

太湖底泥营养要素动态释放模拟和模型计算

逢勇, 韩涛, 李一平, 翟金波

(河海大学环境科学与工程学院, 南京 210098)

摘要: 采用太湖湖区底泥, 根据环型水槽实验总结了各种扰动强度下太湖底泥的起动、悬浮和营养盐释放规律. 环型水槽内水体流速均匀且能够通过控制水槽的转速精确控制水槽的水体流速. 通过考察水槽中水体 TN、TP 浓度的变化, 建立起了底泥 TN、TP 释放率(γ)与水体流速大小(x)的量化关系. 根据实验确定的各种参数, 采用 ECOMSED 模型计算模拟, 并和太湖实测资料进行了对比, 结果较为合理. 由于目前太湖的野外监测资料存在较明显的时空不一致性, 模型参数率定的精度受到了较大影响, 通过室内实验模拟底泥的内源释放对太湖的富营养化治理具有重要意义.

关键词: 太湖底泥; 环型水槽实验; ECOMSED 模型; 富营养化; 动态释放

中图分类号: X143 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2007)09-1960-05

Simulation and Model Computation on Dynamic Release of Nutrition Factors of Bottom Mud in Taihu Lake

PANG Yong, HAN Tao, LI Yi-ping, ZHAI Jin-bo

(College of Environment Science and Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: The dynamic release of bottom mud in Taihu Lake was simulated indoors in an annular tank. The rules of starting principle, resuspension and release rate of bottom mud were analyzed under different kinds of disturbing intensity. The velocity of flow was basically uniform in the annular tank. Both the rotation rate of the tank and the velocity of flow can be controlled precisely. The relational expression between the release rate of TN, TP(γ) and flow velocity (x) was calculated on the basis of the relationship between them. The calculated result from the model of ECOMSED conforms to the observation data in Taihu Lake very well. Because the conflict of field observation data in time and space greatly influences the accuracy of model parameters, simulating the dynamic release of bottom mud indoors is very important to the cure of eutrophication in Taihu Lake.

Key words: bottom mud in Taihu Lake; annular tank experiment; ECOMSED model; eutrophication; dynamic release

太湖是我国第三大淡水湖泊. 近年来随着太湖流域的经济发展, 水体富营养化不断加剧, 严重破坏了太湖的生态环境, 底泥的内源释放是导致太湖富营养化重要原因. 目前, 对太湖沉积物中营养盐的赋存形态与含量的研究, 以及不同环境条件下沉积物中营养盐静态释放研究的文献比较多见^[1~3], 这些研究主要是分析营养盐在底泥中的迁移转化特性, 不同环境因子(溶解氧、水温、pH 等)对底泥营养盐释放的影响, 以及底泥间隙水中营养盐的分布特性和释放机理等. 虽然取得了很多有意义的成果, 但这些研究主要局限于底泥的静态释放; 也有一些文章具体分析了水动力因素对底泥释放的影响, 但都仅限于使用烧杯、锥形瓶等模拟湖体, 不能很好地代表太湖湖体的实际情况, 此外在利用人工搅拌或机械搅拌模拟太湖水动力因素时, 很多文章都没有建立搅拌速度与装置内水体实际流速之间的关系, 只能定性地说明动力扰动造成的沉积物营养盐释放远远大于静态条件下的释放. 本研究根据环型水槽实验结果, 总结了各种扰动强度下太湖底泥的起动、悬浮

和营养盐释放规律, 将底泥释放率参数化, 在此基础上利用 ECOMSED 模型建立了太湖的水量水质以及富营养化数学模型.

1 材料与方法

本实验在河海大学海岸及海洋工程研究所双向环型水槽中进行, 其装置见图 1, 水槽由上盘、下盘和计算机控制系统组成. 下盘底板上安装 2 个直径分别为 108 cm 和 150 cm 的有机玻璃同心圆环, 构成水槽的内壁和外壁, 两壁之间宽(即水槽宽)为 21 cm, 壁高 41 cm, 并且在外壁不同高度处都设有取样口; 上盘为一环片, 覆盖在环槽上, 上盘的高度可以调节, 以控制水深.

