

文章编号:1000-0550(2006)03-0349-07

陕北红碱淖沉积物粒度特征所揭示的环境变化^①

汪 勇^{1,2} 沈 吉¹ 羊向东¹ 张恩楼¹ 刘兴起¹ 刘恩峰¹

(1. 中国科学院南京地理与湖泊研究所 南京 210008; 2. 中国科学院研究生院 北京 100049)

摘要 通过沉积物粒度参数,对陕西红碱淖近几十年来的湖泊演化和区域环境变化进行了探讨。沉积岩芯下部样品粒度组成呈双峰特征,据此可以分辨沉积物中湖相和风成组分。结果表明红碱淖形成于1928年,成湖初期流域风沙发育,其中1936年、1939年和1941年发生了三次强沙尘暴事件;1952~1960年为湖泊快速扩张时期,系人为改造使入湖地表径流在短时间内快速增强所致;1960年以后,红碱淖演化为稳定深湖环境,湖区降水增多,风沙发生的频率和强度大大降低,沉积物粒度频率分布曲线也演变为单峰形态。20世纪90年代中期以来,该湖水面有下降趋势。红碱淖粒度参数特征较好地反映了湖泊演化历史、区域风沙强度变化以及人类活动特征。

关键词 红碱淖 湖泊沉积 粒度 风沙特征 湖泊演化

第一作者简介 汪勇 男 1977年出生 博士研究生 湖泊沉积与环境

中图分类号 PS12.2 **文献标识码** A

风沙现象在我国北方,尤其是干旱、半干旱地区十分普遍,风沙沉积在陆相地层中也多有保存^[1-3]。然而,连续、完整的高分辨率风沙沉积记录在地层中一般难以保存。湖泊作为相对稳定的静水水体,对风沙物质具有良好的保存性,尤其是我国北方干旱、半干旱区湖泊,其沉积物记录了风沙发生的频率、强度以及与之有关的流域自然环境。由于风沙过程与土地沙漠化和沙尘暴具有十分密切的联系^[4-6],因此提取沙尘源区湖泊沉积物中的风沙沉积记录,研究风沙演化历史与流域环境变化的相互关系,对深刻理解区域土地沙漠化的历史原因,揭示沙尘暴发生的自然或人为因素具有十分重要的意义。

本文以陕西红碱淖湖泊为例,通过对湖泊沉积物粒度特征的分析,力图识别湖泊沉积中所保存的风沙记录,并由此探讨历史时期风沙发生的频率和强度。

1 区域概况

红碱淖($39^{\circ}04' \sim 39^{\circ}08' N$, $109^{\circ}50' \sim 109^{\circ}56' E$)是跨陕西省神木县和内蒙古伊金霍洛旗的界湖(图1),隶属于榆林地区,系风蚀洼地所成,成湖前是一片低洼湿地,盆地内广泛分布富碱红色沙壤,历史时期一直被作为碱矿开采地,而洼地中心也形成一南北贯通的贸易通道。由于20世纪初期降水增多,于1929年前后洼地积水成湖^[7]。据记载,1929年湖泊

形成初期水面积仅 $1.3 km^2$,至1947年,逐步扩大到 $20 km^2$ 。1958年,由于人为疏导,湖面面积猛增到 $40 km^2$,1960年前后随着降水的不断增多,湖泊面积扩大到 $60 km^2$ 左右,后维持在一稳定水平,直至20世纪90年代中后期湖泊水位有大幅下降,到2002年湖泊面积已减小到 $40 km^2$ ^[2]。20世纪90年代中期,湖泊最大水深 $10.5 m$,平均水深 $8.2 m$,蓄水量 $4.9 \times 10^8 m^3$ ^[1]。湖水依赖时令河、湖面降水和地下水补给,入湖主要河流4条,无出流,系内陆封闭湖盆。湖区处在东亚季风区西北边缘和沙漠—黄土边界带,对气候变化有敏感的响应。湖区属半干旱气候,年平均气温 $8.5^{\circ}C$,年降水量为 $400 mm$,其中60%集中在7~9月份。

2 样品采集与实验方法

于2002年6月,在红碱淖中部水深 $7.5 m$ 处(图1),用Kajak重力采样器获得一 $71.5 cm$ 长柱状岩芯(H孔)。其岩性特征为:42 cm以上为灰黑色粉砂质泥,42~65 cm为灰白色细粉砂,65 cm以下为绛红色细砂。野外现场以 $0.5 cm$ 间距进行分样,样品密封于塑料袋内运回实验室进行分析。

粒度分析采用英国Malvern Mastersizer2000型激光粒度仪进行测试,测试范围为 $0.02 \sim 2000 \mu m$,重复测量误差小于 $\pm 3\%$ 。

