

塔克拉玛干沙漠天然水体的化学特征及其成因

朱秉启 杨小平*

(中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029. * 联系人, E-mail: xpyang@mail.igcas.ac.cn)

摘要 天然水体特别是河水和地下水的物理特性和化学成分既受流域岩石风化程度的影响, 也受流域气候、地貌、地质构造背景等的制约. 依据对塔克拉玛干沙漠南部地区的克里雅河、策勒河、土米亚河、玉龙喀什河的河水及沙漠南、北缘和沙漠腹地的地下水的物理参数和主要阴、阳离子(Cl^- , HCO_3^- , SO_4^{2-} , NO_3^- , Na^+ , Ca^{2+} , K^+ , Mg^{2+})含量的测定结果, 分析探讨塔克拉玛干沙漠地区天然水体的特征及其中溶解物的来源. 离子含量通过离子色谱和盐酸滴定法测定, pH、可溶性固体总量(TDS)和电导率用便携式仪器在野外测定. 实验数据说明, 塔克拉玛干沙漠南部地区河水虽属淡水, 但TDS含量相对较高, 呈微碱性. 地下水水质变化在淡水和微咸水之间, TDS普遍高于当地河流河水. 河水和地下水的水化学组成都呈现一定的地域性特征, 反映了沙漠干旱气候和区域地质地貌的影响. 分析数据显示, 研究区河水中溶解物主要受岩石风化作用、蒸发结晶作用控制, 而地下水中溶解物受蒸发结晶作用控制. 天然水中溶解物主要来自蒸发岩, 人类活动对地下水已造成轻度污染.

关键词 沙漠 水化学 河流 地下水 自然地理 塔克拉玛干沙漠

归纳起来讲, 5 个主要因素决定河流系统中溶解物性质和离子相浓度, 即地貌、地质、流域面积、流域气候和水流量, 而地质因素中岩石类型对河水化学特征有着决定性的作用^[1]. 例如, 火成岩和变质岩地区的河流河水中溶解物总量通常只有沉积岩集水带河流的一半^[2]. 换言之, 河水的化学成分对其所经地区的岩石、气候等也有指示作用. 本文拟在对南疆塔里木盆地塔克拉玛干沙漠南部地区几条河流河水和沙区地下水的主量元素测试的基础上, 分析讨论主要阴、阳离子的来源.

1 区域概况

塔里木盆地气候条件为暖温带大陆性干旱气候, 年平均气温 10~12℃, 年平均降水量 15~60 mm^[3]. 盆地内部平均海拔 900~1000 m, 四周高山和高原平均海拔 4000~5000 m, 南部的昆仑山和北部的天山是盆地内水系的主要发源地(图 1). 发源于昆仑山脉西段的玉龙喀什河、克里雅河、策勒河等沙漠南缘河流, 由南至北流向塔克拉玛干沙漠, 穿越了不同的地质地貌单元(图 1, 2). 河流发源处基岩以太古代、元古代的片岩、片麻岩和古生代、中生代砂岩、砾岩、岩浆岩为主^[4]. 高山带花岗岩和变质岩等结晶岩所含盐分较难溶解, 可溶盐以重碳酸盐为主, 部分出现大

理岩和石灰岩. 低山带由第三系的含盐岩系所组成, 可溶性盐类多^[5]. 塔克拉玛干沙漠的流动沙丘覆盖面积高达 85%, 下覆地层中普遍发育板状石膏层、芒硝、石盐、钾盐等蒸发岩^[5].

2 分析方法

2003 年 9~10 月我们在沙漠北缘、沙漠腹地、沙漠南缘绿洲等地采集了天然水体(河水和地下水)样品, 井深多大于 30 m(图 1, 表 1). 水样的 pH、可溶性固体总量(TDS)、电导率是用校准过的 Eijkelkamp 18.28 型分析仪在野外测定, 测试过程温度自动补偿, 平行样分析结果的相对误差, pH 小于 $\pm 1\%$, TDS 小于 $\pm 0.5\%$, 电导率小于 $\pm 5\%$. 每个样品取满 2 个 0.5 L 的无色塑料瓶, 用蜡烛密封, 化学成分测试在开封时立即在中国科学院地质与地球物理研究所水分析实验室完成. 实验室分析时, 先将原始水样用 0.45 μm 微孔滤膜过滤. 量取过滤后的溶液 10 mL 加入去离子水稀释至 100 mL, 均匀混合, 用于测定 F^- , Cl^- , Br^- , NO_2^- , SO_4^{2-} , NO_3^- 和 H_2PO_4^- 等阴离子. Li^+ , Na^+ , NH_4^+ , K^+ , Mg^{2+} 和 Ca^{2+} 等阳离子测试液的制取, 是将过滤后的水样加入 10% 的优级纯硝酸稀释溶液若干滴使水样 pH<4, 再量取溶液 10 mL, 加入去离子水稀释至 100 mL, 均匀混合. 阴、阳离子测试均以电化

