

不同水动力扰动下太湖沉积物的悬浮特征*

罗激葱^{1,2} 秦伯强¹ 胡维平¹ 张发兵^{1,2}

(1: 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 南京 210008; 2: 中国科学院研究生院, 北京 100039)

提 要 利用2002年7月及2003年4月分别在太湖乌龟山和梅梁湾的水动力观测资料, 计算了波浪和湖流产生的湖底切应力, 分析了二者对太湖沉积物悬浮的不同贡献. 结果发现, 在小扰动情况下, 流切应力大于波切应力, 但不能引起沉积物的悬浮; 在强扰动情况下, 底流对沉积物悬浮的影响可以忽略, 且扰动越强, 其作用越小, 而波浪的影响却愈加突出; 在中等扰动下, 二者的相互作用产生沉积物的悬浮, 但波浪的作用较为显著. 该结论能为计算太湖水体悬浮物浓度和动态内源释放提供重要的参考依据.

关键词 扰动 沉积物 悬浮 太湖

分类号 P512.32

沉积物悬浮以其对水体生态系统的巨大影响而为众多研究者所关注^[1-4], 特别在浅水湖泊中, 如 Luetich 等^[5]指出, 在 Balaton 湖沉积物中磷的释放量相当于外源磷输入量的 95%, 一次中等强度的扰动产生的内源磷释放量相对于一天的外源磷输入量. 即使在沉积物深度达 20cm 的层位上, 其中的磷依然可被释放进入水体^[6]. 这些沉积物中的营养盐之所以能够进入水体, 与沉积物的再悬浮过程密切相关^[7]. 由此可见, 研究水动力作用对沉积物悬浮的影响, 具有非常重要的意义.

秦伯强等^[8]和罗激葱等^[9]通过对湖底切应力的计算, 得出了太湖中沉积物悬浮主要由波动作用引起的结论, 但是没有具体分析不同扰动下的情况. 本文基于上述研究, 分析了太湖沉积物在不同扰动下的悬浮机制, 以期对太湖内源释放的研究提供参考.

1 湖底切应力的计算

目前, 大多数计算水底切应力的方法主要源于 Grant & Madsen 的研究^[10], 因为该研究较早也较系统地提出了水底边界层处切应力计算的基本理论, 本文参考了该研究和其他适用于浅水域的计算方法, 基于太湖中波浪和湖流观测资料, 分别计算了波切应力和流切应力.

1.1 波切应力的计算

计算波切应力时, 主要采用下式,

$$\tau_w^b = 0.5\rho f_w u_m^2 \quad (1)$$

其中, τ_w^b 代表波切应力, ρ 为水的密度, u_m 为波动产生的底部最大水平速度, f_w 代表波摩擦系数, u_m 和 f_w 采用下述方法计算,

$$u_m = \pi H_s / (T_s \sinh(2\pi h / L_s)) \quad f_w = \exp[-6 + 5.2(A_s / K_s)^{-0.19}] \quad (2)$$

$$f_{w, \max} = 0.3 \quad A_s / K_s \leq 1.57 \quad (3)$$

以上各式中, T_s 和 H_s 分别为有效波高和周期, h 代表水深, π 为圆周率, A_s 为近底波幅, 通过线性波理论确定^[10], K_s 为湖底糙度, 取 0.2mm^[11,12].

1.2 流切应力的计算

流切应力计算主要基于流速的对数分布规律^[10,13,14], 通过下式进行计算,

* 中国科学院长江项目(KZCX1-SW-12)和国家自然科学基金(40071019)联合资助.
2003-03-30 收稿; 2004-3-21 收修改稿. 罗激葱, 男, 1972年生, 博士研究生.

$$\tau_w^b = \rho [k u_* / \ln(z/K_s)]^2 \quad (4)$$

式中, τ_w^b 为流切应力, k 为卡曼常数, 取 0.4, u_* 代表湖底以上 z 高度处的潮流速度。

2 临界切应力的确定

为确定太湖沉积物再悬浮的临界切应力, 委托南京水利科学研究院河港研究所进行了太湖沉积物起动试验, 泥样取自太湖梅梁湾中部, 在波浪水槽中进行。根据试验结果, 对中性粒径约 0.017mm, 密度为 1.3g/cm³ 的太湖表层沉积物, 其临界启动应力的平均值约为 0.037 N/m² 左右^①。

3 结果分析

根据在不同时间和地点的水动力观测资料, 依式(1)~(4)分别计算了波切应力(T_w)和流切应力(T_s), 为了比较不同扰动下二者对沉积物悬浮的重要性, 对风速小于 5.0m/s、大于 8.5m/s 和介于二者之间的不同情况, 分别计算了波切应力与流切应力的比值, 并与临界切应力做了比较(图 1)。

