

# 基于湖泊(水库)沉积物分析的土壤侵蚀研究

吕明辉, 王红亚, 蔡运龙

(北京大学 环境学院 资源环境与地理系, 北京 100871)

**摘要:** 土壤侵蚀作为全球性的环境问题之一, 受自然和人为因素的共同影响。而湖泊(水库)沉积物作为流域物质迁移的“汇”, 可以连续、高分辨率地记录流域土壤侵蚀的信息。通过湖泊沉积指标的研究, 可以反演流域土壤侵蚀过程、演化规律。与流域人类活动、气候变化等自然因素综合分析, 可对流域土壤侵蚀发生机制等做出科学论断, 为目前水土流失治理等提供参考依据。介绍了基于湖泊(水库)沉积物的放射性同位素示踪研究、矿物与磁性分析、粒度分析、孢粉、元素地球化学分析方法应用于土壤侵蚀的研究进展, 并对其应用前景做了展望。

**关键词:** 湖泊(水库); 沉积物; 土壤侵蚀

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2007)03-0036-06

中图分类号: S157.1, P333.4

## Soil Erosion Investigations Based on Analyses of Sediment in Lakes and Reservoirs

LU Ming-hui, WANG Hong-ya, CAI Yun-long

(Department of Resources, Environments and Geography, School of Environmental Sciences, Peking University, Beijing 100871, China)

**Abstract:** Soil erosion, as one of the major global environmental concerns, is usually the result from both natural and human factors. Sediment in lakes and reservoirs can continuously record the history of soil erosion with a high resolution in drainage basins of those water bodies, and therefore analyses of it have been becoming an important approach of investigation of occurrence and persistence of soil erosion. Furthermore, an understanding of the process and mechanism of material migration within a lake watershed system, interactions of lake evolution with human activities and their quantitative distinction is the focus of limnology. This paper reviews the development of applications of radioactive trace isotopes, magnetic minerals, particle size, carbon, nitrogen and other chemical elements of lake/reservoir sediment in soil erosion investigations, and elucidates their further utilizations and advances.

**Keywords:** lake/reservoir; sediment; soil erosion

土壤侵蚀是当今颇受关注的全球性灾害, 它严重地制约着人类社会的持续健康发展。据估算, 全球水土流失面积占地表总面积的 10.95%, 中国每年流失的土壤量达  $5.00 \times 10^9 \text{ t}^{[1]}$ 。作为全球性的主要环境问题之一, 土壤侵蚀又通常是由于自然因素和人为因素相叠加作用的结果, 而湖泊(水库)作为一个流域地表物质运移的“汇”, 其沉积物可以连续、高分辨率地记录土壤侵蚀的信息, 从而为利用沉积物分析来推测区域土壤侵蚀过程的研究提供了可能性。

湖泊沉积物具有地理覆盖面广、时间连续、蕴含信息量大、分辨率高等特点, 成为恢复地球环境不同时间尺度下历史演变的重要指示器。多年来, 湖泊沉积物在第四纪古气候重建方面发挥了重要作用, 但这些研究多为较长时间尺度和较低分辨率的情况, 随着

研究的深入和现代环境问题的日益突显, 人们开始更加关注与人类生活密切相关的现代环境变化; 而湖泊—流域物质输移过程与机理、湖泊与人文影响因素的相互作用和定量区分研究, 又是湖泊科学的研究前沿和优先发展领域, 因此很多的研究重点都转向短时间尺度上地球气候与环境历史的高分辨率重建<sup>[2-3]</sup>, 其中利用湖泊(水库)沉积物分析, 进行土壤侵蚀研究就是一个新的研究领域。基于湖泊(水库)沉积物分析基础上的土壤侵蚀研究, 多以短时间尺度、高分辨率为特征, 提取沉积物中所包含的环境信息, 探索在一定时间尺度上的自然因素和人为影响对环境的作用过程及变化规律, 从而揭示土壤侵蚀及其相关的地表过程与机理, 为预防和治理土壤侵蚀、合理利用水土资源、建设良性生态环境提供科学依据。

收稿日期: 2006-12-13

修稿日期: 2007-03-29

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(40335046)

作者简介: 吕明辉(1972—), 女(汉族), 河北省沧州市人, 博士研究生, 主要从事环境磁学和土地科学研究。E-mail: lvminghui@126.com。

# 1 基于湖泊(水库)沉积指标分析的土壤侵蚀研究

沉积物分析的方法有很多,具体应用到土壤侵蚀研究,常用的研究方法主要包括放射性同位素的示踪方法、环境磁学方法、粒度分析方法、元素地球化学分析方法等。

## 1.1 沉积物放射性同位素的示踪研究

由于放射性同位素具有随被示踪土壤再分配的特点,因而该技术被广泛地应用到沉积和土壤侵蚀研究中。湖泊(水库)可较好地记录流域的环境变化信息,因此应用环境放射性同位素作为指示剂,可以确定沉积物的年代,进而通过沉积通量/速率的变化,判断流域土壤的侵蚀强度。常用的放射性同位素主要有 $^7\text{Be}$ ( $T_{1/2}=53.3\text{ d}$ ), $^{210}\text{Pb}$ ( $T_{1/2}=22.3\text{ a}$ )和 $^{137}\text{Cs}$ ( $T_{1/2}=30.17\text{ a}$ )。