^①国家重点基础研究发展计划“973”项目(2004CB720205)(KZCX3-SW-341);中国科学院西部创新项目(KZCX1-10);中国科学院知识创新工程重要方向项目资助。

^② 红碱淖风景名胜区红石岛和东部码头区详细规划说明书. 1998

收稿日期:2005-07-12;收修改稿日期:2005-09-12

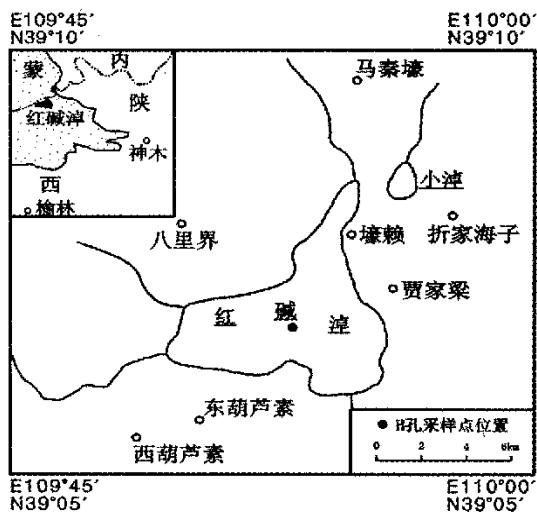


图1 红碱淖位置及H孔采样点

Fig. 1 Location of Hongjiannao Lake and the sampling site H

H孔年代序列的建立是采用¹³⁷Cs测年法^[8-10]。根据¹³⁷Cs在沉积物柱心垂直剖面上的3个峰值位置(1952年为全球首次进行核试验年,1963年为北半球核试验高峰年,1986年为切尔诺贝利核泄露事件年),可以求算出每两个时标段内平均沉积速率,再通过内插、外推的方法便可算出整段沉积岩芯的年代序列(图2)。由于受¹³⁷Cs测年的限制,对钻孔48 cm以下层位的年龄无法直接获得。考虑到42~65 cm时段内沉积物岩性变化不大,因此采用39~48 cm之间的沉积速率对下部48~65 cm层段年龄进行外推,为尽量避免误差,采用平均沉积通量并去除压实影响,由此计算出65 cm处的年龄为1928年。钻孔65 cm以下岩性为绛红色细砂,代表了红碱淖成湖前的基底沉积,因此红碱淖成湖时期应在65 cm深度处。依据¹³⁷Cs建立的钻孔年代序列,推算的红碱淖成湖时间(65 cm深度)为1928年,与历史记载的成湖时间(1929年)十分吻合^[7],由此表明钻孔的年代测定和推导是可信的,钻孔内湖相沉积层代表了近80年的沉积,沉积速率很大(平均为0.87 cm/a),样品年代分辨率很高(平均为1.74 a/样),可以满足年分辨率研究的要求。

3 钻孔粒度变化特征

红碱淖H孔沉积物颗粒分布在0.3~1 000 μm之间,钻孔岩芯42 cm以下样品粒度组成为双峰特征(图3),第一峰在10~100 μm之间,第二峰在100~1 000 μm之间。钻孔42 cm以上样品粒度组成为单峰形态(图3),峰值在10~100 μm之间。

