

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2020.329>



柴达木盆地北缘古-新近纪河湖相 沉积物颜色的气候意义

李星波¹, 季军良^{1*}, 曹展铭², 王 朴³, 吴武军³, 孙 玲¹

1. 中国地质大学地理与信息工程学院, 湖北武汉 430078

2. 中国石油青海油田分公司采油五厂, 青海海西 816499

3. 中国石油勘探开发研究院西北分院, 甘肃兰州 730020

摘 要: 柴达木盆地厚达万米的新生代沉积物记录了青藏高原东北部隆升和古气候变化信息. 本文基于盆地北缘大红沟剖面高分辨率的磁极性年代标尺, 对该剖面古-新近纪河湖相沉积物进行了颜色测量, 首次获得了柴达木盆地长时间尺度(52~7 Ma)的色度参数变化序列. 在此基础上, 综合沉积相与区域构造和古气候记录, 探讨了影响河湖相沉积物颜色参数的因素及柴达木盆地古-新近纪的气候演变. 结果表明, 大红沟剖面沉积物颜色的变化与全球温度变化趋势基本一致, 说明温度是影响颜色参数, 特别是红度(a^*)的主要因素; 沉积相变化, 尤其是水面上、下的氧化-还原环境变化对颜色参数也有重要影响. 根据色度参数在时间标尺上的变化, 将柴达木盆地的气候变化划分为8个阶段: (a) 52.0~44.2 Ma 湿热, (b) 44.2~33.7 Ma 在干湿波动中逐渐变干, (c) 33.7~27.1 Ma 进一步变干, (d) 27.1~19.7 Ma 逐渐变湿, (e) 19.7~17.0 Ma 较干旱, (f) 17.0~13.3 Ma 气候湿润, (g) 13.3~9.5 Ma 快速变干, (h) 9.5~7.0 Ma 进一步变干旱. 影响柴达木盆地古-新近纪气候变化的主要因素包括全球温度、副特提斯海、青藏高原构造隆升和东亚夏季风.

关键词: 青藏高原; 柴达木盆地; 古-新近纪; 颜色; 古气候; 地层学.

中图分类号: P532

文章编号: 1000-2383(2021)09-3278-12

收稿日期: 2020-08-13

The Climatic Significance of the Color of the Paleo-Neogene Fluvial and Lacustrine Sediments in the Northern Qaidam Basin

Li Xingbo¹, Ji Junliang^{1*}, Cao Zhanming², Wang Pu³, Wu Wujun³, Sun Ling¹

1. School of Geography and Information Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430078, China

2. The Fifth Oil Production Plant, Qinghai Oilfield Branch of CNPC, Haixi 816499, China

3. Research Institute of Petroleum Exploration and Development-Northwest, PetroChina, Lanzhou 730020, China

Abstract: Cenozoic sediments up to 10 000 meters thick in the Qaidam basin recorded the Tibetan plateau uplift and paleoclimate changes. Based on the high-resolution magnetic polarity dating scale of the Dahonggou section in the northern margin of the basin, the color measurement of the Paleo-Neogene fluvial and lacustrine sediments in this section is performed. Furthermore, integrating the sedimentary facies, regional tectonic and paleoclimate records, this paper discusses the factors affecting the color parameters of river-lacustrine sediments and the climate evolution of the Qaidam basin during the Paleo-Neogene period. The research results show that the change of sediment color in Dahonggou section is basically consistent with the global temperature trend, indicating that temperature is the main factor affecting color parameters, especially the redness (a^*) value, but the sedimentary facies

基金项目: 中国地质调查局项目(No.DD20190370); 国家油气重大科技专项(No.2016ZX05003-006).

作者简介: 李星波(1996-), 男, 硕士研究生, 主要从事第四纪地质与古气候研究. ORCID: 0000-0003-1733-8780. E-mail: leexb@cug.edu.cn

*** 通讯作者:** 季军良, ORCID: 0000-0001-7337-9857. E-mail: jijl@cug.edu.cn

引用格式: 李星波, 季军良, 曹展铭, 等, 2021. 柴达木盆地北缘古-新近纪河湖相沉积物颜色的气候意义. 地球科学, 46(9): 3278-3289.

changes, especially changes in the oxidation-reduction environment above and below the water, also have an important influence on the color parameters. According to the changes of color parameters on the time scale, the climate change in the Qaidam basin has been divided into 8 stages: (a) hot and humid during 52.0–44.2 Ma, (b) gradually becomes dry in the fluctuation of dryness and wetness during 44.2–33.7 Ma, (c) further dries during 33.7–27.1 Ma, (d) gradually becomes wet during 27.1–19.7 Ma, (e) relatively dry during 19.7–17.0 Ma, (f) warm and humid during 17.0–13.3 Ma, (g) rapidly dries during 13.3–9.5 Ma, (h) becomes further arid during 9.5–7.0 Ma. The main factors affecting the Paleo-Neogene climate change in the Qaidam basin include global temperature, the Para-Tethys Sea, the uplift of the Tibetan plateau and the East Asian summer monsoon.

Key words: Tibetan plateau; Qaidam basin; Paleo-Neogene; color; paleoclimate; stratigraphy.

0 引言

新生代全球气候显著变冷,从两极无冰的“温室期”转变为两极发育冰盖的“冰室期”,同时发生了包括古新世末期极热事件、早渐新世冰期、早中新世冰期等气候异常事件(Zachos *et al.*, 2001).在亚洲地区,气候模式在古近纪与新近纪之交由行星风系转变为季风模式,亚洲内陆干旱化逐渐增强(Sun and Wang, 2005).通常认为青藏高原隆升和副特提斯海西退消亡与亚洲内陆干旱化有密切关系,但具体机制仍需进一步研究(安芷生等, 2006; Meijer *et al.*, 2019).柴达木盆地位于青藏高原东北缘(图1a),处在西北干旱区、亚洲季风区和青藏高原高寒区的交汇处,盆地内堆积巨厚的新生代沉积物是高原隆升和古气候变化的良好载体.

目前,围绕柴达木盆地人们对青藏高原东北部新生代构造演化已经做了大量的研究工作,但是,受限于地层年代标尺的缺失,古气候方面的研究直到近年才取得一些成果.基于磁性地层学建立的地层时间标尺,前人通过孢粉组合(路晶芳等, 2010; Miao *et al.*, 2011)、稳定同位素(Zhuang *et al.*,

2011; Song *et al.*, 2017)、元素地球化学和黏土矿物学(Song *et al.*, 2013)等方法对柴达木盆地不同位置、不同时间段或时间点的古气候进行了研究,对柴达木盆地新生代气候变化及其机制有了一定的认识.但是,受限于柴达木盆地新生界长时间尺度地层标尺的缺失,前人无法系统分析柴达木盆地新生代气候的总体演化过程.近期, Ji *et al.* (2017)通过磁性地层学方法建立了柴达木盆地北缘大红沟剖面古近纪-新近纪地层的磁极性年代标尺,时间跨度为~52~7 Ma,这为研究柴达木盆地长时间尺度上的古气候变化提供了重要的年代学基础.

