@mail.cgs.gov.cn。

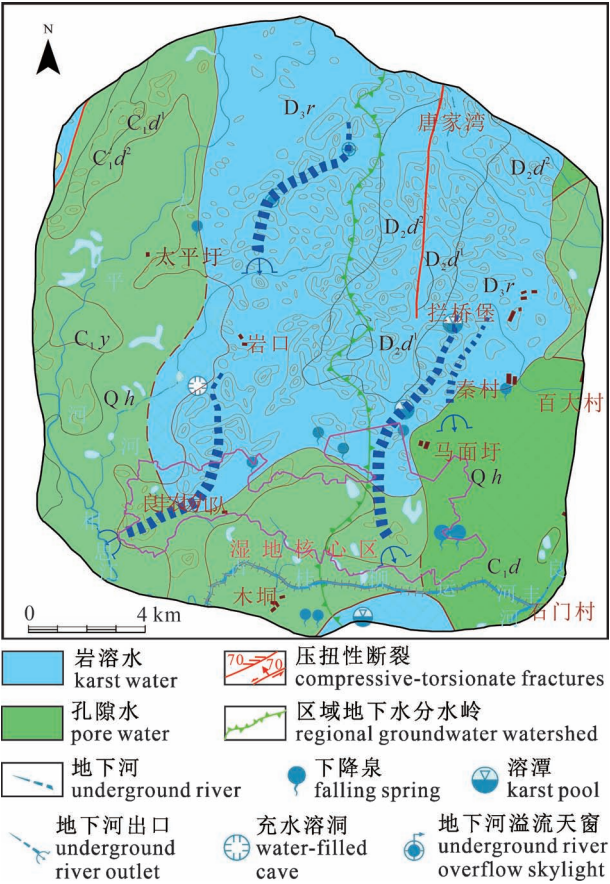


图 1 广西桂林会仙湿地水文地质略图

Fig. 1 Hydrogeological sketch of Huixian wetland, Guilin, Guangxi

区分自然过程与人类活动等因素对地下水水质的影响以及影响程度 (Liu Chenwuing et al., 2003)。虽然已有研究利用因子分析对地下水进行了评价工作,但是大多数仅停留在水质的影响因素的确定上,而对影响程度缺乏定量的计算 (崔健等,2011;卢丽等,2015)。

笔者等以广西会仙湿地为研究对象,选取主要超标指标进行因子分析,试图通过各成分中指标的差异将影响研究区地下水水质的主要因素进行分类,确定各因素影响地下水质的程度。该方法不仅可定性区分人为与天然因素对地下水水质的影响,还可以定量的计算人为与天然条件下对地下水水质影响程度,评价结果可更加科学全面地指导居民饮水安全。

1 研究区概况

研究区位于桂林市雁山区会仙镇、四塘乡一带,东经 110°09'50"~110°14'30",北纬 25°05'20"~25°06'45"。海拔 150~170 m,属中亚热带季风气候区,年均气温 19.5℃,多年平均降雨量为 1835.8 mm,多年平均蒸发量为 1569.7 mm,雨季为 3~8 月,降雨量占全年的 80%,其中 4~8 月是暴雨多发时期,降雨量占全年的 50%。

区内主要地层岩性包括泥盆系中统东岗岭组第一、二段 (D_2d^1/D_2d^2) 白云岩,上统融县组 (D_3r) 灰

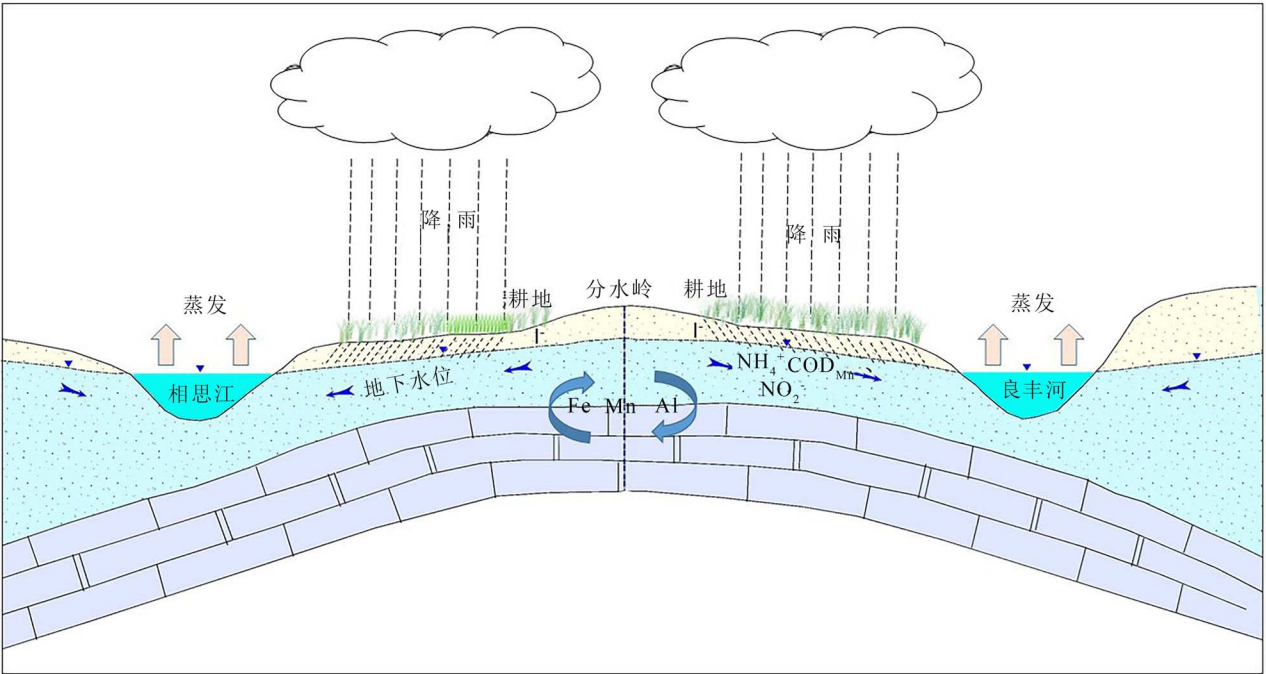


图 2 桂林会仙湿地水循环示意图

Fig. 2 Diagram of the water cycle in the Huixian Wetland, Guilin



图4 桂林市仙湿地采样点分布图
Fig. 4 Distribution of sampling points in Huixian wetland, Guilin

活动影响控制或天然背景控制的样本或异常值组 (Güler et al. , 2002, 2012), 该方法可较好的区分出天然及人为影响因素对地下水的影响情况 (彭聪等, 2017)。

为确认数据是否适合因子分析, 在分析之前, 需要对数据进行检验, 常用的检验方法有: 相关系数进行检验、Bartlett 球形检验、KMO 检验等。因子分析的主要原理为: 假设有 n 组地下水样品, 每组样品用 p 个变量 $X_1, X_2, X_3, \dots, X_p$ 来描述, 且每个指标都已标准化, 则可以得到正交因子模型为 (Zhang Yuan et al. , 2012):

$$\begin{aligned} X_1 &= a_{11}F_1 + a_{12}F_2 + \dots + a_{1m}F_m + \varepsilon_1 \\ X_2 &= a_{21}F_1 + a_{22}F_2 + \dots + a_{2m}F_m + \varepsilon_2 \\ &\dots \\ X_p &= a_{p1}F_1 + a_{p2}F_2 + \dots + a_{pm}F_m + \varepsilon_p \end{aligned}$$

