

山西晋中地区地下水高碘的地球化学特征研究

徐 清 刘晓端 汤奇峰 刘久臣 黄园英 张玲金

(国家地质实验测试中心;中国地质科学院生态地球化学重点实验室,北京 100037)

摘要:研究区位于山西省太原盆地西南部的冲积平原内。通过对研究区内 950 个样品中碘含量的分析测定可知,浅层水(<50 m)、中层水(50~200 m)和深层水(>200 m)碘含量超标率分别为 76.8%、70.3%和 85.2%,其中,浅层水碘含量最高可达 4117 $\mu\text{g/L}$,是国家饮用水标准值(GB/T19380-2003, 150 $\mu\text{g/L}$)的 27 倍。地下水无机碘主要以 I^- 存在, IO_3^- 含量极少;约 60%的样品中存在有机碘。研究表明,特殊的地形地貌及地下含水层结构特点是造成该地区地下水高碘的主要原因。此外,当地普遍采用中层或深层地下水进行农业灌溉的耕作方式及低洼地区的地表盐化都大大加剧了浅层地下水碘的积蓄。地下水碘的来源与研究区的海相、湖相和河相沉积有着不可分割的联系。本研究将为中国高碘地区的改水工程提供科学依据。

关键词:碘;地下水;太原盆地

中图分类号: P641.69 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3657(2010)03-0809-07

碘是具有重要生物效应的微量元素之一,是合成甲状腺激素的主要原料。碘元素对于维持机体能量代谢、保持体温和促进体格发育等均发挥重要作用。研究表明^[1-3],碘对机体的作用具有双向性,碘缺乏与碘过多都会对人体健康造成危害,从而造成碘缺乏病(Iodine Deficiency Disorders, IDD)和碘过多病(Iodine Excess Disorders, IED)。

环境中的碘主要通过食物链进入人体,因此,环境中碘的分布能够很大程度地影响当地人群的碘负荷水平,继而影响人体的碘营养水平。近几十年来,随着碘缺乏病防治科研工作的深入开展,高碘问题日益凸现。在中国,由水源性高碘引起的高碘地甲肿疾病最为常见,已构成一个公共卫生问题^[4-6]。近些年来,虽然在病理学机理研究方面已取得了斐然的成绩,但对于高碘致病区的环境地球化学方面的研究仍处于起步阶段,很多科学问题尚未得到解决。

本次工作将通过山西晋中盆地西南部地区地下水碘含量的分布、存在形式和环境地质特征等方面的研究,以期探明研究区内地下水碘的来源和高碘水的形成机制,为高碘地方病区的改水和供水安

全提供可靠的科学依据。

1 研究区概况

1.1 地理位置

根据山西省地方病研究所对本省高碘性地方病的调查研究结果^[7],本次研究选择山西省发病最重的地区之一晋中地区太原盆地西南部作为研究区,包括汾阳、文水和平遥 3 县的部分地区。其中,汾阳市所辖 6 个乡镇 89 个村;文水所辖 8 个乡镇 73 个村;平遥所辖 3 个乡镇 70 个村。总面积约 1 575 km^2 ,地理位置:北纬 37°15′~37°40′,东经 111°46′~112°20′(图 1)。

1.2 地质构造及水文特征

受太原盆地地形的影响,研究区呈现北高南低,西高东低的地势。太原盆地西部南北向的吕梁山复背斜使得西部山区与倾斜平原直接相接,靠近吕梁山的边山地区洪积坡度大,呈裙状起伏,形成扇小坡大的特点。靠近盆地中部地区则为宽广平坦的冲积平原。区内流经汾河及其两条支流汶峪河和磁窖河,在介休市的义棠镇附近流出太原盆地。

