

高娟琴, 于扬, 王登红, 等. 新疆阿勒泰地区地表水体氢氧同位素组成及空间分布特征[J]. 岩矿测试, 2021, 40(3): 397 – 407.
GAO Juan – qin, YU Yang, WANG Deng – hong, et al. Composition and Spatial Distribution Characteristics of Hydrogen and Oxygen Isotopes of Surface Water in Altay, Xinjiang Province[J]. Rock and Mineral Analysis, 2021, 40(3): 397 – 407.
【DOI: 10.15898/j.cnki.11 – 2131/td.202101140007】

新疆阿勒泰地区地表水体氢氧同位素组成及空间分布特征

高娟琴^{1,2}, 于扬^{2*}, 王登红², 王伟³, 代鸿章², 于泓^{1,2}, 秦燕²

- (1. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083;
2. 自然资源部成矿作用与资源评价国家重点实验室, 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037;
3. 四川省地质矿产勘查开发局地质矿产科学研究所, 四川 成都 610036)

摘要: 氢氧同位素可以识别水体来源, 示踪水循环, 自 20 世纪 50 年代以来已被广泛应用于水文地球化学领域。已有学者开展了新疆大气降水及部分河流湖泊的稳定同位素研究, 而关于阿勒泰地区大气降水之外的地表水体稳定同位素研究尚需加强。本文采用液体水激光同位素分析法开展了新疆阿勒泰地区地表河水、湖泊、山泉水、雪水、锂矿坑裂隙水五类水体的氢氧同位素组成研究。结果表明: 阿勒泰地区各种类型水体氢氧同位素组成差异明显, 地表河流的 $\delta^{18}\text{O}$ 及 δD 值变化范围分别为 $-15.4\text{‰} \sim -11.5\text{‰}$ 及 $-114\text{‰} \sim -100\text{‰}$, 氘过量参数(d 值)变化范围为 $-12.4\text{‰} \sim 12.4\text{‰}$; 乌伦古湖湖水的 $\delta^{18}\text{O}$ 及 δD 值均远高于地表河流, 平均值分别为 -5.95‰ 及 -78.5‰ , 氘过量参数远低于地表河流, 均值为 -30.9‰ 。地表河流与全球及乌鲁木齐大气降水线相比差异很大, 河水除了大气降水外还受到冰川融水的补给, 且在水循环过程中经历了蒸发分馏作用, 地表河流之间的氢氧同位素组成差异主要受水体补给来源及蒸发程度强弱的控制。由于氢氧同位素温度效应、纬度效应等的存在, 阿勒泰地区水体 δD 及 $\delta^{18}\text{O}$ 与水温(T)、总溶解性固体(TDS)及主要离子 Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 摩尔浓度呈显著正相关关系, 而与采样点纬度及溶解氧含量(DO)呈显著负相关关系($P < 0.05, n = 32$)。本研究获得的氢氧同位素组成特征为阿勒泰地区各类型水体稳定同位素研究提供了基础数据。

关键词: 地球化学; 地表水; 氢氧同位素; 氘过量参数; 空间分布特征
要点:

- (1) 调查了阿勒泰地区主要地表河流及湖泊的氢氧同位素组成及氘过量参数差异。
(2) 水体 δD 及 $\delta^{18}\text{O}$ 与水体参数 T 、TDS 及主要离子 Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 摩尔浓度呈显著正相关关系。
(3) 河流氢氧同位素分布与大气降水线有较大差异, 其补给源除大气降水外有一定比例的高山冰川融水, 且在水循环过程中经历了一定程度的蒸发分馏。

中图分类号: S482 文献标识码: A

氢氧同位素是广泛存在于自然界各类水体中的稳定同位素。在水循环过程中, 受到同位素分馏作用的影响, 水分子中的轻同位素倾向于在水汽中富集, 重同位素则倾向于留在液相中, 不同来源、不同纬度及高程的水体氢氧同位素差异明显, 故通过水体的氢氧同位素组成特征差异可以确定其来源, 分析运移过程, 从而示踪水循环^[1]。氢氧同位素作为水体的有效示踪剂, 已广泛应用于水文地球化学领域^[2-4]。国际上水体稳定同位素的研究始于 20 世纪 50 年代, Dansgaard^[5]首次分析了大气水中的¹⁸O。

收稿日期: 2021 – 01 – 14; 修回日期: 2021 – 04 – 08; 接受日期: 2021 – 05 – 03
基金项目: 中国地质调查局地质调查项目(DD20190173)
第一作者: 高娟琴, 博士研究生, 地球化学专业。E – mail: gaojuanqinmail@ sina. com。
通信作者: 于扬, 博士, 副研究员, 主要从事地球化学研究。E – mail: yuyang_cags@ sina. com。

中国水体稳定同位素研究开展较晚,20 世纪 70 年代,中国学者研究了珠穆朗玛峰高海拔地带水体的氢氧同位素^[6],其后逐步将氢氧同位素应用于其他各类型水体来源及循环过程的分析^[4,7-11]。

目前已有学者开展了新疆乌鲁木齐地区大气降水^[12-13]、塔里木盆地河水^[14]、博斯腾湖流域^[15]、呼图壁河流域^[16-17]、哈萨克斯坦东部额尔齐斯河^[18]的氢氧同位素分布特征研究。新疆阿勒泰地区有部分大气降水的研究结果可供参考,但该区域地表河流稳定同位素变化特征研究尚需补充。此外 Natalia 等^[19]收集了阿尔泰山区域 7 个气象站点的降雨量数据,发现自 1959 年至 2014 年阿尔泰山脉暖季(4 月—10 月)降雨量有明显的提高。在此气候条件变化的背景下,开展阿勒泰地区各类型水体氢氧同位素组成的研究具有重要的意义。

本文采集了新疆阿勒泰地区主要河流及湖泊水样品,采用 LGR DT100 液体水激光同位素分析法研究氢氧同位素组成,获得阿勒泰地区河流、湖泊等水体稳定同位素组成数据,对该区各类型水的氢氧同位素组成特征进行了总结并判断其水汽补给来源。

1 研究区概况

阿勒泰地区地处阿尔泰山南麓,新疆最北部,西北部与哈萨克斯坦、俄罗斯相接,东北部与蒙古国接壤,年平均降水量 200mm,蒸发量 1814.9mm^[20]。阿勒泰地区常年受到西风带水汽的影响,在冬天还会受到极地水汽侵入。水系发育,是新疆的丰水区之一,多见山间河流,发育于阿尔泰山南部的诸多支流以梳状排列汇入额尔齐斯河,发育于阿尔泰山东部的山间河流汇入乌伦古河^[21]。

额尔齐斯河为鄂毕河最大的支流,起源于新疆维吾尔自治区富蕴县阿尔泰山东南部,由喀依尔特河及库依尔特河汇集而成,沿阿尔泰山南麓向西北方向流出哈巴河县后流经哈萨克斯坦国,转而进入俄罗斯境内汇入鄂毕河,最终注入北冰洋,是起源于中国的唯一一条注入北冰洋的河流。额尔齐斯河河流总长 4248km,流域面积 $1.64 \times 10^6 \text{ km}^2$,在中国境内上游长度及面积分别占 2.76% 及 14.90%,是同处于干旱区的哈萨克斯坦国以及中国新疆的重要水资源^[22]。

