doi:10.3799/dqkx.2026.008

柴达木盆地早渐新世湖相沉积碳氧同位素组成及其古气候意义

吴昊[1]，宋博文*[1,2]¹，季军良[2,3]，张克信[1,2]，王嘉轩[4]，柯学[1,2]

1. 中国地质大学（武汉）地质调查研究院，湖北武汉 430074
2. 中国地质大学（武汉）地质微生物与环境全国重点实验室，湖北武汉 430074
3. 中国地质大学（武汉）地理与信息工程学院，湖北武汉 430074
4. 江西师范大学地理与环境学院，江西南昌 330022

摘　要：青藏高原新生代以来的隆升显著改变了亚洲的构造地貌格局，而且深刻影响了东亚及全球的新生代季风环流和气候演变过程。位于青藏高原北部的柴达木盆地是研究新生代气候环境演化历史的重要窗口。湖相沉积作为连续的、高分辨率的环境记录载体，对区域环境响应十分灵敏，而其中赋存的自生碳酸盐是古湖泊地质历史时期古气候重建研究的重要载体。本文以柴达木盆地北部大红沟剖面上干柴沟组中的湖相泥灰岩为研究对象，利用X射线衍射、扫描电镜及能谱分析确定其矿物组成为石英、方解石、伊利石、斜长石、绿泥石、钾长石等。通过泥灰岩碳氧同位素组成相关性分析（r^2=0.04）以及与区域及全球现代湖泊沉积自生碳酸盐碳氧同位素组成对比，揭示出柴达木古湖在早渐新世（~30.8 Ma）仍然为一开放型淡水湖泊。在此基础上，基于泥灰岩氧同位素组成重建了柴达木古湖早渐新世（~30.8 Ma）时期夏季大气降水的氧同位素值（~-6.2±0.7‰）。该值较柴达木盆地现代夏季大气降水及河水 $\delta^{18}O_{(water\text{-}SMOW)}$ 值高~2.2‰，指示自早渐新世（~30.8 Ma）以来柴达木盆地夏季发生了显著降温，幅度达~6.5 °C。这一降温过程受全球变冷及青藏高原隆升共同驱动，其中全球变冷起到了主导作用。

关键词：柴达木盆地；早渐新世；湖相自生碳酸盐；碳氧同位素；古气候

中图分类号：P597.2　　　　　　**收稿日期：**2025-11-07

Carbon and Oxygen Isotopic Composition of Early Oligocene Lacustrine Sediments in the Qaidam Basin and Their Paleoclimate Significance

Wu Hao[1]，Song Bowen*[1,2]，Ji Junliang[2,3]，Zhang Kexin[1,2]，Wang Jiaxuan[4]，Ke Xue[1,2]

1. *Institute of Geological Survey*，*China University of Geosciences* (*Wuhan*)，*Wuhan* 430074，*China*
2. *State Key Laboratory of Geomicrobiology and Environmental Changes*，*China University of Geosciences* (*Wuhan*)，*Wuhan* 430074，*China*
3. *School of Geography and Information Engineering*，*China University of Geosciences* (*Wuhan*)，*Wuhan* 430074，*China*
4. *School of Geography and environment*，*Jiangxi Normal University*，*Nanchang* 330022，*China*

Abstract: The Cenozoic uplift of the Tibetan Plateau has profoundly reshaped the tectonic geomorphology of Asia and deeply influenced the Cenozoic monsoon circulation and climatic evolution of East Asia and globally. The Qaidam Basin, located in the northern Tibetan Plateau, serves a window into studying Cenozoic climatic and environmental evolution. Lacustrine sediments, as continuous and high-resolution environmental records, sensitively record regional environmental fluctuations. Among these, the authigenic carbonates preserved within the sediments provide key records for reconstructing paleoclimatic histories of ancient lakes. This study focuses on lacustrine marlstones from the

---

[1]**基金项目：**国家自然科学基金项目（42572126，42072141，41702118）和中国地质调查局地质调查项目（DD20221645）联合资助.

作者简介：吴昊（2003—），男，硕士研究生，地质资源与地质工程专业。ORCID: 0009-0007-3000-794X. E-mail: 1424712948@qq.com

通讯作者：宋博文（1985—），男，副教授，硕士生导师，从事古生物学与地层学、沉积学研究。E-mail: bwsong1985@cug.edu.cn

Shangganchaigou Formation in the Dahonggou Section, northern Qaidam Basin. The mineral composition of these marlstones is determined by XRD, SEM and EDS analysis methods, which mainly includes quartz, calcite, illite, plagioclase and chlorite. By examining the correlation between $\delta^{13}C$ and $\delta^{18}O$ values of the marlstones (r^2=0.04) and comparing them with regional and global authigenic carbonates from modern lacustrine sediments, this research reveals that the paleo-Qaidam Lake remains an open freshwater lake during the Early Oligocene (~30.8 Ma). Based on this, the oxygen isotopic composition of summer atmospheric precipitation in the paleo-Qaidam Lake during the Early Oligocene (~30.8 Ma) is reconstructed by using the oxygen isotopic composition of the marlstone(~-6.2±0.7‰). This value is approximately 2.2‰ higher than the modern summer atmospheric precipitation and river water $\delta^{18}O_{(water\text{-}SMOW)}$ values in the Qaidam Basin, indicating the Qaidam Basin has undergone significant cooling since the Early Oligocene (~30.8 Ma), with a magnitude of approximately 6.5 °C. It is proposed that global cooling and the uplift of the Tibetan Plateau cooperate to drive the significant cooling in the Qaidam Basin since the early Oligocene, with global cooling playing a dominant role.

Key Words: Qaidam Basin；Early Oligocene；Lacustrine-authigenic carbonates；Carbon and oxygen isotopes；Paleoclimate

0 引言

印度板块与欧亚板块的碰撞以及随后青藏高原的形成是地球历史上最重要的地质事件之一（Molnar and Tapponnier，1975；钟大赉和丁林，1996；Zhang *et al.*，2010；Ding *et al.*，2022）。青藏高原新生代的显著隆升不仅使亚洲地区的地理地貌及构造格局发生了重大改变，而且对新生代东亚区域及全球古气候的变迁都有显著的影响（Raymo and Ruddiman，1992；李吉均和方小敏，1998；施雅风等，1999；An *et al.*，2001；Guo *et al.*，2002；张培震等，2006；Dupont-Nivet *et al.*，2007；Fang *et al.*，2020，2022；Ding *et al.*，2022）。柴达木盆地位于青藏高原北部，新生代地层序列连续清晰，盆地中的河湖相沉积完整记录了新生代青藏高原北部地区的构造活动历史和古环境演变信息（Fang *et al.*，2007；Miao *et al.*，2011；Song *et al.*，2013，2018；Ji *et al.*，2017；Wang *et al.*，2017，2022；Nie *et al.,* 2020；Sun *et al.*，2020；Cheng *et al.*，2021；Lu *et al.*，2022；Liu *et al.*，2023）。要充分理解柴达木盆地早新生代以来构造隆升与气候之间的耦合关系，选择关键载体尤为关键。作为一个区域的物质交汇点，湖泊在广泛地接受周缘源区的物质供给的同时，其自身较高的沉积速率使其在较短时间内就能记录丰富的沉积信息（汪品先和刘传联，1993；沈吉，2009；金章东，2011），从而使得连续的、高分辨率的湖相沉积对区域环境响应十分灵敏，而其中赋存的自生碳酸盐岩更是古湖泊地质历史时期古气候和古地理重建研究的重要载体（刘传联，1998；Dettman *et al.*，2003；吴珍汉等，2007；伊海生等，2007；Kent-Corson *et al.*，2009；蓝江湖等，2013；Han *et al.*，2014；张成君等，2016；鹿化煜等，2018；Yang *et al.*，2022；Zhang *et al.*，2024）。

基于此，本研究以柴达木盆地北部大红沟剖面上干柴沟组中的湖相泥灰岩为研究对象，利用 X 射线衍射、扫描电镜及能谱分析确定其矿物组成，并开展碳氧稳定同位素分析研究。通过泥灰岩碳氧同位素组成相关性分析以及与区域碳酸盐岩基岩、现代湖泊沉积自生碳酸盐碳氧同位素组成的对比研究，以揭示柴达木古湖在早渐新世时期的古水文特征，进而探讨柴达木盆地自早渐新世以来古气候变迁过程及其驱动机制。

1 区域地质背景

1.1 区域地质概况

柴达木盆地位于青藏高原北部，是该区最大的陆相沉积盆地（图 1a）。新生代以来受印度板块与欧亚板块碰撞的远程效应影响，柴达木盆地在周缘三大主控断裂带即阿尔金断裂、东昆仑断裂及祁连山-柴北缘断

裂控制下发生显著沉降，接受了巨厚的新生代沉积，盆-山耦合效应十分显著（Yin *et al.*，2008；Cheng *et al.*，2021；Zhang *et al.*，2025）。现今的柴达木盆地是亚洲内陆地区最为干旱的地区之一，其年平均气温为~4 ℃，大部分地区年均降雨量小于 100 mm（Zeng *et al.*, 2024）。

依据地层岩性、接触关系、古生物化石组合、磁性地层学等特征，柴达木盆地新生代地层序列由老到新依次为：路乐河组（E_2^1l）、下干柴沟组（E_2^2xg）、上干柴沟组（$E_3N_1^1sg$）、下油砂山组（N_1^2xy）、上油砂山组（N_1^3sy）、狮子沟组（N_1^3-sh）和七个泉组（$Q_{1\text{-}2}q$）（青海省地质矿产局，1991；Fang *et al.*，2007，2019；Yin *et al.*，2008；Lu and Xiong，2009；Zhang *et al.*，2010；Zhuang *et al.*，2011a；Chang *et al.*，2015；Ji *et al.*，2017；Cheng *et al.*，2021）。需要指出的是，近年来研究者通过对柴达木盆地北部地层开展高精度磁性地层学研究，将路乐河组沉积的起始年龄限定在~30 Ma 或者~20.5 Ma（Wang *et al.*，2017，2022；Nie *et al.*，2020），这与之前~52 Ma 的认识相差甚大，从而造成了柴达木盆地新生代地层“传统年龄模型”与“新年龄模型”的争议（Cheng *et al.*，2021；Lu *et al.*, 2022；Wang *et al.*，2022；傅志明等，2025；宋博文等，2025）。而最近学者们开展的碳酸盐岩 U-Pb 定年结果对柴达木盆地新生代地层年代格架依旧存在不同认识（Ge *et al.*，2025；Zeng *et al.*，2025）。考虑到路乐河组初始沉积年龄偏老的“传统年龄模型”与通过地震资料、生长地层和热年代学等地质证据得到的盆地内变形历史更为吻合（Cheng *et al.*，2021），同时大红沟剖面轮藻化石生物地层学研究结果与先前对大红沟剖面开展的高精度磁性地层学年龄格架相一致（Xing *et al.*，2023），特别是最近有学者在柴达木盆地北部红沟剖面路乐河组地层中获得了 45.0 ± 2.8 Ma 的火山凝灰质砂岩最年轻锆石年龄（Zeng *et al.*, 2025），本研究依旧采用柴达木盆地新生代地层“传统年龄模型”。

