

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2018.614>

中一晚全新世以来安固里淖气候演变的植硅体记录

刘林敬^{1,2,3}, 李长安^{1,4*}, 介冬梅^{5,6}, 张茹春^{7,8}, 王江永⁵,
张玉芬¹, 毛欣^{2,3}, 姜高磊^{2,3}, 王盼丽^{2,3}

1. 中国地质大学地球科学学院, 湖北武汉 430074
2. 中国地质科学院水文地质环境地质研究所, 河北石家庄 050061
3. 中国地质科学院第四纪年代学与水文环境演变重点实验室, 河北石家庄 050061
4. 中国地质大学生物地质与环境地质国家重点实验室, 湖北武汉 430074
5. 东北师范大学地理科学学院, 吉林长春 130024
6. 东北师范大学植被生态科学教育部重点实验室, 吉林长春 130024
7. 河北省科学院地理科学研究所, 河北石家庄 050011
8. 河北省地理信息开发应用工程技术研究中心, 河北石家庄 050011

摘要: 河北坝上地区位于东亚季风边缘区和农牧交错带, 季风强弱的变化深刻影响着该地区人类文明的发展。为了重建河北坝上地区中一晚全新世以来的气候演化过程, 剖析气候变化与人类文明发展的关系, 以坝上地区安固里淖湖为研究对象, 通过对该湖沉积剖面植硅体的分析, 并结合孢粉组合特征, 恢复了安固里淖地区 5 000 cal. a BP 以来的气候演变历史。结果显示, 在千年尺度上该区域气候总体呈冷干趋势, 但在 5 030~3 070 cal. a BP 时期气候相对湿润, 千年尺度上气候的变化主要受控于北半球太阳辐射量的变化。在百年尺度上安固里淖地区经历了 7 次冷干事件, 分别发生于 4 500 cal. a BP, 4 100~3 800 cal. a BP, 3 500 cal. a BP, 3 000 cal. a BP, 2 100 cal. a BP, 1 100 cal. a BP 和 800~270 cal. a BP 左右, 这 7 次冷干事件对应于东亚季风减弱阶段, 主要受到了北半球高纬气候和太阳活动的共同影响。该区人类文明的演化敏感响应于气候变化, 气候温暖期以农业文明为主, 气候冷干期以草原文明为主。

关键词: 河北坝上; 安固里淖; 植硅体; 孢粉; 中一晚全新世; 聚类分析; 气候演变。

中图分类号: P595

文章编号: 1000-2383(2018)11-4138-11

收稿日期: 2018-04-17

Paleoclimate Recorded by Phytolith in Anguli-Nuur Lake since Mid-Late Holocene

Liu Linjing^{1,2,3}, Li Chang'an^{1,4*}, Jie Dongmei^{5,6}, Zhang Ruchun^{7,8}, Wang Jiangyong⁵,
Zhang Yufen¹, Mao Xin^{2,3}, Jiang Gaolei^{2,3}, Wang Panli^{2,3}

1. School of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China
2. Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Shijiazhuang 050061, China
3. Key Laboratory of Quaternary Chronology and Hydrological Environment Evolution, Chinese Academy of Geological Sciences, Shijiazhuang 050061, China
4. State Key Laboratory of Biogeology and Environmental Geology, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China
5. School of Geographical Sciences, Northeast Normal University, Changchun 130024, China
6. Key Laboratory of Vegetation Ecology, Ministry of Education, Northeast Normal University, Changchun 130024, China
7. Institute of Geographical Sciences, Hebei Academy of Sciences, Shijiazhuang 050011, China
8. Hebei Engineering Research Center for Geographic Information Application, Shijiazhuang 050011, China

基金项目: 国家自然科学基金项目 (Nos. 41602194, 41471164, 41672355)。

作者简介: 刘林敬 (1982—), 男, 助理研究员, 主要从事第四纪地质与环境演变方面的研究。ORCID: 0000-0002-8711-9578. E-mail: liulj206@126.com

* **通讯作者:** 李长安, ORCID: 0000-0002-7401-0725. E-mail: chanli@cug.edu.cn

引用格式: 刘林敬, 李长安, 介冬梅, 等, 2018. 中一晚全新世以来安固里淖气候演变的植硅体记录. 地球科学, 43(11): 4138-4148.

Abstract: Bashang area of Hebei Province is located in the East Asian monsoon-margin region and the ecotone between agriculture and animal husbandry. East Asian monsoon variability significantly affects the development of human civilization within its area of influence. In order to reconstruct the climate changes in Bashang area and understand the interactions between past climate and human civilization, a continuous 120 cm sediment profile was recovered from Anguli-Nuur Lake based on phytolith and pollen analysis. The results show that the climate in this region was gradually becoming cold and dry during the last 5 000 years, which is related to the weakening of East Asian monsoon produced by gradual variations of solar radiation. However, the climate was relatively wet during the periods of 5 030–3 074 cal. a BP. On the centennial scale, Anguli-Nuur has experienced seven obvious cold and dry events, which occurred during ~4 500 cal. a BP, 4 100–3 800 cal. a BP, ~3 500 cal. a BP, ~3 000 cal. a BP, ~2 100 cal. a BP, ~1 100 cal. a BP and 800–270 cal. a BP. The cold and dry events are consistent with the weakening stage of East Asian monsoon that is probably affected by high latitude climate and the solar activities. In this region, the development of human civilization is sensitive to climate change. Agriculture civilization is relatively developed during warm and humid stage, and grassland civilization appears during cool and arid stage.

Key words: Bashang area of Hebei Province; Anguli-Nuur Lake; phytolith; pollen; Mid-Late Holocene; cluster analysis; climatic evolution.

中华文明诞生在中全新世,拥有着 5 000 多年的历史,而这 5 000 多年来气候的演变深刻影响着人类活动和文明的演化,例如过去 2 000 年来中华文明发展历程中,朝代更迭与战乱时期往往对应于亚洲季风减弱阶段(Zhang *et al.*, 2008),因此重建过去 5 000 年以来的气候演化过程,剖析气候变化与人类文明发展的关系,不仅可以理解现代气候背景,还可为人类适应未来气候变化提供重要的科学依据(PAGES, 2009)。

河北坝上地区位于东亚季风边缘区,属于农牧交错区和生态脆弱带,是气候变化敏感区域(毛欣等, 2017)。安固里淖作为坝上地区最大的湖泊,可以完整、灵敏地记录不同时期的气候环境信息,是研究该区域气候变化的重要载体。近些年来,不少学者以安固里淖为研究载体,从不同角度对该区域全新世以来的环境演变进行了探讨(邱维理等, 1999; 翟秋敏等, 2000; 翟秋敏, 2001; 翟秋敏和郭志永, 2002; 姜加明等, 2004; 马龙和吴敬禄, 2009; Wang *et al.*, 2010)。但是这些成果大多是基于湖区自然地理特征和沉积物理化特征等,很少提及湖泊周边的古植被演变历史以及该区域气候演变对中一晚全新世古文明的影响。

项目组通过对安固里淖 120 cm 深的沉积剖面进行孢粉分析发现,安固里淖沉积物中孢粉含量相对较低,且以木本植物花粉为主,其中松属在整个剖面的含量多超过 50%(阳小兰等, 2017)。由于松和杉的花粉传播能力较强,安固里淖湖剖面孢粉组合中的松属和云杉可能主要来源于研究区东南部的坝缘山地,从而使湖区周围草本植物花粉所占真实比例受到外源花粉的稀释。因此,位于农牧交错带的安固

