

干旱区湖泊沉积物中过剩²¹⁰Pb的沉积特征与风沙活动初探*

陈永福¹, 赵志中²

(1: 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029)

(2: 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081)

摘要: 过剩²¹⁰Pb不仅是沉积物年龄测定的重要手段,而且是环境示踪的一种主要方法.干旱区湖泊主要为封闭湖泊,其沉积物所接受的过剩²¹⁰Pb沉积在大气沉降背景外,主要受风沙侵蚀来源的影响.因此,较高的过剩²¹⁰Pb沉积通量有可能与区域风沙活动有关.本文在对比分析近几年来发表在各期刊中的湖泊²¹⁰Pb数据的基础上,计算各个湖泊多年平均过剩²¹⁰Pb的沉积通量并与大气过剩²¹⁰Pb沉降背景比较,从而初步确定中国北方干旱区风沙活动的可能区域.然后对所确定的典型风沙多发区,利用过剩²¹⁰Pb模式(PF-CRS)计算沉积物沉积速率,并与相应区域的“尘暴”记录对比,进而论证该方法在指示风沙活动方面的可靠程度.

关键词: 干旱区; 湖泊沉积物; Pb-210 沉积通量; 沉积速率; 风沙活动

Preliminary study on excess ²¹⁰Pb flux characteristic of lake sediment in arid regions and its implication for aeolian activity

CHEN Yongfu¹& ZHAO Zhizhong²

(1: *Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, P.R.China*)

(2: *Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, P.R.China*)

Abstract: Excess ²¹⁰Pb dating is not only an important method for sediment dating, but also a major environmental tracer. In arid regions, excess ²¹⁰Pb deposited in lake sediment mainly depends on wind erosion recycle besides the atmospheric precipitation flux background. Therefore, the higher excess ²¹⁰Pb is a potential for identifying the aeolian activities. This paper makes a systematical analysis on the data published in recent years, and calculates the multi-year average excess ²¹⁰Pb flux in different lakes. Thus, the areas in which multi-year average excess ²¹⁰Pb flux that exceeded atmosphere flux background could be recognized preliminarily as regional aeolian deposits. And then, we use the excess ²¹⁰Pb model (PF-CRS) to calculate the lake sedimentation rates in some typical aeolian regions. At last, we compare the results with the dust records correspondingly so as to estimate the reliability of this method.

Keywords: Arid regions; lake sediment; Pb-210 flux; sedimentation rates; aeolian activities

近年来,环境恶化越来越成为人们关注的重大问题之一.风沙活动由于其可能在中国北方干旱区及相邻区域形成风沙灾害而对区域环境造成极大的威胁,如加剧空气污染,对人类的生存环境造成直接危害等^[1].因此,揭示风沙活动的空间分布和近几十年来的演化规律,将为人类应对由风沙活动引起的生存环境恶化起到积极作用.

环境的示踪和监测是人们认识环境变化的一种重要手段.天然放射性核素²¹⁰Pb自从Goldberg 1963年引入地学相关领域以来,应用范围十分广泛,主要表现在沉积物定年^[2-4],湖泊、河口以及沿海沉积物沉积速率的测定等方面^[5-8].近年来在流域土壤侵蚀、坡面侵蚀以及泥沙来源示踪方面的研究也迅速开始展开^[9-13].

* 国家重点基础研究发展计划(973)项目“北方干旱化与人类适应”子课题“北方干旱化进程中的阶段性转折和突变及其可预测研究”(2006CB400503)资助. 2009-04-23 收稿; 2009-05-21 收修改稿. 陈永福,男,1980年生,博士; E-mail: saiwaijiaozi@163.com.

过剩 ^{210}Pb 在理论和环境示踪方面的应用都已经比较成熟. 此外, 过剩 ^{210}Pb 可能对干旱区的风沙活动具有一定的指示意义^[14], 中国北方干旱区是典型的风沙活动多发区, 散布于其周边的湖泊作为风沙活动的汇, 可能记录了过剩 ^{210}Pb 的沉积特征, 从而为研究中国北方风沙活动的区域分布和历史演化奠定了基础. 因此, 具有较高分辨率、沉积环境稳定等特点的湖泊沉积, 是利用过剩 ^{210}Pb 研究干旱区风沙活动的良好载体.