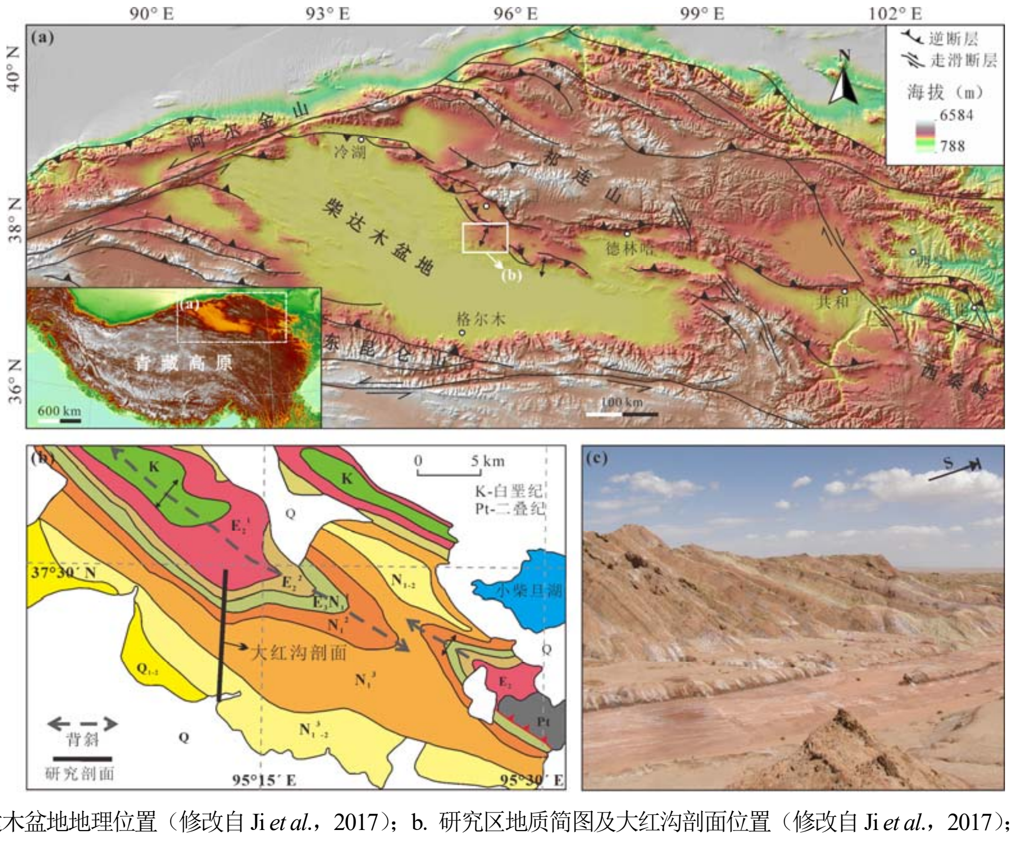

图 1　a. 柴达木盆地地理位置（修改自 Ji *et al.*，2017）；b. 研究区地质简图及大红沟剖面位置（修改自 Ji *et al.*，2017）；c. 大红沟剖面下段地层野外露头

Fig.1 a. Geographical location of the Qaidam Basin (modified after Ji et al., 2017); b. The simplified geologic map of the study area and location of the Dahonggou section (modified after Ji et al., 2017); c. Field outcrop of the stratum in the lower member of the Dahonggou section

1.2 研究层位及地层时代限定

大红沟剖面（地理坐标：37°29′11″N，95°12′42″E）位于柴达木盆地北部，大红沟背斜南翼（图 1b），出露的地层自老到新依次为路乐河组、下干柴沟组、上干柴沟组、下油砂山组、上油砂山组和狮子沟组。剖面中上干柴沟组岩性以灰绿色—紫红色细砂岩、泥质粉砂岩和泥岩为主，含有少量薄层石膏、泥灰岩夹层。其中砂岩可见平行层理、板状及楔状交错层理、滑塌构造发育，泥岩、泥质粉砂岩则发育水平层理（图 2），为典型的湖泊三角洲-浅湖相沉积（Song *et al.*，2013；Ji *et al.*，2017）。此外，先前在大红沟剖面上干柴沟组下段 135 层湖相地层中发现了大量保存完好的植物大化石（Song *et al.*，2020）。

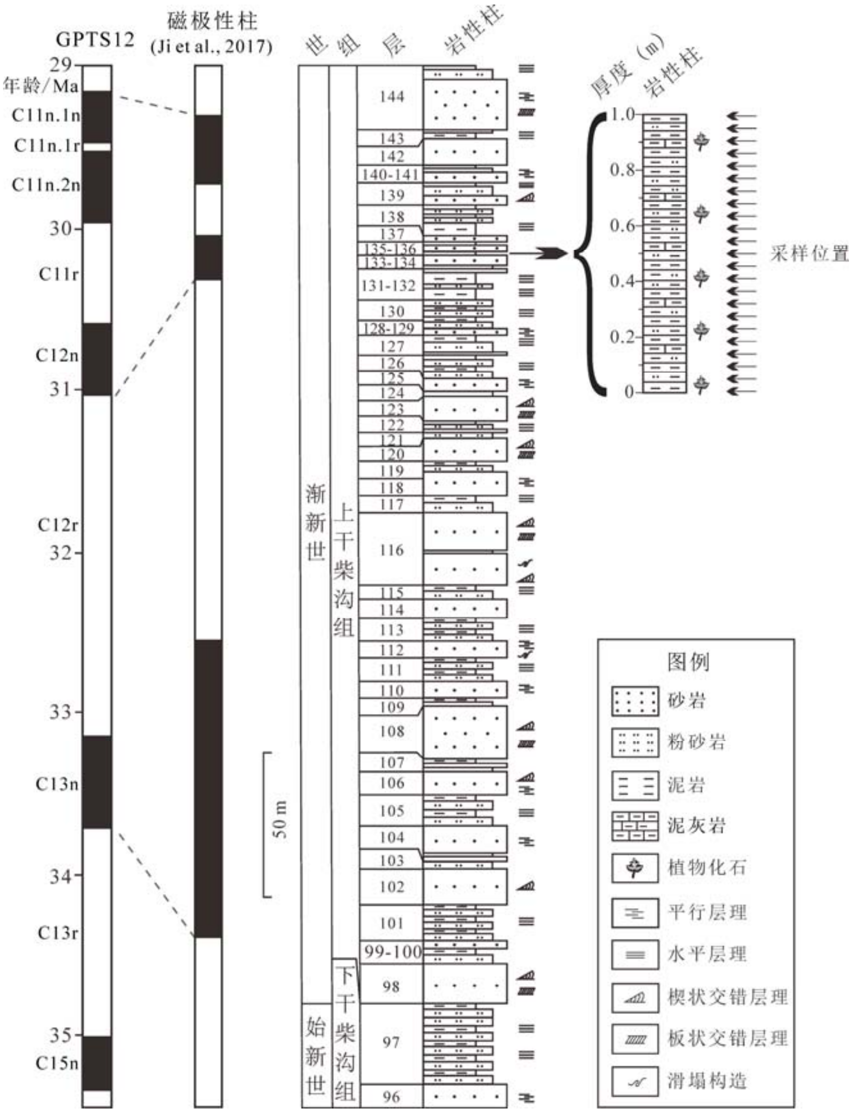

图 2　柴达木盆地大红沟剖面上干柴沟组下段年代地层框架与本次采样位置（修改自 Song *et al.*，2020）

Fig.2 Chronostratigraphic framework of the lower member of the Shangganchaigou Formation of the Dahonggou section, Qaidam Basin, showing the location of those study samples (modified after Song *et al.*, 2020)

本项目组先前已经对大红沟剖面河湖相地层开展了高精度磁性地层学研究，将上干柴沟组地层时代限定为渐新世—中新世早期（34.2~19.5Ma）（Ji *et al.*，2017）；基于内插法，将植物大化石的产出层位，即本次研究的泥灰岩样品采样层位的地质年代限定为~30.8Ma（图2，Song *et al.*，2020）。

2 样品采集和室内分析

本次研究的泥灰岩样品均采自大红沟剖面上干柴沟组 135 层产植物大化石层位（图 2）。野外采样时选择新鲜、未经风化的岩石样品，共计 23 件。

2.1 X 射线衍射（XRD）和扫描电镜（SEM）分析

选择新鲜样品，经过前处理之后使用荷兰 X’Pert PRO DY2198 型 X 射线粉晶衍射仪进行检测，设置 Ni 片滤波，X 光管、CuKα 辐射电压、电流分别为 kV 40，mA 40。扫描速率 0.02°2θ/s，分辨率设置为 0.02°2θ，在 3°~65°2θ 范围内进行扫描。此外，还选择典型样品，使用配备 EDAX 能量色散谱仪（EDS）系统的 FEI Apero S 扫描电子显微镜（SEM）进行照相分析。SEM 图像在 20kv 的加速电压、10 的光斑尺寸、约 135 μA 的发射电流和 10mm 的工作距离下获得。XRD 分析和 SEM 分析均在中国地质大学（武汉）地质过程与成矿预测全国重点实验室进行。

2.2 碳氧同位素分析

首先在无污染环境下将新鲜样品自然风干。接着去除与空气接触的部分，取样品 0.2~0.5 g，使用玛瑙研钵研磨至小于 80 目。挑取 200~400 μg 粉末样品置于 10 mL 的顶空反应瓶中，盖紧瓶盖，放置于 72℃恒温反应器中。由 Gasbench 自动完成加酸、CO_2 气体制备、分离和采集步骤、最后将 CO_2 气体输入 Gasbench II—MAT253 稳定同位素质谱仪进行碳、氧同位素测定。测样分析结果以 VPDB 为标准，标样为 GBW04416 和 GBW04417，测试结果 $\delta^{13}C$ 误差优于±0.1‰，$\delta^{18}O$ 误差优于±0.2‰。碳氧稳定同位素分析在中国地质大学（武汉）地质微生物与环境全国重点实验室完成。