里淖,仅依据孢粉组合,是不能够真实地重建古植被信息,需要结合其他指标来完善该地区古植被和古气候的重建。

植硅体是一种发育在高等植物细胞和细胞间隙且具有一定特殊形态的二氧化硅沉积物(王永吉和吕厚远, 1993; 顾延生等, 1997),具有耐腐蚀和易保存的特征,常常大量保存在沉积物中。不同形态的植硅体记录着不同的植被类型和环境信息,是恢复过去古生态环境的重要手段之一(葛勇等, 2010; 顾延生等, 2016; 刘林敬等, 2017)。相比孢粉而言,植硅体具有原地沉积的特点,而且可以较好地反映草本植物信息,因此对于以草原景观为主的安固里淖湖,植硅体指标在恢复古植被面貌和古气候方面具有一定的优势。鉴于此,本文利用前期孢粉分析的湖泊沉积进一步开展植硅体分析,综合植硅体分析结果和已有的孢粉结果,以期更为真实地反映周边的植被状况,进而重建安固里淖地区中一晚全新世以来的气候演变过程。同时根据邻近区域的考古发现,分析全新世大暖期后段气候演变对人类文明的影响,为今后研究农牧交错带人地关系模式提供参考。

1 研究区概况

安固里淖是坝上地区最大的内陆封闭湖泊(姜加明等, 2004),位于河北省张家口市张北县西北部(41°18′~41°24′N, 114°10′~114°27′E, 湖泊海拔 1 312 m)。所在区域属于温带大陆性半干旱季风气候,夏季多降水,主要集中在 6~8 月份,年均气温在 2.6℃左右,年均降水量约 401.6 mm,蒸发量介于 1 500~2 000 mm。安固里淖主要以地表径流和降水

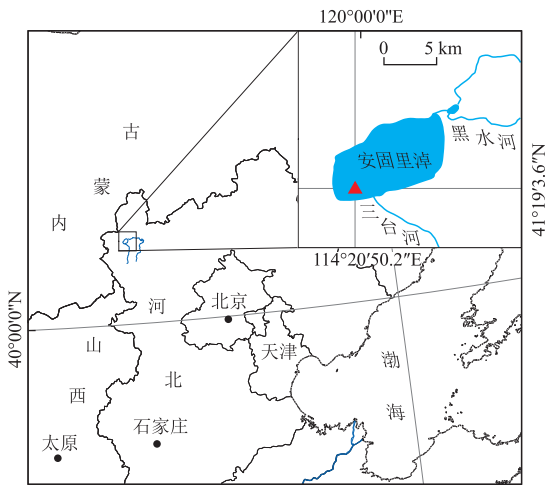


图 1 安固里淖地理位置及采样点

Fig.1 Location of the Anguli-Nuur Lake and the sampling site

补给,入湖河流主要有安固里河、黑水河、大囿囿河、东洋河、台路河、三台河等季节性河流,湖泊无出水口,以蒸发散失为主,属于典型的内陆封闭湖泊(图 1).安固里淖所属的区域在自然区划上属于温带草原,植被类型为干草原,植物群落以耐寒的多年生草本植物为主,间有小灌木伴生(阳小兰等,2017).

2 材料与方法

2.1 剖面特征及样品采集

2013 年 7 月在安固里淖西南部($41^{\circ}19'3.6''N$, $114^{\circ}20'50.2''E$,海拔 1 307 m)干涸的湖床上获取沉积岩心,深度为 120 cm,其中 0~69 cm 为人工开挖剖面采样,69~120 cm 为重力采样器采样.整个剖面岩性以粘土为主,连续性较好,没有明显的沉积间断.根据沉积物岩性特征的变化(图 2),可将剖面自下而上划分为 4 层,分别为:69~120 cm 为灰色粘土;60~69 cm 为灰色淤泥;28~60 cm 为灰色粘土;0~28 cm 为黑色粘土.本次研究以 2 cm 为间隔选取样品进行植硅体分析实验(69~72 cm 以 3 cm 为间隔取样),共 56 个样品.

2.2 年代测定

AMS ^{14}C 测试在美国 Beta 实验室完成,利用 IntCal09 校正曲线进行日历年龄校正(表 1).安固里淖沉积物中未能挑出陆源植物残体和碳屑等可靠的测年材料,所以选用了全有机质样品进行测年.在干旱—半干旱区的湖泊沉积物中,利用总有机质测得的 ^{14}C 年代通常会偏老(吴艳宏等,2007; Xiao *et al.*, 2008; 韩鹏和刘兴起,2017),这与受到碳库效应

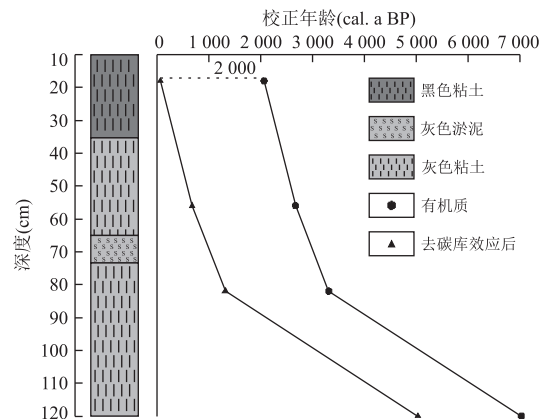


图 2 安固里淖剖面深度、岩性及年代序列

Fig.2 Lithology and depth-age model of the Anguli-Nuur Lake profile

表 1 安固里淖剖面 AMS ^{14}C 测年结果Table 1 Results of AMS ^{14}C dating in the Anguli-Nuur Lake profile

测年物质	深度 (cm)	AMS ^{14}C 年龄 (a BP)	树轮校正 中值年龄 (cal. a BP, 2σ)	碳库效应 校正年龄 (cal. a BP)
有机质	18	2 080 \pm 30	2 060	60
有机质	56	2 450 \pm 30	2 670	670
有机质	82	3 010 \pm 30	3 310	1 310
有机质	120	6 130 \pm 40	7 030	5 030

的影响有关,因此安固里淖总有机质测得的 ^{14}C 年代需要进行碳库效应校正.安固里淖与其相距仅 160 km 的岱海,同处内蒙古高原南缘,同属一个植被及气候区,湖泊性质相近,可以认为两个湖泊具有类似的碳库效应.吴艳宏等(2007)在岱海地区通过对表层沉积物、不同深度湖水、水草、鱼骨和湖岸土壤样品的 ^{14}C 年代测定,认为岱海现代碳库效应约为 2 000 a 左右,因此本文采用 2 000 a 作为安固里淖的碳库效应,对其年代进行校正,具体年代分析见阳小兰等(2017).根据测年结果和校正结果可见(图 2),120~82 cm 平均沉积速率为 0.01 cm/a,82~56 cm 平均沉积速率为 0.04 cm/a,56~18 cm 平均沉积速率为 0.06 cm/a,对于剖面其他样品的年代采用线性内插的方式获得.