1 干旱区湖泊的选取

中国北方湖泊沉积的地理覆盖区域十分广泛, 面积超过 1km^2 的湖泊就接近 2300 个^[15], 且湖泊沉积物记录的环境要素信息较为丰富. 在中国北方干旱区尤其是沙漠区, 由于风沙活动的反复侵扰, 很难找到连续的沉积记录. 而湖泊作为静水系统, 其湖泊沉积物具有连续性好、分辨率高的特点, 是短尺度气候变化研究的重要材料^[15].

中国北方干旱区的湖泊主要分布在蒙新湖区, 多为封闭湖泊, 沉积环境较为稳定. 沉积物所接受的过剩 ^{210}Pb 沉积影响因素较少, 不会形成入湖过剩 ^{210}Pb 的损失, 剖面中的过剩 ^{210}Pb 由于衰变而随深度增加以指数形式减少. 随着 ^{210}Pb 理论和测试技术的不断成熟, 在年代测定以及沉积通量计算方面已经有大量研究材料产生. 本文主要选取了沉积物剖面中过剩 ^{210}Pb 衰变形态较接近理想形态的 11 个湖泊, 分别是乌伦古湖^[16]、艾比湖^[17]、博斯腾湖^[18]、苏干湖^[19]、青海湖^[20]、泊江海子^[21]、乌梁素海^[22]、岱海^[23]、安固里淖^[24]、白银库伦^[25]和呼伦湖^[26], 并从中提取相应过剩 ^{210}Pb 比活度数据进行综合分析. 所选取的湖泊以新疆和内蒙古两省为主, 其中内蒙古的几个湖泊分布相对比较集中, 多见于毛乌素沙地与浑善达克沙地之间, 数据较充分; 新疆的湖泊分布主要集中在北疆. 而巴丹吉林沙漠周边, 可供研究的材料则较少.

2 湖泊中 ^{210}Pb 的沉积

湖泊沉积物中蓄积的 ^{210}Pb 有两个来源: 一是沉积物中所蓄积的 ^{226}Ra 衰变生成的 ^{210}Pb , 即与 ^{226}Ra 平衡的 ^{210}Pb , 常称作补偿 ^{210}Pb ; 另一部分是地表 ^{238}U 放射性衰变子体 ^{222}Rn 逸散到大气后衰变产生的随降水或干沉降形式沉降的 ^{210}Pb , 这部分 ^{210}Pb 被称作过剩 ^{210}Pb .

过剩 ^{210}Pb 的大气沉积通量在特定区域相对比较稳定, 但是不同的区域之间虽然具有相似的沉降演化历史, 却在沉积通量上会随纬度和降水的变化而存在一定的差别^[27], 如热带和中纬度地区沉积通量较大. 相对而言, 在北半球中纬度(30–60°N)地区的区域差异较小^[28-29].

2.1 过剩 ^{210}Pb 沉积通量多年平均值的计算

湖泊中过剩 ^{210}Pb 沉积通量的组成比较复杂, 一部分来源于大气直接沉降; 而另一部分则可能是通过大气沉降于陆地表面后经过流水、风沙等侵蚀因素再循环的结果^[27,30]. 但总的过剩 ^{210}Pb 多年平均沉积通量可由下面的公式计算^[31]:

$$F = \lambda N_t \quad (1)$$

$$N_t = \sum_{i=1}^n \rho_i d_i c_i \quad (2)$$

其中, F 为湖泊中沉积物-水界面过剩 ^{210}Pb 的多年平均沉积通量, λ 是衰变常数, 其值为 0.03114, N_t 为单位面积内岩芯总的过剩 ^{210}Pb 沉积总量; ρ_i 、 d_i 和 c_i 分别为某一层节沉积物的干密度、样品厚度以及过剩 ^{210}Pb 比活度. 对于文献中采集的数据, 都有样品厚度数据(d_i)和活度数据(c_i), 可以直接使用; 但是, 一般没有干密度数据(ρ_i). 由于干旱区湖泊沉积物粒度分布主要以粉砂为主(本文选择的主要为这类湖泊), 所以样品干密度多在 $1.2 \pm 0.3\text{g/cm}^2$ 左右, 如青海达连海^[31]的干密度为 $1.1 \pm 0.1\text{g/cm}^2$. 根据各个湖泊的岩芯描述和过剩 ^{210}Pb 随深度的分布特征, 沙漠区的湖泊干密度在岩芯剖面和区域上具有可对比性. 因此本文在计算过剩 ^{210}Pb 多年平均值时, 干密度数据统一使用 1.2g/cm^2 .

