

呼和浩特市承压水水化学特征及其成因

刘力玮, 冯海波, 刘晓波, 董少刚*

(内蒙古大学 环境与资源学院, 内蒙古 呼和浩特 010021)

摘要:通过水文地质调查、采样分析并结合地下水流动系统理论,对呼和浩特市承压水水化学特征及水质污染情况进行研究。共采集地下承压水样67组,分析了pH、氯化物、总硬度、高锰酸盐指数、铁锰、氨氮等23项指标。结果表明:研究区大青山山前及中—东部承压水水质较好,仅硝酸盐氮有一处超标;西南部承压水水质相对较差,高锰酸盐指数、铁锰、氨氮等出现超标现象。氨氮是研究区承压水的主要污染物,超标率达19.4%,最高浓度为10.85mg/L,高浓度区处于地下水的排泄区,主要集中在研究区西南部的后本滩及台阁牧镇一带。受人类活动的影响部分氮素通过断层或越流补给承压含水层,在承压含水层相对缺氧的还原环境中,硝化作用受到抑制,导致氨氮不断积累。表1,图4,参20。

关键词:地下水;水文地球化学;矿化度;氨氮;呼和浩特市

中图分类号:P641.3

文献标识码:A

地下水资源是淡水资源的重要组成部分,随着全球淡水资源的紧缺,地下水的污染问题备受关注。地下水水化学的组成是地下水水质评价的重要内容,也是研究地下水循环和演化的重要条件之一^[1]。通过对地下水水化学的时空变异特征与演变规律研究,可以更好揭示地下水与环境的相互作用机制。地下水的化学类型及其分布规律,是受地貌、岩性、构造、地下水流场等自然因素及人类活动等多种因素影响^[2,3]。前人对本研究区也做过相关研究,并取得一些重要成果,文献[4]通过研究呼和浩特市浅层地下水水化学特征演变规律,表明地下水中主要离子为 HCO_3^- 和 Ca^{2+} ,离子浓度与地下水水温呈现显著的负相关性;文献[5]分析了呼和浩特市大青山山前倾斜平原地下水,表明由于自然因素和人为因素导致出现浅层水“疏干”、承压水转无压的地质环境问题;文献[6]探究呼和浩特市托克托县潜水与承压水中氟的分布特征,表明地下水中的 F^- 浓度与 HCO_3^- 、 Na^+ 、溶解性总固体(TDS)和电导率(EC)

呈正相关,与 Ca^{2+} 呈负相关,高氟水的水化学类型为 $\text{HCO}_3^- \cdot \text{Cl}-\text{Na}$ 型。

随着多年大规模的开发利用,呼和浩特市地下水资源短缺、污染及水资源配置不合理等问题日益突出。本研究通过分析呼和浩特市承压水中的主要化学组分的空间分布及迁移转化,以揭示该区地下水与环境的相互作用,为呼和浩特市承压水的可持续利用、管理及其污染防治提供科学依据。

1 研究区概况

呼和浩特市位于内蒙古自治区中部、土默川平原的东北,北有大青山为天然屏障,东南部被蛮汉山所环绕,地势东北高、西南低。该区属典型的蒙古高原大陆性气候,半干旱半湿润地区,年平均降水量在400 mm左右,年平均蒸发量为1 800 mm左右。区内河流有大黑河、小黑河等季节性河流,目前地下水成为呼和浩特市的主要供水水源^[7]。

收稿日期:2016-08-28

基金项目:国家自然科学基金项目资助(编号:41562020,41002129)

作者简介:刘力玮(1991-),女,山东潍坊人,硕士研究生,研究方向:地下水污染与防治。

* 通讯作者,Email: groundwater@163.com.

研究区第四系承压含水层,主要接受北部大青山和东部蛮汉山的侧向径流补给,在断层的控制作用下(图 1),承压水基本上是从北、东、南三个方向向大黑河径流,最终汇入黄河,排泄以径流和人工开采为主^[8].

