

文章编号: 1004-8227(2010)06-0707-07

太湖洑东流域陆地侵蚀与入湖物质通量的定量关系研究

曾海鳌, 吴敬禄

(中国科学院南京地理与湖泊研究所 湖泊与环境国家重点实验室, 江苏 南京 210008)

摘要: 在太湖流域选择了一个典型的半封闭洑东小流域, 通过该流域及入湖口区域沉积物的元素和同位素地球化学研究, 建立了反映流域陆地侵蚀与入湖物质输入量之间的定量关系模型。研究结果表明: 近 40 a 来洑东流域的入湖物质通量约为 6 074 t/a, 与实际监测结果一致。根据流域土地利用类型和土壤侵蚀速率的分布, 估算出流域土壤侵蚀总量为 25 670 t/a, 说明侵蚀总量的 23.7% 进入湖泊, 其余在河道或土地内部沉积下来。近 40 a 来太湖宜溧河湖交界区入湖物质通量(Q)与流域土壤侵蚀速率(E)和流域面积(A)的数学关系为: $E = 4.22Q/A$ 。结合湖泊沉积物来源分析结果, 计算出流域内不同土地利用类型的平均土壤侵蚀速率, 林地、茶园和水田的土壤侵蚀速率分别为 126.6、5 835.5 和 1 729.3 t/(km²·a)。该结果与¹³⁷Cs 示踪法计算结果基本一致, 表明利用湖泊沉积记录可以较好地反演流域不同土地类型土壤侵蚀量及其入湖营养通量的变化。

关键词: 太湖流域; 湖泊沉积; 土壤侵蚀; 定量关系; 土地利用

文献标识码: A

近年来, 随着经济快速发展, 流域生态环境质量不断下降, 湖泊生态环境不断恶化, 尤其是湖泊富营养化问题日趋严重, 已成为许多国家和地区经济持续发展的制约因素并危及人类生存环境^[1~3]。研究流域在人与自然相互作用下的物质(水、营养盐、泥沙、元素)迁移规律及湖泊响应过程是当前全球变化和流域可持续发展研究的基础科学问题^[4]。作为流域地表运移物质宿体, 湖泊沉积物记录了丰富的流域环境变化信息^[5~8]。基于湖泊沉积记录连续、高分辨率的特征, 提取湖泊沉积物中所包含的环境信息, 建立流域物质输移和湖泊沉积记录之间的定量关系, 进而探索自然状态和人类活动影响下流域地表物质输移的演变规律具有重要的科学意义。

太湖是我国五大淡水湖之一, 在我国社会经济发展中具有举足轻重的地位^[9]。近年来, 随着流域生态环境质量不断下降, 湖泊水环境问题不断加重, 太湖水体富营养化及其治理成为目前最亟待解决的科学问题^[10, 11]。太湖流域尤其是西部山区的水土流失严重, 大量污染物和营养物质随流失土壤进入

太湖, 成为太湖的重要物质来源之一^[12, 13]。有关太湖沉积记录与流域陆地侵蚀的定量研究还未见报道。本文在太湖流域选择了一个典型的半封闭洑东小流域, 试图通过该流域及入湖口区域沉积物的元素和同位素地球化学研究, 建立反映流域陆地侵蚀与入湖物质输入量之间的定量关系, 以期对太湖流域治理、农业规划和湖泊富营养防治等方面的决策提供科学依据。

1 采样和分析方法

1.1 研究区域概况

洑东流域位于太湖宜溧河流域南部, 流域总面积为 34.4 km², 属宜兴市丁蜀镇, 丘陵山区, 流域南面、北面和西面被山地包围, 东面直接与太湖相连, 属半封闭流域。流域内通入太湖的河道主要有大港河和新港河, 流域地形及所处位置见图 1。洑东流域目前有总人口 2.2 万, 粮食总产量 5 502 t/a^[14]。根据 1999 年的太湖流域遥感资料分析, 洑

收稿日期: 2009-09-08; 修回日期: 2009-12-25

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(2008CB418005); 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2009ZX07101-013); 中国科学院知识创新工程领域前沿项目(09SL021)

作者简介: 曾海鳌(1980-), 男, 重庆市万州人, 助理研究员, 博士, 主要从事环境地球化学研究, E-mail: zenghaiiao@niglas.ac.cn

东流域土地利用类型以林地和水田为主,林地总面积 21.9 km^2 ,水田总面积 10.5 km^2 。目前,洑东流域工业以陶瓷为主,也是闻名于世的陶都“丁蜀镇”的一部分,另外还有一些当地居民以渔业和种植业为生。

