

DOI: 10.16788/j.hddz.32-1865/P.2023.12.017

引文格式: 李亮, 周锴锬, 李洁, 龚建师, 檀梦皎, 张飞, 朱应新, 刘林, 叶永红. 2024. 无锡市浅层地下水的化学影响因子及贡献率解析[J]. 华东地质, 45(4): 440-451. (LI L, ZHOU K E, LI J, GONG J S, TAN M J, ZHANG F, ZHU Y X, LIU L, YE Y H. 2024. Chemical influence factors and contribution rate in shallow groundwater of Wuxi City[J]. East China Geology, 45(4): 440-451.)

无锡市浅层地下水的化学影响因子及贡献率解析

李亮^{1,2}, 周锴锬^{1,2}, 李洁^{1,2}, 龚建师^{1,2}, 檀梦皎^{1,2},
张飞^{1,2}, 朱应新^{1,2}, 刘林^{1,2}, 叶永红^{1,2}

(1. 中国地质调查局南京地质调查中心, 江苏 南京 210016;
2. 自然资源部流域生态地质过程重点实验室, 江苏 南京 210016)

摘要: 地下水化学影响因子的准确判断是地下水污染评价等级划分、治理方案选择和治理目标确立的重要依据。文章以无锡市 67 组浅层地下水样品为研究对象, 利用数理统计、因子分析和绝对因子得分-多元线性回归分析模型对地下水化学影响因子进行解析, 结果显示: ①无锡市浅层地下水质量等级评价中Ⅲ类水占比 53.7%, 超Ⅲ类水占比 46.3%, 超标离子依次为 COD、 NH_4^+ 、 NO_3^- 、 SO_4^{2-} , 表明地下水受到了外界环境的影响; ②地下水类型共 9 种, 以 $\text{HCO}_3\text{-Ca-Na}$ 型、 $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ 型和 $\text{HCO}_3\text{-SO}_4\text{-Ca-Na}$ 型为主, 占样品总数的 76.1%, 表明地下水化学优势离子明显, 即影响因子较为集中; ③通过因子分析法筛选出该区影响地下水化学的 3 大公因子, 即自然演化影响因子 F_1 、工业生产影响因子 F_2 和农业生产影响因子 F_3 , 累计方差贡献率为 76.05%, 它们对地下水化学指标的综合贡献率分别为 57.44%、27.62% 和 14.94%, 说明自然演化是地下水主要化学组分的主控因素, 工业、农业活动对可能造成地下水污染的化学组分影响较大, 且工业活动的影响大于农业活动。地下水化学指标实测浓度与绝对因子得分-多元线性回归分析模型的预测浓度具有较好的一致性, 表明该方法适用于地下水化学影响因子解析。

关键词: 无锡市; 浅层地下水; 影响因子解析; 因子分析; 绝对因子得分; 回归分析

中图分类号: P641.3

文献标识码: A

文章编号: 2096-1871(2024)04-440-12

水是人类赖以生存的宝贵资源, 地下水资源已经成为国内外的研究热点(Dar et al., 2014; 杨恒等, 2013; 姜月华等, 2023), 我国也正在开展基于水质和水量的新一轮地下水资源调查。随着我国经济社会的发展和人类活动的增加, 地下水受自然因素和人为因素的影响程度不断加深, 地下水化学组分也逐渐复杂化(Neshat et al., 2014; 程东会等, 2007)。目前, 地下水水化学的研究多集中在水化学特征的分析(郑涛等, 2021)、水化学演化(Mao et al., 2022; 金阳等, 2021)、成因环境(许乃政等, 2015)、污染物迁移转化(胥焘等, 2014)

和防污性能评价(李亮等, 2019; 黄顺生等, 2023)等方面, 而对水化学影响因子的快速解析和定量评估的研究相对较少(林承奇等, 2016)。

目前, 地下水化学影响因子的解析方法主要采用扩散模型和受体模型两类。扩散模型是一种预测模型, 通过影响因子的排放数据和相关参数来预测水化学的变化情况(孟利等, 2017)。该模型中应用最广泛的方法之一是质量平衡法, 这种方法以化学质量守恒定律为计算依据, 能够较精确地识别污染源。但质量平衡法需要预先知道影响因子的指纹图谱, 同时要求不同影响因子之间

* 收稿日期: 2023-12-28 修订日期: 2024-06-20 责任编辑: 袁静

基金项目: 中国地质调查局“沙颍河—涡河流域水文地质调查(编号: DD20190354)”和“长江流域下游水文地质与水资源调查监测(编号: DD20221756)”项目联合资助。

第一作者简介: 李亮, 1985 年生, 男, 高级工程师, 硕士, 主要从事水资源调查评价、水环境等研究工作。Email: 280283941@qq.com。

通信作者简介: 周锴锬, 1980 年生, 男, 高级工程师, 硕士, 主要从事水资源调查评价、水环境等研究工作。Email: 315503329@qq.com。

具有明显的化学组成差异,且不能出现“混源”现象,因而在实际生产过程中较难得到应用。受体模型是通过受体样品的化学和显微分析结果,建立化学成分与影响因子的因果关系,识别各影响因子对化学成分变化的贡献。这种根据受体样品的化学特征反向识别影响因子的方法,具有更好的适用性。

多元统计法是受体模型中最常用的分析方法之一(Duan et al., 2016; 李俊霞等, 2010)。其中,因子分析法(FA)和主成分分析法(PCA)可以通过物质之间的相关关系对多维变量进行降维,从而实现以较少的综合特征因子表征水化学的绝大部分特征,使复杂关系变得简单(张学敏, 2007),但单独的PCA或FA难以实现定量描述影响因子对水化学的影响程度。为此,Thurston和Spengler(1985)提出了绝对因子得分-多元线性回归(APCS-MLR)方法。该方法在原始数据标准化后进行因子分析的基础上,得到因子的绝对真实得分(APCS),再结合多元线性回归(MLR)分析计算各公因子对受体的影响程度(陈秀端和卢新卫, 2017),从而实现了定量刻画影响因子对受体的影响程度。目前,APCS-MLR已在大气污染、水污染和土壤地球化学等方面得到了广泛应用,但在地下水化学影响因子解析方面的应用却鲜有报道(秦先燕等, 2017)。

无锡市是我国经济发展最为迅速、人类活动最为强烈的地区之一,其地下水的化学特征受到多种外界因素的影响。因此,本文应用PCA-APCS-MLR模型对无锡市67组浅层地下水样品的水化学数据进行分析,量化影响因子对水化学的贡献率,以期对不同影响因子控制下的地下水质量修复提供明确的指示,为区域地下水质量控制、水源地保护及合理开发利用提供依据,为正在开展的水资源调查工作提供数据支撑。

1 研究区概况

无锡市位于江苏省南部,陆地面积约170 km²(不含江阴市、宜兴市,下文亦同)。区内以平原地貌为主,整体地势平坦,河网密布,第四系松散沉积物分布广泛,仅在太湖沿岸局部出露石炭系碳酸盐岩、泥盆系和侏罗系碎屑岩及燕山期中酸

