

doi:10.3969/j.issn.2097-0013.2024.02.015

珠海市酸性地下水分布特征及成因机制

何 军, 黎义勇, 曾 敏, 吴 盼, 陈 晨, 赵信文

HE Jun, LI Yi-Yong, ZENG Min, WU Pan, CHEN Chen, ZHAO Xin-Wen

1. 中国地质调查局武汉地质调查中心(中南地质科技创新中心), 湖北 武汉 430205;

2. 中国地质调查局长江河湖湿地生态水文地质过程重点实验室, 湖北 武汉 430205

1. Wuhan Center, China Geological Survey (Geosciences Innovation Center of Central South China), Wuhan 430205, Hubei, China;

2. Key Laboratory of Eco-hydrogeological Process of River and Lake Wetlands in Changjiang Reaches, China Geological Survey, Wuhan 430205, Hubei, China

摘要:酸性地下水是我国南方广泛存在的水环境问题, 查明酸性地下水的分布特征和成因机制, 对区域地下水开发利用和水资源保护具有重要的科学意义。本文系统采集了珠海市不同类型的地下水样品 211 件, 采用数理统计和水文地球化学等方法, 分析并研究了地下水 pH 值的空间分布、酸性地下水的主要成因和影响因素。结果表明, 研究区地下水 pH 值为 3.24 ~ 8.23, 大多数为 6.06 ~ 6.52, 以酸性水为主。地下水 pH 值随着地势降低而升高, 大部分丘陵、台地区裂隙水的碱度和酸中和能力较弱, 地下水酸性较强, 平原区孔隙承压水的碱度和酸中和能力相对较强, 地下水呈中性; 地下水的酸碱度与大气降水、包气带介质、水岩相互作用以及河流、潮汐作用有关; 酸雨的补给、偏酸性的包气带介质、花岗岩和陆源碎屑岩中的硅酸盐矿物化学风化和硫化物矿物的氧化水解是丘陵区地下水偏酸性的主要原因。

关键词:酸性地下水; 分布特征; 成因机制; 珠海市

中图分类号: P641.3

文献标识码: A

文章编号: 2097-0013(2024)02-0404-09

He J, Li Y Y, Zeng M, Wu P, Chen C and Zhao X W. 2024. Characteristics of Distribution and Genetic Mechanism of Acidic Groundwater in Zhuhai City. *South China Geology*, 40(2): 404–412.

Abstract: Acidic groundwater is a widespread water environment problem in southern China. The research on distribution characteristics and genetic mechanism of acidic groundwater has great scientific significance for the development and utilization of regional groundwater and the protection of water resources. 211 groundwater samples in different aquifers in Zhuhai city were systematically collected, and the distribution and main genetic and influential factors of acidic groundwater were analyzed by the method of mathematical statistics and hydrogeochemistry. The results show that the groundwater is mainly acidic, with the pH from 3.24 to 8.23, and mostly between 6.06 and 6.52. The pH of groundwater increases with the decrease of the terrain. The alkalinity and acid neutralization ability of groundwater in most hilly platform areas are weak, and the acidity of groundwater is strong. The alkalinity and acid neutralization ability of pore phreatic water and pore confined water are relatively strong, and the groundwater is neutral. The acidity and alkalinity of groundwater in the study area are related to atmospheric precipitation, vadose zone medium, water-rock interaction,

收稿日期: 2024-02-06; 修回日期: 2024-03-17

基金项目: 中国地质调查局项目(DD20221729)和珠海市财政项目(MZCD-2201-008)

第一作者: 何军(1984—), 男, 正高级工程师, 主要从事环境地质调查研究工作, E-mail: 05302105hj@163.com

river and tidal action. The recharge of acid rain, acidic vadose zone medium, weathering and dissolution of silicate minerals in granite and terrigenous clastic rocks and the oxidative hydrolysis of sulfide minerals are the main genesis for the acidic groundwater.

Key words: acidic groundwater; characteristics of distribution; genetic mechanism; Zhuhai city

地下水已成为满足全球日益增长的人口在生活、农业和工业用水需求方面不可或缺的淡水来源。在全球开采的地下水总量中,约65%用于饮用,20%用于灌溉和牲畜饲养,其余15%用于工业和采矿活动(Salehi et al., 2018; Adimalla et al., 2020)。中国是全球三大酸雨区之一,南方以及西南地区已成为全球酸性最强的降水区(向任军, 2012)。大气降水是地下水重要的天然补给来源,酸性降水在补给地下水的时候可能导致地下水呈现偏酸性。酸性地下水($\text{pH} < 6.5$)会破坏土壤和地下水的地球化学平衡(Appleyard and Cook, 2009),促使水岩相互作用过程中金属元素的活动性增加而易引发重金属污染(Choi et al., 1998),威胁到生态系统的平衡(Serrano et al., 2016),造成一系列环境问题。

