

2014—2020年扬州市 地下水水化学特征变化分析

刘 平, 王永东, 吴小伟, 尹景伟

(江苏省水文水资源勘测局扬州分局, 江苏 扬州 225002)

摘要:为研究扬州市地下水水化学特征时空变化及其影响因素, 综合应用多元统计分析法、Piper三线图解法、Gibbs图解法及离子比值法, 对扬州市2014年和2020年地下水进行水化学特征变化分析。结果表明: 2014年以来地下水水化学组分未发生明显变化, 潜水阳离子以 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^+ 为主, 阴离子以 Cl^- 和 HCO_3^- 为主; 承压水阳离子以 Ca^{2+} 和 Na^+ 为主, 阴离子以 HCO_3^- 为主。6年来水化学类型逐渐增多, 种类更加多样化。水化学组分主要受岩石风化控制, 潜水还受到蒸发-浓缩作用影响, 少数地区亦受到阳离子交换影响。

关键词:水化学特征; 变化趋势; 影响因素; 地下水; 扬州

中图分类号: X143

文献标识码: A

文章编号: 1007-7839(2024)08-0031-0006

Analysis of changes in groundwater hydrochemical characteristics in Yangzhou City from 2014 to 2020

LIU Ping, WANG Yongdong, WU Xiaowei, YIN Jingwei

(Yangzhou Branch of Jiangsu Province Hydrology and Water Resources Investigation Bureau,
Yangzhou 225002, China)

Abstract: To study the spatio-temporal variation of the chemical characteristics of groundwater in Yangzhou and its influencing factors, the multivariate statistical analysis method, Piper three-line graphical method, Gibbs graphical method and ion ratio method were used, the changes in hydrochemical characteristics of groundwater in Yangzhou in 2014 and 2020 were analyzed. The results show that the chemical composition of groundwater has not changed significantly since 2014. The main phreatic water cations are Ca^{2+} , Mg^{2+} and Na^+ , the main anions are Cl^- and HCO_3^- , and the main cations of confined water are Ca^{2+} and Na^+ , the anion is mainly HCO_3^- . Over the past 6 years, the types of hydrochemistry have gradually increased and become more diversified. The hydrochemical composition is mainly controlled by rock weathering. Phreatic water is also affected by evaporation-concentration, and a few areas are also affected by cation exchange.

Key words: hydrochemical characteristics; changing trend; related factors; groundwater; Yangzhou

自2014年以来,随着扬州市替代水源工程的全面实施,地下水资源管理和保护的加强,尤其是《江苏省地下水压采方案(2014—2020年)》的贯彻落实,扬州地下水资源开采和保护均发生了较大变

化。近年来,对扬州地下水资源量、脆弱性评价以及地下水管理方面的研究较多^[1-3]。国内众多学者分别在平原区、沿海区、高原区等不同地质条件下的深浅层地下水区域开展了水化学特征、水质状况

收稿日期: 2024-02-18

作者简介: 刘平(1986—),女,高级工程师,硕士,主要从事水环境监测与分析评价工作。E-mail: 774304770@qq.com

及成因分析研究,复杂的地质条件和不同的人类活动干扰对不同区域地下水的影响各异,研究成果对水资源保护和可持续利用具有重要指导意义^[4-10]。然而文献中关于扬州地下水水化学类型基于时间尺度的变化规律等方面还鲜有报道。因此,本文基于扬州地下水水质长期监测资料,对扬州2014—2020年间地下水水化学类型变化规律及其影响因素进行分析,以期对扬州市地下水资源保护和水污染防治提供依据。

1 研究区概况

扬州市位于江淮流域下游,地势西高东低,分为山丘区和平原区2个类型区,包气带岩性主要分为亚黏土、黏土亚黏土互层、亚砂土。横跨长江三角洲平原、里下河平原、丘陵岗地3个水文地质单元。研究区内按含水介质分为松散岩类孔隙水和基岩裂隙水两大类,基岩裂隙水被不同程度掩埋,以松散岩类孔隙水分布最广泛,水量最丰富,为扬州市主要供水开采层。自上而下分为潜水、第Ⅰ承压水、第Ⅱ承压水、第Ⅲ承压水、第Ⅳ承压水等5个含水层。其中第Ⅱ、Ⅲ承压水为扬州主采层,区内大巷—湾头—头桥一线西南地区缺失,Ⅱ、Ⅲ承压含水层的总体流向由西北流向东南。

