

珠江三角洲地区地下水铁的分布特征及其成因

黄冠星¹ 孙继朝¹ 荆继红¹ 汪 珊¹ 杜海燕² 刘景涛¹
陈 玺¹ 张玉玺¹ 狄效斌¹ 支兵发²

(1. 中国地质科学院水文地质环境地质研究所, 河北 石家庄 050061; 2. 广东省地质调查院, 广东 广州 510080)

摘要: 为了解珠江三角洲地区地下水中铁的含量及其成因, 采集并分析了 352 组地下水样和 12 组地表水样。分析结果表明: 珠江三角洲地区地下水铁含量为未检出~94.8 mg/L, 平均含量为 1.46 mg/L。该地区地下水铁含量的分布与其工业化程度及所处区域的补、径、排条件密切相关, 尤其在平原区, 地下水铁含量与部分地表河流的污染程度更是密切相关, 随着远离污染的地表河流, 地下水铁含量有明显减少的趋势。不同地区对其地下水铁含量起主导作用的因素也不相同, 氧化还原条件是影响珠江三角洲地区地下水铁含量分布的主要因素之一, 而酸碱条件和地面污染则只在局部地区对地下水铁含量的分布起主导作用。另外, 含水层介质组分、径流条件、上覆土层性质等因素对珠江三角洲地区地下水铁含量也都起到了一定的作用。

关键词: 珠江三角洲; 地下水; 铁含量; 分布特征; 成因

中图分类号: P641.11 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3657(2008)03-0531-08

珠江三角洲地区是广东省经济社会发展的龙头和主体, 作为改革开放的前沿阵地, 其经济的高速发展带来了越来越重的环境污染问题。广东省 2004 年公布的水资源公报表明^[1], 珠江三角洲地区大部分河段的水质已经超过了《地表水环境质量标准》(GB3838-2002), 广州、佛山以及东莞三地区的各水系尤为严重。这些水环境污染问题导致目前珠江三角洲地区出现了“水质型缺水”问题。为了缓解可利用水资源短缺问题, 有关部门已经开始组织人员进行了地下水水质调查, 希望能通过利用部分优质的地下水资源补充不足的可利用地表水资源。在这一前提下, 笔者对珠江三角洲地区地下水中铁的分布特征及其成因进行阐述。

1 研究区概况

珠江三角洲地区位于广东省中南部, 濒临南海,

毗邻港澳。区内地下水分为松散岩类孔隙水、碳酸盐岩类裂隙溶洞水、基岩裂隙水三大类。其中松散岩类孔隙水主要分布于西江、北江、潭江、流溪河等河流冲积平原。含水层岩性以粗中砂及卵砾石为主, 厚度 3~40 m, 水量中等—丰富, 西北部丘陵山区水质一般较好, 沿海及近珠江口一带水质较差(咸水或受三废污染)。碳酸盐岩类裂隙溶洞水主要分布于广花盆地、高明盆地、肇庆、从化等地, 岩性以灰岩、白云岩、大理岩、泥灰岩为主, 水量贫乏—丰富不等, 变化较大。特别是广花盆地、高明盆地等地岩溶裂隙普遍发育, 水量较丰富。基岩裂隙水主要分布于开平—恩平、肇庆市南部和北部等地, 含水层以粉砂岩、细砂岩、砂砾岩、泥质粉砂岩、石英砂岩等为主, 富水性贫乏—中等。另外, 珠江三角洲地区分布有好几个大型、特大型水源地, 如广花盆地岩溶特大型水源地、肇庆岩溶水特大型水源地、三水龙江特大型水源地、

