

DOI:10.16788/j.hddz.32-1865/P.2023.04.009

引用格式:刘林,陈琦,赵汝荣,等.人类活动驱动下的高碘地下水成因机制——以福州市为例[J].华东地质,2023,44(4):457-466.(LIU L, CHEN Q, ZHAO R R, et al. The mechanism of high iodine groundwater driven by human activities; a case study of Fuzhou City[J]. East China Geology, 2023, 44(4):457-466.)

人类活动驱动下的高碘地下水成因机制 ——以福州市为例

刘林^{1,2,3}, 陈琦⁴, 赵汝荣⁴, 周迅^{2,3}, 姜月华^{2,3}, 叶永红^{2,3}

(1. 中国地质科学院, 北京 100037; 2. 中国地质调查局南京地质调查中心, 江苏 南京 210016;

3. 自然资源部流域生态地质过程重点实验室, 江苏 南京 210016;

4. 福建省地质环境监测中心, 福建 福州 350001)

摘要: 长期饮用高碘水会引起甲状腺功能障碍, 威胁人体健康。文章以福州市富碘浅层地下水为研究对象, 基于不同土地利用类型区的 42 组地下水样品, 采用统计分析和离子比系数等方法, 研究了地下水中碘的分布特征及高碘地下水成因机制。结果表明: 福州市地下水中碘含量为 0.008 0~0.52 mg/L, 平均值为 0.10 mg/L, 呈现出内陆低-沿海高、山地低-平原高、农村低-城市高的分布特征。高碘地下水样品占 19.1%, 主要分布在闽江沿岸主城区、福清东部及平潭等滨海地区。第四纪形成的冲海积沉积物是区内地下水中碘富集的天然物质基础, 还原的地下水环境、较长的滞留时间是利于地下水中碘富集的自然条件。高碘地下水的空间分布与人口密度高的地区高度耦合, 揭示了人类活动排放的高碘生活污水是该地区高碘地下水形成的重要驱动因素。

关键词: 高碘地下水; 成因机制; 人类活动; 福州市

中图分类号: P641; X523

文献标识码: A

文章编号: 2096-1871(2023)04-457-10

碘是元素周期表中ⅦA族卤素家族的一种非金属元素, 是人体必需的一种微量元素。碘在人体中主要以甲状腺素的形式存在, 其缺乏和过量都会诱发甲状腺功能障碍疾病^[1-2], 如甲状腺肿、克汀病等。人体中的碘主要通过食物和饮水摄入^[3], 相较于食物, 饮水中的碘更易被人体吸收^[4]。近30年来, 我国为了预防碘缺乏病, 普遍采用食盐加碘措施。另一方面, 碘过量引发的疾病, 尤其是高碘水源型甲状腺功能障碍疾病日益凸显, 已经成为全球关注的公共卫生问题^[5]。根据《GB/T 19380—2003 水源性高碘地区和地方性高碘甲状腺肿病区的划定》^[6]标准, 地下水中碘含量超过 0.15 mg/L 时, 即

为高碘水, 不适合作为饮用水源。高碘地下水在我国 12 个省份均有分布, 主要分布在华北平原、干旱内陆盆地和东南沿海地区, 近 4 000 万人的健康受其威胁^[7-8]。

充分了解高碘地下水分布及成因机制, 对于从源头预防高碘水源型甲状腺疾病具有重要科学意义, 这也是各国学者一直高度关注的科学问题^[9-17]。目前已有研究一致认为: 地下水系统中碘的来源与第四系松散层中较高含量的富碘有机质有关, 强还原条件和微生物介导下富碘有机质或沉积物的还原性溶解, 被认为是原生高碘地下水的主要形成机制^[1, 18-19]。虽然原生高碘劣质水成因研究已经颇为

* 收稿日期: 2022-12-22 修订日期: 2023-06-07 责任编辑: 袁静

基金项目: 中国地质调查局“长江下游及淮河流域水文地质与水资源调查监测(编号: DD20221756)”、“长江经济带地质资源环境综合评价(编号: DD20190260)”、“东南地区地下水污染调查与综合评价(编号: 1212011121168)”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: 刘林, 1986 年生, 男, 高级工程师, 博士研究生, 主要从事地下水污染防治研究工作。Email: liulincgs@126.com。

通信作者简介: 周迅, 1978 年生, 男, 教授级高级工程师, 博士, 主要从事地下水污染防治研究工作。Email: weapon341@163.com。

深入,但是人类活动驱动下的高碘地下水形成机制的研究还较为缺乏。已有研究证实富含碘的医疗废水、生活污水的排放也是地下水中碘的来源之一^[20-22]。因此,开展原生地质环境背景和人类活动双重驱动下的高碘地下水形成机制研究,对地下水污染防控和饮水安全保障具有重要的科学意义。福州市是我国典型的东部滨海大城市,其人口主要聚集居住在滨江滨海平原区。周迅等^[23]报道了福州市高强度的人类生活污水排放和农业活动与区内近半数地下水的硝酸盐化(硝酸盐毫克当量在阴离子中的占比>25%)密切相关,指示了该区地下水受到了相当程度的人为污染,同时还发现了福州市范围内浅层地下水样品中近五分之一为高碘地下水。本文围绕福州市地下水中碘的分布规律展开研究,揭示高碘地下水的成因机制,为区域地下水资源保护提供技术支撑。

1 研究区概况

福州市(以下均指福州行政区全域)地处我国大陆东南部,闽江下游及沿海地区,包括鼓楼区、台江区、仓山区、晋安区、马尾区、长乐区 6 个区,闽侯县、连江县、罗源县、闽清县、永泰县、平潭县 6 个县,代管福清市 1 个县级市,总面积 12 200 km²。东隔台湾海峡与台湾相望,南与泉州市和莆田市、西与三明市、北与南平市和宁德市分别接壤。福建省第一大河流闽江自西向东穿过福州市汇入大海。全境地势西高东低,地貌类型自西北向东南依次是山地、丘陵、盆地、平原、滩涂。研究区气候总体上为亚热带海洋性季风气候,多年平均气温 16~20℃,多年平均降雨量为 1 431.93 mm。区内浅层地下水以松散岩类孔隙水为主,主要赋存于平原和山麓沟谷的第四系冲海积层及残坡积层中,另有部分地区存在埋藏较浅的基岩裂隙水。福州盆地沉积环境为内海湾沉积环境,第四纪间冰期,气候偏暖,海平面上升,原来河口段被海水淹没,经历了 4 次海侵。第四系松散沉积层成因类型为冲积、湖积和海积,厚 30~40 m,上部为中—上全新统长乐组冲海积灰色淤泥与砂质、粉砂互层的沉积,是浅层地下水主要的赋存层位^[24]。

