

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2018.0108

崔小顺, 郑昭贤, 程中双, 等. 穆兴平原北区浅层地下水水化学分布特征及其形成机理[J]. 南水北调与水利科技, 2018, 16(4): 146-153. CUI X S, ZHENG Z X, CHENG Z S, et al. Hydrochemical distribution characteristics of shallow groundwater in the north of Muling Xingkai Plain and their formation mechanism[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2018, 16(4): 146-153. (in Chinese)

穆兴平原北区浅层地下水水化学分布特征 及其形成机理

崔小顺^{1,2}, 郑昭贤^{3,4}, 程中双³, 苏晨³, 李壮⁴, 吴宇龙⁴, 陈宗宇³

(1. 吉林大学 环境与资源学院, 长春 130021; 2. 吉林大学 水资源与环境研究所, 长春 130021;
3. 中国地质科学院 水文地质环境地质研究所, 石家庄 050061; 4. 中国地质大学(北京), 北京 100083)

摘要: 采用2016年8月采集的192个地下水样品水化学数据, 查明了穆棱河—兴凯湖平原(穆兴平原)北区第四系浅层地下水溶解性总固体(*TDS*)和地下水化学类型分布特征, 并结合研究区水文地质条件和人类活动影响分析其形成原因。结果表明: 穆兴平原北区浅层地下水主要以 *TDS* 小于 0.5 g/L 的淡水为主, 未见 *TDS* 大于 1.0 g/L 的微咸水。地下水 *TDS* 受含水介质、溶滤作用和地表水—地下水交互作用影响, 在区内呈多种分带规律。区内浅层地下水化学类型不具备明显的水平分带规律, 主要以 $\text{HCO}_3^- \text{Ca} \cdot \text{Mg}$ 型水为主, 与人为活动较少的20世纪60年代背景水化学类型($\text{HCO}_3^- \text{Ca} \cdot \text{Na}$ 型水)对照, 地下水中硫酸根、氯离子及镁离子的增加与煤矿开采、生活用水污染及大范围农业施肥等人类活动相关。

关键词: 溶解性总固体; 水化学类型; 水化学特征; 跨界含水层; 穆兴平原

中图分类号: P426.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2018)04-0146-08

Hydrochemical distribution characteristics of shallow groundwater in the north of Muling Xingkai Plain and their formation mechanism

CUI Xiaoshun^{1,2}, ZHENG Zhaoxian^{3,4}, CHENG Zhongshuang³, SU Chen³, LI Zhuang⁴, WU Yulong⁴, CHEN Zongyu³

(1. College of Environment and Resources, Jilin University, Changchun 130021, China;

2. Institute of Water Resources and Environment, Jilin University, Changchun 130021, China;

3. Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, Chinese Academy of Geological Science,

Shijiazhuang 050061, China; 4. China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: We studied the distribution characteristics of total dissolved solids (*TDS*) and hydrochemical types of shallow groundwater in the Muling Xingkai Plain on the basis of analyzing 192 groundwater samples. Then we explored the cause of formation by considering the hydrogeological conditions and human activities. The results showed that the shallow groundwater in the study area was mainly fresh water with *TDS* less than 0.5 g/L, and there was no saline groundwater with *TDS* higher than 1.0 g/L. Influenced by aquifer medium, leaching, and groundwater river interaction, the groundwater *TDS* showed zonal distribution in the study area. There was no obvious zonal distribution regularity of the hydrochemical types in the study area. Nowadays, the $\text{HCO}_3^- \text{Ca} \cdot \text{Mg}$ type water has replaced the $\text{HCO}_3^- \text{Ca} \cdot \text{Na}$ type water in the 1960s (considered as background water type) to become the common water type in the study area. The increases of sulfate ion, chloride ion, and magnesium ion in groundwater were mainly due to coal mining, domestic wastewater pollution, and fertilization.

Key words: total dissolved solids; hydrochemical type; hydrochemical characteristic; transboundary aquifer; Muling Xingkai Plain

收稿日期: 2017-12-12 修回日期: 2018-05-08 网络出版时间: 2018-05-18

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20180515.0913.002.html>

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目(DD20160311); 河北省自然科学基金项目(D2018504011)

Funds: China Geological Survey Project(DD20160311); Hebei Natural Science Foundation of China(D2018504011)

作者简介: 崔小顺(1985-), 女(朝鲜族), 吉林汪清人, 主要从事水文地球化学研究。E-mail: cxsh109@126.com

通讯作者: 苏晨(1985-), 男, 山西太原人, 助理研究员, 主要从事地下水资源评价研究。E-mail: sc.1219@163.com

穆棱河-兴凯湖平原(以下简称穆兴平原)位于我国东北三江平原南部,与俄罗斯接壤,是我国重要的商品粮食基地,也是大量珍稀濒危保护物种的栖息地,其由沼泽湿地为主,陆地水域、岛状林、草甸为辅的综合生态体系对整个东亚-远东地区的生态系统具有十分重要的调控作用^[1]。近年来,随着我国“一带一路”战略方针的加快实施,地处“中俄蒙经济走廊带”重要位置的穆兴平原,因其重要的经济定位和生态功能受到广泛关注。第四系含水层作为穆兴平原主要供水水源,在穆兴平原经济社会发展及生态体系建设中起着举足轻重的作用。随着穆兴平原城市化进程的加快推进与现代化农业程度的不断提高,地下水过量开采,农药、化肥的大量使用,引发了地下水降落漏斗、地下水污染等一系列环境与生态问题,导致地下水环境恶化,严重制约了穆兴平原经济、社会发展,并影响其生态承载力和功能^[2,3]。不仅如此,穆兴平原第四系含水层作为中俄跨界含水层,涉及国家之间利益关系,地下水资源分配、地下水污染问题有可能引发国际纠纷^[4],有必要尽快开展穆兴平原地下水环境调查与相关研究。浅层地下水化学分布特征,是研究区域地下水循环和水化学演化的主要手段,也是地下水资源评价的重要内容,可为科学管理、合理开发、公平利用跨界含水层提供指导意见,使跨国界地下水资源可持续利用,对维护国家主权、加强国家间睦邻友好关系具有重要的指导意义。然而,目前关于穆兴平原浅层地下水化学分布特征的研究较少,除1962年穆兴平原综合水文地质测量外^[5],未见其它相关研究。对此,本次研究利用2016年所采集的192个第四系浅层地下水样品的水化学数据,分析穆兴平原两大地下水系统之一的穆棱河北区系统地下水化学特征,并结合研究区水文地质条件进一步探讨其成因。