收稿日期: 2007-10-25; 改回日期: 2007-12-28

基金项目: 中国地质调查局地质大调查项目(2010534807)资助。

作者简介: 黄冠星, 男, 1981 年生, 硕士, 主要从事地下水环境研究; E-mail: huangguanxing2004@126.com。

通讯作者: 孙继朝, 男, 主要从事水文地质研究, E-mail: gwwsun@263.net.cn。

园洲—石滩特大型水源地等,水量非常丰富。

受气象、水文、地貌、岩性、地质构造等因素影响,珠江三角洲地区地下水补给、径流、排泄具有明显的地域性特点。松散岩类孔隙水主要补给来源为降雨形成地表漫流通过表层砂性土直接入渗补给,循环交替由中游向下游逐渐变弱,水平排泄入河;三角洲海冲积层地段地下水、地表水之间水力关系复杂,丰、枯期多呈互补排特征;局部受潮汐顶托影响;滨海海积砂堤、砂地地下水受当地降水和凝结水补给,径流途径短,直接向附近海域或低洼地排泄。广大基岩出露区断裂构造发育,地表浅部岩石破碎,节理裂隙发育,有利于大气降水的渗入补给。第四纪松散岩类分布区,因地形平缓,雨后地表径流缓慢,且地表非连续分布弱透水粘土层,亦有利于地表径流入渗补给。

2 样品采集与分析

2.1 样品的采集

于2005—2006年共采集水样23批次,获取地下水样352组、地表水样12组。取样井为一些民井和现场挖坑,对于这些民井,先进行抽水,然后等恢复水位后于水下50cm左右定深取样(若民井日用水量较大,则无需抽水,直接取样);而对于这些挖坑,一般都挖到潜水位以下50cm左右,先将最初渗出的水基本排出,然后等坑水位稳定、水变清,再进行取样。所用采样瓶为2.5L的白色塑料瓶。在取完样后,贴上标签,并用胶带对瓶盖处进行缠绕、密封,采样位置见图1。

2.2 样品的分析

样品均在国土资源部广州矿产资源监督检测中心测试。执行标准参照GB/T 8538-95,铁和碳酸氢根的检测方法分别为为原子吸收法和酸碱容量法。现场测试指标pH、DO、Eh等采用德国制造的多功能便携式测试仪——Multi-340i/SET。

3 结果与讨论

3.1 珠江三角洲地区地下水中铁的分布特征

由于测试数据过多,笔者仅列出珠江三角洲地区地下水样中铁的部分参数(表1)。从表1可以看出,珠江三角洲地区地下水中铁的最小含量为未检出,最大含量为94.8mg/L,表明该地区地下水中铁含量的变化较大。其平均值为1.46mg/L,高出中国2006年的生活饮用水卫生标准限值^①近3倍,说明珠江三角洲地区地下水中铁含量总体较高(图2)。另外,从表1中还可以看出地下水样中铁含量超出饮用水卫生标准的样品数已达86组,超标率为24.4%。结合珠江三角洲地区的地形、城镇化程度等资料,从图2上可以看出珠江三角洲地区地下水高铁含量主要出现在佛山、广州中南部、东莞、惠州西南部、中山以及江门东部等城镇化程度相对较高和工业相对发达的平原区以及地下水系统的排泄区,而在广州北部以及惠州东部和北部等城镇化程度相对较低和工业化相对落后的丘陵区地下水的铁含量明显偏低,只有极个别铁含量超标的水样位于丘陵区。即珠江三角洲地区地下水中铁含量的分布与该地区的工业化程度以及所处区域的补、径、排条件密切相关。

3.2 成因分析

3.2.1 地面污染

根据相关调查资料表明,珠江三角洲地区许多中、小企业的废水处理能力极差,其大多废水都未经处理就直接排入附近的地表水体,造成该地区的许多地表河流受到严重污染,间接导致与其水力联系密切的地下水也受到相应的污染。目前地下水铁含量超标的水样有很大一部分集中在佛山市南海区以及广州的石井河沿岸(图2)。正是这些地区工厂繁多、工业化程度较高,其附近的地表水体大多受到了严重污染,如流经南海区的佛山水道以及广州的石

表1 珠江三角洲地区地下水中铁含量

Table 1 Content of iron in the groundwater of the Zhujiang delta

组分	最小值(mg/L)	最大值(mg/L)	平均值(mg/L)	标准限值(mg/L)	超标数(组)	超标率(%)
Fe	ND ^①	94.8	1.46 ^②	0.3 ^③	86	24.4