$^7\text{Be}$ 的半衰期短,不存在长期累积效应,因而具备季节性微粒示踪的价值。湖泊、海湾沉积物的 $^7\text{Be}$ 示踪研究已取得了一定的进展。 $^7\text{Be}$ 还可以作为流域侵蚀和湖泊沉积耦合关系的示踪。白占国等在贵州省百花湖通过沉积物与汇水区表土层 $^7\text{Be}$ 的累积值对比,揭示出沉积物中 $^7\text{Be}$ 的累积值高于汇水区表土中的累积值约2~3倍。表明可能由于流域内含有有机质的土壤通过搬运进入湖泊沉积物中,揭示出沉积物中污染物与流域侵蚀的关系<sup>[5]</sup>。

$^{210}\text{Pb}$ 是一种半衰期为22.3 a,在自然界中广泛存在的天然放射性核素,对示踪百年时间尺度上的流域侵蚀速率、湖泊沉积速率及其耦合关系等极有价值。Krishnaswamy 等人在1971年用 $^{210}\text{Pb}$ 成功地进行了沉积速率的研究<sup>[6]</sup>,之后 $^{210}\text{Pb}$ 在现代沉积速率的研究中得到广泛应用。

$^{137}\text{Cs}$ 作为湖泊沉积与流域土壤侵蚀的示踪剂,得到了广泛的应用。通过识别沉积物中 $^{137}\text{Cs}$ 峰值位置,研究湖泊、水库、湿地和洪积平原的沉积速率与土壤侵蚀已经发展成为一个相当成熟的技术<sup>[6]</sup>。Ritchie和McHenry在1990年指出, $^{137}\text{Cs}$ 可用于确定沉积环境中自1954年以来沉积物的沉积速率研究,为侵蚀速率和模式提供数据; $^{137}\text{Cs}$ 是研究整个景观中完全侵蚀和沉积循环的独特手段<sup>[7]</sup>。

全球范围 $^{137}\text{Cs}$ 的沉降始于1952年末,到1954年累积到第一个峰值;1960—1964年是另一个重要的沉降期;1986年4月,前苏联切尔诺贝利核电站发生泄漏事故,散落的 $^{137}\text{Cs}$ 在北半球的湖泊沉积物中有相应的保留,也具备辅助计年价值<sup>[8]</sup>。Royall研究表明的1994年 $^{137}\text{Cs}$ 的完全枯竭,也可作为一个辅助

计年的标志<sup>[9]</sup>。研究中发现,一些地区湖泊(水库)沉积物 $^{137}\text{Cs}$ 的垂直剖面存在一个与1974年对应的,比活度不是很大,但较清晰的次级沉降峰值<sup>[10]</sup>。也有学者指出湖泊沉积物中 $^{137}\text{Cs}$ 计年时应在考虑大气沉降的同时,也要考虑来自于侵蚀土壤的部分,从而对湖泊沉积物中1963年以后的 $^{137}\text{Cs}$ 蓄积峰的确定要慎重<sup>[11]</sup>。

Ionita 等在对罗马尼亚 Moldavian 高原的研究中,通过湖泊(水库)中沉积物的 $^{137}\text{Cs}$ 计年,绘制各个时期各个流域的沉积速率图,发现水库沉积速率的降低与土壤侵蚀速率的模式有关。并与当地《地产法》实行之后的土地利用与土地覆被变化相比较,分析沉积速率的增加可能与流域的土壤侵蚀相关联,这一发现得到 $^{137}\text{Cs}$ 分布深度的支持。调查表明,在这种环境下, $^{137}\text{Cs}$ 剖面是两层或双倍的状态<sup>[12]</sup>。P. A. Jones 等在澳大利亚半干旱区的研究中,通过测定沉积速率,总结出集水盆地中沉积物运移和土壤侵蚀的关系,指出不同时期沉积速率的不同,可能与水库的拦水效率下降和土地所有者的管理行为改善所导致的区域侵蚀速率发生变化有关<sup>[13]</sup>。Ping Yan 等在青海 Dalian 湖的研究中发现, $^{137}\text{Cs}$ 在湖泊沉积物中的垂直剖面显示出3个活度峰值和一个波谷:主峰对应于1963年的 $^{137}\text{Cs}$ 沉降;2个次级峰值对应于1986年核泄漏的事件和1994年的 $^{137}\text{Cs}$ 完全枯竭。波谷对应于20世纪80年代末和90年代初,开垦农田引起的风成沉积<sup>[14]</sup>。

