

doi: 10.12029/gc20220511

金阳,姜月华,董贤哲,杨国强,刘红樱,雷长征,周权平,张鸿,梅世嘉,杨辉,吕劲松,李云. 2022. 浙江宁波平原地下水水化学特征及其生态环境效应[J]. 中国地质, 49(5): 1527-1542.

Jin Yang, Jiang Yuehua, Dong Xianzhe, Yang Guoqiang, Liu Hongying, Lei Changzheng, Zhou Quanping, Zhang Hong, Mei Shijia, Yang Hui, Lü Jinsong, Li Yun. 2022. Chemical characteristics and eco-environmental effect of groundwater in Ningbo Plain, Zhejiang Province[J]. *Geology in China*, 49(5): 1527-1542(in Chinese with English abstract).

浙江宁波平原地下水水化学特征及其生态环境效应

金阳^{1,2,3}, 姜月华^{1,2,3}, 董贤哲⁴, 杨国强^{2,3}, 刘红樱^{2,3}, 雷长征⁴, 周权平^{2,3},
张鸿^{2,3}, 梅世嘉^{2,3}, 杨辉^{2,3}, 吕劲松^{2,3}, 李云^{2,3}

(1. 中国地质科学院, 北京 100037; 2. 中国地质调查局南京地质调查中心, 江苏南京 210016; 3. 自然资源部流域生态地质过程重点实验室, 江苏南京 210016; 4. 浙江省水文地质工程地质大队, 浙江宁波 315012)

摘要:【研究目的】为查明浙江宁波平原地下水特征及成因演化, 促进宁波地区地下水环境优化。【研究方法】在野外调查和取样分析的基础上, 充分利用前人资料, 综合运用数理统计、相关性分析、Piper 三线图、离子比例系数及环境同位素等方法手段, 全面系统地分析了宁波平原地下水状况。【研究结果】宁波平原地表水和潜水以淡水为主, I 承压水和 II 承压水以微咸水、咸水为主, 潜水中 HCO_3^- 占绝对优势, Cl^- 、 Ca^{2+} 、 Na^+ 次之, 地表水和承压水中 Cl^- 、 Na^+ 占主导地位, HCO_3^- 次之。4 种水共划分 23 种水化学类型, 地表水和潜水受大气降水影响明显, 深层承压水以封存型为主, 与浅表水体天然联系不密切, 受地质历史时期海侵影响较大。【结论】与 20 世纪 70 年代相比, 宁波城区 I 承压淡水体分布范围无明显变化, II 承压水在人类生产生活和水体自然循环双重影响下, 原淡水区演化出孤岛状咸水体, 但淡水体整体分布范围外扩, 面积增加了约 12 km², 其生态环境效应趋于正向发展。

关键词: 水化学特征; 成因演化; 同位素; 生态环境效应; 地下水地质调查工程; 宁波; 浙江省

创新点: 系统总结了宁波平原地下水特征及演化成因; 综合宁波平原古环境变化和现代社会发展用水变化讨论地下水生态环境效应。

中图分类号: P64112; X171.1

文献标志码: A

文章编号: 1000-3657(2022)05-1527-16

Chemical characteristics and eco-environmental effect of groundwater in Ningbo Plain, Zhejiang Province

JIN Yang^{1,2,3}, JIANG Yuehua^{1,2,3}, DONG Xianzhe⁴, YANG Guoqiang^{2,3}, LIU Hongying^{2,3},
LEI Changzheng⁴, ZHOU Quanping^{2,3}, ZHANG Hong^{2,3}, MEI Shijia^{2,3}, YANG Hui^{2,3},
LÜ Jinsong^{2,3}, LI Yun^{2,3}

(1. Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 2. Nanjing Center, China Geological Survey, Nanjing 210016, Jiangsu, China; 3. Key Laboratory of Watershed Eco-Geological Processes, Ministry of Natural Resources, Nanjing 210016,

收稿日期: 2020-07-13; 改回日期: 2020-09-06

基金项目: 中国地质调查局项目(DD20190260、DD20221728)项目资助。

作者简介: 金阳, 男, 1990 年生, 博士生, 主要从事环境地质和水文地质研究工作; E-mail: sdkjdxjy@163.com。

通讯作者: 李云, 男, 1984 年生, 高级工程师, 从事环境地质和水文地质研究工作; E-mail: liyun9220@163.com。

Jiangsu, China; 4. Zhejiang Institute of Hydrogeology and Engineering Geology, Ningbo 315012, Zhejiang, China)

Abstract: This paper is the result of groundwater geological survey engineering.

[Objective] In order to find out the characteristics of groundwater and its reason for evolution in Ningbo plain, and help to optimize the groundwater environment of Ningbo area. **[Methods]** Groundwater in Ningbo plain was analyzed comprehensively and systemically based on field survey and samples analysis, making full use of the previous data, then multiple methods including the mathematical statistics, the correlation matrices, Piper diagram, the ratio coefficient of main ions and environmental isotope were used for this study. **[Results]** The main of surface water and phreatic water were fresh water, however, confined water were mainly brackish water or salt water. HCO_3^- of phreatic water was the predominant anion and Cl^- , Ca^{2+} , Na^+ were all secondary. Contrastly, the dominant ions of surface water and confined water were Cl^- and Na^+ , HCO_3^- was the second. The four water were divided into twenty-three hydrochemical types, and surfer water and phreatic water were both influenced by precipitation evidently, whereas confined water deeply was closed in the aquifer during previous transgression, so there was little relationship with shallow water. **[Conclusions]** Compared with that in the 1970s, the distribution of fresh water body in confined aquifer I of Ningbo urban area had no significant change, but that in confined aquifer II was changing obviously by the influence of both human activities and natural water recycle. Salt water appeared in the scope of fresh water by hydrochemical evolution, and the scope of fresh water body expanded outside, overall, the distribution area increased by twelve square kilometer approximately, and the environmental effect was being towards positive tendency.

Key words: hydrochemical characteristic; reason of evolution; isotope; eco-environmental effect; groundwater geological survey engineering; Ningbo; Zhejiang Province

Highlights: Characteristics and evolution reasons of groundwater were systematically summarized in Ningbo Plain; Eco-environmental effect of groundwater in Ningbo Plain was discussed by considering comprehensively the change of paleoenvironment and water variation of modern social development.

About the first author: JIN Yang, male, born in 1990, doctor candidate, mainly engaged in the research of environmental geology and hydrogeology; E-mail: sdkjdxjy@163.com.

About the corresponding author: LI Yun, male, born in 1984, senior engineer, engaged in the research of environmental geology and hydrogeology; E-mail: liyun9220@163.com.

Fund support: Supported by the project of China Geological Survey (No.DD20190260, No.DD20221728).

1 引 言

水资源是保障国家城乡居民用水、支撑社会发展的重要战略资源,在维持生态系统安全和生态环境建设方面具有重要作用(孙跃等,2019)。地下水作为水资源的重要组成部分,在漫长的地质历史过程中,不断与其接触的大气圈、生物圈、岩石圈等周围圈层介质发生物质、能量和信息交换,导致其水化学特征也随时空变化而演化更替,因此,研究地下水水化学时空变异特征和演化规律,分析其现状成因,有利于更好地揭示地下水与环境的相互作用机制,为地下水资源管理和环境保护提供科学依据(Adams,2001;中国科学院,2018)。

近年来,国内外学者应用数理统计(陈倩等,2012;黄耀裔等,2014;邢立亭等,2015)、相关性分

析(刘文波,2010)、模拟计算(赵江涛等,2017;李国礼等,2018;刘瑞平等,2019)、Langelier-ludwing图(Tiziano,2011;刘颖超等,2015)、Piper三线图(王瑞久,1983;陆徐荣等,2010)等多元方法,对不同地域地表水、浅层地下水(杨巧凤等,2010;赵全升等,2010;於昊天等,2017;金阳等,2021)、深层地下水(付昌昌,2012;张振国等,2018;牛兆轩等,2019)、地热水(王香桂等,2011)、矿泉水(孙岐发等,2017;孙岐发等,2019)等不同水体的水化学特征进行研究分析,揭示其演化规律和形成原因。

宁波平原地处中国东南沿海,位于中国大陆海岸线中段,长江三角洲南翼,是长三角五大区域中心之一(徐美娟等,2017),也是浙江省“大湾区、大花园、大通道、大都市区”建设的核心区。虽然宁波市自2007年实行禁限采以来(侯艳声等,2018),地

下水开采量明显降低,主要在农业生产、畜牧养殖和农村饮水等方面发挥一定作用,但地下水资源作为未来区域发展的应急供水水源与重要后备资源,地下水环境和水资源安全问题仍需高度重视(赵团芝等,2016)。出于供水目的,历史时期曾针对宁波平原开展过多次水工环地质调查,但针对宁波平原地下水水化学方面的研究文献(王怀颖等,1990;阎葆瑞等,1992)更新不足、相对分散。本文以长江经济带地质资源环境综合评价和宁波城市应急供水地下水源地调查评价为依托,在分析近期样品数据基础上,充分利用前人资料,综合分析研究区水化学特征及其成因,以期为宁波地区水资源管理和水环境保护提供参考依据。

2 研究区概况

2.1 自然地理概况

本文所选研究区宁波平原,南起奉化尚田,北濒滨海,东临东钱湖,西至溪口—章水一线,面积约1000 km²(图1),南、东、西三面环绕中生代火山岩组成的低山丘陵,基本地貌成因为海积平原,后期外动力作用使其地貌复杂化,冲积平原、湖沼平原及河口、滨海平原等多类型共存。研究区属北亚热带季风气候区,全年温和湿润,四季分明,雨量充沛,日照充足,多年平均气温16.5℃,多年平均降水量1387.7 mm。区内河网密布,地势低平,平均海拔2~4 m。研究区水系主要由甬江流域组成,东江、