3 实验结果

3.1 XRD 和 SEM 分析

如表 1 和图 3 所示，XRD 分析表明大红沟剖面上干柴沟组泥灰岩矿物组成主要为石英（36.14%~19.26%）、方解石（36.82%~7.06%）、伊利石（33.04%~15.01%）和斜长石（28.36%~9.33%），其次为绿泥石（13.45%~6.41%）和钾长石（16.48%~0%）。其中碳酸盐矿物几乎都为方解石，仅在 1 个样品（135-17）中可见微量的白云石。蒸发岩类矿物含量同样非常低，仅在 2 个样品（135-7、135-22）中发现有低含量的石盐产出。而在扫描电镜下，形态大小不一的黏土矿物，如伊利石，呈片状分布（图 4a），而半自形方解石则呈块状围绕在石英周围生长发育（图 4c）。同时 X 射线能谱分析（EDS）显示泥灰岩样品中方解石中的 Mg 含量均很低，为低镁方解石（图 4b，d-f）。

表 1 柴达木盆地大红沟剖面上干柴沟组泥灰岩矿物组成（%）XRD 分析结果

Table.1 Mineral composition (%) of the study marlstone in the Shangganchaigou Formation, Dahonggou section, Qaidam Basin

样品	矿物含量（%）							
编号	石英	钾长石	斜长石	方解石	白云石	绿泥石	伊利石	石盐
*135-10	21.45	2.54	18.29	25.01	—	9.43	23.27	—
135-2	28.21	2.28	28.63	10.91	—	9.10	20.88	—
135-3	24.68	—	17.00	28.91	—	8.89	20.43	—

样品编号	矿物含量（%）							
	石英	钾长石	斜长石	方解石	白云石	绿泥石	伊利石	石盐
135-4	36.14	—	20.12	10.61	—	10.41	22.71	—
*135-50	29.07	10.20	12.45	20.74	—	8.39	19.15	—
135-6	23.80	—	15.30	27.37	—	10.45	23.08	—
135-7	30.46	2.90	24.37	10.13	—	10.30	20.98	0.86
*135-80	25.51	—	18.16	24.01	—	8.70	23.62	—
135-9	28.88	—	25.32	7.75	—	12.62	25.43	—
135-10	29.44	3.55	16.31	21.70	—	10.18	18.82	—
135-11	23.06	2.45	20.94	7.06	—	13.45	33.04	—
*135-12	22.43	1.81	13.43	34.24	—	8.06	20.03	—
135-13	24.93	4.23	12.53	22.73	—	9.43	26.16	—
135-14	20.50	4.74	16.30	26.05	—	10.55	21.87	—
*135-15	19.26	—	17.37	26.99	—	9.18	27.20	—
135-16	31.75	2.80	16.68	12.13	—	11.01	25.63	—
*135-17	25.40	3.72	9.33	19.31	2.54	10.95	28.75	—
135-18	28.42	3.06	26.52	10.78	—	9.52	21.71	—
135-19	33.59	16.48	17.75	7.95	—	6.41	17.82	—
*135-20	30.35	—	13.85	20.46	—	12.98	22.37	—
135-21	25.55	—	19.78	24.22	—	9.38	21.07	—
135-22	27.95	—	26.68	18.84	—	7.75	16.87	1.92
*135-23	23.48	3.75	13.07	36.82	—	7.88	15.01	—

注：表中带“*”的为具代表性的典型泥灰岩样品，其 XRD 分析图见图 3.

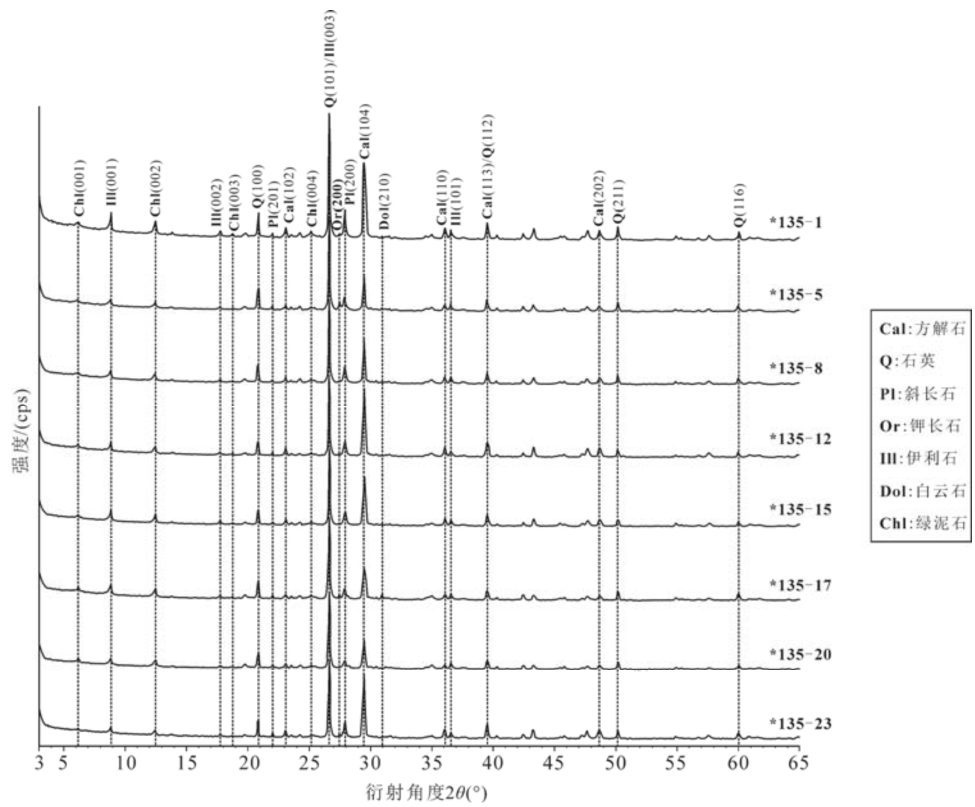

图 3　柴达木盆地大红沟剖面上干柴沟组典型泥灰岩样品 XRD 分析图

Fig.3　XRD pattern of typical marlstone samples in the Shangganchaigou Formation, Dahonggou section, Qaidam Basin

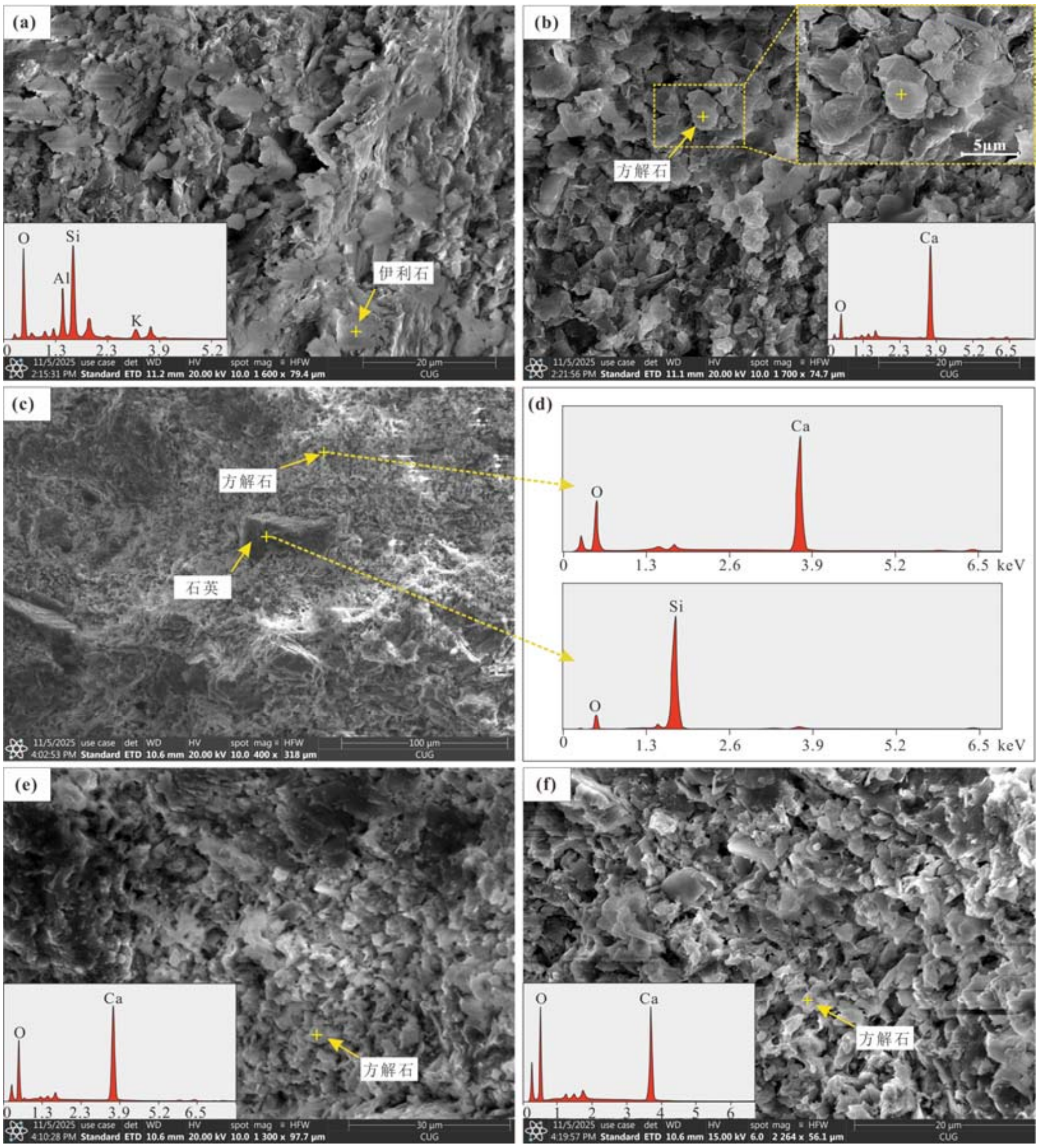

图 4 柴达木盆地大红沟剖面上干柴沟组典型泥灰岩样品扫描电镜（SEM）照相和能谱（EDS）分析

（a）薄片状伊利石及其 EDS 图解，样品号 135-7，扫描电镜；（b）半自形方解石及其 EDS 图解，样品号 135-7，扫描电镜；（c-d）围绕在石英周围生长的半自形方解石及其 EDS 图解，样品号 135-20，扫描电镜；（e-f）半自形方解石及其 EDS 图解，样品号 135-20，扫描电镜.

