

天津市奥陶系热储层地热流体水化学特征 及其主要影响因素

高宝珠¹⁾, 黎雪梅¹⁾, 聂瑞平²⁾, 穆春一¹⁾

1)天津地热勘查开发设计院, 天津 300250;

2)天津市地质基础工程公司, 天津 300191

摘 要: 天津境内在宝坻断裂以南的广大平原区, 蕴藏着丰富的中低温地热资源。在水平方向上地热流体自北东向南西矿化度逐渐增高, 水质渐趋复杂。其中奥陶系热储层是位于最上层的基岩裂隙型热储层、紧邻上覆的孔隙型热储层。其地热流体的矿化度变化范围是天津地区所有热储层中最大的、水化学类型也出现天津地区所有热储层中所独有的高硫、高钙水型: $\text{SO}_4 \cdot \text{Cl-Na} \cdot \text{Ca}$ 。本文以分布在沧县隆起区中南部的奥陶系地热井为研究重点, 通过地热流体水质检测、岩性化学分析、淋溶实验等手段, 分析了形成奥陶系水质的主要影响因素。

关键词: 地热流体; 奥陶系; 基岩裂隙型热储层; 水质类型; 岩性化学分析; 淋溶实验

中图分类号: P614.12 文献标志码: A 文章编号: 1006-3021(2009)03-369-06

Hydrochemical Properties of Geothermal Fluids in Ordovician Reservoirs of Tianjin and Main Affecting Factors

GAO Bao-zhu¹⁾, LI Xuemei¹⁾, NIE Rui-ping²⁾, MU Chun-yi¹⁾

1) *Tianjin Institute of Geothermal Exploration and Development Design, Tianjin 300250;*

2) *Tianjin Geological Foundation Engineering Company, Tianjin 300191*

Abstract: Tianjin area has abundant mesothermal-epithermal geothermal resources in its vast plain area south of Baodi fault. TDS values of geothermal fluids gradually increase horizontally from northeast to southwest, with the water types becoming increasingly complex. In all these reservoirs, the Ordovician reservoir is the uppermost fractured basement rock reservoir and is adjacent to the upper porous sandstone reservoirs, and the range of its TDS values is the widest, with the water type assuming unique characteristics in all reservoirs, i.e., $\text{SO}_4\text{-Cl-Na-Ca}$. This paper has dealt mainly with Ordovician heat wells located in the mid-south area of Congxian upheaval, and analyzed the main affecting factors for the formation of Ordovician heat fluid types by such means as geothermal water quality analysis, Lithology Component Appraising and ion elution test.

Key words: geothermal fluid; Ordovician; karst/fractured basement rock reservoir water type; Lithology Component Appraisal; ion elution test

天津地区位于华北盆地东北部, 在构造上分属于冀中拗陷、沧县隆起和黄骅拗陷三个Ⅲ级构造单元(天津地热勘探开发设计院, 2007), 构造方向NNE(王坤等, 2003)(图 1)。天津地下蕴含着丰富的中

低温地热资源, 其赋存于孔隙型热储层和基岩裂隙型热储层两大地热流体系统中(何满潮等, 2004), 目前的开采深度一般为 1000~3500 m。其中基岩裂隙型热储层自上而下的主要开采层位为: 古生界奥陶

本文由天津市科技攻关计划重点科技攻关专项项目(编号: 06YFGZGX02300)资助。

收稿日期: 2009-04-03; 改回日期: 2009-05-14。

第一作者简介: 高宝珠, 女, 1965年生。水文地质高级工程师。研究方向为水文地质及地热地质。通信地址: 300250, 天津市河东区卫国道 189 号。电话: 022-24582701。E-mail: gaobz01@163.com。

