

珠江三角洲地区地下水中铁的时空变异特征及影响因素

刘 畅¹, 余香英¹, 郜志云², 罗育池¹

(1. 广东省环境科学研究院, 广东 广州 510000;
2. 生态环境部环境规划院, 北京 100012)

摘 要:为掌握珠江三角洲地区地下水中铁的时空变异特征及影响因素, 分析了375组地下水样品。结果表明: 区内地下水铁含量范围0~68.60 mg/L, 平均值1.64 mg/L, 总体上, 深层地下水铁平均值高于浅层, 丰水期地下水铁平均值高于枯水期, 2013~2016年地下水铁平均值较2005~2006年略有升高。采用空间趋势分析和Spearman相关分析发现, 本区地下水铁含量受氧化还原环境和人类活动影响相对较大, 氧化还原电位越低, 铁含量越高, 且铁含量较高点相对集中于人口集中的河网密集区, 受水质较差河流补给及农业面源三氮淋溶作用等影响。补给径流条件、pH值和海水入侵对区内地下水铁含量影响相对较小。

关键词: 珠江三角洲; 地下水; 铁; 时空变异特征; 影响因素

中图分类号: X523

文献标志码: A

DOI: 10.16803/j.cnki.issn.1004-6216.2020.01.017

Spatial and Temporal Variation Characteristics and Its Influencing Factors of Iron in Groundwater in Pearl River Delta

LIU Chang¹, YU Xiangying¹, GAO Zhiyun², LUO Yuchi¹

(1. Guangdong Provincial Academy of Environmental Science, Guangdong 510000, China; 2. Environmental Planning Department of the Ministry of Environmental Protection, Beijing 100012, China)

Abstract: In order to understand the spatial and temporal variation characteristics and its influencing factors of the iron in groundwater in the Pearl River Delta region, 375 samples of groundwater are analyzed. The results indicate that the iron content ranges from 0 to 68.60 mg/L with an average of 1.64 mg/L in the groundwater of this region. The iron content in the deep groundwater is higher than that in the shallow groundwater. The content in the rain season is higher than that in the dry season. And the average content increases slightly from 2005–2006 to 2013–2016. The spatial trend analysis and Spearman correlation results also show that, the iron content in groundwater of this region is strongly affected by the REDOX environment and the human activity. The iron content is higher with a lower REDOX potential. And the high iron content positions are generally in the densely populated brooky areas. These positions are influenced by the polluted river and three nitrogen leaching in the agricultural non-point source area. The recharge runoff and pH value as well as the seawater intrusion have a little impact on the iron content in the groundwater.

Keywords: Pearl River Delta; Groundwater; Iron; Spatial and Temporal Variation Characteristics; Influencing Factors

CLC number: X523

1 研究区概况

珠江三角洲地区位于广东省东南部, 东经111°59'42"~115°25'18", 北纬21°17'36"~23°55'54"。行政辖区包括广州市、深圳市、珠海市、东莞市、中山市、江门市、佛山市(顺德区)、惠州市和肇庆市, 陆地总面积41 689 km², 是广东省经济社会发展的

龙头和主体, 也是我国沿海地带最发达、经济发展最快的三大经济单元之一。区内东、西、北三面低山环绕, 中部平原地势低平, 河网纵横交错, 属南亚热带季风湿润气候。

2 采样点分布及数据检验

2013~2016年在珠江三角洲地区对地下水进

收稿日期: 2019-06-10

基金项目: 生态环境部专项、广东省省级环境保护专项-广东省地下水基础环境状况调查评估资助

作者简介: 刘 畅(1986-), 女, 硕士、工程师。研究方向: 地下水环境保护。E-mail: 316532479@qq.com

引用格式: 刘 畅, 余香英, 郜志云, 等. 珠江三角洲地区地下水中铁的时空变异特征及影响因素[J]. 环境保护科学, 2020, 46(1): 97-100.

