

DOI:10.16788/j.hddz.32-1865/P.2023.03.005

引用格式:叶永红,龚建师,许乃政,等. 涡河流域河南段浅层高碘地下水分布及成因[J]. 华东地质, 2023, 44(3): 292-299. (YE Y H, GONG J S, XU N Z, et al. Distribution and genesis of high iodine shallow groundwater in Henan section of Guohe Basin [J]. East China Geology, 2023, 44(3): 292-299.)

涡河流域河南段浅层高碘地下水分布及成因

叶永红^{1,2}, 龚建师^{1,2}, 许乃政^{1,2}, 张 飞^{1,2}, 王赫生^{1,2}, 李 亮^{1,2},
周锴锸^{1,2}, 朱春芳^{1,2}, 陶小虎^{1,2}, 檀梦皎^{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: 通过分析涡河流域河南段 249 组浅层地下水样, 发现浅层高碘地下水分布面积为 5 818.9 km², 占总面积的 51.97%, 主要分布于研究区北部、东北部, 其次分布于太康县的东部地区。第四纪松散沉积物中的碘是浅层地下水中碘的主要来源。气候条件使得浅层地下水中的碘倾向于聚集, 地形地貌控制下的地下水水流场以及抽取地下水灌溉庄稼的过程, 均使浅层地下水中的碘逐渐浓缩而形成浅层高碘地下水。

关键词: 涡河流域; 河南段; 高碘地下水; 浅层地下水; 地下水水流场

中图分类号: P641.11

文献标识码: A

文章编号: 2096-1871(2023)03-292-08

碘是人体生长发育不可或缺的微量元素, 人体缺碘易得地方性甲状腺肿等病症。然而, 长期饮用碘含量超标的水, 同样会导致一系列健康问题。

近几十年来, 许多学者对高碘地下水形成的原因进行了深入的研究。孙一博^[1]对渭河流域地下水中碘的研究表明, 碘富集主要受浅层地下水的蒸发浓缩作用、深部富含有机质的生物降解作用以及 HCO₃⁻ 与 I⁻ 竞争吸附作用的控制。徐清等^[2]在研究山西晋中地区地下水高碘的地球化学特征时认为, 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, 在蒸发作用下地表土壤盐化, 导致浅层地下水碘含量升高; 农业灌溉等人类活动, 可使中层及深层地下水碘向地表运移, 并被地表黏土吸附; 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升高。徐芬等^[3]在研究内蒙古河套平原地下水的水文地球化学特征时指出, 地下水中碘的富集有 2 种机制: 浅层地下水的蒸发作用和深部富含有机

质、偏还原的地下水环境中的微生物作用。陆徐荣等^[4]在探讨江苏平原地区(淮河流域)潜水碘含量控制因素时认为, 地下水径流条件影响重大, 径流条件较好的丘陵、岗地潜水碘含量较低, 地势低平、径流条件较差的洼地和泛滥沉积区往往为高碘地区。

根据《GB/T 19380—2016 水源性高碘地区和高碘病区的划定》^[5] 规定, 居民饮用水碘中位数 > 100 μg/L 的地区为水源性高碘地区。根据《WS/T 669—2020 碘缺乏地区和适碘地区的划定》^[6] 规定, 具备居民饮用水碘中位数 < 40 μg/L 等指标的地区为碘缺乏地区, 碘中位数 ≥ 40 μg/L 且 ≤ 100 μg/L 等指标的地区为适碘地区。本文参考以上标准, 根据地下水中的 I 含量, 将浅层地下水分为低碘地下水 (< 40 μg/L)、中碘地下水 (40~100 μg/L) 和高碘地下水 (> 100 μg/L)。

根据 2019 年国家卫生健康委员会发布的《全国生活饮用水水碘含量调查报告》^[7], 涡河流域河南段部分地区水碘含量 > 100.0 μg/L。该地区饮

* 收稿日期: 2021-11-17 修订日期: 2022-04-09 责任编辑: 叶海敏

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“长江下游及淮河流域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: 叶永红, 1985 年生, 男, 高级工程师, 硕士, 主要从事水文地质、水化学研究工作。Email: njyunwuli@foxmail.com。