收稿日期: 2010-04-21; **改回日期:** 2010-05-16

基金项目: 中国地质局地质大调查项目(1212010634714)资助。

作者简介: 徐清,女,1972年生,博士,助理研究员,主要从事环境地球化学研究;E-mail: xuqing825@163.com。

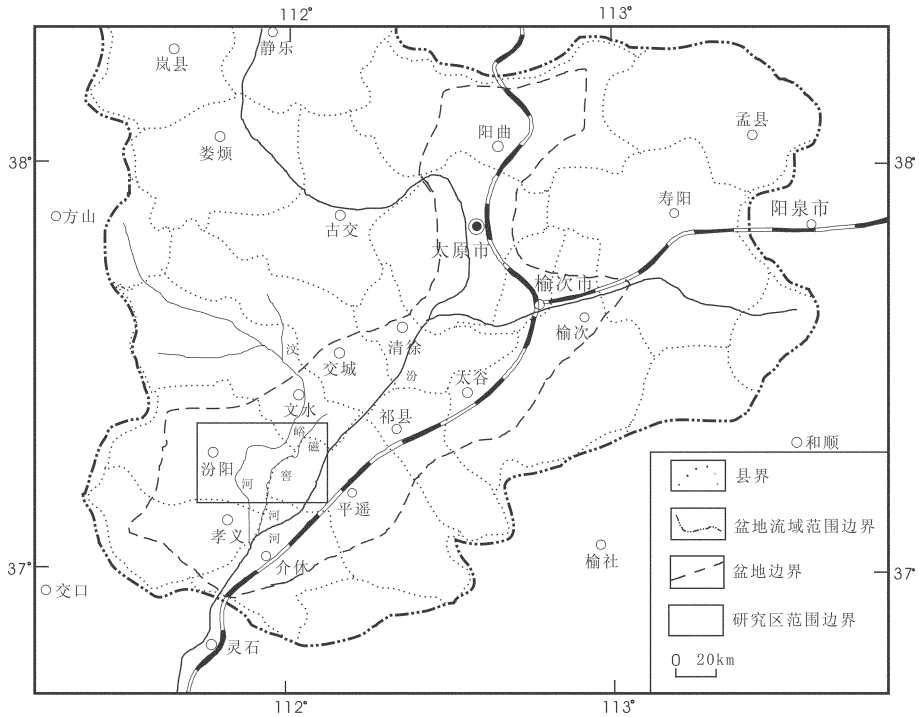


图1 研究区地理位置示意图

Fig.1 Schematic map of geographical location of the study area

研究区的地质构造主要受控于山西陆台晚新生代断裂带——交城凹陷及太原盆地西部断阶。研究区及周边地区地层出露比较齐全,主要有太古宇的各种片麻岩、变粒岩、大理岩及石英岩,寒武系砾岩、砂岩、页岩和鲕状灰岩以及奥陶系竹叶状白云岩、白云质灰岩和泥岩。盆地基底则由石炭系和二叠系的砂岩、页岩、灰岩、煤层的海陆交互结构组成;冲积平原内部上覆巨厚的古近—新近系和第四系河流相、湖相沉积层组成的泥岩、沙岩、砾岩、亚粘土和粘土。

由于含水层结构较为复杂,研究区内浅层(<50 m)和层地下水(50~150 m)以松散岩类孔隙水为主。潜水富水性受冲积层的岩性、厚度及补给条件的控制,地下水赋存条件及富水性有着较大的差别。中层含水层补给来源主要为地表水在山前地段的入渗和基岩地下水的侧向径流补给。盆地中层水的分布与上覆浅层水具有边部混合地下水系统和中部双层结构的地下水系统的特点。深层地下水(>200 m)主要分布于汾阳和文水县城西山区,靠近边山地带、盆地深部地带及汾河河床以下的基岩中,可分为碳酸盐岩裂隙岩溶水、碎屑岩夹碳酸盐岩裂隙水、碎屑岩裂隙水、基岩裂隙水^④。

