

我国典型地区浅层高碘地下水分布特征及其赋存环境

吴飞^{1,2}, 王曾祺^{1,2}, 童秀娟^{1,2}, 段磊^{1,2}

(1. 长安大学 环境科学与工程学院, 陕西 西安 710054; 2. 旱区地下水文与生态效应教育部重点实验室, 陕西 西安 710054)

摘要: 碘作为人体必需的一种微量元素, 缺碘或过多摄入碘都会导致甲状腺肿大疾病。相较于缺碘, 高碘地下水对人体的危害更加难以控制。针对我国典型的水源型高碘地区, 通过对高碘地下水环境的对比研究, 分析了我国不同高碘地区高碘地下水的水环境特征及碘的赋存环境。结果表明: 我国浅层高碘地下水主要分布在东部沿海地区的平原区以及中西部的山前冲洪积平原的中下游地区; 高碘地下水的赋存环境与沉积环境、地下径流条件和气候类型相关, 人类活动也是重要的影响因素; 在此基础上, 提出了我国浅层高碘地下水研究亟待解决的科学问题, 为今后浅层高碘地下水的系统研究提供了理论指导。

关键词: 高碘; 浅层地下水; 分布特征; 赋存环境; 水环境

中图分类号: P641.3

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2017)02-0099-06

The distribution characteristics and storage environments of rich iodine in shallow groundwater of typical areas in China

WU Fei^{1,2}, WANG Zengqi^{1,2}, TONG Xiujuan^{1,2}, DUAN Lei^{1,2}

(1. School of Environmental Science and Engineering, Chang'an University, Xi'an 710054, China; 2. Key Laboratory of Subsurface Hydrology and Ecological Effect in Arid Region of Ministry of Education, Xi'an 710054, China)

Abstract: Iodine is an essential micronutrient in human body, Iodine deficiency and excess can lead to two kinds of goiters. Compared with iodine deficiency, the harm of high iodine groundwater to human health is more difficult to control. Aiming to the typical areas with rich iodine in China, a contrast research of the environments of the ground water with rich iodine was conducted, and the distribution characteristics and storage environments of shallow groundwater with rich iodine were analyzed. The results showed that: the shallow groundwater with rich iodine mainly distributed in the eastern plains near the sea and the middle and lower reaches of piedmont plain in midwest China. The distributions of the shallow groundwater with rich iodine were affected by the sedimentary environment, the underground runoff conditions, the types of climate and human activities, etc. After having a contrast research of the water environmental characteristics and storage environments of the shallow groundwater with rich iodine, some problems of the shallow rich-iodine groundwater to be solved were proposed. The paper can provide theory guidance for the systematic research of the shallow groundwater with rich iodine in the future.

Key words: rich iodine; shallow-groundwater; distribution characteristics; storage environments; water environment

人体摄入的碘元素主要来源于食物和饮水, 人体中 80% ~ 90% 的碘来自于食物, 10% ~ 20% 通过饮水获得, 5% 来自于空气^[1]。据世界卫生组织 1999 年统计, 全球有 130 多个国家存在碘缺乏问题, 约 1/3 的人口生活在碘缺乏地区, 存在遭受甲状

腺肿大疾病的风险^[2-4], 世界卫生组织对于人体补碘给予了高度的关注^[5]。我国大部分地区都存在缺碘问题, 20 世纪中期, 我国提出了食盐加碘的补碘方法, 20 世纪末, 我国开始在全国范围内推广“全民食盐加碘”, 到 1995 年, 我国基本实现了“全民食

收稿日期: 2017-01-03; 修回日期: 2017-02-13

基金项目: 陕西省自然科学基金项目(2016JM4002)

作者简介: 吴飞(1992-), 男, 河南郑州人, 硕士研究生, 研究方向: 环境工程。

通讯作者: 段磊(1978-), 男, 河南周口人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向为地下水环境演化和水文地球化学。

盐加碘”^[6]。自 20 世纪 70 年代末期,我国在河北省发现高碘性甲状腺肿流行以来,陆续有一些关于高碘性甲状腺肿的研究报道。随着“全民食盐加碘”政策的实行,我国高碘水区的高碘现象也日益明显。众所周知,碘缺乏与碘过多都会对人体健康造成危害^[7-8],如何在防治碘缺乏症的同时,避免高水碘地区群众受到高碘危害,是迫切需要解决的重要问题。到 21 世纪初,我国有 12 个省市存在高碘地区,包括北京、天津、河北、河南、山东、山西、内蒙古、新疆、江苏、安徽、福建、陕西^[9-10]。

