

全新世以来岱海湖泊沉积与环境演变

杜青松¹, 常诗楠², 李志华¹, 张玲玲¹, 张鹏飞¹

(1. 内蒙古自治区矿产实验研究所, 内蒙古 呼和浩特 010031;

2. 内蒙古地质勘查有限责任公司, 内蒙古 呼和浩特 010020)

摘要: 岱海湖泊位于半干旱区东部边缘及东亚夏季风的尾闾区, 生态环境体系脆弱, 气候和环境变化敏感, 是研究环境演变的理想地区。全新世以来, 由于气候的变化和季风的强弱而引起的气候带界限的迁移极为频繁, 使得本区成为一个气候敏感区。利用内陆封闭湖泊沉积物连续性强、分辨率高、对气候敏感等特点, 以单一流域化学风化记录恢复了岱海地区全新世以来的环境演化过程。根据岱海湖泊岩心沉积物的粒度变化、孢粉来源和分布以及有机碳及其同位素指标序列分析, 结合²¹⁰Pb 测定的沉积速率, 讨论了岱海全新世以来的气候环境演化过程。从空间尺度、不同时间尺度与其他研究结果的对比以及代用指标与气候要素的关系研究等几个方面总结了全新世以来高原湖泊岱海沉积与环境演变研究的主要成果。

关键词: 岱海; 湖泊沉积; 环境演变; 研究进展

中图分类号: P512.2

文献标识码: A

文章编号: 1009-6248(2013)03-0140-08

Holocene Lake Sediments and Environmental Changes in Daihai

DU Qing-song¹, CHANG Shi-Nan², LI Zhi-hua¹, ZHANG Ling-ling¹, ZHANG Peng-fei¹

(1. Inner Mongolian Mineral Experiment Research Institute, Hohhot 010031, China;

2. Geological Prospecting LLC in Inner Mongolia, Hohhot 010020, China)

Abstract: The Daihai Lake is located in the east margin of semiarid region and the north margin of East Asian summer monsoon. Being fragile in ecological environment system and sensitive to changes in climate and environment, it is an ideal location for environmental evolution study. Since Holocene, the frequent migration of climate zone boundaries due to climate change and intensity of monsoon has transferred this area into a climate-sensitive region. Based on characteristics like strong continuity of inland lake sediments, high resolution and climate-sensitive, this paper restored the environmental evolution process since Holocene, by using single water chemical weathering record. Moreover, the process is discussed in details according to the granular changes of core sediments, pollen sources and distribution, organic carbon and its isotopic index sequence analysis, as well as the deposition rate determined by Pb-210 data. Finally, the major findings of Daihai Lake sediments and environmental evolution since Holocene were summarized on the basis of a comparison analysis with other researches from the perspectives of spatial scales and different time scales, and on the relationship study between climate proxy index and climatic factors.

Key words: Daihai Lake; lake sediments; environmental changes; progress

收稿日期: 2013-03-19; 修回日期: 2013-07-12

基金项目: 内蒙古自治区地质矿产勘查基金项目“凉城县金钼矿预查”(08-2-KC11)

作者简介: 杜青松 (1985-), 男, 内蒙古赤峰市人, 中国地质大学 (北京) 研究生毕业, 现主要从事地质矿产勘查开发与基础地质研究。E-mail: 1005368061@qq.com

1 引言

根据 IGBP (国际地圈-生物圈计划) 在经历十余年的全球变化后研究, 认为在气候环境敏感的区域中找到过去变化的证据, 发现过去环境演变的规律和机制, 是对未来一定时期内的环境演变进行科学预测的重要基础。但是要真正理解过去历史时期甚至地质时期地球环境系统的演变以及未来气候变化的可预报性, 仅仅依赖仪器测得的气象记录显然是不够的(施雅风, 1997)。因此, 基于多种手段开展以往全球变化(PAGES)研究则具有十分重要的意义。

作为未来全球增温背景下气候环境状况的历史相似型, 全新世适宜期的研究一直受到国际学术界的关注(Steig E J., 1999; Joussaume S., 1999)。岱海地处中国北方环境敏感带的封闭湖泊。20世纪晚期以来, 其气候环境变化一直受到诸多研究者的关注。其中, 中科院南京湖泊所等在20世纪90年代前后对岱海全新世以来的气候环境变化进行了系统研究。21世纪初中, 科院地球环境所、南京湖泊所和地质与地球物理所等又利用从岱海湖心获得的高质量岩心, 结合高精度的加速器测年和沉积物气候、环境多种代用指标的测试分析, 取得了岱海全新世以来环境变化更为详细的历史记录。通过对我国中东部地区孢粉、湖泊、古土壤等记录的研究, 提出全新世暖期出现在8.5~3.0 kaB.P., 且7.2~6.0 kaB.P. 为中国全新世暖期鼎盛期(施雅风等, 1992; 1993), 并根据季风降水增量的变化等, 提出了全新世适宜期降水变化的时空分布特征(安芷生等, 1993; 吴锡浩等, 1994)。另外, PAGES把过去2 ka以来的全球气候环境变化作为极其重要的时段, 并已证实其间存在多次气候波动。例如, 中世纪暖期和近500 a以来的小冰期就是其中最显著的气候事件(PAGES, 1995; Keigwin L D., 1996)。该段时期我国尚缺少足够的证据, 特别是高分辨率的自然记录。除了近几年个别冰心资料外(Thompson L G, et al., 1993; 姚檀栋等, 1996), 有关主要证据都来自于史料的物候记录(竺可桢, 1973; 张德二, 1993; 满志敏, 1998)。

