J. Lake Sci.(湖泊科学),2026,38(6):000-000
DOI 10.18307/2026.0653
©2026 by *Journal of Lake Sciences*

青藏高原中部热那错年纹层的形成机理*

殷浩真[1]，张琪[2]，毛欣[3,4]，刘兴起[1**]
（1：首都师范大学资源环境与旅游学院，北京 100048）
（2：山东女子学院旅游学院，济南 250352）
（3：中国地质科学院水文地质环境地质研究所，石家庄 050061）
（4：中国地质调查局第四纪年代学与水文环境演变重点实验室，石家庄 050061）

摘 要:湖泊年纹层是进行高分辨率古气候环境研究的重要载体之一，其分辨率可以达到年际乃至季节尺度，能够为气候重建提供高精度的时间标尺。通过对年纹层形成机理的研究，可以更深入地理解年纹层的形成过程及其记录的气候环境信息。本文以青藏高原中部的热那错年纹层为研究对象，结合 $^{210}Pb/^{137}Cs$ 测年与纹层计年结果，证实其纹层为年纹层。通过纹层大薄片观察、纹层薄片的微 X 射线（μ-XRF）元素面扫描、岩芯的 X 射线衍射分析（XRD）以及粗颗粒表面特征的扫描电镜下观察等方法，系统地分析了热那错年纹层的结构、成分和形貌特征，进而探讨其形成过程与机理。研究结果表明，热那错年纹层由浅色层和深色层交替组成：浅色层形成于夏季，主要由富含 Ca 元素的自生碳酸盐文石构成，颗粒较细，同时该层含有大量枝角类碎片；深色层形成于冬季湖泊封冻后，由冰面下缓慢沉淀的富含 Fe 的黏土细颗粒组分与冰面上富含 Si 的石英、长石风成粗颗粒物质（冰面融化后沉积至湖底）共同组成。
关键词：青藏高原中部；热那错；年纹层；形成机理

Formation mechanism of varved sediments from Rena Co, central Tibetan Plateau

Yin Haozhen[1], Zhang Qi[2], Mao Xin[3,4]& Liu Xingqi[1**]
([1] *College of Resource Environment and Tourism, Capital Normal University, Beijing 100048, P.R.China;*
[2] *College of Tourism, Shangdong Women's University, Jinan 250352, P.R.China;*
[3] *Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Shijiazhuang, 050061, P.R.China;*
[4] *Key Laboratory of Quaternary Chronology and Hydrological-Environment Evolution, China Geological Survey, Shijiazhuang, 050061, P.R.China*)

Abstract: Varved lake sediments serve as critical archives for high-resolution paleoclimate and paleoenvironmental research. Because they preserve seasonal to interannual signals, these sediments allow the establishment of precise chronologies for climate reconstruction. Understanding the mechanisms behind varve formation is essential for interpreting depositional processes and for extracting reliable climatic and environmental information from these records. In this study, we examine laminated sediments from Rena Co, a lake in the central Tibetan Plateau. Through combined analyses of 210Pb/137Cs dating and varve counting, we confirm that these laminations are true varves. We conducted microscopic inspections of varve thin sections, micro-X-ray fluorescence (μ-XRF) elemental mapping, X-ray diffraction (XRD) analysis of bulk sediment, and scanning electron microscopy (SEM) imaging of coarse particle surface textures. These methods allowed us to systematically characterize the structural, compositional, and morphological features of the Rena Co varves, and to investigate their formation processes and primary controls. Our results indicate that the varves consist of alternating light and dark layers. Light layers are formed during summer and are composed mainly of fine-grained, Ca-rich authigenic carbonate (e.g., aragonite) and abundant cladoceran fossil fragments.

*2026-01-21 收稿；2026-02-23 收修改稿。
国家自然科学基金项目（42572234, 42272218）资助.
通信作者；E-mail：xqliu@niglas.ac.cn

Dark layers accumulate in winter, after the development of lake ice. These layers contain fine-grained Fe-rich clay minerals that settled slowly under the ice cover, as well as coarser Si-rich aeolian materials (e.g., quartz and feldspar). The aeolian particles were first trapped on the ice surface and later released to the lakebed during ice melt.

Keywords: central Tibetan Plateau; Rena Co; varve; formation mechanism

湖泊年纹层是以年为周期的层状沉积物，同冰芯、石笋和树轮一样，是高分辨率古气候研究的主要载体。通过对湖泊年纹层结构、成分和形貌特征的研究，可以获得年际乃至季节性的高分辨率古气候环境信息[1-3]。目前利用湖泊年纹层进行的古气候研究主要集中在欧洲[4-6]、北美[7, 8]和日本[4, 9]等地区[2, 3, 10, 11]。中国的湖泊年纹层研究起步相对较晚[12, 13]，主要有东北龙岗火山区的玛珥湖（四海龙湾、二龙湾和小龙湾）[14-18]、河北坝上高原安固里淖[19]、柴达木盆地的苏干湖[20]，以及青藏高原的库赛湖[21, 22]、新路海[23-25]和江错[26, 27]。

对年纹层形成机理的研究，是理解各种环境代用指标气候指示意义的基础，对于重建气候环境演化过程至关重要。例如，青藏高原的新路海、江错以及芬兰南部 Lake Nautajärvi 等湖泊年纹层中，由径流输入形成的粗颗粒层厚度可有效指示夏季降水强度[23, 24, 26, 28] 。位于柴达木盆地的苏干湖，其年纹层在漫长冬季冰封期形成的富含有机质的深色层，可用于反映湖泊初级生产力的变化[20]。对可可西里地区库赛湖的石英颗粒表面形态研究进一步揭示，其粗颗粒年纹层形成于冬季湖面封冻期，主要由风力搬运作用形成，其厚度可以指示当地风沙活动强度 [21, 22, 29]。此外，约阿湖（Lake Yoa）和凡湖（Lake Van）的年纹层中，夏季形成的自生碳酸盐（如方解石和文石）构成的浅色层，可用于反映当地蒸发作用的强弱[30, 31]。而日本 Lake Suigetsu 的年纹层中，硅藻层与有机质层的相对厚度和成分变化，则为重建东亚季风区的季节性强度、有效湿度和水文条件提供了高分辨率指标[9, 32]。

位于青藏高原中部阿里地区的热那错纹层发育，为研究该区域高分辨率古气候环境提供了理想材料。本文以该湖的 20 cm 沉积岩芯为研究对象，通过 $^{210}Pb/^{137}Cs$ 测年及纹层计年，验证热那错的纹层是否为年纹层。研究进一步利用显微镜下观察纹层大薄片、纹层薄片的微 X 射线（μ-XRF）元素面扫描、岩芯的 X 射线衍射分析（XRD）以及粗颗粒表面特征扫描电镜下观察等方法，系统地揭示了热那错年纹层的结构特征、元素特征、矿物特征以及纹层中的粗颗粒表面形态，并在此基础上探讨了热那错年纹层的形成过程和机制。该研究有助于从年际至季节性尺度上理解热那错年纹层的形成过程，进而为青藏高原中部高分辨率古气候环境重建提供强有力的支撑。

1 研究区域概况

热那错（32°42′36″-32°45′36″N, 84°13′48″-84°17′24″E）位于西藏自治区阿里地区改则县境内，地处青藏高原腹地，受到季风和西风的综合影响（图 1A）。湖水补给主要来源于湖泊北部和东部的河流（图 1B）。湖泊呈近似圆形，湖面海拔 4599 m，湖泊面积为 17 km^2，流域集水面积为 440 km^2，最大水深为 22 m（图 1C）。湖水 pH 值为 9.7，矿化度为 18.79 g/L，属于弱度碳酸盐型微咸水湖[33]。距热那错约 60 km 的改则县气象站（32°18′36″N , 84°36′E）1967-2022 年的气象资料显示，该地区年平均降水量为 355.2 mm，年潜在蒸发约 582.6 mm，降水集中在 6-9 月份，其中 7、8 月份的降水量可占全年总降水量的 50%；年平均气温为-5.7℃，6-9 月份的气温通常在 0℃以上，湖面从每年 10 月冰封至翌年 5 月，封冻期长达 8 个月；年平均风速为 2.25 m/s，最大风速为 4.10m/s（图 1D）。