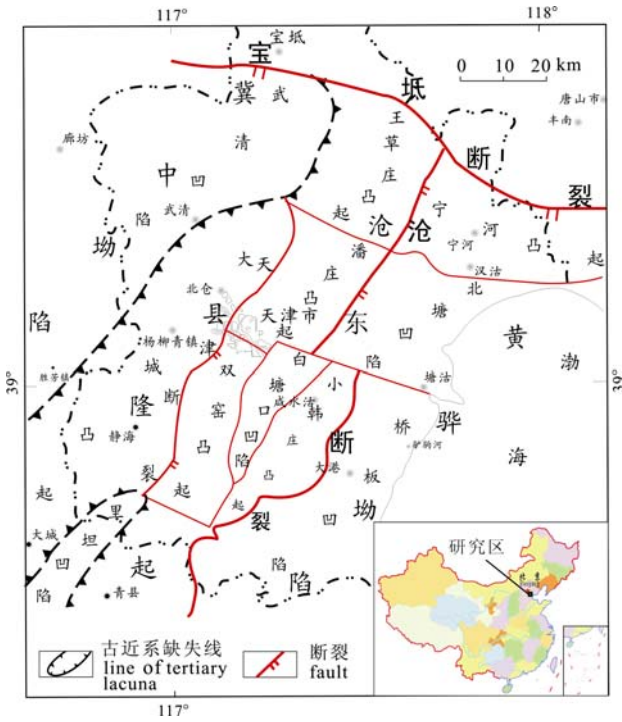


图 1 天津地区构造分区图
Fig. 1 Tectonic units in Tianjin area

系(O)、寒武系(Є)和中上元古界蓟县系雾迷山组(Jxw)三个热储层。因为拗陷区基岩埋藏深度大,开采井主要位于沧县隆起区。受区域地质构造、断裂、地层岩性、地热流体迳流速度和迳流距离等因素的影响,地热流体的矿化度在水平方向上自北东向南西、在垂直方向自上而下逐渐增高;水质类型渐趋复杂。雾迷山组热储层分布连续稳定,各地连通性较好且水质稳定,由北东向南西沿着地下水迳流方向,地热流体的矿化度由 1000 mg/L 逐渐增加至 6000 mg/L 左右;矿化度一般在 2000 mg/L 左右。而奥陶系虽然遵循矿化度自北东向南西逐渐增高的总体变化规律,但其变化范围是天津地区所有热储层最大的。位于最北部王草庄凸起区(仅有一眼开采井)奥陶系矿化度为 1000 mg/L 左右,水质类型为 HCO₃-Na;而位于板桥凹陷区的矿化度最高可达 39380 mg/L,水质类型为 Cl-Na(闫敦实等, 2000)。

1 奥陶系热储层分布范围及地热流体特征

奥陶系热储层属海相碳酸盐岩沉积建造,岩性以灰色、深灰色灰岩、白云质灰岩为主夹泥质灰岩,自下而上分为四个岩性组、六个段:冶里组、亮甲山组一段、亮甲山组二段、下马家沟组一段、下马家沟组二段、上马家沟组一段和上马家沟组二段。在拗陷区的埋藏深度普遍大于 5000 m,在沧县隆起区海河断裂以北的大部分地区及其南侧的隆起区核

部缺失。目前奥陶系热储层主要分布在沧县隆起区中南部的东、西两侧(图 2):即双窑凸起区(西区)和白塘口凹陷区(东区),也是本次研究的重点区域;在潘庄凸起区(北部)只有小面积分布。

从图 3 可以看出,东、西区地热流体的矿化度和离子组成有着明显差异,各区具体情况如(图 3)。

1.1 双窑凸起区

奥陶系顶板埋深为 1500~2700 m,热储层温度 55~70 ℃,其上覆地层为石炭—二叠系(C-P)或新近系(N)。矿化度为 2953~4689 mg/L,主要离子中的 Na⁺、Ca²⁺、Mg²⁺、SO₄²⁻随矿化度的增高而增高,但