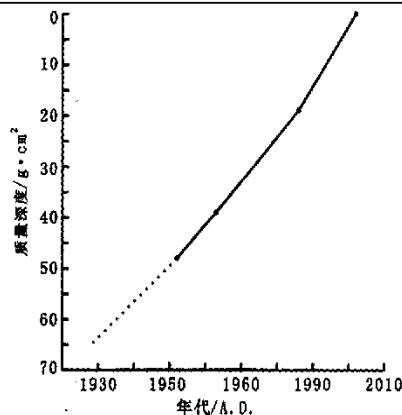


图2 H孔深度与年代关系

Fig. 2 Relationship between the depth and age

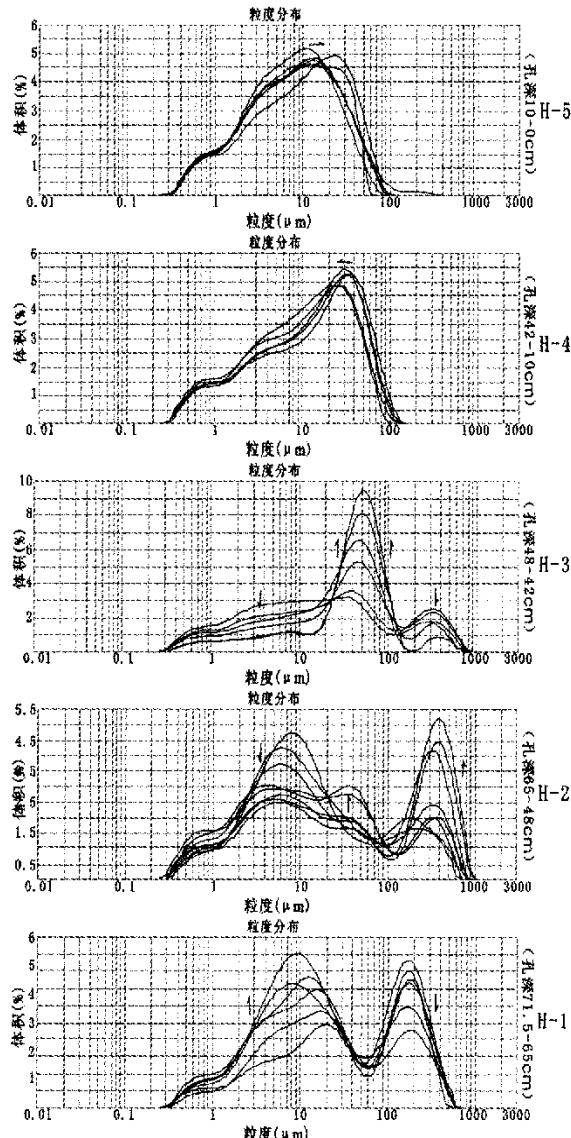


图3 H孔沉积物粒度分布特征

Fig. 3 Grain-size frequency curve distribution

钻孔 48 cm 以下沉积物中 $<16 \mu\text{m}$ 组分处在较高值段, $16\sim64 \mu\text{m}$ 和 $64\sim100 \mu\text{m}$ 颗粒含量处在极低值段, 平均为 15%, 而 $>100 \mu\text{m}$ 颗粒含量较高, 平均在 20% 左右, 中值粒径 (M_D) 也处在较高值段。值得注意的是, 钻孔 58~54 cm 处 $>100 \mu\text{m}$ 粗颗粒含量突然剧烈增加(最高达 40%), 且波动十分频繁, 以 1936 年、1939 年和 1941 年三次波峰最为显著, 中值粒径与之相应。钻孔 42~48 cm 沉积物粒度各指标都发生突变, $16\sim64 \mu\text{m}$ 和 $64\sim100 \mu\text{m}$ 颗粒含量的陡增(最高分别达 45% 和 20%), $>100 \mu\text{m}$ 颗粒含量略有增加, $<16 \mu\text{m}$ 组分剧烈减少。钻孔 42 cm 以上部分沉积物相对较细, $<16 \mu\text{m}$ 细颗粒含量逐渐增加, $16\sim64 \mu\text{m}$ 颗粒含量处在较高值段(平均在 30% 左右), 但整体上呈减小趋势, $>100 \mu\text{m}$ 粗颗粒含量极低, 平均接近于 0。

4 讨论

4.1 粒度指标的环境指示意义

在一个稳定的湖泊体系中, 湖水物理能量是控制沉积物粒度分布的主要因素。根据沉积物机械分选原理^[11], 沉积物颗粒大小应由湖岸向湖心逐渐变细, 呈带状分布, 粒度频率曲线呈正态分布。在干旱一半干旱地区, 湖泊除接纳地表径流搬运来的流域物质

外, 还接受风力输送来的物质。这两种不同动力机制的沉积物必然会对沉积物粒度频率曲线的峰态和偏态产生影响^[12~14]。孙千里^[15]、金章东^[16]等在对岱海的研究中, 认为沉积物粒度分布的双峰形态是风力作用和流水作用共同影响形成的, 粗粒($>100 \mu\text{m}$)小峰反映了外源风尘物质的输入。另有资料显示, 尘暴降尘粒度具有双峰分布的特征, 反映了地方性(较粗颗粒)和远程搬运(较细颗粒)的粉尘混合物特征^[17]。1993 年覆盖我国北方 42 小时之久的“5.5”特大沙尘暴粒度曲线显示出明显的双峰分布特征, 峰值分别出现在粉砂粒级(含量 39.5%)和细砂粒级(含量 33.1%)^[12,18]。由此可见, 较强尘暴降尘粒度的双峰分布叠加在河流搬运组分的粒度分布上, 完全可能在细砂粒级以上部分显露出次峰来, 而次峰强弱能够很好地反映强风沙沉降事件强弱的变化。对于较弱的尘暴降尘, 由于其颗粒物粒级减小, 次峰减弱, 与河流搬运物质粒度分布重合而被其掩盖, 因而很难从沉积物中将风力搬运的组分区分出来。

4.2 环境演化阶段

根据 H 孔粒度各指标, 将红碱淖过去 70 几年来的环境演化过程划分为以下 5 个阶段(图 4):