2 研究材料与方法

2.1 样品采集

2019 年 8 月使用奥地利生产的 UWITEC 重力采样器，在热那错水深 20 m 处（32°43′48″N，84°15′E，海拔 4599 m）采集了一根长度约 20 cm 的岩芯（RNCS-2019）（图 1C）。将岩芯运送至首都师范大学湖泊沉积实验室后，利用岩芯切割机沿 PVC 管的中轴线将岩芯 RNCS-2019 剖开，对新鲜的岩芯切面进行拍照和岩性描述后，储存在恒温 4℃ 的冰箱中。

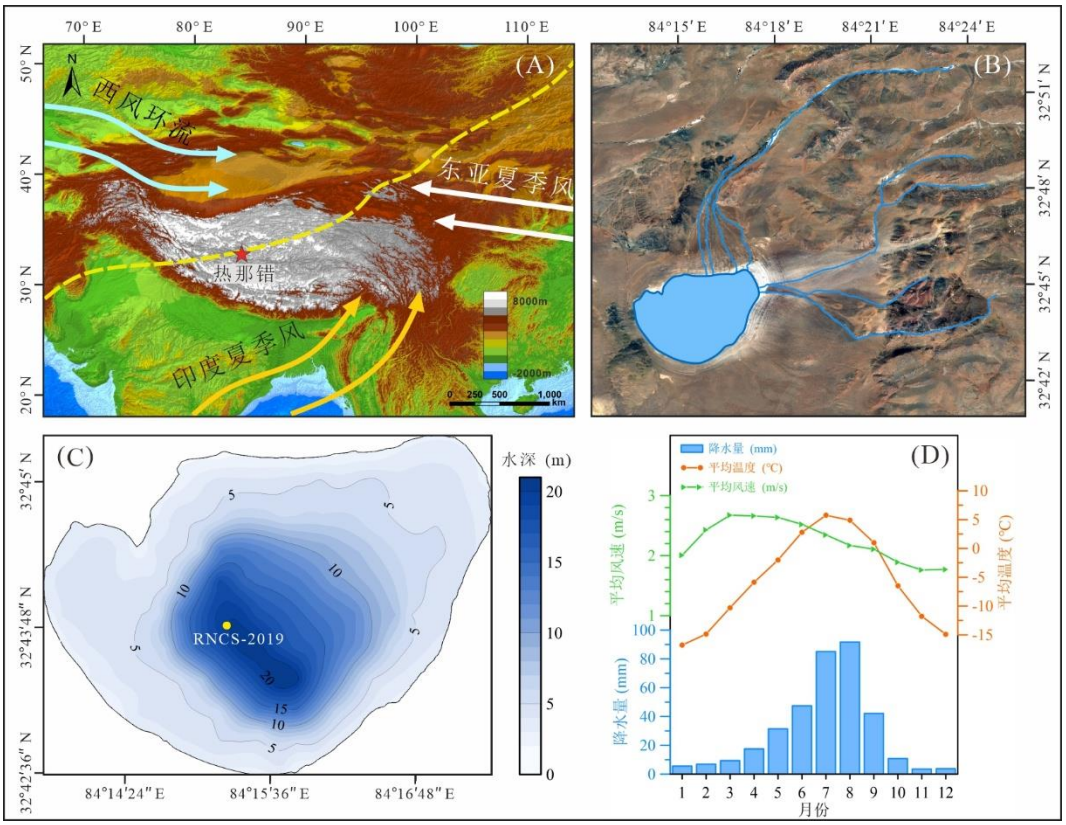

图 1（A）热那错在青藏高原的位置（红色五角星）；（B）热那错流域地形图；（C）热那错水深图及岩芯 RNCS-2019 钻孔位置（黄色圆圈）；（D）改则县气象站气象记录（1967-2022 年）

Fig. 1 (A) Location of Rena Co on the Tibetan Plateau (red pentagram); (B) Topographic map of Rena Co; (C) Bathymetric contour map of Rena Co and sampling site of core RNCS-2019 (yellow circle); (D) Meteorological data from Gaize Station,1967-2022

2.2 纹层薄片制作和纹层计年

从剖开的一半岩芯中，用分样铲自岩芯 RNCS-2019 顶部至底部逐一分割出 60 mm×15 mm×15 mm 的样块（每个样块之间互相重合 20 mm），放入 70 mm×20 mm×20 mm 铝盒中，用液氮快速冷冻约 15 min 后置于真空冷冻干燥机中干燥 48 h，在通风橱中对干燥的样块注环氧树脂胶，对注胶完全凝固后的样块进行粘片、切割、粗磨、细磨、抛光，将制好的纹层薄片放在光学显微镜下观察和计年，为保证计年的准确性，纹层计年分别由 3 位研究人员完成。

2.3 $^{210}Pb/^{137}Cs$ 测年

岩芯 RNCS-2019 以 1 cm 的间隔分样，样品烘干后取 3~5 g 的适量样品，研磨至 100 目左右，装入 5 ml 特定的透明 PVC 管中，利用美国 ORTEC 公司的高纯锗谱仪测量样品中的 ^{210}Pb 和 ^{137}Cs 的比活度。

2.4 微区 X 射线荧光分析（μ-XRF）

利用布鲁克高性能微区 X 射线荧光光谱仪（M4 TORNADO）对纹层薄片进行微区 X 射线荧光分析（μ-XRF）元素面扫描，扫描的电压设置为 50 kV，扫描步长为 20 μm。

2.5 X 射线衍射分析（XRD）

将岩芯 RNCS-2019 按照 2 cm 的间隔取样，取大约 0.5~1 g 的干样，在玛瑙研钵中研磨至 350 目左右，置于 PANalytical X' Pert Pro X 射线粉末衍射仪的样品台上进行 X 射线衍射分析，各种矿物的百分比采用 X' Pert HighScore Plus 软件进行半定量分析。

2.6 纹层中粗颗粒表面微形貌特征分析

随机选取岩芯 RNCS-2019 中的粗颗粒层，称取重量大约 2~3g 的湿样，加入 10ml 浓度为 20%的 HCl 和 H_2O_2 溶液，分别去除碳酸盐和有机质，随后加入 10 ml 浓度为 0.05 M 的六偏磷酸钠[（$NaPO_3$）$_6$]溶液，超声振荡 5 min 后过 500 μm 和 150 μm 的筛网。将处理后的粗颗粒用铜导电胶粘至载样台上，使用 LEICA EM ACE600 高真空镀膜仪抽真空，并在颗粒表面喷镀金膜，利用中国地质大学（北京）扫描电子显微镜实验室 Zeiss Supra 55 场发射扫描电镜对颗粒进行形态、形貌观察。

3 结果

3.1 纹层年代学

岩芯 RNCS-2019 孔沉积物中 ^{137}Cs 的比活度在约 12 cm 显著增加，至约 10 cm 处达到峰值，这两个深度分别与 20 世纪 50 年代初大气层核试验的开始期和 1963 年世界核武器试验的高峰期相对应[34]（图 2A）；^{210}Pb 随着深度的增加呈指数递减（图 2B），^{210}Pb 的 CFCS 模式年龄显示，10 cm 的年代为 1963 A.D.，与 ^{137}Cs 峰值对应的 1963 A.D.基本吻合（图 2A）。由三位研究人员获得的纹层计年结果随深度的变化十分一致，10 cm 左右处，纹层计年的平均年代为 1962 A.D.，在误差范围内，与 ^{137}Cs 确定的 1963 A.D.以及 ^{210}Pb 的 CFCS 模式确定的 1963 A.D.基本吻合（图 2A），表明热那错的纹层为年纹层。

