

doi: 10.12029/gc20210510

李政红, 李亚松, 郝奇琛, 李剑锋, 朱玉晨. 2021. 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, 48(5): 1441-1452.
Li Zhenghong, Li Yasong, Hao Qichen, Li Jianfeng, Zhu Yuchen. 2021. Characteristics, genesis and treatment measures of NO₃ type groundwater in Xiamen, Fujian Province[J]. Geology in China, 48(5): 1441-1452(in Chinese with English abstract).

福建厦门市硝酸型地下水特征、成因及其治理措施建议

李政红^{1,2}, 李亚松¹, 郝奇琛^{1,2}, 李剑锋¹, 朱玉晨¹

(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)

摘要: 地下水硝酸盐污染是世界性水环境问题。地下水硝酸盐绝对含量的增加, 引起水质恶化, 而其相对含量的增加, 改变了地下水的水化学特征。在某些地区 NO₃⁻ 成为地下水中的主要阴离子之一, 用“硝酸型水”命名这种新的地下水化学类型, 目前正在逐渐被学者所接受。本研究通过分析厦门市平原区地下水中硝酸型水分布特征和影响因素, 探讨了硝酸型水的水化学指示意义。结果表明, 厦门市地下水已受到硝酸盐氮污染。在全区采集的 87 组地下水样品中, 硝酸型水占比 36.8%, 主要分布于风化残积平原区, 东部翔安区和同安区已形成较大面状分布, 西部集美区和海沧区分布较少, 且呈点状或局部小面积分布。硝酸型水主要存在于氧化沉积环境, 具有低 pH、低 TDS 和低硬度特征。风化残积坡含水层的酸性土壤、地下水径流缓慢和浅层地下水埋深浅等特征为地下水 NO₃⁻ 富集提供了有利的环境条件。人类生活污水、垃圾渗滤液下渗、农业施肥等是地下水硝酸盐污染的主要来源。建议开展地下水硝酸盐污染源识别研究, 针对不同污染源采取完善污染管网建设、农村改厕、科学施肥等措施, 从源头上防治污染。

关键词: 硝酸型水; 分布特征; 影响因素; 氮污染; 地质调查工程; 厦门; 福建

中图分类号: X523 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2021)05-1441-12

Characteristics, genesis and treatment measures of NO₃ type groundwater in Xiamen, Fujian Province

LI Zhenghong^{1,2}, LI Yasong¹, HAO Qichen¹, LI Jianfeng¹, ZHU Yuchen¹

(1. Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, CAGS, Shijiazhuang 150061, Hebei, China; 2. Key Laboratory of Groundwater Sciences and Engineering, Ministry of Natural Resources, Shijiazhuang 050061, Hebei, China)

Abstract: Groundwater nitrate pollution is a worldwide water environment problem. The increase of nitrate concentration in groundwater causes the deterioration of water quality, while the increase of its relative contents changes the hydrochemical characteristics of groundwater. NO₃⁻ becomes one of the main anions in groundwater in some areas, and the name of "NO₃ type water" for this new chemical type of groundwater is gradually accepted by scholars. Based on the analysis of the distribution, characteristics and influencing factors of NO₃ type water in shallow groundwater in plain area of Xiamen City, the significance of

收稿日期: 2021-04-02; 改回日期: 2021-07-27

基金项目: 中国地质调查局项目“厦漳泉同城化地区综合地质调查”(DD20190303)资助。

作者简介: 李政红, 女, 1970 年生, 高级工程师, 主要从事环境地质研究; E-mail: lzhhb@sina.com。

通讯作者: 郝奇琛, 男, 1986 年生, 副研究员, 研究方向为地下水循环及数值模拟; E-mail: haoqichen_iheg@163.com。

NO_3^- type water was discussed. The results show that the groundwater in Xiamen has been polluted by nitrate nitrogen. NO_3^- type water comprising 36.8% of all 87 samples is mainly distributed in weathered residual plain. The eastern Xiang'an and Tong'an districts have formed a relatively large planar distribution, while the western Jimei and Haicang districts have a small distribution, and the distribution is point-like or local small area. NO_3^- type water mainly exists in oxidation deposition environment with low pH, low TDS and low hardness. The weathered residual aquifer's characteristics of acid soil, slow runoff and shallow water table provide favorable environmental conditions for NO_3^- enrichment in groundwater. Human sewage, landfill leachate infiltration and agricultural fertilization are the main sources of nitrate pollution in groundwater. It is suggested to carry out research on groundwater nitrate source identification. According to different sources of pollution, measures such as improving the construction of pollution pipe network, improving toilets in rural areas and scientific fertilization should be taken to prevent and control pollution from the source.

Key words: NO_3^- type water; distribution characteristic; influence factor; nitrogen pollution; geological survey engineering; Xiamen; Fujian Province

About the first author: LI Zhenghong, female, born in 1970, Senior engineer, engaged in the study of environmental geology; E-mail: lzhhb@sina.com.

About the corresponding author: HAO Qichen, male, born in 1986, associate researcher, engaged in groundwater circulation and numerical simulation; E-mail: haoqichen_iheg@163.com.

Fund support: Supported by China Geological Survey Project "Comprehensive Geological Survey of Xiamen, Zhangzhou and Quanzhou Cities(No.DD20190303).

1 引 言

硝酸盐污染是世界性水环境问题,全球范围内约有110个国家和地区的地下水存在氮污染,且以硝态氮污染为主(Katharina, 2012; 陈新明等, 2013; Chetan et al., 2018)。长期饮用高含量硝酸盐的水易引起高铁血红蛋白症,并在人体内形成亚硝胺类物质,从而引发消化道癌症。中国地下水硝酸盐污染较为普遍(唐克旺等, 2006; 何泽等, 2019; 朱亮等, 2020; 郭晓东等, 2021),在东部主要平原地下水中“三氮”普遍呈面状污染特征,浅层地下水 NO_3^- 的超标率高达10.3%(文冬光等, 2012)。华北平原浅层地下水“三氮”污染以重污染为主,硝酸盐氮超标率达7.45%,主要分布在古黄河地下水系统、海河地下水系统的农村和城市周边地区(张兆吉等, 2012)。松嫩平原地下水硝酸盐污染分布面积较大,特别是高平原区硝酸盐含量已在大范围内超过生活饮用水国家标准,最大值高达220 mg/L(朱巍等, 2013)。

随着工业化、城镇化的快速发展,地下水硝酸盐绝对含量的增加,导致水质恶化问题不断加重,引起了中国学者的广泛关注,针对硝酸盐污染成因及影响因素、迁移转化、污染源识别、健康风险评估和污染治理等多方面开展研究(李政红等, 2017; 刘贯群等, 2017; 盛丹睿等, 2019; 傅雪梅等, 2019; 赵然等, 2020)。地下水硝酸盐相对含量(阴离子毫克当

量百分比)的增加,改变了地下水的水化学特征。国内已有报道,在中国一些地区 NO_3^- 成为地下水中的主要阴离子之一,已存在地下水硝酸盐相对含量 $\geq 25\%$,甚至超过50%的现象,并将此类水命名为硝酸型水(周迅等, 2014; 朱亮等, 2016; 徐进等, 2018)。

NO_3^- 是典型的污染指示因子。硝酸型水可成为识别地下水是否遭受硝酸盐污染的重要判别依据(周迅等, 2014)。目前针对地下水中硝酸型水的分布、成因及水化学指示意义等方面的研究较少,尤其是在中国南方地区。厦门市居民饮用水源虽以地表水为主,但厦门市为水资源缺乏区,供水主要依赖区外调水,在枯水期和特枯水期仍存在较大水资源缺口,地下水应急供水意义重大。地下水质量好坏直接影响其供水意义,地下水污染也将危害到居民的身体健康。2019年中国地质科学院水文地质环境地质研究所组织开展了厦漳泉同城化地区综合地质调查,通过系统的水文地质调查和水化学分析,发现硝酸盐是影响厦门市地下水质量的主要影响因子之一,且检出较多硝酸型水。因此,本文针对厦门市硝酸型地下水的分布特征、影响因素及其水化学指示意义进行探讨分析,为地下水污染防治提供科学依据。