1928 年前(H-1 阶段) 该阶段沉积物岩性为绛红色粉砂(与现今红碱淖湖区周围岩性一致), 与 H-2

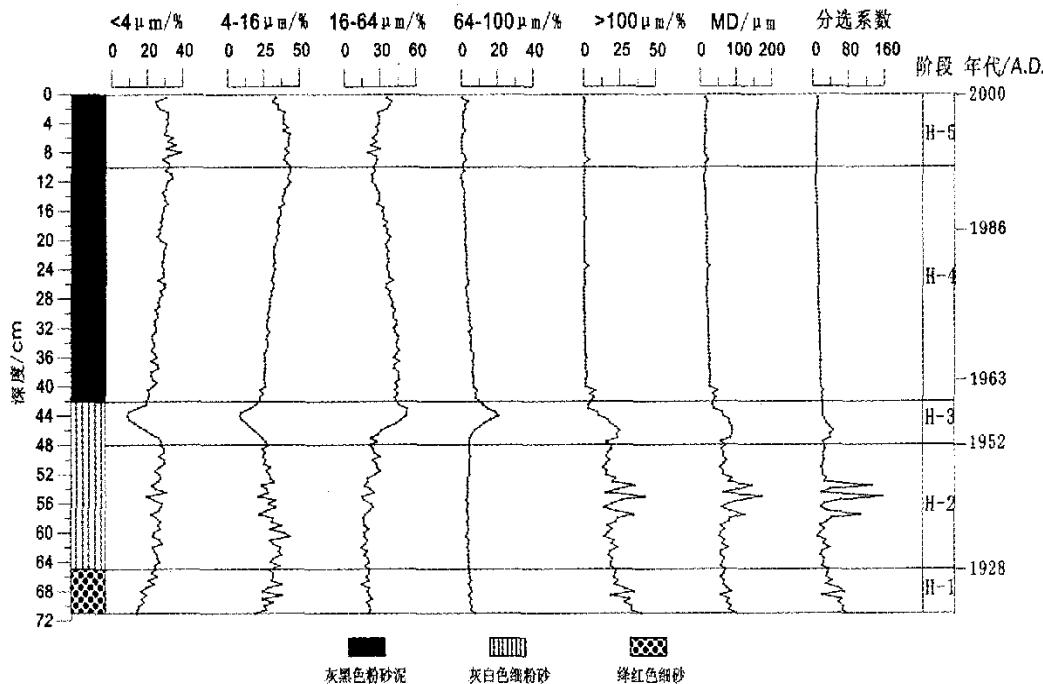


图 4 H 孔粒度指标特征
Fig. 4 Grain-size characteristics in Core H

阶段截然不同,说明沉积环境有较大不同。粒度分布的双峰形态,与干旱、半干旱区干涸湖盆粒度特征相一致^[19],且粒度各指标大多呈渐变趋势,细颗粒($<16 \mu\text{m}$)含量逐渐增多,粗颗粒($>100 \mu\text{m}$)、中值粒径(M_D)、分选系数的变化与之相反。该阶段结束年龄推算为1928年,与红碱淖1929年成湖的时间较相吻合。综上所述,本阶段反映了红碱淖从成湖前低洼湿地逐渐演变为湖泊的过程,但此时入湖径流较小,因而其携带入湖以 $<16 \mu\text{m}$ 细颗粒为主。粒度频率曲线图(图3)也清晰地反映了这一过程。湖相组分分布粒级明显变宽,沉积物中湖相组分($<16 \mu\text{m}$ 细颗粒物)开始发育,但由于此时搬运和沉积动力较弱,以较细粉砂为主。与此同时,粗颗粒组分($>100 \mu\text{m}$)减少,风成第二峰被显著削弱。粗颗粒组分($>100 \mu\text{m}$)的减少,一方面与湖相组分的增多有关,另一方面也是区域风沙减弱的标志,究其原因可能与红碱淖成湖之始区域降水增多有关(降水增加使地表土壤湿度增加,对地面起沙扬尘有一定的抑制作用)。沉积物分选性增强,与沉积物中湖相组分的增加和风成组分的减少的有序化过程有关。

1928~1952年(H-2阶段)该阶段 $<100 \mu\text{m}$ 较细颗粒组分都不是很大,粗颗粒($>100 \mu\text{m}$)含量、 M_D 、分选系数在1935~1942年期间同步频繁、剧烈增大, $16 \sim 64 \mu\text{m}$ 粒级组分与之反相关,其含量的增加早于 $>100 \mu\text{m}$ 粗颗粒含量的增加。沉积物粒度组成出现3次峰值,与H-1阶段相比,湖相第一峰较为稳定,风成细颗粒峰(二峰)显著露出,风成粗颗粒峰(三峰)快速增高,且分布粒级显著增大(图3)。这说明湖区风沙显著增强,沉积物中属风成的地方性(较粗颗粒)和远程搬运(较细颗粒)粉尘混合物同时增多。 $16 \sim 64 \mu\text{m}$ 颗粒的增多变化早于 $>100 \mu\text{m}$ 粗颗粒,反映了风沙逐渐增强的过程。此时,沉积物组成十分复杂,分选性很低,反映了沉积物搬运动力的多元性。陕西省灾害史显示20世纪30年代末至40年代该区出现的严重的旱灾^①。另外马兰冰芯的研究反映的20世纪30年代后期冰芯较高的污化层厚度比率值^②,也揭示了我国北方这一时期沙尘天气普遍较为强烈。综上所述,1936年、1939年和1941年粗颗粒峰值很可能对应了当时3次较为强烈的沙尘暴事件。值得注意的是,该段沉积物磁化率、地球化学元素、总有机碳(TOC)、总氮(TN)等指标并没有出现较大的变化^③,反映了流水搬运动力相对稳定,此时,即使是沉积物中混入大量的风成组分,但对于源