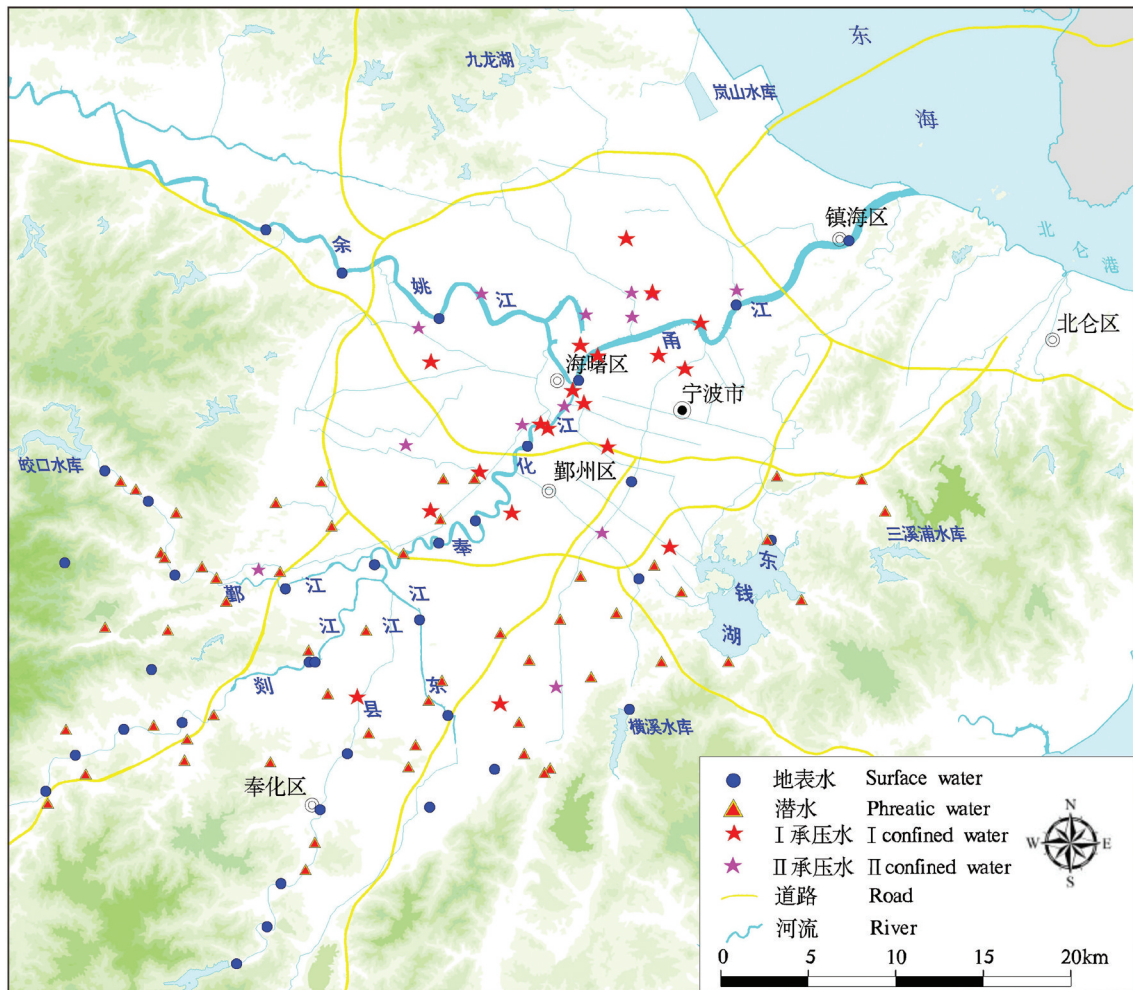


图1 宁波平原及采样点位置图
Fig.1 Location of Ningbo Plain and sampling point

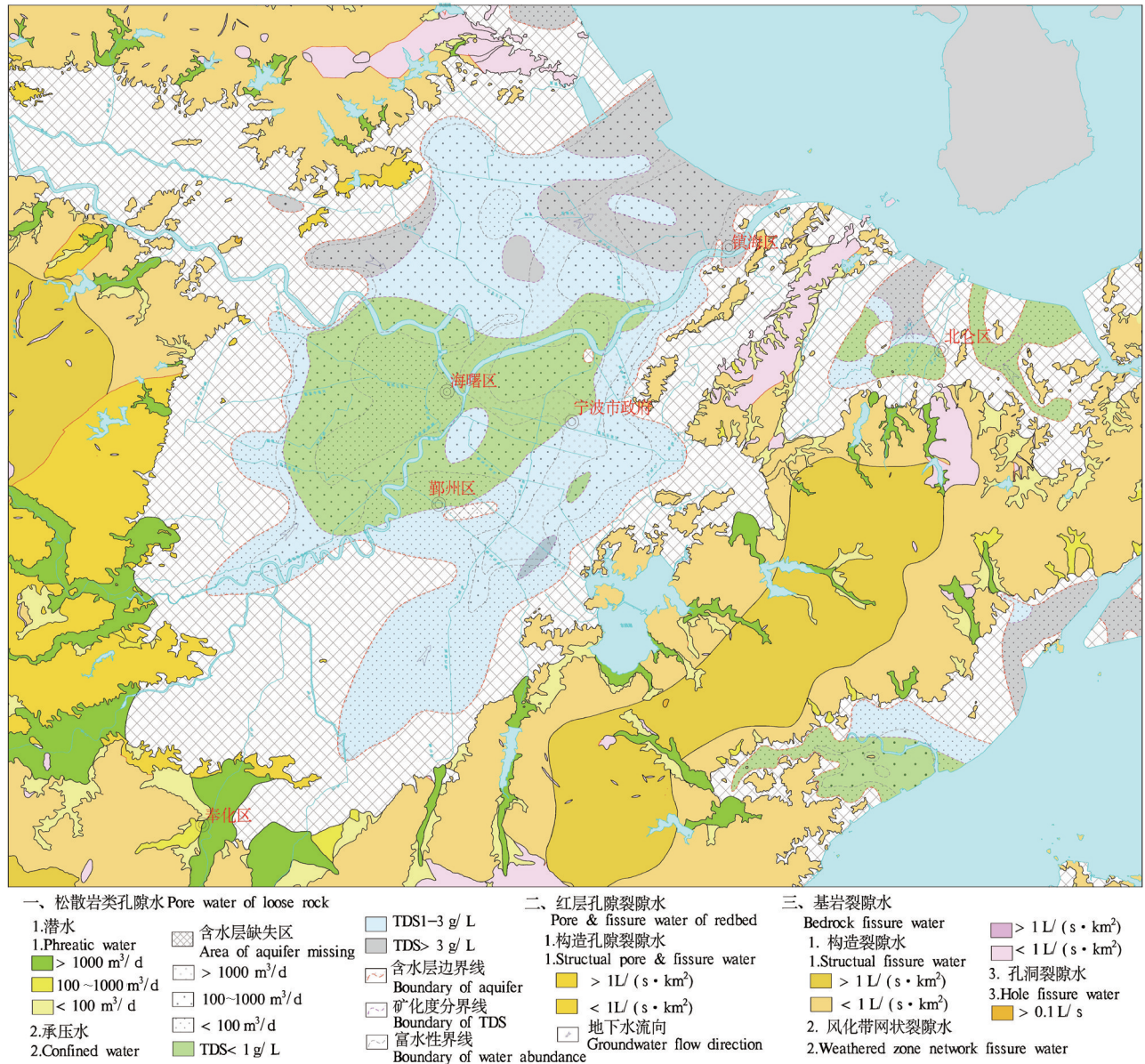


图2 宁波平原水地质图
Fig.2 Hydrogeological map of study area

县江、剡江、鄞江、奉化江、姚江等依次汇入甬江，东流入海。

2.2 水文地质条件

宁波平原出露地层主要为白垩系火山-沉积岩系，零星出露下侏罗统火山岩和上新统玄武岩。第四纪地层广泛分布，主要由海积作用形成，后期受冲积、湖沼积等外动力作用影响，地层厚度由南部及周边向滨海方向逐渐增大，由河谷地段的30~40 m递增至滨海地带的100~120 m，岩性、岩相也由简单结构变为海陆相地层叠置的复杂结构。

复杂的沉积环境导致含水岩组层次划分多元化。根据赋存规律和埋藏条件，宁波平原地下水分为松散岩类孔隙水、红层孔隙裂隙水和基岩裂隙水(图2)，自上而下划分为4个含水层组(图3)：(1)孔隙潜水含水层组，主要由全新统、上更新统冲积、洪冲积、坡洪积砂砾石、含黏性土砂砾石组成，二元结构明显，呈条带状分布于低丘沟谷及平原区，厚度3~12 m；(2)第I承压含水层组，以上更新统冲积含砾砂、粉细砂及砾石为主，由于沉积演化复杂，该含水层又被冲湖相黏性土分隔为I₁、I₂两层，二者