酸性地下水在华南地区广泛存在,众多学者对华南地区酸性地下水的分布特征和主要成因进行了研究(周训等, 2007; 欧业成等, 2009; 张玉玺等, 2011; 李丹等, 2015; 程新伟和孙继朝, 2017; 张宏鑫等, 2022)。前人研究表明,酸性地下水主要与酸雨的入渗补给(周训等, 2007; 荆继红等, 2010)、土壤的酸缓冲能力(宋绵等, 2018; 张宏鑫等, 2022)、水岩相互作用(Clohesy et al., 2013)以及碳酸、硼酸、硅酸及其他弱酸酸化有关(沈照理等, 1993)。

荆继红等(2010)在珠三角地区通过2005年至2008年地下水水质状况的调查发现,酸性地下水分布范围占全区面积的3/4,表明酸性地下水在珠三角地区广泛存在。作为广东省经济特区之一的珠海市,地下淡水资源是其重要的水资源,大尺度的水污染调查无法满足城市供水的需求,急需系统开展中大比例尺的酸性地下水的成因机制研究。本次系统采集了研究区不同地貌和不同类型的地下水样,通过数理统计、水文地球化学等方法(赵幸悦子等, 2021; 陈雯等, 2023; 姜守俊等, 2023),对研究区不同类型的地下水pH值和主要阴、阳离子等化学组分进行了分析,查明了珠海市酸性地下水的分布

范围、现状特征,研究总结了酸性地下水的成因机制,为研究区地下水开发利用和水资源保护提供了科学依据。

1 工作区概况

珠海市位于我国华南沿海地区,地势由西北向东南倾斜,河网密布,前山河、磨刀门、泥湾门、鸡啼门和崖门等西江分流入海水道与当地河流、涌道、水渠纵横交织,最后汇入南海。区内地下水的赋存及分布主要受地质构造、地层岩性、地形地貌、气象水文等综合因素控制(魏凤英, 2014)。

珠海市的地形以丘陵为主,海拔较低,坡度较小。市区内陆部分地势由西北向东南倾斜,地形多样,包括平原、丘陵、低山和滩涂等(王令占等, 2024)。丘陵台地主要分布于东部的黄杨山和西部的凤凰山周边,岩性主要为花岗岩,少量为浅变质细粒长石石英杂砂岩、砂砾岩、粉砂岩、石英砂岩,主要的地下水类型为花岗岩变质岩裂隙水和碎屑岩类孔隙裂隙水(图1)。平原区主要分布于中部的河道两侧和滨海地区,含水层岩性以粗、中砂及砂砾石为主(图2),地下水类型为松散岩类孔隙水(姚普, 2015)。在珠海市实施的3个水文地质钻孔中发现了第四系覆盖的白云质灰岩,地下水类型为碳酸盐岩裂隙岩溶水,其分布范围尚不明确。地下水的补给主要为大气降雨入渗补给和地表水侧向补给。丘陵山区地下水以泉的形式向邻近沟谷排泄,或以潜流的形式侧向补给孔隙水。滨海平原区孔隙水地下水位埋深较浅,上部发育多层淤泥或淤泥质土,局部具有承压性。地下水排泄主要是蒸发、排泄至河流后汇入南海以及人工开采。

2 采样及测试方法

2023年4-5月采集211件地下水样,采样点位

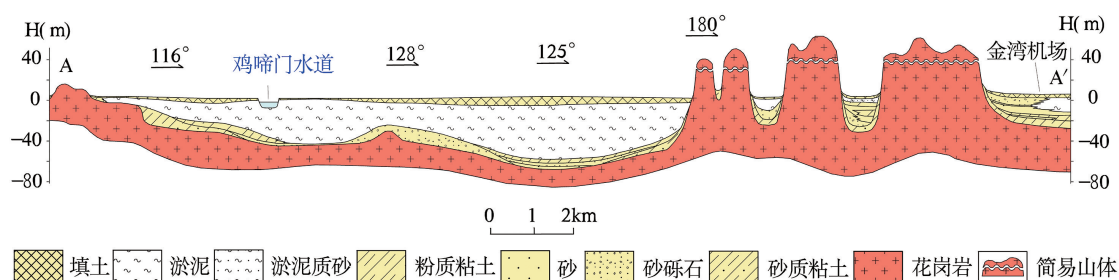


图2 研究区A-A'地质剖面图(剖面位置见图1)

Fig. 2 A-A' geology section map of the study area (location of the section is in Fig. 1)