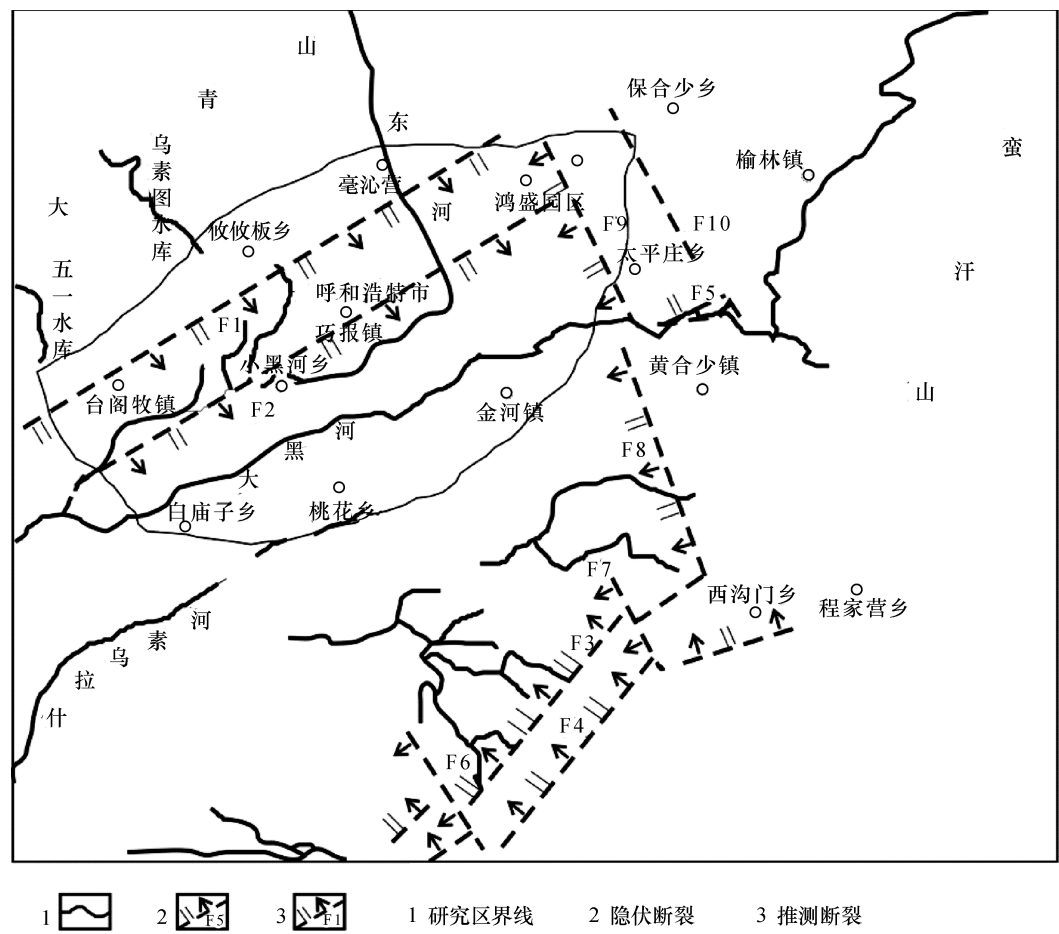


图 1 呼和浩特市水系及地质构造图
Fig.1 Water system and geological structure of Hohhot

2 水样的采样及测试方法

根据地下水流场的特点,结合敏感目标的分布,在研究区共布设地下水采样点 67 处(图 2),采样时间为 2014 年 5 月 7 日至 5 月 15 日.监测分析指标为:pH、氟化物、高锰酸盐指数、总硬度(以 CaCO₃计)、硫酸盐、氯化物、挥发酚、镉、硫化物、铁、锰、六价铬、铅、锌、铜、氨氮、亚硝酸盐氮、硝酸盐氮、溶解性总固体(TDS)、总汞、总砷、氰化物及总大肠菌群等 23 个指标.水样检验方法,按国家标准《生活饮用水标准检验方法》GB/T5750—2006 执行.