性侵入岩。区内属北亚热带湿润季风气候,多年平均气温为16.2℃,多年平均降雨量为1121.7 mm。

无锡市地下水类型可划分为松散岩类水、碎屑岩类裂隙水和碳酸盐岩岩溶水。除基岩出露区外,浅层松散岩类地下水在全区广泛分布。浅层含水层由全新统和上更新统冲洪积相、冲湖积相沉积的中细砂、粉砂和亚砂土组成,厚度为0.3~28 m。包气带以全新统和上更新统太湖堆积相的亚黏土、亚黏土夹亚砂土、亚砂土和粉砂为主,结构紧密。地下水位埋深为0.5~4 m,年变幅为0.5~1.5 m,单井涌水量为0.5~15 m³/d(井径0.4 m,降深1 m)。大气降水入渗、地表水入渗和灌溉回渗是浅层地下水的主要补给方式。浅层地下水质量等级以Ⅲ类水为主,是居民生活和农业用水的主要来源之一(李亮等, 2022)。

无锡市北部的锡山区和惠山区以农田为主,耕地大面积分布;中部的主城区以居民区为主,人类活动对环境的影响较大;太湖沿岸以旅游业为主;东南部硕放区和新区以工业园区为主,工厂较集中。

2 数据来源

2018年6月,南京地质调查中心在无锡市开展了“苏南现代化建设示范区1:5万环境地质调查”工作,共采集浅层地下水样品67组。样品采集过程中采取均匀布样、兼顾地层沉积相和地貌差异的原则,同时在农业生产和工业生产集中区增加采样密度,在太湖沿岸湿地区则减小采样密度。样品采集时使用中海达V30 Plus GNSS RTK测量系统对样品点进行定位,取样点分布如图1所示。

样品采集时,取样瓶先用水样清洗2~3次后再将样品装入其中。每个采样点均采集2瓶水样,其中一瓶水样加入1:1浓硝酸,使样品pH值<2,用于金属阳离子的测定;另一瓶水样为原水,用于HCO₃⁻、Cl⁻、SO₄²⁻和溶解性总固体(TDS)等化学指标的测定。采集的样品保存在4℃左右的保温箱内,并在5天内送至自然资源部华东矿产资源监督检测中心进行检测。Na⁺、Ca²⁺和Mg²⁺等离子均采用电感耦合等离子体发射光谱法测定,COD、HCO₃⁻和Cl⁻等离子采用滴定法测定,NO₃⁻、

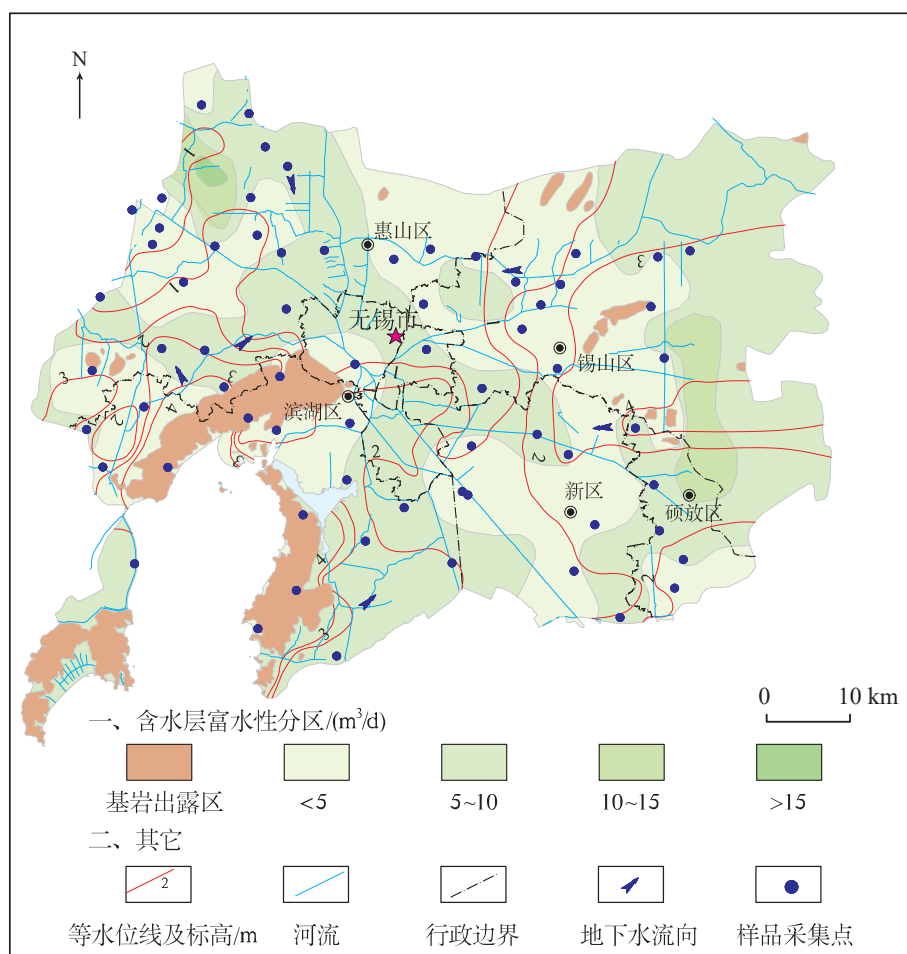


图1 无锡市浅层地下水样品的采集点分布图

Fig. 1 Distribution of shallow groundwater sampling points in Wuxi City

SO_4^{2-} 等采用离子色谱法测定, NH_4^+ 采用比色法测定, Cu^{2+} 采用电感耦合等离子体质谱法测定, TDS采用重量法测定。

3 结果与分析

3.1 地下水组分特征

采用 Aqqa 软件对 67 组地下水样品的测试结果进行分析并绘制 Piper 三线图。在阳离子三线图中, Ca^{2+} 含量最高, 其次为 Na^+ 、 Mg^{2+} ; 在阴离子三线图中, HCO_3^- 含量最高, SO_4^{2-} 次之, Cl^- 含量最少 (图 2)。采用舒卡列夫法 (Yay et al., 2008) 对样品化学类型进行分类, 结果显示, 研究区共有 9 种地下水化学类型, 其中 $\text{HCO}_3\text{-Ca}\cdot\text{Na}$ 型有 29 组样品, 占样品总数的 43.3%; 其次为 $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ 型, 共 12 组样品, 占样品总数的 17.9%; 再次为 $\text{HCO}_3\text{-SO}_4\text{-Ca}\cdot\text{Na}$ 型, 共 10 组样品, 占样品总数的 14.9%; 其余为

$\text{HCO}_3\text{-Cl}\text{-Ca}\cdot\text{Na}$ 型、 $\text{HCO}_3\text{-Ca}\cdot\text{Na}\cdot\text{Mg}$ 型、 $\text{HCO}_3\text{-SO}_4\text{-Ca}\cdot\text{Mg}$ 型、 $\text{HCO}_3\text{-SO}_4\text{-Ca}\cdot\text{Na}\cdot\text{Mg}$ 型、 $\text{HCO}_3\text{-Ca}\cdot\text{Mg}$ 型和 $\text{HCO}_3\text{-Cl}\text{-Ca}$ 型等, 共 16 组样品, 占样品总数的 23.9%。

分析表明, 无锡市人口密度大、经济发达, 浅层地下水含水层的覆盖层较薄, 容易受到人类活动的影响。在自然地质环境和人类活动的双重影响下, 浅层地下水组分较复杂, 特别是受人类活动影响的 Cl^- 和 SO_4^{2-} 含量明显偏高, NH_4^+ 局部含量高且分布不均匀, 变异系数达到 305 % (表 1)。

依据《GB/T14848—2017 地下水质量标准》(中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局和中国国家标准化管理委员会, 2017) 的相关要求, 对上述 67 组样品的 8 种水化学指标 TDS、COD、 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 Cl^- 、 NH_4^+ 、 Na^+ 和 Cu^{2+} 进行综合质量等级评价和单要素质量等级评价。综合质量等级评价结果显示: 36 组样品属于 I—III 类水, 占样品