1.2 样品采集

2006 年 11 月,根据流域内土地利用类型分布,流域及河口的样品采集主要包括表层土壤、表层湖泊沉积物和沉积岩芯,采样点分布如图 1 所示。根据流域内不同土壤类型选取采样点,利用不锈钢铲子采集表层 2 cm 土壤样品,装入塑料袋密封保存;利用重力采样器集了 3 个较长沉积岩芯 FDZ1、FDZ2 和 FDZ3,分别位于离河口较远的湖心,流域内新港河河口和大港河河口(图 1),岩芯深度分别为 24、29 和 25 cm。另外,还采集了 8 个较短的沉积岩芯($5 \sim 10 \text{ cm}$)作为表层沉积物样品均匀布置在入湖口到湖心区域。所有沉积物岩芯保持完好,未受扰动。在野外现场进行分样,以 1 cm 间隔切分,装入塑料袋中密封保存。

1.3 实验分析

湖泊沉积物和土壤粒度采用英国 Malvern Mastersizer 2000 型激光粒度仪进行测试。元素分析采用美国 Leeman Labs Profile ICP-AES(电感耦合等离子体原子发射光谱仪)测定,共测得 Al、Fe、Ca、Na、K、Mg、Ti、Co、V、Cr、Be、Ba、Sr、Cu、Zn、Mn、Ni、P 及 Cd 等 19 种元素含量。采用美国 SPEX Certi-PrePTM Custom Assurance Standard 多元素标准溶液,以中国水系沉积物成份分析标准物质 GBW07311 作为标准参考物质。 ^{137}Cs 和 ^{210}Pb 测试采用 γ 分析方法,分析仪器采用美国 EG & G Ortec 公司生产的高纯锗井型探测器与 OTEC919 型谱控制器和 IBM 微机构成的高纯锗、低本底 γ 谱仪(外加 α 探头)进行测定,用中国原子能研究院提供的定年标准样品进行结果对比校正。

2 结果与讨论

2.1 太湖洑东流域入湖物质通量

太湖洑东流域入湖物质通量的研究方法是:在利用沉积岩芯 ^{210}Pb 、 ^{137}Cs 放射性核素准确定年的基础上,计算出各沉积岩芯的沉积速率,进而分析湖泊沉积速率的时空分布。结合流域输出物质扩散边界的分析,得出该流域入湖物质通量。

2.1.1 流域输出物质扩散边缘确定

河口沉积物扩散情况可以根据沉积物的粒度组

成、矿物组成、微量元素、稀土元素示踪,以及常量元素地球化学及其赋存形态等来判别^[15]。沉积物颗粒粒径的大小分布直接反映了湖泊水动力状况。洑东流域入湖口区域表层沉积物中值粒径 $11 \sim 23 \mu\text{m}$,粘土含量为 $9\% \sim 24\%$,粉砂含量为 $70\% \sim 86\%$,砂的含量为 $0\% \sim 20\%$,从粒度组成来看,表层沉积物绝大部分为粉砂。随着离岸距离的增加,沉积物中的粘土含量百分比增加,砂含量百分比以及中值粒径逐渐减小,且以大港河入湖口为原点,呈带状分布。延伸至开阔湖区,粒度组成逐渐转变为粘土质粉砂。

表层沉积物中值粒径和砂百分含量的分布如图 2 所示。在大港河河口,中值粒径和砂含量最大、粘土含量最少,说明流域泥沙主要从大港河输入太湖,并且粗颗粒物优先在河口沉积下来,湖泊表层沉积物粒度组成的分布特征与水流方向基本一致。中值粒径为 $11 \mu\text{m}$ 的等值线边界线(图 2 中的虚线),该边界与砂含量百分比为 0% 的等值线边界线基本重合。在这个边界以东,中值粒径又呈逐渐增大的趋势,说明其来源已经逐渐发生改变。据此分析,流域输出的泥沙主要沉积在这个区域内。

根据表层元素分布特征,受粒度效应和水流的影响,各元素含量的高值均出现在距离湖岸较远的区域。选取元素 Zn 和 Sr 分别代表重金属元素和易迁移元素,其含量的分布特征如图 3 所示,对比粒度分布的扩散边界线(黑色粗线),Zn 和 Sr 含量等值线最高值分布与粒度获取的扩散东源基本重合,或者非常接近。而且尽管 Zn 元素出现了两个高值区,但两个高值点都正好落在扩散东缘上,仍然与我们所划定的边界基本吻合。

因此,通过对入湖口湖泊沉积物的粒度和元素分布的综合分析表明,东部的线框区域大体代表了太湖洑东流域入湖泥沙扩散的东缘,顶部位于 31.19°N 、 119.92°E 左右,总面积为 2.36 km^2 。由于流域泥沙主要从大港河输入,故入湖泥沙的扩散以河口为圆心,呈扇形分布。

