

# 湖泊(水库)沉积物分析在土壤侵蚀研究中的运用

薛天翼, 王红亚

(北京大学城市与环境学院, 北京 100871)

**摘 要:**土壤侵蚀研究对于防治自然灾害, 实现土地的可持续利用具有重要的现实意义。由于一些地区长期以来水文观测资料较为匮乏, 针对过去时间段内的土壤侵蚀研究通常需要寻找替代指标。湖泊(水库)作为流域内侵蚀产物的“汇”, 其沉积物可不同程度地记录较长时间土壤侵蚀的具体特征, 因此, 基于湖泊(水库)沉积物分析的土壤侵蚀研究具有较强的应用价值和发展潜力。本文主要围绕确定土壤侵蚀年代, 反演侵蚀过程, 探寻沉积物来源的研究主线, 详细论述了湖泊(水库)沉积物中放射性同位素、矿物磁性、粒度以及地球化学指标的应用原理和方法, 分别总结了国内外学者利用湖泊(水库)沉积物在上述3个领域所取得的研究成果, 在此基础上讨论了目前研究中存在的不确定性, 并对未来的研究方向进行了展望。

**关 键 词:**湖泊(水库)沉积物; 土壤侵蚀; 磁性特征; 指纹示踪

## 1 引言

土壤侵蚀是当今全球性的重大环境问题之一, 其过程受气候变化、土地利用、土壤类型及地形地貌等多种因素的影响。长期的土壤侵蚀不仅造成土地退化、土壤肥力降低、引发沙漠化及石漠化等现象, 还会使河渠水道堵塞, 野生动植物栖息地遭受破坏。基于土壤侵蚀带来的巨大危害, 开展此项研究具有重要的现实意义。

土壤侵蚀是一个长期且持续的过程, 其强弱变化不会立即在环境中得到体现, 因此对于土壤侵蚀研究通常需要以长时间序列的实测数据为基础, 而在一些水文观测站点建立较晚、分布较少的地区, 现有的观测数据无法做到这一点(de Boer, 1997)。相比之下, 湖泊(水库)分布广泛, 且作为流域内土壤侵蚀的“汇”, 其沉积物中通常蕴含了不同时期侵蚀方式和侵蚀强度的真实信息, 具有时间序列连续、稳定性高的特点。

在早期的研究中, 湖泊(水库)沉积物分析多用于寻找侵蚀产物源地, 通过比较潜在侵蚀源与湖泊

(水库)沉积物的磁性参数, 可定性地指示土壤侵蚀的发生区域(Walling et al, 1979; Caitcheon, 1993; Foster et al, 1998)。随着 $^{137}\text{Cs}$ 和 $^{210}\text{Pb}$ 等定年手段应用于湖泊(水库)沉积物分析, 定量地确定土壤侵蚀的发生过程成为可能, 通过将历史事件与不同时期的沉积速率进行比较分析, 可以发现强降雨和人类活动是影响研究区土壤侵蚀程度最主要的2个因素(Foster et al, 1994; Owens et al, 2002)。在反演土壤侵蚀的过程中, 为提升实验结果的准确性并拓展其研究角度, 越来越多的实验指标被运用于湖泊(水库)沉积物分析。其中沉积物粒度与矿物磁性之间的相关性明显, 其粒度大小变化可在一定程度上反映研究区土壤侵蚀的强度变化(Foster et al, 1998; Booth et al, 2005; Gao et al, 2016)。与粒度指标类似, 利用湖泊(水库)沉积物中的化学指标也可反演一定时期的土壤侵蚀过程, 且地球化学指标种类多样, 特点不一, 除碳—氮比值(C/N)和全有机碳含量(TOC)等常用指标外, 脂质分子指标和化学元素指标也极具发展潜力(Olsson et al, 1997; Lammers et al, 2013; Boyle et al, 2011)。随着土壤侵蚀研究的

收稿日期: 2017-06-21; 修订日期: 2017-10-13。

基金项目: 国家自然科学基金项目(41571130044) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.41571130044]。

作者简介: 薛天翼(1994-), 男, 陕西榆林人, 硕士研究生, 主要从事土地科学研究, Email: xty@pku.edu.cn。

引用格式: 薛天翼, 王红亚. 2018. 湖泊(水库)沉积物分析在土壤侵蚀研究中的运用[J]. 地理科学进展, 37(7): 890-900. [Xue T Y, Wang H Y. 2018. Soil erosion investigation based on sediments in lakes and reservoirs[J]. Progress in Geography, 37(7): 890-900.]. DOI: 10.18306/dlkxjz.2018.07.003

不断发展,定性分析向定量分析的转变已逐渐成为该研究领域最主要的发展方向。20世纪90年代,复合指纹示踪技术实现了这一跨越性的转变,基于湖泊(水库)沉积物分析,该项技术可有效地识别侵蚀产物的多种来源,并定量评估不同来源所占比例(Walling, 2005; 郭进等, 2014)。

总的来说,以湖泊(水库)沉积物为样品,能有效地确定土壤侵蚀年代,反演土壤侵蚀过程并对沉积物来源进行示踪。在此基础上,结合区域气候变化和土地利用信息,可在一定程度上揭示研究区内影响土壤侵蚀的具体因素,为预防和治理土壤侵蚀、合理开发和利用水土资源、建设良性生态环境提供有效的科学依据(吕明辉等, 2007)。

本文基于湖泊(水库)沉积物在土壤侵蚀研究中的发展现状,从确定土壤侵蚀发生年代、重建土壤侵蚀发生过程、探寻沉积物来源3个方面分别介绍利用湖泊(水库)沉积物进行土壤侵蚀研究的具体方法,展示近年来国内外学者在该领域所取得的研究成果,并对存在的问题和未来的发展方向进行展望。

## 2 确定土壤侵蚀发生年代

精准地确定沉积物的堆积年代,是研究过去土壤侵蚀的基础(李春梅等, 2010)。相比于古环境研究中常用的光释光及碳-14( $^{14}\text{C}$ )定年技术,基于放射性核素铯-137( $^{137}\text{Cs}$ )及铅-210( $^{210}\text{Pb}$ )比活度分析的定年手段虽时间尺度较短,但定年结果分辨率高,适用于较短时间尺度的定年需要。

$^{137}\text{Cs}$ 是半衰期为30.2 a的核裂变产物,主要来源于20世纪中叶的大气层核试验。最早的 $^{137}\text{Cs}$ 沉降发生于1954年前后,但随时间流逝,痕迹已不明显。目前较为公认的沉降峰值为1963-1964年前后;受切尔诺贝利核泄漏影响,1986年有时也被用于辅助指标(Brown et al, 1981; Ritchie et al, 1990; Rowan et al, 1993)。此外,部分学者认为,受一些非条约国大气层核试验的影响,1974-1975也可作为一个辅助指标(张燕等, 2005)。

沉降后的 $^{137}\text{Cs}$ 受土壤颗粒尤其是较细土壤颗粒的紧密吸附,并随土壤颗粒发生迁移。湖泊(水库)沉积物中的 $^{137}\text{Cs}$ 主要有2种来源,分别为附着于土壤颗粒被侵蚀入水体的 $^{137}\text{Cs}$ 和自大气中直接沉降入湖的 $^{137}\text{Cs}$ (Xiang et al, 2002)。在小流域内, $^{137}\text{Cs}$ 在水体中的滞留期不长,因此 $^{137}\text{Cs}$ 到达湖底的年份