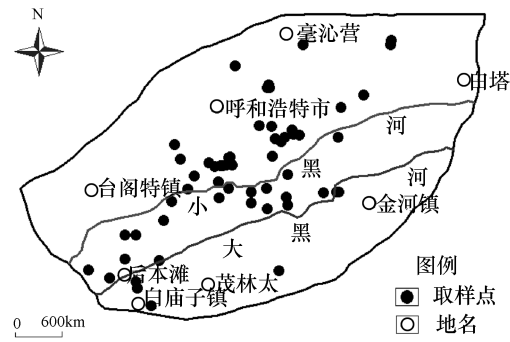


图 2 地下水采样点分布
Fig.2 Distribution of sample wells for groundwater

3 水样的结果及分析

3.1 水化学基本特征

利用 SPSS 22.0 统计软件对地下水中主要化学组分含量进行统计学分析,主要监测指标的统计结

果见表 1,其他监测指标均低于检出限或优于地下水Ⅲ类水水质标准,在此不做讨论.依据《中华人民共和国国家标准—地下水质量标准》(GB/T14848—1993)中规定的Ⅲ类水水质标准,对比分析该区承压水水质状况.

表 1 2014 年呼和浩特市地下水水化学参数的统计特征值($n=67$)

Table 1 Statistics of hydrochemical parameters of groundwater for Hohhot County in 2014($n=67$)

水化学参数	最小值	最大值	均值	标准差	变异系数/%	超标率/%
pH	7.340	8.330	7.870	0.230	2.910	0.0
总硬度/(mg/L)	71.000	373.000	176.900	64.000	36.100	0.0
硫酸盐/(mg/L)	1.300	95.200	18.460	17.120	92.760	0.0
氯化物/(mg/L)	2.200	146.000	13.390	22.870	170.770	0.0
铁/(mg/L)	0.015	0.555	0.061	0.130	214.940	9.0
锰/(mg/L)	0.005	0.340	0.024	0.049	200.720	3.0
高锰酸盐指数/(mg/L)	0.250	6.450	0.720	0.840	117.110	1.5
硝酸盐氮/(mg/L)	0.040	36.900	3.540	5.610	158.660	1.5
氨氮/(mg/L)	0.013	10.850	0.415	1.390	335.280	19.4
氟化物/(mg/L)	0.170	0.980	0.360	0.146	40.750	0.0

从表 1 中可以看出,67 个采样点中,pH、总硬度、硫酸盐、氯化物、氟化物均未出现超标现象,符合地下水Ⅲ类水标准.其中硝酸盐氮和高锰酸盐指数各有一处超标,浓度分别达 36.90 mg/L 和 6.45 mg/L;锰的平均值为 0.024 mg/L,两处采样点超标,最高浓度为 0.340 mg/L;铁有 3 处采样点超标,最大值为 0.555 mg/L;氨氮的平均值为 0.415 mg/L,最大值为 10.850 mg/L,67 个采样点中有 13 个采样点出现超标,超标率为 19.4%.铁、锰、氨氮的变异系数均较大,表明其在地下水中的浓度变化比较大.

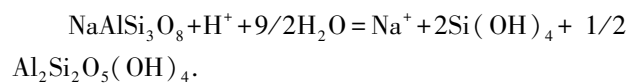
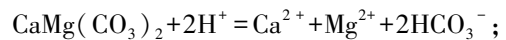
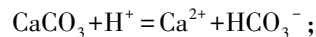
3.2 常规监测指标浓度空间分布分析

应用 SURFER8.0 绘制研究区承压含水层中各监测指标浓度的等值线空间分布特征图(图 3).氯化物、总硬度、硫酸盐和硝酸盐氮等高浓度区主要分布在大青山前和呼和浩特市; pH、氟化物、高锰酸盐指数、铁、锰和氨氮等高浓度主要集中在后本滩、台阁牧镇一带,属于地下水的排泄区,氨氮成为本区承压水中主要污染物.

