

近 200 年来黑河下游天鹅湖湖泊沉积记录的环境变迁*

马 燕^{1,2}, 郑祥民^{1**}, 曹希强³, 远藤邦彦⁴

(1: 华东师范大学地理信息科学教育部重点实验室, 上海 200062)

(2: 华北水利水电学院岩土工程系, 郑州 450008)

(3: 河南省国土资源科学研究院, 郑州 450053)

(4: 日本大学地球系统科学系, 东京 日本 156 - 8550)

摘 要:通过对黑河下游天鹅湖-2 孔湖泊沉积柱状岩芯的多环境指标的分析, 同时参照相关的历史文献记录, 提取了其中包含的气候变化和人类活动信息。根据天鹅湖-2 孔湖泊沉积记录, 将天鹅湖在近 200 年的湖泊演化分为七个阶段, 影响湖泊演化各个阶段的主导因素各不相同, 包括气候变化与人类活动, 正是这两者的共同作用导致了天鹅湖及其周围地区的环境变化。湖泊沉积记录的环境演化主要受气候冷暖干湿变化的控制, 而人类活动在特定时段对湖泊环境演变产生明显影响。

关键词:天鹅湖; 湖泊沉积; 气候变化; 人类活动

Environmental changes recorded by lacustrine sediment from Lake Swan, lower reaches of Heihe River during recent 200 years

MA Yan^{1,2}, ZHENG Xiangmin¹, CAO Xiqiang³ & Kunihiro Endo⁴

(1: *Key Lab. of Geographical Information of Ministry of Education, East China Normal University, Shanghai 200062, P. R. China*)

(2: *Department of Geo-technical Engineering, North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power, Zhengzhou 450008, P. R. China*)

(3: *Academy of Land Resources of Henan Province, Zhengzhou 450053, P. R. China*)

(4: *Department of Geosystem Science, Nihon University, Tokyo, Japan*)

Abstract: Based on the data of environmental multi - proxy of lake sediments from Core 2 in Lake Swan, one of the tail-lakes of Heihe River, the contained information of climate changes and human activities is distilled. The evolution of Lake Swan during recent 200 years is divided into 7 phases according to the information recorded by lake sediment. In each phases different factors affected the lake evolution on different levels, and the combining effect of both climate changes and human activities led evolution of Lake Swan and the environmental changes of Ejina Oasis. The natural climate change played a leading role in the process of evolution of Lake Swan during recent 200 years, and human activities affected the lake environment greatly especially in special periods.

Keywords: Lake Swan; lake sediment; climate changes; human activities

内陆干旱 - 半干旱气候区封闭湖泊对区域气候变化的响应十分敏感, 利用湖泊沉积记录的环境变化信息恢复古气候环境演变是过去全球变化研究的重要内容之一^[1]。本文通过对黑河下游额济纳旗境内的天鹅湖-2 孔的高分辨率的分析测试, 包括磁性特征、碳酸盐含量等, 并结合精确的测年数据, 提取其中包含的气候变化和人类活动信息, 在查阅大量历史文献记录的基础上, 演绎天鹅湖的湖泊演化及其周围地区的环

* 国家自然科学基金(40372135)和上海市科委重大项目(05 DZ 12005)联合资助。2005 - 07 - 07 收稿; 2005 - 12 - 20 收修改稿。马燕, 女, 1978 年生, 现为华北水利水电学院岩土工程系教师; E-mail: mayanelani@163.com.

** 通讯作者

境变化过程,揭示影响湖泊演化和环境变化的因素.

1 研究区域概况

天鹅湖位于内蒙古阿拉善盟额济纳旗北部,地理坐标为 $42^{\circ}00'27.6''N, 101^{\circ}34'33.9''E$,海拔 888 m. 处于我国荒漠地带,气候极端干旱,属大陆性极端干旱气候区,具有降水稀少,地表水资源贫乏,地下水补给量少,蒸发强烈,温差大,风大沙多,日照时间长,干燥度大,易起风暴等特点.

天鹅湖过去主要依靠黑河下游的众多小支流补给,属于黑河众多终端尾间湖泊之一,曾是古居延泽的一部分,随着黑河的改道变迁,在古居延泽干涸之后,天鹅湖也只是间歇性来水,靠雨水和少量的河水补给. 2000 年至今,一直处于蓄水状态.