注:①“ND”表示未检出;②计算中把未检出的作零处理;③引自中国国家2006生活饮用水卫生标准。

①GB 5749-2006,生活饮用水卫生标准。

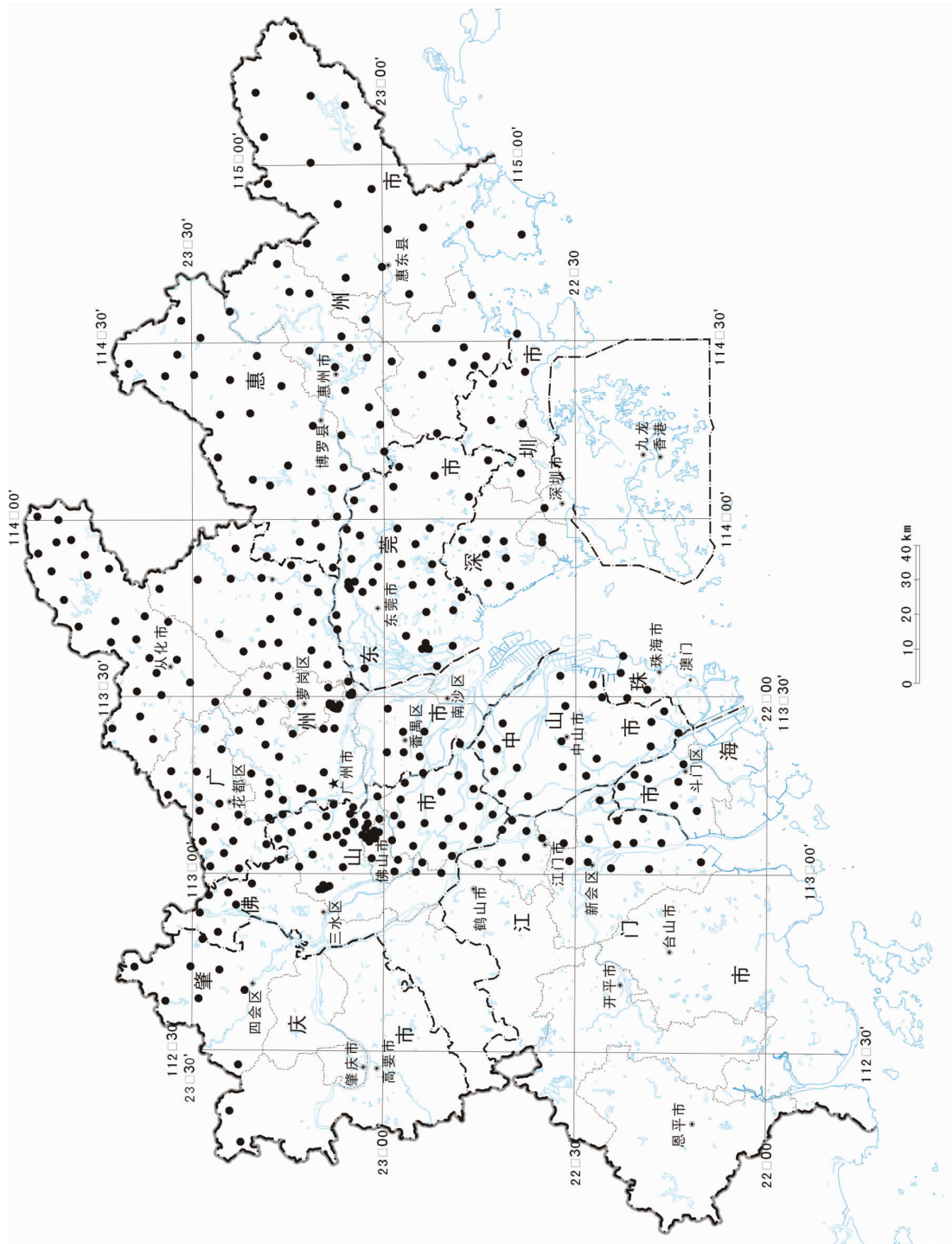


图 1 采样点分布图
Fig.1 Distribution of sampling sites

