

鄂尔多斯沙区天然水体水化学组成及其成因

任孝宗¹, 杨小平²

(1. 太原师范学院地理科学学院, 晋中 030619; 2. 浙江大学地球科学学院, 杭州 310027)

摘要: 天然水体水化学组成及其成因分析既有助于重塑和预测区域水文地质环境及水文地球化学发展历史, 也是水资源评价的基础。本文基于鄂尔多斯沙区天然水体水化学数据和前人在该地区的研究成果, 利用多种水化学分析方法, 对该地区天然水体的水化学组成及其成因进行分析。结果表明: 鄂尔多斯沙区毛乌素沙地和库布齐沙漠虽然具有不同的沙漠景观, 但其相同类型的天然水体具有相似的水化学性质和成因, 该现象的出现可能和两者具有相似的蒸发量有关。鄂尔多斯沙区受蒸发影响较小的深层地下水水化学类型以 $\text{Ca}^{2+}\text{-HCO}_3^-$ 型为主, 其水化学组成主要受控于岩石风化; 湖水蒸发较强烈, 水化学类型为 $\text{Na}^+\text{-Cl}^-$ 型, 其水化学组成主要受控于蒸发—结晶过程的影响; 浅层地下水和河水的水化学类型及其成因均处于两者之间, 具有过渡特征。离子比例关系显示, 蒸发岩风化、碳酸盐岩风化和硅酸盐岩风化在不同程度上影响着深层地下水、浅层地下水和河水的水化学组成。鄂尔多斯沙区地下水和河水虽然能满足灌溉水要求, 但由于蒸发强烈, 长期使用可能会引起盐碱化。本研究结果可为区域水资源可持续开发利用提供科学依据。

关键词: 鄂尔多斯沙区; 天然水体; 水化学组成; 水化学成因

DOI: 10.11821/dlxb202109013

1 引言

进入21世纪以来, 随着人口增长和社会经济的快速发展, 由水质危机导致的水资源问题比水量减少更加严重^[1-2]。影响水质的因素可以概况为人为因素和自然因素, 特别是对自然因素的探讨, 对于认识自然条件下水文地球化学演变具有重要意义^[3]。影响天然水体水化学组成的成因复杂, 受气候、地貌、水文地质、构造背景、补给类型、岩石类型及风化程度等多种因素的影响^[4], 但对于特定水体而言, 只有一些关键因素对其水化学组成起主要作用。分析天然水体的水化学组成, 有助于重塑和预测区域水文地质环境及水文地球化学发展历史, 并为区域水资源可持续开发利用提供科学依据^[5]。位于中国干旱/半干旱地区的沙漠/沙地水资源尤其匮乏, 其水化学组成特征对当地脆弱的生态环境影响更为深刻。正确认识该地区天然水体的水化学组成及其成因对于维持区域生态平衡、合理开发利用水资源具有十分重要的意义。

收稿日期: 2020-06-20; 修订日期: 2021-02-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(41672182); 中国科学院陆地水循环及地表过程重点实验室开放基金(WL2018004); 山西省高等学校科技创新项目(2019L0789); 太原师范学院青年学术带头人项目 [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.41672182; Key Laboratory of Water Cycle and Related Land Surface Processes, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, No.WL2018004; Scientific and Technological Innovation Programs of Higher Education Institutions in Shanxi, No.2019L0789; Youth Academic Leader Programs of Taiyuan Normal University]

作者简介: 任孝宗(1983-), 男, 甘肃人, 博士, 副教授, 研究方向为水化学、水文地球化学。E-mail: renxzmail@126.com

通讯作者: 杨小平(1964-), 男, 宁夏固原人, 教授, 博士生导师, 主要从事沙漠地貌、干旱区环境演变、荒漠化及风沙灾害防治、干旱地区古气候与水资源、绿洲演化等方面的研究。E-mail: xpyang@zju.edu.cn

鄂尔多斯沙区主要包括毛乌素沙地、库布齐沙漠以及零星分布有沙丘的宁夏河东沙区^[6]。对该地区天然水体水化学组成及其成因的探讨具有特殊的意义。首先, 鄂尔多斯沙区毛乌素沙地和库布齐沙漠位于同一地理单元——鄂尔多斯高原, 具有相同的构造背景, 都有湖泊和河流分布, 但两者地貌类型不同, 分别属于沙地和沙漠。因此, 对该地区天然水体水化学组成及其成因的研究既具有明确的地理学意义, 又丰富了不同地貌类型下探讨天然水体水化学演变规律的实践活动。其次, 毛乌素沙地和库布齐沙漠具有近似的经度分布范围(分别为 $107^{\circ}18'E\sim 110^{\circ}30'E$ 和 $107^{\circ}15'E\sim 111^{\circ}23'E$), 气候干旱, 地下水 and 地表水系统脆弱, 历史时期因气候和水资源问题导致多次沙漠化, 生态环境遭到破坏^[7]。为避免上述问题的再度发生, 对当地水资源的开发利用就必须建立在对其准确评价的基础之上。再者, 鄂尔多斯沙区特殊的地理位置导致其天然水体的水化学组成及其成因可对其毗邻的河套地区及黄河的水质产生影响, 因此对其天然水体水化学组成及其成因的探讨可为认识区域水质变化提供科学依据。

前人对鄂尔多斯盆地水文地质和水化学组成研究较多, 但对以毛乌素沙地和库布齐沙漠为主体的鄂尔多斯沙区天然水体水化学组成及其成因的研究较为分散。区域上分别对鄂尔多斯沙区西部都思兔河流域^[8]、中部苏贝淖尔地区^[9-10]、东部农牧交错带(红碱淖尔及其周边)^[11]、东南缘榆林地区^[12]、东胜煤田^[13]、东北地区^[14]、北部库布齐沙漠^[15-16]天然水体的水化学组成及其成因进行了研究。前人^[17]虽然对鄂尔多斯地下水 SO_4^{2-} 的空间分布和成因进行了一定研究, 但并未对天然水体的其他水化学组成及其成因进行深入探讨。

本文主要利用天然水体(包括河水、泉水、地下水、湖水和降水)的水化学综合指标及阴、阳离子的绝对含量(折线图)和相对含量(Mauch图), 应用Piper图、USSL图、Wilcox图、Gibbs图、扩展型Durov三线图、离子比例关系, 分析该地区天然水体的水化学组成及其成因, 以期对沙漠/沙地天然水体水化学成因规律的探讨提供参考, 为实现对水资源的可持续开发利用提供科学依据。

2 研究区概况

鄂尔多斯沙区位于黄河河套“几”字型以南, 长城以北, 西、北、东三面被黄河环绕, 南临黄土高原。沙区主体位于鄂尔多斯高原, 地势中西部高, 四周低, 特殊的地形使得发源于鄂尔多斯沙区的外流河均注入黄河。根据前人对鄂尔多斯盆地地下水系统的划分^[18-19], 鄂尔多斯沙区主体位于白垩系自流盆地地下水大系统中的北部沙漠高原单一结构地下水系统。鄂尔多斯沙区的沙漠/沙地既不同于中国东部沙地那样以固定沙丘为主, 也不同于中国贺兰山以西的沙漠那样以流沙为主, 而是呈现出流沙和固定、半固定沙丘交错分布的景观^[6]。

毛乌素沙地位于鄂尔多斯高原南部, 东、西为黄河, 北部紧邻库布齐沙漠但未接壤, 南部为黄土高原^[20], 面积约 4万 km^2 ^[21], 地势从西北部的 1600 m 下降到东南的 950 m 。由于季风对毛乌素沙地的影响从东南向西北逐渐减弱, 导致降水量从沙地东南部 $\sim 440\text{ mm}$ 减小到西北部的 $\sim 250\text{ mm}$ ^[22]。利用中国气象数据网鄂托克旗气象站数据及改进后的Penman公式^[23-24], 计算得到1990—2019年毛乌素沙地水面多年平均蒸发量约 1200 mm 。相对优越的水分条件使得毛乌素沙地主要以固定和半固定沙丘为主^[6], 沙地也分布着流动沙丘, 通常以新月形沙丘链为主, 最高可达 20 m ^[20]。毛乌素沙地的地下水和地表水较为丰富, 丘间地地下水一般埋深 $1\sim 3\text{ m}$ ^[6], 野外调查发现地下水水位有时 $< 1\text{ m}$ 。此外, 沙地内部分布着众多湖泊, 河流主要包括自东向西注入黄河的都思兔河, 自西北向东南注入黄河的黄甫川、窟野河、秃尾河, 以及流经毛乌素沙地的最大河流无定河(图1)。