沉积物的色度参数是古气候研究中常用的代用指标.依据国际照明委员会(CIE)1976年推荐的色度空间(Lab),色度参数包括亮度(L^*)、红度(a^*)和黄度(b^*), L^* 介于黑(0)与白(100)之间, $+a^*$ 代表红色的饱和程度, $-a^*$ 代表绿色的饱和程度, $+b^*$ 代表黄色的饱和程度, $-b^*$ 代表蓝色的饱和程度.对现代土壤的色度研究表明, a^* 和 b^* 一般与年平均温度和年平均降水量正相关, L^* 与土壤中的有机质含量负相关(杨胜利等, 2001).在黄土、红黏土中,高 a^* 反映了较强的化学风化和温暖湿润的气

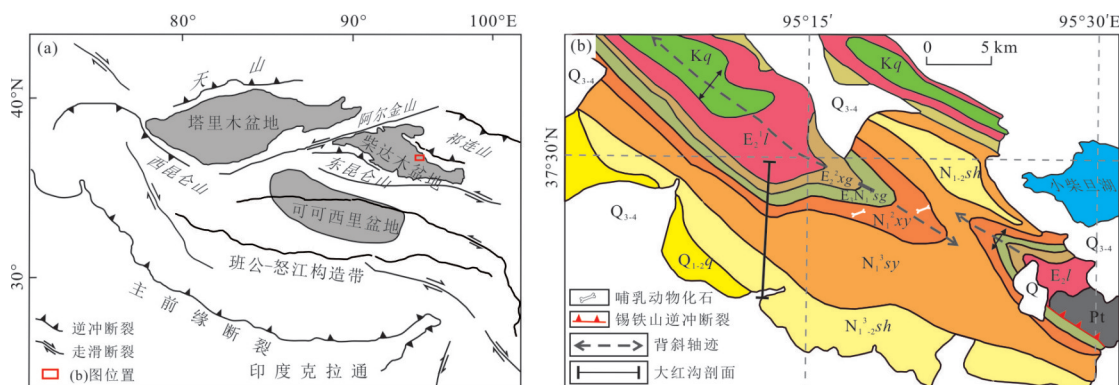


图1 柴达木盆地及邻区构造示意图(a)和大红沟剖面区域地质图(b)

Fig.1 Structural map of Qaidam basin and adjacent regions (a); geological map of the Dahonggou anticline (b)

修改自 Ji *et al.* (2017)

候, L^* 随碳酸盐含量降低而降低, 随有机质含量增加而降低(杨胜利等, 2001; Yang and Ding, 2003). 黄土-古土壤颜色变化主要取决于赤铁矿和针铁矿的含量, 二者在古土壤中的含量都高于黄土, 反映了暖湿气候(季峻峰等, 2007). 上述色度参数变化的古气候意义是限定在大气下的氧化环境(土壤和风积物), 具有明确的气候意义. 在河湖相沉积物中, 色度参数的古气候意义更为复杂, 受到温度、降水和沉积环境的共同影响(Zhang *et al.*, 2014; 王熠哲等, 2019). 河湖相沉积物主要来源于物源区物理、化学风化形成的碎屑物, 其风化成因的致色矿物(如赤铁矿)受源区温度和降水的影响, 因此可以反映源区气候. 沉积环境的变化受降水量与构造的共同作用: 在构造稳定的情况下, 降水量决定了水域的面积和水深变化; 而构造活动会导致沉积中心的迁移, 同样会引起水面的分布范围和水深的变化, 因此, 降水量和构造引起的水位变化会导致陆上和不同水深氧化-还原环境的变化, 进而影响沉积物颜色的变化. 尽管河湖相沉积物的颜色受多种因素的影响, a^* 值的变化趋势仍与全球温度变化一致, 气候的干湿变化则需要结合沉积相和其他气候代用指标进行具体分析(Jiang *et al.*, 2007; 戴霜等, 2011; Zhang *et al.*, 2014; 王熠哲等, 2019), L^* 与化学沉积物(如碳酸盐和石膏)和磁铁矿的含量正相关, 与有机质含量负相关, 高值一般反映了较干冷的气候(戴霜等, 2011). 在海洋沉积物中, a^* 值与赤铁矿含量正相关, 高值反映了源区强化学风化作用(Helmke *et al.*, 2002). 综上所述, 沉积物的颜色参数可以反映气候变化, 但是河湖相沉积物颜色古气候意义须结合沉积相、区域其他气候代用指标和全球气候背景进行综合分析(戴霜等, 2011; 王熠哲等, 2019; Fang *et al.*, 2019a).

柴达木盆地北缘大红沟剖面为河湖相沉积, 包含了盆地古-新近纪的主要地层单元, 磁性地层学建立了该剖面古-新近纪地层年代框架, 由老到新依次为路乐河组(E_2^1l)($>52.0\sim44.2$ Ma)、下干柴沟组(E_2^2xg)($44.2\sim34.2$ Ma)、上干柴沟组($E_3N_1^1sg$)($34.2\sim19.5$ Ma)、下油砂山组(N_1^2xy)($19.5\sim12.9$ Ma)、上油砂山组(N_1^3sy)($12.9\sim8.1$ Ma)和狮子沟组(N_1^3sh)(<8.1 Ma)(Ji *et al.*, 2017). 尽管处在同一背斜带南翼、距离大红沟剖面西约 10 km 的剖面给出了柴达木盆地北缘新生界的底界年龄

(路乐河组)只有 ~ 26 Ma(Wang *et al.*, 2017), 这与传统的认识存在巨大差异. 最近 Song *et al.* (2020) 和 Sun *et al.* (2020) 对 Wang *et al.* (2017) 获得的地层年龄进行了评价, 认为 Ji *et al.* (2017) 获得的地层年代结果更为可靠, 因此本文采用 Ji *et al.* (2017) 建立的地层年代框架. 同时, 前人已在该剖面进行了沉积相(宋博文等, 2011; Ji *et al.*, 2017)、物源分析(Song *et al.*, 2019)和不同代用指标的古气候研究(路晶芳等, 2010; Song *et al.*, 2013, 2017; Sun *et al.*, 2020). 在上述工作的基础上, 本文结合区域和全球的古气候研究成果, 通过沉积物色度指标探讨了柴达木盆地古-新近纪气候变化, 为相关研究提供了有利条件.

1 研究区概况

柴达木盆地是青藏高原东北部最大的山间盆地, 北东为祁连山-南山逆冲带, 北西为阿尔金左旋走滑断裂带, 南为东昆仑逆冲带(图 1a). 柴达木盆地新生代以来经历了强烈的构造沉降, 堆积了厚逾万米的新生代沉积物(Yin *et al.*, 2008).

大红沟剖面位于柴达木盆地北缘、大红沟背斜的南翼(图 1b), 背斜核部为白垩系犬牙沟组, 与上覆新生界路乐河组之间为平行不整合接触关系, 其余各组之间为整合接触(Ji *et al.*, 2017). 大红沟剖面古-新近纪地层总厚度约 5 400 m, 路乐河组(0~460 m)岩性主要为紫红色砾岩、砾质砂岩夹泥岩, 形成环境为辫状河-冲积扇相. 下干柴沟组(460~1 092 m)和上干柴沟组(1 092~2 600 m)主要为灰绿色细-粗砂岩与绛红、砖红色粉砂岩、泥岩互层, 灰绿色砂岩中发育滑塌构造和板状、楔状斜层理, 粉砂岩和泥岩中可见平行层理, 为三角洲前缘-浅湖相沉积, 二者的区别在于上干柴沟组灰绿色砂岩占比更多, 三角洲前缘相更发育. 下油砂山组(2 600~3 588 m)主要为棕红色细-中砂岩、泥质粉砂岩和泥岩, 夹灰绿色细砾岩、砾质粗砂岩, 为三角洲平原-湖相沉积. 上油砂山组(3 588~4 400 m)岩性为灰黄色细-中粒砂岩、灰绿色、棕红色泥质粉砂岩和泥岩, 夹灰黄色砾岩和砾质粗砂岩, 沉积环境为微咸水湖-曲流河. 狮子沟组(4 400~5 340 m)岩性为厚层灰色砾岩夹薄层砂岩, 属于辫状河-冲积扇沉积(图 2)(宋博文等, 2011; Ji *et al.*, 2017).

