DOI:10.16788/j.hddz.32-1865/P.2022.01.004
引用格式: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.(LI Z H, HAO Q C, LI Y S, et al. The groundwater quality and suggestion on groundwater exploitation in Xiamen, Fujian[J]. East China Geology,2022,43(1):40-48.)

福建厦门市地下水质量及开发利用建议

李政红[1,2],郝奇琛[1,2],李亚松[1],李剑锋[1],朱玉晨[1],李 倩[3]

(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.自然资源部地下水科学与工程重点实验室,河北 石家庄 050061;
3.河北省地矿局第八地质大队(河北省海洋地质资源调查中心),河北 秦皇岛 066000)

摘要:地下水质量和污染问题已成为制约城市发展的重要因素。该文对厦门市平原区地下水的有机和无机化学组分进行了系统全面的分析,根据"地下水标准"和"矿泉水标准"对地下水质量进行了综合评价。研究表明:厦门市地下水质量总体一般,可以直接饮用的水占22.9%,经过适当处理可以饮用的水占59.8%,不能饮用的占17.3%。有益人体健康的H_2SiO_3、Sr微量组分在地下水中含量普遍较高。在采集的87组样品中,有17组高H_2SiO_3或Sr元素地下水优于"地下水标准"Ⅲ类水标准和"矿泉水标准"相关标准,为兼有饮用和医疗价值的优质天然矿泉水。影响地下水质量的主要因子为pH值和Mn、Fe等与原生地质环境有关的无机组分,以及由人类活动引起污染的无机组分NO_3^-、Pb和有机组分二氯甲烷等。基于"优质优用,按需开采"的原则,从居民饮水安全的角度,对厦门市地下水开发利用提出科学有序开采优质矿泉水、适度开采水质优良水、应急利用原生水质较差水的建议。

关键词:厦门市;地下水质量;影响因子;矿泉水;开发利用
中图分类号:X824 **文献标识码**:A **文章编号**:2096-1871(2022)01-040-09

水资源是人类赖以生存的基础性资源,是国民经济和社会经济可持续发展的重要战略资源。厦门市虽然降雨量丰富,但淡水资源仍非常匮乏[1-3],市区供水以地表水为主,对区域外调水依赖程度高。据厦门市水资源公报,2019年区域外调入水量和地下水供水量占总供水量的比例分别为57.29%和6.39%。作为闽西南经济协作区的发展核心,厦门市整体发展已经上升为国家战略,水资源需求量也随之逐年增加。预测分析显示,在保持现有用水和节水力度条件下,2030年厦门市存在较大的水资源供水缺口,最大缺水量(特枯水年)高达$5.12\times10^8 m^3$,供水形势严峻,水资源短缺成为制约其经济可持续发展的重要问题。2019年厦门市地下水资源量为$2.987\times10^8 m^3$,开采量占可开采量的14.6%,开采程度很低,尚有一定的利用前景,在缓解供水矛盾、应对突发事件中具有重要补充和应急作用。地下水质量直接影响着补充和后备水源的供水能力和供水安全,影响着城市可持续发展。近年来,部分学者虽对厦门市地下水质量进行了相关研究,如黄浩等[4]分析了厦门岛西水东调工程对海岛地下水质量的影响,发现工程沿线150~800 m范围内地下水的盐度产生了明显变化;林玉锦等[5]通过31组地下水水样评价了厦门市地下水质量,评价表明12组良好、19组较差;伍成成[6]分析了厦门市同安区浅层地下水质量状况,发现地下水质量主要受原生地质环境的Fe、Mn元素以及人为引起的"三氮"污染影响,但以往研究几乎未对全市域地下水质量进行过调查评价和系统研究,且水质评价指标均未包含有机指标。本文依

*收稿日期:2021-06-09 修订日期:2021-09-13 责任编辑:叶海敏
基金项目:中国地质调查局"厦漳泉同城化地区综合地质调查(编号:DD20190303)"项目资助。
第一作者简介:李政红,1970年生,女,正高级工程师,本科,主要从事环境地质研究。Email:lzhhb@sina.com。
通信作者简介:郝奇琛,1986年生,男,副研究员,博士,研究方向为地下水循环及数值模拟。Email:haoqichen_iheg@163.com。

托 2019 年中国地质调查局的“厦漳泉同城化地区综合地质调查项目（简称厦漳泉项目）”，通过全面的地下水有机和无机水化学分析评价，查明了厦门市地下水质量现状，为该市地下水合理开发利用和保障饮水安全提供了重要依据。

1　研究区概况

厦门市位于台湾海峡西岸中部、闽南金三角的中心，属亚热带海洋性季风气候，气候温和湿润，多年平均气温 20.9 ℃。全市土地面积 1 700.61 km^2，海域面积约 390 km^2，海岸线总长约为 234 km。市域由陆地、海洋和岛屿组成，陆地总体地势由西北向东南倾斜。西北部为中山、低山区，海拔较高；向南过渡至丘陵地带，海拔降低；南面是海洋、厦门岛和鼓浪屿，海拔一般 10 m 以下。2019 年底厦门市常住人口 429 万人，其中城镇人口 383 万人。2020 年 GDP 约 6 384.02 亿元，占福建省的 14.5 %。厦门有丰富的海洋生物资源，金属矿藏资源较缺乏，淡水资源匮乏。