研究区内地下水的补给方式主要为大气降水,其次为径流补给、地表水体的侧渗补给和灌溉补给等;地下水的排泄方式以蒸发蒸腾、人工开采和侧向径流为主。

2 研究方法

2.1 地下水水样采集和测试

2014—2020年,每年丰、枯水期对扬州市地下水各取样监测1次。2015年起监测井不断优化完善,监测专用井逐渐全面覆盖,至2020年潜水井32个,承压水井33个(其中Ⅰ承压11个、Ⅱ承压13个、Ⅲ承压4个、Ⅳ承压5个),详见图1。监测项目包含: Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 K^{+} 、 Na^{+} 、 Cl^{-} 、 SO_4^{2-} 、 NO_3^{-} 、 NO_2^{-} 、 CO_3^{2-} 、 HCO_3^{-} 、pH、As、Se、Hg、Cu、Zn、Pb、Cd、Fe、Mn、 NH_4^{+} -N、 COD_{Mn} 、 F^{-} 、 Cr^{6+} 、总硬度(TH)、溶解性总固体(TDS)、矿化度等。

2.2 分析方法

运用经典统计法对地下水水化学组分进行统计分析。运用Piper三线图法对地下水水化学类型进行划分,并分析其变化趋势。运用Gibbs图解法判别地下水中化学成分的形成机制,通过离子比值

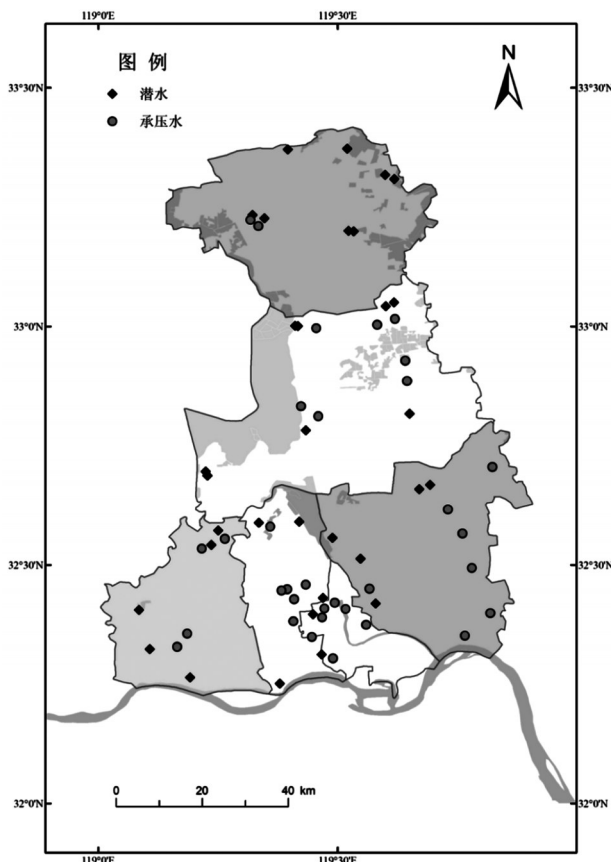


图1 采样点位置示意

法进一步识别地下水化学成分来源。

3 结果与讨论

3.1 水化学组分变化特点

3.1.1 潜水

对扬州市2014年和2020年潜水水样的11项指标做描述性统计分析(表1)。由表1可知,2014年潜水pH范围跨度大,在扬州北部宝应城区出现碱性水;2020年全市潜水pH趋于稳定,整体呈中性。TDS总体相对稳定,但全市空间差异性增大,2014年83.3%为淡水、16.7%为微咸水;2020年90.6%为淡水、6.3%为微咸水,在北部宝应县鲁垛镇出现咸水。潜水TH总体相对稳定,以硬水为主,2020年极硬水的比例和浓度值都有所增加,极硬水主要出现在宝应和高邮地区。2014—2020年间主要阴阳离子结构比无明显变化,阳离子均以 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^{+} 为主,阴离子以 Cl^{-} 和 HCO_3^{-} 为主。 K^{+} 和 NO_3^{-} -N的变异系数显著减小,在2014年出现了极值(宝应地区),2020年趋于稳定,均值明显降低,空间差异性也变小。但大部分阴阳离子的变异系数明显增大,因地下水中人类活动导致的输入性物质往往具有离散