Fig.4 SEM (Scanning Electron Microscopy) imaging and EDS (Energy Dispersive Spectroscopy) analysis of typical marlstone samples in the Shangganchaigou Formation, Dahonggou section, Qaidam Basin

(a) Flaky clay minerals and EDS diagram, illite, sample 135-7, SEM; (b) Semi-idiomorphic calcite and EDS diagram, calcite, sample 135-7, SEM; (c-d) Semi-idiomorphic calcite growing around quartz and EDS diagram, sample 135-20, SEM; (e-f) Semi-idiomorphic calcite and EDS diagram, sample 135-20, SEM

3.2 碳氧同位素分析

本次采自大红沟剖面上干柴沟组的泥灰岩样品的碳氧稳定同位素测定结果如表 2 所示，δ^{13}C 值为-3.20‰~-6.27‰，平均值为-4.57±0.8‰；δ^{18}O 值为-7.28‰~ -10.42‰，平均值为-8.56±0.7‰。

表 2 柴达木盆地大红沟剖面上干柴沟组泥灰岩 $\delta^{18}O_{carb}$ 和 $\delta^{13}C_{carb}$ 测试结果

Table.2 $\delta^{18}O_{carb}$ and $\delta^{13}C_{carb}$ values of marlstone in the Shangganchaigou Formation, Dahonggou section, Qaidam Basin

样品编号	$\delta^{13}C_{VPDB}$（‰）	$\delta^{18}O_{VPDB}$（‰）
135-1	-4.95	-8.34
135-2	-3.87	-9.64
135-3	-4.70	-8.32
135-4	-3.81	-8.95
135-5	-5.16	-8.74
135-6	-5.24	-8.64
135-7	-4.03	-10.42
135-8	-5.17	-8.50
135-9	-4.38	-8.97
135-10	-5.80	-8.79
135-11	-4.19	-8.71
135-12	-5.96	-9.13
135-13	-4.70	-8.14
135-14	-4.33	-7.83
135-15	-5.26	-8.36
135-16	-3.28	-7.28
135-17	-5.07	-7.97
135-18	-3.52	-7.74
135-19	-3.20	-9.06
135-20	-4.26	-7.81
135-21	-4.15	-8.26
135-22	-3.72	-7.92
135-23	-6.27	-9.40
平均值	-4.57±0.8‰	-8.56±0.7‰

4 讨论

4.1 上干柴沟组泥灰岩中碳酸盐的来源

湖泊沉积物中的碳酸盐主要包括自生碳酸盐与碎屑（外源）碳酸盐两部分：自生碳酸盐是湖泊通过无机沉淀、生物活动（包括生物诱发和生物直接成因）作用从湖泊表层沉淀形成的碳酸盐；碎屑碳酸盐则是湖泊流域内的碳酸盐岩经风化、剥蚀，再由搬运介质（如地表径流、风等）直接搬运入湖沉淀而成（汪品先和刘传联，1993；兰敏文等，2022）。在利用碳酸盐岩碳氧同位素重建地质历史时期古气候时，由于碎屑碳酸盐的形成不受湖泊环境控制，因此不具有气候指示意义，反而会干扰古气候的重建（蓝江湖等，2013）；而直接受控于湖泊环境变化的自生碳酸盐才具有气候指示意义。

本次研究的大红沟剖面上干柴沟组泥灰岩中的碳酸盐（方解石）主要为自生成因，证据如下：1）泥灰岩样品的采样层位普遍发育水平层理，沉积环境为稳定的静水环境，水动力条件弱，十分有利于自生碳酸盐（方解石）的沉淀（Leng and Marshall，2004；兰敏文等，2022）；2）将泥灰岩样品的碳氧同位素组成与源区即柴达木盆地周缘造山带中碳酸盐岩基岩（灰岩和白云岩）的碳氧同位素组成对比（Han *et al.*，2014；Song *et al.*，2018），显示它们的碳氧同位素组成差异显著（图 5），表明上述泥灰岩样品中的碳酸盐（方解石）主要为自生成因，几乎没有受到源区碳酸盐岩基岩碎屑的混入影响；3）先前学者们对柴达木盆地新生代地层开展的岩性组成和碳氧同位素研究也表明柴达木盆地新生代沉积中的碳酸盐矿物主要为自生成因

（Han *et al.*，2014；Zhang *et al.*，2024），且受后期成岩作用的影响微弱（Kent-Corson *et al.*，2009；Zhuang *et al.*，2011b；Song *et al.*，2018）。

综上所述，大红沟剖面上干柴沟湖相泥灰岩样品中的碳酸盐（方解石）主要为自生成因，且受后期成岩作用影响甚小，其碳氧同位素组成主要受控于其发生初始沉淀时柴达木古湖湖水的碳氧同位素组成，从而保存了早渐新世柴达木古湖湖水的原始碳氧同位素信息。

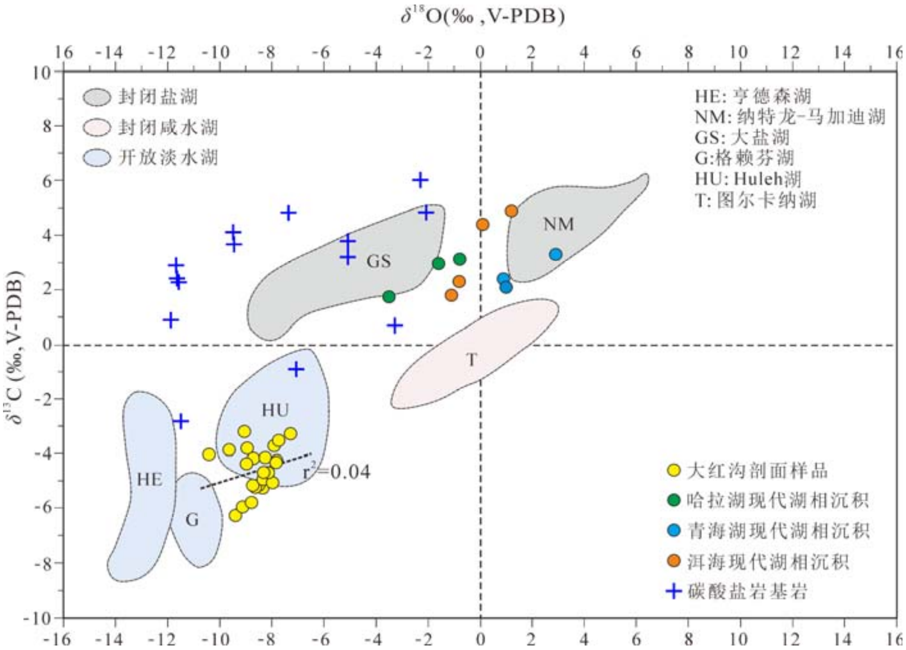

图 5　大红沟剖面上干柴沟组湖相泥灰岩碳氧同位素组成与区域及全球对比

Fig.5　Carbon and oxygen isotope composition of lacustrine marlstone from the Shangganchaigou Formation, Dahonggou section, and its regional and global comparison

图中碳氧同位素数据来源：全球不同水文条件下现代湖泊沉积（Talbot，1990；Talbot and Kelts，1990）；青海哈拉湖现代湖泊沉积（马雪洋，2017）；青海青海湖、洱海现代湖泊沉积（Liu *et al.*，2018）；柴达木盆地周边造山带碳酸盐岩基岩（Han *et al.*，2014；Song *et al.*，2018）

4.2　碳氧同位素相关性分析及其古水文指示

在古湖泊学研究中，通过分析湖泊沉积物中自生碳酸盐的碳氧同位素组成，进而分析二者之间的相关性，是判别古湖泊开放封闭程度、湖水盐度高低的一个重要手段（Talbot，1990；Horton *et al.*，2016）。将本次研究的泥灰岩样品的碳氧同位素组成与区域乃至全球其他不同水文条件下的现代湖泊沉积碳氧同位素组成开展对比研究（图 5），显示：1）大红沟剖面上干柴沟组泥灰岩样品的 δ^{13}C 值和 δ^{18}O 值之间相关性非常弱（r^2=0.04）（图 5），表明当时柴达木古湖为一水文条件开放、水体交换活跃、水体滞留时间短的淡水湖泊（Talbot，1990；Leng and Marshall，2004；Horton *et al.*，2016），这与上述通过 XRD 分析揭示的泥灰岩样品中蒸发岩类矿物（白云石和石盐）含量极低的结果一致；2）泥灰岩样品 δ^{13}C 值和 δ^{18}O 值的投点均落入开放的淡水湖泊区间（图 5），与全球其他地区的典型咸水湖泊现代沉积（Talbot，1990）和中国西北地区典型咸水湖现代沉积（青海湖、洱海和哈拉湖，马雪洋，2017；Liu *et al.*，2018）的碳氧同位素组成差异显著（图 5），同样表明早渐新世时期柴达木古湖仍然为一湿润气候背景下的开放型淡水湖泊。Keith 和 Weber（1964）提出了利用碳酸盐岩的 δ^{18}O 和 δ^{13}C 值区分咸水碳酸盐岩和淡水碳酸盐岩的经验公式：$Z=2.048\times(\delta^{13}C+50)+0.498\times(\delta^{18}O+50)$，当 Z 值大于 120 时，为咸水碳酸盐岩；Z 值小于 120 时，为淡水碳酸盐岩。将上干柴沟组泥灰岩样品的 δ^{18}O 和 δ^{13}C 平均值（δ^{18}O=-8.56‰，δ^{13}C=-4.57‰）分别代入该公式，获得

的 *Z* 值为 113.68，同样指示当时的湖泊水体为淡水环境。此外，前人研究表明湖泊中自生方解石中 Mg 的含量也可作为反映湖泊水体盐度的重要指标，低镁方解石通常产出于低盐度的开放湖泊水体中（Müller *et al.*，1972；Mischke *et al.*，2008；张菀漪等，2011）。如上所述，泥灰岩样品 EDS 分析结果显示其中的自生方解石主要为低镁方解石（图 4），进一步支持当时的柴达木古湖仍为低盐度的开放湖泊。

综上，柴达木古湖在早渐新世（~30.8 Ma）仍为一湿润气候背景下的开放型淡水湖泊。这与先前基于同层位产出的植物大化石得到的柴达木盆地早渐新世仍然温暖湿润这一古气候重建结果相一致（Song *et al.*，2020；Han *et al.*，2020；Hou *et al.*，2024）。此外，前人在柴达木盆地北部红柳沟剖面开展的植物叶片蜡质氢同位素（δ^2H）研究也显示早渐新世柴达木古湖表现为气候适宜背景下的湖泊扩张（Wu *et al.*，2021），这与柴达木盆地西部西岔沟剖面记录的柴达木古湖湖平面在上干柴沟组早中期上升到最高点相吻合（宋华颖等，2010）。由于晚始新世-早渐新世中国西部的天山、阿尔金山等大型山脉尚未隆升到现今的海拔高度（Botsyun *et al.*，2019），西风带仍然可以携带来自副特提斯洋的大量的水汽传输进入塔里木盆地（Caves *et al.*，2015；Bougeois *et al.*，2019）和柴达木盆地（Song *et al.*，2020），从而带来充沛的降雨并促使淡水湖泊的扩张。