1 研究区概况

穆兴平原北区位于黑龙江省东部,与俄罗斯接壤,区内包括穆棱河、七虎林河、阿布沁河及穆棱河冲积平原。本区东起乌苏里江、西到张广才岭、北依完达山,南濒穆棱河,总面积5 252 km²,行政区跨越虎林市、密山市^[6]。本区属中纬度寒温带湿润、半湿润大陆性季风气候,冬季漫长,严寒而干燥,夏季短促,温暖且湿润,年平均温度2.9~3.1℃。区内雨量充沛,多年平均降水量为526~710 mm,6月至9月占全年总量70%;蒸发量为降水量1.5~2倍,5至9月占全年总量70%^[7]。

穆兴平原北区地形总体由西向东略微倾斜,坡

降1/6 000~1/10 000,地势低平,微有起伏,仅在虎林和虎头散布着被地堑切割残余的孤山。平原区分布着广泛的第四系地层,其中第四系含水层自山前至平原区主要分为中、下更新统坡积、洪积层和上更新统、全新统冲积层。坡积、洪积层中的潜水主要分布在山前岗阜状缓坡底部,主要含水层为黏土加碎石,一般厚度为10~20 m,地下水埋藏深度约为10~20 m,地下水位呈显著季节性动态特征;冲积层中的潜水主要分布在河漫滩及一级阶地之下,主要含水层为细、中、粗砂及砂砾石,其厚度由山前地区1~35 m,向平原区逐渐增厚到60~150 m,地下水埋藏深度通常在1~3 m,地下水位动态主要受大气降水和地表水控制,呈季节性动态特征。第四系浅层地下水主要接受大气降水的入渗补给、山区和丘陵区的基岩裂隙水的侧向径流补给和水稻田的灌溉入渗补给。地下水总体由西、西北向东、东南流动至区内最主要的两条河流,即乌苏里江和穆棱河(图1)。区内浅层地下水主要排泄方式以蒸散发和人工开采(以农业用水为主)为主,其次向地表水排泄,仅有极少量越流排泄至深层地下水。

穆兴平原第四系含水层在区内分布广泛,水量丰富,水质较好,埋藏浅,是区内城镇及工农业的主要供水水源。从2011年虎林市、密山市及其辖区地下水资源开采结构及开采量资料可知^[8],城镇居民用水量为2 193万 m³、第一产业用水量为133 918.4万 m³、第二产业用水量为1 594.7万 m³、第三产业用水量为425.5万 m³、生态环境用水量为9.4万 m³,其中农田灌溉用水量占第一产业用水量97.6%。由此可见,地下水开采中,农田灌溉用水量所占比重最大,这与研究区以农业用地为主的土地利用类型相符。

2 样品采集和测试

本次研究参考《地下水环境监测技术规范》(HJ/T 164-2004)^[9]中有关地下水水质控制监测井的布置原则和要求,根据区内浅层地下水的流向,考虑主要河流与地下水的潜在交互作用,以有限元网格剖分方法,在研究区不同地貌单元及第四系地层布置了192个样品取样点(图1)。地下水取样时间为2016年8月份(丰水期),即区内广泛分布的农田已经完成施肥和除草除虫施药工作。采集样品均为第四系浅层地下水,主要取自农田灌溉机井和乡镇居民供水民井。