2 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℃,多年平均降水量为 1513.3 mm,多年平均蒸发量为 1651.3 mm。全市土地面积 1700.61 km²,海域面积约 390 km²,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 年底常住人口 429 万人,其中城镇人口 383 万人。GDP 约 5995.04 亿元,占福建省的 14.1%。厦门有丰富的海洋生物资源,金属矿藏资源比较缺乏,淡水资源匮乏。

厦门市水系发育,河网密,呈树枝状分布,径流方向自西向东。其河流特点为径流量小、水流短、河道窄、河床浅。水量随季节变化大,河水含沙量低。厦门平原区属于滨海、丘陵平原,其水文地质条件具有单元小、径流短、水量小和循环浅的特征。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。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。风化残积孔隙裂隙水分布于残积地台及山前坡脚地带,含水层岩性为碎石、角砾。基岩裂隙水分布于山区基岩裂隙及断层中(图 1)。地下水主要补给来源为大气降水。在汛期或开采条件下地下水还受地表水的侧向补给。

厦门市虽降雨丰富,但淡水资源仍非常匮乏。

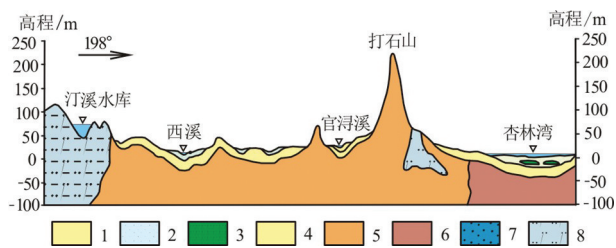


图1 研究区典型水文地质剖面
1—砂质粘土;2—砾砂;3—砂;4—淤泥;5—花岗岩;6—二长花岗岩;
7—砂岩;8—凝灰岩
Fig.1 Typical hydrogeological section in the study area
1—Sandy clay;2—Sand gravel;3—Sand;4—Mud;5—Granite;
6—Monzogranite;7—Sandstone;8—Tuff

根据《厦门市水资源公报》(2000—2019年)统计数据显示,近20年来,厦门市年均水资源量为 13.412×10⁸ m³,2016年水资源数量最大,为 25.129×10⁸ m³,2003年最小为 8.55×10⁸ m³。厦门市城市供水结构较单一,地表水是主要的供水水源,2019年全市供用水量 6.81×10⁸ m³(不含海水供应量和生态补水),地表水、地下水和其他水源供应量占总供水量的比例分别为 92.41%、6.39%和 1.20%。城镇居民用水量最大,为 2.289×10⁸ m³,占 33.59%;生产、生活、生态用水量比例分别为 57.75%、37.23%、5.02%。当地水资源供应量不足,对区域外调水依赖程度高,区域外调入水量占总供应量的比例为 57.29%。以户籍人口计算,2019年人均水资源量为 419 m³,约是全国人均占有量的 1/5,属绝对贫水区(人均水资源量 < 500 m³)。2019年地下水开采量占地下水资源量的比例为 14.5%,地下水具有一定的开采潜力。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,水资源短缺问题成为制约其经济可持续发展的重要问题(徐祥清,1999;黄初龙等,2009)。地下水作为补充和后备应急水源的作用越发显得重要,地下水质量直接影响着补充和后备应急水源的供水能力和供水安全。

3 研究方法

3.1 样品采集与测试

2019年在厦门市平原区采集 112 组全分析的水样,包括地下水样品 87 组,地表水样品 25 组,采样点位置分布见图 2。分析项目包括 pH、HCO₃⁻、SO₄²⁻、Cl⁻、CO₃²⁻、K⁺、Na⁺、Ca²⁺、Mg²⁺、NH₄⁺、NO₃⁻、NO₂⁻、F⁻、TDS,总硬度、Al³⁺、Fe、Mn、偏硅酸、Br⁻、I⁻、耗氧量。采样体积 2 L。地下水样品多采自居民宅院大口井或小机井。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。采集后立即密封,低温保存。样品均送至有国家检测资质的自然资源部地下水矿泉水及环境监测中心,阳离子 K⁺、Na⁺、Ca²⁺、Mg²⁺由电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-MS, Varian820-ms)测定。阴离子中 SO₄²⁻、NO₃⁻使用离子色谱仪(ISC1500)测定,检出限分别为 0.2 mg/L 和 0.1 mg/L。NO₂⁻使用紫外分光光度法测定,检出限为 0.02 mg/L。Cl⁻使用 AgNO₃滴定法测定,检出限为 0.01 mg/L。HCO₃⁻用酸标准溶液滴

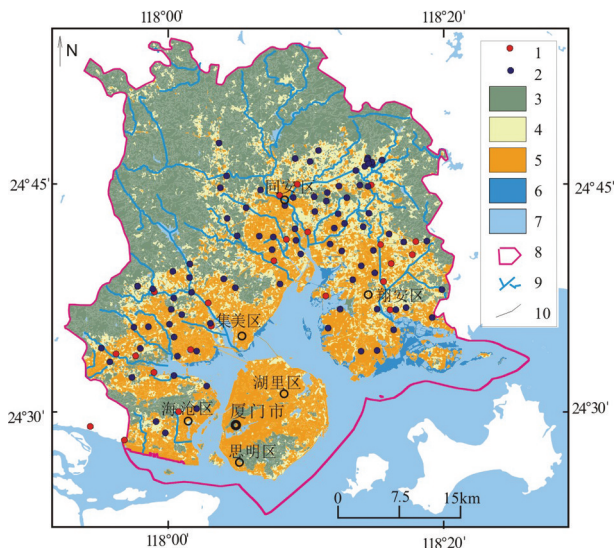


图2 样品采集点分布

1—地表水;2—地下水;3—林地;4—耕地;5—人工表面;6—湿地;
7—水体;8—研究区边界;9—河流;
10—行政区界线

Fig.2 Distribution of sampling sites

1—Surface water; 2— Groundwater; 3—Woodland; 4—Cultivated
land; 5—Artificial surfaces;6—Wetland; 7—Water; 8—Boundary of the
study area; 9—Rivers; 10—Administrative boundaries

定法。 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。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/T5750—2006》中的有关规定。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,分析误差均小于3%。

3.2 分析方法

采用改进的舒卡列夫分类法识别硝酸型水的分布。改进的舒卡列夫分类法是在传统的舒卡列夫分类法的基础上,将 NO_3^- 纳入水化学类型划分,据7种阴、阳离子 HCO_3^- 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^+ (包括 K^+)毫克当量百分数划分地下水类型。命名原则:毫克当量百分数 $\geq 25\%$ 的离子参与命名,水型按阴离子在前,阳离子在后;含量大的在前,小的在后。并将有 NO_3^- 参与水化学命名的地下水统称为硝酸型水。

利用 NO_3^- 的绝对含量和相对含量关系分析硝酸型水的特征。绝对含量是指1 L水中含某离子的毫克数(mg/L),用 $\rho(\text{B})$ 表示B离子的绝对含量。相对

含量是以离子毫克当量百分数表示。将1 L水中阴、阳离子的毫克当量总数各作为100%,按阴、阳离子分别计算。

$$X(\text{B}) = \gamma(\text{B}) / \gamma_{\text{阴}}(\text{或} \gamma_{\text{阳}}) \times 100\%$$

其中: $X(\text{B})$ 表示B离子的毫克当量百分数(%); $\gamma(\text{B})$ 表示B离子的毫克当量数; $\gamma_{\text{阴}}(\text{或} \gamma_{\text{阳}})$ 表示阴(阳)离子毫克当量总数。