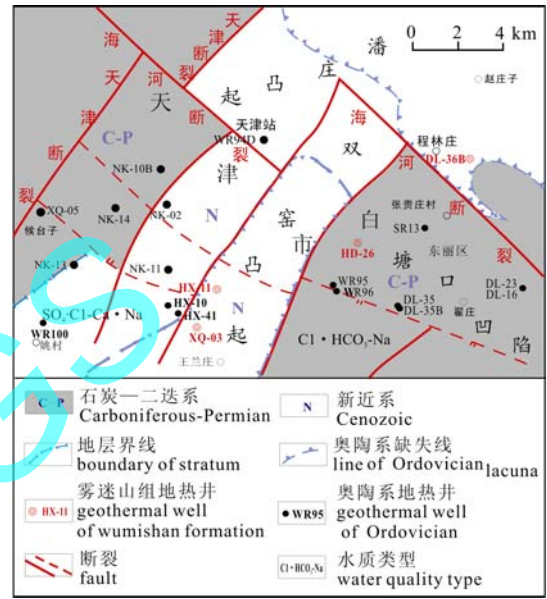


图 2 奥陶系上覆地层及水质类型分布图
Fig. 2 Distribution of strata overlying Ordovician and their hydrochemical types

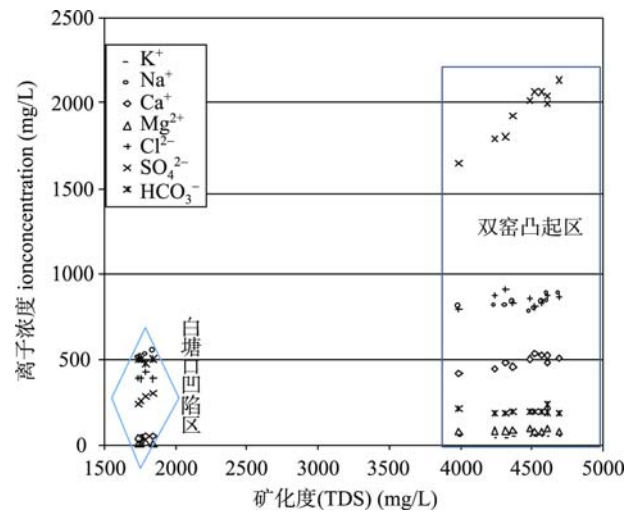


图 3 奥陶系地热流体在不同构造单元的离子特征
Fig. 3 Ion characteristics of Ordovician geothermal fluids in different tectonic units

HCO₃⁻、Cl⁻与矿化度呈负相关关系,水质类型以SO₄·Cl-Na·Ca为主,其中阳离子以Na⁺、Ca²⁺含量为主(高宝珠等,2007)是其它热储层所没有的。水质普遍劣于同一地区的新近系孔隙型地热流体(2200~3000 mg/L,水质类型为Cl·HCO₃-Na)和雾迷山组地热流体(矿化度1800~2200 mg/L,水质类型为Cl·SO₄·HCO₃-Na)。

1.2 白塘口凹陷区

奥陶系顶板埋深为1500~2700 m,热储层温度65~80℃,其上覆地层为C-P。矿化度为1742~1907 mg/L,水质类型为Cl·HCO₃-Na,随着矿化度的增高,主要离子含量呈增加趋势,与同一地区的馆陶组和雾迷山组地热流体水化学类型一致。

1.3 潘庄凸起区

奥陶系顶板埋深1100~1500 m,热储层温度55~70℃,其上覆地层为新近系。目前该区没有奥陶系地热井,预测矿化度小于1700 mg/L,水质类型为Cl·HCO₃-Na。

2 奥陶系地热流体特征

造成奥陶系东、西部水质差异的主要观点有:

(1) 岩性差异:认为东、西区奥陶系的沉积环境不同,导致岩性成分存在差异,从而影响了赋存其间的地热流体水质。

(2) 裂隙发育程度差异:推测白塘口以东地区受断裂的影响较大,岩溶裂隙发育,迳流较强;而天津断裂为弱导水断裂,不利于地下水迳流,从而造成东、西差异。

(3) 上覆地层的影响:认为奥陶系上覆有C-P分布的地区,必然造成奥陶系地热流体矿化度(高宝珠等,2007)尤其是SO₄²⁻含量的增高。但随着近年WR96D成分测定及其周边深井的开凿,查明这一地区亦有C-P的分布,且其水质与下伏雾迷山组和上覆新近系热流体水质相近。所以SO₄²⁻的形成条件远比以往认为的更为复杂。

为了查明各种可能造成奥陶系水质东、西差异的影响因素,本课题进行了进一步研究。

2.1 岩石化学成分分析(表1)

所取样品的WR94、WR96D、WR100分别位于潘庄凸起区、白塘口凹陷区和双窑凸起区的奥陶系不同组段,岩石化学分析结果表明(表1):亮甲山组和下马家沟组白云石含量高、灰岩纯度低、岩石成分复杂,SO₄²⁻含量低,不含泥页岩。下马家沟组的白云石含量、SO₄²⁻含量介于亮甲山组和上马家沟组之间,岩性变化较大、岩性及岩石结构复杂。上马家沟组,白云石含量较低;SO₄²⁻和泥质含量较高,夹有页岩。

2.2 淋溶实验

为了了解岩石成分在不同组段的溶解能力,对WR94D、WR96D及WR100孔的岩屑进行了可溶盐淋溶实验。取样品100 mg溶于400 g水中,淋溶温度与各井的出水温度相近,恒温保持15天。实验结果显示(表2)主要离子的溶出量呈如下特征:

2.2.1 全盐量在不同组段的特征及与岩石成分的关系
马家沟组的全盐溶出量显著大于亮甲山组,上、下马家沟组都有易溶的层位。

表1 不同构造单元奥陶系各组岩石成分鉴定名称折算表

Table 1 Name conversion table of lithologic component appraisal of various Ordovician rocks in different tectonic units

井号	WR100	WR96D	WR94D	WR94D	WR94D
井位方向	西	东		北	
构造单元	双窑凸起	白塘口凹陷		潘庄凸起	
取样深度(m)	1395-1478	2100-2180	1212-1252	1254-1334	1342-1448
岩样编号					
CaO(%)	33.79	47.53	47.15	40.79	31.56
折算方解石(%)	60.48	85.08	84.40	73.01	56.49
MgO(%)	2.48	1.46	5.06	6.52	15.79
折算白云石(%)	5.18	3.05	10.58	13.63	32.60
泥质及其它(%)	34.34	11.87	5.02	13.36	10.92
SO ₄ ²⁻ (%)	0.57	0.42	0.078	0.36	0.18
Ca/Mg	16.22	38.76	11.09	7.45	2.38
所属组段	上马家沟组	上马家沟组	下马家沟组二段	下马家沟组一段	亮甲山组
岩石基本名称	含白云质泥灰岩	含泥灰岩	含泥含白云质灰岩	含泥含白云质灰岩	含泥白云质灰岩
镜下鉴定	含泥含包粒	含泥含包粒	含泥含白云质	含泥含白云质	含泥白云质
主要岩性组合	灰岩夹页岩	灰岩	灰岩	灰岩	灰岩

注:检测单位为天津地质矿产研究所。

表 2 奥陶系岩屑淋溶实验统计表
Table 2 Statistics of ion elution tests of cuttings from Ordovician strata

井号	WR94D	WR94D	WR96D	WR100	WR94D	
取样深度(m)	1342-1448	1212-1252	2100-2180	1395-1478	1254-1334	
岩样编号						
淋溶温度()	65	65	70	65	65	
阳离子	K ⁺	3	3.1	5.2	7.2	4.8
	Na ⁺	14.8	7.2	27.5	38.1	14.3
	Ca ²⁺	8.2	17.6	9.9	13.4	30.7
检测项目 (mg/100 g)	Mg ²⁺	3.1	5.3	0.6	2.8	7.1
	Cl ⁻	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7
	阴离子	SO ₄ ²⁻	24	26	37.2	47.8
	HCO ₃ ²⁻	36.6	51.9	42.7	82.4	94.6
全盐量	91.9	111.8	125.34	204.1	204.4	
泥质及其它(%)	10.92	5.02	11.87	34.34	13.36	