所有水样在取样之前均进行洗井作业,洗井抽水量达到3~5倍井筒体积时,现场测量地下水水质参数,包括溶解氧(DO)、氧化还原电位(Eh)、酸碱度

(pH)、电导率(EC)、温度, 当上述参数稳定后进行取样。采集的水样由聚乙烯瓶储存, 并冷藏保存, 并

于一周内送达实验室进行相关测试前处理, 以保证测试数据的准确性。

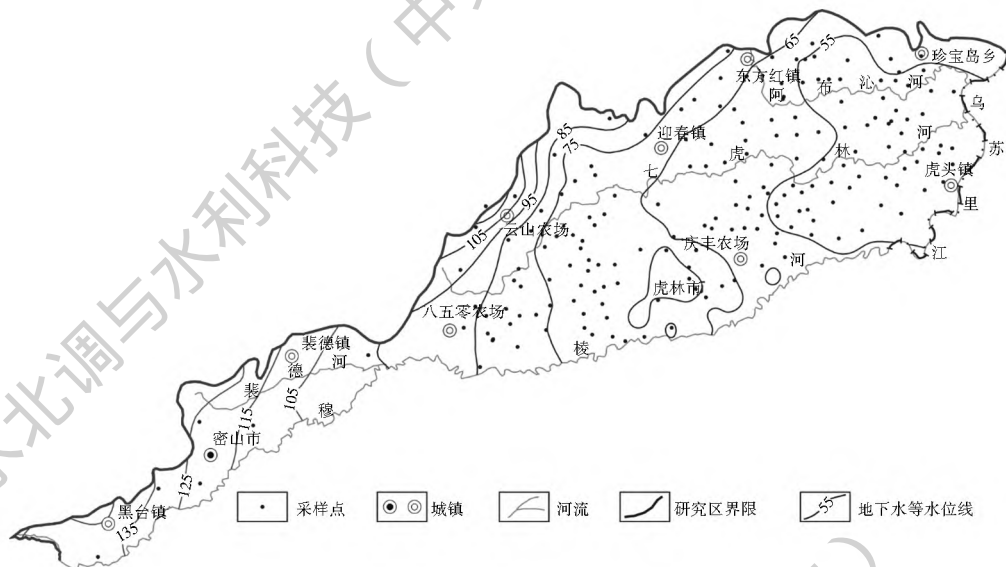


图 1 地下水流场及采样分布

Fig.1 The groundwater flow field and distribution of groundwater sampling points

水样的室内测试分析项目包括 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 HCO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 Cl^- 、 NO_3^- 、 $\delta D-H_2O$ 、 $\delta^{18}O-H_2O$, 测试分析方法参照《水和废水监测分析方法(第四版)》^[10] 和《同位素地质样品分析方法总则及一般规定》^[11]。水化学测试分析结果采用阴阳离子平衡的方法进行可靠性检查, 相对误差均小于 $\pm 5\%$, 氢、氧同位素测试分析相对误差分别为 $\pm 0.1\%$ 、 $\pm 0.025\%$, 确保本次研究中的水化学和同位素数据准确可靠。

3 结果与讨论

3.1 地下水溶解性总固体分布特征

溶解性总固体(TDS)是地下水中主要离子的集中体现, 也是研究地下水化学特征的重要指标^[12]。从浅层地下水 TDS 分析测试结果中可知, 穆兴平原北区广泛分布着 $0.1 < TDS < 0.5$ g/L 的淡水, 仅在个别点位(5 个水样)点状分布 $0.5 < TDS < 1.0$ g/L 的水体。为清晰地表达研究区 TDS 分布特征, 将 TDS 分区阈值在小于 0.5 g/L 范围内进一步细化后得出: $TDS < 0.2$ g/L 的地下水分布面积为 2 700 km², 占全区总面积的 51.4%, 主要沿乌苏里江、穆棱河、七虎林河和阿布沁河条带状分布, 在七虎林河与阿布沁河河间地带以及虎林以西七虎林河与穆棱河河间地带面状分布; $0.2 \leq TDS < 0.3$ g/L 的地下水的分布面积为 1 703 km², 占全区总面积的 32.4%, 主要在虎林和虎头间七虎

林河-穆棱河河间地带面状分布; $TDS \geq 0.3$ g/L 地下水的分布面积为 849 km², 占全区总面积的 16.2%。主要沿山前岗阜状缓坡新月形分布(图 2)。

从研究区浅层地下水 TDS 分布特征来看, 其空间变化较大, 但总体上具有一定的规律, 即自山前岗阜状缓坡至河成一级阶地, 以地貌单元为界, 沿区域地下水流向, 浅层地下水 TDS 逐渐降低, 与我国北方盆地中常见的地下水 TDS 沿径流路径逐渐增加的一般规律相反, 仅在七虎林河与穆棱河河间地带, 自八五零农场至虎头沿地下水流路径 TDS 呈增加趋势。经分析, 上述地下水 TDS 分布特征的成因主要有以下几方面:

(1) 含水层岩性。

岗阜状缓坡处于地形上升和下降的过渡地带, 此处含水层以坡积物和洪积物为主, 由亚黏土、砂、亚黏土夹碎石组成, 含水层透水性较差, 地下水流动缓慢, 径流相对较弱^[5]。因此, 降水垂直入渗对地下水补给有限的条件下, 以山区基岩裂隙水侧向径流补给为主的地下水在此处与含水层中矿物组分产生长时间水岩交互作用, 使含水介质中易溶岩类不断溶滤进入地下水, 导致地下水 TDS 上升。地下水径流至河成二级阶地, 因含水层中亚黏土含量相比岗阜状缓坡较少, 透水能力提高, 大气降水垂向入渗在地下水补给中的比重增加, 稀释了上游径流而来的高 TDS 地下水, 使地下水 TDS 降低。当地下水径流至区内广泛分布的河成一级阶地, 因其含水层主要由冲积砂、砂砾石组成, 透水蓄水性良好, 加之