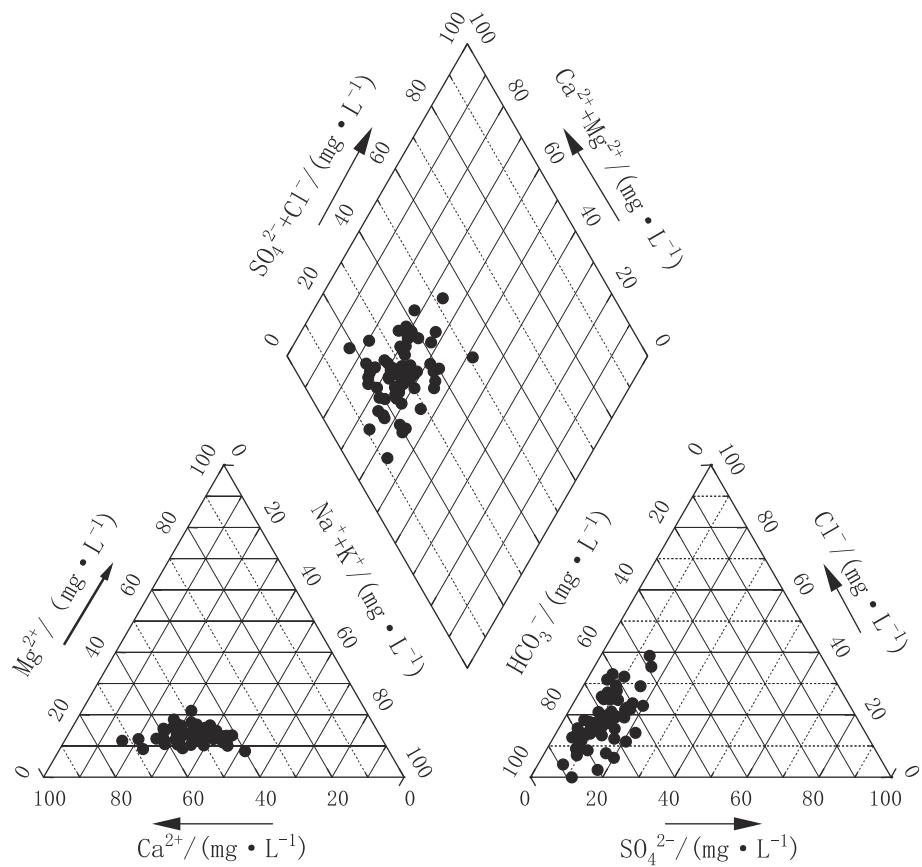


图2 无锡市浅层地下水的 Piper 三线图

Fig. 2 Piper three-line diagrams of shallow groundwater in Wuxi City

表1 无锡市浅层地下水的主要离子浓度统计结果

Table 1 Statistics of main ions in samples of shallow groundwater in Wuxi City

	最大值	最小值	平均值	标准差	变异系数/%
TDS	838	202	411	129	31.3
COD	15.1	0.38	2.86	2.03	70.9
NO ₃ ⁻	108	0	30.9	24.4	79.1
SO ₄ ²⁻	253	0.001	58.1	33.3	57.4
Cl ⁻	128	12.4	40.2	25.9	64.6
NH ₄ ⁺	2.94	0.003	0.16	0.49	306
Ca ²⁺	119	31.0	65.3	21.6	33.2
Mg ²⁺	38.1	6.75	17.3	6.91	39.9
Na ⁺	146	12.2	44.1	20.4	46.2
Cu ²⁺	0.015	0.001	0.004	0.002	60.3

注：最大值、最小值、平均值和标准差的单位为mg/L。

总数的 53.7%；31 组样品属于超Ⅲ类水，占样品总数的 46.3 %。单要素质量等级评价结果(图 3)显示：超Ⅲ类水的影响因子为 COD、NO₃⁻、SO₄²⁻和 NH₄⁺，它们的超标率分别为 40.2%、3.0%、1.5% 和

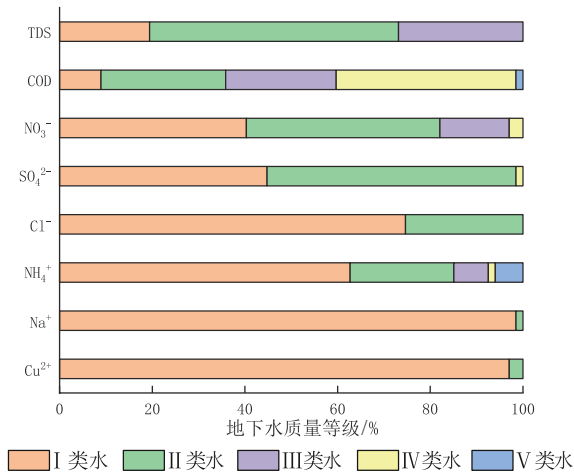


图3 无锡市地下水的单要素质量评价等级

Fig. 3 Single-element quality evaluation grade of groundwater in Wuxi City

7.5%，其中 COD 和 NH₄⁺分别为Ⅳ类水和Ⅴ类水的最大影响因子。

3.2 影响因子解析

选取 11 项地下水化学指标(TDS、COD、NO₃⁻、SO₄²⁻、Cl⁻、HCO₃⁻、NH₄⁺、Ca²⁺、Mg²⁺、Na⁺、和 Cu²⁺)

进行影响因子识别,通过极差标准化对原始数据进行标准转换后,采用 KMO 和 Bartlett 球形检验对变量间的相关程度进行检验(Qin et al., 2013)。结果显示:KMO 测度为 0.728,数值>0.7,较适合做因子分析(秦子元等, 2019); Bartlett 球形检验 P 值接近 0,表明 11 项指标之间有较强的相关关系。

采用 SPSS 软件进行因子分析,对数据集进行解析并降维,再通过求取代表性的主因子来说明数据集的主要信息,从宏观上描述地下水水化学的影响因素,从而进一步判断影响因子。因子分析结果如表 2 所示。

根据 Kaiser 标准,选取特征值>1 的 3 个公因子 F₁、F₂ 和 F₃,其方差分别为 48.137%、16.040% 和 11.874%,累计方差值贡献率为 76.050%,表明这 3 个公因子反映了影响因素总体特征信息的 76.050%。因子分析各指标的信息提取率均>60%(图 4),其中 TDS 的信息提取率达到了 90%以上,表明分析过程中对各指标进行了充分的信息提取和利用。

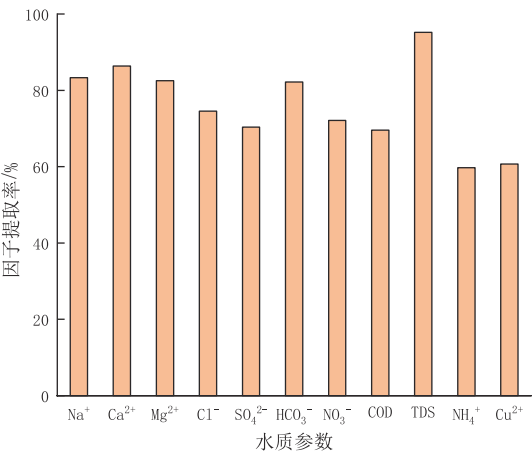


图4 无锡市地下水水质指标的因子提取率

Fig. 4 The factor extraction rates of groundwater quality index in Wuxi City

将因子荷载矩阵进行正交转换,以使旋转后的各指标荷载向 1 或者 0 两极转化,从而突显各公因子的指向性。旋转因子矩阵如表 3 所示。

(1)公因子 F₁。特征值为 5.295,主要代表指标为 TDS、Ca²⁺、Mg²⁺、Na⁺、HCO₃⁻和 Cl⁻。F₁是地下水化学的主要影响因素,共包含 6 项主要化学