乌伦古河总长 573km,流域总面积 $3.79 \times 10^4 \text{ km}^2$ ^[23],是准噶尔盆地的内陆河,起源于青河县境内阿尔泰山,自东向西流经富蕴县,于福海县先注入吉力湖,经 8km 长的库依戈河最终流入乌伦古湖。乌

伦古湖与吉力湖位于准噶尔—北天山褶皱系的福海凹陷中。乌伦古湖和吉力湖在全新世时期原本为一个湖体,后由于乌伦古河入湖三角洲发育,进一步形成沙丘阻塞河道,遂演变而成的两个独立湖泊^[24]。其中乌伦古湖大部分湖体位于福海县境内,北部属于阿勒泰市及吉木乃县;吉力湖位于福海县内。据已有研究统计^[25],2012 年乌伦古湖平均水位 482m,面积约 859km²,蓄水量 $8.88 \times 10^9 \text{ m}^3$;吉力湖面积为 169km²,蓄水量 $1.48 \times 10^9 \text{ m}^3$ 。

2 实验部分

2.1 样品采集

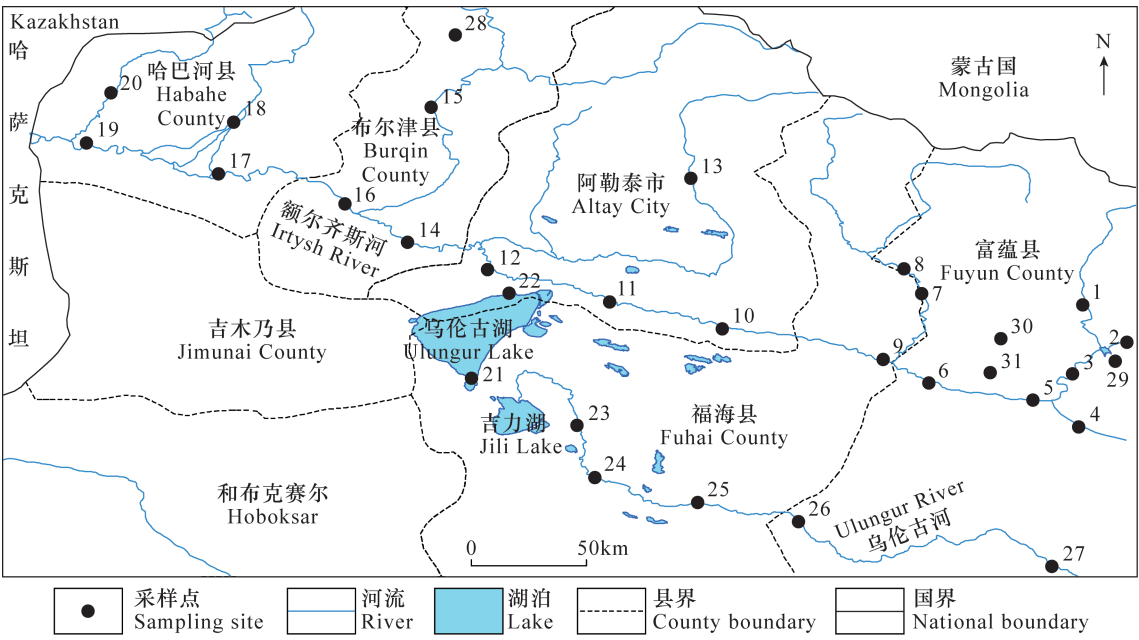
本文重点选取阿勒泰地区额尔齐斯河及乌伦古河湖水系采集水样品,共采集水样品 32 件。其中河水样品 25 件(编号 1~20、23~27),湖水样品 3 件(编号 21~22、32,其中采自南疆艾丁湖的 32 号湖水为对比样品),山泉水样品 2 件(编号 30、31),雪水样品 1 件(编号 28),可可托海 3 号矿坑裂隙水样品 1 件(编号 29)。各采样点位分布如图 1 所示。

使用有机玻璃采水器于宽阔的河湖面中间采集地表水样品,样品采集前用蒸馏水洗净采样器及采样瓶,并用待采水样品润洗三次。保证样品采集于水面之下至少 20cm,采样之前排尽瓶内空气避免进一步发生同位素分馏,每个采样点采集样品 1500mL,记录编号。使用一次性医用注射器及 0.45μm 孔径的聚醚砜滤膜过滤原水样品,于预先酸洗的聚乙烯瓶中收集过滤水样品 10mL 以上,记录样品编号。

2.2 样品测试

为了掌握各类水体水质基本情况,使用德国 WTW3430 多参数水质分析仪于野外现场测定了水样品的温度(temperature, T)、溶解氧(dissolved oxygen, DO)、溶解性总固体(total dissolved solids, TDS)、pH 等基本参数。

原水样品送至国家地质实验测试中心测定主要阴阳离子。主要阳离子 Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 采用电感耦合等离子体发射光谱法(PE8300 型,美国 PerkinElmer 公司)进行分析,测试依据《生活饮用水标准检验方法:金属指标》(GB/T 5750.6—2006),检测下限分别为 5μg/L、20μg/L、11μg/L、13μg/L; HCO_3^- 、 CO_3^{2-} 用碱滴定法测定,测试依据《地下水分析方法 第 49 部分:碳酸根、重碳酸根和氢氧根离子的测定 滴定法》(DZ/T 0064.49—2021),检出下限为 5mg/L; Cl^- 、 SO_4^{2-} 采用离子色谱法分析,参见



注:32号采样点为艾丁湖湖水样品,因与阿勒泰地区距离较远,未绘制于图上。
Note:No. 32 is a water sample from Aiding Lake, which is not drawn on the map due to the long distance from Altay Region.

图1 采样点位置图
Fig.1 Map of sampling sites

GB/T 5750.5—2006,检测下限分别为0.15mg/L及0.75mg/L。主要阴阳离子测试过程中的质量控制通过监测空白样、插入重复样(重复样结果差异在2%~5%之间)以及加标回收实验(标准回收率介于90%~100%)完成。

过滤水样品在中国地质科学院矿产资源研究所同位素实验室采用LGR DT100液体水激光同位素分析仪测定氢氧同位素,测定结果以相对于国际上公认的V-SMOW(standard mean ocean water,标准平均海水)的千分差来表示,即δD和δ¹⁸O,分析精度分别为1.0‰和0.1‰。

3 结果与讨论

3.1 样品氢氧同位素及主要阴阳离子测试结果

阿勒泰地区水样品氢氧同位素组成、主要阴阳离子及氡过量参数的测试结果见表1。阿勒泰地区水体氢氧同位素变化幅度较大,δ¹⁸O值变化范围为-15.4‰~-5‰,算术平均值为-12.64‰,δD值变化范围为-121‰~-49‰,平均值为-102.75‰。其中,地表河流(额河、乌伦古河、额河支流)的δ¹⁸O值变化范围为-15.4‰~-11.5‰,平均值为-13.48‰,δD值变化范围为-114‰~-100‰,平均值为-106.04‰;两件山泉水的δ¹⁸O值及δD值分别为-14.9‰、-121‰以及

