

武汉东湖沉积物孔隙度与含水量*

杨 洪^{1,2} 易朝路³ 邢阳平^{4,2} 谢 平²

(1:中国科学院测量与地球物理研究所环境与国土研究室, 武汉 430077; 2: 中国科学院水生生物研究所东湖湖泊生态实验站
武汉 430072; 3:南京大学城市与资源学系, 南京 210093; 4:华南热带农业大学农学院, 儋州 571700)

提 要 对采自武汉东湖 I 站、II 站的沉积物采用一种新的方法计算孔隙度:拍摄扫描式电子显微镜(SEM)图像,采用局部区域阈值化的方法对图像进行阈值化(thresholding)处理,运用自编程序求出孔隙度的垂直变化。结合含水量的垂直变化,分析孔隙度与含水量之间的关系,并对影响它们垂直变化的因素进行了讨论。结果表明:SEM 图像局部区域阈值化法是研究沉积物孔隙度的有效方法,孔隙度与含水量表层较大,从表层到底层呈明显的下降趋势;孔隙度(K)与含水量(H)有比较好的正相关。运用拟合的相关方程式,可以由较易获得的东湖 I 站和 II 站的含水量反推较难获得的孔隙度。

关键词 东湖 沉积物 阈值化处理 孔隙度 含水量 相关分析

分类号 P512.32

日益严重的湖泊水体富营养化使得人们密切关注生源要素的含量、分布和迁移转化规律^[1,2]。湖泊沉积物是流域中生源要素的主要归宿,进入沉积物的生源要素在水体中容易长期积累,并在适宜的条件下释放到水体中,引起水体二次污染。沉积物中生源要素主要随孔隙水渗透向水体中释放,渗透率与孔隙度和含水量密切相关,影响渗透率的因素直接或间接的影响着孔隙度^[3,4]。因此,孔隙度和含水量与物质的释放有密切关系^[5-7],研究沉积物的孔隙度和含水量就具有十分重要的意义。但孔隙度较难求出,对沉积物孔隙度研究较少^[8-8]。扫描式电子显微镜(SEM)为沉积物孔隙度的研究提供了新的方法。在 SEM 中观察到的是沉积物的二维空间图像,由于沉积物中大部分孔隙呈分枝网状,可以认为第三维是等值的,所以虽然观察到的是随机的一些切面,但整个来说他们还是相当准确的反映了整个孔隙系统^[8]。本文对采自武汉东湖 I 站和 II 站的沉积物拍摄 SEM 图像,对图像进行阈值化(thresholding)处理,求出孔隙度的垂直变化。结合含水量的垂直变化,分析孔隙度与含水量之间的关系,并对影响二者垂直变化的因素进行了讨论。

1 研究区概况和研究方法

1.1 研究区概况

东湖位于武汉市武昌区东北部,是长江中游一个中型浅水湖泊(图 1),水域面积在水位 20.5 m 时为 27.9 km²,流域面积约 187 km²,平均水深约 2.21 m,最大水深 4.75 m^[9]。自 20 世纪 60 年代以来,随着工农业迅速发展和居民人口大量增加,东湖受到人类活动的干扰和影响越来越大,水体富营养化严重。

1.2 样品的采集

采样时间为 2002 年 4 月,用自制的静压采样器,在东湖 I 站(30.33,02.5°N,114.21,29.9°E)钻取孔深为 90 cm 的钻孔一个,在东湖 II 站(30.32,59.5°N,114.22,40.7°E)钻取孔深为 150 cm 的钻孔一个(图 1)。样品储存于内径 57 mm 的 PVC 管内。根据沉积物的质地、颜色与磁化率 K 值^[10],将 I 站和 II 站的样品大致分为三层:表层到 16 cm,16 cm 到 70 cm,70 cm 到底层。

1.3 样品孔隙度和沉积物含水量的计算

按 1 cm 一份将样品分割成的两份小样装入小塑料盒和塑料袋中。将样品连同小塑料盒在液氮中浸泡 15 min,用冻干机在 -50°C 冷冻干燥 6 h,表面喷金,采用 1000 倍的放大率拍摄 SEM 图像。由于湖泊沉积物的 SEM