1.1 环型水槽工作原理

环型水槽是把直槽的长度转化为时间尺度, 以

收稿日期: 2006-09-28; 修订日期: 2006-10-29

基金项目: 国家自然科学基金项目(50579015); 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2002CB412300)

作者简介: 逢勇(1958~), 男, 教授, 主要研究方向为水环境数值模拟和影响评价, E-mail: ypang@hhu.edu.cn

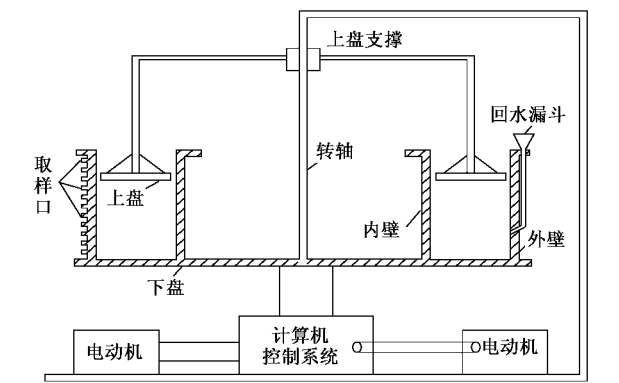


图 1 环型水槽结构示意图
Fig.1 Sketch map of annular tank structure

模拟无限长的水槽,解决了直槽研究泥沙中水泵搅动破坏絮团及细颗粒泥沙沉降速度慢、直槽不够长等问题.另外,由于水槽体积小,实验所需泥沙量少,所以可以精确模拟不同流速、不同含沙量等条件下的现场环境,从而对泥沙起动流速、动水沉速、冲刷率等进行实验研究,通过水槽实测数据计算淤积量、冲刷深度等.本实验中,水槽的上下盘由计算机自动控制无级调速电机带动而产生相向运动,在切应力作用下产生水流.由于水槽存在曲率,下盘运动会使水流产生沿半径向外的离心力,出现向外的横向副流;而上盘向相反方向转动时,会使水流产生沿半径向里的离心力,出现向里的横向副流.又因为离心力的大小与转盘的流速大小有关,故通过对上下盘转速比的合理调配,可使离心力相互抵消,使副流基本消失,槽内流场基本均匀,这样整个水槽就相当于一个宽阔的水体.由于太湖实际流速在小范围内变化不大,特别是湖底流速在小范围内可近似看作均匀,故环形水槽能够模拟无限长的水槽,并且槽内流场基本均匀的特征为粗略模拟太湖湖体的实际水流状况提供了可能,本研究正是基于这一点利用该装置探讨了水动力条件下太湖底泥释放的规律和特征.

1.2 样品采集

- (1)水样 用有机玻璃采样器采集样点(125°25'50"N, 20°12'04"E)沉积物上覆水约 150 L,装入清洁的蒸馏水瓶中并使不留气泡,即日带回备用.
- (2)沉积物 2003-04-25 用彼得森采泥器在太湖梅梁湾口地区(125°25'50"N, 20°12'04"E)分别采集沉积物表层样品约 100 kg,沉积物在中国科学院南京地理与湖泊研究所太湖水体生态系统研究站(简称“太湖站”)进行现场处理后,装入清洁的聚乙烯保鲜袋中带回备用.

1.3 实验方法

本实验于 2003-04-26 ~ 2003-04-30 在河海大学海岸及海洋工程研究所重点实验室进行.实验期间气温控制在 25℃,实验分 2 个阶段连续进行,第 1 阶段为前期准备阶段,将采集回来的采样点沉积物均匀铺于环形流速生成装置底部,轻压使底泥处于相对平整状态,并控制底泥厚度为 5 cm,再以虹吸法轻注入采集的新鲜湖水,水深为 15 cm,然后静置 24 h.第 2 阶段为研究阶段,通过微机控制使水体流速分别为 0、5、8.5、17.5、25、30、40、50 和 60 cm/s 进行实验研究.实验从 0 流速(即静置)开始,续步加速,每一流速均保持水流作用 30 min,然后分上、中、下 3 层采集样品,并即时进行分析实验,之后进入下一流速,如此直到试验研究的最高流速.