式中 $F_i (i = 1, 2, \dots, m, m < p)$ 为原始变量标准化后提取的主因子, 其均值为 0, 方差为 1。特殊因子 $\varepsilon_j (j = 1, 2, \dots, p)$ 与主因子 F_i 相互独立, a_{ij} 是第 i 个指标在第 j 个主因子上的系数, 为因子荷载。

根据各因子的得分及其特征值, 可计算出各指标在各因子中的权重值 t_{ij} , 计算公式如下:

$$t_{ij} = \frac{F_{ij}}{\sqrt{S_i}} \tag{1}$$

式中, F_{ij} 为第 i 个指标在第 j 个因子中的得分; S_i 为每个成分的特征值;

根据权重值, 可计算出各水点中每个因子的得分, 再根据各因子的解释贡献率, 计算出各点中综合得分值。

$$y_{nj} = a_{ni} \times t_{ij} \tag{2}$$

$$Z_{nj} = \sum F_{ij} \times y_{nj} \tag{3}$$

式中, a_{ni} 为第 n 个点中第 j 个指标的标准值; y_{nj} 为第 n 个点中每个成分中的得分值。

由此, 分别计算出各点中每个因子中的 Z 值代表该因子影响因素下各点的得分值, 即为该因素对研究区地下水水质影响程度。

3 结果与讨论

3.1 地下水水化学特征

地下水中的主要组分主要包括 $K^+, Na^+, Ca^{2+}, Mg^{2+}, HCO_3^-, SO_4^{2-}$ 和 Cl^- , 这些离子在地下水中的含量占有溶解盐类的 90% 以上。会仙湿地各类水点中, 其中包括井水 23 个, 溶潭水 22 个, 地下河 4 个, 地表水 7 个。对比分析各类型水点主要指标的质量浓度发现, 在丰水期各水体中主要离子的质量浓度整体均表现为井水 > 地表水 > 溶潭水 > 地下河 (表 1)。井水中的主要组分离子质量浓度均较高, 其主要原因是井水中地下水循环较缓慢, 导致其水中各离子富集而质量浓度偏高。地表水较易受到附近排污的影响, 因此主要离子质量浓度也较高。

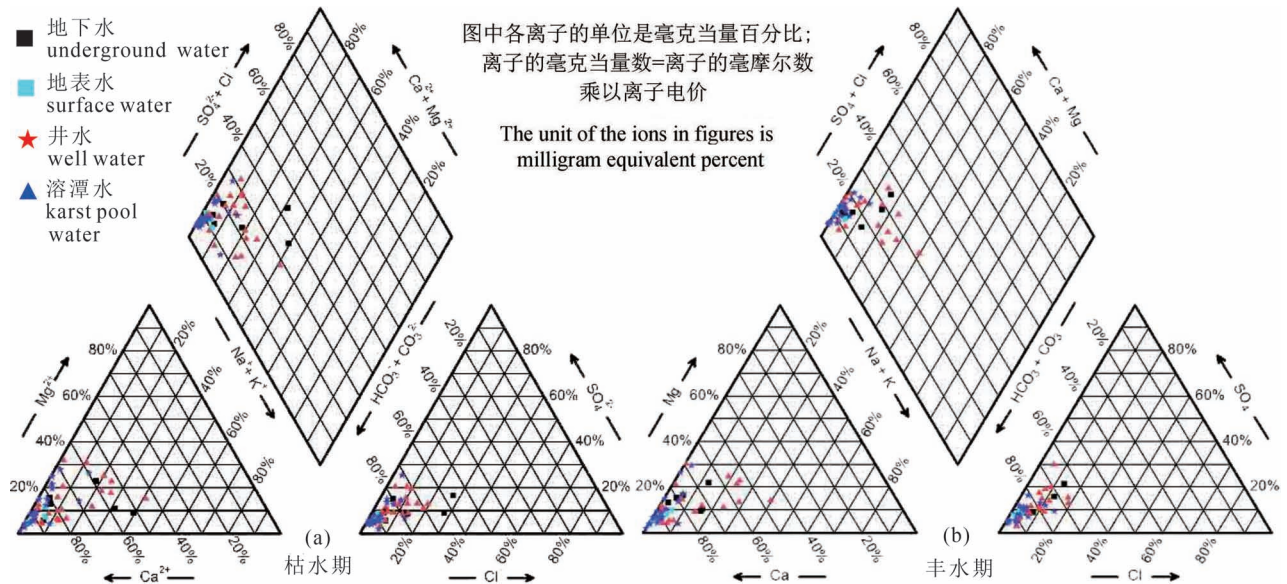


图 5 广西会仙湿地水化学 piper 三线图

Fig. 5 Piper diagram of Hydrochemistry in Huixian wetland

在丰、枯水期,研究区各水点的水化学类型均为 HCO_3^- — Ca^{2+} 型水,水化学类型较为单一(图 5),说明该区地下水尚未受到严重人为污染(朱丹尼等,2021)。

3.2 地下水水质特征

对照地下水水质标准(GB/T 14848-2017)对研

究区 49 组地下水进行质量评价,评价指标包括 Na^+ 、总硬度、 NH_4^+ 、 Fe 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 NO_2^- 、 F^- 、pH、 COD_{Mn} 、 I^- 、Al、Cu、Pb、Zn、Cr、Cd、Mn、As、Hg 和 TDS (溶解性固体总量)等 22 项指标,综合评价参照推荐的最高级别法。评价结果显示,丰水期地下水质量以Ⅲ类水为主,占 65%,其次为Ⅱ类水,占比为

表 1 桂林会仙湿地丰水期和枯水期水体主要离子质量浓度特征值(mg/L)

Table 1 Characteristic value (mg/L) of water ion mass concentration of Huixian wetland, Guilin, in wet season and dry season

季节	指标	井水			溶潭水			地下河			地表水		
		最小值	最大值	平均值	最小值	最大值	平均值	最小值	最大值	平均值	最小值	最大值	平均值
丰水期	$\rho(\text{K}^+)$	0.2	72.3	17.6	0.2	7.0	2.0	0.5	6.9	3.2	2.4	10.3	5.6
	$\rho(\text{Na}^+)$	0.3	22.5	8.1	0.0	14.3	1.8	0.0	1.9	0.9	0.3	10.2	4.6
	$\rho(\text{Ca}^{2+})$	32.0	139.5	85.5	33.4	120.4	80.3	72.5	84.0	77.1	39.3	57.0	50.9
	$\rho(\text{Mg}^{2+})$	2.5	21.5	9.2	1.1	9.8	4.9	1.9	5.4	3.4	4.4	8.1	5.9
	$\rho(\text{Cl}^-)$	3.5	42.5	15.6	1.9	28.6	6.4	2.5	7.2	4.9	4.4	13.6	8.8
	$\rho(\text{SO}_4^{2-})$	5.8	101.3	30.4	6.7	42.7	15.8	12.5	18.1	15.6	11.0	28.7	16.6
	$\rho(\text{HCO}_3^-)$	97.7	306.8	248.3	97.7	319.5	227.2	211.0	246.2	225.7	148.5	180.7	163.1
枯水期	$\rho(\text{K}^+)$	0.1	86.9	17.3	0.1	27.3	2.7	0.3	7.1	2.8	1.4	17.1	8.2
	$\rho(\text{Na}^+)$	1.0	23.5	8.3	0.3	13.1	2.2	0.7	3.1	1.7	1.6	35.8	10.2
	$\rho(\text{Ca}^{2+})$	44.9	134.1	89.5	34.8	126.1	87.9	52.6	104.3	78.1	37.8	93.2	57.0
	$\rho(\text{Mg}^{2+})$	2.7	31.9	10.6	0.9	15.7	6.8	2.0	4.5	3.5	3.8	9.0	6.0
	$\rho(\text{Cl}^-)$	3.4	49.6	16.7	1.4	27.4	5.9	2.2	7.5	4.6	4.1	44.6	15.1
	$\rho(\text{SO}_4^{2-})$	6.3	64.2	29.6	4.1	75.6	17.5	8.4	19.1	12.0	8.4	22.6	15.8
	$\rho(\text{HCO}_3^-)$	159	354.4	273.8	142.1	317.5	259.9	164.9	277.2	226.7	133.3	277.2	183.7