目前,国内外对于高碘地下水的研究主要集中在典型地区高碘地下水的分布及影响因素^[11-16]。由于我国高碘分布的地域性,对于高碘地下水缺少全国性系统的研究,本文以河套平原、关中盆地、太原盆地、大同盆地以及华北平原、淮河流域为研究对

象,总结和归纳我国不同地区浅层高碘地下水的分布特征以及其赋存环境的差异,提出浅层高碘地下水研究中亟待解决的科学问题,为深化我国高碘地下水研究提供借鉴。

1 高碘地下水的分布特征

我国高碘地下水分布较为广泛,主要以蒸发浓缩和沉积物淋溶形成的浅层高碘地下水为主,此外也有海侵现象引起的地下水高碘现象。从东部沿海地区到中部平原,再到西北内陆盆地,从浅层地下水到深层地下水,均存在高碘现象。我国浅层高碘地下水分布在山间盆地如关中盆地、河套平原、大同盆地、太原盆地,另外,在淮河流域的中下游以及华北平原的中东部也有高碘地下水分布,我国典型地区浅层高碘地下水分布图如图 1。

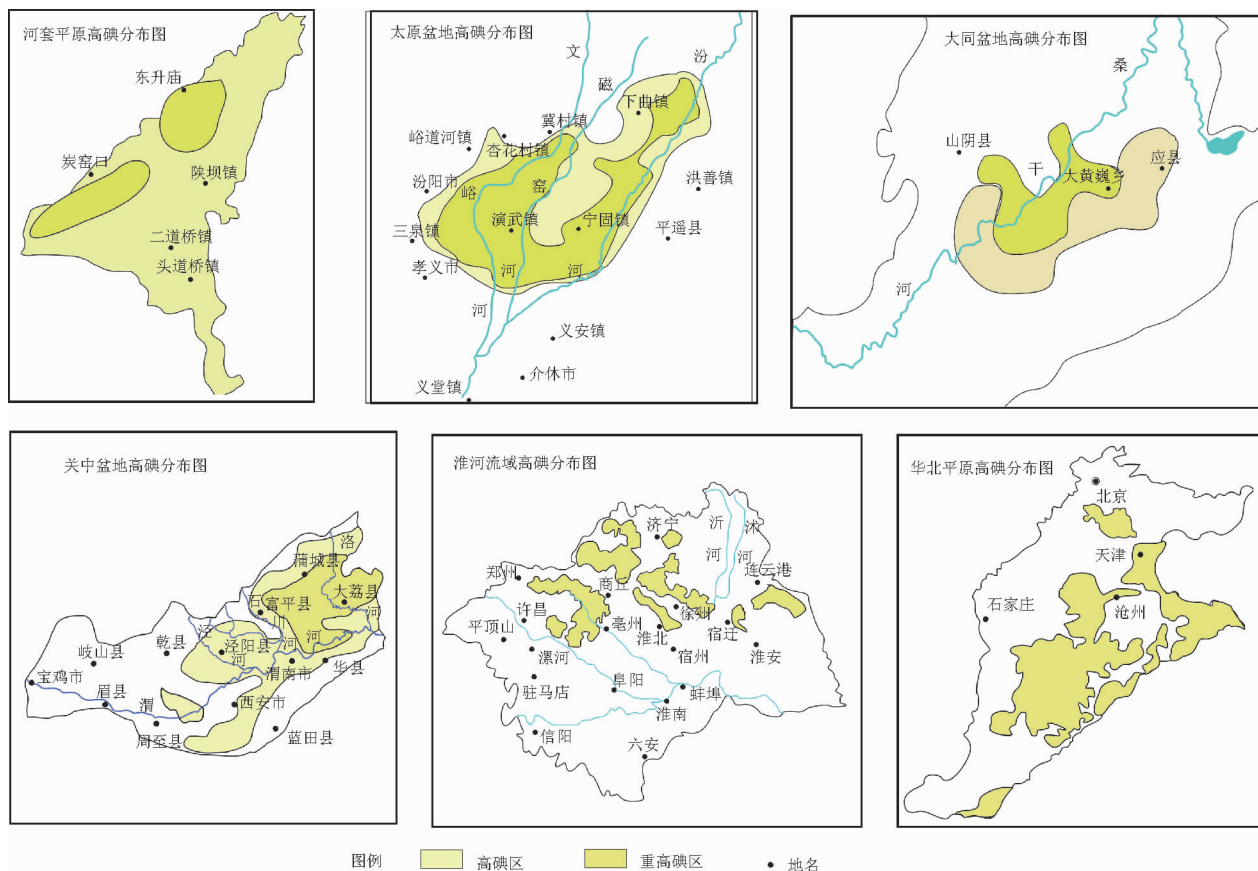


图 1 我国典型地区浅层高碘地下水分布图

1.1 山前盆地

我国地域辽阔,在中西部地区分布着众多的山脉,山麓前缘的冲洪积扇的下游形成了大大小小的盆地和山前冲积平原,而这些地区一般都是人口聚集地以及农作物生长的主要地区,此类地区的地下水为人类主要水源,其天然的地形条件及地下水环

境容易形成高碘水的聚集。我国中西部浅层高碘地下水主要分布在内蒙古河套平原、山西大同盆地和太原盆地以及陕西的关中平原等地区^[10,13]。

1.1.1 河套平原 位于内蒙古西部的河套平原北至阴山,西靠乌兰布和沙漠,南邻黄河,东依乌梁素海,为典型的冲湖积平原,此地区平缓的地下水径流

条件及其合适的沉积环境,使得在平原的地势平缓地带形成了高碘地下水。河套平原的杭锦后旗陕坝镇以北到东升庙之间的区域为此地区的重度高碘地区,在其区域内采集的地下水中碘的浓度为 $27.30 \sim 1638.00 \mu\text{g/L}^{[17]}$ 。