利用MapGIS软件研究“硝酸型水”空间分布特征。利用 NO_3^- 的相对含量和某些离子比例系数之间的相关关系分析“硝酸型水”成因及影响因素。

4 硝酸型水的分布和特征

根据传统舒卡列夫分类法,厦门市平原区地下水化学类型25种。阴离子中 HCO_3^- 占绝对优势,重碳酸型水占样品总数的23.8%,重碳酸型和以重碳酸为主的水占61.9%。阳离子以 Na^+ 为主,其次是 Ca^{2+} 。钠型水和钠钙型水占样品总数的53.3%。钙型水和钙钠型水占46.6%。74.3%的样品水化学类型集中分布于9种水化学类型中,按样品数量计,占比由大到小依次为 $\text{HCO}_3^- \cdot \text{Cl}^- \cdot \text{Ca} \cdot \text{Na}$ 型、 $\text{HCO}_3^- \cdot \text{Ca} \cdot \text{Na}$ 型、 $\text{Cl}^- \cdot \text{Na} \cdot \text{Ca}$ 型、 $\text{Cl}^- \cdot \text{Na}$ 型、 $\text{HCO}_3^- \cdot \text{Cl}^- \cdot \text{Na} \cdot \text{Ca}$ 型、 $\text{Cl}^- \cdot \text{HCO}_3^- \cdot \text{Na} \cdot \text{Ca}$ 型、 $\text{Cl}^- \cdot \text{Ca} \cdot \text{Na}$ 型、 $\text{HCO}_3^- \cdot \text{Ca}$ 型和 $\text{HCO}_3^- \cdot \text{Na} \cdot \text{Ca}$ 型。25.7%的样品的水化学类型分散在 $\text{HCO}_3^- \cdot \text{Cl}^- \cdot \text{Na}$ 型等16种水化学类型中,每种类型样点占比均小于3%。

4.1 硝酸型水分布

采用改进的舒卡列夫分类法重新计算研究区地下水的水化学类型。结果显示,研究区87组样品 $X(\text{NO}_3^-)$ 范围0.1%~53.1%,均值为22.0%,其中有32组样品因 $X(\text{NO}_3^-) \geq 25\%$ 而参与了水化学类型命名,占总数的36.8%。 $X(\text{NO}_3^-)$ 最大值、平均值和中位数均超过了 $X(\text{SO}_4^{2-})$ (表1), NO_3^- 已成为影响研究区地下水水化学命名的主要阴离子组分。与传统的舒卡列夫分类法相比,由于 NO_3^- 的加入,使研究区地下水水化学变得复杂化。阴离子水化学类型由12种增至19种,减少了 $\text{Cl}^- \cdot \text{HCO}_3^- \cdot \text{SO}_4^{2-}$ 型、 $\text{HCO}_3^- \cdot \text{SO}_4^{2-} \cdot \text{Cl}^-$ 型和 $\text{SO}_4^{2-} \cdot \text{Cl}^-$ 型水,增加了 $\text{NO}_3^- \cdot \text{Cl}^-$ 型(9组)、 $\text{NO}_3^- \cdot \text{HCO}_3^-$ 型(6组)、 $\text{Cl}^- \cdot \text{NO}_3^-$ 型(5组)、 $\text{HCO}_3^- \cdot \text{NO}_3^- \cdot \text{Cl}^-$ 型(3组)、 $\text{NO}_3^- \cdot \text{Cl}^- \cdot \text{HCO}_3^-$ 型(2组)、 $\text{Cl}^- \cdot \text{HCO}_3^- \cdot \text{NO}_3^-$ 型(2组)、 $\text{HCO}_3^- \cdot \text{Cl}^- \cdot \text{NO}_3^-$ 型(2组)、 $\text{Cl}^- \cdot \text{NO}_3^- \cdot \text{SO}_4^{2-}$ 型(1组)、 $\text{NO}_3^- \cdot \text{SO}_4^{2-}$ 型(1组)、 $\text{HCO}_3^- \cdot \text{NO}_3^-$ 型(1组)10种硝酸型

表1 主要离子毫克当量百分数(%)特征参数
Table1 Characteristic parameter of Anion mEq Percentage

类别	样品数/组	项目	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	NO ₃ ⁻
松散岩类 孔隙水	29	Min	0.52	15.48	4.11	0.57	10.69	2.65	1.17	0.13
		Max	15.30	81.30	73.22	17.53	87.96	32.72	77.72	37.42
		Mean	5.71	40.00	44.15	10.14	28.83	14.69	41.97	14.52
		Std.	4.73	21.38	18.05	4.92	18.01	7.53	20.41	10.89
		Cv	0.83	0.53	0.41	0.48	0.62	0.51	0.49	0.75
风化残 积孔隙 裂隙水	55	Min	0.45	20.67	1.80	0.14	6.27	1.49	2.15	1.00
		Max	31.25	80.06	73.33	23.85	81.80	36.10	84.74	53.12
		Mean	8.38	40.82	39.17	11.63	32.16	12.71	28.92	26.20
		Std.	7.09	12.95	13.78	5.16	14.51	7.94	19.50	13.58
		Cv	0.85	0.32	0.35	0.44	0.45	0.62	0.67	0.52
基岩裂 隙水	3	Min	1.99	17.30	36.28	10.86	11.40	4.72	32.25	11.59
		Max	14.20	31.08	57.64	20.06	24.85	21.60	72.10	21.30
		Mean	9.63	26.45	49.63	14.29	15.95	14.55	53.27	16.23
		Std.	6.65	7.92	11.64	5.03	7.71	8.78	20.02	4.87
		Cv	0.69	0.30	0.23	0.35	0.48	0.60	0.38	0.30
全区	87	Min	0.45	15.48	1.80	0.14	6.27	1.49	1.17	0.13
		Max	31.25	81.30	73.33	23.85	87.96	36.10	84.74	53.11
		Mean	7.53	40.05	41.19	11.23	30.49	13.43	34.11	21.96
		Std.	6.45	16.20	15.38	5.10	15.79	7.79	20.85	13.65
		Cv	0.86	0.40	0.37	0.45	0.52	0.58	0.61	0.62

水。32组硝酸型水样品中有18组是以NO₃⁻为主。按样品数量统计,厦门市地下水前五种阴离子水化学类型依次为HCO₃⁻型、HCO₃⁻·Cl型、Cl型、NO₃⁻·Cl型和NO₃⁻·HCO₃⁻型。硝酸型水主要分布于风化残积平原区,岛外4区均有分布,东部翔安区和同安区已形成较大面状分布,西部集美区和海沧区分布较少,且呈点状或局部小面积分布(图3)。

4.2 硝酸型水特征

4.2.1 绝对含量和相对含量关系

用硝酸盐的绝对含量ρ(NO₃⁻)和相对含量X(NO₃⁻)关系分析硝酸型水的特征。分别以绝对含量88.5 mg/L(《地下水质量标准》(GB/T14848-2017)Ⅲ类水限值)和相对含量25%(参照舒卡列夫分类对地下水化学类型命名方法)(王大纯等,1995)为分界线将数据点分布分为4个区:A区水样点既不是超Ⅲ类水,也不是硝酸型水;B区水样点不是超Ⅲ类水,但是硝酸型水;C区水样点是超Ⅲ类水,但不是硝酸型水;D区水样点既是超Ⅲ类水,也是硝酸型水(徐进等,2018)。