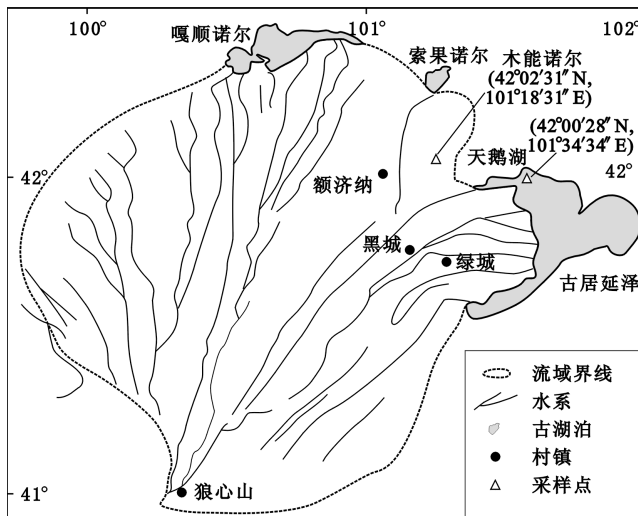


图 1 天鹅湖及天鹅湖-2 孔样芯位置图

Fig. 1 Location of Lake Swan and core-2

2 样品采集和分析

本项研究采用的研究对象主要是天鹅湖-2 孔岩芯,于 2004 年 9 月 5 日在内蒙古额济纳旗境内的天鹅湖采集,岩芯长度为 84.5 cm. 该岩芯主要以粉砂为主,并含有黑色有机质以及水草根系.

以 0.5 cm 为间隔分割岩芯,共取得样品 169 个,经过风干、研磨、过筛、称重后全部进行磁化率和碳酸盐含量测定. 其中磁性测量采用采用 MS2 磁化率仪测量低频磁化率(χ_{lf})和低频磁化率(χ_{hf}),碳酸盐含量采用 GMY - III 型碳酸盐含量测定仪进行测定.

另外从岩芯上部 40 cm 段中按照 1 个/2 cm 选取样品 20 个称取 3g 左右装在聚乙烯试管内,蜡封静置 20 天后,在华东师范大学河口海岸国家重点实验室利用 γ 谱仪²¹⁰Pb 比活度测定,以确定岩芯的沉积年代. 通过²¹⁰Pb 测年确定天鹅湖湖泊沉积物沉积速率为 0.491 cm/a,因此可以推算天鹅湖-2 孔所代表的沉积年代约为 200 aBP.

3 湖泊沉积记录的环境变迁

3.1 天鹅湖-2 孔沉积物环境磁学特征

天鹅湖 2 号孔的磁化率 χ 和饱和等温剩磁 SIRM 相对较小, χ 变化于 $23.44 - 54.84 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ 之间,平均值为 $31.29 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$,磁化率明显偏低,反映了沉积物中磁性矿物的总体含量不高,由于内陆封闭湖泊在历史时期环境相对稳定,湖泊沉积物的次生变化不大,因此磁性矿物含量总体偏低指示了沉积期间

干冷的气候条件. 岩芯磁化率的垂向变化比较大(图2).

3.2 天鹅湖-2孔的碳酸盐含量变化特征

经过实验室测定分析,天鹅湖-2孔沉积物样品碳酸盐含量平均值为10.9%,其中最小值为5.0%,最大值为15.8%. 碳酸盐含量的垂向变化特征如图2所示.

通过对比磁性变化曲线和碳酸盐含量变化曲线,可以看出磁化率与碳酸盐含量基本上是呈反向变化的,即磁化率的峰值段对应碳酸盐含量的谷值段,磁化率的谷值段对应碳酸盐含量的峰值段,特别是在68.5 cm处磁化率达到整个柱样的最大值,而对应的碳酸盐含量则为整个柱样的最小值. 曹继秀等对塬堡黄土剖面15万年以来磁化率气候记录及黄土磁化率时空特征的研究中指出 CaCO_3 的峰值滞后于磁化率的峰值,常出现在磁化率的低值处,和黄土层的层位相对应, CaCO_3 含量的谷值对应于磁化率的峰值^[2]. 与黄土中这两种参数的变化相类似,天鹅湖-2孔碳酸盐含量与质量磁化率的变化也呈负向相关. 因此,按照磁化率变化分层,由下到上对各个不同层位的碳酸盐含量和质量磁化率分别进行了相关性分析(表1),可以看出第一层、第五层、第七层以及第八层中两者的负线性相关较为显著或极为显著,而其它层则相关性较差.