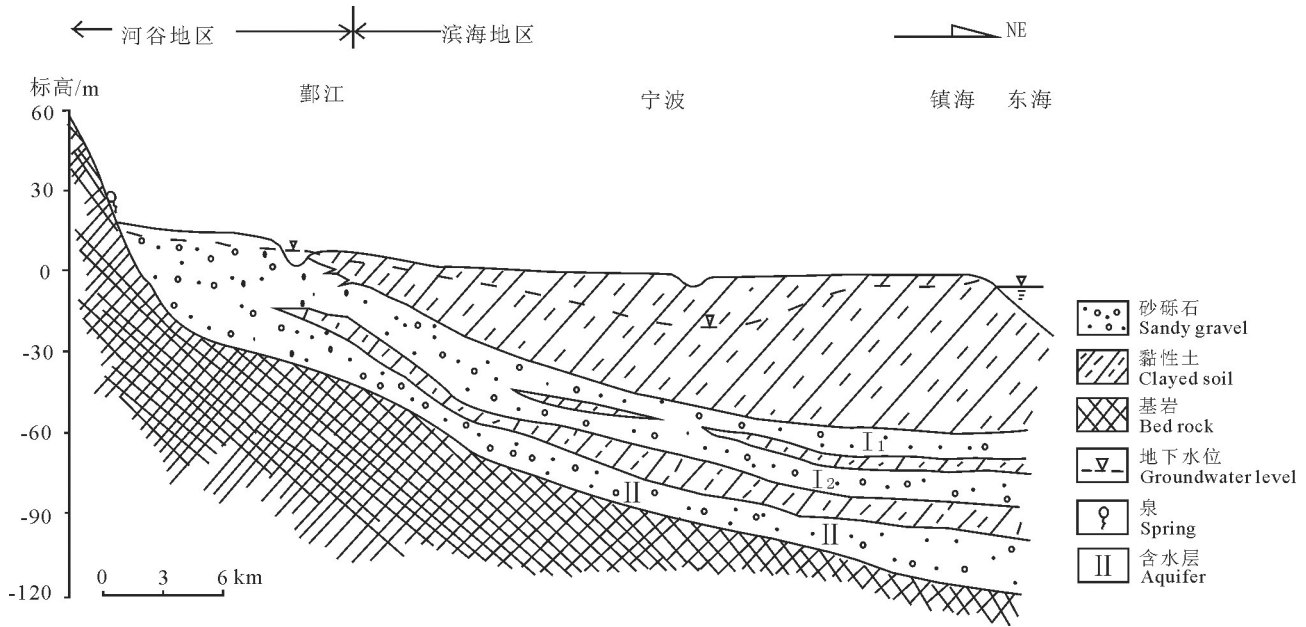


图3 宁波平原含水层剖面示意图
Fig.3 Schematic diagram of aquifer profile in Ningbo Plain

厚度相当,局部存在水力联系,但 I_2 层岩性粒度要粗于 I_1 层;(3)第II承压含水层,岩性为中更新统冲积砂砾石、含砾中粗砂,厚度0.5~27.30 m,顶板埋深由上游向下游逐渐增大;(4)基岩裂隙含水层组,主要由晚侏罗世火山岩、潜火山岩、燕山晚期酸性一中酸性侵入岩等组成,裂隙普遍不发育,水量贫乏,局部断裂带附近裂隙涌水量相对较大。

3 样品采集与测试方法

为揭示研究区地下水演化的阳离子交换、水岩相互作用等水文地球化学过程,按照中国地质调查局《地下水污染地质调查评价规范(DD2008-01)》的要求,以“先调查,后采样”为原则,充分利用以往机(民)井、监测井和本次施工钻孔,对研究区代表性的地表水点和井点进行取样。地表水采集于宁波平原甬江、奉化江、姚江、鄞江、剡江等主干河流水面以下0.5 m左右,实现由上游至下游全覆盖;孔隙潜水以民井为主,受客观条件限制,城区样点密度较村镇略小;孔隙承压水以现存监测井和施工钻孔为主。现场均采用便携式GPS对采样点坐标进行准确定位,并记录包气带岩土体特征、采样井类型及周边环境等信息。采样前先抽水一段时间,去除井中滞留水。本次共采集水样134组,其中,地表水样35组,潜水样57组,I承

压水21组,II承压水21组。

样品测试工作由国土资源部华东矿产资源监督检查中心完成,测试指标包括 Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 、 HCO_3^- 、 SO_4^{2-} 等常规离子,其中: Na^+ 、 K^+ 测试采用火焰原子吸收分光光度法(GFU-202); Cl^- 、 SO_4^{2-} 测试采用离子色谱法(HLC-601); Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 测试采用EDTA滴定法; HCO_3^- 、 CO_3^{2-} 测试采用酸碱滴定法。考虑到水样运输过程中溶解性总固体(TDS)、水温等指标会随时间发生变化,因此采用SMARTROLL多参数水质分析仪在现场完成测试。

4 研究结果与分析

在系统采样、科学测试的基础上,利用SPSS统计软件和AquaChem水化学软件,综合统计性描述、相关性分析、离子比例系数和Piper三线图等方法,全面系统地研究水化学特征及其演化规律,揭示影响地下水水质变化的主要水化学过程。

4.1 水化学组分描述性统计分析

水化学特征是建立在对相关水化学组分进行描述性统计分析基础上的,应用SPSS 25软件对研究区33组地表水样、57潜水样、21组I承压水样和21组II承压水样相关水化学参数进行特征值统计分析(表1)。

表1 宁波平原水化学参数特征值统计

Table 1 Statistics of hydrochemical parameters in Ningbo Plain

		TDS	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺
地 表 水	最小值	32.00	12.00	5.83	4.05	2.65	0.69	2.96	0.77
	最大值	317.13	109.61	68.14	61.99	41.16	9.66	44.80	11.23
	平均值	143.06	52.19	26.62	21.02	18.13	4.67	17.25	5.22
	标准偏差	84.22	24.12	20.24	17.79	10.40	2.81	12.87	3.26
	变异系数/%	58.87	46.22	76.02	84.62	57.37	60.16	74.62	62.53
潜 水	最小值	55.27	18.00	2.57	4.52	6.13	1.42	5.00	1.44
	最大值	1050.00	721.00	154.00	287.00	141.00	55.20	226.00	48.10
	平均值	300.55	163.13	24.32	44.68	33.26	11.21	39.59	13.70
	标准偏差	241.68	152.60	24.98	61.40	22.59	13.29	46.29	13.30
	变异系数/%	80.41	93.55	102.73	137.41	67.94	118.51	116.93	97.12
I 承 压 水	最小值	620.00	36.49	9.99	156.80	2.88	28.51	110.99	4.20
	最大值	13540.0	731.48	299.05	8453.13	468.17	841.79	4149.90	74.11
	平均值	4289.76	341.99	35.18	2472.49	184.34	197.28	1235.95	18.90
	标准偏差	3649.24	172.00	60.92	2270.09	105.77	172.90	1280.71	17.11
	变异系数/%	85.07	50.29	173.14	91.81	57.38	87.64	103.62	90.51
II 承 压 水	最小值	410.00	58.95	9.72	44.80	12.66	29.00	15.80	1.25
	最大值	4620.00	596.00	343.21	2557.51	407.00	245.00	1042.38	12.10
	平均值	1462.00	351.48	39.57	705.92	173.64	103.26	260.96	5.27
	标准偏差	1135.72	122.94	70.61	698.87	108.47	62.28	236.87	3.36
	变异系数/%	77.68	34.98	178.43	99.00	62.47	60.31	90.77	63.89

注:最大值、最小值、平均值的单位均为 mg/L。

统计结果表明:潜水和地表水的溶解性总固体(TDS)平均值小于1000 mg/L,以淡水为主,潜水仅1组为微咸水,承压水TDS平均值远大于1000 mg/L,以咸水为主。

在离子含量方面,地表水各离子质量浓度明显小于地下水,潜水HCO₃⁻质量浓度的平均值最大,其次为Cl⁻、Na⁺、Ca²⁺,承压水以Cl⁻质量浓度的平均值为最大,其次为Na⁺、HCO₃⁻。研究区水体由淡水到咸水,各主要离子组分含量均增加(图4)。

变异系数(Cv)表征变量变幅和稳定性的特征,变量变幅越小,稳定性越强,Cv值越小,反之亦然(孙岐发等,2020)。地下水变异系数明显大于地表水,潜水Cl⁻、Mg²⁺、Na⁺变异系数明显大于I承压水和II承压水,说明潜水该组分稳定性比承压水差,影响其形成和演化的因素更复杂。I承压水和II承压水各离子组分整体变异系数相差不大,SO₄²⁻变异系数最大,推测与宁波平原局部地区富含芒硝和石膏等盐岩有关。需要说明的是,本次地表水样品35组,靠近入海口的2组地表水(TDS分别为11797.66 mg/L和20974.4 mg/L)未计入统计,甬江为感潮河,海水可沿河道上

溯,与上游汇集的淡水发生混合导致其TDS高异常,不利于反映研究区地表水整体特征。

4.2 相关性分析

利用各离子之间的相关性分析,可以更好地揭示水化学特征,识别水中各离子来源的一致性和差异性(孙厚云,2018;刘裕等,2019)。运用统计学软件SPSS 25,对研究区四种类型的水样进行Pearson相关分析,得到各组分相关系数矩阵,如表2所示。

由表2可知,地表水各组分离子之间相关性非常显著且相差较小,说明其补给源单一,水化学反应简单,地下水组分与Cl⁻相关性明显强于其他离子之间的相关性。地表水和潜水TDS与各离子之间具有良好的正相关性,而承压水却存在负相关性。潜水TDS与HCO₃⁻、Na⁺相关性最强,地表水和承压水TDS与Cl⁻、Na⁺相关性最强,承压水TDS与HCO₃⁻、SO₄²⁻呈现负相关性,说明地表水和承压水在一定程度上受海水影响显著。

4.3 水化学类型分析

研究区背山面海,地质条件相对复杂,按照舒卡列夫分类法,可划分为23种水化学类型(表3),其

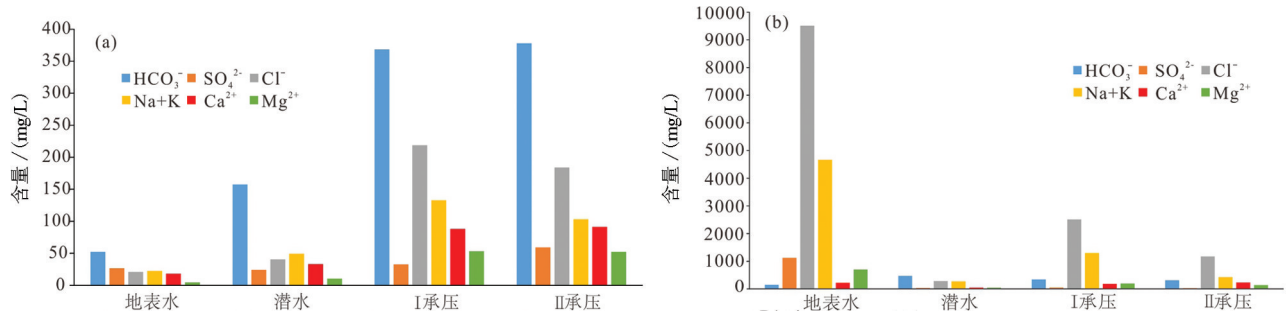


图4 淡水离子(a)和咸水离子(b)组分含量对比图
Fig.4 Contrast diagram of ions content between salinity and fresh water