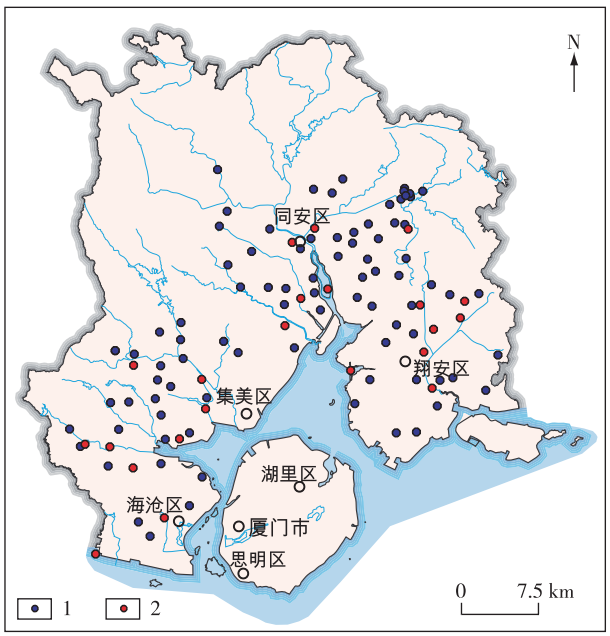
厦门市水系发育，河网密集，呈树枝状分布，径流方向自西北向东南。其河流特点为径流量小、水流短、河道窄、河床浅。河流水量随季节变化大，河水含沙量低。地下水主要赋存于松散岩类孔隙含水层、风化残积孔隙裂隙含水层、基岩裂隙含水层。松散岩类孔隙水包括冲洪积孔隙水和海积孔隙水。冲洪积孔隙水分布于河谷两侧阶地及山前洪积扇，含水层岩性为砂、砾石及砾卵石等，厚度 3～9 m，一般二级阶地区单位涌水量＜20 $m^3/(d \cdot m)$、一级阶地区单位涌水量为 20～200 $m^3/(d \cdot m)$。海积孔隙水分布于海岸及河口地带，含水层岩性为淤泥质砂、中粗砂等，厚度不大。风化残积孔隙裂隙水分布于残积台地及山前坡脚地带，含水层岩性为碎石、角砾，厚度一般为 10～20 m，一般单位涌水量均＜10 $m^3/(d \cdot m)$。基岩裂隙水分布于山区基岩裂隙及断层中，其富水性受构造断裂控制，含水性极不均一，一般单位涌水量均＜10 $m^3/(d \cdot m)$。地下水主要补给来源为大气降水，其次为地表水。

近二十年来，厦门市年均水资源量为 13.412×10^8 m^3。以户籍人口计算，2019 年人均水资源量为 419 m^3，属绝对贫水区。城市供水 90%以上为地表水，城镇居民用水量最大，为 2.289×10^8 m^3，占总用水量的 33.59 %。2015 年 8 月厦门市政府为加强地下水管理划定了地下水禁采区和限采区，厦门市大部分区域禁采、限采地下水，仅在城市供水系统未覆盖的一些边远地区的家庭以地下水作为生活用水。

2　研究方法

2.1　样品采集与测试

2019 年在厦门市平原区采集 112 组全分析水样品，包括地下水样品 87 组（松散岩类孔隙水 29 组、风化残积孔隙裂隙水 55 组、基岩裂隙水 3 组），地表水样品 25 组，采样点位置见图 1。分析项目包括 39 项无机指标和 27 项有机指标。地下水样品多采自村镇大口井或小机井，75 %的采样井井深＜50 m。无机样品采样体积 2 L，采样时，先用待取水样将水样瓶清洗 3 次，再将水样采集于瓶中。有机样品采样体积为 1 000 ml 和 40 ml，采样瓶为棕色玻璃瓶。采样前需在室内用蒸馏水清洗样品瓶，40 ml 样品瓶还需加入 1∶1盐酸 4 滴以控制样品 pH＜2。采样时，直接将水样采集于瓶中。采集后立即密封，低温保存。样品均送至自然资源部地下水矿泉水及环境监测中心，水样测定严格按照《GB/T5750—2006 生活饮用水标准检验方法》[7] 和《GB 8538—2016 食品安全国家标准饮用天然矿泉水检验方法》[8] 中的相关规定，阳离子 K^+、Na^+、Ca^{2+}、Mg^{2+} 由电感耦合等离子体质谱仪（ICP-MS，Varian820—



1.地下水；2.地表水

图 1　样品采集点分布图

Fig. 1　Distribution of sampling points

ms)测定。阴离子 SO_4^{2-}、NO_3^- 使用离子色谱仪(ICS1500)测定,检出限分别为 0.2 mg/L 和 0.1 mg/L。阴离子 NO_2^- 使用紫外分光光度法测定,检出限为 0.002 mg/L。阴离子 Cl^- 使用 $AgNO_3$ 滴定法测定,检出限为 0.01 mg/L。阴离子 HCO_3^- 用酸标准溶液滴定法。阳离子 NH_4^+ 采用纳氏试剂光度法测定,检出限为 0.04 mg/L。总硬度采用乙二胺四乙酸二钠滴定法,TDS 采用烘干测量法。为确保测试结果准确可靠,检测结果根据离子平衡原理进行阴阳离子平衡分析,分析误差均<3%。挥发性有机化合物采用气相色谱质谱联用仪(GCMS-QP2010pus)测定。