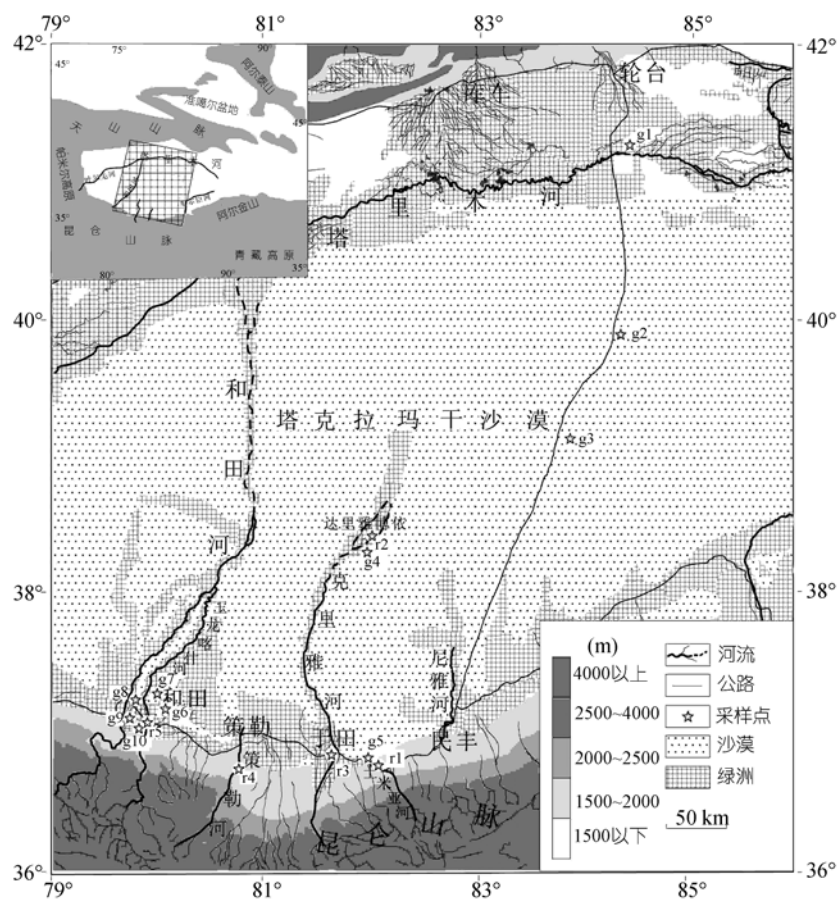


图1 塔克拉玛干沙漠地表水与地下水采样图
g表示地下水,r表示河水

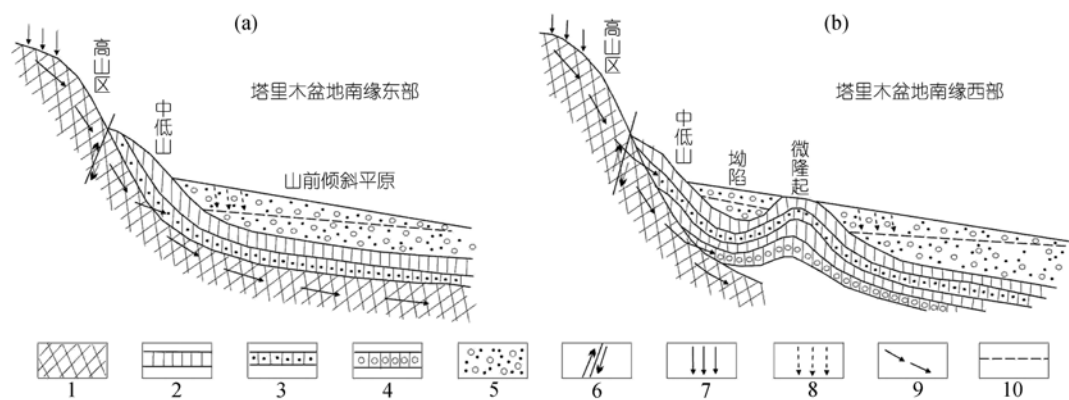


图2 塔里木盆地南缘水文地质结构图 [6]