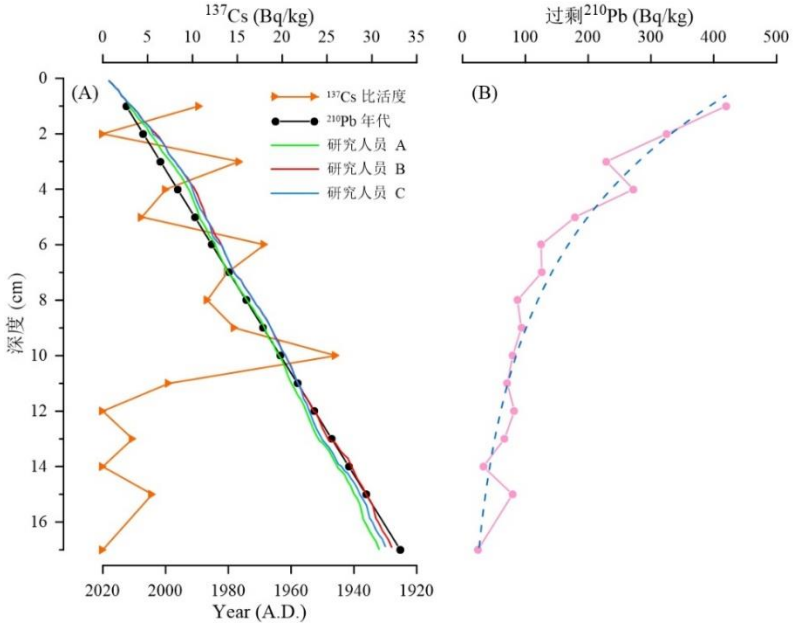

图 2 （A）热那错纹层计年与 ^{210}Pb/^{137}Cs 测年结果对比；（B）过剩 ^{210}Pb 随深度增加呈指数递减

Fig.2 (A)Comparison between varve chronology and ^{210}Pb/^{137}Cs dating results from Rena Cuo; (B) The excess ^{210}Pb decreases exponentially with increasing depth.

3.2 年纹层的结构特征

通过对热那错纹层大薄片进行显微镜下观察，可以看出其纹层整体上是由浅色层和深色层交互组成的（图 3A）。深色层较薄，沉积物颗粒较粗（图 3B），深色层的厚度范围为 0.14-1.99 mm，平均为 0.61 mm；相比之下，浅色层较厚，沉积物颗粒较细（图 3C），浅色层的厚度范围为 0.43-2.55 mm，平均为 1.23 mm，且在该层中发现大量的枝角类碎片（图 3D）。

3.3 年纹层的元素特征

从热那错纹层薄片的 μ-XRF 元素面扫描结果来看（图 4），热那错年纹层中 Ca 元素层和 Fe、Si 元素层分布具有明显差异（图 4B-D）。Ca 元素含量较高的层（橙色表示）对应浅色层（图 4B），Ca 元素层较厚；富含 Fe 元素（深蓝色表示）和 Si 元素（浅蓝色表示）的层对应深色层（图 4C-D），Fe、Si 元素层较薄。

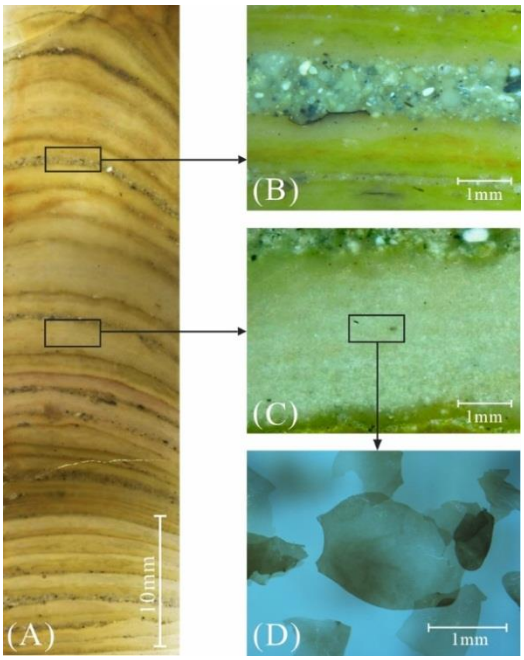

图 3（A）显微镜下纹层薄片图像；（B）深色层中富含粗颗粒；（C）浅色层；（D）浅色层中的枝角类

Fig. 3 (A) Varve thin section under optical microscope; (B) Coarse-grained particles in the dark-colored layer; (C) Light-colored layer; (D) Cladoceran fragments in the light-colored layer.

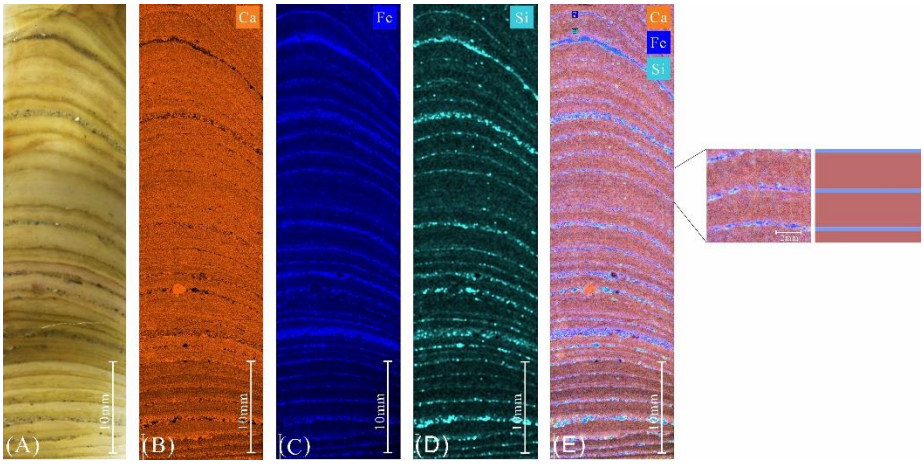

图 4 热那错的年纹层薄片以及 μ-XRF 元素面扫描图像

（A）显微镜下纹层薄片图像；（B）Ca 元素面扫描图像；（C）Fe 元素面扫描图像；（D）Si 元素面扫描图像；（E）Ca、Si 和 Fe 元素面扫描图像

Fig. 4 Varve thin section of the sediments and μ-XRF elemental mapping images of varve thin sections from Rena Co. (A) Varve thin section under optical microscope; (B) Elemental mapping image of Ca; (C) Elemental mapping image of Fe; (D) Elemental mapping image of Si; (E) Elemental mapping image of Ca, Fe and Si.