-11.8‰、-114‰,δ¹⁸O平均值为-13.35‰,δD平均值为-117.5‰;三件湖泊水的δ¹⁸O值变化范围为-6.9‰~-5‰,平均值为-5.77‰,δD值变化范围为-98‰~-49‰,平均值为-68.67‰;矿坑裂隙水的δ¹⁸O值为-11.6‰,δD值为-106‰;雪水的δ¹⁸O值和δD值分别为-11.8‰及-90‰。

样品采集于2016年秋季10月9日至10月16日,河湖水体温度介于3.2~23.3℃,最高者为南疆艾丁湖样品,最低者为布尔津河周边雪水及喀依尔特河样品。

3.2 氢氧同位素分布特征

前人研究阿勒泰地区各类水体氢氧同位素的原始结果较少(表2),本文中雪水的δ¹⁸O及δD值高于田立德等对阿勒泰大气降水以及Alzen等对俄罗斯Belukha山(阿勒泰山脉)雪坑中雪和雪芯的研究结果,可能是由于本研究中采集的雪水经历了蒸发分馏作用,与大气降水数据有一定的差别。河水的氢氧同位素组成比较接近大气降水,但δD值略低于阿勒泰地区大气降水,可能是由于除大气降水外阿勒泰部分河水还受到冰川融水的补给。山泉水、湖水与大气降水差异较大,本文中的乌伦古湖(δD:-98‰~-59‰;δ¹⁸O:-6.9‰~-5‰)与新疆博斯腾湖(δD:-33‰~-10‰;δ¹⁸O:-2‰~3‰)相比具有更低的δ¹⁸O值及δD值^[15],这是由纬度效应

表 1 阿勒泰地区水体氢氧同位素及主要阴阳离子含量

Table 1 δD, δ¹⁸O and content of major anion and cation ions in waters, Altay Region

样品编号 Sample ID	采样位置 Sampling location	δD (‰)	δ ¹⁸ O (‰)	<i>d</i> (‰)	<i>T</i> (℃)	pH	阴阳离子含量(mg/L) Concentration of anion and cation ions (mg/L)								
							DO	TDS	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻
1	喀依尔特河(支流 1-1) Kaylt River (Tributary 1-1)	-106	-14.8	12.4	3.2	8.296	9.95	100.3	0.42	2.03	10.5	1.51	38.4	1.19	4
2	库依尔特河(支流 1-2) Kuilit River (Tributary 1-2)	-100	-11.5	-8	7.2	8.144	8.32	90.2	0.71	3.9	13.5	1.66	38.1	4.76	8.01
3	胡二茨河(支流 1) Huzitz River (Tributary 1)	-102	-13.6	6.8	9	8.436	8.83	166.1	0.75	4.35	19.7	2.16	65.6	2.21	5.45
4	无名支流(支流 2) Unnamed River (Tributary 3)	-114	-12.7	-12.4	7.7	7.975	8.8	2900	9.36	395	209	57.7	316	261	855
5	额尔齐斯河 Irtysh River	-103	-13.6	5.8	12	8.736	9.45	108.6	0.73	4.25	13.3	1.89	43.4	2.55	9.04
6	额尔齐斯河 Irtysh River	-103	-12.9	0.2	15	8.421	8.97	122.1	0.7	4.32	15.9	1.88	43.9	3.06	17.5
7	喀拉—额尔齐斯河(支流 3) Kara Irtysh River (Tributary 3)	-103	-13.1	1.8	6	8.049	8.83	109.8	1.08	4.45	13.9	2.54	47.5	2.04	8.69
8	喀拉—额尔齐斯河(支流 3) Kara Irtysh River (Tributary 3)	-105	-13.2	0.6	7.1	8.659	8.92	140.8	0.64	3.45	13.1	2.87	49.2	1.36	3.55
9	额尔齐斯河 Irtysh River	-112	-15.4	11.2	13.1	7.93	8.52	113.3	0.67	3.87	15	1.83	38.1	4.25	17.2
10	额尔齐斯河 Irtysh River	-111	-15.3	11.4	13.5	8.745	8.45	135.3	0.74	4.99	17.9	2.18	41	3.4	20.3
11	额尔齐斯河 Irtysh River	-110	-14.4	5.2	12.3	8.621	8.59	169.1	0.82	6.86	19.8	2.62	47.8	5.95	20.5
12	额尔齐斯河 Irtysh River	-107	-12.9	-3.8	10	7.814	9.16	183.1	0.9	8.4	21.8	3.11	54.5	6.29	28.8
13	克兰河(支流 4) Crane River (Tributary 4)	-108	-14.6	8.8	9.9	7.792	8.41	105.2	0.66	3.42	14	1.94	49.8	2.21	8.13
14	额尔齐斯河 Irtysh River	-107	-14.3	7.4	10.3	8.094	9.27	593	2.53	48.3	56.1	11	136	20.9	158
15	布尔津河(支流 5) Burqin River (Tributary 5)	-108	-14.2	5.6	8.7	8.229	8.84	86.7	0.72	2.44	11.4	1.89	11.7	2.21	8.35
16	额尔齐斯河 Irtysh River	-107	-13.3	-0.6	12.6	8.075	8.03	522	2.26	42.7	49.1	10.2	126	36.2	111
17	额尔齐斯河 Irtysh River	-109	-14	3	10.7	7.677	10.4	208	1.2	11.9	21.4	4.24	72.7	3.4	34.3
18	哈巴河(支流 6) Haba River (Tributary 6)	-110	-14.2	3.6	12.5	7.645	9.35	124.8	0.53	3.04	17.7	3.07	68	5.95	8.05
19	额尔齐斯河 Irtysh River	-109	-12.2	-11.4	13.6	7.792	8.64	628	1.76	26.5	36.8	11.4	99.6	16.2	97.3
20	别列则克河(支流 7) Belzek River (Tributary 7)	-107	-12.7	-5.4	12.4	7.785	9.01	227	1.37	6.4	33	5.18	110	3.4	18.9
21	乌伦古湖 Ulungur Lake	-59	-5	-19	13	8.228	8.71	1979	20.4	309	48.4	40.5	263	231	472
22	乌伦古湖 Ulungur Lake	-98	-6.9	-42.8	12.5	8.434	8.32	182.1	0.92	8.84	21	3.07	52.7	5.95	25.9
23	乌伦古河 Ulungur River	-101	-13.1	3.8	10.1	8.195	8.15	655	2.92	52.3	66.9	13.2	161	36.6	123
24	乌伦古河 Ulungur River	-100	-11.7	-6.4	11.9	8.146	8.6	654	2.9	50.2	68.1	13.1	166	36	140
25	乌伦古河 Ulungur River	-102	-12.9	1.2	14	8.249	8.35	700	3.05	54.9	71.3	13.8	173	39.6	152
26	乌伦古河 Ulungur River	-102	-13.2	3.6	14.3	8.205	8.64	605	2.85	48	62	11.8	150	31.8	121
27	乌伦古河 Ulungur River	-105	-13.3	1.4	10.3	8.123	8.36	448	2.46	27.4	50.4	9.49	135	16.2	88
28	雪水 Snow water	-90	-11.8	4.4	3.2	7.516	7.86	35.3	0.24	0.46	4.42	0.24	12.9	2.89	6.47
29	矿坑裂隙水 Water from the mine pit	-106	-11.6	-13.2	7	8.345	9.96	567	3.04	58.5	43.6	5.66	121	51.5	63.2
30	山泉水 1 Spring water 1	-114	-11.8	-19.6	11.7	7.218	8.9	685	2.97	84.1	47	11	218	13.9	138
31	山泉水 2 Spring water 2	-121	-14.9	-1.8	10.3	7.929	8.84	1040	7.21	132	77.8	19.5	387	21.8	253
32	艾丁湖 Aiding Lake	-49	-5.4	-5.8	23.3	8.207	7.35	2049	4.18	288	104	32.4	165	133	608