表2 特征因子解释的总方差
Table 2 Total variance interpretation of characteristic factors

公因子	初始特征值			提取平方和载入			旋转平方和载入		
	合计	方差/%	累计/%	合计	方差/%	累计/%	合计	方差/%	累计/%
F ₁	5.295	48.137	48.137	5.295	48.137	48.137	5.022	45.655	45.655
F ₂	1.764	16.040	64.176	1.764	16.040	64.176	1.777	16.157	61.812
F ₃	1.306	11.874	76.050	1.306	11.874	76.050	1.566	14.237	76.050
F ₄	0.864	7.857	83.907	—	—	—	—	—	—
F ₅	0.643	5.849	89.757	—	—	—	—	—	—
F ₆	0.385	3.503	93.260	—	—	—	—	—	—
F ₇	0.333	3.029	96.289	—	—	—	—	—	—
F ₈	0.233	2.122	98.411	—	—	—	—	—	—
F ₉	0.107	0.977	99.388	—	—	—	—	—	—
F ₁₀	0.050	0.452	99.840	—	—	—	—	—	—
F ₁₁	0.018	0.160	100.000	—	—	—	—	—	—

表3 旋转因子的荷载矩阵
Table 3 The loading matrix of twiddle factor

指标	TDS	Ca ²⁺	Mg ²⁺	HCO ₃ ⁻	Na ⁺	Cl ⁻	COD	Cu ²⁺	NO ₃ ⁻	NH ₄ ⁺	SO ₄ ²⁻
荷载系数	F ₁	0.960	0.909	0.879	0.876	0.863	0.861	-0.206	0.134	-0.120	0.000
	F ₂	0.028	-0.099	-0.206	-0.215	0.203	0.031	0.799	0.681	0.642	0.091
	F ₃	0.173	0.168	0.098	-0.087	0.220	0.059	-0.120	0.354	-0.543	-0.768

指标,反映了自然化学演化对地下水化学的影响,因此, F_1 称为自然演化因子。无锡市潜水含水层以全新统、上更新统中细砂、粉砂和亚砂土为主,粒度较细,含水层水力梯度小,径流缓慢,地下水与含水层物质充分接触,强烈的水岩相互作用导致了主要离子浓度的升高。 Cl^- 离子一般认为代表了人类活动的影响,但其荷载系数小于其余5个指标,表明 F_1 同时代表了较少的人类活动的影响。 F_1 因子值(图5)在0~2之间的样品主要分布在无锡市中部的主城区,这可能是因为主城区生活废水集中处理、下垫面硬化率高等因素,外部因素难以对地下水化学产生影响。

(2)公因子 F_2 。特征值为1.764,主要代表指标为COD、 Cu^{2+} 和 NO_3^- ,其中,COD的荷载系数最高。地下水环境中的酚和氰化物主要来源于石油化工、造纸、纺织、电镀、机械铸造和农药等,而微生物对酚和氰化物的降解过程是造成COD升高的主要原因之一; Cu^{2+} 主要与农业化肥施用、家畜集约化养殖和生活垃圾有关,同时又与工业生产具有一定的联系; NO_3^- 作为营养元素,主要与含

水层氧化还原环境、农业化肥和生活污水等有关。综上, F_2 因子代表了以石油化工为主的工业、农业和生活垃圾等人类活动的综合作用,由于以工业生产为主, F_2 称为工业影响因子。 F_2 因子值(图6)为2~7的样品主要分布在东部的新区和硕放区,而在北部的惠山区、锡山区和主城区则呈孤点分布,这与无锡市东部和东南部以工业园区为主、工厂较集中的产业布局一致。

(3)公因子 F_3 。特征值为1.306,主要代表指标为 NH_4^+ 和 SO_4^{2-} 。其中, NH_4^+ 的荷载系数最高,推测为浅层地下水受地表人类活动影响较大所致,如农业生产中的化肥使用,以及农灌水下渗对地下水形成面状污染; SO_4^{2-} 一般反映的是工矿活动的影响,无锡市矿业活动较少,而制造业较为发达,因此,可以认为是原料加工等工业活动的影响。综上所述, F_3 因子代表了农业和工业的综合影响,由于以农业生产为主, F_3 称为农业影响因子。 F_3 因子值(图7)为2~4的样品点主要分布在北部的惠山区和锡山区,这与无锡市北部的惠山区和锡山区以农业为主、村镇集中的产业布局一致。

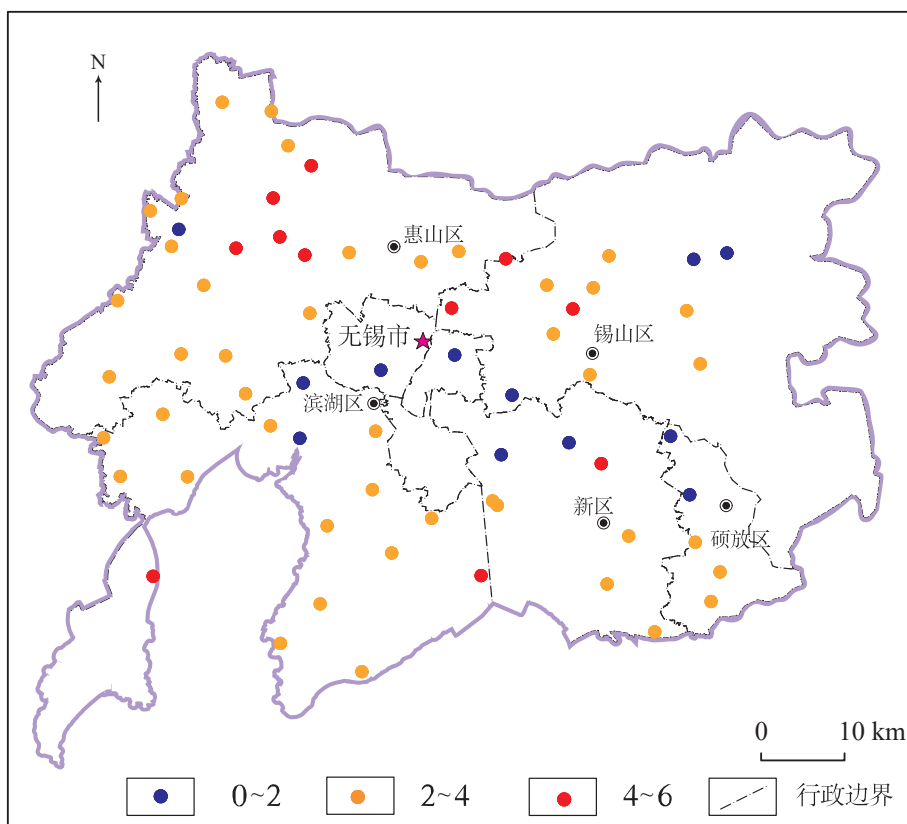
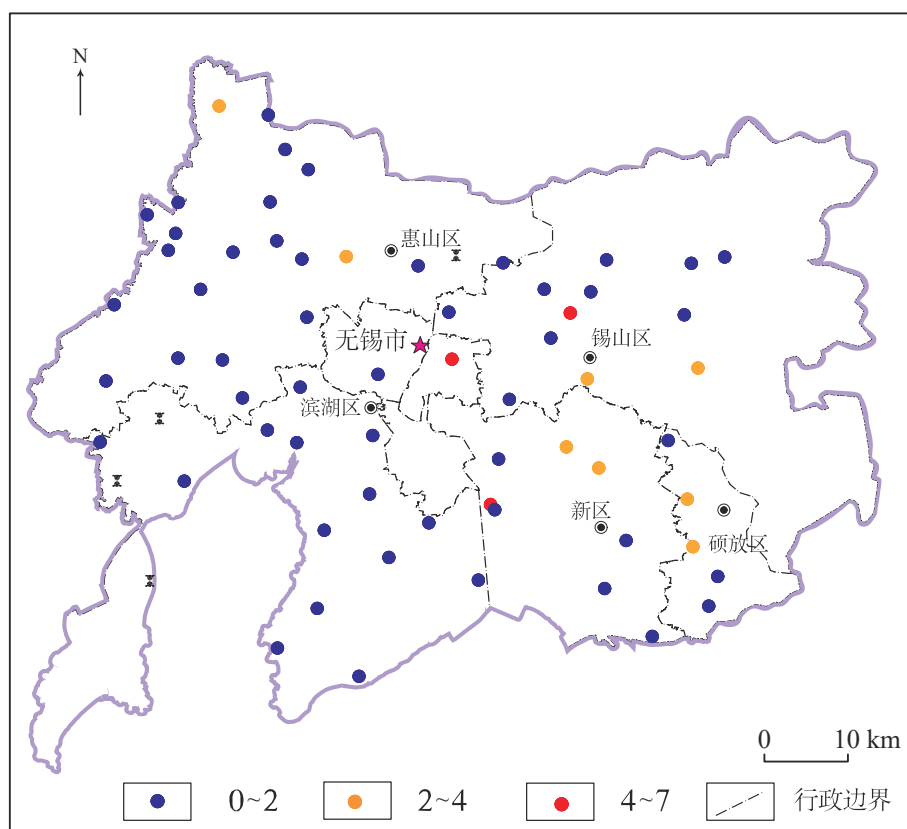