由图4可见,水样点主要分布于A区,占样品总数的56.3%。其次是B区和D区,占比分别为24.1%

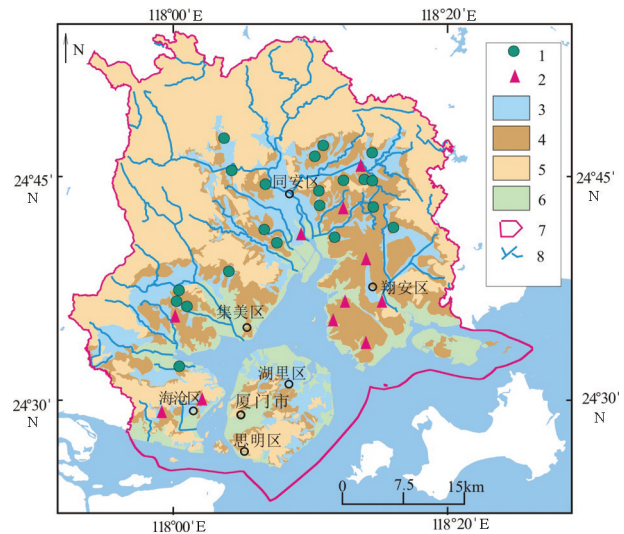


图3 硝酸型水分布图

1—硝酸型水,但不是超Ⅲ类水;2—既是硝酸型水,也是超Ⅲ类水;3—冲洪积孔隙含水层;4—风化残积孔隙裂隙含水层;5—基岩裂隙含水层;6—海积孔隙含水层;7—研究区边界;8—河流

Fig.3 Distribution of NO₃ type water

1-NO₃ type water, but not overtake Ⅲ class;2-NO₃ type water, and also overtake Ⅲ class;3-Alluvial-diluvial pore aquifer;4-Weathered residual pores crack aquifers;5-Marine pore aquifer;6-Bedrock fractured aquifer;7-Boundary of the study area;8-Rivers

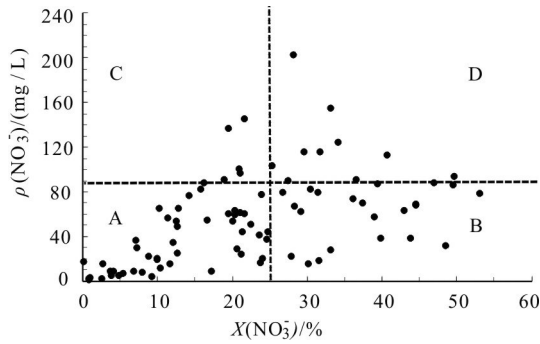


图4 硝酸盐绝对含量与相对含量关系
Fig.4 Nitrate concentration and mEq percentage relationship

和12.6%。C区水样点分布最少。硝酸型水以硝酸盐绝对含量偏低为主。

地下水化学 Piper 三线图(图5)显示,A、B、C、D四区地下水阳离子均以Na⁺、Ca²⁺为主,阴离子特征有明显差异。非硝酸型水(A区和C区)地下水阴离子以HCO₃⁻为主,地下水化学类型以HCO₃-Ca·Na型、HCO₃·Cl-Ca·Na型、HCO₃·Cl-Na·Ca型为主。硝酸型水(B区和D区)地下水阴离子Cl⁻增多,以Cl⁻和HCO₃⁻为主,地下水化学类型以Cl-Na·Ca型、HCO₃·Cl-Ca·Na型为主。

4.2.2 相对含量与主要离子的相关性

32组硝酸型地下水pH值范围在5.31~7.06,平均值为6.19,总体呈弱酸性;TDS范围为71.49~787.7 mg/L,平均值为263.70 mg/L,为淡水;Eh范围为110~354 mV,平均值为237.87 mV;总硬度范围为11.01~296.2 mg/L,平均值为95.58 mg/L;硝酸盐的相对含量X(NO₃⁻)范围在25.3%~53.1%,平均值为36.6%。X(NO₃⁻)与地下水pH值、TDS、Eh和总硬度均呈直线相关关系。其中,X(NO₃⁻)与pH值、TDS和总硬度均为相对较强的负相关关系,与Eh呈相对较强的正相关关系(图6)。硝酸型水主要存在于氧化沉积环境,具有低pH,低TDS、低硬度特征。

5 硝酸型水形成的主要影响因素

地下水水化学特征是在气候、水文、地质、地貌、水文地质和人类活动等多种因素的综合影响下(张翠云等,2007),经过离子交换、溶解与沉淀、氧化还原、蒸发浓缩以及生物化学等复杂的地球化学过程后形成与演化。近几十年来,人类活动强度不断加大,NO₃⁻等污染组分进入地下水的数量不断增

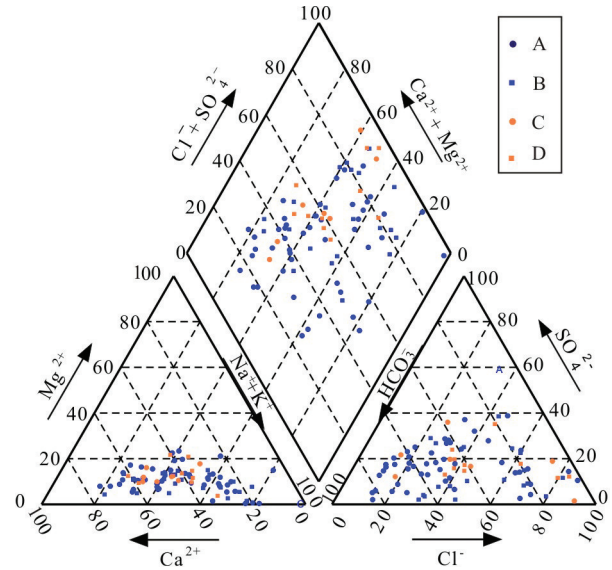


图5 Piper 三线图
A—不是超Ⅲ类水,也不是硝酸型水; B—不是超Ⅲ类水,但是硝酸型水; C—是超Ⅲ类水,但不是硝酸型水; D—既是超Ⅲ类水,也是硝酸型水

Fig.5 Trigram of piper
A—Not super III type water, nor NO₃ Type Water; B—Not super III type water, but NO₃ Type Water; C—Is super III type water, but not NO₃ Type Water; D—Is super III type water, but also NO₃ Type Water

多,天然地下水化学组成被改变。本研究从自然因素和人为因素两个方面分析研究区硝酸型地下水的形成。

5.1 自然因素

土壤与地下水的包气带岩性及其结构、含水层类型、潜水埋深等均是影响氮转化的主要因素。本次地下水样品主要采自厦门市平原区分布广泛的两类含水层:冲洪积孔隙含水层和风化残坡积孔隙裂隙含水层。

采自风化残坡积孔隙裂隙含水层的地下水样品55组,X(NO₃⁻)范围为1.0%~53.1%,均值为26.2%。其中28组样品X(NO₃⁻)≥25%,形成NO₃·Cl型、NO₃·HCO₃型、Cl·NO₃型等10种硝酸型水。冲洪积孔隙含水层的地下水样品27组,X(NO₃⁻)范围为0.1%~37.4%,均值为14.4%。其中4组样品X(NO₃⁻)≥25%,形成NO₃·HCO₃型、Cl·NO₃·SO₄型和HCO₃·Cl·NO₃型3种硝酸型水(表2)。在海积孔隙含水层和基岩裂隙含水层采集的5组地下水样品,X(NO₃⁻)均小于25%,未出现硝酸型水。