3 结果与讨论

3.1 水化学特征

珠海市地下水pH值为3.24~8.23,大多数在6.06~6.52之间,主要为弱酸性水,少数地区为碱性水。从不同类型的地下水(图3)来看,碎屑岩类孔隙裂隙水pH值为4.54~6.86,平均值为5.85,绝大多数为5.52~6.45;花岗岩变质岩裂隙水pH值为4.53~8.00,平均值为6.29,绝大多数为5.77~6.79;碳酸盐岩裂隙岩溶水仅有3件样品,pH值为5.88~7.04,平均值为6.29;松散岩类孔隙潜水pH值为3.24~7.79,平均值为6.18,绝大多数为5.77~6.63;松散岩类孔隙承压水pH值为4.64~8.23,平均值为6.86,绝大多数为6.51~7.52。总体上浅层水均表现为弱酸性,深层承压水接近中性。

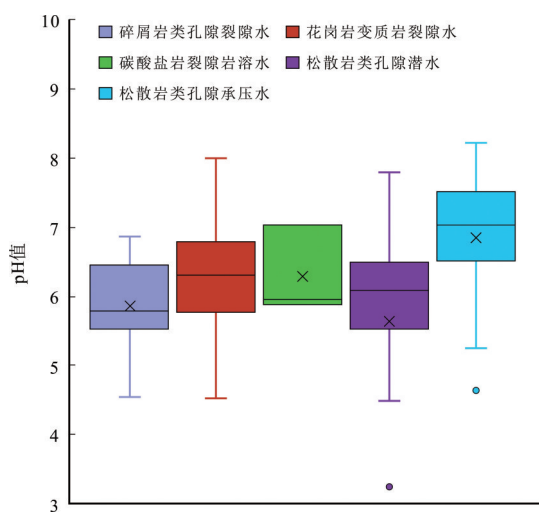


图3 研究区地下水pH值箱型图

Fig. 3 Box diagram of pH in groundwater in the study area

研究区地下水中阳离子以 Na^+ 和 Ca^{2+} 为主,整体表现为 $\text{Na}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+$,浓度平均值分别为457.74 mg/L、67.93 mg/L、61.30 mg/L和25.53 mg/L。阴离子以 Cl^- 和 HCO_3^- 为主,整体表现为 $\text{Cl}^- > \text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-}$,浓度平均值分别为909.85 mg/L、154.84 mg/L和65.23 mg/L。地下水主要阴、阳离子的区域变化较大,变异系数1.57~2.94,指示了珠海市地下水化学特征较为复杂,地下水的来源和运移过程中的水岩相互作用也较为复杂。

从平面上来看,强酸性地下水($\text{pH} < 5.0$)较少,零星分布于研究区北部、南部、西南部和东北部山前,弱酸性地下水($5.0 \leq \text{pH} < 6.5$)分布范围较广,主要位于香洲区、斗门区以及金湾区西南部的丘陵和台地区(图4)。

从地貌上来看(图5),丘陵、台地区地下水pH值总体较低,大部分地下水样呈现酸性,少量为中性,pH值大于7的水样较少。这些区域分布的地下水类型主要为花岗岩变质岩裂隙水、松散岩类孔隙潜水和碎屑岩类孔隙裂隙水。平原区地下水样虽然出现了较多的中性水样,但位于山前的冲洪积平原以及山间沟谷的松散岩类孔隙潜水和碎屑岩类裂隙水仍表现为偏酸性,这可能与丘陵、台地区地下水的补给有关。而位于平原区的松散岩类孔隙承压水绝大部分为中性水,还有2个水样的pH值超过了8.0,该区域的地下水主要接受与海水连通的河渠水的补给,受海水潮汐作用的影响而使pH值升高(张玉玺等,2011)。总体来看,地下水的pH值与地貌有一定的关系,地下水pH值随着地势降低而升高。