4.3 泥灰岩氧同位素组成的古气候意义

4.3.1 氧同位素的影响因素

湖相自生碳酸盐氧同位素组成主要受控于湖水氧同位素组成和其发生沉淀时的湖水温度（Leng and Marshall，2004）：湖水氧同位素组成与大气降水、入湖水体的氧同位素组成以及湖水蒸发作用的强弱直接相关（兰敏文等，2022）；湖水温度与湖相自生碳酸盐 δ^{18}O 值呈反比，温度每升高 1°C，自生碳酸盐 δ^{18}O 值约降低 0.24‰（Craig and Gordon，1965）。如上文所述，本次研究的上干柴沟组泥灰岩样品碳氧同位素组成指示早渐新世柴达木古湖仍为一开放型淡水湖泊，在此背景下，蒸发作用对湖水氧同位素值的影响十分微弱；而入湖河流的同位素组分通常由流域内大气降水的同位素组分决定，因此湖水氧同位素组成就接近流域内大气降水的氧同位素组成（Leng and Marshall，2004）。因此，在此背景下，柴达木古湖中自生碳酸盐的 δ^{18}O 值主要受控于当时大气降水的 δ^{18}O 值和湖水温度这两个因素。

此外，由于青藏高原地区来自不同的水汽来源的降水氧同位素组成存在明显差异（Tian *et al.*，2007；Yao *et al.*，2013；Li and Garzione，2017），还需考虑研究区即柴达木盆地早渐新世时期与现今的水汽来源是否存在差异这一因素。而前人的研究已经显示包括柴达木盆地的亚洲内陆地区新生代早期的水汽主要来自西风带的输送（Caves *et al.*，2015），这与柴达木盆地现今仍主体受控于中纬度西风环流是一致的（Yao *et al.*，2013；Chen *et al.*，2019）。

4.3.2 基于氧同位素的古气候重建

先前已经基于大红沟剖面上干柴沟组地层中产出的植物叶片化石重建了柴达木盆地早渐新世(~30.8 Ma）时期的年均温（MAAT）为~11.6°C（Song *et al.*，2020）。Hren 和 Sheldon（2012）通过统计全球 88 个现代湖泊的表层水温记录，建立了现代湖泊季节性表层水温与年均温（MAAT）的转换函数，该转换函数为利用湖泊自生碳酸盐形成温度约束现代和地质历史时期陆地气候提供了方法（Huntington *et al.*，2015；Xiong *et al.*，2020），其中，夏季（6-8 月）湖泊表层水温与年均温的相关性方程为：

$$\mathrm{MAAT}=-0.0055*T_{water}^2+1.476*T_{water}-18.915;\ r^2=0.90\ (\mathrm{MAAT}<12\sim15^\circ\mathrm{C})\quad(1)$$

据此公式（1），将柴达木盆地早渐新世时期的年均温（~11.6°C）代入公式（1），从而获得了柴达木古湖早渐新世时期的夏季表层水温为~22.57°C。考虑到先前学者的研究已经表明现代湖泊中自生碳酸盐主要

在夏季的表层湖水中沉淀形成（Hren *et al.*，2013；Huntington *et al.*，2015；Horton *et al.*，2016），据此基于泥灰岩样品氧同位素组成和柴达木盆地早渐新世夏季表层湖水温度，可以重建当时柴达木古湖湖水的氧同位素组成。

采用 Kim and O’Neil（1997）提出的分馏系数计算公式：

$1000\ln\alpha_{(calcite\text{-}water)}=18.03\ (10^3T^{-1})-32.42$，其中 T 为绝对温度（$T_{绝对温度}=T_{摄氏度}+273.15$）(2)

计算得出~22.57°C条件下方解石和水的分馏系数为 1.02896。

根据分馏系数定义公式：

$$\alpha_{(calcite\text{-}water)}=(1000+\delta^{18}O_{calcite})\ /\ (1000+\delta^{18}O_{water})\quad(3)$$

将上述温度条件下对应的分馏系数和泥灰岩样品中 $\delta^{18}O_{(VPDB)}$ 平均值（-8.56±0.7‰）分别代入公式（3），计算得到~22.57℃条件下柴达木古湖湖水 $\delta^{18}O_{(water\text{-}VPDB)}$ 值为-36.47±0.7‰。

最后，利用 SMOW 和 VPDB 标准之间的转换公式 $\delta^{18}O_{(SMOW)}=1.03091*\delta^{18}O_{(VPDB)}+30.91$（4）得到柴达木古湖早渐新世时期的湖水 $\delta^{18}O_{(water\text{-}SMOW)}$ 值为-6.67±0.7‰。

考虑到自早渐新世以来全球海水 $\delta^{18}O$ 值以及柴达木盆地纬度的变化，还需对该数据结果进行校正。由于全球降温和大陆冰盖的形成，现今地球海洋中海水的氧同位素值相比早渐新世增加了~0.5‰（Zachos *et al*，1994）；前人的研究显示柴达木盆地自早渐新世以来并没有发生显著的纬向移动（Halim *et al.*，2003；Yu *et al.*，2014），这与先前基于 HadCM3L 模型模拟研究得出的柴达木盆地早渐新世古纬度数据（37.47° N）一致（Song *et al.*，2020），因而不再需要进行纬度校正。经过综合校正之后最终获得了早渐新世柴达木盆地夏季大气降水的氧同位素为~-6.2±0.7‰。将最终获得的柴达木盆地早渐新世夏季大气降水 $\delta^{18}O$ 值与该盆地现代夏季大气降水和河水 $\delta^{18}O$ 值-8.4±2.2‰（朱建佳等，2015；朱谱成，2015；Song *et al.*，2018）进行对比（图 6），显示柴达木盆地早渐新世夏季大气降水 $\delta^{18}O_{(water\text{-}SMOW)}$ 值比该盆地现代夏季大气降水和河水 $\delta^{18}O_{(water\text{-}SMOW)}$ 值高~2.2‰（图 6）。

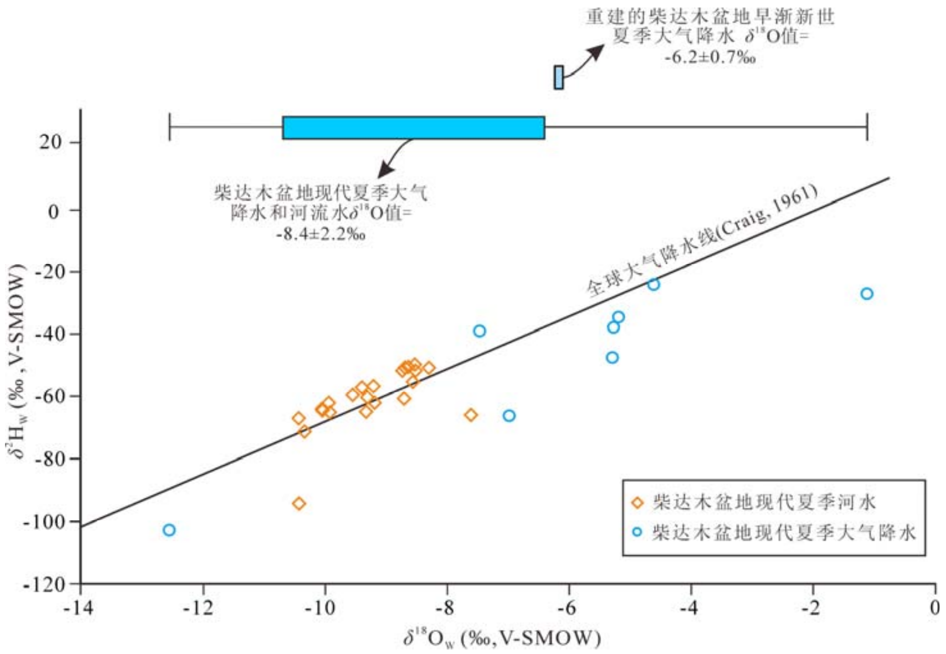

图 6　柴达木盆地现代夏季大气降水和河水氢氧同位素组成及与重建的早渐新世夏季大气降水氧同位素值对比

Fig.6　Modern summer atmospheric precipitation and river water hydrogen and oxygen isotope composition in the Qaidam Basin and their comparison with the reconstructed Early Oligocene summer atmospheric precipitation oxygen isotope values

图中柴达木盆地现代夏季大气降水和河水 δ^{18}O、δ^{2}H 数据来自：朱建佳等（2015）、朱谱成（2015）和 Song *et al.*（2018）；全球大气降水线 δ^{18}O、δ^{2}H 数据来自：Craig（1961）.

除温度引起的方解石与水之间氧同位素组成约-0.24‰/°C的分馏效应外（Craig and Gordon，1965），大气降水的年平均 δ^{18}O 值与地表气温之间还呈显著正相关（~0.58‰/°C）（Rozanski *et al.*，1993）。因此，温度变化对湖相自生碳酸盐 δ^{18}O 值的综合影响为~0.34‰/°C。因此，柴达木盆地现代夏季大气降水和河水 δ^{18}O 值发生的~2.2‰的负偏指示自早渐新世至今柴达木盆地夏季发生了显著降温，降温幅度达~6.5°C，这与基于大红沟剖面上干柴沟组产出的植物叶片化石重建的柴达木盆地自早渐新世（~30.8 Ma）至今的降温幅度（~7.5℃）基本一致（Song *et al.*，2020）。基于深海底栖有孔虫壳体 Mg/Ca 比和氧同位素重建的全球海洋底层海水温度变化记录显示，自早渐新世（30.8 Ma）以来全球底层海水温度降低了~6.2°C（Lear *et al.*，2000；Hansen *et al.*，2008）。而同样基于深海底栖有孔虫壳体氧同位素重建的全球平均温度记录显示，自早渐新世（30.8 Ma）以来全球平均温度降低了~7.5°C（Westerhold *et al.*，2020）。此外，除了海洋温度变化记录，陆相古土壤结核团簇同位素古温度 T（Δ_{47}）记录显示，与柴达木盆地处于相近纬度的美国西部地区自渐新世以来的降温幅度同样达 6-8°C（Fan *et al.*，2014）。由此可知，本次得出的柴达木盆地早渐新世以来夏季的显著降温幅度与地球自早渐新世以来的降温幅度基本保持一致。而前人开展的长时间尺度化学风化记录和湖泊古水文变迁研究同样显示柴达木盆地自早始新世以来的气候演变主要受控于全球变化（Song *et al.*，2013；Guo *et al.*，2018；Fang *et al.*，2019；Ye *et al.*，2020）。与此同时，考虑到青藏高原东北部新近纪以来经历了多期构造隆升事件（Li *et al.*，2014；Miao *et al.*，2022），叠加在全球变冷的气候背景之上，青藏高原隆升对柴达木盆地自早渐新世以来的显著降温同样有重要影响。综上，全球变冷和青藏高原隆升共同驱动了自早渐新世以来柴达木盆地夏季的显著降温，其中全球变冷起到了主导作用。