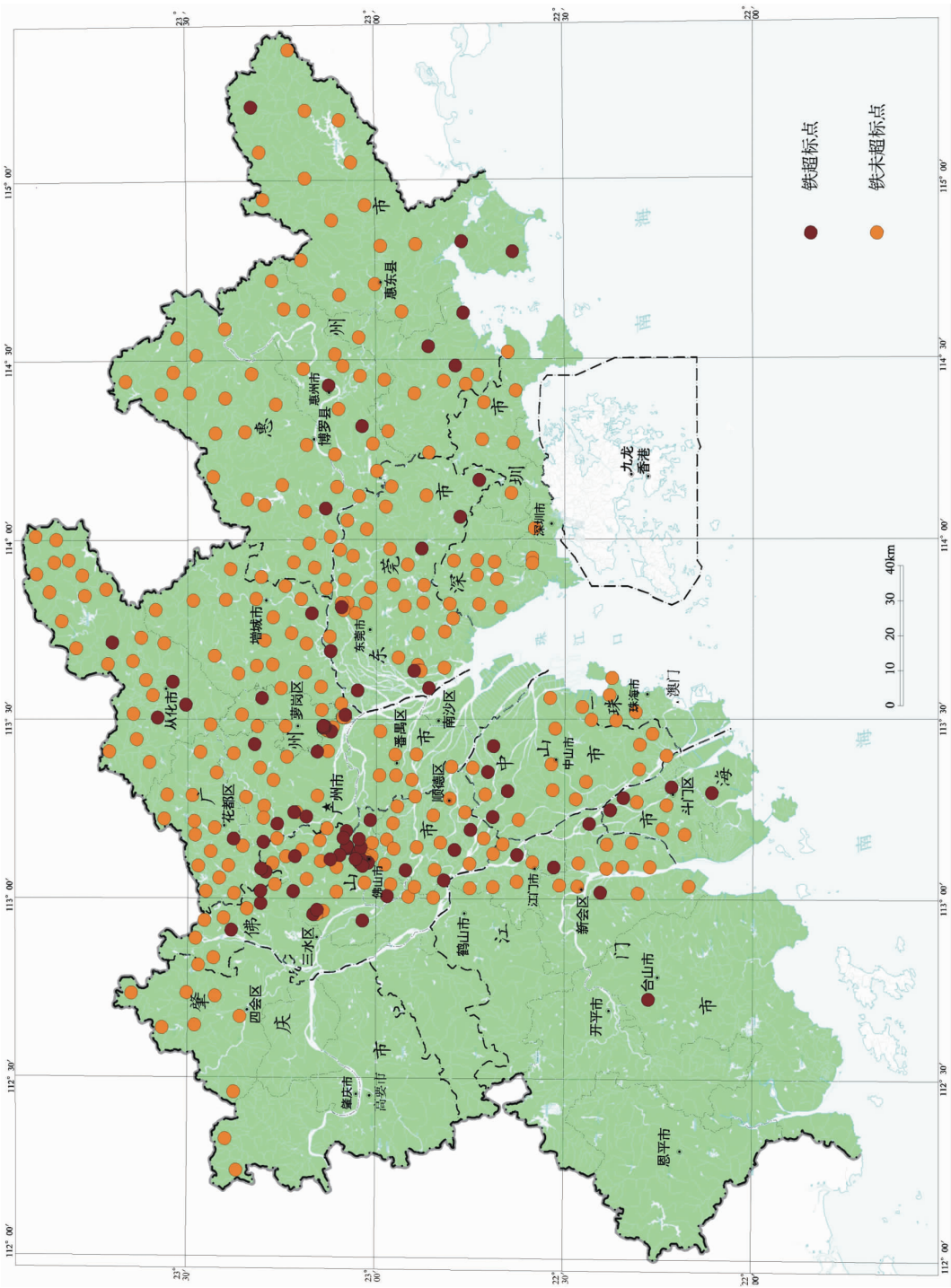


图2 珠江三角洲地区地下水中铁含量分布图
Fig.2 Distribution of iron content in groundwater of the Zhujiang delta