2.3 植硅体分析

植硅体分析在中国地质科学院第四纪年代学与水文环境演变重点实验室完成.分析步骤为:(1)将选取好的湖泊沉积物样品置于烘箱内烘干并称重记录,前 24 个样品每个称重 10 g 左右,后 32 个样品每个称重 3.5 g 左右;(2)将烘干的湖泊沉积物样品置于 15 mL 的 PVC 试管中,加入浓度为 10% 的

HCl 溶液以去除样品中的钙和铁,并用蒸馏水清洗;(3)加入浓度为 10% 的 H_2O_2 溶液以去除有机质,并用蒸馏水清洗;(4)加入比重为 2.30 的 $ZnBr_2$ 溶液进行浮选,取上清液,离心后所得到的沉淀物为植硅体;(5)向植硅体中加入石松孢子片,加入适量的稀盐酸溶解并用蒸馏水洗至中性;(6)向所得混合物中加入无水乙醇至适合的浓度,然后用加拿大中性树胶制成永久性玻片.植硅体鉴定和统计在江南永新 BM2000 显微镜下放大 400 倍完成,每个样品统计植硅体数目不少于 300 粒.植硅体鉴定和描述参考王永吉和吕厚远(1993)对植硅体的分类与命名及 ICPN 1.0 (international phytolith code nomenclature 1.0) (Madella *et al.*, 2005) 的命名建议.植硅体的百分比和浓度图式采用 Tilia 软件制作完成 (Grimm, 1991).

2.4 数据分析

样品中每种形态植硅体的百分比和总浓度均是根据孢子的数量(每颗石松孢子片内含孢子数目为 27 640 粒)计算而得,计算方法如下:

百分比计算公式: $p = n/s \times 100\%$. 式中: p 表示每种形态植硅体的百分比, n 表示每种形态植硅体个数, s 表示植硅体总数.

浓度计算公式: $w = (n \times M) / (N \times m)$. 式中: n 表示镜下统计的植硅体粒数, N 表示统计的石松孢子粒数, M 表示每片石松孢子片中的孢子数, m 表示实验中所取样品的重量(单位为 g), w 表示植硅体浓度(单位为粒/g).

温暖指数 (I_w) 可用于反映植硅体组合与温度之间的关联性,其计算公式为:温暖指数 (I_w) = 示暖性植硅体 / (示暖性植硅体 + 示冷性植硅体) (王伟铭等, 2003). 由现代代表土中植硅体的分布规律 (王永吉和吕厚远, 1993; Lu *et al.*, 2006; An, 2016) 可知, 方型、扇型、哑铃型、鞍型等植硅体主要分布在我国东南和南部地区, 代表温暖气候, 可作为示暖型植硅体; 棒型、尖型、齿型和帽型等植硅体主要分布在我国北部、西部和东北地区, 代表寒冷气候, 可作为示冷型植硅体.

3 结果

安固里淖剖面 56 个样品中共鉴定和统计植硅体 11 406 粒. 选取 11 种具有代表意义的植硅体类型进行分析, 分别为: 植物短细胞产生的帽型植硅体(平顶帽型和尖顶帽型)、齿型植硅体(多齿型和弱齿

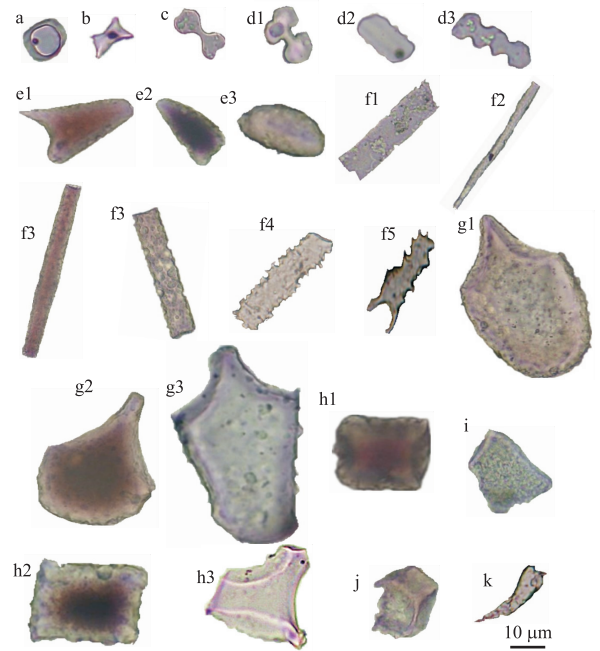


图 3 安固里淖剖面中典型的植硅体形态

Fig. 3 Typical phytolith in Anguli-Nuur Lake profile
a. 帽型; b. 鞍型; c. 哑铃型; d. 齿型 (d1. 二齿型; d2. 弱齿型; d3. 多齿型); e1、e2、e3、k. 尖型(毛状细胞); f. 棒型 (f1. 扁棒型; f2. 细长棒型; f3. 光滑棒型; f4. 突起棒型; f5. 刺棒型); g1、g3. 芦苇扇型; g2. 其他扇型; h1、h2. 方型; h3. 不规则块状; i. 不规则扁平状; j. 特殊型

型)、哑铃型植硅体; 长细胞产生的棒型植硅体(平滑棒型、扁棒型、细长棒型、突起棒型、刺棒型); 泡状细胞产生的扇型植硅体(芦苇扇型植硅体和少量的其他扇型植硅体); 毛状细胞产生尖型植硅体(包含少量的毛发状植硅体); 方型植硅体; 在草本植物和木本植物中都较多的不规则块状植硅体 (Gao *et al.*, 2017); 不规则扁平状植硅体 (An, 2016; Gao *et al.*, 2017) 以及特殊型植硅体 (图 3). 从整个剖面来看, 0~61 cm 示冷型植硅体百分含量较大, 植硅体浓度较高; 61~120 cm 示暖型植硅体百分含量增加, 植硅体浓度相对较低. 根据各代表形态植硅体的百分比、植硅体浓度和温暖指数的变化特征, 结合有序聚类分析, 将植硅体组合划分为 4 个组合带和 4 个亚带 (图 4), 各带植硅体组合特征如下:

带 I (120~100 cm, 5 030~3 070 cal. a BP) 为扇型—棒型—尖型组合带. 示暖型植硅体以扇型和方型为主, 其平均百分含量分别为 15.31% 和 6.25%; 示冷型植硅体主要为棒型和尖型, 其平均百分含量分别为 14.62% 和 11.65%. 本带中温暖指数较高且波动明显, 介于 0.20~0.67, 均值为 0.4.

带 II (100~61 cm, 3 070~800 cal. a BP) 为棒型—尖型—扇型组合带. 与带 I 相比, 该带中示暖型

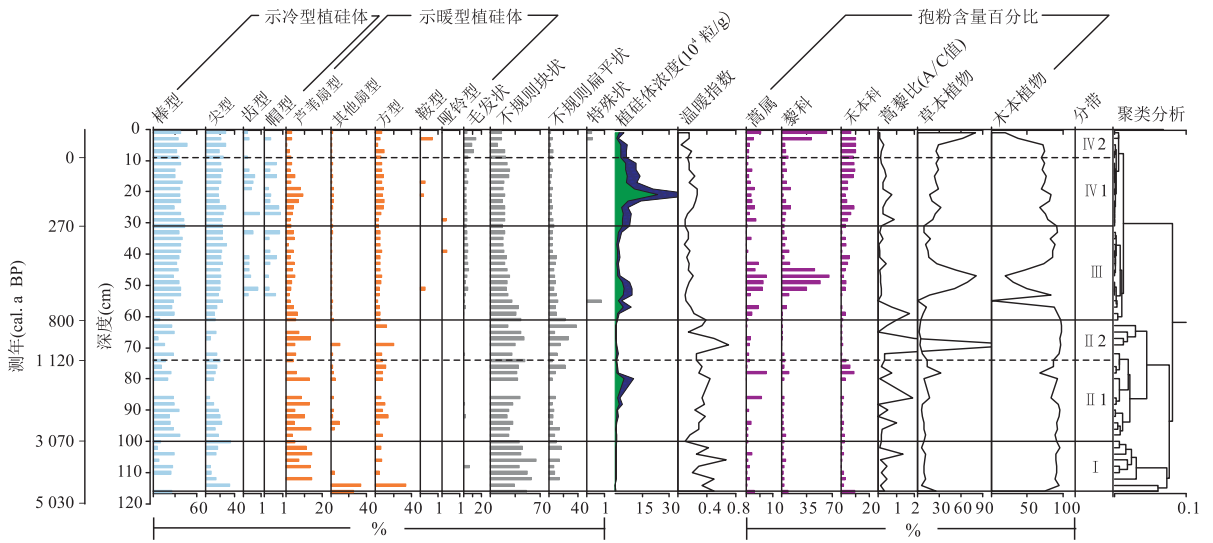


图 4 安固里淖剖面植硅体、孢粉百分含量以及温暖指数曲线变化

Fig.4 Phytolith and pollen percentage composition diagram (%), warmth index in the Anguli-Nuur Lake profile
孢粉数据来自阳小兰等(2017);横坐标起始刻度为 0