于小流域的沉积物指标的影响也是不大的。这更进一步印证了笔者上述的结论。

1952~1960年(H-3阶段)该阶段时间较短,但粒度各指标皆出现较大变幅, $<16 \mu\text{m}$ 细颗粒剧烈降至剖面最低(9%)后快速回升, $16 \sim 64 \mu\text{m}$ 和 $64 \sim 100 \mu\text{m}$ 颗粒变化与之相反,所占比例分别高达39%和20%,而 $>100 \mu\text{m}$ 风成粗颗粒略有增加后快速减少,可见该阶段 M_D 的增大主要来自 $16 \sim 100 \mu\text{m}$ 组分增加的贡献。粒度分布主峰移至 $20 \sim 100 \mu\text{m}$,峰形呈尖塔状, $>100 \mu\text{m}$ 粒级上保留一较小次峰。该阶段,受 $16 \sim 64 \mu\text{m}$ 颗粒组分快速增多的影响,沉积物组成趋于简单,因此分选性大为增强,这反映了沉积动力的单一化。次峰被大大削弱,表明沉积物中风成组分已大大减少。榆林地区降水资料显示,20世纪50年代中后期至70年代早期区域降水量显著增加^④。1958年,由于人为疏导,湖面积激增到 40 km^2 ^[7]。可见,由于人类对湖周围低洼湿地进行疏导汇流,使得入湖径流在短时间内快速增长,是本阶段各种变化的主导原因。

1960~1995年(H-4阶段)该阶段沉积物中 $<16 \mu\text{m}$ 细颗粒持续增多, $16 \sim 64 \mu\text{m}$ 及 $64 \sim 100 \mu\text{m}$ 颗粒颗粒含量并未回复至H-3阶段前的低值而处在一稳定较高水平上, $>100 \mu\text{m}$ 颗粒含量近乎于0, M_D 值、分选系数也大大降低。粒度分布演变为负偏单峰形态,峰值处在 $20 \sim 50 \mu\text{m}$ 之间。反映了入湖径流经人为改造后已持续显著增强,但也同时造成了湖水位的逐渐升高,水动力减弱,故细颗粒增多,中粗颗粒难以到达湖中心故呈缓慢减小趋势。沉积物粒度分布演变为单峰形态,为典型湖泊沉积特征,也反映了该阶段较好地发育了分选性高的湖相沉积物。据载^[7],由于人类改造,1958年红碱淖面积增至 40 km^2 左右,上世纪60年代初期湖面积已与现今水平(60 km^2)接近。

1995~2002年(H-5阶段)该阶段 $<4 \mu\text{m}$ 及 $<16 \mu\text{m}$ 细颗粒含量和 $16 \sim 64 \mu\text{m}$ 颗粒含量都有明显的频繁波动,且呈较好的反相关关系。尤其是该阶段

① 陕西省气象局气象台资料,1976

② 数据由中国科学院寒区旱区环境与工程研究所冰芯与寒区环境重点实验室王宁炼研究员提供。

③ 汪勇.陕西红碱淖近百年来环境变化的湖泊沉积记录(硕士论文).

④ 数据由中国科学院南京地理与湖泊所王苏民研究员提供.

最后, $<4 \mu\text{m}$ 及 $<16 \mu\text{m}$ 颗粒减少而 $16\sim64 \mu\text{m}$ 颗粒增多。与此同时, 粒度频率分布也显示偏度偏负, 反映了沉积物有变粗的趋势, 沉积动力有所起伏。 $<4 \mu\text{m}$ 粘土的增加可能与人类活动造成的土壤细颗粒侵蚀有关, 而沉积物变粗则与 20 世纪 90 年代中期以来, 特别是 2000 年以来湖区气温上升和湖泊水位下降有关^[20,21]。