(a) 东部区域;(b) 西部区域。1. 古生界变质岩,2. 第三系泥岩,3. 第三系砂岩,4. 第三系砾岩,5. 第四系砾石层,6. 断裂,7. 降水,8. 河床渗漏,9. 地下径流,10. 潜水位

学质谱检测法在离子色谱(Dionex 600)上检测完成。分析结果的相对误差,阴离子小于±3%,阳离子小于±2%。水样的碱度、 HCO_3^- 和 CO_3^{2-} 分析,采用盐酸滴定法测定。水样的硬度采用德国度,即每10

mg/L 的 CaO 为 1°, 通过 Ca^{2+} , Mg^{2+} 含量计算得出.

3 分析结果

3.1 河水的化学成分

沙漠南缘河流河水 TDS 变化范围 0.34~1.16 g/L(表 1), pH 值范围 7.79~8.13, 碳酸盐碱度变化范围 0.9~3.4 meq/L, 硬度范围 4.6~19.6, 为软水至中等硬水. 在所分析的河水样中, 玉龙喀什河(r5)的 TDS 最低, 阴、阳离子组成中都没有超过 50%的优势离子, 阴离子以 HCO_3^- 为主, 阳离子以 Na^+ 为主(表 2, 图 3). 策勒河水(r4)中碱土金属离子超过碱金属离子, 阴离子以 SO_4^{2-} 和 Cl^- 为主. 克里雅河流域中游和下游碱金属离子均超过碱土金属离子, 阴离子以 HCO_3^- 和 Cl^-

为主, 阳离子以 Na^+ 占绝对优势, 而克里雅河下游河水 r2 中 Cl^- 则占绝对优势. 米亚河水(r1)阴离子以 SO_4^{2-} 占优势, 阳离子以 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 较多(表 1, 2, 图 3).

3.2 地下水的化学成分

塔克拉玛干沙漠腹地地下水的 TDS 普遍高于外围绿洲地下水, 其 TDS 含量变化范围为 0.75~4.62 g/L; pH 值介于 7.58~8.58 之间, 碳酸盐碱度变化范围 1~7.8 meq/L; 硬度范围 12.1~49.4, 为中等硬水和硬水(表 1, 2). 腹地水样(g2, g3 和 g4)阴、阳离子分别以 Cl^- 和 Na^+ 占绝对优势. 在外围绿洲地下水水样中, 和田绿洲(g6~g10)、塔北平原(g1)阴离子没有 50%以上的优势离子, 阳离子均以 Na^+ 为主, 奥依托格拉克绿

表 1 塔克拉玛干沙漠河水样(r)和地下水样(g)的主要物理参数

样号	采样深度/m	pH	TDS/g · L ⁻¹	电导率 /ms · cm ⁻¹	碱度 /meq · L ⁻¹	硬度 (德国度)	采样点(图 1)描述
r1	—	7.98	0.69	1.29	0.96	19.6	土米亚河河水, 奥依托格拉克绿洲
r2	—	8.03	1.16	2.17	2.56	15.0	克里雅河下游河水
r3	—	7.95	0.57	1.06	3.38	10.9	克里雅河中游河水, 于田绿洲
r4	—	8.13	0.63	1.18	1.76	14.0	策勒河中游河水
r5	—	7.79	0.34	0.63	1.76	4.60	玉龙喀什河中游河水
g1	40	8.48	1.12	2.10	2.36	15.6	沙漠北缘
g2	30	8.10	2.71	5.00	1.38	22.3	沙漠腹地
g3	14	7.91	4.62	8.46	1.00	49.4	沙漠腹地
g4	30	8.58	3.66	6.73	7.72	39.9	沙漠腹地
g5	60	7.84	0.75	1.41	2.32	21.5	奥依托格拉克绿洲
g6	70	7.58	1.01	1.89	3.64	13.1	和田绿洲
g7	95	7.65	1.00	1.88	3.52	13.3	和田绿洲
g8	70	7.61	0.98	1.80	3.40	13.0	和田绿洲
g9	6	7.79	1.43	2.68	6.48	15.1	和田绿洲
g10	14	7.76	1.49	2.78	5.90	12.1	和田绿洲