植硅体含量有所下降,尤其是扇型植硅体,其平均百分含量下降至 9.24%;而示冷的棒型和尖型植硅体平均百分含量有所增加,分别增至 21.83%和 14.22%。温暖指数也相应降低,介于 0.10~0.44,均值为 0.32。根据聚类分析结果将该带划分为两个亚带:在亚带 II 1 中(100~74 cm, 3 070~1 120 cal. a BP),示暖的扇型和方型植硅体含量较少;示冷的棒型和尖型植硅体含量相对较多。温暖指数较带 I 明显降低,植硅体浓度上升;在亚带 II 2 中(74~61 cm, 1 120~800 cal. a BP),示暖型和示冷型植硅体含量均有所减少,并伴随有较大的波动。植硅体浓度较低,温暖指数有所增加。

带 III(61~31 cm, 800~270 cal. a BP)为棒型—尖型组合带。自该带开始,植硅体组合发生快速转变,具体表现为示暖型植硅体含量明显下降,扇型植硅体和方型植硅体百分含量分别下降至 4.47%和 4.71%;而示冷型植硅体含量显著增加,棒型和尖型植硅体含量百分含量分别增加至 34.34%和 21.11%。本带中植硅体浓度增加,温暖指数明显减小。

带 IV(31~0 cm, 270 cal. a BP 至今)为棒型—尖型组合带。与带 III 相比,该带中示暖型为主的扇型和方型植硅体平均含量明显增多,分别增至 5.48%和 6.80%。温暖指数逐渐升高,介于 0.05~0.26,均值为 0.17,植硅体浓度达到剖面最大值。根据聚类结果可分成两个亚带:在亚带 IV 1(31~9 cm, 270 cal. a BP~1950 AD)中示暖型植硅体与温暖指数较带 III 相比有所升高,均值达到 0.19,植硅体浓

度达到剖面内最大值;在亚带 IV 2(9~0 cm, 1950 AD 至今)中,示冷的棒型和尖型植硅体平均含量有所升高,示暖的块状和扇型植硅体平均含量下降,温暖指数下降至 0.05~0.19,均值为 0.14,植硅体浓度降低。

4 讨论

4.1 安固里淖地区中一晚全新世以来气候环境演变历史

安固里淖及周边地区虽然从新石器晚期开始就存在以草原原始文化为主的人类文明,但是该地区人口稀少,人类活动强度较弱,对本区生态环境影响较小(孙建中等,1999)。因此安固里淖剖面中植硅体组合可以较为真实地反映该地区中一晚全新世以来的气候演化历史。在 5 030~3 070 cal. a BP 期间,植硅体组合中示暖型植硅体含量和温暖指数较高,指示该时期气候较为温暖。孢粉组合中木本植物占有绝对优势,草本植物相对较少,反映湿润的气候条件。植硅体浓度较小可能与温湿气候条件下地表植被以木本植物为主有关(Piperno, 2006)。温暖指数和蒿藜比值(A/C值)在该时期频繁波动,并且在 4 500 cal. a BP、4 100~3 800 cal. a BP 和 3 500 cal. a BP 左右温暖指数位于谷值,表明在 5 030~3 070 cal. a BP 时期存在 3 次较为显著的冷干事件。

在 3 000 cal. a BP 左右,植硅体组合恢复的温暖指数显著降低,指示温度大幅下降,推测全新世大

暖期在此区域彻底结束.翟秋敏等(2000)研究也表明安固里淖在 3 000 cal. a BP 左右湖面下降明显,气候变干且气温降低.邻区的岱海(孙千里和肖举乐,2006)和公海(Chen *et al.*, 2015)沉积记录显示 3 000 cal. a BP 左右气候温湿程度急剧衰退.科尔沁地区在 3 000 cal. a BP 之后气候也由暖湿逐步转为冷干,后期冬季风持续强盛,沙丘开始重新活动(Yang *et al.*, 2010, 2012).由此可见,3 000 cal. a BP 左右的干旱事件应该是区域性的气候突变事件,但是安固里淖孢粉所记录的此次气候变冷事件并没有植硅体反映的强烈,只是草本植物孢粉含量略微上升以及 A/C 值相应的降低,其原因可能是由于该时期外缘松属花粉所占比例较高(阳小兰等,2017),从而使湖区周围草本植物花粉的比例受到稀释所致.

在 3 070~1 120 cal. a BP 期间,温暖指数逐渐升高,指示气候在经历了 3 000 cal. a BP 左右的显著降温后开始向温暖的方向发展,略有上升的草本植物孢粉含量指示该时期降水减少.1 120~800 cal. a BP 期间,较高的温暖指数指示气候相对温暖,草本植物含量的降低和 A/C 值的增大,反映了降水量的增加.该阶段气候湿润期介于我国东部中世纪暖期内(公元 9~13 世纪)(Wang and Gong, 2000;王绍武等,2002;葛全胜等,2002;金章东等,2002),说明在东亚季风边缘的安固里淖地区也存在中世纪暖期.温暖指数在 2 100 cal. a BP 和 1 100 cal. a BP 左右显著降低,表明在 3 070~800 cal. a BP 存在 2 次冷干事件.

在 800~270 cal. a BP 期间,示冷型植硅体含量的明显升高以及示暖型植硅体含量和温暖指数的显著降低,均指示了该时期气候逐渐转冷.孢粉组合中草本植物孢粉含量的增加(尤其是蒿属和藜科植物孢粉含量)以及 A/C 值的降低,表明降水减少.温暖指数在该时期存在一个明显的降温过程,且历时较长,降温幅度大,推测是安固里淖植硅体记录对小冰期气候的显著响应.