5 结论

（1）柴达木盆地大红沟剖面上干柴沟组湖相泥灰岩中的碳酸盐（方解石）主要为自生成因，保存了早渐新世柴达木古湖湖水的原始碳氧同位素信息。

（2）通过泥灰岩碳氧同位素组成相关性分析以及与区域及全球现代湖泊沉积自生碳酸盐碳氧同位素组成开展对比研究，揭示出柴达木古湖在早渐新世（~30.8 Ma）仍然为一湿润气候背景下的开放型淡水湖泊。

（3）基于泥灰岩氧同位素组成重建了柴达木盆地早渐新世（~30.8Ma）夏季大气降水的氧同位素值。该值比柴达木盆地现代夏季大气降水和河水 δ^{18}O 值高~2.2‰，指示自早渐新世至今柴达木盆地夏季发生了显著降温，幅度达~6.5℃。全球变冷和青藏高原隆升共同驱动了早渐新世以来柴达木盆地夏季的显著降温，其中全球变冷起到了主导作用。

此外，需要强调的是，尽管本文依旧采用“传统年龄模型”，而目前学界对柴达木盆地新生代年代地层格架依然存在较大争议，希冀今后学界开展更深入系统的研究以取得共识。

致谢：陈锐明、张婕钰、艾可可和姜高磊参加了野外地质调查及样品采集工作；室内样品X射线衍射和扫描电镜工作得到了王朝文副教授和杨琴博士的大力协助；论文撰写中与史恭乐研究员和栗兵帅副教授进行了有益的讨论；两名匿名评审专家审阅并提出了宝贵修改建议，在此一并致以衷心的谢意。

References:

An, Z. S., Kutzbach, J. E., Prell, W. L., et al., 2001. Evolution of Asian Monsoons and Phased Uplift of the Himalaya-Tibetan Plateau since Late Miocene Times. *Nature*, 411: 62-66. https://doi.org/10.1038/35075035

Bougeois, L., Dupont-Nivet, G., de Rafélis, M., et al., 2018. Asian Monsoons and Aridification Response to Paleogene Sea Retreat and Neogene Westerly Shielding Indicated by Seasonality in Paratethys Oysters. *Earth and Planetary Science Letters*, 485: 99-110. https://doi.org/ 10.1016/j.epsl.2017.12.036

Bureau of Geology and Mineral Resources of Qinghai Province, 1991. Regional Geology of Qinghai Province. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).

Caves, J. K., Winnick, M. J., Graham, S. A., et al., 2015. Role of the Westerlies in Central Asia Climate Over the Cenozoic. *Earth and Planetary Science Letters*, 428: 33-43. https://doi.org/10.1016/j.epsl.2015.07.023

Chang, H., Li, L. Y., Qiang, X. K., et al., 2015. Magnetostratigraphy of Cenozoic Deposits in the Western Qaidam Basin and Its Implication for the Surface Uplift of the Northeastern Margin of the Tibetan Plateau. *Earth and Planetary Science Letters*, 430: 271-283. https://doi.org/10.1016/j.epsl.2015.08.029

Chen, F. H., Chen, J. H., Huang, W., et al., 2019. Westerlies Asia and Monsoonal Asia: Spatiotemporal Differences in Climate Change and Possible Mechanisms on Decadal to Sub-Orbital Timescales. *Earth-Science Reviews*, 192: 337-354. https://doi.org/10.1016/ j.earscirev.2019.03.005

Cheng, F., Jolivet, M., Guo, Z. J., et al., 2021. Cenozoic Evolution of the Qaidam Basin and Implications for the Growth of The Northern Tibetan Plateau: A review. *Earth-Science Reviews*, 220 (B1): 103730. https://doi.org/ 10.1016/j.earscirev.2021.103730

Craig, H., 1961. Isotopic Variations in Meteoric Waters. *Science*, 133(3465): 1702-1703. DOI: 10.1126/science.133.3465.1702

Craig, H., Gordon, L., 1965. Deuterium and Oxygen 18 Variations in the Ocean and Marine Atmosphere. Symposium on Marine Geochemistry. In :Tongiorgi, Eds. Stable Isotopes in Oceanographic Studies and Palaeotemperatures. Pisa:Consiglio Nazionale delle Ricerche Laboratorio di Geologia Nucle-are, 1965: 161-182.

Dettman, D. L., Fang, X. M., Garzione, C.N., et al., 2003. Uplift-driven climate change at 12 Ma: a long δ18O record from the NE margin of the Tibetan plateau. *Earth and Planetary Science Letters*, 214 (1-2), 267-277.

Ding, L., Kapp, P., Cai, F. L., et al., 2022. Timing and Mechanisms of Tibetan Plateau Uplift. *Nature Reviews Earth & Environment*, 3(10): 652-667. https://doi.org/10.1038/s43017-022-00318-4

Dupont-Nivet, G., Krijgsman, W., Langereis, C. G., et al., 2007. Tibetan Plateau Aridification Linked to Global Cooling at the Eocene-Oligocene Transition. *Nature*, 445: 635-638. https://doi.org/10.1038/nature05516

Fan, M. J., Hough, B. G., Passey, B. H., 2014. Middle to Late Cenozoic Cooling and High Topography in the Central Rocky Mountains: Constraints from Clumped Isotope Geochemistry. *Earth and Planetary Science Letters*, 408: 35-47. https://doi.org/10.1016/ j.epsl. 2014.09.050

Fang, X. M., Dupont-Nivet, G., Wang, C. S. et al., 2020. Revised Chronology of Central Tibet Uplift (Lunpola Basin). *Science Advances*, 6(50): eaba7298. DOI:10.1126/sciadv.aba7298

Fang, X. M., Galy A, Yang, Y. B., et al., 2019. Paleogene Global Cooling–induced Temperature Feedback on Chemical Weathering, as Recorded in the Northern Tibetan Plateau. *Geology*, 47(10): 992-996. https://doi.org/10.1130/G46422.1

Fang, X. M., Guo, Z. T., Jiang, D. B., et al., 2022. No Monsoon-Dominated Climate in Northern Subtropical Asia before 35Ma. *Global and Planetary Change*, 218: 103970. https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2022.103970

Fang, X. M., Zhang, W. L., Meng, Q. Q., et al., 2007. High-resolution Magnetostratigraphy of the Neogene Huaitoutala Section in the Eastern Qaidam Basin on the NE Tibetan Plateau, Qinghai Province, China and Its Implication on Tectonic Uplift of the NE Tibetan Plateau. *Earth and Planetary Science Letters*, 258(1-2): 293-306. https://doi.org/10.1016/j.epsl.2007.03.042

Fu, Z. M., Li, S. H., Wang, W. Y., et al., 2025. Advances in the chronostratigraphy of the Cenozoic succession in the Qaidam Basin. *Journal of Stratigraphy*. https://doi.org/10.19839/j.cnki.dcxzz.2025.0033

Ge, M. J., Wu, L., Wu, S.T., et al., 2025. Late Oligocene Formation of the Qaidam Basin Revealed by Calcite U-Pb Dating: Insights into the Northward Growth of Tibetan Plateau. *Earth and Planetary Science Letters*, 653: 119208. https://doi.org/10.1016/j.epsl.2025.119208

Guo, P., Liu, C. Y., Huang, L., et al., 2018. Palaeohydrological Evolution of the Late Cenozoic Saline lake in the Qaidam Basin, NE Tibetan Plateau: Tectonic vs. Climatic Control. *Global and Planetary Change*, 165: 44-61. https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2018.03.012

Guo, Z. T., Ruddiman, W. F., Hao, Q. Z., et al., 2002. Onset of Asian Desertification by 22 Myr ago Inferred from Loess Deposits in China. *Nature*, 416(6877): 159-163. https://doi.org/10.1038/416159A

Halim, N., Chen, Y., Cogné, J. P., 2003. A First Palaeomagnetic Study of Jurassic Formations from the Qaidam Basin, Northeastern Tibet, China—Tectonic Tmplications. *Geophysical Journal International*, 153(1): 20-26. https://doi.org/10.1046/j.1365-246X.2003.01860.x

Han, F., Yang, T. L., Zhang, K. X., et al., 2020. Early Oligocene Podocarpium (Leguminosae) from Qaidam Basin and Its Paleoecological and Biogeographical Implications. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 282: 104309. https://doi.org/10.1016/j.revpalbo.2020.104309.

Han, W. X., Fang, X. M., Ye, C. C., et al., 2014. Tibet Forcing Quaternary Stepwise Enhancement of Westerly Jet and Central Asian Aridification: Carbonate Isotope Records from Deep Drilling in the Qaidam Salt Playa, NE Tibet. *Global and Planetary Change*, 116: 68-75. https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2014.02.006

Hansen, J., Sato, M., Kharecha, P., et al., 2008. Target atmospheric CO_2: Where should humanity aim? *The Open Atmospheric Science Journal*, 2: 217-231. https://doi.org/10.48550/arXiv.0804.1126

Horton, T. W., Defliese, W. F., Tripati, A. K., et al., 2016. Evaporation Induced ^{18}O and ^{13}C Enrichment in Lake Systems: A Global Perspective on Hydrologic Balance Effects. *Quaternary Science Reviews*, 131: 365-379. https://doi.org/10.1016/j. quascirev.2015.06.030

Hou, Y. F., Song, B. W., Li, X. C., et al., 2024. First Record of Cyclocarya from the Early Oligocene Qaidam Basin, North Tibet: Implications for the Paleogeography and Paleoecology. *Journal of Earth Science*, 35: 201-211. https://doi.org/10.1007/s12583-021-1580-2

Hren, M. T., Sheldon, N. D., 2012. Temporal Variations in Lake Water Temperature: Paleoenvironmental Implications of Lake Carbonate δ^{18}O and Temperature Records. *Earth and Planetary Science Letters*, 337-338: 77-84. https://doi.org/10.1016/j.epsl.2012.05.019

Hren, M. T., Sheldon, N. D., Grimes, S.T., et al., 2013. Terrestrial Cooling in Northern Europe during the Eocene–Oligocene Transition. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110(19): 7562-7567. https://doi.org/10.1073/pnas.1210930110

Huntington, K. W., Saylor, J., Quade, J., et al., 2015. High Late Miocene-Pliocene Elevation of the Zhada Basin, Southwestern Tibetan Plateau, from Carbonate Clumped Isotope Thermometry. *GSA Bulletin*, 127(1-2): 181-199. https://doi.org/10.1130/B31000.1

Ji, J. L., Zhang, K. X., Clift, P. D., et al., 2017. High-resolution Magnetostratigraphic Study of the Paleogene-Neogene Strata in the Northern Qaidam Basin: Implications for the Growth of the Northeastern Tibetan Plateau. *Gondwana Research*, 46: 141-155. https://doi.org/10.1016/j.gr.2017.02.015

Jin, Z. D., 2011. Composition, Origin and Environmental Interpretation of Minerals in Lake Sediments and Recent Progress. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 33(1): 34-44, 77 (in Chinese with English abstract).