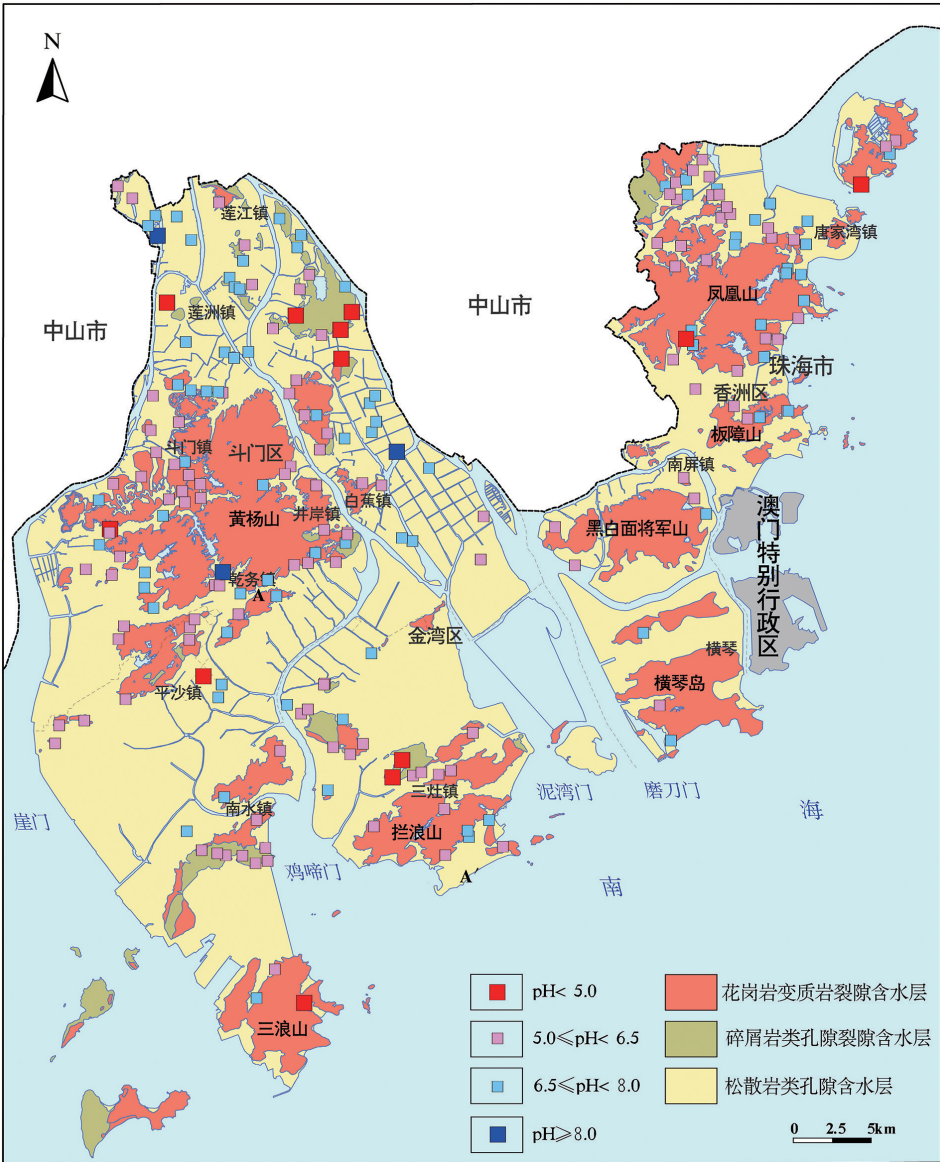


图4 研究区地下水pH值分布图

Fig. 4 Distribution of pH in groundwater in the study area

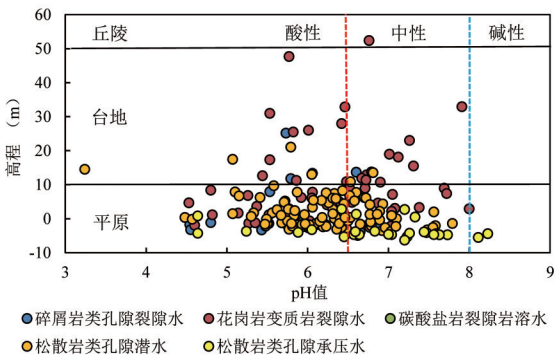


图5 研究区酸性地下水与地貌关系图

Fig. 5 Relationship between acidic groundwater and landform in study area

3.2 研究区地下水碱度和酸中和能力

地下水碱度是反映地下水结合质子的能力,即抗酸化能力,一般情况是指重碳酸盐(HCO_3^-)和碳酸盐(CO_3^{2-})的总和,低碱度地下水更易受酸化影响(Takem et al., 2015)。研究区地下水中 CO_3^{2-} 的含量均低于0.5 mg/L的检出限,故根据 HCO_3^- 与pH值的关系即可反应研究区地下水的抗酸化能力。如图6a所示,研究区地下水碱度一般较低,大部分水样的 HCO_3^- 浓度低于400 mg/L,少量的孔隙潜水和大部分孔隙承压水抗酸化能力较其他类型地下水强,这是平原区地下水pH值相对较高的原因之一。

地下水酸中和能力(ANC)是水样中 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 四种阳离子与 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 Cl^- 三种阴离子的当量浓度差(张宏鑫等, 2022), 计算公式如下:

$$ANC = n(K^+) + n(Na^+) + n(Ca^{2+}) + n(Mg^{2+}) - n(NO_3^-) - n(SO_4^{2-}) - n(Cl^-)$$

图6b显示了研究区地下水样品ANC值, 结果表明大部分地下水的酸中和能力较弱, ANC值在0 (meq/L)附近, 仅有少量的孔隙承压水有相对强的酸中和能力。同时, 还有少量的水样ANC值为负数, 这些水样的Cl含量均较高, 且为咸水, 可能受到了海水的影响。

