DOI:10. 19657/j. geoscience. 1000-8527. 202508210022

厦门市浅层地下水pH值分布特征及成因探讨

于开宁[1]，翟益凤[1]，刘 瑜[3]，刘景涛[2]，张 英[2]，朱 亮[2]，张玉玺[2]，
王慧玮[2]，荆继红[2]，杨才佳[1]，陈 玺[2*]

（1. 河北地质大学河北省高校生态环境地质应用技术研发中心，河北 石家庄 052161；2. 中国地质科学院水文地质环境地质研究所，河北 石家庄 050061；3. 厦门市环境科学研究院，福建 厦门 361000）

摘要：pH值是衡量地下水质的关键指标之一，它直接影响地下水的化学特性和污染物迁移转化能力。厦门市作为我国东南沿海重要的滨海城市，其中约有一半的地下水呈现出酸性特征。揭示该地区地下水pH值的空间分布规律及其影响因素，对于合理开发利用区域地下水资源以及加强水资源保护具有重要的科学价值。本研究以厦门市浅层地下水为研究对象，综合利用水化学分析与数理统计等方法，对地下水pH值的分布特征、主控因素及其成因进行了探讨。结果表明：厦门市地下水pH值主要以酸性（pH < 6. 5）和中性（6. 5 ≤ pH < 8. 0）为主，pH值在4. 8 ~ 7. 7之间，且地下水pH值空间分布地貌分异性显著，具体表现为：滨海平原区地下水pH值高于丘陵台地区。酸雨、水岩相互作用、酸性包气带介质以及海水入侵是厦门市地下水pH值的主要影响因素。总体而言，厦门市地下水pH值的分布格局是多种自然与环境因素耦合作用的综合结果。

关键词：pH值；分布特征；影响因素；厦门市；酸性地下水
中图分类号：P641. 3 **文献标志码**：A **文章编号**：1000-8527（2026）02-0479-13

Characteristics and Causes of the Formation of pH in Shallow Groundwater in Xiamen

YU Kaining[1], ZHAI Yifeng[1], LIU Yu[3], LIU Jingtao[2], ZHANG Ying[2], ZHU Liang[2], ZHANG Yuxi[2], WANG Huiwei[2], JING Jihong[2], YANG Caijia[1], CHEN Xi[2*]

(1. *Hebei Center for Ecological and Environmental Geology Research, Hebei GEO University, Shijiazhuang, Hebei* 052161, *China*; 2. *Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Shijiazhuang, Hebei* 050061, *China*; 3. *Xiamen Academy of Environmental Science, Xiamen, Fujian* 361000, *China*)

Abstract: The pH was identified as one of the primary factors of groundwater quality, as it directly influences the chemical properties of groundwater, the migration and transformation capabilities of pollutants. Xiamen, a major coastal city in southeastern China, exhibited acidic characteristics in approximately half of its samples. The distribution characteristics and influencing factors of pH in Xiamen were considered to have significant scientific value for both the rational development and utilization of regional groundwater resources and the enhancement of water resource protection. This study, focusing on shallow groundwater in Xiamen, utilized a combination of hydrochemical analysis and statistical methods to investigate the distribution characteristics, controlling

收稿日期：2025-08-21；**修回日期**：2025-12-10；**编辑**：袁茂文。
基金项目：中央水污染防治资金项目“厦门市地下水环境状况调查评估”（［350201］GWCG［GK］2024066）；国土资源大调查项目“典型冰川水资源调查监测”（DD20242633）。
作者简介：于开宁，男，教授，1965年出生，主要从事水文地质、环境地质方面的研究。Email：1211931193@qq. com。
＊通信作者：陈玺，男，正高级工程师，1979年出生，主要从事地下水污染与防治方面的研究。Email：596273061@qq. com。
引用格式：于开宁，翟益凤，刘瑜，等. 厦门市浅层地下水pH值分布特征及成因探讨［J］. 现代地质，2026，40（2）：479-491. DOI：10. 19657/j. geoscience. 1000-8527. 202508210022.
YU Kaining, ZHAI Yifeng, LIU Yu, et al. Characteristics and Causes of the Formation of pH in Shallow Groundwater in Xiamen［J］. GEOSCIENCE, 2026, 40（2）: 479-491. DOI: 10. 19657/j. geoscience. 1000-8527. 202508210022.

factors, and causes of groundwater pH in Xiamen. The results indicated that groundwater pH in Xiamen were predominantly acidic (pH < 6.5) and neutral (6.5 ≤ pH < 8.0), ranging from 4.8 to 7.7. Moreover, the spatial distribution of groundwater pH exhibited significant geomorphological differentiation. Specifically, the pH of groundwater in the coastal plain region was higher than in the hilly-terrace region. Acid rain, water-rock interaction, characteristics of acidic vadose zone medium, and seawater intrusion were identified as the main Influencing factors of groundwater pH in Xiamen. Overall, the distribution pattern of groundwater pH in Xiamen was a comprehensive result of the coupling effect of multiple natural and environmental factors.

Key words: pH; distribution characteristic; influencing factor; Xiamen; acidic groundwater

0 引 言

地下水作为地球水循环的重要组成部分，在水资源供应、生态环境保护和维持地质结构稳定等方面发挥着不可替代的作用。酸性地下水(pH < 6.5)在全球范围内广泛分布，其作为突出的地下水环境问题，在北美洲[1]、欧洲[2]、澳大利亚[3-4]和中国南部沿海地区[5-8]等均有出现，对区域地下水水质、生态环境演化、工程建设等都产生了不同程度的影响。酸性地下水(pH < 6.5)会增强金属离子(如铝、铁、锰)活动性，破坏土壤-地下水地球化学平衡[9]，加速水岩相互作用过程中砷、镉等毒性元素的迁移转化，导致重金属污染。酸性地下水还抑制土壤硝化，影响氮循环，加速碱金属、碱土金属流失，导致土壤贫瘠化[10]。此外，酸性地下水还会严重地腐蚀其流经的岩石和土壤，导致建筑物的变形甚至损坏，影响工程安全。

现有研究表明，地下水pH值偏低的成因是多方面的，主要影响因素包括酸雨[6, 8, 11-12]、黄铁矿氧化[13-14]、水岩相互作用[15]、包气带介质特性[16]和人类活动(农业活动、采矿活动和垃圾填埋场渗漏等)[17]。地下水pH值偏低通常由多种自然与人为因素共同导致，酸雨是其中一个直接诱因。张玉玺等研究表明酸雨、包气带介质以及河流与海水潮汐的交互作用，会显著改变地下水酸碱平衡[6]。尤其在沿海区域，酸雨叠加海水入侵和地形影响，更易引发地下水酸化[8]；人类活动同样不可忽视，农业施肥、矿产开采和垃圾渗滤液等[17]都可能加剧这一过程。自然机制中，黄铁矿氧化是地下水pH值偏低的另一重要成因。Peiffer等发现澳大利亚西部大范围酸性地下水与此密切相关[18]；Clohessy等进一步指出，pH值低于5的地下水多受此过程主导[9]。国内研究如付宇等以寻乌地区为例，从物质基础、循环条件和外部因素的角度探讨了地下水pH值偏低的主要成因，强调水岩相互作用对pH值形成和演化的关键影响，说明地层矿物特性本身也是深层诱因[16]。此外，气候与降水特征同样参与调控。周迅等对我国东南地区的研究显示，地下水pH值与酸雨频率呈负相关，而与降雨pH值呈正相关，酸性地下水分布与酸雨带基本重合[10]。这意味着在酸雨频发区，降水补给本身可能成为酸性物质输入的通道，加剧地下水酸化。总体来看，地下水pH值偏低是酸雨、矿物氧化、水岩相互作用及人类活动等多因素长期交织的结果。

目前关于我国地下水pH值的研究主要集中在珠江三角洲[8, 19]、赣南[16]、北海市[20-21]、潮汕[15]等地区，厦门市常年受酸雨污染的影响[22]，其浅层地下水主要补给来源为大气降水，地下水偏酸性。以往厦门市地下水质量评价的研究发现pH值是影响当地地下水质量的主要因子之一[23]，但目前厦门市pH值分布特征尚不明确，缺乏其影响因素及成因的相关研究。本文基于厦门市地下水环境状况调查评估项目和厦门市以往相关项目所取得的数据资料，总结了厦门市浅层地下水pH值分布特征，对浅层地下水pH值分布规律的成因进行了探讨。本研究对于深入认识酸性地下水的形成机制具有重要的意义，同时为地下水水质恶化和污染防控提供了科学依据。