及湖泊蒸发量差异造成的。博斯腾湖所处的纬度较低,年均气温较高,湖水蒸发量更大,富集重同位素的特征较明显。

由于阿勒泰地区缺乏具有代表性的大气降水的氢氧同位素组成数据,故以 Craig 在 1961 年提出的

全球大气降水线方程(GNML)^[29] $\delta D = 8\delta^{18}O + 10$ 以及乌鲁木齐大气降水线方程^[12](LNML) $\delta D = 7.21\delta^{18}O + 4.5$ 作为对比。阿勒泰地区 32 件水样品氢氧同位素线性拟合方程为: $y = 4.7102x - 43.21$, $R^2 = 0.7048$,大部分水样品位于全球及乌鲁木齐大气降

表 2 前人研究中阿勒泰水体氢氧同位素组成与本研究对比

Table 2 Hydrogen and oxygen isotopes of water in Altay Region in previous studies and this study

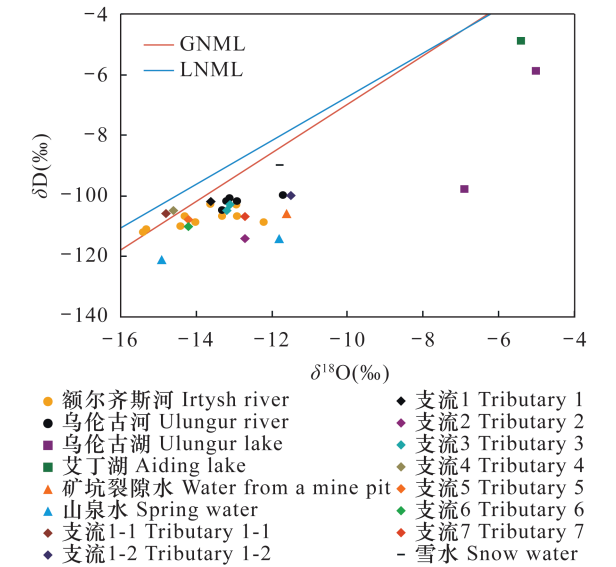
样品类型 Sample type	采样位置 Sampling location	采样时间 Sampling date	样品数量 Sample quantity	δD (‰)	δ ¹⁸ O (‰)	数据来源 Data source
大气降水 Atmospheric precipitation	阿勒泰 Altay	1998 年—2001 年 Year 1998 to 2001	226	−100.4	−13.8	[26],[27]
雪坑中的雪 Snow in a snow pit	俄罗斯 Belukha 山(阿尔泰山脉) Belukha Mountains, Russia (Altai Mountains)	2000 年—2001 年, 每年 1 月—4 月,10 月—12 月 January to April, October to December in each year, Year 2000 to 2001	/	−98.7	−17.7	[28]
雪芯、冰芯 Snow core, ice core	俄罗斯 Belukha 山 (阿尔泰山脉) Belukha Mountains, Russia (Altai Mountains)	1984 年—2000 年,每年 1 月— 4 月,10 月—次年 2 月 January to April, October to December in each year, Year 1984 to 2000	/	−100.9	−13.8	[28]
河水 River water	阿勒泰 Altay	2016 年 10 月 October 2016	25	−106.04	−13.484	本文 This study
湖水 Lake water	阿勒泰 Altay	2016 年 10 月 October 2016	3	−68.67	−5.77	本文 This study
山泉水 Spring water	阿勒泰 Altay	2016 年 10 月 October 2016	2	−117.5	−13.35	本文 This study
雪水 Snow water	阿勒泰 Altay	2016 年 10 月 October 2016	1	−90	−11.8	本文 This study

水线的右下侧(图 2),说明该区各种类型水体与全球及乌鲁木齐降水平均水平相比,在形成过程中发生了相当程度的蒸发作用;此外说明阿勒泰水体的补给源除大气降水之外,有一定比例的冰川融水补

给。且由于存在纬度效应的存在,阿勒泰地区的大气降水亦拥有更低的 δD 及 δ¹⁸O 值,故当地所采集的雪水投点位置位于 GNML 及 LNML 下方。地表河流水样品的氢氧同位素组成相近,投点区域较为集中,与其相比,山泉水的 δD 值明显低于其他类型水,因为山泉水补给源主要为地下水,其氢氧同位素组成与地表水体有较大差别。乌伦古湖及艾丁湖的三件湖水与其他类型水差异较大,δ¹⁸O 及 δD 值均远高于其他水体,说明湖水相对于河流来说是更为稳定的开放性水体,流动性较差,从而受到更强烈的蒸发作用,使得重同位素趋于富集。

位于图 1 左下角的额尔齐斯河水样品富轻同位素,反映其来源除大气降水之外也有冰雪及冰川融水的混入。锂矿坑裂隙水和山泉水与 GNML 及 LNML 距离均较远,说明其并非由大气降水完全补给,或者由大气降水补给后发生的一系列水循环过程使其偏离大气降水线,其与地表河流水样品氢氧同位素组成较为相似,说明锂矿坑裂隙水流经锂矿脉并未对其氢氧同位素组成造成明显影响,与地表河流经历了相似的水循环过程。

额尔齐斯河及乌伦古河水样品 δD - δ¹⁸O 关系图(图 3)显示,额尔齐斯河 10 件水样品 δD - δ¹⁸O 线性拟合方程为:δD = 1.7297δ¹⁸O - 83.879, R² 为 0.3550。乌伦古河样品的 δD - δ¹⁸O 关系可表示为:



注:额尔齐斯河各支流代号已于表 1 中标注。
Note:The tributaries' serial numbers of the Itysh River have been shown in Table 1.