1.4 分析方法

样品采集后分成 2 组,分别测定其 TN、TP 值.测定 TN、TP 的样品采集后,于实验室中按《湖泊富营养化调查规范》直接进行处理.TN 采用过硫酸钾氧化-紫外分光光度法,TP 采用钼锑抗分光光度法,用 HACH-DR4000 紫外/可见分光光度计进行分光测定.

1.5 底泥释放率的计算公式

底泥释放率的计算公式如下所示:

$$r = [\bar{V}(c_n - c_0) + \sum_{j=1}^n V_i(c_{j-1} - c_a) + \sum_{j=1}^n T(\text{NH}_4^+ - \text{N})_j]t/A$$

式中, r 为释放速率 [$\text{mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$], $\bar{V}$ 为实际环形水槽中水样体积(L); c_n 为第 n 次采样时水中营养物浓度(mg/L); c_0 为初始营养物浓度(mg/L); V_i 为每次采样量(L); c_{j-1} 为第 $j-1$ 次采样时水中营养物浓度(mg/L); c_a 为添加原水后水体营养物浓度(mg/L); $T(\text{NH}_4^+ - \text{N})_j$ 为第 j 次采样时收集液中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 量(mg); t 为释放时间(d); A 为与水接触的沉积物表面积(m^2).当所考虑的营养物质非 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 DTN 时,省略 $T(\text{NH}_4^+ - \text{N})_j$ 项.

2 结果与分析

根据泥沙起动理论,泥沙的起动,一般可分为 3 种状态,即将动未动、少量动和普遍动,不同起动状态对应的水体中污染物质的浓度也有较大的变化,而且底泥释放的特点也有所不同,本实验中底泥的起动和释放也符合这一规律.

当水流较小时,泥液面保持静止.随着水流流速的加大,泥面开始发生变化.首先由于水流的加速,淤泥整体所受剪切力变大,泥面随水流发生错动;接着泥面上一层很薄的稀释层发生悬扬,此时淤泥处于“将动未动”阶段,流速达到 25 cm/s 左右.

随着流速的进一步增大,淤泥达到“少量动”阶段.此时由于水流紊动作用不断加强,床面局部地方不时有小块淤泥被冲起,淤泥呈散粒状在床面上滚,并摩擦床面而使其他地方的底泥开始悬浮,水体明显变得浑浊,这一过程对应的流速变化范围在 25 ~ 50 cm/s 之间.

当流速达到 60 ~ 70 cm/s 时,水流底层紊动更加剧烈,淤泥达到“普遍动”状态.这时可清楚地看到旋涡不断掀起淤泥,平滑的床面受到较大破坏.特别是当某一局部被破坏后,这一部分的起动便急剧起来,淤泥被成层、成片掀起,水流很快便完全浑浊.

2.1 底泥中污染物释放率与水体流速的量化关系

为了能够为太湖悬浮物质污染物通量模式、水动力模式或富营养化模式的建立提供量化的参数支持,更进一步地建立太湖水动力条件对底泥悬浮、底泥释放的定量描述,本研究根据实验结果总结了一些规律,建立了太湖底泥中污染物释放率与水体流速的量化关系.底泥中 TN、TP 的释放率随流速的变化关系如图 2、图 3 所示.

