

内蒙古高原 3 大典型湖泊水化学特征及其控制因素分析

吴用¹, 史小红^{1*}, 赵胜男¹, 林涛涛², 马军³

1. 内蒙古农业大学水利与土木建筑工程学院, 内蒙古 呼和浩特 010018; 2. 长江水利委员会长江三峡水文水资源勘测局, 湖北 宜昌 443000;
3. 河套灌区排水事业管理局总排干沟排水站, 内蒙古 巴彦淖尔 014400

摘要: 内蒙古高原地处我国北方半干旱与干旱气候区, 经度跨度大, 由东向西气候呈现半干旱区向干旱区过渡特征。区内湖泊多属内陆型湖泊, 湖泊水化学特征受地理位置和气候环境影响显著。文章在空间上从东向西依次选择呼伦湖、达里湖和乌梁素海为研究对象, 通过对不同气候区域和不同类型的湖泊水体中主要离子组成进行分析对比研究, 揭示区域内湖泊水化学特征及其控制因素。结果表明, 内蒙古高原区内湖泊水化学类型单一, 阳离子以 Na^+ 主导, 阴离子以 Cl^- 主导, 但各湖泊水体中主要离子质量浓度差异较大。呼伦湖、达里湖和乌梁素海 3 个湖泊 Na^+ 分别占其阳离子摩尔总数的 76.6%、97.2% 和 66.0%; Cl^- 分别占其阴离子摩尔总数的 49.6%、55.5% 和 45.2%。湖泊水体中 Na^+ 和 SO_4^{2-} 、 Cl^- 的变异系数相对较小, 在水体中质量浓度相对稳定。借助 Piper 三角图, 分析出呼伦湖和乌梁素海阴离子分布在 SO_4^{2-} - Cl^- 线上, 阳离子分布在 Na^+ + K^+ 线上; 达里湖的阴离子分布在 HCO_3^- - Cl^- 线上, 阳离子分布在 Na^+ + K^+ 线上, 说明区内湖泊受蒸发结晶和岩石风化共同作用影响。湖泊水体中主要离子质量浓度的空间变化特征受径流, 补排关系的影响, 结合 Gibbs 模型图进一步说明了 3 个湖泊受蒸发浓缩作用和人类活动影响。湖泊水化学特征的研究, 对于保护区域内湖泊环境具有重要意义。

关键词: 内蒙古高原湖泊; 干旱与半干旱气候区; 主要离子组成; 水化学特征

DOI: 10.16258/j.cnki.1674-5906.2015.07.019

中图分类号: X131.2

文献标志码: A

文章编号: 1674-5906 (2015) 07-1202-07

引用格式: 吴用, 史小红, 赵胜男, 林涛涛, 马军. 内蒙古高原 3 大典型湖泊水化学特征及其控制因素分析[J]. 生态环境学报, 2015, 24(7): 1202-1208.

WU Yong, SHI Xiaohong, ZHAO Shengnan, LIN Taotao, MA Jun. Major Ion Chemistry and Influencing Factors of Three Typical Lakes in Inner Mongolia Plateau [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2015, 24(7): 1202-1208.

湖泊水体中的化学离子被视为天然的“示踪剂”, 能够反映湖泊水循环过程, 流域水-岩作用以及湖泊演化历史(周嘉欣等, 2014)。研究水体中主要离子的组成特征, 可用于识别水体化学组成的基本过程。国内外已有不少学者通过对各地主要湖泊的水化学组成和特征进行了分析研究, 研究表明湖泊水化学组成受到大气沉降、岩石风化、水体生物和人类活动的综合影响(王苏民等, 1995)。

我国湖泊水化学特征的研究大多集中在长江中下游湖泊群, 西南岩溶湖、青藏高原湖区和新疆湖区, 研究成果较多(胡春华等, 2011; 白占国等, 1998; 侯韶华等, 2009)。处于我国西北干旱和半干旱的湖区, 生态环境脆弱, 对全球气候变化敏感, 区域内的湖泊具有较高的生态价值和经济价值, 对区域内湖泊水化学特征和盐化过程的深入研究非常重要。近年来, 学者们对干旱区和半干旱区的高原湖泊进行了相关研究, 如王鹏等(2013)研究了

青藏高原打加芒错湖水的水化学组成特征及其盐化过程, 王海雷等(2010)对高原上 400 多个湖泊的水化学成分与湖水盐度的相关性进行了综合分析, 郑绵平等(2010)分析了青藏高原盐湖水化学类型及其地带分布, 指出不同的水化学类型具有不同的矿物组合特征。内蒙古高原的湖泊研究中, 甄志磊(2014)利用同位素研究了达里湖与地下水的补给关系, 汪敬忠等(2013)结合氢、氧同位素和水化学特征研究了河套平原地下水对乌梁素海矿化度的影响; 曾海鳌等(2010)人分析了蒙新高原湖区各湖泊水体矿化度的影响因素。针对内蒙古地区的湖泊, 其空间上气候条件差异显著, 湖泊类型和地理环境复杂, 需要研究区内典型湖泊水化学特征并进行对比分析, 为进一步了解内蒙古地区各个湖泊的水环境特征提供依据。

内蒙古高原地处内陆, 区内湖泊大多属内陆湖泊, 气候干旱少雨, 地表径流补给不丰, 湖泊逐渐

基金项目: 国家自然科学基金项目(51269016; 51269017; 51339002; 51409288); 内蒙古农业大学优秀青年科学基金项目(2014XYQ-10)