3.2.1 pH

研究区承压水呈弱碱性,pH 在 7.3~8.3 之间,未出现超标现象.研究区西南部的茂林太、白庙子镇及后本滩一带,pH 值均超过 8.0.后本滩一带属于承压水的滞留排泄区,水循环交替十分缓慢,处于还

原环境.岩层中的方解石、白云石、钠长石均呈溶解反应,其反应方程分别为:



这些反应均消耗水中的 H^+ ,导致地下水 pH 值相对升高^[9].

3.2.2 氯化物、氟化物和硫酸盐

研究区承压水氯化物、氟化物、硫酸盐浓度均符合地下水Ⅲ类水标准.北部大青山山前倾斜平原区氯化物浓度最高为 48 mg/L,研究区中的东部仅为 6 mg/L 左右.研究区承压水氟化物浓度普遍低于 0.4 mg/L,总的来看东部蛮汉山山前倾斜平原较北部大青山山前倾斜平原高,这可能与蛮汉山岩层富含含氟矿物(如萤石与氟磷灰石)有关^[6,10-12].北部大青山山前倾斜平原区硫酸盐浓度最高为 54 mg/L,中—东部仅为 12~14 mg/L 左右.由于大青山岩石中含石膏及其它硫酸盐,在长期溶滤作用下,导致该区地下水中硫酸盐浓度相对升高.