硝酸型水多出现在风化残坡积含水层,这主要

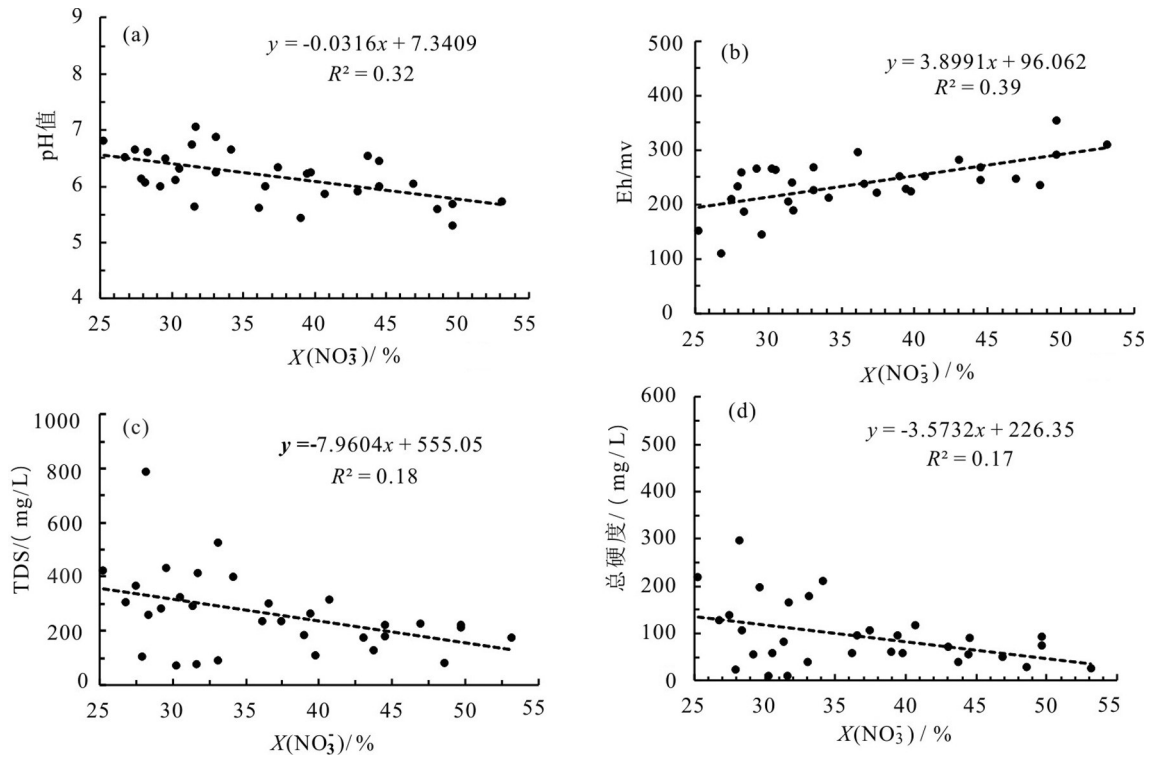


图6 $X(\text{NO}_3^-)$ 与pH值、Eh、TDS和总硬度的相关关系
Fig.6 Nitrate mEq percentage and pH, Eh, TDS, TH relationship

是受到该含水层的岩性、水动力条件、地下水埋深等自然环境的影响。

5.1.1 含水层的岩性

残坡积物由燕山期花岗岩类岩石风化而成。花岗岩属酸性母岩,在高温多雨的气候条件下,由其形

成的土壤一般呈酸性($5.0 \leq \text{pH} < 6.5$) (王文俊, 2018)。在氮循环转化过程中细菌起到重要作用,一般情况下,酸性越强硝化细菌活性越强,偏酸性环境有利于氨氮转化为硝酸盐氮。这与研究区硝酸型地下水 $X(\text{NO}_3^-)$ 与pH呈负相关的特征是一致的。

表2 硝酸型地下水分布特征

Table 2 Distribution characteristics of nitric acid groundwater

地下水类型	水化学类型	样品数/组	阴离子毫克当量数百分数/%			
			Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	NO ₃ ⁻
风化 残坡 积孔 隙裂 隙水	NO ₃ ·Cl	9	28.4~37.5	2.1~22.6	3.3~15.7	36.6~53.1
	NO ₃ ·HCO ₃	4	17.8~22.8	1.6~18.4	26.0~37.3	33.1~44.5
	NO ₃ ·Cl·HCO ₃	2	27.3~28.7	12.3~18.4	26.0~27.3	28.3~31.7
	NO ₃ ·SO ₄	1	20.7	36.1	4.1	39.0
	HCO ₃ ·NO ₃	1	18.1	18.9	31.6	31.4
	HCO ₃ ·NO ₃ ·Cl	3	25~29.1	5.1~11.6	31.5~36.8	29.6~33.1
	Cl·NO ₃	4	47.6~60.6	6.9~9.1	2.1~14.3	28.2~40.7
	Cl·NO ₃ ·SO ₄	1	30.6	27.3	11.4	30.5
	HCO ₃ ·Cl·NO ₃	1	33.8	2.1	37.3	26.8
Cl·HCO ₃ ·NO ₃	2	31.4~33.3	7.8~11.1	30.1~31.0	27.4~27.9	
冲洪	NO ₃ ·HCO ₃	2	14.6~24.4	13.4~18.5	28.0~29.5	34.1~37.4
积孔	Cl·NO ₃	1	46.9	6.1	15.3	31.6
隙水	HCO ₃ ·Cl·NO ₃	1	27.5	10.2	37.0	25.3

5.1.2 水动力条件

$\gamma(\text{Ca}^{2+})/\gamma(\text{Cl}^-)$ 系数是描述地下水动力特点的参数,其值越大表明水动力条件越好,反之,地下水径流条件越差(Sun,2007;李虎等,2015)。由硝酸盐绝对含量 $\rho(\text{NO}_3^-)$ 、相对含量 $X(\text{NO}_3^-)$ 与 $\gamma\text{Ca}/\gamma\text{Cl}$ 系数相关关系图(图7)可见,残坡积含水层地下水径流条件明显比冲洪积含水层差,易于 NO_3^- 的富集, NO_3^- 相对含量也较大。

5.1.3 地下水埋深

浅层地下水埋深即包气带厚度,是影响氮转化的主要地质因素之一。埋深小有利于表层土壤富集的有机碳进入含水层,反硝化作用强。埋深大一些,反硝化作用不强, NO_3^- 污染较严重(沈照理等,1993)。埋深太大,水渗过包气带的路程增大,水中溶解氧被地层中的有机物消耗,Eh值减小,不利于硝化作用,地下水不易受到 NO_3^- 污染。图8所示为研究区地下水硝酸盐含量和硝酸型水随水位埋深的分布。 NO_3^- 含量与地下水埋深呈负相关关系,约20%的样品 NO_3^- 绝对含量超过地下水质量标准Ⅲ类水限值,超标点水位埋深均小于13 m。而水位埋

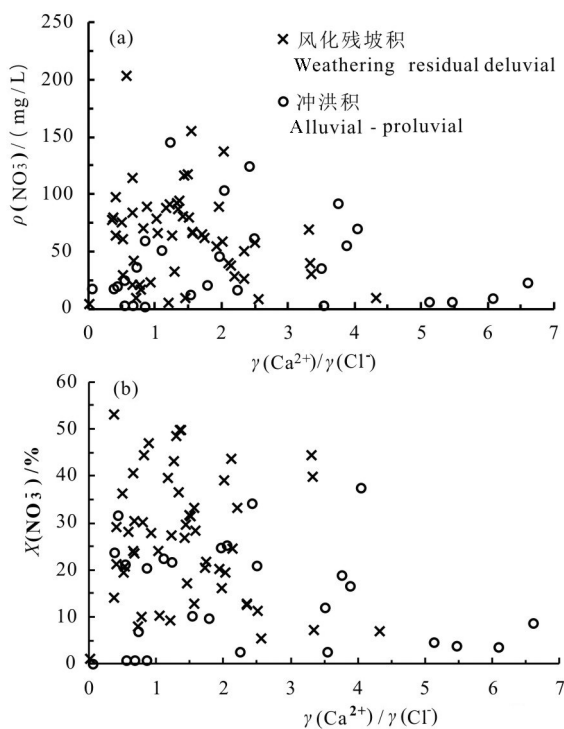


图7 硝酸盐相对含量(a)和绝对含量(b)与 $\gamma(\text{Ca}^{2+})/\gamma(\text{Cl}^-)$ 的相关关系

Fig.7 Nitrate concentration, mEq percentage and $\gamma(\text{Ca}^{2+})/\gamma(\text{Cl}^-)$ relationship