福州市是福建省省会城市,是一个较大规模的现代化沿海开放城市,是该省的政治、经济、文化中心。福州市行政区内人口主要集中在沿江平原区,人口密

度(1 386 人/km²)大。福州市地表水资源丰富,主要江河有闽江、大樟溪、敖江、梅溪、龙江等。但随着极端干旱天气频发,地表水的持续供给能力明显受限,地下水资源对饮水安全的应急保障作用日益凸显。

2 样品采集与分析测试

地下水样品采集按照《水文地质手册》^[25]的规范流程开展。2018 年 1 月至 3 月,从研究区的村镇用地、城市用地、农业用地和工业用地 4 种不同土地类型区的浅层地下水井中采集了 42 组样品(图 1),井深 3~10 m。采样前,采样设备及采样瓶均用待采集的水冲洗 3~5 次,所有样品装入聚乙烯塑料瓶密封保存。野外样品采集时,用于阴离子测试分析的样品现场采用滤纸过滤,用于阳离子测试分析的样品采用 HNO₃ 酸化至 pH<2。野外现场测定了地下水中的溶解氧(DO)、水温(T)、电导率(EC)、氧化还原电位(Eh)、浊度、总溶解固体(TDS)和 pH 值等指标。溶解氧采用 JPBJ-608 型便携式溶解氧分析仪即时测定,水温、EC、Eh 和 TDS 采用防水笔式电导率测定仪测定,浊度采用 WGZ-B 型便携式浊度计测定,pH 值采用 HI8424 型便携式酸度计测定。

水化学数据测试在国土资源部华东地质矿产监督检测中心完成。Cl⁻、SO₄²⁻、NO₃⁻、NO₂⁻ 和 F⁻ 等离子采用 Dionex-2500 型离子色谱仪测定,SO₄²⁻ 检出限为 0.08 mg/L,NO₂⁻ 检出限为 0.004 mg/L,Cl⁻、NO₃⁻、F⁻ 的检出限均为 0.02 mg/L;K⁺、Na⁺、Ca²⁺、Mg²⁺、偏硅酸(H₂SiO₃)采用 ICAP 6300Duo 型电感耦合等离子体光谱仪测定,其中 K⁺、Na⁺、Mg²⁺、Ca²⁺、H₂SiO₃ 的检出限分别为 0.02 mg/L、0.005 mg/L、0.013 mg/L、0.011 mg/L、0.02 mg/L;I⁻ 采用 ICAP Q 型电感耦合等离子体质谱仪测定,检出限为 1 μg/L;HCO₃⁻ 采用滴定法测定,检出限为 3 mg/L;NH₄⁺ 采用 Auto Analyzer3 型全自动连续流动分析仪测定,检出限为 0.02 mg/L;化学需氧量(COD_{Mn},以 O₂ 计)采用高锰酸钾法滴定法测定,检出限为 0.03 mg/L。