岱海湖为一个内陆封闭型湖泊, 长期处于封闭水文状态, 其沉积序列能很好地记录流域环境演化

历史, 是研究古气候、古环境变迁的理想场所。与其他记录相比, 湖泊沉积具有储存信息量大、沉积连续性好以及地理覆盖面广的优点(吉磊, 1995)。尽管湖泊沉积在反映环境变化方面仍然存在着定年尚欠精确、时间分辨率不高等不足, 但其突出的优点是既可以提供长时间尺度的环境演变序列, 满足长周期气候环境变化研究的需要, 同时又可以得到10年左右的较高分辨率的记录, 典型的湖泊年纹层沉积分析甚至可以达到年际的分辨尺度(王君波等, 2005)。前人对岱海湖泊沉积岩心(朱艳明, 2007)进行了年代学(孙千里等, 2006)、有机质含量(TOC, TN)(毛海芳等, 2011)、碳酸盐含量(CaCO_3)(曹建廷等, 1999)、碳氧同位素(沈吉等, 2011)和孢粉(李月丛等, 2004)等代用气候环境指标的测试与分析, 并在有关论文中对全新世以来岱海湖泊沉积与环境演变进行了系统论述。

2 岱海盆地概述

岱海位于内蒙古自治区呼和浩特东南方向的凉城县境内, 湖区介于 $40^{\circ}29'27''\sim 40^{\circ}37'06''\text{N}$, $112^{\circ}33'\sim 112^{\circ}46'\text{E}$ 之间(图1)。岱海形状介于长方形与椭圆形之间, 东西长约20 km, 南北最大宽度14 km。岱海地区属中温带半干旱气候, 冬季长而寒冷, 夏季短而温暖, 日照率高, 无霜期短, 年温差和日温差较大。降水集中在夏季, 雨季较短, 降水量较少。蒸发旺盛, 多风沙天气。本区的年均温仅 5.1°C , 远低于全球北纬 40° 大陆的均温 15.6°C 。据凉城站统计, 该区年均降雨量仅为423.7 mm, 但年蒸发量高达1 930.4 mm。岱海湖泊主要靠地表径流和大气降水补给, 自形成以来, 湖泊水位和湖泊面积波动很大, 全新世气候适宜期, 岱海湖泊面积达 431 km^2 , 湖面高出现代湖面40~45 m, 而现代岱海湖泊面积仅 133 km^2 (王苏民等, 1990)。