用水来源主要为地下水,深层地下水的供应方式主要为集中供水,浅层地下水的供应方式主要为分散供水。本文以涡河流域河南段浅层地下水(地面以下 $<50\text{ m}$ 深处范围)为研究对象,探索该地区浅层高碘地下水的分布特征以及形成原因,为后续地下水资源的合理开发利用提供基础资料和理论依据。

1 研究区概况

涡河流域河南段北临黄河,南至河南省与安徽省交界处,西界为涡河流域与沙颍河流域的分水岭带,东界为涡河流域与废黄河等流域的分水岭带(图1)。研究区行政区划上包含开封市、商丘市和周口市。

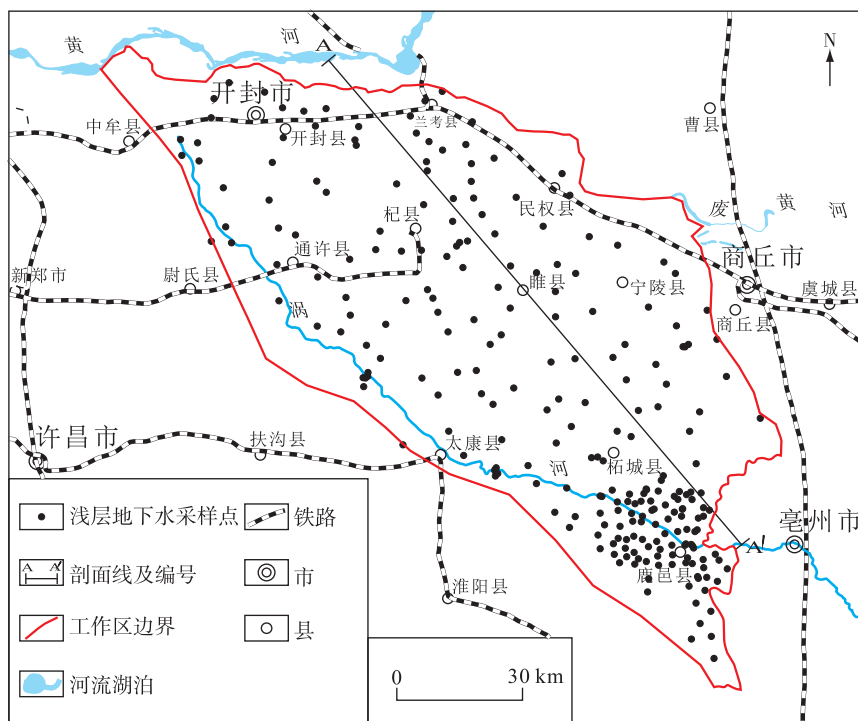


图1 研究区地理位置及采样点分布图

Fig. 1 Geographical location and distribution of sampling points in the study area

研究区在大地构造上属华北板块,位于黄河冲积平原,包括小块的决口扇,广泛分布第四系,岩性主要为细砂、粉砂、黏质砂土和砂质黏土,厚度为 $180\sim 400\text{ m}$,以开封一带最深。其中,全新统为河流冲积层,厚度一般为 $20\sim 30\text{ m}$,开封凹陷处最深可达 40 m 。

本区浅层含水层岩性主要为细砂和粉砂。浅层地下水补给来源主要为大气降水和地表河流的入渗补给,径流条件差,主要通过3种方式排泄,分别是:向东南方向侧向径流排泄、蒸发蒸腾排泄和人工开采排泄。大部分浅层地下水TDS浓度为 $500\sim 2\,000\text{ mg/L}$,水化学类型复杂,主要为 $\text{Ca}+\text{Mg}-\text{HCO}_3$ 、 $\text{Na}+\text{Mg}-\text{HCO}_3$ 和 $\text{Na}+\text{Ca}+\text{Mg}-\text{HCO}_3$ 。

2 样品采集和测试情况

研究区采样点大致沿地下水流向(自北西向南东方向)分布(图1),共采集浅层地下水样品249组,采集时间为2019年5—9月。样品存储于 1.555 L 聚乙烯塑料瓶中,用生胶带密封,常温避光保存。碘的测定由自然资源部华东矿产资源监督检测中心完成,采用电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS),检出限为 $0.008\text{ }\mu\text{g/L}$,测定下限为 $0.024\text{ }\mu\text{g/L}$ 。