2.2 分析方法

根据《GB/T14848—2017 地下水质量标准》[9](简称“地下水标准”)和《GB 8537—2018 食品安全国家标准饮用天然矿泉水》[10](简称“矿泉水标准”)对地下水质量进行综合评价。按照“地下水标准”规定的方法进行地下水质量单指标、分类指标及综合评价,目的是评价地下水是否适合饮用,并获取地下水质量影响因子。按照“矿泉水标准”规定的方法进行矿泉水水质评价,目的是评价地下水是否可评定为矿泉水。

采用超标率分析某指标的超标程度。按公式(1)计算:

超标率(%)=超标点总数/样品总数×100%, (1)

采用影响程度分析影响地下水质量的主要因子及程度。根据地下水综合质量评价结果,按公式(2)和公式(3)分别计算各指标对Ⅳ、Ⅴ类水的影响程度。

影响程度(%)=指标(i) Ⅳ类水样本点数/Ⅳ类水样本点总数×100 %, (2)

影响程度(%)=指标(i) Ⅴ类水样本点数/Ⅴ类水样本点总数×100 %。 (3)

3 地下水质量评价

3.1 评价指标

参与地下水质量评价的指标共 55 项(表 1)。

表 1 地下水质量评价参评指标表

Table 1 Indicators of groundwater quality evaluation

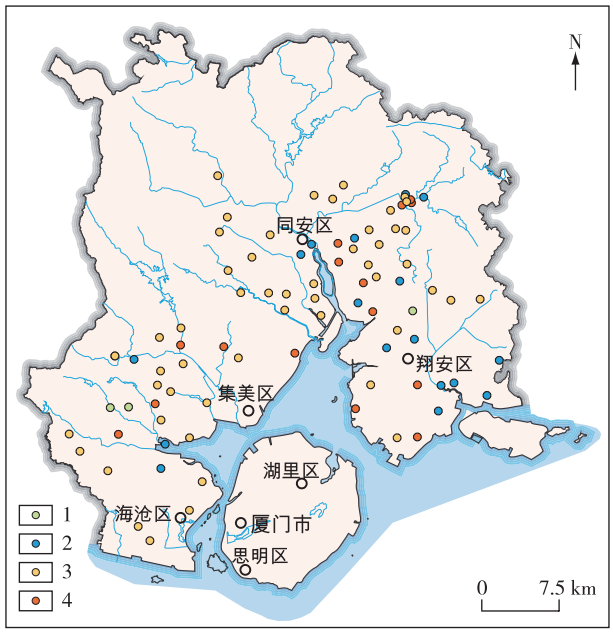
	指标类别	指标
无机指标	一般化学指标(13 项)	pH 值、总硬度、溶解性总固体、硫酸盐、氯化物、铁、锰、铜、锌、铝、COD、氨氮、钠
	毒理指标(4 项)	亚硝酸盐、硝酸盐、氟化物、碘化物
	毒性重金属指标(11 项)	硒、汞、砷、镉、铬(六价)、铅、钡、镍、钴、钼、银
有机指标	挥发性指标(22 项)	三氯甲烷、四氯化碳、苯、甲苯、二氯甲烷、1,2-二氯乙烷、1,1,1-三氯乙烷、1,1,2-三氯乙烷、1,2-二氯丙烷、溴仿、氯乙烯、1,1-二氯乙烯、1,2-二氯乙烯、三氯乙烯、四氯乙烯、氯苯、对二氯苯、邻二氯苯、1,2,4-三氯苯、乙苯、二甲苯、苯乙烯
	半挥发性指标(5 项)	总六六六、γ-六六六(林丹)、六氯苯、总滴滴涕、苯并(a)芘

3.2 评价结果

“地下水标准”评价研究表明,厦门市平原区地下水质量总体一般,无Ⅰ类水。按样品数量统计,可以直接饮用的(Ⅱ—Ⅲ类水)占 23.0 %,主要分布在翔安区的新店镇、新圩镇,同安区的新民镇,集美区的灌口镇等山前残积台地和河流的冲积阶地。经过适当处理可以饮用的(Ⅳ类水)占 59.8 %,在研究区广泛分布。不能饮用的(Ⅴ类水)占 17.2 %,主要分布在翔安区的新店镇、新圩镇,集美区的后溪镇等工业区、农业区及人口密集分布区(图 2)。

地下水有机指标好于无机指标。半挥发性有机指标最好,5 项指标在地下水均未检出。在 20 个样品中检出挥发性有机指标,占样品总数的 25.3 %,检出指标包括 1,2-二氯乙烯、氯苯、邻二氯苯、对二氯苯、1,2-二氯乙烷、1,2-二氯丙烷、甲苯、乙苯、溴仿、苯、三氯甲烷、三氯乙烯和二氯甲烷等 13 项,除采自同安区的 1 个水点二氯甲烷为Ⅳ类外,其余指标均未超过Ⅲ类水标准限值。

无机指标中毒理性指标好于一般化学指标(表 2)。按样品数量计,毒性重金属指标Ⅰ—Ⅲ类水占 78.1%,Ⅳ类水和Ⅴ类水分别占 18.4%和 3.5%,超标项目为 Pb 和 Ba 元素,其余毒性重金属指标在地下水中含量均未超过Ⅲ类水标准限值。无机毒理性指标Ⅰ—Ⅲ类水占 66.7%,Ⅳ类水和Ⅴ类水分别占 25.3%和 8.0%,按超标率由大到小,超标项目依次为 NO_3^-、I^-、F^-、NO_2^-。一般化学指标最差,Ⅰ—Ⅲ类水仅占 35.6%,Ⅳ类水和Ⅴ类水分别占 57.5%和 6.9%,除 Zn 和 Cu 含量未超过Ⅲ类水标