地形平坦, 为大量接收大气降水和地表水入渗补给地下水进一步被降水和地表水稀释, 在山前岗阜状缓坡至一级阶地形成 TDS 趋减分带。

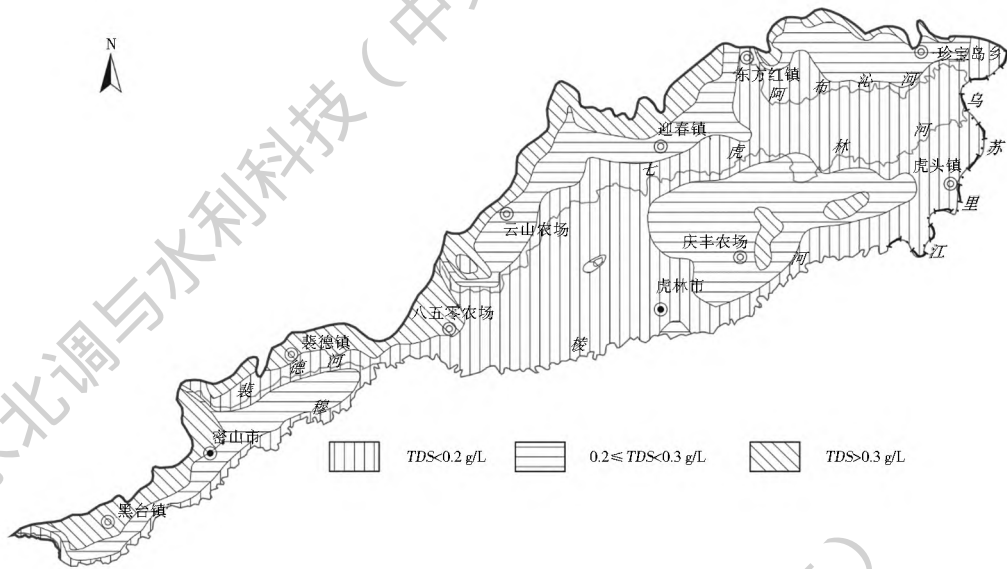


图 2 研究区浅层地下水 TDS 分区

Fig. 2 TDS zone diagram of shallow groundwater in study area

(2) 溶滤作用。

影响水化学场形成的主要作用包括溶滤作用、阳离子交替吸附作用、蒸发浓缩作用和混合作用。Gibbs 通过对全球典型地表水化学组分的分析, 将天然水组分的控制因素分为三个类型: 大气降水控制型、水岩作用控制型和蒸发沉淀控制型, 并利用 $TDS-Cl/(Cl+HCO_3)$ 关系图和 $TDS-Na/(Na+Ca)$ 关系图, 划分三种主要控制因素下天然水体的特征区域^[13-14]。Gibbs 图同样适用于人为影响较少的地下水化学成因及控制因素的研究^[15]。本次研究根据工作区地下水中 TDS 分带规律, 将潜水分 TDS 低值区 ($TDS < 0.2 \text{ g/L}$)、 TDS 中值区 ($0.2 \leq TDS < 0.3 \text{ g/L}$) 和 TDS 高值区 ($TDS \geq 0.3 \text{ g/L}$), 分别分析地下水在不同区域发生的水化学作用。从浅层地下水 Gibbs 图 (图 3) 中可知, 整个研究区潜水在不同 TDS 分区主要受水岩作用控制。因研究区浅层地下水中 TDS 均较低, 地下水中所有矿物饱和指数均小于零, 即处于矿物可溶状态, 可判定研究区 TDS 主要受溶滤作用影响。

$c(Mg/Na)$ 与 $c(Ca/Na)$ 相关性可用于评估不同类型矿物在地下水溶滤作用中的贡献量^[16-17]。从图 2、图 4 可知, 浅层地下水在穆棱河与七虎林河间地带 (TDS 低值区和 TDS 中值区) 自八五零农场至虎头沿线形成较长的地下径流, 在径流过程中产生以硅酸盐矿物溶解为主、碳酸盐矿物溶解为辅的溶滤作用, 使地下水 TDS 沿地下水流向缓慢增加。庆丰农场一带地下水开采量较大, 在此区形成了两

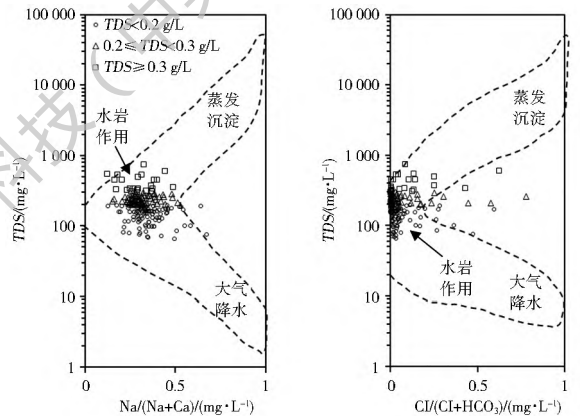


图 3 浅层地下水 Gibbs 图

Fig. 3 Gibbs plots of shallow groundwater in study area

处较为明显的地下水降落漏斗, 而且 TDS 高值区与漏斗中心基本重叠, 在含水介质并无明显变化的情况下, 表明地下水流经此处, 由漏斗边缘向中心汇聚, 形成了环状溶滤加强区, 将漏斗区周边含水介质中的可溶盐分聚集到中心区, 导致地下水 TDS 在漏斗中心升高。浅层地下水在七虎林河与阿布沁河河间地带自迎春镇至乌苏里江同样形成地下潜流, 但在径流下游区未出现 TDS 大于 0.2 g/L 的中值区, 表明以难溶的硅酸盐矿物风化溶解为主的地下水化学作用, 在较短的径流路径上, 对地下水 TDS 影响有限。而在岗阜状缓坡 (TDS 高值区) 地下水中 Mg/Na (中值为 1.42) 和 Ca/Na (中值为 0.76) 比值相比 TDS 中值区 (Mg/Na 中值为 1.35 , Ca/Na 中值为 0.72) 较高, 表明地下水溶滤作用中碳酸盐溶解比重有所增加。当研究区不同地貌第四系含水

介质物源相似的情况下,这也从另一侧面反映径流条件较好的一级阶地和河漫滩含水介质中碳酸盐岩矿物在长期的地下径流过程中已基本溶解殆尽,现阶段含水介质以硅酸盐矿物为主,而径流条件相对较差的岗阜状缓坡及二级阶地含水介质中还保留了较多相对易溶的碳酸盐岩矿物。

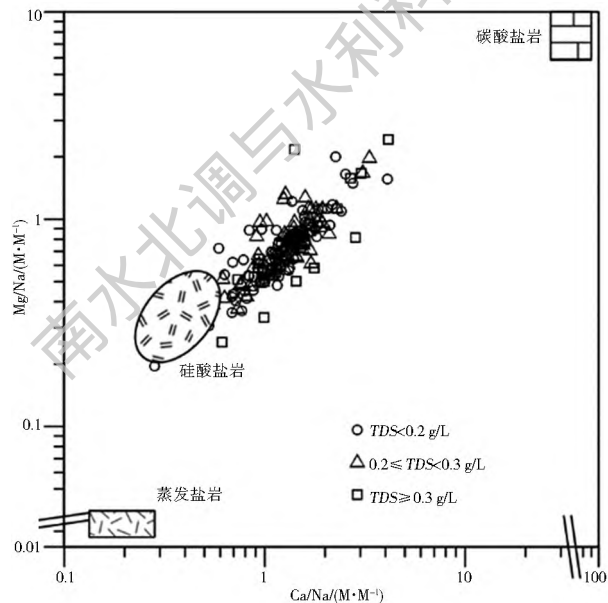


图 4 $c(\text{Mg}/\text{Na})$ 与 $c(\text{Ca}/\text{Na})$ 的相关性

Fig. 4 Relationship between $c(\text{Mg}/\text{Na})$ and $c(\text{Ca}/\text{Na})$ for shallow groundwater in study area