3.2.3 总硬度

研究区承压水总硬度均低于 450 mg/L,符合地下水Ⅲ类水标准.大青山山前含水层颗粒粗大,地下水径流条件较好,溶滤作用强烈,使地下水中的阳离

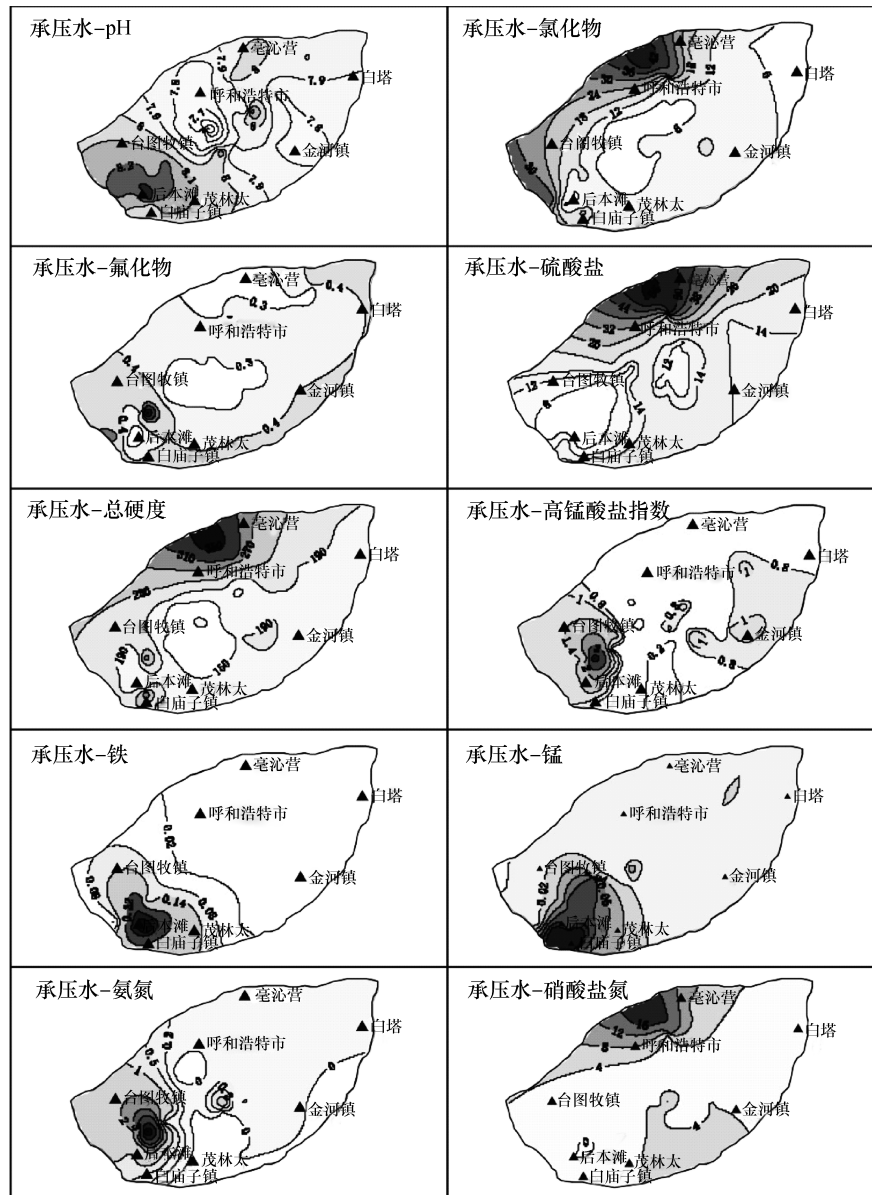


图3 各常规监测指标浓度的等值线空间分布特征(ml/L)

Fig.3 The conventional inspection concentration of the characteristics of spatial distribution (ml/L)

子主要以 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 为主^[13], 该区硬度达到 350 mg/L 以上; 到了台阁牧镇及其以东含水层的颗粒变得细小, 地下水径流缓慢, 浓缩沉淀作用明显, Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 含量相对降低, 地下水硬度仅为 150~190 mg/L 左右。总的来看, 该区地下水总硬度与 pH 值呈明显的负相关性(图 4), 随着 pH 值的升高地下水总硬度明显降低。

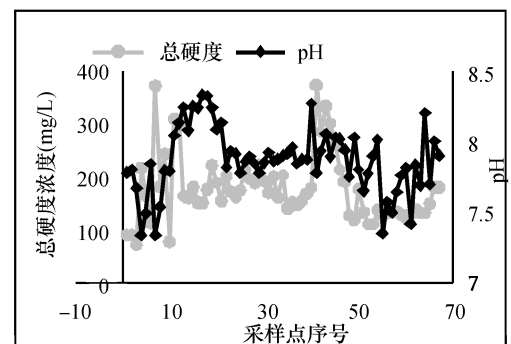


图4 pH与总硬度变化的关系

Fig.4 Relationship between pH and total hardness

3.2.4 高锰酸盐指数

研究区承压水中高锰酸盐指数主要在后本滩以北一带超标,最大浓度为 6.45 mg/L.台阁牧镇和后本滩一带为本区承压地下水的滞留排泄区,地下水流速缓慢,且长期处于还原环境,承压水中的还原性物质较多,从而导致高锰酸盐指数浓度较高.毫沁营、呼和浩特市和茂林太等地的高锰酸盐指数浓度在 0.2~0.8 mg/L 之间,而白塔、金河镇、白庙子镇周围的高锰酸盐指数浓度在 0.8~1.4 mg/L 之间.

3.2.5 铁、锰

研究区承压水中铁、锰高浓度区主要分布在后本滩及白庙子镇一带,属于地下水的排泄区,铁、锰最高浓度分别达 0.555 mg/L 和 0.340 mg/L.

研究区北部为大青山,东部为蛮汉山,岩层中含有丰富的铁锰矿物.岩石受强烈风化、分解、溶滤作用时,部分原生铁锰被溶解释放进入地下水.在地下水径流作用下向排泄区运移并富集.地下水中铁、锰离子浓度的高低,除受浅部土层中有机物含量、酸碱条件、径流条件影响外,主要与还原环境有关^[14,15].在后本滩一带,地层全部被第四系覆盖,同时受冲洪积平原扇缘影响,承压含水层中夹有淤泥质的亚黏土,使得承压水径流缓慢,易形成强还原环境.在还原环境中有机质可促进铁、锰络合物的稳定性,以致在弱碱性介质中都不沉淀^[16].同时,有机质能分解而产生大量二氧化碳和硫化氢等还原性物质,使氧化还原电位值降低, Fe_2O_3 、 MnO_2 还原成低价的铁锰易溶盐,并离解出 Fe^{2+} 、 Mn^{2+} ,导致这一区域铁锰离子浓度升高.