1. Ⅱ类水；2. Ⅲ类水；3. Ⅳ类水；4. Ⅴ类水

图 2　地下水质量等级分布图

Fig. 2　Rank distribution of groundwater quality

准限值外，其余 11 项一般化学指标均有超标现象，pH 值和 Mn 、Fe 超标率分别为 43.7%、37.9%和 13.8%，总硬度、溶解性总固体、Na、Cl^-、SO_4^{2-}、NH_4^+ 和耗氧量的超标率均<5%。

3.3　影响因子及成因分析

3.3.1　影响因子

影响厦门市地下水质量的主要因子为 Mn、Pb、NO_3^-、Fe 等离子和 pH 值(图 3)。

3.3.2　成因分析

(1)环境地质因素。地下水中 Fe、Mn 和 pH 值含量较高，主要与原生地质环境有关[11]。研究区土壤由燕山期花岗岩类岩石风化而成。花岗岩属酸性岩浆岩，在高温多雨的气候条件下，由其风化淋滤形成的土壤一般呈酸性(5.0≤pH 值<6.5)[12-13]。地下水中 Fe、Mn 的水文地球化学特性受 pH 值和氧化还原反应影响很大，pH 值从 6 增加到 8，Fe 在水中的溶解度减少 10^6 倍[14]。研究区黏土层中含有较多的还原性 Fe、Mn 元素[15]，地下水 pH 值范围为 5.31～10.03，平均值为 6.63，多为弱酸性水。在偏酸性环境，地下水循环、运移过程中溶解了岩石中的 Fe、Mn，从而形成高 Mn、高 Fe 的地下水。

表 2　地下水质量评价结果统计

Table 2　Statistics of groundwater quality evaluation results

评价指标	占比/%				
	Ⅰ类水	Ⅱ类水	Ⅲ类水	Ⅳ类水	Ⅴ类水
一般化学指标	3.5	17.2	14.9	57.5	6.9
无机毒理指标	6.9	11.5	48.3	25.3	8.0
毒性重金属指标	0	21.8	56.3	18.4	3.5
挥发性有机指标	86.1	10.1	2.5	1.3	0
半挥发性有机指标	100	0	0	0	0
综合评价	0	3.5	19.5	59.8	17.2

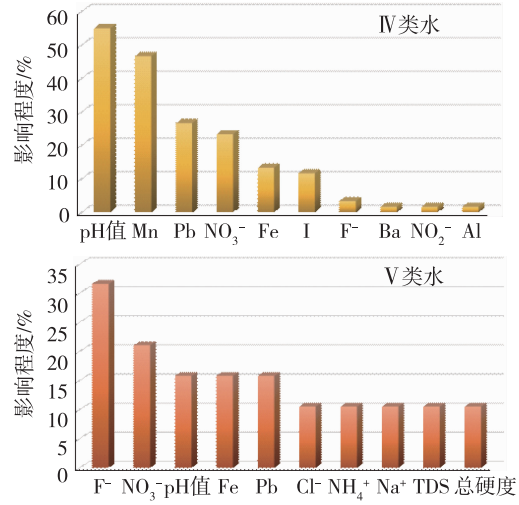


图 3　地下水质量主要影响因子的影响程度柱状图

Fig. 3　Effect degrees from main influencing factors of groundwater quality

(2)人为因素。地下水中 NO_3^- 和 Pb 含量偏高，主要受人类活动影响[16]。研究区地表水是地下水补给来源之一，其质量好坏也直接影响着地下水的化学组成。由于农村地区污水管网建设不完善，调查中可见生活污水直接排入坑塘、河道现象，造成地表水污染。朱珍香等[17]调查发现，在厦门后溪流域内分布有 93 个排污口，农业、工业和生活污水中的总氮对后溪流域的负荷量为 269.67 t/a；其中农业面源污染、生活污水和畜禽养殖是流域的主要污染源，占后溪流域污染负荷的 90%以上。本次“厦漳泉项目”采集的 25 个地表水样品中，“总氮”(NH_4^+-N、NO_3^--N 和 NO_2^--N 之和)含量 0.54 ～7.01 mg/L。与《GB 3838—2002 地表水环境质量标准》[18]中总氮Ⅴ类水标准限值(2.0 mg/L)对比，有 10 个为劣Ⅴ类水。局部地段地表水补给地下水，向地下水中输入了氮，引起地下水的氮污染。

利用 $\rho(NO_3^-)$ 与 $\rho(Cl^-)$、$\rho(NO_3^-)$ 与 $\rho(K^+)$ 的相关关系分析也进一步说明生产、生活污水和农业施肥是地下水氮污染的来源。Cl^- 离子主要来源于人类生产和生活污水排放，农业施肥是地下水中 K^+ 离子的重要来源之一[19-20]。$\rho(NO_3^-)$ 与 $\rho(Cl^-)$、$\rho(K^+)$ 相关性较好，拟合系数 R^2 分别为 0.15 和 0.13。NO_3^- 与 Cl^-、K^+ 离子浓度呈正相关关系，说明地下水中 NO_3^- 与 Cl^-、K^+ 有相同或相似的来源，地下水中 NO_3^- 离子来自生活污水或垃圾渗滤液下渗、农业施肥。

