

高放废物处置库雅满苏和 天湖地段地下水化学特征

郭永海, 李娜娜, 周志超, 董建楠, 季瑞利, 刘淑芬

核工业北京地质研究院, 北京 100029

摘要:新疆雅满苏和天湖地区是我国高放废物处置库场址的主要预选地段之一。在高放废物处置库选址和评价中,水文地球化学特征是最重要的评价因素之一。在 2009—2013 年间,开展了雅满苏和天湖地段区域水文地球化学调查,采集地下水样品 30 余组,根据样品测试结果,讨论了该地区水文地球化学特征,其主要结论是:研究区地下水主要为高矿化的咸水。地下水的 $\text{pH}=7.69\sim 9.64$; 水温 $11.8\sim 24.0\text{ }^\circ\text{C}$; 地下水矿化度 (TDS) 在 $542.7\sim 413\ 375.5\text{ mg/L}$ 之间变化,地下水的主要化学类型为 $\text{Cl}\cdot\text{SO}_4\text{—Na}$ 、 $\text{SO}_4\cdot\text{Cl—Na}$ 和 Cl—Na 型。控制地下水化学形成的主要作用是溶滤作用和蒸发浓缩作用。

关键词:地下水; 化学特征; 咸水; 雅满苏-天湖地段

中图分类号: TL942.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-9950(2014)S0-0078-07

doi: 10.7538/hhx.2014.36.S0.0078

Groundwater Chemical Characteristics in Yamansu and Tianhu Section for High Level Radioactive Waste Disposal Repository

GUO Yong-hai, LI Na-na, ZHOU Zhi-chao, DONG Jian-nan, JI Rui-li, LIU Shu-fen

Beijing Research Institute of Uranium Geology, Beijing 100029, China

Abstract: Yamansu and Tianhu area in Xinjiang is the main preselected section of disposal repository for high level radioactive waste (HLW) in our country. In the siting and site characterization study for high level radioactive waste repository, the groundwater chemical characteristics are the one of the most important evaluation factors. From 2009 to 2013, the field hydrogeochemical investigation was carried out and more than 30 groundwater samples were collected. According to the measurement data, the paper discussed the groundwater chemical features in Yamansu and Tianhu preselected section for China's high level radioactive waste repository. The main conclusion is that: the groundwater in the study area is mainly saline water with high dissolved solids, 7.69-9.64 pH value, 11.8-24.0 °C, 542.7-413 375.5 mg/L total dissolved solids and $\text{Cl}\cdot\text{SO}_4\text{—Na}$, $\text{SO}_4\cdot\text{Cl—Na}$ and Cl—Na chemical types. The hydrogeochemical features show that lixiviation and evaporation are the basic pattern forming the groundwater chemistry in the section.

收稿日期: 2014-09-01; **修订日期:** 2014-11-25

基金项目: 核设施退役及放射性废物治理专项资助项目(科工二司[2011]835号)

作者简介: 郭永海(1957—),男,吉林梅河口人,研究员,博士生导师,从事核废物地质处置方面研究工作

Key words: groundwater; chemical characteristics; saline water; Yamansu and Tianhu section

国内外的大量研究表明,高放废物处置库中的放射性核素是通过地下水的溶解作用、载体作用而迁移的。因此,处置库的安全性与场址水文地质因素息息相关。地下水化学特征对核素迁移的影响主要表现在:(1)地下水化学特征可以影响工程屏障的防护性能,如废物罐的腐蚀与地下水的 pH、Eh、Cl⁻ 含量等密切相关;(2)地下水化学特征直接影响放射性核素的迁移,如地下水的 pH、Eh 等因素可以对核素的溶解度、吸附、解吸、水相络合物的形成等产生重大影响,从而改变放射性核素的迁移能力^[1]。也就是说,高放废物中核素的溶解及其随后发生在地质介质中的迁移行为,均伴随与地下水、岩石间的各种物理、化学作用,而作用的方式和程度,一方面取决于围岩的地球化学特征,另一方面取决于水文地球化学特征。这些作用既可以起到阻滞或减缓核素在地下迁移的效果,也可能起到促进核素迁移的作用。因此,在高放废物处置库选址和评价中,必须开展水文地球化学特征研究。