从图 2、图 3 TN、TP 浓度和释放率分别与流速的关系可以看出:当底泥处于“将动未动”状态时,随着流速的增大,底泥释放率呈上升趋势,TN、TP 浓度和释放率的增加幅度都不大,主要是由于底泥还只是受到了轻微的扰动,只有间隙水中的营养物质在大量释放,而底泥还未大量悬浮所致;随着流速的进一步增大,底泥达到“少量动”状态时,TN、TP 的浓度和释放率较前一阶段有了明显的上升,主要是由于此时已有部分底泥开始大量起动,小的泥沙颗粒悬浮到了上覆水体中,也带动了吸附在其上的营养物质,一并进入水体,同时下层的底泥间隙水也得以大量释放,致使水体 TN、TP 浓度升高;当流速达到 60 ~ 70 cm/s 时,底泥处于“普遍动”状态时,TN、TP 的浓度和释放率产生了 1 个较大的突增,底泥中的营养物质被完全释放出来,TN、TP 的浓度分别为:11.27 mg/L 和 0.7 mg/L,分别是初始状态的 3 倍和 7 倍之多;TN、TP 的释放率也是原先状态的 10 ~ 20 倍.同样 Reddy 等^[4]在对 Apoka 湖的研究中也发现,悬浮作用(悬浮 + 扩散)造成的上覆水营养盐浓度增加可

以达到单纯由扩散产生的营养盐浓度的数十倍^[5]. Sondergaard 等^[6]在对丹麦的 Arreso 湖(面积 41 km², 平均水深 2.9 m)的野外调查也发现,动力悬浮产生的营养盐浓度增加可以达到原先的 20 ~ 30 倍的数量级,这充分说明了水动力作用在湖泊内源氮磷循环中扮演着非常重要的作用.

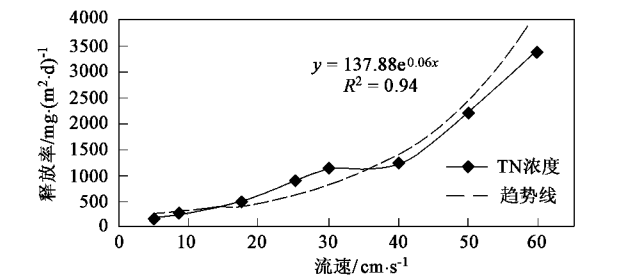


图 2 TN 释放率与流速的关系曲线
Fig.2 Relationship of TN release and flow velocity

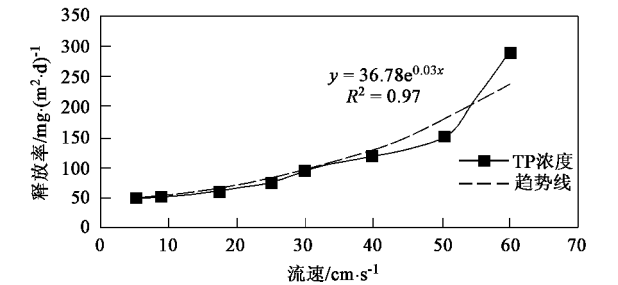


图 3 TP 释放率与流速的关系曲线
Fig.3 Relationship of TP release and flow velocity

由整个实验结果,根据前文所述的底泥释放率的公式可以建立太湖底泥 TN、TP 释放率与流速的量化关系式为:

$$y = 137.88e^{0.06x} \quad R^2 = 0.94 \text{ (TN)}$$
$$y = 36.78e^{0.05x} \quad R^2 = 0.97 \text{ (TP)}$$

式中, y 为底泥中 TN 或 TP 的释放率 [$\text{mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$], x 为水体流速 ($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$).

2.2 实验分析

通过建立的关系式可以看出:底泥中 TN、TP 释放率与流速的关系服从指数分布,在一定的流速范围内,底泥中 TN、TP 释放率随流速的增大而增大.总之,在浅水湖泊中,有机颗粒物质在底泥的掩埋产生的还原环境中发生降解,析出进入孔隙水,动力悬浮使得表层的数 cm 至数十 cm 底泥发生悬浮,底泥孔隙水中营养盐发生释放^[7],在风浪过程结束后,悬浮沉积物沉降至湖底,有机物继续降解等待下一次风浪的来临.故控制湖泊富营养化除了要控制外源

污染外,还特别要加大力度控制湖泊的内源释放.