图 2 阿勒泰地区水体 δD - δ¹⁸O 关系

Fig. 2 δD - δ¹⁸O diagram of Altay waters

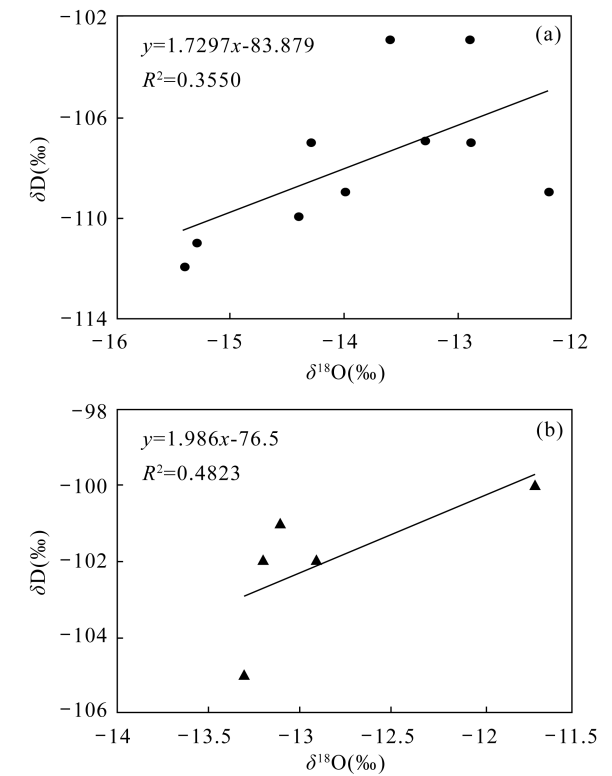


图3 (a)额尔齐斯河及(b)乌伦古河的δD-δ¹⁸O关系
Fig. 3 δD - δ¹⁸O diagrams of (a) Irtysh River and (b) Ulung River

$\delta D = 1.986\delta^{18}O - 76.5$, R^2 为0.4823。两河流样品氢氧同位素组成分布范围较大,拟合相关系数偏小,这是由于采样范围内额尔齐斯河及乌伦古河河流流程均较长,途中不断有支流补给混入,沿河氢氧同位素组成差异很大。

3.3 氘过量参数

每个地区的大气降水氢氧同位素线性方程与全球大气降水线均会有一定的差异,Dansgaard首次将降水氢氧同位素关系的差异值定义为过量氘(d),即大气降水线斜率为8时的截距值,用来衡量降水蒸发时同位素分馏的不平衡程度^[30],作为大气降水 δD 、 $\delta^{18}O$ 的补充数据,其季节变化特征亦为识别水汽来源、研究水循环及当地气候条件的有力依据^[26]。在2001年之前,中国学者对氘过量参数的应用多为描述大气降水样品同位素分馏不平衡程度。尹观等^[31-33]经大量实践研究发现,特定地区的大气降水的 d 值固定,且在地表循环过程中不发生改变,而当其补给到地下后,地下水的 d 值在水岩作用过程中会发生明显改变,已确定 d 值与地下水在岩层中滞留时间、流速、岩层易溶程度明显相关,若将此概念应用于地表水中,则 d 值大小可以代表地

下水混入的程度, d 值越小,则地下水补给越多。

阿勒泰地区水体氘过量参数见表1, d 值变化范围在-42.8‰~12.4‰之间。其中乌伦古湖水体氘过量参数最低(-42.8‰~-19‰),若按照 d 值的新的水文地质内涵,则说明与艾丁湖(-5.8‰)、山泉水(-19.6‰~-1.8‰)及地表河流(-12.4‰~12.4‰)相比,乌伦古湖受到更多的地下水补给。地下水的氘过量参数(均值为-10.7‰)远小于地表河流(均值为1.832‰),地表河流中乌伦古河的氘过量参数(均值为-0.05‰)小于额尔齐斯河及其支流(均值为2.11‰)水系。两件山泉水的 d 值差异较大,山泉水1的 d 值为-19.6‰,山泉水2的 d 值为-1.8‰。

3.4 氢氧同位素与水体属性的关系

前人曾对中国东部季风区^[7]及丹江流域^[34]大气降水氢氧同位素与地理及化学参数的相关关系作了研究,结果表明 δD 值与纬度、高程呈极显著负相关关系,与源头距离、水温呈极显著正相关关系。此外有学者对阿勒泰大气降水季节性变化研究发现,阿勒泰地区大气降水 $\delta^{18}O$ 值与逐月气温变化趋势一致,正相关关系明显^[26]。本研究分析阿勒泰地区水体氢氧同位素与地理及化学属性(包括经纬度、TDS值、DO、pH、水温、主要离子的摩尔浓度)的关系结果见表3。

阿勒泰地区水体32件水样品的 δD 、 $\delta^{18}O$ 值与采样点纬度的相关系数分别为-0.63及-0.5,呈极显著负相关,此关系是该地区水体稳定同位素的纬度效应导致的;与 T 呈显著正相关,此为温度效应的体现;与DO呈显著负相关,考虑到氢氧同位素组与高度成反比,DO亦与海拔高度成反比,此处 δD 、 $\delta^{18}O$ 与DO的显著负相关关系可能由于水体补给源氢氧同位素组成差异较大,若补给源相同,则氢氧同位素组成应该与DO呈现正相关关系。值得注意的是, δD 和 $\delta^{18}O$ 分别与TDS呈显著和极显著正相关关系,又由于TDS及各主要离子之间的极显著正相关关系的存在, δD 和 $\delta^{18}O$ 与 Na^+ 、 K^+ 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 及 SO_4^{2-} 也呈显著或极显著正相关关系,氢氧同位素组成与水中总悬浮物及主要离子的正相关现象未在前人研究中出现,具体原因有待进一步研究。

4 结论

本文在阿勒泰地区采用LGR DT100液体水激光同位素分析法开展了以地表水为主的区域水体氢氧同位素组成研究,基于此,探讨了阿勒泰地区水体

表 3 氢氧同位素及其他参数相关分析结果

Table 3 Correlation relationships among δD , $\delta^{18}O$ and other physicochemical parameters

参数 Parameters	δD	$\delta^{18}O$	经度 Longitude	纬度 Latitude	T	pH	TDS	DO	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻
$\delta^{18}O$	0.840 * *													
经度 Longitude	0.019	-0.001												
纬度 Latitude	-0.634 * *	-0.503 * *	-0.460 * *											
T	0.415 *	0.382 *	-0.153	-0.632 * *										
pH	0.142	0.029	0.331	-0.240	0.107									
TDS	0.431 *	0.508 * *	0.178	-0.532 * *	0.309	0.201								
DO	-0.425 *	-0.366 *	-0.023	0.418 *	-0.374 *	-0.028	-0.234							
Na ⁺	0.488 * *	0.548 * *	0.214	-0.524 * *	0.281	-0.068	0.986 * *	-0.219						
K ⁺	0.470 * *	0.542 * *	0.047	-0.224	0.157	-0.028	0.777 * *	-0.079	0.812 * *					
Ca ²⁺	0.114	0.226	0.207	-0.460 * *	0.226	-0.097	0.896 * *	-0.210	0.833 * *	0.516 * *				
Mg ²⁺	0.387 *	0.469 * *	0.135	-0.453 *	0.264	-0.086	0.990 * *	-0.221	0.976 * *	0.808 * *	0.894 * *			
Cl ⁻	0.494 * *	0.550 * *	0.139	-0.396 *	0.196	0.003	0.943 * *	-0.173	0.959 * *	0.845 * *	0.777 * *	0.953 * *		
HCO ₃ ⁻	0.081	0.245	0.170	-0.324	0.205	-0.218	0.791 * *	-0.099	0.753 * *	0.731 * *	0.784 * *	0.799 * *	0.648 * *	
SO ₄ ²⁻	0.426 *	0.479 * *	0.199	-0.552 * *	0.307	-0.076	0.990 * *	-0.260	0.982 * *	0.717 * *	0.903 * *	0.979 * *	0.929 * *	0.743 * *

注：“* *”表示通过了 $P=0.01$ 显著性检验；“*”表示通过了 $P=0.05$ 显著性检验。
Note: “* *” indicates passing the significance test of $P=0.01$; “*” indicates passing the significance test of $P=0.05$.