270 cal. a BP 以来,植硅体浓度达到剖面的最大值,温暖指数和 A/C 值逐渐升高,表明气候向偏暖偏湿的方向发展.1950 AD 以后,植硅体含量和浓度的变化可能与大规模的人类活动有关.自 20 世纪 50 年代以来,安固里淖上游修建了多处水库(王超等,2005),使入湖水量大幅度减少,对生物硅产生了滞留效应(冉祥滨等,2013),从而使植硅体浓度显著减小.由于人为干扰(包括超载放牧、农业活动等)导致草场退化和土地沙化现象严重(孙建中等,1999),

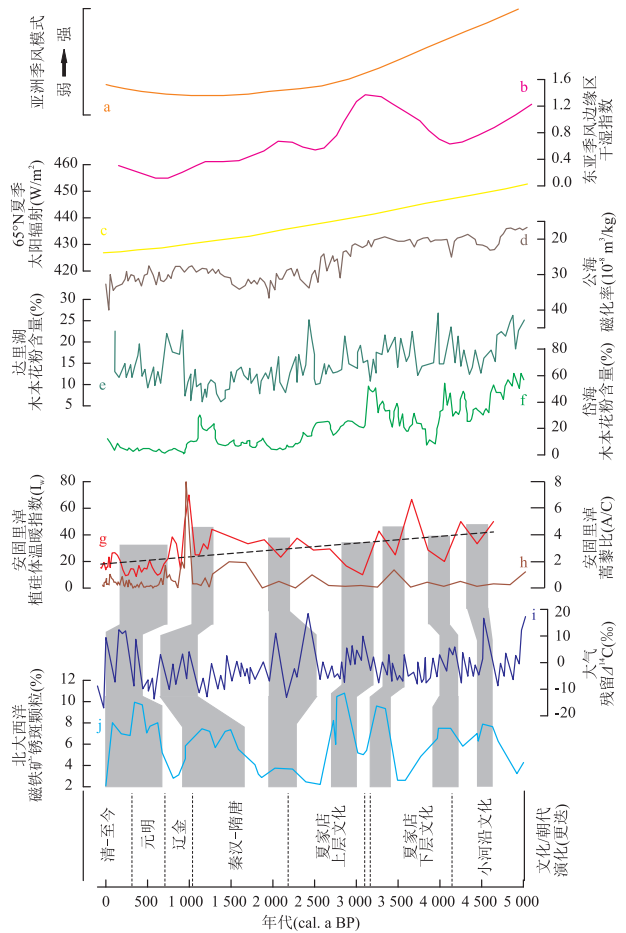


图 5 安固里淖与周边古气候记录、65°N 太阳辐射、亚洲季风模式、太阳活动及北大西洋极端冷事件的对比

Fig.5 Correlations of Anguli-Nuur and the surrounding paleoclimate records, July insolation at 65°N, Asian monsoon model, solar activity and extreme cold events in the North Atlantic

a.亚洲季风模式据 Chen *et al.*(2008); b.东亚季风边缘区干旱指数数据郭超等(2014); c.65°N 太阳辐射据 Berger and Loutre(1991); d.公海磁化率据 Chen *et al.*(2015); e.达里湖水木本花粉含量据 Wen *et al.*(2017); f.岱海水木本花粉含量据 Xiao *et al.*(2004); g.安固里淖温暖指数; h.安固里淖蒿藜比(A/C); i.大气残留 $\Delta^{14}\text{C}$ 据 Reimer *et al.*(2013); j.北大西洋磁铁矿锈斑颗粒含量据 Bond *et al.*(2001)

安固里淖地区原始植被类型发生改变.因此在最近几十年里,植硅体组合反映湖区植被的变化主要受到了人类活动的影响,而不是气候条件的改变所造成的.

4.2 安固里淖地区千年尺度和百年尺度上的区域气候记录对比及其驱动机制

安固里淖剖面植硅体和孢粉记录显示该地区中一晚全新世以来气候温湿程度整体呈下降趋势(图 5g),反映东亚夏季风逐渐减弱.在千年尺度上,安固里淖沉积物记录的气候变化与岱海(Xiao *et al.*, 2004)、达里湖(Wen *et al.*, 2017)和公海(Chen

et al., 2015)记录的气候变化具有较好的一致性(图 5d~5g),即中一晚全新世以来存在一个相对湿润期,之后气候逐渐变干变冷,但是各个湖泊沉积物所记录的中一晚全新世相对湿润期的起止时间存在一定的差异.本研究中安固里淖在 5 030~3 080 cal. a BP 时期温暖指数和木本植物含量较高,指示气候较为湿润.而岱海和达里湖分别在 3 950~3 500 cal. a BP 和 3 650~1 800 cal. a BP 湖泊水位缓慢上升(Xiao *et al.*, 2004; Wen *et al.*, 2017).这种差异一方面可能与年代测定的准确性有关,另一方面则可能与不同流域地形地貌有关(韩鹏和刘兴起,2017).

在百年尺度上,安固里淖剖面温暖指数和 A/C 比值显示(图 5g~5h),在~4 500 cal. a BP、4 100~3 800 cal. a BP、~3 500 cal. a BP、~3 000 cal. a BP、~2 100 cal. a BP、~1 100 cal. a BP 和 800~270 cal. a BP 左右存在 7 次冷干事件.这 7 次较为显著的百年尺度冷干事件在邻区达里湖(Fan *et al.*, 2016)、岱海(Xiao *et al.*, 2006; Peng *et al.*, 2005)及查干淖尔(韩鹏和刘兴起,2017)均有记录,表明这几个时期是东亚季风减弱的阶段.

安固里淖地区中一晚全新世气候温湿程度逐渐减小的趋势(图 5g)与北半球 65°夏季太阳辐射量变化(图 5c)基本吻合,表明北半球夏季太阳辐射量的变化是驱动该区温度变化的直接因素.该气候变化历史与 Chen *et al.*(2008)根据石笋、泥炭、湖泊等沉积记录重建的季风区湿度变化基本一致(图 5a),与郭超等(2014)根据多个湖泊的多指标沉积记录拟合的季风边缘区的平均干湿指数变化也具有很好的对应关系(图 5b),这说明安固里淖地区千年尺度的气候变化主要受东亚季风影响.安固里淖沉积物中记录的 5 000 a 以来的百年尺度东亚季风减弱阶段(7 次冷干事件)在年代误差范围内很好地对应于指示太阳活动减弱的大气残留 $\Delta^{14}\text{C}$ 高值(Reimer *et al.*, 2013)(图 5i)和北大西洋极端冷事件(Bond *et al.*, 2001)(图 5j),说明百年尺度上的东亚季风强弱变化可能受到了太阳活动和高纬气候变化的共同影响.

4.3 安固里淖地区中一晚全新世以来气候变化对人类文明的影响

安固里淖地区位于农牧交错带,气候显著影响着该区人类文明的演化(Jia *et al.*, 2016a, 2016b).剖面植硅体和孢粉记录显示 5 000~3 000 cal. a BP 夏季风强劲,气候暖湿,降水充足,此时是小河沿文化和夏家店下层文化发育的主要时期.小河沿文化

时期以渔猎为主,夏家店下层文化时期是史前农业发展的鼎盛时期,黍、粟等为主要农作物,具有发达的耒耨农业(Jia *et al.*, 2016b).5 000~3 000 cal. a BP 良好的气候条件为渔猎和农业的发展提供了重要的条件(胡金明等,2002; Li *et al.*, 2006).3 000 cal. a BP 左右,东亚夏季风迅速减弱,气候变干变冷,导致生态环境逐渐恶化,如浑善达克地区植被减少,风沙活动增强(Liu *et al.*, 2002),科尔沁沙丘重新活动(Yang *et al.*, 2010, 2012),呼伦湖水位降低(Xiao *et al.*, 2009),岱海地区木本植物减少,森林消失(Xiao *et al.*, 2004).环境的恶化导致农业发展的需求得不到满足,进而转为以畜牧业为主的夏家店上层文化(夏正楷等,2000;胡金明等,2002; Jia *et al.*, 2016a).夏家店上层文化中生产工具的改变,也反映出与夏家店下层文化(约 4 000~3 300 cal. a BP)截然不同的两种生业模式(韩茂莉,2010).杨志荣和索秀芬(1996)根据我国北方农牧交错带人类活动历史,也判定我国北方真正的草原牧业文化形成于 3 000 cal. a BP 左右.