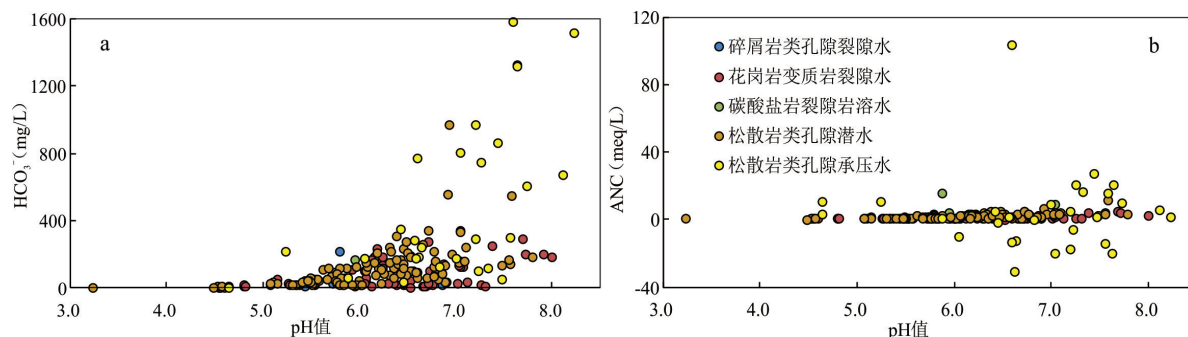


图6 研究区地下水pH值与 HCO_3^- (a)和酸中和能力(ANC)(b)关系图

Fig. 6 Relationship between pH and HCO_3^- (a), ANC (b) of groundwater in the study area

3.3 研究区地下水成因机制

3.3.1 酸雨

大气降水是珠江三角洲浅层地下水的主要补给来源, 酸雨的入渗补给导致地下水的pH值变低, 因此酸雨是造成珠江三角洲地区地下水总体偏酸性的主要原因之一(荆继红等, 2010)。珠海曾是广东9个重酸雨城市之一, 近10多年来珠海市酸雨已有很大改善(陈虹颖等, 2020), 但形势依然严峻, 酸雨在研究区内广泛存在。根据2013—2022年《珠海市环境质量状况公报》显示, 珠海城市降水的pH值为3.64~7.86, 平均值为5.22, 低于5.5, 以酸性降水为主, 强酸雨频率较高, 为38.40%~78.50%, 平均酸雨频率为53.78%(图7), 个别年份出现了超强酸雨, 以2018年最为显著, 降水酸化问题普遍。另据王国桢等(2021)报道, 珠海市降水的酸中和能力评估参数较低, 说明研究区降水缺乏中和能力。

3.3.2 包气带酸性介质

研究区丘陵、台地区包气带介质以三叠纪-白垩纪的花岗岩和变质岩、少量的陆源碎屑岩及其风化残坡积物为主, 山前平原为冲洪积物, 平原区多为海相沉积物和海陆交互相沉积物, 根据《广东省珠江三角洲经济区农业地质与生态地球化学调查

报告》(广东省地质调查院, 2012)显示, 不同类型成土母质的pH值见表1。结果表明, 丘陵、台地区的花岗岩、变质岩、陆源碎屑岩以及冲洪积物母质土壤为偏酸性土壤, 其众数为5.03~5.19, 海相沉积物和海陆交互相沉积物母质土壤为中性土壤, 众数位7.42~8.01, 因此丘陵区包气带几乎没有抗酸化能力, 在酸雨的淋滤作用下地下水逐渐酸化。山前冲洪积平原受酸雨和丘陵区地表径流的补给, 包气带岩性多为砂砾石层, 地下水埋深较浅, 酸性降雨入渗较快, 故该区域地下水也呈酸性。

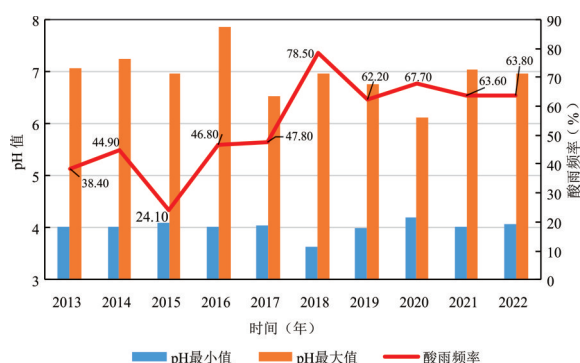


图7 研究区2013—2022年降雨pH值和酸雨频率图

Fig. 7 pH of precipitation and frequency of acid rain in the study area from 2013 to 2022 in the study area

表1 珠江三角洲地区不同成土母质土壤pH值统计

Table 1 Statistical values of pH in soil from different original materials in the Pearl River Delta

成土母质	中位数	众数	最大值	最小值	变异系数 (%)
海陆交互相沉积物	6.42	7.42	8.84	3.28	0.17
冲洪积物	5.62	5.19	8.23	3.64	0.13
海相沉积物	6.38	8.01	8.31	3.45	0.17
灰岩类	5.44	4.82	7.73	3.84	0.13
陆源碎屑岩类	5.10	5.08	8.94	3.76	0.12
花岗岩类	5.15	5.03	9.42	3.89	0.12
变质岩类	5.12	5.17	8.34	4.17	0.11