分类丰富度由大到小依次是地表水、潜水、I承压水和II承压水,这与前文不同类型水中离子组分变异系数变化趋势基本一致。其中,地表水以18-A、4-A和11-A号水为主,即HCO₃⁻·SO₄²⁻·Cl⁻·Na⁺·Ca²⁺型、HCO₃⁻·Na⁺·Ca²⁺型和HCO₃⁻·SO₄²⁻·Na⁺·Ca²⁺型,分别占比40.00%、31.43%、14.29%;潜水以4-A、25-A、11-A号水为主,即HCO₃⁻·Na⁺·Ca²⁺型、HCO₃⁻·Cl⁻·Na⁺·Ca²⁺型、HCO₃⁻·SO₄²⁻·Na⁺·Ca²⁺型,占比分别为40.35%、26.32%、14.04%;I承压水主要为49-B、44-B、47-B号水,即Cl⁻·Na⁺型、Cl⁻·Ca²⁺·Mg²⁺型、Cl⁻·Na⁺·Ca²⁺·Mg²⁺

型,分别占比33.33%、19.05%、14.29%;II承压水主要为26-A、47-B、44-A号水,即HCO₃⁻·Cl⁻·Na⁺·Ca²⁺·Mg²⁺型、Cl⁻·Na⁺·Ca²⁺·Mg²⁺型、Cl⁻·Ca²⁺·Mg²⁺型,分别占比33.33%、19.05%、9.52%。

为了更直观地看出各离子的相对含量,分析研究区水化学趋势和演变规律,本文利用AquaChem软件绘制不同类型水样的Piper三线图。由图5可知:(1)地表水和潜水中,阴离子以HCO₃⁻和Cl⁻为主,阳离子以Na⁺为主,Ca²⁺次之。(2)沿径流方向,呈现一定渐变规律:山前补给区径流条件好,水资源

表2 宁波平原水化学参数相关性系数矩阵
Table 2 Correlation matrices of hydrochemical parameters in Ningbo Plain

	地表水								潜水							
	TDS	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	TDS	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺
TDS	1	0.855**	0.958**	0.960**	0.969**	0.950**	0.967**	0.948**	1	0.946**	0.442**	0.923**	0.774**	0.903**	0.965**	0.719**
HCO ₃ ⁻		1	0.759**	0.718**	0.910**	0.854**	0.747**	0.856**		1	0.304*	0.790**	0.759**	0.899**	0.888**	0.655**
SO ₄ ²⁻			1	0.965**	0.918**	0.941**	0.960**	0.919**			1	0.383**	0.713**	0.162	0.351**	0.381**
Cl ⁻				1	0.900**	0.905**	0.979**	0.898**				1	0.573**	0.869**	0.959**	0.626**
Ca ²⁺					1	0.943**	0.899**	0.904**					1	0.535**	0.617**	0.598**
Mg ²⁺						1	0.900**	0.915**						1	0.905**	0.515**
Na ⁺							1	0.939**							1	0.635**
K ⁺								1								1
	I承压水								II承压水							
	TDS	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	TDS	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺
TDS	1	-0.440*	0.344	0.996**	0.336	0.652**	0.975**	0.670**	1	-0.269	-0.227	0.995**	0.903**	0.887**	0.955**	0.775**
HCO ₃ ⁻		1	-0.347	-0.471*	-0.288	-0.450*	-0.374	-0.240		1	-0.178	-0.317	-0.300	-0.192	-0.217	-0.226
SO ₄ ²⁻			1	0.376	0.103	0.126	0.336	0.160			1	-0.256	-0.173	-0.224	-0.194	0.177
Cl ⁻				1	0.363	0.683**	0.965**	0.684**				1	0.914**	0.903**	0.944**	0.780**
Ca ²⁺					1	0.824**	0.130	0.444*					1	0.856**	0.793**	0.742**
Mg ²⁺						1	0.488*	0.793**						1	0.823**	0.790**
Na ⁺							1	0.587**							1	0.751**
K ⁺								1								1

注:**表示在0.01级别(双尾),相关性显著;*表示在0.01级别(双尾),相关性显著。

表3 宁波平原水化学类型舒卡列夫分类

Table 3 Shukalev classification of hydrochemistry types in Shukalev in Ningbo Plain		地表水		潜水		I 承压水		II 承压水		
化学类型	阴离子类型	阳离子类型	个数	比例	个数	比例	个数	比例	个数	比例
1-A		Ca			1	1.75%				
2-A		CaMg			1	1.75%				
4-A	HCO ₃ ⁻	NaCa	11	31.43%	23	40.35%				
5-A		NaCaMg	1	2.86%	1	1.75%			1	4.76%
7-A		Na							1	4.76%
11-A		NaCa	5	14.29%	8	14.04%				
12-A	HCO ₃ SO ₄	NaCaMg							1	4.76%
18-A		NaCa	14	40.00%	2	3.51%				
19-A	HCO ₃ SO ₄ Cl	NaCaMg			1	1.75%				
25-A		NaCa	1	2.86%	15	26.32%	2	9.52%	1	4.76%
26-A		NaCaMg					1	4.76%	7	33.33%
27-A	HCO ₃ Cl	NaMg			3	5.26%			1	4.76%
28-A		Na			2	3.511%				
42-A	SO ₄ Cl	Na	1	2.86%						
44-A		CaMg					1	4.76%	2	9.52%
47-A		NaCaMg							1	4.76%
44-B		CaMg					4	19.05%		
46-B		NaCa							1	4.76%
47-B	Cl	NaCaMg					3	14.29%	4	19.05%
48-B		NaMg					1	4.76%		
49-B		Na	1	2.86%			7	33.33%	1	4.76%
44-C		CaMg					1	4.76%		
49-C		Na	1	2.86%			1	4.76%		

交替迅速,滞留时间短,HCO₃⁻和Cl⁻为主,阳离子以Na⁺为主,Ca²⁺占优势;平原径流区地势降低,水流变缓,以HCO₃⁻、SO₄²⁻和Na⁺、Ca²⁺为主,至下游滨海平原排泄区,以Cl⁻和Na⁺为主,距离东海最近的2个地表水点TDS高达11797.66 mg/L和20974.4 mg/L,海水潮汐上溯对地表水的直接影响远大于潜水,潜水主要受溶滤作用和蒸发作用的影响。(3)承压水埋藏深度相对大,径流交替迟缓,成因复杂,不具备图5a所示上游—下游的离子变化规律,I承压水和II承压水Cl⁻均占绝对优势,II承压水呈现HCO₃⁻-Ca类趋势,而I承压水呈现Cl⁻-Na类趋势(图5b)。

4.4 离子比例系数分析

在水的化学成分中,各种组分之间的含量比例系数常被用来研究某些水文地球化学问题(王冬等,2014),不同成因或不同条件下形成的地下水,其离子比例系数有明显的差异(章光新等,2006),通过离子比例系数可以了解地下水化学特征形成的主要

作用及影响因素。

Na⁺与Cl⁻之间毫克当量比值是地下水的成因系数,表征水中钠离子富集程度,当 $\gamma_{Na^+}/\gamma_{Cl^-} < 1$ 时,表示硅酸盐溶解为主,当 $\gamma_{Na^+}/\gamma_{Cl^-} > 1$ 时,表示以岩盐溶解为主。由图6a可知,地表水和潜水样点比值位于1:1线之上,说明 $\gamma_{Cl^-} < \gamma_{Na^+}$,地下水在径流过程中溶滤风化的岩盐,钠离子相对富集。承压水样点比值位于1:1线之下,表示硅酸盐溶解,与研究区承压含水层主要由硅酸盐和铝硅酸盐矿物组成有关,但此含水层不足以提供远高于地表水和潜水的NaCl,I承压水的 $\gamma_{Na^+}/\gamma_{Cl^-}$ 系数主要为0.45~0.76,II承压水的 $\gamma_{Na^+}/\gamma_{Cl^-}$ 系数主要为0.42~0.93,说明承压水受变质封存海水影响(王怀颖等,1990;王冬等,2014),I承压水影响更为明显,这与前人在该地层发现海相有孔虫、牡蛎化石等相吻合。四种类型水的 $\gamma_{Na^+}/\gamma_{Cl^-}$ 随TDS的增加而逐渐减小(图6b)。

$\gamma_{(SO_4^{2-}+Cl^-)}$ 与 $\gamma_{HCO_3^-}$ 的比值反映地下水中化

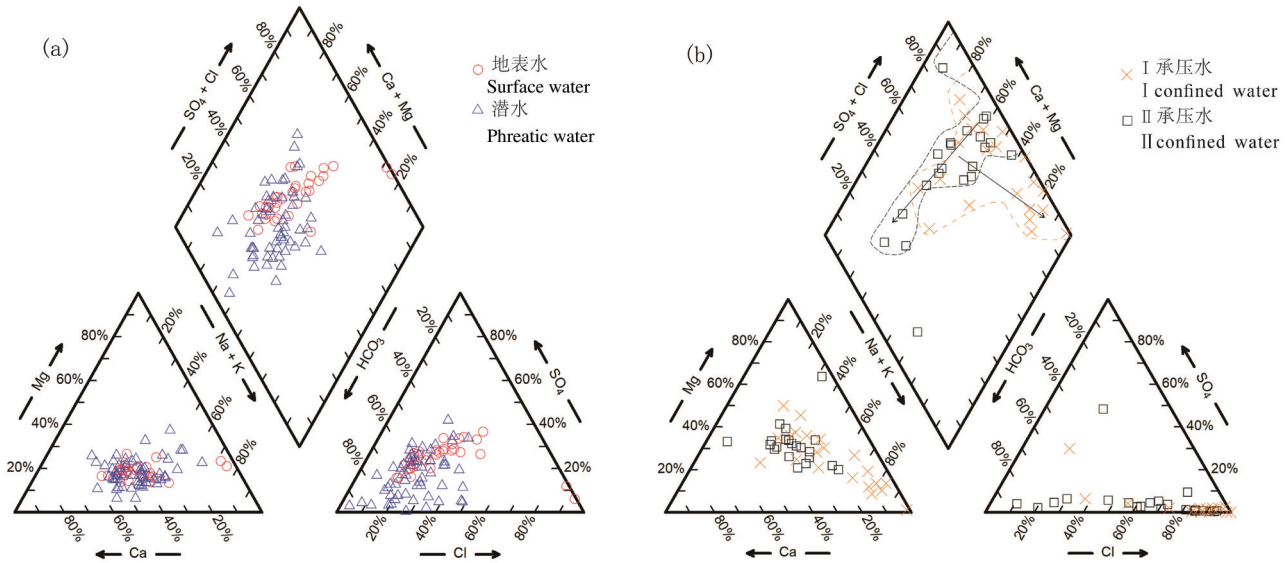


图5 水化学Piper三线图
Fig.5 Hydrochemical Piper three-line map

学成分的主要来源,当 $\gamma(\text{SO}_4^{2-}+\text{Cl}^-)/\gamma\text{HCO}_3^- > 1$ 时,地下水中化学成分主要是来自蒸发岩的溶解,当 $\gamma(\text{SO}_4^{2-}+\text{Cl}^-)/\gamma\text{HCO}_3^- < 1$ 时,地下水中化学成分主要是来自碳酸盐的溶解。由图6c可知,地表水和潜水位于1:1线下方,水中化学成分主要来源于碳酸盐溶解,而承压水则多位于1:1线上方,与地表水、潜水明显不同。