19%,Ⅳ类水和Ⅴ类水分别占比12%和4%。在枯水期,区内地下水也以Ⅲ类水为主,占53%,其次为Ⅳ类水,占比41%,无Ⅰ类水和Ⅱ类水,Ⅴ类水占6%。对比丰枯水期地下水质量可知,研究区枯水期水质要劣于丰水期。地下水质量评价结果空间分布显示,在丰枯水期超Ⅲ类水主要集中在流域排泄区。此外,因受到人为污染,在补给区也存在零星的Ⅳ和Ⅴ类水。

通过分别计算丰枯水期超Ⅲ类水点的指标贡献率,得出两个时期的超Ⅲ类水的贡献指标有较强的一致性,其中丰水期的超Ⅲ类水的主要贡献指标有Al、Mn、I⁻、Fe、NH₄⁺和COD_{Mn},其中以Al的贡献最高,贡献率为48%,其次为Mn,贡献率为43%。其余I⁻、Fe、NH₄⁺和COD_{Mn}的贡献率分别为35%、22%、17%和4%。枯水期,超Ⅲ类水的主要贡献指标有Mn、I⁻、NH₄⁺、Fe、NO₂⁻和Al,其中Mn的指标贡献率最高,为50%,其次为I⁻和NH₄⁺,贡献率均为25%,其余指标Fe、NO₂⁻和Al的贡献率均为13%。两个时期的超Ⅲ类水的主要贡献指标虽然基本一

致,但是也存在一定的差别。其中,COD_{Mn}只出现在丰水期的超Ⅲ类水指标中,而NO₂⁻则只出现在枯水期的超Ⅲ类水指标,但两个指标均不是主要的贡献指标。其次,丰水期Al的贡献率最高,而在枯水期其贡献率则降为最低,其余指标的贡献率差异不大(图6)。

3.3 影响水质因素

在对研究区进行水质评价的基础上,筛选出NH₄⁺、TF_{Fe}、COD_{Mn}、I⁻、Al、Mn、NO₂⁻的质量浓度等7个主要影响研究区地下水水质的指标进行因子分析。最终,共提取了3个主要因子,累计方差解释率为89.022%,可以较好的解释研究区的部分数据(表2)。根据各因子中指标的特征,可以将影响因素分为3类,一是因天然高背景引起的高Fe、Mn和Al;二是农业及生天然与人为复合影响导致的I⁻污染。

3.3.1 因子1:天然高背景引起的高Fe、Mn和Al
该因子主要包含的指标为Fe、Mn和Al,其方差解释率为44.98%。其中,研究区地下水中Fe丰水期的质量浓度变化范围在3~310 μg/L,丰水期的超

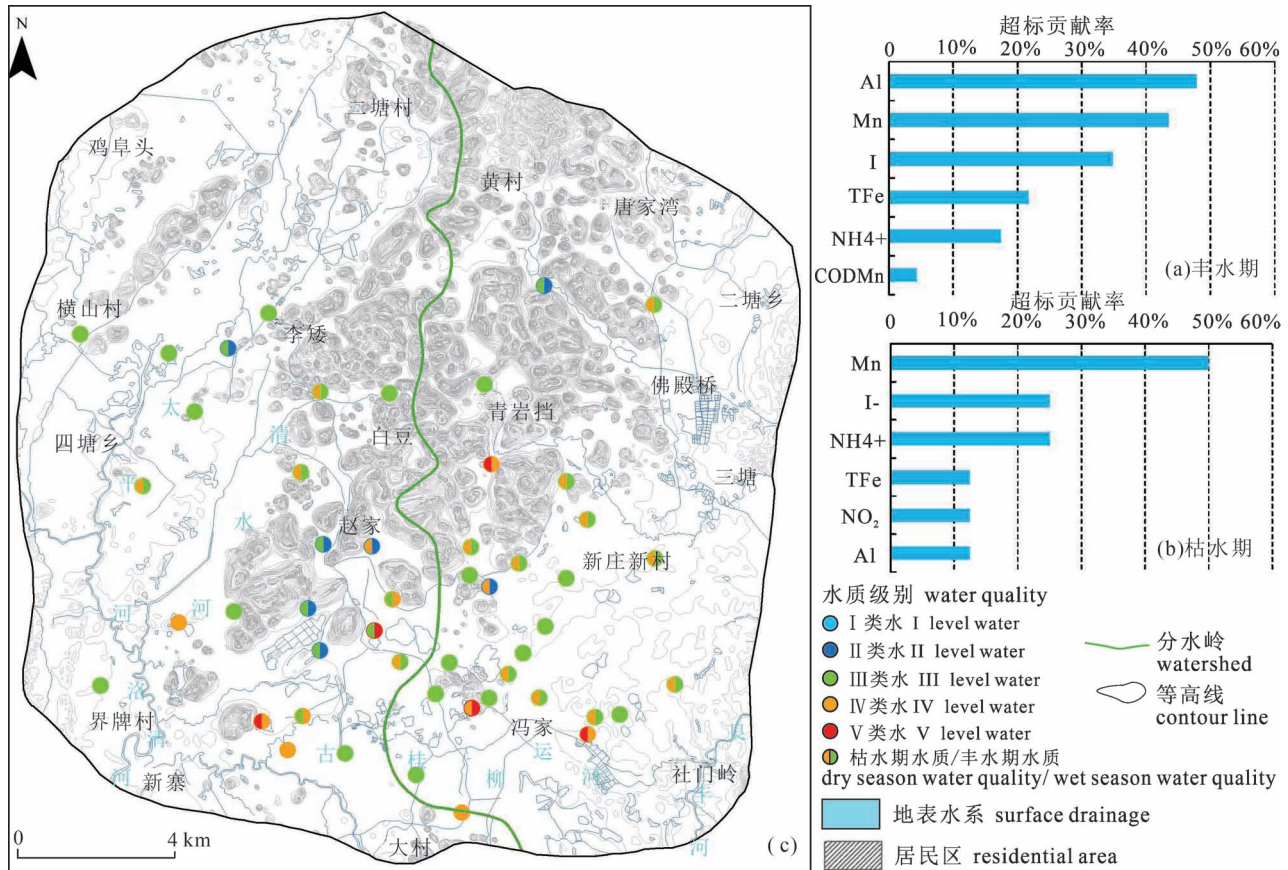


图 6 桂林会仙湿地地下水水质状况
Fig. 6 Groundwater quality in Huixian wetland, Guilin

表 2 旋转成分矩阵
Table 2 Rotating component matrix

指标(mg/L)	因子 1	因子 2	因子 3
$\rho(\text{NH}_4^+)$	0.028	0.988	0.053
$\rho(\text{TFe})$	0.959	0.207	0.117
$\rho(\text{COD}_{\text{Mn}})$	0.235	0.953	-0.023
$\rho(\text{I}^-)$	-0.134	-0.080	0.893
$\rho(\text{Al})$	0.962	0.043	-0.082
$\rho(\text{Mn})$	0.634	0.202	0.473
$\rho(\text{NO}_2^-)$	0.102	0.625	0.356
特征值	2.143	1.976	1.223
累计方差(%)	44.984	69.420	89.022