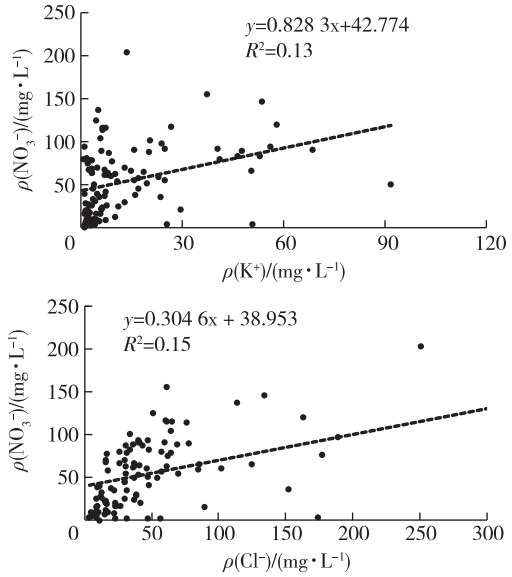


图 4 $\rho(NO_3^-)$ 与 $\rho(K^+)$、$\rho(Cl^-)$ 的相关关系图

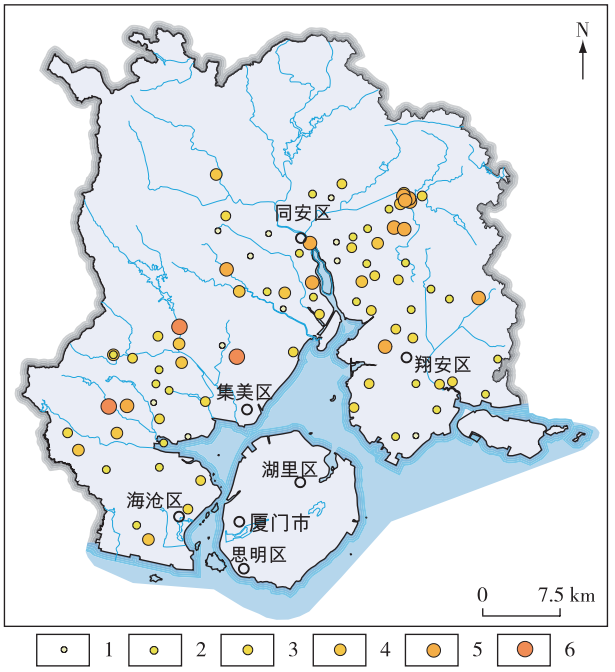
Fig. 4 Relationship among $\rho(NO_3^-)$ and $\rho(K^+)$, $\rho(Cl^-)$ concentration

铅污染主要是由于矿山的开采、冶炼，玻璃、电缆、颜料等的生产，砷酸铅农药和含铅汽油的使用等人类活动导致的[21]。

4 矿泉水水质评价

“矿泉水标准”评价研究表明，厦门市地下水 H_2SiO_3 和 Sr 含量普遍较高(图 5，图 6)。地下水中 H_2SiO_3 的含量范围为 5.44～98.64 mg/L，平均值为 33.08 mg/L，变异系数为 0.63，与“矿泉水标准”规定的 $H_2SiO_3 \geqslant 25.0$ mg/L 的界限要求相比，50 个样品达到标准界限要求。地下水中 Sr 含量范围为 0.006～2.128 mg/L，平均值为 0.29 mg/L，变异系数为 0.93，与“矿泉水标准”规定的 Sr≥0.20 mg/L 的界限要求相比，50 个样品达到标准界限要求。

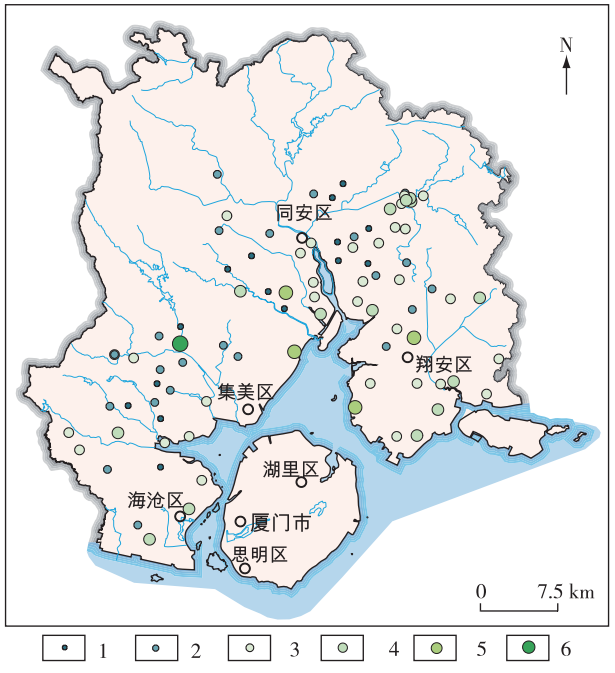
地下水 H_2SiO_3 或 Sr 含量达到“矿泉水标准”



1.<12.5 mg/L；2. 12.5～25.0 mg/L；3. 25.0～37.5 mg/L；4. 37.5～50.0 mg/L；5. 50.0～75.0 mg/L；6.≥75.0 mg/L

图 5 地下水 H_2SiO_3 含量分布图

Fig. 5 Distribution of H_2SiO_3 content in groundwater



1.<0.1 mg/L；2. 0.1～0.2 mg/L；3. 0.2～0.4 mg/L；4. 0.4～0.6 mg/L；5. 0.6～1.0 mg/L；6.≥1.0 mg/L