1 研究区概况及数据来源

1.1 研究区概况

厦门市位于我国东南沿海地区，地势西北高东南低，属亚热带海洋性季风气候，气候温和湿润，四季分明，雨热同期。多年平均气温为20.9 ℃，年均降水量约1513.3 mm，年均蒸发量约1651.3 mm[24]。降水主要集中在夏秋两季，受

季风和台风影响显著。城市受海洋调节作用强，气温年较差小，冬季温暖，夏季炎热期相对较短。河网密布，地表径流丰富，境内河流主要包括九龙江及其支流、西溪、官浔溪等，河流径流方向自西向东，普遍具有径流量小、水流短、河道窄、河床浅的特点。

厦门市的地形以丘陵为主，海拔较低，坡度平缓。其地形地貌多样，涵盖山地、丘陵、平原、滩涂和海岛等(图 1)。其中，丘陵台地从西北部山地边缘延伸至中部和南部的部分地区，在北部云顶山和西部天竺山周边广泛分布，岩性主要为花岗岩、火山岩。平原区则主要包括河流冲积平原和海积平原，河流冲积平原主要沿河谷两岸呈带状或面状分布，而海积平原主要分布于海湾内部及周围低洼地区，岩性以粉砂、黏土、淤泥质为主，夹有贝壳碎屑[23]。

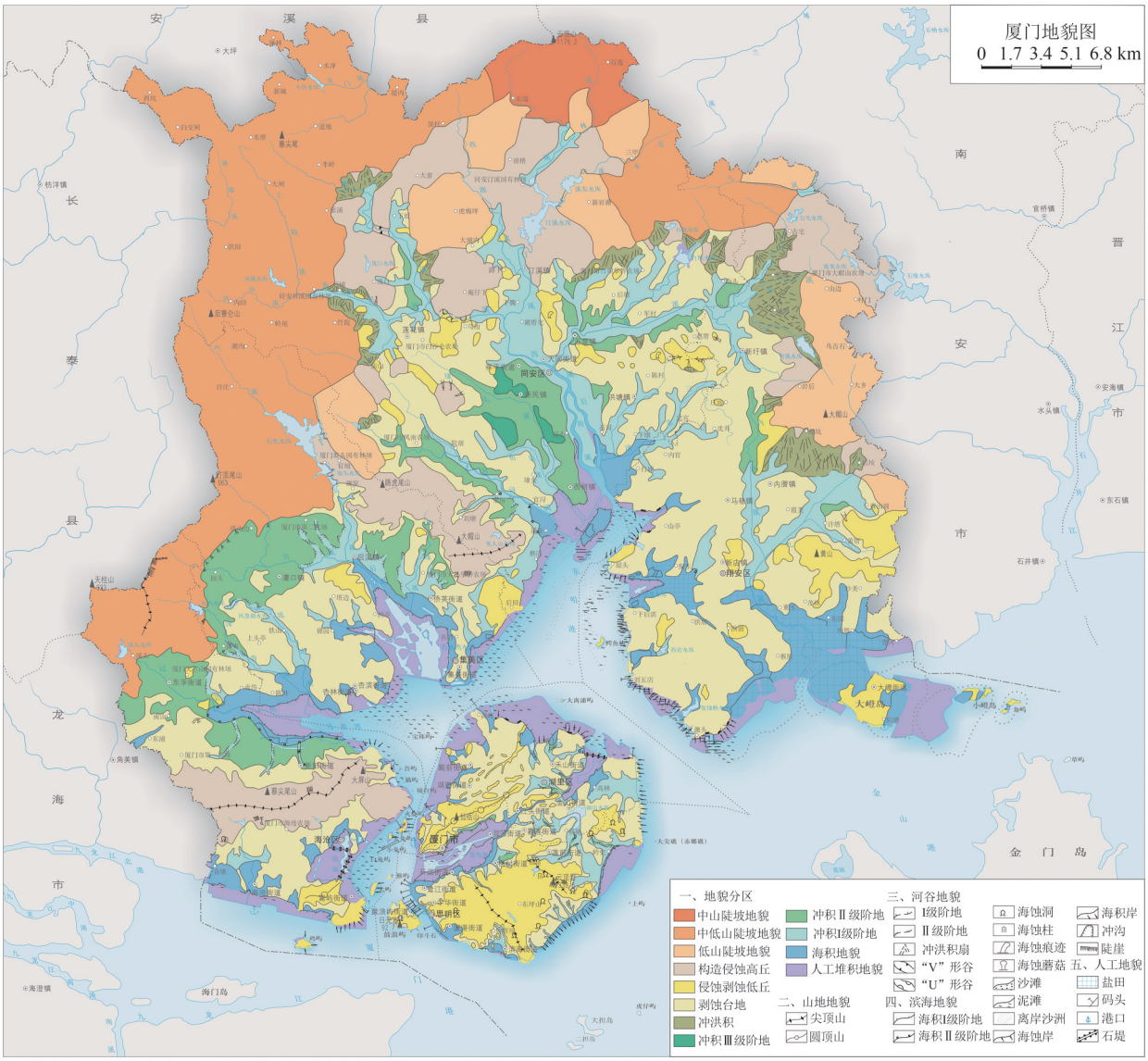


图 1　厦门市地貌图(厦门自然资源图集)

Fig. 1　Geomorphic map of Xiamen (Atlas of natural resources in Xiamen)

厦门市水文地质条件独特，具有单元小、径流短、水量小和循环浅的特征。研究区内地下水的分布与赋存特征受地质构造、地层岩性、地形地貌以及气象水文条件等多重因素共同影响。根据含水介质的不同，地下水主要赋存于三种类型的含水层中，分别是松散岩类孔隙含水层、风化残积孔隙裂隙含水层和基岩裂隙含水层。其中，松散岩类孔隙含水层包括冲洪积孔隙含水层和海积孔隙含水层。冲洪积孔隙水主要存在于河谷两侧和山前的洪积扇区域，其含水层通常由砂、砾

石以及卵砾石组成；而海积孔隙水主要分布在海岸线和河口地区，含水层的岩性特征则以淤泥质砂和中粗砂较为典型。风化残积孔隙裂隙水常见于残积地台及山前坡脚地带，其含水层由碎石、角砾等残积物构成。基岩裂隙水主要分布在山区基岩中的裂隙以及断层中(图2)。大气降水是地下水的主要补给来源。此外，在汛期和地下水开采时期，地表水也会对地下水产生侧向补给的作用[23-24]。