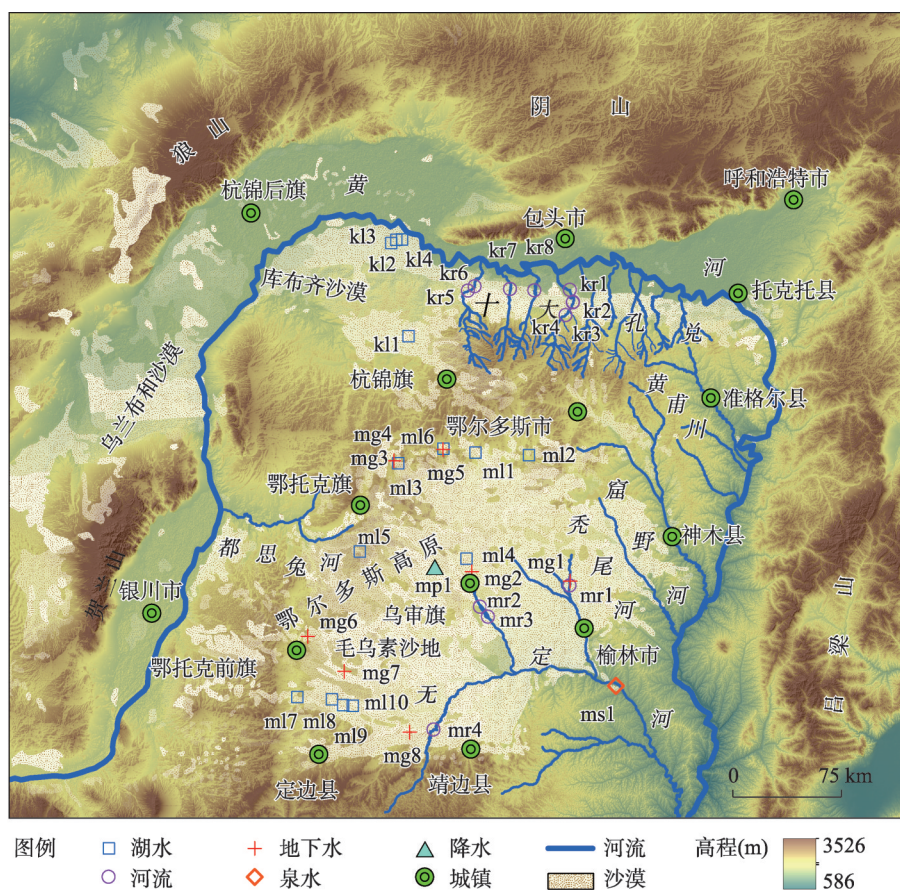


图1 研究区概况及采样点位置

Fig. 1 Overview of the Ordos Deserts and locations of the water sampling sites

库布齐沙漠位于鄂尔多斯高原北部边缘,地处黄河中游河套平原以南,西、北、东三面被黄河环绕^[25],面积约为1.87万 km²,呈带状分布,东西长约300 km,沙漠西部南北宽通常可达100 km,中部宽约10 km,东部不足5 km。沙漠东、中部被发源于鄂尔多斯高原的十大孔兑(十条黄河支流)自南向北切割而过,而西部较为完整,没有河流切割(图1)。利用中国气象数据网鄂托克旗气象站数据及改进后的Penman公式^[23-24],计算得到1990—2019年库布齐沙漠水面多年平均蒸发量也约为1200 mm。由于地处东亚季风边缘区,库布齐沙漠东、西部受东亚夏季风的影响程度不同,导致沙漠年均降水量从沙漠东部的~400 mm递减到西部的~150 mm^[26]。库布齐沙漠大部分位于半荒漠地带,仅东部有一小部分位于干草原地带,流动沙丘分布占绝对优势,其中以沙丘链和格状沙丘为主,仅边缘地区分布有固定和半固定沙丘^[6]。

3 样品采集与分析方法

3.1 样品采集

本文共采集水样36个,其中毛乌素沙地24个,库布齐沙漠12个。毛乌素沙地的水样包括1个泉水样品(ms1),位于靠近无定河的石峁村;4个来自无定河的河水样品

(mr1~mr4); 8个分布于沙地的地下水样品 (mg1~mg8, 其中mg3和mg5为浅层地下水, 其他为深层地下水, mg3和mg4距离较近, 在图1比例尺下显示为同一样品); 10个位于沙地西南和西北的湖水样品 (ml1~ml10); 1个 (mp1) 位于沙地中部乌审旗的降水样品 (图1)。

库布齐沙漠的水样均为地表水, 其中河水样品8个, 分布在十大孔兑中的西柳沟 (样品kr1~kr4样品距离较近, 在图1比例尺下显示为同一样品)、毛不拉孔兑 (样品kr5和kr6)、卜尔色太沟 (样品kr7) 和黑赖沟 (样品kr8); 湖水样品4个, 采集于西南的盐海子 (样品kl1) 以及西北部七星湖地区的大道图湖 (样品kl2)、东大道图湖 (样品kl3) 和扎汉道图湖 (样品kl4) (图1)。

3.2 分析方法

样品的水化学综合指标包括酸碱性 (pH)、氧化—还原电位 (Eh)、电导率 (EC)、可溶性固体总量 (TDS)、盐度 (SAL), 采用Eijkelkamp 18.28型多参数水质分析仪进行现场测定, 测试前需要对仪器的pH和EC进行校正, 并将仪器设置为温度自动补偿模式。对采集的样品用直径0.45 μm 的微孔滤膜过滤后分为两份装入聚乙烯塑料采样瓶中, 一份用作阳离子检测, 向其中加入若干滴优级纯稀硝酸试剂, 直至其pH值小于2; 另一份用作阴离子检测, 无需添加任何试剂。分析结果pH相对误差<1%, Eh相对误差<1%, EC相对误差<5%, TDS相对误差<0.5%, SAL相对误差<0.01%。

样品的阴、阳离子检测在中国科学院地质与地球物理研究所水化学实验室完成。阴离子 (F^- 、 Cl^- 、 NO_3^- 、 SO_4^{2-}) 和阳离子 (Na^+ 、 NH_4^+ 、 K^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+}) 采用Dionex600研究型离子色谱仪检测, 其阴离子分析误差< $\pm 3\%$, 阳离子分析误差< $\pm 2\%$ 。样品的 CO_3^{2-} 和 HCO_3^- 检测采用Gran滴定法^[27], 该方法的分析误差<5%。

3.3 灌溉水指标的建立

USSL (U.S. Salinity Laboratory) 图法横坐标为EC, 纵坐标为钠吸附比 (Sodium Adsorption Ratio, SAR)。其中, EC与水中可溶性物质的量有关, EC越大溶解性盐类越大, 指示盐害大小; 灌溉水的SAR与土壤对钠的吸收程度有关, 土壤中过高的SAR能影响土壤的物理结构, 导致耕作困难, 因此用SAR指示碱害程度^[28], SAR的计算公式^[29]为:

$$\text{SAR} = \frac{\text{Na}^+}{\sqrt{\frac{\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}}{2}}} \quad (1)$$

式中: Na^+ 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 的单位为 $\text{meq} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

Wilcox图横坐标与USSL图相同, 为EC, 纵坐标为可溶性钠百分比 (Soluble Sodium Percentage, SSP), 该值越大, 则水质越偏向软水, 该值越小, 则水质越偏向硬水。SSP同样能指示碱害程度, 但不如SAR理想^[30]。其表达式为:

$$\text{SSP} = \frac{\text{Na}^+ + \text{K}^+}{\text{Na}^+ + \text{K}^+ + \text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}} \times 100 \quad (2)$$

式中: Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 的单位为 $\text{meq} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

4 鄂尔多斯沙区天然水体的水化学特征

4.1 毛乌素沙地天然水体的水化学特征

毛乌素沙地湖水的TDS均大于 $1000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 显著大于其他水体, 其TDS最小者为 $2410 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 仪器可测最大者为 $51400 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。其他水体均为淡水 ($\text{TDS} < 1000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$),

其中泉水、河水、地下水和降水样品的 TDS 分别为 $491 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $180 \sim 560 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $167 \sim 660 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $35.9 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (表 1)。湖水样品的 pH 也显著高于其他水体, 分布范围为 $7.49 \sim 10.17$ 。其他水体的 pH 较低, 其中泉水、河水、地下水和降水样品的 pH 值分别为 7.14 、 $7.58 \sim 8.48$ 、 $7.00 \sim 8.71$ 和 7.78 (表 1)。