(3) 地表水与地下水交互作用。据穆兴平原地下水资源勘察资料^[18],研究区地表水与地下水的交互作用较为强烈,尤其河流两岸漫滩砂岗地段,因其含水层均由无亚粘土夹层的砂卵砾石组成,在丰水期,河水可大量入渗补给地下水。从阿布沁河河水与地下水化学指标对比统计(表 1)可知,阿布沁河不同河

段 $\delta^2\text{D}-\text{H}_2\text{O}$ 、 $\delta^{18}\text{O}-\text{H}_2\text{O}$ 、 Ca/Mg 、 pH 等同位素组成和水化学特征值与相应河段漫滩地下水相近,而且自河流上游至下游均呈现类似的“亲缘性”,根据 Kehew 等总结的湿地与地下水交互模型^[19],在丰水期主要河流沿线,形成以河水入渗补给地下水为主的水质交互带,使地下水 TDS 在河流两岸呈带状低值区。

表 1 阿布沁河与相邻地下水化学指标对比统计

Tab. 1 Comparison of hydrochemical indexes of groundwater and surface water

河段	水体	$\delta^2\text{D}-\text{H}_2\text{O}$ (‰)	$\delta^{18}\text{O}-\text{H}_2\text{O}$ (‰)	Ca/Mg ($\text{mM} \cdot \text{mM}^{-1}$)	pH
上游	河水	- 89	- 12.4	1.4	7.70
	地下水	- 85	- 11.7	1.1	7.31
中游	河水	- 87	- 11.9	1.6	7.33
	地下水	- 88	- 11.9	1.6	7.84
下游	河水	- 71	- 9.3	2.1	7.24
	地下水	- 76	- 9.7	2.3	7.11

3.2 地下水化学类型分布特征

地下水的化学成分是地下水与环境—自然地理、地质背景以及人类活动长期相互作用的产物^[20]。区域地下水化学类型可综合反映地下水赋存条件、水岩相互作用、补排循环特征等原生水文地球化学环境和地下水超采、地下水污染等人为活动影响^[21]。为了解穆兴平原北区浅层地下水化学类型及空间分布规律,采用舒卡列夫分类法对区域地下水化学类型进行划分。由于研究区地下水化学分类较多,为便于分析,对阴离子和阳离子分别确定其水化学类型。

从浅层地下水阴离子水化学类型分区(图 5)可知,研究区浅层地下水主要以 HCO_3^- 型水为主,在本区广泛分布,其分布面积为 $4\,823\text{ km}^2$,占研究区总面积的 91.8%。其它水化学类型在研究区内零星分

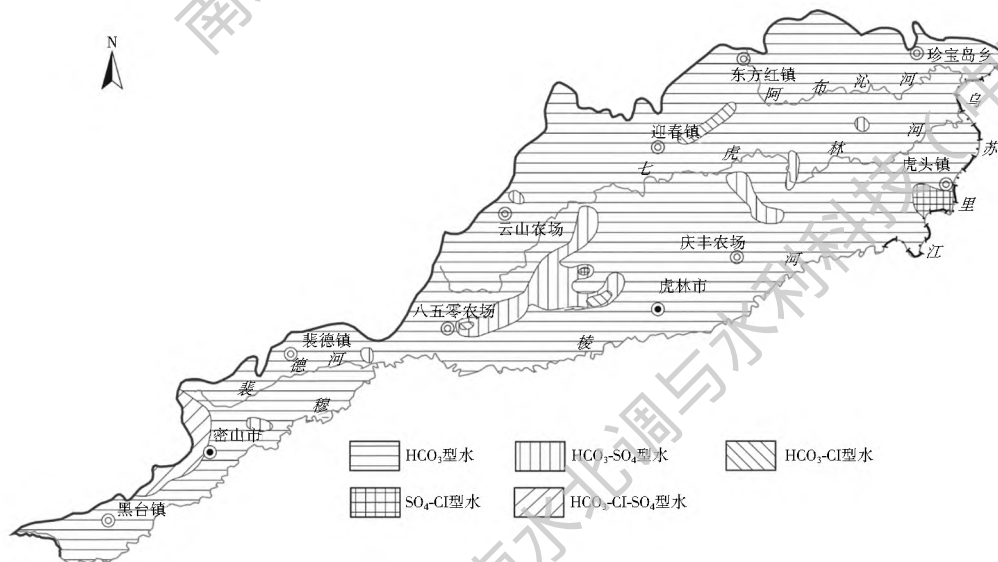


图 5 研究区浅层地下水阴离子水化学类型分区

Fig. 5 Zone diagrams of hydrochemical types (anions) in shallow groundwater

布, $\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4$ 型水主要在八五零农场至云山农场以东成条带状分布, 其分布面积 271 km^2 , 占研究区总面积的 5.2%; $\text{HCO}_3 \cdot \text{Cl}$ 型水、 $\text{HCO}_3 \cdot \text{Cl} \cdot \text{SO}_4$ 型水和 $\text{SO}_4 \cdot \text{Cl}$ 型水主要在迎春镇、密山、云山农场、虎头呈点状分布, 其分布面积分别为 82 km^2 、 38 km^2 、 37 km^2 , 占研究区总面积的 1.6%、0.7%、0.7%。