通过计算得出干旱区各个湖泊的沉积通量表明, 新疆的乌伦古湖和博斯腾湖的过剩 ^{210}Pb 沉积通量最大, 而与之相邻的艾比湖的沉积通量则最小; 而位于内蒙古浑善达克沙地周边湖泊的过剩 ^{210}Pb 沉积通量相差不大, 只有位于浑善达克沙地下风区较近的安固里淖相对较大(图 1).

2.2 较高的多年平均过剩²¹⁰Pb沉积通量与风沙活动

于2007年在浑善达克沙地采得7个沙漠砂, 没有检测到过剩²¹⁰Pb. 由于²¹⁰Pb更易吸附于细颗粒沉积物中, 所以沙漠中沉降的过剩²¹⁰Pb必然是经过再循环散落于其下风区域. 而干旱区由于降水极少, 流域水流侵蚀不会是过剩²¹⁰Pb再循环的主要因素, 而风沙活动极有可能是其控制因素.

沙漠下风区周边的湖泊是记录这些再循环过剩²¹⁰Pb的主要载体, 因为干旱区湖泊主要为封闭湖泊, 不会对沉降入湖泊的过剩²¹⁰Pb产生再侵蚀而丢失. 因此, 湖泊沉积物中的过剩²¹⁰Pb往往远高于大气沉降背景.

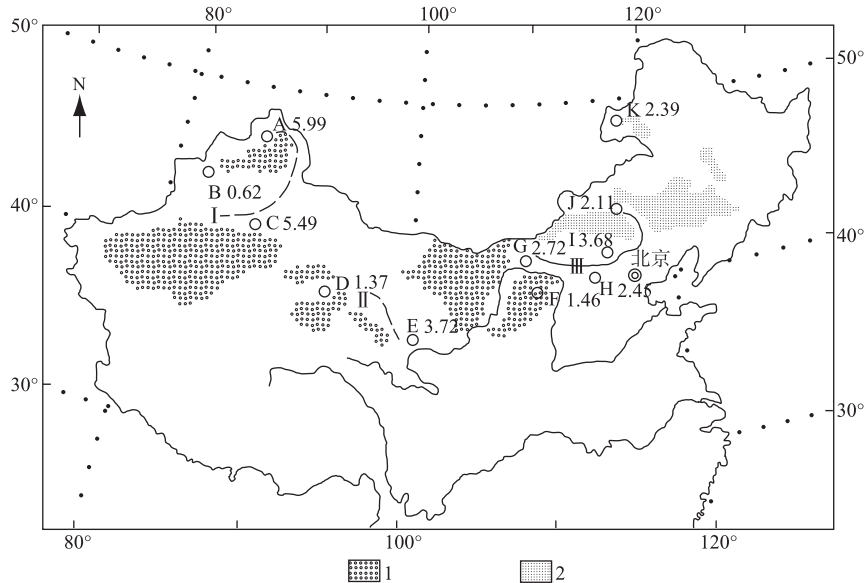


图1 过剩²¹⁰Pb在干旱区各湖中的沉积通量

(1为沙漠; 2为沙地; 大写英文字母及其后的数字分别为相应湖泊的代号以及过剩²¹⁰Pb在相应湖泊中的沉积通量, 沉积通量的单位为 $\text{dpm}/(\text{cm}^2 \cdot \text{a})$; A-乌伦古湖, B-艾比湖, C-博斯腾湖, D-苏干湖, E-青海湖, F-泊江海子, G-乌梁素海, H-岱海, I-安固里淖, J-白银库伦, K-呼伦湖; I-北疆风沙活动区, II-巴丹吉林周边风沙活动区, III-浑善达克风沙活动区)