折线图反映的水样各离子的绝对含量显示 (图 2): 湖水样品 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 CO_3^{2-} 、 HCO_3^- 、 Na^+ 、 NH_4^+ 、 K^+ 、 Mg^{2+} 的含量通常显著高于其他水体, F^- 含量略高于其他水体。除个别样品外, 湖水的 Ca^{2+} 含量与其他水体的十分接近。Maucha 图能指示样品中 8 种主要离子的相对含量^[31], 根据离子总浓度高、低原则将研究区各类水体分别绘制于比例尺不同的 3 组 Maucha 图中 (图 3)。对于毛乌素沙地各类型水体 (由于降水样品缺少 CO_3^{2-} 和 HCO_3^- 数据, 因此未显示在 Maucha 图中, 类似地, 降水样品未出现在下文其他图中), 泉水、河水和地下水位于 Maucha 图低浓度组, 其多数样品的优势离子对为 Ca^{2+} - HCO_3^- , 是低盐淡水中最常见的优势离子对组合类型; 湖水位于 Maucha 图中、高浓度组, 样品优势离子对均为 Na^+ - Cl^- , 是典型的高盐水体常见的优势离子对组合类型。

4.2 库布齐沙漠水化学特征

与毛乌素沙地类似, 库布齐沙漠湖水的 TDS 大于河水。其中, 湖水的 TDS 均大于 $1000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 分布范围 $1220 \sim 9100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 一般低于毛乌素沙地湖水样品; 库布齐沙漠河水的 TDS 均小于 $1000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 为淡水, 分布范围 $246 \sim 780 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (表 1)。类似于毛乌素沙地, 库布齐沙漠湖水的 pH 高于河水, 两者分布范围分别为 $8.22 \sim 10.13$ 和 $7.69 \sim 8.16$ (表 1)。

折线图显示 (图 4), 除 Ca^{2+} 和 NO_3^- 外, 库布齐沙漠湖水样品的其他离子含量一般高于河水, 此外, 湖水和河水样品中均不含 NH_4^+ , 这不同于毛乌素沙地各类水体中均含有 NH_4^+ 且湖水样品中含量很高的特点。Maucha 图 (图 3) 显示, 库布齐沙漠的河水样品均位于低浓度组, 多数样品的优势离子对为 Ca^{2+} - HCO_3^- ; 湖水样品均位于中浓度组, 多数样品的优势离子对为 Na^+ - Cl^- 。

4.3 鄂尔多斯沙区天然水体水化学类型

Piper 图可以通过 3 种变量 (离子) 的比例关系综合反映水化学特征^[32], 并在一定程度上具有指示水化学演变过程的作用^[33-34]。Piper 图的菱形区域被划分为 9 个区, 指示了 9 种水化学类型^[35], 或者根据优势阴、阳离子是否超过 50% 而划分为 Ca^{2+} - HCO_3^- 型、 Ca^{2+} - SO_4^{2-} 型、 Na^+ - Cl^- 型、 Na^+ - HCO_3^- 型以及混合型 (无一对阴、阳离子大于 50%), 分别对应于 Piper 图菱形区域中的 5、6、7、8 和 9 区 (图 5b)^[36]。对于鄂尔多斯沙区天然水体而言, 深层地下水的水化学类型均属于 Ca^{2+} - HCO_3^- 型, 大部分湖水样品的水化学类型为 Na^+ - Cl^- 型, 浅层地下水和河水样品在 5、6、7、8 和 9 区均有分布, 表现出过渡特征 (图 5a)。

Piper 水化学分类法在鄂尔多斯沙区应用较为广泛, 前人的研究也有类似的结果。研究发现, 沙区东部^[11]和中部^[9-10]的大多数第四系和白垩系地下水、沙区东南缘的承压水^[12]、沙区北部库布齐沙漠的自流井、泉水、深井等的水化学类型一般为 Ca^{2+} - HCO_3^- 型^[15]; 沙区东部^[11]及中部湖泊集中分布区^[9-10]的湖水、库布齐沙漠的湖水和水泡子水化学类型以 Na^+ - Cl^- 型为主; 沙区东部潜水的水化学类型除了部分为 Ca^{2+} - HCO_3^- 型外, 还存在 SO_4^{2-} - Cl^- - Ca^{2+} - Mg^{2+} 型^[12], 沙区中部^[9-10]的部分第四系地下水、北部的浅层地下水^[13], 水化学类型还包括 HCO_3^- - Na^+ 型和 HCO_3^- - Ca^{2+} - Na^+ - Mg^{2+} 混合型, 库布齐沙漠浅层地下水甚至还有 Na^+ - SO_4^{2-} 型和 Na^+ - Cl^- 型^[15], 总体表现出一定的过渡特征。

这种现象的产生除了和当地的岩性特征和矿物组成有关外, 可能和气候要素, 特别

是与蒸发密切相关。毛乌素沙地和库布齐沙漠降水量都较少而蒸发量均为 1200 mm 左右,蒸发对湖水和浅层地下水的水化学组成及其演变产生重要影响,类似的水化学组成特征在中国北方其他沙漠也比较普遍。例如,位于中国西部塔克拉玛干沙漠的浅层地下水,由于蒸发强烈,水化学类型主要为 Na^+-Cl^- 型^[4]。而位于中国东部浑善达克沙地东部的浅层地下水,由于蒸发量较小,其浅层地下水为 $\text{Ca}^{2+}-\text{HCO}_3^-$ 型^[37]。鄂尔多斯沙区的毛乌素沙地和库布齐沙漠具有相似的蒸发量,这可能是造成其同类水体具有相同水化学类型的重要原因。如果以鄂尔多斯沙区 $\text{Ca}^{2+}-\text{HCO}_3^-$ 型的泉水、河水和地下水样品及 Na^+-Cl^- 型的湖水样品为两个端元,由前者演化为后者则有 3 种途径(图 5a)。由 Piper 图推测(图 5a),在全球气候变暖的背景下,如果鄂尔多斯沙区降水量持续减少而蒸发量不断增大,则其 $\text{Ca}^{2+}-\text{HCO}_3^-$ 型天然水体演变为 Na^+-Cl^- 型水体或过渡类型水体的可能性将增大,可能对当地生态环境和人类生存产生不利影响。

4.4 鄂尔多斯沙区天然水体的灌溉水等级

不达标的水源灌溉会对人体健康构成潜在威胁,还会导致土壤质量下降和农作物减产^[38]。导致水质恶化的因素很多,对于有机污染物较少的天然水体,盐或碱是影响其作为灌溉水水质的主要因素。USSL 图法与 Wilcox 图法是 2 种常用的能综合反映灌溉水水质的方法^[39],其既能反映灌溉水水质对土壤的影响,还能反映水质对植物的影响^[40]。