与沉降于水体表面的年份相差不大;但在大流域内,需要考虑 $^{137}\text{Cs}$ 沉积滞后的影响。总的来看,因为大气中 $^{137}\text{Cs}$ 沉降年份突出,加之沉降后与沉积物紧密结合,使得 $^{137}\text{Cs}$ 可作为沉积物定年的有效指标(Owens et al, 1997)。基于定年结果,可计算一定时间范围内的土壤侵蚀速率。

$^{210}\text{Pb}$ 是铀系的衰变子体,广泛存在于自然环境中,其半衰期为22.3 a,可用于百年尺度的沉积物定年。大气中的 $^{210}\text{Pb}$ 通过干、湿沉降进入湖泊、水库,并蓄积在沉积物中,沉积物中蓄积的这部分 $^{210}\text{Pb}$ 因不与其母体镭-226( $^{226}\text{Ra}$ )共存和平衡,通称为过剩 $^{210}\text{Pb}$ ( $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ ),通过对沉积物柱芯中不同层节样品的 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 比活度进行分析,便可计算沉积速率或某一层节的沉积年龄,常用的方法主要有恒定沉积通量模式(constant initial concentration, CIC)和恒定放射性通量模式(constant rate of supply, CRS)(Appleby et al, 1978)。

CIC模式应用的前提条件是沉积物沉积时的初始比活度恒定,其公式如下:

$$t = \lambda^{-1} \ln(C_0/C) \quad (1)$$

式中: $t$ 为沉积物某一层结的沉积年龄; $C_0$ 为表层沉积物比活度(Bq/kg); $C$ 为沉积物在该层的比活度(Bq/kg); $\lambda$ 为 $^{210}\text{Pb}$ 衰变常数( $\lambda=0.03114$ )。

CRS模式应用的前提条件为输入的沉积物中 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 通量(蓄积量)是恒定的,其公式为:

$$t = -\ln(1 - A_x/A)/\lambda \quad (2)$$

式中: $t$ 为沉积物某一层结的沉积年龄; $A_x$ 为 $x$ 深度以上的蓄积量(Bq/cm<sup>2</sup>); $A$ 为总的蓄积量(Bq/cm<sup>2</sup>); $\lambda$ 为 $^{210}\text{Pb}$ 衰变常数( $\lambda=0.03114$ )。

Foster等(1994)在对英国南部德文郡(Devon)的土壤侵蚀研究中,选择了Old Mill水库作为采样地,通过沉积物的 $^{137}\text{Cs}$ 定年,将流域内侵蚀过程分为4个时段并分别计算了平均沉积速率,见图1。研究发现,相比于第二次世界大战时期,研究区内沉积物总量在20世纪90年代增长了4倍多,土壤侵蚀强度明显加剧,通过与土地利用变化进行比较,作者将这一现象归结为战后畜牧业发展所造成的地表植被破坏。此外,在假设大气直接沉降至水库表面的 $^{137}\text{Cs}$ 全部沉积的情况下,水库沉积物中的 $^{137}\text{Cs}$ 仍有2/3是随土壤侵蚀而至,可见被土壤颗粒吸附并随侵蚀过程进入水体的 $^{137}\text{Cs}$ 是水库沉积物中 $^{137}\text{Cs}$ 的主要来源,这也印证了 $^{137}\text{Cs}$ 分析可反映土壤侵蚀

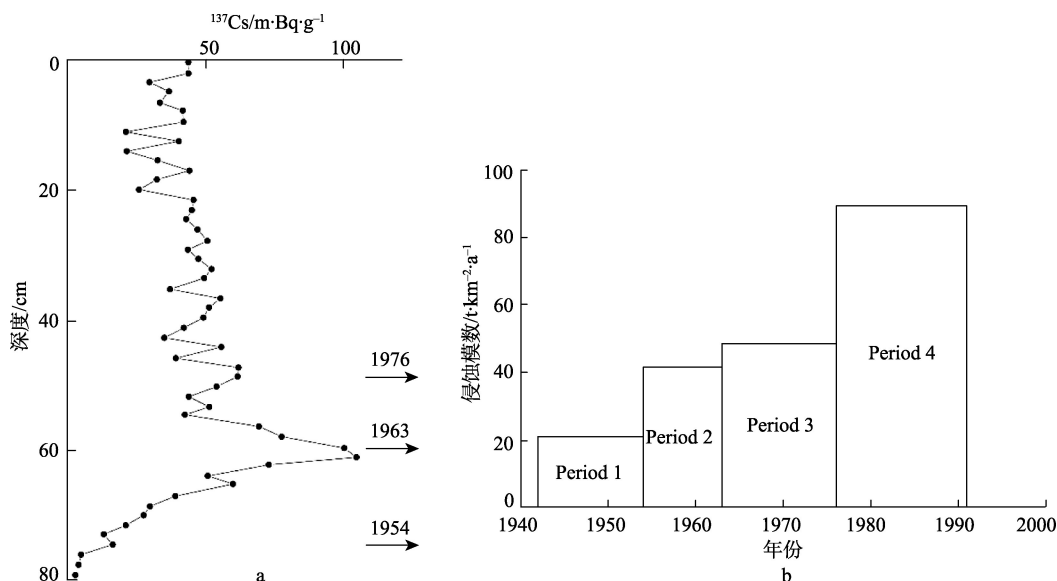


图1 Old Mill水库沉积物 $^{137}\text{Cs}$ 定年结果及沉积序列图(改自Foster et al, 1994)

Fig.1  $^{137}\text{Cs}$  dating and sedimentary sequence of Old Mill reservoir (from Foster et al, 1994)

的强度变化。

Owens 等(2002)利用 $^{137}\text{Cs}$ 和 $^{210}\text{Pb}$ 对苏格兰Tweed流域河漫滩沉积物进行定年,并根据定年结果计算了不同时段内流域的沉积速率。研究显示,流域内沉积速率自1963年之后有了显著上升。利用降水及土地利用数据与沉积速率进行对比分析,结果表明,降水量变化无法对沉积速率变化作出合理的解释,而土地利用变化与沉积速率之间存在明显的联系,由此可见,在研究区内土地利用变化更能影响土壤侵蚀的强弱。利用同样的方法,陈诗越等(2009)通过 $^{137}\text{Cs}$ 和 $^{210}\text{Pb}$ 定年了山东省东平湖湖泊沉积物柱状岩芯的年代序列,根据沉积速率与记录资料的对比分析,作者认为黄河泛滥与人类活动都是影响东平湖沉积速率变化的重要因素。

虽然利用 $^{137}\text{Cs}$ 和 $^{210}\text{Pb}$ 沉积速率反演土壤侵蚀的强弱程度存在一定的有效性,但相比磁化率等其他指标,其结果反映的仅为几个节点间的平均沉积速率,代表性较弱;因此对于 $^{137}\text{Cs}$ 和 $^{210}\text{Pb}$ 定年而言,其价值更多体现在确定沉积序列年代上,从而为沉积物中其他指标的分析提供一个时间参考。例如, Das 等(2008)利用 $^{137}\text{Cs}$ 和 $^{210}\text{Pb}$ 对南非最大的淡水湖Zeekoevlei湖沉积物柱芯进行了定年,用于分析各个时期人类活动对湖泊化学性质的影响。Zan 等(2012)同样对中国五大淡水湖之一的巢湖进行了沉积物 $^{137}\text{Cs}$ 和 $^{210}\text{Pb}$ 定年,从而为研究不同时段湖泊化学性质的变化情况提供了时间参考。