此外,地下水化学成分是地下水与自然地理、地质环境以及人类活动长期相互作用的产物,一个地区地下水的化学特征,反映了该地区地下水的历史演化。研究地下水的化学成分特征,可以帮助水文地质工作者追溯一个地区的水文地质历史,推测地下水的起源、形成及其循环交替规律。这也是开展场址水文地球化学特征研究的重要原因之一^[2]。

雅满苏和天湖地段是我国高放废物处置库新疆预选区重要预选地段之一。2009 年以来在该区开展了场址筛选和评价研究。雅满苏和天湖地段地处人烟稀少的戈壁荒漠区,地下水基本上未开发利用,因此水文地质研究程度较低。在该区高放废物处置库选址过程中,地下水化学特征始终被视为非常重要的研究内容之一,投入了较多的工作。2009—2013 年期间,在研究区开展了区域水文地球化学调查工作,采集水化学样品近 30 余组,并对样品进行了测试。本工作以这批样品的测试数据为基础,讨论研究区区域水文地球化学特征。

1 自然地理概况

雅满苏和天湖地段位于新疆维吾尔自治区东

部,在行政上主要为新疆维吾尔自治区哈密地区管辖,该区处于哈密盆地边缘地带,气候干旱,降水稀少,蒸发强烈。多年平均降水量 22.5~30.3 mm,多集中在 7—9 月份,约占全年降水量的 80%。

在地貌上,该区属于低山丘陵区。由于缓慢的上升运动,在外应力的综合作用下,形成了岛状、缓坡状、垄岗状等多种地貌形态的低山丘陵。相对高度小于 200 m,山势平缓,山脊呈波浪状或锯齿状。其间沟谷发育,但切割微弱。

兰新铁路、雅满苏铁路支线、312 国道和新建的哈密至罗布泊公路从研究区通过,交通较为便利(图 1)。

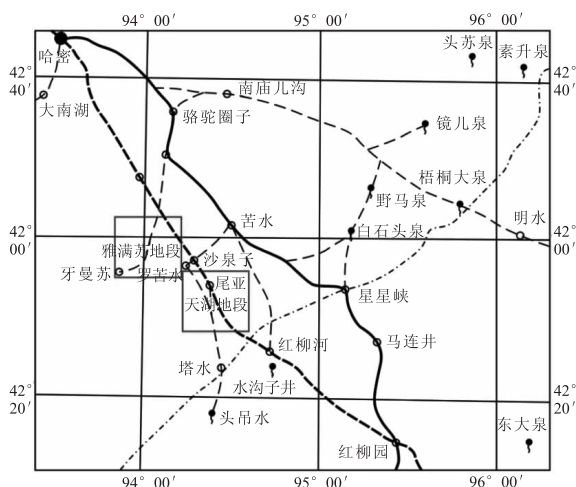


图 1 研究区位置图

Fig. 1 Location of study area

2 水文地质背景

根据地下水的赋存条件、含水层的结构特点及水动力特征,可将区内地下水划分为松散岩类孔隙地下水、碎屑岩类孔隙-裂隙水、碳酸岩类岩溶裂隙水、基岩裂隙水 4 种主要类型。其中松散岩类孔隙地下水主要分布在北部地区及沟谷和山间洼地地区,碎屑岩类孔隙-裂隙水主要分布在研究区北部及东南一带,碳酸岩类岩溶裂隙水仅在雅满苏铁矿附近地区少量分布,基岩裂隙水主要分布在南部广大地区。

地下水主要源自当地大气降水入渗补给。一般地说,降水量的多寡决定着一个地区地下水的

丰富程度。由于极端干旱的气候条件,区内地下水资源极为贫乏。

地形高低一般是控制地下水流动最直接的驱动力。该区总体地势是南高北低、东高西低,如天湖岩体地面标高可达 1 400 m 左右,雅满苏岩体地面标高可达 950 m 左右,而北部骆驼圈子一带地面标高为 800 m 左右,哈密市西南的大南湖一带地面标高低于 500 m。因此,地下水总体流向