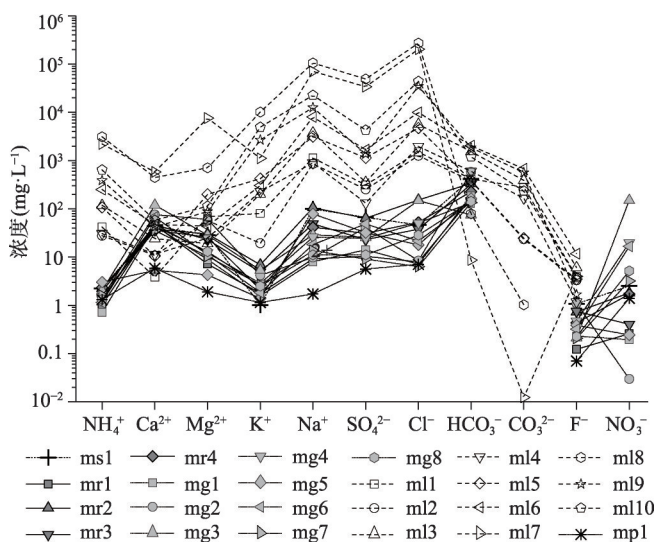


图 2 毛乌素沙地天然水体主要离子含量

Fig. 2 The content of major ions in natural waters from Mu Us Sandy Land

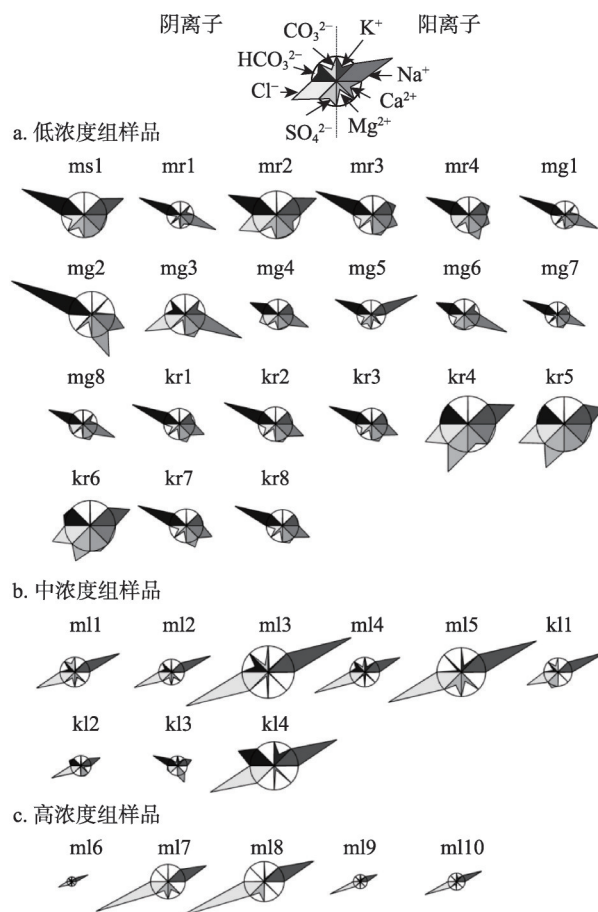


图 3 Maucha 图指示的 8 种主要离子的相对浓度

Fig. 3 The Maucha diagram showing the relative content of eight major ions

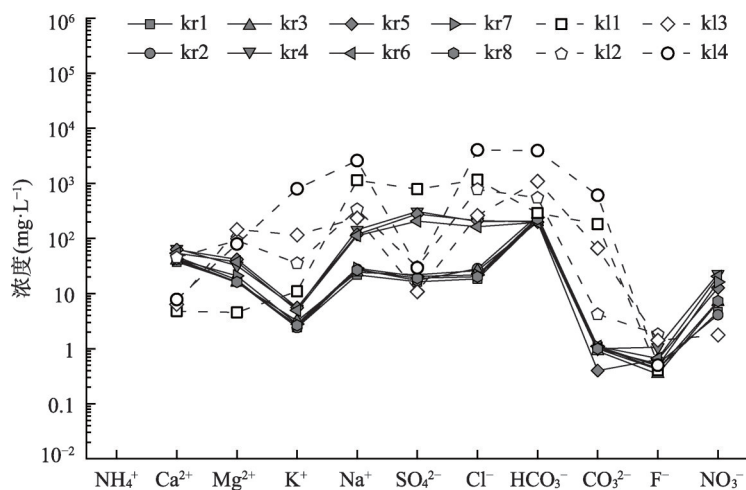


图4 库布齐沙漠天然水体主要离子含量

Fig. 4 The content of major ions in natural waters from Hobq Sand Sea

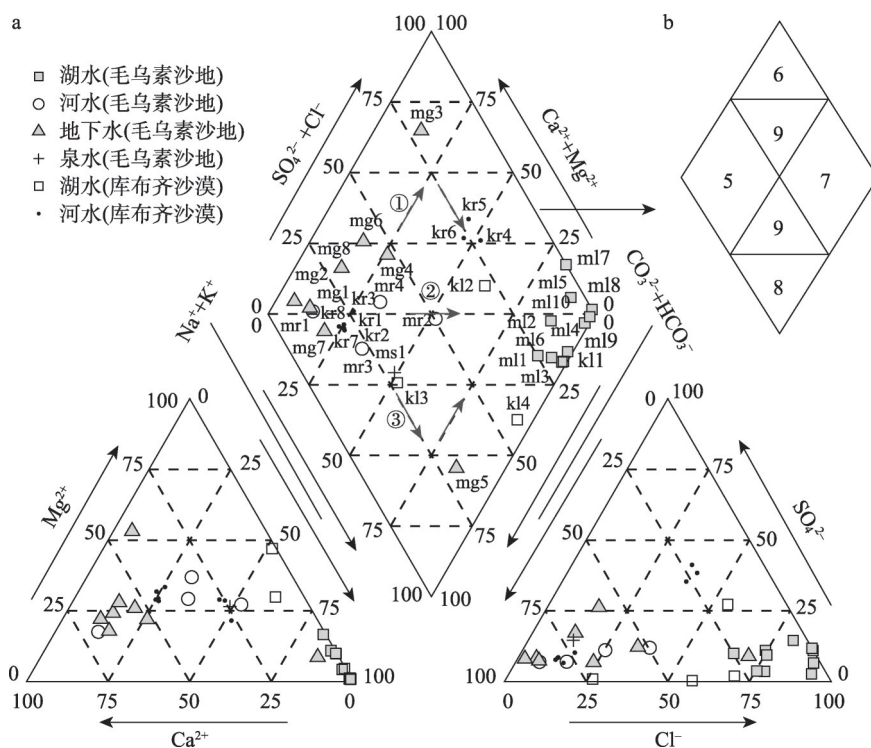


图5 Piper图指示的鄂尔多斯沙区天然水体水化学类型(a)和Piper图菱形区域分区示意图(b)

Fig. 5 Hydrochemical types of natural waters in Ordos Deserts indicated by Piper diagram (a) and the classification of hydrochemical types showed in the diamond field of Piper diagram (b)

鄂尔多斯沙区自古以来农牧业活动活跃^[41], 现代农业主要依赖当地地下水灌溉^[11]。USSL图(图6)与Wilcox图(图7)显示的结果非常相似, 几乎所有的毛乌素沙地河水和地下水样品及库布齐沙漠河水样品属于USSL图中S1C2、S1C3区, 或Wilcox图中I、II类, 表明其基本符合灌溉用水的要求。鄂尔多斯沙区一部分湖水样品属于USSL图中

S2C4、S4C4区,或属于Wilcox图中IV、V类,表明其不符合灌溉用水标准;其他湖水样品由于EC、SAR和SSP过高而未显示在图中,表明其更不适宜合作灌溉用水。对鄂尔多斯沙区天然水体而言,除湖水之外的其他水体均具有作为灌溉用水的潜力,但从该地区水文地球化学演变过程来看,该地区蒸发作用非常显著,长期灌溉可能会导致农田盐碱化。

5 控制天然水体水化学组成的主要机制

5.1 控制天然水体水化学组成的因素

天然水体的水化学组成有多种成因,和其经历的各种水文地球化学过程密切相关。Gibbs通过对全球天然水体的研究,将其总结为大气降水、岩性和蒸发—结晶3种成因^[42],Gibbs图能指示控制天然水体水化学组成的主要因素^[5, 43]。

鄂尔多斯沙区深层地下水的水化学组成主要受控于岩石风化,浅层地下水、河水、泉水处于岩性控制和蒸发—结晶作用之间,湖水样品主要受蒸发—结晶过程控制(图8)。水体在形成演变过程中,可以与其接触的各类岩石发生溶解、离子交换、逆离子交换等物理和化学反应,从而改变天然水体原有的化学组成。扩展性Durov三线图的正方形投影区被划分为9个区,指示了水体的水化学类型和水文地球化学演变过程^[44-45]。从水文地球化学演变的角度来看,位于1区的毛乌素沙地地下水和河水样品,可以通过与其接触的岩石进行离子交换,演变为2区和3区的地下水或河水类型;也可以通过溶解岩石中的可溶性矿物成分或与其他化学成分的水体进行线性混合,从而向9区的湖水演变。类似地,库布齐沙漠的河水也可以通过简单溶解或线性混合,向9区的湖水演变(图9)。

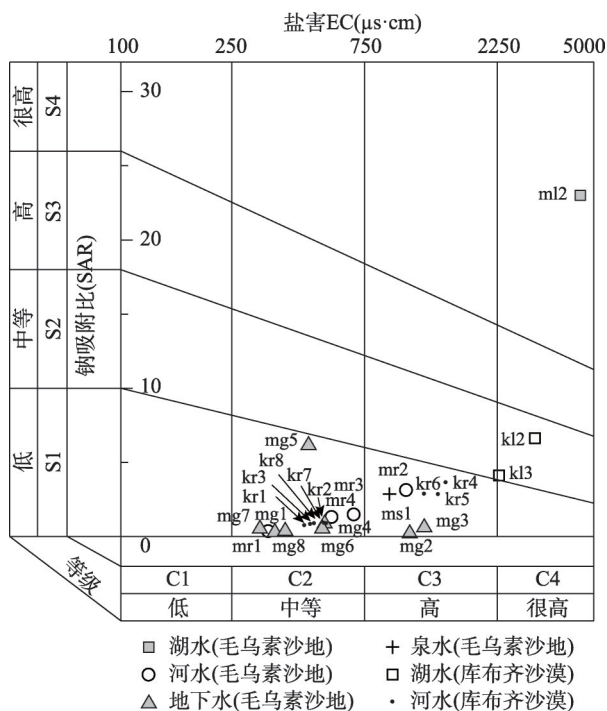


图6 USSSL图指示的鄂尔多斯沙区天然水体的灌溉水等级

Fig. 6 Irrigation water grade of natural waters in Ordos Deserts indicated by USSSL diagram

