

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2025.02.004

基于多源数据的柴达木盆地降水同位素特征研究

王涛¹, 李其发¹, 张茜², 王媛¹, 陈建生³

(1. 河海大学水利水电学院, 江苏南京 210098; 2. 河海大学地球科学与工程学院, 江苏南京 210098;
3. 河海大学土木与交通学院, 江苏南京 210098)

摘要: 为解决采用单一来源数据研究柴达木盆地降水同位素组成时空分布特征的局限性, 综合利用 TNIP 数据、文献数据、C-Isoscape 数据和 GCMs 数据, 构建了当地大气降水线(LMWL), 分析了柴达木盆地降水同位素组成的年内、年际变化及其温度和降水量效应。结果表明: LMWL 的斜率和截距低于 GMWL, 在空间分布上斜率呈现自西向东逐渐增大的趋势, 这归因于云下二次蒸发的差异; 降水 $\delta^{18}\text{O}$ 在年内尺度上呈现夏高冬低的季节变化特征; 德令哈、小灶火、茫崖、大柴旦、乌兰站的降水 $\delta^{18}\text{O}$ 呈现逐年富集的变化趋势, 温度是影响降水同位素年际变化的重要因素; 柴达木盆地降水同位素温度效应显著, 而降水量效应不明显。

关键词: 同位素特征; 大气降水; 多源数据; 水文循环; 柴达木盆地

中图分类号: P426 文献标志码: A 文章编号: 1000-1980(2025)02-0029-10

Study on isotope characteristics of precipitation in Qaidam Basin based on multi-source data

WANG Tao¹, LI Qifa¹, ZHANG Xi², WANG Yuan¹, CHEN Jiansheng³

(1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. School of Earth Sciences and Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;
3. School of Civil Engineering and Transportation, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: To overcome the limitations of traditional investigations on the temporal-spatial distributions of precipitation isotopic compositions based on single-source data in the Qaidam Basin, this study synthesized data from multiple sources, including TNIP, previous literatures, C-Isoscape, and GCMs, to establish the local meteoric water line (LMWL) and analyze intra-annual and interannual variations of precipitation isotopic compositions as well as temperature and precipitation quantity effects. The findings indicated that the slope and interception of the LMWL were lower than those of the Global Meteoric Water Line (GMWL), with the slope showing a gradual rising eastward spatially, attributed to the difference in below-cloud secondary evaporation. On intra-annual scale, precipitation $\delta^{18}\text{O}$ shows a seasonal variation with high values in summer and low values in winter, in which trend over time is influenced by temperature fluctuations. A significant temperature effect was observed for precipitation isotopes across the basin, whereas no obvious precipitation quantity effect was identified.

Key words: isotope characteristics; atmospheric precipitation; multi-source data; hydrological cycle; Qaidam Basin

柴达木盆地位于青藏高原东北缘, 属于高原大陆性气候, 常年干旱少雨, 河流大多为间歇性, 水资源十分匮乏, 大气降水是区域水循环的重要水分输入项^[1-2]。在降水形成过程中, 水汽中的氢氧同位素在不同温度、湿度条件下会发生同位素分馏, 导致降水同位素组成($\delta^{18}\text{O}$ 和 δD) 呈现出区域性差异特征^[3-6], 因而降水同位素组成可以有效示踪水汽来源和水汽输送过程^[7-10]。另外, 降水的 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 的线性关系(即大气降水线)也常被用于示踪水体补给和交换等水文过程^[11-13]。利用同位素进行区域水文循环示踪的前提是已知区域降水同位素特征^[14-15]。研究柴达木盆地降水同位素特征有助于深入认识区域降水形成机制和水文循环特征。

柴达木盆地降水同位素特征的早期研究主要依托于青藏高原降水稳定同位素监测计划(Tibetan network

基金项目: 国家自然科学基金项目(42101021, U2240210)

作者简介: 王涛(1990—), 男, 副教授, 博士, 主要从事同位素示踪研究。E-mail: wangtao77@hhu.edu.cn

引用本文: 王涛, 李其发, 张茜, 等. 基于多源数据的柴达木盆地降水同位素特征研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2025, 53(2): 29-38.

WANG Tao, LI Qifa, ZHANG Xi, et al. Study on isotope characteristics of precipitation in Qaidam Basin based on multi-source data[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2025, 53(2): 29-38.

for isotopes in precipitation, TNIP)。基于 TNIP 提供的数据,学者们研究了德令哈降水 $\delta^{18}\text{O}$ 的时间变化特征,指出德令哈降水同位素存在显著的温度效应,但降水量效应不明显^[16-18]。由于 TNIP 未公布 δD 数据,且仅有德令哈站的数据^[19],因此没有足够的数据用于建立柴达木盆地区域大气降水线(LMWL)、分析降水同位素组成的空间分布特征。后来,学者们在德令哈、诺木洪、格尔木等地进行降水实地采样,测量其同位素组成,在分析降水同位素组成及其时间变化的基础上,建立了这些地区的大气降水线,并探讨了这些地区的水汽来源^[20-22]。然而,由于柴达木盆地区域环境恶劣,因此采样的站点有限,且冬季降水少,难以获得样品,采样时间大都集中在夏季,因而数据的时间序列较短,空间分布有限,无法获取降水同位素组成的年际变化和空间分布特征。

随着计算机技术的快速发展,降水同位素分馏过程被嵌入全球大气环流模型(GCMs)中^[23]。为确保 GCMs 数据的可靠性和准确性,多个国家共同组建了稳定同位素相互比较小组(SWING),用来评估和比较嵌入氢氧同位素的大气环流模型^[24-29]。氢氧稳定同位素景观图谱是另一种新兴技术:Wang 等^[30]基于我国降水同位素数据库和模糊聚类方法建立了月降水同位素景观图谱(C-Isoscape),为我国各地提供了月尺度的降水同位素数据,但每个站点只有 12 个数据(每月一个数据),无法用于分析降水同位素组成的年际变化特征。

上述研究对分析柴达木盆地降水同位素组成特征具有重要意义,但受环境条件影响,基于单一来源数据分析柴达木盆地降水同位素组成的时空变化时,存在一定局限性,因此本文综合利用 TNIP 数据、文献数据、C-Isoscape 数据、GCMs 数据等多源数据,在对比分析和互补验证的基础上,选取柴达木盆地 9 个气象站,结合相应的温度和降水量数据,对盆地降水同位素组成的空间分布特征、月变化和年际变化特征、温度和降水量效应进行分析,以期利用同位素示踪区域水汽输送和水文循环过程提供参考,同时也为其他观测资料匮乏区域的降水同位素组成特征研究提供一种新思路。

1 研究区概况与研究数据

1.1 研究区概况

柴达木盆地位于青藏高原东北部,地势相对平坦,四周被昆仑山脉、祁连山脉、阿尔金山脉环绕,平均海拔约 2800 m,总面积约 2.56 万 km^2 ,是中国三大内陆盆地之一。由于地处高海拔内陆,柴达木盆地具有典型的高原大陆性气候,干旱少雨。盆地气温较低,多年平均气温为 3.5℃,昼夜温差大,年降水量较少,在 16~190 mm 之间,且主要集中在夏季,大部分为短暂且强烈的降水^[31]。河流多为季节性或间歇性,主要依赖雨水和冰川融水,地表水资源短缺^[32]。

