

太湖表层沉积物的空间分布与层序特征分析

沈吉^①, 袁和忠^{①②}, 刘恩峰^①, 王建军^①, 汪勇^①

① 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, 南京 210008;

② 中国科学院研究生院, 北京 100049

E-mail: jishen@niglas.ac.cn

2010-05-04 收稿, 2010-09-30 接受

中国科学院知识创新工程重大项目(KZCX1-YW-14-5)和江苏省自然科学基金资助项目(BK2008055)

摘要 利用 StrataBox 浅水剖面测深系统对大型浅水湖泊-太湖沉积物进行了高密度走航式探测, 采用 SonarWiz.Map 声学软件包对测量矢量图谱进行了解译, 并就解译结果与太湖沉积岩芯及北部湖区姚湾地层剖面进行了对比. 结果显示, 太湖水-土界面以下 10 m 内沉积地层层序较清晰, 湖相沉积物(地层 U1)直接堆覆于黄土层(地层 U2)上, 接触界面年代不整合. 湖相沉积物(淤泥及淤泥质黏土)主要呈带状分布于太湖西部沿岸, 并延伸至东南部的西山岛及西北部湖区, 其余湖区大面积出露致密坚硬的黄土层. 整套湖相沉积物在太湖的沉积厚度主要集中于 1~2 m, 而与现代环境密切相关的淤泥层厚度主要集中于 0.03~1.0 m, 入湖河流泥沙输移以及湖流等水动力作用是影响湖相沉积物空间分布的主要因素.

关键词

表层沉积物
空间分布
层序特征
地球物理勘测
太湖

太湖是我国长江中下游地区最为典型的大型浅水湖泊, 也是富营养化较为严重的湖泊之一^[1,2]. 太湖水环境的研究和治理一直得到各级政府和管理部门的高度重视, 尤其自 2007 年太湖蓝藻大规模暴发, 引发无锡市供水危机后, 太湖的水环境治理引起了社会各界的广泛关注^[3]. 近年来的研究发现, 太湖水体营养盐浓度与底泥的分布存在密切关系^[4-6], 并且在空间上也与蓝藻水华的爆发区域相吻合^[7,8]. 但由于受水下测量技术的限制, 前人对太湖沉积物的空间分布及层序特征一直缺乏全面的认识.

20 世纪 80 年代末, 孙顺才等人^[9]曾采用 GPY 型浅地层剖面仪对太湖湖盆的构造特征开展过断面式勘探, 获得了太湖湖盆的基本构造特征; 范成新等人^[10]采用竹竿插深法, 对太湖沉积物进行插深测量, 定性获得了太湖底泥的区域分布. 继贾更华等人^[11]利用荷兰 SILAS 走航式水深测量系统对太湖北部梅梁湾、竺山湾及贡湖湾进行小规模沉积物分布调查后, 本次研究采用美国 StrataBox 浅水剖面测深系统, 对全太湖沉积物进行了高密度走航式探测, 湖面航程

历时 4 个多月. 室内利用 SonarWiz.Map 声学软件包对测量矢量图谱进行解译, 并通过声学剖面的反射特征与已有沉积岩芯、湖底剖面资料及现场采集的短沉积柱芯进行对比, 获得了太湖沉积物的空间分布以及湖相沉积物的垂向层序特征. 该研究对了解太湖底泥分布, 正确估算太湖内源污染物负荷, 以及指导即将开展的太湖底泥疏浚等具有重要的科学与现实意义.

1 材料与方法

采用数字声纳测深仪(Hondex, USA)首先测定太湖水深分布. 沉积物调查采用 StrataBox 浅水剖面测深系统(Ocean Data Equipment Corporation, USA)进行走航式勘测, 该系统是一套便携、低功耗、高分辨率的水下沉积物探测仪, 最初用于内河和近海沉积物探测^[12,13], 最小分辨率 6 cm, 最大沉积物探测厚度 40 m, 工作区最大水深可达 150 m, 工作频率为 10 kHz. 本次研究将该仪器运用于国内浅水湖泊的沉积物探测, 设定沉积物探测深度为 10 m, 测深系统工

作载体为 10 t 中型渔船, 船体长约 10 m, 航速 6~8 km/h. GPS 定位采用 TRIMBLE 模块化 GPS 接收机 (DSM 232, USA), 与测深仪配套显示系统联用.

勘测路线布设沿 E-W 纬线方向, 测线间距 1 km, 测控范围基本覆盖全湖, 共获得沉积物剖面 130 条 (图 1). 通过 StrataBox 浅水剖面测深仪配套软件系统记录数字化测深数据, 并于现场通过个人电脑实时显示及管理探测剖面图像. 野外工作分别于 2008 年 10~12 月及 2009 年 4~6 月开展. 室内采用 SonarWiz. MAP 声学软件包以 2 km 间距 (局部 1 km 间距) (图 1) 对所得反射剖面矢量图谱进行解译, 得到经度、纬度及深度三维数据组.

在沉积物勘测的同时, 根据不同湖区沉积物类型, 现场以重力采样器 (PVC, ID=8 cm) 无扰动采集沉积岩芯 100 多个, 用于监控地球物理勘测结果与实际岩芯特征的吻合, 也为测量矢量图谱的解译提供验

证. 所采岩芯最短 5 cm, 见于太湖南部及东部湖区, 其他区域岩芯长度均大于 30 cm, 最长 1.5 m, 部分岩芯在底部采得湖底广泛分布的硬质黄土 (下蜀黄土层). 本次研究对 15 个代表性采样点 (图 1) 的沉积岩芯从上往下, 在 0~30 cm 以 1 cm 间距分割, 30 cm 以下以 2 cm 间距分割. 各子样品装入聚乙烯塑料袋密封并低温保存, 于实验室内测定含水率 (ϕ) 及容重 (γ), 用以岩性对比及地层层序确定. 此外, 现场采集了 40 多个覆盖全湖的上覆水和底泥样品, 测定 TN 和 TP 等指标.