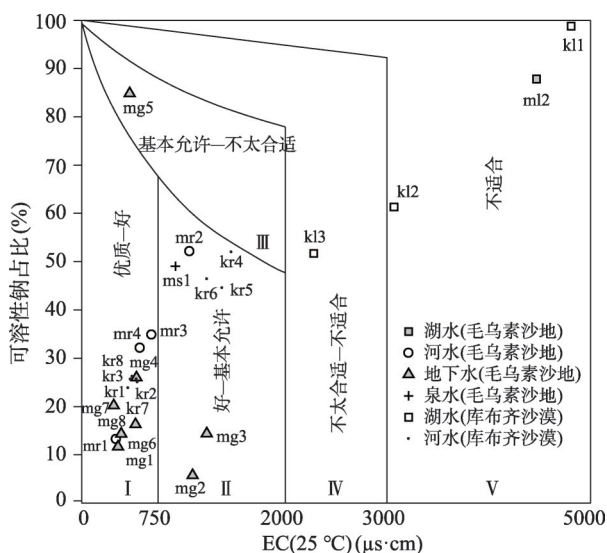
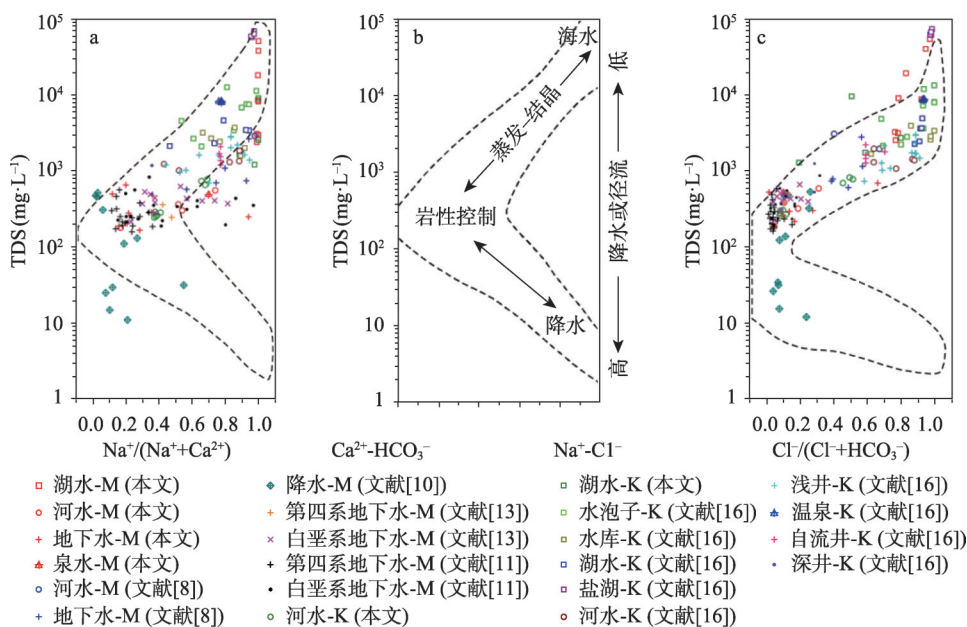


图7 Wilcox图指示的鄂尔多斯沙区天然水体的灌溉水等级

Fig. 7 Irrigation water grade of natural waters in Ordos Deserts indicated by Wilcox diagram



注: 图例中水样类型后面的“-M”指毛乌素沙地样品,“-K”指库布齐沙漠样品。

图8 Gibbs图指示的控制鄂尔多斯沙区天然水体水化学组成的主要因素

Fig. 8 The influencing factors for natural water chemistry showed by Gibbs Diagram in Ordos Deserts

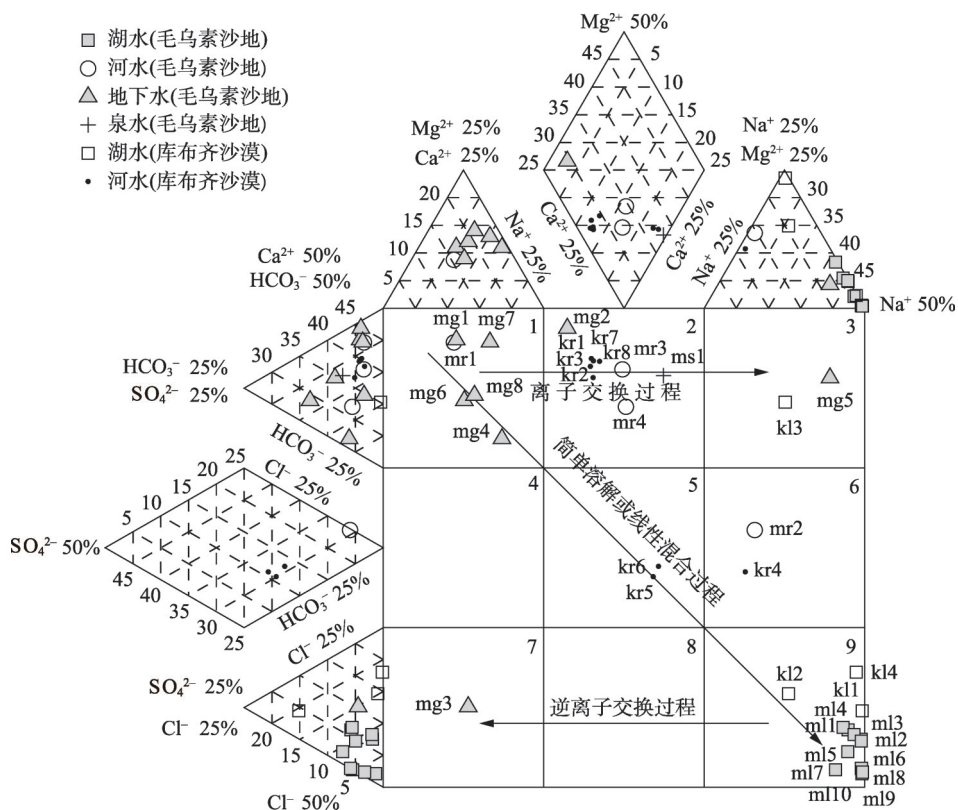


图9 扩展型Durov三线图指示的水化学类型及水文地球化学演变过程

Fig. 9 The hydrochemical water types indicated by the expanded Durov diagram and hydrogeochemical evolution process

将鄂尔多斯沙区西部都思兔河河水和地下水^[8]、沙区中部降水^[10]、沙区北部东胜地区^[13]和东部地区^[11]白垩系和第四系地下水以及库布齐沙漠^[16]水泡子、水库、湖泊、盐湖、河流、浅井、温泉、自流井、深井的水样投影到Gibbs图中。结果显示(图8),大部分深层地下水样品,如白垩系和第四系地下水,其水化学组成主要受控于岩石风化。浅层地下水水化学成因较复杂,受岩石风化影响的同时,一些区域,如都思兔河地区和库布齐沙漠的浅层地下水受到的蒸发—结晶作用较显著。河水水化学成因不一致,位于岩性控制区域和蒸发—结晶作用之间。湖水的水化学成因较一致,主要和蒸发—结晶作用有关(图8)。

通过对比中国北方中纬度部分沙漠天然水体水化学成因,结果发现,对于中国西部和中部沙漠而言,蒸发浓缩作用在天然水体水化学组成的形成过程中扮演着重要的角色^[5]。例如对塔克拉玛干沙漠的研究表明,其天然水体中溶解物主要来自蒸发岩,但河水 and 地下水的水化学成因并不一致,前者主要受岩石风化作用、蒸发结晶作用控制,而后者主要受蒸发结晶作用控制^[4]。对于中部沙漠如腾格里沙漠的研究表明,除蒸发浓缩作用外,溶滤、阳离子吸附作用和微弱的混合作用共同决定了其地下水的水化学成分^[46]。对于中国另一个中部沙漠乌兰布和沙漠地下水的研究表明,其水化学组成主要受蒸发浓缩和岩石风化的共同控制^[47]。不同于中国中、西部沙漠,蒸发浓缩作用对东部沙地天然水体的水化学组成影响较小。如对东部的浑善达克沙地和科尔沁沙地的研究表明^[5, 48],岩石风化是控制天然水体水化学组成的主要因素,蒸发浓缩作用并不显著。