表1 潜水水样主要水化学组分统计

年份	统计值	pH	$\rho(\text{TH})/$ (mg/L)	$\rho(\text{TDS})/$ (mg/L)	$\rho(\text{Ca}^{2+})/$ (mg/L)	$\rho(\text{Mg}^{2+})/$ (mg/L)	$\rho(\text{K}^{+})/$ (mg/L)	$\rho(\text{Na}^{+})/$ (mg/L)	$\rho(\text{SO}_4^{2-})/$ (mg/L)	$\rho(\text{Cl}^{-})/$ (mg/L)	$\rho(\text{HCO}_3^{-})/$ (mg/L)	$\rho(\text{NO}_3^{-}\text{-N})/$ (mg/L)
2014	最小值	7.32	182.00	356.00	56.60	10.00	0.51	16.60	11.40	20.0	8.12	0.18
	最大值	10.90	734.00	1 959.00	243.00	98.50	67.40	382.00	101.00	1 093.0	657.00	27.00
	均值	7.76	401.00	946.00	99.00	37.40	8.67	114.00	59.80	185.0	439.00	5.46
	标准差	0.78	151.00	414.00	42.90	20.20	15.10	97.70	25.20	256.0	169.00	6.81
	变异系数	0.10	0.38	0.44	0.43	0.54	1.75	0.86	0.42	1.38	0.39	1.25
2020	最小值	7.01	176.00	386.00	32.40	11.70	0.32	15.00	ND	12.20	182.00	ND
	最大值	7.76	1 774.00	4 502.00	476.00	158.00	4.50	835.00	392.00	2 289.00	848.00	12.30
	均值	7.38	419.00	934.00	105.00	38.20	1.64	108.00	68.60	177.00	436.00	3.80
	标准差	0.18	318.00	729.00	78.90	33.20	1.09	150.00	70.30	415.00	140.00	3.20
	变异系数	0.02	0.76	0.78	0.75	0.87	0.67	1.40	1.02	2.34	0.32	0.84

程度高、波动性高的特点^[11],这表明2020年扬州市潜水仍受到人类活动的影响。

3.1.2 承压水

由表2可知,承压水pH无明显变化,整体呈中性,少量弱碱性。TDS和TH在均值上无明显变化,2014—2020年间承压水均为淡水;2014年微硬水占82.6%,硬水占17.4%;2020年微硬水占81.8%,硬水占15.2%,在江都施桥镇出现极硬水。2014年和2020年承压水中最主要的阴离子均为 HCO_3^{-} ,主要的阳离子均为 Ca^{2+} 和 Na^{+} 。与浅层相似,2014年 K^{+} 和 $\text{NO}_3^{-}\text{-N}$ 的变异系数较大,可能由于局部承压水受到潜水补给影响,2020年空间差异性显著变小。

3.2 水化学特征演变

Piper三线图可以表明水体总的化学性质和主

要离子组成变化特征^[12]。根据离子当量浓度分别绘制2014年和2020年潜水及和承压水的Piper图,分析地下水类型变化情况。

由图2可知,扬州市潜水中阳离子主要为 Ca^{2+} 和 Na^{+} ,阴离子主要为 HCO_3^{-} 和 Cl^{-} 。承压水中阳离子主要为 Ca^{2+} 、 Na^{+} 和 Mg^{2+} ,阴离子主要为 HCO_3^{-} 。与2014年相比,水化学类型明显增多,种类更加复杂化。潜水从2014年以 $\text{HCO}_3^{-}\text{-Ca}\cdot\text{Na}$ 型和 $\text{HCO}_3^{-}\cdot\text{Cl}^{-}\text{-Ca}\cdot\text{Na}$ 型为主向2020年以 $\text{HCO}_3^{-}\text{-Ca}$ 型、 $\text{HCO}_3^{-}\text{-Ca}\cdot\text{Mg}$ 型和 $\text{HCO}_3^{-}\cdot\text{Cl}^{-}\text{-Ca}\cdot\text{Na}$ 型为主转变。承压水水化学类型从 $\text{HCO}_3^{-}\text{-Ca}\cdot\text{Na}$ 型为主向以 $\text{HCO}_3^{-}\text{-Ca}\cdot\text{Mg}$ 型、 $\text{HCO}_3^{-}\text{-Ca}\cdot\text{Na}$ 型和 $\text{HCO}_3^{-}\text{-Na}\cdot\text{Mg}$ 型为主转变。此外,Piper图中可以看出承压水的阴、阳离子分布较为集中,潜水阴、阳离子分布更为分散,这表明