Fig.1 Excess ²¹⁰Pb flux in arid regions of different lakes

虽然北半球大陆过剩²¹⁰Pb的大气沉积通量随纬度和降雨而产生区域差异^[27], 但在中纬度差别较小^[28-29], 其分布范围为 $0.3-0.9\text{dpm}/(\text{cm}^2 \cdot \text{a})$, 平均为 $0.7\text{dpm}/(\text{cm}^2 \cdot \text{a})$. 相对较高的日本也仅 $1.8\text{dpm}/(\text{cm}^2 \cdot \text{a})$ ^[28]. 在中国北方干旱区由于年平均降雨集中在 400mm 以下, 大部分地区在 200mm 以下, 因此降水对过剩²¹⁰Pb沉降的区域差异所造成的影响较小. 而对于新疆地区的部分湖泊, 由于湖泊主要靠高山冰雪融水和地下水补给. 但是, 由于²¹⁰Pb属于难溶物质, 经过流水搬运入湖的过剩²¹⁰Pb只占大气沉积通量的 $1\%-2\%$, 影响甚微; 即使吸附于沉积物颗粒的过剩²¹⁰Pb经过冰川或洪水搬运, 也常常沉积于出山口的洪积扇或者湖泊汇水盆地的远端, 很难进入湖泊^[27]. 因此, 湖泊中高于大气沉降背景的过剩²¹⁰Pb是风沙活动作用的结果, 而沉积物则主要来源于风成沉积. 但由于²¹⁰Pb易于吸附在细粒级和有机质中, 极强风沙活动时, 会有粗颗粒(砂粒级)沉积物入湖, 而这部分沉积物其过剩²¹⁰Pb含量反而少. 因此, 该方法对于指示源区极强风沙活动(即有大量砂颗粒入湖的情况)具有一定局限. 而本文所选择的湖泊其沉积物近年来多为粉砂组分, 沉积物中过剩²¹⁰Pb随深度的变化也未见明显的突变. 而粉砂组分多为类似于黄土的近源粉尘, 所以该指标反映的是湖泊上风区较远距离的多年平均风沙活动的相对强弱.

所有11个湖泊只有艾比湖的结果接近大气沉积通量(图1), 为 $0.62\text{dpm}/(\text{cm}^2 \cdot \text{a})$, 这是由于该湖在风沙活动的背风区, 没有接受风沙活动影响的结果. 而其它区域都远大于大气沉积通量的背景, 尤其是位于北疆的乌伦古湖和博斯腾湖, 应当是风沙区域活动范围较大的结果. 与北疆相比, 另一风沙活动区是浑善达

克沙地活动区,可能由于风沙活动范围较小,所以几个湖泊的过剩 ^{210}Pb 都不是特别高.而位于乌兰布和沙漠周边的湖泊仅表明是风沙活动能到达的区域,其过剩 ^{210}Pb 沉积通量仅比黄土高原(子长县赵家沟黄土丘陵顶部)的沉积通量 $0.96\text{dpm}/(\text{cm}^2\cdot\text{a})$ ^[32]稍高.因此,北疆地区和浑善达克沙地可能是风沙活动高发区.

3 湖泊沉积物沉积速率与风沙演化

湖泊多年平均过剩 ^{210}Pb 沉积通量指示的是风沙活动的多年平均状况,即在多年平均时间内是否能检出风沙活动,以及区域风沙活动的相对强弱.而具体时段风沙活动的演化还需进一步研究.一般认为,风沙活动降尘比大气降尘颗粒更粗,因此风沙活动对湖泊沉积物沉积速率的贡献可能比过剩 ^{210}Pb 沉积通量的贡献更大.所以,计算沉积物的沉积速率更能说明风沙活动的演化情况.沉积速率的计算首先由Appleby^[4]应用于湖泊沉积,其假设前提是过剩 ^{210}Pb 的沉积通量恒定.而风沙活动的变化则可能导致过剩 ^{210}Pb 通量不恒定.因此,本文选用阶段性沉积通量恒定模式^[33](PF-CRS)计算沉积物沉积速率(该模式所计算的年龄结果和CRS模式年龄一致),公式为:

$$S_i = \frac{N_i}{tC_i}(1 - e^{-\lambda t}) \quad (3)$$

其中, S_i 为样品 i 的沉积物沉积速率; N_i 为岩芯底部到第 i 个样品累加的过剩 ^{210}Pb 沉积总量(计算方法见公式(2)),干密度数据仍采用 $1.2\text{g}/\text{cm}^3$; C_i 为第 i 个样品的比活度; t 为沉积第 i 个样品所需的时间,即该样品的顶底年龄差.