* 国家自然科学基金(4997108),中国科学院东湖生态系统实验站开放基金(200105)联合资助。

2003-02-02 收稿; 2003-08-10 收修改稿。杨洪,男,1978 年生; email: hongyanghy@yahoo.com.cn

图像还有一定的独特性:图像不均匀,泥土颗粒与背景之间的灰度混迭,不可能在整幅图像中选择一个阈值,必须在各个局部区域设立不同的阈值进行处理,最后连接成整幅图像。因此作者对东湖沉积物 SEM 图像采用局部区域阈值化的方法选择恰当的阈值^[11]。在 PhotoShop 软件中将 SEM 得到的灰阶图像进行阈值化处理,最后根据公式 $V=n_1/(n_1+n_2) \times 100\%$ 来计算孔隙度,其中 n_1 是孔隙的像素数目, n_2 是沉积物颗粒的像素数目。

将另外一份样品烘干至恒重测含水量。

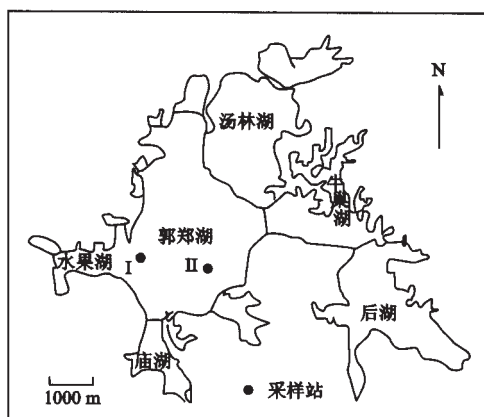


图 1 东湖采样位置

Fig.1 Location of sampling in Lake Donghu, Wuhan

2 结果

2.1 东湖沉积物孔隙度

运用笔者完成的湖泊沉积物孔隙度计算程序求出东湖 I 站、II 站沉积物的孔隙度平均为 39.40% 和 40.24%。东湖 II 站的孔隙度略高于 I 站,尤其是在表层东湖 II 站孔隙度比 I 站高 3.75%。I 站和 II 站沉积物的孔隙度都表现出从表层到底层逐渐减小的特点(图 2),尤其是 II 站表层沉积物孔隙度比底层沉积物孔隙度大 8.58%。表层沉积物的孔隙度波动较大,II 站的波动更大,变异系数(C_V)是 0.067。

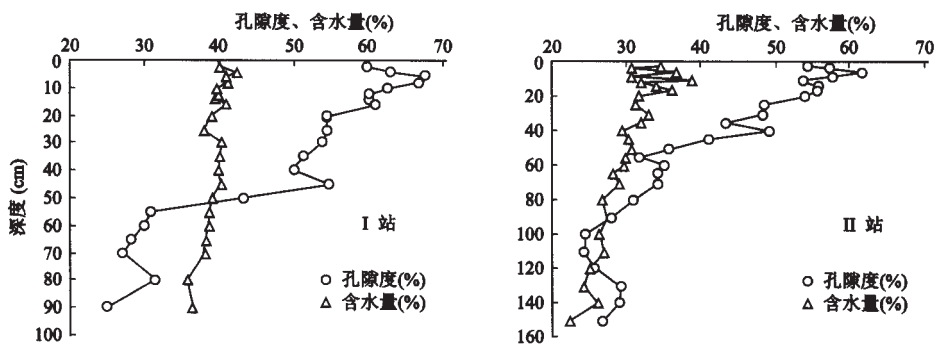


图 2 东湖 I 站、II 站沉积物的孔隙度和含水量

Fig.2 Porosity and water content of sediment at Station I and II in Lake Donghu, Wuhan

2.2 东湖沉积物含水量

东湖 I 站、II 站沉积物的平均含水量分别为 49.25% 和 51.70%, II 站高于 I 站。在中层和底层东湖 II 站含水量比 I 站高 8.04% 和 9.20%。I 站和 II 站沉积物的含水量从表层到底层都逐渐减小(图 2), I 站和 II 站表层