3. 4 年纹层的矿物特征

岩芯 RNCS-2019 的 XRD 分析结果表明，矿物由文石、白云石、水菱镁矿、石英、伊利石、钠长石、斜绿泥石以及少量的方解石和无水芒硝组成（图 5-6），其中碳酸盐矿物的含量最高，平均含量可达 61.90%（图 5），从热那错年纹层的结构特征和元素特征可以看出，浅色层 Ca 元素含量很高（图 4B），而文石

为主要的碳酸盐矿物，其平均含量占碳酸盐矿物的 82.89%（图 5）。因此浅色纹层中的矿物主要以文石为主，含有少量的白云石和方解石。而深色层中 Fe 和 Si 元素的含量很高（图 4C-D），在检测出的矿物中除斜绿泥石中含有 Fe 元素[35, 36]，其他矿物中很少含 Fe（图 5）。因此富含 Fe 元素层应该以斜绿泥石为主；而富含 Si 元素层应该以硅酸盐的石英和铝硅酸盐的钠长石为主。

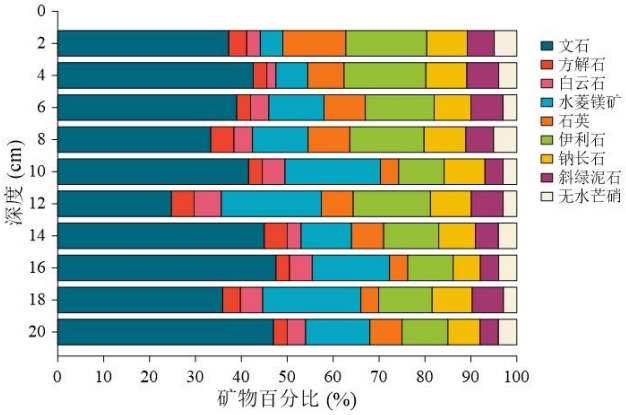

图 5 岩芯 RNCS-2019 的 XRD 分析结果

Fig. 5 The XRD analysis results of core RNCS-2019.

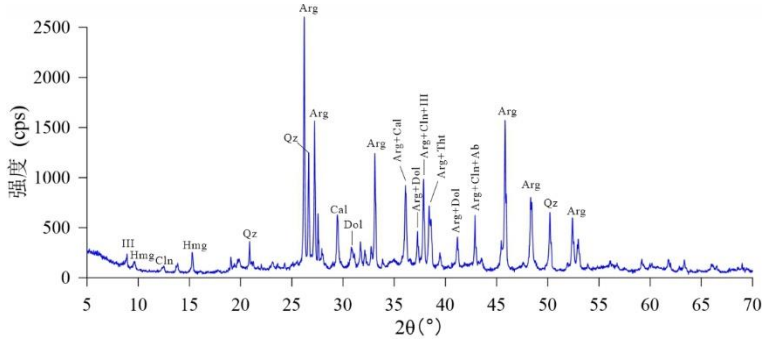

图 6 热那错的 XRD 矿物衍射图谱

矿物名称及缩写：文石（Arg），方解石（Cal），白云石（Dol），水菱镁矿（Hmg），石英（Qz），伊利石（III），钠长石（Ab），斜绿泥石（Cln），无水芒硝（Tht）

Fig. 6 The XRD mineral diffraction pattern of Rena Cuo.

Mineral names and abbreviations: Aragonite (Arg), Calcite (Cal), Dolomite (Dol), Hydromagnesite (Hmg), Quartz (Qz), IIIite (III), Albite (Ab), Clinochlore (Cln), Thenardite (Tht).

3.5 纹层中粗颗粒表面微形貌特征

对岩芯 RNCS-2019 孔石英颗粒 35 种微形貌特征的统计结果表明，出现频率较高的机械成因微形貌特征有圆形轮廓（图 7A-C）、半棱形轮廓（图 7D）、贝壳状断口（图 7C-F）、弓形阶梯（图 7D）、直形阶梯（图 7F）、翻板（图 7A、B、D）、新月形撞击坑（图 7F）和碟形坑（图 7C）等；化学成因的微形貌主要有溶蚀坑（图 7C）；机械和化学成因的微形貌特征为低浮雕（图 7A-C）、中浮雕（图 7D）和黏附颗粒（图 7C、E）。除了石英颗粒外，热那错纹层中的长石颗粒表面磨圆度也十分高（图 8）。

4 热那错年纹层的形成机理和过程

湖泊纹层的形成机理，主要依赖于对年纹层层偶类型的解析，年纹层层偶类型可分为以下三类[3]：（1）碎屑型；（2）生物型；（3）化学型。碎屑纹层多为强径流输入湖泊而沉积的粉砂—砂粗颗粒纹层，以及径流较弱时悬浮的黏土沉降形成的细颗粒纹层，该类型的年纹层在冰川融水补给的湖泊中较为常见[37-39]。生物纹层的形成源于水体或陆地生物生产力随季节的变化，典型生物纹层包含一层硅藻壳体或春、夏季形

成的藻类，此类纹层常见于温带、亚热带及热带气候区的环境[3, 40-42]。湖水夏季蒸发强烈（例如在干旱-半干旱气候条件下），水中的离子达到过饱和状态时就会发生化学沉积[43, 44]，也可能由生物和物理因素诱发[45]，从而形成化学年纹层。湖泊年纹层的存在形式多样，既有单一的纹层类型，也有由两种或三种纹层构成的混合层偶[3, 46]。青藏高原不同湖泊发育了各具特色的年纹层类型，其形成过程因沉积环境而异。例如，新路海的纹层为单一的碎屑年纹层：浅色粉砂层源自春、夏季冰川融水和季节性降水携带的外源碎屑物质，而深色黏土层则形成于冬季湖面冰封期间，由湖水中悬浮的细颗粒组分沉降而成[23, 24]。库赛湖发育碎屑—化学年纹层，由冬季冰面风成物质形成的粗颗粒深色层与夏季沉积的细碎屑矿物、生物残体及自生碳酸盐组成的细颗粒浅色层交替构成[21, 29]。江错的年纹层类型为碎屑—有机质纹层，夏季外源碎屑物质经径流进入到湖中形成粗颗粒层，冬季湖水中悬浮的细颗粒和有机质沉积成层[26]。柴达木盆地苏干湖的年纹层为化学—生物年纹层，夏半年主要由湖水强烈蒸发形成的浅色碳酸盐层构成，而在漫长的冬季冰封期，则形成以有机质为主的深色层[20]。下面，我们将从热那错年纹层层偶的物质来源入手，探讨其形成过程与机理。

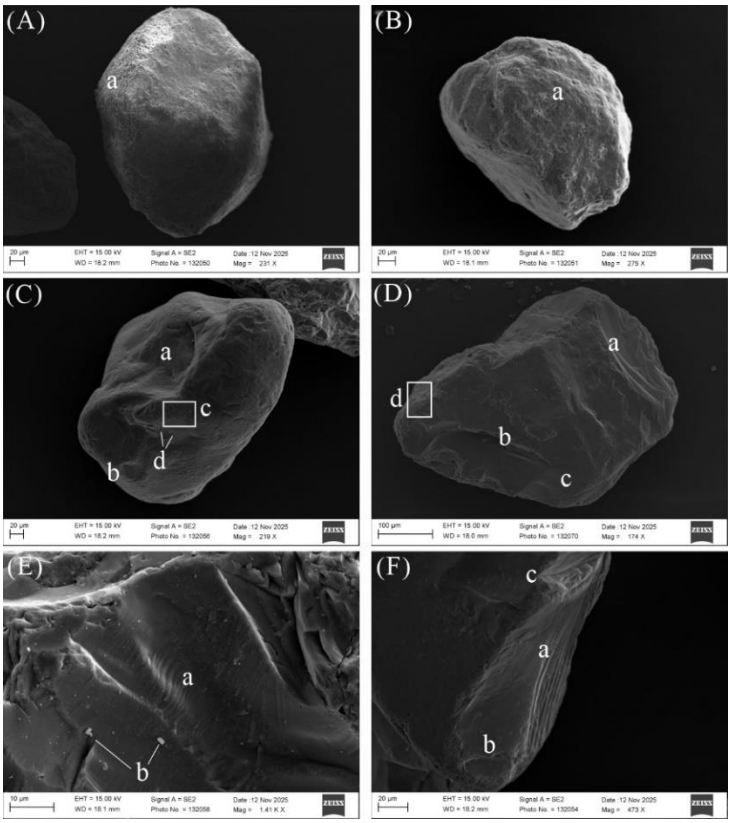

图 7 热那错年纹层粗颗粒层石英颗粒表面 SEM 图像

（A）圆形轮廓、低浮雕、球根状边缘、翻板 [a]；（B）圆形轮廓、低浮雕、翻板 [a]；（C）圆形轮廓、低浮雕、球根状边缘、碟形坑 [a]、中贝壳状断口（10-100 μm）[b]、黏附颗粒 [c]、溶蚀坑 [d]；（D）半棱角轮廓、中浮雕、弓形阶梯 [a]、大贝壳状断口（>100 μm）[b]、中贝壳状断口（10-100 μm）[c]、翻板 [d]；（E）中贝壳状断口（10-100 μm）、平行条纹 [a]、黏附颗粒 [b]；（F）直形阶梯 [a]、新月形撞击坑 [b]、中贝壳状断口（10-100 μm）[c]

Fig. 7 SEM images of the surface of quartz grains in the coarse layers of varved sediments in Rena Cuo.