Ⅲ类水点是 GW22,该点为溶潭水,位于新陡门南部。枯水期 TFe 的质量浓度变化范围在 3~790 μg/L,超Ⅲ类水点有 8 处,其中,浓度最高点为 GW06,也为溶潭水,位于白滕挡。地下水中 Mn 丰水期质量浓度变化范围为 0.6~1540 μg/L,其中浓度最高点为 GW28,该点位于安龙北部。枯水期 Mn 的质量浓度变化范围在 0.6~961 μg/L,浓度最高点为 GW05,位于马面村西北部。地下水中 Al 的丰水期质量浓度范围在 1~466 μg/L,浓度最高点也位于新陡门南部的 GW22 溶潭水。枯水期质量浓度变化范围在 0.6~2460 μg/L,浓度最高点为位于神山东的 GW50 井水中。

计算因子 1 中的 3 个指标的综合得分值可知,得分较高的范围有 4 处,分别位于李矮南部、界牌村东部、青岩挡南部和冯家一大村—社门岭一带(图 7)。据调查可知,李矮南部及青岩挡南部地区均属于补给区,其人类活动程度较低,而界牌村东部和冯家一大村—社门岭一带地区位于排泄区,其大部分为耕地,地下水受施肥等影响不断恶化(图 7)。综合分析,4 处得分较高的地区表现为地下水中 Fe、Mn 和 Al 浓度相对较高,4 处区域虽部分有人类活动影响,但是较少有 Fe、Mn 和 Al 3 个指标的输入污染,因此,基本可判断 Fe、Mn 和 Al 浓度高值点为天然高背景影响。已有研究表明,西南岩溶区地下水中也存在 Fe、Mn 和 Al 超标现象,其超标原因主要为天然高背景引起(曹敏等,2012;罗维等,2014)。研究区主要的岩溶含水层为泥盆系中统东岗岭组灰岩含水层(D₂d)、融县组灰岩含水层(D₃r)和石炭系岩关阶泥质灰岩白云岩含水层(C₁y)(图 1)。已有研究表明,在广西的岩溶峰丛山区,其岩土中 Al、Fe

和 Mn 元素的背景值相对较高(蒋忠诚,1997),受水—岩相互作用影响,地下水中也会出现 Al、Fe、Mn 高背景现象。如李矮南部,代表样品 GW38 和 GW43 中 Fe 和 Mn 单指标评价均为Ⅳ类水,该区域地处山前地带,受岩土 Fe 和 Mn 高背景影响,导致地下水中 Fe 和 Mn 的质量浓度偏高,最终,计算该因子的得分在李矮南部出现了相对高值。综合分析,因子 1 主要为天然高背景引起的高 Fe、Mn 和 Al。

3.3.2 因子 2:农业及生活污水影响导致的 NH₄⁺、COD_{Mn} 和 NO₂⁻ 超标

该因子主要包含的指标为 NH₄⁺、COD_{Mn} 和 NO₂⁻,其方差解释率为 24.43%。其中,研究区地下水中 NH₄⁺ 在丰水期时质量浓度范围 0.02~8.66 mg/L,超标点有两处,分别为 GW14 和 GW24,质量浓度分别为 1.04 mg/L 和 8.66 mg/L。枯水期质量浓度范围在 0.02~12.96 mg/L,超标点有四处,分别为 GW06、GW07、GW14 和 GW56,质量浓度分别为 12.96 mg/L、1.8 mg/L、2.24 mg/L 和 1.93 mg/L。超标

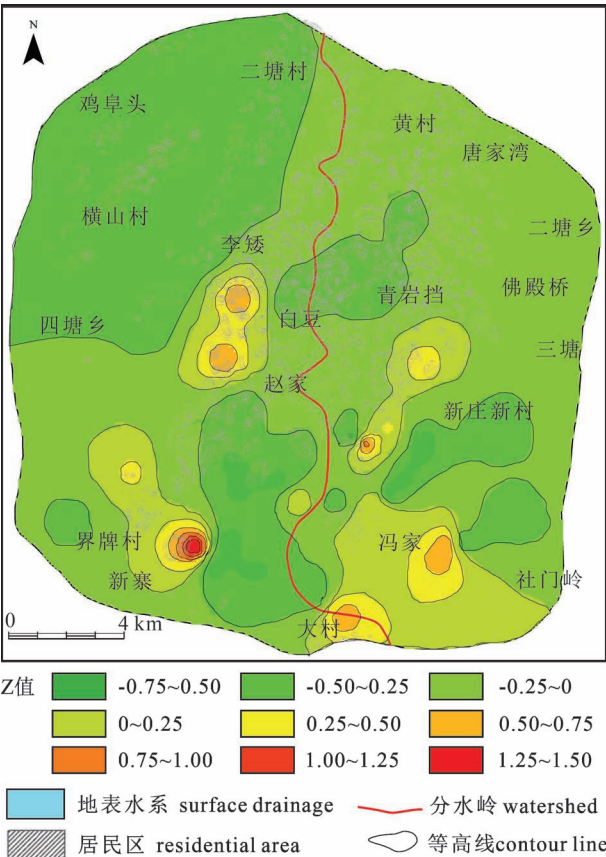


图 7 因子 1 影响程度得分图
Fig. 7 Score chart of factor 1 influence degree

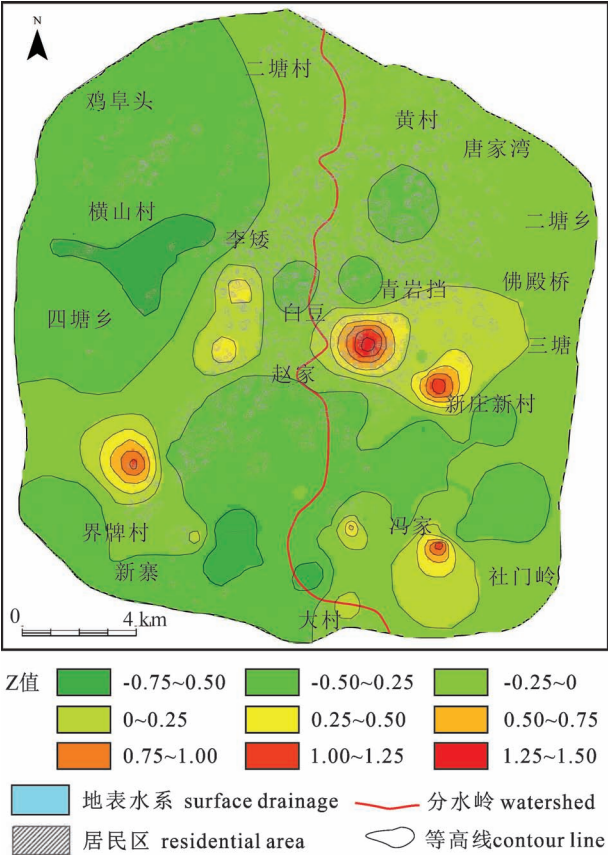


图 8 因子 2 影响程度得分图
Fig. 8 Score chart of factor 2 influence degree

水点均位于耕地附近,农家肥及复合肥未充分被植物吸收部分下渗至地下水中而导致水中的 NH_4^+ 浓度超标。地下水中 COD_{Mn} 在丰水期的质量浓度范围为 0.5~2.74 mg/L,无超标点。在枯水期质量浓度变化范围为 0.5~4.17 mg/L,超标点有两处,分别为 GW01 和 GW50,质量浓度分别为 4.17 mg/L 和 3.34 mg/L。超标的两处水点中,一处为溶潭水,一处为井水,分别受耕地及农村生活污水影响致使浓度超标。地下水中的 NO_2^- 仅丰水期中的 GW40 超标,质量浓度为 4.17 mg/L,其余点均未超标。地下水中的 NO_2^- 主要来源于 NH_4^+ 的硝化作用产生,当硝化作用较弱时,地下水中的 NO_2^- 浓度则较低。因此,研究区地下水中整体表现为 NO_2^- 浓度较低。