选取柴达木盆地 9 个气象站作为研究站点,给出了各气象站的月均气温与降水量(图 1)。这些气象站均匀分布在盆地四周,其中茫崖、冷湖、小灶火位于盆地西部,大柴旦、格尔木、诺木洪位于盆地中部,德令哈、乌兰、都兰位于盆地东部。

1.2 研究数据

本文主要采用 4 组来源的降水同位素数据:①TNIP 提供的降水 $\delta^{18}\text{O}$ 数据,包括德令哈 1992—2006 年的月 $\delta^{18}\text{O}$,以下称为 TNIP 数据,来自国家青藏高原科学数据中心(<https://data.tpdc.ac.cn/>);②收集已发表文献中实测的降水 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 数据,包括德令哈 68 组^[22,33]、格尔木 80 组^[20,22,34],以下称为文献数据;③由全国月降水同位素景观图谱插值获得的月 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD ^[30],每个站点各 12 组,以下称为 C-Isoscape 数据;④GCMs 模拟得到的降水同位素数据,包括 9 个气象站 1979—2007 年的月 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 数据(CAM2 截至 2003 年, HadAM3 截至 2001 年),以下称为 GCMs 数据,下载自美国国家航空航天局(NASA)的官方网站(<https://data.giss.nasa.gov/swing2/>)。

相应的气温和降水量数据来源于美国国家海洋和大气管理局(NOAA)提供的全球开放气象数据(<https://www.nccl.noaa.gov/maps/daily/>)。从 NOAA 官方网站下载了柴达木盆地 9 个气象站 1979—2007 年的日气温和降水量数据,其中部分站点数据有缺失,诺木洪站数据年限为 1979—1997 年,小灶火站数据年限为 1979—2000 年,乌兰站由于数据缺失严重,用茶卡站(茶卡镇隶属于乌兰县)的数据替代,数据年限为 1979—1997 年。

1.3 分析方法

通过对比德令哈站 TNIP 数据和 GCMs 数据的 $\delta^{18}\text{O}$,选取纳什系数(NSE)、线性拟合度(R^2)、拟合斜率

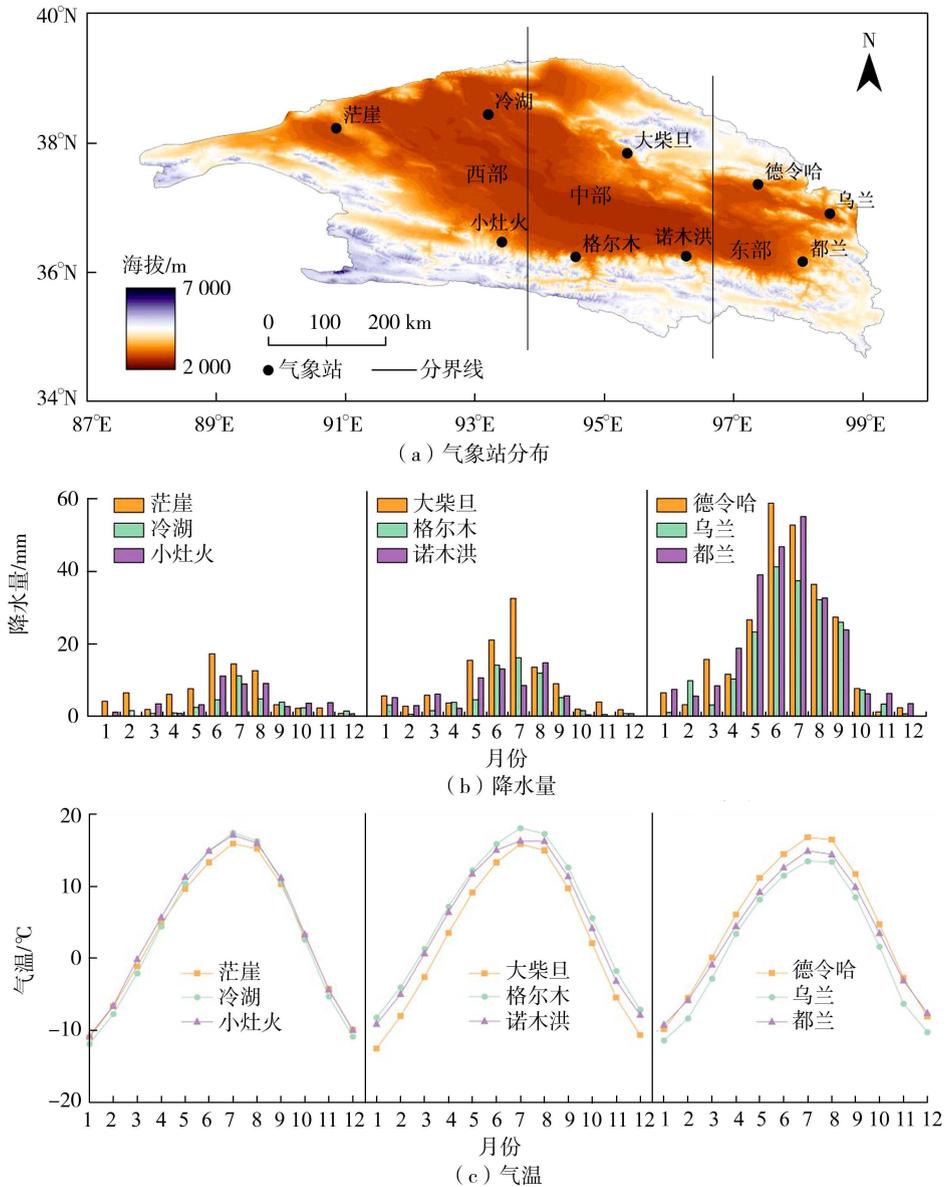


图 1 柴达木盆地气象站分布和各气象站月均降水量、气温

Fig. 1 Distribution of meteorological stations and their monthly mean precipitation as well as air temperature in Qaidam Basin

(K)、相对误差 4 个指标对 SWING 公布的 11 种 GCMs^[23] (CAM2、GISS-E (free)、GISS-E (nudged)、GISS-E (MERRA)、GISS-E (NCEP)、HadAM3、LMDZ (free)、LMDZ (nudged)、MIROC32、isoGSMnew (free)、isoGSMnew (nudged)) 的模拟效果进行评估,进而选择适用于柴达木盆地的 GCMs。NSE 越大表示模拟数据与监测数据的吻合程度越高^[35-36]。