图5 无锡市地下水样品的 F_1 因子得分

Fig. 5 The grading and distribution of natural evolution factor(F_1) score of groundwater in Wuxi City

图6 无锡市地下水样品的 F_2 因子得分Fig. 6 The grading and distribution of industrial production factor(F_2) score of groundwater in Wuxi City

3.3 影响因子贡献率分析

3.3.1 绝对因子分析(APCS)

因子分析过程中,因子得分是基于样品标准浓度进行计算求得的。样品标准浓度计算公式如下:

$$Z_{ij} = (C_{ij} - \bar{C}_i) / S_i, \quad (1)$$

式中, Z_{ij} 为样品标准浓度; C_{ij} 为 j 样品 i 指标的实测浓度,引入的水化学指标为零的样品浓度 C_{0j} 取值为 0; $\bar{C}_i$ 为 i 指标的平均浓度; S_i 为 i 指标的标准方差。

利用公式(1)计算引入的所有水化学指标都为零的样品的标准浓度(童芳, 2012; 史文昌等, 2020),进而得到绝对零值因子得分。各实测样品的因子得分减去绝对零值因子得分即为实际样品与“纯水”之间的因子得分差,称为绝对主因子得分。

3.3.2 多元线性回归分析(MLR)

多元线性回归又称为示踪元素法,主要用于计算示踪元素对应的源对受体的平均贡献。以 F_1 、

F_2 和 F_3 主因子为自变量,以地下水的各化学指标为因变量,计算主因子对各指标的贡献。其公式如下所示:

$$C_i = APCS \times b_{ij} + b_0, \quad (2)$$

式中, C_i 为 i 元素的预测浓度; $APCS$ 为样品的绝对主因子得分; b_{ij} 为 j 样品的 i 元素的回归系数; b_0 为常数项。

计算结果如表 4 所示。将各公因子对水质指标的预测结果与实测值进行拟合,绘制预测结果与实测结果关系图(图 8)。结果表明:多元回归模型计算所得的预测浓度与实测浓度的线性拟合 R^2 大部分 > 0.7 ,说明两者具有很好的一致性,进一步表明公因子对水化学的贡献率计算较为准确,也说明多元线性回归对地下水化学影响因子的计算分配具有较好的适用性。

3.3.3 影响因子贡献率

F_1 自然演化影响因子对 TDS、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 、 HCO_3^- 的贡献率分别达到了 98.26%、87.62%、93.84%、87.67%、97.89% 和 87.15%,而其

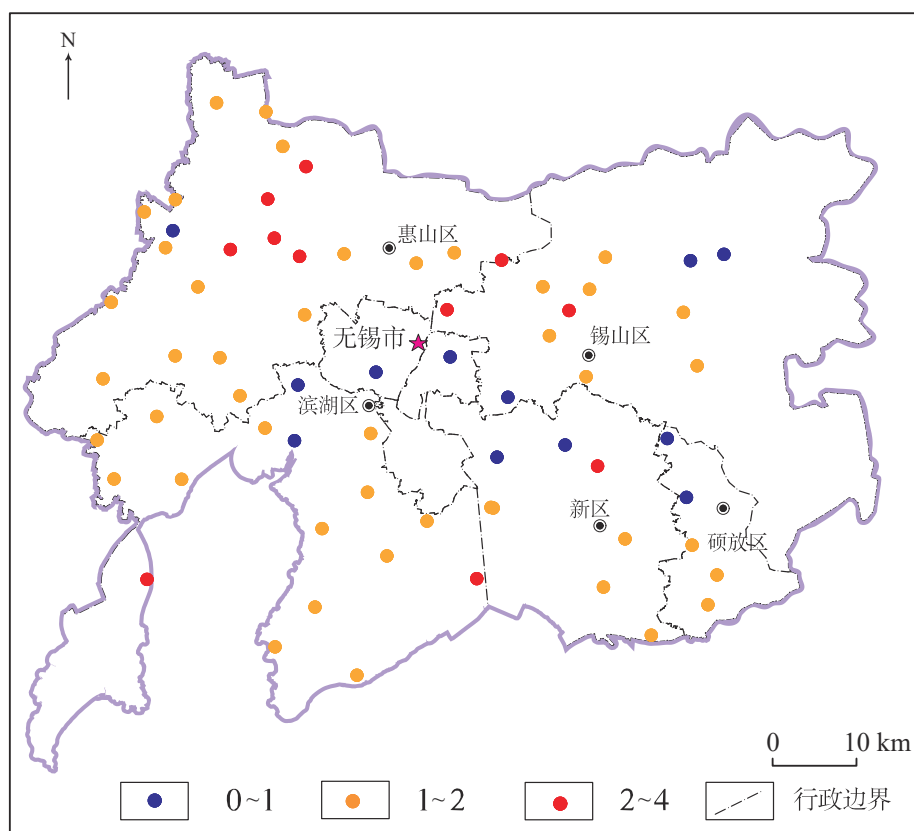
图7 无锡市地下水样品的 F_3 因子得分Fig. 7 The grading and distribution of agricultural production factor(F_3) score of groundwater in Wuxi City