从计算的综合得分可知,得分较高的地区有青岩挡南部、新庄新村西北部、界牌村北部及冯家村一带(图 8)。这些地区主要为耕地及养殖用地区,耕地及养殖在使用肥料时,绝大部分未被吸收而下渗进入地下水中,导致了地下水中的氮污染(彭聪等, 2018)。此外,村镇生活污水的随意排放也导致了

地下水氮污染。如李矮南部,代表样品 GW38 和 GW43 中仅 GW43 的 NH_4^+ 为 II 类水,因子内其他指标均为 I 类水,该因子在该区域整体得分不高。其原因为受耕地种植的影响,其地下水也显现出氮污染情况。但因该区域属山前补给区,受地下水向西南方向径流影响,地下水中的 NH_4^+ 、 COD_{Mn} 和 NO_2^- 污染指标向排泄区迁移,从而最终表现出该区域因子 2 得分偏中等。综合分析,因子 2 主要受农业及生活污水影响导致的 NH_4^+ 、 COD_{Mn} 和 NO_2^- 超标。

3.3.3 因子 3:天然与人为复合影响导致的 I⁻ 污染

该因子主要包含的指标为 I^- ,其方差解释率为 19.6%。研究区地下水中的 I^- 丰水期质量浓度为 2~173 $\mu\text{g/L}$,超标点有 2 处,分别为 GW18 和 GW30,质量浓度分别为 116 $\mu\text{g/L}$ 和 173 $\mu\text{g/L}$ 。枯水期质量浓度为 2~173 $\mu\text{g/L}$,超标点有 8 处,分别为 GW05、GW13、GW18、GW19、GW41、GW43、GW49 和 GW53,质量浓度分别为 88 $\mu\text{g/L}$ 、107 $\mu\text{g/L}$ 、126 $\mu\text{g/L}$ 、99 $\mu\text{g/L}$ 、90 $\mu\text{g/L}$ 、83 $\mu\text{g/L}$ 、173 $\mu\text{g/L}$ 和 80 $\mu\text{g/L}$ 。据计算的综合得分可知,研究区地下水 I^- 超标点主要分布在李矮南部、大村和冯家一带,这些区域

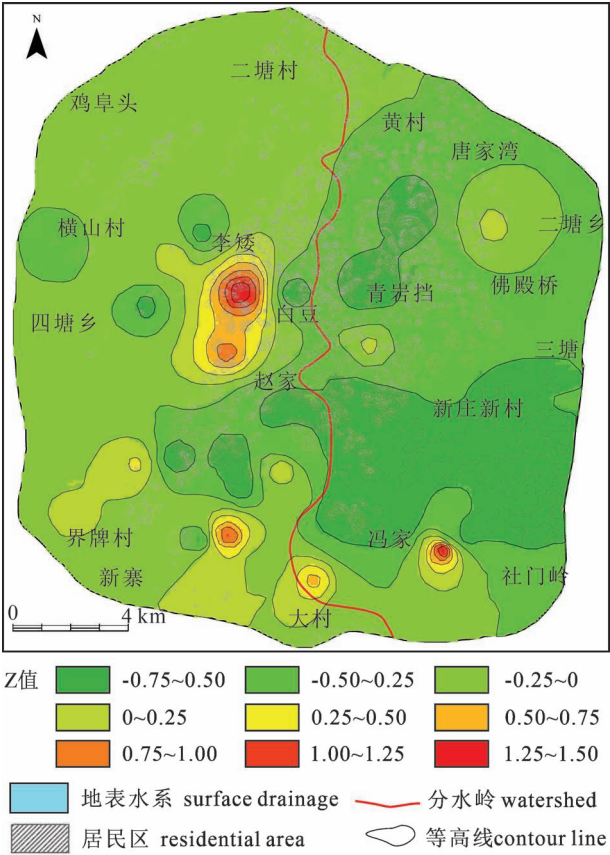


图 9 因子 3 影响程度得分图
Fig. 9 Score chart of factor 3 influence degree

主要为湿地开垦区(图 9)。研究发现,地下水 I⁻ 的迁移富集主要与含水介质的有机质、地下水的径流条件、地下水所处的氧化还原环境、地下水的酸碱度等有密切的关系(曾昭华, 1999; 张二勇等, 2010)。据姚高峰和佟小微(2009)的研究表明,会仙湿地的土壤有机质水平为原生湿地>垦后湿地>退化湿地>非湿地。而本次研究区的地下水中 I⁻ 的超标点主要集中在垦后湿地区,且绝大部分为井水,相对于地下河水 and 溶潭水,其地下水径流条件相对较差,这些都为地下水中 I⁻ 的富集提供了有利的条件。如李矮南部,代表样品 GW38 和 GW43 中 GW43 的 I⁻ 单指标评价结果为 IV 类水,其原因为该区域除山区外,分布了较大面积的耕地,这一类型的耕地属于垦后耕地,有机质水平较高。此外, GW43 为水井样品,其地下水径流条件较差,综合条件导致该区域因子 3 得分较高。