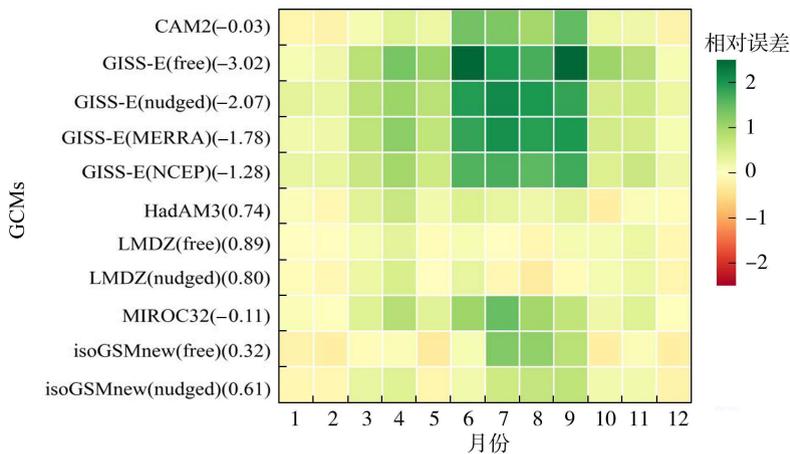
2 GCMs 数据选取

在德令哈将 11 种 GCMs 模拟得到的完整 $\delta^{18}\text{O}$ 数据,称为长序列 GCMs 数据;将长序列 GCMs 数据中每月不同年份的数据看成一组样本,计算降水量加权平均的多年月均 $\delta^{18}\text{O}$,称为月 GCMs 数据。同样,将 TNIP 数据的全部 $\delta^{18}\text{O}$ 数据称为长序列 TNIP 数据;将长序列 TNIP 数据中每月不同年份的数据看成一组样本,计算降水量加权平均的多年月均 $\delta^{18}\text{O}$,称为月 TNIP 数据。分别将 11 种长序列 GCMs 数据与长序列 TNIP 数据进行对比,计算得到 NSE、 R^2 和 K;分别将 11 种月 GCMs 数据与月 TNIP 数据进行对比,计算得到 NSE 和相对误差。通过分析 NSE、 R^2 、K 和相对误差,选出与 TNIP 数据吻合最好的一组 GCMs 数据。

由表 1 可知,LMDZ(nudged)、LMDZ (free) 和 isoGSMnew (nudged) 的 NSE 更接近 1,分别为 0.73、0.64 和

0.42,表明这3种GCMs数据与TNIP数据的吻合程度较好;其他模型的NSE小于0,表明其与TNIP数据严重不符,不具备实际参考价值。LMDZ(nudged)数据的 R^2 为0.73, K 为0.72,表明LMDZ(nudged)数据与TNIP数据之间呈现高度相关关系,变化趋势具有良好的一致性。在长序列尺度上,综合考虑NSE、 R^2 和 K ,LMDZ(nudged)数据是最好的。

由图2可知,所有模型在1月、2月、12月与月TNIP数据的相对误差较小,表现较好,但是在6—9月,CAM2、GISS-E(free)、GISS-E(nudged)、GISS-E(MERRA)、GISS-E(NCEP)与月TNIP数据的相对误差很大,模拟结果严重高估了降水 $\delta^{18}\text{O}$ 。LMDZ(free)、LMDZ(nudged)的表现最好,相对误差分别为 $-0.14 \sim 0.32$ 和 $-0.28 \sim 0.50$ 。LMDZ(free)、LMDZ(nudged)、HadAM3、isoGSMnew(nudged)的NSE值更接近1,分别为0.89、0.80、0.74、0.61,表明这4种模型与月TNIP数据的吻合程度较高。在月尺度上,综合考虑相对误差和NSE,LMDZ(free)的模拟效果最好,其次是LMDZ(nudged)。



注:模型后面括号中数字为月GCMs数据与月TNIP数据之间的NSE

图2 德令哈站降水 $\delta^{18}\text{O}$ 的月GCMs数据与月TNIP数据之间的相对误差

Fig. 2 Relative error between monthly GCMs and TNIP data of precipitation $\delta^{18}\text{O}$ at Delingha station

LMDZ(free)和LMDZ(nudged)属于LMDZ的不同配置,LMDZ(free)为自由模式,仅依靠模型本身的物理参数和初始条件模拟数据,大气运动完全自主演化;LMDZ(nudged)为强迫模式,通过将模型与观测数据进行同化来驱动模拟结果,可以更准确地模拟观测数据的变化趋势和波动^[27]。综合考虑GCMs数据与TNIP数据在长序列和月尺度上的对比结果,最终选取LMDZ(nudged)的降水同位素模拟数据,结合TNIP数据、文献数据和C-Isoscape数据,用于分析柴达木盆地降水同位素特征。

3 降水 $\delta^{18}\text{O}$ 的年内变化特征与大气降水线

基于柴达木盆地9个气象站的LMDZ(nudged)数据、C-Isoscape数据、TNIP数据和文献数据,进行降水量加权平均得到各组数据的月均 $\delta^{18}\text{O}$,其中文献数据由于缺少降水量数据,采用算术平均值。

由图3可知,4组数据降水 $\delta^{18}\text{O}$ 均呈现夏半年高、冬半年低季节变化特征,具有显著的季节效应。将整年分为3个阶段,1—6月降水 $\delta^{18}\text{O}$ 显著上升,7—9月降水 $\delta^{18}\text{O}$ 保持平稳或缓慢减少,10—12月降水 $\delta^{18}\text{O}$ 急剧下降,极大值出现在6月、7月、8月,极小值出现在1月、2月、12月。从空间分布看,各气象站降水 $\delta^{18}\text{O}$ 差异性不大,茫崖为 $-23.35\text{‰} \sim -5.78\text{‰}$,大柴旦为 $-21.06\text{‰} \sim -4.92\text{‰}$,德令哈为 $-21.65\text{‰} \sim -3.25\text{‰}$,冷湖为 $-21.07\text{‰} \sim -2.68\text{‰}$,格尔木为 $-19.13\text{‰} \sim -4.71\text{‰}$,乌兰为 $-19.17\text{‰} \sim -4.44\text{‰}$,小灶火为 $-20.03\text{‰} \sim -4.77\text{‰}$,诺木洪为 $-19.89\text{‰} \sim -4.43\text{‰}$,都兰为 $-19.21\text{‰} \sim -4.42\text{‰}$ 。