Keith, M. L., Weber, J. N., 1964. Carbon and Oxygen Isotopic Composition of Selected Limestones and Fossils. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 28(10-11): 1787-1816. https://doi.org/10.1016/0016-7037(64)90022-5

Kent-Corson, M. L., Ritts, B. D., Zhuang, G. S., et al., 2009. Stable Isotopic Constraints on the Tectonic, Topographic, and Climatic Evolution of the Northern Margin of the Tibetan Plateau. *Earth and Planetary Science Letters*, 282(1-4): 158-166. https://doi.org/10.1016/j.epsl.2009.03.011

Kim, S. T., O'Neil, J. R., 1997. Equilibrium and Nonequilibrium Oxygen Isotope Effects in Synthetic Carbonates. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 61(16): 3461-3475. https://doi.org/10.1016/S0016-7037(97)00169-5

Lan, J. H., Xu, H., Liu, B., et al., 2013. Paleoclimate Implications of Carbonate, Organic Matter, and Their Stable Isotopes in Lacustrine Sediments: A Review. *Chinese Journal of Ecology*, 32(5): 1326-1334 (in Chinese with English abstract).

Lan, M. W., Song, Y. G., Cheng, L. Q., 2022. Review on Formation of Lacustrine Carbonate Minerals and Their Paleoclimate Significance. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 44(2): 156-170 (in Chinese with English abstract).

Lear, C. H., Elderfield, H., Wilson, P. A., 2000. Cenozoic Deep-Sea Temperatures and Global Ice Volumes from Mg/Ca in Benthic Foraminiferal Calcite. *Science*, 287(5451): 269-272. DOI: 10.1126/science.287.5451.26

Leng, M. J., Marshall, J. D., 2004. Palaeoclimate Interpretation of Stable Isotope Data from Lake Sediment Archives. *Quaternary Science Reviews*, 23(7-8): 811-831. https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2003.06.012

Li, J. J., Fang, X. M., 1998. Study on the Uplift and Environmental Change of the Tibetan Plateau. *Chinese Science Bulletin*, 43(15): 1569-1574 (in Chinese).

Li, J. J., Fang, X. M., Song C. H., et al., 2014. Late Miocene-Quaternary Rapid Stepwise Uplift of the NE Tibetan Plateau and Its Effects on Climatic and Environmental Changes. *Quaternary Research*, 81(3): 400-423. https://doi.org/10.1016/j.yqres.2014.01.002

Li, L., Garzione, C. N., 2017. Spatial Distribution and Controlling Factors of Stable Isotopes in Meteoric Waters on the Tibetan Plateau: Implications for Paleoelevation Reconstruction. *Earth and Planetary Science*, 460: 302-314. https://doi.org/10.1016/j.epsl.2016.11.046

Liu, C. L., 1998. Carbon and Oxygen Isotopic Compositions of Lacustrine Carbonates of the Shahejie Formation in the Dongying Depression and Their Paleolimnological Significance. *Acta Sedimentologica Sinica*, 16(3): 109-114 (in Chinese with English abstract).

Liu, W. G., Zhang, P. J., Zhao, C., et al., 2018. Reevaluation of Carbonate Concentration and Oxygen Isotope Records from Lake Qinghai, the Northeastern Tibetan Plateau. *Quaternary International*, 482: 122-130. https://doi.org/10.1016/j.quaint.2018.03.038

Liu, Y. D., Yang, Y. B., Yang, R. S., et al., 2023. Deciphering Source-to-sink History from a Solute Perspective: A Sr Isotope Approach in the Qaidam Basin, NE Tibet. *Gondwana Research*, 118: 76-91. https://doi.org/10.1016/j.gr.2023.02.012

Lu, H. J., Xiong, S. F., 2009. Magnetostratigraphy of the Dahonggou Section, Northern Qaidam Basin and Its Bearing on Cenozoic Tectonic Evolution of the Qilian Shan and Altyn Tagh Fault. *Earth and Planetary Science Letters*, 288(3-4): 539-550. https://doi.org/ 10.1016/ j.epsl.2009.10.016.

Lu, H.Y., Zhang, H.Z., Wang, Y.C., et al., 2018. Cenozoic depositional sequence in the Weihe Basin (Central China). A long-term record of Asian monsoon precipitation from the greenhouse to icehouse Earth. *Quaternary Sciences*, 2018, 38(5):1057-1067 (in Chinese with English abstract).

Lu, H. J., Malusà, M. G., Zhang, Z. Y., et al., 2022. Syntectonic Sediment Recycling Controls Eolian Deposition in Eastern Asia Since ~8 Ma. *Geophysical Research Letters*, 49(3): e2021GL096789. DOI:10.1029/2021GL096789

Ma, X. Y., 2017. High-resolution Climatic and Environmental Change since the LGM Recorded by Lake Hala, Northeastern Tibetan Plateau(Dissertation). Lanzhou University, Lanzhou (in Chinese with English abstract).

Miao, Y. F., Fang X. M., Sun, J. M., et al., 2022. A New Biologic Paleoaltimetry Indicating Late Miocene Rapid Uplift of Northern Tibet Plateau. *Science*, 378(6624): 1074-1079. https://doi.org/10.1126/science.abo2475

Mischke, S., Kramer, M., Zhang, C. J., et al., 2008. Reduced Early Holocene Moisture Availability in the Bayan Har Mountains, Northeastern Tibetan Plateau, Inferred from A Multi-Proxy Lake Record. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 267(1-2): 59-76. https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2008.06.002

Molnar, P., Tapponnier, P., 1975. Cenozoic Tectonics of Asia: Effects of A Continental Collision. *Science*, 189: 419-426. https://www.science.org/doi/10.1126/science.189.4201.419

Müller, G., Irion, G., Förstner, U., 1972. Formation and Diagenesis of Inorganic Ca-Mg Carbonates in the Lacustrine Environment. *Naturwissenschaften*, 59(4): 158-164. https://doi.org/10.1007/BF00637354

Nie, J. S., Ren, X. P., Saylor, J . E., et al., 2020. Magnetic Polarity Stratigraphy, Provenance, and Paleoclimate Analysis of Cenozoic Strata in the Qaidam Basin, NE Tibetan Plateau. *Geological Society of America Bulletin*, 132(1-2): 310-320. https://doi.org/10.1130/ B35175.1

Raymo, M., Ruddiman, W. F., 1992. Tectonic Forcing of Late Cenozoic Climate. *Nature*, 359(6391): 117-122. https://doi.org/10.1038/359 117a0

Rozanski, K., Araguas-Araguas, L., Gonfantini, R., 1993. Isotopic Patterns in Modern Global Precipitation. In: Swart, P. K., Lohmann, K. C., McKenzie, J. A., Eds. Climate Change in Continental Isotopic Records. American Geophysical Union, Washington, D.C., 1993: 36. https://doi.org/10.1029/GM078p0001

Shen, J., 2009. Progress and Prospect of Palaeolimnology Research in China. Journal of Lake *Sciences*, 21(3): 307-313 (in Chinese with English abstract).

Shi, Y. F., Li, J. J., Li, B. Y., et al., 1999. Uplift of the Qinghai-Tibet Plateau and East Asia Environmental Change during Late Cenozoic. *Acta Geographica Sinica*, 54(1): 10-21 (in Chinese with English abstract).

Song, B. W., Zhang, K. X., Lu, J. F., et al., 2013. The Middle Eocene to Early Miocene Integrated Sedimentary Record in the Qaidam Basin and Its Implications for Paleoclimate and Early Tibetan Plateau Uplift. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 50(2): 183-196. https://doi.org/10.1139/cjes-2012-0048

Song, B. W., Zhang, K. X., Zhang, L., et al., 2018. Qaidam Basin Paleosols Reflect Climate and Weathering Intensity on the Northeastern Tibetan Plateau during the Early Eocene Climatic Optimum. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 512: 6-22. https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2018.03.027

Song, B. W., Spicer, R. A., Zhang, K. X., et al., 2020. Qaidam Basin Leaf Fossils Show Northeastern Tibet Was High, Wet and Cool in the Early Oligocene. *Earth and Planetary Science Letters*, 537: 116175. https://doi.org/10.1016/j.epsl.2020.116175

Song, B. W., Zhang, K. X., Li S., et al., 2025. The geochronology of the Paleocene continental beds in the Tibetan Plateau: Insights from microfossils. Acta Geologica Sinica. https://doi.org/10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2024581

Song, H.Y., Yi, H.S., Fan, A.C., et al., 2010. Petrology and sedimentary environments of lacustrine carbonate rocks in the Xichagou section, western Qaidam Basin. *Geology in China*, 37(1): 117-126(in Chinese with English abstract).

Sun, Y.Y., Liu, J., Liang, Y., et al., 2020. Cenozoic moisture fluctuations on the northeastern Tibetan Plateau and association with global climatic conditions. *Journal of Asian Earth Sciences*, 200: 104490.

Talbot, M. R., 1990. A Review of the Palaeohydrological Interpretation of Carbon and Oxygen Isotopic Ratios in Primary Lacustrine Carbonates. *Chemical Geology(Isotope Geoscience section)*, 80(4): 261-279. https://doi.org/10.1016/0168-9622(90)90009-2

Talbot, M. R., Kelts, K., 1990. Paleolimnological Signatures from Carbon and Oxygen Isotopic Ratios in Carbonates from Organic Carbon-rich Lacustrine Sediments. *AAPG Memoir*, 50: 61-76. https://doi.org/10.1306/M50523C6

Wang, P. X., Liu, C. L., 1991. Research Methods for Ancient Lacustrine Studies in Oil-Bearing Basins. China Ocean Press, Beijing (in Chinese).

Wang, W.T., Zheng, W.J., Zhang, P.Z., et al., 2017. Weitao，Zheng Wenjun，Zhang Peizhen. 2017. Expansion of the Tibetan plateau during the Neogene. *Nature Communications*, 8: 15887.

Wang, W. T., Zhang, P. Z., Garzione, C. N., et al., 2022. Pulsed Rise and Growth of the Tibetan Plateau to Its Northern Margin since ca.30 Ma. *The Proceedings of the National Academy of Sciences*, 119(8): e2120364119. https://doi.org/10.1073/pnas.2120364119

Westerhold, T., Marwan, N., Drury, A. J., et al., 2020. An Astronomically Dated Record of Earth's Climate and Its Predictability Over the Last 66 Million Years. *Science*, 369(6509): 1383-1387. DOI: 10.1126/science.aba6853

Wu, M.H., Zhuang, G.S., Hou, M.Q., Liu, Z.H., 2021. Expanded Lacustrine Sedimentation in the Qaidam Basin on the Northern Tibetan Plateau: Manifestation of Climatic Wetting during the Oligocene Icehouse. *Earth and Planetary Science Letters*, 565:116935. https://doi.org/10.1016/j.epsl.2021.116935

Wu, Z. H., Zhao, X., Ye, P. S., et al., 2007. Paleo-Elevation of the Tibetan Plateau Inferred from Carbon and Oxygen Isotopes of Lacustrine Deposits. *Acta Geologica Sinica*, 81(9): 1277-1288 (in Chinese with English abstract).