综合分析,研究区地下水中 I⁻ 的超标主要存在于人为复垦湿地中,其较为丰富的土壤有机质含量

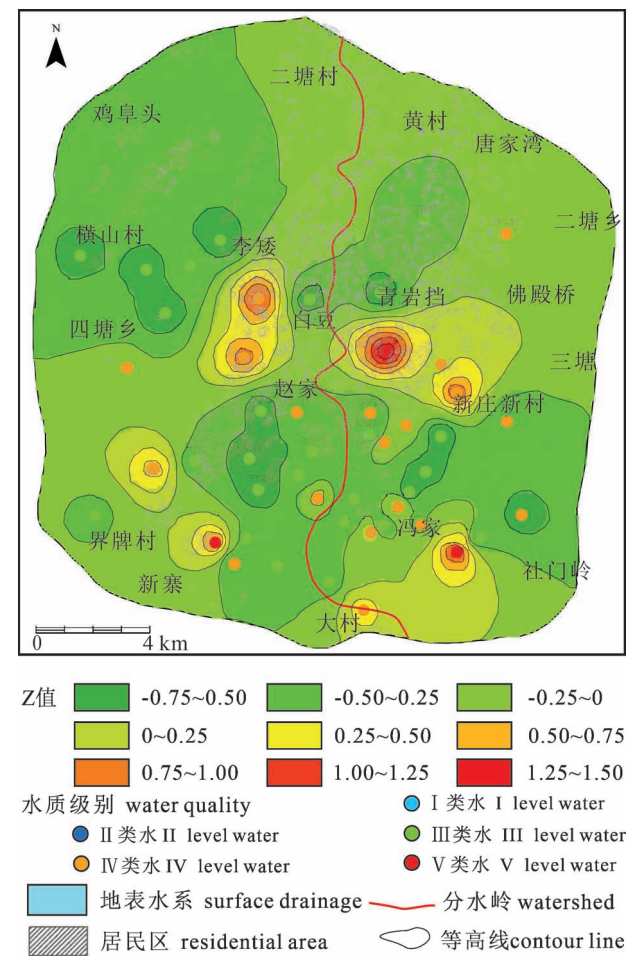


图 10 综合影响程度得分图

Fig. 10 Score chart of comprehensive impact degree

为 I⁻ 的富集提供了条件。因此,研究区地下水中 I⁻ 污染为天然与人为复合污染所致。

根据 3 个因子计算的得分可知,研究区地下水水质受 3 个因子的影响范围及程度不一,将其影响程度综合计算便得到地下水受人为及天然综合影响程度。从图 10 可知,研究区地下水受影响区域主要为李矮南部、青岩挡南部、新庄新村西北部、界牌村东北部、冯家—大村一带。将此结果与水质评价结果比较可知,区内地下水水质超标点与受影响程度基本吻合。如李矮南部,代表样品 GW38 和 GW43 的综合水质均为 IV 类水,其主要超标为别为 TFe、Mn 和 TFe、Mn、I⁻。前文已述, TFe 和 Mn 指标超标主要是地下水高背景引起,而 I⁻ 超标则是天然与人为复合影响导致的。因此,综合得分主要来自因子 1 和因子 3 的贡献,因子 2 得分偏中等,综合使得该区域因子得分较高。

因此,利用超标指标作为因子进行因子分析,再根据因子的特征值及方差解释率得出的因子综合影响程度得分与水质综合评价结果吻合。综合影响程度得分图不仅可以得出地下水水质信息,还可根据确定的因子得出天然与人为对地下水质的影响。

4 结论

- (1)会仙湿地地下水水质整体表现为丰水期好于枯水期,其中丰水期超标水点占比 16%,主要超标指标为 Al、Mn、I⁻、Fe、NH₄⁺ 和 COD_{Mn},以 Al 的贡献最高,贡献率为 48%。枯水期超标水点占比 47%,主要超标指标为 Al、Mn、I⁻、Fe、NH₄⁺ 和 COD_{Mn},以 Mn 的指标贡献率最高,为 50%。
- (2)利用 NH₄⁺、Fe、COD_{Mn}、I⁻、Al、Mn、NO₂⁻ 质量浓度等 7 个主要超标指标进行因子分析结果显示研究区地下水水质共受到 3 个因素影响,分别为天然高背景引起的高 Fe、Mn 和 Al,农业及生活污水影响导致的 NH₄⁺、COD_{Mn} 和 NO₂⁻ 超标和天然与人为复合影响导致的 I⁻ 污染。
- (3)通过利用因子分析计算各因子得分,定量计算了各类影响因子的得分,以此反映人类活动对地下水水质的影响程度。结果显示,研究区地下水受人类活动影响较强的区域为李矮南部、青岩挡南部、新庄新村西北部、界牌村东北部、冯家—大村一带。综合结果图不仅可获取研究区地下水水质信息,还可获取人为活动的影响程度。

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

蔡德所, 马祖陆, 赵湘桂, 王魁. 2009. 桂林会仙岩溶湿地近 40 年演变的遥感监测. 广西师范大学学报(自然科学版), 27(2): 111~117.

曹敏, 沈立成, 肖琼, 邱述兰 王鹏. 2012. 基于 SPSS 的岩溶地下水水质变化及其影响因素——以重庆市金佛山表层岩溶地下水为例. 湖南师范大学自然科学学报, 35(2): 82~87.

陈绮, 庞园. 2016. 两种水质评价方法在广州市从化区地下水水质评价中的应用. 人民珠江, 37(7): 78~81.

崔健, 都基众, 马宏伟, 李霄, 杨泽. 2011. 基于因子分析的浑河冲洪积扇地浅层地下水水质影响因素辨析. 中国农村水利水电, 7: 45~48+51.

高春雨, 汤岩, 任永泰. 2010. 基于改进层次分析法的哈尔滨市地下水水质影响因素分析. 国土与自然资源研究, 3: 87~89.

龚亚兵, 龚绪龙, 许书刚, 唐鑫, 苏东, 吴夏懿. 2022. 苏南地区地下水化学特征及演化分析. 地质论评, 68(3): 2022062014.

焦友军, 潘晓东, 曾洁, 任坤, 彭聪, 梁嘉鹏. 2021. 会仙喀斯特湿地地下水分水岭移动特征研究. 湿地科学, 19(2): 137~146

蒋忠诚. 1997. 广西弄拉白云岩环境元素的岩溶地球化学迁移. 中国岩溶, 4: 24~32.

李军, 邹胜章, 赵一, 赵瑞科, 党志文, 潘民强, 朱丹尼, 周长松. 2021. 会仙岩溶湿地地下水主要离子特征及成因分析. 环境科学, 42(4): 1750~1760.

李亚松, 张兆吉, 费宇红, 钱永, 孟素花, 郭春艳. 2012. 改进的灰色聚类法在地下水水质评价中的应用. 水资源保护, 28(5): 25~28.

李亚松, 张兆吉, 费宇红, 钱永, 王昭, 陈京生, 张凤娥. 2011. 地下水质量综合评价方法优选与分析——以淳沱河冲洪积扇为例. 水文地质工程地质, 1: 6~10.

刘德玉, 贾贵义, 张伟, 喻生波, 魏玉涛. 2021. 甘肃敦煌地区疏勒河尾间区地下水化学特征及成因分析. 地质论评, 67(6): 67120008.

罗维, 杨秀丽, 犹俊, 杨丽君. 2014. 浅谈岩溶地区区域地下水质量评价——以贵州鸭池河—构皮滩流域为例. 贵州地质, 31(2): 150~153+135.

卢丽, 王喆, 裴建国, 杜毓超, 林永生, 樊连杰. 2015. 红水河上中游流域岩溶地下水水质影响因素的 R 型因子分析. 中国岩溶, 34(4): 415~419.

吕敦玉, 余楚, 周爱国, 周建伟, 蔡鹤生. 2011. BP 神经网络在某油田区地下水水质评价中的应用. 地质科技情报, 3: 108~111.

潘俊, 梁海涛, 岳丹丹, 赵磊. 2015. BP 人工神经网络模型在地下水水质评价中的应用. 供水技术, 9(6): 6~11.

彭聪, 何江涛, 廖磊, 张振国. 2017. 应用水化学方法识别人类活动对地下水水质影响程度: 以柳江盆地为例. 地学前缘, 24(1): 321~331.

彭聪, 潘晓东, 焦友军, 任坤, 曾洁. 2018. 多种同位素手段的硝酸盐污染源解析: 以会仙湿地为例. 环境科学, 39(12): 5410~5417.

邱林, 李阿龙, 武亚斐, 马钰其. 2015. 可变模糊综合评价法在地下水水质评价中的应用. 农业与技术, 35(24): 252~253+256.

滕彦国, 左锐, 苏小四, 王金生, 苏洁, 李仙波, 张文静. 2014. 区域地下水环境风险评估评价技术方法. 环境科学研究, 27(12): 1532~1539.