应用放射性同位素 $^{210}\text{Pb}$ 和 $^{137}\text{Cs}$ 对比,可以使湖泊现代沉积速率的计算定量化,两者相互印证,使沉积速率的研究更为准确,从而更有效地进行流域内土壤侵蚀研究。很多研究结果表明运用 $^{210}\text{Pb}$ 和 $^{137}\text{Cs}$ 计算出的沉积速率通常会存在一定的出入,不同的研究差别也存在着较大的出入,但在反应沉积速率总体变化趋势上,这2种方法的结果基本一致<sup>[15]</sup>。孙立广等在南极阿德雷岛进行了湖泊 $^{210}\text{Pb}$ , $^{137}\text{Cs}$ 定年,并将1950年之后沉积速率突然增大的原因,归结为气候变暖导致的侵蚀速率的增大<sup>[16]</sup>。

湖泊沉积物中放射性同位素示踪研究方法,特别是 $^{137}\text{Cs}$ 这种全球范围内沉降的核素,无论在沉积物还是土壤中的分布及含量,都具有全球可对比性。因此,其研究也可作为寻找统一的土壤侵蚀标准做某些尝试。同时,此方法还可用于条件相似区域的沉积物分析和对比。但沉积物的同位素研究方法在采样区的选择、采样点的布设方面都要求比较严格,如应用 $^{210}\text{Pb}$ 法测定沉积物年龄要假设 $^{210}\text{Pb}$ 在沉积柱内是不发生迁移的,且进入沉积物的辐射通量为一常数;运

用 $^{137}\text{Cs}$ 测年的理想条件是沉积速度快,沉积物以原地沉积为主,且生物扰动作用最弱<sup>[17]</sup>。

## 1.2 湖泊(水库)沉积物环境磁学研究

对沉积物的磁性特征进行分析,是土壤侵蚀研究的常用方法。在湖泊(水库)沉积物中,不同的物源输入和沉积速率的变化,土壤中物质的运移、搬运和分异过程,对物质的磁性影响是极为明显的。Thompson 和 Oldfield 在 *Environmental Magnetism* 一书中指出水土流失是导致沉积物磁性增加的一个主要原因<sup>[18]</sup>。通过对沉积物磁性的研究,可识别不同时期沉积物的来源及流域物质侵蚀强度变化,恢复流域土壤侵蚀的自然变化及人为开垦历史。

Thompson 等 1975 年在北爱尔兰 Lough Neagh 的研究中,最早应用矿物磁性来判定沉积物的来源<sup>[19]</sup>。他们利用等温剩磁曲线、退磁曲线,磁化率与等温剩磁之间的线性关系,以及磁化率与孢粉含量的相关性,推断在沉积物中出现的钛磁铁矿,来自于湖周边的第三系玄武岩土壤;沉积物与流域内输送的土壤的量存在着相互关系。

随着环境磁学的深入研究,以及磁性测量技术的不断完善,基于沉积物的磁学分析来进行土壤侵蚀研究显示出诸多的优势,如磁性参数的测量简单快速,对样品无破坏性等。

Thompson 和 Morton 在调查苏格兰的 Loch Lomond 时,得出沉积物磁性特征的变化与流域内岩石的种类有关的结论;沉积物的磁化率和颗粒大小之间表现出一定的相关性,而沉积物的饱和等温剩磁(SIRM),磁化率( $x$ ),SIRM/ $x$ 和剩磁矫顽特征( $B_{cr}$ )均与主要支流中的沉积物相匹配<sup>[20]</sup>。Walling 和 Oldfield 分别测量了英国的 Jackmoor Brook 洪水期和洪水间期悬浮沉积物的磁性特征,并对比流域中土壤磁性特征,对沉积物进行了定性的评估。在这两个研究中,SIRM 与  $x$  的散点图均表明了表土层和心土层土壤与沉积物样品之间存在相互关系,从而进一步反映出流域的土壤侵蚀状况<sup>[21-22]</sup>。

较综合全面的流域研究之一在美国马里兰州的 Rhode River 进行。在这一相对复杂的沉积物环境中,研究者们建立起一个综合的方法来进行沉积物追踪;利用便携式装置对流域表层磁化率进行调查,选择有代表性的采样点,并针对不同粒级的样品进行磁性测量,将沉积物样品和可能的土壤样品进行磁性特征的对比,发现沉积物的来源存在着一个由河湾内崖壁侵蚀,向流域内耕作土表层土壤转变的一个过程,此过程与流域内大规模垦殖、森林植被破坏,造成大量表土细粒物质流失相关联<sup>[23]</sup>。Huang 和 O'Con-