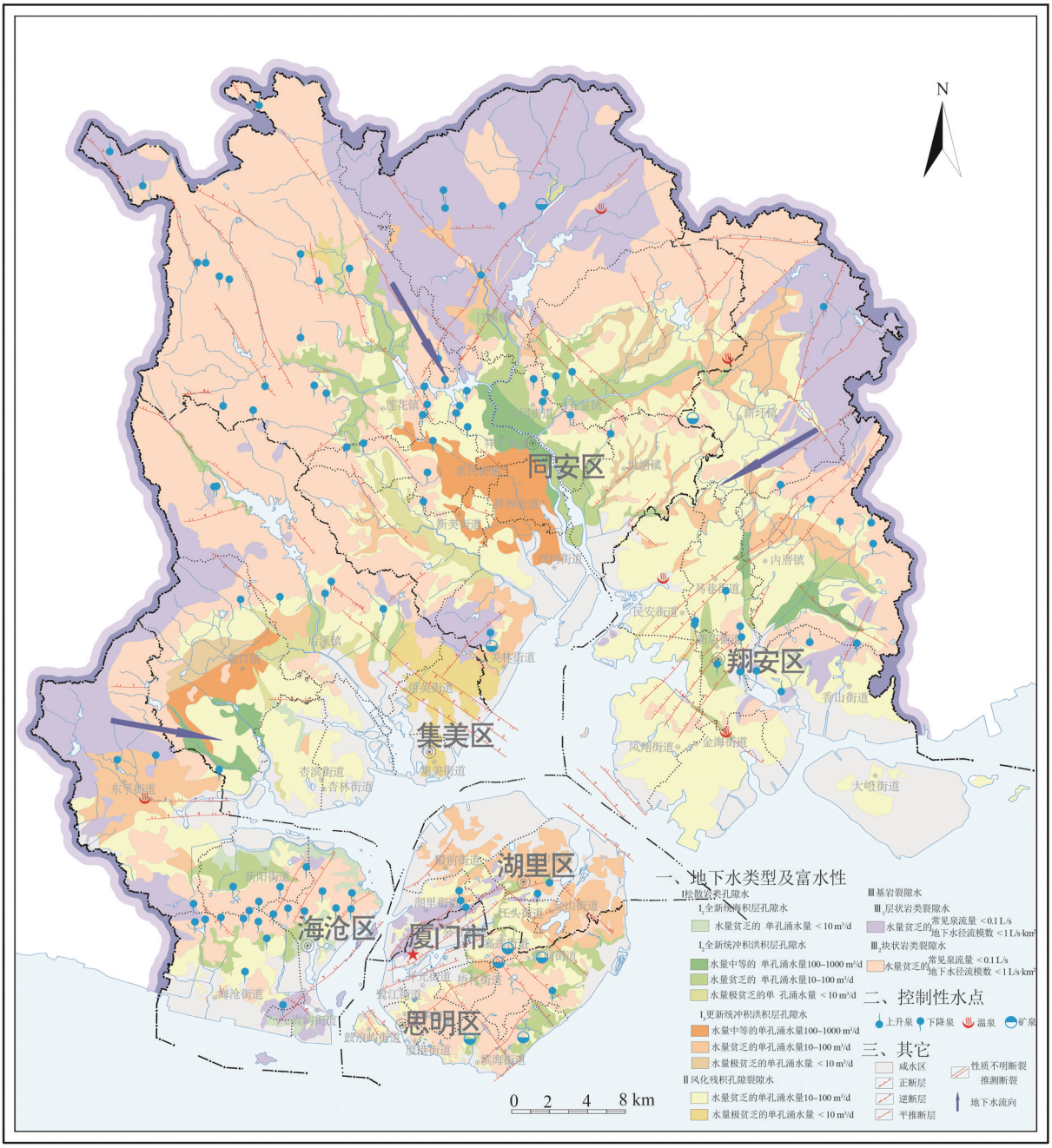


图2 厦门市水文地质图(厦门市地下水环境状况调查评估项目图集)

Fig. 2 Hydrogeological map of Xiamen (Atlas of the groundwater environment investigation and assessment in Xiamen)

厦门市平原区土壤类型主要为赤红壤。山地土壤类型主要以红壤为主，其次为赤红壤。植被覆盖广泛，包括沿海的红树林、低丘陵的常绿阔叶林以及城市绿地和农田。

1.2 数据来源

基于对厦门市域地形地貌与水文地质结构的系统分析，结合多期野外勘查数据，本研究在2024年内开展地下水样品采集工作。调查对象以

民用井为主，井深一般在 30 m 之内，属浅层地下水。2024 年丰水期在厦门市采集 85 组地下水水样，其中松散岩类孔隙含水层地下水样本占比约 35%（30 组）、基岩裂隙含水层地下水样本占比约 14%（12 组）、风化残积孔隙裂隙含水层地下水样本占比约 51%（43 组）。采样前通过水泵持续抽水约 10 分钟，直至 pH、TDS 及水温等现场参数趋于稳定，随后开展取样工作。每个样品在采集前均使用原水样润洗容器 3 次以上，装样后依据检测指标添加相应的保护剂，充分摇匀后即刻标记。样品置于 4 ℃泡沫箱内密封冷藏，并于同日送达实验室进行分析。样品采集与现场测试同步进行，水质分析样品送至有国家检测资质的厦门市华测检测技术有限公司进行测试。结合以往在厦门市所开展项目采集的地下水测试数据，在 2021—2024 年累计获得地下水 pH 数据 375 组（图 3），其中平原区 297 组，丘陵区 78 组。本研究所采用数据除部分 pH 数据为现场测试数据（2021 年枯水期、2022 年丰

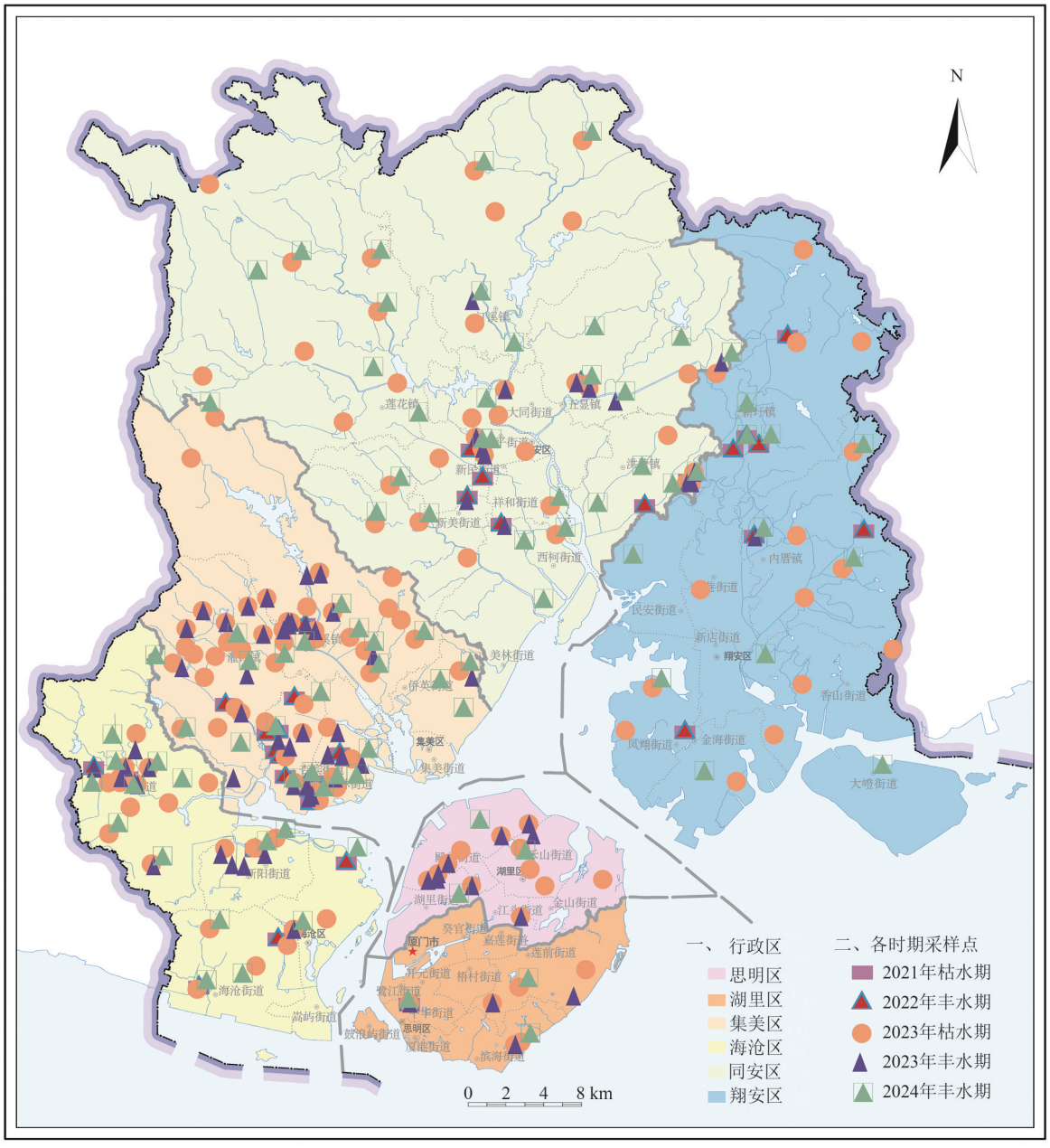


图 3　厦门市采样点示意图

Fig. 3　Schematic map of sampling sites in Xiamen

水期），其余均为实验室测定。水样的采集、保存和检测过程均严格按照《生活饮用水标准检验方法 GB/T 5750—2023》中的有关规定执行，进行严格质量控制。

2 结果与分析

2.1 地下水 pH 值的统计特征

基于厦门市 2021—2023 年开展的项目所采集的地下水环境调查数据，并结合 2024 年丰水期采集的 85 组浅层地下水 pH 值测试数据进行统计分析。根据《地下水资源储量分类分级》标准中的相关规定，地下水按照 pH 值分类如下：pH < 5.0 为强酸性水、5.0 ≤ pH < 6.5 为弱酸性水、6.5 ≤ pH < 8.0 为中性水、8.0 ≤ pH < 10.0 为弱碱性水、pH ≥ 10.0 为强碱性水。按不同时期（枯水期、丰水期）统计地下水的 pH 值，统计结果（图 4）显示：枯水期地下水 pH 值在 4.90 ~ 7.61 之间，平均为 6.34，数值主要分布于 5.85 ~ 6.80 区间；丰水期地下水 pH 值则介于 4.80 与 7.70 之间，均值为 6.43，集中于 5.90 ~ 6.90 范围。不同时期不同 pH 值范围的地下水占比统计结果如下表（表 1）所示。整体而言，厦门市地下水主要是中性地下水（6.5 ≤ pH < 8.0）和酸性地下水（pH < 6.5），其中酸性地下水占比最高，达到 52.80%；中性地下水次之，占比为 47.20%。其中酸性地下水又以 pH 值为 5.0 ~ 6.5 的弱酸性地下水为主（占比 51.73%）。从 375 组丰水期、枯水期浅层地下水 pH 值占比统计结果可以看出，枯水期酸性地下水所占比例略高于丰水期。其中酸性地下水占枯水期样品的 57.95%，而在丰水期其占比降至 48.24%，pH 值小于 5.0 的强酸性地下水样品占比变化较小，其比例由枯水期 0.57% 增加到丰水期 1.51%。