地下水中的 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 主要是来自碳酸盐或硅酸盐、蒸发岩的溶解,因此可以用 $(\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+})$ 与 $(\text{HCO}_3^-+\text{SO}_4^{2-})$ 之间的毫克当量比值来判断 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 的主要来源。由图6d可知,地表水和潜水样点接近值线1:1,表明主要补给源为大气降水,水中 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 主要来源于硅酸盐和蒸发岩的溶解,右上角2组地表水样点受海水影响明显。承压水位于1:1线之上,其中 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 主要是来自碳酸盐的溶解。当 $\text{TDS} > 800 \text{ mg/L}$ 时,潜水钙镁离子含量开始下降,而承压水钙镁离子含量下降开始于 $\text{TDS} > 4000 \text{ mg/L}$,说明浅层水和深层水化学特征差异明显(图6e、f)。

4.5 氢氧同位素特征

为研究地表水、潜水和承压水之间关系,进而分析影响其水化学特征的原因,选择代表性样点进行氕氧同位素测试并绘制各水体 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 关系图(图7a),水体由浅表至深层,重同位素呈现贫化趋势(表4)。由于研究区缺乏降水稳定同位素的长期

监测资料,本文选取距离研究区最近的同位素观测网(IAEA-GNIP)南京站点的监测值代表研究区的大气降水氢氧稳定同位素特征,当地大气降水线方程取 $\delta^2\text{H}=8.49\delta^{18}\text{O}+17.71$ (许乃政等,2015)。

地表水样点落在当地降水线右下方,说明径流过程中受到一定程度的蒸发作用影响,沿径流方向受海水影响也逐渐增大,呈现沿流向逐渐富集的趋势,奉化江流域由于蒸发富集,靠近上游的样点重同位素较为贫化,下游附近的样点重同位素较为富集(图7b)。甬江属于感潮河,在潮汐作用下,该段地表水与海水混合度高,重同位素较其他地表水样品更为富集。

潜水的 δD 、 $\delta^{18}\text{O}$ 值从上游到下游并未呈现出明显的富集趋势,与地表水的同位素特征有所不同。潜水的 δD 、 $\delta^{18}\text{O}$ 值位于当地降水线附近,鄞江沟谷区潜水重同位素最为贫乏,剡江沟谷区最为富集,县江沟谷区介于二者之间(图7c),说明潜水主要为大气降水入渗补给,鄞江沟谷区地下水循环系统的循环速率较快,潜水和地表水接受大气降水之后,其互补互排速率快、蒸发量小;而剡江沟谷区的水循环速率较慢,潜水在接受大气降水/地表水的补给之后,滞留时间较长,重同位素的蒸发富集效应明显。

I承压水和II承压水样点的 $\delta^2\text{H}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 值均位于全球大气降水线附近(图7d),表明其形成时期为大气降水补给。根据沉积环境变迁历史分析,承压水

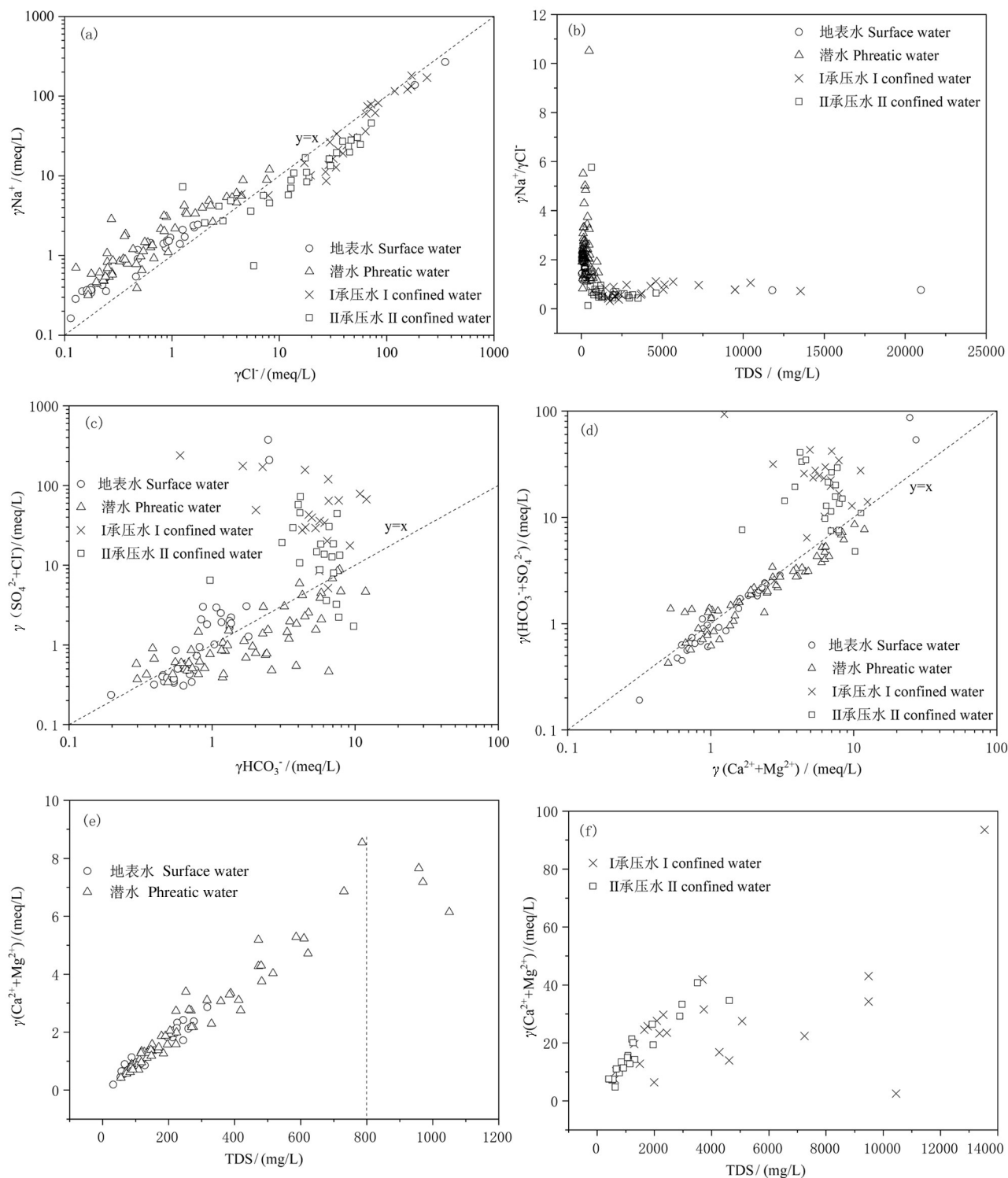


图6 宁波平原四种水离子比值图

a— $\gamma \text{Na}^+ / \gamma \text{Cl}^-$; b— $\gamma \text{Na}^+ / \gamma \text{Cl}^-$ vs. TDS; c— $\gamma (\text{SO}_4^{2-} + \text{Cl}^-)$ vs. $\gamma (\text{HCO}_3^-)$; d— $\gamma (\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-})$ vs. $\gamma (\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})$; e, f—TDS vs. $\gamma (\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})$