5.2 岩石风化对水化学特征的影响

根据Gibbs图的结果(图8),鄂尔多斯沙区深层地下水水化学组成属于岩石风化成因,泉水、河水和浅层地下水的水化学组成也受到岩石风化的影响,岩石风化的类型可由可溶性离子的组合特征来判断,一般包括蒸发岩风化、碳酸盐岩风化和硅酸盐岩风化。

当 $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ 与 Cl^- 的比值等于1时,水体的化学组成主要来自于蒸发岩的溶解^[49-50];当该比值不等于1时,表明水中的化学组分除蒸发岩溶解外还存在其他岩石的溶解。图10a显示,一些样品如库布齐沙漠河水样品kr4、kr5和kr6位于1:1等值线上,表明其化学成分和蒸发岩的溶解有关,这与扩展型Durov三线图(图9)所显示的其处于“简单溶解或线性混合过程”一致。毛乌素沙地河水和地下水样品(mr2、mr4、mg4、mg6和mg8)距离1:1等值线较近,表明蒸发岩溶解对其化学组成影响较显著。此外,大部分鄂尔多斯沙区样品位于1:1等值线左上方,表明 $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ 不能完全被 Cl^- 平衡, $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ 相对 Cl^- 盈余。 $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ 通常被认为来源于蒸发岩或硅酸盐岩的风化^[51-53],因此,盈余的 $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ 还和硅酸盐岩的风化有关。沙漠地区的硅酸盐岩种类较多,其中较典型的硅酸盐岩风化过程是钠长石和钾长石水解产生 Na^+ 和 K^+ ^[5]。此外,毛乌素沙地地下水样品mg3位于1:1离子等值线右下方,表明其 Cl^- 相对 $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ 盈余, Cl^- 通常主要来源于蒸发岩的溶解^[4],mg3中盈余的 Cl^- 和蒸发岩溶解有关。

在 $\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-}$ 与 $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ 关系图中,如果样品位于离子等值线左上方,则表明 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 只来自于碳酸盐岩风化;当样品位于离子等值线右下方时,表明 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 可能是硅酸盐岩风化的结果;当样品位于离子等值线上时,表明 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 来自于硅酸盐岩风化和碳酸盐岩风化两者的共同作用^[54]。图10b中鄂尔多斯沙区绝大多数河水、地下水和泉水样品位于离子等值线左上方,表明其 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 为碳酸盐岩来源,该结论可由 HCO_3^- 与 $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ 关系图进一步得到验证。当 $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ 为碳酸盐岩来源时,样品应位于 HCO_3^- 与 $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ 关系图的离子等值线上^[5]。图10c进一步表明 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 为碳酸盐岩来源。其他样品如毛乌素沙地地下水样品mg3、mg4、mg6、mg7、mg8位于图10b的1:1离子等值线右下方,表明其 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 与硅酸盐岩风化有关。

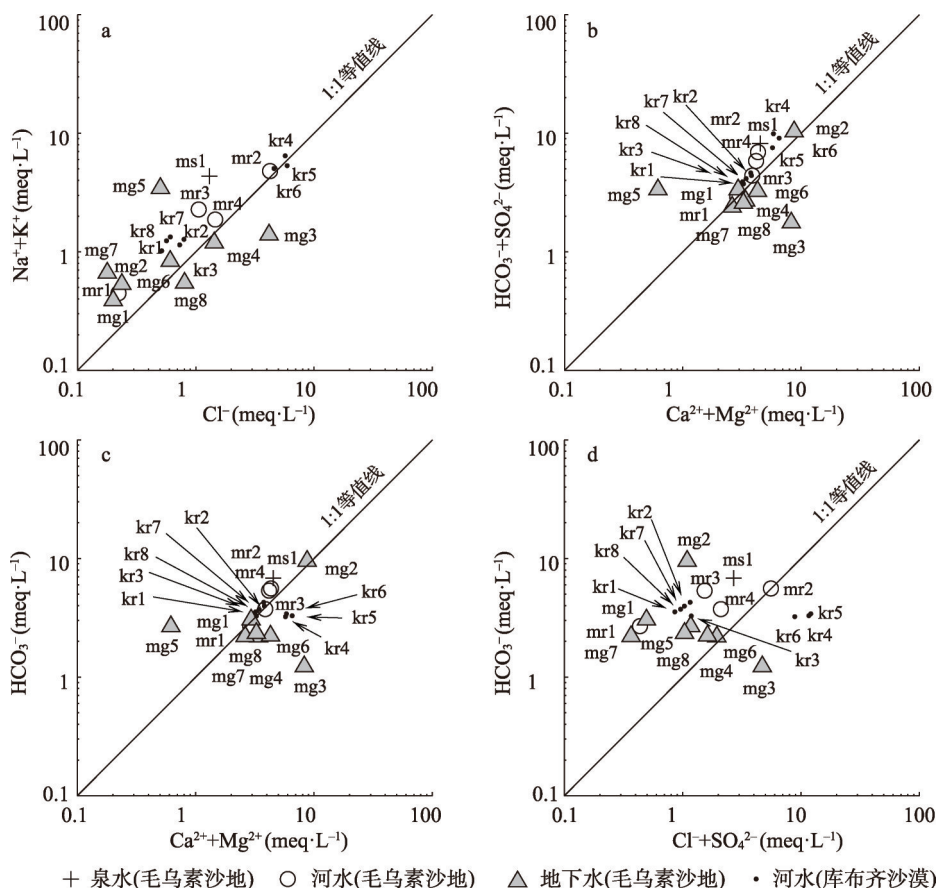


图10 鄂尔多斯沙区泉水、河水和地下水主要离子比例关系

Fig. 10 The ions ratios of spring water, river water and groundwater in Ordos Deserts

碳酸盐岩和蒸发岩的风化程度可由 HCO_3^- 与 $\text{Cl}^- + \text{SO}_4^{2-}$ 的关系确定。当水体中的 $\text{Cl}^- + \text{SO}_4^{2-} > \text{HCO}_3^-$ 时,表明溶解性离子中蒸发岩源大于碳酸盐岩源;相反,当水体中的 $\text{Cl}^- + \text{SO}_4^{2-} < \text{HCO}_3^-$ 时,表明溶解性离子中蒸发岩源小于碳酸盐岩源^[4]。图10d显示,鄂尔多斯沙区大多数河水样品位于离子等值线左上方,表明该类型河水的溶解性离子中蒸发岩源小于碳酸盐岩源,碳酸盐岩风化起主要作用。少部分样品如库布齐沙漠河水样品kr4、kr5和kr6位于1:1离子等值线右下方,表明蒸发岩溶解是构成其化学成分的主要因素,该结果与图10a指示的蒸发岩溶解一致。类似地,毛乌素沙地地下水样品mg3的化学组分受蒸发岩溶解的影响较多。

6 结论

通过对鄂尔多斯沙区地表水和地下水的采集、分析,并结合前人的研究成果,利用天然水体的水化学指标、离子含量折线图、Maucha图、Piper图、USSL图、Wilcox图、Gibbs图、扩展型Durov三线图、离子比例关系等水化学分析方法,对鄂尔多斯沙区天然水体的水化学组成及其成因进行了分析,结果表明:

(1) 鄂尔多斯沙区毛乌素沙地和库布齐沙漠不同类型水体的水化学类型不同,但相

同类型的天然水体具有相似的水化学性质,其原因可能与两地具有相似的蒸发量有关。鄂尔多斯沙区深层地下水和湖水的水化学类型分别以 $\text{Ca}^{2+}\text{-HCO}_3^-$ 型和 $\text{Na}^+\text{-Cl}^-$ 型为主,而浅层地下水和河水的水化学类型介于两者之间,属于过渡类型。

(2) USSL 图和 Wilcox 图显示,虽然鄂尔多斯沙区河水和地下水能满足农业灌溉水的要求,但是强烈的蒸发作用容易导致盐碱化的发生,长期使用势必会导致农田盐碱化。