样品中I含量测试结果如表1所示。249组浅层地下水样品中,I含量最小值 $2.52\text{ }\mu\text{g/L}$,最大值 $923.15\text{ }\mu\text{g/L}$,平均值 $119.60\text{ }\mu\text{g/L}$ 。其中, $<40\text{ }\mu\text{g/L}$ 的样品76组, $40\sim 100\text{ }\mu\text{g/L}$ 的样品72组, $>100\text{ }\mu\text{g/L}$ 的样品101组。

表 1 研究区浅层地下水中碘含量测试结果
Table 1 Iodine contents in shallow groundwater in the study area

编号	I 含量/ ($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)	编号	I 含量/ ($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)	编号	I 含量/ ($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)	编号	I 含量/ ($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)	编号	I 含量/ ($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)	编号	I 含量/ ($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)	编号	I 含量/ ($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)
S1	5.65	S37	9.43	S73	31.53	S109	150.06	S145	153.70	S181	193.74	S217	271.88
S2	11.23	S38	48.59	S74	6.70	S110	100.25	S146	768.96	S182	213.60	S218	325.12
S3	69.33	S39	56.08	S75	84.84	S111	56.44	S147	431.53	S183	64.57	S219	166.86
S4	2.52	S40	40.85	S76	92.88	S112	170.20	S148	189.25	S184	361.04	S220	159.24
S5	36.80	S41	11.48	S77	174.81	S113	260.02	S149	291.67	S185	78.59	S221	923.15
S6	54.34	S42	101.45	S78	57.21	S114	893.20	S150	141.46	S186	263.78	S222	460.12
S7	26.88	S43	12.85	S79	15.20	S115	168.81	S151	159.10	S187	49.88	S223	93.33
S8	4.75	S44	108.37	S80	21.83	S116	183.72	S152	103.67	S188	159.26	S224	79.46
S9	34.82	S45	22.81	S81	41.27	S117	369.01	S153	116.56	S189	74.62	S225	67.44
S10	56.03	S46	53.88	S82	22.41	S118	274.76	S154	77.21	S190	367.60	S226	32.49
S11	12.69	S47	91.11	S83	19.30	S119	455.49	S155	73.18	S191	74.49	S227	168.56
S12	34.31	S48	36.31	S84	30.61	S120	775.46	S156	74.55	S192	222.11	S228	119.34
S13	56.85	S49	4.68	S85	113.62	S121	188.01	S157	149.14	S193	84.07	S229	104.21
S14	80.25	S50	12.00	S86	5.00	S122	627.96	S158	25.78	S194	12.85	S230	229.07
S15	46.31	S51	64.62	S87	91.90	S123	258.51	S159	22.68	S195	118.52	S231	294.17
S16	66.91	S52	21.73	S88	98.63	S124	69.85	S160	159.03	S196	273.16	S232	127.12
S17	5.79	S53	3.63	S89	140.18	S125	103.48	S161	80.49	S197	509.26	S233	68.43
S18	73.06	S54	114.11	S90	275.12	S126	225.54	S162	88.15	S198	141.17	S234	103.85
S19	37.72	S55	10.54	S91	238.74	S127	184.34	S163	3.05	S199	33.66	S235	73.50
S20	26.01	S56	43.18	S92	217.21	S128	579.97	S164	18.42	S200	84.97	S236	69.18
S21	95.36	S57	90.92	S93	279.46	S129	60.87	S165	22.86	S201	109.84	S237	58.20
S22	7.07	S58	6.02	S94	14.49	S130	45.83	S166	177.81	S202	69.52	S238	4.10
S23	29.48	S59	32.11	S95	239.40	S131	22.63	S167	116.53	S203	86.83	S239	54.03
S24	108.76	S60	24.29	S96	195.03	S132	52.04	S168	109.28	S204	20.01	S240	474.75
S25	153.07	S61	15.71	S97	421.66	S133	140.04	S169	75.05	S205	54.69	S241	41.86
S26	20.26	S62	14.88	S98	133.75	S134	114.37	S170	73.81	S206	184.04	S242	6.02
S27	3.13	S63	32.03	S99	106.89	S135	89.89	S171	58.87	S207	161.56	S243	34.98
S28	62.17	S64	28.61	S100	140.37	S136	117.49	S172	110.59	S208	111.68	S244	16.76
S29	118.05	S65	77.65	S101	213.14	S137	59.30	S173	811.35	S209	139.49	S245	7.61
S30	12.51	S66	3.06	S102	123.75	S138	143.30	S174	232.81	S210	80.42	S246	106.08
S31	55.97	S67	10.39	S103	91.86	S139	69.21	S175	57.51	S211	51.36	S247	8.95
S32	4.55	S68	29.20	S104	115.00	S140	63.87	S176	43.42	S212	174.43	S248	14.60
S33	37.23	S69	39.08	S105	6.84	S141	119.45	S177	109.99	S213	151.88	S249	4.59
S34	8.87	S70	5.85	S106	20.44	S142	63.67	S178	35.70	S214	59.76		
S35	23.61	S71	13.22	S107	147.11	S143	120.33	S179	5.06	S215	73.27		
S36	118.43	S72	44.42	S108	53.29	S144	205.51	S180	8.31	S216	325.40		