表1 各层位碳酸盐含量与磁化率的相关系数

Tab. 1 Correlation coefficient between content of carbonate and magnetic susceptibility in each stratum

层位	第一层	第二层	第三层	第四层	第五层	第六层	第七层	第八层	第九层
相关系数	0.6316	0.3941	0.0017	0.3479	0.8855	0.0185	0.8152	0.9475	0.0096

碳酸盐含量的高低分别指示了湖水的咸化与淡化,间接反映了气候的干湿变化,气候干旱时,湖区蒸发远远大于降水量,湖水中的 Ca^{2+} 出现过饱和状态,碳酸盐开始结晶沉淀;而入湖水量增大时,湖水淡化,湖泊沉淀物碳酸盐含量降低^[3]. 与碳酸盐含量相比,影响磁化率变化的因素较为复杂,但质量磁化率可以粗略的反映气候的干湿变化,气候暖湿利于磁性矿物的形成与聚集,所以,质量磁化率的高值指示了暖湿的气候环境;反之,质量磁化率的低值指示了干冷的气候环境,从以上分析也可以得出两者的变化呈负线性相关关系是符合其形成与变化机理的.

就垂直方向各个层位不同的变化来说,由于碳酸盐含量仅受湖泊水位变化的影响,因此碳酸盐含量较低的值段总体上指示了该层位代表较高的湖泊水位,间接指示了较为暖湿的气候环境;碳酸盐含量较高的值段总体上指示了较低的湖泊水位,间接指示了较为干冷的气候环境. 第一层、第五层、第七层以及第八层中两者呈较显著或极显著负相关,说明在这些层位影响这两个参数变化的因素是一致的,两者的变化可以互相印证,均是受气候变化主导的;而质量磁化率与碳酸盐含量负向相关性较差的层位($R^2 < 0.4$)可能是由于人类活动的影响加强引起的.

3.4 湖泊沉积记录的环境变化与人类活动信息

根据²¹⁰Pb测年结果,本项研究所采集的天鹅湖-2孔沉积物柱样所代表的年代仅为最近200年,按照天鹅湖-2孔湖泊沉积环境指标分析结果,我们将近现代以来湖泊环境演变分为七个阶段. 需要说明的是根据分析结果并结合历史文献记录,将特征比较一致的第四层与第五层、第七层与第八层整合在一起,按照七个阶段讨论湖泊演化过程.

阶段(I):约1800-1850 AD(84.5-75.5 cm). 气候干冷、湖泊水位较低. 该阶段天鹅湖-2孔碳酸盐含量较高,指示湖泊盐度较高,而水位较低,与天鹅湖-2孔的(偏低,指示了干冷的气候条件,与碳酸盐含量负向相关性较为显著,可以相互印证,说明该段时期气候总体趋向干冷. 而古里雅冰芯反映出得现代小冰期当中就存在着发生在公元19世纪左右的寒冷事件^[4],靳鹤龄等在东居延海最近1500年来的变迁与气候变化研究中也发现,索果诺尔湖区气候变干冷事件与小冰期气候事件在时间上基本对应^[5],因此可以说该阶段湖泊沉积记录是受气候主导的,而当时气候干冷是对具有全球意义的小冰期气候变动的响应.

阶段(II):约1850-1860 AD(75.5-68.5 cm). 气候逐渐变暖湿,湖泊水位总体较高,但中间出现几次较强的波动,人类活动影响加强. 该阶段天鹅湖-2孔的碳酸盐含量经过几次波动后,总体比上一个阶段降