3.2.6 氨氮和硝酸盐氮

氨氮是研究区承压水中的主要污染物,超标率达 19.4%,高浓度区主要分布在西南部的后本滩及台阁牧镇一带,浓度达到 2 mg/L 以上,最高浓度为 10.85 mg/L.

研究区受大青山山前断裂带的控制,断层充分发挥其集水廊道和疏水通道的作用,因此降水以及地表水直接通过断层补给承压含水层,将地表由于人类活动产生的大量氮素带入承压水中^[17],成为该区氮污染的主要来源.

此外,后本滩和台阁牧镇一带为区域地下水的滞留排泄区,经过漫长流动途径上的消耗,承压水中的溶解氧含量大幅减低,使该区承压水处于较强的还原环境中^[18,19].受还原环境控制,由断层直接补给以及通过淋溶进入到承压含水层中氨氮的硝化

作用受到抑制,硝酸盐氮的反硝化作用增强,使得氨氮在缺氧环境下不断积累^[20].总之,研究区承压水中较高浓度的氨氮可能主要来自于地表污染源,通过断层或越流进入承压含水层,承压含水层中强还原环境使其能够长期存在.

研究区承压水硝酸盐氮在大青山山前一带浓度超过地下水Ⅲ类水标准,最高浓度为 36.9 mg/L.主要来自农田化肥的施用,污水灌溉,导致地下水中硝酸盐氮含量升高;大青山南缘地下水处于强氧化环境,氨氮和亚硝酸盐氮容易发生硝化反应,被氧化为硝酸盐氮,导致地下水中硝酸盐氮浓度超标.随着承压地下水的径流和排泄,其所处环境的还原性增强,使得水中硝酸盐氮浓度逐渐降低,故在本区的径流排泄区,未出现硝酸盐氮浓度超标现象.

4 结 论

通过对呼和浩特地下水流动系统特征调查、结合采样分析,揭示研究区承压水水质的空间变化规律,主要得出如下结论:

(1)主要监测指标统计分析表明,67 个采样点中,pH、总硬度、硫酸盐、氯化物、氟化物均未出现超标现象,符合地下水Ⅲ类水标准.硝酸盐氮和高锰酸盐指数、铁和锰,超标率较低.氨氮有 13 个采样点出现超标,超标率为 19.4%,成为本区主要污染物;

(2)研究区承压水呈弱碱性,地下水氯化物、总硬度、硫酸盐和硝酸盐氮等高浓度区主要分布在大青山前和呼和浩特市;氟化物、高锰酸盐指数、铁、锰和氨氮等高浓度区主要集中在后本滩、台阁牧镇一带,属于地下水的滞留排泄区;

(3)氨氮高浓度区主要集中在研究区西南部的后本滩及台阁牧镇一带.受人类活动的影响部分氮素通过断层或越流补给承压含水层,在承压含水层相对缺氧的还原环境中,硝化作用受到抑制,导致氨氮不断积累.

参考文献:

- [1] 章光新,邓伟,何岩,等.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,2006,17(1): 20-28.
Zhang Guang-xin, Deng Wei, He Yan, et al. The hydrochemical characteristics and the evolution of groundwater in Songnen Plain, China [J]. Advances in Water Science,