作者简介: 吴用(1990年生), 男, 博士, 主要从事流域水污染控制研究。E-mail: wuyong526@126.com

*通信作者。E-mail: imaushixiaohong@163.com

收稿日期: 2015-04-29

萎缩咸化。加之，高原横跨经度大，从东向西气候由半干旱向干旱过渡，蒸发量由 1 500 mm 逐渐增大 2 400 mm，降雨量由 256 mm 逐渐减小至 140 mm，蒸发量约是降雨量的 5~10 倍。由东向西选择区内 3 个典型湖泊：呼伦湖、达里湖和乌梁素海，湖泊类型分别为草原湖泊，岩溶堵塞湖和灌区湖泊。文中从水化学的角度出发，系统分析不同类型湖泊（呼伦湖、达里湖和乌梁素海）主离子水化学特征及其分布规律，并试图对各湖泊水化学成因及演化过程进行探讨，以期为内蒙古高原干旱与半干旱湖泊的生态环境治理提供基础资料和科学依据。

1 研究区概况

呼伦湖也称达赉湖，地理坐标为：116°58'~117°48'E, 48°33'~49°20'N，坐落于呼伦贝尔大草原中部，是典型的草原湖泊，也是内蒙古最大的湖泊，蓄水量为 $138 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，湖水面积 2 339 km^2 。呼伦湖主要补给水源为克鲁伦河、乌尔逊河，达兰鄂罗木河（新开河）。其中新开河为吞吐性河流，海拉尔河水大时，顺此河流入呼伦湖，呼伦湖水大时又顺此河流向额尔古纳河（李畅游等，2011；王志杰等，2012）。达里湖位于赤峰市克什克腾旗西北部，其地理坐标为：116°22'~117°00'E, 43°11'~43°27'N，是一个岩溶堵塞湖，蓄水量为 $15.53 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，湖水面积 224.6 km^2 。湖水主要依赖湖面降水和地表地下径流补给。入湖河流主要有贡格尔河、沙里河、亮子河及浩来河，没有排泄出口（甄志磊等，2014）。乌梁素海位于乌拉特前旗境内，地理坐标为：108°43'~108°57'E, 40°47'~41°03'N，是黄河改道后形成的牛轭湖和典型的灌区湖泊，是河套灌区排灌水系的重要组成部分，蓄水量为 $2.64 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，湖泊现有水域面积 285.38 km^2 （汪敬忠等，2013；付绪金等，2013）。内蒙古高原的内陆湖泊，蒸发强度

较大以致超过湖水的补给量，湖泊水体因不断被浓缩而发育成闭流类的咸水湖和盐湖。本研究选取的呼伦湖、达里湖和乌梁素海，是内蒙古高原主要和具有代表性的湖泊，内蒙古高原湖区如图 1。

2 样品采集与分析方法

2012 年 6 月至 8 月，内蒙古高原湖泊都处于非冰封期。对 3 个湖泊的水质状况进行依次调查采样。其中：呼伦湖采样点 9 个，达里湖采样点 9 个，乌梁素海采样点 11 个，采样深度均为水面以下 0.6 m 处。采样点编号和位置如图 2。现场采用梅特勒（SG8-ELK, SG9-ELK）多参数水质分析仪测定湖水矿化度，盐度、pH 值和电导率； HCO_3^- 质量浓度采用酸碱指示剂滴定法（国家环境保护总局，2002）；阴、阳离子测定前，水样经 0.45 μm 的玻璃纤维滤膜过滤后，使用洁净聚氟乙烯瓶封装后取回水样，在实验室采用离子色谱法进行分析测定，所采用仪器为 Dionex ICS-1100 型号的色谱仪。



