

呼伦贝尔草原小型湖泊沉积物元素地球化学记录及其古环境意义

朱建波^{1,2}

¹云南师范大学地理学部, 云南 昆明

²云南省高原地理过程与环境变化重点实验室, 云南 昆明

收稿日期: 2026年5月29日; 录用日期: 2026年6月30日; 发布日期: 2026年7月30日

摘要

利用XRF岩芯扫描技术, 获取了内蒙古呼伦贝尔草原西南边缘小型封闭湖泊阿然吉诺尔湖的沉积物岩芯高分辨率的元素地球化学记录, 并结合AMS¹⁴C测年建立了可靠的年代框架。通过沉积物的元素地球化学记录进行综合分析对比, 重建了该区域末次冰消期以来的气候环境演变序列。研究结果表明: 14.3~9.3 ka BP, 气候特征总体上为寒冷干燥, 但有向暖干变化的趋势。9.3~5.9 ka BP, 总体气候特征较为温暖湿润。5.9~1.6 ka BP, 早期气候呈现逐渐干旱化的趋势, 后期保持温暖湿润且气候变化更加和缓。1.6 ka BP至今, 气候波动较为剧烈, 大致经历了冷干到暖湿再到冷干的过程。该高分辨率记录显著揭示了8.2 ka BP和4.2 ka BP等百年 - 千年尺度的气候突变(干旱)事件, 表明阿然吉诺尔湖作为呼伦贝尔草原上的小型封闭湖泊对全球气候事件存在敏感响应。

关键词

元素地球化学, 环境演变, 末次冰消期, 呼伦贝尔草原

Element Geochemical Records of Sediments from Small Lakes in the Hulun Buir Grassland and Their Paleoenvironmental Significance

Jianbo Zhu^{1,2}

¹Faculty of Geography, Yunnan Normal University, Kunming Yunnan

²Yunnan Key Laboratory of Plateau Geographical Processes & Environmental Changes, Kunming Yunnan

Received: May 29, 2026; accepted: June 30, 2026; published: July 30, 2026

文章引用: 朱建波. 呼伦贝尔草原小型湖泊沉积物元素地球化学记录及其古环境意义[J]. 环境保护前沿, 2026, 16(7): 1319-1326. DOI: 10.12677/aep.2026.167132

Abstract

Using XRF core scanning technology, high-resolution elemental geochemical records of sediment cores from Aranjinuoer Lake, a small closed lake on the southwestern margin of the Hulun Buir grassland in Inner Mongolia, were obtained, and a reliable dating framework was established in combination with AMS¹⁴C dating. Through the comprehensive analysis and comparison of the elemental geochemical records of the sediments, the climatic and environmental evolution sequence since the last deglaciation in the region was reconstructed. The results show that: At 14.3~9.3 ka BP, the climate characteristics are generally cold and dry, but there is a trend of warm and dry change. At 9.3~5.9 ka BP, the overall climate is warm and humid. At 5.9~1.6 ka BP, the early climate showed a trend of gradual drought, and the later period remained warm and humid and the climate change was more moderate. From 1.6 ka BP to now, the climate fluctuation is more intense, and it has undergone a process from cold dry to warm wet and then to cold dry. The high-resolution record significantly reveals 100-millennium-scale climate abrupt (drought) events such as 8.2 ka BP and 4.2 ka BP, indicating that Aranjinuoer Lake, as a small closed lake on the Hulun Buir grassland, is sensitive to global climate events.

Keywords

Element Geochemistry, Environmental Evolution, The Last Deglaciation, Hulun Buir Grassland

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

末次冰消期是地球从末次冰盛期向全新世冰期过渡的关键转型阶段，其气候变化存在一定的复杂性，全球气候总体变暖，波动频繁，而全新世(约距今 11,700 年至今)作为最近一次冰期结束后的温暖间冰期，其气候虽总体相对稳定，但仍存在百年至千年尺度的显著波动(如 4.2 ka、8.2 ka 等冷干事件) [1] [2]。这一时期的气候环境演化序列，为探究自然变率下地球系统的运作模式提供了“天然实验室”。气候变化间接控制了其他环境要素的变化，利用环境要素组合在精准测年基础之上能很好地实现冰消期末至全新世以来长时间尺度高分辨率气候环境的重建以及气候变化影响因子和响应机制的探讨。湖泊沉积物的地球化学元素变化能够反映湖泊水体环境的变化过程，帮助重建气候演化过程[3] [4]。XRF 岩芯扫描(XRF Core Scanning, XRF-CS)分析作为一种新兴的研究方法，在湖泊沉积物元素分析领域显示出其独特的优势：无损、高分辨率、快速定量湿细粒沉积物的主要元素[5] [6]。通过 XRF 扫描得到的元素数据与粒度指标的对比分析，可以更深入地理解沉积物的地球化学特征及其气候指示意义。