表 2 塔克拉玛干沙漠河水(r)和地下水(g)水样中的主要阴、阳离子含量(单位: mg · L⁻¹)

样号	Cl^-	NO_3^-	SO_4^{2-}	HCO_3^-	Na^+	K^+	Mg^{2+}	Ca^{2+}	水化学类型 ^{a)}
r1	81.9	4.27	388	58.5	61.2	7.43	36.3	80.3	SO_4^{2-} - Ca^{2+} - Mg^{2+} - Na^+
r2	328	1.59	247	156	230	18.9	44.0	35.0	Cl^- - SO_4^{2-} - Na^+
r3	118	3.81	81.7	206	95.8	11.6	28.0	31.6	HCO_3^- - Cl^- - Na^+ - Mg^{2+}
r4	127	6.20	199	107	92.7	9.99	30.5	50.0	SO_4^{2-} - Cl^- - Na^+ - Mg^{2+} - Ca^{2+}
r5	33.4	2.28	40.3	107	32.9	5.78	9.55	17.2	HCO_3^- - Cl^- - Na^+ - Ca^{2+} - Mg^{2+}
g1	288	1.81	315	144	214	12.1	44.0	39.3	Cl^- - SO_4^{2-} - Na^+
g2	1022	4.32	655	84.2	539	32.7	73.1	39.1	Cl^- - SO_4^{2-} - Na^+
g3	2164	12.7	1234	61.0	969	55.7	158	94.4	Cl^- - SO_4^{2-} - Na^+
g4	1338	1.49	836	471	785	56.5	158	27.0	Cl^- - SO_4^{2-} - Na^+ - Mg^{2+}
g5	93.1	5.88	311	141	74.3	14.9	57.2	59.6	SO_4^{2-} - Mg^{2+} - Na^+ - Ca^{2+}
g6	131	7.62	151	222	116	18.2	33.1	39.4	Cl^- - HCO_3^- - SO_4^{2-} - Na^+ - Mg^{2+}
g7	128	7.37	148	215	117	18.1	33.9	39.6	Cl^- - HCO_3^- - SO_4^{2-} - Na^+ - Mg^{2+}
g8	126	4.44	144	207	116	18.2	31.8	40.8	Cl^- - HCO_3^- - SO_4^{2-} - Na^+ - Mg^{2+}
g9	210	0.63	250	395	192	41.3	48.6	28.6	HCO_3^- - Cl^- - SO_4^{2-} - Na^+ - Mg^{2+}
g10	202	0.55	231	360	227	26.6	39.1	22.0	HCO_3^- - Cl^- - SO_4^{2-} - Na^+