2 样品的采集及分析测试

地下水样品的采集方式以行政村为单元,根据地下水的开采情况,每个村尽可能地采集浅层(井深小于50 m)、中层(井深50~200 m)和深层地下水(井深大于200 m)3~5个。每个样品的采集量分别为一瓶500 mL和两瓶100 mL,其中前者为测定地下水阴离子含量,采集时要求充分灌满采样瓶,以免CO₂产生曝气;后者为测定阳离子和碘离子含量,分别现场添加5%的HNO₃ 2 mL和1%的KOH 1 mL。采集后的样品随即放入冰箱低温冷藏保存,以带回实验室进行分析测试。

此次研究共采集了950个地下水样品,其中浅层地下水155个、中层水734个、深层水61个。样品的水化学组分的分析测定方法分别为:阴离子SO₄²⁻、CO₃²⁻、HCO₃⁻和Cl⁻、用离子色谱和化学法;阳离子K、Na、Ca和Mg用ICP-AES法;碘含量用ICP-MS法测定。

3 地下水碘含量分布特征

3.1 水平分布特征

研究区地下水碘含量分布特征(图2)在水平方

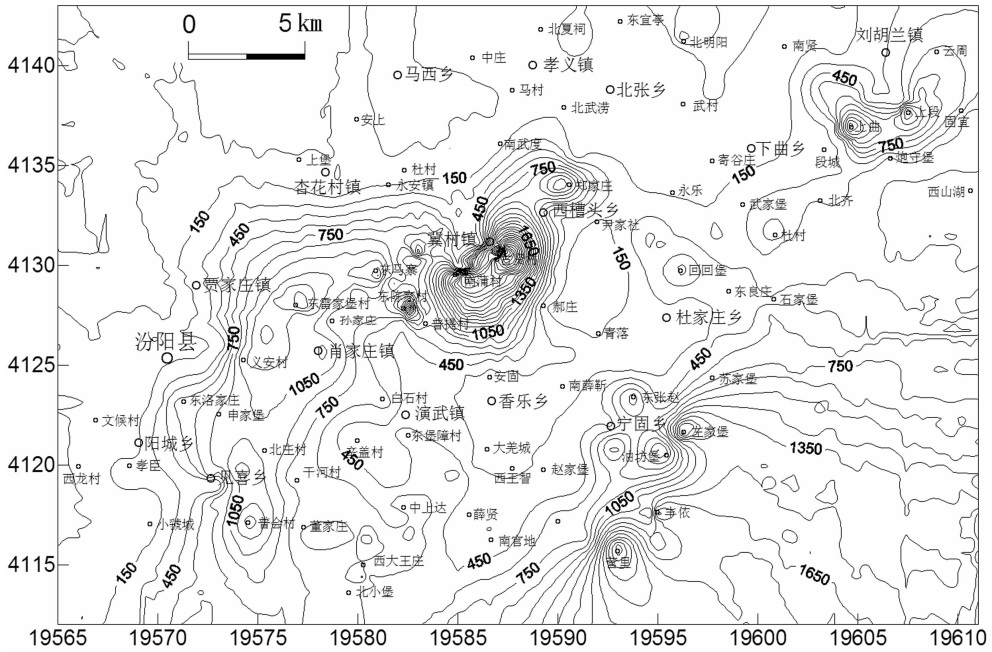


图 2 研究区地下水碘含量分布图 ($\mu\text{g/L}$)

Fig.2 Spatial distribution of iodine concentration of groundwater in the study area ($\mu\text{g/L}$)

向上表现为盆地低洼地区高于西部边山区的趋势,并存在 2 个东北-南西方向的地下水高碘带,分别为汾河附近地势较为低洼的文水县上段、上曲;平遥县苏家堡、左家堡、丰衣、营里和汾河的主要支流汶峪河附近的水文县郑家庄、西槽头;汾阳县古贤村、南蒲村、东陈家村、东雷家堡村、义安村、见喜乡和普会村,地下水碘含量为 577~4117 $\mu\text{g/L}$ 。而地势相对较高的文水县南贤、下曲、永乐;汾阳的东堡障村、辛盖村和平遥县的杜家庄、南薛靳、香乐和薛贤一带地下水碘处于这 2 条高碘带之间。此外,在整个研究区内靠近吕梁山的西部边山地区地下水碘含量较低,汾阳县的杏花村、汾阳县城、文候村和西龙村及山前丘陵地带碘含量多小于 100 $\mu\text{g/L}$,文水县的北夏