3 气候环境重建

3.1 沉积物粒度变化分析

为恢复岱海盆地千年来古气候、古环境的变迁, 1997年5月孙千里等在岱海深水区采样, 分别

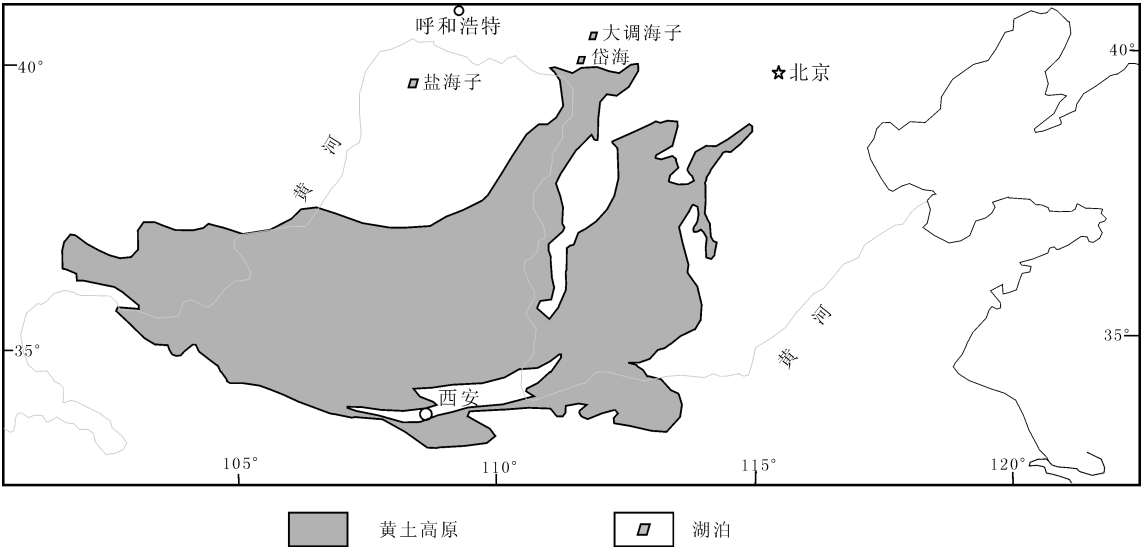


图 1 研究区地理位置图
Fig. 1 Location of the study area

用于磁化率、Rb、Sr 含量、矿物组成、孢粉、粒度、有机质含量、碳酸盐含量等气候环境代用指标的分析测试工作。根据 210Pb 测年，得到岱海现代的沉积速率约为 1.8~2.0 mm/a。因此，每块样品的分辨率约 5 a（曹建廷等，1999）。已知为湖相环境的岱海湖相 123 个样品中有 121 个样品判为湖相沉积物，仅 2 个样品被判为风成沉积物（沈吉等，2006；强明瑞等，2006）。对于稳定湖相沉积物造成其粒度变化的原因可能是尘暴或河流注入稳定湖相沉积环境带来新的沉积物加入。岱海典型的稳定湖相沉积物曲线表现为较对称的峰态，且平均粒径较风成黄土的粒径小，是稳定深水环境的产物（孙千里等，2001）。图 2 中 5 和 6 两条曲线是岱海判为风成沉积物的 2 个样品，其频率曲线呈多峰，其中曲线 5 的粗端组分粒度在 200 μm 以上，它可能指示了河流作用（跃移组分）的参与（Donghuai Sun, et al., 2002）。据孙千里等（2006）对岱海稳定湖相沉积物上部 9.9 m 的研究，沉积速率基本呈线性变化，平均为 1.83 mm/a。由此推算曲线 5 和 6 两样品（分别为 440 cm 和 630 cm）形成年龄距今分别为 2 414 a 和 3 452 a 左右。同时，前人对岱海地区孢粉和粒度等指标的研究表明（孙千里等，2006），3.5 kaB.P. 以后岱海流域气候总体趋于干旱。当冬季风增强时大量的粗颗粒被吹起，导致稳定的湖相沉积物中混入了较粗

的风成组分。因此，判别岱海 2 个样品（440 cm 和 630 cm）风成沉积物可能代表近 3 500 a 来 2 次强烈尘暴事件（张平等，2008）。

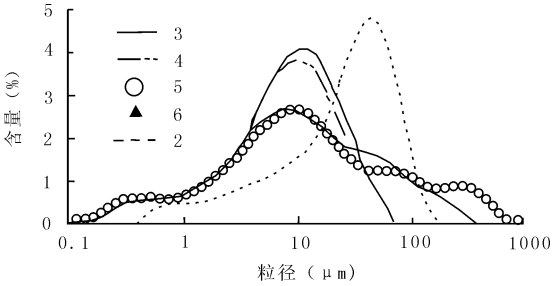


图 2 岱海典型稳定湖相沉积物（代表曲线 3、4）和判别为非稳定湖相沉积物 2 个样品（曲线 5、6）的粒度频率曲线

Fig. 2 Typical stable Daihai lacustrine sediments (represented by curves 3 and 4) and lacustrine sediments identified as non-stable Particle size frequency curve of two samples (curves 5 and 6)

3.2 沉积物中孢粉的分布和来源与环境特征

李月丛等（2004）采集了入湖河流的冲积物和湖表层沉积物样品。受沉积环境的影响，岱海湖区孢粉浓度总体上要低于入湖河流孢粉浓度，湖区中部孢粉浓度最高，依次向湖滨递减，湖区东南边缘孢粉浓度最低。岱海沉积环境不利于孢粉保存，孢粉以河流携带的为主，同时受风力传播的影响。

蒿、藜科、桦、虎榛子等花粉和蕨类孢子以河流搬运为主，松、禾本科及莎草科花粉可能还受风力传播的影响。一些仅在个别样品中出现且百分比很低的花粉类型，例如，豆科、十字花科等还有可能是昆虫、鸟类或人类活动携带而来。河流携带入湖的孢粉可能有一部分未能保存下来。另外，肖举乐等选择水上平台及活塞取心技术获得的利用岱海湖心两支 12 m 以上的高质量平行沉积岩心（名为 DH-99A 和 DH-99B，取心率均达到了 95% 以上）（Sun Qianli et al.，2001；Peng Y J，et al.，2005）为研究材料，利用其独立的高分辨率代用指标序列揭示了季风/干旱过渡区全新世的气候环境特征。选择 DH-99A 岩心的孢粉是因为其 4 cm 样品分析间距可以保证较高的时间分辨率。显示结果表明：约 10.25~7.90 kaB. P. 的早全新世，岱海湖区植被以耐旱草本占据优势，指示气候温和干燥；约 7.90~4.45 kaB. P.，木本花粉比例逐渐增加，总体指示了相对温暖湿润的适宜气候，其中木本花粉占据相对优势的时期出现在 6.05~5.10 kaB. P.，是全新世气候的最佳期；4.45~3.10 kaB. P.，木本植被开始退缩，气候开始从相对温暖湿润转向寒冷干燥；3.1 kaB. P. 以后，耐旱草本植被占据绝对优势，反映流域气候总体上趋于干燥（Xiao J L et al.，2004）。在众多的植物孢粉中，有一些是对湿度敏感的，一些是对温度敏感的。为了区分对水热条件具有不同的指示性的植物孢粉，选用对应分析。对应分析是在因子分析的基础上，把关系错综复杂的多个变量归结为少数几个独立的新变量，在原始信息损失最少的情况下找出起主导作用的因素。其 R 型结果反映变量之间的关系，Q 型结果反映样品之间的内在联系。具体于孢粉分析，则是通过 R 型对应分析的结果，确立每个主因子的环境意义，再根据 Q 型结果，在已确立环境意义的主因子上画出相应的环境变化曲线。一些研究者（乌云格日勒等，1998）在古气候研究中尝试采用孢粉定量分析，其所揭示的 2 500 年来古气候变化