井河,都是受污染很重的地表河流,尤其是石井河,其河水多年处于发黑、发臭状态。从表 2 珠江三角洲地区所检选的地表水体的铁含量为 0.23~150 mg/L,可以看出绝大部分水样的铁含量都已经超过中国 2006 的生活饮用水卫生标准限值,其平均值明显高于地下水铁含量的平均值。另外,从图 3 可以看出,受附近金属厂废水污染的排污沟水体的铁含量最高,其附近的地下水也相应地受到了污染,其污染程度随远离排污沟而逐步降低。

综上所述,表明珠江三角洲地区受工业废水不合理排放的影响,部分地表水体的铁污染比较严重,导致其附近的地下水也受到相应的铁污染,且其污染程度随远离污染的地表水体而逐步降低。说明地面污染是珠江三角洲地区部分地下水铁含量分布的影响因素之一,并在局部地区起主导作用(根据调查资料显示丘陵区地下水铁含量超标的地区一般不存在铁的地面污染)。

表 2 珠江三角洲地区地表水的铁含量
Table 2 Content of iron in surface water of the Zhujiang delta

样品编号	经度	纬度	Fe(mg/L)
1	113° 06' 26.6"	23° 07' 08.2"	0.50
2	113° 09' 56.0"	23° 02' 40.9"	0.58
3	113° 13' 48.8"	23° 11' 23.8"	0.79
4	112° 47' 39.4"	23° 23' 08.5"	0.23
5	113° 38' 30.1"	22° 53' 33.8"	0.94
6	113° 48' 40.5"	23° 05' 29.5"	1.88
7	113° 57' 37.3"	23° 08' 54.8"	0.96
8	113° 18' 54.8"	23° 02' 10.8"	0.86
9	113° 08' 21.4"	23° 04' 34.9"	2.01
10	113° 08' 40.7"	23° 04' 37.7"	1.11
11	113° 08' 39.1"	23° 04' 39.1"	150
12	113° 41' 19.7"	23° 07' 15.8"	0.54
平均值	—	—	13.4

注:“—”表示内容空缺。

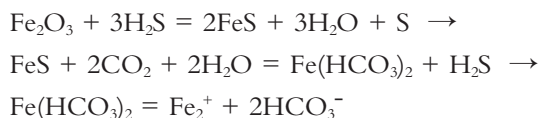
表 3 珠江三角洲地区部分地下水的铁含量
Table 3 Content of iron in part of groundwater in the Zhujiang delta

地理位置	pH 值	D0(mg/L)	Eh(mv)	Fe(mg/L)
佛山市南海区九江镇南方下东村	6.92	1.53	0	1.40
东莞市大市镇	6.87	0.96	1	0.36
佛山市南海区盐步镇岳利沙村	6.90	1.15	-3	1.68
佛山市南海区桂城镇叠南东村	6.94	1.35	-1	1.36
佛山市禅城区张槎镇筒村	7.04	0.59	-12	0.44
佛山市禅城区上沙中街同德里	7.14	0.72	-18	0.72

3.2.2 氧化还原环境

从珠江三角洲地区地下水的铁含量来看,在平原区和地势低洼处的铁含量明显高于丘陵区的铁含量(图 2)。这不仅与平原区地面污染严重、人类活动影响大于丘陵区有关,还与其所处的氧化还原环境条件密切相关。因为,在丘陵区,即使岩石受强烈的风化、分解以及溶滤作用而释放出大量的铁离子,但是由于所处区域为地下水系统的补给区,其氧化还原环境往往都是些强氧化环境,导致其释放出来的铁离子也以高价的 Fe³⁺形式存在,最终易形成难溶的氢氧化铁沉淀而很难溶入地下水中^[9]。在平原区和地势低洼处则刚好相反,由于它们所处的区域往往为地下水系统的排泄区,其氧化还原环境一般都处于还原环境状态,使得该区域中的铁离子主要以 Fe²⁺形式存在而更容易进入地下水中。这些推理已经在《珠江三角洲地区地下水污染调查评价》中得到了一定的证实,其野外调查资料显示,部分平原区的地下水呈黄色、发浑、有异味,其地下水的现场测试指标 DO 明显偏低,往往在 1 mg/L 左右或更低,其氧化还原电位 Eh 往往接近零或小于零,而这些水样的测试结果都为铁含量超标(表 3)。根据地下水氧化还原电位 Eh 与其铁含量的相关性分析来看,珠江三角洲地区地下水中铁含量与该地区的氧化还原电位呈明显的非线性负相关关系(图 4)。