2 结果与讨论

2.1 太湖水深分布

采用数字声纳测深仪测得均布太湖 (除东太湖及五里湖) 的水深数据点共 1590 组, 图 2 显示了太湖水深分布的等值线图. 结果显示, 整个太湖测区内水深

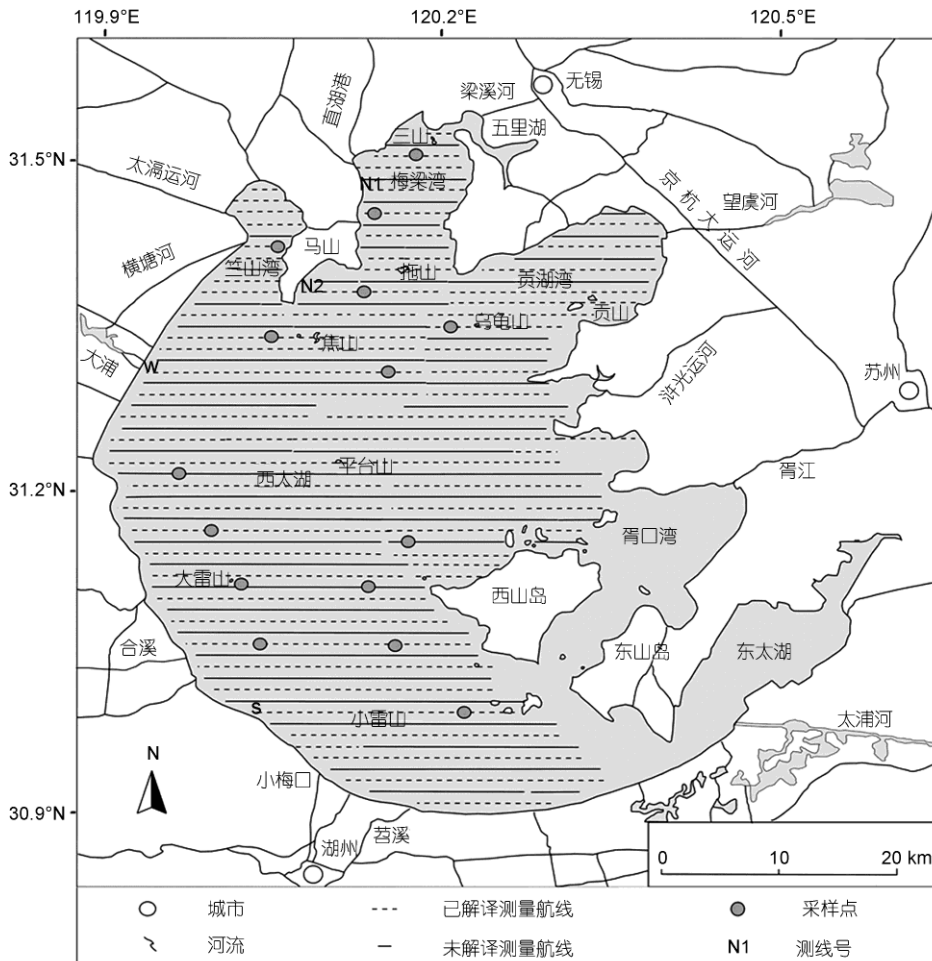


图 1 太湖沉积物勘测航线及代表性柱状岩芯采样点

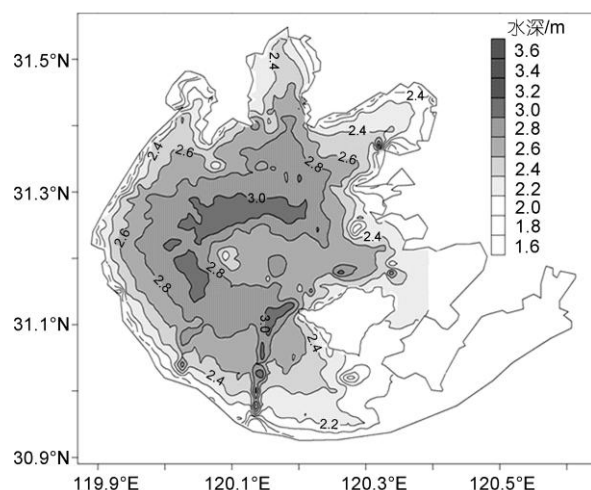


图 2 太湖水深分布

大致在 2.2~3.0 m 之间, 平均水深约 2.6 m. 其中竺山湾平均水深约 2.1 m; 梅梁湾平均水深约 2.3 m; 贡湖湾平均水深约 2.4 m. 大湖区湖盆大致呈碟状, 湖盆边缘水浅湖心水深, 测得最深处 3.4 m. 与以往测量数据相比^[1], 本次测量结果更为精确地显示了太湖的水下地形特征, 湖心整体平坦开阔, 局部存在水底岗丘及深槽, 航道处水深较大, 苕溪入湖口(小梅口)经西山岛西北侧至贡湖湾东北入湖河流(望虞河)为比较明显的条带状深水区, 是太湖南部湖州等地区向北穿过太湖至东北部京杭大运河的主要航道, 表明行船漕运等人类活动引发的水动力作用对湖底地形具有一定影响.