3 ECOMSED 模型

ECOMSED 模型是 Blumberg 等^[8-11]在美国普林斯顿大学的三维海洋模型(POM)及其后来发展的海口、陆架和海洋模式(ECOM)的基础上发展而来的,其中的三维水动力模块从原始三维模型出发,将风力作为表面力,以自由水位、三方向的速度通量、温度、盐度、密度以及代表湍流的 2 个特征量:湍动能和湍宏观尺度作为预报变量.此模型目前在国内应用较少,且主要集中于海域^[12-14].关于此模型的特点及有关方程详见 Blumberg^[15]的 ECOMSED 用户手册.

3.1 底泥释放项 S_i 的处理

为了在 ECOMSED 模型中引入底泥释放率的定量化关系式,反映底泥中 TN、TP、高锰酸盐指数的释放率随流速的变化关系,在建模时利用实验整理分析得到的关系式来计算释放率,由于 TN 的释放率一般为高锰酸盐指数的 3 倍左右,故高锰酸盐指数释放率计算式采用 TN 底泥释放率的 1/3,具体的公式如下:

$$a_i = S_i/H;$$
$$p = \sqrt{u^2 + v^2}$$
$$a_{\text{TN}} = 137.88e^{0.06p}; \quad a_{\text{TP}} = 36.78e^{0.05p};$$
$$a(\text{高锰酸盐指数}) = 45.96e^{0.06p}$$

式中, S_i 为 ECOMSED 水质方程中营养盐的源汇项, u 、 v 为水流沿 x 、 y 方向垂向平均流速, H 为水深, p 为合速度, a_{TN} 、 a_{TP} 和 $a(\text{高锰酸盐指数})$ 分别为 TN、TP 和高锰酸盐指数的单位面积底泥释放系数.

3.2 计算结果与分析

采用 2005-09 的水文水质资料作为模型的流量、流速边界条件和水质条件,风速取 9 月实测的平均值为 3.5 m/s,风向为太湖夏季盛行的东南风;水动力模型、水质模型和富营养化模型的内模时间步长均取为 300 s,外模时间步长均取为 60 s.计算的污染因子为 TN、TP 和高锰酸盐指数 3 项.并利用全太湖 14 个采样点每天 1 次的水质监测资料和模型的计算结果进行比较,这 14 个采样点分别位于污染严重的梅梁湖区域、流速较大的太湖西岸区域以及湖心区域等,基本上遍布了整个太湖,具有一定的代表性.上世纪 80 年代以来,对太湖全湖沉积物的粒度分布情况做了几次调查和观测,其中,既有深钻资料,也有浅钻资料.既有个别湖区的资料,也有全湖面上调查的资料.粒度分析表明太湖表层沉积物大部分为粘土质粉砂(粘土含量占 20% ~ 40%,粉砂含量占 60% ~ 80%).太湖粒度和沉积物组成详细情况参考文献[16].采样点具体的分布位置见图 4,这些采样点除小梅口、竺山湖等底泥沉积物为粘壤土外,其余点沉积物和实验底泥一样,均属于粉砂,因此,本实验得出的底泥释放规律具有一定的代表性.2005-09 TN、TP 和高锰酸盐指数计算值与实测值的比较见表 1,太湖各监测点 2005-09 TN、TP 和高锰酸盐指数模型计算值与 2005-09 实测值的相对误差大都在 10% ~ 30% 以内,只有极少数点的相对误差超过了 30%,计算值与实测值基本吻合,说明本研究所建立的 TN、TP 和高锰酸盐指数的底泥释放率与流速的变化关系是合理的,可满足模型计算的要求.

表 1 TN、TP 和高锰酸盐指数模型计算值与实测值的比较/mg·L⁻¹

Table 1 Compare of computation value and observation value of TN, TP and permanganate index/mg·L⁻¹