3.3.3 岩石化学风化

Gibbs 图可以快速定性判断自然水体的起源机制,有降雨稀释(大气降水)、蒸发浓缩和岩石风化三种受控因素(Gibbs, 1970)。将研究区不同类型地下水投影至 Gibbs 图(图8)上,结果显示,研究区大部分 pH 值小于 6.5 的酸性地下水位于 Gibbs 图的下半部分(TDS<500 mg/L),指示酸性地下水 TDS(总溶解性固体含量)明显低于中性和弱碱性地下水。而且,酸性地下水主要被岩石风化作用控制,又受到了一定降雨稀释(大气降水)作用的影响,以中性和弱碱性为主的松散岩类孔隙承压水主要受强烈的蒸发浓缩作用影响。

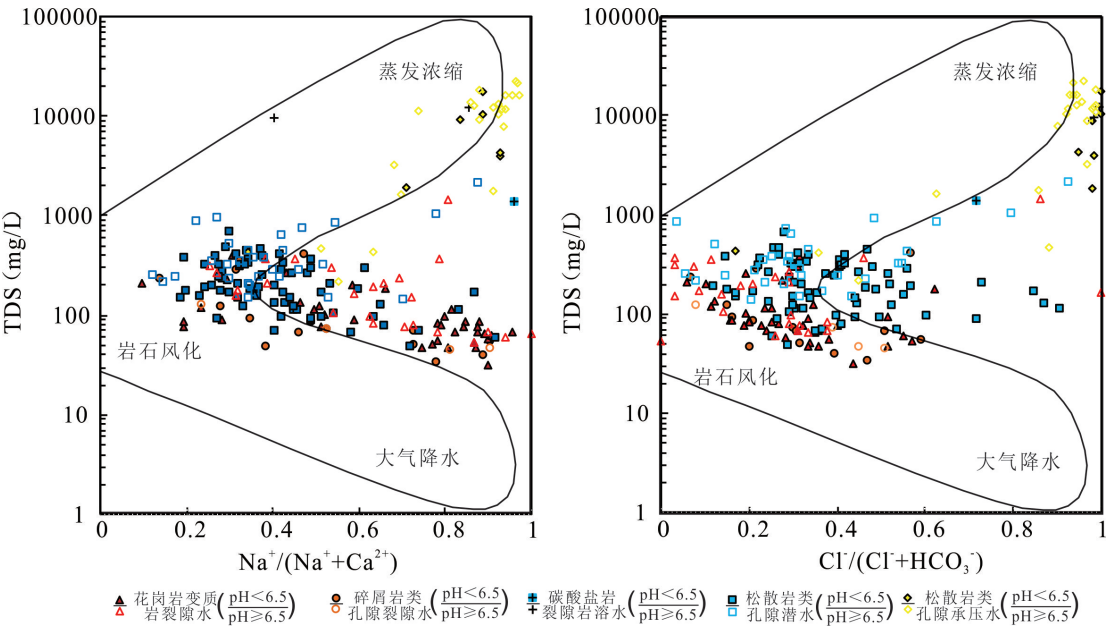


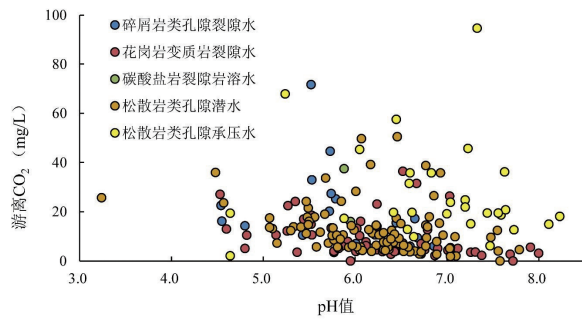
图8 研究区地下水 Gibbs 图

Fig. 8 Gibbs diagram of groundwater in the study area

研究区丘陵区的岩石化学风化作用主要是花岗岩中的硅酸盐矿物的溶解,其次是泥盆系砂岩、粉砂岩地层及其残坡积物中的硫化矿物氧化,这两种矿物的化学风化均能产生 H⁺,导致地下水酸化(Preda and Cox, 2000; 付宇等, 2023)。花岗岩的主要矿物成分为长石和石英,长石的非全等溶解会产生偏硅酸(沈照理等, 1993),如钠长石的反应式如下:

$$2\text{NaAlSi}_3\text{O}_8 + 2\text{CO}_2 + 11\text{H}_2\text{O} = \text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4 + 2\text{Na}^+ + 4\text{H}_4\text{SiO}_4 + 2\text{HCO}_3^-$$