nell 在研究西爱尔兰的 Ballydoo Lough 时,利用沉积物的磁性测量,结合地球化学元素、孢粉、放射性同位素和流域 200 a 多来的人口数量、土地利用状况、农业种植结构以及家畜饲养类型等社会经济因素,综合分析流域内的自然、社会等多因素对土壤侵蚀的作用<sup>[24]</sup>。Eriksson 和 Sanelgren 在坦桑尼亚的 Haubi 湖沉积物的研究中,发现磁性参数反映了 2 个完全不同的沉积阶段,并利用磁性参数重建流域中的土壤侵蚀历史。分析流域内 100 a 多的土壤侵蚀过程,除与降水量的多少有关之外,还与人类的活动有直接关系<sup>[25]</sup>。王红亚等在中国贵州省喀斯特山区的石板桥小流域的研究中,利用沉积物的磁性特征,结合粒度分析,TOC、C/N 分析,发现自 1960 以来的土壤侵蚀逐渐加剧的趋势,其原因可能与流域内持续的林地面积减小和农田面积增大有关,以及 1990 年以后植树导致的翻动地表物质造成的;同时也指出降水的波动可能是造成土壤侵蚀的次一级的原因<sup>[26]</sup>。

Thompson 用自然物质混合来模拟磁性特征,试图建立一个能量化地识别磁性矿物的方法<sup>[27]</sup>。Yu 和 Oldfield 在对先前 Rhode River 研究的基础上,建立一套多参数途径来量化研究沉积物来源的方法。利用聚类分析的方法对流域内可能沉积物来源进行分类,通过样品的混合试验,建立磁参数混合模型,再利用线性规划模型计算沉积物来源组成<sup>[28]</sup>。在后续的研究中,Yu 和 Oldfield 在西班牙的 Isabal 水库中使用同样的途径来确定沉积物来源,并将沉积物和 5 类可能来源的样品分离出砂、粉砂、黏土 3 个组分,分别测定其磁参数。

定量分析的结果表明,水库沉积物中片岩母质的来源占到很大的比例,粉砂组分对沉积物总量的贡献高达 40% 以上,远远超过了现代河床中细颗粒泥沙成分,指示了流域突发性径流过程对水库淤积的重要影响<sup>[29]</sup>。

近期的许多学者在沉积物来源的定量判别上进行了大量研究,试图找到确定沉积物来源的方便可靠的方法。Lees 用线性附加和磁性参数统计分配的方法,在确定沉积物来源数目的研究中使用了“unmixed”模型,评估来源贡献比例在计算中的不确定性。采集代表性的土壤样品和河流沉积物进行磁性测量,用聚类分析和主成分分析来对来源样品进行分类,并利用线性模型来进行量化研究<sup>[30]</sup>。Caitcheon 则通过测量河流沉积物的磁性特征,来检验空间和时间上的不变性,采用“双成分混合”来确定相关来源贡献的方法,应用于河流中自然沉积物的混合过程<sup>[31]</sup>。

由于磁性测量具有快速简便、经济易行、对样品无破坏及多用性的特点,在对沉积物来源判别和环境信息提取等方面都有着独到的作用,磁性信息还可以间接地指示流域环境的变迁与人类活动的影响。对磁性参数的定量化研究,也可以提供可靠的环境信息,如多变量统计方法、线性模拟技术、谱分析等方法的应用都在一定程度上加深了这方面的研究。值得注意的是,利用沉积物的磁性分析定量化地研究沉积物来源及土壤侵蚀,通常会因为诸多巧合性和假性因素而左右最终的计算结果,从而使其条件的限定、过程的控制和运算结果的检验都应该有严格的要求。因此针对不同的流域,也要根据具体的情况选择不同的定量模型,才能使定量化的研究更贴近实际情况,对深入研究土壤侵蚀的机制、寻找潜在的侵蚀源,探索环境演变的过程与响应模式等更具有实用价值。

### 1.3 湖泊(水库)沉积物的粒度分析

沉积物的粒度分布主要受搬运介质、搬运方式、沉积环境等因素的控制,因此,通过对沉积物粒度的研究可以了解沉积物所处的沉积环境。对沉积物的粒度分析目前主要应用于区分沉积环境及判定物质运动方式上、判别水动力条件,及应用于海洋环境中沉积物输运方向的研究领域。

沉积物粒度是重建古湿度的重要指标之一,并因其测定简单、快速、经济、不受生物作用影响,对气候变化敏感等特点而倍受研究者青睐。已有研究结果表明,从湖岸至湖心,随着水深逐步增大,水动力条件由强变弱,湖泊沉积物呈环带状分布,即从湖岸至湖心依次出来砾、砂、粉砂及黏土带,沉积物粒径逐渐减小<sup>[32]</sup>。人们认为,沉积物粒径减小反映采样点离湖岸距离增大、湖泊水位上升,指示气候湿润,Wang等在对内蒙古高原湖泊沉积环境记录的研究中也认为,细粒沉积物对应较高的湖泊水位,指示气候湿润;粗粒沉积物较低的湖泊水位,反映气候干旱<sup>[33]</sup>。