深小于1 m的样品有8个,均为非硝酸型水。硝酸型水多出现在水位埋深1~20 m的区域。

5.2 人为因素

人类活动是地下水中氮的主要来源,如施用化肥、农家肥和污水灌溉是农业地区地下水氮污染的重要来源,城市化的结果导致了城镇周边地下水氮污染。

采用 $\gamma(\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+})/\gamma(\text{HCO}_3^-+\text{SO}_4^{2-})$ 分析人类活动对硝酸型水形成的影响。天然状态下,地下水径流过程中可溶性岩石(或矿物)按照固定的比例不断溶解,水中 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 HCO_3^- 和 SO_4^{2-} 之间的成分遵守矿物溶解的化学平衡等比例溶解。水样点 $\gamma(\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+})/\gamma(\text{HCO}_3^-+\text{SO}_4^{2-})$ 比值应该落在1:1线上;如果在排泄带有任何污染物或其他水体混入,都会扰乱 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 HCO_3^- 、 SO_4^{2-} 之间的比例分配,使之偏离1:1线(Sandow et al., 2010;孙厚云等,2018)。图9显示硝酸型水的 $\gamma(\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+})/\gamma(\text{HCO}_3^-+\text{SO}_4^{2-})$ 的比值明显偏离1:1线,这说明硝酸型水中有

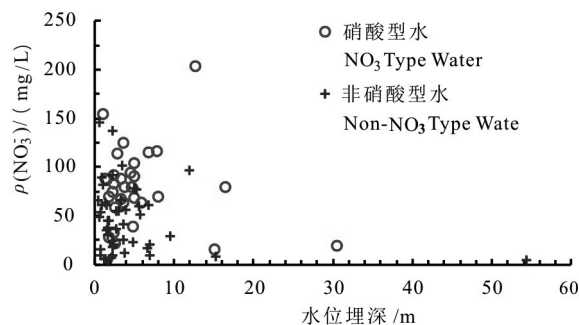


图8 硝酸盐浓度和地下水埋深关系

Fig.8 Relationship between nitrate and groundwater level depth

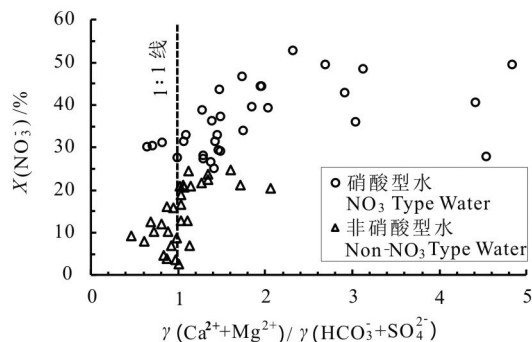


图9 硝酸盐相对含量与 $\gamma(\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+})/\gamma(\text{HCO}_3^-+\text{SO}_4^{2-})$ 的相关关系
Fig.9 Nitrate mEq percentage and $\gamma(\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+})/\gamma(\text{HCO}_3^-+\text{SO}_4^{2-})$ relationship

污染水体渗入。

Cl⁻主要来源于人类活动生产和生活污水排放,农业施肥是地下水中K⁺的重要来源之一(Fetter, 2011; 袁建飞等, 2016; Geophrey et al., 2017)。利用 $\rho(\text{NO}_3^-)$ 与 $\rho(\text{Cl}^-)$ 、 $\rho(\text{NO}_3^-)$ 与 $\rho(\text{K}^+)$ 相关关系,进一步分析地下水中NO₃⁻的来源(图10)。

$\rho(\text{NO}_3^-)$ 与 $\rho(\text{K}^+)$ 相关关系分析结果显示,非硝酸型水 $\rho(\text{NO}_3^-)$ 与 $\rho(\text{K}^+)$ 相关性较好,拟合系数为 $R^2 = 0.27$ 。而硝酸型水的相关性稍弱于非硝酸型水,拟合系数为 $R^2 = 0.11$, NO₃⁻与K⁺浓度呈弱正相关。说明部分地下水中NO₃⁻与K⁺有相同或相似的来源,即农业施肥对硝酸型水的形成有影响,但影响范围不大。

$\rho(\text{NO}_3^-)$ 与 $\rho(\text{Cl}^-)$ 相关关系分析结果显示,非硝酸型水 $\rho(\text{NO}_3^-)$ 与 $\rho(\text{Cl}^-)$ 相关性较好,拟合系数为 $R^2 = 0.26$ 。而硝酸型水的相关性明显好于非硝酸型水,拟合系数为 $R^2 = 0.66$, NO₃⁻与Cl⁻浓度呈显著正相关。说明地下水中NO₃⁻与Cl⁻有相同或相似的来源,硝酸型水中NO₃⁻来自生活污水或垃圾渗滤液下渗等。

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。在采集的25个地表水样品中,“总氮”(NH₄⁺-N、NO₃⁻-N和NO₂⁻-N之和)含量0.54~7.01 mg/L。与《地表水环境质量标准》GB 3838-2002中总氮V类水标准限值(2.0 mg/L)对比,有10个为劣V类水。NH₄⁺-N、NO₃⁻-N和NO₂⁻-N的含量范围分别为0~6.22 mg/L, 0~4.220 mg/L, 和0~0.73 mg/L, 均值分别为1.24 mg/L、1.16 mg/L和0.04 mg/L。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。说明生产、生活污水是地下水氮污染来源,这与 $\rho(\text{NO}_3^-)$ 与 $\rho(\text{Cl}^-)$ 相关关系分析结果一致。进一步说明硝酸型水主要受控于生活污水或垃圾渗滤液下渗等。

6 防治措施与建议

地下水污染具有隐蔽性和难以逆转性,因此,地下水硝酸盐污染治理应以防止污染为重点。

(1)建议开展厦门市地下水基础环境调查评价,针对厦门市集中式饮用水源补给区及重点污染源周边,开展污染源的种、数量和分布状况调查,评价地下水质量和污染状况,以及地下水受人类活动影响的污染程度。在硝酸型地下水分布区,采用

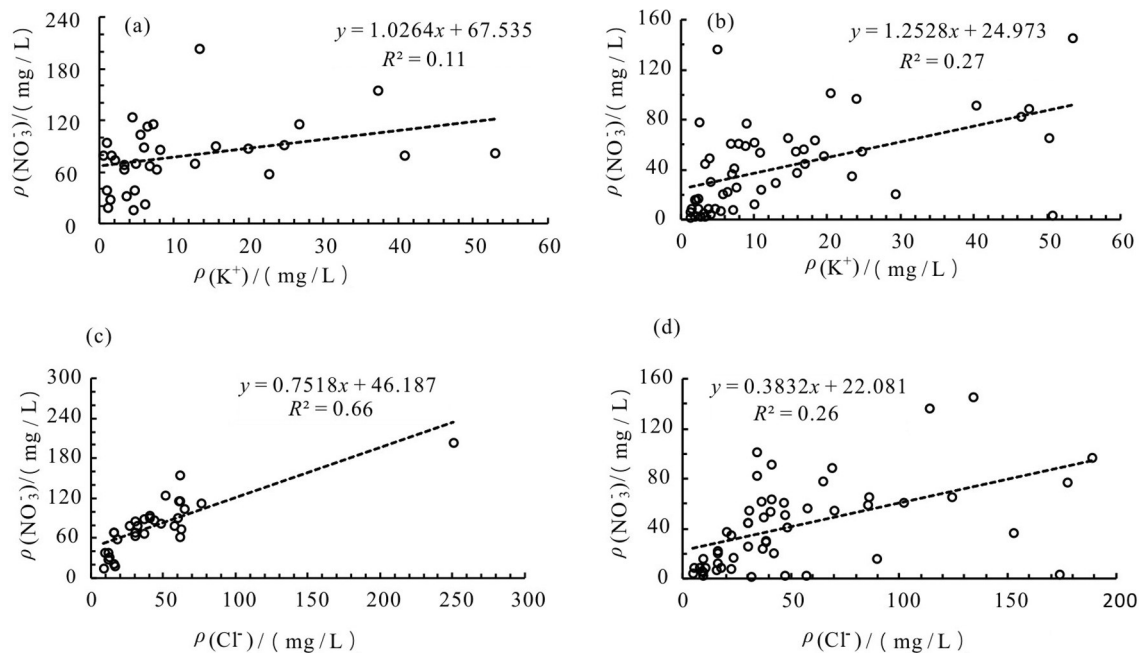


图10 $\rho(\text{NO}_3^-)$ 与 $\rho(\text{K}^+)$ 、 $\rho(\text{Cl}^-)$ 的相关关系
a—硝酸型; b—非硝酸型; c—硝酸型; d—非硝酸型
Fig.10 NO₃⁻ and K⁺、Cl⁻ concentration relationship

a-NO₃ Type Water; b-Non-NO₃ Type Water; c-NO₃ Type Water; d-Non-NO₃ Type Water

水化学和同位素¹⁵N、¹⁸O测试技术相结合方法,识别地下水NO₃⁻污染来源,研究NO₃⁻的循环、迁移、混合等过程,真正达到从源头上控制污染源,从而为制定厦门市地下水环境保护措施提出科学建议。