3 结果与分析

3.1 地下水水化学特征

福州市浅层地下水的主要水化学指标统计特征如表 1 所示。地下水 pH 值为 5.46~7.76,平均

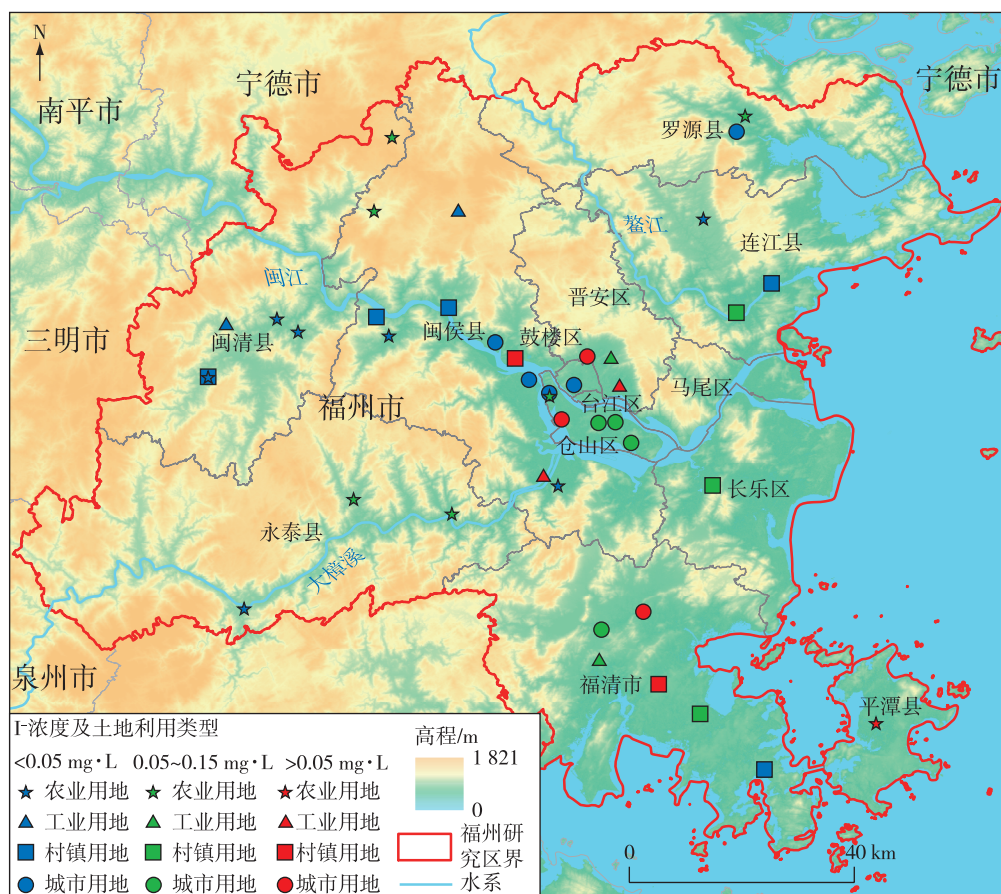


图1 福州市地下水采样点分布图

Fig. 1 The sampling sites of groundwater in Fuzhou City

值为 6.6, 呈现弱酸性, 大部分满足 I—III 类水的限值要求 (pH 值 6.5~8.5) (《GB/T 14848—2017 地下水质量标准》^[26])。TDS 为 51.3~538 mg/L, 平均值 255 mg/L, 均为淡水。地下水离子浓度平均值关系为 $\text{Na}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+}$, $\text{HCO}_3^- > \text{NO}_3^- > \text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-}$, 其中阳离子以 Na^+ 、 Ca^{2+} 为主, 阴离子以 HCO_3^- 、 NO_3^- 为主。阳离子的毫克当量百分比平均值的排列顺序为 $\gamma(\text{Na}^+) > \gamma(\text{Ca}^{2+}) > \gamma(\text{Mg}^{2+})$, 即 Na^+ 在浅层地下水的阳离子中是明显占优势的, 提示福州市浅层地下水与海相沉积物之间发生了水岩相互作用^[27]。除 pH 值外, 其他指标的变异系数均在 50% 以上, 特别是 I^- 、Eh 和 COD_{Mn} 的变异系数在 100% 以上, 可能指示了这几项水化学指标受到人类活动的影响^[28]。

根据舒卡列夫分类法划分了研究区地下水水化学类型, 并绘制了 Piper 三线图 (图 2)。研究区内的低山丘陵和山间河谷地带地下水径流主要受到地

形控制, 径流短而快, 水化学类型简单, 主要为 $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ 型和 $\text{HCO}_3\text{-Ca}\cdot\text{Na}$ 型。由山地过渡至红土台地区, 地下水的 TDS 升高, 水化学类型变得更为复杂, 主要为 $\text{HCO}_3\text{-Na}\cdot\text{Ca}$ 型和 $\text{HCO}_3\cdot\text{Cl-Na}\cdot\text{Ca}$ 型。在滨海平原区, 地下水的 TDS 自山前向下游河口地带逐渐升高, 水化学类型为 $\text{HCO}_3\text{-Ca}\cdot\text{Na}$ 型、 $\text{Cl}\cdot\text{HCO}_3\text{-Na}\cdot\text{Ca}$ 型和少量 Cl-Na 型。按照地下水样点处土地利用类型和 I^- 浓度的大小对样点进行了分类 (图 2), 其中农业用地的地下水样点多数落在 HCO_3^- 占比 50% 以上的区域, 而来自城市用地、工业用地和村镇用地的地下水样点多数分布在 $\text{SO}_4^{2-} + \text{Cl}^-$ 占比 50% 以上的区域。但不同土地利用类型的样点在 Piper 图中相互交织, 并无明显的界线, 指示了土地利用类型虽然影响了地下水, 但其主要水化学演变还受径流强度、含水介质等自然因素控制。此外, 从图 2 中还可以看出, 高碘和非高碘地下水样点混在一起, 并没有随着地下水化学演化而变化的趋

势,这可能暗示了地下水中碘的增加并非主要受到自然因素控制,而是主要受到人为因素影响。

表 1 浅层地下水主要水化学指标统计表

Table 1 The statistics of main hydrochemical indicators of shallow groundwater

指标	最大值	最小值	平均值	变异系数/%
Na ⁺	73.2	3.71	27.8	61.92
Ca ²⁺	77.2	1.79	26.6	72.39
Mg ²⁺	17.8	0.62	6.90	65.31
Cl ⁻	123	2.13	34.0	77.30
SO ₄ ²⁻	73.5	0.080	22.2	86.83
HCO ₃ ⁻	312	3.10	87.1	77.70
NO ₃ ⁻	166	1.57	44.9	92.49
I ⁻	0.52	0.0080	0.10	112.02
TDS	538	51.3	255	53.19
pH	7.76	5.46	6.60	9.14
Eh	80.8	-58.6	16.0	211.91
COD _{Mn}	3.44	0.23	0.60	110.03

注:表中阴、阳离子单位为 mg/L, Eh 单位为 mV, pH 为无量纲。

3.2 地下水中碘的分布特征

研究区地下水中 I⁻ 浓度为 0.008 0~0.52 mg/L, 平均值 0.10 mg/L, 变异系数 112.0%, 空间分布不均。I⁻ 含量超过 0.15 mg/L 的高碘地下水样品共 8 个, 占总数的 19.1%, 主要分布于闽侯县城以东的福州市主城区(图 1), 其中, 江心洲和闽江两岸地区, 即鼓楼、台江、苍山三区最为集中。福清市以东一带地下水 I⁻ 含量也较高。此外, 连江、罗源县城内采集的地下水样品中 I⁻ 含量也达到或接近 0.15 mg/L。总体来看, 研究区浅层地下水中碘呈现出内陆低-沿海高、山地低-平原高、农村低-城市高的分布特征。这种分布特征表明除了沉积环境外, 土地利用类型对地下水中碘的富集也存在不可忽略的影响。

潜水水位埋深越大, 就意味着包气带厚度越大, 其抵御人为污染的能力越强^[29]。一般情况下, 随着水位埋深的增加, 地下水环境的还原性会增强, 有利于原生碘的在地下水中富集。研究区地下水中碘含量在垂向上分布如图 3 所示, 随着地下水