采样点	TN			TP			高锰酸盐指数		
	实测值	计算值	相对误差/%	实测值	计算值	相对误差/%	实测值	计算值	相对误差/%
梅园	3.47	3.28	5.5	0.174	0.125	28.2	7.28	5.98	17.9
闾江口	3.01	3.61	19.9	0.13	0.136	4.6	4.8	5.50	21.4
3 号标	1.11	0.72	35.1	0.067	0.072	7.4	4.44	5.21	17.3
拖山	0.9	1.12	24.4	0.068	0.058	14.8	4.52	4.83	6.9
小湾里	2.62	2.41	8.0	0.098	0.089	9.2	5.97	5.67	5.0
竺山湖	3.75	3.12	16.8	0.188	0.154	18.1	6.85	7.47	9.1
焦山	3.38	2.97	12.1	0.05	0.049	2.1	3.94	4.80	21.8
平台山	0.91	0.76	16.5	0.041	0.048	17.1	3.68	3.78	2.6
乌龟山	0.87	0.83	4.6	0.041	0.050	22.0	3.68	3.55	3.6
夹浦	2.22	1.480	33.3	0.101	0.072	28.7	9.46	4.96	47.6
洑东	2.09	1.470	29.7	0.096	0.071	26.0	7.84	4.98	36.5
大浦	3.47	2.87	17.3	0.105	0.082	21.9	7.04	5.46	22.4
大钱	1.61	1.59	1.2	0.067	0.080	19.4	5.28	4.04	23.4
小梅口	1.35	1.54	14.1	0.071	0.073	2.81	5.06	4.05	20.0

从图 4 和表 1 可以看出:计算值不仅在各监测点上与实测值比较接近,而且其空间分布和污染带范围也比较符合实际.通过实测值可以看出,梅梁湾和竺山湖等西北部湖域的浓度比较高,而西南部的浓度较低,这一变化趋势在计算值浓度场(图 5)上有着比较明显的反映,通过等浓度线可以看出,在梅梁湾处高锰酸盐指数浓度由湾里向湾外逐渐减小;在西北部湖域处,高锰酸盐指数浓度由北向南逐渐降低,清楚地反映了太湖中污染物质的分布状况,以及污染物质迁移扩散的规律.