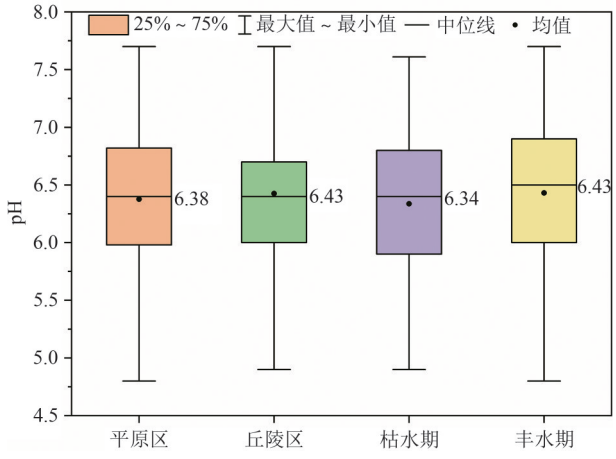


图 4 不同区域、不同时期地下水 pH 值统计

Fig. 4 Statistics of pH in groundwater in different areas and periods

表 1 丰、枯水期浅层地下水 pH 值占比

Table 1 Proportion of pH of shallow groundwater during wet season and dry season

采样时期	样品数/个	6.5≤pH<8.0/%	5.0≤pH<6.5/%	pH<5.0/%
丰水期	199	51.76	46.73	1.51
枯水期	176	42.05	57.39	0.57
总计	375	47.20	51.73	1.07

按不同的地貌分区（丘陵台地区和平原区）分别统计厦门市 375 组地下水的 pH 值，结果如下图（图 4）所示。统计结果表明：厦门市浅层地下水 pH 值范围为 4.80 ~ 7.70，丘陵区地下水 pH 值在 4.90 ~ 7.70 之间，平均为 6.43，数值主要分布于 5.90 ~ 6.60 区间，酸性样品占比为 58.97%；平原区 pH 值则介于 4.80 与 7.70 之间，均值为 6.38，集中于 6.00 ~ 6.85 范围，酸性地下水占 51.18%。总体来看，丘陵台地区的地下水呈现出较低的 pH 值特征，多数样品为酸性，少数样品接近中性（pH > 7）。平原区地下水 pH 值占比情况与丘陵台地区类似，但相对于丘陵区而言，平原区中性水的比例较高。

2.2 地下水 pH 值空间分布

采用 2021—2024 年厦门市 pH 值数据绘制厦门市地下水 pH 值空间分布图（图 5），厦门市的 pH 值分布呈现出一定的空间变化规律，大多数的内陆丘陵台地区域 pH 值总体较低，浅层地下水偏酸性，其中 58.97% 的丘陵区地下水样品 pH < 6.5，主要分布在陆域西部天竺山—蔡尖尾山、钉顶尾山—黄厝山一带，翔安区香山和西岩山周边。而 pH 值在 6.5 ~ 8.0 范围内的丘陵区地下水样品占 41.03%，主要分布在北辰山—云顶山一带，岛内东坪山周边，多为基岩裂隙水；平原区约有一半的地下水样品呈酸性，主要分布在山前冲积平原以及山间沟谷。其余平原区地下水 pH 值大多在 6.5 ~ 8.0 范围内属中性地下水，主要分布在马銮湾、杏林湾及滨海地带。

2.3 地下水水化学类型

Piper 图示法是常用的水化学类型分析方法，通过 Piper 图可以了解地下水的水化学类型、阴阳离子的组成及其变化规律[25-26]。根据研究区 2021

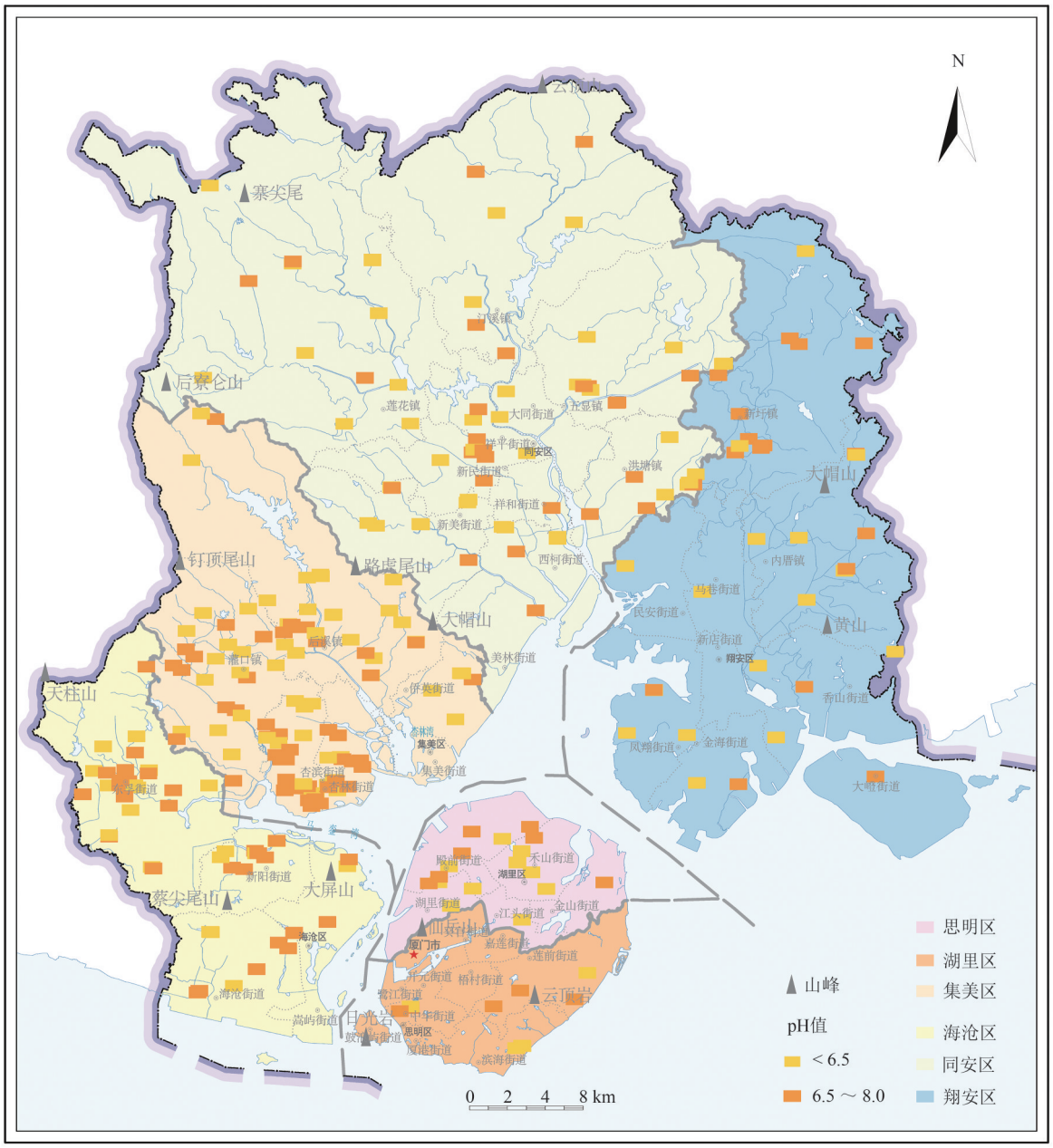


图 5　厦门市地下水 pH 值空间分布图

Fig. 5　Spatial distribution map of groundwater pH in Xiamen

年枯水期、2022 年和 2023 年丰水期的水质测试数据绘制 Piper 三线图，如下图（图 6）所示。研究区浅层地下水的主要阴离子为 HCO_3^- 与 Cl^-，主要阳离子为 Ca^{2+} 与 Na^+；水化学类型较为复杂，以 HCO_3·Cl–Na·Ca 型、HCO_3–Na·Ca 型、Cl–Na·Ca 型及 Cl·SO_4–Na·Ca 型为主（图 6）。不同水化学类型的地下水 pH 值存在差异，四类主要水化学类型的 pH 值由低到高排列为 Cl–Na·Ca 型、HCO_3·Cl–Na·Ca 型、Cl·SO_4–Na·Ca 型和 HCO_3–Na·Ca 型。具体来看，Cl–Na·Ca 型的平均 pH 值最低，为 5. 95，范围为 4. 80 ~ 6. 90；HCO_3·Cl–Na·Ca 型与 Cl·SO_4–Na·Ca 型的均值分别为 6. 36 和 6. 56，前者 pH 值分布在 5. 10 ~ 7. 70 之间，后者在 4. 80 ~ 6. 80 之间；HCO_3–Na·Ca 型的平均 pH 值最高，为 6. 63，pH 值区间为 5. 40 ~ 7. 40。