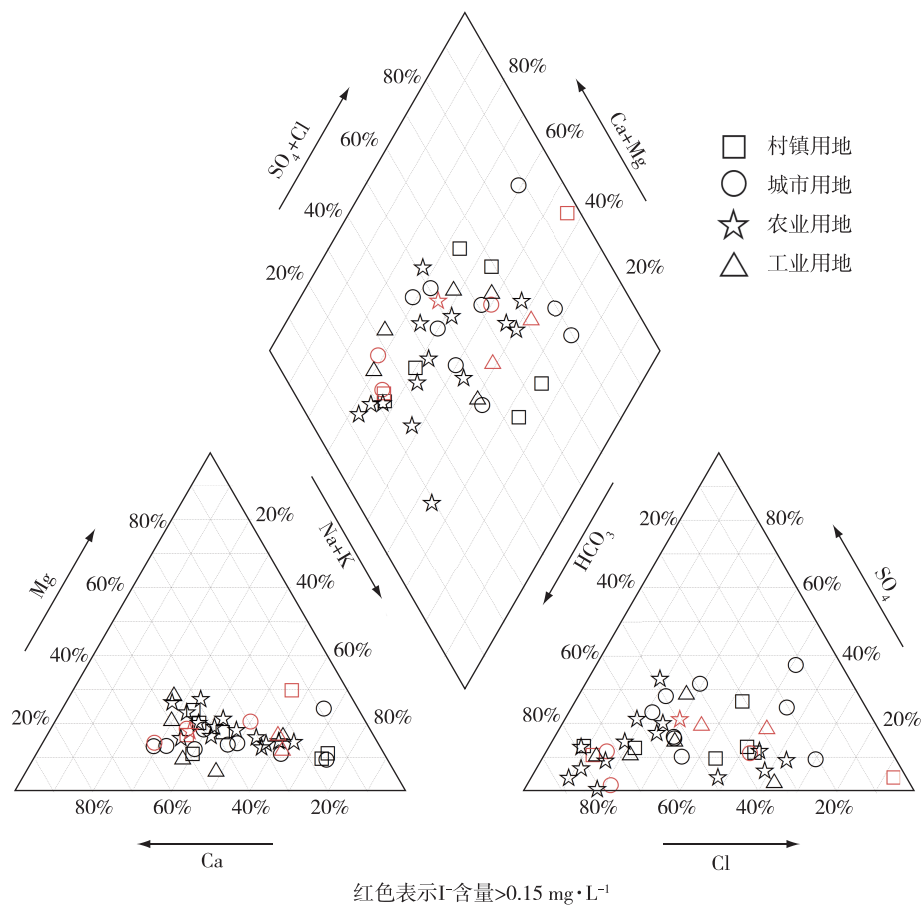


图 2 研究区地下水 Piper 三线图

Fig. 2 The Piper diagram of groundwater in the study area

位埋深增加,碘含量呈现出两个明显不同的变化趋势:一是碘含量沿着绿色虚线变化的趋势,这可以解释为,随水位埋深增加,地下水还原性环境增强,含水介质中碘的还原性溶解导致地下水中碘浓度增加^[1],这种变化趋势可以归属为自然演化;二是沿着蓝色线变化的趋势,地下水样点中碘含量增加幅度较自然演化异常增大,且所有高碘地下水样点均分布在该变化趋势线上。这种异常增加的趋势可能是在自然演化的基础上叠加了人类污染的影响。

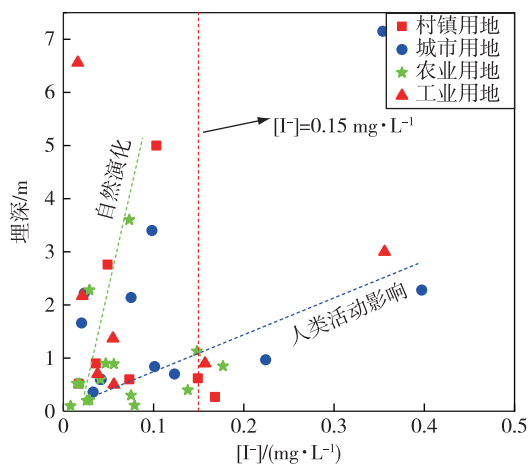


图3 地下水中碘与水位埋深关系图

Fig. 3 The correlation diagram of $[I^-]$ in groundwater and groundwater depth

4 高碘地下水的成因机制

4.1 地下水中碘的物质来源

地下水中碘的来源有天然污染和人为污染两种。天然地质背景下,痕量的碘分散于岩石和土壤中,当岩土介质中有机质含量较高时,在吸附作用下能够形成岩土介质中碘的富集^[1],并在有利的条件下经过水岩相互作用释放至地下水中。人为污染来源的碘主要来自生活废水、医疗废水,尤其是在长期使用加碘食盐的地区,人口密度越大生活废水中碘含量越高。这些人为排放于环境中的碘,经过地表水与地下水的交互作用及土壤的入渗过程进入地下水。研究区地处沿海地区,经过海水改造的含水层岩土介质往往含有较高含量的碘,并在有利条件下释放至地下水中^[30],这就是研究区地下水中碘主要的天然来源。此外,由于海水中碘含量高,滨海地区地下水受到海水或海相沉积水混合作

用的影响,也会导致碘含量升高。

离子比例系数可以用来判别地下水中 I^- 的来源。例如,受海相沉积水影响较大的地下水中 I^- 与 Cl^- 的含量一般呈正相关关系^[31-32],原始海水中的 I^- 浓度一般为 $13\sim 75\ \mu\text{g/L}$,典型值为 $60\ \mu\text{g/L}$ ^[33]。福州市浅层地下水中 I^- 含量超过 $60\ \mu\text{g/L}$ 的样品数量为 20 个,占总数的 46.5%,表明该区地下水中的碘存在高异常的输入。张媛静等^[31]研究沧州地区海相沉积层中地下水的碘时,发现深层地下水中 $[I^-]/[Cl^-]$ 值为 $(3\sim 6)\times 10^{-4}$ 。赵振宏等^[32]研究发现沧州高碘浅层地下水中 $[I^-]/[Cl^-]$ 值为 $(2.3\sim 4)\times 10^{-4}$ 。王妍妍等^[9]研究发现河套平原高碘地下水中 $[I^-]/[Cl^-]$ 的典型值为 4×10^{-4} 左右。本次研究发现福州市地下水中 $[I^-]/[Cl^-]$ 值为 $4\times 10^{-4}\sim 2.2\times 10^{-3}$,平均值 4×10^{-3} 。该地区高碘地下水的 $[I^-]/[Cl^-]$ 值为 $3.2\times 10^{-3}\sim 1.3\times 10^{-2}$,平均值 6.8×10^{-3} ,高于张媛静等^[31]、赵振宏等^[32]和王妍妍等^[9]报道的原生高碘地下水中 $[I^-]/[Cl^-]$ 值 1~2 个数量级,表明研究区地下水中的 I^- 除了来源于海水或海相沉积水混合和含水介质碘的溶解释放外,还有其他来源。在图 4 中,来自农业用地的地下水样品投影点沿着绿线分布,农业活动不会带来碘的额外输入,代表了自然条件下的趋势线;来自村镇、城市及工业用地的地下水样品投影点主要沿蓝线展布,这些区域人口密集,明显受到了人为污染的影响,代表叠加了人类活动影响的趋势线。