1.1.2 山西大同盆地和太原盆地 20 世纪,山西省是全国碘缺乏病流行较严重的省份之一,但是在 20 世纪 60 年代山西实施食盐加碘之后,高碘甲状腺肿也随之出现,到 1999 年已经确认了 9 个县的 44 个乡镇为高碘地区,其中,大同盆地和太原盆地地区是山西省高碘地方病的重病区^[18]。

大同盆地位于山西省的北部,其区域内最大的河流为桑干河,主要高碘区位于山阴县和应县之间,分布在桑干河的河漫滩以及冲积平原较为平缓的地方。平原内从山前到盆地的中心,沉积物颗粒由卵石、砾石逐渐变为粉细砂、黏土,厚度也逐渐增加^[19]。因此沉积物中的碘在释放后迁移的过程中,被盆地中心区域的黏土等吸附性较强的土层所吸附,再随着大气降水及人工灌溉水入渗,进入到地下水,也就在盆地的中心部分富集形成了高碘地下水。大同盆地区域内地下水碘含量为 $6.23 \sim 1380 \mu\text{g/L}^{[20]}$ 。

太原盆地位于山西省的中部,呈现北高南低,西高东低的地势,其中部地区为宽广平坦的冲积平原。盆地内存在两个东北-西南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,汶峪河附近的文水县郑家庄、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 $577 \sim 4117 \mu\text{g/L}^{[21]}$ 。

1.1.3 关中盆地 关中盆地位于陕西省秦岭以北,是典型的山前冲洪积平原。盆地内的高碘地区主要分布在地势较为平缓的渭河中下游,地下水碘含量为 $2 \sim 28620 \mu\text{g/L}$,其中地下水碘含量在 $150 \sim 300 \mu\text{g/L}$ 的高碘区主要分布在关中盆地的冲积平原区,如西安、咸阳、兴平、渭南、华县和华阴等地区。地下水碘含量大于 $1000 \mu\text{g/L}$ 的地区为超高碘病区,主要分布在关中盆地的蒲城县和大荔县的大部分地区,以及华县、泾阳县周边也有点状区域为地下水超高碘病区^[22]。