本文选取过剩 ^{210}Pb 形态比较好同时为风沙活动较为典型的安固里淖和博斯腾湖进行沉积速率计算.计算过程中,干密度都采用 $1.2\text{g}/\text{cm}^3$,年龄结果参照文献数据.同时,由于湖泊沉积物中可能含有较多自生碳酸盐和有机质,而这些组分多不是风成沉积物来源.因此,在计算沉积物沉积速率时要予以扣除,以保证计算的沉积速率主要反映的是风成沉积物的沉积速率.碳酸盐含量在博斯腾湖整个计算段的变幅不足5%,而安固里淖的变化则更小,只有3%;有机质博斯腾湖变幅为3%,而安固里淖则为2%,在计算过程中扣除,计算结果见图2.

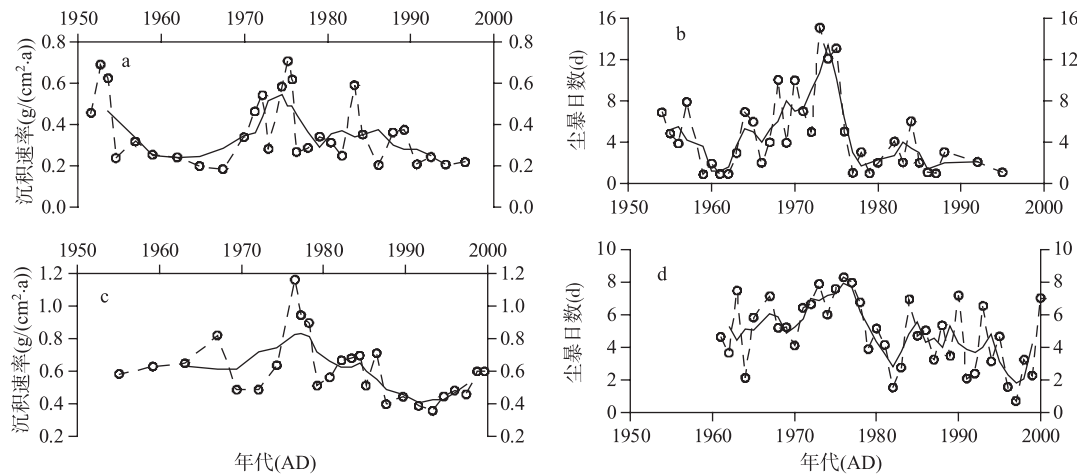


图2 湖泊沉积物沉积速率变化(博斯腾湖沉积物沉积速率的变化(a); 乌鲁木齐沙尘暴日数^[34](b); 安固里淖沉积物沉积速率的变化(c); 浑善达克沙地沙尘暴日数^[35](d))

Fig.2 Sedimentation rate of the lake sediment

由上可知,博斯腾湖和安固里淖湖泊沉积物可能多为风成来源.两个湖泊沉积物沉积速率记录分别与湖区上风区风沙活动记录的总体演变趋势具有较高的一致性,都以20世纪70年代为高风沙活动时段,类似于北疆的风沙活动情况^[36],尤其是博斯腾湖的记录;随后,沉积速率记录的风沙活动逐渐减弱(图2).这

说明, 过剩 ^{210}Pb 阶段模式年龄(PF-CRS)计算的沉积物沉积速率具有指示风沙活动演化的可能. 研究表明, 中国北方风沙活动演化总体趋势一致^[37], 从 60 年代早期到 70 年代中期呈增加趋势并达到高峰, 随后风沙活动减弱程度比较明显, 而 80 年代中期出现较弱的风沙活动高峰. 而东西部风沙活动演化的差异主要表现在 90 年代, 以浑善达克沙地为代表的东部区域有明显的增加趋势.

4 结论

过剩 ^{210}Pb 在沉积物年龄测定和环境示踪方面具有广泛的应用, 同时在风沙活动示踪方面具有很大的潜力^[14]. 在中国北方干旱区, 湖泊沉积物中过剩 ^{210}Pb 的多年平均沉积通量远远大于大气沉积通量, 并且具有明显的区域差异. 干旱区湖泊由于降水量少, 由河流侵蚀携带的沉积物过剩 ^{210}Pb 浓度较低. 因此, 较高的多年平均过剩 ^{210}Pb 沉积通量可能主要受风沙活动影响, 湖泊沉积物主要为风成沉积物. 经多年平均过剩 ^{210}Pb 确定的中国北方主要风沙活动区域与气象记录^[37]具有一定的相似性, 说明该方法在指示多年平均风沙活动的区域相对强弱具有可参考性.