前人的研究表明^[22~24], 20 世纪 60 年代以来, 我国北方风沙发生的频率有明显减小趋势, 近四、五十年来内蒙古腾格里沙漠、乌兰布和沙漠以及毛乌素沙地、科尔沁沙地等流动沙丘面积呈显著减少趋势^[25], 尤其是榆林地区, 近 40 年来由于植树造林和地表水土涵养生物工程措施, 沙尘暴发生频率已明显降低^[26~29]。冰芯和树轮记录所反映的我国北方不同地点近 100 年来降水变化情况显示, 我国北方中西部大部分地区呈上升趋势^[30]。历史文献和气象观测资料所揭示的陕、甘、宁、青在 20 世纪前半叶干旱而在后半叶多雨^[30], 以及上世纪 20 年代以来黄河中上游年径流量的增加趋势^[31]也说明了 20 世纪我国北方中西部地区降水量存在增加趋势, 这和红碱淖自 1929 年以来形成与扩展的历史相对应。降水的增加也使地表土壤湿度增加, 从而对地面起沙扬尘有一定的抑制作用, 这也是红碱淖上个世纪 50 年代以来沙尘暴减弱的一个重要原因。

5 结论

(1) H 孔岩芯粒度特征揭示了红碱淖湖泊形成和演化的历史。红碱淖于 1928 年开始成湖, 1928~1952 年入湖径流较弱, 湖泊面积很小, 湖区风沙较为强烈, 1936~1941 年发生 3 次较为强烈的沙尘暴; 1952 年前后由于区域降水的增加, 更因为人类疏导的原因该湖泊经历了短暂的快速扩张, 于 20 世纪 60 年代早期至 80 年代中期演变为稳定的深湖环境, 同时区域沙尘暴的频率和强度都大大降低。

(2) 红碱淖沉积物各粒级含量变化与粒度频率曲线峰态和偏态变化有很好的对应关系, 其清晰地记录了沉积物中湖相组分和风成组分相互制约、相互消长的变化过程, 反映了红碱淖形成、扩张的历史以及区域风沙强度和人类活动的变化。

(3) 红碱淖高分辨率沉积精确地反映了该区近几十年来环境变化过程以及人类活动的特征, 其结果与历史记载、他人结论和器测资料都有很好地对应。显示出近代湖泊沉积在进行更短时间尺度(年变化)

的高分辨率环境变化研究上初显优势。

致谢 本所夏威嵐高级工程师提供了年代数据, 王苏民研究员在论文的撰写过程中给予了指导, 在此深表感谢! 同时也感谢南京大学城市与资源学系任学梅同学实验和写作方面的帮助。

参考文献(References)

- 董光荣, 李保生, 高尚玉, 等. 鄂尔多斯高原第四纪古风成沙的发现及其意义. 科学通报, 1983, (16): 998~1001 [Dong Guangrong, Li Baosheng, Gao Shangyu, et al. Significance of Quaternary paleoaeolian sand found in Ordos Plateau. Chinese Science Bulletin, 1983, (16): 998~1001]
- 苏志珠, 董光荣, 李小强, 等. 晚冰期以来毛乌素沙漠环境特征的湖沼相沉积记录. 中国沙漠, 1999, (2): 104~109 [Su Zhishu, Dong Guangrong, Li Xiaoqiang, et al. The lake-swamp sediment records on the environmental characteristics of Mu Us Desert since the Late Glacial Epoch. Journal of Desert Research, 1999, (2): 104~109]
- 李保生, 董光荣, 高尚玉, 等. 陕西北部榆林第四纪地层剖面的粒度分析与讨论. 地理学报, 1988, 43 (2): 127~132 [Li Baosheng, Dong Guangrong, Gao Shangyu, et al. Analysis and discussion on the grain size of the Quaternary strata profile in Yulin Area of the Northern Shaanxi. Acta Geographica Sinica, 1988, 43 (2): 127~132]
- 陈镇东, 罗建育, 万政康, 等. 中国台湾大鬼湖沉积物所保留之降尘记录. 第四纪研究, 2001, 21(1): 18~28 [Chen Zhendong, Luo Jianyu, Wan Zhengkang, et al. Eolian dust flux recorded in the sediments of Great Ghost Lake, Taiwan, China. Quaternary Sciences, 2001, 21 (1): 18~28]
- 王式功, 董光荣, 陈惠中, 等. 沙尘暴研究的进展. 中国沙漠, 2000, 20 (4): 349~356 [Wang Shigong, Dong Guangrong, Chen Huizhong, et al. Advances in studying sand-dust storms of China. Journal of Desert Research, 2000, 20 (4): 349~356]
- 张德二. 我国历史时期以来降尘的天气气候学初步分析. 中国科学(B辑), 1984, 24 (3): 278~288 [Zhang De'er. Meteorology and climatology analysis of historical aeolian dust in China. Science in China (Ser. B), 1984, 24 (3): 278~288]
- 王苏民, 窦鸿身. 中国湖泊志. 北京: 科学出版社, 1998. 339~340 [Wang Sumin, Dou Hongshen. China Lakes Chorography. Beijing: Science Press, 1998. 339~340]
- 万国江. ^{137}Cs 及 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 方法湖泊沉积记年研究进展. 地球科学进展, 1995, 10 (2): 188~192 [Wan Guojiang. Advances in ^{137}Cs and $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ chronology for lacustrine sediments. Advance in Earth Sciences, 1995, 10 (2): 188~192]
- 万国江. 环境质量的地球化学原理. 北京: 中国环境科学出版社, 1998. 1~211 [Wan Guojiang. Geochemistry Principles of Environmental Quality. Beijing: China Environmental Science Press, 1998. 1~211]
- 万国江, 桑季 P, 法任库忍 K, 等. 瑞士 Greifen 湖新近沉积物中的 ^{137}Cs 分布及其计年. 环境科学学报, 1985, 10 (3): 360~365 [Wan Guojiang, Santschi P, Farrenkothen K, et al. Distribution and