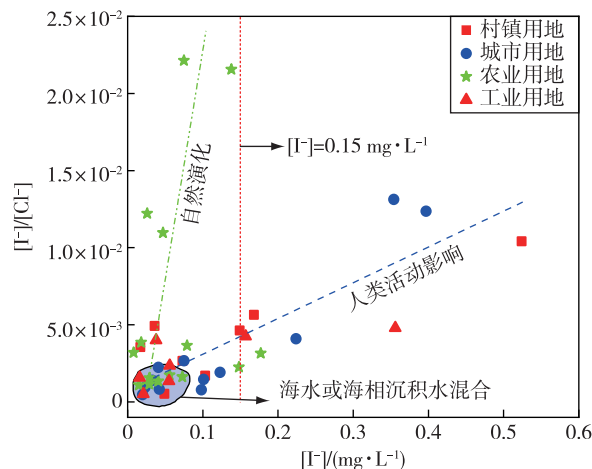


图4 地下水中 $[I^-]/[Cl^-]$ 与 $[I^-]$ 的关系图

Fig. 4 The correlation diagram of $[I^-]/[Cl^-]$ and $[I^-]$ in groundwater

在滨海地区,海水中的碘很容易被土壤、沉积物所吸附。一般认为沿海地区海陆交互带的高碘地下水中碘主要来源于海水或海相沉积物的分解^[8]。虽然研究区属于滨海地区,高碘地下水中碘本应主要来源于海水或者海相沉积物,但根据上述分析,研究区高碘地下水中碘存在其他高异常的输入,且与人类活动有关,暗示了该地区地下水中存在人类活动污染输入的碘。

4.2 地下水中碘的富集条件

研究区地下水中碘的分布具有内陆低-沿海高的特点,这表明滨海地区富碘的沉积物是地下水中碘富集一个重要条件。此外,地下水中碘的富集还与氧化还原环境、地下水径流条件等赋存环境关系十分密切。研究区地下水中 I^- 含量总体呈现随着 Eh 的减小而增加的趋势(图 5),当 $[I^-] < 0.15 \text{ mg/L}$ 时,地下水 I^- 含量与 Eh 的负相关关系更为明显,这与曾昭华等^[4]在江汉平原、鄱阳湖平原和吉林省东部所做的地下水碘含量与氧化还原环境的对比研究结果是一致的,即还原环境有利于碘在地下水中富集。然而,当 $[I^-] > 0.15 \text{ mg/L}$ 时则两者负相关关系较弱,这种偏离了相关性规律的异常分布暗示着高碘地下水受到了人类活动的影响。此外,表征地下水滞留时间的离子比系数 $\gamma(Cl^-)/\gamma(SO_4^{2-})$ 与 $[I^-]$ 关系图(图 6)表明,更长的滞留时间有利于地下水中 I^- 的富集^[4]。

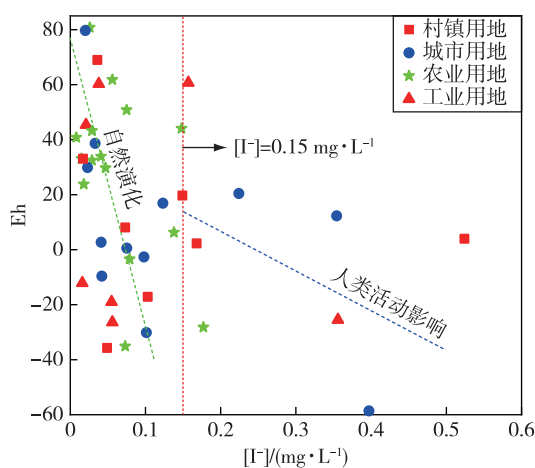


图 5 地下水 Eh 与 $[I^-]$ 的关系图

Fig. 5 The correlation diagram of Eh and $[I^-]$ in groundwater

综上所述,滨海地区富碘的沉积物是研究区地下水中碘富集的重要物质基础,而还原的地下水环境、较长的滞留时间是影响研究区地下水中 I^- 富集的自然条件,此外高碘地下水中 I^- 含量高异常是由于叠加了人类活动污染影响。

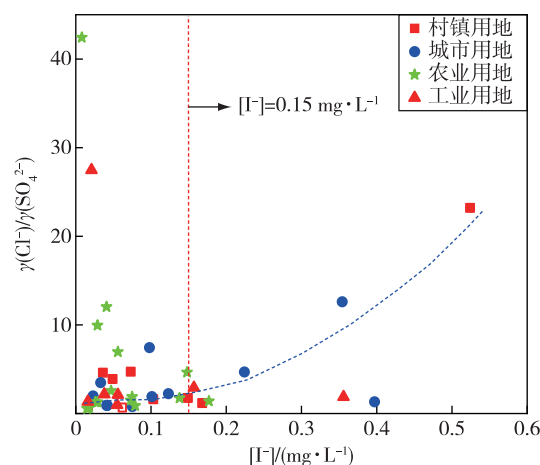


图 6 地下水时间滞留系数与 $[I^-]$ 的关系

Fig. 6 The correlation diagram of $\gamma(Cl^-)/\gamma(SO_4^{2-})$ and $[I^-]$ in groundwater