氢氧同位素组成特征、空间分布规律及水体来源等。新疆阿勒泰地区水体的 $\delta^{18}O$ 及 δD 值变化范围分别为 $-15.4‰ \sim -5‰$ 以及 $-121‰ \sim -49‰$ 。不同类型水体 $\delta^{18}O$ 及 δD 值差别很大,湖水由于强蒸发其 $\delta^{18}O$ 、 δD 值明显大于地表河水,地下水 $\delta^{18}O$ 值与地表河流相近,但 δD 值略高于地表河流,表明其来源于地表河流补给但受到了水岩反应的影响。阿勒泰地表河流主要受到大气降水及冰川融水的补给,地表河流氢氧同位素组成差异主要是由不同补给源以及蒸发程度强弱导致,结合地表河流氢氧同位素组成数据,得出额尔齐斯河和乌伦古河氢氧同位素拟合方程。阿勒泰地区各类水体 $\delta^{18}O$ 及 δD 与水体属性有明显的相关关系, $\delta^{18}O$ 和 δD 与水温、总溶解性固体含量成正比,与纬度及水体溶解氧含量成反比。

本研究得到的氢氧同位素组成特征,为阿勒泰地区各类型水体稳定同位素研究提供了基础数据,以氢氧同位素组成为依据对地表水体水汽补给来源作了判定。阿勒泰近几十年降水明显增多,在此背景下,对阿勒泰大气降水及其他各类型水体氢氧同位素组成继续开展长期深入的系统研究确有必要。

5 参考文献

[1] 丁悌平. 氢氧同位素地球化学[M]. 北京:地质出版社,1980:116.
Ding T P. Hydrogen and oxygen isotope geochemistry [M]. Beijing:Geological Publishing House,1980:116.

[2] Yi P, Wan C, Jin H, et al. Hydrological insights from

hydrogen and oxygen isotopes in source area of the Yellow River, east - northern part of Qinghai—Tibet Plateau [J]. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry,2018,317(1):131 - 144.

[3] Jeelani G, Deshpande R D, Galkowski M, et al. Isotopic composition of daily precipitation along the southern foothills of the Himalayas: Impact of marine and continental sources of atmospheric moisture [J]. Atmospheric Chemistry & Physics, 2018, 18 (12): 8789 - 8805.

[4] 刘广山,黄奕普,金德秋,等. 南极雪的氢氧同位素组成[J]. 厦门大学学报(自然科学版),2001,40(3): 664 - 668.
Liu G S, Huang Y P, Jin D Q, et al. Deuterium and ^{18}O contents and distributions in Antarctic snow[J]. Journal of Xiamen University (Natural Science), 2002, 40(3): 664 - 668.

[5] Dansgaard W. The abundance of O^{18} in atmospheric water and water vapor[J]. Tellus,1953,5(4):461 - 469.

[6] 章申,于维新,张青莲,等. 我国西藏南部珠穆朗玛峰地区冰雪水中氘和重氧的分布[J]. 中国科学:数学,1973(4):430 - 433.
Zhang S, Yu W X, Zhang Q L, et al. Distribution of deuterium and heavy oxygen in ice and snow waters in the Everest Region of southern Tibet in China [J]. Science China:Mathematics,1973(4):430 - 433.

[7] 柳鉴容,宋献方,袁国富,等. 中国东部季风区大气降水 $\delta^{18}O$ 的特征及水汽来源[J]. 科学通报,2009,54(22):3521 - 3531.

- Liu J R, Song X F, Yuan G F, et al. Characteristics of $\delta^{18}\text{O}$ in precipitation over eastern monsoon China and the water vapor sources[J]. Chinese Science Bulletin, 2009, 54(22): 3521–3531.
- [8] 高建飞, 丁梯平, 罗续荣, 等. 黄河水氢、氧同位素组成的空间变化特征及其环境意义[J]. 地质学报, 2011, 85(4): 596–602.
- Gao J F, Ding T P, Luo X R, et al. δD and $\delta^{18}\text{O}$ variations of water in the Yellow River and its environmental significance[J]. Acta Geologica Sinica, 2011, 85(4): 596–602.
- [9] 丁梯平, 高建飞, 石国钰, 等. 长江水氢、氧同位素组成的时空变化及其环境意义[J]. 地质学报, 2013, 87(5): 661–676.
- Ding T P, Gao J F, Shi G Y, et al. Spatial and temporal variations of H and O isotope compositions of the Yangtze River water and their environmental implications[J]. Acta Geologica Sinica, 2013, 87(5): 661–676.
- [10] 孙芳强, 尹立河, 马洪云, 等. 新疆三工河流域土壤水 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 特征及其补给来源[J]. 干旱区地理, 2016, 39(6): 1298–1304.
- Sun F Q, Yin L H, Ma H Y, et al. Features of δD and $\delta^{18}\text{O}$ and origin of soil water in Sangong River Basin, Xinjiang[J]. Arid Land Geography, 2016, 39(6): 1298–1304.
- [11] 吴秀杰. 氢氧同位素指示沙漠地下水来源研究——以巴丹吉林沙漠为例[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2018.
- Wu X J. An investigation on groundwater origination in deserts indicated by hydrogen and oxygen isotopes, taking the Badain Jaran Desert as an example[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2018.
- [12] 李晖, 周宏飞. 乌鲁木齐地区大气降水中 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 的变化特征[J]. 干旱区资源与环境, 2007, 21(9): 46–50.
- Li H, Zhou H F. Variation characteristics of δD and $\delta^{18}\text{O}$ stable isotopes in the precipitation of Urumqi[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2007, 21(9): 46–50.
- [13] 李晖, 蒋忠诚, 王月, 等. 新疆地区大气降水中稳定同位素的变化特征[J]. 水土保持研究, 2009, 16(5): 157–161.
- Li H, Jiang Z C, Wang Y, et al. Variation characteristics of stable isotopes in the precipitation of Xinjiang[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2009, 16(5): 157–161.
- [14] 王文祥, 王瑞久, 李文鹏, 等. 塔里木盆地河水氢氧同位素与水化学特征分析[J]. 水文地质工程地质, 2013, 40(4): 29–35.
- Wang W X, Wang R J, Li W P, et al. Analysis of stable isotopes and hydrochemistry of rivers in Tarim Basin[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2013, 40(4): 29–35.
- [15] 努尔阿米乃姆·阿木克, 麦麦提吐尔逊·艾则孜, 海米提·依米提. 博斯腾湖流域氢氧同位素特征研究[J]. 安徽农业科学, 2016, 44(8): 11–13, 77.
- Hamuk N, Eziz M, Yimit H. Study on characteristics of hydrogen and oxygen isotope in Bosten Lake Basin[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2016, 44(8): 11–13, 77.
- [16] 姚俊强, 刘志辉, 郭小云, 等. 呼图壁河流域水体氢氧稳定同位素特征及转化关系[J]. 中国沙漠, 2016, 36(5): 1443–1450.
- Yao J Q, Liu Z H, Guo X Y, et al. Characteristics of water stable isotopes (^{18}O and ^2H) in the Hutubi River Basin, northwestern China[J]. Journal of Desert Research, 2016, 36(5): 1443–1450.
- [17] 郭小云. 呼图壁河流域不同水体的水化学和稳定同位素特征分析[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2016.
- Guo X Y. Water chemistry and stable isotope characteristics analysis of different water bodies in the Hutubi River Basin[D]. Urumqi: Xinjiang University, 2016.
- [18] 曾海鳌, 吴敬禄, 刘文, 等. 哈萨克斯坦东部水体氢、氧同位素和水化学特征[J]. 干旱区地理, 2013, 36(4): 662–668.
- Zeng H A, Wu J L, Liu W, et al. Characteristics on hydrochemistry and hydrogen, oxygen isotopes of waters in Kazakhstan[J]. Arid Land Geography, 2013, 36(4): 662–668.
- [19] Natalia M, Tatiana P, Nina K, et al. Influence of atmospheric circulation on precipitation in Altai mountains[J]. Journal of Mountain Science, 2017, 14(1): 46–59.
- [20] 李帅, 李祥余, 何清, 等. 阿勒泰地区近40年的气候变化研究[J]. 干旱区研究, 2006, 23(4): 637–643.
- Li S, Li X Y, He Q, et al. Study on climate change in Altay Prefecture since recent 40 years[J]. Arid Zone Research, 2006, 23(4): 637–643.
- [21] 贺斌. 新疆阿勒泰区域水资源总量评价及其预测分析[J]. 能源与节能, 2017(10): 103–104.
- He B. Total evaluation and predictive analysis of water resources in Altay Region of Xinjiang[J]. Energy and Energy Conservation, 2017(10): 103–104.
- [22] 雷雨, 龙爱华, 邓铭江, 等. 1926—2009年额尔齐斯河流域中游地区气候变化及其对水资源的影响分析