2.1.2 河口沉积速率分布

洑东流域河湖交接区沉积岩芯的 ^{137}Cs 剖面分布如图 4。根据流域入湖口至湖心各岩芯 ^{137}Cs 测量结果,FDZ1 孔的质量深度 12 和 8 g/cm^2 分别对应 1952 年和 1963 年,1986 年的峰值在研究区域内不明显。FDZ2 孔底部 28 g/cm^2 有比较明显的 1952 年初始值,质量深度为 16 g/cm^2 处的峰值代表 1963 年;FDZ3 孔 33 g/cm^2 处为 1952 年, 27 g/cm^2 代表 1963 年。

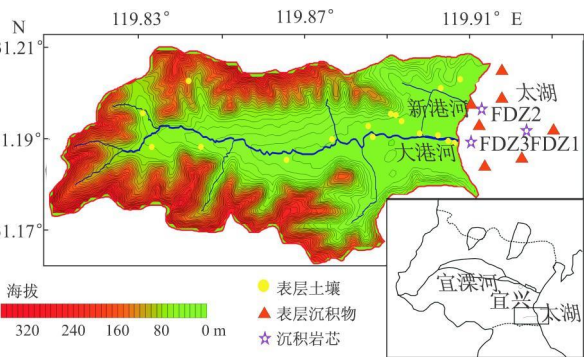


图 1 流域地形及采样点位置

Fig. 1 Map of the Catchment Landform and the Location of Sampling Sites

根据各年代所对应的质量深度计算出各岩芯近 50 a 来的沉积速率, 如表 1 所示。研究区域内河口的沉积速率明显高于开阔湖区, 大港河河口的沉积速率最高。根据各沉积岩芯峰值对应年代计算出的不同

时间段的沉积速率分布, 发现除 FDZ3 孔以外, 其他岩芯 1952~ 1963 年的沉积速率都明显增大。其原因一方面可能是 20 世纪 50 年代的洪水引起了沉积速率增大; 另一方面, 也有可能反映了当时较大规模的山地林砍伐导致大量泥沙入湖^[16]。因此, 我们采用相对稳定时期的 1963~ 2006 年的沉积速率作为近几十年来洮东流域河湖交接区的沉积速率。

2. 1. 3 洮东流域入湖物质通量

利用克里金插值法求出流域输出物质扩散范围内的沉积速率分布(如图 5)。大港河河口沉积速率最高, 说明流域物质主要从大港河输出。由于入湖水动力条件的突然改变, 大部分泥沙尤其是粗颗粒物在河口沉积下来, 导致其沉积速率明显高于其他区域。随着与湖岸距离的增加, 沉积速率逐渐下降。