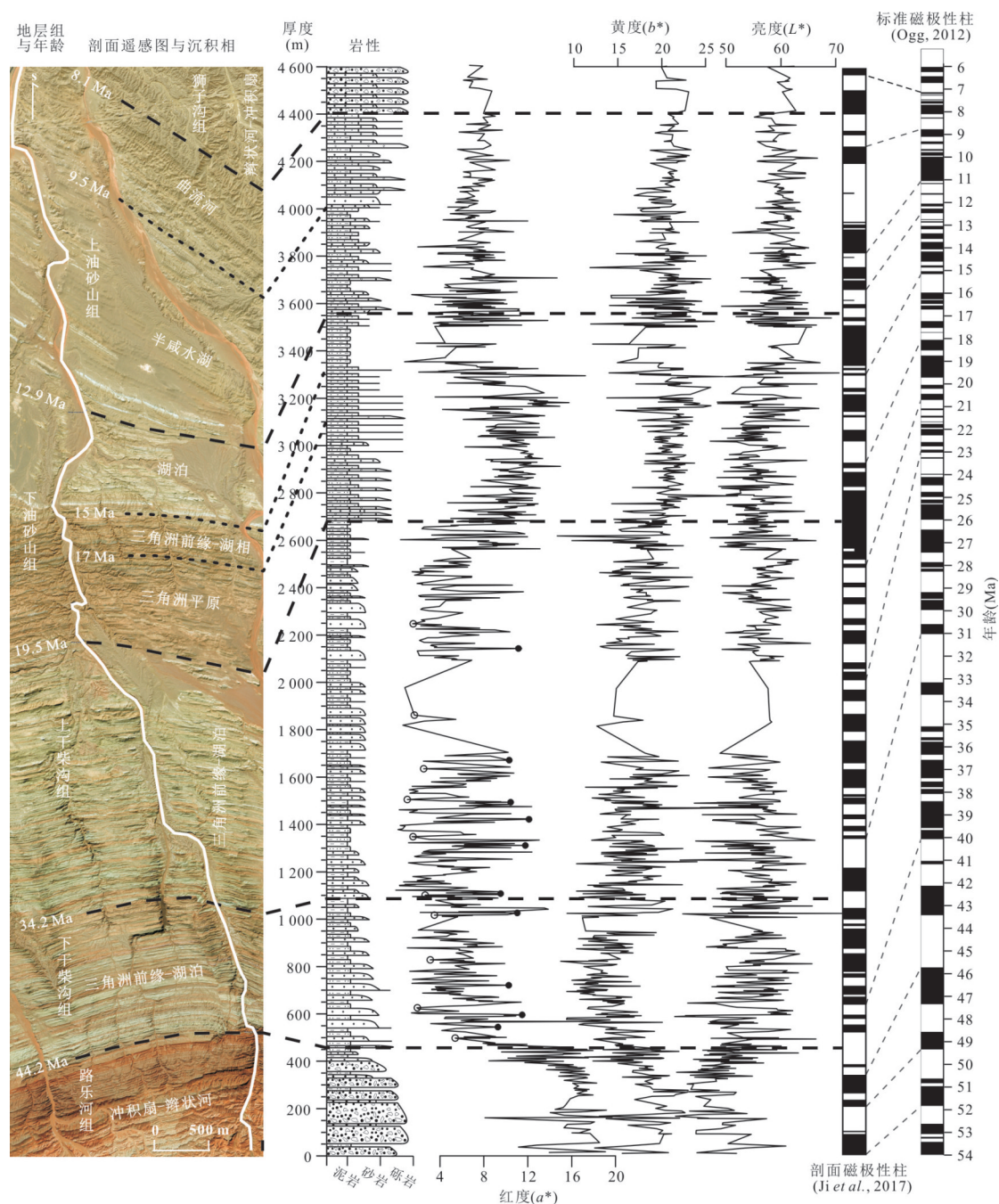


图2 柴达木盆地大红沟剖面遥感图、岩性柱状图与色度参数

Fig.2 Satellite image showing the Dahonggou section with lithostratigraphic formations, ages inferred from our magnetostratigraphic results, lithology and color parameters

白色线为大红沟剖面;圆点为粒度分析样品;空心圆点为低 a^* 值的灰绿色砂岩样品,实心圆点为高 a^* 值的红色泥岩样品

2 样品采集与测量

色度样品为古地磁样品的平行样.大红沟剖面由于岩性限制,古地磁样品采自路乐河组上部至狮子沟组下部总共约4 600 m厚的地层,共选取古地磁样品910块,每块样品取样5 g左右,用玛瑙研钵研磨至粉末状,用三恩时(深圳)

公司生产的NS800分光测色仪进行颜色测量.该仪器依据CIE(1976)Lab表色系统,测量波长范围400~700 nm,波长间隔10 nm,重复精度 ΔE^*_{ab} 0.04以内,台间差 ΔE^*_{ab} 0.2以内.测量时,先对仪器进行黑板、白板校正,再将前期处理好的样品压平、压实,将仪器竖直放置并紧贴样品,每个样品测量3次求平均值以减小误差.

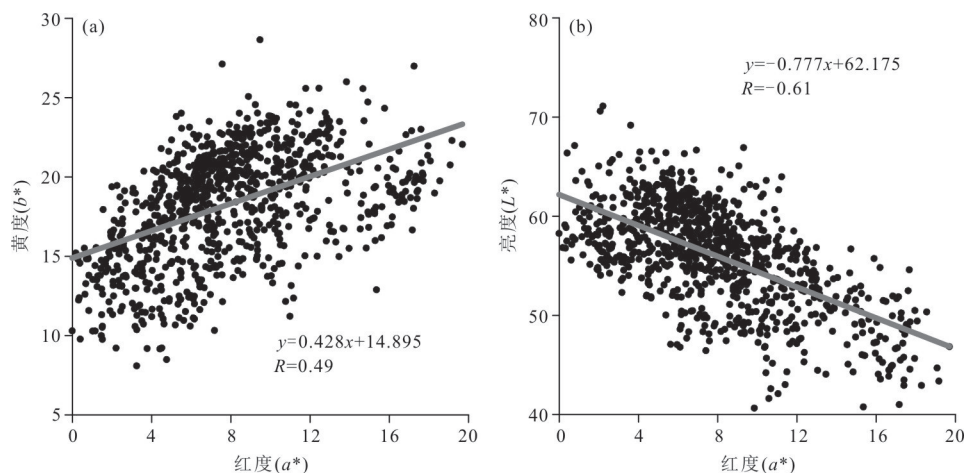


图3 色度参数相关性分析

Fig.3 Correlation analysis of color parameters

大红沟剖面上、下干柴沟组岩性与颜色变化显著,为了进一步探讨沉积物颜色与岩性的关系,选取典型样品进行了粒度分析.所用仪器为英国马尔文仪器有限公司生产的 Mastersizer3000 型号的激光粒度仪,测试结果的重复性优于 0.5%.称取 0.5 g 左右的样品放入 250 mL 的烧杯,先加入 10 mL 浓度为 10% 的 H_2O_2 ,反应结束后再加入 10 mL 浓度为 10% 的 HCl ,至反应结束给烧杯中注满纯水,静置 8 h 以上,然后去除烧杯上层清液,再加入 10 mL 浓度为 0.05 mol/L 的 $(NaPO_3)_6$ 分散剂,在超声波仪器里超声 10 min,最后将样品加入激光粒度仪进行测试.每个样品测试 3 次,结果取平均值.