[J]. 冰川冻土,2012,34(4):912-919.

Lei Y, Long A H, Deng M J, et al. Analyses of the climate change and its impact on water resources in the middle reaches of Irtysh River during 1926—2009 [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2012, 34(4):912-919.

[23] 王振升, 蒋惠敏. 乌伦古河流域水资源及其特征[J]. 干旱区地理, 2000, 23(2):123-128.

Wang Z S, Jiang H M. Water resources and its features in Ulungur River watershed, Xinjiang [J]. Arid Land Geography, 2000, 23(2):123-128.

[24] 王苏民, 窦鸿身. 中国湖泊志[M]. 北京: 科学出版社, 1998.

Wang S M, Dou H S. Chinese lakes[M]. Beijing: Science Press, 1998.

[25] 吴敬禄, 曾海鳌, 马龙, 等. 新疆主要湖泊水资源及近期变化分析[J]. 第四纪研究, 2012, 32(1):142-150.

Wu J L, Zeng H A, Ma L, et al. Recent changes of selected lake water resources in arid Xinjiang, northwestern China [J]. Quaternary Sciences, 2012, 32(1):142-150.

[26] Tian L D, Yao T, Macclune T, et al. Stable isotopic variations in West China: A consideration of moisture sources[J]. Journal of Geophysical Research, 2007, 112(D10):1-12.

[27] Kong Y L, Wang K, Li J, et al. Stable isotopes of precipitation in China: A consideration of moisture sources[J]. Water, 2019, 11(6):1239.

[28] Aizen V B, Aizen E, Fujita K, et al. Stable - isotope time series and precipitation origin from firn - core and snow samples, Altai glaciers, Siberia [J]. Journal of Glaciology, 2005, 51(175):637-654.

[29] Craig H. Isotopic variations in meteoric waters[J]. Science, 1961, 133(3465):1702-1703.

[30] Dansgaard W. Stable isotopes in precipitation[J]. Tellus, 1964, 16(4):436-468.

[31] 尹观, 倪师军. 地下水氘过量参数的演化[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2001, 20(4):409-411.

Yin G, Ni S J. Deuterium excess parameter evolution in ground water [J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2001, 20(4):409-411.

[32] 尹观, 倪师军, 张其春. 氘过量参数及其水文地质学意义——以四川九寨沟和冶勒水文地质研究为例[J]. 成都理工学院学报, 2001, 28(3):251-254.

Yin G, Ni S J, Zhang Q C. Deuterium excess parameter and geohydrology significance—Taking the geohydrology researches in Jiuzhaigou and Yele, Sichuan for example [J]. Journal of Chengdu University of Technology, 2001, 28(3):251-254.

[33] 尹观, 倪师军, 范晓, 等. 冰雪消融的同位素效应及氘过量参数演化——以四川稻城水体同位素为例[J]. 地球学报, 2004, 25(2):157-160.

Yin G, Ni S J, Fan X, et al. Isotopic effect and the deuterium excess parameter evolution in ice and snow melting process: A case study of isotopes in the water body of Daocheng, Sichuan Province [J]. Acta Geoscientica Sinica, 2004, 25(2):157-160.

[34] 成玉婷, 李鹏, 徐国策, 等. 丹江流域氢氧同位素变化特征[J]. 水土保持学报, 2014, 28(5):129-133.

Cheng Y T, Li P, Xu G C, et al. Characteristics of hydrogen and oxygen isotopes in Danjiang Watershed [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2014, 28(5):129-133.

Composition and Spatial Distribution Characteristics of Hydrogen and Oxygen Isotopes of Surface Water in Altay, Xinjiang Province

GAO Juan - qin^{1,2}, YU Yang^{2*}, WANG Deng - hong², WANG Wei³, DAI Hong - zhang², YU Feng^{1,2}, QIN Yan²