富含 HCO_3^- 的地下水水化学类型（如 HCO_3–Na·Ca 型）以 HCO_3^- 为主要阴离子，具有较强的 pH 缓冲能力。该类地下水在形成过程中经历了强烈而充分的水岩相互作用，尤其是与硅酸盐岩的溶解反应，使水体天然呈现较高的 pH 值。相反，以

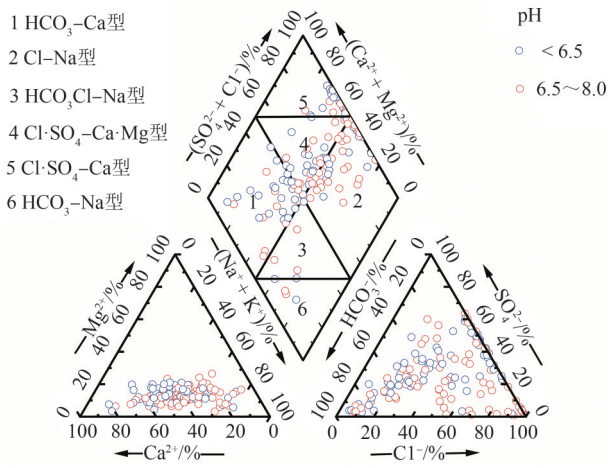


图6 厦门市浅层地下水Piper图

Fig. 6 Piper diagram of shallow groundwater in Xiamen

Cl^-和SO_4^{2-}等强酸阴离子为主的水化学类型(如Cl–Na·Ca型)相对缺乏缓冲作用。厦门市滨海平原区存在海水入侵现象，该过程通常伴随着低pH环境，因此以Cl^-或SO_4^{2-}为主导的地下水pH值相对较低。厦门市地下水由Cl–Na·Ca型向HCO_3–Na·Ca型转变的pH差异，本质上反映了水体经历不同地球化学演化路径的结果。pH值的升高表明水体从缺乏缓冲、易受外界影响的状态，逐渐演化为经地质介质改造后具有稳定pH机制的状态。厦门地区地下水pH值范围较宽(4.8～7.7)，正说明了酸性水体与具缓冲能力的中性水体在空间上的并存。

2.4 地下水水化学成因特征

Gibbs图通过分析水体中阳离子浓度比值[$c(Na^+)/c(Na^++Ca^{2+})$]与阴离子浓度比值[$c(Cl^-)/c(Cl^-+HCO_3^-)$]与溶解性总固体(TDS)的变化特征，将地下水主要离子化学组分的控制机制划分为三种类型：即蒸发浓缩作用主导型、岩石风化作用主导型及大气降水输入主导型。该模型可揭示不同水文地球化学过程中地下水水化学演化机制[27-29]，将厦门市2021年枯水期、2022年和2023年丰水期的地下水化学数据绘制于Gibbs图中(图7)，结果显示：研究区pH < 6.5的酸性地下水离子浓度比值大多小于0.6，而中性地下水的离子比值浓度整体较高。采样点大部分分布在Gibbs图的中部，小部分采样点有向大气降水偏移的趋势，表明研究区水化学特征主要受到了水岩作用的控制，又受到了一定降水作用的影响。此外，少部分采样点出现在模型图框之外，可能受到人类活动的影响。

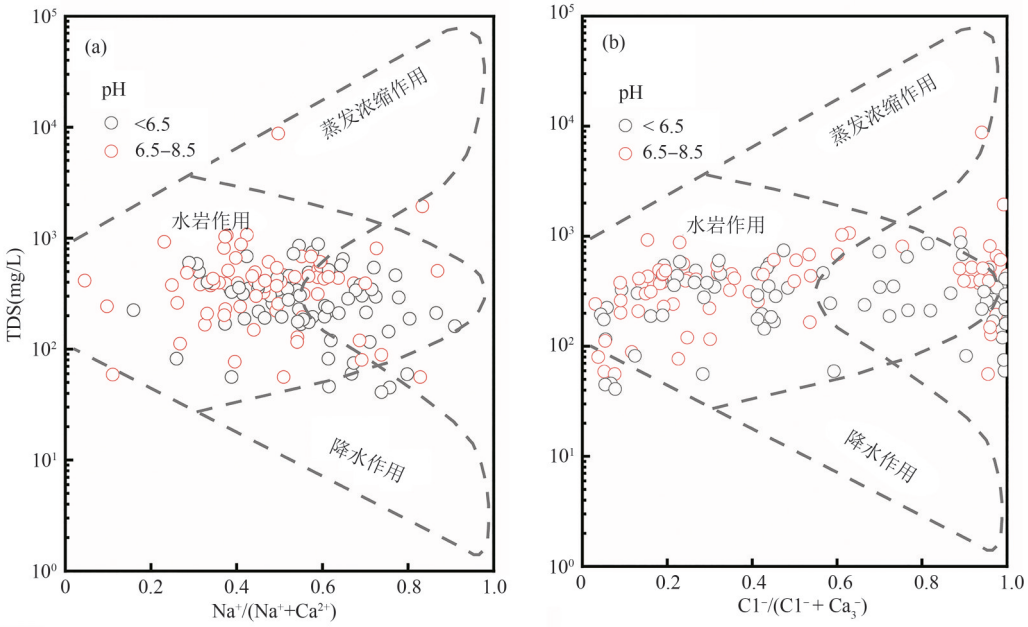


图7 厦门市地下水Gibbs图[阳离子(a)、阴离子(b)浓度比值与TDS关系]

Fig. 7 Gibbs diagram of groundwater in Xiamen [The relationship between the cation (a) to anion (b) concentration ratio and TDS]

岩石风化溶解相对贡献图可以揭示不同矿物对地下水化学的贡献，进一步探讨地下水水化学演化过程受岩石风化的影响[16, 30-31]。鉴于研究区内地表及浅层地层中普遍缺失碳酸盐矿物，这决定了区域地下水化学组分的形成与演化过程并非由碳酸盐矿物的快速溶解作用所主导，而是受到水岩相互作用的综合制约。在此背景下，硅酸盐类矿物的风化淋滤作用构成了控制地下水化学特征演变的核心驱动力(图8)。不同区域的地下水受矿物风化不同，可能造成地下水的pH值存在差异。

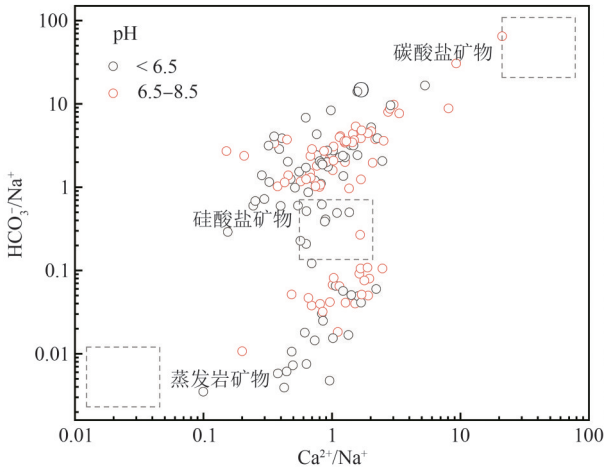


图 8　厦门市岩石风化溶解相对贡献图

Fig. 8　Relative contribution of rock weathering and dissolution in Xiamen

2.5　酸中和能力分析

地下水碱度反映其结合质子的能力，即抗酸化能力，通常以重碳酸根(HCO_3^-)和碳酸根(CO_3^{2-})的总量来衡量，低碱度地下水更易受酸化作用的影响[32]。研究区内地下水中 CO_3^{2-} 的含量均低于检出限，因此可通过 HCO_3^- 与 pH 值的关系评价其抗酸化水平。如图(图 9a)所示，研究区内地下水碱度一般较低，所有水样的 HCO_3^- 浓度低于 600 mg/L，地下水 pH 值易受外界影响而波动。