3 结果

柴达木盆地大红沟剖面不同组的岩性和沉积物颜色存在明显差别(图 2)(Ji *et al.*, 2017).总体上,路乐河组、下油砂山组下部、上油砂山组上部及狮子沟组的陆上氧化环境(河流与三角洲平原相) a^* 和 b^* 值较高, L^* 值较低,且颜色值波动较小;上、下干柴沟组水下较还原的环境(三角洲前缘-湖泊) a^* 和 b^* 值较低, L^* 值较高,波动强烈.

色度参数的相关性分析表明, a^* 与 b^* 正相关,相关系数为 0.49(图 3a),说明 a^* 与 b^* 具有较相似的古气候意义. a^* 与 L^* 负相关,相关系数为 -0.61(图 3b),说明二者具有相反的气候意义.

上、下干柴沟组以三角洲前缘灰绿色砂岩与浅湖相绛红、砖红色粉砂岩、泥岩互层为特征,野外岩性和颜色变化显著,遥感图上可以看到清晰的韵律性变化(图 2).进一步的粒度

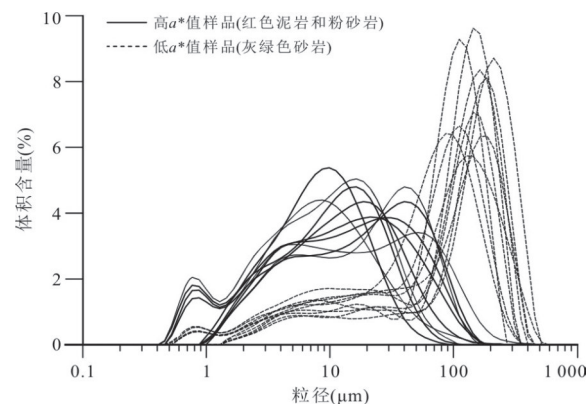


图4 上、下干柴沟组不同岩性和颜色样品的粒度频率分布曲线

Fig.4 Grain size frequency distribution curves of samples with different lithology and color from the Shanggan-chagou Formation and Xiaganchagou Formation

样品选取位置见图 2

分析结果显示,高 a^* 值的红色泥岩样品的粒度众数多为 10~20 μm ,而低 a^* 值的灰绿色砂岩样品的粒度众数为 100~200 μm (图 4).

4 讨论

为在时间标尺上讨论大红沟剖面沉积物颜色变化与区域及全球气候变化的关系,根据 Ji *et al.* (2017) 的剖面磁性地层学结果,将深度转换成时间标尺,在此基础上笔者对色度参数变化的阶段性进行了划分(图 5),各阶段色度参数的平均值见表 1.

(a) 阶段(52.0~44.2 Ma) a^* 值为最高值, b^* 值也较高,总体趋势降低,与全球深海 $\delta^{18}O$ 指示的降温趋势相吻合(Zachos *et al.*, 2001)(图 5),而 L^* 值

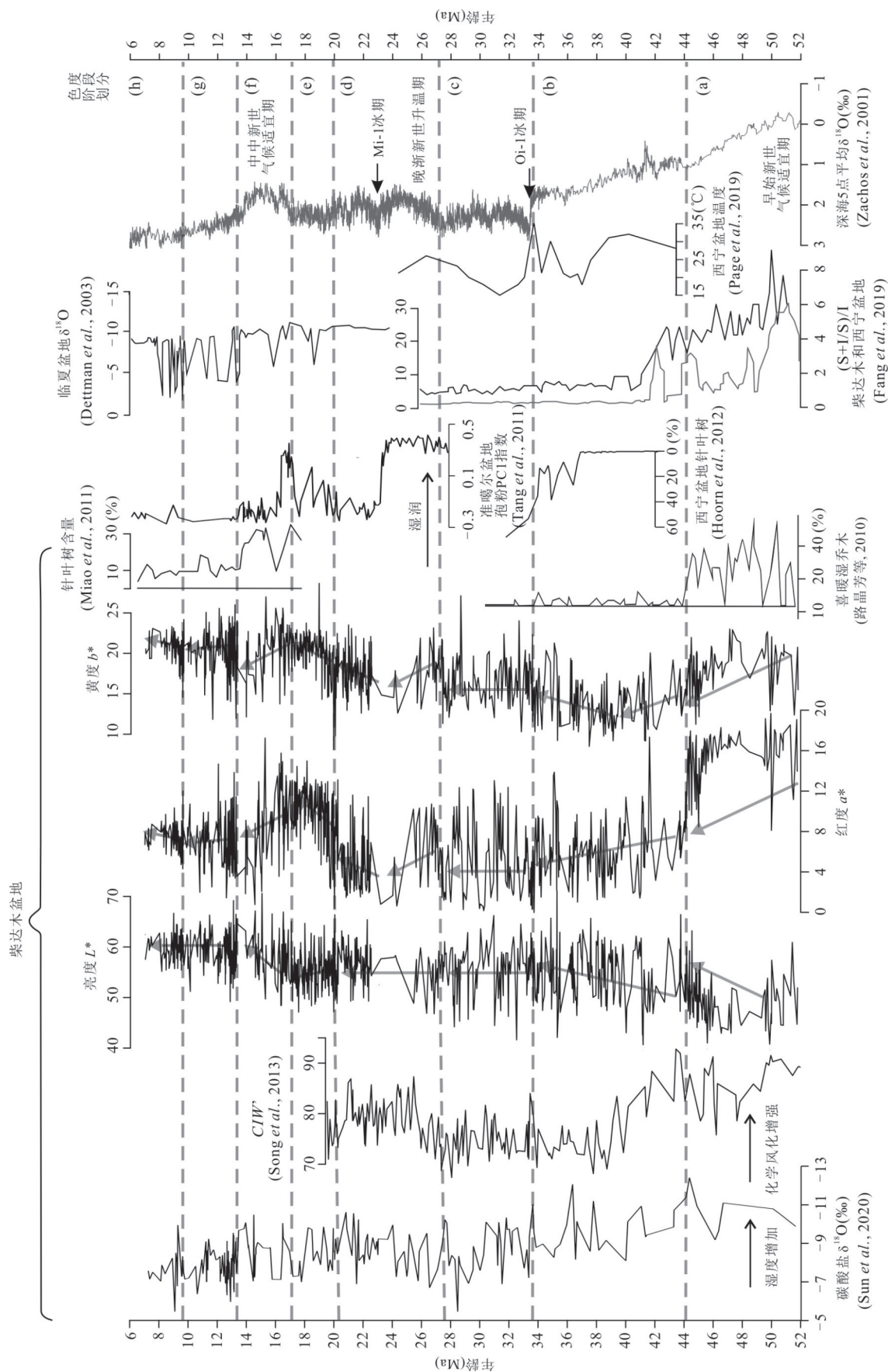


图5 柴达木盆地大红沟剖面色度参数与其他气候指标综合对比

Fig.5 Comparison of color parameters of the Dahonggou section with regional and global climatic records