综上所述, $^{137}\text{Cs}$ 和 $^{210}\text{Pb}$ 定年已成为短时间尺度定年中最为常用的方法,即便如此,其定年结果仍然存在一定的不确定性。 $^{137}\text{Cs}$ 和 $^{210}\text{Pb}$ 定年结果的准确性除受样品质量和实验过程中误差的影响,还取决于不同时段内自然环境是否稳定,放射性核素在沉积物中的再迁移以及极端天气事件的发生都会降低实验结果的可靠性(Foster et al, 1994)。相比于 $^{210}\text{Pb}$ 定年, $^{137}\text{Cs}$ 来源确定且单一,时间节点清晰,更便于定量研究(魏彦昌等, 2006),但涉及的尺度较短; $^{210}\text{Pb}$ 虽涉及的时间尺度更长,但前提假设十分严格(Appleby et al, 1990)。因此,将 $^{210}\text{Pb}$ 与 $^{137}\text{Cs}$ 结合使用,更能增加定年结果的准确性。

### 3 重建土壤侵蚀发生过程

#### 3.1 基于环境磁学的土壤侵蚀研究

与湖泊(水库)中磁化率较低的自生沉积物相比,随土壤侵蚀进入水体的沉积物通常蕴含着丰富的铁磁性矿物(Dearing, 1999),可被视为湖泊(水库)沉积物中磁性矿物的主要来源(Oldfield, 1991)。值得注意的是,在湖泊(水库)沉积物氧化还原电位较低的情况下,丰富的有机质和大量的还原细菌可使水体内自生矿物含量增加,从而有可能影响磁化率测量结果的准确性(胡守云等, 2001)。但是,由于土壤侵蚀研究的时间尺度较短,自生矿物对于沉积物磁化特征的影响一般较小,因此往往可以忽略不



计。总的来说,湖泊(水库)沉积物的矿物磁性主要来自流域内被侵蚀的土壤,其磁性强弱与流域内土壤侵蚀的强度有直接联系。通过研究湖泊(水库)沉积物的磁性特征,可在一定程度上反演不同时期流域内土壤侵蚀过程,探寻影响侵蚀强弱变化的具体因素。

根据近年来国内外学者在环境磁学领域的研究成果,可以总结出一些磁性矿物指标在土壤侵蚀研究中所具有的指示意义。

在对阿尔巴尼亚布特林特地区(Butrint)的研究中,Hounslow等(2004)利用矿物磁性指标反演了该地区450AD–1200AD期间土壤侵蚀的变化情况,并指出低频磁化率( $X_{lf}$ )可用于表示所有矿物磁性的丰富度,频率磁化率( $X_{fd}\%$ )一般表示超顺磁颗粒(superparamagnetic, SP)的相对含量。超顺磁颗粒多来自表土层,因此 $X_{lf}$ 伴随着 $X_{fd}\%$ 的升高反映了来自表土层土壤侵蚀量的增大。Shen等(2008)对英国Crummock Water的研究指出,亚铁磁性矿物多来自土壤表层,使得 $X_{lf}$ 、 $X_{fd}\%$ 、非磁滞剩磁(ARM)和饱和等温剩磁(SIRM)在土壤表层较高,较细SP颗粒和SSD(stable-single domain, SSD)颗粒也多集中于此;而土壤较低层位或母质层中的磁性矿物主要包含反铁磁性矿物,较粗的多畴颗粒(multi-domain, MD)和假单畴颗粒(pseudo-single domain, PSD)所占比例相对较高,硬等温剩磁(HIRM)数值较高。

上述研究从原理上剖析了矿物磁性与土壤侵蚀间的相互联系,为利用湖泊(水库)沉积物磁性特征研究流域土壤侵蚀过程提供了理论依据。总的来看,当侵蚀较弱即主要发生在土壤浅层时,较多的细粒亚铁磁性矿物遭到侵蚀,沉积物中 $X_{lf}$ 、 $X_{fd}\%$ 、ARM、SIRM和相应等温剩磁( $IRM_{20mT}$ )的含量也因此相对较高;当侵蚀加剧致使土壤深层受到侵蚀时,更多的粗颗粒矿物被携带至湖泊(水库),沉积物中 $IRM_{-100mT}$ /SIRM会相对升高。据此,通过测量沉积物柱芯中磁化率的变化趋势,便可反演不同时期的土壤侵蚀状况。

Eriksson等(1997)在 $^{210}\text{Pb}$ 定年的基础上,利用磁性参数反演了坦桑尼亚中部Haubi湖流域的土壤侵蚀历史,根据沉积物柱芯中SIRM、ARM等磁性参数的变化趋势,作者判断取样地早期为季节性沼泽,沉积物中富含反铁磁性矿物;自1902年湖泊形成以来,流域内土壤侵蚀加剧,出现了1945–1950年和1955–1990年的侵蚀强烈期,通过对比,作者将土

壤侵蚀强度变化的原因归结为受人类活动的影响。利用同样的方法,Thorndycraft等(1998)在对法国东部安纳西湖(Annecy)沉积物的研究中,分析了沉积物4个时段的磁性参数,结果表明,SP和SD(single-domain, SD)颗粒在沉积物中占大多数,在此基础上结合化学分析和孢粉分析,推断出安纳西湖沉积物主要来自土壤表层,且4个时段的侵蚀都与单个的洪水事件有关。

除反演侵蚀过程外,为更好地克服放射性核素测量成本高、耗时长等问题,Ayoubi等(2012)还尝试利用沉积物样品中的矿物磁性参数与 $^{137}\text{Cs}$ 含量进行相关性分析,试图为 $^{137}\text{Cs}$ 寻找替代指标。结果表明,研究区样品中低频磁化率 $X_{lf}$ 与 $^{137}\text{Cs}$ 的非线性拟合结果优于线性拟合,两者间存在明显的正相关, $R^2=0.45$ ;在此基础上进一步利用 $X_{lf}$ 与可提取的钾元素K对 $^{137}\text{Cs}$ 进行多元线性拟合, $R^2=0.61$ ,相关性更加明显,从而肯定了利用矿物磁性作为 $^{137}\text{Cs}$ 替代指标的可能性。

利用矿物磁性反演流域土壤侵蚀过程的研究,通常忽略湖泊(水库)中自生矿物的影响,而认为湖泊(水库)沉积物中的矿物磁性主要来自流域内被侵蚀的土壤。需要注意的是,在一些特殊环境下,沉积物中自生矿物的存在会对研究结果造成极大的影响。在对美国宾夕法尼亚州伊利湖的研究中,Kim等(2005)便发现湖泊沉积物中过去几百年间的矿物磁性主要来自细菌磁铁矿,大量的自生矿物掩盖了被土壤侵蚀带入湖泊的磁性信息,使得针对侵蚀过程的分析无法进行。由此可见,利用沉积物磁性参数研究土壤侵蚀仍然存在其不确定性,需要在今后的研究中加以改善。但不可否认的是,在大多数情况下,针对湖泊(水库)沉积物的磁性测量可提供有关沉积物来源和沉积过程的重要信息,而相比单独利用磁性参数进行分析,将沉积物磁性参数作为土壤侵蚀多指标研究方法中的关键一环,更能提高研究结果的准确性(Oldfield, 2013; Oldfield et al, 2010)。