酸中和能力(Acid Neutralization Capacity，ANC)是衡量地下水对酸性物质缓冲能力的关键指标，其值范围可反映水体的酸化敏感性和缓冲机制。具体值可通过公式(1)[33]计算：

$$ANC = \left(Ca^{2+} + Mg^{2+} + Na^{+} + K^{+}\right) - \left(NO_3^- + SO_4^{2-} + Cl^-\right) \quad (1)$$

ANC 越大，地下水酸中和能力越强，反之地下水酸中和能力越弱；当 ANC 为负数时，表明研究区可能已经经历了较长的酸化过程[10, 16]。如图(图 9b)所示的 ANC 值进一步表明，厦门市地下水的酸中和能力普遍较弱，仅能抵御少量酸性物质的输入。同时，部分样品的 ANC 值呈负数，这类水样具有较高的 Cl^- 浓度，显示其可能受到了海水入侵的影响。

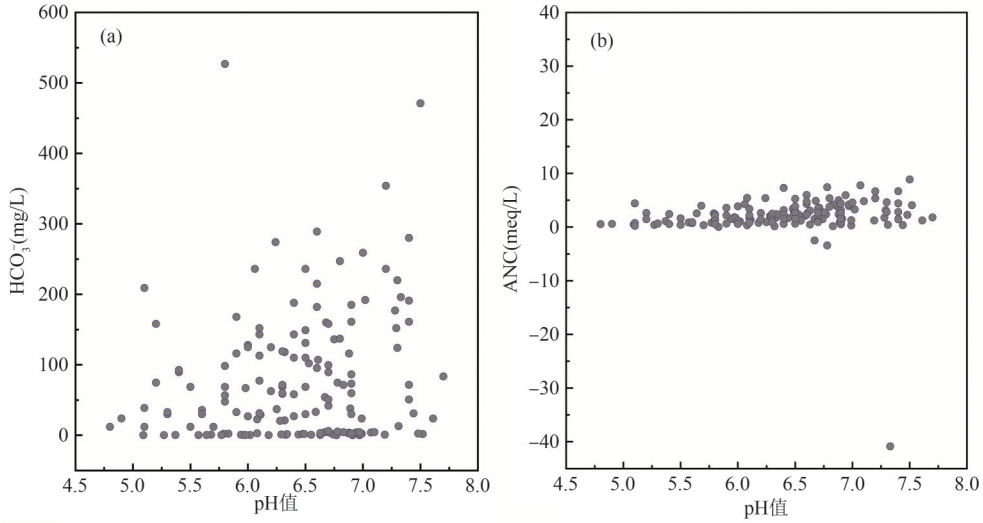


图 9　厦门市地下水 pH 值与 HCO_3^-(a)和酸中和能力(ANC)(b)关系图

Fig. 9　Relationship between groundwater pH and(a)HCO_3^-, and(b)Acid Neutralization Capacity in Xiamen

3　讨　论

3.1　酸　雨

酸雨入渗是形成酸性地下水的主要因素。酸雨在我国南方地区广泛分布，在浅层地下水的主要补给来源为大气降水的地区，酸雨是偏酸性地下水中 H^+ 的主要来源。偏酸性的大气降水不断地补给含水层，因地下水系统酸中和能力(ANC)弱，酸性降水入渗后持续消耗有限碱性物质，导致 H^+ 累积及 pH 值下降。

厦门市地处东南酸雨区，是酸雨出现频率高，强度较大的区域之一。近几年厦门市酸雨已有很大改善，但形势依然严峻。据厦门市环境质量公报统计数据，2001—2024 年厦门市降水的 pH 最小值为 3.04、最大值为 8.86；厦门市降水 pH 加权平均值范围为 4.37 ~ 5.41，且自 2018 年以来整体呈现波动上升的趋势；酸雨发生率范围为 23.5% ~ 93%，除了 2017 年、2024 年酸雨发生率较低分别

为23.5%、33.9%，其余年份酸雨发生率均在60%以上(图10)。厦门市浅层地下水的主要补给来源为大气降水，其酸化与区域酸雨密切相关。酸雨入渗不断地补给含水层，对浅层地下水的酸化起到了重要作用，这与其他滨海平原河网密集区情况类似[8, 10, 19]。厦门市长期受到酸雨污染的影响，这是该地区地下水酸化的重要驱动因素[8]。厦门市地下水所表现出偏酸性的pH特征，这一结果进一步印证了酸雨对地下水化学性质及其空间分布格局的显著影响。

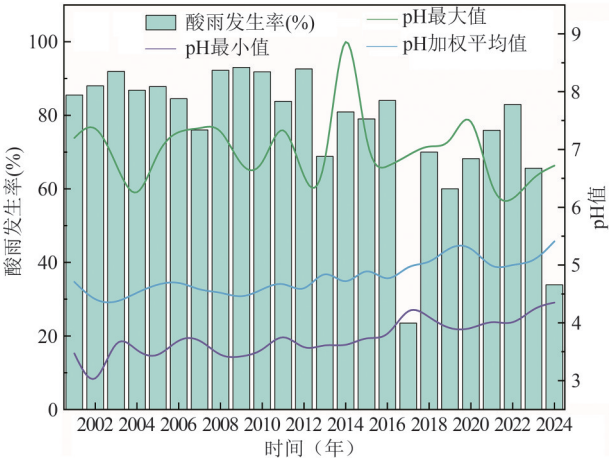


图10 2001—2024年厦门市酸雨发生率及pH值范围

Fig. 10 Acid rain occurrence rate and pH range in Xiamen from 2001 to 2024

前人的研究表明，酸雨对地下水pH值的影响在不同地区表现不一。例如，在广西防城港地区丰水期酸性地下水比例(79.2%)显著高于枯水期(63.1%)，主要归因于酸雨的直接入渗[33]。然而，其他研究也确实观测到枯水期酸性地下水比例更高的现象[34-35]。在丰水期，降水渗透过程“快速且直接”，酸性物质(如硫酸和硝酸)未能与矿物充分中和，导致地下水pH在短时间内显著下降，而枯水期酸性地下水比例升高通常源于缓慢的“演化型”地球化学过程。此阶段降水稀少、蒸发强烈，浅层地下水因蒸散发作用而水分减少，溶解性总固体(TDS)及离子浓度升高，形成蒸发浓缩效应。当水体中含有酸性组分(如硝酸盐)时，其浓度上升可能使原本中性的地下水转为酸性。此外，枯水期的农业灌溉用水量较大。过度取水加剧浓缩效应，而氮肥经硝化作用生成硝酸盐并释放氢离子，成为土壤和浅层地下水酸化的重要来源。在降水稀少条件下，这些酸性物质不易被稀释或淋洗，易随灌溉回渗进入地下水系统。因此，枯水期酸性水样比例升高并非由外部酸性输入引起，而是由浓缩作用、产酸反应累积以及降水减少导致的稀释效应减弱共同作用的结果。