灰色箭头指示色度参数变化趋势

表 1 柴达木盆地北缘大红沟剖面色度参数阶段划分
Table 1 Stages of color parameters in Dahonggou section

阶段	深度(m)	年龄(Ma)	平均值		
			<i>L</i> *	<i>a</i> *	<i>b</i> *
(h)	4 100~4 601	9.5~7.0	60.02	7.36	20.66
(g)	3 505~4 100	13.3~9.5	59.34	7.10	20.31
(f)	3 086~3 505	17.0~13.3	58.18	8.87	20.65
(e)	2 661~3 086	19.7~17.0	55.34	10.37	20.42
(d)	1 577~2 661	27.1~19.7	56.20	5.56	17.70
(c)	1 145~1 577	33.7~27.1	55.71	5.00	16.37
(b)	460~1 145	44.2~33.7	54.43	6.34	14.07
(a)	0~460	52.0~44.2	49.11	15.49	18.34

在全球降温的过程中增大. 该阶段大红沟剖面碳酸盐 $\delta^{18}\text{O}$ 值最偏负, 指示了湿度最大 (Sun *et al.*, 2020), 化学风化指数 CIW' 为最高值, 指示了强化学风化作用 (Song *et al.*, 2013), 喜暖湿孢粉含量最高 (路晶芳等, 2010), 这些证据说明了柴达木盆地 52.0~44.2 Ma 为暖湿气候. 柴达木盆地北缘和西宁盆地的 (蒙脱石 + 伊利石 / 蒙脱石) / 伊利石高值也反映了流域硅酸盐化学风化强烈, 气候暖湿 (Fang *et al.*, 2019b). 西宁盆地的 a^* 值也与全球深海 $\delta^{18}\text{O}$ 值揭示的温度变化一致, 为 ~52 Ma 以来的最高值 (Fang *et al.*, 2019a). 这一阶段气候暖湿的原因可能有两个因素: 一是深海 $\delta^{18}\text{O}$ 揭示该时期全球温度高 (Zachos *et al.*, 2001), 导致大气中携带的水汽多; 二是这一时期副特提斯洋面积广阔, 塔里木盆地西部被海水占据 (孙继敏等, 2017; Kaya *et al.*, 2019), 西风环流可以将大量水汽输送到柴达木盆地. 这一时期是柴达木盆地响应印度-亚洲板块碰撞的初始形成时期, 沉积环境为冲积扇-辫状河 (宋博文等, 2011; Ji *et al.*, 2017), 沉积物长期处在陆上氧化环境, 且较高温度和降水有利于化学风化进行, 铁的氧化物易于形成赤铁矿, 因此 a^* 值最高.

(b) 阶段 (44.2~33.7 Ma) a^* 值逐渐降低, L^* 值逐渐增大, b^* 值在 ~40 Ma 前逐渐降低, 之后又逐渐增大, 且均强烈波动. 该剖面 CIW' 值指示化学风化作用逐渐降低 (Song *et al.*, 2013), 反映暖湿气候的乔木花粉含量大幅减小 (路晶芳等, 2010), 碳酸盐 $\delta^{18}\text{O}$ 也指示气候湿润程度逐渐下降 (Sun *et al.*, 2020), 与深海 $\delta^{18}\text{O}$ 指示的全球逐渐降温相吻合 (Zachos *et al.*, 2001). 该阶段以三角洲前缘-湖相沉积频繁交替为主, 对应

岩性为灰绿色砂岩与红色粉砂岩、泥岩交替 (图 2) (宋博文等, 2011; Ji *et al.*, 2017). 灰绿色砂岩平行层理、斜层理和滑塌构造发育, 为三角洲前缘水下分支河道快速搬运沉积, 在地表风化和搬运过程中化学风化作用较弱; 红色粉砂岩和泥岩水平层理发育, 产介形类和轮藻化石, 为湖相沉积, 代表了降水较多的高湖面期, 粉砂岩和泥岩经地表强化学风化后被悬浮搬运至湖中沉积. 分别选取该阶段 a^* 值急剧波动阶段的高 a^* 值和低 a^* 值的代表性样品做粒度分析 (图 4), 结果表明高 a^* 值的红色泥岩粒度众数多为 10~20 μm , 而低 a^* 值的灰绿色砂岩粒度众数多为 100~200 μm , 粒度分析结果进一步支持高湖面期为悬浮搬运泥岩沉积、低湖面期为三角洲前缘水下分流河道快速沉积. 因此, 该阶段沉积物和色度值的强烈波动指示了干、湿气候的频繁波动. 西宁盆地此阶段的 a^* 值随着全球降温也快速降低, 但是波动没有柴达木盆地显著 (Fang *et al.*, 2019a), 孢粉揭示 ~36.4 Ma 前气候较为暖湿, 之后由于高原隆升和副特提斯海西退变得冷干 (Hoorn *et al.*, 2012), 古温度重建结果显示在 37 Ma 前温度逐渐降低, 与全球深海 $\delta^{18}\text{O}$ 指示的降温趋势相符, 但是古温度和孢粉揭示 37 Ma 以后气候不稳定, 分别在 37 Ma 和 33.5 Ma 经历了两个阶段的降温后进入早渐新世南极冰盖开始形成的冷期 (Page *et al.*, 2019). 柴达木盆地和西宁盆地反映硅酸盐化学风化强度的粘土矿物比值总趋势与全球变化一致, 说明温度对化学风化作用的重要性: 在副特提斯洋西退之前, 较高的温度可以通过西风带携带更多水汽进入该地区, 温度和降水共同增强了化学风化作用 (Fang *et al.*, 2019b). 大红沟剖面 (b) 阶段 a^* 值在大幅波动的过程中逐渐降低, 在 ~33.6 Ma 出现极低值, 与深海 $\delta^{18}\text{O}$ 反映的全球降温趋势相吻合, 但是 b^* 值在 ~40 Ma 后有升高趋势, 可能与 40~34 Ma 副特提斯洋向西持续退缩, 导致西风带携带来的水汽减少, 气候进一步变干有关 (孙继敏等, 2017; Kaya *et al.*, 2019).

(c) 阶段 (33.7~27.1 Ma) L^* 、 a^* 和 b^* 值的波动幅度均较大, 但是总体上没有明显的变化趋势, a^* 的平均值是整个剖面最低的. 色度值的大幅波动同样体现了沉积环境和岩性的变化. 该阶段的沉积环境也是三角洲前缘-湖泊

相,高 a^* 值为红色泥岩、低 a^* 值为灰绿色砂岩(图5),与(b)阶段不同的是该阶段灰绿色砂岩层明显增多、增厚。(c)阶段 CIW' 值较低,碳酸盐 $\delta^{18}O$ 值偏正,说明气候较干旱(Song *et al.*, 2013; Sun *et al.*, 2020),与这一阶段较深水的粉砂岩和泥岩减少、而较浅水的三角洲前缘砂体增多相一致。柴达木盆地和西宁盆地硅酸盐化学风化强度在34~26 Ma持续降低,说明气候较冷干(Fang *et al.*, 2019b)。西宁盆地的 a^* 也保持了稳定的低值(Fang *et al.*, 2019a)。这些变化特征与深海 $\delta^{18}O$ 值反映的全球温度变化趋势一致,该阶段是早渐新世低温期,且总体上趋势平稳(Zachos *et al.*, 2001)。