注：检测单位为天津市国土资源部天津矿产资源监督检测中心。

比较表 1、表 2 中的各岩石成分及其相应的溶蚀量可知：SO₄²⁻、Mg²⁺的溶出量与相应的岩石成分百分含量成较好的正相关关系；但 Ca²⁺的相关性不好(如 号样的 CaO(%)=47.53%为最高，但其淋溶的 Ca²⁺=9.9 mg/100 g 却为最小)；泥质含量高的层位 Na⁺更易溶出；而各段的 Cl⁻溶出量相近。

2.2.2 主要淋溶离子与全盐量的关系

总体趋势，离子的溶出量与全盐量基本呈着正相关关系(图 4)。但 号样的 HCO₃⁻和 Ca²⁺溶出量有明显偏离，可能与其高碳酸盐、低泥质含量相关(表 1)；而 Na⁺溶出量与全盐量没有明显相关性，主要与泥质含量有关(表 2)。所以泥质含量高的热储层的地热水中更易溶入 Na⁺。

2.2.3 Ca/Mg 值

碳酸岩中的 Ca/Mg 值对孔隙度影响很大，该值降低孔隙度增加。所以亮甲山组和下马家沟组更利于储层的岩溶化进程；而且西区好于东区。抽水试

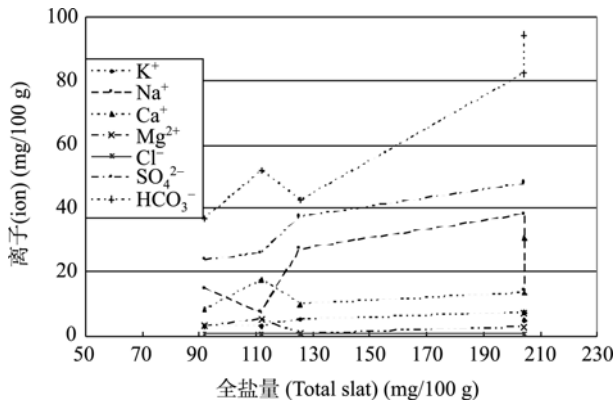


图 4 奥陶系岩性淋溶实验主要离子与全盐量关系图
Fig. 4 Relationship between major ions and total salt from Ordovician lithologic ion elution test

验井也显示，WR100 的渗透系数为 2.29 m²/d，大于 WR96D 的 0.65 m²/d(陈墨香, 1988)(该井经过酸化压裂后才成井)。仅根据这 2 眼井的情况看，东区奥陶系(至少在局部范围)的岩溶裂隙发育程度并不好于西区。

3 地热流体水质与岩屑溶出量对比

从表 3(检测单位：国土资源部天津矿产资源监督检测中心)中可知，地质流体中的大多数离子含量与可溶盐溶出量有较好的相关性，即 WR100 和 WR96D 大多数离子的溶出量比值和水质比值相差不大。但 SO₄²⁻和 Ca²⁺相差较大(Mg²⁺的比值也相差较大，因为 Mg²⁺与 Ca²⁺化学性质相近)。说明地热流体中，虽然奥陶系自身岩性对水质产生了一定影响，但不是高 SO₄²⁻含量的主要原因。

表 3 WR96D 和 WR100 井的岩屑淋溶结果与地热井水质对比表

Table 3 Contrast between ion elution results and water qualities of well WR96D and WR100