图 1 内蒙古高原湖泊区域概况图

Fig. 1 The locations of the lakes in the region of Inner Mongolia plateau

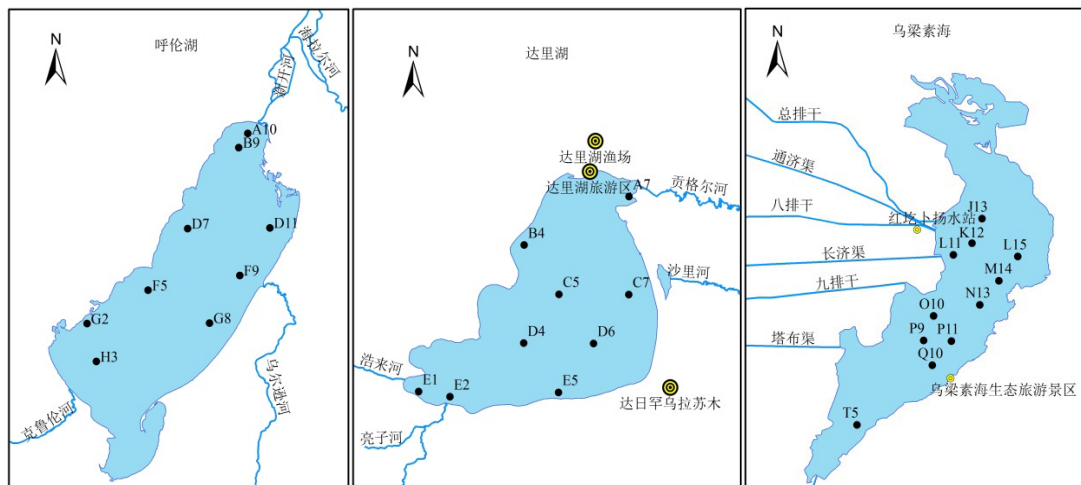


图 2 研究区采样点

Fig. 2 The samples in study areas

3 结果与讨论

3.1 湖泊水化学指标统计

总溶解性固体(TDS)是水化学成分的重要指标,一般以溶解于水中的主要离子总量表示,受降水量、蒸发量、流域岩石成分等因素影响。

3个典型湖泊水化学指标统计结果(表1)表明,呼伦湖的TDS最小,为 $1520\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,达里湖最大为 $5990\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,乌梁素海居中为 $2250\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。分析原因,呼伦湖是内蒙古东部草原型湖泊,属中温带半干旱偏湿地区,多年平均年降水量为 319 mm ,年蒸发量为 $1400\sim 1900\text{ mm}$,剧烈的蒸发导致呼伦湖水体的TDS值高于湿润地区湖泊,如太湖、鄱阳湖和洞庭湖,其TDS值分别为 345.86 、 99.04 和 $165.48\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (蔡永久等,2013)。但呼伦湖TDS值要低于干旱区和半干旱区的达里湖和乌梁素海,这是由于克鲁伦河和乌尔逊河两大河的补给,年补给量达 $11.94\times 10^8\text{ m}^3$,因而湖泊水体的TDS值偏低。达里湖是内蒙古高原干旱地区岩溶堵塞湖,湖泊水没有排泄出口,湖泊水的排泄主要依靠剧烈的蒸发。河流带到湖中的盐分不能排出,盐分在湖中不断累积,导致湖水TDS值偏高。乌梁素海地处内蒙古中西部,其属于黄河改道形成的牛轭湖,水量的补给来源主要靠黄河水和河套灌区农田退水,与河套灌区的灌溉措施密切相关,湖泊换水周期较快,湖泊水的水化学类型和水质取决黄河水和农田退水。加之同时受干旱区气候和灌区内人类活动,企业、工厂的污水的影响,湖泊水体的TDS值相对较高。

表1 3个湖泊主要离子质量浓度对比分析

Table 1 Analysis the content of main ions is of their discrepancy in each of lakes $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

名称	各离子质量浓度平均值						TDS	
	Na^+	K^+	Mg^{2+}	Ca^{2+}	Cl^-	SO_4^{2-}		HCO_3^-
呼伦湖	640.83	27.50	89.35	7.34	347.17	277.02	253.02	1520.00
达里湖	2204.02	159.24	20.04	5.09	2022.29	457.35	2210.59	5990.00
乌梁素海	671.48	14.93	132.73	66.06	640.29	375.44	1010.64	2250.00

3个湖泊同属内蒙古高原干旱区和半干旱区,受气候条件的影响,区域内蒸发量远大于降水量,湖泊湖水的排泄很大一部分靠蒸发,因此,3大湖泊都有向微咸水和咸水湖泊开始转化。

3.2 湖泊水化学特征

3.2.1 湖泊水体水化学类型

呼伦湖TDS平均值为 $1520\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,属于微咸水湖泊。阳离子当量浓度大小依次为 $\text{Na}^+>\text{Mg}^{2+}>\text{K}^+>\text{Ca}^{2+}$,湖水优势阳离子为 Na^+ ,占阳离子总摩尔数的 76.6% ;阴离子当量浓度大小依次为 $\text{Cl}^->\text{SO}_4^{2-}>\text{HCO}_3^-$,水中优势阴离子为 Cl^- 、 SO_4^{2-} ,分别占阴离子总摩尔数的 49.6% 、 29.3% 。湖泊水的水化学类型

为 $\text{Cl}^-\text{SO}_4^{2-}\text{Na}^+$ 。

达里湖TDS平均值为 $5990\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,属于咸水湖泊。阳离子当量浓度大小依次为 $\text{Na}^+>\text{Mg}^{2+}>\text{K}^+>\text{Ca}^{2+}$,湖水优势阳离子为 Na^+ ,占阳离子总摩尔数的 97.5% ;阴离子当量浓度大小依次为 $\text{Cl}^->\text{HCO}_3^->\text{SO}_4^{2-}$,水中优势阴离子为 Cl^- 、 HCO_3^- ,分别占阴离子总摩尔数的 55.5% 、 35.3% 。湖泊水的水化学类型为 $\text{Cl}^-\text{HCO}_3^-\text{Na}^+$ 。

乌梁素海TDS平均值为 $2250\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,属于微咸水湖泊。阳离子当量浓度大小依次为 $\text{Na}^+>\text{Mg}^{2+}>\text{Ca}^{2+}>\text{K}^+$,湖水优势阳离子为 Na^+ ,占阳离子总摩尔数的 66.0% ;阴离子当量浓度大小依次为 $\text{Cl}^->\text{HCO}_3^->\text{SO}_4^{2-}$,水中优势阴离子为 Cl^- 、 HCO_3^- ,分别占阴离子总摩尔数的 45.2% 、 37.5% 。湖泊水的水化学类型为 $\text{Cl}^-\text{HCO}_3^-\text{Na}^+$ 。