(d)阶段(27.1~19.7 Ma) L^* 值在波动中没有明显变化趋势, a^* 和 b^* 值在早期较高,中期最低,后期再次增大,总的变化趋势与深海 $\delta^{18}O$ 值揭示的晚渐新世升温期、早中新世冰期和随后的升温期相吻合(Zachos *et al.*, 2001),说明 a^* 和 b^* 值反映了温度变化。该阶段的 CIW' 值揭示了较高的化学风化作用,中期化学风化作用略有减弱(Song *et al.*, 2013),碳酸盐 $\delta^{18}O$ 值揭示了前期较干旱,后期较湿润的特点(Sun *et al.*, 2020)。准噶尔盆地孢粉组合揭示晚渐新世升温期为森林草原的湿润气候,在早中新世冰期(~23.3 Ma)时快速转变为以荒漠草原为主的干旱气候,随后逐渐变湿,说明高温期湿润,低温期干旱(Tang *et al.*, 2011)。值得注意的是,根据岩性和沉积相分析,~23.3 Ma是大红沟剖面三角洲前缘亚相最盛时期,灰绿色砂岩异常发育,其中可见大量的滑塌构造、楔状、板状斜层理和平行层理(图2)(宋博文等, 2011),低温和快速搬运沉积的灰绿色砂岩导致 a^* 值显著降低。 a^* 和 b^* 值在~26~25 Ma比(c)段明显升高, CIW' 值也揭示了强的化学风化作用(Song *et al.*, 2013),说明气候比较湿润。西宁盆地赤铁矿含量和色度参数值自~26 Ma明显升高,结合生物地层和沉积相,这一时期气候转湿润(Fang *et al.*, 2019a)。同时,~25 Ma也是青藏高原和中亚造山带隆升的重要时期(Xiao *et al.*, 2012; Ji *et al.*, 2017; Song *et al.*, 2019),该构造隆升事件导致了中亚内陆由行星风系转变为季风风系,亚洲内陆干旱化加强,季风区变湿(Sun and Wang, 2005; Zhang *et al.*, 2014)。大红沟剖面在~25 Ma沉积速

率快速增加,但是岩性并没有显著变化,应是对构造隆升事件和降水增多的综合响应,降水的来源可能与东亚季风增强有关(Ji *et al.*, 2017)。

(e)阶段(19.7~17.0 Ma) L^* 值略有降低, a^* 和 b^* 值快速升高。这一阶段大红沟剖面砾岩与砂、泥岩互层,斜层理发育,为三角洲平原沉积,沉积物处在氧化环境下,有利于赤铁矿的形成,因此 a^* 和 b^* 值均比较高。由湖相转变为三角洲平原相说明降水量减少,气候较干旱。大红沟剖面碳酸盐 $\delta^{18}O$ 值和 CIW' 均揭示这一阶段气候较干旱(Song *et al.*, 2013; Sun *et al.*, 2020)。西宁盆地沉积物颜色、粘土矿物和风化指标也揭示了自19.7 Ma气候明显变干旱(Zhang *et al.*, 2015)。准噶尔盆地孢粉组合揭示了该阶段以荒漠草原为主的干旱气候(Tang *et al.*, 2011)。这些证据说明(e)阶段气候较干旱,与深海 $\delta^{18}O$ 值反映的该阶段全球温度较低相对应(Zachos *et al.*, 2001)。 a^* 和 b^* 值在此阶段明显升高主要是由于干旱气候导致沉积物在搬运、沉积过程中长期暴露氧化、形成了更多赤铁矿。

(f)阶段(17.0~13.3 Ma) L^* 快速增多, a^* 和 b^* 值在17~15 Ma的高值后快速减小。17~15 Ma是中中新世气候适宜期(Zachos *et al.*, 2001),说明 a^* 和 b^* 高值对应于高温。大红沟剖面这一阶段碳酸盐 $\delta^{18}O$ 值揭示了湿润气候(Sun *et al.*, 2020),柴达木盆地的孢粉(Miao *et al.*, 2011)和临夏盆地碳酸盐 $\delta^{18}O$ (Dettman *et al.*, 2003)也指示了湿润气候。准噶尔盆地在17.3~16.2 Ma仍以草原植被为主,但是局部木本植被恢复(Tang *et al.*, 2011)。这些证据说明全球升温是亚洲内陆气候变湿的重要原因。大红沟剖面在17~15 Ma岩性明显较之前变细,以细砂岩和泥岩互层为主(图2),逐渐由之前的三角洲平原陆上环境向湖相沉积环境转变,说明在中中新世高温期柴达木盆地气候较湿润。15.0~13.3 Ma期间 a^* 和 b^* 值快速减小、 L^* 值达到剖面最大值与较还原的湖相沉积环境有关。这一时期岩性以青灰色细、粉砂岩和棕灰色泥岩为主,介形虫和轮藻化石丰富,为淡水湖相沉积(Song *et al.*, 2017),较还原的湖相沉积环境不利于氧化环境下赤铁矿的形成。大红沟剖面沉积速率在~15 Ma明显增大(Ji *et al.*, 2017),在柴达木盆地也显示了同期沉积速率增大(Fang *et al.*, 2007),在青藏高

原东北部不同方法也揭示了中中新世发生了构造重组 (Lease, 2014). 粉尘记录则显示 ~15 Ma 亚洲内陆干旱化和东亚夏季风同步增强 (安芷生等, 2006). 基于上述气候与区域构造的研究结果, 大红沟剖面 ~15.0~13.3 Ma 的湖相沉积可能是构造隆升与夏季风增强共同作用的结果, 构造隆升使大红沟剖面所在位置进一步拗陷 (Yin *et al.*, 2008), 强的夏季风带来了更多降水.

(g) 阶段 (13.3~9.5 Ma) L^* 值没有明显变化趋势, 平均值较上阶段略有增加 (表 1), a^* 和 b^* 值均在波动中逐渐降低, 与深海 $\delta^{18}\text{O}$ 值揭示的逐渐降温趋势相符 (Zachos *et al.*, 2001), 说明温度对 a^* 和 b^* 值有重要的影响. 该阶段岩性仍以砂岩和泥质粉砂岩互层为主, 介形虫化石种属揭示了 13.3 Ma 由淡水湖泊转变为半咸水湖泊, 风化指数揭示了化学风化作用减弱 (Song *et al.*, 2017). 大红沟剖面和临夏盆地碳酸盐 $\delta^{18}\text{O}$ 值 (Dettman *et al.*, 2003; Sun *et al.*, 2020)、柴达木盆地孢粉 (Miao *et al.*, 2011) 和准噶尔盆地孢粉均揭示了干旱的气候 (Tang *et al.*, 2011). 这些证据说明 (g) 阶段随着全球降温, 气候干旱化.