- 2006,17(1):20-28.
- [2] 唐玺雯,吴锦奎,薛丽洋,等.锡林河流域地表水水化学主离子特征及控制因素[J].环境科学,2014,35(1):131-142.
- Tang Xi-wen, Wu Jin-kui, Xue Li-yang, et al. Major ion chemistry of surface water in the Xilin river basin and the possible controls[J]. Environmental Science, 2014, 35(1): 131-142.
- [3] 周嘉欣,丁永建,曾国雄,等.疏勒河上游地表水水化学主离子特征及其控制因素[J].环境科学,2014,35(9):3315-3324.
- Zhou Jia-xin, Ding Yong-jian, Zeng Guo-xiong, et al. Major ion chemistry of surface water in the upper reach of Shule river basin and the possible controls[J]. Environmental Science, 2014, 35(9): 3315-3324.
- [4] 张翼龙,王丽娟,王文中,等.呼和浩特市浅层地下水水化学特征演变规律[C].南水北调与水利科技.2010,8(6):14-17.
- Zhang Yi-long, Wang Li-juan, Wang Wen-zhong, et al. Hydrochemical characteristics and variation of mineralization for the groundwater in Hohhot country [C]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2010, 8(6): 14-17.
- [5] 曹文庚,张翼龙,李政红,等.呼和浩特市大青山山前倾斜平原地质环境问题形成机理研究[J].现代地质,2013,27(2):468-474. Cao Wen-geng, Zhang Yi-long, Li Zheng-hong, et al. Formation mechanism of geological environment issue in piedmont clinoplain of daqing mountain, Hohhot, inner mongolia [J]. Geoscience, 2013, 27(2): 468-474.
- [6] 冯海波,董少刚,史晓珑,等.内蒙古托克托县潜水与承压水中氟化物的空间分布特征及形成机理[J].现代地质,2016,30(3):672-679.
- Feng Hai-bo, Dong Shao-gang, Shi Xiao-long, et al. The spatial distribution and its formed mechanism of fluoride in the unconfined and confined groundwater of Tuoketuo county, Inner Mongolia [J]. Geoscience, 2016, 30(3): 672-679.
- [7] 马君,于秀娟.呼和浩特市地下水现状与发展[J].内蒙古科技与经济,2008,(23):32-34.
- Ma Jun, Yu Xiu-juan. Current situation and development of groundwater in Hohhot [J]. Inner Mongolia Science Technology and Economy, 2008, (23): 32-34.
- [8] 邢世录,包俊江,杨亮平.呼和浩特市地区城市地下水现状及评价[J].内蒙古环境保护,2003,15(4):31-33.
- Xing Shi-lu, Bao Jun-jiang, Yang Liang-ping. Present situation and evaluation of groundwater in Hohhot city [J]. Inner Mongolia Environmental Protection, 2003, 15(4): 31-33.
- [9] 郭永海,沈照理,钟佐桑.河北平原深层碱性淡水形成的水文地球化学模拟——以保定、沧州地区为例[J].地球科学—中国地质大学学报,2002,27(2):157-162.
- Guo Yong-hai, Shen Zhao-li, Zhong Zuo-shen. Hydrogeochemical modeling for the formation of deep-Lying alkaline fresh groundwater in Heibei plain; a case study in Baoding and Cangzhou districts [J]. Earth Science-Journal of China University of Geosciences, 2002, 27(2): 157-162.
- [10] Rafiue T, Naseem S, Bhanger M I, et al. Fluoride ion contamination in the groundwater of mithi sub-district, the thar desert, pakistan [J]. Environmental Geology, 2008, 56(2): 317-326.
- [11] Dong Shao-gang, Liu Bai-wei, Shi Xiao-long, et al. The spatial distribution and hydrogeological controls of fluoride in the confined and unconfined groundwater of Tuoketuo county, Hohhot, Inner Mongolia, China [J]. Environ Earth Sci (2015) 74:325 - 335.
- [12] 邢丽娜,郭华明,魏亮,等.华北平原浅层含氟地下水演化特点及成因[J].地球科学与环境学报,2012,34(4):57-67.
- Xing Li-na, Guo Hua-ming, Wei Liang, et al. Evolution feature and genesis of fluoride groundwater in the shallow aquifer from North China Plain [J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2012, 34(4): 57-67.
- [13] 姜体胜,杨忠山,黄振芳,等.北京郊区浅层地下水总硬度变化趋势及其机理浅析[J].水文地质工程地质,2010,37(4):33-37. Jiang Ti-sheng, Yang Zhong-shan, Huang Zhen-fang, et al. Tendency and mechanism analysis of total hardness in shallow groundwater in the suburb of Beijing [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2010, 37(4): 33-37.
- [14] 曾昭华.长江中下游地区地下水中Mn元素的背景特征及其形成[J].上海国土资源,2004,25(1):9-12.
- Zeng Shao-hua. The background characteristics and formation of Mn element in groundwater in the middle and lower reaches of the Yangtze River [J]. Shanghai Land & Resources, 2004, 25(1): 9-12.
- [15] 曾昭华,曾雪萍.地下水中铁元素的形成及其与人群健康的关系[J].环保科技,2001,7(1):17-19.
- Zeng Shao-hua, Zeng Xue-ping. Formation of iron element in groundwater and its relationship with human health [J]. Environmental Protection and Technology, 2001, 7(1): 17-19.
- [16] 朱锦旗,王彩会,陆徐荣,等.苏锡常地区浅层地下水铁锰离子分布规律及成因分析[J].水文地质工程地质,2006,33(3):30-33.
- Zhu Jin-qi, Wang Cai-hui, Lu Xu-rong, et al. Iron