2.2 浅水剖面测深系统揭示的反射界面和地层层序

为了准确解译浅水剖面测深系统所获矢量图谱

的层序含义, 本文开展了太湖钻孔岩芯与矢量图谱的对比分析. 图 3 左侧彩图为梅梁湾北部姚湾内拦湖排水一年后(2007 年), 湖底开挖所得到的地层剖面露头, 这套地层露头清楚而直观地显示了太湖北部湖盆底部的地层层序, (a)为其概化的柱状剖面图; (b)为西太湖马山附近水域沉积物柱状剖面图(据王建等人^[14]资料); (c)为东太湖水域沉积物柱状剖面图(据许雪珉等人^[15]、William 等人^[16]资料); (d)为南太湖表层沉积物柱状剖面图. 根据浅水剖面测深系统获得的全太湖沉积物矢量图谱, 对比现场采集和已有钻孔岩性, 以及出露的地层剖面(图 3), 我们对不同湖区的地层序列进行了划分. 就本次勘探深度, 按反射界面可划分为 I1(水土界面), I2, I3, I4 等共 4 层界面, 10 m 内地层可以划分为 U1, U2, U3, U4 等共 4 套层序(图 4~8).

(i) 地层 U1. 为灰黑色第四纪湖相沉积物, 位于水土界面 I1 之下, 硬质黄土层基底以上, 表面开阔平坦, 为最年轻的一套地层. 地层 U1 上部层序不明显; 下部沉积稳定, 沉积岩芯及地层剖面局部见粗-细不等沉积旋回, 成层性较好, 层理较清晰. U1 地层在各湖区厚度不一, 主要分布于西太湖及太湖西北部, 东太湖及太湖南部分布少而浅, 整体向黄土层(地层 U2)缓坡边缘尖灭. 按含水量变化, 地层 U1 从上往下又可细分为淤泥层(U1-I)及淤泥质黏土层(U1-II), 其中淤泥层与上覆水体直接接触, 生物地球化学过程复杂, 为营养盐等污染物沉降及内源释放的主要蓄积体, 是开展底泥污染、底泥生物地球化学等现代湖沼学研究的主要对象^[17,18].

(ii) 地层 U2. 为黄褐色硬质黏土层, 在太湖湖盆内广泛分布, 勘测图像的反射信号较强. 这套地

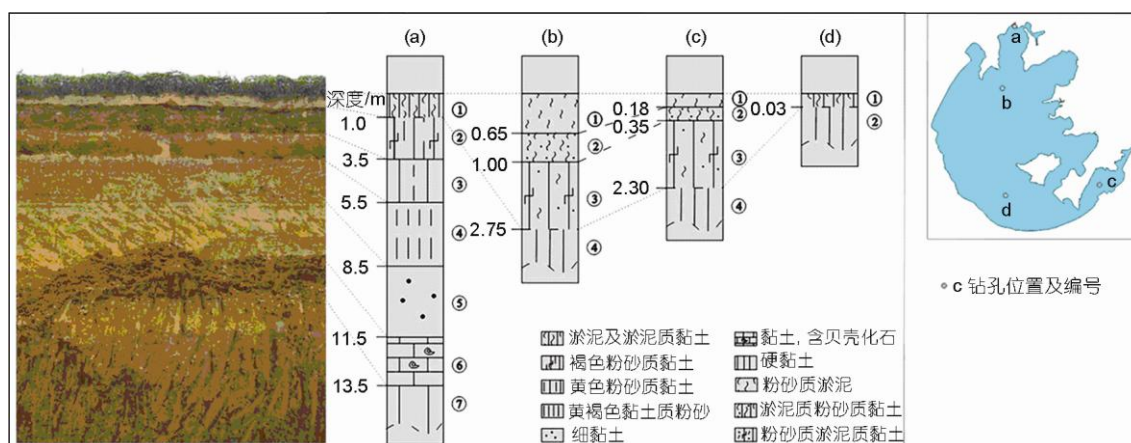


图 3 太湖沉积物岩芯剖面图及地层层序对比

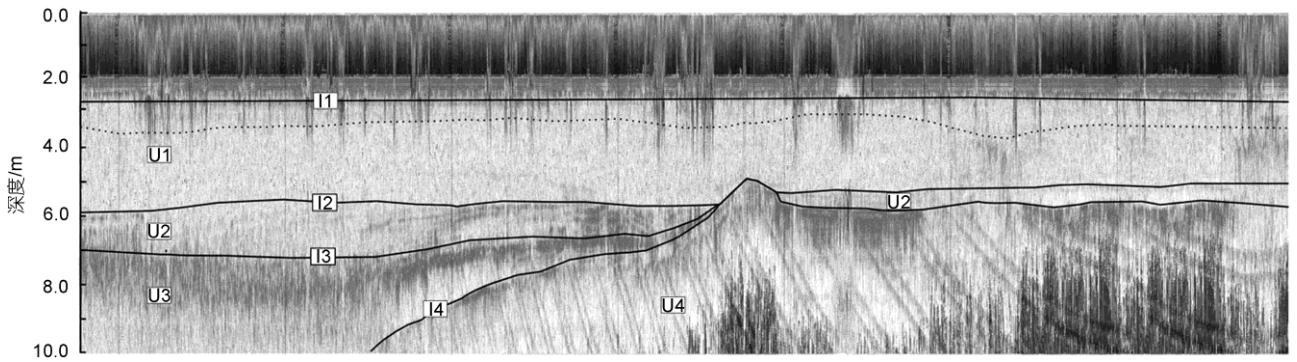


图 4 梅梁湾内 N1 测线剖面图谱揭露的部分地层层序剖面

实线为地层层序分界面, 虚线定义为淤泥层与淤泥质黏土层分界, 不代表明显的层序差异性, 但可以标示两套与现代环境相关的重要地层层序; I1 为去除声纳信号在沉积物表层多重反射后修正的水-土界面, 下同