另一方面,平原区和地势低洼处的还原环境还能促使该区域土壤层中的有机物发生厌氧反应,产生大量的 H₂S 和 CO₂,最终促使土层中的 Fe³⁺被还原为 Fe²⁺而溶入地下水^[9],反应过程如下:



本次水样的测试结果也明确显示珠江三角洲地区地下水铁含量与其 HCO₃⁻含量呈明显的非线性正相关关系(图 5)。

3.2.3 酸碱条件

地层中的铁离子一般以 Fe²⁺和 Fe³⁺形式共同存在,经过淋滤作用,通常情况下,Fe²⁺比较容易从地层中进入地下水,而 Fe³⁺则相对难以从地层中进入地下水。然而随着酸碱条件的改变,当环境逐渐朝酸性条件发展时,Fe²⁺和 Fe³⁺都将变得更加容易进入地下水中。研究资料表明,水溶液中的 pH 值

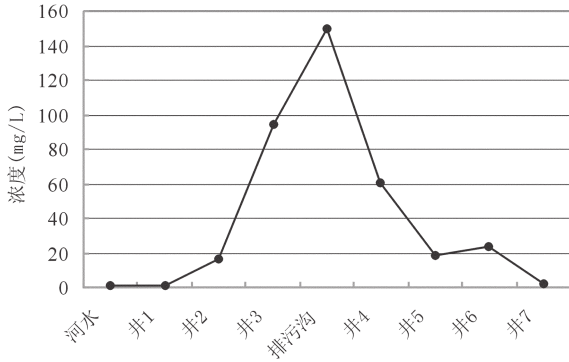


图3 佛山地区某剖面各水体中铁含量
Fig.3 Iron content of various water bodies in one section of the Foshan area

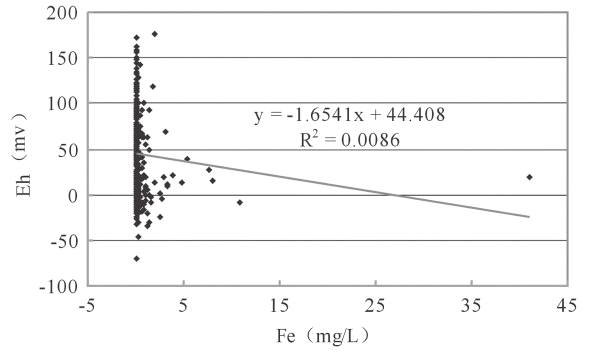


图4 珠江三角洲地区地下水铁含量与 Eh 的相互关系
Fig.4 Relationship between the content of iron and Eh in groundwater of the Zhujiang delta

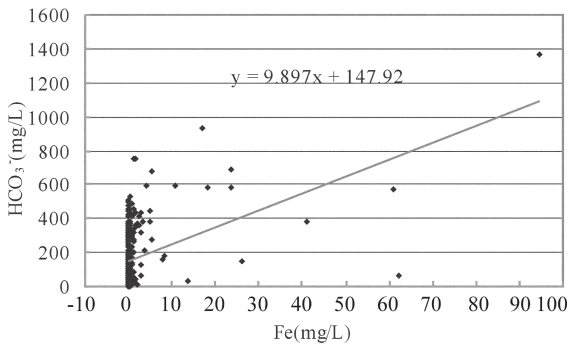


图5 珠江三角洲地区地下水铁含量与 HCO₃⁻ 的相互关系
Fig.5 Relationship between the content of iron and HCO₃⁻ in groundwater of the Zhujiang delta