(A) Rounded outline, low relief, bulbous edges and upturned plates [a]; (B) Rounded outline, low relief and upturned plates [a]; (C) Rounded outline, low relief, bulbous edges, dish shaped depression [a], medium conchoidal fractures (10-100 μm) [b], adhering particles [c] and solution pits [d]; (D) Subangular outline, medium relief, arcuate steps [a], large conchoidal fractures (>100 μm) [b], medium conchoidal fractures (10-100 μm) [c] and upturned plates [d]; (E) Medium conchoidal fractures (10-100 μm), parallel striations [a] and adhering particles [b]; (F) Straight steps [a], crescentic percussion marks [b] and medium conchoidal fractures (10-100 μm) [c].

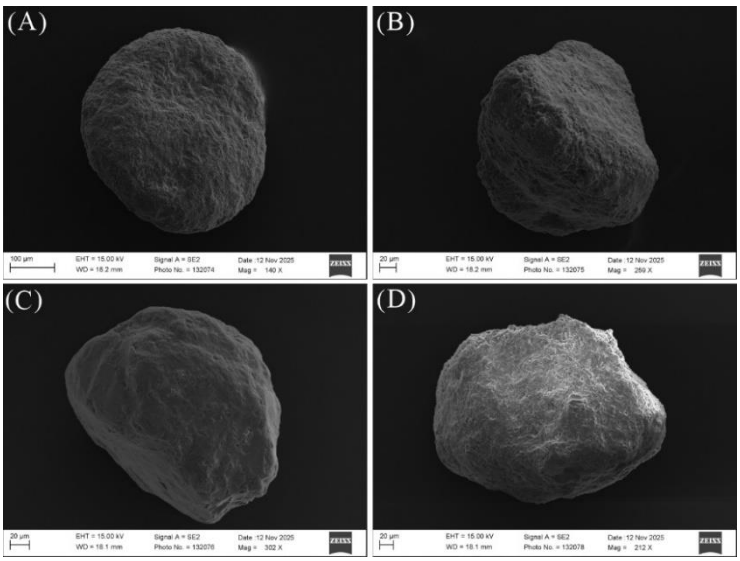

图 8 热那错年纹层粗颗粒层长石颗粒表面 SEM 图像 （A-D） 圆形轮廓；低浮雕；球根状边缘；翻板发育

Fig.8 SEM images of the surface of feldspar grains in the coarse－grained layers of varved sediments in Rena Cuo.

(A-D) Well-developed rounded outline, low relief, bulbous edges and upturned plates.

4.1 热那错年纹层的物质来源

4.1.1 浅色层 热那错年纹层的结构、元素和矿物特征对比结果表明浅色层对应 Ca 元素层（图 4），沉积物中含 Ca^{2+}的矿物主要为文石（图 5）。热那错位于干旱—半干旱区，属于碳酸盐型微咸水湖[33]，因此热那错沉积物中浅色层的碳酸盐为自生碳酸盐。当蒸发作用强，湖泊中的 Ca^{2+}和 $CO3^{2-}$达到饱和时，湖泊将析出 $CaCO_3$，如文石和方解石[47]。浅色层中的碳酸盐矿物除文石外，还含有较多的水菱镁矿（图 5），蒸发作用的加剧会导致湖水中的 Ca^{2+}进一步消耗，使 Mg^{2+}/Ca^{2+}比值升高，从而引发水菱镁矿的析出，水菱镁矿的出现可能是湖水盐度增加的标志[48-50]。同时，浅色层中发现了大量的枝角类碎片（图 3D），这些枝角类只有在夏季生长季才会大量繁殖。因此，浅色层形成于夏季。

4.1.2 深色层 热那错深色层富含 Fe 元素（图 4），以黏土矿物为主，通常冬季湖水封冻后，在静水环境条件下，水体扰动显著减弱，冰面下湖水中的悬浮细颗粒物质沉积至湖底形成黏土层[3, 51-53]。深色层的粗颗粒层富含 Si 元素（图 3-4），岩芯 RNCS-2019 的 XRD 分析结果表明，含 Si 元素的矿物可能为碎屑物质石英和钠长石（图 5）。石英砂具有硬度大、化学稳定性强等性质，在其沉积过程中由于搬运介质、搬运形式以及沉积环境不同，常常会在其颗粒表面留下反映不同沉积和搬运过程的形状及外貌特征[54]，热那错石英颗粒表面的高频率的翻板、贝壳状断口、新月型撞击坑、半棱角和圆形轮廓等表面形态，均属于石英颗粒在风成环境中常见的微形貌特征[55-59]（图 7）。统计结果显示，热那错石英颗粒表面的微形貌特征，与可可西里地区典型的风成石英颗粒微形貌特征具有很强的相似性[29]（图 9）。长石的表面微形貌特征也可以作为辨别其沉积环境的良好指标[60]，热那错深色的粗颗粒层中长石颗粒表面磨圆度高，并呈圆形轮廓和低浮雕等（图 8），同样显示风成沉积的特征。因此，热那错深色层的粗颗粒是由风力搬运作用形成的. 在纹层计年时，我们将冬季冰下沉积的细颗粒和春季冰融后沉降的粗颗粒视为一个完整的“冬季层”。

4.2 热那错年纹层的形成过程和机理

热那错地区年平均气温约为-5.7℃（图 1D），冬季湖面处于结冰状态。春季气温逐渐回升，季节性冰雪大量融化，同时夏季降水增多，入湖径流量显著上升，给湖泊持续输送了丰富的物质，包括 Ca^{2+}、CO_3^{2-}等离子（图 10A）。热那错属于碳酸盐型微咸水湖[33]，位于干旱—半干旱地区，夏、秋季蒸发量远高于降水量。伴随自生碳酸盐的不断析出，湖水盐度逐渐升高，大量碳酸盐（如文石等）沉淀，形成对应的 Ca 元素层（图 10B）。温度升高时蒸发作用增强，Ca 元素层越厚；温度降低则碳酸盐析出减少，Ca 元素层相应变薄。同时，在温暖的夏季湖泊中的生物活动旺盛，产生大量的生物残体，如枝角类碎片（图 3D）。

冬季湖面封冻后，冰面下湖水中悬浮的含 Fe 离子的细颗粒黏土矿物（主要为斜绿泥石）在整个封冻期缓慢沉积，形成 Fe 元素层（图 10C）。冰封时间越长，沉积持续时间越久，Fe 元素层越厚；反之冰封时间越短，Fe 元素层越薄。热那错地区冬季的平均风速明显高于其他季节（图 1D），加之湖泊周围地表植被覆盖度低，地表松散物质丰富，风力作用将粗颗粒（如石英、长石等）搬运至冰面并保存。翌年春季气温回升、冰面融化后，这些风成物质沉降至湖底，从而形成年纹层中的粗颗粒层，对应 Si 元素含量显著升高（图 10D）。