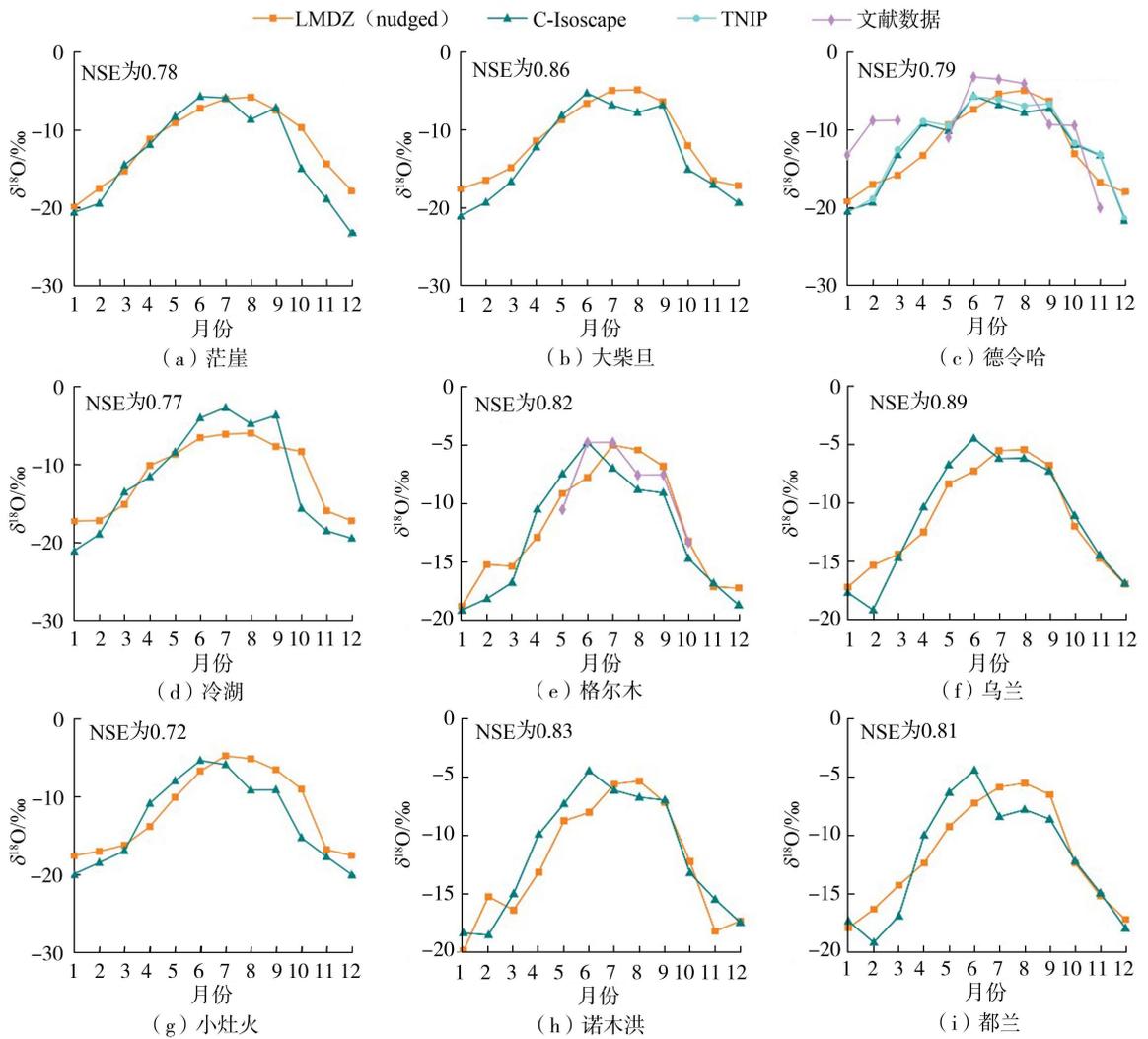


图 3 各气象站降水 $\delta^{18}\text{O}$ 的年内变化

Fig. 3 Monthly changes in precipitation $\delta^{18}\text{O}$ at each meteorological station

不同数据源间降水 $\delta^{18}\text{O}$ 特征存在差异 (图 3): LMDZ (nudged) 数据的极大值出现在 7 月、8 月, C-Isoscape 数据、TNIP 数据、文献数据的极大值出现在 6 月, 这是因为 LMDZ (nudged) 数据在模拟过程中更重视温度对 $\delta^{18}\text{O}$ 的影响, 低估了降水量的影响^[27], 而在实际降水过程中 $\delta^{18}\text{O}$ 同时受到温度和降水量的控制。为进一步对比各数据源之间的差异, 计算了所有气象站 LMDZ (nudged) 数据与 C-Isoscape 数据的 NSE, 其分布范围为 0.72~0.89 (图 3), 表明两组数据之间的吻合程度比较高。德令哈的 LMDZ (nudged) 数据与 TNIP 数据、文献数据间的 NSE 分别为 0.80 和 0.10, 表明前两者之间吻合度较好, 后两者之间存在较大差异。产生较大差异的原因是两者在时间尺度上存在差别, LMDZ (nudged) 数据的时间范围为 1979—2007 年, 文献数据的采样时间为 2010—2020 年, 全球气候变暖使得柴达木盆地的温度逐年升高, 进而导致降水 $\delta^{18}\text{O}$ 呈现逐年增长趋势, 因而文献数据在整体上更加富集^[22,33]。

氢氧稳定同位素之间存在线性关系, 全球大气降水线 (GMWL, $\delta\text{D} = 8\delta^{18}\text{O} + 10$) 反映了全球的平均状况^[37]。由于局部区域水汽来源和气候条件的不同, LMWL 的斜率和截距与 GMWL 存在不同程度的偏差^[38]。基于月尺度的 LMDZ (nudged) 数据和 C-Isoscape 数据, 分别建立了柴达木盆地 9 个气象站的 LMWL (图 4)。LMDZ (nudged) 数据的 LMWL 斜率范围为 7.59~7.93, 截距范围为 2.57~8.96; C-Isoscape 数据的 LMWL 斜率范围为 7.08~8.61, 截距范围为 -1.63~19.10。大多数 LMWL 的斜率和截距均低于 GMWL, 并且斜率在空间分布上呈现自西向东逐渐增加的变化趋势。影响 LMWL 斜率的主要因素有温度和云下二次蒸发^[38], 但是各个气象站温度没有较大差异 (图 1), 因此 LMWL 斜率的变化不是由温度引起的。强烈的云下二次蒸发会引起 LMWL 斜率趋缓, 柴达木盆地气候干旱, 在降水过程中易发生云下二次蒸发现象^[31], 而斜率的空