(3) 岩石风化和蒸发—结晶作用分别控制着鄂尔多斯沙区深层地下水和湖水的水化学组成,浅层地下水和河水的水化学成因介于两者之间。对于水化学组成受岩石风化影响的深层地下水、浅层地下水和河水,蒸发岩风化、碳酸盐岩风化和硅酸盐岩风化在不同程度上影响着其水化学组成。

参考文献(References)

- [1] Jiang Wenlai. Study on water resource safety strategy for China in the 21st century. *Advances in Water Science*, 2001, 12(1): 66-71. [姜文来. 中国 21 世纪水资源安全对策研究. *水科学进展*, 2001, 12(1): 66-71.]
- [2] Xia Jun, Zhai Jinliang, Zhan Chesheng. Some reflections on the research and of development water resources in China. *Advances in Earth Science*, 2011, 26(9): 905-915. [夏军, 翟金良, 占车生. 我国水资源研究与发展的若干思考. *地球科学进展*, 2011, 26(9): 905-915.]
- [3] Tian Yuan, Yu Chengqun, Zha Xinjie, et al. Hydrochemical characteristics and factors controlling of natural water in the western, southern, and northeastern border areas of the Qinghai-Tibet Plateau. *Acta Geographica Sinica*, 2019, 74(5): 975-991. [田原, 余成群, 查欣洁, 等. 青藏高原西部、南部和东北部边界地区天然水的水化学性质及其成因. *地理学报*, 2019, 74(5): 975-991.]
- [4] Zhu Bingqi, Yang Xiaoping. Chemical composition of natural waters and its origin in the Taklamakan Desert. *Chinese Science Bulletin*, 2007, 52(13): 1561-1566. [朱秉启, 杨小平. 塔克拉玛干沙漠天然水体的化学特征及其成因. *科学通报*, 2007, 52(13): 1561-1566.]
- [5] Ren Xiaozong, Li Jiangang, Liu Min, et al. Hydrochemical composition of natural waters and its affecting factors in the east Hunshandak Sandy Land. *Arid Zone Research*, 2019, 36(4): 791-800. [任孝宗, 李建刚, 刘敏, 等. 浑善达克沙地东部地区天然水体的水化学组成及其控制因素. *干旱区研究*, 2019, 36(4): 791-800.]
- [6] Zhu Zhenda, Wu Zheng, Liu Shu, et al. *An Outline of Chinese Deserts*. Beijing: Science Press, 1980. [朱震达, 吴正, 刘恕, 等. *中国沙漠概论*. 北京: 科学出版社, 1980.]
- [7] Wang Nai'ang, Huang Yinzhou, He Tonghui, et al. The environmental significance of tamping sandy layer in ancient city ramparts on Erdos Plateau. *Acta Geographica Sinica*, 2006, 61(9): 937-945. [王乃昂, 黄银洲, 何彤慧, 等. 鄂尔多斯高原古城夯层沙的环境解释. *地理学报*, 2006, 61(9): 937-945.]
- [8] Qian Hui, Song Xiuling, Dou Yan, et al. Formation mechanism of water compositions in the middle part of the Dousitu River. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2008(6): 103-106, 120. [钱会, 宋秀玲, 窦妍, 等. 都思兔河中段河水化学成分的形成机制分析. *水文地质工程地质*, 2008(6): 103-106, 120.]
- [9] Liu F, Song X, Yang L, et al. Identifying the origin and geochemical evolution of groundwater using hydrochemistry and stable isotopes in the Subei Lake basin, Ordos energy base, northwestern China. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2015, 19(1): 551-565.
- [10] Liu F, Song X F, Zhen P N, et al. Insights from stable isotopes of water and hydrochemistry to the evolutionary processes of groundwater in the Subei lake basin, Ordos energy base, northwestern China. *Isotopes in Environmental and Health Studies*, 2019, 55(5): 438-458.
- [11] Qian C, Wu X, Mu W P, et al. Hydrogeochemical characterization and suitability assessment of groundwater in an agro-pastoral area, Ordos Basin, NW China. *Environmental Earth Sciences*, 2016, 75: 1356. DOI: 10.1007/s12665-016-6123-2.
- [12] Wu J H, Zhou H, He S, et al. Comprehensive understanding of groundwater quality for domestic and agricultural purposes in terms of health risks in a coal mine area of the Ordos basin, north of the Chinese Loess Plateau. *Environmental Earth Sciences*, 2019, 78: 446. DOI: 10.1007/s12665-019-8471-1.
- [13] Li P Y, Qian H, Wu J H, et al. Major ion chemistry of shallow groundwater in the Dongsheng Coalfield, Ordos Basin, China. *Mine Water and the Environment*, 2013, 32(3): 195-206.
- [14] Yang Q C, Wang L C, Ma H Y, et al. Hydrochemical characterization and pollution sources identification of

- groundwater in Salawusu aquifer system of Ordos Basin, China. *Environmental Pollution*, 2016, 216: 340-349.
- [15] Ge jian. Natural tracing method applied for vadose zone soil moisture dynamics in arid and semi-arid areas [D]. Nanjing: Hohai University, 2017. [葛建. 干旱—半干旱区包气带土壤水运动示踪研究[D]. 南京: 河海大学, 2017.]
- [16] Ge J, Chen J S, Ge L, et al. Isotopic and hydrochemical evidence of groundwater recharge in the Hopq Desert, NW China. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 2016, 310(2): 761-775.
- [17] Yang Yuncheng, Shen Zhaoli, Wen Dongguang, et al. Hydrochemical characteristics and sources of sulfate in groundwater of the Ordos Cretaceous Groundwater Basin. *Acta Geoscientica Sinica*, 2008, 29(5): 553-562. [杨郦城, 沈照理, 文冬光, 等. 鄂尔多斯白垩系地下水盆地硫酸盐的水文地球化学特征及来源. *地球学报*, 2008, 29(5): 553-562.]
- [18] Wang Deqian, Liu Zuzhi, Yin Lihe. Hydro-geological characteristics and groundwater systems of the Erdos Basin. *Quaternary Sciences*, 2005, 25(1): 6-14. [王德潜, 刘祖植, 尹立河. 鄂尔多斯盆地水文地质特征及地下水系统分析. 第四纪研究, 2005, 25(1): 6-14.]
- [19] Hou Guangcai, Lin Xueyu, Su Xiaosi, et al. Groundwater system in Ordos Cretaceous Artisan Basin (CAB). *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2006, 36(3): 391-398. [侯光才, 林学钰, 苏小四, 等. 鄂尔多斯白垩系盆地地下水系统研究. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2006, 36(3): 391-398.]
- [20] Yang X P, Li H W, Conacher A. Large-scale controls on the development of sand seas in northern China. *Quaternary International*, 2012, 250: 74-83.
- [21] Huang Fuxiang, Niu Haishan, Wang Mingxing, et al. The relationship between vegetation cover and sand transport flux at Mu Us Sandland. *Acta Geographica Sinica*, 2001, 56(6): 700-710. [黄富祥, 牛海山, 王明星, 等. 毛乌素沙地植被覆盖率与风蚀输沙率定量关系. *地理学报*, 2001, 56(6): 700-710.]
- [22] Mason J A, Swinehart J B, Lu H Y, et al. Limited change in dune mobility in response to a large decrease in wind power in semi-arid northern China since the 1970s. *Geomorphology*, 2008, 102(3): 351-363.
- [23] Yang X P, Ma N N, Dong J F, et al. Recharge to the inter-dune lakes and Holocene climatic changes in the Badain Jaran Desert, western China. *Quaternary Research*, 2010, 73(1): 10-19.
- [24] Penman H L. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Proceedings of the Royal Society A*, 1948, 193 (1032): 120-145.
- [25] Yang X P, Forman S, Hu F G, et al. Initial insights into the age and origin of the Kubuqi sand sea of northern China. *Geomorphology*, 2016, 259: 30-39.
- [26] Yang X P, Liang P, Zhang D G, et al. Holocene aeolian stratigraphic sequences in the eastern portion of the desert belt (sand seas and sandy lands) in northern China and their palaeoenvironmental implications. *Science China Earth Sciences*, 2019, 62(8): 1302-1315.
- [27] Gran G. Determination of the equivalence point in potentiometric titrations. Part II. *Analyst*, 1952, 77: 661-671.
- [28] Ismail A H, Hassan G, Sarhan A H. Hydrochemistry of shallow groundwater and its assessment for drinking and irrigation purposes in Tarmiah district, Baghdad governorate, Iraq. *Groundwater for Sustainable Development*, 2020, 10 (2020): 100300. DOI: 10.1016/j.gsd.2019.100300.
- [29] USSSL. Diagnosis and Improvements of Saline and Alkali Soils. Washington: US Department of Agriculture, 1954.
- [30] Wilcox L. Classification and Use of Irrigation Waters. Washington: US Department of Agriculture, 1955.
- [31] Ren Xiaozong, Liu Min, Li Jiangang, et al. Plotting Maucha Diagram based on Matlab and its applications on hydrochemistry. *Arid Land Geography*, 2019, 42(5): 1078-1084. [任孝宗, 刘敏, 李建刚, 等. Maucha图的Matlab实现及其在水化学中的应用. *干旱区地理*, 2019, 42(5): 1078-1084.]
- [32] Zaporozec A. Graphical interpretation of water-quality data. *Groundwater*, 1972, 10(2): 32-43.
- [33] Abdalla O, Al-Abri R, Semhi K, et al. Hydro-chemical evolution of groundwater in a sequence of Tertiary Formations in Northwest Oman. *Environmental Earth Sciences*, 2016, 75: 1410. DOI: 10.1007/s12665-016-6196-y.
- [34] Karmegam U, Chidambaram S, Prasanna M V, et al. A study on the mixing proportion in groundwater samples by using Piper diagram and Phreeqc model. *Chinese Journal of Geochemistry*, 2011, 30(4): 490-495.
- [35] Zhang Renquan, Liang Xing, Jin Menggui, et al. General Hydrogeology. Beijing: Geological Publishing House, 2011. [张人权, 梁杏, 靳孟贵, 等. 水文地质学基础. 北京: 地质出版社, 2011.]
- [36] Kehew A E. Applied Chemical Hydrogeology. New Jersey: Prentice Hall, 2001.
- [37] Ren X Z, Zhu B Q, Liu M, et al. Mechanism of groundwater recharge in the middle- latitude desert of eastern Hunshandake, China: Diffuse or focused recharge? *Hydrogeology Journal*, 2019, 27(2): 761-783.
- [38] Raychaudhuri M, Raychaudhuri S, Jena S, et al. WQI to monitor water quality for irrigation and potable use.