### 3.2 基于沉积物粒度的土壤侵蚀研究

沉积物粒度是衡量沉积环境的一种代用指标,在研究百年尺度土壤侵蚀的过程中,湖泊(水库)水位变化很小,降雨量的变化将成为影响沉积物粒度的主要因素。降雨量大的年份,地表径流发育,土壤侵蚀较强,使得更多的粗粒物质被搬运入水体;降雨量小的年份,地表径流较弱,沉积于水体中的

物质粒度较小(陈敬安等, 2003; 吴霜等, 2017)。除受自然因素影响外, 人为因素对粒度的作用也不可忽视, 植被砍伐和过度放牧等行为都会引起侵蚀加剧从而使沉积物粒度变大。因此, 在利用湖泊(水库)沉积物反演土壤侵蚀的过程中需要对粒度的变化趋势加以考虑。

以上观点在 Gao 等(2015)对中国重庆龙溪流域的研究中得到证实。在对长寿水库沉积物的分析过程中, 通过将不同时间段降雨侵蚀力强度和沉积物颗粒大小进行对比, 作者确定了降雨强度是决定沉积物颗粒大小的重要因素之一, 极端降雨事件会使深层砂砾受到侵蚀从而降低黏粒土壤在沉积物中的比例(Tanaka et al, 2014); 但随着人类改变自然能力的增强, 土地利用方式的转变对沉积物粒度的影响显得更加突出, 1982–1988 年家庭联产责任制承包制的实施和 1990 年以来生态保护工程的启动, 都深刻地影响着研究流域相应时段的土壤侵蚀强度, 并在沉积物粒度序列中得到体现。

湖泊(水库)沉积物粒度除可反演研究区的土壤侵蚀过程外, 其与矿物磁性之间的相关关系一直以来也是国内外科学家研究的重点。Dearing 等(1981)、Dearing 等(1986)在对威尔士 Llyn Peris 湖流域侵蚀过程的研究中指出, 当搬运入湖的磁性矿物种类一定时, 磁化率波动的主要因素是侵蚀产物颗粒的粒度发生了变化, 并总结出湖泊(水库)沉积物粒度与磁性参数之间存在相关关系。

Foster 等(1998)在对英国德文郡南部 Old Mill 水库流域的研究中, 以  $63\ \mu\text{m}$  为界分析了粒度与沉积物磁性之间的关系, 指出:  $X_{\text{ir}}$ 、ARM 不论沉积物粒度变粗变细, 数值都会增加;  $X_{\text{sd}}$  和  $X_{\text{sd}}\%$  随着粒度变细逐渐增加, HIRM 和  $\text{IRM}_{800\text{mT}}$  随着颗粒越粗数值越大, 并将颗粒粒度与磁性参数进行拟合, 取得了不错的效果。Booth 等(2005)也指出, 利用矿物磁性作为沉积物粒度的代用指标具有一定的可行性。

基于粒度与磁化率之间的关系, 在研究土壤侵蚀的过程中通常将两者结合进行分析, 以提升结果的可信度。Wang 等(2008)和 Wang 等(2011)在对贵州石板桥水库和小河水库的研究中, 结合磁化率、粒度等参数, 反演了流域内近 50 年来的土壤侵蚀状况。

当然, 通过湖泊(水库)沉积物粒度分析研究土壤侵蚀过程的方法并不仅限于此。张晴华等(2014)将沉积物粒度与植物孢粉信息相结合, 对广东黄洞

水库沉积物所反映的近 50 年土壤侵蚀信息进行了研究, 结果表明: 在孢粉浓度较低的时期, 植被覆盖度较差, 此时沉积物粒度的变化通常与降雨事件相对应; 但在孢粉浓度较高的时期, 植被覆盖度较好, 沉积物粒度变化则由人类活动所决定。此外, 王小雷等(2010)在对云南抚仙湖近代环境变化的研究中, 通过选取平均粒度、分选系数、偏度等粒度指标, 结合  $^{137}\text{Cs}$  和  $^{210}\text{Pb}$  的定年结果, 将抚仙湖环境演变过程大致划分为 4 个阶段, 以此确定不同阶段流域内的土壤侵蚀状况, 并结合土地利用信息, 证实了相应历史时期强烈的人类活动(围湖造田、砍伐森林等)是影响抚仙湖沉积环境的一个重要因素。

虽然利用沉积物粒度进行土壤侵蚀研究具有一定的有效性, 但以上分析均属于定性分析, 且受泥沙输移过程和沉积环境等外部因素的影响, 通过沉积物粒度分析反演土壤侵蚀过程误差较大, 通常需与其他参数结合使用, 以提升实验结果的准确性。在今后的研究中, 寻找更为有效的粒度指标以降低实验误差, 将沉积物粒度运用于土壤侵蚀模型以推动量化进程, 将是该研究领域主要的发展方向。

### 3.3 基于地球化学元素的土壤侵蚀研究

湖泊沉积物地球化学指标受控于有机质的来源、运移路径、沉积过程以及保存能力等, 反映的信息丰富, 可用于短时间尺度流域土壤侵蚀过程的重建, 其中常用的有机地球化学指标包括碳—氮比值(C/N)和全有机碳含量(TOC)。

湖相沉积物中的有机质有 2 种来源, 分别为外源的陆生植物和内源的水生生物(Meyers et al, 1999)。水生生物降解产物含有较多的蛋白质, C/N 一般较低; 而陆源植物富含木质素且蛋白质较少, C/N 通常大于 20。可见, 当流域内土壤侵蚀增强, 进入水体的陆生植物残体增多, 沉积物中的 C/N 便会相应上升; 当流域内土壤侵蚀强度减弱, 进入水体的陆生植物残体减少, 则沉积物中的 C/N 便会降低。

TOC 可反映湖泊及流域的初级生产力状况, 即沉积物中有机质的含量, 与 C/N 类似。当侵蚀加剧, 进入水体的陆生植物残体增多, TOC 上升; 当侵蚀减弱, 进入水体的陆生植物残体减少, TOC 降低。可以看出, 湖泊(水库)沉积物中 TOC 与 C/N 的变化趋势通常较为一致(图 2)。

Olsson 等(1997)在对瑞典南部湖泊的研究中指



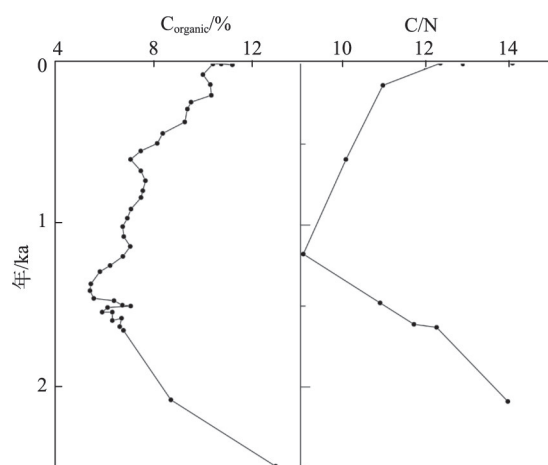


图2 湖泊沉积物中TOC浓度和C/N变化图

(改自 Meyers et al, 1999)