行了监测,采样点包括地下水环境监测井、机井、民井和泉等。根据《地下水环境监测技术规范》(HJ/T164—2004)^[1]采集与分析地下水样品,并对所获数据进行异常值判定与剔除,最终得到有效数据 375 组,对应采样点类型及分布见表 1、图 1。

表 1 采样点信息统计表

采样点类型	样点数/个	比例/%	井深范围/m
地下水环境监测井	原有	96	25.6
	新建	197	52.5
机井	12	3.2	40.10 ~ 109.80
供水井	6	1.6	40.40 ~ 80.30
民井	59	15.7	2.00 ~ 54.33
泉	5	1.3	—
总计	375	100	1.93 ~ 245.10

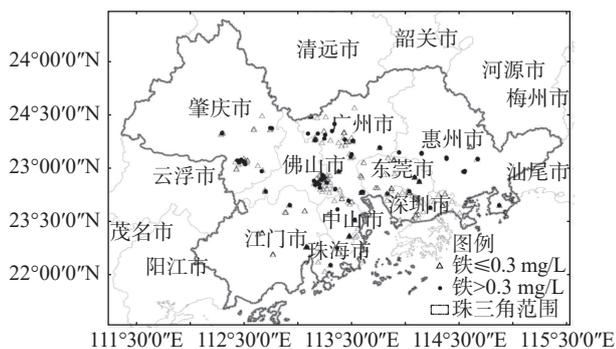


图 1 采样点分布图

3 地下水中铁的分布特征

3.1 铁的空间变异特征

应用 SPSS 软件进行统计,区内地下水铁含量

表 2 不同深度地下水铁含量特征统计

地下水	监测井深度/m	样点数/个	比例/%	含量范围/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	平均值/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	中数/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	变异系数/%
浅层	<30	222	50.80	0 ~ 68.60	1.44	0.05	453.19
深层	>30	93	21.28	0 ~ 58.90	2.79	0.07	348.10

注:部分采样点井深未知,未纳入分析。

表 2 可知,深层地下水铁含量高于浅层地下水,且其空间变异性较浅层地下水小。

3.2 铁的时间变化特征

对比早期研究成果^[3-4],2005 ~ 2006 年区内地下水铁平均值达到 1.46 mg/L ,本次调查阶段 2013 ~ 2016 年增加至 1.64 mg/L ,略有上升。同时,总体上 2013 ~ 2016 年丰水期地下水铁平均值高于枯水期,见表 3。其中,广州、佛山、惠州和肇庆丰

介于 0 ~ 68.60 mg/L ,平均值 1.64 mg/L ,总体水平较高,铁含量经对数转换后符合偏态分布。375 个样点中达到《地下水质量标准》(GB/T 14848—2017)^[2] I ~ III 类标准($\leq 0.3 \text{ mg/L}$)的占 77.07%。含量较高的样点位于顺德、中山和珠海等河网相对密集区域见图 1。