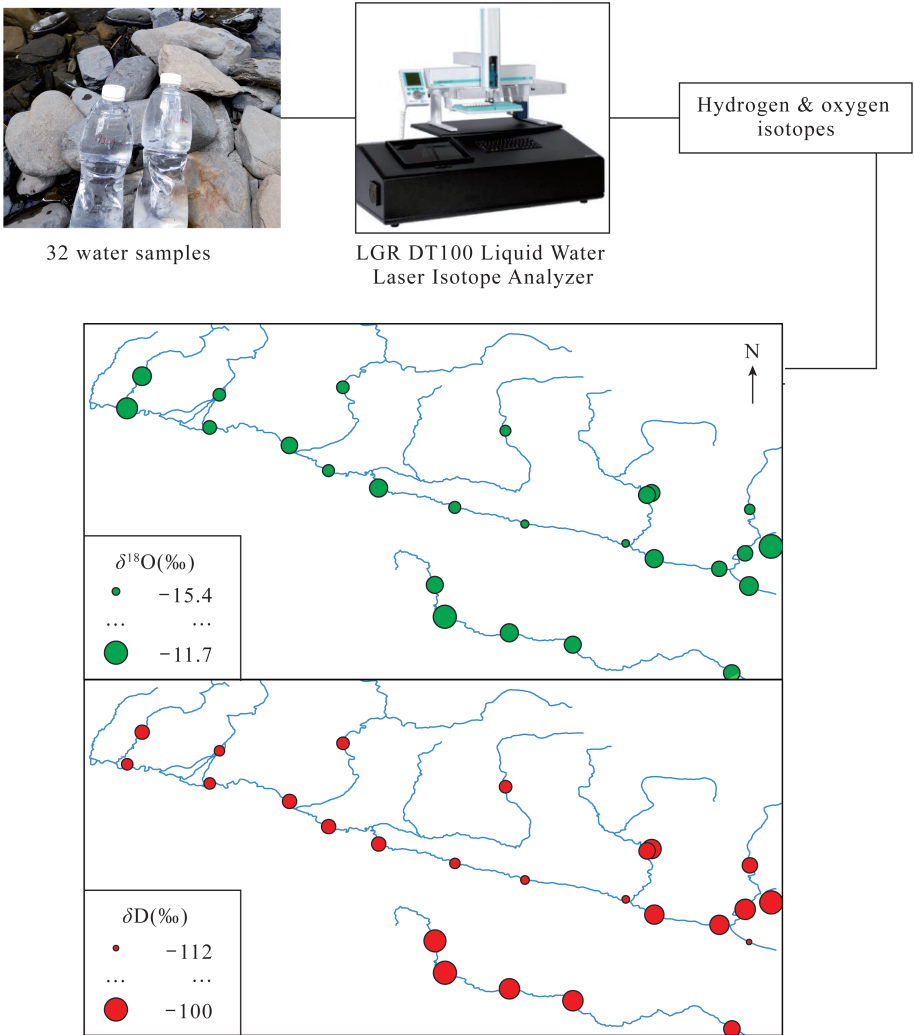
(1. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China;

2. Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Ministry of Natural Resources; Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China;

3. Geology and Mineral Resources Scientific Institute, Sichuan Exploration Bureau of Geology and Mineral Resources, Chengdu 610036, China)

HIGHLIGHTS

- (1) The differences in hydrogen and oxygen isotope composition and deuterium excess parameters of major surface rivers and lakes inthe Altay region were investigated.
- (2) δD and $\delta^{18}O$ of waters showed positive correlation with temperature (T) , total dissolved solids (TDS) and the molar concentrations of Na^{+} , K^{+} , Ca^{2+} , Cl^{-} and SO_4^{2-} .
- (3) The hydrogen and oxygen isotopic composition of river water was quite different from the global and Urumqi's atmospheric precipitation line, indicating that, apart from atmospheric precipitation, there was a certain proportion of glacier meltwater supply. Moreover, hydrogen and oxygen isotopes experienced evaporative fractionation during the water cycle, to some extent.



A spatial distribution map of δD and $\delta^{18}O$ in major rivers in Altay Region

ABSTRACT

BACKGROUND: Hydrogen and oxygen isotopes can be used to identify water sources and trace water cycles and have been used in hydrogeochemistry since the 1950s. Studies have been carried out on stable isotopes of atmospheric precipitation, rivers and lakes in Xinjiang. However, the research on hydrogen and oxygen isotopes of waters in Altay is scarce, except for atmospheric precipitation. Researchers found that the rainfall in the Altai Mountains during the warm season (April—October) increased significantly from 1959 to 2014. Due to this background of climate condition changes, it is meaningful to study the hydrogen and oxygen isotope compositions of various types of water bodies in the Altay region, at the southern foot of the Altai Mountains.

OBJECTIVES: To obtain the basic data of hydrogen and oxygen isotopic composition of water in Altay and reveal their spatial distribution characteristics.

METHODS: Hydrogen and oxygen isotope compositions of river water, lake water, spring water, snow water, and water from a mine pit in the Altay region of Xinjiang were determined by liquid water laser isotope analyzer (LGR DT100, America). The dissolved oxygen (DO), TDS, T , and pH of the water samples were measured using the German WTW3430 multi-parameter water quality analyzer. The concentrations of Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , and Mg^{2+} were analyzed by inductively coupled plasma-optical emission spectrometry (PE8300, PerkinElmer, USA). The concentrations of HCO_3^- and CO_3^{2-} were determined by alkali titration method. Cl^- and SO_4^{2-} concentrations were analyzed by ion chromatography method.

RESULTS: The results showed that the ranges of $\delta^{18}\text{O}$ and δD of the waters in the Altay area were from -15.4‰ to -5‰ and from -121‰ to -49‰ , respectively. The hydrogen and oxygen isotope content of various types of water in the Altay region were significantly different. The $\delta^{18}\text{O}$ and δD values of river waters varied from -15.4‰ to -11.5‰ and from -114‰ to -100‰ , respectively, and the deuterium excess parameter varied from -12.4‰ to 12.4‰ . The $\delta^{18}\text{O}$ and δD of Ulungur Lake were much higher than those of surface rivers, with an average value of -5.95‰ and -78.5‰ , respectively. The deuterium excess parameter of Ulungur Lake was much lower than those of surface rivers, with an average value of -30.9‰ . The $\delta^{18}\text{O}$ value (-14.9‰ and -11.8‰) of groundwater was similar to that of surface rivers, but δD (-114‰ and -121‰) was slightly higher than that of surface rivers, indicating that groundwater was supplied by surface rivers but may be affected by water-rock reactions. The $\delta^{18}\text{O}$ and δD values of snow water and the water from a mine pit were -11.8‰ and -90‰ , -11.6‰ and -106‰ , respectively. The fitting lines for hydrogen and oxygen isotopes of the Irtysh River and Ulungur River were $\delta\text{D} = 1.7297\delta^{18}\text{O} - 83.879$ and $\delta\text{D} = 1.986\delta^{18}\text{O} - 76.5$, respectively. Surface rivers were remarkably different from the global and Urumqi atmospheric precipitation lines, indicating that apart from atmospheric precipitation, surface rivers were also recharged by glacier meltwater, and underwent evaporation and isotope fractionation during the water cycle. Due to the temperature and latitude effect of hydrogen and oxygen isotopes, the δD and $\delta^{18}\text{O}$ showed significant positive correlation relationships with T , TDS, and the molar concentration of major ions such as Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Cl^- , and SO_4^{2-} , also showing a significant negative correlation with the latitude of the sampling sites and DO ($P < 0.05$, $n = 32$).

CONCLUSIONS: The hydrogen and oxygen isotope composition characteristics obtained in this study provide basic data for the stable isotope research of various types of water bodies in the Altay area. The precipitation in Altay has increased significantly in recent decades. Due to this background, it is indeed necessary to continue to conduct long-term and in-depth systematic research on the composition of hydrogen and oxygen isotopes in Altay's atmospheric precipitation and other types of water bodies.

KEY WORDS: geochemistry; surface water; hydrogen and oxygen isotopes; deuterium excess; spatial distribution characteristics