(2)采取加大城镇周边和农村地区污水管网建设,开展农村改厕等措施,减少生活污水、粪便等对农村饮用水源的污染,保障农村居民用水安全。

(3)开展地下水硝酸盐污染监测与预防工作。建议在因施用化肥所引起的地下水硝酸盐污染地区,布设专门的NO₃⁻监测项目,通过地下水监测点获取有关硝酸盐污染的地下水数据,并根据这些数据进行合理的施肥。

7 结 论

(1)NO₃⁻已成为影响厦门市平原区地下水水化学命名的主要阴离子组分。已形成NO₃·Cl型、NO₃·HCO₃型、Cl·NO₃型等10种硝酸型水,占比达36.8%。硝酸型水主要分布于风化残积平原区,东部翔安区和同安区已形成较大面状分布,西部集美区和海沧区分布较少,且呈点状或局部小面积分布。硝酸型水主要存在于氧化沉积环境,具有低pH、低TDS、低硬度特征。硝酸型水以NO₃⁻绝对含量偏低为主。21个NO₃⁻绝对含量未超过Ⅲ类水限值,但其相对含量在26.8%~53.1%,已形成硝酸型水,说明地下水已受到硝酸盐污染。

(2)厦门市平原区硝酸型地下水形成主要受自然环境和人类活动的影响。风化残坡积含水层的酸性土壤、地下水径流缓慢和地下水埋深浅等为地下水NO₃⁻富集提供了有利的环境条件。人类生活污水、垃圾渗滤液下渗、农业施肥、牲畜粪便等是地下水硝酸盐污染的主要来源。

(3)建议开展地下水硝酸盐污染源识别研究,针对不同污染源采取完善污染管网建设、农村改厕、科学施肥等措施,从源头上防治污染。

References

Chen Xinming, Ma Teng, Cai Hesheng, Wang Yanyan. 2013. Regional control of groundwater nitrogen contamination[J]. *Geoscientific Information*, 32(6):130-143,149 (in Chinese with English abstract).
Chetan P S. Ahada, Surindra Suthar. 2018. Groundwater nitrate contamination and associated human health risk assessment in southern districts of Punjab, India[J]. *Environmental Science and*

Pollution Research. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-2581-2>.
Fu Xuemei, Sun Yuanyuan, Su Jing, Zheng Mingxia, Xi Beidou, Qian Guangren. 2019. Source of nitrate in groundwater based on hydrochemical and dual stable isotopes[J]. *China Environmental Science*, 39(9):3951-3958. (in Chinese with English abstract).
Fetter C W. 2011. Contaminant hydrogeology[M]. (Second edition). Zhou Nianqing, Huang Yong(translator). Beijing: Higher Education Press, 249-254(in Chinese).
Geophrey Anormu, Abass Gibrilla, Dickson Adomako. 2017. Tracking nitrate sources in groundwater and associated health risk for rural communities in the white Volta River basin of Ghana using isotopic approach ($\delta^{15}\text{N}$, $\delta^{18}\text{O}$ -NO₃ and ³H) [J]. *Science of the Total Environment*, 603/604: 687-698.
Guo Xiaodong, Wang Xiaoguang, Liu Qiang, Wang Changqi, Xiao Changlai, Cheng Xuxue.2021. Groundwater resources and ecological environment in Songhua River-Liaohe River Basin[J]. *Geology in China*, 48(4): 1062-1074(in Chinese with English abstract).
He Ze, Ning Zhuo, Huang Guanxing, Liu Dandan, Zhang Qianqian, Sun Jichao. 2019. The response characteristics of microbial diversity to shallow groundwater contamination in the piedmont of the Taihang Mountains using molecular biotechnologies: A case study of groundwater of Hutuo River Basin[J]. *Geology in China*, 46(2): 290-301(in Chinese with English abstract).
Huang Chulong, Zheng Chaohong. 2009. Spatial Differentiation of water resources supply and demand balance in Fujian Province[J]. *Resources Science*, 31(5): 750-756 (in Chinese with English abstract).
Katharina Wick, Christine Heumesser, Erwin Schmid. 2012. Groundwater nitrate contamination: Factors and indicators[J]. *Journal of Environmental Management*, 111: 178-186.
Li Hu, Xia Lingxiao, Jiang Guosheng. 2015. Analysis on geothermal fluid ion ratios in Tianjin area[J]. *Ground Water*, 37(5): 35-37(in Chinese with English abstract).
Li Zhenghong, Zhang Yilong, Hu Bo, Wang Lijuan, Zhu Yuchen, Li Jianfeng. 2018. Driving action of human activities on NO₃⁻ N pollution in confined groundwater of Togtoh County, Inner mongolia[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 39(3): 358-364 (in Chinese with English abstract).
Liu Guanqun, Zhou Shuyu, Huang Xiudong, Wang Ting, Xu dong, Yue Caidong. 2017. Multiple methods to recognize sources of underground water nitrate contamination in plain area of Dagu river, Qingdao, China[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*. 37(1): 347-356 (in Chinese with English abstract).
Sandow Mark Yidana, Bruce Banoeng-Yakubo, Thomas M. Akabzaa. 2010. Analysis of groundwater quality using multivariate and spatial analyses in the Keta basin, Ghana[J]. *Journal of African Earth Sciences*, 58(2): 220-234.
Shen Zhaoli, Zhu Wanhua, Zhong Zuoxin. 1993. Fundamentals of Hydrogeochemistry[M]. Beijing: Geological Publishing House,