间变化表明云下二次蒸发在西部地区更加强烈,并且自西向东逐渐减弱。

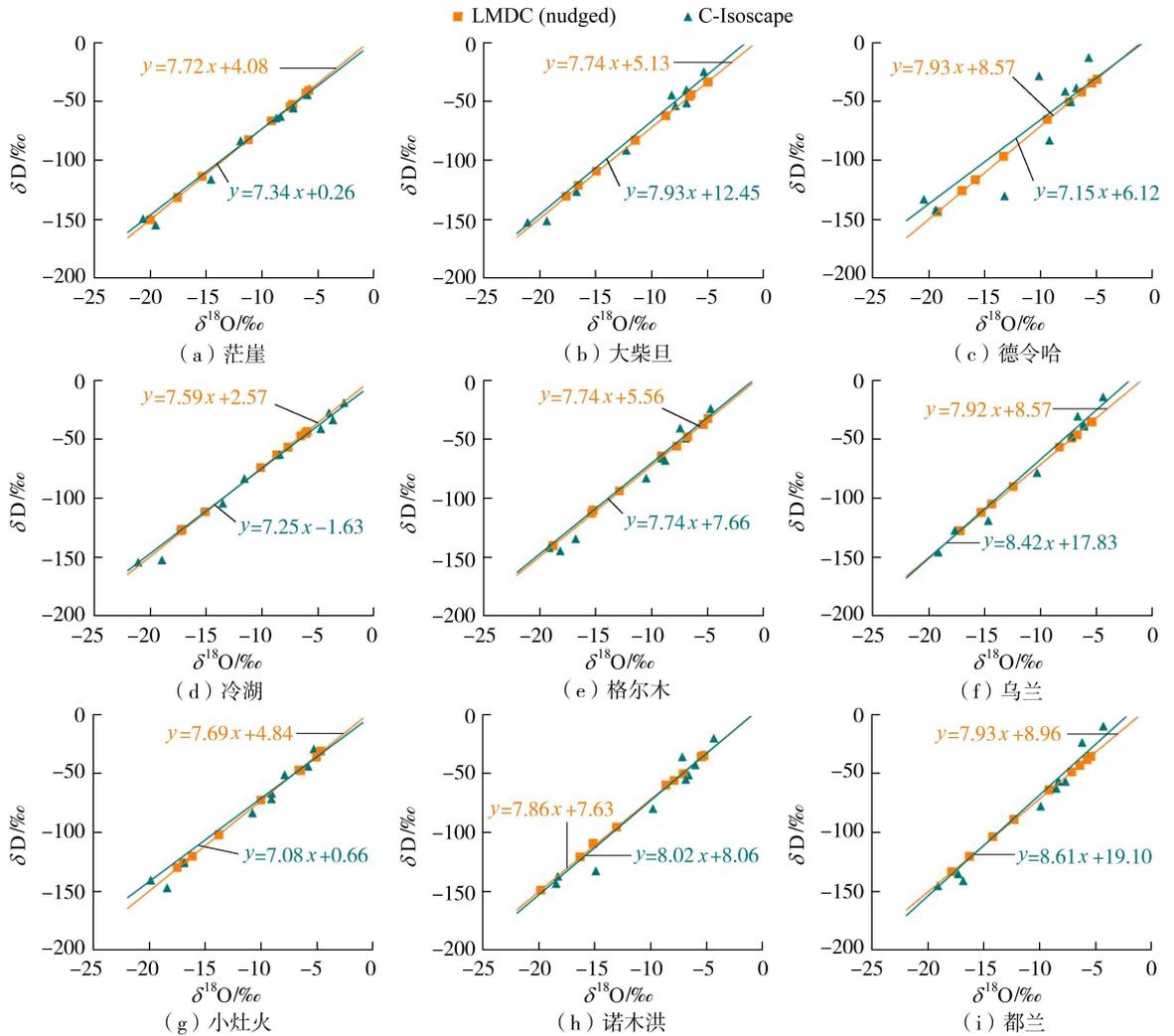


图4 各气象站的当地大气降水线

Fig. 4 Local meteoric water lines at each meteorological station

朱建佳等^[22]利用德令哈2010年6—9月的降水同位素数据建立的LMWL为 $\delta D = 7.83\delta^{18}O + 8.61$; Yang等^[33]利用2017—2020年德令哈、格尔木、鱼卡3个地区的降水采样资料确定的LMWL为 $\delta D = 7.50\delta^{18}O + 6.03$; 饶文波等^[20]基于格尔木2019年6—10月的降水数据建立的山区LMWL为 $\delta D = 7.4\delta^{18}O + 13.2$; 朱谱成等^[34]建立的格尔木降水线方程为 $\delta D = 7.8\delta^{18}O + 7.2$; 刑星等^[21]基于诺木洪2010年6—9月的6组数据获得的LMWL为 $\delta D = 7.019\delta^{18}O - 3.217$ 。其他地区由于缺少数据,并没有学者建立对应的LMWL。本文建立的LMWL与上述学者的研究结果基本一致,仅与刑星等^[21]的差别较大,这可能与刑星等^[21]用以建立LMWL的降水同位素数据较少有关。因此,LMDZ(nudged)数据的同位素值比较接近真实值,能够较好地反映柴达木盆地的降水同位素特征,建立的LMWL可以作为研究同位素水循环的参考线。

4 降水 $\delta^{18}O$ 的年际变化

基于长序列LMDZ(nudged)数据,将各气象站每年不同月份的 $\delta^{18}O$ 数据视作一组样本,计算降水量加权平均的年均 $\delta^{18}O$,并对年均值进行5a滑动平均处理。计算得到各气象站的年均温度和年降水量,同样进行5a滑动平均处理,并将各气象站处理后的年均 $\delta^{18}O$ 、年均温度、年均降水量分别与年数进行线性拟合(图5)。

由图5可知,各气象站的年均 $\delta^{18}O$ 变化范围为 $-10.20\text{‰} \sim -6.41\text{‰}$,其中冷湖的年均 $\delta^{18}O$ 整体最富集($-8.82\text{‰} \sim -6.54\text{‰}$),都兰的整体最贫化($-9.67\text{‰} \sim -7.91\text{‰}$);年均温度变化范围为 $1.05 \sim 6.80\text{℃}$,各气象站差别不大;年降水量变化范围为 $13.00 \sim 363.37\text{mm}$,德令哈、都兰的年降水量整体较高。德令哈与小灶火

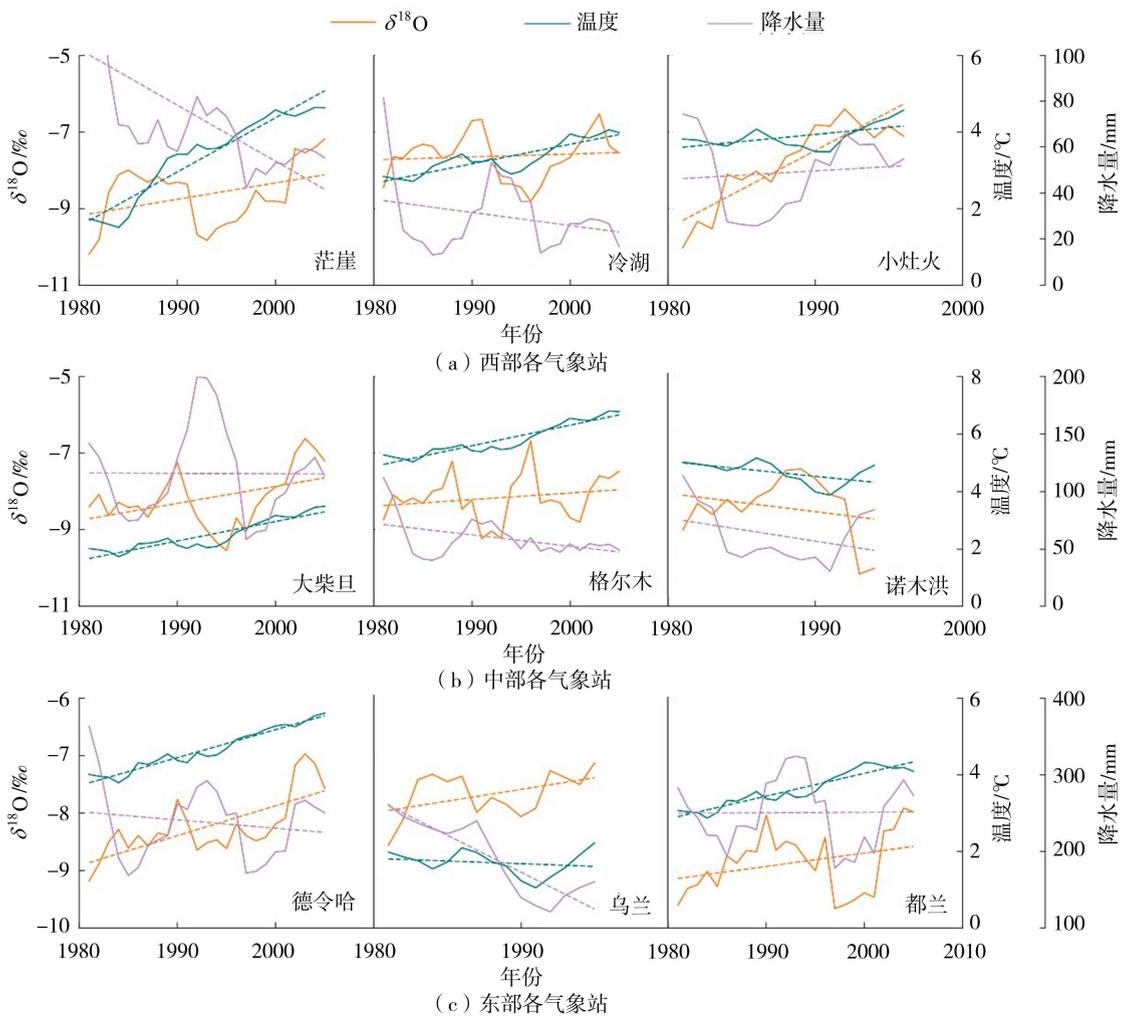


图 5 各气象站降水 $\delta^{18}\text{O}$ 、温度和降水量的年际变化

Fig. 5 Interannual changes in precipitation $\delta^{18}\text{O}$, temperature and precipitation at each meteorological station