3.2 水岩相互作用

研究区地下水的pH值受到水岩相互作用影响，其中淋滤过程，尤其是在特定地质背景下，是形成厦门市酸性地下水的关键。研究区内缺乏碳酸盐岩，基岩以花岗岩为主，其组成矿物主要是各类硅酸盐(如长石、石英、云母等)。区内土壤类型主要是红壤和赤红壤，根据相关研究[36]，这两类土壤普遍呈酸性，其pH值较低。在这种地质格局下，厦门市地下水化学成分的演化路径主要依赖于硅酸盐矿物风化过程，该过程是控制当地地下水化学组分的核心地质作用。通常而言，地下环境中的质子(H^+)主要源自多种弱酸物质的电离过程，例如碳酸(H_2CO_3)、硅酸(H_2SiO_3)以及硼酸等。大气及土壤中的二氧化碳(CO_2)溶解于水后形成碳酸，随后发生解离($CO_2 + H_2O \rightleftharpoons H_2CO_3 \rightleftharpoons H^+ + HCO_3^- \rightleftharpoons 2H^+ + CO_3^{2-}$)，成为驱动后续水文地球化学反应的初始$H^+$供给源[37]。当携带大量溶解$CO_2$的地下水向下渗透，与硅酸盐矿物长期接触后，水岩相互作用逐渐成为控制地下水pH演变的关键过程。从硅酸盐矿物的风化过程来看，这本身是一个消耗H^+的反应，也是地下水系统中重要的酸中和机制。以钾长石风化形成高岭石的典型反应式为例：$2KAlSi_3O_8$(钾长石) + $2H^+ + 9H_2O \rightarrow Al_2Si_2O_5(OH)_4$(高岭石) + $2K^+ + 4H_4SiO_4$。其他硅酸盐矿物(如钠长石、钙长石等)也会通过类似机理发生风化，在消耗H^+的同时将碱金属和碱土金属阳离子(如K^+、Na^+、Ca^{2+}等)释放到水中。随着水岩相互作用的进行，水中H^+的浓度不断下降，原有的碳酸平衡系统向消耗H^+的方向移动，促使CO_2转化为重碳酸根离子(HCO_3^-)。因此，硅酸盐风化过程还会增加地下水中HCO_3^-含量，是研究区主要阴离子HCO_3^-的重要来源。H^+的消耗使得地下水pH值逐渐上升，且地下水流动越缓慢、路径越长，随着水岩相互作用效应的累积，地下水pH值的升高也更显著。

硅酸盐矿物的水解通过持续消耗H^+、释放阳离子，可抵消部分来自降水和CO_2溶解的酸性输入，推动地下水pH的上升。虽然这一过程相比碳酸盐矿物的风化速率更为缓慢，但在没有碳酸盐岩分布的地区，却是控制地下水pH演化的关键机制。在同安区北部和西北部的山区、集美区西部

和后溪镇北部山地、海沧区北部天竺山一带、翔安区内厝镇、厦门岛内东南部等区域花岗岩分布广泛，以花岗岩为主的硅酸盐矿物风化作用，导致了这些区域地下水 pH 值有所上升。

3.3　酸性包气带介质

地下水的质量演化进程受控于上覆包气带的水文地球化学属性，其酸化过程会因包气带介质物理化学组成的区域性差异而呈现显著分异[38]。在水岩相互作用过程中，包气带介质本身的酸碱特性间接调控下方地下水的酸碱度平衡。包气带特性对地下水的酸碱性存在间接影响，其核心机理在于不同岩性所含矿物组分的酸缓冲效能存在显著差异。由于矿物成分不同，其酸中和能力也不同，从而影响地下水酸碱性。在降雨补给量长期超过蒸散量的淋溶环境下，包气带中的钙、镁、钾等碱性阳离子会逐渐淋失，其在土壤胶体上的吸附点位被氢离子等所占据，从而导致包气带介质的酸化趋势加剧。通常，抗风化能力较弱的岩石和土壤体系更容易发生酸化[39]。

厦门地区地貌类型多样，水文地质条件复杂，其包气带表现出显著的空间异质性。西北部分布的低山与丘陵地貌，其包气带介质主要由火山岩和花岗岩及其风化形成的残坡积物构成。而在东南部地势低平开阔的沿海平原区，包气带则以第四纪的海相和河流冲积沉积物为主，其物质组分常呈现“二元结构”，即上部为粉砂、黏土等细颗粒物质，下部为粗砂和砾石层。作为典型的亚热带季风气候区，高温多雨的气候条件促进了强烈的化学风化和盐基淋溶作用，这使得研究区土壤介质整体上具备酸化的内在趋势。同时，外部环境压力亦不容忽视，厦门市常年受到酸雨影响[40]，这为包气带的持续酸化提供了稳定的外部驱动力。

包气带的物理结构与渗透特性同样对地下水的 pH 值响应起着关键的间接调控作用[6]。在厦门西北部的丘陵山地区，花岗岩风化后形成的残坡积物通常质地较为疏松，颗粒较粗，可能导致其包气带结构松散且整体透水性较好。同时，这些地区地形高差较大，地下水水力坡度陡，降雨补给后径流迅速，浅层地下水循环路径短，水与包气带介质的接触和反应时间也相应缩短。这种水力模式，加上介质本身可能因淋溶而降低的缓冲能力，使得酸性补给水对地下水水质的影响更为直接迅速。相比之下，东南部平原区的第四纪海积与冲积层，由于其上部普遍覆盖有黏土、淤泥质黏土以及粉质黏土等细颗粒物质，包气带的渗透性相对较弱，垂向渗透系数较低。较差的渗透性增大了酸性雨水在包气带中的滞留时间，为水岩之间的缓冲反应提供了更为有利的时间条件。丘陵区可能因其较强的渗透性和较短的水岩作用时间，使酸性补给水对地下水系统的影响更为直接；而平原区以黏性沉积物为主的包气带，则对酸性入渗具有更强的缓冲与净化功能。同时，平原区作为区域地下水排泄区，矿化度较高，高浓度的 Ca^{2+} 离子等显著增强水体酸中和能力，推动 pH 值升至中性范围（6.5 ~ 8.0）。这可能导致平原区地下水的 pH 值普遍略高于丘陵区，并形成了研究区地下水 pH 值的空间分异现象。

3.4　海水入侵

在沿海地带，海水入侵是改变地下水化学环境的关键地质过程，受其影响的区域，地下水 pH 值会表现出明显抬升的趋势。同时，潮汐作用力能驱动海水通过河口上溯，侵入内陆河网，从而造成河水 pH 值的升高。特别是在平原河网密集区，地表水体与地下水之间存在着复杂的相互补给关系，受高 pH 值河水补给的地下水，其自身的 pH 值也会相应提高[8]。厦门市沿海平原同样面临着严峻的海水入侵问题，并且入海口的河流系统亦会遭受咸潮现象的干扰。因此，pH 值较高的海水，无论是通过直接渗透还是经由河网系统间接补给，都在深刻地影响着厦门沿海平原区的地下水化学平衡，是导致滨海区域地下水 pH 值升高的一个主导因素。

3.5　成因探讨

根据以上的分析基本可以明确厦门市酸性地下水的主要影响因素，研究区地下水 pH 值的主要影响因素是酸雨、水岩相互作用、酸性包气带介质和海水入侵。综合厦门市地质环境、水文条件，该区域地下水 pH 值分布规律及偏酸性的成因系统可归纳为以下机制：首先，高强度酸雨持续输入是主导因素，酸性大气降水的入渗直接导致浅层地下水 pH 值降低。其次在丘陵台地区，地表土层颗粒较粗，大气降水在向下入渗的过程中丘陵台地区的偏酸性包气带介质加剧了地下水的酸化；以花岗岩为主的硅酸盐矿物风化作用和海水入侵则使地下水的 pH 值呈现上升趋势。在北部的北辰山—云顶山一带，地下水主要是基岩裂隙水，埋

藏较深，受酸雨的影响较小，其pH值为中性。而山前的冲积平原以及风化残积平原地带，地下水接受了自上游丘陵区酸性地下水的侧向补给，该区域地下水pH依然保留了较为明显的弱酸性特质。而在地势更低的滨海平原，地下水的pH值出现了升高趋势。在这些区域，大多数地下水样品转变为中性地下水。这种变化原因在于该区域地下水系统与海洋存在密切的水力交换。海水入侵带来了高浓度的氯化物和钠离子，有效中和了陆源补给水的酸性，从而导致地下水pH显著上升。

除此之外，人类活动也在一定程度上改变着局部地下水的化学组成及pH值。例如，在农业活动集中的区域，化肥尤其是氮肥的长期过量施用，会显著加剧土壤的硝化作用，该生化过程持续产生氢离子(H^+)，直接导致土壤淋溶液的pH值下降，进而通过入渗补给的方式酸化浅层地下水，并使地下水硝酸盐(NO_3^-)浓度升高。与此同时，厦门市作为工业化程度较高的沿海城市，其工业活动对地下水酸碱性的也有一定的影响。特别是电子、电镀、化工等企业密集分布的区域，其生产过程中排放的未达标酸性或碱性废水，成为了局部地下水酸化的直接外源输入。

本研究主要揭示了地下水pH的空间分布特征及其驱动因子，为理解区域地下水酸化的形成机制提供了基础。然而，由于监测数据的时空覆盖有限，部分关键环境因子(如降雨化学组成、人类活动强度及地下水动力条件等)缺乏系统性数据支撑，难以开展多因子定量分析。若能在未来研究中获取更高分辨率的多源环境数据，并结合地理探测器、冗余分析或多元回归等方法，对各影响因素的相对贡献率进行定量评估，将有助于更深入地阐明地下水pH的主控机制及其空间差异性，从而为区域水资源保护与污染防控提供更科学的依据。