图 6 地下水 Sr 含量分布图

Fig. 6 Distribution of Sr content in groundwater

界限要求的样品共计 63 个，其中有 17 个样品同时满足了“地下水标准”Ⅱ、Ⅲ类水标准限值要求。17 个样品中达到 H_2SiO_3 和 Sr 含量界限要求的样品分别为 11 个和 13 个，其中 7 个样品同时达到 H_2SiO_3 和 Sr 含量界限要求。另外，部分水样还含有 Li、Zn、溴化物、碘化物、游离二氧化碳等有益微量组分，且各元素均在允许范围内。

11 个含高 H_2SiO_3 样品 pH 值为 6.54 ～ 7.16，TDS 为 131.5 ～ 556.8 mg/L，游离 CO_2 为 11.08～41.05 mg/L，水化学类型包含 HCO_3-Ca・Na 型、HCO_3・Cl-Na・Ca 型、HCO_3・SO_4-Ca・Na 型和 Cl-Na 型。13 个含高 Sr 元素样品 pH 值为 6.55～7.16，TDS 为 201.2～556.8 mg/L，游离 CO_2 为 18.88～41.05 mg/L，水化学类型包含 HCO_3-Ca・Na 型、HCO_3・Cl-Ca・Na 型、HCO_3・SO_4-Ca・Na 型、SO_4・Cl・HCO_3-Na・Ca 型、Cl・SO_4・HCO_3-Na・Ca 型和 Cl-Na 型。分析结果表明，这 17 个含 H_2SiO_3、Sr 元素的地下水样品是具 pH 值适中、低矿化特征的优质天然矿泉水，兼有饮用和医疗价值。

5　开发利用建议

基于“优质优用，按需开采”和保障居民饮水安全的原则，综合分析地下水质量、地下水质量影响因子、矿泉水水质评价结果，将厦门市地下水开发利用分为科学有序开采、适度开采、应急开采、限制开采和不宜开采 5 个等级（表 3）。

表 3　地下水可开发利用分级表

Table 3　Classification of groundwater exploitation

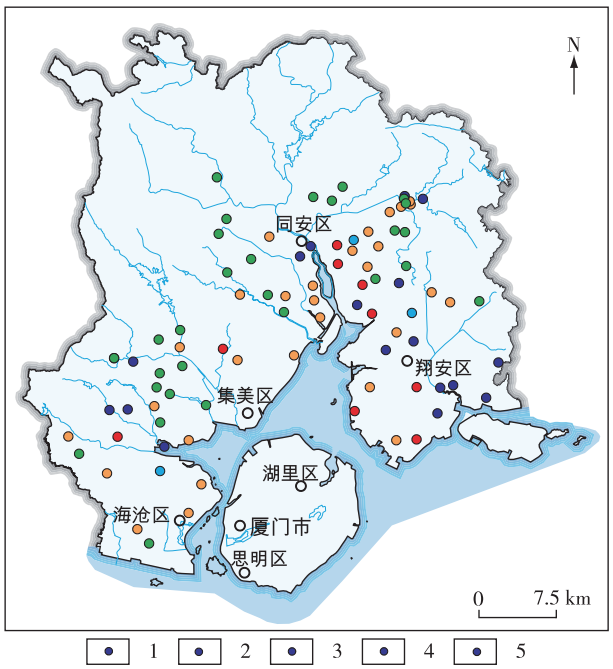
开发利用分级		分级标准	说明
一级	科学有序开采	各指标均满足“地下水标准”Ⅲ类限值标准，同时应有 1 项（或 1 项以上）满足“矿泉水标准”界限指标规定	兼饮用和医疗价值
二级	适度开采	各指标均满足“地下水标准”Ⅲ类限值标准	适宜饮用。在城市供水系统末端，供水保障不足、存在季节性缺水的区域适度开采
三级	应急开采	毒理指标均满足“地下水标准”Ⅲ类限值标准。TDS、总硬度、pH 值和 Cl^-、SO_4^{2-}、Na^+、Fe、Mn 等一般化学指标满足Ⅳ类水标准	基本适宜饮用。采用适当处理方法去除有害物质后饮用，或短期作为应急饮用水源
四级	限制开采	毒理指标均满足“地下水标准”Ⅳ类限值标准。TDS、总硬度、pH 值和 Cl^-、SO_4^{2-}、Na^+、Fe、Mn 等一般化学指标为Ⅳ或Ⅴ类水	一般不宜饮用
五级	不宜开采	以“地下水标准”评为Ⅴ类水，且超标指标含毒理指标	不宜饮用

由地下水开发利用分级图（图 7）可见，厦门市地下水具有一定的开发利用潜力。结合厦门市地下水开发利用现状、水资源供需形势，提出以下开发利用建议。

（1）科学有序开采矿泉水资源。H_2SiO_3 具有软化血管、维持血管壁弹性、防止心血管动脉硬化、缓和细胞衰老等功能；适量补充 Sr 元素对老年性骨质疏松有保护作用。“厦漳泉项目”采集的 87 组地下水样品中，开发利用分级为一级的占 19.5%。因此，建议在含 H_2SiO_3、Sr 元素优质矿泉水的分布区开展水资源评价工作，科学有序开发利用优质矿泉水资源，使其产生最大附加值。

（2）适度开采水质优良的地下水。在城市供水系统末端，供水保障不足、存在季节性缺水的区域，适量开采水质优良的地下水补充供水缺口。“厦漳泉项目”在同安区琼坑村、东塘埔、苎溪桥施工的探采结合井解决了 3 个村庄约 3 000 人的饮用水问题，以及部分牲畜、灌溉用水，有效提升了当地安全供水保障能力，社会效益显著。