是晚全新世温凉半干旱环境中的次一级微小波动。2 500 年来的植被演变，经过典型草原—灌丛草原—森林草原—灌丛草原的变化过程。在千年尺度上，2 500 年来的气候存在相对温暖半湿润—温暖半干燥—寒冷半干燥—寒冷半湿润—寒冷半干燥的演化过程。孢粉信息表明，近代气候有向温干方向发展的趋势。

3.3 沉积物岩心 TOC& $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 的代用指标序列

沉积物中的 C/N 值一般可用于区别有机质来源（Jasper J P，1990）。藻类植物的 C/N 值为 4~10，而陆源的维管植物的 C/N 值约为 14~23（中国科学院兰州地质研究所等，1979）。岱海流域植被较稀疏，近代湖泊沉积的 C/N 值小于 10。反映岱海有机质来源主要是湖泊水生物。当气候温暖湿润时，湖泊水生生物发育，湖泊水位较高有机质保存条件好，沉积物的有机碳含量高；反之冷干气候条件下有机碳含量较低。但总有机碳（TOC）含量受保存条件的影响，因此有必要结合有机碳同位素的研究。而有机碳同位素可反映植被类型，对气候记录更明确。对岱海现代环境中生活的水生生物及表层沉积物进行碳同位素（ $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ ）研究表明（表 1），岱海挺水植物的 $\delta^{13}\text{C}$ 值为-28.3‰，而沉水植物的 $\delta^{13}\text{C}$ 值为-21.2‰，这可能因为前者主要以大气 CO_2 为来源进行光合作用，而后者以水溶 CO_2 为光合作用的来源，与大气的 CO_2 相比水溶的 CO_2 的 $\delta^{13}\text{C}$ 值偏重（Deuser W G，1967），这同样也是造成藻类的 $\delta^{13}\text{C}$ 偏重的原因。岱海表层沉积物有机质的 $\delta^{13}\text{C}$ 值变化范围为-24.75‰~26.00‰，湖湾浅水处的 $\delta^{13}\text{C}$ 值相对偏负，可能与小部分有机质来源于近岸的挺水植物有关，而湖中深水处的 $\delta^{13}\text{C}$ 相对偏重。用沉积速率推断岱海剖面的年代序列，尽管存在一定误差，但仍是相对可靠的（曹建廷等，2000）。根据岱海湖泊沉积多项环境指标重建的气候环境演化过程可以与历史记录作对比，深水处岩心有效地记录了近千年来内蒙古岱海地区气候环境演变过程，大致经历了温湿—冷

表 1 内蒙古岱海现代植物与表层沉积有机碳同位素组成表

Tab.1 Organic carbon isotopic composition of modern plants and surface sediment from Daihai, Inner Mongolia

样品号	T	CH	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7
$\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ (PDB,‰)	-28.3	-21.21	-25.40	-24.83	25.67	-24.75	-24.66	-25.15	-26.00

注：T：挺水植物；CH：沉水植物；S1—S7：表层沉积。

湿—冷干—温偏湿—温干—冷干—凉偏湿的气候演化阶段,期间又有次一级的干湿与暖冷不同组合的波动。

4 区域性对比

在内蒙古鄂尔多斯高原地区,多数的环境考古记录表明龙山文化时期的遗址远低于仰韶文化遗址,反映气候相对干旱。但在岱海流域,龙山文化遗址却高于仰韶文化时期,反映湖区降水增加导致的湖面升高(田广金,1991)。从某种意义上讲,这可能体现了小流域地形、地貌植被、水文等环境特征对全球变化的差异性响应。对于岱海和大青山的大调海子地区而言,两者具有相似的地形、地貌、植被和水文特征,均处于群山之中,有较好的植被覆盖和较高的海拔高度,流域水文网因封闭盆地而相对简单。在大青山调角海子,利用花粉-气候因子转换函数所重建的全新世时期的最大降水量比现在高 100~21 mm/a(宋长青等,1997)。黄旗海于 40~2 kaB. P. 高湖面稳定存在时期降水量与现在相比的数值略高(申洪源等,2005)。黄旗海本身,在全新世 9 kaB. P. 前后达到最大湖面(施雅风等,1999),比 40~22 kaB. P. 最高湖面要大 50~110 km²,显示出降水量可能也比 40~22 kaB. P. 时期要高。这些数据表明全新世高温期东亚季风区降水量比 40~22 kaB. P. 高湖面稳定存在时期要高。

