

中国西部湖泊水体 δD 与 $\delta^{18}\text{O}$ 的空间变化特征及其影响因素*

冯盛楠, 刘兴起**, 李华淑

(首都师范大学资源环境与旅游学院, 北京 100048)

摘要: 湖泊水体的氢氧同位素(δD 、 $\delta^{18}\text{O}$)是研究区域大气降水和水文循环的重要手段之一, 目前对其的研究主要以单一湖泊为主. 以2016年夏季在中国西部地区采集的33个湖泊水体为研究对象, 分析其氢氧同位素的变化特征, 并结合当地夏季大气降水、湖水盐度、海拔与纬度等资料, 探讨中国西部33个湖泊水体 δD 、 $\delta^{18}\text{O}$ 的空间分布特征及其影响因素. 结果表明:33个湖泊水体的 δD 与 $\delta^{18}\text{O}$ 组成主要受控于大气降水, 但受蒸发分馏的影响, 湖水线的斜率与截距低于大气水线. 湖泊水体与夏季大气降水氢氧同位素存在明显的空间分异, 这种分异与湖水盐度无关, 主要受到区域降水水汽来源不同的影响. 青藏高原南北两侧由于水汽来源及蒸发条件的不同, 使得青藏高原湖泊水体的氢氧同位素呈现出“北高南低”的特点, 新疆西北部受西风影响, 湖泊水体的氢氧同位素明显偏负, 内蒙古及邻近地区受东南季风的影响, 湖水受到蒸发分馏作用使其 δD 与 $\delta^{18}\text{O}$ 偏正. 不同区域湖泊水体的氘盈余(d_{excess})反映了不同的水汽源地的湿度状况而不能指示湖水的蒸发状况. 受降水影响, 青藏高原地区湖水氢氧同位素组成与海拔高度呈负相关, 与纬度呈正相关.

关键词: 中国西部; 湖泊水体; 氢氧同位素; 空间特征; 氘盈余; 影响因素

Spatial variations of δD and $\delta^{18}\text{O}$ in lake water of western China and their controlling factors*

FENG Shengnan, LIU Xingqi** & LI Huashu

(College of Resource Environment and Tourism, Capital Normal University, Beijing 100048, P.R.China)

Abstract: The compositions of hydrogen and oxygen stable isotopes (δD and $\delta^{18}\text{O}$) in lake water are important proxies to study regional precipitation and hydrological cycle. At present, the research on hydrogen and oxygen stable isotopes of lake water mainly focused on a single lake. In this study, combined with hydrogen and oxygen stable isotopes in local summer precipitation, the lake salinity, the elevation and latitude of the lakes, 33 lake water samples collected in western China in the summer of 2016 were used to investigate the spatial variations of δD and $\delta^{18}\text{O}$ in water of 33 lakes and their controlling factors. The results showed that the compositions of δD and $\delta^{18}\text{O}$ in lake water dominated by precipitation. Due to the influence of evaporation on isotopic fractionation, the stable isotope slope and intercept of Lake Water Line in western China are below these of the Global Meteoric Water Line. Spatial distribution of the hydrogen and oxygen isotopes in 33 lake waters varies in different regions, which is mainly controlled by the hydrogen and oxygen isotope components of meteoric waters in different regions rather than lake salinity. The hydrogen and oxygen isotopes of lake waters in the Tibetan Plateau are characterized by “high north and low south”, which is caused by different water vapor sources and evaporation between the north and south of the Tibetan Plateau. In northwestern Xinjiang affected by westerlies, the hydrogen and oxygen stable isotopes are negative, while the lake water isotopes in Inner Mongolia and adjacent areas controlled by East Asia monsoon are positive subjected to evaporation fractionation. The d_{excess} of lake waters in different regions may reflect diverse water vapor source rather than the evaporation effects of lake water. Influenced by the precipitation, the compositions of hydrogen and oxygen isotopes in the lakes of the Tibetan Plateau are negatively correlated with altitude and positively correlated with latitude.

Keywords: Western China; lake water; hydrogen and oxygen stable isotope; spatial characteristic; d_{excess} ; controlling factors

* 2019-09-20 收稿; 2019-11-22 收修改稿.

国家自然科学基金项目(41572338)资助.

** 通信作者; E-mail: xqliu@cnu.edu.cn.

对于天然水体氢氧同位素的研究可追溯到 20 世纪 60 年代, Craig 首次对世界范围内淡水氢氧同位素进行研究, 发现全球大气降水中氢氧同位素存在明显的线性关系, 拟合关系式为 $\delta D = 8 \delta^{18}O + 10$ ^[1], 后被定义为全球大气水线 (Global Meteoric Water Line, GMWL)^[2], 这对研究不同地区水循环过程中氢氧同位素变化具有重要的参考价值. 同年, 国际原子能机构 (IAEA) 与世界气象组织 (WMO) 在全球范围内对降水氢氧同位素进行有组织的监测, 搜集不同地区的月降水中氢氧同位素组成数据^[2]. 随着研究的深入, 对于天然水体氢氧同位素的研究由降水中同位素变化特征^[3-6] 向河流^[7-9]、冰川^[10-11]、湖泊^[12-14] 等其他地表水体扩展. 而探讨地球表面其他水体 (如湖泊、河流、冰川等) 中氢氧同位素比率及其与降水同位素之间的关系有利于进一步理解不同水体之间的相互联系, 为现代水文过程研究提供有力的证据. 就湖泊而言, 基于水体氢氧同位素组成研究, 可以探讨湖泊与其他水体的补给关系及区域控制因素^[15-17]; 利用湖水氢氧同位素记录的区域气候特征可以建立湖水同位素与现代气候关系, 进而为重建过去气候或构造变化提供数据支撑^[14, 18]; 利用不同水文特征的湖泊水体氢氧同位素与当地其他水体同位素长期监测的数据可建立质量平衡模型, 用于估算及解释湖水水量收支变化^[19-23]. 然而, 关于湖泊水体氢氧同位素的众多研究主要以单一湖泊或流域为主^[12-13, 24], 这些研究只能反映局地水循环以及温度、湿度、海拔等特定地理因素对湖水氢氧同位素的影响, 无法探究大范围空间尺度的水汽来源及其影响因素.

中国西部地区涉及西风区、东南季风边缘区、西南季风区以及干旱区, 面积大, 天然湖泊众多, 且以封闭湖泊为主^[25], 受人类活动影响小, 是研究湖泊自然演化的理想场所. 本文选取中国西部不同区域的 33 个湖泊, 并结合当地夏季降水氢氧同位素资料, 分析湖水氢氧同位素与大气降水的氢氧同位素、湖水盐度、湖面海拔高度、湖泊所处的纬度之间的关系, 旨在揭示不同区域湖水氢氧同位素的空间分布特征与分异规律, 探讨不同水汽来源、水汽输送过程、局地水循环状况对不同区域湖泊水体氢氧同位素的影响, 为今后中国西部水循环及气候环境演化的研究提供科学依据.

1 采样与方法

2016 年 7—8 月, 对中国内蒙古、山西、甘肃、青海、新疆、西藏等地区 33 个代表性湖泊的湖水进行了采集 (图 1, 表 1). 为避免入湖径流对湖水的影响, 对于面积较小的湖泊, 采样点一般设在湖的中心, 而对于面积较大的湖泊, 采样点至少离岸边 2 km 以上. 为确保湖泊水体充分混合以避免受到表面水体蒸发等同位素分馏效应的影响, 水样采自湖水水下 50 cm 处, 采集的水样取 500 mL 密封于塑料瓶内, 并在 0~4°C 温度下冷藏保存.