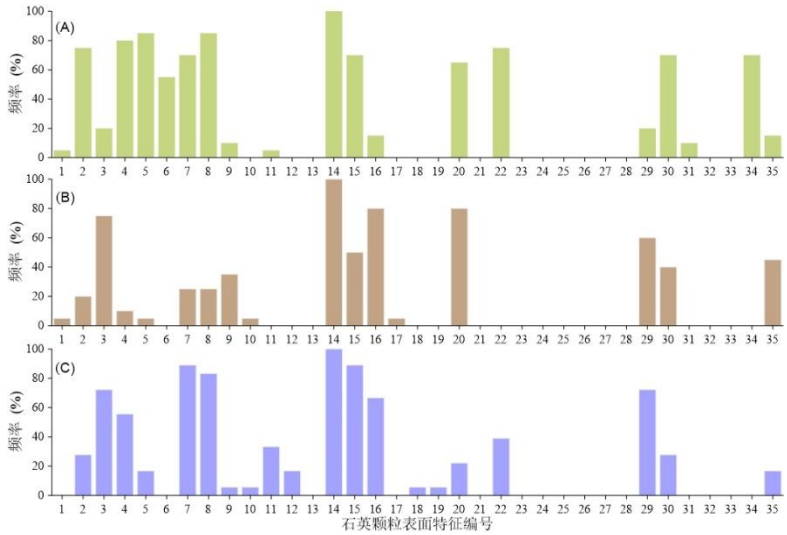

图 9 热那错年纹层粗颗粒层石英颗粒表面特征（A）与典型风成活动石英颗粒表面特征[29]（B-C）的对比

石英颗粒表面特征编号：1：棱角轮廓；2：半棱角轮廓；3：圆形轮廓；4：小贝壳状断口（<10 μm）；5：中贝壳状断口（10-100 μm）；6：大贝壳状断口（>100 μm）；7：弓形阶梯；8：直形阶梯；9：曲型脊线；10：平行节理；11：等级弧；12：V 形撞击坑；13：直形/曲形凹槽划痕；14：翻板；15：新月形撞击坑；16：球根状边缘；17：磨损疲劳；18：平行光条纹；19：覆瓦状磨削特征；20：碟形坑；21：定向溶蚀坑；22：溶蚀坑；23：溶蚀裂缝；24：剥落；25：二氧化硅小球；26：二氧化硅花；27：二氧化硅薄膜；28：晶体生长；29：低浮雕；30：中浮雕；31：高浮雕；32：细长萧条；33：振动波纹；34：黏附颗粒；35：弓形/曲形/多边形裂纹[55]

Fig. 9 Comparison of quartz grains in the coarse-grained layer from varved sediments of Rena Cuo(A) with surface feature frequencies of quartz grains in typical aeolian activity[29] (B-C).

Serial numbering of quartz grain surface features: 1, Angular outline; 2, Subangular outline; 3, Rounded outline; 4, Small conchoidal fractures (<10 μm); 5, Medium conchoidal fractures (10-100 μm); 6, Large conchoidal fractures (>100 μm); 7, Arcuate steps, 8, Straight steps; 9, Meandering ridges; 10, Flat cleavage surfaces; 11, Graded arcs; 12, V-shaped percussion cracks; 13, Straight/curved grooves and scratches; 14, Upturned plates; 15, Crescentic percussion marks; 16, Bulbous edges; 17, Abrasion fatigue; 18, Parallel striations; 19, Imbricated grinding features; 20, dish shaped depression; 21, Oriented etch pits; 22, Solution pits; 23, Solution crevasses; 24, Scaling; 25, Silica globules; 26, Silica flowers; 27, Silica pellicle; 28, Crystalline overgrowths; 29, Low relief; 30, Medium relief; 31, High relief; 32, Elongated depressions; 33, Chatter marks; 34, Adhering particles; 35, Arcuate/circular/polygonal cracks[55].

因此，热那错年纹层层偶为浅色层和深色层互层，浅色的细颗粒层为温暖的夏季沉积的富含 Ca 的自生碳酸盐（以文石为主），同时该层含有大量的枝角类碎片；深色层为冬季湖面封冻后冰面下缓慢沉积的富含 Fe 元素的黏土物质（如斜绿泥石）与冰面上形成的富含 Si 元素的风成物质（如石英和长石）组成。

5 结论

（1）纹层计年与 $^{210}Pb/^{137}Cs$ 测年的对比结果，证实青藏高原中部热那错的纹层为年纹层。热那错年纹层呈现浅色层与深色层交替分布的特征。浅色层较厚，颗粒较细，主要由富含 Ca 元素的文石组成，并

含有大量的枝角类碎片；深色层相对较薄，主要由富含 Fe 元素的斜绿泥石细颗粒层和富含 Si 元素的石英、长石等矿物的粗颗粒层构成。

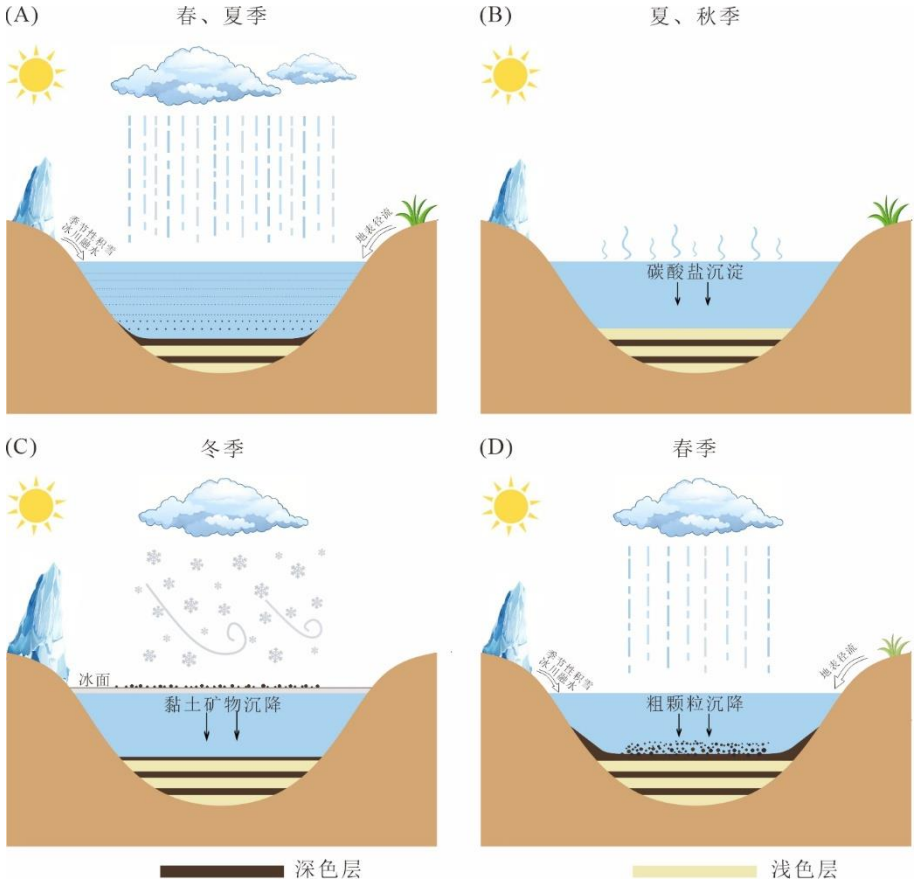

图 10 热那错年纹层的形成过程示意图

Fig. 10 The formation process of varve in Rena Cuo.