（3）应急利用原生水质较差的地下水。厦门市原生劣质水占比较高，“厦漳泉项目”采集的 87 组地下水样品中，开发利用分级为三级的占 33.3%。仅受原生地质环境影响的劣质地下水，可采用适当处理方法去除有害物质后饮用，或短期作为应急饮用水源。如仅有 Fe、Mn 元素超标的水，可采用高锰酸钾复合剂预氧化法、曝气接触氧化法、化学氧化法、超滤膜法等[22]降低水中 Fe、Mn 的含量，使之达标后可作为生活饮用水。因此，建议在原生劣质水分布区开展地下水基础环境调查评价，提出区域地下水-地表水联合调配优化方案。



1.科学有序开采;2.适度开采;3.应急开采;4.限制开采;5.不宜开采

图 7 地下水开发利用分级图

Fig. 7 Classification of groundwater exploitation

6 结论

(1)厦门市地下水质量总体一般,可以直接饮用水占 23.0%,经过适当处理可以饮用的水占 59.8%,不能饮用的占 17.2%。影响地下水质量的主要因子为与原生地质环境有关的无机组分 Fe、Mn 等,以及由人类活动引起污染的无机组分 NO_3^-、Pb 和有机组分二氯甲烷等。

(2)有益人体健康的 H_2SiO_3、Sr 微量组分在厦门市地下水中含量普遍较高。在采集的 87 组样品中,19.5%的样品优于"地下水标准"Ⅲ类水标准和"矿泉水标准"H_2SiO_3 或 Sr 元素的标准,是兼有饮用和医疗价值的含 H_2SiO_3、Sr 元素的优质饮用天然矿泉水。

(3)基于"优质优用,按需开采"和保障居民饮水安全的的原则,分类提出了开发利用地下水的建议,包括科学有序开采优质矿泉水、适度开采水质优良水、应急利用原生水质较差水等,为进一步发挥地下水的经济社会效益提供参考。

参考文献

[1] 黄初龙,郑朝洪.福建省水资源供需平衡区域差异分析[J].资源科学,2009,31(5):750-756.
HUANG C L, ZHENG C H. Spatial differentiation of water resources supply and demand balance in Fujian Province[J]. Resources Science,2009,31(5):750-756.

[2] 徐祥清."以海代淡"是厦门水资源可持续发展之良策[J].台湾海峡,1999,18(4):450-455.
XU X Q. Desalination of seawater is most effective way to solve water shortage in Xiamen[J]. Taiwan Strait,1999, 18(4):450-455.

[3] 谢季遥,陈星,许钦.城镇化对厦门市水资源脆弱性的影响评价[J].水电能源科学,2020,28(4): 18-21.
XIE J Y,CHEN X,XU Q. Impact of urbanization on water resources vulnerability in Xiamen City[J]. Water Resources and Power,2020,28(4): 18-21.

[4] 黄浩,陈彬,刘正华,等.厦门岛西水东调对海岛地下水质的影响分析[J].工程地质学报,2008,16(5):688-693.
HUANG H, CHEN B, LIU Z H, et al. Impact of west to east sea water diversion project on groundwater quality in Xiamen island[J]. Journal of Engineer Geoloty,2008,16(5): 688-693.

[5] 林玉锦,林建平.福建省主要城市地下水环境质量[C]//中国地质调查局.全国主要城市环境地质调查评价学术交流会议论文集.北京:地质出版社,2010:73-80.
LIN Y J,LIN J P. Groundwater environmental quality of major cities in Fujian Province [C]//China Geological Survey. Proceedings of the Academic Exchange Conference on Environmental Geological Survey and Evaluation of Major Cities in China. Beijing:Geological Publishing House,2010:73-80.

[6] 伍成成.滨海地区浅层地下水质量现状评价[J].地下水,2014,36(5):79-80.
WU C C. Evaluation of shallow groundwater quality in coastal area[J]. Ground Water,2014,36(5): 79-80.

[7] 中国疾病预防控制中心环境与健康相关产品安全所.GB/T5750—2006 生活饮用水标准检验方法[S].北京:中国标准出版社,2007:50-490.
Institute of Environmental and Health-related Product Safety, Chinese Center for Disease Control and Prevention. GB/T5750—2006 Standard examination methods for drinking water [S]. Beijing: China Standards Press,2007:50-490.

[8] 中国饮料工业协会. GB 8538—2016 食品安全国家标准饮用天然矿泉水检验方法[S].北京：中国质检出版社，2017：1-187.
China Beverage Industry Association. GB 8538—2016 National standard for food safety-Inspection method for natural mineral water for drinking [S]. Beijing: China Quality Inspection Press，2017：1-187.

[9] 中国地质调查局.GB/T14848—2017 地下水质量标准[S].北京：中国环境科学出版社，2017：1-14.
China Geological Survey. GB/T14848—2017 Standard for groundwater quality[S]. Beijing: China Environmental Science Press, 2017：1-14.

[10] 中国食品发酵工业研究院.GB 8537—2018 食品安全国家标准饮用天然矿泉水[S].北京：中国标准出版社，2018：1-3.
China Food Fermentation Industry Research Institute. GB 8537—2018 National standard for food safety Natural mineral water for drinking [S]. Beijing: China Standards Press，2018：1-3.

[11] 孙跃，刘中刚，侯香梦，等.安徽合肥地区浅层地下水质量评价[J].华东地质，2019，40(1)：74-80.
SUN Y, LIU Z G, HOU X M, et al. Quality assessment for shallow groundwater in the Hefei area, Anhui Province[J]. East China Geological, 2019, 40(1)：74-80.