Fig.2 Variation of TOC concentration and C/N in lake sediments(from Meyers et al, 1999)

出,该地区C/N的升高与土壤侵蚀的加剧紧密相关,这一观点在Kaushal等(1999)的研究中也有体现。18世纪末美国马萨诸塞州大规模的森林砍伐正好同Pleasant湖沉积物中C/N的升高相同步,显然森林的砍伐一方面会加剧土壤侵蚀过程,另一方面会将大量的木屑颗粒带入湖中,从而改变湖泊沉积物的化学性质。Routh等(2004)对瑞典Brunns-viken湖沉积物的分析还表明C/N和TOC同大规模城市建设之间的联系,城市的发展不仅改变当地的土壤侵蚀状况,随之而来的人为污染也将对湖泊沉积的理化性质产生十分重要的影响。

需要注意的是,对于TOC和C/N的分析一定要与实际情况相结合,Fisher等(2003)在英国Gormire湖的研究就发现,高强度的土地利用和森林砍伐对应着C/N的大幅降低,而这一异常状况的出现可能也是土壤侵蚀增强的结果,即伴随着土壤侵蚀的加剧,更多的营养物质被带入湖泊,水生植被和内源有机质迅速增长,从而使得C/N逐渐降低;同样,TOC的降低也不总是指示侵蚀的减弱,更多的成矿物质随土壤侵蚀的加剧不断流入湖泊将在一定程度上稀释有机质的浓度,造成TOC的降低(Enters et al, 2006)。为了避免上述影响,Meyers(2003)尝试使用有机质沉积速率MARs(mass accumulation rates)研究沉积环境的变化,并取得了不错的效果。

除TOC和C/N外,总氮(TN)、碳—硫比(C:S)、有机稳定同位素 $\delta^{13}C_{org}$ 等也都是土壤侵蚀研究领域中常用的地球化学指标,在发展并完善这些指标的同时,为更好地表征流域的土壤侵蚀过程,学者们

提出和使用了一些新的地球化学指标,并取得了不错的效果(张灿等, 2015)。Boyle等(2011)就曾利用湖泊沉积物中Ti的浓度作为土壤侵蚀强度变化的指标,并采用Ti/K指示侵蚀来源的变化情况;当底层土壤侵蚀越强烈Ti/K越大,反之亦然。此外,利用脂质分子判断沉积物中有机质来源也十分有效,基于其自身特性,相比TOC、C/N等传统的有机质指标,沉积物中的脂质分子对于流域的环境变化显得更为敏感(Lammers et al, 2013)。一般认为,短链脂质分子源于内源水生生物,而长链脂质分子则来自外源陆生生物(O'Beirne et al, 2015),两者的比率可在一定程度上反映内源和外源有机质对湖泊(水库)沉积物中有机质的贡献程度,从而反演土壤侵蚀状况。结合脂质分子和化学元素指标,通过沉积物的时间序列分析,Zhang等(2016)成功地反演了泸沽湖周边环境在过去200年间的变化过程,并强调了人类活动在其中扮演的主导作用。

## 4 沉积物来源示踪

### 4.1 指纹示踪技术的应用

基于湖泊(水库)沉积物分析,除反映气候—环境变化和人类活动对土壤侵蚀强弱的影响外,还可结合地表信息识别不同时期沉积物的来源。通过对比沉积物与土壤的特定理化性质,进而寻找沉积物来源的方法被统称为“指纹示踪技术”,该方法于20世纪70年代兴起,并在世界各地得到了广泛的使用。

将磁性参数作为“示踪因子”进行指纹示踪是诸多示踪方法中发展较早的一类(Stott, 1986; Yu et al, 1989)。David等(1998)在对英国Groby湖的研究中明确说明了:流域内表土层高 $X_{ir}$ 和 $X_{fd}$ ,而底土层 $X_{ir}$ 和 $X_{fd}$ 较低,由此可相对容易地判断沉积物主要源自流域表层土壤还是底层土壤。Foster(1998)的研究结果表明,表土层与底土层相比在 $X_{ir}$ 、 $X_{fd}$ 、 $IRM_{(0.8T-0.1T)}$ 以及 $IRM_{(-0.1T)}/IRM_{(0.8T)}$ 上数值较高,在HIRM上较低;而在 $X_{fd}\%$ 和ARM上两者差距不大。此前,Dearing等(1986)还提出了利用SIRM/ $X_{ir}$ 分辨表土和底土对沉积物的相对贡献程度方法。

除反演沉积物的相对来源外,利用磁性参数还可追寻具体的沉积物来源。Oldfield(1979)等以 $X_{ir}$ 、SIRM和Corecivity of IRM为指标,对比了湖泊悬浮沉积物与不同土地利用条件下土壤样品的差异,结

果表明,研究区内湖泊悬浮沉积物磁性参数介于林地表层土壤和母质之间,与耕地表层土壤最为相似,这说明在当时的环境条件下,耕地是土壤侵蚀最强烈的地区。

随着研究的逐渐深入,越来越多的“示踪因子”被引入指纹示踪技术,除最初的矿物地球化学指标和磁性参数外,沉积物颜色、植物孢粉种类、同位素特征特别是放射性核素特征都被尝试用于进行沉积物示踪(Walling, 2005)。在英国德文郡的研究中,Foster(1996)首先利用矿物磁性确定了土壤表层为主要侵蚀源,在此基础上通过对比河漫滩表层沉积物、牧场表层1 cm土壤和耕地表层1 cm土壤的 $^{137}\text{Cs}$ 浓度,证明牧场是研究流域自1970s以来主要的侵蚀源地。此外,在对南非Karoo Uplands 2个小流域的研究中,Foster等(2007)还验证了利用 $^{210}\text{Pb}$ 示踪沉积物来源的有效性。

#### 4.2 复合指纹示踪技术

20世纪90年代,有关指纹示踪技术的研究迎来了跨越性的发展,定量混合模型与复合指纹示踪技术的结合使得定量评估不同沉积物来源占比成为可能(Walling, 2005)。复合指纹示踪技术通过选取多个差异性最大的“示踪因子”,结合多变量线性混合模型便可有效地获取不同沉积物来源的相对比例。郭进等(2014)以三峡库区一个封闭式农业单元小流域为研究区,对复合指纹示踪技术定量辨析塘库沉积泥沙来源进行了尝试。研究过程中首先定性地划分了旱地、水田、林草地3种泥沙来源,通过指纹因子非参数检验和多元判别分析,将土壤全碳、放射性核素 $^{137}\text{Cs}$ 、 $^{226}\text{Ra}$ 、碱金属K及重金属Zn等参数共同组成了最优复合指纹因子组,结合Walling模型,定量揭示了3种来源相对淤沙贡献分别为:旱地约84%,林草地约2%,水田约14%,有效地验证了复合指纹示踪技术在辨析小流域泥沙来源中所发挥的显著作用。在对法国Louroux农业流域的研究中,Le等(2015)以锶同位素比值( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ )为“示踪因子”,成功地确定了研究流域沉积物的2个主要来源——悬浮颗粒物、碳酸岩,并在此基础上利用质量平衡方程,给出了1955–2013年间4个不同时期2种沉积物来源的相对比例。