1.2 华北平原及淮河流域

我国海岸线较长,沿海分布着多个高碘区,这些地区地下水的高碘主要来自沉积物和海水入侵,另外,海洋大气携带的含碘粒子随大气降水进入土壤

也是滨海地区高碘的来源之一^[10]。华北平原和淮河流域的东部主要沉积物为河海相沉积物,沉积物中富含含碘的有机物,在农业灌溉及降水的淋溶作用下迁移进入地下水。高碘地下水在这些地区的分布具有较好的规律性,形成的高碘地区主要在淮河流域的中下游。而华北平原的中西部,主要为冲积湖积平原和黄河冲积平原的交接位置,淮河流域的中西部则主要为废黄河带河相沉积物。在这两个区域内,淮河流域的山东菏泽、江苏徐州和河北的沧州、邯郸、廊坊、塘沽为高碘最集中区域,山东济宁、泰安、枣庄,江苏宿迁、连云港、淮安,安徽淮北、亳州也有分布^[23]。华北平原和淮河流域内沉积物主要为河湖相沉积物和海相沉积物,受历史上 6 次海侵影响,其沉积物中存在较多富含碘的有机质,在水流作用下由沉积物中释放进入到地下水中,形成了高碘地下水,其浅层地下水碘含量为 $1 \sim 3320 \mu\text{g/L}^{[24]}$ 。

2 地下水中碘的形态

地下水中碘的形态包括碘离子、碘酸根和有机碘,基本未发现高碘酸根,多以组合形式存在,例如在丹麦饮用水中发现了 6 种碘组合形态^[25],在我国高碘地区地下水中,碘离子为其主要形态,其次是碘离子和碘酸根的共存形态,单纯的碘酸根形态较少;在以碘离子和碘酸根形态共存的水源中,碘酸根为主要形态^[11]。土壤中的大多数碘呈强吸附态,一般水溶碘比例极小,一些研究人员发现土壤中可溶态碘可高达 25%,而一般情况下土壤中的水溶碘都小于 10%^[26]。

我国各个高碘地区由于其高碘地下水环境的不同,地下水中碘的形态也有所不同。刘列钧等^[11]在我国东部地区,如河北沧州市的东部沿海地区、黄骅市羊二庄乡所取的地下水样中,其碘的形态主要以碘离子和碘酸根共存形态为主,碘酸根为主要存在形态;在淮河流域的江苏沛县以及丰县所取的 30 份水样中,只有两个水样中检出碘离子和碘酸根共存形态,一个水样检出单纯的碘酸根形态;在河南开封杞县以及兰考县所取的 120 个水样中,未检出碘酸根形态,全部为碘离子形态。徐清等^[21]在太原盆地西南部的冲积平原内所取 950 个水样中,地下水无机碘主要以 I^- 存在, IO_3^- 含量极少,约 60% 的样品中检出了有机碘。

碘的形态对碘的生物有效性起着重要的作用。如在江苏省的两相邻县丰县和沛县,高碘乡镇的水

碘中位数相当,沛县高碘乡镇存在碘酸根形态的水源,而丰县高碘乡镇水碘均以碘离子形态存在;沛县高碘乡镇的甲状腺疾病的现患率达 38‰,是对照乡的 2.39 倍,而丰县未见此类报道^[27]。另外有研究成果显示,一些地区高碘导致人群甲状腺肿的患病率与水碘含量没有一致的相关性^[28]。因此,高碘引发的人群甲状腺肿疾病是否与水碘形态有关,是一个值得深入研究的科学问题。

3 浅层高碘地下水的赋存环境

碘在地下水中的富集是长期的地质作用和地球化学演变的结果,其主要影响因素有地形地貌、地质构造、水文地质、基岩类型等地质环境因素,此外人为灌溉因素也对高碘的形成有影响。

3.1 地形地貌

地形地貌反映了一个地区的地质构造、地层岩性、土壤类型、植被类型、地下水和地表水赋存状态等特点,还反映了地球化学特征和元素迁移富集规律。特殊的地形地貌条件及地下含水层结构是造成我国高碘地区地下水高碘的主要原因,我国高碘地区广泛分布在冲积平原区以及盆地中心相对低洼的区域,如关中盆地、山西大同盆地、华北平原和滨海地区。这几个地区共同特点是地势较为平坦,地下水动力条件差,地下径流缓慢,地下水排泄不畅,地下水埋深较浅,蒸发作用较强,这些因素共同导致了地下水中碘的富集。

另外,我国几个典型高碘地区又各有各的特点。我国滨海地区含水层多为河湖相沉积物,其富含有机质,粘土矿物和铁铝氧化物。华北平原含水层为由冲洪积、湖积、海积物交错叠置而成的第四系松散层,其含水层结构复杂。大同盆地、关中盆地等西北干旱半干旱地区盆地含水层多为第四系河流相和湖相松散沉积物。这几类沉积环境的沉积物中都富含高碘的动植物遗体或者有机质,松散的沉积层环境及其富含的有机质有利于碘释放进入到地下水中,形成高碘地下水。