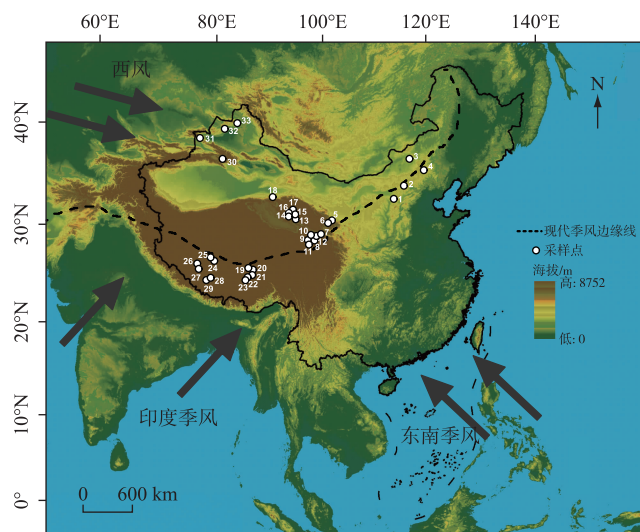


图 1 中国西部地区 33 个湖泊的取样位置

Fig.1 Sampling locations of 33 lakes in western China

表 1 中国西部 33 个湖泊的基本信息及夏季湖水与降水氢氧同位素组成

编号	湖泊名称	取样位置	湖面		面积/ km ²	采样点 湖水深/ m	湖水 盐度/ (g/L)	湖水 $\delta^{18}O$	湖水 δD	降水 $\delta^{18}O$	降水 δD	湖水氘盈余	降水氘盈余
			海拔/ m	海拔/ m				$(V-SMOW)/\%$	$(V-SMOW)/\%$	$(V-SMOW)/\%$	$(V-SMOW)/\%$	$(V-SMOW)/\%$	$(V-SMOW)/\%$
1	琵琶湖	38°55'15.58"N, 110°55'43.36"E	1770	0.4	3.0	0.46	2.92	-8.01	-8.55	-60.0	8.4	-31.37	
2	岱海	40°35'18.6"N, 112°41'23.10"E	1218	86.8	7.9	10.05	3.78	1.92	-7.20	-50.0	7.6	-28.32	
3	查干淖尔	43°26'25.96"N, 115°00'43.67"E	1021	109.3	2.7	1.05	-2.19	-35.34	-7.65	-52.0	9.2	-17.82	
4	达理诺尔	43°15'34.66"N, 116°30'41.36"E	1228	188.5	8.8	7.20	-2.77	-35.17	-8.55	-57.5	10.9	-13.01	
5	尕斯库勒湖(青海湖)	37°01'19.54"N, 100°34'15.24"E	3192	45.7	8.8	34.44	1.14	-0.67	-5.20	-34.5	7.1	-9.79	
6	青海湖	36°35'44.49"N, 100°38'43.09"E	3196	4254	25.0	14.07	1.44	5.65	-5.25	-34.5	7.5	-5.87	
7	苦海	35°20'5.78"N, 99°11'21.66"E	4133	49.0	10.2	20.16	-0.85	-21.15	-7.65	-51.0	10.2	-14.35	
8	鄂陵湖	35°02'18.32"N, 97°43'36.26"E	4272	628.0	30.0	0.43	-3.54	-36.01	-9.10	-62.5	10.3	-7.69	
9	扎陵湖	35°00'19.98"N, 97°20'45.68"E	4298	517.0	8.8	0.72	-1.58	-25.63	-9.45	-65.5	10.1	-12.99	
10	星星海	34°51'20.33"N, 98°07'20.41"E	4224	26.2	9.7	0.55	-0.84	-23.94	-10.05	-70.0	10.4	-17.22	
11	寇查湖	34°00'32.99"N, 97°14'07.21"E	4537	17.5	6.8	0.35	-3.55	-37.19	-12.85	-92.0	10.8	-8.79	
12	冬给措纳	35°16'55.47"N, 98°39'56.75"E	4092	230.2	29.0	0.52	-3.99	-38.53	-7.90	-52.5	10.7	-6.61	
13	金子海	36°43'12.53"N, 97°52'47.83"E	2985	0.5	9.1	0.77	-8.60	-60.45	-2.95	-14.5	9.1	8.35	
14	尕斯库勒湖(德令哈)	37°07'11.85"N, 97°33'35.99"E	2859	37.0	10.2	87.99	3.49	-5.21	-2.60	-12.0	8.8	-33.13	
15	托素湖	37°09'49.60"N, 96°59'00.92"E	2804	167.5	14.1	29.29	5.65	11.22	-2.55	-12.0	8.4	-33.98	
16	克鲁克湖	37°17'17.60"N, 96°54'29.75"E	2832	58.6	3.6	0.84	-4.48	-35.31	-2.65	-13.0	8.2	0.53	
17	哈拉湖	38°14'24.76"N, 97°36'42.07"E	4081	625.0	30.2	17.58	1.45	-4.69	-5.60	-35.5	9.3	-16.29	
18	苏干湖	38°52'32.86"N, 93°54'24.04"E	3000	103.7	5.0	25.88	2.11	-3.52	-3.80	-25.0	5.4	-20.40	
19	错那湖	31°56'51.11"N, 91°27'41.63"E	4592	400.0	20.4	0.38	-8.82	-77.53	-17.25	-129.0	9.0	-6.97	
20	蓬措	31°29'47.28"N, 90°59'59.23"E	4540	135.8	16.5	13.14	-3.73	-53.04	-17.55	-130.5	9.9	-23.20	

续表 1

编号	湖泊名称	取样位置	湖面海拔/ m	面积/ km ²	采样点 湖水深/ m	湖水 盐度/ (g/L)	湖水 $\delta^{18}\text{O}$ (V-SMOW)/ ‰	湖水 δD (V-SMOW)/ ‰	降水 $\delta^{18}\text{O}$ (V-SMOW)/ ‰	降水 δD (V-SMOW)/ ‰	降水氘盈余 (V-SMOW)/ ‰	湖水氘盈余 (V-SMOW)/ ‰
21	江措	31°31'54.33"N, 90°48'29.98"E	4616	36.1	18.9	23.54	-5.98	-67.74	-17.65	-131.0	10.2	-19.90
22	巴木措	31°10'05.29"N, 90°32'32.30"E	4575	180.0	70.8	10.40	-5.58	-65.81	-17.75	-131.5	10.5	-21.17
23	申措	31°00'53.33"N, 90°30'36.39"E	4744	43.3	5.6	12.69	-3.75	-53.90	-18.05	-134.0	10.4	-23.90
24	色林措	31°34'10.82"N, 89°06'18.20"E	4553	1640.0	16.8	10.79	-3.18	-47.05	-17.10	-128.0	8.8	-21.61
25	达则措	31°50'23.71"N, 87°33'26.57"E	4480	244.7	16.7	20.74	-5.45	-63.64	-15.50	-117.0	7.0	-20.04
26	扎日南木措	31°03'01.27"N, 85°25'37.04"E	4629	1147.0	4.8	12.40	-7.54	-79.12	-14.05	-106.0	6.4	-18.80
27	打加措	29°52'04.42"N, 85°44'37.53"E	5156	114.5	31.6	8.81	-7.07	-79.08	-15.10	-120.0	0.8	-22.52
28	昂仁金措	29°18'50.18"N, 87°10'17.10"E	4295	24.3	7.1	7.71	-4.54	-70.70	-14.20	-113.0	0.6	-34.38
29	朗措	29°12'26.71"N, 87°23'12.32"E	4303	12.1	31.8	2.41	-5.67	-78.11	-14.25	-113.0	1.0	-32.75
30	博斯腾湖	41°51'32.79"N, 86°46'54.56"E	1044	1646.0	4.5	0.48	-7.98	-54.16	-4.75	-26.5	11.5	9.68
31	赛里木湖	44°38'35.03"N, 81°14'40.99"E	2078	1408.0	78.9	2.49	-2.22	-22.72	-5.20	-32.0	9.6	-4.96
32	艾里克湖	45°55'38.57"N, 85°48'04.10"E	270	55.0	5.2	0.94	-4.43	-51.11	-3.20	-22.5	3.1	-15.67
33	乌伦古湖	47°06'17.44"N, 87°12'15.56"E	482	760.0	5.2	2.24	-4.67	-49.56	-3.80	-27.5	2.9	-12.2

※ 33 个湖泊所处位置 7、8 月降水氢氧同位素的平均值, 数据的计算由 Online Isotopes Precipitation Calculation (OIPC) -3.1 版本 (<http://waterisotopes.org>) 获得^[27-28].