3 000~1 120 cal. a BP 的干旱气候致使秦汉一直到隋唐该地区都是以畜牧文化为主(胡金明等, 2002).1 120~800 cal. a BP 时期,气候相对温暖,降雨量明显增加,短暂的温暖时期造就了辽金时代的农业大开发.据史料记载,在辽代时期,辽西地区的村落遗址较现代还要密集,出土的铁锄、铁镐等工具表明该时期的农业生产技术达到了较高的水平.金统治时期,农业繁荣,人口激增,出土的锄、镰、斧、铧等工具表明农业生产已经由粗放式经营转变为精耕细作(肖忠纯,2014).800~270 cal. a BP 期间,进入小冰期,寒冷干燥的气候使元朝时期该地区农业逐渐衰退.明朝中后期为小冰期最盛期,气候寒冷,沙地扩大,已经不适合人类的居住(胡金明等,2002).清朝初期气候转好,使得该地区的农业和畜牧业并行发展(关亚新,2011).由上述分析可见,在史前文明时期,气候变化是影响人类文明的重要因素,在安固里淖等季风边缘地区,夏季风的进退直接影响了人类文明的更替.

5 结论

(1)安固里淖中一晚全新世以来大致经历了暖湿(5 030~3 070 cal. a BP)、温干(3 070~1 120 cal. a BP)、暖湿(1 120~800 cal. a BP)、冷干(800~270 cal. a BP)、暖湿(270 cal. a BP 至今)的气候变化过程.

(2)在千年尺度上该区域气候总体呈冷干趋势,但在 5 030~3 074 cal. a BP 时期气候相对湿润.这种气候的演化与邻区其他湖泊记录具有较好的一致性.千年尺度上气候的变化主要受控于北半球太阳辐射量的变化.

(3)在百年尺度上,安固里淖地区经历了 7 次冷干事件,分别发生于 4 500 cal. a BP、4 100~3 800 cal. a BP、3 500 cal. a BP、3 000 cal. a BP、2 100 cal. a BP、1 100 cal. a BP 和 800~270 cal. a BP 左右.这 7 次冷干事件与大气残留 $\Delta^{14}\text{C}$ 高值和北大西洋极端冷事件在时间上基本一致,表明百年尺度上的东亚季风减弱阶段主要受到了北半球高纬气候和太阳活动的共同影响.

(4)近 5 000 a 来,安固里淖及相邻地区经历了以渔猎为主的小河沿文化、具有发达锄耕农业的夏家店下层文化、以畜牧业为主的夏家店上层文化、农业大发展的辽金时代、农业衰退的元明时代以及农业和畜牧业并行发展的清朝时代.对比该区近 5 000 a 来气候演化历史,认为处于东亚夏季风边缘地区的安固里淖地区的文化演化及人地关系明显受到气候的影响.

致谢:南京师范大学萧家仪教授、河北省科学院地理科学研究所阳小兰研究员对野外工作进行指导;地科院水环所刘畅、南京师范大学研究生尹建吉、吴小爽参与野外采样工作;审稿专家提出了宝贵建议;在此一并感谢!

References

An, X. H., 2016. Morphological Characteristics of Phytoliths from Representative Conifers in China. *Palaeoworld*, 25 (1): 116–127.

Berger, A., Loutre, M. F., 1991. Insolation Values for the Climate of the Last 10 Million Years. *Quaternary Science Reviews*, 10 (4): 297–317. [https://doi.org/10.1016/0277-3791\(91\)90033-q](https://doi.org/10.1016/0277-3791(91)90033-q)

Bond, G., Kromer, B., Evans, M. N., et al., 2001. Persistent Solar Influence on North Atlantic Climate during the Holocene. *Science*, 294(5549): 2130–2136. <https://doi.org/10.1126/science.1065680>

Chen, F. H., Xu, Q. H., Chen, J. H., et al., 2015. East Asian Summer Monsoon Precipitation Variability since the Last Deglaciation. *Scientific Reports*, 5 (1): 11186. <https://doi.org/10.1038/srep11186>

Chen, F. H., Yu, Z. C., Yang, M. L., et al., 2008. Holocene Moisture Evolution in Arid Central Asia and Its Out-of-

Phase Relationship with Asian Monsoon History. *Quaternary Science Reviews*, 27(3–4): 351–364. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2007.10.017>

Fan, J. W., Xiao, J. L., Wen, R. L., et al., 2016. Droughts in the East Asian Summer Monsoon Margin during the Last 6 kyrs: Link to the North Atlantic Cooling Events. *Quaternary Science Reviews*, 151: 88–99. <https://doi.org/10.13039/501100001809>

Gao, G. Z., Jie, D. M., Wang, Y., et al., 2017. Phytolith Reference Study for Identifying Vegetation Changes in the Forest-Grassland Region of Northeast China. *Boreas*, 47 (2): 481–497. <https://doi.org/10.1111/bor.12280>

Ge, Q. S., Zheng, J. Y., Man, Z. M., et al., 2002. Reconstruction and Analysis on the Series of Winter-Half-Year Temperature Changes over the Past 2 000 Years in Eastern China. *Earth Science Frontiers*, 9(1): 169–181 (in Chinese with English abstract).

Ge, Y., Jie, D. M., Guo, J. X., et al., 2010. Response of Phytoliths in *Leymus Chinensis* to the Simulation of Elevated Global CO₂ Concentrations in Songnen Grassland, China. *Chinese Science Bulletin*, 55 (27): 2735–2741 (in Chinese).

Grimm, E. C., 1991. Tilia and Tiliagraph. Illinois State Museum, Springfield.

Gu, Y. S., Li, C. A., Zhang, Z. J., 1997. Application of Phytolith Analysis in Study of Vermicular Red Earth in South China. *Geological Science and Technology Information*, 16(4): 55–58 (in Chinese with English abstract).

Gu, Y. S., Liu, H. M., Zeng, Z. X., et al., 2016. Environmental Change Documented by Pluvial Phytolith Records in the Past 26 ka on East Edge of Tengger Desert. *Earth Science*, 41(4): 605–611 (in Chinese with English abstract).

Guan, Y. X., 2011. A Research on the Land Use of the West of Liao River and Environmental Change in Qing Dynasty (Dissertation). Jilin University, Changchun (in Chinese with English abstract).

Guo, C., Ma, Y. Z., Hu, C. L., et al., 2014. Holocene Humidity Changes in Inland China Inferred from Lake Sediments. *Progress in Geography*, 33(6): 786–798 (in Chinese with English abstract).

Han, M. L., 2010. A Study on Settlements and Environment of Prehistoric Times in the West Liaohe River Valley. *Acta Archaeologica Sinica*, (1): 1–20 (in Chinese with English abstract).

Han, P., Liu, X. Q., 2017. The Climate Evolution Inferred from Chagan-Nuur in Middle-East Part of Inner Mongolia since the Last 7 000 Years. *Quaternary Sciences*, 37(6): 1381–1390 (in Chinese with English abstract).