其次, 通过过剩 ^{210}Pb 阶段模式年龄(PF-CRS)计算的沉积物沉积速率变化不仅与湖区附近尘暴记录相似, 同时与气象记录^[37]的全国总的风沙活动趋势也比较吻合. 因此, 过剩 ^{210}Pb 阶段模式年龄(PF-CRS)计算的沉积物沉积速率可能指示区域风沙活动的演化.

通过相对可靠的湖泊沉积物沉积速率数据而言, 在中国北方风沙活动区的北疆活动区和浑善达克沙地活动区, 历史演化规律总体呈相似的规律, 在 20 世纪 70 年代是风沙活动的高峰. 随后, 总体呈逐渐减弱的情况. 不同的是, 在东部, 可能由于人类活动的加强, 近年来又有回升的趋势^[38].

5 参考文献

- [1] 史培军, 严平, 袁艺. 中国北方风沙活动的驱动力分析. 第四纪研究, 2001, **21**(1): 41-47.
- [2] Krishnaswamy S, Lal D, Matin JM *et al.* Geochronology of lake sediments. *Earth and Planetary Science Letters*, 1971, **11**(5): 407-414.
- [3] Appleby PG, Oldfield F. The calculation of ^{210}Pb dates assuming a constant rate of supply of unsupported ^{210}Pb to the sediment. *Catena*, 1978, **5**: 1-8.
- [4] Appleby PG, Oldfield F. The assessment of ^{210}Pb data from sites with varying sediment accumulation rates. *Hydrobiologia*, 1983, **103**: 29-35.
- [5] 李建芬, 王宏, 夏威夷等. 渤海湾西岸 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 、 ^{137}Cs 测年与现代沉积速率. 地质调查与研究, 2003, **26**(2): 114-128.
- [6] 李凤业, 史玉兰. 渤海南部现代沉积物堆积速率和沉积环境. 黄渤海海洋, 1995, **13**(2): 33-37.
- [7] 段凌云, 王张华, 李茂田等. 长江口沉积物 ^{210}Pb 分布及沉积环境解释. 沉积学报, 2005, **23**(3): 514-522.
- [8] 夏小明, 谢钦春, 李炎等. 东海沿岸海底沉积物中的 ^{137}Cs 、 ^{210}Pb 分布及其沉积环境解释. 东海海洋, 1999, **17**(1): 20-27.
- [9] He Q, Walling DE. The distribution of fallout ^{137}Cs and ^{210}Pb in undisturbed and cultivated soils. *Applied Radiation and Isotopes*, 1997, **48**(5): 677-690.
- [10] Walling DE, He Q. Using fallout lead-210 measurements to estimate soil erosion on cultivated land. *Soil Science Society of America Journal*, 1999, **63**: 1404-1412.
- [11] Walling DE, Collins AL, Sickingabula HM. Using unsupported lead-210 measurements to investigate soil erosion and sediment delivery in a small Zambian catchment. *Geomorphology*, 2003, **52**(3-4): 193-213.
- [12] Zhang XB, Walling DE, Feng MY *et al.* $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ depth distribution in soil and calibration models for assessment of soil erosion rates from $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ measurements. *Chinese Science Bulletin*, 2003, **48**(8): 813-818.
- [13] 张信宝, 贺秀斌, 文安邦等. 川中丘陵区小流域泥沙来源的 ^{137}Cs 和 ^{210}Pb 双同位素法研究. 科学通报, 2004, **49**(15): 1537-1541.
- [14] Samuel KM, Balz SK, Hamish AM. Estimates of Australian dust flux into New Zealand: Quantifying the eastern Australian dust plume pathway using trace element calibrated ^{210}Pb as a monitor. *Earth and Planetary Science Letters*, 2005, **239**(3-4): 336-351.
- [15] 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. 地球科学进展, 1995, **10**(2): 169-175.