3 浅层地下水高碘分布特征

根据采样点位置和测试结果,绘制研究区浅层地下水 I 含量分布图(图2)。

I 含量 $<40\text{ }\mu\text{g/L}$ 的低碘地下水分布区面积为 $1\,377.1\text{ km}^2$,占总面积的 12.30% ,主要分布于南部鹿邑县和柘城县附近。

I 含量 $40\sim 100\text{ }\mu\text{g/L}$ 的中碘地下水分布区面积为 $4\,001.1\text{ km}^2$,占总面积的 35.73% ,主要以条带状分布于通许县—太康县—柘城县一带,其次以斑块状分布于宁陵县北部、开封县北部和鹿邑县附近。

I 含量 $>100\text{ }\mu\text{g/L}$ 的高碘地下水分布区面积为 $5\,818.9\text{ km}^2$,占总面积的 51.97% ,大范围分布于北部、东北部,其次分布于太康县的东部地区。

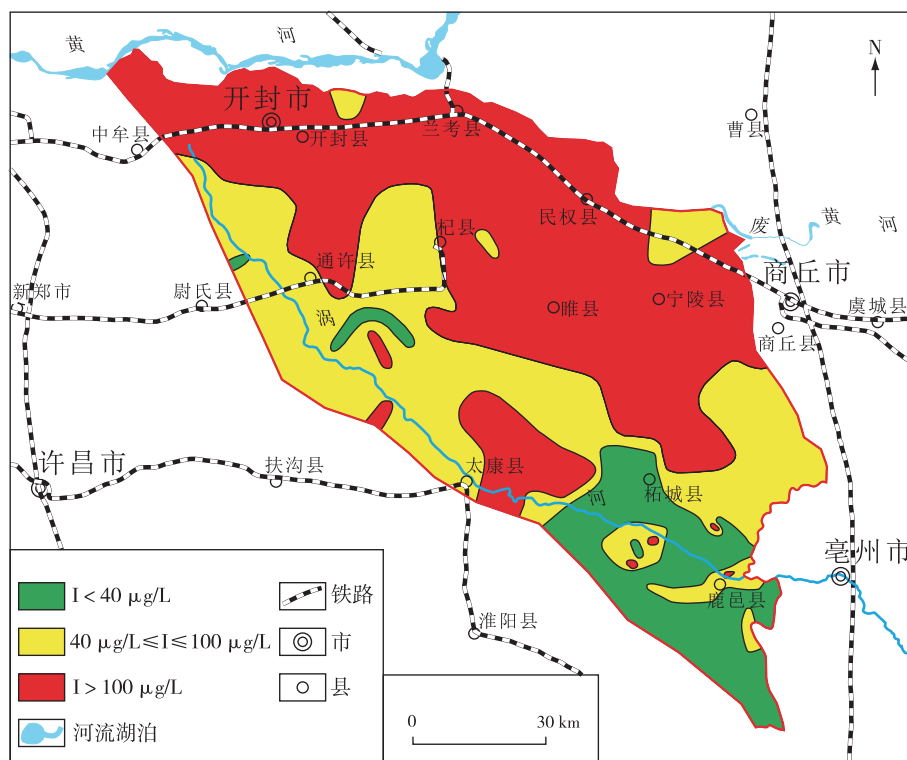


图2 研究区浅层地下水碘含量分布图

Fig. 2 Distribution of iodine contents in shallow groundwater in the study area

4 浅层地下水高碘的物质来源

研究区浅层地下水中的碘主要来源为第四纪松散沉积物中的碘。

根据相关文献资料^[8-9],研究区北部的开封市表层土壤(0~20 cm)I 含量为 $(0.34\sim 10.01)\times 10^{-6}$,平均值 1.93×10^{-6} ,中值为 1.84×10^{-6} ;南部的商丘地区表层土壤(0~20 cm)中碘的背景值为 1.91×10^{-6} ,深层土壤(150 cm 以下)中碘的基准值为 1.30×10^{-6} 。对比沉积物和浅层地下水中的碘含量,沉积物中的 I 含量远大于浅层地下水中的 I 含量,反映在长期的溶解-沉淀、吸附-解吸等水-岩相