（2）随着春、夏季气温回升，冰雪消融与降水增加导致入湖径流量显著增大，给湖泊带来丰富的物质，夏季温度的升高以及秋季蒸发强度的增大，促使富含 Ca 的自生碳酸盐矿物析出，形成年纹层中的浅色层。热那错地区冬季寒冷，湖面处于封冻状态，冰下湖水中悬浮的细颗粒物质持续沉淀，形成富含 Fe 的黏土层；同时，风力搬运的粗颗粒物在冰面堆积，并于翌年春季冰面解冻后沉降至湖底，形成年纹层中富含 Si 的石英、长石粗颗粒深色层。

（3）对热那错年纹层的形成过程和机理的分析表明，其纹层层偶的结构具有显著的季节性气候响应特征。该研究不仅为青藏高原中部地区提供了年际乃至季节性分辨率的高精度时间标尺，也为高分辨率古气候环境的重建提供了重要的科学依据。

6 参考文献：

[1] Brauer A. Annually Laminated Lake Sediments and Their Palaeoclimatic Relevance. *Springer Berlin Heidelberg*, 2004.

[2] Ojala AEK, Francus P, Zolitschka B, et al. Characteristics of sedimentary varve chronologies - A review. *Quaternary Science Reviews*, 2012, 43: 45-60.

[3] Zolitschka B, Francus P, Ojala AEK, et al. Varves in lake sediments - a review. *Quaternary Science Reviews*, 2015, 117: 1-41.

[4] Kawakami I, Matsuoa M, Kato M, et al. Chronology and sedimentation process of varved lacustrine sediment in Lake Fukami, central Japan. *Quaternary International*, 2004, 123: 27-34.

[5] Lücke A, Brauer A. Blogeochemical and micro-facial fingerprints of ecosystem response to rapid Late Glacial climatlic changes in varved sediments of Meerfelder Maar (Germany). *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 2004, 211(1-2): 139-155.

[6] Haltia-Hovi E, Saarinen T, Kukkonen M. A 2000-year record of solar forcing on varved lake sediment in eastern Finland. *Quaternary Science Reviews*, 2007, 26(5-6): 678-689.

[7] Cook TL, Bradley RS, Stoner JS, et al. Five thousand years of sediment transfer in a high arctic watershed recorded in annually laminated sediments from Lower Murray Lake, Ellesmere Island, Nunavut, Canada. *Journal of Paleolimnology*, 2009, 41(1): 77-94.

[8] Menounos B, Clague JJ. Reconstructing hydro-climatic events and glacier fluctuations over the past millennium from annually laminated sediments of Cheakamus Lake, southern Coast Mountains, British Columbia, Canada. *Quaternary Science Reviews*, 2008, 27(7-8): 701-713.

[9] Nakagawa T, Gotanda K, Haraguchi T, et al. SG06, a fully continuous and varved sediment core from Lake Suigetsu, Japan: stratigraphy and potential for improving the radiocarbon calibration model and understanding of late Quaternary climate changes. *Quaternary Science Reviews*, 2012, 36: 164-176.

[10] Ramisch A, Brauser A, Dorn M, et al. VARDA (VARved sediments DAtabase) - providing and connecting proxy data from annually laminated lake sediments. *Earth System Science Data*, 2020, 12(3): 2311-2332.

[11] Shanahan TM, Overpeck JT, Hubeny JB, et al. Scanning micro-X-ray fluorescence elemental mapping: A new tool for the study of laminated sediment records. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 2008, 9: Q02016.

[12] Li K, You HT, Liu XQ. Review on lake sediment varve chronology in China. *Journal of Lake Sciences*, 2017, 29(02): 266-275. [李凯, 游海涛, 刘兴起. 中国湖泊沉积物纹层年代学研究进展. 湖泊科学, 2017, 29(02): 266-275.]

[13] Tian X, Gao Y, Wang CS. Progress and Prospects of Lacustrine Varve Research. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2023, 41(06): 1645-1661. [田兴, 高远, 王成善. 湖泊年纹层研究进展与展望. 沉积学报, 2023, 41(06): 1645-1661.]

[14] Chu GQ, Gu ZY, Xu B, et al. Varvechronology and Radiometric Dating (^{137}Cs, ^{210}Pb) from the Sihailongwan Maar, Northeastern China. *Quaternary Sciences*, 2005, (02): 202-207. [储国强, 顾兆炎, 许冰等. 东北四海龙湾玛珥湖沉积物纹层计年与 ^{137}Cs、^{210}Pb 测年. 第四纪研究, 2005, (02): 202-207.]

[15] Chu GQ, Liu JQ, Schettler G, et al. Sediment fluxes and varve formation in Sihailongwan, a maar lake from northeastern China. *Journal of Paleolimnology*, 2005, 34(3): 311-324.

[16] Mingram J, Allen JRM, Brüchmann C, et al. Maar and crater lakes of the Long Gang Volcanic Field (NE China) - overview, laminated sediments, and vegetation history of the last 900 years. *Quaternary International*, 2004, 123: 135-147.

[17] You HT, Liu JQ, Liu Q, et al. Study of the varve record from Erlongwan maar lake, NE China, over the last 13 ka BP. *Chinese Science Bulletin*, 2008, 53(2): 262-266.

[18] Chu GQ, Sun Q, Wang XH, et al. A 1600 year multiproxy record of paleoclimatic change from varved sediments in Lake Xiaolongwan, northeastern China. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 2009, 114: D22108.

[19] Zhai QM, Guo ZY, Li YL, et al. Annually laminated lake sediments and environmental changes in Bashang Plateau, North China. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 2006, 241(1): 95-102.

[20] Zhou AF, Chen FH, Qiang MR, et al. The discovery of annually laminated sediments (varves) from shallow Sugan Lake in inland arid China and their paleoclimatic significance. *Science in China Series D-Earth Sciences*, 2007, 50(8): 1218-1224.

[21] Chen Y, Liu XQ, He L, et al. Micro-Area Analysis and Mechanism of Varves from Lake Kusai in the Hoh Xil Area, Northern Tibetan Plateau. *Acta Geologica Sinica*, 2016, 90(05): 1006-1015. [陈钰, 刘兴起, 何利等. 青藏高原北部可可西里库赛湖年纹层微区分析及形成机理. 地质学报, 2016, 90(05): 1006-1015.]

[22] Liu XQ, Yu ZT, Dong HL, et al. A less or more dusty future in the Northern Qinghai-Tibetan Plateau? *Scientific Reports*, 2014, 4: 6672.

[23] Chu GQ, Sun Q, Yang K, et al. Evidence for decreasing South Asian summer monsoon in the past 160 years from varved sediment in Lake Xinluhai, Tibetan Plateau. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 2011, 116: D02116.

[24] Qin R, Liu LY, Wang JJ, et al. Application of XRF core scanning in varved lake sediments: A case study on Lake Xinluhai in the southeastern margin of Qinghai-Tibetan Plateau. *Journal of Lake Sciences*, 2022, 34(05): 1723-1734. [秦蓉, 刘丽媛, 王晶晶等. 岩芯 XRF 扫描在湖泊年纹层研究中的应用——以青藏高原东南缘新路海为例. 湖泊科学, 2022, 34(05): 1723-1734.]

[25] Huang ZC, Yang JX, Mao X, et al. Flood and earthquake records over the past 2000 years revealed by varved lake sediments from Lake Xinluhai, southeastern Tibetan Plateau. *Quaternary Science Reviews*, 2025, 358: 109349.

[26] Ji KJ, Zhu EL, Chu GQ, et al. Precipitation record based on varve chronology in Jiang Co on the central Tibetan Plateau during the past 2000 years. *Quaternary Sciences*, 2021, 41(02): 424-433. [冀克家, 朱二雷, 储国强等. 青藏高原中部湖泊江错纹层记录的过去 2000 年降水变化. 第四纪研究, 2021, 41(02): 424-433.]

[27] Hou JZ, Ji KJ, Zhu ER, et al. Climate change fostered rise and fall of the Tibetan Empire during 600-800 AD. *Science Bulletin*, 2023, 68(11): 1187-1194.

[28] Ojala AEK, Alenius T. 10 000 years of interannual sedimentation recorded in the Lake Nautajrvi (Finland) clastic–organic varves. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 2005, 219(3-4): 285-302.