5 结论与讨论

(1) 根据岱海湖泊岩心沉积物的粒度变化、孢粉来源和分布以及有机碳及其同位素指标序列分析,结合²¹⁰Pb测定的沉积速率,讨论了岱海全新世以来的气候环境演化过程。结合沉积记录的气候演化特征,指出了目前湖泊水面萎缩、环境恶化主要是人类活动的影响所致(李智佩等,2007)。

(2) 全新世以来岱海湖泊演变特征表现出总体发展趋势的收缩性,以及发展过程的波动性和阶段性特点。主要变化是水位高程不断降低,湖面不断缩小,多数湖泊向着咸化方向发展。但这种发展变化不是均匀的,也不是直线式的。全新世以来岱海湖泊演变的另一个突出特征表现在湖面变化与气候

变化的一致性,而且这种变化与全球性气候变化背景相一致(史培军等,2002)。

(3) 近年来,岱海湖泊沉积与环境演变研究发展迅速,但区域之间的可比性不强,这主要是由于各研究的时间跨度不一致、分辨率不一致、所采用的环境代用指标不一致,以及定年还不够精确等原因造成的。同时,目前,大多数湖泊沉积的研究手段较为单一,对于与气候环境具有复杂响应关系的湖泊沉积来讲,多学科、多环境指标的综合分析与集成研究尚显不足,应进一步提高定年的准确性,开展环境代用指标与气候要素之间的数量关系研究,发现新的更为敏感的环境代用指标,填补各个区域不同时间尺度上的研究空白,进一步完善多学科多环境指标的综合分析以及加强区域之间的对比研究。在实际情况中,岱海盆地自身的一些特征。例如,较高的海拔高度、封闭盆地、植被状况和水文状况等等,有可能使得其对全球气候变化的反馈更为复杂,而具有不同于中国中东部和西部环境记录的某些特征。已有的湖泊沉积记录主要是以中长时间尺度的研究为主,而短时间尺度高分辨率的研究稍显不足。

与其他地区全球变化研究结果的对比表明,湖泊沉积所反映的高原气候环境变化既具有全球性,又具有区域性的特征。湖泊沉积重建的环境序列的定量化研究仍处于探索阶段。由于湖泊沉积的环境代用指标存在着相对多解性,所以在实际研究中,多学科交叉、多指标分析的方法是必需的。当前和今后需要深入开展环境代用指标与气候要素之间定量关系的研究,进一步提高沉积物定年的精确性,发现新的更为敏感的环境代用指标,不断完善多学科多环境代用指标的综合分析,并注重填补不同区域不同时间尺度的研究空白,加强高原上不同区域之间的对比研究。

参考文献 (References):

- 施雅风. 2000 年记录与全球变化研究[J]. 第四纪研究, 1997, (1): 37-40.
- Shi Yafeng. Past 2000 years records and global change [J]. Quaternary Sciences, 1997, (1): 37-40.
- 施雅风, 孔昭宸, 王苏民, 等. 中国全新世大暖期的气候波动与重要事件[J]. 中国科学 (B 辑), 1992, 22