呼伦贝尔草原上湖泊星罗棋布，这些封闭水体对局部气候变化具有较高敏感性，其沉积物可提供评估该区域气候环境变化的指示性指标。目前关于该地区的古气候研究大多以呼伦湖为研究对象，温锐林等[7]基于呼伦湖 HL06 岩芯孢粉记录重建了全新世以来该地区的植被演变和气候变化历史，揭示了该地区气温和降水变化与北半球太阳辐射量、东亚夏季风势力以及热带西太平洋海气相互作用的密切联系。张生瑞等[8]通过对呼伦湖 HL08 岩芯孢粉进行分析，揭示了末次冰消期该地区植被和气候的显著变化，表明 Heinrich 1 事件在东亚中高纬地区以剧烈降温、显著干旱化为特征。呼伦湖作为大型湖泊，其沉积物能够提供跨越多个地质时期的气候信息；而其他小型湖泊则因沉积速率更快且对气候响应更敏感而能够

提供更高的气候分辨率,在较长时间尺度上通过小型封闭湖泊湖相沉积常微量元素组合及地球化学分析方法高分辨率重建呼伦贝尔草原末次冰消期至全新世以来的气候环境演变研究尚显不足。

因此,本研究以位于呼伦贝尔草原西南边缘的小型湖泊阿然吉诺尔为采样区域,以 AMS¹⁴C 年代数据为可靠框架,基于 XRF 扫描元素分析其沉积记录的 14.3 ka BP 以来气候变化特征,可揭示该区域对全球气候变化的响应及其可能的驱动机制,有助于科学理解季风边缘高海拔区域的气候变化过程及其潜在原因,同时也为预测未来气候变化提供重要依据。

2. 研究区概况

内蒙古呼伦贝尔草原平均海拔在 500~800 米之间,地形为开阔的高平原,东、北、东南三面环抱大兴安岭,西南面向蒙古高原敞开。阿然吉诺尔作为草原上的内陆封闭湖泊,其形成与演化直接受区域水文平衡控制,流域内无大型外源河流干扰,主要依靠地下水、大气降水和季节性径流补给。这种封闭性使其沉积记录能更灵敏地反映区域环境的变化,是反演古气候的理想载体。

阿然吉诺尔(118°36'23"E, 48°11'30"N, 海拔 700 m)位于内蒙古自治区呼伦贝尔市新巴尔虎左旗阿木古郎镇境内,是内蒙古高原东部,呼伦贝尔草原西南边缘的一个小型封闭内陆湖泊。湖泊周长约 4.24 km,面积约为 1.17 km² (图 1)。

区域气候为大陆性寒温带半干旱气候,年平均气温在-0.2℃~0.5℃之间,年极端最高气温 40.9℃,极端最低气温-40.1℃。年平均降雨量 250~400 毫米,自东南向西北递减,且年际和季节变率极大,蒸发量远大于降水量。这种水热配置格局决定了其对季风强弱变化的高度敏感性。区域年平均风速为 3.4 m/s。