陈敬安等则通过对洱海和程海的研究指出,粒度变化指示气候变化,有一个重要的应用前提条件,即湖泊经历了较大幅度的水位波动、湖水面积存在大范围的扩张与收缩,因而可能只适用于长时间尺度、低分辨率(百年、千年)研究,不能延用至短时间尺度、高分辨率(年际、十年)研究。而短时间尺度下水位的变化对粒度分布的影响很小,相反,湖盆流域降雨量的变化则可能是控制沉积物粒度的重要因素,尤其在降雨量较大的热带、亚热带地区。降雨量的变化通过影响地表径流强度而在相当程度上决定着进入湖泊的陆源颗粒物的粗细和多少,进而影响沉积物粒度:降雨量大的湿润年份,地表径流发育,其剥蚀和搬运能

力增强,更多的粗颗粒物可被携带至湖泊,沉积物粒径增大;降雨量小的干旱年份,地表径流贫乏,粗颗粒物难以搬运至湖泊,沉积物粒径减小<sup>[3]</sup>。

汪勇等在陕西红碱淖沉积物粒度特征分析中发现,近几十年来的湖泊演化与环境变化、区域风沙强度变化以及人类活动相关联。并根据沉积物样品粒度组成呈双峰特征,分辨沉积物中的湖相和风成组分。结果表明,成湖于1928年的红碱淖在初期经历了3个强沙尘暴事件。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年以后为稳定深湖环境,风沙发生的频率和强度大降低,沉积物粒度频率分布曲线也演变为单峰形态<sup>[34]</sup>。

对天然沉积物进行粒度分析的研究方法由来已久,而由于沉积物粒度分布是物质来源、沉积区水动力环境、输移能力和输移路线的综合反映,加上粒度数据的多解性,因此利用沉积物粒度分析所提取出相应的土壤侵蚀信息存在着较大的误差。近年来,对粒度分析的数值模拟趋势越来越明显。根据沉积物在输移过程中的磨损、动力分选和混合作用的定量表达式、粒径趋势的形成来进行数值模拟,如利用分形理论,对沉积物的粒度分形结构计算其分维值,作为沉积物类型判别的参数,以达到分析来源和输移判别等研究目的;借助于人工神经网络模式识别技术,改进粒度分布表征方法,建立沉积环境识别系统等,都会对应用沉积物分析进行土壤侵蚀研究提供有力的研究手段和研究方法。

### 1.4 湖泊(水库)沉积物的元素地球化学分析

湖泊沉积物中既存在无机碳酸盐的溶蚀和结晶,又存在生物残骸有机碳的分解和转化。碳酸盐包括外源(Allogenic)、内生(Endogenic)和自生(Authigenic)3种来源<sup>[35]</sup>。沉积物中的有机碳和氮都是属于有机质分解过程中,赋存状态比较容易转化的元素,其变化取决于沉积物中微生物作用的程度<sup>[36]</sup>。埋藏在沉积物中的颗粒物较悬浮状态更有利于碳—氮比(C/N)的稳定和信息的保存。不同湖泊沉积物中,C/N的不同主要是其来源的差异。通常,有纤维束植物碎屑的C/N>20,无纤维束植物的C/N为4~12;湖泊中浮游动物的C/N低,浮游植物高;许多湖泊表层沉积物的C/N为6~14<sup>[37]</sup>。对于淡水而言,如果颗粒物中C/N、C/P和N/P比值高,可认为是陆源为主。湖泊颗粒物的碳—氮比(C/N),碳—磷比(C/P)和氮—磷比(N/P)值总体高于海洋。其中,近极地湖泊较低,赤道和温带贫营养湖泊较高;水寄宿时间长的湖泊较高;小湖较大湖更缺少N和P<sup>[38]</sup>。

沉积物中的总碳(TOC)、总氮(TN)是判断侵蚀状况的重要指标。由于土壤中有有机质和氮随着水土流失而被带走,并随着侵蚀泥沙的富集而富集<sup>[39]</sup>。当汇水流域内侵蚀加剧时,进入水体中的陆地植物残体便增多,沉积物或泥沙的 TOC 和 TN 也相应增高;当汇水流域内侵蚀减缓时,进入水体中的陆地植物残体减少,TOC 和 TN 也相应降低<sup>[40]</sup>,因此,沉积物中 TOC、TN 含量的变化,能反映沉积物中外源物质的输入量,从而来推断土壤侵蚀状况。