水样中常量离子的分析在中国科学院青海盐湖研究所完成,采用的是常规水化学分析法^[26]:用重量法测定水样中的 K^+ 、 SO_4^{2-} , 测试精度为 1%;用滴定法测定水样中的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 、 HCO_3^- 、 CO_3^{2-} 浓度,测试精度为 0.2%; Na^+ 浓度采用差减法计算,精度为 2%;湖水的盐度为上述八大离子的总和(表 1)。水体氢氧同位素采用美国 Los Gatos Research 公司生产的 DLT-100 型液态水同位素分析仪测量(表 1),精度为 $\delta^{18}O/\delta^{16}O < 0.2\text{‰}$, $\delta D/\delta H < 0.6\text{‰}$ 。分析结果采用相对维也纳标准平均海洋水(V-SMOW)的千分差表示: $\delta X = (R_s/R_{V-SMOW} - 1) \times 1000$, R_s 和 R_{V-SMOW} 分别是水样和 V-SMOW 中的氘或氧的同位素比率 $R(\delta D/\delta H$ 或 $\delta^{18}O/\delta^{16}O)$ 。

为了与 33 个湖泊夏季湖水同位素值作对比,我们利用 Online Isotopes Precipitation Calculation (OIPC)-3.1 版本 (<http://waterisotopes.org>) 计算获得 33 个湖泊所处位置 7、8 月降水氢氧同位素的平均值。通过 OIPC-3.1 计算获得的数据来自于 IAEA/WMO 联合建立的全球降水同位素观测 GNIP, 计算的数据结合了水汽输送过程、地理位置、气温等多种因素^[27-28], 可达 95% 的置信水平。

2 结果

2.1 研究区 33 个湖泊的基本特征

本研究选取的 33 个湖泊分布于我国的第二、第三级阶梯,地势变化明显,其湖泊类型、气候水文特征也各不相同。33 个样点区域跨度大,东西最大跨度为 34.84° ,南北最大跨度为 17.94° ;湖面海拔高度也存在明显的梯度差异,湖面海拔最高的湖泊为青藏高原南部的打加错(5156 m),湖面海拔最低的湖泊为新疆西北部的艾里克湖(270 m)。33 个湖泊的湖水盐度差异显著,盐度最大的为德令哈尔海(87.99 g/L),盐度最小的为寇查湖(0.35 g/L)。33 个湖泊中,除鄂陵湖、扎陵湖、寇查湖、冬给错纳、克鲁克湖、朗措、博斯腾湖属于出口型湖泊外,其他湖泊大都为封闭型湖泊。

中国西部 33 个研究样点的湖水与降水氢氧同位素波动范围较大。湖水 δD 的波动范围在 $-79.12\text{‰} \sim 11.22\text{‰}$ 之间, $\delta^{18}O$ 的波动范围在 $-8.82\text{‰} \sim 5.65\text{‰}$ 之间,而当地夏季降水中 δD 波动范围在 $-134\text{‰} \sim 24.28\text{‰}$ 之间, $\delta^{18}O$ 波动范围在 $-18.05\text{‰} \sim -2.55\text{‰}$ 之间,总体上湖水 δD 与 $\delta^{18}O$ 比当地夏季降水的 δD 与 $\delta^{18}O$ 更偏正(表 1)。

2.2 中国西部夏季湖水水线

根据研究区降水的氢氧同位素资料回归拟合得出相应的当地夏季大气水线(Local Meteoric Water Line, LMWL): $\delta D = 8.00 \delta^{18}O + 8.02$ ($R^2 = 0.99$, $n = 33$) (图 2a), 与全球大气水线(GMWL, $\delta D = 8 \delta^{18}O + 10$)、中国境内降水线^[29] ($\delta D = 7.9 \delta^{18}O + 8.2$) 相似。综合 33 个湖泊水体 δD 与 $\delta^{18}O$ 进行回归拟合,建立了中国西部地区氢氧同位素湖水水线(Lake Water Line, LWL), 它们之间存在着良好的线性关系: $\delta D = 6.73 \delta^{18}O - 19.79$ ($R^2 = 0.86$, $P < 0.0001$, $n = 33$) (图 2a)。与 GMWL 和 LMWL 进行比较发现,西部湖水线居于大气水线右下方并明显偏离大气水线,其斜率与截距低于 GMWL 和 LMWL。

中国西部 33 个湖泊水体氢氧同位素存在明显的空间分异(图 2b):青藏高原北部与南部湖水氢氧同位素组成明显分布在上下两侧(图 2b),两者氢氧同位素差异显著。北部湖水 δD 与 $\delta^{18}O$ 明显偏正, $\delta^{18}O$ 最高可达 5.65‰ , δD 最高达 11.22‰ ;而青藏高原南部湖水 δD 与 $\delta^{18}O$ 明显偏负, $\delta^{18}O$ 最低为 -8.82‰ , δD 最低达 -77.53‰ 。与新疆西北部湖泊相比,内蒙古及邻近地区湖水 δD 与 $\delta^{18}O$ 明显偏正(图 2b),但琵琶湖、岱海、查干淖尔、达里诺尔 4 个湖泊水体的 δD 与 $\delta^{18}O$ 波动范围较大,其中琵琶湖与岱海氢氧同位素值偏正,而相比之下查干淖尔和达里诺尔湖水的氢氧同位素偏负(表 1)。

3 讨论

3.1 降水对湖水氢氧同位素的影响

湖泊水体同位素组成由主要补给水源决定其初始值,又受到自身湖泊类型、局地水汽循环条件、温度、湿度、海拔等多种因素影响,因此湖水同位素可以反映补给水源的同位素值,又与复杂的气候环境变量密切相关^[15, 30]。中国西部地区湖泊多为封闭性湖泊,受外流河影响较小,特别在夏季,大气降水与湖水表面蒸发对湖水理化性质的变化发挥着重要的作用。我们将从中国西部 33 个湖泊所处位置的降水蒸发线与湖水蒸发线的关系、降水与湖水氢氧同位素空间分异规律、湖水气盈余与水汽来源 3 个方面,讨论降水对中国

西部湖水氢氧同位素的影响.

3.1.1 降水与湖水线 本文所研究的 33 个湖泊的湖水线(LWL)延长可最终落于 LMWL 上(图 2a), 这说明研究区湖泊主要补给来源为大气降水, 其湖水氢氧同位素初始组成受到大气降水的水汽源区、水汽凝结与输送过程中分馏效应的影响^[31]. 一般而言, 不同水体水线的斜率和截距代表水循环过程中的水体性态变化与平衡状态, 在降水量少且蒸发强烈的地区, 水体处于非平衡蒸发状态, 除湖水表面的平衡蒸发外, 还会出现由于氢氧同位素比例组成不同的水分子的扩散速度差异引起的动力分馏^[32], 且水体中氢氧同位素比率增大, 斜率往往随之降低. 强烈的蒸发分馏使轻同位素在水中优先分离出来, 重同位素不断富集, 导致轻、重同位素分馏速率比不断增大, 从而使得中国西部湖水线的斜率和截距低于大气降水线, 即 LWL 明显偏离 LMWL 并位于其右下方(图 2a).

一般地, 湖水的蒸发线与当地大气水线的交点即反映了湖水氢氧同位素的初始组成^[33]. 针对不同的区域发现, 青藏高原南部和北部湖水蒸发线 LEL1、LEL2 分别交于 LMWL 的左下方和右上方, 很好地落入了青藏高原南部和北部降水氢氧同位素组成点附近; 新疆西北部地区湖水蒸发线 LEL3 交于 LMWL 的中部, 内蒙古及邻近地区湖水蒸发线 LEL4 与 LMWL 的交点位置, 与青藏高原北部地区的类似(图 2b). 这表明不同区域的大气降水水汽来源以及水汽输送过程的不同, 影响了中国西部不同区域湖水同位素的初始组成. 因此, 中国西部 33 个湖泊水体同位素组成受到不同区域大气降水同位素组成与当地蒸发作用的共同影响.