从图 1-A-1 可以看出, 当风速小于 5.0m/s 时, 波切应力与流切应力的比值(以下简称切应力比值)小于 1.0, 在 2002 年 7 月 28 日上午甚至趋于 0, 说明在小风速情况下, 太湖中底流切应力大于波浪切应力, 但从底流切应力(T_s)和临界切应力(T_{cr})的比较来看(图 1-A-2), 显然难以引起悬浮; 图 1-B 为风速超过 8.5m/s 情况下的对比曲线, 切应力比值较大, 最大超过 200, 且波切应力的数值远大于临界应力, 说明在太湖中当扰动较强时, 沉积物悬浮的动力学分析中可只考虑波浪的作用; 当风速介于 5.0~8.5 m/s 时, 切应力比值一般大于 1.0, 最大达到 40 左右, 从 T_w 、 T_s 和 T_{cr} 的对比曲线分析, 大多数情况下 T_w 大于 T_{cr} , 而 T_s 在 T_{cr} 左右振动, 这说明在此风速段内, 波浪和潮流相互作用, 引起太湖沉积物的悬浮, 而此风速在太湖中较常见, 因此在分析沉积物悬浮时, 除了考虑波动的影响外, 底流的作用亦不容忽视。

4 结论

本文通过计算太湖中的波切应力和流切应力, 比较了二者在不同扰动下对沉积物悬浮的贡献, 结果发现, 在小扰动情况下, 流切应力大于波切应力, 但不能引起沉积物的悬浮; 在强扰动情况下, 底流对沉积物悬浮的影响可以忽略, 且扰动越强, 其作用越小; 在中等扰动下, 二者的相互作用产生沉积物的悬浮, 但波浪的作用较为显著。需要说明的是, 本文选取不同的风速段进行分析, 主要为说明不同扰动情况, 实际上, 扰动强弱除了与风速有关外, 还与风向及风时有关。

弄清了太湖沉积物的悬浮机制后, 在研究太湖水体中悬浮浓度随扰动的变化时, 在沉积物的向上通量项的计算中, 可参考上述结果选用适当的计算方法, 特别在强扰动情况下, 可以不必考虑潮流对沉积物悬浮的影响, 大大简化了计算过程, 因为如果考虑波-流非线性相互作用, 必须对波浪的传播方向进行确定, 靠目前实验室的观测设备难以达到要求。同样, 在计算动态内源释放时, 必须基于底泥悬浮的计算结果,

因此本文结论对动态内源释放的计算亦具有非常重要的借鉴意义。

参 考 文 献

- 1 Matthai C, Birch G F, Jenkinson A, et al. Physical resuspension and vertical mixing of sediment on a high energy continental margin (Sydney, Australia). *J Environ Radioactivity*, 2001, 52: 67-89
- 2 Mihelcic G, Suriya B, Juracic M, et al. History of the accumulation of trace metals in sediments of the saline Rogoznica Lake (Croatia). *The Science of the Total Environment*, 1996, 182: 105-115
- 3 Pejrup M, Valeur J, Jensen A. Vertical flux of particulate matter in Aarhus Bight, Denmark. *Continental Shelf Research*, 1996, 16(8): 1047-1064
- 4 Rutgers van der Loeff M M, Boudreau B P. The effect of resuspension on chemical exchanges at the sediment-water interface in the deep sea-A modelling and natural radiotracer approach. *J Marine Systems*, 1997, 11: 305-342
- 5 Luettich R A Jr, Harteman D R F & Somlyódy L. Dynamic behavior of suspended sediment concentrations in a shallow lake