从研究区浅层地下水阴离子水化学类型分布特征来看, 其空间分布变化较小, 不具备水平分带性, 但其分布也具有一定的规律性。在岗阜状缓坡及河成二级阶地, 由于地下水主要产生硅酸盐矿物风化溶解和碳酸盐矿物溶解作用(图 4), 故以重碳酸型水为主。岗伏状缓坡及合成二级阶地部分地区, 因居民点居多, 人为污染风险加剧, 其中密山以西缓坡地下水中氯离子和硫酸根含量相比相同地貌其余地区较高, 而该区含水层中并无相关化学组成的蒸发盐岩, 判定该区为典型人为污染区, 地下水类型由 HCO_3 型水转变为 $\text{HCO}_3 \cdot \text{Cl} \cdot \text{SO}_4$ 型水。在河成一级阶地及河漫滩, 含水层为透水良好的砂和砾石组成, 因大气降水可入渗补给此区的地下水, 地下水从补给到排泄路径不长, 而且地下水以硅酸盐风化溶解

作用为主(图 4), 水化学成分仍以 HCO_3 型水为主, 与上游区缓坡地水化学类型变化不大。但在八五零农场以东形成带状分布的 $\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4$ 型水, 其原因是此带上游区煤田中硫化物在空气氧化和降水淋滤作用下, 增加了地下水中硫酸根含量。除此之外, 在虎头镇和云山农场局部点状分布 $\text{SO}_4 \cdot \text{Cl}$ 型水, 这可能与村镇集中垃圾填埋场相关, 各种污染物经过大气降水的溶解、淋滤、下渗等作用进入地下水, 导致地下水中氯离子和硫酸根含量增高, 进而完全改变天然地下水化学类型。

从浅层地下水阳离子水化学类型分区(图 6)可知, 研究区浅层地下水主要以 $\text{Ca} \cdot \text{Mg}$ 型水为主, 在本区广泛分布, 其分布面积为 4116 km^2 , 占研究区总面积的 78.4%。其它水化学类型在研究区内零星分布, Ca 型水主要在张广才岭山前分布, 其分布面积为 456 km^2 , 占研究区总面积的 8.7%; $\text{Ca} \cdot \text{Mg} \cdot \text{Na}$ 型水、 $\text{Ca} \cdot \text{Na}$ 型水主要在东方红镇、八五零农场、虎头局部呈小型面状分布, 其分布面积分别为 315 km^2 、 316 km^2 , 占研究区总面积的 6.0%、6.0%。

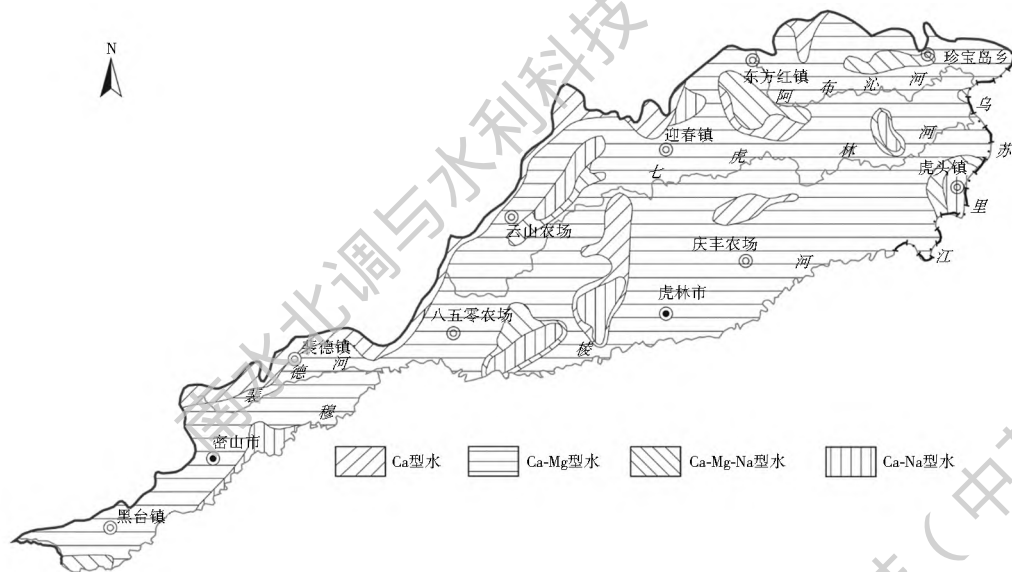


图 6 研究区浅层地下水阳离子水化学类型分区

Fig. 6 Zone diagrams of hydrochemical types (cations) in shallow groundwater

据 1962 年穆兴平原水文地质测绘资料^[5], 现状阳离子水化学类型相比人类活动较少的 20 世纪 60 年代背景地下水化学类型有明显变化, 原本区内广泛分布的 $\text{Ca} \cdot \text{Na}$ 型水转变为 $\text{Ca} \cdot \text{Mg}$ 型水, 这与近几十年快速发展的农业不无关系。据调查, 除乌苏里江沿线湿地自然保护区之外, 区内广泛分布的农田均以镁肥改善土质、增加产量。镁肥中的镁离子经过大气降水的溶解、淋滤等作用进入地下水, 导致区内地下水化学类型产生较大改变。山前带状分

布的 Ca 型水主要反映了大气降水中阳离子水化学特征。除虎头之外, $\text{Ca} \cdot \text{Mg} \cdot \text{Na}$ 型水、 $\text{Ca} \cdot \text{Na}$ 型水面状分布区地下水 TDS 与周边 $\text{Ca} \cdot \text{Mg}$ 型水相似, 也未见明显的阴离子水化学类型的变化, 表明此区地下水未见明显人为污染, 分析其钠离子毫克当量百分比的上升与此区普遍分布的火成岩风化亚黏土夹层有关, 此类亚黏土中含有较多的含钠盐矿物, 可在含水层中产生以钠离子为主为硅酸盐淋滤作用。[[$(\text{Ca} + \text{Mg}) - (\text{HCO}_3 + \text{SO}_4)$] 与 [($\text{Na} + \text{K}$) - Cl]