亦为自东南流向西北。

地下水的排泄方式主要有侧向径流排泄、蒸发排泄和泉水排泄。其中蒸发是最主要的排泄途径。

3 地下水化学特征

3.1 地下水样品采集和测试

2009—2013 年 4 年期间,在研究区共采集了地下水样品 30 组,采样点情况列于表 1。采样过

表 1 研究区地下水取样点基本情况表

Table 1 Situation of groundwater sampling points in study area

No.	取样点位置 (Sampling location)	坐标(北纬) (Coordinate(N))	坐标(东经) (Coordinate(E))	地面标高 (Elevation)/m	水位埋深 (Water table depth)/m	水位标高 (Water table elevation)/m
1	冲沟泉 1	N41°53.312'	E93°42.923'	1 003	0.0	1 003
2	冲沟泉 2	N41°59.572'	E93°42.916'	893	0.0	893
3	天宝矿	N41°53.078'	E93°53.386'	1 081	31.0	1 050
4	盐湖 1	N41°43.021'	E93°39.510'	1 096	0.5	1 095
5	盐湖 2	N41°40.677'	E93°36.639'	1 125	1.5	1 123
6	吐资利克盐场	N41°40.243'	E93°41.062'	1 130	1.0	1 129
7	银矿东	N41°37.588'	E93°43.840'	1 176	1.0	1 175
8	骆驼圈子	N42°33.329'	E94°09.151'	807	10.0	797
9	铁矿水	N41°49.216'	E94°23.670'	1 298	5.0	1 293
10	二桥坑	N41°39.585'	E94°28.389'	1 403	1.2	1 402
11	红柳河	N41°34.031'	E94°40.592'	1 499	1.5	1 497
12	大口井	N41°51.234'	E94°21.095'	1 210	2.0	1 208
13	机挖坑	N41°41.681'	E93°41.528'	1 139	1.0	1 138
14	133/ No. 133	N41°41.959'	E93°42.336'	1 138	0.0	1 138
15	雅北盐矿	N42°8.525'	E94°4.931'	820	1.0	819
16	选矿厂湖	N41°21.203'	E93°39.979'	1 188	1.0	1 187
17	86 公里	N41°41.501'	E93°50.615'	1 193	0.5	1 192
18	雅西湖	N41°51.732'	E93°43.140'	1 037	1.0	1 036
19	土堆坑	N41°40.489'	E94°25.562'	1 398	1.2	1 397
20	1161 坑	N41°33.469'	E94°31.088'	1 455	3.5	1 451
21	瑞泰矿业	N41°47.303'	E94°21.026'	1 288	10.8	1 277
22	雅东挖坑	N41°53.989'	E94°02.309'	1 020	1.0	1 019
23	雅北泉	N42°00.178'	E94°00.523'	946	0.0	946
24	雅东北坑	N41°57.798'	E94°07.258'	995	0.9	994
25	选矿厂井	N41°17.232'	E93°43.820'	1 222	22	1 200
26	输油路泉	N42°23.807'	E93°52.367'	638	0.0	638
27	输油管沟 1	N42°31.229'	E93°43.897'	657	3.5	653
28	输油管沟 2	N42°34.164'	E93°36.689'	614	1.0	613
29	输油管沟 3	N42°36.287'	E93°31.247'	603	1.8	601
30	南湖乡西	N42°34.053'	E93°21.383'	506	1.3	503

程中,现场测量了地下水的物理化学参数,包括温度、电导率、溶解氧含量、pH值、氧化还原电位等。样品的测试由核工业北京地质研究院测试中心完成。

3.2 测试结果及其分析

由地下水现场物理、化学参数测量结果可知,地下水温度在 11.8~24.0 °C 之间,属于地下水正常温度范围;地下水电导率在 $1.7 \times 10^3 \sim$

$2.3 \times 10^5 \mu\text{S}/\text{cm}$ 之间,变化范围很大,反映了地下水来源、水文要素、地下水埋藏条件等因素变化强烈;地下水溶解氧含量在 0.63~4.1 mg/L 之间变化,属于浅部地下水溶解氧含量的正常范围;地下水 pH 值在 7.69~9.64 之间,反映地下水具有偏碱性特征;地下水氧化还原电位在 39~130 mV 之间,说明浅部地下水处于氧化状态。