- Bhubaneswar, India: Directorate of Water Management, 2014.
- [39] Zhou Y H, Li P Y, Xue L L, et al. Solute geochemistry and groundwater quality for drinking and irrigation purposes: A case study in Xinle City, North China. *Geochemistry*, 2020, 80(4): 125609. DOI: 10.1016/j.chemer.2020.125609.
- [40] Wilcox L V. The quality of water for irrigation use. *Technical Bulletin*, 1948, 962: 1-40.
- [41] Song Naiping, Zhang Fengrong. The changing process and mechanism of the farming-grazing transitional land use pattern in Ordos. *Acta Geographica Sinica*, 2007, 62(12): 1299-1308. [宋乃平, 张凤荣. 鄂尔多斯农牧交错土地利用格局的演变与机理. *地理学报*, 2007, 62(12): 1299-1308.]
- [42] Gibbs R J. Mechanisms controlling world water chemistry. *Science*, 1970, 170(3962): 1088-1090.
- [43] Marandi A, Shand P. Groundwater chemistry and the Gibbs Diagram. *Applied Geochemistry*, 2018, 97: 209-212.
- [44] Ren Xiaozong, Liu Min, Zhang Yingzhen, et al. Plotting Durov Diagram based on Matlab. *Arid Land Geography*, 2018, 41(4): 744-750. [任孝宗, 刘敏, 张迎珍, 等. 基于 Matlab 的 Durov 三线图的实现. *干旱区地理*, 2018, 41(4): 744-750.]
- [45] Lloyd J W, Heathcote J A. *Natural Inorganic Hydrochemistry in Relation to Groundwater: An Introduction*. Oxford: Clarendon Press, 1985.
- [46] Ding Zhenyu, Ma Jinzhu, He Jianhua. Geochemical evolution of groundwater in the southwest of Tengger Desert, NW of China. *Arid Land Geography*, 2009, 32(6): 948-957. [丁贞玉, 马金珠, 何建华. 腾格里沙漠西南缘地下水水化学形成特征及演化. *干旱区地理*, 2009, 32(6): 948-957.]
- [47] Dang Huihui, Dong Jun, Yue Ning, et al. Study of the evolution of hydrochemical properties of groundwater in Ulan Buh Desert in the north of the Helan Mountains. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2015, 37(3): 793-802. [党慧慧, 董军, 岳宁, 等. 贺兰山以北乌兰布和沙漠地下水水化学特征演化规律研究. *冰川冻土*, 2015, 37(3): 793-802.]
- [48] Wei Shuilian, Liu Xinping, Zhao Xueyong, et al. Spatial and temporal variability analysis of groundwater quality in Naiman Region of Horqin Sandy Land. *Journal of Desert Research*, 2017, 37(3): 571-579. [魏水莲, 刘新平, 赵学勇, 等. 科尔沁沙地奈曼地区地下水水质时空变化特征. *中国沙漠*, 2017, 37(3): 571-579.]
- [49] Ahmad T, Khanna P P, Chakrapani G J, et al. Geochemical characteristics of water and sediment of the Indus river, Trans-Himalaya, India: Constraints on weathering and erosion. *Journal of Asian Earth Sciences*, 1998, 16(2/3): 333-346.
- [50] Wang Yaping, Wang Lan, Xu Chunxue, et al. Hydro-geochemistry and genesis of major ions in the Yangtze River, China. *Geological Bulletin of China*, 2010, 29(Suppl.1): 446-456. [王亚平, 王岚, 许春雪, 等. 长江水系水文地球化学特征及主要离子的化学成因. *地质通报*, 2010, 29(Suppl.1): 446-456.]
- [51] Zhu B Q, Yang X P. The ion chemistry of surface and ground waters in the Taklimakan Desert of Tarim Basin, western China. *Chinese Science Bulletin*, 2007, 52(15): 2123-2129.
- [52] Zhang L, Song X F, Xia J, et al. Major element chemistry of the Huai River basin, China. *Applied Geochemistry*, 2011, 26(3): 293-300.
- [53] Chen J S, Wang F Y, Xia X H, et al. Major element chemistry of the Changjiang (Yangtze River). *Chemical Geology*, 2002, 187(3/4): 231-255.
- [54] Elango L, Kannan R. Chapter 11 Rock-water interaction and its control on chemical composition of groundwater// Sarkar D, Datta R, Hannigan R. *Developments in Environmental Science, Volume 5*. Amsterdam: Elsevier, 2007: 229-243.

Hydrochemical compositions of natural waters in Ordos Deserts and their influencing factors

REN Xiaozong¹, YANG Xiaoping²

(1. School of Geography Science, Taiyuan Normal University, Jinzhong 030619, Shanxi, China;

2. School of Earth Sciences, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: The analysis of hydrochemical compositions of natural waters and their influencing factors is helpful to understand the regional hydrogeological environment and hydrogeochemical development history. The Ordos Deserts, consisting mainly of the Mu Us Sandy Land and the Hobq Sand Sea, are located in the south of Hetao Plain, north to the Great Wall, surrounded by the Yellow River in the west, north and east, and adjacent to the Loess Plateau in the south. The Ordos Deserts make up the Ordos Plateau, with the same tectonic background, similar amount of precipitation and evaporation rates. There are a large number of lakes and rivers in these deserts. In this paper, based on the hydrochemical data of natural waters in the Ordos Deserts, the chemical compositions of natural waters and their influencing factors are analyzed, using various hydrochemical analysis methods. Results show that although Mu Us Sandy Land and Hobq Sand Sea have different landscapes, their natural waters of the same type have similar hydrochemical features, which should be related to their similar rates of evaporation. Deep groundwater in the Ordos Deserts is mainly $\text{Ca}^{2+}\text{-HCO}_3^-$ type and its chemical composition is mainly influenced by rock weathering. Due to strong evaporation, the hydrochemical nature of lakes in these regions is characterized with $\text{Na}^+\text{-Cl}^-$ contents. As for shallow groundwater and river waters, their hydrochemical features and influencing factors show transitional characteristics between deep groundwater and lake water. The ion ratios show that the weathering of evaporites, carbonate and silicate rocks affects the hydrochemical composition of deep groundwater, shallow groundwater and river water to a varying degree. Although the groundwater and river water in the Ordos Deserts are suitable for irrigation, an excessive use of them will cause salinization, which should be given attention timely.

Keywords: Ordos Deserts; natural waters; hydrochemical composition; influencing factor