3个湖泊的水化学类型表明,其水化学组成相对单一,阳离子为钠型,阴离子为氯化物型。是处于内蒙古高原干旱半干旱区湖泊的共同点,因气候环境和水汽来源相近,使得湖泊水水中离子化学组成和水化学类型存在一定的相似性。然而水体中各离子摩尔浓度差别较大,主要受水文条件和地质环境的影响。呼伦湖湖盆地层主要是中生界地层及上第三系、第四系地层,岩性基本为沙岩、泥岩、砾岩夹煤系地层。近年来人类活动,湖区北面扎鲁诺尔矿区的煤矿工业得到大力发展,工业污水的大量排放,夹杂着大量的硫化物进入呼伦湖流域,从而导致湖水中 SO_4^{2-} 是除 Cl^- 外质量浓度最大的阴离子(王苏民等,1995)。达里湖存在乌日根塔拉-西拉沐伦东西向大断裂上,是由玄武岩的喷发构成的堰塞湖,没有排泄出口。周边地层中分布着大量的岩浆岩和变质岩,每年达里湖的河川径流量补给量为 $0.44\times 10^8\text{ m}^3$,蒸发量为 $2.48\times 10^8\text{ m}^3$,其亏损水量依靠地下水的补给,水流对岩层的淋滤作用导致湖泊水体中碳酸盐的浓度要比同样是封闭湖泊的呼伦湖要高,湖水中 HCO_3^- 离子质量浓度仅次于 Cl^- 离子(张郝哲等,2012)。乌梁素海是黄河改道形成的河迹湖,水源主要靠黄河灌溉水和农田退水补给,依靠黄河水的大量补给,水体交换条件较好,水体地球化学环境以还原性为主,因此湖泊水体中 HCO_3^- 质量浓度也相对较高(崔凤丽等,2013)。3个湖泊水化学组成成分的成因各不相同,充分说明内蒙古高原内不同湖泊类型其水化学特征有差异,需对其各自水化学特征进行详细的分析。

3.2.2 不同湖泊水体主离子组成变化

采用通用的水化学分类方法,将毫克当量百分数大于 25% 的离子参与水化学类型的分类。利用Gw-chart软件(USGS开发)绘出阳离子 $\text{Ca}^{2+}\text{-Mg}^{2+}$ -

($\text{Na}^+ + \text{K}^+$) 组成的三角图和阴离子 $\text{SO}_4^{2-} - \text{Cl}^-$ ($\text{CO}_3^{2-} + \text{HCO}_3^-$) 组成的三角图来表明不同水体的化学组成特征。湖泊演化一般趋势是从淡水湖到咸水湖再到盐湖，直至干涸结束演化，其水化学类型也遵循一定的盐化规律：即一般为碳酸盐型-硫酸钠型-硫酸镁型-氯化物型（陆莹等，2010）。

阴阳离子三角形图可表示水体中溶质载荷主要离子的相对丰度和分布特征，从而揭示不同岩石风化对水中总溶质成分的相对贡献率。在阴离子 $\text{HCO}_3^- - \text{SO}_4^{2-} - \text{Cl}^-$ 组成的三角组图中，在碳酸盐岩地区的水以 HCO_3^- 为主导，组分点落在 HCO_3^- 一端；在蒸发盐岩地区的水 SO_4^{2-} 、 Cl^- 含量较高，其组分点会落在 $\text{SO}_4^{2-} - \text{Cl}^-$ 线上，远离 HCO_3^- 一端。在阳离子 $\text{Ca}^{2+} - \text{Mg}^{2+} - (\text{Na}^+ + \text{K}^+)$ 组成的三角图中也有类似的反映，主要受碳酸盐岩影响的水体，其组分点会落在 $\text{Ca}^{2+} - \text{Mg}^{2+}$ 线上，靠近 Ca^{2+} 端元；主要受蒸发盐岩影响的水体，其组分点偏向 $(\text{Na}^+ + \text{K}^+)$ 端元（王瑞久，1983）。

图 3 为呼伦湖、达里湖和乌梁素海的主要阴阳离子组成 Piper 图，从中可以看出呼伦湖和乌梁素海的阴离子分布在三角图 $\text{SO}_4^{2-} - \text{Cl}^-$ 线上，阳离子分布在三角图的 $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ 线上；达里湖的阴离子分布在三角图 $\text{HCO}_3^- - \text{Cl}^-$ 线上，阳离子分布在三角图的 $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ 线上。通过计算各离子的变异系数，表 2 得知：呼伦湖和乌梁素海水体中主要阴阳离子 Na^+ 和 SO_4^{2-} 、 Cl^- 的变异系数相对较小，达里湖水体中主要阴阳离子 Na^+ 和 Cl^- 的变异系数相对较小，进一步说明他们在水体中的质量浓度相对稳定。可以推断呼伦湖和乌梁素海主要受蒸发盐岩控制，达里湖受碳酸盐岩和蒸发盐岩的共同作用，湖泊离子组成与气候条件和湖泊地质环境密不可分（叶宏萌等，2010）。

对比 20 世纪 80~90 年代资料（表 3），呼伦湖

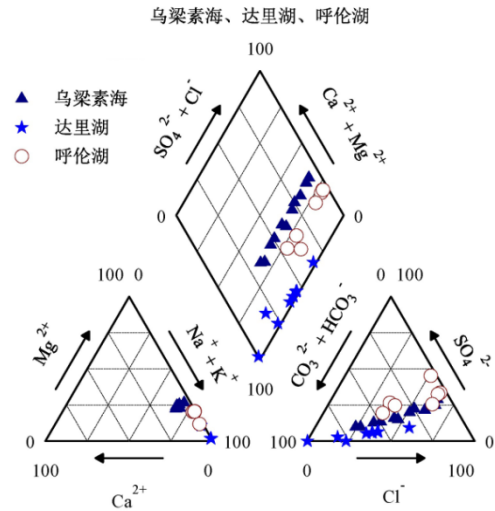


图 3 3 个湖泊主离子组成 Piper 图
Fig. 3 The Piper triangle chart for main ions of three lakes

表 3 3 个湖泊主离子现状与历史资料对比分析

Table 3 The status quo ions concentration percent compare with history in the three lakes %