- (12): 1300-1308.
- Shi Yafeng, Kong Zhaochen, Wang Sumin, et al. The climatic fluctuations and important events of Holocene Megathermal in China [J]. *Science in China (Series B)*, 1992, 22 (12): 1300-1308.
- 施雅风, 孔昭宸, 王苏民, 等. 中国全新世大暖期鼎盛阶段的气候与环境[J]. *中国科学 (B辑)*, 1993, 23 (8): 865-873.
- Shi Yafeng, Kong Zhaochen, Wang Sumin, et al. The Holocene Mega thermal climate and environment in China. *Science in China [J]. (Series B)*, 1993, 23 (8): 865-873.
- 安芷生, 波特 S C, 吴锡浩, 等. 中国中、东部全新世气候适宜期与东亚夏季风变迁[J]. *科学通报*, 1993, 38 (14): 1302-1305.
- An Zhisheng, Porter S C, Wu Xihao et al. Holocene optimum in Central and East China and East Asian summer monsoon evolution [J]. *Chinese Science Bulletin*, 1993, 38 (14): 1302-1305.
- 吴锡浩, 安芷生, 王苏民, 等. 中国全新世气候适宜期东亚夏季风时空变迁[J]. *第四纪研究*, 1994, 14 (1): 24-37.
- Wu Xihao, An Zhisheng, Wang Sumin, et al. The temporal and spatial variation of eastasian summer monsoon in holocene optimum in China [J]. *Quaternary Sciences*, 1994, 14 (1): 24-37.
- 姚檀栋, 杨志红, 黄翠兰, 等. 近 2 ka 以来高分辨率的连续气候环境变化记录——古里雅冰芯近 2 ka 记录初步研究[J]. *科学通报*, 1996, 41 (12): 1103-1106.
- Yao Tandong, Yang Zhihong, Huang Cuilan, et al. A continuous climatic and environmental record during recent 2 ka: preliminary study of Guliya ice core in recent 2000 years [J]. *Chinese Science Bulletin*, 1996, 41 (12): 1103-1106.
- 竺可桢. 中国近五千年来气候变迁的初步研究[J]. *中国科学*, 1973, 12 (2): 168-189.
- Zhu Kezhen. Preliminary study of recent 5000 years climatic change in China [J]. *Science in China*, 1973, 12 (2): 168-189.
- 张德二. 我国“中世纪温暖期”气候的初步推断[J]. *第四纪研究*, 1993, 13 (1): 7-15.
- Zhang Deer. A study on the medieval warm period in China. *Quaternary Sciences*, 1993, 13 (1): 7-15.
- 满志敏. 关于唐代气候冷暖的讨论[J]. *第四纪研究*, 1998, 18 (1): 20-30.
- Man Zhimin. Climate in Tang dynasty of China: discussion for its evidence [J]. *Quaternary Sciences*, 1998, 18 (1): 20-30.
- 吉磊. 中国过去 2000 年湖泊沉积记录的高分辨率研究: 现状与问题 [J]. *地球科学进展*, 1995, 10 (2): 169-175.
- Ji Lei, Highsolution study on lacustrine sedimentary records for past 2000 years in China: developments and problems [J]. *Advances in Earth Science*, 1995, 10 (2): 169-175.
- 王君波, 朱立平. 青藏高原湖泊沉积与环境演变研究: 现状与展望[J]. *地球科学进展*, 2005, 9 (5): 1-9.
- Wang Junbo, Zhu Liping. Environmental change reflected by lake sediments on Tibetan plateau: progress and prospect [J]. *Advances in Earth Science*, 2005, 9 (5): 1-9.
- 朱艳明, 于永涛, 周力平, 等. 岱海湖泊沉积岩芯高分辨率磁性测量——U 型槽与常规方法之比较[J]. *第四纪研究*, 2007, 27 (6): 983-988.
- Zhu Yanming, Yu Yongtao, Zhou Liping, et al. High-resolution magnetic measurements on a lake sediment core from Daihai Lake: comparison between u-channel and discrete sample methods [J]. *Quaternary Sciences*, 2007, 27 (6): 983-988.
- 孙千里, 周杰, 沈吉, 等. 北方环境敏感带岱海湖泊沉积所记录的全新世中期环境特征[J]. *中国科学. D 辑*, 2006, 36 (9): 838-849.
- Sun Qianli, Zhou Jie, Shen Ji, et al. Environmental characteristics of Mid-Holocene record by lacustrine sediments from Lake Daihai, north environment sensitive zone, China [J]. *Science in China (Series D: Earth Sciences)*, 2006, 36 (9): 838-849.
- 毛海芳, 何江, 吕昌伟, 等. 乌梁素海和岱海沉积物有机碳的形态特征 [J]. *环境科学*, 2011, 32 (3): 658-666.
- Mao Haifang, He Jiang, Lü Changwei, et al. Characteristics of Organic Carbon Forms in the Sediment of Wuliangsu Hai and Daihai Lakes [J]. *Environmental Science*, 2011, 32 (3): 658-666.
- 曹建廷, 徐爱霞, 王苏民, 等. 内蒙岱海湖岩芯碳酸盐含量变化与气候环境演化[J]. *海洋湖沼通报*, 1999, 21 (4): 21-26.
- Cao Jianting, Wang Sumin, Shen Ji, et al. Carbonate content record of climate and environment changes from Laustrine core in Daihai Lake, Inner Mongolia [J]. *Transaction of Oceanology and Limnology*, 1999, 21 (4): 21-26.