- Hu, J. M., Cui, H. T., Li, Y. Y., 2002. Reconstruction of the Evolution History of Man-Land System since the Holocene in the Xiliao River Basin. *Scientia Geographica Sinica*, 22 (5): 535—542 (in Chinese with English abstract).
- Jia, X., Lee, H. F., Zhang, W. C., et al., 2016a. Human-Environment Interactions within the West Liao River Basin in Northeastern China during the Holocene Optimum. *Quaternary International*, 426: 10—17. <https://doi.org/10.13039/501100001809>
- Jia, X., Sun, Y. G., Wang, L., et al., 2016b. The Transition of Human Subsistence Strategies in Relation to Climate Change during the Bronze Age in the West Liao River Basin, Northeast China. *The Holocene*, 26(5): 781—789. <https://doi.org/10.1177/0959683615618262>
- Jiang, J. M., Wu, J. L., Shen, J., 2004. Lake Sediment Records of Climatic and Environmental Change in Angulinao Lake. *Scientia Geographica Sinica*, 24 (3): 346—351 (in Chinese with English abstract).
- Jin, Z. D., Shen, J., Wang, S. M., et al., 2002. The Medieval Warm Period in the Daihai Area. *Journal of Lake Sciences*, 14 (3): 209—216 (in Chinese with English abstract).
- Li, Y. Y., Willis, K. J., Zhou, L. P., et al., 2006. The Impact of Ancient Civilization on the Northeastern Chinese Landscape: Palaeoecological Evidence from the Western Liaohe River Basin, Inner Mongolia. *The Holocene*, 16 (8): 1109—1121.
- Liu, H. Y., Xu, L. H., Cui, H. T., 2002. Holocene History of Desertification along the Woodland-Steppe Border in Northern China. *Quaternary Research*, 57 (2): 259—270. <https://doi.org/10.1006/qres.2001.2310>
- Liu, L. J., Yang, Z. J., Wang, P. L., et al., 2017. Comparative Study of Pollen and Phytolith Records since the Middle Holocene from Pingliang Region of Loess Plateau. *Acta Geoscientica Sinica*, 38(3): 393—402 (in Chinese with English abstract).
- Lu, H. Y., Wu, N. Q., Yang, X. D., et al., 2006. Phytoliths as Quantitative Indicators for the Reconstruction of Past Environmental Conditions in China I: Phytolith-Based Transfer Functions. *Quaternary Science Reviews*, 25(9/10): 945—959. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2005.07.014>
- Ma, L., Wu, J. L., 2009. Environmental Significance from Organic Carbon and Its Isotope of Angulinao Lake Sediment. *Journal of Natural Resources*, 24 (6): 1099—1104 (in Chinese with English abstract).
- Madella, M., Alexandre, A., Ball, T., 2005. International Code for Phytolith Nomenclature 1.0. *Annals of Botany*, 96 (2): 253—260. <https://doi.org/10.1093/aob/mci172>
- Mao, X., Liu, L. J., Li, C. A., et al., 2017. Elemental Composition Features of Loess-Paleosol Profile in Fengning, Hebei Province. *Earth Science*, 42(10): 1750—1759 (in Chinese with English abstract).
- PAGES, 2009. Science Plan and Implementation Strategy. IG-BP Report NO.57. IGBP Secretariat, Stockholm, 67.
- Peng, Y., Xiao, J., Nakamura, T., et al., 2005. Holocene East Asian Monsoonal Precipitation Pattern Revealed by Grain-Size Distribution of Core Sediments of Daihai Lake in Inner Mongolia of North-Central China. *Earth and Planetary Science Letters*, 233 (3—4): 467—479. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2005.02.022>
- Piperno, D. R., 2006. Phytoliths; A Comprehensive Guide for Archaeologists and Paleoecologists. Alta Mira Press, Lanham, MD, 238.
- Qiu, W. L., Zhai, Q. M., Hu, H. B., et al., 1999. Holocene Water Level Changes of Angulinao Lake and Their Environmental Significance. *Journal of Beijing Normal University (Natural Science)*, 35 (4): 542—548 (in Chinese with English abstract).
- Ran, X. B., Yu, Z. G., Zang, J. Y., et al., 2013. Advances in the Influence of Earth Surface Process and Human Activity on Silicon Output. *Advances in Earth Science*, 28(5): 577—587 (in Chinese with English abstract).
- Reimer, P. J., Bard, E., Bayliss, A., et al., 2013. IntCal13 and Marine13 Radiocarbon Age Calibration Curves 0—50 000 Years cal BP. *Radiocarbon*, 55(4): 1869—1887. https://doi.org/10.2458/azu_js_rc.55.16947
- Sun, J. Z., Sheng, X. B., Liu, Y. X., 1999. A Study on the Human Activities and Ecological and Environmental Changes in the Bashang Area of Hebei Province. *Advances in Environmental Science*, 7(4): 102—111 (in Chinese with English abstract).
- Sun, Q. L., Xiao, J. L., 2006. Characteristics of the Holocene Optimum in the Monsoon/Arid Transition Belt Recorded by Core Sediments of Daihai Lake, North China. *Quaternary Sciences*, 26(5): 781—790 (in Chinese with English abstract).
- Wang, C., Fu, Y. S., Bi, J., 2005. A Preliminary Study on the Reasons of Degradation of Angulinuur Wetland. *Journal of Hebei Forestry Science and Technology*, (S1): 5—6, 11 (in Chinese).
- Wang, H. Y., Liu, H. Y., Zhu, J. L., et al., 2010. Holocene Environmental Changes as Recorded by Mineral Magnetism of Sediments from Anguli-Nuur Lake, Southeastern Inner Mongolia Plateau, China. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 285(1—2): 30—49. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2009.10.020>

- Wang, S. W., Cai, J. N., Zhu, J. H., et al., 2002. Studies on Climate Change in China. *Climatic and Environmental Research*, 7 (2): 137—145 (in Chinese with English abstract).
- Wang, S. W., Gong, D. Y., 2000. Enhancement of the Warming Trend in China. *Geophysical Research Letters*, 27 (16): 2581—2584. <https://doi.org/10.1029/1999gl010825>
- Wang, W. M., Liu, J. L., Zhou, X. D., 2003. A Study on the Climate Index of Phytoliths in the Nanjing Homo Erectus Cave Deposits. *Chinese Science Bulletin*, 48(11): 1205—1208 (in Chinese).
- Wang, Y. J., Lu, H. Y., 1993. The Study of Phytolith and Its Application. China Ocean Press, Beijing (in Chinese with English abstract).
- Wen, R. L., Xiao, J. L., Fan, J. W., et al., 2017. Pollen Evidence for a Mid-Holocene East Asian Summer Monsoon Maximum in Northern China. *Quaternary Science Reviews*, 176: 29—35. <https://doi.org/10.13039/501100001809>
- Wu, Y. H., Wang, S. M., Zhou, L. P., et al., 2007. Modern Reservoir Age for ^{14}C Dating in Daihai Lake. *Quaternary Sciences*, 27(4): 507—510 (in Chinese with English abstract).
- Xia, Z. K., Deng, H., Wu, H. L., 2000. Geomorphologic Background of the Prehistoric Cultural Evolution in the Xar Moron River Basin, Inner Mongolia. *Acta Geographica Sinica*, 55(3): 329—336 (in Chinese with English abstract).
- Xiao, J. L., Chang, Z. G., Wen, R. L., et al., 2009. Holocene Weak Monsoon Intervals Indicated by Low Lake Levels at Hulun Lake in the Monsoonal Margin Region of Northeastern Inner Mongolia, China. *The Holocene*, 19(6): 899—908. <https://doi.org/10.1177/0959683609336574>
- Xiao, J. L., Wu, J. T., Si, B., et al., 2006. Holocene Climate Changes in the Monsoon/Arid Transition Reflected by Carbon Concentration in Daihai Lake of Inner Mongolia. *The Holocene*, 16 (4): 551—560. <https://doi.org/10.1191/0959683606hl950rp>
- Xiao, J. L., Xu, Q. H., Nakamura, T., et al., 2004. Holocene Vegetation Variation in the Daihai Lake Region of North-Central China: A Direct Indication of the Asian Monsoon Climatic History. *Quaternary Science Reviews*, 23 (14—15): 1669—1679. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2004.01.005>
- Xiao, J. L., Si, B., Zhai, D. Y., et al., 2008. Hydrology of Daili Lake in Central-Eastern Inner Mongolia and Holocene East Asian Monsoon Variability. *Journal of Paleolimnology*, 40(1): 519—528.
- Xiao, Z. C., 2014. The Archaeological Site and Social Development of Liaoxi Corridor in Liao Dynasty. *Agricultural Archaeology*, 4: 89—93 (in Chinese).
- Yang, L. H., Wang, T., Zhou, J., et al., 2012. OSL Chronology and Possible Forcing Mechanisms of Dune Evolution in the Horqin Dunefield in Northern China since the Last Glacial Maximum. *Quaternary Research*, 78 (2): 185—196. <https://doi.org/10.1016/j.yqres.2012.05.002>
- Yang, L. H., Zhou, J., Lai, Z. P., et al., 2010. Late Glacial and Holocene Dune Evolution in the Horqin Dunefield of Northeastern China Based on Luminescence Dating. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 296 (1—2): 44—51. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2010.06.014>
- Yang, X. L., Zhang, R. C., Zhang, Z., et al., 2017. Environmental Change since 5 000 cal. a B.P. in the Anguli-Nuur Lake Area Based on Palynological and Geochemical Records. *Quaternary Sciences*, 37 (1): 130—142 (in Chinese with English abstract).
- Yang, Z. R., Suo, X. F., 1996. Preliminary Study on Relations between Human Activities and Environment in Farming-Animal Husbandry Zigzag Zone of North China. *Journal of Beijing Normal University (Natural Science)*, 32 (3): 415—420 (in Chinese with English abstract).
- Zhai, Q. M., 2001. Holocene Soluble Salt Sediments of Angulinao Lake and Its Environment. *Journal of Palaeogeography*, 3 (1): 91—96 (in Chinese with English abstract).
- Zhai, Q. M., Guo, Z. Y., 2002. Geochemical Characters and Environmental Changes of Holocene Sediments of Angulinao Lake in Bashang Plateau. *Journal of Palaeogeography*, 4 (4): 55—60 (in Chinese with English abstract).
- Zhai, Q. M., Qiu, W. L., Li, R. Q., et al., 2000. The Middle and Late Holocene Lacustrine Sediments and Its Climate Significance of Angulinao-Bojianghaizi Lakes, Inner Mongolia. *Journal of Palaeogeography*, 2 (2): 87—94 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, P., Cheng, H., Edwards, R. L., et al., 2008. A Test of Climate, Sun, and Culture Relationships from an 1 810-Year Chinese Cave Record. *Science*, 322 (5903): 940—942. <https://doi.org/10.1126/science.1163965>