a) 阴、阳离子均以摩尔含量大于 25%的离子计

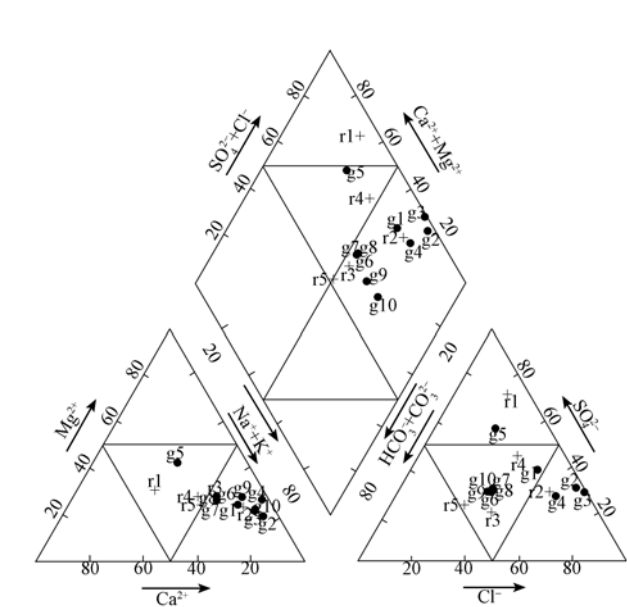


图 3 塔克拉玛干沙漠地表水和地下水主要离子化学组成的三角图解
以摩尔比例计算, +示河水, ●示地下水

洲(g5)阴离子以 SO_4^{2-} 占优势, 阳离子中则没有过半的优势离子. 绿洲浅层地下水(g9, g10)与深层位地下水(g6, g7 和 g8)之间, 沙漠腹地浅层地下水(g3 和 g4)与略深层位地下水(g2)之间相比较, 它们的离子组成类型相似(图 3).

依据碱度与 TDS 含量之间的关系图(图 4), 所采样品的水质可区分为 3 类: I 类是河水和绿洲浅层地下水, 其 $\text{TDS} < 1.5 \text{ g/L}$ 且 $\text{碱度} < 4.5 \text{ meq/L}$; II 类为沙漠腹地地下水, 其 $2.5 \text{ g/L} < \text{TDS} < 5 \text{ g/L}$, $\text{碱度} < 2 \text{ meq/L}$;

类是和田绿洲和达里雅博依绿洲深层地下水, 其 $1 \text{ g/L} < \text{TDS} < 4 \text{ g/L}$, $\text{碱度} > 5 \text{ meq/L}$.

4 水化学成分来源的讨论

由于大多数可溶矿物在水中溶解较慢, 因此与可溶解矿物接触时间越长的水, 其 TDS 越高 [2], 这应是塔克拉玛干沙漠同一区域内地下水 TDS 含量高于地表水的原因. 沙漠外围绿洲水样和沙漠腹地地下水化学组成之间较高的相关系数(见表 3)也说明沙漠边缘地表水和地下水与沙漠腹地地下水之间有较紧密的亲缘关系.

塔里木盆地南缘西部与东部水文地质(图 2)上的不同点在于西部存在山前坳陷带. 西部和田河流域上游古老基岩山体与山前平原之间的第三系构造带组成了山前背斜构造和山前纵向凹陷, 凹陷带填满

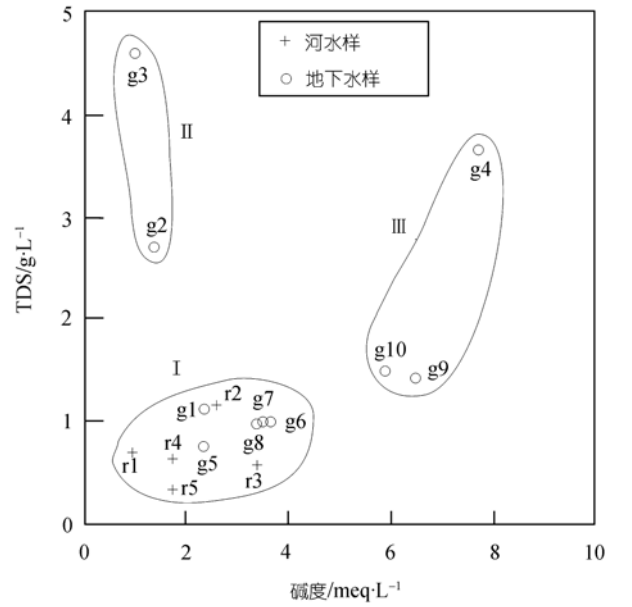


图 4 塔克拉玛干沙漠地表水和地下水样 TDS 与碱度的关系

了第四纪松散堆积物, 储藏地下水, 从而使和田河流域成为地下水调节的河流, 河流流量较稳定, 水的矿化度较低. 而策勒河及其以东河流的上游古老基岩山体与盆地沙漠之间缺少这种构造, 使山区流来的地下水快速下渗到盆地较深地层中, 使这些河流沿途没有地下水的补给, 导致河水矿化度相对较高. 塔克拉玛干沙漠河水的 TDS 远高于世界河流平均值 (115 mg/L) [8].