分别以横坐标代表采样点经度或纬度,以纵坐标代表某一经度或纬度采样点地下水铁含量的大小,对地下水铁含量进行空间趋势分析见图 2。

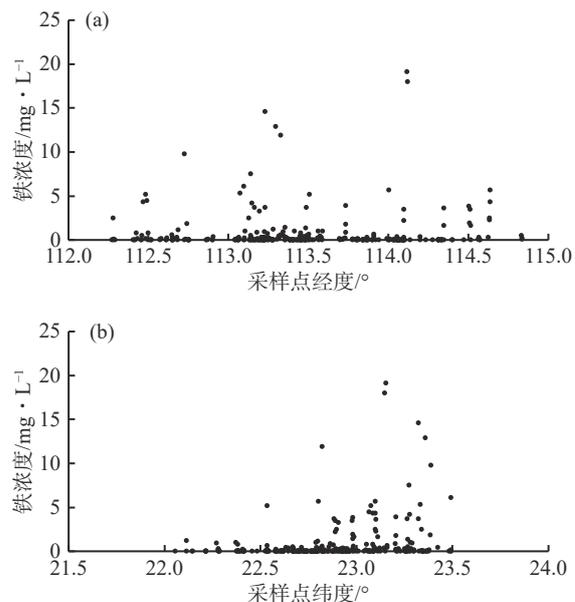


图 2 地下水中铁的空间趋势变化图

图 2(a)可见,区内地下水铁含量东西方向变化趋势不显著,随着纬度降低,即自北向南,地下水铁含量变化趋势为先增大后减小。

对比区内不同深度地下水铁含量平均值及变异系数,见表 2。

水期地下水铁平均值高于枯水期,深圳、珠海、顺德区和东莞丰水期地下水铁平均值低于枯水期,中山、江门分别只在枯水期和丰水期进行了地下水监测,见表 4。

4 铁分布特征的影响因素

铁在地壳中属于丰度较高的元素,大量分散存在于地壳的岩石、土壤、水体中。地下水中铁的赋

表 3 珠江三角洲地区铁含量特征统计

采样时间		样点数/个	含量范围/mg·L ⁻¹	平均值/mg·L ⁻¹	超标率/%
2005 ~ 2006年	总体	352	0 ~ 94.80	1.46	24.40
	总体	375	0 ~ 68.60	1.64	22.93
2013 ~ 2016年	丰水期 (4月 ~ 9月)	154	0 ~ 52.30	2.16	/
	枯水期 (10月 ~ 次年3月)	203	0 ~ 69.00	1.39	/

注：2013 ~ 2016年部分采样点采样时间缺失，未纳入分析；超标率指超过《地下水质量标准：GB/T 14848—2017》Ⅲ类标准，≤0.3 mg/L。

表 4 各地市 2013 ~ 2016 年铁含量特征统计

地市	采样时间	样点数/个	含量范围 /mg·L ⁻¹	平均值 /mg·L ⁻¹
广州	丰水期	40	0 ~ 37.00	2.25
	枯水期	18	0.01 ~ 3.90	0.57
深圳	丰水期	13	0 ~ 0.02	0.00
	枯水期	41	0 ~ 68.60	1.69
珠海	丰水期	7	0 ~ 1.22	0.18
	枯水期	1	1.01 ~ 1.01	1.01
佛山	丰水期	12	0.02 ~ 7.49	1.19
	枯水期	13	0 ~ 0.00	0.00
顺德区	丰水期	11	0 ~ 11.90	1.28
	枯水期	40	0 ~ 58.90	3.88
惠州	丰水期	16	0.29 ~ 52.30	11.01
	枯水期	9	0 ~ 0.64	0.25
东莞	丰水期	9	0 ~ 0.08	0.03
	枯水期	37	0.01 ~ 5.70	0.40
中山	枯水期	28	0 ~ 5.15	0.34
江门	丰水期	31	0 ~ 0.40	0.06
肇庆	丰水期	15	0 ~ 21.90	2.26
	枯水期	16	0 ~ 9.76	1.24
总计	—	357	0 ~ 68.60	—

注：2013 ~ 2016年部分采样点采样时间缺失，未纳入分析。

存形式极为复杂，其水文地球化学特征除和含水介质岩性密切相关外，还受地下水补给径流条件、氧化还原环境、pH 值和人类活动等多种因素共同影响。

4.1 补给径流条件

珠江三角洲地区南临南海，东部、西部、北部三面环山为低山丘陵区，中部为平坦开阔的三角洲平原及条带状或树枝状的河流冲洪积阶地、山间谷地。低山丘陵区主要分布基岩裂隙水，地下水普遍为潜水，容易获得降雨或地下水体的入渗补给，其补给区接近排泄区，径流途径短，水力坡度较陡，地下水赋存于以垂直循环为主、循环交替强烈的氧化环境，地下水铁含量一般都较低；三角洲平原区及山间谷地主要分布第四系松散岩类孔隙水，砂砾石含水层大都埋藏于粘土、淤泥或粉质粘土隔水层之下，地下水普遍为承压水或微承压水图 3，其水力坡度平缓、补径排途径长，地下水赋存于以水平径流为主、循环交替较弱或较为封闭的还原环境中，地下水铁离子含量一般都高于山区基岩裂隙水，于三角洲平原中部地下水铁含量常常高于平原后缘及山前地带。