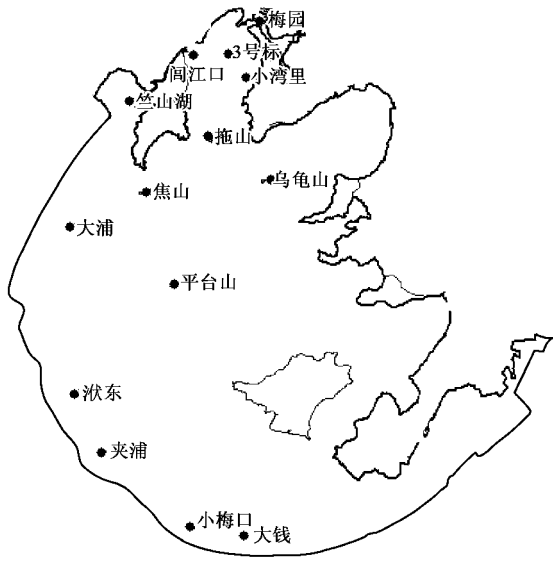


图 4 太湖各采样点分布

Fig.4 Sample distribution in Taihu Lake

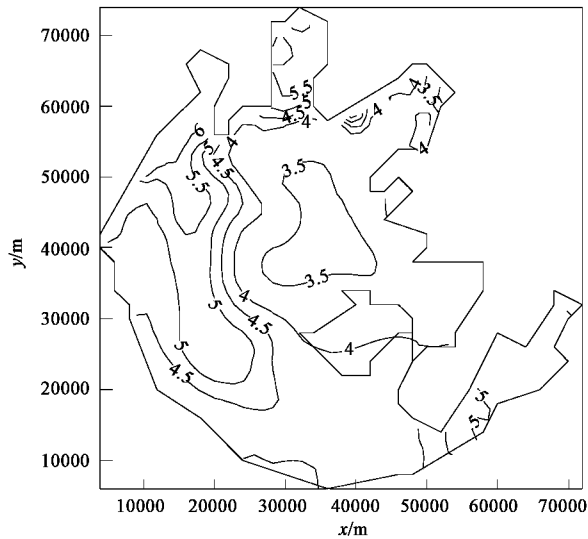


图 5 太湖高锰酸盐指数浓度场计算值分布

Fig.5 Permanganate index isoline distribution in Taihu Lake

4 结论

通过实验在室内环形水槽内模拟了不同水动力条件下底泥的起动规律,分析了底泥运动的不同状态,通过考察上覆水中 TN、TP 浓度随流速的变化关系,计算出了水动力条件下太湖底泥中 TN、TP 释放率与流速大小之间的量化关系,并据此推出了高锰酸盐指数释放率与流速的关系.将这一结果在 ECOMSED 数学模型中加以应用,计算结果与实测结果比较接近,这说明建立的底泥释放率与水动力条件的关系是基本合理的,可满足模型计算的要求,同时也说明通过室内实验装置研究湖泊底泥的问题是可行的,具有较强的可操作性.需要说明的是,由于实验设备限制,本实验没有能够进行波浪对底泥释放影响的研究. ECOMSED 水量模型中耦合了 4 种波浪模型,将这些模型应用到太湖流域,进一步研究波浪、湖流、底泥释放率的相互关系,是下一步的工作内容.

参考文献:

[1] 尹大强,谭秋荣. 环境因子对五里湖沉积物磷释放的影响[J]. 湖泊科学, 1994, 6(3): 240 ~ 244.

[2] 范成新. 漏湖沉积物理化特性及磷释放模拟[J]. 湖泊科学, 1995, 7(4): 341 ~ 350.

[3] 范成新,杨龙元,张路. 太湖底泥及其间隙水中氮磷垂直分布及其相互关系分析[J]. 湖泊科学, 2000, 12(4): 359 ~ 366.

[4] Reddy K R, Fisher M M, Ivaoff D. Resuspension and diffusive flux of nitrogen and phosphorus in a hypereutrophic lake[J]. Journal of Environmental Quality, 1996, 25: 363 ~ 371.

[5] 张路,范成新,秦伯强,等. 模拟扰动条件下太湖表层沉积物磷行为的研究[J]. 湖泊科学, 2001, 13(1): 35 ~ 42.

[6] Sondergaard M, Kristensen P, Jeppesen E. Phosphorus release from resuspended sediment in the shallow and wind-exposed Lake Arreso[J]. Denmark Hydrobiologia, 1992, 228: 91 ~ 99.

[7] 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[J]. 科学通报, 2003, 48(17): 1822 ~ 1831.

[8] Mellor G L, Wang X H. Pressure compensation and the bottom boundary layer[J]. J Phys Oceanogr, 1996, 10: 1824 ~ 1841.

[9] Blumberg A F, Mellor G L. Diagnostic and prognostic numerical circulation studies of the South Atlantic Bight[J]. J Geophys Res, 1983, 88: 4579 ~ 4592.

[10] Blumberg A F, Mellor G L. A description of a three-dimensional coastal ocean circulation model, in Three-Dimensional Coastal Ocean Models [J]. American Geophysical Union, 1987, 4: 208 ~ 215.

[11] Jungclaus H, Mellor G L. A three-dimensional model study of the Mediterranean out flow[J]. J Mar Res, 2000, 24: 41 ~ 66.

[12] 万修全,鲍献文,吴德星,等. 胶州湾及邻近海域潮流和污染物扩散的数值模拟[J]. 海洋科学, 2003, 27(5): 31 ~ 36.

[13] 包芸,周水华,胡如根. 伶仃洋正交曲线坐标网格的生成及在虎门双向流数值模拟中的应用[J]. 暨南大学学报(自然科学版), 2005, 26(1): 1 ~ 4.

[14] 张学庆,孙英兰. 胶南近岸海域三维潮流数值模拟[J]. 中国海洋大学学报, 2005, 35(4): 579 ~ 582.

[15] Blumberg A F. A Primer for ECOMSED 1. 3[EB/OL]. <http://www.hydroqual.com/ehst-ecomsed.html>, 2002. 1 ~ 180.

[16] 范成新,张路,秦伯强. 太湖沉积物-水界面生源要素迁移机制及量化[J]. 湖泊科学, 2004, 16(1): 10 ~ 20.