互作用的过程中,沉积物中的碘能缓慢释放进入浅层地下水中^[10-12]。

5 浅层高碘地下水形成原因

5.1 气候因素

碘在地下水中的富集与气候条件密切相关,以往的研究^[13-15]表明,强烈的蒸发作用,往往可能造成地下水中的碘含量升高。研究区地处中纬度北温带,受蒙古高压、太平洋副热带高压交替控制,属温带大陆型季风气候。据商丘国家基准气候站1961—2011年资料记载^[16],研究区气温、降水量和蒸发量如表2所示。

表 2 商丘国家基准气候站 1961—2011 年气温、降水量、蒸发量平均值^[16]

Table 2 Average values of temperature, precipitation and evaporation of Shangqiu national benchmark climate station from 1961 to 2011^[16]

	全年	春季	夏季	秋季	冬季
气温/℃	14.3	14.5	26.2	14.8	1.4
降水量/mm	705.9	130.5	390.1	143.0	42.2
蒸发量/mm	1 460.6	457.7	558.3	293.0	151.0

由此可知,研究区降水量在年内分布不均匀,相对比较集中在雨季,大气降水通过包气带入补给浅层地下水时,对包气带中的可溶性含碘矿物进行淋滤,形成具有一定碘浓度的溶液进入含水层。在这个

过程中,包气带中的碘向浅层地下水中转移。旱季蒸发作用强烈,靠近地表的支持毛细水在高温下不断转换成气态,浅层地下水不断通过毛细作用进行补充使得蒸发作用得以继续。在这个过程中,碘将滞留在浅层地下水中,碘含量将逐渐升高。