的 R^2 分别为 0.51 和 0.79, 年际增长率分别为 0.0522、0.2026‰/a, 表明 $\delta^{18}\text{O}$ 呈现较强的年际增长趋势; 茫崖、大柴旦、乌兰的 R^2 分别为 0.15、0.19、0.21, 年际增长率分别为 0.0426、0.0444、0.0408‰/a, 表明 $\delta^{18}\text{O}$ 呈现较弱的年际增长趋势; 冷湖、格尔木、诺木洪和都兰的 R^2 均小于等于 0.1, 表明 $\delta^{18}\text{O}$ 的年际变化不明显。温度的年际增长趋势在茫崖 ($R^2 = 0.92$)、大柴旦 ($R^2 = 0.83$)、德令哈 ($R^2 = 0.95$)、冷湖 ($R^2 = 0.76$)、格尔木 ($R^2 = 0.88$)、都兰 ($R^2 = 0.89$) 非常明显, 在小灶火 ($R^2 = 0.32$) 较弱, 在乌兰 ($R^2 = 0.04$) 不明显, 而在诺木洪 ($R^2 = 0.3$), 温度呈现较弱的年际减小趋势。降水量的年际降低趋势在乌兰 ($R^2 = 0.79$) 非常明显, 在茫崖 ($R^2 = 0.41$) 较弱, 而在其他气象站, 降水量的年际变化趋势不明显 ($R^2 = 0 \sim 0.19$)。

一般来说, 降水 $\delta^{18}\text{O}$ 与温度之间存在正相关关系, 在年内尺度上表现为季节效应, 在年际尺度上温度是引起降水 $\delta^{18}\text{O}$ 变化的主要因素, 降水 $\delta^{18}\text{O}$ 与降水量之间存在负相关关系^[38]。在 5 个 $\delta^{18}\text{O}$ 年际变化趋势明显的气象站中, 茫崖的 $\delta^{18}\text{O}$ 与温度的年际变化趋势一致 (图 5), 与降水量的年际变化趋势相反, 且温度的变化趋势更加明显, 表明 $\delta^{18}\text{O}$ 的年际变化可能受到温度和降水量的共同影响, 且温度影响占主导; 大柴旦、德令哈和小灶火的 $\delta^{18}\text{O}$ 与温度的年际变化趋势一致, 而降水量年际变化不明显, 表明 $\delta^{18}\text{O}$ 的年际变化主要受温度的影响; 乌兰的温度年际变化不明显, $\delta^{18}\text{O}$ 与降水量的年际变化趋势相反, 表明 $\delta^{18}\text{O}$ 的年际变化主要受降水量的影响。

5 温度和降水量效应

为确定柴达木盆地降水同位素的主要影响因素, 进一步分析了降水同位素的温度效应和降水量效应。基于长序列 LMDZ(nudged) 数据, 对各气象站的 $\delta^{18}\text{O}$ 与温度、 $\delta^{18}\text{O}$ 与降水量、 δD 与温度、 δD 与降水量之间进

行线性拟合,得到线性拟合曲线和 R^2 (表2)。由表2可知, $\delta^{18}\text{O}$ 、 δD 与温度的 R^2 分别在0.84~0.90、0.83~0.89之间, p 均小于0.01,表明 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 与温度之间呈高度相关关系;尤其在茫崖和德令哈, $\delta^{18}\text{O}$ 与温度的 R^2 高达0.9,表明 $\delta^{18}\text{O}$ 与温度呈现显著相关关系,说明柴达木盆地降水同位素的温度效应十分显著,与前人^[20,22,39]的研究结果一致。此外, $\delta^{18}\text{O}$ 与温度的 K (也称作温度系数)在0.43~0.53‰/°C之间,截距在-14.42‰~-12.26‰之间, δD 与温度的 K 在3.18~4.17‰/°C之间,截距在-105.63‰~-88.29‰之间, p 均小于0.01,表明 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 与温度呈正相关性,随着温度的升高而增大。在空间分布上, $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 的温度系数呈现自西向东逐渐升高的变化趋势。温度系数的变化表明在空间分布上温度效应自西向东逐渐增强,这可能是由于西部地区湿度小、风速大。

表2 各气象站降水同位素与温度、降水量的线性拟合关系

Table 2 Linear fitting of hydrogen and oxygen stable isotope compositions of precipitation with temperature and precipitation at each meteorological station

拟合量	站点	与温度线性拟合				与降水量线性拟合				
		拟合关系式	R^2	n	p	拟合关系式	R^2	n	p	
$\delta^{18}\text{O}$	西部	茫崖	$\delta^{18}\text{O}=0.48T-13.24$	0.90	348	<0.01	$\delta^{18}\text{O}=0.05P-11.12$	0.03	236	<0.01
		冷湖	$\delta^{18}\text{O}=0.43T-12.44$	0.88	348	<0.01	$\delta^{18}\text{O}=0.07P-9.89$	0.02	166	0.04
		小灶火	$\delta^{18}\text{O}=0.46T-13.51$	0.85	248	<0.01	$\delta^{18}\text{O}=0.08P-10.79$	0.04	150	0.01
	中部	大柴旦	$\delta^{18}\text{O}=0.47T-12.44$	0.89	348	<0.01	$\delta^{18}\text{O}=0.10P-12.15$	0.13	267	<0.01
		格尔木	$\delta^{18}\text{O}=0.49T-14.42$	0.87	348	<0.01	$\delta^{18}\text{O}=0.10P-11.37$	0.08	247	<0.01
		诺木洪	$\delta^{18}\text{O}=0.49T-14.22$	0.84	216	<0.01	$\delta^{18}\text{O}=0.02P-10.58$	0.01	123	0.30
		德令哈	$\delta^{18}\text{O}=0.53T-14.35$	0.90	348	<0.01	$\delta^{18}\text{O}=0.08P-13.28$	0.22	291	<0.01
	东部	乌兰	$\delta^{18}\text{O}=0.48T-12.26$	0.85	215	<0.01	$\delta^{18}\text{O}=0.12P-13.06$	0.31	163	<0.01
		都兰	$\delta^{18}\text{O}=0.50T-13.21$	0.88	348	<0.01	$\delta^{18}\text{O}=0.08P-13.16$	0.24	326	<0.01
		茫崖	$\delta\text{D}=3.67T-97.71$	0.89	348	<0.01	$\delta\text{D}=0.37P-81.37$	0.02	236	0.02
δD	西部	冷湖	$\delta\text{D}=3.18T-91.55$	0.85	348	<0.01	$\delta\text{D}=0.49P-72.48$	0.02	166	0.05
		小灶火	$\delta\text{D}=3.52T-98.96$	0.83	248	<0.01	$\delta\text{D}=0.61P-78.28$	0.04	150	0.01
		大柴旦	$\delta\text{D}=3.63T-90.77$	0.87	348	<0.01	$\delta\text{D}=0.74P-88.65$	0.13	267	<0.01
	中部	格尔木	$\delta\text{D}=3.79T-105.63$	0.85	348	<0.01	$\delta\text{D}=0.78P-82.17$	0.08	247	<0.01
		诺木洪	$\delta\text{D}=3.85T-103.97$	0.83	216	<0.01	$\delta\text{D}=0.19P-75.30$	0.01	123	0.30
		德令哈	$\delta\text{D}=4.17T-104.91$	0.88	348	<0.01	$\delta\text{D}=0.63P-96.35$	0.21	291	<0.01
		乌兰	$\delta\text{D}=3.76T-88.29$	0.84	215	<0.01	$\delta\text{D}=0.91P-94.46$	0.30	163	<0.01
	东部	都兰	$\delta\text{D}=3.95T-95.48$	0.86	348	<0.01	$\delta\text{D}=0.63P-95.21$	0.24	326	<0.01