- [16] Liu XQ, Herzsuh U, Shen J *et al.* Holocene environmental and climatic changes inferred from Wulungu Lake in northern Xinjiang, China. *Quaternary Research*, 2008, **70**: 412-425.
- [17] 吴敬禄, 刘建军, 王苏民. 近 1500 年来新疆艾比湖同位素记录的气候环境演化特征. 第四纪研究, 2004, **24**(5): 585-590.
- [18] 陈发虎, 黄小忠, 张家武等. 新疆博斯腾湖记录的亚洲内陆干旱区小冰期湿润气候研究. 中国科学(D 辑), 2007, **37**(1): 77-85.
- [19] 强明瑞, 陈发虎, 张家武等. 2ka 来苏干湖沉积碳酸盐稳定同位素记录的气候变化. 科学通报, 2005, **50**(13): 1385-1393.
- [20] 沈吉, 张恩楼, 夏威夷. 青海湖近千年来气候环境变化的湖泊沉积记录. 第四纪研究, 2001, **21**(6): 508-513.
- [21] 杨志荣, 张梅青. 鄂尔多斯泊江海子地区 800 余年来的气候与环境变化. 湖南师范大学学报(自科版), 1997, **20**(4): 74-81.
- [22] 赵锁志, 孔凡吉, 王喜宽等. 内蒙古乌梁素海 ^{210}Pb 和 ^{137}Cs 测年与现代沉积速率. 现代地质, 2008, **22**(6): 909-914.
- [23] 曹建廷, 沈吉, 王苏民. 内蒙古岱海湖泊沉积记录的小冰期气候环境. 湖泊科学, 2000, **12**(2): 97-104.
- [24] 姜加明, 吴敬禄, 沈吉. 安固里淖沉积物记录的气候环境变迁. 地理科学, 2004, **24**(3): 346-351.
- [25] 武健伟, 鲁瑞洁, 赵廷宁. 湖泊沉积记录的近 500 年来浑善达克沙地气候环境变化. 中国水土保持科学, 2004, **2**(4): 42-47.
- [26] 吉磊, 夏威夷, 项亮等. 内蒙古呼伦湖表层沉积物的矿物组成和沉积速率. 湖泊科学, 1994, **6**(3): 227-232.
- [27] Appleby PG. Sediment records of fallout radionuclides and their application to studies of sediment-water interactions. *Water Air and Soil Pollution*, 1997, **99**: 573-586.
- [28] Preiss N, Melieres MA, Pourche M. A compilation of data on lead 210 concentration in surface air and fluxes at the air-surface and water-sediment interfaces. *Journal of Geophysical Research*, 1996, **101**(D22): 28847-28862.
- [29] Considine DB, Bergmann DJ, Liu H. Sensitivity of global modeling initiative chemistry and transport model simulations of radon-222 and lead-210 to input meteorological data. *Atmospheric Chemistry Physics Discussions*, 2005, **5**: 5325-5372.
- [30] Chung Y, Chang WC. Pb-210 fluxes and sedimentation rates on the lower continental slope between Taiwan and South Okinawa Trough. *Continental Shelf Research*, 1995, **15**(2-3): 149-164.
- [31] 严平, 董光荣, 董治宝等. 青海共和盆地达连海湖积物 ^{137}Cs 失踪的初步结果. 地球化学, 2000, **29**(5): 469-474
- [32] 张信宝, Walling DE, 冯明义等. $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 在土壤中的深度分布和通过 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 法求算土壤侵蚀速率模型. 科学通报, 2003, **48**(5): 502-506.
- [33] Sanchez-Cabeza JA, Ani-Ragolta I, Masque P. Some considerations of the ^{210}Pb constant rate of supply(CRS) dating model. *Limnology and Oceanograph*, 2000, **45**(4): 990-995.
- [34] 李栋梁, 钟海玲, 魏丽等. 中国北方年沙尘暴日数的气候特征及对春季高原地面感热的响应. 高原气象, 2003, **22**(4): 337-345.
- [35] 成天涛, 吕达仁, 王革丽等. 浑善达克沙地气候因子对沙尘暴频率影响作用的模拟研究. 中国沙漠, 2005, **25**(1): 68-74.
- [36] 李红军, 李军, 何清. 新疆沙尘暴的趋势和突变研究. 中国沙漠, 2008, **28**(5): 915-919.
- [37] 周自江, 章国材. 中国北方的典型强沙尘暴事件(1954-2002 年). 科学通报, 2003, **48**(11): 1224-1228
- [38] 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.