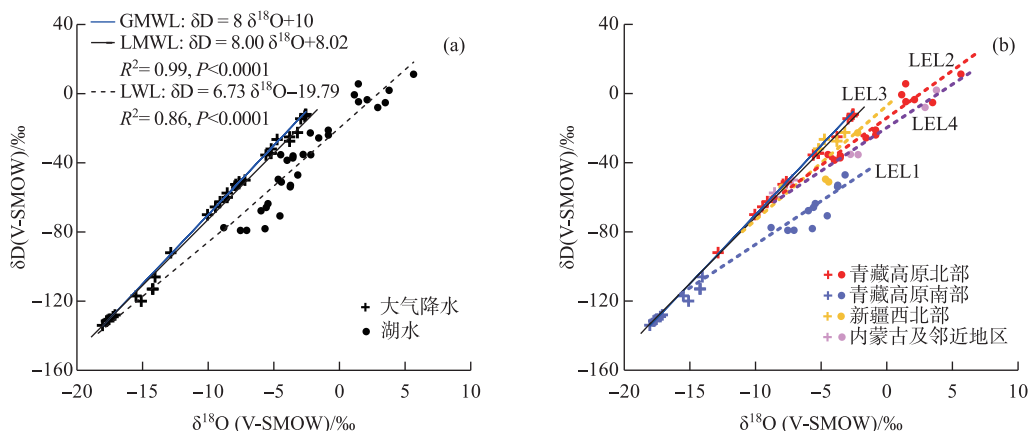


图 2 中国西部 33 个湖水与夏季降水氢氧同位素之间的关系

Fig.2 The relationship of hydrogen and oxygen stable isotopic values between 33 lake waters and summer meteoric waters in western China

3.1.2 降水与湖水氢氧同位素空间分异规律及影响因素 青藏高原北部、青藏高原南部、新疆西北部、内蒙古及邻近地区 4 个区域降水与湖水氢氧同位素具有显著的空间分异特征(图 3), 不同区域的降水与湖水同位素都有其特定的分布范围.

前人的研究表明, 青藏高原南、北两侧降水氢氧同位素的明显差异反映出水汽来源及水汽循环方式的不同^[34]. 夏季青藏高原主要存在两种气团: 一种是来自印度洋的湿润海洋气团, 另一种是来自内陆水体和土壤的大陆气团, 前者主要控制青藏高原南部, 后者主要控制青藏高原北部^[31]. 高原南部受到西南季风带来的降水影响, 而降水氢氧同位素不仅与气团初始湿度、温度以及源地有关, 还与暖湿气团中氢氧同位素的残余量有关, 气团在运移过程中不断形成降水, 剩余水汽的 δ 值下降, 加之水汽在运移过程中随海拔抬升凝结分馏从而加剧氢氧同位素的贫化^[32], 导致青藏高原南部降水中 δD 与 $\delta^{18}\text{O}$ 偏负; 而北部深处大陆内部, 喜马拉雅山阻挡来自西南的水汽向北运行, 又加之北部冈底斯山脉与唐古拉山的阻隔, 使得大陆气团控制青藏高原北部, 加剧了北部的干旱气候. 一方面, 来自内陆与土壤的大陆水汽中氢氧同位素保持着较高值, 另一方面, 由于气候条件干旱, 容易出现雨滴云下二次蒸发与水体表面蒸发^[35-36], 从而使青藏高原北部降水中 δD 与 $\delta^{18}\text{O}$ 偏正. 受上述降水同位素分异特征的影响, 青藏高原南、北两侧湖泊水体的氢氧同位

素也表现出与降水同位素分异特征一致的现象(图3),即青藏高原南部湖泊氢氧同位素明显偏负,而北部湖泊氢氧同位素明显偏正。

内蒙古及邻近地区和新疆西北部湖水与夏季降水氢氧同位素具有相反的组成特征(图3)。与新疆西北部相比,内蒙古及邻近地区夏季降水同位素值偏负,而湖水同位素值偏正。而根据 OIPC 所计算的 33 个湖区年均降水同位素值来看,2 个地区的年均降水氢氧同位素组分变化与湖水具有一致性,均为内蒙古及邻近地区氢氧同位素偏正,新疆西北部偏负。相对湿度、温度、风速、日照时数等气象因子都是已知的可能控制水体氢氧同位素组分变化的重要因素^[37-39]。内蒙古及邻近地区夏季降水氢氧同位素值偏负,一方面是由于该地区位于现代季风边缘区,夏季受到东南季风的影响^[40],随着水汽运输距离的增加,瑞利分馏作用更加显著,导致降水同位素值较低;另一方面该地区 7、8 月相对湿度>新疆西北部,日照时长<新疆西北部(国家气象信息中心, <http://data.cma.cn>),导致夏季雨滴二次蒸发现象少于新疆西北部地区,使其夏季降水同位素值低于新疆西北部。而新疆西北部主要受西风控制,受到西风环流所携带高纬地区海源水汽的影响,并在沿途输送过程中不断形成降水,在欧亚大陆上,大西洋沿岸的气团比太平洋和印度洋的气团推进的更远^[21],导致其年均降水氢氧同位素比内蒙古及邻近地区贫化。两地湖水氢氧同位素组成并未及时随降水同位素的变化而变化,可能是由于湖水同位素反映的是长时间尺度的水汽来源特征,对当季补给水源的响应有一定滞后性。

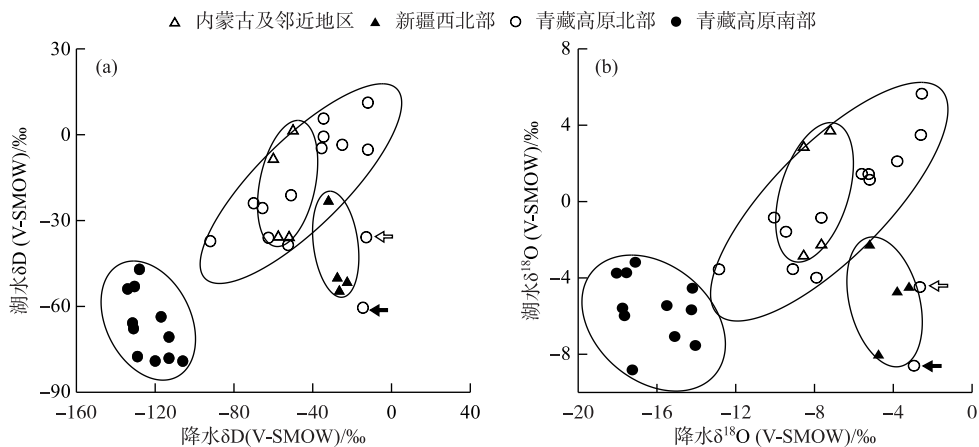


图3 中国西部湖水与夏季降水 δD 、 $\delta^{18}O$ 的空间变化

Fig.3 Spatial variations of δD and $\delta^{18}O$ in summer meteoric waters and lake waters of western China

上述研究表明我国西部湖水氢氧同位素的变化,明显受降水同位素的控制和影响,或者说我国西部不同区域湖水氢氧同位素的变化,继承了不同区域降水同位素的变化。

3.1.3 研究区湖水氘盈余与水汽源地的关系 氘盈余($d_{\text{excess}} = \delta D - 8 \delta^{18}O$)作为氢氧同位素关系的重要指标,指示水汽源地的大气湿度以及区域蒸发分馏过程等水文环境状况^[4, 32, 41],分析 33 个湖泊水体中氘盈余的变化有利于进一步探究降水水汽源地湿度状况,揭示大气降水以及局部水循环过程。前人研究表明,理想状态下,湖水的停滞时间越长,越会增加潜在蒸发的可能性,使得轻质量的水分子蒸发到空气中,氢氧同位素分馏比率不断增加,使得残余水中 $\delta^{18}O$ 升高,而氘盈余降低,即较低的氘盈余指示了强烈的蒸发分馏作用^[41-43]。中国西部地区湖水与降水中氘盈余相比,33 个湖泊降水氘盈余均为正值,而湖水中氘盈余普遍偏负,平均湖水氘盈余低于降水氘盈余平均值 24.28‰(表 1),这在一定程度上反映了湖水经历了蒸发富集的作用,使得湖水中氘盈余远低于降水。但若按照上述效应,青藏高原北部由于受到强烈的蒸发分馏作用应显示为较低的氘盈余值,但除尕斯库勒湖(德令哈)和托素湖(盐度分别为 87.99 和 29.29 g/L)2 个盐度最大、蒸发量最高的湖泊遵循蒸发效应外,其余 12 个湖泊氘盈余相对较高(表 1,图 4)。因此在本文所研究的湖泊水体中,氘盈余并不能反映蒸发分馏作用,可能指示水汽来源与氢氧同位素初始组分,以及它们对中国