井号	WR96D	WR100	WR100/WR96D
检测项目	可溶盐溶出量 mg/100g	水质 mg/L	可溶盐溶出量 mg/100g 水质 mg/L 溶出量比值 水质比值
K ⁺	5.2	39.2	7.2 40.2 1.38 1.03
Na ⁺	27.5	473	38.1 773.2 1.39 1.63
Ca ²⁺	9.9	38	13.4 482 1.35 12.68
Mg ²⁺	0.6	8.1	2.8 82.6 4.67 10.20
Cl ⁻	0.7	395.3	0.7 911.1 1.00 2.30
SO ₄ ²⁻	37.2	244	47.8 1808 1.28 7.41
HCO ₃ ²⁻	42.7	497.3	82.4 186.1 1.93 0.37
全盐量	125.34	-	204.1 -
矿化度	-	1742	- 4311

4 高 SO_4^{2-} 的来源及形成原因

根据以上所做工作可知, 岩性及岩溶裂隙发育情况(据抽水实验及测井曲线)并不是造成东、西两区水质差异的主要因素; 高 SO_4^{2-} 的来源应主要来源于其上覆的 C-P。但双窑凸起区和白塘口凹陷区都有 C-P 分布, 所以东、西区的构造位置及其所经历了的地质事件、不同的迳流环境才可能造成如此大的水质差异。其主要影响因素有:

(1) 最新研究成果显示(天津地热勘探开发设计院, 2008), 东、西区的 C-P 在新生代经历了不同的构造热事件。储层温度相对较低的西区经历了岩溶释水作用, C-P 中大量的 SO_4^{2-} 进入奥陶系热储层; 而储层温度相对较高的东区则经历了有氧热水岩溶作用, C-P 经历了脱硫作用, 使 SO_4^{2-} 大大降低。

(2) 沧县隆起区在早新生代时期, 不管有无盖层存在, 都处于开启条件, 双窑凸起和白塘口凹的奥陶系经历了不同程度的淋溶作用。而根据地热井的抽水试验及测井曲线解释, 西区的岩溶发育好于东区。但燕山期的构造运动, 使天津断裂以西地层下沉, 双窑凸起区的奥陶系基本与 C-P 对接, 加之覆地层通过天津断裂与奥陶系的联通作用, 使 C-P 中的高 SO_4^{2-} 浸入热储层。虽然奥陶系本层的岩溶裂隙较发育, 但在大范围循环体系中地热流体向西迳流受到阻滞, 奥陶系地热流体矿化度升高。而东区奥陶系西与雾迷山组对接、东侧与小韩庄凸起区的古生界相接(其通过沧东断裂与黄骅凹陷区的新近系相接)。受高温、高压的雾迷山组地热流体的排挤压力, 其水平方向上的迳流速度大于垂向上 C-P 的浸润作用, 并最终排泄至黄骅凹陷区的新近系热储层中。这也是白塘口凹陷以东地区各热储层水质趋同的原因。

5 结论

(1) 泥质含量高的岩性段, 使地热流体中更易于聚集 Na^+ ; Cl^- 虽然在地层中的含量不高, 但其多以易溶岩形式存在、且溶解度很高, 所以仍可在地下水中大量聚集(王大纯, 2002)。随着矿化度的增高, 绝对含量也随之增高, 所以在较高矿化度的地热流体中, Na^+ 、 Cl^- 始终是主要离子。

(2) 东、西两区地热流体 SO_4^{2-} 和 Ca^{2+} 离子含量有较大差异, 因此其矿化度及水化学类型也有较大差异。因为 CaSO_4 的溶解度较高, 所以大量 SO_4^{2-}

的进入, 使 Ca^{2+} 不断溶入地热流体中, 其摩尔百分比可达 40% 左右。而西区的 HCO_3^- 离子含量仅是白塘口凹陷区的 2/5 左右, 这是因为 CaCO_3 的溶度积远小于 CaSO_4 , 受同离子效应的影响(钱会等, 2005)大量 Ca^{2+} 的溶入可与 HCO_3^- 反应产生沉淀, 并形成天津地区所有热储层独有的高硫、高钙水型: $\text{SO}_4 \cdot \text{Cl-Na} \cdot \text{Ca}$ 。