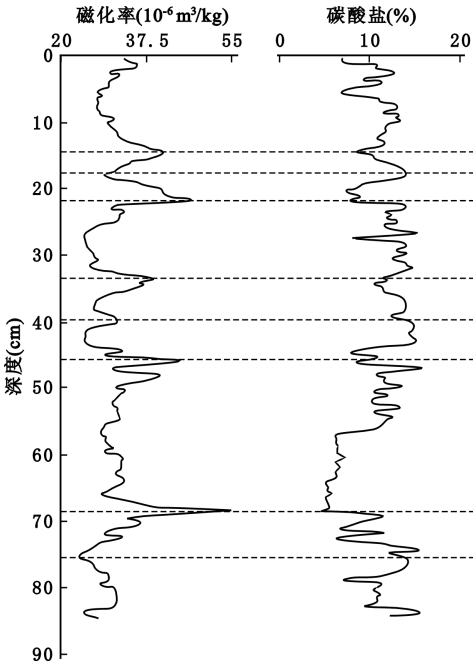


图2 天鹅湖-2孔碳酸盐含量变化及其与磁化率对比

Fig. 2 Comparison between the content of carbonate and magnetic susceptibility

低,说明湖泊水位虽经历几次波动但总体处于较高水平,这与小冰期后期气候逐渐回暖变湿的大趋势相对应,其中在样芯68.5 cm处出现了最低值,指示了在约1860 AD左右天鹅湖出现了近200年来的最高水位.与此同时天鹅湖-2孔磁化率在样芯的68.5 cm处出现最大值,磁化率涨幅非常剧烈,但在小冰期后期的气候背景下,磁化率的大幅度增加并不是受气候主导的,也就是说磁化率的最高值并不指示当时气候环境最为暖湿;而且该阶段碳酸盐含量和磁化率的负向相关性也比较差,这都说明该阶段影响湖泊沉积物磁化率变化的因素较为复杂,可能有人类活动的参与.张振克等在对2600年来内蒙古居延海湖泊沉积记录的环境变迁的研究中发现农业生产加速了土壤侵蚀,结果造成入湖细铁磁性颗粒增加,引起湖泊沉积物磁化率升高^[3],因此磁化率的迅速升高可能与当时天鹅湖周边地区大规模的农业及畜牧业开发有关.

阶段(Ⅲ):约1860-1910 AD(68.5-46 cm).开始进入20世纪暖期,气候趋向暖干化,湖泊萎缩.该阶段天鹅湖-2孔碳酸盐含量的变化分为两个阶段,约1860-1885 AD期间,湖泊水体盐度维持在一个较低水平,说明在此期间湖泊水位基本维持在较高水平,且没有出现较大的波动,湖区气候暖湿且较为稳定;在样芯的57 cm处,碳酸盐含量突然增大,且增幅明显,说明在其对应的年代即1885 AD左右,天鹅湖水位突然下降,据记载额济纳旗所在的内蒙古阿拉善盟在1880-1894年期间接连发生了几次大旱^[6],导致天

鹅湖严重萎缩.从天鹅湖-2孔的磁性参数看,磁化率值稳定在一个较低水平,磁性矿物的种类和含量变化均不大,说明这一时期从地表进入湖泊沉积的细颗粒磁性矿物较少,这可能是由于气候干旱造成河流干涸,入湖补给量小,以上湖泊沉积记录都指示了随着小冰期的结束,气候逐渐趋向暖干化,开始进入20世纪暖期.

阶段(Ⅳ):约1910-1930 AD(46-33.5 cm).气候持续暖干化,湖泊水位较低.该阶段天鹅湖-2孔的碳酸盐含量变化曲线表现为两个弱峰值,均没有出现较强烈的波动,碳酸盐含量持续偏高,碳酸盐含量的高值说明该时期湖泊水体盐度较高,湖泊水位较低,间接地反映了当时湖泊得到降水和径流补给都较少.从天鹅湖-2孔的磁性特征上看,磁化率表现为两个谷值,与碳酸盐含量的变化呈负向相关,且均无较大波动,两者所指示的环境变化较为一致,说明在持续趋于暖干的气候条件下蒸发量远远大于降水量,湖泊水位较低,继续呈萎缩状态;另外据记载由于黑河上中游农业发展,致使额济纳河每年5-7月份“常致干涸”^[7],使湖泊长时间得不到上游补给,这也是导致了湖泊水位降低的一个重要原因.

阶段(Ⅴ):约1930-1955 AD(33.5-22 cm).气候开始向暖湿转变,但湖泊水位仍然较低.该阶段天鹅湖-2孔的碳酸盐含量达到整个样芯的最高值,但也出现过较大的波动,说明该段时期内总体上湖泊水体盐度最高,水位最低,湖泊持续萎缩,只是在约1945 AD左右天鹅湖-2孔的碳酸盐含量出现了一个低值,证明当时出现了短时间的较高水位.从内蒙古地区300年以来旱涝等级序列十年滑动平均曲线图^[8],可以看到内蒙古地区在20世纪30年代以来持续干旱,至40年代后期,旱情开始有所缓解;另外据研究近50年以来黑河上游来水变化不大,但降水有所增多^[5],气候有由暖干向暖湿转化的趋势^[9],因此这次短时间的高水位应该与气候的转变有关.从天鹅湖-2孔的磁性曲线来看,磁化率也有增强的趋势,与暖湿的气候变化趋势相适应,但与碳酸盐含量的负线性相关较差;而且经历这次高水位之后天鹅湖水位再次持续偏低,说明造成湖泊干涸绝不是气候变化的原因,人类活动必然产生了重大的影响.十九世纪二、三十年代以后东河为