复合指纹示踪技术成功地将定量分析引入沉积物示踪研究中,使得对沉积物来源的识别不再限于土壤表层和底层的辨析以及单一潜在源地的定性指示,成为了进行土壤侵蚀研究的重要手段。但

是复合指纹示踪技术的运用依然存在一定的局限性,对流域内潜在泥沙来源的定性划分是否准确,“示踪因子”的选择是否合适,以及其在侵蚀运输过程中是否会发生变化,这些问题都将影响最终的实验结果(Pulley et al, 2015; Sadeghi et al, 2014),为得到更加准确的土壤侵蚀信息,针对复合指纹示踪技术,有必要在今后的研究中对其进行更加深入的改进和优化(唐强等, 2013)。

## 5 问题与展望

根据上述3个方面的讨论和总结,可以肯定的是利用湖泊(水库)沉积物研究土壤侵蚀具有其特有的优势。关于土壤/水库沉积物的研究一方面可以复原曾经发生的土壤侵蚀过程,弥补观测资料的不足;另一方面还可对沉积物来源进行示踪,探寻侵蚀的发生源地。以上2点对土壤侵蚀研究具有重要的意义,表明利用湖泊(水库)沉积物研究土壤侵蚀具有很大的发展潜力和应用价值。但不可否认的是,基于湖泊(水库)的土壤侵蚀研究同样也存在着以下一些缺陷:首先,研究中对于突发性灾变事件的识别尚无准确的方法,这在土壤侵蚀研究的各个领域都有所体现;此外,无论是定年、反演侵蚀过程还是示踪沉积物来源,从研究区的选取、样品的采集到实验处理和数据分析,每一步都存在不确定的因素,比如研究区划定时遵从的湖泊、流域面积比取多少合适,采样点应选择湖泊中什么位置,放射性核素是否存在沉积滞后或沉积后再迁移等,为确保实验结果的准确性,研究者必须深入了解研究过程中包含的理论问题,选取最优方式,以减少可能出现的误差。

随着土壤侵蚀研究的日趋成熟,研究方法从定性到定量的转变也随之发生,模型的使用将越加广泛,湖泊(水库)沉积物数据与模型的结合将是土壤侵蚀研究中的重要一环。对于土壤侵蚀速率模型和沉积物示踪模型来说,有关湖泊(水库)沉积物的数据已是模型中十分重要的组成部分,可以说,这一结合有效地拓宽了土壤侵蚀定量研究的思路和方法。值得注意的是,基于现阶段的研究成果,尽管未来的气候变化很有可能会加剧土壤侵蚀程度,但通过模型可以证明,相比于气候变化,土地利用变化对土壤侵蚀的影响将会更加突出,因此人类影响因子也将是未来模型研究领域不可忽视的组

成部分(Boardman, 2006)。

未来很长时期内,土壤侵蚀都将是人类面临的重大环境问题之一,基于湖泊(水库)沉积物的土壤侵蚀研究将为开展水土保持工作提供有效的支持。此外,将湖泊(水库)沉积物信息与3S技术、地球化学方法等多学科领域相交叉,发展并完善针对不同环境类型、不同时空尺度的研究手段,对土壤侵蚀从发生机制、沉积物运移方式到生态响应和人为治理的多个角度开展深入研究,将极大地推动土壤侵蚀研究领域的进步和发展,从而帮助人类更有效地应对未来气候环境下愈加严峻的挑战。

### 参考文献(References)

- 陈敬安,万国江,张峰,等. 2003. 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:地球科学, 33(6): 563-568. [Chen J A, Wan G J, Zhang F, et al. 2003. Environmental records of lacustrine sediments in different time scales: Sediment grain size as an example[J]. Science China: Earth Sciences, 33(6): 563-568.]
- 陈诗越,王苏民,陈影影,等. 2009. 东平湖沉积物 $^{210}\text{Pb}$ 、 $^{137}\text{Cs}$ 垂直分布及年代学意义[J]. 第四纪研究, 29(5): 981-987. [Chen S Y, Wang S M, Chen Y Y, et al. 2009. Vertical distribution and chronological implication of  $^{210}\text{Pb}$  and  $^{137}\text{Cs}$  in sediments of Dongping Lake, Shandong Province[J]. Quaternary Sciences, 29(5): 981-987.]
- 郭进,文安邦,严冬春,等. 2014. 复合指纹识别技术定量示踪流域泥沙来源[J]. 农业工程学报, 30(2): 94-104. [Guo J, Wen A B, Yan D C, et al. 2014. Quantifying catchment scale sediment source using composite fingerprinting technique[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 30(2): 94-104.]
- 胡守云,邓成龙,Apple E,等. 2001. 湖泊沉积物磁学性质的环境意义[J]. 科学通报, 46(17): 1491-1494. [Hu S Y, Deng C L, Apple E, et al. 2001. Environmental magnetic study of lacustrine sediments[J]. Chinese Science Bulletin, 46(17): 1491-1494.]
- 李春梅,王红亚. 2010. 贵州省西南部麦岗水库沉积物的 $^{137}\text{Cs}$ 和 $^{210}\text{Pb}$ 测年与沉积速率研究[J]. 水土保持通报, 30(2): 215-219. [Li C M, Wang H Y. 2010.  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{210}\text{Pb}$  dating and inference of sedimentation rate for Maigang Reservoir in southwest Guizhou Province[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 30(2): 215-219.]
- 吕明辉,王红亚,蔡运龙. 2007. 基于湖泊(水库)沉积物分析的土壤侵蚀研究[J]. 水土保持通报, 27(3): 36-41. [Lv M H, Wang H Y, Cai Y L. 2007. Soil erosion investigations based on analyses of sediment in lakes and reservoirs[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 27(3): 36-41.]
- 唐强,贺秀斌,鲍玉海,等. 2013. 泥沙来源“指纹”示踪技术研究综述[J]. 中国水土保持科学, 11(3): 109-117. [Tang Q, He X B, Bao Y H, et al. 2013. A review of studies on catchment sediment sources discrimination with fingerprinting techniques[J]. Science of Soil and Water Conservation, 11(3): 109-117.]
- 王小雷,杨浩,赵其国,等. 2010. 云南抚仙湖近现代环境变化的沉积物粒度记录[J]. 沉积学报, 28(4): 776-782. [Wang X L, Yang H, Zhao Q G, et al. 2010. Recent environmental change inferred from grain-size records in Fuxian Lake, Yunnan Province[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 28(4): 776-782.]
- 魏彦昌,欧阳志云,苗鸿,等. 2006. 放射性核素 $^{137}\text{Cs}$ 在土壤侵蚀研究中的应用[J]. 干旱地区农业研究, 24(3): 200-206. [Wei Y C, Ouyang Z Y, Miao H, et al. 2006. Application of radioactive fallout cesium-137 for soil erosion measurement[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 24(3): 200-206.]
- 吴霜,刘倩,曹向明,等. 2017. 赣北黄茅潭湖泊沉积记录的240年以来古洪水事件[J]. 地理科学进展, 36(11): 1413-1422. [Wu S, Liu Q, Cao X M, et al. 2017. A 240-year sedimentary record of paleoflood events from the Huangmaotan Lake, northern Jiangxi Province[J]. Progress in Geography, 36(11): 1413-1422.]
- 张灿,周爱锋,张晓楠,等. 2015. 湖泊沉积记录的古洪水事件识别及与气候关系[J]. 地理科学进展, 34(7): 898-908. [Zhang C, Zhou A F, Zhang X N, et al. 2015. Identification of palaeoflood events by lacustrine archives and their links to climatic conditions[J]. Progress in Geography, 34(7): 898-908.]
- 张晴华,王红亚,徐琳,等. 2014. 广东惠州黄洞水库沉积物特征及其反映的近50年土壤侵蚀意义[J]. 地理研究, 33(4): 643-653. [Zhang Q H, Wang H Y, Xu L, et al. 2005. Characteristics of sediment from Huangdong Reservoir in Huizhou, Guangdong Province and their implications on soil erosion during the past 50 years[J]. Geographical Research, 33(4): 643-653.]
- 张燕,潘少明,彭补拙. 2005. 用 $^{137}\text{Cs}$ 计年法确定湖泊沉积物沉积速率研究进展[J]. 地球科学进展, 20(6): 671-678. [Zhang Y, Pan S M, Peng B Z. 2005. An overview on the evaluation of sediment accumulation rate of lake by  $^{137}\text{Cs}$  dating[J]. Advances in Earth Science, 20(6): 671-678.]
- Appleby P G, Oldfield F. 1978. The calculation of  $^{210}\text{Pb}$  dates