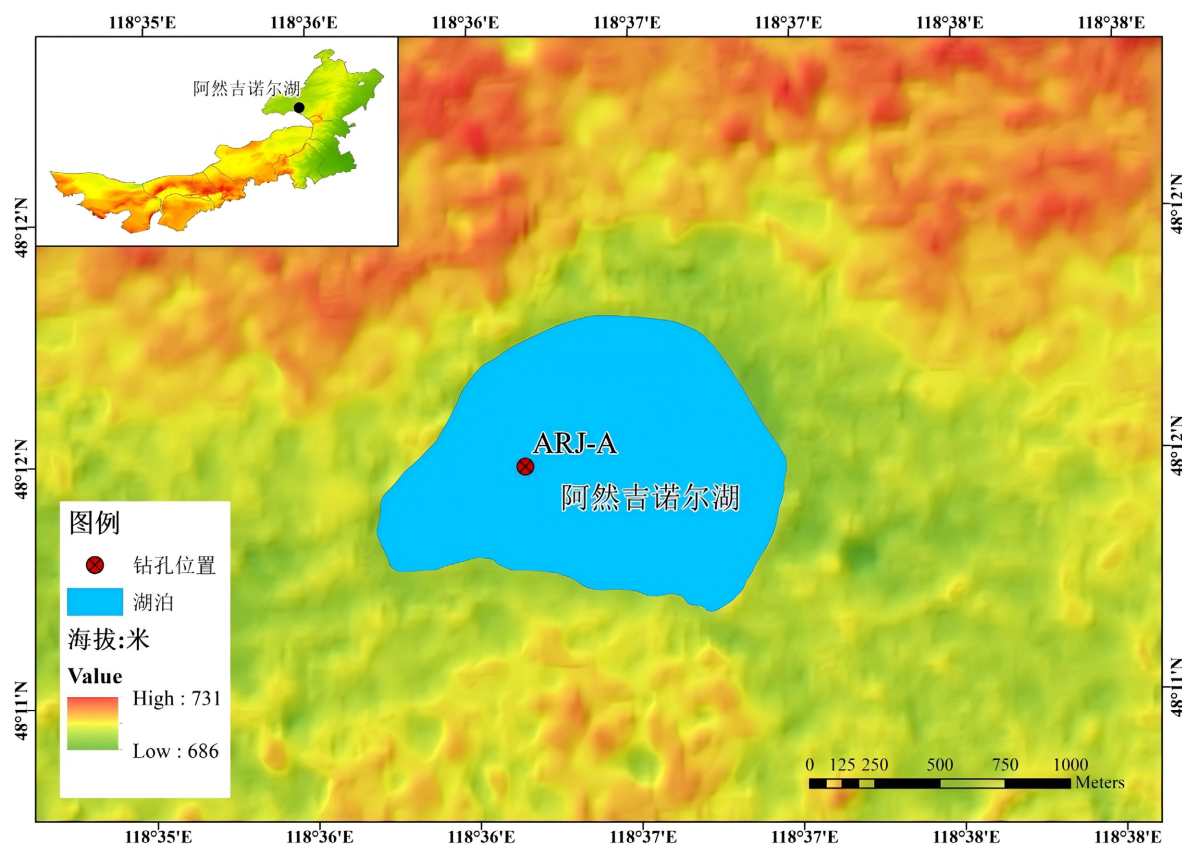


Figure 1. Overview of the study area
图 1. 研究区概况图

区域内地表层土壤以黑钙土和草甸土为主，厚度为 0.4~1.5 m，下层主要是白土[9]。主要类型和分布如下：

- (1) 栗钙土：地带性土壤，广泛分布于低山丘陵、冲积平原及湖河沿岸低洼地，对应典型草原植被(如克氏针茅、大针茅)。
- (2) 草甸土与沼泽土：集中于河谷阶地、低洼盆地和湿地周边，水分充足、肥力较高，支持羊草、芦苇等草甸和沼泽植被。
- (3) 风沙土：分布在呼伦湖东、南岸沙地，颗粒粗、松散、不粘结，植被以差巴嘎蒿、沙蒿等沙生植物为主。
- (4) 黑钙土：在乌布尔宝力格苏木等局部区域有分布，属肥沃土壤类型。

3. 材料与方法

3.1. 样品采集

2024 年 2 月，我们在阿然吉诺尔湖区实施湖相沉积岩芯钻探取样。通过使用 UWITEC 采样平台和 Piston 沉积物采集系统钻取了长约 6 m 的沉积物岩芯，编号为 ARJ 孔，钻孔位置水深均为 1.6 m，钻取岩芯过程中未出现扰动和污染。用保鲜膜和锡纸将岩芯封运回实验室，在 4℃ 环境下保存。

3.2. XRF 元素扫描

为获取阿然吉诺尔沉积物岩芯的元素数据，应用荷兰 Avaatech 公司研发的 XRF 扫描仪在云南省高原地理过程与环境变化重点实验室进行元素扫描。分别采用 10 kV (扫描时间 10 s)，30 kV (扫描时间 20 s)和 50 kV (扫描时间 30 s)对岩芯进行扫描，获得 Al, Si, P, S, Cl, K, Ca, Ti, Cr, Mn, Fe, Rh, Cu, Zn, Ga, Br, Rb, Sr, Y, Zr, Nb, Mo, Pb, Bi, Ag, Cd, Sn, Te, Ba 等 29 种元素的强度(单位: counts per second, cps)。

3.3. 年代序列建立

本文根据 8 个 AMS¹⁴C 年代建立了阿然吉诺尔湖(ARJ)钻孔的年代序列。在岩芯中，选择了 6 个全样和 2 个鱼骨做 AMS¹⁴C 测年。选择的测年材料分别位于钻孔的 44、107、183、185、235、247、422、507 cm。AMS¹⁴C 测年是由美国 Beta 实验室测试分析完成，测年结果见表 1。

Table 1. AMS ¹⁴C dating results from the ARJ core at Aranjinoer Lake
表 1. 阿然吉诺尔湖 ARJ 钻孔 AMS¹⁴C 测年结果