西部湖泊水体的同位素值变化的影响。

青藏高原南北两侧湖泊水体氘盈余差异显著(图4), 指示了区域降水水汽源区湿度的不同^[31]。除尕斯库勒(德令哈)与托素湖湖水的氘盈余明显偏低外, 青藏高原北部其他湖泊的氘盈余整体偏高, 南部氘盈余显著偏低。青藏高原北部水汽来源为内陆水循环, 与温暖湿润的季风所携带水汽相比, 表现为较高的氘盈余^[44], 而青藏高原南部在季风时期相对低的氘盈余与来自孟加拉湾的水汽湿度增加有关^[45]。

内蒙古及邻近地区湖水中氘盈余明显偏低, 这是由于该地区夏季受到东南季风携带的太平洋湿润水汽的影响, 而采样时间为6—7月, 使测得湖水水样中氘盈余偏低。值得一提的是, 岱海与琵琶湖氘盈余偏低, 平均氘盈余为-29.84‰, 查干淖尔与达里诺尔平均氘盈余为-15.45‰, 整体偏高, 而岱海、琵琶湖与查干淖尔、达里诺尔相比, 其 δD 与 $\delta^{18}O$ 值却是偏正的。这可能是由于岱海、琵琶湖相较于查干淖尔、达里诺尔来说位置更偏南, 距离东南季风源地较近, 受东南季风所带来的湿润水汽影响更大, 导致其氘盈余偏低; 而查干淖尔与达里诺尔位置偏北, 一方面季风携带的水汽到达时剩余湿度减小, 导致氘盈余偏高, 另一方面水汽输送过程中不断形成降水, 又导致其氢氧同位素较贫化。这说明了同一水汽源地的剩余湿度以及运输距离会对不同湖泊水样氘盈余及氢氧同位素产生影响。

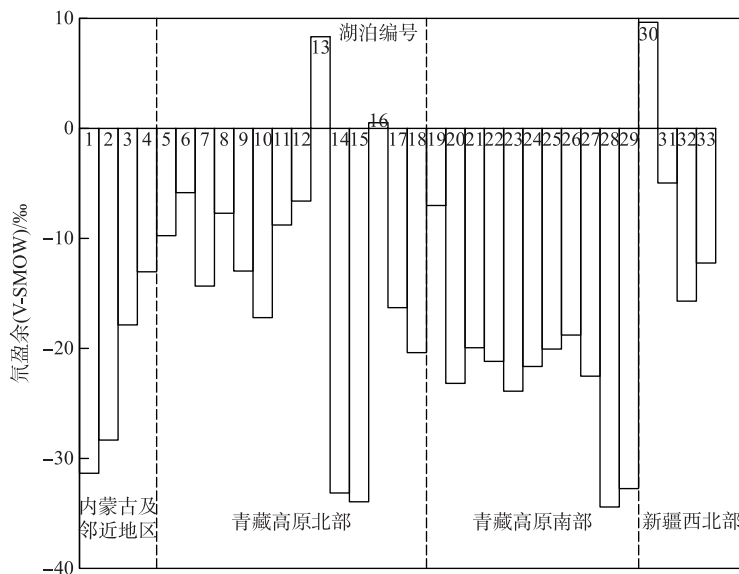


图4 中国西部33个湖泊水体氘盈余的空间变化

Fig.4 Spatial variations of d_{excess} in 33 lakes water in western China

新疆西北部与内蒙古及邻近地区相比湖泊水体氢氧同位素偏负(表1, 图3), 而两地的氘盈余却显示了相反的特征, 新疆西北部湖水与内蒙古及邻近地区相比, 氘盈余更偏正(图4)。前人对哈萨克斯坦西部地表水研究发现, 来自地中海与里海、黑海的水汽中具有较高的氘盈余^[41], 因此西风所带来的水汽会使氘盈余偏高^[46]。新疆氘盈余最偏正(图4), 进一步表明该地区受西风影响显著。这也在一定程度上说明东南季风所处的太平洋水汽源区比西风所处的北大西洋源区湿度大, 指示了不同水汽源地对湖水氘盈余的影响。

3.2 湖水盐度对湖泊水体氢氧同位素的影响

湖水盐度与水体氢氧同位素变化所表现出的关系取决于蒸发、径流、降雨等多种因素的混合^[47]。研究表明, 随着水的不断蒸发, 水的盐度增高, 剩余水中的 $\delta^{18}O$ 逐渐增高^[48-49]。2000年, 沈吉等^[50]通过实验室蒸发模拟实验, 对岱海湖水盐度与氧同位素关系进行了研究, 发现随着蒸发增加, 剩余水体中盐度升高, $\delta^{18}O$ 也随之升高并呈指数形式增大。Liu等^[51]对青海湖及周边湖泊的相关研究发现, 湖水 $\delta^{18}O$ 与盐度的关系不仅受到蒸发的影响, 还与补给水源的多少有关, 且不同采样点与补给湖泊的主要河流入湖口的距离不

同,其湖水 $\delta^{18}O$ 与盐度也有所不同.随着蒸发量增加,湖水盐度增加且 $\delta^{18}O$ 呈指数形式升高,但当盐度 > 14 g/L 时,随盐度增加 $\delta^{18}O$ 缓慢升高或几乎不变,除此以外,补给水源与采样点的距离较近时,由于入湖河水的稀释作用会导致湖水盐度降低, $\delta^{18}O$ 偏负,而距离增大时,湖水盐度升高, $\delta^{18}O$ 偏正^[51].

本文所研究的 33 个湖泊以内陆封闭湖泊为主,盐度的变化幅度大,盐度最小的为 0.35 g/L(寇察湖),最大的可达 88.0 g/L(德令哈尔海).通过对 33 个湖泊湖水盐度与 δD 、 $\delta^{18}O$ 的关系研究发现(图 5),湖水盐度与 δD 、 $\delta^{18}O$ 并没有呈现很好的相关性,表明我国西部地区 33 个湖泊水体氢氧同位素组分的变化与盐度并无直接联系,蒸发也并不是造成其空间差异的重要因素,而大气降水所带来的氢氧同位素初始组成决定了我国西部湖泊水体的 δD 、 $\delta^{18}O$ 的空间分异.

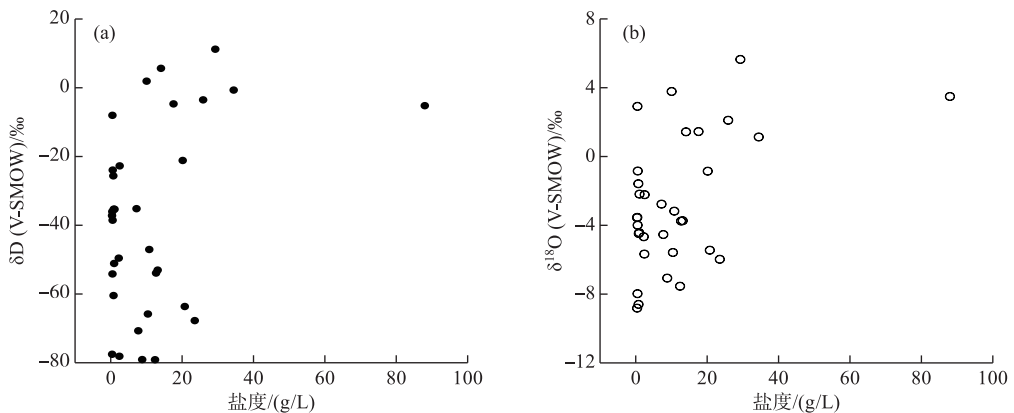


图 5 中国西部 33 个湖泊湖水盐度与 δD (a)、 $\delta^{18}O$ (b) 的关系

Fig.5 The relationship of δD (a) and $\delta^{18}O$ (b) vs water salinity in 33 lakes in western China

从上面的讨论可以看出,单一地理背景条件下的封闭湖泊,湖水本身的蒸发率以及离补给水源的距离所引起的湖水盐度变化是影响湖水氢氧同位素的主要因素,但当湖泊处于不同地理位置使其受到不同气候及水汽条件影响时,补给水源的同位素组成是最终决定并影响湖水同位素组分变化的最重要因素.