- manganese ion distribution rule and causes of Suxichang regional shallow groundwater [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2006, 33(3): 30-33.
- [17] 王 凌, 张国印, 孙世友, 等. 河北省环渤海地区地下水硝态氮含量现状及其成因分析 [J]. 河北农业科学, 2009, 13(10): 89-92.
- Wang Ling, Zhang Guo-yin, Sun Shi-you, et al. Analysis on the current Situation of Nitrate-N concentration in groundwater and its causes in Bohai Rim of Hebei Province [J]. Journal of Hebei Agricultural Sciences, 2009, 13(10): 89-92.
- [18] 王大纯, 张人权. 水文地质学基础 [M]. 北京: 地质出版社, 1985.
- Wang Da-chun, Zhang Ren-quan. Foundation of hydrogeology [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1985.
- [19] Huang Guo-xin, Liu Fei, Yang Ying-zhao, et al. Removal of ammonium-nitrogen from groundwater using a fully passive permeable reactive barrier with oxygen-releasing compound and clinoptilolite [J]. Journal of Environmental Management, 2015, 154: 1-7.
- [20] 沈照理, 朱苑华. 水文地球化学基础 [M]. 北京: 地质出版社, 1993.
- Shen Zhao-li, Zhu Yuan-hua. Hydro-geochemistry [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1993.

Chemical Characteristics and Causes of Confined Water in Hohhot

LIU Li-wei, FENG Hai-bo, LIU Xiao-bo, DONG Shao-gang

(College of Environment and Resource, Inner Mongolia University, Hohhot 010021, China)

Abstract: Based on the investigation and sampling analysis of hydrogeology as well as the groundwater flow system theory, this paper analyzed hydrogeochemical characteristics of confined water and condition of water pollution in Hohhot. The total underground confined water samples were 67 groups analyzing 23 indexes including the pH, chloride, total hardness, permanganate index, iron, manganese and ammonia nitrogen. The results show that: the confined groundwater quality in the study area of east-central or piedmont clinoplain of Daqing Mountain was satisfactory because only nitrate nitrogen was in excess of the standard levels. The confined groundwater quality in southwest was generally not satisfactory because the permanganate index, iron, manganese and ammonia nitrogen were in excess of the standard levels. Ammonia nitrogen became major pollutants in this area and the excess standard rate and maximum concentration were 19.4% and 10.85mg/L. High concentration was in the discharge area of groundwater, which mainly existed in Houbentan and the town of Taigemu. Part of nitrogen pollution caused by human activities entered confined water through rainfall and surface water, meanwhile, the denitrification of nitrate nitrogen enhanced in the reducing environment, leading to the continuous accumulation of ammonia in the hypoxic environment. 1Tab., 4figs., 20refs.

Keywords: groundwater; hydrogeochemistry; mineralization; ammonia nitrogen; Hohhot

Biography: LIU Li-wei, female, born in 1991, master, groundwater pollution and control.