虽然该反应发生过程中也产生了 HCO₃⁻,可以对地下水的酸性起到一定的缓冲作用,但由于丘陵区地下水径流路径短,水流交替循环周期短,因此对酸的缓冲能力较弱。此外,大气中的 CO₂溶入地下水中形成碳酸,碳酸离解时也能产生一定的 H⁺。研究区地下水 pH 值与游离 CO₂的含量有一定的负相关性(图9),但花岗岩变质岩裂隙水中游离 CO₂的含量相对较低,产生的 H⁺有限,因此该类地下水偏酸性的原因不是 CO₂溶解产生的碳酸的离解,而是来自于长石中硅铝酸盐矿物的溶解。

图9 研究区地下水pH与游离CO₂的关系图Fig. 9 Relationship between pH and dissolved CO₂ of groundwater in study area

另外,硫化物的氧化水解可能是该区偏酸性地下水H⁺的又一重要来源(Preda and Cox, 2000)。研究区少量出露的泥盆系砂岩、粉砂岩地层及其残坡积物多含铁质结核,可能是硫化物氧化后的褐铁矿化(张宏鑫等, 2022; 付宇等, 2023)。

3.3.4 河流及潮汐作用

河流在很大程度上影响了平原区地下水,使pH值升高。地下水的水化学特征受海水潮汐作用影响发生变化的同时,pH值也有增大的趋势(赵健, 1999)。研究区入海河流与河涌、水渠纵横交错。据张玉玺等(2011)的研究显示,珠江三角洲101处河水断面pH值平均为7.21,90%的河流点pH值大于6.5。

3.3.5 成因分析

根据以上的分析基本可以明确研究区地下水偏酸性的形成原因。首先,酸性大气降水的入渗补给引起地下水pH值降低。其次,大气降水在向入渗和径流的过程中与包气带介质发生水岩相互作用,丘陵、台地区偏酸性的花岗岩、变质岩、陆源碎屑岩以及冲洪积物母质土壤加剧了地下水的酸化,而平原区的海相沉积物和海陆交互相沉积物中性土壤减缓了地下水的酸化,同时丘陵、台地区地下水还溶解了包气带中的硅酸盐和硫化物等矿物,为地下水进一步提供了酸化的H⁺。大部分地下水的酸中和能力较弱,仅有少量的孔隙承压水有相对较强的酸中和能力。再加上平原区孔隙承压水受潮汐作用的影响,地下水pH值进行中和升高而呈现为以中性为主。因此,研究区地下水pH值的主要影响因素是酸性大气降水、酸性包气带介质、硅酸盐和

硫化物矿物溶解以及河流和潮汐作用,其中酸雨、酸性包气带、硅酸盐和硫化物矿物溶解导致地下水pH值下降,河流和潮汐作用可使地下水pH值升高。

4 结论

(1)珠海市地下水pH值为3.24~8.23,大多数在6.06~6.52之间,主要为酸性水,少数地区为碱性水。碎屑岩类裂隙孔隙水和花岗岩变质岩裂隙水的pH值低于其他类型地下水。丘陵、台地区地下水pH值较低,随着地势的降低,平原区地下水pH值相对略高。

(2)大部分地下水的碱度和酸中和能力较弱,孔隙潜水和孔隙承压水的碱度和酸中和能力相对较强,这是研究区地下水总体偏酸性、平原区孔隙水偏中性的直接原因。

(3)研究区地下水的酸碱性与大气降水、包气带含水介质、水岩相互作用以及河流、潮汐作用有关。丘陵区接受酸雨的补给,包气带介质为偏酸性土壤,花岗岩和陆源碎屑岩中的硅酸盐矿物化学风化和硫化物的氧化水解是丘陵区地下水偏酸性的主要原因。

参考文献:

- 陈虹颖,赵新锋,何志东,范绍佳.2020.2000—2016年珠海市酸雨变化特征及酸雨概念模型[J].环境科学学报,40(6):1998-2006.
- 陈雯,余绍文,张宏鑫,刘怀庆.2023.北海市铁山港东部地区地下水水化学特征及形成机制[J].华南地质,39(1):95-107.
- 程新伟,孙继朝.2017.珠江三角洲地区酸性地下水分布特征及其影响因素研究[J].地下水,39(5):25-27+87.
- 付宇,董好刚,李立湘,方泓锦,袁东方,周施阳.2023.东江流域上游赣南地区酸性浅层地下水特征及成因探讨—以寻乌地区为例[J/OL].中国地质. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1167.P.20230505.1251.020.html>.
- 广东省地质调查院.2012.广东省珠江三角洲经济区农业地质与生态地球化学调查报告[R].
- 姜守俊,许兰芳,倪泽华,杨宏宇,涂世亮.2023.广东清远盆地地下水水文地球化学及流场特征[J].华南地质,39(4):