- assuming a constant rate of supply of unsupported  $^{210}\text{Pb}$  to the sediment[J]. *Catena*, 5(1): 1-8.
- Appleby P G, Richardson N, Nolan P J, et al. 1990. Radiometric dating of the United Kingdom SWAP sites[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 327: 233-238.
- Ayoubi S, Ahmadi M, Abdi M R, et al. 2012. Relationships of  $^{137}\text{Cs}$  inventory with magnetic measures of calcareous soils of hilly region in Iran[J]. *Journal of Environmental Radioactivity*, 112: 45-51.
- Boardman J. 2006. Soil erosion science: Reflections on the limitations of current approaches[J]. *Catena*, 68(2): 73-86.
- Booth C A, Walden J, Neal A, et al. 2005. Use of mineral magnetic concentration data as a particle size proxy: A case study using marine, estuarine and fluvial sediments in the Carmarthen Bay area, South Wales, UK[J]. *Science of the Total Environment*, 347(1): 241-253.
- Boyle J F, Plater A J, Mayers C, et al. 2011. Land use, soil erosion, and sediment yield at Pinto Lake, California: Comparison of a simplified USLE model with the lake sediment record[J]. *Journal of Paleolimnology*, 45(2): 199-212.
- Brown R B, Kling G F, Cutshall N H. 1981. Agricultural erosion indicated by  $^{137}\text{Cs}$  redistribution: II. Estimates of erosion rates[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 45(6): 1191-1197.
- Caitcheon G G. 1993. Sediment source tracing using environmental magnetism: A new approach with examples from Australia[J]. *Hydrological Processes*, 7(4): 349-358.
- Das S K, Routh J, Roychoudhury A N, et al. 2008. Elemental (C, N, H and P) and stable isotope ( $\delta^{15}\text{N}$  and  $\delta^{13}\text{C}$ ) signatures in sediments from Zeekoevlei, South Africa: A record of human intervention in the lake[J]. *Journal of Paleolimnology*, 39(3): 349-360.
- David C, Dearing J, Roberts N. 1998. Land-use history and sediment flux in a lowland lake catchment: Groby Pool, Leicestershire, UK[J]. *The Holocene*, 8(4): 383-394.
- de Boer D H. 1997. Changing contributions of suspended sediment sources in small basins resulting from European settlement on the Canadian Prairies[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 22(7): 623-639.
- Dearing J A. 1999. Holocene environmental change from magnetic proxies in lake sediments[J]. *Quaternary Climates, Environments and Magnetism*, 231-278.
- Dearing J A, Elnor J K, Happey-Wood C M. 1981. Recent sediment flux and erosional processes in a Welsh upland lake-catchment based on magnetic susceptibility measurements [J]. *Quaternary Research*, 16(3): 356-372.
- Dearing J A, Morton R I, Price T W, et al. 1986. Tracing movements of topsoil by magnetic measurements: Two case studies[J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 42(1-2): 93-104.
- Enters D, Lücke A, Zolitschka B. 2006. Effects of land-use change on deposition and composition of organic matter in Frickenhauser See, northern Bavaria, Germany[J]. *Science of the Total Environment*, 369(1): 178-187.
- Eriksson M G, Christiansson C. 1997. Accelerated soil erosion in central Tanzania during the last few hundred years[J]. *Physics and Chemistry of the Earth*, 22(3-4): 315-320.
- Fisher E, Oldfield F, Wake R, et al. 2003. Molecular marker records of land use change[J]. *Organic Geochemistry*, 34(1): 105-119.
- Foster I D L. 1996. Sediment yields and sediment delivery in the catchments of Slapton Lower Ley south Devon. UK[J]. *Field Studies*, 8: 629-661.
- Foster I D L, Boardman J, Keay-Bright J. 2007. Sediment tracing and environmental history for two small catchments, Karoo Uplands, South Africa[J]. *Geomorphology*, 90(1): 126-143.
- Foster I D L, Lees J A, Owens P N, et al. 1998. Mineral magnetic characterization of sediment sources from an analysis of lake and floodplain sediments in the catchments of the Old Mill reservoir and Slapton Ley, South Devon, UK[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 23(8): 685-703.
- Foster I D L, Walling D E. 1994. Using reservoir deposits to reconstruct changing sediment yields and sources in the catchment of the Old Mill Reservoir, South Devon, UK, over the past 50 years[J]. *Hydrological Sciences Journal*, 39(4): 347-368.
- Gao J, Long Y, Zhang X, et al. 2016. Interpreting sedimentation dynamics at Longxi Catchment in the Three Gorges Area, China, using Cs-137 activity, particle size and rainfall erosivity[J]. *Journal of Mountain Science*, 13(5): 857-869.
- Hounslow M W, Chepstow-Lusty A. 2004. A record of soil loss from Butrint, southern Albania, using mineral magnetism indicators and charcoal (AD 450 to 1200)[J]. *Holocene*, 14(14): 321-333.
- Kaushal S, Binford M W. 1999. Relationship between C: N ratios of lake sediments, organic matter sources, and historical deforestation in Lake Pleasant, Massachusetts, USA[J].