4.3 人口密度与高碘地下水分布的耦合

调查显示当地居民已有二十多年食用加碘盐的历史。在普遍食用碘盐之前的 1994 年,福州市学龄儿童尿碘中位数为 $57 \mu\text{g/L}$ ^[34];采用加碘食盐后,2011 年学龄儿童尿碘中位数为 $135.43 \sim 232.06 \mu\text{g/L}$,部分超出人体正常的尿碘水平($100 \sim 199 \mu\text{g/L}$)^[35]。按样点处土地利用类型进行分类,处于城市和农村人口密集区内的地下水中 I^- 含量平均值(分别为 0.14 mg/L 、 0.13 mg/L)高于其他用地类型区(图 7),尤以村镇居住用地最高。人体尿碘水平一般高于饮用水及环境水源中碘含量 1 个数量级以上^[36],碘随生活污水排放至环境中,也会通过化粪池和污水管道系统渗漏污染地下水^[33-34],导致地下水碘含量异常增加。福州市 2018 年统计年鉴显示:鼓楼区和台江区的每平方公里人口达到 25 000 人以上,明显高于福州市其他地区,同时也是地下水碘含量较高的区域。高碘地下水的空间分布与人口密度高的地区高度耦合,揭示了人类活动排放的高碘生活污水是该地区高碘地下水形成的重要驱动因素。

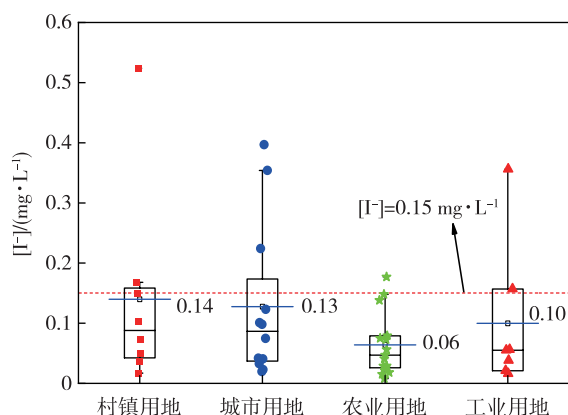


图7 研究区不同土地利用类型地下水中碘含量统计图
Fig. 7 Statistical chart of iodine content in groundwater of different land use types in the study area

5 结论

(1)福州市浅层地下水中碘的含量为0.008 0~0.52 mg/L,平均值0.10 mg/L,并呈现内陆低-沿海高、山地低-平原高、农村低-城市高的分布特点。高碘地下水样品占19.1%,主要分布在闽江沿江的主城区、福清东部和平潭岛等滨海且人口稠密的地区。

(2)第四纪形成的冲海积沉积物是区内地下水中碘富集的天然物质基础,还原的地下水环境、较长的滞留时间是利于地下水中碘富集的自然条件。高碘地下水的空间分布与人口密度高的地区高度耦合,揭示了人类活动排放的高碘生活污水是该地区高碘地下水形成的重要驱动因素。

(3)建议福州市进一步更新城区老旧污水管网、完善农村生活污水管网,增强生活污水处理能力,进而减少生活污水对地下水的污染。

本文初步探索了福州市高碘地下水的成因机制。由于此次采集数据有限,缺乏进一步定量评价自然背景和人类活动输入碘对地下水中碘贡献率的氡氧、碘同位素证据。下一步将系统采集生活污水、含水介质、地下水等样品,获取同位素数据,研究该地区地下水中天然背景成因和生活污染成因碘的比例,量化评价人类活动对地下水影响的程度。

致谢:感谢福建省地质环境监测中心的邱海源、白振炎在样品采集工作中提供的帮助;感谢编

辑和审稿专家提出的宝贵建议,对提升本文语言表达、主题凝练起到了关键作用!

参考文献

- [1] 徐芬,马腾,石柳,等. 内蒙古河套平原高碘地下水的水文地球化学特征[J]. 水文地质工程地质, 2012, 39(5): 8-15.
XU F, MA T, SHI L, et al. Hydrogeochemical characteristics of high iodine groundwater in the Hetao Plain, Inner Mongolia [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2012, 39(5): 8-15.
- [2] 钱坤. 大同盆地高碘地下水系统中胶体影响下的碘富集机理研究[D]. 武汉:中国地质大学(武汉), 2017.
QIAN K. Effects of colloids on iodine enrichment in groundwater of the Datong basin, China[D]. Wuhan: China University of Geosciences (Wuhan), 2017.
- [3] 郑宝山,王滨滨,朱广伟,等. 大气与植物中碘的环境地球化学——综述与新的假说[J]. 地学前缘, 2001, 8(2): 359-365.
ZHENG B S, WANG B B, ZHU G W, et al. Environmental geochemistry of iodine in atmosphere and plant—review and a hypothesis [J]. Earth Science Frontier, 2001, 8(2): 359-365.
- [4] 曾昭华. 地下水中碘的形成及其控制因素[J]. 吉林地质, 1999, 18(2): 30-33, 72.
ZENG S H. The formation of I and its control factors [J]. Jilin Geology, 1999, 18(2): 30-33, 72.
- [5] WANG Y X, LI J X, MA T, et al. Genesis of geogenic contaminated groundwater: As, F and I[J]. Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 2021(24): 2895-2933.
- [6] 国家质量监督检验检疫总局. GB/T 19380—2003 水源性高碘地区和地方性高碘甲状腺肿病区的划定[S]. 2003: 1-8.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of The People's Republic of China. GB/T 19380—2003 Determination and classification of the areas of high water iodine and the endemic areas of iodine excess goiter[S]. 2003: 1-8.
- [7] 周海玲,苏春利,李俊霞. 地表灌溉对沉积含水层中碘迁移释放过程的影响[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2018, 48(6): 1810-1820.
ZHOU H L, SU C L, LI J X. Influence of surface irrigation practices on iodine mobilization in sedimentary aquifers[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2018, 48(6): 1810-1820.