祠、马西村,碘含量最低,为 1.09~55 $\mu\text{g/L}$ 。

3.2 垂向分布特征

研究区内浅层、中层和深层地下水碘含量统计结果(表 1)显示:绝大多数浅层地下水、中层地下水和深层地下水中碘的含量都高于《水性高碘地区和地方性高碘甲状腺肿病区的规定 (GB/T19380-2003)》的 150 $\mu\text{g/L}$ 国家标准,其垂向分布特征总体表现为浅层水高于深层、深层水高于中层水的趋势。

浅层地下水中碘的含量高于国家标准的占浅层井总数的 76.8%,平均值为 1143 $\mu\text{g/L}$,中位数为 912 $\mu\text{g/L}$,最高值可达 4117 $\mu\text{g/L}$ 。浅层地下水含量的高值区主要分布于汾阳县的冀村乡以南的城子附近,包括乡政府所在地、东陈家庄和古贤村一带,而

表 1 不同层位地下水碘含量统计结果
Table 1 Statistical results of iodine concentration of groundwater at different depths

井深/m	n	碘含量/ ($\mu\text{g/L}$)				>150 $\mu\text{g/L}$	
		最小值	最大值	平均值	中位数	n	%
<50	155	2.7	4117	1143	912	119	76.8
50~200	734	0.02	2782	450	331	516	70.3
>200	61	6.4	2433	668	534	52	85.2

汾阳县西部和北部边山地带的上堡、文候村和孝义村的地下水碘相对较低,大多低于国家标准。此外,浅层水碘含量的平均值、中位数和最高值均居于三层水之首,说明浅层地下水水质最差,其碘的来源与富集具有较为复杂的特性。

中层地下水中有 70.3%样品碘的含量高于国家标准,平均值和中位数分别为 $450 \mu\text{g/L}$ 和 $331 \mu\text{g/L}$,明显低于深层水和浅层水,水质相对较好。然而,在地势较为低洼的平遥市汾河边的营里村、汾阳县的东雷家堡和文水县上曲村附近地下水碘含量相对较高,最高值可达 $2782 \mu\text{g/L}$ 。

深层地下水碘的含量的超标率最高,达 85.2%,其平均值为 $668 \mu\text{g/L}$,中位数为 $534 \mu\text{g/L}$,最高值为 $2433 \mu\text{g/L}$,是标准值的 16 倍。深层地下水碘含量的高值区主要位于平遥市汾河周边的左家堡、文水县的郑家庄等地,而边山地带的文水县北夏祠、马西村等地相对较低。深层井的地下水碘含量超标率最高,说明该地区深层水水质普遍较差,水力交替微弱,处于较为封闭的环境。

3.3 地下水碘存在形态特征

研究区绝大部分水样中无机碘大多以 I^- 形式存在,占无机碘总量的 95%以上, IO_3^- 含量极少或不存在。这是由于相对封闭的地下水系统处于厌氧环境,不利于氧化态的 IO_3^- 存在。此外,约 60%的样品中存在有机碘,部分样品中有机碘含量可占总碘的 20%以上。碘离子和有机碘的存在表明地下水碘长期处于碱性还原条件下,有利于土壤中的碘释放到地下水中^[9]。

3.4 水化学类型特点

盆地地下水水质主要受岩石成分、沉积环境、气候和补径排条件的控制,具有明显的水平变化规律。研究区内汾阳县西部吕梁山边山地区和文水县西南部地区地下水化学类型以 HCO_3^- -Mg, Ca 型为主,平原区内部汾阳县白石乡和演武乡以南、文水县以东、平遥大部分地区以 HCO_3^- -Na, Ca 型、 HCO_3^- , SO_4^{2-} -Na, Ca 型为主,仅在地势低洼地带和汾河河道附近小部分区域存在 HCO_3^- , SO_4^{2-} -Ca, Mg、 HCO_3^- , SO_4^{2-} -Na, Ca 和 HCO_3^- , SO_4^{2-} , Cl-Na, Ca 型水。