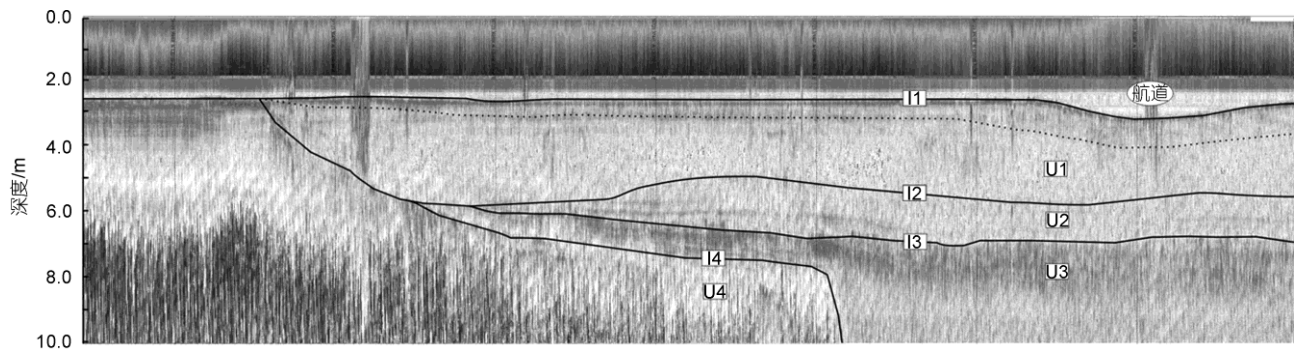


图 5 梅梁湾口马山附近 N2 剖面图谱揭露的部分地层层序剖面

层于湖心及太湖东部湖区大面积出露, 向西部呈缓斜坡下沉. 由所采沉积岩芯可以看出, 其上覆铁锰质胶膜, 内含大量褐色铁锰质结核^[19], 构成太湖湖相沉积物的基底. 太湖北部姚湾湖底长约 15 m 的地层剖面(a)、西太湖长约 2.8 m 岩芯(b)、东太湖长约 2.4 m 岩芯(c)及南太湖所采约 5 cm 的短柱(d)皆穿透湖相沉积至该黄土层, 湖相沉积物与黄土层之间呈不整合接触关系(图 3). William 等人^[16]对钻孔岩芯(c)的湖相沉积与黄土接触部位进行了测年, 湖相沉积物底部 ^{14}C 年龄约为 6500 a BP, 黄土层顶部 ^{14}C 年龄为 (15885 ± 170) a BP, 其他科研人员的研究也证实了沉积间断的存在^[14,15], 由此表明湖相沉积物(或大部分)后期直接堆覆于黄土层之上.

(iii) 地层 U3. 为灰色、灰黄色黏土层, 大致呈近水平的层状结构, 反射信号强, 勘探揭露厚度不等, 沉积稳定, 成层性好. 整套层序中间厚, 边缘至 U4 黄土层斜坡减薄, 直至尖灭. 部分水域勘测深度内该层位缺失, 可能为后期剥蚀, 反映了太湖地层层序的不连续性.

(iv) 地层 U4. 为灰黄色砂土层, 该层位未探测至底部, 反射信号强, 层序稳定, 成层性好. 局部区域 U2 及 U3 缺失, 直接承接 U1 沉积, 形成不整合接触. 层序 U4 下部含大量贝壳等生物化石, 这一层位可为研究太湖是否存在海侵提供佐证.

2.3 太湖湖相沉积物分布特征

湖相沉积是太湖最年轻的一套沉积物, 其分布及淤积厚度与入湖河流空间分布、泥沙入湖量、湖水动力等因素有关, 掌握湖相沉积物的分布, 对揭示太湖底泥中污染物的蓄积和迁移有着重要意义. 此外, 湖相沉积物特别是近表层沉积物孔隙率高, 与上覆湖水物质交换频繁, 是外部污染物质包括河流携带、大气沉降的营养盐等进入湖泊后的初始宿所, 也是内源释放营养盐的主要源区. Søndergaard 等人^[20]研究认为, 通常湖泊表层沉积物中磷的含量是水体中磷浓度的 100 倍以上. 如此高的营养盐浓度, 在沉积物受到扰动(物理、化学及生物等作用)的情况下很容易向上覆水释放, 造成上覆水体的污染.