表 3 塔克拉玛干沙漠河水(r)与地下水(g)水样化学组成之间的相关系数 (采样点见图 1)

	r1	r2	r3	r4	r5
g1	0.77	0.98	0.95	0.97	0.97
g2	0.58	0.99	0.96	0.87	0.89
g3	0.55	0.98	0.95	0.84	0.87
g4	0.56	0.99	0.97	0.86	0.89
g5	0.99	0.70	0.66	0.94	0.83
g6	0.77	0.97	0.96	0.97	0.99
g7	0.77	0.97	0.96	0.97	0.99
g8	0.76	0.97	0.96	0.96	0.99
g9	0.76	0.97	0.95	0.96	0.97
g10	0.70	0.97	0.96	0.92	0.96

世界河流、湖泊及主要海洋水 TDS 与 $\text{Na}^+ / (\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+})$ 、TDS 与 $\text{Cl}^- / (\text{Cl}^- + \text{HCO}_3^-)$ 关系图 [9,10] (图 5) 区别出天然水化学成分 的 3 个主要来源, 即大气降

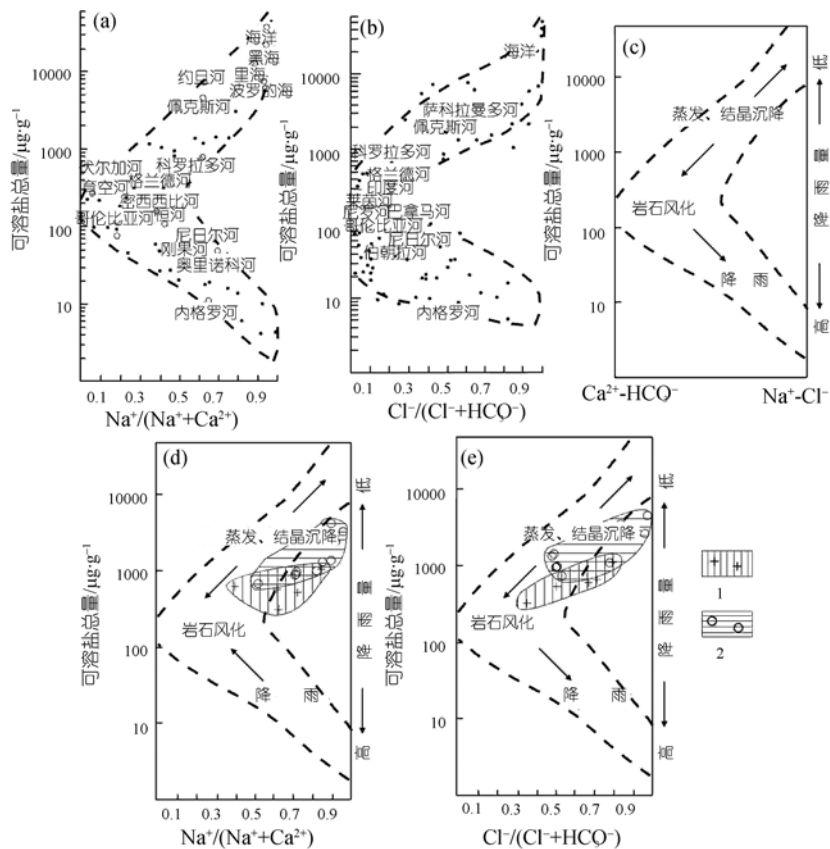


图 5 水化学组成 Gibbs 图解

(a)~(c)为世界河流、湖泊、海洋等水体的Gibbs图^[9,10], (d)和(e)为塔克拉玛干沙漠河水和地下水样在Gibbs图上的投影。1. 河水; 2. 地下水