表 2 给出了研究区地下水常量化学组分实验

表 2 研究区地下水化学组分测量结果

Table 2 Measurement results of main groundwater chemical components in study area

No.	$\rho/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$								TDS/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)
	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	NO ₃ ⁻	
1	20 485	1 063	926	2 095	30 546	11 148	110	900	66 318.0
2	6 047	79.7	85.6	618	6 141	2 228	133	81	18 424.3
3	2 922	53.5	118	691	3 298	3 644	101	92.1	10 777.0
4	72 105	1 858	1 194	1 658	77 010	51 940	480	6 650	206 005.0
5	135 046	2 388	1 556	2 786	191 660	30 035	74.6	4 450	363 508.3
6	9 495	236	192	655	8 997	9 486	167	610	29 167.6
7	7 220	224	190	695	6 802	8 025	183	302	23 271.9
8	60.3	4.79	19.6	102	129	158	138	20.6	542.7
9	1 509	50.7	66.5	331	1 531	2 039	162	35.5	5 628.5
10	2 145	64.1	78.7	529	1 777	3 788	145	33.2	8 454.3
11	5 150	92.6	237	430	6 309	3 933	157	50.5	16 230.1
12	1 685	47.1	67.9	282	1 453	2 152	237	61.1	5 829.4
13	14 230	464	386	1 080	12 800	15 825	190	462	44 911.3
14	29 340	536	457	1 020	21 924	33 790	338	565	87 294.1
15	152 900	/	3 380	5 970	209 400	41 550	351	6 850	413 375.5
16	6 495	79.1	60.7	971	8 774	4 335	37.7	329	20 733.65
17	43 550	558	486	1 410	54 510	15 120	113	5 735	115 690.5
18	2 332	67.5	69.4	998	2 870	3 758	22.9	201	10 106.4
19	3 110	26.9	86.5	608	2 666	4 417	111	40.7	11 010.6
20	3 060	23.5	82	566	2 794	4 266	139	108	10 969.0
21	1 640	15.2	41.7	225	1 616	1 994	157	71.6	5 682.0
22	28 800	223	415	742	39 695	11 805	146	1 285	83 038.0
23	22 600	125	541	559	26 305	12 845	296	805	63 928.0
24	1 270	15.4	12.4	497	1 701	1 703	27.9	64.3	5 277.1
25	3 060	12.5	99	531	4 233	2 525	86.7	85	10 588.9
26	110 000	276	5 125	430	178 300	18 200	613	/	312 637.5
27	898	7.92	24.4	439	707	2 104	160	/	4 260.3
28	1 070	6.24	13.9	354	1 034	1 756	131	62.3	4 361.9
29	281	1.08	9.32	43.6	220	198	280	/	893.0
30	1 870	23.4	364	379	1 827	3 455	942	/	8 389.4

室测试结果。由表 2 可以看出, Cl^- 和 SO_4^{2-} 是地下水主要阴离子, Na^+ 是地下水主要阳离子, 地下水矿化度(TDS)在 542.7~413 375.5 mg/L 之间变化, 变化幅度很大, 高、低含量之间相差 460 多倍; 地下水化学类型主要为 $\text{Cl} \cdot \text{SO}_4$ -Na 型, 其次为 Cl -Na 型和 $\text{SO}_4 \cdot \text{Cl}$ -Na 型。

图 2 是该区地下水化学三线图。由图 2 可以清楚看出, 地下水阴离子 Cl^- 一般占阴离子毫摩尔(mmol)的 40%~80%, SO_4^{2-} 一般占阴离子毫摩尔(mmol)的 30%~80%, HCO_3^- 所占比例很小; 阳离子 Na^+ 一般占阳离子毫摩尔(mmol)的 60%~90%, Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 所占比例很小。