Xing, Y., Song, B.W., Li, T., et al., 2023. Eocene to Miocene Charophytes from the Qaidam Basin on the Northern Tibetan Plateau and Its Calibration to the Geomagnetic Polarity Time Scale. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 308: 10478 4. https://doi.org/10.1016/j.revpalbo.2022.104784

Xiong, Z. Y., Ding, L., Spicer, R. A., et al., 2020. The Early Eocene Rise of the Gonjo Basin, SE Tibet: From Low Desert to High Forest. *Earth and Planetary Science Letters*, 543: 116312. https://doi.org/10.1016/j.epsl.2020.116312

Yang, Y. B., Fang, X. M., Han, W. X., et al., 2022. Terrestrial Carbonate Oxygen Isotopes Constraints on the Interplay between Westerlies and Monsoonal Rains Modulating the Cenozoic Climate on the Northeastern Tibetan Plateau. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 608: 111289. https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2022.111289

Yao, T. D., Masson-Delmotte, V., Gao, J., et al., 2013. A Review of Climatic Controls on $\delta^{18}O$ in Precipitation Over the Tibetan Plateau: Observations and Simulations. *Reviews of Geophysics*, 51: 525-548. https://doi.org/10.1002/rog.20023

Ye, C. C., Yang, Y.B., Fang, X.M., et al., 2020. Paleolake salinity evolution in the Qaidam Basin (NE Tibetan Plateau) between~ 42 and 29 Ma: Links to global cooling and Paratethys sea incursions *Sedimentary geology,* 409: 105778.

Yi, H. S., Lin, J. H., Zhou, K. K., et al., 2007. Carbon and Oxygen Isotope Characteristics and Palaeoenvironmental Implication of the Cenozoic Lacustrine Carbonate Rocks in Northern Qinghaim-Tibetan Plateau. *Journal of Palaeogeography*, 9(3): 303-312 (in Chinese with English abstract).

Yin, A., Dang, Y. Q., Zhang, M., et al., 2008. Cenozoic Tectonic Evolution of the Qaidam Basin and Its Surrounding Regions (Part 3): Structural Geology, Sedimentation, and Regional Tectonic Reconstruction. *GSA Bulletin*, 120(7-8): 847-876. https://doi.org/10.1130/B26232.1

Yu, X. J., Fu, S., Guan, S., et al., 2014. Paleomagnetism of Eocene and Miocene Sediments from the Qaidam Basin: Implication for No Integral Rotation since the Eocene and a Rigid Qaidam Block. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 15(6): 2109-2127. https://doi.org/10.1002/2014GC005230

Zachos, J. C., Stott, L. D., Lohmann, K. C., 1994. Evolution of Early Cenozoic Marine Temperatures. *Paleoceanography*, 9(2): 353-387. https://doi.org/10.1029/93pa03266

Zeng, D., Ding, L., Spicer, R. A., et al.,. 2025. Direct Dating of Qaidam Basin Stratigraphy, Northern Tibet. *Earth and Planetary Science Letters*, 664: 119440. https://doi.org/10.1016/j.epsl.2025.119440

Zeng, F. M., Zhang, X.Y., Zhan, T., et al., 2024. Rapid warming and increasing moisture levels in the Qaidam basin. Theoretical and Applied Climatology 155 (8), 7121-7132. https://doi.org/10.1007/s00704-024-05058-7

Zhang, C. J., Zhang, W. Y., Zhang, L., et al., 2016. The Characteristics of Carbon and Oxygen Isotopes of Carbonates and Carbon Isotopes of Organic Matter of Bulk Sediments and Their Responses to Lake Environments in Western and Northeastern China. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 35(4): 609-617 (in Chinese with English abstract).

Zhang, K. X., Wang, G. C., Ji J. L., et al., 2010. Paleogene-Neogene Stratigraphic Realm and Sedimentary Sequence of the Qinghai-Tibet Plateau and Their Response to Uplift of the Plateau. *Science China Earth Science*，53(9): 1271-1294. DOI:10.1007/s11430-010-4048-2

Zhang, P. Z., Zheng, D. W., Yin, G. M., et al., 2006. Discussion on Late Cenozoic Growth and Rise of Northeastern Margin of the Tibetan Plateau. *Quaternary Sciences*, 26(1): 5-13 (in Chinese with English abstract).

Zhang, T., Han, W. X., Tian, Q., et al., 2024. Stable Isotope Revealed Hydroclimate Transition and Topography Growth in the Northern Tibetan Plateau at ~10 Ma. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 649: 112341. https://doi.org/10.1016 /j.palaeo. 2024.112341

Zhang, W. Y., Zhang, C. J., An, J., et al., 2011. Content of Mg in the Calcite as A Lake Salinity Proxy in the Northwest Inland China: A Case of Primary Research in Lake Koucha. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 31(1): 135-141 (in Chinese with English abstract).

Zhang, X., Song, B. W., Yang, T. L., et al., 2025. Source-to-Sink Relationships between the Qaidam Basin and Its Surrounding Mountain Ranges: New Insights from Detrital Zircon U-Pb Ages in Modern River Sediments.. *Journal of Earth Science*, 36(3): 930-946. https://doi.org/10.1007/s12583-022-1666-5

Zhong, D. L., Ding, L., 1996. Discussion on Uplift Process and Mechanism of Qinghai-Tibet Plateau. *Scientia Sinica Terrae*, 26(4): 289-295 (in Chinese).

Zhu, J. J., Chen, H., Gong, G. L., 2015. Hydrogen and Oxygen Isotopic Compositions of Precipitation and Its Water Vapor Sources in Eastern Qaidam Basin. *Environmental Science*, 36(8): 2784 -2790 (in Chinese with English abstract).

Zhu, P. C., 2015. Groundwater Circulation Patterns of Yuqia-Mahai Basin in the Middle and Lower Reaches of Yugia River (Dissertation). Jilin University, Jilin (in Chinese with English abstract).

Zhuang, G. S., Hourigan, J. K., Ritts, B. D., et al., 2011a. Cenozoic Multiple-phase Tectonic Evolution of the Northern Tibetan Plateau: Constraints from Sedimentary Records from Qaidam Basin, Hexi Corridor, and Subei Basin, Northwest China. *American Journal of Science*, 311(2): 116-152. https://doi.org/10.2475/02.2011.02

Zhuang, G. S., Hourigan, J. K., Koch, P. L., et al., 2011b. Isotopic Constraints on Intensified Aridity in Central Asia around 12Ma. *Earth and Planetary Science Letters*, 312(1-2): 152-163. https://doi.org/10.1016/j.epsl.2011.10.005

附中文参考文献:

傅志明, 李仕虎, 王维钰, 等, 2025. 柴达木盆地新生代地层年代学研究进展. 地层学杂志. https://doi.org/10.19839/j.cnki.dcxzz.2025.0033

金章东, 2011. 湖泊沉积物的矿物组成、成因、环境指示及研究进展. 地球科学与环境学报, 33(1): 34-44, 77.

兰敏文, 宋友桂, 程良清, 2022. 湖泊碳酸盐矿物的形成过程及古气候环境指示意义. 地球科学与环境学报, 44(2): 156-170.

蓝江湖, 徐海, 刘斌, 等, 2013. 湖泊沉积中碳酸盐、有机质及其同位素的古气候意义. 生态学杂志, 32(5): 1326-1334.

李吉均, 方小敏, 1998. 青藏高原隆起与环境变化研究. 科学通报, 43(15): 1569-1574.

刘传联, 1998. 东营凹陷沙河街组湖相碳酸盐岩碳氧同位素组分及其古湖泊学意义. 沉积学报, 16(3): 109-114.

鹿化煜, 张瀚之, 王逸超, 等, 2018. 渭河盆地新生代沉积序列与亚洲季风气候起源演化. 第四纪研究, 38(5): 1057-1067.

马雪洋, 2017. 青藏高原东北部哈拉湖沉积物记录的末次盛冰期以来的高分辨率气候环境变化(博士学位论文). 兰州: 兰州大学.
青海省地质矿产局, 1991. 青海省区域地质志. 北京: 地质出版社.
沈吉, 2009. 湖泊沉积研究的历史进展与展望. 湖泊科学, 21(3): 307-313.
施雅风, 李吉均, 李炳元, 等, 1999. 晚新生代青藏高原的隆升与东亚环境变化. 地理学报, 54(1): 12-22.
宋博文, 张克信, 李莎, 等, 2025. 青藏高原古近纪陆相地层年代学探讨:来自微体化石的启示. 地质学报. https://doi.org/10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2024581
宋华颖, 伊海生, 范爱春, 等, 2010. 柴达木盆地西部西岔沟剖面湖相碳酸盐岩岩石学特征与沉积环境分析. 中国地质, 37(1): 117-126.
汪品先, 刘传联, 1993. 含油盆地古湖泊学研究方法. 北京: 海洋出版社.
吴珍汉, 赵逊, 叶培盛, 等, 2007. 根据湖相沉积碳氧同位素估算青藏高原古海拔高度. 地质学报, 81(9): 1277-1288.
伊海生, 林金辉, 周恳恳, 等, 2007. 青藏高原北部新生代湖相碳酸盐岩碳氧同位素特征及古环境意义. 古地理学报, 9(3): 303-312.
张成君, 张菀漪, 张丽, 等, 2016. 中国西部、东北地区湖泊沉积物中碳酸盐碳、氧和有机碳同位素组成及与环境的响应. 矿物岩石地球化学通报, 35(4): 609-617.
张培震, 郑德文, 尹功明, 等, 2006. 有关青藏高原东北缘晚新生代扩展与隆升的讨论. 第四纪研究, 26(1): 5-13.
张菀漪, 张成君, 安娟, 等, 2011. 青海寇查湖碳酸盐方解石中镁含量对湖泊水体盐度变化的响应. 海洋地质与第四纪地质, 31(1): 135-141.
钟大赉, 丁林, 1996. 青藏高原的隆起过程及其机制探讨. 中国科学(D 辑: 地球科学), 26(4): 289-295.
朱建佳, 陈辉, 巩国丽, 2015. 柴达木盆地东部降水氢氧同位素特征与水汽来源. 环境科学, 36(8): 2784-2790.
朱谱成, 2015. 鱼卡河中下游鱼卡—马海盆地地下水循环模式研究(硕士学位论文). 长春: 吉林大学.