实验室编号	深度/cm	测年材料	AMS ¹⁴ C 年代(a.BP)	校正年代(cal a.BP)
Beta-731268	44	全有机质	1710 ± 30	1632~1525
Beta-740766	107	全有机质	4210 ± 30	4761~4691
Beta-731270	183	全有机质	5750 ± 30	6640~6450
Beta-731269	185	全有机质	5770 ± 30	6658~6491
Beta-731275	235	全有机质	8210 ± 30	9284~9076
Beta-731271	247	鱼骨	8280 ± 30	9332~9191
Beta-720677	422	鱼骨	9560 ± 30	11,083~10,910
Beta-731272	507	全有机质	10520 ± 30	12,625~12,475

根据 6 个全样和 2 个鱼骨进行 AMS¹⁴C 测年的结果建立岩芯年代序列。在 235 cm 深度处全样与 247 cm 深度的鱼骨样品进行对比, 测年结果显示, 二者 ¹⁴C 年龄仅相差 70 年(表 1), 表明阿然吉诺尔的碳库效应[10]几乎可以忽略。而后使用 R 中 Bacon 程序包中贝叶斯模型建立阿然吉诺尔湖 ARJ 钻孔岩芯的深度 - 年代模型(图 2)。

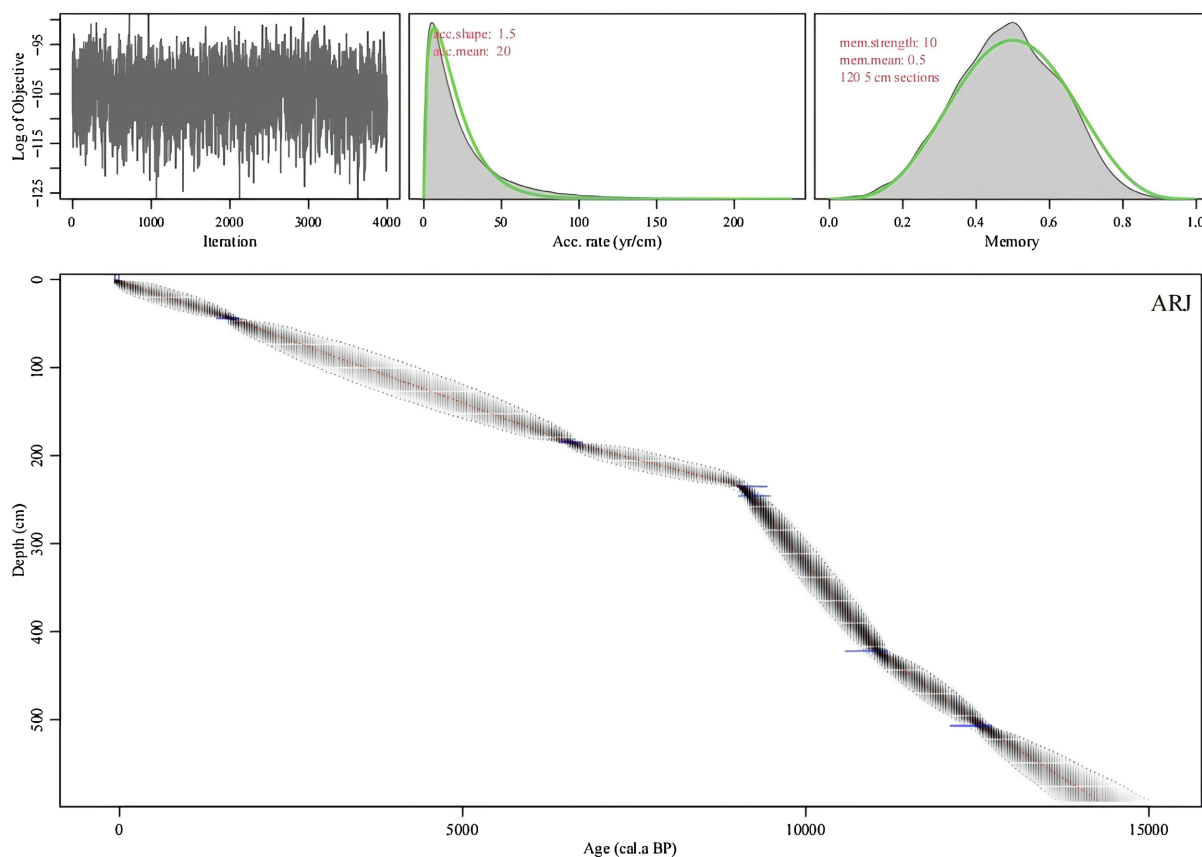


Figure 2. ARJ core “Depth-Age” model of Aranjinoer Lake
图 2. 阿然吉诺尔湖 ARJ 钻孔岩芯 “深度 - 年代” 模型