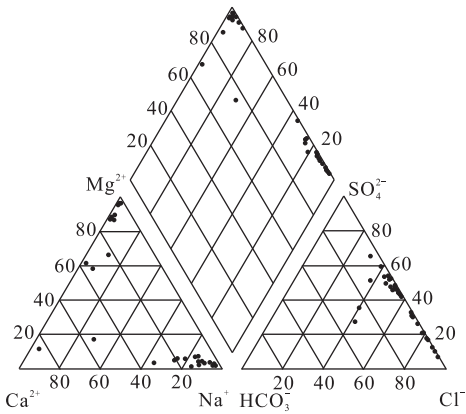


图 2 雅满苏和天湖地段地下水化学 Piper 三线图

Fig. 2 Groundwater Piper map of Yamansu and Tianhu section

通过地下水主要离子之间相互关系分析可知, 地下水 Na^+ 与 Cl^- 之间具有明显的线性相关关系, 即随着 Cl^- 的增加, Na^+ 也明显增加; 地下水 Ca^{2+} 与 HCO_3^- 之间相互关系很不明显, 说明地下水对与 Ca^{2+} 和 HCO_3^- 相关的矿物(方解石)达到过饱和状态; 地下水 SO_4^{2-} 与 Ca^{2+} 之间的相互关系也不很明显, 说明地下水对与 Ca^{2+} 和 SO_4^{2-} 相关的矿物(石膏)达到过饱和状态。

地下水的矿化度(TDS)是表征水化学特征的重要参数, 它是地下水中所含各种离子、分子与化合物的总量, 是反映地下水化学成分形成作用和地下水径流条件的重要指标。由地下水主要离子与地下水 TDS 之间的相互关系分析可知, 地下水 TDS 与 Na^+ 、 Cl^- 之间的线性关系十分明显, 说明地下水对岩盐尚未达到饱和状态; 地下水 TDS 与 NO_3^- 之间的线性关系也相对较明显; 而地下水 TDS 与 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 HCO_3^- 、 SO_4^{2-} 之间

的关系均不明显, 这种特征进一步说明, 地下水对钙、镁碳酸盐和硫酸盐矿物均已达到过饱和状态, 随着矿化度的升高, 地下水中的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 与 HCO_3^- 、 SO_4^{2-} 形成沉淀, 从水中析出, 因此, 矿化度的升高, 并不能导致这几种组分含量的升高。

需要说明的是, 雅满苏和天湖地段地下水 NO_3^- 含量相对较高, 最高达到 6 850 mg/L, 这在我国地下水中是十分罕见的。前人^[3]在开展水文地质普查时也注意到了这一现象, 并对其发生原因进行了解释, 认为可能是因为古代地下水污染所致; 或与野生动物饮水和栖息导致的污染有关。

本次调查对该区地下水 NO_3^- 含量高的现象也给予了重点关注, 发现 NO_3^- 含量很高的地下水多取自水位埋深较浅、相对封闭的洼地区域, 水位埋深一般小于 1 m, 地面盐渍化严重, 常有盐类覆盖于地表。此外, 通过地下水 NO_3^- 含量与 TDS 相关分析, 两者多呈正相关关系, 因此, 认为地下水 NO_3^- 含量高的现象可能主要与地下水蒸发强度有关。本区为戈壁荒漠地区, 人烟稀少, 动物也很少, 由此认为, 区内地下水 NO_3^- 含量高的原因基本上可以排除人为污染和动物污染。而沉积地层一般均或多或少含有有机氮, 这种有机氮可以构成地下水 NO_3^- 的天然来源。因此, 天然地下水中一般均含有 NO_3^- , 特别是在相对开放的地下水系统中, NO_3^- 一般均以常量组分存在, 在未受污染的地下水中, 含量一般不大于 30 mg/L。 NO_3^- 一旦进入地下水中, 在相对还原的条件下可以转化为 NH_4^+ 或 NO_2^- , 但一般不可能形成盐类而发生沉淀^[4]。因此, 设想如果在 TDS 为 0.5 g/L 的地下水中 NO_3^- 含量为 30 mg/L, 受蒸发浓缩作用使水的 TDS 变为 20 g/L 时, 水中 NO_3^- 含量就可以达到 1 200 mg/L。该区 NO_3^- 含量高的地下水 TDS 多大于 20 g/L, 这就不难解释地下水 NO_3^- 含量高的原因了。当然, 这种解释也许还缺乏足够的科学依据, 如果对地下水样品进行氮同位素测试, 若地下水 $\delta^{15}\text{N}$ 值位于 $-3\text{‰} \sim 5\text{‰}$ 之间, 就基本上可以认为区内地下水 NO_3^- 为天然来源, 而非人为和动物来源^[4]。在该区后续进一步的工作中, 可以开展地下水 $\delta^{15}\text{N}$ 同位素研究。