利用泰森多边形法和辛普森多边形法求得扩散区域内的总沉积通量为 6 074 t/a。由于扩散区域的面积较小, 来源于大气沉降的物质通量也相对很小。

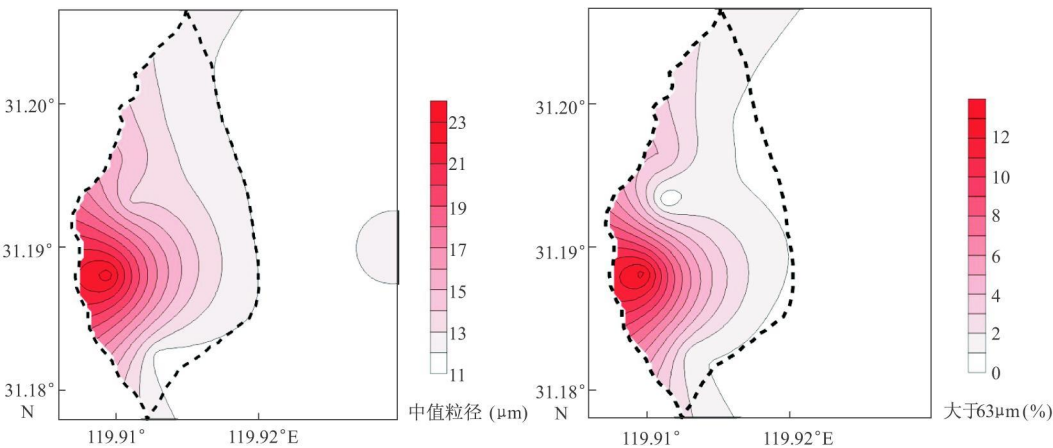


图 2 河湖口区域表层沉积物粒度组成分布

Fig. 2 Distribution of Grain Size of Surface Sediments in the Estuary

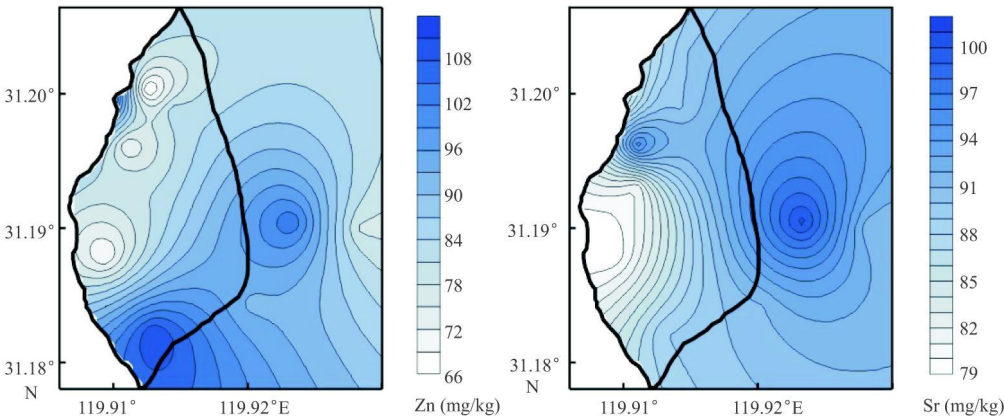


图 3 河湖交接区表层沉积物元素 Zn、Sr 分布

Fig. 3 Distribution of Zn and Sr of Surface Sediments in the Estuary

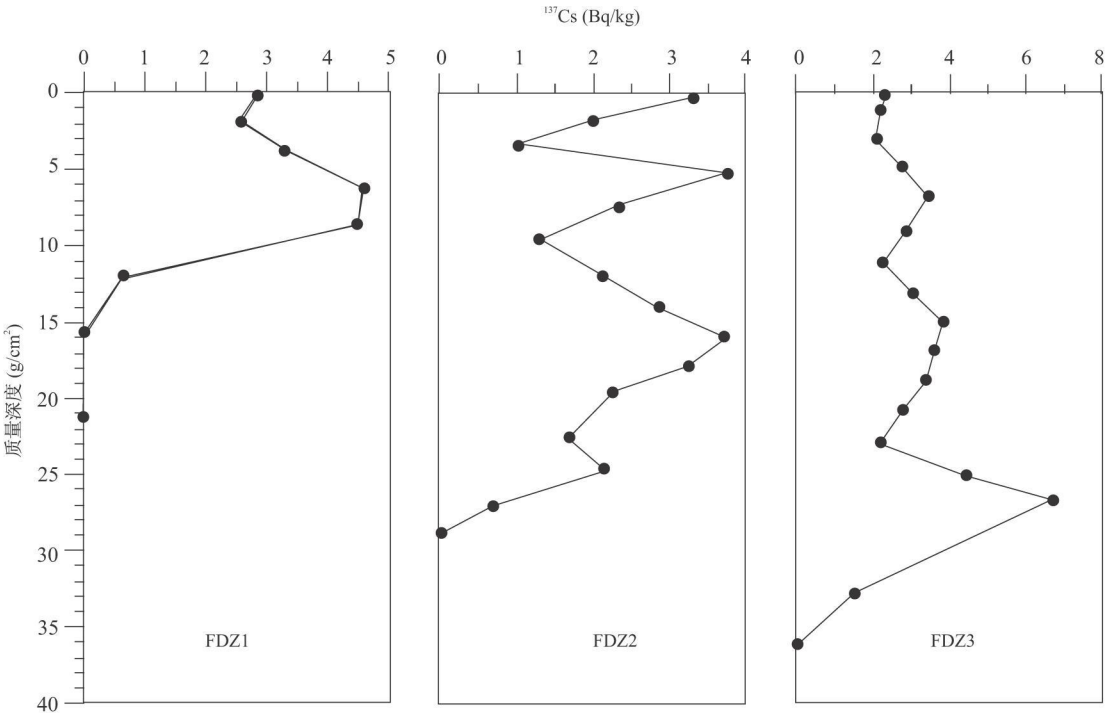


图 4 河湖交接区沉积岩芯¹³⁷Cs 剖面分布
Fig. 4 ¹³⁷Cs-depth Profiles of Sediment in the Estuary

表 1 河湖交接区各岩芯沉积速率分布

Tab. 1 Distribution of Sediment Rates in the Estuary			
沉积速率(g/(cm ² ·a))	1952~ 2006	1963~ 2006	1952~ 1963
FDZ1	0.22	0.17	0.36
FDZ2	0.50	0.37	1.00
FDZ3	0.61	0.62	0.58