3.3 海拔、纬度对湖水氢氧同位素的影响

探讨海拔、纬度与水体 δD - $\delta^{18}O$ 的相关性有助于分析这些地理变量对水体氢氧同位素组成的影响程度^[41].湖水 δD 与 $\delta^{18}O$ 与海拔的相关性表明(图 6a,6b):以 3000 m 为界,当海拔小于 3000 m 时,即新疆西北部地区与内蒙古及邻近地区湖泊,湖水 δD 、 $\delta^{18}O$ 与海拔 E (m)的关系为: $\delta D=0.023 E-57.647$, $R^2=0.43$, $P=0.0769$; $\delta^{18}O=0.003 E-5.717$, $R^2=0.22$, $P=0.2360$,相关性并不显著;当海拔大于 3000 m 时,即青藏高原南北两侧湖泊,湖水 δD 与 $\delta^{18}O$ 与海拔 E (m)呈显著性负相关: $\delta D=-0.039 E+120.693$, $R^2=0.71$, $P<0.0001$; $\delta^{18}O=-0.005 E+18.219$, $R^2=0.77$, $P<0.0001$.当海拔抬升到 2000 m 以上,气温迅速下降,水汽凝结致雨^[52],受海拔效应的影响,青藏高原降水的氢氧同位素明显偏负^[53],进而使得青藏高原地区湖泊水体 δD 与 $\delta^{18}O$ 随海拔的抬升而发生贫化.内蒙古及邻近地区与新疆西北部海拔均在 3000 m 以下,且内蒙古及邻近地区与新疆西北部湖泊样点少,因此在研究中高程效应并不明显.

青藏高原湖泊水体中氢氧同位素与纬度 $LAT(^{\circ})$ 呈显著性正相关($\delta D=9.495 LAT-359.539$, $R^2=0.88$, $P<0.0001$; $\delta^{18}O=1.067 LAT-38.567$, $R^2=0.72$, $P<0.0001$)(图 6c,6d),这种正相关关系并不符合降水同位素中一般意义上的纬度效应—水汽由低纬向高纬输送过程中,随温度的降低与运输距离的增加不断凝结降水,剩余水汽中 $\delta^{18}O$ 逐渐降低^[52].但青藏高原南北降水的氢氧同位素同样不符合纬度效应,研究表明,青藏高原南北两侧水汽来源不同,青藏高原南部受到西南季风的影响,湖水氢氧同位素偏负,青藏高原北部居于大陆内部,主要受大陆气团控制,氢氧同位素值偏正^[34,54],因此,纬度较高的青藏高原北部降水的氢氧同位素比青藏高原南部降水的同位素偏重,青藏高原北部湖泊水体的氢氧同位素同样比南部偏重,表明湖水中氢氧同位素组成仍然受控于青藏高原南北大气降水氢氧同位素组成.内蒙古及邻近地区与新疆西北

部大陆效应不明显. 整体来看, 虽然 33 个湖泊夏季湖水氢氧同位素在一定程度上受到海拔、纬度等因素的影响, 但湖水 δD 与 $\delta^{18}O$ 值仍然显示了明显的空间分异特征(图 6), 表明水汽源地是控制中国西部夏季湖水氢氧同位素的主要因素.

值得一提的是, 青藏高原北部的金子海(图 3、图 6 中的黑色实心箭头所示, 图 4 中编号为 13 的湖泊)与克鲁克湖(图 3、图 6 中的空心箭头所示, 图 4 中编号为 16 的湖泊)的湖水氢氧同位素值既不符合 δD 与 $\delta^{18}O$ 的空间分布规律, 也不遵循高程效应与纬度效应, 属于本研究的特殊点. 其中, 克鲁克湖是柴达木盆地最大的淡水湖, 位于东北部的巴音河与西北部的巴勒更河是其主要的补给水源, 湖水在东南部流出到托素湖^[55], 水体更新速度快, 可能在一定程度上导致湖水氢氧同位素异常偏负. 金子海与克鲁克湖均位于蒸发强烈的柴达木盆地, 但二者却都是淡水湖, 且两个湖泊水体氢氧同位素在区域上异常, 表明这 2 个湖泊水体来源的复杂性, 值得今后做深入的研究.

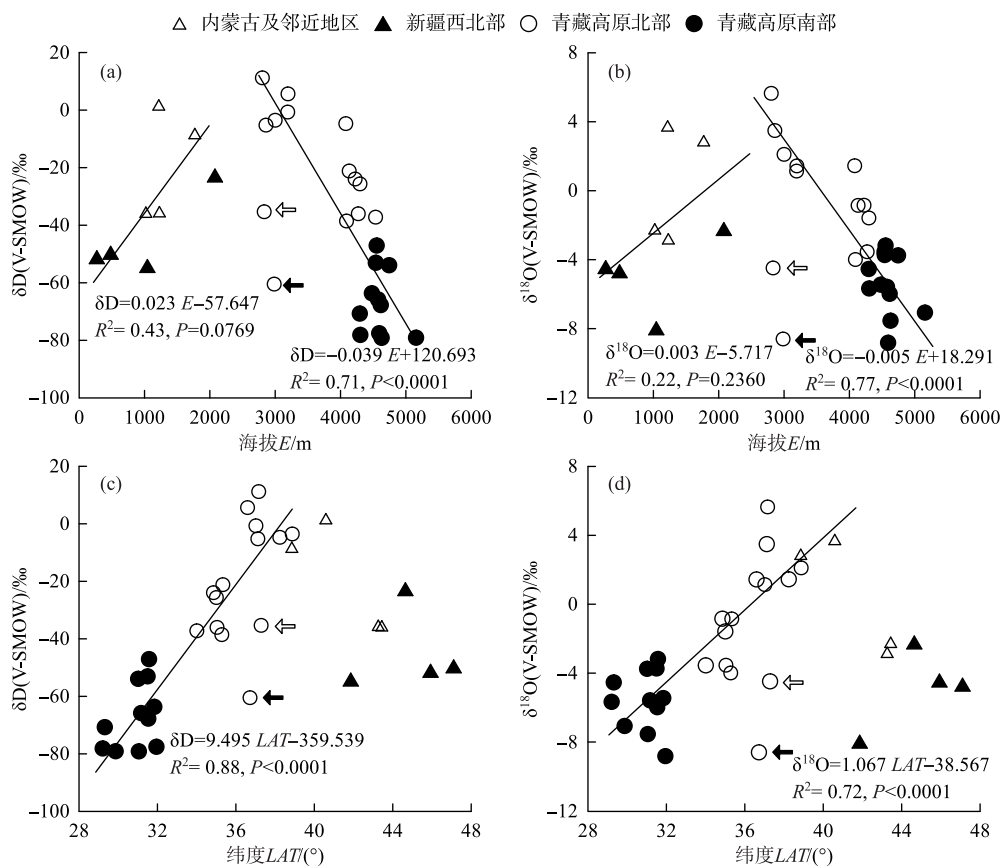


图 6 中国西部湖水氢氧同位素与海拔、纬度的关系

Fig.6 Correlations between hydrogen and oxygen stable isotopic values of lake waters and elevation, latitude in western China

4 结论

本文对中国西部 33 个湖泊水体氢氧同位素组成与当地夏季降水氢氧同位素组成、湖水盐度、湖面海拔高度、及湖泊所处纬度的关系进行了研究, 从大的空间尺度上, 探讨了中国西部湖泊水体 δD 和 $\delta^{18}O$ 的变化特征、分异规律及其影响因素, 为今后中国西部水循环及气候环境演化的研究提供了一定的数据支撑.