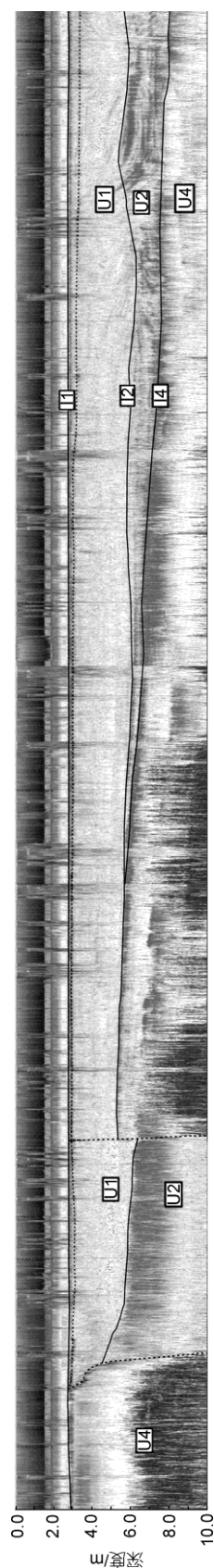


图 6 西太湖大浦口附近纬线方向 W 测线部分地层层序剖面
垂向虚线标示为埋藏的古河道

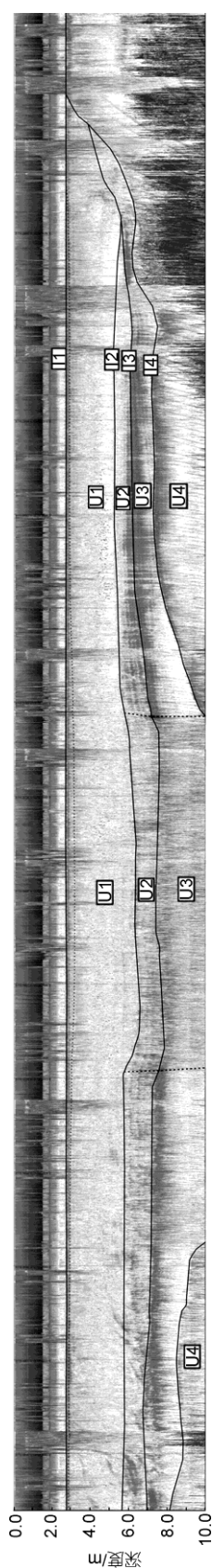


图 7 西太湖大浦口附近纬线方向 W 测线近湖心部分地层层序剖面
垂向虚线标示为埋藏的古河道

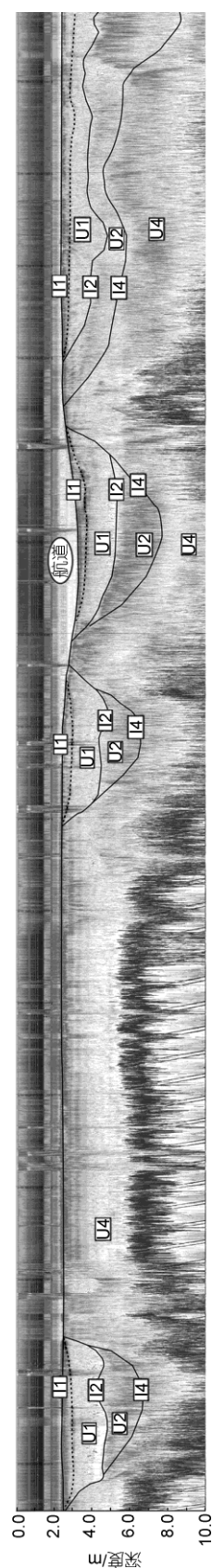


图 8 太湖 S 测线剖面图谱揭露的部分地层层序剖面

受后期压实作用,湖相沉积物含水量、容重、孔隙率及有机质含量等理化指标值由上至下总体呈降低趋势,根据《港口工程地基规范》(JTJ 250-98),湖相沉积物(U1)按含水率(ϕ)划分为淤泥层($\phi > 55\%$, U1-I)及淤泥质黏土层($26\% < \phi < 55\%$, U1-II)两套沉积物相序列,如图 4~8 中虚线所标示。利用 SonarWiz.MAP 声学软件包对 StrataBox 浅水剖面测深系统走航获得的矢量图谱进行空间经度、纬度和深度三维解译,得到 35 万组湖相沉积层底界面数据,42 万组淤泥层底界面数据。再利用 Surfer 8.0 作太湖勘探区湖相沉积物及淤泥空间分布等值线图(图 9)。由此可以看出太湖湖相沉积物总体分布特征。

(i) 湖东及湖心大部分出露黄褐色硬质黄土层,局部湖区上覆浮泥 < 3 cm。湖相沉积层主要分布于太湖偏西及西北部,北部与竺山湾连接,并沿岸向东延伸至马山再向南折至约 31.3°N 湖心区;南部至 31.1°N 大雷山岛附近分化成两支:一支向东延伸至西山岛并环西山岛向北部诸岛扩展;一支向西延伸至苕溪小梅口。全湖平均泥深 0.7 m,与范成新等人^[10]2000 年所得数据(0.82 m)大致相同,有泥区平均泥深约 1.9 m,深于范成新等人 2000 年所测得的 1.17 m。除西部湖区及大雷山岛至西山诸岛绵延成片外,其他湖区呈斑块状零星散布,泥深不等。全湖湖相沉积层深度主要集中于 $1\sim 2$ m,最深处约 5 m,出现在大浦河口附近。

(ii) 太湖北部湖湾内湖相沉积物分布各有特点。竺山湾除中部以外,基本为湖相沉积物所覆盖,湾内有泥区平均泥深约 1.8 m;梅梁湾内的湖相沉积物则

主要分布于湾西及湾北,有泥区平均泥深约 1.4 m,与范成新等人^[10]所得平均泥深约 1.5 m 类似。梅梁湾平均泥深约 0.4 m,浅于范成新等人^[10]所测得 0.75 m,除技术手段的精度差异外,这或许和梅梁湾部分湖区后期经疏浚挖除部分淤泥有关。贡湖湾仅小部分区域为软泥覆盖,主要分布于贡山周边,全湾平均泥深 0.3 m,有泥区平均泥深约 1 m,大部分区域出露硬质黄土。