- Journal of Paleolimnology, 22(4): 439-442.
- Kim B Y, Kodama K P, Moeller R E. 2005. Bacterial magnetite produced in water column dominates lake sediment mineral magnetism: Lake Ely, USA[J]. Geophysical Journal International, 163: 26-37.
- Lammers J M, van Soelen E E, Donders T H, et al. 2013. Natural environmental changes versus human impact in a Florida estuary (Rookery Bay, USA)[J]. Estuaries and coasts, 36(1): 149-157.
- Le Gall M, Evrard O, Thil F, et al. 2015. Tracing sediment sources using strontium isotopes in a pond draining an agricultural catchment (Loire River Basin, France)[J]. Procedia Earth and Planetary Science, 13: 30-34.
- Meyers P A. 2003. Applications of organic geochemistry to paleolimnological reconstructions: A summary of examples from the Laurentian Great Lakes[J]. Organic geochemistry, 34(2): 261-289.
- Meyers P A, Lallier-Vergès E. 1999. Lacustrine sedimentary organic matter records of Late Quaternary paleoclimates[J]. Journal of Paleolimnology, 21(3): 345-372.
- O'Beirne M D, Strzok L J, Werne J P, et al. 2015. Anthropogenic influences on the sedimentary geochemical record in western Lake Superior (1800-present)[J]. Journal of Great Lakes Research, 41(1): 20-29.
- Oldfield F. 1991. Environmental magnetism: A personal perspective[J]. Quaternary Science Reviews, 10(1): 73-85.
- Oldfield F. 2013. Mud and magnetism: Records of late Pleistocene and Holocene environmental change recorded by magnetic measurements[J]. Journal of Paleolimnology, 49(3): 465-480.
- Oldfield F, Battarbee R W, Boyle J F, et al. 2010. Terrestrial and aquatic ecosystem responses to late Holocene climate change recorded in the sediments of Lochan Uaine, Cairngorms, Scotland[J]. Quaternary Science Reviews, 29(7): 1040-1054.
- Oldfield F, Rummery T A, 1979. Thompson R, et al. Identification of suspended sediment sources by means of magnetic measurements: Some preliminary results[J]. Water Resources Research, 15(2): 211-218.
- Olsson S, Regnéll J, Persson A, et al. 1997. Sediment-chemistry response to land-use change and pollutant loading in a hypertrophic lake, southern Sweden[J]. Journal of Paleolimnology, 17(3): 275-294.
- Owens P N, Walling D E. 2002. Changes in sediment sources and floodplain deposition rates in the catchment of the River Tweed, Scotland, over the last 100 years: The impact of climate and land use change[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 27(4): 403-423.
- Owens P N, Walling D E, He Q, et al. 1997. The use of caesium-137 measurements to establish a sediment budget for the Start Catchment, Devon, UK[J]. Hydrological Sciences Journal, 42(3): 405-423.
- Pulley S, Foster I, Antunes P. 2015. The uncertainties associated with sediment fingerprinting suspended and recently deposited fluvial sediment in the Nene River Basin[J]. Geomorphology, 228: 303-319.
- Ritchie J C, McHenry J R. 1990. Application of radioactive fallout cesium-137 for measuring soil erosion and sediment accumulation rates and patterns: A review[J]. Journal of environmental quality, 19(2): 215-233.
- Routh J, Meyers P A, Gustafsson O, et al. 2004. Sedimentary geochemical record of human-induced environmental changes in the Lake Brunnsviken Watershed, Sweden[J]. Limnology and Oceanography, 49(5): 1560-1569.
- Rowan J S, Higgitt D L, Walling D E. 1993. Incorporation of Chernobyl-derived radiocaesium into reservoir sedimentary sequences[M]//Mcmanus J, Duck R W. Geomorphology and sedimentology of lakes and reservoirs: Chichester, UK: Wiley & Sons: 55-72.
- Sadeghi S H, Najafi S, Riyahi Bakhtiari A, et al. 2014. Ascribing soil erosion types for sediment yield using composite fingerprinting technique[J]. Hydrological Sciences Journal, 59(9): 1753-1762.
- Shen Z, Bloemendal J, Mauz B, et al. 2008. Holocene environmental reconstruction of sediment-source linkages at Crummock Water, English Lake District, based on magnetic measurements[J]. The Holocene, 18(1): 129-140.
- Stott A P. 1986. Sediment tracing in a reservoir-catchment system using a magnetic mixing model[J]. Physics of the Earth and Planetary Interiors, 42(1-2): 105-112.
- Tanaka K, Iwatani H, Sakaguchi A, et al. 2014. Relationship between particle size and radiocesium in fluvial suspended sediment related to the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accident[J]. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 301(2): 607-613.
- Thorndycraft V, Hu Y, Oldfield F, et al. 1998. Individual flood events detected in the recent sediments of the Petit Lac d'Annecy, eastern France[J]. The Holocene, 8(6): 741-746.
- Walling D E. 2005. Tracing suspended sediment sources in catchments and river systems[J]. Science of the total environment

- ronment, 344(1): 159-184.
- Walling D E, Peart M R, Oldfield F, et al. 1979. Suspended sediment sources identified by magnetic measurements[J]. *Nature*, 281: 110-113.
- Wang H, Huo Y, Zeng L, et al. 2008. A 42-yr soil erosion record inferred from mineral magnetism of reservoir sediments in a small carbonate-rock catchment, Guizhou Plateau, southwest China[J]. *Journal of Paleolimnology*, 40 (3): 897-921.
- Wang H, Xu L, Sun X, et al. 2011. Comparing mineral magnetic properties of sediments in two reservoirs in "strongly" and "mildly" eroded regions on the Guizhou Plateau, southwest China: A tool for inferring differences in sediment sources and soil erosion[J]. *Geomorphology*, 130(3): 255-271.
- Xiang L, Lu X X, Higgitt D L, et al. 2002. Recent lake sedimentation in the middle and lower Yangtze Basin inferred from  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{210}\text{Pb}$  measurements[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 21(1): 77-86.
- Yu L, Oldfield F. 1989. A multivariate mixing model for identifying sediment source from magnetic measurements[J]. *Quaternary Research*, 32(2): 168-181.
- Zan F, Huo S, Xi B, et al. 2012. A 100-year sedimentary record of natural and anthropogenic impacts on a shallow eutrophic lake, Lake Chaohu, China[J]. *Journal of Environmental Monitoring*, 14(3): 804-16.
- Zhang Y, Su Y, Liu Z, et al. 2016. A sediment record of environmental change in and around Lake Lugu, SW China, during the past two centuries[J]. *Journal of paleolimnology*, 55(3): 259-271.

## Soil erosion investigation based on sediments in lakes and reservoirs

XUE Tianyi, WANG Hongya

(College of Urban and Environmental Sciences, Peking University, Beijing 100871, China)

**Abstract:** Soil erosion investigation has important significance for preventing natural hazard-induced disasters and promoting the sustainable use of land. Due to the absence of long-term hydrological observation data in some areas, research on historical soil erosion often needs to use surrogate indicators. As the sink of erosion products in drainage basins, sediments in lakes and reservoirs record the characteristics of soil erosion in a long period of time and have high application value and potential in many fields. Focusing on the questions of determining the age of soil erosion, reconstructing the erosion processes, and searching for sediment sources, this study first reviewed the application theories and methods of radioactive isotopes, mineral magnetism, grain size, and geochemical indicators. Second, we summarized the research in the above fields with the sediments in lakes and reservoirs respectively, thus confirmed the important role of these sediments. Finally, we discussed the uncertainty in soil erosion investigations and identified the potential research directions.

**Key words:** sediments in lakes and reservoirs; soil erosion; magnetic characteristics; fingerprinting technique