Fig.6 Ion ratio diagram of four types water in Ningbo Plain

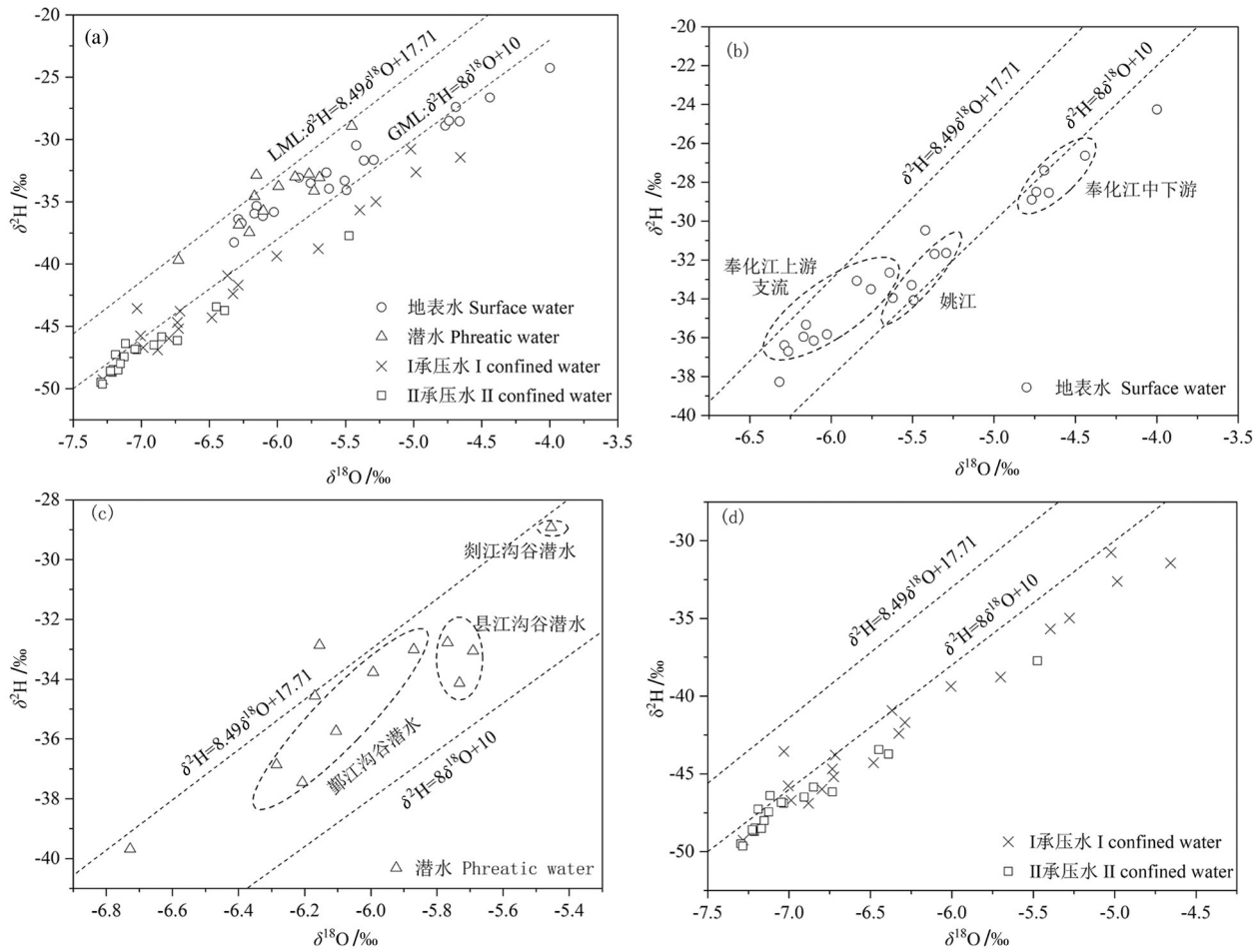


图7 宁波平原水体 $\delta^2\text{H}-\delta^{18}\text{O}$ 关系图

a—各水体; b—地表水; c—典型潜水; d—承压水

Fig.7 Relationship between $\delta^2\text{H}-\delta^{18}\text{O}$ of water in Ningbo Plain

a—All kinds of water; b—Surface water; c—Typical phreatic water; d—Confined water

可能形成于晚更新世初期和中期(阎葆瑞等, 1992),推测二者都受到了更新世和全新世海侵的影响,为更新世古淡水、更新世海水、全新世海水和现代水的混合。I 承压水比 II 承压水富集重同位素,也反映出 I 承压水受到海侵影响比 II 承压水更为强烈。

5 讨论

5.1 生态环境效应

从上述分析可以看出宁波平原水资源的水化学现状:地表水和潜水以淡水为主, I 承压和 II 承压水以微咸水、咸水为主,仅局部地区分布承压淡

表4 宁波平原水体氧同位素特征统计

Table 4 Statistics of $\delta^2\text{H}$ and $\delta^{18}\text{O}$ characteristic of water in Ningbo Plain

特征值	地表水		潜水		I 承压水		II 承压水	
	^{18}O	D	^{18}O	D	^{18}O	D	^{18}O	D
最大值	-3.999	-24.262	-5.455	-28.918	-4.657	-30.767	-5.474	-37.724
最小值	-6.318	-38.270	-6.728	-39.68	-7.282	-49.260	-7.296	-49.645
平均值	-5.480	-34.399	-6.01317	-34.3991	-6.23305	-41.2372	-6.95174	-46.7539

注:最大值、最小值、平均值的单位均为‰。

表5 宁波平原承压水TDS统计

Table 5 Statistics of total dissolved solid of confined water in Ningbo Plain

TDS	<1 g/L		1~3 g/L		3~10 g/L		>10 g/L	
	样品数	占比	样品数	占比	样品数	占比	样品数	占比
I 承压水	2	9.52%	9	42.86%	8	38.10%	2	9.52%
II 承压水	9	42.86%	10	47.62%	2	9.52%	0	0.00%

水体。宁波市有开发利用价值的地下水主要有河谷孔隙潜水、孔隙承压水和基岩裂隙水(侯艳声等, 2018)。承压水作为水资源的重要组成部分,人为活动干预下开发利用必然会改变其演化进程,影响生态环境。过量开采地下水会引起地裂缝、地面沉降等环境地质问题(杨勇等, 2013)。地下水位过高会导致土壤盐渍化、沼泽化,进而影响植被生长(张长春等, 2003)。长期服用TDS过高的地下水,严重者引发泌尿系统结石、胃肠道疾病、心脑血管硬化等疾病,影响人体健康。

本次样品中, I 承压水 47.6%为咸水, 42.9%为微咸水, 淡水仅占 9.52%, II 承压水 42.86%为淡水, 47.62%为微咸水, 咸水占 9.52%(表 5), 干旱年份, 承压咸水用于灌溉或饮用必然对植被或人体健康造成不利影响。

宁波平原承压水开采始于 20 世纪 30 年主城区, 至 80 年代中期达到大规模开采, 引起地面沉降等环境地质问题。从图 8 可以看出承压水生态环境

变化: I 承压淡水体分布在城区西侧的芦港—秀丰—古庵—薛家一带, 面积约为 30.5 km², 与 20 世纪 70 年代相比, I 承压咸淡水分布无明显变化。II 承压淡水体现今分布范围以宁波城区为中心, 南起栎社机场, 北至谢家—压赛—清水浦, 西至高桥—集仕港—古林, 东抵梅墟—邱隘, 面积约为 184.1 km², 分布范围较 20 世纪 70 年代出现不同程度的变化, 特别是宁波东边西侧的奉化江右岸以及庄市街道甬江左岸部分区域受早期人为开采地下水影响已由淡水演变为咸水, 整体分布面积也较彼时增加约 12 km²。

5.2 效应形成原因

上更新世初期(Qp¹), 河流堆积局限于宁波平原中部、北部, 山前和沟谷地带仍有洪积和冲洪积山前堆积物, 冲积层间厚度较大, 隔水性良好的湖相地层, 将上更新统初期(Qp¹)和中期(Qp²)的两套冲积层分成 I 承压含水层组和 II 承压含水层组, 当时, 宁波远离海岸线, 是江河横溢、湖沼遍地的淡水沉积环境, 地下水与陆相地层同时形成并充填于孔

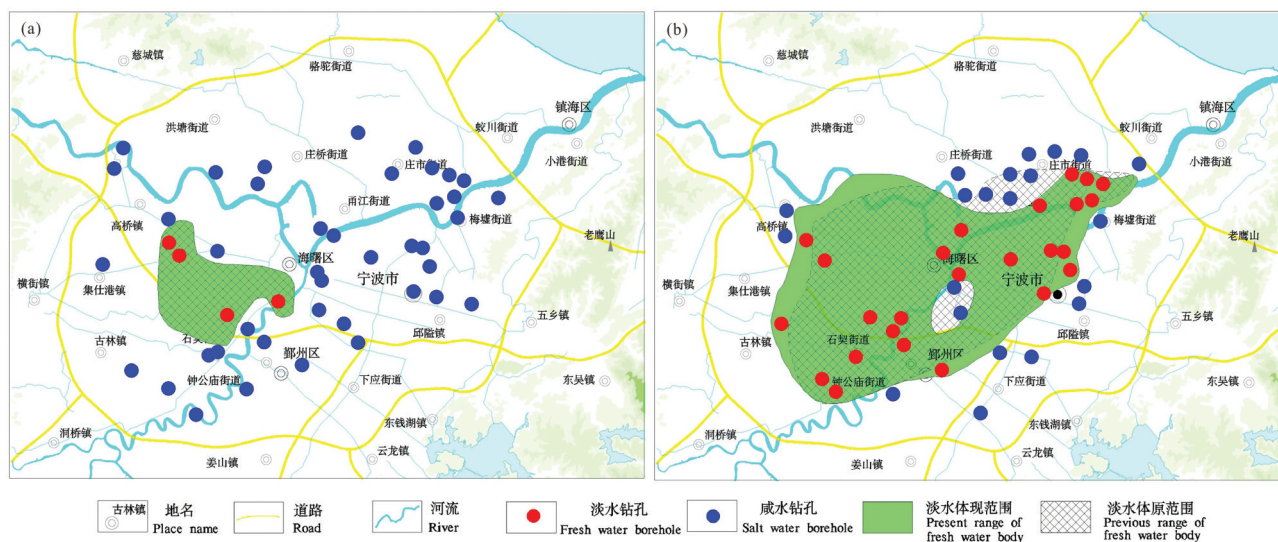


图8 宁波主城区承压水淡水体演化图

a—第 I 承压淡水体; b—第 II 承压淡水体

Fig.8 Revolution of confined water body in Ningbo urban area

a- I nonfinned fresh water; b- II confined fresh water

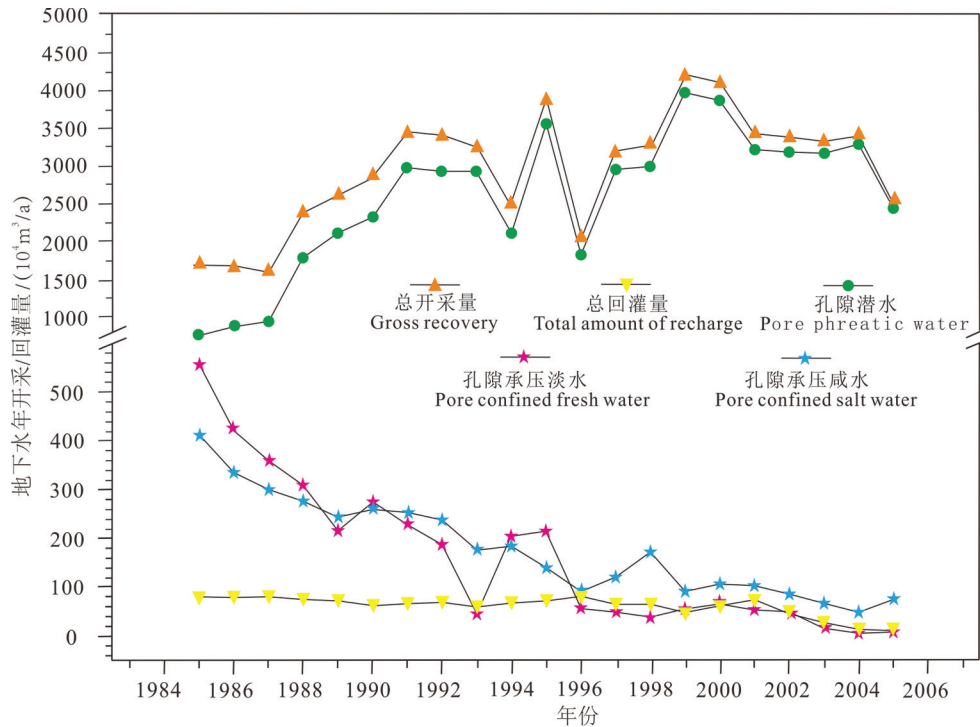


图9 宁波城区地下水开采和回灌量

Fig.9 The number of groundwater mining and artificial recharge in Ningbo urban area