- [8] 薛江凯, 邓娅敏, 杜尧, 等. 长江中游沿岸地下水中有有机质分子组成特征及其对碘富集的指示[J]. 地球科学, 2021, 46(11): 4140-4149.
XUE J K, DENG Y M, DU Y, et al. Molecular characterization of dissolved organic matter (DOM) in shallow aquifer along middle reach of Yangtze River and its implications for iodine enrichment[J]. Earth Science, 2021, 46(11): 4140-4149.
- [9] 王妍妍, 马腾, 董一慧, 等. 内陆盆地区高碘地下水的成因分析: 以内蒙古河套平原杭锦后旗为例[J]. 地学前缘, 2014, 21(4): 66-73.
WANG Y Y, MA T, DONG Y H, et al. The formation of inland-high-iodine groundwater: A case study in Hangjinhouqi, Hetao Plain[J]. Earth Science Frontiers, 2014, 21(4): 66-73.
- [10] TAYLOR P N, ALBRECHT D, SCHOLZ A, et al. Global epidemiology of hyperthyroidism and hypothyroidism[J]. Nature reviews. Endocrinology, 2018, 14(5): 301-316.
- [11] 孙英, 周金龙, 杨方源, 等. 塔里木盆地南缘绿洲带地下水砷氟碘分布及共富集成因[J]. 地学前缘, 2022, 29(3): 99-114.
SUN Y, ZHOU J L, YANG F Y, et al. Distribution and co-enrichment genesis of arsenic, fluorine and iodine in groundwater of the oasis belt in the southern margin of Trim Basin[J]. Earth Science Frontiers, 2022, 29(3): 99-114.
- [12] 罗义鹏, 邓娅敏, 杜尧, 等. 长江中游故道区高碘地下水分布与形成机理[J]. 地球科学, 2022, 47(2): 662-673.
LUO Y P, DENG Y M, DU Y, et al. Occurrence and formation of high iodine groundwater in oxbows of the middle reach of the Yangtze River[J]. Earth Science, 2022, 47(2): 662-673.
- [13] 王焰新, 李俊霞, 谢先军. 高碘地下水成因与分布规律研究[J]. 地学前缘, 2022, 29(3): 1-10.
WANG Y X, LI J X, XIE X J. Genesis and occurrence of high iodine groundwater [J]. Earth Science Frontiers, 2022, 29(3): 1-10.
- [14] 孙英, 周金龙, 梁杏, 等. 塔里木盆地南缘浅层高碘地下水的分布及成因: 以新疆民丰县平原区为例[J]. 地球科学, 2021, 46(08): 2999-3011.
SUN Y, ZHOU J L, LIANG X, et al. Distribution and genesis of shallow high-iodine groundwater in southern margin of Tarim Basin: A case study of plain area in Minfeng County, Xinjiang. Earth Science, 2021, 46(8): 2999-3011.
- [15] 朱沉静, 李俊霞, 谢先军. 大同盆地地下水中碳硫同位素组成特征及其对碘迁移富集的指示[J]. 地球科学, 2021, 46(12): 4480-4491.
ZHU C J, LI J X, XIE X J. Carbon and sulfur isotopic features and its implications for iodine mobilization in groundwater system at Datong Basin, Northern China [J]. Earth Science, 2021, 46(12): 4480-4491.
- [16] 钱永, 张兆吉, 费宇红, 等. 华北平原饮用地下水碘分布及碘盐分区供应探讨[J]. 生态与农村环境学报, 2014, 30(1): 9-14.
QIAN Y, ZHANG Z J, FEI Y H, et al. Spatial distribution of iodine in underground drinking water and discussion on region-specific supply of iodized salt in the North China Plain[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2014, 30(1): 9-14.
- [17] 张媛静, 张玉玺, 向小平, 等. 华北平原典型剖面地下水碘分布及对配碘影响[J]. 水资源保护, 2013, 29(5): 7-9.
ZHANG Y J, ZHANG Y X, XIANG X P, et al. Distribution of iodine in typical sections in North China Plain and its influence on choice of edible salt [J]. Water Resources Protection, 2013, 29(5): 7-9.
- [18] 李俊霞. 大同盆地高碘地下水系统地球化学研究[D]. 武汉: 中国地质大学(武汉), 2014.
LI J X. Geochemistry of high iodine groundwater system of Datong basin, northern china[D]. Wuhan: China University of Geosciences (Wuhan), 2014.
- [19] FUGE R, JOHNSON C C. Iodine and human health, the role of environmental geochemistry and diet, a review[J]. Applied Geochemistry, 2015, 63: 282-302.
- [20] ABDELKADER B, ABDELHAK M, ABDESLAM K, et al. Estimation of pollution load of domestic sewage to Oued bechar (sw algeria) and its impact on the microbiological quality of groundwater [J]. Procedia Engineering, 2012, 33(3): 261-267.
- [21] 孙跃, 刘中刚, 侯香梦, 等. 安徽合肥地区浅层地下水质量评价[J]. 华东地质, 2019, 40(1): 74-80.
SUN Y, LIU Z G, HOU X M, et al. Quality assessment for shallow groundwater in the Hefei area, Anhui Province[J]. East China Geology, 2019, 40(1): 74-80.
- [22] 吕晓立, 刘景涛, 韩占涛, 等. 快速城镇化三角洲地区高碘地下水赋存特征及驱动因素: 以珠江三角洲为例[J]. 环境科学, 2022, 43(1): 339-348.
LÜ X L, LIU J T, HAN Z T, et al. Geochemical characteristics and driving factors of high-iodine groundwater in rapidly urbanized delta areas: a case