(iii) 太湖淤泥层主要集中于 $0.03\sim 1.0$ m,表层呈浮、流泥态,极易为风浪扰动再悬浮,地球化学作用复杂。它受生物扰动强烈,是微生物活动的主要场所。淤泥层分布区域与湖相沉积物大致相同,最深处达 1.2 m,位于大浦河口附近。淤泥层含水率 $> 55\%$,与其他湖泊的底泥类似^[20],表层淤泥所蓄积的营养盐含量远高于上覆水体中营养盐的浓度,如大浦河口附近,测得上覆水中 TP 含量约 0.06 mg/L,而表层 2 cm 沉积物中 TP 含量高达 657.0 mg/(kg·dw)。另外,可为生物直接利用的 PO_4^{3-} ,上覆水中浓度为 0.02 mg/L,表层沉积物($0\sim 2$ cm)孔隙水中则达到 0.26 mg/L,存在一个数量级的差别。作为大型浅水湖泊,太湖水动力及生物地球化学作用频繁复杂,导致淤泥层蓄积的营养盐易于解析并通过浓度梯度向上覆水体释放,从而加重湖水的营养状态^[21,22]。所以单独划出这一层位具有重要的环境学及生态学意义。

2.4 太湖湖相沉积物分布与人湖泥沙及湖流的关系

孙顺才等人^[9]、William 等人^[23]及刘建军等人^[24]分别对西太湖开阔区、太湖西北部马山附近及西太湖

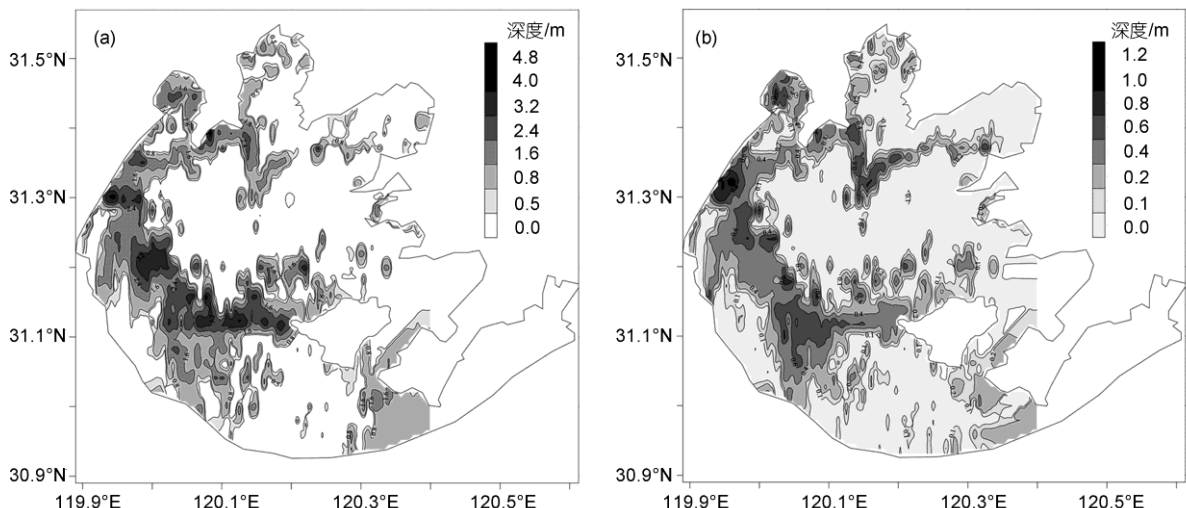


图 9 太湖湖相沉积物分布(a)及淤泥层分布(b)

大浦河口附近表层沉积物进行了 ^{210}Pb , ^{14}C 和 ^{137}Cs 测年, 得出相应点位沉积速率分别为 0.4, 0.3 和 1.4 mm/a. 前两者相差不大, 后者位于河口区, 沉积速率明显高于前两者. 悬移泥砂经河水搬运至河口, 水面骤然开阔, 水动力减弱, 泥砂颗粒发生沉降, 从而导致近河口区的沉积速率高于湖心区, 表现为沿岸带沉积物较厚, 向湖心方向越来越薄. 太湖主要入湖河流(苕溪水系、南溪水系及太滬运河等)分布于西部, 湖相沉积物的分布和主要来水系入湖口(如大浦口和小梅口)空间上的一致性和连续性(图 9), 说明了入湖河流对太湖湖相沉积物的影响.

另一方面, 夏季丰水期(河流泥沙主要补给季节)太湖地区盛行东南风, 湖面开阔, 吹程长^[5], 风力驱动下常形成较稳定的湖流. 图 10 代表太湖在夏季盛行风场情况下的主导风成湖流场^[25], 在偏东南风场作用下, 太湖形成逆时针的主环流, 最大流速可达 30 cm/s. 在此主控流场外, 还存在不同规模形态的小型流场, 如北部湖湾受复杂的地形影响, 流场复杂且不稳定. 作为浅水湖泊, 太湖浪基面常大于湖水深度, 风浪形成的湖流沿着湖底地形和流场方向搬运和沉积泥沙, 在湖流作用下, 湖心表层悬浮泥砂等难以沉降堆积, 从而保持了湖心的硬底状态; 而西部及西山岛沿岸则形成风生沿岸流沉积, 加强了该区域湖相沉积物的蓄积. 同时, 小规模的地局环流形成了局部湖区湖相沉积物的空间分布特点, 如小尺度的硬底出露或湖相沉积物的斑状蓄积. 总体而言, 太湖湖盆西低东高的自然地形叠合后期的水动力作用形成了现今的太湖湖相沉积物分布特点.