(h) 阶段 (9.5~7.0 Ma) L^* 值没有明显变化趋势, 平均值较上阶段略有增加 (表 1), a^* 和 b^* 值略有升高趋势, 平均值较上阶段略有增加 (表 1). 深海 $\delta^{18}\text{O}$ 值揭示 ~9.5 Ma 为降温趋势中的低温期, ~8.0 Ma 温度略有上升 (Zachos *et al.*, 2001), 因此 a^* 和 b^* 值变化与全球温度相符. 这一阶段大红沟剖面主体岩性为砂砾岩, 平行层理和斜层理发育, 可见底冲刷面, 沉积环境由半咸水湖相转变为曲流河-辫状河, 碳酸盐 $\delta^{18}\text{O}$ 值偏正揭示了干旱气候 (Sun *et al.*, 2020). 这一时期临夏盆地碳酸盐 $\delta^{18}\text{O}$ 偏正 (Dettman *et al.*, 2003)、柴达木盆地 (Miao *et al.*, 2011) 和准噶尔盆地 (Tang *et al.*, 2011) 的孢粉组合以及藏南扎达盆地的生标指标 (Xie *et al.*, 2012) 均揭示了强的干旱化事件. 这些证据均表明这一阶段为干旱气候. 大红沟剖面 ~9.5 Ma 岩性变粗、沉积速率倍增, 揭示了一次快速隆升事件 (Ji *et al.*, 2017), 与青藏高原晚中新世构造隆升事件发生的时间相符 (季军良等, 2010; 徐亚东等, 2010). 因此, 这一干旱化事件被认为是由构造驱动 (安芷生等, 2006; Xie *et al.*, 2012).

5 小结

项目组前期在柴达木盆地北缘大红沟剖面建立了 52~7 Ma 河湖相沉积物的磁性地层学时间标尺, 为研究青藏高原东北部长时间尺度古气候变化提供了年代学基础. 本文以大红沟剖面河湖相沉积物的颜色参数为研究对象, 结合剖面沉积相、区域构造及区域和全球气候变化, 探讨了河湖相沉积物色度参数的影响因素及其反映的气候变化.

(1) 大红沟剖面古-新近系由老到新包括路乐河组、下/上干柴沟组、下/上油砂山组和狮子沟组, 各组之间的色度参数具有显著差别.

(2) 颜色参数与全球温度变化密切相关, 一般高温对应于高 a^* 和 b^* 值. 但是, 河湖相沉积由于相变引起的岩性和氧化-还原环境变化会影响色度参数.

(3) 根据颜色参数的变化, 将大红沟剖面的古气候变化划分为 8 个阶段: (a) 52.0~44.2 Ma 气候湿热, 全球高温和广阔的副特提斯海是湿热气候的原因; (b) 44.2~33.7 Ma 气候在干湿波动中逐渐变干, 对应于全球逐渐降温和副特提斯海西退; (c) 33.7~27.1 Ma 气候进一步变干, 与早渐新世全球低温期对应; (d) 27.1~19.7 Ma 随着全球温度回升及东亚夏季风出现, 气候逐渐变湿, 但是在早中新世小冰期期间气候较干旱; (e) 19.7~17.0 Ma 气候较干旱, 对应于早中新世全球较低温期; (f) 17.0~13.3 Ma 气候湿润, 高湖面期对应于中中新世暖期和东亚夏季风增强期, 可能与构造拗陷有关; (g) 13.3~9.5 Ma 气候快速变干, 与晚中新世全球降温有关; (h) 9.5~7.0 Ma 气候进一步变干旱, 对应于全球持续降温和晚中新世青藏高原重要的构造隆升.

References

- An, Z. S., Zhang, P. Z., Wang, E. Q., et al., 2006. Changes of the Monsoon-Arid Environment in China and Growth of the Tibetan Plateau since the Miocene. *Quaternary Sciences*, 26(5): 678–693 (in Chinese with English abstract).
- Dai, S., Liu, J. W., Zhang, M. Z., et al., 2011. Climate Change during 140.66–124.19 Ma Recorded by the Color of the Sediments of the Hekou Group from Lanzhou-Minhe Basin. *Acta Geologica Sinica*, 85(6): 1058–1067 (in Chinese with English abstract).
- Dettman, D. L., Fang, X. M., Garzzone, C. N., et al., 2003. Uplift-Driven Climate Change at 12 Ma: a

- Long $\delta^{18}\text{O}$ Record from the NE Margin of the Tibetan Plateau. *Earth and Planetary Science Letters*, 214(1–2): 267–277. [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(03\)00383-2](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(03)00383-2)
- Fang, X. M., Fang, Y. H., Zan, J. B., et al., 2019a. Cenozoic Magnetostratigraphy of the Xining Basin, NE Tibetan Plateau, and Its Constraints on Paleontological, Sedimentological and Tectonomorphological Evolution. *Earth - Science Reviews*, 190: 460–485. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.01.021>
- Fang, X. M., Galy, A., Yang, Y. B., et al., 2019b. 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., 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>
- Helmke, J. P., Schulz, M., Bauch, H. A., 2002. Sediment-Color Record from the Northeast Atlantic Reveals Patterns of Millennial-Scale Climate Variability during the Past 500, 000 Years. *Quaternary Research*, 57(1): 49–57. <https://doi.org/10.1006/qres.2001.2289>
- Hoorn, C., Straathof, J., Abels, H. A., et al., 2012. A Late Eocene Palynological Record of Climate Change and Tibetan Plateau Uplift (Xining Basin, China). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 344–345: 16–38. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2012.05.011>
- Ji, J. F., Chen, J., Balsam, W., et al., 2007. Quantitative Analysis of Hematite and Goethite in the Chinese Loess-Paleosol Sequences and Its Implication for Dry and Humid Variability. *Quaternary Sciences*, 27(2): 221–229 (in Chinese with English abstract).
- 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>
- Ji, J. L., Zhang, K. X., Qiang, T., et al., 2010. Magnetostratigraphy of the Neogene Strata in Xunhua Basin, Qinghai Province. *Earth Science*, 35(5): 803–810 (in Chinese with English abstract).
- Jiang, H. C., Ding, Z. L., Xiong, S. F., 2007. Magnetostratigraphy of the Neogene Sikouzi Section at Guyuan, Ningxia, China. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 243(1–2): 223–234. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2006.07.016>
- Kaya, M. Y., Dupont-Nivet, G., Proust, J. N., et al., 2019. Paleogene Evolution and Demise of the Proto-Paratethys Sea in Central Asia (Tarim and Tajik Basins): Role of Intensified Tectonic Activity at Ca. 41 Ma. *Basin Research*, 31(3): 461–486. <https://doi.org/10.1111/bre.12330>
- Lease, R. O., 2014. Cenozoic Mountain Building on the Northeastern Tibetan Plateau. *Special Paper of the Geological Society of America*, 507: 115–127. <https://doi.org/10.1130/2014.2507>
- Lu, J. F., Song, B. W., Chen, R. M., et al., 2010. Palynological Assemblage of Eocene-Oligocene Pollen and Their Biostratigraphic Correlation in Dahonggou, Qaidam Area, Qaidam Basin. *Earth Science*, 35(5): 839–848 (in Chinese with English abstract).
- Meijer, N., Dupont-Nivet, G., Abels, H. A., et al., 2019. Central Asian Moisture Modulated by Proto-Paratethys Sea Incursions since the Early Eocene. *Earth and Planetary Science Letters*, 510: 73–84. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2018.12.031>
- Miao, Y. F., Fang, X. M., Herrmann, M., et al., 2011. Miocene Pollen Record of KC-1 Core in the Qaidam Basin, NE Tibetan Plateau and Implications for Evolution of the East Asian Monsoon. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 299(1–2): 30–38. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2010.10.026>
- Ogg, J. G., 2012. Geomagnetic Polarity Time Scale. In: Gradstein, F. M., Ogg, J. G., Schmitz, M., Ogg, G., eds., *The Geological Time Scale 2012*. Elsevier, Amsterdam.
- Page, M., Licht, A., Dupont-Nivet, G., et al., 2019. Synchronous Cooling and Decline in Monsoonal Rainfall in Northeastern Tibet during the Fall into the Oligocene Icehouse. *Geology*, 47(3): 203–206. <https://doi.org/10.1130/g45480.1>
- Song, B. W., Ji, J. L., Wang, C. W., et al., 2017. Intensified Aridity in the Qaidam Basin during the Middle Miocene: Constraints from Ostracod, Stable Isotope, and Weathering Records. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 54(3): 242–256. <https://doi.org/10.1139/cjes-2016-0052>
- Song, B. W., Spicer, R. A., Zhang, K. X., et al., 2020. Qa-