4 高碘地下水的形成机制

两山夹一河及北高南低的特殊地质地形为地下水碘的聚集创造了充分条件。研究区内地下水的水

平径流以自西向东和自北向南为主。其中,西部吕梁山边山地带水力坡度较大,为 2‰~10‰,可接受较强的西-东方向的水平侧向补给,成为区内中层水的主要来源;然而,冲积平原区内部地区,由于水力坡度小于 1‰,汇水面积广(整个盆地汇水面积为 6874 km^2)、排泄区域狭窄(仅在介休的义堂镇出口),水平径流变得非常缓慢,尤以研究区东部汾河两岸最为微弱,成为地下水排泄最为不畅的地区之一。水平水力交替强弱与地下水碘含量分布特征相一致说明平原区内地下水水平水力交替受阻有利于地下水碘的集聚^[9]。

长期沉积作用导致的含水层结构复杂、垂向水力交替变化较大,是引起研究区地下水碘含量存在较大差异的主要原因。边山地带和倾斜平原中上部的汾阳县阳城乡、小虢城、杏花村和马西一带的浅层和 中 层 水,地 下 含 水 层 大 多 由 透 水 性 较 强 的 卵 砾 石、砾石、中砂和细砂组成,具有由单一层次,逐渐向下部过渡,并出现多层次结构的特点,且水力坡度由大变小,地下水埋深由深变浅,从而引起以浅、中层混合为主的地下水分化,一部分转为浅层水,一部分转为中(深)层水。因而,该地区的地下水垂向水力交替畅通,地下水侧向补给充分,地下水碘含量小于 $150 \mu\text{g/L}$ 。宽广、平坦的冲积平原内部,由于水力坡度很小,地下水水平径流相当缓慢,浅、中层地下水运动都以垂直交替运动为主。盆地平原区的堆积大多由河流多次改道的冲积物和洪积物组成,包气带及水位变动带岩性以亚砂土为主,粒度较粗,土层结构比较松散,且地下水位埋深小于 4 m,这就为降水、地表水、灌溉水的垂直下渗补给和潜水垂直向上蒸发创造了条件。区内浅层水位普遍高于中层水位,浅层水可通过中间弱透水层向中层含水层运动和补给,它们之间的水力联系密切,致使浅层水的垂直交替运动趋于复杂化。中层地下水运动则表现为因得到浅层水越流补给,水位上升,却因开采而下降的特点。在汾河和汶峪河古河道等地势低洼地带正是由于浅层水与中层水密切的垂向水力交替,造成了中层地下水中碘的大量积蓄,导致该地区的浅层和中层水碘含量大多高于 $1000 \mu\text{g/L}$ 。太原盆地水文地质剖面图如图 3 所示。