3.2 气候

我国高碘地区呈片状分布,主要分布地区的气候类型为温带季风气候和温带大陆气候。这些地区的共同点是降水量随季节变化较大,降雨多集中在 6~9 月,全年表现为春季干旱少雨,夏季炎热多雨,秋季温和凉爽,冬季寒冷干燥。蒸发量较大,全年蒸发量远远大于降雨量。各地代表地区平均气温、降雨量、蒸发量见表 1。

表 1 各代表地区的气温、降雨量、蒸发量对照表

区域类型	代表地区	多年平均 气温/℃	年平均降 水量/mm	年蒸发量/ mm
滨海地区	淮河流域下游	11~16	883	900~1500
中部平原	河北沧州	12.8	600~800	1100~2000
	大同盆地	9.75	225~400	>2000
干旱半干旱地区	太原盆地	12	425	1739
	关中盆地	6~13	650	>2000
	河套平原	5.6~7.8	130~220	1900~2500

注:表 1 中数据引自文献[12]、[13]、[17]、[21]、[29]。

从表 1 可以看出,除淮河流域外其他几个地区蒸发量普遍较高,是多年平均降水量的 3 倍以上,强烈的蒸发作用促进了地下水中离子的富集,使得易从水中析出的离子如 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 从地下水中析出,使碘离子浓度上升。另外,沿海地区高碘的另一个原因是温带季风气候和亚热带季风气候使得海洋大气中的碘随悬浮的微尘粒子下降到土壤,经过降雨或灌溉,土壤中的碘进入到地下水。

3.3 水化学条件及地下水径流条件

研究表明,地下水的水化学条件及水文地质条件对高碘地下水的形成与分布起着重要的控制作用。综合他人研究结果来看,淮河流域下游 pH 值为 6.9~8.4,属于中性或者弱碱性;河北沧州及大同盆地的 pH 值在 7.2~9.28 之间,属于弱碱性;关中盆地及河套平原的 pH 值在 6.51~9.67 之间,大部分属于中性或者弱碱性。除了在淮河流域下游和关中盆地有部分 $\text{pH}<7$ 的弱酸性环境外,其他高碘地区的地下水环境 pH 值均在 7 以上,部分达到 9 以上,而一般情况下的地下水环境为中性,因此得出结论:弱碱性的水环境是高碘地下水形成的影响因素之一。高碘地区地下水 pH 值范围如表 2。

表 2 高碘地区地下水 pH 值范围表

高碘区域	代表地区	高碘地下水 pH
滨海地区	淮河流域下游	6.9~8.4
中部平原	河北沧州	7.2~7.8
	大同盆地	7.26~9.28
山前盆地	关中盆地	6.51~9.67
	河套平原	7.19~8.48

注:表 2 中数据引自文献[12]、[13]、[17]、[29]、[30]。

在含水介质中,碘的吸附还受有机质及盐类的影响。有机质吸附碘的能力较强,碘与有机质结合主要表现为碘与芳环的结合,在深层含水层中 I-C 键相当稳定,有机物分子是碘运移的主要载体,有机

态碘的迁移速率低于无机态碘^[31]。大同盆地高碘地下水的研究表明,EC、Br、Cl⁻、SO₄⁻、Na⁺、Ca²⁺和Mg²⁺是高碘地下水影响因素中影响最大的,比重占到33.2%^[20]。在有盐类参与时,碘的吸附作用按下列顺序略有增强:K⁺ > Na⁺ > Mg²⁺ > Ca²⁺和SO₄²⁻ > Cl⁻,这说明随着Ca²⁺、Mg²⁺和Cl⁻含量增高,碘的吸附作用逐渐减弱,解吸作用增强^[32]。另外,氧化还原条件是影响地下水碘的形成及富集的重要影响因素。多个研究均表明^[13,17],还原条件有利于地下水中碘的富集,例如河套平原、关中盆地等浅层高碘地下水普遍分布在弱氧化或者还原环境中。