表4 公因子对各指标的贡献率

Table 4 Contribution rate of common factors to each index

指标	贡献率/%			实测浓度/标准偏差/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	预测浓度/标准偏差/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	实测浓度/预测浓度	R^2
	F_1	F_2	F_3				
TDS	98.26	1.70	0.04	411/129	411/125	0.99	0.952
Cu^{2+}	24.66	75.20	0.14	0.004/0.002	0.004/0.002	1.04	0.607
Na^+	87.62	12.33	0.05	44.1/20.4	44.1/18.6	1.01	0.833
Ca^{2+}	93.84	6.13	0.04	65.3/21.6	65.3/20.1	1.00	0.864
Mg^{2+}	87.67	12.31	0.02	17.3/6.9	17.3/6.27	1.01	0.825
NH_4^+	0.72	2.83	96.45	0.16/0.49	0.16/0.38	0.72	0.594
Cl^-	97.89	2.09	0.01	40.2/25.9	40.2/22.4	1.06	0.745
SO_4^{2-}	0.22	32.47	67.31	58.1/33.3	58.1/27.9	1.06	0.704
HCO_3^-	87.15	12.84	0.02	252/105	252/95.1	1.01	0.822
NO_3^-	23.70	76.08	0.22	0.09/0.26	0.09/0.22	0.69	0.721
COD	30.13	69.83	0.04	2.86/2.03	2.86/1.69	1.01	0.696

余指标的贡献率为 0.22%~30.13%; F_2 工业影响因子对 Cu^{2+} 、COD 和 NO_3^- 的贡献率分别为 75.24%、69.83% 和 76.08%, 其余指标的贡献率为 1.7%~32.47%; F_3 农业影响因子对 NH_4^+ 和 SO_4^{2-} 的

贡献率为 96.45% 和 67.31%, 而对其它指标的贡献率仅为 0.02%~0.22%。 F_1 、 F_2 和 F_3 的综合贡献率分别为 57.44%、27.62% 和 14.94%, 表明自然演化是地下水主要化学组分的主控因素, 工业、农业

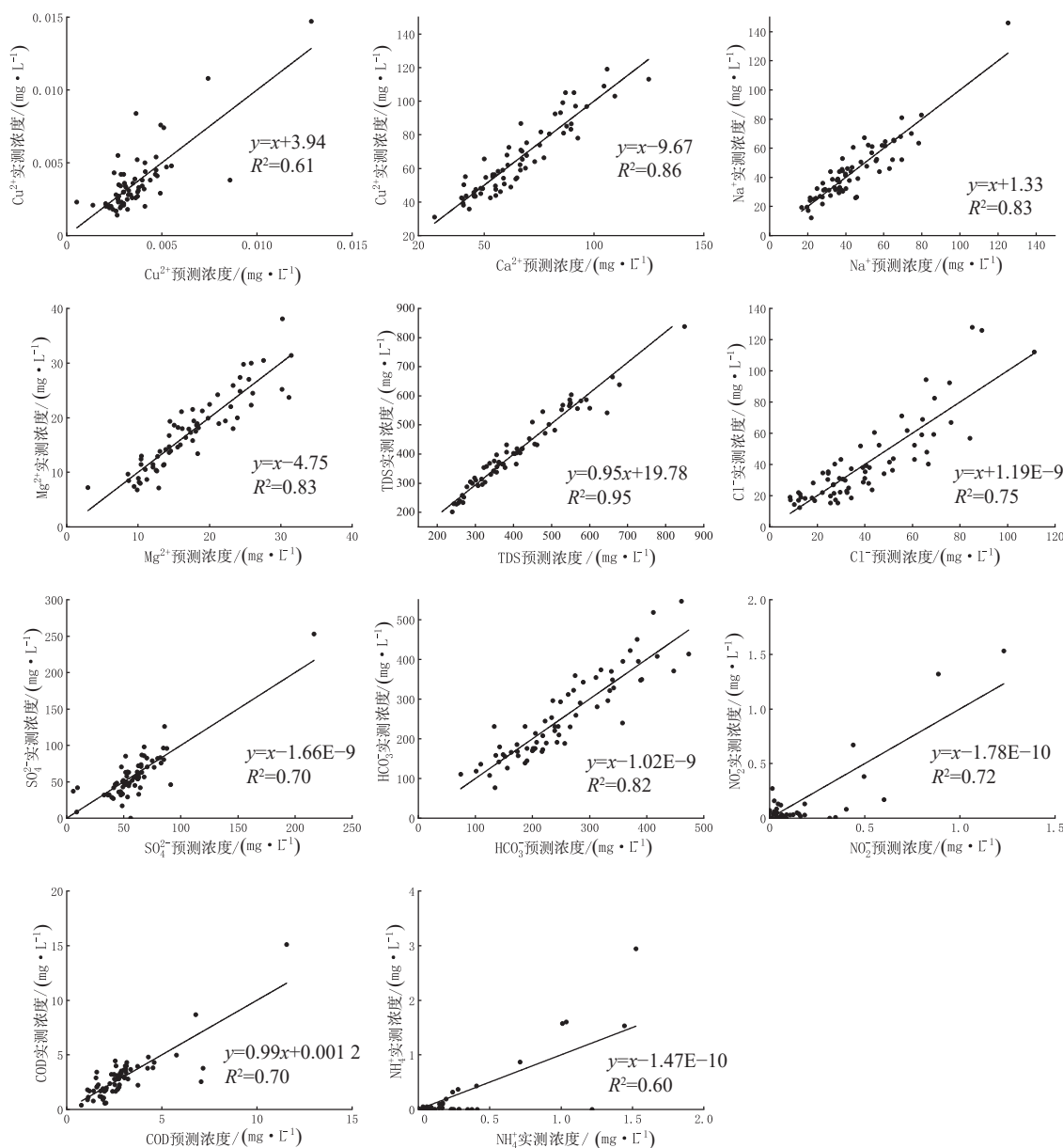


图8 无锡市地下水化学的实测浓度与 MLR 预测浓度对比

Fig. 8 The relation of of measured concentrations of groundwater chemistry and MLR predicted concentration (calculated by common factor water quality indexes based on Multiple Regression Model) in Wuxi City

活动对可能造成地下水污染的化学组分影响较大,且工业活动的影响大于农业活动。

根据主要影响因子对不同元素的贡献率可以看出,在地下水污染评价时应排除自然演化的影响,避免仅对浓度分析而夸大了人类活动的影响程度;在地下水污染防治方面,应充分了解不同影响因子的贡献率,如 NH_4^+ 主要受到农业生产影响,应从农业化肥施用方面进行治理,从而制定科学合理的治理手段;对地下水污染治理目标,应根据不同影响因子合理制定;在地下水资源调查、监

测方面,应重视自然演化的影响,开展原生劣质地下水的调查。

4 结论

(1) 无锡市浅层地下水水化学主要影响因子有自然演化影响因子 F_1 、工业影响因子 F_2 和农业影响因子 F_3 , 它们的方差贡献率分别达到 48.137%、16.040% 和 11.874%。

(2) APCS-MLR 模型计算结果显示, F_1 、 F_2 和

F₃ 影响因子对地下水水化学的贡献率分别为 57.44%、27.62% 和 14.94%, 表明自然演化是地下水化学最主要的影响因子, 且在全区分布, 工业和农业等人类活动的影响小于自然演化, 且分布在不同人类活动集中区。

(3) PCA-APCS-MLR 模型计算所得的预测浓度与实测浓度的线性拟合 $R^2 > 0.7$, 表明两者具有很好的一致性, 获取的影响因子对水化学的贡献率计算较为准确, 也说明该模型对地下水化学影响因子的计算分配具有较好的适用性。