研究区的平均蒸发量和平均降水量之比为 2.07,降水的淋滤过程和地下水的蒸发作用不对应,地下水盐化效应明显,导致碘聚集,这是研究区成为高碘区的重要原因。

5.2 地形地貌控制下的地下水流场

根据地形、地下水流向和地下水流场,在剖面线 A-A' 所在位置绘制研究区地形地貌剖面图以及地下水径流示意图,如图 3 所示。

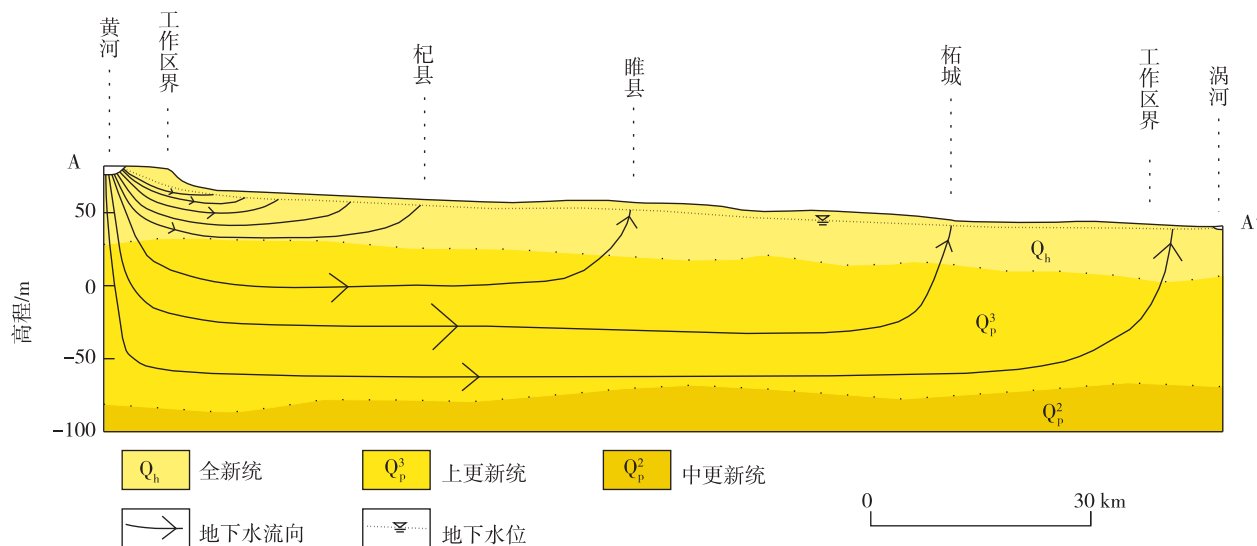


图 3 研究区地形地貌剖面图以及地下水径流示意图

Fig. 3 Topographic section and schematic diagram of groundwater runoff in the study area

区内地形总体上呈北高南低态势,北部黄河附近高程可达 80 多 m;沿地下水流向,地面高程至中部睢县附近降至 55~60 m;南部涡河附近高程降至 40 m 左右。根据相关资料^[17]可知,黄河水对南岸涡河流域地下水的补给深度可达 200~300 m,对南岸深层地下水的影响可到达亳州地区。由于本区第四纪松散沉积物分布不均匀,砂质黏土、黏质砂土、粉砂、细砂相互之间呈透镜体状覆盖,因此浅层地下水和深层地下水没有绝对的隔水层,存在天窗等现象。浅层地下水和深层地下水之间有水力联系,存在着补排关系。

黄河水可以源源不断地补充研究区地下水。

地下水在入渗和径流的过程中,第四纪松散沉积物中的碘缓慢进入地下水中。在排泄区,随着蒸发作用,浅层地下水中的碘逐渐浓缩而形成浅层高碘地下水^[18-20]。

5.3 农业灌溉的影响

近几十年来,随着农业灌溉技术的提高,农业灌溉方式也随着转变,农业灌溉除了使用地表水外,还大量抽取地下水用于灌溉。每一次抽取地下水灌溉庄稼,相当于产生一次小范围的蒸发作用和淋滤作用,从而使得浅层地下水中的碘进一步浓缩(图 4)。随着时间的推移,浅层地下水中的碘浓度将逐渐升高^[21-22]。