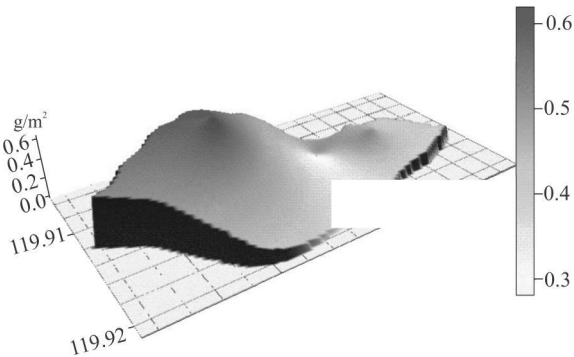


图 5 河湖交接区沉积速率分布
Fig. 5 Distribution of Sediment Rates
in the Boundary of Sediment Diffusion

因此, 本文以扩散区域内的沉积通量作为洮东流域入湖物质通量。太湖各入湖河道监测数据表明^[17], 大港河每年悬浮物输入量为 5 755 t/a, 略小于我们计算所得的入湖物质通量。考虑到流域输出物质

通量除大港河外, 还需加上新港河的年输入量以及河道以外的面源输入, 监测数据与我们的分析结果基本一致。

2. 2 流域入湖通量与土壤侵蚀的定量/ 半定量关系

2. 2. 1 流域土壤侵蚀总量

放射性核素(如¹³⁷Cs、²¹⁰Pb、⁷Be、²²⁶Ra 和²²⁸Ra 等)示踪土壤侵蚀的研究已成为土壤学的国际前沿研究热点之一, 其中以¹³⁷Cs 示踪技术在土壤侵蚀中的应用研究最为深入^[18~ 21]。已有的研究结果充分证明了利用¹³⁷Cs 示踪太湖流域土壤侵蚀的可行性^[22~ 24]。¹³⁷Cs 示踪法的研究结果表明太湖洮东流域土壤侵蚀速率的分布主要受人类活动的影响。近 40 a 来非耕作土(自然山坡)的侵蚀量很小, 耕作土壤(茶园和水田)侵蚀严重。自然山坡的土壤侵蚀速率仅为 186.6 t/(km²·a), 而种植茶园的山坡土壤侵蚀速率高达 3 898.5 t/(km²·a), 平原地区水田的平均侵蚀速率为 1 869.9 t/(km²·a)^[25]。根据洮东流域的土壤侵蚀速率分布和 1999 年太湖流域遥感资料分析所得的流域内不同土地利用类型(茶园, 水田和林地)的面积分布资料, 估算出流域的土壤侵蚀总量, 见表 2。结果表明, 整个洮东流域土壤侵蚀总量约为 25 670 t/a, 实际侵蚀总量可能还稍高于此值。

表 2 流域土壤侵蚀总量及分布
Tab. 2 Total Amount and Distribution of
Soil Erosion Within Fudong Watershed

土地利用类型	水田	林地	茶园	总计
侵蚀速率($t/(km^2 \cdot a)$)	1 869. 9	186. 6	3 898. 5	
面积统计(km^2)	10. 5	21. 9	0. 5	
总侵蚀量(t/a)	19 634	4 087	1 949	25 670
所占比例(%)	76. 4	16. 0	7. 5	100

2. 2. 2 流域土壤侵蚀与入湖物质通量的关系

近 40 a 来流域的土壤侵蚀总量为 25 670 t/a, 而根据河湖交接区沉积通量估算出的流域入湖物质通量为 6 074 t/a, 流域泥沙输移比(SDR)为 0. 237。因此, 仅有侵蚀总量的 23. 7% 的土壤进入湖泊, 大部分(76. 3%) 在沟道或者土地内部沉积下来。传统的基于湖泊沉积物的土壤侵蚀研究也表明, 由于泥沙在流域和河道运移的过程中, 很大一部分在沿途沉积和再运移, 往往使得从湖泊沉积通量估算出的土壤侵蚀速率偏低。利用 ^{137}Cs 示踪法在英国一些大流域(超过 1 000 km^2) 的研究结果表明, 由于绝大部分被侵蚀的土壤在沟道和土地内部沉积, 输送到河口的泥沙仅为总侵蚀量的 1%^[26]。对于较小的而且为低山丘陵地区流域(大约 10 km^2), 输送到河口的泥沙约占侵蚀总量的 30%^[27], 此结果与本文的研究比较一致。

流域入湖物质通量(Q) 与流域土壤侵蚀速率(E) 和流域面积(A) 的数学关系为: $E = 1/SDR \times Q/A$ 。因此, 近 40 a 来太湖洮东流域土壤侵蚀速率与入湖物质通量的关系为: $E = 4. 22Q/A$ 。该方程对于面积较小(约 50 km^2 以下)、坡度比较平缓的流域有一定通用性, 但对于面积较大的流域, 由于泥沙运移过程更加复杂, 还需进一步验证。