[12] 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.
WANG W J. Achievements of the multi-purpose geochemistry survey in Fujian Province, and their application[J]. Geology of Fujian, 2018，37(2)：146-156.

[13] 黄炎，陈国光，李雪平.武夷山茶叶品质与土壤地球化学背景特征关系探讨[J].华东地质，2020，41(2)：166-176.
HUANG Y，CHEN G G，LI X P.Discussion on the relationship between Wuyishan tea quality and geochemistry background characteristics [J].East China Geology, 2020，41(2)：166-176.

[14] 沈照理，朱宛华，钟佐燊.水文地球化学基础[M].北京：地质出版社，1993：77-44.
SHEN Z L, ZHU W H, ZHONG Z X. Fundamentals of hydrogeochemistry [M]. Beijing: Geological Publishing House，1993：77-44.

[15] 王旭全.福建省城镇地下水环境质量状况及污染原因分析[J].福建地质科技情报，1991(3)：1-7.
WANG X Q. Analysis of groundwater environmental quality and pollution cause in Fujian province [J]. Fujian Geological Science and technology information，1991(3)：1-7.

[16] KATHRINA W, CHRISTINE H, ERWIN S. Groundwater nitrate contamination: Factors and indicators[J]. Journal of Environmental Management，2012 (111)：178-186.

[17] 朱珍香，高肖飞，彭凤，等. 厦门后溪水质与流域景观特征沿城乡梯度的变化分析[J].生态学报，2019，39(6)：2021-2033.
ZHU Z X, GAO X F, PENG F, et al. Relationship between water quality and landscape characteristics of the Houxi River watershed in Xiamen City along a rural-urban gradient. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(6)：2021-2033.

[18] 中国环境科学研究院.GB 3838—2002 地表水环境质量标准[S].北京：中国环境科学出版社，2002：1-9.
Chinese Academy of Environmental Sciences. GB 3838—2002 Environmental quality standards for surface water[S].Beijing：China Environmental Science Press，2002：1-9.

[19] 袁建飞，邓国仕，徐芬，等.毕节市北部岩溶地下水水化学特征及影响因素的多元统计分析[J].中国地质，2016，43(4)：1446-1456.
YUAN J F, DENG G S, XU F, et al. The multivariate statistical analysis of chemical characteristics and influencing factors of karst groundwater in the northern part of Bijie City, Guizhou Province [J]. Geology in China, 2016, 43(4)：1446-1456.

[20] GEOPHREY A，ABASS G，DICKSON A. Tracking nitrate sources in groundwater and associated health risk for rural communities in the white Volta River basin of Ghana using isotopic approach($\delta^{15}N$、$\delta^{18}O$ NO_3 and ^{3}H)[J]. Science of The Total Environment，2017，(603/604)：687-698.

[21] FETTER C W.污染水文地质学[M].周念清，黄勇，译.北京：高等教育出版社，2011：254-261.
FETTER C W. Contaminant Hydrogeology [M]. ZHOU N Q，HUANG Y, translator. Beijing: Higher Education Press, 2011：254-261.

[22] 龙必能. 文山县饮用水水源铁锰超标调查研究、处理方法及建议[J].环境科学导刊，2007，26(2)：91-93.
LONG B N. Investigation and Treatment Method and Suggestion of overproof Manganese and iron in drinking water source of Wenshan County[J]. Environmental Science Guide，2007，26(2)：91-93.

The groundwater quality and suggestion on groundwater exploitation in Xiamen, Fujian

LI Zhenghong[1,2], HAO Qichen[1,2], LI Yasong[1], LI Jianfeng[1], ZHU Yuchen[1], LI Qian[3]

(1. *Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Shijiazhuang* 050061, *Hebei, China*; 2. *Key Laboratory of Groundwater Sciences and Engineering, Ministry of Natural Resources, Shijiazhuang* 050061, *Hebei, China*; 3. *The eighth Geology Party, Hebei Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development (Hebei Marine Geological Resources Survey Center), Qinhuangdao* 066000, *Hebei, China*)

Abstract: Groundwater quality and pollution have become important factors restricting urban development. Based on the systematic and comprehensive analysis of organic and inorganic chemical components, the groundwater quality in the plain area of Xiamen City was comprehensively evaluated according to the "groundwater standard" and "mineral water standard", and the formation reason of inferior water was analyzed. The results show that the overall quality of shallow groundwater in Xiamen is ordinary, which consists of 22.9% directly potable water, 59.8% potable water after proper treatment, and 17.3% impotable water. The main factors affecting the groundwater quality are the inorganic components including pH value, Mn and Fe, which are related to the primary geological environment, and the inorganic components such as NO_3^-, Pb and organic components such as dichloromethane, which are resulted from human activities. The content of trace components of H_2SiO_3 and Sr, which are beneficial to human health, is generally high in groundwater. Among the 87 groups of samples, 17 groups are high H_2SiO_3 and Sr element groundwater, better than the standards of "the rank III groundwater" and "mineral water", which can be listed as superior natural mineral potable water with medical value. Based on the principle of "The high-quality water shall be used optimally and exploited according to needs", from the perspective of drinking water safety, the suggestions of scientific and orderly exploitation of high-quality mineral water, moderate exploitation of good-quality water and emergency utilization of inferior primary water were put forward for the utilization of groundwater in Xiamen.

Key words: Xiamen; groundwater quality; influence factor; mineral water; exploitation