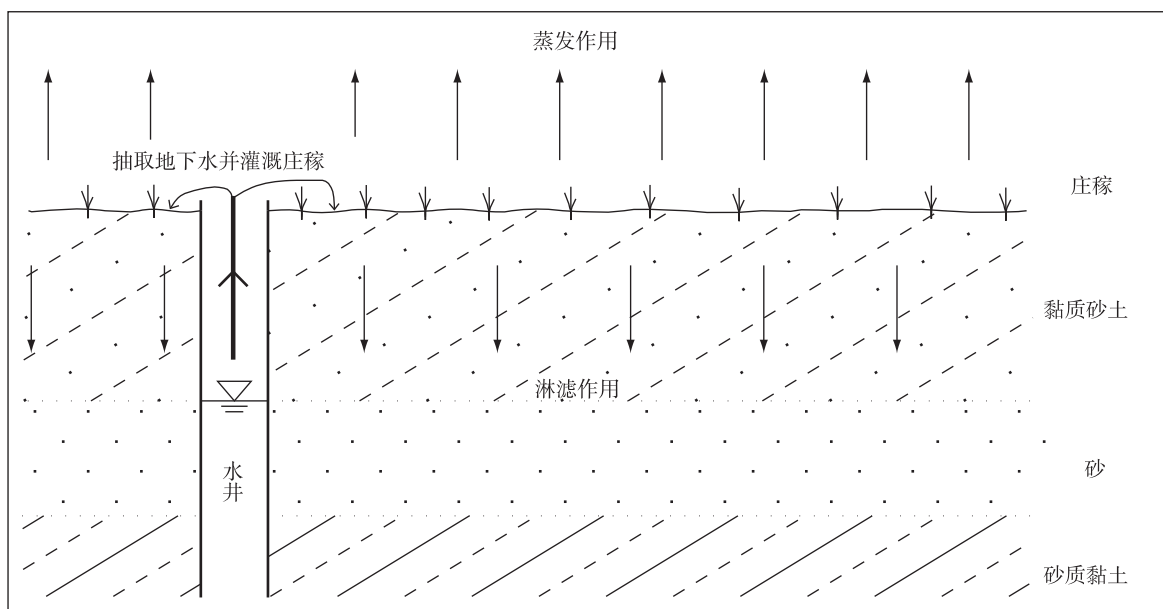


图4 抽取地下水灌溉庄稼示意图

Fig. 4 Schematic diagram of pumping groundwater to irrigate crops

6 结论

(1) 涡河流域河南段浅层高碘地下水的面积为 5 818.9 km², 占总面积的 51.97%, 大范围分布于北部、东北部, 其次分布于太康县的东部地区。

(2) 降水的淋滤过程和地下水的蒸发作用不对应的气候特征, 使得碘有聚集的趋势, 这是研究区成为高碘区的重要原因。地形地貌控制下的地下水流场使得补给区和径流区的碘缓慢进入地下水中; 在排泄区, 随着蒸发作用, 浅层地下水中的碘逐渐浓缩而形成浅层高碘地下水。每一次抽取与灌溉地下水行为就相当于产生一次小范围的蒸发作用和淋滤作用, 从而使得浅层地下水中的碘进一步浓缩。

(3) 第四纪松散沉积物中的碘是研究区浅层地下水碘的主要来源, 为浅层高碘地下水提供物质基础。

参考文献

- [1] 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.
SUN Y B. Formation mechanism and human health influence of fluorine and iodine of groundwater in Wei River Basin[D]. Xian: Changan University, 2014.
- [2] 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.
XU Q, LIU X D, TANG Q F, et al. High iodine geochemical characteristics of the groundwater in central Shanxi Province[J]. Geology in China, 2010, 37(3): 809-815.
- [3] 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 Hetiao Plain, Inner Mongolia[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2012, 39(5): 8-15.
- [4] 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.
LU X R, YANG L, LU H, et al. A tentative discussion on the control factors of iodine content in phreatic water in Huaihe River Plains of Jiangsu Province[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2014, 35(2): 211-216.
- [5] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. GB/T 19380—2016 水源性高碘地区和高碘病区的划定[S]. 2016.
National Health Commission of the People's Republic of China. GB/T 19380—2016 Definition and demarcation of