[29] Chen Y, Liu XQ. Surface textural analysis of quartz grains from varved sediments of Lake Kusai in the HohXil area, Tibetan Plateau. *Journal of Lake Sciences*, 2016, 28(05): 1123-1133. [陈钰, 刘兴起. 青藏高原可可西里库赛湖年纹层石英颗粒表面形态特征研究. 湖泊科学, 2016, 28(05): 1123-1133.]

[30] Francus P, Von Suchodoletz H, Dietze M, et al. Varved sediments of Lake Yoa (Ounianga Kebir, Chad) reveal progressive drying of the Sahara during the last 6100 years. *Sedimentology*, 2013, 60(4): 911-934.

[31] Litt T, Krastel S, Sturm M, et al. 'PALEOVAN', International Continental Scientific Drilling Program (ICDP): site survey results and perspectives. *Quaternary Science Reviews*, 2009, 28(15-16): 1555-1567.

[32] Marshall M, Schlolaut G, Nakagawa T, et al. A novel approach to varve counting using μXRF and X-radiography in combination with thin-section microscopy, applied to the Late Glacial chronology from Lake Suigetsu, Japan. *Quaternary Geochronology*, 2012, 13: 70-80.

[33] 王苏民, 窦鸿身. 中国湖泊志. 科学出版社, 1998.

[34] Appleby PG. Chronostratigraphic techniques in recent sediments. Tracking environmental change using lake sediments: basin analysis, coring, and chronological techniques. Springer. 2001: 171-203.

[35] Cuven S, Francus P, Lamoureux SF. Estimation of grain size variability with micro X-ray fluorescence in laminated lacustrine sediments, Cape Bounty, Canadian High Arctic. *Journal of Paleolimnology*, 2010, 44(3): 803-817.

[36] Van Daele M, Moernaut J, Silversmit G, et al. The 600 yr eruptive history of Villarrica Volcano (Chile) revealed by annually laminated lake sediments. *Geological Society of America Bulletin*, 2014, 126(3-4): 481-498.

[37] Hardy DR, Bradley RS, Zolitschka B. The climatic signal in varved sediments from Lake C2, northern Ellesmere Island, Canada. *Journal of Paleolimnology*, 1996, 16(2): 227-238.

[38] Gilbert R, Lamoureux S. Processes affecting deposition of sediment in a small, morphologically complex lake. *Journal of Paleolimnology*, 2004, 31(1): 37-48.

[39] Amann B, Szidat S, Grosjean M. A millennial-long record of warm season precipitation and flood frequency for the North-western Alps inferred from varved lake sediments: implications for the future. *Quaternary Science Reviews*, 2015, 115: 89-100.

[40] Schimmelmann A, Lange CB, Schieber J, et al. Varves in marine sediments: A review. *Earth-Science Reviews*, 2016, 159: 215-246.

[41] Brauer A, Haug GH, Dulski P, et al. An abrupt wind shift in western Europe at the onset of the Younger Dryas cold period. *Nature Geoscience*, 2008, 1(8): 520-523.

[42] Leng MJ, Wagner B, Boehm A, et al. Understanding past climatic and hydrological variability in the Mediterranean from Lake Prespa sediment isotope and geochemical record over the Last Glacial cycle. *Quaternary Science Reviews*, 2013, 66(1): 123-136.

[43] Ben Dor Y, Neugebauer I, Enzel Y, et al. Varves of the Dead Sea sedimentary record. *Quaternary Science Reviews*, 2019, 215: 173-184.

[44] Dean JR, Eastwood WJ, Roberts N, et al. Tracking the hydro-climatic signal from lake to sediment: A field study from central Turkey. *Journal of Hydrology*, 2015, 529: 608-621.

[45] Last WM. Mineralogical Analysis of Lake Sediments. *Springer Netherlands*, 2001.

[46] Zander PD, Żarczyński M, Tylmann W, et al. Seasonal climate signals preserved in biochemical varves: insights from novel high-resolution sediment scanning techniques. *Climate of the Past*, 2021, 17: 2055-2071.

[47] Liu XQ, Shen J, Wang SM, et al. A16000-Year Paleoclimatic Record Derived from Authigenetic Carbonate of Lacustrine Sediment in Qinghai Lake. *Geological Journal of China University*, 2003, (01): 38-46. [刘兴起 沈吉，王苏民等. 16ka 以来青海湖湖相自生碳酸盐沉积记录的古气候. 高校地质学报, 2003, (01): 38-46.]

[48] Jin ZD. Composition, Origin and Environmental Interpretation of Minerals in Lake Sediments and Recent Progress. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2011, 33(01): 34-44+77. [金章东. 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, 2011, 33(01): 34-44+77.]

[49] Wang XZ, Xu XY. On the Mineralogical Properties and Origin of Hydromagnesite from China. *Scientia Geologica Sinica*, 1965, (04): 374-382. [王秀璋，徐学炎. 我国发现的水菱镁矿特征及其成因的探讨. 地质科学, 1965, (04): 374-382.]

[50] Gu ZY, Liu JQ, Yuan BY, Liu DS, Zhang GY. Lacustrine authigenic deposition expressive of environment and the sediment record from Siling Co, Xizang (Tibet), China. *Quaternary Sciences*, 1994, (02): 162-174. [顾兆炎，刘嘉麟，袁宝印，刘东生，张光宇. 湖相自生沉积作用与环境——兼论西藏色林错沉积物记录. 第四纪研究, 1994, (02): 162-174.]

[51] Mortimer CH. The Exchange of Dissolved Substances between Mud and Water in Lakes. *Journal of Ecology*, 1942, 29(1): 147-201.

[52] Philippe ÉG, St‐Onge G, Valet JP, et al. Influence of Seasonal Post‐Depositional Processes on the Remanent Magnetization in Varved Sediments From Glacial Lake Ojibway (Canada). *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2023, 24(3): e2022GC010707.

[53] Tiljander M, Saarnisto M, Ojala AE, et al. A 3000‐year palaeoenvironmental record from annually laminated sediment of Lake Korttajarvi, central Finland. *Boreas*, 2003, 32(4): 566-577.

[54] Li ZL, Yu XH, Dong SP, et al. Microtextural features on quartz grains from eolian sands in a subaqueous sedimentary environment: A case study in the hinterland of the Badain Jaran Desert, Northwest China. *Aeolian Research*, 2020, 43: 100573.

[55] Vos K, Vandenberghe N, Elsen J. Surface textural analysis of quartz grains by scanning electron microscopy (SEM): From sample preparation to environmental interpretation. *Earth-Science Reviews*, 2014, 128: 93-104.

[56] Campbell DH. Percussion Marks on Quartz Grains. *Sepm Journal of Sedimentary Research*, 1963, 33(4): 855-859.

[57] Higgs R. Quartz-Grain Surface Features of Mesozoic-Cenozoic Sands from the Labrador and Western Greenland Continental Margins. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1979, 49(2): 599-610.

[58] Warrier AK, Pednekar H, Mahesh BS, et al. Sediment grain size and surface textural observations of quartz grains in late quaternary lacustrine sediments from Schirmacher Oasis, East Antarctica: Paleoenvironmental significance. *Polar Science*, 2016, 10(1): 89-100.

[59] Mejía-Ledezma RO, Kasper-Zubillaga JJ, Alvarez-Sánchez LF, et al. Surface textures of quartz and ilmenite grains from dune and beach sands of the Gulf of Mexico Coast, Mexico: Implications for fluvial, aeolian and marine transport. *Aeolian Research*, 2020, 45: 100611.

[60] Kemnitz H, Lucke B. Quartz grain surfaces - A potential microarchive for sedimentation processes and parent material identification in soils of Jordan. *Catena*, 2019, 176: 209-226.