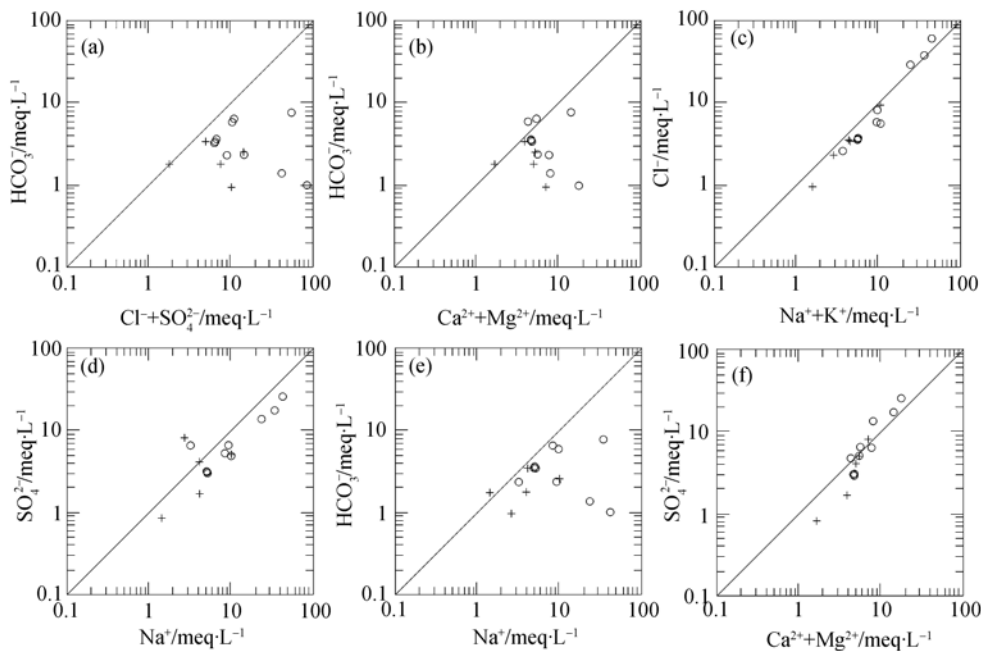


图 6 塔克拉玛干沙漠地表水和地下水中的主要离子比例关系

+示河水; o示地下水

水、岩石风化、蒸发-结晶. 将本文所述的塔克拉玛干沙漠地表水和地下水的水化学数据投绘于Gibbs图中(图5(d), (e)), 可以看出, 所有水样处于岩石风化作用和蒸发结晶作用的过渡带, 并远离大气降雨作用带, 河水更接近于岩石风化作用控制区, 地下水则更接近于蒸发-结晶沉降作用控制区, 表现出与一些中亚干旱区河流相似的特征^[8].

蒸发岩占地表岩石分布面积比例虽小(仅约1.25%), 它的风化溶解却可以贡献全球河流溶解物的17.2%, 硅酸盐的溶解物占全球河流溶解物的11.6%, 来自碳酸盐岩的约占50%^[11]. $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ 主要来源于蒸发岩或硅酸盐的风化产物, Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 可能来源于碳酸盐、蒸发岩或硅酸盐, Cl^- 和 SO_4^{2-} 主要来源于蒸发岩的溶解, HCO_3^- 主要来源于碳酸盐岩^[12]. 由图6(a)可以看到, 大多数数据点处在 $\text{Cl}^- + \text{SO}_4^{2-}$ 与 HCO_3^- 1:1等量线的下方且偏离等量线较远, 暗示蒸发岩来源远大于碳酸盐岩来源. 塔克拉玛干沙漠河水样的 $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})/(\text{Na}^+ + \text{K}^+)$ 比值的平均值为0.89, 比世界平均(2.2)低, 远低于以碳酸盐岩石风化为主的印度河流域(6.0)^[13].

$\text{Mg}^{2+} + \text{Ca}^{2+}$ 与 HCO_3^- 含量关系图(图6(b))也显示, 多数数据点偏离1:1等量线且处在该线下方, 暗示碳酸盐岩的风化作用不能完全解释水中的 $\text{Mg}^{2+} + \text{Ca}^{2+}$ 组成. 当蒸发盐的溶解对水化学组成起主要作用时, 水中 $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ 与 Cl^- 的分子含量比值应为1:1^[9]. $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ 与 Cl^- 的关系图(图6(c))所示, 多数数据点接近1:1等量线, 表明蒸发岩中的石盐(NaCl 和 KCl)是 $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ 和 Cl^- 离子的主要来源.

图6(d)中, 所有数据点接近 Na^+ 与 SO_4^{2-} 的1:1等量线, 图6(e)中, 除沙漠腹地地下水样外, 其他水样的数据点接近 Na^+ 与 HCO_3^- 1:1等量线, 也暗示硫酸盐矿物的溶解可能是水中 Na^+ 的重要来源. 由图6(f)可以看出, 所有水样的 Ca^{2+} , Mg^{2+} 与 SO_4^{2-} 关系密切, 进一步说明水中的 Ca^{2+} , Mg^{2+} 可能来源于硫酸盐矿物的溶解.