4. 结果与分析

4.1. 环境代用指标的指示意义

湖泊沉积物中的元素组成可以还原湖泊营养状态、盐度等水体化学性质[11], 还可以指示沉积时期的水热条件以及元素迁移变化的过程, 进而反演和重建汇水盆地内降雨模式、大气温度、水流和风尘作用、植被覆盖度等气候环境状况[12][13]。Al、Si、K、Fe 和 Ti 是常见的陆源碎屑示踪元素[14]-[17], Ca 元素具有湖泊生物成因或陆源碎屑成因的[16]-[18], Ti 也被用作亚洲季风区季风降水和植被密度的代用指标[19]-[21]; K 通常与成矿沉积和黏土富集层有关[22][23]。Zr 通常以碎屑颗粒的形式富存于粗粒沉积组分中; 锆石在风化和迁移的过程中会保持其原始形态、结构和化学组分不变; 因此 Zr 常被用来指示沉积物中粗粒物质的输入情况[24]。Fe 通常以氧化铁(赤铁矿、磁铁矿)的形式出现。高 Fe 值不仅可以反映岩石的致密度, 还反映了氧化还原条件, Mn 是一种高度氧化还原敏感的指标[25]-[27]。Rb 和 Sr 与化学风化相关, 主要受温度和降水的影响。溶解的 Rb 与 Sr 可以通过强降水和强烈的化学风化作用输送到湖泊中, 导致湖泊沉积物中 Rb/Sr 比值低于残余风化壳中的值[28]-[31]。因此, 湖泊沉积物的 Rb/Sr 比值可以作为

湖泊流域降水变化的指标,湿润气候时期湖泊沉积物中的 Rb/Sr 比值降低,化学风化强度较强;干燥时期 Rb/Sr 则表现为较高的元素比值[29] [32] [33]。

4.2. XRF 元素扫描结果

根据已有相关研究,从元素扫描结果中选取了具有明确气候指示意义的 10 种元素(Al、Fe、Rb、Ti、K、Si、Sr、Ca、Cl、Br)以及 3 个元素比值(Rb/Sr、Fe/Ti、Sr/Ba),并绘制了这些指标的变化曲线(图 3)。

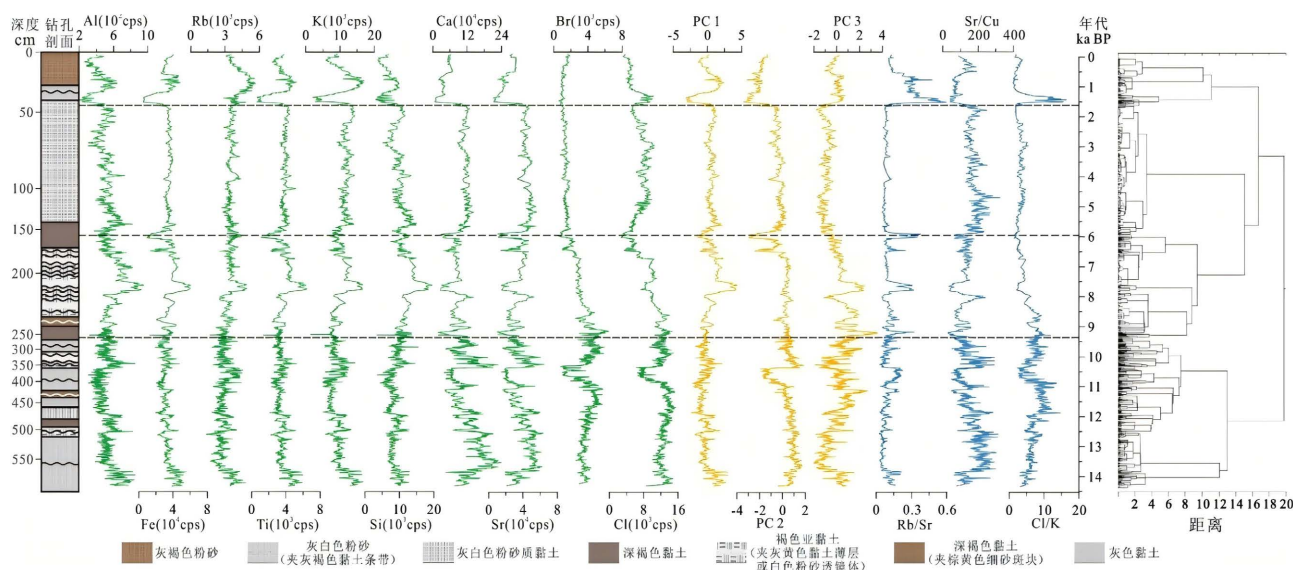


Figure 3. Trends in major element variations in the sediments of Aranjinor

图 3. 阿然吉诺尔沉积物中的主要元素变化趋势

根据 ARJ 钻孔岩芯地球化学常微量元素及其比值含量的变化,可以将研究区冰消期末至全新世以来的环境演化分为四个阶段:

阶段 I: 630~259 cm (约 14.3~9.3 ka BP), 该阶段湖泊沉积速率明显增快,所有元素和元素比值波动幅度较大。大致相当于晚冰期-早全新世过渡时期,总体气候特征为寒冷干燥,可进一步细分为 3 个亚阶段。阶段 I-1 (约 14.3~13.5 ka BP)气候相对温暖干燥。阶段 I-2 (约 13.5~11.0 ka BP)是一个相对冷期,可能对应了新仙女木期。在新仙女木期,气候整体较寒冷,但阿然吉诺尔的元素数据表明,在 12.5 ka BP 与 12.0 ka BP 处存在两个相对较暖期。阶段 I-3 (约 11.0~9.3 ka BP)气候较为冷干,在约 10.4 ka BP 时可能发生了一次气候显著干旱事件。

阶段 II: 259~157 cm (约 9.3~5.9 ka BP), 该阶段元素 Al、Fe、Rb、Ti、K、Si 均表现出先上升后下降的趋势, Ca、Sr 则相反,同时 Cl、Br 波动下降,3 种元素比值波动变化但相对较为稳定。大致为早全新世向中全新世过渡的阶段,总体气候特征较为温暖湿润。在约 8.2 ka BP 处,各元素及元素比值变化较为剧烈,可能发生了一次气候干旱事件,一定程度上对应了 8.2 ka BP 的气候突变事件。

阶段 III: 157~44 cm (约 5.9~1.6 ka BP), 该阶段所有元素与元素比值均处于较为稳定的状态,波动变化幅度不大。该阶段气候仍温暖湿润,该阶段可进一步分为 2 个亚阶段。阶段 III-1 (约 5.9~4.5 ka BP)气候呈现逐渐干旱化的趋势。阶段 III-2 (约 4.5~1.6 ka BP)气候保持温暖湿润且气候变化更加和缓。本阶段末气候较暖,可能指示了罗马暖期(Roman Warm Period, RWP)。在约 4.2 ka BP 时可能发生了一次气候干旱事件,可能对应了 4.2 ka BP 的气候突变事件。

阶段 IV: 44~0 cm (约 1.6 ka BP 至今), 该阶段沉积物元素 Al、Fe、Rb、Ti、K、Si、Cl 与元素比值 Sr/Cu 均表现出下降 - 上升 - 下降的趋势, 元素 Ca、Sr 和元素比值 Sr/Cu 的变化趋势表现为先下降后上升, 元素比值 Rb/Sr、Cl/K 则相反。虽然元素强度值存在一定差异, 但元素 Ti 和 Fe 在整个沉积序列中变化趋势基本一致, Sr 和 Ca 亦然。本阶段是阿然吉诺尔流域气候变化最剧烈的时期, 可划分为 3 个亚阶段。阶段 IV-1 (约 1.6~1.2 ka BP) 气候较为冷干, 可能对应了黑暗时代寒冷期(Dark Ages Cold Period, DACP)。阶段 IV-2 (约 1.2~0.5 ka BP) 气候总体较为温暖干燥, 一定程度上能够对应中世纪暖期(Medieval Warm Period, MWP)。阶段 IV-3 (约 0.5 ka BP 至今) 气候较为寒冷, 该阶段可能对应小冰期(Little Ice Age, LIA)。

5. 结论

阿然吉诺尔湖 ARJ 钻孔岩芯元素地球化学指标记录揭示了 14.3 ka BP 以来呼伦贝尔草原区域详细的气候环境变化, 结论如下:

(1) 14.3 ka BP 以来呼伦贝尔草原地区气候环境演化过程主要表现为: 14.3~9.3 ka BP, 气候特征总体上为寒冷干燥, 但有向暖干变化的趋势。9.3~5.9 ka BP, 总体气候特征较为温暖湿润。5.9~1.6 ka BP, 早期气候呈现逐渐干旱化的趋势, 后期保持温暖湿润且气候变化更加和缓。1.6 ka BP 至今, 气候波动较为剧烈, 大致经历了冷干到暖湿再到冷干的过程。