① 张金善, 陆培东. 波浪作用下太湖底泥启动特性的初步实验研究. 南京水利科学研究院报告, 2002

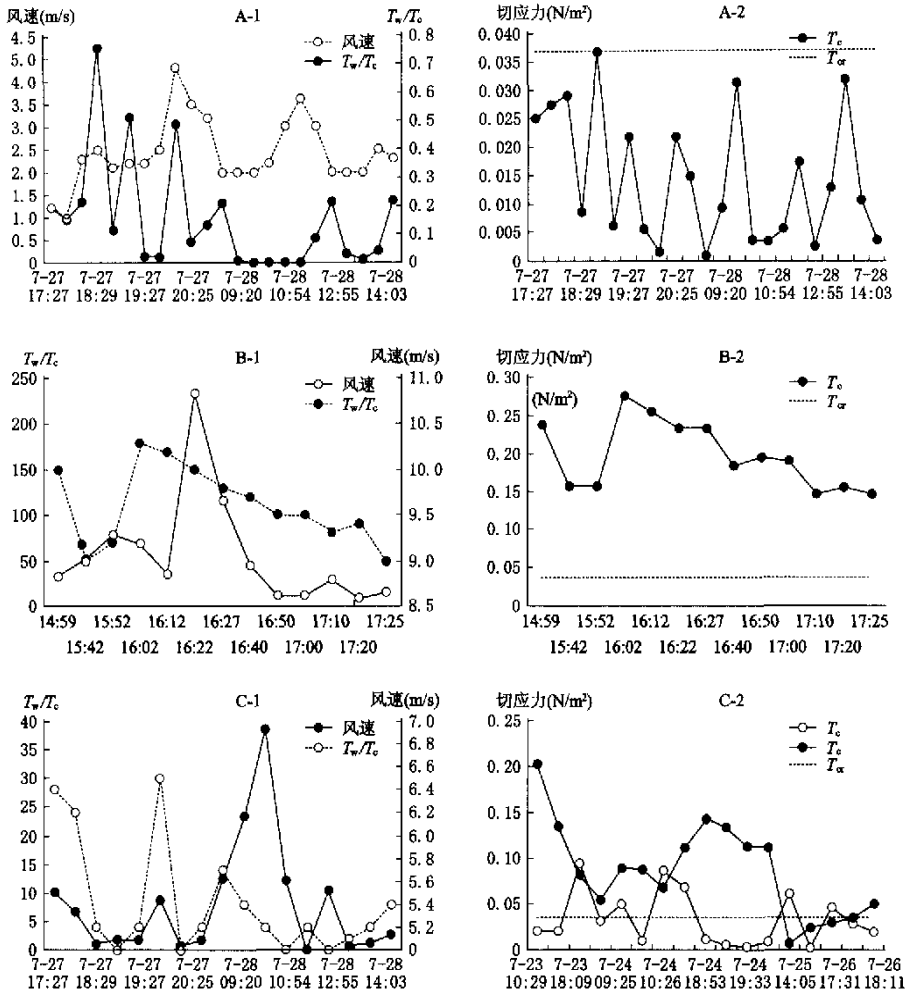


图1 不同扰动下波切应力 (T_w) 与流切应力 (T_c) 的比及其与表层沉积物悬浮临界切应力 (T_{cr}) 的比较
 A: 风速 < 5.0 m/s, 2002年7月27-28日, 乌龟山; B: 风速 > 8.5 m/s, 2003年4月18日, 太湖站栈桥
 C: 5.0 m/s ≤ 风速 ≤ 8.5 m/s, 2002年7月23-26日, 乌龟山

Fig. 1 Comparison of ratio of wave stress (T_w) / current stress (T_c) under different scenarios and the critical stress (T_{cr}) in surficial sediments

perturbed by episodic wind events. *Limnol Oceanogr*, 1990, **35**(5): 1050 - 1067

- 6 Sandergaard M, Jensen J P, Jeppesen E. Role of sediment and internal loading of phosphorus in shallow lakes. *Hydrobiologia*, 2003, **506-509**: 135 - 145
- 7 Brzakova M, Hejzlar J, Nedoma J. Phosphorus uptake by suspended and settling seston in a stratified reservoir. *Hydrobiologia*, 2003, **504**: 39 - 49
- 8 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** (17):

1822 - 1831

- 9 罗激葱, 秦伯强. 波浪和湖流对太湖底泥悬浮的影响研究. 水文, 2003, 23 (4): 1-4
- 10 Grant W D, Madsen O S. Combined wave and current interaction with a rough bottom. *Journal of Geophysical Research*, 1979, 84(C4): 1797 - 1808
- 11 Hawley N & Lesht B. Sediment resuspension in Lake St. Clair. *Limnol Oceanogr*, 1992, 37(8): 1720 - 1737
- 12 Hawley N. Sediment resuspension near the Keweenaw Peninsula, Lake Superior during the fall and winter 1990 - 1991. *J Great Lakes Res*, 2000, 26 (4): 495 - 505
- 13 Anderson F E. Resuspension of estuarine sediments by small amplitude waves. *J Sediment Petrol*, 1972, 42: 602 - 607
- 14 Lavelle J W, Young R A, Swift D J P & Clarke T L. Near-bottom sediment concentration and fluid velocity measurements on the inner continental shelf, New York. *Journal of Geophysical Research*, 1978, 83(C12): 6052 - 6062

Sediment Re-suspension under Different Hydrodynamic Disturbances in Lake Taihu

LUO Liancong^{1,2}, QIN Boqiang¹, HU Weiping¹ & ZHANG Fabing^{1,2}

(1: Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, P. R. China;

2: Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, P. R. China)

Abstract

Based on the collected wave and current data in July, 2002 and April, 2003, Lake Taihu, the wave stress (T_w) and the current stress (T_c) were calculated for better understanding of sediment re-suspension mechanism. The results show that T_c is much larger than T_w with the water surface slightly disturbed but no re-suspension can be found. Under stronger disturbance, T_w is so much larger than T_c that the current effects can be ignored in the bottom stress calculation. The wave effect is more important than the current effect although T_c is slightly smaller than T_w when the water surface is forced by a moderate wind. In this case, the non-linear wave-current interaction was favored to be considered for the bottom stress calculation in Lake Taihu. The conclusion can benefit the coming research on nutrients release from sediment and suspended sediment concentration (SSC) response to the surface disturbance.

Keywords: Hydrodynamic disturbance; sediment; re-suspension; Lake Taihu