图 10 太湖夏季盛行湖流流场^[25]

2.5 太湖湖盆古河道及洼地

从浅水剖面测深系统所揭露的湖底地形及沉积层序看, 除湖心、太湖东部及南太湖大部分湖区出露黄土地层(U2)外, 其余皆分布有现代湖相沉积物, 声纳反射特征总体稳定, 层序较清晰. 同时, 湖盆内湖相沉积物之下可见埋藏的古河道(图 6,7)及深浅不一的低洼地分布(图 8). 古河道主要发育于太湖西部, 宽窄不一, 部分切穿下部黄土层及其下的沉积层, 并可能和现代入湖河道相连, 如图 6 中古河道靠近大浦口入湖河口, 最宽处可达 300 余米. 不同于孙顺才等人^[1]调查显示古河道多呈 E-W 向分布, 本次探测到古河道呈近 S-N 走向, 这一定程度上和两次调查测线的布设不同有关, 也反映了太湖古河道的走向不一. 浅洼地处则多见于太湖东部及南部, 局部呈不等幅波状起伏, 大部分并未穿透黄土层. 古河道及洼地皆为后成的湖相沉积所覆盖. 据孙顺才等人^[1,9]、William 等人^[23]推测, 整个太湖底部曾经为海退之后大面积黄土所覆盖的冲积平原环境, 这些古河道及浅洼地一定程度上反映了后期营力对黄土层的侵蚀和剥蚀作用.

2.6 太湖湖相沉积物分布与水体富营养化关系

西北部包括竺山湾、梅梁湾及太湖西部已处于重富营养化状态, 水体中的营养盐如 TN, TP 浓度严重超标, 水华灾害频发^[17,26]. 图 11 显示了由均布太湖的 40 个采样点所得到的 TN 和 TP 空间变化特征等值线图, 图中明显可以看出太湖西北部及西部沿岸表现出较高浓度的 TN 和 TP 分布, 湖心、太湖东部及南部浓度则明显低于西北部, 这基本上和太湖西北部湖相沉积物的分布一致. 研究表明, 湖泊中底泥既可以是水体中营养盐的“源”, 也可以是“汇”. 当受污染的河水将大量营养盐带入湖泊时, 大部分营养盐滞留于湖水中, 但也有一部分营养盐进入底泥, 这时底泥成为水体中营养盐的“汇”; 另一方面, 当蓝藻暴发时, 藻类吸收水体中大量的 N 和 P 营养盐, 这时风浪扰动底泥, 底泥中可为生物吸收的 N 和 P 释放进入水体, 再进一步为藻类吸收, 通过这种“泵吸”作用使底泥成为水体中营养盐的“源”. Ruban 等人^[27]的研究表明, 湖相沉积物所蓄积的营养盐在物理、化学及生物等机制作用下受浓度梯度的驱动和水动力影响向上覆水体释放, 导致上覆水体营养盐浓度的增加, 这种营养盐的水-土界面互馈机制在浅水湖泊水体富营养过程

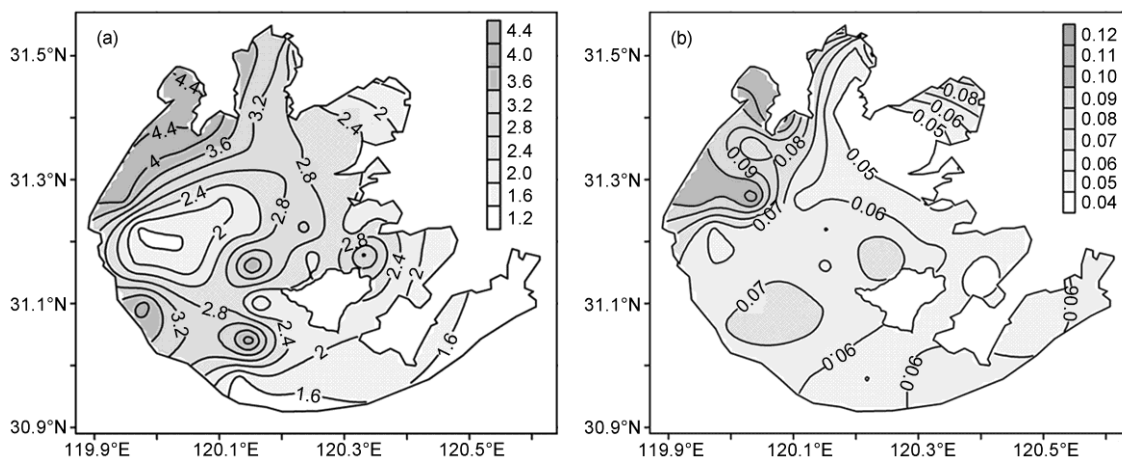


图 11 太湖水体 TN(a)和 TP(b)浓度(mg/L)空间变化等值线图

中是十分重要的。此外，内、外源污染物的相互叠加也是西北部湖区富营养状态难以改善的重要原因。

3 结论

StrataBox 浅水剖面测深系统对太湖沉积物探测结果表明，太湖湖盆表层 10 m 内沉积物存在比较明显的层序分层，湖相沉积物直接堆覆于致密的黄褐色黏土层上，呈明显的地层不整合。湖相沉积物在全太湖分布极为不均衡，主要分布于西太湖沿岸、西山