时间	名称	$\text{Na}^+ + \text{K}^+$	Mg^{2+}	Ca^{2+}	Cl^-	SO_4^{2-}	HCO_3^-
20 世纪 80-90 年代*	呼伦湖	77.1	14.9	8.0	15.1	11.7	73.2
	达里湖	97.4	2.3	0.3	40.1	6.4	53.5
	乌梁素海	74.4	15.8	9.8	37.8	33.2	29.0
2012 年	呼伦湖	87.4	11.7	1.0	39.6	31.6	28.8
	达里湖	99.0	0.8	0.2	43.1	9.8	47.1
	乌梁素海	77.6	15.0	7.5	31.6	18.5	49.9

*数据来源中国湖泊志

各离子质量浓度变化剧烈。近几十年来，由于流域降雨的减少，河川径流补给持续减少，湖泊水体受蒸发主控，水体中 Cl^- 的增加。煤矿工业的大力发展，对湖泊环境造成了一定的影响，从而导致水体中 SO_4^{2-} 的增多。达里湖是岩溶堵塞湖，水环境条件较为封闭，湖泊水体中各离子质量浓度变化不大，受

表 2 呼伦湖、达里湖和乌梁素海湖泊水化学特征值*

Table 2 The water chemical characteristics values in Hulun Lake, Dali Lake and Ulansuhai Lake

湖泊名称	项目	Na^+	K^+	Mg^{2+}	Ca^{2+}	Cl^-	SO_4^{2-}	HCO_3^-
呼伦湖	最大值	736.83	32.27	103.87	11.17	446.19	356.95	637.30
	最小值	503.16	20.91	69.04	4.16	269.33	217.28	32.93
	平均值	640.83	27.50	89.35	7.34	347.17	277.02	253.02
	标准差	90.03	4.41	13.88	2.83	67.34	54.04	247.88
	变异系数 CV	14.05	16.02	15.54	38.63	19.40	19.51	97.97
达里湖	最大值	2 763.94	207.91	26.36	7.41	2 225.20	584.80	3 638.67
	最小值	1 656.21	102.62	12.16	3.26	1 842.18	409.09	895.86
	平均值	2 204.02	159.24	20.04	5.09	2 022.29	457.35	2 210.59
	标准差	358.22	34.71	5.45	1.44	126.19	53.62	762.02
	变异系数 CV	16.25	21.80	27.19	28.28	6.24	11.72	34.47
乌梁素海	最大值	951.76	16.59	193.87	84.87	885.71	544.50	1 838.64
	最小值	391.21	13.27	71.58	47.25	394.87	206.39	182.64
	平均值	671.48	14.93	132.73	66.06	640.29	375.44	1 010.64
	标准差	163.80	1.00	36.26	12.73	168.82	103.47	563.55
	变异系数 CV	24.39	6.72	27.32	19.27	26.37	27.56	55.76

*样品测试中设 1 组平行和 1 次重复，呼伦湖、达里湖和乌梁素海各参与统计样品数 $n=36, 36, 44$

蒸发盐岩控制,湖水中Na⁺、K⁺、和Cl⁻质量浓度变大。取决达里湖湖泊水文循环过程,地下径流大量补给湖水,达里湖碳酸盐岩的作用要大于蒸发盐岩。乌梁素海虽然依赖黄河水的补给,但同样受蒸发盐岩影响,流域内蒸发量是降水量的10倍左右,水体中Na⁺、K⁺增加。

Piper图上可以看出,各个湖泊的离子质量浓度在空间上也存在差异。通过绘制呼伦湖、达里湖和乌梁素海空间上各离子质量浓度变化图(图4),并结合各湖泊空间采样点的位置(图2)分析,呼伦湖从北向南湖水中各离子质量浓度呈现先增大后减小的过程。在湖泊南部有两条河流进行补给,水动力条件较好,水体交换强烈,各离子质量浓度较小;湖北部是新开河,为吐纳型河流,补给情况下各离子质量浓度会被稀释。达里湖空间上,离子变化幅度较小,主要原因是达里湖没有外泄出口,湖水交换主要依靠地下水的补给和蒸发排泄。其全湖整体上由北向南出现降低趋势。湖中部和南部有3条河流,水体交换能力较北部活跃,河流的淡水稀释了入湖口周围的离子质量浓度。乌梁素海的主要的补给口是总排干,湖泊南部只有唯一的泄水渠乌毛计。湖泊水体从北向南各离子质量浓度整体增大,由于南部水动力条件较北部偏弱,没有大量的水流交换,加上强烈的蒸发,流进湖泊的盐分在湖泊南部逐渐积累,造成南部湖泊水体例子质量浓度增大。同时进一步说明蒸发依然是乌梁素海湖泊水体的主要排泄方式之一。

综上,不同湖泊水体的主要阴阳离子组成及水

化学类型存在显著差别,离子组成与水化学类型呈显著的区域性。与历史资料的对比分析,现状下湖泊水体的离子组成的变化主要受气候条件和人类活动的综合影响。同一湖泊水体中主要阴阳离子组成及水化学类型存在空间上的差异,受湖泊本身水动力条件和补给排泄的综合影响。

3.3 不同湖泊水体离子来源及控制因素

陆地水溶解盐的可能来源包括大气携带的海盐(循环盐)成分、可溶性岩石(蒸发岩、硅酸盐、碳酸盐、硫化物)的风化物和人类活动产生的污染物(Berner et al., 1987)。Gibbs通过对世界雨水、河水、湖泊等地表水化学组分分析,利用 $\rho(\text{TDS})$ 与 $\rho(\text{Na}^+)/[\rho(\text{Na}^+)+\rho(\text{Ca}^{2+})]$ 图和 $\rho(\text{TDS})$ 与 $\rho(\text{Cl}^-)/[\rho(\text{Cl}^-)+\rho(\text{HCO}_3^-)]$ 图,直观地反映出水体主要组分的类型:降水控制类型、岩石风化类型和蒸发-浓缩类型(Gibbs, 1970; 朱海勇等, 2013)。该图把地表水化学组分划分为3个控制端元:岩石风化主控端元,大气降水主控端元和蒸发-结晶主控端元。