(2) 阿然吉诺尔湖元素分析结果较为显著地记录了 8.2 ka BP、4.2 ka BP 等气候突变事件。

参考文献

- [1] 刘丛强. 全球变化、层圈相互作用研究与地球系统科学[J]. 地学前缘, 2025, 32(3): 1-6.
- [2] 樊倍希, 杨保, 王丰, 等. 基于东亚季风区石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录的 8.2 和 4.2ka BP 气候事件的时空特征研究[J]. 中国科学: 地球科学, 2025, 55(9): 2962-2976.
- [3] 陈敬安, 万国江, 陈振楼, 等. 洱海沉积物化学元素与古气候演化[J]. 地球化学, 1999(6): 562-570.
- [4] 李小强, 刘汉斌, 赵克良, 等. 河西走廊西部全新世气候环境变化的元素地球化学记录[J]. 人类学学报, 2013, 32(1): 110-120.
- [5] 张晓楠, 张灿, 吴铎, 等. 基于 XRF 岩心扫描的中国西部湖泊沉积物元素地球化学特征[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2015, 35(1): 163-174.
- [6] Kido, Y., Koshikawa, T. and Tada, R. (2006) Rapid and Quantitative Major Element Analysis Method for Wet Fine-Grained Sediments Using an XRF Microscanner. *Marine Geology*, **229**, 209-225. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2006.03.002>
- [7] 温锐林, 肖举乐, 常志刚, 等. 全新世呼伦湖区植被和气候变化的孢粉记录[J]. 第四纪研究, 2010, 30(6): 1105-1115.
- [8] 张生瑞, 肖举乐, 温锐林, 等. 东亚中高纬 Heinrich1 事件的表现特征: 呼伦湖孢粉记录[J]. 第四纪研究, 2019, 39(4): 905-915.
- [9] 王国光, 王国贤, 陈诚明, 刘国忠. 内蒙古土壤[M]. 北京: 科学出版社, 1994: 37.
- [10] 吴艳宏, 王苏民, 周力平, 等. 岱海 ^{14}C 测年的现代碳库效应研究[J]. 第四纪研究, 2007(4): 507-510.
- [11] Yang, Y.B., Fang, X.M., Galy, A., et al. (2013) Quaternary Paleolake Nutrient Evolution and Climatic Change in the Western Qaidam Basin Deduced from Phosphorus Geochemistry Record of Deep Drilling Core SG-1. *Quaternary International*, **313-314**, 156-167. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2013.06.004>
- [12] Zhen, Z.L., Li, W.B., Xu, L.S., et al. (2020) Characteristics of Palaeosalinity and Palaeoredox Records in Sediment from Dali Lake: Climate Change in North China from 0 to 2100 cal BP. *Quaternary Geochronology*, **60**, Article ID: 101104. <https://doi.org/10.1016/j.quageo.2020.101104>
- [13] 徐佳佳, 贾玉连, 赖忠平, 等. 黄旗海湖泊沉积记录的早中全新世大湖期环境的差异性[J]. 沉积学报, 2012(4): 731-738.
- [14] Arz, H.W., Pätzold, J., Müller, P.J. and Moammar, M.O. (2003) Influence of Northern Hemisphere Climate and Global Sea Level Rise on the Restricted Red Sea Marine Environment during Termination I. *Paleoceanography*, **18**, Article