岛西北侧以及北部湖湾内，其余湖区斑块状散布，或出露大面积黄土层。太湖底泥分布受河口沉积作用和湖流水动力两方面因素的控制和影响。

本文将 StrataBox 浅水剖面测深系统运用于太湖沉积物探测，为国内大型浅水湖泊底泥探测积累了一定经验。但由于太湖面积过大且沉积物分布复杂，对太湖沉积物层序划分的精确性及内部结构的分析，尚存在一定的不确定性，需要后续更多岩芯钻探的配合对比与分析研究。

致谢 无锡市考古研究所陈万康研究员提供太湖姚湾剖面资料。孟祥华、张勇参加野外沉积物调查与部分实验工作，在此深表感谢。

参考文献

- 1 孙顺才, 黄漪平. 太湖. 北京: 海洋出版社, 1993
- 2 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. 湖泊科学, 2005, 17: 213—218
- 3 Rydin E. Potentially mobile phosphorus in Lake Erken sediment. Water Res, 2000, 34: 2037—2042
- 4 秦伯强, 胡维平, 高光, 等. 太湖沉积物悬浮的动力机制及内源释放的概念性模式. 科学通报, 2003, 48: 1822—1831
- 5 范成新, 张路, 秦伯强, 等. 风浪作用下太湖悬浮态颗粒物中磷的动态释放估算. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2003, 33: 760—768
- 6 朱广伟, 秦伯强, 高光. 风浪扰动引起大型浅水湖泊内源磷暴发性释放的直接证据. 科学通报, 2005, 50: 66—71
- 7 中国科学院南京地理与湖泊研究所. 太湖梅梁湾 2007 年蓝藻水华形成及取水口污水团成因分析与应急措施建议. 湖泊科学, 2007, 19: 357—358
- 8 朱广伟. 太湖富营养化现状及原因分析. 湖泊科学, 2008, 20: 21—26
- 9 孙顺才, 伍贻范. 太湖形成演变与现代沉积作用. 中国科学 B 辑, 1987, 12: 1329—1339
- 10 范成新, 刘元波, 陈荷生. 太湖底泥蓄积量估算及分布特征探讨. 上海环境科学, 2000, 19: 72—75
- 11 贾更华, 袁洪州. 荷兰 SILAS 走航式适航水深测量系统在太湖底泥测量中的应用与实践. 水利科技与经济, 2005, 11: 521—523
- 12 Moreno-Amich R, Garcia-Berthou E. A new bathymetric map based on echo-sounding and morphometrical characterization of the Lake of Banyoles (NE-Spain). Hydrobiologia, 1989, 185: 83—90
- 13 Sindhu B, Suresh I, Unnikrishnan A S, et al. Improved bathymetric datasets for the shallow water regions in the Indian Ocean. J Earth Syst Sci, 2007, 116: 261—274
- 14 王建, 汪永进, 刘金陵, 等. 太湖 16000 年来沉积环境的演变. 古生物学报, 1996, 35: 213—223

- 15 许雪珉, William Y B C, 刘金陵. 11000 年以来太湖地区的植被与气候变化. 古生物学报, 1996, 35: 175—186
- 16 William Y B C, 刘金陵. 11000 年以来太湖的形成与演变. 古生物学报, 1996, 35: 129—135
- 17 朱广伟, 秦伯强, 高光, 等. 太湖近代沉积物中重金属元素的累积. 湖泊科学, 2005, 17: 143—150
- 18 刘恩峰, 沈吉, 朱育新, 等. 太湖表层沉积物重金属元素的来源分析. 湖泊科学, 2004, 16: 113—119
- 19 俞立中, 许羽, 许世远. 太湖沉积物的磁性特征及其环境意义. 湖泊科学, 1995, 7: 141—150
- 20 Søndergaard M, Jensen J P, Jeppesen E. Role of sediment and internal loading of phosphorus in shallow lakes. *Hydrobiologia*, 2003, 506-509: 135—145
- 21 Lijklema L, Koelmans A A, Portielje R. Water quality impacts of sediment pollution and the role of early diagenesis. *Water Sci Technol*, 1993, 28: 1—12
- 22 秦伯强, 朱广伟, 张路, 等. 大型浅水湖泊沉积物内源营养盐释放模式及其估算方法—以太湖为例. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2005, 35(增刊 II): 33—44
- 23 William Y B C, 许雪珉, 杨景荣, 等. 从沉积物特征谈太湖的演变. 湖泊科学, 1994, 6: 217—226
- 24 刘建军, 吴敬禄. 太湖大浦湖区近百年来湖泊记录的环境信息. 古地理学报, 2006, 8: 559—564
- 25 秦伯强, 陈宇炜, 胡维平, 等. 太湖梅梁湾水动力及相关过程的研究. 湖泊科学, 2000, 12: 327—334
- 26 Trolle D, Zhu G W, Hamilton D, et al. The influence of water quality and sediment geochemistry on the horizontal and vertical distribution of phosphorus and nitrogen in sediments of a large, shallow lake. *Hydrobiologia*, 2009, 627: 31—44
- 27 Ruban V, Brigault S, Demare D, et al. An investigation of the origin and mobility of phosphorus in freshwater sediments from Bort-Les-Orgues Reservoir, France. *J Environ Monit*, 1999, 1: 403—407