将3个湖泊的水化学数据绘于Gibbs图中,从图5看出3个湖泊的水化学主控端元落在蒸发-结晶端元, TDS大于1000 mg·L⁻¹, $\rho(\text{Na}^+)/[\rho(\text{Na}^+)+\rho(\text{Ca}^{2+})]$ 比值接近于1, $\rho(\text{Cl}^-)/[\rho(\text{Cl}^-)+\rho(\text{HCO}_3^-)]$ 比值在0.2~0.9之间,说明湖泊水体分布在蒸发作用很强的干旱区域,符合内蒙古高原湖泊的特征,受干旱与半干旱气候的影响。同时通过计算呼伦湖、达里湖和乌梁素海的Cl/Na值,分别为0.54, 0.94和1.11,均都小于世界平均海水比值(Cl/Na=1.15)(叶宏萌等, 2010),符合内陆湖泊的特点,受大气环流影

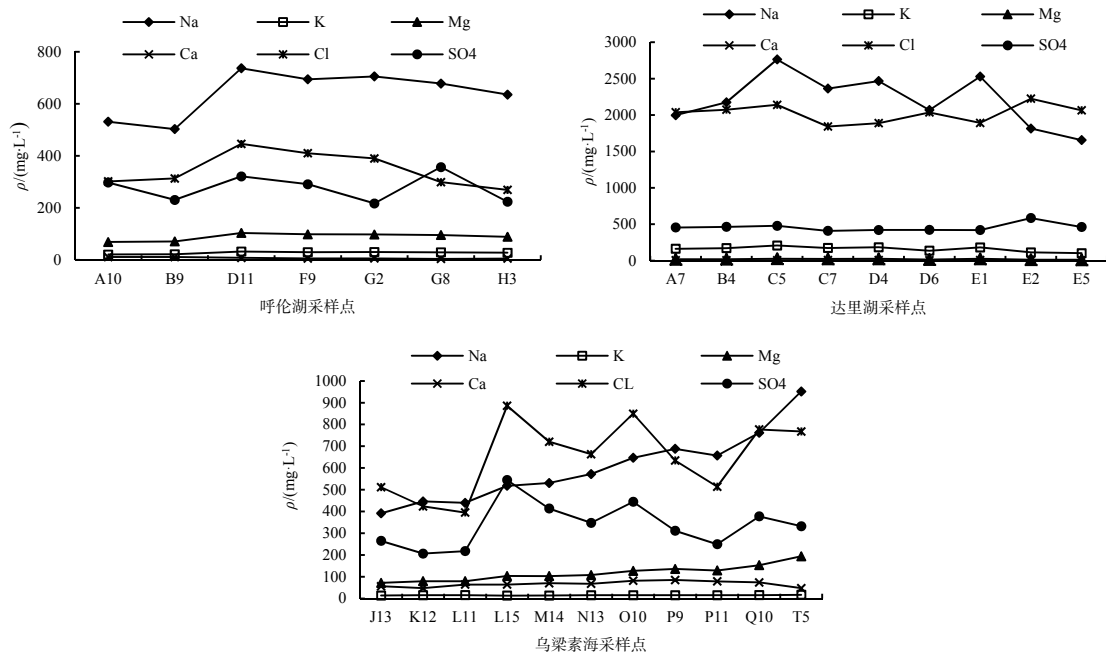


图4 3个湖泊各离子质量浓度空间变化

Fig. 4 The space changes of content of main ions for three lakes

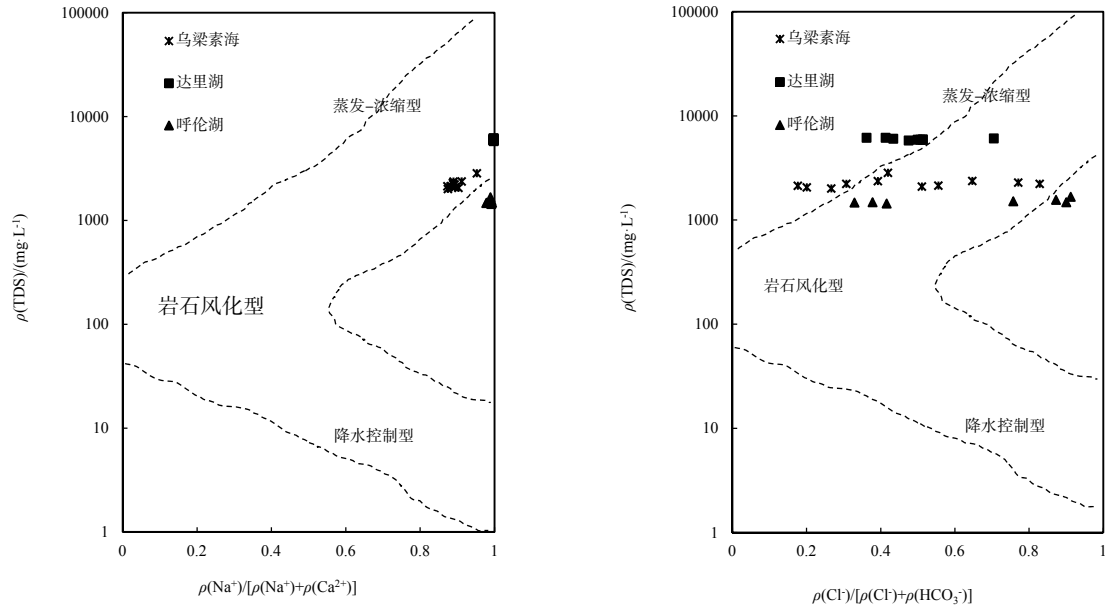


图 5 3 个湖泊 Gibbs 模型图示
Fig. 5 The Gibbs model for three lakes

响较小。但 3 个湖泊受干旱和半干旱气候影响的程度不同，与上文离子组成特征相符。由图 5 还可知，3 个湖泊部分区域还均受到不同程度的人为活动的干扰，部分采样点落在了 Gibbs 模型外。