王慧玮, 郭小娇, 张千千, 李兵岩. 2021. 淳沱河流域地下水水化学特征演化及成因分析. 环境化学, 40(12): 3838~3845.

向用彬, 梁川, 林源. 2014. 改进的灰色聚类方法及其在水环境质

量评价中的应用. 四川大学学报(工程科学版), (S2): 7~12.

姚高峰, 佟小微. 2009. 桂林会仙湿地土壤有机质空间变异研究. 企业科技与发展, 16: 305~307.

袁利, 蒋少杰, 汪定圣, 李婷. 2022. 宿州市城区地下水化学特征及成因机制研究. 地质论评, 68(4): 1555~1566.

曾昭华. 1999. 地下水中碘的形成及其控制因素. 吉林地质, 2: 3~5.

赵一, 邹胜章, 申豪勇, 周长松, 樊连杰, 朱丹尼, 李军. 2021. 会仙湿地岩溶地下水系统水位动态特征与均衡分析. 中国岩溶, 40(2): 325~333.

张二勇, 张福存, 钱永, 叶念军, 龚建师, 王雨山. 2010. 中国典型地区高碘地下水分布特征及启示. 中国地质, 37(3): 797~802.

张兰真, 孔海燕, 陈珂, 丁敏, 王建英. 2018. 地下水环境风险评价技术方法. 环境与发展, 30(2): 14+16.

朱丹尼, 邹胜章, 李军, 樊连杰, 赵一, 谢浩, 朱天龙, 潘民强, 徐利. 2021. 会仙岩溶湿地丰平枯水期地表水污染及灌溉适用性评价. 环境科学, 42(5): 2240~2250.

Cai Desuo, Ma Zulu, Zhao Xianggui, Wang Kui. 2009&. Remote sensing supervision on spatio-temporal evolution of karst wetland in recent 40 years in Huixian District of Guilin, China. Journal of Guangxi Normal University: Natural Science Edition, 27(2): 111~117.

Cao Min, Shen Licheng, Xiao Qiong, Qiu Shulan, Wang Peng. 2012&. Application of factor analysis in the assessment of influence factors of karst groundwater quality——A case from epikarst groundwater at Jinpo Mountain in Chongqing. Journal of Natural Science of Hunan Normal University, 35(2): 82~87.

Chen Qi, Pang Yuan. 2016&. Application of two kinds of water quality evaluation methods for groundwater of Conghua District in Guangzhou City. Pearl River. 37(7): 78~81.

Cui Jian, Du Jizhong, Ma Hongwei, Li Xiao, Yang Ze. 2011&. Distinguishing significant factors for shallow groundwater quality in the Hunhe River alluvial fan based on factor analysis. China Rural Water and Hydropower, 7: 45~48+51.

Gao Chunyu, Tang Yan, Ren Yongtai. 2010&. Analisis of influence on groundwater quality in Harbin basing on AHP evaluation. Territory & Natural Resources Study, 3: 87~89.

Gong Yabing, Gong Xulong, Xu Shugang, Tang Xin, Su Dong, Wu Xiayi. 2022&. Hydrogeochemical characteristics and evolution of groundwater in southern Jiangsu. Geological Review, 68(3): 2022062014.

Güler C, Kurt M A, Alpaslan M, Akbulut C. 2012. Assessment of the impact of anthropogenic activities on the groundwater hydrology and chemistry in Tarsus coastal plain (Mersin, SE Turkey) using fuzzy clustering, multivariate statistics and GIS techniques. Journal of Hydrology, 414~415(3): 435~451.

Güler C, Thyne G D, Mcrcay J E, Turner K A. 2002. Evaluation of graphical and multivariate statistical methods for classification of water chemistry data. Hydrogeology Journal, 10(4): 455~474.

Guo Huaming, Jia Yongfeng, Wanty R B, Jiang Yuxiao, Zhao Wweiguang, Xiu Wei, Shen Jiaying, Li Yuan, Cao Yongsheng, Wu Yang, Zhang Di, Wei Chao, Zhang Yilong, Cao Wengeng, Foster A. 2016. Contrasting distributions of groundwater arsenic and uranium in the western Hetao basin, Inner Mongolia: Implication for origins and fate controls. Science of the Total Environment, 541: 1172~1190.

Huang Guanxing, Sun Jichao, Zhang Ying, Chen Zongyu, Liu Fan. 2013. Impact of anthropogenic and natural processes on the evolution of