隙介质中。上更新世中期末至晚期,第一次海侵波及宁波平原中部和北部,全新世中期,第二次海侵达到极盛,浸没了整个宁波平原和山麓沟谷地带,宁波平原水体,特别是循环更新较慢的承压水,受海侵影响明显,从上文水化学离子特征的分析也可看出承压水仍保留海侵迹象,但其直接的古生物证据和地层年代证据还需进一步工作获取。

针对地面沉降和承压水以咸为主问题,宁波市高度重视,加强了对地下水开采量控制和人工回灌工作(图9),2002年以来,随着纺织、化工等部分企业搬迁、倒闭,加上政府部门对地下水开采的严格控制,地下水开采井减少,宁波城区于2007年实行地下水禁限采(侯艳生等,2017),对保护承压淡水体起到了积极促进作用,推动了宁波平原水生态环境效应正向发展。Ⅱ承压淡水体分布范围内出现“孤岛状”咸化,推测其原因是早期成井工艺落后,Ⅰ、Ⅱ承压水混合开采或止水不良造成上层咸水混入下层淡水体。

6 结论

(1) 宁波平原地表水和潜水以淡水为主,从上

游沟谷补给区至下游滨海平原排泄区,水质呈变劣咸化趋势,Ⅰ承压水和Ⅱ承压水以微咸水、咸水为主,淡水仅局部存在,建议正常工农业生产以合理利用地表水和沟谷区潜水为主。

(2) 地下水各离子质量浓度明显大于地表水,潜水中占主导地位的依次为 HCO_3^- 、 Cl^- 、 Na^+ 和 Ca^{2+} ,地表水和承压水中依次为 Cl^- 、 Na^+ 、 HCO_3^- ,4种水共划分23种水化学类型,复杂程度依次为Ⅱ承压水、潜水、Ⅰ承压水、地表水,建议结合古生物地层学、同位素年代学、离子理化性质等深入研究其成因。

(3) 地表水和潜水主要受大气降水影响,承压水最初形成时期受大气降水影响,地壳抬升沉积埋藏后受伴随的第四纪海侵影响较大,与浅表水体天然联系不密切,宁波城区深层地下水以封存型为主,建议在丰水期逐年将浅表淡水回灌入深部目的层位,优化深层水质。

(4) 在人类活动和水体自然循环影响下,宁波平原承压水生态环境效应趋于正向发展,虽然Ⅱ承压淡水体出现孤岛状咸化,但淡水体面积较20世纪70年代扩增了约 12 km^2 ,建议将深层淡水体作为宁波城区的应急水源地,并加强现有监测井的维护使

用,力保宁波地下水生态环境优良,同时,备用作为干旱特殊年份的应急取水通道。

致谢:论文审稿过程中匿名专家及编辑提出建设性的修改意见,对提升论文质量起到了重要作用,在此一并表示诚挚的感谢。

Reference

- Adams S, Titus R, Pietersen K, Tredoux G, Harris C. 2001. Hydrochemical characteristics of aquifers near Sutherland in the Western Karoo, South Africa[J]. *Journal of Hydrology*, (24): 91–103.
- Chinese Academy of Science. 2018. Chinese Discipline Development Strategy, Groundwater Science[M]. Beijing: Science Press (in Chinese).
- Chen Qian, Zhong Jinxian, Li Changshun. 2012. Application of mathematical statistics methods on the study of hydrogeochemistry for the shallow groundwater[J]. *Geoscience*, 26(3): 607–613 (in Chinese with English abstract).
- Fu Changchang. 2012. The Hydrochemical Characteristics and Processes for Salinity Sources of the Deep Confined Groundwater in the Coastal Plain of Huai River Basin[D]. Changchun: Jilin University (in Chinese with English abstract).
- Hou Yansheng, Hu Xinfeng, Zhao Tuanzhi. 2018. Study on developing potential and protection countermeasures of fresh underground water resources in Ningbo under emergency condition[C]// Geological Work Promoting Ecological Civilization Construction—2018 Conference of Geological Society of Zhejiang Province(in Chinese with English abstract).
- Hou Yansheng, Hu Xinfeng, Zhao Tuanzhi. 2017. Characteristics and protection countermeasures of the groundwater environment in Ningbo City[J]. *Shanghai Land & Resources*, 38(4): 69–74 (in Chinese with English abstract).
- Huang Yaoyi, Su Jianyun. 2014. Analysis on the hydrochemical characteristics of shallow groundwater and cause of formation using GIS and mathematical statistics in Jinjiang[J]. *Journal of Jilin Normal University (Natural Science Edition)*, 35(2): 145–152 (in Chinese with English abstract).
- Jin Yang, Jiang Yuehua, Zhou Quanping, Lei Ting, Jia Junyuan, Yang Guoqiang. 2021. Evolution characteristics and genesis of shallow groundwater in Lücheng area of Danyang City[J]. *East China Geology*, 42(4): 475–482 (in Chinese with English abstract).
- Li Guoli, Zhou Kaie, Zhang Qing, Yuan Hongwu. 2018. The application of a joint numerical simulation system of surface water and groundwater in optimized management of Fuyang water resources[J]. *East China Geology*, 39(3): 234–240 (in Chinese with English abstract).
- Liu Ruiping, Xu Youning, Kang Wenting. 2019. Based on phreeqc and netpath joint inversion hydrology geochemistry process: Example for the Xiaqingling Tianyu reservoir[J]. *Northwestern Geology*, 52(1):243–247 (in Chinese with English abstract).
- Liu Wenbo, Gao Cunrong, Liu Bin, Chen Youjian. 2010. Hydrochemical constituents and correlation analysis of shallow groundwater in the Hetao Plain[J]. *Geology in China*, 37(3): 816–823 (in Chinese with English abstract).
- Liu Yingchao, Liu Kai, Sun Ying, Liu Jiurong, Guo Gaoxuan. 2015. Hydrochemical characteristics and isotope analysis of geothermal water in Liangxiang geothermal field[J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 13(5): 963–967, 994 (in Chinese with English abstract).
- Liu Yu, Lu Chenming, Ma Rong. 2019. Source discrimination analysis of iron ions in groundwater of Jidong Plain[J]. *Geological Survey and Research*, 42(2): 135–142 (in Chinese with English abstract).
- Lu Xurong, Zhou Aiguo, Wang Maoting, Yang Lei, Lu Hua. 2010. Characteristic analysis of phreatic water equality evolution by Piper diagram in Huaihe river drainage area, Jiangsu Province[J]. *Geotechnical Investigation & Surveying*, 38(2): 42–47 (in Chinese with English abstract).
- Niu Zhaoxuan, Jiang Xiaowei, Hu Yunzhuang. 2019. Characteristics and causes of hydrochemical evolution of deep groundwater in the Luanhe Delta[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 46(1): 27–34 (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 Qifa, Tian Hui, Guo Xiaodong, Yu Huiming, Ma Shimin, Li Lijun. 2017. The discovery of silicic acid and strontium enrichment areas in groundwater of Changchun area, Jilin Province[J]. *Geology in China*, 44(5): 1031–1032 (in Chinese with English abstract).
- Sun Qifa, Tian Hui, Guo Xiaodong, Yu Huiming. 2019. Strontium enriched area discovered in Lianhua Mountain, Changchun[J]. *Geology in China*, 46(2): 430–431 (in Chinese with English abstract).
- Sun Qifa, Yang Ke, Sun Zhuoan, Jia Lin'an, Tian Hui, Guo Xiaodong, Li Xuguang, Zhu Wei. 2022. Characteristics of groundwater quality in Changchun New Area and its evaluation on ecological health[J]. *Geology in China*, 49(3): 834–848 (in Chinese with English abstract).
- Sun Yue, Liu Zhonggang, Hou Xiangmeng, Zhou Xun. 2019. Quality assessment for shallow groundwater in the Hefei area, Anhui Province [J]. *East China Geology*, 40(1): 76–82 (in Chinese with English abstract).
- Tiziano Boschetti. 2011. Application of brine differentiation and Langelier–Ludwig plots to fresh–to–brine waters from sedimentary basins: Diagnostic potentials and limits[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 108(2):126–130.