另据收集到的前人资料^[3], 研究区北部的洪积平原区和低山丘陵区, 地下水主要为 $\text{SO}_4 \cdot \text{Cl}$ -Na 型, 矿化度(TDS)一般在 3~10 g/L 之间; 而研究区南部广大的丘陵山区, 地下水主要为

Cl·SO₄-Na 型,矿化度(TDS)一般在 10~50 g/L 之间。经分析认为,这种差异的主要原因是:北部洪积平原和低山丘陵区地下水主要接受北部的东天山地下水侧向补给,且由于埋藏深度一般较大,受蒸发作用影响较小,使得这一带地下水矿化度(TDS)一般较低;而南部广大的丘陵山区,地下水主要来自当地大气降水的补给,由于降水量很小,气候极端干旱,使得这一带地表易溶盐分大量积累,降水形成的地表径流沿途溶解了较多的盐分,在入渗补给地下水之前,其矿化度(TDS)就已经很高了。如前人曾对暴雨过后 2 h 的洪水进行取样分析^[3],其矿化度(TDS)就已经达到了 5 g/L 之多。加上地下水多年强烈的蒸发作用,使地下水矿化度(TDS)不断升高,由此导致南部地区地下水矿化度(TDS)普遍高于北部地区。

3.3 地下水化学组分形成的分析

前已叙及,该区地下水的主要特征表现为矿化度高,多在 10 g/L 以上,分析其原因可主要归结为如下 3 个方面。

(1) 溶滤作用使地下水获得化学组分。在水与岩土相互作用下,岩土中一部分物质转入地下水中,这就是溶滤作用。溶滤作用是一种与一定的自然地理与地质环境相联系的历史过程。区内地处戈壁荒漠地区,岩石的物理风化作用强烈,导致浅部风化裂隙发育,同时,区内构造裂隙也较为发育,为溶滤作用创造了条件,导致岩土中的组分易于转入地下水中。

(2) 蒸发浓缩作用使地下水 TDS 升高。溶滤作用将岩土中的某些成分溶入地下水中,并随

地下水一起迁移。在干旱半干旱地区,蒸发往往是地下水的主要排泄方式之一,蒸发作用对地下水化学特征影响的主要表现形式是地下水 TDS 升高。因为蒸发作用只排走水分,盐分仍保留在余下的地下水中,随着时间延续,地下水溶液被逐渐浓缩,导致矿化度不断增大。

该区是我国典型的干旱区,降水稀少,但年均蒸发量约为 3 000 mm;区内地貌上属于丘陵地区,山间洼地等局部汇水区广泛分布,并具有地下水埋深浅的特征,具备地下水蒸发浓缩作用发生的有利条件,在长期的强烈蒸发作用下,不但浅埋区地下水不断浓缩,使盐分增加,同时,也使地表普遍发生盐渍化现象,地表盐渍化又可以导致降水形成地表径流含盐量增高,即入渗水本身的矿化度就很高。高矿化度的入渗水加上入渗后的地下强烈蒸发,必然导致地下水的高矿化。

图 3 是雅满苏和天湖地段地下水 Gibbs 图。由图 3 可以看出,地下水样品数据点只有极少数落在水岩作用区域,绝大多数分布于蒸发浓缩区域。说明控制地下水化学特征的主要机制是蒸发浓缩作用^[5-6]。