的相关性可用于评估含水层中产生的阳离子交替吸附作用^[22-23]。从图 7 可知, TDS 低、中值区大部分水点均落在 $y = -x$ 线上或附近, 反映含水层中发生阳离子交替吸附作用, 其中 $Ca \cdot Mg \cdot Na$ 型水、 $Ca \cdot Na$ 型水不仅均落在 $y = -x$ 线上, 而且阳离子交换量较高, 表明此类地下水中发生强烈的阳离子交替吸附作用, 使吸附于黏土矿物中的钠离子进入地下水, 进而与淋滤作用共同影响地下水化学类型。与之相反, 虎头镇周边地下水 TDS 相比周边地下水明显上升, 地下水以 $SO_4 \cdot Cl$ 型水为主, 表明此区地下水中钠离子的升高主要受到人为污染影响。

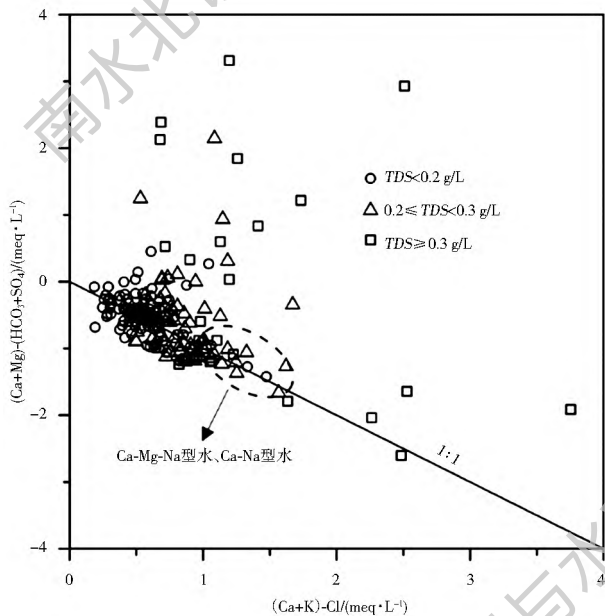


图 7 浅层地下水中 $[(Ca+Mg)-(HCO_3+SO_4)]$ 与 $[(Na+K)-Cl]$ 相关性

Fig. 7 Relationship between $[(Ca+Mg)-(HCO_3+SO_4)]$ and $[(Na+K)-Cl]$ for shallow groundwater in study area

4 结论

(1) 穆兴平原北区广泛分布着 TDS 小于 0.5 g/L 的浅层地下水, 未见 TDS 大于 1.0 g/L 的微咸水。地下水 TDS 分布特征可归纳为: 自山前岗阜状缓坡至合成一级阶地边缘, 沿区域地下水流向, 以地貌单元为界, 浅层地下水 TDS 逐渐降低; 在广泛分布的河成一级阶地, 沿地下水流向 TDS 逐渐升高, 在降落漏斗周边出现小型 TDS 面状高值区 ($TDS > 0.3$ g/L); 河流与地下水水质交互作用明显, 丰水期以河水补给地下水为主, 在河流沿线形成条带状 TDS 低值区 ($TDS < 0.2$ g/L)。

(2) 穆兴平原北区浅层地下水化学类型不具备明显的水平分带规律。本区含水介质主要以硅酸盐矿物和碳酸盐矿物组成, 使全区地下水主要以

HCO_3 型水为主, 仅在局部受强烈人为活动影响地区, 形成带状或点状分布的 $HCO_3 \cdot SO_4$ 型水、 $HCO_3 \cdot Cl$ 型水、 $HCO_3 \cdot Cl \cdot SO_4$ 型水和 $SO_4 \cdot Cl$ 型水。本区受长期农业灌溉影响, 全区地下水以 $Ca \cdot Mg$ 型水为主, 而在局部受含水介质矿物组分影响, 出现小型面状分布的 $Ca \cdot Mg \cdot Na$ 型水、 $Ca \cdot Na$ 型水。虎头附近地下水受人为污染影响, 地下水中钠离子含量增高, 导致在该区形成小型面状 $Ca \cdot Na$ 型水。

(3) 本文重点论述了穆兴平原 TDS 和水化学类型空间分布特征, 并对其成因进行了深入分析, 但人为活动对地下水化学特征的影响有待进行进一步探讨。随着工作程度的不断推进, 今后将开展典型人为污染物的示踪识别研究, 进一步确定人为活动对地下水化学组分的影响, 地下水污染识别及防控提供理论依据。

参考文献 (References):

- [1] 魏强, 佟连军, 杨丽华, 等. 三江平原湿地生态系统生物多样性保护价值[J]. 生态学报, 2013, 34 (3): 375-380. (WEI Q, TONG L K, YANG L H, et al. The biodiversity conservation value of wetland ecosystem in the Sanjiang Plain[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 34 (3): 375-380. (in Chinese)) DOI: 10.5846/stxb201305301241.
- [2] 杨湘奎, 孔庆轩, 李晓航. 三江平原地下水合理开发利用模式探讨[J]. 水文地质工程地质, 2006, 33 (3): 49-52. (YANG X K, KONG Q X, LI X K. Discussion of reasonable exploration and use pattern of groundwater resources in the Sanjiang Plain[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2006, 33 (3): 49-52. (in Chinese)) DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.2006.03.012.
- [3] 王勇, 柏钰春, 尹喜霖, 等. 三江平原生态地质环境分区研究[J]. 水文地质工程地质, 2004, 31 (6): 11-18. (YANG W, BAI Y C, YIN X L, et al. Assessment and zoning of ecologic geologic environment of Sanjiang Plain in Heilongjiang Province[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2004, 31 (6): 11-18. (in Chinese)) DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.2004.06.003.
- [4] 李尧. 基于亚洲地下水资源图的跨界含水层研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2013. (LI Y. Research on transboundary aquifers based on maps of groundwater resources in Asia[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing) (in Chinese))
- [5] 黑龙江省地质局水文地质工程地质大队. 第三章 水文地质[R]. 黑龙江省兴凯湖平原 1/20 万区域地质—综合水文地质测量报告书, 1962. (Hydrogeology and engineering geology team of Heilongjiang province geology survey. Chapter 3 Hydrogeology[R]. Report of regional geology and comprehensive hydrogeology mapping of Xingkaihu plain in Heilongjiang province, 1962. (in Chinese))