表2 承压水水样主要水化学组分统计

年份	统计值	pH	$\rho(\text{TH})/$ (mg/L)	$\rho(\text{TDS})/$ (mg/L)	$\rho(\text{Ca}^{2+})/$ (mg/L)	$\rho(\text{Mg}^{2+})/$ (mg/L)	$\rho(\text{K}^{+})/$ (mg/L)	$\rho(\text{Na}^{+})/$ (mg/L)	$\rho(\text{SO}_4^{2-})/$ (mg/L)	$\rho(\text{Cl}^{-})/$ (mg/L)	$\rho(\text{HCO}_3^{-})/$ (mg/L)	$\rho(\text{NO}_3^{-}\text{-N})/$ (mg/L)
2014	最小值	7.05	153.00	324.00	41.40	7.27	0.54	20.50	ND	4.50	195.00	ND
	最大值	8.17	439.00	901.00	109.00	43.40	6.74	132.00	50.50	112.00	615.00	2.00
	均值	7.76	242.00	628.00	61.00	21.80	1.64	62.60	19.40	24.40	437.00	0.52
	标准差	0.27	77.30	145.00	19.00	8.94	1.46	31.30	13.80	24.70	94.40	0.61
	变异系数	0.03	0.32	0.23	0.31	0.41	0.89	0.50	0.71	1.01	0.22	1.19
2020	最小值	7.30	95.00	232.00	19.80	7.94	0.24	17.80	ND	2.70	81.00	ND
	最大值	8.31	591.00	1 071.00	152.00	83.90	4.43	112.00	50.70	119.00	810.00	1.58
	均值	7.64	240.00	558.00	50.80	28.80	1.63	52.90	12.50	23.20	389.00	0.79
	标准差	0.20	94.40	165.00	26.10	15.00	0.79	25.60	12.20	21.20	131.00	0.49
	变异系数	0.03	0.39	0.29	0.51	0.52	0.49	0.48	0.98	0.91	0.34	0.62

潜水水化学特征变异较大,易受到更多因素影响。

3.3 水化学形成作用分析

3.3.1 Gibbs图离子分析

Gibbs图将天然水体的化学形成机制分为蒸发浓缩机制、岩石风化机制和降水作用机制,利用Gibbs图可以分析地下水水化学组分的影响机制^[13]。

由图3可知,扬州地下水大部分取样点分布在岩石风化区,表明地下水中的主要水化学成分来源于水与岩石的相互作用。与2014年相比,承压水整体无明显变化,主要受岩石风化控制,蒸发浓缩和大气降水对承压水化学组分形成作用影响较小。潜水大部分监测点落在岩石风化区,极少部分落在了蒸发浓缩区,但部分点有向蒸发浓缩区偏移的趋势,这说明蒸发浓缩作用对潜水化学组分也有一定影响。此外,少数取样点落在Gibbs图模型之外,表明扬州地下水除受上述作用影响外,还可能受到阳离子交换、人类活动等影响。

3.3.2 地下水离子比分析

地下水中主要离子毫克当量比值在一定程度上可以反应不同岩石风化对主要化学组分来源的影响程度^[14-16]。应用 $(\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^{+})\text{VS}(\text{HCO}_3^-/\text{Na}^{+})$ 和 $(\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^{+})\text{VS}(\text{Mg}^{2+}/\text{Na}^{+})$ 离子比值端元图和主要离子比值图可以定性区分不同岩石风化溶解作用对地下水溶质的影响。

由图4可知,2014—2020年间扬州地下水水样主要集中于硅酸盐岩与碳酸盐岩控制端元之间,表明地下水化学组分主要来源于硅酸盐岩与碳酸盐岩的溶解作用,部分还来自蒸发岩盐的风化溶解。

从图5(a)可知,取样点大部分紧靠在 $\gamma(\text{Na}^{+}+\text{K}^{+})/\gamma\text{Cl}^{-}=1$ 的两侧,表明地下中 Na^{+} 、 K^{+} 主要来源于岩盐溶解和硅酸盐溶解的共同作用。从图5(b)可知,大部分取样点集中于 $\gamma(\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+})/\gamma(\text{HCO}_3^{-}+\text{SO}_4^{2-})=1$ 的线下侧,仅个别潜水取样点位于线上侧,说明地下水中 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 主要来源于蒸发岩和钙镁