杨洪等在对武汉东湖沉积物的 C、N、P 的垂向分布研究中,发现在暖湿条件下,湖水上涨,湖泊扩张,内源有机质比例相对增大,C/N 比值相应减小。在较高温度条件下,有机质也易于分解而难以保存,使得 TOC 较低。但同时也发现在 I 号采样点的 1 000 ~ 800 a B. P. 之间,II 号采样点的 1 670 ~ 1 400 a B. P. 之间的 C/N 值较大,但 TOC 和 TN 并没有相应地显著增大,这表明陆源有机质在一定时段内在沉积物中大量增加,这可能是由于降雨量增大导致陆源物质输入增加<sup>[41]</sup>。而王苏民等在岱海也发现存在暴雨导致 C/N 比值突增的现象<sup>[42]</sup>。此外,杨洪在东湖的 330 a B. P., 350 a B. P. 时期,沉积物中 C/N 比值迅速增加,TOC 也在此时间处开始增加,分析与清朝康熙年间开始实行的“滋生人口,永不加赋”政策有关,由于人口激增,农民大量开垦沿湖荒地,种植粮食,导致区域内陆源物质向湖内大量输入,一方面随着陆源物质所占比例增加,TOC 比值升高。另一方面随着陆源物质所占比例增加,C/N 比值升高<sup>[41]</sup>。

另外,沉积物中的元素地球化学的比值,可以用来判断流域内物质的风化程度,再与气候的阶段变化相结合,就可以识别流域内侵蚀的强度。杨丽原等在山东南四湖沉积物的元素地球化学研究中,对高分辨率的连续沉积序列(1957—2000)测定其主要元素含量。根据聚类分析与人类活动进程的对比,认为 Cu、V、K、Ni、Be、Cr、Ti、Ba、Mg、Al、Fe、Zn、Na、Co、Ca 和 Sr 等元素的含量变化主要受流域侵蚀物质的变化控制;Hg、Pb、As 和 Mn 则主要来源于人为污染。受流域侵蚀物质来源控制的元素含量变化可以分为 2 个阶段:1957—1962 年为上升阶段,1962—2000 年为下降阶段,这与南四湖流域气候向干旱方向变化和历史记载资料一致。与流域侵蚀物质有关的元素变化是流域气候变化及人类改造活动的响应,由流域年降水量阶段平均值的下降趋势可以看出,向干旱化方向发展的流域气候变化是该组元素含量变化的主要原因,人类的改造活动如水利设施的建设加剧了元素含量减少的趋势<sup>[43]</sup>。应用沉积物的地球化学元素分析

来进行土壤侵蚀过程的研究,具有准确、直观等特点,但由于其测定方法复杂、测量仪器较昂贵等因素,在一定程度上限制了其应用的广泛性。

## 2 问题与展望

上述的几种基于沉积物分析的土壤侵蚀研究方法都有各自的优点和缺点,但是随着各种研究方法日趋成熟和未来湖泊科学的发展趋势,基于湖泊(水库)沉积物的研究在土壤侵蚀过程与动力学机制、水蚀和风蚀的环境效应等领域,都显示出巨大的发展和应用潜力。湖泊(水库)沉积物一方面能弥补历史和观测资料的不足,另一方面还可以借助放射性同位素、环境磁学和粒度等相应指标来提取区域土壤侵蚀和堆积的信息。这种特点尤其适用于缺乏水文泥沙观测数据的流域尺度上的研究。土壤侵蚀与非点源污染是一对密不可分的共生现象<sup>[44]</sup>,通过分析湖泊沉积物的有机物、金属、铵离子、磷酸盐以及其它毒性物质,可以很好的建立土壤侵蚀与非点源污染之间的相关关系,从而实现有效控制土壤侵蚀和非点源污染的目的。此外,利用磁性特征建立的沉积物来源的模型,拓展了土壤侵蚀学科领域新的研究思路和研究方法。今后,随着研究的深入以及多学科领域的交叉,基于沉积物分析的土壤侵蚀研究应与区域的土壤侵蚀研究方法相结合,将沉积物分析与区域的侵蚀方式、运移方式等相结合,实现时间尺度与空间尺度的结合,以及不同尺度间的有效转换,使研究方法更趋于完善,提高研究成果的可信度、精确度,从而推动土壤侵蚀研究的发展,更好地发挥其在生态环境建设中的作用。

### [ 参 考 文 献 ]

- [1] 唐克丽. 中国土壤侵蚀与水土保持学的特点及展望[J]. 水土保持研究, 1999, 6(2): 2—7.
- [2] 张振克, 王苏民. 中国湖泊沉积记录的环境演变: 研究进展与展望[J]. 地球科学进展, 1999, 14(4): 417—422.
- [3] 陈敬安, 万国江, 张峰, 等. 不同时间尺度下的湖泊沉积物环境记录——以沉积物粒度为例[J]. 中国科学(D 辑), 2003, 33(6): 563—568.
- [4] 石辉, 刘普灵, 田均良. 核示踪技术在土壤侵蚀研究中的应用[J]. 水土保持通报, 1997, 17(3): 44—49.
- [5] 白占国, 吴丰昌, 万曦, 等. 百花湖季节性水质恶化机理研究[J]. 重庆环境科学, 1995, 17(3): 10—14.
- [6] Krishnaswamy Marttn J. M., Meybeck M. Geochronology of lake sediments, Earth Planet Sci Lett, 1971, 11: 407.
- [7] Jerry C. Ritchie and J. Roger McHenry, Application of radioactive fallout <sup>137</sup>Cs for measuring soil erosion and sed-