下游主要过水河道,也是额济纳东部众多尾间湖泊的主要补给来源,1941年因东河堵塞,使来水流入西河,致使后来的十年东河干枯^[7],因此补给断流是造成天鹅湖干涸的主要原因之一。

阶段(VI):约1955-1970 AD(22-14.5 cm).气候干旱背景下出现几次洪涝,湖泊经历了高水位-低水位-高水位的变化.该阶段天鹅湖-2孔的碳酸盐含量表现为一个峰值,经历了由小变大再变小的过程,说明该阶段湖泊经历了高水位-低水位-高水位的变化过程;天鹅湖-2孔的磁化率的变化与此相适应,表现为一个谷值,两者呈较显著负向相关,因此该阶段气候变化对湖泊沉积记录的影响比较大.从历史文献中的气候记录中看到,20世纪60年代初期的几年,额济纳旗所在的阿拉善盟连续发生了几次洪涝灾害,包括连降暴雨造成的山洪暴发和过境黄河决口^[8],这些突发的洪涝灾害,使得湖泊水位升高,在湖泊沉积记录当中也有所体现,是该阶段前期碳酸盐含量偏低的原因.在几次洪涝之后,1965年左右开始气候再次变得干旱,湖泊再一次萎缩.与此同时建国后水利工程的修建极大的改变了黑河下游地区水资源的空间分配,从建国后黑河中游地区水库建设情况^[10](表2),可以看出中游地区的水利建设,使黑河下游流量进一步减小,这势必会造成下游尾间湖泊的干涸.

阶段(VII):1970 AD至今(14.5-0 cm).气候暖干,湖泊萎缩.该阶段天鹅湖-2孔碳酸盐含量与本能诺尔-2孔的碳酸盐含量变化趋势十分相似,先维持在较高值段,只是在表层附近较低,这也与最近几年来天鹅湖水位较高的情况相符.另外天鹅湖-2孔的磁化率的变化也比较平稳没有出现大的波动,说明这段时期湖泊基本上处于水位较低的萎缩状态.从气候记录上来看,近30年来额济纳旗基本上连年干旱,只有1981年出现过一次连降暴雨的情况,而从狼心山水文站水文资料来看^[7],从1988年到1995年黑河下游年度来水量总体呈下降趋势.在2000以后干旱的情况有所改观,天鹅湖再次蓄水至今.

表2 1949年以来黑河中游地区水库建设情况^[10]

Tab. 2 Condition of reservoir construction along middle and lower reaches of Heihe River since 1949

年份	1949	1954	1958	1963	1968	1973	1978	1985	1995
蓄水量(m ³)	1798	2549	6519	18950	20186	27885	33524	36044	38155
水库(座)	2	10	33	43	54	78	93	95	98

4 讨论

长期以来,众多学者对生态环境变化与人类活动的关系有三种观点:一是强调历史时期以来人类活动的影响^[11],二是强调气候变化的主导作用^[12],三是强调气候变化和人类活动在不同时间尺度的耦合叠加作用^[13].从天鹅湖-2孔近200年来湖泊沉积记录来看,尽管影响湖泊变化的因素很多,但气候变化和人类活动的影响最为重要,人类活动在特定时段对湖泊环境演变产生明显影响,湖泊沉积记录的环境演化主要受气候冷暖干湿变化的控制.

4.1 冷暖干湿气候组合控制的湖泊演化

从天鹅湖-2孔的指标来看,磁化率减小和碳酸盐含量增大总体上反映气候干旱化、湖泊缩小的趋势,在气候干旱化和湖泊缩小的大背景下,存在着一定程度的气候干湿波动和湖泊盛衰的变化,这种变化与全球性的气候变化具有较好的一致性.靳鹤龄等在对最近1500年以来黑河下游东居延海变迁与环境气候变化的研究中也发现,居延海及黑河流域的气候干湿波动和湖泊盛衰变化与全球冷暖更替关系密切^[5].而从天鹅湖-2孔的沉积记录来看,近200年内湖区气候的变化可以归纳为:小冰期时气候干冷,湖泊萎缩;小冰期后期,气候开始趋向暖湿,湖泊有扩张的趋势;进入20世纪暖期后,气候转向暖干,湖泊萎缩;20世纪50年代以后干旱气候有所缓解,湖泊水位出现一些波动,但总体暖干的气候仍然造成湖泊萎缩干涸.