此外,地下水径流条件是影响地下水中碘迁移富集的重要影响因素。地势低洼、地形坡度平缓的地区,尤其是洼地地形,地下水埋藏较浅,这些地区往往是地下水水平径流微弱或径流滞缓的地区,此类条件减慢了浅层地下水中碘的运移,有利于含水层对碘的富集。而在平原或者盆地的边缘地势起伏较为明显的地区,如华北平原西部的山区、关中地区北部的山麓、大同盆地的西北部山脉、河套平原的西北部山区多为阶梯状下降的地形,山区地形高峻,坡降较大,切割较为强烈,地下水交替强烈,对碘元素的淋滤和迁移十分有利,容易形成低碘地区。我国的高碘地区基本上分布在平原及盆地的中心,地势较为平缓,如关中盆地的富平县以东,大同盆地的西南地区,黄淮海平原,河套平原等。

4 高碘地下水研究亟待解决的科学问题

尽管国内外对高碘地下水的研究很多,但仍存在一些未解决的问题:(1)关于高碘性地下水形成的影响因素研究较多,而对碘的影响因素的定量研究较少;(2)远离海洋的干旱半干旱地区地下水中的碘来源于区内含碘岩石的风化溶滤,但区内关于基岩和沉积物中含碘矿物组成及其对地下水碘含量影响的定量研究比较薄弱;(3)高碘地区地下水循环过程中的水文地球化学和生物地球化学过程研究较为薄弱;(4)高碘地区伴生的高氟或者高砷等地下水环境问题及碘与其他元素之间的相互影响的研究相对较少。例如,地下水盐渍化过程影响了地下水中碘、氟、砷的富集^[33],但是在富集过程中碘与氟和砷之间的相互关系的研究尚不清楚;(5)目前对地下水中碘元素与人体健康的研究,大多数都是局限于患病率与碘含量之间的相关性分析,而对于饮

水碘含量致病机制有待进一步深入研究。

5 结论与建议

高碘地下水对人体有严重的危害,在我国以地下水为主要供水水源的大部分地区,地下水更多作为饮用水,其所含碘是人体摄入碘的主要来源。综合我国各个高碘地区的地质地貌类型和地下水环境等,得出以下结论:

(1)我国高碘地下水主要分布在盆地的中心低洼地带以及平原的下游平缓地带,这主要是受沉积环境及地下径流条件影响所致。

(2)沉积环境中富含碘和有机物,微生物的分解使得碘进入到地下水,强烈的蒸发以及人类活动促进了地下水中碘的富集,形成了高碘地下水。

(3)对于高碘地下水地区,现在较好的解决办法是开采深层低碘的地下水或者建设饮水安全工程,减少高碘地下水对人体健康的影响。

参考文献:

- [1] 葛可佑. 中国营养科学全书[M]. 北京:人民卫生出版社,2004.
- [2] Shelor C P, Dasgupta P K. Review of analytical methods for the quantification of iodine in complex matrices[J]. *Analytica Chimica Acta*, 2011, 702(1):16-36.
- [3] Pinder M, Moorthy V S, Akanmori B D, et al. An iodine mass-balance for Lake Constance, Germany: Insights into iodine speciation changes and fluxes[J]. *Geochimica Et Cosmochimica Acta*, 2010, 74(11):3090-3111.
- [4] Hu Qinhong, Zhao Pihong, Moran Jean E, et al. Sorption and transport of iodine species in sediments from the Savannah River and Hanford Sites[J]. *Journal of Contaminant Hydrology*, 2005, 78(3):185-205.
- [5] Benoist B D, Clugston G. Eliminating iodine deficiency disorders[J]. *Bulletin of the World Health Organisation*, 2002, 80(5):341-341.
- [6] 阎玉芹,陈祖培,舒延清. 全民食盐加碘4年来我国是否发生了高碘性甲状腺肿流行[J]. *中国地方病学杂志*, 2001, 20(3):228-229.
- [7] 陈祖培,阎玉芹,赵金扣,等. 必需微量元素过量(碘过量)对健康影响的研究[J]. *中国地方病学杂志*, 2004, 23(4):378-379.
- [8] 叶振坤,罗玉玉,项建梅,等. 缺碘大鼠补充不同剂量碘酸钾和碘化钾对甲状腺和血液抗氧化能力的影响[J]. *中国地方病防治杂志*, 2003, 18(5):260-263.
- [9] 张根红,李素梅. 水源性高碘研究进展[J]. *河南预防医学杂志*, 2006, 17(1):48-50.