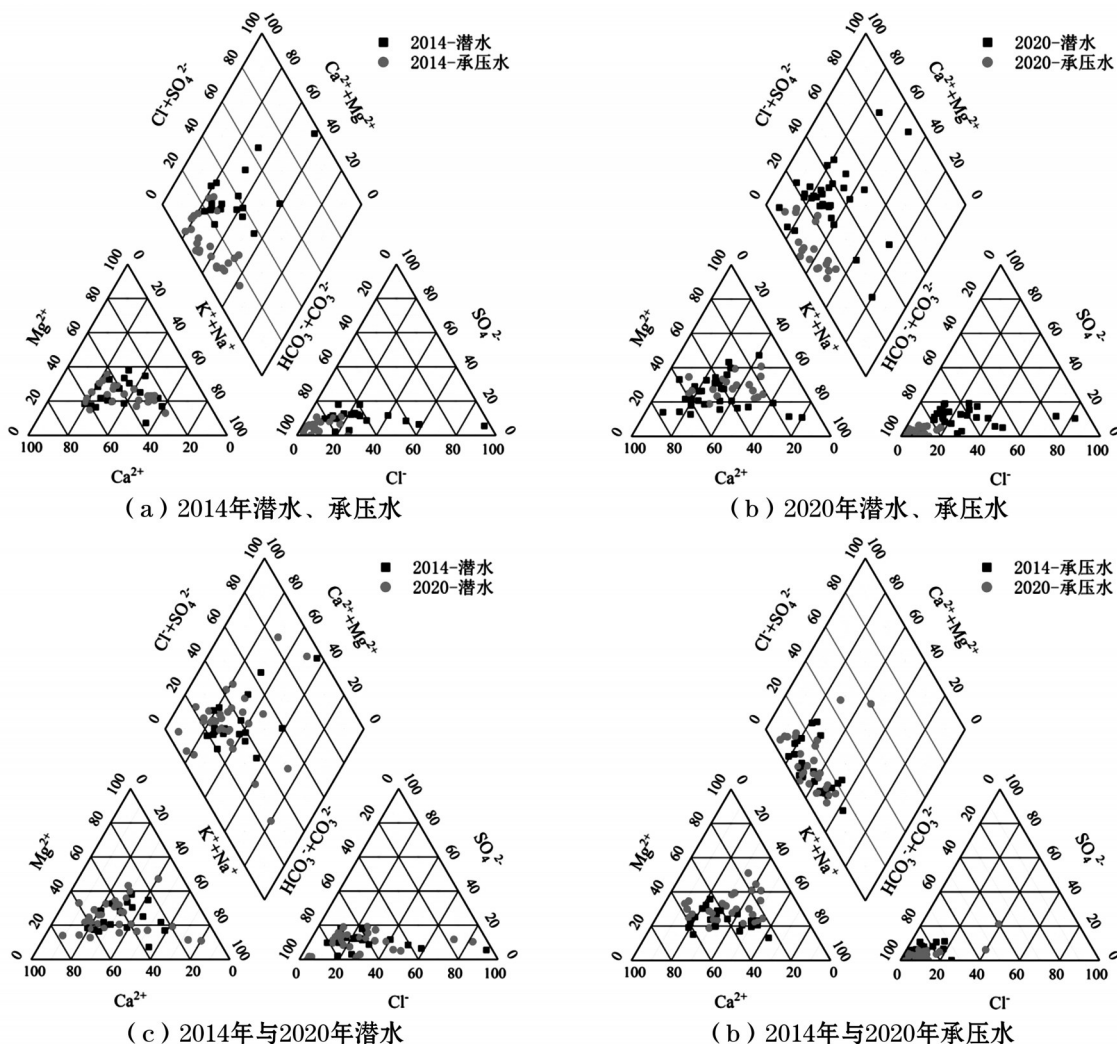


图2 扬州市地下水Pipers三线

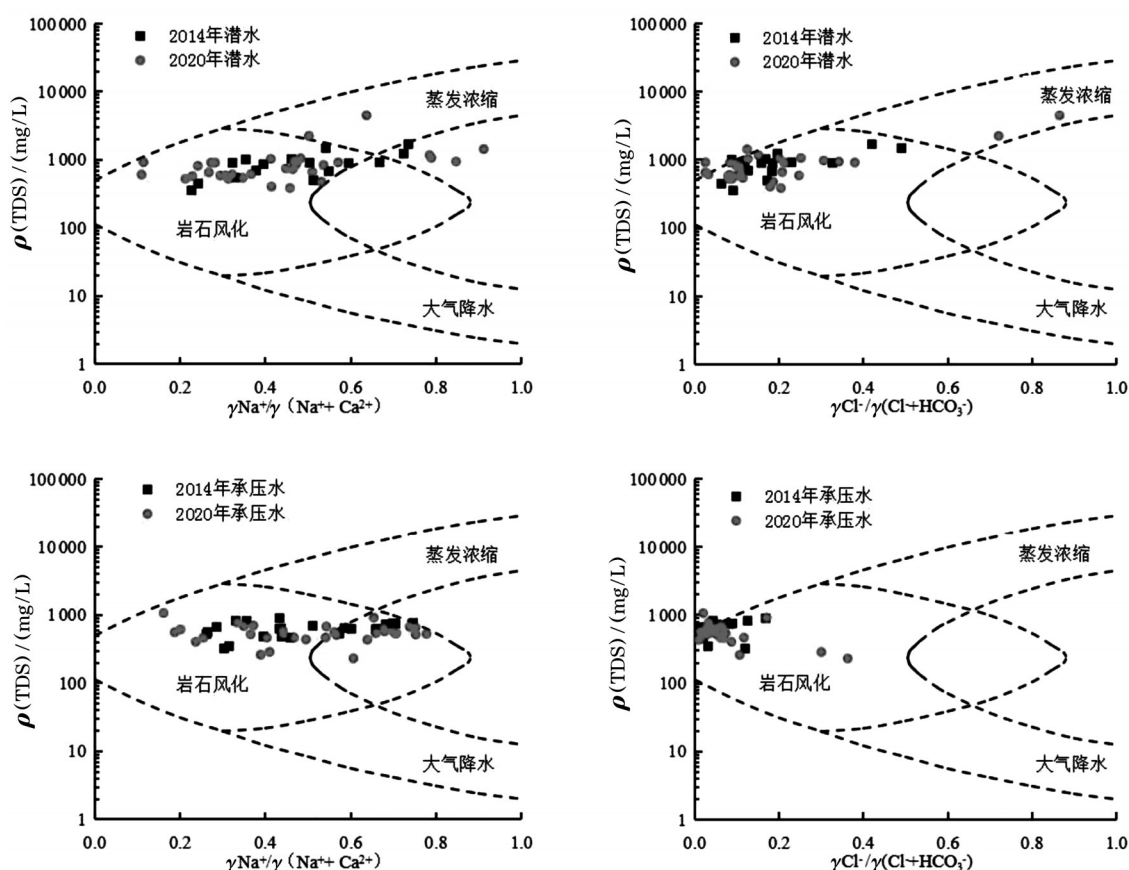


图3 地下水 Gibbs 分布

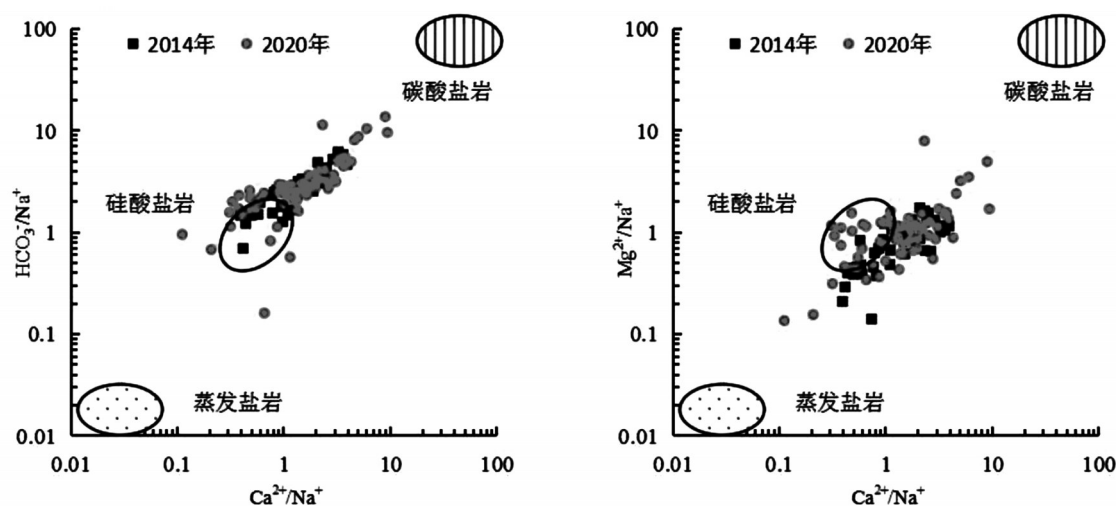


图4 地下水离子比值端元

硅酸盐岩的风化溶解,部分来自碳酸盐岩溶解。从图 5(c)可知,绝大多数取样点位于 $\gamma(SO_4^{2-}+Cl^-)/\gamma HCO_3^-=1$ 的下侧,说明碳酸盐的溶解对水化学的形成起主要作用。由图 5(d)可知,2014 和 2020 年潜水和承压水水样的斜率均接近-1,说明 2014 年至 2020 年扬州地下水存在阳离子交换吸附作用,这也印证了 Gibbs 图中有部分点落在了模型之外。