中国西部 33 个湖泊夏季湖水氢氧同位素存在良好的线性关系, 其蒸发线特征说明湖水的主要补给来

源为大气降水,并且由于蒸发现象的普遍存在使得湖水线斜率与截距低于大气降水线.湖水氢氧同位素呈现明显的空间分异特征:青藏高原北部>内蒙古及邻近地区>新疆西北部>青藏高原南部,这种空间分异特征与降水氢氧同位素的空间分异特征基本一致,而湖水盐度与其氢氧同位素之间并没有相关性,表明影响湖水氢氧同位素的最主要因素为大气降水所带来的氢氧同位素的初始组分,降水对湖水氢氧同位素的影响远大于盐度与蒸发作用.此外,研究区湖水的氘盈余并不能很好地反映蒸发效应对氢氧同位素的影响,但可以指示不同区域水汽源地的湿度.青藏高原地区湖泊的氢氧同位素与海拔高度呈负相关、与纬度呈正相关,由于湖水的氢氧同位素受降水的影响,从而使得湖水的氢氧同位素也随海拔和纬度的变化而变化.

总之,尽管中国西部33个湖泊水体氢氧同位素受到自身湖泊类型、局地水汽循环条件、温度、湿度、海拔等多种因素影响,但湖水氢氧同位素组成仍主要受控于大气降水,其空间分布特征与降水水汽来源及气团性质密切相关.

5 参考文献

- [1] Craig H. Isotopic variations in meteoric waters. *Science*, 1961, **133**: 1702-1703.
- [2] Rozanski K, Araguas-Aranguas L, Confortini R. Isotopic patterns in modern global precipitation//Swart PK, Lohmann KC, Mckenzie J *et al* eds. *Climate change in continental isotopic records*, vol.78. Washington: American Geophysical Union, 1993: 1-36.
- [3] Zhang XP, Shi YF, Yao TD. The variations of $\delta^{18}O$ of precipitation in the northeastern Tibetan Plateau. *Science in China: Series B*, 1995, **25**(5): 540-547. [章新平,施雅风,姚檀栋.青藏高原东北部降水中 $\delta^{18}O$ 的变化特征.中国科学: B辑,1995, **25**(5): 540-547.]
- [4] Froehlich K, Kralik M, Papesch W *et al*. Deuterium excess in precipitation of Alpine regions-moisture recycling. *Isotopes Environ Health Stud*, 2008, **44**(1): 61-70.
- [5] Yu WS, Tian LD, Yao TD *et al*. Precipitation stable isotope records from the northern Hengduan Mountains in China capture signals of the winter India-Burma Trough and the Indian Summer Monsoon. *Earth and Planetary Science Letters*, 2017, **477**: 123-133.
- [6] Liu JR. A study of deuterium and oxygen-18 in precipitation in China [Dissertation]. Beijing: Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, 2008. [柳鉴容.中国大气降水稳定氢氧同位素研究[学位论文].北京:中国科学院地理科学与资源研究所,2008.]
- [7] Kendall C, Tyler BC. Distribution of oxygen-18 and deuterium in river waters across the United States. *Hydrological Processes*, 2001, **15**(7): 1363-1393.
- [8] Dutton A, Wikinson BH, Welker JM *et al*. Spatial distribution and seasonal variation in $^{18}O/^{16}O$ of modern precipitation and river water across the conterminous USA. *Hydrological Processes*, 2005, **19**(20): 4121-4146.
- [9] Rank D, Wyhlidal S, Schott K *et al*. Temporal and spatial distribution of isotopes in river water in Central Europe: 50 years experience with the Austrian network of isotopes in rivers. *Isotopes Environ Health Stud*, 2018, **54**(2): 115-136.
- [10] Pang HX, He YQ, Lu AG *et al*. Comparisons of stable isotopic fractionation in winter and summer at Baishui Glacier No. 1, Mt. Yulong. *Scientia Geographica Sinica*, 2006, **61**(5): 501-509. [庞鸿喜,何元庆,卢爱刚等.玉龙雪山冰川稳定同位素分馏冬夏对比.地理科学,2006, **61**(5): 501-509.]
- [11] Hou H, Hou SG, Pang HX. Stable isotopes in different water samples on the Monh Hayrhan Glacier, Altay Mountains: Spatial distribution features and vapor sources. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2014, **36**(5): 1271-1279. [侯浩,侯书贵,庞鸿喜.阿尔泰山蒙赫海尔汗冰川不同水体稳定同位素空间分布特征及水汽来源.冰川冻土,2014, **36**(5): 1271-1279.]
- [12] Tian LD, Liu ZF, Gong TL *et al*. Isotopic variation in the lake water balance at the Yamdruk-tso basin, southern Tibetan Plateau. *Hydrol Process*, 2008, **22**(2008): 3386-3392.
- [13] Li WB, Liu ZJ, Yang X *et al*. Changes of stable oxygen and hydrogen isotopes in summer Dali-nor Lake in Inner Mongolia of Northern China. *J Lake Sci*, 2019, **31**(2): 539-550. DOI: 10.18307/2019.0222. [李文宝,刘志娇,杨旭等.内蒙古高原达里诺尔湖夏季水体稳定同位素变化特征.湖泊科学,2019, **31**(2): 539-550.]
- [14] Henderson AK, Shuman BN. Hydrogen and oxygen isotopic compositions of lake water in the western United States. *GSA Bulletin*, 2009, **121**(7/8): 1179-1189.