- groundwater chemistry in a rapidly urbanized coastal area, South China. *Science of the Total Environment*, 463~464(5): 209~221.
- Jiao Youjun, Pan Xiaodong, Zeng Jie, Ren Kun, Peng Cong, Liang Jiapeng. 2021&. The moving characteristics of the groundwater divide in Huixian karst wetland. *Wetland Science*. 19(2): 137~146.
- Jiang Zhongchen. 1997&. Element migration in karst geochemical processes of the dolomite in Nongla, Guangxi. *Carsologica Sinica*, 4: 24~32.
- Li Jun, Zou Shengzhang, Zhao Yi, Zhao Ruiké, Dang Zhiwen, Pan Minqiang, Zhu Danni, Zhou Changsong. 2021&. Major ionic characteristics and factors of karst groundwater at Huixian karst wetland, China. *Environmental Science*. 42(4): 1750~1760.
- Li Yasong, Zhang Zhaoji, Fei Yuhong, Qian Yong, Meng Suhua, Guo Chunyan. 2012&. Application of an improved grey clustering method to groundwater quality evaluation. *Water Resources Protection*, 28(5): 25~28.
- Li Yasong, Zhang Zhaoji, Fei Yuhong, Qian Yong, Wang Zhao, Chen Jingsheng, Zhang Feng'e. 2011&. Optimal selection and analysis of groundwater quality evaluation methods: A case study in the Hutuo River alluvial pluvial fan. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 1: 6~10.
- Liu Chenwu, Lin Kaohung, Kuo Yiming. 2003. Application of factor analysis in the assessment of ground water quality in a blackfoot disease area in Taiwan. *Science of the Total Environment*, 313(1~3): 77~89.
- Liu Deyu, Jia Guiyi, Zhang Wei, Yu Shengbo, Wei Yutao. 2021&. Hydrochemical characteristics and genetic mechanism analysis of groundwater in the tail area of the Shule River, Dunhuang, Gansu. *Geological Review*, 67(6): 67120008.
- Luo Wei, Yang Xiuli, You Jun, Yang Lijun. 2014&. Assessment of regional groundwater quality in karst area—A case study of Yachihe—Goupitan area in Guizhou. *Guizhou Geology*, 31(2): 150~153, 135.
- Lu Li, Wang Zhe, Pei Jianguo, Du Yuchao, Lin Yongsheng, Fan Lianjie. 2014&. R-mode analysis for influencing factors of karst groundwater quality in middle and upper reaches of the Hongshuihe river. *Carsologica Sinica*, 34(4): 415~419.
- Lü Dunyu, Yu Chu, Zhou Aiguo, Zhou Jianwei, Cai Hesheng. 2011&. Application of BP neural network in evaluation of groundwater quality of certain oilfield. *Geological Science and Technology Information*, 30(3): 108~111.
- Ouedraogo I, Defourny P, Vanclooster M. 2016. Mapping the groundwater vulnerability for pollution at the pan African scale. *Science of the Total Environment*, 544: 939~953.
- Pan Jun, Liang Haitao, Yue Dandan, Zhao Lei. 2015&. Application of BP artificial neural network model in the evaluation of groundwater quality. *Water Technology*, 9(6): 6~11.
- Peng Cong, He Jiangtao, Liao Lei, Zhang Zhenguo. 2017&. Research on the influence degree of human activities on groundwater quality by the method of geochemistry: A case study from Liujiang Basin. *Earth Science Frontiers*, 24(1): 321~331.
- Peng Cong, Pan Xiaodong, Jiao Youjun, Ren Kun, Zeng Jie. 2018&. Identification of nitrate pollution sources through various isotopic methods: A case study of the Huixian wetland. *Environmental Science*, 39(12): 5410~5417.
- Peng Cong, He Jiangtao, Wang Manli, Zhang Zhenguo, Wang Lei. 2017. Identifying and assessing human activity impacts on groundwater quality through hydrogeochemical anomalies and NO_3^- , NH_4^+ , and COD contamination: a case study of the Liujiang River Basin, Hebei Province, P. R. China. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(4): 3539~3556.
- Qiu Lin, Li Along, Wu Yafei, Ma Yuqi. 2015&. Application of variable fuzzy integrated evaluation method in groundwater quality assessment. *Agriculture and Technology*, 35(12): 252~253+256.
- Kazakis N, Voudouris K S. 2015. Groundwater vulnerability and pollution risk assessment of porous aquifers to nitrate: Modifying the DRASTIC method using quantitative parameters. *Journal of Hydrology*, 525: 13~25.
- Teng Yanguo, Zuo Rui, Su Xiaosi, Wang Jinsheng, Su Jie, Li Xianbo, Zhang Wenjing. 2015&. Technique for assessing environmental risk of regional groundwater. *Research of Environmental Sciences*, 27(12): 1532~1539.
- Wang Huiwei, Guo Xiaojiao, Zhang Qianqian. Li Bingyan. 2021&. Evolution of groundwater hydrochemical characteristics and origin analysis in Hutuo River Basin. *Environmental Chemistry*, 40(12): 3838~3845.
- Xiang Yongbin, Liang Chuan, Lin Yuan. 2014&. Improved grey clustering method and its application to water environmental quality assessment. *Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition)*, 46(S2): 7~12.
- Yao Gaofeng, Tong Xiaowei. 2009&. Some researches on spatial variability of the organic materials in soil in Huixian Marsh, Guilin. *Enterprise Science and Technology and Development*, 16: 305~307.
- Yan Jiaheng, Chen Jiansheng, Zhang Wenqing. 2022. Impact of land use and cover on shallow groundwater quality in Songyuan city, China: A multivariate statistical analysis. *Environmental Pollution*, 307: 119532.
- Yuan Li, Jiang Shaojie, Wang Dingsheng, Li Ting. 2022&. Study on hydrochemical characteristics and formation of groundwater in urban district of Suzhou. *Geological Review*, 68(4): 1555~1566.
- Xiang Juan, Zhou Junju, Yang Juncang, Huang Meihua, Feng Wei, Li Qiaoqiao, Xue Dongxiang, Zhao Yaru, Zhu Guofeng. 2020. Applying multivariate statistics for identification of groundwater chemistry and qualities in the Sugan Lake Basin, Northern Qinghai—Tibet Plateau, China. *Journal of Mountain Science*, 17(2): 448~463.
- Zeng Zhaohua. 1999&. The formation of I and its control factors. *Jilin Geology*, 2: 30~33+72.
- Zhao Yi, Zou Shengzhang, Shen Haoyong, Zhou Changsong, Fan Lianjie, Zhu Danni, Li Jun. 2021&. Dynamic characteristics and equilibrium of water level of the karst groundwater system beneath the Huixian wetland. *Carsologica Sinica*, 40(2): 325~333.
- Zhang Eryong, Zhang Fucun, Qiang Yong, Ye Nianjun, Gong Jianshi, Wang Yushan. 2010&. The distribution of high iodine groundwater in typical areas of China and its inspiration. *Geology in China*. 37(3): 797~802.
- Zhang Lanzhen, Kong Haiyan, Chen Ke, Ding Min, Wang Jianying. 2018&. Groundwater environmental risk assessment techniques and methods. *Environment and Development*, 30(2): 14+16.
- Zhang Yuan, Guo Changsheng, Xu Jian, Tian Yingze, Shi Guoliang, Feng Yinchang. 2012. Potential source contributions and risk assessment of PAHs in sediments from Taihu Lake, China: comparison of three receptor models. *Water Research*, 46(9): 3065~3073.

Zhu Danni, Zou Shengzhang, Li Jun, Fan Lianjie, Zhao Yi, Xie Hao,
Zhu Tianlong, Pan Minqiang, Xu Li. 2021&. Pollution and
irrigation applicability of surface water from wet, normal, and dry

periods in the Huixian karst wetland, China. Environmental
Science, 42(5): 2240~2250.

Identification and quantitative evaluation of influencing factors
of groundwater quality

——A case study of Huixian Wetland, Guilin, Guangxi

LIANG Jianhong, PENG Cong, PAN Xiaodong, JIAO Youjun, ZENG Jie, REN Kun

Key Laboratory of Karst Dynamics Laboratory, Ministry of Land and Resources & Guangxi;

International Research Centre on Karst Under the Auspices of UNESCO,

National Center for International Research on Karst Dynamic System and Global Change; Institute of Karst Geology,

Chinese Academy of Geological Sciences, Guilin, Guangxi, 541004

Objectives: The groundwater environment of wetland has been deteriorating under the strong interference of human activities in recent years. Because of the traditional evaluation methods for groundwater quality do not distinguish the effects of high natural background and anthropogenic pollution, the evaluation results can not represent the real state of water quality comprehensively, faithfully and reliably.

Methods: In the study, the principal component analysis was developed for factor analysis. The scores of each sampling point were calculated based on the score and variance contribution of each factor. The comprehensive score under the influence of factors was calculated.

Results: The comprehensive evaluation results showed that there were three main factors affecting groundwater in the study area. Factor 1 contained high Fe, Mn and Al caused by natural high background. Factor 2 contained NH_4^+ , COD_{Mn} and NO_2^- exceeding the standard caused by agricultural and domestic sewage. Factor 3 was I^- pollution caused by a combination of natural and anthropogenic influences.

Conclusions: The calculated comprehensive impact degree was consistent with the results of traditional water quality assessment. The score chart of comprehensive impact degree can not only evaluate groundwater quality, but also the natural and anthropogenic impacts on groundwater quality based on the identified factors.

Keywords: factor analysis; groundwater quality; Huixian wetland; score chart of impact degree; influencing factors of water quality; recognition method

Acknowledgements: This study is financially supported by the Guangxi Key Research and Development Program (No. GuikeAB21196026); the Natural Science Foundation of Guangxi (No. 2020GXNSFAA238034) and Basic Research Projects of the Institute of Karst Geology, CAGS (No. 202017)

First author: LIANG Jianhong, male, born in 1982, doctor, major in the karst environment sciences; Email: jhliang@karst. ac. cn

Corresponding author: PENG Cong, male, born in 1991, Assistant researcher, major in the karst environment sciences and hydrogeology; Email: pengcong@mail. cgs. gov. cn

Manuscript received on: 2022-03-27; Accepted on: 2022-08-28; Network published on: 2022-09-20

Doi: 10. 16509/j. georeview. 2022. 09. 091

Edited by: LIU Zhiqiang