天然水中生物成因的物质如含氮化合物、硫和磷的化合物(NH_4^+ , NO_2^- , NO_3^- , SO_4^{2-} 和 H_2PO_4^- 等)的存在, 在一定程度能够反映生物或人类活动对水化学成分的影响^[14,15]. 研究区河水和地下水化学分析均没有检测到 NH_4^+ 和 H_2PO_4^- 等成分, 河水样 NO_3^- 平均含量3.63 $\mu\text{g/g}$, 地下水平均4.68 $\mu\text{g/g}$, 高于亚洲河水平均值(0.7 $\mu\text{g/g}$)和世界河水平均值(1 $\mu\text{g/g}$)^[16], 表明塔克拉玛干沙漠河流中 NO_3^- 的含量受到了一定程度人为活动(施肥等)的影响.

5 结论

塔里木盆地干燥的气候是影响塔克拉玛干沙漠地区河水和地下水化学组成的重要因素. 一方面, 强烈的蒸发作用使地表水和地下水浓缩, 矿化度增高, 另一方面, 盆地降雨稀少, 地表的淋溶过程微弱. 受向心地形控制, 盆地积盐普遍, 增加了河流和地下径流的可溶盐来源. 本文所研究的克里雅河、策勒河、玉龙喀什河河水的溶解物主要受岩石风化作用、蒸发结晶作用的双重控制, 而地下水中溶解物则主要来自蒸发岩, 受蒸发结晶作用的控制. 人类活动对地下水已造成轻度污染. 由于河流中下游地区缺乏支流注入、河水对沙漠腹地含盐地层的溶解作用, 使得克里雅河河水向下游出现矿化度增高的现象.

参 考 文 献

- Berner E K, Berner R A. The Global Water Cycle: Geochemistry and Environment. New Jersey: Prentice-Hall, 1987
- Holland H D. The Chemistry of the Atmosphere and Oceans. New York: John Wiley, 1978. 111—125
- 中国科学院塔克拉玛干沙漠综合科学考察队. 塔克拉玛干沙漠气候. 北京: 科学出版社, 1993. 3—10
- 中国科学院青藏高原综合科学考察队. 喀喇昆仑山-昆仑山地区地质演化. 北京: 科学出版社, 2000. 6—9
- 朱震达, 陈治平, 吴正, 等. 塔克拉玛干沙漠风沙地貌研究. 北京: 科学出版社, 1981. 1—4
- 中国科学院新疆综合考察队, 中国科学院地质研究所, 中国科学院新疆分院. 新疆地下水. 北京: 科学出版社, 1965. 25—32
- Fitts C R. Groundwater Science. Amsterdam: Academic Press, 2002. 285
- Sarin M M, Krishnasswami S. Major ion chemistry of the Ganga-Brahmaputra river systems, India. Nature, 1984, 312: 538—541 [DOI]
- Gibbs R J. Mechanisms controlling world water chemistry. Science, 1970, 170: 1088—1090
- Gibbs R J. Mechanisms controlling world water chemistry: Evaporation-crystallization process. Science, 1971, 172: 871—872
- Meybeck M. Global chemical weathering of surficial rocks estimated from river dissolved loads. Am J Sci, 1987, 287: 401—428
- Chen J S, Wang F Y, Xia X H, et al. Major element chemistry of the Changjiang (Yangtze River). Chem Geol, 2002, 187: 231—255 [DOI]
- Ahmad T, Khanna P P, Chakrapani G J, et al. Geochemical characteristics of water and sediment of the Indus river, Trans-Himalaya, India: Constrains on weathering and erosion. J Asian Earth Sci, 1998, 16: 333—346 [DOI]
- Roy S, Gaillardet J, Allegre C J. Geochemistry of dissolved and suspended loads of the Seine River, France: Anthropogenic impact, carbonate and silicate weathering. Geochim Cosmochim Acta, 1999, 63: 1277—1292 [DOI]
- Yang X. Chemistry and late Quaternary evolution of ground and surface waters in the area of Yabulai Mountains, western Inner Mongolia, China. Catena, 2006, 66: 135—144 [DOI]
- 刘英俊, 曹励明, 李兆麟, 等. 元素地球化学. 北京: 科学出版社, 1984. 439—441