附中文参考文献

- 葛全胜, 郑景云, 满志敏, 等, 2002. 过去 2 000 a 中国东部冬半年温度变化序列重建及初步分析. *地学前缘*, 9(1): 169—181.
- 葛勇, 介冬梅, 郭继勋, 等, 2010. 松嫩草原羊草植硅体对模拟全球 CO_2 浓度升高的响应研究. *科学通报*, 55(27): 2735—2741.
- 顾延生, 李长安, 章泽军, 1997. 植硅石分析在第四纪环境研究中的应用. *地质科技情报*, 16(4): 55—58.
- 顾延生, 刘胡玫, 曾佐勋, 等, 2016. 腾格里沙漠东缘 26 ka 来环境演化的植硅体记录. *地球科学*, 41(4): 605—611.

- 关亚新, 2011. 清代辽西土地利用与生态环境变迁研究(博士学位论文). 长春: 吉林大学.
- 郭超, 马玉贞, 胡彩莉, 等, 2014. 中国内陆区湖泊沉积所反映的全新世干湿变化. 地理科学进展, 33(6): 786-798.
- 韩茂莉, 2010. 史前时期西辽河流域聚落与环境研究. 考古学报, (1): 1-20.
- 韩鹏, 刘兴起, 2017. 内蒙古中东部查干淖尔湖流域 7 000 年以来的气候演变. 第四纪研究, 37(6): 1381-1390.
- 胡金明, 崔海亭, 李宜垠, 2002. 西辽河流域全新世以来人地系统演变历史的重建. 地理科学, 22(5): 535-542.
- 姜加明, 吴敬禄, 沈吉, 2004. 安固里淖沉积物记录的气候环境变迁. 地理科学, 24(3): 346-351.
- 金章东, 沈吉, 王苏民, 等, 2002. 岱海的“中世纪暖期”. 湖泊科学, 14(3): 209-216.
- 刘林敬, 杨振京, 王盼丽, 等, 2017. 黄土高原平凉地区中全新世以来孢粉-植硅体记录对比研究. 地球学报, 38(3): 393-402.
- 马龙, 吴敬禄, 2009. 安固里淖湖积物中总有机碳含量及其碳同位素的环境意义. 自然资源学报, 24(6): 1099-1104.
- 毛欣, 刘林敬, 李长安, 等, 2017. 丰宁黄土-古土壤剖面常量元素地球化学特征. 地球科学, 42(10): 1750-1759.
- 邱维理, 翟秋敏, 扈海波, 等, 1999. 安固里淖全新世湖面变化及其环境意义. 北京师范大学学报(自然科学版), 35(4): 542-548.
- 冉祥滨, 于志刚, 臧家业, 等, 2013. 地表过程与人类活动对硅产出影响的研究进展. 地球科学进展, 28(5): 577-587.
- 孙建中, 盛学斌, 刘云霞, 1999. 河北坝上地区人类活动与生态环境变化研究. 环境科学进展, 7(4): 102-111.
- 孙千里, 肖举乐, 2006. 岱海沉积记录的季风/干旱过渡区全新世适宜期特征. 第四纪研究, 26(5): 781-790.
- 王超, 付芸生, 毕君, 2005. 安固里淖湿地退化原因初探. 河北林业科技, S1: 5-6, 11.
- 王绍武, 蔡静宁, 朱锦红, 等, 2002. 中国气候变化的研究. 气候与环境研究, 7(2): 137-145.
- 王伟铭, 刘金陵, 周晓丹, 2003. 南京直立人洞穴沉积的植硅体气候指数研究. 科学通报, 48(11): 1205-1208.
- 王永吉, 吕厚远, 1993. 植物硅酸体研究及应用. 北京: 海洋出版社.
- 吴艳宏, 王苏民, 周力平, 等, 2007. 岱海¹⁴C测年的现代碳库效应研究. 第四纪研究, 27(4): 507-510.
- 夏正楷, 邓辉, 武弘麟, 2000. 内蒙西拉木伦河流域考古文化演变的地貌背景分析. 地理学报, 55(3): 329-336.
- 肖忠纯, 2014. 辽代辽西走廊的考古遗址与社会发展. 农业考古, 4: 89-93.
- 阳小兰, 张茹春, 张振, 等, 2017. 安固里淖湖近 5 000 年来环境变化的孢粉及地球化学沉积记录. 第四纪研究, 37(1): 130-142.
- 杨志荣, 索秀芬, 1996. 我国北方农牧交错带人类活动与环境的关系. 北京师范大学学报(自然科学版), 32(3): 415-420.
- 翟秋敏, 2001. 全新世安固里淖易溶盐沉积与环境. 古地理学报, 3(1): 91-96.
- 翟秋敏, 郭志永, 2002. 坝上高原安固里淖全新世沉积地球化学特征与环境变化. 古地理学报, 4(4): 55-60.
- 翟秋敏, 邱维理, 李容全, 等, 2000. 内蒙古安固里淖-泊江海子全新世中晚期湖泊沉积及其气候意义. 古地理学报, 2(2): 87-94.