强烈的垂向蒸发排泄作用所导致的表层土壤次生盐渍化是导致研究区内地势低洼地带地下水碘含量升高的原因之一。研究区地处大陆内部,属大陆性

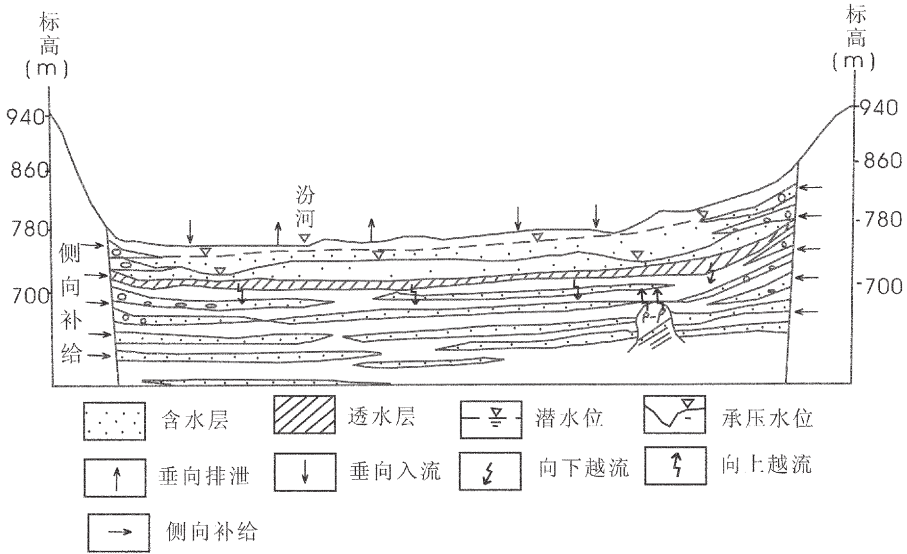


图 3 太原盆地水文地质概略剖面图

Fig.3 Hydrogeological outline sections of Taiyuan basin

半干旱气候,多年平均气温 9.75℃,多年平均蒸发量为 1739 mm,多年平均降水量为 425~520 mm。过度的潜水蒸发作用使得溶解度较低的钙、镁离子以碳酸钙、碳酸镁、硫酸钙和硫酸镁的形式大量析出,造成了地下水中钠离子、氯离子和碘离子含量的升高,尤以水位埋深小于 4 m 的冲积平原内部低洼地带、汾河灌区和汶峪河灌区出现的大片次生盐碱地伴随浅层地下水碘含量异常高值最为突出^[12]。

此外,农业灌溉也是中、深层地下水碘进入浅层地下水的主要途径。当地大多采用深层地下水进行农业灌溉,这就使得深层地下水中的高碘通过农业灌溉的方式进入表层土壤成为可能,在降雨的冲刷淋滤作用下,碘离子从表层土壤向下溶失迁移,在粉砂、粘土等隔水层较为发育地区,大量碘被滞留于浅层含水层中,导致浅层地下水碘含量的升高。然而,在隔水层不发育地区,碘离子(或有机碘)随浅层地下水通过中间弱透水层向中层含水层运动和补给,可导致中层地下水碘的大量聚集。在局部地区部分碘甚至还可通过越流补给的方式进入深层地下水中。

总之,汇水面积大,排泄区域过于狭窄,水力坡度小等特殊的地形地貌特征,地下粘土隔水含水层的共同作用所导致的地下水径流受阻、水力交替缓慢及农业灌溉是该地区地下水碘积蓄的主要原因。

5 地下水碘的来源

研究区地处太原新断陷盆地,受小峪口—交

城—杏花村断裂和孝义西断裂正断层控制,西部山区及边山区出露的寒武系砂岩、页岩、鲕状灰岩;奥陶系竹叶状白云岩、灰岩及石炭系煤层说明该地区古海相地层发育。随着二叠系及三叠系燕山运动的上升阶段的到来,古海底变得凹凸不平,形成古河流和地势低洼地带的古湖泊。自新生代以来,整个太原盆地持续下降,研究区内又沉积了以河湖相为主的巨厚的松散堆积物,主要以亚砂土、亚粘土夹砂层,砾石及细砂、粉砂和有机质含量较高的黑色粘土组成。古海洋、古河流和古湖泊中生物富集可使水中的碘沉积于泥沙中,成为深层地下水碘的主要来源^[13]。

此外,降雨的淋滤作用也可使易于迁移的表层和中层土壤中的碘随着地下水水平运动作用从山区向平原区汇集,成为平原区浅层和中层碘的来源之一。

6 结论和建议

(1)由于研究区特殊的地形地貌,区内大部分地区的地下水碘含量已超出国家饮用水碘标准,为不宜饮用地下水,仅西部靠近吕梁山地区的地下水碘含量相对较低,可以作为饮用水。