注: n 为样本数量, p 为显著性水平, T 为温度, P 为降水量。

降水量是影响降水同位素变化的另一个重要因素,两者之间应该呈现负相关关系^[38]。但柴达木盆地所有气象站中, $\delta^{18}\text{O}$ 与降水量的 R^2 为0.01~0.31, K 为0.02~0.12, δD 与降水量的 R^2 为0.01~0.30, K 为0.19~0.91(表2)。可见, $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 与降水量之间线性相关关系非常弱,且两者呈现正相关,表明柴达木盆地基本不存在降水量效应(如果存在,两者应为负相关关系)。这是因为柴达木盆地属于半干旱地区,单个站点多年平均降水量不足260mm(图1),降水量对降水同位素的影响非常有限。

6 结论

a. 降水 $\delta^{18}\text{O}$ 呈现夏高冬低的季节变化特征;大多数LMWL的斜率和截距低于GMWL,是由云下二次蒸发造成的;降水同位素的温度效应显著,降水量效应不明显,与前人的研究结果相吻合,表明利用多源数据研究柴达木盆地降水同位素特征可行。

b. 德令哈、小灶火、茫崖、大柴旦、乌兰站点的降水 $\delta^{18}\text{O}$ 呈现逐年富集的变化趋势,温度是影响同位素年际变化的重要因素。在空间分布上,各气象站降水同位素组成差异不大,但温度效应和LMWL的斜率都呈现出自西向东逐渐增加的变化趋势。

参考文献:

- [1] ZHANG Yu, TAN Hongbing, CONG Peixin, et al. Isotopic variations in surface waters and groundwater of an extremely arid basin and their responses to climate change[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2023, 27(21): 4019-4038.
- [2] 王振亚, 姚成, 董俊玲, 等. 郑州“7·20”特大暴雨降水特征及其内涝影响[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2022, 50(3): 17-22. (WANG Zhenya, YAO Cheng, DONG Junling, et al. Precipitation characteristic and urban flooding influence of “7·20”

- extreme rainstorm in Zhengzhou[J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2022, 50(3):17-22. (in Chinese))
- [3] 王圣杰,王立伟,张明军. 降水氢氧稳定同位素景观图谱方法与应用[J]. *应用生态学报*, 2023, 34(2):566-576. (WANG Shengjie, WANG Liwei, ZHANG Mingjun. Methodology and application of precipitation isoscapes of stable hydrogen and oxygen isotopes[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2023, 34(2):566-576. (in Chinese))
- [4] 汪集旻,陈建生,陆宝宏,等. 同位素水文学的若干回顾与展望[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2015, 43(5):406-413. (WANG Jiyang, CHEN Jiansheng, LU Baohong, et al. Review and prospect of isotope hydrology[J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2015, 43(5):406-413. (in Chinese))
- [5] WANG Tao, CHEN Jiansheng, ZHANG Chenming, et al. An entropy-based analysis method of precipitation isotopes revealing main moisture transport corridors globally[J]. *Global and Planetary Change*, 2020, 187:103134.
- [6] 王涛,陈建生,严嘉恒,等. 中国降水同位素信息熵时空分布及其水汽输送示踪[J]. *水科学进展*, 2022, 33(4):581-591. (WANG Tao, CHEN Jiansheng, YAN Jiaheng, et al. Spatial and temporal distributions of precipitation isotope information entropy to trace water vapor transport in China[J]. *Advances in Water Science*, 2022, 33(4):581-591. (in Chinese))
- [7] WANG Tao, CHEN Jiansheng, LI Ling. Entropy analysis of stable isotopes in precipitation: tracing the monsoon systems in China[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6(1):30389.
- [8] 王帅,饶文波,金可,等. 阿拉善地区降水同位素特征与水汽来源[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2019, 47(5):411-419. (WANG Shuai, RAO Wenbo, JIN Ke, et al. Hydrogen and oxygen isotopic characteristic and moisture source of precipitation of Alxa Desert Plateau[J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2019, 47(5):411-419. (in Chinese))
- [9] DAR T, RAI N, BHAT M A, et al. Surface water isoscape modeling in the Himalayan region: an alternative for moisture source investigation, hydrograph separation, and paleolatitude estimation [J]. *Water Resources Research*, 2023, 59(6): e2022WR033572.
- [10] 王轶凡,瞿思敏,李代华,等. 小流域降雨径流氢氧同位素特征分析及其对径流分割的指示意义[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2017, 45(4):365-371. (WANG Yifan, QU Simin, LI Daihua, et al. Characteristics of hydrogen and oxygen isotopes in rainfall-runoff in small watershed and their implications for runoff separation [J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2017, 45(4):365-371. (in Chinese))
- [11] 陈建生,韩莉文,马芬艳. 苏北平原隐伏玄武岩地下水研究[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2022, 50(6):1-8. (CHEN Jiansheng, HAN Liwen, MA Fenyang. Study on the concealed basalt groundwater in Subei Plain[J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2022, 50(6):1-8. (in Chinese))
- [12] WANG Tao, CHEN Jiansheng, LI Ping, et al. Natural tracing for concentrated leakage detection in a rockfill dam[J]. *Engineering Geology*, 2019, 249:1-12.
- [13] WANG Tao, CHEN Jiansheng, XU Yi, et al. Isotopes and hydrochemistry of Daihai Lake recharging sources, northern China[J]. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 2017, 312(3):615-629.
- [14] 詹沪成,赵娜,陈建生. 雾水和降水的氢氧稳定同位素差异及其影响因素[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2023, 51(4):10-17. (ZHAN Lucheng, ZHAO Na, CHEN Jiansheng. Hydrogen and oxygen stable isotope difference between fog water and precipitation and influencing factors[J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2023, 51(4):10-17. (in Chinese))
- [15] WANG Shengjie, ZHANG Mingjun, CHEN Fenli, et al. Comparison of GCM-simulated isotopic compositions of precipitation in arid central Asia[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2015, 25(7):771-783.
- [16] 李泽霞,姚檀栋,田立德,等. 德令哈降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 年际变化与水汽输送[J]. *地学前缘*, 2006, 13(5):330-334. (LI Zexia, YAO Tandong, TIAN Lide, et al. Variation of $\delta^{18}\text{O}$ in precipitation in annual timescale with moisture transport in Delingha region [J]. *Earth Science Frontiers*, 2006, 13(5):330-334. (in Chinese))
- [17] 章新平,施雅风,姚檀栋. 青藏高原东北部降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 的变化特征[J]. *中国科学(B辑)*, 1995, 25(5):540-547. (ZHANG Xinping, SHI Yafeng, YAO Tandong. Variation characteristics of $\delta^{18}\text{O}$ in precipitation over the northeastern Tibetan Plateau[J]. *Science in China (Series B)*, 1995, 25(5):540-547. (in Chinese))
- [18] 尹常亮,姚檀栋,田立德,等. 德令哈大气水汽中 $\delta^{18}\text{O}$ 的时间变化特征:以2005年7月~2006年2月为例[J]. *中国科学D辑:地球科学*, 2008, 38(6):723-731. (YIN Changliang, YAO Tandong, TIAN Lide, et al. Temporal variations of $\delta^{18}\text{O}$ of atmospheric water vapor at Delingha[J]. *Scientia Sinica Terrae*, 2008, 38(6):723-731. (in Chinese))
- [19] YAO Tandong, MASSON-DELMOTTE V, GAO Jing, et al. A review of climatic controls on $\delta^{18}\text{O}$ in precipitation over the Tibetan Plateau: observations and simulations[J]. *Reviews of Geophysics*, 2013, 51(4):525-548.
- [20] 饶文波,李焱炜,谭红兵,等. 高寒干旱区降水氢氧稳定同位素组成及其水汽来源:以昆仑山北坡格尔木河流域为例[J]. *水利学报*, 2021, 52(9):1116-1125. (RAO Wenbo, LI Yaowei, TAN Hongbing, et al. Stable hydrogen-oxygen isotope composition and atmospheric moisture sources of precipitation in an arid-alpine region: a case study of the Golmud River Watershed on the