- dating of ^{137}Cs for recent sediments in Lake Greifen (Switzerland). *Acta Scientiae Circumstantiae*, 1985, 10 (3): 360~365]
- 11 Lerman A. *Lake: Chemistry, Geology, Physics*. Berlin: Springer-Verlag, 1978, 79~83
- 12 师育新. 兰州“930505”特大尘暴沉积物特征研究. *沉积学报*, 1995, 13(3): 76~82 [Shi Yuxin. On the wind-blown deposits from a heavy dustfall numbered “930505” in Lanzhou, North-Central China. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1995, 13(3): 76~82]
- 13 Metainish G H, Nickling W G. Dust deposition and particle size in Mali, West Africa. *Catena*, 1997, 29: 307~322
- 14 王赞红. 现代尘暴降尘与非尘暴降尘的粒度特征. *地理学报*, 2003, 58(4): 606~610 [Wang Zanhong. Particle size analysis of aeolian dust derived from duststorm and non-duststorm. *Acta Geographica Sinica*, 2003, 58(4): 606~610]
- 15 孙千里, 周杰, 肖举乐. 岱海沉积物粒度特征及其古环境意义. *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 palaeoenvironment significance. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 2001, 21(1): 93~95]
- 16 金章东, 邹成娟, 高南华, 等. 小冰期以来岱海地区的环境变迁与尘暴事件. *西安工程学院报*, 2001, 23(4): 6~10 [Jin Zhangdong, Zou Chengjuan, Gao Nanhua, et al. Paleoenvironmental change and dust storm event at Daihai area since the Little Ice Age. *Journal of Xi'an Engineering University*, 2001, 23(4): 6~10]
- 17 PYE K. *Aeolian Dust and Dust Sediment*. Beijing: Ocean Publishing House, 1991. 79~80
- 18 樊恒文, 肖洪浪, 段争虎, 等. 中国沙漠地区降尘特征与影响因素分析. *中国沙漠*, 2002, 22(6): 559~565 [Fan Hengwen, Xiao Honglang, Duan Zhenghu, et al. Dustfall characteristics and influencing factors in Chinese Desert Region. *Journal of Desert Research*, 2002, 22(6): 559~565]
- 19 岳乐平, 杨利荣, 李智佩, 等. 西北地区干枯湖床沉积粒度组成与东亚沙尘天气. *沉积学报*, 2004, 22(2): 325~331 [Yue Leiping, Yang Lirong, Li Zhipei, et al. Grain-size distribution of the sediments of dry lake-bed in the Northwest of China and sand-dust weather in East Asia. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2004, 22(2): 325~331]
- 20 肖霞云, 羊向东, 沈吉, 等. 陕西红碱淖近百年来的孢粉记录及环境变化. *湖泊科学*, 2005, 17(1): 28~34 [Xiao Xiayun, Yang Xiangdong, Shen Ji, et al. Sporopollen record and environmental evolution since ~100 years in Lake Hongjiannao, Shaanxi Province. *Journal of Lake Sciences*, 2005, 17(1): 28~34]
- 21 唐克旺, 王浩, 刘畅. 陕北红碱淖湖泊变化和生态需水初步研究. *自然资源学报*, 2003, 18(3): 304~309 [Tang Kewang, Wang Hao, Liu Chang. Preliminary study of Hongjiannao Lake's variation and ecological water demand. *Journal of Natural Resources*, 2003, 18(3): 304~309]
- 22 钱正安, 宋敏红, 李万元. 近 50 年来我国北方沙尘暴的分布及变化趋势分析. *中国沙漠*, 2002, 22(2): 106~111 [Qian Zheng'an, Song Minhong, Li Wanwan. Analyses on distributive variation and forecast of sand-dust storms in recent 50 years in North China. *Journal of Desert Research*, 2002, 22(2): 106~111]
- 23 全林生, 时少英, 朱亚芬, 等. 中国沙尘天气变化的时空特征及其气候原因. *地理学报*, 2001, 56(4): 477~485 [Quan Linsheng, Shi Shaoying, Zhu Yafen, et al. Temporal-spatial distribution characteristics and causes of dust-day in China. *Acta Geographica Sinica*, 2001, 56(4): 477~485]
- 24 周自江, 王锡稳, 牛若芸, 等. 近 47 年中国沙尘暴气候特征研究. *应用气象学报*, 2002, 13(2): 193~200 [Zhou Zijiang, Wang Xiwen, Niu Ruoyun, et al. Climate characteristics of sandstorm in China in recent 47 years. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2002, 13(2): 193~200]
- 25 乌云娜, 裴浩, 白美兰. 内蒙古土地沙漠化与气候变化和人类活动. *中国沙漠*, 2002, 22(3): 292~299 [Wu Yunna, Pei Hao, Bai Meilan. Relationship between sandy desertification and climatic change, human activity in Inner Mongolia. *Journal of Desert Research*, 2002, 22(3): 292~299]
- 26 刘子林, 刘晓丽, 毕旭. 榆林沙尘暴天气的气候特征及其对策. *陕西气象*, 2002, (5): 7~9 [Liu Zilin, Liu Xiaoli, Bi Xu. Characteristics of sandstorms in Yulin and countermeasures to bring it under control. *Meteorology of Shanxi Province*, 2002, (5): 7~9]
- 27 严钦尚. 陕北榆林定边间流动沙丘及改造. *科学通报*, 1954, (11): 28~34 [Yan Yinshang. Moving dunes and its harness in the places lying between Yulin and Dinghan, Shanxi Province. *Chinese Science Bulletin*, 1954, (11): 28~34]
- 28 张凤荣, 王立新, 牛振国, 等. 伊金霍洛旗土地利用变化与可持续利用. *中国沙漠*, 2002, 22(2): 166~171 [Zhang Fengrong, Wang Lixin, Niu Zhenguo, et al. Land use change and sustainable utilization in Ejin Horo Banner. *Journal of Desert Research*, 2002, 22(2): 166~171]
- 29 吴薇. 近 50 年来毛乌素沙地的沙漠化过程研究. *中国沙漠*, 2001, 21(2): 164~169 [Wu Wei. Study on process of desertification in Mu Su Sandy Land for last 50 years, China. *Journal of Desert Research*, 2001, 21(2): 164~169]
- 30 吴永森, 孙武林. 陕、甘、宁、青干旱序列年表及其气候特征. 见: 孙国武, 中国西北干旱气候研究. 北京: 气象出版社, 1997, 59~63 [Wu Yongsen, Sun Wulin. Drought sequence chronology and climate characteristics of Shanxi, Gansu, Ningxia and Qinghai, China. In: Dry Weather Study in Northwest China. Beijing: China Meteorological Press, 1997, 59~63]
- 31 史辅成, 王国安, 高治定, 等. 黄河 1922~1932 年连续 11 年枯水段的分析研究. *水科学进展*, 1991, 2(4): 258~263 [Shi Fucheng, Wang Guo'an, Gao Zhidong, et al. Recurrence probability of 11-year continuous low water period (1922~1932 A. D.) in the Yellow River. *Advances in Water Science*, 1991, 2(4): 258~263]