4 结 论

(1)2020 年扬州市地下水化学组分较 2014 年未发生明显变化。潜水电离离子以 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^+ 为主,阴离子以 Cl^- 和 HCO_3^- 为主;承压水电离离子以 Ca^{2+} 和 Na^+ 为主,阴离子以 HCO_3^- 为主。pH 整体呈中性,少量弱碱性;TDS、TH 总体相对稳定,潜水以淡水、微

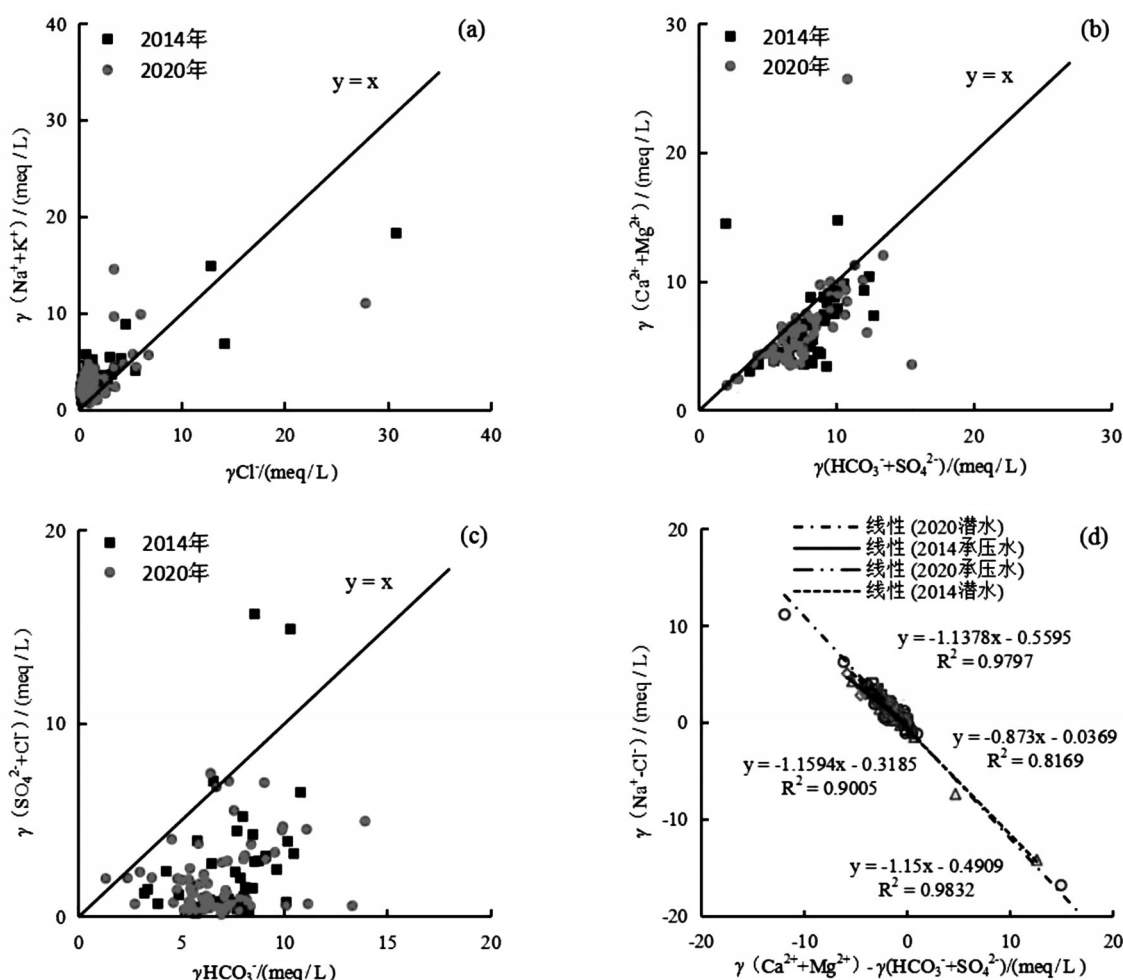


图5 地下水主要离子比值

硬水为主,承压水以淡水、硬水为主。与2014年相比,除了 K^+ 和 NO_3^- -N变异系数减小外,其余化学组分的变异系数均增大,表明潜水仍受到人类活动的影响。

(2)潜水从2014年以 HCO_3^- -Ca·Na型和 HCO_3^- - Cl^- -Ca·Na型为主,向2020年以 HCO_3^- -Ca型、 HCO_3^- -Ca·Mg型和 HCO_3^- - Cl^- -Ca·Na型为主转变。承压水水化学类型从 HCO_3^- -Ca·Na型为主,向以 HCO_3^- -Ca·Mg型、 HCO_3^- -Ca·Na型和 HCO_3^- -Na·Mg型为主转变。

(3)扬州潜水和承压水的水化学组分均主要受岩石风化控制,主要来源于硅酸盐岩与碳酸盐岩的溶解作用。潜水还受到蒸发浓缩作用的影响,少数地区还受到阳离子交换、人类活动等影响。

参考文献:

- [1] 王红梅,黄勇,王丽丽. 基于层次分析法对扬州市深层地下水水质评价[J]. 河北工程大学学报(自然科学版),

2016,33(4):67-71.