- 沈吉, 王苏民, 朱育新, 等. 内蒙古岱海古水温定量恢复及其古气候意义[J]. 中国科学 (D 辑), 2011, (12): 1017-1023.
- Shen Ji, Wang Sumin, Zhu Yuxin, et al. Daihai ancient water restoration and its pale climatic significance of quantitative [J]. Science in China (Series D), 2011, (12): 1017-1023.
- 李月丛, 许清海, 阳小兰, 等. 内蒙古岱海表层沉积物中孢粉的分布及来源[J]. 古地理学报, 2004, (3): 316-328.
- Li Yuecong, Xu Qinghai, Yang Xiaolan, et al. Distribution and source of pollens and spores in surface sediments of Daihai Lake, Inner Mongolia [J]. Journal of Palaeogeography, 2004, (3): 316-328.
- 王苏民, 余源盛, 吴瑞金, 等. 岱海环境演变和气候变化[M]. 合肥: 中国科技大学出版社, 1990.
- Wang Sumin, Yu Yuansheng, Wu Ruijin, et al. The Daihai Lake: Environmental evolution and climate change [M]. University of Science and Technology of China Press, Hefei, 1990, 147-154.
- 曹建廷, 沈吉, 王苏民. 内蒙古岱海气候环境演变的沉积记录[J]. 地理学与国土研究, 1999, 8 (3): 82-86.
- Cao Jianting, Shen Ji, Wang Sumin. Daihai sedimentary record of the evolution of climate and environment [J]. Geography and Territorial Research, 1999, 8 (3): 82-86.
- 沈吉, 汪勇, 羊向东, 等. 湖泊沉积记录的区域风沙特征及湖泊演化历史: 以陕西西碱淖湖泊为例[J]. 科学通报, 2006, 51 (1): 87-92.
- Shen Ji, Wang Yong, Yang Xiangdong, et al. Paleosandstorm characteristics and lake evolution history deduced from investigation on lacustrine sediments: The case of Hongjiannao Lake, Shaanxi Province [J]. Chinese Science Bulletin, 2006, 51 (1): 87-92.
- 强明瑞, 陈发虎, 周爱锋, 等. 苏干湖沉积物粒度组成记录尘暴事件的初步研究[J]. 第四纪研究, 2006 (6): 915-922.
- Qiang Mingrui, Chen Fahu, Zhou Aifeng, et al. Preliminary study on dust storm events documented by grain size component of Sugan Lake sediments, North Qaidam Basin [J]. Quaternary Sciences, 2006 (6): 915-922.
- 孙千里, 周杰, 肖举乐. 岱海沉积物粒度特征及其古环境意义[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2001, 21 (1): 93-95.
- Sun Qianli, Zhou Jie, Xiao Jule. Grain-size characteristics of lake Daihai sediments and its paleoenvironment significance [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2001, 21 (1): 93-95.
- 孙千里, 肖举乐. 岱海沉积记录的季风/干旱过渡区全新世适宜期特征[J]. 第四纪研究, 2006, 26 (5): 781-790.
- Sun Qianli, Xiao Jule. Characteristics of the Holocene optimum in the monsoon/arid transition belt recorded by core sediments of Daihai Lake, North China [J]. Quaternary Sciences, 2006, 26 (5): 781-790.
- 张平, 宋春晖, 杨用彪, 等. 稳定湖相沉积物和风成黄土粒度判别函数的建立及其意义[J]. 沉积学报, 2008, 6 (3): 501-507.
- Zhang Ping, Song Chunhui, Yang Yongbiao, et al. The significance and establishment of discriminant function with grain size of stable lacustrine sediment and eolian loess [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2008, 6 (3): 501-507.
- 李月丛, 许清海, 阳小兰, 等. 内蒙古岱海表层沉积物中孢粉的分布及来源[J]. 古地理学报, 2004, 8 (3): 316-328.
- Li Yuecong, Xu Qinghai, Yang Xiaolan, et al. Distribution and source of pollens and spores in surface sediments of Daihai Lake, Inner Mongolia [J]. Journal of Palaeogeography, 2004, (3): 316-328.
- 乌云格日勒, 刘清泗. 岱海游乐场孔孢粉分析及其 2500 年来古气候演化[J]. 干旱区资源与环境, 12 (3): 21-27.
- Wuyungerile, Liu Qingsi. Analysis of Sporopollen of Daihai Lake and Climate Change Over 2500 Years [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 12 (3): 21-27.
- 中国科学院兰州地质研究所等. 青海湖考察报告[M]. 北京: 科学出版社, 1979.
- Lanzhou Institute of Geology, Chinese Academy of Sciences, et al. A Synthetical Investigation Report on Qinghai Lake [M]. Sciences Press, Beijing, 1979.
- 曹建廷, 王苏民, 沈吉. 内蒙古岱海地区近千年气候环境演变的初步研究[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2000, 5 (2): 15-20.
- Cao Jianting, Wang Sumin, Shen Ji. The Primary Study of Paleoclimate Changes During the Past Millennium in Daihai Lake, Inner Mongolia [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2000, 5 (2): 15-20.
- 田广金. 内蒙古中南部仰韶时代文化遗存研究[A]. 内蒙古文物考古研究所编. 内蒙古中南部原始文化研究文集[C]. 北京: 海洋出版社, 1991, 55-85.