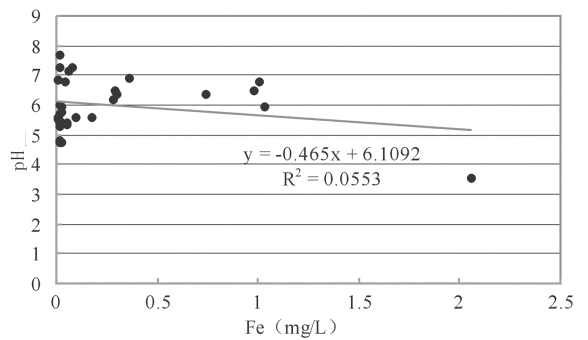


图6 东莞地区地下水铁含量与 pH 值的相互关系
Fig.6 Relationship between the content of iron and pH values in groundwater of the Dongguan area

从 8 减少到 6，其 Fe³⁺ 的浓度将从 1.5×10⁻¹⁸ mol/L 增大到 1.5×10⁻¹² mol/L，而 Fe³⁺ 在水中的溶解度增大 10⁶ 倍^[4]。根据化合物在水中的溶度积的原理表明，Fe(OH)₂ 的溶度积 $K_p = [2 \times c(\text{OH}^-)]^2 \times c(\text{Fe}^{2+})$ ，也就是说，在不考虑其他离子络合及离子强度等因素的条件下，并在 25℃ 和一标准大气压下 (K_p 不变)，理论上，随着 pH 值每减少 1，Fe²⁺ 在水中的溶解度每次将增大 10² 倍。上述原理表明水中的 Fe 含量与其酸碱条件关系密切。如图 6 所示，珠江三角洲东莞地区地下水中的 pH 值与 Fe 含量（由于珠江三角洲地区部分 pH 值数据缺失，而作为属于该区域的东莞地区的 pH 值则相对较完全，所以用东莞代替珠江三角洲整个地区）存在一定的非线性负相关关系。这一结论与以往的研究结果比较相一致^[3-5]，如东莞地区某一点的地下水 Fe 含量为 2.06 mg/L，其 pH 值、Eh 值、DO 以及 HCO₃⁻ 的含

量分别为 3.57、177 mv、3.87 mg/L 以及 7.63 mg/L，从这些数据可以看出，该地下水处于弱酸性的强氧化环境，促使地下水中 Fe 含量超标的主要因素就是其 pH 值明显偏低。

对比上述几个影响因素对地下水铁含量分布的影响程度，从图 4~6 中各方程的 R₂ 来看，图 4~5 方程的 R₂ 值明显大于图 6 方程的 R₂ 值，表明在珠江三角洲地区，氧化还原条件与地下水铁含量的相关关系明显大于酸碱条件与地下水铁含量的相关关系，认为氧化还原条件是影响珠江三角洲整个地区地下水铁含量分布的主要因素之一，而酸碱条件则可能只在局部地区对地下水铁含量的分布起主导作用。当然，影响地下水铁含量分布的还有一些其他因素，如含水层介质组分、径流条件、上覆土层性质等^[2,6]。这些因素对珠江三角洲地区地下水铁含量也都起到一定的影响作用，由于受

资料所限未能分析这些影响因素对地下水铁含量分布的影响程度。

4 结 论

(1)珠江三角洲地区地下水铁含量为未检出~94.8 mg/L,平均含量为 1.46 mg/L。所检选的地表水铁含量为 0.23~150 mg/L,其平均值为 13.4 mg/L,明显高于地下水中铁的平均值。

(2)该地区地下水铁含量的分布与其工业化程度及所处区域的补、径、排条件密切相关,尤其在平原区,地下水铁含量与部分地表河流的污染程度更是密切相关,远离污染的地表河流,地下水铁含量有明显减少的趋势。

(3)不同地区对地下水铁含量起主导作用的因素也不相同,氧化还原条件是影响珠江三角洲整个地区地下水铁含量分布的主要因素之一,而酸碱条件和地面污染则只在局部地区对地下水铁含量的分布起主导作用。另外,含水层介质组分、径流条件、上覆土层性质等因素对珠江三角洲地区地下水铁含量也都起到了一定的作用。

参考文献 (References):