(3) 地下水循环交替缓慢加剧了盐分的聚集。含水介质中化学组分进入地下水的机制是水岩作用,水岩作用的程度在很大程度上取决于水-岩相互作用时间的长短,而地下水循环交替速度是决定水-岩相互作用时间的主要因素,实际上也在很大程度上决定了蒸发浓缩作用持续时间的长短。区内广泛分布岩浆岩、变质岩等低渗透介质,且地形相对平缓,水力坡度较小,地下水补给条件差,这些均不利于地下水循环与更新,却能有效延

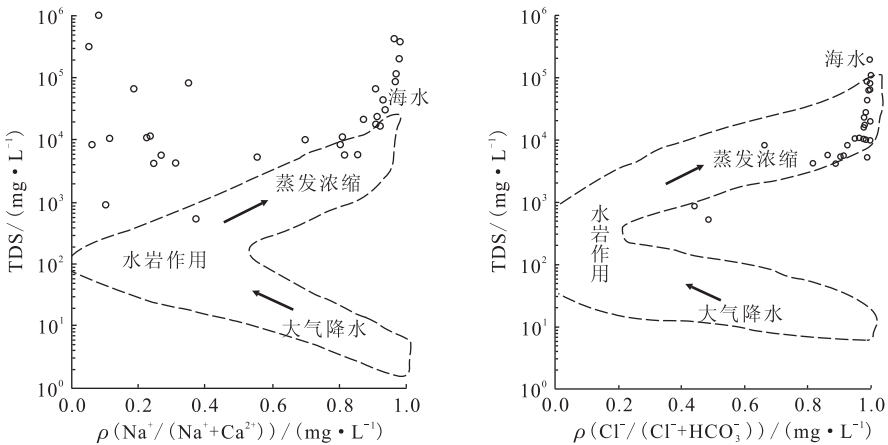


图 3 雅满苏和天湖地段地下水 Gibbs 图

Fig. 3 Groundwater Gibbs map of Yamansu and Tianhu section

长水-岩相互作用时间和蒸发浓缩的时间,从而加剧了地下水中盐分的聚集。

4 结 论

(1) 研究区地下水以高矿化为主要特征。 Cl^- 和 SO_4^{2-} 是地下水主要阴离子, Na^+ 是地下水主要阳离子, 地下水矿化度变化在 542.7~413 375.5 mg/L 之间, 地下水化学类型主要为 $\text{Cl} \cdot \text{SO}_4$ -Na 型, 其次为 Cl -Na 型和 $\text{SO}_4 \cdot \text{Cl}$ -Na 型。

(2) 地下水 pH 在 7.69~9.64 之间, 偏碱性; 氧化还原电位在 39~130 mV 之间, 处于氧化状态。

(3) NO_3^- 含量高, 最高可达 6 000 mg/L 以上, 属国内少见。分析认为, 地下水 NO_3^- 含量高的现象可能主要与地下水蒸发强度有关, 而与人类活动及动物活动无关。

(4) 溶滤作用、蒸发浓缩作用以及地下水循环交替滞缓是地下水化学组分形成的主要控制因素。

参考文献:

[1] IAEA. Hydrogeological investigation of sites for

the geological disposal of radioactive waste; Technical reports series, ISSN0074-1914, No. 391 [R]. Vienna: International Atomic Energy Agency (IAEA), 1998.

- [2] RAO N S, RAO P S. Major ion chemistry of groundwater in a river basin: a study from India[J]. Environ Earth Sci, 2010, 61: 757-775.
- [3] 新疆地质局第一水文地质工程地质大队. 新疆哈密雅满苏地区区域水文地质普查报告(1:50万)[R]. 新疆:新疆地质局第一水文地质工程地质大队, 1980.
- [4] Schuh W M, Klinkebiel D L, Gardner J C, et al. Tracer and nitrate movements to groundwater in the Norruem Great Plains[J]. J Environ Qual, 1997, 26: 1335-1347.
- [5] Gibbs R J. Mechanism controlling world's water chemistry[J]. Science, 1970, 170: 1088-1090.
- [6] Zhang J, Huang W W, Letolle R, et al. Major element chemistry of the Huanghe(Yellow River), China: weathering processes and chemical fluxes[J]. Hydrol, 1995, 168: 173-203.