- 672-685.
- 荆继红,孙继朝,韩双平,黄冠星,陈玺,张玉玺,刘景涛.2010.珠江三角洲地区酸雨及酸化地下水分布特征[J].上海地质,(2):8-12.
- 李丹,孟庆强,张明珠.2015.广州市地下水源地浅层地下水pH值的时空变化及其成因分析[J].地下水,37(6):3-5+17.
- 欧业成,陈润玲,黄喜新,周训.2009.北海市滨海地下水天然偏酸性特征及其影响因素[J].桂林工学院学报,29(4):449-454.
- 沈照理,朱婉华,钟佐燊.1993.水文地球化学基础[M].北京:地质出版社.
- 宋绵,龚磊,王新峰,李甫成,马涛.2018.江西兴国县偏酸性地下水研究现状[J].地球学报,39(5):581-586.
- 王国祯,刘偲嘉,于兴娜.2021.珠海市降水化学与沉降特征[J].环境科学研究,34(7):1612-1620.
- 王令占,李响,吴俊,贾小辉,王晶,张宗言,金巍,徐大良.2024.广东珠海地区三灶断裂带早白垩世以来多期活动、古应力特征及动力学背景[J].华南地质,40(2):323-342.
- 魏凤英.2014.珠海市应急供水地下水水质评价[J].地下水,36(5):126-128.
- 向任军.2012.中国南方典型酸雨区酸沉降特性及其环境效应研究[D].中南大学博士学位论文,3-5.
- 姚普.2015.珠海西部海岸带地下水锰的分布与成因[J].地下水,37(4):1-3+31.
- 张玉玺,孙继朝,陈玺,黄冠星,荆继红,刘景涛,向小平,王金翠,支兵发.2011.珠江三角洲浅层地下水pH值的分布及成因浅析[J].水文地质工程地质,38(1):16-21.
- 张宏鑫,余绍文,张彦鹏,陈雯,黎清华,刘怀庆,张庆玉.2022.广西防城港地区浅层地下水pH值时空分布、成因及对生态环境的影响[J].中国地质,49(3):822-833.
- 赵健.1999.海(咸)水入侵与浅层地下水水化学特征及变化研究[J].地理科学,19(6):525-531.
- 赵幸悦子,肖攀,黎义勇,邵长生.2021.赣南缺水地区浅层地下水水化学特征及成因分析——以银坑幅为例[J].华南地质,37(4):418-426.
- 周训,张华,赵亮,沈晔,严霞,欧业成,黄喜新.2007.浅析广西北海市偏酸性地下水的形成原因[J].地质学报,81(6):850-856.
- Adimalla N, Dhakate R, Kasarla A, Taloor A K. 2020. Appraisal of groundwater quality for drinking and irrigation purposes in Central Telangana, India[J]. Groundwater for Sustainable Development, 10: 100334.
- Appleyard S, Cook T. 2009. Reassessing the management of groundwater use from sandy aquifers: Acidification and base cation depletion exacerbated by drought and groundwater withdrawal on the Gngara Mound, Western Australia[J]. Hydrogeology Journal, 17(3):579-588.
- Choi J, Hulseapple S M, Conklin M H, Harvey J W. 1998. Modeling CO₂ degassing and pH in a stream-aquifer system[J]. Journal of Hydrology, 209(1-4): 297-310.
- Clohesy S, Appleyard S, Vogwill R. 2013. Groundwater acidification near the water table of the Superficial aquifer, Gngara Mound, Swan Coastal Plain, Western Australia[J]. Applied Geochemistry, 36(1):140-152.
- Gibbs R J. 1970. Mechanisms controlling world water chemistry[J]. Science, 170(3962): 1088-1090.
- Preda M, Cox M E. 2000. Sediment-water interaction, acidity and other water quality parameters in a subtropical setting, Pimpama River, southeast Queensland[J]. Environmental Geology, 39(3-4): 319-329.
- Salehi S, Chizari M, Sadighi H, Bijani M. 2018. Assessment of agricultural groundwater users in Iran: a cultural environmental bias[J]. Hydrogeology Journal, 26(1): 285-295.
- Serrano L, Díaz-Paniagua C, Gómez-Rodríguez C, Florencio M, Marchand M A, Roelofs J G M, Lucassen E C H E T. 2016. Susceptibility to acidification of groundwater-dependent wetlands affected by water level declines, and potential risk to an early-breeding amphibian species[J]. Science of the Total Environment, 571(1): 1253-1261.
- Takem G E, Kuitcha D, Ako A A, Mafany G T, Takounjou-Fouepe A, Ndjama J, Ntchancho R, Ateba B H, Chandrasekharam D, Ayonghe S N. 2015. Acidification of shallow groundwater in the unconfined sandy aquifer of the city of Douala, Cameroon, western Africa: Implications for groundwater quality and use[J]. Environmental Earth Sciences, 74(9): 6831-6846.