- [1] 广东省水利厅. 广东省水资源公报[R]. 2004.
Water Conservancy Department of Guangdong Province. Water Resources Communique of Guangdong Province [R]. 2004 (in Chinese).
- [2] 雷万荣,唐春梅,江凌云. 浅谈地下水中铁、锰质的迁移与富集规律[J]. 江西科学, 2006, 24(1):80-82.
Lei Wanrong, Tang Chunmei, Jiang Lingyun. Discussion on iron and manganese transport and concentrate in underground water[J]. Jiangxi Science, 2006, 24 (1):80-82 (in Chinese with English abstract).
- [3] 任陶军,李晓,周亚芹. 成都市地下水中铁、锰变化规律及成因分析[J]. 水土保持研究, 2007, 14(1):211-214.
Ren Taojun, Li Xiao, Zhou Yaqin. The Analysis of iron and manganese ion in groundwater, Chengdu [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2007,14(1):211-214(in Chinese with English abstract).
- [4] 沈照理,朱宛华,钟佐森. 水文地球化学基础[M]. 北京:地质出版社, 1993:74-77.
Shen Zhaoli, Zhu Wanhua, Zhong Zuoshen. The Foundation of Hydrogeochemistry [M]. Beijing:Geological Publishing House, 1993:74-77(in Chinese).
- [5] 曾昭华. 地下水中铁元素的形成及其控制因素[J]. 江苏地质, 2003, 27(4):220-224.
Zeng Zhaohua. Formation of Fe element in groundwater and its control factors [J]. Jiangsu Geology, 2003, 27 (4):220-224 (in Chinese with English abstract).
- [6] 朱锦旗,王彩会,陆徐荣,等. 苏锡常地区浅层地下水铁锰离子分布规律及成因分析[J]. 水文地质工程地质, 2006, (3):30-33.
Zhu Jinqi, Wang Caihui, Lu Xurong, et al. An analysis of the occurrence and influence factors of Fe^{2+} and Mn^{2+} in the shallow groundwater in the Suzhou -Wuxi -Changzhou area [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2006, (3):30-33 (in Chinese with English abstract).

Distribution and origin of iron in groundwater of the Zhujiang delta

HUANG Guan-xing¹, SUN Ji-chao¹, JING Ji-hong¹, WANG Shan¹, DU Hai-yan²,
LIU Jing-tao¹, CHEN Xi¹, ZHANG Yu-xi¹, DI Xiao-bin¹, ZHI Bing-fa²

(1. *Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Shijiazhuang 050061, Hebei, China;*

2. *Guangdong Institute of Geological Survey, Guangzhou 510080, Guangdong, China)*

Abstract: In order to understand the content and origin of iron in groundwater of the Zhujiang delta, the authors took and analyzed 352 groups of groundwater samples and 12 groups of surface water samples. The results show that the iron content in groundwater of the Zhujiang delta range from undetected to 94.8 mg/L with an average of 1.46 mg/L. The distribution of iron content in groundwater of the area is closely related to the extent of industrialization and recharge, runoff, discharge conditions of the Zhujiang delta, especially in the plain area, where the content of iron in groundwater is more closely related to the pollution degree of rivers. The content of iron in groundwater decreased significantly far away from the polluted surface rivers. The factors that play a dominant role in iron content of groundwater are different in different areas of the Zhujiang delta. The redox condition is one of the main factors for affecting the distribution of iron content in groundwater in the Zhujiang delta, while the pH values and ground pollution only play a dominant role in the distribution of iron content in groundwater in some areas of the Zhujiang delta. In addition, such factors as the components of aquifer media, runoff conditions and characteristics of overlying soils all exert a certain effect on the iron content of groundwater in the Zhujiang delta.

Key words: Zhujiang delta; groundwater; iron content; distribution characteristics; origin

About the first author: HUANG Guan-xing, male, born in 1981, master, engages in the research on groundwater environment; E-mail: huangguanxing2004@126.com.

About the corresponding author: SUN Ji-chao, male, mainly engages in the study of hydrogeology; E-mail: gwwsun@263.net.cn.