- 136–140 (in Chinese).
- Sheng Danrui, Wen Xiaohu, Feng Qi, Wu Jun, Si Jianhua, Wu Min. 2019. Groundwater nitrate pollution and human health risk assessment in the Zhangye basin, Gansu, China[J]. *Journal of Desert Research*, 39(5): 37–41 (in Chinese with English abstract).
- Sun Houyun, Mao Qigui, Wei Xiaofeng, Zhang Huiqiong, Xi Yuze. 2018. Hydrogeochemical characteristics and formation evolutionary mechanism of the groundwater system in the Hami basin[J]. *Geology in China*, 45(6): 1128–1141 (in Chinese with English abstract).
- Sun Yaqiao, Qian Hui, Wu Xuehua. 2007. Hydrogeochemical characteristics of groundwater depression cones in Yinchuan City, Northwest China [J]. *Chinese Journal of Geochemistry*, 26(4): 350–355.
- Tang Kewang, Wu Yucheng, Hou Jie. 2006. Assessment of groundwater quality in China: II. Groundwater quality and pollution analysis[J]. *Water Resources Protection*. 22(3):1–4,8 (in Chinese with English abstract).
- Wang Dachun, Zhang Renquan, Shi Yihong, Xu Shaozhuo, Yu Qingchun, Liang Xing. 1993. *General Hydrogeology*[M]. Beijing: Geological Publishing House, 61–62 (in Chinese).
- Wang Wenjun. 2018. Achievements of the multi-purpose geochemistry survey in Fujian Province, and their Application[J]. *Geology of Fujian*, 37(2): 146–156 (in Chinese with English abstract).
- Wen Dongguang, Lin Liangjun, Sun Jichao, Zhang Zhaoji, Jiang Yuehua, Ye Nianjun, Fei Yuhong, Qian Yong, Gong Jianshi, Zhou Xun, Zhang Yuxi. 2012. Groundwater quality and contamination assessment in the main plains of eastern China[J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 7(2): 220–228 (in Chinese with English abstract).
- Xu Jin, He Jiangtao, Peng Cong, Zeng Ying. 2018. Characteristics and genesis of NO₃ type water in shallow groundwater in Liujiang basin[J]. *Environmental Science*, 39(9): 4142–4149 (in Chinese with English abstract).
- Xu Xiangqing. 1999. Desalination of seawater is most effective way to solve water shortage in Xiamen[J]. *Journal of Oceanography in Taiwan Strait*, 18(4): 450–455 (in Chinese with English abstract).
- Yuan Jianfei, Deng Guoshi, Xu Fen, Tang Yeqi, Li Pengyue. 2016. 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*, 43(4): 1146–1156 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Cuiyun, Ma Linna, Zhang Sheng, Li Zhenghong, Yin Miying, Zang Yizhong. 2007. The application of visual modflow to the simulation of groundwater nitrate contamination in Shijiazhang[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 28(6): 561–566 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Zhaoji, Fei Yuhong, Guo Chunyan, Qian Yong, Li Yasong. 2012. Regional groundwater contamination assessment in the North China plain[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 42(5):1456–1461 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Ran, Han Zhiwei, Tian Yongzhu, Li Geng, Zeng Xiangying, He Shouyang. 2020. Quantitative identification of nitrate source of surface water and groundwater in Karst Basin[J]. *China Environmental Science*, 40(4): 1706–1714 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Xun, Zhu Chunfang. 2014. The nitrate content characteristics of shallow groundwater in Jinjiang City, Fujian Province, and their hydrochemical indication significance [J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 35(2): 177–182 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Liang, Yang Mingnan, Zhang Yuxin, Liu Jingtao. 2016. Research on distribution and influence factor of nitrate of shallow groundwater in Dongsheng and surrounding area[J]. *Journal of Water Resource & Water Engineering*, 27(5): 37–41, 45 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Liang, Liu Jingtao, Lü Xiaoli, Xie Fei, Wei Yutao. 2020. Changes and driving factors of groundwater environment in Lanzhou since 1998[J]. *Geology in China*, 47(6): 1677–1687 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Wei, Zhao Yongsheng, Tang Wei, Du Jizhong. 2013. Study on shallow groundwater water quality status and development trends in Songnen plain[J]. *Journal of Anhui Agri. Sci.*, 41(4):1664–1669 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 陈新明,马腾,蔡鹤生,王妍妍. 2013. 地下水氮污染的区域性调控策略[J]. *地质科技情报*, 32(6): 130–143, 149.
- Fetter C W. 2011. *污染水文地质学*[M]. 周念清, 黄勇译. 北京: 高等教育出版社, 249–254.
- 傅雪梅, 郑源媛, 苏婧, 郑明霞, 席北斗, 钱光人. 2019. 基于水化学和氮氧双同位素的地下水硝酸盐源解析[J]. *中国环境科*, 39(9): 3951–3958.
- 郭晓东, 王晓光, 刘强, 王长琪, 肖长来, 程旭学. 2021. 松花江—辽河流域地下水资源及其生态环境问题[J]. *中国地质*, 48(4): 1062–1074.
- 何泽, 宁卓, 黄冠星, 刘丹丹, 张千千, 孙继朝. 2019. 太行山前平原浅层地下水污染的分子生态学响应特征——以滹沱河流域为例[J]. *中国地质*, 46(2): 290–301.
- 黄初龙, 郑朝洪. 2009. 福建省水资源供需平衡区域差异分析[J]. *资源科学*, 31(5): 750–756.
- 李虎, 夏玲晓, 江国胜. 2015. 天津地区奥陶系地热流体离子比例系数分析研究[J]. *地下水*, 37(5): 35–37.
- 李政红, 张翼龙, 胡波, 王丽娟, 朱玉晨, 李剑锋. 2018. 人类活动对内蒙古托克托县浅层地下水 NO₃-N 污染的驱动作用[J]. *地球学报*, 39(3): 358–364.
- 刘贯群, 周书玉, 黄修东, 王婷, 徐栋, 岳彩东. 2017. 多种方法识别青岛大沽河平原区地下水硝酸盐污染来源[J]. *环境科学*, 37(1):

- 347-356.
- 盛丹睿, 温小虎, 冯起, 武君, 司建华, 吴敏. 2019. 张掖盆地地下水硝酸盐污染与人体健康风险评价[J]. 中国沙漠, 39(5): 37-41.
- 沈照理, 朱宛华, 钟佐燊. 1993. 水文地球化学基础[M]. 北京: 地质出版社, 136-140.
- 孙厚云, 毛启贵, 卫晓锋, 张会琼, 蕙玉泽. 2018. 哈密盆地地下水系统水化学特征及形成演化[J]. 中国地质, 45(6): 1128-1141.
- 唐克旺, 吴玉成, 侯杰. 2006. 中国地下水资源质量评价(II)-地下水水质现状和污染分析[J]. 水资源保护, 22(3): 1-4, 8.
- 王大纯, 张人权, 史毅虹, 许绍倬, 于青春, 梁杏. 1993. 水文地质学基础[M]. 北京: 地质出版社, 61-62.
- 王文俊. 2018. 福建多目标区域地球化学调查成果及其应用[J]. 福建地质, 37(2): 146-156.
- 文冬光, 林良俊, 孙继朝, 张兆, 姜月华, 叶念军, 费宇红, 钱永, 龚建师, 周迅, 张玉玺. 2012. 中国东部主要平原地下水质量与污染评价[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 7(2): 220-228.
- 徐进, 何江涛, 彭聪, 曾颖. 2018. 柳江盆地浅层地下水硝酸型水特征和成因分析[J]. 环境科学, 39(9): 4142-4149.
- 徐祥清. 1999. “以海代淡”是厦门水资源可持续发展之良策[J]. 台湾海峡, 18(4): 450-455.
- 袁建飞, 邓国仕, 徐芬, 唐业旗, 李鹏岳. 2016. 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, 43(4): 1146-1156.
- 张翠云, 马琳娜, 张胜, 李政红, 殷密英, 臧逸中. 2007. Visual Modflow在石家庄市地下水硝酸盐污染模拟中的应用[J]. 地球学报, 28(6): 561-566.
- 张兆吉, 费宇红, 郭春艳, 钱永, 李亚松. 2012. 华北平原区域地下水污染评价[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 42(5): 1456-1461.
- 赵然, 韩志伟, 田永著, 李耕, 曾祥颖, 何守阳. 2020. 岩溶流域地表水和地下水硝酸盐来源定量识别[J]. 中国环境科学, 40(4): 1706-1714.
- 周迅, 朱春芳. 2014. 福建省晋江市浅层地下水硝酸盐含量特征及其水化学指示意义[J]. 地球学报, 35(2): 177-182.
- 朱亮, 刘景涛, 杨明楠, 吕晓立, 解飞, 魏玉涛. 2020. 1998年以来兰州市地下水环境变化及驱动因素[J]. 中国地质, 47(6): 1677-1687.
- 朱亮, 杨明楠, 张玉玺, 刘景涛. 2016. 东胜城区及周边地区浅层地下水硝酸盐分布及影响因素研究[J]. 水资源与水工程学报, 27(5): 37-41, 45.
- 朱巍, 赵勇胜, 唐雯, 都基众. 2013. 松嫩平原浅层地下水水质状况及发展趋势研究[J]. 安徽农业科学, 41(4): 1664-1669.