- [10] 申红梅,张树彬,刘守军,等. 全国高水碘地区地理分布及高碘地区水碘等值线研究[J]. 中国地方病学杂志, 2007,26(6):658-661.
- [11] 刘列钧,王海燕,李秀维,等. 我国水源型高碘地区水碘形态的研究[J]. 疾病监测,2012,27(11):891-893.
- [12] Li Junxia, Wang Yanxin, Xie Xianjun, et al. Effects of water-sediment interaction and irrigation practices on iodine enrichment in shallow groundwater[J]. Journal of Hydrology, 2016,543:293-304.
- [13] Duan Lei, Wang Wenke, Sun Yaqiao, et al. Iodine in groundwater of the Guanzhong Basin, China: Sources and hydrogeochemical controls on its distribution[J]. Environmental Earth Sciences, 2016, 75(11):1-11.
- [14] Tang Qifeng, Xu Qing, Zhang Fucun, et al. Geochemistry of iodine-rich groundwater in the Taiyuan Basin of central Shanxi Province, North China[J]. Journal of Geochemical Exploration, 2013, 135(6):117-123.
- [15] Dai Jiulan, Zhang Min, Zhu Yongguan. Adsorption and desorption of iodine by various Chinese soils: I. Iodate[J]. Environment International, 2004, 30(4):525-530.
- [16] Togo Yoko S, Takahashi Yoshio, Amano Yuki, et al. Age and speciation of iodine in groundwater and mudstones of the Horonobe area, Hokkaido, Japan: Implications for the origin and migration of iodine during basin evolution[J]. Geochimica Et Cosmochimica Acta, 2016, 191:165-186.
- [17] 徐芬,马腾,石柳,等. 内蒙古河套平原高碘地下水的地球化学特征[J]. 水文地质工程地质, 2012, 39(5):8-15.
- [18] 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]. 中华地方病学杂志, 2006, 25(3):294-296.
- [19] 张丽萍,谢先军,李俊霞,等. 大同盆地地下水中碘的形态、分布及其富集过程研究[J]. 地质科技情报, 2014,33(1):178-184.
- [20] Li Junxia, Wang Yanxin, Guo Wei, et al. Iodine mobilization in groundwater system at Datong basin, China: Evidence from hydrochemistry and fluorescence characteristics[J]. Science of the Total Environment, 2013, 468-469C(2):738-745.
- [21] 徐清,刘晓端,汤奇峰,等. 山西晋中地区地下水高碘的地球化学特征研究[J]. 中国地质,2010,37(3):809-815.
- [22] 孙一博. 渭河流域地下水中氟和碘的形成机理及其对人体健康的影响[D]. 西安:长安大学, 2014.
- [23] 张二勇,张福存,钱永,等. 中国典型地区高碘地下水分布特征及启示[J]. 中国地质, 2010, 37(3):797-802.
- [24] 陆徐荣,杨磊,陆华,等. 江苏平原地区(淮河流域)潜水碘含量控制因素探讨[J]. 地球学报, 2014,35(2):211-216.
- [25] Voutchkova D D, Ernstsens V, Hansen B, et al. Assessment of spatial variation in drinking water iodine and its implications for dietary intake: A new conceptual model for Denmark[J]. Science of the Total Environment, 2014, 493(5):432-444.
- [26] Johnson C C. The geochemistry of iodine and a preliminary investigation into its potential use as a pathfinder element in geochemical exploration[D]. University College of Wales, 1980.
- [27] 周永林,王培桦,张庆兰,等. 碘过量地区居民甲状腺疾病现患调查[J]. 中国公共卫生, 2007,23(12):1510-1511.
- [28] 王金彪,边建朝,王晓明,等. 山东省黄河下游流域水源性高碘地区调查结果分析[J]. 中国地方病学杂志, 2008,27(5):545-547.
- [29] Zhang Eryong, Wang Yanyan, Qian Yong, et al. Iodine in groundwater of the North China Plain: Spatial patterns and hydrogeochemical processes of enrichment[J]. Journal of Geochemical Exploration, 2013, 135(6):40-53.
- [30] 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.
- [31] Schlegel M L, Reiller P, Mercier-Bion F, et al. Molecular environment of iodine in naturally iodinated humic substances: Insight from X-ray absorption spectroscopy[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2006,70(22):5536-5551.
- [32] 罗津. 溴和碘的地球化学[M]. 北京:地质出版社, 1977.
- [33] Li Junxia, Wang Yanxin, Xie Xianjun. Cl/Br ratios and chlorine isotope evidences for groundwater salinization and its impact on groundwater arsenic, fluoride and iodine enrichment in the Datong basin, China[J]. Science of the Total Environment, 2016, 544:158-167.