4 结 论

(1)厦门市浅层地下水以酸性和中性类型为主，pH值大多集中在5.0～6.5，其中酸性地下水样品占总数的52.80%，且丰水期酸性地下水比例略低于枯水期。

(2)浅层地下水pH值在地貌单元上分异性明显，丘陵区低于平原区。丘陵区的平均pH值为6.43，主要分布在5.90～6.60之间，其中pH＜6.5的样品占58.97%；平原区平均pH值为6.38，集中在6.00～6.85范围内，pH低于6.5的样品比例为51.18%。

(3)酸性地下水的形成主要受酸雨、水岩相互作用、酸性包气带介质和海水入侵等因素共同控制。其中酸雨是导致地下水pH值偏低的重要物质基础；水岩相互作用、酸性包气带介质则为次要影响因素，而包气带结构特征和渗透性能在一定程度上加剧pH值的空间差异；硅酸盐矿物风化作用和海水入侵对滨海平原区地下水pH升高有一定的贡献；人类活动也在一定程度上影响pH值的分布。研究区酸性地下水的空间分布差异是在各个因素共同影响下长期演化而产生的结果。

参考文献：

[1] PASCHKE S S, HARRISON W J, WALTON-DAY K. Effects of acidic recharge on groundwater at the st. Kevin gulch site, leadville, colorado[J]. Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis, 2001, 1(1): 3－14.

[2] EDMUNDS W M, KINNIBURGH D G, MOSS P D. Trace metals in interstitial waters from sandstones: Acidic inputs to shallow groundwaters[J]. Environmental Pollution, 1992, 77(2/3): 129－141.

[3] BENISON K C, BOWEN B B. The evolution of end-member continental waters: The origin of acidity in southern western australia[J]. GSA Today, 2015, 25(6): 4－10.

[4] DICKSON B L, GIBLIN A M. Features of acid－saline systems of southern australia[J]. Applied Geochemistry, 2009, 24(2): 297－302.

[5] 周训，张华，赵亮，等. 浅析广西北海市偏酸性地下水的形成原因[J]. 地质学报，2007,81(6)：850－856.

[6] 张玉玺，孙继朝，陈玺，等. 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，2011，38(1)：16－21.

[7] 李丹，孟庆强，张明珠. 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，2015，37(6)：3－5，17.

[8] 荆继红，孙继朝，韩双平，等. 珠江三角洲地区酸雨及酸化地下水分布特征[J]. 上海地质，2010,31(2)：8－12.

[9] CLOHESSY S, APPLEYARD S, VOGWILL R. Groundwater acidification near the water table of the Superficial aquifer, Gnangara Mound, Swan Coastal Plain, Western Australia[J]. Applied Geochemistry, 2013, 36(1): 140－152.

[10] 周迅，张后虎，刘林，等. 中国东南地区偏酸性地下水的分布及影响因素[J]. 环境科技，2017，30(4)：52－57.

[11] KJØLLER C, POSTMA D, LARSEN F. Groundwater acidification and the mobilization of trace metals in a sandy aquifer[J]. Environmental Science & Technology, 2004, 38(10): 2829－

2835.

[12] LEYDEN E, COOK F, HAMILTON B, et al. Near shore groundwater acidification during and after a hydrological drought in the lower lakes, south australia[J]. Journal of Contaminant Hydrology, 2016, 189(1): 44 – 57.

[13] HA Q K, CHOI S, PHAN N L, et al. Occurrence of metal-rich acidic groundwaters around the mekong delta (vietnam): A phenomenon linked to well installation[J]. Science of The Total Environment, 2019, 654: 1100 – 1109.

[14] SERRANO L, DÍAZ-PANIAGUA C, GÓMEZ-RODRÍGUEZ C, et al. 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, 2016, 571: 1253 – 1261.

[15] 胡启智, 王秀娟, 丘锦荣, 等. 潮汕地区地下水饮用水源地酸性浅层地下水特征及成因探讨[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2025,55(3):906-918.

[16] 黄旭娟, 刘前进, 李思思, 等. 江西赣州东北部地下水水化学、同位素特征及成因分析[J]. 东华理工大学学报(自然科学版), 2025, 48(5): 444-454.

[17] WANG H V, ALLAN K. Corrosion control for a waste water disposal line[C]. CORROSION 2011. Houston, TX: AMPP, 2011.

[18] PEIFFER S, OLDHAM C, SALMON U, et al. Does iron cycling trigger generation of acidity in groundwaters of western australia?[J]. Environmental Science & Technology, 2009, 43(17): 6548 – 6552.

[19] 程新伟, 孙继朝. 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, 2017, 39(5): 25 – 27, 87.

[20] 张华, 周训, 沈晔, 等. 广西北海市地下水系统水化学特征的分析[J]. 现代地质, 2007, 21(4): 613 – 618.

[21] 李锐, 周训, 张理, 等. 北海市偏酸性地下水 pH 值的特点及其影响因素简析[J]. 勘察科学技术, 2006(5): 46 – 50.

[22] 林文辉, 张燕茹. 厦门市 2021 年大气降水化学组分变化趋势及来源分析[J]. 环保科技, 2023, 29(5): 14 – 21.

[23] 李政红, 郝奇琛, 李亚松, 等. 福建厦门市地下水质量及开发利用建议[J]. 华东地质, 2022, 43(1): 40 – 48.

[24] 李政红, 李亚松, 郝奇琛, 等. 福建厦门市硝酸型地下水特征、成因及其治理措施建议[J]. 中国地质, 2021, 48(5): 1441 – 1452.

[25] 徐一鸣, 李傲宇, 程立群, 等. 冀东平原馆陶组地热流体水化学成分和 H-O 同位素组成特征及其地质意义[J]. 现代地质, 2025, 39(2): 429 – 439

[26] 梁颂, 路玉沁, 梁金龙, 等. 川西巴塘温泉地球化学特征及其循环演化过程[J]. 现代地质, 2025, 39(6): 1716-1729.

[27] 彭红霞, 侯清芹, 曾敏, 等. 雷州半岛地下水化学特征及控制因素分析[J]. 环境科学, 2021, 42(11): 5375 – 5383.

[28] 张涛, 蔡五田, 李颖智, 等. 尼洋河流域水化学特征及其控制因素[J]. 环境科学, 2017, 38(11): 4537 – 4545.

[29] 杜珍妮, 张家贵, 马彦彪, 等. 矿井水水化学特征及生态复用研究——以山西省西山矿区为例[J]. 现代地质, 2025, 39(05): 1363 – 1372.

[30] 李海明, 李梦娣, 肖瀚, 等. 天津平原区浅层地下水水化学特征及碳酸盐风化碳汇研究[J]. 地学前缘, 2022(3): 167 – 178.

[31] 吴嘉铃, 王莹, 胡倩, 等. 雷州半岛地下水水化学特征及成因分析[J]. 安全与环境工程, 2022, 29(1): 145 – 153, 162.

[32] TAKEM G E, KUITCHA D, AKO A A, et al. 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, 2015, 74(9): 6831 – 6846.

[33] 张宏鑫, 余绍文, 张彦鹏, 等. 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, 2022, 49(3): 822 – 833.

[34] KHOUND N J, BHATTACHARYYA K G. Assessment of water quality in and around jia-bharali river basin, north brahmaputra plain, India, using multivariate statistical technique [J]. Applied Water Science, 2018, 8(8): 221.

[35] BERHANU K G, LOHANI T K, HATIYE S D. Spatial and seasonal groundwater quality assessment for drinking suitability using index and machine learning approach[J]. Heliyon, 2024, 10(9): e30362.

[36] 王文俊. 福建多目标区域地球化学调查成果及其应用[J]. 福建地质, 2018, 37(2): 146 – 156.

[37] 刘玉, 刘德深, 沈立成. 云南维西花岗岩地区水文地球化学特征及形成机制研究[J]. 地球化学, 2007, 36(2): 161 – 170.

[38] 何军, 黎义勇, 曾敏, 等. 珠海市酸性地下水分布特征及成因机制[J]. 华南地质, 2024, 40(2): 404 – 412.

[39] CAMPBELL D H, MUTHS E, TURK J T, et al. Sensitivity to acidification of subalpine ponds and lakes in north-western Colorado[J]. Hydrological Processes, 2004, 18(15): 2817 – 2834.

[40] 欧寿铭, 潘荔卿, 庄马展, 等. 厦门地区酸沉降现状研究[J]. 环境科学研究, 1996, 9(5): 55-60.