References

- CHEN X D, LU X W. 2017. Source apportionment of soil heavy metals in city residential areas based on the receptor model and geostatistics[J]. *Environmental Science*, 38(6): 2513-2521 (in Chinese with English abstract).
- CHENG D H, CHEN H H, HE J T, LIN J, YANG D G, YU H. 2007. A study of indicators of anthropogenic influence and water-rock interaction in groundwater system in the urban region of Beijing[J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 34(5): 37-42 (in Chinese with English abstract).
- DAR F A, PERRIN J, AHMED S, NARAYANA A C. 2014. Review: carbonate aquifers and future perspectives of karst hydrogeology in India[J]. *Hydrogeology Journal*, 22(7): 1493-1506.
- DUAN W L, HE B, NOVER D, YANG G S, CHEN W, MENG H F, ZOU S, LIU C M. 2016. Water quality assessment and pollution source identification of the eastern Poyang Lake Basin using multivariate statistical methods[J]. *Sustainability*, 8(2): 133.
- GENERAL ADMINISTRATION OF QUALITY SUPERVISION, INSPECTION AND QUARANTINE OF THE PEOPLE'S REPUBLIC OF CHINA, STANDARDIZATION ADMINISTRATION OF THE PEOPLE'S REPUBLIC OF CHINA. 2017. GB/T 14848-2017 Standard for groundwater quality[S]. Beijing: Standards Press of China (in Chinese).
- HUANG S S, XU W W, HE P L, ZHOU Q, LI W B, HE X X. 2023. Distribution characteristics and pollution evaluation of nutrient salts in typical wetland sediment in Huai'an, Jiangsu Province[J]. *East China Geology*, 44(3): 323-332.
- JIN Y, JIANG Y H, ZHOU Q P, LEI T, JIA J Y, YANG G Q. 2021. Evolution characteristics and genesis of shallow groundwater in Lücheng area of Danyang City[J]. *East China Geology*, 42(4): 475-482 (in Chinese with English abstract).
- JIANG Y H, ZHOU Q P, NI H Y, CHEN L D, CHENG H Q, LEI M T, GE W Y, MA T, SHI B, CHENG Z Y, DUAN X J, SU J W, ZHU J Q, XIU L C, XIANG F, ZHU Z M, FENG N Q, XIE Z S, TAN J M, PENG K, GUO S Q, FU Y P, REN H Y, SUN J P, YANG Q, ZHU J L, WANG D H, LI M H, LIU G N, FAN C Z, WANG X F, SHI Y J, WANG H M, DONG X Z, CHEN H Y, HAO S F, DENG Y M, LI Y, XIAO Z Y, YANG H, LIU L, JIN Y, ZHANG H, MEI S J, QI Q J, LÜ J S, HOU L L, CHEN G, CHEN Z, JIA Z Y. 2023. Progress of environmental geological investigation and research in the Yangtze River Economic Zone[J]. *East China Geology*, 44(3): 239-261.
- LI J X, SU C L, XIE X J, WANG Y X. 2010. Application of multivariate statistical analysis to research the environment of groundwater: a case study at Datong Basin, northern China[J]. *Geological Science and Technology Information*, 29(6): 94-100 (in Chinese with English abstract).
- LI L, WANG M, XING H X, GE W Y, JIA J Y, YU C. 2019. Risk assessment of phreatic water pollution in Wuxi City based on AHP-DRASTIC evaluation model[J]. *Journal of Hefei University of Technology (Natural Science)*, 42(3): 310-314 (in Chinese with English abstract).
- LI L, XING H X, GONG J S, WANG H S, ZHOU K E, ZHU Y X, DENG T T. 2022. Hydrochemical characteristics and formation mechanism of groundwater in northern Taihu Lake Basin[J]. *East China Geology*, 43(2): 217-226 (in Chinese with English abstract).
- LIN C Q, HU G R, YU R L, YANG Q L, YU W H. 2016. Pollution assessment and source analysis of heavy metals in offshore surface sediments from Jiulong River[J]. *China Environmental Science*, 36(4): 1218-1225 (in Chinese with English abstract).
- MAO H R, WANG G C, LIAO F, SHI Z M, HUANG X J, LI B, YAN X. 2022. Geochemical evolution of groundwater under the influence of human activities: a case study in the southwest of Poyang Lake Basin[J]. *Applied Geochemistry*, 140: 105299.
- MENG L, ZUO R, WANG J S, YANG J, TENG Y G, ZHAI Y Z, SHI R T. 2017. Quantitative source apportionment of groundwater pollution based on PCA-APCS-MLR[J]. *China Environmental Science*, 37(10): 3773-3786 (in Chinese with English abstract).
- NESHAT A, PRADHAN B, DADRAS M. 2014. Groundwater vulnerability assessment using an improved DRASTIC method in GIS[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 86: 74-86.
- QIN Z Y, GAO R Z, ZHANG S, JIA D B, DU D D, ZHANG A