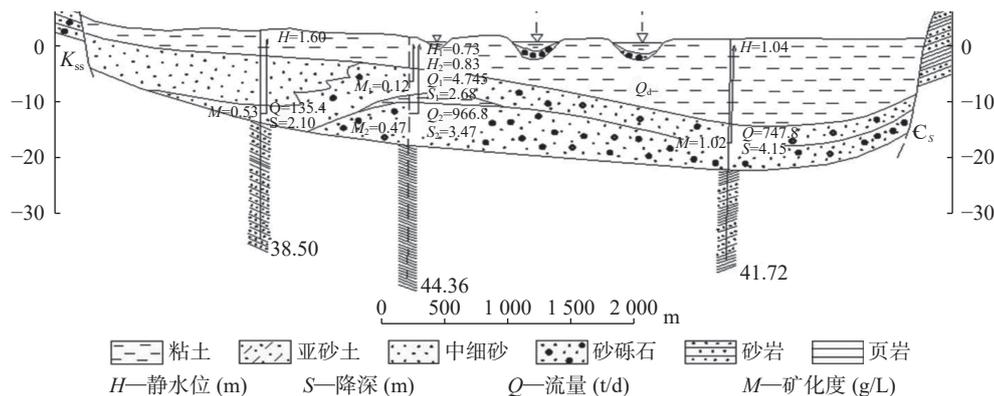


图 3 开平地区水文地质剖面图

对照图 2 的南 ~ 北向地下水铁含量全局性趋势效应变化可知，从山区至初进平原，地下水中铁含量缓慢上升，再向沿海方向延伸，铁含量逐渐降低。本区在山区至初进平原区域，地下水中铁含量随径流条件变差而呈缓慢升高的趋势，靠近沿海，其它因素对铁含量的影响增强，铁含量受地下水径

流条件影响不再显著。

4.2 氧化还原环境和 pH 值

地下水处于氧化环境时，铁多被氧化成 Fe³⁺以沉淀的形式从地下水中析出，地下水中铁含量降低；地下水处于还原环境时，铁多以 Fe²⁺形式存于地下水中，地下水中铁含量升高。相关研究表明，pH 从

8 减少到 6 时,铁在水中的溶解度增加 10^6 倍;在氧化带内 Fe^{3+} 的活度没有达到 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 的溶度积时,铁的可能最大稳定形势是 $\text{Fe}(\text{OH})_3$,在 $\text{pH}<5$ 时, $\text{Fe}(\text{OH})^{2+}$ 及 $\text{Fe}(\text{OH})_2^+$ 占优势,在还原环境内, $\text{pH}>8$ 时才会出现 FeCO_3 沉淀,之后是 $\text{Fe}(\text{OH})_2$ 占优势。

为分析珠江三角洲地区地下水氧化还原环境和 pH 值对铁含量的影响程度,在区内地下水铁含量不符合正态分布的条件下,采用 Spearman 相关分析评价氧化还原电位(Eh)、pH 值和铁的相关性^[5-6],相关分析数据见表 5。

表 5 珠江三角洲地区铁与其他因子相关分析

项目	Eh	pH	NO_3^-	TDS
Spearman 相关系数	-0.265*	0.008	-0.242*	0.027
Sig. (双侧)	0.000	0.881	0.000	0.599
N	226	329	375	375

注:“Sig. (双侧)”指双侧检验时相关系数的P值;“N”指纳入分析的观察量,即样本量;“*”代表在置信度(双侧)为 0.01 时,相关性是显著的。

结果表明,区内地下水氧化还原电位与铁含量存在负相关。地下水氧化还原电位越低,铁含量越高;同时,丰水期地下水位上升导致部分包气带变为饱水状态,含水层中溶解氧降低,还原程度增强,沉积物中铁的氧化物、氢氧化物发生还原作用生成 Fe^{2+} 进入地下水中,同时部分 Fe^{3+} 转化为 Fe^{2+} ,使得总铁含量增高,总体上,区内地下水丰水期铁平均值高于枯水期,见表 3。