- iment accumulation rates and patterns: A view, Environ. Qual. 1990, 19: 215—233.
- [ 8 ] 项亮, 王苏民, 薛滨. 切尔诺贝利核事故泄漏 $^{137}\text{Cs}$ 在苏皖地区湖泊沉积物中的蓄积及时标意义[ J ]. 海洋与湖沼, 1996, 27(2): 132—137.
- [ 9 ] Dan Royall. Use of mineral magnetic measurements to investigate soil erosion and sediment delivery in a small agricultural catchment in limestone terrain, Catena, 2001, 46: 15—34.
- [ 10 ] 万国江, P. Santschi, K. Farrenkoth. 瑞士 Greifen 湖新近沉积物中的 $^{137}\text{Cs}$ 分布及其计年[ J ]. 环境科学学报, 1985, 5(3): 360—364.
- [ 11 ] 张信宝. 有关湖泊沉积 $^{137}\text{Cs}$ 深度分布资料解译的探讨[ J ]. 山地学报, 2005, 23(3): 294—299.
- [ 12 ] Ionita I, Margineanu R M, Hurjui C. Assessment of the reservoir sedimentation rates of from  $^{137}\text{Cs}$  measurements in the Moldavian Plateau, Acta Geologica Hispanica, 2000, 35(3—4): 357—367.
- [ 13 ] Jones P A, Loughran R J, Elliott G L. Sedimentation in semi-arid zone reservoir in Australia determined by  $^{137}\text{Cs}$ , Acta geologica hispanica, 2000, 35(3—4): 329—338.
- [ 14 ] Ping Yan, Peijun Shi, Shangyu Gao,  $^{137}\text{Cs}$  dating of lacustrine sediments and human impacts on Dalian Lake, Qinghai Province, China, Catena, 2002, 47: 91—99.
- [ 15 ] 姚书春, 李世杰, 刘吉峰, 等. 太湖 THS 孔现代沉积物 $^{137}\text{Cs}$ 和 $^{210}\text{Pb}$ 的分布及计年[ J ]. 海洋地质与第四纪地质, 2006, 26(2): 79—83.
- [ 16 ] 孙立广, 谢周清, 赵俊琳, 等. 南极阿德雷岛湖泊沉积 $^{210}\text{Pb}$ 、 $^{137}\text{Cs}$ 定年及其环境意义[ J ]. 湖泊科学, 2001, 13(1): 93—96.
- [ 17 ] 霍坎松, 杨松. 湖泊沉积学原理[ M ]. 北京: 科学出版社, 1992.
- [ 18 ] R. Thompson, F. Oldfield, Environmental, Allen & Unwin(Publesher) Ltd. London, 1986.
- [ 19 ] Thompson R., Batterbee R. W., O' Sullivan P. E., Oldfield F., Magnetic susceptibility of lake sediments, Limnol. Oceanog, 1975(20): 687—698.
- [ 20 ] Thompson R, Morton D J. Magnetic susceptibility and particle-size distribution in recent sediments of the Loch Lomond drainage basin, Scotland, J. Sed. Petrol, 1979, 49: 801—812.
- [ 21 ] Walling D E, Peart M R, Oldfield F, et al. Suspended sediment sources identified by magnetic measurements, Nature, 1979, 281: 110—113.
- [ 22 ] Oldfield F, Rummery T A, Thompson R, et al. Identification of suspended sediment sources by means of magnetic measurements: some preliminary results, Water Resources Research, 1979, 15(2): 211—218.
- [ 23 ] Oldfield F, Maher B A, Donoghue J, et al. Particle-size related, mineral magnetic source sediment linkages in the Rhode River catchment, Maryland, USA, J. Geol. Soc. London, 1985, 142, 1035—1046.
- [ 24 ] Huang C C, O' Connell M. Recent land-use and soil-erosion history within a small catchment in Connemara, Western Ireland: evidence from lake sediments and documentary sources, Catena, 2000(41): 293—335.
- [ 25 ] Eriksson M G. Mineral magnetic analyses of sediment cores recording recent soil erosion history in central Tanzania, Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 152(1999): 365—383.
- [ 26 ] 王红亚, 霍豫英, 吴秀芹, 等. 贵州省关岭县石板桥水库沉积物的矿物磁性特征及其土壤侵蚀意义[ J ]. 地理研究, 2006, 25(5): 865—876.
- [ 27 ] Thompson R. Modelling magnetization data using Simplex. Phys. Earth Planet. Int., 1986, 42: 113—127.
- [ 28 ] Yu L, Oldfield F. A multivariate mixing for identifying sediment source from magnetic measurements. Quaternary Research, 1989, 32: 168—181.
- [ 29 ] 俞立中, 张卫国. 沉积物来源组成定量分析的磁诊断模型[ J ]. 科学通报, 1998, 43(19): 2034—2041.
- [ 30 ] Lees J A. Mineral magnetic properties of mixtures of environmental and synthetic materials: linear additivity and interaction effects, Geophys. J. Int., 1997, 131: 335—346.
- [ 31 ] Caitcheon G G. The significance of various sediment magnetic mineral fractions for tracing sediment sources in Killimicat Creek, Catena, 1998, 32: 131—142.
- [ 32 ] 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.
- [ 33 ] Wang H. Mineral magnetism of lacustrine sediments and Holocene palaeoenvironmental changes in Dali Nor area, southeast Inner Mongolia Plateau, China, Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2001, 170: 115—132.
- [ 34 ] 汪勇, 沈吉, 等. 陕北红碱淖沉积物粒度特征所揭示的环境变化[ J ]. 沉积学报, 2004, 24(3): 349—355.
- [ 35 ] Jones B F, Bowser C J. The mineralogy and related chemistry of lake sedimentation in Greifensee, Switzerland [ J ]. Chem Geol, 1987, 63: 181—196.
- [ 36 ] Sarasin G, Michard G, Gharib I A I, et al. Sedimentation rate and early diagenesis of particulate organic nitrogen and carbon in Aydat Lake(Puy de Dome, France) [ J ]. Chem Geol, 1992, 98(3/4): 3074—316.
- [ 37 ] Meyers P A, Ishiwatari R. Lacustrine organic geochemistry: An overview of indicators of organic matter sources and diagenesis in lake sediments [ J ]. Org Geochem, 1993, 20(7): 867—900.