- [15] Henderson AK, Shuman BN. Differing controls on river-and lake-water hydrogen and oxygen isotopic values in the western United States. *Hydrological Processes*, 2010, **24**(26): 3894-3906.
- [16] Arnoux M, Barbecot F, Brunet EG *et al.* Impacts of changes in groundwater recharge on the isotopic composition and geochemistry of seasonally ice-covered lakes: insights for sustainable management. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2017, **21**(11): 5875-5889.
- [17] Luo X, Jiao JJ, Wang XS *et al.* Groundwater discharge and hydrologic partition of the lakes in desert environment: Insights from stable $^{18}\text{O}/^{2}\text{H}$ and radium isotopes. *Journal of Hydrology*, 2017, **546**(2017): 189-203.
- [18] Jonsson CE, Leng MJ, Rosqvist GC *et al.* Stable oxygen and hydrogen isotopes in sub-Arctic lake waters from northern Sweden. *Journal of Hydrology*, 2009, **376**(1/2): 143-151.
- [19] Jones MD, Cuthbert MO, Leng MJ *et al.* Comparisons of observed and modelled lake $\delta^{18}\text{O}$ variability. *Quaternary Science Reviews*, 2016, **131**(2016): 329-340.
- [20] Jasechko S, Gibson JJ, Edwards TWD. Stable isotope mass balance of the Laurentian Great Lakes. *Journal of Great Lakes Research*, 2014, **40**(2): 336-346.
- [21] Shapley MD, Ito E, Donovan JJ. Isotopic evolution and climate paleorecords: modeling boundary effects in groundwater-dominated lakes. *Journal of Paleolimnology*, 2007, **39**(1): 17-33.
- [22] Gao ZY, Niu FJ, Lin ZJ *et al.* Evaluation of thermokarst lake water balance in the Qinghai-Tibet Plateau via isotope tracers. *Science of the Total Environment*, 2018, **636**(2018): 1-11.
- [23] Bao WM, Hu HY, Zhai SM *et al.* Application of stable isotope method in the study of lake water balance. *Yellow River*, 2007, **29**(8): 29-31. [包为民, 胡海英, 翟思敏等. 稳定同位素方法在湖泊水量平衡研究中的应用. 人民黄河, 2007, **29**(8): 29-31.]
- [24] Hua MQ, Zhang XP, Yao TC *et al.* Variation characteristics and influencing factors of the stable water isotopes in Lake Peach in China. *J Lake Sci*, 2018, **30**(6): 1766-1778. DOI: 10.18307/2018.0627. [华明权, 章新平, 姚天次等. 长沙桃子湖湖水稳定同位素的变化及其影响因素. 湖泊科学, 2018, **30**(6): 1766-1778.]
- [25] Ma RH, Yang GS, Duan HT *et al.* China's lakes at present: Number, area and spatial distribution. *Sci in China: Earth Sci*, 2011, **41**(3): 394-401. [马荣华, 杨桂山, 段洪涛等. 中国湖泊的数量、面积与空间分布. 中国科学: 地球科学, 2011, **41**(3): 394-401.]
- [26] Qinghai Institute of Salt Lakes, Chinese Academy of Sciences ed. Analysis method of brine and salt; Second Edition. Beijing: Science Press, 1988. [中国科学院青海盐湖研究所. 卤水和盐的分析方法: 第2版. 北京: 科学出版社, 1988.]
- [27] Bowen GJ, Wilkinson B. Spatial distribution of $\delta^{18}\text{O}$ in meteoric precipitation. *Geology*, 2002, **30**(4): 315-318.
- [28] Bowen GJ, Revenaugh J. Interpolating the isotopic composition of modern meteoric precipitation. *Water Resources Research*, 2003, **39**(10): 1-13.
- [29] Zheng SH, Hou FG, Ni BL. Hydrogen and oxygen isotope studies of precipitation in China. *Chinese Science Bulletin*, 1983, (13): 801-806. [郑淑慧, 侯发高, 倪葆龄. 我国大气降水的氢氧同位素研究. 科学通报, 1983, (13): 801-806.]
- [30] Confiantini R. Environmental isotopes in lake studies. In: Fritz P, Fontes JC eds. The Terrestrial Environment, B. Amsterdam. New York: Elsevier, 1986: 113-168.
- [31] Ren W, Yao TD, Yang XX *et al.* Implications of variations in $\delta^{18}\text{O}$ and δD in precipitation at Madoi in the eastern Tibetan Plateau. *Quaternary International*, 2013, **313/314**(2013): 56-61.
- [32] Dansggard W. Stable isotopes in precipitation. *Tellus*, 1964, **16**(4): 436-486.
- [33] Gibson JJ, Edwards TWD, Birks SJ *et al.* Progress in isotope tracer hydrology in Canada. *Hydrological Processes*, 2005, **19**(1): 303-327.
- [34] Tian LD, Yao TD, Sun WZ. The relationship between δD and $\delta^{18}\text{O}$ in precipitation and the water vapor cycle in Tibetan Plateau. *Science in China: Series D*, 2001, **31**(3): 214-220. [田立德, 姚檀栋, 孙维真. 青藏高原南北降水中 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 关系及水汽循环. 中国科学: D 辑, 2001, **31**(3): 214-220.]
- [35] Chen FL, Zhang MJ, Wang SJ *et al.* Environmental controls on stable isotopes of precipitation in Lanzhou, China: An enhanced network at city scale. *Science of the Total Environment*, 2017, **609**(2017): 1013-1022.
- [36] Peng TR, Wang CH, Huang CC *et al.* Stable isotopic characteristic of Taiwan's precipitation: A case study of western Pa-

- cific monsoon region. *Earth and Planetary Science Letters*, 2010, **289**(3/4): 357-366.
- [37] Jones MD, Leng MJ, Roberts CN *et al.* A coupled calibration and modelling approach to the understanding of dry-land lake oxygen isotope records. *Journal of Paleolimnology*, 2005, **34**(3): 391-411.
- [38] Kumar B, Rai SP, Kumar US *et al.* Isotopic characteristics of Indian precipitation. *Water Resources Research*, 2010, **46**(12): 1-15.
- [39] Deshpande RD, Maurya AS, Kumar B *et al.* Rain-vapor interaction and vapor source identification using stable isotopes from semiarid western India. *Journal of Geophysical Research*, 2010, **115**(D23): 1-11.
- [40] Wang W, Feng ZD. Holocene moisture evolution across the Mongolian Plateau and its surrounding areas: A synthesis of climatic records. *Earth-Science Reviews*, 2013, **122**(2013): 38-57.
- [41] Wu HW, Wu JL, Song F *et al.* Spatial distribution and controlling factors of surface water stable isotope values ($\delta^{18}O$ and δ^2H) across Kazakhstan, Central Asia. *Science of the Total Environment*, 2019, **678**(2019): 53-61.
- [42] Wu HW, Li XY, He B *et al.* Characterizing the Qinghai Lake watershed using oxygen-18 and deuterium stable isotopes. *Journal of Great Lakes Research*, 2017, **43**(3): 33-42.
- [43] Gibson JJ, Edwards TWD. Development and validation of an isotopic method for estimating lake evaporation. *Hydrological Processes*, 1996, **10**(10): 1369-1382.
- [44] Bershaw J, Penny SM, Garzione CN. Stable isotopes of modern water across the Himalaya and eastern Tibetan Plateau: Implications for estimates of paleoelevation and paleoclimate. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2012, **117**(D2): 1-18.
- [45] Tian LD, Yao TD, Numaguti A *et al.* Stable isotope variations in monsoon precipitation on the Tibetan plateau. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 2001, **79**(5): 959-966.
- [46] Tian LD, Yao TD, White JWC *et al.* High d_{excess} in the middle of the Himalayas is related to water vapor transport in the westerlies. *Chinese Science Bulletin*, 2005, **50**(7): 669-672. [田立德, 姚檀栋, White JWC 等. 喜马拉雅山中段高过量氘与西风带水汽输送有关. 科学通报, 2005, **50**(7): 669-672.]
- [47] Delaygue G, Bard E, Rollion C *et al.* Oxygen isotope/salinity relationship in the northern Indian Ocean. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2001, **106**(C3): 4565-4574.
- [48] Craig H, Gordon LI, Horibe Y. Isotopic exchange effects in the evaporation of water. *Journal of Geophysical Research*, 1963, **68**(17): 5079-5087.
- [49] Tian LD, Yao TD, Sun WZ *et al.* Study on stable isotope fractionation during water evaporation in the middle of the Tibetan Plateau. *Journal of Glaciology*, 2000, **22**(2): 159-164. [田立德, 姚檀栋, 孙维贞等. 青藏高原中部水蒸发过程中的氧稳定同位素变化. 冰川冻土, 2000, **22**(2): 159-164.]
- [50] Shen J, Cao JT. Establishment of quantitative relationship between water salinity and oxygen isotope in Bohai Lake. *Quaternary Sciences*, 2000, **20**(2): 211. [沈吉, 曹建廷. 岱海湖水盐度与氧同位素定量关系的建立. 第四纪研究, 2000, **20**(2): 211.]
- [51] Liu WG, Li XZ, Zhang L *et al.* Evaluation of oxygen isotopic in carbonate as an indicator of lake evolution in arid areas: The modern Qinghai Lake, Qinghai-Tibet Plateau. *Chemical Geology*, 2009, **268**: 126-136.
- [52] Tripti M, Lambs L, Moussa I *et al.* Evidence of elevation effect on stable isotopes of water along highlands of a humid tropical mountain belt (Western Ghats, India) experiencing monsoonal climate. *Journal of Hydrology*, 2019, **573**(2019): 469-485.
- [53] Liu ZF, Tian LD, Yao TD *et al.* Spatial distribution of $\delta^{18}O$ in precipitation over China. *Chinese Science Bulletin*, 2009, **54**(6): 804-811. [刘忠方, 田立德, 姚檀栋等. 中国大气降水中 $\delta^{18}O$ 的空间分布. 科学通报, 2009, **54**(6): 804-811.]
- [54] Tian LD, Yao TD, Stievenard M *et al.* A study of hydrogen isotope in precipitation in West China. *Journal of Glaciology*, 1998, **20**(2): 79-83. [田立德, 姚檀栋, Stievenard M 等. 中国西部降水中 δD 的初步研究. 冰川冻土, 1998, **20**(2): 79-83.]
- [55] Wang WW, Jiang X, Zheng BH *et al.* Composition, mineralization potential and release risk of nitrogen in the sediments of Keluke Lake, a Tibetan Plateau freshwater lake in China. *Royal Society Open Science*, 2018, **5**: 1-15.