- idam 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., Hou, Y. F., et al., 2019. New Insights into the Provenance of Cenozoic Strata in the Qaidam Basin, Northern Tibet: Constraints from Combined U-Pb Dating of Detrital Zircons in Recent and Ancient Fluvial Sediments. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 533: 109254. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2019.109254>
- Song, B. W., Zhang, K. X., Ji, J. L., et al., 2011. Outcrop Sequence Stratigraphy of the Paleogene Strata of Da-honggou Region in the Northeast Margin of Qaidam Basin. *Geological Science and Technology Information*, 30 (3): 25—32 (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>
- Sun, J. M., Liu, W. G., Liu, Z. H., et al., 2017. Effects of the Uplift of the Tibetan Plateau and Retreat of Neotethys Ocean on the Stepwise Aridification of Mid-Latitude Asian Interior. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 32(9): 951—958 (in Chinese with English abstract).
- Sun, X. J., Wang, P. X., 2005. How Old is the Asian Monsoon System?—Palaeobotanical Records from China. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 222 (3—4): 181—222. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2005.03.005>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2020.104490>
- Tang, Z. H., Ding, Z. L., White, P. D., et al., 2011. Late Cenozoic Central Asian Drying Inferred from a Palynological Record from the Northern Tian Shan. *Earth and Planetary Science Letters*, 302(3—4): 439—447. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2010.12.042>
- Wang, W. T., Zheng, W. J., Zhang, P. Z., et al., 2017. Expansion of the Tibetan Plateau during the Neogene. *Nature Communications*, 8(1): 15887. <https://doi.org/10.1038/ncomms15887>
- Wang, Y. Z., Wu, C. D., Ma, J., et al., 2019. Strata Color Rhythm of the Cretaceous-Neogene and Evolution of Palaeoenvironment and Palaeoclimate in Junggar Basin. *Journal of Palaeogeography*, 21(3): 451—468 (in Chinese with English abstract).
- Xiao, G. Q., Guo, Z. T., Dupont-Nivet, G., et al., 2012. Evidence for Northeastern Tibetan Plateau Uplift between 25 and 20 Ma in the Sedimentary Archive of the Xining Basin, Northwestern China. *Earth and Planetary Science Letters*, 317—318: 185—195. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2011.11.008>
- Xie, S. C., Pancost, R. D., Chen, L., et al., 2012. Microbial Lipid Records of Highly Alkaline Deposits and Enhanced Aridity Associated with Significant Uplift of the Tibetan Plateau in the Late Miocene. *Geology*, 40(4): 291—294. <https://doi.org/10.1130/g32570.1>
- Xu, Y. D., Zhang, K. X., Wang, G. C., et al., 2010. Geological Significance of Miocene—Early Pleistocene Palynological Zones in the Gyirong Basin, Southern Tibet. *Earth Science*, 35(5): 759—773 (in Chinese with English abstract).
- Yang, S. L., Ding, Z. L., 2003. Color Reflectance of Chinese Loess and Its Implications for Climate Gradient Changes during the Last Two Glacial-Interglacial Cycles. *Geophysical Research Letters*, 30(20): 2058. <https://doi.org/10.1029/2003gl018346>
- Yang, S. L., Fang, X. M., Li, J. J., et al., 2001. Qualitative to Semi-Quantitative Relationship between Topsoil Color and Climate. *Science in China (Series D)*, 31(S1): 175—181(in Chinese).
- Yin, A., Dang, Y. Q., Wang, L. C., et al., 2008. Cenozoic Tectonic Evolution of Qaidam Basin and Its Surrounding Regions (Part 1): The Southern Qilian Shan-Nan Shan Thrust Belt and Northern Qaidam Basin. *Geological Society of America Bulletin*, 120(7—8): 813—846. <https://doi.org/10.1130/b26180.1>
- Zachos, J., Pagani, M., Sloan, L., et al., 2001. Trends, Rhythms, and Aberrations in Global Climate 65 Ma to Present. *Science*, 292(5517): 686—693. <https://doi.org/10.1126/science.1059412>
- Zhang, C. X., Xiao, G. Q., Guo, Z. T., et al., 2015. Evidence of Late Early Miocene Aridification Intensification in the Xining Basin Caused by the Northeastern Tibetan Plateau Uplift. *Global and Planetary Change*, 128: 31—46. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2015.02.002>
- Zhang, Y. B., Sun, D. H., Li, Z. J., et al., 2014. Cenozoic Record of Aeolian Sediment Accumulation and Aridification from Lanzhou, China, Driven by Tibetan Plateau Uplift and Global Climate. *Global and Plane-*

tary Change, 120: 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2014.05.009>

Zhuang, G. S., Hourigan, J. K., Koch, P. L., et al., 2011. Isotopic Constraints on Intensified Aridity in Central Asia around 12 Ma. *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

安芷生, 张培震, 王二七, 等, 2006. 中新世以来我国季风-干旱环境演化与青藏高原的生长. *第四纪研究*, 26(5): 678–693.

戴霜, 刘俊伟, 张明震, 等, 2011. 兰州-民和盆地八盘峡剖面河口群沉积物色度纪录的 140.66~124.19 Ma 间气候变化. *地质学报*, 85(6): 1058–1067.

季峻峰, 陈骏, Balsam, W., 等, 2007. 黄土剖面中赤铁矿和针铁矿的定量分析与气候干湿变化研究. *第四纪研究*, 27(2): 221–229.

季军良, 张克信, 强泰, 等, 2010. 青海循化盆地新近纪磁性

地层学. *地球科学*, 35(5): 803–810.

路晶芳, 宋博文, 陈锐明, 等, 2010. 柴达木盆地大柴旦地区大红沟古近纪孢粉组合序列与地层对比. *地球科学*, 35(5): 839–848.

宋博文, 张克信, 季军良, 等, 2011. 柴达木盆地东北缘大红沟地区古近系露头层序地层. *地质科技情报*, 30(3): 25–32.

孙继敏, 刘卫国, 柳中晖, 等, 2017. 青藏高原隆升与新特提斯海退却对亚洲中纬度阶段性气候干旱的影响. *中国科学院院刊*, 32(9): 951–958.

王熠哲, 吴朝东, 马健, 等, 2019. 准噶尔盆地白垩纪-新近纪地层颜色韵律与古环境和古气候演化. *古地理学报*, 21(3): 451–468.

徐亚东, 张克信, 王国灿, 等, 2010. 西藏南部吉隆盆地中新世-早更新世孢粉组合带及其地质意义. *地球科学*, 35(5): 759–773.

杨胜利, 方小敏, 李吉均, 等, 2001. 表土颜色和气候定性至半定量关系研究. *中国科学(D辑:地球科学)*, 31(S1): 175–181.