- water-borne iodine-excess areas and iodine-excess endemial areas[S].2016.
- [6] 中华人民共和国国家卫生健康委员会. WS/T 669—2020 碘缺乏地区和适碘地区的划定[S].2020.
National Health Commission of the People's Republic of China. WS/T 669—2020 Definition and demarcation of iodine deficient areas and iodine adequate areas [S].2020.
- [7] 中华人民共和国国家卫生健康委员会. 全国生活饮用水水碘含量调查报告[EB/OL]. (2019-05-17)[2022-04-05]. <http://www.nhc.gov.cn/jkj/s5874/201905/bb1da1f5e47040e8820b9378e6db4bd3.shtml>.
National Health Commission of the People's Republic of China. Investigation report on iodine content of drinking water in China[EB/OL]. (2019-05-17)[2022-04-05]. <http://www.nhc.gov.cn/jkj/s5874/201905/bb1da1f5e47040e8820b9378e6db4bd3.shtml>.
- [8] 张云霞,李玲,付巧玲,等. 开封市土壤地球化学元素分布特征研究[J]. 土壤通报,2014,45(2):272-280.
ZHANG Y X, LI L, FU Q L, et al. Geochemical distribution characteristics of soil elements in Kaifeng City[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2014, 45(2): 272-280.
- [9] 张妍,李玉嵩,盛奇,等. 河南省商丘地区土壤地球化学特征[J]. 现代地质,2019,33(2):305-314.
ZHANG Y, LI Y S, SHENG Q, et al. Soil geochemical characteristics of Shangqiu area in Henan Province[J]. Geoscience, 2019, 33(2): 305-314.
- [10] 李云峰,张庆,周小平,等. 安庆大别山区矿泉水化学特征及成因模式[J]. 华东地质,2021,42(2):193-201.
LI Y F, ZHANG Q, ZHOU X P, et al. Chemical characteristics and genetic model of mineral water in Dabie Mountain area of Anqing City[J]. East China Geology, 2021, 42(2): 193-201.
- [11] 郟海满,文帮勇,王继强,等. 江西赣州梓山地区富硒土壤重金属元素安全性评价[J]. 华东地质,2017,38(3):234-240.
QIE H M, WEN B Y, WANG J Q, et al. Safety evaluation of heavy metal contents in selenium-rich soil in the Zishan area, Ganzhou, Jiangxi Province[J]. East China Geology, 2017, 38(3): 234-240.
- [12] SHEPPARD M I, THIBAUT D H, SMITH P A. I-iodine dispersion and effects on groundwater chemistry following a release to a peat bog, Manitoba, Canada [J]. Geochemistry, 1989, 4: 423-432.
- [13] 董陆阳. 河套平原区碘和砷地球化学特征及地方病控制因素[D]. 北京:中国地质大学(北京),2019.
DONG L Y. Geochemical characteristics of iodine and arsenic and controlling factors of endemic diseases in Hetao Plain[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2019.
- [14] 韩颖,张宏民,张永峰,等. 大同盆地地下水高砷、氟、碘分布规律与成因分析及质量区划[J]. 中国地质调查, 2017, 4(1): 57-68.
HAN Y, ZHANG H M, ZHANG Y F, et al. Distribution regularity, origin and quality division of high arsenic, fluorine and iodine contents in groundwater in Datong Basin[J]. Geological Survey of China, 2017, 4(1): 57-68.
- [15] 吴飞,王曾祺,童秀娟,等. 我国典型地区浅层高碘地下水分布特征及其赋存环境[J]. 水资源与水工程学报, 2017, 28(2): 99-104.
WU F, WANG Z Q, TONG X J, et al. The distribution characteristics and storage environments of rich iodine in shallow groundwater of typical areas in China [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2017, 28(2): 99-104.
- [16] 张艳玲. 河南省商丘 51 年来气候变化特征分析[J]. 河南科学, 2013, 31(8): 1262-1266.
ZHANG Y L. Climate variation characteristics in recent 51 years in Shangqiu, Henan Province [J]. Henan Science, 2013, 31(8): 1262-1266.
- [17] YE N J, GONG J S, GE W Y, et al. Environmental isotopic study for groundwater of the North Plain of Huai He River, China [C]//International Atomic Energy Agency. Advances in Isotope Hydrology and its Role in Sustainable Water Resources Management (IHS-2007). Vienna: International Atomic Energy Agency, 2007: 177-186.
- [18] 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.
ZHANG E Y, ZHANG F C, QIAN Y, et al. The distribution of high iodine groundwater in typical areas of China and its inspiration[J]. Geology in China, 2010, 37(3): 797-802.
- [19] YANG X Q, ZHENG Q, HE M, et al. Bromine and iodine species in drinking water supply system along the Changjiang River in China: Occurrence and transformation [J]. Water Research, 2021, 202: 1-9.
- [20] 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. Dis-

- tribution characteristics and cause analysis of iodine in groundwater of Cangzhou Region[J]. *Earth Science Frontiers*, 2014, 21(4): 59-65.
- [21] LI J X, WANG Y X, XIE X J, et al. Effects of water-sediment interaction and irrigation practices on iodine enrichment in shallow groundwater [J]. *Journal of Hydrology*, 2016, 543: 293-304.
- [22] 宋秀辉. 土壤-作物系统中碘的迁移转化研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2006.
- SONG X H. Study on transfer and transform of iodine in soil-crop system [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2006.

Distribution and genesis of high iodine shallow groundwater in Henan section of Guohe Basin

YE Yonghong^{1,2}, GONG Jianshi^{1,2}, XU Naizheng^{1,2}, ZHANG Fei^{1,2}, WANG Hesheng^{1,2},
LI Liang^{1,2}, ZHOU Kaie^{1,2}, ZHU Chunfang^{1,2}, TAO Xiaohu^{1,2}, TAN Mengjiao^{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: By analyzing 249 groups of shallow groundwater samples in Henan section of Guohe Basin, it is found that the area of high iodine shallow groundwater covers 5 818.9 km², accounting for 51.97% of the total. It is widely distributed in the north and northeast of the study area, followed by the east of Taikang County. Iodine in the shallow groundwater of the study area is mainly sourced from the Quaternary loose sediments. The combination of climate condition, the groundwater flow field constrained by topography and the groundwater pumping for crops irrigation is the prerequisite for the gradual concentration of iodine in the shallow groundwater.

Key words: Guohe Basin; Henan section; high iodine groundwater; shallow groundwater; groundwater flow field