(2)地处平原区内部的地势低洼地带,地下水埋深小于地表蒸腾深度,在强烈的蒸发作用下,地表土壤严重盐化,导致浅层地下水碘含量升高;汾河和汶峪河的河道周边地区,由于地下弱隔水层的存在,具有浅层水向中层水补给的特征,导致浅层水中的碘向中层水运移,造成了局部地区中层水碘的聚集。

(3)农业灌溉等人为活动,可使中层及深层地下水碘向地表运移,并被地表粘土吸附。在降雨的淋溶作用下,碘离子又可不断地向下层土壤迁移,引起浅层地下水碘的不断积蓄和明显升高。

(4)鉴于研究区内地下水碘含量特征,盆地平原区内部地区,应采取边山区泉水引水工程,积极推广自来水,以解决当地居民的饮水安全问题。

(5)对于地下水高碘地区应停止食用加碘盐,改用无碘盐,以保证该地区人民的身体健康。

参考文献 (References):

- [1] 马泰, 卢侗章, 于志恒. 碘缺乏病——地方性甲状腺肿与地方性克汀病[M]. 北京:人民卫生出版社, 1993:115-116.
Ma Tai, Lu Zhouzhang, Yu Zhiheng. IDD—Endemic Goiter and Endemic Cretinism [M]. Beijing:People's Medical Publishing House, 1993:115-116(in Chinese with English abstract).
- [2] 陈祖培, 等. 必需微量元素过量(碘过量)对健康的影响研究[J]. 中国地方病学杂志, 2004, 23(4):378-379.
Chen Zupei, et al. The study of the effects of excessive important trace elements (iodine) on health [J]. Chin. J. Ctrl. Endem. Dis., 2004, 23(4):378-379(in Chinese with English abstract).
- [3] Ye Z K, Luo Y Y, Xiang J M, et al. Effect of potassium iodate and iodide on the antioxidation of thyroid and serum in iodine deficiency rats [C]//The Abstract Book of 7th Asia and Oceania Thyroid Association Congress, Hong Kong, 2003:35.
- [4] 韩俊杰, 韩勇, 汤鸣皋. 邯郸东部平原地区饮用高碘地下水对人体危害的初步研究[J]. 现代地质, 1996, 10(3):404-407.
Han Junjie, Han Yong, Tang Minggao. Preliminary research on harmfulness to human body by drinking high iodine content groundwater at plain area in east Handan city [J]. Geoscience, 1996, 10(3):404-407(in Chinese with English abstract).
- [5] 马东瑞, 周荣华, 贾丽辉. 河北平原水源性高碘地区分布调查[J]. 中国地方病防治杂志, 2006, 21(4):237-238.
Ma Dongrui, Zhou Ronghua, Jia Lihui, et al. Survey on the distribution of the areas with excessive iodine in drinking water in Hebei Plain[J]. Chin. J. Ctrl. Endem. Dis., 2006, 21(4):237-238(in Chinese with English abstract).
- [6] 郭晓尉, 秦启亮, 边建朝, 等. 山东省水源性高碘地区分布现状与特征[J]. 中国公共卫生, 2005, 21(4):403-405.
Guo Xiaowei, Qing Qiliang, Bian Jianchao, et al. Distribution and characteristic of areas with high iodine concentration in drinking water in Shandong province [J]. Chin. J. Public Health A Pr, 2005, 21(4):403-405(in Chinese with English abstract).
- [7] 贾清珍, 张向东, 王正辉, 等. 山西省高碘地区分布特征与高碘危害的流行病学调查[J]. 中国地方病杂志, 2006, 25(3):294-296.
Jia Qingzhen, Zhang Xiangdong, Wang Zhenghui, et al. An epidemiological study on the distributive characters and the harm of high water iodine in Shanxi Province [J]. China Endemiol., 2006, 25(3):294-296(in Chinese with English abstract).
- [8] 梁文彪, 李洪建, 杨彩云. 太原盆地边缘地貌与新构造运动及其意义[J]. 山西大学学报(自然科学版), 2000, 23(2):178-181.
Liang Wenbiao, Li Hongjian, Yang Caiyun. Edge geomorphology and neotectonic movement in Taiyuan basin and their meanings[J]. Journal of Shanxi University (Nat. Sci. Ed.), 2000, 23(2):178-181 (in Chinese with English abstract).
- [9] 余孝颖. 内蒙高腐殖酸地下水中碘的分布特征与IDD病的关系[J]. 环境科学, 2000, 21(3):56-59.
Yu Xiaoying. Distribution characteristics of iodine in humic acid-high underground water in Inner Mongolia and their relation to iodine defect disease [J]. Environmental Science, 2000, 21(3):56-59 (in Chinese with English abstract).
- [10] 董少刚, 唐仲华, 马腾, 等. 太原盆地地下水数值模拟[J]. 水资源保护, 2009, 25(2):25-27.
Dong Shaogang, Tang Zhonghua, Ma Teng, et al. Numerical simulation of groundwater flow in Taiyuan basin [J]. Water Resources Protection, 2009, 25(2):25-27(in Chinese with English abstract).
- [11] 曾昭华. 地下水碘的形成及其控制因素 [J]. 吉林地质, 1999, 18(2):30-33.
Zeng Shaohua. The formation of I and its control factors [J]. Jilin Geology, 1999, 18(2):30-33(in Chinese with English abstract).
- [12] 李向全, 侯新伟, 周志超, 等. 太原盆地地下水系统水化学特征及其形成演化机制[J]. 现代地质, 2009, 23(1):1-8.
Li Xiangquan, Hou Xinwei, Zhou Zhichao, et al. Hydrogeochemical characteristics and formation evolutionary mechanism of the groundwater systems in Taiyuan basin[J]. Geoscience, 2009, 23(1):1-8(in Chinese with English abstract).
- [13] 朱发庆, 谭见安. 土壤碘的来源及其与我国地甲病分布规律的关系研究[J]. 地理科学, 1989, 9(4):369-377.
Zhu Faqing, Tan Jian'an. Study on iodine source in soils and its relation to distribution law of endemic goiter in china [J]. Scientia Geographica, 1989, 9(4):369-377 (in Chinese with English abstract).