- study of the Pearl River Delta[J]. *Environmental Science*, 2022, 43(1): 339-348.
- [23] 周迅, 赵汝荣, 陈琦. 福州市浅层地下水的硝化机制[J]. *水资源保护*, 2015, 33(4): 26-31, 46.
- ZHOU X, ZHAO R R, CHEN Q. Nitrification of shallow groundwater in Fuzhou City, China[J]. *Water Resources Protection*, 2015, 33(4): 26-31, 46.
- [24] 福建省地质调查研究院. 福建省区域地质志[R]. 福州: 福建省地质调查研究院, 2012: 719-791.
- Fujian Institute of Geological Survey. *Regional geology of Fujian Province*[R]. Fuzhou: Fujian Institute of Geological Survey, 2012: 719-791.
- [25] 中国地质调查局. 水文地质手册(第二版)[M]. 北京: 地质出版社, 2012: 504-516.
- China Geological Survey. *Handbook of hydrogeology (2nd edition)* [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2012: 504-516.
- [26] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 14848—2017 地下水质量标准[S]. 2017: 1-14.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of The People's Republic of China, Standardization Administration of China. GB/T 14848—2017 Standard for groundwater quality [S]. 2017: 1-14.
- [27] 刘立才, 陈鸿汉, 杨仪, 等. 苏锡常地区浅层地下水 rNa/rCl 特征及其成因初探[J]. *中国地质*, 2000, 35(1): 117-122.
- LIU L C, CHEN H H, YANG Y, et al. Characteristics and genesis of rNa/rCl in shallow groundwater in the Suzhou-Wuxi-Changzhou region [J]. *Geology in China*, 2000, 35(1): 117-122.
- [28] 刘林, 周迅, 叶永红. 基于多元统计分析的浅层地下水受人为活动影响表征性指标筛选[J]. *资源调查与环境*, 2014, 35(4): 305-310.
- LIU L, ZHOU X, YE Y H. Screening of characteristic indexes for shallow groundwater influenced by human activities using multivariate statistics[J]. *Resources Survey and Environment*, 2014, 35(4): 305-310.
- [29] 钟佐燊. 地下水防污性能评价方法探讨[J]. *地学前缘*, 2005, 12(A1): 3-13.
- ZHONG Z S. A discussion of groundwater vulnerability assessment methods[J]. *Earth Science Frontiers*, 2005, 12(A1): 3-13.
- [30] ANDERSEN S, GUAN H, TENG W, et al. Speciation of iodine in high iodine groundwater in china associated with goiter and hypothyroidism [J]. *Biological Trace Element Research*, 2009, 128(2): 95-103.
- [31] 张媛静, 张玉玺, 向小平, 等. 沧州地区地下水碘分布特征及其成因浅析[J]. *地学前缘*, 2014, 21(4): 59-65.
- ZHANG Y J, ZHANG Y X, XIANG X P, et al. Distribution characteristics and cause analysis of iodine in groundwater of Cangzhou Region [J]. *Earth Science Frontiers*, 2014, 21(4): 59-65.
- [32] 赵振宏, 田文法. 沧州市浅层高碘地下水成因及分布规律的初步探讨[J]. *水文地质工程地质*, 1988(6): 48-51.
- ZHAO Z H, TIAN W F. Preliminary study on the genesis and distribution of shallow high iodine groundwater in Cangzhou City [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 1988(6): 48-51.
- [33] 张伟娜. 环境水体中碘的存在形态及其影响因素研究[D]. 吉林: 吉林大学, 2012.
- ZHANG W N. Studies on speciation and influencing factors of iodine in environmental water system [D]. Jilin: Jilin University, 2012.
- [34] 陈志辉, 林曙光. 闽东南沿海居民碘营养状况评价及对策[J]. *中华地方病学杂志*, 1997(4): 210-213.
- CHEN Z H, LIN S G. Evaluation and countermeasure on iodine nutritional status of residents in south east coastal areas of Fujian province [J]. *Chinese Journal of Endemiology*, 1997(4): 210-213.
- [35] 刘必端, 张琼. 福州市 2011 年居民碘盐与儿童尿碘监测结果分析[J]. *海峡预防医学杂志*, 2012, 18(5): 60-61.
- LIU B D, ZHANG Q. Analysis on surveillance results of iodized salt and urinary iodine of children in Fuzhou in 2011 [J]. *Strait Journal of Preventive Medicine*, 2012, 18(5): 60-61.
- [36] 纪锋颖. 2008—2009 年青岛市居民饮用水水碘和盐碘及 8~10 岁儿童尿碘调查结果分析[J]. *中华地方病学杂志*, 2011, 30(6): 663-666.
- JI F Y. Analysis of a survey on status of iodine content in drinking water, edible salt and urine of children aged 8~10 in Qingdao in 2008—2009 [J]. *Chinese Journal of Endemiology*, 2011, 30(6): 663-666.

The mechanism of high iodine groundwater driven by human activities: a case study of Fuzhou City

LIU Lin^{1,2,3}, CHEN Qi⁴, ZHAO Rurong⁴, ZHOU Xun^{2,3}, JIANG Yuehua^{2,3}, YE Yonghong^{2,3}

(1. Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China;

2. Nanjing Center, China Geological Survey, Nanjing 210016, Jiangsu, China;

3. Key Laboratory of Watershed Eco-Geological Processes, Ministry of Natural Resources, Nanjing 210016, Jiangsu, China;

4. Geological Environment Monitoring Center of Fujian Province, Fuzhou 350001, Fujian, China)

Abstract: Drinking high iodine water for a long time can cause thyroid dysfunction and pose a threat to human health. We selected high iodine groundwater in Fuzhou as the research object, and collected 42 groups of groundwater samples from different land use types. The spatial characteristics and genetic mechanisms of iodine in shallow groundwater were studied by using statistical analysis and ion ratio analysis. The results showed that the average content of iodine in local groundwater was 0.10 mg/L (0.008 0~0.52 mg/L). The distribution characteristics of iodine were inland low-coastal high, mountain low-plain high, and rural low-urban high. High iodine groundwater samples accounted for 19.1%, and were predominantly distributed in the main urban areas along the Minjiang River, eastern Fuqing and Pingtan coastal areas. The Quaternary alluvial and marine sediments provide a natural material sources for iodine enrichment in groundwater. Moreover, the reduced groundwater environment and long retention time are natural conditions of iodine enrichment in groundwater. As the spatial distribution of high iodine groundwater is highly correlated with the areas of high population density, it is suggested that high iodine domestic sewage discharged from human activities plays a significant role in the formation mechanism of high iodine groundwater.

Key words: high iodine water; formation mechanisms; human activities; Fuzhou City