沉积物含水量比底层沉积物含水量大 34.3%和 28.9%。表层沉积物的含水量波动较大, I 站的波动更大, 变异系数是 0.049。

3 讨论

3.1 东湖沉积物孔隙度

决定沉积物孔隙度的主要因素是颗粒的大小、排列方式、分选程度的好坏、胶结作用和压实作用等^[3,4]。对于东湖这种浅水湖泊, 物理作用对孔隙度的影响也是相当大的。东湖水深较浅, 采样现场测量 I 站为 320 cm, II 站水深为 460 cm, 湖区开敞度大, 风浪对表层沉积物的扰动强烈, 反复的再悬浮再沉积作用使孔隙度发生较大变化, 水动力扰动是导致表层沉积物的孔隙度波动的主要原因。II 站的水动力扰动较为强烈, 因此变异系数也较大。此外, 水生生物生长和污水排入也加剧了表层沉积物孔隙度的波动。

沉积物表层生物活动频繁、有机质含量较高、生物搅动作用和水动力扰动强烈^[11], 孔隙度较大。从表层到底层孔隙度呈明显的下降趋势, 这种趋势与沉积物的质地、生物扰动作用、有机质(OM)含量、压实作用和胶结作用等密切相关。从表层到底层沉积物依次是淤泥质砂质粘土、粉砂质粘土和粘土。根据对生源要素的测定, 东湖 I 站表层的总有机碳(TOC)比中层和底层高 2.54%和 3.87%, 东湖 II 站表层的 TOC 比中层和底层高 2.94%和 3.57%, 有机物质含量显著降低。重力压实作用也会导致孔隙度从表层到底层逐渐减小。产生压实作用的重力包括沉积物自重和上覆水体的重量, 此外, 浅水湖泊水动力扰动也会产生向下压实的力。沉积物所受的重力压实作用使得沉积物的个体颗粒和颗粒群重新组合, 并能增大沉积物颗粒之间的接触面积, 从而减小孔隙度^[13-15]。胶结作用也能增大颗粒间的接触面积减小孔隙度。

可以用对数方程来模拟沉积物孔隙度(K)随埋藏深度(S)的变化^[5,15]:

$$S_1 = -542.69 \ln(K_1) + 2028.40 \quad (r = 0.81); \quad S_2 = -421.61 \ln(K_2) + 1610.90 \quad (r = 0.90)$$

3.2 东湖沉积物含水量

从图 2 可以看出表层的含水量明显高于中层和底层, 表层沉积物的含水量较高与生物搅动作用密切相关。Khadge 等人进行的对比研究证实了扰动作用可以导致沉积物的含水量显著增加^[16]。McCall 等人的研究发现在实验条件下, 珠蚌的挖掘洞穴、进食、呼吸等活动可以增加沉积物含水量 10%–20%^[17]。较高有机质(OM)含量与表层较高的含水量也有着密切的关系。Cyr 的研究证实沉积物的含水量与有机物质含量有很好的正相关^[18]。Malinga-Urban 的研究发现水生生物体对氧的消耗与沉积物的含水量有相当好的正相关^[19]。东湖 I 站和 II 站表层沉积物的生源要素含量比中层和底层明显增加, 其中以 TOC 的增加最为明显, 表层沉积物高生源要素含量与高含水量相对应。

由于受重力压实作用影响沉积物的含水量从表层到底层也表现出明显的下降趋势(图 2)。

3.3 东湖沉积物孔隙度与含水量的相关性

运用 STATISTIC 软件对东湖沉积物的孔隙度和含水量进行分析, I 站和 II 站沉积物孔隙度(K)和含水量(H)都有较好的正相关(图 3)。利用得到的方程式, 就可以由比较容易获得的 I 站和 II 站的含水量反推比较难以获得的孔隙度。但是孔隙度与含水量之间的关系比较复杂, 它不仅取决于湖泊的类型, 而且受到湖泊营养程度、湖底动力特征(侵蚀、搬运、堆积)、湖泊底质等因素的影响^[20]。适用于各种湖泊、各个时期的更为通用的孔隙度和含水量之间关系的拟合方程还有待于进一步研究。

4 结论

应用 SEM 图像局部区域阈值化法求出东湖 I 站和 II 站沉积物的孔隙度, 结合含水量的研究, 可以得到如下结论:

(1) 应用 SEM 图像局部区域阈值化法研究沉积物孔隙度是可行的, 而且结果可靠。

(2) 东湖 I 站和 II 站表层沉积物孔隙度波动较大, 水动力扰动是主要原因, 沉积物的孔隙度从表层到底层呈明显的下降趋势, 这种下降趋势与沉积物的质地、生物扰动作用、有机质含量、压实作用和胶结作用等密切相关, 沉积物孔隙度随深度变化可以用对数方程模拟。

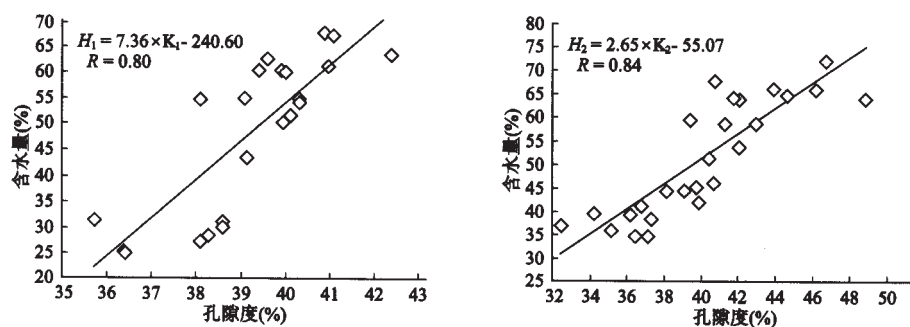


图3 东湖 I 站和 II 站沉积物孔隙度与含水量关系

Fig.3 Relationship of porosity with water content of the sediment at Station I and II in Lake Donghu

(3) 东湖 I 站和 II 站表层沉积物含水量明显高于中层和底层,与生物搅动作用和较高有机质含量密切相关,由于受重力压实作用影响沉积物的含水量从表层到底层也表现出明显的下降趋势。

(4) 东湖 I 站和 II 站沉积物孔隙度和含水量有较好的正相关,运用拟合的相关方程式,可以由比较容易获得的东湖 I 站和 II 站的含水量反推比较难以获得的孔隙度。

致谢 SEM 图像由武汉理工大学测试中心拍摄,采样、分样工作得到戎克文工程师、胡望斌硕士、肖飞硕士的帮助,孔隙度计算得到饶鸣硕士的帮助,在此一并表示衷心的感谢。

参 考 文 献

- Smith V H, Tilman G D, Nekola J C. Eutrophication: impacts of excess nutrient inputs on freshwater, marine and terrestrial ecosystems. *Environmental Pollution*, 1999, **100**: 179-169
- 王雨春, 万国江, 尹澄清等. 红花湖、百花湖沉积物全氮、可交换态氮和固定铵的赋存特征. *湖泊科学*, 2002, **14**(4): 301-309
- 马力, 郑艳辉. 人工神经网络预测木头油田储层孔隙度渗透率. *河南石油*, 2002, **16**(3): 15-17
- 吴欣松. 建立渗透率解释模型的一种优化方法. *石油大学学报(自然科学版)*, 1998, **22**(6): 43-45
- David B Bahr, Eric W H Hutton, James P M Syvitski *et al.* Exponential approximation to compacted sediment porosity profiles. *Computers Geosciences*, 2001, **27**: 691-700
- Yoram Avnimelech, Gad Ritvo, Leon E Meijer *et al.* Water content, organic carbon and dry density in flooded sediments. *Aquaculture Engineering*, 2001, **25**: 25-33
- Fahey T J, Young D R. Soil and xylem water potential and soil water content in contrasting *Pinus contorta* ecosystems, southeastern Wyoming, USA. *Oecologia*, 1984, **61**: 346-351
- 帕尔芬诺娃 Е И, 亚里诺娃 Е А. 土壤微形态研究指南. 北京: 农业出版社, 1987: 81
- 刘建康. 东湖生态学研究(二). 北京: 科学出版社, 1995: 4-25
- 李晓, 龙昱, 申燕萍. 武汉东湖现代沉积物磁组构特征及意义. *世界地质*, 2002, **21**(3): 223-227
- 周孝宪等. 使用微机图像处理. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1994: 195-204
- 李天杰, 郑应顺, 王云. 土壤地理学. 北京: 高等教育出版社, 1983: 45-46
- Hamilton E L. Variation of Density and Porosity with Depth in Deep-Sea Sediments. Performer: Naval Undersea Center San Diego Calif. density porosity depth deep-sediments 1975: 24
- Mastumoto E, Wong C S. Heavy metal sedimentation in Saanich inlet measured with ^{210}Pb technique. *J Geophys Res*, 1977, **82**(34): 5477-5482
- Audet D M, McConne U J D C. Establishing reslution limits for tectonic subsidence curves by forward basin modeling. *Marine and Petroleum Geology*, 1994, **11**(3): 400-411