High iodic geochemical characteristics of the groundwater in central Shanxi Province

XU Qing, LIU Xiao-*duan*, TANG Qi-feng, LIU Jiu-*chen*

(*Key Laboratory of Ecology and Geochemistry, National Research Center for Geoanalysis,
Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China*)

Abstract: The study area is located in southwest Taiyuan basin of Shanxi Province. Totally 950 water samples were collected from the shallow wells (≤ 50 m), middle wells (50–200 m) and deep wells ≥ 200 m). With ICP-MS and HPLC-ICP-MS methods, the authors determined the total iodine content and inorganic iodine content, which included iodine ion and iodine acid radical (I^- and IO_3^-). The results indicate that the proportions of iodic concentration that exceeds the standard are 76.8%, 70.3% and 85.2% in groundwater of three layers, respectively. The highest iodic concentration in the shallow groundwater is up to $4117 \mu\text{g/L}$, which is 27 times higher than the national standard of drinking water ($150 \mu\text{g/L}$). The main form of iodine in the groundwater is ionized iodine, with small amounts of iodate. About 60% water samples have organic iodine. The main causes for high iodine concentration in groundwater are special topography and aquifers in the study area, which results in hindered movement of groundwater. Furthermore, local agricultural irrigation using the middle or deep layer groundwater and salinization of surface soils in the low-lying lands has led to the increase of iodine in the shallow layer groundwater. Iodic source in groundwater is closely related to geological environment of marine, lacustrine and fluvial sediments. The results could offer scientific means to reforming water projects in high iodic water areas of China.

Key words: iodine; groundwater; Taiyuan basin

About the first author: XU Qing, female, born in 1972, doctor, assistant researcher, mainly engages in the study of environmental geochemistry; E-mail: xuqing825@163.com.