区内地下水 pH 值与铁含量不存在显著相关性,地下水酸碱度总体对珠江三角洲地区地下水铁含量影响较小。

4.3 人类活动

根据珠江三角洲地区地下水铁含量空间分布特征如图 1,地下水铁含量较高点相对集中分布在人口集中的河网密集区。2013~2017 年期间,区内龙岗河、坪山河、深圳河和练江江段水质属重度污染,间接导致与其水力联系密切的地下水也受到相应的污染。同时,珠江三角洲地区农业仍然占据重要地位,东莞等地区农业面源污染严重^[7],三氮在淋溶作用下,会迁移至地下水,使水中硝酸根浓度增加,进而促进铁锰的溶解,导致地下水中铁锰浓度升高^[8]。

4.4 其他因素

地下水受海水入侵作用后,矿化度和 Cl 相应增高,“盐”效应逐渐增强,地下水中 Na^+ 、 Ca^{2+} 向吸附体交换出铁,地下水的铁含量升高^[9]。本次研究

发现,地下水矿化度范围 0.025~4.01 g/L,以淡水($\text{TDS}<1$ g/L)为主,微咸水(1 g/L $<$ TDS <3 g/L)和半咸水(3 g/L $<$ TDS <5 g/L)分别占样点总数的 7.61% 和 2.03%,分析发现,区内地下水矿化度和铁含量不存在显著相关性(表 4),海水入侵不是造成本区地下水铁含量升高的主要诱因。

5 结论

(1) 珠江三角洲地区地下水铁含量介于 0~68.60 mg/L,平均值 1.64 mg/L,总体上,深层地下水铁平均值高于浅层地下水,丰水期地下水铁平均值高于枯水期,2013~2016 年地下水铁平均值略高于 2005~2006 年。

(2) 区内地下水铁含量受氧化还原环境和人类活动影响相对较大。地下水氧化还原电位和铁存在较好的相关性,氧化还原电位越低,铁含量越高;铁含量较高点相对集中分布在人口集中的河网密集区,受水质较差河流补给及农业面源三氮淋溶作用等影响。

(3) 补给径流条件、pH 值和海水入侵对区内地下水铁含量影响相对较小。仅在山区至初进平原区域,地下水中铁随径流条件变差而呈缓慢升高的趋势。pH 值、矿化度与铁均不存在显著相关性,本区内地下水铁含量受 pH 值、矿化度影响不显著。

参考文献

- [1] 国家环境保护总局. 地下水环境监测技术规范: HJ/T164-2004[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2005: 4
- [2] 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. 地下水质量标准: GB/T 14848-2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017: 10
- [3] 黄冠星, 孙继朝, 荆继红, 等. 珠江三角洲地区地下水铁的分布特征及其成因[J]. 中国地质, 2008(3): 531-538.
- [4] 张英. 珠江三角洲地区地下水环境背景值研究[D]. 北京: 中国地质科学院, 2011.
- [5] 李常锁, 武显仓, 孙斌, 等. 济南北部地热水水化学特征及其形成机理[J]. 地球科学, 2018, 43(增 1): 313-325.
- [6] 刘文波, 高存荣, 刘滨, 等. 河套平原浅层地下水水化学成分及其相关性分析[J]. 中国地质, 2010, 37(3): 816-823.
- [7] 叶春, 王云鹏. GIS 支持的珠江三角洲农业面源污染时空分析[J]. 农机化研究, 2007(2): 40-43.
- [8] 敬永红. 孝新合气田浅层地下水铁锰分布规律及成因分析[J]. 石油化工安全环保技术, 2008, 24(6): 61-64.
- [9] 曾昭华. 地下水中铁元素的形成及其控制因素[J]. 地质学刊, 2003, 27(4): 220-224.