2. 2. 3 利用湖泊沉积记录定量恢复流域土壤侵蚀状况

在建立流域土壤侵蚀与入湖物质通量的数学关系基础上, 结合湖泊沉积物泥沙来源的分析, 以及流域内土地利用类型的分布情况, 可定量估算出流域内不同土地利用类型的流域侵蚀速率, 其数学关系如下:

$$\begin{aligned} E_1 &= 4. 22 \times Q \times P_1 / A_1 \\ E_2 &= 4. 22 \times Q \times P_2 / A_2 \\ &\dots\dots\dots \\ E_n &= 4. 22 \times Q \times P_n / A_n \end{aligned}$$

式中: E_1 、 E_2 E_n 分别为流域内各土地利用类型的土壤侵蚀速率; Q 为流域入湖物质通量; P_1 、 P_2 P_n 分别为流域内各土地利用类型对湖泊沉

积物来源的贡献百分比; A_1 、 A_2 A_n 分别为流域内各土地利用类型的总面积。

复合指纹法是通过沉积物及其源地的多个地球化学参数对比分析, 结合多元统计定量识别泥沙和沉积物来源的研究方法。该方法首先采集各可能源地样, 利用多元统计方法筛选在不同源地间差异显著的地球化学性质参数作为识别因子。应用的参数包括以下几种类型: 矿物磁性参数、地球化学组成参数(如 Fe、Ca、Cr、Cu、K、Mg、Na、Ni、Sr、Zn、Mn、Al 及 P 的各种形式等)、有机质参数(如有机炭、有机氮等)、放射性同位素参数(^{137}Cs 、 $^{210}Pb_{ex}$ 等) 和物理参数(如颗粒粒径)。然后通过分析比较选定的识别因子在各可能泥沙源地样与河流泥沙样的差异, 利用多元混合模型(最小二乘法) 得出不同源地的贡献百分比, 并且已经广泛应用到泥沙和沉积物来源的研究中^[28~31]。根据复合指纹法在太湖洮东流域河口湖泊沉积物泥沙来源的分析结果, 水田对湖泊沉积物的贡献比例从河口的 87. 3% 到逐渐减小到开阔湖区的 63. 3%, 而林地和茶园分别从 9. 0%、3. 7% 递增至 14. 0%、20. 5%^[32]。取河口和开阔湖区的平均值作为扩散范围内湖泊沉积物的各种来源平均比例, 利用上面的数学公式求出洮东流域内林地、茶园和水田的土壤侵蚀速率, 并将计算结果与 ^{137}Cs 示踪法研究出的侵蚀速率对比, 见表 3。

表 3 湖泊沉积推算和 ^{137}Cs 示踪法获取的
流域土壤侵蚀分布对比

Tab. 3 Soil Erosion Rates Calculated by Lake Sediment Records Contrast Against by ^{137}Cs Tracer Technique				
	林地 $t/(km^2 \cdot a)$	茶园 $t/(km^2 \cdot a)$	水田 $t/(km^2 \cdot a)$	林地+ 茶园 $t/(km^2 \cdot a)$
湖泊沉积估算	126. 6	5 835. 5	1 729. 3	254. 0
^{137}Cs 示踪法	186. 6	3 898. 5	1 869. 9	269. 5
相对误差(%)	32. 10	49. 70	7. 50	5. 72

两种方法推算出的结果中, 水田的土壤侵蚀速率最接近, 误差仅为 7. 5%。尽管林地和茶园的误差相对较高, 分别为 32. 1% 和 49. 7%, 但林地计算结果偏低, 而茶园偏高, 两者的误差正好相互抵消, 林地和茶园总量的误差仅为 5. 72%。利用湖泊沉积记录估算出林地土壤侵蚀速率偏低的原因, 一方面是由于林地多位于山坡上部, 一部分侵蚀的土壤直接沉积在山坡下部或者山脚, 不能输移到湖泊; 另一方面, 林地本身的侵蚀速率相对较低, 容易产生误差。茶园土壤侵蚀速率偏高的原因主要与流域内的土地利用变化有关。近年来, 由于流域内的茶园种植面积增大, 使茶园总的土壤侵蚀量增大, 而本文的

分析中还没有考虑到流域土地利用的历史变化情况,导致利用湖泊沉积推算的土壤侵蚀速率偏高。

总的看来,两种方法的研究结果基本一致,证明了可利用湖泊沉积记录来研究流域土壤侵蚀及其入湖营养通量的变化的可行性。但由于本文的研究区域是一个相对很小的流域,流域侵蚀的土壤输送到湖泊的距离较短,输送过程中对土壤地球化学属性的改造不明显。还需要在更大的流域开展工作,进一步检验该方法的准确性。同时,也应考虑流域内各土地利用类型的面积变化,以获取更准确的结果。