(3) 最新研究证明, 新生代西区发生了岩溶释水作用、而东区发生了有氧热水岩溶作用。加之后期迳流条件的差异, 从而导致东、西区 SO_4^{2-} 的差异。

(4) 奥陶系上覆地层 C-P 的分布, 是造成高 SO_4^{2-} 的必要条件, 但不是必然结果。

参考文献:

- 陈墨香. 1988. 华北地热[M]. 北京: 科学出版社.
- 高宝珠, 曾梅香. 2007. 地热对井运行系统中回灌井堵塞原因浅析及预防措施[J]. 水文地质工程地质, 34[2]: 75-80.
- 何满潮, 李春华, 朱家玲, 徐能雄, 张百鸣, 姚磊华. 2004. 中国中低焓地热工程技术[M]. 北京: 科学出版社.
- 钱会, 马致远. 2005. 水文地球化学[M]. 北京: 地质出版社.
- 天津地热勘探开发设计院. 2002. 天津市地下水热水成因、年龄及补给条件研究[R]. 天津: 天津地热勘探开发设计院.
- 天津地热勘探开发设计院. 2007. 天津市地热资源可持续发展潜力评价报告[R]. 天津: 天津地热勘探开发设计院.
- 天津地热勘探开发设计院. 2008. 天津市市区附近奥陶系地热流体形成条件和利用研究报告[R]. 天津: 天津地热勘探开发设计院.
- 王大纯, 张人权, 史毅虹, 许绍倬, 于青春, 梁杏. 2002. 水文地质学基础[M]. 北京: 地质出版社.
- 王坤, 李明朗, 徐平. 2003. 天津市地热资源开发可持续利用研究[J]. 资源调查与环境, 24(1): 7-13.
- 闫敦实, 于英太. 2000. 京津冀油区地热资源评价与利用[M]. 武汉: 中国地质大学出版社

References:

- CHEN Mo-xiang. 1988. Huabei geothermal[M]. Beijing: Science Press(in Chinese).
- GAO Bao-zhu, ZENG Mei-xiang. 2007. Causes and prevention measures of clogging in the reinjection well of geothermal double-well system[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 34[2]: 75-80(in Chinese with English abstract).
- HE Man-chao, LI Chun-hua, ZHU Jia-ling, XU Neng-xiong, ZHANG Bai-ming, YAO Lei-hua. 2004. Chinese medium-low enthalpy geothermal engineering technic[M]. Beijing: Science Press(in Chinese with English abstract).

- QIAN Hui, MA Zhi-yuan. 2005. Hydrogeochemistry[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- Tianjin Institute of Geothermal Exploration and Development Design. 2002. Geothermal fluid' study on form causation, age and supply conditions in Tianjin[R]. Tianjin: Tianjin Institute of Geothermal Exploration and Development Design(in Chinese).
- Tianjin Institute of Geothermal Exploration and Development Design. 2008. The research report of geothermal fluid forming conditions and utilization of of Ordovician around Tianjin downtown[R]. Tianjin: Tianjin Institute of Geothermal Exploration and Development Design(in Chinese).
- Tianjin Institute of Geothermal Exploration and Development Design. 2007. The Evaluate of Geothermal Resource's Continuable Exploiture Potential in Tianjin[R]. Tianjin: Tianjin Institute of Geothermal Exploration and Development Design(in Chinese).
- WANG Da-chu, ZHANG Ren-quan, SHI Yi-hong, XU Shao-zhuo, WANG Kun, LI Ming-lang, XU Ping. 2003. The sustainable development and utilization of the geothermal resource in Tianjin[J]. Resources Survey & Environment, 24(1):7-13(in Chinese with English abstract).
- YAN Dun-shi, YU Ying-tai. 2000. Geothermal resources evaluation and utilization of oil area in Beijing, Tianjin and Hebei[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press(in Chinese).

CAGS