- ter spatial aggregation on an agricultural non-point source pollution model[J]. *Journal of Hydrology*, 2000, 236: 35—53.
- [10] 王中根, 刘昌明, 黄友波. SWAT 模型的原理、结构及应用研究[J]. *地理科学进展*, 2003, 22(1): 79—86.
- [11] 张东, 张万昌. SWAT 2000 气象模拟器的随机模拟原理、验证及改进[J]. *资源科学*, 2004, 26(4): 28—36.
- [12] 王中根, 刘昌明, 吴险峰. 基于 DEM 的分布式水文模型研究综述[J]. *自然资源学报*, 2003, 18(2): 168—173.
- [13] 黄清华, 张万昌. SWAT 分布式水文模型在黑河干流山区流域的改进与应用[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2004, 28(2): 22—26.
- [14] 刘昌明, 李道峰, 田英, 等. 基于 DEM 的分布式水文模型在大尺度流域应用研究[J]. *地理科学进展*, 2003, 22(5): 437—445.
- [15] 朱利, 张万昌. 基于径流模拟的汉江上游区水资源对气候变化响应的研究[J]. *资源科学*, 2005, 27(2): 16—22.
- [16] 郭生练, 熊立华, 杨井, 等. 基于 DEM 的分布式流域水文物理模型[J]. *武汉水利电力大学学报*, 2000, 33(6): 1—5.
- [17] 张雪松, 郝芳华, 杨志峰, 等. 基于 SWAT 模型的中尺度流域产流产沙模拟研究[J]. *水土保持研究*, 2003, 10(4): 38—42.
- [18] 郭兆元. 陕西土壤[M]. 北京: 科学出版社, 1992.
- [19] 中国自然资源丛书编辑委员会. 中国自然资源丛书·陕西卷[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1995. 3—6, 392—399.
- [20] 张国义, 房明惠, 徐云, 等. RSI River Tools 系统及其应用介绍[J]. *计算机应用*, 2002, 22(8): 38—40.
- [21] Eckhardt K, Arnold J G. Automatic calibration of a distributed catchment model[J]. *Journal of Hydrology*, 2001, 251: 103—109.

(上接第 41 页)

- [38] Mayer L. Surface area control of organic carbon accumulation in continental shelf sediments[J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 1994, 58(4): 1271—1284.
- [39] 张兴昌, 邵明安. 侵蚀条件下土壤氮素流失对土壤和环境的影响[J]. *土壤和环境*, 2000, 9(3): 249—252.
- [40] Kaushal S, Binford M W. Relationship between C:N ratio of lake sediments, organic matter sources, and historical deforestation in Lake Pleasant, Massachusetts, USA. *Journal of Paleolimnology*, 1999, 22: 439—442.
- [41] 杨洪, 易朝路, 等. 武汉东湖沉积物碳氮磷垂向分布研究[J]. *地球化学*, 2004, 33(5): 507—514.
- [42] 王苏民, 余源盛, 吴瑞金, 等. 岱海[M]. 合肥: 中国科学技术出版社, 1990. 82—145.
- [43] 杨丽原, 沈吉, 张祖陆, 等. 近 40 a 来山东南四湖环境演化的元素地球化学记录[J]. *地球化学*, 2003, 32(5): 453—460.
- [44] 李清河, 李昌哲, 孙保平, 等. 土壤侵蚀与非点源污染预测控制[J]. *水土保持通报*, 1999, 19(4): 54—57.