4.2 人类活动影响的湖泊水系变迁

天鹅湖-2孔的湖泊沉积记录还打下了人类活动的烙印,首先是人类的对水资源的利用.进入20世纪特别是20世纪中期以来,额济纳地区得到了大规模的开发,对水资源的利用也发生了翻天覆地的变化.河流湖泊水系逐渐从自然水系、半自然水系演化为人工水系,地表径流基本上为人类所控制,天然河道水网已

被纵横交错的人工渠系所取代. 在人类活动的影响下,水资源在空间上发生极大的位移,持续从下游尾间湖向中游和下游上段迁移,从天然水体向人工水体转化,由于下游地表径流减少,导致尾间湖泊萎缩和干涸^[14]. 这也是20世纪50年代期间,气候虽然由暖干向暖湿转化,降水有所增多,天鹅湖仍然处于充水-干涸交替状态的原因. 除此以外黑河的终端湖西居延海在1961年干涸,东居延海从70年代开始一直处于充水-干涸交替状态^[15].

人类活动的影响另一方面还表现在历史时期的人类活动,特别是土地利用方式和强度的变化对环境演变产生重要影响,并直接被湖泊沉积所记录. 在约1850-1860 AD,湖泊沉积物磁化率及频率磁化率急剧上升,出现了一个及其显著的峰值,这与当时气候回暖之后,大规模的进行屯垦和畜牧业开发有关,农业生产活动引起土地利用方式的改变,加速了土壤侵蚀,加之风力搬运、进入湖泊沉积的细颗粒物在大规模屯垦阶段迅速增加,引起磁化率和频率磁化率的急剧上升^[8]. 进入20世纪以来,连年战乱,使得额济纳地区人口下降,农业生产特别是以土地开垦为标志的耕作业逐渐荒废,地表细颗粒土壤被风蚀殆尽,入湖细颗粒物减少,磁化率与频率磁化率都比较低. 同时受到人类活动的影响,额济纳地区的环境也发生了很大的变化,具体表现为绿洲范围缩小,植被退化,沙堆及灌丛沙堆出现,土地沙漠化日趋严重^[16].

5 参考文献

- [1] 王苏民. 湖泊沉积的信息原理与研究趋势. 北京:海洋出版社,1993:22-31.
- [2] 曹继秀,张宇田,王建民等. 塬堡黄土剖面15万年以来磁化率气候记录及黄土磁化率时空特征. 兰州大学学报(自然科学版),1997,33(1):124-132.
- [3] 张振克,吴瑞金,王苏民等. 近2600年来内蒙古居延海湖泊沉积记录的环境变迁. 湖泊科学,1998,10(2):45-51.
- [4] 姚嬿栋,秦大河,田立德等. 青藏高原2ka来温度和降水变化——古里雅冰芯记录. 中国科学(D辑),1996,26(4):348-353.
- [5] 靳鹤龄,肖洪浪,孙良英等. 最近1500年黑河下游东居延海变迁与环境气候变化. 中国科学(D辑),2003,33(增刊):58-65.
- [6] 刑野. 内蒙古自然灾害通志. 呼和浩特:内蒙古人民出版社,2001.
- [7] 内蒙古额济纳旗志编委会编. 额济纳旗志. 北京:方志出版社,1998:115-565.
- [8] 王文辉. 内蒙古气候. 北京:气象出版社,1990:253-269.
- [9] 施雅风,李栋梁. 中国西北气候由暖干向暖湿转型的特征和趋势探讨. 第四纪研究,2003,23(2):152-163.
- [10] 王根绪,程国栋. 近50a来黑河流域水文及生态环境变化. 中国沙漠,1998,18(3):234-238.
- [11] 党瑜. 历史上西北农业开发及对生态环境的影响. 西北大学学报,2001,31(3):271-276.
- [12] 王铮,张丕远,周清波等. 历史气候变化对中国社会发展的影响. 地理学报,1996,51(4):329-339.
- [13] 肖生春,肖洪浪. 黑河流域环境演变因素研究. 中国沙漠,2003,23(4):1-6.
- [14] 肖生春,肖洪浪. 额济纳地区历史时期的农牧业变迁与天人关系演进. 中国沙漠,2004,24(4):448-450.
- [15] 肖生春,肖洪浪. 近百年来人类活动对黑河流域水环境的影响. 干旱区资源与环境,2004,18(3):57-62.
- [16] 李并成. 河西走廊汉唐沙漠化的调查研究. 地理学报,1998,53(2):106-115.