Environmental Changes Deduced from Grain-size Characteristics of the Sediments from Hongjiannao Lake, Shaanxi Province

WANG Yong^{1,2} SHEN Ji¹ YANG Xiang-dong¹

ZHANG En-lou¹ LIU Xing-qi¹ LIU En-feng¹

1(*Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008*)

2(*Graduate School, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049*)

Abstract On the basis of analyzing grain-size proxies, the evolution history of Hongjiannao Lake for the past 80 yrs. is discussed in this article. Grain-size distribution of the samples from the lower part of the sedimentary core is characterized by the “double-peak” feature, which enables us to distinguish the aeolian materials from the lacustrine sediments. It's revealed that Hongjiannao Lake formed in about 1928 A. D. and in its initial stage sandstorms were prevalent with three extremes took place in 1936 A. D., 1939 A. D. and 1941 A. D.. During 1952 ~ 1960 A. D., the lake expanded greatly, due to the sharp increase of inflow waters to the lake as a result of the channelled-off water from the around swamp caused by human beings. Hongjiannao Lake has remained a higher water level since 1960s and the frequency and intensity of sandstorms have reduced a lot with the “double-peak” feature of the grain-size frequency curve changing into the “single-peak” feature. The water level of Hongjiannao Lake has been holding a dropping trend since 1950s. The lake evolution history as well as the paleosandstorm characteristics and the anthropogenic activities are perfectly inferred from the study of grain-size proxies.

Key words Hongjiannao Lake, lacustrine sediment, grain-size, paleosandstorm characteristics, lake evolution history