- Tian Guangjin. Studies on cultural remains of the Yangshao Age in central-southern Inner Mongolia [A]. In: Inner Mongolia Cultural and Archaeology Institute ed. Proceedings of Researches on the Primitive Culture in Central-Southern Inner Mongolia [C]. China Ocean Press, Beijing, 1991: 55-85.
- 田广金. 内蒙古中南部龙山时代文化遗存研究[A]. 内蒙古文物考古研究所编. 内蒙古中南部原始文化研究文集[C]. 北京: 海洋出版社, 1991. 140-160.
- Tian Guangjin. Studies on cultural remains of the Longshan Age in central-southern Inner Mongolia [A]. In: Inner Mongolia Cultural and Archaeology Institute ed. Proceedings of Researches on the Primitive Culture in Central-Southern Inner Mongolia [C]. China Ocean Press, Beijing, 1991: 140-160.
- 宋长青, 吕厚远, 孙湘君. 中国北方花粉-气候因子转换函数建立及其应用[J]. 科学通报, 1997, 42 (20): 2182-2186.
- Song Changqing, Lü Houyuan, Sun Xiangjun. Construction of pollen-climate factor transfer and its application in North China [J]. Chinese Science Bulletin, 1997, 42 (20): 2182-2186.
- 申洪源, 贾玉连, 魏灵. 末次冰期间冰阶 (40-22 kaBP) 内蒙古黄旗海古降水量研究[J]. 沉积学报, 2005, 9 (3): 523-529.
- Shen Hongyuan, Jia Yulian, Wei Ling. Paleoprecipitation reconstruction during the interstadial of the last glacial (40-22 ka bp) in Huangqihai Lake, Inner Mongolia [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2005, 9 (3): 523-529.
- 施雅风, 刘晓东, 李炳元, 等. 距今 40~30ka 青藏高原特强夏季风事件及其与岁差周期关系[J]. 科学通报, 1999, 44 (14): 1475-1480.
- Shi Yafeng, Liu Xiaodong, Li Bingyuan, et al. Extreme strong event of the summer monsoon and its relation to precession periods in the Qinghai-Xizang Plateau 40-30 ka BP [J]. Chinese Science Bulletin. 199, 44 (14): 1475-1480.
- 李智佩, 岳乐平, 郭莉, 等. 全新世气候变化与中国北方沙漠化[J]. 西北地质, 2007, 3: 1-29.
- Li Zhipei, Yue Leping, Guo Li, et al. Holocene climate change and desertification on Northern China [J]. Northwestern Geology, 2007, 3: 1-29.
- 史培军, 哈斯. 中国北方农牧交错带与非洲萨哈尔地带全新世环境变迁的比较研究[J]. 地学前缘, 2002, 3 (1): 121-128.
- Shi Peijun, Ha Si. Comparison between holocene environmental changes in North China agro-pastoral zone and Africa Sahelian Belt [J]. Earth Science Frontiers, 2002, 3 (1): 121-128.
- Steig E J. Mid-Holocene climate change [J]. Science, 1999, 286: 1485-1487.
- Joussaume S, Taylor K E [J]. Braconnot Petal Monsoon changes for 6000 years ago: Results of 18 simulations from the Paleoclimate Modeling Intercomparison Project (PMIP) [J]. Geophysical Research Letters, 1999, 26 (7): 859-862.
- Pages/Panash. Paleoclimates of the Northern and Southern Hemispheres [J]. Bern: Pages Press, 1995: 1-92.
- Keigwin L D. The Little Ice Age and Medieval Warm Period in the Sargasso Sea [J]. Science, 1996, 274: 1504-1508.
- Thompson L G, Mosley-Thompson E, Davis M, et al. "recent warming": Ice core evidence from tropical ice core with emphasis on central Asia [J]. Global Planet Change, 1993, 7: 145-156.
- Donghuai Sun, Bloemendal J, Rea D K, et al. Grain-size distribution function of polymodal sediments in hydraulic and aeolian environments, and numerical partitioning of the sedimentary components [J]. Sedimentary Geology, 2002, 152: 263-277.
- Sun Qianli, Zhou Jie, Peng Zicheng et al. High-precision uranium-series dating of lacustrine carbonates from Daihai Lake [J]. Chinese Science Bulletin, 2001, 46 (7): 588-591.
- Peng Y J, Xiao J L, Nakamura T, et al. Holocene East Asian monsoonal precipitation pattern revealed by grain-size distribution of core sediments of Daihai Lake in Inner Mongolia of North-central China [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2005, 233 (3-4): 467-479.
- Xiao J L, Xu Q H, Nakamura T et al. Holocene vegetation variation in the Daihai Lake region of North-central China: A direct indication of the Asian monsoon climatic history [J]. Quaternary Science Reviews, 2004, 23 (14-15): 1669-1679.
- Deuser W G, Degens E T. Carbon isotope fractionation in the system CO_2 (gas) - CO_2 (aqueous) - HCO_3^- (aqueous) [J]. Nature, 1967, 215: 1033-1035.
- Jasper J P, Hayer J M. A carbon isotope record of CO_2 levels during the late Quaternary [J]. Nature, 1990, 347: 462-464.