- [2] 韩银富,杨林. 运用模糊数学综合评判法评价宝应县地下水质量[J]. 地质灾害与环境保护,2000(1):17-20.
- [3] 许凤群,王荃. 扬州市地下水水质资源特征及可持续利用对策研究[J]. 扬州职业大学学报,2015,19(4):32-36.
- [4] 袁瑞强,钟钰翔,龙西亭. 洞庭湖上游平原浅层地下水水质综合评价[J]. 水资源保护,2021,37(6):121-127.
- [5] 孟舒然,吕敦玉,王翠玲,等. 郑州市中牟县地下水水化学特征及控制因素[J]. 环境化学,2021,40(1):1-10.
- [6] 赵楠芳,鄢笑宇,李青,等. 鄱阳湖环湖区浅层地下水水化学特征及形成机制[J]. 人民长江,2021,52(1):44-48.
- [7] 刘鑫,向伟,司炳成,等. 渭河和泾河流域浅层地下水水化学特征和控制因素[J]. 环境科学,2021,42(6):2817-2825.
- [8] 马健,冀东,王泽勇,等. 胶州湾北岸浅层地下水水化学特征及成因分析[J]. 水文,2021,41(5):103-108.
- [9] 谭浩,刘燕,赵志强,等. 泾惠渠灌区地下水水质特征及评价[J]. 人民长江,2021,52(5):18-23.

(下转第42页)

他城市的小流域分类提供了理论依据和实用方法,对于因地制宜地实施分类指导具有实践价值。

参考文献:

- [1] 段文标,任翠梅,颜永强,等. 关于小流域可持续发展几个问题的思考[J]. 水土保持通报,2006(3):132-135.
- [2] 陈建卓,田素萍,葛茂杭,等. 河北省太行山区小流域综合治理模式研究[J]. 水土保持通报,1999(4):41-44.
- [3] 张利超,谢颂华. 基于功能的江西省生态清洁小流域分类研究[J]. 中国水土保持,2018(1):7-10.
- [4] 杨坤,李世荣. 北京市生态清洁小流域分类分级建设对策研究[J]. 中国水土保持,2012(2):7-9.
- [5] 柳金杰. 河北省邢台县不同型式生态清洁小流域建设成效分析[J]. 地下水,2015,37(5):172-173.
- [6] 汪发勇,蔡雄飞,张琦,等. 县级水土保持规划中生态清洁小流域分类研究——以贵州省修文县为例[J]. 湖北农业科学,2016,55(24):6436-6441.
- [7] 陈进红,王兆骞,张贤林. 浙江省红壤小流域生态系统的分类研究[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版),1999,25(5):479-483.
- [8] 郭金玉,张忠彬,孙庆云. 层次分析法的研究与应用[J]. 中国安全科学学报,2008(5):148-153.
- [9] 李裕瑞,卜长利,曹智,等. 面向乡村振兴战略的村庄分类方法与实证研究[J]. 自然资源学报,2020,35(2):243-256.
- [10] 彭红霞,候清芹,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.
- [11] 郑涛,焦团理,胡波,等. 涡河流域中部地区地下水化学特征及其成因分析[J]. 环境科学,2021,42(2):766-775.
- [12] 王瑞久. 三线图解及其水文地质解释[J]. 工程勘察,1983(6):6-11.
- [13] 吴璇,宋一心,王金晓,等. 山东省柴汶河上游地区地下水化学特征分析[J]. 环境化学,2021,40(7):2125-2134.
- [14] 栾凤娇,周金龙,贾瑞亮,等. 新疆巴里坤-伊吾盆地地下水水化学特征及成因[J]. 环境化学,2017,36(2):380-389.
- [15] 王卓微,赵新锋,庞园,等. 流溪河流域地下水化学时空特征及源辨析[J]. 环境化学,2017,36(12):2701-2710.
- [16] 许畅畅,温瑶,成思,等. 长江口滨岸浅层地下水化学组分时空分布特征及影响机制[J]. 水资源保护,2022,38(3):181-188.

(上接第36页)