- Wang Dong, Hou Guangcai, Zhao Zhenhong. 2014. Division of groundwater flow system of Yanhaizi in Erdos: From the aspect of hydrochemistry[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 28(12): 122–127 (in Chinese with English abstract).
- Wang Huaiying, Yuan Zhimei. 1990. A geochemical study of groundwater in the Ningbo basin[J]. Geological Review, 36(5): 414–422 (in Chinese with English abstract).
- Wang Xiangui, Wu Qianfu, Wu Kunyu, Shen Licheng. 2011. Hydrochemical characteristics and constraints of hot springs in Dagejia geothermal field, Tibet, China[J]. Northwestern Geology, (2): 161–168 (in Chinese with English abstract).
- Xing Liting, Zhang Fengjuan, Li Changshou, Yang Lizhi, Wang Liyan. 2015. Hydrochemical characteristics of shallow groundwater in Lubei Plain [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 34 (6): 90–94 (in Chinese with English abstract).
- Xu Meijuan, Sun Dan, Tong Guihua, Li Jianxin, Yu Xiaoyi. 2017. Distribution and health risk assessment of heavy metals in inland river in eastern coastal cities in China——Take Ningbo City for example[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Nankaiensis, 50 (6): 99–104 (in Chinese with English abstract).
- Xu Naizheng, Liu Hongying, Wei Feng, Yang Hui, Ge Weiya. 2015. Study on the environmental isotope compositions and their evolution in groundwater of Yoco port in Jiangsu Province, China[J]. Acta Science Circumstantiae, 35(12): 3862–3871 (in Chinese with English abstract).
- Yan Baorui, Zhang Sheng, Zhang Zuochen. 1992. Geochemical characteristics of iron and some trace elements in groundwater in Ningbo City[C]//Bulletin. Institute of Hydrogeology and Engineering Geology CAGS (The Eighth) (in Chinese with English abstract).
- Yan Baorui, Zhang Sheng. 1992. Genesis of deep-seated fresh-water body, formation and evolution of trace elements in Ningbo basin[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 19(2):30–33 (in Chinese with English abstract).
- Yu Haotian, Ma Teng, Deng Yamin, Du Yao, Shen Shuai, Lu Zongjie. 2017. Hydrochemical characteristics of shallow groundwater in eastern Jianhan Plain[J]. Earch Science, 42(5): 685–692 (in Chinese with English abstract).
- Yang Qiaofeng, Li Wenpeng, Wang Ruijiu. 2010. Hydrogeochemistry and stable isotopes of shallow groundwater in coastal Shenzhen[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 37(5): 26–32 (in Chinese with English abstract).
- Yang Yong, Zheng Fandong, Liu Licai, Dou Yanbing, Jia Sanman. 2013. Susceptibility zoning and control measures on land subsidence caused by groundwater exploitation[J]. Geology in China, 40(2): 653–658 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Guangxin, Deng Wei, He yan, Ramsis Salama. 2006. Hydrochemical characteristics and evolution laws of groundwater in Songnen Plain, Northeast China[J]. Advances in Water Science, 17(1):20–28 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Jiangtao, Zhou Jinlong, Liang Chuan, Yin Zhong, Qian Li, Bao Zhengde. 2017. Reverse hydrogeochemical simulation of groundwater in the plain area of Yanqi Basin, Xinjiang[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 31(10): 65–70 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Quansheng, Feng Juan, An Lesheng. 2010. Shallow groundwater quality evolution in Dezhou City[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 40(5): 1075–1082 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Tuanzhi, Zheng Xianxin, Wang Lingling. 2016. Preliminary discussion of urbanized construction and urban geological work in Ningbo City[J]. Shanghai Land & Resources, 37(1): 58–61 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Zhenguo, He Jiangtao, Wang Lei, Peng Cong. 2018. Hydrochemical characteristics and evolution processes of deep groundwater in Hengshui Area[J]. Journal of Hydrology, 32(3): 565–573 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Changchun, Shao Jingli, Li Cijun, Cui Yali. 2003. Eco-environmental effects on groundwater and its eco-environmental index[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 32(3): 565–573 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 陈倩, 钟金先, 李长顺. 2012. 数理统计方法在区域浅层地下水水文地球化学研究中的应用[J]. 现代地质, 26(3):607–613.
- 付昌昌. 2012. 淮河流域沿海平原深层地下水水化学特征及咸水成因[D]. 长春:吉林大学.
- 侯艳声, 胡新锋, 赵团芝. 2018. 应急状态下宁波市地下淡水资源开发潜力与保护对策研究[C]// 地质工作助推生态文明建设——浙江省地质学会2018年学术年会.
- 侯艳声, 胡新锋, 赵团芝. 2017. 宁波市地下水环境特征与保护对策[J]. 上海国土资源, 38(4): 69–74.
- 黄耀裔, 苏建云. 2014. 利用GIS与数理统计分析晋江市浅层地下水水化学特征及成因[J]. 吉林师范大学学报:自然科学版, 35(2): 145–152.
- 金阳, 姜月华, 周权平, 雷廷, 贾军元, 杨国强. 2021. 丹阳市吕城地区浅层地下水演化特征及成因[J]. 华东地质, 42(4): 475–482.
- 李国礼, 周锴镔, 张庆, 袁红武. 2018. 地表水与地下水联合数值模拟系统在阜阳市水资源优化管理中的应用[J]. 华东地质, 39(3): 234–240.
- 刘瑞平, 徐友宁, 亢文婷. 2019. 基于 phreeqc 和 netpath 联合反演水文地球化学过程——以小秦岭太峪水库为例[J]. 西北地质, 52 (1): 243–247.
- 刘文波, 高存荣, 刘滨, 陈有鑑. 2010. 河套平原浅层地下水水化学成分及其相关性分析[J]. 中国地质, 37(3): 816–823.
- 刘颖超, 刘凯, 孙颖, 刘久荣, 郭高轩. 2015. 良乡地热田地热水化学特征及同位素分析[J]. 南水北调与水利科技, 13(5):963–967,994.
- 刘裕, 陆晨明, 马荣. 2019. 冀东平原地下水中铁离子来源判别分析

- 研究[J]. 地质调查与研究, 42(2): 135-142.
- 陆徐荣, 周爱国, 王茂亭, 杨磊, 陆华. 2010. Piper图解淮河流域江苏地区浅层地下水水质演化特征[J]. 工程勘察, 38(2): 42-47.
- 牛兆轩, 蒋小伟, 胡云壮. 2019. 滦河三角洲地区深层地下水化学演化规律及成因分析[J]. 水文地质工程地质, 46(1): 27-34.
- 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.
- 孙岐发, 田辉, 郭晓东, 于慧明, 马诗敏, 李丽君. 2017. 吉林长春地区地下水中发现偏硅酸和镉富集区[J]. 中国地质, 44(5): 1031-1032.
- 孙岐发, 田辉, 郭晓东, 于慧明. 2019. 长春莲花山发现镉富集区[J]. 中国地质, 46(2): 430-431.
- 孙岐发, 杨柯, 孙苗桢, 贾林刚, 田辉, 郭晓东, 李旭光, 朱巍. 2022. 长春新区地下水水质特征及其对生态健康的评价[J]. 中国地质, 49(3): 834-848.
- 孙跃, 刘中刚, 侯香梦, 周迅. 2019. 安徽合肥地区浅层地下水质量评价[J]. 华东地质, 40(1): 76-82.
- 王冬, 侯光才, 赵振宏. 2014. 鄂尔多斯盐海子地下水水流系统划分——来自水化学方面的探讨[J]. 干旱区资源与环境, 28(12): 122-127.
- 王怀颖, 袁志梅. 1990. 宁波盆地地下水地球化学研究[J]. 地质论评, 36(5): 414-422.
- 王香桂, 伍乾富, 伍坤宇, 沈立成. 2011. 搭格架温泉水化学特征及其约束因素研究[J]. 西北地质, 44(2): 161-168.
- 王瑞久. 1983. 三线图解及其水文地质解释[J]. 工程勘察, (6): 8-13.
- 邢立亭, 张凤娟, 李常锁, 杨丽芝, 王立艳. 2015. 鲁北平原浅层地下水水化学特征[J]. 灌溉排水学报, 34(6): 90-94.
- 徐美娟, 孙丹, 童桂华, 李建新, 虞效益. 2017. 我国东部沿海城市内河重金属污染现状和健康风险评价——以宁波为例[J]. 南开大学学报(自然科学版), 50(6): 99-104.
- 许乃政, 刘红樱, 魏峰, 杨辉, 葛伟亚. 2015. 江苏洋口港地区地下水的同位素组成及其形成演化研究[J]. 环境科学学报, 35(12): 85-94.
- 阎葆瑞, 张胜, 张作辰. 1992. 宁波盆地地下水铁及微量元素地球化学[C]//中国地质科学院水文地质工程地质研究所刊(第8号).
- 阎葆瑞, 张胜. 1992. 宁波盆地深层淡水体成因及微量元素的形成与演变[J]. 水文地质工程地质, 19(2): 30-33.
- 於昊天, 马腾, 邓娅敏, 杜尧, 沈帅, 鲁宗杰. 2017. 江汉平原东部地区浅层地下水水化学特征[J]. 地球科学, 42(5): 685-692.
- 杨巧凤, 李文鹏, 王瑞久. 2010. 深圳沿海带浅层地下水的稳定同位素与地球化学[J]. 水文地质工程地质, 37(5): 26-32.
- 杨勇, 郑凡东, 刘立才, 窦艳兵, 贾三满. 2013. 地下水开采引发的地面沉降易发性区划及控制措施[J]. 中国地质, 40(2): 653-658.
- 中国科学院. 2018. 中国学科发展战略·地下水科学[M]. 北京: 科学出版社.
- 章光新, 邓伟, 何岩, Ramsis Salama. 2006. 中国东北松嫩平原地下水水化学特征与演变规律[J]. 水科学进展, 17(1): 20-28.
- 赵江涛, 周金龙, 梁川, 尹钟, 钱立, 鲍正德. 2017. 新疆焉耆盆地平原区地下水反向水文地球化学模拟[J]. 干旱区资源与环境, 31(10): 65-70.
- 赵全升, 冯娟, 安乐生. 2010. 德州市浅层地下水水质演化[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 40(5): 1075-1082.
- 赵团芝, 郑毓鑫, 王玲玲. 2016. 宁波城市化建设及城市地质工作的初步探讨[J]. 上海国土资源, 37(1): 58-61.
- 张振国, 何江涛, 王磊, 彭聪. 2018. 衡水地区深层地下水水化学特征及其演化过程[J]. 现代地质, 32(3): 565-573.
- 张长春, 邵景力, 李慈君, 崔亚莉. 2003. 地下水位生态环境效应及生态环境指标[J]. 水文地质工程地质, 30(3): 6-10.