- 16 Khadge N H. Effect of benthic disturbance on geotechnical characteristics of sediments from nodule mining area in the Central Indian Basin. The Proceedings of the Third (1999) ISOPE Ocean Mining Symposium, Goa, India, 1999: 138-144
- 17 McCall P L, Tevesz M J S, Schwelgien S F. Sediment mixing by *Lampsilis radiata siliquoidea* (Mollusca) from western Lake Erie. *Journal of Great Lakes Research*, 1979, 5(2): 105-111
- 18 Cyr H. Effects of wave disturbance and substrate slope on sediment characteristics in the littoral zone of small lakes. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 1998, 55(4): 967-976
- 19 Malinga-Urban B, Opalinski K. Interstitial community oxygen consumption in a Baltic sandy beach: horizontal zonation. *Oceanologia*, 2001, 43(4): 455-468
- 20 霍坎松 L, 杨松 M. 湖泊沉积学原理. 北京: 科学出版社, 1992: 60-62

Porosity and Water Content of Sediments in Lake Donghu, Wuhan

YANG Hong^{1,2}, YI Chaolu³, XING Yangping^{4,2} & XIE Ping²

(1: Department of Environmental Science, Institute of Geodesy and Geophysics, CAS, Wuhan 430077, P.R.China;

2: Donghu Experimental Station of Lake Ecology, Institute of Hydrobiology, CAS, Wuhan 430072, P.R.China;

3: Department of Environment and Resource Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093, P.R.China;

4: Agriculture College, South China University of Tropic Agriculture, Danzhou 571700, P.R.China)

Abstract

Two undisturbed sediment cores of 95cm and 150cm at the Station I and II in Lake Donghu, Wuhan, were collected respectively. A new method was used to calculate the samples' porosity with the following procedures: the images of the samples were taken in scanning electron microscope (SEM); thresholding of the images were taken by the selection method for local threshold; and the variations of porosity and water content with the depth were analysed by the self-made program. Furthermore, the factors that affect the variations of porosity and water content with the depth were discussed. The relationship of porosity with water content was studied as well. The results show that:

(1) SEM images local thresholding method was a new feasible and effective method of researching sediments' porosity. The results were reliable.

(2) At Station I and Station II in Lake Donghu, sediment porosity fluctuated greatly in the surface layer due to water disturbance. Reduction of sediment porosity with depth was the results of decrease of the organic matter (OM) content and disturbance and increase of the gravitational compaction. Gravitational compaction was modelled by an logarithm equation that gave the sediment porosity as a function of burial depth. The variations of the sediment porosity with depth were modelled by logarithm equations.

(3) In the surface layer, the water content exhibited an abrupt decrease with depth due to the decrease of bio-perturbation and organic matter content (OM). Under gravitational compaction, the water content exhibited an obvious decrease with depth from surface layer to substrate.

(4) Porosity(K) was well correlated with water content(H), and they were both in positive correlation. The correlation equations were: $H_1 = 7.3571 \times K_1 - 240.60 (r = 0.80)$; $H_2 = 2.65 \times K_2 - 55.07 (r = 0.84)$. Using the equations, we could calculate porosity of the sediments at Station I and Station II in Lake Donghu, which can not be easily made, from water content that can be easily obtained.

Keywords: Lake Donghu; sediment; porosity; water content; correlation analysis