结合表 4 中和图 5，分别分析 3 个湖泊落在的 Gibbs 模型外方的采样点，通过对比发现，呼伦湖 D11 和 G2 两点，分别离达赉湖渔场双山子分场和大沙圈渔场较近，两个渔场人为活动在呼伦湖流域相对较大，对湖泊水体的影响也就相对突出；达里湖的 A7 和 D6 两个点，分别与达里湖自然保护区的达来诺尔渔场、达里湖度假中心较近，人为活动产生的生活污水对湖泊水体的离子组成造成了一定的影响；乌梁素海落在 Gibbs 图外的点主要分布在总排干入湖口处 J13、K12、L11 点和湖的东南部乌梁素海渔场附近 P11、Q10 点，也说明灌区内的生活污水和企业工矿废水通过总排干和排污口排入乌梁素海，一定程度上改变了湖泊水体的水

化学组分。

4 结论

处于干旱-半干旱地区的内蒙古高原湖泊，由于地理气候的影响，蒸发强烈，降雨稀少，蒸发是降雨的 10~20 倍，导致该区域湖泊由淡水湖向微咸水和咸水湖泊转化，水化学类型呼伦湖为 $Cl^- \cdot SO_4^{2-} \cdot Na^+$ ，达里湖为 $Cl^- \cdot HCO_3^- \cdot Na^+$ ，乌梁素海为 $Cl^- \cdot HCO_3^- \cdot Na^+$ 。

分析湖泊水中离子的组成发现，湖泊水中各离子的质量浓度呈显著性的区域差异，达里湖各离子质量浓度显著高于呼伦湖和乌梁素海，与湖区所在的地理环境和水文条件密切相关。对同一湖区，空间上湖泊水体离子质量浓度也有差异，主要与湖泊水体的水动力条件和补给排泄关系联系紧密。

与历史资料的对比，并结合 Piper 解析了湖泊主要离子变化原因。利用 Gibbs 图进一步分析，3 个湖泊水化学主控端元落在蒸发-结晶端元，同时 3

表 4 3 个湖泊采样点对应的 $\rho(Na^+)/[\rho(Na^+)+\rho(Ca^{2+})]$ 和 $\rho(Cl^-)/[\rho(Cl^-)+\rho(HCO_3^-)]$ 比值
Table 4 The value of $\rho(Na^+)/[\rho(Na^+)+\rho(Ca^{2+})]$ and $\rho(Cl^-)/[\rho(Cl^-)+\rho(HCO_3^-)]$ for three lakes

呼伦湖			达里湖			乌梁素海		
点号	$\rho(Na^+)/[\rho(Na^+)+\rho(Ca^{2+})]$	$\rho(Cl^-)/[\rho(Cl^-)+\rho(HCO_3^-)]$	点号	$\rho(Na^+)/[\rho(Na^+)+\rho(Ca^{2+})]$	$\rho(Cl^-)/[\rho(Cl^-)+\rho(HCO_3^-)]$	点号	$\rho(Na^+)/[\rho(Na^+)+\rho(Ca^{2+})]$	$\rho(Cl^-)/[\rho(Cl^-)+\rho(HCO_3^-)]$
A10	0.98	0.38	A7	1.00	0.48	J13	0.87	0.27
B9	0.98	0.33	B4	1.00	0.51	K12	0.90	0.20
D11	0.99	0.91	C5	1.00	0.70	L11	0.87	0.18
F9	0.99	0.87	C7	1.00	0.43	L15	0.89	0.83
G2	0.99	0.76	D4	1.00	0.51	M14	0.88	0.56
G8	0.99	0.90	D6	1.00	0.41	N13	0.89	0.51
H3	0.99	0.42	E1	1.00	0.51	O10	0.89	0.77
			E2	1.00	0.50	P9	0.89	0.39
			E5	1.00	0.36	P11	0.89	0.31
						Q10	0.91	0.65
						T5	0.95	0.42

个湖泊采样点均有部分落在 Gibbs 模型外,说明3个湖泊个别区域已受到了不同程度的人为活动影响。

参考文献:

- BERNER E K, BERNER R A. 1987. The global water cycle [J]. Englewood Cliffs: Prentice-Hall.
- GIBBS R J. 1970. Mechanisms controlling world water chemistry [J]. Science, 170(3962): 1088-1090.
- 白占国, 万国江. 1998. 喀斯特区域的水化学不稳定性——以黔中地区为例[J]. 水科学进展, 12(4): 325-332.
- 蔡永久, 姜加虎, 张路, 等. 2013. 长江中下游湖群大型底栖动物群落结构及影响因素[J]. 生态学报, 23(16): 4987-4999.
- 曾海鳌, 吴敬禄. 2010. 蒙新高原湖泊水质状况及变化特征. 湖泊科学 [J]. 22(6): 882-887.
- 崔凤丽, 李畅游, 史小红, 等. 2013. 乌梁素海主要例子季节变化特征分析[J]. 干旱区资源与环境, 27(8): 137-142.
- 付绪金, 贾克力, 史小红, 等. 2013. 乌梁素海沉积物腐殖质的组成及分布特征[J]. 湖泊科学, 25(4): 489-496.
- 国家环境保护总局. 2002. 水和废水监测分析方法[M]. 中国环境科学出版社.
- 侯韶华, 徐海, 安芷生. 2009. 青海湖流域水化学主离子特征及控制因素初探[J]. 地球与环境, 37(1): 11-18.
- 胡春华, 周文斌, 夏思奇. 2011. 鄱阳湖流域水化学主离子特征及其来源分析[J]. 环境化学, 30(9): 1620-1626.
- 李畅游, 孙标, 高占义, 等. 2011. 呼伦湖多波段遥感水深反演模型研究

- [J]. 水利学报, 42(12): 1423-1431.
- 陆莹, 王乃昂, 李贵鹏, 等. 2010. 巴丹吉林沙漠湖泊水化学空间分布特征[J]. 湖泊科学, 22(5): 774-782.
- 汪敬忠, 吴敬禄, 曾海鳌, 等. 2013. 内蒙古河套平原水体同位素及水化学特征[J]. 地球科学与环境学报, 35(4): 104-111.
- 王海雷, 郑绵平. 2010. 青藏高原湖泊水化学与盐度的相关性初步研究[J]. 地质学报, 54(10): 1517-1522.
- 王鹏, 尚英男, 沈立成, 等. 2013. 青藏高原淡水湖泊水化学组成特征及其演化[J]. 环境科学, 34(3): 874-881.
- 王瑞久. 1983. 三线图解及其水文地质解释[J]. 工程勘探, (6): 6-11.
- 王苏民. 1995. 呼伦湖古湖泊学研究[M]. 中国科学技术大学出版社.
- 王志杰, 李畅游, 李卫平, 等. 2012. 内蒙古呼伦湖水量平衡计算与分析[J]. 湖泊科学, 24(2): 273-281.
- 叶宏萌, 袁旭音, 葛敏霞, 等. 2010. 太湖北部流域水化学特征及控制因素[J]. 生态环境学报, 19(1): 23-27.
- 张郝哲, 田明中, 郭婧, 等. 2012. 基于 RS 和 GIS 的内蒙古达里诺尔湖 1990—2010 年动态监测[J]. 干旱区资源与环境, 26(10): 41-46.
- 甄志磊, 李畅游, 李文宝, 等. 2014. 内蒙古达里诺尔湖流域地表水和地下水环境同位素特征及补给关系[J]. 湖泊科学, 26(6): 916-922.
- 郑绵平, 刘喜方. 2010. 青藏高原盐湖化学及其矿物组合特征[J]. 地质学报, 84(11): 1585-1600.
- 周嘉欣, 丁永建, 曾国雄, 等. 2014. 疏勒河上游地表水水化学主离子特征及其控制因素[J]. 环境科学, 35(9): 3315-3324.
- 朱海勇, 陈永金, 刘加珍, 等. 2013. 塔里木河中下游地下水水化学及其演变特征分析[J]. 干旱区地理, 36(1): 8-18.

Major Ion Chemistry and Influencing Factors of Three Typical Lakes in Inner Mongolia Plateau

WU Yong¹, SHI Xiaohong¹, ZHAO Shengnan¹, LIN Taotao², MA Jun³

1. Water Conservancy and Civil Engineering College, Inner Mongolia Agricultural University, Huhhot 010018, China;

2. Three Gorges Hydrology and Water Resources Survey Bureau, Bureau of Hydrology, Yangtze River Water Conservancy Commission, Yichang, 443000, China; 3. Honggebo Drainage Station of Hetao Irrigation District Management Bureau of Inner Mongolia, Bayannur 014400, China

Abstract: Inner Mongolia plateau is located in the semi-arid and arid climate zone of northern China. The climate exhibits both semi-arid and arid characteristics as it spans across longitudes from East to West. Lakes in the region are mostly inland lakes. Their water chemistry characteristics are greatly influenced by geographical and climate. Three lakes, Hulun Lake, Dali Lake and Ulansuhai Lake, were analyzed for their main ions and the discrepancies, the chemical characteristics of the water, and their control factors. The results showed that the water chemical type, cation by Na^+ leading and anion by Cl^- leading, was single by the geographical and climate. However, the main ions content was very different in these lakes. The percent of Na^+ in the total number of mole of cationic was 76.6%, 97.2% and 66.0%, while the percent of Cl^- in the total number of mole of anion was 49.6%, 55.5% and 45.2%, respectively for three lakes. The coefficient of variation of Na^+ and SO_4^{2-} , Cl^- was relatively low, it showed the ion content was stable in the water. Based on the Piper triangle chart analyzed ions consist, the anion distributed in the line of SO_4^{2-} - Cl^- and the cation in the line of Na^+ + K^+ in Hulun lake and Ulansuhai Lake. But the anion was in the line of HCO_3^- - Cl^- and the cation in the line of Na^+ + K^+ in Dali Lake. It shows that the water chemistry characteristics are affected by evaporation and crystallization and rock weathering. The spatial changes of the content of the main ions are also affected by the relationship between runoff and drainage, and are combined with the Gibbs model to further explain the different degree of human activity for these three typical lakes. Researching the lakes' chemistry characteristics has a great significance for protecting lakes' environment.

Key words: lakes in the Inner Mongolia plateau; arid and semi-arid regions; mainly composed of ions; water chemistry characteristics