- north slope of the Kunlun Mountains[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2021, 52(9): 1116-1125. (in Chinese))
- [21] 邢星,陈辉,朱建佳,等. 柴达木盆地诺木洪地区5种优势荒漠植物水分来源[J]. *生态学报*, 2014, 34(21): 6277-6286. (XING Xing, CHEN Hui, ZHU Jianjia, et al. Water sources of five dominant desert plant species in Nuomuhong area of Qaidam Basin[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(21): 6277-6286. (in Chinese))
- [22] 朱建佳,陈辉,巩国丽. 柴达木盆地东部降水氢氧同位素特征与水汽来源[J]. *环境科学*, 2015, 36(8): 2784-2790. (ZHU Jianjia, CHEN Hui, GONG Guoli. Hydrogen and oxygen isotopic compositions of precipitation and its water vapor sources in eastern Qaidam Basin[J]. *Environmental Science*, 2015, 36(8): 2784-2790. (in Chinese))
- [23] 章新平,孙治安,关华德,等. 东亚水循环中水稳定同位素的GCM模拟和相互比较[J]. *冰川冻土*, 2011, 33(6): 1274-1285. (ZHANG Xinping, SUN Zhian, GUAN Huade, et al. GCM simulation of stable water isotopes in water cycle and intercomparisons over East Asia[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2011, 33(6): 1274-1285. (in Chinese))
- [24] LEE J E, FUNG I, DEPAOLO D J, et al. Analysis of the global distribution of water isotopes using the NCAR atmospheric general circulation model[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2007, 112(D16): D16306.
- [25] SCHMIDT G A, LEGRANDE A N, HOFFMANN G. Water isotope expressions of intrinsic and forced variability in a coupled ocean-atmosphere model[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2007, 112(D10): D10103.
- [26] TINDALL J C, VALDES P J, SIME L C. Stable water isotopes in HadCM3: isotopic signature of El Niño-southern Oscillation and the tropical amount effect[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2009, 114(D4): D04111.
- [27] RISI C, BONY S, VIMEUX F, et al. Water-stable isotopes in the LMDZ4 general circulation model: model evaluation for present-day and past climates and applications to climatic interpretations of tropical isotopic records[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2010, 115(D12): D12118.
- [28] KURITA N, NOONE D, RISI C, et al. Intraseasonal isotopic variation associated with the Madden-Julian Oscillation[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2011, 116(D24): D24101.
- [29] YOSHIMURA K, KANAMITSU M, NOONE D, et al. Historical isotope simulation using reanalysis atmospheric data[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2008, 113(D19): D19108.
- [30] WANG Shengjie, LEI Shijun, ZHANG Mingjun, et al. Spatial and seasonal isotope variability in precipitation across China: monthly isoscapes based on regionalized fuzzy clustering[J]. *Journal of Climate*, 2022, 35(11): 3411-3425.
- [31] 尹文杰,张梦琳,胡立堂. 柴达木盆地干旱时空变化特征[J]. *干旱区研究*, 2018, 35(2): 387-394. (YIN Wenjie, ZHANG Menglin, HU Litang. Spatiotemporal variation of drought in the Qaidam Basin[J]. *Arid Zone Research*, 2018, 35(2): 387-394. (in Chinese))
- [32] 王洋,魏加华,解宏伟. 基于GRACE的柴达木盆地水储量变化[J]. *南水北调与水利科技*, 2018, 16(1): 75-82. (WANG Yang, WEI Jiahua, XIE Hongwei. The variation of terrestrial water storage in the Qaidam Basin based on GRACE data[J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2018, 16(1): 75-82. (in Chinese))
- [33] YANG Nuan, WANG Guangcai, LIAO Fu, et al. Insights into moisture sources and evolution from groundwater isotopes (^2H , ^{18}O , and ^{14}C) in northeastern Qaidam Basin, Northeast Tibetan Plateau, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 864: 160981.
- [34] 朱谱成,苏小四,张世广,等. 那陵郭勒河冲洪积扇地表水—地下水转化关系[J]. *人民黄河*, 2014, 36(7): 60-64. (ZHU Pucheng, SU Xiaosi, ZHANG Shiguang, et al. Study on the interaction relationship between surface water and groundwater in Nalingguole River alluvial-proluvial fan[J]. *Yellow River*, 2014, 36(7): 60-64. (in Chinese))
- [35] 田焯,谭伟丽,王国庆,等. LSTM变体模型在径流预测中的性能及其可解释性[J]. *水资源保护*, 2023, 39(3): 188-194. (TIAN Ye, TAN Weili, WANG Guoqing, et al. Performance of variant LSTM models in runoff prediction and their interpretability[J]. *Water Resources Protection*, 2023, 39(3): 188-194. (in Chinese))
- [36] 冯平,张立斌,李建柱,等. 目标函数对滦河流域SWAT模型径流模拟不确定性的影响[J]. *水资源保护*, 2023, 39(2): 17-24. (FENG Ping, ZHANG Libin, LI Jianzhu, et al. Influence of objective function on uncertainty of SWAT model runoff simulation in the Luanhe River Basin[J]. *Water Resources Protection*, 2023, 39(2): 17-24. (in Chinese))
- [37] CRAIG H. Isotopic variations in meteoric waters[J]. *Science*, 1961, 133(3465): 1702-1703.
- [38] 顾慰祖,庞忠和,王全九,等. 同位素水文学[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
- [39] 章新平,中尾正义,姚檀栋,等. 青藏高原及其毗邻地区降水中稳定同位素成分的时空变化[J]. *中国科学(D辑)*, 2001, 31(5): 353-361. (ZHANG Xinping, MASAYOSHI N, YAO Tantong, et al. The temporal and spatial variation of the isotope composition in precipitation in the Qinghai-Tibet Plateau and its neighboring areas[J]. *Science in China(Series D)*, 2001, 31(5): 353-361. (in Chinese))