1053. <https://doi.org/10.1029/2002pa000864>
- [15] Nizou, J., Hanebuth, T.J.J. and Vogt, C. (2011) Deciphering Signals of Late Holocene Fluvial and Aeolian Supply from a Shelf Sediment Depocentre off Senegal (North-West Africa). *Journal of Quaternary Science*, **26**, 411-421. <https://doi.org/10.1002/jqs.1467>
- [16] Zhang, X.N., Zhang, C., Wu, D. and Zhou, A.F. (2015) Element Geochemical Characteristics of Lake Sediments Measured by X-Ray Fluorescence (XRF) Core Scanner in Northwest China. *Marine Geology & Quaternary Geology*, **35**, 163-174. (In Chinese)
- [17] Chang, J., Zhang, E., Liu, E., Sun, W., Langdon, P.G. and Shulmeister, J. (2018) A 2500-Year Climate and Environmental Record Inferred from Subfossil Chironomids from Lugu Lake, Southwestern China. *Hydrobiologia*, **811**, 193-206. <https://doi.org/10.1007/s10750-017-3488-5>
- [18] Turner, J.N., Holmes, N., Davis, S.R., Leng, M.J., Langdon, C. and Scaife, R.G. (2015) A Multiproxy (Micro-XRF, Pollen, Chironomid and Stable Isotope) Lake Sediment Record for the Lateglacial to Holocene Transition from Thomas-town Bog, Ireland. *Journal of Quaternary Science*, **30**, 514-528. <https://doi.org/10.1002/jqs.2796>
- [19] Haug, G.H., Hughen, K.A., Sigman, D.M., Peterson, L.C. and Röhl, U. (2001) Southward Migration of the Intertropical Convergence Zone through the Holocene. *Science*, **293**, 1304-1308. <https://doi.org/10.1126/science.1059725>
- [20] Shen, J., Wu, X., Zhang, Z., Gong, W., He, T., Xu, X., *et al.* (2013) Ti Content in Huguangyan Maar Lake Sediment as a Proxy for Monsoon-Induced Vegetation Density in the Holocene. *Geophysical Research Letters*, **40**, 5757-5763. <https://doi.org/10.1002/grl.50740>
- [21] Zhang, E., Zhao, C., Xue, B., Liu, Z., Yu, Z., Chen, R., *et al.* (2017) Millennial-Scale Hydroclimate Variations in Southwest China Linked to Tropical Indian Ocean since the Last Glacial Maximum. *Geology*, **45**, 435-438. <https://doi.org/10.1130/g38309.1>
- [22] Unkel, I., Fernandez, M., Björck, S., Ljung, K. and Wohlfarth, B. (2010) Records of Environmental Changes during the Holocene from Isla De Los Estados (54.4°S), Southeastern Tierra Del Fuego. *Global and Planetary Change*, **74**, 99-113. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2010.07.003>
- [23] Cuven, S., Francus, P. and Lamoureux, S.F. (2010) Estimation of Grain Size Variability with Micro X-Ray Fluorescence in Laminated Lacustrine Sediments, Cape Bounty, Canadian High Arctic. *Journal of Paleolimnology*, **44**, 803-817. <https://doi.org/10.1007/s10933-010-9453-1>
- [24] Chu, R., Wu, H., Zhu, R., Fang, Q., Deng, S., Cui, J., *et al.* (2020) Orbital Forcing of Triassic Megamonsoon Activity Documented in Lacustrine Sediments from Ordos Basin, China. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **541**, Article ID: 109542. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2019.109542>
- [25] Spears, D.A. (1989) Aspects of Iron Incorporation into Sediments with Special Reference to the Yorkshire Ironstones. *Geological Society, London, Special Publications*, **46**, 19-30. <https://doi.org/10.1144/gsl.sp.1989.046.01.05>
- [26] Raiswell, R. and Canfield, D.E. (2012) The Iron Biogeochemical Cycle Past and Present. *Geochemical Perspectives*, **1**, 1-220. <https://doi.org/10.7185/geochempersp.1.1>
- [27] Shaw, T.J., Sholkovitz, E.R. and Klinkhammer, G. (1994) Redox Dynamics in the Chesapeake Bay: The Effect on Sediment/Water Uranium Exchange. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **58**, 2985-2995. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(94\)90173-2](https://doi.org/10.1016/0016-7037(94)90173-2)
- [28] Goldstein, S.J. and Jacobsen, S.B. (1987) The Nd and Sr Isotopic Systematics of River-Water Dissolved Material: Implications for the Sources of Nd and Sr in Seawater. *Chemical Geology: Isotope Geoscience Section*, **66**, 245-272. [https://doi.org/10.1016/0168-9622\(87\)90045-5](https://doi.org/10.1016/0168-9622(87)90045-5)
- [29] 陈骏, 汪永进, 季峻峰, 等. 陕西洛川黄土剖面的 Rb/Sr 值及其气候地层学意义[J]. 第四纪研究, 1999(4): 350-356.
- [30] Xu, H., Liu, B. and Wu, F. (2010) Spatial and Temporal Variations of Rb/Sr Ratios of the Bulk Surface Sediments in Lake Qinghai. *Geochemical Transactions*, **11**, Article No. 3. <https://doi.org/10.1186/1467-4866-11-3>
- [31] 曾艳, 陈敬安, 朱正杰, 等. 湖泊沉积物 Rb/Sr 比值在古气候/古环境研究中的应用与展望[J]. 地球科学进展, 2011, 26(8): 805-810.
- [32] 申洪源, 贾玉连, 李徐生, 等. 内蒙古黄旗海不同粒级湖泊沉积物 Rb、Sr 组成与环境变化[J]. 地理学报, 2006(11): 1208-1217.
- [33] Jin, Z., An, Z., Yu, J., Li, F. and Zhang, F. (2015) Lake Qinghai Sediment Geochemistry Linked to Hydroclimate Variability since the Last Glacial. *Quaternary Science Reviews*, **122**, 63-73. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2015.05.015>