- L, WANG X X. 2019. Source identification of groundwater chemical components in the Salt Lake Basin of Northwest Arid Area, China[J]. *Research of Environmental Sciences*, 32(11): 1790-1799 (in Chinese with English abstract).
- QIN X Y, LI Y H, SUN Y, PENG M Z. 2017. Source apportionment of soil heavy metals in Typically Agricultural Region around Chaohu Lake, China[J]. *Earth and Environment*, 45(4): 455-463 (in Chinese with English abstract).
- QIN R G, WU Y Q, XU Z G, XIE D, ZHANG C. 2013. Assessing the impact of natural and anthropogenic activities on groundwater quality in coastal alluvial aquifers of the lower Liaohe River Plain, NE China[J]. *Applied Geochemistry*, 31: 142-158.
- SHI W C, GU Z G, FENG Y, WU Y N, WU X R, ZHANG Z S. 2020. Source Apportionment of Heavy Metals in Sediments with Application of APCS-MLR Model in Baoxiang River[J]. *Environmental Science & Technology*, 43(10): 51-59.
- THURSTON G D, SPENGLER J D. 1985. A quantitative assessment of source contributions to inhalable particulate matter pollution in Metropolitan Boston[J]. *Atmospheric Environment* (1967), 19(1): 9-25.
- TONG F. 2012. Contamination characteristics and health risk assessment of heavy metals in urban dusts of Hefei city[D]. Hefei: Hefei University of Technology (in Chinese with English abstract).
- XU N Z, LIU H Y, WEI F, YANG H, GE W Y. 2015. Study on the environmental isotope compositions and their evolution in groundwater of Yoco port in Jiangsu Province, China[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 35(12): 3862-3871 (in Chinese with English abstract).
- XU T, WANG F, GUO Q, NIE X Q, HUANG Y P, CHEN J. 2014. Transfer characteristic and source identification of soil heavy metals from Water-Level-Fluctuating zone along Xiangxi River, Three-Gorges Reservoir Area[J]. *Environmental Science*, 35(4): 1502-1508 (in Chinese with English abstract).
- YANG P H, YUAN D X, YE X C, XIE S Y, CHEN X B, LIU Z Q. 2013. Sources and migration path of chemical compositions in a karst groundwater system during rainfall events[J]. *Chinese Science Bulletin*, 58(20): 2488-2496.
- YAY O D, ALAGHA O, TUNCEL G. 2008. Multivariate statistics to investigate metal contamination in surface soil[J]. *Journal of Environmental Management*, 86(4): 581-594.
- ZHANG X M. 2007. Source apportionment of inhalable particulates in air of Xiamen city[J]. *Environmental Science & Technology*, 30(11): 51-54, 69 (in Chinese with English abstract).
- ZHENG T, JIAO T L, HU B, GONG J S, HOU X M, WANG H S. 2021. Hydrochemical characteristics and origin of groundwater in the Central Guohe River Basin[J]. *Environmental Science*, 42(2): 766-775 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 陈秀端, 卢新卫. 2017. 基于受体模型与地统计的城市居民区土壤重金属污染源解析[J]. *环境科学*, 38(6): 2513-2521.
- 程东会, 陈鸿汉, 何江涛, 林健, 杨德贵, 蔚辉. 2007. 北京城近郊区地下水人为影响和水-岩作用指示性指标研究[J]. *水文地质工程地质*, 34(5): 37-42.
- 黄顺生, 许伟伟, 何培良, 周强, 李文博, 贺新星. 2023. 江苏省淮安市典型湿地底泥营养盐分布特征及污染评价[J]. *华东地质*, 44(3): 323-332.
- 姜月华, 周权平, 倪化勇, 陈立德, 程和琴, 雷明堂, 葛伟亚, 马腾, 施斌, 程知言, 段学军, 苏晶文, 朱锦旗, 修连存, 向芳, 朱志敏, 冯乃琦, 谢忠胜, 谭建民, 彭轲, 郭盛乔, 伏永朋, 任海彦, 孙建平, 杨强, 朱继良, 王东辉, 李明辉, 刘广宁, 范晨子, 王新峰, 史玉金, 王寒梅, 董贤哲, 陈焕元, 郝社峰, 邓娅敏, 李云, 肖则佑, 杨海, 刘林, 金阳, 张鸿, 梅世嘉, 齐秋菊, 吕劲松, 侯莉莉, 陈刚, 陈孜, 贾正阳. 2023. 长江经济带环境地质调查研究进展[J]. *华东地质*, 44(3): 239-261.
- 金阳, 姜月华, 周权平, 雷廷, 贾军元, 杨国强. 2021. 丹阳市吕城地区浅层地下水演化特征及成因[J]. *华东地质*, 42(4): 475-482.
- 李俊霞, 苏春利, 谢先军, 王焰新. 2010. 多元统计方法在地下水环境研究中的应用——以山西大同盆地为例[J]. *地质科技情报*, 29(6): 94-100.
- 李亮, 王敏, 邢怀学, 葛伟亚, 贾军元, 余成. 2019. 基于 AHP-DRASTIC 评价模型的无锡市潜水污染风险评价[J]. *合肥工业大学学报(自然科学版)*, 42(3): 310-314.
- 李亮, 邢怀学, 龚建师, 王赫生, 周锴铎, 朱应新, 邓婷婷. 2022. 太湖流域北部地下水化学特征及成因分析[J]. *华东地质*, 43(2): 217-226.
- 林承奇, 胡恭任, 于瑞莲, 杨秋丽, 余伟河. 2016. 九龙江近岸表层沉积物重金属污染评价及来源解析[J]. *中国环境科学*, 36(4): 1218-1225.
- 孟利, 左锐, 王金生, 杨洁, 滕彦国, 翟远征, 石榕涛. 2017. 基于 PCA-APCS-MLR 的地下水污染源定量解析研究[J]. *中国环境科学*, 37(10): 3773-3786.
- 秦子元, 高瑞忠, 张生, 贾德彬, 杜丹丹, 张阿龙, 王喜喜. 2019. 西北旱区盐湖盆地地下水化学组分源解析[J]. *环境科学研究*, 32(11): 1790-1799.
- 秦先燕, 李运怀, 孙跃, 彭苗枝. 2017. 环巢湖典型农业区土壤

- 重金属来源解析[J]. 地球与环境, 45(4): 455-463.
- 史文昌, 古正刚, 冯燕, 吴雅楠, 伍胤融, 张志尚. 2020. 基于APCS-MLR的宝象河沉积物重金属污染源解析[J]. 环境科学与技术, 43(10): 51-59.
- 童芳. 2012. 合肥城区地表灰尘重金属污染特征及健康风险评估研究[D]. 合肥: 合肥工业大学.
- 许乃政, 刘红樱, 魏峰, 杨辉, 葛伟亚. 2015. 江苏洋口港地区地下水的环境同位素组成及其形成演化研究[J]. 环境科学学报, 35(12): 3862-3871.
- 胥焘, 王飞, 郭强, 聂小倩, 黄应平, 陈俊. 2014. 三峡库区香溪河消落带及库岸土壤重金属迁移特征及来源分析[J]. 环境科学, 35(4): 1502-1508.
- 杨平恒, 袁道先, 叶许春, 谢世友, 陈雪彬, 刘子琦. 2013. 降雨期间岩溶地下水化学组分的来源及运移路径[J]. 科学通报, 58(18): 1755-1763.
- 张学敏. 2007. 厦门市大气可吸入颗粒物源解析的研究[J]. 环境科学与技术, 30(11): 51-54, 69.
- 郑涛, 焦团理, 胡波, 龚建师, 侯香梦, 王赫生. 2021. 涡河流域中部地区地下水化学特征及其成因分析[J]. 环境科学, 42(2): 766-775.
- 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. 2017. GB/T 14848-2017 地下水质量标准[S]. 北京: 中国标准出版社.

Chemical influence factors and contribution rate in shallow groundwater of Wuxi City

LI Liang^{1,2}, ZHOU Kaie^{1,2}, LI Jie^{1,2}, GONG Jianshi^{1,2}, TAN Mengjiao^{1,2}, ZHANG Fei^{1,2},
ZHU Yingxin^{1,2}, LIU Lin^{1,2}, YE Yonghong^{1,2}

(1. Nanjing Center, China Geological Survey, Nanjing 210016, Jiangsu, China; 2. Key Laboratory of Watershed Eco-Geological Processes, Ministry of Natural Resources, Nanjing 210016, Jiangsu, China)

Abstract: Accurate assessment of the chemical factors influencing groundwater is crucial to classify groundwater pollution, select appropriate treatment schemes and set treatment objectives. This study analyzes 67 groups of shallow groundwater samples from Wuxi city in Jiangsu Province by using mathematical statistics, factor analysis, and an absolute factor score-multiple linear regression model. The findings are as follows: Firstly, regarding the quality grade of shallow groundwater in Wuxi, Class III water constitutes 53.7% of the samples, while ultra-Class III water accounts for 46.3%. The ions exceeding standards are COD, NH_4^+ , NO_3^- and SO_4^{2-} in sequence. Secondly, the groundwater can be categorized into 9 types, with $\text{HCO}_3\text{-Ca}\cdot\text{Na}$, $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ and $\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4\text{-Ca}\cdot\text{Na}$ types predominating, representing 76.1% of the total samples. Thirdly, three major chemical influence factors in the groundwater chemical index system—natural evolution (F1), industrial production (F2) and agricultural production (F3)—account for 76.05% of the cumulative variance contribution rate, with their comprehensive contributions being 57.44 %, 27.62 % and 14.94 %, respectively. The results indicate that the measured concentrations of groundwater chemical index closely match the predicted concentrations derived from the absolute factor score and multiple linear regression model, demonstrating the method's effectiveness in analyzing the chemical factors influencing groundwater.

Key words: Wuxi City; shallow groundwater; influence factors; factors analysis; absolute factor score; multiple linear regression