3 结论

根据河湖口交接区沉积物粒度和元素分布特征,分析了流域输出物质的扩散边界,结合该区域的沉积速率分布,估算出近 40 a 来流域的入湖物质通量约为 6 074 t/a,与实际监测结果一致。根据流域土地利用类型和土壤侵蚀速率的分布,估算出流域土壤侵蚀总量为 25 670 t/a,其中 23.7% 进入湖泊,其余在河道或土地内部沉积下来。近 40 a 来太湖宜溧河湖交界区入湖物质通量(Q)与流域土壤侵蚀速率(E)和流域面积(A)的数学关系为: $E = 4.22Q/A$ 。

利用湖泊沉积记录与元素复合指纹法综合分析获得了林地、茶园和农田的土壤侵蚀速率 126.6, 5 835.5 和 1 729.3 t/(km²·a)。该结果¹³⁷Cs 示踪法分析结果基本一致,表明利用湖泊沉积记录可以较好地反演流域不同土地类型土壤侵蚀量及其入湖营养通量的变化。

致谢 中国科学院南京地理与湖泊研究所湖泊沉积与环境重点实验室朱育新和夏威岚分别帮助完成元素和年代分析。

参考文献:

- [1] SCHINDLER D W. Eutrophication and recovery in experimental lakes: Implication for lake management[J]. Science, 1974: 184.
- [2] LAU A S S, LANE S N. Biological and chemical factors influencing shallow lake eutrophication: A long-term study[J]. The Science of the Total Environment, 2002, 88: 167~ 181.
- [3] WU G F, ZHOU X P. Characterization of phosphorus-releasing bacteria in a small eutrophic shallow lake, Eastern China[J]. Water Research, 2005, 39: 4 623~ 4 632.
- [4] 冷疏影, 杨贵山, 刘正文, 等. 湖泊及流域科学重点发展领域与方向[J]. 中国科学基金, 2003(2): 82.
- [5] WU J L, LIN L, GAGAN M K, et al. Organic matter stable isotope (¹³C, ¹⁵N) response to historical eutrophication of Lake Taihu, China[J]. Hydrobiologia, 2006, 563: 19~ 29.
- [6] WU J L, HUANG C M, ZENG H, et al. Sedimentary evidence for recent eutrophication in the northern basin of lake Taihu, China: Human impacts on a large shallow lake[J]. Journal of Paleolimnology, 2007, 38(1): 13~ 23.
- [7] ERIKSSON M G. Mineral magnetic analyses of sediment cores recording recent soil erosion history in central Tanzania[J]. Palaeogeography, 1999, 152: 365~ 383.
- [8] ANDREAS L, GERHARD H S, BERND Z, et al. A Lateglacial and Holocene organic carbon isotope record of lacustrine palaeoproductivity and climatic change derived from varved lake sediments of Lake Holzmaar, Germany[J]. Quaternary Science Reviews, 2003, 22: 569~ 580.
- [9] 黄漪平. 太湖水环境及其污染控制[M]. 北京: 科学出版社, 2001: 1~ 53.
- [10] 秦伯强, 范成新. 大型浅水湖泊内源营养盐释放的概念性模式探讨[J]. 中国环境科学, 2002, 22(2): 150~ 153.
- [11] 靳晓莉, 高俊峰, 赵广举. 太湖流域近 20 年社会经济发展对水环境影响及发展趋势[J]. 长江流域资源与环境, 2006, 15(3): 298~ 302.
- [12] 许朋柱, 秦伯强. 2001~ 2002 水文年环太湖河道的水量及污染物通量[J]. 湖泊科学, 2005, 17(3): 213~ 218.
- [13] 许朋柱, 秦伯强, 黄文钰, 等. 太湖流域宜溧河地区水体水质状况及营养状态评价[J]. 湖泊科学, 2001, 13(4): 315~ 321.
- [14] 史云祥. 宜溧河流域水环境演变趋势以及污染物输移过程研究[D]. 南京: 南京理工大学硕士学位论文, 2002.
- [15] 沈焕庭. 长江河口物质通量[M]. 北京: 海洋出版社, 2001.
- [16] 樊宝敏. 中国清代以来林政史研究[D]. 北京: 北京林业大学博士学位论文, 2002.
- [17] 黄卫, 张祥志, 朱泽华. 江苏省太湖流域入湖河流污染物入湖总量监测[J]. 中国环境监测, 2005, 21(2): 52~ 55.
- [18] ZAPATA F. The use of environmental radionuclides as tracers in soil erosion and sedimentation investigations: Recent advances and future developments[J]. Soil & Tillage Research, 2003, 69: 3~ 13.
- [19] RITCHIE J C, MCHENRY J R. Application of radioactive fallout Caesium-137 for measuring soil erosion and sediment accumulation rates and patterns: A review[J]. Journal of Environmental Quality, 1990, 19(2): 215~ 233.
- [20] YANG M Y, TIAN J L, LIU P L. Investigating the spatial distribution of soil erosion and deposition in a small catchment on the Loess Plateau of China, using ¹³⁷Cs[J]. Soil and Tillage Research, 2006, 87(2): 186~ 193.
- [21] LOWRANCE R, MCINTYRE S, LANCE C. Erosion and deposition in a forest system estimated using Caesium-137 activity[J]. Journal of Soil Water Conservation, 1988, 43(2): 195~ 199.
- [22] 金平华, 濮励杰, 王金磊, 等. ¹³⁷Cs 法用于典型流域土壤侵蚀的初步研究——以太湖流域上游西苕溪流域为例[J]. 自然资源