- [6] 袁立海, 欧阳忠, 吕绪东, 等. 穆棱河-兴凯湖平原稀土分析及稀土微肥应用的研究[J]. 河南大学学报, 1990(1): 81-86. (YUAN L H, OUYANG Z, LV X D, et al. Analysis of rare earth elements and application of rare earth fertilizers in Murling-Xingkai Plain[J]. Journal of Henan University, 1990(1): 81-86. (in Chinese)) DOI: 10.15991/j.cnki.411100.1990.01.017.
- [7] 刘芳芳. 兴凯湖湿地自然保护区生态质量评价[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2009. (LIU F F. Ecological quality evaluation of Xingkai Lake wetland nature reserve[D]. Haerbin: Northeast Forestry University (in Chinese))
- [8] 黑龙江省地质调查研究院. 第三章 区域水文地质概况[R]. 三江平原地下水污染调查评价成果报告, 2015. (Institute of geological survey of Heilongjiang province. Chapter 3 Hydrogeology[R]. Report of groundwater contamination evaluation of Sanjiang Plain, Northeast China, 2015 (in Chinese))
- [9] HJ/T 164-2004, 地下水环境监测技术规范[S]. (HJ/T 164-2004, Technical specifications for environmental monitoring of groundwater[S]. (in Chinese))
- [10] 国家环境保护总局《水和废水监测分析方法》编委会. 水和废水监测分析方法[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002. (State Environmental Protection Administration "Water and wastewater monitoring and analysis method" Editorial Board. Water and wastewater monitoring and analysis method[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2002. (in Chinese))
- [11] DZ/T 0184.1~0184.22—1997 同位素地质样品分析方法[S]. (DZ/T 0184.1~0184.22—1997, Analysis method of isotopic geology sample[S]. (in Chinese))
- [12] 张岩, 董伟红, 李满洲, 等. 河南平原浅层地下水总溶解固体和水化学类型的分布特征[J]. 水文, 2011, 31(2): 79-83, 68. (ZHANG Y, DONG W H, LI M Z. Study on distribution characteristics of TDS and hydrochemical type of shallow groundwater in Henan plain[J]. Journal of China Hydrology, 2011, 31(2): 79-83, 68. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1000-0852.2011.02.019.
- [13] GIBBS R J. Mechanisms controlling world water chemistry[J]. Science, 1970, 170: 1088-1090. DOI: 10.1126/science.170.3962.1088.
- [14] WANTY R B, VERPLANCK P L, SANJUAN C A, et al. Geochemistry of surface water in Alpine catchments in central Colorado, USA: resolving host rock effects at different spatial scales[J]. Applied geochemistry, 2009, 24(4): 600-610. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2008.12.012.
- [15] 郭华明, 郭琦, 贾永峰等. 中国不同区域高砷地下水化学特征及形成过程[J]. 地球科学与环境学报, 2013, 35(3): 83-96. (GUO H M, GUO Q, JIA Y F, et al. Chemical characteristics and geochemical processes of high arsenic groundwater in different regions of China[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2013, 35(3): 83-96. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1672-6561.2013.03.008.
- [16] MUKHERJEE A, SCANLON B R, FRYAR A E, et al. Solute chemistry and arsenic fate in aquifers between the Himalayan foothills and Indian craton (including central Gangetic plain): influence of geology and geomorphology[J]. Geochimica et Cosmochimica, 2012, 90: 283-302. DOI: 10.1016/j.gca.2012.05.015.
- [17] GRAILLARDET J, DUPRE B, LOUVAT P, et al. Global silicate weathering and CO₂ consumption rates deduced from the chemistry of large rivers[J]. Chemical Geology, 1999, 159: 3-30. DOI: 10.1016/S0009-2541(99)00031-5.
- [18] 黑龙江省地质局水文地质工程地质大队. 第二章 水文地质[R]. 黑龙江省兴凯湖平原一比二十万地下水资源勘查报告, 1962. (Hydrogeology and engineering geology team of Heilongjiang province geology survey. Chapter 2 Hydrogeology[R]. Exploration report of groundwater resources of Xingkaihu plain in Heilongjiang province, 1962. (in Chinese))
- [19] KEHEW A E, PASSERO R N, KRISHANAMURTHY R V, et al. Hydrochemical interaction between a wetland and an unconfined glacial drift aquifer, Southwestern Michigan[J]. Groundwater, 1998, 36(5): 849-856. DOI: 10.1111/j.1745-6584.1998.tb02204.x.
- [20] 沈照理. 水文地球化学基础[M]. 北京: 地质出版社, 1990. (SHEN Z L. Hydrogeochemistry Basis[M]. Beijing: Geological Press, 1990. (in Chinese))
- [21] 寇文杰. 地下水化学分类方法的思考[J]. 西部资源, 2012, (5): 108-109. (KOU W J. The thinking of groundwater chemical classification method[J]. Western Resource, 2012, (5): 108-109. (in Chinese))
- [22] GARCIAL M G, DEL H M, BLESAM A. Geochemistry of groundwater in the alluvial plain of Tucuman province Argentina[J]. Journal of Hydrology, 2001, 9: 597-610. DOI: 10.1007/s10040-001-0166-4.
- [23] 王晓艳, 李忠勤, 蒋继文. 天山哈密榆树沟流域地下水化学特征及其来源[J]. 干旱区地理, 2017, 40(3): 313-321. (WANG X Y, LI Z Q, JIANG C W. Chemical characteristic and sources of the groundwater in Yushugou River Basin, Hami, Tianshan Mountains[J]. Arid Land Geography, 2017, 40(3): 313-321. (in Chinese)) DOI: 10.13826/j.cnki.cn65-1103/x.2017.02.009.