源学报, 2004, 19(1): 47~ 54.

[23] 张 燕, 杨 浩, 金 峰, 等. 宜兴茶园土壤侵蚀及生态影响 [J]. 土壤学报, 2003, 40(6): 815~ 821.

[24] 曹 慧, 杨 浩, 唐翔宇, 等. ¹³⁷Cs 技术对长江三角洲丘陵区小流域土壤侵蚀初步估算 [J]. 水土保持学报, 2001, 15(1): 13~ 15.

[25] 曾海鳌, 吴敬禄, 林 琳. ¹³⁷Cs 示踪法研究太湖流域土壤侵蚀分布与总量 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2008, 28(2): 79~ 85.

[26] WALLING D E, COLLINSA A L, JONESA P A, et al. Establishing fine-grained sediment budgets for the Pang and Lambourn LOCAR catchments, UK [J]. Journal of Hydrology, 2006, 330(1-2): 126~ 141.

[27] WALLING D E, RUSSELL M A, HODGKINSON R A, et al. Establishing sediment budgets for two small lowland agricultural catchments in the UK [J]. Catena, 2002, 47: 323~ 353.

[28] CARTER J, OWENS P N, WALLING D E, et al. Fingerprinting suspended sediment sources in a large urban river system [J]. The Science of the Total Environment, 2003, 314 316: 513~ 5341.

[29] COLLINS A L, WALLING D E, SICHINGABULA H M, et al. Suspended sediment source fingerprinting in a small tropical catchment and some management implications [J]. Applied Geography, 2001, 21: 387~ 412.

[30] COLLINS A L, WALLING D E, LEEKS G J L. Use of composite fringerprints to determine the provenance of the contemporary suspended sediment load transported by rivers [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 1998, 23: 31~ 52.

[31] KRAUSE A K, FRANKS S W, KALMA J D, et al. Multiparameter fingerprinting of sediment deposition in a small gullied catchment in SE Australia [J]. Catena, 2003, 53: 327~ 348.

[32] 曾海鳌. 同位素地球化学记录的太湖宜溧河流域入湖物质通量及其环境特征研究 [D]. 北京: 中国科学院研究生院博士学位论文, 2008.

QUANTIFYING THE RELATIONSHIP BETWEEN SOIL EROSION AND MATERIAL FLUXES FROM THE FUDONG WATERSHED TO LAKE TAIHU

ZENG Hai-ao, WU Jing-lu
(State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology,
Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

Abstract: This paper focused on the Fudong watershed of Taihu Lake Basin. Based on analyzing the element and isotopic geochemistry of sediments within the watershed and estuary, the quantitative relationship between soil erosion and the material fluxes from Fudong watershed to Taihu Lake were established. The results showed that the average material flux from the Fudong watershed to Taihu Lake was 6 074 t/a in recent forty years, which was consistent with actual monitor data. The total amount of soil erosion within Fudong watershed was 25 670 t/a, which meant that only 23.7 percent of eroded soil transferred into Taihu Lake and the others were deposited in the channels and fields. Therefore, the mathematical relationship among the material flux from watershed to lake (Q), the watershed erosion rate (E) and watershed area (A) was: $E=4.22Q/A$. According to the analysis of source of lake sediments by using multi-element fingerprinting method, the soil erosion rate distribution of different land use types in Fudong watershed were calculated. The average soil erosion rates of forest lands, tea plantations and paddy fields were 126.6, 5 835.5 and 1 729.3 t/(km²·a) respectively, which was consistent with the results by using ¹³⁷Cs tracer technique. Our study proved that the soil erosion of different land use types and the nutrient flux of catchment could be reconstructed by using lake sediment records.

Key words: Taihu Lake Basin; lake sediment; soil erosion; quantitative relationship; land use